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 phycocyanin nanocapsule on color and textural properties of enriched functional breads

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

1. Ph.D. Graduate 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, 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: 08.16.2025
Revised: 08.28.2025
Accepted: 08.30.2025

Keywords:
Bread Color,
Bread Texture,
Maltodextrin,
Nanocapsulation,
Phycocyanin,
Soy Protein Isolate

ABSTRACT

Background and Objectives: Increasing interest in natural pigments has emerged due to the reduced use of synthetic colorants in the food industry. Phycocyanin, a bioactive pigment from *Spirulina platensis*, exhibits antioxidant and anticancer properties but is sensitive to heat, light, and pH, limiting its application. This study aimed to evaluate the effect of different phycocyanin nanocapsule coatings on the color and texture of enriched functional breads.

Materials and Methods: Phycocyanin powder was nanocapsulated with whey protein, soy protein isolate, and a combination of soy protein isolate + maltodextrin. Non-encapsulated phycocyanin (control) and free phycocyanin were also tested. The nanocapsules were incorporated into bread formulations, and color parameters (L*, a*, b*, ΔE) and texture hardness were measured. Data were analyzed using ANOVA at a significance level of ($P<0.05$).

Results: The type of coating significantly affected color and texture. In bread crumb, the soy protein isolate + maltodextrin coating produced the highest lightness (L* = 79.33) and total color difference (ΔE = 81.10), while free phycocyanin showed the lowest values. In the bread crust, this coating also exhibited the highest redness (a* = 12.67) and yellowness (b* = 19.40). Regarding texture, bread with whey protein had the highest hardness (1732 N), and bread with soy protein isolate had the softest texture (1075.33 N).

Conclusion: Nanocapsulation of phycocyanin with a soy protein isolate + maltodextrin coating improved color stability, enhanced visual attributes,

and maintained desirable bread texture. This approach offers a promising strategy for developing functional breads and natural food products with higher consumer acceptance.

Cite this article: Bahramizade, Issa, Ojagh, Seyed Mahdi, Alishahi, Alireza, Hasani, Shirin, Zolfeghari, Mehdi. 2026. Effect of phycocyanin nanocapsule on color and textural properties of enriched functional breads. *Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics*, 14 (4), 169-181.

© The Author(s).
Doi: 10.22069/japu.2025.23975.1972
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

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

بررسی اثر نانوکپسول فیکوسیانین بر ویژگی‌های رنگی و بافتی نان‌های عملکردی غنی‌شده

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

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

۲. نویسنده مسئول، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، 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، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران. رایانامه: alishahi@gau.ac.ir

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

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

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰٤/۰٥/۲٥
تاریخ ویرایش: ۱٤۰٤/۰٦/۰٦
تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۰٦/۰۸

واژه‌های کلیدی:
ایزوله سویا،
بافت نان،
رنگ نان،
فیکوسیانین،
مالتودکسترین،
نانوکپسوله‌سازی

چکیده

سابقه و هدف: روند کاهش استفاده از رنگ‌های مصنوعی در صنایع غذایی، افزایش یافته است. فیکوسیانین، رنگدانه‌ای زیست‌فعال استخراج‌شده از جلبک *Spirulina platensis*، به‌دلیل خواص آنتی‌اکسیدانی و ضدسرطانی مورد توجه قرار گرفته است؛ اما حساسیت آن به حرارت، نور و pH، کاربردش را محدود می‌سازد. نانوکپسوله‌سازی راهکاری مؤثر برای بهبود پایداری این رنگدانه است. هدف مطالعه حاضر بررسی اثر نوع پوشش نانوکپسول فیکوسیانین بر ویژگی‌های رنگی و بافتی نان غنی‌شده بود.

مواد و روش‌ها: پودر فیکوسیانین با پوشش‌های پروتئین آب‌پنیر، ایزوله پروتئین سویا و ترکیب ایزوله سویا + مالتودکسترین نانوکپسوله شد. تیمار شاهد (فیکوسیانین بدون کپسوله‌سازی) و فیکوسیانین آزاد نیز به‌عنوان کنترل به‌کار رفتند. نانوپودرها در فرمولاسیون نان استفاده و شاخص‌های رنگ (L*, a*, b*, ΔE) و سختی بافت اندازه‌گیری شد. داده‌ها با آزمون ANOVA در سطح (P<۰/۰٥) تحلیل گردید.

یافته‌ها: نوع پوشش اثر معنی‌داری بر شاخص‌های رنگ و بافت داشت. در نان، پوشش ایزوله سویا + مالتودکسترین بیش‌ترین روشنایی (L*=۷۹/۳۳) و اختلاف رنگ کلی (ΔE=۸۱/۱۰) را

ایجاد کرد، در حالی‌که فیکوسیانین آزاد پایین‌ترین مقادیر رنگی را نشان داد. در پوسته نان نیز این پوشش بالاترین قرمزی (a*=۱۲/٦۷)، زردی (b*=۱۹/٤۰) را داشت. از نظر بافت، نان با پروتئین آب‌پنیر سخت‌ترین بافت (۱۷۳۲ نیوتون) و نان با ایزوله سویا نرم‌ترین بافت (۱۰۷۵/۳۳ نیوتون) را نشان داد.

نتیجه‌گیری: نانوکپسوله‌سازی فیکوسیانین با ترکیب ایزوله سویا + مالتودکسترین موجب بهبود پایداری رنگ، ارتقای ویژگی‌های ظاهری و حفظ بافت مطلوب نان شد. این رویکرد می‌تواند راهکاری مناسب برای توسعه نان‌های عملکردی و محصولات غذایی طبیعی با پذیرش بالاتر مصرف‌کنندگان باشد.

استناد: بهرامی‌زاده، عیسی، اجاق، سید مهدی، عالیشاهی، علیرضا، حسنی، شیرین، ذوالفقاری، مهدی (۱۴۰۴). بررسی اثر نانوکپسول فیکوسیانین بر ویژگی‌های رنگی و بافتی نان‌های عملکردی غنی‌شده. *نشریه بهره‌برداری و پرورش آبزیان*، ۱۴ (۴)، ۱۸۱-۱۶۹.
Doi: 10.22069/japu.2025.23975.1972

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

مقدمه

در دهه‌های اخیر، استفاده گسترده از رنگ‌های مصنوعی در صنایع غذایی به‌دلیل قیمت پایین، پایداری بالا و شدت رنگ زیاد رایج بوده است، اما نگرانی‌های روزافزون درباره تأثیرات منفی این رنگ‌ها بر سلامت انسان و محیط‌زیست باعث تغییر گرایش صنایع و مصرف‌کنندگان به استفاده از رنگدانه‌های طبیعی شده است (۱). رنگدانه‌های طبیعی به‌دلیل ایمنی بالا، منشأ زیستی و اثرات مثبت سلامت‌محور (مانند خاصیت آنتی‌اکسیدانی، ضدسرطانی و ضدالتهابی) توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند (۲). اما کاربرد این ترکیبات در صنایع غذایی با چالش‌هایی از جمله ناپایداری در برابر حرارت، نور، اکسیژن و pHهای نامناسب مواجه است که در نهایت منجر به تخریب ساختاری رنگدانه، تغییر رنگ و کاهش اثرگذاری آن‌ها در طول فرآوری و نگهداری می‌شود (۱). یکی از مهم‌ترین رنگدانه‌های طبیعی که اخیراً در صنعت غذا و دارو مورد توجه قرار گرفته، فیکوسیانین است. فیکوسیانین یک رنگدانه طبیعی سبز – آبی محلول در آب است که به‌صورت پودری غیرسمی، بدون بو و کمی شیرین از جلبک *Spirulina platensis*، به‌دست می‌آید. 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 (۳). با این‌حال، فیکوسیانین نیز همانند سایر رنگ‌های طبیعی، نسبت به حرارت، نور، pH و اکسیداسیون بسیار حساس بوده و این ناپایداری، استفاده مستقیم از آن را در محصولات غذایی محدود می‌کند (۲). برای رفع این محدودیت‌ها، فناوری نانوکپسوله‌سازی به‌عنوان یک راهکار نوین و مؤثر در حفظ و بهبود پایداری ترکیبات زیست‌فعال، از جمله رنگدانه‌ها، مطرح شده است. در این فرآیند، فیکوسیانین در یک ماتریس محافظ (دیواره کپسول) محصور می‌شود که مانع از تماس مستقیم آن با عوامل تخریب‌زا می‌گردد (٤). نوع و ترکیب مواد پوششی نقش حیاتی در کارایی کپسوله‌سازی دارد. دیواره‌های زیست‌سازگار متشکل از پروتئین‌های گیاهی (مانند ایزوله پروتئین سویا)، پروتئین‌های جانوری (مانند پروتئین آب‌پنیر) و کربوهیدرات‌ها (مانند مالتودکسترین) به‌دلیل ویژگی‌هایی چون خاصیت امولسیفایری، پایداری حرارتی، توانایی تشکیل ژل، و تعامل مناسب با رنگدانه‌ها، در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند (٤، ٥ و ٦). برخی گزارش‌ها نشان داده‌اند که ترکیب این مواد دیواره‌ای می‌تواند منجر به سینرژیسم[1] عملکردی، افزایش راندمان کپسوله‌سازی، پایداری بیش‌تر فیکوسیانین و بهبود خواص حسی محصول نهایی شود (۷ و ۸). به ویژه ترکیب ایزوله سویا و مالتودکسترین عملکرد بهتری در کنترل رهایش، حفظ رنگ و ممانعت از اکسیداسیون نشان داده است (۹). از آن‌جا که رنگ و بافت از عوامل تعیین‌کننده در پذیرش فرآورده تولیدی توسط مصرف‌کننده هستند، استفاده از نانوکپسول‌های فیکوسیانین به‌عنوان عامل بهبوددهنده ویژگی‌های عملکردی و حسی، به‌ویژه در محصولات نانوایی، مورد توجه قرار گرفته است. نان، به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین محصولات غذایی، بستر مناسبی برای غنی‌سازی با ترکیبات زیست‌فعال محسوب می‌شود (۷، ۱۰ و ۱۱). در همین راستا، هدف این پژوهش

۱- سینرژیسم به حالتی اطلاق می‌شود که اثر ترکیب دو یا چند ماده، از مجموع اثرات آن‌ها به‌صورت مجزا بیش‌تر باشد

بررسی تأثیر نوع پوشش نانوکپسول فیکوسیانین (تیمار شاهد، پروتئین آب‌پنیر، ایزوله پروتئین سویا و ترکیب ایزوله سویا و مالتودکسترین) از جلبک *Spirulina platensis*، بر ویژگی‌های رنگی و بافتی نان غنی‌شده بود. هم‌چنین به‌منظور ارزیابی عملکرد نانوکپسوله‌سازی، نتایج حاصل با نمونه حاوی فیکوسیانین آزاد (فاقد کپسوله‌سازی) نیز مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

مواد: برای انجام این پژوهش، فیکوسیانین از شرکت مجموعه تولیدی بازرگانی قفنوس (biogreens)، پروتئین آب پنیر و ایزوله پروتئین سویا (۹۰ درصد پروتئین) از گروه بازرگانی پارس بالک، ترانس گلوتامیناز میکروبی (TGase) و مالتودکسترین (DE=۱۸–۲۰) از شرکت سیگما آلدریچ، و سایر مواد شیمیایی مورد نیاز با درجه خلوص بالا از شرکت مرک خریداری شد. برای تهیه محلول‌ها از آب مقطر و آب دی‌یونیزه استفاده گردید.

آماده‌سازی نانوامولسیون حاوی فیکوسیانین: برای انجام این پژوهش، ابتدا محلول‌های ایزوله پروتئین سویا و آب‌پنیر با غلظت ۱۰ درصد (وزنی/حجمی) در آب دیونیزه حاوی فیکوسیانین (با غلظت ۲/۵ درصد) و مالتودکسترین تهیه و pH هر دو محلول روی ۷ تنظیم شد. مخلوط پروتئینی با نسبت ۱:۱ به مدت ۳۰ دقیقه با همزن مغناطیسی همگن شد. سپس به منظور ایجاد پیوندهای عرضی بین مولکول‌های پروتئینی و افزایش پایداری ساختار نانوامولسیون، ۵ واحد آنزیم ترانس‌گلوتامیناز (TGase) به‌ازای هر گرم پروتئین به مخلوط افزوده شد. نمونه‌ها در دمای ٤۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۳ ساعت انکوبه شدند تا فرآیند اتصال عرضی کامل شود. پس از آن، ۰/۵ درصد مالتودکسترین به مخلوط افزوده و مجدد به مدت ۳۰ دقیقه در دمای محیط هم زده شد. در مرحله فاز روغنی، ۰/٤ گرم فیکوسیانین در ۱۰۰ گرم روغن کلزا حل شده و پس از ۳۰ دقیقه گرمایش در ٤۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۳۰ دقیقه تحت امواج فراصوت قرار گرفت. این فاز روغنی (۵ درصد v/v) به فاز آبی (۹۵ درصد) اضافه و امولسیون درشت با هموژنایزر با دور ۷۰۰۰ rpm به مدت ۵ دقیقه تهیه شد. در نهایت، نمونه‌ها با هموژنایزر فشار بالا در ۵۰ مگاپاسکال و طی ۳ پاس همگن شده و سپس با سونیکاتور پروبی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به نانوامولسیون یکنواخت تبدیل شدند (۱۲). فرمولاسیون تیمارهای مختلف نانوامولسیون (F1 تا F7) بر اساس ترکیبات مختلف دیواره شامل ایزوله پروتئین سویا، پروتئین آب‌پنیر و مالتودکسترین طراحی شد، که شرح دقیق آن‌ها در جداول مربوطه پارامترهای اندازه‌گیری ارائه شده است.

خشک کردن انجمادی: امولسیون تهیه شده به مدت ۲٤ ساعت در دمای ۸۰– درجه سانتی‌گراد منجمد شده و پس از آن در خشک‌کن انجمادی در دمای ٤۰– درجه سانتی‌گراد و فشار ۰/۷ میلی‌بار به مدت ۷۲ ساعت خشک شد. این پودرها در کیسه‌های پلاستیکی کاملاً درب بسته در فریزر ۷۰– درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند تا آزمایش‌های فیزیکوشیمیایی لازم بر روی آن‌ها صوت بگیرد.

اندازه‌گیری رنگ: رنگ کپسول‌های فیکوسیانین با استفاده از کروم‌سنج قابل حمل Konica Minolta CR-400 (ساخت ژاپن) ارزیابی شد (۱۳).

روش تهیه و ارزیابی ویژگی‌های نان غنی‌شده با فیکوسیانین: نان غنی‌شده با فیکوسیانین با افزودن ۲/۵ درصد از نانوکپسول تیمار بهینه (ترکیب ایزوله

پروتئین سویا و مالتودکسترین) بر پایه وزن خمیر تهیه شد. نانوکپسول‌ها ابتدا در آب حل شده و سپس با سایر مواد اولیه ترکیب و خمیرسازی انجام گرفت. پس از تخمیر، خمیرها در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۰ دقیقه پخته شدند. هم‌چنین برای تعیین سختی نان غنی شده با پودر نانوکپسوله و نان شاهد از دستگاه بافت‌سنج (TA-XT-PLUS Texture Analyzer, UK) جهت تعیین نیروی لازم برای سوراخ کردن بافت نان از آزمون نفوذسنجی (Penetration) استفاده شد. برای ارزیابی خصوصیات نمونه، نمونه‌ها به ابعاد ۳×۳ سانتی‌متر برش داده شد و از پروب ٦ میلی‌متری، نفوذ ۵۰ درصد و سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه استفاده شد (١٤).

آزمون رنگ‌سنجی نان‌های تولیدشده: به‌منظور استخراج پارامترهای رنگ پوسته و مغز از دوربین دیجیتال Canon EOS 80D (ساخت ژاپن) استفاده شده و فضای رنگی عکس‌های گرفته شده با استفاده از نرم‌افزار Image J تحلیل شدند و فضای رنگ تصاویر از RGB به L^* و b^* و a^* تبدیل گردید (۱۵).

$$\sqrt{(0b*-b*)+2(0a*-a*)+2(0L*-L*)=\ \Delta E}$$

که در آن، 0L*، 0a*، 0b* مقادیر رنگ نمونه شاهد و L* و b* و a* مقادیر رنگ نمونه‌های تیماری هستند. این شاخص میزان تغییر رنگ را به صورت عددی نشان می‌دهد و امکان مقایسه دقیق نمونه‌ها را فراهم می‌کند.

آنالیزهای آماری: از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ به‌منظور آنالیز آماری استفاده گردید. آزمون شاپیرو–ویلک به‌منظور بررسی نرمال بودن داده‌ها استفاده شد و در مقایساتی که دارای چند گروه و یک متغیر باشند از آزمون ANOVA یک‌طرفه و درصورتی‌که دارای چند گروه و دو متغیر باشند آزمون ANOVA دوطرفه استفاده می شود. برای بررسی مقایسه میانگین‌ها نیز آزمون دانکن انجام می شود. سطح معنی‌داری در آنالیزها (P<۰/۰۵) در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

شاخص رنگ نانوفیکوسیانین: اندازه‌گیری رنگ پودر نانوپوشانی فیکوسیانین: نوع پوشش نانوکپسول تأثیر قابل‌توجهی روی ویژگی‌های رنگی دارد. تیمار شاهد بیش‌ترین روشنایی (L=۳۹/۲۰) و تیمار با مالتودکسترین کم‌ترین روشنایی (L=۲٦/۹۷) را داشت که به واکنش میلارد و حضور رنگدانه‌ها در ماتریکس مربوط است (۷ و ١٦). تیمار با ایزوله سویا بیش‌ترین قرمزی (a=١٤/٦٣) را نشان داد که به آمینواسیدهای فعال و واکنش میلارد مربوط می‌شود، در حالی‌که تیمار پروتئین آب پنیر و مالتودکسترین کم‌ترین قرمزی (a=۰/۸۰) را داشت (٤٥). بیش‌ترین زردی (b=۱۸/۸۳) در تیمار شاهد بود و کم‌ترین آن (b=٤/۷۰) در تیمار مالتودکسترین، که این پوشش باعث کاهش زردی و همگنی رنگ می‌شود (۱۷). هم‌چنین شاخص تغییر رنگ (ΔE) در تیمار شاهد بالاترین (٤٤/۷۷) و در تیمار مالتودکسترین پایین‌ترین (۲۹/۷۷) بود، که نشان‌دهنده بهبود ثبات رنگی با مالتودکسترین است (۷) (جدول ۱).

جدول ١- ارزیابی رنگ پودر نانوریزپوشانی‌شده فیکوسیانین با دیواره‌های مختلف مالتودکسترین، پروتئین ایزوله سویا و پروتئین آب پنیر.

Table 1. Color analysis of phycocyanin Nano-encapsulated powder using different wall materials (maltodextrin, soy protein isolate, and whey protein).

ΔE	b*	a*	L*	تیمارها Treatments	ردیف ROW
44.77±1.18 [a]	18.83±1.33 [a]	10.47±0.46 [c]	39.20±0.69 [a]	F1 رنگدانه خام (تیمار شاهد) Raw Pigment (Control Treatment)	1
35.93±0.31 [c]	12.77±0.46 [c]	14.63±0.46 [a]	30.02±0.40 [c]	F2 نانوکپسول حاوی رنگدانه با پوشش پروتئین ایزوله سویا Pigment-loaded nanocapsules coated with soy protein isolate	2
37.10±1.51 [b]	14.37±1.67 [c]	5.50±0.80 [e]	33.07±1.06 [b]	F3 نانوکپسول حاوی رنگدانه با پوشش پروتئین آب پنیر Pigment-loaded nanocapsules coated with whey protein	3
29.77±0.55 [c]	4.70±0.80 [d]	11.80±0.00 [b]	26.97±0.46 [d]	F4 نانوکپسول حاوی رنگدانه با مالتودکسترین Pigment-loaded nanocapsules coated with maltodextrin	4
43.14±0.57 [e]	18.80±1.39 [a]	6.03±0.46 [e]	37.27±0.46 [a]	F5 نانوکپسول حاوی رنگدانه با پوشش پروتئین ایزوله سویا + پروتئین آب پنیر Pigment-loaded nanocapsules coated with a combination of soy protein isolate and whey protein	5
33.17±1.50 [d]	2.63±0.40 [e]	9.13±0.92 [d]	31.77±1.69 [c]	F6 نانوکپسول حاوی رنگدانه با پوشش پروتئین ایزوله سویا + مالتودکسترین Pigment-loaded nanocapsules coated with a combination of soy protein isolate and maltodextrin	6
38.63±1.05 [b]	16.50±0.00 [b]	0.80±0.80 [f]	34.09±1.20 [b]	F7 نانوکپسول حاوی رنگدانه با پوشش پروتئین آب پنیر + مالتوکسترین Pigment-loaded nanocapsules coated with a combination of whey protein and maltodextrin	7

اعداد بیانگر میانگین ± انحراف معیار می‌باشند. حروف مختلف کوچک در هر ستون بیانگر اختلاف معنی‌دار میان تیمارهای مختلف در یک زمان نمونه برداری می‌باشد

Data are presented as mean ± standard deviation. Different lowercase letters within a column indicate statistically significant differences among treatments at the same sampling time

در کل، نانوکپسول‌های با ایزوله سویا رنگ گرم‌تر و جذاب‌تری دارند و برای محصولاتی با رنگ‌های گرم مناسب‌اند، در حالی‌که نانوکپسول‌های مالتودکسترین رنگ خنثی‌تر و یکنواخت‌تری ایجاد می‌کنند و برای محصولات نیازمند رنگ ملایم‌تر بهترند.

اندازه‌گیری رنگ پودر نانو فیکوسیانین غنی‌شده در مغز نان: نتایج نشان داد نوع پوشش نانوکپسول تأثیر معنی‌داری بر شاخص‌های رنگ مغز نان دارد (P<٠/٠٥). تیمار حاوی پروتئین ایزوله سویا و مالتودکسترین (F6) بالاترین مقادیر روشنایی (L^*=٧٩/٣٣)، قرمزی (a^*=٧/٤٠)، زردی (b^*=١٣/٥٠) و اختلاف رنگ کلی (ΔE=٨١/١٠) را نشان داد، در حالی‌که تیمار فیکوسیانین آزاد پایین‌ترین مقادیر را ثبت کرد. این بهبود رنگ در نمونه‌های نانوکپسوله‌شده به پایداری بالاتر رنگدانه، واکنش میلارد مؤثرتر و پراکندگی یکنواخت‌تر فیکوسیانین نسبت داده می‌شود (جدول ٢).

جدول ۲- نتایج اندازه‌گیری رنگ پودر نانو فیکوسیانین غنی‌شده در پوسته نان با دیواره‌های مختلف مالتودکسترین، پروتئین ایزوله سویا و پروتئین آب پنیر.

Table 2. Results of color analysis of bread crust enriched with phycocyanin Nano-powder using different wall materials (maltodextrin, soy protein isolate, and whey protein).

ردیف ROW	تیمارها Treatments	L*	a*	b*	ΔE
1	نانوکپسول حاوی رنگدانه با پوشش پروتئین ایزوله سویا + مالتودکسترین Pigment-loaded nanocapsules coated with a combination of soy protein isolate and maltodextrin	79.33±1.01 [a]	7.40±0.36 [a]	13.50±0.53 [a]	81.10±0.98 [a]
2	رنگدانه خام (تیمار شاهد) Raw Pigment (Control Treatment)	77.10±0.56 [a]	4.30±0.40 [b]	9.87±0.42 [b]	77.87±0.71 [b]
3	فیکوسیانین آزاد Free Phycocyanin	64.23±2.89 [b]	1.13±0.42 [c]	3.13±1.36 [c]	64.10±3.05 [c]

اعداد بیانگر میانگین ± انحراف معیار می‌باشند. حروف مختلف کوچک در هر ستون بیانگر اختلاف معنی‌دار میان تیمارهای مختلف در یک زمان نمونه‌برداری می‌باشد

Data are presented as mean ± standard deviation. Different lowercase letters within a column indicate statistically significant differences among treatments at the same sampling time

نتایج با مطالعات پیشین هم‌خوان بوده (۷ و ۱۶)، و نقش حفاظتی نانوکپسوله‌سازی در حفظ و تقویت ویژگی‌های رنگی نان را تأیید می‌کند.

شاخص رنگ نانوفیکوسیانین

اندازه‌گیری رنگ پودر نانو فیکوسیانین غنی شده در پوسته نان: نتایج نشان داد که نوع پوشش نانوکپسول تأثیر معنی‌داری بر شاخص‌های رنگی پوسته نان غنی‌شده دارد ($P<۰/۰۵$). بیش‌ترین مقدار روشنایی (L^*) مربوط به تیمار نانو کپسول ایزوله سویا و مالتودکسترین ($L^*=۷۰/۴۳$) و کم‌ترین آن مربوط به تیمار فیکوسیانین آزاد با ($L^*=۵۰/۴۷$) بود. این تفاوت از نظرآماری معنی‌دار بود ($P<۰/۰۵$). کاهش شاخص روشنایی (L^*) در نمونه‌های حاوی فیکوسیانین آزاد، به‌دلیل وقوع واکنش میلارد و هم‌چنین توزیع یکنواخت‌تر رنگدانه در سطح نمونه نسبت داده شد. در شاخص قرمزی (a^*)، تیمار ایزوله سویا و مالتودکسترین بیش‌ترین مقدار (۱۲/۶۷) را داشت که نشان‌دهنده حفظ بهتر رنگ قرمز فیکوسیانین در این پوشش بود. در مقابل، فیکوسیانین آزاد کم‌ترین قرمزی (۰/۳۳) را داشت که ناشی از تخریب رنگدانه در برابر حرارت و اکسیداسیون است. هم‌چنین، بالاترین شاخص زردی ($b^*=۱۹/۴۰$) و بیش‌ترین اختلاف رنگ کلی ($\Delta E=۷۴/۳۷$) نیز در تیمار ایزوله سویا + مالتودکسترین مشاهده شد، که بیانگر شدت و پایداری بالای رنگ در فرآیند پخت است. تیمار فیکوسیانین آزاد با $b^*=۴/۵۳$ و $\Delta E=۵۱/۰۳$، پایداری رنگ بسیار کم‌تری را نشان داد (جدول ۳).

جدول ۳- نتایج اندازه‌گیری رنگ پودر نانو فیکوسیانین غنی‌شده در پوسته نان با دیواره‌های مختلف مالتودکسترین، پروتئین ایزوله سویا و پروتئین آب پنیر.

Table 3. Results of color analysis of bread crust enriched with phycocyanin Nano-powder using different wall materials (maltodextrin, soy protein isolate, and whey protein).

ΔE	b*	a*	L*	تیمارها Treatments	ردیف ROW
74.37±0.70 [a]	19.40±0.35 [a]	12.67±0.57 [a]	70.43±0.85 [a]	نانوکپسول حاوی رنگدانه با پوشش پروتئین ایزوله سویا + مالتودکسترین Pigment-loaded nanocapsules coated with a combination of soy protein isolate and maltodextrin	1
65.10±3.12 [b]	9.90±0.44 [b]	5.67±0.85 [b]	64.60±2.84 [a]	رنگدانه خام (تیمار شاهد) Raw Pigment (Control Treatment)	2
51.03±1.10 [c]	4.53±1.55 [c]	0.33±0.42 [c]	50.47±1.22 [b]	فیکوسیانین آزاد Free Phycocyanin	3

اعداد بیانگر میانگین ± انحراف معیار می‌باشند. حروف مختلف کوچک در هر ستون بیانگر اختلاف معنی‌دار میان تیمارهای مختلف در یک زمان نمونه‌برداری می‌باشد

Data are presented as mean ± standard deviation. Different lowercase letters within a column indicate statistically significant differences among treatments at the same sampling time

در مجموع، نانوکپسوله‌سازی با ترکیب ایزوله سویا و مالتودکسترین موجب افزایش پایداری رنگ، حفظ جلوه ظاهری نان، و محافظت از رنگدانه در برابر تخریب‌های حرارتی و نوری شد (شکل ۱). این نتایج با پژوهش‌های پیشین از جمله اجاق و همکاران (۷) و اژیلارسی و همکاران (١٦) هم‌راستا بوده و نقش محافظتی پوشش‌های نانو در حفظ ترکیبات زیست‌فعال را تأیید می‌کند.

شکل ۱- رنگ آبی فیکوسیانین در نان طی پخت در ۱۸۰ درجه سلسیوس پایدار ماند. این پایداری به دلیل نانوکپسول‌های پوشش‌دار با پروتئین ایزوله سویا و مالتودکسترین است که از رنگدانه در برابر حرارت، اکسیداسیون و تغییرات pH محافظت می‌کنند و تماس مستقیم رنگ با عوامل محیطی را کاهش می‌دهند.

Figure 1. The blue color of phycocyanin in the enriched bread remained stable during baking at 180 °C. This thermal stability is attributed to the double-layered nanocapsules coated with soy protein isolate and maltodextrin, which effectively protect the pigment from heat degradation, oxidation, and pH fluctuations by limiting direct exposure to environmental factors, thereby preserving the color in the dough matrix during baking.

ارزیابی بافت نان غنی‌شده با نانوپوشانی فیکوسیانین: ارزیابی بافت نان‌های غنی‌شده با نانوکپسول‌های فیکوسیانین نشان داد نوع پوشش پروتئینی تأثیر زیادی بر سختی نان دارد. نان با پوشش پروتئین آب‌پنیر سفت‌ترین بافت (۱۷۳۲/۰۰ نیوتون) و نان با ایزوله سویا نرم‌ترین بافت (۱۰۷۵/۳۳ نیوتون) را داشت که حتی از نمونه شاهد نیز نرم‌تر بود ($P<0/05$) (جدول ٤).

جدول ٤- ارزیابی بافت نان غنی‌شده با نانوپوشانی فیکوسیانین با دیواره‌های مختلف مالتودکسترین، پروتئین ایزوله سویا و پروتئین آب پنیر بر حسب نیوتن.

Table 4. Texture analysis of bread fortified with phycocyanin nanoencapsulation using different wall materials (maltodextrin, soy protein isolate, and whey protein), expressed in Newtons (N).

ردیف ROW	تیمارها Treatments	میانگین ± انحراف معیار Mean ± standard deviation
1	رنگدانه خام (تیمار شاهد) Raw Pigment (Control Treatment)	1666.12 ± 369.42 [b]
2	نانوکپسول حاوی رنگدانه با پوشش پروتئین ایزوله سویا Pigment-loaded nanocapsules coated with soy protein isolate	1075.33 ± 166.57 [c]
3	نانوکپسول حاوی رنگدانه با پوشش پروتئین آب پنیر Pigment-loaded nanocapsules coated with whey protein	1732.00 ± 431.26 [a]

اعداد بیانگر میانگین ± انحراف معیار می‌باشند. حروف مختلف کوچک در هر ستون بیانگر اختلاف معنی‌دار میان تیمارهای مختلف در یک زمان نمونه‌برداری می‌باشد

Data are presented as mean ± standard deviation. Different lowercase letters within a column indicate statistically significant differences among treatments at the same sampling time

پروتئین آب‌پنیر با ایجاد شبکه متراکم گلوتنی موجب سفتی بیش‌تر شد، در حالی‌که ایزوله سویا با ایجاد تعاملات ملایم‌تر با نشاسته و گلوتن، بافتی نرم‌تر و مرطوب‌تر فراهم کرد. ترکیب ایزوله سویا و مالتودکسترین نیز با حفظ بافت مناسب، راندمان بالای کپسوله‌سازی و پایداری رنگدانه، عملکرد مطلوبی داشت (شکل ۲). ایزوله سویا با خواص امولسیفایری و توان مهار اکسیداسیون، از رهایش سریع رنگدانه جلوگیری کرده و بافت نان را در برابر بیاتی حفظ نمود. یافته‌ها با مطالعات قبلی (١٦، ١٨ و ١٩) همخوانی دارد و نشان می‌دهد انتخاب پوشش مناسب نانوکپسول‌ها می‌تواند کیفیت بافتی نان را بهبود داده و در توسعه نان‌های عملکردی مؤثر باشد.

شکل ۲- بافت نان غنی‌شده با نانوپوشانی فیکوسیانین با دیواره‌های مختلف مالتودکسترین، پروتئین ایزوله سویا و پروتئین آب پنیر (تیمار نانوکپسول حاوی رنگدانه با پوشش پروتئین ایزوله سویا و مالتودکسترین).

Figure 2. Microstructural texture of bread enriched with phycocyanin-loaded nanocapsules formulated using different wall materials, including maltodextrin, soy protein isolate, and whey protein (treatment containing nanocapsules coated with soy protein isolate and maltodextrin).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که نوع پوشش نانوکپسول نقش اساسی در بهبود ویژگی‌های رنگی و بافتی نان‌های غنی‌شده با فیکوسیانین دارد. استفاده از ترکیب ایزوله سویا و مالتودکسترین منجر به افزایش روشنایی، قرمزی و زردی در نان، همراه با کاهش سختی بافت شد که به نانوپوشانی بهتر، پایداری بیش‌تر رنگدانه و تعامل مناسب با ساختار گلوتن و نشاسته نسبت داده می‌شود. نانوکپسول‌های مبتنی بر ایزوله سویا و مالتودکسترین با ایجاد رنگ گرم، یکنواخت و بافت نرم‌تر، قابلیت بالایی در توسعه نان‌های عملکردی و سالم دارند. این یافته‌ها کاربرد بالقوه نانوکپسوله‌سازی را در بهبود کیفیت حسی و عملکردی محصولات نانوایی را تأیید می‌کند.

منابع

1. Amchova, P., Siska, F., & Ruda-Kucerova, J. (2024). Food Safety and Health Concerns of Synthetic Food Colors: *An Update. Toxics*, 12, 466. **https://doi.org/10.3390/toxics12070466.**
2. Oplatowska-Stachowiak, M., & Elliott, C. T. (2017). Food colors: Existing and emerging food safety concerns. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57(3), 524-548.
3. 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.
4. Bahramizade, I., Ojagh, S. M., Alishahi, A. R., Hasani, Sh., & Zolfaghari, M. (2025). Effect of spirulina phycocyanin on health and safety of food products. *Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics*, 14 (1), 117-142.
5. 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.

6. Ezhilarasi, P. N. (2013). Nano encapsulation techniques for food bioactive components: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 6(3), 628-647.
7. Ojagh, S. M. (2010). Encapsulation of fish oil using Nano liposomes. *Food Chemistry,* 122(4), 1125-1131.
8. Tonon, R. V. (2008). Microencapsulation of ascorbic acid by spray drying: Effect of process parameters on product properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(2), 163-170.
9. Kandasamy, S., & Naveen, R. (2022). A review on the encapsulation of bioactive components using spray-drying and freeze-drying techniques. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8), e14059.
10. Bagheri, H., et al. (2020). Encapsulation of bioactive using maltodextrin and soy protein isolate: Characterization and applications. *Journal of Food Engineering*, 276, 109884.
11. Pashetak, M, (2025). Microencapsulation of Active Compounds for Bread Fortification: A Novel Approach to Enhancing Nutritional Value, National Conference on Healthy Bread (From Farm to Table), Isfahan, Iran. Available at: **https://civilica.com/doc/2243619.**
12. Kim, W., Wang, Y., Ye, Q., Yao, Y., & Selomulya, C. (2023). Enzymatic cross-linking of pea and whey proteins to enhance emulsifying and encapsulation properties. *Food and Bio products processing.* 139, 204-215.
13. Marty, S., Baker, K. W., & Marangoni, A. G. (2009). Optimization of a scanner imaging technique to accurately study oil migration kinetics. *Food research international*, 42(3), 368-373.
14. Razavizadegan, J. S. H., Tabatabaee Yazdi, F. S., Mortazavi, A., Karimi, M., Ghiafeh Davoodi, M. A., & Pourfarzad Hematian Soorki, A. (2009). Comparison and effect of formulated coating improving agents for shelf-life extension of Barbari bread. *EJFPP*. 1(4), 43-62.
15. Shahidi Noghabi, M., & Molaveisi, M. (2020). Using Arabic gum, maltodextrin and inulin for wall compounds microencapsulation and rapid release of the bioactive compounds from cardamom essential oil in saliva. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, 9(1), 57-72.
16. Ezhilarasi, P. N., Indrani, D., Jena, B. S., & Anandharamakrishnan, C. (2014). Microencapsulation of Garcinia fruit extract by spray drying and its effect on bread quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(6), 1116-1123.
17. Takeungwongtrakul, S., Benjakul, S., & Aran, H. (2016). Characteristics and oxidative stability of bread fortified with encapsulated shrimp oil. *Ital. J. Food Sci.* 27(4), 476-86.
18. Ghaemi, P., Arabshahi Delouee, S., & Alami, M. (2022). Effect of whey protein concentrate, soy protein isolate and basil seed gum on some physicochemical and sensory properties of rice flour based gluten-free batter and cake. *Journal of food science and technology (Iran)*, 19(127), 139-154.
19. Conto, de. L. C., Oliveira, R. S. P., Martin, L. G. P., Chang, Y. K., & Steel, C. J. (2012). Effects of the addition of microencapsulated omega-3 and rosemary extract on the technological and sensory quality of white pan bread. *LWT-Food Science and Technology*, 45(1), 103-109.