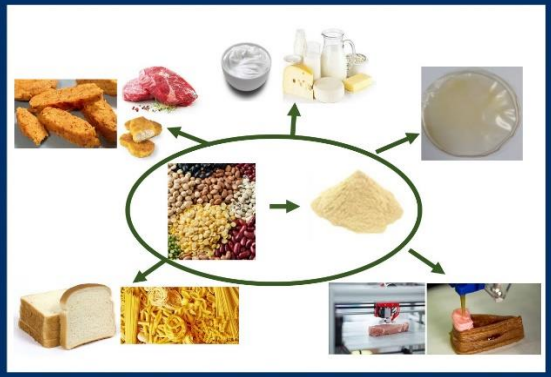
وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نشریه فنی:

پروتئین حبوبات و دورنمای کاربردهای آن در صنایع غذایی

فوزان بدیعی



AERI

آدرس: کرج، بلوار شهید فهمیده، کدپستی: ۳۱۳۵۹۱۳۵۳۳، مؤسسه تحقیقات فنی ومهندسی کشاورزی
تلفن: ۳۲۷۰۵۳۲۰، ۳۲۷۰۵۲۴۲ و ۳۶۱۵۰۰۰۰(۰۲۶)
دورنگار: ۳۲۷۰۶۲۷۷ (۰۲۶)، آدرس دسترسی: www.aeri.ir(بخش انتشارات الکترونیکی)

سال انتشار: ۱۴۰۲

بسم‌الله الرّحمن الرّحیم

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نشریهٔ فنی

پروتئین حبوبات و دورنمای کاربردهای آن در صنایع غذایی

تهیه و تدوین:

فوژان بدیعی

عضو هیئت علمی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

سال انتشار:

۱۴۰۲

وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نوع نوشتار: نشریهٔ فنی

عنوان نوشتار: پروتئین حبوبات و دورنمای کاربردهای آن در صنایع غذایی

نگارنده: فوژان بدیعی

ویراستار ادبی: محمدرضا داهی

صفحه‌آرا: شبنم جباری

طراح جلد: سمیه وطن‌دوست

ناشر: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

شمارگان: محدود

نوبت چاپ: اول

سال انتشار: ۱۴۰۲

مسئولیت صحت مطالب با نگارنده است.

شماره ثبت ٦٤١٤٢ در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع‌رسانی کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به تاریخ ۱۴۰۲/۰۶/۱۳

:

مخاطبان نشریهٔ فنی

تولیدکنندگان حبوبات، مروجان و کارشناسان ترویج، متخصصان فرآوری و تولید فرآورده‌های غذایی، دانشجویان و محققان رشتهٔ صنایع غذایی

هدف‌های آموزشی

شما خوانندگان گرامی در این نشریه با:

- اهمیت و نقش پروتئین حبوبات در صنایع غذایی
- روش‌های استخراج پروتئین حبوبات
- کاربردهای پروتئین حبوبات در صنایع غذایی
- چشم اندازه آیندهٔ مصرف تجاری پروتئین حبوبات

آشنا خواهید شد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	۱
مشخصات و مزایای دانهٔ حبوبات	۲
روش‌های استخراج پروتئین حبوبات	۴
خواص عملکردی پروتئین‌های حبوبات	۱۰
قابلیت هضم پروتئین‌های حبوبات	۱۲
ویژگی‌های حسی پروتئین‌های حبوبات	۱۵
کاربردهای پروتئین‌های حبوبات در تولید فرآورده‌های غذایی	۱۶
نتیجه‌گیری و پیشنهادها	۲۲
منابع	۲۴

مقدمه

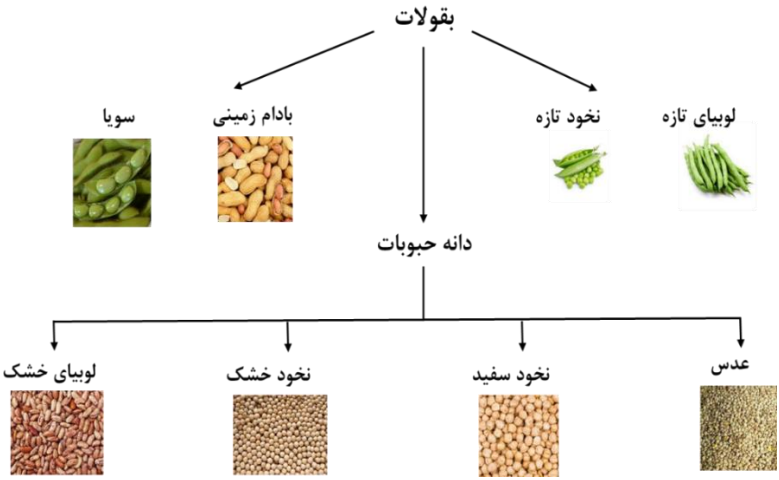
امروزه بشر برای تأمین غذای جمعیت رو به رشد خود، با چالش‌های بی‌سابقهٔ ناشی از تغییر اقلیم و ناامنی غذایی روبه‌روست. در دهه‌های آینده جهان برای پاسخگویی به این تقاضا، نیاز به افزایش چشمگیر تولید غذاهای اساسی دارد. این امر فشار قابل توجهی بر منابع طبیعی مانند زمین‌های زراعی، منابع انرژی و آب وارد می‌کند که خود به‌دلیل مسائل زیست محیطی مانند تغییرات آب و هوایی، بیابان‌زایی، جنگل‌زدایی و از بین‌رفتن تنوع زیستی در حال نابودشدن هستند.

غذاهای با منشأ حیوانی منبع اصلی اسیدهای آمینه ضروری و پروتئین غذایی برای تغذیهٔ انسان هستند. تولید غذاهای سنتی با منشأ حیوانی پایداری کمتری دارد و علاوه بر نیاز به مساحت قابل توجهی از زمین، باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. از طرفی، مصرف دائم رژیم غذایی برپایهٔ پروتئین حیوانی با برخی از بیماری‌های مزمن مرتبط است. راه‌حل امیدوارکننده برای رفع این مشکل، استفاده از پروتئین‌های گیاهی است که به‌دلیل سابقهٔ طولانی کشت، دسترسی آسان در بسیاری از نقاط جهان، هزینهٔ کمتر تولید و از همه مهم‌تر تولید پایدار آنها از دیدگاه زیست‌محیطی، اهمیت و جایگاه ویژه‌ای در تأمین نیازهای غذایی رو به رشد بشر یافته‌اند.

در حال حاضر، پروتئین سویا و گلوتن گندم دو منبع پروتئین گیاهی هستند که بیشتر به‌جای پروتئین‌های حیوانی استفاده می‌شوند. با این حال، بسیاری از مصرف کنندگان از این مواد پروتئینی اجتناب می‌کنند که به‌دلیل حساسیت به گلوتن و بیماری سلیاک یا اثرهای حساسیت‌زای پروتئین سویا است. بنابراین، نیاز ضروری به منابع جدید پروتئین گیاهی وجود دارد. از مهم‌ترین منابع بالقوهٔ پروتئین گیاهی می‌توان به حبوبات اشاره کرد که به‌دلیل مقدار پروتئین بالا و ویژگی‌های تغذیه‌ای‌شان از دیگر منابع پروتئین گیاهی مناسب‌تر هستند.

مشخصات و مزایای دانهٔ حبوبات

بقولات از نظر گیاه‌شناسی در راستهٔ باقلاسانان[1] و در خانواده فاباسه[2]، پاپیلیوناسه[3] و یا لگومینوسه[4] قرار می‌گیرند. بقولات را می‌توان به سه دستهٔ کلی طبقه‌بندی کرد: بقولات دانه روغنی مانند سویا و بادام زمینی، بقولات تازه مانند لوبیای تازه، نخود/غلاف تازه و دانه حبوبات مانند لوبیای خشک، نخود خشک، عدس و نخود سفید (شکل ۱).



شکل ۱- دسته‌بندی بقولات (دیدینگر و تامپسون[5]، ۲۰۲۰)

حبوبات از مهم‌ترین منابع گیاهی غنی از پروتئین و دوّمین منبع مهم غذایی انسان، پس از غلات، به‌شمارمی‌روند. حبوبات شامل دانه‌های خوراکی مغذی، از جمله لوبیای خشک،

[1] Fabales
[2] Fabaceae
[3] Papilionaceae
[4] Leguminosae
[5] Didinger and Thompson

نخود سفید، نخود و عدس می‌شوند. علاوه بر مقدار پروتئین بالا تا ۲۵ درصد (وزنی/وزنی) و سایر مواد تغذیه‌ای مانند فیبرهای خوراکی، ویتامین‌ها، مواد معدنی، پلی‌فنل‌ها و کاروتنوئیدها، حبوبات فواید متعدد دیگری نیز دارند (بدیعی و همکاران، ۱۳۹۲). میزان گاز گلخانه‌ای منتشرشده معادل دی‌اکسیدکربن برای تولید هر کیلوگرم نخود و لوبیا به‌ترتیب ۰/۹۸ و ۱/۷۹ کیلوگرم تخمین زده شده است که در مقایسه با ۹۹/۴۸ و ۲۳/۸۸ کیلوگرم به ازای هر کیلوگرم به‌ترتیب برای گوشت گاو و پنیر، به‌طور قابل توجهی کمتر است (راجپوروهیت و لی[1]، ۲۰۲۳). حبوبات با داشتن قابلیت تثبیت زیستی نیتروژن، نقش قابل‌توجهی در بهبود حاصلخیزی خاک دارند. حبوبات در تناوب با بسیاری از گیاهان زراعی، کاشته می‌شوند و بدین‌ترتیب با تنوع‌بخشی به نظام‌های کشت مبتنی بر غلات، جایگاه ویژه‌ای در کشاورزی پایدار دارند. حبوبات به‌راحتی رشد می‌کنند و به‌دلیل داشتن ریشهٔ عمیق به خشکی و کم‌آبی بسیار مقاوم هستند. مزیت کاشت و تولید حبوبات این است که مصرف آب و تخصیص زمین کشاورزی را کاهش می‌دهند، آسیب به اکوسیستم را به‌حداقل می‌رسانند، بازدهی محصولات زراعی در تناوب و مرتبط را افزایش می‌دهند و حتی برای کشاورزان کوچک مقیاس تولید درآمد می‌کنند (دیدینگر و تامپسون، ۲۰۲۰). این گیاهان، کم‌توقع‌اند و برای کشت در نظام‌های زراعی کم‌نهاده مناسب هستند و به صورت گیاهان پوششی، در جلوگیری از فرسایش خاک مؤثرند. مجموعهٔ این ویژگی‌ها، حبوبات را از جنبه‌های زراعی، بوم‌شناختی و زیست‌محیطی در جایگاه ارزشمندی قرار داده است. حبوبات در ایران پس از غلات، بیشترین سطح زیرکشت را دارا هستند.

در سال‌های اخیر، انواع پروتئین‌های حبوبات از منابعی مانند باقلا، عدس، نخود و نخود سفید با هدف استفاده به‌جای پروتئین سویا بررسی و مطالعه شده‌اند که در این میان پروتئین نخود موفقیت تجاری بیشتری داشته‌است (راجپوروهیت و لی ، ۲۰۲۳). در مطالعات متعدد کاربرد پروتئین‌های حبوبات به دلیل خواص عملکردی و تغذیه‌ای‌شان در فرآورده‌هایی مانند شبه‌گوشت‌ها، پاستا و محصولات نانوایی گزارش شده‌است. ولی هنوز نیاز به شناسایی منابع جدید پروتئین‌های حبوبات است که دارای خواص عملکردی و کاربردهای بالقوه در غذا

[1] Rajpurohit and Li

هستند. در این نشریه سعی می‌شود نقشه راهی برای توسعهٔ ترکیبات پروتئینی حبوبات و تولید محصولات غذایی جدید پیشنهاد و ترسیم شود.

روش‌های استخراج پروتئین حبوبات

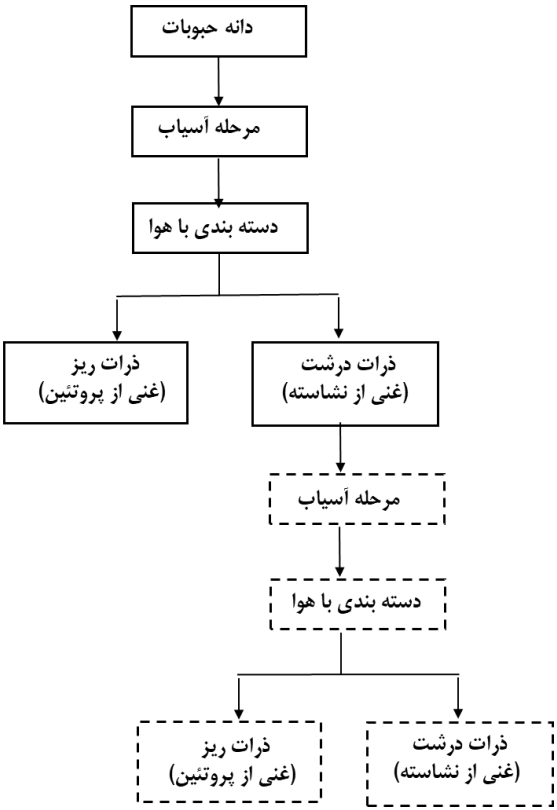
دانهٔ حبوبات از گرانول‌های نشاستهٔ قرار گرفته در داخل ماتریس پروتئینی، فیبرها و چربی‌ها تشکیل شده‌است. پروتئین حبوبات به دو روش متداول جداسازی خشک و مرطوب استخراج می‌شود. در هر دو روش، دانهٔ کامل حبوبات در ابتدا پوستگیری می‌شود. در روش خشک در مقایسه با روش مرطوب، پروتئین خلوص کمتری دارد، اما روش خشک نیاز به انرژی و هزینهٔ عملیاتی کمتری دارد و روش پایدارتری است. در روش خشک ساختار اولیهٔ پروتئین و خواص عملکردی آن حفظ می‌شود. روش مرطوب پرهزینه‌تر، سخت‌تر و طولانی‌تر است و باعث تولید مقدار زیادی پساب و مواد شیمیایی می‌شود که اثر منفی زیست محیطی دارند.

۱-روش‌های جداسازی خشک

-دسته‌بندی با هوا

در روش خشک، حبوبات پس از پوستگیری آسیاب می‌شوند و آرد کامل حبوبات به‌دست می‌آید. آسیاب کردن (تا حدودی) دانه‌های نشاسته را از ماتریس پروتئین/فیبر در لپه‌ها[1] آزاد می‌کند. آرد به‌دست‌آمده با استفاده از سیستم طبقه‌بندی هوا بر اساس تفاوت در اندازهٔ ذرات، هندسه و چگالی به بخش غنی از نشاسته و بخش غنی از پروتئین تقسیم می‌شود. بخش غنی از نشاسته متراکم‌تر و درشت‌تر است در حالی که بخش غنی از پروتئین سبک‌تر و ظریف‌تر است. شکل ۲ مراحل جداسازی پروتئین از نشاسته را به روش دسته‌بندی با هوا نشان می‌دهد. در روش خشک، در مقایسه با روش مرطوب، بخش‌های پروتئینی خلوص کمتری دارند. خلوص بخش غنی از پروتئین بین ۴۲/۹ –۷۵/۱ درصد است (راجپوروهیت و لی، ۲۰۲۳).

[1] cotyledons



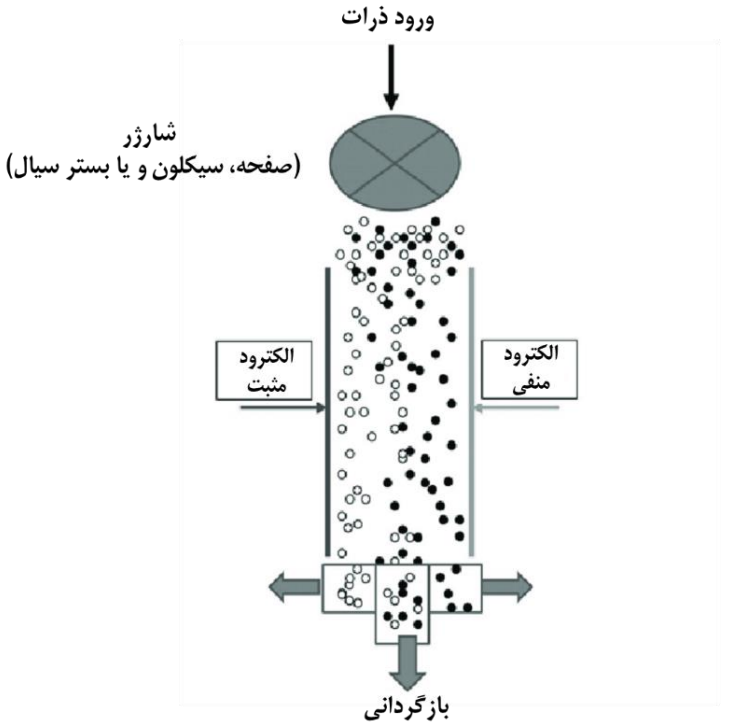
شکل ۲ -مراحل جداسازی پروتئین از نشاسته به روش دسته‌بندی با هوا

-روش جداسازی با جداکننده الکترواستاتیکی[1]

این روش بر اساس تفاوت در بار الکتریکی کربوهیدرات‌ها و اجزای پروتئینی در حبوبات عمل می‌کند. در این روش، آرد حبوبات دارای بار الکتریکی خواهندشد و در ادامه ذرات آرد

[1] Tribo-electrostatic separation

در اثر میدان الکترواستاتیکی از هم جدا می‌شوند. ذرات پروتئین و فیبرها بار الکتریکی متفاوت دارند و به‌راحتی در یک میدان الکتریکی از هم جدا می‌شوند (شکل ۳). در فرآیند پوستگیری با استفاده از جداسازی الکترواستاتیکی می‌توان ذرات فیبر را از آرد کامل حبوبات جدا کرد، ولی این روش برای جداسازی ذرات پروتئین و نشاسته مناسب نیست زیرا هردو بار الکتریکی مشابهی دارند. برای به‌دست آوردن غلظت بالای پروتئین، روش‌های دسته‌بندی با هوا و جداسازی الکترواستاتیکی با هم به‌طور ترکیبی استفاده می‌شوند.



شکل ۳ –جداکننده الکترواستاتیکی (بیتنر[1] و همکاران، ۲۰۱۴)

[1] Bittner

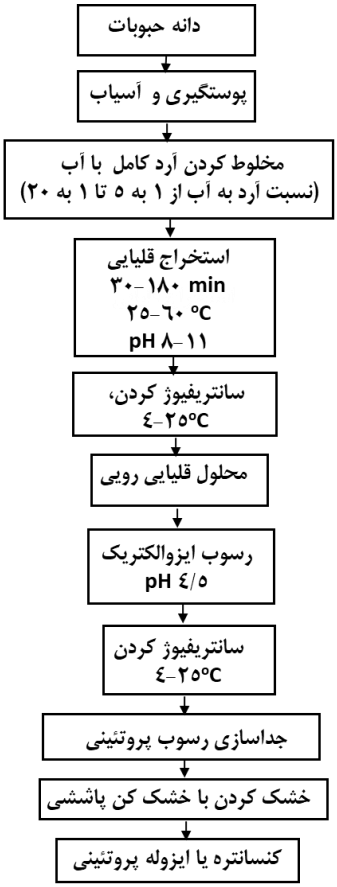
۲-روش‌های جداسازی مرطوب[1]

دانه‌های پوستگیری‌شده در این روش، در آب یا سایر حلال‌های استخراج‌کننده خیسانده و به‌صورت مرطوب آسیاب می‌شوند و یا آرد آسیاب‌شده در آب پخش می‌شود و به‌صورت تعلیق درمی‌آید. پروتئین موجود در مخلوط آبی به‌دست آمده را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف مانند استخراج قلیایی- رسوب ایزوالکتریک، استخراج با نمک، استخراج با حلال آلی، استخراج آب یا اولترافیلتراسیون استخراج و تغلیظ کرد. مراحل استخراج قلیایی- رسوب ایزوالکتریک در شکل ۴ نشان داده شده‌است (بدیعی و همکاران، ۱۳۹۲). نشاسته‌ای را که در مخلوط باقی می‌ماند می‌توان با شستشوی بیشتر (برای حذف پروتئین محلول) و فیلترکردن از طریق یک الک مشبک (برای جدا کردن فیبر باقی‌مانده)، خالص کرد. در ادامه برای بازیابی نشاسته، محلول سانتریفیوژ و خشک می‌شود. خلوص بخش پروتئین از ۴۶/۳ تا ۹۴/۲ درصد متغیر است (بدیعی و همکاران، ۱۳۹۲).

استفاده از اسیدها و بازها برای استخراج پروتئین ممکن است ساختار پروتئین را تغییر دهد. حلال‌های آلی نیز ممکن است مواد زائد خطرناکی تولید کنند. بنابراین، نیاز به توسعه روش‌های متفاوتی برای استخراج پروتئین وجود دارد. استخراج با حلال یوتکتیک عمیق[2] روشی مناسب و ملایم به‌جای استفاده از اسیدها و حلال‌های خطرناک پیشنهاد می‌شود که هم‌اکنون در استخراج فنل‌ها و قندها دیده می‌شود. کاربرد حلال‌های آلی مانند اتیل لاکتات[3] و د-لیمونن[4] نیز برای جداسازی اجزای آرد نخود بررسی و مطالعه شده‌است (لو[5] همکاران، ۲۰۱۹). از مزایای استفاده از این حلال‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد: حذف مرحلهٔ

[1] Wet Separation Methods
[2] Deep Eutectic Solvent
[3] Ethyl Lactate
[4] *D*-limonene
[5] Lu

خنثی‌سازی یا شستشوی اضافی بعد از تفکیک اجزا، سالم و ایمن بودن این ترکیبات (GRAS[1])، قابلیت بازیابی و استفادهٔ مکرر از این حلال‌ها.



شکل ٤- مراحل استخراج قلیایی-رسوب ایزوالکتریک (بدیعی و همکاران، ۱۳۹۲)

[1] Generally Recognized as Safe

۳-روش‌های ترکیبی

این روش‌ها ترکیبی از دو روش خشک و مرطوب هستند. آرد حبوبات غنی از پروتئین که از روش خشک به‌دست می‌آید در مرحله بعد با محلول آبی دوباره استخراج می‌شود تا خلوص پروتئین آن افزایش یابد. بعد از جداسازی خشک، ذرات نرم آرد در آب معلق می‌شوند و لایه آبی رویی به روش سانتریفیوژ یا فیلترکردن خالص می‌شود (عامری شهرابی و همکاران، ۱۳۹۰). مصرف آب به روش ترکیبی ممکن است تا ۱۳ کیلوگرم به ازای هر کیلوگرم پروتئین کاهش یابد (راجپوروهیت و لی، ۲۰۲۳).

٤-سایر روش‌های استخراج پروتئین

روش‌های بیوشیمیایی و فیزیکی متعددی را می‌توان به‌صورت پیش‌تیمار برای تسهیل یا بهبود راندمان استخراج پروتئین به‌کارگرفت. برخی از این روش‌ها عبارت‌اند از: استخراج به کمک روش بیوشیمیایی مانند استخراج به کمک آنزیم یا استخراج به کمک روش‌های فیزیکی مانند اولتراسونیک[1]، میدان الکتریکی متناوب[2]، ماکروویو[3]، فشار بالا[4]، نور پالسی شدید[5] و فرکانس رادیویی[6].

دیوارۀ سلول‌های گیاهی، مانع سختی در برابر استخراج پروتئین‌هاست. در روش استخراج به کمک آنزیم‌ها، آنزیم‌هایی مانند پکتینازها و کربوهیدرازها دیوارۀ سلول را تخریب می‌کنند و پروتئین‌ها آزاد می‌شوند. پروتئازها پروتئین را از ماتریس کربوهیدراتی آزاد می‌سازند و مولکول‌های بزرگ پروتئین‌ها را به بخش‌های کوچک‌تر و انحلال‌پذیر هیدرولیز می‌کنند که به استخراج آن‌ها کمک خواهد کرد. به‌علاوه، بسیاری از پروتئازها در شرایط ملایم pH عمل می‌کنند (pH بین ۶ تا ۸) و بنابراین از دناتوره‌شدن پروتئین‌ها جلوگیری می‌شود. از معایب این روش می‌توان به کند بودن فرآیند، اشکال در افزایش مقیاس فرآیند، بازدهی

[1] Ultrasound-assisted Extraction
[2] Pulsed electric Field-assisted Extraction
[3] Microwave-assisted Extraction
[4] High Pressure-assisted Extraction
[5] Intense Pulsed Light-assisted Extraction
[6] Radio Frequency-assisted Extraction

متغیر و انرژی‌بر بودن فرآیند اشاره کرد. با این حال، استخراج آنزیمی کمترین تأثیر را بر محیط زیست دارد و عملکرد پروتئین آن بالاست. استخراج آنزیمی را می‌توان با تیمارهای فیزیکی مانند استفاده از امواج صوت، اولتراسوند یا مایکروویو ترکیب کرد تا عملکرد و کیفیت پروتئین استخراج‌شده افزایش و زمان فرآیند کاهش یابد (نادار[1] و همکاران، ۲۰۱۸).

خواص عملکردی پروتئین‌های حبوبات

در جدول ۱، خلاصه‌ای از مهم‌ترین خواص عملکردی پروتئین‌ها نشان داده شده‌است.

جدول۱-برخی خواص عملکردی پروتئین‌ها و کاربرد صنعتی آن‌ها

خواص عملکردی	مکانیسم اثر	مادۀ غذایی
انحلال‌پذیری	افزایش خواص آب دوستی	نوشیدنی‌ها
ویسکوزیته	اتصال هیدرودینامیکی به آب	آب گوشت، سس سالاد و سوپ‌ها
اتصال آب	برقراری پیوند هیدروژنی	گوشت‌های فرآوری شده، کیک‌ها و نان‌ها
ژله‌ای شدن	تشکیل شبکۀ سه بعدی	گوشت‌های فرآوری شده، فرآورده‌های نانوایی و پاستا
افزایش الاستیسیته	برقراری پیوندهای آب‌گریز و دی‌سولفید	فرآورده‌های گوشتی و محصولات نانوایی
امولسیون‌کنندگی	جذب بین سطحی و تشکیل فیلم	گوشت‌های‌فرآوری‌شده، سوپ‌ها، دسرها و سس‌ها
کف‌کنندگی	جذب بین سطحی-تشکیل فیلم	روکش‌های زده‌شده غذایی، موس، ناگت و کیک‌ها
اتصال‌چربی و موادطعم‌دهنده	برقراری پیوندهای آب گریز	محصولات نانوایی

[1] Nadar

ظرفیت نگهداری آب (WHC[1]) و ظرفیت نگهداری روغن(OHC[2]) پروتئین‌ها به‌ترتیب میزان آب یا میزان روغن نگهداری شده در واحد جرم را نشان می‌دهند. به‌طورکلی، WHC و OHC پروتئین‌ها با افزایش خلوص پروتئین افزایش می‌یابد. WHC و OHC برای ایزوله پروتئین حبوبات بین ۶/۸–۱/۸ گرم بر گرم و ۶/۸–۳/۵ گرم بر گرم اندازه‌گیری شده‌است. میزان جذب آب و روغن ایزوله پروتئینی نخود مشابه میزان جذب آب و روغن پروتئین سویا است (عامری شهرابی و همکاران، ۱۳۹۰). WHC و OHC بر آبدار بودن و قابلیت پخت گوشت‌های گیاهی و سینرزیس ماست‌های گیاهی تأثیر می‌گذارند.

از نظر صنعتی، خواص ژل‌کنندگی پروتئین‌ها در موادغذاییِ دارای ساختار نیمه‌جامد مانند شبه‌گوشت‌ها، تخم‌مرغ، ماهی یا فرآورده‌های پنیر بااهمیت است. پروتئین‌های گیاهی با قدرت تشکیل ژل خوب برای بهبود بافت فرآورده‌های گوشتی استفاده می‌شوند. سختی همبرگرهای گوشت گاو با افزودن آرد عدس و آرد نخود افزایش می‌یابد (معتمدی و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین، در توسعهٔ شبه‌گوشت‌ها و فرآورده‌های پروتئینی، پتانسیل زیادی برای استفاده از ترکیبات پروتئین حبوبات با قدرت تشکیل ژل خوب وجود دارد.

انحلال‌پذیری[3] پروتئین توانایی حل‌شدن کامل پروتئین در آب را نشان می‌دهد و بر بسیاری از ویژگی‌های کیفی غذا تأثیر می‌گذارد. انحلال‌پذیری با سایر خواص مانند امولسیون‌کنندگی، کف‌کنندگی و تشکیل ژل مرتبط است و از این‌رو تا حد زیادی مناسب بودن پروتئین را در کاربردهای مختلف غذایی تعیین می‌کند. انحلال‌پذیری پروتئین‌ها به میزان pH بستگی دارد و پروتئین‌ها در نقطهٔ ایزوالکتریک خود کمترین انحلال‌پذیری را دارند (برای مثال، pH بین ۴ و ۶ برای پروتئین های حبوبات) (بدیعی و همکاران، ۱۳۹۲).

[1] Water Holding Capacity (WHC)
[2] Oil Holding Capacity (OHC)
[3] Solubility

فعالیت امولسیون‌کنندگی در شبه‌گوشت‌های گیاهی برای شبیه‌سازی بافت چربی کاربرد دارد. امولسیون‌کننده‌ها قطره‌های روغن را در غذاهای امولسیون‌شدهٔ گیاهی مانند سس‌ها، شیرهای گیاهی و خامه‌های گیاهی تثبیت می‌کنند.

پروتئین‌های گیاهی می‌توانند با جذب در سطح مشترک هوا و آب و تشکیل لایه‌ای محافظ در اطراف حباب‌های هوا سبب پایداری کف شوند. خواص کف‌کنندگی برای موادغذایی مانند خامهٔ فرم‌گرفته، بستنی و کیک‌هایی ضروری است که بافت نرم و سبک[1] یا خامه‌ای دارند. مقادیر بالای کف تشکیل شده و پایداری خوب کف در ایزوله و کنسانتره نخود، آنها را به عنوان پروتئین‌های طبیعی انحلال‌پذیر در فازهای پیوسته (آبی) مواد غذایی مناسب می‌سازد (بدیعی و همکاران، ۱۳۹۲).

ویژگی‌های رئولوژیکی محلول‌های پروتئینی مهم است زیرا بر ویژگی‌های حسی (برای مثال، احساس دهانی) محصولات غذایی مایع تأثیر می‌گذارد. رایج‌ترین روش برای تعیین ویژگی رئولوژیکی، اندازه‌گیری ویسکوزیته است. علاوه‌بر ویژگی‌های حسی، رئولوژی به‌هنگام فرآوری‌های مختلف مانند پمپ‌کردن، مخلوط‌کردن و خشک‌کردن به روش پاششی بسیار مهم است.

قابلیت هضم پروتئین‌های حبوبات

پروتئین‌های گیاهی، در مقایسه با پروتئین‌های حیوانی، کیفیت پروتئینی پایین‌تری دارند. پروتئین‌های حیوانی ترکیب اسیدهای آمینهٔ ضروری و غیر ضروری خوبی دارند، در حالی که پروتئین‌های گیاهی فاقد حداقل یک یا چند اسیدآمینهٔ ضروری هستند. پروتئین‌های گیاهی، در مقایسه با پروتئین‌های حیوانی، قابلیت هضم کمتری دارند و از نظر گوارشی نیز قابلیت دسترسی زیستی آنها کمتر است.

[1] Fluffy Texture

سه عامل اصلی باعث کمترشدن قابلیت هضم پروتئین‌های گیاهی می‌شوند. اول، وجود عوامل ضدتغذیه‌ای[1] مانند مهارکننده‌های تریپسین، تانن‌ها، فیتوهماگلوتینین‌ها[2] و فیتات‌ها که می‌توانند در هضم و جذب پروتئین اختلال ایجاد کنند. دوم، تفاوت‌های ساختاری بین پروتئین‌های گیاهی و حیوانی، برای مثال پروتئین‌های گیاهی، نسبت به پروتئین‌های حیوانی، از مارپیچ‌های α کمتر و ورقه‌های β بیشتری تشکیل شده‌اند که بیشتر باعث ایجاد توده‌های پروتئینی می‌شوند. سوم، وجود فیبرهای رژیمی، هضم پروتئین‌های گیاهی را کاهش می‌دهد (دودو[3] و همکاران، ۲۰۰۳).

فیتوهماگلوتینین ترکیب ضدتغذیه‌ای است که در برخی از حبوبات به‌ویژه لوبیای قرمز و لوبیای سفید وجود دارد. فیتوهماگلوتینین در برابر آنزیم‌های گوارشی مقاوم است و باعث بروز التهاب معده‌ای–روده‌ای[4] حاد می‌شود. این ترکیب اگر در غلظت بالا خورده شود می‌تواند کشنده باشد. بنابراین لوبیای خام قبل از مصرف باید فرآوری مقدماتی شود تا از نظر خوراکی ایمن گردد. فرآوری سنتی برای مهار سمیت فیتوهماگلوتینین فرآیند پخت است، اما این ترکیب به دناتوره‌شدن حرارتی نسبی مقاوم است و از این‌رو دانه‌های لوبیا باید به‌مدت طولانی پخته شوند (لیو[5] و همکاران، ۲۰۱۳). برای حذف این ترکیب سمی، ابتدا باید لوبیا را به مدت ۵ ساعت در آب قرار داد تا خیس بخورد. پس از آن آب را دور بریزند و لوبیا را در آب تازه در دمای ۱۰۰ درجهٔ سلسیوس به‌مدت ۳۰ دقیقه بجوشانند. به این ترتیب غلظت این مادهٔ سمی به حد استاندارد و بی‌خطر کاهش می‌یابد.

روش‌های متعددی برای افزایش کیفیت پروتئین‌های گیاهی استفاده می‌شود. مانند ازبین بردن مواد ضدتغذیه‌ای به کمک فرآوری، غنی‌سازی پروتئین گیاهی با اسیدآمینه‌های محدود

[1] Anti-Nutritive Factors (ANF)
[2] Phytohaemagglutinin (PHA)
[3] Duodu
[4] Gastroenteritis
[5] Liu

کننده و ترکیب مناسب منابع غذایی گیاهی (مانند حبوبات با غلات) برای تهیهٔ مکمل‌های پروتئین.

روش‌های مختلف فرآوری مانند پوست‌گیری، خیساندن، تیمار حرارت مرطوب/ پختن/ برشته‌کردن، جوانه‌زنی، تخمیر و تابش برای کاهش یا حذف مواد ضدتغذیه‌ای در حبوبات استفاده می‌شوند (شکل ۵). پوستگیری می‌تواند برخی از مواد ضدتغذیه‌ای مانند تانن‌ها، ساپونین‌ها و کل ترکیبات فنلی موجود در پوسته رویی را کاهش دهد یا حذف کند. پوستگیری می‌تواند جوانه و لایه صمغی بین پوسته و لپه‌ها را از بین ببرد و باعث کاهش مواد ضدتغذیه‌ای شود. خیساندن با حل‌کردن مواد ضدتغذیه‌ای در آب یا فعال‌کردن آنزیم‌ها باعث کاهش مواد ضدتغذیه‌ای می‌شود. پختن حبوبات قبل از مصرف در کاهش فعالیت ساپونین‌ها، تانن‌ها، فیتوهماگلوتینین و مهارکننده‌های تریپسین مؤثر است (کومار[1] و همکاران، ۲۰۲۲).

گزارش شده است که جوانه‌زنی باعث کاهش مواد ضدتغذیه‌ای در حبوبات می‌شود. پروتئازها باعث غیرفعال شدن مواد ضدتغذیه‌ای پروتئینی مانند لکتین‌ها[2] و مهارکننده‌های آنزیمی می‌شوند. تابش می‌تواند مهارکننده‌های تریپسین را در حبوبات با تخریب پیوندهای سولفیدریل (–SH) و دی سولفید (–S-S–) غیرفعال کند (راجپوروهیت و لی ، ۲۰۲۳).

[1] Kumar
[2] Lectins

شکل ۵-روش‌های مختلف برای حذف و یا کاهش مواد ضدتغذیه‌ای در حبوبات

ویژگی‌های حسی پروتئین‌های حبوبات

یکی از چالش‌های اصلی در توسعهٔ محصولات غذایی جدید برپایهٔ پروتئین حبوبات، وجود ترکیبات بدطعم است. برای درک دلایل و عوامل ایجادکننده بدطعمی به آنالیز مواد بدطعم نیاز است تا ترکیبات شیمیایی مسئول شناسایی و مشخصات و مقدار آنها تعیین شود. روش‌های کروماتوگرافی گازی[1] (GC) و کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا[2] (HPLC) برای مطالعهٔ ترکیبات ایجادکنندهٔ طعم بد استفاده می‌شوند. ترکیبات فرار یا غیرفرار طبیعی در حبوبات یا ایجاد شده به‌هنگام فرآوری عمدتاً مسئول بدطعمی هستند. مزه‌های نامطلوب معمول در حبوبات عبارت‌اند از: طعم لوبیایی، تلخی، علفی، و گسی (راجپوروهیت و لی ، ۲۰۲۳). طعم‌های غیرعادی در همهٔ انواع حبوبات از جمله نخود، عدس، نخود خشک و لوبیا دیده شده‌است.

اسیدهای آمینهٔ آبگریز و ترکیبات ضدتغذیه‌ای، ترکیبات غیرفرار بدطعم موجود در حبوبات هستند. علاوه بر این، اسیدهای فنولیک و مشتقات آنها نیز می‌توانند به طعم تلخ یا ترش

[1] Gas Chromatography (GC)
[2] High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)

کمک کنند. دیگر ترکیبات عامل بدطعمی شامل پلی‌فنل‌های تلخ هستند مانند تانن‌ها که مسئول کاهش هضم پروتئین و کاهش جذب مواد مغذی نیز به‌شمار می‌آیند (سینگ[1] و همکاران، ۲۰۱۷).

روش‌های بهبود طعم حبوبات شامل انتخاب رقم مناسب، کنترل اکسیداسیون و کنترل دماست. ترکیب شیمیایی مواد بدطعم در بین ارقام مختلف متفاوت است. بنابراین، ارقامی باید تولید شوند که حاوی مقدار کمی از ترکیبات بدطعم، پیش‌سازهای ترکیبات عامل بدطعمی یا آنزیم‌هایی باشند که مسئول ایجاد بدطعمی هستند. روش دیگر برای جلوگیری از تشکیل ترکیبات بدطعم، غیرفعال کردن آنزیم لیپوکسیژناز و دیگر آنزیم‌هاست که می‌توان با فرآیندهای حرارتی مانند حرارت دادن خشک، حرارت دادن با بخار یا بلانچینگ به‌دست آورد (رولند[2] و همکاران، ۲۰۱۷). برای حذف یا اصلاح طعم‌های ناخوشایند در حبوبات می‌توان از فناوری‌هایی مانند خیساندن و فرآیند حرارتی، جوانه‌زنی، استخراج با حلال، تخمیر، تیمار آنزیمی و اولترافیلتراسیون استفاده کرد.

روش دیگر برای کاهش یا حذف طعم‌های بد، پوشاندن طعم‌های بد است. معمولا طعم‌دهنده‌ها، نمک، شکر و اسیدها در صنایع غذایی برای پوشاندن طعم‌های ناخوشایند استفاده می‌شوند. مطالعات در مورد پوشاندن طعم‌های ناخوشایند در حبوبات اندک است و به تحقیقات بیشتری در این زمینه نیاز خواهد بود.

کاربردهای پروتئین‌های حبوبات در تولید فرآورده‌های غذایی

در شکل ۶ برخی از مهم‌ترین کاربردهای پروتئین حبوبات در صنایع غذایی نشان داده شده‌است.

[1] Singh
[2] Roland

شکل ٦ - کاربردهای پروتئین حبوبات در تولید فرآورده‌های غذایی

۱-فرآورده‌های نانوایی و پاستا

مطالعات متعددی در زمینهٔ استفاده از حبوبات در فراورده‌های پخت (نانوایی) گزارش شده‌است. پروتئین حبوبات را به‌عنوان افزودنی در تولید نان و کلوچه می‌توان به‌کار برد. در اکثر مطالعات، آرد کامل حبوبات استفاده شده‌است. در موارد اندک نیز کنسانتره یا ایزولهٔ پروتئینی حبوبات به‌کار رفته است. برای مثال، با استفاده از آرد نخود سفید، ایزولهٔ پروتئین نخود و آرد سویا نان تهیه شده‌است (مینارو[1] و همکاران، ۲۰۱۲). نان به‌دست آمده با آرد حبوبات خواص فیزیکوشیمیایی مناسب و ویژگی‌های حسی مطلوبی داشته‌است. تحقیقات نشان داده‌است که در فرمولاسیون نان به‌خوبی می‌توان آرد نخود سفید و ایزولهٔ پروتئین نخود را به‌جای آرد سویا استفاده کرد. اما افزودن پروتئین حبوبات به‌عنوان مادهٔ اولیه به نان به‌دلیل رقیق‌شدن گلوتن، اثر منفی بر ویژگی‌های خمیر داشته‌است. گزارش شده‌است که افزودن پروتئین نخود به میزان ۱۵ درصد به آرد گندم، حجم نان را کاهش داده‌است (هوهنل[2]

[1] Miñarro
[2] Hoehnel

و همکاران، ۲۰۱۹). تحقیقات نشان داده‌است که استفاده از غلظت‌های کم پروتئین حبوبات (حداکثر ۱۵ درصد) به‌عنوان مادهٔ اولیه در آرد نان، کیفیت پروتئینی آرد را بهبود بخشیده است، بی‌آنکه کمترین تغییر نامطلوبی در کیفیت محصول نهایی به‌وجود آورد. برای تعیین دقیق‌تر امکان استفاده از آرد حبوبات مختلف یا پروتئین آنها در فرمولاسیون فرآورده‌های نانوایی به مطالعات بیشتری نیاز است.

۲-شبه گوشت‌ها[1]

شبه‌گوشت‌ها با استفاده از پروتئین‌های غیرگوشتی فرموله می‌شوند ولی از نظر بافت و ظاهر شبیه محصولات گوشتی هستند. اجزای اصلی فرمولاسیون شبه‌گوشت‌ها، پروتئین‌های گیاهی بافت‌دار، آب، پلی‌ساکاریدها، چربی، نمک و دیگر افزودنی‌های جزئی هستند که ۵۰ تا ۹۵ درصد پروتئین دارند و پروتئین جزء اصلی مادهٔ خشک را تشکیل می‌دهد. در حال حاضر، منابع اصلی پروتئین مورد استفاده در فرمولاسیون شبه‌گوشت‌ها عبارت‌اند از پروتئین سویا، گلوتن گندم، پروتئین نخود، مایکوپروتئین، تخم‌مرغ، آلبومین و پروتئین شیر. پروتئین حبوبات منبع پروتئین گیاهی بالقوه‌ای برای تهیهٔ شبه‌گوشت‌ها در نظر گرفته می‌شود. در مطالعات اخیر برای تهیه شبه‌گوشت‌ها از پروتئین منابعی مانند ماش، باقلا، بادام زمینی و لوبیا با موفقیت استفاده شده‌است (بنیوال[2]، ۲۰۲۲). پروتئین نخود توسط اکستروژن با رطوبت بالا به شکل شبه‌گوشت تبدیل شده‌است. با این حال، ساختارهای مبتنی بر پروتئین نخود، در مقایسه با محصولات مبتنی بر پروتئین سویا، نرم‌تر هستند. بنابراین، روی بهبود استحکام ژل پروتئین از طریق تغییراتی که بر پیوندهای هیدروژنی پروتئین اثر می‌گذارند، یا با تغییر پارامترهای فرآوری (مانند اندازه ذرات پروتئین و دما) مطالعه شده‌است (اوسن[3] و همکاران، ۲۰۱۴).

تقلید ویژگی‌های بافتی محصولات گوشتی خردشده مانند ناگت، برگر و سوسیس با استفاده از پروتئین گیاهی بافت‌دار نسبتاً آسان است. با این حال، تقلید از ویژگی‌های بافتی

[1] Meat analogues
[2] Beniwal
[3] Osen

غذاهای ماهیچه‌ای کامل، مانند فیله مرغ، استیک گوشت گاو، و غذاهای دریایی چالش برانگیز است. بافت شبه‌گوشت‌ها باید به‌هنگام پخت و نیز به‌هنگام جویدن (خردشدن در دهان) شبیه گوشت معمولی باشد تا حسی شبیه به گوشت واقعی در دهان ایجاد کند. بسیاری از مواد پروتئین گیاهی مانند پروتئین‌های لوبیا، پروتئین بادام زمینی، پروتئین شاهدانه، پروتئین سویا، پروتئین نخود، پروتئین باقلا و گلوتن گندم در بافت‌سازی به روش اکستروژن با رطوبت بالا برای ایجاد ساختارهایی شبیه به‌گوشت استفاده شده‌اند. ترکیبی از پروتئین‌های نخود یا سویا با گلوتن برای تولید بافتی شبیه گوشت مرغ با استفاده از روش‌های برشی به‌کار رفته‌است (راجپوروهیت و لی، ۲۰۲۳). بازار شبه‌گوشت‌ها در حال رشد است و پروتئین‌های حبوبات فرصت خوبی برای توسعه و تولید شبه‌گوشت‌ها فراهم می‌کنند.

۳-فرآورده‌های جانشین لبنیات

در حال حاضر، شیر سویا با مقدار پروتئین یکسان با شیر گاو به‌جای شیر گاو در بازار موجود است. با این حال، نیاز به منابع پروتئین جدید وجود دارد. جایگزین‌های شیر با پروتئین بالا برپایهٔ پروتئین نخود در حال حاضر به صورت تجاری در دسترس هستند. علاوه بر این، باقلا، نخود و دیگر حبوبات به‌عنوان جایگزین شیر مطالعه شده‌اند. پروتئین حبوبات برای استفاده در محصولات جایگزین شیر و سایر فرآورده‌های لبنی باید خواص عملکردی مانند خاصیت انحلال‌پذیری و امولسیون‌کنندگی خوبی داشته باشند. در تحقیقی مشخص شد که نوشابه‌های لبنی برپایهٔ پروتئین نخود نسبت به محصولات مشابه تهیه شده از پروتئین دیگر حبوبات، خواص حسی مطلوب‌تری دارند (لو[1] و همکاران، ۲۰۲۰). در حال حاضر ماست بر پایهٔ پروتئین گیاهی عمدتا از سویا و نارگیل تهیه می‌شود. محصولات بر پایه نارگیل چربی اشباع‌شده زیاد و پروتئین کمی دارند، در حالی که محصولات برپایهٔ سویا به‌دلیل اصلاح ژنتیکی و حساسیت‌زایی باعث نگرانی مصرف‌کنندگان می‌شوند. بنابراین، پروتئین‌های حبوبات برای تهیهٔ ماست بر پایهٔ فرآورده‌های گیاهی مناسب به نظر می‌رسند. جایگزین‌های

[1] Lu

ماست برپایهٔ حبوبات را می‌توان از عصارهٔ آبی حبوبات کامل یا با مخلوط کردن پروتئین‌های حبوبات، چربی، آب و شکر (برای تخمیر) تولید کرد (راجپوروهیت و لی، ۲۰۲۳).

٤-تهیهٔ فیلم و پوشش خوراکی از پروتئین حبوبات

شکل ۷ چرخهٔ تولید و تجزیهٔ فیلم و پوشش خوراکی را از پروتئین حبوبات به‌عنوان منابع پروتئینی تجدیدپذیر نشان می‌دهد. پروتئین حبوبات، به‌ویژه نخود، قابلیت تشکیل فیلم خوراکی را دارد. نتایج تحقیقات در زمینهٔ تولید فیلم و پوشش خوراکی از ایزولهٔ پروتئین نخود نشان می‌دهد که فیلم‌های تهیه شده نیز مانند بسیاری از فیلم‌های تهیه شده از پروتئین‌ها، سرعت انتقال بخارآب بسیار بالایی دارند. این فیلم‌ها به‌طور کامل در آب حل می‌شوند ولی از بسیاری جهات به‌ویژه خواص مکانیکی با برخی از فیلم‌های خوراکی برپایه پلی‌ساکاریدها برابری می‌کنند. از فیلم‌های پروتئین نخود می‌توان برای تهیهٔ بسته‌بندی‌های انحلال‌پذیر در آب استفاده کرد. افزودن چربی به این فیلم‌ها و تهیهٔ فیلم مرکب (کامپوزیت) می‌تواند مقاومت آنها را در برابر رطوبت بهبود بخشد و کاربردهای صنعتی آنها را افزایش دهد (عامری شهرابی، ۱۳۹۲).

شکل ۷ - چرخهٔ تولید و تجزیهٔ فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی از پروتئین حبوبات

۵-مواد غذایی تولیدشده با چاپگر سه‌بعدی

چاپ سه‌بعدی یک فناوری نوظهور است که می‌توان از آن برای تهیهٔ غذاهای با شکل پیچیده استفاده کرد و در صنایع غذایی مورد توجه قرار گرفته است. محصولات گوشتی تهیه‌شده با چاپگر سه‌بعدی مانند فرآورده‌های گوشت گاو، مرغ، ماهی و غذاهای دریایی توسعه یافته‌اند. با این حال، جوهرهای غذایی مورد استفاده در این محصولات عمدتاً از پروتئین‌های حیوانی تشکیل شده‌اند. پروتئین نخود مخلوط‌شده با آلژینات سدیم خواص رئولوژیکی و بافتی مناسبی برای استفاده در چاپ سه‌بعدی موادغذایی دارد (چن و ژانگ[1]، ۲۰۲۱). در مطالعه‌ای مشخص‌شد که پروتئین بادام‌زمینی، در مقایسه با پروتئین هیدرولیز

[1] Chen and Zhang

گندم و کنسانترهٔ پروتئین بادام‌زمینی و کنسانترهٔ پروتئین نخود، بهترین خواص حسی و بافتی را برای استفاده در چاپ سه بعدی دارد (چن و ژانگ، ۲۰۲۱).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پروتئین‌های حبوبات به دلیل دسترسی آسان، تولید پایدار، ارزش تغذیه‌ای مناسب و کاربرد آنها در طیف وسیعی از غذاها، گزینه‌ای مناسب برای استفاده به‌جای پروتئین حیوانی محسوب می‌شوند. علاوه بر این، پروتئین‌های موجود در حبوبات خواص عملکردی مناسبی دارند، به‌طوری‌که می‌توان با استفاده از این پروتئین‌ها محصولات غذایی جدید تولید کرد و پروتئین‌های استخراج‌شده از حبوبات مختلف به‌خوبی پاسخگوی تقاضای رو به رشد مصرف‌کنندگان پروتئین‌های گیاهی در صنعت غذا هستند. بنابراین، مهم‌ترین و اصلی‌ترین راهکار برای افزایش مصرف پروتئین حبوبات، افزایش آگاهی در میان مصرف‌کنندگان در مورد مزایای تغذیه‌ای و سلامتی‌بخش بالقوه ترکیبات حبوبات و نقش آنها در کشاورزی پایدار و تولید پایدار مواد غذایی است.

به‌رغم ارزش تغذیه‌ای بالای دانهٔ حبوبات، ترکیبات ضدتغذیه‌ای نیز در این محصولات وجود دارد که ضروری است پیش از فرآوری و مصرف، این ترکیبات حذف شوند. آبکشی، تمیز کردن، خیساندن در آب ولرم و پخت اولیه، روش‌هایی هستند که پیش از فرآوری حبوبات به‌کار می‌روند. خیساندن و پختن اصلی‌ترین و مهم‌ترین روش‌ها برای کاهش عوامل ضدتغذیه‌ای حبوبات هستند. خیساندن باعث نرم‌شدن بافت دانهٔ خشک، تسریع فرآیند پخت، افزایش نفوذپذیری بافت و نرم‌شدن دیوارهٔ سلولی دانهٔ حبوبات می‌شود. کاربرد توأم خیساندن در آب ولرم (به‌مدت چندین ساعت) و پخت اولیه دانهٔ حبوبات مؤثرترین روش برای حذف ترکیبات ضدتغذیه‌ای در این محصولات است. زمان و دمای خیساندن و پخت اولیه بسته به نوع محصول متفاوت است.

در حال حاضر، در بین پروتئین‌های حبوبات، پروتئین نخود به‌راحتی و به‌طور گسترده به‌صورت تجاری در دسترس است. به‌منظور شناسایی پروتئین‌هایی با عملکرد مناسب از

منابع حبوبات جایگزین (به غیر از نخود)، به تحقیقات بیشتری نیاز خواهد بود. برای اقتصادی شدن و باصرفه‌شدن استخراج پروتئین حبوبات باید به‌طور همزمان برای محصولات فرعی این فرآیند مانند نشاسته، فیبر و مواد انحلال‌پذیر تولید شده، کاربردهای بیشتری یافت. برای مثال آکوافابا[1] مایعی است چسبناک که پس از پختن حبوبات، به‌ویژه نخود، جدا و دور ریخته می‌شود. در سال های اخیر، به این محصول جانبی توجه زیادی شده‌است و از آن به‌جای تخم‌مرغ برای تهیه و فرمولاسیون فرآورده‌های مختلف مانند شیرینی پفکی (مرنگ[2])، کیک‌های بدون تخم‌مرغ و محصولات مشابه می‌توان استفاده کرد.

پروتئین‌های حبوبات می‌توانند کاربردهای جدید و وسیع‌تری در تولید فرآورده‌های غذایی مختلف داشته باشند، مانند: تهیهٔ شیرخشک مخصوص نوزادان و کودکان، تولید نوشیدنی‌ها، تهیهٔ غلات صبحانه، توسعهٔ محصولات غذایی جدید با استفاده از فناوری‌های نوظهور مانند چاپ سه‌بعدی به‌همراه هوش مصنوعی[3] (AI) و فرآورده‌های غذایی میان‌وعده‌ای. بنابراین مطالعات بیشتری برای توسعه و ارزیابی ترکیبات پروتئینی جدید از حبوبات نیاز خواهد بود.

[1] Aquafaba
[2] Meringue
[3] Artificial Intelligence (AI)

منابع

بدیعی، ف. ۱۳۹۲. بررسی امکان تهیه فرآورده‌های پروتئینی از نخود. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. ۴۴۴۰۷. ۵۶ صفحه.

عامری شهرابی، آ.، بدیعی، ف.، مفتون آزاد، ن.، احسانی، م.ر. و سرمدی‌زاده، د.۱۳۹۰. بررسی خواص عملگر و حرارتی کنسانتره و ایزوله پروتئین نخود و سویا. مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران. ۶، ۳: ۴۹-۵۸.

عامری شهرابی، آ.، بدیعی، ف.، مفتون آزاد، ن. و احسانی، م.ر. ۱۳۹۲. مطالعه ویژگی‌های فیلم خوراکی ایزوله پروتئین نخود با روش پاسخ سطح. مجله علوم و صنایع غذایی. ۳۸، ۱۰: ۸۹-۱۰۱.

Bittner, J.D., Hrach, F.J., Gasiorowski, S.A., Canellopoulus, L.A., and Guicherd, H. 2014. Triboelectric belt separator for beneficiation of fine minerals. Procedia Engineering. 83: 122 – 129

Beniwal, A.S., Singh, J., Kaur, L., Hardacre, A. Meat analogs: protein restructuring during thermomechanical processing. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 20: 1221-1249.

Chen, Y., Zhang, M., Phuhongsung, P. 2021.3D printing of protein-based composite fruit and vegetable gel system. LWT. 141: 110978.

Didinger, C., Thompson, H. 2020. Motivating pulse-centric eating patterns to benefit human and environmental well-being. Nutrients. 12 (11): 3500.

Duodu, K.G., Taylor, J.R.N., Belton, P.S., Hamaker, B.R. 2003. Factors affecting sorghum protein digestibility. Journal of Cereal Science. 38(2): 117-131.

Hoehnel, A. Axel, C. Bez, J., Arendt, E.K., Zannini, E. 2019. Comparative analysis of plant-based high-protein ingredients and their impact on quality of high-protein bread. Journal of Cereal Science. 89: 102816.

Kumar, Y., Basu, S., Goswami, D., Devi, M., Shivhare, U.V., Vishwakarma, R.K. 2022. Anti-nutritional compounds in pulses: Implications and alleviation methods. Legume Science. 4: e111.

Liu, C., Zhao, M., Sun, W., and Ren, J. 2013. Effects of high hydrostatic pressure treatments on haemagglutination activity and structural conformations of phytohemagglutinin from red kidney bean (Phaseolus vulgaris). Food Chemistry. 136 (3-4): 1358-1363.

Lu, Z.H., Donner, E., Liu, Q. 2019. The Effect of various extracting agents on the physicochemical and nutritional properties of pea starch. Stärke. 71: 1900123.

Lu, Z.X., He, J.F., Zhang, Y.C., Bing, D.J. 2020. Composition, physicochemical properties of pea protein and its application in functional foods. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 60: 2593-2605.

Miñarro, B., Albanell, E., Aguilar, N., Guamis, B., Capellas, M. 2012. Effect of legume flours on baking characteristics of gluten-free bread. Journal of Cereal Science. 56 (2): 476-481.

Motamedi, A., Vahdani, M., Baghaei, H., Borghei, M.A. 2015. Considering the physicochemical and sensorial properties of momtaze hamburgers containing lentil and chickpea seed flour. Nutrition and Food Science Research. 2 (3): 55-62.

Nadar, S.S., Rao, P., Rathod, V.K. 2018. Enzyme assisted extraction of biomolecules as an approach to novel extraction technology: A review. Food Research International. 108: 309-330.

Osen, R. Toelstede, S. Wild, F. Eisner, P., Schweiggert-Weisz, U. 2014. High moisture extrusion cooking of pea protein isolates: raw material characteristics, extruder responses, and texture properties. Journal of Food Engineering. 127: 67-74.

Rajpurohit, B., and Li, Y. 2023. Overview on pulse proteins for future foods: ingredient development and novel applications. Journal of Future Foods. 3-4: 340-356.

Roland, W.S.U., Pouvreau, L., Curran, and van de Velde, F. 2017. Flavor aspects of pulse ingredients. Cereal Chemistry. 94: 58-65.

Singh, B., Singh, J.P., Shevkani, K., Singh, N., Kaur, A. 2017. Bioactive constituents in pulses and their health benefits. Journal of Food Science and Technology. 54: 858-870.