

## کاربرد ریزپوشانی (میکروانکپسولاسیون) در فرآورده های لبنی

حسین جوینده

عضو هیات علمی گروه صنایع غذایی، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

زهرا ورشوی\*

فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی صنایع غذایی، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

### چکیده

شیر و غذاهای مبتنی بر شیر محصولات سرشار از مواد مغذی هستند که در سراسر جهان از محبوبیت بالایی برخوردارند. اخیراً استفاده از مواد غذایی فعال زیستی محصور شده در شیر و غذاهای لبنی به عنوان روشی مناسب برای دریافت آن ها به دلیل سهم بالقوه آنها در تغذیه و سلامت انسان، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. انواع مختلفی از فناوری های ریزپوشانی یا کپسوله سازی وجود دارد که می توان از آنها در صنایع غذایی استفاده کرد. استفاده از فناوری های مختلف برای محافظت از مواد سلامتی بخش، کارایی بالای این مواد را برای انسان به همراه دارد. ریزپوشانی به عنوان فناوری بسته بندی جامدات، مایعات یا مواد گازی در کپسول های بسیار ریز محصور شده تعریف می شود که می توانند محتویات خود را با سرعت های کنترل شده در شرایط خاص آزاد کنند. مزایای میکروکپسولاسیون و فناوری نانو فرصت های جدیدی را ایجاد کرده است که می تواند فرآوری محصولات لبنی را متحول کند. نانو ذرات را می توان در مواد غذایی برای رساندن مواد مغذی، افزایش جذب مواد مغذی توسط بدن، قابلیت استفاده از برخی ریزمغذی ها و همچنین افزایش ماندگاری محصول به کار برد. این مقاله مروری کوتاه، برخی فرصت ها و چالش های ترکیب مواد غذایی فعال زیستی محصور شده در شیر و محصولات لبنی را مورد بررسی قرار داده است.

**کلمات کلیدی:** میکروانکپسولاسیون، فناوری های کپسوله سازی، فرآورده های لبنی، میکروسفر

## ۱. مقدمه

ریزپوشانی یک فرآیند فیزیوشیمیایی حفاظت از عناصر غذایی یا عملکردی از شرایط محیطی و معده و رهاسازی عناصر موجود در وضعیت روده است [۱]. این فناوری در صنعت لبنیات نسبتاً جدید است و در حال حاضر کاربردهای متعددی پیدا کرده است که از جمله می‌توان به محصور کردن اسیدهای چرب غیر اشباع امگا ۳، جوانه بادام زمینی، لاکتاز، آهن، ویتامین C، باکتریهای پروبیوتیک و بسیاری از موارد دیگر اشاره کرد [۲ و ۳]. مواد فعال زیستی به شدت به شرایط محیطی و فرآیند مانند دما، نور، pH، و غیره حساس هستند. علاوه بر این، چنین موادی نمی‌توانند در شرایط معده باقی بمانند و در اغلب موارد قادر به رسیدن به محل جذب نیستند. برای رفع این مشکل چندین تکنیک کپسوله سازی برای به دام انداختن مواد فعال زیستی برای استفاده در صنایع لبنی پیشنهاد شده است. برای هر ماده، می‌باید از روش مناسب ریزپوشانی استفاده نمود و یک روش خاص برای تمامی مواد به خوبی قابل اجرا نیست. کاربرد هر روش خاص عمدتاً به دو عامل مهم بستگی دارد؛ ماده ای که باید محصور شود و نوع پوشش [۱].

نانوتکنولوژی به عنوان یک تکنیک بسیار پیشرفته تغییرات انقلابی در فرآوری محصولات لبنی ایجاد کرده است. علیرغم این که نانوتکنولوژی یک پدیده جدید در صنعت لبنیات است، در حال حاضر به عنوان روشی محبوب برای افزایش فراهمی زیستی و همچنین اثرات مفید سلامتی برخی ترکیبات مؤثر در سلامتی در مدت زمان بسیار کوتاهی مورد توجه قرار گرفته است. در نتیجه تعدادی از ترکیبات عملکردی نانو مانند جوانه نانو بادام زمینی، نانو کیتوسان، نانو جین سینگ و غیره تلفیق شده در شیر، ماست و انواع پنیر جهت غنی‌سازی این محصولات گزارش شده است [۴]. مواد عملکردی نانو را می‌توان به دو صورت نانو پودر و نانو امولسیون برای محصولات لبنی اعمال کرد. تا همین اواخر، ترکیبات کاربردی معمولاً به صورت پودر به محصولات لبنی اضافه می‌شدند زیرا کاربرد نانو امولسیون هنوز پذیرفته نشده بود. جدای از ترکیبات کاربردی، نانو کلسیم نیز برای کاربرد بالقوه آن در محصولات لبنی مورد مطالعه قرار گرفته است. پارک و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند که مواد نانوساختار نسبت به فرم پودری موجود در بازار سطح زیست سازگاری بسیار بالاتری را نشان می‌دهند [۵]. با این حال تحقیقات در مورد ترکیب مواد در سطح نانو در شیر و محصولات لبنی هنوز در مرحله مقدماتی تلقی می‌شود، زیرا به تحقیقات علمی بیشتری برای توسعه فناوری تجاری قابل قبول نیاز است.

## ۲. نمونه های کاربرد میکروانکپسولاسیون در محصولات لبنی

### ۲-۱. شیر

شیر و محصولات لبنی بخش عمده‌ای از بازار مواد غذایی کاربردی را تشکیل می‌دهند و این‌ها بخش‌های ضروری رژیم غذایی روزانه ما هستند. از این رو استفاده از مواد کاربردی در شیر ارزشمند است. ریزپوشانی به عنوان یک راه حل امکان پذیر جهت انتقال مؤثر مواد فعال زیستی به شیر در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از این فناوری می‌توان با محافظت از عملکرد مواد تا زمانی که این ترکیبات به محل مورد نظر در روده برسند از تغییرات نامطلوب مواد فعال زیستی جلوگیری کرد. طیف گسترده ای از روشهای کپسوله سازی برای ریزپوشانی کردن اجزای فعال زیستی که در شیر غنی سازی میشوند پیشنهاد شده اند، اما هیچ روش واحدی در سراسر جهان قابل استفاده نیست [۶]. مناسب بودن هر روش ریز کپسولاسیون در درجه اول به ساختار مولکولی و ویژگی های یک ماده فعال زیستی فردی بستگی دارد [۷]. مواد پوشش بر اساس ویژگی های اجزای عملکردی فردی و نوع محصولات خودرو انتخاب می شوند. برای استفاده از مواد مغذی ریزپوشانی شده در شیر چندین روش تا کنون مورد بررسی قرار گرفته است [۸]. از جمله مواد مغذی مورد استفاده در شیر جهت ریزپوشانی می‌توان کیتوزان، ایزوفلاون و داروآش را نام برد که در ادامه توضیح داده می‌شود.

**کیتوزان:** کیتین دومین بیوپلیمر طبیعی فراوان روی زمین است. شکل دی استیل شده کیتین که کیتوزان نامیده می شود. کیتوزان در چند سال گذشته به دلیل طیف گسترده ای از عملکردهای ارتقا دهنده سلامت مورد توجه قرار گرفته است. پس از تایید کیتوزان به عنوان افزودنی خوراک توسط سازمان غذا و داروی ایالات متحده آمریکا (USFDA) صنایع غذایی نیز در تلاش برای استفاده از اثرات تغذیه ای آن هستند و در نتیجه برخی از کشورهای پیشرفته کیتوزان را به عنوان یک ماده غذایی کاربردی شناخته اند [۹]. شیر یکی از ابزارهای بالقوه برای مکمل کیتوزان است اما طعم تلخ، مشخصه همراه با طعم بد و رنگ کیتوزان یا محصولات مشتق شده از کیتین محدودیت بزرگی جهت کاربرد آن در شیر است. در نتیجه، ادغام کیتوالیگوساکارید میکرو کپسوله شده در شیر با استفاده از پلی گلیسرول مونو استنرات (PGMS) به عنوان یک ماده پوشش مورد مطالعه قرار گرفته است [۴]. با داشتن راندمان کپسولاسیون ۸۸/۰۸ درصد، میکروکپسولهای کیتوزان بسیار پایدار بودند و تنها ۷/۶ درصد کیتوالیگوساکارید در طی ۱۵ روز نگهداری در دمای ۴ درجه سانتیگراد از میکروکپسولها آزاد شدند. با توجه به خواص فیزیکیوشیمیایی و حسی شیر حاوی کیتوالیگوساکارید، فرایند ریزوشانی اثر بسیار ناچیزی بر محصول داشت. بنابراین چشم انداز بزرگی برای توسعه شیر حاوی کیتوالیگوساکارید میکروکپسوله برای تولید انبوه وجود دارد.

**ایزوفلاون:** ایزوفلاونها فیتواستروژنهای مشتق شده از سویا با فعالیت بیولوژیکی قوی هستند. مطالعات گزارش کرده اند که ایزوفلاون می تواند نقش مهمی در کاهش سطح کلسترول خون داشته باشد [۱۰، ۱۱]. با این حال طعم تلخ به همراه رنگ قهوه ای، کاربرد مستقیم ایزوفلاون در شیر را محدود کرده است. جئون و همکاران با به کمک ذرات کیتوزان به همراه تری گلیسیرید متوسط زنجیره (MCT) ایزوفلاون میکرو کپسوله شده را تهیه و به شیر اضافه کرد [۱۲]. این مطالعه مشخص کرد که با توجه به نسبت پوشش به ماده هسته ۱:۱۵ بیش از ۷۰ درصد بازدهی کپسولاسیون را می توان به دست آورد. نرخ آزادسازی ایزوفلاون در طی ۳ روز نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی گراد تا ۸ درصد محدود شد. در شرایط شبیه سازی شده معده، میزان آزادسازی ۹۰/۳-۴۰ درصد ثبت شد در حالی که در شرایط شبیه سازی شده روده، نرخ رهاسازی ۸۷/۶ درصد بود. تجزیه و تحلیل داده ها، تغییر نامطلوب کیفیت شیر پس از افزودن ایزوفلاون را نشان نداد. علاوه بر این، جئون و همکاران شواهدی ارائه کردند که نشان می داد شیر حاوی ایزوفلاون دارای اثر کاهش قوی کلسترول در موش ها است. بعدها کیم و همکاران نشان دادند که در صورت استفاده از MCT یا PGMS به عنوان ماده پوشش دهنده ایزوفلاون همراه با گالاکتوزید، می تواند بدون هیچگونه تأثیر نامطلوبی بر رهايش آنها در شیر استفاده کرد [۱۳].

**عصاره دارویش:** دارویش برای چندین قرن به عنوان یک داروی رایج درخاور دور و همچنین در کشورهای اروپایی به دلیل ارزش درمانی آن مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴]. لکتین جزء عملکردی اصلی دارویش است و دما و سایر شرایط فرآوری آن را بسیار ناپایدار می کند. بنابراین محافظت از pH لکتین در برابر شرایط محیطی یا فرآوری در طول کاربرد مواد غذایی بسیار مهم است. کیم و همکاران نشان دادند که اگر دارویش با PGMS کپسوله شود، عصاره دارویش را با موفقیت می توان در شیر استفاده کرد چراکه به عنوان یک ماده پوشش در تضمین پایداری لکتین و همچنین در آزادسازی لکتین در محیط روده کارآمد است [۱۵]. براساس نتایج این مطالعه، افزودن میکروکپسولهای حاوی عصاره دارویش هیچ تغییر کیفی نامطلوبی در شیر ایجاد نمی کند.

## ۲-۲. میکروانکپسولاسیون ویتامین ها

غنی سازی شیر با ریز مغذی های ضروری با ویتامین D در دهه ۱۹۳۰ در ایالات متحده به توصیه شورای غذا و تغذیه انجمن پزشکی آمریکا به منظور مبارزه با شیوع راشیتیس در کودکان آغاز شد [۱۶، ۱۷]. این ابتکار موفقیت آمیز بود و در حال حاضر در ایالات متحده و کانادا، غنی سازی شیر با ویتامین D الزامی است [۳]. این موفقیت منجر به آغاز غنی سازی شیر با ویتامین A شد که طبق مقررات در دهه ۱۹۴۰ اجرا شد. هرچند جدای از این دو ویتامین، افزودن عناصر کمیاب دیگر به شیر رایج نشده است، دانشمندان علوم غذا در تلاش هستند تا با استفاده از فناوری مناسب، برخی از عناصر کمیاب مهم دیگر را در شیر بگنجانند.

هدف از غنی سازی ویتامینها در محصولات غذایی عمدتاً تامین نیازهای تغذیه ای ویژه نوزادان و افراد مسن و پیشگیری از بیماری ها در جمعیت های دارای کمبود مواد مغذی است. این هدف نمیتواند محقق شود مگر اینکه یک سیستم تحویل مناسب

تعیین شود که بتواند ماده مغذی را با محافظت از آن در برابر شرایط محیطی و گوارشی تا رسیدن به محل مناسب برساند. ویتامینهای محلول در آب به شرایط محیطی مانند دما pH، رطوبت نور و غیره حساس بوده و در برابر پردازش و ذخیره سازی حساس هستند. می توان از حساسیت و خطر تخریب ویتامینها با کپسوله کردن آنها با مواد پوششی مناسب جلوگیری کرد. اسید اسکوربیک یا ویتامین C، یک ویتامین محلول در آب است و یکی از ریز مغذی های ضروری است که باید در شیر گنجانده شود. این عنصر عملکردهای بسیار مهمی در بدن انسان دارد. علاوه بر نقش آنتی اکسیدانی، اسید اسکوربیک با تبدیل آهن فریک به فرم دیگر آن نقش مهمی در افزایش جذب آهن دارد [۱۸]. به منظور غلبه بر برخی از کاستی ها در مورد ناپایداری اسید اسکوربیک در حین ادغام آن در شیر، میکروکپسولاسیون به عنوان یک راه حل ممکن پیشنهاد شده است. دو فناوری پودر خشک و میکروکپسول مایع برای محصور کردن اسید اسکوربیک قابل استفاده هستند. از بین چندین عامل انتخاب مواد پوشش دهنده، خواص فیزیکیوشیمیایی مواد، هسته فرآیند کپسولاسیون و خواص نهایی میکروکپسول ها می باید در نظر گرفته شود. لی و همکاران مناسب بودن PGMS را به عنوان یک ماده پوشش دهنده اسید اسکوربیک در طی ادغام آن در شیر معرفی کرده اند [۱۹]. در تحقیقات، آنها راندمان کپسوله سازی ۹۴.۲ درصد و آزادسازی اسید اسکوربیک طی ۵ روز نگهداری تا ۶.۷ درصد محدود شد بدون اینکه تغییر قابل توجهی در خواص حسی شیر غنی شده مشاهده شود. در یک مطالعه دیگر، این محققان نشان دادند که همراه با MCT، PGMS نیز می تواند یک گزینه بالقوه به عنوان یک ماده پوشش دهنده باشد [۲۰]. بررسی آزمایشگاهی انجام شده در این مطالعه نشان داد که این دو ماده پوششی سطوح بسیار بالایی را در حفظ اسید اسکوربیک در مایع شبیه سازی شده معده و آزادسازی آن در مایع روده شبیه سازی شده نشان دادند. این مطالعه نشان داد که اسید اسکوربیک کپسوله شده هنگامی که با شیر مصرف می شود، آهن سرم را افزایش می دهد که به معنای افزایش فراهمی زیستی آهن است.

## ۲-۳. نانوکلسیم

کلسیم یک عنصر مهم در بدن انسان است که بخش عمده ای از اسکلت و برخی از اندام های دیگر را تشکیل می دهد. کمبود این عنصر تغذیه ای منجر به چندین بیماری کمبود آن از جمله پوکی استخوان می شود. متوسط دریافت روزانه کلسیم برای یک انسان بالغ ۱۰۰۰-۱۳۰۰ میلی گرم است. با توجه به اینکه رژیم غذایی معمولی ما اغلب نمی تواند این نیاز را برآورده کند، گنجاندن کلسیم در رژیم غذایی توصیه می شود. با این حال نشان داده شده است که محصولات غذایی مکمل کلسیم موجود در بازار سطح بسیار پایینی از فراهمی زیستی کلسیم دارند. در نتیجه یک مطالعه به منظور بررسی زیست سازگاری نانوکلسیم، زمانی که به جای کلسیم تجاری موجود در شیر اضافه می شود انجام شد [۲۱]. مصرف شیر حاوی مکمل نانوکلسیم، نسبت به شیر حاوی مکمل کلسیم در اصلاح استخوان تراپکولار موشها و جلوگیری از پوکی استخوان بهتر عمل کرد. تجزیه و تحلیل نشانگرهای تشکیل استخوان و تحلیل استخوان نیز برتری آشکار نانوکلسیم را نسبت به کلسیم پودری تجاری نشان داد [۵]. با این حال تحقیقات جامع تر و مطالعات انسانی برای استفاده گسترده از نانو کلسیم توصیه می شود.

## ۲-۴. ماست

ماست یکی از شش تنقلات رایج است که در سالهای اخیر مصرف آن رو به افزایش بوده است و جزو معدود خوراکی های محبوب برای کودکان ۲ تا ۱۷ ساله است. روند رو به افزایشی در مصرف ماست در سراسر جهان وجود دارد و به نظر می رسد این روند در سالهای آینده ادامه یابد. با توجه به ارزش غذایی بالا و علاقه مصرف کنندگان، ماست میتواند یک وسیله عالی برای مکمل مواد تشکیل دهنده کاربردی باشد. همانند بسیاری از غذاهای حامل، افزودن مواد فعال زیستی به ماست با توجه به پایداری ترکیبات زیست فعال و کیفیت ماست میتواند چالش برانگیز باشد. با این حال، ادغام مواد کاربردی میکروکپسوله شده در ماست هنوز رایج نشده است. مطالعات بسیار کمی برای ترکیب اجزای عملکردی میکروکپسوله شده در ماست انجام شده است. روغن ماهی دریایی و عصاره جوانه بادام زمینی دو ماده ای هستند که برای تولید ماست عملگرا مورد استفاده قرار گرفته اند. روغن ماهی: روغن ماهی بزرگترین منبع چندین اسید چرب غیراشباع است. بسیاری از نشریات علمی پیشنهاد می کنند که مصرف منظم اسیدهای چرب ضروری اثرات پیشگیرانه ای بر بیماریهای قلبی عروقی دارند و افزایش مصرف این مواد با مکمل

کردن آنها با غذاهای خاص توصیه می شود [۲۲]. تعدادی از مطالعات اثرات مفید اسیدهای چرب اشباع نشده زنجیره بلند (LC- $\omega$ -۳) را در پیشگیری از سرطان سینه و پروستات [۲۳]، بیماری آلزایمر [۲۴]، و اسکیزوفرنی و اختلالات خود ایمنی [۲۵] گزارش کرده اند. روغن ماهیهای دریایی، منبع اصلی PUFA- $\omega$ -۳ها به ویژه ایکوزاپنتانویک اسید (EPA) و دوکوزاهگزانوئیک اسید (DHA) هستند. از آنجایی که میانگین مصرف روزانه این اسیدهای چرب ضروری بسیار کمتر از حداقل نیاز روزانه است، غنی سازی محصولات غذایی با این اسیدها می تواند حداقل دریافت روزانه را تضمین کند. ماست به عنوان یکی از محبوب ترین میان وعده ها، برای غنی سازی بسیار مناسب است. تلاشهای مختلفی برای تلفیق اسیدهای چرب امگا ۳ به ماست انجام شده است [۲۶، ۲۷]. از آنجایی که این ترکیبات به راحتی در سیستم غذایی اکسید می شوند و باعث ایجاد ویژگیهای حسی نامطلوب همراه با بوی ماهی میشوند، نشان داده شده است که محصور شدن PUFA می تواند اکسیداسیون را کاهش داده و طعم نامطلوب را به حداقل برساند [۲۸]. مالتودکسترین و صمغ عربی در کپسوله کردن مواد غذایی گزینه های بسیار مناسبی هستند. استرادا و همکاران نشان دادند که تغییرات حسی ناخواسته از جمله بوی روغن ماهی با پوشاندنشان با این دو ماده مهار می شود [۲۹]. افزودن روغن ماهی کپسوله شده تغییر قابل توجهی در pH، رنگ، ظرفیت نگهداری آب و سایر خواص فیزیکی و شیمیایی ماست نداشت. این محققین پیشنهاد کردند که ماست توت فرنگی غنی شده با روغن ماهی ریز کپسوله شده را می توان با افزودن مستقیم روغن ماهی ریز کپسوله شده قبل از همگن شدن و پاستوریزاسیون تولید کرد. خشک کردن امولسیون با روش پاششی یا اسپری کردن، رایج ترین فناوری برای ریزپوشانی لیپیدهای روغن ماهی تاکنون بوده است. با این حال سطوح بالای میکروکپسول های روغن ماهی با استفاده از روش خشک کردن اسپری اغلب برای ذخیره سازی طولانی مدت مشکل ساز است. اخیراً تعدادی از محصولات غذایی حاوی روغن ماهی ریز کپسوله شده به صورت کواسروات های پیچیده خشک شده با اسپری عرضه شده اند. کواسروپاسیون پیچیده کواک یک جداسازی فاز ترکیبی مایع-مایع است که به دلیل کمپلکس پلی الکترولیت رخ میدهد [۳۰].

تمجیدی و همکاران نشان دادند که کواسروات پیچیده ژلاتین / صمغ اقلایا در محصور کردن PUFAهای امگا ۳ به منظور جلوگیری از اکسیداسیون و بوی ماهی بسیار موثر است [۳۱]. پس از خشک شدن و استخراج روغن، سطح میکروکپسولهای حاصل به پایداری بهتری دست یافتند و مشخص شد که افزودن این میکروکپسولها به ماست باعث کاهش جدایش آب ماست و ایجاد ویسکوزیته بالاتری می شود. ارزیابان هیچ بو یا طعم قابل مشاهده نامطلوبی را در ماست حاوی میکروکپسول PUFA امگا ۳ گزارش نکردند.

**عصاره جوانه بادام زمینی:** عصاره جوانه بادام زمینی با گزارش های متعدد در مورد عملکردهای مفید آن برای سلامتی یک نامزد بالقوه برای استفاده در ماست است. اما افزودن مستقیم جوانه بادام زمینی به محصولات شیر مشکل ساز است. مطالعه اخیر نشان داده است که مکمل عصاره جوانه بادام زمینی ریزپوشانی شده با غلظت تا ۰/۵ درصد تغییر نامطلوب یا محدودی در خواص فیزیکی و شیمیایی ماست داشته است [۳۲]. کپسوله کردن عصاره جوانه بادام زمینی می تواند از اکسیداسیون جلوگیری کند. علاوه بر این، این فرایند محافظت از رسوراترول (ماده اصلی عملکردی در جوانه بادام زمینی) را تضمین می کند. بر اساس این یافته ها، ممکن است در آینده از طریق مطالعات گسترده، یک فناوری مداوم برای توسعه ماست مغذی حاوی مکمل عصاره جوانه بادام زمینی به دست آید. دانشمندان علوم غذا، استفاده از جوانه بادام زمینی را به دلیل محتوای بسیار بالای رسوراترول در آن توصیه کرده اند. ریزپوشانی قابلیت آن را دارد که این جزء عملکردی مهم در جوانه بادام زمینی را در برابر شرایط محیطی محافظت کند.

## ۵-۲. ریزپوشانی برای تسریع رسیدن پنیر

رسیدن یک فرآیند مهم در تولید انواع پنیر رسیده است و به طور کامل مسئول توسعه بافت و طعم در محصول است. زمان رسیدن بسته به نوع و انواع پنیر از ۴ هفته تا ۳ سال متغیر است. در طی این دوره، پنیرها با تغییرات شیمیایی، بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی متعددی روبرو هستند و طی آن پروتئین، چربی و لاکتوز به محصولات اولیه و ثانویه تجزیه میشوند. بدین ترتیب پنیر ویژگیهای نهایی خود را به دست می آورد [۳۳]. تسریع رسیدن پنیر با استفاده از عوامل مختلف مانند آنزیم، دما و

میکروارگانیزم ها برای مدت طولانی مورد مطالعه قرار گرفته است. کوتاه کردن زمان رسیدن، مزیت های اقتصادی و فنی فراوانی را برای تولید کنندگان پنیر به همراه دارد. افزودن آنزیم های پروتئولیتیک و لیپولیتیک به پنیر از مدت ها قبل به عنوان یک روش تسریع رسیدن پنیر مورد استفاده قرار گرفته است. در هر حال استفاده از این روش ممکن است مشکلاتی را نیز به همراه داشته باشد. برای مثال گزارش شده است که افزودن آنزیم به شیر باعث کاهش عملکرد پنیر و بروز نواقصی در طعم طی مدت نگهداری می شود. پیشنهاد شده است که کپسوله سازی روشی کارآمد برای رفع معایب مرتبط با افزودن مستقیم آنزیم ها است. روش های مختلفی برای محصور کردن آنزیم های رسیدن پنیر مورد بررسی قرار گرفته اند؛ در یکی از تلاش های اولیه، عصاره های بدون سلول (CF) سویه های لاکتوباسیلوس لاکتیس با استفاده از چربی شیر برای رسیدن پنیر چدار کپسوله شدند. تقریباً هشت برابر دی استیل و استونین بیشتر در پنیر با آنزیم کپسوله اضافه شده تولید شد. بعداً براون و اولسون، عصاره CF محصور شده از *St. lactis* و مقداری از *Gluconobacter oxydans* و multigens را اضافه کردند که به دنبال آن ترکیبات مولد طعم بیشتری را به دست آوردند. [۳۴].

تا به امروز تحقیقات قابل توجهی برای توسعه یک فناوری ریزپوشانی مناسب برای تسریع رسیدن پنیر انجام شده است. گزارش های متعددی در مورد محصور کردن پروتئین های کیموزین و لیپازها با استفاده از لیپوزوم ها، کاراگینان، دانه های هیدروژل و چربی شیر به عنوان مواد کپسوله کننده انجام شده است [۳۵، ۳۶، ۳۷، ۳۸]. بسیاری از مطالعات ذکر شده، استفاده از یک آنزیم منفرد یا مخلوطی از آنزیم های لیپولیتیک یا پروتئولیتیک را مورد بررسی قرار دادند. با این حال، خدر و همکاران نشان دادند که یک مخلوط آنزیمی محصور شده با لیپوزوم حاوی طعم دهنده پروتئاز باکتریایی خنثی، و پروتئاز و لیپاز اسیدی قارچی را می توان برای رسیدن خواص حسی متعادل به شیر پنیرسازی اضافه کرد [۳۳]. اما فناوری لیپوزوم محدودیتهایی برای کاربرد صنعتی دارد؛ زیرا این فناوری گران است و در طول رسیدن پنیر آزاد می شود. با این حال، علاوه بر بهبود فناوری لیپوزوم، روش های دیگری نیز به منظور توسعه فناوری مناسب تر برای میکروکپسوله سازی رسیدن پنیر به کار گرفته می شود.

## ۲-۶. ریزپوشانی آهن

علاوه بر شیر و ماست، غنی سازی چندین فرآورده لبنی دیگر با هدف تسهیل برنامه غنی سازی آهن تاکید شده است. بنابراین، تحقیقات قابل توجهی تاکنون برای غنی سازی انواع مختلف پنیر با آهن انجام شده است. در یک بررسی جامع، گواچرون نشان داد که هنگام مکمل سازی با آهن آزاد، بدلیل تجمع آن با کازئین و سایر مواد موجود در شیر، کیفیت حسی پنیر تحت تأثیر قرار می گیرد در حالی که غنی سازی با آهن کپسوله شده تغییر معنی داری در خواص حسی محصول ایجاد نمی کند [۳۹]. جکسون و لی نیز در بررسی غنی کردن پنیر هاوارتی با آهن، خواص ارگانولپتیک بهتری را در پنیر حاوی آهن ریزپوشانی شده گزارش کردند [۴۰]. علاوه بر این آن ها دریافتند که مقدار کمتری از آهن از طریق آب پنیر هنگام ریزپوشانی شدن آن از دست می رود. به طور کلی، آهن آزاد به دلیل اثر اکسید کننده گی، طعم و رنگ ناخوشایندی را در حامل غذایی ایجاد میکند در حالی که آهن پوشش داده شده با PGMS هیچ اثر مخربی بر ویژگی های طعم پنیر ندارد [۴۱].

همچنین برخی از فرآورده های شیری را می توان به عنوان وسیله ای برای تقویت آهن ریزکپسوله در نظر گرفت. شیر خشک کاربرد وسیعی در تولید چندین فرآورده لبنی دارد. بنابراین غنی سازی آهن به شیر خشک می تواند بخشی از برنامه غنی سازی آهن باشد. تحقیقات اولیه روی موش ها نشان میدهد که سولفات آهن با پوشش SFE-۱۷۱ که در شیر خشک تکمیل شده است فراهمی زیستی بالاتری نسبت به نوع غیر غنی شده دارد. غنی سازی آهن در شیر خشک میتواند نقش برجسته ای در مکمل آهن برای جمعیت های انبوه در کشورهای در حال توسعه ایفا کند، جایی که غذای نوزادان عمدتاً شیر خشک است. برای تکمیل موثر آهن از طریق شیر خشک، روش میکروکپسولاسیون را می توان به شدت توصیه کرد. اجماع زیادی وجود دارد که محصولات لبنی گزینه خوبی برای استفاده به عنوان حامل غذایی در برنامه غنی سازی آهن برای جمعیت های انبوه هستند. با این حال هنوز یک فناوری تجاری قابل قبول برای غنی سازی آهن در محصولات لبنی ایجاد نشده است. اخیراً تحقیقات انجام شده در ETH سوئیس، با این ادعا که نانوذرات آهن ترکیب شده با روی دارای درجه بسیار بالایی از فراهمی زیستی بدون تجمع بافت هستند، توجه قابل قبولی را به خود جلب کرده است [۴۲]. هرچند چنین موضوعی در حد یک مطالعه مقدماتی است، ولی به



طور بالقوه مسیر جدیدی از تحقیقات را برای پیشرفت فناوری غنی سازی آهن در محصولات لبنی ارائه خواهد نمود. توصیه میشود که تحقیقات گسترده تری بر اساس ریزپوشانی و فناوری نانو به منظور ایجاد یک فناوری غنی سازی آهن کارآمد و قابل قبول تجاری برای صنایع لبنی انجام شود.

### ۳. نتیجه گیری

با توجه به افزایش چشمگیر تولید مواد غذایی عملگرا یا کاربردی، محصولات لبنی به طور گسترده ای در این زمینه به خصوص جهت غنی سازی با مواد فعال زیستی مورد مورد توجه قرار گرفته اند. به منظور بهبود فرآیند تلفیق مواد عملگرای سلامت در محصولات لبنی، می توان از روش های میکروکپسوله سازی و فناوری نانو استفاده نمود. میکروکپسوله سازی به طرز قابل توجهی مورد توجه قرار گرفته است و کارایی روش مکمل سازی مواد زیست فعال در شیر و محصولات لبنی را بهبود بخشیده است. مزیت ریزپوشانی در این واقعیت نهفته است که این تکنیک میتواند از مواد تشکیل دهنده و محصول حامل در برابر تغییرات نامطلوب ویژگی های مورد نظر محافظت کند. همچنین فناوری نانو پتانسیل زیادی در فراهم نمودن اجزای کاربردی زیستی در فراورده های لبنی را ارائه میدهد. مواد کاربردی در اندازه نانو دارای سطح بیشتری از زیست سازگاری هستند. تحقیقات در مورد کاربرد نانوتکنولوژی در محصولات لبنی هنوز در مراحل ابتدایی است؛ با این حال تعداد معدود مطالعات انجام شده پتانسیل بالای این روش را برای صنعت لبنیات نشان داده اند. در کنار نانوذرات، استفاده از نانو امولسیون نیز ضروری است که ممکن است بعد جدیدی در توسعه محصولات لبنی کاربردی ایجاد کند.

### مراجع

- [۱] Wilson, N., and Shah, N.P. ۲۰۰۷. Microencapsulation of vitamins. ASEAN Food Journal ۱۴, ۱-۱۴.
- [۲] Shah, N.P., and Ravula, R.R. ۲۰۰۰. Microencapsulation of probiotic bacteria and their survival in frozen fermented dairy desserts. The Australian Journal of Dairy Technology ۵۳: ۱۳۹-۱۴۴.
- [۳] Calvo, M.S., Whitting, S.J., and Barton, C.N. ۲۰۰۴. Vitamin D fortification in the United States and Canada: Current status and data needs. American Journal of Clinical Nutrition ۸۰ (supple- ment), ۱۷۱۰-۱۷۱۶۸.
- [۴] Choi, H.J., Ahn, J., Kim, N.C., and Kwak, H.S. ۲۰۰۶. The effects of microencapsulated chitooligosaccharide on physical and sensory properties of the milk. Asian Australasian Journal of Animal Sciences ۱۹: ۱۳۴۷-۱۳۵۳.
- [۵] Park, H.S., Ahn, J., and Kwak, H.S. ۲۰۰۸. Effect of nano-calcium-enriched milk on calcium metabolism in ovariectomized rats. Journal of Medicinal Food ۱۱, ۴۵۴-۴۵۹.
- [۶] Betoret, E., Betoret, N., Vidal, D., and Fito, P. ۲۰۱۱. Functional dairy foods development: trends and technologies. Trends in Food Science & Technology ۲۲, ۴۹۸-۵۰۸.
- [۷] Augustin, M.A. and Hemar, Y. ۲۰۰۹. Nano- and micro-structured assemblies for encapsulation of food ingredients. Chemical Society Reviews ۳۸, ۹۰۲-۹۱۲.
- [۸] Sanguansri, L., and Augustin, M. ۲۰۱۰. Microencapsulation in functional food development. In Smith, J., and Charter, E. (eds.) Functional Food Product Development. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell Publishing, pp. ۱-۲۳.
- [۹] Shahidi, F., Arachchi, J.K.V., and Arachchi, J. Y. J. ۱۹۹۹. Food applications of chitin and chitosans. Trends in Food Science & Technology ۱۰, ۳۷-۵۱.
- [۱۰] Anthony, M.S., Clarkson, T.B., Hughes, C.L., Morgan, T.M., and Burke, G.L. ۱۹۹۶. Soybean isoflavones improve cardiovascular risk factors without affecting the reproductive system of peripubertal rhesus monkeys. Journal of Nutrition ۱۲۶, ۴۳-۵۰.
- [۱۱] Fukui, K., Tachibana, N., Wanezaki, S., Tsuzaki, S., Takamatsu, K., Yamamoto, T., et al. ۲۰۰۲. Isoflavone free soy protein prepared by column chromatography reduces plasma cholesterol in rats. Journal of Agricultural Food Chemistry ۵۰, ۵۷۱۷-۵۷۲۱.
- [۱۲] Jeon, B.J., Kim, N.C., Han, E.M., and Kwak, H.S. ۲۰۰۵. Application of microencapsulated isoflavone into milk. Archives of Pharmacology Research ۷, ۸۵۹-۸۶۵.



- [۱۳] Kim, N.C., Jeon, B J., Ahn, J., and Kwak, H.S. ۲۰۰۶. In vitro study of microencapsulated isoflavone and ascorbic acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* ۵۴, ۲۵۸۲-۲۵۸۶.
- [۱۴] Park, C. H., Lee, D.W., Kang, T.B., Lee, K.H., Yoon, T.J., Kim, J.B. et al. ۲۰۰۱. cDNA cloning and sequence analysis of the lectin genes of the Korean mistletoe (*Viscum album coloratum*). *Molecules and Cells* ۱۲, ۲۱۵-۲۲۰.
- [۱۵] Kim, N.C., Kim, J.B., and Kwak, H.S. ۲۰۰۸. Microencapsulation of Korean Mistletoe (*Viscum album var. coloratum*) extract and its application into milk. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* ۲۱, ۲۹۹-۳۰۶.
- [۱۶] Stevenson, E.H. ۱۹۵۵. Importance of vitamin D milk. *JAMA Council on Foods and Nutrition* ۱۵۹, ۱۰۱۸-۱۰۱۹.
- [۱۷] Murphy, S.C., Whited, L.J., Rosenberry, L.C., Hammond, B.H., Bandler, B.K., and Boor, K.G. ۲۰۰۱. Fluid milk fortification compliance in New York State. *Journal of Dairy Science* ۸۴, ۲۸۱۳-۲۸۲۰.
- [۱۸] Monsen, E.R. ۱۹۸۲. Ascorbic acid: An enhancing factor in iron absorption. In Kies, C. (ed.) *National Bioavailability of Iron*. Washington, DC: American Chemical Society, pp. ۸۵-۹۵.
- [۱۹] Lee, J.B., Ahn, J., Lee, J.H., and Kwak, H.S. ۲۰۰۴. L-ascorbic acid microencapsulated with poly- acylglycerol monostearate for milk fortification. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry* ۶۸, ۴۹۵-۵۰۰.
- [۲۰] Lee, J.B., Ahn, J., Lee, J., and Kwak, H.S. ۲۰۰۳. The microencapsulated ascorbic acid release in vitro and its effect on iron bioavailability. *Archives of Pharmaceutical Research* ۲۶, ۸۷۴-۸۷۹.
- [۲۱] Park, H.S., Jeon, B.J., Ahn, J., and Kwak, H.S. ۲۰۰۷. Effects of nanocalcium supplemented milk on bone calcium metabolism in ovariectomized rats. *Asian-Australasian Journal of Animal Science* ۲۰, ۱۲۶۶-۱۲۷۱.
- [۲۲] Bauch, A., Lindtner, O. Mensink, G., and Niemann, B. ۲۰۰۶. Dietary intake and sources of long chain n-۳ PUFAs in German adults. *European Journal of Clinical Nutrition* ۶۰, ۸۱۰-۸۱۲.
- [۲۳] Champagne, C.P., and Fustier P. ۲۰۰۷. Microencapsulation for the improved delivery of bioactive compounds into foods. *Current Opinion in Biotechnology* ۱۸, ۱۸۴-۱۹۰.
- [۲۴] Reifen, R., Blank, M., and Afek, A. ۱۹۹۸. Dietary polyunsaturated fatty acids decrease anti-dsDNA and anti-cardiolipin antibodies production in idiotype induced mouse model of systemic lupus erythematosus. *Lupus* ۷, ۱۹۲-۱۹۷.
- [۲۵] Jin, Y., Perrie, C., Zhang, W., Diepen, C.V., Curtis, J., and Barrow, C.J. ۲۰۰۷. Microencapsulation of marine lipids as a vehicle for functional food delivery. In Barrow, C.J., and Shahidi, F. (eds.) *Marine Nutraceuticals and Functional Foods*. London: CRC Press, pp. ۱۱۵-۱۵۴.
- [۲۶] Chee, C.P., Gallaher, J.J., Djordjevic, D., Faraji, H., McClements, D.J., Decker, E.A., et al. ۲۰۰۵. Chemical and sensory analysis of strawberry flavoured yogurt supplemented with an algae oil emulsion. *Journal of Dairy Research* ۷۲, ۳۱۱-۳۱۶.
- [۲۷] McCowen, K.C., Ling, P.R., Decker, E., Djordjevic, D., Roberts, R.F., Coupland, J.M., and Bistran, B.R. ۲۰۱۰. A simple method of supplementation of omega-۳ polyunsaturated fatty acids: Use of fortified yogurt in healthy volunteers. *Nutrition in Clinical Practice* ۲۵, ۶۴۱-۶۴۵.
- [۲۸] Barrow, C.J., Nolan, C., and Holub, B.J. ۲۰۰۹. Bioequivalence of encapsulated and microencapsulated fish oil supplementation. *Journal of Functional Foods* ۱, ۳۸-۴۳.
- [۲۹] Estrada, J.D., Boeneke, C., Bechtel, P., and Sathivel, S. ۲۰۱۱. Developing a fortified yogurt with marine fish oil. *Journal of Dairy Science* ۹۴: ۵۷۶۰-۵۷۶۹.
- [۳۰] Lakkis, J.M. ۲۰۰۷. Introduction. In Lakkis, J.M. (ed.) *Encapsulation and Controlled Release Technologies in Food Systems*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, pp. ۱-۱۱.
- [۳۱] Tamjidi, F., Nasirpour, A., and Shahedi, M. ۲۰۱۲. Physicochemical and sensory properties of microencapsulated fish oil. *Food Science and Technology International* ۱۸, ۳۸۱-۳۹۰.
- [۳۲] Lee, Y.K., Mijan, M.A., and Kwak, H.S. ۲۰۱۲. Properties of milk supplemented with peanut sprout extract microcapsules during storage. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* ۲۶ (in press).
- [۳۳] Kheadr, E.E., Vuillemand, J., and El Deeb, S.A. ۲۰۰۳. Impact of encapsulated enzyme cocktails on Cheddar cheese ripening. *Food Research International* ۳۶, ۲۴۱-۲۵۱.



- [۳۴] Braun, S.D., and Olson, N.F. ۱۹۸۶b. Microencapsulation of cell-free extracts to demonstrate the possibility of heterogeneous enzyme systems and cofactor of recycling for development of flavor in cheese. *Journal of Dairy Science* ۶۹: ۱۲۰۲-۱۲۰۸.
- [۳۵] Perols, C., Piffault, B., Scher, J., Ramet, J.P., and Poncelet, D. ۱۹۹۷. The potential of enzyme entrapment in konjac cold-melting gel beads. *Enzyme and Microbial Technology* ۲۰, ۵۷-۶۰.
- [۳۶] Khailaspathy, K., Lam, S.H., and Hourigan, J.A. ۱۹۹۸. Studies on encapsulating enzymes to accelerate cheese ripening. *Australian Journal of Dairy Technology* ۵۳, ۱۲۵.
- [۳۷] Khailaspathy, K., and Lam, S.H. ۲۰۰۵. Application of encapsulated enzymes to accelerate cheese ripening. *International Dairy Journal* ۱۵, ۹۲۹-۹۳۹.
- [۳۸] Laloy, E., Vuilleumard, J.C., Dufour, P., and Simard, R. ۱۹۹۸. Release of enzymes from liposomes during cheese ripening. *Journal of Controlled Release* ۵۴, ۲۱۳-۲۲۲.
- [۳۹] Gaucheron, F. ۲۰۰۰. Iron fortification in dairy industry. *Trends in Food Science and Technology* ۱۱, ۴۰۳-۴۰۹.
- [۴۰] Jackson, L.S., and Lee, K. ۱۹۹۲. Fortification of cheese with microencapsulated iron. *Cultured Dairy Products Journal* ۲۷, ۴-۷.
- [۴۱] Kwak, H.S., Ju, Y.S., Ahn, H.J., Ahn, J., and Lee, S. ۲۰۰۳a. Microencapsulated iron fortification and flavor development in Cheddar cheese. *Asian-Australasian Journal of Animal Science* ۱۶, ۱۲۰۵-۱۲۱۱.
- [۴۲] Hilty, F.M., Arnold, M., Hilbe, M., Teleki, A., Knijnenbug, J.T.N., Ehrensperger, F., et al. ۲۰۱۰. Iron from nanocompounds containing iron and zinc is highly bioavailable in rats without tissue accumulation. *Nature Nanotechnology* ۵, ۳۷۴-۳۸۰.