



مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

بهبود پایداری و فعالیت آنتی اکسیدانی کورکومین در ماست هم زده با استفاده از نانوحامل های لیپیدی بر پایه چربی شیر

پوشش دهی شده با کیتوزان

آرش آبابی؛ محمد قربانی*، علیرضا صادقی ماهونک، سارا ناجی طبسی

۱- دانشجوی دکتری صنایع غذایی، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۲- استاد تمام، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۳- استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۴- گروه نانوفناوری مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴

تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۴/۱۴

کلمات کلیدی:

کورکومین،

نانوحامل های لیپیدی،

چربی شیر،

کیتوزان،

ماست هم زده.

DOI: 10.48311/fsct.2026.84096.0

* مسئول مکاتبات:

افزودن ترکیبات زیست فعال مانند کورکومین به مواد غذایی، راهکاری برای تولید غذاهای فراسودمند است که خواص سلامتی دارند، اما پایداری و زیست دسترسی این ترکیبات چالش برانگیز است. در این پژوهش، نانوحامل های لیپیدی بر پایه چربی شیر برای ریزپوشانی کورکومین سنتز و سپس با کیتوزان پوشش دهی شدند. این نانوحامل ها با بازده ریزپوشانی ۹۱/۸۳٪ توانایی بالایی در بارگذاری کورکومین نشان دادند. پوشش با کیتوزان منجر به افزایش اندازه ذرات (از ۳۰۶ به ۴۹۷ نانومتر) و تغییر پتانسیل زتا (از ۲۶/۹۶- به ۶۷/۴ میلی ولت) گردید. آنالیز FT-IR تشکیل ساختار چندلایه پایدار لیپید-کورکومین/کیتوزان/پروتئین شیر را تأیید کرد و نشان داد کورکومین در ماتریکس لیپیدی به صورت غیرکریستالی جاسازی شده است. پوشش کیتوزان پایداری حرارتی کورکومین را به طور چشمگیری بهبود بخشید؛ به طوری که پس از ۴ ساعت در ۹۰ درجه سلسیوس، ۱۵/۵۰٪ کورکومین در نمونه های پوشش دار باقی ماند، در حالی که این مقدار در نمونه های بدون پوشش تنها ۵/۱٪ بود. نانوحامل ها پس از خشک کردن انجمادی، برای غنی سازی ماست هم زده استفاده شدند. ارزیابی فیزیکوشیمیایی و ارگانولپتیکی نشان داد که اگرچه فرمولاسیون نانوحامل لیپیدی فعالیت آنتی اکسیدانی با روش DPPH را افزایش می دهد، اما پایداری آن در طول زمان تنها در حضور پوشش کیتوزان حفظ شد. همچنین، پوشش کیتوزانی به خوبی اثرات منفی غنی سازی بر پذیرش حسی ماست را کاهش داد.

۱-مقدمه

افزودن ترکیبات زیست فعال و غذا داروها مانند ویتامین ها، پروبیوتیک ها، پریبیوتیک ها، پپتیدهای زیست فعال و آنتی اکسیدان ها به مواد غذایی باعث تولید غذاهای فراسودمند می شود که از نظر فیزیولوژیکی مفید بوده و خطر ابتلا به بیماری را کاهش می دهند. تاکنون سامانه های رسانش متنوعی برای ریزپوشانی ترکیبات زیست فعال طراحی شده اند. این سامانه ها شامل محلول های ساده، امولسیون ها، سوسپانسیون ها، کلوئیدهای مجتمع شده، ماتریس های جامد و غیره می باشند. استفاده از سامانه های رسانش منجر به تولید محصولاتی با خواص بیولوژیکی مانند فعالیت آنتی اکسیدانی، ضد باکتریایی، ضد التهابی، ضد سرطانی و ضد دیابتی شده است [۱].

زردچوبه با نام علمی *Curcuma longa* Linn یک گیاه دارویی است که به طور گسترده در درمان بیماری های عفونی و غیر عفونی استفاده می شود [۲]. عصاره ریزوم زردچوبه عمدتاً از سه ترکیب فنولی به نام کورکومینوئیدها مانند کورکومین یا کورکومین-I، کورکومین-II (دمتوکسی کورکومین^۱) و کورکومین-III (بیس دمتوکسی کورکومین^۲) تشکیل شده است [۳]. در سال های اخیر کورکومین به واسطه داشتن گستره وسیعی از عملکردهای دارویی و خصوصیات بیولوژیکی به طور ویژه مورد توجه قرار گرفته است. کورکومین می تواند به عنوان یک ترکیب طعم دهنده، نگهدارنده مواد غذایی و یک ترکیب رنگی طبیعی (رنگ زرد روشن) و به عنوان آنتی اکسیدان در مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرد [۴]. در تحقیقات بسیاری کاربرد کورکومین در پیشگیری و درمان بیماری های التهابی شامل التیام زخم پوست، زخم های برشی و موضعی، بیماری

پارکینسون، بیماری آلزایمر و برخی از انواع سرطان گزارش شده است [۵]. با این حال، پراکندگی ضعیف در آب، متابولیسم سریع و پایداری کم کورکومین، زیست دسترسی آن را کاهش می دهد و همچنین کاربردهای این ترکیب زیست فعال را در محصولات غذایی محدود می کند [۶]. برای غلبه بر این چالش ها و بهبود زیست دسترسی کورکومین در هنگام مصرف، بسیاری از مطالعات تلاش کرده اند تا کورکومین را با استفاده از سامانه های رسانش مانند هیدروژل ها، نانوذرات و لیپوزوم ها ریزپوشانی کنند [۷].

نانوذرات لیپیدی جامد^۳ (SLN) سامانه های کلوئیدی هستند که برای ریزپوشانی، حفاظت و رسانش ترکیبات چربی دوست مانند لیپیدهای زیست فعال و داروها طراحی شده اند. در ساختار نانو ذرات لیپیدی جامد از چربی هایی استفاده می شود که در دمای اتاق و همچنین دمای بدن جامد هستند. برای تشکیل این سامانه ها فاز روغنی مایع (حاوی لیپید حامل ذوب شده و ترکیبات زیست فعال) و فاز آبی حاوی سورفکتانت در دمای بالاتر از نقطه ذوب چربی حامل هموژن می شوند تا یک امولسیون روغن در آب تشکیل شود [۸].

در گام بعدی امولسیون تشکیل شده تا زیر دمای انجماد چربی حامل خنک می شود تا ذرات چربی جامد حاصل شوند. بکارگیری لیپید جامد برای رسانش دارو در مقایسه با چربی مایع باعث کنترل شدن نرخ رهایش ترکیب ریزپوشانی و افزایش پایداری آن نسبت به شرایط محیطی می شود [۹]. امروزه از نانو ذرات لیپیدی جامد به طور گسترده ای در صنایع داروسازی استفاده می شود. این

سامانه‌ها، پتانسیل بسیار بالایی برای ریزپوشانی، رسانش و حفظ ترکیبات زیست فعال غذایی دارا می‌باشند. در صورت استفاده از این سامانه‌های رسانش در صنعت غذا، نانوذرات لیپیدی جامد می‌بایست از ترکیباتی تشکیل شده باشند که در فهرست ترکیبات ایمن (GRAS) قرار داشته باشند و باید از فرایند تولیدی استفاده شود که صرفه‌ی اقتصادی داشته باشد و منجر به تولید در مقیاس بالا شود. البته به‌طور کلی استفاده از نانوذرات لیپیدی جامد در رسانش ترکیبات زیست فعال دارای معایبی می‌باشد از جمله این که ظرفیت بارگذاری دارو^۲ در نانوذرات لیپیدی جامد به علت ساختار کریستالی لیپید جامد محدود است، امکان وقوع پدیده‌ی پلی مورفیزم وجود دارد، امکان رشد ذرات و تشکیل ژل در دیسپرسیون‌های نانوذرات لیپیدی جامد هنگام نگهداری وجود دارد، ممکن است ترکیب ریزپوشانی شده در اثر ایجاد یک شبکه‌ی کاملاً کریستالی از درون کپسول خارج شود [۹]. درحالیکه، در نوعی دیگر از سامانه‌های رسانش به نام حامل‌های لیپیدی نانوساختار -^۳(NLC) بخشی از چربی به صورت مایع وجود دارد و شبکه کریستالی کامل نیست [۹]. بنابراین، اکثر مشکلاتی که در نانوذرات لیپیدی جامد وجود دارد در حامل‌های لیپیدی نانوساختار برطرف شده است. علاوه بر این، بازده ریزپوشانی و پایداری فیزیکی حین نگهداری در حامل‌های لیپیدی نانوساختار بیشتر می‌باشد [۱۰]. یکی از روندهای اصلی در توسعه حامل‌های لیپیدی نانوساختار، استفاده از روغن‌ها و چربی‌های خوراکی برای جایگزینی ماتریس‌های مصنوعی است که برای استفاده در صنایع غذایی قابل استفاده نیستند [۱۱]. چربی شیر در دمای اتاق و دماهای پایین‌تر حالت نیمه کریستالی دارد [۱۲]. بنابراین با توجه به تنوع در پروفایل اسیدهای چرب شیر و در نتیجه دارا بودن نقطه ذوب مختلف برای هر اسید چرب، بدون افزودن

چربی مایع از سایر منابع می‌توان از چربی شیر حامل‌های لیپیدی نانوساختار تولید نمود [۱۳]. شیر یک سیستم رسانش طبیعی برای انواع مواد مغذی کربوهیدرات، چربی و پروتئین‌ها به بدن انسان استفاده می‌باشد و حلالیت داروها در شیر در مقایسه با سامانه‌های آبی فاقد چربی بیشتر می‌باشد [۱۴].

کیتوزان به دلیل خواص غیرسمی، زیست تخریب‌پذیر، سازگار با محیط زیست و بار مثبت که دارد، به عنوان یک پلی ساکارید طبیعی مناسب برای کاربرد های، صنایع غذایی، زیست پزشکی و داروسازی به شمار می‌آید [۱۵].

این پلیمر خطی طبیعی متشکل از گلوکز آمین و N-استیل -D-گلوکز آمین است که توسط پیوندهای گلیکوزیدی (۴ → ۱) β به هم مرتبط شده است و از استیل زدایی جزئی کیتین به دست می‌آید [۱۶].

وجود گروه‌های هیدروکسیل و آمین روی سطح کیتوزان در pH پایین تحت پروتونه شدن قرار می‌گیرد، در نتیجه بار مثبت مولکول به ایجاد برهمکنش الکترواستاتیکی با اجزای بار منفی سلول‌ها کمک می‌کند. پوشش با کیتوزان ممکن است یک بار مثبت به سطح نانوذرات اضافه کند و از این رو خواص فیزیکوشیمیایی این نانوذرات را اصلاح کند [۱۷]. بهبود پایداری فیزیکوشیمیایی، افزایش رهاش ترکیبات، گسترش فعل و انفعالات سلولی و بهبود زیست دسترس پذیری و اثربخشی ترکیبات به عنوان مزایای پوشش نانوذرات با کیتوزان گزارش شده است [۱۸، ۱۹، ۲۰].

در این پژوهش، از چربی شیر به عنوان منبع لیپیدی برای تولید حامل‌های لیپیدی نانوساختار حاوی کورکومین استفاده شد و بخشی از این نانوحامل‌ها با کیتوزان جهت بهبود پایداری پوشش دهی شدند. سپس با

درجه سلسیوس (دستگاه همزن مغناطیسی، مد پایپ ایران) به فاز روغنی اضافه گردید. سپس این محلول با استفاده از دستگاه هوموژنایزر (هایدولف آلمان مدل D91126) به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۸۰۰۰ دور در دقیقه هموژن شد. امولسیون شامل کورکومین، لسیترین و روغن کره در نسبت-های وزنی ۰/۱، ۲ و ۱۲/۹ به عنوان فاز روغنی و آب مقطر و توئین ۸۰ در نسبت‌های وزنی ۸۰ و ۵ درصد به عنوان فاز آبی بود. در مرحله بعد، امولسیون اولیه در معرض پروپ التراسوند (شرکت توسعه فراصوت ایران، ۴۰۰ وات-۲۰۰ کیلوهرتز) با دامنه ۱۰۰ میکرومتر و توان ۱۰۰ درصد برای مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفت. پس از خنک شدن تا دمای ۲۵ درجه سلسیوس، حامل‌های لیپیدی نانوساختار تشکیل شد [۲۱]. غلظت نهایی کورکومین در حامل‌های لیپیدی نانوساختار ۱ میلی گرم در میلی لیتر بود. نمونه‌های تولید شده در داخل لوله فالكون‌های با حجم ۵۰ میلی لیتر و در یخچال در دمای ۸ درجه سلسیوس نگهداری شدند.

۲-۳- پوشش دهی نانوذرات با کیتوزان

جهت پوشش دهی با کیتوزان طبق روش Li و همکاران (۲۰۱۶) با اندکی اصلاحات عمل شد. کیتوزان به محلول اسید استیک ۲ درصد اضافه شد. بطوریکه درصد وزنی کیتوزان در محلول ۱ درصد بود. محلول کیتوزان به مدت ۸ ساعت با استفاده از همزن مغناطیسی همزده شد و سپس با استفاده از کاغذ صافی صاف گردید تا ناخالصی‌ها جدا شود. پوشش دهی با کیتوزان با افزودن ۱۰ میلی لیتر از محلول نانوذرات به ۱۰ میلی لیتر از محلول کیتوزان تحت شرایط همزنی ۲۰۰ دور در دقیقه برای مدت ۱۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام شد. سپس تیمار فراصوت با توان ۷۵ وات برای مدت ۵ دقیقه جهت کاهش سایز ذرات و همچنین شکستن پل‌های کیتوزان که ممکن است بین ذرات به وجود آمده باشد انجام شد [۱۸].

به کارگیری فرآیند خشک کردن انجمادی در حضور پروتئین‌های شیر، یک پودر غذا دارو با قابلیت ماندگاری بالا و کاربرد مستقیم در هاتریس‌های لبنی تهیه گردید. وجه تمایز این مطالعه نسبت به تحقیقات پیشین، استفاده همزمان از چربی و پروتئین شیر، پوشش کیتوزان، تبدیل نانوحامل‌ها به پودر غذا دارو و استفاده از آن در غنی سازی ماست همزده و ارزیابی همزمان ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، آنتی اکسیدانی و حسی محصول در طول نگهداری است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد اولیه

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش شامل کورکومین، -n هگزان (گرید HPLC خلوص $\leq 99\%$ ، پتاسیم هیدروکسید (خلوص $\leq 98\%$ ، سدیم هیدروژن سولفات (خلوص $\leq 99\%$ ، توئین ۸۰، سدیم آزید (خلوص $\leq 99\%$ ، برومید پتاسیم (خلوص $\leq 99\%$ ، معرف فولین و ۲-پروپانول (خلوص $\leq 99/5\%$) بودند که همگی از شرکت مرک آلمان تهیه شدند. همچنین اتانول و متانول (خلوص $\leq 99/8\%$ ، اسید استیک (خلوص $\leq 99\%$) و محلول DPPH از شرکت سیگما آلد ریچ آمریکا خریداری گردیدند. شیر اسکیم با چربی ۰/۰۵٪ پروتئین ۳/۲٪، لاکتوز ۴/۵٪ و pH برابر با ۶/۶ و روغن کره با درصد چربی ۹۹/۵ توسط شرکت پگاه ایران تأمین شدند و استارتر ماست حاوی سویه‌های باکتری استرپتوکوکوس ترموفیلوس و باکتری لاکتوباسیلوس دلبروکی زیرگونه بولگاریکوس از شرکت کریستین هانسن دانمارک تهیه شد.

۲-۲- تولید حامل‌های لیپیدی نانوساختار

برای آماده سازی امولسیون اولیه، ابتدا کورکومین در روغن کره ذوب شده در دمای ۶۵ درجه سلسیوس حل شد (فاز روغنی) و سپس فاز آبی (آب مقطر و توئین ۸۰) به آرامی و همراه با همزدن ۵۰۰ دور در دقیقه در دمای ۶۵

۲-۴- خشک کردن حامل‌های لیپیدی نانوساختار

خشک کردن حامل‌های لیپیدی نانوساختار با استفاده از خشک‌کن انجمادی آزمایشگاهی (مدل CHRIST LDplus Alpha 1-2 ساخت آلمان) تحت شرایط دمای ۴۰- درجه سلسیوس و فشار خلأ حدود ۱/۰ میلی‌بار

به مدت ۲۴ ساعت انجام شد. نمونه‌های پودری به‌دست‌آمده بلافاصله پس از خشک کردن، در ویال‌های شیشه‌ای تیره و درب‌دار، در دمای یخچال (۴- درجه سلسیوس)، به دور از نور و رطوبت نگهداری شدند. نمونه‌های خشک شده که در این بخش از پژوهش تولید شدند، در جدول زیر ارائه شده‌اند.

Table 1 Treatments used in this study

Row	Treatment	Chitosan coating	Matrix	Curcumin
1	NLC	No	-	No
2	CS-NLC	Yes	-	No
3	Cur-NLC	No	-	Yes
4	CS-Cur-NLC	Yes	-	Yes
5	Milk-Cur-NLC	No	Milk	Yes
6	Milk-CS-Cur-NLC	Yes	Milk	Yes

همکاران (۲۰۱۹)، با تغییرات مورد نیاز اندازه‌گیری شد [۲۳]. به‌طور خلاصه، ۲ میلی‌لیتر از محلول آبی کورکومین آزاد (ریزپوشانی نشده) یا حامل‌های لیپیدی نانوساختار حاوی کورکومین با غلظت برابر کورکومین با ۲ میلی‌لیتر محلول اتانولی DPPH با غلظت ۰/۲ میلی‌مولار مخلوط شد. نمونه کنترل از طریق مخلوط کردن ۲ میلی‌لیتر محلول DPPH و ۲ میلی‌لیتر آب مقطر تهیه گردید. محلول حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در تاریکی نگهداری و سپس در $g \times 1500$ به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. رنگ‌بری DPPH با استفاده از اندازه‌گیری جذب در طول موج ۵۱۷ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر سنجیده شد. فعالیت مهارکنندگی رادیکال DPPH از طریق معادله زیر محاسبه شد:

$$DPPH (\%) = [(A_c - A_s) / A_c] \times 100$$

که A_c جذب نمونه کنترل A_s جذب نمونه اصلی می‌باشد.

۲-۷- تعیین اندازه قطرات و پتانسیل زتا

تعیین اندازه ذرات توسط دستگاه DLS^2 مدل Quadix (شرکت Applied Photophysics)

۲-۵- طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون‌قرمز^۱ (FT-IR)

تعیین برهمکنش‌ها و بررسی ساختارها با کمک روش FT-IR (شرکت Bruker، آلمان مدل Tensor II) انجام شد. جهت آماده‌سازی برای آنالیز طیف‌سنجی، یک میلی‌گرم از نمونه خشک شده با ۱۰۰ میلی‌گرم برمید پتاسیم مخلوط شد و در هاون ساییده شد تا مخلوط کاملاً همگن به دست آید. سپس مخلوط در دستگاه قرص‌ساز ریخته شد و به صورت قرص آماده گردید. طیف حاصل از نمونه‌ها در محدوده عدد موجی ۴۰۰ تا 4000 cm^{-1} بررسی شد [۲۲].

۲-۶- سنجش فعالیت آنتی‌اکسیدانی به روش مهار

رادیکال آزاد DPPH

فعالیت آنتی‌اکسیدانی محلول آبی کورکومین آزاد (ریزپوشانی نشده) و حامل‌های لیپیدی نانوساختار بارگذاری شده با کورکومین با استفاده از آزمون‌های فعالیت مهار رادیکال DPPH مطابق روش Mohammadian و

انگلستان) و پتانسیل زتا توسط دستگاه Zetameter مدل Particle Metrix Zeta Analyzer (شرکت Metrix GmbH، آلمان) در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام شد. نمونه‌ها ۱۰ برابر با آب دیونیزه رقیق شدند تا از پدیده‌های پراکندگی متعدد به دلیل برهمکنش بین ذرات جلوگیری شود [۲۵، ۲۴].

۲-۸- تعیین بازده ریزپوشانی کورکومین

ابتدا منحنی کالیبراسیون توسط مقادیر مختلف کورکومین در محدوده ۱۰-۰/۱ میکروگرم بر میلی‌لیتر رسم شد ($Y = 0.138 X + 0.0049$; $R^2 = 0.9999$). بازده ریزپوشانی^۱ (EE) با توجه به نسبت کورکومین کپسوله شده به محتوای مورد استفاده تعیین شد. به این ترتیب که، ۱ میلی‌لیتر کورکومین کپسوله شده در ۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد و مایع رویی به نسبت ۱:۹ به استون اضافه شد. در نهایت، جذب با استفاده از اسپکتروفتومتر UV-vis در طول موج ۴۲۶ نانومتر خوانده شد [۲۶]. برای محاسبه بازده کپسوله‌سازی از فرمول زیر استفاده شد:

$$100 \times [(\text{محتوای کل کورکومین (mg)} / \text{کورکومین}$$

$$EE (\%) = [\text{کپسوله شده (mg)}]$$

۲-۹- بررسی پایداری حرارتی کورکومین

محلول اتانولی کورکومین به‌عنوان نمونه کنترل، با حل کردن ۱۰ میلی‌گرم کورکومین در ۱۰ میلی‌لیتر اتانول تهیه شد تا غلظت نهایی ۱ میلی‌گرم در میلی‌لیتر حاصل گردد. تیمار CUR-NLC و CS-CUR-NLC نیز حاوی مقدار معادل کورکومین (۱ میلی‌گرم در میلی‌لیتر) بودند. برای آنالیز، ۱ گرم از هر محلول کنترل، CUR-NLC و CS-CUR-NLC با آب مقطر ۱۰ برابر رقیق شدند. سپس محلول‌ها در بن ماری (شرکت ممبرت آلمان

مدل UFE500) در دمای ۹۰ درجه سلسیوس به مدت ۴ ساعت حرارت داده شدند. در فواصل زمانی ۰، ۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ ساعت مقدار کورکومین با اندازه‌گیری مقدار جذب با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UV-1800، Shimadzu، ژاپن) در طول موج ۴۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد [۳].

۲-۱۰- تولید ماست هم‌زده غنی‌سازی شده

جهت تولید ماست پر چرب (۱/۰ ± ۵ گرم چربی در ۱۰۰ گرم)، شیر ۵ درصد چربی در دمای ۹۰ درجه سلسیوس، به مدت ۳۰ دقیقه پاستوریزه شد. سپس تا دمای ۴۵ درجه سلسیوس سرد و با استارترهای ماست (*Lactobacillus bulgaricus* و *Streptococcus thermophilus*) تلقیح گردید. نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در دمای ۴۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند. سپس، ۵ گرم از پودر لیوفیلیزه NLC حاوی کورکومین (معادل ۱ میلی‌گرم کورکومین خالص) به ۵۰۰ گرم ماست اضافه و با سرعت ۵۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه هم‌زده شد. در مرحله بعد ماست سرد شده به سردخانه در دمای ۴ درجه سلسیوس منتقل گردید. pH ماست در روز اول در سردخانه معادل ۴/۶ و در پایان ۲۱ روز معادل ۴/۴ بود [۱۷].

۲-۱۱- ارزیابی حسی

ارزیابی حسی نمونه‌ها با استفاده از آزمون هدونیک ۵ درجه‌ای (۱ = کاملاً نامطلوب، ۲ = نامطلوب، ۳ = متوسط، ۴ = مطلوب، ۵ = کاملاً مطلوب) انجام شد. این آزمون توسط ۲۰ ارزیاب آموزش‌دیده (۱۲ زن و ۸ مرد، با دامنه سنی ۲۰-۴۵ سال) در دو نوبت (صبح و عصر، با فاصله ۴۸ ساعت) و در شرایط استاندارد آزمایشگاه حسی (نور غیرمستقیم، دمای ۲۲ درجه سلسیوس، رعایت کدبندی

^۱Encapsulation efficiency

نمونه‌ها با سه رقم تصادفی و استفاده از آب معدنی برای شست‌وشوی دهان بین نمونه‌ها انجام گرفت ویژگی‌های حسی نمونه‌های مورد ارزیابی شامل طعم، خامه‌ای شدن، آب‌اندازی، پس‌طعم، تلخی، شیرینی، ترشی، رنگ، بو و گسی می‌باشند [۲۷].

۲-۱۲- اندازه‌گیری میزان ظرفیت نگهداری آب در

ماست همزده غنی شده

اندازه‌گیری میزان ظرفیت نگهداری آب^۱ (WHC) ماست مطابق روش Taghadosi و همکاران (۲۰۲۴) با تغییرات مورد نیاز انجام گرفت [۲۸]. ۲۰ گرم ماست (W₁) به لوله فالکون منتقل و در ۳۰۰۰ × g به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سلسیوس سانتریفیوژ گردید. بعد از سانتریفیوژ، میزان آب ماست جدا شده وزن گردید (W₂) و با استفاده از فرمول زیر، ظرفیت نگهداری آب نمونه‌ها محاسبه گردید:

$$WHC (\%) = [(W_1 - W_2 / W_1)] \times 100$$

۲-۱۳- فعالیت آنتی‌اکسیدانی ماست همزده غنی‌شده با

کورکومین در طول دوره نگهداری

به منظور پایش روند تغییرات فعالیت آنتی‌اکسیدانی از ابتدای دوره تا پایان عمر مصرف بهینه، فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌های ماست همزده در طول دوره نگهداری (تا ۲۸ روز در دمای ۴ درجه سلسیوس) در روزهای ۱، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ با استفاده از روش مهار رادیکال آزاد DPPH انجام شد. برای تهیه عصاره متانولی، ۵ گرم از هر نمونه ماست به‌طور متوالی دو بار با ۲۰ میلی‌لیتر متانول ۸۰٪ مخلوط شد. مخلوط حاصل به مدت ۱۰ دقیقه در سرعت ۴۵۰۰ × g و دمای محیط سانتریفیوژ گردید و مایع رویی از طریق کاغذ صافی واتمن گرید ۱ جدا شد. عصاره‌های به‌دست‌آمده ترکیب و مجدداً به مدت

۱۵ دقیقه در سرعت ۱۵۰۰ × g سانتریفیوژ شدند. سپس مایع شفاف نهایی پس از فیلتراسیون مجدد، به‌عنوان عصاره کارآزمایی مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام آزمون DPPH، ۲ میلی‌لیتر از عصاره متانولی نمونه با ۲ میلی‌لیتر محلول اتانولی DPPH با غلظت ۰/۲ میلی‌مولار مخلوط شد. مخلوط حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و در تاریکی نگهداری شد تا واکنش کامل شود. پس از این مدت، محلول به مدت ۱۰ دقیقه در سرعت ۱۵۰۰ × g سانتریفیوژ گردید و جذب مایع شفاف نهایی در طول موج ۵۱۷ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل Shimadzu، UV-1800، ژاپن) اندازه‌گیری و از فرمول زیر برای محاسبه فعالیت مهارکنندگی رادیکال DPPH استفاده شد [۲۸]:

$$DPPH (\%) = [(A_c - A_s) / A_c] \times 100$$

در این فرمول، A_c جذب نمونه کنترل A_s جذب نمونه اصلی می‌باشد.

۲-۱۴- روش آماری

به منظور آنالیز داده‌ها و بررسی اطلاعات از طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. جهت تعیین اختلاف میانگین داده‌ها پس از آنالیز واریانس با روش ANOVA، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد استفاده گردید. در تمامی مراحل تجزیه و تحلیل آماری نتایج با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS 16 انجام شد. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده گردید. تمامی آزمون‌ها در ۳ تکرار انجام شد.

1 -Water holding capacity

۳- نتیجه و بحث

۳-۱- طیف سنجی تبدیل فوری مادون قرمز (FT-IR)

طیف های FTIR برای نمونه های مختلف حامل های لیپیدی نانو ساختار حاوی کورکومین در شکل ۳ نشان داده

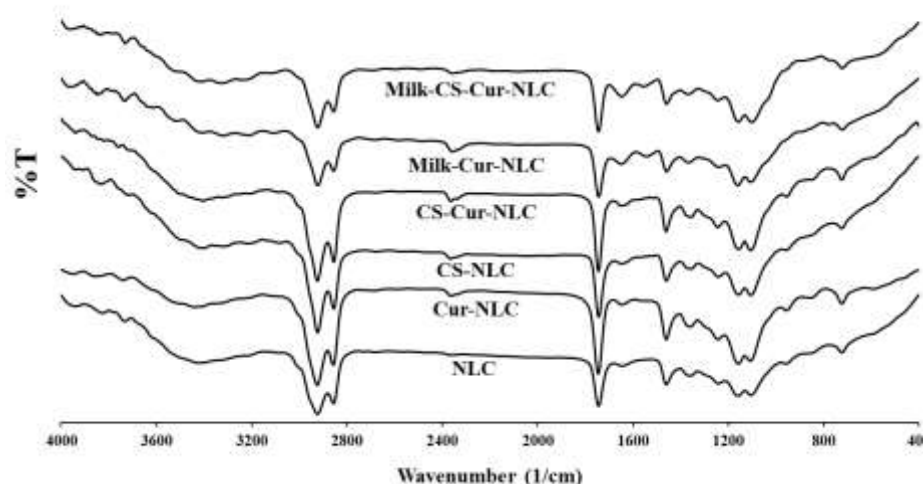


Figure 3 FTIR spectra of nanostructured lipid carriers (NLC), curcumin-loaded nanostructured lipid carriers (Cur-NLC), chitosan-coated nanostructured lipid carriers (CS-NLC), curcumin-loaded nanostructured lipid carriers coated with chitosan (CS-Cur-NLC), and nanostructured lipid carriers in milk matrix (Milk-Cur-NLC and Milk-CS-Cur-NLC)

است که منجر به اختلال در بخشی از ساختار مرتب کریستالی لیپیدها می شود [۲۹]. همچنین، شدت پیک در عدد موجی 1740 cm^{-1} در Cur-NLC بیشتر است که بیانگر حضور پیوندهای C=C و C=O کورکومین می باشد [۳۰].

در نمونه های پوشش داده شده با کیتوزان (CS-NLC و CS-Cur-NLC) باند وسیع و قوی در محدوده 3400 cm^{-1} به طور چشمگیری برجسته تر شد. این باند مربوط به ارتعاش کششی گروه های هیدروکسیل (OH) و آمین- (NH₂) کیتوزان است که حضور آن نشان دهنده پوشش سطح نانوذرات با این پلی ساکارید قطبی است. گستردگی و شدت بالای این باند بیانگر تشکیل پیوند هیدروژنی متعدد بین گروه های عاملی کیتوزان و سطح نانوذره است. این تعامل ها نقش کلیدی در پایداری لایه پوششی و کنترل رهایش دارو

در طیف نمونه NLC، باند قوی در محدوده $2850\text{--}2920\text{ cm}^{-1}$ به ارتعاش کششی گروه های متیلن- (CH₂) و متیل (CH₃) زنجیره های اسیدچرب لیپیدی نسبت داده شد که نشان دهنده حضور لیپیدهای جامد در ساختار نانوحامل است. همچنین، پیک مشخصی در 1740 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی گروه کربونیل (C=O) استرهای تری گلیسریدی مشاهده شد که ویژگی بارز ترکیبات گلیسریدی به کاررفته در NLC است.

مقایسه طیف نمونه NLC با Cur-NLC تغییرات جزئی در شدت و موقعیت باندهای طیفی نشان می دهد. در Cur-NLC باندهای مربوط به ارتعاش های کششی CH₂- و CH₃- کمی به سمت اعداد موج بالاتر جابه جا شدند و شدت آن ها افزایش یافت. این تغییرات نشان دهنده برهم کنش هیدروفوب بین مولکول های کورکومین و ماتریس لیپیدی

بطور کلی، پیک‌های اصلی نمونه‌ها در یک موقعیت تقریباً مشابهی ظاهر شدند. با این وجود، تغییرات جزئی در شدت و مکان پیک‌ها مشاهده گردید که نشان‌دهنده تغییرات شیمیایی ناشی از تعاملات بین مولکولی بین اجزاء فرمولاسیون است. نتایج FT-IR وجود برهم‌کنش‌های هیدروفوبی (کورکومین-لیپید)، هیدروژنی (کیتوزان-لیپید/پروتئین) و الکتروستاتیک (کیتوزان-پروتئین شیر) را تأیید کرد که منجر به تشکیل ساختار چندلایه پایدار لیپید کورکومین/کیتوزان/پروتئین شیر گردید.

۳-۲- فعالیت آنتی‌اکسیدانی

کورکومین به دلیل فعالیت آنتی‌اکسیدانی قوی خود شناخته شده است؛ با این حال، فعالیت زیستی آن به دلیل حلالیت ضعیف آن در آب، پایین می‌باشد. فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH بر اساس کینتیک‌های واکنش انتقال الکترون یا انتقال اتم هیدروژن می‌باشد. حلالیت بسیار پایین کورکومین در آب منجر پیدایش تعداد زیادی از تجمعات کورکومین می‌گردد که منجر به کاهش مقدار کورکومین در دسترس برای مهار رادیکال‌های آزاد و قدرت احیاء کنندگی می‌گردد. اما محلول‌های آبی حامل‌های لیپیدی قابلیت بالایی در مهار رادیکال آزاد نشان دادند. در این راستا، ریزپوشانی کورکومین در حامل‌های لیپیدی باعث جلوگیری از تجزیه کورکومین و افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن در مقایسه با کورکومین آزاد گردید. همچنین، پوشش‌دهی با کیتوزان می‌تواند از طریق افزایش پایداری کورکومین، قابلیت آنتی-اکسیدانی آن را افزایش دهد. بطور کلی، فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH سامانه‌های Cur، Cur-NLC و CS-Cur به ترتیب برابر با ۳۵، ۶۵ و ۶۴/۲ درصد بود (شکل ۵). این نتایج بیانگر این حقیقت است که ریزپوشانی کورکومین در حامل‌های لیپیدی فضای مولکولی مناسب‌تری را برای واکنش کورکومین با رادیکال آزاد و تسریع واکنش انتقال الکترون/هیدروژن به وجود می‌آورد.

دارند. هماهنگ با نتایج این پژوهش، Al-Ziyadi و همکاران (۲۰۲۴) گزارش نمودند که پیک ظاهر شده در عدد موجی 3306 cm^{-1} در طیف حامل‌های لیپیدی نانوساختار پوشش داده شده با کیتوزان مربوط به ارتعاشات کششی باندهای OH و NH_2 کیتوزان می‌باشند [۳۱].

در نمونه‌های تهیه‌شده در بستر شیر-Milk-Cur (Milk-CS-Cur-NLC) و NLC، تغییرات قابل توجهی در نواحی مربوط به پروتئین‌ها مشاهده شد. به‌ویژه، پیک‌های 1650 cm^{-1} مربوط به باند آمید I، ناشی از ارتعاش کششی C=O گروه پپتیدی و 1540 cm^{-1} مربوط به باند آمید II، شامل خمش N-H و کشش C-N برجسته شدند که نشان‌دهنده حضور پروتئین‌های شیر (عمدتاً کازئین و پروتئین‌های سرمی) در ساختار نهایی فرمولاسیون است. این تغییرات حاکی از برهم‌کنش‌های سطحی بین پروتئین‌های شیر و نانوذرات لیپیدی است که می‌تواند منجر به تشکیل لایه‌ای پایدار از پروتئین بر روی سطح ذرات شود [۳۲]. این لایه نه تنها از تجمع نانوذرات جلوگیری می‌کند، بلکه پایداری کلوئیدی سیستم را در طول فرآیند خشک‌کردن و انحلال مجدد بهبود می‌بخشد. حضور کیتوزان در این سامانه سبب جابجایی (افزایش) این پیک به عدد موجی 1557 cm^{-1} گردید. این حالت ممکن است ناشی از ایجاد پیوندهای هیدروژنی بین پروتئین‌های شیر و کیتوزان باشد که قادر به افزایش فرکانس ارتعاش خمشی گروه‌های N-H می‌باشند [۳۳]. همچنین، کاهش شدت باندهای مربوط به گروه‌های کربونیل لیپیدی 1740 cm^{-1} و تغییرات در باندهای CH_2 و CH_3 در نمونه‌های حاوی شیر، نشان‌دهنده پوشش بخشی از سطح لیپیدی توسط پروتئین‌های شیر است. این پدیده می‌تواند به عنوان شواهدی از تشکیل کمپلکس‌های لیپید-پروتئین در سطح نانوذرات تفسیر شود که در بهبود پایداری و عملکرد سیستم تحویل کورکومین مؤثر است.

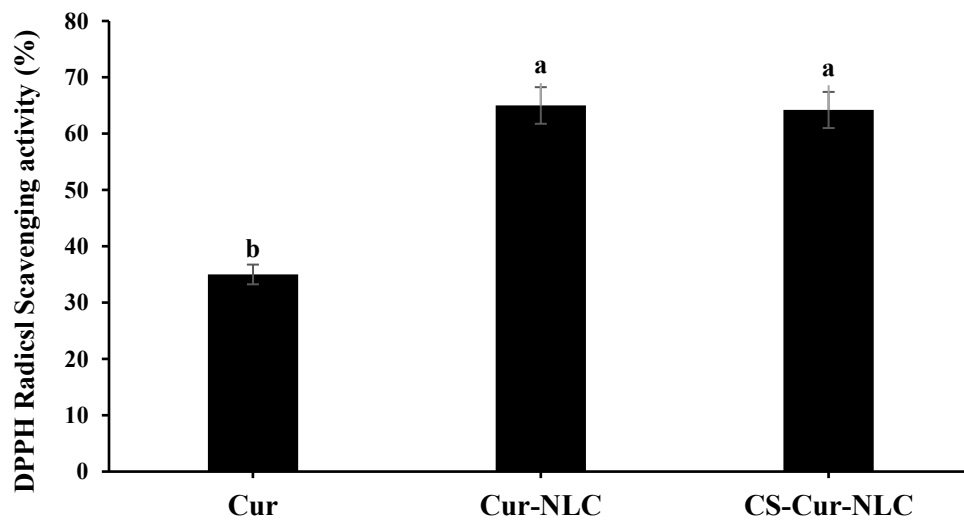


Figure 5 Antioxidant activity of free curcumin (Cur), curcumin-loaded nanostructured lipid carriers (Cur-NLC), and chitosan-coated curcumin-loaded nanostructured lipid carriers (CS-Cur-NLC), expressed as DPPH free radical scavenging activity

سبب افزایش معنادار فعالیت آنتی اکسیدانی آن بر پایه روش DPPH گردید که به حضور کورکومینوئیدها و گروه های هیدروکسیل در ساختار عصاره زردچوبه نسبت داده شد. همچنین، به نقش خاصیت آنتی اکسیدانی پیوندهای دوگانه و گروه های کربونیل آن با گروه های پاراهیدروکسی در این راستا نیز اشاره گردید [۳۹]. خواص آنتی اکسیدانی بالای کورکومین ابزار مفیدی در افزایش ماندگاری غذاها و کاهش اکسیداسیون لیپیدها و تخریب اجزای زیست فعال می باشد.

۳-۳- اندازه ذرات و پتانسیل زتا

شکل ۲، اندازه ذرات حامل های لیپیدی نانوساختار (NLC)، حامل های لیپیدی نانوساختار بارگذاری شده با کورکومین (Cur-NLC)، حامل های لیپیدی نانوساختار پوشش داده شده با کیتوزان (CS-NLC) و حامل های لیپیدی نانوساختار بارگذاری شده با کورکومین و پوشش داده شده با کیتوزان (CS-Cur-NLC) را نشان می دهد. اندازه

مطالعات پیشین نشان می دهد که کورکومین فعالیت آنتی اکسیدانی بسیار کمی در محیط آبی دارد و ریزپوشانی آن در یک ماتریکس پلیمری چربی دوست برای افزایش قابل توجه زیست فعالیت آن مورد نیاز است [۳۵، ۳۴]. Chang و همکاران (۲۰۱۷) گزارش نمودند که ریزپوشانی کورکومین در نانوذرات کمپلکس پروتئین-پلی ساکارید، به طور چشمگیری فعالیت مهارکنندگی آن را در برابر رادیکال های آزاد در مقایسه با کورکومین آزاد محلول در اتانول یا پراکنده در آب، بهبود بخشید این حالت را می توان با پراکندگی بهبود یافته کورکومین ریزپوشانی شده در نانوذرات توضیح داد که منجر به تسهیل سینتیک واکنش با رادیکال آزاد می گردد [۳۶]. در مطالعات Huang و همکاران (۲۰۱۶) و Hu و همکاران (۲۰۲۰)، فعالیت آنتی اکسیدانی بیشتری برای کورکومین موجود در نانوذرات نسبت به شکل آزاد آن گزارش شده است؛ این حالت به حلالیت آبی کم کورکومین نسبت داده شد، اما گنجاندن آن در نانوذرات، میزان کورکومین موجود برای تعامل با رادیکال های آزاد را افزایش می دهد [۳۷، ۳۸]. در این راستا، Karimi و همکاران (۲۰۱۸) گزارش نمودند که درون-پوشانی عصاره زردچوبه در حامل های لیپیدی نانوساختار

ذرات با D_{50}^1 نشان داده شده است که قطر متوسط نانوذرات می باشد.

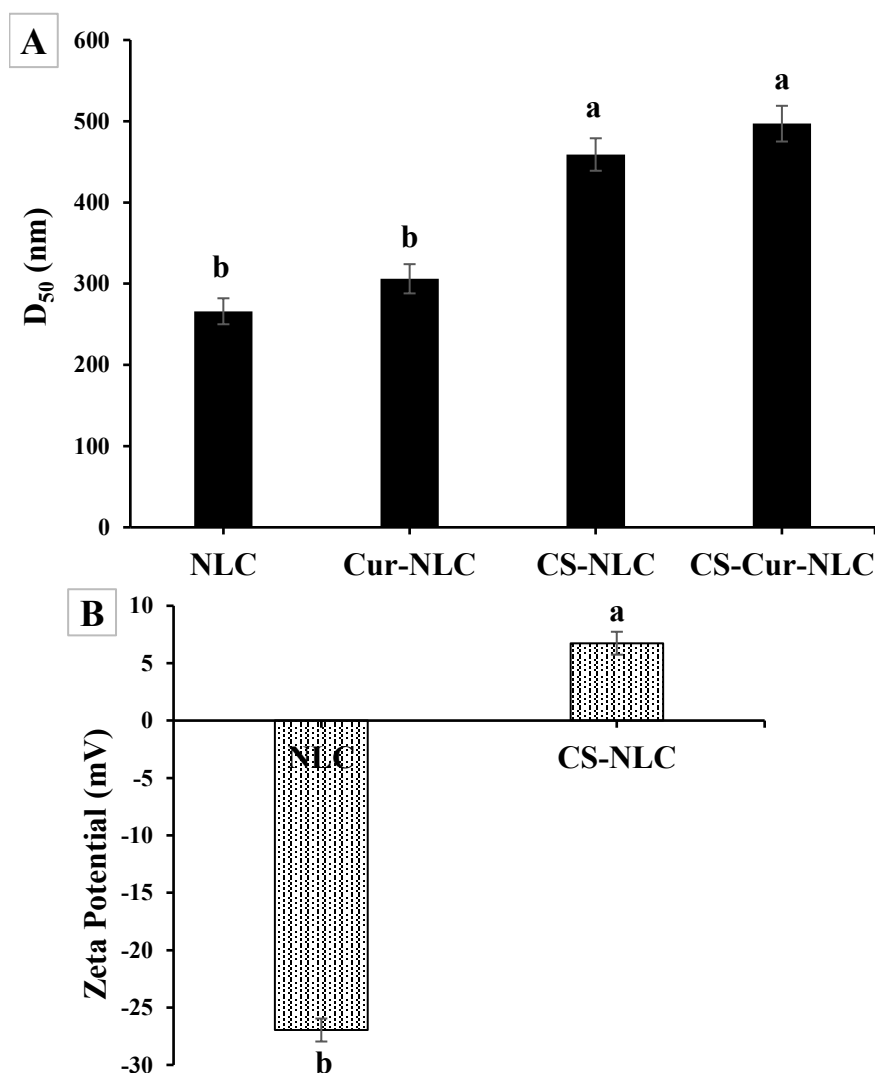


Figure 2. A) Particle size of nanostructured lipid carriers (NLC), curcumin-loaded nanostructured lipid carriers (Cur-NLC), chitosan-coated nanostructured lipid carriers (CS-NLC), and curcumin-loaded nanostructured lipid carriers coated with chitosan (CS-Cur-NLC) B) Zeta potential of nanostructured lipid carriers (NLC) and chitosan-coated nanostructured lipid carriers (CS-NLC)

است به دلیل حجم اضافی اشغال شده توسط مولکول‌های کورکومین در ماتریکس لیپیدی باشد.

اندازه ذرات برای CS-NLC معادل ۴۵۹ نانومتر بدست آمد. پوشش‌دهی حامل‌های لیپیدی نانوساختار با

اندازه ذرات تیمارهای NLC و CUR-NLC به ترتیب برابر با ۲۶۶ و ۳۰۶ نانومتر بود. نتایج نشان می‌دهد که افزودن کورکومین اندازه ذرات را افزایش می‌دهد که ممکن

¹ قطری که ۵۰٪ از حجم کل ذرات، اندازه‌ای کوچک‌تر (یا مساوی) آن دارند.

کیتوزان منجر به افزایش معنادار متوسط اندازه ذرات در مقایسه با NLC گردید ($p < 0.05$). این افزایش را می توان به لایه کیتوزان اضافی اطراف نانوذرات نسبت داد. مقدار اندازه ذرات برای CS-CUR-NLC برابر با ۴۹۷ نانومتر گزارش گردید که بزرگترین اندازه ذره در بین چهار نوع حامل لیپیدی نانوساختار بود، که نشان می دهد هم بارگذاری کورکومین و هم پوشش با کیتوزان در افزایش اندازه نقش دارند. در واقع، زمانی که هم بارگذاری کورکومین و هم پوشش کیتوزان اعمال شد، اندازه ذرات بیشتر افزایش یافت که می تواند ناشی از اثرات ترکیبی بارگذاری داخلی کورکومین و لایه خارجی کیتوزان باشد.

شایان ذکر است که پوشش دهی حامل های لیپیدی نانوساختار با کیتوزان سبب تغییر پتانسیل زتای ذرات از مقادیر منفی (۲۶/۹۶ - میلی ولت) به مقادیر مثبت (۶/۷۴ + میلی ولت) گردید که شاهدهی بر پوشش دهی موفقیت آمیز نانوذرات با کیتوزان است.

در تطابق با یافته های این پژوهش، Al-Ziyadi و همکاران (۲۰۲۴) گزارش نمودند که حامل های لیپیدی نانوساختار پوشش داده شده با کیتوزان دارای اندازه ذرات ۱۹۸ نانومتر و بار سطحی ۸/۴۱ + میلی ولت می باشند که از تجمع آنها در محیط های آبی جلوگیری کرده و پایداری قابل قبول آنها را منعکس می کند [۳۱]. علاوه بر این، Bashiri و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که پوشش دهی NLC با کیتوزان سبب افزایش اندازه ذرات می گردد و این حالت به ماهیت کاتیونی کیتوزان و در نتیجه فعل و انفعالات الکترواستاتیکی بین زنجیره های آن و اجزای بار منفی روی سطح ذرات NLC نسبت داده شد [۲۴]. افزایش غلظت کیتوزان می تواند باعث تشکیل سطح چند لایه ای ضخیم اطراف ذرات NLC و متعاقباً افزایش اندازه ذرات آنها گردد. علاوه بر این، پوشش دهی کیتوزان سبب تغییر پتانسیل زتا از مقادیر ۱۷/۵۶ - میلی ولت به ۲۱/۴ + میلی ولت گردید. سطح بار منفی NLC به گروه های هیدروکسیل آزاد ترکیبات فنولی در اسانس یا اسید چرب آزاد (اسید کربوکسیلیک) و

گروه فسفات فسفولیپیدها، که به طور طبیعی در بیشتر روغن ها و لیپیدهای خوراکی وجود دارد، نسبت داده شد. این سطح دارای بار منفی NLC می تواند به صورت الکترواستاتیکی با گروه های آمین با بار مثبت (NH_3^+) کیتوزان تعامل داشته باشد که به نوبه خود بار سطحی نمونه های پوشش داده شده با کیتوزان را از مقادیر منفی به مثبت تغییر می دهد [۲۴]. Luo و همکاران (۲۰۱۵) گزارش نمودند که هنگامی که فاز لیپیدی ذوب شده در فاز آبی حاوی کیتوزان همگن شد، اندازه ذرات نانوذرات لیپیدی از ۲۵۲/۵ نانومتر به ۲۶۹ نانومتر افزایش یافت و پتانسیل زتا از منفی (۱۵/۹ - میلی ولت) به مقدار مثبت (۲۶/۱ میلی ولت) تغییر کرد که گواهی بر پوشش دهی موفق ذرات با کیتوزان بود [۳۱]. در مطالعه ای دیگر مشخص گردید که پوشش دهی نانوذرات لیپیدی با کیتوزان سبب افزایش اندازه ذرات از ۱۴۰ نانومتر به ۲۳۵ نانومتر شد؛ علاوه بر این، پتانسیل زتا نانوذرات لیپیدی از مقدار ۳۵ - میلی ولت به مقدار ۲۹ + میلی ولت افزایش یافت [۲۰]. بطور مشابه، پوشش نانوذرات لیپیدی با کیتوزان سبب افزایش اندازه ذرات از ۲۴۳ نانومتر به ۴۷۰ نانومتر و تغییر پتانسیل زتا از ۲۵/۱ - میلی ولت به ۳۴/۲ + میلی ولت گردید. افزایش اندازه ذرات و وارونگی بار سطحی، حضور پوشش کیتوزان را در اطراف سطح حامل های لیپیدی نانوساختار تأیید می کند. نانوذرات لیپیدی پوشش داده شده با کیتوزان با بار سطحی مثبت قادر به برهمکنش با غشاء با بار منفی سلول های روده می باشد [۴۰].

۳-۴- بازده ریزپوشانی

بازده ریزپوشانی کورکومین در حامل های لیپیدی نانوساختار برابر با $91/83 \pm 0/50$ درصد بود که بیانگر کارایی بالای نانوذرات در ریزپوشانی کورکومین می باشد. در این راستا، راندمان ریزپوشانی کورکومین بیشتر از ۹۱ درصد در حامل های لیپیدی نانوساختار گزارش شده است [۴۱]. علاوه بر این، راندمان ریزپوشانی کورکومین در نانوذرات کیتوزان در محدوده ۸۰/۴۰ تا ۸۸/۴۰ درصد وابسته به غلظت کیتوزان و تری پلی فسفات گزارش شده است [۴۲]. در

هر دو سامانه گردید. پس از ۲ ساعت حرارت‌دهی، میزان باقیمانده کورکومین در دو سامانه Cur-NLC و CS-Cur-NLC به ترتیب برابر با ۸/۳ و ۲۲/۳ درصد بود. با ادامه حرارت‌دهی و بعد از ۴ ساعت حرارت‌دهی در دمای ۹۰ درجه سلسیوس، تنها ۱/۵ درصد از کورکومین در سامانه Cur-NLC حفظ شد، درحالی‌که CS-Cur-NLC قادر به حفظ ۱۵/۵۰ درصد کورکومین گردید که بیانگر کارایی قابل‌توجه پوشش کیتوزان در بهبود پایداری حرارتی کورکومین می‌باشد.

در راستای نتایج این پژوهش، محققین گزارش نمودند که اگرچه افزایش دمای نگهداری سبب تسریع در تجزیه کورکومین در حامل‌های لیپیدی می‌گردد، اما حضور غلظت‌های بالاتر کیتوزان در سطح نانوذرات منجر به حفظ غلظت بیشتری از کورکومین در نانوذرات گردید. کیتوزان با تشکیل یک لایه محافظ روی سطح نانوذرات، می‌تواند از تماس مستقیم کورکومین با محیط حرارتی و متعاقباً اکسیداسیون و هیدرولیز کورکومین تحت شرایط حرارتی جلوگیری نماید. علاوه بر این، کیتوزان با ایجاد بار مثبت روی سطح نانوذرات، قادر به افزایش پایداری کلوئیدی و جلوگیری از تجمع ذرات تحت تأثیر حرارت می‌باشد [۳].

مطالعه‌ای دیگر، کارایی ریزپوشانی ۹۳/۱۲، ۹۳/۱۲ و ۹۳/۱۳ درصد کورکومین به ترتیب در نانوذرات لیپیدی کنترل، نانوذرات لیپیدی پوشش داده شده با کیتوزان و نانوذرات لیپیدی پوشش داده شده با تری‌متیل کیتوزان گزارش شده است [۴۳]. بنظر می‌رسد که خاصیت آگریزی بالای کورکومین منجر به راندمان ریزپوشانی بالای آن در هسته لیپیدی می‌گردد. در مطالعه‌ی Taghadosi و همکاران (۲۰۲۴) مشخص گردید که نانوکپسول‌های کورکومین پایدار شده با صمغ فارسی دارای بار سطحی منفی (۳۰/۷۸ - میلی ولت) و راندمان ریزپوشانی بالایی (۹۶/۸۴ درصد) می‌باشند. حفظ غلظت بالایی از کورکومین در این ساختارها به امکان تشکیل پیوند هیدروژنی بین گروه‌های کربوکسیل هیدروکلوئید و گروه‌های هیدروکسیل کورکومین و همچنین واکنش آگریز بین نواحی چربی‌دوست صمغ با حلقه‌های آروماتیک ساختار کورکومین نسبت داده شد [۲۸].

۳-۵- پایداری حرارتی کورکومین

شکل ۴، پایداری حرارتی کورکومین در دو سامانه حامل‌های لیپیدی نانوساختار (Cur-NLC) و حامل‌های لیپیدی نانوساختار پوشش داده شده با کیتوزان (CS-Cur-NLC) طی زمان حرارت‌دهی ۴ ساعت در دمای ۹۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، افزایش زمان حرارت‌دهی سبب کاهش قابل‌توجه در میزان کورکومین در

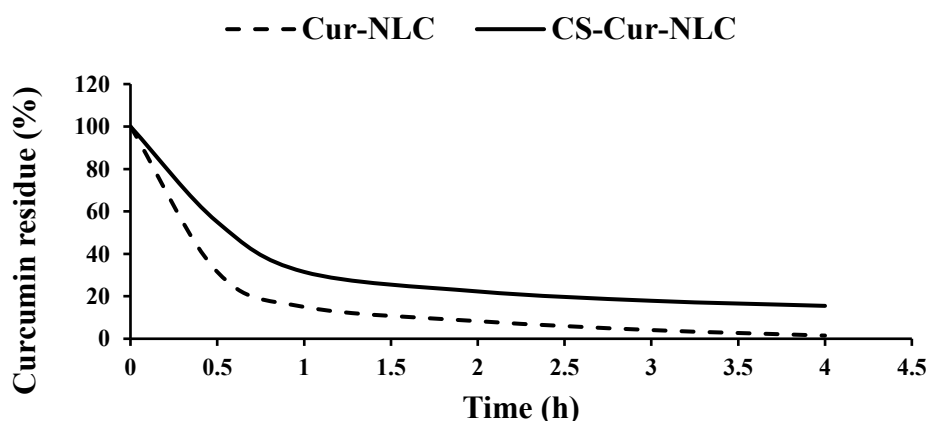


Figure 4 Thermal stability (residual mass) of curcumin in nanostructured lipid carriers (Cur-NLC) and chitosan-coated nanostructured lipid carriers (CS-Cur-NLC)

۳-۶- ارزیابی حسی ماست همزده غنی شده

شکل ۶، ویژگی‌های حسی ماست شاهد، ماست Yog-Milk-CS-Cur-NLC و Milk-Cur-NLC را بر اساس آزمون هدونیک ۵ نقطه‌ای نشان می‌دهد. ماست شاهد (۴) و تیمار Yog-Milk-CS-Cur-NLC (۵) به ترتیب کمترین و بیشترین امتیازات خامه‌ای شدن را بخود اختصاص دادند. پوشش کیتوزان ممکن است با ایجاد پایداری در نانوذرات، اختلال کمتری در بافت محصول نهایی ایجاد کند. در این راستا، نمونه Yog-Milk-CS-Cur-NLC بالاترین امتیاز حسی آب اندازی (کمترین میزان آب اندازی) را نشان داد که مطابق یافته‌های ظرفیت نگهداری آب نمونه‌ها بود. بطوریکه ظرفیت نگهداری آب در نمونه‌های شاهد، Yog-Milk-Cur-NLC و Yog-Milk-CS-Cur-NLC به ترتیب برابر با 62 ± 0.60 درصد، 63 ± 0.65 درصد و 65 ± 0.50 درصد بدست آمد.

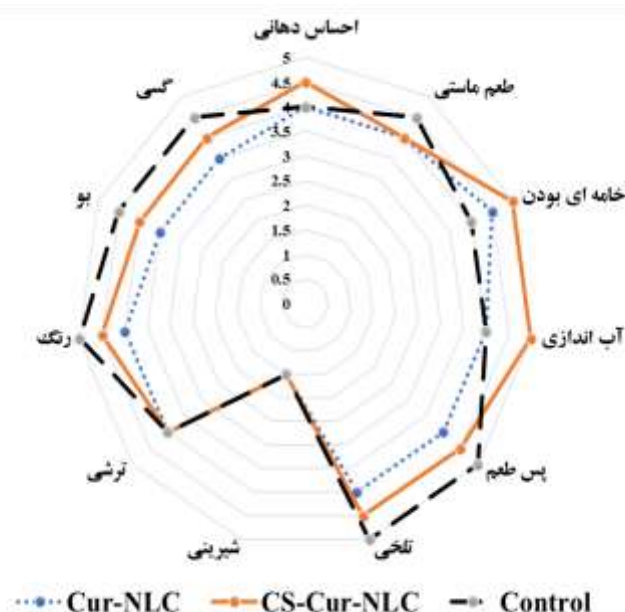


Figure 6: Sensory evaluation (sensory scores) of control yogurt samples (Control), yogurt enriched with lipid nanocarriers (Yog-Milk-Cur-NLC), and yogurt enriched with chitosan-coated lipid nanocarriers (Yog-Milk-CS-Cur-NLC)

بودند که ناشی از حضور ترکیب پلی فنولی کورکومین می‌باشد. با اینحال، پوشش‌دهی نانوذرات با کیتوزان سبب کاهش اثرات حسی منفی کورکومین گردید. در حقیقت، پوشش کیتوزان به بهبود ویژگی‌های حسی از جمله کاهش

اگرچه افزودن حامل‌های لیپیدی نانوساختار تغییری در امتیازات حسی شیرینی و ترشی محصول نهایی ایجاد نکرد، اما نمونه‌های غنی‌شده دارای امتیازهای حسی تلخی، پس طعم، رنگ، بو و گسی ضعیف‌تری نسبت به نمونه شاهد

اما ممکن است بر پذیرش حسی مصرف‌کننده تأثیر منفی داشته باشد. برای تولید ماست فراسودمند، بهینه‌سازی اندازه و غلظت نانوذرات یا استفاده از طعم‌دهنده‌های مکمل می‌تواند پذیرش حسی را افزایش دهد.

تلخی و پس مزه و بهبود نسبی بافت کمک می‌کند. در این راستا، گزارش شده است که پوشش‌دهی سامانه‌های حامل با کیتوزان، بدلیل رهایش آهسته‌تر دارو در فاز دهانی، منجر به کاهش طعم تلخی داروها می‌گردد [۴۶]. اگرچه نمونه‌های حاوی نانوذرات خاصیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری نشان دادند،



Figure 7: Visual appearance images of control yogurt samples (Control), yogurt enriched with lipid nanocarriers (Yog-Milk-Cur-NLC), and yogurt enriched with chitosan-coated lipid nanocarriers (Yog-Milk-CS-Cur-NLC).

حسی، همه نمونه‌ها رضایت‌بخش تلقی شدند و نمرات حسی خوبی دریافت کردند؛ با اینکه امتیازات حسی بعضی از صفات کاهش یافته بود. در مطالعه این محققین، صمغ فارسی برای کپسوله کردن کورکومین استفاده شده بود که منجر به کاهش طعم، رنگ و شدت بو این ترکیب شد [۲۸]. در مطالعه‌ای دیگر، Liu و همکاران (۲۰۱۸) کاهش امتیاز

نتایج مشابهی در منابع علمی گزارش شده است. در این راستا، Taghadosi و همکاران (۲۰۲۴) گزارش دادند که هنگامی که نانو کپسول‌های حاوی کورکومین به مخلوط ماست اضافه شد، امتیازات حسی بافت و بو نمونه‌ها به‌طور قابل‌توجهی تغییر نکرد. اما نمرات پذیرش برای رنگ، طعم و مقبولیت کلی همگی پایین‌تر بودند. از نظر ویژگی‌های

شده است. شکل ۸، تغییرات خاصیت آنتی‌اکسیدانی ماست شاهد، ماست غنی‌شده با حامل‌های لیپیدی نانوساختار حاوی کورکومین (Yog-Milk-Cur-NLC) و ماست حاوی حامل‌های لیپیدی نانوساختار کورکومین پوشش داده شده با کیتوزان (Yog-Milk-CS-Cur-NLC) طی زمان نگهداری (۱، ۷، ۱۴، ۲۱، و ۲۸ روز)، بر پایه روش‌های فعالیت مهار رادیکال‌های آز

طعم ماست را با ترکیب کورکومین گزارش کردند، اما هیچ تغییر قابل توجهی در امتیاز بو و بافت نمونه‌ها مشاهده نشد و نمونه غنی‌شده همچنان به‌طور کلی قابل قبول در نظر گرفته شد [۴۷].

۳-۷- فعالیت آنتی‌اکسیدانی ماست همزده غنی‌شده با

کورکومین در طول دوره نگهداری

کورکومین به‌عنوان یک ترکیب پلی‌فنولی، به‌خاطر خاصیت آنتی‌اکسیدانی قابل توجهی که دارد به‌خوبی شناخته‌شده DPPH را نشان می‌دهد.

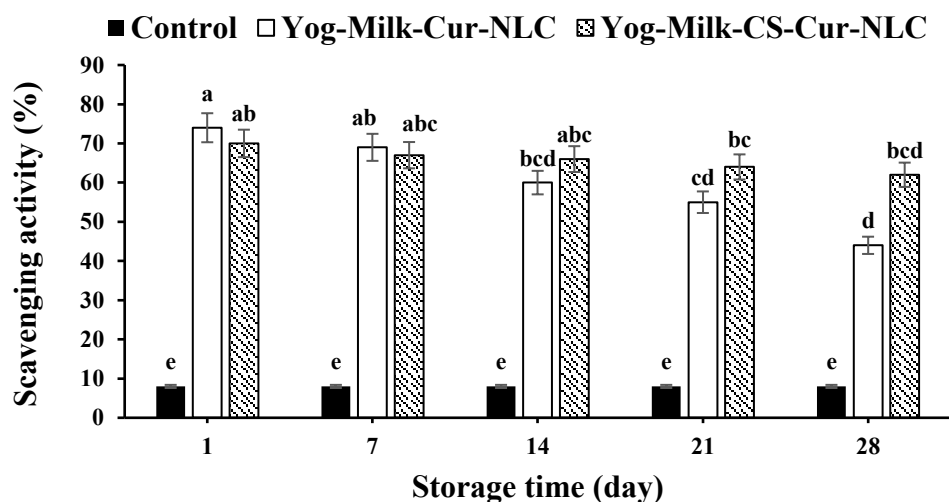


Figure 8 DPPH free radical scavenging activity of control yogurt samples (Control), yogurt enriched with lipid nanocarriers (Yog-Milk-Cur-NLC), and yogurt enriched with chitosan-coated lipid nanocarriers (Yog-Milk-CS-Cur-NLC).

تیمار Yog-Milk-Cur-NLC در روزهای اول و هفتم نگهداری، فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها نشان داد. اما با گذشت زمان، فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن کاهش یافت و نمونه CS-Cur-NLC خاصیت آنتی‌اکسیدانی بهتری بخود اختصاص داد؛ بطوریکه فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌های Yog-Milk-Cur-NLC و Yog-Milk-CS-Cur-NLC در روز ۲۸م نگهداری به ترتیب برابر با ۴۴ و ۶۲ درصد بود. این پایداری بالاتر در نمونه CS-Cur-NLC را می‌توان به چندین عامل نسبت داد: اولاً، پوشش کیتوزانی به عنوان یک لایه محافظ در برابر

نتایج نشان داد که نمونه شاهد، علیرغم عدم حضور کورکومین، دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی پایه‌ای معادل حدود ۸ درصد در تمامی روزهای نگهداری بود که بدون کاهش قابل توجهی باقی ماند. این فعالیت را می‌توان به ترکیبات زیست‌فعال طبیعی موجود در شیر و ماست از جمله پپتیدهای آنتی‌اکسیدانی حاصل از فعالیت باکتری‌های اسیدلاکتیک، ویتامین‌های آنتی‌اکسیدانی مانند ویتامین E، آنزیم‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی و متابولیت‌های ثانویه تولیدشده در طول تخمیر نسبت داد [۴۸].

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه فرمولاسیون کورکومین در نانوحامل لیپیدی می‌تواند فعالیت آنتی‌اکسیدانی اولیه را به‌طور چشمگیری افزایش دهد، اما بدون پوشش محافظ، این فعالیت در طول زمان به سرعت کاهش می‌یابد. در مقابل، پوشش‌دهی این نانوساختارها با کیتوزان منجر به حفظ قابل توجه فعالیت آنتی‌اکسیدانی تا پایان دوره نگهداری می‌شود. بنابراین، سیستم-Yog-Milk-CS-Cur-NLC به‌عنوان یک راهکار مؤثر و پایدار برای تولید ماست‌های فراسودمند با فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالا و پایدار معرفی می‌شود و می‌تواند در صنایع غذایی به‌عنوان یک فناوری ارزشمند برای بهبود کیفیت تغذیه‌ای و افزایش عمر مفید محصولات لبنی غنی‌شده مورد استفاده قرار گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری حامل‌های لیپیدی نانوساختار مبتنی بر چربی شیر، رویکردی کارآمد برای ریزپوشانی کورکومین و غنی‌سازی محصولات لبنی به‌شمار می‌رود. بازده بالای ریزپوشانی (۹۱٪/۸)، همراه با شواهد طیف‌سنجی مادون‌قرمز (FT-IR)، موفقیت‌آمیز بودن تشکیل ساختار چندلایه پایدار لیپید-کورکومین/کیتوزان/پروتئین شیر را تأیید کرد. پوشش‌دهی با کیتوزان نقش کلیدی در بهبود پایداری حرارتی و حفظ فعالیت آنتی‌اکسیدانی کورکومین در طول فرآوری و نگهداری ایفا نمود؛ به‌طوری‌که در نمونه‌های پوشش‌دار، میزان باقیمانده کورکومین پس از ۴ ساعت در دمای ۹۰ درجه سلسیوس بیش از ۱۵ برابر نمونه‌های بدون پوشش بود. کاربرد این نانوحامل‌ها در ماست هم‌زده نشان داد که اگرچه حضور آن‌ها ممکن است تا حدی پذیرش حسی محصول را تحت تأثیر قرار دهد، اما پوشش کیتوزانی قادر است این اثر منفی را به‌خوبی تعدیل کند و در عین حال، پایداری عملکردی ترکیب زیست‌فعال را حفظ نماید. در مجموع، توسعه نانوحامل‌های لیپیدی پوشش‌دار می‌تواند زمینه‌ساز تولید غذاهای فراسودمند غنی از ترکیبات زیست‌فعال حساس باشد. برای گسترش کاربرد این سامانه، پیشنهاد

عوامل تخریب‌کننده مانند نور، اکسیژن و pH پایین عمل می‌کند. ثانیاً، کیتوزان با ایجاد بار مثبت سطحی، پایداری کلوئیدی نانوساختارها را در ماتریکس ماست بهبود بخشیده و از تجمع آن‌ها جلوگیری می‌کند. ثالثاً، این پوشش با کنترل رهایش تدریجی کورکومین، از تخریب سریع آن جلوگیری کرده و فعالیت آن را در طول زمان حفظ می‌کند. علاوه بر این، کیتوزان خود دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی ذاتی است و از طریق اهدا الکترون و کیلیت کردن یون‌های فلزی می‌تواند با کورکومین اثر هم‌افزایی ایجاد کند [۱۸]. این عوامل ترکیبی منجر به عملکرد برتر نمونه-Yog-Milk-CS-Cur-NLC در مقایسه با Yog-Milk-Cur-NLC شده است. بنابراین، استفاده از نانوذرات پوشش داده شده با کیتوزان می‌تواند یک راهکار مؤثر برای تولید ماست‌های فراسودمند با خاصیت آنتی‌اکسیدانی پایدار باشد. یافته‌های این مطالعه با پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد که نشان داده‌اند پوشش‌دهی نانوحامل‌های لیپیدی با پلیمرهای زیست‌سازگار مانند کیتوزان، نه تنها پایداری فیزیکی و شیمیایی ترکیبات حساس را بهبود می‌بخشد، بلکه از کاهش سریع فعالیت زیستی آن‌ها در طول نگهداری جلوگیری می‌کند [۴۹،۳۹]. همچنین، مطالعات نشان داده‌اند که سیستم‌های پوشش‌دار کیتوزانی در محیط‌های غذایی اسیدی، عملکرد بهتری نسبت به نانوحامل‌های بدون پوشش دارند [۵۰،۳۶]. تجزیه ترکیبات شیمیایی فنولی در طول زمان، به‌ویژه توسط باکتری‌های اسید لاکتیک، احتمالاً علت کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی در نمونه‌های ماست غنی‌شده است [۵۱]. همچنین، Taghadosi و همکاران (۲۰۲۴) گزارش دادند که فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌های ماست غنی‌شده پس از افزودن نانو کپسول‌های حاوی کورکومین در سطوح افزایشی (۱ تا ۳ درصد)، به‌طور قابل‌توجهی در مقایسه با نمونه شاهد افزایش یافت و کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی طی زمان نگهداری ماست به تجزیه کورکومین توسط باکتری‌های اسید لاکتیک نسبت داده شد [۲۸].

می شود در پژوهش های آتی، رفتار آن در مقیاس صنعتی و در سایر ماتریس های غذایی نیز بررسی شود.

۵- سپاسگزاری

بدین وسیله مراتب قدر دانی را به شرکت شیر پاستوریزه پگاه گلستان به دلیل حمایت علمی و تجهیزات فنی ابراز میدارم.

دسترسی به داده ها

داده های پشتیبان یافته های این مطالعه در متن مقاله ارائه شده اند و تمامی نتایج گزارش شده بر اساس داده های موجود در جداول و نمودارهای مقاله است.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافع (اعم از مالی، شخصی یا سازمانی) در رابطه با این پژوهش و نتایج آن وجود ندارد.

بیانیه تأمین مالی

این پژوهش با حمایت مالی شرکت پگاه گلستان و در قالب

قرارداد پژوهشی شماره ۱۱۵۶۱۶/۴ مورخ ۱۴۰۱/۱۲/۰۳ بین دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و شرکت پگاه گلستان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

آرش آبایی: انجام آزمایش ها، جمع آوری داده ها، تحلیل آماری و نگارش پیش نویس اصلی مقاله.

محمد قربانی: نویسنده مسئول، مفهوم سازی مطالعه، طراحی روش شناسی، نظارت بر کلیه مراحل پژوهش و بازبینی نهایی مقاله.

علیرضا صادقی ماهونک: مشاوره در طراحی آزمایش ها، بازبینی فنی و ویرایش تخصصی مقاله.

سارا ناجی: همکاری در انجام بخش های تخصصی پژوهش (نانوفناوری)، تحلیل داده ها و بازبینی مقاله.

همه نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کرده اند.

۶- منابع

- [1] Teixé-Roig, J., Oms-Oliu, G., Odriozola-Serrano, I., & Martín-Belloso, O. (2023). Emulsion-based delivery systems to enhance the functionality of bioactive compounds: Towards the use of ingredients from natural, sustainable sources. *Foods*, 12(7), 1502.
- [2] Hewlings, S. J., & Kalman, D. S. (2017). Curcumin: A review of its effects on human health. *Foods*, 6(10), 92. <https://doi.org/10.3390/foods6100092>
- [3] JB, V. K., & Madhusudhan, B. (2015). Synthesis, characterization and hemocompatibility evaluation of curcumin encapsulated chitosan nanoparticles for oral delivery. *International Journal*, 3(4), 604–611.
- [4] Prakash, V., Reddy, B. V., & Rao, J. (2022). Curcumin as a natural food additive: Functionality, stability, and delivery strategies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(21), 5964–5982. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1900057>
- [5] Tiwari, S. K., Agarwal, S., Seth, B., Yadav, A., Nair, S., Bhatnagar, P., ... & Gupta, K. C. (2014). Curcumin-loaded nanoparticles potently induce adult neurogenesis and reverse cognitive deficits in Alzheimer's disease model via canonical Wnt/ β -catenin pathway. *ACS Nano*, 8(1), 76–103.

- [6] Alavi, F., Emam-Djomeh, Z., Yarmand, M. S., Salami, M., Momen, S., & Moosavi-Movahedi, A. A. (2018). Cold gelation of curcumin loaded whey protein aggregates mixed with κ -carrageenan: Impact of gel microstructure on the gastrointestinal fate of curcumin. *Food Hydrocolloids*, 85, 267–280.
- [7] Araiza-Calahorra, A., Akhtar, M., & Sarkar, A. (2018). Recent advances in emulsion-based delivery approaches for curcumin: From encapsulation to bioaccessibility. *Trends in Food Science & Technology*, 71, 155–169.
- [8] Martins, S., Sarmento, B., Ferreira, D. C., & Souto, E. B. (2021). Lipid nanoparticles as drug delivery systems: From development to applications. *Current Pharmaceutical Design*, 27(1), 126–140. <https://doi.org/10.2174/1381612826666200812153723>
- [9] Müller, R. H., Radtke, M., & Wissing, S. A. (2002). Solid lipid nanoparticles (SLN) and nanostructured lipid carriers (NLC) in cosmetic and dermatological products. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 54(Suppl. 1), S131–S155. [https://doi.org/10.1016/S0169-409X\(02\)00118-7](https://doi.org/10.1016/S0169-409X(02)00118-7)

- [10] Doktorová, S., & Müller, R. H. (2022). Nanostructured lipid carriers (NLCs): A review of formulation strategies, characterization, and applications in food and pharmaceutical industries. *Trends in Food Science & Technology*, 120, 242–255. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.033>
- [11] Das, S., & Chaudhury, A. (2011). Recent advances in lipid nanoparticle formulations with solid matrix for oral drug delivery. *AAPS PharmSciTech*, 12, 62–76.
- [12] Akanda, M., Mithu, M. S. H., & Douroumis, D. (2023). Solid lipid nanoparticles: An effective lipid-based technology for cancer treatment. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 86, 104709.
- [13] Tang, C. H., Chen, H. L., & Dong, J. R. (2023). Solid lipid nanoparticles (SLNs) and nanostructured lipid carriers (NLCs) as food-grade nanovehicles for hydrophobic nutraceuticals or bioactives. *Applied Sciences*, 13(3), 1726.
- [14] Boyd, B. J., Salim, M., Clulow, A. J., Ramirez, G., Pham, A. C., & Hawley, A. (2018). The impact of digestion is essential to the understanding of milk as a drug delivery system for poorly water soluble drugs. *Journal of Controlled Release*, 292, 13–17.
- [15] Kumari, A., Yadav, S. K., & Yadav, S. C. (2010). Biodegradable polymeric nanoparticles based drug delivery systems. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 75(1), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2009.09.001>
- [16] Muxika, A., Etxabide, A., Uranga, J., Guerrero, P., & de la Caba, K. (2017). Chitosan as a bioactive polymer: Processing, properties and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 105, 1358–1368. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.07.087>
- [17] Kumari, A., Yadav, S. K., & Yadav, S. C. (2010). Chitosan based nanocarriers for drug delivery: An overview. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 10(11), 7125–7137. <https://doi.org/10.1166/jnn.2010.2778>
- [18] Li, Z., Chen, X., Xing, R., & Liu, S. (2016). Antioxidant activity of chitosan and its derivatives: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 92, 1007–1015.
- [19] Akrawi, S. H., Gorain, B., Nair, A. B., Choudhury, H., Pandey, M., Shah, J. N., & Venugopala, K. N. (2020). Development and optimization of naringenin-loaded chitosan-coated nanoemulsion for topical therapy in wound healing. *Pharmaceutics*, 12(9), 893.
- [20] Dawoud, M. (2021). Chitosan coated solid lipid nanoparticles as promising carriers for docetaxel. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 62, 102409.
- [21] Behbahani, E. S., Ghaedi, M., Abbaspour, M., Rostamizadeh, K., & Dashtian, K. (2019). Curcumin loaded nanostructured lipid carriers: In vitro digestion and release studies. *Polyhedron*, 164, 113–122.
- [22] Pirestani, S., Nasirpour, A., Keramat, J., Desobry, S., & Jasniewski, J. (2018). Structural properties of canola protein isolate–gum arabic Maillard conjugate in an aqueous model system. *Food Hydrocolloids*, 79, 228–234.
- [23] Mohammadian, M., Salami, M., Momen, S., Alavi, F., & Emam-Djomeh, Z. (2019). Fabrication of curcumin-loaded whey protein microgels: Structural properties, antioxidant activity, and in vitro release behavior. *LWT*, 103, 94–100.
- [24] Mohammadian, M., Salami, M., Momen, S., Alavi, F., Emam-Djomeh, Z., & Moosavi-Movahedi, A. A. (2019). Enhancing the aqueous solubility of curcumin at acidic condition through the complexation with whey protein nanofibrils. *Food Hydrocolloids*, 87, 902–914.
- [25] Bashiri, S., Ghanbarzadeh, B., Ayaseh, A., Dehghannya, J., & Ehsani, A. (2020). Preparation and characterization of chitosan-coated nanostructured lipid carriers (CH-NLC) containing cinnamon essential oil for enriching milk and anti-oxidant activity. *LWT*, 119, 108836.
- [26] Gómez-Estaca, J., López de Dicastillo, B., & Montero, P. (2014). Curcumin-loaded nanostructured lipid carriers: Optimization, physicochemical properties, and in vitro digestion study. *Food Research International*, 64, 569–576. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.07.033>
- [27] Comunian, T. A., Chaves, I. E., Thomazini, M., Moraes, I. C. F., Ferro-Furtado, R., de Castro, I. A., & Favaro-Trindade, C. S. (2017). Development of functional yogurt containing free and encapsulated echium oil, phytosterol and sinapic acid. *Food Chemistry*, 237, 948–956.
- [28] Taghadosi, M., Bolandi, M., & Baghaei, H. (2024). Encapsulation of curcumin with Persian gum and its application to the production of functional yogurt: Physicochemical, antioxidant, sensory properties, and starter bacteria survival study. *Food Science & Nutrition*, 12(11), 9379–9390.
- [29] Li, Y., Zhang, Q., Wang, L., McClements, D. J., & Decker, E. A. (2020). Encapsulation of curcumin within lipid nanoparticles improves its chemical stability and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 309, 125718.
- [30] Gumireddy, A., Christman, R., Kumari, D., Tiwari, A., North, E. J., & Chauhan, H. (2019). Preparation, characterization, and in vitro evaluation of curcumin-and resveratrol-loaded solid lipid nanoparticles. *AAPS PharmSciTech*, 20, 1–14.
- [31] Al-Ziyadi, R. K. M., Hayati, N., Rezaei, M. R., & Eshaghi, A. (2024). Preparation and characterization of chitosan-coated nanostructured lipid carriers (CS-NLC) containing (6)-gingerol and investigating their toxicity against MCF-7 breast cancer cell line. *BioNanoScience*, 14(1), 153–163.
- [32] Livney, Y. D. (2010). Milk proteins as vehicles for bioactives. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 15(1–2), 73–83.

- [33] Barth, A. (2007). Infrared spectroscopy of proteins. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 1767(9), 1073–1101.
- [34] Esmaili, M., Ghaffari, S. M., Moosavi-Movahedi, Z., Atri, M. S., Sharifzadeh, A., Farhadi, M., ... & Moosavi-Movahedi, A. A. (2011). β -casein-micelle as a nano vehicle for solubility enhancement of curcumin; food industry application. *LWT - Food Science and Technology*, 44(10), 2166–2172.
- [35] Pan, K., Zhong, Q., & Baek, S. J. (2013). Enhanced dispersibility and bioactivity of curcumin by encapsulation in casein nanocapsules. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(25), 6036–6043.
- [36] Chang, Y., Wang, T., Adhikari, B., & Chen, J. (2017). Enhancement of curcumin bioavailability using nanoemulsions: Influence of surfactant type and formulation. *Food Chemistry*, 231, 147–154.
- [37] Huang, X., Huang, X., Gong, Y., Xiao, H., McClements, D. J., & Hu, K. (2016). Enhancement of curcumin water dispersibility and antioxidant activity using core-shell protein-polysaccharide nanoparticles. *Food Research International*, 87, 1–9.
- [38] Hu, Q., Luo, Y., & Sun, Q. (2020). Development of chitosan-coated liposomes for improved delivery of curcumin. *LWT - Food Science and Technology*, 118, 108762.
- [39] Karimi, N., Ghanbarzadeh, B., Hamishehkar, H., Mehramuz, B., & Kafil, H. S. (2018). Antioxidant, antimicrobial and physicochemical properties of turmeric extract-loaded nanostructured lipid carrier (NLC). *Colloid and Interface Science Communications*, 22, 18–24.
- [40] Fonte, P., Nogueira, T., Gehm, C., Ferreira, D., & Sarmiento, B. (2011). Chitosan-coated solid lipid nanoparticles enhance the oral absorption of insulin. *Drug Delivery and Translational Research*, 1, 299–308.
- [41] Ban, C., Jo, M., Park, Y. H., Kim, J. H., Han, J. Y., Lee, K. W., ... & Choi, Y. J. (2020). Enhancing the oral bioavailability of curcumin using solid lipid nanoparticles. *Food Chemistry*, 302, 125328.
- [42] Nair, R. S., Morris, A., Billa, N., & Leong, C. O. (2019). An evaluation of curcumin-encapsulated chitosan nanoparticles for transdermal delivery. *AAPS PharmSciTech*, 20(2), 69.
- [43] Ramalingam, P., & Ko, Y. T. (2015). Enhanced oral delivery of curcumin from N-trimethyl chitosan surface-modified solid lipid nanoparticles: Pharmacokinetic and brain distribution evaluations. *Pharmaceutical Research*, 32, 389–402.
- [44] Akgün, D., Gültekin-Özgüven, M., Yüçetepe, A., Altın, G., Gibis, M., Weiss, J., & Özçelik, B. (2020). Stirred-type yoghurt incorporated with sour cherry extract in chitosan-coated liposomes. *Food Hydrocolloids*, 101, 105532.
- [45] Zedan, H., Hosseini, S. M., & Mohammadi, A. (2021). The effect of tarragon (*Artemisia dracunculus*) essential oil and high molecular weight chitosan on sensory properties and shelf life of yogurt. *LWT*, 147, 111613.
- [46] Almurisi, S. H., Akkawi, M. E., Chatterjee, B., & Sarker, M. Z. I. (2020). Taste masking of paracetamol encapsulated in chitosan-coated alginate beads. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 56, 101520.
- [47] Liu, Y., Shi, L., & Li, J. (2018). Preparation and physicochemical properties of curcumin fortified yogurt. *Hans Journal of Food and Nutrition Science*, 7(4), 311–321.
- [48] López-Expósito, I., & Recio, I. (2006). Angiotensin-converting enzyme inhibitory activity in milk products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46(2), 107–120.
- [49] Hu, Y., He, C., Jiang, C., Liao, Y., Xiong, H., & Zhao, Q. (2020). Complexation with whey protein fibrils and chitosan: A potential vehicle for curcumin with improved aqueous dispersion stability and enhanced antioxidant activity. *Food Hydrocolloids*, 104, 105729.
- [50] Chen, S., Wu, J., Tang, Q., Xu, C., Huang, Y., Huang, D., ... & Wang, S. (2020). Nanomicelles based on hydroxyethyl starch-curcumin conjugates for improved stability, antioxidant and anticancer activity of curcumin. *Carbohydrate Polymers*, 228, 115398.
- [51] Kim, D. H., Cho, W. Y., Yeon, S. J., Choi, S. H., & Lee, C. H. (2019). Effects of lotus (*Nelumbo nucifera*) leaf on quality and antioxidant activity of yogurt during refrigerated storage. *Food Science of Animal Resources*, 39(5), 792–803.



Scientific Research

Improving the Stability and Antioxidant Activity of Curcumin in Stirred Yogurt Using Chitosan-Coated Milk Fat-Based Nanostructured Lipid Carriers

Arash Abaee¹, Mohammad Ghorbani^{2*}, Alireza Sadeghi Mahoonak³, Sara Naji-Tabasi⁴

1- Ph.D. Student in Food Science and Technology, Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Sciences and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2- Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Sciences and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

3- Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Sciences and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

4- Department of Food Nanotechnology, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2025/09/15

Review: 2026/01/26

Accepted: 2026/02/03

Keywords:

Curcumin;

Lipid nanocarriers;

Milk fat;

Chitosan;

Stirred yogurt

DOI: 10.48311/fsct.2026.84096.0

*Corresponding Author E-

Abstract: The incorporation of bioactive compounds such as curcumin into food products is a promising strategy for developing functional foods with health-promoting properties; however, the stability and bioavailability of these compounds remain challenging. In this study, milk fat-based lipid nanocarriers were synthesized for curcumin encapsulation and subsequently coated with chitosan. These nanocarriers exhibited high curcumin-loading capacity, achieving an encapsulation efficiency of 91.83%. Chitosan coating led to an increase in particle size (from 306 nm to 497 nm) and a shift in zeta potential (from -26.96 mV to +6.74 mV). FT-IR analysis confirmed the formation of a stable lipid-curcumin/chitosan/milk protein multilayer structure and indicated that curcumin was incorporated into the lipid matrix in a non-crystalline (amorphous) form. Chitosan coating significantly enhanced the thermal stability of curcumin: after 4 hours at 90 °C, 50.15% of curcumin remained in coated samples, compared to only 5.1% in uncoated ones. Following freeze-drying, the nanocarriers were incorporated into stirred yogurt to enrich its curcumin content. Physicochemical and organoleptic evaluations revealed that, although the lipid nanocarrier formulation enhanced antioxidant activity (as assessed by the DPPH assay), its stability over time was maintained only in the presence of the chitosan coating. Moreover, chitosan coating effectively mitigated the negative sensory impacts of curcumin enrichment on yogurt acceptability.