



مدل سازی فرآیند استخراج با پیش تیمار فراصوت گالاتومانان از دو دانه شنبلیله  
(*Trigonella foenum – graceum*) و لیلکی ایرانی (*Gleditsia caspica*):

استفاده از روش عددی معکوس

رسول نیکنام<sup>۱\*</sup>، سید محمد موسوی<sup>۲</sup>، حسین کیانی<sup>۳</sup>

۱-دانشجوی دکتری، آزمایشگاه زیست سنجش و زیست فرآوری، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران.

۲-استاد، آزمایشگاه زیست سنجش و زیست فرآوری، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران.

۳-دانشیار، آزمایشگاه زیست سنجش و زیست فرآوری، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۹

کلمات کلیدی:

روش عددی معکوس،

مدل سازی،

استخراج،

گالاتومانان.

استخراج هیدروکلونید از دانه های گیاهی به دلیل افزایش مصرف این ترکیبات در فرمولاسیون محصولات غذایی محبوبیت زیادی پیدا کرده است. استخراج با پیش تیمار فراصوت به دلیل مزایای زیاد، محبوبیت گسترده ای پیدا کرده است که یکی از مهم ترین مزایای آن، افزایش راندمان استخراج بیوپلیمر می باشد. هدف این پژوهش، امکان سنجی استفاده از روش عددی معکوس جهت تخمین پارامترهای مؤثر در انتقال جرم مربوط به فرآیند استخراج با پیش تیمار فراصوت گالاتومانان از دو دانه گیاهی شنبلیله (*Trigonella foenum graceum*) و لیلکی ایرانی (*Gleditsia caspica*) بود. برای رسیدن به این هدف، غلظت گالاتومانان استخراج شده از هر دو دانه گیاهی در مقابل زمان به دست آمد و داده های آزمایشگاهی و داده های پیش بینی شده توسط نرم افزار (براساس شبیه سازی انجام شده) با هم مقایسه گردید که همخوانی قابل قبولی بین آنها وجود داشت. پارامترهای مؤثر در انتقال جرم شامل ضریب پخش (E)، ضریب انتشار (D) و ضریب انتقال جرم کلی (kc) برای نمونه های مختلف به ترتیب در دامنه  $1/52 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  -  $1/21$ ،  $3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  -  $2/39$  و  $1/85 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  -  $1/18$  برای گالاتومانان شنبلیله و  $1/54 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  -  $1/31$ ،  $3/11 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  -  $2/63$  و  $1/95 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  -  $1/46$  برای گالاتومانان لیلکی ایرانی بود. تفاوت بین مقادیر به دست آمده برای دو گالاتومانان می تواند به نوع دانه، سختی و نرمی دیواره و ویژگی های ترکیب هدف مرتبط باشد. با توجه به نتایج به دست آمده، روش عددی معکوس به عنوان روش قابل قبول و مؤثر جهت مدل سازی فرآیند استخراج هر دو گالاتومانان معرفی گردید.

DOI: 10.22034/FSCT.19.127.13

DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.127.2.5

\* مسئول مکاتبات:

rasoul.niknam97@ut.ac.ir

## ۱- مقدمه

هیدروکلوئیدها، مجموعه‌ای از بیوپلیمرهای با وزن مولکولی بالا هستند که به عنوان قوام دهنده، ژل کننده و امولسیفایر در فرمولاسیون محصولات غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۱]. معرفی منابع جدید هیدروکلوئیدی با ویژگی‌های عملکردی مناسب که بتواند جایگزین مناسبی برای بیوپلیمرهای تجاری باشد به یکی از دغدغه‌های اصلی محققان تبدیل شده است [۳]. این منابع باید ضمن در دسترس بودن، از قیمت مناسبی نیز برخوردار باشند. از جمله مهم‌ترین این منابع، دانه‌های گیاهی هستند که به وفور در کشورهای مختلف کشت می‌شوند [۴ و ۵].

گالاکتومانان‌ها زیر مجموعه مهمی از هیدروکلوئیدها هستند که از نظر تقسیم بندی جزء هترو پلی ساکاریدهای خنثی هستند و به عنوان یک منبع ذخیره انرژی در آندوسپرم دانه تمامی گیاهان خانواده بقولات وجود دارند [۶]. گالاکتومانان از یک اسکلت خطی مانوز با اتصالات بتا ۱ و ۴ تشکیل شده که گالاکتوز به عنوان زنجیره فرعی با اتصالات آلفا ۱ و ۶ به آن پیوند داده شده است [۷]. گالاکتومانان‌ها، اغلب آبدوست بوده و خصوصیات رئولوژیکی و فیزیکوشیمیایی متفاوتی را نشان می‌دهند که بستگی به نسبت مانوز به گالاکتوز، توزیع گالاکتوز بر روی زنجیره اصلی مانوز، وزن مولکولی و چگونگی توزیع آن دارد [۸ و ۹]. شنبلیله با نام علمی *Trigonella foenum-graceum*، گیاهی یک ساله است که متعلق به خانواده بقولات می‌باشد. این گیاه در کشورهای مختلف از جمله ایران کشت می‌شود. دانه شنبلیله از مقادیر فراوانی موسیلاژ تشکیل شده است که قسمت عمده آن، گالاکتومانان است و قابل مقایسه با گالاکتومانان‌های تجاری مانند صمغ گوار می‌باشد [۱۰ و ۱۱].

لیلکی ایرانی با نام علمی *Gleditsia caspica*، نیز گیاهی از خانواده بقولات است که در مناطق اطراف دریای خزر و آذربایجان به وفور یافت می‌شود [۱۲]. این گیاه به شکل لوبیا اما به صورت پهن می‌باشد. از دانه این گیاه نیز گالاکتومانان استخراج شده است که دارای خواص عملکردی مناسب از جمله نسبت مانوز به گالاکتوز نزدیک به گالاکتومانان‌های تجاری همچون صمغ گوار و صمغ دانه خرنوب می‌باشد [۱۳].

روش‌های کلاسیک مورد استفاده در استخراج گالاکتومانان‌ها با استفاده از حلال که عمدتاً آب می‌باشد و با عنوان استخراج آبی از آن یاد می‌شود، به عوامل مختلفی همچون نوع حلال، استفاده

از دما و زمان بستگی دارد [۱۴]. امروزه روش‌های جدیدی همچون استخراج با پیش تیمار فراصوت (اولتراسوند) مورد استفاده قرار گرفته است. روش‌های نوین استخراج علاوه بر حفظ خصوصیات کیفی، معمولاً سریع‌تر و ارزان‌تر می‌باشند. مزایای استفاده از این روش‌ها شامل سرعت بالا، انتقال جرم بیشتر، گرادیان حرارتی کمتر، زمان استخراج کوتاه‌تر و کاهش استفاده از حلال‌های آلی سمی می‌باشد [۱۵]. امواج فراصوت بر اساس کاربرد به دو نوع تشخیصی (با فرکانس بالا) و پر قدرت (فرکانس پایین) تقسیم می‌شوند. استخراج با پیش تیمار فراصوت، به دلیل سادگی، هزینه کم و حفظ ویژگی‌های بیولوژیکی ماده به صورت گسترده استفاده می‌شود [۱۶ و ۱۷]. همچنین نتایج مطالعات پیشین نشان داده است که استفاده از این روش می‌تواند سبب افزایش راندمان گردد که علت آن، پدیده کاویتاسیون است. از هم پاشیدن حباب‌های کاویتاسیون گرمای موضعی شدید و فشار بالایی تولید می‌کند [۱۸]. این تنش‌ها و از هم پاشیدن مکرر حباب‌ها باعث تخریب دیواره سلولی گیاه می‌شود و فرآیند انتقال جرم ترکیب هدف در حلال را بهبود می‌بخشد [۵ و ۱۹]. به عبارت دیگر، امواج فراصوت، مراحل فرآیند استخراج یعنی تورم بافت به منظور جذب حلال و نیز خروج ترکیبات از بافت به حلال را از طریق ایجاد تخلخل و منفذ در دیواره سلول‌ها و بهبود انتشار و انتقال جرم، تسهیل و تسریع می‌کنند [۲۰]. پارامترهای انتقال جرم نیز همچون ضرایب انتقال، انتشار، پراکندگی<sup>۳</sup> و تخریب<sup>۴</sup> را می‌توان برای فرآیند استخراج با امواج فراصوت به دست آورد. از آنجایی که فرآیند استخراج تحت تأثیر متغیرهای فیزیکوشیمیایی مختلف قرار می‌گیرد، ارزیابی دقیق کمی و کیفی پارامترها دشوار است [۲۱].

امروزه مدل سازی ریاضی و شبیه سازی کامپیوتری براساس آنالیزهای عددی، به یکی از روش‌های اصلی طراحی، توسعه، بهینه سازی و کنترل فرآیندهای مختلف غذایی تبدیل شده است [۲۲]. علت این مسئله، دسترسی به کامپیوترهای با سرعت بالا، حافظه ارزان قیمت و نرم افزار اختصاصی است که به پژوهشگران در مدیریت منابع با روش کارآمد و هزینه مؤثر در مقایسه با تکنیک‌های تجربی آزمون و خطا کمک می‌کند [۲۳]. آگاهی از خواص انتقال جرم نقش مهمی در طراحی و شبیه سازی فرآیند-

1. Mass Transfer
2. Diffusion
3. Dispersion
4. Degradation

های استخراج دارد. ویژگی‌های فیزیکی غذاها در شرایط محیطی مختلف، متفاوت است و تعیین ضرایب نیاز به اندازه گیری زمان بر دارد. علاوه بر این، مشخص کردن این پارامترها با استفاده از آزمایش‌های رایج ممکن است شرایط واقعی را نشان ندهد [۲۴]. در سال‌های اخیر توجه به برآورد خواص فیزیکی به وسیله روش‌های معکوس در مطالعات علمی افزایش یافته است. روش‌های معکوس، یک روش کلی ریاضی، به منظور تخمین علل ناشناخته براساس مشاهدات اثرات آن‌ها، در مقایسه با مدل سازی مستقیم هست، که راه حل آن‌ها، شامل یافتن اثرات براساس توضیحات علل آن‌هاست [۲۳]. در واقع روش معکوس، تکنیکی برای تخمین پارامترهای مدل با استفاده از داده‌های تجربی است. در این روش، پارامترهای مدل با استفاده از داده‌های تجربی، معادلات کلی حاکم بر سیستم و الگوریتم‌های بهینه سازی مناسب (با استفاده از تکرار) محاسبه می‌شوند [۲۵]. پارامترهای بهینه مدل با به حداقل رساندن تفاوت بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش بینی شده به دست می‌آیند. تا به امروز از این روش برای تعیین ویژگی‌های حرارتی [۲۶]، نفوذ پذیری رطوبت [۲۴] و خواص رئولوژیکی مواد غذایی [۲۷] استفاده شده است. با این حال، هیچ مطالعه‌ای بر روی مدل سازی فرآیند استخراج با پیش‌تیمار فراصوت گالاکتومانان‌ها با این روش انجام نشده است.

هدف اصلی این مقاله، مدل سازی فرآیند استخراج گالاکتومانان با پیش‌تیمار فراصوت از دو دانه گیاهی با استفاده از روش عددی معکوس می‌باشد که ضمن مطالعه این روش برای استخراج هر دو هیدروکلوئید، مقادیر به دست آمده نیز با هم مقایسه خواهند شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- آماده سازی نمونه

دانه های لیلکی ایرانی و شنبلیله استفاده شده در این مطالعه از بازار محلی تبریز خریداری و پس از بسته بندی در ظروف پلاستیکی، تا زمان استفاده در جای خشک و خنک نگهداری شدند. همه مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق از شرکت مرک (آلمان) تهیه شدند.

### ۲-۲- استخراج گالاکتومانان از هر دو منبع با

#### پیش‌تیمار فراصوت

جهت استخراج گالاکتومانان از هر دو منبع، مقدار مشخصی از دانه‌ها (۵۰ گرم از هر دانه) و حلال (آب مقطر) با نسبت ۱ به ۱۰ با هم مخلوط شدند که دور همزن مورد استفاده ۵۰۰ دور در دقیقه بود. در ادامه، از دستگاه اولتراسوند پروب با توان ۱۵۰ - ۷۵ وات استفاده شد. مدت زمان کل فرآیند استخراج، ۱۸۰ دقیقه بود و نمونه برداری به تعداد ۱۹ بار در دقیقه‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۵، ۱۲۰، ۱۳۵، ۱۵۰، ۱۶۵ و ۱۸۰ انجام گرفت و در هر بار نمونه برداری مقدار ۵۰ سی سی نمونه برداشته شد. در این پژوهش، متغیرهای موجود، دمای استخراج (۴۰، ۵۵ و ۷۰ درجه سلسیوس)، زمان در معرض گیری امواج فراصوت (۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه) و توان دستگاه فراصوت (۷۵، ۱۲۵ و ۱۵۰ وات) بودند. در مرحله بعد، از یک اکستراکتور مجهز به صفحه چرخنده جهت جداسازی موسیلاژ از دانه‌ها استفاده شد. بعد، از اتانول ۹۶٪ به نسبت ۱ به ۳ جهت رسوب گالاکتومانان استخراج شده استفاده گردید. گالاکتومانان استخراج شده از پارچه کتانی فیلتر شد و دو بار با اتانول ۷۰٪ و دو بار با اتانول ۹۶٪ در دمای اتاق جهت خالص سازی شستشو داده شد. این فرآیند شستشو جهت حذف کامل باقی مانده‌های احتمالی دانه‌ها و مواد دیگر غیر از گالاکتومانان صورت گرفت. در مرحله بعد، گالاکتومانان به دست آمده به مدت مشخص در آن جهت خشک شدن قرار گرفت و در نهایت بیوپلیمر خشک شده به صورت کامل آسیاب شد. لازم به ذکر است که علاوه بر نمونه‌های اصلی که از امواج فراصوت به عنوان پیش‌تیمار در فرآیند استخراج آن‌ها استفاده شده بود، نمونه کنترل نیز تهیه شد که در آن از امواج فراصوت استفاده نشده بود. مقادیر پودر گالاکتومانان به دست آمده بر حسب گرم بر میلی لیتر (g/ml) بود که جهت انجام مدل سازی، تمامی داده‌ها به کیلوگرم بر متر مکعب تبدیل شدند ( $\text{kg/m}^3$ ) [۲۳ و ۲۸]. لازم به ذکر است که نمونه‌های استفاده شده جهت مدل سازی فرآیند استخراج در جدول ۱ آورده شده است که UF، Control و UG به ترتیب نشان دهنده نمونه‌های کنترل (بدون پیش‌تیمار)، استخراج با پیش‌تیمار فراصوت گالاکتومانان از دانه شنبلیله و استخراج با پیش‌تیمار فراصوت گالاکتومانان از دانه لیلکی ایرانی می‌باشد. مراحل انجام استخراج و نمونه برداری برای مدل سازی به صورت شماتیک در شکل ۱ آورده شده است.



Fig 1 Ultrasound-assisted extraction of galactomannans from plant seeds

**Table 1** Samples utilized in modeling of ultrasound-assisted extraction of galactomannan from plant seeds (UF and UG indicated ultrasound-assisted extracted fenugreek and *Gleditsia caspica* galactomannans)

Sample Name	Pretreatment	Ultrasound power (W)	Ultrasound time (min)	Extraction temperature ( $^{\circ}$ C)
Control	Without pretreatment	-	-	-
UF 1	Ultrasound	200	20	55
UF 2	Ultrasound	400	20	55
UF 3	Ultrasound	600	20	55
UF 4	Ultrasound	400	10	55
UF 5	Ultrasound	400	30	55
UF 6	Ultrasound	400	20	40
UF 7	Ultrasound	400	20	70
UG 1	Ultrasound	200	20	55
UG 2	Ultrasound	400	20	55
UG 3	Ultrasound	600	20	55
UG 4	Ultrasound	400	10	55
UG 5	Ultrasound	400	30	55
UG 6	Ultrasound	400	20	40
UG 7	Ultrasound	400	20	70

گالاکتومانان‌ها به محلول اطراف از طریق لایه مرزی مایع - بخش سوم: انتقال ترکیب هدف توسط مکانیسم پخش و یا نفوذ به فاز مایع.

بسیاری از پژوهشگران بر این باورند که این فرآیند توسط نفوذ داخلی ذرات حل شونده در بستر جامد کنترل می‌شود و آن را با قانون دوم نفوذ فیک مدل می‌کنند [۲۳] آنچه که در این مطالعه فرض می‌شود این است که فرآیند استخراج تحت تأثیر انتقال

### ۲-۳- تئوری مدل سازی

در این پژوهش، سیستم استخراج شامل دانه‌های لیلکی ایرانی و شنبلیله به عنوان فاز جامد و آب به عنوان فاز مایع است. به طور کلی، فعل و انفعالاتی که در طی فرآیند استخراج گالاکتومانان از دو دانه گیاهی رخ می‌دهد را می‌توان به سه بخش اساسی تقسیم بندی کرد: بخش اول: انتقال ترکیب هدف توسط مکانیسم نفوذ به سطح خارجی ساختار جامد (دانه) - بخش دوم: انتقال

متفاوت فرآیندهای انتقال جرم است. در نتیجه، ضریب انتقال جرم کلی سیستم ( $k_c$ ) که در واقع ترکیبی از مقاومت داخلی و خارجی در برابر انتقال جرم است به صورت زیر بیان می‌شود [۲۳]:

$$K_c = \frac{K_{cl}K_{cs}}{K_{cl} + K_{cs}} \quad \text{معادله (۳)}$$

در این رابطه،  $k_{cs}$  و  $k_{cl}$  به ترتیب ضرایب انتقال جرم داخلی و خارجی هستند. به طور کلی، ضریب انتقال جرم از نسبت سرعت جرمی جریان به ضرب مساحت در تفاوت گرادیان غلظت به دست می‌آید [۳۱]. ضریب انتقال جرم در ذرات دانه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_{cs} = \frac{60D_e}{h^2a} \quad \text{معادله (۴)}$$

از طرف دیگر، ضرایب انتقال جرم در فاز مایع با توجه به اعداد بدون بعد رینولدز، اشمیت و شرود محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$Sh = 0.442Re^{0.69}Sc^{0.42} \quad \text{معادله (۵)}$$

$$Re = \frac{V_s h \rho_j}{\mu_j} \quad \text{معادله (۶)}$$

$$Sc = \frac{\mu_j}{\rho_j D_{ab}} \quad \text{معادله (۷)}$$

$$Sh = \frac{K_c h}{D_{ab}} \quad \text{معادله (۸)}$$

در این رابطه،  $V_j$  حجم حلال ( $m^3$ )،  $h$  ضخامت ( $m$ )،  $\rho_j$  دانسیته حلال ( $kg/m^3$ )،  $\mu_j$  ویسکوزیته حلال ( $Pa \cdot s$ ) و  $D_{ab}$  ضریب نفوذ گالاتومانان در آب ( $m^2/s$ ) است. عدد رینولدز نشان دهنده نسبت نیروی اینرسی به نیروی ویسکوز، عدد اشمیت، شدت نفوذ مومنتوم به شدت نفوذ جرمی و عدد شرود، نسبت شدت انتقال جرم ناشی از جابه‌جایی به شدت انتقال جرم ناشی از نفوذ است [۳۲ و ۳۳].

مولکولی که در یک سیستم تحت انتقال جرم است دارای دو بخش نفوذ به دلیل حرکت تصادفی مولکول‌ها و جابه‌جایی به دلیل سرعت کلی سیستم است. در این پژوهش، با توجه به اینکه سیستم در طول زمان استخراج تحت همزنی مداوم بود،  $E \nabla^2 C$  به عنوان بخش جابه‌جایی به معادله توازن جرم افزوده شد، در این معادله،  $E$ ، ضریب پخش و دارای بعد مشابه  $D$  است. در جریان‌های آرام ارتباط بین ضریب نفوذ و پخش را می‌توان به

جرم ذرات حل شونده بین بستر جامد و فاز مایع بوده و انتقال جرم توسط گرادیان غلظت حل شونده در فاز مایع و غلظت تعادلی آن کنترل می‌شود. در تعادل فرآیند عوامل مختلفی به خصوص دما و زمان استخراج و نسبت فاز جامد به مایع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند [۲۹].

با توجه به موارد مطرح شده و جهت ایجاد یک مدل مناسب، برای سیستم فرضیاتی نیز در نظر گرفته شد که عبارتند از: سیستم هم دما و هم فشار است و خواص فیزیکی آن در طول فرآیند ثابت است - پروفایل غلظت گالاتومانان در ذرات جامد در ابتدای فرآیند ثابت است - غلظت ترکیب هدف در حلال تنها وابسته به زمان است - حجم حلال ثابت در نظر گرفته می‌شود - فاز مایع اولیه عاری از هرگونه گالاتومانان است - ضریب نفوذ مستقل از زمان و مکان است.

با توجه به فرضیات اشاره شده و نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین، معادلات دیفرانسیلی زیر به عنوان تعادل جرم گالاتومانان‌ها در فاز مایع در نظر گرفته شد:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} - E \nabla^2 C_i - k_c a (C_i^* - C_i) + \nabla \cdot (\phi C_i) = 0 \quad \text{معادله (۱)}$$

$$\nabla \cdot \rho \vec{u} = 0 \quad \text{معادله (۲)}$$

این رابطه انتقال جرم گالاتومانان در فاز مایع را نشان می‌دهد که در آن نرخ تجمع ذرات هدف تحت تأثیر انتقال مولکولی و جابه‌جایی در طول حجم کنترل (بخش لاپلاس معادله) است. به طور کلی، در معادله اساسی انتقال جرم، سهم ناشی از نفوذ، سهم ناشی از واکنش همگن، سهم ناشی از تجمع و سهم ناشی از جابه‌جایی نقش اساسی را ایفا می‌کنند [۳۰]. در معادله ۱،  $C$  غلظت ( $kg/m^3$ )،  $t$  زمان ( $s$ )،  $E$  ضریب پخش ( $m^2/s$ )،  $k_c$  ضریب انتقال جرم ( $m/s$ )،  $C^*$  غلظت ترکیب هدف در دانه‌های گیاهی ( $kg/m^3$ )،  $a$  مساحت سطحی مخصوص ذرات ( $m^2/m^3$ ) و  $\phi$  فلاکس ذرات که متناظر با میزان سیالی است که وارد سیستم می‌شود. در پژوهش حاضر، سیستم، بسته در نظر گرفته شده است که هیچ ورودی یا خروجی نداشته باشد و در نتیجه این پارامتر در معادله، صفر در نظر گرفته شد [۲۹]. معادله ۲ بیانگر پایستگی جرم بوده و نشان می‌دهد که جرم کلی مواد در سیستم استخراج ثابت است. در این معادله،  $u$  سرعت ( $m/s$ ) و  $\rho$  دانسیته ذرات ( $kg/m^3$ ) است. همان گونه که در معادله ۱ نشان داده شده است، استخراج گالاتومانان از بافت، شامل انواع

DAKOTA برای به حداقل رساندن تابع هدف که به طور کلی از طریق کد شبیه ساز با توجه به محدودیت‌های متغیر و پاسخ‌های طرح محاسبه می‌شود، عمل می‌کند. این فرآیند با تغییر میزان پارامترهای مدل به گونه‌ای انجام می‌شود که میزان باقی مانده به صفر نزدیک شود.

در این مطالعه، هدف، بهینه سازی ضریب نفوذ پذیری ( $D_e$ ) و ضریب پخش ( $E$ ) با استفاده از روش معکوس برای مدل سازی فرآیند استخراج گالاتومنان‌ها بود. بر این اساس تابع هدف به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$\text{OF}(D_e, E) = \int [\bar{C}_{\text{exp}}(t_i) - \bar{C}_{\text{num}}(t_i, D_e, E)]^2 \quad (11)$$

برای هر کدام از پارامترهای مورد اشاره محدوده‌ای براساس مقادیر گزارش شده در منابع در نظر گرفته شد. داکوتا و کد شبیه ساز اطلاعات را از طریق خواندن و نوشتن فایل‌های کوتاه اطلاعاتی مبادله می‌کنند. الگوریتم تخمین پارامترها مقادیری را به هریک از متغیرها نسبت داده و آن را در کد شبیه ساز اعمال می‌کند. سپس مجموعه‌ای از داده‌های عددی برای غلظت را دریافت کرده و نتایج عددی را با داده‌های آزمایشی مقایسه می‌کند. در نهایت تابع هدف در داکوتا ارزیابی شده و زمانی که خطاها به میزان قابل قبول کاهش پیدا کنند، مقادیر متناظر به عنوان پارامترهای نهایی گزارش می‌شوند (شکل ۲).

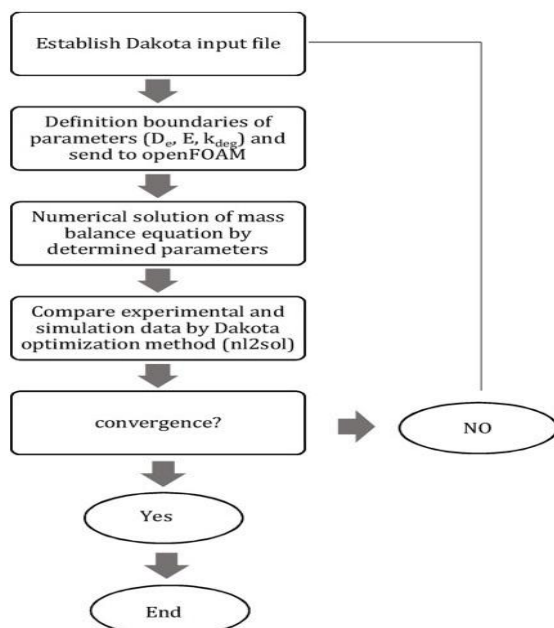


Fig 2 Schematic of numerical inverse method analysis

صورت زیر تعریف کرد:

$$\frac{E}{dv} = \frac{D}{dv} + \frac{dv}{192D} \quad (9)$$

در این رابطه،  $d$  قطر ستون استخراج و  $v$  سرعت جریان است. این رابطه بیان می‌کند که در جریان‌های بسیار پایین (نزدیک به صفر) ضریب نفوذ برابر با ضریب پخش است اما در جریان‌های غیر صفر بخش دوم سمت راست معادله غالب بوده و  $E$  متناسب با  $v$  است. تحت این شرایط،  $E$  به صورت معکوس با  $D$  متناسب است [۲۵].

## ۲-۴- مدل سازی عددی و تخمین پارامترها

مدل ریاضی مورد اشاره در قسمت قبلی، در نرم افزار محاسباتی OpenFoam (Foam-Extend, 3.1) توسعه پیدا کرد (این نرم افزار یک کتابخانه C++ مبتنی بر لینوکس می‌باشد که کدهای ضروری برای حل مسائل پیچیده انتقال سیالات را فراهم می‌کند) و مطابق با آن حل گری براساس روش حجم محدود ایجاد شد. پیش از اجرای کدها، هندسه و شبکه مش مورد نظر با استفاده از نرم افزار انسیس (ANSYS Fluent) تولید و در اختیار حلگر قرار گرفت. بدین ترتیب مدل مورد نظر در یک حلقه تکرار شونده حل شد و پایداری مطلوب زمانی حاصل شد که باقی مانده برای غلظت تا میزان یک صد هزارم کاهش یابد. خروجی حلگر نوشته شده در شبیه ساز به صورت منحنی تغییرات غلظت در برابر زمان بود که تابعی از پارامترهای ضریب نفوذ پذیری ( $D$ ) و ضریب پخش ( $E$ ) بود. براساس معیار خطای حداقل مربعات، بهترین میزان برای پارامترهای مدل زمانی حاصل می‌شود که کمترین میزان تابع هدف که در واقع اختلاف بین داده‌های آزمایشی و نتایج حاصل از مدل است، به دست بیاید [۲۴]:

$$\text{minimize: } f(x) = \sum_{i=1}^n [T_i(x)]^2 \quad (10)$$

در این رابطه،  $T_i$  باقی مانده در نقطه  $i$  بین مقادیر مدل و نتایج آزمایشی و  $x$  پارامتری است که بایستی پیش بینی شود.

برای رسیدن به این هدف، شبیه ساز (OpenFoam) به یک نرم افزار بهینه سازی (DAKOTA, USA) متصل شد. در واقع هدف اصلی از کاربرد نرم افزارهای بهینه سازی ایجاد ابزارهای سیستماتیک و سریع برای رسیدن به طراحی‌های بهینه با استفاده از روش‌های مبتنی بر شبیه سازی است. الگوریتم‌های بهینه سازی



مخلوط محدود می‌شود. این نقل و انتقال به دلیل تغییر در تعادل فیزیکی سیستم که در اثر اختلاف غلظت ایجاد می‌شود، روی می‌دهد [۳۷]. انتقال جرم هم شامل نفوذ جرم در مقیاس مولکولی و هم جابه‌جایی توده جرم در اثر جریان‌های جابه‌جایی می‌باشد [۳۸]. دیاگرام فرآیند استخراج با پیش‌تیمار فراصوت گالاکتومانان از دو دانه گیاهی شنبلیله و لیلکی ایرانی که نشان دهنده تغییرات غلظت در برابر زمان است در شکل‌های ۳ تا ۵ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در ابتدای فرآیند استخراج، مقدار گالاکتومانان استحصال شده به صورت صعودی افزایش پیدا کرد که علت آن احتمالاً شکسته شدن دیواره دانه‌ها به خصوص در اثر استفاده از امواج فراصوت می‌باشد. رفته رفته مشاهده می‌شود مقدار گالاکتومانان استحصال شده به صورت ثابت افزایش یافت که نشان می‌دهد مکانیسم غالب در فرآیند انتقال جرم، انتشار یا diffusion می‌باشد [۳۹ و ۴۰]. هر چه قدر به انتهای زمان فرآیند استخراج نزدیک می‌شویم مشاهده می‌شود که مقدار گالاکتومانان استخراج شده به یک مقدار ثابت رسید که نشان می‌دهد هیچ انتقال جرمی صورت نمی‌گیرد یا به مقدار بسیار ناچیز است که قابل اغماض است [۲۳]. مقادیر به دست آمده برای پارامترهای مؤثر در فرآیند انتقال جرم شامل ضریب نفوذ پذیری (D)، ضریب پخش (E) و ضریب انتقال جرم کلی سیستم ( $k_c$ ) در جدول ۲ آورده شده است. همچنین مقادیر به دست آمده برای  $R^2$ ، RMSE و SSE نیز برای نمونه‌های مختلف که با شرایط مختلف تحت تیمار با امواج فراصوت قرار گرفته‌اند نیز در این جدول آورده شده است. این مقادیر براساس مقایسه بین داده‌های آزمایشی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار به دست آمدند. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقادیر  $R^2$  برای همه نمونه‌ها بالاتر از ۰/۹۴ و مقادیر RMSE و SSE به ترتیب بین ۰/۵۳۲۶ و ۰/۹۶۹۴ و ۰/۱۲۵۸ و ۰/۸۵۶۵ می‌باشد. با توجه به این مقادیر می‌توان گفت که همخوانی مناسبی بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل عددی بود. به عبارت دیگر، مدل عددی ارائه شده قادر بود با تخمین مقادیر D، E و  $k_c$  به طور قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی برازش یابد. این برازش به واسطه استفاده از ابزار کاربردی داکوتا حاصل گردید که توانست به طور قابل قبولی خروجی نرم‌افزار مدل سازی عددی را با داده‌های آزمایشگاهی

در این مطالعه به منظور بررسی میزان برازش داده‌های آزمایشی با مدل از پارامترهای آماری  $R^2$ ، SSE و RMSE استفاده شد و مدل‌های بهینه وقتی  $R^2$  بیش از ۰/۷ بود، در حالی که RMSE حداقل بود، انتخاب شدند.

کد شبیه سازی بر روی یک کامپیوتر (ASUS TUF GAMING، Lubuntu، سیستم عامل ۶۴ بیتی) مجهز به یک CPU (AMD RYZEN7) و ۱۶ گیگابایت RAM حل شد.

### ۳- نتایج و بحث

گالاکتومانان حاصل از دانه لیلکی ایرانی به عنوان منبع جدید بیوپلیمر دارای ۱۰/۱۷٪ رطوبت، ۱/۱۴٪ خاکستر، ۰/۹۴٪ پروتئین، ۰/۹۱٪ چربی و ۸۳/۴۵٪ کربوهیدرات بود. همچنین انجام کروماتوگرافی با کارایی بالا (HPLC) نشان داد که دو مونوساکارید گالاکتوز و مانوز به عنوان مونوساکاریدهای اصلی در ساختار این گالاکتومانان بودند. یکی از موارد بسیار مهم در مورد گالاکتومانان‌ها، نسبت مانوز به گالاکتوز است که تأثیر بسیار زیادی بر خواص فیزیکیوشیمیایی، رئولوژیکی، امولسیفایری و کف‌کنندگی گالاکتومانان دارد. این نسبت در گالاکتومانان حاصل از دانه لیلکی ایرانی ۱/۹۵ می‌باشد که نزدیک به موارد گزارش شده برای گالاکتومانان‌های تجاری همچون صمغ گوار و صمغ دانه خرنوب بود [۳۴]. از طرف دیگر، گالاکتومانان حاصل از دانه شنبلیله دارای ۷/۰۳٪ رطوبت، ۵/۳۵٪ خاکستر، ۰/۸۵٪ پروتئین، ۰/۵۹٪ چربی و ۸۵/۸۹٪ کربوهیدرات بود و نتایج به دست آمده از HPLC شبیه به نتایج به دست آمده برای گالاکتومانان حاصل از دانه لیلکی ایرانی بود. این گالاکتومانان قابلیت بالایی برای جایگزینی با گالاکتومانان‌های تجاری همچون صمغ گوار و صمغ دانه خرنوب دارد [۲].

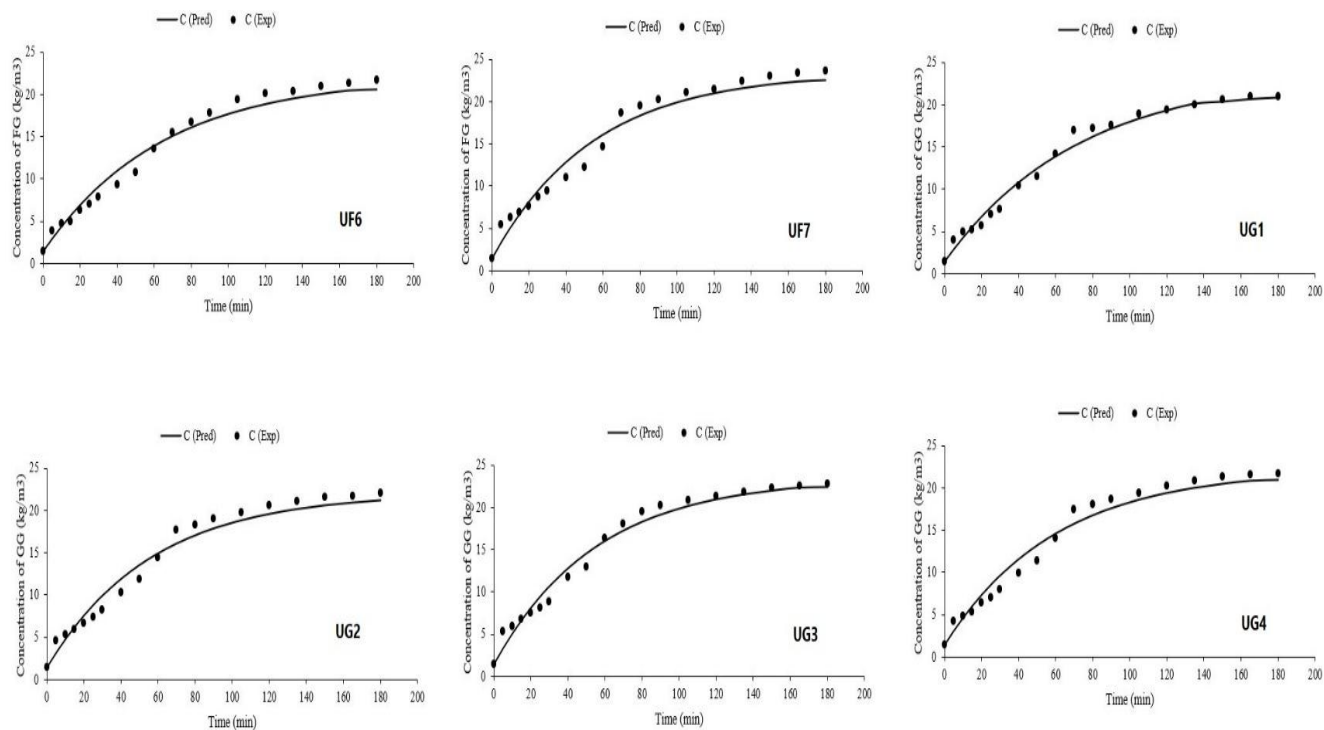
سیستم فراصوت پروب با دارا بودن پروب توانایی ایجاد شدت‌های بالایی را دارد. در استفاده از فراصوت به عنوان کمک تیمار فرآیند استخراج، کایتاسیون سبب ایجاد نیروهای برشی بالا می‌شود و ریز حباب‌ها تشدید خوردگی سطح را موجب می‌گردند و به این ترتیب افزایش بازده و سرعت فرآیند استخراج حاصل می‌شود [۳۵ و ۳۶]. اصطلاح انتقال جرم به مهاجرت و نقل و انتقال جزء تشکیل دهنده یک سیال یا جزئی از یک

همچنین ساختار و خواص گالاکتومانان استخراج شده می تواند بر نتایج به دست آمده تأثیرگذار باشد.

مقایسه نموده و مقادیر پارامترها را تخمین بزند. لازم به ذکر است که امکان همخوانی کامل بین این دو نوع داده وجود ندارد چرا که خطاهای احتمالی در طول فرآیند استخراج در آزمایشگاه و

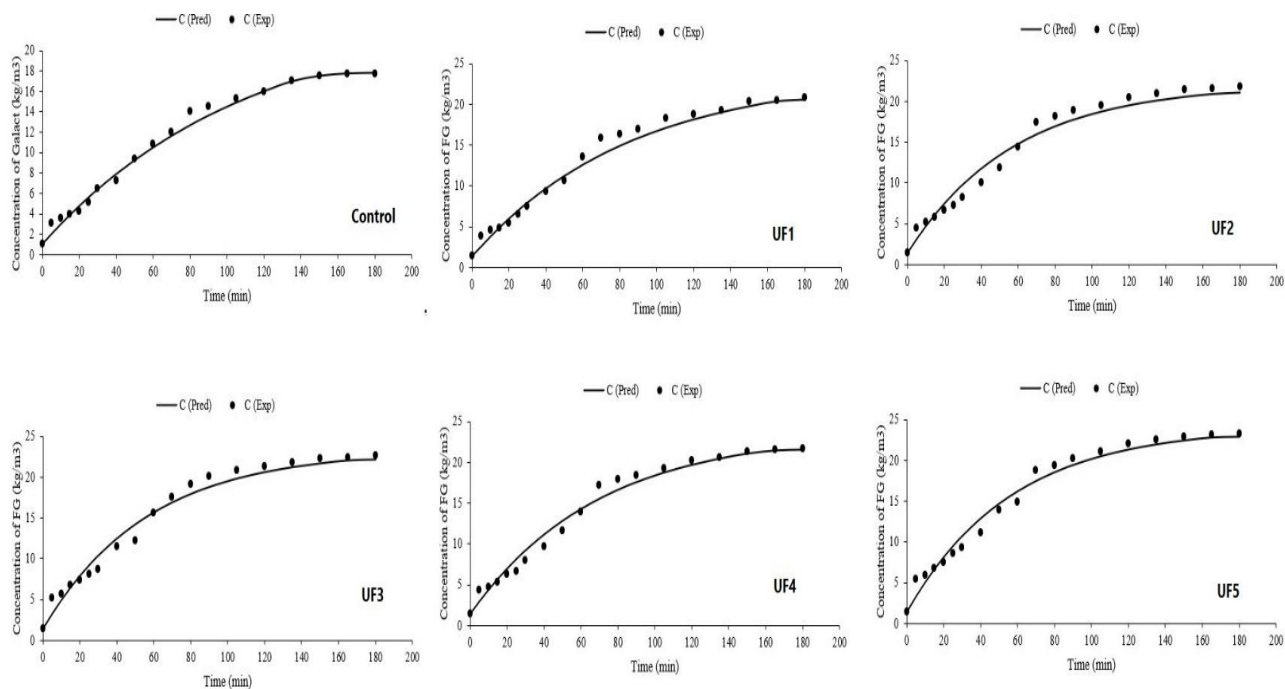
**Table 2** Estimated parameters of mass balance equation during UAE of galactomannans from plant seeds (Control, UF, UG, D,  $k_c$  and E indicated control sample, ultrasound-assisted extracted fenugreek galactomannan, ultrasound-assisted extracted *Gleditsia caspica* galactomannan, diffusion coefficient, total mass transfer coefficient and dispersion coefficient)

Sample Name	R <sup>2</sup>	RMSE	SSE	D	k <sub>c</sub>	E
Control	0.9878	0.5326	0.3906	$1.10 \times 10^{-12}$	$1.77 \times 10^{-8}$	$1.02 \times 10^{-7}$
UF 1	0.9764	0.9180	0.3572	$1.21 \times 10^{-12}$	$2.39 \times 10^{-8}$	$1.18 \times 10^{-7}$
UF 2	0.9678	0.8906	0.6460	$1.44 \times 10^{-12}$	$2.90 \times 10^{-8}$	$1.60 \times 10^{-7}$
UF 3	0.9790	0.9694	0.8565	$1.45 \times 10^{-12}$	$2.91 \times 10^{-8}$	$1.68 \times 10^{-7}$
UF 4	0.9803	0.9248	0.3019	$1.35 \times 10^{-12}$	$2.71 \times 10^{-8}$	$1.48 \times 10^{-7}$
UF 5	0.9815	0.9531	0.5006	$1.47 \times 10^{-12}$	$2.94 \times 10^{-8}$	$1.77 \times 10^{-7}$
UF 6	0.9746	0.7849	0.7919	$1.26 \times 10^{-12}$	$2.54 \times 10^{-8}$	$1.31 \times 10^{-7}$
UF 7	0.9685	0.9334	0.8969	$1.52 \times 10^{-12}$	$3.05 \times 10^{-8}$	$1.85 \times 10^{-7}$
UG 1	0.9793	0.7748	0.4066	$1.31 \times 10^{-12}$	$2.63 \times 10^{-8}$	$1.46 \times 10^{-7}$
UG 2	0.9452	0.9393	0.5701	$1.47 \times 10^{-12}$	$2.95 \times 10^{-8}$	$1.63 \times 10^{-7}$
UG 3	0.9799	0.9477	0.6915	$1.50 \times 10^{-12}$	$3.02 \times 10^{-8}$	$1.70 \times 10^{-7}$
UG 4	0.9687	0.9413	0.2069	$1.39 \times 10^{-12}$	$2.78 \times 10^{-8}$	$1.55 \times 10^{-7}$
UG 5	0.9774	0.6939	0.7719	$1.50 \times 10^{-12}$	$3.02 \times 10^{-8}$	$1.83 \times 10^{-7}$
UG 6	0.9597	0.8815	0.1258	$1.27 \times 10^{-12}$	$2.55 \times 10^{-8}$	$1.38 \times 10^{-7}$
UG 7	0.9660	0.8452	0.4638	$1.54 \times 10^{-12}$	$3.11 \times 10^{-8}$	$1.95 \times 10^{-7}$

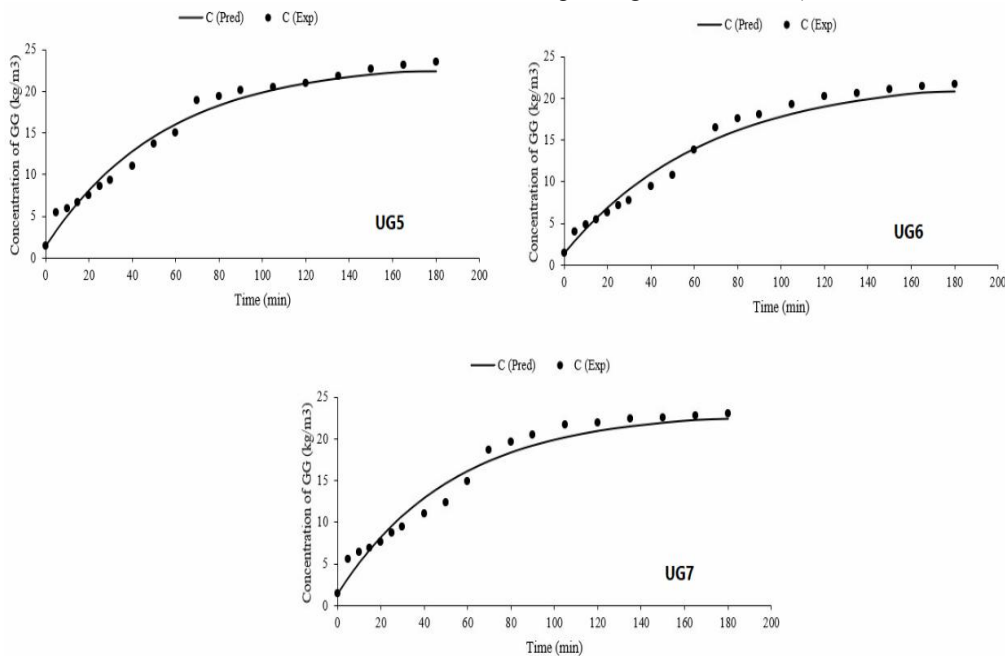


**Fig 3** Experimental and predicted values of galactomannan concentration (Part 1) (UF and UG belongs to fenugreek and *Gleditsia caspica* galactomannans)





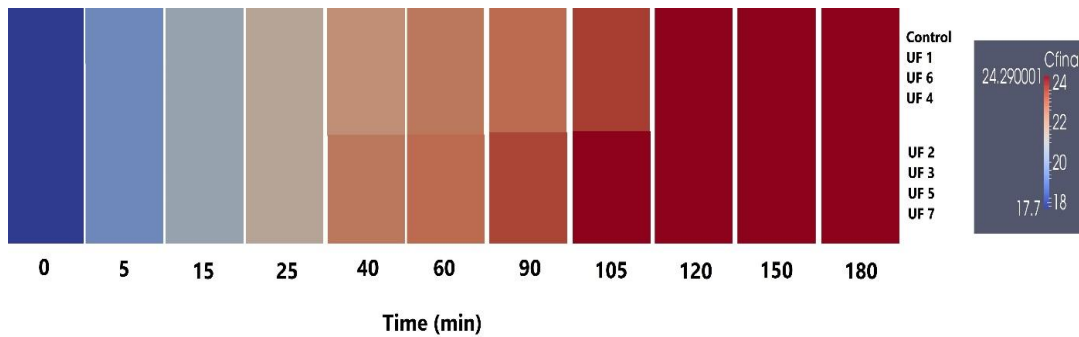
**Fig 4** Experimental and predicted values of galactomannan concentration (Part 2) (UF and UG belongs to fenugreek and *Gleditsia caspica* galactomannans)



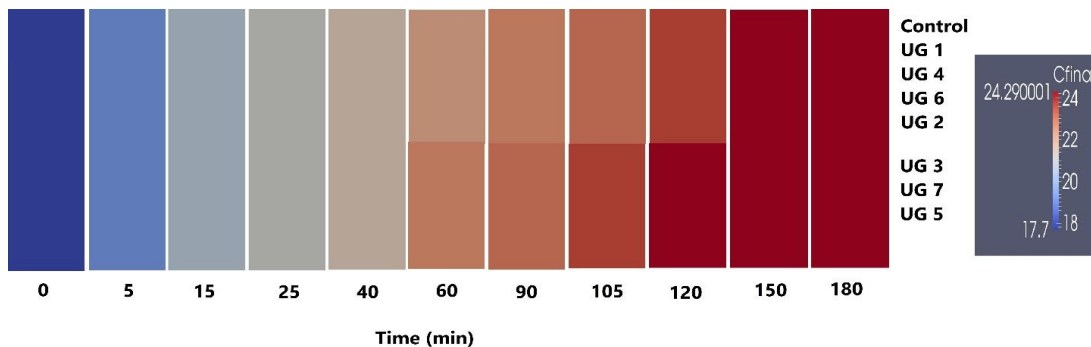
**Fig 5** Experimental and predicted values of galactomannan concentration (Part 3) (UF and UG belongs to fenugreek and *Gleditsia caspica* galactomannans)

به قرمز پر رنگ (مربوط به غلظت بالا) تغییر پیدا کرده است. این تغییر رنگ با نتایج به دست آمده برای پارامترهای مختلف جدول ۲ همخوانی دارد.

در شکل‌های ۶ و ۷ روند تغییرات غلظت با گذشت زمان به صورت کانتورهای رنگی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با گذشت زمان، غلظت گالاکتومانان افزایش یافته و به تبع آن رنگ کانتورها از آبی (مربوط به غلظت پایین)



**Fig 6** Trends of simulated fenugreek galactomannan concentration during extraction time (UF indicated ultrasound-assisted extracted fenugreek galactomannan)



**Fig 7** Trends of simulated *Gleditsia caspica* galactomannan concentration during extraction time (UG indicated ultrasound-assisted extracted *Gleditsia caspica* galactomannan)

اهمیت کمتری برخوردار هستند. هرچه با دیواره سخت‌تری روبه‌رو باشیم، تخریب دیواره توسط امواج فراصوت، سخت‌تر و استحصال ترکیب هدف زمان‌بر خواهد بود [۲۹ و ۴۱].

یکی از دلایل اصلی که نتایج حاصل از این پژوهش با پژوهش‌های پیشین قابلیت مقایسه ندارد این است که شرایط آزمایش، متغیرها و از همه مهم‌تر، روش شبیه‌سازی متفاوت از مطالعات گذشته می‌باشد. در اکثر مطالعات پیشین، داده‌های آزمایشی به دست آمده را با مدل‌های متداول انتقال جرم که صرفاً بخش تغییر غلظت ماده هدف در دانه یا میوه را در نظر می‌گیرند، برازش کرده‌اند در صورتی که در شرایط واقعی، علاوه بر این نوع انتقال جرم، انتقال جرم جابه‌جایی<sup>۵</sup> نیز وجود دارد [۴۲]. همچنین در بررسی بعضی پژوهش‌ها، مشاهده گردید که از قانون فیک (براساس این قانون، شار جرمی در واحد سطح یک جزء، متناسب با شیب غلظت آن است) برای تخمین ضریب انتشار استفاده شده است [۴۳]. با در نظر گرفتن ساختار متخلخل مواد غذایی، مقادیر به دست آمده برای این پارامتر عموماً بیشتر از مقادیر واقعی به دست می‌آید که

مقادیر  $D$  به دست آمده در این مطالعه برای هر دو گالاکتومانان، در دامنه  $1.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s} - 1.1 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$  بود. براساس بررسی‌های انجام شده بر روی مطالعات پیشین، تا به امروز برای تخمین مقدار  $D$  در فرآیند استخراج با پیش‌تیمار فراصوت گالاکتومانان‌های حاصل از دانه‌های گیاهی به خصوص دو دانه شنبلله و لیلکی ایرانی، پژوهشی صورت نگرفته است اما بر روی فرآیند استخراج با پیش‌تیمار فراصوت ترکیبات دیگر از جمله استخراج آنتوسیانین از زرشک [۲۳] و استخراج ترکیبات فنولی از پوست سیب [۳۹] مطالعاتی صورت گرفته است و مقادیر  $5.01 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s} - 2.05 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$  و  $6.32 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s} - 4.49 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$  برای پارامتر  $D$  گزارش شده است. عوامل مختلفی از جمله ساختار و ترکیب هر کدام از دانه‌ها، تأثیر امواج فراصوت بر دیواره دانه‌ها و ساختار گالاکتومانان-های استحصال شده بر روی غلظت به دست آمده و پارامتر-های اندازه‌گیری شده مؤثر هستند اما براساس تئوری انتقال جرم، عاملی که بیشتر در مقادیر به دست آمده برای پارامترهای مورد بررسی و غلظت گالاکتومانان استحصال شده مؤثر است، دیواره دانه‌ها می‌باشد و عوامل دیگر در مقایسه با این عامل، از

5. Convection

این خود نیز می‌تواند به عنوان ایراد مطرح باشد چون ممکن است این قانون نتواند مکانیسم اصلی یا کنترل کننده در انتقال جرم سیستم را به طور کامل پوشش دهد [۴۴]. به همین دلیل در پژوهش حاضر، علاوه بر تخمین مقدار ضریب انتشار گالاتومنان‌های استحصال شده، ضریب انتقال جرم کلی ( $k_c$ ) نیز محاسبه گردید که علاوه بر انتشار، جابه‌جایی نیز در نظر گرفته شده باشد تا بتوان نتایج به دست آمده را به شرایط واقعی نزدیک کرد.

همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، در فرآیند استخراج جامد - مایع، دو مرحله اصلی قابل تصور است: مرحله اول - مرحله‌ای که ماده هدف (که در پژوهش حاضر، گالاتومنان است) سریعاً از دیواره دانه استخراج می‌شود و مرحله دوم - مرحله‌ای که ماده هدف با مکانیسم انتشار، از لایه‌های داخلی دانه استخراج می‌شود که طبیعتاً سرعت استخراج آن نسبت به مرحله اول به مراتب کمتر است. در مرحله اول، مکانیسم جابه‌جایی، غالب است و پارامتر اصلی در آن  $E$  یا ضریب پخش است و در مرحله دوم، مکانیسم انتشار، غالب است و پارامتر اصلی در آن  $D$  است.

مقدار  $E$  تخمین زده شده برای هر دو گالاتومنان در دامنه  $10^{-10} \text{m}^2/\text{s} - 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$  بود. در بسیاری از پژوهش‌هایی که انتقال جرم در فرآیند استخراج جامد - مایع را بررسی می‌کنند، اندازه گیری ضریب پراکندگی از اهمیت زیادی برخوردار نیست. همانند  $D$ ، برای این پارامتر نیز مقداری در مطالعات پیشین برای فرآیند استخراج گالاتومنان‌ها گزارش نشده است ولی با توجه به مقادیر گزارش شده برای ترکیبات استخراج شده دیگر همچون آنتوسیانین و ترکیبات فنولی، مقادیر  $E$  به دست آمده در این پژوهش بیشتر از مقادیر گزارش شده توسط آنها بود که احتمالاً به دلیل خصوصیات فیزیکی دانه‌های گیاهی مورد بررسی (مانند سختی و نرمی دانه) و همچنین روش استخراج (لازم به ذکر است که روش خالص سازی هم می‌تواند بر این پارامتر مؤثر باشد) می‌باشد [۲۹ و ۴۱].

### ۳-۱- تأثیر دمای استخراج بر پارامترهای اندازه

#### گیری شده ( $E$ و $D$ )

همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها نیز اشاره شد، سه دمای استخراج شامل ۴۰، ۵۵ و ۷۰ درجه سلسیوس به عنوان دماهای انتخابی در نظر گرفته شدند. در شکل‌های ۳ تا ۵، نمودارهای  $UF2$ ،  $UF6$  و  $UF7$  در بخش گالاتومنان حاصل از دانه

شنبلیله و نمودارهای  $UG2$ ،  $UG6$  و  $UG7$  در بخش گالاتومنان حاصل از دانه لیلکی ایرانی، جهت بررسی تأثیر دمای استخراج بر پارامترهای اندازه گیری شده آورده شده‌اند که تغییرات غلظت در برابر زمان را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای استخراج از ۴۰ به ۷۰ درجه سلسیوس، غلظت گالاتومنان استحصال شده نیز افزایش یافت. در هر سه نمودار آنچه مشخص است این است که در ابتدا غلظت گالاتومنان به طور صعودی با شتاب افزایش یافت و سپس هر چه قدر به انتهای زمان استخراج نزدیک می‌شویم، غلظت به طور ثابت افزایش پیدا کرد. در بسیاری از فرآیندهای غذایی، حلالیت و ضریب انتشار ترکیبات با افزایش در دما، افزایش می‌یابد که به افزایش در راندمان استخراج منتهی می‌شود. علت این مسئله، افزایش در انرژی داخلی مولکول‌ها و کاهش ویسکوزیته دینامیک حلال می‌باشد (معادله استوک - انیشتین) [۴۵]. همچنین افزایش دما سبب دناتوراسیون یا تغییر شکل بعضی ترکیبات مؤثر در استحکام دیواره دانه‌های گیاهی می‌شود و بدین صورت سبب نرم‌تر شدن و احتمالاً شکسته شدن دیواره دانه‌ها شده و ضریب انتشار گالاتومنان استحصال شده بیشتر می‌گردد [۴۶]. همان‌طور که در جدول ۲ نیز مشاهده می‌گردد، با افزایش دمای استخراج از ۴۰ به ۷۰ درجه سلسیوس، مقادیر  $D$  گالاتومنان حاصل از دانه شنبلیله از  $10^{-12} \text{m}^2/\text{s} \times 1/26$  به  $10^{-12} \text{m}^2/\text{s} \times 1/54$  و برای گالاتومنان حاصل از دانه لیلکی ایرانی از  $10^{-12} \text{m}^2/\text{s} \times 1/27$  به  $10^{-12} \text{m}^2/\text{s} \times 1/54$  افزایش یافت. همچنین، مقادیر  $k_c$  به عنوان ضریب انتقال جرم کلی نیز از  $10^{-10} \text{m}^2/\text{s} \times 2/54$  به  $10^{-10} \text{m}^2/\text{s} \times 3/05$  برای گالاتومنان شنبلیله و از  $10^{-10} \text{m}^2/\text{s} \times 2/55$  به  $10^{-10} \text{m}^2/\text{s} \times 3/11$  برای گالاتومنان حاصل از دانه لیلکی ایرانی، افزایش نشان داد. این افزایش در پژوهش‌های دیگر نیز گزارش شده است.

همان‌طور که در نمودارهای مربوط به تأثیر دمای استخراج بر غلظت گالاتومنان‌های استحصال شده از دانه‌های گیاهی در شکل‌های ۳ تا ۵ مشاهده می‌گردد، در ابتدای فرآیند استخراج، افزایش رو به صعود قابل ملاحظه‌ای در غلظت گالاتومنان‌ها مشاهده گردید که در آن عامل اصلی انتقال جرم، دسپرسیون و یا ضریب پخش بود. در این بین، نمونه‌های با دمای استخراج ۷۰ درجه سلسیوس دارای ضریب پخش یا  $E$  بالاتری ( $10^{-10} \text{m}^2/\text{s} \times 1/85$ ) برای گالاتومنان شنبلیله و

نمونه‌های با دمای ۴۰ و ۵۵ درجه سلسیوس بود. دلیل این مسئله همان تأثیر دمای استخراج بر راندمان استخراج گالاکتومانان‌ها است به صورتی که در دماهای بالاتر، تأثیر دما بر دیواره دانه بیشتر شده و سبب خروج بیشتر گالاکتومانان از دانه‌ها می‌گردد که به تبع آن، غلظت گالاکتومانان استحصال شده افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. با گذشت زمان، همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، افزایش غلظت به صورت ثابت بود چرا که مکانیسم انتقال جرم از پخش به انتشار تغییر پیدا می‌کند. با این وجود، مقادیر  $D$  و  $k_c$  با افزایش دما افزایش یافتند هر چند این افزایش چندان ملموس نیست (جدول ۲). دلیل ملموس نبودن این افزایش احتمالاً خروج ترکیبات غیر از گالاکتومانان از دیواره دانه‌ها در نتیجه‌ی افزایش دما باشد. در انتها، ذکر این نکته ضروری است که در نمونه کنترل که در آن از امواج فراصوت به عنوان پیش تیمار استفاده نشده بود، مقادیر پارامترهای اندازه گیری شده کمتر از نمونه‌های دیگر بود و این خود نیز دلیل دیگری بر افزایش راندمان استخراج با حضور امواج فراصوت می‌باشد. مقادیر  $D$  و  $E$  به دست آمده برای نمونه‌های مربوط به گالاکتومانان لیلکی ایرانی بیشتر از نمونه‌های حاوی گالاکتومانان شنبلیله بودند که علت آن می‌تواند ساختار متفاوت دو دانه گیاهی، نوع و ترکیب گالاکتومانان استحصال شده و تأثیر روش استخراج بر هیدروکلوئید استحصال شده باشد.

### ۳-۲- تأثیر مقدار زمان استفاده از امواج فراصوت بر پارامترهای اندازه گیری شده ( $E$ و $D$ )

سه زمان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه به عنوان زمان‌های انتخابی جهت بررسی تأثیر زمان استفاده از امواج فراصوت بر غلظت گالاکتومانان‌های استحصال شده انتخاب شدند و نمودارهای غلظت در برابر زمان برای این نمونه‌ها که شامل UF4، UF2 و UF5 برای گالاکتومانان شنبلیله و UG2، UG4 و UG5 برای گالاکتومانان لیلکی ایرانی بودند در شکل‌های ۳ تا ۵ آورده شده است. همانند دمای استخراج، با افزایش زمان استفاده از امواج فراصوت از ۱۰ به ۳۰ دقیقه، غلظت گالاکتومانان استحصال شده افزایش پیدا کرد. در نمونه کنترل که از هیچ گونه پیش تیماری استفاده نشده بود، مقدار

گالاکتومانان استحصال شده پایین‌تر از نمونه‌های با پیش تیمار بود. علت افزایش غلظت گالاکتومانان با افزایش زمان این است که وجود امواج فراصوت سبب تخریب دیواره دانه‌های گیاهی و بیشتر شدن تماس بین حلال و بافت جامد می‌شود و بدین طریق راندمان استخراج افزایش می‌یابد [۲۳]. مقادیر پارامترهای اندازه گیری شده در نمونه کنترل نیز پایین‌تر از مقادیر نمونه‌های استخراج شده با امواج فراصوت بود (جدول ۲). در همه نمونه‌ها، یک افزایش صعودی در مراحل ابتدایی استخراج مشاهده گردید که در انتهای زمان به افزایش با سرعت ثابت منتهی شد. این افزایش با سرعت ثابت احتمالاً به دلیل کاهش در انتشار ترکیب هدف از دانه به حلال و به تبع آن کاهش در مقدار ضریب انتشار باشد. در واقع می‌توان این‌گونه بیان کرد که هر چقدر دانه‌ها بیشتر در معرض امواج فراصوت قرار بگیرند، دیواره دانه‌ها دچار شکستگی و تخریب بیشتری می‌شود و در نتیجه احتمال دارد ترکیبات دیگری غیر از گالاکتومانان که ماده هدف است، خارج شود و بدین ترتیب مقدار انتشار آن کاهش پیدا می‌کند و تأثیر خود را در نتایج نشان می‌دهد [۴۷]. نتیجه مشابه توسط Wang و همکاران (۲۰۱۲) [۴۷] و Carrera و همکاران (۲۰۱۲) [۴۸] و همکاران (۲۰۱۶) [۴۹] که بر روی استخراج ترکیبات مختلف با پیش تیمار فراصوت پژوهش‌هایی انجام داده بودند نیز گزارش شد. براساس آنچه در جدول ۲ نیز آورده شده است، مقادیر  $D$  با افزایش زمان استفاده از امواج فراصوت از ۱۰ دقیقه به ۳۰ دقیقه، از  $1.35 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  به  $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  و از  $1.47 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  برای گالاکتومانان شنبلیله و از  $1.39 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  به  $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  برای گالاکتومانان لیلکی ایرانی افزایش یافت. همچنین تفاوت معنی‌داری بین مقادیر  $D$  به دست آمده برای نمونه‌هایی که ۲۰ و ۳۰ دقیقه در معرض امواج فراصوت قرار گرفته بودند مشاهده نشد و اعداد به دست آمده بسیار به هم نزدیک بودند. این مسئله شاید به این دلیل باشد که بعد از تخریب نسبی دیواره، مقدار گالاکتومانان استحصال شده تغییر چندانی پیدا نمی‌کند و مانند دقایق اول استخراج نیست که دیواره هنوز به حد کافی تخریب نشده باشد. همانند این پارامتر، مقادیر  $E$  نیز با افزایش زمان از ۱۰ به ۳۰ دقیقه، از  $1.48 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  به  $1.77 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  برای گالاکتومانان شنبلیله و از  $1.55 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  به  $1.83 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  رسید اما بر خلاف  $D$ ، مقادیر به دست آمده برای زمان‌های ۲۰ و ۳۰

دقیقه با هم متفاوت بودند. احتمالاً دلیل این مسئله، خروج ترکیبات غیر گالاکتومانان باشد که سبب بیشتر شدن مکانیسم پخش می‌شود و از مکانیسم انتشار جلوگیری می‌کند. در نتیجه مقدار E به صورت صعودی بیشتر می‌شود اما مقدار D با وجود افزایش، به صورت ثابت می‌ماند. همانند پخش گذشته، مقادیر D و E به دست آمده برای نمونه‌های مربوط به گالاکتومانان لیلکی ایرانی بیشتر از نمونه‌های حاوی گالاکتومانان شنبليله بودند که علت آن می‌تواند ساختار متفاوت دو دانه گیاهی، نوع و ترکیب گالاکتومانان استحصال شده و تأثیر روش استخراج بر هیدروکلئید استحصال شده باشد.

### ۳-۳- تأثیر توان امواج فراصوت بر پارامترهای اندازه گیری شده (E و D)

سه توان ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ وات به عنوان مقادیر انتخاب شده جهت بررسی اثر توان فراصوت بر پارامترهای انتقال جرم در نظر گرفته شد. داده‌های آزمایشگاهی و پیش بینی شده توسط مدل برای نمونه‌های UF1، UF2، UF3 و UF3 مربوط به گالاکتومانان شنبليله و UF1، UF2، UF3 مربوط به گالاکتومانان لیلکی ایرانی که توان فراصوت در آن‌ها متغیر بود، در شکل‌های ۳ تا ۵ آورده شده است. همان‌طور که در نمودارها نیز مشاهده می‌گردد، با افزایش توان فراصوت از ۲۰۰ به ۶۰۰ وات، غلظت گالاکتومانان استخراج شده افزایش یافت. استفاده از دستگاه فراصوت پروب دارای مزایایی همچون کاهش زمان فرآیند، بالا بودن راندمان استخراج و مقرون به صرفه بودن از لحاظ انرژی است [۲]. همچنین استفاده از اولتراسوند پروب می‌تواند سریع‌تر و راحت‌تر دیواره دانه را تخریب کند و بدین صورت هم راندمان استخراج را افزایش دهد و هم بتواند زمان فرآیند را کاهش دهد [۲۳]. براساس نتایج به دست آمده برای پارامترهای مؤثر در انتقال جرم که در جدول ۲ آورده شده است، با افزایش توان فراصوت از ۲۰۰ به ۶۰۰ وات مقادیر D و E به ترتیب از  $1.0 \times 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$  به  $1.21 \times 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$  و  $1.0 \times 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$  به  $1.18 \times 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$  و  $1.0 \times 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$  به  $1.45 \times 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$  برای گالاکتومانان شنبليله و  $1.0 \times 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$  به  $1.31 \times 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$  و  $1.0 \times 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$  به  $1.70 \times 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$  برای گالاکتومانان لیلکی ایرانی افزایش یافت. بین مقادیر به دست آمده برای هر دو پارامتر در نمونه‌های با توان ۶۰۰ و ۴۰۰ وات تفاوت قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد. در هر سه توان بررسی شده، در ابتدای فرآیند، مکانیسم غالب، پخش بود و غلظت

گالاکتومانان‌ها به صورت صعودی افزایش یافت. در ادامه، مکانیسم غالب از پخش به انتشار تغییر یافت و بدین صورت، با وجود افزایش غلظت، از حالت صعودی به ثابت تغییر یافت که احتمالاً دلیل تفاوت غیر قابل ملاحظه بین نمونه‌های تیمار شده با ۴۰۰ و ۶۰۰ وات نیز همین مسئله می‌باشد. در بین کل نمونه‌های بررسی شده برای هر دو گالاکتومانان، نمونه‌هایی که در آن‌ها از توان ۴۰۰ وات، زمان ۲۰ دقیقه و دمای استخراج ۷۰ درجه سلسیوس استفاده شده بود، دارای مقادیر D و E بالاتری نسبت به نمونه‌های دیگر بودند. همان‌طور که در این بخش و دو بخش قبلی نیز اشاره شد، دو توان ۴۰۰ وات و ۶۰۰ وات و همچنین زمان ۲۰ و ۳۰ دقیقه، از لحاظ مقادیر دو پارامتر تفاوت قابل ملاحظه‌ای نداشتند اما در مورد دمای استخراج، تفاوت بین ۵۵ و ۷۰ درجه سلسیوس معنی‌دار بود. در واقع در نمونه‌های UF7 و UF7 که بالاترین مقادیر D و E به دست آمد، شرایط برای استحصال حداکثری گالاکتومانان از دو دانه گیاهی فراهم شده بود.

### ۴- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، مقادیر پارامترهای مؤثر در فرآیند انتقال جرم (ضرایب انتقال جرم کلی  $(K_c)$ ، انتشار (D) و پخش (E)) مربوط به استخراج با پیش‌تیمار فراصوت گالاکتومانان از دو دانه شنبليله و لیلکی ایرانی به دست آمد. برای محاسبه این مقادیر از روش جدید و دقیق به نام روش عددی معکوس که بر مبنای حجم محدود بود، استفاده گردید. مقادیر  $R^2$ ، RMSE و SSE از مقایسه بین داده‌های آزمایشی و پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار برای نمونه‌های مختلف به دست آمدند و نتایج حاکی از آن داشت که همخوانی قابل قبولی بین این دو نوع داده برقرار بود. این داده‌ها در نمودارهای غلظت در برابر زمان با هم مقایسه شدند. این همخوانی مناسب بین داده‌ها، نشان داد که روش عددی معکوس می‌تواند به طور قابل قبولی به عنوان گزینه مناسبی جهت تخمین مقدار غلظت گالاکتومانان‌های استحصال شده در فرآیند پیچیده‌ای به نام استخراج با پیش‌تیمار فراصوت و همچنین تعیین مقادیر پارامترهای مؤثر در انتقال جرم در نظر گرفته شود. در بیشتر مطالعات پیشین، از مدل‌های ساده کینتیکی استفاده شده بود که در بیشتر موارد نمی‌توانست به طور جامع و مؤثر در فرآیندهای پیچیده عمل کند اما نتایج این پژوهش، عملکرد

- Testing, 77, 105868.
- [9] Zhao, Y., Yang, J., Liu, Y., Zhao, M., & Wang, J. (2018). Ultrasound assisted extraction of polysaccharides from *Lentinus edodes* and its anti-hepatitis B activity in vitro. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 2217 – 2223.
- [10] Gupta, S.K., Kalaiselvan, V., Srivastava, S., Saxena, R., & Agrawal, S.S. (2010). *Trigonella foenum – graecum* (Fenugreek) protects against selenite – induced oxidative stress in experimental cataractogenesis. *Biological Trace Element Research*, 136 (3), 533 – 542.
- [11] Niknam, R., Mousavi, M., & Kiani, H. (2020). New studies on galactomannan extracted from *Trigonella foenum – graecum* (fenugreek) seed: Effect of subsequent use of ultrasound and microwave on the physicochemical and rheological properties. *Food and Bioprocess Technology*, 13(5), 882 – 900.
- [12] M. Busch, V., A. Kolender, A., R. Santagapita, P., & Buera, P. (2015). Vinal gum, a galactomannan from *Prosopis ruscifolia* seeds: Physicochemical characterization. *Food Hydrocolloids*, 51, 495 – 502.
- [13] Shaheen, U., A. Ragab, E., N. Abdalla, A., & Bader, A. (2018). Triterpenoidal saponins from the fruits of *Gleditsia caspica* with proapoptotic properties. *Phytochemistry*, 145, 168 – 178.
- [14] Liyanage, S., Abidi, N., Auld, D., & Moussa, H. (2015). Chemical and physical characterization of galactomannan extracted from guar cultivars (*Cyamopsis tetragonolobus* L.). *Industrial Crops and Products*, 74, 388 – 396.
- [15] Guo, X., Shang, X., Zhou, X., Zhao, B., & Zhang, J. (2017). Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from *Rhododendron aganniphum*: Antioxidant activity and rheological properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 246 – 255.
- [16] Sun, M., Sun, Y., Li, Y., Liu, Y., Liang, J., & Zhang, Z. (2018). Physical properties and antidiabetic potential of a novel galactomannan from seeds of *Gleditsia japonica* var. *delavayi*. *Journal of Functional Foods*, 46, 546 – 555.
- [17] Roohi, R., Abedi, E., Hashemi, S.M.B., Marszalek, K., Lorenzo, J., & Barba, F. (2019). Ultrasound-assisted bleaching: Mathematical and 3D computational fluid
- قابل قبول روش عددی معکوس در نیل به این هدف را نشان داد.
- ۵-منابع**
- [1] Niknam, R., Ghanbarzadeh, B., Ayaseh, A., & Rezagholi, F. (2019). The hydrocolloid extracted from *Plantago major* seed: Effects on emulsifying and foaming properties. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 41(5), 667 – 673.
- [2] Niknam, R., Ghanbarzadeh, B., Ayaseh, A., & Rezagholi, F. (2020). Barhang (*Plantago major* L.) seed gum: Ultrasound-assisted extraction optimization, characterization and biological activities. *Journal of Food Processing and Preservation*. DOI: 10.1111/jfpp.14750.
- [3] Jiang, Y., Koteswara Reddy, C., Huang, K., Chen, L., & Xu, B. (2019). Hydrocolloidal properties of flaxseed galactomannan / konjac glucomannan compound gel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 133, 1156 – 1163.
- [4] Niknam, R., Ghanbarzadeh, B., Ayaseh, A., & Rezagholi, F. (2018). The effects of *Plantago major* seed gum on steady and dynamic oscillatory shear rheology of sunflower oil-in-water emulsions. *Journal of Texture Studies*, 49(5), 536 – 547.
- [5] Wang, P., Luo, J., Wang, X.B., Fan, B.Y., & Kong, L.Y. (2015). New indole glucosides as biosynthetic intermediates of camptothecin from the fruits of *Camptotheca acuminata*. *Fitoterapia*, 103, 1 – 8.
- [6] Rashid, F., Hussain, S., & Ahmed, Z. (2018). Extraction purification and characterization of galactomannan from fenugreek for industrial utilization. *Carbohydrate Polymers*, 180, 88 – 95.
- [7] Bakhshy, E., Zarinkamar, F., & Nazari, M. (2019). Isolation, qualitative and quantitative evaluation of galactomannan during germination of *Trigonella persica* (Fabaceae) seed. *International Journal of Biological Macromolecules*, 137, 286 – 295.
- [8] Niknam, R., Ghanbarzadeh, B., Ayaseh, A., & Hamishehkar, H. (2019). *Plantago major* seed gum based biodegradable films: Effects of various plant oils on microstructure and physicochemical properties of emulsified films. *Polymer*



- algorithm technique. *Geophysical Journal International*, 163, 403 -418.
- [26] Anderson, B., & Singh, P. (2006). Effective heat transfer coefficient measurement during air impingement thawing using an inverse method. *International Journal of Refrigeration*, 29(2), 281 – 293.
- [27] Fabbri, A., & Cevoli, C. (2016). Rheological z finite elements model inversion. *Journal of Food Engineering*, 169, 172 – 178.
- [28] Niknam, R., Mousavi, M., & Kiani, H. (2021). intrinsic viscosity, steady and oscillatory shear rheology of a new source of galactomannan isolated from *Gleditsia caspica* (Persian honey locust) seeds in aqueous dispersions. *European Food Research and Technology*, 247 (10), 2579 – 2590.
- [29] Kiani, H., Hojjatoleslami, M., & Mousavi, M. (2016). Data reduction of a numerically simulated sugar extraction process in counter-current flow horizontal extraction. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18(3), 615 – 627.
- [30] Tramontin, D., Alves, A., Bolzan, A., & Quadri, M. (2021). Mathematical modeling and numerical simulation of the extraction of bioactive compounds from *Artocarpus heterophyllus* with supercritical CO<sub>2</sub>. *The Journal of Supercritical Fluids*, 177, 105353.
- [31] Yuan, Y., Tan, L., Xu, Y., Yuan, Y., & Dong, J. (2019). Numerical and experimental study on drying shrinkage-deformation of apple slices during process of heat-mass transfer. *International Journal of Thermal Sciences*, 136, 539 – 548.
- [32] Sajjadi, B., Asgharzadehahmadi, S., Asaithambi, P., Abdul Raman, A., & Parthasarathy, R. (2017). Investigation of mass transfer intensification under power ultrasound irradiation using 3D computational simulation: A comparative study. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 504 – 518.
- [33] Sorourian, R., Khajehrahimi, A., Tadayoni, M., Azizi, M.H., & Hojjati, M. (2020). Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from *Typha domingensis*: Structural characterization and functional properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 160, 758 – 768.
- [34] Niknam, R., Mousavi, M., & Kiani, H. (2021). A new source of galactomannan dynamics simulation of ultrasound parameters on microbubble formation and cavitation structures. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 55, 66 – 79.
- [18] Gorgani, L., Mohammadi, M., D.Najafpour, G., & Nikzad, M. (2017). Sequential microwave-ultrasound-assisted extraction of piperine from black pepper (*Piper nigrum* L.). *Food and Bioprocess Technology*, 10, 2199 – 2207.
- [19] Zheng, Q., Ren, D., Yang, N., & Yang, X. (2016). Optimization of ultrasound-assisted extraction of polysaccharides with chemical composition and antioxidant activity from the *Artemisia sphaerocephala* Krasch seeds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 91, 856 – 866.
- [20] Hamed, F., Mohebbi, M., Shahidi, F., & Azarpazhooh, E. (2018). Ultrasound-assisted osmotic treatment of model food impregnated with pomegranate peel phenolic compounds: Mass transfer, texture and phenolic evaluations. *Food and Bioprocess Technology*, 11, 1061 – 1074.
- [21] Lu, X., Zheng, Z., Li, H., Cao, R., Zheng, Y., Yu, H., Xiao, J., Miao, S., & Zheng, B. (2017). Optimization of ultrasonic – microwave assisted extraction of oligosaccharides from lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds. *Industrial Crops and Products*, 107, 546 – 557.
- [22] Kiani, H., & Sun, D.W. (2016). Numerical modeling of particle to fluid heat transfer during ultrasound assisted immersion cooling. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 99, 25 – 32.
- [23] Homayoonfal, M., Mousavi, S.M., Kiani, H., Askari, G.H., Khani, M., Rezazad, M., & Alizadeh, M. (2018). The use of an innovative inverse numerical modeling method for the evaluation and parameter estimation of barberry anthocyanins ultrasound assisted extraction. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 133, 1 – 11.
- [24] Fabbri, A., Cevoli, C., & Troncoso, R. (2014). Moisture diffusivity coefficient estimation in solid food by inversion of a numerical model. *Food Research International*, 56, 63 – 67.
- [25] Currenti, G., Negro, C., & Nunnari, G. (2005). Inverse modeling of volcanomagnetic fields using a genetic

- [42] Xu, Z., Wu, J., Zhang, Y., Hu, X., Liao, X., & Wang, Z. (2010). Extraction of anthocyanins from red cabbage using high pressure CO<sub>2</sub>. *Bioresource Technology*, 101 (18), 7151 – 7157.
- [43] Abrahamsson, V., Andersson, N., Nilsson, B., & Turner, C. (2016). Method development in inverse modeling applied to supercritical fluid extraction of lipids. *The Journal of Supercritical Fluids*, 111, 14 – 27.
- [44] Kiani, H., Karimi, F., Labbafi, M., & Fathi, M. (2018). A novel inverse numerical modeling method for the estimation of water and salt mass transfer coefficients during ultrasonic assisted-osmotic dehydration of cucumber cubes. *Ultrasonic Sonochemistry*, 44, 171 – 176.
- [45] Cisse, M., Vaillant, F., Acosta, O., Mayer, C., & Dornier, M. (2009). Thermal degradation kinetics of anthocyanins from blood orange, blackberry, and roselle using the Arrhenius, eyring, and ball models. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57, 6285 – 6291.
- [46] Tao, Y., Zhang, Z., & Sun, D. (2014). Experimental and modeling studies of ultrasound-assisted release of phenolics from oak chips into model wine. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21, 1839 – 1848.
- [47] Carrera, C., Ruiz-Rodriguez, A., Palma, M., & Barroso, C.G. (2012). Ultrasound assisted extraction of phenolic compounds from grapes. *Analytica Chimica Acta*, 732, 100 – 104.
- [48] Wang, X.S., Wu, Y.F., Dai, S.L., Chen, R., & Shao, Y. (2012). Ultrasound-assisted extraction of geniposide from *Gardenia jasminoids*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19, 1155 – 1159.
- [49] Lazar, I., Talmaciu, A.I., Volf, I., & Popa, V.I. (2016). Kinetic modeling of the ultrasound-assisted extraction of polyphenols from *Picea abies* bark. *Ultrasonics Sonochemistry*, 32, 191 – 197.
- isolated from *Gleditsia caspica* (Persian honey locust) seeds: Extraction and comprehensive characterization. *Journal of Food Processing and Preservation*, e15774.
- [35] Jiang, C., Li, X., Jiao, Y., Jiang, D., Zhang, L., Fan, B., & Zhang, Q. (2014). Optimization for ultrasound-assisted extraction of polysaccharides with antioxidant activity in vitro from the aerial root of *Ficus microcarpa*. *Carbohydrate Polymers*, 110, 10 – 17.
- [36] Kiani, H., Sun, D., Delgado, A., & Zhang, Z. (2012). Investigation of the effect of power ultrasound on the nucleation of water during freezing of agar gel samples in tubing vials. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19, 576 – 581.
- [37] Mtetwa, M., Qian, L., Zhu, H., Cui, F., Zan, X., Sun, W., Wu, D., & Yang, Y. (2020). Ultrasound-assisted extraction and antioxidant activity of polysaccharides from *Acanthus ilicifolius*. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14, 1223 – 1235.
- [38] Miano, A., Ibarz, A., & Augusto, A. (2016). Mechanisms for improving mass transfer in food with ultrasound technology: Describing the phenomena in two model cases. *Ultrasonics Sonochemistry*, 29, 413 – 419.
- [39] Pinelo, M., Zornoza, B., & Meyer, A. (2008). Selective release of phenols from apple skin: Mass transfer kinetics during solvent and enzyme-assisted extraction. *Separation and Purification Technology*, 63(3), 620 – 627.
- [40] Goula, A. (2013). Ultrasound-assisted extraction of pomegranate seed oil – Kinetic modeling. *Journal of Food Engineering*, 117, 492 – 498.
- [41] Fabbri, A., & Cevoli, C. (2015). 2D water transfer finite elements model of salami drying, based on real slice image and simplified geometry. *Journal of Food Engineering*, 158, 73 – 79.



## Modeling of ultrasound – assisted extraction of galactomannans obtained from *Trigonella foenum – graceum* (fenugreek) and *Gleditsia caspica* seeds: Using inverse numerical method

Niknam, R.<sup>1\*</sup>, Mousavi, S. M.<sup>1</sup>, Kiani, H.<sup>1\*</sup>

1. PhD student, Bioprocessing and Biodetection Lab, Department of Food Science and Technology, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran.
2. Professor, Bioprocessing and Biodetection Lab, Department of Food Science and Technology, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Bioprocessing and Biodetection Lab, Department of Food Science and Technology, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 2022/ 05/ 21

Accepted 2022/ 08/ 10

#### Keywords:

Inverse numerical method,  
Modeling,  
Extraction,  
Galactomannan.

**DOI:** 10.22034/FSC.T.19.127.13

**DOR:** 20.1001.1.20088787.1401.19.127.2.5

\*Corresponding Author E-Mail:  
rasoul.niknam97@ut.ac.ir

### ABSTRACT

Extraction of hydrocolloids from plant seeds is important due to the increased consumption of these compounds in the formulation of food products. Ultrasound-assisted extraction has become very popular due to its many advantages, one of the most important of which is to increase the extraction efficiency of the biopolymers. The aim of this research was to use inverse numerical method to estimate the effective parameters in mass transfer related to the ultrasound-assisted extraction of galactomannan from two plant seeds including fenugreek and *Gleditsia caspica*. To achieve this goal, the concentration of galactomannan extracted from both plant seeds was obtained against time and the experimental data and the data predicted by the software (based on the simulation) were compared which had proper convergence. Effective parameters in mass transfer including dispersion coefficient (E), diffusion coefficient (D) and total mass transfer coefficient ( $k_c$ ) were in the range of  $1.21 - 1.52 \times 10^{-12}$ ,  $2.39 - 3.05 \times 10^{-8}$  and  $1.18 - 1.85 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  for fenugreek galactomannan and  $1.31 - 1.54 \times 10^{-12}$ ,  $2.63 - 3.11 \times 10^{-8}$  and  $1.46 - 1.95 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  for *Gleditsia caspica* galactomannan. The difference between the values obtained for the two galactomannans could be attributed to the seed type, hardness or softness of the seed wall and characteristics of the target component. According to the obtained results, inverse numerical method could be introduced as an acceptable and effective method for modeling of the extraction process of both galactomannans.