



Research Paper

**Enrichment of Butter with Electrosprayed Polycaprolactone Nanoparticles
Loaded with Vitamin D3**

Soheila Rastan Masali-Begloo*, Lida Shahsavani, Shadi Mehdikhani

Department of Food Science and Technology, ShQ.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 26/08/2025, **Accepted:** 25/09/2025

Abstract

Butter is one of the most popular dairy products due to its special and delicious taste, but it is not considered a good source of vitamins such as vitamin D3 and using this vitamin in its formulation can add to the bioactive properties of this product. The present study aimed to encapsulate vitamin D3 in the structure of electrospray nanoparticles based on poly-caprolactone and then use it in butter formulation. Electrosprayed polycaprolactone nanoparticles containing vitamin D3 with levels of 5, 10, and 15(w/w) were produced and encapsulated and FTIR test and encapsulation efficiency were performed on the formed nanoparticles. The sample that had higher encapsulation efficiency was added to the butter. FTIR test results showed that vitamin D3 was successfully trapped in the structure of electrosprayed poly-caprolactone nanoparticles. By using 10% vitamin D3 in the nanoparticle structure, the highest encapsulation efficiency was achieved. The physicochemical, color, and sensory properties of the samples were compared with the control sample during 3 months of storage. The results showed that the use of nanoparticles containing vitamin D3 and increasing its application level in butter formulation resulted in a decrease in peroxide value, acid value, thiobarbituric acid value during storage. The sample containing 5% vitamin D3 did not cause any significant difference in color characteristics and did not change sensory characteristics compared to the control sample. It can be concluded that butter containing 5% electrosprayed polycaprolactone nanoparticles containing vitamin D3 has desirable physicochemical, color, and sensory properties and is selected as the superior sample.

Keywords: Vitamin D3, Polycaprolactone, butter, Nanoparticles

Citation: Rastan Masali-Begloo, S Shahsavani L, Mehdikhani S, Enrichment of Butter with Electrosprayed Polycaprolactone Nanoparticles Loaded with Vitamin D3. *Quality and Durability of Agricultural Products and Food Staffs*, 2025;5(1): 55-74.

DOI: <https://doi.org/10.71516/qafj.2025.1216010>



© The Author(s) **Publisher:** Islamic Azad University of Kerman, Iran

* **Corresponding author:** Soheila Rastan Masali-Begloo, **Email:** rastansoheila@gmail.com

Extended Abstract

Introduction

Butter is a natural dairy product primarily composed of milk fat (80–84%), water (15.3–15.9%), and minor amounts of salt, proteins, minerals (e.g., calcium, phosphorus), and fat-soluble vitamins. Despite its favorable sensory attributes and clean-label perception among consumers, butter is not a rich source of essential micronutrients such as vitamin D₃, which plays a critical role in calcium, magnesium, and phosphorus absorption, thereby supporting bone health and integrity. This is particularly relevant for vulnerable populations with limited sun exposure, including the elderly and women. However, incorporating free vitamin D₃ into food matrices like butter is challenging due to its sensitivity to environmental stressors such as heat, light, and oxygen, which can lead to degradation and loss of bioactivity. To overcome these limitations, advanced delivery systems based on encapsulation technologies have been explored. Among these, electrospraying a subset of electrohydrodynamic processing offers a solvent-efficient, low-temperature method to produce nanostructured carriers with high encapsulation efficiency and controlled release properties. Polycaprolactone (PCL), a biodegradable, biocompatible, and FDA-approved polyester, has emerged as a promising wall material for bioactive compound delivery. This study aimed to develop PCL-based electrosprayed nanoparticles loaded with vitamin D₃ and incorporate them into butter to enhance its nutritional profile while improving oxidative stability and maintaining sensory acceptability.

Methods

PCL nanoparticles containing vitamin D₃ at three loading levels (5%, 10%, and 15% w/w relative to PCL) were fabricated via

electrospraying. A 10% (w/v) PCL solution was prepared in a mixed solvent system of acetic acid and ethanol (80:20 v/v), followed by addition of vitamin D₃. The solution was loaded into a 10 mL syringe and electrosprayed using a syringe pump at a flow rate of 1.5 mL/h, an applied voltage of 25 kV, and a tip-to-collector distance of 15 cm. Encapsulation efficiency (EE) was determined spectrophotometrically using UV-Vis at 264 nm after ethanol extraction, applying the formula: $EE (\%) = [(C - C_0)/C] \times 100$, where C is total vitamin D₃ and C₀ is the supernatant concentration. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) was employed to assess potential interactions between PCL and vitamin D₃. The nanoparticle formulation with the highest EE was selected for incorporation into commercial butter at concentrations of 3%, 5%, and 10% (w/w). Samples were stored at –18°C for 48 h before analysis. Over a three-month refrigerated storage period, samples were evaluated monthly for peroxide value (PV), acid value (AV), and thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) using Iranian national standards. Color parameters (L*, a*, b*) were measured using a colorimeter, and sensory evaluation was conducted using a 5-point hedonic scale assessing color, flavor, texture, and overall acceptability. Data were analyzed using one-way ANOVA followed by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$) in SPSS v22.

Results and Discussion

FTIR analysis confirmed successful encapsulation: characteristic peaks of both pure vitamin D₃ (e.g., 3358 cm⁻¹ for –OH, 1647 cm⁻¹ for C=O) and PCL (e.g., 1722 cm⁻¹ for carbonyl) were present in the spectra of loaded nanoparticles, with no peak shifts only increased intensity with higher vitamin D₃ loading indicating physical entrapment without chemical interaction. Encapsulation efficiency peaked at $91.38\% \pm 1.56$ for the 10% vitamin D₃ formulation, significantly

higher than $72.52\% \pm 1.23$ at 5% and $84.23\% \pm 1.74$ at 15% ($p < 0.05$), suggesting an optimal loading threshold beyond which particle aggregation and incomplete coating reduced efficiency. Butter samples enriched with 5% and 10% nanoparticles exhibited significantly lower PV, AV, and TBARS values throughout storage compared to control ($p < 0.05$), with the 10% formulation showing the greatest oxidative stability. This is attributed to the antioxidant properties of vitamin D₃ and the protective PCL matrix, which mitigated lipid oxidation by scavenging free radicals and limiting oxygen diffusion. Color analysis revealed no significant differences in L*, a*, or b* between control and samples with $\leq 5\%$ nanoparticles ($p > 0.05$), but a significant decrease in all three parameters occurred at 10% ($p < 0.05$), likely due to nanoparticle agglomeration causing light scattering and opacity. Sensory scores mirrored these findings: samples with up to 5% nanoparticles received scores statistically equivalent to the control (5/5 for all attributes), whereas the 10% sample showed significant declines in color (3), flavor (4), texture (2), and overall acceptability (3), possibly due to gritty mouthfeel and visual dullness from particle clustering.

Conclusion

This study demonstrates that electrosprayed PCL nanoparticles effectively encapsulate vitamin D₃ and enhance the oxidative stability of butter without compromising sensory quality provided the nanoparticle concentration does not exceed 5%. While 10% vitamin D₃ loading yielded the highest encapsulation efficiency, the optimal functional formulation in butter was 5% nanoparticle incorporation, which maintained color and sensory attributes comparable to unfortified butter while significantly improving shelf-life indicators. These findings support the use of electrospraying and PCL as a viable

strategy for fortifying lipid-rich foods with sensitive bioactives, balancing nutritional enhancement, physicochemical stability, and consumer acceptability. Future work should explore in vitro bioaccessibility and scale-up feasibility for industrial application.

Keywords: Vitamin D₃, Polycaprolactone, butter, Nanoparticles

Funding: There was no external funding in this study.

Authors' contribution: All authors contributed equally to the writing and preparation of this manuscript.

Conflict of interest: The authors declare that they have no conflict of interest.



مقاله پژوهشی

غنی سازی کره با نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون بارگذاری شده
با ویتامین D3

سهیلا راستان مستعلی بگلو*، لیدا شاهسونی، شادی مهدیخانی

گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳

چکیده

کره به دلیل طعم ویژه و لذیذش از محبوب ترین محصولات لبنی است لیکن به لحاظ وجود ویتامین هایی نظیر ویتامین D3 منبع خوبی به شمار نمی رود و به کارگیری این ویتامین در فرمولاسیون آن می تواند به خصوصیات زیست فعال این محصول بیفزاید. پژوهش حاضر با هدف انکپسولاسیون ویتامین D3 در ساختار نانوذرات الکترواسپری بر پایه پلی کاپرولاکتون و سپس به کارگیری آن در فرمولاسیون کره انجام شد. بدین منظور نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D3 با سطوح ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد (وزنی/وزنی) انکپسوله تولید و آزمون FTIR و کارایی انکپسولاسیون روی نانوذرات تشکیل شده انجام و نمونه ای که دارای کارایی انکپسولاسیون بالاتر بود جهت افزودن به کره استفاده شد. نتایج آزمون FTIR نشان داد ویتامین D3 به طور موفقیت آمیزی در ساختار نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون به دام افتاده و با به کارگیری ۱۰٪ ویتامین D3 در ساختار نانوذرات بالاترین راندمان انکپسولاسیون حاصل گردید و سپس خصوصیات فیزیکوشیمیایی، رنگی و حسی نمونه ها در طی ۳ ماه نگهداری با نمونه شاهد مقایسه شدند. نتایج نشان داد استفاده از نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D3 و افزایش سطح به کارگیری آن در فرمولاسیون کره موجب کاهش اندیس پراکسید، عدد اسیدی و اندیس تیوباربیتوریک اسید در طی دوره نگهداری شد و نمونه حاوی ۵٪ ویتامین D3 موجب عدم ایجاد تفاوت معنی داری خصوصیات رنگی (L*, a و b) و نیز عدم تغییر خصوصیات حسی در مقایسه با نمونه شاهد شد. به طور کلی می توان نتیجه گرفت که کره حاوی ۵٪ نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D3 دارای خصوصیات فیزیکوشیمیایی، رنگی و حسی مطلوب و به عنوان نمونه برتر انتخاب می شود.

واژه های کلیدی: ویتامین D3، پلی کاپرولاکتون، کره، نانوذرات

استناد: سهیلا راستان مستعلی بگلو، لیدا شاهسونی، شادی مهدیخانی، غنی سازی کره با نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون بارگذاری شده با ویتامین D3، کیفیت و ماندگاری تولیدات کشاورزی و مواد غذایی، (۱۴۰۴)، دوره ۵، شماره ۱، صفحات ۷۴-۵۵.

DOI: <https://doi.org/10.71516/qafj.2025.1216010>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، ایران

نویسندگان © CC BY NC

مقدمه

کره یکی از فراآورده‌های حاصل از شیر می‌باشد که از طریق یک فرآیند ساده‌ی هم زدن شیر، خامه یا ماست تهیه می‌شود و باید فاقد هرگونه چربی یا روغنی غیر از چربی شیر باشد. این محصول متشکل از ۸۴-۸۰ درصد چربی شیر، ۱۵/۹-۱۵/۳ درصد آب، ۱ درصد ماده خشک بدون چربی و ۱/۸-۰/۳ درصد نمک به همراه مقادیر کمی پروتئین، کلسیم و فسفر تشکیل شده است. علاوه بر این، کره حاوی ویتامین‌های محلول در چربی نظیر ویتامین D و همچنین ۶ تا ۷ درصد اسیدهای چرب ضروری نیز می‌باشد. این فراآورده با عطر و طعم مطلوب توسط مصرف‌کنندگان به‌عنوان فراآورده طبیعی شناخته می‌شود و دارای مزایایی نظیر پروفایلی کاملاً طبیعی و عطر و طعم عالی می‌باشد. با این وجود کره از لحاظ وجود ویتامین‌های نظیر ویتامین D₃ منبع خوبی به شمار نمی‌رود و به‌کارگیری این ویتامین در فرمولاسیون کره می‌تواند به خصوصیات زیست‌فعال این محصول بیفزاید (۱ و ۲). ویتامین D₃ از طریق بهبود جذب کلسیم، منیزیم و فسفر موجب ایفای نقش حیاتی در سنتز استخوان‌ها، استحکام و سلامتی آن‌ها دارد. بر این اساس جذب ویتامین D₃ از طریق رژیم غذایی برای افرادی که کمتر در معرض اشعه مستقیم آفتاب (افراد مسن و زنان) هستند بسیار مهم می‌باشند (۳). بنابراین استفاده از ویتامین D به‌عنوان عامل غنی‌کننده در مکمل‌های غذایی و دارویی و نیز محصولات غذایی ممکن است تأثیر قابل‌توجهی روی سلامتی افراد جامعه داشته باشد. وجود شرایط نامساعد محیطی و شرایط سخت فرآوری و نیز نور و حرارت از جمله چالش‌های جدی در ارتباط با غنی‌سازی مواد غذایی با ویتامین D₃ می‌باشند. به همین خاطر استفاده از تکنولوژی‌های تحویلی مانند روش‌های مختلف انکپسولاسیون می‌تواند پایداری این ترکیب را برای به‌کارگیری و تحویل آن به بدن افزایش دهد (۴ و ۵). انکپسولاسیون ممکن است به‌عنوان فرآیندی برای به دام انداختن یک ماده (عامل فعال) در ماده دیگر (مواد دیواره) تعریف شود. ماده محصور شده به جز عامل فعال را می‌توان فاز هسته، فعال، داخلی یا محموله نامید. یکی از اصلی‌ترین چالش‌های روبری فرآورده‌ها و تکنولوژی‌های متداول انکپسولاسیون مواد غذایی نظیر خشک کردن و سرد کردن انجمادی، خشک کردن پاششی، اکستروژن و

ساختارهای بر پایه چربی‌ها (نیوزوم، لیپوزوم و فیتوزوم) استفاده از دماهای بسیار زیاد و یا بسیار کم می‌باشد که علاوه بر هزینه بالا ممکن است موجب القای شوک به ترکیبات زیست‌فعال و حتی غیرفعال‌سازی آن‌ها شود. علاوه بر این‌ها استفاده از حلال‌های سمی، ایجاد خلل و فرج در سطح کپسول‌های انکپسوله‌کننده، راندمان پایین انکپسولاسیون، عدم تبخیر کامل حلال و پیچیده بودن ازجمله سایر محدودیت‌های ناشی از این فرآیندها می‌باشد (۶-۸). فرآیندهای الکتروهایدرودینامیک^۱ که متشکل از الکتروریسی^۲ و الکتروپاشش^۳ هستند جزء فرآیندهای فیزیکی محسوب می‌شوند که با القای میدان الکتریکی خارجی صورت می‌گیرند. در ولتاژ پایین نیروی الکتریکی خارجی برای غلبه بر کشش سطحی بسیار ضعیف است و محلول خوراک به‌صورت قطره‌ای جریان می‌یابد که تحت عنوان حالت چکیدن از آن یاد می‌شود. هنگامی که ولتاژ بالا می‌رود نیروی الکتریکی خارجی قوی‌تر باعث می‌شود جریان خوراک به‌صورت حالت مخروطی به نام مخروط تیلور از نوک سوزن خارج شود. سپس جت بسیار ریز (بسیار ریزتر از نازل سوزن) از نوک مخروط تیلور خارج می‌شود که این پدیده را تحت عنوان حالت جت مخروطی از آن یاد می‌کنند که در اغلب موارد به دلیل قابلیت تکرارپذیری و کنترل‌پذیری مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین زمانی که یک سیال نیوتنی یا سیال با خاصیت رقیق شوندگی با برش کم مورد استفاده قرار می‌گیرد جت تشکیل شده در نوک سوزن به‌صورت قطرات بسیار ریز باردار روی جمع‌کننده تشکیل می‌شود که ناشی از ناپایداری جریان سیال می‌باشد از همین رو این فرآیند را تحت عنوان الکتروپاشش می‌شناسند (۹). کاپرولاکتون یک استر حلقوی است که دارای یک حلقه ۷ عضوی است. کاپرولاکتون دارای چندین ایزومر مختلف (آلفا، بتا، گاما و دلتا) است. پلی‌کاپرولاکتون یک پلی‌استر آلیفاتیک است که به‌طور گسترده برای انکپسولاسیون ترکیبات زیست‌فعال مورد استفاده قرار می‌گیرد که زیست‌تخریب‌پذیری و زیست‌سازگاری، ارزان بودن، پایداری ازجمله خصوصیات ویژه آن محسوب می‌شود. پلی‌کاپرولاکتون توسط سازمان غذا-داروی آمریکا

¹ Electrohydrodynamic atomization² Electrospinning³ Electrospray

(Shimadzu, Japan) سنجیده شد. در نهایت با استفاده از رابطه ۱ کارایی انکپسولاسیون محاسبه گردید.

$$EE (\%) = ((Ct - Cs)/Ct) \times 100 \quad \text{معادله ۱}$$

در آن، Ct و Cs به ترتیب غلظت کل ویتامین D₃ و غلظت ویتامین D₃ موجود در سوپرناتانت می باشد.

آزمون FTIR

به منظور بررسی احتمال برهم کنش شیمیایی بین اجزای تشکیل دهنده نانوذرات، یعنی ویتامین D₃ و پلی کاپرولاکتون (PCL)، از طیف سنجی تبدیل فوری مادون قرمز (FTIR) استفاده شد. اندازه گیری ها با دستگاه FTIR مدل Bruker Alpha (ساخت آمریکا) در محدوده طیفی ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ cm⁻¹ انجام گرفت. برای این منظور، طیف های FTIR نمونه های خالص ویتامین D₃ و پلی کاپرولاکتون به صورت جداگانه ثبت شد و سپس با طیف نانوذرات الکترواسپری شده حاوی ویتامین D₃ در غلظت های مختلف مقایسه گردید. این تحلیل به منظور شناسایی تغییرات در موقعیت، شدت یا ظهور/ناپدید شدن نوارهای جذبی مشخصه، و در نتیجه ارزیابی امکان برهم کنش فیزیکی یا شیمیایی بین دارو و پلیمر حامل انجام شد (۱۳).

تهیه و آماده سازی نمونه های کره

در این تحقیق، از کره تولیدی کارخانه پاک به عنوان ماتریس پایه استفاده شد. نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ در سه سطح غلظتی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد (وزنی/وزنی) تهیه و سپس به صورت جداگانه در سه غلظت ۳، ۵ و ۱۰ درصد به کره اضافه گردید. پس از همگن سازی ترکیبات، نمونه ها به مدت ۴۸ ساعت در فریزر با دمای ۱۸- درجه سلسیوس نگهداری شدند تا فرآیند تثبیت و توزیع یکنواخت نانوذرات در ماتریس کره تکمیل شود (۱۴).

اندیس پراکسید

به منظور تعیین اندیس پراکسید از روش پیشنهاد شده توسط استاندارد ملی ایران به شماره ۴۱۷۹ استفاده شد.

(FDA¹) برای به کارگیری در محصولات غذایی و دارویی تأیید شده است. بر این اساس می توان از پلی کاپرولاکتون برای انکپسولاسیون و رسانس ترکیبات زیست فعال مختلف استفاده نمود (۱۰). بنابراین هدف از این پژوهش تولید نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون بارگذاری شده با ویتامین D₃ و به کارگیری آن در فرمولاسیون کره می باشد.

روش کار

تولید نانوذرات الکترواسپری شده

پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃

به منظور تهیه نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ ابتدا محلول ۱۰ درصد پلی کاپرولاکتون در مخلوط اسید استیک (۸۰): اتانول (۲۰) (۲۰: ۸۰) تهیه شد و سپس ویتامین D₃ با سه سطح مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد (بر اساس وزن پلی کاپرولاکتون) به آن اضافه گردید. در ادامه به منظور تولید نانوذرات، محلول به دست آمده در داخل سرنگ پلاستیکی ۱۰ میلی لیتری ریخته شد و سپس توسط پمپ سرنگی با دبی ۱/۵ میلی لیتر بر ساعت به داخل میدان الکتریکی با ولتاژ ۲۵ کیلوولت پمپ شد. فاصله نوک سوزن تا صفحه جمع کننده ۱۵ سانتی متر در نظر گرفته شد (۱۱). بعد از تولید نانوذرات بارگذاری شده با ویتامین D₃ (با سطوح مختلف) کارایی انکپسولاسیون هر کدام از نمونه ها اندازه گیری شد و نمونه ای که دارای کارایی انکپسولاسیون بالاتر بود جهت افزودن به کره مورد استفاده قرار گرفت.

کارایی انکپسولاسیون

به منظور تعیین کارایی انکپسولاسیون ویتامین D₃ از روش الکترو هیدرودینامیک، استفاده شد (۱۲). هر کدام از ریزکپسول های بارگذاری شده با ویتامین D₃ (۲۰ میلی گرم) با ۵ میلی لیتر اتانول به آرامی و کاملاً مخلوط شد. مخلوط حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در ۱۰۰۰ دور بر دقیقه در دمای محیط همزده شد. سپس جذب فاز رویی در ۲۶۴ نانومتر با اسپکتروفتومتر UV-Vis

¹ Food and Drug Administration

ارزیابی حسی

ارزیابی حسی نمونه‌ها با استفاده از روش هدونیک ۵ نقطه‌ای انجام شد. در این راستا، شاخص‌های حسی شامل: رنگ، طعم، بافت و پذیرش کلی مورد بررسی قرار گرفتند. امتیازدهی بر اساس مقیاس ۵ درجه‌ای صورت گرفت که در آن: ۱، به معنای «غیرقابل مصرف یا خیلی ضعیف»، ۲، به معنای «غیرقابل قبول یا ضعیف»، ۳، به معنای «قابل قبول یا متوسط»، ۴ به معنای «رضایت‌بخش یا خوب» و ۵ به معنای «بسیار رضایت‌بخش یا خیلی خوب» بود. امتیاز کلی هر نمونه از مجموع امتیازات اختصاص یافته به هر یک از شاخص‌های حسی به دست آمد (۱۹).

بررسی آماری

آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام شدند. داده‌های به دست آمده از آزمون‌های مختلف با استفاده از تحلیل واریانس یک‌طرفه^۱ در نرم افزار SPSS نسخه ۲۲ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند تا اختلاف معنی دار بین تیمارها بررسی شود. در صورت وجود اختلاف معنی دار، میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن^۲ در سطح احتمال ۵ درصد ($p < 0.05$) مقایسه گردیدند.

نتایج

آنالیز FTIR

در این مطالعه آنالیز طیف FTIR ویتامین D3 خالص، پلی‌کاپرولاکتون خالص و نانوذرات الکترواسپری شده پلی‌کاپرولاکتون حاوی سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد ویتامین D3 در شکل (۱)، نشان داده شده است. طیف FTIR ویتامین D3 خالص حاوی مجموعه‌ای پیوندهای ارتعاشی مانند پیک تشکیل شده در حدود 3358 cm^{-1} ، پیک‌های در حدود 2923 cm^{-1} و 2853 cm^{-1} ، پیک در حدود 1647 cm^{-1} ، پیک در حدود 1160 cm^{-1} و پیک 780 cm^{-1} بود. علاوه بر این‌ها چندین پیک دیگر در دامنه طول موج 1060 cm^{-1} و 700 cm^{-1} نانومتر تشکیل شد. طیف FTIR پلی‌کاپرولاکتون خالص نیز پیک‌ها

این آزمون در روز تولید و ماه اول، دوم و سوم پس از تولید و نگهداری در دمای یخچال صورت گرفت (۱۵).

عدد اسیدی

برای تعیین عدد اسیدی، از روش استاندارد ملی ایران شماره ۴۱۷۸ (ISIRI 4178) استفاده شد. این آزمون در چهار زمان بندی مشخص انجام گرفت: روز تولید (زمان صفر) و در پایان ماه‌های اول، دوم و سوم پس از تولید. تمام نمونه‌ها در طول دوره آزمایش در شرایط استاندارد نگهداری یخچالی (دمای 4 ± 1 درجه سلسیوس) نگهداری شدند تا تغییرات عدد اسیدی در شرایط شبیه‌سازی شده نگهداری معمول محصول پایش گردد (۱۶).

اندیس تیوباربتوریک

یک گرم از هر نمونه با $2/5$ میلی لیتر معرف اسید تیوباربتوریک مخلوط شد و مخلوط حاصل به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب داغ، گرم گردید. سپس، نمونه‌ها به سرعت در یخ سرد شدند تا واکنش متوقف شود. پس از سرد کردن، ۱۰ میلی لیتر سیکلو هگزان و ۱ میلی لیتر محلول ۴ مولار آمونیم سولفات به هر نمونه اضافه شد. نمونه‌ها در دمای اتاق به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۲۴۹۰ $g \times$ سانتریفوژ گردیدند تا فازهای آلی و آبی به خوبی از هم جدا شوند. جذب فاز رویی (حلال آلی) در طول موج ۵۳۲ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه گیری شد (۱۷). این آزمون در چهار زمان بندی انجام شد: روز تولید (زمان صفر) و در پایان ماه‌های اول، دوم و سوم پس از تولید، درحالی که نمونه‌ها در طول دوره آزمایش در دمای یخچال ($4 \pm 1^\circ C$) نگهداری می شدند.

خصوصیات رنگی

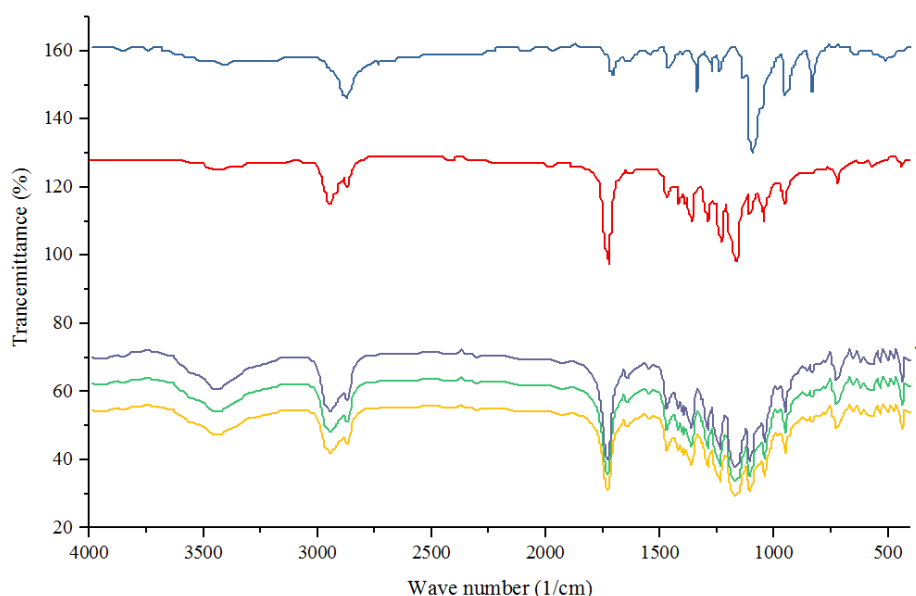
برای اندازه گیری خصوصیات رنگی نمونه‌ها از دستگاه رنگ سنج (FRU، ساخت چین) استفاده شد. در این راستا، پارامترهای رنگی مبتنی بر سیستم CIELAB شامل شاخص روشنایی (L)، شاخص قرمزی (a) و شاخص (b) توسط دستگاه ثبت و گزارش گردید (۱۸).

¹ One-way ANOVA

² Duncan's Multiple Range Test

تشکیل شدند. علاوه بر این‌ها پیوندهایی در دامنه طول موج 1060 cm^{-1} و 700 cm^{-1} نانومتر (1045 cm^{-1})، 952 cm^{-1} ، 837 cm^{-1} ، 739 cm^{-1} نیز در طیف FTIR نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون بارگذاری شده با سطوح مختلف ویتامین D3 ظاهر شدند. بر این اساس همان‌طور که در شکل (۱)، نشان داده شده است با بارگذاری سطوح مختلف ویتامین D3 (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) در ساختار نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون محل و موقعیت پیک‌ها دچار تغییر نشد و تنها شدت پیک‌ها افزایش یافت.

ارتعاشی متعددی از خود نشان داد. در طیف FTIR پلی کاپرولاکتون خالص پیک‌هایی در طول موج‌های 2931 cm^{-1} ، 2858 cm^{-1} ، 1722 cm^{-1} ، 1292 cm^{-1} ، 1239 cm^{-1} و 1161 cm^{-1} تشکیل شد. همچنین طیف FTIR نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون بارگذاری شده با سطوح ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد ویتامین D3، نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از طیف FTIR این نانوذرات مشخص شد که پیک‌هایی در نواحی 3431 cm^{-1} ، 2938 cm^{-1} ، 2862 cm^{-1} و 1724 cm^{-1} تشکیل شدند. همچنین پیوندهایی در طول موج‌های 1631 cm^{-1} ، 1297 cm^{-1} و 1237 cm^{-1} و 1165 cm^{-1}



شکل ۱- نتایج طیف FTIR (۱) ویتامین D3 خالص، (۲) پلی کاپرولاکتون خالص، (۳) نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ۱۵ درصد ویتامین D3، (۴) نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ۱۰ درصد ویتامین D3، و (۵) نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ۵ درصد ویتامین D3.

که با افزایش سطح به کارگیری ویتامین D3 از ۵ تا ۱۰ درصد به طور معنی داری ($p < 0.05$) کارایی انکپسولاسیون آن از $1/23 \pm 72/52$ درصد تا $1/56 \pm 91/38$ درصد افزایش یافت. با این وجود افزایش سطح به کارگیری ویتامین D3 در فرمولاسیون نانوذرات الکترواسپری شده بر پایه پلی کاپرولاکتون از ۱۰ تا ۱۵ درصد به طور معنی داری ($p < 0.05$) کارایی انکپسولاسیون از $1/56 \pm 91/38$ درصد تا $1/74 \pm 84/23$ درصد کاهش یافت.

کارایی انکپسولاسیون

جدول (۱)، نتایج کارایی انکپسولاسیون ویتامین D3 در ساختار نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون و مقایسه میانگین داده‌ها بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج تحلیل واریانس داده‌ها مشخص شد که کارایی انکپسولاسیون ویتامین D3 در ساختار نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون به طور معنی داری ($p < 0.05$) وابسته به سطح به کارگیری ویتامین D3 در ساختار نانوذرات الکترواسپری شده می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان داد

جدول ۱- نتایج کارآیی انکپسولاسیون ویتامین D3 در ساختار نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون

کارآیی انکپسولاسیون (%)	سطح به کارگیری ویتامین D3 در ساختار نانوذرات (%)
$72/52 \pm 1/23^c$	۵
$91/38 \pm 1/56^a$	۱۰
$84/23 \pm 1/74^b$	۱۵

*حروف کوچک متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی دار در هر ستون می باشند ($p < 0/05$).

نانوذرات از ۳ تا ۱۰ درصد به طور معنی داری ($p < 0/05$) اندیس پراکسید نمونه های کره در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافت. همچنین مشخص شد که افزایش مدت زمان نگهداری از روز اول تا پایان ماه سوم نگهداری به طور معنی داری ($p < 0/05$) منجر به افزایش اندیس پراکسید نمونه های کره شد که در این میان شیب افزایش اندیس پراکسید در نمونه شاهد بیشتر از سایر تیمارها بود. همچنین مشخص شد که افزایش سطح به کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D3 شیب افزایش اندیس پراکسید نمونه های کره غنی سازی شده با ویتامین D3 را کاهش داد.

تأثیر نانوذرات حامل ویتامین D3 بر اندیس پراکسید کره در طول نگهداری

جدول (۲)، بیانگر نتایج مربوط به اندیس پراکسید نمونه های کره غنی سازی شده با سطوح صفر (شاهد)، ۳، ۵ و ۱۰ درصد نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D3 در طی ۳ ماه نگهداری می باشد. بر اساس نتایج تحلیل واریانس داده ها مشخص شد که اندیس پراکسید نمونه های مختلف کره به طور معنی داری ($p < 0/05$) وابسته به سطح به کارگیری نانوذرات و نیز مدت زمان نگهداری نمونه های کره می باشد. بر این اساس نتایج نشان داد که با افزایش سطح به کارگیری

جدول ۲- تأثیر سطوح نانوذرات ویتامین D3 بر اندیس پراکسید کره (mEq/kg)

سطح نانوذرات (%)	روز اول	ماه اول	ماه دوم	ماه سوم
شاهد	$0/659 \pm 0/004^{aD}$	$0/773 \pm 0/006^{aC}$	$0/861 \pm 0/003^{aB}$	$0/989 \pm 0/006^{aA}$
۳	$0/662 \pm 0/002^{aD}$	$0/729 \pm 0/004^{bC}$	$0/786 \pm 0/008^{bB}$	$0/842 \pm 0/005^{bA}$
۵	$0/663 \pm 0/005^{aD}$	$0/683 \pm 0/007^{cC}$	$0/721 \pm 0/005^{cB}$	$0/776 \pm 0/007^{cA}$
۱۰	$0/665 \pm 0/003^{aC}$	$0/678 \pm 0/002^{dC}$	$0/697 \pm 0/004^{dB}$	$0/716 \pm 0/005^{dA}$

*حروف کوچک متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی دار در هر ستون می باشند ($p < 0/05$) و حروف بزرگ متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی دار در هر ردیف می باشند ($p < 0/05$).

نگهداری بر اساس آزمون چند دامنه ای دانکن در جدول (۳)، نشان داده شده است. بر اساس نتایج تحلیل واریانس داده ها مشخص شد که عدد اسیدی نمونه های مختلف کره به طور معنی داری ($p < 0/05$) وابسته به سطح به کارگیری نانوذرات و نیز مدت زمان نگهداری نمونه های کره می باشد. با افزایش سطح به کارگیری نانوذرات از ۳ تا ۱۰ درصد به طور معنی داری ($p < 0/05$) عدد اسیدی نمونه های کره

تأثیر نانوذرات حامل ویتامین D3 بر عدد اسیدی کره در طول نگهداری

نتایج مربوط به مقایسه میانگین داده های مربوط به عدد اسیدی نمونه های کره غنی سازی شده با سطوح صفر (شاهد)، ۳، ۵ و ۱۰ درصد نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D3 در طی ۳ ماه

از سایر تیمارها بود. همچنین نتایج نشان داد که افزایش سطح به کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ شیب افزایش عدد اسیدی نمونه های کره غنی سازی شده با ویتامین D₃ را کاهش داد.

در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافت. همچنین مشخص شد که افزایش مدت زمان نگهداری از روز اول تا پایان ماه سوم نگهداری به طور معنی داری ($p < 0.05$) منجر به افزایش اندیس پراکسید نمونه های کره شد که در این میان شیب افزایش اندیس پراکسید در نمونه شاهد بیشتر

جدول ۳- تأثیر سطوح مختلف نانوذرات حامل ویتامین D₃ بر عدد اسیدی کره (mg/g)

سطح نانوذرات (%)	روز اول	ماه اول	ماه دوم	ماه سوم
شاهد	۰/۲۹۵ ± ۰/۰۰۲ ^{aD}	۰/۳۶۸ ± ۰/۰۰۴ ^{aC}	۰/۴۳۵ ± ۰/۰۰۵ ^{aB}	۰/۴۸۹ ± ۰/۰۰۷ ^{aA}
۳	۰/۲۹۴ ± ۰/۰۰۳ ^{aD}	۰/۳۲۹ ± ۰/۰۰۶ ^{bC}	۰/۳۷۶ ± ۰/۰۰۴ ^{bB}	۰/۴۱۲ ± ۰/۰۰۴ ^{bA}
۵	۰/۲۹۱ ± ۰/۰۰۴ ^{aD}	۰/۳۰۹ ± ۰/۰۰۵ ^{cC}	۰/۳۱۸ ± ۰/۰۰۹ ^{cB}	۰/۳۳۲ ± ۰/۰۰۳ ^{cA}
۱۰	۰/۲۹۰ ± ۰/۰۰۴ ^{aC}	۰/۲۹۶ ± ۰/۰۰۷ ^{dC}	۰/۳۰۴ ± ۰/۰۰۲ ^{dB}	۰/۳۲۵ ± ۰/۰۰۶ ^{dA}

*حروف کوچک متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی دار در هر ستون می باشند ($p < 0.05$) و حروف بزرگ متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی دار در هر ردیف می باشند ($p < 0.05$).

معنی داری ($p < 0.05$) اندیس تیوباربتوریک نمونه های کره در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافت. همچنین مشخص شد که افزایش مدت زمان نگهداری از روز اول تا پایان ماه سوم نگهداری به طور معنی داری ($p < 0.05$) منجر به افزایش اندیس تیوباربتوریک نمونه های کره شد که در این میان شیب افزایش اندیس پراکسید در نمونه شاهد بیشتر از سایر تیمارها بود. همچنین مشخص شد که افزایش سطح به کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ شیب افزایش اندیس تیوباربتوریک نمونه های کره غنی سازی شده با ویتامین D₃ را کاهش داد.

اندیس تیوباربتوریک

جدول (۴)، نتایج مربوط به اندیس تیوباربتوریک نمونه های کره غنی سازی شده با سطوح صفر (شاهد)، ۳، ۵ و ۱۰ درصد نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ در طی ۳ ماه نگهداری را نشان می دهد. بر اساس نتایج تحلیل واریانس داده ها مشخص شد که اندیس تیوباربتوریک نمونه های مختلف کره به طور معنی داری ($p < 0.05$) وابسته به سطح به کارگیری نانوذرات و نیز مدت زمان نگهداری نمونه های کره می باشد. بر این اساس نتایج نشان داد که با افزایش سطح به کارگیری نانوذرات از ۳ تا ۱۰ درصد به طور

جدول ۴- تأثیر نانوذرات ویتامین D₃ بر اندیس تیوباربتوریک کره (mg MA/kg)

سطح نانوذرات (%)	روز اول	ماه اول	ماه دوم	ماه سوم
شاهد	۰/۰۳۲ ± ۰/۰۰۳ ^{aD}	۰/۰۹۸ ± ۰/۰۰۲ ^{aC}	۰/۱۴۳ ± ۰/۰۰۳ ^{aB}	۰/۱۸۹ ± ۰/۰۰۴ ^{aA}
۳	۰/۰۳۵ ± ۰/۰۰۴ ^{aD}	۰/۰۶۵ ± ۰/۰۰۳ ^{bC}	۰/۰۹۹ ± ۰/۰۰۲ ^{bB}	۰/۱۲۱ ± ۰/۰۰۳ ^{bA}
۵	۰/۰۳۳ ± ۰/۰۰۲ ^{aD}	۰/۰۵۴ ± ۰/۰۰۲ ^{cC}	۰/۰۶۶ ± ۰/۰۰۱ ^{cB}	۰/۰۸۳ ± ۰/۰۰۲ ^{cA}
۱۰	۰/۰۳۱ ± ۰/۰۰۲ ^{aC}	۰/۰۴۵ ± ۰/۰۰۱ ^{dC}	۰/۰۵۹ ± ۰/۰۰۱ ^{dB}	۰/۰۷۱ ± ۰/۰۰۴ ^{dA}

*حروف کوچک متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی دار در هر ستون می باشند ($p < 0.05$) و حروف بزرگ متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی دار در هر ردیف می باشند ($p < 0.05$).

تأثیر نانوذرات حامل ویتامین D₃ بر خصوصیات رنگی کره

نتایج مقایسه میانگین داده‌های مربوط به خصوصیات رنگی (L*, a و b) نمونه‌های کره غنی‌سازی شده با سطوح صفر (شاهد)، ۳، ۵ و ۱۰ درصد نانوذرات الکترواسپری شده پلی‌کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در جدول (۵)، نشان داده شده است. بر اساس نتایج تحلیل واریانس داده‌ها مشخص شد که خصوصیات رنگی (L*, a و b) نمونه‌های مختلف کره به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) وابسته به سطح به‌کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی‌کاپرولاکتون

حاوی ویتامین D₃ می‌باشد. بر این اساس، اختلاف معنی‌داری بین شاخص‌های رنگی (L*, a و b) نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی ۳ و ۵ درصد نانوذرات الکترواسپری شده پلی‌کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ وجود ندارد ($p > 0.05$). با وجود این افزایش سطح به‌کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی‌کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ از ۵ تا ۱۰ درصد به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) منجر به کاهش شاخص L* (روشنایی)، a (قرمزی) و b (زردی) نمونه‌های کره شد.

جدول ۵- پارامترهای رنگی (L*, a*, b) کره غنی‌شده با نانوذرات حامل ویتامین D₃

سطح نانوذرات (%)	L* (روشنایی)	a (قرمزی)	b (زردی)
شاهد	87/63 ± 1/12 ^a	7/37 ± 1/21 ^a	13/74 ± 1/14 ^a
۳	87/57 ± 1/21 ^a	7/33 ± 1/35 ^a	13/69 ± 1/18 ^a
۵	87/51 ± 1/09 ^a	7/31 ± 1/14 ^a	13/64 ± 1/39 ^a
۱۰	85/031 ± 1/33 ^b	4/67 ± 1/24 ^b	9/49 ± 1/10 ^b

*حروف کوچک متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در هر ستون می‌باشند ($p < 0.05$).

به سطح به‌کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی‌کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ می‌باشد. بر این اساس همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است افزایش سطح به‌کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی‌کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ از ۳ تا ۵ درصد به‌طور معنی‌داری روی امتیاز خصوصیات حسی رنگ، طعم، بافت و پذیرش کلی تأثیر معنی‌داری نداشت ($p > 0.05$). با این وجود افزایش سطح به‌کارگیری نانوذرات از ۵ تا ۱۰ درصد به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) امتیاز تمامی خصوصیات حسی را کاهش داد.

تأثیر نانوذرات حامل ویتامین D₃ بر ویژگی‌های حسی کره

نتایج مربوط به ارزیابی خصوصیات مختلفی حسی (رنگ، طعم، بافت و پذیرش کلی) نمونه‌های کره غنی‌سازی شده با سطوح صفر (شاهد)، ۳، ۵ و ۱۰ درصد نانوذرات الکترواسپری شده پلی‌کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ و مقایسه میانگین داده‌ها بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در جدول (۶)، ارائه شده است. بر اساس نتایج تحلیل واریانس داده‌ها مشخص شد که امتیاز تمامی خصوصیات حسی (رنگ، طعم، بافت و پذیرش کلی) نمونه‌های مختلف کره به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) وابسته

جدول ۶- ویژگی‌های حسی کره حاوی غنی شده نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون بارگذاری شده با ویتامین D3

سطح نانوذرات (%)	طعم	رنگ	بافت	پذیرش کلی
شاهد	$5/00 \pm 0/00^a$	$5/00 \pm 0/00^a$	$5/00 \pm 0/00^a$	$5/00 \pm 0/00^a$
۳	$5/00 \pm 0/00^a$	$5/00 \pm 0/00^a$	$5/00 \pm 0/00^a$	$5/00 \pm 0/00^a$
۵	$5/00 \pm 0/00^a$	$5/00 \pm 0/00^a$	$5/00 \pm 0/00^a$	$5/00 \pm 0/00^a$
۱۰	$4/00 \pm 0/00^b$	$3/00 \pm 0/00^b$	$2/00 \pm 0/00^b$	$3/00 \pm 0/00^b$

*حروف کوچک متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی دار در هر ستون می باشند ($p < 0/05$).

بحث

توسعه سیستم‌های نوین رهایش کنترل شده برای ویتامین‌های حساس مانند ویتامین D₃، به ویژه در محصولات چربی دار پرمصرف مانند کره، از اهمیت بالایی در بهبود ارزش تغذیه‌ای و پایداری محصول برخوردار است. در این راستا، استفاده از نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون به عنوان حامل ویتامین D₃ نه تنها امکان غنی سازی مؤثر کره را فراهم می کند، بلکه با حفاظت از ویتامین در برابر عوامل محیطی، پایداری اکسیداتیو و کیفیت حسی محصول نهایی را نیز بهبود می بخشد. در این پژوهش، بر اساس آنالیز طیف FTIR ویتامین D₃ خالص، پلی کاپرولاکتون خالص و نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد ویتامین D₃، طیف FTIR ویتامین D₃ خالص، حاوی مجموعه‌ای پیوندهای ارتعاشی مانند پیک تشکیل شده در حدود 3358 cm^{-1} که می تواند در ارتباط با پیوندهای هیدروژنی گروه‌های هیدروکسیل (-OH)، پیک‌های در حدود 2923 cm^{-1} و 2853 cm^{-1} احتمالاً مربوط به ارتعاشات پیوندهای C-H آلکیل، پیک در حدود 1647 cm^{-1} در ارتباط با ارتعاشات پیوند C=O، پیک در حدود 1160 cm^{-1} مربوط به پیوندهای C-O و پیک 780 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات پیوندهای C=CH₂ باشند. علاوه بر این‌ها چندین پیک دیگر در دامنه طول موج 1060 cm^{-1} و 700 cm^{-1} نانومتر تشکیل شد که می تواند در ارتباط با پیوندهای C-H باشد (۲۰). طیف FTIR پلی کاپرولاکتون خالص نیز پیک‌ها ارتعاشی متعددی از خود نشان داد. در طیف FTIR پلی کاپرولاکتون خالص پیک‌هایی در طول موج‌های 2931 cm^{-1} ، 2858 cm^{-1} ، 1722 cm^{-1} ، 1292 cm^{-1} ، 1239 cm^{-1} و 1161 cm^{-1}

تشکیل شده که احتمالاً به ترتیب در ارتباط با ارتعاشات پیوندهایی نظیر CH₂-نامتقارن، CH₂-متقارن، گروه‌های کربونیل، پیوندهای C-O و C-C، پیوندهای C-O-C نامتقارن، و پیوندهای C-O-C متقارن می باشند (۲۱). همچنین طیف FTIR نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون بارگذاری شده با سطوح ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد ویتامین D₃ در شکل ۱ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از طیف FTIR این نانوذرات مشخص شد که پیک‌هایی در نواحی 3431 cm^{-1} ، 2938 cm^{-1} ، 2862 cm^{-1} و 1724 cm^{-1} تشکیل شدند که احتمالاً به ترتیب مربوط به پیوندهای هیدروژنی گروه‌های هیدروکسیل (-OH)، پیوندهایی نظیر: CH₂-نامتقارن، CH₂-متقارن و گروه‌های کربونیل می باشند. علاوه بر این پیوندهایی در طول موج‌های 1631 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات پیوند C=O، 1297 cm^{-1} مربوط به پیوندهای C-O و C-C، 1237 cm^{-1} مربوط به پیوندهای C-O-C نامتقارن و 1165 cm^{-1} مربوط به پیوندهای C-O-C متقارن تشکیل شدند. همچنین پیوندهایی در دامنه طول موج 1060 cm^{-1} و 700 cm^{-1} نانومتر (۱۰۴۵ cm^{-1})، 952 cm^{-1} ، 837 cm^{-1} و 739 cm^{-1} نیز در طیف FTIR نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون بارگذاری شده با سطوح مختلف ویتامین D₃ ظاهر شدند که مربوط به ارتعاشات پیوندهای C-H هستند (۲۲). بر اساس نتایج طیف‌سنجی FTIR، بارگذاری سطوح مختلف ویتامین D₃ (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی/وزنی) در ساختار نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون منجر به تغییری در موقعیت یا شکل پیک‌های مشخصه نشد؛ بلکه تنها شدت پیک‌های مربوط به ویتامین D₃ با افزایش غلظت آن در

معنی‌داری ($p < 0.05$) وابسته به سطح به‌کارگیری ویتامین D₃ در ساختار نانوذرات الکترواسپری شده می‌باشد. نتایج نشان داد که استفاده از ۱۰ درصد وزنی/وزنی ویتامین D₃ در ساختار نانوذرات الکترواسپری شده پلی‌کاپرولاکتون موجب بالاترین راندمان انکپسولاسیون شد. لیکن شایسته ذکر است که نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با افزایش سطح به‌کارگیری ویتامین D₃ از ۵ تا ۱۰ درصد به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) کارایی انکپسولاسیون آن از $1/23 \pm 72/52$ درصد تا $1/56 \pm 91/38$ درصد افزایش یافت. با این وجود افزایش سطح به‌کارگیری ویتامین D₃ در فرمولاسیون نانوذرات الکترواسپری شده بر پایه پلی‌کاپرولاکتون از ۱۰ تا ۱۵ درصد به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) کارایی انکپسولاسیون از $1/56 \pm 91/38$ درصد تا $1/74 \pm 84/23$ درصد کاهش یافت. دلیل این رفتارهای احتمالاً ناشی از گردآیدان غلظت و پوشش مؤثر توسط لایه انکپسوله کننده باشد. با افزایش غلظت ویتامین D₃ از ۵ تا ۱۰ درصد گردآیدان غلظت ویتامین D₃ در دسترس برای پوشش توسط لایه انکپسوله کننده افزایش می‌یابد که منجر به افزایش کارایی انکپسولاسیون خواهد شد. با این وجود افزایش بیش‌ازحد ویتامین D₃ سبب می‌شود که پوشش مؤثر اطراف ویتامین D₃ در غلظت‌های بالا صورت نگیرد و همین امر سبب ادغام ذرات و کاهش کارایی انکپسولاسیون خواهد شد (۲۴). در راستای تحقیق حاضر، یافته‌های علی‌عباسی و همکاران (۲۰۲۵) نشان داد که با افزایش نسبت دیواره به هسته از ۱:۵۰ به ۱:۱۲۵ در فرمولاسیون نانوذرات حاوی کورکومین، کارایی انکپسولاسیون به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. با این حال، ادامه افزایش این نسبت از ۱:۱۲۵ به ۱:۲۵۰ منجر به کاهش چشمگیر کارایی انکپسولاسیون شد. محققان تبیین کردند که در نسبت‌های بهینه (مانند ۱:۱۲۵)، غلظت کافی پلیمر دیواره قادر است گردآیدان غلظتی لازم برای تشکیل یک پوشش یکنواخت و مؤثر اطراف هسته کورکومین را فراهم آورد. در مقابل، در نسبت‌های بالاتر (مانند ۱:۲۵۰)، علیرغم افزایش مقدار پلیمر، تشکیل لایه‌ای پایدار و یکپارچه اطراف هسته به دلیل رقیق‌تر شدن محلول و کاهش کارایی خودآرایی مولکول‌های دیواره مختل می‌شود. این امر سبب می‌گردد که نانوذرات قادر به حفظ پایداری کلوئیدی خود نباشند و تمایل به ادغام و تشکیل

نانوذرات افزایش یافت. مقایسه طیف‌های FTIR نمونه‌های خالص (ویتامین D₃ و پلی‌کاپرولاکتون) با نمونه‌های نانوذرات بارگذاری شده نشان داد که تمام پیک‌های مشخصه هر یک از اجزای خالص در طیف نانوذرات ترکیبی حضور دارند و هیچ جابه‌جایی یا ناپدید شدن پیکی مشاهده نگردید. این یافته‌ها بیانگر عدم برهم‌کنش شیمیایی بین ویتامین D₃ و پلیمر PCL و همچنین انکپسولاسیون موفق ویتامین در ماتریس نانوذرات است. افزایش تدریجی شدت پیک‌های مربوط به ویتامین D₃ با بالا رفتن غلظت آن، نیز تأییدکننده توزیع یکنواخت و حضور مؤثر مولکول‌های دارویی در ساختار نانوذرات می‌باشد. این نتایج با یافته‌های گزارش‌شده توسط سایر پژوهشگران در زمینه انکپسولاسیون ویتامین‌ها در نانوحامل‌های پلیمری همخوانی دارد. Guler و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی به بررسی بارگذاری ویتامین D₃ در نانوالیاف مبتنی بر پلی‌کاپرولاکتون و پلی‌لاکتیک اسید پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که افزایش غلظت ویتامین D₃ در ساختار نانوالیاف منجر به افزایش شدت پیک‌های مربوطه در طیف FTIR کامپوزیت حاصل شد، درحالی‌که موقعیت پیک‌ها تغییر معنی‌داری نکرد. محققان این روند را نشانه‌ای از انکپسولاسیون موفق ویتامین D₃ در ماتریس پلیمری دانستند؛ چرا که حضور ویتامین بدون ایجاد برهم‌کنش شیمیایی با پلیمر، تنها باعث تقویت سیگنال‌های طیفی مربوط به خود شد. همچنین، آن‌ها تأکید کردند که ظهور پیک‌های مشخصه ترکیبات خالص (ویتامین D₃ و پلیمرها) در طیف FTIR نانوالیاف بارگذاری‌شده، گواهی بر حضور مؤثر ویتامین در ساختار کامپوزیت و موفقیت فرآیند انکپسولاسیون است. این یافته‌ها با نتایج حاصل از پژوهش حاضر همسو بوده و اعتبار بیشتری به نتیجه‌گیری مبنی بر انکپسولاسیون کارآمد ویتامین D₃ در نانوذرات الکترواسپری‌شده پلی‌کاپرولاکتون می‌بخشد (۲۳). در آزمون انکپسولاسیون، کارایی انکپسولاسیون ویتامین D₃ در ساختار نانوذرات الکترواسپری شده پلی‌کاپرولاکتون و مقایسه میانگین داده‌ها بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد. بر اساس نتایج تحلیل واریانس داده‌ها مشخص شد که کارایی انکپسولاسیون ویتامین D₃ در ساختار نانوذرات الکترواسپری شده پلی‌کاپرولاکتون به‌طور

تجمعات بیشتری پیدا کنند. در چنین شرایطی، نشت کورکومین به محیط اطراف افزایش یافته و در نتیجه، کارایی انکپسولاسیون کاهش می یابد. این یافته ها بر اهمیت تعیین نسبت بهینه دیواره به هسته در طراحی سامانه های نانوحامل مؤثر تأکید دارند و با رویکرد بهینه سازی فرمولاسیون در پژوهش حاضر همخوانی دارد (۲۵). نتایج تحلیل واریانس داده های مربوط به اندیس پراکسید نمونه های کره غنی سازی شده با سطوح صفر (شاهد)، ۳، ۵ و ۱۰ درصد نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ در طی ۳ ماه نگهداری نشان داد که اندیس پراکسید نمونه های مختلف کره به طور معنی داری ($p < 0.05$) وابسته به سطح به کارگیری نانوذرات و نیز مدت زمان نگهداری نمونه های کره می باشد. بر این اساس نتایج نشان داد که با افزایش سطح به کارگیری نانوذرات از ۳ تا ۱۰ درصد به طور معنی داری ($p < 0.05$) اندیس پراکسید نمونه های کره در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافت. همچنین مشخص شد که افزایش مدت زمان نگهداری از روز اول تا پایان ماه سوم نگهداری به طور معنی داری ($p < 0.05$) منجر به افزایش اندیس پراکسید نمونه های کره شد که در این میان شیب افزایش اندیس پراکسید در نمونه شاهد بیشتر از سایر تیمارها بود. همچنین مشخص شد که افزایش سطح به کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ شیب افزایش اندیس پراکسید نمونه های کره غنی سازی شده با ویتامین D₃ را کاهش داد. دلیل این امر ممکن است در ارتباط با افزایش پایداری ویتامین D₃ و خاصیت آنتی اکسیدانی آن باشد. تشکیل لایه محافظ پلی کاپرولاکتون اطراف ویتامین D₃ از یک طرف آن را در مقابل تأثیرات نامطلوب محیطی محافظت می نماید و از طرف دیگر آن را در مقابل اکسیداسیون پایدار می سازد. همچنین مشخص شده که ویتامین D₃ خاصیت آنتی اکسیدانی دارد و از تشدید واکنش های زنجیری اکسیداسیون و استرس های اکسیداتیو جلوگیری می نماید (۲۶). بنابراین انتظار می رود که به کارگیری ویتامین D₃ و افزایش سطح به کارگیری آن موجب افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی محصول شود که همراه با افزایش پایداری آن خواهد بود. همچنین در طی نگهداری به دلیل وجود اکسیژن تشکیل هیدروپراکسیدهای ناشی از اکسیداسیون چربی ها امری

اجتناب ناپذیر است بنابراین با افزایش ماندگاری در همه محصولات اندیس پراکسید افزایش می یابد. اما وجود ویتامین D₃ در محصول و افزایش سطح به کارگیری آن به دلیل افزایش محتوی ترکیبات آنتی اکسیدانی موجب کاهش شیب گسترش اندیس پراکسید در محصول می شود (۲۷). این یافته ها با نتایج سایر محققین از لحاظ افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی و کنترل اندیس پراکسید مطابقت دارد. پژوهشی دیگر (۲۰۲۴) به بررسی اثر اسانس چوب در افزایش پایداری اکسیداتیو و کنترل روند افزایش شاخص پراکسید در روغن کره پرداخته است. یافته های این مطالعه نشان داد که اسانس چوب دارای فعالیت آنتی اکسیدانی قابل توجهی است که از فرآیند اکسیداسیون چربی ها در روغن کره جلوگیری می کند. محقق مذکور تبیین کرد که این اثر محافظتی عمدتاً ناشی از توانایی ترکیبات فنولی موجود در اسانس چوب در واکنش با محصولات اولیه اکسیداسیون و خنثی سازی رادیکال های آزاد ناشی از آن است. این مکانیسم منجر به کاهش تشکیل هیدروپراکسیدها - که شاخص اصلی اکسیداسیون اولیه چربی ها محسوب می شوند - می گردد. در نتیجه، افزایش شاخص پراکسید در طول دوره نگهداری به طور مؤثری سرکوب شده و پایداری اکسیداتیو روغن کره افزایش می یابد. این یافته ها همچنین برجسته می کنند که استفاده از اسانس های گیاهی مانند چوب می تواند به عنوان یک راهبرد طبیعی و پایدار در بهبود عمر انبارمانی محصولات چرب مطرح شود (۲۸). نتایج مربوط به مقایسه میانگین داده های مربوط به عدد اسیدی نمونه های کره غنی سازی شده با سطوح صفر (شاهد)، ۳، ۵ و ۱۰ درصد نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ در طی ۳ ماه نگهداری بر اساس آزمون چند دامنه ای دانکن در جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج تحلیل واریانس داده ها مشخص شد که عدد اسیدی نمونه های مختلف کره به طور معنی داری ($p < 0.05$) وابسته به سطح به کارگیری نانوذرات و نیز مدت زمان نگهداری نمونه های کره می باشد. همان طور که مشاهده شد با افزایش سطح به کارگیری نانوذرات از ۳ تا ۱۰ درصد به طور معنی داری ($p < 0.05$) عدد اسیدی نمونه های کره در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافت. همچنین مشخص شد که افزایش مدت زمان نگهداری از روز اول تا پایان ماه سوم نگهداری به طور

معنی داری ($p < 0.05$) منجر به افزایش اندیس پراکسید نمونه‌های کره شد که در این میان شیب افزایش اندیس پراکسید در نمونه شاهد بیشتر از سایر تیمارها بود. همچنین نتایج نشان داد که افزایش سطح به‌کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی‌کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ شیب افزایش عدد اسیدی نمونه‌های کره غنی‌سازی شده با ویتامین D₃ را کاهش داد. از عدد اسیدی به‌عنوان شاخصی برای تعیین فساد روغن‌ها و خاصیت اسیدی آن‌ها استفاده می‌کنند. این عدد اسیدی رابطه مستقیمی با فعالیت آنتی اکسیدانی محصول و اکسیداسیون آن دارد. در نتیجه هیدرولیز تری آسیل گلیسرول‌ها به گروه‌های کربونیل که ناشی از اکسیداسیون چربی‌ها است عدد اسیدی افزایش می‌یابد. بنابراین با به‌کارگیری ترکیبات آنتی اکسیدانی در روغن و چربی‌ها می‌توان از هیدرولیز و اکسیداسیون تری آسیل گلیسرول‌ها جلوگیری نمود و از این طریق از گسترش عدد اسیدی در محصول نیز جلوگیری کرد (۲۹). استفاده از نانوذرات الکترواسپری شده ویتامین D₃ در کره احتمالاً به دلیل افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی آن مانع از اکسیداسیون تری آسیل گلیسرول‌ها می‌شود که این امر نیز باعث کنترل عدد اسیدی کره حاوی نانوذرات در مقایسه با نمونه شاهد می‌شود. این یافته‌ها با نتایج سایر محققین نیز سازگاری داشت. در راستای تحقیق حاضر، محققین دیگری، به ارزیابی فعالیت آنتی اکسیدانی و افزایش پایداری اکسیداتیو مارگارین غنی‌سازی شده با عصاره پوست انار پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها مشخص شد که با به‌کارگیری عصاره پوست انار و افزایش سطح به‌کارگیری آن در فرمولاسیون مارگارین ظرفیت آنتی اکسیدانی مارگارین افزایش می‌یابد که این امر همراه با افزایش پایداری اکسیداتیو و شاخص‌های اکسیداسیون آن بود. آن‌ها بیان کردند که استفاده از عصاره پوست انار به دلیل خاصیت آنتی اکسیدانی که دارد از اکسیداسیون مارگارین در طی دوره نگهداری جلوگیری می‌شود و شیب افزایش شاخص‌های اکسیداتیو نظر عدد اسیدی در مقایسه با نمونه شاهد کاهش می‌یابد (۳۰). نتایج تحلیل واریانس داده‌های مربوط به اندیس تیوباریتوریک نمونه‌های کره غنی‌سازی شده با سطوح صفر (شاهد)، ۳، ۵ و ۱۰ درصد نانوذرات الکترواسپری شده پلی‌کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ در طی ۳ ماه

نگهداری نشان داد که اندیس تیوباریتوریک نمونه‌های مختلف کره به‌طور معنی داری ($p < 0.05$) وابسته به سطح به‌کارگیری نانوذرات و نیز مدت‌زمان نگهداری نمونه‌های کره می‌باشد. براین اساس نتایج نشان داد که با افزایش سطح به‌کارگیری نانوذرات از ۳ تا ۱۰ درصد به‌طور معنی داری ($p < 0.05$) اندیس تیوباریتوریک نمونه‌های کره در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافت. همچنین مشخص شد که افزایش مدت‌زمان نگهداری از روز اول تا پایان ماه سوم نگهداری به‌طور معنی داری ($p < 0.05$) منجر به افزایش اندیس تیوباریتوریک نمونه‌های کره شد که در این میان شیب افزایش اندیس پراکسید در نمونه شاهد بیشتر از سایر تیمارها بود. همچنین مشخص شد که افزایش سطح به‌کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی‌کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ شیب افزایش اندیس تیوباریتوریک نمونه‌های کره غنی‌سازی شده با ویتامین D₃ را کاهش داد. اندیس تیوباریتوریک اسید یکی از شاخص‌های اکسیداسیون روغن‌ها و چربی‌ها محسوب می‌شود که به‌عنوان شاخصی برای تشکیل محصولات ثانویه اکسیداسیون و مراحل پیشرفته اکسیداسیون در نظر گرفته می‌شود. با تشکیل هیدروپراکسیدهای ناشی از مراحل اولیه اکسیداسیون و شکستن این ترکیبات مالون دی آلدید تشکیل می‌شود که عدد تیوباریتوریک اسید را افزایش می‌دهد. به‌کارگیری ترکیبات آنتی اکسیدانی در روغن‌ها و چربی‌ها نه تنها از اکسیداسیون اسیدهای چرب و شکستن تری آسیل گلیسرول‌ها جلوگیری می‌نماید بلکه در اثر واکنش ترکیبات آنتی اکسیدانی با محصولات اکسیداسیون پایداری محصولات روغنی را نیز افزایش می‌یابد (۳۲ و ۳۱). بنابراین استفاده از نانوذرات الکترواسپری شده پلی‌کاپرولاکتون بارگذاری شده با ویتامین D₃ به دلیل افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی کره موجب افزایش پایداری اکسیداتیو آن در طی دوره نگهداری و در نتیجه کاهش شیب گسترش اندیس تیوباریتوریک اسید در مقایسه با نمونه شاهد خواهد شد. این یافته‌ها با نتایج سایر محققین از لحاظ افزایش پایداری اکسیداتیو و کنترل اندیس تیوباریتوریک اسید در نتیجه به‌کارگیری ترکیبات آنتی اکسیدانی در کره مطابقت دارد. پژوهشگران دیگری (۲۰۲۳)، به مطالعه فعالیت آنتی اکسیدانی مارگارین غنی‌سازی شده با عسل

و روغن لنستیک^۱ به عنوان ترکیبات آنتی اکسیدان طبیعی پرداختند. بر اساس نتایج به دست آمده توسط این محققین مشخص شد که استفاده از این ترکیبات آنتی اکسیدانی به دلیل جلوگیری از واکنش های اکسیداتیو در مارگارین موجب افزایش پایداری آن در طی دوره نگهداری می شوند. آن ها همچنین اظهار نمودند که استفاده از عسل و روغن لنستیک به دلیل فعالیت آنتی اکسیدانی که دارند موجب جلوگیری از تشکیل محصولات اولیه و ثانویه اکسیداسیون می شوند و از این طریق پایداری اکسیداتیو مارگارین را افزایش می دهند. محققین بیان کردند که اندیس تیوباریتوریک اسید مارگارین در نمونه های با غلظت های بالاتر عسل و روغن لنستیک در طی دوره نگهداری پایین تر از نمونه شاهد است که دلیل این امر را به فعالیت آنتی اکسیدانی این ترکیبات جهت جلوگیری از تشکیل مالون دی آلدید نسبت دادند (۳۳). نتایج مقایسه میانگین داده های مربوط به خصوصیات رنگی (L^* , a و b) نمونه های کره غنی سازی شده با سطوح صفر (شاهد)، ۳، ۵ و ۱۰ درصد نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D_3 بر اساس آزمون چند دامنه ای دانکن نشان داد که خصوصیات رنگی (L^* , a و b) نمونه های مختلف کره به طور معنی داری ($p < 0.05$) وابسته به سطح به کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D_3 می باشد. براین اساس همان طور که در جدول ۵ نشان داده شده اختلاف معنی داری بین شاخص های رنگی (L^* , a و b) نمونه شاهد و نمونه های حاوی ۳ و ۵ درصد نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D_3 وجود ندارد ($p > 0.05$). با این وجود افزایش سطح به کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D_3 از ۵ تا ۱۰ درصد به طور معنی داری ($p < 0.05$) منجر به کاهش شاخص L^* (روشنایی)، a (قرمزی) و b (زردی) نمونه های کره شد. خصوصیات رنگی یکی از پارامترهای مهم مورد ارزیابی در تهیه و فرمولاسیون کره محسوب می شود. زیرا خصوصیات رنگی می تواند روی خصوصیات ظاهری محصول و امتیازات حسی آن تأثیر مستقیم بگذارد و به طور کلی پذیرش محصول را از طرف مصرف کننده تحت تأثیر قرار می دهد. پراکندگی ذرات

روغن و آب در ساختار کره روی خصوصیات ظاهری و رنگی محصول تأثیر قابل توجهی دارد زیرا توزیع یکنواخت این قطرات همراه با انعکاس نور و جذابیت محصول خواهد شد. احتمالاً با به کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D_3 تا سطح ۵ درصد توزیع یکنواخت نانوذرات در ماتریس کره به خوبی صورت می گیرد که بافت محصول را دچار تغییرات جدی نمی نماید به همین خاطر روشنایی و شاخص زردی و قرمزی به صورت معناداری تغییر نمی یابد. با این وجود استفاده از مقادیر بالاتر نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D_3 (بیشتر از ۵ و تا ۱۰ درصد) همراه با تشکیل تجمعات نانوذرات و آگلومره شدن این نانو ذرات در مقادیر بالاتر می شود که مانع از انعکاس موثر نور و ایجاد کدوری در محصول خواهد شد که این امر نیز با کاهش شاخص های قرمزی و زردی محصول نیز خواهد بود (۳۵ و ۳۴). این یافته ها با نتایج سایر محققین از لحاظ خصوصیات رنگی سازگاری دارد. پژوهشگران دیگری به مطالعه خصوصیات رنگی مارگارین حاوی نانوذرات TiO_2 پرداختند. بر اساس نتایج آن ها مشخص شد که استفاده بیش از حد نانوذرات TiO_2 به دلیل تشکیل تجمعات نامطلوب در بافت مارگارین موجب کاهش شاخص های رنگی روشنایی، قرمزی و زردی محصول نهایی شد (۳۶). نتایج مربوط ارزیابی خصوصیات مختلفی حسی (رنگ، طعم، بافت و پذیرش کلی) نمونه های کره غنی سازی شده با سطوح صفر (شاهد)، ۳، ۵ و ۱۰ درصد نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D_3 و مقایسه میانگین داده ها بر اساس آزمون چند دامنه ای دانکن نشان داد که امتیاز تمامی خصوصیات حسی (رنگ، طعم، بافت و پذیرش کلی) نمونه های مختلف کره به طور معنی داری ($p < 0.05$) وابسته به سطح به کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D_3 می باشد. براین اساس همان طور که در جدول ۶ نشان داده شده است افزایش سطح به کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D_3 از ۳ تا ۵ درصد به طور معنی داری روی امتیاز خصوصیات حسی رنگ، طعم، بافت و پذیرش کلی تأثیر معنی داری نداشت ($p > 0.05$). با این وجود افزایش سطح به کارگیری نانوذرات از ۵ تا ۱۰ درصد به طور معنی داری ($p < 0.05$)

¹ Lentisk

شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ به عنوان نمونه برتر انتخاب می شود.

نتیجه گیری

امروزه نانوتکنولوژی به دلیل تولید ساختارهای بسیار ریز موجب ایجاد پتانسیل ها قابل توجهی جهت تحویل ترکیبات زیست فعال به بدن و محصولات غذایی می شود. یکی از تکنیک هایی که اخیراً برای تولید نانوساختارهای حاوی ترکیبات زیست فعال در محصولات غذایی رواج پیدا کرده است تکنیک الکترواسپری است. بنابراین در طی این پژوهش از نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ جهت به کارگیری و غنی سازی کره استفاده شد. بطوریکه استفاده از ۱۰ درصد وزنی/وزنی ویتامین D₃ در ساختار نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون موجب بالاترین راندمان انکپسولاسیون شد و با به کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ در فرمولاسیون کره، پایداری اکسیداتیو کره در مقایسه با نمونه شاهد افزایش و در طی ۳ ماه نگهداری بهبود یافت. لیکن استفاده از ۵ درصد نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ از لحاظ آماری موجب عدم تغییر معنی دار شاخص های L^* ، a و b و همچنین عدم تغییر امتیاز خصوصیات حسی در مقایسه با نمونه شاهد در محصول نهایی شد بطوریکه پذیرش کلی آن در مقایسه با نمونه شاهد تفاوت معنی داری نداشت. بنابراین نمونه کره غنی سازی شده با ۵ درصد نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ به عنوان نمونه برتر انتخاب شد.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تعارض منافی ندارند.

امتیاز تمامی خصوصیات حسی را کاهش داد. امتیاز خصوصیات حسی از نظر ارزیاب ها رابطه مستقیمی با خصوصیات فیزیکوشیمیایی و رنگی محصولات دارد. در طی این مطالعه مشاهده شد که افزایش سطح به کارگیری نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ تا ۱۰ درصد همراه با افزایش پایداری اکسیداتیو کره در طی دوره نگهداری بود. با این وجود استفاده از مقادیر بالای نانوذرات (۱۰ درصد) موجب کاهش افت خصوصیات رنگی (روشنایی، قرمزی و زردی) کره شد که احتمالاً موجب کاهش امتیاز خصوصیات حسی این تیمار در مقایسه با سایر تیمارها و تیمار شاهد شده است. همان طور که بیان شد استفاده بیش از حد از نانوذرات در فرمولاسیون کره ممکن است با تشکیل تجمعات موضعی در بافت کره همراه باشد. با تشکیل این تجمعات نه تنها قابلیت انکسار نور و امتیاز خصوصیات حسی رنگی دچار افت می شود بلکه همراه با ایجاد احساس دهانی نامطلوب در ارزیاب ها خواهد شد که افت امتیاز بافت نیز به همین خاطر است. با تشکیل تجمعات موضعی ممکن است حالت شنی در دهان برای ارزیاب ها ایجاد بنماید که امتیاز بافت محصول را دچار افت می نماید و طعم آن را تحت تأثیر قرار می دهد. عدم ایجاد بافتی یکنواخت در کره ممکن است قابلیت پخش پذیری محصول در دهان را تحت تأثیر قرار دهد که این امر نیز همراه با کاهش امتیاز طعم محصول خواهد شد. همچنین برآیند این خصوصیات تحت عنوان قابلیت پذیرش کلی شناخته می شود که توسط ارزیاب ها برای نمونه حاوی ۱۰ درصد امتیاز مناسبی از لحاظ پذیرش کلی ارائه نداده اند. بنابراین باتوجه به خصوصیات فیزیکوشیمیایی و رنگی محصول و همچنین تمامی خصوصیات حسی کره غنی سازی شده با سطوح مختلف نانوذرات الکترواسپری شده پلی کاپرولاکتون حاوی ویتامین D₃ می توان نتیجه گرفت که نمونه کره حاوی ۵ درصد نانوذرات الکترواسپری

References

1. Salehin MN, Khan SI, Kabir MS, Kumar K, Montaha S, Arefuzzaman M, Uddin MB, Ahmed M. Assessment of oxidative and shelf life stability of lycopene enriched butter during storage. *Food Chemistry Advances*. 2025;101003.
2. Ma Z, & Boye, J. I. Advances in the design and production of reduced-fat and reduced-cholesterol salad dressing and mayonnaise: a review. *Food and Bioprocess Technology*. 2013; 6(3), 648-670.
3. Holick M. F. The one-hundred-year anniversary of the discovery of the sunshine vitamin D3: historical, personal experience and evidence-based perspectives. *Nutrients*. 2023; 15(3), 593.
4. Khan W. A, Butt M S, Pasha I, Jamil A. Microencapsulation of vitamin D in protein matrices: In vitro release and storage stability. *Journal of food measurement and characterization*. 2020; 14, 1172-1182.
5. Winuprasith T, Khomein P, Mitbumrung W, Supphantharika M, Nitithamyong A, McClements DJ. Encapsulation of vitamin D3 in pickering emulsions stabilized by nanofibrillated mangosteen cellulose: Impact on in vitro digestion and bioaccessibility. *Food hydrocolloids*. 2018; 83:153-64.
6. Ghorani B, Tucker N. Fundamentals of electrospinning as a novel delivery vehicle for bioactive compounds in food nanotechnology. *Food Hydrocolloids*. 2015; 51, 227-240.
7. Hernández-Rodríguez L, Lobato-Calleros C, Pimentel-González D. J, Vernon-Carter E. J. Lactobacillus plantarum protection by entrapment in whey protein isolate: κ -carrageenan complex coacervates. *Food Hydrocolloids*. 2014; 36, 181-188.
8. Pérez-Masiá, R, López-Nicolás, R, Periago M. J, Ros G, Lagaron J. M, López-Rubio A. Encapsulation of folic acid in food hydrocolloids through nanospray drying and electrospraying for nutraceutical applications. *Food Chemistry*. 2015; 168, 124-133.
9. Alehosseini A, Ghorani, B, Sarabi-Jamab, M, Tucker N. Principles of electrospraying: A new approach in protection of bioactive compounds in foods. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2018; 58(14), 2346-2363.
10. Prieto C, Calvo L. Supercritical fluid extraction of emulsions to nanoencapsulate vitamin E in polycaprolactone. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2017; 119, 274-282.
11. Wang J, Jansen J. A, Yang F. Electrospraying: possibilities and challenges of engineering carriers for biomedical applications—a mini review. *Frontiers in Chemistry*. 2019; 7, 258.
12. Rezaeinia H, Ghorani B, Emadzadeh B, Tucker N. Electrohydrodynamic atomization of Balangu (*Lallemantia royleana*) seed gum for the fast-release of *Mentha longifolia* L. essential oil: Characterization of nano-capsules and modelling the kinetics of release. *Food hydrocolloids*. 2019; 93, 374-385.
13. Rezaeinia H, Ghorani B, Emadzadeh B, Mohebbi M. Prolonged-release of menthol through a superhydrophilic multilayered structure of balangu (*Lallemantia royleana*)-gelatin nanofibers. *Materials Science and Engineering*. 2020; C, 111115.
14. Azizkhani, M. Zandi, P. Gaini, A. Safafar, H. Akhavan Attar, Z. (2006). The effect of natural antioxidant mixtures on the oxidative stability of margarine. *Iranian Quarterly Journal of Nutritional Sciences and Food Industry*. 2006: 2: 44-35.
15. National Standards Organization of Iran (2017), First Edition. Vegetable and Animal Oils and Fats: Measurement of Peroxide Content by Iodometry - Determination of Endpoint by Visual Method. Publications of the Iranian Standards and Industrial Research Organization. National Standard Number 4179.
16. National Standards Organization of Iran (1400), First Edition. Vegetable and Animal Oils and Fats - Measurement of Acid Number and Acidity. Publications of the Iranian Standards and Industrial Research Organization. National Standard Number 4178.
17. Ehsani A, Hashemi M, Jazani N. H, Aliakbarlu J, Shokri S, Naghibi S. S. Effect of *Echinophora platyloba* DC. essential oil and lycopene on the stability of pasteurized cream obtained from cow milk. In *Veterinary Research Forum*. 2016; Vol. 7, No. 2, p. 139. Faculty of Veterinary Medicine, Urmia University, Urmia, Iran.

18. Abid Y, Azabou S, Jridi M, Khemakhem I, Bouaziz M, Attia H. Storage stability of traditional Tunisian butter enriched with antioxidant extract from tomato processing by-products. Food Chemistry, 2017; 233: 476-482.
19. Lawless H. T, Heymann H. Sensory evaluation of food: principles and practices. 2010 Springer Science & Business Media.
20. Janković B, Papović S, Vraneš M, Knežević T, Pržulj S, Zeljković S, Jelić D. Biomineral nanocomposite scaffold (CaCO₃/PVA based) carrier for improved stability of vitamin D₃: characterization analysis and material properties. Journal of Materials Science. 2023; 58(15), 6580-6601.
21. Al-Bishari A. M, Al-Shaabi B. A, Al-Bishari A. A, Al-Baadani M. A, Yu L, Shen J, Gao P. Vitamin D and curcumin-loaded PCL nanofibrous for engineering osteogenesis and immunomodulatory scaffold. Frontiers in bioengineering and biotechnology. 2022; 10, 975431.
22. Wsoo M. A, Abd Razak S. I, Bohari S. P. M, Shahir S, Salihu R, Kadir M. R. A, & Nayan, N. H. M. Vitamin D₃-loaded electrospun cellulose acetate/polycaprolactone nanofibers: Characterization, in-vitro drug release and cytotoxicity studies. International journal of biological macromolecules. 2021; 181, 82-98.
23. Guler E, Baripoglu Y. E, Alenezi H, Arian A, Babazade R, Unal, S., Cam M. E. Vitamin D₃/vitamin K₂/magnesium-loaded polylactic acid/tricalcium phosphate/polycaprolactone composite nanofibers demonstrated osteoinductive effect by increasing Runx2 via Wnt/ β -catenin pathway. International Journal of Biological Macromolecules. 2021; 190, 244-258.
24. Heydari-Majd M, Rezaeinia H, Shadan M. R, Ghorani B, Tucker N. Enrichment of zein nanofibre assemblies for therapeutic delivery of Barije (*Ferula gummosa* Boiss) essential oil. Journal of Drug Delivery Science and Technology. 2019; 54, 101290.
25. Aliabbasi N, Mehrabi S, Kheirandish M, Gashtasbi S, Mokhtarian M, Hosseini-Isfahani M., & Rezaeinia H. The novel nano-electrospray delivery of curcumin via ultrasound assisted Balangu (*Lallemantia royleana*) hydrocolloid-chickpea protein interaction. Food Chemistry. 2025; 144388.
26. Mokhtari, Z., Hekmatdoost, A., & Nourian, M. Antioxidant efficacy of vitamin D. Journal of Parathyroid Disease, 2016; 5(1), 11-16.
27. Leal L. K. A. M, Lima L. A, de Aquino P. E. A, de Sousa J. A. C, Gadelha C. V. J., Calou, I. B. F, de Barros Viana, G. S. Vitamin D (VD₃) antioxidative and anti-inflammatory activities: Peripheral and central effects. European journal of pharmacology. 2020; 879, 173099.
28. Shavisi N. Improving the oxidative stability of butter oil with nanoencapsulated *Ferulago angulata* essential oil during accelerated shelf-life storage. Journal of Food Science and Technology. 2024; 61(11), 2100-2110.
29. Kreivaitis R, Gumbytė M, Kazancev K, Padgurskas J, Makarevičienė, V. A comparison of pure and natural antioxidant modified rapeseed oil storage properties. Industrial Crops and Products. 2013; 43, 511-516.
30. Aidli-Ouadah A, Rezig L, Chougui N, Beder-Belkhiri W, Hadjal S, Zeroual B, Idoui T. Effect of pomegranate (*Punica granatum* L.) peel extract on the oxidative stability of soybean oil and margarine. Journal of Food Measurement and Characterization. 2025; 1-15.
31. Akça A. E, Kandil M, Özcan M. M. Uses of margarines, consumption rates of margarine, oxidative deterioration and storage conditions, the relationship between spices and antioxidants-A Review. Journal of Agroalimentary Processes & Technologies. 2022; 28(4).
32. Guenaoui, N., Ouchemoukh, S., Amessis-Ouchemoukh, N., Ayad, R., Puşcaş, A., Zeroual, B., Mureşan, V. (2024). Physico-chemical properties and antioxidant activity of five Algerian honeys and margarines formulated with honey as antioxidant and preservative. Journal of Food Safety and Food Quality-Archiv für Lebensmittelhygiene, 75(6), 167-178.
33. Sadou D, Amessis-Ouchemoukh N, Ouchemoukh S, Ayad R, Guenaoui N, Otmani, A., & Madani, K. Elaboration of enriched margarine with lentisk oil and honey: Formulation, characterization, and monitoring of oxidative stability. European Journal of Lipid Science and Technology. 2023; 125(11), 2300081.
34. Pădureţ, S. The quantification of fatty acids, color, and textural properties of locally produced bakery margarine. Applied Sciences 2022; 12(3), 1731.

35. Fallahasgari M, Barzegar F, Abolghasem D, Nayebzadeh K. An overview focusing on modification of margarine rheological and textural properties for improving physical quality. *European Food Research and Technology*. 2023; 249(9), 2227-2240.
36. Jassim L, Mahmood K. Study of some physicochemical, microbial and sensory properties of low-fat butter produced by titanium dioxide (TiO₂) nano particles. *Eurasian Chemical Communications*. 2022; 4(3), 241-55.