

بهره‌وری از ضایعات ساقه مسطح (*Opuntia ficus-indica*) در تولید هیدروکلونیدهای طبیعی و کاربردهای آن در صنایع غذایی

ریحانه البرزی اوانکی^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی صنایع غذایی گرایش زیست فناوری مواد غذایی، دانشگاه صنعتی اصفهان .

r.alborzi@ag.iut.ac.ir

خلاصه

افزایش تقاضا برای هیدروکلونیدهای طبیعی در صنایع غذایی، دارویی و زیستی، توجه به منابع گیاهی کم‌هزینه و پایدار را گسترش داده است. در این میان، ساقه‌های مسطح (کلادودهای) *Opuntia ficus-indica* به‌عنوان زیست‌توده‌ای حاصل از هرس و پسماندهای کشاورزی، به دلیل غنای بالا در موسیلاژ، پلی‌ساکاریدها و فیبرهای غذایی، منبعی ارزشمند برای تولید هیدروکلونیدهای طبیعی محسوب می‌شوند. این ساختارهای گیاهی علاوه بر ترکیبات ساختاری، حاوی ترکیبات زیست فعال نظیر پلی‌فنول‌ها و فلاونوئیدها بوده و قابلیت ایجاد ویژگی‌های عملکردی مهمی از جمله افزایش ویسکوزیته، امولسیون‌سازی، ژل‌سازی و پایداری در سامانه‌های غذایی را دارند. توسعه روش‌های نوین استخراج مانند استخراج به کمک فراصوت و مایکروویو نیز موجب بهبود بازده، حفظ ساختار زیستی و ارتقای کیفیت موسیلاژ استخراج‌شده شده است. همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد ضایعات کلادود علاوه بر کاربردهای غذایی، قابلیت استفاده در حوزه‌های زیست‌محیطی مانند جاذب‌های زیستی برای حذف آلاینده‌ها و بازیافت عناصر غذایی را نیز دارند. در مجموع، کلادودهای *Opuntia ficus-indica* به‌عنوان یک زیست‌توده پایدار، تجدیدپذیر و چندمنظوره، نقش مهمی در توسعه محصولات زیست‌پایه و تحقق رویکرد اقتصاد چرخشی ایفا می‌کنند. با این حال، برای تجاری‌سازی گسترده این منابع، بهینه‌سازی فرایندهای استخراج و ارزیابی جامع اقتصادی - زیست‌محیطی همچنان ضروری است.

کلمات کلیدی: *Opuntia ficus-indica*، ساقه مسطح، موسیلاژ، هیدروکلونید طبیعی، پلی‌ساکارید، ضایعات کشاورزی، اقتصاد چرخشی، استخراج سبز، فراصوت، مایکروویو، کاربردهای غذایی، ارزش‌افزایی زیست‌توده.

۱. مقدمه

افزایش تقاضای جهانی در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی، دارویی و شیمیایی برای هیدروکلونیدهای طبیعی، موجب رشد قابل توجه بازار این ترکیبات در سال‌های اخیر شده است. در این میان، گیاهان آپونتیا به‌عنوان گونه‌هایی سازگار با شرایط اقلیمی نامساعد و مناطق خشک و نیمه‌خشک، از پتانسیل اقتصادی و صنعتی بالایی برخوردار هستند. بخش‌های مختلف این گیاه شامل میوه، کلادود، دانه و گل، دارای ارزش تغذیه‌ای قابل توجه بوده و غنی از ترکیبات زیست فعال و مواد

ارزشمند افزوده هستند. در میان این اجزا، ساقه‌های مسطح *Opuntia ficus-indica* که به‌عنوان زیست‌توده‌ای حاصل از هرس و در نتیجه یک منبع پسماند کشاورزی در باغات تخصصی، به‌ویژه در مناطق مدیترانه‌ای مانند سیسیل، تولید می‌شوند، به دلیل محتوای بالای فیبر غذایی، پلی‌ساکاریدها و موسیلاژ، مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. این ترکیبات همچنین شامل ترکیبات فنولی نظیر کوئرستین، کامفرول و ایزورامنتین بوده که به ارزش عملکردی آن‌ها در صنایع غذایی می‌افزاید.

موسیلاژ استخراج‌شده از کلادودها به‌عنوان یک هتروپلی‌ساکارید با وزن مولکولی بالا، دارای ویژگی‌های عملکردی مهمی از جمله ویسکوزیته مناسب، ظرفیت امولسیون‌کنندگی و قابلیت ژل‌شوندگی است و می‌تواند در تولید هیدروکلوئیدهای طبیعی، فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی و همچنین افزایش ماندگاری محصولات غذایی مورد استفاده قرار گیرد. ازسوی دیگر، بهره‌گیری از روش‌های استخراج مکانیکی با بازده بالا و مصرف انرژی کمتر (تا حدود ۳۰ درصد وزن خشک) امکان استفاده مؤثرتر از این زیست‌توده را فراهم کرده و رویکردی در راستای بهره‌وری منابع، کاهش پسماند و توسعه پایدار در زنجیره تولید مواد غذایی ارائه می‌دهد. در مجموع، استفاده از ساقه‌های مسطح *Opuntia ficus-indica* در چارچوب اقتصاد چرخشی، امکان تبدیل ضایعات کشاورزی به محصولات با ارزش افزوده بالا را فراهم کرده و نقش مهمی در ارتقای بهره‌وری و پایداری سیستم‌های تولید غذایی ایفا می‌کند. با این حال، علی‌رغم انجام مطالعات متعدد درباره کاربردهای موسیلاژ *Opuntia ficus-indica*، ارزیابی جامع پتانسیل کلادودهای ضایعاتی به‌عنوان منبع هیدروکلوئیدهای طبیعی در چارچوب مدیریت یکپارچه پسماند و افزایش بهره‌وری در صنایع غذایی همچنان محدود است [۱] [۲].

۲. معرفی *Opuntia ficus indica* و تولید ضایعات ساقه‌های مسطح آن

آپونتیا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین جنس‌های خانواده کاکتوس‌ها، گیاهی بومی مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود که به دلیل سازگاری بالا با شرایط اقلیمی نامساعد و مکانیسم‌های ویژه ذخیره‌سازی آب (مکانیسم اسید کراسولاسه یا CAM) در بیش از ۳۰ کشور جهان کشت می‌گردد. این گیاه علاوه بر ارزش زیست‌محیطی و اقتصادی، به طور گسترده در سیستم‌های کشاورزی مناطق مدیترانه‌ای، از جمله ایتالیا، مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد [۱] [۲].

در میان اجزای مختلف این گیاه، ساقه‌های مسطح آن به‌عنوان بخش رویشی اصلی، در اثر عملیات مدیریتی باغات از جمله هرس سالانه و همچنین برداشت‌های زراعی و تنک‌سازی تولید می‌شوند. علاوه بر این، بخشی از کلادودها و میوه‌های نارس به دلیل کیفیت نامطلوب یا عدم انطباق با استانداردهای بازار، وارد جریان پسماند کشاورزی می‌شوند. در مناطق تولیدکننده عمده مانند سیسیل در ایتالیا، عملیات هرس در باغات تخصصی *Opuntia ficus-indica* سالانه منجر به تولید حدود ۶ تا ۸ تن در هکتار زیست‌توده کلادودی می‌شود که عمدتاً به‌عنوان ضایعات کشاورزی مدیریت می‌گردد [۱] [۲].

ازسوی دیگر، فراوری این محصول در صنایع غذایی و کشاورزی نیز منجر به تولید پسماندهای جانبی شامل بقایای کلادود و بافت‌های غیرقابل استفاده می‌شود. با توجه به حجم قابل توجه تولید این زیست‌توده و چالش‌های مرتبط با دفع آن، کلادودهای هرس‌شده و ضایعاتی به‌عنوان یک جریان پسماند کشاورزی پایدار و در دسترس مطرح هستند که ظرفیت بالایی برای استفاده مجدد و ارزش‌افزایی دارند [۱] [۲].

۳. ترکیبات شیمیایی، زیست فعال و پتانسیل عملکردی ساقه مسطح آپونتیا

کلادوئیدهای *Opuntia ficus-indica* از نظر ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های عملکردی، یکی از منابع مهم زیست‌پلیمرهای طبیعی محسوب می‌شوند. این اندام‌های فتوسنتزی عمدتاً شامل آب (حدود ۹۵-۸۰٪)، کربوهیدرات‌ها، فیبر غذایی، مواد معدنی و ترکیبات زیست فعال هستند. بخش قابل توجهی از کربوهیدرات‌های ساختاری کلادود به پلی‌ساکاریدهایی از نوع هتروپلی‌ساکاریدها و پکتین‌های کم متوکسیل (low-methoxy pectin) اختصاص دارد که شامل مونوساکاریدهایی نظیر آرابینوز، گالاکتوز، رامنوز، زایلوز و اسیدهای اورونیک هستند. این ترکیب موجب ایجاد ساختارهای ژل‌مانند و رفتار رئولوژیکی ویژه در محلول‌های موسیلاژ می‌گردد.

فیبر غذایی موجود در کلادودها شامل هر دو بخش محلول و نامحلول است. فیبر محلول عمدتاً از موسیلاژ، پکتین و همی سلولز تشکیل شده و نقش کلیدی در افزایش ویسکوزیته، ظرفیت نگهداری آب و بهبود ویژگی‌های عملکردی سامانه‌های غذایی دارد. در مقابل، فیبر نامحلول شامل سلولز و لیگنین بوده که در بهبود عملکرد گوارشی و کاهش جذب چربی‌ها مؤثر گزارش شده است.

موسیلاژ کلادود به‌عنوان یک هتروپلی‌ساکارید با وزن مولکولی بالا، دارای ویژگی‌های رئولوژیکی قابل توجهی نظیر رفتار غیرنیوتنی از نوع (shear-thinning) و قابلیت تشکیل شبکه‌های ژلی پایدار است. حضور گروه‌های هیدروفیلی و بارهای منفی سطحی (ζ -potential) موجب افزایش ظرفیت جذب آب، پایداری امولسیون‌ها و بهبود عملکرد به‌عنوان پایدارکننده و غلظت‌دهنده در سامانه‌های غذایی می‌شود. همچنین، ترکیب موسیلاژ با یون‌های دوظرفیتی مانند Ca^{2+} منجر به تقویت ساختار ژلی از طریق پیوندهای یونی و افزایش ویسکوزیته محلول می‌گردد.

از منظر ترکیبات زیست فعال، کلادودها منبع مهمی از پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها (از جمله کوئرستین، کامفرول و ایزورهمنتین)، کاروتنوئیدها و ویتامین C هستند که نقش مهمی در فعالیت آنتی‌اکسیدانی دارند. این ترکیبات با مهار رادیکال‌های آزاد، پتانسیل کاربردی کلادود را در توسعه محصولات عملکردی و فراسودمند افزایش می‌دهند.

از نظر عملکرد صنعتی، موسیلاژ کلادود قابلیت‌های متعددی شامل امولسیون‌سازی، پایدارسازی، تشکیل فیلم‌های خوراکی، جایگزینی چربی و کپسوله‌سازی ترکیبات زیست فعال را نشان داده است. این ویژگی‌ها ناشی از ساختار پلی‌ساکاریدی، تعاملات پروتئین-پلی‌ساکارید و رفتار رئولوژیکی ویژه آن است. علاوه بر این، قابلیت تشکیل هیدروژل و رفتار شبه‌پلاستیک موجب کاربرد آن در سامانه‌های غذایی مایع و نیمه‌جامد از جمله سس‌ها، نوشیدنی‌ها و محصولات لبنی می‌شود. در مجموع، ترکیب هم‌زمان فیبرهای محلول، پلی‌ساکاریدهای ساختاری و ترکیبات زیست فعال در کلادوئیدهای *Opuntia ficus-indica* این زیست‌توده را به یک منبع ارزشمند برای توسعه هیدروکلوئیدهای طبیعی و مواد عملکردی در صنایع غذایی تبدیل کرده است [۳] [۴] [۵] [۶] [۷] [۸] [۹].

۴. استخراج مهم‌ترین هیدروکلوئید از ضایعات ساقه‌های مسطح آپونتیا

استخراج موسیلاژ از کلادوئیدهای *Opuntia ficus-indica* به‌عنوان یک هیدروکلوئید طبیعی، با استفاده از روش‌های سنتی و نوین انجام می‌شود که هر یک تأثیر متفاوتی بر بازده استخراج و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی محصول نهایی دارند. در روش‌های سنتی، فرایند استخراج عمدتاً مبتنی بر استفاده از آب گرم همراه با عملیات مکانیکی نظیر خردایش، هم‌زدن و پرس است. جداسازی موسیلاژ از فاز نامحلول نیز معمولاً از طریق رسوب‌دهی در حلال‌های الکلی مانند اتانول یا ایزوپروپانول انجام می‌شود. با وجود سادگی و هزینه پایین این روش‌ها، کنترل محدود بر پارامترهای عملیاتی موجب کاهش بازده و ناهمگنی در کیفیت محصول می‌گردد [۷] [۱۰].

در مقابل، روش‌های نوین استخراج از جمله استخراج به کمک فراصوت (Ultrasound-Assisted Extraction, UAE) و استخراج به کمک مایکروویو (Microwave-Assisted Extraction, MAE) به‌عنوان رویکردهای سبز و کارآمد مطرح هستند. این روش‌ها با بهبود انتقال جرم و تخریب ساختار سلولی گیاه، موجب تسهیل آزادسازی پلی‌ساکاریدها و افزایش بازده استخراج می‌شوند. در مطالعات مختلف گزارش شده است که کاربرد UAE می‌تواند بازده استخراج موسیلاژ را تا حدود ۲۲/۸٪ افزایش دهد و منجر به تولید پلی‌ساکاریدهایی با ترکیب مونوساکاریدی شامل آرابینوز، گالاکتوز، گلوکز، مانوز و اسیدهای اورونیک گردد. علاوه بر این، بهبود خواص رئولوژیکی از جمله افزایش ویسکوزیته و یکنواختی محلول نیز در این روش مشاهده شده است. در روش MAE، پارامترهایی نظیر توان، زمان و دما نقش تعیین‌کننده‌ای در راندمان استخراج دارند. افزایش توان مایکروویو از طریق تحریک قطبیت مولکولی و ایجاد گرمایش حجمی، موجب تسهیل خروج ترکیبات پلی‌ساکاریدی از ماتریس گیاهی می‌شود. با این حال، اعمال توان‌های بالا می‌تواند منجر به تخریب ساختاری و افت کیفیت عملکردی موسیلاژ گردد [۱۱] [۱۲].

بازده استخراج به مجموعه‌ای از عوامل وابسته است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به pH، دما، زمان استخراج، نسبت جامد به مایع و سن کلادود اشاره کرد. شرایط اسیدی ملایم معمولاً موجب افزایش استخراج پلی‌ساکاریدهای محلول می‌شود، درحالی‌که افزایش بیش از حد دما و زمان می‌تواند باعث تخریب ساختارهای زیستی گردد. همچنین، بیشترین بازده استخراج در کلادودهای با سن متوسط (حدود ۵۰ روز) گزارش شده است که این موضوع به تغییر نسبت فیبرهای محلول به نامحلول در مراحل رشد گیاه نسبت داده می‌شود. از منظر ویژگی‌های محصول، روش‌های نوین استخراج علاوه بر افزایش بازده، بر بهبود خواص فیزیکوشیمیایی موسیلاژ نیز اثرگذار هستند. به طور مشخص، وزن مولکولی موسیلاژ استخراج‌شده به روش فراصوت در محدوده ۳۶۶-۲۳۰ kDa گزارش شده است. همچنین، به‌کارگیری پیش‌تیمارهایی نظیر حذف پروتئین‌ها و املاح آزاد با استفاده از حلال‌های مناسب، موجب افزایش خلوص، پایداری و قابلیت کاربرد موسیلاژ در صنایع غذایی و دارویی می‌شود. در مجموع، انتخاب روش استخراج باید بر اساس توازن میان بازده، حفظ ساختار زیستی، هزینه و هدف کاربردی انجام گیرد. شواهد موجود نشان می‌دهد که روش‌های نوین مبتنی بر فراصوت و مایکروویو، گزینه‌های کارآمدتری برای تولید موسیلاژ باکیفیت عملکردی بالا از کلادودهای *Opuntia ficus-indica* محسوب می‌شوند [۱۰] [۱۲].

۵. کاربردهای موسیلاژ ساقه مسطح *Opuntia ficus-indica* در صنایع غذایی

موسیلاژ استخراج‌شده از ساقه مسطح (کلادود) *Opuntia ficus-indica* به دلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و عملکردی مطلوب، به‌عنوان یکی از هیدروکلوئیدهای طبیعی با کاربردهای گسترده در صنایع غذایی مطرح است. این پلی‌ساکارید طبیعی با دارا بودن گروه‌های هیدروفیلی متعدد، ظرفیت بالای جذب آب و توانایی تشکیل شبکه‌های ژل‌مانند، نقش مؤثری در بهبود خواص رئولوژیکی و ساختاری سامانه‌های غذایی ایفا می‌کند. از مهم‌ترین کاربردهای این موسیلاژ می‌توان به عملکرد آن به‌عنوان پایدارکننده، غلظت‌دهنده، امولسیفایر و جایگزین چربی اشاره کرد. مطالعات نشان داده‌اند که موسیلاژ آپونتیا قادر است با ایجاد امولسیون‌های پایدار روغن در آب، اندازه قطرات یکنواخت و پایداری فیزیکی قابل‌مقایسه با هیدروکلوئیدهای تجاری نظیر زانتان، گوار و (CMC) فراهم نماید. رفتار رئولوژیکی این سامانه‌ها عمدتاً از نوع (shear-thinning) بوده و حضور موسیلاژ موجب افزایش ویسکوزیته و پایداری ساختاری در شرایط تنش مکانیکی می‌شود. علاوه بر این، موسیلاژ نقش مهمی در بهبود بافت و ویژگی‌های حسی محصولات غذایی دارد. کاربرد آن در سامانه‌هایی نظیر سس‌ها، سوپ‌ها، نوشیدنی‌ها و محصولات لبنی موجب افزایش یکنواختی بافت و بهبود حس دهانی می‌گردد. همچنین، گزارش‌ها حاکی از آن است که این هیدروکلوئید می‌تواند به‌عنوان جایگزین مناسب ژلاتین در محصولات بافت‌دار مانند دسر‌ها و

مارشمالو مورد استفاده قرار گیرد. یکی دیگر از کاربردهای مهم موسیلاژ *Opuntia ficus-indica* استفاده به عنوان جایگزین چربی در فرمولاسیون محصولات کم چرب است. این ترکیب با تشکیل شبکه‌های ژل مانند، امکان تقلید رفتار بافتی چربی را فراهم کرده و در عین حال موجب کاهش محتوای کالری محصول می‌شود. به عنوان نمونه، در فرمولاسیون امولسیون‌های مدل مایونز، استفاده از موسیلاژ منجر به ایجاد ساختار پایدار با خواص رئولوژیکی مشابه محصول مرجع شده است. در حوزه بسته‌بندی و سیستم‌های زیست‌پایه نیز موسیلاژ ساقه مسطح آپونتیا قابلیت تولید فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی را داراست. این فیلم‌ها با کاهش نفوذپذیری گازها و رطوبت، کنترل اکسیداسیون و مهار رشد میکروبی، موجب افزایش ماندگاری محصولات غذایی تازه می‌شوند. همچنین، ترکیب این موسیلاژ با ترکیبات فعال زیستی مانند اسانس‌ها یا آنتی‌اکسیدان‌ها؛ می‌تواند عملکرد ضد میکروبی و حفاظتی آن را بهبود بخشد. در مجموع، موسیلاژ کلادود *Opuntia ficus-indica* به عنوان یک هیدروکلوئید طبیعی، زیست‌سازگار و پایدار، پتانسیل بالایی برای جایگزینی مواد سنتزی در صنایع غذایی داشته و نقش مهمی در توسعه نسل جدید محصولات غذایی عملکردی و زیست‌پایه ایفا می‌کند [۷] [۱۳] [۱۴] [۱۵] [۱۶] [۱۷] [۲] [۱۸] [۱۹] [۲۰] [۲۱] [۲۲] [۲۳] [۲۴] [۲۵] [۲۶] [۳].

۶. بهره‌وری و ارزش‌افزایی از ضایعات ساقه مسطح (*Opuntia ficus-indica*)

ضایعات حاصل از کلادودهای *Opuntia ficus-indica*، به‌ویژه در اثر عملیات هرس، پوست‌گیری و فراوری صنعتی، یکی از جریان‌های قابل توجه زیست‌توده کشاورزی محسوب می‌شوند. این مواد عمدتاً شامل بافت‌های فیبری، لایه‌های اپیدرمی و بقایای پس از استخراج موسیلاژ هستند که در بسیاری از موارد بدون ارزش افزوده خاصی دفع می‌شوند، در حالی که دارای پتانسیل بالایی برای تبدیل به مواد اولیه با کاربرد صنعتی هستند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که این زیست‌توده در چارچوب رویکرد اقتصاد چرخشی (Circular Economy) قابلیت تبدیل به محصولات با ارزش افزوده بالا را دارد. از جمله مسیرهای ارزش‌افزایی می‌توان به تولید بیوپلیمرها، مواد زیست‌تجزیه‌پذیر، فیبرهای عملکردی و همچنین استفاده مستقیم به عنوان جاذب‌های زیستی (biosorbents) برای حذف آلاینده‌ها از محیط‌های آبی اشاره کرد. به عنوان نمونه، گزارش شده است که پسماندهای هرس *Opuntia ficus-indica* پس از آسیاب و اصلاح شیمیایی از جمله بارگذاری با یون‌های دوظرفیتی کلسیم و آهن، توانایی قابل توجهی در جذب فسفر از محلول‌های آبی نشان می‌دهند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ضایعات کلادود نه تنها یک منبع زیستی خام، بلکه یک بستر فعال برای کاربردهای محیط‌زیستی و بازیافت عناصر غذایی مانند فسفر محسوب می‌شوند. از منظر اقتصادی، بهره‌برداری از این ضایعات می‌تواند به کاهش هزینه تأمین مواد اولیه در صنایع غذایی و زیستی کمک کند. جایگزینی بخشی از هیدروکلوئیدها و مواد عملکردی سنتزی با مشتقات کلادود، موجب کاهش وابستگی به منابع صنعتی گران‌قیمت و افزایش خودکفایی در زنجیره تأمین مواد اولیه می‌گردد. این موضوع به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که گیاه آپونتیا به صورت گسترده رشد می‌کند، از اهمیت بیشتری برخوردار است. از دیدگاه زیست‌محیطی، استفاده مجدد از ضایعات کلادود نقش مؤثری در کاهش حجم پسماندهای کشاورزی و کاهش اثرات ناشی از دفع غیر کنترل‌شده آن‌ها دارد. این رویکرد با اصول توسعه پایدار (Sustainability) و سیستم‌های غذایی پایدار همسو بوده و در راستای افزایش استفاده از مواد طبیعی و کاهش افزودنی‌های سنتزی (Clean Label Trend) قرار می‌گیرد. در مجموع، تبدیل ضایعات کلادود *Opuntia ficus-indica* به محصولات با ارزش افزوده، نه تنها یک راهکار مؤثر در مدیریت پسماندهای کشاورزی محسوب می‌شود، بلکه امکان توسعه مسیرهای نوین در حوزه مواد زیستی، جذب آلاینده‌ها و تولید هیدروکلوئیدهای طبیعی را فراهم کرده و به بهبود بهره‌وری منابع در زنجیره صنایع غذایی و زیستی کمک می‌کند [۲۷] [۷].

۷. نتیجه‌گیری

کلادودهای *Opuntia ficus-indica* به‌عنوان یک زیست‌توده کشاورزی در دسترس و کم‌هزینه، از نظر ترکیب شیمیایی، ویژگی‌های عملکردی و قابلیت‌های فرآیندی، یک منبع چندمنظوره برای تولید هیدروکلوئیدهای طبیعی و مواد زیستی ارزشمند محسوب می‌شوند. شواهد موجود نشان می‌دهد که این ساختارهای گیاهی، به‌واسطه غنای بالا در پلی‌ساکاریدها (به‌ویژه موسیلاژ و پکتین‌های با درجه متوکسیلاسون پایین)، فیبرهای محلول و نامحلول، و ترکیبات زیست‌فعال، دارای پتانسیل قابل توجهی در بهبود ویژگی‌های رئولوژیکی، امولسیون‌سازی، ژل‌سازی و پایدارسازی سامانه‌های غذایی هستند.

ازسوی دیگر، توسعه روش‌های نوین استخراج نظیر استخراج به کمک فراصوت و مایکروویو، امکان بهره‌برداری کارآمدتر از این زیست‌توده را فراهم کرده و با افزایش بازده، کاهش زمان فرایند و بهبود خواص عملکردی، مسیر استفاده صنعتی از موسیلاژ را تسهیل نموده است. این پیشرفت‌ها نقش مهمی در ارتقای ارزش افزوده کلادودها و کاهش اتلاف منابع ایفا می‌کنند. در سطح کاربردی، موسیلاژ کلادودها قابلیت جایگزینی با هیدروکلوئیدهای سنتزی در صنایع غذایی را داشته و می‌تواند در توسعه محصولات عملکردی، کم‌چرب، زیست‌پایه و دارای برچسب پاک (Clean Label) مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، قابلیت استفاده از ضایعات کلادود در حوزه‌هایی نظیر جاذب‌های زیستی و بازیافت عناصر غذایی، نشان‌دهنده ظرفیت این ماده در فراتر رفتن از کاربردهای صرفاً غذایی و ورود به حوزه‌های محیط‌زیستی و صنعتی است.

در مجموع، نتایج این مطالعه بر نقش کلادودهای *Opuntia ficus-indica* به‌عنوان یک منبع پایدار، تجدیدپذیر و چندکاربردی تأکید دارد. با این حال، برای تحقق کامل پتانسیل صنعتی و تجاری این زیست‌توده، انجام تحقیقات بیشتر در زمینه استانداردسازی فرایندهای استخراج، بهینه‌سازی عملکرد، و ارزیابی جامع اقتصادی - زیست‌محیطی ضروری است. چنین رویکردی می‌تواند زمینه‌ساز توسعه سیستم‌های تولید پایدار و مبتنی بر اقتصاد چرخشی در صنایع غذایی و زیستی باشد.

۸. مراجع

1. Silvia Procacci¹, E.B.-Q., Giovambattista Platamone³, Oliviero Maccioni¹, Vania Lo Vecchio³, Vincenzo Morreale³, Chiara Alisi⁴, Roberto Balducchi¹, Loretta Bacchetta¹, *Opuntia ficus-indica* Pruning Waste Recycling: Recovery and Characterization of Mucilage from Cladodes. Natural Resources, 2021.
2. Rodrigues, C., et al., *Opuntia spp.: An Overview of the Bioactive Profile and Food Applications of This Versatile Crop Adapted to Arid Lands*. Foods, 2023. **12**(7): p. 1465.
3. Salehi, E., et al., *Opuntia ficus-indica* Mucilage, in *Emerging Natural Hydrocolloids*. 2019. p. 425–449.
4. Bayar, N., M. Kriaa, and R. Kammoun, *Extraction and characterization of three polysaccharides extracted from Opuntia ficus indica cladodes*. International Journal of Biological Macromolecules, 2016. **92**: p. 441–450.



5. Contreras-Padilla, M., et al., *Physicochemical and rheological characterization of Opuntia ficus mucilage at three different maturity stages of cladode*. European Polymer Journal, 2016. **78**: p. 226–234.
6. Torregrossa, F., et al., *Rheological and Physical Properties of Mucilage Hydrogels from Cladodes of Opuntia ficus-indica: Comparative Study with Pectin*. Gels, 2025. **11**(7): p. 556.
7. Mukaila, Y.O., J.O. Adeyemi, and O.A. Fawole, *Towards Sustainable Biopolymer Innovation: A Review of Opuntia ficus-indica Mucilage*. Processes, 2025. **13**(12): p. 3837.
8. Coqueiro, J.M., et al., *Techno-functional properties of Cactaceae polysaccharides for food packaging application: A review*. International Journal of Biological Macromolecules, 2025. **312**: p. 144099.
9. Yılmaz, T., *CHARACTERIZATION AND PROCESS OPTIMIZATION OF ULTRASOUND EXTRACTED POLYSACCHARIDES FROM THE “OPUNTIA FICUS INDICA” CLADODES*. Journal of Scientific Reports-A, 2020(045): p. 126–142.
10. Hu, X., et al., *Ultrasonic-assisted hot water extraction of polysaccharides from opuntia dillenii: process optimization, derivatization, physicochemical properties and biological activities*. Microchemical Journal, 2026. **223**: p. 117336.
11. Mannai, F., et al., *Comparative study of conventional and combined ultrasound-assisted methods on the quality of mucilage extracted from Opuntia ficus-indica cladodes*. Industrial Crops and Products, 2024. **214**: p. 118566.
12. Felkai-Haddache, L., et al., *Microwave optimization of mucilage extraction from Opuntia ficus indica Cladodes*. International Journal of Biological Macromolecules, 2016. **84**: p. 24–30.
13. Abohlek, M.W., et al., *Protective biological effects of pan bread fortified with opuntia ficus-indica cladodes against hepatic toxicity in rats*. Discover Food, 2026. **6**(1).
14. Tosif, M.M., et al., *Application of mucilage-based functional and clean-label food ingredients as vegan fat replacers in different food products*. Current Opinion in Food Science, 2025. **62**: p. 101275.
15. Monteiro, S.S., et al., *Fermentation of mucilage from Opuntia cochenillifera cladodes with Lactobacillus gasseri: Modification of physicochemical and techno-functional properties*. Food Bioscience, 2025. **68**: p. 106424.
16. De Araújo, J.M.D., et al., *Impact of different prebiotics on ultrasound-treated nopal cladode (Opuntia dillenii) beverages*. Food Chemistry, 2025. **464**: p. 141721.
17. Soltani, M., et al., *Emulsifying properties of biopolymer extracts from Opuntia ficus indica cladodes*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024. **683**: p. 133005.



18. Elhleli, H., et al., *The use of mucilage extracted from Opuntia ficus indica as microencapsulating shell*. Journal of the Serbian Chemical Society, 2021. **86**(1): p. 25–38.
19. Gheribi, R. and K. Khwaldia, *Cactus Mucilage for Food Packaging Applications*. Coatings, 2019. **9**(10): p. 655.
20. Quinzio, C., et al., *Stability and rheology properties of oil-in-water emulsions prepared with mucilage extracted from Opuntia ficus-indica (L). Miller*. Food Hydrocolloids, 2018. **84**: p. 154–165.
21. Otálora, M.C., et al., *Microencapsulation of betalains obtained from cactus fruit (Opuntia ficus-indica) by spray drying using cactus cladode mucilage and maltodextrin as encapsulating agents*. Food Chemistry, 2015. **187**: p. 174–181.
22. Shinga, M.H., O.A. Fawole, and S. Pareek, *Opuntia ficus-indica mucilage coating prolongs the shelf life of bananas (Musa spp.) by enhancing antioxidant activity and modulating antioxidant enzyme systems*. Food Bioscience, 2025. **65**: p. 106039.
23. Dick, M., et al., *Mucilage and cladode flour from cactus (Opuntia monacantha) as alternative ingredients in gluten-free crackers*. Food Chemistry, 2020. **314**: p. 126178.
24. Cruz-Rubio, J.M., et al., *The Effect of Cladode Drying Techniques on the Prebiotic Potential and Molecular Characteristics of the Mucilage Extracted from Opuntia ficus-indica and Opuntia joconostle*. Scientia Pharmaceutica, 2020. **88**(4): p. 43.
25. Otálora, M.C., A. Wilches-Torres, and J.A. Gómez Castaño, *Spray-Drying Microencapsulation of Pink Guava (Psidium guajava) Carotenoids Using Mucilage from Opuntia ficus-indica Cladodes and Aloe Vera Leaves as Encapsulating Materials*. Polymers, 2022. **14**(2): p. 310.
26. Medina-Torres, L., et al., *Microencapsulation by spray drying of gallic acid with nopal mucilage (Opuntia ficus indica)*. LWT - Food Science and Technology, 2013. **50**(2): p. 642–650.
27. Auteri, N., R. Scalenghe, and F. Saiano, *Phosphorus recovery from agricultural waste via cactus pear biomass*. Heliyon, 2023. **9**(9): p. e19996.