

Journal Pre-proofs

3D Food Printing with Hydrocolloids: Opportunities, Challenges, and Applications

Sahar Khalili, Hajar Shekarchizadeh

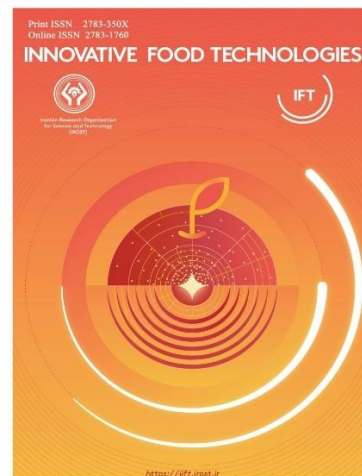
DOI: <https://doi.org/10.22104/ift.2025.7913.2243>

To appear in: Innovative Food Technologies (IFT)

Received Date: 5 October 2025

Revised Date: 14 December 2025

Accepted Date: 20 December 2025



Please cite this article as: Sahar Khalili, Hajar Shekarchizadeh, 3D Food Printing with Hydrocolloids: Opportunities, Challenges, and Applications, *Innovative Food Technologies* (2025), doi: <https://doi.org/10.22104/ift.2025.7913.2243>

This is a PDF file of an article that has undergone enhancements after acceptance, such as the addition of a cover page and metadata, and formatting for readability, but it is not yet the definitive version of record. This version will undergo additional copyediting, typesetting and review before it is published in its final form, but we are providing this version to give early visibility of the article. Please note that, during the production process, errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

© 2023 The Author(s). Published by iroast.org.

مقاله پژوهشی

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

سحر خلیلی^۱، هاجر شکرچی زاده^{۲*}^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان^۲ دانشیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

Email: shekarchizadeh@iut.ac.ir

چکیده

چاپ سه بعدی غذا به عنوان یک فناوری نوین، نه تنها امکان تولید مواد غذایی لایه لایه و سفارشی سازی شده را فراهم می کند، بلکه به دلیل پتانسیل بالای آن در حل چالش های جهانی مانند سوء تغذیه، بهینه سازی تغذیه فردی، کاهش ضایعات غذایی و بهبود تولید پایدار اهمیت ویژه ای یافته است. ضرورت توسعه این فناوری از آن جهت است که می تواند نیازهای تغذیه ای گروه های حساس را به طور دقیق و قابل کنترل برآورده کرده و مسیر تولید غذاهای عملکردی، شخصی سازی شده و سازگار با رژیم های خاص را هموار سازد. این روش کاربردهای گسترده ای در تهیه غذاهای متنوع، به ویژه برای گروه های خاص مانند سالمندان، کودکان و بیماران دارد. مزایای اصلی آن شامل افزایش بهره وری تولید، کاهش ضایعات غذایی و خلق ساختارهای زیباشناختی و پیچیده است. مواد غذایی مورد استفاده در چاپ سه بعدی به سه دسته قابل چاپ به طور طبیعی، غیرقابل چاپ و جایگزین تقسیم می شوند. در این میان، هیدروکلوئیدها به دلیل ویژگی های رئولوژیکی مطلوب و توانایی ژل سازی، نقش کلیدی در بهبود عملکرد جوهر چاپ ایفا می کنند. ژلاتین، زانتان، کاراگینان و آلژینات از جمله مهم ترین هیدروکلوئیدهایی هستند که اثر آن ها بر بافت، پایداری، نگهداری آب و پذیرش حسی مواد غذایی بررسی شده است. شواهد موجود نشان می دهد که انتخاب و ترکیب مناسب هیدروکلوئیدها و افزودنی ها می تواند کیفیت مکانیکی و حسی محصولات چاپ شده را به طور 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، چالش ها و رویکردهای نوین در بهبود کیفیت محصولات چاپ شده، با هدف ارائه تصویری جامع از نقش هیدروکلوئیدها در چاپ سه بعدی غذا، بررسی می شود. در نهایت می توان گفت، چاپ سه بعدی غذا با استفاده از هیدروکلوئیدها، افق های جدیدی را برای تولید غذاهای سالم، محصولات گیاهی و جایگزین های گوشتی گشوده و به عنوان رویکردی نوین در کاهش چالش های صنعت غذا و ارتقای تغذیه شناخته می شود.

واژه های کلیدی: ژل های هیدروکلوئیدی، پرینتر سه بعدی، چاپ سه بعدی غذا، ژلاتین، کاراگینان

۱- مقدمه

چاپ سه بعدی مواد غذایی یک فناوری نوظهور است که در آن ماده غذایی به صورت لایه به لایه ساخته می شود. از این روش برای ساخت مواد غذایی سفارشی سازی شده و با طرح های پیچیده برای افراد با شرایط خاص مانند گیاه خوران، سالمندان، بیماران دیسفاژی و دارای مشکلات بلعی و فنانوردان استفاده می شود [۱، ۲]. همچنین در جهت افزایش علاقه کودکان به مصرف غذاهای مفید، استفاده از پرینتر سه بعدی برای تولید غذای کودک با اشکال زیبا و پیچیده مورد توجه قرار گرفته است. افزودن ویتامین ها، مواد معدنی و پروبیوتیک ها به غذای چاپ شده برای کودکان، باعث رفع کمبود تغذیه ای کودکان و ارتقای سلامت روده آنها می شود [۱-۴]. با افزودن ترکیباتی مانند روغن نارگیل، پلی فنول ها و جینسینگ قرمز به جوهر چاپ نیز ویژگی های سلامتی غذا ارتقا یافته و غذای چاپ شده نقش درمانی نیز خواهد داشت [۱]. از مزایای دیگر استفاده از این فناوری می توان به افزایش راندمان تولید غذا، تولید مواد غذایی با اشکال پیچیده [۳]، کاهش هزینه ها، جبران کمبود نیروی کار [۵] و به حداقل رساندن ضایعات مواد غذایی اشاره کرد [۳]. تولید ماده غذایی مطابق سلیقه مصرف کننده، تولید آن در محل و کاهش فساد ناشی از نگهداری و حمل و نقل از علل کاهش ضایعات مواد غذایی تهیه شده به روش چاپ سه بعدی هستند [۱]. به طور کلی، این رویکرد، نویدبخش تحول در تولید مواد غذایی و افزایش رضایت مصرف کننده است [۵ و ۶].

برای داشتن یک چاپ سه بعدی مطلوب لازم است جوهر دستگاه چاپ، ویژگی های مطلوب برای چاپ و فرآیندهای پس از چاپ داشته باشد. به همین منظور از ترکیبات مختلف از جمله پلی ساکاریدها و پروتئین ها استفاده می شود. البته همه پلی ساکاریدها به عنوان پلی ساکارید غذایی به حساب نمی آیند. پلی ساکارید غذایی به پلی ساکاریدی گفته می شود که به عنوان 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 افزودنی ها طبقه بندی می شوند [۷].

در این پژوهش، جستجوی مقالات علمی در پایگاه های ScienceDirect، Scopus و همچنین Google Scholar (برای تکمیل جستجو) انجام شد. فرایند جستجو با استفاده از کلیدواژه های مرتبط از جمله hydrocolloids، 3D food printing، hydrocolloid، gels و نام هیدروکلوئیدهای رایج مانند pectin، carrageenan، xanthan، alginate و gelatin 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 دقیق تر انتخاب گردید. در نهایت، با اعمال معیارهای نهایی شامل تناسب با هدف مرور و کیفیت محتوا، ۳۹ مقاله به عنوان منابع اصلی برای نگارش مقاله حاضر مورد استفاده قرار گرفت. هدف از این بخش، ارائه یک مرور ساختاریافته از منابع علمی موجود و شناسایی چالش ها و فرصت های مربوط به کاربرد هیدروکلوئیدها در چاپ سه بعدی غذا و تبیین جهت گیری های راهبردی برای توسعه فرمولاسیون های مناسب در این حوزه است.

۲- روش های چاپ سه بعدی

روش های چاپ سه بعدی مواد غذایی به سه گروه اصلی شامل روش بستر پودری^۱، روش های مبتنی بر اکستروژن^۲ و روش های مبتنی بر اصول پرینت جوهرافشان دو بعدی^۱ تقسیم می شوند. هر یک از این فناوری ها دارای مزایا، محدودیت ها و حوزه های کاربرد متفاوتی اند 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 می دهد که هیچ یک از این روش ها به طور مطلق بر دیگری برتری ندارد؛ بلکه هر کدام برای کاربردهای خاص مناسب تر هستند [۲].

¹ Powder bed

² Extrusion based

¹ 2D inkjet printing principles

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 به صورت لایه لایه تکرار می‌شود تا یک شکل سه‌بعدی پیچیده ایجاد شود. اتصال این لایه‌ها به همدیگر به دو صورت تف جوشی و ذوب^۱ یا پیوند دادن مواد پودری^۲ مانند یک چسب انجام 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 جامد شدن 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 نیمه‌خشک است و فرایند تولید نیز معمولاً آهسته و با حجم پایین انجام می‌شود [۹].

روش اکستروژن: اکستروژن محبوب‌ترین روش در تولید مواد غذایی سه‌بعدی 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^۳ 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^۴ 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 جوهر افشان دو بعدی^۵: روش آخر پرینت جوهر افشان دو بعدی است. اصول این روش به این صورت است که قطرات جوهر خروجی از دستگاه بسیار ریز و در حد پیکولیتتر 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 سه‌بعدی حجیم مناسب نیست و بیشتر برای کاربردهای دوبعدی یا نیمه‌سه‌بعدی توصیه می‌شود. بنابراین از نظر فنی در دسته چاپ دوبعدی قرار می‌گیرد، مگر در مواردی که چندین لایه نازک به‌صورت تدریجی روی هم قرار گیرد [۲].

روش‌های چاپ سه‌بعدی هر کدام مزایا و محدودیت‌هایی دارند و انتخاب بهترین روش باید بر اساس 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. به‌طور کلی، هیچ روش چاپی بدون در نظر گرفتن ویژگی‌های ماده غذایی عملکرد مطلوبی نخواهد داشت و طراحی فرمولاسیون و انتخاب فناوری باید به‌صورت همزمان انجام شود.

۳- طبقه‌بندی مواد غذایی برای چاپ سه‌بعدی

¹ Sintering

² Bonding of powder

³ Fused Deposition Modeling

⁴ Fused Filament Fabrication

⁵ 2D inkjet printing

طبقه‌بندی مواد غذایی برای چاپ سه‌بعدی 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 سه‌بعدی استفاده شوند زیرا دارای خواص رئولوژیکی مناسبی هستند. ویسکوزیته و رفتار رقیق‌شونده با نیروی برشی این مواد باعث می‌شود که آنها در حین چاپ به آرامی اکستروود شوند و ساختارهای پایداری تشکیل دهند. شکلات، پوره سیب زمینی، روکش خامه‌ای^۱، کیک، پنیرهای خامه‌ای و 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 به صورت طبیعی، لزوماً به معنای قابلیت چاپ برای همه کاربردها نیست [۱۴].

مواد غذایی سنتی غیر قابل چاپ: این مواد به طور 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 به صورت 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 نانوبی و شیر در این دسته قرار می‌گیرند [۱۴].

مواد غذایی جایگزین: این دسته شامل مواد غذایی غیرمتعارف مانند قارچ‌ها، حشرات و جلبک‌ها هستند که به عنوان منابع جدیدی از مواد مغذی (پروتئین و فیبرها) شناخته می‌شوند. این مواد جایگزین‌های پایدار مواد غذایی اصلی هستند. اغلب آنها به منظور اطمینان از قابلیت چاپ و پایداری، نیاز به فرمولاسیون‌های خاصی دارند. مواد غذایی جایگزین از نظر تغذیه‌ای جذاب اند، 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 به شمار می‌آید. به‌طور کلی، چاپ‌پذیری 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 موثر 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.

۴-۱- خواص ماده غذایی

ترکیب ماده غذایی مورد استفاده در تعیین قابلیت چاپ آنها بسیار اثرگذار است. قابلیت چاپ مواد غذایی به ترکیب، ساختار و خواص فیزیکوشیمیایی 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. به همین دلیل در قسمت قبلی،

¹ Frosting

مواد غذایی براساس قابلیت چاپشان طبقه‌بندی شدند و به ترکیباتی که قابلیت چاپ ندارند لازم است افزودنی‌ها اضافه شود. مواد افزودنی به طور قابل توجهی ویژگی‌های بافتی و حسی ترکیبات چاپ‌شده را تحت تاثیر قرار می‌دهد و علاوه بر ایجاد قابلیت چاپ در آنها پذیرش این مواد غذایی را برای مصرف‌کننده بیشتر می‌کند [۱۵]. به عنوان مثال در پژوهش Anukiruthika و همکاران در سال ۲۰۲۰ مشخص شد که وجود نشاسته در مخلوط آرد برنج و تخم مرغ 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، ارتفاع و سرعت حرکت نازل، دما و ضخامت لایه است. زمانیکه فشار و سرعت اکستروژن بهینه باشند، جریان مواد یکنواخت‌تر و لایه‌گذاری دقیق‌تر خواهد بود. تغییر این دو پارامتر به نقص و ناسازگاری در محصول چاپ‌شده منجر می‌شود [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 می‌شود. اما اگر سرعت کم باشد، جریان مواد به صورت یکنواخت نخواهد بود و رشته‌های خروجی از نازل ناپیوسته و ضخامت لایه‌ها متغیر خواهد بود [۱]. در مطالعه انجام‌شده توسط وانگ و همکاران گفته شده اگر فشار اکستروژن بیشتر از حد بهینه باشد، مدت زمانی که نانوکریستال‌های سلولز تحت تاثیر نیروی برشی قرار می‌گیرند، کمتر خواهد بود و سرعت جریان مواد در اکستروژن افزایش می‌یابد و در نتیجه امکان جهت‌گیری نانوکریستال‌های سلولز کمتر می‌شود [۱۷].

قطر و طول نازل پارامترهای بعدی اثرگذار خواهند بود. اندازه نازل برای دستیابی به وضوح مطلوب و یکپارچگی ساختار حیاتی است. نازل‌هایی با قطر کوچک‌تر، جزئیات، وضوح و دقت بیشتری را به نمایش می‌گذارند. اما در ترکیب مواد آنها باید دقت بیشتری اعمال شود [۱]. هرچه طول نازل بیشتر باشد جریان هیدروکلوئید طولانی‌تر خواهد بود [۱۷]. در مطالعه وانگ و همکاران اثر سرعت حرکت نازل بر جهت‌گیری مناسب نانوکریستال‌های سلولزی گفته شده و بیان شده که برای بهترین جهت‌گیری نانوکریستال‌های سلولزی باید سرعت حرکت نازل ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه باشد.

دمایی که چاپ سه‌بعدی در آن انجام می‌شود نیز بر وضوح، یکپارچگی ساختار، ویسکوزیته و تشکیل ژل اثر می‌گذارد. 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 می‌شود [۱۸]. در تحقیقی که در سال ۲۰۲۴ میلادی انجام شده است ویسکوزیته نانوکریستال‌های سلولز و ژلاتین در دماهای بالاتر از ۳۵ درجه سلسیوس کاهش یافته و بعد از انجام اکستروژن در دمای اتاق ویسکوزیته محصول افزایش یافته است [۱۷].

۳-۴- فرآیندهای پس از چاپ

اغلب مواد غذایی چاپ شده با پرینتر سه‌بعدی بعد از چاپ، نیاز به فرآیندهایی مانند حرارت‌دهی 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 سفارشی‌سازی محصولات از موادی استفاده می‌شود که ویژگی آنها طی زمان یا در پاسخ به محرک‌های محیطی تغییر می‌کند. از این موضوع در ایجاد طرح‌های پیچیده استفاده می‌شود. مثالی از آن استفاده از نانوکریستال‌های سلولز و ژلاتین در تولید محصول است. محصولات با طرح‌های پروانه و گل شبدر حاوی نانوکریستال‌های سلولز و ژلاتین در مواجهه با کم آبی طی زمان تغییر شکل می‌دهند و منجر به ایجاد پروانه در حال پرواز یا شکوفه شبدر باز شده می‌شود [۱۷].

در نهایت باید گفت کیفیت چاپ مواد غذایی حاصل تعامل سه‌گانه بین خواص ماده اولیه، پارامترهای چاپ و فرآیندهای پس از چاپ است و هرگونه عدم تعادل در این حوزه‌ها می‌تواند کیفیت محصول نهایی را کاهش دهد. از آنجا که خواص رئولوژیکی جوهر تعیین‌کننده 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 حرارت‌دهی یا خشک‌کردن نیز تنها زمانی مؤثر عمل می‌کنند که ساختار اولیه از شبکه‌ای پایدار برخوردار باشد؛ در غیر این صورت این فرآیندها موجب تغییر شکل محصول خواهند شد.

۵- استفاده از هیدروکلوئیدها در چاپ سه‌بعدی مواد غذایی

به کارگیری هیدروکلوئیدها در جوهرهای غذایی، تنها به افزایش قوام محدود نمی‌شود، بلکه نقش تعیین‌کننده‌ای در ایجاد تعادل بین سه نیاز اصلی چاپ سه‌بعدی (قابلیت اکستروژن، حفظ شکل پس از چاپ و پایداری ساختاری 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.

۵-۱- خواص رئولوژیکی

بررسی این خواص برای اطمینان از موفقیت اکستروژن و حفظ یکپارچگی ساختار مواد غذایی چاپ شده ضروری است. خواص رئولوژیکی جوهر غذایی و مواد چاپ‌شده تحت تاثیر 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 باز می‌گردد. 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 نگه داشتن 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 درصد، توانایی ماده 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].

۵-۲- 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

^۱ Flexural strength

^۲ Anisotropic properties

منجر می‌شود بافت مانند فشر 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 چاپ شده 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 هم جهت شدن نانوکریستال‌های سلولزی به هنگام چاپ سه‌بعدی اشاره کرد. این هم جهت شدن منجر به ایجاد نواحی روشن و تاریک در میکروسکوپ نوری پلاریزه (POM) می‌شود که نشان از ایجاد شبکه هیدروکلوئیدی است. هر چه 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]. هم جهت شدن 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 خمیری شدن^۳

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

در مطالعه انجام شده بر روی مخلوط اجزای تخم‌مرغ و آرد برنج این خاصیت مورد بررسی قرار گرفته است. زرده تخم‌مرغ و آرد برنج با نسبت ۲ به ۱ بالاترین ویسکوزیته و بهترین پایداری را در چاپ سه‌بعدی 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

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

عملکرد مطلوب تری ایجاد می‌کنند. باید توجه داشت که اثر هیدروکلوئیدها به شدت 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.

۶- مکانیسم‌های تشکیل ژل هیدروکلوئیدها

هنگامیکه 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. به منظور 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 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 به طور گسترده استفاده می‌شود به خصوص هنگامیکه میکروانکپسولاسیون نیاز باشد. تشکیل ژل آلترینات با کلسیم مثالی از این روش است. آلترینات 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 آلترینات می‌تواند ژل تشکیل دهد [۱۹].

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 به وجود می‌آید. در این نوع تشکیل ژل یک پلی آنیون و یک پلی کاتیون 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 به عنوان پلی کاتیون و ژلاتین به عنوان پلی آنیون عمل کرده و تشکیل ژل داده‌اند [۱۹].

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

شکل (۱)

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 گذاشته می‌شود. در مقابل، **ionotropic cross-linking** به دلیل 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 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 بر اساس زمان‌بندی ژل‌دهی، پایداری مکانیکی مورد نیاز و نوع محصول چاپ‌شونده انجام شود [۱۹ و ۲۲].

۷- انواع هیدروکلوئیدهای مورد استفاده در چاپ سه‌بعدی مواد غذایی

تا اینجا به خواص و اثرات هیدروکلوئیدهای مفید در چاپ سه‌بعدی 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 سه‌بعدی غذا می‌توان از آنها استفاده کرد. در اینجا به هیدروکلوئیدهایی که در چاپ سه‌بعدی 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 سه‌بعدی مواد غذایی خلاصه شده است.

جدول (۱)

۱-۷- ژلاتین

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 به دلیل افزایش دما، امکان رشد میکروبی وجود دارد. در روش دوم ژلاتین به صورت متورم به خمیر گوشت اضافه می‌شود. به منظور 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 چاپ‌شده نیاز به فرآیند پس از چاپ داشته باشد، ساختار ماکروسکوپی به علت 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 به عنوان تابعی از دما در نظر گرفته شده است. در غلظت‌های مختلف ژلاتین، با افزایش دما از ۳۵ به ۴۰ درجه سلسیوس ویسکوزیته کاهش یافته و لذا به منظور چاپ مناسب، دمای ۴۰ درجه سلسیوس 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].

شکل (۲)

همانطور که گفته شد غلظت ژلاتین نیز در ایجاد قابلیت چاپ محصولات اثرگذار است. اگر غلظت ژلاتین بسیار کم باشد به دلیل رقیق بودن جوهر امکان چاپ وجود نخواهد داشت. از طرف دیگر اگر غلظت ژلاتین بیش از حد باشد، به دلیل ایجاد ژل قبل از خروج از نازل، چاپ مطلوب و با کیفیت نخواهد بود. در نتیجه غلظت ژلاتین برای چاپ باید بهینه باشد. در مطالعه انجام شده در سال ۲۰۲۴ پایدارترین ساختار سه‌بعدی مربوط به غلظت ۳۵ درصد 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 به صورت سه‌بعدی مناسب است. با افزایش غلظت ژلاتین، ویسکوزیته جوهر در نیروی برشی کمتر، بیشتر می‌شود. همچنین در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۲ انجام شده است بیان شده با افزایش غلظت ژلاتین در خمیر مرغ، ویسکوزیته، خاصیت ارتجاعی، تشکیل ژل و حفظ شکل محصول افزایش می‌یابد و وابستگی به فرکانس کم می‌شود. علت حالت ارتجاعی در ژل محصول به بیشتر بودن مقدار مدول ذخیره‌سازی نسبت به مدول افت ژلاتین برمی‌گردد [۲۴].

شکل (۳)

یکی از مشکلات ژلاتین در چاپ سه‌بعدی خواص مکانیکی ضعیف محصولات چاپ‌شده است. اگر ژلاتین به صورت ترکیبی با هیدروکلوئیدهای دیگر یا در مخلوط با پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها استفاده شود، ویژگی‌های چاپ به ویژه خواص مکانیکی آن بهبود می‌یابد. هنگامیکه ژلاتین با نانوکریستال‌های سلولز یا گلیسرول مخلوط می‌شود، پیوندهای هیدروژنی بین آنها تشکیل می‌شود و پایداری و خواص مکانیکی محصول چاپ‌شده بهتر می‌شود [۱۷ و ۲۳]. اختلاط ژلاتین با غلظت ۲ درصد با پروتئین آب پنیر

با غلظت ۱۸ درصد 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 سیتريک اسید لیمو منجر به ایجاد طعم ترش می‌شود. به طور 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 و ۱۴]. 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 [۱۴ و ۲۳].

ژلاتین با ایجاد ساختارهای متخلخل امکان به دام انداختن مواد مغذی را دارد و برای غنی‌سازی و سفارشی‌سازی 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 مرغ، مخلوط ژلاتین و کاپا-کاراگینان به فرمولاسیون محصول اضافه شد. نتایج آنها نشان می‌دهد که غلظت ۱/۷۹ درصد 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 به عنوان 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 [۲۰ و ۲۳ و ۲۴]. ضعف اصلی آن، خواص مکانیکی ضعیف محصولات چاپ‌شده است که در اثر ترکیب با پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها یا استفاده از آنزیم‌ها بهبود می‌یابد. کاربرد اصلی ژلاتین در فرمولاسیون خمیرهای پروتئینی است [۱۴ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۶].

۲-۷- کاراگینان

کاراگینان یک هیدروکلوئید بلند زنجیر است که از جلبک قرمز جداسازی می‌شود. کاراگینان توانایی تشکیل ژل‌های برگشت-پذیر با حرارت را دارد. همچنین کاراگینان جایگزین مناسبی برای ژلاتین حاصل از منابع حیوانی است. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۳ انجام شده است به منظور 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 فضاها 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 مشکلاتی که ترکیب کاپا-کاراگینان با زانتان ایجاد می‌کند افزایش شکنندگی است [۲۷].

در سال‌های اخیر تولید آب‌نبات و آدامس‌های حاوی مواد مغذی به منظور جلوگیری از پیری محبوب شده است. به دلیل 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 به خوبی پیش برود، ویژگی‌های مخلوطی از کاراگینان

و فروکتوز مورد بررسی قرار گرفته است. تشکیل ژل کاراگینان در دو مرحله انجام می شود: (۱) تبدیل حالت تصادفی زنجیره های مولکولی به مارپیچ و (۲) به هم پیوستن مارپیچ ها و ایجاد مارپیچ های دوتایی. به هنگام خنک کردن ساختار سه بعدی و تشکیل ژل، دمایی که مدول ذخیره سازی و مدول افت جوهر در آن برابر هستند، دمای تشکیل ژل کاراگینان (Tg) در نظر گرفته می شود. اگر خنک کردن ادامه داشته باشد و دما به زیر دمای تشکیل ژل برود، افزایش هر دو مدول مشاهده می شود. همچنین مدول ذخیره سازی بیشتر از مدول افت خواهد بود که نشان از تجمع مارپیچ های دوتایی کاراگینان است. قندها و پلی آل ها توانایی کنترل انتقال حالت محلول به ژل را دارند. با افزایش غلظت فروکتوز، دمای تشکیل ژل افزایش می یابد. علت این موضوع به جذب آب توسط فروکتوز از کاراگینان هیدراته و تشکیل پیوند هیدروژنی بین گروه های هیدروکسیل فروکتوز و کاراگینان و ایجاد نقاط اتصال بر می گردد و تشکیل ژل را تسهیل می کند. به طور کلی افزودن فروکتوز به کاراگینان منجر به ایجاد ژل متراکم تر و همگن تر می شود و می توان در آینده از آن برای تولید محصولات پاسخ دهنده به تغییرات دما طی تبدیل حالت محلول به ژل استفاده کرد [۲۸].

به طور کلی کاراگینان تعامل خوبی با اجزای دیگر فرمولاسیون جوهر مانند پروتئین و پلی ساکارید و هیدروکلوئیدهای دیگر دارد و خواص مکانیکی و قابلیت چاپ جوهر را افزایش می دهد. همچنین توانایی ایجاد سیستم های ژل کننده ترکیبی را دارد. در مطالعه ای که در سال ۲۰۲۳ انجام شده است، سیستم ژل کننده ترکیبی از موم زنبور عسل و کاراگینان و زانتان تهیه شده و ویژگی های آن مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از ترکیب کاراگینان و زانتان بر میکروساختار سیستم ژل کننده اثرگذار بوده است. این دو با تشکیل شبکه ای پایدار به حفظ یکپارچگی ساختار محصول چاپ شده، مقاومت در برابر تنش های مکانیکی، توزیع یکنواخت موم زنبور عسل و بهبود خواص رئولوژیکی سیستم کمک می کنند. البته پروتئین ها، الیاف و پلی ساکاریدها نقاط اتصال بیشتری بین این دو ایجاد می کنند و همین منجر به تعاملات بیشتر بین آنها شده و میکروساختار همگن تری 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 زنبور عسل به ذوب ساختار ارتورومبیک موم در دماهای بالا برمی گردد. ذوب ذرات منجر به ایجاد ترکیبات هیدروکربنی و مونواستری می شود که خواص هیدروکلوئیدها مانند رفتار رقیق شونده با نیروی برش آنها را افزایش می دهد و زمان تشکیل ژل آنها را کوتاه تر می کند. ژل کننده های ترکیبی ویژگی های میکرومورفولوژی پیچیده ای دارند و ویژگی بارز آنها سطح خشن آنها است. این سطح خشن باعث افزایش سطح تعاملات و تثبیت بیشتر ریزساختار می شود. در نهایت از این سیستم ژل کننده ترکیبی در جوهرهای لیچی که ماده ای برای چاپ سه بعدی است استفاده می شود [۲۹].

امروزه تولید محصولات مبتنی بر گیاه مانند گوشت های جایگزین برای افراد گیاه خوار بسیار مطرح شده است [7]. یکی از روش های تولید گوشت های جایگزین استفاده از چاپ سه بعدی است. به همین منظور می توان از ترکیب کاراگینان با مواد دیگر استفاده کرد. در مطالعه ای که در سال ۲۰۲۱ 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 می دهند [۳۰]. همچنین در مطالعه دیگری که در سال های ۲۰۲۴ انجام شده است از ترکیب کاراگینان و آلژینات و ایزوله پروتئین سویا برای تولید کامپوزیت های پروتئین و پلی ساکارید 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 می شود. افزودن کاراگینان و آلژینات به کمک واکنش های الکتروستاتیک و هیدروفوبی و پیوندهای دی سولفیدی تغییراتی را در ساختار کریستالی جوهر ایجاد کردند که حفظ ساختار، پایداری حرارتی، ویسکوزیته، مدول ذخیره سازی و چسبندگی را بهبود بخشید. همچنین FTIR نشان داد که افزودن این هیدروکلوئیدها منجر به تشکیل پیوندهای هیدروژنی از طریق گروه های هیدروکسیل شد و ساختارهای مارپیچ آلفا و صفحه بتا به وجود آمده است. در شکل (۴) می توان نحوه تشکیل ژل و ارتباط آن با واکنش های 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 [7]. در شکل ۵ اثر غلظت های مختلف کاراگینان و آلژینات بر شکل محصول چاپ شده و جریان جوهر در نازل نشان داده شده است.

شکل (۴)

شکل (۵)

به طور کلی 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 جوهر غذایی و افزایش خواص مکانیکی و ویسکوالاستیسیته مواد غذایی چاپ شده به صورت سه‌بعدی می‌شود. با وجود اینکه تقویت خواص مکانیکی باعث افزایش شکنندگی محصولات می‌شود و کنترل فرآیند چاپ جوهر غذایی حاوی کاراگینان به علت 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 به صورت 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]. زمانی که 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 بازیابی 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 درصد به ۱/۵ درصد) به عنوان یک عامل تغلیظ‌کننده، باعث افزایش مدول ذخیره‌سازی و مدول افت به ترتیب از ۱۰۰۰ به ۱۰۰۰۰ پاسکال و از حدود ۱۰۰ به ۱۰۰۰ پاسکال شده و خاصیت ویسکوالاستیک را افزایش داده است [۲۷].

شکل (۶)

تحقیقات زیادی در مورد ژل‌های گیاهی چاپ‌شده به صورت سه‌بعدی در دنیا انجام شده است. یکی از این مطالعات بررسی اثر زانتان بر خمیر متشکل از نشاسته و گوجه فرنگی (TSP)^۱ به عنوان 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 فشردگی 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 گرم زانتان به ۱ کیلوگرم خمیر نشاسته و گوجه فرنگی 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 به هنگام سرخ کردن این گوشت‌ها، زانتان باعث کاهش میزان چربی جذب شده 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 ضعیف شدن عضلات درگیر در بلع است که بیشتر در افراد سالمند دیده می‌شود. در نتیجه افراد مبتلا به این بیماری از ترس خفگی با

¹ Tomato-Starch Paste

سوء تغذیه و کم آبی مواجه هستند. امروزه از روش چاپ سه بعدی و استفاده از هیدروکلوئیدها به منظور بهبود بافت و ویژگی‌های ویسکوالاستیک غذا و برطرف کردن نیازهای تغذیه‌ای این افراد استفاده می‌شود. در تحقیق انجام شده به مخلوط آرد نخود فرنگی، 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 انجام شده نشان داد که استفاده از زانتان در کنار کاراگینان در فرمولاسیون باعث Self-supporting، حفظ درشت‌مغذی‌ها و ریزمغذی‌ها و عملکرد مطلوب چاپ می‌شود. همچنین به کارگیری 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 ایجاد ساختار پیچیده و جذاب با سطح صاف و مرطوب باعث افزایش اشتها در این بیماران شد زیرا اغلب غذاهای آنها به صورت پوره است [۳۴].

در مجموع می‌توان گفت زانتان پلی آنیونی با شاخه تری ساکاریدی 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 به منظور 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 پلی ساکاریدی آنیونی است که در بین سلول‌های گیاهی و بین دو لایه دیواره سلولی گیاهان وجود دارد. پکتین، هتروپلی ساکاریدی 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 دناتوره شدن پروتئین‌های میوزین و اکتین در ماهی اثر می‌گذارد و به آن سرعت می‌بخشد. در نتیجه سرعت باز شدن 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 باز شدن 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 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 به منظور 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 به طور کلی بین ۵۰ تا ۶۰ درصد 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 زیست‌پزشکی و تهیه غذاهای خاص به کمک ژل سوریمی استفاده می‌شود.

۵-۷- آلژینات

آلژینات پلی‌ساکارید به دست آمده از جلبک قهوه‌ای است. در ساختار آن بتا دی مانوریک اسید (M) و آلفا ال گلورونیک 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 برگشت ناپذیر با حرارت می‌شود. پس وجود واحدهای G منجر به سفتی و واحدهای M منجر به انعطاف‌پذیری ساختار می‌شود [۳۷]. در تحقیقی که در سال ۲۰۲۳ انجام شده است برای تولید گوشت‌های جایگزین از پروتئین تک‌سلولی میکروبی به همراه پروتئین نخود که به صورت بافت در آمده، 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 ژل‌کننده و از LBG به عنوان قوام‌دهنده 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 چاپ‌شده 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].

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 سه‌بعدی گلیبرگ‌های رز بررسی شد. گلیبرگ‌های 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 چاپ‌شده را مناسب کرد. آنتوسیانین‌ها به عنوان عامل رنگ در گلیبرگ‌های رز شناخته می‌شود و یکی از مشکلاتی که آلژینات در ترکیب با گلیبرگ‌ها داشت تخریب و تغییر آنتوسیانین‌ها بود. به منظور رفع این مشکل، سطح گلیبرگ‌ها با کیتوزان پوشانده شد. اثر کیتوزان بر حفظ رنگ گلیبرگ‌های 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 گلیبرگ‌های رز زیر هستند و مقداری آب از آلژینات جذب می‌کنند که همین باعث افزایش ویسکوزیته می‌شود [۳۸].

شکل (۷)

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 سطح صاف شد. در واقع آلژینات، پروتئین را به صورت یکنواخت در محصول چاپ‌شده 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].

در مفهوم کلی آلژینات پلی‌ساکاریدی با ساختار شانه تخم مرغی است که به کمک بلوک‌های G خود یک ژل برگشت‌ناپذیر با حرارت ایجاد می‌کند. آلژینات تعامل سینرژیستی با هیدروکلوئیدهای دیگر به منظور بهبود خواص چاپ دارد و پروتئین به صورت 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 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.

۹- 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.

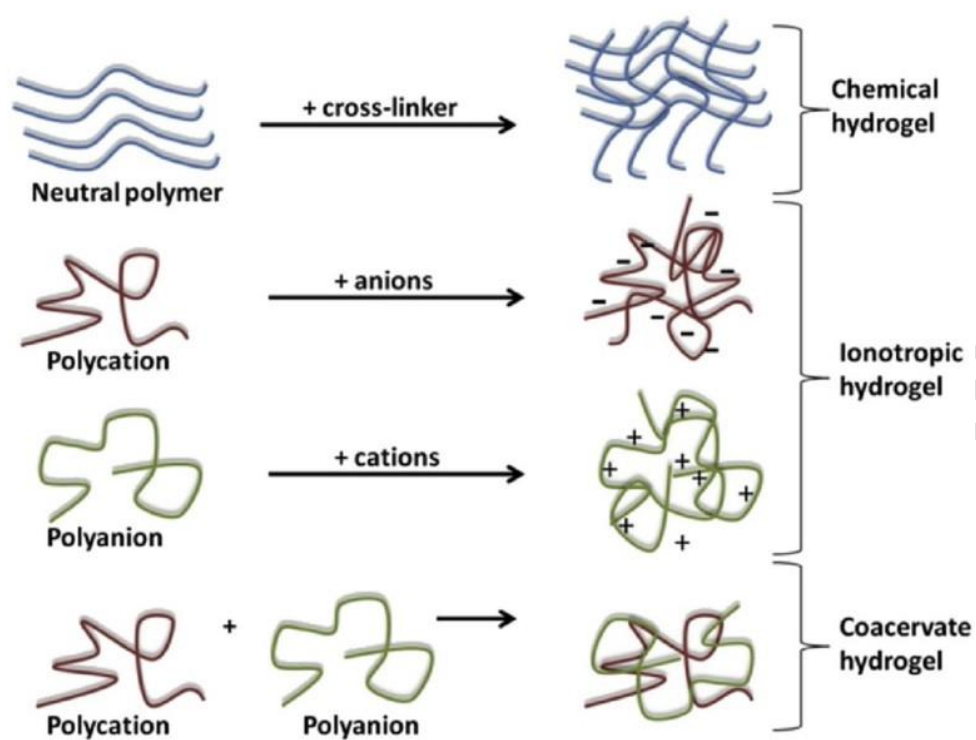
۱۱- بیانیه استفاده از هوش مصنوعی

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.

- [۱] Anukiruthika, T., Moses, J., & Anandharamakrishnan, C. (2020). 3D printing of egg yolk and white with rice flour blends. *Journal of Food Engineering*, 265, 109691.
- [۲] 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. *Journal of Food Engineering*, 215, 13-22.
- [۳] 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. *Journal of Food Processing Preservation*, 2024(1), 6621344.
- [۴] 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 Manufacturing*, 1, 308-319.
- [۵] Niyet, I. Z., Dogan, S., & Cobanoglu, C. (2024). Feeding the future: 3D food printing as a strategic response to labor scarcity. *Worldwide Hospitality and Tourism Themes*, 16(5), 555-565.
- [۶] Millán, M. G. D. (2024). 3D Food Printing: Technological Advances, Personalization and Future Challenges in the Food Industry. *International Journal of Gastronomy Food Science*, 37, 100963.
- [۷] 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 Hydrocolloids*, 153, 109942.
- [۸] 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 Proceedings - International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering, SCSE 2021.
- [۹] Singhal, S., Rasane, P., Kaur, S., Garba, U., Bankar, A., Singh, J., & Gupta, N. (2020). 3D food printing: Paving way towards novel foods. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 92(3), e20180737.
- [۱۰] 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. *Journal of Food Process Engineering*, 45(4), e13996.
- [۱۱] Sun, J., Zhou, W., Yan, L., Huang, D., & Lin, L. Y. (2018). Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*, 220, 1-11. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.02.028
- [۱۲] Li, X., Liu, B., Pei, B., Chen, J., Zhou, D., Peng, J., . . . Xu, T. (2020). Inkjet Bioprinting of Biomaterials. *Chemical Reviews*, 120(19), 10793-10833. doi: 10.1021/acs.chemrev.0c00008
- [۱۳] Fukui, T. (2018). Nozzle-Free Inkjet Technology *Nanoparticle Technology Handbook* (pp. 691-694): Elsevier.
- [۱۴] 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 in Food Science & Technology*, 118, 87-105.
- [۱۵] 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. *Advances in Colloid Interface Science*, 328, 103181.
- [۱۶] Tian, H., Wu, J., Hu, Y., Chen, X., Cai, X., Wen, Y., . . . & Wang, S. (۲۰۲۴). Recent advances on enhancing 3D printing quality of protein-based inks: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(3), e13349.
- [۱۷] 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 Hydrocolloids*, 151, 109780.

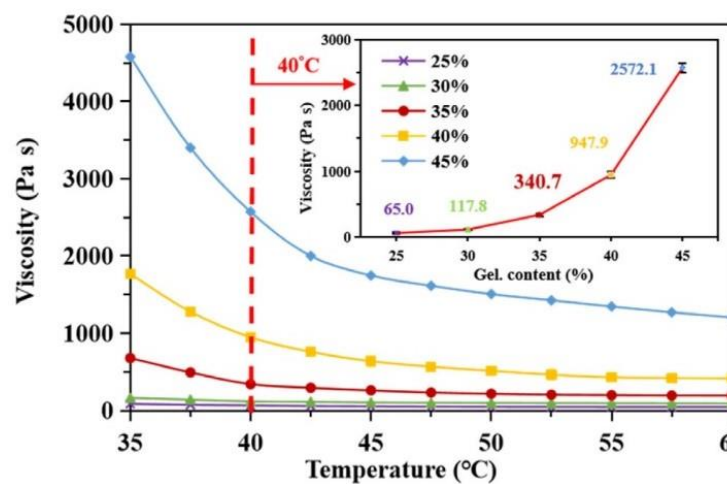
- [18] Wedamulla, N. E., Fan, M., Choi, Y. J., & Kim, E. K. (2023). Combined effect of heating temperature and content of pectin on the textural properties, rheology, and 3D printability of potato starch gel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 127129.
- [19] Godoi, F. C., Prakash, S., & Bhandari, B. R. (2016). 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44-54.
- [20] Dick, A., Dong, X., Bhandari, B., & Prakash, S. (2021). The role of hydrocolloids on the 3D printability of meat products. *Food Hydrocolloids*, 119, 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. *Journal of Food Engineering*, 370, 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. *Journal of Materials Chemistry B*, 3(20), 4105-4117.
- [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. *Journal of Applied Polymer Science*, 141.(3), e55708.
- [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.
- [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 Hydrocolloids*, 120, 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.
- [27] Avallone, P. R., Russo Spena, S., Acierno, 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.
- [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. *Journal of Food Engineering*, 340, 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 Hydrocolloids*, 113, 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 Hydrocolloids*, 120, 106898.
- [31] Malleshham, 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. *International Journal of Gastronomy Food Science*, 38, 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. *International Journal of Biological Macromolecules*, 257, 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 Hydrocolloids*, 159, 110716.
- [34] Ekonomou, S. I., Hadnadev, M., Gioxiari, A., Abosedo, O. R., Soe, S., & Stratakis, A. C. (2024). Advancing dysphagia-oriented multi-ingredient meal development: Optimising hydrocolloid incorporation in 3D printed nutritious meals. *Food Hydrocolloids*, 147, 109300.

- [۳۵] 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 Chemistry*, 403, 134429.
- [۳۶] 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. *Journal of Food Engineering*, 263, 454-464.
- [۳۷] 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 Research International*, 174, 113633.
- [۳۸] 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. *Journal of Food Process Engineering*, 44(1), e13583.
- [۳۹] 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 Hydrocolloids*, 152, 109946.



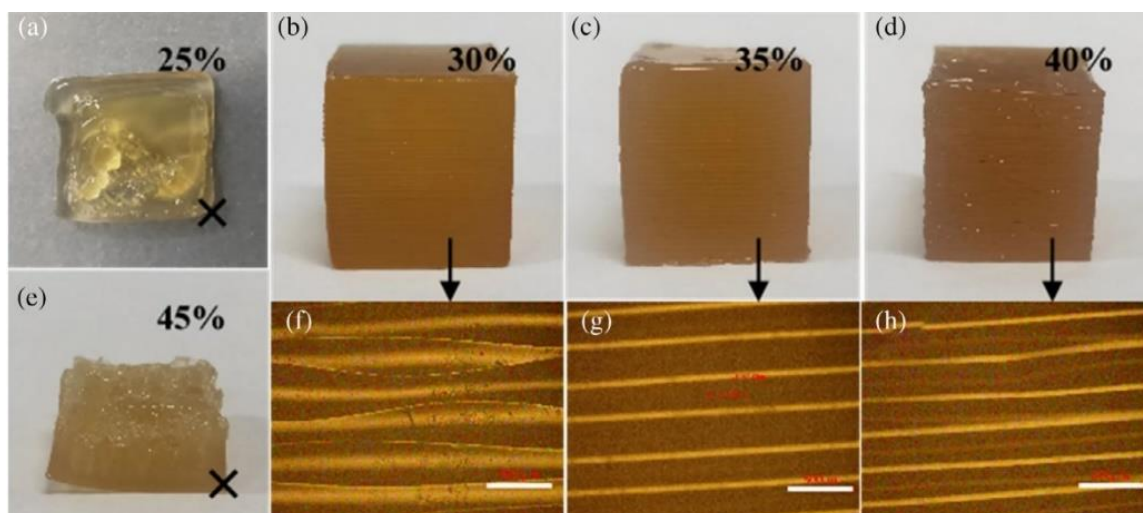
شکل (۱) انواع مکانیسم تشکیل ژل [۱۹]

Figure (1) Types of gel formation mechanisms [19]. Copyright @ 2016 Elsevier



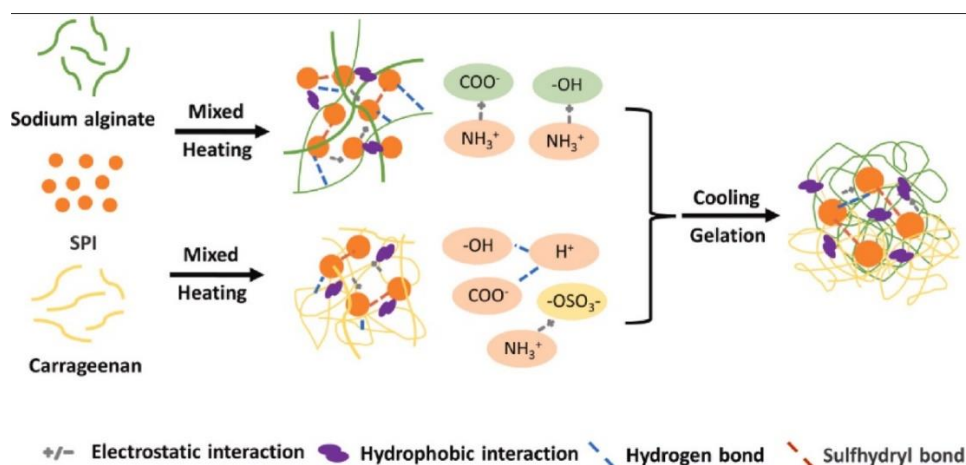
شکل (۲) اثر دما بر ویسکوزیته غلظت‌های مختلف ژلاتین [۲۳]

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



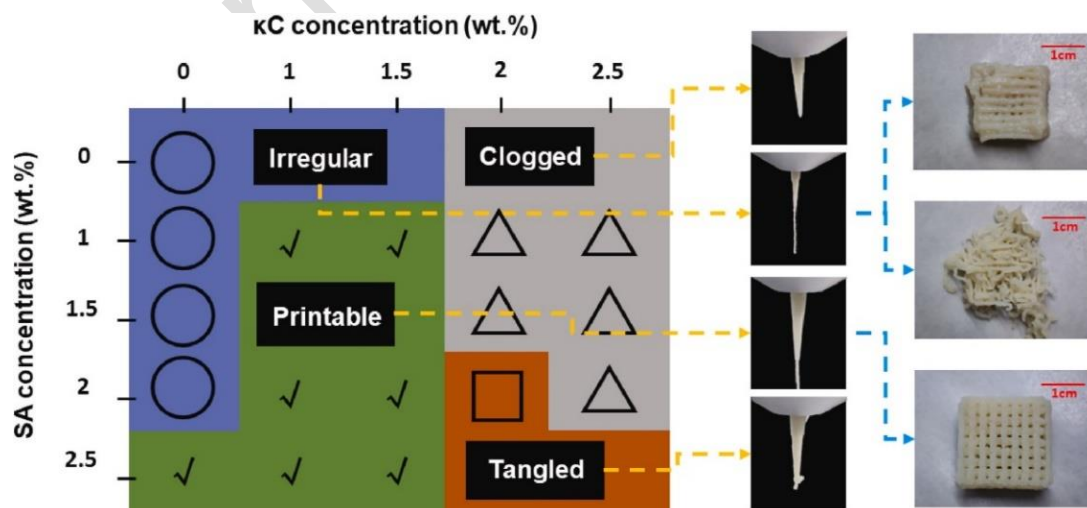
شکل (۳) قابلیت چاپ غلظت‌های مختلف ژلاتین [۲۳]

Figure (3) Printability of different gelatin concentrations [23]. Copyright @ 2024 Wiley



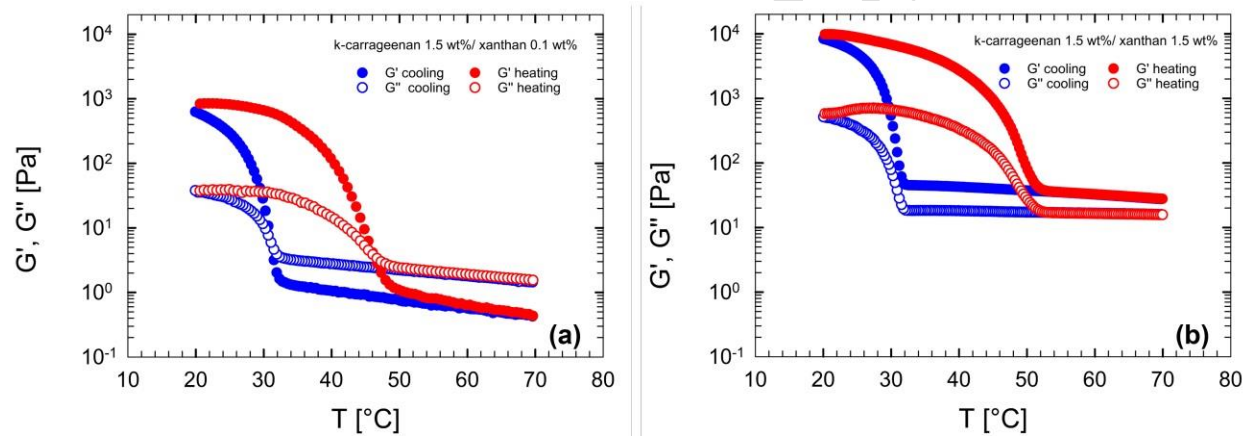
شکل (۴) نحوه تشکیل ژل در کامپوزیت‌های ایزوله پروتئین سویا و کاپا-کاراگینان و سدیم آلژینات [۷]

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



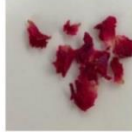
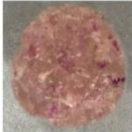
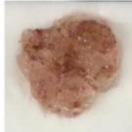
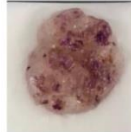
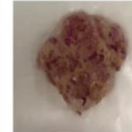
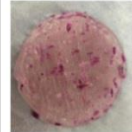
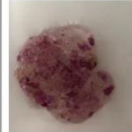
شکل (۵) اثر غلظت‌های مختلف کاپا-کاراگینان و سدیم آلژینات بر ساختار چاپ‌شده [۷]

Figure (5) Effect of different concentrations of kappa-carrageenan and sodium alginate on the printed structure [7]. Copyright @ 2024 Elsevier



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

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

Color protection agent	Control	Deionized water	1% Citric acid	0.5% Ascorbic acid	Fructose syrup (F60)	Peanut Oil	1% Chitosan
Drying after immersion in coloring solution							
After 5 hours combined with sodium alginate and rose treated by different agents							

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

Figure (7) Preserving of the color of rose petals with chitosan [38]. Copyright @ 2021 Wiley

جدول (۱) مروری بر انواع هیدروکلوئیدها ی 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

3D Food Printing with Hydrocolloids: Opportunities, Challenges, and Applications

Sahar Khalili¹, Hajar Shekarchizadeh^{2*}

¹Master of science student, Department of Food Science and Technology, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

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

*Corresponding Author: Tel: +983133913369, Fax: +983133913381, Email: shekarchizadeh@iut.ac.ir

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