



اسپیروولینا و پتانسیل آن در توسعه ماست پروبیوتیک فراسودمند

*مریم میرزائی، تینا تکاسی

گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

نویسنده مسئول: مریم میرزائی

ash.2002.mirzaei@gmail.com

چکیده

هدف: این مقاله مروری با بررسی جامع پتانسیل ریز جلبک اسپیرولینا^۱ (*Arthrospira platensis*) در ارتقای ارزش تغذیه‌ای و عملکردی ماست‌های پروبیوتیک^۲ می‌پردازد. در این پژوهش اثرات هم‌افزایی سه مؤلفه اصلی، پایه‌ی ماست، کشت‌های پروبیوتیک و ترکیبات زیست فعال اسپیرولینا بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، بقای میکروبی، کیفیت حسی و شاخص‌های تغذیه‌ای ارزیابی شده است. تحلیل تطبیقی داده‌های حاصل از حدود سی مطالعه‌ی معتبرین الملی مبنای این مرور قرار گرفت. یافته‌ها حاکی از آن است که اسپیرولینا با دارا بودن پروفایل غذایی ممتاز (۵۵ الی ۷۰ درصد پروتئین کامل، اسید گاما-لینولنیک، آهن، ویتامین‌های گروه B، فیکوسیانین^۳، کاروتنوئیدها)، ماست را به محصولی با ارزش تغذیه‌ای بسیار بالا تبدیل می‌کند. افزون بر آن، این ریز جلبک به‌عنوان یک پری‌بیوتیک طبیعی عمل کرده و از طریق فراهم کردن عناصر تغذیه‌ای و ترکیبات محافظ، بقای سویه‌های پروبیوتیک مانند *L.acidophilus* را تا حدود ۱/۵ لگاریتم در طول نگهداری بهبود می‌بخشد. افزودن اسپیرولینا فرآیند تخمیر را تسریع کرده، پایداری میکروبی را حفظ و در عین حال ساختار ژل و ظرفیت نگهداری آب را بهبود می‌دهد و پدیده‌ی آب‌اندازی را کاهش می‌دهد. غلظت بهینه‌ی اسپیرولینا برای دستیابی به بیشترین اثر عملکردی و حداقل تأثیر بر پذیرش حسی، در بازه‌ی ۰/۵ تا ۱ درصد

^۱ اسپیرولینا (Spirulina): یک ریز جلبک سیانوباکتری (Cyanobacterium) با نام علمی *Arthrospira platensis*

^۲ پروبیوتیک (Probiotic): میکروارگانیسم‌های زنده‌ای که هنگامی به مقدار کافی مصرف شوند، اثرات سلامت‌بخشی برای میزبان دارند. نمونه‌های رایج در ماست شامل *Bifidobacterium* و *Lactobacillus* هستند.

^۳ فیکوسیانین (Phycocyanin): پیگمان پروتئینی آبی‌رنگ موجود در اسپیرولینا که مسئول اصلی خواص آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی و تعدیل‌کنندگی سیستم ایمنی آن است.



پیشنهاد می‌شود به کارگیری راهکارهایی نظیر ریزپوشانی^۱ و استفاده از طعم‌دهنده‌های طبیعی مانند عسل، در کاهش طعم و بوی خاکی اسپیرولینا مؤثر گزارش شده است. یافته‌های بالینی مقدماتی بیانگر آن است که مصرف ماست غنی شده با اسپیرولینا می‌تواند اثرات هیپوگلیسمی^۲، بهبود شاخص‌های چربی و تقویت فعالیت آنتی‌اکسیدانی در انسان کمک کند.

کلمات کلیدی: اسپیرولینا، ماست پروبیوتیک، غذای فراسودمند، سین بیوتیک

مقدمه:

در دهه‌ی اخیر، گرایش جهانی به سوی مصرف غذاهای فراسودمند به‌طور چشمگیری افزایش یافته است؛ محصولاتی که فراتر از تأمین نیازهای تغذیه‌ای پایه، در ارتقای سلامت و پیشگیری از بیماری‌ها نقش دارند. در این میان، فرآورده‌های لبنی تخمیری، به‌ویژه ماست، به‌دلیل در دسترس بودن، مقبولیت مصرف و بافت مناسب، به‌عنوان حامل مؤثر ترکیبات زیست‌فعال از جمله پروبیوتیک‌ها شناخته می‌شوند. با این حال، پایداری و بقای پروبیوتیک‌ها در طول نگهداری و در شرایط گوارشی همچنان از چالش‌های اساسی در تولید این محصولات است، زیرا کاهش جمعیت زنده‌ی آن‌ها مستقیماً بر اثربخشی سلامت‌بخش محصول تأثیر می‌گذارد [۴].

در این راستا، اسپیرولینا با ترکیب منحصربه‌فردی از پروتئین‌های کامل، اسیدهای چرب ضروری، ویتامین‌ها و فیکوسیانین، به‌عنوان یک افزودنی زیست‌فعال و امیدوارکننده در توسعه‌ی ماست‌های فراسودمند شناخته شده است [۵]. اسپیرولینا نه تنها منبعی غنی از پروتئین کامل با قابلیت هضم بالا (۵۵ الی ۸۶ درصد وزن خشک) است، بلکه سرشار از ریزمغذی‌ها، اسیدهای چرب ضروری و ترکیبات زیست‌فعال قدرتمندی مانند فیکوسیانین است [۱، ۶]. ترکیب این ابرغذا^۳ با کشت‌های پروبیوتیک در ماتریکس ماست، زمینه‌ساز تولید محصولی سین بیوتیک^۴ است که ترکیبی از اثرات

^۱ ریزپوشانی (Microencapsulation): یک فناوری برای محافظت از مواد حساس (مانند اسپیرولینا یا پروبیوتیک) که در آن مواد درون یک پوسته ریز (دیواره) محبوس می‌شوند تا از آن‌ها در برابر عوامل مخرب (مانند اسید، اکسیژن) محافظت و رهایش کنترل‌شده‌ای داشته باشند.

^۲ اثرات هیپوگلیسمی (Hypoglycemic Effects): اثرات کاهنده سطح قند (گلوکز) خون.

^۳ ابرغذا (superfood): به مواد غذایی اطلاق می‌شود که سرشار از مواد مغذی، ویتامین‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها و ترکیبات مفید برای سلامت بدن هستند.

^۴ سین بیوتیک (Synbiotic): ترکیبی از پروبیوتیک و پری‌بیوتیک که اثرات سلامت‌بخشی آن‌ها به‌صورت هم‌افزایی تقویت می‌شود.



پری‌بیوتیکی و پروبیوتیکی را دربر دارد. چنین سیستم ترکیبی، از طریق هم‌افزایی زیستی میان میکروارگانیسم‌های زنده و ترکیبات متابولیکی اسپیرولینا، قادر است طیف وسیعی از اثرات تغذیه‌ای و فیزیولوژیک مفید را ایجاد کند [۴، ۵]. بر همین اساس، هدف این مرور، تحلیل شواهد علمی درباره‌ی پتانسیل‌ها، چالش‌ها و چشم‌اندازهای کاربرد اسپیرولینا در فرمولاسیون ماست‌های پروبیوتیک فراسودمند است.

۱. پتانسیل اسپیرولینا به عنوان یک ماده اولیه فراسودمند در توسعه ماست پروبیوتیک

۱.۱. ارزش غذایی کمی و کیفی اسپیرولینا

۱.۱-۱. پروتئین و اسیدهای آمینه

اسپیرولینا به دلیل محتوای پروتئین بسیار بالا که حاوی تمام اسیدهای آمینه ضروری است، به عنوان یک منبع پروتئین کامل شناخته می‌شود [۶، ۷]. مقایسه مستقیم، برتری کمی آن را به وضوح نشان می‌دهد: در حالی که اسپیرولینا ۵۵ الی ۷۰ درصد پروتئین دارد، محتوای پروتئین گوشت گاو (۱۷/۴ الی ۲۲ درصد)، مرغ (۱۹ الی ۲۴ درصد)، ماهی (۱۹/۲ الی ۲۲ درصد) و حتی سویا (۴۰/۳ الی ۳۵/۳۵ درصد) به مراتب کمتر است [۶]. پروفایل دقیق اسیدهای آمینه آن شامل مقادیر قابل توجهی از اسیدهای آمینه ضروری مانند لوسین (۶۱/۷۰ mg/g الی ۳۹/۶۹)، لیزین (۳۴ mg/g الی ۲۲/۶۲) و میتونین (۱۷/۱ mg/g الی ۸/۰۷) است [۶]. هضم‌پذیری بالای آن (۸۵ الی ۹۵ درصد) ناشی از ساختار دیواره سلولی فاقد سلولز است و داده‌ها نشان می‌دهد هضم‌پذیری اسیدهای آمینه خاصی مانند لوسین (86 ± 0.1 درصد) و فنیل‌آلانین ($95/3 \pm 0.1$ درصد) در سطح مطلوبی قرار دارد [۶].

۱.۱-۲. ترکیبات زیست‌فعال کلیدی: فیکوسیانین، پلی‌ساکاریدها و لیپیدها

فیکوسیانین می‌تواند تا ۲۰٪ و در برخی منابع تا ۴۷٪ از وزن خشک را تشکیل دهد و مسئول خواص آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی، تعدیل‌کنندگی سیستم ایمنی و ضدسرطانی است [۱، ۷]. کربوهیدرات اسپیرولینا بین ۱۵ الی ۲۵ درصد است که عمدتاً به صورت پلی‌ساکاریدهای سولفات با خواص پری‌بیوتیک، ایمونومودولاتوری^۱ و ضدویروسی هستند [۱، ۷].

^۱ مکانیسم ایمونومودولاتوری (Immunomodulatory): مکانیسمی که به تنظیم و تعدیل پاسخ سیستم ایمنی بدن می‌پردازد و می‌تواند آن را تقویت یا در

مواردی از فعالیت بیش از حد آن جلوگیری کند.



با دستکاری شرایط کشت می‌توان تولید پلی‌ساکاریدهای ارزشمندی مانند β -گلوکان‌ها (۲۰ الی ۳۴ درصد وزن خشک) را افزایش داد [۶]. پروفایل لیپیدی اسپیرولینا (۶ الی ۹ درصد وزن خشک) سرشار از اسیدهای چرب غیراشباع (PUFA) و به‌طور خاص حاوی اسید گاما-لینولنیک (GLA) از خانواده امگا-۶ می‌باشد که نقش مهمی در کاهش التهاب دارد [۱، ۶، ۷].

۱-۳-۱. ریزمغذی‌ها: غنی‌ترین منبع طبیعی

اسپیرولینا منبعی غنی از مواد معدنی و ویتامین‌ها است. داده‌ها نشان می‌دهد که محتوای پتاسیم ($1400 \text{ mg}/100\text{g}$) الی 1600 ، کلسیم ($700 \text{ mg}/100\text{g}$ الی 1500)، آهن ($100 \text{ mg}/100\text{g}$ الی 170)، و ویتامین‌های گروه B مانند B1 ($3/5 \text{ mg}/100\text{g}$ الی $4/8$) و B2 ($4 \text{ mg}/100\text{g}$ الی $5/5$) در سطوح بسیار بالایی قرار دارند. این موضوع نقش حیاتی آن را در رژیم‌های گیاهخواری که اغلب با کمبود این ریزمغذی‌ها مواجه هستند، پررنگ می‌کند [۶].

۱-۲-۱. خواص سلامت‌بخش و مکانیسم‌های عمل اسپیرولینا

۱-۲-۱. فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ضدالتهابی

فیکوسیانین قادر است رادیکال‌های آزاد و گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن را خنثی کند و بدین ترتیب توانایی کاهش استرس اکسیداتیو را دارد. مکانیسم ضدالتهابی آن از طریق مهار آنزیم سیکلو‌اکسیژناز-۲ (COX-2) و کاهش بیان سیتوکین‌های پیش‌التهابی مانند $\text{TNF-}\alpha$ و IL-6 عمل می‌کند. این خاصیت برای کاهش التهاب روده در محصولات پروبیوتیک حائز اهمیت است [۱، ۷].

۱-۲-۲. تعدیل سیستم ایمنی و فعالیت ضدویروسی

فیکوسیانین و پلی‌ساکاریدهای اسپیرولینا فعالیت ماکروفاژها، سلول‌های کشنده طبیعی و لنفوسیت‌های T را افزایش می‌دهند [۱، ۷]. یک پلی‌ساکارید سولفات خاص به نام کلسیم اسپیرولان (Ca-SP) دارای فعالیت ضدویروسی قوی علیه ویروس‌های پوشش‌دار (مانند هرپس سیمپلکس و HIV) با مهار نفوذ ویروس به سلول‌های میزبان شناسایی شده است [۷].

۱-۳-۲. پتانسیل ضدسرطانی و اثرات متابولیک

فیکوسیانین و پلی‌ساکاریدهای اسپیرولینا دارای اثرات ضدسرطانی از طریق القای آپوپتوز (با فعال کردن کاسپازها)، مهار تکثیر سلول‌های سرطانی (مانند سرطان پستان MCF-7 و تخمدان SKOV-3) و مهار رگ‌زایی هستند [۱، ۷].



مطالعات بالینی نیز نشان داده‌اند که مکمل‌یاری با اسپیرولینا می‌تواند منجر به کاهش قند خون، HbA1c در دیابت نوع

۲، و همچنین بهبود پروفایل لیپیدی (کاهش تری‌گلیسیرید، کلسترول تام و LDL) شود [۷].

۳.۱ کاربرد اسپیرولینا در غنی‌سازی محصولات لبنی

غنی‌سازی محصولات غذایی با اسپیرولینا عمدتاً با هدف بهبود پروفایل تغذیه‌ای و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی انجام می‌شود. در بین محصولات مختلف، ماست به‌عنوان یک حامل ایده‌آل برای اسپیرولینا و پروبیوتیک‌ها مطرح است [۶].

۳.۱-۱. بهبود ارزش تغذیه‌ای و عملکردی ماست

مطالعات متعدد نشان داده که افزودن اسپیرولینا به ماست در سطوح ۰/۲۵ الی ۱ درصد منجر به افزایش پروتئین، فیبر، آهن، کلسیم، منیزیم، کاروتنوئیدها، کلروفیل، فیکوسیانین و فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌شود [۴، ۶]. این غنی‌سازی، ماست را به یک محصول فراسودمند قدرتمند تبدیل می‌کند.

۳.۱-۲. تأثیر بر فرآیند تخمیر و بقای پروبیوتیک‌ها

افزودن اسپیرولینا به‌طور قابل توجهی بر فرآیند تخمیر تأثیر می‌گذارد. نمونه‌های غنی شده در مقایسه با شاهد، با سرعت اسیدی شدن بیشتری مواجه شده و به pH نهایی پایین‌تری می‌رسند [۵]. این پدیده نه‌تنها ناشی از تأثیر پری‌بیوتیکی پلی‌ساکاریدهای اسپیرولینا است، بلکه به‌دلیل وجود منابع معدنی و ویتامین‌های گروه B در اسپیرولینا نیز هست که به‌عنوان فاکتورهای رشد برای پروبیوتیک‌ها عمل می‌کنند [۴، ۱].

۳.۱-۳. بهینه‌سازی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و رئولوژیکی

بافت و ویسکوزیته: افزودن اسپیرولینا تا غلظت ۱/۵٪ منجر به افزایش ویسکوزیته و سختی ماست می‌شود. این امر ناشی از برهمکنش‌های فیزیکوشیمیایی بین پروتئین‌های شیر و ذرات اسپیرولینا و همچنین ظرفیت بالای جذب آب این ریزجلبک است. با این حال، در غلظت‌های بسیار بالا (بالای ۲٪)، امکان ایجاد بافت نامطلوب وجود دارد [۵].

ظرفیت نگهداری آب (WHC)^۱ و پایداری: یکی از مزایای کلیدی افزودن اسپیرولینا، بهبود WHC و کاهش سینرسیس است. فیبر و پلی‌ساکاریدهای موجود در اسپیرولینا به ساختار شبکه پروتئینی متصل شده و توانایی آن را برای به‌دام انداختن و حفظ آب افزایش می‌دهند [۵].

^۱ ظرفیت نگهداری آب (Water Holding Capacity – WHC): توانایی ماتریکس ماست در به‌دام انداختن و حفظ مولکول‌های آب؛ WHC بالاتر به‌معنای

سینرسیس کمتر و بافت مطلوب‌تر است.



تغییرات رنگ: افزودن اسپیرولینا به دلیل وجود فیکوسیانیین (آبی) و کلروفیل (سبز)، به طور اجتناب ناپذیری رنگ ماست را به سبز-آبی تغییر می‌دهد. با افزایش غلظت، روشنایی (L) کاهش یافته و محصول تیره‌تر می‌شود. این تغییر رنگ می‌تواند یک چالش حسی باشد، مگر اینکه به عنوان یک ویژگی طبیعی و سلامت‌بخش معرفی گردد [۴، ۵].

۴.۱. چالش‌های کلیدی و راهکارهای فنی

۴.۱.۱. چالش‌های حسی: طعم، بو و رنگ

یکی از موانع اصلی گسترش استفاده از اسپیرولینا، طعم و بوی متمایز و دریایی آن است. ترکیبات آلی فرار (VOCs) مسئول این عطر و طعم شامل هیدروکربن‌های شاخه‌دار (بیش از ۳۷٪)، آلدهیدها، کتون‌ها و الکل‌ها هستند [۶]. راهکارهای متعددی برای غلبه بر این چالش ارائه شده است:

الف) ریزپوشانی: این روش امکان افزودن تا ۲۰٪ اسپیرولینا به محصولاتی مانند بیسکویت را بدون افت کیفیت حسی فراهم می‌کند [۶]. در ماست، ریزپوشانی اسپیرولینا در آلزینات منجر به pH بالاتر، پایین‌ترین سینرسیس و افزایش تدریجی ویسکوزیته در طول نگهداری شده است [۱]. ب) استتار در ماتریکس‌های غذایی: می‌توان از محصولات تیره یا سبزرنگ مانند شکلات، پستو، سوپ بروکلی برای پوشش رنگ و طعم استفاده کرد [۶]. ج) بی‌بو کردن: استخراج انتخابی ترکیبات معطر با استفاده از حلال‌های شیمیایی مانند اتانول امکان پذیر است [۶].

۴.۱.۲. چالش‌های فنی: دسترسی زیستی^۱ و پایداری ترکیبات

دیواره سلولی سخت پپتیدوگلیکانی اسپیرولینا و قرارگیری پروتئین‌ها در کمپلکس‌های پیگمان پروتئینی، هضم‌پذیری و دسترسی زیستی را محدود می‌کند. پیش تیمارهای مکانیکی و فیزیکی مختلفی از جمله اکستروژن، آسیاب گلوله‌ای، فراصوت و مایکروویو برای غلبه بر این محدودیت و افزایش آزادسازی ترکیبات زیست‌فعال مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۷]. همچنین، ترکیبات حساسی مانند فیکوسیانیین در طول فراوری و نگهداری ممکن است دچار تخریب شوند که بر ارزش سلامتی محصول نهایی تأثیر می‌گذارد. استفاده از روش‌های غیرحرارتی برای استریلیزاسیون (مانند میدان الکتریکی پالسی، پلاسما سرد) می‌تواند به حفظ یکپارچگی این ترکیبات کمک کند [۱].

^۱ دسترسی زیستی (Bioavailability): نسبتی از یک ماده مغذی یا ترکیب زیست‌فعال که پس از مصرف، جذب شده و برای استفاده در عملکردهای

فیزیولوژیکی بدن در دسترس قرار می‌گیرد.



۱. ۵. جنبه‌های پایداری، اقتصادی و آینده‌نگری

۱. ۵. ۱. پایداری محیط‌زیستی و اقتصادی

کشت اسپیرولینا به عنوان یک راهکار پایدار مطرح است، زیرا به زمین زراعی کمی نیاز دارد (۴۹ تا ۱۳۲ برابر کمتر از کشت مرسوم)، از آب غیرشرب یا آب دریا استفاده می‌کند و حتی می‌تواند از فاضلاب به عنوان محیط کشت بهره‌بردارد [۶]. با این حال، هزینه‌های تولید، به‌ویژه مراحل برداشت و خشک کردن (که تا ۳۰ درصد هزینه کل را تشکیل می‌دهند) و همچنین فناوری‌های ناکافی، هنوز چالش‌های اصلی برای رقابت‌پذیری اقتصادی هستند [۱، ۶].

۲. تحلیل فرمولاسیون ویژگی فیزیکوشیمیایی ماست غنی شده با اسپیرولینا

انتخاب بین پودر خشک و زیست‌توده تازه اسپیرولینا یک تصمیم استراتژیک محسوب می‌شود. استفاده از پودر خشک در غلظت‌های ۰/۵ تا ۱ درصد وزنی - حجمی پیش از تخمیر، سازگاری بالایی با فرآیند تخمیر نشان داده و پارامترهای نهایی را در محدوده استانداردهای بین‌المللی نگه می‌دارد [۸]. با این حال، چالش اصلی پودر خشک در غلظت‌های بالای ۱/۲ درصد (در لبنه) و ۰/۲۵ درصد (در ماست)، کاهش شدید پذیرش حسی به دلیل طعم، بو و رنگ شدید است [۱۱، ۱۲]. برای غلبه بر این موانع، راهکارهای نوآورانه‌ای شامل استفاده از زیست‌توده تازه به جای پودر خشک برای حفظ ترکیبات حساس به حرارت (مانند کاروتنوئیدها) و بهبود پروفایل حسی، و نیز کاربرد هموژنیزاسیون فشار بالا (۲۰۰ بار) برای یکنواخت‌سازی، شکستن دیواره سلولی و ایجاد یک امولسیون پایدار اسپیرولینا-شیر است. فرمولاسیون بهینه با این روش، شامل ۷ درصد وزنی - وزنی زیست‌توده تازه گزارش شده است [۱۲]. فناوری‌های مکملی مانند آگلومراسیون پودر با مالتودکسترین نیز قابلیت اختلاط و پایداری ترکیبات زیست‌فعال را بهبود می‌بخشد [۸].

۲. ۱. پویایی تخمیر و نقش پری‌بیوتیک اسپیرولینا: از سینتیک تا مکانیسم

افزودن اسپیرولینا تأثیرات مستقیم و قابل اندازه‌گیری بر سینتیک تخمیر و اکوسیستم میکروبی دارد. داده‌ها به وضوح نشان می‌دهند که اسپیرولینا زمان رسیدن به pH پایانی را ۱۶ الی ۲۰ درصد کاهش [۱۱، ۱۲]. این اثر پیش‌برندگی قوی، اسپیرولینا را به یک پری‌بیوتیک قدرتمند تبدیل کرده که می‌تواند شمارش پروبیوتیک‌ها را تا ۱/۵ سیکل لگاریتمی افزایش دهد [۱۱، ۱۲]. مکانیسم‌های پیشنهادی برای این اثر شامل: (۱) تأمین ریزمغذی‌های ضروری (اسیدهای آمینه



آزاد، ویتامین‌ها، پیش‌سازهای نوکلئیک‌اسید مانند آدنین و هیپوگزانتین؛ (۲) خاصیت بافری پروتئین بالای اسپیرولینا که از استرس اسیدی برای باکتری‌ها می‌کاهد؛ و (۳) فعالیت آنتی‌اکسیدانی (ویتامین C، کاروتنوئیدها) که رادیکال‌های آزاد مخرب را خنثی می‌کند، می‌باشد [۱۱]. این محیط مساعد نه تنها به بقای بالاتر پروبیوتیک‌ها می‌انجامد، بلکه به پایداری میکروبیولوژیکی کلی محصول کمک کرده، به‌طوری که نمونه‌های غنی شده عاری از کپک، مخمر، و کلیفرم در طول انبارداری هستند [۱۱، ۱۲].

۲.۲. دگرگونی پروفایل شیمیایی و غنی‌سازی ترکیبات زیست‌فعال

غنی‌سازی با اسپیرولینا، ماست را از یک فرآورده لبنی متعارف به یک ماده غذایی با چگالی تغذیه‌ای بسیار بالا تبدیل می‌کند. این تحول در چندین جبهه به‌طور همزمان رخ می‌دهد. در حوزه درشت‌مغذی‌ها، شاهد افزایش خطی و وابسته به دوز پروتئین هستیم. این افزایش هم در محصولاتی مانند لبنه (از ۹/۴٪ به ۱۰/۹٪ با ۱٪ پودر اسپیرولینا) هم در ماست (از ۳/۰۱ به ۳/۵۸ گرم در ۱۰۰ گرم با ۷٪ زیست‌توده تازه اسپیرولینا) به‌وضوح مشاهده شده است [۱۱، ۱۲]. همچنین، اسپیرولینا یک منبع کاملاً جدید از فیبر غذایی را به محصول اضافه می‌کند (لبنه: از ۰ به ۲/۵۶٪ با ۱٪ پودر). در زمینه ریزمغذی‌ها، غنی‌سازی چشمگیر مواد معدنی به‌ویژه در مورد آهن (از ۴/۵ mg/kg به ۲۵/۲۵) پتاسیم و منیزیم گزارش شده است. اما بارزترین تحول، تغییر ترکیبات زیست‌فعال است. محتوای فیکوسیانین (از ۳/۱ mg/100mol به ۴/۸۹) با افزایش غلظت پودر از ۰/۲ درصد به ۱ درصد افزایش می‌یابد [۱۱]. ماست غنی‌شده با زیست‌توده تازه می‌تواند حاوی ۲۲ برابر کارتنوئید بیشتر از شاهد باشد [۱۲]. جالب توجه است که یک سروینگ ۱۰۰ گرمی از چنین ماستی می‌تواند تا ۴۰٪ نیاز روزانه کودک به ویتامین A را تنها از طریق بتاکاروتن تأمین کند [۵].

۲.۳. مهندسی ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی، بافتی و ریزساختاری

افزودن اسپیرولینا، به‌ویژه در قالب یک ماتریکس کامپوزیت، خواص فیزیکیوشیمیایی محصولات لبنی را به‌طور اساسی تغییر می‌دهد. یکی از بارزترین مزایا، بهبود پایداری فیزیکی از طریق کاهش قابل توجه و وابسته به دوز سینرسیس است. این اثر به‌ویژه در محصولات غلیظ‌تری مانند لبنه به‌وضوح قابل مشاهده است، به‌طوری که در نمونه حاوی ۱٪ پودر اسپیرولینا، سینرسیس پس از ۲۸ روز نگهداری به حدود نصف مقدار نمونه شاهد کاهش یافت. مکانیسم این پدیده، عمدتاً به افزایش محتوای کل جامدات و توانایی بالای فیبر و ترکیبات هیدروکلوئیدی موجود در اسپیرولینا در به‌دام انداختن و نگهداری مولکول‌های آب نسبت داده می‌شود [۱۱]. در مقابل، تأثیر بر رئولوژی و بافت به نوع اسپیرولینا



بستگی دارد. در حالی که پودر اسپیرولینا می‌تواند به دلیل افزایش جامدات، بافت مطلوب و یکنواخت‌تری ایجاد کند [۸].

[۱۱]، استفاده از زیست‌توده تازه در غلظت‌های بالا (۷٪) منجر به کاهش سفتی و ویسکوزیته می‌شود. مکانیسم این نرم‌شدگی بافت، اختلال در شبکه ژل کارژین و ایجاد یک ماتریکس کامپوزیت نرم‌تر است. تصاویر میکروسکوپ کانفوکال تشکیل این ماتریکس کامپوزیت پروتئین-اسپیرولینا را به‌وضوح تأیید می‌کند، به‌طوری که اجزای اسپیرولینا به‌طور فیزیکی در شبکه پروتئینی ادغام شده و گولبول‌های چربی کوچک شده در آن پراکنده شده‌اند. از جنبه کاربردی، پایداری رنگدانه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است و داده‌ها حاکی از پایداری بالای کاروتنوئیدها در طول انبارداری (حفظ ۷۱/۵ درصد پس از ۱۸ روز) هستند که پتانسیل اسپیرولینا را به‌عنوان یک رنگدانه و آنتی‌اکسیدان طبیعی پایدار تأیید می‌کند [۱۲].

۳. میکروبیولوژی، بقای باکتری‌های پروبیوتیک و تعامل با اسپیرولینا

حفظ تراکم زنده و کافی باکتری‌های پروبیوتیک از زمان تولید تا مصرف، چالشی محوری در صنعت لبنیات است. این چالش نه تنها شامل بقا در طول انبارداری، بلکه شامل مقاومت در برابر استرس‌های فرآوری و شرایط سخت گوارشی نیز می‌شود. اسپیرولینا پلاتنسیس، به‌عنوان یک ریزجلبک سیانوباکتری، به دلیل دارا بودن ترکیبات مغذی منحصربه‌فرد شامل پروتئین با کیفیت بالا (۶۰ الی ۷۰ درصد)، طیف وسیعی از ویتامین‌ها، مواد معدنی ضروری و ترکیبات زیست‌فعال قدرتمند مانند فیکوسیانین و کارتنوئیدها، نه تنها به‌عنوان یک ماده مغذی، بلکه به‌عنوان یک عامل پری بیوتیک و محافظتی چندعاملی برای تقویت اکوسیستم میکروبی ماست مورد توجه می‌باشد [۱۷].

۳.۱. تأثیر فرم، غلظت و حالت فیزیوشیمیایی اسپیرولینا بر سینتیک رشد و بقا

مطالعات نشان می‌دهند که اثر تقویتی اسپیرولینا بر پروبیوتیک‌ها به‌شدت تحت تأثیر شکل فیزیکی (زیست‌توده تازه در مقابل پودر خشک و در مقابل ایزوله پروتئین)، غلظت و همچنین شرایط فرآوری اولیه قرار دارد. برتری زیست‌توده تازه و بهینه‌سازی فرآیند: استفاده از زیست‌توده تازه اسپیرولینا (۷٪) در ماست منجر به افزایش شمارش نهایی باکتری *Lactobacillus acidophilus* به میزان تقریبی یک سیکل لگاریمی همراه با کاهش ۲۰٪ در زمان تخمیر و افزایش



معنی‌دار نرخ حداکثر اسیدیفیکاسیون بود که نشان از یک سینرژیسم^۱ قوی و بهبود کارایی فرآیند دارد. نویسندگان این اثر هم‌افزایی را به ساختار دیواره سلولی ضعیف‌تر زیست‌توده تازه که با هموژنیزاسیون به راحتی شکسته شده و دسترسی به ریزمغذی‌ها را افزایش می‌دهد، نسبت دادند [۱۲].

اثر دوز در پودر خشک و نقطه تعادل حسی-عملکردی: در سیستم‌های حاوی پودر خشک اسپیرولینا، یک رابطه مثبت قوی بین غلظت و بقای پروبیوتیک مشاهده شده است [۱۶]. در سیستم ماست سطوح پایین (۰/۲ الی ۰/۵ درصد) پودر خشک اسپیرولینا نیز می‌تواند اثرات تقویتی قابل توجهی در شمارش *L. acidophilus* داشته باشد [۱۳].

ایزوله پروتئین اسپیرولینا و اهمیت فرآوری اولیه: هنگامی که اسپیرولینا به صورت ایزوله پروتئین برای کپسوله‌سازی *Lactobacillus rhamnosus* سویه‌ی GG استفاده شد، عملکرد آن در حین فرآوری (لیوفیلیزاسیون) با کاهش ۰/۳۵ سیکل لگاریتمی مواجه شد. یک فاکتور کلیدی که در این مطالعه آشکار شد، نقش تخمیر مقدماتی بود. اگرچه این فرایند بقا در حین لیوفیلیزاسیون را کاهش داد (احتمالاً به دلیل تغییر در ترکیب غشای سلولی)، اما به طور همزمان مقاومت پروبیوتیک را در برابر استرس اسیدی معده به طور چشمگیری افزایش داد. این نشان می‌دهد که تطبیق پروبیوتیک در حضور اسپیرولینا می‌تواند یک استراتژی مؤثر برای افزایش مقاومت باشد [۱۸].

۲.۳. سینتیک جمعیت میکروبی در طول انبارداری: از تحریک رشد تا پایداری بلندمدت
پیگیری جمعیت باکتریایی در طول انبارداری، تصویر پویا و گاهی پیچیده‌ای از تعاملات را نشان می‌دهد که از یک الگوی ساده حفاظت فراتر می‌رود. الگوی رشد دو فازی و تحریک فعال متابولیک: در ماست حاوی ۷٪ زیست‌توده تازه اسپیرولینا، قابلیت زنده‌مانی *L. acidophilus* تا روز سوم به ۱۰۳/۰۳ درصد افزایش یافت و این سطح تا یک هفته حفظ شد. این مشاهده که شمارش سلول‌های زنده از شمارش اولیه فراتر می‌رود، به وضوح نشان‌دهنده یک تحریک فعال متابولیک و رشد باکتریایی در حضور اسپیرولینا در مراحل اولیه انبارداری است، و نه صرفاً یک اثر محافظتی غیرفعال می‌باشد [۱۶].

[۱۲]

^۱ سینرژیسم (Synergism / Synergy): هم‌افزایی؛ هنگامی که اثر ترکیبی دو یا چند عامل (مانند اسپیرولینا و پروبیوتیک) بیشتر از مجموع اثرات جداگانه آن‌ها باشد.



پایداری برتر در حضور اسپیرولینا: در پایان دوره‌های انبارداری (۲۸ الی ۳۵ روز)، در تمامی مطالعات، تیمارهای حاوی اسپیرولینا شمارش نهایی بالاتری از پروبیوتیک را نشان دادند. به عنوان مثال، در سس ماست سین بیوتیک، کاهش لگاریتمی جمعیت *L. acidophilus* در تیمار حاوی ۲٪ عصاره اسپیرولینا تنها ۱/۳۱ سیکل لگاریتمی بود، در حالی که این کاهش در نمونه شاهد ۴/۳۳ سیکل لگاریتمی گزارش شد. این موضوع نشان‌دهنده نقش اسپیرولینا در کاهش نرخ مرگ و میر پروبیوتیک‌ها در طول زمان است [۱۴].

مدلسازی سینتیک بقا و برآورد ماندگاری: مطالعه‌ی Fortuin و همکاران با استفاده از مدل غیرخطی ویبول (Weibull)، برای سینتیک بقای *L. rhamnosus* کپسوله شده با پروتئین سویا را در طی دوره‌ی ذخیره‌سازی مورد بررسی و کمی‌سازی قرار داد. در شرایط مطلوب (دمای ۲۰°C و رطوبت نسبی ۰/۱۱) در محدوده قابل قبولی قرار داشت و زمان رسیدن به حداقل تعداد سلول زنده ضروری برای این نمونه‌ها بین ۱۵۱ تا ۳۴۸ روز برآورد شد. این رویکرد مدلسازی، ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی ماندگاری محصولات پروبیوتیک غنی شده با اسپیرولینا فراهم می‌کند [۱۸].

۳.۳. تعاملات پیچیده بین اسپیرولینا، پروبیوتیک و کشت استارتر
اسپیرولینا بر هر یک از اجزای میکروبیوم ماست به‌طور متفاوتی تأثیر می‌گذارد که منجر به ایجاد یک سینتیک تعادلی جدید می‌شود.

پاسخ گونه‌ای استارترها: شواهد قوی وجود دارد که نشان می‌دهد *Lacobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* پاسخ بسیار مثبتی به اسپیرولینا نشان می‌دهد. در ماست پروبیوتیک، افزودن ۱٪ پودر اسپیرولینا منجر به افزایش ۲/۲ سیکل لگاریتمی در شمارش این باکتری در پایان انبارداری نسبت به کنترل شد. در مقابل، تأثیر اسپیرولینا بر *Streptococcus thermophilus* کم‌تر و اغلب از نظر آماری معنی‌دار نبود. این تفاوت را می‌توان به نیازهای تغذیه‌ای بالاتر و متابولیسم پیچیده‌تر *L. bulgaricus* نسبت داد [۱۳].

مهار رقبای میکروبی و پالایش فلور: یک مشاهده جالب در مطالعه‌ی Patel و همکاران این بود که شمارش کل میکروارگانیسم‌ها (Total Plate Count) در ماست حاوی اسپیرولینا به تدریج کاهش یافت، در حالی که در نمونه‌ی شاهد افزایش نشان داد. این موضوع حاکی از آن است که اسپیرولینا، با تقویت انتخابی پروبیوتیک و استارترهای اصلی (*L. acidophilus* و *L. bulgaricus*)، ممکن است به‌طور غیرمستقیم رشد باکتری‌های رقیب را در میکروفلورای کلی مهار کند و در نتیجه پایداری و خلوص میکروبیولوژیکی محصول را بهبود بخشد [۱۲]. این یافته با مطالعه Ebid و



همکاران که افزایش را گزارش کردند، در تضاد است که ممکن است ناشی از تفاوت در بستر محصول (ماست معمولی در مقابل لبنه) و سویه‌های باکتریایی باشد [۱۶].

اثر سینرژیسم در سیستم‌های ساده: در سیستم‌های فاقد استارترهای رقیب، اثر تقویتی اسپیرولینا بر پروبیوتیک حتی بارزتر است. در شیر اسیدوفیلوس (فقط حاوی *L. acidophilus*)، نمونه حاوی ۱٪ پودر اسپیرولینا افزایش ۳/۱ سیکل لگاریتمی را نسبت به نمونه شاهد در پایان ۳۰ روز نشان داد. این یافته بر پتانسیل ذاتی اسپیرولینا به عنوان یک پری بیوتیک برای *L. acidophilus*، مستقل از اثرات رقابتی در یک میکروبیوم پیچیده، تأکید می‌کند [۱۳].

۴.۳. نقش اسپیرولینا در افزایش مقاومت پروبیوتیک در شرایط استرس گوارشی
بقای پروبیوتیک‌ها در شرایط شبیه‌سازی گوارشی، شاخص کلیدی دیگری از کارایی عملکردی آن‌ها است. اسپیرولینا نشان داده است که می‌تواند یک اثر محافظتی قوی در این زمینه نیز اعمال کند.

محافظت در برابر اسید معده: در سس ماست سین بیوتیک، تیمارهای حاوی (۰، ۰.۵٪، ۱٪، ۲٪) عصاره اسپیرولینا در مقایسه با نمونه شاهد، کاهش کمتری در شمارش *L. acidophilus* پس از ۱۲۰ دقیقه قرارگیری در معرض شیر معده شبیه‌سازی شده نشان دادند. این محافظت وابسته به دوز بود، به طوری که تیمار ۲٪ عصاره اسپیرولینا بهترین عملکرد را داشت [۱۴]. مطالعه Fortuin نیز نشان داد که تخمیر مقدماتی پروبیوتیک در محیط حاوی ایزوله پروتئین اسپیرولینا، مقاومت آن را در برابر استرس اسیدی به طور چشمگیری افزایش می‌دهد [۱۸].

بازیابی و فعالیت در محیط روده: پس از انتقال از محیط اسیدی معده به محیط خنثی روده، یک بهبود و افزایش در شمارش باکتری در تمام تیمارها مشاهده شده است. این پدیده که به بازیابی سلول‌های آسیب‌دیده اما زنده (sub-lethally injured) نسبت داده می‌شود، در تیمارهای حاوی اسپیرولینا بارزتر بود. این موضوع نشان می‌دهد که اسپیرولینا نه تنها از مرگ سلول‌ها جلوگیری می‌کند، بلکه به حفظ قابلیت بازیابی و متابولیسم آن‌ها کمک می‌کند [۱۴].

۵.۳. ارتباط بین پارامترهای فیزیوشیمیایی ناشی از اسپیرولینا و بقای میکروبی
تعدیل pH و اسیدیته: در تمامی مطالعات، نمونه‌های حاوی اسپیرولینا در طول انبارداری، اسیدیته بالاتر و pH پایین‌تری نسبت به نمونه‌های شاهد نشان دادند. این امر عمدتاً به ترکیبات نیتروژنه اسپیرولینا نسبت داده می‌شود که منبع غذایی، باکتریایی و تولید اسید را تحریک می‌کنند [۱۲، ۱۳، ۱۵، ۱۶].



عملکرد بافری و کاهش استرس اسیدی: اگرچه حضور اسپیرولینا منجر به اسیدیته نهایی بالاتر می‌شود، اما به‌طور متناقضی ممکن است به کاهش استرس اسیدی روی سلول‌های باکتریایی کمک کند. محتوای پروتئین بالای اسپیرولینا می‌تواند ظرفیت بافری محصول را افزایش دهد. این بدان معناست که کاهش pH در واحد زمان کندتر اتفاق می‌افتد و به باکتری‌ها زمان بیشتری برای تطبیق با شرایط اسیدی می‌دهد. این مکانیسم می‌تواند توضیح‌دهنده‌ی بقای بهتر پروبیوتیک‌ها در مراحل پایانی انبارداری، علیرغم pH پایین‌تر، باشد [۱۶].

کاهش سینرسیس و ایجاد حالت فیزیکی پایدارتر: افزودن اسپیرولینا به‌طور معنی‌داری سینرسیس را در لبنه پروبیوتیک کاهش داد. در روز ۲۸، نمونه شاهد ۹ میلی‌متر و نمونه حاوی ۱٪ اسپیرولینا تنها ۵ میلی‌متر آب‌انداختگی داشت. یک ساختار ژل پایدار و یکنواخت‌تر، با جلوگیری از جدایی فازها، محیط فیزیکی یکنواخت‌تر و کم‌استرس‌تری را برای باکتری‌ها فراهم می‌کند و از ایجاد منطقه با اسیدیته موضعی بسیار بالا جلوگیری می‌کند [۱۶].

۳.۶. مکانیسم‌های پیشنهادی برای تأثیرات اسپیرولینا بر بقای میکروبی

الف) مکانیسم تغذیه‌ای و پری‌بیوتیکی: اسپیرولینا یک منبع غنی و کاملاً در دسترس از نیتروژن (اسیدهای آمینه آزاد، پپتیدها)، ویتامین‌های کمپلکس B (به‌عنوان کوآنزیم)، کرین (گلیکوپروتئین‌ها) و مواد معدنی (Mg, Fe) فراهم می‌کند که همگی برای سنتز پروتئین، ترمیم سلولی و متابولیسم انرژی باکتری‌ها ضروری هستند [۱۲، ۱۳، ۱۶، ۱۷]. این امر به‌وضوح در افزایش رشد و شمارش نهایی باکتری‌ها منعکس شده است. علاوه بر این نقش تغذیه‌ای اسپیرولینا شامل تأمین انرژی پلی‌ساکاریدها، آدنین، هیپوگزانتین، اسیدهای آمینه آزاد، مواد معدنی و ویتامین‌ها که از رشد و زنده‌مانی باکتری‌های اسید لاکتیک و کشت‌های پروبیوتیک پشتیبانی می‌کنند، می‌باشد [۶]. ب) مکانیسم آنتی‌اکسیدانی: رنگ‌دانه‌های قدرتمند اسپیرولینا، به‌ویژه فیکوسیانین و بتا-کاروتن، به‌عنوان خنثی‌کننده‌های قوی رادیکال‌های آزاد عمل می‌کنند. این ترکیبات با خنثی کردن گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) که در طی فرآوری، انبارداری و استرس اسیدی تولید می‌شوند، از آسیب اکسیداتیو به لیپیدهای غشایی، پروتئین‌ها و DNA باکتری‌ها جلوگیری می‌کنند [۱۶، ۱۷]. مطالعه Fortuin و همکاران نیز به پتانسیل اکسیداتیو لیپیدهای اشباع نشده در ایزوله پروتئین اسپیرولینا تحت شرایط خاص که بر اهمیت تعادل این مکانیسم تأکید دارد [۱۸]. ج) مکانیسم بافری: همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، محتوای پروتئین بالا و ماهیت آمفوتریک اسپیرولینا به آن توانایی تعدیل تغییرات pH را می‌دهد. این ویژگی با کاهش نرخ pH، یک دوره تطبیق برای باکتری‌ها فراهم کرده و شوک اسیدی را کاهش می‌دهد [۱۶]. د) مکانیسم بهبود محیط



فیزیکی: با کاهش سینرسیس و افزایش پایداری فیزیکی محصول، اسپیرولینا یک ماتریکس یکنواخت و پایدار ایجاد می کند که از سلول‌های باکتریایی در برابر تنش‌های مکانیکی و ایجاد محیط‌های نامساعد موضعی محافظت می کند [۱۶].

۴. ارزیابی حسی و پذیرش مصرف‌کننده در ماست پروبیوتیک غنی شده با اسپیرولینا

اسپیرولینا با وجود دارا بودن پروفایل غذایی ممتاز، به دلیل دارا بودن ترکیبات معطر خاص، طعم خاکی و جلبکی متمایز و نیز رنگ سبز-آبی شدید خود، چالش‌های قابل توجهی را برای پذیرش حسی مصرف‌کننده ایجاد می کند [۲۰، ۱۵]. این ویژگی‌ها ذاتی می توانند به طور مستقیم بر پارامترهای کلیدی حسی از جمله طعم، بو، بافت، رنگ، و در نهایت پذیرش کلی محصول تأثیر منفی بگذارند. بنابر این، درک دقیق این تأثیرات و یافتن راهکارهای بهینه‌سازی فرمولاسیون و فرآیند، برای توسعه یک محصول موفق در بازار ضروری است [۲۰، ۲۱، ۱۵].

۴. ۱. تعیین غلظت بهینه اسپیرولینا: نقطه تعادل بین ارزش غذایی و پذیرش حسی

یافته‌ها به وضوح نشان می دهد که غلظت اسپیرولینا عاملی تعیین کننده در پذیرش حسی نهایی است و یک رابطه غیرخطی و پیچیده بین غلظت و امتیازات حسی برقرار است. در یک سوی طیف، مطالعات روی ماست ساده نشان می دهد که افزودن اسپیرولینا تا غلظت ۰/۲۵ الی ۰/۶ درصد، امتیاز پذیرش کلی را به طور معنی داری نسبت به نمونه کنترل کاهش نمی دهد [۲۰، ۲۱]. در برخی موارد، نمونه حاوی ۰/۶ درصد اسپیرولینا حتی امتیازی مشابه یا اندکی بالاتر از نمونه شاهد گزارش شده است [۲۱]. با این حال، با افزایش غلظت به بیش از ۱٪، کاهش شدید و معنی دار در امتیازات همه پارامترهای حسی، به ویژه طعم، رنگ و بو مشاهده می شود. در غلظت‌های بالا (۱/۵ الی ۲ درصد)، طعم نامطلوب جلبکی شدت یافته و محصول را به طور کامل غیر قابل قبول می کند [۲۰، ۱۵، ۹]. یک نقطه بهینه کلیدی که در چندین مطالعه به آن اشاره شده است، غلظت ۱٪ است، جایی که مزایای تغذیه‌ای قابل توجهی افزوده می شود، در حالی که پذیرش کلی محصول هنوز در سطح مطلوبی حفظ می شود و از نظر آماری با نمونه شاهد تفاوت معنی داری ندارد [۱۵، ۹]. این ناهمخوانی‌های ظاهری در یافته‌ها (بهینه ۰/۲۵ در مقابل ۰/۶ و ۱٪) می تواند ناشی از تفاوت در نوع محصول پایه (ماست ساده، سس ماست، ماست غنی شده با کنسانتره و پروتئین)، منبع اسپیرولینا (پودر اسپیرولینا در مقابل عصاره اسپیرولینا)، فرمولاسیون پایه و سلیقه جمعیت مورد ارزیابی باشد و بر اهمیت بهینه‌سازی غلظت بر اساس محصول نهایی تأکید می کند [۲۰، ۱۵، ۹].



۲.۴. تغییرات رنگ و ظاهر: از جذابیت طبیعی تا دافعه بصری

تغییر رنگ محصول به سبز-آبی، یکی از بارزترین و مستقیم‌ترین اثرات افزودن اسپیرولینا است که هم می‌تواند یک جذابیت بصری (طبیعی و سالم) باشد و هم یک نقطه ضعف محسوب شود. داده‌های رنگ‌سنجی کمی این تغییر را به‌وضوح تأیید می‌کنند. در سس ماست، با افزایش غلظت عصاره اسپیرولینا از ۰/۵٪ به ۲٪، مقدار شاخص سبزی به‌طور پیوسته افزایش یافت و تغییر کل رنگ (ΔE) بین نمونه حاوی ۲٪ عصاره اسپیرولینا و نمونه شاهد به ۴/۷۱ رسید که تغییراتی کاملاً محسوس برای چشم انسان هستند [۱۵]. در ماست غنی شده، این اثر حتی چشمگیرتر بود، به‌طوری که مقدار روشنی نمونه حاوی ۱/۵٪ پودر اسپیرولینا به ($L=58$) کاهش یافت که در مقایسه با نمونه شاهد ($L=112$) نشان دهنده‌ی تیره شدن قابل توجه محصول است. همچنین، شاخص سبزی از ۵- در شاهد به ۱۴- در نمونه ۱/۵٪ پودر اسپیرولینا رسید که شدت رنگ سبز را نشان می‌دهد [۹]. در غلظت‌های پایین (۰/۵٪ تا ۱٪)، این تغییر رنگ توسط ارزیابان آموزش‌دیده قابل قبول و حتی مطلوب ارزیابی شد [۹، ۲۱]. با این حال، در غلظت‌های بالا، رنگ شدید، غیرمعمول و تیره به یک عامل دافعه تبدیل شده و امتیاز ظاهری محصول را به‌شدت کاهش می‌دهد [۲۰، ۱۵].

۳.۴. تأثیر بر پروفایل طعم، بو و بافت

الف) طعم و بو: طعم خاکی یا جلبکی اسپیرولینا بزرگ‌ترین چالش در پذیرش حسی است. با افزایش غلظت اسپیرولینا، این طعم غالب‌تر شده و می‌تواند سایر طعم‌های مطلوب ماست را بیوشاند. در نمونه‌های حاوی ۲٪ عصاره اسپیرولینا، امتیاز طعم به حدود ۲ از ۵ رسید که نشان‌دهنده‌ی تأثیر قوی طعم نامطلوب در غلظت‌های بالا است [۱۴]. به‌طور مشابه، در ماست ساده، طعم نامطلوب در غلظت ۱٪ احتمالاً ناشی از آزاد شدن ترکیبات ناشی از اکسیداسیون لیپیدها و مواد معدنی است که می‌توانند طعم فلزی ایجاد کنند [۱۹]. از نظر بو، با افزایش غلظت اسپیرولینا، بوی جلبکی نامطلوب ظاهر می‌شود که در غلظت‌های پایین (۰/۲۵ درصد) قابل تشخیص نبوده و یا در غلظت‌های بالا (۱٪) به‌شدت آزاردهنده می‌شود [۱۹].

ب) بافت: تأثیر اسپیرولینا بر بافت ماست پیچیده و وابسته به غلظت و فرمولاسیون پایه است. از یک سو، اسپیرولینا به‌دلیل محتوای پروتئین بالا و ظرفیت جذب آب، می‌تواند موجب افزایش معنی‌دار سفتی و قوام ماست شود [۲۰]. در ماست غنی‌شده با کنسانتره پروتئین شیر، نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ و ۱٪ پودر اسپیرولینا امتیاز بافت بهتری نسبت به شاهد کسب کردند که احتمالاً ناشی از اثر هم‌افزایی کنسانتره پروتئین شیر و اسپیرولینا در ساختار شبکه ژل ماست



است [۹]. از سوی دیگر، در محصولاتی مانند سس ماست، افزودن اسپیرولینا می‌تواند با کاهش ویسکوزیته همراه باشد که منجر به کاهش امتیاز بافت می‌گردد [۱۴]. همچنین، در غلظت‌های بالا (۰/۵ الی ۱٪)، دانه‌دانه شدن نامطلوب و رسوب پودر اسپیرولینا در ماست مشاهده می‌شود که بر احساس دهانی تأثیر منفی می‌گذارد. روش افزودن اسپیرولینا نیز بر بافت نهایی حیاتی است. افزودن پودر به شیر قبل از پاستوریزاسیون، منجر به حل شدن یکنواخت، جلوگیری از رسوب و حذف بافت دانه‌دار در محصول نهایی می‌شود. در حالی که افزودن پس از پاستوریزاسیون، منجر به ایجاد ذرات نامحلول و بافتی ناهموار می‌گردد [۱۹].

۵.۴. راهبردهای بهبود پذیرش حسی: پوشش طعم و بهینه‌سازی بافت

یک راهکار مؤثر برای پوشاندن طعم خاکی اسپیرولینا، استفاده از شیرین‌کننده‌ها و طعم‌دهنده‌های طبیعی است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که جایگزینی بخشی از شکر با عسل طبیعی می‌تواند پذیرش حسی را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. در مطالعه‌ای، تیمار حاوی ۰/۶ درصد اسپیرولینا همراه با ۳٪ عسل (که معادل ۵۰٪ جایگزینی شکر است)، بالاترین امتیاز را در تمامی پارامترهای حسی، شامل طعم، بافت، ظاهر و پذیرش کلی به خود اختصاص داد [۲۰]. این یافته حاکی از آن است که عسل نه تنها به عنوان یک شیرین‌کننده طبیعی عمل می‌کند، بلکه با طعم و عطر منحصر به فرد خود، قادر به خنثی کردن یا پوشش طعم نامطلوب اسپیرولینا است. راهکار دیگر، افزودن اسپیرولینا در مرحله صحیح فرآیند (قبل از پاستوریزاسیون) و همراهی آن با عوامل بافت‌دهنده مانند کنسانتره پروتئین شیر است که می‌تواند بر چالش‌های بافتی غلبه کند و حتی بافت را بهبود بخشد [۹، ۱۹].

۵. فرآیند، پایداری و ماندگاری ماست پروبیوتیک غنی‌شده با اسپیرولینا

۵.۱. تأثیر فرمولاسیون و فناوری‌های فرآوری بر ویژگی‌های اولیه و ریزساختار

انتخاب روش فرآوری و فرم فیزیکی اسپیرولینا (پودر آزاد، آگلومره، ریزپوشانی شده یا زیست‌توده تازه کپسوله‌شده) تأثیر مستقیم و تعیین‌کننده‌ای بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اولیه و ریزساختار^۱ ماست دارد. مطالعات نشان می‌دهند که افزودن پودر اسپیرولینا در غلظت‌های مختلف (۰/۵ الی ۳٪) پیش از تخمیر، در صورت انجام صحیح مراحل پاستوریزاسیون

^۱ ریزساختار (Microstructure): ساختار و آرایش ذرات و اجزای تشکیل‌دهنده‌ی یک ماده در مقیاس میکروسکوپی (مانند شبکه پروتئینی ماست و نحوه توزیع ذرات اسپیرولینا در آن).



(۸۰ الی ۸۵ درجه سانتیگراد)، تأثیر منفی قابل توجهی بر سینتیک تخمیر لاکتیکی ندارد و پارامترهای کلیدی مانند سینتیک تولید اسید و رشد باکتری‌های اسید لاکتیک در محدوده قابل قبول استانداردهای بین‌المللی باقی می‌ماند [۲۱].

۸. با این حال، فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند آگلومراسیون و ریزپوشانی مزایای بیشتری ارائه می‌کنند. به عنوان مثال، استفاده از اسپیرولینای آگلومره شده با مالتودکستین، به دلیل ایجاد ساختار ریزدانه و محافظ، برتری قابل توجهی در حفظ ترکیبات حساس آنتی‌اکسیدانی مانند ترکیبات فنولی در مقایسه با پودر تجاری معمولی از خود نشان می‌دهد [۸].

از سوی دیگر، ریزپوشانی اسپیرولینا در یک ماتریکس آلژینات-کنسانتره پروتئین آب پنیر نه تنها امکان افزایش چشمگیر غلظت افزودنی (تا ۱٪) بدون تأثیر منفی بر طعم را فراهم می‌کند، بلکه با بهبود ویسکوزیته و کاهش سینرسیس، پایداری فیزیکی محصول نهایی را به طور معنی‌داری افزایش می‌دهد [۲۲].

۵. ۲. پویایی و پایداری فیزیکوشیمیایی در طول دوره ماندگاری

پایداری فیزیکوشیمیایی ماست غنی شده در طول انبارداری، شاخصی کلیدی برای کیفیت و پذیرش مصرف‌کننده است. به طور کلی، افزودن اسپیرولینا، صرف‌نظر از شکل آن، منجر به بهبود پایداری فیزیکی می‌شود. این بهبود به وضوح در کاهش معنی‌دار سینرسیس و افزایش ظرفیت نگهداری آب مشاهده می‌شود [۲۱، ۲۲، ۲۵]. به عنوان مثال، مطالعه‌ای که اثر غلظت‌های مختلف اسپیرولینا (۰/۲۵ الی ۱٪) را بررسی کرد، نشان داد که نمونه غنی شده با ۰/۲۵٪ اسپیرولینا در طول ۲۸ روز نگهداری، سینرسیس به طور معنی‌داری کمتر از نمونه کنترل داشت و در مقابل، از ظرفیت نگهداری آب بالاتری برخوردار بود [۲۵]. این پدیده عمدتاً به حضور ترکیباتی مانند پروتئین‌ها و به‌ویژه فیبرهای غذایی در اسپیرولینا نسبت داده می‌شود که با تقویت شبکه ژل کازئین و به دام انداختن مولکول‌های آب، از جدایش سرم جلوگیری می‌کنند [۲۱، ۲۵]. در نمونه‌های ریزپوشانی شده، مواد دیواره (مانند آلژینات و کنسانتره پروتئین آب پنیر) نیز سهم به‌سزایی در افزایش ویسکوزیته و کاهش سینرسیس دارند [۲۳]. روند تغییرات pH و اسیدیته در طول انبارداری تا حدی به فرم اسپیرولینا بستگی دارد. ماست‌های حاوی پودر آزاد اسپیرولینا معمولاً کاهش pH بیشتری را نشان می‌دهند که با تحریک رشد باکتری‌های اسید لاکتیک مرتبط است [۲۱، ۲۴، ۲۵]. در مقابل، نمونه‌های حاوی اسپیرولینای کپسوله شده در آلژینات، به دلیل اثر بافری ماتریکس، در طول ۱۵ روز نگهداری pH بالاتری را در مقایسه با نمونه‌های شاهد حفظ می‌کنند [۲۳]. یک یافته مهم، پایداری بالای رنگدانه‌های اسپیرولینا در بستر ماست است، به طوری که شاخص‌های رنگی



در نمونه‌های غنی شده در طول ۲۸ روز نگهداری تغییرات ناچیزی داشته‌اند [۲۱]. این پایداری، اسپیرولینا را به عنوان یک رنگ‌زای طبیعی مطلوب برای محصولات لبنی معرفی می‌کند [۲۵].

۵.۳. پایداری میکروبیولوژیکی و سینرژیسم پروبیوتیک-اسپیرولینا

یکی از امیدوارکننده‌ترین یافته‌ها در زمینه غنی‌سازی ماست با اسپیرولینا، اثر سینرژیستیک قوی آن با کشت‌های پروبیوتیک است. شواهد متقاعدکننده‌ای از مطالعات مختلف وجود دارد که اسپیرولینا نقش یک عامل پری‌بیوتیک مؤثر را ایفا می‌کند. این اثر به‌وضوح در افزایش معنی‌دار شمارش و بقای باکتری‌های اسید لاکتیک در طول دوره نگهداری مشاهده شده است. به عنوان مثال، در ماست غنی شده با ریزکپسول‌های آلژیناتی حاوی اسپیرولینای تازه، هر دو باکتری *L. bulgaricus* و *S. thermophilus* پس از ۱۵ روز نگهداری، افزایش بار میکروبی بسیار بالاتری را در مقایسه با نمونه شاهد نشان دادند. این اثر تقویتی به انتشار تدریجی ترکیبات پری بیوتیک از اسپیرولینا (مانند اگزوپلی‌ساکاریدها، اسیدهای آمینه آزاد، ویتامین‌ها و مواد معدنی) در بستر ماست نسبت داده می‌شود [۲۳]. این یافته با نتایج مرور سیستماتیک که بر اساس چندین مطالعه، بهبود بقای *L. acidophilus* و *Bifidobacterium lactis* را در حضور پودر اسپیرولینا (۰/۲۵ الی ۱٪) گزارش می‌دهد، کاملاً همسو است [۲۴]. علاوه بر این، از دیدگاه ایمنی، تمامی مطالعات مورد بررسی تأیید می‌کنند که غنی‌سازی با اسپیرولینا تحت شرایط استاندارد تولید، تأثیر منفی بر ایمنی میکروبیولوژیکی محصول نداشته و شمارش کپک، مخمر و کلیفرم در طول دوره ماندگاری در حد مجاز باقی می‌ماند [۲۱، ۲۳].

۵.۴. پایداری ترکیبات زیست‌فعال و عملکردی در طول فرآیند و انبارداری

حفظ فعالیت ترکیبات زیست‌فعال اسپیرولینا در طول فرآیند تولید و دوره ماندگاری، چالشی بزرگ و در عین حال حیاتی برای توسعه یک محصول عملکردی واقعی است. مطالعات به وضوح نشان می‌دهند که غنی‌سازی ماست با اسپیرولینا منجر به افزایش چشمگیر فعالیت آنتی‌اکسیدانی و محتوای ترکیبات زیست‌فعال می‌شود. این بهبود ناشی از ورود ترکیباتی نظیر فیکوسیانین (تا ۳/۶۵ mg/100g)، بتا-کاروتن (تا ۶/۳۷ mg/100g)، کلروفیل a (تا ۱۴/۰۷ mg/100g) و ترکیبات فنولی (تا ۱۴/۹۶ mg/100g) به بستر ماست است [۲۱، ۸]. فعالیت آنتی‌اکسیدانی (بر اساس سنجش DPPH) با افزایش غلظت اسپیرولینا تا ۲٪ به‌طور پیوسته افزایش یافته و در این غلظت به اوج خود می‌رسد [۲۱]. یک نکته کلیدی، تأثیر مثبت فناوری آگلومراسیون در حفظ برتر این ترکیبات، به‌ویژه ترکیبات فنولی، در مقایسه با پودر معمولی است [۸]. با این حال، پایداری خود سلول‌های اسپیرولینا در محیط اسیدی ماست یک محدودیت بزرگ است. مطالعات



نشان می‌دهد که سلول‌های اسپیرولینای محصور شده در آلژینات، هنگام قرار گرفتن در تماس با ماست، به سرعت و به طور کامل از بین می‌روند؛ این امر عمدتاً به دلیل نفوذ اسید از منافذ ماتریکس و ناسازگاری با pH پایین (حدود ۴) رخ می‌دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که اگر هدف، تولید محصولاتی حاوی اسپیرولینای زنده باشد، لازم است از فناوری‌های کپسولاسیون مقاوم‌تر استفاده شود، مانند پوشش دهی مضاعف با کیتوسان. در غیر این صورت، تمرکز اصلی باید بر حفظ پایداری و یکپارچگی ترکیبات زیست‌فعال داخل سلولی باشد، چرا که این ترکیبات حتی پس از مرگ سلول می‌توانند اثرات سلامت‌بخش خود را اعمال کنند [۲۳].

۵.۵. چالش‌ها، راهکارهای بهینه‌سازی و چشم‌اندازهای آینده

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، چالش‌های متعددی در مسیر تولید صنعتی ماست غنی شده با اسپیرولینا با پایداری مطلوب وجود دارد. پذیرش حسی (طعم و رنگ) همچنان یک مانع اصلی است که فناوری ریزپوشانی به طور مؤثر آن را برطرف می‌کند [۲۲، ۲۴]. تغییرپذیری ترکیبات اسپیرولینا به دلیل وابستگی به شرایط کشت نیز یک چالش برای استانداردسازی محصول نهایی محسوب می‌شود [۲۴]. راهکارهای آینده برای غلبه بر این چالش‌ها و بهبود هر چه بیشتر پایداری شامل موارد زیر است:

الف) بهینه‌سازی فناوری‌های ریزپوشانی: در زمینه مواد دیواره جدید (مانند پلی‌ساکاریدهای متعدد) و روش‌های پوشش دهی مضاعف برای ایجاد سد قوی‌تر در برابر اسید و اکسیژن نیاز به یک تحقیق و توسعه می‌باشد [۲۳، ۲۴].
ب) بهینه‌سازی ژنتیکی سویه‌های اسپیرولینا: سویه‌هایی با مقاومت بیشتر به اسید، طعم مطلوب‌تر و محتوای ترکیبات زیست‌فعال بالاتر توسعه یابد. پ) استانداردسازی فرایندهای پس از برداشت: برای به حداقل رساندن تخریب ترکیبات حساس پارامترهای خشک کردن و انجماد به طور دقیق کنترل شود. ت) تعیین غلظت بهینه بر اساس کاربرد: با توجه به پایداری فیزیکیوشیمیایی، عملکرد پروبیوتیکی و پذیرش حسی، غلظت‌های بین ۰/۵ الی ۱٪ برای پودرهای آزاد و ریزپوشانی شده توصیه می‌شود. همچنین، در صورت دسترسی، استفاده از زیست‌توده تازه با توجه به چالش‌های پایداری مناسب است [۲۴].



۶. مطالعات عملکردی و بالینی و کاربردی

۶.۱. شواهد بالینی: اثرات هیپوگلیسمی و بهبود پروفایل قند خون

فراتر از اثرات پایه شواهد قانع کننده ای از کارآزمایی های بالینی در مورد اثر بخشی ماست غنی شده با اسپیرولینا در مدیریت دیابت نوع ۲ وجود دارد. یک کارآزمایی بالینی ۲۱ روزه روی ۱۰۰ بیمار نشان داد که مصرف روزانه ۲۰۰ گرم ماست کم چرب غنی شده با ۸ گرم پودر اسپیرولینا باعث کاهش معنی دار سطح قند خون ناشتا از ۱۵۰/۴۴ به ۱۴۰/۴۴ میلی گرم بر دسی لیتر گردید در مقابل در گروه شاهد چنین تغییری مشاهده نشد [۲۷]. این نتایج با گزارشهای پیشین در زمینه اثرات کاهنده قند خون اسپیرولینا همخوانی دارد به طور خاص مصرف روزانه ۲ گرم اسپیرولینا به مدت ۲ تا ۳ ماه موجب کاهش معنی دار قند خون ناشتا، هموگلوبین A1c و قند خون پس از غذا گزارش شده است. مکانیسم های متعددی برای اثرات ضددیابتی اسپیرولینا پیشنهاد شده است که شامل مهار آنزیمهای درگیر در هضم کربوهیدراتها (آلفا آمیلاز و آلفا گلوکوزیداز)، تحریک ترشح انسولین افزایش حساسیت به انسولین از طریق کاهش شاخص مقاومت به انسولین (HOMA-IR) و افزایش سطح آدیپونکتین، و همچنین مهار آنزیمهای گلوکونئوژنز در کبد میباشد [۲۸].

۶.۲. شواهد بالینی: کاهش استرس اکسیداتیو سیستمیک و اثرات کاردیومتابولیک

اثر آنتی اکسیدانی قوی اسپیرولینا که در سطح محصول نشان داده شد، در سطح بدن انسان نیز تأیید شده است در کارآزمایی بالینی مذکور، سطح مالون دی آلدئید (MDA) سرم که یک شاخص کلیدی برای پراکسیداسیون لیپیدی و استرس اکسیداتیو است در گروهی که ماست غنی شده با اسپیرولینا مصرف می کردند، کاهش معنی داری یافت [۲۷]. این کاهش استرس اکسیداتیو نه تنها به خودی خود برای سلامت کلی مفید است بلکه یکی از مکانیسمهای کلیدی در بهبود حساسیت به انسولین و پیشگیری از عوارض دیابت محسوب میشود [۲۷، ۲۸]. مکانیسم این عمل در سطح سلولی، شامل افزایش سطح گلوتاتیون (GSH) و فعالیت آنزیمهای آنتی اکسیدانی داخلی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و گلوتاتیون پراکسیداز (GPX) است. مرور جامع مطالعات بالینی، پتانسیل قابل توجه اسپیرولینا در بهبود سلامت قلب و عروق را نشان میدهد. در بیماران مبتلا به فشار خون مصرف روزانه ۲ گرم اسپیرولینا به مدت ۸ هفته منجر به کاهش معنی دار در فشار خون سیستولیک و دیاستولیک شد. مکانیسم اثر ضد فشار خون اسپیرولینا عمدتاً به وجود پپتیدهای زیست فعال آن نسبت داده میشود. این پپتیدها با مهار آنزیم مبدل آنژیوتانسین (ACE) و فعال سازی مسیر سیگنالینگ



PIK/Akt/eNOS/NO، موجب افزایش تولید نیتریک اکسید (NO) و گشاد شدن عروق خونی میشوند. علاوه بر این اسپیرولینا دارای اثرات هیپولیپیدمیک^۱ ثابت شده ای است مطالعات متعددی گزارش کرده اند که مصرف روزانه ۱ تا ۴/۵ گرم اسپیرولینا میتواند سبب کاهش معنیدار کلسترول تام (TC)، کلسترول LDL و تری گلیسیرید (TG)، و افزایش سطح کلسترول HDL شود. این اثرات از طریق مکانیسمهایی نظیر مهار آنزیم MG-CoA ردوکتاز (مشابه داروهای استاتینی)، افزایش دفع اسیدهای صفراوی، و فعالسازی مسیرهای اکسیداسیون اسیدهای چرب تحقق مییابد [۲۸].

۳.۶. کاربرد نوآورانه و عملکردی: بسته بندی های هوشمند و فعال برای افزایش ماندگاری

ادغام اسپیرولینا در فیلمها و پوششهای خوراکی زیست تخریب پذیر برای بسته بندی محصولات لبنی حوزه ای کاملاً تخصصی است. این فیلمها نقش دوگانه محافظتی و عملکردی ایفا میکنند به عنوان مثال، فیلم های بر پایه کنسانتره پروتئین آب پنیر حاوی ۲٪ پودر اسپیرولینا، استحکام کششی (TS) را از ۰/۶۹ مگاپاسکال (شاهد) به ۲/۵۵ مگاپاسکال افزایش داد و همزمان محتوای ترکیبات فنلی را به میزان قابل توجهی بالا بردند [۲۳] یک ویژگی کاربردی مهم، قابلیت هضم این فیلمها در شرایط شبیه سازی شده معده است که امکان استفاده از آنها به عنوان بسته بندی اولیه و خوراکی را فراهم میکند هنگام استفاده از این فیلم برای بسته بندی، پنیر نمونه های پوشش دار حتی پس از ۶۰ روز نگهداری فاقد هرگونه رشد کپک و مخمر بودند، در حالی که نمونه های شاهد به ۷/۶ سیکل لگاریتمی رسیدند [۲۳].

مطالعات متعدد نشان داده اند که افزودن اسپیرولینا یا مشتقات آن، مانند پلی ساکاریدها و فیکوسیانیین به فیلمهای زیست تخریب پذیر بر پایه کیتوزان یا ژلاتین، موجب افزایش چشمگیر فعالیتهای آنتی اکسیدانی و ضد میکروبی آنها میشود و در نتیجه ماندگاری محصولات غذایی، حساس، از جمله ماهی، را به طور معنی داری افزایش میدهد [۲۹]. نکته قابل توجه آن است که این فیلمها بوی نامطلوب اسپیرولینا را به محصول منتقل نکرده اند که این امر مزیتی مهم از نظر پذیرش حسی و تمایل مصرف کننده به شمار می رود [۲۳].

^۱ اثرات هیپولیپیدمیک (Hypolipidemic Effects): اثرات کاهنده سطح چربیهای خون مانند کلسترول و تری گلیسیرید).



نتیجه گیری

اسپیرولینا صرفاً یک مکمل مغذی نیست، بلکه به عنوان یک نتایج این مرور نشان می‌دهد که اسپیرولینا ظرفیت قابل توجهی برای ارتقای ماست پروبیوتیک به یک محصول فراسودمند با ارزش افزوده‌ی بالا دارد. عامل عملکردی چندوجهی عمل کرده و هم‌زمان چهار نقش کلیدی زیر را ایفا می‌کند:

الف) تقویت کننده پروبیوتیک: با عملکردی مشابه پری بیوتیک، بقای باکتری‌های پروبیوتیک در ماست و مقاومت آنها در دستگاه گوارش را افزایش می‌دهد. ب) بهبود بافت: با تقویت ساختار ژل، منجر به ایجاد بافتی یکنواخت و پایدار شده و پدیده سینرسیس را کاهش می‌دهد. پ) عامل سلامت بخش: منبع غنی ترکیبات زیست فعال مانند فیکوسیانیین است که خواص آنتی اکسیدانی و ضدالتهابی قابل توجهی به محصول نهایی می‌بخشد. ت) رنگ دهند طبیعی: رنگدانه‌های منحصر به فرد اسپیرولینا، رنگ سبز - آبی طبیعی را به محصول می‌بخشد و قابلیت استفاده به عنوان یک افزودنی طبیعی را دارد.

تعیین غلظت بهینه‌ی اسپیرولینا (حدود ۱ درصد) عامل کلیدی در دستیابی به تعادل میان بیشترین اثر عملکردی و حفظ پذیرش حسی مطلوب است. فناوری‌های نوین مانند ریزپوشانی می‌توانند با پوشاندن طعم و بوی خاص اسپیرولینا و حفظ ترکیبات حساس آن، در دستیابی به این تعادل نقش مؤثری داشته باشند. چشم انداز آینده شامل انجام کارآزمایی‌های بالینی گسترده تر برای تأیید اثربخشی‌های سلامت بخش؛ توسعه فناوری‌های پیشرفته کپسوله سازی جهت پایداری ترکیبات فعال؛ به کارگیری راهبردهای نوین طراحی و بازاریابی برای افزایش پذیرش حسی و کاربرد صنعتی اسپیرولینا در فرآورده‌های لبنی. اجرای این راهبردها می‌تواند مسیر توسعه‌ی صنعتی و تجاری ماست پروبیوتیک غنی شده با اسپیرولینا را هموار سازد و جایگاه آن را در بازار محصولات فراسودمند تثبیت کند.

سپاس‌گزاری

با سپاس از الطاف بی‌پایان پروردگار متعال، بدین وسیله مراتب قدردانی و سپاس صمیمانه‌ی خود را از سرکار خانم دکتر فاطمه زهرا شیرزاد، استاد راهنمای گرامی، ابراز می‌دارم. راهنمایی‌های ارزشمند و دیدگاه‌های علمی ایشان نقش بسزایی در غنای علمی و ارتقای کیفیت این پژوهش داشته است.



فهرست مراجع

- [1] Marjanović, B., Benković, M., Jurina, T., Sokač Cvetnić, T., Valinger, P., Gajdoš Kljusurić, J., Jurinjak Tušek, A. (2024). Bioactive Compounds from *Spirulina* spp. Nutritional Value, Extraction, and Application in Food Industry. *Separations*, 11(9), 257.
<https://doi.org/10.3390/separations/1090257>
- [2] Luo, G., Liu, H., Yang, S., Sun, Z., Sun, L., & Wang, L. (2024). Manufacturing processes, additional nutritional value and versatile food applications of fresh microalgae *Spirulina*. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1455553. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1455553>
- [3] Caporgno, M. P., & Mathys, A. (2018). Trends in Microalgae Incorporation Into Innovative Food Products With Potential Health Benefits. *Frontiers in Nutrition*, 5, 58.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00058>
- [4] Kovalski, G., & Ventura, M. (2025). Benefits, challenges and future of incorporation of algae into dairy products such as cheese and yogurt. *Journal of Dairy Science*
- [5] Albuquerque, T., Silva, R., Ferreira, A., Santos, L., & Pereira, M. (2024). Incorporation of Cyanobacteria and Microalgae in Yogurt: Formulation Challenges and Nutritional, Rheological, Sensory, and Functional Implications. *Applied Microbiology*, 4(2), 103
- [6] Podgórska-Kryszczuk, I. (2024). *Spirulina*-An Invaluable Source of Macro- and Micronutrients with Broad Biological Activity and Application Potential. *Molecules*, 29 (23), 5387.
<https://doi.org/10.3390/molecules29235387>
- [7] Spinola, M. P., Mendes, A. R., & Prates, J. A. M. (2024). Chemical Composition, Bioactivities, and Applications of *Spirulina*



- (*Limnospira platensis*) in Food, Feed, and Medicine. *Foods*, 13(24), 3656. <https://doi.org/10.3390/foods13243656>
- [8] Albuquerque, R. C. V., Silva, C. E. F., Silva, M. C. S., Carneiro, W. S., Andreola, K., Gama, B. M. V., Figueiredo, M. V. A., Silva, A. E., & Silva, J. V. O. (2025). Incorporation of Agglomerated *Spirulina platensis* Powder in Yogurt: A Strategy for Enhancing Nutritional Quality and Bioactive Compounds. *Fermentation*, 11(1), 389. <https://doi.org/10.3390/fermentation1080389>
- [9] Mesbah, E. E., Matar, A. A., & Karam-Allah, A. A. (2022). Fortified with *Spirulina platensis* and Functional Properties of Yoghurt Milk Protein Concentrate. *Journal of Food and Dairy Sciences*, 13(1), 1-7. <https://doi.org/10.21608/jfds.2022.114135.1032>
- [10] Yagmur, N., Sahin, S., & Yilmaz Ersan, L. (2024). Bio-yoghurt enriched with *Spirulina*- encapsulated pomegranate peel: Impact on some metabolomics, antioxidative, textural and colour properties. *International Journal of Dairy Technology*, 77(3), 724-734. <https://doi.org/10.1111/1471-0713.13105>
- [11] Ebid, W. M. A., Ali, G. S., & Elewa, N. A. H. (2022). Impact of *Spirulina platensis* on physicochemical, antioxidant, microbiological and sensory properties of functional labneh. *Discover Food*, 2(1), 29. <https://doi.org/10.1007/544187-022-00031-7>
- [12] Patel, P., Jethani, H., Radha, C., Vijayendra, S. V. N., Mudliar, S. N., Sarada, R., & Chauhan, V. S. (2019). Development of a carotenoid enriched probiotic yogurt from fresh biomass of *Spirulina* and *Technology*, and its characterization. *Journal of Food Science* 56(8), 3721–3731. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03844-0>
- [13] Guldas M, Irkin R. Influence of *Spirulina platensis* powder on the microflora of yoghurt and acidophilus milk. *Miljekarstvo*, 2010;60(4):237-43



- [14] Kazemeini H, Azizian A, Ahmadi K. Preparation of Synbiotic Yogurt Sauce Containing *Spirulina platensis* Microalgae Extract and Its Effect on the viability of *Lactobacillus acidophilus*. *Biomed Res Int.*, 2023;2023:8434865.
<https://doi.org/10.1155/2023/8434865>
- [15] Azizian A, Noori N, Jalali K, Esmaeilpour Z, Manjili SS. Evaluation of the effect of *Spirulina platensis* on the viability of *Lactobacillus acidophilus* (LA-5) in yogurt and its properties. *Casp J Vet Sci.*, 2024;1(1):49-54. <https://doi.org/10.22034/cjvs.2024.198851>
- [16] Ebid R, El-Desouky A, Mahgoub S, El-Messery T. The Impact of *Spirulina platensis* on the Viability of *Lactobacillus acidophilus* in Probiotic Labneh and its Properties. *J Nutr Food Sci*. 2022;5(2):100025.
- [17] Ghasemi A, Jafari SM. Microencapsulation of Probiotics by Spray Drying: A Review of Recent Advances and Challenges. *Trends Food Sci Technol.* 2023;135:52-65.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.016>
- [18] Fortuin L, van der Merwe R, de Smidt O, Hougaard AB. The Stabilizing and Functional Effects of *Spirulina platensis* Protein Isolate (SPI) on Encapsulated *Lactobacillus rhamnosus* GG During Processing, Storage, and Simulated Gastrointestinal Digestion. *Food Hydrocoll.* 2024;149:109567.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109567>
- [19] Ragab, M., El-Diasty, M., El-Sherbini, M., Elsharkawy, H. I., & Abdelkhalek, A. (2024). Effect of *Spirulina* Powder on Physical Different and Chemical Composition of Yoghurt Produced from Milk of Somatic Cell Counts. *Zagazig Veterinary Journal*, 52(4), 451-464.
<https://doi.org/10.21608/zyjz.2024.299103.1249>



- [20] Ilavarasan, R., Vijay, L., & Karthikeyan, N. (2022). Sensory and Textural Properties of Functional Yoghurt Enriched with Spirulina and Natural Honey. *The Pharma Innovation Journal*, 11(6), 648-651
- [21] El-Moustaqim, K., Mabrouki, J., Benchrif, M., Azdem, D., & Hmouni, D. (2025). Microalgae-Based Food Additives for Improved Shelf Life and Nutritional Value. *Biology and Life Sciences Forum*, 40(1), 42. <https://doi.org/10.3390/blsf2024040042>
- [22] Akshay, P., Paul, P. T., Joy, J. M., Ajeeshkumar, K. K., Amruth, P., Jacob, M. R., Gopika, R., Ninan, G., & Mathew, S. (2025). Microencapsulated spirulina fortified yoghurt - An insight into physicochemical and sensory properties. *Indian Journal of Fisheries*, 72(3), 153-163. <https://doi.org/10.21077/ijf.2025.72.3.166590-17>
- [23] Kontogianni, V. G., Kosma, I., Mataragas, M., Pappa, E., Badeka, A. V., & Bosnea, L. (2023). Innovative Intelligent Cheese Packaging with Whey Protein-Based Edible Films Containing Spirulina. *Sustainability*, 15(18), 13909. <https://doi.org/10.3390/su151813909>
- [24] Withana, T. N., Ranasinghe, Y. S., Rathnayake, A. I., Bamunuarachchige, T. C., & de Zoysa, H. K. S. (2025). Applications of Spirulina in the food industry: Scientometric and systematic review. *Food and Humanity*, 5, 100644. <https://doi.org/10.1016/j.fooHum.2025.100644>
- [25] Barkallah, M., Dammak, M., Louati, I., Hentati, F., Hadrich, B., Mechichi, T., Ayadi, M. A., Fendri, I., Attia, H., & Abdelkafi, S. (2017). Effect of Spirulina platensis fortification on physicochemical, textural, antioxidant and sensory properties of yogurt storage. *LWT - Food Science and Technology*, during fermentation and 84, 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.071>
- [26] Narayana, R.; Kale, A. Functional Probiotic Yoghurt with Spirulina. *Asian Journal of Pastry and Food Research*, 2019, 38 (4), 311–314. <https://doi.org/10.18805/ajdfr.PR-1472>



[27] Ghaffari, A.; Sharifan, A.; Gharibi, M.; Moradzadeh, R.

Effects of Spirulina-Enriched Yogurt on Fasting Blood Sugar and Malondialdehyde Levels in Type 2 Diabetic Patients: A Randomized Clinical Trial. *Food and Health* 2022 .

<https://doi.org/10.34172/fh.2022.13>

[28] Prete, V.; Abate, A. C.; Di Pietro, P.; De Lucia, M.;

Vecchione, C.; Carrizzo, A. Beneficial Effects of Spirulina

Supplementation in the Management of Cardiovascular Diseases: A

Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrients* 2024, 16 (17), 2943.

<https://doi.org/10.3390/nul 6172943>

[29] Dakhili, S., Hashami, Z., Rostami, N., Moradi, S.,

Moslehishad, M., & Shojae-Aliabadi, S. (2025). Innovative

applications of microalgae in biodegradable food packaging: A review.

Journal of Agriculture and Food Research, 19, 101723.

<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101723>