مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی_پژوهشی

درون‌پوشانی اسانس بیدمشک (*Salix aegyptiaca L.*) با آلژینات سدیم و پروتئین آب پنیر: خصوصیات، رهایش کنترل شده و مدل‌سازی ریاضی

محسن زندی[1*]، علی گنجلو[2]، ماندانا بی مکر[2]

[1] استادیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

[2] دانشیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۶

کلمات کلیدی:

ریزپوشش،

اسانس بیدمشک،

آلژینات سدیم،

رهایش کنترل‌شده،

مدل‌های سینتیکی.

DOI: 10.22034/FSCT.19.125.121

DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.6.5

* مسئول مکاتبات:

Zandi@znu.ac.ir

چکیده

درون‌پوشانی اسانس بیدمشک می‌تواند از آن‌در برابر عوامل محیطی مانند نور، اکسیژن و دما محافظت کند. در پژوهش حاضر، تهیه ریز پوشش آلژینات سدیم-پروتئین آب پنیر حاوی اسانس بیدمشک با روش امولسیون‌سازی- ژلاسیون داخلی با راندمان درون‌پوشانی برابر ۸۷/۳۱ درصد انجام شد. خصوصیات ریزپوشش‌های حاصل با استفاده از تجزیه‌وتحلیل اندازه ذرات، پتانسیل زتا و میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص گردید. راندمان درون‌پوشانی، متورم شدن و رهایش اسانس در شرایط شبیه‌ساز غذاهای چرب و اسیدی مورد بررسی قرار گرفت.در شرایط شبیه‌ساز غذاهای چرب و اسیدی، ریزپوشش دارای بار منفی با پتانسیل زتا به ترتیب ۴۲/۲۵ و ۳۸/۱۱ میلی‌ولت است. بیشترین اثر متقابل الکترواستاتیکی در نزدیکی pH=۳ رخ داد که در آن بار تقریباً به خنثی نزدیک می‌شود، که نشان دهندهٔ تعادل بین بارهای پلیمر است. ریزپوشش‌ها در شرایط شبیه‌ساز مواد غذایی اسیدی منقبض (pH=۳) و در شرایط شبیه‌ساز مواد غذایی چرب منبسط شدند (pH=۷). نتایج انتشار نشان داد که آزاد شدن اسانس بیدمشک از ریزپوشش در هر دو شرایط به صورتکنترل‌شده با سرعت آهسته رخ می‌دهد. بهترین برازش بر داده‌های رهایش اسانس توسط مدل هایگسون-کروول (R^2 =۰/۹۹۳) برای شرایط شبیه‌ساز غذای اسیدی و R^2=۰/۹۹۵ برای شرایط شبیه‌ساز غذای چرب) انجام گردید که نشان دهندهٔ تغییر قطر ریزپوشش به‌عنوان تابعی از زمان می‌باشد. مدل‌سازی ریاضی سینتیک رهایش نشان داد که انتشار از ریزپوشش حاوی اسانس بیدمشک از سازوکارهای انتشار فیک و فرسایش/ تخریب پیروی می‌کند.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-06-02]

[DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.6.5]

[DOI: 10.22034/FSCT.19.125.121]

۱-مقدمه

اسانس، مایعات فرار معطر طبیعی هستند که از قسمت‌های مختلف گیاهان مانند گل‌ها، جوانه‌ها، دانه‌ها، برگ‌ها، ساقه‌ها و پوست استخراج می‌شوند. ترکیب و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اسانس‌ها تحت تأثیر نوع گیاه، بخشی از گیاه که اسانس‌گیری انجام می‌شود، منشا جغرافیایی، زمان برداشت، مرحله رشد، سن گیاهان و روش استخراج قرار دارد[۱]. این اجزاء فرار به‌راحتی در معرض نور و تحت تأثیر گرما تجزیه می‌شوند و درون‌پوشانی آنها با هدف محافظت از خصوصیات عملکردی و همچنین تعدیل انتشار صورت می‌گیرد [۲]. درون‌پوشانی فرآیندی است که در آن ماده زیست‌فعال (جامد، مایع یا گاز) در داخل ماده دیگر (ماده دیواری) محصور می‌شود تا از آن در برابر شرایط نامساعد محیطی محافظت شود؛ در نتیجه ماندگاری و انتشار کنترل‌شده ماده زیست‌فعال در ریزپوشش افزایش می‌یابد [۳-۵و ۱]. ریزپوشش‌ها ذرات میکروسکوپی کروی با اندازه در حد نانومتر تا میکرومتر هستند کهاز یک هسته و دیواره تشکیل شده است. روش‌های مختلفی شامل امولسیون‌سازی-تبخیرحلال (کاربرد آزمایشگاهی)، خشک‌کن پاششی، امولسیون‌سازی-انتشار حلال، اتصال عرضی امولسیون، ژلاسیون داخلی، کواسرواسیون (هم‌انباشت) و غیره برای تهیه ریزپوشش‌ها وجود دارد[۲و ٦].

اخیراً تحقیقات مختلفی برای محصورسازی اسانس‌و ایجاد ریزپوشش‌ها انجام پذیرفته است.آلژینات سدیماز بین بیوپلیمرهای بی‌شماری که برای تهیه ریزپوشش‌ها استفاده می‌شود، به‌دلیل سازگاری زیستی، غیرسمی بودن، پایداری شیمیایی، حساسیت به pH، ظرفیت ایجاد ژل قوی در آب و گازها و عملکرد بیولوژیکی بسیار مورد توجه است. آلژیناتیک پلی‌ساکارید طبیعی است که از مخلوط اسیدهای پلی‌اورونیک (متشکل از دی‌مانورونیک اسید و ال-گلورونیک اسید) تشکیل می‌شود و توانایی ایجاد ژل‌ها را با تعامل با کاتیون‌های دو ظرفیتی (مثل کلرید کلسیم) دارد. این بیوپلیمر به‌طور گسترده و با موفقیت در درون‌پوشانی مولکول‌های زیست‌فعال از جمله داروها، ویتامین‌ها، عطر و طعم و اسانس مورد استفاده قرار گرفته است(۵, ۷-۱۰).با این‌حال، آلژینات ظرفیت امولسیون‌کنندگی ضعیفی دارد و بنابراین از ترکیبات مخلوط آلژینات و سایر بیوپلیمرها برای تنظیم رفتار رهایشی آن و نیز افزایش عملکرد ریزپوشش بر پایه آلژینات استفاده شده است[۱۱]. مشخص شده است که پروتئین آب پنیریک ترکیب مناسب برای استفاده به‌عنوان دیواره پوشش است. پروتئین‌های آب پنیر که به‌عنوان پروتئین‌های سرم شیرشناخته می‌شوند، محصول جانبی از صنایع لبنی است که به‌دلیل ارزش غذایی بالا و توانایی ایجاد ژل، تشکیل فیلم، امولسیون‌سازی، اتصال به آب و تشکیل کف به‌طور گسترده‌ای در محصولات غذایی استفاده می‌شود. پروتئین آب پنیر ماده دیواری مناسبی برای درون‌پوشانی است. توانایی پروتئین‌های آب پنیر در تشکیل ژل و ریزپوشش‌ها بدون استفاده از عملیات حرارتی شدید (ژلاسیون سرد) و هرگونه مواد شیمیایی آنها را به ماده‌ای جذاب برای کاربردهای کنترل‌شده در سیستم‌های غذایی تبدیل می‌کند [۱۲و ۱۳، ۸].

روش ژلاسیون سرد یک روش جایگزینشبکه ژل است که مبتنی بر افزودن کاتیون‌ها به یک سوسپانسیون پروتئین از قبل گرم شده است.این روش به یک مرحله گرم شدن نیاز دارد که طی آن پروتئین‌های آب پنیردناتوره و از حالت طبیعی خارج می‌شوند و ساختار آن باز می‌گردد که در ادامه سرد کردن محلول و افزودن یون‌های کلسیم منجر به تشکیل شبکه از طریق فعل‌وانفعالات با کلسیم سبب ایجادتوده‌های محلول پلیمری می‌شود. از تکنیک امولسیون‌سازی-ژلاسیون داخلیمی‌توان برای تولید ریزپوشش استفاده شود[١٤و ۱۳، ۸].

بیدمشک[1] از خانواده *سالیانسه*[2] و از راسته مالفی‌جیالس[3] است که شامل حدود ۵۵ جنس و بیش از ۱۰۰۰ گونه است. گونه‌های تیره سالیکس درختان برگ‌ریز و درختچه‌هایی با برگ‌های ساده و منقوش است که به‌طور متناوب روی ساقه‌های چوبی قرار گرفته‌اند. گونه‌های بیدمشک احتمالاً از خاورمیانه خصوصاً مصر، ترکیه، ایران، عراق، ارمنستان، ترکمنستان و افغانستان سرچشمه می‌گیرند[۱۵-۱۷]. بیدمشک یک درختچه برگ‌ریز با شاخه‌های ضخیم به رنگ قرمز مایل به ارغوانیاست که ارتفاع آن به ٤ تا ۵ متر می‌رسد و گل آذین آن دم‌گربه‌ای معطر و خاکستریمی‌باشد. از

1. Pussy willow
2. *Salicaceae*
3. *Malpighiales*

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-06-02]
[DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.6.5]
[DOI: 10.22034/FSCT.19.125.121]

اسانس و عرقگل آذین نر گیاه مدت هاست که در طب عامیانه ایران به عنوان تقویت‌کننده قلب، درمان کم‌خونی و سرگیجه و همچنین افزودنی معطر در نوشیدنی‌ها استفاده می‌شود[۱۸و ۱۵]. از جوشانده برگ یا پوست آن نیزبرای دردهای روماتیسمی و به‌عنوان ضدعفونی‌کننده و داروی ضدکرم (کرم روده) استفاده می‌شود. علاوه بر این، از بیدمشک به‌عنوان ملین، آرام‌بخش، خواب‌آور، مسکن و محافظت گوارشی استفاده می‌گردد [۱۷و ۱۵]. خانواده سالیکس به دلیل داشتن اسید سالیسیلیک و اسید استیل سالیسیلیک اثرات ضدالتهابی دارند. خواص ضدالتهابی و ضددردی عصاره‌های خانواده سالیکس ممکن است به مواد شیمیایی آن از جمله سالیسین[۴]، میریستین[۵]، کامفرول[۶]، کوئرستین[۷]، روتین[۸] و لوتئولین[۹] مربوط باشد. محتوای قابل توجه‌ی میریستین، روتین و کاتچین در بیدمشک می‌تواند به عملکرد ضدالتهابی آن کمک کند. اسانس بیدمشک تب‌بر است و به اثر آرام‌بخشی بر قلب و اثر ضدفشار خون در بین مردم ایران مشهور است[۱۸،۱۷و ۱۵]. هدف از پژوهش حاضر درون‌پوشانی اسانس بیدمشک در پوشش آلژینات سدیم-پروتئین آب پنیر و ارزیابی خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و رهایش از آن می‌باشد. در این مطالعه مشخصات انتشار اسانس محصورشده در ریزپوشش طی نگهداری در محیط شبیه‌سازی شده غذایی (چرب و اسیدی) با روش اسپکتروفتومتری اندازه‌گیری شد و مدل‌های سینتیکی بر داده‌های تجربی انتشار برازش شدند.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-مواد گیاهی و شیمیایی

در این پژوهش، کلرید کلسیم (سیگما آلدریچ، آلمان، درجه خلوص بالاتر از ۹۳ درصد)، کلرید سدیم (فلوکا، سوئیس، درجه خلوص ۹۹/۵ درصد)، توئین ۸۰ (سمچون، کره‌جنوبی)، آلژینات سدیم (سیگما آلدریچ، آلمان) و آب دیونیزه با مقاومت ۱۸/۲ مگا اهم در سانتی‌متر (سیگما آلدریچ، آلمان) مورد استفاده قرار گرفت.کنسانتره پروتئین آب پنیر تجاری (۸۰ درصد) نیز از شرکت به‌تام پودر (ایران)، اسید کلریدریک و اتانول هم از شرکت دکتر مجللی (ایران) تهیه گردید. سایر مواد شیمیایی نیز دارای درجه ازمایشگاهی بودندکه از شرکت سیگما آلدریچ (آلمان) خریداری گردید. گل آذین دم‌گربه‌ای[۱۰] بیدمشک (*Salix aegyptiaca L.*) نیز در فصل بهار از باغات شهرستان ارومیه (استان آذربایجان غربی) برداشت گردید و پس از خشک نمودن در شرایط سایه‌خشک تا زمان مصرف در شرایط تاریک و در دمای زیر ۱۵ درجه سلسیوس نگهداری گردید.

۲-۲-استخراج اسانس

برای تهیه اسانس مورد نیاز از روش تقطیر آبی استفاده گردید. به‌این منظور گل آذین تازه بیدمشک به همراه آب مقطر به نسبت ۱ به ۵ در محفظه سیستم تقطیر آبی و در دمای جوش به مدت ۱۸۰ دقیقه قرار گرفت تا اسانس آن استخراج گردد. اسانس استخراج‌شده با کمک سولفات سدیم بی‌آب، آب‌زدایی گردید. برای جلوگیری از ایجاد کف مقدار ۰/۰۲ درصد (۰/۳ گرم) عامل ضد کف نیز به مخلوط اضافه گردید.

۲-۳-درون‌پوشانی اسانس بیدمشک

برای درون‌پوشانی اسانس بیدمشک از ریزپوشش‌های آلژینات سدیم- پروتئین آب پنیر استفاده گردید، که این ریزپوشش‌ها با روش امولسیون‌سازی- ژلاسیون داخلی ارئه شده توسط زندی و همکاران [۸] با اصلاحات تهیه گردید. برای این منظور ابتدا محلول آلژینات سدیم ۲ درصد (وزنی/حجمی) و پروتئین آب پنیر ۸ درصد (وزنی/حجمی) آماده گردید؛ برای تهیه محلول آب پنیر، حرارت‌دهی در دمای ۸۰ درجه سلسیوس برای دناتوره شدن پروتئین صورت پذیرفت و پس از آب‌گیری هر دو محلول برای مدت یک شب، محلول آلژینات سدیم و پروتئین آب پنیر به نسبت ۱ به ۲ با یکدیگر مخلوط شدند. سپس اسانس بیدمشک به محلول نهایی آلژینات سدیم-پروتئین آب‌پنیر با نسبت وزن ۱ به۱۰ اضافه شد و با استفاده از هموژنایزر دوربالا (MTOPS-SR30- کره جنوبی) با سرعت ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه و به مدت ۳ دقیقه امولسیون ایجاد گردید. امولسیون حاصل از طریق سرنگ به آرامی به محلول کلرید کلسیم (۰/۱ مول در لیتر) اضافه گردید

4. Salicin
5. Myricetin
6. Kaempferol
7. Quercetin
8. Rutin
9. Luteolin

10. Catkins

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-06-02]
[DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.6.5]
[DOI: 10.22034/FSCT.19.125.121]

تا ریزپوشش‌های آلژینات-پروتئین حاوی اسانس بیدمشک شکل گیرد. ریزپوشش‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در محلول کلرید کلسیم باقی ماندند تا سفت شوند؛ در نهایت ریزپوشش‌ها پس از جداسازی توسط قیف دکانتور و شسشو با محلول کلرید کلسیم ۰/۰۵ مولار، با استفاده از فیلتر ۰/٦٥ نیتروسلولزی فیلتر شدند. ریزپوشش‌های حاصل توزین و به نسبت ۱ به ۹ در آب دیونیزه پخش شدند.

۲-٤-راندمان درون‌پوشانی

به منظور ارزیابی راندمان درون‌پوشانی، رهایش اسانس بیدمشک با کمک دستگاه طیف‌سنج ماورا بنفش-نور مرئی (Specord 250, Jena, Germany) تعیین شد. ۱ میلی‌لیتراز ریزپوشش در ۹ میلی‌لیترهگزان پراکنده شد و پس ازاعمال ۵ دقیقه فراصوت (شرایط شدید)، نمونه فیلتر شد و در نهایت میزان جذب نمونه‌ها در طول موج برابر ۲۷۸ نانومتر اندازه‌گیری گردید. راندمان درون‌پوشانی (%EE) با کمکوزن اولیه اسانس مورد استفاده (M_0) و اسانس درون‌پوشانی‌شده (M) مطابق رابطه۱ محاسبه گردید [۵]:

(رابطه ۱)

$$\%EE= M / M_0 \times 100$$

۲-۵-مورفولوژی ریزپوشش‌ها

برای حصول اطمینان از تشکیل ریزپوشش‌ها، بررسی مورفولوژی آن‌ها و نیز تعیین ضخامت پوسته از میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدلLeo1450VP) استفاده گردید؛ برای این منظور، پس از خشک‌کردن ریزپوشش‌ها به مدت یک شب در معرض هوا، پودر حاصل روی صفحه دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی ثبیت گردید؛ قبل از قرارگیری نمونه در این سیستم، آماده‌سازی نمونه شامل پوشش‌دهی ریزپوشش‌ها توسط یک لایه نازک پلاتین (٤۰ میلی‌آمپر، ٦۰ ثانیه، ۱۰-۳ میلی بار و در محیط آرگون) صورت پذیرفت و نمونه پوشش‌دار به داخل دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی که ولتاژ شتاب‌دهی الکترون‌ها در آن ۱۵ کیلوولت بود منتقل و تصویر مورد نظر گرفته شد[۸].

۲-٦-اندازه و پایداری ریزپوشش‌ها

اندازه‌گیری میانگین قطر هیدرودینامیکی و پایداری ریزپوشش‌ها با استفاده از دستگاه تجزیه و تحلیل اندازه و پتانسیل زتا (Malvern مدل ZEN3600، انگلستان) انجام پذیرفت. قطر ریزپوشش به‌عنوان میانگین سه قرائت گزارش شدند[۷].

۲-۷-آزمون متورم شدن

مطالعات متورم شدن با استفاده از ریزپوشش‌های مرطوب (بلافاصله پس از آماده سازی) انجام شد. هیدروژل‌های مرطوب آلژینات سدیم-پروتئین آب پنیر همانند مطالعات رهایش در شرایط مختلف (شبیه‌ساز غذای چرب و اسیدی) قرار گرفت وپس از ۱ ساعت، ریزپوشش‌ها با استفاده از صافی از جنساستیل ضد زنگ از محیط جدا شد و جرم آنها اندازه‌گیری شد. تغییر وزن ریزپوشش‌ها بر حسب درصد با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد[۱۱]:

(رابطه ۲)

$$\text{تغییرات جرم٪} = \frac{\text{جرم اولیه} - \text{جرم نهایی}}{\text{جرم اولیه}} \times ۱۰۰$$

۲-۸-رهایش اسانس

رهایش اسانس بیدمشک از ریزپوشش‌های آلژینات سدیم-پروتئین آب پنیر به موادغذایی با استفاده از دوشبیه‌ساز غذایی شامل شبیه‌ساز مواد غذایی اسیدی توسط اسید استیک ۳ درصد (حجمی/حجمی، شبیه‌سازمواد غذایی اسیدی) و شبیه‌ساز مواد غذایی چرب متوسط تا زیاد توسط اتانول ۸۵ درصد (حجمی/حجمی) صورت گرفت. ریزپوشش‌های مرطوبآلژینات سدیم-پروتئین آب پنیر حاوی اسانس بیدمشک (۳ گرم) در ویال شیشه‌ای حاوی ۵۰ میلی‌لیترشبیه‌ساز قرار داده شد و به صورت دوره‌ای و در فواصل زمانی مشخص با استفاده از سرنگ مقدار ۱ میلی‌لیتر از محلول برداشته شد وازفیلترسرنگی ۰/۲۲ میکرون عبور داده شد و میزان جذب آن توسط دستگاه طیف‌سنج ماورا بنفش-نور مرئی (Specord 250, Jena, Germany) در طول موج برابر۲۷۸ نانومتر به‌دست آمد. منحنی استاندارد با استفاده از جذب غلظت‌های مختلف مشخص ازاسانس بیدمشک در اتانول ۸۵ درصد و اسید استیک ۳ درصد در طول موج برابر۲۷۸ نانومتر تهیه شد. پس از هر اندازه‌گیری، محلول‌های نمونه‌گیری‌شده دوباره به محلول‌های نمونه اولیه اضافه شدند. آزمایش‌های انتشار در هر تیمار برای تأیید قابلیت تکرارپذیری در چهار ویال شیشه‌ای مختلف انجام گردید.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-06-02]
[DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.6.5]
[DOI: 10.22034/FSCT.19.125.121]

۲-۹-پیش‌بینی سینتیک و سرعت رهایش

سازوکار رهایش اسانس بیدمشک به‌صورت کنترل‌شده‌از ریزپوشش‌های آلژینات سدیم-پروتئین آب پنیر (چه به‌صورت انتشار و چه به‌صورت تخریب)، از طریق مدل‌های سینتیکی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از مدل درجه صفر[11] (رابطه ۳) [۱۹]، مدل درجه یک[12] (رابطه ٤) [۲۰و ۲۱]، مدل کوپچا[13] (رابطه ٥) [۲۲]، مدل کورسمیر-پپاس[14] یا رایتر- پپاس[15] (رابطه ٦) (۲۳, ۲٤)، مدل هیگوچی[16] (رابطه ۷)، مدل ویبال[17] (رابطه ۸) و مدل هایگسون-کروول[18] [۲] (رابطه ۹) برای برازش داده‌های انتشار تجربی اسانس بیدمشک استفاده گردید:

$$M_t = M_0 + k_0 \times t$$ (رابطه ۳)

$$logM_t = logM_0 + \frac{(k_1 \times t)}{2.303}$$ (رابطه ٤)

$$M_t = A \times t^{0.5} + B \times t$$ (رابطه ٥)

$$\frac{M_t}{M_\infty} = k_{KP} \times t^n$$ (رابطه ٦)

$$M_t = k_H \times t^{0.5}$$ (رابطه ۷)

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - e^{\frac{-(t-T_i)^\beta}{\alpha}}$$ (رابطه ۸)

$$W_0^{1/3} - W_t^{1/3} = k_{Hc} \times t$$ (رابطه ۹)

که M_t برابر مقدار اسانس آزاد شده در زمان t، M_0 برابر اسانس آزاد شده در زمان صفر، M_t/M_∞ برابر نسبت اسانس آزاد شده در زمان t، k_0 برابر ثابت رهایش درجه صفر، k_1 برابر ثابت رهایش درجه یک، A و B برابر ثابت‌های رهایش کوپچا، k_{KP} برابرثابت رهایش کورسمیر-پپاس، n برابر نما رهایش کورسمیر-پپاس (خصوصیت نمایی انتشار مکانیسیم رهایش)، k_H برابر ثابت رهایش هیگوچی، T_i برابر زمان تاخیر اندازه‌گیری شده توسط فرایند انحلال (اغلب برابر صفر می‌باشد)، β برابر توصیف‌کننده شکل پیشرفت منحنی انحلال، α برابر مقیاس زمانی فرایند، k_{HC} برابر ثابت رهایش هایگسون-کروول، W_0 و W_t به‌ترتیببرابر مقدار اولیه اسانس در ریزپوشش (مقدار باقیمانده اسانس در زمان صفر) و مقدار باقی مانده اسانس در ریزپوشش در زمان t می‌باشند. به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل در برازش از ضریب تبیین[19] (R^2) بین مقدار واقعی با مقدار پیش‌بینی شدهو ریشه میانگین مربعات خطا[20] (RMSE) برای یافتن بهترین مدل استفاده گردید:

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(O-P)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O-\bar{P})^2}\right)$$ (رابطه ۱۰)

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{(O-P)^2}{n-p}}$$ (رابطه ۱۱)

که O، P، p و nبه‌ترتیب داده تجربی، داده پیش‌بینی شده، تعداد مشاهده و تعداد پارامترهای مدل است.

۲-۱۰-تجزیه‌وتحلیل آماری

برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از طرح کاملاً تصادفی استفاده گردید و داده‌ها تحت تجزیه‌وتحلیل واریانس (ANOVA) قرار گرفتند؛ از آزمون چند دامنه‌ای دانکن برای مقایسه تفاوت بین میانگین‌ها در سطح معنی‌داری ۵ درصدی استفاده شد. کلیه آزمون‌ها حداقل در سه تکرار انجام شد، سپس میانگین و انحراف معیار آنها به دست آمد. تمام مراحل تجزیه وتحلیل آماری داده‌ها، با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS (نسخه ۲٤، آمریکا) صورت پذیرفت.

۳-نتایج و بحث

۳-۱-خصوصیات ریزپوشش‌ها

برخی از خصوصیات ریزپوشش‌آلژینات سدیم-پروتئین آب پنیر حاوی اسانس بیدمشک تولیدی در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کاراییدرون‌پوشانی برابر

11. Zero-order
12. First-order
13. Kopcha
14. Korsmeyer-Peppas
15. Ritger-Peppas
16. Higuchi
17. Weibull function
18. Hixson-crowell

19. Adjusted R-squared
20. Root mean squared error

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-06-02]
[DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.6.5]
[DOI: 10.22034/FSCT.19.125.121]

۸۷/۳۱ درصد به‌دست آمد که نشان از عملکرد مناسب فرایند درون‌پوشانی است؛ عوامل زیادی مانند اندازه ذرات تشکیل دهنده ریزپوشش، اندازه ریزپوشش و نوع و ماهیت ماده درون‌پوشانی شده (مواد دیواره) بر راندمان درون‌پوشانی موثر می‌باشند [۳]. از این‌رو نوع، فراریت و غلظت اسانس مورد استفاده در تعیین راندمان نهایی درون‌پوشانی مهم می‌باشد.اتلاف حدود ۱۳ درصدی اسانس عمدتاً به‌سبب فراریت آن (وزن مولکولی کم) است که بخشی هم در مرحله شستشوی ریزپوشش اتفاق می‌افتد [۸]. برخی از محققان گزارش دادند که اسانس‌هابه‌سبب دارا بودن ترکیبات آب‌دوست که توانایی عمل به‌عنوان عوامل فعال‌سطحی دارند، در مقایسه با روغن‌های گیاهی و معدنی پایداری و کاراییدرون‌پوشانی بیشتری دارند. از سوی دیگر معمولاً اسانس‌ها در غلظت‌های کم (به سبب خواص، ارزش و قیمت) درون‌پوشانی می‌شوند و در نتیجه ریزپوشش‌ها حاوی ماده کمتری در مرکز آنهستند و مواد دیواره فراوانی در دسترس می‌باشد [۲۵و ۳]. گزارش شده است که غلظت اسانس بین ۳ تا ۱۰ درصد سبب افزایش راندمان درون‌پوشانی می‌گردد و غلظت‌های خارج از این محدوده نیز سبب کاهش این متغیر می‌گردد [۲٦]. از آنجائی‌که در پژوهش حاضر غلظت اسانس ۱۰ درصد در نظر گرفته شد؛ راندمان درون‌پوشانی نیز مورد انتظار بود. نتایج مشابهی از راندمان درون‌پوشانی توسط ریزپوشش‌های آلژینات سدیم-پروتئین آب پنیر حاوی مواد فعال توسط سایر محققان گزارش شده‌است [۱۳و ۵ ،۸-۱۰].

Table 1 Sodium alginate-whey protein microcapsule containing musk willow essential oil characterize

87.31±3.21	Encapsulation efficiency (%)
10.65±0.95	Particle size (μm)
-11.40±5.24	Swelling- acidic food simulator (%)
385.47±21.09	Swelling- fatty food simulator (%)

میانگین قطر هیدرودینامیکی ریزپوشش‌ها از طریق تجزیه‌وتحلیل اندازه ذرات برابر ۱۰/٦۵±۰/۹۵ میکرومتر (جدول ۱) اندازه‌گیریگردید. از آنجائی‌که اندازه ریزپوشش‌ها از طریق رابطه بین کشش سطحی و نیروهایمشخص فاز ناپیوسته تعیین می‌گردد [۸]، غلظت محلول آلژینات و پروتئین آب پنیر نقش مهمی در اندازه ریزپوشش‌ها و توزیع آن دارد؛ با افزایش غلظت این محلول‌ها، اندازه ذرات بزرگتر و توزیع آن نیز بیشتر می‌گردد [۱۳،۸]. البته کاهش بیش از حد ویسکوزیته نیز سبب کاهش راندمان درون‌پوشانی می‌گردد [۱۳]. همان‌طور که در جدول ۱مشاهده می‌گردد، متورم شدن ریزپوشش در دو شرایط شبیه‌ساز غذای اسیدی و غذای چرب بررسی شده است. ریزپوشش حاوی اسانس بیدمشک در محیط اسیدی دچار چروکیدگی و انقباض و در محیط خنثی تا قلیایی دچار تورم و انبساط گردیده است؛ چروکیدگی ریزپوشش‌های آلژینات احتمالاً به‌سبب از دست دادن بار منفی گروه کربوکسیل آلژینات در محیط اسیدی و افزایشدرجه پروتون‌دار شدن آنها و در نتیجه کاهش نیروهای دافعه است؛ این در حالی است که در محیط خنثی و قلیایی تورم ریزپوشش‌ها عمدتاً به‌علت افزایش بارهای منفی است که سبب دافعه الکترواستاتیک می‌گردد؛ زیرا pH خنثی و قلیایی بسیار بالاتر از مقدار pKa (تقریباً برابر ۳/۵) اورونیک اسید مولکول آلژینات است[۲۷، ۲۸].

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزپوشش آلژینات سدیم-پروتئین آب پنیر حاوی اسانس بیدمشک در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ریزپوشش‌کاملاً گرد با سطحی صاف است که دارای منافذ اندکی در سطح خود می‌باشد. این سطح صاف به‌سبب اتصالات عرضی بین آلژینات سدیم-پروتئین آب پنیر از طریق گروه‌های کربوکسیل تشکیل شده است [۱۳،۸]. پروتئین آب پنیر به‌عنوان یک پلیمر آمفی‌فیل (دوخصلتی)، مسئول شکل کروی ریزپوشش می‌باشد؛ زنجیره‌های جانبی آب‌گریز و آب‌دوست پروتئین آب پنیر برای به حداکثر رساندن آنتروپی سیستمبه‌ترتیب در هسته و محلول قرار می‌گیرند و یون‌های کلسیم آزاد شده در محیط باعث تثبیت این شبکه و تشکیل گرانول‌های داخلی از طریق اتصالات عرضی کربوکسیل می‌گردد و آلژینات نیز به همان روش یک شبکه پلیمری خارجی را تشکیل می‌دهد [۱۳،۸].

پتانسیل زتا ریزپوشش‌ها به‌عنوان تابعی از pH در شکل ۲ نشان داده شده است. پتانسیل زتا که نشان‌دهندهٔ میزان پتانسیل سطحی ریزپوشش است، عمدتاً تابعی از pH و قدرت یونی دیسپرسیون می‌باشد و میزان پایداری ریزپوشش را تعیین می‌کند [۲۹].

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-06-02]
[DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.6.5]
[DOI: 10.22034/FSCT.19.125.121]

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-06-02]

[DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.6.5]
[DOI: 10.22034/FSCT.19.125.121]

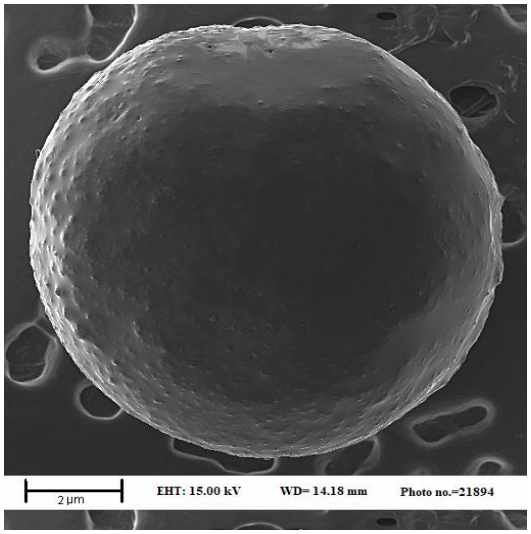

Fig. 1: SEM micrograph of sodium alginate -whey protein microcapsulecontaining musk willow essential oil.

مقدار پتاسیل زتا در هر دو pH شبیه‌ساز غذایی اسیدی و چرب از قدر مطلق ۳۰ بیشتر است که نشان از پایداری کامل ریزپوشش دارد. با این حال با افزایش pH، مقدار قدر مطلق پتاسیل زتا به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (p<۰/۰۵).

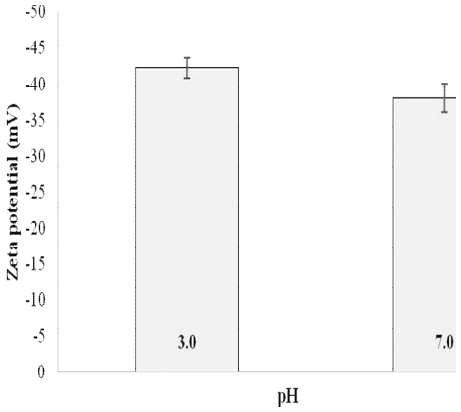

Fig 2 Influence of pH on zeta potential of sodium alginate -whey protein microcapsule containing musk willow essential oil.

۳-۲-رهایش اسانس

در این پژوهش از روش طیف‌سنجی در محدوده امواج فرابنفش برای تعیین مقدار کمی اسانس بیدمشک رهایش‌شده در طول موج ۲۷۸ نانومتر استفاده گردید و رهایش در مدت ۲۰۰ ساعت در شرایط مختلف بررسی گردید. نمایه انتشار اسانس بیدمشک با کمکدرصد تجمعی اسانس بیدمشک در زمان ایجاد گردید. این نمایه برای رهایش اسانس بیدمشک از ریزپوشش آلژینات سدیم-پروتئین آب پنیر در دو محیط شبیه‌ساز غذای اسیدی و شبیه‌ساز غذای چرب در شکل ۳ نشان داده شده است.در این شکل داده‌های مربوط به رهایش تجربی (نقاط) در دو شرایط مختلف به‌همراه داده‌های رهایش پیش‌بینی توسط مدل هایگسون-کروول (به عنوان بهترین مدل توصیف کننده- توضیحات در بخش سینتیک رهایش) ترسیم گردیده است.نتایج نشان داد که رهایش اسانس بیدمشک از ریزپوشش به‌صورت کنترل‌شده رخ می‌دهد که با سرعت پائینی اتفاق می‌افتد. این پدیده را شاید بتوان به سبب لایه ژل‌مانند حاصل از بیوپلیمر که دارای وزن مولکولی بالایی است، نسبت داد؛ این لایه به‌عنوان مانعی عمل می‌نماید و رهایش اسانس را به تاخیر می‌اندازد. هرچه وزن مولکولی بیوپلیمر بالاتر باشد، میزان نفوذپذیری آن کاهش پیدا می‌نماید و رهایش با سرعت کمتری اتفاق می‌افتد [۲، ٦]. پروتئین آب پنیر دارای نقش دوگانه در تغییر سرعت رهایش است؛ از یک طرف پروتئین آب پنیر سبب تورم و باز شدن بیشتر ساختار ریزپوشش و در نتیجه افزایش سرعت انتشار می‌گردد و از سوی دیگر اثرات متقابل پروتئین با اسانسِ آب‌گریز سبب محدودیت در سرعت انتشار می‌شود [۱۱].

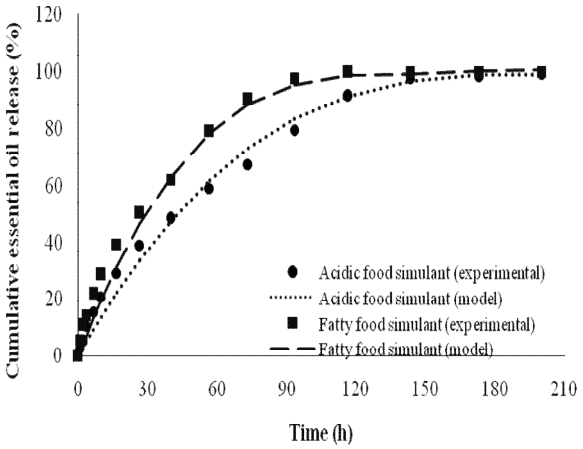

Fig 3 Release profile of musk willow essential oil sodium alginate -whey protein microcapsule in simulated acidic and fatty food conditions.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌گردد، ۱۰ ساعت اول رهایش از ریزپوشش‌ها در هر دو شرایط، انتشار با سرعت اولیه بسیار بالایی رخ می‌دهد؛ به‌طوری‌که حدود ۲۰ و ۲۹ درصد از اسانس بیدمشک به‌ترتیب در شرایط شبیه‌ساز غذای اسیدی و شبیه‌ساز غذای چرب از ریزپوشش انتشار می‌یابد. این رهایش ناگهانی

(فورانی) اولیه بیشتر به‌سبب انتشار اسانس‌درون‌پوشانی‌نشده از سطح ریزپوشش‌ها می‌باشد [۱۱]. زمان لازم برای رهایش حدود ۵۰ درصد اسانس بیدمشک از ریزپوشش در شرایط شبیه‌ساز غذای اسیدی و شبیه‌ساز غذای چرب به‌ترتیب برابر ٤٠ و ٢٧ ساعت بود؛ که نشان‌دهنده پایداری بیشتر ریزپوشش در شرایط اسیدی نسبت به شرایط خنثی و قلیایی (شبیه‌ساز غذای چرب) است؛ مورفولوژی ریزپوشش تحت تاثیر محیط رهایش قرار دارد که این امر با تغییر خصوصیات ریزپوشش همراه است که در محیط خنثی دارای ساختار متورم و با منافذ باز و در محیط اسیدی دارای ساختاری متراکم‌تر با منافذ بسته‌تر می‌باشد [۳۰]. این نتایج با نتایج حاصل از پتاسیل زتای ریزپوشش‌ها و نیز آزمون تورم آن‌ها مطابقت دارد.همانطور که پیش‌تر نیز اشاره گردید، در شرایط pHخنثی به‌سبب افزایش دافعه الکترواستاتیک و بازشدن بیشتر ساختار و منافذ ریزپوشش، رهایش اسانس با سرعت بالاتری رخ می‌دهد.

۳-۳-مدل‌سازی سینتیک رهایش اسانس

رهایش اسانس از پلیمر متورم پدیده‌ای پیچیده است که ممکن است شامل انتشار فیک، تخریب و فرسایش و یا ترکیبی از این سازوکارها باشد [۲]. معادلات ریاضی مختلفی وجود دارد که می‌تواند فرایند رهایش و انحلال اسانس بیدمشک را از ریزپوشش‌های آلژینات سدیم-پروتئین آب پنیر مدل‌سازی و پیش‌بینی نماید. بر اساس این مدل‌ها می‌توان سینتیک رهایش را درک نمود.مدل‌های ریاضی نقش مهمی در تفسیرسازوکار انتشار ماده فعال از ریزپوشش دارند[۳۰]. در این پژوهش مشخصات رهایش با برازش داده‌های تجربی مدل‌های درجه صفر، درجه یک،کوپچا، کورسمیر-پپاس،هیگوچی، ویبال و هایگسون-کروول برای رهایش در محیط‌های شبیه‌ساز غذای اسیدی و غذای چرب ارزیابی گردید. متغیرهای مدل به‌همراه معیارهای ارزیابی مدل (ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا) در جدول ۲ نشان داده شده است. بر اساس معیارهای ارزیابی، بهترین مدل، مدلی با بالاترین ضریب تبیین و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا می‌باشد.نتایج برازش داده‌ها نشان داد که همه مدل‌ها به‌غیر از مدل درجه صفر می‌تواند فرایند رهایش اسانس را با دقت بالایی پیش‌بینی نماید (ضریب تبیین بالای ۰/۹۳ درصد). مدل درجه صفر در حقیقت برای سیستم‌های رهایشی است که در آن رهایش ماده فعال به‌صورت مداوم و خطی اتفاق می‌افتد؛ از آنجائی‌که نتایج تجربی روند غیرخطی را در رهایش اسانس بیدمشک از ریزپوشش را نشان می‌دهد؛ از این‌رو مدل ریاضی درجه صفر قادر به مدل‌سازی رهایش اسانس بیدمشک نمی‌باشد.

Table 2 Kinetic parameters and statistical values of various mathematical models.

Release condition		Parameter
Fatty	**Acidic**	
Zero-order model		
0.1897	0.1739	K_0
0.778	0.893	R^2
0.311	0.223	**RMSE**
First-order model		
0.0194	0.0123	K_1
0.993	0.991	R^2
0.048	0.052	**RMSE**
Kopcha model		
2.82	2.53	**A**
0.0001	0.0001	**B**
0.938	0.986	R^2
0.176	0.078	**RMSE**
Korsmeyer- Peppas model		
0.1139	0.0617	K_{KP}
0.4559	0.5057	**n**
0.956	0.986	R^2
0.121	0.081	**RMSE**
Higuchi model		
2.821388	2.53	K_H
0.938	0.986	R^2
0.178	0.077	**RMSE**
Weibull function		
39.10	62.25	**α**
0.932	0.94	**β**
0.993	0.991	R^2
0.051	0.058	**RMSE**
Hixson-Crowell model		
0.0162	0.0112	K_{HC}
0.995	0.993	R^2
0.044	0.047	**RMSE**

مدل هایگسون-کروول به‌عنوان بهترین و دقیق‌ترین مدل به‌منظور مدل‌سازی رهایش در هر دو محیط شبیه‌ساز غذای اسیدی و غذای چرب با ضریب تبیین به‌ترتیب ۰/۹۹۳ و ۰/۹۹۵ انتخاب گردید.مدل هایگسون-کروول، رهایش را در سیستم‌هایی که در آن تغییر سطح و یا قطر ریزپوشش وجود دارد، توصیف می‌کند[۳۰]. از آنجایی‌که این مدل به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شده است، در این صورت می‌توان تفسیر کرد که تغییر سطح

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-06-02]
[DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.6.5]
[DOI: 10.22034/FSCT.19.125.121]

(قطر) در طی فرآیندرهایش تأثیر مهمی در آزادسازی اسانس را دارد.

مدل ویبال هم نیز به مانند مدل هایگسون-کرول توانست سینتیک رهایش را در هر دو محیط رهایش با دقت بالای ۰/۹۹۱ مدل‌سازی نماید. مقدار β در مدل ویبال شکل منحنی رهایش یا انحلال را مشخص می‌نماید؛ اگرمقدار β برابر یک، بیشتر از یک و کمتر از یک باشد، شکل منحنی نیز به‌ترتیب به صورت نمایی، سیگموئیدیاS شکل با انحنای رو به بالا و پس از آن یک نقطه چرخش و سهموی با شیب اولیه بالا و پس از آن به‌صورت نمایی می‌باشد [۳۱]. اگر مقدار βکمتر از ۰/۷۵ و بیشتر از ۱ باشد، نشان‌دهنده این است که رهایش ماده فعال از ریزپوشش به‌ترتیب از طریق سازوکار انتشار فیکو انتشار پیچیده (نفوذ، تورم و فرسایش همزمان) هدایت می‌گردد. برای مقادیرβ بین ۰/۷۵ تا ۱، رهایش ماده فعال با سازوکاری ترکیبی از انتشار فیک و انتشار پیچیده پیروی می‌نماید [۳۲و ۳۳]. بر این اساس شکل منحنی رهایش اسانس بیدمشک از ریزپوشش آلژینات سدیم-پروتئین آب پنیر در هر دو محیط رهایش به‌صورت سهموی با شیب اولیه بالا و پس از آن به‌صورت نمایی است و سازوکار رهایش نیز ترکیبی از از انتشار فیک و انتشار پیچیده می‌باشد.

مدل کورسمیر-پپاس نیز عملکرد قابل قبولی در مدل‌سازی سینتیک رهایش داشت. مقدار n یا نمارهایش کورسمیر-پپاس نیز سازوکاررهایش ماده فعال از ریزپوشش را نشان می‌دهد. رهایش زمانی‌که n≤۰/٤٥، n=۰/۸۹ و۰/٤٥<n<۰/۸۹ به‌ترتیب از طریقانتشار فیک، انتشار پیچیده (نفوذ، تورم و فرسایش همزمان) و ترکیبی از از انتشار فیک و انتشار پیچیده می‌باشد [۳٤].

همان‌طور که در مدل ویبال هم مشخص گردید، سازوکار رهایش اسانس بیدمشک از ریزپوشش در دو محیط شبیه‌ساز غذای اسیدی و شبیه‌ساز غذای چرب ترکیبی از انتشار فیک و انتشار پیچیده می‌باشد. نفود حلال و شلاته کردن کلسیم (پیوند عرضی) توسط یون‌های فسفات باعث حذف احتمالی کلسیم از ریزپوشش‌ها می‌گردد، که نتیجه این عمل درهم‌گسیختگی و تورم شبکه ریزپوشش می‌باشد. تورم بیوپلیمر باعث افزایش تخلخل ریزپوشش و در نتیجه پدیده‌های رهایش از طریق نفوذ و فرسایش (انتشار پیچیده) می‌شود[۳۵و ۲].

مدل هیگوچیکی از پرکاربردترین و شناخته‌شده‌ترین مدل‌های ریاضی است که برای سیستم‌هایی است که در آن سازوکار انتشار کنترل شده با انتشار است[۳۰]. مدل‌سازی رهایش در محیط شبیه‌ساز غذایی اسیدی که با سرعت پایین‌تر رخ می‌دهد، با مدل هیگوچی دارای ضریب تبیین بالایی است (۰/۹۸٦)؛ در حالی‌که در محیط شبیه‌ساز غذایی چرب این ضریب تبیین مدل برای داده‌های تجربی پایین است (۰/۹۳۸). همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، در محیط اسیدی بیشتر رهایش کنترل شده از طریق انتشار رخ می‌دهد و این در حالی است که بخشی از رهایش در شرایط خنثی به سبب باز شدن ساختار ریزپوشش از طریق حفرات و با سازوکار انتشار پیچیده (نفوذ، تورم و فرسایش همزمان) رخ می‌دهد و به همین علت است که مدل هیگوچی در شرایط اسیدی برازش بهتری برای داده‌های تجربی دارد. داده‌های تجربی و مدل برای مدل‌های مختلف در محیط‌های شبیه‌ساز غذای اسیدی و غذای چرب به‌ترتیب در شکل‌های ٤ و ٥ نشان داده شده است.

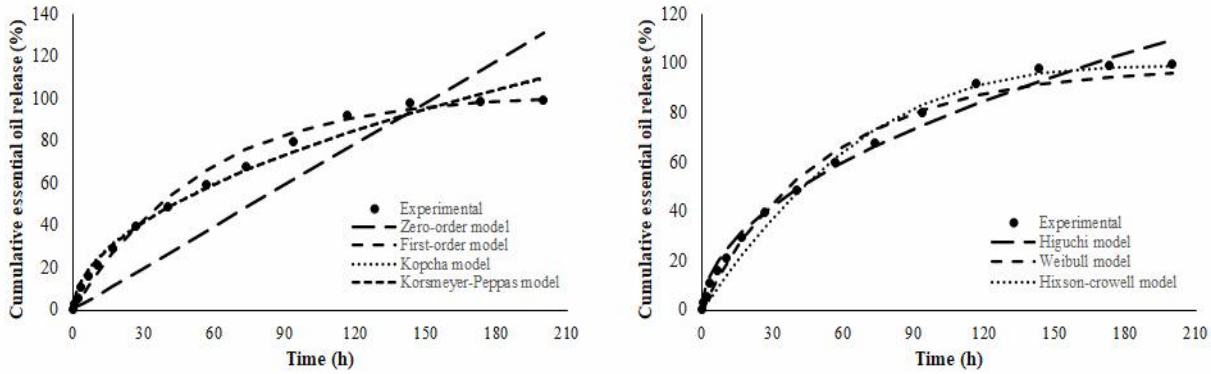

Fig 4 Release profile of musk willow essential oil sodium alginate -whey protein microcapsule in simulated acidic food condition fitted to zero-order, first-order, kopcha, higuchi, korsmeyer-peppas, hixon-crowell and weibull models.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-06-02]
[DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.6.5]
[DOI: 10.22034/FSCT.19.125.121]

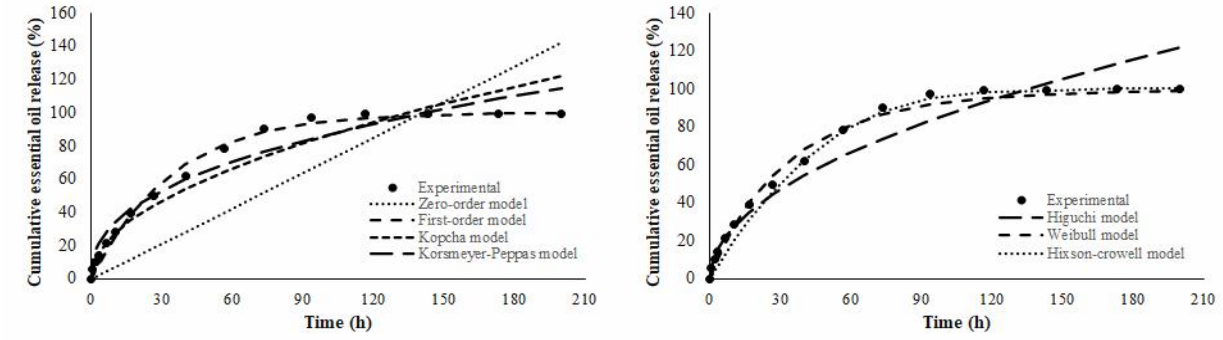

Fig 5 Release profile of musk willow essential oil sodium alginate -whey protein microcapsule in simulated fatty food condition fitted to zero-order, first-order, kopcha, higuchi, korsmeyer-peppas, hixon-crowell and weibull models.

٤-نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر ریزپوشش‌های آلژینات سدیم-پروتئین آب پنیر حاوی اسانس بیدمشک با موفقیت با اندازه برابر ۰/۹۵± ۱۰/٦٥ میکرومترایجاد گردید وتشکیل آن توسط ریزتصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تائید گردید. راندمان درون‌پوشانی در این فرایند که بر اساس امولسیون‌سازی-ژلاسیون داخلی انجام شد، برابر ۸۷/۳۱ درصد به‌دست آمد. نتایج پتانسیل زتا نشان داد که اگرچه ریزپوشش تولیدی در هر دو محیط اسیدی و خنثی پایدار می‌باشد؛ ولی قرارگیری این ریزپوشش در شرایط شبیه‌سازهای غذایی اسیدی و چرب به‌ترتیب باعث انقباض و انبساط ریزپوشش می‌گردد، که این امر در میزان رهایش موثر است و باعث می‌گردد که در شرایط شبیه‌سازغذایی چرب که شرایط خنثی است به سبب تورم ریزپوشش رهایش با سرعت بیشتری رخ دهد. مدل‌های ریاضی ابزار مهمی برای درک سینتیکرهایش ماده فعال از ریزپوشش می‌باشند. نتایج برازش داده‌های تجربی با مدل‌های مختلف مشخص نمود که تنها مدل درجه صفر به‌سبب غیرخطی بودن رهایش اسانس بیدمشک از ریزپوشش نتوانست با دقت بالایی رهایش را مدل‌سازی نمایدو سایر مدل‌ها عمکرد موفقی داشتند. مدل هایگسون-کروول دقیق‌ترین عملکرد را برای مدل‌سازی رهایش در هر دو محیط شبیه‌ساز غذای اسیدی و غذای چرب (با ضریب تبیین به‌ترتیب ۰/۹۹۳ و ۰/۹۹۵) نشان داد. که نشان از تغییر سطح یا قطر ریزپوشش در محیط رهایش است (تورم یا انقباض). نتایج حاصل از متغیرهای مدل‌های مختلف نشان داد که شکل منحنی رهایش در هر دو محیط رهایش به‌صورت سهمویو سازوکار رهایش نیز ترکیبی از انتشار فیک و انتشار پیچیده است.

٥- تقدیر و تشکر

مقاله حاضر حاصل از بخشی طرح پژوهشی مصوب گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی دانشگاه زنجان با عنوان "بهینه‌سازی استخراج اسانس بیدمشک با کمک تقطیر مقاومتی و فراصوت و درون‌پوشانی آن در ریزپوشش آلژینات-پروتئین آب پنیر " مورخ ۱٤۰۰/۰۱/۳۰ و جلسه شورای دانشکده مورخ ۱٤۰۰/۰۲/۰٦ می‌باشد. از دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان که با فراهم آوردن امکانات تحقیق ما را یاری کردند، سپاسگزاری می‌نمایم.

٦- منابع

[1] Bastos LPH, Vicente J, dos Santos CHC, de Carvalho MG, Garcia-Rojas EE. Encapsulation of black pepper (Piper nigrum L.) essential oil with gelatin and sodium alginate by complex coacervation. Food Hydrocolloids. 2020;102:105605.

[2] Faidi A, Lassoued MA ,Becheikh MEH, Touati M, Stumbé J-F, Farhat F. Application of sodium alginate extracted from a Tunisian brown algae Padina pavonica for essential oil encapsulation: Microspheres preparation, characterization and in vitro release study. International journal of biological macromolecules. 2019;136:386-94.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-06-02]
[DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.6.5]
[DOI: 10.22034/FSCT.19.125.121]

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-06-02]

[DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.6.5]

[DOI: 10.22034/FSCT.19.125.121]

[3] Hernández-Nava R, López-Malo A, Palou E, Ramírez-Corona N, Jiménez-Munguía MT. Encapsulation of oregano essential oil (Origanum vulgare) by complex coacervation between gelatin and chia mucilage and its properties after spray drying. Food Hydrocolloids. 2020;109:106077.

[4] Xue F, Gu Y, Wang Y, Li C, Adhikari B. Encapsulation of essential oil in emulsion based edible films prepared by soy protein isolate-gum acacia conjugates. Food Hydrocolloids. 2019;9.89-6;178.

[5] Zandi M, Dardmeh N, Pirsa S, Almasi H. Identification of cardamom encapsulated alginate–whey protein concentrates microcapsule release kinetics and mechanism during storage, stew process and oral consumption. Journal of Food Process Engineering. 2017;40(1):e12314.

[6]Dhadde Gurunath S, Mali Hanmant S, Raut Indrayani D, Nitalikar Manoj M, Bhutkar Mangesh A. A Review on Microspheres: Types, Method of Preparation, Characterization and Application. Asian Journal of Pharmacy and Technology. 2021;1.2;(2)1.

[7] Zandi M. Vitamin protection by Alginate-Whey Protein Micro Gel (AL-WPC MG) as a novel microcapsule against gastrointestinal condition; case study: B-complex vitamins. Iranian Journal Food Science and Technology Research. 2020;16(3):37-50.

[8] Zandi M, Mohebbi M, Varidi M, Ramezanian N. Evaluation of diacetyl encapsulated alginate–whey protein microspheres release kinetics and mechanism at simulated mouth conditions. Food research international. 2014;56:211-7.

[9] Zandi M. Evaluation of the Kinetics of Ascorbic Acid (AA) Release from Alginate-Whey Protein Concentrates (AL-WPC) Microspheres at the Simulated Gastro–Intestinal Condition. Journal of Food Process Engineering. 2017;40(1):e12334.

[10] Zandi M. The Mechanical, Rheological and Release Properties of Riboflavin and Biotin Encapsulated Alginate-whey Protein Micro-Gels. Research and Innovation in Food Science and Technology. 2019;8(3):285-96.

[11] Volić M, Pajić-Lijaković I, Djordjević V, Knežević-Jugović Z, Pećinar I, Stevanović-Dajić Z, et al .Alginate/soy protein system for essential oil encapsulation with intestinal delivery. Carbohydrate polymers. 2018;200:15-24.

[12] Wichchukit S, Oztop M, McCarthy M, McCarthy K. Whey protein/alginate beads as carriers of a bioactive component. Food Hydrocolloids. 2013;33(1):66-73.

[13] Chen L, Subirade M. Alginate–whey protein granular microspheres as oral delivery vehicles for bioactive compounds. Biomaterials. 2006;27(26):4646-54.

[14] Zandi M. Simulation of Ascorbic Acid Release from Alginate‐Whey ProteinConcentrates Microspheres at the Simulated Gastrointestinal Condition Using Netlogo Platform. Journal of Food Process Engineering. 2017;40(1):e12327.

[15] Asgarpanah J. Phytopharmacology and medicinal properties of Salix aegyptiaca L. African Journal of Biotechnology. 2012;11(28):7145-50.

[16]Rabbani M, Vaseghi G, Sajjadi S, Amin B. Persian herbal medicines with anxiolytic properties. Journal of Medicinal Plants. 2011;3(39):7-11.

[17] Sayyari Z, Farahmandfar R. Stabilization of sunflower oil with pussy willow (Salix aegyptiaca) extract and essential oil. Food science & nutrition. 2017;5(2):266-72.

[18] Karimi I, Hayatgheybi H, Kamalak A, Pooyanmehr M, Marandi Y. Chemical composition and effect of an essential oil of Salix aegyptiaca L., Salicaceae,(musk willow) in hypercholesterolemic rabbit model. Revista Brasileira de Farmacognosia. 2011;21(3):407-14.

[19] Crank J. The mathematics of diffusion: Oxford university press; 1979.

[20] Wagner JG. Interpretation of percent dissolved-time plots derived from in vitro testing of conventional tablets and capsules. Journal of pharmaceutical sciences. 1969;58(10):1253-7.

[21] Gibaldi M, Feldman S. Establishment of sink conditions in dissolution rate determinations. Theoretical considerations and application to nondisintegrating dosage forms. Journal of pharmaceutical sciences. 1967;56(10):1238-42.

[22] Kopcha M, Lordi NG, Tojo KJ. Evaluation of release from selected thermosoftening vehicles. Journal of pharmacy and pharmacology. 1991;43(6):382-7.
[23] Korsmeyer R, Peppas N .Macromolecular and modeling aspects of swelling-controlled systems. Controlled release delivery systems. 1983;1983(77-90):83.
[24] Ritger PL, Peppas NA. A simple equation for description of solute release II. Fickian and anomalous release from swellabledevices. Journal of controlled release. 1987;5(1):37-42.
[25] Prata AS, Grosso CR. Influence of the oil phase on the microencapsulation by complex coacervation. Journal of the American Oil Chemists' Society. 2015;92(7):1063-72.
[26] Tamjidi F, Nasirpour A ,Shahedi M. Mixture design approach for evaluation of fish oil microencapsulation in gelatin-acacia gum coacervates. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials. 2013;62(8):444-9.
[27] Peniche C, Howland I, Carrillo O, Zaldıvar C ,Argüelles-Monal W. Formation and stability of shark liver oil loaded chitosan/calcium alginate capsules. Food Hydrocolloids. 2004;18(5):865-71.
[28] Bannikova A, Evteev A, Pankin K, Evdokimov I, Kasapis S. Microencapsulation of fish oil with alginate: In-vitro evaluation and controlled release. LWT. 2018;90:310-5.
[29] Fioramonti SA, Stepanic EM, Tibaldo AM, Pavón YL, Santiago LG. Spray dried flaxseed oil powdered microcapsules obtained using milk whey proteins-alginate double layer emulsions. Food Research International. 2019;119:931-40.
[30] Gouda R, Baishya H, Qing Z. Application of mathematical models in drug release kinetics of carbidopa and levodopa ER tablets. J Dev Drugs. 2017;6(02):1-8.
[31] D'Souza SS, Faraj JA, DeLuca PP. A model-dependent approach to correlate accelerated with real-time release from biodegradable microspheres. Aaps Pharmscitech. 2005;6(4):E553-E64.
[32] Papadopoulou V, Kosmidis K, Vlachou M, Macheras P. On the use of the Weibull function for the discernment of drug release mechanisms. International journal of pharmaceutics. 2006;309(1-2):44-50.
[33] Carbinatto FM, de Castro AD, Evangelista RC, Cury BS. Insights into the swelling process and drug release mechanisms from cross-linked pectin/high amylose starch matrices. asian journal of pharmaceutical sciences. 2014;9(1):27-34.
[34] Arora G, Malik K, Singh I. Formulation and evaluation of mucoadhesive matrix tablets of taro gum: optimization using response surface methodology. Polimery w medycynie. 2011;41(2):23-34.
[35] Al-Tahami K .Preparation of Alginate Microspheres for the Delivery of Risperidone. Yemeni Journal for Medical Sciences. 2014;8:5.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-06-02]
[DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.6.5]
[DOI: 10.22034/FSCT.19.125.121]

Iranian Journal of Food Science and Technology

Homepage:www.fsct.modares.ir

Scientific Research

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-06-02]

[DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.6.5]

[DOI: 10.22034/FSCT.19.125.121]

Encapsulation of musk willow (*Salix aegyptiaca L.*) essential oil with sodium alginateand whey protein: Characterization, controlled release and mathematical modeling

Zandi, M. [1*], Ganjloo, A. [2], Bimakr, M. [2]

1. Assistant Professor, Department of Food Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
2. Associate Professor, Department of Food Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

ABSTRACT

The musk willow essential oil is volatile and encapsulation can protect them from environmental factors such as, light, oxygen and temperature. In the present research, preparation of sodium alginate-whey protein microcapsule containing essential oil of musk willow was carried out by internal gelation-emulsification method with encapsulation efficiency of 87.31%. The obtained microcapsules were characterized by particle size analyzer, zeta potential analyzer and scanning electron microscope. Encapsulation efficiency, swelling ratio and *in vitro* release of the essential oil was also investigated in fatty and acidic food simulationconditions. At acidic and fatty food simulation conditions, the complex presented negatively charged, with potential zeta values being 42.25 and 38.11 mV, respectively. The greatest electrostatic interaction occurred near pH 3.0 where the charge approached neutrality, which represents a balance between the biopolymer charges. Microcapsules shrinking in the acidic food simulation (pH=3.0) and expanding in the fatty food simulation (pH=7.0). The release results indicated that the release of musk willow essential oil from the microcapsule in both conditions occurred with a controlled manner and exhibited a slow rate. The essential oil release was found to be best fitted by Hixson–Crowell model (R^2=0.993 for the acidic food simulation condition and R^2=0.995 for fatty food simulation condition) which implies that a change in diameter of the microcapsule as a function of time. Mathematical modeling of release kinetics shows that musk willow essential oil loaded microsphere release follows by classical Fickian diffusion and erosion/degradation mechanisms.

ARTICLE INFO

Article History:

Received 2021/ 08/ 20
Accepted 2021/ 09/ 28

Keywords:

Microcapsule,
Musk willow essential oil,
Sodium alginate,
Control release,
Kinetic models.

DOI: 10.22034/FSCT.19.125.121
DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.6.5

*Corresponding Author E-Mail:
Zandi@znu.ac.ir