



مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

تأثیر غنی سازی مواد غذایی بر سلامت و راهکارهای کاهش اتلاف ریزمغذی ها

مروا حسینی^۱، لیلا ناطقی^{۱*}، لادن رشیدی^{۲*}، سید عبدالمجید موسوی^۳

۱- گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد ورامین- پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران

۲- گروه پژوهشی مواد غذایی حلال و فرآورده های کشاورزی، پژوهشکده صنایع غذایی و فرآورده های کشاورزی، پژوهشگاه

استاندارد، کرج، ایران

۳- گروه علوم دامی، واحد ورامین- پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۶

تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۳

کلمات کلیدی:

افزایش پایداری،

امولسیون پیکربینگ،

پروبیوتیک ها،

درون پوشانی،

محصولات کاربردی

DOI: 10.48311/fsct.2026.117561.82944

* مسئول مکاتبات:

Leylanategi@yahoo.com

غذاهای کاربردی و غنی شده امروزه به دلیل نقش موثر در پیشگیری از بیماری ها و ارتقای سلامت عمومی، اهمیت روزافزونی یافته اند. غنی سازی مواد غذایی فرآیندی است که طی آن ریزمغذی هایی مانند ویتامین ها، مواد معدنی، اسیدهای چرب ضروری و ترکیبات فعال زیستی به محصولات غذایی افزوده می شوند تا کمبودهای تغذیه ای جبران و نیازهای فیزیولوژیک بدن تأمین گردد. این رویکرد به عنوان یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش شیوع بیماری های ناشی از کمبود ریزمغذی ها از جمله بری بری، پلاگر و راشیتیس شناخته می شود. با این حال، افزودن مستقیم این ترکیبات به مواد غذایی با چالش هایی مانند پایداری کم، حلالیت محدود، فراهمی زیستی پایین و حساسیت بالا به شرایط فرآوری مواجه است. فناوری درون پوشانی به عنوان روشی نوین توانسته است بسیاری از این محدودیت ها را برطرف کند. درون پوشانی موجب افزایش پایداری، محافظت در برابر عوامل محیطی، بهبود جذب و امکان رهاسازی کنترل شده ریزمغذی ها در دستگاه گوارش می شود. روش های متداول درون پوشانی شامل خشک کن پاششی، خشک کن انجمادی، امولسیون، اکستروژن و بستر سیال است که هر کدام مزایا و کاربردهای خاصی دارند. این مقاله مروری با هدف بررسی اهمیت غنی سازی مواد غذایی، نقش ریزمغذی ها در سلامت بدن و مزایای فناوری درون پوشانی تهیه شده است. نتایج نشان می دهد که به کارگیری هم زمان غنی سازی و درون پوشانی می تواند به عنوان یک استراتژی موثر در برنامه های سلامت عمومی مورد توجه قرار گیرد و توسعه پژوهش های بیشتر در این حوزه ضروری است.

۱-مقدمه

در سال‌های اخیر، ترکیبات زیست‌فعال طبیعی به دلیل اثرات عملکردی قابل توجه در صنایع غذایی و سلامت انسان مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. این ترکیبات، شامل آنتی‌اکسیدان‌ها، ضد میکروب‌ها، فیتوکمیکال‌ها و ترکیبات فنولی، نه تنها در بهبود ویژگی‌های حسی و پایداری محصولات غذایی نقش دارند، بلکه با داشتن خواص ضدالتهابی، ضدسرطانی، ضد دیابتی و ضد میکروبی، در ارتقاء سلامت مصرف‌کننده نیز مؤثر هستند. با این حال، پایداری پایین، حلالیت ضعیف، نفوذپذیری محدود روده‌ای و فراهمی زیستی کم در فرم آزاد، استفاده مستقیم از این ترکیبات را با چالش‌هایی مواجه ساخته است؛ به‌ویژه آنکه شرایط محیطی نامساعد مانند حرارت، نور، pH و فشار می‌تواند منجر به تخریب آن‌ها گردد. در این راستا، ریزپوشانی به‌عنوان یک فناوری نوین و مؤثر، با فراهم آوردن حفاظت ساختاری، رهایش کنترل‌شده و افزایش جذب در دستگاه گوارش، راهکار مناسبی برای حفظ زیست‌فعالی و افزایش کارایی ترکیبات زیست‌فعال در محصولات غذایی عملکردی به شمار می‌رود [۱].

در پژوهش‌ها به رابطه بین سلامتی، اهمیت سبک زندگی سالم و داشتن رژیم غذایی مناسب و فعالیت بدنی منظم بسیار پرداخته شده است. به دلیل اینکه جذب مواد مغذی با افزایش سن کاهش می‌یابد و اینکه رژیم غذایی معمولی افراد فاقد مقدار توصیه شده موادی چون امگا ۳ است، نقش مواد غذایی غنی شده و مکمل‌های غذایی در سلامت جامعه پررنگ‌تر می‌شود. همچنین به دلیل مشغله کاری و یا افزایش سن، افراد زمان کمتری را در خارج از محل کار و منزل می‌گذرانند که موجب می‌شود کمتر در معرض نور خورشید قرار گیرند که موجب کاهش سنتز ویتامین D می‌گردد.

ویتامین‌ها نقش مهمی در رشد، بهبود عملکرد سیستم ایمنی، عملکرد قلب، عضلات، بینایی و لخته شدن خون دارند [۲،۳]. گزارش جهانی در سال ۲۰۲۲ نشان داد از هر پنج کودک زیر پنج سال، یک نفر با رشد ناقص متولد می‌شود و حدود ۴۰٪ بزرگسالان دارای اضافه وزن و چاقی هستند. مطالعات نشان داده از سال ۲۰۱۰ مرگ و میر ناشی از بیماری‌های مرتبط با رژیم غذایی ۱۵٪ افزایش یافته و یک چهارم کل مرگ و میر را تشکیل داده است که مرتبط با کاهش کیفیت غذایی و افزایش مصرف غذاهای فوق فراوری شده (UPFs) است [۴].

غنی‌سازی موجب افزایش دریافت مواد مغذی، بدون تغییر در رفتار تغذیه‌ای افراد جامعه و یکی از مقرون‌به‌صرفه‌ترین روش‌ها برای بهبود کیفیت تغذیه‌ای غذاها به‌شمار می‌رود. این فرآیند از طریق اصلاح دستور تهیه اولیه و افزودن ترکیبات مغذی با هدف بهبود ویژگی‌های تغذیه‌ای، حسی و عملکردی محصول انجام می‌شود. بر اساس تعریف سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد^۲ (FAO) غنی‌سازی شامل افزودن هدفمند یک یا چند ریزمغذی به مواد غذایی به‌منظور ارتقاء کیفیت تغذیه‌ای است [۶،۵].

ویتامین‌ها ترکیبات آلی ضروری برای عملکرد طبیعی بدن هستند و سیزده ویتامین شناسایی شده که بر اساس انحلال‌پذیری به دو دسته محلول در آب^۳ (WSVs) و محلول در چربی^۴ (FSVs) تقسیم می‌شوند. ویتامین‌ها بر اساس خواص فیزیوشیمیایی، ویژگی‌های متابولیکی و نقش‌های فیزیولوژیکی تقسیم بندی می‌شوند [۷]. ویتامین‌های محلول در آب در بدن ذخیره نمی‌شوند و باید به‌صورت منظم از طریق رژیم غذایی یا مکمل‌ها تأمین شوند [۸،۹]. ویتامین‌های محلول در چربی A، D، E و K به اشکال مختلفی در مواد غذایی یافت می‌شوند و متابولیسم آن‌ها

4- Fat-soluble vitamins

1- Ultra-processed foods

2 -Food and Agriculture Organization

3- Water-soluble vitamins

شامل مراحل پیچیده‌ای از جذب، انتقال، ذخیره و دفع است. این ویتامین‌ها عمدتاً از طریق مدفوع و به میزان کمتری از طریق ادرار دفع می‌شوند. مقادیر اضافی ویتامین‌های محلول در چربی برای حفظ هموستاز و جلوگیری از سمیت در کبد ذخیره می‌گردند [۷].

اسیدهای چرب، به خصوص اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه (PUFAs)^۵ به دلیل نقش کلیدی در ساختار غشای سلولی، کاهش التهاب، سیگنال‌دهی سلولی و پیشگیری از بیماری‌های مزمن، اهمیت زیادی در تغذیه دارند. از آنجایی که برخی از اسیدهای چرب مانند EPA^۶ و DHA^۷ در بدن سنتز نمی‌شوند، باید از طریق رژیم غذایی تأمین شوند. به دلایلی چون پایداری پایین، حساسیت به اکسیداسیون، ایجاد طعم نامطلوب و حلالیت محدود در آب، کاربرد مستقیم آن‌ها را در محصولات غذایی چالش برانگیز است. فناوری درون پوشانی به عنوان راهکاری مؤثر، موجب بهبود پایداری، فراهمی زیستی، ویژگی‌های حسی و توزیع پذیری اسیدهای چرب در ماتریکس‌های غذایی می‌شود که توجه روز افزون پژوهشگران و صنایع غذایی را به خود جلب کرده است [۱۰، ۱۱].

پروبیوتیک‌ها میکروارگانیسم‌های زنده‌ای هستند که در صورت مصرف به مقدار کافی، اثرات سلامت بخش برای میزبان دارند. این میکروارگانیسم‌ها با تنظیم میکروبیوتای روده و مهار پاتوژن‌ها در پیشگیری و درمان اختلالاتی مانند سندرم روده تحریک‌پذیر، چاقی، دیابت نوع ۲ و برخی سرطان‌ها مؤثرند. بقا پروبیوتیک‌ها به عوامل محیطی، شرایط گوارشی و فراوری بستگی دارد که می‌توان با فناوری ریزپوشانی به حفظ زنده‌مانی، بهبود اثربخشی و خواص عملکردی آن‌ها کمک نمود [۱۲، ۱۳].

مواد معدنی ریزمغذی‌های ضروری هستند که نقش حیاتی در عملکردهای بیولوژیکی، رشد، متابولیسم و تقویت سیستم ایمنی دارند. کمبود این عناصر، به‌ویژه آهن، روی و کلسیم، از چالش‌های مهم سلامت عمومی در بسیاری از کشورهای در حال توسعه است که می‌تواند منجر به عوارضی مانند کم‌خونی، اختلال در رشد، مشکلات تیروئید و ضعف ایمنی شود. مصرف مکمل‌های معدنی با محدودیت‌هایی از جمله پذیرش پایین، دسترسی محدود و عوارض گوارشی همراه است. غنی‌سازی مواد غذایی با مواد معدنی به عنوان یک راهکار مقرون‌به‌صرفه، ایمن و پایدار مورد توجه قرار گرفته است. به دلایلی چون پایداری پایین، طعم فلزی و فراهمی زیستی محدود غنی سازی مواد غذایی با چالش‌هایی روبه‌رو است که می‌توان با کپسوله نمودن مواد مغذی بر آنها غلبه نمود [۱۴، ۱۵].

درون پوشانی از تکنیک‌های نوین در صنایع غذایی است که به منظور محافظت از ترکیبات فعال مانند ویتامین‌ها، ترکیبات ضد میکروبی و سایر مواد حساس به شرایط محیطی و دستگاه گوارش به کار می‌رود. این فناوری موجب افزایش پایداری و آزادسازی کنترل شده و هدفمند ترکیبات فعال می‌گردد و روشی مناسب برای توسعه محصولات غذایی نوین و غنی شده است. درون پوشانی باکتری‌ها با هدف تولید محصولات کاربردی و همچنین مهار رشد میکروارگانیسم‌های ناخواسته صورت می‌گیرد [۱۶]. فراوری مواد غذایی و غنی سازی آن، استراتژی موفق است که موجب کاهش کمبود مواد مغذی و افزایش سلامت جامعه می‌شود. غنی سازی اجباری مواد غذایی به عنوان رویکردی پیدار موجب جبران کمبود مواد مغذی و جلوگیری از عوارض ناشی از آن می‌شود که بیشتر در کشورهای با درآمد متوسط و کم درآمد اجرا می‌شود [۱۷].

7- Docosaheptaenoic acid

5 -Polyunsaturated fatty acids

6- Eicosapentaenoic acid

هدف از این مقاله توجه به اهمیت ترکیبات زیست فعالی چون ویتامین‌ها، مواد معدنی، اسیدهای چرب و پروبیوتیک‌ها برای بهبود سلامتی و پیشگیری از بیماری‌های مزمن می‌باشد. همچنین این مطالعه به بررسی نقش فناوری درون پوشانی در بهبود پایداری، فراهمی زیستی، جلوگیری از هدر رفت مواد مغذی، رها سازی هدفمند و افزایش کارایی در دستگاه گوارش مواد مغذی می‌پردازد.

ویتامین‌ها

ویتامین‌ها ملکول‌های آلی و ریزمغذی‌های ضروری برای رشد و نگهداری هستند که در بدن مهره‌داران سنتز نمی‌شوند (به جز K, D و B7) و باید از طریق رژیم غذایی تامین گردند. در اوایل قرن بیستم (۱۹۰۶) بیوشیمیدان بریتانیایی به نام سر فردریک هاپکینز بیان نمود غذا علاوه بر کربوهیدرات، پروتئین، چربی، آب و مواد معدنی دارای فاکتورهای کمکی دیگری نیز هستند. واژه ویتامین اولین بار توسط فانک کشف شد که از دو کلمه حیاتی^۸ و آمینی^۹ تشکیل شده و بعد از آنکه دریافتند که همه آن‌ها آمین نیستند (نیتروژن یا آمینی هستند) حرف "e" در سال ۱۹۲۰ حذف گردید. بعدها مشخص شد ویتامین‌ها دارای فواید متفاوت و خواص شیمیایی متفاوتی هستند. ویتامین‌ها بر اساس نوع حالیت به دو گروه محلول در چربی (A, D, E, K) و محلول در آب (C و گروه B) طبقه بندی می‌شوند [۱۸، ۱۹].

ویتامین‌های محلول در آب شامل تیامین (B1)، ریبوفلاوین (B2)، نیاسین (B3)، اسید پانتوتینیک (B5)، پیریدوکسین (B6)، بیوتین (B7)، فولات (B9)، کوبالامین (B12) و اسید اسکوربیک (ویتامین C) هستند. این ویتامین‌ها در بدن ذخیره نمی‌شوند و باید به صورت منظم از طریق رژیم غذایی یا مکمل‌ها تأمین شوند [۸، ۹].

ویتامین A به صورت رتینول یا کاروتنوئیدهای پیش‌ساز در غذا وجود دارد و پس از جذب در روده، به رتینول تبدیل شده و توسط پروتئین حامل رتینول (RBP) به کبد یا

بافت‌ها منتقل می‌شود. ویتامین D3 در پوست از طریق نور UV یا از طریق رژیم غذایی تأمین می‌شود و پس از جذب، در کبد و کلیه به شکل فعال ۱/۲۵ دی هیدروکسی D3 تبدیل می‌شود. ویتامین E به صورت توکوفرول‌ها و توکوترینول‌ها وجود دارد و پس از جذب توسط ناقل‌های خاص، از طریق لیوپروتئین‌ها در بدن توزیع می‌شود. ویتامین K نیز به دو شکل K1 (گیاهی) و K2 (حیوانی و تخمیری) وجود دارد و پس از جذب، در سنتز فاکتورهای انعقادی در کبد نقش دارد. ویتامین‌های محلول در چربی دارای عملکرد فیزیولوژیکی متنوع‌تر و پیچیده‌تری هستند. ویتامین‌های محلول در چربی پس از ورود به روده کوچک از دیواره سلولی عبور می‌کنند و وارد گردش خون می‌شوند و در نهایت در کبد ذخیره می‌شوند [۳]. در صورتی که ویتامین K2 عمدتاً در روده بزرگ جذب می‌شود. ویتامین D بر خلاف سایر ویتامین‌های محلول در چربی، نقش پیش‌ساز هورمونی دارد و متابولیسم آن تحت تنظیم بازخوردی سطح کلسیم خون قرار دارد. مصرف توصیه‌شده ویتامین‌های محلول در چربی شامل A، D، E و K بر اساس سن، جنس و وضعیت فیزیولوژیکی مانند بارداری یا شیردهی متغیر است. به طور تقریبی، مقادیر توصیه شده برای بزرگسالان برای ویتامین A ۶۰۰ تا ۹۰۰ میکروگرم معادل رتینول، ویتامین D ۶۰۰ تا ۸۰۰ (IU)، ویتامین E ۱۵ تا ۳۰ میلی گرم و ویتامین K ۷۰ تا ۱۲۰ میکرو گرم در روز است [۷].

ویتامین‌های محلول در چربی

ویتامین A

ویتامین A در بدن به سه شکل یافت می‌شود که شامل رتینول، رتینال و رتینوئیک اسید است که با هم به عنوان رتینوئیدها شناخته می‌شوند و در منابع حیوانی یافت می‌شوند. کاروتنوئیدها که در منابع گیاهی یافت می‌شوند نیز می‌توانند به ویتامین A تبدیل شوند [۱۵]. ساختار آن زنجیره‌ای ایزوپرنوئید غیر اشباع دارد که دارای منشا حیوانی

جبران کمبود ویتامین، کاهش وزن و بهبود شاخص‌های چربی خون نقش دارند [۶،۲۱]. غنی‌سازی مواد غذایی روشی موثر برای مقابله با کمبود ویتامین A است تا از علل کمبود آن که شامل بیماری‌هایی چون نابینایی در دروان کودکی و مرگ و میر ناشی از عفونت‌های شدید را کاهش داد. به دلیل پایداری پائین ویتامین A در زمان فراوری و ذخیره سازی، می‌توان با درون پوشانی نمودن آن از تخریب و هدر رفت آن جلوگیری نمود [۲۲].

بیش از ۵۰ کاروتنوئید پروویتامین A وجود دارد که بیشتر در غلات، روغن‌های گیاهی، میوه و سبزیجات یافت می‌شوند دارای رنگدانه‌های آلی زرد تا نارنجی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی هستند. از شناخته شده‌ترین آن‌ها می‌توان به α -کاروتن، β -کاروتن، γ -کروتین، لیکوپن، لوتئین و کریپتوکسانتین اشاره نمود. بتاکاروتین در سبزیجات قرمز، نارنجی و سبز مانند هویج، گوجه فرنگی و اسفناج یافت می‌شود. بتاکریپتوکسانتین در مرکبات، انبه، خرمالو، پاپایا و فلفل یافت می‌شود. کاروتنوئیدها به صورت آزاد و یا استری شده با اسیدهای چرب (پالمیک، لوریک و میریستیک) وجود دارند [۲۰]. میزان جذب کاروتنوئیدها به عواملی چون نوع کاروتنوئید، ماتریکس غذا و میزبان بستگی دارد [۱۹].

رتینول شکل آبگریز ویتامین A است که در رشد، تقویت سیستم ایمنی و تمایز بافت اپیتلیال ضروری است و در درمان بیماری‌های پوستی نیز بسیار موثر است. به دلیل حلالیت کم در آب، تبلور در مای اتاق و پایداری کم در مقابل نور، اکسیژن و گرما می‌توان با کپسوله نمودن آن فراهمی زیستی و پایداری را افزایش داد. جذب رتینول در روده کوچک و بسیار بالاست (بازده جذب ۷۰ تا ۹۰٪) [۱۹،۲۳].

رتینوئیک اسید (RA) یا آل ترانس رتینوئیک اسید (ATRA)^{۱۰} متابولیت ویتامین A است که نقش مهمی در رشد و نمو، تکثیر سلولی، رشد جنینی، آپوپتوز، عملکرد

(مانند رتینول و مشتقات) و گیاهی (به عنوان پروویتامین مانند کاروتنوئیدها) است. بدن انسان توانایی تولید ویتامین A را ندارد بنابراین تامین آن از طریق رژیم غذایی صورت می‌گیرد. از مهم‌ترین نقش‌های آن می‌توان به رشد، تقویت سیستم ایمنی، بیان ژن، تولید مثل، انتقال نور به شبکیه و بینایی اشاره نمود [۱۹،۲۰]. دو شکل اصلی آن رتینوئیدها (رتینال، رتینول و رتینوئیک اسید) و کاروتن‌ها (α ، β و γ) هستند [۱۸]. غذاهایی با منشا حیوانی مانند جگر و شیر غنی شده دارای رتینوئید و غذاهای گیاهی مانند هویج، کدو حلوائی و اسفناج دارای کاروتنوئید هستند. دوز مورد نیاز روزانه این ویتامین برای زنان و مردان به ترتیب ۷۰۰ و ۹۰۰ میکرو گرم در روز توصیه شده است [۱۵].

کمبود ویتامین A منجر به کاهش سطح سرمی رتینول می‌شود که با بروز اختلالات متعدد فیزیولوژیکی مرتبط است. گزارش‌ها حاکی از آن است که بین ۴۴ تا ۵۰ درصد از کودکان پیش‌دبستانی در منطقه جنوب آسیا به کمبود شدید ویتامین A مبتلا هستند. همچنین، حدود یک‌سوم از مرگ‌ومیرهای جهانی در کشورهای بنگلادش و هند مرتبط با سوءتغذیه و کمبود ویتامین A است. کمبود ویتامین A به یکی از مسائل مهم بهداشت عمومی تبدیل شده و یکی از مهمترین علائم آن خشکی چشم است که حدود ۱۲۰ میلیون کودک در جهان به به دلیل دریافت ناکافی ویتامین در رژیم غذایی به آن مبتلا هستند. مطالعات نشان داده حدود ۶٪ از کودکان زیر پنج سال در آفریقا به دلیل کمبود ویتامین A جان خود را از دست می‌دهند. داده‌های سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهد سه نفر از هر پنج کودک به مکمل ویتامین A احتیاج دارد که بیشترین شیوع کمبود مربوط به جنوب آفریقا و جنوب آسیا است. چاقی به‌عنوان یکی از بیماری‌های غیرواگیر شایع در حال افزایش است و حدود ۱۳٪ از بزرگسالان جهان درگیر آن هستند. در بسیاری از جوامع، سوءتغذیه و چاقی به‌طور هم‌زمان دیده می‌شوند. کاروتنوئیدهای پروویتامین A در

سیستم عصبی، جلوگیری از پیری پوست، آلرژیک، درمان لوسمی میلوپیتیک (APL)¹¹، پیشگیری و درمان بیماری متابولیک و سرطان و جلوگیری از شیمی درمانی دارد [۲۴]. مطالعات نشان داده ATRA اثرات ضد توموری و درمانی مختلفی چون سارکوم کاپوزی، بوروبلاستوما، سرطان مثانه، سرطان تخمدان و ضد التهاب عروقی است [۲۵].

در پژوهشی Yousefi و همکاران (۲۰۲۳) استفاده از امولسیون W/O/W و پوشش آلزینات و کیتوزان حاوی Tween 80 و Span 80 به کپسوله کردن سزامول و رتینول پرداختند. نتایج نشان داد نمونه بهینه دارای ۹۲/۹۳ EE٪ و اندازه ذرات ۳۸۱/۹۴ نانومتر بودند که دارای Tween 80 و Span 80 W/O ۶/۲۴، ۱۰/۸۴ و ۳۷/۷۰٪ عنوان شدند. در خصوص آزادسازی در مایع شبیه سازی معده (SGF)، به ترتیب ۳۹٪ و ۲۲٪ برای سزامول و رتینول و در مایع شبیه سازی روده (SIF) ۵۶٪ و ۲۲٪ بیان شد [۲۳].

ویتامین D

ویتامین D به دو صورت D¹² (غذاهای گیاهی) و D¹³ (غذاهای حیوانی و پوست) وجود دارند که هر دو ایزومر این ویتامین در مکمل‌ها و غنی‌سازی مواد غذایی مورد استفاده هستند. ویتامین D³ در روده انسان به صورت موثرتری جذب می‌شود [۲۶].

در گذشته اعتقاد بر این بود که D² و D³ یکی هستند و می‌توانند به جای یکدیگر مورد استفاده قرار گیرند اما امروزه شواهد علمی تفاوت‌هایی در بین اثر بخشی زیستی آن‌ها را نشان می‌دهد (متابولیسم و پاکسازی بالاتر D² در کبد و D³ در کلیه) [۲۷]. این ویتامین همراه با چربی رژیم غذایی جذب روده کوچک می‌شود. سپس امولسیون لیپیدها توسط اسیدهای صفراوی آغاز می‌گردد و آنزیم لیپاز پانکراس، تری‌گلیسیریدها را هیدرولیز می‌کند و میسل حاوی لیپید و

ویتامین D وارد انتروسیست می‌شوند [۱۹]. مهمترین عملکرد بیولوژیکی این ویتامین حفظ غلظت کلسیم و فسفر خون است. ویتامین D باعث استحکام استخوان‌ها، محافظت از پوست و جلوگیری از پیری و جلوگیری از سرطان‌هایی مانند روده بزرگ، سینه، پروستات و پانکراس می‌شود. مکانیسم ضد تکثیر، افزایش آپوپتوز و افزایش ایمنی آن باعث کاهش سرطان و مرگ و میر می‌شود [۲۸]. به دلیل محرومیت و ناکافی بودن دوز اشعه ماورا بنفش (به دلایلی چون موقعیت جغرافیایی، زاویه تابش، مدت قرار گیری، فرهنگی و مذهبی) و اندک بودن منابع طبیعی غنی از ویتامین D (روغن کبد ماهی، ماهی قزل‌آلا، تخم مرغ، چند گونه وحشی قارچ و گونه خاصی از جلبک‌های گیاهی) و همچنین داده‌های تغذیه‌ای کشورهای مختلف، می‌توان به کمبود این ویتامین در تغذیه افراد پی برد که با غنی‌سازی محصولات، می‌توان از بروز بیماری‌ها جلوگیری نمود [۲۷]. دوز مورد نیاز برای بزرگسالان (۱۹ تا ۷۰ سال) ۱۵ میکروگرم در روز یا ۶۰۰ IU در روز و برای افراد بالای ۷۰ سال ۲۰ میکروگرم در روز یا ۸۰۰ IU در روز توصیه شده است [۱۵].

گروه‌های در معرض خطر بالای کمبود ویتامین D شامل سالمندان، بیماران بستری، بیماران چاق، افراد تیره پوست، زندگی در نقاطی با محدودیت نور آفتاب و اشخاصی که دارای بیماری‌های مزمن مانند نارسایی کلیه می‌باشند [۷]. کمبود ویتامین D باعث اختلالات ایمنی مانند بیماری التهاب روده، مولتیپل اسکلروزیس، آرتریت روماتوئید، اسکلروزیس، فشار خون بالا، بیماری قلبی عروقی، دیابت، عفونت میکروبی، و سندرم حاد تنفسی می‌شود [۲۶]. همچنین کمبود این ویتامین می‌تواند باعث ریکتز^{۱۴}،

^{۱۴} در این بیماری استخوان‌ها نمی‌توانند به طور طبیعی کلسیفیه شوند و موجب اختلال در رشد و غیز طبیعی شدن اسکلت می‌شود و بیشتر کودکان و نوجوانان سیاه پوست را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

11- Promyelocytic leukemia

¹² نام دیگر آن ارگوکلسیفرول است.

¹³ نام دیگر آن کوله کلسیفرول است.

می شود و دریافت آن به طور میانگین حدود ۲ تا ۳ میکروگرم در روز بیشتر از کشورهای است که چنین سیاستی را ندارند [۵].

در پژوهشی Esmaili و همکاران (۲۰۲۱) به نانوکپسوله کردن ویتامین D پرداختند. به دلیل منابع طبیعی محدود ویتامین D، کمبود آن جمعیت زیادی از در سراسر جهان را تحت تأثیر قرار داده است. کپسوله کردن ویتامین D موجب افزایش فراهمی زیستی و پایداری آن در پردازش و ذخیره سازی می گردد. نتایج نشان داد کپسوله کردن باعث به حداقل رسیدن هدر رفت در زمان پردازش، ذخیره سازی و عبور از معده می گردد و از عوامل موثر در فراهمی زیستی اندازه کپسول، نسبت دیواره به هسته، ترکیب روغن حامل و روش درون پوشانی بیان شد [۲۹].

در پژوهشی دیگر Lips و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی وضعیت ویتامین D در مردم سراسر جهان پرداختند. نتایج نشان داد در استرالیا و آمریکا لاتین میزان ویتامین D کافی بوده اما افراد در آسیا، خاورمیانه و اروپا با کمبود این ویتامین مواجه هستند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که ۵۸-۶۲٪ کودکان، ۴۴-۶۰٪ بزرگسالان و ۴۱-۶۲٪ سالمندان در خاورمیانه با کمبود این ویتامین مواجه هستند. همچنین کمبود ویتامین D در نوردان ایران ۸۶٪ هند ۶۱٪ و ترکیه ۵۱٪ است. به دلیل نوع پوشش، کمبود مود غذایی غنی شده و کاهش قرار گرفتن در معرض نور آفتاب کمبود این ویتامین در زنان بیشتر از مردان است. از مهمترین عوامل کمبود ویتامین D فعالیت کم بدنی، افزایش شاخص توده بدنی (BMI)، کمبود مواد غذایی غنی شده، کاهش قرار گرفتن در معرض نور آفتاب، افزایش مصرف کرم ضد آفتاب و فعالیت اجتماعی ضعیف است و عوامل تعیین کننده برای افزایش این ویتامین غنی سازی مواد غذایی با ویتامین D و مکمل های ویتامین D می باشند. نتایج در خصوص غنی سازی مواد غذایی به خصوص در شیر، محصولات لبنی و

استئومالاسی^{۱۵}، استئوپروز^{۱۶} و راشیتیسم^{۱۵} شود [۱۵]. از آنجایی تعداد کمی از غذاها به مقدار کم حاوی ویتامین D هستند، می توان با غنی سازی مواد غذایی نیاز تغذیه ای روزانه را تامین نمود. به دلایلی چون آبگریزی، اکسیداسیون، فراهمی زیستی کم، پایداری شیمیایی ضعیف، حساسیت به نور، فشار و شرایط پردازش، غنی سازی محصولات با ویتامین D چالش برانگیز است که می توان با کپسوله کردن آن در مقیاس نانو و یا میکرو بر این مشکلات غلبه نمود. از سوی دیگر در طی غنی سازی و ذخیره سازی مواد غذایی مشکلاتی مانند همگنی در ماتریکس مواد غذایی، کاهش مقدار در طی پردازش و ذخیره سازی، تخریب فیزیکوشیمیایی، و برهمکنش با سایر اجزای مواد غذایی که در طعم، ظاهر و بافت مواد غذایی تغییر ایجاد می کند، باعث کاهش مقبولیت و بازارپسندی می شود که با ریزپوشانی کردن آن می توان از چنین مشکلاتی جلوگیری نمود [۲۷]. از رایجترین محصولات غنی شده با ویتامین D می توان به محصولات لبنی، غلات صبحانه و نان اشاره نمود. مطالعات نشان داده غنی سازی می تواند به طور قابل توجهی وضعیت دریافت ویتامین D را بهبود بخشد. به عنوان مثال در کشور فنلاند، سیاست اجباری غنی سازی مواد غذایی با ویتامین D اجرا شد و موجب افزایش غلظت سرمی ۲۵-هیدروکسی ویتامین D به میزان ۱۸ نانومول بر لیتر در جمعیت گردید. سیاست غنی سازی ویتامین D در کشورهای مختلف جهان متفاوت است که می توان آن ها را به سه گروه غنی سازی اجباری (مانند کانادا و فنلاند)، غنی سازی داوطلبانه (مانند بریتانیا و ایرلند) و غنی سازی محدود (مانند آسیا و اروپا) تقسیم نمود. اجرای سیاست غنی سازی اجباری به دلایلی چون محدود بودن منابع طبیعی ویتامین D در رژیم غذایی، مصرف پائین مکمل ها و افزایش دریافت ویتامین بدون تغییر رفتار تغذیه ای افراد، مورد توجه قرار گرفته است. شوهده حاکی از آن است که غنی سازی موجب افزایش این ویتامین

^{۱۶} موجب پوکی و شکستگی استخوان می شود.

^{۱۵} موجب ضعف شدن استخوان و ایجاد استخوان های نرم، انعطاف پذیر، دفرمه و شکننده می شود.

آب پرتقال نشان داد می‌توان با غنی سازی مواد غذایی این مشکل را بر طرف نمود [۳۰].

در پژوهشی Lee و Duggan (۲۰۲۲) به بررسی کارایی و بهبود پایداری ویتامین D3 به وسیله میکروژل ایزوله پروتئین آب پنیر (WPI) پرداختند. تجزیه و تحلیل‌ها در برابر عواملی چون دما (۷۲ درجه سانتی گراد برای ۱۵ ثانیه و ۶۳ درجه سانتی گراد برای ۳۰ دقیقه)، نور UV (۲۵۴ نانومتر) و نگهداری در مدت چهار هفته در دماهای ۴، ۲۰ و ۲۰- درجه سانتی گراد انجام شد. نتایج نشان داد میکروژل‌ها توانستند ۹۸٪ ویتامین D3 را محصور کنند و به طور قابل توجهی موجب پایداری آن‌ها در مقابل تنش‌های محیطی شدند. انتشار در دهان و معده ناچیز و در روده و پایان هضم ۹۷٪ آزاد شدند که نشان می‌دهد میکروژل‌ها می‌توانند محافظت مناسبی شرایط هضم و محیطی داشته باشند [۳۱].

ویتامین E

این ویتامین در سال ۱۹۲۲ در سبزیجات کشف شد که ماده‌ای مشتق شده از گیاه و محلول در چربی که در ساختار خود یک حلقه کرومانول با یک زنجیره جانبی در موقیت C2 دارد. ویتامین E آنتی اکسیدانی طبیعی است از غشا سلولی و لیپیدها در برابر آسیب اکسیداتیو محافظت می‌کند. این ویتامین با کاهش اکسیداسیون LDL و بهبود عملکرد اندوتلیال، در کاهش خطر بیماری‌های قلبی عروقی نقش دارد. همچنین با اثرات ضدالتهابی، تسریع ترمیم زخم، محافظت از پوست در برابر آسیب‌های ناشی از اشعه UV و رادیکال‌های آزاد مؤثر است. از منابع این ویتامین می‌توان به روغن‌های گیاهی، آجیل، حبوبات، غلات کامل، سبزیجات و میوه شاره نمود. این ویتامین اثرات مثبتی بر سد پیتلیال روده دارد [۳، ۷، ۱۹]. همچنین مطالعات نشان داده این ویتامین در پیشگیری از سرطان سینه و کاهش علائم یائسگی نیز مفید است [۳۲]. دوز مورد نیاز آن برای بزرگسالان ۱۵ میلی گرم در روز توصیه شده است. از مهمترین علائم کمبود ویتامین E می‌توان به شکستن گلبول‌های قرمز (همولیز اریتروسیت)، اختلال عصبی-عضلانی، اختلال در بینایی و تکلم اشاره نمود [۱۵].

در پژوهشی Kiani و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تولید و ارزیابی خصوصیات فیزیکوشیمیایی حامل‌های لیپیدی نانو ساختار (NLC) و نانوکپسول‌های لیپیدی (LNC) ویتامین E به منظور غنی سازی شیر پرداختند. راندمان درون پوشانی بهینه‌ی NLC و LNC را به ترتیب ۹۵ و ۹۹٪ بیان شد. نتایج طیف سنجی نشان داد هیچ واکنش نامطلوبی بین ویتامین و نانوحامل رخ نداده است. در خصوص رهاسازی در شرایط مشابه معده برای NLC و LNC به ترتیب ۲۹ و ۴٪ بیان شد. همچنین در ارزیابی حسی نیز این نانوحامل‌ها مورد پذیرش مصرف کنندگان قرار گرفت [۳۳].

ویتامین K

این ویتامین نام خود را از کلمه دانمارکی Koagulation به معنای انعقاد گرفته و به دلیل نقش خود در سنتز پروتئین‌های لخته کننده خون و اثرات ضد التهابی شناخته می‌شود. این ویتامین از خانواده ترکیبات محلول در چربی و ساختار پایه آن ۲- متیل ۱،۴-نفتوکینون و یک زنجیره جانبی آلیفاتیک متغیر می‌باشد. ویتامین K به فرم‌های فیلوکینون (K)، مناکینون (K₂) و منادیون (K₃) وجود دارد که فیلوکینون‌ها منبع گیاهی دارند، مناکینون‌ها در بدن و توسط باکتری‌ها ساخته می‌شوند و منادیون به شکل صنعتی یا سنتتیک تولید می‌شود و پیش ساز ویتامین محسوب می‌شود. این ویتامین به عنوان یک کوفاکتور ضروری در مسیرهای انعقاد خون عمل می‌کند و نقش حیاتی در فعال سازی پروتئین‌های وابسته به ویتامین K دارد که برای هموستاز طبیعی ضروری هستند. این ویتامین در متابولیسم پروتئین‌های استخوان و به ویژه استئوکلسین نقش دارد و بدون آن استئوکلسین نمی‌تواند به مواد معدنی‌ای که استخوان را تشکیل می‌دهند متصل شود و موجب کاهش چگالی استخوان می‌شود. دوز مورد نیاز این ویتامین برای زنان و مردان به ترتیب ۹۰ و ۱۲۰ میکروگرم در روز توصیه شده است [۱۵]. کمبود ویتامین K موجب بیماری هموراژیک (خون ریزی غیر قابل کنترل)، اختلالات انعقادی و افزایش خطر خونریزی شود. همچنین این ویتامین در پیشگیری از

میزان توصیه شده روزانه توسط $RD1^{18}$ برای ویتامین B1: 1.1-1.2 mg, B2: 1.1-1.3 mg, B3: 14-16 mg, B5: 5 mg, B6: 1.3-1.7 mg, B7: 30 μ g, B9: 400 μ g و B12: 2.4 μ g توصیه شده و برای افراد آسیب پذیر، کوکان (برای رشد، تکامل، متابولیسم و رشد سیستم عصبی) و زنان باردار (برای رشد جنین، تقسیم سلولی، تولید خون، انتقال انرژی و مواد مغذی، سلامت مادر و تغذیه با شیر مادر) بیشتر از این مقدار توصیه گشته است [۸]. کپسوله نمودن ویتامین‌های گروه B، موجب افزایش پایداری آن در برابر عوامل محیطی، بهبود دسترسی زیستی، رهایش کنترل شده در دستگاه گوارش، جذب بهتر در بدن و افزایش ماندگاری در محصولات غذایی می‌شود [۱،۳۴].

ویتامین B1

ویتامین B1 یا تیامین، کوآنزیم TPP (تیامین پیروفسفات) است و نقش مهمی در متابولیسم انرژی دارد. این ویتامین نقش حیاتی در متابولیسم انرژی، عملکرد سیستم عصبی، سلامت قلب و سنتز نوروترنسمیترها دارد. تیامین به عنوان کوآنزیم تیامین پیروفسفات در اکسیداسیون گلوکز عمل می‌کند و اثرات مستقیم و غیر مستقیمی بر متابولیسم سلولی دارد. تیامین به عنوان کوآنزیم در فرآیند دکربوکسیلاسیون آنزیمی اسید تارتاریک قرمز عمل می‌کند. تجمع اسید تارتاریک قرمز و اسید تارتاریک می‌تواند منجر به اختلالات عصبی، نرسایی گردش خون، نرسایی قلبی و بی‌اشتهایی شود [۳۵]. از مهمترین منابع این ویتامین می‌توان به لبنیات، برنج قهوه‌ای، غلات کامل، گوشت، حبوبات و نان‌های غنی‌شده اشاره نمود و به دلیل عدم ذخیره در بدن، مصرف روزانه آن ضروری است. میزان مورد نیاز روزانه ن بری زنان و مردان به ترتیب ۱/۱ و ۱/۲ میلی گرم در روز توصیه شده است [۱۵]. کمبود تیامین در صورت عدم رعایت مصرف

ترومبوز وریدی، کاهش کلسیفیکاسیون عروقی، و حفظ سلامت استخوان‌ها از طریق فعال‌سازی پروتئین‌هایی مانند استئوکلسین و MGP^{17} نقش دارد. همچنین مطالعات نشان داده K1 و k2 دارای اثرات زیستی مهمی هستند، مانند فعالیت‌های ضد تکثیری، القای پیش آموختگی و تحریک اتوفاژی می‌باشند که موجب مهار رشد سلول‌های سرطانی می‌شوند. حدود ۱۰ تا ۵۰ درصد از نیاز روزانه بدن به ویتامین K از طریق سنتز باکتری‌های مفید روده تأمین می‌شود و بخش اعظم نیاز بدن باید از طریق رژیم غذایی تأمین گردد. میزان مصرف روزانه این ویتامین در کشورهای مختلف متفاوت است، به عنوان مثال در ایالت متحده مقدار توصیه شده روزانه برای زنان ۹۰ میکرو گرم و برای مردان ۱۲۰ میکرو گرم است و در بریتانیا مصرف روزانه را بر اساس وزن بدن و معادل ۱ میکرو گرم به ازای هر کیلوگرم بین نموده‌اند. ویتامین K به ویژه در فرم‌های مکمل و غذاهای فراوری شده با محدودیت‌هایی چون ناپایداری در برابر نور، حرارت و اکسیداسیون و همچنین فراهمی زیستی پائین مواجه است که می‌توان با درون پوشانی آن، این مشکلات را برطرف نمود [۷،۱۵،۱۹].

ویتامین‌های محلول در آب

ویتامین‌های گروه B

ویتامین‌های گروه B محلول در آب هستند و عملکردهای حیاتی و متنوعی در بدن ایفا می‌کنند. این گروه شامل تیامین (B1)، ریبوفلاوین (B2)، نیاسین یا نیاسین آمید (B3)، اسید پانتوتنیک (B5)، پیریدوکسین (B6)، بیوتین (B7)، فولات (B9) و کوبالامین (B12) است. فرایند جذب آن‌ها عمدتاً در روده کوچک انجام می‌شود و به غلظت وابسته است که در سطوح پائین، جذب از طریق سیستم‌های انتقال فعال صورت می‌گیرد و مقادیر بالاتر، جذب عمدتاً از طریق انتشار غیرفعال انجام می‌شود [۸،۹].

در پژوهشی Juhász و همکاران (۲۰۲۱) ویتامین B1 را در لیپوزوم‌های مبتنی بر آسولکتین به منظور رهایش کنترل شده وابسته به pH کپسوله نمودند. نانوحامل‌ها دارای اندازه هیدرودینامیکی میانگین حدود ۲۲۵ نانومتر در شرایط فیزیولوژیکی و ۲۴۵ نانومتر در شرایط اسیدی بودند. بررسی آزادسازی در شرایط فیزیولوژیکی (pH=7.4) و معده (pH=1.5) نشان داد که لیپوزوم‌ها آزادسازی کنترل شده داشتند و ماندگاری بیشتری در مقایسه با فرم آزاد (حدود ۴/۵ برابر در شرایط فیزیولوژیکی و ۱/۵ در شرایط معده) داشتند [۳۵].

ویتامین B2

این ماده در سال ۱۸۷۹ مورد توجه شیمیدانان قرار گرفت و در سال ۱۹۳۶ انجمن شیمی آمریکا واژه فلاوین را انتخاب نمود و در نهایت ریوفلاوین پذیرفته شد. ریوفلاوین رنگدانه طبیعی فلورسنت زرد-سبز دارد و نام دیگر آن لاکتوفلاوین است و به صورت کرسنال‌های نارنجی-زرد دیده می‌شود [۳۸]. ویتامین B2 یا ریوفلاوین توسط همه گیاهان و اکثر میکروارگانیسم‌ها تولید می‌شود و نقش حیاتی در رشد و تولید مثل انسان و حیوانات دارد. این ویتامین در متابولیسم انرژی، رشد و ترمیم بافت‌ها، تولید گلوبول‌های قرمز، عملکرد آنتی‌اکسیدانی و حفظ سلامت پوست و چشم نقش دارد. ویتامین B2 به عنوان پیش ساز کوآنزیم‌های FAD²⁰ و FMN²¹ عمل می‌کند و در واکنش‌های ردوکس و همچنین در متابولیسم کربوهیدرات‌ها، لیپیدها، اجسام کتون و پروتئین‌ها نقش دارند. ریوفلاوین در تریوفان به نیاسین، فعال سازی ویتامین‌های B6 و B9 و انتقال آهن نیز موثر است. از مهمترین منابع آن می‌توان به لبنیات، تخم‌مرغ، گوشت قرمز، جگر، ماهی‌های چرب، مغزها، سبزیجات برگ‌سبز، برخی میوه‌ها و غلات غنی‌شده اشاره نمود. ریوفلاوین از روده کوچک جذب و به بافت‌ها منتقل می‌شود، و مقدار اضافی آن به دلیل محلول بودن در آب، از

روزانه ^{۱۹}(RDI)، اختلال در جذب روده با میزان دفع بالا در افراد الکلی، دارای سندرم نقص ایمنی اکتسابی (AIDS) و افراد دارای سوء تغذیه رخ می‌دهد. همچنین افراد دارای شرایط خاص مانند مسن، دیابت، دارای بیماری دستگاه گوارش، انجام جراحی مربوط به چاقی، پرکاری تیروئید، نارسایی کلیه، رژیم غذایی نامتعادل، روزه دار، گرسنگی طولانی مدت، بارداری و شیردهی بیشتر مستعد کمبود هستند. کمبود ویتامین B1 در رژیم غذایی موجب اختلال در فرایندهای متابولیکی و بیوشیمیایی مانند اختلال در عملکرد میتوکندری، اختلال در سنتز انتقال دهنده‌های عصبی، اختلال در متابولیسم گلوکز و اختلال در فرایندهای بیوانرژی می‌شود. همچنین کمبود تیامین ممکن است منجر به بروز بیماری‌هایی مانند بری‌بری (نوع خشک با علائم عصبی مانند بی‌حسی، ضعف عضلانی و آتاکسی و در نوع مرطوب با علائمی مانند نارسایی قلب) سندرم ورنیکه-کورساکوف (اختلال مغزی شدید همراه با گیجی، اختلالات بینایی، اختلال در حافظه و آلزایمر)، پارکینسون، بیماری هانتینگتون، کاردیومیوپاتی، ضعف عمومی، بی‌اشتهایی، خستگی مزمن و تحریک‌پذیری شود [۳۶]. عدم تشخیص و درمان کمبود این ویتامین می‌تواند منجر به مرگ شود که در نوزادان می‌تواند چند ساعت بعد از بروز علائم بالینی رخ دهد. در گذشته نتایج غنی سازی تیامین در فیلپین نشان داد مصرف برنج غنی سازی شده با تیامین، نیاسین و آهن موجب کاهش چشمگیر بری‌بری (که دومین عامل مرگ و میر بعد از سل بود) شد و مرگ و میر ناشی از بری‌بری در سال اول مداخله در نوزدان ۵۲٪ کاهش یافت [۱۷]. ویتامین B1 در معرض تابش اشعه ماورا بنفش، pH و دیگر عوامل محیطی غیر فعال می‌شود که می‌توان با کپسوله نمودن آن با روش‌هایی چون خشک‌کن انجمادی موجب افزایش پایداری، حلالیت چربی و دسترسی زیستی را بهبود بخشید [۳۷].

21- Flavin mononucleotide

19- Recommended daily intake

20- Flavin adenine dinucleotide

و آهن وابسته است. مقدار مورد نیاز این ویتامین برای زنان و مردان به ترتیب ۱۴ و ۱۶ میلی گرم در روز توصیه شده است (کتاب). کمبود خفیف نیاسین می تواند موجب کاهش متابولیسم و سردرد شود و کمبود شدید آن منجر به بیماری پلاگر با علائمی چون اسهال، اختلالات پوستی، درماتیت، زوال عقل و حتی مرگ شود [۴۰].

ویتامین B5

در سال ۱۹۳۱ راجر جی. ویلیامز، بیوشیمیست آمریکایی اسید پانتوتینیک را به عنوان عامل رشد شناسایی کرد و از واژه یونانی "pantos" به معنی "everywhere" آن را نامگذاری کرد. او و همکارانش مشاهده کردند که این ترکیب اسیدی می تواند رشد مخمر ساکارومایسس سرویزیه را تحریک کند، بنابراین آن را به عنوان "جزء سازنده ماده زنده" معرفی کردند. ویتامین B5، یا D-پانتوتینیک اسید (D-PA) ماده مغذی ضروری و پیش ساز کوآنزیم A(CoA) است و نقش مهمی در فرآیندهای بیولوژیکی مانند تنظیم متابولیسم کربوهیدرات ها، چربی ها، پروتئین ها و اسید نوکلئیک دارد. همچنین در مغز استیل CoA برای ساخت میلین و انتقال دهنده عصبی استیل کولین ضروری است. این ویتامین در متابولیسم انرژی، سنتز کوآنزیم A (CoA)، سنتز هورمون ها، ساخت گلبول های قرمز، سیستم ایمنی و حفظ سلامت پوست، مو و ناخن دارد. از مهمترین منابع این ویتامین می توان گوشت گاو، ماکیان، جگر، ماهی، تخم مرغ، لبنیات، حبوبات، غلات کامل، سبزیجات برگ سبز، گوجه فرنگی و بروکلی اشاره نمود. دوز مورد نیاز این ویتامین ۵ میکروگرم در روز توصیه شده است [۱۵]. کمبود ویتامین B5 می تواند منجر به علائمی مانند خستگی، سر درد، تحریک پذیری، بی حسی یا سوزن سوزن شدن دست و پا، اختلال در هماهنگی و گرفتگی عضلات، اختلالات خواب، تهوع، استفراغ و کاهش اشتها شود. اسید پانتوتینیک در زمان فریز کردن، کنسرو کردن و فرآیندهای مرتبط با تصفیه تخریب می شود که می توان از فرآیند درون پوشانی به منظور جلوگیری از تخریب و هدر رفت آن استفاده نمود [۱۵، ۴۱].

طریق ادرار به شکل متابولیت هایی مانند ۷-هیدروکسی متیل ربیوفلاوین و لومی فلاوین دفع می شود. به دلیل عدم ذخیره ن در بدن، مصرف روزانه آن ضروری است. مقدار مورد نیاز روزانه این ویتامین برای زنان و مردان ۱/۱ و ۱/۳ میلی گرم در روز توصیه شده است (کتاب). کمبود ربیوفلاوین می تواند منجر به علائمی مانند خستگی، التهاب زبان، ترک های گوشه دهان، زخم لب، حساسیت به نور، مشکلات بینایی، کم خونی و اختلالات عصبی شود. این ویتامین در برابر حرارت، اسید و کسیداسیون مقاوم است اما نسبت به نور و به ویژه اشعه ماوراء بنفش (UV) حساس است [۳۸، ۳۹]. تولید صنعتی ربیوفلاوین از طریق سنتز شیمیایی یا تخمیر صورت می گیرد. در روش تخمیر به دلیل انجام فرآیند در یک مرحله موجب مقرون به صرفه شدن آن می شود اما سنتز شیمیایی روشی پیچیده، چند مرحله ای و پرهزینه است. به همین دلیل تولید تخمیری ربیوفلاوین امروزه جایگزین کامل روش شیمیایی شده و از نظر اقتصادی و زیست محیطی نیز مناسب تر است. این ویتامین از میکروارگانیسم هایی مانند *Bacillus subtilis*، *Candida famata*، *Ashbya gossypii* استخراج می شوند [۳۹].

ویتامین B3

ویتامین B3 یا نیاسین دارای دو ساختار شیمیایی، نیکوتینیک اسید و نیکوتین آمید است و دارای نقش حیاتی در متابولیسم انرژی، عملکرد سیستم عصبی، سلامت پوست، و تنظیم کلسترول خون می باشد. نیاسین پیش ساز دو کوآنزیم مهم نیکوتین آمید آدنین دی نوکلئوتید NAD^+ (نیکوتین آمید آدنین دی نوکلئوتید) و $NADP^+$ (شکل فسفات NAD) است که در فرایندهای متابولیسم کربوهیدرات، لیپید و پروتئین نقش دارد. این ویتامین در سنتز DNA، عملکرد سیستم ایمنی و ترمیم آسیب های ژنتیکی نیز نقش بسزایی دارد. منابع غنی از نیاسین شامل گوشت قرمز، مرغ، ماهی، جگر، بادام زمینی، حبوبات، غلات کامل و تخم مرغ می باشند. همچنین بدن انسان می تواند مقدار محدودی نیاسین را از آمینو اسید تریپتوفان سنتز کند که این فرایند به مقدار کافی ویتامین B6

ویتامین B6

پوستی اطراف چشم و دهان، التهاب زبان، خارش پوست، اختلالات عصبی، خستگی، تهوع، افسردگی، بی‌خوابی، و در موارد شدید توهم و بی‌حسی و گزگز بازوها و پاها شود. این کمبود اغلب در افراد با اختلالات ژنتیکی یا مصرف مداوم سفیده تخم‌مرغ خام (روزانه بیش از ۲ دوز و به مدت چند ماه مصرف شود) به دلیل وجود آویدین رخ می‌دهد) پختن تخم مرغ باندهای پروتئینی را دنا توره می‌کند) [۱۵].

ویتامین B9

فولات در دهه ۱۹۳۰ در حین تحقیق بر روی کم خونی ماکروسیتیک زنان باردار کشف شد و در سال ۱۹۴۱ اسید فولیک به عنوان شکل سنتتیک ویتامین B9 از برگ اسفناج جدا سازی شد. واژه فولات از واژه لاتین "Folium" به معنی برگ گرفته شده است. فولات به شکل گلوتامیل (حاوی چندین باقی مانده گلوتامات) یافت می‌شود و اسید فولیک (شکل سنتتیک ویتامین B9) به صورت منوگلوتامات با یک واحد گلوتامات است. همچنین فولات‌های طبیعی دارای ساختار کاهش یافته و اسید فولیک اسید فولیک به طور کامل اکسید می‌شود. تفاوت‌های شیمیایی تاثیر مستقیمی بر فراهمی زیستی دارند، به طوری که فولات در سطوح مصرف معادل، جذب بالاتری نسبت به فولات دارد. مولکول اسید فولیک از سه بخش اسید گلوتامیک، اسید P-آمینوبنزوئیک و پترین تشکیل شده و فرمول مولکولی آن $C_{19}H_{19}N_7O_6$ است. این ویتامین به عنوان اسید فولیک یا فولات نیز شناخته می‌شود و نام شیمیایی آن Pteroylglutamic acid (PGA) می‌باشد. ویتامین B9 نقش مهمی را در تقسیم سلولی، تشکیل مغز استخوان، تشکیل نخاع و سیستم عصبی جنین ایفا می‌کند. همچنین در تولید انرژی، متابولیسم اسیدهای نوکلئیک و آمینه و حفظ فعالیت سلول‌ها ضروری است. اسید فولیک ماده کریستالی زرد رنگ و بی‌بو با قابلیت انحلال پذیری محدود در آب و نامحلول در حلال‌های چرب است. این ماده پایدار به حرارت در محیط‌های خنثی و قلیایی است و نور خورشید حساس است. فولات در غذا و بدن وجود دارد در حالی که اسید فولیک بیشتر در مکمل‌ها

این ویتامین به سه شکل پیریدوکسال، پیریدوکسین و پیریدوکسامین وجود دارند و می‌توانند به کوآنزیم PLP (پیریدوکسال فسفات) تبدیل شوند و در متابولیسم کربوهیدرات، آمینواسید و اسید چرب نقش دارند. از مهمترین منابع B6 می‌توان به گوشت، ماکیان، ماهی، سیب زمینی و میوه‌ها (به جز مرکبات) اشاره نمود. ویتامین B6 بر خلاف دیگر ویتامین‌های محلول در آب به مقدار زیادی در بافت‌های عضلانی ذخیره می‌شود. مقدار مورد نیاز روزانه این ویتامین ۱/۳ میلی گرم در روز توصیه شده است. کمبود آن به نام پیریدوکسین نیز شناخته می‌شود و موجب افزایش سطح IL-4 و کاهش تولید آنتی‌بادی می‌شود. همچنین کمبود ویتامین B6 موجب کاهش نوروتراسمیترها، افسردگی، گیجی و تشنج می‌شود [۱۵، ۱۶]. ویتامین B6 به حرارت و اسید مقاوم و به اکسیداسیون، نور ماورابنفش و قلیا حساس است و حدود ۵۰٪ در زمان فراوری و پخت از بین می‌رود [۴۲].

ویتامین B7

ویتامین B7 یا بیوتین یکی از ویتامین‌های محلول در آب گروه B است که نقش اساسی در متابولیسم کربوهیدرات‌ها، چربی‌ها و پروتئین‌ها، سنتز اسیدهای چرب، گلوکونئوز و فعالیت آنزیم‌های کربوکسیلاز ایفا می‌کند. کمبود آن نقش مهمی در ایجاد بیماری‌های التهابی مزمن ایفا می‌کند و استفاده آن در رژیم غذایی برای حفظ سلامت پوست، مو، ناخن‌ها و عملکرد سیستم عصبی ضروری است. بیوتین در منابع غذایی گوناگونی همچون جگر، زرده تخم‌مرغ، بادام‌زمینی، دانه آفتابگردان، ماهی سالمون، آووکادو، سیب‌زمینی شیرین و سبزیجات برگ‌سبز وجود دارد. همچنین بیوتین توسط باکتری‌های دستگاه گوارش نیز تولید می‌شود. مقدار مورد نیاز این ویتامین برای بزرگسالان ۳۰ میکروگرم در روز توصیه شده است. کمبود بیوتین نادر است اما می‌تواند منجر به علائمی مانند ریزش مو، شکنندگی ناخن‌ها، بثورات

و غذاهای غنی شده یافت می شود. از مهمترین منابع فولات می توان به سبزیجات، میوه ها، حبوبات و محصولات غلات غنی شده اشاره نمود. به دلیل اینکه این ویتامین نقش مهمی در دوران بارداری دارد، نیاز روزانه زنان باردار چندین برابر بیشتر از نیاز روزانه افراد است و با توجه به اینکه تشکیل لوله عصبی جنین به طور معمول پیش از آگاهی زن از بارداری رخ می دهد مصرف روزانه مکمل های حاوی ۴۰۰ میکروگرم اسید فولیک توصیه می شود. مصرف این دوز از اسید فولیک همراه با دریافت غذاهای حاوی فولات، نقش حیاتی در پیشگیری از نقص های مادرزادی ایجاد می کند و در عین حال از حد بالای ایمن روزانه (۱۰۰۰ میکروگرم) تجاوز نمی کند. کمبود B9 نادر است و بیشتر در افراد الکلی (به دلیل اختلال در متابولیسم و مختل شدن جذب فولات و همچنین سوء تغذیه)، زنان باردار (برای جلوگیری از بروز نقص های لوله عصبی در جنین و افزایش سنتز اسید نوکلئیک، لازم است پیش از بارداری به اندازه کافی اسید فولیک مصرف کنند) و افراد مبتلا به اختلالات گوارشی (مانند سندرم روده تحریک پذیر، سلیاک، تب دنگی و گاستریک به دلیل اختلال در جذب فولات) مشاهده می شود. از مهمترین علائم کمبود این ویتامین می توان به کم خونی و اختلالات عصبی مانند ضعف، خستگی و تحریک پذیری اشاره نمود. منابع آن شامل حبوبات، سبزیجات، میوه ها و غلات کامل است. به طور کلی ویتامین B9 نقش مهمی در سلامت بارداری، پیشگیری از افسردگی، سلامت قلب، سلامت پوست و درمان آکنه و کاهش سرطان دارد و موجب فعال شدن ویتامین B12 نیز می شود. فولات به عنوان کوآنزیم در سنتز اسید نوکلئیک و متابولیسم های اسید آمینه عمل می کند. کوآنزیم های THF (تترا هیدروفولات) و DHF (دی هیدروفولات) در ساخت DNA و تشکیل سلول جدید استفاده می شوند. تحقیقات نشان داده ویتامین C تخریب کوآنزیم طبیعی فولات و اسید فولیک را محدود می کند و فراهمی زیستی را بهبود می بخشد [۴۳].

ویتامین B12

ساختار مولکولی ویتامین B12 یا کوبالامین شامل یک هسته کورین با یون کبالت مرکزی و حلقه دی متیل بنزیمیدازول است. شکل های فعال آن شامل متیل کوبالامین، آدنوزیل کوبالامین، هیدروکسی کوبالامین و سیانو کوبالامین هستند که نوع اخیر، فرم پایدار و غالب در مکمل ها است. به دلیل حساسیت این ویتامین به عوامل محیطی، فناوری نانوامولسیون سازی موجب بهبود پایداری و فراهمی زیستی آن شده است [۸]. ویتامین B12 یک ویتامین محلول در آب است که برای متابولیسم اسیدهای چرب و آمینه، سنتز DNA و تشکیل گلبول های قرمز ضروری است. این ویتامین نقش مهمی در عملکرد سیستم عصبی و سلامت مغز استخوان دارد. جذب آن در دستگاه گوارش نیازمند حضور اسید کلریدریک، پپسین و فاکتور ذاتی (IF) است که کمپلکس B12-IF را تشکیل می دهد [۴۴].

این ویتامین عمدتاً در غذاهای حیوانی یافت می شود و توسط باکتری های روده ای سنتز می گردد که میزان تولید داخلی برای تأمین نیاز بدن کافی نیست. منابع غنی B12 شامل جگر، گوشت قرمز، تخم مرغ و لبنیات است. مقدار توصیه شده روزانه ۲/۴ میکروگرم برای بزرگسالان و ۲/۸ میکروگرم برای زنان باردار و شیرده می باشد. غنی سازی مواد غذایی و مصرف مکمل ها در جمعیت های پرخطر (مانند سالمندان و گیاه خواران) توصیه می شود [۴۵]. جذب ویتامین B12 یک فرآیند پیچیده وابسته به سه پروتئین کلیدی هاپتوکورین (HC)، فاکتور داخلی (IF) و ترانس کوبالامین است (TC). ابتدا کوبالامین در معده از پروتئین های غذایی آزاد شده و به HC متصل می شود. در دوازدهه، HC توسط آنزیم های پانکراس تجزیه شده و B12 به IF متصل می شود. کمپلکس B12-IF در ایلئوم دیستال و به کمک کلسیم جذب شده، سپس وارد گردش خون می شود و به TC متصل می گردد. بخشی از ویتامین B12 از طریق صفرا ترشح و مجدداً جذب می شود. این ویتامین در شرایط مصرف بیش از حد و یا تزریق، از طریق ادرار دفع می شود [۴۵، ۴۶]. عواملی چون دمای، pH، اکسیژن و نور در طول فرآوری و نگهداری

باعث کاهش ویتامین می‌شوند. کاهش IF به دلیل بیماری‌هایی مانند گاستریت آتروفیک یا برداشتن آنتروم معده منجر به سوء جذب B12 می‌شوند. همچنین داروهایی مانند مهارکننده‌های پمپ پروتون، متفورمین، برخی داروهای صرع و کلشی‌سین با جذب یا متابولیسم B12 تداخل دارند [۹].

کمبود B12 ممکن است به دلیل دریافت ناکافی (به خصوص در گیاهخواران)، سوء جذب، اختلالات ژنتیکی، بیماری‌های گوارشی (مانند بیماری کرون، رشد باکتریایی بیش از حد)، یا تداخلات دارویی باشد. علائم کمبود شامل کم‌خونی مگالوبلاستیک، آسیب‌های عصبی (بی‌حسی، افسردگی، آلزایمر، روان‌پریشی) و اختلالات شناختی است. کم‌خونی پریشیوز، به عنوان یکی از علل اصلی، ناشی از فقدان IF در گاستریت خودایمنی است. کمبود B12 با بیماری‌های عصبی، زوال شناختیو دژنراسیون ماکولا مرتبط با سن (AMD) در ارتباط است. مصرف مکمل‌های B12 به کاهش بستری بیماران، بهبود عملکرد عضلانی و کاهش خطر AMD کمک می‌کند [۴۵، ۴۶]. کمبود این ویتامین در گیاهخواران بسیار است که شامل ۲۵ تا ۸۶٪ کودکان، ۲۱ تا ۴۱٪ نوجوانان، ۱۱ تا ۹۱٪ بزرگسالان و ۶۲٪ زنان باردار علائم مربوط به آن را دارند و میزان کمبود در افرادی که مدت زمان بیشتری به رژیم گیاهخواری پایبند بودند بیشتر است [۴۷]. مطالعات نشان داده‌اند که افراد سالمند، به‌ویژه آن‌هایی که به گاستریت آتروفیک مبتلا هستند، به دلیل کاهش ترشح اسید معده و فاکتور داخلی (IF)، با کاهش جذب ویتامین B12 مواجه می‌شوند. بر همین اساس، مؤسسه پزشکی ایالات متحده مصرف بیشتر B12 از طریق منابع غذایی غنی‌شده یا مکمل‌ها را برای افراد بالای ۵۱ سال توصیه کرده است. مصرف مواد غذایی غنی شده راهکار مؤثری برای جبران این کاهش جذب و پیشگیری از کمبودهای تغذیه‌ای در این گروه سنی است [۴۶].

Karbalaei-saleh و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به بررسی یک روش کم‌هزینه برای تهیه نانوامولسیون ویتامین B12 از طریق امولسیون‌سازی خودبه‌خودی پرداختند. در این

پژوهش، اثرات غلظت روغن آفتابگردان (۴-۸٪)، توین ۸۰ (۸-۱۶٪) و ویتامین B12 (۱۵-۵٪) بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نانوامولسیون حاوی ویتامین B12 با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل داده‌ها نشان داد که مدل درجه دوم بهترین تطابق را با داده‌های تجربی دارد. شرایط بهینه برای فرمولاسیون نهایی شامل ۶/۵٪ روغن آفتابگردان، ۹۹/۶۶٪ توین ۸۰ و ۱۳٪ ویتامین B12 تعیین شد. در این شرایط، پارامترهای به‌دست‌آمده به ترتیب شامل pH برابر ۷، ویسکوزیته cP۲۴، کدورت ۱۷/۰۰۲۴، راندمان درون پوشانی ۹۸/۵۱٪، محتوای ویتامین B12 برابر ۵۴/۵ ppm، مقدار p-Anisidine برابر ۲/۱۹، شاخص پراکندگی (PDI) معادل ۰/۰۱ و اندازه ذرات برابر با ۳۲۲ نانومتر گزارش گردید. نتایج کارایی بالای نانوامولسیون طراحی‌شده را در بهبود پایداری و فراهمی زیستی ویتامین B12 نشان می‌دهند [۴۴].

ویتامین C

ویتامین C یا آسکوربیک اسید در جریان پژوهش‌ها برای شناسایی عامل بیماری و کشنده اسکوروی کشف شد و در ابتدا به عنوان عامل آنتی‌اسکوربوتیک نامیده شد. قرن‌ها بعد کشف شد که این عامل دارای ترکیب ۶ کربنه و مشابه گلوکز است و نام آن آسکوربیک اسید گذاشته شد [۱۵، ۴۸]. ساختار شیمیایی ویتامین C شامل شش اتم کربن، هشت اتم هیدروژن و شش اتم اکسیژن ($C_6H_8O_6$) است. ویتامین C در پیشگیری از بیماری‌های قلبی عروقی، سرطان و بیماری‌های التهابی مؤثر است و نقش محافظی در سلامت پوست دارد. همچنین موجب افزایش جذب آهن غیرهمی، تقویت سیستم ایمنی و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو می‌شود. ویتامین C کوفاکتور برای آنزیم هیدروکسیلاژ برای سنتز هورمون‌های کاکتول‌آمین (مانند نوراپی‌نفرین) و هورمون‌های پپتیدی آمیدی (مانند وازوپرسین) است. همچنین تحقیقات جدید به نقش این ویتامین در تنظیم رونویسی ژن و مسیر سیگنالینگ سلولی با تنظیم فعالیت فاکتور رونویسی و علائم اپی‌ژنتیکی اشاره دارد [۱۵، ۴۹]. منابع ویتامین C آن شامل مرکبات،

ضروری به دلیل از دست دادن آنزیم کلیدی در بیوستز، قابل سنتز توسط انسان نیست. اسکوروی باعث تضعیف ساختار کلاژنی، عدم بهبود زخم، خونریزی لثه، افزایش التهاب و اختلال در ایمنی می‌شود و افراد را مستعد ابتلا به عفونت‌های کشنده‌ای چون ذات‌الریه می‌کند. این ویتامین یک آنتی اکسیدان محلول در آب است که در سلول‌ها و پلاسما یافت می‌شود و نقش مهمی در عملکردهای متابولیکی و افزایش ایمنی دارد [۱۵، ۴۹].

کیوی، توت‌فرنگی، فلفل، گوجه‌فرنگی، سیب زمینی و سبزیجاتی چون بروکلی، کلم و اسفناج است. این ویتامین در برابر حرارت و اکسیژن تخریب می‌شود. [۱، ۴۸]. با توجه به اینکه انسان قادر به سنتز داخلی ویتامین C نیست، مصرف روزانه آن از طریق رژیم غذایی یا مکمل‌ها برای حفظ سلامت عمومی ضروری است. مقدار مورد نیاز برای جلوگیری از اسکوری حدود ۱۰ میلی گرم در روز است و میزان توصیه شده در رژیم غذایی برای زنان و مردان به ترتیب ۷۵ و ۹۰ میلی گرم در روز است. این ماده مغذی

Table 1. Vitamins and their role in the body

Vitamin	Other names	Daily required dose	Performance	Deficiency symptoms	Food sources	Destructive factors
A	Retinol, retinal, retinoic acid	700-900 µg	Vision, maintenance of the cornea, bone and tooth growth, skin, reproduction, immunity	Night blindness, corneal dryness, corneal softness, corneal destruction and blindness, immune system disorder, infectious disease	Orange fruits, vegetables, fish and liver	Light, heat and oxygen
D	Ergocalciferol, cholecalciferol	15 µg Or 600 IU	Bone growth, helping to absorb calcium and phosphorus, controlling Parkinson's, protecting nerve cells and the brain, reducing inflammation	Rickets, osteoporosis, osteomalacia, bowed and bow-legged legs	Sunlight, fortified milk, fatty fish, liver	Light, heat, oxygen and pH
E	Tocopherol	15 mg	Antioxidant and prevention of chronic diseases, prevention of oxidative stress, neutralization of free radicals	Neuromuscular disorder, visual impairment	Vegetable oils, seeds, and nuts	Light, heat, and oxygen
K	Phylloquinone, Menaquinone, Menadione	90-120 µg	Making blood clotting proteins and bone proteins	Hemorrhagic disease	Synthesis of digestive bacteria, vegetables, and vegetable oils	Light, heat, oxygen, and pH
B1	Thiamine	1.1-1.2 mg	Part of the TPP coenzyme and energy metabolism	Beriberi, nerve problems, heart failure and enlargement, muscle weakness, anorexia, and weight loss	Legumes, whole grains, and meat	Light, heat, oxygen, and pH
B2	Riboflavin	1.1-1.3 mg	Part of the coenzyme FAD and FMN and energy metabolism	Inflammation of the mouth and skin, red tongue	Dairy, whole grains, liver	Light, heat, oxygen, and pH
B3	Niacin	14- 16 mg	Part of the coenzymes NAD and NADP and energy metabolism	Plager	Milk, eggs, whole grains, meat, poultry, nuts	Light, heat, oxygen, and pH
B5	Pantothenic acid	5 mg	Part of coenzyme A and energy metabolism	Neurological disorders, depression, hypoglycemia, increased insulin sensitivity, nausea	Meat, whole grains, potatoes, tomatoes, broccoli	Light, heat, oxygen, and pH

B6	Pyridoxal, pyridoxine, and pyridoxamine	1.3-1.7 mg	Part of the coenzymes PLP and PMP, amino acid and fatty acid metabolism, red blood cell production, conversion of tryptophan to niacin, and serotonin	Depression, confusion, seizures	Meat, fish, vegetables, and fruits	Oxidation, ultraviolet light, and alkali
B7	Biotin	30 µg	Energy metabolism, amino acid metabolism, and gluconeogenesis	Numbness and tingling in the legs, hair loss, depression, weakness, and hallucinations	Egg yolk, liver, gastrointestinal bacteria	Light, heat, oxygen, and pH
B9	Folate, folic acid	400 µg	Part of the coenzyme THF and DHF, DNA synthesis, and new cell formation	Neural tube defects, neurological disorders, and anemia	Vegetables, legumes, and fruits	Light, heat, oxygen, and pH
B12	Cobalamin	2.4 µg	Part of the coenzyme methylcobalamin and deoxyadenosylcobalamin helps maintain nerve cells, builds new cells, and helps break down some fatty acids and amino acids	Anemia, nerve damage, cognitive and memory impairment, paralysis, constipation, tongue ulcers, fatigue	Animal foods such as dairy, meat, poultry, and eggs	Light, heat, oxygen, and pH
C	Ascorbic acid	75-90 mg	Antioxidant, cofactor in collagen synthesis, thyroxine, and neurotransmitter	Scurvy, inflammation and bleeding of the gums, red spots on the skin, non-healing wounds, abnormal bone growth, and joint pain	Citrus fruits, vegetables, tomatoes, potatoes	Heat and oxygen

مواد معدنی

ضروری (مانند Ca، Mg، Fe و Zn) و عناصر غیر ضروری (مانند Pb، Cd و Hg) تقسیم می‌شوند. دوز بالای عناصر غیر ضروری که شامل فلزات سنگین می‌شود سمی هستند و از آفت‌کش‌ها، کودهای شیمیایی، فاضلاب خانگی، زباله‌ها، آگروهای صنعتی و خودرو و آلودگی رادیواکتیو سرچشمه می‌گیرد [۵۰].

نحوه برخورد و جذب مواد معدنی در بدن، متفاوت با ویتامین‌ها است. به عنوان مثال پتاسیم به راحتی توسط خون جذب می‌گردد و پس از انتقال از طریق کلیه‌ها دفع می‌گردد (همانند ویتامین‌های محلول در آب). مواد معدنی دیگری چون کلسیم، برای جذب و انتقال به حامل نیاز دارند و استفاده بیش از حد آن می‌تواند مضر باشد (همانند ویتامین‌های محلول در چربی). وجود یا عدم وجود مواد معدنی نیز مانند ویتامین‌ها می‌تواند بر جذب، متابولیسم و دفع دیگر مواد مغذی تاثیر گذارد. به عنوان مثال افزایش مصرف سدیم باعث دفع بیشتر سدیم و کلسیم می‌شود (به

مواد معدنی عناصر غیرآلی و یکی از هفت گروه اصلی مواد مغذی مورد نیاز بدن انسان هستند که نقش حیاتی در تشکیل بافت‌ها، حفظ عملکردهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی دارند. از آنجایی که بدن توانایی سنتز مواد معدنی را ندارد، مصرف روزانه آن‌ها ضروری است [۵۰]. ۹۰ عنصر شیمیایی طبیعی در پوسته زمین وجود دارد که حدود ۲۵ عنصر برای حیات ضروری است که در سلول‌های زنده و منابع غذایی یافت می‌شوند. مواد معدنی به دو دسته اصلی و جزئی تقسیم می‌شوند. عناصر اصلی مانند کلسیم، منیزیم، فسفر، سدیم، پتاسیم و کلرید و مواد معدنی جزئی شامل آهن، ید، روی، سلنیوم، مس، منگنز، کروم و فلوراید می‌باشند. امروزه توسعه فناوری‌های آنالیتیکی پیشرفته امکان شناسایی و اندازه‌گیری دقیق غلظت بیشتر عناصر جدول تناوبی را فراهم کرده، که درک عمیق‌تری از نقش آن‌ها در سلامت و تغذیه ممکن می‌سازد [۱۴]. از نظر ایمنی غذایی، مواد معدنی به عناصر

دلیل تعاملاتی که بین سدیم و کلسیم وجود دارد) یا افزایش دریافت فسفر منجر به کاهش جذب منیزیم می‌شود (به دلیل اتصال فسفر در دستگاه گوارش به منیزیم) [۱۵].

بیش از نیمی از جمعیت جهان، به‌ویژه در کشورهای با درآمد پایین تا متوسط، از کمبود ریزمغذی‌ها به‌ویژه مواد معدنی رنج می‌برند. مواد معدنی در فرایندهای فیزیولوژیکی متعددی از جمله تشکیل استخوان، سنتز هورمون‌ها، انتقال عصبی و عملکرد آنزیم‌ها نقش دارند. کمبود آهن (Fe) یا آنمی فقر آهن از شایع‌ترین کمبود ریزمغذی‌ها در سطح جهان است که حدود ۴۰٪ جمعیت جهان درگیر آن هستند. کمبود آن به دلایلی چون جذب ضعیف، مصرف ناکافی یا افزایش نیاز در شرایط خاصی مانند بارداری و قاعدگی رخ می‌دهد و بیشتر در زنان، کودکان و نوزادان (دریافت رژیم غذایی حاوی شیر بالا که آنمی شیر نیز نامیده می‌شود) مشاهده می‌شود. آهن در ساختمان هموگلوبین، میوگلوبین و آنزیمهای شرکت کننده در واکنش‌های متنوع سلولی مانند تنفس سلولی شرکت دارد. از مهمترین علائم کمبود آهن می‌توان به ضعف، خستگی، اختلال در عملکرد کروی و شناختی، سردرد، رنگ پریدگی و ناتوانی در تنظیم دمای بدن را اشاره نمود. میزان توصیه شده برای مردان ۸ و برای زنان ۱۹ تا ۵۰ سال ۱۸ (بالای ۵۰ سال ۸ mg) در روز است و منابع اصلی آن شامل گوشت قرمز، ماهی، تخم مرغ و حبوبات است [۱۵، ۱].

کلسیم (Ca) ماده مغذی ضروری و فراوان‌ترین ماده معدنی معدنی بدن است که ۹۹٪ آن در استخوان‌ها و دندان‌ها و ۱٪ آن در سرم خارج سلولی یافت می‌شود. کلسیم موجب کاهش خطرات پوکی و شکستگی استخوان، سرطان، دیابت، چاقی، بیماری قلبی عروقی و سندرم متابولیک می‌شود. همچنین کلسیم در انقباض و شل شدن عضلات، عملکرد عصبی، فشار خون، لخته شدن خون و ترشح هورمونی نقش دارد. از مهمترین منابع آن می‌توان به محصولات لبنی، بروکلی، Bok Choy، Bean Curd، kale در روز است میزان توصیه شده روزانه آن ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ mg در روز است

و افراد مبتلا به عدم تحمل لاکتوز، نوجوانان، سالمندان و زنان جز گروه‌های در معرض خطر کمبود کلسیم هستند [۱۵، ۵۱]. منیزیم (Mg) کاتیون دو ظرفیتی است که بیش از نیمی از آن در استخوان‌ها و مابقی در عضلات و بافت‌های نرم است و ۱٪ در مایع خارج سلولی است. از مهم‌ترین نقش‌های منیزیم می‌توان به تولید انرژی، سنتز پروتئین، چربی، اسید نوکلئیک، گلیکولیز، فسفوریلاسیون اکسیدتیو، تقویت سیستم ایمنی، تنظیم فشار خون و عملکرد ریه اشاره نمود. همچنین منیزیم به عنوان کاتابولیست در سنتز میتوکندری آدنوزین تری فسفات (ATP) و تشکیل MgATP نیز نقش دارد. یون منیزیم همراه با کلسیم در نقباض عضلات و لخته شدن خون موثر هستند. منیزیم کوفاکتور در بیش از ۶۰۰ واکنش آنزیمی است و برای فعالیت پروتئین کینازها، فرایندهای فسفوریلاسیون، آنزیم گلیکولیتیک و واکنش‌های مرتبط با ATP نیاز است. مقدار توصیه شده منیزیم برای زنان و مردان به ترتیب ۳۱۰ و ۴۰۰ میلی گرم در روز توصیه شده است. مهمترین منابع منیزیم شامل مغزها، حبوبات، سبزیجات برگ سبز، غلات سبوس دار و برخی ماهی‌ها می‌باشد. کمبود منیزیم موجب اختلالات خواب، ضعف، خنثالات شناختی، افزایش رادیکال‌های آزاد، بیماری قلبی عروقی، دیابت، سرطان، اختلالات روانی، فشار خون بالا، سکنه مغزی، بیماری‌های عضلانی و شکستگی استخوان می‌شود [۱۵، ۵۲].

کمبود روی (Zn) نیز تقریباً ۱۷٪ از جمعیت جهان را تحت تأثیر قرار داده و در رژیم‌های غذایی مبتنی بر غلات و مصرف کم محصولات حیوانی دیده می‌شود. پوکی استخوان که عمدتاً ناشی از کمبود مزمن کلسیم است، پس از بیماری‌های قلبی عروقی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معضلات بهداشتی جهانی شناخته می‌شود. روی نقش مهمی در پسخ ایمنی ایفا می‌کند و کمبود آن منجر به توقف در رشد، نقص در عملکرد سیستم ایمنی، ریزش مو و ایجاد عفونت‌هایی مانند مالاریا، HIV، ذت‌الریه، سل و سرخک می‌گردد. روی نقش مهمی در ایجاد مواد و پروتئین‌های ژنتیکی، تثبیت غشای سلولی و DNA، رشد و نمو، انتقال ویتامین A، ترمیم

اسیدهای آمینه گوگرددار می‌توانند فراهمی زیستی آهن و روی را افزایش دهند [۵۳].

پروبیوتیک‌ها

در سال ۱۹۰۸ الی متچنیکف برنده جایزه نوبل، در کتاب "طولانی شدن زندگی" عمر بالای کشاورزان بلغاری را به مصرف محصولات لبنی تخمیری نسبت داد. اصطلاح پروبیوتیک اولین بار توسط لیلی و استیل ول و سال ۱۹۶۵ برای توصیف مواد ترشح شده توسط میکروارگانیسم‌ها که موجب تحریک رشد نیز می‌گردد بیان شد [۵۱،۵۵]. تعریف پروبیوتیک بارها مورد تغییر قرار گرفت و در نهایت در سال ۲۰۰۲ WHO و FAO تعریف جدیدی ارائه نمودند و پروبیوتیک‌ها به میکروارگانیسم‌های زنده‌ای گفته شد که اگر به مقدار کافی تجویز شوند می‌توانند اثرات سلامت بخش برای میزبان داشته باشند [۵۵،۵۶]. این میکروارگانیسم‌ها از طریق رقابت با پاتوژن‌ها، تنظیم ترکیب میکروبیوتای روده و القای اثرات بیولوژیکی متنوع، می‌توانند در مدیریت بیماری‌هایی مانند سندرم روده تحریک‌پذیر، اختلالات گوارشی، التهاب روده، اسهال، چاقی، سندرم مقاومت به انسولین، دیابت نوع ۲، بیماری کبد چرب غیرالکلی و برخی سرطان‌ها مؤثر باشند [۵۷].

درون پوشانی باکتری‌ها به دلایلی چون تولید محصولات کاربردی و مهار رشد میکروارگانیسم‌های ناخواسته صورت می‌گیرد. به عنوان مثال، درون پوشانی باکتری‌های *Lactobacillus* و *Bifidobacterium animalis* *acidophilus* در آلزینات سدیم موجب مهار رشد قارچ‌هایی چون *Aspergillus niger* در پنیر فتا (طی ۴۵ روز نگهداری) می‌شود. این فرآیند همچنین باعث افزایش حدود $\log 0.1$ CFU در جمعیت سلول‌های زنده باکتری‌ها در طول نگهداری نیز می‌گردد [۱۶].

کارایی و بقا پروبیوتیک‌ها به عوامل محیطی مانند دما، رطوبت، pH و اکسیژن در طول فراوری، ذخیره‌سازی و انتقال بستگی دارد. همچنین، اسید معده و نمک‌های صفراوی موجب کاهش قابل توجه زنده‌مانی آن‌ها در دستگاه گوارش

زخم، عملکرد هورمون‌ها و آنزیم‌ها دارد. میزان توصیه شده روزانه برای زنان و مردان به ترتیب ۸ و ۱۱ میلی گرم می‌باشد و منابع اصلی آن شامل غلات سبوس دار، گوشت قرمز و صدف است [۱۵،۵۳،۵۴].

سلنیوم (Se) ریز مغذی ضروری برای سلامت است که در ایمنی، آنتی اکسیدانی و تولید مثل نقش دارد. مطالعات نشان داده حدود ۰/۵ تا ۱ میلیارد نفر در جهان سلنیوم در رژیم غذایی خود وجود ندارد و بسیاری دیگر نیز مقدار مورد نیاز روزانه را مصرف نمی‌کنند. سلنیوم موجب کاهش سرطان (مانند سینه، ریه، مری و پروستات)، بیماری‌های خود ایمنی و بیماری نورودژنراتیو می‌شود و کمبود آن با اختلال شناختی، اختلال عملکرد اندوتلیال و افسردگی مرتبط است. مقدار توصیه شده سلنیوم برای بزرگسالان ۵۵ میکروگرم در روز توصیه شده است. منابع اصلی سلنیوم شامل سبزیجات (بسته به خاک و منطقه دارد)، میوه‌ها، نان سبوس دار، غذاهای دریایی و گوشت هستند. مقدار سلنیوم به منطقه و شرایط خاک مرتبط است و کشورهایمانند آمریکا، اروپا، چین و اقیانوسیه دارای کمبود و برزیل بیشترین میزان سلنیوم را در خاک خود دارد. مطالعات نشان داده این کمبود در مناطق کشاورزی غالب است و به دلایلی چون تغییرات اقلیمی کاهش سلنیوم تا سال‌های ۲۰۸۰ تا ۲۰۹۹ تا ۸/۴٪ در خاک خواهد بود [۱۵،۵۴].

فراهمی زیستی مواد معدنی تحت تأثیر عوامل بیرونی و درونی مانند سن وضعیت تغذیه‌ای قرار می‌گیرد. مواد معدنی فقط از طریق رژیم غذایی دریافت می‌شوند و تمام عناصر معدنی موجود در غذا به طور کامل جذب نمی‌شوند و به دلایلی چون تعاملات پیچیده با ترکیبات غذایی دیگر، دسترسی زیستی آن‌ها محدود می‌شود. به عنوان مثال، جذب آهن و روی تحت تأثیر مهارکننده‌هایی چون فیتات، پلی‌فنول‌ها و فیر قرار می‌گیرد و فیتات با تشکیل کمپلکس‌های نامحلول، از جذب آهن و روی جلوگیری می‌کند. ترکیباتی مانند اسید اسکوربیک، اسیدهای آلی و

پایداری و زنده‌مانی پروبیوتیک‌ها در محیط اسیدی آبمیوه‌ها و ماست می‌شوند [۱۶].

Vaziri و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به بررسی ریزپوشانی همزمان *Lactobacillus plantarum* و اسید چرب DHA در ماتریس بیوکمپوزیتی بر پایه آلزینات-پکتین-ژلاتین پرداختند. نتایج نشان داد که این فرمولاسیون توانست بقای *L. plantarum* را تحت شرایط شبیه‌سازی شده گوارشی (۴ ساعت در محیط شبیه‌سازی معده و ۲ ساعت در محیط روده‌ای) به‌طور معناداری حفظ کند. بقای سلول‌های آزاد در محدوده ۷۸/۸۷-۸۸/۰۶٪ و سلول‌های ریزپوشانی شده در بازه ۸۰/۵۳-۹۰/۰۲٪ گزارش شد. تفاوت قابل توجهی در بقای باکتری‌های آزاد در مقایسه با باکتری‌های کپسوله‌شده مشاهده گردید (کاهش ۲۸/۵۳-۳۷/۷٪). بیشترین پایداری مربوط به کپسول آلزینات ۱/۵۷۶٪ و کمترین آن برای آلزینات ۲٪ گزارش شد. راندمان درون پوشانی در محدوده بالای ۹۷/۵ تا ۹۹/۹٪ متغیر بود. فرمولاسیون بهینه شامل ۱/۰۶٪ آلزینات، ۰/۵۵٪ پکتین و ۰/۳۹٪ ژلاتین، توانست بقا را تا ۶۶/۸۸٪ برای سلول‌های ریزپوشانی شده حفظ کند، در حالی که این مقدار برای سلول‌های آزاد تنها ۵۰/۳۶٪ بود. این نتایج کارایی بالای سیستم بیوکمپوزیتی را در حفاظت همزمان از پروبیوتیک‌ها و ترکیبات زیست‌فعال نشان می‌دهد [۶۴].

اسیدهای چرب

اسیدهای چرب ترکیبات آلی با زنجیره بلند هیدروکربنی و یک گروه کربوکسیل هستند. در دهه‌های اخیر، اسیدهای چرب به ویژه اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه (PUFAs) به دلیل نقش حیاتی در سلامت انسان و پیشگیری از بیماری‌های مزمن مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. از مهمترین نقش‌های اسید چرب می‌توان به تشکیل ساختار غشای سلولی، تولید انرژی، سیگنال‌دهی سلولی و تنظیم فرآیندهای التهابی اشاره نمود. اسیدهای چرب (Fas) به‌عنوان اجزای اصلی لیپیدها، شامل فسفولیپیدها، استرهای

می‌شوند. یکی از راه‌های مؤثر برای حفظ بقاء و افزایش اثربخشی پروبیوتیک‌ها، استفاده از فناوری ریزپوشانی است [۵۸، ۵۹]. پروبیوتیک‌ها همچنین قابلیت افزایش جذب ویتامین‌های گروه B نظیر B1، B3، B5 و B12 را دارند و قادرند آنزیم‌هایی نظیر استراز، لیپاز و کوآنزیم‌هایی مانند CoA، Q، NAD و NADP را تولید نمایند [۶۰]. در انتخاب سویه‌های پروبیوتیک، توجه به ایمنی، کارایی عملکردی، مقاومت در برابر شرایط نامساعد محیطی و پتانسیل سودمندی آن‌ها امری ضروری است [۵۷]. پری‌بیوتیک‌ها ترکیبات غیرقابل هضمی هستند که موجب تحریک رشد و فعالیت پروبیوتیک‌ها در روده می‌شوند. ترکیب همزمان پری‌بیوتیک‌ها و پروبیوتیک‌ها در قالب سین‌بیوتیک‌ها می‌تواند اثری هم‌افزا ایجاد کرده و خواصی چون تقویت ایمنی، اثرات ضدسرطانی و ضدباکتریایی به همراه داشته باشد [۱۲]. به عنوان مثال *Lactobacillus plantarum* باسیل‌های گرم‌مثبت است که موجب تقویت سیستم ایمنی و عملکرد گوارشی، تولید لاکتاز و کاهش علائم عدم تحمل لاکتوز می‌باشد. مطالعات متعددی اثرات ضدسرطانی این سویه را به‌ویژه در سرطان‌های پستان، دهانه رحم و کولون تأیید کرده‌اند که این اثرات با فعال‌سازی مسیرهای سیگنالینگ ایمنی و مهار ژن‌های مرتبط با تومور همراه است [۶۱، ۶۲].

برای اثربخشی مطلوب پروبیوتیک‌ها، باید در برابر شرایط معده مقاوم باشند، با موفقیت به روده بزرگ برسند و در آنجا کلونیزه شوند. بنابراین، حفاظت از باکتری‌های پروبیوتیک در طی تولید، ذخیره‌سازی و نگهداری، نقشی مهمی در حفظ اثربخشی و پایداری عملکرد آن‌ها ایفا می‌کند. توجه به اندازه ذرات در ریزپوشانی اهمیت دارد و ذرات کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرومتر ویژگی‌های حسی بهتری دارند و اندازه‌هایی در بازه ۰/۲ تا ۳ میلی‌متر توانایی محافظتی بالایی را در برابر شرایط گوارشی فراهم می‌کنند [۶۳، ۱۳]. افزودن ترکیبات طبیعی مانند عصاره مورینگا، چای سبز و پری‌بیوتیک‌هایی نظیر اینولین و فروکتو-لیگوساکاریدها موجب افزایش

اکسیداسیون سمی بوده و مصرف طولانی مدت آن‌ها سلامت مصرف کننده را به خطر می‌اندازد. از دیگر چالش‌های غنی سازی مواد غذایی با اسیدهای چرب، حلالیت پایین آن‌ها در آب است که درون پوشانی روشی مناسب برای بهبود قابلیت پراکنش در محیط‌های آبی، افزایش پایداری شیمیایی و حرارتی، بهبود خواص حسی و فراهمی زیستی می‌باشد [۶۶]. انتخاب مناسب روش کپسوله‌سازی موجب سازگاری بهتر در ماتریکس غذایی می‌شود و از تغییر بافت، طعم، بو و ظاهر محصول جلوگیری می‌کند [۶۷].

اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه (PUFAs) به ویژه اسید لینولئیک کنژوگه (CLA)، به عنوان ترکیبات زیست‌فعال با خواص سلامت‌بخش گسترده، توجه فراوانی در حوزه تغذیه و علوم دارویی به خود جلب کرده‌اند. CLA که نخستین بار در سال ۱۹۳۲ کشف و در دهه ۱۹۸۰ به عنوان ترکیبی با اثرات ضدسرطانی مورد بررسی قرار گرفت، یکی از ایزومرهای مزدوج اسید لینولئیک است که دارای دو پیوند دوگانه با آرایش مزدوج (بدون گروه متیلن جداکننده) می‌باشد. مهم‌ترین ایزومرهای بیولوژیکی فعال CLA شامل t10,c12 و t9,c11 هستند که به طور طبیعی در محصولات دامی، گیاهان و غذاهای دریایی یافت می‌شوند و همچنین می‌توان آن‌ها را از طریق برخی باکتری‌های پروبیوتیک تولید نمود. تحقیقات نشان داده‌اند که CLA دارای اثرات فیزیولوژیکی متعددی از جمله فعالیت ضدسرطانی، تنظیم سیستم ایمنی، کاهش توده چربی بدن، بهبود ترکیب بدن، اثرات ضدالتهابی، ضد دیابت، ضد فشار خون و پیشگیری از بیماری‌های قلبی-عروقی است. همچنین، توانایی عبور CLA از سد خونی-مغزی و تأثیر آن بر تومورهای مغزی نظیر گلیوبلاستوم، بر اهمیت درمانی آن افزوده است. با این حال، پایداری شیمیایی پایین و حساسیت به شرایط حرارتی، استفاده مستقیم از CLA را با چالش‌هایی مواجه ساخته که راهکارهایی نظیر ریزپوشانی و نانوکپسوله‌سازی، می‌تواند در بهبود پایداری و فراهمی زیستی آن مؤثر باشد. کاربرد این ترکیب در رژیم غذایی، به ویژه در زمینه پیشگیری و کنترل

کلسترول و تری‌گلیسیریدها هستند. این اسیدها که به دو دسته اشباع و غیراشباع طبقه‌بندی می‌شوند، بسته به ساختار شیمیایی و نوع پیوندهای دوگانه، در اشکال مختلف مانند اسید لینولئیک مزدوج (CLA)، اسید لینولئیک مزدوج (CLNA) و CEPA یافت می‌شوند. از آنجا که برخی از این اسیدهای چرب در بدن انسان سنتز نمی‌شوند، به عنوان اسیدهای چرب ضروری شناخته شده و باید از طریق رژیم غذایی تأمین شوند. منابع مهم این ترکیبات شامل روغن‌های گیاهی و دریایی می‌باشند که در صنایع غذایی و دارویی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، اسیدهای چرب غیراشباع به دلیل حساسیت بالا به اکسیداسیون، پایداری شیمیایی پایین، ایجاد بو و طعم نامطلوب، و حلالیت محدود در آب، با چالش‌هایی در فرآوری و کاربرد مواجه‌اند. فناوری ریزپوشانی یا درون پوشانی به عنوان راهکاری نوین، با هدف حفظ پایداری، افزایش فراهمی زیستی، بهبود خواص حسی و توزیع پذیری بهتر این اسیدها در ماتریکس غذایی، مورد توجه پژوهشگران و صنایع غذایی قرار گرفته است [۶۵-۶۷].

مصرف منظم و کافی از اسیدهای چرب چندگانه غیراشباع (PUFAs) موجب کاهش خطر ابتلا به بیماری‌های مزمنی چون سرطان، اختلالات روانی، آرتریت روماتوئید، پسوریازیس، بیماری‌های تنفسی، چاقی، دیابت، پوکی استخوان و بیماری‌های قلبی عروقی می‌شود. از منابع اصلی این اسیدها می‌توان به روغن ماهی که حاوی ایکوزاپنتانویک اسید (EPA) و دوکوزاهگزانویک اسید (DHA) است اشاره نمود [۶۵].

توازن در رژیم غذایی، به خصوص نسبت متعادل بین اسیدهای چرب امگا ۶ و امگا ۳، برای حفظ سلامت و پیشگیری از بیماری‌ها اهمیت بسیاری دارد. از چالش‌های مهم در کاربرد اسیدهای چرب غیراشباع، حساسیت آن‌ها به اکسیداسیون است که می‌تواند موجب تولید ترکیباتی با بوی نامطلوب شود که تأثیر منفی بر ماندگاری و ویژگی‌های حسی محصول می‌گذارد. همچنین از برخی محصولات

اکستروژن به دلیل استفاده از دما و اندازه بزرگ ذرات، برای پروبیوتیک‌ها مناسب نمی‌باشند و روش‌هایی چون امولسیون، اکستروژن و خشک‌کن پاششی کاربرد دارند [۷۱-۷۵]. میکروکپسول‌ها در طیف گسترده‌ای از ماتریس‌های غذایی شامل فرآورده‌های لبنی، غلات، گوشت، میوه‌ها و مشتقات آن‌ها به کار برده می‌شوند و نقش مؤثری در ارتقای کیفیت حسی، کاهش چربی، بهبود ماندگاری و توسعه محصولات کاربردی دارند [۱۶].

اجزای عملکردی کپسوله شده مانند ویتامین‌ها، مواد معدنی و اسیدهای چرب که در ماتریکس مواد غذایی گنجانده می‌شوند و با توجه به نوع و کاربردها باید در یک مکان و زمان خاص آزاد شوند. برای محافظت و رهاسازی هدفمند توجه به نوع مواد پسته اهمیت بسیاری دارد. برای آزاد سازی هدفمند مکانیسم‌های مختلفی وجود دارد مانند مکانیسم رهاسازی انفجاری (برای پروبیوتیک‌های محصور شده) و تخریب حرارتی که در آن مواد پوشش در دمای خاصی تخریب و هسته آزاد می‌گردد [۷۳]. همچنین با درون پوشانی چند لایه می‌توان میکروکپسول‌هایی با خصوصیات سطح مشترک ضخیم‌تر، افزایش راندمان فیتوترمال، قدرت ضد میکروبی و پایداری در مقابل تنش‌های محیطی مانند اکسیداسیون و تغییرات حرارتی را افزایش داد. از آنجایی که مواد پوششی دارای عملکردهای منحصر به فرد و محدود می‌باشند، با اختلاط و ترکیب مواد مختلف می‌توان کپسول موثرتر و کارایی بیشتر را ایجاد نمود. [۷۶، ۷۷]. درون پوشانی باعث محافظت مواد در برابر شرایط محیطی سخت مانند اکسیژن، دما، نور و رطوبت می‌گردد و آزادسازی کنترل شده و هدفمند را ایجاد می‌کند که در صنایع مختلفی مانند غذا، کشاورزی، داروسازی، آرایشی و بهداشتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۷۸].

خشک‌کن پاششی از رایج‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌ها است که به دلیل اقتصادی بودن و توانایی تولید در مقیاس صنعتی بسیار مورد استفاده است و کپسول‌های کارآمد و باکیفیت تولید می‌کند. در این فرآیند، ترکیب فعال با ماده حامل

چاقی، از طریق مکانیسم‌هایی چون بهبود میکروبیوتای روده، افزایش لیپولیز، و فعال‌سازی مسیرهای مولکولی متابولیسم انرژی، از دیگر جنبه‌های برجسته این اسید چرب کاربردی محسوب می‌شود [۶۸-۷۰].

ریزپوشانی اسیدهای چرب موجب افزایش ارزش تغذیه‌ای محصولات لبنی می‌شود. به عنوان مثال، افزودن ۱/۳٪ میکروکپسول امگا ۳ به شیر خشک کامل موجب افزایش پایداری محصول می‌شود. امروزه استفاده از تکنیک درون پوشانی و غنی‌سازی محصولاتی چون آبمیوه با اسیدهای چرب و میکروارگانیزم‌های پروبیوتیک بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقات نشان داده افزودن روغن ماهی به آبمیوه‌ها از طریق میکروکپسول‌های حاصل از کواسرواسیون پیچیده، موجب افزایش کدورت می‌شود اما تأثیری بر پذیرش حسی محصول ندارد. pH پایین آبمیوه‌ها موجب ایجاد چالش‌هایی در پایداری میکروکپسول‌ها و زنده‌مانی میکروارگانیزم‌ها می‌شود، به خصوص در آبمیوه‌هایی مانند تمشک، آناناس و پرتقال که موجب تجزیه بیشتر کپسول‌ها می‌گردد [۱۶].

درون پوشانی مواد مغذی

ریزپوشانی فناوری نوظهور و پیشرفته برای پردازش مواد غذایی است که می‌توان با پوشاندن مواد حساس و با ارزش را در یک ماده خاص از آنها در برابر شرایط محیطی و دستگاه گوارش محافظت نمود. پوشاندن مواد در داخل یک پلیمر موجب بهبود کیفیت مواد غذایی، محافظت و آزادسازی هدفمند آن‌ها می‌شوند. به ترکیبات یا مواد فعالی که کپسوله می‌شود، هسته گفته می‌شود و دیواره کپسول‌ها مواد پلیمری یا غیر پلیمری هستند. از تکنیک‌های متفاوتی برای ریزپوشانی استفاده می‌شود که می‌توان به امولسیون، خشک‌کن پاششی، خشک‌کن انجمادی، اکستروژن، پوشش بستر سیال و کواسرواسیون اشاره نمود. انتخاب تکنیک ریزپوشانی به خواصی چون مواد هسته، دیواره کپسول و مورفولوژی بستگی دارد. روش‌های خشک‌کن پاششی و

(معمولاً پلی ساکاریدها یا پروتئین‌ها) مخلوط می‌شود و یک امولسیون یا سوسپانسیون پایدار تشکیل می‌گردد. امولسیون به وسیله اتمایزر همگن‌سازی می‌شود و قطرات ریز تبدیل شده در جریان هوای گرم خشک می‌شوند. از معایب این روش، تخریب بعضی مواد به دلیل پایداری حرارتی و عدم کنترل اندازه ذرات است [۷۱، ۷۹].

در خشک‌کن انجمادی، درون پوشانی بر پایه انجماد سریع است و در آن مخلوط هسته و دیواره به صورت اتمیزه وارد هوای سرد می‌شوند. کاهش دما باعث جامد شدن سریع پوشش لپیدی و در نتیجه ایجاد ذرات کروی با پوشش یکنواخت می‌شود. برخلاف خشک‌کن پاششی، این روش بدون تبخیر حلال بوده و از نظر مصرف انرژی کارآمدتر است. پوشش‌های مورد استفاده شامل روغن‌هی گیاهی و یا مشتقات آن و چربی‌هایی با نقطه ذوب بین ۳۲ تا ۷۲ درجه سانتی گراد و همچنین مونو و دی‌آسیل‌گلیسرول‌های سخت ب نقطه ذوب ۴۵ تا ۶۵ درجه سانتی گراد هستند. در این فرآیند، لپید ذوب‌شده در دمایی بالاتر از نقطه ذوب خود روی ماده هسته اسپری می‌شود و تماس با هوای سرد موجب می‌شود لپید به سرعت جامد شود و پوششی یکنواخت و پایدار را تشکیل می‌دهد. انجماد سریع منجر به تولید میکروکپسول‌هایی کروی، آب‌گریز و با جریان‌پذیری مناسب می‌شود. این پوشش‌ها در آب نامحلول هستند و به همین دلیل برای ترکیبات محلول در آب مانند ویتامین‌ها، طعم دهنده‌ها، انزیم‌ها و داروها بسیار کاربردی هستند [۷۱، ۷۹].

درون پوشانی به روش پوشش بستر سیال شامل آماده سازی محلول پوشش دهنده، سیال سازی ذرات هسته و سپس پوشش دهی ذرات هسته در دمای مشخص می‌باشد. مواد مورد استفاده در این روش شامل پلیمرهای محلول و نامحلول در آب، موم‌ها و لپیدها می‌باشند. عدم استفاده از دمای بالا در این روش، موجب صرفه جویی در انرژی و زمان می‌گردد. این روش عمدتاً برای پوشش ثانویه ثانویه محصولات از پیش کپسوله شده و به منظور افزایش پایداری کاربرد دارد [۷۹].

درون پوشانی به روش اکستروژن روشی کارآمد برای تولید کپسول‌هایی متراکم و با ساختار پایدار است. این روش بر پایه کوآکستروژن مایع انجام می‌شود و در آن هسته و پوشش‌دهنده به صورت جداگانه از طریق روزنه متحدالمرکز در یک استوانه چرخان پمپ می‌شوند. ماده فعال از مرکز پوشش از مسیر محیطی نازل عبور می‌کنند و به صورت هم‌زمان خارج می‌شوند. در حین چرخش نیروی گریز از مرکز ذرات را به بیرون می‌راند و شکل ذرات کروی ریز در می‌شوند. خاصیت سطحی ماده پوشش‌دهنده باعث می‌شود که به سرعت در اطراف هسته پخش شوند و آن را به طور کامل بپوشانند. از این روش برای درون پوشانی ترکیبات حساسی مانند ویتامین‌ها، طعم دهنده‌ها و سایر مواد زیست‌فعال استفاده می‌شود. از تکنیک‌های رایج در این روش می‌توان به برش جت، برش رزونانسی و تولید قطرات لکترواستاتیک اشاره نمود [۷۹].

الکترورسی روشی پیشرفته و کارآمد برای تولید نانوکپسول‌ها و ساختارهای پلیمری در مقیاس نانو است. در این روش، میدان الکتریکی قوی باعث جدا شدن قطرات ریز محلول پلیمری از نوک نازل و رسوب آن‌ها روی سطح جمع‌کننده می‌شود. بار الکتریکی قطرات، یکنواختی و کشیدگی آن‌ها را افزایش می‌دهد و ذرات نانو با اندازه کوچک و سطح ویژه بالا تولید می‌شوند. الکترورسی امکان کپسوله کردن ترکیبات حساس زیستی و دارویی بدون تخریب حرارتی را فراهم می‌کند و با تنظیم ولتاژ، فاصله نازل و ویسکوزیته، می‌توان جریان پایدار و ذرات یکنواخت را ایجاد نمود. الکترورسی به دلیل دقت، کنترل‌پذیری و قابلیت کاربرد گسترده، در صنایع غذایی، دارویی و بیوتکنولوژی اهمیت ویژه‌ای دارد [۸۰].

امولسیون به مخلوطی از دو مایع غیر قابل امتزاج گفته می‌شود و روشی مناسب و کم هزینه برای محافظت و محصور کردن مواد می‌باشد [۸۱، ۸۲]. امولسیون روش جداسازی شیمیایی است که در آن مواد دیواره و هسته (فاز پراکنده) به روغن (فاز پیوسته) اضافه می‌گردند [۹۶].

امیدبخش برای افزایش پایداری و فراهمی زیستی ویتامین D3 در فرآورده‌های غذایی و محیط گوارشی محسوب می‌شود [۸۷].

۳- نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که غنی‌سازی مواد غذایی به‌عنوان یک راهکار ساده، در دسترس و کم‌هزینه می‌تواند نقش مهمی در کاهش کمبود ریزمغذی‌ها و ارتقای سلامت جامعه ایفا کند. با توجه به اینکه افراد بر اساس سن، جنس، ویژگی‌های ژنتیکی و الگوی غذایی در معرض درجات مختلفی از کمبود تغذیه‌ای قرار می‌گیرند، استفاده از غذاهای کاربردی و غنی‌سازی اجباری می‌تواند از بروز بسیاری از بیماری‌های مرتبط با این کمبودها جلوگیری کند. با این حال، حساسیت بالای ترکیبات زیست‌فعال از جمله ویتامین‌ها، اسیدهای چرب ضروری، مواد معدنی و پروبیوتیک‌ها به حرارت، اکسیداسیون و فرآورده‌های صنعتی، تأثیرگذاری آن‌ها را محدود می‌سازد. فناوری درون پوشانی با ایجاد پوشش محافظتی، افزایش پایداری، بهبود فراهمی زیستی، رفع مشکلات حلالیت و فراهم‌سازی رهاسازی کنترل‌شده توانسته است بر بسیاری از این چالش‌ها غلبه کند و امکان تولید محصولات غذایی با کیفیت حسی و ارزش تغذیه‌ای بالاتر را فراهم آورد. بر این اساس، ترکیب دو رویکرد غنی‌سازی و درون پوشانی می‌تواند به‌عنوان راهبردی مؤثر در بهبود سلامت عمومی مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این، انجام مطالعات آینده‌نگر در مورد اثربخشی ولانی‌مدت، هزینه فایده و پذیرش مصرف‌کنندگان ضروری است تا زمینه برای توسعه سیاست‌های پایدار تغذیه‌ای در سطح جهانی فراهم شود.

دسترس‌ی به داده‌ها

داده‌های این پژوهش بنا به درخواست، از طریق نویسنده مسئول در دسترس قرار خواهند گرفت.

تضاد منافع

امولسیون‌ها از نظر ترمودینامیکی ناپایدارند و از طریق روش‌هایی چون رسوب، ادغام و لخته‌سازی از یکدیگر جدا می‌شوند. برای تثبیت امولسیون از سورفکتانت‌ها، امولسیفایرها و از عوامل ضخیم‌کننده مانند صمغ‌ها برای اصلاح ویسکوزیته استفاده می‌شود. مطالعات نشان داده برخی سورفکتانت‌های مصنوعی با وزن ملکولی کم دارای اثرات مضر برای انسان و محیط زیست هستند [۸۱]. امروزه امولسیون‌های پیکرینگ به دلیل پایداری اکسیداتیو بالاتر نسبت به امولسیون‌های سنتی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. امولسیون پیکرینگ بر خلاف امولسیون‌های معمولی، فاقد سورفکتانت‌های با وزن ملکولی کم هستند و جذب غیر قابل برگشت ذرات جامد در سطح مشترک آب و روغن موجب ایجاد سیستمی پایدار، ایمن و سازگار با محیط زیست می‌گردد [۹۶، ۹۷]. امولسیون پیکرینگ برای واکنش‌های چند فاز مناسب است، ناحیه سطحی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد و باعث بهبود انتقال جرم می‌شود. پایداری امولسیون پیکرینگ به ترشوندگی جزئی مناسب ذرات، اندازه، شکل، غلظت، بار سطحی و زاویه تماس بستگی دارد [۸۵، ۸۶].

در پژوهشی De Melo و همکاران (۲۰۲۱) ویتامین D را با *Acca sellowiana* نانوکپسوله نمودند و پایداری آن را در دستگاه گوارش شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد نانوذرات تولید شده دارای اندازه‌ای کمتر از ۲۰۰ نانومتر، کروی شکل، ساختاری همگن و سطحی صاف بودند و راندمان درون پوشانی برابر با ۹۷/۲۱ درصد بود. نانوفرمولاسیون حاصل (NP-D3) دارای پایداری فیزیکوشیمیایی و حرارتی مناسب و مقادیر بالایی از ترکیبات زیست‌فعال مانند ترکیبات فنولیک و فلاونوئید با ظرفیت آنتی‌اکسیدانی قابل توجه بود. در شرایط گوارشی شبیه‌سازی شده، حدود ۸۰ درصد ویتامین D3 به‌صورت کنترل‌شده آزاد گردید. ارزیابی‌های میکروبیولوژیکی و پایداری نیز نشان داد که نانوفرمولاسیون پس از ۹۰ روز، پایداری و کارایی مطلوبی را حفظ کرده است. نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات مبتنی بر *Acca sellowiana* رویکردی

نویسندگان هیچگونه تضاد منافع را اعلام نمی‌کنند. پژوهش حاضر بر اساس اصول صداقت علمی و بی طرفی انجام شده است.

بیانیه تأمین مالی

این تحقیق حمایت مالی دریافت نکرده است.

۶- منابع

- [1] Mitra, S., Paul, S., Roy, S., Sutradhar, H., Bin Emran, T., Nainu, F., ... & Mubarak, M. S. (2022). Exploring the immune-boosting functions of vitamins and minerals as nutritional food bioactive compounds: A comprehensive review. *Molecules*, 27(2), 555.
- [2] Fekete, M., Lehoczi, A., Tarantini, S., Fazekas-Pongor, V., Csípő, T., Csizmadia, Z., & Varga, J. T. (2023). Improving cognitive function with nutritional supplements in aging: a comprehensive narrative review of clinical studies investigating the effects of vitamins, minerals, antioxidants, and other dietary supplements. *Nutrients*, 15(24), 5116.
- [3] Ribeiro, A. M., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2021). The progress and application of vitamin E encapsulation—A review. *Food hydrocolloids*, 121, 106998.
- [4] Demekas, S., & Rigutto-Farebrother, J. (2024). Perspectives on ultra-processed foods as vehicles for food fortification. *Trends in Food Science & Technology*, 104505.
- [5] McCourt, A. F., & O'Sullivan, A. M. (2022). Using food fortification to improve vitamin D bioaccessibility and intakes. *Proceedings of the Nutrition Society*, 81(1), 99-107.
- [6] Ahmed, M. W., Khan, M. S. I., Parven, A., Rashid, M. H., & Meftaul, I. M. (2023). Vitamin-A enriched yogurt through fortification of pumpkin (*Cucurbita maxima*): A potential alternative for preventing blindness in children. *Heliyon*, 9(4).
- [7] Andrès, E., Lorenzo-Villalba, N., Terrade, J. E., & Méndez-Bailon, M. (2024). Fat-soluble vitamins A, D, E, and K: review of the literature and points of interest for the clinician. *Journal of Clinical Medicine*, 13(13), 3641.
- [8] Gharibzahedi, S. M. T., Moghadam, M., Amft, J., Tolun, A., Hasabnis, G., & Altintas, Z. (2023). Recent Advances in Dietary Sources, Health Benefits, Emerging Encapsulation Methods, Food Fortification, and New Sensor-Based Monitoring of Vitamin B12: A Critical Review. *Molecules*, 28(22), 7469.
- [9] Yaman, M., Çatak, J., Uğur, H., Gürbüz, M., Belli, İ., Tanyıldız, S. N., ... & Yaldız, M. C. (2021). The bioaccessibility of water-soluble vitamins: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 552-563.
- [10] Venugopalan, V. K., Gopakumar, L. R., Kumaran, A. K., Chatterjee, N. S., Soman, V., Peeralil, S., ... & Nagarajarao, R. C. (2021). Encapsulation and protection of omega-3-rich fish oils using food-grade delivery systems. *Foods*, 10(7), 1566.
- [11] Chang, C., & Nickerson, M. T. (2018). Encapsulation of omega 3-6-9 fatty acids-rich oils using protein-based emulsions with spray drying. *Journal of Food Science and Technology*, 55, 2850-2861.
- [12] Hosseiny, M. and Nateghi, L. (2025). Probiotics in the Food Industry from Production to Food Products and Their Impact on Human Health. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 44(2), 447-468. doi: 10.30492/ijcce.2025.2034093.6673
- [13] Călinoiu, L. F., Ștefănescu, B. E., Pop, I. D., Muntean, L., & Vodnar, D. C. (2019). Chitosan coating applications in probiotic microencapsulation. *Coatings*, 9(3), 194.
- [14] Miller, D. D. (2017). Minerals. In *Fennema's food chemistry* (pp. 627-679). CRC Press.
- [15] Whitney, E. N., Rolfes, S. R., Crowe, T., & Walsh, A. (2019). Understanding nutrition. Cengage AU.
- [16] Calderón-Oliver, M., & Ponce-Alquicira, E. (2022). The role of microencapsulation in food application. *Molecules*, 27(5), 1499.
- [17] Whitfield, K. C., Smith, T. J., Rohner, F., Wieringa, F. T., & Green, T. J. (2021). Thiamine fortification strategies in low-and middle-income settings: a review. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1498(1), 29-45.
- [18] Ravisankar, P., Reddy, A. A., Nagalakshmi, B., Koushik, O. S., Kumar, B. V., & Anvith, P. S. (2015). The comprehensive review on fat soluble vitamins. *IOSR Journal of Pharmacy*, 5(11), 12-28.
- [19] Pham, V. T., Dold, S., Rehman, A., Bird, J. K., & Steinert, R. E. (2021). Vitamins, the gut microbiome and gastrointestinal health in humans. *Nutrition Research*, 95, 35-53.

- [20] Carazo, A., Macáková, K., Matoušová, K., Krčmová, L. K., Protti, M., & Mladěnká, P. (2021). Vitamin A update: forms, sources, kinetics, detection, function, deficiency, therapeutic use and toxicity. *Nutrients*, 13(5), 1703.
- [21] Dutta, D., Nayak, A., & Dutta, D. (2023). Reconnoitring the usage of agroindustrial waste in carotenoid production for food fortification: A sustainable approach to tackle vitamin A deficiency. *Food and Bioprocess Technology*, 16(3), 467-491.
- [22] Tang, W., Zhuang, J., Anselmo, A. C., Xu, X., Duan, A., Zhang, R., ... & Jaklenec, A. (2022). Enhanced stability and clinical absorption of a form of encapsulated vitamin A for food fortification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(51), e2211534119.
- [23] Yousefi, S., Rajaei, P., Nateghi, L., Nodeh, H. R., & Rashidi, L. (2023). Encapsulation of sesamol and retinol using alginate and chitosan-coated W/O/W multiple emulsions containing Tween 80 and Span 80. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242, 124766.
- [24] Liang, C., Qiao, G., Liu, Y., Tian, L., Hui, N., Li, J., ... & Ren, X. (2021). Overview of all-trans-retinoic acid (ATRA) and its analogues: structures, activities, and mechanisms in acute promyelocytic leukaemia. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 220, 113451.
- [25] Siddikuzzaman, N., Guruvayoorappan, C., & Berlin Grace, V. M. (2011). All trans retinoic acid and cancer. *Immunopharmacology and immunotoxicology*, 33(2), 241-249.
- [26] Carlberg, C., Raczyk, M., & Zawrotna, N. (2023). Vitamin D: A master example of nutrigenomics. *Redox Biology*, 62, 102695.
- [27] Maurya, V. K., Bashir, K., & Aggarwal, M. (2020). Vitamin D microencapsulation and fortification: Trends and technologies. *The Journal of steroid biochemistry and molecular biology*, 196, 105489.
- [28] Niedermaier, T., Gredner, T., Kuznia, S., Schöttker, B., Mons, U., Lakerveld, J., ... & PEN-Consortium. (2022). Vitamin D food fortification in European countries: the underused potential to prevent cancer deaths. *European Journal of Epidemiology*, 37(4), 309-320.
- [29] Esmaili, M., Yekta, R., Abedi, A. S., Ghanati, K., Derav, R. Z., Houshyarrad, A., ... & Mahmoudzadeh, M. (2021). Encapsulating vitamin D: A feasible and promising approach to combat its deficiency. *Pharmaceutical Sciences*, 28(2), 194-207.
- [30] Lips, P., de Jongh, R. T., & van Schoor, N. M. (2021). Trends in vitamin D status around the world. *Journal of Bone and Mineral Research Plus*, 5(12), e10585.
- [31] Lee, J., & Duggan, E. (2022). Improved stability of vitamin D3 encapsulated in whey protein isolate microgels. *International Dairy Journal*, 129, 105351.
- [32] Feduniw, S., Korczyńska, L., Górski, K., Zgliczyńska, M., Bączkowska, M., Byrczak, M., ... & Ciebia, M. (2022). The Effect of Vitamin E Supplementation in Postmenopausal Women—A Systematic Review. *Nutrients*, 15(1), 160.
- [33] Kiani, A., Fathi, M., & Nasirpour, A. (2021). Production of novel vitamin E loaded nanostructure lipid carriers and lipid nanocapsules for milk fortification. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 23(3), 545-558.
- [34] Rezagholizade-Shirvan, A., Soltani, M., Shokri, S., Radfar, R., Arab, M., & Shamloo, E. (2024). Bioactive compound encapsulation: Characteristics, applications in food systems, and implications for human health. *Food chemistry: X*, 101953.
- [35] Juhász, Á., Ungor, D., Várkonyi, E. Z., Varga, N., & Csapó, E. (2021). The pH-dependent controlled release of encapsulated vitamin b1 from liposomal nanocarrier. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(18), 9851.
- [36] Mrowicka, M., Mrowicki, J., Dragan, G., & Majsterek, I. (2023). The importance of thiamine (vitamin B1) in humans. *Bioscience Reports*, 43(10), BSR20230374.
- [37] Tian, J., Peng, G., Qu, X., Yao, Y., & Li, C. (2023). Liposoluble vitamin B1 microcapsules: Preparation, characterization, stabilization, and bioaccessibility. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 125(10), 2300015.
- [38] Ahgilan, Aarthi, Vikineswary Sabaratnam, and Vengadesh Periasamy. "Antimicrobial properties of vitamin B2." *International Journal of Food Properties* 19.5 (2016): 1173-1181.
- [39] Averianova, L. A., Balabanova, L. A., Son, O. M., Podvolotskaya, A. B., & Tekutyeva, L. A. (2020). Production of vitamin B2 (riboflavin) by microorganisms: an overview. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 570828.
- [40] Lawrance, P. (2015). Niacin (vitamin B 3)-A review of analytical methods for use in food. *Government Chemist Programme Report*, 1(9).

- [41] Sanvictores, T., & Chauhan, S. (2024). Vitamin B5 (pantothenic acid). In *StatPearls [Internet]*. StatPearls Publishing.
- [42] Jafari, F., & Shahsavari, S. (2023). Encapsulation of B6 Vitamin by Boron Nitride Nanotube using DFT Calculation. *Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran*, 42(3), 151-167.
- [43] Mironenko, A., & Eliseeva, T. (2019). Vitamin B9—description, benefits, effects on the body and best sources. *Journal of Healthy Nutrition and Dietetics*, 4(10), 88-100.
- [44] Karbalaei-Saleh, S., Yousefi, S., & Honarvar, M. (2024). Optimization of vitamin B12 nano-emulsification and encapsulation using spontaneous emulsification. *Food Science and Biotechnology*, 33(2), 399-415.
- [45] O'Leary, F., & Samman, S. (2010). Vitamin B12 in health and disease. *Nutrients*, 2(3), 299-316.
- [46] Guéant, J. L., Guéant-Rodriguez, R. M., Kosgei, V. J., & Coelho, D. (2022). Causes and consequences of impaired methionine synthase activity in acquired and inherited disorders of vitamin B12 metabolism. *Critical reviews in biochemistry and molecular biology*, 57(2), 133-155.
- [47] Santos, A. J. M., Khemiri, S., Simões, S., Prista, C., Sousa, I., & Raymundo, A. (2023). The importance, prevalence and determination of vitamins B6 and B12 in food matrices: A review. *Food Chemistry*, 426, 136606.
- [48] Hemilä, H. (2017). Vitamin C and infections. *Nutrients*, 9(4), 339.
- [49] Carr, A. C., & Maggini, S. (2017). Vitamin C and immune function. *Nutrients*, 9(11), 1211.
- [50] Lu, M., Zhu, C., Smetana, S., Zhao, M., Zhang, H., Zhang, F., & Du, Y. (2024). Minerals in edible insects: A review of content and potential for sustainable sourcing. *Food Science and Human Wellness*, 13(1), 65-74.
- [51] Gupta, P., & Badami, S. (2024). Multiple Roles of Calcium in Maintaining Human Health. *Clinical Endocrinology and Metabolism*, 3(1).
- [52] Barbagallo, M., Veronese, N., & Dominguez, L. J. (2021). Magnesium in aging, health and diseases. *Nutrients*, 13(2), 463.
- [53] Wang, X., He, Y., Gao, Q., Yang, D., & Liang, J. (2021). Approaches to evaluate nutrition of minerals in food. *Food Science and Human Wellness*, 10(2), 141-148.
- [54] Kieliszek, M., & Sandoval, S. N. S. (2023). The importance of selenium in food enrichment processes. A comprehensive review. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 79, 127260.
- [55] Zang, J., Yin, Z., Ouyang, H., Liu, Y., Liu, Z., & Yin, Z. (2025). Advances in the preparation, applications, challenges, and future trends of polysaccharide-based gels as food-grade delivery systems for probiotics: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(1), e70111.
- [56] Chandrasekaran, P., Weiskirchen, S., & Weiskirchen, R. (2024). Effects of probiotics on gut microbiota: an overview. *International journal of molecular sciences*, 25(11), 6022.
- [57] Das, T. K., Pradhan, S., Chakrabarti, S., Mondal, K. C., & Ghosh, K. (2022). Current status of probiotic and related health benefits. *Applied Food Research*, 2(2), 100185.
- [58] Hosseiny, M., & Nateghi, L. (2025). Modern Methods Employed to Reduce Aflatoxin in Milk and Dairy Products in the Past Decade. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 44(1), 310-324.
- [59] Gullo, M., & Zotta, T. (2022). Probiotics in dairy products: microencapsulation and delivery. In *Advances in Dairy Microbial Products* (pp. 271-285). Woodhead Publishing.
- [60] Sang, L., Yang, S., Zhu, Y., Zhu, Z., Yang, B., Li, Z., ... & Huang, Y. (2024). The combined use of B vitamins and probiotics promotes B vitamin absorption and increases Akkermansia abundance. *Food & Function*, 15(13), 7017-7031.
- [61] Huang, Y. Y., Yao, Q. B., Jia, X. Z., Chen, B. R., Abdul, R., Wang, L. H., ... & Liu, D. M. (2023). Characterization and application in yogurt of genipin-crosslinked chitosan microcapsules encapsulating with *Lactiplantibacillus plantarum* DMDL 9010. *International Journal of Biological Macromolecules*, 248, 125871.
- [62] Yalçinkaya, S., Azarkan, S. Y., & Çakmakçı, A. G. K. (2022). Determination of the effect of *L. plantarum* AB6-25, *L. plantarum* MK55 and *S. boulardii* T8-3C microorganisms on colon, cervix, and breast cancer cell lines: Molecular docking, and molecular dynamics study. *Journal of Molecular Structure*, 1261, 132939.
- [63] Reque, P. M., & Brandelli, A. (2021). Encapsulation of probiotics and nutraceuticals: Applications in functional food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 1-10.
- [64] Vaziri, A. S., Alemzadeh, I., Vossoughi, M., & Khorasani, A. C. (2018). Co-microencapsulation of

- Lactobacillus plantarum and DHA fatty acid in alginate-pectin-gelatin biocomposites. *Carbohydrate polymers*, 199, 266-275.
- [65] Nejatian, M., Yazdi, A. P. G., Fattahi, R., Saberian, H., Bazsefidpar, N., Assadpour, E., & Jafari, S. M. (2024). Improving the storage and oxidative stability of essential fatty acids by different encapsulation methods; a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 260, 129548.
- [66] Venugopalan, V. K., Gopakumar, L. R., Kumaran, A. K., Chatterjee, N. S., Soman, V., Peeralil, S., ... & Nagarajarao, R. C. (2021). Encapsulation and protection of omega-3-rich fish oils using food-grade delivery systems. *Foods*, 10(7), 1566.
- [67] Chang, C., & Nickerson, M. T. (2018). Encapsulation of omega 3-6-9 fatty acids-rich oils using protein-based emulsions with spray drying. *Journal of Food Science and Technology*, 55(8), 2850-2861.
- [68] Gohari, A. S., Nateghi, L., Rashidi, L., & Berenji, S. (2024). Preparation and characterization of sodium caseinate-apricot tree gum/gum Arabic nanocomplex for encapsulation of conjugated linoleic acid (CLA). *International Journal of Biological Macromolecules*, 261, 129773.
- [69] Ibrahim, K. S., & El-Sayed, E. M. (2021). Dietary conjugated linoleic acid and medium-chain triglycerides for obesity management. *Journal of Biosciences*, 46(1), 12.
- [70] Wu, C., Chen, H., Mei, Y., Yang, B., Zhao, J., Stanton, C., & Chen, W. (2024). Advances in research on microbial conjugated linoleic acid bioconversion. *Progress in Lipid Research*, 93, 101257.
- [71] Hosseiny, M., & Khorshidpour, B. (2025). An overview of the application of advanced non-thermal technologies in the food industry. *Journal of food science and technology (Iran)*, 22(159), 27-42.
- [72] Alu'datt, M. H., Alrosan, M., Gammoh, S., Tranchant, C. C., Alhamad, M. N., Rababah, T., ... & Tan, T. C. (2022). Encapsulation-based technologies for bioactive compounds and their application in the food industry: A roadmap for food-derived functional and health-promoting ingredients. *Food Bioscience*, 50, 101971.
- [73] Choudhury, N., Meghwal, M., & Das, K. (2021). Microencapsulation: An overview on concepts, methods, properties and applications in foods. *Food Frontiers*, 2(4), 426-442.
- [74] Hosseini, Mohammadiyar and Kord, Mohammad. (2025). A review of nanoencapsulation in food industry: technology, applications and challenges. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 22(165), 212-224. doi: 10.22034/FSCT.22.165.212
- [75] Farazi, Ghazal, Asadi, Gholamhossein and Gharachourloo, Maryam. (2023). The effect of using nanoemulsion of garlic essential oil encapsulated with gum arabic on antioxidant activity, shelf life and sensory properties of flavored olive oil. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 20(140), 96-112. doi: 10.22034/FSCT.20.140.96
- [76] Wang, S., Ren, Z., Li, H., Xue, Y., Zhang, M., Li, R., & Liu, P. (2024). Preparation and sustained-release of chitosan-alginate bilayer microcapsules containing aromatic compounds with different functional groups. *International Journal of Biological Macromolecules*, 271, 132663.
- [77] Meng, Q., Zhong, S., Wang, J., Gao, Y., & Cui, X. (2023). Advances in chitosan-based microcapsules and their applications. *Carbohydrate Polymers*, 300, 120265.
- [78] Büyükgümüş, E., Özcan, M., & Bulca, S. (2022). Use of microencapsulation and nanoencapsulation techniques in dairy technology. *Scientific Bulletin Series F. Biotechnologies*, 26(2).
- [79] Timilsena, Y. P., Haque, M. A., & Adhikari, B. (2020). Encapsulation in the food industry: A brief historical overview to recent developments. *Food and Nutrition Sciences*, 11(6), 481-508.
- [80] Daneshmand, Sara , Miri, Mohammad Amin and Noura, Fatemeh . (2023). Encapsulation of essential oils of flaxseed and eucalyptus using electrospinning . *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 20(145), 170-187. doi: 10.22034/FSCT.20.145.170
- [81] Mwangi, W. W., Lim, H. P., Low, L. E., Tey, B. T., & Chan, E. S. (2020). Food-grade Pickering emulsions for encapsulation and delivery of bioactives. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 320-332.
- [82] Heydari, Leila, Javanmardi, Zahra, Nourbakhsh, Hayman and Koshesh Saba, Mahmoud. (2024). Design of nanoemulsion systems of essential oils with chitosan to control gray mold spoilage in strawberries. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 21(156), 49-62. doi: 10.22034/FSCT.21.156.49
- [83] Tabatabaei, F. H., Elhamirad, A. H., Karazhiyan, R., Karazhiyan, H., & Armin, M. (2025). Microencapsulation of Lactobacillus

acidophilus La5 at Sodium Alginate and Sodium Caseinate Matrix and its viability under Simulated Gastrointestinal Conditions. *Journal of Food Science & Technology* (2008-8787), 21(159).

[84] Haji, F., Cheon, J., Baek, J., Wang, Q., & Tam, K. C. (2022). Application of Pickering emulsions in probiotic encapsulation-A review. *Current Research in Food Science*, 5, 1603-1615.

[85] Zhong, Y., Lin, Y., Yang, M., Zeng, X., Liu, D., Liu, W., & Chen, W. (2024). Characterization of methyltetrahydrophthalic anhydride esterified corn starch and their ability in stabilizing Pickering emulsion. *Journal of Food Engineering*, 365, 111830.

[86] Xiao, M., Li, S., Xiong, L., Duan, J., Chen, X., Luo, X., ... & Zhang, J. (2024). Pickering emulsion gel of polyunsaturated fatty acid-rich oils stabilized by zein-tannic acid green nanoparticles for storage and oxidation stability enhancement. *Journal of Colloid and Interface Science*, 675, 646-659.

[87] de Melo, A. P. Z., da Rosa, C. G., Noronha, C. M., Machado, M. H., Sganzerla, W. G., da Cunha Bellinati, N. V., ... & Barreto, P. L. M. (2021). Nanoencapsulation of vitamin D3 and fortification in an experimental jelly model of *Acacia senegal*: Bioaccessibility in a simulated gastrointestinal system. *Lwt*, 145, 111287.



Scientific Research

The impact of food fortification on health and strategies to reduce micronutrient loss

Morva Hosseiny¹, Leila Nateghi^{1*}, Ladan Rashidi^{2*}, Seyed Abdolmajid Mousavi³

1- Department of Food Science and Engineering, Varamin-Pishva Branch, Islamic Azad University, Varamin, Iran

2- Department of Food, Halal, and Agricultural Products Research Group, Food Technology and Agricultural Products Research Center, Standard Research Institute (SRI), Karaj, Iran

3- Department of Animal Science, Varamin-Pishva Branch, Islamic Azad University, Varamin, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2025/11/07

Review: 2026/04/03

Accepted: 2026/04/12

Keywords:

Stability enhancement,

Pickering emulsion,

probiotics,

encapsulation,

functional products.

DOI: 10.48311/fsct.2026.117561.82944

*Corresponding Author E-

Leylanategi@yahoo.com

Functional and fortified foods have become increasingly important today due to their effective role in disease prevention and public health promotion. Food fortification is a process in which micronutrients such as vitamins, minerals, essential fatty acids, and bioactive compounds are added to food products to compensate for nutritional deficiencies and meet the physiological needs of the body. This approach is known as one of the most effective strategies for reducing the prevalence of diseases caused by micronutrient deficiencies, including beriberi, pellagra, and rickets. However, the direct addition of these compounds to food faces challenges such as low stability, limited solubility, low bioavailability, and high sensitivity to processing conditions. Encapsulation technology, as a new method, has been able to overcome many of these limitations. Encapsulation increases stability, protects against environmental factors, improves absorption, and allows for controlled release of micronutrients in the digestive tract. Common encapsulation methods include spray drying, freeze drying, emulsion, extrusion, and fluidized bed, each of which has its own advantages and applications. This review article aims to examine the importance of food fortification, the role of micronutrients in health, and the benefits of encapsulation technology. The results indicate that simultaneous use of fortification and encapsulation can be considered as an effective strategy in public health programs, and further research in this area is necessary.