

بررسی برهم کنش‌های پروتئین-ترکیبات فنلی و تأثیر آن در توسعه سیستم‌های غذایی

حامد حسن زاده^۱، دنیا میناسیان^۲، بشیر بهرامی^۳

۱- استادیار، گروه صنایع غذایی و بهداشت، دانشکده پیرادامپزشکی، دانشگاه ایلام

۲- دانشجوی دکتری علوم و صنایع غذایی دانشگاه ارومیه

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی دانشگاه ارومیه

Email: (h.hassanzadeh@ilam.ac.ir)

Email: (d.minasian28@gmail.com)

چکیده

پروتئین‌های رژیم غذایی و ترکیبات فنلی معمولاً ترکیباتی همزیستی هستند که به راحتی با یکدیگر تعامل می‌کنند تا کمپلکس‌هایی را در طیف گسترده‌ای از سیستم‌های غذایی ایجاد کنند. لذا در این بررسی جدیدترین مطالعات در مورد برهم کنش‌های پروتئین-ترکیبات فنلی رژیم غذایی مورد بررسی قرار گرفته است و به پایداری آنها در طول فرآوری و ذخیره سازی مواد غذایی، تأثیر بر کیفیت محصول و ساخت سیستم‌های تحویل جدید برای ترکیبات زیست فعال نیز پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: ترکیبات زیست فعال، ترکیبات فنلی، پروتئین‌های غذایی، برهمکنش پروتئین-ترکیبات فنلی

۱. مقدمه

پروتئین‌های رژیمی، در شت مغذی‌های ضروری برای بدن انسان و همچنین اجزای حیاتی غذا هستند تا عملکرد و کیفیت منحصربه‌فردی را به محصولات مرتبط منتقل کنند. در سیستم‌های هیبریدی پیچیده، پروتئین‌های رژیم غذایی با ترکیبات دیگر، مانند ترکیبات فنلی، کربوهیدرات‌ها و لیپیدها تعامل دارند، که منجر به تغییرات ساختاری می‌شود که ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های تغذیه‌ای و بیولوژیکی آنها دارد [۹]. ترکیبات فنلی، متابولیت‌های ثانویه به طور گسترده در گیاهان پخش شده‌اند که یکی از منابع اصلی فیتوکمیکال‌های طبیعی برای استفاده انسان هستند. براساس ماهیت اسکلت کربنی آنها، ترکیبات فنلی را می‌توان به زیرگروه‌هایی مانند فلاونوئیدها، اسیدهای فنولیک، تانن‌ها و استیلین‌ها و کورکومینوئیدها و ... طبقه بندی کرد [۲۲]. اکنون به خوبی ثابت شده است که فنولیک‌ها دارای یک سری ویژگی‌های سلامتی

بخش هستند، به ویژه خواص آنتی اکسیدانی، ضد میکروبی، ضد چاقی، ضد دیابتی و ضد سرطانی. در این بین، نشان داده شده است ترکیبات فنلی که با پروتئین‌های رژیم غذایی بر هم کنش دارند، کمپلکس‌های محلول یا نامحلول با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اصلاح شده هر دو مولکول واکنش دهنده تشکیل می‌شوند [۳۰].

این برهم کنش بین مولکولی را می‌توان به راحتی نه تنها در طول فرمولاسیون و فرآوری محصول، بلکه در هنگام مصرف همزمان و ترکیب در دستگاه گوارش از سان نیز القا کرد. در نتیجه تغییرات مرتبط با آن از منظر علمی، صنعتی و اقتصادی مورد توجه صنایع قرار گرفته است. از نظر مکانیکی، پروتئین‌های خوراک می‌توانند با ترکیبات فنلی از طریق برهمکنش‌های غیر کووالانسی یا کووالانسی کمپلکس‌هایی تشکیل دهند. فرآیند غیر کووالانسی توسط نیروهای برگشت پذیر مانند پیوند هیدروژنی، برهم کنش‌های آبگریز و پیوندهای یونی مشخص می‌شود. در حالی که برهمکنش‌های کووالانسی با تشکیل پیوندهای برگشت ناپذیر بین هر دو مولکول تحت شرایط خاص به عنوان مثال شرایط قلیایی یا وجود اکسیدازهای فنولیک مشخص می‌شود [۱۸، ۱۲]، اگرچه هر دو مکانیسم واکنش می‌توانند بر ساختارهای شیمیایی پروتئین‌ها و ترکیبات فنولیک تأثیر متقابل بگذارند. در نتیجه باعث ایجاد تغییراتی در ویژگی‌های تغذیه‌ای، عملکردی و بیولوژیکی آنها و همچنین کیفیت محصول می‌شود. قبلاً اعتقاد بر این بود که برهم کنش پروتئین-فنولیک عمدتاً خواص هر دو ماده، مانند کاهش حلالیت و قابلیت هضم پروتئین، و پوشش زیست فراهمی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی فنولیک‌ها را بدتر می‌کند [۱۶].

برخی از تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که کمپلکس‌های پروتئین-فنولی ممکن است اثرات جزئی یا حتی مثبتی بر شایستگی‌های خود داشته باشند، که عمدتاً به ترکیبات برهمکنش، شرایط اطراف، و روش‌های آماده‌سازی و غیره تکیه می‌کنند [۱۸، ۲۰]. از طریق طراحی مناسب کونژوگ‌های پروتئین-فنولیک‌ها، اجرای آنها برای تولید محصولات غذایی یا مواد مغذی با عملکرد بهبود یافته و مشخصه‌های کیفی نیز می‌تواند امکان پذیر باشد. امروزه، به جای هدف قرار دادن ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ترکیبات غذایی منفرد، تحقیقات در مورد رفتارهای واقعی آن‌هایی که تحت تأثیر ماتریکس‌ها قرار می‌گیرند، اهمیت قابل توجهی به دست آورده‌اند. پروتئین‌های رژیمی و ترکیبات فنلی نمونه‌های خوبی از این موضوع هستند، زیرا در طیف وسیعی از مواد غذایی وجود دارند و بنابراین ارتباط آنها به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اهمیت موضوع، این بررسی پیشرفت‌های اخیر در زمینه برهم کنش‌های پروتئین-ترکیبات فنولیک رژیم غذایی را مورد بررسی قرار می‌دهد.

۲. شیمی اتصال پروتئین به ترکیبات فنلی: برهمکنش‌های غیر کووالانسی و کووالانسی

ترکیبات فنلی می‌توانند با پروتئین‌های رژیم غذایی از طریق دو مکانیسم مختلف برهمکنش داشته باشند: برهمکنش‌های غیر کووالانسی و کووالانسی. برهمکنش غیر کووالانسی برگشت پذیر است و معمولاً شامل چهار نوع نیروی اتصالی است: پیوند هیدروژنی، برهمکنش‌های آبگریز، برهمکنش‌های الکترواستاتیکی و نیروی واندروالسی [۹،۱۶]. گروه‌های فنلی، اهداکنندگان هیدروژن شناخته شده‌ای هستند و می‌توانند با گروه‌های کربوکسیل پروتئین‌ها پیوند هیدروژنی ایجاد کنند. این پیوندهای هیدروژنی همچنین توسط برهمکنش‌های بین گروه‌های هیدروکسیل (-OH) فنولیک‌ها و اکسیژن یا نیتروژن، به ویژه OH گروه‌های آمینه پروتئین‌ها تشکیل می‌شوند [۱۶،۱۸]. برهمکنش آبگریز عمدتاً توسط ارتباط بین حلقه معطر غیرقطبی فنولیک‌ها و مکان‌های آبگریز مولکول‌های پروتئین ایجاد می‌شود. سایر نیروهای برهمکنش مانند برهمکنش الکترواستاتیکی از گروه‌های باردار روی سطح پروتئین (مانند گروه‌های ε- آمینه لیزین) و گروه‌های OH- از فنولیک‌ها ناشی می‌شود و نیروی واندروالسی برهمکنش بین اتم‌های تحت تأثیر حلال‌های اطراف است [۳۰]. به طور کلی، در تشکیل یک کمپلکس غیر کووالانسی پروتئین-فنولیک، پیوند هیدروژنی و برهمکنش‌های آبگریز دو نیروی محرکه اصلی هستند. به عنوان مثال، اپی گالوکاتچین-۳-گالات (EGCG) با بتا لاکتوگلوبولین عمدتاً از طریق برهمکنش‌های آبگریز تعامل داشتند، در حالی که پیوندهای هیدروژنی و نیروی واندروالسی نیروهای اصلی برای برهمکنش بتا لاکتوگلوبولین-فرولیک اسید/کلروژنیک اسید بودند [۱۰]. همانطور که در مطالعات ارائه شده است، اکثر کمپلکس‌های پروتئین-ترکیبات فنلی موجود در طبیعت از طریق پیوند غیر کووالانسی هستند. بنابراین، با وجود ویژگی ناپایدار آن، برهمکنش غیر کووالانسی پروتئین-ترکیبات فنلی نقش حیاتی در صنایع غذایی برای تأثیرگذاری بر توسعه و بهبود سیستم‌های غذایی مرتبط دارد. برهمکنش‌های کووالانسی بین پروتئین‌ها و فنل‌ها با تشکیل پیوندهای کووالانسی بین هر دو مولکول واکنش مشخص می‌شود که می‌تواند با روش‌های آنزیمی و غیر آنزیمی به دست آید. واکنش قلیایی و پیوند رادیکال آزاد دو روش متداول غیر آنزیمی برای مشخص کردن پیوندهای کووالانسی پروتئین-ترکیبات فنلی هستند. در شرایط قلیایی (یعنی pH ۹) با قرار گرفتن آزاد در معرض هوا، ترکیبات فنلی به اکسیداسیون حساس هستند و می‌توانند به آسانی اکسید شوند و سمی کینون‌ها را تشکیل دهند که متعاقباً به کینون‌ها بازآرایی می‌شوند. این محصولات میانی بسیار واکنش پذیر می‌توانند با باقی مانده‌های اسید آمینه نوکلئوفیل (مانند Met، Lys، Try و Cys) در زنجیره‌های پلی پپتیدی واکنش دهند و در نتیجه پیوندهای عرضی کووالانسی بین پروتئین‌ها و ترکیبات فنلی ایجاد کنند [۳۰].

برای روش پیوند رادیکال آزاد، پراکسید هیدروژن و اسید آسکوربیک اغلب به عنوان یک جفت ردوکس برای تولید رادیکال‌های هیدروکسیل استفاده می‌شود، که می‌تواند اسیدهای آمینه را در زنجیره جانبی پروتئین‌ها اکسید کند و به دنبال آن واکنش با فنل‌ها برای ایجاد مزدوجات متقاطع ایجاد می‌شود [۶،۲۶]. با توجه به

رویکردهای آنزیمی، فنولیک اکسیداز، به عنوان مثال، لاکاز و تیروزیناز بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند. مشابه روش قلیایی، فنولها ابتدا به سمی کینون یا کینون میانی اکسید شدند که توسط زنجیره‌های جانبی برای ایجاد پیوندهای کووالانسی C-N یا C-S بین مولکولها از طریق واکنش‌های غیر آنزیمی مورد حمله قرار گرفتند. در مقایسه با برهمکنش غیر کووالانسی، برهمکنش کووالانسی در طول فرمولاسیون و فرآوری مواد غذایی برگشت ناپذیر و نسبتاً پایدار است، در حالی که هر دو مکانیسم می‌توانند ساختار شیمیایی طرفین واکنش را تحت تأثیر قرار دهند و متعاقباً تغییرات در ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، عملکردی و بیولوژیکی در آنها ایجاد شود [۳۰].

۲. عوامل موثر بر تشکیل کمپلکس پروتئین-ترکیبات فنلی

۲-۱. عوامل داخلی

برای بررسی کاربردهای مناسب برهمکنش‌های پروتئین-ترکیبات فنلی، عواملی که بر رفتارهای اتصال آنها تأثیر می‌گذارند باید درک شوند. می‌توان آن‌ها را به عنوان جنبه‌های داخلی و خارجی طبقه بندی کرد. عوامل داخلی به ساختارهای شیمیایی ذاتی پروتئین‌ها و فنولیک‌های درگیر، همراه با غلظت‌های متناظر آن‌ها در سیستم اشاره دارد. توانایی پروتئین‌های رژیم غذایی برای برهمکنش با فنولیک‌ها ارتباط نزدیکی با وزن مولکولی (MW)، آبگریزی، ساختار و ترکیب/توالی اسیدهای آمینه دارد [۱۶، ۳۱]. هیدروفوبی به دلیل تقویت برهمکنش‌های آبگریز باعث اتصال قوی بین پروتئین‌ها و فنولیک‌ها می‌شود. پروتئین‌هایی با محتوای بالاتر آمینو اسیدهای اساسی و پرولین و ساختار نسبتاً بزرگ‌تر، از نظر ساختاری بازتر و انعطاف‌پذیر، فرصت بیشتری برای تعامل با پلی‌فنولها دارند. علاوه بر این، پارامترهای پروتئین، مانند ویژگی‌های سطحی، بارهای کلی و ساختارهای ثانویه نشان داده شد که با اتصال غیر کووالانسی پروتئین‌های رژیم غذایی به برخی از ترکیبات فنلی به درجات مختلف ارتباط دارند [۳۰]. در مورد ویژگی‌های فنولیک، آبگریزی، MW، انعطاف‌پذیری ساختاری و وجود گروه‌های عاملی شامل گروه‌های هیدروکسیل، متیل و گلیکوزیل عوامل اصلی مؤثر بر ظرفیت اتصال آنها به پروتئین‌ها هستند [۲۷].

۲-۲. عوامل خارجی

شرایط محیطی، از جمله دما، pH، غلظت نمک، و حضور معرف‌های خاص، عوامل خارجی اولیه‌ای هستند که بر برهمکنش بین پروتئین‌ها و ترکیبات فنلی تأثیر می‌گذارند [۳۰]. دما می‌تواند تغییراتی در ساختار پروتئین، حالیت لیگاندها و استحکام پیوندهای غیر کووالانسی خاص برای تأثیرگذاری در برهمکنش‌ها ایجاد کند. نشان داده شد که دنا توره شدن پروتئین‌ها در اثر حرارت بر تمایلات پیوندی فنولیک‌ها به پروتئین‌ها در هر دو طرف تأثیر می‌گذارد [۳۰]. عملیات حرارتی سیستم‌های پروتئین-ترکیبات فنلی نیز ممکن است منجر به تغییرات کووالانسی شود، که ناشی از اکسیداسیون فنولیک‌ها به سمی کینون و واسطه‌های کینون است.

تحت pH های مختلف، نه تنها ساختارهای پروتئین ها، بلکه ویژگی های اتصال فنولیک ها نیز می تواند به طور برجسته تحت تأثیر قرار گیرد. ظرفیت رسوب پروتئین - ترکیبات فنولی، مانند انواع توت ها و چای، به pH حساس گزارش شده است، به ویژه در نزدیکی نقاط ایزوالکتریک پروتئین ها، که نشان دهنده تاثیر نیروهای آگریز بر برهمکنش است. ثابت شده است که افزایش pH از اسیدی به مقادیر خنثی باعث کاهش میل ترکیبی اسید فرولیک و کلروژنیک به BSA به دلیل کاهش مکان های اتصال از طریق تغییرات ساختاری سوم پروتئین گردید [۳۰]. به همین ترتیب، برهمکنش اسید فرولیک به ب-لاکتوگلوبولین در pH ۲/۴ ترجیح داده می شود، زیرا در مقایسه با فرم دایمر در pH ۷/۳ شکل مونومر حاوی تعداد بیشتری از نیروهای تثبیت کننده با باقیمانده های اطراف است [۱]. مطالعات متعددی وجود دارد که تأثیر قابل توجهی از غلظت نمک بر برهمکنش پروتئین-فنل را نشان می دهند. افزایش قدرت یونی با افزودن NaCl میل پیوندی کورستین به BSA را کاهش داد، که احتمالاً به بدنه هیدراتاسیون قوی تر پروتئین ها با برهمکنش های الکترواستاتیک محلول نسبت داده می شود [۱۹]. در مقابل، افزایش قدرت یونی در یک سیستم بافر، برهمکنش های بین اسید کلروژنیک و BSA را افزایش داد، که تا حدی توسط نیروهای آگریز میانجی گری شد [۱۷].

۳. تطبیق فعل و انفعالات پروتئین-فنولیک برای غذا

۳-۱. تأثیر برهمکنش های پروتئین-فنولیک بر کیفیت غذا

اگرچه بیشتر مطالعات بر روی ویژگی های فیزیکی شیمیایی اتصال پروتئین-ترکیبات فنلی در سیستم های مدل ساده شده متمرکز شده اند، گزارش های کمی وجود دارد که تلاش هایی را برای مطالعه تأثیر آنها بر پروفایل های کیفی (فرا تر از کیفیت تغذیه ای) ماتریکس های غذایی پیچیده (در نظر گرفتن محصولات لبنی، نانوائی و آب میوه ها به عنوان نمونه های خوب) انجام می دهد. گنجاندن فنولیک های کائو یا قهوه در شیر بر برخی ویژگی های عملکردی پروتئین های شیر مانند حالیت، شکل پذیری، پایداری حرارتی و پایداری میکروبیولوژیکی تأثیر می گذارد [۳۰]. افزودن پلی فنل های انگور سیاه قبل از تخمیر ماست بر تعداد کلنی ها و مورفولوژی کشت های آغازگر و همچنین خاصیت کشسانی و ویسکوزیته مجموعه ماست ها تأثیر می گذارد [۳۰]. نان اغلب با مواد غنی از فنل غنی می شود تا فواید سلامتی بخش آن را تقویت کند. فنولیک های اضافه شده ممکن است با پروتئین های گندم برهمکنش داشته باشند و ژلاتینه شدن و بیات شدن نشا سته را به تأخیر بیندازند، که بیشتر بر خواص خمیر و کیفیت نان تأثیر می گذارد [۲۸]. هنگامی که آرد گندم با پودر برگ کینوا مخلوط شد، افزایش خطی در سختی، انسجام و صمغی مغز نان مشاهده شد [۲۴]. در مقایسه، افزودن تفاله انگور به تدریج جذب آب خمیر را کاهش داد و سختی، درخشندگی و زردی بیسکویت های گندم غنی شده را کاهش داد [۱۵]. آبمیوه و شراب نیز معمولاً سیستم های طبیعی

برای کمپلکس‌های پروتئینی-فنل هستند، و وجود کمپلکس‌های فنلی-پروتئینی بزرگ ممکن است باعث ایجاد کدورت و کاهش پایداری محصولات نوشیدنی مرتبط شود [۲۳]. برهمکنش بین پروتئین‌ها و ترکیبات فنلی می‌تواند بر ویژگی‌های حسی و رنگی سیستم‌های غذایی مخلوط تأثیر بگذارد. نشان داده شد که اتصال پروتئین-فنولیک باعث کاهش شدت درک برخی از طعم‌های غذا می‌شود. علاوه بر این، برخی از پلی‌فنول‌ها دارای رنگ‌های متمایز هستند، به عنوان مثال، PA و آنتوسیانین‌ها [۳۰]. درک تغییرات آنها در ویژگی‌های رنگ پس از اتصال پروتئین در محصولات غذایی رایج ضروری است. بدتر شدن احتمالی رنگ آنها در کمپلکس‌ها در حین فرآوری، حمل و نقل و نگهداری مواد غذایی نیز باید در نظر گرفته شود. به عنوان مثال، اتصال غیرکووالانسی مالویدین-۳-O-گلوکوزید به کازئین‌های a و b شیر تأثیر مثبتی بر پایداری نور عصاره‌های غنی از آنتوسیانین پوست انگور داشت [۷]. این پیامدهای ذکر شده در بالا نمونه‌های خوبی از چگونگی تأثیر متقابل پروتئین-فنولیک موجود در همه جا بر ویژگی‌های کیفی محصولات حاصل را ارائه می‌دهند. بنابراین چنین تأثیراتی را می‌توان برای به دست آوردن غذاهای با کیفیت بالا با ویژگی‌های زیست‌فعالی و عملکردی تقویت شده تنظیم کرد.

۳-۲. پایداری کمپلکس‌های پروتئین-ترکیبات فنلی در طول فرآوری و ذخیره سازی

همانطور که در بالا ذکر شد، عوامل متعددی وجود دارد که می‌تواند بر تشکیل کمپلکس‌های پروتئین-فنلی در سیستم‌های مختلف تأثیر بگذارد. درک پارامترهایی که پیوند بین مولکول‌های خاص را تعیین می‌کنند به تقویت آن برهمکنش مورد نظر کمک می‌کند یا آن تعاملات نامطلوب در محصولات غذایی مرتبط را از هم جدا می‌کند. به عنوان مثال، برای افزودن ویژگی‌های مرتبط با اتصال به شیر، شرایط جفت بهینه بین اسید کافئیک و پروتئین‌های شیر با بهینه‌سازی نسبت مولی پروتئین/فنولیک و pH اطراف به دست آمد [۳۰]. به موازات آن، برای افزایش جذب EGCG به پروتئین‌های هیدرولیز شده سویا، نسبت پروتئین/EGCG، pH و دما تنظیم شد و دیالیز برای به دست آوردن بالاترین راندمان رسوب پروتئین معرفی شد [۲۸]. در مقابل، برای کاهش برهمکنش نامطلوب پروتئین-ترکیبات فنلی، b-cyclodextrin برای کپسوله کردن اسیدهای هیدروکسی سینامیک قهوه در نظر گرفته شد، بنابراین برهمکنش بین اسیدهای فنولیک و پروتئین‌های انتخابی رژیم غذایی محدود شد [۲،۳]. علاوه بر این پارامترها، فناوری‌های فرآوری مواد غذایی نیز ممکن است بر پایداری کمپلکس‌های پروتئین-فنلی تأثیر بگذارد. Correia و همکاران (۲۰۱۷) اثرات سه روش خشک کردن را بر روی خواص فیزیکی شیمیایی و پایداری کمپلکس‌های پلی‌فنل-SPI بلوبری مقایسه کردند و دریافتند که خشک کردن پاششی غلظت‌های بالاتری از پلی‌فنل‌ها را با تخریب محدود در طول ذخیره سازی ۱۶ هفته‌ای در مقایسه با خشک کردن انجمادی و خشک کردن در فر با خلاء حفظ می‌کند [۵]. به همین ترتیب، کمپلکس‌های پلی‌فنل-پروتئین رژیم غذایی بلوبری یکپارچگی

ساختاری و خواص بیولوژیکی خود را پس از تیمارهای خشک کردن پاششی حفظ کردند [۸]. دمای فوق العاده بالا (UHT) معمولاً برای استریل کردن نوشیدنی‌ها استفاده می‌شود و مشخص شد که تولید کمپلکس‌های پروتئین- فنلی در نوشیدنی‌های مبتنی بر جو دو سر با فرآوری UHT تسهیل می‌شود [۱۱]. به طور مشابه، b-casein و ferulic acid معمولاً کمپلکس‌های غیرکووالانسی را در دمای محیط تشکیل می‌دهند، در حالی که ترکیب‌های افزایشی کووالانسی جدید پس از تیمارهای مشابه UHT تولید شدند [۴]. میدان‌های الکتریکی پالسی با شدت بالا و پردازش پرفشار نوشیدنی‌های مبتنی بر آب میوه به طور متفاوتی بر دسترسی زیستی ویتامین C و ترکیبات فنلی در هنگام افزودن شیر یا شیر سویا تأثیر گذاشت [۲۱]. با توجه به سایر فرآیندهای غیر حرارتی، تأثیر آنها بر برهمکنش پروتئین-ترکیبات فنلی و روابط پایداری فرآیند پیچیده کاملاً نامشخص است. از سوی دیگر، ذخیره سازی یکی دیگر از عوامل "تهدید کننده" برای پایداری برهمکنش‌های پروتئین-ترکیبات فنلی مورد نظر است. در طی ۴ هفته نگهداری سرد یک ماست انار، بیشتر آنتوسیانین‌ها به پروتئین‌های شیر متصل می‌مانند و میل ترکیبی بالایی از برهمکنش آنتوسیانین-پروتئین را نشان می‌دهند [۱۵].

۳-۳. ترکیبات پروتئین- فنولیک به عنوان سیستم‌های تحویل جدید برای ترکیبات زیست فعال

با توجه به ماهیت آمفی‌فیلیک پروتئین‌ها، کمپلکس‌های پروتئین- فنولیک دارای پیوندهای پیوندی نسبت به مولکول‌های آبگریز و آب دوست هستند. به این ترتیب، استفاده از کونژوگه‌های پروتئین- فنولیک به عنوان حامل‌های جدید برای ترکیبات زیست فعال اساساً به تازگی به عنوان یک موضوع جدید مانند داروها، هورمون‌ها، اسیدهای چرب و سایر ترکیبات چربی دوست و فنلی مطرح شده است [۱۸، ۱۴]. در درجه اول، امولسیون‌ها و نانوامولسیون‌های مبتنی بر پروتئین، نانو ذرات پلیمری و هیدروژل‌ها به عنوان سیستم‌های تحویل استفاده می‌شوند. چندین ترکیب کووالانسی پروتئین- فنولیک شیر برای حفظ و تثبیت بتا کاروتن در امولسیون‌های روغن در آب، مانند a-lactalbumin-، b-lactoglobulin-catechin catechin مطرح شده‌اند. بهبود مشابهی در پایداری بیواکتیوهای آبگریز محصور شده در امولسیفایرهای کمپلکس پروتئین- فنولیک نیز برای کورکومین و رسوراترول بارگذاری شده در زئین-EGCG و روغن جلبک ساخته شده در ترکیبات افزودنی هیدرولیزات زئین- اسید تانیک گزارش شده است. برای افزودن قابلیت بیشتر به لایه‌های زیستی پوشش، کمپلکس‌های پروتئین- پلی فنل- ساکارید نیز برای به تاخیر انداختن تخریب مواد زیست فعال طراحی شدند مانند پروتئین نخود- کورکومین- پکتین، لاکتوفرین- اسید کلروژنیک- دکستران / پلی دکستروز و اووترانز سفیرین- اسید گالیک- کربوکسی متیل دکستران [۳۰].

در این زمینه، خواص فیزیکی شیمیایی و حفاظت و بازده تحویل کوا سروات‌های سه‌گانه به دست آمده به انواع واکنش‌های رخ داده و توالی سنتز که در آن مرتبط هستند بستگی دارد [۱۴]. نانوذرات و ریزذرات پروتئینی با درجه مواد غذایی را می‌توان با بارگذاری با پلی فنل‌ها ساخت. مشخص شد که لاکتوفرین القاء شده از نظر حرارتی، در تعامل با EGCG نانوذرات نامحلول را با اثرات محافظتی بر روی EGCG باقی مانده تشکیل می‌دهد [۲۹]. با کپسوله کردن کورکومین و سوراترول در نانوذرات پوسته-هسته مشتق شده از مزدوج‌های zein-EGCG با قطرات لیپیدی، هر دو پلی فنل‌های آبگریز پایداری و قابلیت دسترسی زیستی بیشتر تحت شرایط فیزیولوژیکی مرتبط نشان دادند [۱۳]. گزارش کرده است که پلی ساکارید-پلی فنل (به عنوان مثال، اسید هیالورونیک-EGCG) یا کمپلکس‌های پلی ساکارید-پروتئین (مانند لیزوزیم-دکستران) تمایل به تشکیل ریز ساختارهای ژل مانند برای کپسوله کردن ترکیبات فعال زیستی دارند [۳۰].

۴. نتیجه‌گیری

پروتئین‌ها و فنولیک‌های رژیم غذایی به طور گسترده‌ای ترکیباتی هستند که برهم کنش و تغییرات مرتبط با آن‌ها در صنایع مرتبط اهمیت زیادی دارد. براساس برهم کنش بین مولکولی، تغییراتی در ساختار شیمیایی هر دو واکنش دهنده ایجاد می‌شود، در نتیجه کمپلکس‌های پروتئین-فنلی با ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی منحصر به فرد ایجاد می‌شود. علی‌رغم پیشرفت‌های بسیار در درک ارتباط آن‌ها، دانش فعلی در مورد پیامدهای برهمکنش آن‌ها هنوز مبهم است. در مقایسه با کمپلکس‌های غیرکوالانسی، به نظر می‌رسد که مزدوج‌های کوالانسی به عنوان افزودنی‌های غذایی یا سیستم‌های تحویل، با توجه به پایداری و قدرت نسبتاً بالای آن‌ها در اصلاح ویژگی‌های اجزای درگیر، جذاب‌تر هستند. در حالی که، به دلیل گسترش برهمکنش‌های غیرکوالانسی، مکانیسم‌های اتصال و کاربردهای بالقوه آن‌ها نیز باید به طور گسترده مورد مطالعه قرار گیرد. بنابراین ترکیبات تشکیل شده بین پروتئین‌ها و فنولیک‌ها از منابع مختلف باید به طور گسترده مورد بررسی قرار گیرند تا مواد غذایی جدید و با کارایی بالا تولید شوند. تأثیر و پیامد برهمکنش‌های هترو پروتئین‌ها با (پلی) ساکاریدها و فنولیک‌ها در ماتریس‌های غذایی پیچیده نیز باید درک شود. از طریق ساخت کمپلکس‌های پروتئین-فنولیک با عملکردهای متناسب، می‌توان به بهبود مزایای سلامتی بخش، ویژگی‌های حسی و کیفی محصولات مرتبط دست یافت.

۱. Abdollahi K, Ince C, Condict L, Hung A, Kasapis S. Combined spectroscopic and molecular docking study on the pH dependence of molecular interactions between β -lactoglobulin and ferulic acid. *Food Hydrocolloids*. 2020 Apr 1;101:105461.
۲. Budryn G, Zaczyńska D, Rachwał-Rosiak D, Oracz J. Changes in properties of food proteins after interaction with free and β -cyclodextrin encapsulated hydroxycinnamic acids. *European food research and technology*. 2015 Jun;240(6):1157-66.
۳. Budryn G, Palecz B, Rachwał-Rosiak D, Oracz J, Zaczyńska D, Belica S, Navarro-González I, Meseguer JM, Pérez-Sánchez H. Effect of inclusion of hydroxycinnamic and chlorogenic acids from green coffee bean in β -cyclodextrin on their interactions with whey, egg white and soy protein isolates. *Food chemistry*. 2015 Feb 1;168:276-87.
۴. Condict L, Kaur J, Hung A, Ashton J, Kasapis S. Combined spectroscopic, molecular docking and quantum mechanics study of β -casein and ferulic acid interactions following UHT-like treatment. *Food Hydrocolloids*. 2019 Apr 1;89:351-9.
۵. Correia R, Grace MH, Esposito D, Lila MA. Wild blueberry polyphenol-protein food ingredients produced by three drying methods: Comparative physico-chemical properties, phytochemical content, and stability during storage. *Food chemistry*. 2017 Nov 15;235:76-85.
۶. He W, Xu H, Lu Y, Zhang T, Li S, Lin X, Xu B, Wu X. Function, digestibility and allergenicity assessment of ovalbumin-EGCG conjugates. *Journal of Functional Foods*. 2019 Oct 1;61:103490.
۷. He Z, Xu M, Zeng M, Qin F, Chen J. Interactions of milk α - and β -casein with malvidin-3-O-glucoside and their effects on the stability of grape skin anthocyanin extracts. *Food Chemistry*. 2016 May 15;199:314-22.
۸. Hoskin RT, Xiong J, Esposito DA, Lila MA. Blueberry polyphenol-protein food ingredients: the impact of spray drying on the in vitro antioxidant activity, anti-inflammatory markers, glucose metabolism and fibroblast migration. *Food Chemistry*. 2019 May 15;280:187-94.
۹. Jakobek L. Interactions of polyphenols with carbohydrates, lipids and proteins. *Food chemistry*. 2015 May 15;175:556-67.
۱۰. Jia, Z., Zheng, M., Tao, F., Chen, W., Huang, G., & Jiang, J. (2016). Effect of covalent modification by (-)-epigallocatechin-3-gallate on physicochemical and functional properties of whey protein isolate. *LWT-Food Science and Technology*, 66, 305-310.
۱۱. Kaur J, Katopo L, Ashton J, Whitson A, Kasapis S. Molecular interactions of milk protein with phenolic components in oat-based liquid formulations following UHT treatment and prolonged storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2018 Mar;98(5):1794-802.
۱۲. Le Bourvellec C, Renard CM. Interactions between polyphenols and macromolecules: Quantification methods and mechanisms. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2012 Mar 1;52(3):213-48.
۱۳. Liu F, Ma D, Luo X, Zhang Z, He L, Gao Y, McClements DJ. Fabrication and characterization of protein-phenolic conjugate nanoparticles for co-delivery of curcumin and resveratrol. *Food hydrocolloids*. 2018 Jun 1;79:450-61.

۱۴. Liu F, Ma C, Gao Y, McClements DJ. Food-grade covalent complexes and their application as nutraceutical delivery systems: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2017 Jan;16(1):76-95.
۱۵. Mildner-Szkudlarz S, Bajerska J, Zawirska-Wojtasiak R, Górecka D. White grape pomace as a source of dietary fibre and polyphenols and its effect on physical and nutraceutical characteristics of wheat biscuits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2013 Jan 30;93(2):389-95.
۱۶. Ozdal T, Capanoglu E, Altay F. A review on protein–phenolic interactions and associated changes. *Food Research International*. 2013 May 1;51(2):954-70.
۱۷. Prigent SV, Gruppen H, Visser AJ, Van Koningsveld GA, De Jong GA, Voragen AG. Effects of non-covalent interactions with 5-O-caffeoylquinic acid (chlorogenic acid) on the heat denaturation and solubility of globular proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2003 Aug 13;51(17):5088-95.
۱۸. Quan TH, Benjakul S, Sae-leaw T, Balange AK, Maqsood S. Protein–polyphenol conjugates: Antioxidant property, functionalities and their applications. *Trends in Food Science & Technology*. 2019 Sep 1;91:507-17.
۱۹. Rawel HM, Meidtner K, Kroll J. Binding of selected phenolic compounds to proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2005 May 18;53(10):4228-35.
۲۰. Ribas-Agustí A, Martín-Belloso O, Soliva-Fortuny R, Elez-Martínez P. Food processing strategies to enhance phenolic compounds bioaccessibility and bioavailability in plant-based foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018 Oct 13;58(15):2531-48.
۲۱. Rodríguez-Roque MJ, de Ancos B, Sánchez-Moreno C, Cano MP, Elez-Martínez P, Martín-Belloso O. Impact of food matrix and processing on the in vitro bioaccessibility of vitamin C, phenolic compounds, and hydrophilic antioxidant activity from fruit juice-based beverages. *Journal of Functional Foods*. 2015 Apr 1;14:33-43.
۲۲. Rosa LA, Moreno-Escamilla JO, Rodrigo-García J, Alvarez-Parrilla E. Phenolic compounds. Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables. 2019:253-71.
۲۳. Siebert KJ. Haze formation in beverages. *LWT-Food Science and Technology*. 2006 Nov 1;39(9):987-94.
۲۴. Świeca M, Sęczyk Ł, Gawlik-Dziki U, Dziki D. Bread enriched with quinoa leaves–The influence of protein–phenolics interactions on the nutritional and antioxidant quality. *Food chemistry*. 2014 Nov 1;162:54-62.
۲۵. Trigueros L, Wojdyło A, Sendra E. Antioxidant activity and protein–polyphenol interactions in a pomegranate (*Punica granatum L.*) yogurt. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2014 Jul 9;62(27):6417-25.
۲۶. Wu, S., Zhang, Y., Ren, F., Qin, Y., Liu, J., Liu, J., ... & Zhang, H. (2018). Structure–affinity relationship of the interaction between phenolic acids and their derivatives and β -lactoglobulin and effect on antioxidant activity. *Food chemistry*, 245, 613-619.
۲۷. Xiao J, Kai G. A review of dietary polyphenol-plasma protein interactions: characterization, influence on the bioactivity, and structure-affinity relationship. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2012 Jan 1;52(1):85-101.
۲۸. Xu H, Zhang T, Lu Y, Lin X, Hu X, Liu L, He Z, Wu X. Effect of chlorogenic acid covalent conjugation on the allergenicity, digestibility and functional properties of whey protein. *Food chemistry*. 2019 Nov 15;298:125024.

۲۹. Yang W, Xu C, Liu F, Yuan F, Gao Y. Native and thermally modified protein–polyphenol coassemblies: Lactoferrin-based nanoparticles and submicrometer particles as protective vehicles for (–)-epigallocatechin-3-gallate. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2014 Nov 5;62(44):10816-27.

۳۰. Zhang Q, Cheng Z, Wang Y, Fu L. Dietary protein-phenolic interactions: Characterization, biochemical-physiological consequences, and potential food applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021 Nov 25;61(21):3589-615.

۳۱. Zhang H, Yu D, Sun J, Guo H, Ding Q, Liu R, Ren F. Interaction of milk whey protein with common phenolic acids. *Journal of Molecular Structure*. 2014 Jan 24;1058:228-33.