

 سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران	چهارمین کنگره بین‌المللی و بیست و نهمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ۱۴۰۲-۱۳-۱۲ اردیبهشت	 انجمن علوم و صنایع غذایی ایران
--	--	---

بررسی عوامل تاثیرگذار بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و رئولوژیکی محصولات پروتئین‌بار

مریم زرین کفش^۱، محمد مهدی شریفی^۲، حسین هاشمی^۳، نرگس شهباز پور^۴، مهدی فرهودی^{۵*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ فوق لیسانس مهندسی صنایع، شرکت کشت و صنعت فدک، تهران، ایران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

^۴ دکترای علوم و صنایع غذایی تکنولوژی مواد غذایی، کارشناس پایلوت انسستیتو تحقیقات تغذیه ای و صنایع غذایی کشور، تهران، ایران

^۵ دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

نویسنده مسئول: farhoodi@sbmu.ac.ir

چکیده

پروتئین بارها حاوی٪ ۲۰-۵۰ پروتئین هستند و به طورگسترده به عنوان جایگزینی برای وعده غذایی در ورزش و رژیم غذایی مصرف می‌شوند، زیرا می‌توانند به سرعت انرژی مورد نیاز برای عملکرد بدن را از طریق مواد مغذی از جمله پروتئین‌ها در مدت زمان کوتاهی فراهم کنند. با این حال، تغییراتی در ساختار پروتئین‌بارها در طول ذخیره سازی به دلیل برهمکنش مواد تشکیل‌دهنده در ماتریس پروتئین‌بار و اثرات محیط خارجی رخ می‌دهد که منجر به کاهش کیفیت در پروتئین‌بارها مانند بافت، رنگ، طعم و مزه می‌شود و می‌تواند به طور جدی بر ارزش بازار آن‌ها تأثیر بگذارد. این مطالعه به بررسی عوامل تاثیرگذار بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و رئولوژیکی محصولات پروتئین‌بار در هنگام فرایند و ذخیره‌سازی می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی: پروتئین بار، فعالیت آبی، رئولوژی، سختی، مایلارد

 سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران	چهارمین کنگره بین‌المللی و بیست و نهمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ۱۴۰۲-۱۳-۱۲ اردیبهشت	 انجمن علوم و صنایع غذایی ایران
--	--	---

مقدمه

صرف بیش از حد غذاهای سرشار از چربی و قند یکی از بزرگ ترین عوامل در افزایش بروز بیماری‌های مزمن مانند چاقی، بیماری‌های قلبی عروقی و دیابت است (Zhou *et al.*, 2022). یکی از اهداف مهم سلامتی، دستیابی و حفظ وزن مطلوب بدن است و این امر با آگاهی بالا از انواع رژیم‌های غذایی مورد استفاده برای کنترل وزن همراه است (Trzaskowska *et al.*, 2022). پروتئین‌بارها در درجه اول به عنوان جایگزینی برای وعده‌های غذایی در ورزش و رژیم غذایی مصرف می‌شوند زیرا مصرف پروتئین منجر به کاهش مصرف کلی غذا، کاهش وزن کل بدن، افزایش سطح انرژی، بهبود توده عضلانی و افزایش ریکاوری پس از ورزش می‌شود (Diaz, Foegeding and Lila, 2021). این نوع محصول را می‌توان در بخش میان وعده‌های سریع (طراحی شده برای رفع موقت گرسنگی)، در تغذیه ورزشی (رشد بافت عضلانی) یا محصولاتی که برای تغذیه افراد مسن و بیمار که در معرض خطر ابتلا به سارکوبینی هستند، استفاده کرد (Malecki *et al.*, 2020). افرادی که با مشکلات تغذیه‌ای یا وعده‌های غذایی نامنظم به دلیل برنامه کاری شلوغ و سبک زندگی کم تحرک مواجه هستند، می‌توانند از این بارها به عنوان گزینه‌های سالم‌تری برای تغذیه استفاده کنند، علاوه بر این، بارهای پروتئینی جایگزین وعده غذایی، تغذیه متعادل تری نسبت به اسنکها یا آب نبات‌ها ارائه می‌دهند و باعث سیری بین وعده‌های غذایی می‌شوند (Neena Joshi and K. B. Suresha, 2021).

پروتئین‌بارها به عنوان یک غذای سالم مغذی با پروتئین بالا و سطح کم کربوهیدرات محبوب شده‌اند که دارای کالری کم، ارزش غذایی بالا و قابل حمل و نقل هستند (Jiang *et al.*, 2021). فرمولاسیون پروتئین باراز سه ماده اصلی تشکیل شده است: پودرپروتئین، شیرین کننده و نوعی لیپید (Sparkman and Joyner, 2019). بارهای با پروتئین بالا، حاوی پروتئین ۵۰ تا ۱۰۰ گرم در هر ۱۰۰ گرم)، کربوهیدرات (۱۰ الی ۲۰ درصد)، چربی، مرطوب‌کننده‌ها و مقدار کمی آب هستند که به دلیل مزایای سلامتی و مقوون به صرفه بودن تقریباً از پروتئین‌های لبنی یا سویا تشکیل شده‌اند (Loveday *et al.*, 2009; Banach, Clark and Lamsal, 2014; Zhou *et al.*, 2022). پروتئین‌بارها بدون عملیات حرارتی تهیه می‌شوند و عموماً یک دوره زمانی قابل توجه بین تولید و مصرف آن‌ها وجود دارد که در طی این دوره تغییرات فیزیکوشیمیایی متعددی ممکن است در ساختار آن‌ها اتفاق بیفت. پروتئین‌بارها در طول نگهداری تمایل به سخت شدن دارند که مقبولیت و ماندگاری محصول را کاهش می‌دهد و اولین مشخصه‌ای که مصرف‌کنندگان آن را ناخواهایند می‌دانند همین سختی بافت است که می‌تواند ترجیح مصرف پروتئین‌بار را کاهش دهد و به طور قابل توجهی مانع توسعه بازار پروتئین‌بارها شود (Loveday *et al.*, 2009; Diaz, Foegeding and Lila, 2021; Jiang *et al.*, 2021). این مقاله به بررسی عوامل تاثیرگذار بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و رئولوژیکی محصولات پروتئین بار می‌پردازد.

۱) بررسی ویژگی‌های بافتی پروتئین بار و عوامل تاثیرگذار بر میزان سختی^۱ محصول

۱-۱) کریستالیزاسیون شکر^۲

مواد چسبنده‌ای که معمولاً در تولید پروتئین‌بارها مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل شربتهاي گلوكز غلیظ، فروکتوز و مالتوز می‌باشد. به دلیل تفاوت در حلالیت قندهای مختلف، ممکن است در طول فرایند پروتئین‌بارها فوق اشباع شدن رخ دهد و در

^۱ hardness

^۲ Sugar crystallization

 سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران	چهارمین کنگره بین‌المللی و بیست و نهمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ۱۴۰۲-۱۳-۱۲ اردیبهشت	 انجمن علوم و صنایع غذایی ایران
--	--	---

نتیجه قند متبلور و رسوب می‌کند. کریستالیزاسیون شکر نه تنها می‌تواند منجر به تشکیل ذرات شود، بلکه می‌تواند نسبت قندهایی را که به عنوان نرم کننده در ماتریکس غذا عمل می‌کنند کاهش دهد و باعث سخت شدن بافت پروتئین‌بار شود (Jawad *et al.*, 2018). بررسی‌ها نشان داده است که در پروتئین‌بار برهmekنsh قوی بین آب، لیپیدها و ترکیبات پلی هیدروکسی با وزن مولکولی پایین در طول دوره نگهداری اتفاق می‌افتد (Loveday *et al.*, 2009). علاوه بر این، در مطالعات دیگری مشاهده شد که تشکیل کریستال‌های قند در پروتئین‌آب پنیر و سیستم قند دوتایی تأثیر بیشتری بر بافت پروتئین‌بارهای دارد (Fan *et al.*, 2016) and Roos, 2016) از آنجایی که فعالیت آبی سیستم بر تشکیل کریستال‌های قند تأثیر می‌گذارد، زمانی که فعالیت آبی سیستم بیشتر از ۵۶٪ بود، تأثیر کریستال‌های قند بر سخت شدن پروتئین‌بارهای کاهش می‌یابد (Belcourt and Labuza, 2007). با این حال، با توجه به اینکه نسبت‌ها و انواع قندها در تولید فعلی پروتئین‌بارهای بسیار بهبود یافته است، بنابراین، کریستالیزاسیون قند در حال حاضر علت اصلی سخت شدن پروتئین‌بارهای در طول دوره نگهداری به حساب نمی‌آید (Jiang *et al.*, 2021).

۲-۱) مهاجرت رطوبت^۳

به عنوان یک جزء مهم در غذاها، محتوا و توزیع آب تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های کیفی، پایداری و نگهداری مواد غذایی دارد (Zhu *et al.*, 2018). در طی مدت زمان نگهداری، رطوبت و سایر مولکول‌های کوچک از ناحیه با رطوبت بالا به ناحیه با رطوبت کم مهاجرت می‌کنند (Purwanti *et al.*, 2010). مطالعات نشان داده است که سختی پروتئین‌بارهایی که تنها با پروتئین و بافر فسفات سدیم تهیه شدند، پس از ۷ روز نگهداری در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد، سه برابر افزایش یافته است که دلیل اصلی آن تشکیل توده‌های پروتئینی بوده است. با این وجود، پس از جایگزینی آب با گلیسرول، افزایش میزان سختی پروتئین‌بارهای به کمتر از ۵۰ درصد رسیده است (Liu *et al.*, 2009). پروتئین‌بار دارای آب در دو حالت است: آب محدود و آب آزاد. طبق بررسی‌های انجام شده برهمکنش بین آب آزاد و سطح پروتئین ضعیف است، در حالی که آب محدود برهمکنش قوی با مولکول‌های پروتئین و قند نشان می‌دهد (McClements, 2002). نتایج مطالعات نشان داده است که محتوای آب محدود شده پس از ذخیره سازی پروتئین‌بار از ۶۸ به ۴۶ درصد افزایش یافته است و همچنین افزایش برهمکنش بین آب محدود و پروتئین منجر به سخت شدن پروتئین‌بارهای شده است (Zhou, Liu and Labuza, 2008). آبگریزی پروتئین‌های مختلف می‌تواند به طور قابل توجهی متفاوت باشد. گزارش شده است که پروتئین سویا آبگریزی قوی دارد (Li *et al.*, 2017). علاوه بر این، مولکول‌های پروتئین سویا دارای نرخ مهاجرت بالا می‌باشند و مولکول‌های پروتئین از طریق برهمکنش‌های غیرکووالانسی به طور آزاد در کنار هم نگه داشته می‌شوند. به دلیل این خواص، کاهش قابل توجهی در حلایت و درجه سختی بالاتری در پروتئین‌بارهای حاوی پروتئین سویا در مقایسه با پروتئین‌بارهای حاوی پروتئین آب پنیر مشاهده شد (Lu *et al.*, 2016). برای یک سیستم پروتئین‌بار حاوی کازئین، مولکول‌های کازئین و قنی هیدراته می‌شوند، منبسط می‌شوند و این ذرات از طریق برهمکنش‌های غیرکووالانسی ساختار مشبکی با یکدیگر تشکیل می‌دهند که منجر به تولید پروتئین‌بار با سختی بیشتری می‌شود. از این رو، به طور کلی اعتقاد بر این است که سخت شدن بافت پروتئین‌بارهای به دلیل مهاجرت آب و مولکول‌های کوچک مانند گلیسیرین و سوربیتول در طول دوره‌های نگهداری اولیه ایجاد می‌شود (Jawad *et al.*, 2018).

^۳ Moisture migration

 سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران	چهارمین کنگره بین‌المللی و بیست و نهمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ۱۴۰۲-۱۳-۱۲ اردیبهشت	 انجمن علمی و صنایع غذایی ایران
--	--	---

۱-۳) جداسازی فاز^۴

جداسازی فاز عامل اصلی تعیین کننده بافت، ثبات، کیفیت، رنگ و طعم محصول نهایی غذایی به دلیل وجود پلیمرهای متعدد در ماتریس است که منجر به بی ثباتی می‌شود(Anema and de Kruif, 2016). پروتئین تنها پلیمر در ماتریس پروتئین بار است که پلی‌ساکاریدهای ماکرومولکولی در آن وجود ندارد. علاوه بر این، فروکتوز یا شربت گلوکز در ماتریس پروتئین بار می‌تواند تحت یک انتقال فاز قرار گیرد تا در طول نگهداری در دمای اتاق حالت شیشه ای ایجاد کنند(Tolstoguzov, 2003). این پدیده با نتایج به دست آمده مطالعات قبلی مطابقت داشت، که نشان دادند، پس از جداسازی فازی سیستم پروتئین بار در طول مدت زمان نگداری، شکاف‌های بین مولکول‌های پروتئین کاهش یافت و مولکول‌های قند یا پلی‌آل تأثیر کمتری بر روی حفظ ساختار طبیعی پروتئین‌ها داشتند، که منجر به برهمکنش‌های قوی‌تر پروتئین-پروتئین و پروتئین-آب و تسريع مداوم در تجمع پروتئین می‌شود(McMahon, Adams and McManus, 2009). به همین ترتیب، در مطالعات ارزیابی کردند که سخت شدن پروتئین بار در طول فرآیند ذخیره سازی توسط اختلاف فشار اسمزی انجام می‌شود که منجر به جدا شدن پروتئین‌ها از فاز آب می‌شود. بنابراین، سختی پروتئین بارها در طول ذخیره سازی به دلیل تجمع پروتئین افزایش می‌یابد (Loveday *et al.*, 2009). علاوه بر این، جداسازی فاز معمولاً پس از آماده‌سازی پروتئین بارها رخ می‌دهد. پس از جداسازی فاز پروتئین، هیدراتاسیون ذرات پروتئین منجر به تسريع در بدتر شدن کیفیت پروتئین بار می‌شود(Liu *et al.*, 2011). علاوه بر این، تحقیقات انجام شده نشان داد که در سیستم‌های سه تایی پروتئین-گلیسرول-آب، مولکول‌های پروتئین به طور کلی در ناحیه پروتئین بالا و ناحیه ای پروتئین-آب تجمع می‌یابند و تجمع پروتئین‌های ناشی از جداسازی فاز پروتئین ارتباط نزدیکی با دمای انتقال شیشه‌ای آن داشته است(Chen, Zhang and Cao, 2005).

۴) تأثیر فرمولاسیون بر سختی

در یک مطالعه توده ذرات پروتئین-پلی‌فنل فرموله شده با ایزوله پروتئینی آب پنیر (WPI)^۵ و زغال اخته غنی از پلی‌فنل، بافت و ساختار، نوع پروتئین (WPI اصلاح نشده یا توده ذرات) و روش خشک کردن (FD یا SD)^۶ پروتئین بارها در طول ۴۳ روز نگهداری و دمای ۳۲ درجه سانتیگراد، مورد بررسی قرار گرفت. سختی پروتئین بارهای تهیه شده با ذرات پروتئین-پلی‌فنل به روش اسپری درایبر(WPI-C-SD)^۷ در ۴۳ روز نگهداری در دمای ۳۲ درجه سانتیگراد افزایش نیافت. همچنین در مقایسه با پروتئین بارهای ساخته شده با WPI اصلاح نشده (شاهد) یا ذرات بدون پلی‌فنل (WPI-IC-FD)^۸ و WPI-IC-SD^۹، به ترتیب ۰.۰۰۰۱ < P = ۰.۰۰۵ نرم تر بود. علاوه بر این ذرات تشکیل شده با تکنیک SD برهmeknesh‌های بین مولکولی را با سایر ذرات موجود در ماتریس کاهش می‌دهند، که منجر به تولید پروتئین بارهایی می‌شود که در طول دوره ذخیره‌سازی از نظر بافت پایدارتر هستند(Diaz, Foegeding and Lila, 2021).

در بررسی دیگر، پروتئین بارهایی با استفاده از کازئینات سدیم و فروکتوز یا مالتیتول به عنوان مواد اولیه تهیه شد. اثر اختلاط هیدروکسی پروپیل متیل سلولز (HPMC)^{۱۰} بر تغییرات سختی

^۴ Phase separation

^۵ Whey protein isolate

^۶ freeze-drying or spray-drying

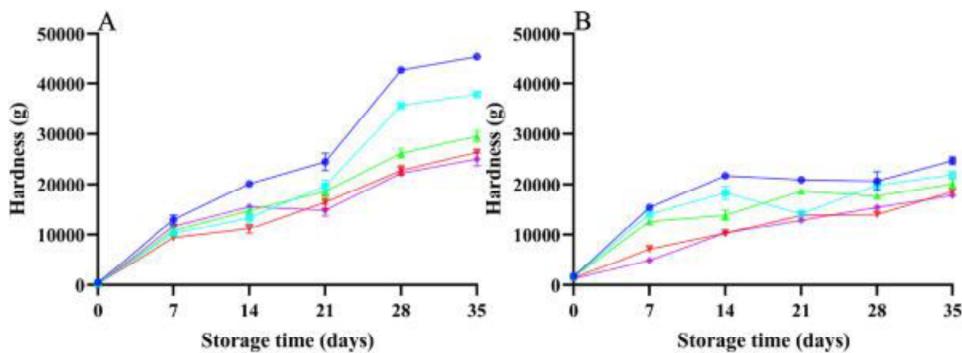
^۷ Whey protein isolate-cranberry - spray-dried

^۸ Whey protein isolate-imitation cranberry- spray-dried

^۹ Whey protein isolate-imitation cranberry -freeze-drying

^{۱۰} Hydroxypropyl methylcellulose

پروتئین بارها در درجه سانتی گراد و دوره نگهداری ۳۵ روزه مورد بررسی قرار گرفت. سختی هر دو پروتئین با حاوی فروکتوز و مالتیتول که در تهیه ای آنها از هیدروکسی پروپیل متیل سلولز (HPMC) استفاده نشده بود به طور قابل توجهی با زمان نگهداری افزایش یافت. در این مطالعه، سختی پروتئین بارهای حاوی فروکتوز در طول نگهداری به طور قابل توجهی بالاتر از پروتئین بارهای حاوی مالتیتول بود. با این حال، اختلاط HPMC ۲٪ با پروتئین بارها، سختی پروتئین بارهای Zhou *et al.*, 2022 مبتنی بر فروکتوز و مالتیتول را به ترتیب ۴۴/۸۳٪ و ۲۷/۸۹٪ از ۳۵ روز به طور قابل توجهی کاهش داد. این تغییر احتمالاً به ماهیت HPMC نسبت داده می‌شود، زمانی که HPMC به طور کامل حل شد، محلول حاصل غلیظ شده و حالت ژلی می‌گیرد (Lim *et al.*, 2021). همچنین با افزایش غلظت HPMC، مولکول‌های کلوئیدی که با یکدیگر برخورد کردند، تحت پیوند عرضی قرار گرفتند و یک شبکه کلوئیدی تشکیل دادند. طبق نتایج مطالعات قبلی تغییر در سختی پروتئین بارها در طول ذخیره‌سازی عمدتاً به مهاجرت مولکول‌های کوچک مانند آب نسبت داده می‌شود در حالی که شبکه کلوئیدی تشکیل شده توسط HPMC حرکت این مولکول‌های کوچک را به تأخیر انداخته است در نتیجه منجر به هیدراتاسیون کمتر پروتئین و تاخیر در تشکیل شبکه‌های توده‌ی پروتئینی می‌شود که افزایش سختی پروتئین بارها را کاهش می‌دهد (Lu *et al.*, 2016).



شکل ۱. تغییرات در سختی پروتئین بارهای حاوی فروکتوز (A) و مالتیتول (B).

از (—) ۰٪ (●), ۰.۵٪ (○), ۱٪ (■), ۲٪ (▲) و ۴٪ (◆) هیدروکسی پروپیل متیل سلولز برای فرمولاسیون پروتئین بار استفاده شد (Zhou *et al.*, 2022)

در ارزیابی دیگر به امکان استفاده از کنسانتره پروتئین شیر^{۱۰} MPC80 اکسترود شده در تهیه ای پروتئین بارهایی که با ۳۰ گرم پروتئین فرموله شده بودند در یک دوره نگهداری ۴۲ روزه پرداخته شد، پروتئین بارهای تهیه شده اکسترود شده در دماهای ۶۵ و ۱۲۰ درجه سانتی گراد در ابتدا سختی را حفظ اما در پایان ذخیره‌سازی سختی کمتری داشتند. پروتئین بارهای اکسترود شده در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد در مقایسه با پروتئین بارهای تولید شده با MPC80 اصلاح نشده در تمام دماهای نگهداری از نظر سختی، تفاوت معنی داری نداشتند. MPC80 اکسترود شده در دمای ۶۵ درجه سانتی گراد به طور قابل توجهی بهتر از MPC80 اکسترود شده در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد در محصول پروتئین بار بود (Banach, Clark and Lamsal, 2014).

^{۱۰} Milk protein concentrates (80 g per 100 g protein)

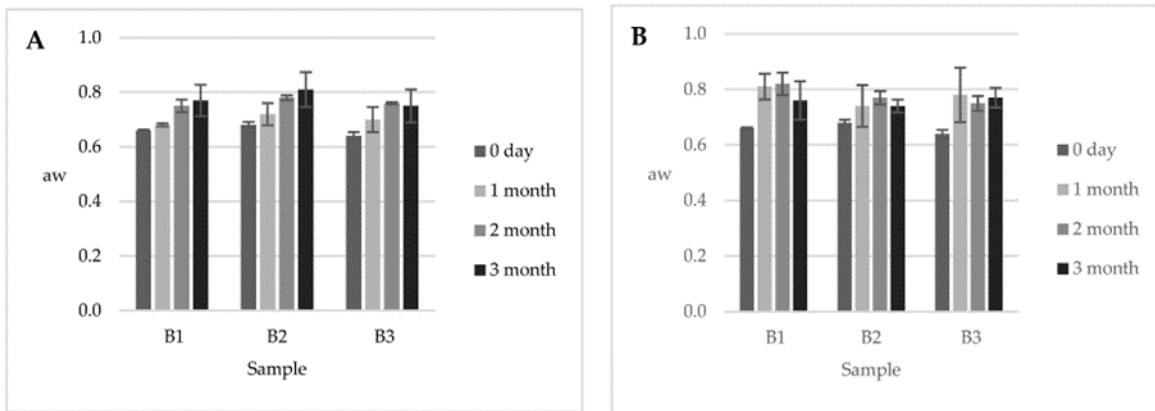
 سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران	چهارمین کنگره بین‌المللی و بیست و نهمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ۱۴۰۲-۱۳-۱۲ اردیبهشت	 انجمن علوم و صنایع غذایی ایران
--	--	---

۲) بررسی تغییرات فیزیکوشیمیایی محصول پروتئین باز

۱-۲) بررسی میزان تغییرات فعالیت آب^۱ در طول تگهداری محصول

یک بررسی به امکان استفاده از ترکیب پروتئین‌های گیاهی مانند: سویا، برنج و نخود با شربت‌های مایع مانند: فیبر تاپیوکا، الیگو فروکتوز و مالتیتول در شرایط کنترل شده (رطوبت نسبی هوا ۵۰ درصد، دمای ۲۰ درجه سانتیگراد) به مدت سه هفته نگهداری در محصول پروتئین بار پرداخته است. پروتئین باری که حاوی پروتئین نخود و شربت فیبر تاپیوکا بود دارای بیشترین فعالیت آبی (۰/۷۹) بود. از سوی دیگر پروتئین باری که حاوی پروتئین سویا و شربت الیگو فروکتوز بود دارای کمترین فعالیت آبی (۰/۵۸) بود (Małecki *et al.*, 2022). در یک مطالعه دیگر که به تأثیر منابع پروتئینی (جلبک، کدوتبل، گندم، آفتابگردان، برنج، سویا، شاهدانه، نخود و آب پنیر) بر پارامترهای فیزیکوшیمیایی پروتئین بار با و بدون در روکش شکلاتی به مدت ۳ هفته پرداختند نشان داد که بیشترین مقدار فعالیت آبی مربوط به پروتئین بار تهیه شده از پروتئین آفتابگردان همراه با روکش شکلاتی و کمترین فعالیت آبی مربوط به پروتئین بار تهیه شده از جلبک بدون روکش شکلاتی بود. پروتئین بارهای ساخته شده از پروتئین: جلبک دریابی، نخود و سویا دارای aw کمتر از ۰/۶۵ بودند که پایداری نمونه‌ها را در طول نگهداری (در دمای اتاق) و مهار رشد میکروبی تضمین می‌کند. سایر پروتئین بارها، دارای فعالیت آبی بالاتر از ۰/۶۵ بودند. بنابراین می‌توان پیشنهاد کرد که در شرایط دمایی پایین تری نگهداری شوند. افزایش فعالیت آبی ممکن است نشان‌دهنده حرکت مولکول‌های آب از فاز میانی، جایی که به عنوان یک پلاستی‌سایزر عمل می‌کنند، به فاز توده‌ای باشد (Małecki *et al.*, 2020). در اندازه‌گیری فعالیت آبی (aw) سه نوع پروتئین بار (B1) حاوی مقدار مساوی آلو و زردآلو خشک شده و تکه‌های نارگیل، B2 فقط حاوی آلو و B3 از زردآلو خشک و تکه‌های جو دوسرا در یک دوره نگهداری سه ماهه و در دو دمای محیط (درجه سانتی‌گراد) و یخچال (۴ درجه سانتی‌گراد) انجام شد، مقدار اولیه فعالیت آبی در محدوده ۰/۶۴-۰/۶۸ قرار داشت، و کمترین aw در نمونه B3 و بیشترین در نمونه B2 بود. با این حال، در طول ۳ ماه دوره نگهداری، مقدار aw به طور قابل توجهی در تمام پروتئین بارها آزمایش شده افزایش یافته است (شکل ۲). در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد پروتئین بار B2 دارای بالاترین فعالیت آبی (۰/۸۱) و پروتئین بار B3 دارای کمترین فعالیت آبی (۰/۷۵) بود، در حالی که در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد فعالیت آبی پروتئین بار B3 (۰/۷۷) و فعالیت آبی پروتئین بار B2 (۰/۷۴) بود. به طور کلی، هیچ تفاوت آماری معناداری بین نمونه‌ها (B1، B2 و B3) در هر دو شرایط مورد مطالعه در خصوص aw وجود نداشت (Szydłowska *et al.*, 2022).

^۱ water activity



شکل ۲. فعالیت آب (aw) محصولات آزمایش شده در طول مدت زمان نگهداری

(Szydłowska *et al.*, 2022) (A) در دمای ۴ درجه سانتی گراد و (B) در دمای ۲۲ درجه سانتی گراد

۲-۲) اثر واکنش مایلارد^{۱۲}

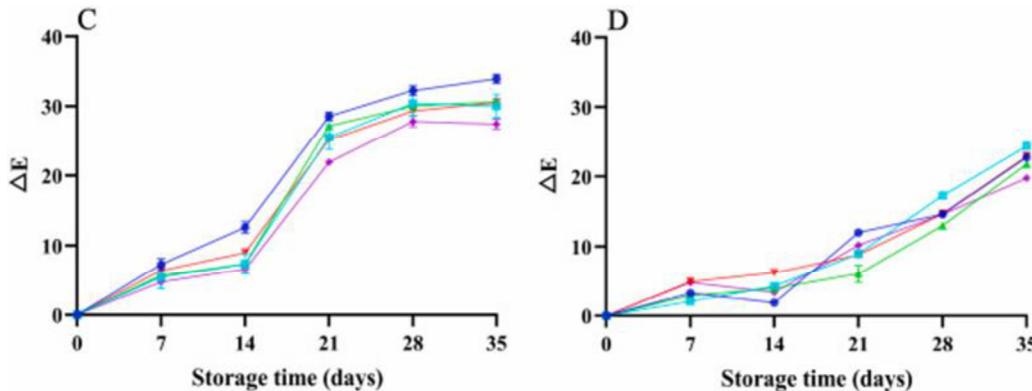
واکنش مایلارد (که به عنوان واکنش های قهقهه ای شدن غیرآنزیمی نیز شناخته می شود) بین گروههای کربونیل روی کربوهیدراتهای احیاکننده و گروههای آمین خارجی روی پروتئینها انجام می شود که در نهایت، باعث گلیکوزیلاسیون مولکولهای پروتئین می شود، که باعث رسوب پروتئین ها به صورت دانه های نامحلول می شوند و منجر به افزایش سخت شدن قهقهه ای شدن پروتئین بارها می شوند (Loveday *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2022). واکنشهای مایلارد در محدوده aw ۰/۶۵-۰/۷۵ در دمای بالا سریع تر اتفاق می افتد. واکنشهای مایلارد می توانند منجر به ایجاد رنگ، بافت یا طعم نامطلوب شوند و می توانند ارزش غذایی را به طور جدی تحت تأثیر قرار دهند (Loveday *et al.*, 2009).

۲-۲-۱) اثر واکنش مایلارد بر تغییر رنگ

در یک مطالعه، پروتئین بارهایی با استفاده از کازئینات سدیم و فروکتوز یا مالتیتول به عنوان مواد اولیه تهیه شدند. برای ارزیابی اثر هیدروکسی پروپیل متیل سلوزل (HPMC) بر میزان واکنشهای مایلارد در طول مدت زمان نگهداری پروتئین بارها، تغییرات رنگ (ΔE) و ترکیب آمین آزاد در پروتئین بارها را در یک دوره نگهداری ۳۵ روزه بررسی کردند. همه پروتئین بارها تغییرات رنگ گسترده ای را در طول مدت زمان نگهداری نشان دادند. پروتئین بارهای حاوی فروکتوز در طول مدت زمان نگهداری به میزان بیشتری قهقهه ای شدند که نشان می دهد اجزای قند و پروتئین موجود در پروتئین بارها تحت واکنشهای مایلارد گسترده ای قرار گرفتند. در مقابل، قهقهه ای شدن پروتئین بارها به طور قابل توجهی با جایگزینی فروکتوز با مالتیتول مهار شدند. در پروتئین بارهای حاوی فروکتوز، تغییر ΔE تا حدی توسط HPMC به تاخیر افتاد و درجه تغییر در ΔE با افزایش غلظت HPMC کاهش یافت، به طوری که HPMC ۲٪ بالاترین مقاومت را در برابر تغییر ΔE نشان داد. این نتیجه نشان داد که HPMC می تواند به طور موثر قهقهه ای شدن پروتئین بارهای حاوی فروکتوز را در طول ذخیره سازی کاهش دهد. در مراحل اولیه دوره نگهداری پروتئین بار، به دلیل عدم دسترسی باقی مانده های لیزین به قندهای احیاکننده، واکنش مایلارد رخ نمیدهد. با این حال، با هیدراتاسیون تدریجی پروتئین ها در طول زمان، که ناشی از تفاوت در فعالیت آبی می باشد، باعث انعطاف پذیری پروتئین

^{۱۲} Maillard

ها و افزایش دسترسی مولکول های قند احیا کننده کوچک در ماتریکس به باقی مانده های لیزین در داخل پروتئین ها می شود. افروden HPMC مانع هیدراتاسیون پروتئین ها در ماتریکس شد که در نتیجه تشکیل شبکه های کلوئیدی از برهم کنش پروتئین ها با سایر مولکول های کوچک جلوگیری کرد (Zhou *et al.*, 2022).



شکل ۳. تغییرات ΔE (A, B) حاوی فروکتوز (A) و مالتیتول (B).

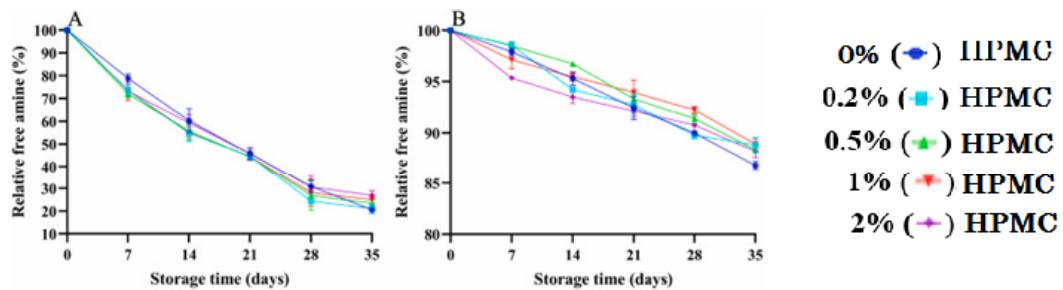
از (—) ۰٪ (●)، ۰.۵٪ (■)، ۰.۲٪ (○)، ۱٪ (▲)، ۲٪ (◆) هیدروکسی پروپیل متیل سلولز برای فرمولاسیون پروتئین بار استفاده شد (Zhou *et al.*, 2022) (غذه های).

نتایج بررسی فرمولاسیون پروتئین بارهای پروتئین نخود، پروتئین شیر و ایزوله پروتئینی آب پنیر با شیرین کننده های (سوکرالوز، ساکارز، میوه مانک، استویا، و فروکتوز) در یک دوره نگهداری ۳۵ روزه نشان داد که همه پروتئین بارها در طول مطالعه تغییرات رنگی را نشان دادند، اما ایزوله پروتئینی آب پنیر تغییر رنگ قابل توجهی را از روز هفتم نشان داد. این تغییر در رنگ به دلیل افزایش ترکیبات قهوه ای شدن غیر آنزیمی در طول نگهداری رخ داده است. به طور کلی، ترکیبات پروتئین - شیرین کننده ارزیابی شده منجر به تولید پروتئین بارهایی می شود که با گذشت زمان رنگ آنها تیره می شود (Keefer *et al.*, 2020). در بررسی دیگر کنسانتره پروتئین شیر اکسترود شده یا برسته شده که در مدل پروتئین بارهایی با ۳۰ گرم پروتئین فرموله شده و تا ۴۲ روز نگهداری شدند. پروتئین بارهای تهیه شده با MPC80 اصلاح نشده در طول ذخیره سازی دچار تغییر رنگ گسترده شدند. MPC80 که در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد برسته شد، رنگ قهوه ای ایجاد کرد و بنابراین تغییر رنگ کلی در طول مدت زمان نگهداری پروتئین بارهای تهیه شده با این ماده پایدارتر بود. در پروتئین بارهای MPC80 اکسترود شده، تغییر رنگ کاهش یافت. همچنین بیان کردند که توسعه رنگ تا حدی به دلیل آمین هایی است که در واکنش های مایلارد شرکت می کنند (Banach, Clark and Lamsal, 2014).

۲-۲-۲) اثر واکنش مایلارد بر ترکیب آمین های آزاد

در مطالعه پروتئین بارهایی با استفاده از کازئینات سدیم و فروکتوز یا مالتیتول، همه نمونه ها کاهش معنی داری در محتوای آمین آزاد در طول ذخیره سازی نشان دادند ($P < 0.05$). ترکیب آمین های آزاد در نمونه های پروتئین بار حاوی فروکتوز و مالتیتول پس از ۳۵ روز نگهداری (در دمای ۳۷ درجه سانتیگراد) به ترتیب ۷۹/۱۲-۷۹/۴۰٪ و ۱۳/۲۰-۱۱/۰٪ کاهش

یافتند(شکل ۴). این نتایج نشان داد که سیستم پروتئین بارحاوی فروکتوز در طول مدت زمان نگهداری تحت واکنش‌های شدید مایلارد قرار گرفته است. با این حال، جایگزینی فروکتوز با مالتیتول همچنان کاهش جزئی آمین‌های آزاد را نشان می‌دهد که به افزایش محتوای پروتئین نامحلول نسبت داده می‌شود که با کاهش محتوای آمین آزاد قابل تشخیص همراه بود. در پروتئین بارهای حاوی فروکتوز، HPMC از دست دادن ترکیب آمین آزاد نسبی را در طول ۲۷ روز اول کاهش نداد. پس از ۳۵ روز دوره نگهداری، ۰.۵-۰.۲٪ HPMC اثر تاخیری قابل توجهی در از دست دادن آمین‌های آزاد در نمونه‌های پروتئین بار داشت. در پروتئین بارهای مبتنی بر مالتیتول، تمام غلظت‌های HPMC به طور قابل توجهی از دست دادن آمین‌های آزاد را در مرحله آخر دوره نگهداری (یعنی ۲۸ تا ۳۵ روز) به تاخیر انداختند. این نتایج نشان داد که HPMC در برابر از دست دادن آمین‌آزاد به پروتئین بار محدود می‌شود، زیرا HPMC تنها تأثیر قابل توجهی در کاهش از دست دادن آمین‌های آزاد در دوره بعدی نگهداری داشت. از آنجایی که واکنش‌های مایلارد مجموعه‌ای از واکنش‌ها بین قندهای احیاکننده و گروه‌های آمینه آزاد هستند، تأثیر HPMC بر تراکم گروه‌های کربونیل و آمینه در طول مرحله شروع محدود بود، اما در طول مرحله انتهایی شیکه ویسکوالاستیک تشکیل شده توسط HPMC در ماتریس‌های پروتئین بار مانع از ایجاد فاز میانی و اواخر واکنش‌های مایلارد می‌شود.(Zhou *et al.*, 2022)



شکل ۴. تاثیر مقادیر مختلف HPMC بر تغییرات در آمین آزاد نسبی پروتئین بار

(A) حاوی فروکتوز و (B) حاوی مالتیتول.(Zhou *et al.*, 2022)

در بررسی کنسانتره پروتئین شیر اکسترود شده یا برشته شده در هرگروه از نمونه پروتئین بارهای، محتوای آمین آزاد در طول دوره ذخیره سازی کاهش یافت. آمین آزاد در پروتئین بارهای MPC80 اصلاح نشده و برشته شده در دماهای ۷۵ و ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد پس از ۶ روز ذخیره‌سازی روند کاهشی پیدا کردند. پروتئین بارهای MPC80 اکسترود شده تا روز سیزدهم نگهداری، کاهش آمین آزاد قابل توجهی نداشتند. محتوای آمین آزاد نسبی در پروتئین بارهای تهیه شده با MPC80 اصلاح نشده و برشته شده در دماهای ۷۵ و ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد از نظر آماری با یکدیگر در روزهای ذخیره‌سازی برابر بودند و همچنین میزان کاهش نسبی آمین آزاد در پروتئین بارهای MPC80 اکسترود شده کمتر از سایر نمونه پروتئین بارها بود. تخریب آمینواسید لیزین در MPC80 پس از اکستروژن ممکن است قهقهه‌ای شدن مایلارد را در آن دسته از پروتئین بارهای MPC80 اکسترود شده محدود کرده باشد، که به تغییر رنگ کمتر منجر شود. پروتئین بارهای برشته شده در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل قهقهه‌ای شدن مایلارد احتمالاً حاوی لیزین کمتری برای شرکت در واکنش مایلارد در طول مدت زمان نگهداری پروتئین بارها باشند.(Banach, Clark and Lamsal, 2014).

 سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران	چهارمین کنگره بین‌المللی و بیست و نهمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ۱۴۰۲-۱۳-۱۲ اردیبهشت	 انجمن علمی و مهندسی ایران
--	--	--

نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی عوامل تاثیرگذار بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و رئولوژیکی محصول پروتئین بار و اقدامات مربوط به بهبود کیفیت پروتئین‌بارها در طول دوره نگهداری پرداخته شد. مکانیسم‌های برجسته و مهم سخت شدن پروتئین‌بارها شامل: کریستالیزاسیون قند، مهاجرت آب، جداسازی فاز و واکنش‌های مایلارد می‌باشند. از روش‌های رایج جلوگیری از سخت شدن نیز به می‌توان به اصلاح پروتئین، افزودن پلی‌فنل‌ها و هیدروکلوفید‌ها برای مهار واکنش‌های مایلارد و روش خشک کردن اسپری درایر یا فریزدرایر اشاره کرد. نتایج مطالعات نشان داده است که هیدروکلوفید هیدروکسی پروپیل متیل سلولز می‌تواند به عنوان یک افزودنی غذایی ایمن و کارآمد در پروتئین‌بارها برای بهبود خواص بافتی و حفظ ماندگاری آنها استفاده شود. ذراتی که به روش اسپری درایر تولید می‌شوند را می‌توان به عنوان تکنیک کاربردی در پروتئین‌بارها استفاده کرد که منجر به ویژگی‌های بافتی مطلوب می‌شود. اکسترود کردن کنستانتره‌ی پروتئین شیر قبل از استفاده در پروتئین‌بارها به عنوان راهی برای کاهش سختی و افزایش ماندگاری بافت عمل می‌کند. این اقدامات اثرات قابل توجهی در برابر سخت شدن پروتئین‌بارها ارائه می‌دهد و نتایج امیدوارکننده‌ای را در حفظ تنفسیه آن‌ها و تضمین کیفیت در طول ذخیره سازی و حمل و نقل نشان می‌دهد. بکارگیری اقداماتی که از سخت شدن پروتئین‌بارها جلوگیری می‌کند باید گسترش یابد تا نیازهای روزافزون مصرف کنندگان را برآورده کند و سبب حفظ کیفیت محصول در طول دوره ماندگاری و توزیع محصول شود.

منابع

- Anema, S. G. and de Kruif, C. G. K. (2016) 'Phase separation and composition of coacervates of lactoferrin and caseins', *Food Hydrocolloids*, 52, pp. 670–677.
- Banach, J. C., Clark, S. and Lamsal, B. P. (2014) 'Texture and other changes during storage in model high-protein nutrition bars formulated with modified milk protein concentrates', *LWT-Food Science and Technology*, 56(1), pp. 77–86.
- Belcourt, L. A. and Labuza, T. P. (2007) 'Effect of raffinose on sucrose recrystallization and textural changes in soft cookies', *Journal of food science*, 72(1), pp. C065–C071.
- Chen, P., Zhang, L. and Cao, F. (2005) 'Effects of moisture on glass transition and microstructure of glycerol-plasticized soy protein', *Macromolecular bioscience*, 5(9), pp. 872–880.
- Diaz, J. T., Foegeding, E. A. and Lila, M. A. (2021) 'Whey protein-polyphenol aggregate particles mitigate bar hardening reactions in high protein bars', *Lwt*, 138, p. 110747.
- Fan, F. and Roos, Y. H. (2016) 'Crystallization and structural relaxation times in structural strength analysis of amorphous sugar/whey protein systems', *Food hydrocolloids*, 60, pp. 85–97.
- Jawad, R. et al. (2018) 'Crystallisation of freeze-dried sucrose in model mixtures that represent the amorphous sugar matrices present in confectionery', *Food & function*, 9(9), pp. 4621–4634.
- Jiang, Z. et al. (2021) 'High-protein nutrition bars: Hardening mechanisms and anti-hardening methods during storage', *Food Control*, 127, p. 108127.
- Keefer, H. R. M. et al. (2020) 'Role of sweeteners on temporality and bar hardening of protein bars', *Journal of dairy science*, 103(7), pp. 6032–6053.
- Li, J. et al. (2017) 'Effects of addition of hydrocolloids on the textural and structural properties of high-protein intermediate moisture food model systems containing sodium caseinate', *Food & function*, 8(8), pp. 2897–2904.
- Lim, C. et al. (2021) 'Adaptive amphiphilic interaction mechanism of hydroxypropyl methylcellulose in water', *Applied Surface Science*, 565, p. 150535.
- Liu, D. et al. (2011) 'Moisture-induced aggregation of alpha-lactalbumin: Effects of temperature, cations, and pH', *Journal of food science*, 76(6), pp. C817–C823.
- Liu, X. et al. (2009) 'Effects of polyols on the stability of whey proteins in intermediate-moisture food model systems', *Journal of agricultural and food chemistry*, 57(6), pp. 2339–2345.

 سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران	چهارمین کنگره بین‌المللی و بیست و نهمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ۱۴۰۲-۱۳-۱۲ اردیبهشت	 انجمن علوم و صنایع غذایی ایران
--	--	---

- Loveday, S. M. et al. (2009) 'Physicochemical changes in a model protein bar during storage', *Food Research International*, 42(7), pp. 798–806.
- Loveday, S. M. et al. (2010) 'Physicochemical changes in intermediate-moisture protein bars made with whey protein or calcium caseinate', *Food Research International*, 43(5), pp. 1321–1328.
- Lu, N. et al. (2016) 'Molecular migration in high-protein intermediate-moisture foods during the early stage of storage: Variations between dairy and soy proteins and effects on texture', *Food Research International*, 82, pp. 34–43.
- Małecki, J. et al. (2020) 'The effect of protein source on the physicochemical, nutritional properties and microstructure of high-protein bars intended for physically active people', *Foods*, 9(10), p. 1467.
- Małecki, J. et al. (2022) 'Physicochemical, Nutritional, Microstructural, Surface and Sensory Properties of a Model High-Protein Bars Intended for Athletes Depending on the Type of Protein and Syrup Used', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), p. 3923.
- McClements, D. J. (2002) 'Modulation of globular protein functionality by weakly interacting cosolvents', *Critical reviews in food science and nutrition*, 42(5), pp. 417–471.
- McMahon, D. J., Adams, S. L. and McManus, W. R. (2009) 'Hardening of high-protein nutrition bars and sugar/Polyol–Protein Phase Separation', *Journal of Food Science*, 74(6), pp. E312–E321.
- Neena Joshi, A. A. and K. B. Suresha, K. V. J. (2021) 'Effect of Chocolate Coating and Essential Oil Incorporation on the Sensory Acceptability of Protein Bars', *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 10(7), pp. 229–240. doi: 10.20546/ijcmas.2021.1007.025.
- Purwanti, N. et al. (2010) 'New directions towards structure formation and stability of protein-rich foods from globular proteins', *Trends in food science & technology*, 21(2), pp. 85–94.
- Sparkman, K. and Joyner, H. S. (2019) 'Impact of formulation on high-protein bar rheological and wear behaviors', *Journal of texture studies*, 50(6), pp. 445–455.
- Szydłowska, A. et al. (2022) 'Development of Ready-to-Eat Organic Protein Snack Bars: Assessment of Selected Changes of Physicochemical Quality Parameters and Antioxidant Activity Changes during Storage', *Foods*, 11(22), p. 3631.
- Tolstoguzov, V. (2003) 'Some thermodynamic considerations in food formulation', *Food Hydrocolloids*, 17(1), pp. 1–23.
- Trzaskowska, M. et al. (2022) 'Safety Assessment of Organic High-Protein Bars during Storage at Ambient and Refrigerated Temperatures', *Applied Sciences*, 12(17), p. 8454.
- Zhou, P., Liu, X. and Labuza, T. P. (2008) 'Moisture-induced aggregation of whey proteins in a protein/buffer model system', *Journal of agricultural and food chemistry*, 56(6), pp. 2048–2054.
- Zhou, X. et al. (2022) 'Hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) reduces the hardening of fructose-containing and maltitol-containing high-protein nutrition bars during storage', *LWT*, 163, p. 113607.
- Zhu, D. et al. (2018) 'Sweet cherry softening accompanied with moisture migration and loss during low-temperature storage', *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(10), pp. 3651–3658.