

## بهبود خواص بافتی و افزایش زنده‌مانی پروبیوتیک‌های ماست توسط میکروکپسول‌های ژلاتین-مالتودکسترین بارگذاری شده با آلفا-توکوفرول

بهنام نامی<sup>۱</sup>، اکرم یدی<sup>۱</sup>، محمد ملاویسی<sup>۱</sup>

- ۱- گروه تحقیق و توسعه، شرکت فرآورده‌های لبنی تین (دامداران)، مشهد، ایران
  - ۲- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
  - ۳- گروه شیمی مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران
- \* نویسنده مسئول (m.molaveisi@rifst.ac.ir)

### چکیده

غنی‌سازی مواد غذایی یکی از مهم‌ترین راهکارها برای جبران کمبود مواد معدنی و ویتامین‌ها در بدن مصرف‌کنندگان است. در این مطالعه درون‌پوشانی آلفا-توکوفرول در ریزذرات ژلاتین و مالتودکسترین با هدف غنی‌سازی ماست کم‌چرب انجام و ویژگی‌های میکروذرات به‌دست‌آمده (مشتمل بر کارایی درون‌پوشانی، پتانسیل زتا، اندازه ذرات، رفتار حرارتی (کالری‌سنجی روبشی تفاضلی) و مورفولوژی (میکروسکوپ الکترونی روبشی) مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج، کارایی درون‌پوشانی و ظرفیت بارگذاری ریزذرات حاوی آلفا-توکوفرول به‌طور قابل‌قبولی بالا بود (به‌ترتیب ۹۷ و ۲۵ درصد). تصاویر میکروسکوپی به‌دست‌آمده از ریزذرات ژلاتین-مالتودکسترین حاوی آلفا-توکوفرول، سطح صاف و کروی و همچنین ترک‌های کوچک در سطح ریزذرات را نشان دادند. علاوه بر این، ریزذرات دارای پتانسیل زتای منفی بالا (۲۷/۲۹- میلی‌ولت) بودند که نشان‌دهنده نیروی دافعه قابل توجه بین میکروذرات و پایداری خوب آنهاست. باتوجه به نتایج، مالتودکسترین به‌عنوان یک درشت‌مولکول پری‌بیوتیک بالقوه زنده‌مانی لاکتوباسیلوس/اسیدوفیلوس را در طول زمان نگهداری افزایش می‌دهد. ریزذرات پروتئین-پلی‌ساکارید مورد مطالعه، برای درون‌پوشانی آلفا-توکوفرول مناسب هستند و به‌طور بالقوه می‌توانند کاربردهای متعددی در صنایع غذایی داشته باشند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۶  
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۲۵  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰  
تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۲/۰۸/۰۸

### واژه‌های کلیدی

آلفا-توکوفرول  
خشک کردن انجمادی  
بررسی مورفولوژیکی  
میکروذرات



### مقدمه

ویتامین E، یک ریزمغذی ضروری و محلول در چربی بوده که سیستم ایمنی بدن را تقویت کرده و از بیماری‌های قلبی جلوگیری می‌نماید. این ترکیب دارای گونه‌های متعددی است که فعالیت دسترس‌زیستیز هر کدام متفاوت می‌باشد. در بین توکوفرول‌ها، آلفا-توکوفرول بیشترین فعالیت زیستی را داراست؛ به‌طوری‌که در محافظت از بافت‌های بدن در برابر پراکسیداسیون لیپیدی کنترل‌نشده نقش مهمی را ایفا

می‌کند (Chung et al., 2016). حلالیت کم در آب و حساسیت به اکسیداسیون و دماهای بالا، مشکل اصلی استفاده از آلفا-توکوفرول در غنی‌سازی و فرمولاسیون مواد غذایی است که منجر به کاهش زیست‌دسترسی آن می‌گردد، درون‌پوشانی آلفا-توکوفرول در یک سامانه کلوتیدی یک ابزار و روش مناسب برای حل این محدودیت می‌باشد (Basiri, Ladan et al., 2017; Basiri, L. et al., 2017; Schröder et al., 2020).

مقاوم در روده کوچک غیرقابل هضم است اما در روده بزرگ قابل تخمیر است که می‌تواند گزینه مناسبی برای استفاده به‌عنوان یک پری‌بیوتیک باشد (Arilla *et al.*, 2020). مالتودکسترین به‌طور مؤثر برای محصورکردن ترکیبات زیست‌فعال مختلف مانند عصاره زعفران (Kyriakoudi & Tsimidou, 2018)، آهن (Churio & Valenzuela, 2018)، رنگدانه‌های میوه انجیر هندی (Gandía-Herrero *et al.*, 2010) و پلی‌فنول‌های آب‌انگور تخمیرشده (Sanchez *et al.*, 2013) استفاده شده است. مالتودکسترین‌ها براساس معادل دکستروز عرضه می‌شوند که مبین میزان هیدرولیز نشاسته است (Madene *et al.*, 2006). استفاده از ماتریکس آب‌دوست مالتودکسترین به تنهایی ممکن است منجر به رهايش سريع تركيب زیست‌فعال ریزپوشانی شده گردد (Francisco *et al.*, 2018). از این‌رو، باید با پلیمر دیگری ترکیب شود تا دیواره‌ای محکم برای ریزپوشانی تشکیل شود. در این میان، ویژگی‌های ذاتی ژلاتین از جمله سازگاری زیستی با دستگاه گوارش، سینتیک تخریب مطلوب، رهايش قابل کنترل، ظرفیت تورم، مقاومت حرارتی و توانایی اتصال متقابل، آن را به یک حامل مناسب برای ترکیبات زیست‌فعال تبدیل کرده است. ژلاتین همچنین بافت ماست را بهبود می‌دهد و منجر به تولید یک محصول سفت‌تر با آب‌اندازی کمتر می‌شود. این تأثیر به تعامل بین ماتریس کازئین ماست و ژلاتین نسبت داده شده است که منجر به ایجاد یک شبکه سه‌بعدی قوی‌تر می‌شود (ARES *et al.*, 2007). بسیاری از محققان ژلاتین را در ماست گنجانده‌اند و به شبکه سه‌بعدی قوی‌تر، آب‌اندازی کمتر، ویسکوزیته بالاتر و ظرفیت نگهداری آب و همچنین پارامترهای رئولوژیکی بهتر دست‌یافته‌اند (Macit & Bakirci, 2017). بنابراین، درون‌پوشانی آلفا-توکوفرول در ژلاتین ظرفیت مناسبی برای غنی‌سازی محصولات صنعتی ایجاد می‌کند.

اگرچه تلاش‌های زیادی برای درون‌پوشانی آلفا-توکوفرول با استفاده از پلیمرهای مختلف انجام شده است اما تاکنون میکروذرات ژلاتین-مالتودکسترین برای درون‌پوشانی آلفا-توکوفرول استفاده نشده‌اند. بنابراین، هدف اصلی این مطالعه، درون‌پوشانی آلفا-توکوفرول در ریزذرات ژلاتین-مالتودکسترین و محافظت از آن در برابر تخریب در دمای بالا هنگام استفاده در ماست می‌باشد.

در سال‌های اخیر، مطالعه‌های زیادی با هدف محافظت از آلفا-توکوفرول در برابر عوامل محیطی نامطلوب نظیر دمای بالا، pH پایین، نور و غیره در طول فرایند غذا انجام شده است (Santos *et al.*, 2021). ریزپوشانی در سیستم‌های حامل مناسب، عملکرد آلفا-توکوفرول را حفظ کرده و آن را در طول فراوری و ذخیره‌سازی بدون تغییر نگه می‌دارد (Mitbumrung *et al.*, 2019). علاوه بر این، استفاده از روش درون‌پوشانی، زیست‌دسترسی آلفا-توکوفرول را به حداکثر می‌رساند و با مکانیسم کنترل رهايش آن در دستگاه گوارش عوارض جانبی هیپرویتامینوز<sup>۱</sup> احتمالی را به حداقل می‌رساند. اگرچه درون‌پوشانی آلفا-توکوفرول در محصولات غذایی از مدت‌ها پیش آغاز شده است، بسیاری از اشکالات و شکاف‌ها هنوز باقی‌مانده است. به‌عنوان مثال، مواد تشکیل‌دهنده دیواره در سامانه‌های رسانش در صنایع غذایی باید خوراکی بوده و سازگار با دیگر اجزای مواد غذایی باشند (Xiang *et al.*, 2020). بسیاری از محققین تاکنون ریزپوشانی آلفا-توکوفرول در پلیمرهای زیستی را مطالعه کرده‌اند و سعی در حل مشکلات ذکر شده داشتند. به‌عنوان مثال، کیتوزان و مشتقات محلول در آب آن، کربوکسی‌متیل کیتوزان، زئین و پروتئین سویا برای درون‌پوشانی آلفا-توکوفرول استفاده شده‌اند (Chung *et al.*, 2016; Rabelo *et al.*, 2018; Xiang *et al.*, 2020). باین‌حال، کیتوزان نه تنها در آب با pH خنثی نامحلول است، بلکه در ایالات متحده آمریکا به‌عنوان یک افزودنی غذایی ناامن شناخته شده است. علاوه بر این، پروتئین‌ها در دمای بالا دناتوره می‌شوند و خصوصیات آنها تغییر می‌کند. در تحقیق دیگری، صمغ عربی به‌عنوان حامل برای بارگذاری آلفا-توکوفرول انتخاب شده است (Jafari *et al.*, 2019). باین‌وجود، اساسی‌ترین موضوعی که کاربرد صمغ‌ها را در سیستم‌های درون‌پوشانی محدود می‌کند، دسترسی کم و گران‌قیمت بودن آنهاست (Ribeiro & Veloso, 2021).

باین‌حال، در بین مواد مختلف مورد استفاده به‌عنوان دیواره، مالتودکسترین به‌دلیل اثربخشی، هزینه کم، مقاومت حرارتی و فیزیکی، طعم و عطر خنثی و حلالیت در آب می‌تواند یک گزینه مناسب باشد (da Silva *et al.*, 2019). مالتودکسترین یک فیبر قابل تخمیر نامحلول است که می‌تواند به‌عنوان پری‌بیوتیک عمل کند. مالتودکسترین

<sup>1</sup> Hypervitaminosis

اسپکتروفتومتری اندازه‌گیری شد. به‌طور خلاصه، میکروکپسول‌ها در ۱۵ میلی‌لیتر هگزان (۲۵ درجه سانتی‌گراد) پراکنده شدند، به مدت ۲ دقیقه هم‌زده‌شده و سپس با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند تا آلفا-توکوفرول غیرکپسوله‌شده جدا شود. مایع رویی تحت یک اسپکتروفتومتر UV/Visible (مدل CA, Fullerton, Beckman Coulter Inc. ساخت آمریکا) قرار گرفت و سپس میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۲۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. درون‌پوشانی ( $EE^3$ ) و ظرفیت بارگذاری ( $LC^4$ ) براساس رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه شدند:

رابطه (۱)

$$EE (\%) = (VE_T - VE_F) / VE_T \times 100$$

رابطه (۲)

$$LC (\%) = (VE_T - VE_F) / W_T \times 100$$

در رابطه (۱) و (۲)،  $VE_T$  غلظت کل آلفا-توکوفرول،  $VE_F$  غلظت آلفا-توکوفرول غیرمحصور و  $W_T$  وزن کل میکروذرات است.

#### پتانسیل زتا، اندازه ذرات و شاخص پراکندگی ( $PDI^5$ )

زتا پتانسیل، اندازه ذرات و  $PDI$  میکروکپسول‌ها با استفاده از یک تحلیل‌گر اندازه ذرات لیزری نوع (Malvern) Nano-ZS ساخت انگلستان) در دمای اتاق با ضریب شکست ۱/۴۵۰ اندازه‌گیری شد (Fang et al., 2019).

#### کالری‌سنجی روبشی تفاضلی

آنالیز کالری‌سنجی روبشی تفاضلی توسط دستگاه Q2000 (TA Instruments, New Castle, D, ساخت انگلستان) انجام شد. به‌طور خلاصه، ۲ میلی‌گرم از میکروکپسول تهیه‌شده در یک ظرف آلومینیومی توزین شد. سپس درب ظرف بسته شد و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. تا دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد (با سرعت ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه) تحت یک اتمسفر آرگون (۲۰ میلی‌لیتر در دقیقه) قرار داده شد (Lamsen et al., 2020).

#### میکروسکوپ الکترونی روبشی

میکروذرات حاوی آلفا-توکوفرول توسط یک میکروسکوپ الکترونی روبشی (Hitachi SU-70, Pleasanton CA, ساخت

علاوه بر این، خواص بافتی ماست در حضور مالتودکسترین و ژلاتین و همچنین اثر پری‌بیوتیکی مالتودکسترین بر بقای پروبیوتیک‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

#### مواد و روش‌ها

##### مواد

شیر خام از شرکت لبنیات دامداران (تهران، ساخت ایران) تهیه شد. کشت استارتر منجمد حاوی سویه‌های *استرپتوکوکوس ترموفیلوس*<sup>۱</sup> و *لاکتوباسیلوس بولگاریکوس*<sup>۲</sup> از شرکت دنیسکو (ساخت آلمان) خریداری شد. مالتودکسترین (معادل دکستروز ۱۰) و ژلاتین (بلوم ۲۲۰-۲۰۰) به ترتیب از شرکت کربوسنت (برکشایر، ساخت انگلستان) و مواد غذایی دیویس (ساخت نیوزیلند) خریداری شد. آلفا-توکوفرول خالص (خلوص  $\leq 99\%$ ) و همچنین سایر مواد شیمیایی، حلال‌ها و معرف‌های مورد استفاده در این تحقیق، از شرکت سیگما-آلدریج (ساخت، آلمان) خریداری شدند.

##### تهیه میکروذرات

میکروذرات براساس روش Jannasari و همکاران (۲۰۱۹) تهیه شدند. ابتدا مواد دیواره متشکل از سطوح مختلف ژلاتین و مالتودکسترین در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد با نسبت ۱:۱۰ به آب تحت شرایط هم‌زدن اضافه گردید تا محلولی یکنواخت به دست‌آید (جدول ۱). سپس آلفا-توکوفرول (۱۰۰۰۰ یکای بین‌المللی بر گرم) با محلول آبی ذکرشده در نسبت هسته به دیواره ۱:۱۰۰ مخلوط و در ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه هم‌گن شد. در نهایت محلول به دست‌آمده در دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد به روش انجمادی خشک و میکروکپسول‌های به دست‌آمده قبل از انجام آزمون‌ها در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

#### کارایی درون‌پوشانی و ظرفیت بارگذاری

کارایی درون‌پوشانی و ظرفیت بارگذاری براساس روش توصیف‌شده توسط Jannasari و همکاران (۲۰۱۹) اندازه‌گیری شد. برای تعیین کارایی درون‌پوشانی و ظرفیت بارگذاری، مقدار آلفا-توکوفرول کپسوله‌نشده به روش

<sup>4</sup> Loading capacity

<sup>5</sup> Polydispersity index

<sup>1</sup> *Streptococcus thermophilus*

<sup>2</sup> *Lactobacillus bulgaricus*

<sup>3</sup> Encapsulation efficiency

### ارزیابی حسی

دو جلسه آموزشی ۳ ساعته برای ۱۰ نفر ارزیاب (۵ نفر خانم و ۵ آقا در رده سنی ۳۵-۲۵ سال) برگزار شد و سپس این افراد خصوصیات حسی نمونه‌های ماست را مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌ها بلافاصله پس از تولید و در تاریخ انقضا (۲۸ روز پس از تولید) در اختیار ارزیابان قرار گرفت. پارامترهای ظاهر، عطر و طعم، بافت و مقبولیت کلی نمونه‌ها با استفاده از مقیاس‌های ۱ (اصلاً دوست‌نداشتن) تا ۹ (بسیار دوست‌داشتنی) ثبت شد.

### آنالیزهای آماری

تمام آزمایش‌ها در سه تکرار انجام و نتایج با استفاده از خطای آزمون‌های چنددامنه‌ای دانکن ارزیابی و به‌عنوان مقادیر میانگین  $\pm$  انحراف معیار گزارش شد. ارزیابی داده‌های تجربی با استفاده از تحلیل واریانس ( $P < 0.05$ ) از طریق نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۱۳ انجام شد.

### نتایج و بحث

#### کارایی درون‌پوشانی (EE) و ظرفیت بارگذاری (LC)

ترکیب میکروذرات اثر معنی‌داری بر کارایی درون‌پوشانی و ظرفیت بارگذاری دارد و ویژگی‌های رهش آنها را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Park et al., 2017). کارایی درون‌پوشانی و ظرفیت بارگذاری فرمولاسیون‌های حاوی آلفا-توکوفرول ریزپوشانی‌شده با نسبت‌های مختلف ژلاتین و مالتودکسترین در جدول (۱) نشان داده شده است. بالاترین کارایی درون‌پوشانی (۹۷/۲۸ درصد) برای نمونه F6 با نسبت ۴۰:۶۰ از ژلاتین به مالتودکسترین به‌دست‌آمد. همچنین یافته‌ها نشان دادند که نسبت ۴۰:۶۰ ژلاتین به مالتودکسترین به‌خوبی آلفا-توکوفرول را محصور می‌نماید و این ترکیب زیست‌فعال توسط ماتریکس پلیمری مورد اشاره به‌خوبی محافظت می‌شود. علاوه بر این، استفاده از ژلاتین به تنهایی برای کپسوله کردن آلفا-توکوفرول منجر به کمترین مقدار کارایی درون‌پوشانی (۶۷/۷۲ درصد) گردید. به‌عبارتی استفاده از ژلاتین به تنهایی به‌منظور به‌دام‌اندازی آلفا-توکوفرول ناکارآمد بود. نتایج نشان داد که مقدار کارایی درون‌پوشانی تحت‌تأثیر نوع و مقدار مواد دیواره قرار دارد ( $P < 0.05$ ).

آمریکا) با بزرگنمایی KX ۵ و ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۰ کیلوولت اسکن شدند (Churio & Valenzuela, 2018).

### تولید ماست

شیر استاندارد (۱/۵ درصد چربی) با آلفا-توکوفرول درون‌پوشانی‌شده با غلظت نهایی ۴۰۰ واحد یکای بین‌المللی بر ۱۰۰ میلی‌لیتر، غنی شد. ۰/۵ درصد از مواد دیواره (ژلاتین و مالتودکسترین) حاوی این غلظت از آلفا-توکوفرول درون‌پوشانی‌شده می‌باشد. در این مرحله، شیر در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه حرارت داده شد، سپس تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد شد و با ۰/۰۲ درصد (وزنی/وزنی) استارتر YoMix 621 (مخلوطی از لاکتوباسیلوس دلبروکی<sup>۱</sup> زیر گونه بولگاریکوس و استرپتوکوکوس ترموفیلوس) و همچنین ۰/۰۲ درصد (وزنی/وزنی) LAC 4 به‌عنوان کشت پروبیوتیک (لاکتوباسیلوس/اسیدوفیلوس<sup>۲</sup>) تلقیح گردید و تا رسیدن به pH=۴/۸ گرم‌خانه‌گذاری و سپس در دمای ۶ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد (Krzeminski et al., 2011). نمونه شاهد فاقد میکروذرات بود.

### آب‌اندازی

اندازه‌گیری شاخص سینرسیس (آب‌اندازی) با استفاده از روش توصیف‌شده توسط ARES و همکاران (۲۰۰۷) ارزیابی شد. برای تعیین آب‌اندازی میزان ۵۰ گرم ماست در کاغذ صافی روی قیف قرار داده شد و پس از ۲ ساعت قرارگرفتن در دمای یخچال میزان آب خارج‌شده توزین و درصد آب‌اندازی محاسبه گردید.

### زنده‌مانی سلول‌های لاکتوباسیلوس/اسیدوفیلوس

سلول‌های زنده لاکتوباسیلوس/اسیدوفیلوس به‌صورت انتخابی با استفاده از محیط کشت ام‌آراس-بیل آگار<sup>۳</sup> در روز ۲۱ شمارش شدند. بدین‌منظور، ۱ گرم ماست در ۹ میلی‌لیتر آب پپتون ۰/۱۵ درصد پخش و به مدت ۱ دقیقه هم‌زده شد. سپس رقت‌های سریال مناسب با استفاده از پپتون استریل برای تعیین جمعیت سلولی تهیه گردید. پس از آن، ۱ میلی‌لیتر از رقت تهیه‌شده به پلیت حاوی ام‌آراس-بیل آگار منتقل و به مدت ۳ روز به‌صورت هوازی در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد انکوبه شد (Shakerian et al., 2014).

<sup>3</sup> MRS-bile agar

<sup>1</sup> *Lactobacillus delbrueckii*

<sup>2</sup> *Lactobacillus acidophilus*

جدول ۱- کارایی درون پوشانی و ظرفیت بارگذاری فرمولاسیون‌های مختلف از میکروذرات ژلاتین-مالتودکسترین حاوی آلفا-توکوفرول

فرمولاسیون	ژلاتین (درصد وزنی/وزنی)	مالتودکسترین (درصد وزنی/وزنی)	آلفا-توکوفرول (واحد یکای بین‌المللی بر ۱۰۰ میلی‌لیتر)	کارایی درون پوشانی (درصد)	ظرفیت بارگذاری (درصد)
F1	۰	۰	۴۰۰	-	-
F2	۱۰۰	۰	۴۰۰	۶۶/۱۲ ± ۱/۱۲ <sup>g</sup>	۹/۸۰ ± ۰/۰۱ <sup>f</sup>
F3	۸۰	۲۰	۴۰۰	۷۲/۴۰ ± ۱/۲۲ <sup>f</sup>	۱۳/۴۲ ± ۰/۰۳ <sup>e</sup>
F4	۶۰	۴۰	۴۰۰	۸۶/۳۷ ± ۱/۹۳ <sup>d</sup>	۱۵/۴۰ ± ۰/۰۶ <sup>d</sup>
F5	۵۰	۵۰	۴۰۰	۹۱/۶۷ ± ۲/۰۴ <sup>c</sup>	۱۷/۱۵ ± ۰/۰۸ <sup>c</sup>
F6	۴۰	۶۰	۴۰۰	۹۷/۲۸ ± ۲/۸۸ <sup>a</sup>	۲۵/۲۴ ± ۰/۱۳ <sup>a</sup>
F7	۲۰	۸۰	۴۰۰	۹۴/۵۰ ± ۲/۳۱ <sup>b</sup>	۲۱/۴۳ ± ۰/۱۱ <sup>b</sup>
F8	۰	۱۰۰	۴۰۰	۸۱/۳۲ ± ۱/۷۵ <sup>e</sup>	۱۴/۶۱ ± ۰/۰۷ <sup>e</sup>

نتایج میانگین سه تکرار ± انحراف استاندارد می‌باشد. حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنی‌داری آماری می‌باشد ( $P < 0.05$ ).

Khan و همکاران (۲۰۲۰) به منظور درون پوشانی آلفا-توکوفرول در ایزوله پروتئین آب‌پنیر و ایزوله پروتئین سویا (۰/۰۶ ± ۱/۲۱ تا ۰/۰۵ ± ۲/۷۵ میکرومتر) قابل مقایسه بود. اندازه میکروذرات عامل تعیین‌کننده‌ای در قابلیت کاربرد آنها در مواد غذایی است و ذرات کوچک‌تر به دلیل توزیع یکنواخت در ماتریس غذایی مطلوب‌تر هستند (Dadkhodazade et al., 2018). علاوه بر این، PDI تأثیر قابل توجهی بر پایداری فیزیکی میکروکپسول‌ها دارد و بهتر است تا حد امکان پایین باشد (Tamjidi et al., 2013). مقادیر PDI بین ۰/۱ تا ۰/۲۵ نشان‌دهنده توزیع اندازه نسبتاً باریک و مقدار بیشتر از ۰/۵ توزیع گسترده را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده در این مطالعه  $PDI = 0.22$  را نشان داد که نشان‌دهنده توزیع اندازه باریک ذرات است. پتانسیل زتا بر سینتیک رهایش و زیست‌دسترسی ریزذرات تأثیر می‌گذارد. این عامل به عنوان یک شاخص مهم و مفید برای ثبات فیزیکی سامانه‌های کلئیدی در نظر گرفته می‌شود. همچنین، نیروی الکترواستاتیک دافعه بین ذرات و بار الکتریکی موجود در سطح ذره را توصیف می‌کند. اگر مقادیر پتانسیل الکتریکی پراکندگی‌های کلئیدی مساوی یا بزرگ‌تر از ۲۵ میلی‌ولت باشد، سامانه پایدار در نظر گرفته می‌شود. ریزذرات به دست آمده (F6) دارای بارهای سطحی منفی قوی (۲۷/۲۹ میلی‌ولت) بودند که نشان می‌دهد که میکروذرات از نظر الکترواستاتیکی پایدار بودند و از نزدیک شدن به یکدیگر برای تجمع و متعاقباً افزایش اندازه نامطلوب جلوگیری می‌کردند.

#### کالری‌سنجی روبشی تفاضلی (DSC<sup>1</sup>)

کاربرد کالری‌سنجی روبشی تفاضلی در سیستم‌های بارگذاری، نظارت بر تغییرات رفتار حرارتی و انتقال فاز

مقادیر ظرفیت بارگذاری بین ۹/۸۴ و ۲۵/۲۴ درصد متغیر بود که نشان‌دهنده مقدار آلفا-توکوفرول بارگذاری شده در یک مقدار معین از میکروذرات است. ظرفیت بارگذاری به شدت به غلظت ترکیبات فعال زیستی مورد استفاده در فرایند کپسولاسیون بستگی داشت. در مطالعه حاضر، ویژگی‌های ریزپوشانی بهتر از موارد گزارش شده برای نانوذرات ژئین با کربوکسی‌متیل کیتوزان (با کارایی درون پوشانی برابر ۸۷/۹ درصد و ظرفیت بارگذاری برابر ۲/۱ درصد) بود (Luo et al., 2012) و مشابه (کارایی درون پوشانی برابر با ۹۶/۹۵ درصد) با آلفا-توکوفرول محصور شده در نانومولسیون‌های روغن ماهی بود (Walia et al., 2017). براساس نتایج به دست آمده برای کارایی درون پوشانی و ظرفیت بارگذاری، F6 (با نسبت ۴۰:۶۰ ژلاتین به مالتودکسترین) برای بررسی‌های بعدی انتخاب شد. برای این ترکیب آزمون‌های کارایی ریزپوشانی، ظرفیت بارگذاری، رفتار حرارتی و مورفولوژی میکروذره بررسی شد و سپس ادغام آن در مدل غذایی مورد مطالعه قرار گرفت.

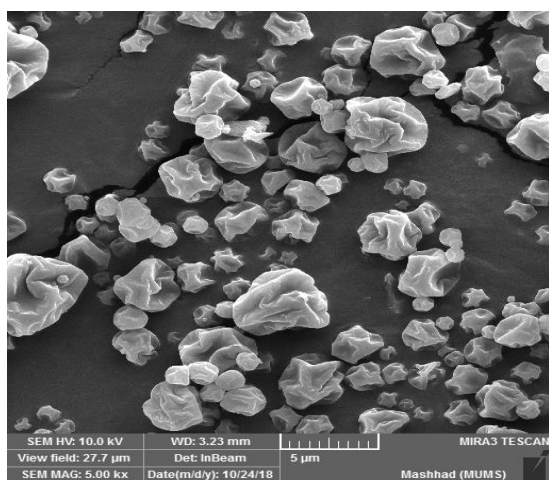
#### پتانسیل زتا، اندازه ذرات و شاخص پراکندگی چندگانه (PDI)

به طور کلی، اندازه ذرات، پتانسیل زتا و PDI، ماهیت میکروکپسول‌ها را تعیین می‌کنند و پایداری فیزیکوشیمیایی، حلالیت، دسترسی زیستی و سرعت رهایش آنها را نشان می‌دهند (Tamjidi et al., 2013). عوامل متعددی نظیر شرایط تولید و نسبت مواد تشکیل‌دهنده بر اندازه و شاخص توزیع ذرات مؤثر هستند (Lekshmi et al., 2021). نتایج نشان داد که ریزذرات F6 دارای میانگین اندازه ذرات ۰/۱۱ ± ۲/۲ میکرومتر بودند که با اندازه ذرات به دست آمده توسط

<sup>1</sup> Differential scanning calorimetry

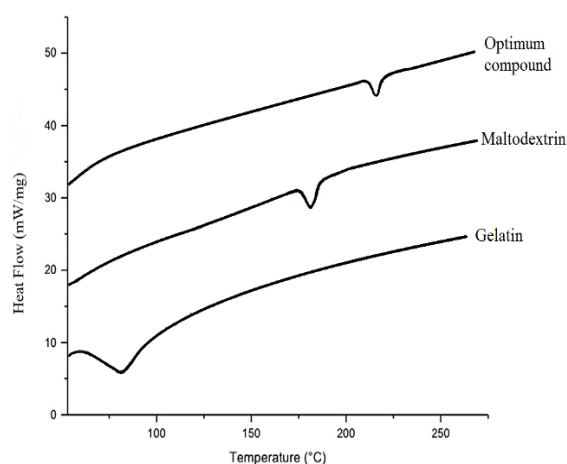


حامل‌ها می‌باشد (Talebi *et al.*, 2021). ترموگرام‌های کالری‌سنجی روبشی تفاضلی ژلاتین، مالتودکسترین و ترکیب بهینه بارگذاری شده با آلفا-توکوفرول (ریزکپسول ژلاتین-مالتودکسترین) در شکل (۱) نشان داده شده است. تجزیه و تحلیل ترموگرام‌ها همچنین نشان داد که ترکیب فرمولاسیون بهینه میکروذرات مالتودکسترین-ژلاتین دارای نقطه ذوب بالاتر (حدود ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد) نسبت به ژلاتین یا مالتودکسترین به تنهایی می‌باشد. این دما به طور قابل توجهی بالاتر از دمای ذوب (۱۳۰ درجه سانتی‌گراد) آلفا-توکوفرول میکروکپسوله شده در صمغ کربوکسی‌متیل تارا-لاکتوفرین است (Santos *et al.*, 2021). نقطه ذوب بالاتر به دست آمده در این مطالعه نشان‌دهنده ساختار سفت و سخت میکروذرات ژلاتین-مالتودکسترین می‌باشد که پایداری و محافظت بالایی را برای آلفا-توکوفرول ایجاد می‌کند. براساس نتایج به دست آمده، میکروذرات ژلاتین-مالتودکسترین پایداری خوبی داشته و محافظت قابل توجهی از ترکیبات زیست‌فعال در مواد غذایی که تحت عملیات حرارتی سخت قرار می‌گیرند، ارائه می‌کنند (Castro-Muñoz *et al.*, 2015).



شکل ۲- تصویر SEM میکروذرات متشکل از ژلاتین و مالتودکسترین (۴۰:۶۰) به عنوان حامل و آلفا-توکوفرول به عنوان ماده هسته

با جمع‌بندی نتایج به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مخلوط ژلاتین-مالتودکسترین به عنوان یک عامل کپسول‌کننده، ساختار ذره‌ای سفت و سخت و بدون گسیختگی ایجاد می‌کند. شکل میکروسکوپ الکترونی روبشی همچنین نشان می‌دهد که ریزذرات بیشتر منفرد و بدون کلوخه شدن بودند، که پایداری مطلوب ریزذرات را نشان می‌دهد. Khan و همکاران (۲۰۲۰) گزارش دادند که استفاده از پروتئین آب‌پنیر برای درون‌پوشانی ویتامین D<sub>3</sub>، کپسول‌های چروکیده با اشکال نامنظم را تشکیل می‌دهد که با نتایج این تحقیق مبنی بر کرویت ذرات ژلاتین-مالتودکسترین حاوی آلفا-توکوفرول در تضاد است و نشان می‌دهد که باید از مواد دیواره مناسب برای دستیابی به ریزپوشانی مؤثر استفاده شود.



شکل ۱- ترموگرام کالری‌متری روبشی تفاضلی ژلاتین، مالتودکسترین و ترکیب بهینه با نسبت ژلاتین به مالتودکسترین ۴۰:۶۰ به عنوان حامل و آلفا-توکوفرول به عنوان ماده هسته

#### میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

میکروسکوپ الکترونی روبشی اطلاعات دقیقی در مورد اندازه، توزیع اندازه، تجمع ذرات و شکل ذرات ارائه می‌دهد

<sup>1</sup> Scanning electron microscope

جدول ۲- اسیدیته، pH، آب‌اندازی و زنده‌مانی باکتری‌های لاکتوباسیلوس/اسیدوفیلوس در ماست غنی‌شده با آلفا-توکوفرول درون‌پوشانی‌شده و نمونه شاهد

ویژگی‌های ماست	نمونه	روز		
		۱	۱۴	۲۸
اسیدیته (اسید لاکتیک، درصد)	شاهد	۰/۸۴ ± ۰/۰۴ <sup>c</sup>	۰/۸۷ ± ۰/۰۵ <sup>b</sup>	۰/۹۳ ± ۰/۰۶ <sup>a</sup>
	منتخب	۰/۸۳ ± ۰/۰۴ <sup>a</sup>	۰/۸۶ ± ۰/۰۴ <sup>a</sup>	۰/۸۸ ± ۰/۰۵ <sup>a</sup>
pH	شاهد	۴/۶۸ ± ۰/۲۵ <sup>a</sup>	۴/۵۳ ± ۰/۲۱ <sup>b</sup>	۴/۴۱ ± ۰/۰۰ <sup>c</sup>
	منتخب	۴/۵۰ ± ۰/۲۳ <sup>a</sup>	۴/۴۹ ± ۰/۲۳ <sup>a</sup>	۴/۴۸ ± ۰/۲۱ <sup>a</sup>
سینرزیست (گرم بر ۱۰۰ گرم ماست)	شاهد	۷/۷۸ ± ۰/۹۳ <sup>c</sup>	۴/۰۲ ± ۱/۱۷ <sup>b</sup>	۴/۱۸ ± ۱/۳۲ <sup>a</sup>
	منتخب	۵/۳۹ ± ۰/۵۷ <sup>a</sup>	۳/۳۱ ± ۰/۶۱ <sup>a</sup>	۳/۲۷ ± ۰/۶۶ <sup>a</sup>
زنده‌مانی لاکتوباسیلوس/اسیدوفیلوس (واحد تشکیل‌دهنده کلنی بر میلی‌لیتر)	شاهد	۳/۵۵ × ۱۰ <sup>۹a</sup>	۲/۸۷ × ۱۰ <sup>۷b</sup>	۳/۱۳ × ۱۰ <sup>۵c</sup>
	منتخب	۳/۵۸ × ۱۰ <sup>۹a</sup>	۳/۲۴ × ۱۰ <sup>۸b</sup>	۲/۹۵ × ۱۰ <sup>۷c</sup>

نتایج میانگین سه تکرار ± انحراف استاندارد می‌باشد. حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنی‌داری آماری می‌باشد ( $P < 0/05$ ).

### ویژگی‌های ماست

#### pH، اسیدیته و آب‌اندازی

از نظر میزان اسیدیته قابل تیتراسیون در روز ۲۸ نگهداری بین نمونه‌های شاهد و نمونه منتخب تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۲). باین حال، کاهش جزئی در pH نمونه‌های ماست در طول کل دوره نگهداری مشاهده شد که به دلیل تولید اسید توسط باکتری‌های اسید لاکتیک طی زمان نگهداری بود. آب‌اندازی فرایندی است که در آن جداسازی آب‌پنیر در ژل‌های ماست رخ می‌دهد. جدول (۲) داده‌های آب‌اندازی را برای نمونه شاهد و نمونه منتخب طی ۲۸ روز نگهداری نشان می‌دهد. در روز اول نگهداری، نمونه حاوی میکروذرات حامل توکوفرول آب‌اندازی کمتری (۵/۳۹) نسبت به نمونه شاهد (۷/۷۸) نشان داد، که با یافته‌های KEOGH و O'KENNEDY (۱۹۹۸) که از پروتئین و هیدروکلونیدها در تولید ماست استفاده نموده بودند، مطابقت داشت و نشان داد که مواد تشکیل‌دهنده دیواره ذرات به میزان قابل‌توجهی جداسازی آب‌پنیر را کاهش داده‌اند. Sahan و همکاران (۲۰۰۸) گزارش دادند که اضافه‌نمودن بتا-گلوکان به ماست هیچ تغییر قابل‌توجهی در ترکیب ماست نداشت که با نتایج این تحقیق ناسازگار بود. این تضاد را می‌توان با این واقعیت توضیح داد که ژلاتین و مالتودکسترین می‌توانند پایداری ماست را در برابر تنش‌های مکانیکی افزایش دهند. مالتودکسترین حاوی مخلوطی از آمیلوز و آمیلوپکتین است که برای افزایش تشکیل ژل در ماست مناسب هستند (Raju & Pal, 2011). علاوه بر این، ژلاتین تشبیت فاز آبی در شبکه ماست را تقویت می‌کند و ساختار شبکه ژل را با میسل‌های کازئین تحریک می‌کند که متعاقباً حساسیت به آب‌اندازی را کاهش می‌دهد (Mudgil et al., 2018). اگرچه آب‌اندازی

نمونه شاهد و نمونه منتخب در طول زمان نگهداری کاهش یافت ( $P < 0/05$ )، باین حال، نرخ کاهش آب‌اندازی در ماست غنی‌شده با ریزکپسول‌های ژلاتین-مالتودکسترین کُندتر از نمونه شاهد بود.

#### زنده‌مانی لاکتوباسیلوس/اسیدوفیلوس

در مطالعه حاضر، زنده‌مانی لاکتوباسیلوس/اسیدوفیلوس در ماست شاهد و حاوی ژلاتین-مالتودکسترین طی ۲۸ روز نگهداری بررسی شد (جدول ۲). همان‌طور که انتظار می‌رفت، مالتودکسترین به‌عنوان یک ماکرومولکول پری‌بیوتیک بالقوه زنده‌مانی لاکتوباسیلوس/اسیدوفیلوس را در طول زمان نگهداری افزایش می‌دهد. در نمونه شاهد، تعداد لاکتوباسیلوس/اسیدوفیلوس در روز ۲۸،  $3/13 \times 10^5$  واحد تشکیل‌دهنده کلنی بر میلی‌لیتر و نمونه منتخب  $2/95 \times 10^7$  واحد تشکیل‌دهنده کلنی بر میلی‌لیتر بود. نتایج تحقیق حاضر با گزارش Gunenc و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد که نشان می‌دهد با افزودن مالتودکسترین، بقای لاکتوباسیلوس/اسیدوفیلوس و بیفیدوباکتریوم لاکتیس به دلیل اثرات احتمالی پری‌بیوتیک مالتودکسترین بهبود یافته است.

#### ارزیابی حسی

نتایج ارزیابی حسی دو نمونه ماست شاهد و ماست غنی‌شده با میکروذرات مالتودکسترین-ژلاتین حاوی آلفا-توکوفرول در جدول (۳) نشان داده شده‌اند. امتیاز بافت و پذیرش کلی ماست حاوی میکروذرات به‌طور معنی‌داری بالاتر از شاهد بود ولی سایر پارامترها نسبت به شاهد تغییر معنی‌داری نداشتند ( $P < 0/05$ ).

جدول ۳- ارزیابی حسی ماست غنی شده با آلفا-توکوفرول درون پوشانی شده و نمونه شاهد

پارامتر	نمونه ماست	روز	
		۱	۱۴
رنگ	شاهد	۹/۲۸ ± ۱/۳۳ <sup>a</sup>	۸/۸۷ ± ۱/۲۵ <sup>b</sup>
	منتخب	۹/۲۷ ± ۱/۳۳ <sup>a</sup>	۸/۹۶ ± ۱/۲۷ <sup>b</sup>
	شاهد	۹/۶۱ ± ۱/۰۸ <sup>a</sup>	۸/۲۹ ± ۱/۰۱ <sup>b</sup>
بافت	منتخب	۹/۶۲ ± ۱/۰۸ <sup>a</sup>	۹/۳۷ ± ۱/۰۵ <sup>b</sup>
	شاهد	۹/۳۴ ± ۱/۲۸ <sup>a</sup>	۹/۰۲ ± ۱/۱۹ <sup>b</sup>
	منتخب	۹/۳۶ ± ۱/۲۹ <sup>a</sup>	۹/۱۰ ± ۱/۲۰ <sup>b</sup>
بو	شاهد	۹/۵۵ ± ۱/۳۳ <sup>a</sup>	۸/۷۹ ± ۱/۲۱ <sup>b</sup>
	منتخب	۹/۵۶ ± ۱/۳۴ <sup>a</sup>	۹/۰۴ ± ۱/۲۴ <sup>b</sup>
	شاهد	۹/۴۴ ± ۱/۵۳ <sup>a</sup>	۸/۱۶ ± ۱/۱۱ <sup>b</sup>
طعم و مزه	منتخب	۹/۷۱ ± ۱/۸۸ <sup>a</sup>	۹/۶۸ ± ۱/۲۳ <sup>a</sup>
	شاهد		
	منتخب		

نتایج میانگین سه تکرار ± انحراف استاندارد می باشد. حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده اختلاف معنی داری آماری می باشد ( $P < 0.05$ ).

خشک کردن انجمادی اجرا شد. اختلاط میکروکپسول های ژلاتین-مالتودکسترین در ماست بقای لاکتوباسیلوس /سیدوفیلوس را در طول ۲۸ روز نگهداری به دلیل اثر پری بیوتیک مالتودکسترین افزایش داد. همچنین، ویژگی های بافتی و در نتیجه پذیرش کلی ماست غنی شده به دلیل ادغام میکروکپسول های ژلاتین-مالتودکسترین در نمونه ماست بهبود یافت. به طور کلی، این کار نشان داد که میکروکپسول های ژلاتین-مالتودکسترین می توانند به عنوان وسیله ای ارزشمند برای محصور کردن و محافظت از آلفا-توکوفرول عمل نمایند. یافته های این تحقیق بینش جدیدی در مورد کاربرد بالقوه این میکروکپسول ها در ماست به دلیل بهبودهایی که قبلاً ذکر شد، ارائه دهند.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان از ارزیاب های حسی آموزش دیده و کسانی که امکانات و حمایت های اخلاقی لازم را در طول تحقیق ارائه کردند، سپاسگزاری می نمایند.

#### مشارکت نویسندگان

**بهنام نامی:** نوشتن پیش نویس مقاله، نظارت بر مطالعه؛ **اکرم یدی:** بازبینی و اصلاح مقاله، نوشتن پیش نویس مقاله؛ **محمد ملاویسی:** جمع آوری داده، تجزیه و تحلیل و تفسیر داده ها، ارائه ایده پژوهشی و طراحی مطالعه، تأیید نسخه نهایی.

#### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، هیچ گونه تعارض منافی وجود ندارد.

از نظر بافت، ماست حاوی ژلاتین-مالتودکسترین از لحاظ آماری امتیاز بالاتری (۹/۲۶) نسبت به شاهد (۷/۴۱) نشان داد. میکروذرات متشکل از مالتودکسترین-ژلاتین می توانند امتیاز حسی بافت را بهبود بخشند. علت این امر را می توان به تفاوت های ترکیبی بین نمونه ها نسبت داد. براساس میانگین امتیاز پذیرش کلی، به نظر می رسد که ماست غنی شده توسط ارزیابان آموزش دیده قابل قبول تر است که نشان می دهد افزودن ژلاتین و مالتودکسترین ویژگی های حسی کلی ماست غنی شده را بهبود می بخشد که می تواند مستقیماً به بهبود بافت نسبت داده شود.

#### نتیجه گیری

در این تحقیق، براساس خواص مطلوب ژلاتین و مالتودکسترین، فرض بر این بود که کمپلکس مالتودکسترین و ژلاتین یک گزینه مناسب برای به دام انداختن آلفا-توکوفرول است و میکروذرات به دست آمده خواص فیزیکی شیمیایی برجسته ای را نشان می دهند که ادغام آنها در ماست را در یک طیف گسترده ای از pH و دما تسهیل می کند. بنابراین، آلفا-توکوفرول با استفاده از مالتودکسترین و ژلاتین درون پوشانی شد و ویژگی های میکروذرات به دست آمده بررسی گردید. سپس، میکروذرات حامل آلفا-توکوفرول با هدف بهبود بافت ماست وارد شدند. ویژگی های ساختاری میکروذرات (کارایی کپسولاسیون، پتانسیل زتا، اندازه ذرات، کالری سنجی روبشی تفاضلی و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی) نشان داد که درون پوشانی آلفا-توکوفرول در میکروذرات ژلاتین-مالتودکسترین با موفقیت از طریق روش



## منابع

- ARES, G., GONÇALVEZ, D., PÉREZ, C., REOLÓN, G., SEGURA, N., LEMA, P., & GÁMBARO, A. (2007). Influence of gelatin and starch on the instrumental and sensory texture of stirred yogurt. *International Journal of Dairy Technology*, 60(4), 263-269. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2007.00346.x>
- Arilla, E., Igual, M., Martínez-Monzó, J., Codoñer-Franch, P., & García-Segovia, P. (2020). Impact of Resistant Maltodextrin Addition on the Physico-Chemical Properties in Pasteurised Orange Juice. *Foods*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/foods9121832>
- Basiri, L., Rajabzadeh, G., & Bostan, A. (2017). Physicochemical properties and release behavior of Span 60/Tween 60 niosomes as vehicle for  $\alpha$ -Tocopherol delivery. *LWT*, 84, 471-478. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.06.009>
- Basiri, L., Rajabzadeh, G., & Bostan, A. (2017).  $\alpha$ -Tocopherol-loaded niosome prepared by heating method and its release behavior. *Food Chem*, 221, 620-628. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.129>
- Castro-Muñoz, R., Barragán-Huerta, B. E., & Yáñez-Fernández, J. (2015). Use of gelatin-maltodextrin composite as an encapsulation support for clarified juice from purple cactus pear (*Opuntia stricta*). *LWT - Food Science and Technology*, 62(1, Part 1), 242-248. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.09.042>
- Chung, S., Ghelfi, M., Atkinson, J., Parker, R., Qian, J., Carlin, C., & Manor, D. (2016). Vitamin E and Phosphoinositides Regulate the Intracellular Localization of the Hepatic  $\alpha$ -Tocopherol Transfer Protein. *J Biol Chem*, 291(33), 17028-17039. <https://doi.org/10.1074/jbc.M116.734210>
- Churio, O., & Valenzuela, C. (2018). Development and characterization of maltodextrin microparticles to encapsulate heme and non-heme iron. *LWT*, 96, 568-575. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.072>
- da Silva, S. C., Fernandes, I. P., Barros, L., Fernandes, Â., José Alves, M., Calhelha, R. C., Pereira, C., Barreira, J. C. M., Manrique, Y., Colla, E., Ferreira, I. C. F. R., & Filomena Barreiro, M. (2019). Spray-dried *Spirulina platensis* as an effective ingredient to improve yogurt formulations: Testing different encapsulating solutions. *Journal of Functional Foods*, 60, 103427. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103427>
- Dadkhodazade, E., Mohammadi, A., Shojaee-Aliabadi, S., Mortazavian, A. M., Mirmoghtadaie, L., & Hosseini, S. M. (2018). Yeast Cell Microcapsules as a Novel Carrier for Cholecalciferol Encapsulation: Development, Characterization and Release Properties. *Food Biophysics*, 13(4), 404-411. <https://doi.org/10.1007/s11483-018-9546-3>
- Fang, S., Zhao, X., Liu, Y., Liang, X., & Yang, Y. (2019). Fabricating multilayer emulsions by using OSA starch and chitosan suitable for spray drying: Application in the encapsulation of  $\beta$ -carotene. *Food Hydrocolloids*, 93, 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.024>
- Francisco, C. R. L., Heleno, S. A., Fernandes, I. P. M., Barreira, J. C. M., Calhelha, R. C., Barros, L., Gonçalves, O. H., Ferreira, I. C. F. R., & Barreiro, M. F. (2018). Functionalization of yogurts with *Agaricus bisporus* extracts encapsulated in spray-dried maltodextrin crosslinked with citric acid. *Food Chemistry*, 245, 845-853. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.098>
- Gandía-Herrero, F., Jiménez-Atiénzar, M., Cabanes, J., García-Carmona, F., & Escribano, J. (2010). Stabilization of the Bioactive Pigment of *Opuntia* Fruits through Maltodextrin Encapsulation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(19), 10646-10652. <https://doi.org/10.1021/jf101695f>
- Gunenc, A., Houry, C., Legault, C., Mirrashed, H., Rijke, J., & Hosseini, F. (2016). Seabuckthorn as a novel prebiotic source improves probiotic viability in yogurt. *LWT - Food Science and Technology*, 66, 490-495. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.061>
- Jafari, S. M., Vakili, S., & Dehnad, D. (2019). Production of a Functional Yogurt Powder Fortified with Nanoliposomal Vitamin D Through Spray Drying. *Food and Bioprocess Technology*, 12(7), 1220-1231. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02289-9>
- Jannasari, N., Fathi, M., Moshtaghian, S. J., & Abbaspourrad, A. (2019). Microencapsulation of vitamin D using gelatin and cress seed mucilage: Production, characterization and in vivo study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 972-979. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.02.096>
- KEOGH, M. K., & O'KENNEDY, B. T. (1998). Rheology of Stirred Yogurt as Affected by Added Milk Fat, Protein and Hydrocolloids. *Journal of Food Science*, 63(1), 108-112. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1998.tb15687.x>

- Khan, W. A., Butt, M. S., Pasha, I., & Jamil, A. (2020). Microencapsulation of vitamin D in protein matrices: in vitro release and storage stability. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(3), 1172-1182. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00366-3>
- Krzeminski, A., Großhable, K., & Hinrichs, J. (2011). Structural properties of stirred yoghurt as influenced by whey proteins. *LWT - Food Science and Technology*, 44(10), 2134-2140. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.05.018>
- Kyriakoudi, A., & Tsimidou, M. Z. (2018). Properties of encapsulated saffron extracts in maltodextrin using the Büchi B-90 nano spray-dryer. *Food Chemistry*, 266, 458-465. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.038>
- Lamsen, M. R. L., Wang, T., D'Souza, D., Dia, V., Chen, G., & Zhong, Q. (2020). Encapsulation of vitamin D(3) in gum arabic to enhance bioavailability and stability for beverage applications. *J Food Sci*, 85(8), 2368-2379. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15340>
- Lekshmi, R. G. K., Tejpal, C. S., Anas, K. K., Chatterjee, N. S., Mathew, S., & Ravishankar, C. N. (2021). Binary blend of maltodextrin and whey protein outperforms gum Arabic as superior wall material for squalene encapsulation. *Food Hydrocolloids*, 121, 106976. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106976>
- Luo, Y., Teng, Z., & Wang, Q. (2012). Development of Zein Nanoparticles Coated with Carboxymethyl Chitosan for Encapsulation and Controlled Release of Vitamin D3. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(3), 836-843. <https://doi.org/10.1021/jf204194z>
- Macit, E., & Bakirci, I. (2017). Effect of different stabilizers on quality characteristics of the set-type yogurt. *African Journal of Biotechnology*, 16(46), 2142-2151. <https://doi.org/10.5897/AJB2017.16197>
- Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., & Desobry, S. (2006). Flavour encapsulation and controlled release – a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 41(1), 1-21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00980.x>
- Mitbunrung, W., Suphantharika, M., McClements, D. J., & Winuprasith, T. (2019). Encapsulation of Vitamin D(3) in Pickering Emulsion Stabilized by Nanofibrillated Mangosteen Cellulose: Effect of Environmental Stresses. *J Food Sci*, 84(11), 3213-3221. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14835>
- Mudgil, P., Jumah, B., Ahmad, M., Hamed, F., & Maqsood, S. (2018). Rheological, micro-structural and sensorial properties of camel milk yogurt as influenced by gelatin. *LWT*, 98, 646-653. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.008>
- Park, S. J., Garcia, C. V., Shin, G. H., & Kim, J. T. (2017). Development of nanostructured lipid carriers for the encapsulation and controlled release of vitamin D3. *Food Chemistry*, 225, 213-219. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.015>
- Rabelo, R. S., Oliveira, I. F., da Silva, V. M., Prata, A. S., & Hubinger, M. D. (2018). Chitosan coated nanostructured lipid carriers (NLCs) for loading Vitamin D: A physical stability study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119, 902-912. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.07.174>
- Raju, P. N., & Pal, D. (2011). Effect of bulking agents on the quality of artificially sweetened misti dahi (caramel colored sweetened yoghurt) prepared from reduced fat buffalo milk. *LWT - Food Science and Technology*, 44(9), 1835-1843. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.03.010>
- Ribeiro, J. S., & Veloso, C. M. (2021). Microencapsulation of natural dyes with biopolymers for application in food: A review. *Food Hydrocolloids*, 112, 106374. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106374>
- Sahan, N., Yasar, K., & Hayaloglu, A. A. (2008). Physical, chemical and flavour quality of non-fat yogurt as affected by a  $\beta$ -glucan hydrocolloidal composite during storage. *Food Hydrocolloids*, 22(7), 1291-1297. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.06.010>
- Sanchez, V., Baeza, R., Galmarini, M. V., Zamora, M. C., & Chirife, J. (2013). Freeze-Drying Encapsulation of Red Wine Polyphenols in an Amorphous Matrix of Maltodextrin. *Food and Bioprocess Technology*, 6(5), 1350-1354. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0654-z>
- Santos, M. B., Geraldo de Carvalho, M., & Garcia-Rojas, E. E. (2021). Carboxymethyl tara gum-lactoferrin complex coacervates as carriers for vitamin D3: Encapsulation and controlled release. *Food Hydrocolloids*, 112, 106347. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106347>

- Schröder, A., Sprakel, J., Schroën, K., & Berton-Carabin, C. C. (2020). Chemical Stability of  $\alpha$ -Tocopherol in Colloidal Lipid Particles with Various Morphologies. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 122(6), 2000012. <https://doi.org/10.1002/ejlt.202000012>
- Shakerian, M., Hadi Razavi, S., Khodaiyan, F., Ziai, S. A., Saeid Yarmand, M., & Moayedi, A. (2014). Effect of different levels of fat and inulin on the microbial growth and metabolites in probiotic yogurt containing nonviable bacteria. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(1), 261-268. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12315>
- Talebi, V., Ghanbarzadeh, B., Hamishehkar, H., Pezeshki, A., & Ostadrahimi, A. (2021). Effects of different stabilizers on colloidal properties and encapsulation efficiency of vitamin D3 loaded nano-niosomes. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 61, 101284. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.101284>
- Tamjidi, F., Shahedi, M., Varshosaz, J., & Nasirpour, A. (2013). Nanostructured lipid carriers (NLC): A potential delivery system for bioactive food molecules. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 19, 29-43. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.03.002>
- Walia, N., Dasgupta, N., Ranjan, S., Chen, L., & Ramalingam, C. (2017). Fish oil based vitamin D nanoencapsulation by ultrasonication and bioaccessibility analysis in simulated gastro-intestinal tract. *Ultrasonics Sonochemistry*, 39, 623-635. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.05.021>
- Xiang, C., Gao, J., Ye, H., Ren, G., Ma, X., Xie, H., Fang, S., Lei, Q., & Fang, W. (2020). Development of ovalbumin-pectin nanocomplexes for vitamin D3 encapsulation: Enhanced storage stability and sustained release in simulated gastrointestinal digestion. *Food Hydrocolloids*, 106, 105926. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105926>

## Improving Texture Properties and Increasing Viability of Yogurt Probiotics by Gelatin-Maltodextrin Microcapsules Loaded with $\alpha$ -Tocopherol

Behnam Nami<sup>1,2</sup>, Akram Yadi<sup>1</sup>, Mohammad Molaveisi<sup>1,3\*</sup>

1- Department of Research and Development, Damdaran (Teen) Dairy Company, Tehran, Iran

2- Department of Food Science and Engineering, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3- Department of Food Chemistry, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

\* Corresponding author (m.molaveisi@rifst.ac.ir)

### Abstract

Enriching food is one of the most important ways to compensate for the lack of minerals and vitamins in the body of consumers. In this study, the encapsulation of  $\alpha$ -tocopherol in gelatin and maltodextrin microparticles was carried out with the aim of enriching low-fat yogurt and the characteristics of the obtained microparticles (including encapsulation efficiency, zeta potential, particle size, thermal behavior (differential scanning calorimetry) and morphology (scanning electron microscope) were investigated. Based on the results, the encapsulation efficiency and the loading capacity of the microparticles containing  $\alpha$ -tocopherol were acceptably high (97 and 25%, respectively). Microscopic images of gelatin-maltodextrin microparticles containing  $\alpha$ -tocopherol showed a smooth and spherical surface as well as small cracks on the surface of the microparticles. In addition, the microparticles had a strong negative zeta potential (-27.29 mV), indicating a significant repulsive force between the microparticles and good stability. According to the results, maltodextrin as a potential prebiotic macromolecule increases the survival of *Lactobacillus acidophilus* during storage. The studied protein-polysaccharide microparticles are suitable for encapsulating  $\alpha$ -tocopherol and potentially, they can have many applications in the food industry.

**Keywords:**  $\alpha$ -Tocopherol, Freeze drying, Microparticles, Morphological evaluation

