



نانوامولسیون پیکرینگ در سس مایونز کم چرب

محدثه پورصفر، عباس عابدفر*

گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت

چکیده

با افزایش تقاضا و آگاهی افراد نسبت به ترجیحات تغذیه‌ای و دغدغه‌های سلامت، از جمله تمایل به محصولات کم‌چرب، موجب شده است که تمرکز پژوهش‌ها و صنایع غذایی به‌طور محسوسی به سوی راهکارهای پایدار و سلامت‌محور سوق پیدا کنند تا ضمن حفظ بافت و پایداری، با انتظارات مصرف‌کنندگان امروزی سلامت‌محور نیز سازگار باشند. کاهش چربی در سس مایونز، همواره چالشی بزرگ برای حفظ بافت، طعم و پایداری محصول بوده است. نانوامولسیون‌های پیکرینگ، که با ذرات جامد پایدار می‌شوند، راهکاری نوین برای حفظ ویژگی‌های حسی و عملکردی محصولات کم‌چرب ارائه می‌دهند. این مرور به بررسی اصول شکل‌گیری نانوامولسیون‌های پیکرینگ، مکانیسم‌های پایداری ناشی از ذرات جامد و عوامل موثر بر خواص رئولوژیکی و پایداری طولانی‌مدت آن‌ها می‌پردازد. همچنین، کاربردهای مختلف این نانوامولسیون‌ها در طراحی سس مایونز کم‌چرب و نقش ذرات مختلف آلی و معدنی (پروتئینی، نشاسته‌ای، سلولزی، پلی‌هیدروکسی‌آپاتیت و...) در بهبود ساختار و بافت محصول مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس یافته‌های این مطالعه، نانوامولسیون پیکرینگ می‌تواند به‌عنوان جایگزین‌های موثر چربی عمل کرده و فرصت‌های جدیدی برای تولید محصولات سالم‌تر و با کیفیت بالاتر ایجاد کنند و مسیرهای نوآورانه برای توسعه مواد پایدار و سیستم‌های امولسیونی پیشرفته فراهم آورند.

واژه‌های کلیدی: نانوامولسیون پیکرینگ، سس مایونز کم‌چرب، امولسیون‌های پایدار شده با ذرات جامد، جایگزین چربی، فناوری نانو در صنایع غذایی

ایمیل نویسنده مسئول: a.abedfar@guilan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳

۱- مقدمه

صنعت غذا بر توسعه محصولات نوآورانه متمرکز شده است که بتوانند روندهای کنونی مصرف را برآورده سازند. در میان این محصولات، فرآورده‌های سالم، کم‌چرب و عملکردی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند [۱]. در سال‌های اخیر، تمرکز پژوهش‌ها و صنایع غذایی به طور محسوسی به سوی راهکارهای پایدار و سلامت محور سوق یافته است؛ که در آن‌ها پایدارکننده‌های طبیعی جایگزین یا موجب کاهش مصرف امولسیفایرهای سنتزی می‌شوند [۲]. ترکیب مایونز به دلیل افزایش نگرانی‌های مرتبط با سلامت به طور قابل توجهی دستخوش تغییر شده است. مایونز سنتی که معمولاً با امولسیفایرهای مبتنی بر زرده تخم مرغ پایدار می‌شود، با افزایش تقاضا برای جایگزین‌های گیاهی در حال تحول است. تمایل به محصولات کم‌چرب، موجب شده است که پژوهش‌ها به سمت بررسی امولسیفایرهای گیاهی سوق پیدا کنند تا ضمن حفظ بافت و پایداری مایونز، با انتظارات مصرف‌کنندگان نیز سازگار باشند [۳]. مایونز یک امولسیون روغن در آب است که از ۶۵ تا ۸۰ درصد روغن، ۶ تا ۲۰ درصد زرده تخم مرغ و ۳ تا ۵ درصد سرکه تشکیل شده است. زرده تخم مرغ به دلیل داشتن خواص امولسیفایری، کاهش تنش سطحی و افزایش پایداری امولسیون، نقش حیاتی در پایداری و خواص ساختاری مایونز ایفا می‌کند. با این حال، زرده تخم مرغ دارای سطوح بالای کلسترول و اسیدهای چرب اشباع است که می‌تواند باعث ایجاد بیماری‌های مختلف و چاقی در افراد شود و همچنین در معرض آلودگی میکروبی توسط *Salmonella enteritidis* قرار دارد [۴]. علاوه بر این، فرمولاسیون سس مایونز، در فرایندهای تولید سنتی شامل محتوای بالای روغن است که برای تضمین پایداری امولسیون و دستیابی به بافت مطلوب ضروری است. با این حال، این فرمولاسیون پرچرب نه تنها هزینه تولید محصول را افزایش می‌دهد، بلکه خطرات سلامتی نیز ایجاد می‌کند بنابراین، چگونگی کاهش محتوای چربی، بهبود ترکیب تغذیه‌ای و افزایش پایداری در حفظ طعم مایونز به منظور پاسخگویی به نیازهای متنوع مصرف‌کنندگان، به مسئله‌ای فوری در صنعت غذا تبدیل شده است [۵]. مسأله‌ای که ضرورت یافتن جایگزین ایمن و کارآمد برای آن را برجسته می‌سازد. در این راستا، مطالعات بر یافتن امولسیفایرهای نوین بالقوه برای مایونز متمرکز شده‌اند. افزودن امولسیفایرهای نوین به فرمولاسیون مایونز بدون زرده تخم مرغ مورد توجه مصرف‌کنندگان قرار گرفته است، زیرا تمایل به رژیم‌های وگان در میان مصرف‌کنندگان افزایش یافته است [۴].

یکی از جایگزین‌های تولید مایونزهای کم‌کلسترول، استفاده از امولسیون‌های پیکرینگ است که با ذرات غیرسمی تولید شده و می‌توانند زرده تخم مرغ را به طور جزئی یا کامل به عنوان پایدارکننده جایگزین کنند [۶]. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهند که امولسیون‌های پیکرینگ می‌توانند به عنوان جایگزین‌های بالقوه برای سس‌های غذایی شبه‌مایونز مطرح شوند، به ویژه در شرایطی که کاهش محتوای چربی مورد نظر است [۱]. پاسخگویی به نیازهای مصرف‌کنندگان چالش برانگیز است، زیرا تفاوت قابل توجهی در کیفیت بین مایونز مبتنی بر زرده تخم مرغ و امولسیون‌های مشابه مایونز وجود دارد [۴]. با تنظیم فرمولاسیون امولسیون پیکرینگ، امکان دستیابی به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی قابل‌مقایسه با مایونزهای سنتی فراهم شده است [۶]. مقایسه این سامانه‌ها با مایونزهای تجاری (سنتی و کم‌چرب) بیانگر آن است که امولسیون‌های پیکرینگ قادرند ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و بافتی قابل‌قبولی ارائه دهند، در حالی که از محتوای چربی پایین‌تری برخوردارند. گزارش‌ها حاکی از آن است که چنین امولسیون‌هایی معمولاً دارای pH اسیدی، پایداری اکسیداتیو بهبودیافته و ویژگی‌های رنگی مناسب برخوردار هستند؛ عواملی که برای کاربرد در محصولات غذایی امولسیونی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند [۱]. امولسیون‌های پیکرینگ به عنوان سامانه‌هایی امیدبخش برای ساختاردهی مواد غذایی ایمن‌تر و سالم‌تر مطرح هستند و علاوه بر این، امکان تنظیم بافت محصول را از طریق تغییر عواملی نظیر غلظت ذرات پیکرینگ فراهم می‌آورند. در این راستا، کیفیت بافتی، حسی و همچنین قابلیت هضم مواد غذایی مبتنی بر امولسیون‌های پیکرینگ، کاربرد آن‌ها را به سوی توسعه محصولات غذایی کم‌چرب و کم‌کالری سوق داده است [۱].

امولسیون‌های پیکرینگ پایدار و سازگار با محیط‌زیست می‌باشند و از نظر فیزیکوشیمیایی نیز پایدارند. پایداری بالاتر امولسیون‌های پیکرینگ، سیستم‌هایی ایجاد می‌کند که نسبت به امولسیون‌های متداول، بافت، ظاهر و ماندگاری طولانی‌تری را حفظ می‌کنند. علاوه بر این، پایدارسازی قطرات روغن با ذرات جامد امکان تولید امولسیون‌های کم‌چرب را بدون کاهش ویژگی‌های حسی فراهم می‌کند، که ابزاری مؤثر برای کاهش میزان چربی در فرمولاسیون‌های غذایی است که بافت و حس دهانی مطلوب حفظ می‌شود [۷]. هدف این مرور، بررسی و تحلیل پیشرفت‌های اخیر در زمینه نانوامولسیون‌های پیکرینگ و کاربرد آن‌ها در تولید سس مایونز کم‌چرب است. علاوه بر این، اثر ذرات

مختلف بر پایداری و بافت محصول و چشم‌انداز پژوهش‌های آینده در این حوزه نیز مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲- امولسیون پیکرینگ

امولسیون‌ها مخلوطی از دو مایع غیرقابل امتزاج هستند که در آن یک فاز به صورت قطرات در فاز دیگر پراکنده می‌شود. تشکیل قطرات امولسیون به حضور امولسیفایرهای مانند سورفکتانت‌ها، پروتئین‌ها، بیوپلیمرها یا ذرات جامد وابسته است [۳]. امولسیون‌هایی که به وسیله ذرات جامد پایدار می‌شوند، با عنوان امولسیون‌های پیکرینگ (Pickering emulsions) شناخته می‌شوند [۸]. مکانیسم‌های پایداری در این دو نوع امولسیون متفاوت است. در امولسیون‌های متداول، امولسیفایرها با کاهش قابل توجه کشش بین سطحی بین فازها، افزایش ممانعت فضایی و یا تقویت دافعه الکترواستاتیکی بین قطرات، موجب افزایش پایداری امولسیون می‌شوند در حالی که امولسیون‌های پیکرینگ از ذرات جامد برای ایجاد موانع فیزیکی و برهم‌کنش‌های سطحی استفاده می‌کنند [۴].

امولسیون‌های متداول که به وسیله سورفکتانت‌ها پایدار می‌شوند، جذب امولسیفایرها و ماکرومولکول‌های متداول در آن‌ها عمدتاً قابل برگشت است. این سیستم‌ها اغلب هنگام مواجهه با تغییرات pH یا دما دچار پایداری ضعیف می‌گردند؛ تغییراتی که موجب تضعیف پایداری امولسیون می‌شوند. این ناپایداری در نهایت منجر به جدایش فازی شده و در نتیجه، عمر ماندگاری امولسیون و کارایی آن در فرمولاسیون‌های غذایی کاهش می‌یابد. همچنین سورفکتانت‌های سنتزی ممکن است با سایر اجزای فرمولاسیون برهم‌کنش‌های نامطلوبی داشته باشند که به بروز مشکلات سازگاری یا تغییر در عملکرد محصول منجر شود [۳]. در مقابل، امولسیون‌های پیکرینگ که از ذرات جامد به عنوان امولسیفایر استفاده می‌کنند، پایداری بهبودیافته‌ای را فراهم می‌آورند؛ به گونه‌ای که ذرات جامد به طور برگشت‌ناپذیر در سطح مشترک روغن-آب جذب شده و یک سد مستحکم ایجاد می‌کنند تا از تجمع قطرات جلوگیری کرده و احتمال لخته‌شدن، هم‌جوشی و ته‌نشینی را کاهش می‌دهد. امولسیون‌های پیکرینگ دارای پایداری بالاتر و توزیع اندازه ذرات کوچک‌تری نسبت به امولسیون‌های سنتی هستند. علاوه بر این، امولسیون‌های پیکرینگ مقاومت بهتری در برابر هم‌آمیختگی و پدیده Ostwald ripening نشان می‌دهند [۴]. در نتیجه، امولسیون‌های پیکرینگ مقاومت بیشتری در برابر تنش‌های محیطی مانند تغییرات pH و دما از خود نشان می‌دهند و همین امر آن‌ها را برای دامنه وسیع‌تری از کاربردها مناسب می‌سازد [۳].

امولسیون‌های پیکرینگ به دلیل توانایی آن‌ها در ایجاد ویژگی‌های مطلوب ظاهری، رئولوژیکی و پایداری، ارزشمند تلقی می‌شوند و توجه گسترده‌ای را در جامعه علوم و فناوری مواد غذایی به خود جلب کرده‌اند [۹].

پتانسیل امولسیون‌های پیکرینگ در حوزه صنایع غذایی ناشی از ویژگی‌های تغذیه‌ای و بافتی مطلوب آن‌ها و همچنین نقش بالقوه آن‌ها به عنوان حامل ترکیبات زیست‌فعال است که می‌تواند به فرمولاسیون‌هایی خاصیت عملکردی ببخشد [۱]. امولسیون پیکرینگ به دلیل توانایی پاسخ‌گویی هم‌زمان به چندین هدف، جایگاه برجسته‌ای یافته‌اند؛ از جمله کاهش چربی‌های اشباع از طریق ساختاردهی به روغن‌های گیاهی غیراشباع، انتقال ترکیبات زیست‌فعال نظیر ویتامین‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها تحت شرایط سخت فرآیندی و حفظ یا بهبود ویژگی‌های بافتی در محصولات کم‌چرب می‌باشد [۲].

امولسیون‌های پیکرینگ، امولسیون‌هایی هستند که توسط ذرات پایدار می‌شوند. این امولسیون‌ها مزایای متعددی ارائه می‌دهند که از جمله آن‌ها می‌توان به کاهش سرعت اکسیداسیون لیپیدها، تنظیم هضم و کپسوله‌سازی ترکیبات فعال اشاره کرد. علاوه بر این، ویژگی‌های ظاهری، خواص رئولوژیکی و عدم نیاز به سورفکتانت در امولسیون‌های پیکرینگ موجب توجه گسترده‌ای در سطوح علمی و صنعتی، به ویژه در صنایع غذایی، شده است [۶]. پس از تهیه فرمولاسیون مایونز، کیفیت آن به ویژگی‌هایی مانند pH، پایداری امولسیون، ظاهر، اندازه قطرات و خواص رئولوژیکی بستگی دارد [۴]. امولسیون‌های پیکرینگ، هنگامی که به عنوان عوامل ساختاردهنده یا بافت‌دهنده در محصولات غذایی به کار می‌روند، در مقایسه با امولسیون‌های پدیدار شده توسط سورفکتانت‌های مولکولی یا ماکرومولکولی، مزایای متعددی ارائه می‌دهند. پایداری این سامانه‌ها اغلب در برابر فرایندهای حرارتی، تنش‌های برشی مکانیکی یا تغییرات شدید pH، دما، فشار، غلظت نمک و ترکیب فازها بسیار مقاوم است؛ امری که امکان ساده‌سازی فرآیندهای تولید و افزایش عمر ماندگاری محصول را فراهم می‌سازد [۸].

۳- عوامل مؤثر بر پایداری امولسیون

عملکرد مؤثر ذرات به عنوان پایدارکننده‌های پیکرینگ به مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن‌ها وابسته است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به ترشوندگی مناسب نسبت به هر دو فاز، اندازه ذرات و غلظت آن‌ها در فرمولاسیون امولسیون اشاره کرد [۱]. با تنظیم نوع، اندازه، مورفولوژی و ترشوندگی ذرات، فناوری‌های غذایی می‌توانند از پایدارسازی پیکرینگ به شیوه‌های متفاوت بهره ببرند و ویژگی‌های قطرات را دقیقاً مطابق با

سورفکتانت‌های مولکولی با ذرات خوراکی جایگزین شوند و بدین ترتیب ایمنی و پایداری محیطی محصولات غذایی بهبود یابد [۸]. امولسیفایرهای پیکرینگ با درجه غذایی به چهار گروه ذرات معدنی، کربوهیدراتی، چربی و پروتئینی تقسیم می‌شوند. ذرات معدنی و ستیک برای پایداری امولسیون‌های پیکرینگ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ذرات کربوهیدراتی مانند کیتوزان، سلولز و نانوذرات نشاسته از شناخته شده‌ترین و پرکاربردترین ذرات به عنوان پایدارکننده‌های پیکرینگ هستند [۴]. پلی ساکاریدها می‌توانند به راحتی از طریق پیوند هیدروژنی، جاذبه آبگریز و برهمکنش‌های الکترواستاتیک با پروتئین‌ها ترکیب شوند و چنین ترکیب‌هایی می‌توانند به طور مؤثر آب را به دام بیندازند و از اتصال عرضی پروتئین‌ها جلوگیری کنند و در نتیجه بافت و امولسیون سازی مواد غذایی را بهبود بخشند [۱۰]. پروتئین‌ها و پلی ساکاریدها، به صورت منفرد یا ترکیبی، می‌توانند امولسیون‌های پیکرینگ را پایدار کنند [۷]. ذرات کربوهیدراتی محدودیت‌هایی مانند فعالیت سطحی پایین و توانایی امولسیفیکاسیون ضعیف دارند. برای غلبه بر این چالش‌ها، تکنیک‌هایی توسعه یافته‌اند؛ مانند پوشش‌دهی سطح با ذرات پروتئینی، اصلاح سطحی و اصلاحات فیزیکی مانند اولتراسوند و آسیاب کردن می‌باشد [۴].

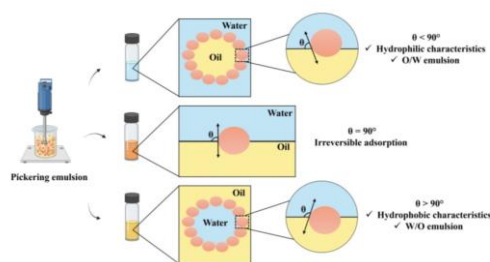
وجود ذرات مازاد در فاز پیوسته یا به کارگیری کسرهای حجمی بالای فاز داخلی روغنی، که به عنوان امولسیون‌های با فاز داخلی بالا (High Internal Phase Emulsions, HIPEs) شناخته می‌شوند، تشکیل سامانه‌های بسیار پایدار و با ویسکوزیته بالا، از جمله ساختارهای ژلی، را تسهیل می‌کند. این سامانه‌ها به دلیل ویژگی‌های ساختاری منحصر به فرد خود، به عنوان بسترهایی مناسب برای طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی مطرح هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به توسعه محصولات غذایی نوین، نظیر سس‌هایی با ویژگی‌های حسی مشابه فرآورده‌های متداول، اشاره کرد [۱].

۴- نانوذرات امولسیون پیکرینگ

نانوذرات می‌توانند به عنوان امولسیفایر برای پایداری امولسیون‌های پیکرینگ به جای امولسیفایرهای متداول مورد استفاده قرار گیرند. نانوذرات در فاز روغن یا آب توزیع شده و در یکی از فازها حل می‌شوند و نقش امولسیفایر را ایفا می‌کنند [۴]. اصطلاح نانوامولسیون برای بازه اندازه‌ای کوچک‌تر (کمتر از ۱۰۰۰ نانومتر) از امولسیون‌های پایدار شده جنبشی به کار رفته است [۸]. سامانه‌های امولسیونی با اندازه قطرات کوچک‌تر، منجر به محصولاتی با سفتی و چسبندگی بالاتر می‌شوند [۱]. نانوامولسیون‌ها در یکسان بودن مقدار روغن، نسبت

نیازهای خاص فرمولاسیون و فرآوری در دسته‌های مختلف محصولات غذایی تنظیم کنند [۲]. فعالیت بین سطحی یک ذره مستلزم ترشوندگی سطحی متوسط و همچنین اندازه کافی ذره است [۸]. ترشوندگی ذرات که معمولاً از طریق اندازه‌گیری زاویه تماس (θ) تعیین می‌شود، نشان‌دهنده تمایل نسبی ذرات به فازهای آبی و روغنی است به طوری که بازه مطلوب زاویه تماس معمولاً بین ۳۰ تا ۱۵۰ درجه گزارش شده است. به طور کلی، ذرات آب دوست ($\theta < 90^\circ$) منجر به تشکیل امولسیون‌های روغن در آب (O/W) می‌شوند، در حالی که ذرات آب گریز ($\theta > 90^\circ$) عمدتاً امولسیون‌های آب در روغن (W/O) را پایدار می‌سازند (شکل ۱) [۱].

امولسیون‌های پیکرینگ توسط ذرات جامد نامحلول پایدار می‌شوند که هر دو فاز روغن (O) و آبی (W) را تا حدی هیدراته می‌کنند و این پایداری از طریق ترکیبی از دافعه‌های فضایی و الکترواستاتیکی تعیین شده توسط ویژگی‌های سطحی ذرات (مانند آب‌گریزی، زاویه تماس و کشش سطحی) صورت می‌گیرد. به دلیل اینکه انرژی جداسازی ذرات بسیار بالا است، جذب آن‌ها برگشتناپذیر در نظر گرفته می‌شود که این موضوع دلیل پایداری بالاتر آن‌ها نسبت به امولسیون‌های متداول است. ذرات جذب شده باعث می‌شوند سطح مشترک به سمت فازی که تمایل کمتری دارد، انحنا پیدا کند. بنابراین، ویژگی‌های سطحی ذرات نوع امولسیون را تعیین می‌کند. ذرات با آب دوستی بیشتر برای امولسیون‌های روغن در آب (O/W) مناسب‌تر هستند و ذرات با آب‌گریزی بیشتر برای امولسیون‌های آب در روغن (W/O) مناسب‌اند [۷].



شکل ۱. زاویه تماس ذرات کروی در سطح مشترک روغن و آب و نوع امولسیون O/W و W/O [۷].

ذرات با درجه‌ای خوراکی معمولاً از منابع پایدار تأمین شده و کاملاً غیرسمی هستند و بنابراین در مقایسه با سورفکتانت‌های مولکولی که ممکن است آلرژن یا سرطان‌زا باشند، ایمن‌ترند. به همین دلیل، تلاش‌های صنعتی گسترده‌ای در جریان است تا

به امولسیون‌هایی با اندازه قطرات بزرگ‌تر ویسکوزیته بیشتری از خود نشان می‌دهند که این ویژگی راه را برای ایجاد خواص بافتی نوین و توسعه غذاهای کم‌چرب هموار می‌سازد [۸].

با انتخاب مناسب نوع ذره، می‌توان به امولسیون‌های روغن در آب و همچنین آب در روغن دست یافت. برای محصولاتی با حجم فاز داخلی بالا و کف، ذرات پیکرینگ جایگزین‌هایی برای سورفکتانت‌های رایج ارائه می‌دهند [۱۱]. اندازه ذرات تأثیر مستقیمی بر اندازه قطرات امولسیون، رفتار رئولوژیکی، پایداری فیزیکی و حتی ادراک حسی در کاربردهای غذایی دارد؛ به گونه‌ای که ذرات کوچک‌تر، به دلیل ظرفیت بالاتر پوشش‌دهی سطح مشترک، توانایی پایداری‌سازی حجم بیشتری از امولسیون را در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر دارا هستند. به‌طور مشابه، افزایش غلظت ذرات امکان پایداری‌سازی سطح بین‌فازی گسترده‌تری را فراهم کرده و در نتیجه به تشکیل امولسیون‌های ریزتر منجر می‌شود، اگرچه این افزایش لزوماً به جذب کامل تمامی ذرات در سطح مشترک منتهی نمی‌گردد [۱]. قابلیت تنظیم اندازه و ترکیب ذرات پایداری‌کننده، کنترل دقیقی بر بافت و رئولوژی محصولات غذایی فراهم می‌کند. این امر به تولیدکنندگان امکان می‌دهد تا حس دهانی و غلظت سس‌های مختلف (مانند سس سالاد و مایونز) را مطابق نیاز تنظیم کرده، ماندگاری محصول را افزایش دهند و از جداشدن مواد تشکیل‌دهنده جلوگیری کنند [۷].

اندازه قطرات و شاخص چندپراکندگی که از طریق پراکندگی نور دینامیکی (DLS) اندازه‌گیری می‌شوند، به‌طور مستمر برای ارزیابی پایداری نانوامولسیون‌ها در طول زمان و اغلب تحت تنش‌های خارجی (مانند چرخه‌های گرم‌کردن-سردکردن، تغییر غلظت و pH) مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸]. روش‌های مختلف تولید ذرات، تکنیک پراکنش جامد به‌عنوان روشی نوآورانه و امیدبخش مطرح شده است در این فرایند، یک ترکیب آب‌گریز درون یک ماتریس حامل آب‌دوست ادغام می‌شود که این امر منجر به افزایش قابلیت انحلال در آب، دسترسی زیستی آن می‌گردد. در مرحله نهایی، پراکنش حاصل خشک می‌شود که در این میان، خشک‌کردن پاششی به‌عنوان روشی کارآمد برای تولید ذرات جامد نهایی شناخته می‌شود. از جمله مزایای این تکنیک می‌توان به سادگی فرایند، هزینه نسبتاً پایین و بازدهی بالا اشاره کرد که امکان تولید ذراتی کوچک و یکنواخت را فراهم می‌آورد عاملی که برای توسعه و پایداری سامانه‌های امولسیونی پیکرینگ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱].

۵- کاربرد امولسیون پیکرینگ

امولسیون‌های پیکرینگ که توسط ذرات کلئیدی پایداری می‌شوند، به‌عنوان جایگزین‌های بالقوه برای سس‌های غذایی شبه‌مایونز

مورد استفاده قرار می‌گیرند. پیشرفت سریع امولسیون‌های پیکرینگ در کاربردهای غذایی طی سال‌های اخیر توجه فزاینده‌ای را در پژوهش‌ها و توسعه فناوری‌های غذایی به خود جلب کرده‌اند و نشان‌دهنده پتانسیل تحول‌آفرین آن‌ها برای دستیابی به پایداری و بهبود پروفایل‌های تغذیه‌ای در طیف وسیعی از محصولات است [۱،۲]. امولسیون‌های پیکرینگ، که در آن‌ها ذرات جامد کلئیدی جایگزین سورفکتانت‌های متداول شده و نقش پایداری‌کننده را ایفا می‌کنند، جذب غیرقابل برگشت این ذرات در فصل مشترک روغن-آب موجب تشکیل پوشش‌های محافظ مستحکمی پیرامون قطرات می‌شود که در برابر نوسانات دمایی، تنش‌های برشی و شرایط شدید pH مقاومت بالایی دارند. این ویژگی‌ها سبب شده است که امولسیون‌های پیکرینگ به‌عنوان گزینه‌ای بسیار جذاب و کارآمد برای کاربرد در طیف گسترده‌ای از محصولات غذایی مطرح شوند. امکان ادغام آن‌ها در محصولات لبنی، نانوبی، آنالوگ‌های گوشت گیاهی و نوشیدنی‌ها را فراهم می‌سازد. امولسیون‌های پیکرینگ به‌طور گسترده برای بهبود ویژگی‌های مایونز بدون زرده تخم‌مرغ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴].

پژوهش‌ها عمدتاً بر کاربرد امولسیون‌های پیکرینگ در حفاظت از پروبیوتیک‌ها، کپسوله‌سازی مواد مغذی عملکردی (nutraceuticals)، جایگزینی اسیدهای چرب اشباع و روغن‌های هیدروژنه، تولید مواد متخلخل و سایر زمینه‌ها متمرکز بوده‌اند [۹]. امولسیون‌های پیکرینگ پتانسیل بالایی برای کپسوله‌سازی ترکیبات هیدروفوبیک و ناپایدار، مانند کاروتنوئیدها، کورکومین و ویتامین‌های محلول در چربی دارند و با افزایش پایداری و دسترسی زیستی این ترکیبات، عمر مفید آن‌ها را ارتقا می‌دهند. با اینکه مطالعات انجام‌شده تاکنون محدود بوده‌اند، این سیستم‌ها علاوه بر کپسوله‌سازی، کاربردهای گسترده‌ای در فرمولاسیون غذاهای عملکردی، بسته‌بندی پایداری و ضد میکروبی، جایگزین چربی‌ها و جوهرهای خوراکی برای چاپ سه‌بعدی دارند، که نوآوری‌های آینده در این حوزه را نوید می‌دهد [۷].

هنگامی که ترکیبات کپسوله‌شده بر طعم یا عطر تأثیر منفی می‌گذارند، امولسیون‌های پیکرینگ به‌عنوان سیستم‌های مناسبی برای ارائه تجربه حسی طولانی‌مدت در محصولات غذایی ظاهر می‌شوند. به‌کارگیری امولسیون‌های پیکرینگ در مایونزها همچنین جایگزین مناسبی برای زرده تخم‌مرغ فراهم می‌کند و بدین ترتیب محصولات نوآورانه‌ای برای مصرف‌کنندگان وگان ایجاد می‌نماید [۷]. در میان فرمولاسیون‌های مختلف بررسی شده، برخی سامانه‌ها ویژگی‌های بافتی مشابهی با مایونزهای کم‌چرب تجاری نشان داده‌اند که این امر قابلیت استفاده آن‌ها را به‌عنوان

۱-۶- ذرات آلی

۱-۶-۱- نانوذرات صمغ

امولسیون‌های پیکرینگ پایدار شده با نانوذرات صمغ می‌توانند به‌عنوان جایگزین‌های سالم برای زرده تخم‌مرغ در مایونزهای سنتی مورد استفاده قرار گیرند. در یک پژوهشی، از نانوذرات صمغ برای تولید امولسیون‌های پیکرینگ به‌منظور تهیه مایونز وگان بدون زرده تخم‌مرغ استفاده کردند؛ آن‌ها امولسیون‌ها را با و بدون بارگذاری عصاره تفاله زیتون تهیه کردند و نشان دادند که این امولسیون‌ها پایداری قابل‌مقایسه‌ای با نمونه‌های کنترل تجاری دارند. علاوه بر این، امولسیون‌های پیکرینگ بارگذاری‌شده با عصاره تفاله زیتون، پایداری اکسیداتیو بهبودیافته‌ای نسبت به نمونه‌های بدون بارگذاری نشان دادند [۶]. نمونه‌های مایونز بدون زرده تخم‌مرغ که با نانوذرات صمغ بارگیری شده با عصاره تفاله زیتون (OPE) تهیه شده بودند، رفتار برش‌نازک، ویژگی‌های شبه‌جامد و قابلیت بازیابی، این ویژگی‌ها با افزایش غلظت نانوذرات افزایش یافت. پایداری و ظرفیت امولسیون در نمونه‌های مایونز بدون زرده تخم‌مرغ با افزایش غلظت نانوذرات افزایش یافت. پایدارکننده پیکرینگ نانوذرات صمغ خالی و بارگیری شده با OPE در مایونز نه‌تنها منبع خوبی از ترکیبات فنولی تفاله زیتون فراهم می‌کند، بلکه برای سلامت انسان مفید بوده و در کاربردهای غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴].

۲-۱-۶- گرانول‌های نشاسته

گرانول‌های نشاسته به‌عنوان نمونه‌ای برجسته از امولسیفایرهای ذره‌جامد با منشأ گیاهی مطرح هستند که توانایی تولید مایونزی معادل مایونز کلاسیک را نشان داده‌اند. امولسیون‌های خوراکی پیکرینگ، فرصت‌هایی برای توسعه انواع جدید مایونز فراهم شده است. گرانول‌های نشاسته برنج از طریق روش‌های اصلاح فیزیکی و شیمیایی تغییر یافته‌اند و به‌عنوان امولسیفایرهای گیاهی برای افزایش پایداری امولسیون‌های پیکرینگ مبتنی بر مایونز مورد استفاده قرار گرفتند [۳].

۳-۱-۶- پروتئین نخود

امولسیون پیکرینگ روغن در آب (O/W) پایدارشده با ذرات، پتانسیل بالایی برای تولید مایونز بدون تخم‌مرغ دارد. میکروژل‌های ایزوله پروتئین نخود (PPI) به روش شکست ژل (gel-breaking method) تهیه شدند و در تهیه یک امولسیون پیکرینگ شبه‌مایونز مورد استفاده قرار گرفتند. ایزوله پروتئین نخود (PPI) یک پروتئین گیاهی بدون آلرژن و با ارزش تغذیه‌ای

جایگزین‌های عملکردی تقویت می‌کند. استفاده از ترکیبات طبیعی، همراه با حضور مواد زیست‌فعال نظیر کورکومین و روغن‌های گیاهی با ارزش تغذیه‌ای بالا، مزایای تغذیه‌ای و عملکردی بیشتری را برای این سامانه‌ها فراهم می‌سازد [۱]. مطالعات نشان داده‌اند که میکروفیبرهای سلولز همراه با اسیدهای چرب غیراشباع می‌توانند امولسیون‌های پایدار روغن در آب (o/w) ایجاد کنند و به این ترتیب اسیدهای چرب اشباع و چربی‌های ترانس مضر در محصولات غذایی را جایگزین نمایند [۸]. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بسیاری از ذرات پروتئینی گیاهی قادر به تشکیل امولسیون‌های شبه‌مایونز هستند با این حال، اختلاف قابل‌توجهی از نظر پایداری و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی (مانند ویسکوزیته ظاهری و بازیابی تیکسوتروپی) میان این امولسیون‌های شبه‌مایونز و مایونز تجاری مبتنی بر زرده تخم‌مرغ وجود دارد [۹].

استفاده از امولسیون‌های پیکرینگ در کاربردهای مرتبط با غذا عمدتاً به بررسی خواص فیزیکوشیمیایی که پایداری امولسیون‌ها را تعیین می‌کنند، متمرکز بوده است. با این حال، پایداری بالاتر امولسیون‌های پیکرینگ، توسعه فرایندهای نوآورانه برای دستیابی به محصولات غذایی سالم‌تر و پایدارتر را امکان‌پذیر می‌سازد، محدودیت‌های تکنولوژیکی را برطرف می‌کند و پاسخگوی نیازهای مصرف‌کنندگان روزافزون و سخت‌گیرانه می‌باشد [۷].

۶- ذرات در امولسیون پیکرینگ

توسعه سس‌های مایونز بدون زرده تخم‌مرغ از طریق امولسیون‌های پیکرینگ در سال‌های اخیر توجه قابل‌توجهی را به خود جلب کرده است و مطالعات متعددی این رویکرد را مورد بررسی قرار داده‌اند [۶].

این ذرات می‌توانند ماهیتی آلی یا معدنی داشته باشند. از جمله ذرات آلی می‌توان به پروتئین‌ها (مانند وی، نخود و سویا)، پلی‌فنول‌ها، بلورهای چربی و پلی‌ساکاریدهای نظیر نشاسته، کیتوسان، کیتین و نانوسلولز اشاره کرد. ذرات معدنی نیز شامل سیلیکا، کربنات کلسیم و هیدروکسی‌آپاتیت هستند. به دلیل ایجاد یک مانع بزرگ توسط ذرات در ناحیه بین‌سطحی، امولسیون‌های پیکرینگ معمولاً در مقایسه با امولسیون‌هایی که به‌وسیله سورفکتانت‌های مولکولی پایدار شده‌اند، مقاومت بیشتری در برابر هم‌جوشی (coalescence) از خود نشان می‌دهند [۸]. امولسیون‌های پیکرینگ پایدارشده با ذرات پالپ سیب، نانوذرات صمغ، ذرات پراکندگی جامد مبتنی بر کورکومین، میکروژل‌ها، برای توسعه مایونزهای خوراکی به‌کار گرفته شده‌اند و پایداری آن‌ها هم در طول ذخیره‌سازی و هم در برابر تنش‌های محیطی مختلف نشان داده شده است [۷].

بالا است. PPI دارای خواص امولسیفایری است که می‌تواند آمفی‌فیلیسیتی و اندازه ذرات خود را تغییر دهد و به تشکیل تجمعات و پایدارسازی امولسیون روغن در آب (O/W) در غلظت نسبتاً کم ($PPI < 1\%$ وزنی) منجر شود [۹].

۴-۱-۶- نانوسلولز

یک روند نوظهور، استفاده از نانوسلولز برای پایدارسازی امولسیون‌های پیکرینگ است. برای مثال، نانوکریستال سلولز (CNCs) به عنوان پایدارکننده امولسیون‌های روغن در آب (o/w) شناخته می‌شوند و حتی با پوشش سطحی کم CNC، مقاومت قابل توجهی در برابر هم‌جوشی نشان می‌دهند که ناشی از ترکیب دافعه‌های الکترواستاتیک و استریک بین قطرات است. در مثال دیگری، امولسیون‌های پایدار o/w که برای مایونز و محصولات نوشیدنی کاربرد دارند، از ترکیب دو مؤلفه ایجاد می‌شوند: نانوفیبریل‌های سلولز (CNFs) با بار زیاد و فیبریلایسون بسیار نازک و پلی‌ساکاریدهای گالاکتوگلوکومانان (GGM) بدون بار الکتریکی، هر دو CNF و GGM به پایداری بین‌سطحی کمک می‌کنند، در حالی که GGM علاوه بر این، مقاومت در برابر اکسیداسیون را نیز فراهم می‌آورد [۸].

۵-۱-۶- کیتوزان

کیتوزان (CS) یک پلی‌ساکارید کاتیونی، به دلیل پایداری شیمیایی، زیست‌سازگاری، عملکردی‌سازی آسان و کاربردهای متنوع خود مورد توجه قرار گرفته است. روشی نوآورانه و ساده برای تولید سس مایونز کم‌چرب تثبیت‌شده با استفاده از EYG-CS و شبکه‌های دوگانه قطره روغن ارائه می‌شود که نیازهای صنعت را برای راه‌حل‌های مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط زیست برطرف می‌کند. تأثیر کسر حجمی‌های مختلف روغن بر ویژگی‌ها و پایداری ژل‌های امولسیونی تثبیت‌شده توسط EYG-CS را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که اندازه ذرات امولسیون در مرحله اولیه کاهش یافته و سپس با افزایش کسر حجمی روغن افزایش می‌یابد. از نظر خواص رئولوژیکی و بافتی، نمونه‌های امولسیون ویژگی‌های حالت جامد معمولی را نشان دادند [۱۰].

۶-۱-۶- دیگر محصولات

از ذرات تفاله سیب به عنوان عامل پایدارکننده امولسیون برای تولید مایونز بدون کلسترول استفاده کردند و گزارش کردند که به جز ویژگی رنگ، سایر خصوصیات، شامل پایداری فیزیکی و رفتار رئولوژیکی، مشابه مایونزهای سنتی است. نانوذرات مختلف تهیه شده از مواد معدنی، پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها پتانسیل تثبیت امولسیون‌های حاوی کورکومین را نشان می‌دهند و ترشوندگی آنها را می‌توان از طریق تشکیل کمپلکس و تشکیل نانوذرات

هیبریدی تغییر داد. تثبیت امولسیون‌های پیکرینگ با نانوذرات مبتنی بر پلی‌ساکارید و کمپلکس‌های آنها می‌تواند پایداری کورکومین را در برابر تخریب افزایش دهد. مطالعات دیگری نیز به استفاده از ذرات گلوتن گندم و کیتوسان پرداخته‌اند که به پتانسیل امولسیون‌های پیکرینگ در توسعه این نوع محصولات را تقویت می‌کند [۶].

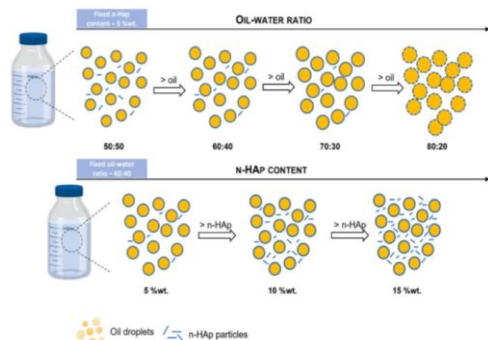
میکروژل‌های پروتئینی گیاهی در صنعت غذا مزیت کلیدی دارند. بیشتر میکروژل‌های پروتئینی، انرژی بالای جدا شدن ذرات پیکرینگ را با قابلیت پروتئین‌ها در جذب به تقریباً هر فصل مشترک ترکیب می‌کنند، در حالی که لایه جذب‌شده بسیار ضخیم‌تر از یک مونولایه پروتئینی است. تأثیر مواد معمول مورد استفاده در فرایند تهیه امولسیون‌های پیکرینگ شبه‌مایونز از میکروژل‌های گیاهی، به ندرت یا به‌طور جامع مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین، لازم است تأثیر عوامل خارجی (مانند pH و قدرت یونی) و مواد معمول بر پایداری، ویژگی‌های سطحی و خواص رئولوژیکی امولسیون‌های پیکرینگ شبه‌مایونز پایداری‌شده با میکروژل‌ها به‌طور سیستماتیک مورد مطالعه قرار گیرد [۹]. توسعه ژل‌های امولسیونی کم‌چرب به عنوان جایگزین سس مایونز، توجه فزاینده‌ای را از سوی محققان به خود جلب کرده است. در حال حاضر، یک استراتژی مؤثر برای تهیه ژل‌های امولسیونی کم‌چرب شامل افزایش برهم‌کنش بین قطرات روغن و فاز پیوسته از طریق تجمع پیوندهای عرضی است که در نتیجه ویسکوزیته و پایداری ژل امولسیون را افزایش می‌دهد. یک روش سبز، سازگار با محیط‌زیست و از نظر عملیاتی ساده مناسب برای تولید ژل‌های امولسیونی کم‌چرب در مقیاس صنعتی وجود دارد [۱۰].

۲-۶- ذرات معدنی

اگرچه بخش عمده‌ای از پژوهش‌ها بر استفاده از ذرات آلی به عنوان پایدارکننده‌های پیکرینگ متمرکز بوده‌اند، ذرات غیرآلی نیز به عنوان گزینه‌هایی قابل‌اتکا مطرح شده و هنگام به‌کارگیری به عنوان پایدارکننده امولسیون، ذرات غیرآلی مزایایی از جمله پایداری بیشتر در برابر تنش‌های محیطی، به‌ویژه دما و قدرت یونی، ایجاد می‌کنند که این امر امکان حفظ یکپارچگی ساختاری امولسیون را در بازه‌های زمانی طولانی‌تر فراهم می‌سازد [۶].

۱-۲-۶- سیلیس

بخش عمده‌ای از سیستم‌های موفق با سیلیس یا ذرات سیلیس اصلاح‌شده به دست آمده‌اند که با تقاضای مصرف‌کننده برای برچسب پاک، سیستم‌های طبیعی یا حتی درجه غذایی مطابقت ندارد. با این حال، تحقیقات در مورد شناسایی مواد اولیه مناسب



شکل ۲. نقش نسبت روغن به آب و غلظت نانوهیدروکسی آپاتیت (n-HAp) در پایداری سازی امولسیون های پیکرینگ [۶].

۷- مشخصه یابی

در مورد لایه های سطح مشترک و برهمکنش های آنها با ترکیبات زیست فعال، پتانسیل زیادی برای بهبود فرمولاسیون و عملکرد نانوامولسیون های کاربردی دارد. لایه های بین سطحی بخش قابل توجهی از قطرات فاز پراکنده در نانوامولسیون ها را تشکیل می دهند. با وجود این اهمیت، مطالعات اندکی به مشخصه یابی خواص بین سطحی و اثرات آن ها پرداخته اند. کشش سطحی سورفکتانت های طبیعی برای ارزیابی ظرفیت امولسیون کنندگی آن ها اندازه گیری شده است، در حالی که از اندازه گیری های کشش سطحی و اتساع بین سطحی برای دنبال کردن تغییرات خواص سطحی تحت شرایط شبیه سازی شده به کار رفته اند [۸]. در سطح اولیه، امولسیون های پیکرینگ خوراکی از نظر اندازه ذره، شکل ذره، اندازه قطرات و نوع امولسیون (روغن در آب یا آب در روغن) مشخصه یابی می شوند. این کار با استفاده از روش های میکروسکوپی انجام می گیرد که با مشاهدات ماکروسکوپی قابلیت پخش فازها تأیید می شوند. در سطح ثانویه، امولسیون های پیکرینگ خوراکی از نظر پایداری شامل پایداری گرانشی، جدایش فازی و هم جوشی، رئولوژی توده ای و کشش بین سطحی مورد ارزیابی قرار می گیرند [۱۱].

روش های میکروفلوئیدیک، که امکان تحلیل سریع نمونه های کوچک را فراهم می کنند، برای تعیین فرکانس هم جوشی و نیز زمان تماس و تخلیه فیلم بین قطرات در امولسیون های روغن در آب توسعه یافته اند. این روش ها را می توان به مطالعه سیستم های امولسیون پیکرینگ نیز تعمیم داد [۱۲].

در ترکیب با رویکردهای نوین مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری عمیق برای دسته بندی قطرات که می توان اطلاعات سریع و عینی درباره خواص امولسیون به دست آورد و از آن برای بهبود فرمولاسیون امولسیون ها استفاده کرد [۸]. نسبت بالای

جدید، بهبود فرمولاسیون های موجود و شناسایی زمینه های کاربردی جدید را توجیه می کند [۱۱].

۲-۲-۶- هیدروکسی آپاتیت

امولسیون های پیکرینگ پایدار شده با ذرات معدنی مانند هیدروکسی آپاتیت (HAp) به عنوان رویکردی نوین برای تولید سس های شبه مایونز بدون تخم مرغ مطرح شده اند. HAp علاوه بر ایجاد پایداری فیزیکی و اکسیداتیو بالا، می تواند به عنوان منبع زیست دسترس کلسیم عمل کرده و ارزش تغذیه ای محصول را افزایش دهد. رنگ سفید ذاتی این ذرات نیز امکان تنظیم رنگ و افزودن ترکیبات زیست فعال طبیعی را فراهم کرده و این سامانه ها را به گزینه ای امیدبخش برای توسعه محصولات غذایی عملکردی و سالم تبدیل می کند [۶].

به صورت شماتیک نقش نسبت روغن به آب و غلظت نانوهیدروکسی آپاتیت (n-HAp) را در پایداری سازی امولسیون های پیکرینگ نشان می دهد (شکل ۲). در غلظت ثابت n-HAp افزایش نسبت روغن به آب منجر به افزایش سطح بین فازی شده و در نسبت های بالای روغن (مانند ۸۰:۲۰)، به دلیل کمبود ذرات برای پوشش کامل قطرات روغن، ناپایداری و جدایش فازی رخ می دهد. در مقابل، در نسبت ثابت روغن به آب، افزایش غلظت n-HAp موجب دسترسی بیشتر ذرات برای جذب در فصل مشترک روغن-آب شده و ذرات اضافی باقی مانده در فاز پیوسته با افزایش ویسکوزیته و ایجاد دافعه های الکترواستاتیکی، به بهبود پایداری فیزیکی و رئولوژیکی امولسیون کمک می کنند. این سازوکار اهمیت تنظیم هم زمان مقدار فاز روغنی و غلظت ذرات معدنی را در طراحی امولسیون های پیکرینگ شبه مایونز برجسته می سازد.

فرصت های فراوانی برای توسعه امولسیون های پیکرینگ از طریق تنظیم شکل و خواص سطحی ذرات مانند بار الکتریکی، کمپلکس سازی و غیره که از مواد طبیعی به دست می آیند، وجود دارد. نانوسلولزهای میله ای شکل امکان پوشش کارآمد سطح مشترک فازها را فراهم می کنند، در حالی که سطوح آن ها همچنان قابل تنظیم و مهندسی باقی می ماند. همچنین ذرات مبتنی بر پروتئین و سلول های باکتریایی به راحتی قابل اصلاح و مهندسی هستند [۸].

می‌کنند، بلکه چشم‌اندازی نوآورانه برای صنایع غذایی با کیفیت و پایدار ارائه می‌دهند.

۹. منابع

- 1-Ghirro, L. C., et al. (2022). "Pickering emulsions stabilized with curcumin-based solid dispersion particles as mayonnaise-like food sauce alternatives." *Molecules* 27(4): 1250
- 2-Kirttil, E. and E. Yildiz (2025). "Recent advances and future frontiers in Pickering emulsions for food applications: Bridging science, industry, and nutrition." *Food Research International*: 116622
- 3-Taghavi, E., et al. (2024). "Rheological and stability of mayonnaise-based Pickering emulsions stabilised by modified rice starch granules as a plant-based emulsifier." *International Journal of Food Science and Technology* 59(8): 5651-5663
- 4- Akcicek, A., et al. (2022). "Egg yolk-free vegan mayonnaise preparation from pickering emulsion stabilized by gum nanoparticles with or without loading olive pomace extracts." *ACS omega* 7(30): 26316-26327
- 5-Tian, Z., et al. (2025). "Stability of whey protein isolate-chitosan Pickering emulsions and their application in mayonnaise." *Discover Food* 5(1): 230
- 6- Relvas, M. E., et al. (2024). "Nano-hydroxyapatite Pickering emulsions as edible mayonnaise-like food sauce templates: A novel approach for food design." *Journal of Food Engineering* 381: 11218.
- 7-Cassani, L. V. and A. Gomez Zavaglia (2024). "Pickering emulsions in food and nutraceutical technology: from delivering hydrophobic compounds to cutting-edge food application
- 8- Øye, G., et al. (2023). "Trends in food emulsion technology: Pickering, nano-, and double emulsions." *Current opinion in food science* 50: 101003
- 9-Li, S., et al. (2022). "Edible mayonnaise-like Pickering emulsion stabilized by pea protein isolate microgels: Effect of food ingredients in commercial mayonnaise recipe." *Food Chemistry* 376: 131866
- 10-Sun, H., et al. (2025). "Enhancement of the formation and stability of low-fat Pickering emulsion gels stabilized with egg yolk granules-chitosan complex: Insights into the development of mayonnaise substitutes." *Food Chemistry* 464: 141734
- 11-Linke, C. and S. Drusch (2018). "Pickering emulsions in foods-opportunities and limitations." *Critical reviews in food science and nutrition* 58(12): 1971-1985
- 12-Dudek, M., et al. (2020). "Microfluidic method for determining drop-drop coalescence and contact times in flow." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 586: 124265.

سطح به جرم، نانوامولسیون‌ها را به حامل‌های جذاب برای ترکیبات زیست‌فعال در غذاهای عملکردی تبدیل می‌کند. با این حال، نسبت بالای سطح به جرم ممکن است به غلظت‌های بالای امولسیفایر نیاز داشته باشد. این موضوع می‌تواند هزینه‌های سیستم‌ها را افزایش دهد و در عین حال، غلظت امولسیفایرها نباید از حداکثر میزان مجاز یا سطح مصرفی تعریف‌شده توسط مراجع قانونی تجاوز کند تا اطمینان حاصل شود که مقدار مصرف روزانه قابل قبول (ADI) رعایت می‌شوند[۱].

رزونانس مغناطیسی هسته‌ای NMR با میدان پایین یک تکنیک کاربردی برای بررسی ساختار امولسیون‌های چندگانه و نانوامولسیون‌ها محسوب می‌شود و حتی برای نمونه‌های کدر نیز قابل استفاده است. همچنین، مشخصه‌یابی میکروفلوئیدیک در ترکیب با روش‌های تصویربرداری دیجیتالی و هوش مصنوعی اخیراً ظهور یافته است و قابلیت مشخصه‌یابی سریع نرخ هم‌جوشی در سیستم‌های امولسیونی را فراهم می‌کند. این روش‌ها می‌توانند امکان غربالگری سریع و مشخصه‌یابی بین‌سطحی امولسیون‌ها را که با عامل‌های امولسیون‌کننده سبز و پایدار، چه به شکل مولکولی و چه به شکل ذرات، تهیه شده‌اند، فراهم آورند و جایگزین سورفکتانت‌های سنتزی خوراکی فعلی شوند[۱۲]. تمرکز تحقیقات و توسعه (R&D) بر امولسیون‌های پیکرینگ، امولسیون‌های چندگانه و نانوامولسیون‌ها قرار دارد. مشخصه‌یابی مناسب خواص بین‌سطحی و رفتار پراکندگی کلید دستیابی به محصولات تجاری برای تمامی این سیستم‌ها است [۸].

۸. نتیجه گیری

نانوامولسیون‌های پیکرینگ به‌عنوان یک رویکرد نوآورانه در تولید سس مایونز کم‌چرب، توانسته‌اند محدودیت‌های کاهش چربی را با حفظ ساختار، پایداری و ویژگی‌های حسی محصول به حداقل برسانند. بررسی مطالعات اخیر نشان می‌دهد که نوع و اندازه ذرات، غلظت و شرایط فرآوری تاثیر قابل توجهی بر خواص رئولوژیکی، پایداری و ویژگی‌های حسی محصول دارند. استفاده از این فناوری نه تنها امکان کاهش چربی را فراهم می‌کند، بلکه فرصت‌های جدید برای طراحی محصولات سالم‌تر و با عملکرد بهبودیافته ایجاد می‌کند. با این حال نیاز به تحقیقات بیشتر برای ارزیابی اثرات طولانی‌مدت ذرات، ایمنی مصرف و بهینه‌سازی سیستم‌های امولسیونی وجود دارد. در نهایت، نانوامولسیون‌های پیکرینگ نه تنها فرصتی برای توسعه محصولات سالم‌تر ایجاد