

مقاله مروری

چاپ سه‌بعدی غذا با استفاده از هیدروکلوئیدها: فرصت‌ها، چالش‌ها و کاربردها

سحر خلیلی^۱، هاجر شکرچی‌زاده^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲. استاد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹)

چکیده

چاپ سه‌بعدی غذا به‌عنوان یک فناوری نوین، نه‌تنها امکان تولید مواد غذایی لایه‌لایه و سفارشی‌سازی‌شده را فراهم می‌کند، بلکه به‌دلیل پتانسیل بالای آن در حل چالش‌های جهانی مانند سوءتغذیه، بهینه‌سازی تغذیه فردی، کاهش ضایعات غذایی و بهبود تولید پایدار اهمیت ویژه‌ای یافته است. ضرورت توسعه این فناوری از آن جهت است که می‌تواند نیازهای تغذیه‌ای گروه‌های حساس را به‌طور دقیق و قابل کنترل برآورده کرده و مسیر تولید غذاهای عملکردی، شخصی‌سازی‌شده و سازگار با رژیم‌های خاص را هموار سازد. این روش کاربردهای گسترده‌ای در تهیه غذاهای متنوع، به‌ویژه برای گروه‌های خاص مانند سالمندان، کودکان و بیماران دارد. مزایای اصلی آن شامل افزایش بهره‌وری تولید، کاهش ضایعات غذایی و خلق ساختارهای زیباشناختی و پیچیده است. مواد غذایی مورد استفاده در چاپ سه‌بعدی به سه دسته قابل چاپ به‌طور طبیعی، غیرقابل چاپ و جایگزین تقسیم می‌شوند. در این میان، هیدروکلوئیدها به دلیل ویژگی‌های رئولوژیکی مطلوب و توانایی ژل‌سازی، نقش کلیدی در بهبود عملکرد جوهر چاپ ایفا می‌کنند. ژلاتین، زانتان، کاراگینان و آلژینات از جمله مهم‌ترین هیدروکلوئیدهایی هستند که اثر آن‌ها بر بافت، پایداری، نگهداری آب و پذیرش حسی مواد غذایی بررسی شده است. شواهد موجود نشان می‌دهد که انتخاب و ترکیب مناسب هیدروکلوئیدها و افزودنی‌ها می‌تواند کیفیت مکانیکی و حسی محصولات چاپ‌شده را به‌طور چشمگیری ارتقا دهد. علاوه بر ترکیبات فرمولاسیون، شرایط چاپ و فرآیندهای پس از چاپ نیز در تعیین کیفیت نهایی محصول نقش بسزایی دارند. در این مقاله مروری، عملکرد رئولوژیکی، چالش‌ها و رویکردهای نوین در بهبود کیفیت محصولات چاپ‌شده، با هدف ارائه تصویری جامع از نقش هیدروکلوئیدها در چاپ سه‌بعدی غذا، بررسی می‌شود. در نهایت می‌توان گفت، چاپ سه‌بعدی غذا با استفاده از هیدروکلوئیدها، افق‌های جدیدی را برای تولید غذاهای سالم، محصولات گیاهی و جایگزین‌های گوشتی گشوده و به‌عنوان رویکردی نوین در کاهش چالش‌های صنعت غذا و ارتقای تغذیه شناخته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ژل‌های هیدروکلوئیدی، پرینتر سه‌بعدی، چاپ سه‌بعدی غذا، ژلاتین، کاراگینان

۱. مقدمه

(برای تکمیل جستجو) انجام شد. فرایند جستجو با استفاده از کلیدواژه‌های مرتبط از جمله 3D food hydrocolloids, printing hydrocolloid gels, و نام هیدروکلوئیدهای رایج مانند pectin, carrageenan, xanthan, و alginate صورت گرفت. در مرحله نخست، ۱۰۳ مقاله انگلیسی مرتبط شناسایی شد. سپس براساس معیارهایی مانند تناسب موضوعی، کیفیت علمی و ارتباط با اهداف پژوهش، ۵۰ مقاله برای بررسی دقیق‌تر انتخاب گردید. در نهایت، با اعمال معیارهای نهایی شامل تناسب با هدف مرور و کیفیت محتوا، ۳۹ مقاله به‌عنوان منابع اصلی برای نگارش مقاله حاضر مورد استفاده قرار گرفت. هدف از این بخش، ارائه یک مرور ساختاریافته از منابع علمی موجود و شناسایی چالش‌ها و فرصت‌های مربوط به کاربرد هیدروکلوئیدها در چاپ سه‌بعدی غذا و تبیین جهت‌گیری‌های راهبردی برای توسعه فرمولاسیون‌های مناسب در این حوزه است.

۲. روش‌های چاپ سه‌بعدی

روش‌های چاپ سه‌بعدی مواد غذایی به سه گروه اصلی شامل روش بستر پودری^۱، روش‌های مبتنی بر اکستروژن^۲ و روش‌های مبتنی بر اصول پرینت جوهرافشان دو بعدی^۳ تقسیم می‌شوند. هر یک از این فناوری‌ها، دارای مزایا، محدودیت‌ها و حوزه‌های کاربرد متفاوتی‌اند و انتخاب روش مناسب باید بر اساس نوع ماده غذایی، ساختار هدف، دقت مورد انتظار و نیازهای فرایند پس از چاپ انجام شود. تحلیل مطالعات نشان می‌دهد که هیچ‌یک از این روش‌ها به‌طور مطلق بر دیگری برتری ندارد؛ بلکه هر کدام برای کاربردهای خاص مناسب‌تر هستند [۲].

روش بستر پودری: در روش بستر پودری یک لایه از مواد پودری با یک مایع مخلوط می‌شود و در سراسر بستر پخش می‌شود. در این روش یک الگوی دو بعدی به‌صورت لایه‌لایه تکرار می‌شود تا یک شکل سه‌بعدی پیچیده ایجاد شود. اتصال این لایه‌ها به همدیگر به دو صورت تف جوشی و ذوب^۴ یا پیوند دادن مواد پودری^۵ مانند یک چسب انجام

چاپ سه‌بعدی مواد غذایی یک فناوری نوظهور است که در آن ماده غذایی به صورت لایه‌به‌لایه ساخته می‌شود. از این روش برای ساخت مواد غذایی سفارشی‌سازی شده و با طرح‌های پیچیده برای افراد با شرایط خاص مانند گیاه‌خواران، سالمندان، بیماران دیسفاژی و دارای مشکلات بلعی و فضا‌نوردان استفاده می‌شود [۱، ۲]. همچنین در جهت افزایش علاقه کودکان به مصرف غذاهای مفید، استفاده از پرینتر سه‌بعدی برای تولید غذای کودک با اشکال زیبا و پیچیده مورد توجه قرار گرفته است. افزودن ویتامین‌ها، مواد معدنی و پروبیوتیک‌ها به غذای چاپ‌شده برای کودکان، باعث رفع کمبود تغذیه‌ای کودکان و ارتقای سلامت روده آنها می‌شود [۱-۴]. با افزودن ترکیباتی مانند روغن نارگیل، پلی‌فنول‌ها و جینسینگ قرمز به جوهر چاپ نیز ویژگی‌های سلامتی غذا ارتقا یافته و غذای چاپ‌شده نقش درمانی نیز خواهد داشت [۱]. از مزایای دیگر استفاده از این فناوری می‌توان به افزایش راندمان تولید غذا، تولید مواد غذایی با اشکال پیچیده [۳]، کاهش هزینه‌ها، جبران کمبود نیروی کار [۵] و به حداقل رساندن ضایعات مواد غذایی اشاره کرد [۳]. تولید ماده غذایی مطابق سلیقه مصرف‌کننده، تولید آن در محل و کاهش فساد ناشی از نگهداری و حمل‌ونقل از علل کاهش ضایعات مواد غذایی تهیه‌شده به روش چاپ سه‌بعدی هستند [۱]. به‌طور کلی، این رویکرد، نویدبخش تحول در تولید مواد غذایی و افزایش رضایت مصرف‌کننده است [۵ و ۶]. برای داشتن یک چاپ سه‌بعدی مطلوب لازم است جوهر دستگاه چاپ، ویژگی‌های مطلوب برای چاپ و فرآیندهای پس از چاپ داشته باشد. به همین منظور از ترکیبات مختلف از جمله پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها استفاده می‌شود. البته همه پلی‌ساکاریدها به‌عنوان پلی‌ساکارید غذایی به حساب نمی‌آیند. پلی‌ساکارید غذایی به پلی‌ساکاریدی گفته می‌شود که به‌عنوان یک افزودنی غذایی در فرآیندهای تهیه غذا برای کنترل خواص حسی، خواص فیزیکی و بهبود ارزش غذایی مجاز باشد. اکثر هیدروکلوئیدها جزو این دسته از افزودنی‌ها طبقه‌بندی می‌شوند [۷].

در این پژوهش، جستجوی مقالات علمی در پایگاه‌های ScienceDirect، Scopus و همچنین Google Scholar

1. Powder bed
2. Extrusion based
3. 2D inkjet printing principles
4. Sintering
5. Bonding of powder

صورت است که قطرات جوهر خروجی از دستگاه بسیار ریز و در حد پیکولیتر هستند [۱۲]. جوهر بدون تماس با سطح، در محل موردنظر پاشیده می‌شود. همچنین فرمولاسیون جوهر باید مناسب با ویژگی‌های نازل باشد تا از گرفتگی نازل جلوگیری شود [۱۳]. در این روش، از دو دستگاه پیزوالکتریک و جت حرارتی استفاده می‌شود. این روش برای تولید ساختارهای سه بعدی حجیم مناسب نیست و بیشتر برای کاربردهای دوبعدی یا نیمه سه بعدی توصیه می‌شود. بنابراین از نظر فنی در دسته چاپ دوبعدی قرار می‌گیرد، مگر در مواردی که چندین لایه نازک به صورت تدریجی روی هم قرار گیرد [۲].

روش‌های چاپ سه بعدی هرکدام مزایا و محدودیت‌هایی دارند و انتخاب بهترین روش باید براساس نوع ماده اولیه، رئولوژی، نیازهای ساختاری و هدف نهایی محصول صورت گیرد. روش بستر پودری برای ساختارهای پیچیده و خشک مناسب است، اکستروژن برای غذاهای مرطوب و قوام‌یافته بهترین گزینه محسوب می‌شود و جوهرافشان بالاترین دقت را در لایه‌نشانی مواد سیال دارد؛ اما برای ساختارهای حجیم مناسب نیست. به‌طورکلی، هیچ روش چاپی بدون در نظر گرفتن ویژگی‌های ماده غذایی عملکرد مطلوبی نخواهد داشت و طراحی فرمولاسیون و انتخاب فناوری باید به صورت همزمان انجام شود.

۳. طبقه‌بندی مواد غذایی برای چاپ سه بعدی

طبقه‌بندی مواد غذایی برای چاپ سه بعدی تنها براساس نوع ماده اولیه انجام نمی‌شود، بلکه بر پایه رفتار رئولوژیکی، میزان نیاز به اصلاح ساختار و قابلیت آنها برای ایجاد لایه‌های پایدار است. مرور مطالعات نشان می‌دهد که مواد غذایی را می‌توان براساس میزان سازگاری طبیعی با فرآیند چاپ به سه گروه اصلی تقسیم کرد. این طبقه‌بندی کمک می‌کند تا بتوان فرمولاسیون مناسب، پارامترهای چاپ و نیازهای اصلاحی را برای هر نوع ماده تعیین کرد.

مواد غذایی قابل چاپ به صورت طبیعی: این مواد می‌توانند بدون تغییرات قابل توجه در چاپ سه بعدی استفاده شوند؛ زیرا دارای خواص رئولوژیکی مناسبی هستند. ویسکوزیته و رفتار رقیق‌شونده با نیروی برشی این مواد باعث

می‌شود [۲]. در این روش مخلوطی از پودرهای خوراکی مانند پروتئین‌های محلول در آب، هیدروکلوئیدها و نرم‌کننده‌ها در بستر رسوب می‌کنند. سپس یک مایع که اغلب محلول آبی است با نازل پیزوالکتریک روی این بستر اسپری می‌شود و به کمک واکنش‌های شیمیایی لایه‌ها در حین جامدشدن به همدیگر متصل می‌شوند [۸]. این روش برای تولید مواد غذایی متنوعی مانند پاستا، شکلات و کیک کاربرد دارد. این فناوری محدودیت‌هایی نیز دارد: نیاز به مواد خشک باعث می‌شود بسیاری از مواد غذایی تازه مانند میوه و گوشت برای آن مناسب نباشند، بافت محصول نهایی اغلب شبیه مواد خشک یا نیمه خشک است و فرایند تولید نیز معمولاً آهسته و با حجم پایین انجام می‌شود [۹].

روش اکستروژن: اکستروژن محبوب‌ترین روش در

تولید مواد غذایی سه بعدی است که در این روش نیز مواد غذایی به صورت لایه لایه روی هم قرار می‌گیرند. در فرایند اکستروژن دما پارامتر مهمی است و ماده غذایی ورودی می‌تواند به صورت سرد یا گرم وارد دستگاه شود [۱۰]. به همین منظور دو روش اکستروژن وجود دارد. روش اول مدل‌سازی رسوبی ذوب‌شونده^۱ است که در این روش مواد از اکسترودر به صورت داغ خارج شده و از یک محیط گرم عبور کرده و روی یک بستر گرم قرار می‌گیرند. در نهایت ماده غذایی خنک می‌شود. روش دوم روش فیلامنت ذوبی^۲ است. تنها تفاوت این روش با روش قبلی آن است که ماده غذایی پس از خروج از اکسترودر از یک محیط با دمای معمولی عبور می‌کند. روش اول در صنعت کاربرد بیشتری دارد. مزیت این روش تولید یک وعده غذایی کامل و استفاده از گستره وسیعی از مواد غذایی است. در این روش ماده غذایی سطح کاملاً صافی نخواهد داشت. همچنین این روش امکان تولید مواد غذایی با ارتفاع زیاد را ندارد و منجر به فرو ریختن ماده غذایی می‌شود [۲]. لذا مهمترین چالش حفظ پایداری ساختارهای چاپ شده است [۱۱].

روش پرینت جوهرافشان دو بعدی^۳: روش آخر پرینت

پرینت جوهرافشان دو بعدی است. اصول این روش به این

1. Fused Deposition Modeling
2. Fused Filament Fabrication
3. 2D inject printing

مواد غذایی ویژگی ذاتی و ثابتی نیست، بلکه می‌توان آن را از طریق اصلاح ترکیب، مهندسی رئولوژی و طراحی فرمولاسیون به‌طور هدفمند ایجاد یا تقویت کرد؛ موضوعی که اساس این طبقه‌بندی را شکل می‌دهد.

۴. عوامل مؤثر بر کیفیت مواد غذایی سه‌بعدی

کیفیت نهایی محصولات غذایی چاپ‌شده تنها نتیجه عملکرد پرنتر نیست، بلکه حاصل برهم‌کنش پیچیده بین خواص ماده اولیه، پارامترهای چاپ و فرآیندهای پس از چاپ است. مرور مطالعات نشان می‌دهد که ضعف در هر یک از این سه حوزه، می‌تواند موجب کاهش و یا عدم حفظ شکل و یا از بین رفتن ویژگی‌های حسی محصول شود. در این بخش، نقش هر دسته از عوامل بررسی می‌شود.

۱.۴. خواص ماده غذایی

ترکیب ماده غذایی مورداستفاده در تعیین قابلیت چاپ آنها بسیار اثرگذار است. قابلیت چاپ مواد غذایی به ترکیب، ساختار و خواص فیزیکی‌شیمیایی آنها مانند میزان رطوبت، فعالیت آبی و آلودگی میکروبی بستگی دارد. همچنین خواص رئولوژیکی مواد مانند ویسکوزیته و رفتار جریان آنها برای تشکیل لایه‌های صاف و مناسب در چاپ اثرگذار است؛ به‌همین دلیل در قسمت قبلی، مواد غذایی براساس قابلیت چاپشان طبقه‌بندی شدند و به ترکیباتی که قابلیت چاپ ندارند، لازم است افزودنی‌ها اضافه شود. مواد افزودنی به‌طور قابل توجهی ویژگی‌های بافتی و حسی ترکیبات چاپ‌شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد و علاوه بر ایجاد قابلیت چاپ در آنها پذیرش این مواد غذایی را برای مصرف‌کننده بیشتر می‌کند [۱۵]. به‌عنوان مثال در پژوهش Anukiruthika و همکاران در سال ۲۰۲۰ مشخص شد که وجود نشاسته در مخلوط آرد برنج و تخم‌مرغ منجر به افزایش چسبندگی و اتصال بهتر می‌شود و در نتیجه پایداری محصول چاپ‌شده افزایش می‌یابد. البته نشاسته منجر به کاهش سیالیت جوهر نیز می‌شود [۱].

۲.۴. پارامترهای چاپ

پارامترهای چاپ شامل فشار و سرعت اکستروژن، قطر،

می‌شود که آنها در حین چاپ به آرامی اکستروژن شوند و ساختارهای پایداری تشکیل دهند. شکلات، پوره سیب‌زمینی، روکش خامه‌ای^۱ کیک، پنیرهای خامه‌ای و ژل‌ها ژل‌ها نمونه‌هایی از این دسته مواد غذایی هستند. با وجود قابلیت چاپ طبیعی، بسیاری از این مواد برای ایجاد ساختارهای پیچیده یا تحمل بار لایه‌های متعدد به تقویت رئولوژیکی یا خنک‌سازی سریع نیاز دارند. بنابراین قابل چاپ بودن به‌صورت طبیعی، لزوماً به معنای قابلیت چاپ برای همه کاربردها نیست [۱۴].

مواد غذایی سنتی غیر قابل چاپ: این مواد به‌طور ذاتی

غیر قابل چاپ هستند و برای ایجاد این قابلیت، لازم است در آنها تغییراتی ایجاد شود. این تغییرات می‌تواند با افزودن ترکیباتی مانند هیدروکلوئیدها، آنزیم‌ها و مواد قابل چاپ به‌صورت طبیعی یا از طریق انجام پیش‌فرآیندهای مکانیکی مانند مخلوط کردن، پوره کردن و حرارت‌دهی برای بهبود خواص رئولوژیکی آنها ایجاد شود. معمولاً مواد غذایی اصلی مصرفی مانند گوشت، تخم‌مرغ، میوه‌ها، سبزیجات، غذاهای دریایی، محصولات نانوائی و شیر در این دسته قرار می‌گیرند [۱۴].

مواد غذایی جایگزین: این دسته شامل مواد غذایی

غیرمتعارف مانند قارچ‌ها، حشرات و جلبک‌ها هستند که به‌عنوان منابع جدیدی از مواد مغذی (پروتئین و فیبرها) شناخته می‌شوند. این مواد جایگزین‌های پایدار مواد غذایی اصلی هستند. اغلب آنها به‌منظور اطمینان از قابلیت چاپ و پایداری، نیاز به فرمولاسیون‌های خاصی دارند. مواد غذایی جایگزین از نظر تغذیه‌ای جذاب‌اند، اما به دلیل ویژگی‌های ساختاری غیرمعمول، بیش از همه به طراحی رئولوژیکی و افزودنی‌های مناسب وابسته‌اند [۱۴].

مرور مطالعات نشان می‌دهد که طبقه‌بندی مواد غذایی برای چاپ سه‌بعدی صرفاً یک دسته‌بندی مفهومی نیست، بلکه ابزاری کاربردی برای تعیین راهبردهای فرمولاسیون، تشخیص نیاز به افزودنی‌ها و هیدروکلوئیدها، تنظیم پارامترهای چاپ متناسب با نوع ماده و پیش‌بینی پایداری ساختار چاپ‌شده به‌شمار می‌آید. به‌طور کلی، چاپ‌پذیری

1. Frosting

۳.۴. فرآیندهای پس از چاپ

اغلب مواد غذایی چاپ شده با پرینتر سه بعدی بعد از چاپ، نیاز به فرآیندهایی مانند حرارت دهی و خشک کردن دارند. این فرآیندها برای دستیابی به بافت، طعم، پایداری و کیفیت مطلوب در محصول لازم هستند. البته مواد غذایی باید نسبت به این فرآیندها مقاومت کافی داشته باشند [۱۹]. همچنین گاهی به منظور سفارشی سازی محصولات از موادی استفاده می شود که ویژگی آنها طی زمان یا در پاسخ به محرک های محیطی تغییر می کند. از این موضوع در ایجاد طرح های پیچیده استفاده می شود. مثالی از آن استفاده از نانوکریستال های سلولز و ژلاتین در تولید محصول است. محصولات با طرح های پروانه و گل شبدر حاوی نانوکریستال های سلولز و ژلاتین در مواجهه با کم آبی طی زمان تغییر شکل می دهند و منجر به ایجاد پروانه در حال پرواز یا شکوفه شبدر باز شده می شود [۱۷].

در نهایت باید گفت کیفیت چاپ مواد غذایی حاصل تعامل سه گانه بین خواص ماده اولیه، پارامترهای چاپ و فرآیندهای پس از چاپ است و هرگونه عدم تعادل در این حوزه ها می تواند کیفیت محصول نهایی را کاهش دهد. از آنجا که خواص رئولوژیکی جوهر تعیین کننده رفتار آن در اکستروژن هستند، انتخاب و مقداردهی هیدروکلوئیدها باید بر اساس شرایط چاپ تنظیم شود تا عملکرد مناسب حاصل شود. همچنین تنظیم پویا و کنترل شده دما و فشار اکستروژن ضروری است تا هم سیالیت کافی در حین چاپ و هم ایستایی ساختاری پس از خروج از نازل تضمین گردد. فرآیندهای پس از چاپ مانند حرارت دهی یا خشک کردن نیز تنها زمانی مؤثر عمل می کنند که ساختار اولیه از شبکه ای پایدار برخوردار باشد، در غیر این صورت این فرآیندها موجب تغییر شکل محصول خواهند شد.

۵. استفاده از هیدروکلوئیدها در چاپ سه بعدی مواد غذایی

به کارگیری هیدروکلوئیدها در جوهرهای غذایی، تنها به افزایش قوام محدود نمی شود، بلکه نقش تعیین کننده ای در ایجاد تعادل بین سه نیاز اصلی چاپ سه بعدی (قابلیت اکستروژن، حفظ شکل پس از چاپ و پایداری ساختاری

ارتفاع و سرعت حرکت نازل، دما و ضخامت لایه است. زمانی که فشار و سرعت اکستروژن بهینه باشند، جریان مواد یکنواخت تر و لایه گذاری دقیق تر خواهد بود. تغییر این دو پارامتر به نقص و ناسازگاری در محصول چاپ شده منجر می شود [۱۶]. سرعت اکستروژن به سرعت موتور بستگی دارد. اگر سرعت اکستروژن زیاد باشد، فشار بیشتر خواهد بود. در نتیجه حجم مواد اکستروژن شده بیشتر است و وضوح ساختار بیشتر می شود. اما اگر سرعت کم باشد، جریان مواد به صورت یکنواخت نخواهد بود و رشته های خروجی از نازل ناپیوسته و ضخامت لایه ها متغیر خواهد بود [۱]. در مطالعه انجام شده توسط وانگ و همکاران، گفته شده اگر فشار اکستروژن بیشتر از حد بهینه باشد، مدت زمانی که نانوکریستال های سلولز تحت تأثیر نیروی برشی قرار می گیرند، کمتر خواهد بود و سرعت جریان مواد در اکستروژن افزایش می یابد و در نتیجه امکان جهت گیری نانوکریستال های سلولز کمتر می شود [۱۷].

قطر و طول نازل پارامترهای بعدی اثرگذار خواهند بود. اندازه نازل برای دستیابی به وضوح مطلوب و یکپارچگی ساختار حیاتی است. نازل هایی با قطر کوچک تر، جزئیات، وضوح و دقت بیشتری را به نمایش می گذارند. اما در ترکیب مواد آنها باید دقت بیشتری اعمال شود [۱]. هرچه طول نازل بیشتر باشد، جریان هیدروکلوئید طولانی تر خواهد بود [۱۷]. در مطالعه وانگ و همکاران، اثر سرعت حرکت نازل بر جهت گیری مناسب نانوکریستال های سلولزی گفته شده و بیان شده که برای بهترین جهت گیری نانوکریستال های سلولزی باید سرعت حرکت نازل 10 mm/s باشد.

دمایی که چاپ سه بعدی در آن انجام می شود نیز بر وضوح، یکپارچگی ساختار، ویسکوزیته و تشکیل ژل اثر می گذارد. بهتر است برای چاپ، دما بالاتر از دمای تشکیل ژل باشد تا اکستروژن به طور مناسب انجام شود. افزایش دما منجر به کاهش ویسکوزیته و افزایش وضوح و انجام اکستروژن صاف می شود [۱۸]. در تحقیقی که در سال ۲۰۲۴ میلادی انجام شده است ویسکوزیته نانوکریستال های سلولز و ژلاتین در دماهای بالاتر از 35°C کاهش یافته و بعد از انجام اکستروژن در دمای اتاق ویسکوزیته محصول افزایش یافته است [۱۷].

چاپ‌شده در تحمل وزن لایه‌های بعدی چاپ را افزایش می‌دهد و از فروپاشی لایه‌های زیرین جلوگیری می‌کند [۲۱].

هیدروکلوئیدهایی مانند زانتان، پکتین و کاراگینان باعث افزایش ویسکوزیته و تنش تسلیم می‌شوند که موجب اکستروژن صاف و حفظ شکل و پایداری ساختارهای چاپ‌شده می‌شوند. وقتی تنش تسلیم افزایش می‌یابد از چکیدن جوهر غذایی قبل و هنگام اکستروژن جلوگیری می‌کند. از طرف دیگر بعد از اکستروژن و برداشتن نیروی برشی به دلیل افزایش تنش تسلیم، ماده غذایی چاپ‌شده سریعتر به ویسکوزیته اولیه خود باز می‌گردد. این موضوع پایداری و حفظ شکل‌های چاپ‌شده را تضمین می‌کند [۲۰].

۲.۵. خواص مکانیکی

از خواص مکانیکی جوهر و مواد چاپ‌شده می‌توان به پایداری ساختار، الاستیسیته، استحکام خمشی^۱ و خواص ناهمسانگرد^۲ اشاره کرد. افزودن هیدروکلوئیدها منجر به ایجاد الاستیسیته و بهبود خواص بافتی و کیفیت چاپ می‌شود. در واقع این خاصیت منجر می‌شود بافت مانند فتر عمل کند. به عنوان مثال، می‌توان به افزودن زانتان به محصولات بر پایه مرغ اشاره کرد که منجر به افزایش الاستیسیته و حفظ یکپارچگی ساختار پس از چاپ می‌شود [۱۴].

استحکام خمشی و خواص ناهمسانگرد پارامترهای بعدی در خواص مکانیکی هستند. استحکام خمشی به توپولوژی و فضاهای خالی ساختار چاپ‌شده وابسته است. منظور از توپولوژی ویژگی‌های کلی ساختار است که تغییر نمی‌کنند. توپولوژی اشکال مثلثی در مقایسه با توپولوژی اشکال مربع دارای استحکام کمتری است. به طور کلی افزودن هیدروکلوئید منجر به افزایش استحکام در ساختارهای پیچیده و دارای فضای خالی زیاد می‌شود [۱۴].

منظور از خواص ناهمسانگرد، جهت‌گیری ذرات در یک راستاست. به عنوان نمونه، می‌توان به هم‌جهت‌شدن نانوکریستال‌های سلولزی به هنگام چاپ سه‌بعدی اشاره کرد.

محصول نهایی) دارد. بررسی مطالعات نشان می‌دهد که نوع هیدروکلوئید، غلظت، تعامل با ماتریکس غذایی و شرایط فرآیندی، هر کدام اثر متفاوتی بر رئولوژی، خواص مکانیکی، نگهداری آب و رفتار خمیری دارند که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

۱.۵. خواص رئولوژیکی

بررسی این خواص برای اطمینان از موفقیت اکستروژن و حفظ یکپارچگی ساختار مواد غذایی چاپ‌شده ضروری است. خواص رئولوژیکی جوهر غذایی و مواد چاپ‌شده تحت تأثیر نوع و غلظت هیدروکلوئیدها و ماتریکس غذایی قرار دارد. این خواص شامل ویسکوزیته، رفتار مواد تحت نیروی برشی، تنش تسلیم، مدول ذخیره‌سازی (G') و مدول افت (G'') است.

یکی از مهمترین خواص هیدروکلوئیدها به هنگام اکستروژن و چاپ، رفتار آنها در مقابل نیروی برشی است. اغلب هیدروکلوئیدهای مورد استفاده رفتار رقیق‌شونده با نیروی برشی دارند. این رفتار به این معنی است که ویسکوزیته آنها با اعمال نیروی برشی کاهش می‌یابد و باعث می‌شود جوهر غذایی به هنگام چاپ به راحتی از نازل اکستروژن خارج شود و لایه‌های چاپ دارای ضخامت یکسانی باشند [۲۰].

همچنین برای یک چاپ خوب لازم است جوهر غذایی رفتار ویسکوالاستیک داشته باشد. به همین منظور از هیدروکلوئیدها که سیالات ویسکوالاستیک هستند، برای ایجاد این قابلیت استفاده می‌شود. ویژگی سیالات ویسکوالاستیک به مدول ذخیره‌سازی (G') و افت (G'') آنها بازمی‌گردد. مدول ذخیره‌سازی نشان از اجزاء الاستیک جوهر غذایی و مدول افت نشان از اجزاء ویسکوز جوهر غذایی است. هر دو مدول بر ویژگی‌های ماده پس از اکستروژن اثرگذار خواهند بود. تعادل بین اجزاء الاستیک و ویسکوز در جوهر غذایی توانایی آنها را در نگهداشتن شکل و بازیابی ساختار پس از اکستروژن تعیین می‌کند. به منظور اینکه ماده غذایی چاپ‌شده رفتار جامدتر و یکپارچگی ساختاری بهتری داشته باشد، لازم است مدول ذخیره‌سازی افزایش یابد. افزایش مدول ذخیره‌سازی به بالای ۹۰٪، توانایی ماده

1. Flexural strength

2. Anisotropic properties

تخم‌مرغ و آرد برنج با نسبت ۲ به ۱ بالاترین ویسکوزیته و بهترین پایداری را در چاپ سه بعدی داشته است. علت آن به ترکیبات این دو ماده بازمی‌گردد. زرده تخم‌مرغ حاوی لیپید و پروتئین‌های کروی شکل است. از طرف دیگر علت افزودن آرد برنج، نشاسته آن است که رفتار هیدروکلوئیدی دارد. زمانی که این دو با نسبت‌های گفته شده مخلوط می‌شوند، شبکه‌ای متراکم از لیپوپروتئین زرده تخم‌مرغ و نشاسته (پلی‌ساکارید) آرد برنج تشکیل می‌شود که خاصیت چسبندگی و جذب آب دارد. حال هرچه میزان نشاسته بیشتر شود، خاصیت چسبندگی بیشتر و سیالیت جوهر کاهش می‌یابد [۱].

در نهایت می‌توان گفت که هیدروکلوئیدها نقش چندبعدی در چاپ دارند و انتخاب آن‌ها باید بر اساس تعادل بین رئولوژی، خواص مکانیکی و رفتار ژل‌سازی باشد. خمیری شدن و رفتار ویسکوالاستیک باید با هم بررسی شوند؛ زیرا هر دو پیش‌بینی‌کننده کیفیت اکستروژن و پایداری ساختار هستند. هیچ هیدروکلوئیدی به‌تنهایی بهترین گزینه نیست؛ بلکه ترکیب هیدروکلوئیدها غالباً عملکرد مطلوب‌تری ایجاد می‌کنند. باید توجه داشت که اثر هیدروکلوئیدها به‌شدت به ماتریکس غذایی وابسته است و همچنین پارامترهای چاپ (قطر نازل، فشار، زمان ماند) به اندازه ترکیب مواد در تعیین خواص مکانیکی و ناهمسانگردی اهمیت دارند.

۵. مکانیسم‌های تشکیل ژل هیدروکلوئیدها

هنگامی که از هیدروکلوئیدهای ژل‌دهنده در فرمولاسیون جوهر غذایی استفاده می‌شود باید به این نکته توجه داشت که تشکیل ژل قبل از خروج از پرینتر اتفاق نیفتد. به‌منظور جلوگیری از این اتفاق باید کنترل زمانی بر مکانیسم‌های تشکیل ژل وجود داشته باشد [۱۹]. سه مکانیسم تشکیل ژل وجود دارد:

۱.۶. **chemical cross-linking**: این اتصال معمولاً با کمک مواد شیمیایی خاصی انجام می‌شود. به این صورت که این مواد با گروه‌های فعال پلیمر واکنش داده و پیوند کووالانسی بین رشته‌های پلیمر ایجاد می‌کنند [۲۲]. این

این هم‌جهت‌شدن منجر به ایجاد نواحی روشن و تاریک در میکروسکوپ نوری پلاریزه (POM)^۱ می‌شود که نشان از ایجاد شبکه هیدروکلوئیدی است. هرچه زمان ماند ذرات نانوکریستال سلولزی در معرض اکستروژن و نیروی برشی بیشتر باشد، جهت‌گیری هم بیشتر خواهد بود. قطر نازل بر خواص ناهمسانگرد ذرات اثرگذار است. اگر قطر نازل بیشتر از حالت بهینه باشد، نیروی برشی به ناحیه کنار دیواره بیشتر از مرکز اعمال می‌شود و باعث جهت‌گیری کمتر ذرات می‌شود [۱۷]. هم‌جهت‌شدن ذرات در اثر تنش، باعث اکستروژن صاف و حفظ شکل مطلوب آنها می‌شود [۱۴].

۳.۵. نگهداری آب

هیدروکلوئیدها ظرفیت نگهداری آب (WHC)^۲ جوهر غذایی را بهبود می‌بخشند. استفاده از هیدروکلوئیدها باعث شده سینرسیس بعد از چاپ کم شود و قوام و ویسکوزیته نهایی محصول حفظ شود و در نتیجه ساختار پایدار بماند. همچنین با ایجاد ماتریکس و ژل، مواد مغذی را محصور می‌کند و می‌تواند مناسب بیماران دیسفاژی و افراد مسن باشد [۱۴].

۴.۵. ویژگی‌های خمیری‌شدن^۳

به رفتار ویسکوزیته جوهر غذایی در برابر تغییرات دما و نیروی برشی در طول فرآیند چاپ سه بعدی، خمیری‌شدن گفته می‌شود که نشان‌دهنده تعاملات شیمیایی و فیزیکی بین اجزای ماده غذایی است. ویژگی‌های خمیری‌شدن شامل ویسکوزیته اوج^۴، دمای خمیری‌شدن^۵، قدرت نگهداری^۶، ویسکوزیته شکست^۷، ویسکوزیته نهایی^۸ و ویسکوزیته برگشتی^۹ است [۱].

در مطالعه انجام‌شده بر روی مخلوط اجزای تخم‌مرغ و آرد برنج این خاصیت مورد بررسی قرار گرفته است. زرده

1. Polarization optical microscopy
2. Water Holding Capacity
3. pasting characteristics
4. Peak viscosity
5. Pasting temperature
6. Holding strength
7. Breakdown viscosity
8. Final viscosity
9. Setback viscosity

۳.۶. **complex coacervate formation**: روش

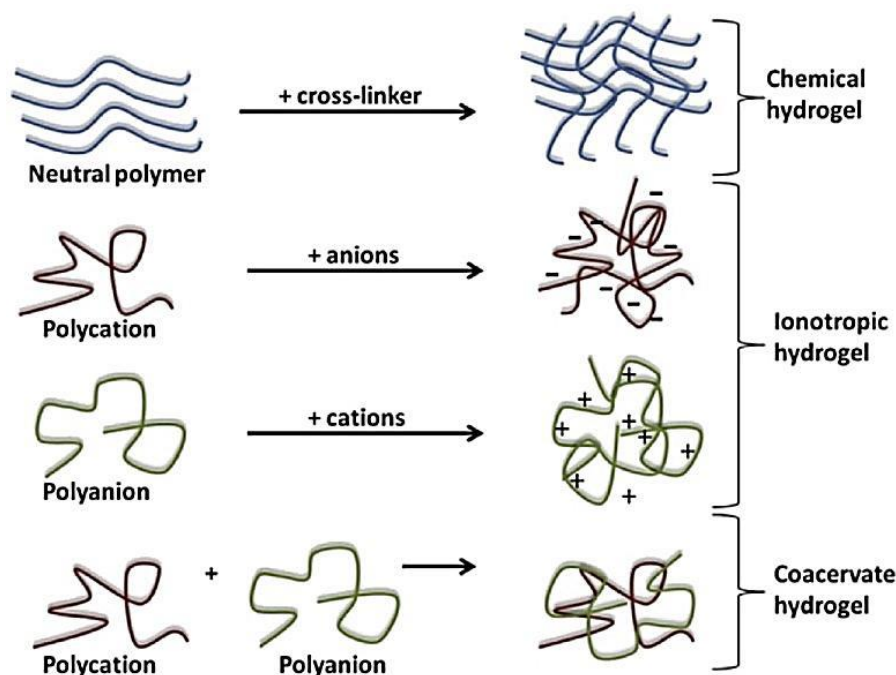
سومی که برای تشکیل ژل به کار می‌رود، زمانی است که از مخلوط هیدروکلوئیدها استفاده می‌شود و کمپلکس کوآسرات به‌وجود می‌آید. در این نوع تشکیل ژل یک پلی‌انیون و یک پلی‌کاتیون نیاز است. در مطالعه‌ای مخلوط زانتان و ژلاتین با مواد غذایی حاوی نشاسته و پروتئین، ماده‌ای قابل چاپ ایجاد کرده است که احساس دهانی مشابهی با ماده غذایی اصلی داشته است. این احساس دهانی مطلوب را هیدروکلوئیدها به تنهایی نتوانسته‌اند ایجاد کنند. در این ترکیب زانتان به‌عنوان پلی‌کاتیون و ژلاتین به‌عنوان پلی‌انیون عمل کرده و تشکیل ژل داده‌اند [۱۹].

در شکل (۱) شماتیک انواع مکانیسم‌های تشکیل ژل آورده شده است.

روش معمولاً برای تشکیل ژل در مواد غذایی استفاده نمی‌شود زیرا عواملی که این اتصال را برقرار می‌کنند، سمی و مضر هستند و باید قبل از استفاده حتماً از ماده غذایی حذف شوند [۱۹ و ۲۲].

۲.۶. **ionotropic cross-linking**: بر عکس روش قبلی از

این روش در مواد غذایی به‌طور گسترده استفاده می‌شود، به‌خصوص هنگامی که میکروانکپسولاسیون نیاز باشد. تشکیل ژل آلژینات با کلسیم مثالی از این روش است. آلژینات از واحدهای مانورونیک اسید و گلورونیک اسید تشکیل شده است که هر دو در pH بالاتر از ۲ بار منفی دارند. وقتی از کلسیم استفاده می‌شود، بین بارهای منفی قرار گرفته و آلژینات می‌تواند ژل تشکیل دهد [۱۹].



شکل (۱). انواع مکانیسم تشکیل ژل [۱۹]

Fig. 1. Types of gel formation mechanisms [19]. Copyright @ 2016 Elsevier

گذاشته می‌شود. در مقابل، **ionotropic cross-linking** به‌دلیل ماهیت خوراکی و قابلیت تنظیم از طریق غلظت یون‌ها، رایج‌ترین مکانیسم در فرمولاسیون جوهرهای چاپ است. با این حال، سرعت و ناهمگونی انتشار یون کلسیم چالش‌هایی مانند ژل‌شدگی زود هنگام در نازل و کاهش

مطالعات مختلف نشان می‌دهد که سه مکانیسم اصلی ژل‌سازی رفتار کاملاً متفاوتی در فرآیند چاپ سه‌بعدی غذا ایجاد می‌کنند. در روش **chemical cross-linking** اگرچه امکان دستیابی به ژل‌های بسیار پایدار وجود دارد، اما کاربرد غذایی آن محدود است و بنابراین در اغلب مطالعات کنار

۶. انواع هیدروکلوئیدهای مورد استفاده در چاپ سه بعدی مواد غذایی

تا اینجا به خواص و اثرات هیدروکلوئیدهای مفید در چاپ سه بعدی به صورت کلی پرداخته شد. ژلاتین، زانتان، آلژینات، پکتین، کاراگینان، ژلان، آگار، گوار، نشاسته، سلولز و هیدروکسی پروپیل متیل سلولز هیدروکلوئیدهایی هستند که در چاپ سه بعدی غذا می‌توان از آنها استفاده کرد. در اینجا به هیدروکلوئیدهایی که در چاپ سه بعدی مواد غذایی بیشترین استفاده را داشته‌اند و بر روی آنها مطالعه انجام شده است، اشاره می‌شود. در جدول (۱)، خواص انواع هیدروکلوئیدهای مورد استفاده در چاپ سه بعدی مواد غذایی خلاصه شده است.

یکنواختی ساختار ایجاد می‌کند، مسئله‌ای که برخی مطالعات با کنترل pH یا استفاده از منابع آهسته‌رهش کلسیم سعی در حل آن داشته‌اند. روش complex coacervate formation، برخلاف دو روش دیگر، بیشتر در مواردی اهمیت دارد که هدف، بازتولید ویژگی‌های حسی و دهانی ماده غذایی است. مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب هیدروکلوئیدهای دارای بار مخالف، علاوه بر ایجاد یک ماتریس ژلی پایدار، می‌تواند بافت و رئولوژی را به گونه‌ای تنظیم کند که دقت چاپ افزایش یابد و حس دهانی مشابه نمونه اصلی ایجاد شود؛ قابلیت‌هایی که هیدروکلوئیدهای منفرد معمولاً فاقد آن هستند. مقایسه نتایج مطالعات نشان می‌دهد که هیچ مکانیسمی به تنهایی برای تمام سناریوهای چاپ مطلوب نیست و انتخاب آن باید براساس زمان‌بندی ژل‌دهی، پایداری مکانیکی موردنیاز و نوع محصول چاپ‌شونده انجام شود [۱۹ و ۲۲].

جدول (۱). مروری بر انواع هیدروکلوئیدهای مورد استفاده در چاپ سه بعدی مواد غذایی

Table 1. Overview of different types of hydrocolloids for 3D Food Printing

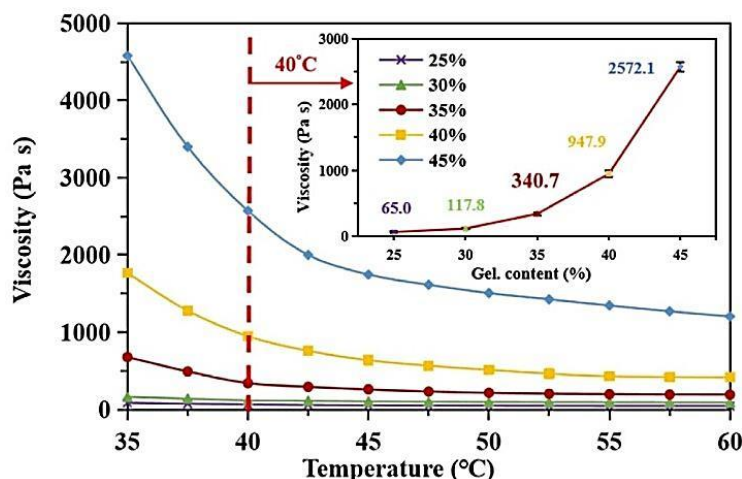
Hydrocolloid	Key properties	Advantages	Disadvantages	Main application
Gelatin	Good gel reversibility Good rheological behavior	Printability Development of porous structures with adequate stability	Low mechanical properties of printed food products	Formulation of protein-based pastes
Carrageenan	Thermally reversible gel High interaction with proteins and polysaccharides	Ink printability Enhancement of mechanical properties of food materials Increase in food viscoelasticity	Increased brittleness of products Difficulty in process control	Production of alternative meats and plant-based products
Xanthan	Increase in viscosity Formation of a weak gel network Shear-thinning behavior	Improved printing accuracy Formation of a smooth product surface	Coagulation during alternative meat production	Formulation of low-fat alternative meats and plant-based products Production of specialized foods for dysphagia patients
Pectin	Anionic polysaccharide Cross-linking between proteins	Gel-forming ability Contribution to the development of porous bio-scaffolds	Reduction in water-holding capacity and tissue firmness with increasing pectin concentration Cell damage during extrusion with higher pectin concentration	Printing of plant cells and biomedical structures Preparation of specialized foods using surimi
Alginate	Presence of G-blocks Egg-box structure Thermally reversible gel	Synergistic interaction with other components Uniform protein distribution within alginate gel	Anthocyanin degradation due to moisture absorption from alginate	3D printing of nutrient-enriched plant-based products Production of protein-based composites for alternative meats

۱.۷. ژلاتین

چاپ‌شده نیاز به فرآیند پس از چاپ داشته باشد، ساختار ماکروسکوپی به‌علت ذوب ژلاتین در اثر حرارت از بین می‌رود. این خاصیت به برگشت‌پذیر بودن ژل ژلاتین برمی‌گردد [۲۰].

قابلیت چاپ محصولات مبتنی بر ژلاتین به دما و غلظت آن بستگی دارد. برای ایجاد این قابلیت لازم است ویسکوزیته کم و غلظت ژلاتین زیاد باشد تا دقت در چاپ محصولات تضمین شود. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۴ انجام شده است، ویسکوزیته به‌عنوان تابعی از دما در نظر گرفته شده است. در غلظت‌های مختلف ژلاتین، با افزایش دما از 35°C به 40°C ویسکوزیته کاهش یافته و لذا به‌منظور چاپ مناسب، دمای 40°C انتخاب شده است. اگر ویسکوزیته بیشتر باشد، خروج جوهر را از نازل سخت می‌کند و تشکیل ژل در دستگاه اتفاق می‌افتد. در شکل (۲) می‌توان اثر دما بر ویسکوزیته ژلاتین را مشاهده کرد [۲۳].

ژلاتین پر کاربردترین هیدروکلوئید در چاپ مواد غذایی به صورت سه‌بعدی است. مواد غذایی حاوی این هیدروکلوئید، پس از اکستروژن با کاهش دما، شبکه سه‌بعدی و ژل تشکیل می‌دهند [۲۰]. از ژلاتین معمولاً در خمیرهای پروتئینی از جمله خمیر گوشت خام، ماهی و مرغ استفاده می‌شود. ژلاتین را به دو روش می‌توان به خمیر گوشت خام افزود. روش اول به این صورت است که محلول ژلاتین با دمای بالاتر از دمای ذوب آن به خمیر گوشت اضافه شود. در این حالت قابلیت نگهداری آب و چاپ خمیر افزایش می‌یابد؛ اما به‌دلیل افزایش دما، امکان رشد میکروبی وجود دارد. در روش دوم ژلاتین به‌صورت متورم به خمیر گوشت اضافه می‌شود. به‌منظور حل شدن ژلاتین لازم است دمای اکستروژن بالاتر از دمای ذوب ژلاتین باشد. سپس برای تشکیل ژل، خمیر به هنگام خروج از اکستروژن باید خنک شود. اگر محصول



شکل (۲). اثر دما بر ویسکوزیته غلظت‌های مختلف ژلاتین [۲۳]

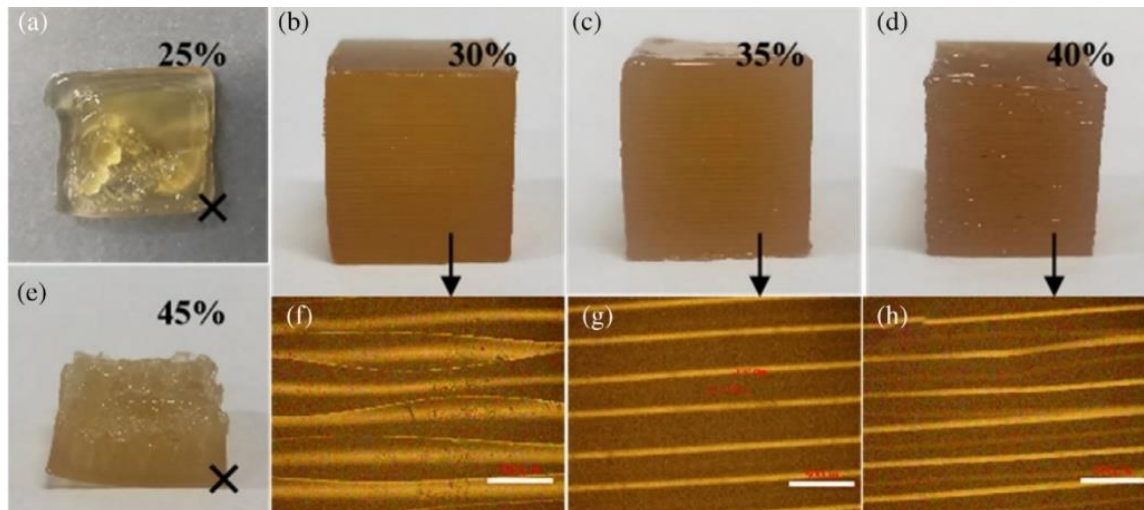
Fig. 2. Effect of temperature on the viscosity of different gelatin concentrations [23]. Copyright @ 2024 Wiley

همانطور که گفته شد، غلظت ژلاتین نیز در ایجاد قابلیت چاپ محصولات اثرگذار است. اگر غلظت ژلاتین بسیار کم باشد، به‌دلیل رقیق‌بودن جوهر امکان چاپ وجود نخواهد داشت. از طرف دیگر اگر غلظت ژلاتین بیش از حد باشد، به‌دلیل ایجاد ژل قبل از خروج از نازل، چاپ مطلوب و باکیفیت نخواهد بود. در نتیجه غلظت ژلاتین برای چاپ باید بهینه باشد. در مطالعه انجام‌شده در سال ۲۰۲۴ پایدارترین

ساختار سه‌بعدی مربوط به غلظت ۳۵٪ ژلاتین بود. در شکل (۳) می‌توان شکل‌پذیری و قابلیت چاپ غلظت‌های مختلف ژلاتین و بافت خمیر چاپ‌شده آنها را مشاهده کرد [۲۳]. ویسکوزیته جوهر حاوی ژلاتین، با افزایش نیروی برشی کاهش می‌یابد. این رفتار برای چاپ مواد غذایی به‌صورت سه‌بعدی مناسب است. با افزایش غلظت ژلاتین، ویسکوزیته جوهر در نیروی برشی کمتر، بیشتر می‌شود. همچنین در

وابستگی به فرکانس کم می‌شود. علت حالت ارتجاعی در ژل محصول به بیش‌تر بودن مقدار مدول ذخیره‌سازی نسبت به مدول افت ژلاتین برمی‌گردد [۲۴].

مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۲ انجام شده است، بیان‌شده با افزایش غلظت ژلاتین در خمیر مرغ، ویسکوزیته، خاصیت ارتجاعی، تشکیل ژل و حفظ شکل محصول افزایش می‌یابد و



شکل (۳). قابلیت چاپ غلظت‌های مختلف ژلاتین [۲۳]

Fig. 3. Printability of different gelatin concentrations [23]. Copyright @ 2024 Wiley

تغییرات دما بر تشکیل پیوندهای هیدروژنی ژلاتین و پایداری محصول اثرگذار است. همچنین پراکندگی یکنواخت ژلاتین در پروتئین‌های میوفیبریلار خمیرهای گوشتی منجر به اتصال عرضی و بهبود خواص ژل می‌شود [۲۴]. برای اینکه پایداری مکانیکی خمیرهای گوشتی حاوی ژلاتین بعد از چاپ افزایش یابد، می‌توان از آنزیم ترانس گلوتامیناز استفاده کرد. این آنزیم با ایجاد پیوند کووالانسی بین دو اسید آمینه گلوتامین و لیزین ژلاتین، به ایجاد پایداری و انسجام و کاهش تغییر شکل کمک می‌کند. همچنین این آنزیم به بهبود احساس دهانی و قابلیت جویدن کمک می‌کند [۲۳، ۱۴].

ژلاتین با ایجاد ساختارهای متخلخل امکان به‌دام‌انداختن مواد مغذی را دارد و برای غنی‌سازی و سفارسی‌سازی محصولات سه‌بعدی استفاده می‌شود. وقتی ژلاتین در مخلوط با گلیسرول و شکر قهوه‌ای استفاده می‌شود، شکر قهوه‌ای باعث بهبود طعم می‌شود؛ اما اثری بر قابلیت چاپ ژلاتین نمی‌گذارد [۲۵].

در مطالعه‌ای که توسط بولوت و کاندوغان در سال ۲۰۲۲ انجام شده است، برای تهیه میان‌وعده‌های مبتنی بر گوشت

یکی از مشکلات ژلاتین در چاپ سه‌بعدی خواص مکانیکی ضعیف محصولات چاپ‌شده است. اگر ژلاتین به‌صورت ترکیبی با هیدروکلوئیدهای دیگر یا در مخلوط با پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها استفاده شود، ویژگی‌های چاپ به‌ویژه خواص مکانیکی آن بهبود می‌یابد. هنگامی که ژلاتین با نانوکریستال‌های سلولز یا گلیسرول مخلوط می‌شود، پیوندهای هیدروژنی بین آنها تشکیل می‌شود و پایداری و خواص مکانیکی محصول چاپ‌شده بهتر می‌شود [۲۳، ۱۷]. اختلاط ژلاتین با غلظت ۲٪ با پروتئین آب پنیر با غلظت ۱۸٪ در موس لیمو منجر به وضوح چاپ سه‌بعدی و پایداری ساختار، افزایش سفتی ژل و مدول ذخیره‌سازی و تنش تسلیم می‌شود. پروتئین آب پنیر در غلظت‌های بالای ژلاتین، جلوی شکستگی بافت در اثر ژلاتین را می‌گیرد و محصول چاپ‌شده سطحی براق و صاف دارد. طعم سیتریک اسید لیمو منجر به ایجاد طعم ترش می‌شود. به‌طور کلی از این ترکیب می‌توان در تولید میان‌وعده‌های اشتها‌آور و غنی از پروتئین برای مصرف‌کنندگان خاص استفاده کرد [۲۴].

در تشکیل ژل ژلاتین و ایجاد دو حالت ژل یا محلول آن تغییرات دما و اتصال عرضی اثرگذار هستند [۲۳، ۱۴].



مشکلاتی که ترکیب کاپا-کاراگینان با زانتان ایجاد می‌کند، افزایش شکنندگی است [۲۷].

در سال‌های اخیر تولید آب‌نبات و آدامس‌های حاوی مواد مغذی به‌منظور جلوگیری از پیری محبوب شده است. به‌دلیل اینکه روش پرینت سه‌بعدی نیز یک روش جدید است، لذا استفاده از این روش برای تولید آب‌نبات و آدامس‌های سفارشی‌سازی شده برای افراد مورد توجه قرار گرفته است. برای اینکه چاپ این محصولات به‌خوبی پیش برود، ویژگی‌های مخلوطی از کاراگینان و فروکتوز مورد بررسی قرار گرفته است. تشکیل ژل کاراگینان در دو مرحله انجام می‌شود: (۱) تبدیل حالت تصادفی زنجیره‌های مولکولی به مارپیچ و (۲) به هم پیوستن مارپیچ‌ها و ایجاد مارپیچ‌های دوتایی. به هنگام خنک‌کردن ساختار سه‌بعدی و تشکیل ژل، دمایی که مدول ذخیره‌سازی و مدول افت جوهر در آن برابر هستند، دمای تشکیل ژل کاراگینان (Tg) در نظر گرفته می‌شود. اگر خنک‌کردن ادامه داشته باشد و دما به زیر دمای تشکیل ژل برود، افزایش هر دو مدول مشاهده می‌شود. همچنین مدول ذخیره‌سازی بیشتر از مدول افت خواهد بود که نشان از تجمع مارپیچ‌های دوتایی کاراگینان است. قندها و پلی‌ال‌ها توانایی کنترل انتقال حالت محلول به ژل را دارند. با افزایش غلظت فروکتوز، دمای تشکیل ژل افزایش می‌یابد. علت این موضوع به جذب آب توسط فروکتوز از کاراگینان هیدراته و تشکیل پیوند هیدروژنی بین گروه‌های هیدروکسیل فروکتوز و کاراگینان و ایجاد نقاط اتصال بر می‌گردد و تشکیل ژل را تسهیل می‌کند. به‌طور کلی، افزودن فروکتوز به کاراگینان منجر به ایجاد ژل متراکم‌تر و همگن‌تر می‌شود و می‌توان در آینده از آن برای تولید محصولات پاسخ‌دهنده به تغییرات دما طی تبدیل حالت محلول به ژل استفاده کرد [۲۸].

به‌طور کلی کاراگینان تعامل خوبی با اجزای دیگر فرمولاسیون جوهر مانند پروتئین و پلی‌ساکارید و هیدروکلوئیدهای دیگر دارد و خواص مکانیکی و قابلیت چاپ جوهر را افزایش می‌دهد. همچنین توانایی ایجاد سیستم‌های ژل‌کننده ترکیبی را دارد. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۳ انجام شده است، سیستم ژل‌کننده ترکیبی از موم زنبورعسل و کاراگینان و زانتان تهیه‌شده و ویژگی‌های آن مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از ترکیب کاراگینان و زانتان بر

مرغ، مخلوط ژلاتین و کاپا-کاراگینان به فرمولاسیون محصول اضافه شد. نتایج آنها نشان می‌دهد که غلظت ۱/۷۹٪ ژلاتین ساختارهای استوانه‌ای شکل توخالی مناسب‌تری ایجاد کرده است. این مقدار ژلاتین باعث ایجاد ریزساختار فشرده‌تر و یکنواخت‌تری شد و کیفیت، بافت و ویژگی‌های حسی محصول افزایش یافت [۲۶].

بنابراین می‌توان گفت، ژلاتین به‌عنوان پر کاربردترین هیدروکلوئید در چاپ سه‌بعدی شناخته می‌شود. ویژگی‌هایی همچون برگشت‌پذیری ژل و رفتار رئولوژیکی مناسب، باعث شده ژلاتین توانایی ایجاد جوهر غذایی با قابلیت چاپ و ایجاد ساختارهای متخلخل با پایداری مناسب را داشته باشد [۲۴، ۲۳، ۲۰]. ضعف اصلی آن، خواص مکانیکی ضعیف محصولات چاپ شده است که در اثر ترکیب با پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها یا استفاده از آنزیم‌ها بهبود می‌یابد. کاربرد اصلی ژلاتین در فرمولاسیون خمیرهای پروتئینی است [۲۶، ۲۴، ۲۳، ۱۴].

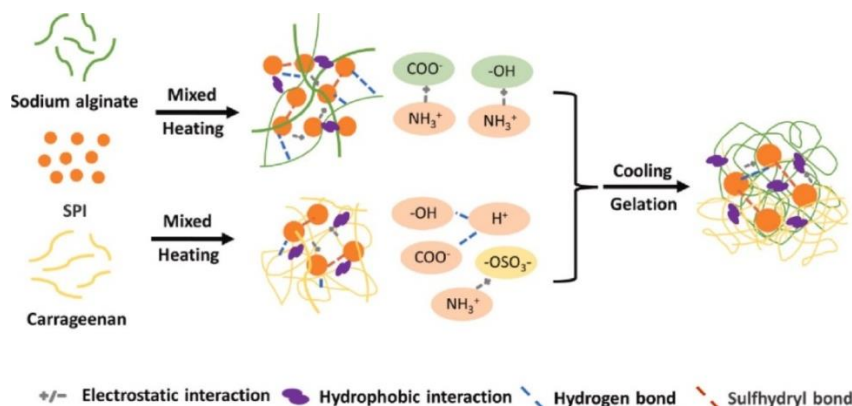
۲.۷. کاراگینان

کاراگینان یک هیدروکلوئید بلند زنجیر است که از جلبک قرمز جداسازی می‌شود. کاراگینان توانایی تشکیل ژل‌های برگشت‌پذیر با حرارت را دارد. همچنین کاراگینان جایگزین مناسبی برای ژلاتین حاصل از منابع حیوانی است. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۳ انجام شده است به‌منظور جایگزینی ژلاتین از مخلوط زانتان و کاپا-کاراگینان استفاده شده است. اختلاط این دو هیدروکلوئید باعث شد خواص مکانیکی حاصل از کاپا-کاراگینان با تشکیل مارپیچ‌های دوتایی توسط زانتان تقویت شود و ژل قوی‌تری ایجاد شود. کاپا-کاراگینان منجر به ایجاد خواص ویسکوالاستیک نیز می‌شود. با افزایش غلظت کاپا-کاراگینان، مدول ذخیره‌سازی نیز بیشتر می‌شود و ژل سفت‌تر ایجاد می‌شود. علت این موضوع کاهش فضای خالی در شبکه سه‌بعدی است. همچنین افزایش غلظت کاراگینان، دماهای انتقال (از حالت محلول به ژل یا از حالت ژل به محلول) را نیز افزایش می‌دهد. در این مطالعه ساکارز نیز با این دو هیدروکلوئید مخلوط شد و ساکارز منجر به تقویت تجمع مارپیچ‌ها شد که باعث افزایش استحکام ژل و دماهای انتقال و پایداری ژل در شرایط مختلف گردید. یکی از

انجام شده است برای ایجاد بافت فیبرهای عضلانی از ترکیب کاراگینان با آلژینات و گلوکومانان استفاده شده است. این هیدروکلوئیدها استحکام ژل و الاستیسیته محصول چاپ شده را افزایش می‌دهند [۳۰]. همچنین در مطالعه دیگری که در سال‌های ۲۰۲۴ انجام شده است، از ترکیب کاراگینان و آلژینات و ایزوله پروتئین سویا برای تولید کامپوزیت‌های پروتئین و پلی‌ساکارید که در محصولات مبتنی بر گیاه کاربرد دارند، استفاده شد. ایزوله پروتئین سویا برای چاپ سه بعدی دارای محدودیت است؛ زیرا تحت نیروی برشی زیاد، شکسته می‌شود. افزودن کاراگینان و آلژینات به کمک واکنش‌های الکتروستاتیک و هیدروفوبی و پیوندهای دی‌سولفیدی تغییراتی را در ساختار کریستالی جوهر ایجاد کردند که حفظ ساختار، پایداری حرارتی، ویسکوزیته، مدول ذخیره‌سازی و چسبندگی را بهبود بخشید. همچنین FTIR نشان داد که افزودن این هیدروکلوئیدها منجر به تشکیل پیوندهای هیدروژنی از طریق گروه‌های هیدروکسیل شد و ساختارهای مارپیچ α و صفحه بتا به وجود آمده است. در شکل (۴) می‌توان نحوه تشکیل ژل و ارتباط آن با واکنش‌های مولکولی را مشاهده کرد. همچنین تعامل بین ایزوله پروتئین سویا و هیدروکلوئیدها منجر به ایجاد ساختار آمورف از ساختار کریستالی شد و شبکه متراکم آنها سطح خشنی را ایجاد کرد که مناسب چاپ بود [۷]. در شکل (۵) اثر غلظت‌های مختلف کاراگینان و آلژینات بر شکل محصول چاپ شده و جریان جوهر در نازل نشان داده شده است.

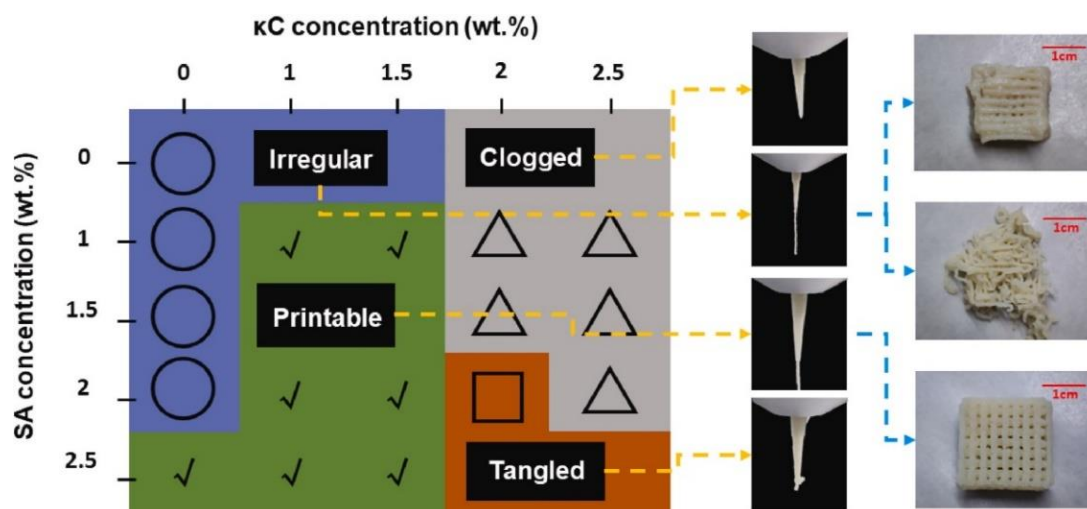
میکروساختار سیستم ژل‌کننده اثرگذار بوده است. این دو با تشکیل شبکه‌ای پایدار به حفظ یکپارچگی ساختار محصول چاپ شده، مقاومت در برابر تنش‌های مکانیکی، توزیع یکنواخت موم زنبورعسل و بهبود خواص رئولوژیکی سیستم کمک می‌کنند. البته پروتئین‌ها، الیاف و پلی‌ساکاریدها نقاط اتصال بیشتری بین این دو ایجاد می‌کنند و همین منجر به تعاملات بیشتر بین آنها شده و میکروساختار همگن‌تری خواهند داشت. حفظ این میکروساختار طی اکستروژن و پس از آن و افزایش بیشتر استحکام ساختار به یکنواختی ذرات موم زنبور عسل بستگی دارد. اثر ذرات موم زنبورعسل به ذوب ساختار ارتورومبیک موم در دماهای بالا برمی‌گردد. ذوب ذرات منجر به ایجاد ترکیبات هیدروکربنی و مونواستری می‌شود که خواص هیدروکلوئیدها مانند رفتار رقیق‌شوندگی با نیروی برش آنها را افزایش می‌دهد و زمان تشکیل ژل آنها را کوتاه‌تر می‌کند. ژل‌کننده‌های ترکیبی ویژگی‌های میکرومورفولوژی پیچیده‌ای دارند و ویژگی بارز آنها سطح خشن آنها است. این سطح خشن باعث افزایش سطح تعاملات و تثبیت بیشتر ریزساختار می‌شود. درنهایت از این سیستم ژل‌کننده ترکیبی در جوهرهای لیچی که ماده‌ای برای چاپ سه بعدی است استفاده می‌شود [۲۹].

امروزه تولید محصولات مبتنی بر گیاه مانند گوشت‌های جایگزین برای افراد گیاه‌خوار بسیار مطرح شده است [۷]. یکی از روش‌های تولید گوشت‌های جایگزین استفاده از چاپ سه بعدی است. به همین منظور می‌توان از ترکیب کاراگینان با مواد دیگر استفاده کرد. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۱



شکل (۴). نحوه تشکیل ژل در کامپوزیت‌های ایزوله پروتئین سویا و کاپا-کاراگینان و سدیم آلژینات [۷]

Fig. 4. Gel formation in soy protein isolate, kappa-carrageenan, and sodium alginate composites [7]. Copyright @ 2024 Elsevier



شکل (۵). اثر غلظت‌های مختلف کاپا-کاراگینان و سدیم آلژینات بر ساختار چاپ‌شده [7]

Fig. 5. Effect of different concentrations of kappa-carrageenan and sodium alginate on the printed structure [7].

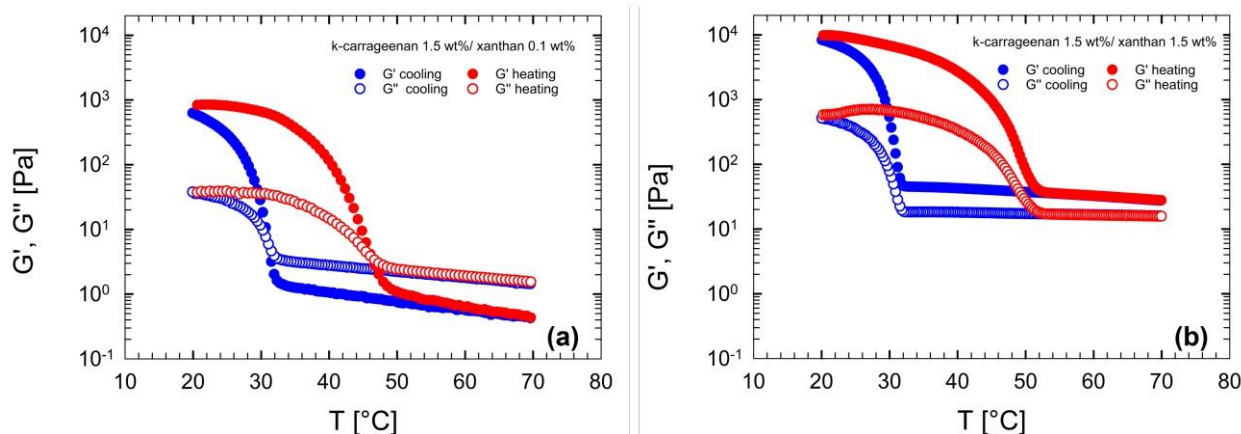
زمانی‌که در خمیر کیک از زانتان استفاده می‌شود، زانتان باعث کاهش ویسکوزیته تحت نیروی برشی و همچنین تخریب ذرات آگلومره بزرگ کیک و جهت‌گیری مولکول‌های نشاسته می‌شود. جهت‌گیری نشاسته، منجر به شکسته شدن رشته‌های آمیلوز و تشکیل پیوند هیدروژنی بین آنها و سایر اجزا می‌شود که سبب افزایش ویسکوزیته خمیر کیک می‌شود. البته زانتان بعد از اکستروژن با ایجاد شبکه‌ای ضعیف در جوهر به بازایی ساختار و رسیدن به ویسکوزیته اولیه کمک می‌کند [۳۱].

غلظت زانتان مانند ژلاتین بر میزان مدول‌های ذخیره‌سازی و افت ساختارها اثرگذار است. در مطالعه‌ای از مخلوط کاپا-کاراگینان و زانتان به عنوان جایگزین ژلاتین استفاده شده است. در شکل (۶) نشان داده شده است که افزایش غلظت زانتان (از ۰/۱٪ به ۱/۵٪) به‌عنوان یک عامل تغلیظ‌کننده، باعث افزایش مدول ذخیره‌سازی و مدول افت به ترتیب از ۱۰۰۰ Pa به ۱۰۰۰۰ Pa و از حدود ۱۰۰ Pa به ۱۰۰۰ Pa شده و خاصیت ویسکوالاستیک را افزایش داده است [۲۷].

به‌طورکلی گفته می‌شود کاراگینان هیدروکلوئیدی بلندزنجیر است که می‌تواند ژل‌های برگشت‌پذیر با حرارت تولید کند و تعامل زیادی با پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها داشته باشد. همین امر موجب افزایش قابلیت چاپ و استحکام جوهرغذایی و افزایش خواص مکانیکی و ویسکوالاستیسیته موادغذایی چاپ‌شده به‌صورت سه‌بعدی می‌شود. با وجود اینکه تقویت خواص مکانیکی باعث افزایش شکنندگی محصولات می‌شود و کنترل فرآیند چاپ جوهرغذایی حاوی کاراگینان به‌علت برگشت‌پذیری ژل دشوار است؛ اما، کاراگینان جایگزین مناسبی برای ژلاتین حیوانی است و از آن در تولید گوشت‌های جایگزین و محصولات مبتنی بر گیاه استفاده می‌شود [۲۷-۳۰].

۳.۷. زانتان

زانتان یک پلی‌آنیون است که در آن گلوکزها با پیوند بتا ۱ به ۴ به یکدیگر متصل شده‌اند و به‌صورت یکی در میان به یک شاخه جانبی تری‌ساکاریدی متصل شده‌اند. این ساختار منجر به برهمکنش‌های ضعیف بین مولکولی زانتان با نشاسته، پروتئین، آب و سایر هیدروکلوئیدها شده است [۲۷ و ۳۱].



شکل (۶). اثر غلظت زانتان بر مدول‌های ذخیره‌سازی (G') و افت (G'') [۲۷]

Fig. 6. Effect of xanthan concentration on storage (G') and loss (G'') moduli [27]. Copyright @ 2023 MDPI

باعث کاهش میزان چربی جذب‌شده می‌شود. از طرف دیگر زانتان منجر به افزایش دقت در چاپ و صافی سطح، بیشترین پایداری و کمترین افت در پخت می‌شود [۳۳].

بیماری دیسفاژی به بیماری‌ای گفته می‌شود که افراد برای بلع غذا دچار مشکل هستند. علت این بیماری ضعیف‌شدن عضلات درگیر در بلع است که بیشتر در افراد سالمند دیده می‌شود. در نتیجه افراد مبتلا به این بیماری از ترس خفگی با سوءتغذیه و کم‌آبی مواجه هستند. امروزه از روش چاپ سه‌بعدی و استفاده از هیدروکلوئیدها به‌منظور بهبود بافت و ویژگی‌های ویسکوالاستیک غذا و برطرف کردن نیازهای تغذیه‌ای این افراد استفاده می‌شود. در تحقیق انجام‌شده به مخلوط آرد نخودفرنگی، کاپا-کاراگینان و سایر افزودنی‌ها، هیدروکلوئیدهایی مانند زانتان، صمغ عربی، و گوار اضافه شد تا به فرمولی مناسب برای غذای این بیماران برسند. نتیجه تحقیق انجام‌شده، نشان داد که استفاده از زانتان در کنار کاراگینان در فرمولاسیون باعث Self-supporting، حفظ درشت‌مغذی‌ها و ریزمغذی‌ها و عملکرد مطلوب چاپ می‌شود. همچنین به‌کارگیری زانتان افزایش تنش تسلیم جوهر و افزایش ویسکوزیته در نرخ‌های برشی پایین را به همراه داشته است. از طرفی افزودن زانتان منجر به افزایش چسبندگی درون مولکولی، سفتی، انعطاف‌پذیری و خاصیت چسبندگی نیز می‌شود و باعث افزایش ایمنی برای بیماران دیسفاژی می‌شود. توانایی چاپ این فرمولاسیون و

تحقیقات زیادی در مورد ژل‌های گیاهی چاپ‌شده به‌صورت سه‌بعدی در دنیا انجام شده است. یکی از این مطالعات بررسی اثر زانتان بر خمیر متشکل از نشاسته و گوجه‌فرنگی (TSP)^۱ به‌عنوان جوهر چاپ بوده است. افزودن زانتان به این خمیر منجر به ایجاد ریزساختار متراکم‌تر و توزیع پایدارتر رطوبت نمونه‌ها شد و این اثر به غلظت زانتان وابسته بود. افزودن زانتان Self-supporting، پایداری شکل و مقاومت در برابر فشرده‌سازی و دقت در محصول چاپ‌شده را افزایش داد. وقتی میزان زانتان افزایش می‌یابد، شبکه خمیر نشاسته فشرده‌تر و پیچیده‌تر می‌شود و ساختار متخلخل، آب را به دام می‌اندازد و یکپارچگی ایجاد می‌کند. علت آن چسبندگی زنجیره مولکولی زانتان به سطح نشاسته و ایجاد پل‌هایی بین مولکول‌های نشاسته است که منجر به بهبود چسبندگی بین مولکول‌های نشاسته می‌شود. افزودن ۵ g زانتان به ۱ kg خمیر نشاسته و گوجه‌فرنگی بالاترین دقت در چاپ خمیر را داشت و سختی، الاستیسیته، قابلیت جویدن و اکستروژن را بهبود بخشید.

در تحقیقی که بر روی گوشت‌های جایگزین انجام شده است، اثرات چندین هیدروکلوئید از جمله زانتان بررسی شده است. زانتان در این گوشت‌ها باعث کاهش ویسکوزیته، مدول ذخیره‌سازی و قدرت ژل می‌شود؛ چون لخته‌سازی اتفاق می‌افتد. همچنین به‌هنگام سرخ‌کردن این گوشت‌ها، زانتان

1. Tomato-Starch Paste

تقویت کند. وجود همه این عوامل در میزان زیاد پکتین منجر می‌شود که ظرفیت نگهداری آب سوریمی کاهش یابد. پس میزان پکتین برای ترکیب با پروتئین مهم است و باید در حد بهینه باشد [۳۵].

یکی دیگر از کاربردهای پکتین، تولید غذاهای گیاهی به‌منظور کاربردهای زیست پزشکی است. در سال ۲۰۱۹ یک بررسی روی جوهرهای زیستی انجام شد. در این بررسی از پکتین با متوکسیل کم برای انکپسولاسیون سلول‌های گیاهی زنده مانند کاهو استفاده شد و ژل از طریق اتصال عرضی بین کربوکسیل‌های آزاد پکتین به کمک کلسیم تشکیل شد. ژل پکتین حباب‌های هوا را به دام انداخته و یک بافت متخلخل ایجاد می‌کند. علت انتخاب پکتین این بود که پکتین سازگاری خوبی با سلول‌های گیاهی و ایجاد داربست دارد. همچنین پکتین در بافت‌های گیاهی به صورت یک لایه چسب‌مانند عمل کرده و سلول‌ها را کنار هم نگه می‌دارد. پس پکتین انتخاب مناسبی بوده است. نتایج نشان می‌دهد پکتین گاهی بر روی زنده ماندن سلول‌ها اثرگذار است و به‌طور کلی بین ۵۰٪ تا ۶۰٪ سلول‌ها زنده می‌مانند؛ اما با افزایش غلظت پکتین به علت ایجاد ژل‌های با خاصیت ویسکوالاستیک بیشتر، نیروی برشی اکستروژن بر سلول‌ها تاثیر گذاشته و آسیب سلولی افزایش یافته است. در این تحقیق از سرم آلبومین گاوی نیز در ترکیب با پکتین استفاده شد. سرم آلبومین گاوی منجر به افزایش تخلخل در نمونه‌های چاپ‌شده شد؛ زیرا در سطح مشترک هوا و مایع جوهر قرار می‌گیرد و مانع از خروج هوا می‌شود [۳۶].

در نهایت می‌توان گفت پکتین پلی‌ساکاریدی آنیونی است که با ایجاد اتصال عرضی پروتئین‌ها به تشکیل ژل سوریمی و داربست‌های زیستی متخلخل کمک می‌کند. از معایب آن، می‌توان به کاهش ظرفیت آب و سفتی بافت در اثر افزایش غلظت پکتین و آسیب به سلول‌ها در اکستروژن اشاره کرد. پکتین در تولید جوهرهای زیستی برای چاپ سلول‌های گیاهی و ساختارهای زیست پزشکی و تهیه غذاهای خاص به کمک ژل سوریمی استفاده می‌شود.

۵.۷. آلژینات

آلژینات پلی‌ساکارید به‌دست‌آمده از جلبک قهوه‌ای است.

ایجاد ساختار پیچیده و جذاب با سطح صاف و مرطوب باعث افزایش اشتها در این بیماران شد؛ زیرا اغلب غذاهای آنها به‌صورت پوره است [۳۴].

در مجموع می‌توان گفت زانتان پلی‌آنیونی با شاخه تری‌ساکاریدی است که در هنگام اکستروژن رفتار رقیق‌شونده با جریان نشان می‌دهد و پس از آن با افزایش ویسکوزیته و ایجاد یک شبکه ضعیف به بازیابی ساختار کمک می‌کند و سطح محصول صاف و دقت چاپ افزایش می‌یابد. از این هیدروکلوئید در فرمولاسیون غذاهای ویژه بیماران دیسفاژی و فرمولاسیون جوهرهای گیاهی و گوشت‌های جایگزین به‌منظور کاهش جذب چربی استفاده می‌شود. استفاده از زانتان برای بیماران دیسفاژی باعث ایمنی به هنگام بلع برای آنها می‌شود و بزرگترین عیب آن ایجاد لخته در تولید گوشت‌های جایگزین است [۳۲-۳۴].

۴.۷. پکتین

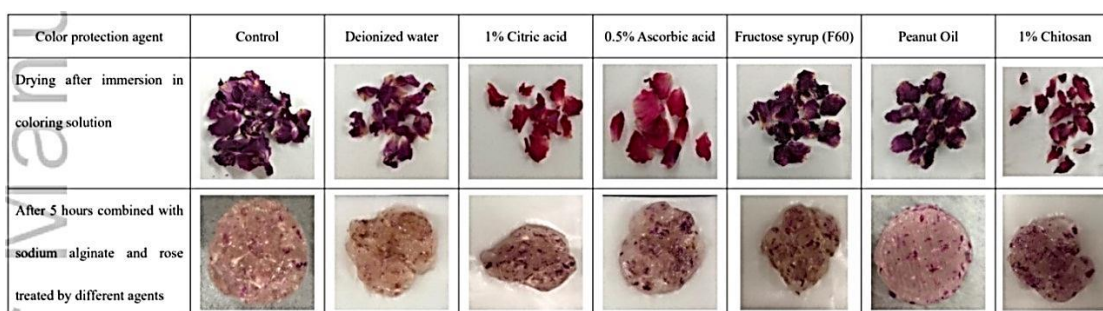
پکتین پلی‌ساکاریدی آنیونی است که در بین سلول‌های گیاهی و بین دو لایه دیواره سلولی گیاهان وجود دارد. پکتین، هتروپلی‌ساکاریدی است که از واحدهای دی گالاکتورونیک اسید با پیوند گلیکوزیدی آلفا ۱ به ۴ تشکیل شده است. با توجه به میزان متوکسیله شدن پکتین، این هیدروکلوئید دارای دو نوع پکتین با متوکسیل کم و پکتین با متوکسیل زیاد است [۳۵].

یکی از کاربردهای عالی پکتین ترکیب آن با پروتئین در سوریمی و تشکیل ژل سوریمی است. از سوریمی می‌توان در تولید غذاهای خاص استفاده نمود. کای و همکاران در سال ۲۰۲۳ بیان کردند که پکتین بر دمای دنا توره شدن پروتئین‌های میوزین و اکتین در ماهی اثر می‌گذارد و به آن سرعت می‌بخشد. در نتیجه سرعت بازشدن پروتئین تغییر می‌کند و پکتین به ایجاد اتصال عرضی و تجمع پروتئین کمک می‌کند. البته این نتایج مربوط به مقدار کم پکتین است. اگر میزان پکتین زیاد شود سرعت بازشدن و تجمع پروتئین نامناسب می‌شود و یک ژل سفت ایجاد می‌کند. علاوه بر این، افزایش پکتین منجر به کاهش pH سوریمی می‌شود که می‌تواند بر پیوندهای الکتروستاتیکی بین مولکول‌های پروتئین اثر بگذارد و ساختار شبکه پروتئین را

از آلژینات برای تولید مواد غذایی با اندازه ذرات مختلف استفاده می‌شود. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۱ انجام شده است، اثر آلژینات بر چاپ سه بعدی گلبرگ‌های رز بررسی شد. گلبرگ‌های رز به علت دارا بودن ذرات بزرگ قابلیت چاپ ندارند، ولی سرشار از مواد مغذی و رایحه مطلوب هستند. افزودن آلژینات به آن منجر به اتصال آب به ذرات و هیدراته شدن آنها و تبدیل آب آزاد به آب پیوندی شد که همین توزیع آب محصول چاپ شده را مناسب کرد. آنتوسیانین‌ها به عنوان عامل رنگ در گلبرگ‌های رز شناخته می‌شود و یکی از مشکلاتی که آلژینات در ترکیب با گلبرگ‌ها داشت تخریب و تغییر آنتوسیانین‌ها بود. به منظور رفع این مشکل، سطح گلبرگ‌ها با کیتوزان پوشانده شد. اثر کیتوزان بر حفظ رنگ گلبرگ‌های رز را می‌توان در شکل (۷) مشاهده کرد. کیتوزان در محلول‌های آبی نامحلول است و در نتیجه از تخریب ساختار آنتوسیانین‌ها با رطوبت جلوگیری می‌کند و در عین حال ژل آلژینات را کدر نمی‌کند. برای ایجاد بیشترین ویسکوزیته و بهترین ژل توسط آلژینات باید غلظت آلژینات کمتر از غلظت مناسب آن برای چاپ انتخاب شود؛ زیرا گلبرگ‌های رز زبر هستند و مقداری آب از آلژینات جذب می‌کنند که همین باعث افزایش ویسکوزیته می‌شود [۳۸].

در ساختار آن بتا دی مانوریک اسید (M) و آلفا ال گلوکونیک اسید (G) وجود دارد که به صورت بلوک‌های متوالی قرار گرفته‌اند. تشکیل ژل آلژینات به وجود کلسیم وابسته است. کلسیم با ایجاد اتصال عرضی با بلوک‌های G آلژینات، ساختاری به اصطلاح شانه تخم مرغی ایجاد می‌کند که منجر به تشکیل ژل برگشتناپذیر با حرارت می‌شود. پس وجود واحدهای G منجر به سفتی و واحدهای M منجر به انعطاف پذیری ساختار می‌شود [۳۷].

در تحقیقی که در سال ۲۰۲۳ انجام شده است، برای تولید گوشت‌های جایگزین از پروتئین تک سلولی میکروبی به همراه پروتئین نخود که به صورت بافت درآمده، سدیم آلژینات، صمغ دانه خرنوب (LBG) و کلسیم لاکتات استفاده شده تا بافتی مشابه گوشت ایجاد شود. در این پژوهش از سدیم آلژینات به عنوان ژل کننده و از LBG به عنوان قوام دهنده استفاده شد. این دو اثر سینرژیستی داشته و منجر به بهبود خواص خمیر برای مرحله چاپ شدند. با اختلاط این دو، تنش تسلیم نمونه‌ها افزایش یافت که به حفظ شکل لایه‌های چاپ شده کمک کرد. البته جایگزینی بخشی از سدیم آلژینات با LBG اتصال عرضی را در آلژینات و در نتیجه توانایی تشکیل ژل آن را در مرحله پس از چاپ کاهش داد [۳۷].



شکل (۷). حفظ رنگ گلبرگ‌های رز با کیتوزان [۳۸]

Fig 7. Preserving the color of rose petals with chitosan [38].

سطح صاف شد. در واقع آلژینات، پروتئین را به صورت یکنواخت در محصول چاپ شده پراکنده کرد. با افزایش غلظت آلژینات اندازه کمپلکس‌های آلژینات و پروتئین کوچک‌تر شد و همین، باعث متراکم شدن امولسیون و افزایش مقاومت به نیرو و تغییر شکل و در نتیجه سفتی شد [۳۹].

آلژینات به طور گسترده می‌تواند به صورت مخلوط با پروتئین استفاده شود؛ زیرا توانایی برقراری پیوند الکتروستاتیکی و هیدروژنی با آنها را دارد. آلژینات در ترکیب با پروتئین نخود، ذرات کامپوزیتی بزرگتری را ایجاد کرد که ناشی از همین پیوندها بوده و منجر به تقویت شبکه ژلی و

آزمایشگاهی است و سرعت پایین چاپ و دشواری حفظ کیفیت یکنواخت، مانع تولید انبوه می‌شود. همچنین، مسائل ایمنی و الزامات مقرراتی از جمله افزایش خطر آلودگی میکروبی در چاپ‌های زمان‌بر و نبود استانداردهای مشخص برای برچسب‌گذاری و ارزیابی سلامت افزودنی‌ها، پیشبرد صنعتی آن را محدود می‌کند. پذیرش مصرف‌کننده نیز چالش دیگری است؛ زیرا بخشی از جامعه، غذاهای چاپ‌شده را مصنوعی یا کم‌کیفیت می‌دانند و این امر نیازمند اطلاع‌رسانی و آموزش درباره ایمنی و ارزش تغذیه‌ای است. از سوی دیگر، هزینه بالای تجهیزات و نیاز به فرمولاسیون‌های تخصصی، مانع ورود تولیدکنندگان به این حوزه می‌شود. مسیرهای آینده تحقیقاتی می‌تواند بر توسعه جوهرهای چاپ با عملکرد پیشرفته، تولید غذاهای عملکردی ویژه بیماران و کودکان، طراحی ساختارهای پاسخ‌گو به محرک‌ها و مطالعه دقیق‌تر فرآیندهای پس از چاپ مانند ژل‌سازی، خشک‌کردن یا پخت متمرکز شود. در مجموع، چاپ سه‌بعدی مواد غذایی با بهره‌گیری از هیدروکلوئیدها رویکردی نوآورانه برای بهبود تولید، کاهش ضایعات و ارتقای پایداری صنعت غذا ارائه می‌دهد، اما پیشرفت آن مستلزم غلبه بر چالش‌های فنی، اقتصادی، ایمنی و پذیرش مصرف‌کننده و توسعه تحقیقات هدفمند در سال‌های آینده است.

۷. تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

۱۰. تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های مالی و معنوی دانشگاه صنعتی اصفهان در انجام این پژوهش صمیمانه قدردانی نمایند.

۱۱. بیانیه استفاده از هوش مصنوعی

متن اصلی این دست‌نوشته به‌طور کامل توسط نویسندگان تهیه و نگارش شده است. از ابزار ChatGPT محصول شرکت OpenAI صرفاً برای بهبود نگارش و ویرایش زبانی استفاده شده است و هیچ‌گونه تولید محتوای علمی توسط این ابزارها انجام نشده است.

در مفهوم کلی آلژینات پلی‌ساکاریدی با ساختار شانه تخم‌مرغی است که به کمک بلوک‌های G خود یک ژل برگشت‌ناپذیر با حرارت ایجاد می‌کند. آلژینات تعامل سینرژیستی با هیدروکلوئیدهای دیگر به‌منظور بهبود خواص چاپ دارد و پروتئین به‌صورت یکنواخت در ژل آن پراکنده می‌شود. از معایب آن می‌توان به تخریب آنتوسیانین‌ها اشاره کرد. کاربرد آن بیشتر در چاپ سه‌بعدی مواد مغذی گیاهی و تولید گوشت‌های جایگزین به کمک کامپوزیت‌های پروتئینی است.

۸. نتیجه‌گیری

چاپ سه‌بعدی مواد غذایی با بهره‌گیری از هیدروکلوئیدها می‌تواند انقلابی در صنعت غذا ایجاد کند. این فناوری با امکان تولید مواد غذایی سفارشی بر اساس رژیم‌های تغذیه‌ای، سن و شرایط سلامتی افراد، راهکاری نوین برای برطرف کردن نیازهای خاص ارائه می‌دهد. به‌ویژه، تولید غذاهایی با اشکال پیچیده و جذاب برای کودکان یا غذاهای خاص برای بیماران دیسفاژی، از مهم‌ترین کاربردهای این روش است.

یکی از نکات کلیدی در چاپ سه‌بعدی غذا، انتخاب فرمولاسیون مناسب جوهر چاپ است. هیدروکلوئیدها، نظیر ژلاتین، زانتان و آلژینات، به دلیل ویژگی‌هایی همچون توانایی تشکیل ژل، نگهداری آب و خواص رئولوژیکی مناسب، نقش مهمی در این فناوری ایفا می‌کنند. برای مثال، استفاده از ژلاتین در ترکیب با سایر مواد غذایی می‌تواند به بهبود پایداری و چسبندگی ساختارهای چاپی کمک کند. همچنین، ترکیب زانتان با کاراگینان یا پروتئین‌های گیاهی، باعث افزایش استحکام و کاهش شکنندگی محصول می‌شود. یکی دیگر از دستاوردهای چاپ سه‌بعدی تولید جایگزین‌های گوشتی با استفاده از هیدروکلوئیدها و پروتئین‌های گیاهی است که نشان‌دهنده توانایی این فناوری در حمایت از رژیم‌های غذایی پایدار و سازگار با محیط‌زیست است. استفاده از هیدروکلوئیدهایی نظیر آلژینات در ترکیب با پروتئین‌ها یا ذرات گیاهی بزرگ، موجب بهبود کیفیت ساختار و قابلیت چاپ آن‌ها شده است.

با وجود این مزایا، چاپ سه‌بعدی غذا با چالش‌های مهمی روبه‌رو است. نخست، این فناوری هنوز در مقیاس

مراجع

- [1] Anukiruthika, T., Moses, J., & Anandharamakrishnan, C. (2020). 3D printing of egg yolk and white with rice flour blends. *J. Food Eng.*, 265, 109691.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109691>
- [2] Lanaro, M., Forrestal, D. P., Scheurer, S., Slinger, D. J., Liao, S., Powell, S. K., & Woodruff, M. A. (2017). 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation. *J. Food Eng.*, 215, 13-22.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.029>
- [3] Shabir, I., Dar, A. H., Manzoor, S., Pandey, V. K., Srivastava, S., Shams, R., . . . Prithviraj, V. (2024). Advancements in Food Printing Technologies and Their Potential Culinary Applications: A Contemporary Exploration. *J. Food Process. Preserv.*, 2024(1), 6621344.
<https://doi.org/10.1155/2024/6621344>
- [4] Sun, J., Peng, Z., Zhou, W., Fuh, J. Y., Hong, G. S., & Chiu, A. (2015). A review on 3D printing for customized food fabrication. *Procedia Manuf.*, 1, 308-319.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.057>
- [5] Niyet, I. Z., Dogan, S., & Cobanoglu, C. (2024). Feeding the future: 3D food printing as a strategic response to labor scarcity. *Worldw. Hosp. Tour. Themes*, 16(5), 555-565.
<https://doi.org/10.1108/WHATT-07-2024-0161>
- [6] Millán, M. G. D. (2024). 3D Food Printing: Technological Advances, Personalization and Future Challenges in the Food Industry. *Int. J. Gastron. Food Sci.*, 37, 100963.
<https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2024.100963>
- [7] Wang, J., Jiang, Q., Huang, Z., Muhammad, A. H., Gharsallaoui, A., Cai, M., . . . Sun, P. (2024). Rheological and mechanical behavior of soy protein-polysaccharide composite paste for extrusion-based 3D food printing: Effects of type and concentration of polysaccharides. *Food Hydrocoll.*, 153, 109942.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109942>
- [8] Raiapaksha, R. R. A. K. N., Thilakarathne, B. L. S., Kondarage, Y. G., & De Silva, R. (2021). *Design and development of pump based chocolate 3D printer*. Paper presented at the *Proc. Int. Res. Conf. Smart Comput. Syst. Eng. (SCSE)*, SCSE 2021.
<https://doi.org/10.1109/SCSE53661.2021.9568345>
- [9] Singhal, S., Rasane, P., Kaur, S., Garba, U., Bankar, A., Singh, J., & Gupta, N. (2020). 3D food printing: Paving way towards novel foods. *An. Acad. Bras. Cienc.*, 92(3), e20180737.
<https://doi.org/10.1590/0001-3765202020180737>
- [10] Agunbiade, A. O., Song, L., Agunbiade, O. J., Ofoedu, C. E., Chacha, J. S., Duguma, H. T., . . . & Guine, R. P. (2022). Potentials of 3D extrusion-based printing in resolving food processing challenges: A perspective review. *J. Food Process Eng.*, 45(4), e13996.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.13996>
- [11] Sun, J., Zhou, W., Yan, L., Huang, D., & Lin, L. Y. (2018). Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *J. Food Eng.*, 220, 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.028>
- [12] Li, X., Liu, B., Pei, B., Chen, J., Zhou, D., Peng, J., . . . Xu, T. (2020). Inkjet Bioprinting of Biomaterials. *Chem. Rev.*, 120(19), 10793-10833.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00008>
- [13] Fukui, T. (2018). *Nozzle-Free Inkjet Technology Nanoparticle Technology Handbook* (pp. 691-694): Elsevier.
- [14] Bhat, Z. F., Morton, J. D., Kumar, S., Bhat, H. F., Aadil, R. M., & Bekhit, A. E.-D. A. (2021). 3D printing: Development of animal products and special foods. *Trends Food Sci. Technol.*, 118, 87-105.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.019>
- [15] Abedini, A., Sohrabvandi, S., Sadighara, P., Hosseini, H., Farhoodi, M., Assadpour, E., . . . & Jafari, S. M. (2024). Personalized nutrition with 3D-printed foods: A systematic review on the impact of different additives. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 328, 103181.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103181>
- [16] Tian, H., Wu, J., Hu, Y., Chen, X., Cai, X., Wen, Y., . . . & Wang, S. (2024). Recent advances on enhancing 3D printing quality of protein-based inks: A review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 23(3), e13349.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.13349>
- [17] Wang, T., Lu, S., Hu, X., Xu, B., Bai, C., Ma, T., & Song, Y. (2024). Cellulose nanocrystals-gelatin composite hydrocolloids: Application to controllable responsive deformation during 3D printing. *Food Hydrocoll.*, 151, 109780.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109780>
- [18] Wedamulla, N. E., Fan, M., Choi, Y. J., & Kim, E. K. (2023). Combined effect of heating temperature and content of pectin on the textural properties, rheology, and 3D printability of potato starch gel. *Int. J. Biol. Macromol.*, 253, 127129.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127129>
- [19] Godoi, F. C., Prakash, S., & Bhandari, B. R. (2016). 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. *J. Food Eng.*, 179, 44-54.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025>
- [20] Dick, A., Dong, X., Bhandari, B., & Prakash, S. (2021). The role of hydrocolloids on the 3D printability of meat products. *Food Hydrocoll.*, 119, 106879.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106879>
- [21] Zhong, Q., Chen, Y., Zhang, X., Yang, G., Jin, W., Peng, D., & Huang, Q. (2024). Correlation

- between 3D printability and rheological properties of biopolymer fluid: A case study of alginate-based hydrogels. *J. Food Eng.*, 370, 111970.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111970>
- [22] Kirchmayer, D. M., Gorkin, R., & In Het Panhuis, M. (2015). An overview of the suitability of hydrogel-forming polymers for extrusion-based 3D-printing. *J. Mater. Chem. B*, 3(20), 4105-4117.
<https://doi.org/10.1039/C5TB00586H>
- [23] Chen, B., Xu, H., Liu, S., Shi, H., Tuo, X., & Gong, Y. (2024). Processing and performance of 3D-printed gelatin-based edible composite hydrogels. *J. Appl. Polym. Sci.*, 141.(۳۰), e55708.
<https://doi.org/10.1002/app.55708>
- [24] Yang, G.-h., Han, Y., Tao, Y., Zhu, X.-y., & Xu, X.-l. (2022). Effect of gelatin on the 3 d printing forming stability of chicken meat paste. *Food Sci.*, 43(12), 51-57.
<https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-20210719-210>
- [25] Chow, C. Y., Thybo, C. D., Sager, V. F., Riantiningtyas, R. R., Bredie, W. L., & Ahrné, L. (2021). Printability, stability and sensory properties of protein-enriched 3D-printed lemon mousse for personalised in-between meals. *Food Hydrocoll.*, 120, 106943.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106943>
- [26] Bulut, E. G., & Candoğan, K. (2022). Development and characterization of a 3D printed functional chicken meat based snack: Optimization of process parameters and gelatin level. *LWT*, 154, 112768.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112768>
- [27] Avallone, P. R., Russo Spena, S., Acerno, S., Esposito, M. G., Sarrica, A., Delmonte, M., . . . Grizzuti, N. (2023). Thermorheological behavior of κ-carrageenan hydrogels modified with xanthan gum. *Fluids*, 8(4), 119.
<https://doi.org/10.3390/fluids8040119>
- [28] Zhu, Y., Di, W., Song, M., Chitrakar, B & ,Liu, Z. (2023). Correlating 3D printing performance with sol-gel transition based on thermo-responsive κ-carrageenan affected by fructose. *J. Food Eng.*, 340, 111316.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111316>
- [29] Tian, H., Wang, K., Lan, H., Wang, Y., Hu, Z., & Zhao, L. (2021). Effect of hybrid gelator systems of beeswax-carrageenan-xanthan on rheological properties and printability of litchi inks for 3D food printing. *Food Hydrocoll.*, 113, 106482.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106482>
- [30] Ko, H. J., Wen, Y., Choi, J. H., Park, B. R. ,Kim, H. W., & Park, H. J. (2021). Meat analog production through artificial muscle fiber insertion using coaxial nozzle-assisted three-dimensional food printing. *Food Hydrocoll*, 120, 106898.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106898>
- [31] Mallesham, P., Parveen, S., Pandiselvam, R., Rajkumar, P., & Naik, R. (2024). Characterisation of 3D printing cake batter with xanthan gum and optimization of printing parameters using response surface methodology. *Int. J. Gastron. Food Sci.*, 38, 101026.
<https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2024.101026>
- [32] Zhao, Y., Li, Y., Liu, Q., Chen, Q., Sun, F., & Kong, B. (2024). Investigating the rheological properties and 3D printability of tomato-starch paste with different levels of xanthan gum. *Int. J. Biol. Macromol.*, 257, 128430.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.128430>
- [33] Bhuiyan, M. H. R., Yeasmen, N., & Ngadi, M. (2025). Effect of food hydrocolloids on 3D meat-analog printing and deep-fat-frying. *Food Hydrocoll*, 159, 110716.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110716>
- [34] Ekonomou, S. I., Hadnadev, M., Gioxari, A., Abosede, O. R., Soe ,S., & Stratakis, A. C. (2024). Advancing dysphagia-oriented multi-ingredient meal development: Optimising hydrocolloid incorporation in 3D printed nutritious meals. *Food Hydrocoll*, 147, 109300.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109300>
- [35] Cai, Y., Wang, J., Xiao, S., Zhu, J., Yu, J., Li, L., & Liu, Y. (2023). The interaction study of soluble pectin fiber and surimi protein network from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) based on a new prediction model. *Food Chem.*, 403, 134429.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134429>
- [36] Vancauwenberghe, V., Mbong, V. B. M., Vanstreels, E., Verboven, P., Lammertyn, J., & Nicolai, B. (2019). 3D printing of plant tissue for innovative food manufacturing: Encapsulation of alive plant cells into pectin based bio-ink. *J. Food Eng.*, 263, 454-464.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.05.017>
- [37] Calton, A., Lille, M., & Sozer, N. (2023). 3-D printed meat alternatives based on pea and single cell proteins and hydrocolloids: Effect of paste formulation on process-induced fibre alignment and structural and textural properties. *Food Res. Int.*, 174, 113633.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113633>
- [38] Feng, C., Zhang, M., Bhandari, B., Wang, Y., & Wang, B. (2021). Improvement of 3D printing properties of rose-sodium alginate heterogeneous gel by adjusting rose material. *J. Food Process Eng.*, 44(1), e13583.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.13583>
- [39] Ma, C., Yan, J., Li, W., Wang, Y., McClements, D. J., Liu, X., & Liu, F. (2024). Enhanced printability of food-grade edible inks: Emulsions formulated with modified pea protein and sodium alginate. *Food Hydrocoll*, 152, 109946.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109946>

*Review Article***3D food printing with hydrocolloids:
Opportunities, challenges, and applications****Sahar Khalili¹, Hajar Shekarchizadeh^{2*}**

1. MSc, Department of Food Science and Technology, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2. Professor, Department of Food Science and Technology, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

(Received 5 October 2025, Received in revised form 14 December 2025, Accepted 20 December 2025)

Abstract

3D food printing, as an emerging technology, not only enables the layer-by-layer fabrication of customized foods, but has also gained significant importance due to its potential to address global challenges such as malnutrition, personalized nutrition management, food waste reduction, and the improvement of sustainable production. The development of this technology is crucial because it can precisely meet the nutritional needs of sensitive population groups and pave the way for producing functional, personalized foods tailored to specific dietary requirements. This method offers wide applications in preparing diverse foods, particularly for special groups such as the elderly, children, and patients. Its major advantages include enhanced production efficiency, reduced food waste, and the creation of complex and aesthetically appealing structures. Food materials used in 3D printing are generally categorized into naturally printable, non-printable, and alternative materials. Among these, hydrocolloids play a key role in improving printability due to their desirable rheological properties and gel-forming ability. Gelatin, xanthan, carrageenan, and alginate are among the most important hydrocolloids whose effects on texture, stability, water-holding capacity, and sensory acceptance have been widely investigated. Current evidence shows that selecting and combining appropriate hydrocolloids and additives can markedly enhance the mechanical and sensory quality of printed products. In addition to formulation components, printing parameters and post-printing (post-processing) treatments also play a decisive role in determining the final product quality. This review article examines the rheological performance, challenges, and novel approaches to improving the quality of printed products, with the aim of providing a comprehensive picture of the role of hydrocolloids in 3D food printing. Ultimately, 3D food printing using hydrocolloids opens new horizons for the production of healthy foods, plant-based products, and meat alternatives, and is increasingly recognized as an innovative approach to overcoming challenges in the food industry and advancing nutritional quality.

Keywords: *Hydrocolloid gels, 3D printer, 3D food printing, Gelatin, Carrageenan*

* Corresponding Author: shekarchizadeh@iut.ac.ir