Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics
Print ISSN: 2345-427X
Online ISSN: 2345-4288

انجمن علمی ماهیان زینتی ایران
Iranian Ornamental Fish Society (IOFS)

(OPEN ACCESS)

Effect of spirulina phycocyanin on health and safety of food products

Isa Bahramizade[1], Seyed Mahdi Ojagh[*2], Alireza Alishahi[3], Shirin Hasani[4], Mehdi Zolfaghari[5]

1. Ph.D. Student in Seafood Processing, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: Issabahramy@yahoo.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran and Associate Prof., Dept. of Seafood Processing, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: ojagh@ut.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Seafood Processing, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: alishahi@gau.ac.ir
4. Ph.D. Graduate in Seafood Processing, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: shirin.hasani88@gmail.com
5. Assistant Prof., Dept. of Seafood Processing, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: zolfaghari.mz@gmail.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 05.06.2024
Revised: 05.14.2024
Accepted: 05.18.2024

Keywords:
Antioxidant,
Bioavailability,
Food Safety,
Functional Foods,
Microencapsulation,
Nanoencapsulation,
Nanotechnology,
Natural Colorant,
Phycocyanin,
Spirulina platensis

ABSTRACT

Background and Objectives: Phycocyanin, a member of the phycobiliprotein family, is one of the most important compounds extracted from Spirulina platensis. Due to its antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial, and anticancer properties, it has attracted significant attention in the food and pharmaceutical industries.

Results: To enhance the stability and bioavailability of this pigment, innovative technologies such as microencapsulation (nanoencapsulation) have been proposed, enabling protection against environmental stressors and improving its functionality.

Conclusion: Nanotechnology, with its extensive applications, not only helps extend shelf life and improve food safety but also reduces packaging waste and contributes to the development of health-promoting products. This study reviews the role of phycocyanin extracted from *Spirulina* in enhancing food safety and health, discussing challenges and strategies for improving its stability.

Cite this article: Bahramizade, Isa, Ojagh, Seyed Mahdi, Alishahi, Alireza, Hasani, Shirin, Zolfaghari, Mehdi. 2025. Effect of spirulina phycocyanin on health and safety of food products. *Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics*, 14 (1), 117-142.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/japu.2024.22958.1913
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه بهره‌برداری و پرورش آبزیان
شاپا چاپی: ۲۳٤٥-٤۲۷X
شاپا آنلاین: ۲۳٤٥-٤۲۸۸

تأثیر فیکوسیانین اسپیرولینا بر سلامت و ایمنی محصولات غذایی

عیسی بهرامی‌زاده[۱]، سید مهدی اجاق*[۲]، علیرضا عالیشاهی[۳]، شیرین حسنی[٤]، مهدی ذوالفقاری[٥]

۱. دانشجوی دکتری فرآوری محصولات شیلاتی، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: Issabahramy@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران و دانشیار گروه فرآوری محصولات شیلاتی، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: ojagh@ut.ac.ir

۳. دانشیار گروه فرآوری محصولات شیلاتی، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: alishahi@gau.ac.ir

٤. دانش‌آموخته دکتری فرآوری محصولات شیلاتی، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: shirin.hasani88@gmail.com

٥. استادیار گروه فرآوری محصولات شیلاتی، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: zolfaghari.mz@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۳/۰۲/۱۷
تاریخ ویرایش: ۱٤۰۳/۰۲/۲٥
تاریخ پذیرش: ۱٤۰۳/۰۲/۲۹

واژه‌های کلیدی:
اسپیرولینا پلاتنسیس، آنتی‌اکسیدان، ایمنی مواد غذایی، پایداری زیستی، رنگ‌دهنده طبیعی، ریزپوشانی، غذاهای فراسودمند، فناوری نانو، فیکوسیانین، نانوپوشانی

چکیده

سابقه و هدف: فیکوسیانین، عضوی از خانواده فیکوبیلی‌پروتئین‌ها، یکی از مهم‌ترین ترکیبات استخراج‌شده از اسپیرولینا پلاتنسیس است. به‌دلیل خواص آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی، ضدمیکروبی و ضدسرطانی، توجه گسترده‌ای در صنایع غذایی و دارویی به خود جلب کرده است.

یافته‌ها: برای افزایش پایداری و دسترس‌پذیری زیستی این رنگدانه، فناوری‌های نوینی مانند ریزپوشانی (نانوپوشانی) پیشنهاد شده است که امکان محافظت از ترکیب در برابر عوامل مخرب محیطی و بهبود عملکرد آن را فراهم می‌سازد.

نتیجه‌گیری: فناوری نانو با کاربردهای گسترده خود، نه‌تنها به افزایش ماندگاری و ایمنی محصولات غذایی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند منجر به کاهش ضایعات بسته‌بندی و تولید فرآورده‌های سلامت‌محور گردد. این مطالعه به بررسی نقش فیکوسیانین استخراج‌شده از اسپیرولینا در ارتقای سلامت و ایمنی مواد غذایی پرداخته و چالش‌ها و راهکارهای بهبود پایداری آن را مورد بحث قرار می‌دهد.

استناد: بهرامی‌زاده، عیسی، اجاق، سید مهدی، عالیشاهی، علیرضا، حسنی، شیرین، ذوالفقاری، مهدی (۱۴۰۴). تأثیر فیکوسیانین اسپیرولینا بر سلامت و ایمنی محصولات غذایی. *نشریه بهره‌برداری و پرورش آبزیان*، ۱۴ (۱)، ۱۴۲-۱۱۷.
DOI: 10.22069/japu.2024.22958.1913

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
© نویسندگان.

مقدمه

فناوری نانوریزپوشانی به‌عنوان یک رویکرد نوین، نقش مهمی در بهبود ایمنی و کیفیت مواد غذایی ایفا می‌کند. این فناوری در تمام مراحل زنجیره تولید و مصرف مواد غذایی، از بهینه‌سازی فرایند تولید تا افزایش ماندگاری، حفظ ارزش تغذیه‌ای، کنترل کیفیت و ارتقای کارایی بسته‌بندی، تأثیر به‌سزایی داشته است. یکی از منابع ارزشمند در تولید ترکیبات زیست‌فعال، جلبک‌های دریایی هستند که به دلیل غنای بالای خود از اسیدهای چرب ω-3، اسیدهای آمینه ضروری، ویتامین‌های A، C، D، E، K و ویتامین‌های گروه B، مواد معدنی ضروری و فیبرهای غذایی، توجه بسیاری را در صنایع غذایی، آرایشی- بهداشتی و دارویی به خود جلب کرده‌اند (۱). در این میان، جلبک‌های سبز- آبی (سیانوباکتری‌ها) که از ابتدایی‌ترین اشکال حیاتی روی زمین محسوب می‌شوند، به دلیل ساختار سلولی ساده، شباهت به پروکاریوت‌ها و توانایی انجام فتوسنتز، قابلیت بالایی در تولید متابولیت‌های ثانویه ارزشمند دارند. یکی از مهم‌ترین این ترکیبات، فیکوسیانین است که به‌عنوان رنگدانه‌ای طبیعی و زیست‌فعال، پتانسیل بالایی در تولید غذاهای فراسودمند دارد (۲). مصرف منظم محصولات حاوی این ترکیبات می‌تواند بدون ایجاد اثرات مضر، به‌عنوان مکملی ارزشمند در ارتقای سلامت انسان نقش‌آفرینی کند. این مقاله به بررسی اهمیت فیکوسیانین استخراج‌شده از اسپیرولینا، تأثیر آن بر ایمنی و کیفیت مواد غذایی و چالش‌های مرتبط با پایداری آن پرداخته و راهکارهای فناورانه از جمله نانوریزپوشانی را به‌عنوان راه‌حلی برای بهبود عملکرد این رنگدانه معرفی می‌کند. آن‌ها هم‌چنین دارای غشاء سلولی مشابه گلیکوژن در حیوانات هستند که حاوی قندهای پیچیده است. در میان جلبک‌های سبزآبی هر دو گونه سمی و خوراکی با اکثر اکوسیستم‌ها سازگار شده‌اند. جلبک‌های سبز خوراکی مانند اسپیرولینا[1]، نوستوک[2]، و آفانیزومنون[3]، هزاران سال است که برای مواد غذایی استفاده می شوند. یکی از ریزجلبک‌های فراسودمند، جلبک اسپرولینا می‌باشد که به دلیل دارا بودن ترکیبات ارزشمند بسیار زیادی از جمله ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، رنگدانه مهم طبیعی فایکوسیانین، اسیدهای چرب ضروری مانند گامالینولینیک و و دیگر ترکیبات فعال زیستی، امروزه از اهمیت بسیار زیادی برخوردار بوده، به‌طوری‌که از سوی سازمان بهداشت جهانی به‌عنوان غذای برتر معرفی گردید. اسپیرولینا پلاتینسیس (*Spirulina platensis*) به‌واسطه داشتن رنگدانه‌های ارزشمندی از جمله رنگدانه‌های فیکوسیانین (blue green algae)، فیکواریترین (Red algae)، بتاکاروتن (green algae)، فوکوگزانتین (brown algae)، آستاگزانتین و کلروفیل (green algae) به دلیل کاربرد زیاد و استخراج آسان، اهمیت تجاری روبه رشدی یافته‌اند (۳، ٤). اسپیرولینا به‌دلیل ترکیبات زیست‌فعال ارزشمند خود، کاربرد گسترده‌ای در صنایع داروسازی، غذایی، آرایشی- بهداشتی و هم‌چنین در تغذیه دام و آبزیان دارد. این جلبک به‌صورت مستقیم یا در قالب فرمولاسیون‌های مختلفی هم‌چون کپسول و پودر، به همراه سایر مواد مغذی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۵). یکی از مهم‌ترین ترکیبات استخراج‌شده از سیانوباکتری‌ها، رنگدانه فیکوسیانین است که به‌دلیل رنگ آبی درخشان، خاصیت فلورسانس و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بالا، در صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفته است (٦). این رنگدانه نه‌تنها در کشورهای مختلف به‌عنوان مکمل غذایی و رنگ طبیعی در فرمولاسیون مواد غذایی و نوشیدنی‌ها استفاده می‌شود، بلکه در تولید محصولات آرایشی و نشانگرهای فلورسانس نیز کاربرد دارد (۷). بااین‌حال، یکی از چالش‌های موجود در استفاده از رنگ‌های

1- Spirulina
2- Nostoc
3- Aphanizomenon

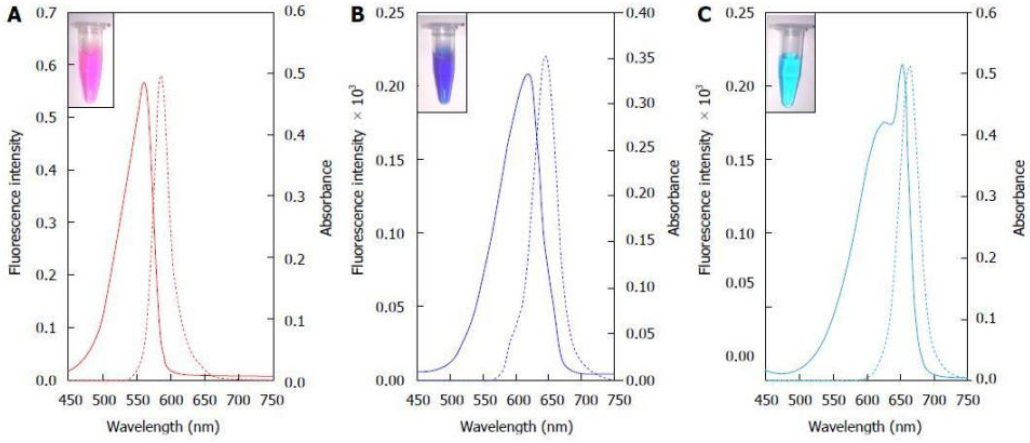
طبیعی، هزینه بالاتر تولید و فرآوری آن‌ها نسبت به رنگ‌های مصنوعی است. با افزایش آگاهی عمومی درباره خطرات و عوارض رنگ‌های سنتزی، میزان استفاده از رنگ‌های طبیعی در صنایع غذایی سالانه ١٠ تا ١٥ درصد رشد داشته است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی پتانسیل رنگدانه فیکوسیانین در غنی‌سازی محصولات غذایی، دارویی و آرایشی-بهداشتی است. به‌دلیل حساسیت این ترکیب به عوامل محیطی مانند دما، pH و نور، استفاده از فناوری ریزپوشانی (نانوپوشانی) به‌عنوان یک رویکرد کارآمد برای افزایش پایداری، بهبود دسترسی زیستی و حفظ خواص عملکردی آن پیشنهاد شده است.

مواد و روش ها

هدف مطالعه حاضر، تأثیر فیکوسیانین اسپیرولینا بر سلامت و ایمنی محصولات غذایی: راهکارهای نوین در نانوپوشانی است. علاوه‌بر این موارد، به پژوهش‌های داخلی و خارجی انجام گرفته پیرامون رنگدانه و غنی‌سازی محصولات مذکور (حداقل ٤٠ مقاله)، و هم‌چنین نتایج آن‌ها به اختصار اشاره شده است.

نتایج و بحث

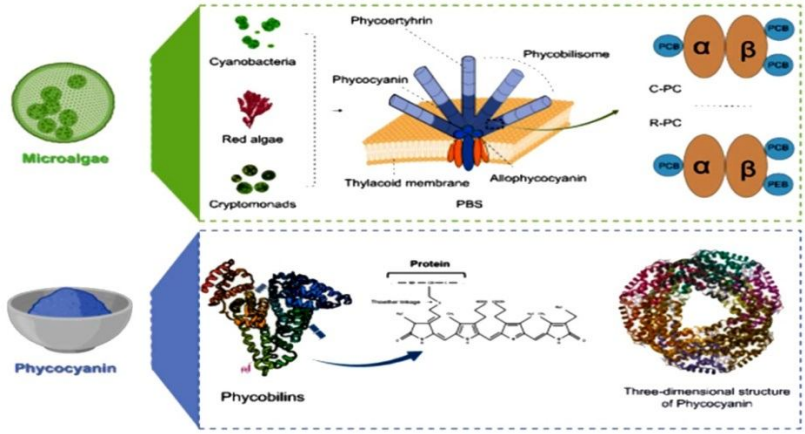
فیکوسیانین، در غشای سلولی سیانوباکتری‌ها و رودوفیت‌ها (Rhodophytes)، پروتئین‌های موسوم به فیکوبیلی پروتئین (Phycobiliprotein) وجود دارند که در واقع پروتئین‌های چندزنجیره‌ای تشکیل شده از آپوپروتئین‌ها (Apoprotein) بوده و به‌طور کووالانسی به فیکوبیلین‌ها (Phycobilin) متصل هستند. این پروتئین‌ها کروموفورهای (Chromophore) تتراپیرولی (Tetrapyrrole) با زنجیره‌های باز هستند. فیکوبیلی زوم‌ها که شامل مجموعه‌ای از فیکوبیلی پروتئین می‌باشند به صورت توده‌های بزرگ مولکولی در غشای خارجی تیلاکوئیدها قرار گرفته است. بر همین اساس، فیکوبیلی پروتئین ها براساس توالی‌های اسید آمینه خود و خصوصیات جذب اسپکتروسکوپی به سه گروه اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند (شکل ١) که عبارتند از: الف) فیکواریترین با رنگ قرمز و محدوده جذب (٥٧٥-٥٤٠ نانومتر) ب) فیکوسیانین با رنگ آبی تیره و محدوده جذب (٦٤٠-٦١٠ نانومتر) ج) آلوفیکوسیانین با رنگ سبز آبی و محدوده جذب (٦٥٥-٦٥٠ نانومتر).



شکل ١- نمایی از رنگ طاهری رنگدانه‌های فیکواریترین (Red)، فیکوسیانین (Blue) و آلوفیکوسیانین با رنگ سبز آبی (Blue green) (٨).

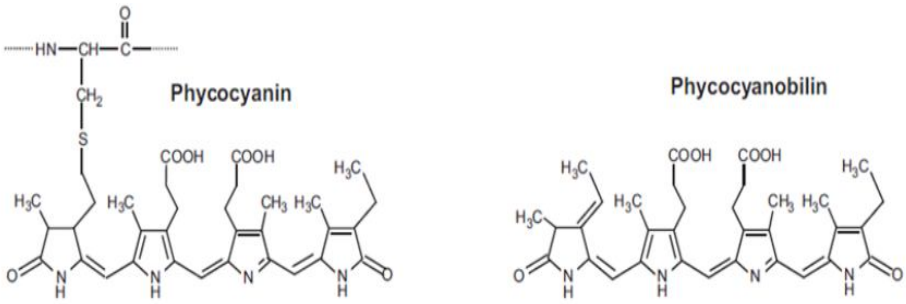
Figure 1. An overview of the apparent color of phycoerythrin (Red), phycocyanin (Blue), and allophycocyanin with a blue-green color (Blue-green) (8).

همه این گروه‌ها، محتوی متنوع و متفاوتی از ساختاها، پروتئین‌ها و مواد رنگ‌زا را دارا هستند. رنگ فیکواریترین‌ها عمدتاً قرمز است، در حالی‌که فیکوسیانین‌ها بسته به نوع ساختاری خود، طیفی از بنفش تا آبی تیره را شامل می‌شوند. به‌طور خاص، فیکوسیانین‌ها در گونه‌های مختلف به‌صورت C-PCY، R-PCY و R-PCY II وجود دارند که به‌ترتیب در سیانوباکتری‌ها، جلبک‌های قرمز و سیانوباکتری‌های دریایی مشاهده می‌شوند. هم‌چنین، آلوفیکوسیانین‌ها رنگی آبی متمایل به سبز دارند و نقش مهمی در فرآیندهای فتوسنتزی این جلبک‌ها ایفا می‌کنند (۹). فیکوبیلی زوم‌ها شامل یک هسته مرکزی از فیکوسیانین، آلوفیکوسیانین و فیکواریترین، که روی هم قرار می‌گیرند و ساختار میله‌ای تشکیل می‌دهند (شکل ۲).



شکل ۲- ساختار فیکوسیانوبیلین (ساختار سه‌بعدی) (۱۰، ۱۱).

Figure 2. Structure of Phycocyanobilin (Three-Dimensional Structure) (10, 11).



شکل ۳- ساختار شیمیایی فیکوسیانوبیلین و فیکوسیانین (۱۰، ۱۱).

Figure 3. Chemical Structure of Phycocyanobilin and Phycocyanin (10, 11).

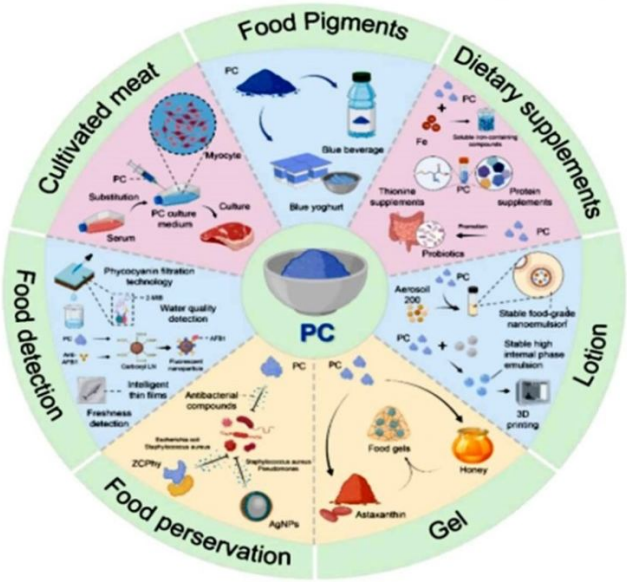
فیکوسیانین رنگدانه آبی (PC)، یکی از مهم‌ترین پروتئین‌های دریایی، دارای گیرنده نور با خاصیت آنتی‌اکسیدانی و فلورسنتی در سیانوباکتری‌ها و دو جلبک از جنس رودوفیت‌ها و کریپتوفیت‌ها (Cryptophytes) می‌باشد. این رنگدانه به سیانوباکتری‌ها رنگ آبی می بخشد و به همین خاطر آن‌ها با نام

خارجی مثل یون‌های فلزی و منشأ پروتئین جلبکی دارد و دارای خواص سلامت‌زایی، تغذیه‌ای و هم‌چنین دارای خصوصیات آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی (١٢) مورد تأثیر FDA و EFSA بوده، و در پژوهش‌های مختلف اثبات شده است (١٣، ١٤). لی و همکاران (٢٠١٩) نشان دادند، زیر واحدهای α و β فیکوسیانین به صورت جداگانه هر کدام خواص آنتی‌اکسیدانی دارند ولی وقتی این دو زیر واحد با هم ترکیب شوند میزان اثربخشی آنتی‌اکسیدانی حتی از مجموع میزان اثر آنتی‌اکسیدانی زیرواحدها به‌صورت جداگانه منفرد، عدد بالاتری را نشان می‌دهد (١٥). C- فیکوسیانین به راحتی قابل دستیابی، ایمن، قابل‌حل در آب و غیرسمی بوده (١٦)، بنابراین به عنوان دارو (تومور انسانی) یا یک ماده غذایی کاربردی پتانسیل بالایی برای پژوهش و پیشرفت دارد (١٧). فیکوسیانین هم‌چنین دارای اثر محافظتی بر نورون‌های عصبی و فعالیت ضدمیکروبی است (١٨). در سال ٢٠١٣، فیکوسیانین اولین رنگ طبیعی مجاز در سازمان غذا و دارو در ایالات متحده بود که در صنایع غذایی مورد استفاده قرار گرفت. از آن زمان، تقاضا برای این رنگدانه به ویژه در قاره آمریکا و اروپا افزایش یافته است، زیرا نه سمی است و نه سرطانزاست (١٩). پایداری فیکوسیانین تحت‌تأثیر منشأ، pH، دما، نور و برخی عوامل خارجی قرار دارد. این رنگدانه در دامنه pH بین ٤/٥ تا ٨ و دمای حداکثر ٤٥ درجه سانتی‌گراد پایداری مطلوبی از خود نشان می‌دهد. بااین‌حال، حساسیت بالای فیکوسیانین به نور یکی از محدودیت‌های اصلی آن محسوب می‌شود، که می‌تواند منجر به کاهش کیفیت و تغییر رنگ آن در شرایط نامناسب ذخیره‌سازی شود. به‌منظور استخراج فیکوسیانین از روش‌های مختلفی مانند انجماد- انجمادزدایی، روش آنزیمی، تکنیک اولتراسوند (Ultrasound Technique)، فشار هیدرواستاتیک بالا (High-Pressure Electrostatic)، اولتراسانتریفیوژ (Ultracentrifuge)، اولتراهموژنیزاسیون (Ultra Homogenization)، استخراج با آب و حلال‌های مختلف استفاده شده است که هر یک دارای مزایا و معایب متفاوت می‌باشند (٢٠).

کاربرد فیکوسیانین در حوزه‌های مختلف

رنگدانه[1]: رنگ، بو و طعم از مهم‌ترین فاکتورهای تعیین‌کننده کیفیت مواد غذایی محسوب می‌شوند، که در این میان، رنگ نقش کلیدی در پذیرش محصولات توسط مصرف‌کنندگان دارد. با افزایش آگاهی عمومی در مورد خطرات رنگ‌های مصنوعی از جمله باقی‌مانده‌های شیمیایی در غذا، تأثیرات نامطلوب زیست‌محیطی، پایداری پایین و حساسیت به عوامل محیطی روند استفاده از این ترکیبات رو به کاهش است. در مقابل، رنگ‌های طبیعی به‌دلیل خواص ارزشمند و ایمنی بالاتر، توجه بیش‌تری را به خود جلب کرده‌اند (٢١). فیکوسیانین یک رنگدانه طبیعی آبی‌رنگ است که به‌صورت پودری غیرسمی، بدون بو و کمی شیرین استخراج می‌شود. این ترکیب هنگام حل شدن در آب، فلورسانس درخشانی از خود نشان می‌دهد که آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای متنوع تبدیل کرده است. کاربردهای اصلی فیکوسیانین شامل موارد زیر است: به‌عنوان یک ترکیب آنتی‌اکسیدانی قوی در صنایع غذایی (مکمل غذایی)، جایگزین طبیعی برای رنگ‌های مصنوعی (رنگدانه غذایی)، برای پژوهش‌های زیستی و پزشکی (نشانگر فلورسنت)، در محصولات آرایشی- بهداشتی (رنگ‌کننده مانند لوسیون‌ها، ژل‌ها و کرم‌های پوستی) استفاده می‌شود (٧) (شکل ٤). هم‌چنین در صنایع نوین از جمله گوشت آزمایشگاهی[2]، که نیازمند جایگزین‌های طبیعی برای رنگ‌پذیری مطلوب است.

1- Pigment
2- In vitro meat



شکل ٤- شماتیکی از کاربردهای مختلف فیکوسیانین (۱۱).

Figure 4. Schematic Representation of Various Applications of Phycocyanin (11).

مکمل‌های غذایی[1]: فیکوسیانین[2] یکی از مهم‌ترین پروتئین دریایی و یک ماده مغذی مورد نیاز برای بدن انسان است. بنابراین، اغلب به‌عنوان یک مکمل غذایی در رژیم غذایی استفاده می‌شود. در برخی از مطالعات صنایع غذایی تأیید شده که PC یک پروتئین اتصال‌دهنده به آهن، و غنی از آهن است و بنابراین می‌تواند به‌عنوان یک مکمل آهن در مکمل‌های غذایی تجاری استفاده شوند (۹۷). مطالعات انجام‌شده بر روی فیکوسیانین (PC) استخراج‌شده از *Galdieria sulphuraria* نشان داده است که این ترکیب حاوی درصد بالایی از تیونین[3] می‌باشد (۲۲). این ویژگی، فیکوسیانین به‌دست آمده از این گونه را به یک منبع بالقوه برای مکمل‌های غذایی حاوی تیونین تبدیل می‌کند که می‌تواند در صنایع غذایی مورد استفاده قرار گیرد. فیکوسیانین (PC) علاوه بر استفاده به عنوان یک ریزمغذی و مکمل اسید آمینه، یک محرک رشد برای پروبیوتیک با کیفیت بالا است. پژوهش‌گران آزمایش‌هایی را برای ارزیابی تأثیر این پروتئین بر بقای پروبیوتیک (*Limosilactobacillus reuteri*) در طول روده انجام دادند و نتایج نشان داد که این پروتئین آبی، پتانسیل زیادی برای تقویت رشد پروبیوتیک دارد (۲۳).

امولسیفایر[4]: به‌دلیل فعالیت سطحی فیکوسیانین (PC) و توانایی آن در کاهش کشش سطحی، این رنگدانه می‌تواند به‌عنوان یک امولسیفایر مؤثر در فرایند تهیه امولسیون‌ها مورداستفاده قرار گیرد. فناوری امولسیون‌سازی، به‌عنوان یک تکنیک رایج در صنایع غذایی، نقش مهمی در بهبود ویژگی‌های ارگانولپتیکی مواد غذایی و تأمین خواص سلامت‌بخش مورد نیاز بدن انسان ایفا می‌کند. با در نظر گرفتن PC به عنوان یک امولسیفایر به‌دلیل حساسیت شدید آن به شرایط محیطی، تکنیکی که می تواند PC را پایدار کند تهیه امولسیون است. نتایج نشان داد که ترکیب PC با یک ترکیب سیلیکا، آیروسیل ۲۰۰ (Aerosil)، می‌تواند هر

1- Dietary supplements
2- PC
۳- تیونین (Thionine) یک ترکیب هتروسیکلی غیراشباع با نه اتم، تا حدی خصلت آروماتیکی دارد

4- Emulsifier

دو خاصیت امولسیون‌کنندگی آن را حفظ و حالت آن را پایدار کنند (۲٤). از نظر پایداری امولسیون‌ها، مطالعات نشان دادند که نانوذرات کامپوزیت نانوذرات ساخته شده با PC و اسید تانیک در نسبت معینی می توانند به عنوان یک امولسیفایر با کیفیت بالا برای PC استفاده شوند (۲۵).

ژل (Gel): ژل‌های غذایی به‌دلیل خواص حسی، زیست‌سازگاری، سازگاری با محیط زیست و رفع نیازهای غذایی انسان، به‌تدریج موردتوجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. اخیراً بر اساس یک مطالعه، نتایج نشان داد که یک سیستم ژلی تشکیل شده از PC (پروتئین آبی رنگ) و عسل، در غلظت معینی از آلژینات و ژلاتین، سبب افزایش قابل‌توجهی در هضم فنل‌ها در PC و یک ماتریس ژلی با کارایی مناسب ایجاد کرده است (۲٦). بنابراین در زمینه پایداری ژل، یک روش امولسیون دومرحله‌ای (ژل‌های تهیه شده با آستاگزانتین و PC به‌منظور بهبود پایداری ژل و خواص غذایی آن‌ها) استفاده می‌شود (۲۷). در حال حاضر، کاربردهای فیکوسیانین (PC) در ژل‌های غذایی محدود بوده و پژوهش‌های انجام‌شده عمدتاً در مقیاس آزمایشگاهی صورت گرفته است. بنابراین، لزوم نوآوری و توسعه فناوری‌های پیشرفته و بهینه‌سازی مواد خام برای بهره‌برداری گسترده‌تر از این پروتئین آبی در صنایع غذایی احساس می‌شود.

نگهداری مواد غذایی (Food preservation): به‌دلیل خاصیت آنتی‌اکسیدانی، خواص ضد میکروبی و سایر فعالیت‌های بیولوژیکی، PC برای نگهداری مواد غذایی استفاده می‌شود. در یک مطالعه مرتبط، ترکیبات فرار موجود در پنیر غنی شده با رنگدانه PC با استفاده از روش کروماتوگرافی گازی- طیف‌سنجی جرمی (GC-MS) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حضور ترکیبات ضدمیکروبی در فیکوسیانین (PC) موجب افزایش ماندگاری و حفظ تازگی پنیر در طول دوره نگهداری شده است. (۲۸). با توجه به ویژگی‌های ساختاری پروتئین‌های آبی (PC)، از جمله فعالیت آنتی‌اکسیدانی و خواص ضدمیکروبی، در کنار مواد کامپوزیتی حاوی زینک، یک کامپوزیت الکتروریسی‌شده زینک/ C-PC(ZCPhy 20) از طریق فرآیند چرخش الکترواستاتیکی تهیه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که این کامپوزیت پتانسیل بالایی در تولید فیلم‌های خوراکی دارد (۲۹). بر همین اساس، از PC و آنتوسیانین برای تولید فیلم‌های خوراکی با هدف جلوگیری از فساد ماهی در طی فرآیند نگهداری استفاده شده است (۳۰).

ردیابی غذا[1]: تشخیص و ردیابی مواد سمی در مواد غذایی یکی از بخش‌های کلیدی در صنایع غذایی محسوب می‌شود و توسعه فناوری‌های تشخیص سریع و کارآمد، مسیر اصلی پیشرفت این صنعت را شکل می‌دهد. با توجه به ویژگی‌های پروتئینی فیکوسیانین (PC) و قابلیت‌های منحصربه‌فرد آن، استفاده از خواص عملکردی این پروتئین در توسعه فناوری‌های شناسایی و ردیابی مواد آلاینده، چشم‌اندازی امیدبخش برای آینده دارد. آفلاتوکسین‌ها، از مهم‌ترین مایکوتوکسین‌ها (سموم قارچی) هستند که موجب آلودگی محصولات غذایی می‌شوند. در همین راستا، از یک نانوکره فلورسنتی حاوی پروتئین PC جهت ردیابی و شناسایی آفلاتوکسین در محصولات غذایی استفاده شده است (۳۱). با این‌حال، کاربرد PC در حوزه تشخیص و ردیابی آلاینده‌های سمی هنوز محدود بوده و نیازمند پژوهش‌های گسترده‌تر برای توسعه فناوری‌های کارآمد در این زمینه است.

1- Food detection

گوشت کشت‌شده (Cultivated meat): استفاده از فیکوسیانین (PC) به‌عنوان جایگزینی برای سایر پروتئین‌های رایج در تولید مواد غذایی، به عنوان یک فناوری نوظهور مطرح شده است. این جایگزینی می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری در صنعت غذایی کمک کند، در حالی‌که ویژگی‌های عملکردی و ارزش تغذیه‌ای مطلوبی را نیز ارائه می‌دهد. گوشت کشت شده یک فناوری نوظهور برای به‌دست آوردن محصولات گوشتی از کشت سلولی بدون کشتار دام است که منعکس‌کننده مفهوم توسعه سبز و پایدار است (۳۲). تهیه گوشت کشت شده به‌دلیل سرم زیاد مورد نیاز و فرآیند طولانی و زمان‌بر کشت از هزینه بالایی برخوردار است. بنابراین، مدل PC استخراج‌شده از سیانوباکتری‌ها به‌عنوان سرم موردنیاز در گوشت کشت‌شده برای کاهش هزینه‌های تولید، با هدف بهبود کارایی تولید گوشت کشت‌شده پیشنهاد می‌شود (۳۳). با توجه به کاربرد فعلی PC در زمینه مواد غذایی، استفاده از PC به عنوان رنگدانه غذایی بخش بزرگی از این فناوری بر پایداری این رنگدانه پس از فرآوری مواد غذایی متمرکز شده است. کاربردهای کمی به عنوان اصلاح‌کننده بافت مواد غذایی و غذاهای سالم عملکردی وجود دارد، در حالی‌که کاربردهای آن در نگهداری و کشت مواد غذایی است. با این‌حال، این مدل گوشت کشت شده در عمل، تولید در مقیاس بزرگ تأیید نشده است. نکته اصلی این است که زمان کشت گوشت مصنوعی بیش از حد طولانی است و هزینه فرآیند برای استفاده در مقیاس بزرگ در تولید گوشت مصنوعی بسیار زیاد است. بنابراین، تولید محصولات گوشتی کشت شده مقرون به صرفه نیاز به بهینه‌سازی و بهبود عملی دارد.

استفاده از رنگ‌ها در مواد غذایی: از مهم‌ترین دلایل استفاده از رنگ‌ها در صنایع غذایی می‌توان به بهبود و تقویت رنگ محصول، به‌ویژه در نوشیدنی‌ها، ایجاد یکنواختی در ظاهر مواد غذایی مانند مارگارین، شیرینی‌ها و دسرها، و حفظ رنگ طبیعی در فرآیندهای حرارتی و فرآوری مانند تولید آرد، دسرها و سس‌های استریل‌شده اشاره کرد. علاوه‌بر این، رنگ‌های غذایی به حفظ عطر و طعم محصول و جلوگیری از تخریب ویتامین‌های حساس به نور کمک می‌کنند. هم‌چنین، افزایش جذابیت بصری مواد غذایی برای تحریک اشتها و ارتقای پذیرش مصرف‌کنندگان، از دیگر مزایای استفاده از رنگ‌ها است. در این میان، رنگ‌های طبیعی نه‌تنها نقش یک افزودنی رنگ‌دهنده را ایفا می‌کنند، بلکه به‌دلیل خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدمیکروبی منحصربه‌فرد، می‌توانند به‌عنوان ترکیبات مغذی و مفید در محصولات غذایی مورد استفاده قرار گیرند (۳٤). با این‌حال مطالعه‌های محدودی روی فیکوبیلی پروتئین‌های غذایی با خلوص بیش‌تر از ۷۰ درصد گزارش شده است (۳٤). این ترکیبات پتانسیل بالایی در به‌کارگیری به‌عنوان افزودنی و ترکیبات فراسودمند به‌علت طبیعی‌بودن، رنگ منحصربه‌فرد و هم‌چنین دارابودن صفات بیولوژیکی دارد. فیکوسیانین اولین بار توسط یک شرکت ژاپنی تحت نام Blue Lina تجاری شد و در حال حاضر به عنوان رنگدانه طبیعی در کشورهای چین و ژاپن در محصولات غذایی مانند آدامس، شکلات، فرآورده‌های لبنی، ژله‌ها، بستنی، نوشیدنی‌ها و هم‌چنین محصولات آرایشی مانند کرم‌های ضد آفتاب و کرم دور چشم مورد استفاده قرار می‌گیرد (۳۵) (جدول ۱).

رنگدانه فیکوسیانین، به‌دلیل خواص ضد میکروبی، آنتی‌اکسیدانی و نقش آن به عنوان یک رنگدانه طبیعی، پتانسیل قابل‌توجهی برای استفاده در فرمولاسیون فرآورده‌های غذایی دارد. این ترکیب نه تنها به عنوان

یک ماده مغذی برای غنی‌سازی مواد غذایی و افزایش ماندگاری آن‌ها به‌کار می‌رود، بلکه فاقد مضرات رنگ‌های سنتتیک بوده و اثرات درمانی آن در صنایع داروسازی و پیشگیری از بیماری‌هایی مانند کم‌خونی، بیماری‌های کبدی و چربی خون به اثبات رسیده است (٤٤) (شکل ٥). این ویژگی فیکوسیانین، به‌ویژه در مقابله با بیماری‌هایی که ناشی از تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) هستند، اهمیت دارد. این ROSها که درون سلول‌های اسپیرولینا تولید می‌شوند، با سایر سلول‌ها واکنش داده و منجر به استرس اکسیداتیو و آسیب سلولی می‌شوند. این آسیب، عامل پاتولوژیک بسیاری از بیماری‌ها مانند دیابت، سرطان، اختلالات نورودژنراتیو، تصلب شرایین، هیپرپیگمانتاسیون و التهابات مختلف محسوب می‌شود (٤٥).

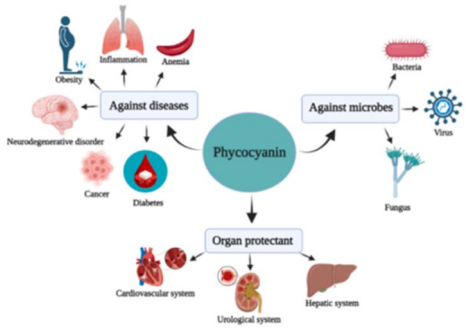
فیکوسیانین به‌دلیل خواص ضد سرطانی خود، در درمان انواعی از سرطان‌ها از جمله سرطان کبد (٤٦)، سرطان سینه (٤٧)، سرطان روده بزرگ (٤٨)، لوسمی (٢٧) و سرطان ریه (٤٩) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این رنگدانه با تأثیر بر سلول‌های سرطانی، از طریق مکانیسم‌های مختلفی از جمله سرکوب چرخه سلولی در مراحل خاص، تعدیل واکنش‌های اکسیداتیو سلولی و تقویت بیان ژن‌ها و گیرنده‌های مرتبط با نکروز و و آپوپتوز[1]، فعالیت ضدسرطانی خود را نشان می‌دهد (٥٠).

حقیقت انجام‌شده بر روی مدل‌های بیماری پارکینسون نشان داده است که فیکوسیانین از سلول‌ها در برابر سمیت ناشی از α- سینوکلئین و تشکیل فیبریل‌های آمیلوئید (β Aβ) محافظت می‌کند. هم‌چنین، این رنگدانه موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های مرتبط با ایجاد بیماری آلزایمر، از جمله آنزیم‌های مؤثر در تولید Aβ[2] می‌شود (٥١). پتانسیل فیکوسیانین به‌عنوان یک دارو برای اختلالات نورودژنراتیو[3] موضوع مورد توجه برای توسعه و استفاده در آینده است. هم‌چنین از فیکیوسیانین به‌عنوان یک نشانگر فلورسنت زیستی (به‌دلیل خاصیت فلورسنت طبیعی آن) برای رنگ‌آمیزی DNA، گلبول‌های قرمز، گلبول‌های سفید و پلاکت‌ها استفاده شده است (٩). بنابراین برای سنتز نانوذرات در طول درمان فتوترمال و فوتودینامیک برای درمان سرطان‌زایی مورد بررسی قرار گرفته است (٥٢). به‌عنوان یک مورد مطالعاتی، که توسط (٥٤) انجام شد، نشان داد که فیکوسیانین به عنوان یک عامل دارویی موجب کاهش فعالیت آنزیم‌هایی می‌شود که در مدل حیوانی انفارکتوس حاد میوکارد نقش دارند (جدول ٢). کاربرد فیکوسیانین در صنایع مختلف در جدول ١ و شکل‌های ٤ و ٥ نشان داده شده است.

١- آپوپتوزیس (Apoptosis)، گونه‌ای از مرگ سلولی یا زوال سلولی طی فرایند مرگ برنامه‌ریزی‌شده سلول است که در جانداران پرسلولی به وقوع می‌پیوندد که اصطلاحاً آن را خودکشی سلولی هم می‌نامند

٢- مونومر Aβ متشکل از ٣٣٢ اسید آمینه و ٣ تا پیوند تیواتری فیکوسیانوبیلین (PCB) به صورت تیواتری است

٣- زوال عصبی (Neurodegeneration)، ازدست رفتن ساختار یا عملکرد یاخته‌های عصبی یا مرگشان است. بسیاری از بیماری‌های زوال عصبی، شامل اسکلروز جانبی آمیوتروفیک، اسکلروز چندگانه، بیماری بارکینسون، بیماری آلزایمر، بیماری هانتینگتون و بیماری پریون، سبب به‌وجود آمدن زوال عصبی می‌شوند



شکل ۵- کاربرد درمانی فیکوسیانین در برابر بیماری‌های مختلف و هم‌چنین محافظت از اندام‌های مختلف (٤٤).

Figure 5. Therapeutic Applications of Phycocyanin against Various Diseases and Protection of Different Organs (44).

جدول ۱- کاربردهای متنوع فیکوسیانین در صنایع مختلف (٣٦).

Table 1. Diverse Applications of Phycocyanin in Various Industries (36).

حوزه‌های کاربردی Application Areas	کاربردها Application	مراجع References
صنایع غذایی Food Industry	پوشش قندی، صمغ، آب‌نبات صمغی، پودر آب‌میوه‌ها، کیک برنج، نوشیدنی‌های میوه، پودر سوپ‌ها، دسرهای منجمد، ژله‌ها، آدامس ژله‌ای، روکش شیرینی، محصولات پخته شده، پنیر فرآوری‌شده، ماست، روکش کیک خامه‌ای، نودل‌ها، کره، کپسول، کره گیاهی و ... Sugar coating, gum, gummy candy, fruit juice powder, rice cake, fruit beverages, soup powder, frozen desserts, jellies, jelly gum, pastry coating, baked goods, processed cheese, yogurt, cream cake frosting, noodles, butter, capsules, margarine, etc.	(37)
پروب‌های فلورسنت Fluorescent Probes	سنجش ایمونولوژیک؛ فلورسنت؛ برچسب‌هایی برای مرتب‌سازی سلولی؛ نشانگرها در الکتروفورز ژل؛ فوکوس ایزوالکتریک و حذف ژل؛ کروماتوگرافی، میکروسکوپ فلورسانس؛ هیبریداسیون فلورسانس درجا (FISH). مرتب‌سازی سلول‌های فعال‌شده با فلورسانس (FACS)؛ طیف‌سنجی همبستگی فلورسانس (FCS)؛ برچسب زدن پروتئین‌ها، آنتی‌بادی‌ها و اسیدهای نوکلئیک Immunoassay; Fluorescence; Labels for Cell Sorting; Markers in Gel Electrophoresis; Isoelectric Focusing and Gel Elution; Chromatography; Fluorescence Microscopy; Fluorescence In Situ Hybridization (FISH); Fluorescence-Activated Cell Sorting (FACS); Fluorescence Correlation Spectroscopy (FCS); Labeling of Proteins, Antibodies, and Nucleic Acids	(38) (39) (40) (41)
فرآورده‌های مغذی Nutritional Products	افزایش دفاع ایمنی خواص آنتی‌اکسیدانی، خواص ضدالتهابی، ضدویروسی، اثرات ضدسرطان و کاهش کلسترول Enhancing Immune Defense, Antioxidant Properties, Anti-inflammatory, Antiviral Effects, Anti-cancer Effects, and Cholesterol Reduction	(42) (9) (43)

محدودیت‌های استفاده از رنگدانه‌های طبیعی: استفاده از رنگدانه‌های طبیعی در غذا با محدودیت‌هایی مانند حساسیت بالای این ترکیبات به حرارت، نور، واکنش‌های شیمیایی و اکسیداسیون، تخریب آن‌ها در طول فرآوری و نگهداری، توزیع ناهمگن مواجه شده و هم‌چنین عطر و طعم آن‌ها ممکن است سبب تغییراتی در خواص حسی محصول غذایی گردد (٦١). در همین راستا، رنگدانه فیکوسیانین در برابر شرایط محیطی مانند اکسیژن، تغییرات دما، pH و سایر عوامل، مقاومت کم‌تری داشته و پایداری آن محدود است. این ویژگی باعث کاهش کاربرد تجاری آن در فرآوری مواد غذایی می‌شود، زیرا منجر به تخریب رنگدانه، کاهش شدت رنگ و کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن می‌گردد. این مسأله یکی از مهم‌ترین چالش‌های استفاده از فیکوسیانین به‌عنوان رنگدانه طبیعی محسوب می‌شود. (٦٢). فعالیت آنتی‌اکسیدانی

فیکوسیانین با مکانیسم‌های مختلفی انجام می‌گیرد. این رنگدانه به‌عنوان عامل قوی در خنثی کردن رادیکال‌های آزاد اکسیژن مطرح است و با اکسیدان‌های دیگر که باعث بروز ضایعات پاتولوژیک می شوند نیز واکنش می‌دهد. غیرفعال‌سازی رادیکال‌های هیدروکسیل و آلکیل توسط فیکوسیانین با استفاده از سنجش کیمی لومینسانس[1] تأیید شده است (٦٣).

فیکوسیانین موجب غیرفعال کردن رادیکال‌های آزاد اکسیژن، هیدروکسیل،آلکسیل، پرواکسیل، کاهش پراکسیداسیون چربی، غیرفعال کردن پراکسی نیتریت و واکنش با هیپوکلریت می‌شود و اثرات آنتی‌اکسیدانی خود را از طریق واکنش‌های فوق اعمال می‌کند (٦٤). در یک مطالعه، فعالیت آنتی‌اکسیدانی فیکوسیانین مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش خلوص فیکوسیانین، فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن نیز به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (٦٥). اسپیرولینا پلاتنسیس (حاوی رنگدانه فیکوسیانین) دارای فعالیت غیرفعال‌کنندگی رادیکال‌های آزاد و قدرت احیاءکنندگی فلزات است (٦٦). بر این اساس ریزپوشانی، یک تکنیک رایج برای کپسوله کردن ترکیبات در یک ماده خاص برای محافظت از مواد حساس (خواص آنتی‌اکسیدانی، ضد میکروبی، ترکیبات فنولی و...) و کنترل رهایش سالم است (٦٧). ریزپوشانی، یک تکنیک رایج برای کپسوله کردن ترکیبات در یک ماده خاص برای محافظت از مواد حساس و برای تحویل ایمن است (٦٧). ریزپوشانی شامل قرارگیری ترکیبات غذایی، آنزیمی و یا مواد دیگر در کپسول‌های کوچک می‌باشد (٦٨). ریزپوشانی بر اساس اندازه ذراتی که پوشش داده می‌شود به سه دسته نانوکپسولاسیون (اندازه ذرات کم‌تر از ۱ میکرون)، میکروکپسولاسیون (اندازه ذرات بین ۱ تا ۱۰۰۰ میکرون)، ماکروکپسولاسیون (اندازه ذرات بیش‌تر از ۱۰۰۰ میکرون) تقسیم می‌گردد. بر این اساس درون‌پوشانی مواد در نانوکپسول‌ها می‌تواند به عنوان یک سیستم حامل محافظتی از ترکیبات زیست‌فعال طی فرآوری و نگهداری در شرایط مختلف مورد استفاده قرار گیرد (٦٧). برای ریزپوشانی کردن از امولسیفایرهای متفاوتی از جمله هیدروکلوئیدها (پروتئین آب پنیر، ایزوله سویا، مالتودکسترین، پکتین، زانتان، نشاسته، کتیرا، ژلاتین، صمغ کتیرا، آلژینات، کربوکسی متیل سلولز، هیدروکسی پروپیل متیل سلولز و غیره)، استفاده می‌شود (٦٩، ۷۰، ۷۱). هیدروکلوئیدها، گروهی از پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها می‌باشند که عملکرد مثبت آن‌ها در زمینه‌های مختلف (مانند افزایش ویسکوزیته در محلول‌های آبی، پایداری کف‌ها و امولسیون‌ها، پوشش‌دهی میوه‌جات، شرکت در ساخت میکروامولسیون–نانوکپسول‌های غذایی، و ایجاد حالت خامه‌ای و چربی در محصولاتی که چربی آن‌ها کاهش یافته است) موجب کاربرد گسترده آن‌ها در صنایع غذایی شده است (۷۲).

رنگدانه فیکوسیانین در فرآوری مواد غذایی دچار تخریب شده و رنگ آن به آبی کم‌رنگ تغییر می‌کند که این امر موجب کاهش شدت رنگ و کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن می‌شود. این مسأله به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معایب این رنگدانه تلقی می‌گردد (٦٢).

۱- کمی لومینسانس (Chemi Luminescence) همان‌طور که از اسمش مشخص است "پرتاب نور طی واکنش‌های شیمیایی" می‌باشد و نسل جدید روش‌های سنجش ایمنی است که پس از متدهای رادیو ایمونواسی و الایزا به‌دلیل ویژگی‌هایی از جمله حجم اندک نمونه، افزایش سرعت واکنش و اتوماسیون حاکم بر مراحل انجام آزمون، در تشخیص بیماری‌ها به‌کار گرفته می‌شود

جدول ۲- مروری بر تأثیر فیکوسیانین در ترکیب با سایر داروها در مبارزه با سرطان (٤٤).

Table 2. Overview of the Effect of Phycocyanin in Combination with Other Drugs against Cancer (44).

ردیف Row	انواع مختلف تومور Different Types of Tumors	لاین سلولی Cell Line	غلظت فیکوسیانین Phycocyanin Concentration	محتوی دارویی Pharmaceutical Content	مدت زمان تأثیر دارو بر حسب روز Duration of Drug Effect (in Days)	مراجع References
1	سرطان ریه Lung cancer	سلول‌های A549 A549 cells	٤٠ یا ٨٠ میکروگرم در لیتر 40 or 80 µg/L	بتائین Betaine	28	(54)
2	سرطان ریه Lung cancer	سلول‌های A549 A549 cells	۳۲۰ میلی‌گرم در میلی‌لیتر	رتینوئیک اسید (آل ترانس) All-trans retinoic acid (ATRA)	10	(55)
3	سرطان دهانه رحم Cervical cancer	سلول‌های HELA/SiHa HELA/SiHa cells	NA320 mg/mL	فایکوسیانین با استفاده از نانوذرات Phycocyanin using nanoparticles CD95sp	20	(56)
4	سرطان روده بزرگ Colorectal cancer	NA NA	حداکثر ۲۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم وزن بدن مدل حیوانی Up to 200 mg/kg body weight of the animal model	پیروسیکام Piroxicam	42	(57)
5	سرطان سینه Breast cancer	سلول‌های MCF-7 MCF-7 cells	۳۲۰ میلی‌گرم در میلی‌لیتر 320 mg/mL	درمان فتودینامیک Photodynamic therapy (PDT)	13	(58)
6	سرطان کبد Liver cancer	سلول‌های H22 H22 cells	۱۰ میلی‌گرم در میلی‌لیتر 10 mg/mL	درمان فتودینامیک Photodynamic therapy (PDT)	10	(59) (60)

یکی از تکنیک‌های مؤثر برای افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی و حفظ پایداری این خاصیت در فیکوسیانین، نانوریزپوشانی آن است. در سال‌های اخیر، ترکیب پروتئین‌های گیاهی و جانوری به‌عنوان مواد دیواره‌ای در نانوریزپوشانی مورد توجه قرار گرفته‌اند و در دهه گذشته کاربرد خود را به‌عنوان امولسیفایرهای طبیعی برای کپسوله کردن نشان داده‌اند (۷۳). در یک مطالعه، رنگدانه فیکوسیانین با پوششی ترکیبی از مالتودکسترین و کازئینات سدیم نانوریزپوشانی شد و فعالیت آنتی‌اکسیدانی نانوکپسول‌های حاوی این رنگدانه در مقایسه با فرم خالص آن ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که نانوریزپوشانی فیکوسیانین به‌طور معناداری موجب افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن می‌شود. هم‌چنین، قدرت آنتی‌اکسیدانی فیکوسیانین خالص و نانوریزپوشانی‌شده در زمان صفر تقریباً مشابه بود، اما در طول دوره نگهداری (دمای ۱۸- درجه سلسیوس به‌مدت ٦٠ روز)، فعالیت آنتی‌اکسیدانی فیکوسیانین خالص کاهش یافت. کاهش نسبی قدرت آنتی‌اکسیدانی فیکوسیانین خالص پس از ٦٠ روز نگهداری، در اکثر موارد معنی‌دار بود. اما تکنیک نانوریزپوشانی مانع از کاهش قابل‌توجه فعالیت آنتی‌اکسیدانی فیکوسیانین شد (٧٤). یافته‌های پژوهشی که خواص نانوکپسول‌ها حامل فیکوسیانین را بررسی کرد، بیانگر افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی فیکوسیانین نانوریزپوشانی‌شده با کیتوزان ۳ درصد نسبت به فرم خالص بود. با انجام فرآیند نانوریزپوشانی، میزان بارگیری فیکوسیانین افزایش

یافته و به دلیل رهایش تدریجی، فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن نیز پایدار می‌ماند (۱۲). نتایج پژوهشی که در آن مالتو دکسترین و کارآگینان (به نسبت ۹ به ۱) جهت ریزپوشانی کردن فیکوسیانین استفاده شد. نشان داد که که ریزپوشانی کردن فیکوسیانین باعث افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی و محافظت آن در برابر فرآیند اکسیداسیون، مقاومت در برابر گرما و مواد زیست‌فعال می‌گردد (۷۵). رنگدانه فیکوسیانین دارای خاصیت ضدباکتریایی علیه باکتری های شاخص گرم مثبت و منفی است (٦۳). در یک مطالعه، فعالیت فیکوسیانین در دو فرم خالص و نانوریزپوشانی شده (با پوشش ترکیبی مالتودکسترین- کازئینات سدیم) علیه باکتری‌های گرم باکتری‌های گرم مثبت *لیستریا مونوسیتوژنز*[1]، *استافیلوکوکوس اورئوس*[2] و *استرپتوکوکوس اینیایی*[3] و گرم منفی *یرسینا روکری*[4] و *اشرشیاکلی*[5] مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عدم رشد باکتری‌ها در محیط آگاردار بیانگر آن است که با نانوریزپوشانی فیکوسیانین، اثر ضدمیکروبی آن در طول زمان حفظ می‌شود و بین روز صفر و روز شصتم نگهداری در دمای ۱۸- درجه سلسیوس تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. اما در فیکوسیانین خالص، اثر ضدباکتریایی با نگهداری فیکوسیانین کاهش نسبی داشته و در برخی از موارد، اختلاف موجود معنی‌دار بود. تأثیر ضدمیکروبی میکروجلبک اسپیرولینا، علاوه‌بر فیکوسیانین، به متابولیت‌های دیگری مثل ترکیبات فنلی و پلی‌ساکاریدی نیز مربوط می‌باشد. علاوه بر این فیکوسیانین فساد شیمیایی ناشی از افزایش عدد پراکسید، تیوباربیتوریک اسید و اسیدهای چرب آزاد را به تاخیر انداخته و از این طریق زمان ماندگاری مواد غذایی را افزایش می‌دهد (۷٦). در یک پژوهش، از فیکوسیانین در دو فرم خالص و نانوریزپوشانی شده با پوشش ترکیبی مالتودکسترین کازئینات سدیم در فرمولاسیون بستنی استفاده و گزارش گردید که استفاده از این رنگدانه در بستنی موجب بهینه نمودن سفتی، درصد ذوب، بافت، شدت صمغیت، کریستالی و سردی می‌شود و این روند در فیکوسیانین نانوریزپوشانی‌شده مطلوب‌تر از فیکوسیانین خالص است (۷٤). طی پژوهش دیگری در زمینه استفاده از رنگدانه‌های طبیعی فیکوسیانین در فرمولاسیون کلوچه، نتایج نشان داد که میزان پروتئین، آهن و اسید چرب لینولنیک در کلوچه‌های غنی‌شده با جلبک به‌طور معنی‌داری افزایش داشته و برخی از پارامترهای فساد مانند عدد پراکسید نیز کاهش یافتند (۹۵). در مطالعه دیگری به‌منظور غنی‌سازی پنیر با استفاده از فیکوسیانین و پودر پونه کوهی، با هدف تأثیر آن‌ها بر بقاء باکتری لاکتوباسیلوس اسیدوفیلوس (*Lactobacillus acidophilus*) را مورد سنجش قرار دادند. نتایج نشان داد که غلظت ۰/۸ درصد فیکوسیانین و دو سطح ۰/۵ و ۱ درصد پونه کوهی باعث افزایش ماندگاری باکتری مذکور گردید (۹٤). هم‌چنین در مطالعه بهشتی‌پور و همکاران (۲۰۱۲)، اثر افزودن ریزجلبک اسپیرولینا و کلرلا بر میزان اسیدیته و زنده‌مانی باکتری‌های پروبیوتیک طی تخمیر ماست طی ۲۸ روز سردخانه‌گذاری مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد محتوای پروتئینی ریزجلبک ماهیتی بافری ایجاد کرده و از افت سریع pH جلوگیری می‌کند (۹۲). در پژوهش اوزکان و همکاران (۲۰۱٤)، فرآیند ریزپوشانی را در رنگ‌های بیولوژیک خوراکی مورد بررسی قرار داده و اشاره کردند که پوشش‌هایی که برای ریزپوشانی کردن مورد استفاده قرار می‌گیرند باید دارای ویژگی‌هایی مانند خاصیت تشکیل فیلم، خواص امولسیونی، قابلیت تجزیه‌پذیربودن، پایداری در مجرای گوارشی، ویسکوزیته مناسب، قیمت ارزان و هیدروسکوپی

1- *Listeria monocytogenes*
2- *Staphylococcus aureus*
3- *Streptococcus iniae*
4- *Yersinia ruckeri*
5- *Escherichia coli*

پائین باشند (۹۳). مارتلی و همکاران (۲۰۱٤) گزارش کردند که غلظت‌های بالای شکر می‌تواند باعث افزایش مقاومت حرارتی فیکوبیلی پروتئین‌ها شود و پایداری آن‌ها بستگی به غلظت شکر دارد. این ترکیبات قادرند سطح فیکوسیانین را پوشش داده و ساختار شیمیایی آن را در برابر تغییرات محافظت کنند. این‌گونه ترکیبات هم‌چنین به‌عنوان رنگ‌دهنده‌های طبیعی و امولسیفایر در محصولات غذایی مانند انواع نوشیدنی‌های یخی و غیرالکلی، آدامس‌ها، آبنبات، قوام‌دهنده و ترکیبات ژل‌کننده و در صنایع بهداشتی و آرایشی نیز به‌عنوان جایگزین رنگ‌دهنده‌های مصنوعی به‌کار گرفته می‌شوند (۷٦). هم‌چنین از دیگر کاربردهای فیکوبیلی پروتئین‌ها می‌توان به تولید پروب‌های رنگی در تشخیص ایمنولوژیکی مواد براساس ویژگی‌های فلورسنت آن‌ها اشاره نمود (۷۷). در پژوهش خزائی پول و همکاران (۲۰۱٤)، اثر ریزجلبک اسپیرولینا پلانتیس به همراه آگار و گوار بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و حسی پاستیل کیوی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد با آگار و اسپیرولینا در فرمولاسیون، پارامتر صمغی بودن بافت نمونه‌ها به شکل معنی‌داری افزایش یافت. در آنالیز حسی این محصول اثر هیچ‌یک از سه متغیر روی پذیرش کلی معنی‌دار نبود (۷۸). در مطالعه دیگری، فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی میکروکپسول‌های فیکوسیانین با استفاده از مالتودکسترین و کاراگینان به عنوان مواد پوشش‌دهنده را مورد پژوهش قرار دادند. نتایج نشان داد که میکروکپسول حاوی ۱ درصد فیکوسیانین در پارامترهای ارزیابی‌شده ارزش بالاتری را نشان می‌دهد، این یعنی بازدهی کپسولاسیون (۰/۲۸۹ ± ۱۲/۸۹) درصد، رطوبت (۰/۰۵۹ ± ۸/۳٦) درصد، درصد فیکوسیانین (۰/۰۷۲ ± ۲/۸۳) و فعالیت آنتی‌اکسیدانی (۱/۰۱۷ ± ٤۹/۰۵) درصد است. نتایج ریزساختارهای میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که میکروکپسول‌هایی که فقط حاوی مالتودکسترین بودند، ماده پوششی مناسبی نداشته و تمامی ریزذرات دارای ظاهر کروی نامنظم و اندازه‌های متفاوت بودند، اما کاراگینان دارای ظاهری پوسته‌پوسته و مناسب بود. (۷۵). پژوهشی دیگری، خصوصیات فیزیکی فیکوسیانین میکروکپسوله‌شده حاصل از جلبک اسپیرولینا در پوشش مالتودکسترین و کاراژینان با نسبت‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد میکروکپسول‌های فیکوسیانین با ۹ درصد مالتودکسترین و ۱ درصد کاراژینان، بالاترین مقادیر دانسیته حجمی، راندمان ریزپوشانی و اندازه ذرات را داشتند. نتایج گرماسنجی تفاضلی (DSC) و طیف‌سنجی (FTIR) نیز حضور فیکوسیانین، مالتودکسترین و کاراگینان را در میکروکپسول تأیید کرد (۷۵). کورتیاسه همکاران (۲۰۱۸)، فرمولاسیون و خصوصیات میکروکپسول‌های فیکوسیانین در مالتودکسترین-آلژینات را مورد پژوهش قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش غلظت آلژینات می‌تواند سطوح فیکوسیانین و میزان رطوبت را افزایش و راندمان کپسوله‌سازی، میزان چگالی، میزان شدت آبی و اندازه‌گیری ذرات و ساختار ذرات را نیز بهبود ببخشد (۷۹). میکروکپسول‌های فیکوسیانین با غلظت ۰/٦ درصد آلژینات و ۹/٤ درصد مالتودکسترین، بالاترین محتوای فیکوسیانین، راندمان کپسولاسیون و شدت رنگ آبی را دارند. در مطالعه‌ای به بررسی پایداری میکروکپسول‌های فیکوسیانین با استفاده از مالتودکسترین و کاپا گاراگینان به عنوان ماده پوشش‌دهنده پرداختند. در این مطالعه از روش خشک کردن پاششی در دمای ورودی مختلف استفاده شد. نتایج نشان داد که میکروکپسول فیکوسیانین با ۹۰ درجه سانتی‌گراد دمای ورودی بیش‌ترین رطوبت، غلظت فیکوسیانین و بازده محصورسازی به ترتیب ۷، ۱/۵۳، و ۲۹ درصد را دارد(۸۰). پژوهشی دیگر بر روی ریزپوشانی عصاره

جلبک سارگاسوم بوویانوم در نانولیپوزوم تولید شده به روش مظفری و بررسی اثر نگهدارندگی آن در مایونز توسط ساواکابی و همکاران (١٣٩٨)، انجام شد. طرح سطح پاسخ مرکب مرکزی برای تعیین شرایط بهینه ریزپوشانی ترکیبات فنولی در نانولیپوزوم‌ها استفاده گردید. متغیرهای مستقل شامل غلظت لیستین (٠/٥، ١/٢٥ و ٢ درصد وزنی/وزنی)، دما (٣٠، ٥٠ و ٧٠ درجه سانتی‌گراد) و غلظت ترکیبات فنولی (٥٠٠، ١٠٠٠ و ١٥٠٠ ppm) بودند. تعیین اندازه ذرات و شاخص پراکندگی (PDI)، اندازه ذره (نانومتر)، پتانسیل زتا (میلی‌ولت) و راندمان ریزپوشانی به عنوان متغیرهای وابسته طرح در نظر گرفته شدند. بر اساس نتایج، اندازه نانولیپوزوم‌های بارگذاری شده در محدوده ٨٦/٦ تا ١١٨/٧ نانومتر قرار داشت و بالاترین راندمان ریزپوشانی ترکیبات فنولی ٥٠/٢ درصد بود. نانولیپووم‌های خالی و بارگذاری شده کروی شکل بودند و ساختار تک‌لایه داشتند. بررسی طیف FTIR ریزپوشانی عصاره جلبک را در نانولیپوزوم‌ها تأیید کرد. ترکیبات فنولی عصاره جلبک دمای انتقال فاز نانولیپوزوم‌ها را نیز افزایش دادند (از ١/٦ به ٦/٣ درجه سانتی‌گراد). رهایش برون‌تنی ترکیبات فنولی از نانولیپوزوم‌ها در PH های ٣، ٥ و ٧ بررسی شد. براساس نتایج، رهایش در pH ٣ با سرعت بیش‌تری رخ داد و میزان رهایش تجمعی بعد از ٣٣٦ ساعت به ٩٢/٩ درصد افزایش پیدا کرد. نانولیپوزوم‌های حاوی عصاره کارایی بالاتری در کنترل تعداد کلی ریزاندامگان و کپک و مخمر در سس مایونز پس از گذشت ٤ ماه داشتند (٨١). در پژوهش صفری و همکاران (٢٠١٧)، ارزیابی تأثیر دما، زمان و pH بر پایداری رنگدانه فیکوسیانین استخراج شده از جلبک اسپیرولینا (*Spirulina platensis*) را مورد پژوهش قرار دادند. نتایج بیانگر کاهش نسبی پایداری فیکوسیانین با افزایش زمان نگهداری در دماهای مورد بررسی بود. با این وجود، بیش‌ترین پایداری فیکوسیانین در دمای ١٨- و سپس ٤ درجه سانتی‌گراد با روند مشابه در دامنه pHهای مورد بررسی بوده است. با افزایش دمای نگهداری به ١٠ درجه سانتی‌گراد، پایداری فیکوسیانین به‌خصوص در pH=٥/٥ کاهش شدیدی داشته و جذب نوری آن در روز ٣٠ به صفر رسید. بهترین شرایط جهت حداقل کاهش غلظت فیکوسیانین، pH=٤/٥، دمای ١٨- درجه سانتی‌گراد و زمان ٣٠ روز بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده، امکان استفاده از فیکوسیانین در فرآورده‌های غذایی که در دمای یخچال و یا انجماد (فراورده‌های لبنی و بستنی) نگهداری می‌شوند وجود دارد (٨٢). در پژوهش یعقوبی و همکاران (٢٠١٨)، تولید نانوحامل‌های فیکوسیانین اسپیرولینا پلاتنسیس و ارزیابی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که نوع و میزان چربی و سورفکتانت تأثیر معنی‌داری بر اندازه ذرات، شاخص تعیین اندازه ذرات، شاخص پراکندگی و پتانسیل زتا دارد. استفاده از مقادیر بالای چربی مایع تأثیر منفی در کارایی نانوپوشانی نشان داد. سورفکتانت‌های ترکیبی در مقایسه با سورفکتانت‌های مستقل تأثیر معنی‌داری در ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی فرمولاسیون‌ها داشت. در همه فرمولاسیون‌های تهیه شده از ترکیب سورفکتانت‌ها میزان کارایی نانوپوشانی بالاتر گزارش شد. نتایج آنالیز DSC، FTIR و XRD نشان داد که پیک مربوط به فیکوسیانین در فرمولاسیون‌های تهیه‌شده مشاهده نشد، که این موضوع کارایی فرمولاسیون‌های SLN و NLC[1] در نانوپوشانی فیکوسیانین را تأیید می‌کند. تصویر میکروسکوپ الکترونی نشان داد که، اندازه نانوذرات

١- امروزه نانو ذرات لیپیدی جامد (SLN) و حامل‌های لیپیدی نانوساختار (NLC) به عنوان سیستم‌های حامل برای کاربردهای زیادی مورد پژوهش قرار گرفته‌اند

تشکیل شده در محدوده ۵۰ تا ۸۰ نانومتر با ابعاد کروی و یکنواخت می‌باشد. کارایی درون‌پوشانی نانوذرات از ۳۷ تا ٦۹ درصد متغیر بود. نتایج این پژوهش نشان داد فیکوسیانین به عنوان یک رنگدانه پروتئینی با قابلیت امولسیفایری مناسب می‌تواند در سیستم‌های بر پایه لیپید مورد نانوپوشانی قرار گیرد (۸۳). در پژوهش شبخیز و همکاران (۲۰۲۱)، تکنیک درون‌پوشانی را به‌عنوان روشی مناسب برای حفاظت از اسانس و بالا بردن کارایی آن بررسی نمودند. به این منظور هیدروژل‌های آلژیناتی حاوی اسانس *Thymus daenensis*[1] بارگذاری‌شده در بتاسیکلودکسترین تولید شد و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، خواص ضدمیکروبی و رهایش اسانس از هیدروژل‌ها بررسی شد. هیدروژل‌ها دارای اثر مهارکنندگی رشد بر روی دو سویه باکتری، استافیلوکوکوس اورئوس و اشرشیاکلی بودند. رهایش اسانس در دو دوره کوتاه‌مدت (شبیه‌سازی‌شده دستگاه گوارش) و بلندمدت (سایر کاربردها) بررسی شد و نتایج نشان داد که سرعت رهایش ترکیبات زیست‌فعال را می‌توان با کپسوله کردن در بتاسیکلو دکسترین و تولید هیدروژل آلژیناتی آن کاهش داد و بدین صورت می‌تواند به عنوان ابزار مناسبی برای کنترل رهایش در سیستم‌های غذایی و دارویی مورد استفاده قرار گیرد (۸٤). صفری و همکاران (۲۰۲۲)، اقدام به بررسی و مقایسه فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی فیکوسیانین استخراج شده از میکروجلبک اسپیرولینا (*Spirulina Platensis*) در دو فرم خالص و نانوپوشانی‌شده با پوشش ترکیبی مالتودکسترین- کازئینات سدیم پرداختند. نتایج نشان داد که فیکوسیانین خالص دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی است؛ دوما نانوپوشانی این رنگدانه با پوشش ترکیبی مالتودکسترین- کازئینات سدیم موجب ارتقای این خواص و ثبات آن‌ها در طول دوره نگهداری می‌گردد (۷٤). در پژوهش دیگری از صفری و همکاران (۲۰۲۲)، نانوریزپوشانی فیکوسیانین استخراج‌شده از جلبک اسپیرولینا (*Spirulina platensis*) و استفاده از نانوذرات حاصل در فرمولاسیون بستنی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که شاخص رنگ در بستنی فرموله شده با فیکوسیانین خالص در مقایسه با تیمار دارای فیکوسیانین نانوریزپوشانی‌شده مطلوب‌تر و از مقبولیت بیش‌تری برخوردار بود. با توجه به ویژگی‌های فیکوسیانین به‌ویژه فرم نانوریزپوشانی‌شده، می‌توان از آن به عنوان رنگ بیولوژیک و بهبود دهنده خواص کیفی و حسی در انواع بستنی استفاده کرد (۷٤). درمطالعه کاراژان و همکاران (۲۰۲۱)، به ارزیابی نوع و ترکیب مواد پوشش‌دهنده در پایداری رنگ‌دانه فیکوسیانین به روش خشک‌کن پاششی پرداختند. نتایج نشان داد که پوشش‌دهی رنگدانه در پایداری آن تأثیر معنی‌داری دارد به‌طوری‌که آنالیز واریانس مقایسه میانگین تیمار حاوی ۱۰۰ درصد و ۷۵ درصد مالتودکسترین در پوشش دارای کم‌ترین میزان افت جذب رنگ‌دانه با مقادیر ۱۲/۳ و ۱٤/۵ درصد به ترتیب بودند. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داد که ریزکپسول‌های حاوی مقادیر بالاتر مالتودکسترین، کروی‌تر با سطح صاف‌تر و دارای چین و چروک کم‌تری نسبت به ریزکپسول‌های تهیه شده با صمغ عربی بودند. هم‌چنین نتایج بررسی اندازه ذرات نشان داد که نمونه‌های پودر حاوی مالتودکسترین در مقایسه با نمونه‌های دارای صمغ عربی از اندازه درشت‌تری برخوردار بودند و اندازه آن‌ها به ترتیب ۵۰/۵ و ٤۱/۳ نانومتر می‌باشند (۸). هم‌چنین در پژوهش ریگی و همکاران (۲۰۲۲)، استخراج فیکوسیانین از جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس و ارزیابی پایداری نانولیپوزوم‌های حامل رنگدانه در

۱- آویشن دنایی (Thymus daenensis Celak) در عرصه‌های طبیعی برخی از مناطق ایران ازجمله استان قزوین پراکنش دارد

برابر شرایط محیطی را مورد پژوهش قرار دادند. نتایج نشان داد که میانگین اندازه نانولیپوزوم‌ها و شاخص پراکندگی به‌ترتیب از محدوده ٣٢٢/٢١ تا ٤٢٦/٣١ نانومتر و ٠/٢٧ تا ٠/٢٨ در نانوحامل‌ها متغیر بود. بالاترین مقادیر راندمان نانوپوشانی نانولیپوزوم حاوی فیکوسیانین (٨١/٤ درصد) تحت شرایط بهینه در نانولیپوزوم با پوشش کیتوزان به‌دست آمد. ارزیابی ثبات لیپوزوم‌ها در برابر نور، رطوبت نسبی و دماهای مختلف نگهداری طی زمان بیانگر افزایش پایداری فیکوسیانین محصور شده در حامل های لیپیدی بوده و کیتوزان به عنوان پوشش لیپوزوم، سبب افزایش ثبات و کنترل انتشار پایدار فیکوسیانین گردید (٨٥). ادجالی و همکاران (٢٠٢٢)، در یک پژوهش اقدام به بررسی تجزیه فیزیکوشیمیایی فیکوسیانین و ابزاری برای بهبود پایداری آن پرداختند. نتایج نشان داد که حساسیت بالای ترکیبات فیکو سیانین به حرارت، نور، واکنش‌های شیمیایی و اکسیداسیون، فراریت و تخریب آنها در طول فرآوری و نگهداری، با توزیع ناهمگن مواجه می‌شود. محدوده pH بهینه برای فیکوسیانین بین ٥/٥ تا ٦ است. بنابراین، کپسوله‌سازی این رنگدانه در مواد نانو یا ریزساختارهایی مانند نانوالیاف، ریزذرات یا نانوذرات می‌تواند به بهبود پایداری ترکیبات زیست‌فعال آن کمک کند یا حتی آن را افزایش دهد (٨٦). در مطالعه‌ای که توسط باکر و همکاران (٢٠٢٣) انجام شد، بهبود پایداری کلوئیدی کمپلکس‌های پکتین- فیکوسیانین با افزایش نسبت ترکیب (mixing ratio) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش محتوای پکتین، باعث تقویت واکنش‌های اولیه با پروتئین و کروموفور شده و در نتیجه، رنگ از آبی به فیروزه‌ای تغییر می‌کند. هم‌چنین، اندازه کمپلکس‌ها با افزایش غلظت پکتین از چند میکرومتر به مقیاس نانومتری کاهش یافت، اما فیکوسیانین به‌طور کامل در داخل کمپلکس‌ها محصور نشده و بخشی از آن به سطح کمپلکس متصل باقی ماند (٨٧). در مطالعه کاشی و همکاران (٢٠٢٤)، کاربرد صنعتی رنگدانه طبیعی خوراکی فیکوسیانین مستخرج از سیانوباکتری *Spirulina platensis* در تهیه بستنی با تاکید بر ویژگی‌های میکروبی و آنتی‌اکسیدانی را مورد سنجش قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که میزان چربی و قند کل، نقطه ذوب، ABTS و DPPH بستنی‌های غنی‌شده کاهش معناداری نسبت به کنترل داشته است. هم‌چنین میزان پروتئین، هوادهی، FRAP و به افزایش معناداری نسبت به کنترل داشته است. ارزیابی حسی نیز تفاوت معناداری در طعم، مزه، رنگ و قوام بستنی نسبت به کنترل نداشته است جز حس بویایی که نسبت به کنترل کاهش داشته است. علاوه بر آن، هیچ نشانی از حضور اشرشیا کلی، استافیلوکوکوس ارئوس و سالمونلا در طی روزهای مختلف یافت نگردید. نتایج ترکیبات فرار حاصل از آزمایش GC/MS در بستنی شاهد و بستنی غنی‌شده با ٢ درصد رنگدانه فیکوسیانین نشان از حضور ترکیباتی با خاصیت ضدمیکروبی و آنتی‌اکسیدانی دارد که نقش مهمی در ماندگاری و کیفیت بستنی دارد (٨٨). آک و همکاران (٢٠١٦)، خصوصیات تغذیه‌ای و فیزیکوشیمیایی نان غنی‌شده با میکروجلبک *Spirulina platensis* را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که ارزیابی حسی نان غنی‌شده با جلبک اسپیرولینا از نظر طعم، بافت، بو و پذیرش کلی مورد تأیید کارشناسان ارزیابی قرار گرفت. هم‌چنین، در بررسی ماندگاری نان غنی‌شده در شرایط محیطی مشاهده شد که جلبک اسپیرولینا موجود در محصول تأثیر مثبتی بر مهار کپک‌ها دارد. با توجه به این نتایج، استفاده از ریزجلبک‌ها می‌تواند کیفیت تغذیه‌ای نان را افزایش دهد (٨٩). در مطالعه‌ای دیگر، هرناندز لوپز و همکاران (٢٠٢٣) اثر اسپیرولینا (فیکوسیانین) را در

نان فرموله‌شده با آرد گندم دارای قدرت آلوئوگرافی متفاوت بررسی کردند. نتایج نشان داد که نان‌های حاوی ریزجلبک اسپیرولینا، در مقایسه با نمونه شاهد، تغییرات معنی‌داری در ویژگی‌های خود نشان دادند. ظرفیت آنتی‌اکسیدانی آن‌ها بالا بوده و این نان‌ها دارای رنگ سبز- آبی، و از لحاظ ارزیابی حسی دارای طعم، بو، بافت و پذیرش کلی مورد قبول واقع شده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که جلبک اسپیرولینا با خواص ارزشمند غذایی- دارویی در جهت غنی‌سازی فرآورده‌ها، به عنوان "محصولات سلامت محور" که می‌تواند سلامتی مصرف‌کننده را نیز تضمین نماید سوق دهد. با این وجود، استفاده از فیکوسیانین در غذا با محدودیت‌هایی مانند: حساسیت بالای این ترکیبات به حرارت، نور، واکنش‌های شیمیایی و اکسیداسیون، فراریت و تخریب آن‌ها در طول فرآوری و نگهداری، توزیع ناهمگن مواجه شود. هم‌چنین عطر و طعم آن‌ها ممکن است سبب تغییراتی در خواص حسی محصول غذایی گردد (٦١، ٩٠). بر این اساس، درون‌پوشانی ترکیبات زیست‌فعال موجود در ریزجلبک در مقیاس نانو می‌تواند روش مناسبی به‌منظور متعادل ساختن طعم و بو و جلوگیری از تخریب سریع آن باشد. اخیراً، جایگزینی و یا افزودن نانو ذرات و نانوکپسول‌ها به عنوان یک تغییر ساده در فرمولاسیون مواد غذایی در نظر گرفته می‌شود، که به‌طور بالقوه می‌تواند کارایی بهتری به حالت معمول ایجاد کند (٩١). بنابراین درون‌پوشانی راهی برای غلبه بر این دسته ناپایداری‌های ترکیبات زیست فعال است و امکان رهایش کنترل شده آن‌ها و افزایش پایداری ترکیبات را در محیط معده و روده فراهم می‌کند. به‌علاوه سرعت رهایش ترکیبات زیست‌فعال را می‌توان با کپسوله کردن آن‌ها کاهش داد و بدین‌صورت به‌عنوان ابزار مناسبی برای کنترل رهایش در سیستم‌های غذایی و دارورسانی مورد استفاده قرار داد (٨٦). به‌علاوه، فراسودمند نمودن مواد غذایی با استفاده از ترکیبات زیست‌فعال مانند فیکوسیانین ابزاری مناسب در جهت بهبود خصوصیات کیفی و حسی محصول و مصرف آن همراه با رژیم غذایی مطرح می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

استفاده از فناوری نانوریزپوشانی مزایای متعددی را در رابطه با ایمنی و کیفیت مواد غذایی ایجاد می‌کند. این فناوری توانسته است از تولید مواد غذایی تا مصرف، بر هر مرحله از پیشرفت از جمله افزایش تولید، ماندگاری طولانی‌تر، حفظ مواد مغذی، کنترل کیفیت و بسته‌بندی مواد غذایی تأثیر مثبت بگذارد. کاربردهای مستقیم بیش‌تر شامل نانونگهدارنده‌ها، نانوکپسولاسیون طعم‌ها، عطرها، آنتی‌اکسیدان‌ها، رنگدانه‌های طبیعی و ترکیبات زیست‌فعال مانند پلی‌فنل‌ها، ویتامین‌ها، اسیدهای چرب و غیره است. رنگدانه فیکوسیانین به دلیل دارا بودن خواص ضدمیکروبی، آنتی‌اکسیدانی و یک رنگدانه طبیعی، پتانسیل بالقوه‌ای جهت استفاده در فرمولاسیون فرآورده‌های غذایی به عنوان ماده مغذی (غنی‌سازی) و افزایش ماندگاری فرآورده‌ها را دارد. این ماده مضرات رنگ‌های سنتتیک را نداشته، بلکه اثرات درمانی (صنعت داروسازی) و پیشگیری از بیماری‌های مختلف (بیماری کم‌خونی، بیماری کبدی، چربی خون) آن به اثبات رسیده است. به‌طورکلی براساس نتایج مطالعات فوق، باتوجه به خواص زیستی بالای فیکوسیانین، استفاده از آن به عنوان نانوریزپوشانی در صنایع مختلف توصیه می‌کنند.

منابع

1. Villanueva, M. J., Morcillo, M., Tenorio, M. D., Mateos-Aparicio, I., Andrés, V., & Redondo-Cuenca, A. (2014). Health-promoting effects in the gut and influence on lipid metabolism of Himanthalia 136haracte and Gigartina pistillata in hypercholesterolaemic Wistar rats. *European Food Research Technology*, 238, 409-416.
2. Shannon, E., & Abu-Ghannam, N. (2019). Seaweeds as nutraceuticals for health and nutrition. *Phycologia*. 58, 563-577. **Doi: 10.1080/00318884.2019.1640533.**
3. Fratelli, C., Bürck, M., Silva-Neto, A. F., Oyama, L. M., De Rosso, V. V., & Braga, A. R. C. (2022). Green extraction process of food grade C-phycocyanin: Biological effects and metabolic study in mice. *Processes*, 10 (9), 1793.
4. Mogany, T., Kumari, S., Swalaha, F. M., & Bux, F. (2019). Extraction and haracterization of analytical grade C-phycocyanin from *Euhalothece* sp. *Journal of Applied Phycology*, 31, 1661-1674.
5. Altmann, B. A., & Rosenau, S. (2022). Spirulina as animal feed: Opportunities and challenges. *Foods*, 11 (7), 965.
6. Rahman, D. Y., Sarian, F. D., Van Wijk, A., Martinez-Garcia, M., & Van der Maarel, M. J. E. C. (2017). Thermostable phycocyanin from the red microalga Cyanidioschyzon merolae, a new natural blue food colorant. *Journal of Applied Phycology*, 29, 1233-1239.
7. Aoki, J., Sasaki, D., & Asayama, M. (2021). Development of a method for phycocyanin recovery from filamentous cyanobacteria and evaluation of its stability and antioxidant capacity. *BMC biotechnology*, 21 (1), 40.
8. Karazhyan, R. (2021). Optimization of microencapsulation process and use of pigments extracted from Algae spirulina platensis in food products. Iran national Science foundation Science deputy of presidenct. Support fund for researchers and technologists of the country. 1-105.
9. Ashaolu, T. J., Samborska, K., Lee, C. C., Tomas, M., Capanoglu, E., Tarhan, Ö… & Jafari, S. M. (2021). Phycocyanin, a super functional ingredient from algae; properties, purification characterization, and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 193, 2320-2331.
10. Minato, T., Teramoto, T., Adachi, N., Hung, N. K., Yamada, K., Kawasaki, M., & Yoon, K. S. (2021). Non-conventional octameric structure of C-phycocyanin. *Communications biology*, 4 (1), 1238.
11. Mao, M., Han, G., Zhao, Y., Xu, X., & Zhao, Y. (2024). A review of phycocyanin: Production, extraction, stability and food applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135860.
12. Suzery, M., Majid, D., Setyawan, D., & Sutanto, H. (2017, February). Improvement of stability and antioxidant activities by using phycocyanin-chitosan encapsulation technique. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 55, No. 1, p. 012052). IOP Publishing.
13. Zhang, S., Zhang, Z., Dadmohammadi, Y., Li, Y., Jaiswal, A., & Abbaspourrad, A. (2021). Whey protein improves the stability of C-phycocyanin in acidified conditions during light storage. *Food Chemistry*, 344, 128642.
14. Christwardana, M., Sutanto, H., Suzery, M., Amelia, D., & Aritonang, R. F. (2018). Kinetic study on the effects of sugar addition on the thermal degradation of phycocyanin from *Spirulina* sp. *Food bioscience*, 22, 85-90.
15. Li, W., Su, H. N., Pu, Y., Chen, J., Liu, L. N., Liu, Q., & Qin, S. (2019). Phycobiliproteins: Molecular structure, production, applications, and prospects. *Biotechnology Advances*, 37 (2), 340-353.
16. Zarandi Miandoab, Pouriosov, Farshad, Razavi, Seyedeh Fahimeh, & Chaparzadeh. (2022). Phycocyanin, a

Cyanobacterial Antioxidant: Structure, Function and Applications. *Plant Process and Function*, 1, 1-22.
17. Liu, Q., Huang, Y., Zhang, R., CAI, T., & CAI, Y. (2016). Medical application of Spirulina platensis derived C-phycocyanin. Evidence-Based Complementary and *Alternative Medicine*, 2016 (1), 7803846.
18. Shanmugam, A., Sigamani, S., Venkatachalam, H., Jayaraman, J. D., & Ramamurthy, D. (2017). Antibacterial activity of extracted phycocyanin from Oscillatoria sp. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 7 (3), 62-67.
19. de Morais, M. G., da Fontoura Prates, D., Moreira, J. B., Duarte, J. H., & Costa, J. A. V. (2018). Phycocyanin from microalgae: properties, extraction and purification, with some recent applications. *Industrial Biotechnology*, 14 (1), 30-37.
20. Sivasankari, S., Naganandhini, N., & Ravindran, D. (2014). Comparison of different extraction methods for phycocyanin extraction and yield from Spirulina platensis.
21. Albuquerque, B. R., Oliveira, M. B. P., Barros, L., & Ferreira, I. C. (2021). Could fruits be a reliable source of food colorants? Pros and cons of these natural additives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61 (5), 805-835.
22. Abiusi, F., Fernández, P. M., Canziani, S., Janssen, M., Wijffels, R. H., & Barbosa, M. (2022). Mixotrophic cultivation of Galdieria sulphuraria for C-phycocyanin and protein production. *Algal Research*, 61, 102603.
23. Chakroun, I., Haddaji, N., Fedhila, K., Maatallah, M., Mzoughi, R., Chaabouni, Y., & Bakhrouf, A. (2023). In Vitro Characterization of Limosilactobacillus reuteri Lac Ib01 (OL468126. 1) Isolated from Traditional Sheep Dry Sausage and Evaluation of the Activity of Arthrospira platensis or Phycocyanin on Its Growth-Promoting Ability. *Fermentation*, 9 (3), 248.
24. Tello, P., Sánchez, R., Trujillo-Cayado, L. A., Santos, J., & Vladisavljevic, G. (2023). Microfluidization and characterization of phycocyanin-based emulsions stabilised using fumed silica. *LWT*, 184, 115077.
25. Chen, H., Guo, X., Yu, S., Meng, H., Ai, C., Song, S., & Zhu, B. (2024). Phycocyanin/tannic acid complex nanoparticles as Pickering stabilizer with synergistic interfacial antioxidant properties. *Food Chemistry*, 434, 137353.
26. Sahin, O. I., Uzuner, K., Dundar, A. N., Parlak, M. E., Gul, L. B., Dagdelen, A. F., & Simsek, S. (2023). Functional properties and bioaccessibility of alginate based phycocyanin-honey hydrogels. *LWT*, 184, 115099.
27. Yu, H., Wang, H., Su, W., Song, Y., Zaky, A. A., Abd El-Aty, A. M., & Tan, M. (2022). Co-delivery of hydrophobic astaxanthin and hydrophilic phycocyanin by a pH-sensitive water-in-oil-in-water double emulsion-filled gellan gum hydrogel. *Food Hydrocolloids*, 131, 107810.
28. Iry, N., Nowruzi, B., & Ghazi, S. (2023). Study of the Effect of Phycocyanin Pigment on Physicochemical, Sensory, Microbial and Antioxidant Properties of Cheese. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, 12 (1), 55-76.
29. Hajjari, M. M., Golmakani, M. T., & Sharif, N. (2023). Electrospun zein/ C-phycocyanin composite: Simulation, characterization and therapeutic application. *Food Hydrocolloids*, 140, 108638.
30. Tavakoli, S., Mubango, E., Tian, L., ŃDri, Y. B., Tan, Y., Hong, H., & Luo, Y. (2023). Novel intelligent films containing anthocyanin and phycocyanin for nondestructively tracing fish spoilage. *Food Chemistry*, 402, 134203.
31. Chen, J., Wu, A., Yang, M., Ge, Y., Pristijono, P., Li, J., & Mi, H. (2021). Characterization of sodium alginate-based films incorporated with thymol for fresh-cut apple packaging. *Food Control*, 126, 108063.

32. Post, M. J. (2012). Cultured meat from stem cells: Challenges and prospects. *Meat science*, 92 (3), 297-301.
33. Park, S., Jung, S., Heo, J., Koh, W. G., Lee, S., & Hong, J. (2021). Chitosan/ cellulose-based porous nanofilm delivering C-phycocyanin: A novel platform for the production of cost-effective cultured meat. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13 (27), 32193-32204.
34. Chen, X., Wu, M., Yang, Q., & Wang, S. (2017). Preparation, characterization of food grade phycobiliproteins from Porphyra haitanensis and the application in liposome-meat system. *Lwt*, 77, 468-474.
35. Kuddus, M., Singh, P., Thomas, G., & Al-Hazimi, A. (2013). Recent developments in production and biotechnological applications of C-phycocyanin. *BioMed research international*, 2013 (1), 742859.
36. Morya, S., Kumar Chattu, V., Khalid, W., Zubair Khalid, M., & Siddeeg, A. (2023). Potential protein phycocyanin: an overview on its properties, extraction, and utilization. *International Journal of Food Properties*, 26 (2), 3160-3176.
37. Li, X., Hou, W., Lei, J., Chen, H., & Wang, Q. (2023). The unique light-harvesting system of the algal phycobilisome: structure, assembly components, and functions. *International Journal of Molecular Sciences*, 24 (11), 9733.
38. Patel, R., de Oliveira, A., Newby Jr, R., & Chu, T. (2019). Flow cytometric analysis of freshwater cyanobacteria: A case study. *Water*, 11 (7), 1422.
39. Chen, H., Qi, H., & Xiong, P. (2022). Phycobiliproteins-a family of algae-derived biliproteins: productions, characterization and pharmaceutical potentials. *Marine Drugs*, 20 (7), 450.
40. Zhu, Q., Yan, K., Dong, Y., & Wang, Y. (2023). Rhizosphere bacterial communities and soil nutrient conditions reveal sexual dimorphism of Populus deltoides. *Journal of Forestry Research*, 34 (3), 761-771.
41. Hachicha, R., Elleuch, F., Ben Hlima, H., Dubessay, P., de Baynast, H., Delattre, C., & Fendri, I. (2022). Biomolecules from microalgae and cyanobacteria: Applications and market survey. *Applied Sciences*, 12 (4), 1924.
42. Singh, S. K., Kaur, R., Bansal, A., Kapur, S., & Sundaram, S. (2020). Biotechnological exploitation of cyanobacteria and microalgae for bioactive compounds. In Biotechnological production of bioactive compounds (pp. 221-259). Elsevier.
43. Devi, A., Kalwani, M., Patil, K., Kumari, A., Tyagi, A., Shukla, P., & Pabbi, S. (2023). Microalgal bio-pigments: production and enhancement strategies to enrich microalgae-derived pigments. In Cyanobacterial Biotechnology in the 21st Century (pp. 85-106). Singapore: Springer Nature Singapore.
44. Athiyappan, K. D., Routray, W., & Paramasivan, B. (2024). Phycocyanin from Spirulina: a comprehensive review on cultivation, extraction, purification, and its application in food and allied industries. *Food and Humanity*, 100235.
45. Fernandes, R., Campos, J., Serra, M., Fidalgo, J., Almeida, H., Casas, A., & Barros, A. I. (2023). Exploring the benefits of phycocyanin: From Spirulina cultivation to its widespread applications. *Pharmaceuticals*, 16 (4), 592.
46. Jiang, L., Wang, Y., Yin, Q., Liu, G., Liu, H., Huang, Y., & Li, B. (2017). Phycocyanin: a potential drug for cancer treatment. *Journal of Cancer*, 8 (17), 3416.
47. Heisnam, R., Keithellakpam, O. S., Kshetrimayum, V., Mukherjee, P. K., & Sharma, N. (2022). Phycocyanin purified from Westiellopsis sp. induces caspase 3 mediated apoptosis in breast cancer cell line MDA-MB-231. *Algal Research*, 68, 102852.
48. Wen, Y., Wen, P., Hu, T. G., Linhardt, R. J., Zong, M. H., Wu, H., & Chen, Z. Y. (2020). Encapsulation of phycocyanin by prebiotics and polysaccharides-based electrospun fibers and improved colon cancer prevention effects. *International*

journal of biological macromolecules, 149, 672-681.

49. Hao, S., Li, Q., Liu, Y., Li, F., Yang, Q., Wang, J., & Wang, C. (2021). Insulin receptor substrate 1 is involved in the phycocyanin-mediated antineoplastic function of non-small cell lung cancer cells. *Molecules*, 26 (16), 4711.
50. Dranseikienė, D., Balčiūnaitė-Murzienė, G., Karosienė, J., Morudov, D., Juodžiukynienė, N., Hudz, N., & Savickienė, N. (2022). Cyano-phycocyanin: Mechanisms of action on human skin and future perspectives in medicine. *Plants*, 11 (9), 1249.
51. Koh, E. J., Kim, K. J., Choi, J., Kang, D. H., & Lee, B. Y. (2018). Spirulina maxima extract prevents cell death through BDNF activation against amyloid beta 1-42 (Aβ1-42) induced neurotoxicity in PC12 cells. *Neuroscience letters*, 673, 33-38.
52. Lee, S. H., Lee, J. E., Kim, Y., & Lee, S. Y. (2016). The production of high purity phycocyanin by Spirulina platensis using light-emitting diodes based two-stage cultivation. *Applied biochemistry and biotechnology*, 178, 382-395.
53. Blas-Valdivia, V., Moran-Dorantes, D. N., Rojas-Franco, P., Franco-Colin, M., Mirhosseini, N., Davarnejad, R., & Cano-Europa, E. (2022). C-Phycocyanin prevents acute myocardial infarction-induced oxidative stress, inflammation and cardiac damage. *Pharmaceutical Biology*, 60 (1), 755-763.
54. Li, B., Gao, M. H., Chu, X. M., Teng, L., Lv, C. Y., Yang, P., & Yin, Q. F. (2015). The synergistic antitumor effects of all-trans retinoic acid and C-phycocyanin on the lung cancer A549 cells in vitro and in vivo. *European journal of pharmacology*, 749, 107-114.
55. Bingula, R., Dupuis, C., Pichon, C., Berthon, J. Y., Filaire, M., Pigeon, L., & Filaire, E. (2016). Study of the Effects of Betaine and/or C-Phycocyanin on the Growth of Lung Cancer A549 Cells in Vitro and In Vivo. *Journal of oncology*, 2016 (1), 8162952.
56. Liu, Q., Li, W., & Qin, S. (2020). Therapeutic effect of phycocyanin on acute liver oxidative damage caused by X-ray. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 130, 110553.
57. Saini, M. K., & Sanyal, S. N. (2014). Piroxicam and c-phycocyanin prevent colon carcinogenesis by inhibition of membrane fluidity and canonical Wnt/ β-catenin signaling while up-regulating ligand dependent transcription factor PPARγ. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 68 (5), 537-550.
58. Li, B., Chu, X., Gao, M., & Li, W. (2010). Apoptotic mechanism of MCF-7 breast cells in vivo and in vitro induced by photodynamic therapy with C-phycocyanin. *Acta Biochim Biophys Sin*, 42 (1), 80-89.
59. Li, B., Gao, M. H., Chu, X. M., Teng, L., Lv, C. Y., Yang, P., & Yin, Q. F. (2015). The synergistic antitumor effects of all-trans retinoic acid and C-phycocyanin on the lung cancer A549 cells in vitro and in vivo. *European journal of pharmacology*, 749, 107-114.
60. Liu, Z., Fu, X., Huang, W., Li, C., Wang, X., & Huang, B. (2018). Photodynamic effect and mechanism study of selenium-enriched phycocyanin from Spirulina platensis against liver tumours. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 180, 89-97.
61. El Asbahani, A., Miladi, K., Badri, W., Sala, M., Addi, E. A., Casabianca, H., & Elaissari, A. (2015). Essential oils: From extraction to encapsulation. *International journal of pharmaceutics*, 483 (1-2), 220-243.
62. Hadiyanto, H., Khoironi, A., Dianratri, I., Suherman, S., Muhammad, F., & Vaidyanathan, S. (2021). Interactions between polyethylene and polypropylene microplastics and *Spirulina* sp. microalgae in aquatic systems. *Heliyon*, 7 (8).
63. Safari, R., Raftani Amiri, Z., & Esmaeilzadeh Kenari, R. (2020). Antioxidant and antibacterial activities of C-phycocyanin from common name

Spirulina platensis. *Iranian journal of fisheries sciences*, 19 (4), 1911-1927.
64. Sonani, R. R., Singh, N. K., Kumar, J., Thakar, D., & Madamwar, D. (2014). Concurrent purification and antioxidant activity of phycobiliproteins from Lyngbya sp. A09DM: An antioxidant and anti-aging potential of phycoerythrin in Caenorhabditis elegans. *Process Biochemistry*, 49 (10), 1757-1766.
65. Bermejo, P., Piñero, E., & Villar, Á. M. (2008). Iron-chelating ability and antioxidant properties of phycocyanin isolated from a protean extract of Spirulinaplatensis. *Food chemistry*, 110 (2), 436-445.
66. Ismaiel, M. M., El-Ayouty, Y. M., & Piercey-Normore, M. D. (2014). Antioxidants characterization in selected cyanobacteria. *Annals of Microbiology*, 64, 1223-1230.
67. Choudhury, N., Meghwal, M., & Das, K. (2021). Microencapsulation: An overview on concepts, methods, properties and applications in foods. *Food Frontiers*, 2 (4), 426-442.
68. Gouin, S. (2004). Microencapsulation: industrial appraisal of existing technologies and trends. *Trends in food science & technology*, 15 (7-8), 330-347.
69. Garti, N., & Reichman, D. (1993). Hydrocolloids as food emulsifiers and stabilizers. *Food structure*, 12 (4), 3.
70. Akbarbaglu, Z., Kamali, S. A., Sarabandi, K., & Sadeghi, M. A. (2021). Effect of maltodextrin and gum Arabic carriers on the physicochemical properties and antioxidant activity of spraydried casein hydrolysates.
71. Zhang, Y., Jiang, Z., Zhang, Z., Ding, Y., Yu, Q., & Li, Y. (2019). Polysaccharide assisted microencapsulation for volatile phase change materials with a fluorescent retention indicator. *Chemical Engineering Journal*, 359, 1234-1243.
72. Baqeri, F., Nejatian, M., Abbaszadeh, S., & Taghdir, M. (2020). The effect of gelatin and thymol-loaded nanostructured lipid carrier on physicochemical, rheological, and sensory properties of sesame paste/date syrup blends as a snack bar. *Journal of texture studies*, 51 (3), 501-510.
73. Kim, W., Wang, Y., & Selomulya, C. (2020). Dairy and plant proteins as natural food emulsifiers. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 261-272.
74. Safari, R., Raftani Amiri, Z., Reyhani Poul, S., & Ghaffari, H. (2022). Nanoencapsulation of phycocyanin extracted from the alga Spirulina (Spirulina platensis) and use of nanoparticles in ice cream formulation. *Journal of food science and technology (Iran)*, 19 (123), 145-159.
75. Dewi, E. N., Purnamayati, L., & Kurniasih, R. A. (2016). Antioxidant activities of phycocyanin microcapsules using maltodextrin and carrageenan as coating materials. *Jurnal Teknologi*, 78 (4-2).
76. Martelli, G., Folli, C., Visai, L., Daglia, M., & Ferrari, D. (2014). Thermal stability improvement of blue colorant C-Phycocyanin from Spirulina platensis for food industry applications. *Process Biochemistry*, 49 (1), 154-159.
77. Marzieh Hosseini, S., Shahbazizadeh, S., Khosravi-Darani, K., & Reza Mozafari, M. (2013). Spirulina paltensis: Food and function. *Current Nutrition & Food Science*, 9 (3), 189-193.
78. Khazai Pool, E., Shahidi, F., Mortazavi, S. A., & Mohebi, M. (2015). The effect of different levels of Spirulina Platensis micro-algae and agar and guar hydrocolloids on water activity, texture, color parameters and Overall acceptability of kiwi puree-based fruit pastille. *Journal of food science and technology (Iran)*, 12 (48), 47-59.
79. Kurniasih, R. A., Purnamayati, L., Amalia, U., & Dewi, E. N. (2018). Formulation and characterization of phycocyanin microcapsules within maltodextrin-alginate. *Agritech*, 38 (1), 23-29.
80. Purnamayati, L., Dewi, E. N., & Kurniasih, R. A. (2018, February). Phycocyanin stability in microcapsules

processed by spray drying method using different inlet temperature. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 116, No. 1, p. 012076). IOP Publishing.

81. Sawaqabi, F. D. 2018. Microencapsulation of algae extract in nanoliposome and its preservation effect in mayonnaise. Dissertation for the doctoral course of the Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University.
82. Safari, R., Raftani Amiri, Z., & Esmaeilzadeh Kenari, R. (2017). Evaluation of the effect of temperature, time and pH on stability of phycocyanin extracted from Spirulina platensis. *Iranian Scientific Fisheries Journal*, 26 (5), 85-93.
83. Yagoubi, A., Shahidi, F., Mohebbi, M., Varidi, M., & Golmohammadzadeh Sh. (2018). Production of Spirulina platensis phycocyanin nanocarriers and evaluation of their physicochemical properties. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12 (1), 378-385.
84. Shabkhiz, M. A., Pirouzi Fard, M., Mahdavinia, G., & Pirsa, S. (2021). Investigating the release and antibacterial properties of alginate hydrogel containing beta-cyclodextrin nanoparticles loaded with Danai thyme essential oil. *Iranian journal of food science and industry*. 18, 115.
85. Rigi, M., Ojagh, S. M., Alishahi, A., & Hasani, S. (2022). Extraction of phycocyanin from spirulina microalgae and evaluation of the stability of nanoliposomes incorporated with pigment against environmental conditions. *Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics*, 11 (1), 18-30.
86. Adjali, A., Clarot, I., Chen, Z., Marchioni, E., & Boudier, A. (2022). Physicochemical degradation of phycocyanin and means to improve its stability: A short review. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 12 (3), 406-414.
87. Buecker, S., Gibis, M., Bartmann, L., Bussler, S., & Weiss, J. (2024). Improving the colloidal stability of pectin–phycocyanin complexes by increasing the mixing ratio. *Journal of Food Science*, 89 (2), 1086-1097.
88. Kashi, M. S., Ghazi, S., & Nowruzi, B. (2024). Industrial application of Natural Phycocyanin Edible Pigment isolated from Spirulina platensis in Preparation of fortified ice cream with emphasize on microbial and antioxident properties. *Iranian journal of food science and industry*, 21 (149).
89. Ak, B., Avsaroglu, E., Isik, O., Özyurt, G., Kafkas, E., & Etyemez, M. (2016). Nutritional and physicochemical characteristics of bread enriched with microalgae Spirulina platensis. *Int. J. Eng. Res. Appl.* 6 (9).
90. Hernández-López, I., Alamprese, C., Cappa, C., Prieto-Santiago, V., Abadias, M., & Aguiló-Aguayo, I. (2023). Effect of Spirulina in bread formulated with wheat flours of different alveograph strength. *Foods*, 12 (20), 3724.
91. Souza, J. M., Caldas, A. L., Tohidi, S. D., Molina, J., Souto, A. P., Fangueiro, R., & Zille, A. (2014). Properties and controlled release of chitosan microencapsulated limonene oil. Revista Brasileira de Farmacognosia, 24, 691-698.
92. Beheshtipour, H., Mortazavian, A. M., Haratian, P., & Darani, K. K. (2012). Effects of Chlorella vulgaris and Arthrospira platensis addition on viability of probiotic bacteria in yogurt and its biochemical properties. *European Food Research and Technology*, 235, 719-728.
93. Özkan, G., & Bilek, S. E. (2014). Microencapsulation of natural food colourants. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 3 (3), 145-156.
94. Mazinani, S., Fadaie, V., & Khosravi-Darani, K. (2015). Viability of Lactobacillus acidophilus in sinbiotic ultrafiltration white cheese containing powdered *Menthe longifolia* L. and Spirulina platensis.

95. Salehifar, M., Shahbazizadeh, S., Khosravi-Darani, K., Behmadi, H., & Ferdowsi, R. (2013). Possibility of using microalgae Spirulina platensis powder in industrial production of Iranian traditional cookies. *Iranian Journal of Nutrition Sciences and Food Technology*, 7 (4), 63-72.

96. Isani, G., Ferlizza, E., Bertocchi, M., Dalmonte, T., Menotta, S., Fedrizzi, G., & Andreani, G. (2022). Iron Content, Iron Speciation and Phycocyanin in Commercial Samples of *Arthrospira* spp. *International Journal of Molecular Sciences*, 23 (22), 13949.