



مدل‌سازی راندمان انکپسولاسیون و پایداری کورکومین موجود در پیکرینگ امولسیون سلولز با استفاده از الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و درخت طبقه بندی و رگرسیون (CART)

هدا فهیم<sup>۱</sup>، علی معتمدزادگان<sup>۲\*</sup>، رضا فرهمندفر<sup>۳</sup>، نادر غفاری خلیق<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.

۲- استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.

۳- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.

۴- دانشیار، مرکز تحقیقات نانو تکنولوژی و کاتالیست، انستیتوی مطالعات تحصیلات تکمیلی، دانشگاه مالایا، کوالالامپور، مالزی.

## چکیده

## اطلاعات مقاله

پایداری کورکومین و راندمان انکپسولاسیون آن در امولسیون از جمله مهمترین فاکتورهای تعیین کننده زیست دسترس پذیری و جذب آن در بدن است. به این منظور در پژوهش حاضر پارامترهای موثر بر این دو فاکتور شامل زمان، pH و غلظت سلولز به عنوان متغیرهای ورودی و پایداری کورکومین و راندمان انکپسولاسیون به عنوان متغیر پاسخ در شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم درخت تصمیم استفاده شد. در این راستا نانوکریستال سلولز حاصل از هیدرولیز اسیدی برای تهیه پیکرینگ امولسیون کورکومین با نسبت روغن:آب ۵:۹۵ و غلظت سلولز ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ و درصد وزنی/حجمی استفاده شد و راندمان انکپسولاسیون روغن حاوی کورکومین و پایداری آن در طول ۸ روز اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت سلولز راندمان انکپسولاسیون به صورت معنی داری افزایش یافته و همچنین راندمان انکپسولاسیون در pH ۷ بالاتر از pH ۲ بود ( $p \leq 0.05$ ). کورکومین موجود در امولسیون‌های تهیه شده در pH ۲ در طول نگهداری به شدت کاهش یافت این در حالی بود که میزان کورکومین موجود در امولسیون‌های با pH ۷ در طول ۸ روز نگهداری به خوبی پایدار بود. مدل‌سازی برای دو پارامتر پایداری کورکومین و راندمان انکپسولاسیون با آماره‌های  $R^2$  و  $RMSE\%$  به ترتیب نشان داد ۱-۳  $MPLP$  ( $RMSE\% = 10.00$ ) و ۱-۲  $RBF$  ( $RMSE\% = 9.99$  و  $R^2 = 0.99$ ) دارای دقت بالاتری است. در نهایت نتایج نشان داد استفاده از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی نسبت به درخت تصمیم برای پیش‌بینی این دو پارامتر عملکرد بهتری داشت.

## تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۱۱

## کلمات کلیدی:

پیکرینگ امولسیون،  
درخت تصمیم،  
سلولز،  
شبکه عصبی مصنوعی،  
کورکومین.

DOI: 10.22034/FSCT.20.136.38  
DOR: 20.1001.1.20088787.1402.20.136.4.2

\* مسئول مکاتبات:

amotgan@yahoo.com

## ۱. مقدمه

امولسیون‌ها در صنعت غذا یکی از ایده‌آل‌ترین سیستم‌ها برای محصور کردن ریزمغذی‌های مختلف هستند، چرا که از این ترکیبات در برابر تخریب شیمیایی محافظت کرده، زیست‌دسترس‌پذیری آنها را در بدن انسان افزایش داده و در عین حال امکان تحویل کنترل‌شده ریزمغذی‌ها را در بدن فراهم می‌کنند [۱]. امولسیون‌ها سیستم‌هایی چند فازی هستند که از قطرات یک فاز مایع پراکنده در فاز مایع پیوسته ساخته شده‌اند. این دو فاز غیرقابل اختلاط بوده و به همین دلیل امولسیون‌ها از نظر ترمودینامیکی ناپایدار هستند [۲]. به طور سنتی، برای پایدار کردن ترمودینامیکی امولسیون‌ها از امولسیفایرهای مختلف استفاده می‌شود. با این حال، در سال‌های اخیر نوع دیگری از امولسیون‌ها، پیکرینگ امولسیون، مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. در این نوع امولسیون‌ها، به جای استفاده از امولسیفایرهای رایج از ذرات کلئیدی جامد جهت تثبیت پایداری فیزیکی استفاده می‌شود [۱]. به طور کلی ذراتی که دارای میل‌نم‌پذیری بالاتری هستند، جهت تولید امولسیون‌های روغن/آب مناسب‌تر می‌باشند.

سلولز به فرم میکروکریستال یا نانوکریستال از جمله رایج‌ترین بیوپلیمرهای طبیعی است که می‌تواند به‌عنوان یک ذره کلئیدی جهت تولید پیکرینگ امولسیون استفاده شود. گزارش شده است که نانوکریستال‌های میله‌ای شکل سلولز به اندازه کافی انعطاف‌پذیر هستند تا در سطح مشترک قطرات روغن/آب قرار گرفته و برای تثبیت امولسیون‌های غلیظ استفاده شوند [۳]. در این راستا، Miao و همکاران [۴] از نانوکریستال‌های سلولز جهت تثبیت پیکرینگ امولسیون‌های با فاز داخلی بالا (۸۰٪ روغن) و متوسط (۶۵٪ روغن) استفاده کرده و گزارش کردند که نانوسلولز به‌خوبی توانسته است امولسیون پایدار تشکیل دهد. Torlopov و همکاران نیز از نانوسلولزهای نیمه استیل شده جهت پایداری امولسیون روغن زیتون و پارافین مایع در آب استفاده کردند و مشاهده نمودند که سلولز اصلاح شده توانست امولسیون‌های پایداری با اندازه قطرات ۱ تا ۵ میکرومتر ایجاد کند [۵].

همانطور که پیشتر اشاره شد، امولسیون در صنعت غذا یکی از بهترین سیستم‌هایی است که می‌تواند جهت انتقال ریزمغذی‌ها به بدن انسان مورد استفاده قرار گیرد. این سیستم با محافظت از ترکیبات ریزمغذی، ماندگاری آنها را افزایش داده و در نتیجه خصوصیات عملکردی این ترکیبات تا مدت زمان بیشتری حفظ شده و از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه‌تر خواهد بود. کورکومین از جمله ریزمغذی‌هایی است که می‌توان از آن در سیستم پیکرینگ امولسیون بهره برد. کورکومین مهم‌ترین پلی‌فنول موجود در زردچوبه بوده و کاربردهای درمانی آن از جمله اثرات ضد التهابی، آنتی‌اکسیدانی، ضد دیابتی، ضد باکتریایی و ضد سرطانی اثبات شده است. با وجود فعالیت زیستی بالای این ترکیب، کورکومین در آب انحلال‌پذیری کمی داشته و در نتیجه زیست‌دسترس‌پذیری آن پایین است. جهت غلبه بر این مشکلات، می‌توان کورکومین را در سیستم‌هایی مانند پیکرینگ امولسیون وارد کرده و بر محدودیت‌های ذاتی آن فائق آمد [۶]. همچنین تثبیت کورکومین در پیکرینگ امولسیون‌های تهیه شده با نانوذرات پلی‌ساکاریدی مانند سلولز می‌تواند پایداری کورکومین را در برابر تخریب در مسیر گوارش بهبود بخشیده و در نتیجه جذب آن را در بدن افزایش دهند [۷]. نتایج مطالعه‌ای که توسط Li و همکاران (۲۰۲۳) انجام شد نشان داد که سلولز باکتریایی می‌تواند ذرات روغن حاوی کورکومین را به صورت موثری در امولسیون تثبیت کرده و پایداری آن را در برابر دمای بالاتر از محیط، pH پایین، نور خورشید و نور فرابنفش افزایش دهد [۸]. همچنین این محققان گزارش کردند که ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کورکومین کپسوله شده در امولسیون بالاتر از کورکومین آزاد است.

با توجه به تاثیر مثبت پیکرینگ امولسیون سلولز در افزایش پایداری کورکومین، در پژوهش حاضر تلاش شد تا با استفاده از مدل‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی، میزان پایداری کورکومین را در این نوع امولسیون پیشبینی کنیم. مدل شبکه عصبی مصنوعی<sup>۱</sup> (ANN) به دلیل عواملی چون توانایی یادگیری و تعمیم و مدل‌سازی روابط غیر خطی بین متغیرها نسبت به

1-Artificial neural network

تاکنون مطالعات مختلفی از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های مختلف جهت پیشبینی انواع فرایندهای دخیل در صنایع غذایی استفاده شده است. به‌عنوان مثال، Mohebbi و همکاران (۲۰۱۱) از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک برای مدل‌سازی پارامترهای دهیدراتاسیون اسمزی و پوشش صمغی بر میزان رطوبت و روغن قارچ سرخ شده استفاده کردند [۱۱]. Cardoso-Daodu و همکاران (۲۰۲۲) نیز با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی فورمول لیپوزوم‌های حاوی کورکومین را بهینه‌سازی کردند. در مطالعه این محققان متغیرهای ورودی شامل زمان فراصوت، حجم هیدراتاسیون و نسبت روغن به کورکومین بود [۱۲]. متغیرهای پاسخ نیز راندمان انکپسولاسیون و رهایش کورکومین بود. این محققان بهترین راندمان انکپسولاسیون برابر با ۹۹/۹۳۴٪ را با استفاده از نسبت روغن به کورکومین برابر با ۴/۳۵، زمان فراصوت ۱۵ دقیقه و حجم هیدراتاسیون ۲۵ میلی‌لیتر به دست آوردند.

به همین دلیل، در این پژوهش، سعی کردیم تا با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم درخت تصمیم، پایداری کورکومین و راندمان انکپسولاسیون کورکومین در پیکرینگ امولسیون‌های تهیه شده با نانوسلولز اصلاح شده را مدل‌سازی کنیم. در کار ما متغیرهای ورودی یا مستقل شامل pHهای مختلف، غلظت متفاوت نانوسلولز و زمان نگهداری بودند.

## ۲. مواد و روش‌ها

برای تولید نانوکریستال سلولز از پنبه هیدروفیل غیر استریل (نگین، ایران) استفاده شد. پنبه و روغن مایع آفتابگردان (بهار، ایران) از فروشگاه‌های موجود در سطح شهر تهیه شدند. کورکومین پودری خالص (۹۸٪) از شرکت مرک (آلمان) تهیه گردید. جهت جداسازی نانوکریستال سلولز از کیسه دیالیز با کات آف ۱۲-۱۴ کیلو دالتون (Analab TUB2012) با عرض ۲۳/۸ میلی‌متر استفاده شد. اسید سولفوریک ۹۸٪ با درجه آزمایشگاهی نیز از شرکت دکتر مجلی (ایران) خریداری شد.

### ۲-۱. تهیه نانوکریستال سلولز

مدل‌های رگرسیون خطی مزیت بالاتری دارد [۹]. این سیستم از تعداد زیادی عناصر به هم پیوسته به نام نرون تشکیل شده که در راستای حل یک مساله به صورت هماهنگ و همزمان کار می‌کنند. لایه ابتدایی که اطلاعات و داده‌های ورودی در آن وارد می‌شوند لایه ورودی نامیده می‌شود. لایه دوم لایه نهان نامیده شده و لایه انتهایی لایه خروجی است که نتیجه نهایی مدل را نشان می‌دهد. تعداد نرون‌های لایه ورودی بسته به مدل و آزمون متفاوت بوده و روند تعیین وزن بهینه و تنظیم مقدار آنها به صورت بازگشتی انجام می‌شود [۱۰]. به طور کلی، در مدل ANN بین لایه‌های ورودی و خروجی و با توجه به تعداد لایه‌های پنهان اتصالات مختلفی بین لایه‌ها ایجاد شده و با توجه به تبادل اطلاعات یا همان داده‌های ورودی، و مقدار رفت و برگشت داده‌ها در اتصالات ایجاد شده که شبیه به مغز انسان است در نهایت یک پاسخ صحیح با حداقل خطا به دست می‌آید [۹]. ساده‌ترین نوع شبکه عصبی پرسپترون چند لایه یا MLP نامیده شده و در آن تعداد نرون‌های لایه ورودی و خروجی به ترتیب برابر با تعداد عناصر بردار ورودی و خروجی می‌باشند. نوع دیگری از شبکه عصبی مصنوعی شبکه با تابع پایه شعاعی یا RBF نامیده می‌شود و در آن داده‌های ورودی مستقیماً وارد سلول‌های لایه پنهان می‌شوند. برخلاف MLP توابع فعالیت این شبکه از روش سعی و خطا به دست می‌آید [۱۰].

الگوریتم درخت تصمیم<sup>۱</sup> (CART) از جمله روش‌هایی است که در مدل‌سازی داده‌ها استفاده می‌شود. در این الگوریتم ابتدا کار با تمامی داده‌ها در ریشه درخت (گره‌ی که راس درخت تصمیم است) آغاز می‌شود. در این الگوریتم با استفاده از معیارهای تعیین شده در ابتدا تمام داده‌ها به صورت برگشت‌پذیر تقسیم شده و سپس تمام متغیرهای مستقل مورد بررسی قرار می‌گیرند تا مشخص شود که کدام یک از آنها بهترین تقسیم‌بندی را داشته‌اند. در ادامه داده‌های ورودی بر اساس متغیرهای مستقل که بیشترین اهمیت را دارند تقسیم‌بندی می‌شوند و این کار تا زمانی پیش می‌رود تا برگ‌ها حاوی داده‌هایی باشند که بیشترین همگونی را با هم دارند [۹].

۱۰۰۰۰ به مدت ۵ دقیقه همگن شد. نسبت آب به روغن در امولسیون ۹۵:۵ (حجمی/حجمی) بود. در ادامه مخلوط حاصله به مدت ۵ دقیقه با فراصوت (توان ۳۰۰ وات، ۷ ثانیه روشن، ۳ ثانیه خاموش) فراصوت شد. جهت تهیه امولسیون پایدار، تیمار التراتورکس-فراصوت سه بار تکرار شد. جهت بررسی اثر pH، امولسیون‌ها پس از تولید در دو pH خنثی (۷) و اسیدی (۲) به مدت ۸ روز مورد بررسی قرار گرفتند. جهت کاهش اسیدیته امولسیون‌ها، چند قطره محلول ۲ مولار هیدروکلریک اسید به امولسیون اضافه شده تا pH آن به ۲ برسد و سپس به مدت ۱ دقیقه دیگر با التراتورکس هموزن گردید.

۲-۳- تعیین میزان کورکومین در روغن

برای تعیین بازده انکپسولاسیون، در درجه اول باید میزان کورکومین فعال موجود در فاز روغنی اندازه‌گیری شود. به همین دلیل، کورکومین با غلظت ۱۰۰۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر در روغن حل شده و به مدت ۱ ساعت روی همزن مغناطیسی همزده شد تا کاملاً حل شود. سپس به مدت ۱۰ دقیقه در ۶۰۰۰ rpm سانتریفوژ شد تا ناخالصی‌های احتمالی و بخش‌های حل نشده رسوب کنند. روغن تا ۱۰۰ برابر با متانول رقیق شد و غلظت آن در ۴۲۵ نانومتر قرائت گردید [۱۴]. برای تبدیل جذب کورکومین به غلظت از نمودار استاندارد استفاده شد. جهت رسم نمودار استاندارد، از روش Kadam و همکاران (۲۰۱۸) با اندکی تغییر استفاده شد [۱۵]. بدین ترتیب که غلظت‌های ۰/۰۱ تا ۰/۰۷ عصاره اتانولی کورکومین تهیه شده و غلظت آن در ۴۲۵ نانومتر قرائت شد. منحنی کالیبراسیون رسم گردید و با استفاده از معادله زیر، جذب کورکومین در طول موج ۴۲۵ تبدیل به غلظت گردید.

معادله (۱):

$$y = 0.1706x - 0.0179 \quad R^2 = 0.9999$$

مقدار  $y$  در این معادله جذب خوانده شده با اسپکتروفوتومتر و  $x$  غلظت کورکومین است.

۲-۴- تعیین بازده انکپسولاسیون

به جهت تولید نانوکریستال‌های سلولز و همزمان تغییر سطحی آنها از روش هیدرولیز اسیدی با اسید سولفوریک به روش Pirich و همکاران با اندکی تغییرات استفاده شد [۱۳]. به طور خلاصه، ۵۰ گرم پنبه به ۵۰۰ میلی‌لیتر محلول اسید سولفوریک با غلظت ۶۴٪ اضافه شد (نسبت پنبه:اسید:۱:۱۰ وزنی:حجمی) و مخلوط به مدت ۳/۵ ساعت در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد روی همزن مغناطیسی هم زده شد. پس از طی زمان هیدرولیز، به سوسپانسیون شیری رنگ ۱۰ برابر حجم آن آب مقطر اضافه شد تا هیدرولیز متوقف گردد. در ادامه نمونه در سانتریفوژ به مدت ۱۵ دقیقه با دور ۵۰۰۰ rpm قرار داده شد تا ذرات سلولز از محلول اسیدی جدا شوند. ذرات ته‌نشین شده جمع‌آوری شده و آب بالای لوله‌ها دور ریخته شد. این عمل انقدر تکرار شد تا فاز بالایی شیری رنگ و کدر حاصل آید. در ادامه فاز بالایی کدر (که pH حدود ۳ دارد) در کیسه دیالیز با کات آف ۱۲۰۰۰-۱۴۰۰۰ دالتون ریخته شده و به مدت یک هفته در برابر آب مقطر دیالیز گردید تا pH آن به حدود ۵-۶ برسد. پس از اینکه pH محلول درون کیسه دیالیز به این محدوده رسید، به مدت ۱۵ دقیقه توسط فراصوت (UP400- TOP Sonics, Iran) با توان ۴۰۰ وات تیمار شده و در ادامه به مدت ۲۰ دقیقه در سانتریفوژ با دور ۱۰۰۰۰ rpm سانتریفوژ گردید. پس از اتمام سانتریفوژ، محلول شیری رنگ بالایی جمع‌آوری شده و بخش رسوب یافته دوباره در آب مقطر حل شده و تحت فراصوت قرار گرفت تا دوباره سانتریفوژ شود. این عمل سه بار تکرار شد. محلول شیری رنگ حاصله به مدت ۲۴ ساعت در آن با دمای ۳۵ درجه سانتیگراد قرار داده شد تا خشک شود. نانوکریستال‌های خشک شده در ادامه توسط آسیاب پودر شدند.

۲-۲. تهیه پیکرینگ امولسیون کورکومین

جهت تهیه امولسیون، ابتدا نانوکریستال‌های سلولز در نسبت‌های وزنی متفاوت (۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد وزنی/حجمی) در آب مقطر به مدت ۱۰ دقیقه تحت تیمار فراصوت قرار گرفتند تا به‌خوبی در آب همگن شوند. کورکومین با غلظت ۱۰۰۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر در روغن تهیه شد. سپس مخلوط کورکومین در روغن قطره قطره به سوسپانسیون نانوکریستال سلولز اضافه شد و در همان زمان با التراتورکس با سرعت rpm

به‌عنوان متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شد. در این کار، دو نوع شبکه عصبی پرسپترون چند لایه<sup>۱</sup> (MLP) و تابع پایه شعاعی<sup>۲</sup> (RBF) که به نام شبکه عصبی توابع اساسی شعاعی نیز معروف بوده و از رایج‌ترین انواع شبکه‌های عصبی هستند مورد استفاده قرار گرفتند. این دو شبکه با الگوریتم پس از انتشار آموزش داده می‌شوند و ساختار لایه‌ای دارند. خروجی شامل دو مدل شبکه عصبی است که به ترتیب شامل نام شبکه یعنی (MLP و RBF)، نورون‌هایی حاوی لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی است که به هم خوانی داشته و در انتها روی یک راه حل با حداقل خطا برای مساله همگرایی می‌کنند. جهت بهینه‌سازی نیز از روش شبه نیوتونی BFGS استفاده شد.

الگوریتم درخت تصمیم نیز یک فرایند طبقه‌بندی است که به صورت تکراری داده‌های آموزشی را بر مبنای آزمایش‌ها به بخش‌های کوچکتر، به یک یا بیشتر ارزش متغیر تقسیم می‌کند. از جمله شروط درخت تصمیم گیری بدون فرض بودن است [۱۶]. در این روش، آنالیز تمام داده‌ها از ریشه درخت یا گرهی که در راس درخت تصمیم قرار دارد شروع می‌شود. به بیان دیگر، در این روش در ابتدا و با استفاده از معیارهای تعیین شده تمامی داده‌ها به صورت بازگشت‌پذیر تقسیم می‌شوند. در ادامه، تمام متغیرهای پیشگو مورد بررسی قرار می‌گیرند تا مشخص شود که کدام یک بهترین تقسیم‌بندی را داشته است. پس از این مرحله، متغیرهای ورودی بر اساس بیشترین اهمیت تقسیم‌بندی می‌شوند. این تقسیم‌بندی تا جایی ادامه می‌آید که برگ‌ها (گره‌هایی که قابل تقسیم نیستند و در انتهای درخت قرار گرفته‌اند) شامل داده‌هایی شوند که همگنی زیادی با یکدیگر داشته باشند [۱۷]. اندازه بهینه درخت با استفاده از معیار پارامتر پیچیدگی و روش اعتبار سنجی متقابل k-fold تعیین شد.

۲-۷- اعتبار سنجی مدل‌ها

برای بررسی مدل‌ها، ۷۰ درصد از داده‌ها برای آموزش، ۱۵ درصد برای اعتبار و ۱۵ درصد از آنها برای آزمون در نظر گرفته شدند [۱۸]. اعتبار مدل‌های آماری با استفاده از ضریب تبیین ( $R^2$ )

بازده انکپسوله شدن کورکومین در امولسیون به روش Ngwabebhoh و همکاران اندازه‌گیری شد [۱۴]. به طور خلاصه، ۳ میلی‌لیتر اتانول به ۶۰۰ میکرولیتر امولسیون اضافه شد و به مدت ۱ دقیقه کاملاً همزده شد تا مخلوط حاصله کاملاً همگن شود. سپس به مدت ۱۰ دقیقه در ۶۰۰۰ rpm سانتریفوژ شد تا دو فاز کاملاً از هم جدا شده و فاز بالایی نسبتاً شفاف حاصل آید. ۲۴۰۰ میکرولیتر از سوپرناتانت جمع‌آوری شده و ۶۰۰ میکرولیتر اتانول به آن اضافه شد تا به حجم ۳ میلی‌لیتر برسد. مخلوط کاملاً همزده شده و جذب آن در ۴۲۵ نانومتر با اسپکتروفتومتر قرائت گردید. بازده انکپسولاسیون کورکومین با استفاده از فورمول زیر محاسبه گردید:

معادله (۲):

$$100 \times \frac{\text{وزن کورکومین انکپسوله نشده} - \text{وزن اولیه کورکومین اضافه شده به فاز روغنی}}{\text{وزن اولیه کورکومین اضافه شده به فاز روغنی}} = (\%) \text{ بازده انکپسولاسیون}$$

۲-۵- پایداری کورکومین در امولسیون در طول زمان

برای بررسی پایداری کورکومین در طول زمان، امولسیون‌ها در دمای محیط و در مکان تاریک به دور از نور خورشید نگهداری شدند. میزان پایداری کورکومین در طول زمان با اندازه‌گیری جذب کورکومین در ۴۲۵ نانومتر و به روش Ngwabebhoh و همکاران اندازه‌گیری گردید [۱۴].

۲-۶- آنالیز آماری

داده‌های حاصل از راندمان انکپسولاسیون با استفاده از طرح کاملاً تصادفی ساده و داده‌های پایداری کورکومین با کمک طرح فاکتورریل دوامی و با استفاده از نرم افزار InfoSTAT ورژن ۹،۰،۰ آنالیز گردید. جهت مقایسه میانگین داده‌ها نیز از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده شد.

۲-۷- مدل‌سازی با شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم درخت تصمیم

pHهای مختلف (۲ و ۷)، غلظت سلولز (۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ و درصد) و همینطور زمان‌های نگهداری (۱ تا ۸ روز) به‌عنوان متغیرهای ورودی و پایداری کورکومین و راندمان انکپسولاسیون

1-Multi-Layer Perceptron: MLP  
2-Radial Basic Functions: RBF

Table1. curcumin stability in different Pickering emulsions during storage at pH 2

Day	Curcumin emulsion at different cellulose concentration at pH 2 (µg/ml)				
	1	1.5	2	2.5	3
1	2.22±0.09 <sup>a</sup>	2.02±0.03 <sup>ab</sup>	2.15±0.05 <sup>a</sup>	2.03±0.04 <sup>ab</sup>	1.85±0.00 <sup>abc</sup>
2	1.39±0.03 <sup>cde</sup>	1.42±0.02 <sup>cde</sup>	1.97±0.02 <sup>ab</sup>	1.81±0.10 <sup>abc</sup>	1.29±0.04 <sup>de</sup>
3	0.67±0.00 <sup>fgh</sup>	0.80±0.00 <sup>fg</sup>	1.63±0.02 <sup>bcd</sup>	1.64±0.05 <sup>bcd</sup>	1.02±0.05 <sup>ef</sup>
4	0.34±0.05 <sup>ghijk</sup>	0.61±0.03 <sup>fghij</sup>	1.30±0.01 <sup>de</sup>	1.41±0.10 <sup>cde</sup>	0.75±0.05 <sup>fg</sup>
5	0.24±0.04 <sup>hijk</sup>	0.52±0.03 <sup>ghijk</sup>	1.02±0.15 <sup>ef</sup>	1.03±0.04 <sup>ef</sup>	0.15±0.02 <sup>ijk</sup>
6	0.19±0.01 <sup>hijk</sup>	0.43±0.03 <sup>ghijk</sup>	0.82±0.04 <sup>fg</sup>	0.66±0.01 <sup>gh</sup>	0.05±0.01 <sup>k</sup>
7	0.13±0.01 <sup>jk</sup>	0.30±0.56 <sup>ab</sup>	0.67±0.01 <sup>fgh</sup>	0.10±2.59 <sup>ghijk</sup>	0.03±0.01 <sup>k</sup>
8	0.08±0.01 <sup>j</sup>	0.15±0.05 <sup>ijk</sup>	0.48±0.05 <sup>ghijk</sup>	0.64±0.01 <sup>ghi</sup>	0.02±0.01 <sup>k</sup>

Table2. curcumin stability in different Pickering emulsions during storage at pH 7

Day	Curcumin emulsion at different cellulose concentration at pH 7 (µg/ml)				
	1	1.5	2	2.5	3
1	2.20±0.07 <sup>a</sup>	1.92±0.02 <sup>bc</sup>	1.98±0.03 <sup>b</sup>	1.87±0.00 <sup>cd</sup>	1.57±0.01 <sup>hi</sup>
2	1.72±0.09 <sup>fg</sup>	1.59±0.04 <sup>hi</sup>	1.92±0.03 <sup>bc</sup>	1.79±0.03 <sup>def</sup>	1.43±0.01 <sup>kl</sup>
3	1.36±0.06 <sup>lmn</sup>	1.55±0.03 <sup>ij</sup>	1.86±0.05 <sup>cd</sup>	1.74±0.02 <sup>ef</sup>	1.32±0.03 <sup>mno</sup>
4	1.31±0.01 <sup>nop</sup>	1.40±0.02 <sup>klm</sup>	1.81±0.06 <sup>de</sup>	1.52±0.08 <sup>ij</sup>	1.21±0.04 <sup>qr</sup>
5	1.34±0.03 <sup>lmn</sup>	1.32±0.01 <sup>mno</sup>	1.65±0.09 <sup>gh</sup>	1.37±0.02 <sup>lmn</sup>	1.02±0.03 <sup>u</sup>
6	1.29±0.02 <sup>nopq</sup>	1.25±0.00 <sup>opqr</sup>	1.48±0.08 <sup>jk</sup>	1.22±0.03 <sup>pqr</sup>	0.87±0.09 <sup>w</sup>
7	1.23±0.02 <sup>opqr</sup>	0.75±0.04 <sup>x</sup>	1.31±0.08 <sup>mno</sup>	1.18±0.03 <sup>rs</sup>	0.72±0.15 <sup>x</sup>
8	1.27±0.09 <sup>nopqr</sup>	0.73±0.03 <sup>x</sup>	1.05±0.07 <sup>tu</sup>	1.12±0.03 <sup>st</sup>	0.53±0.03 <sup>y</sup>

همانطور که گفته شد، یکی از کارکردهای امولسیون افزایش پایداری کورکومین در برابر عوامل محیطی و زمان نگهداری است چرا که این ماده حساسیت بالایی به شرایط محیطی داشته و در حلال‌هایی با شرایط مختلف ناپایدار است. نتایج به دست آمده نشان داد میزان کورکومین در طول دوره نگهداری به تدریج

(معادله ۳) و درصد میانگین مجذور مربعات خطا (معادله ۴) مورد بررسی قرار گرفت.

معادله (۳)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{oi} - \bar{y}_p)^2}{\sum_{i=1}^n (y_{oi} - \bar{y}_o)^2}$$

معادله (۴)

$$RMSE\% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 / n}{\bar{y}}} \times 100$$

در این معادلات،  $\hat{y}$  مقدار برآورد شده،  $\bar{y}$  میانگین برآورد شده و  $\bar{Y}$  مقدار مشاهده است.  $n$  نیز تعداد مشاهده‌ها و  $y_{oi}$  نیز مقدار مشاهده  $i$ ام است.

مدلسازی شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم درخت تصمیم (CART) با استفاده از نرم‌افزار STATISTICA 12.0 انجام شد.

### ۳. نتایج و بحث

در این مطالعه جهت پیشبینی و مدلسازی راندمان انکپسولاسیون و پایداری کورکومین در امولسیون، از دو شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و تابع پایه شعاعی و همچنین الگوریتم درخت تصمیم استفاده شد. نتایج حاصل از پایداری کورکومین در pHهای اسیدی و خنثی نیز در جداول ۱، ۲ و شکل ۱ آورده شده‌اند. نتایج دو مدل CART و ANN برای مشخصه پایداری کورکومین نشان داد مقادیر ضریب تبیین و درصد مجذور میانگین مربعات خطا در مدل ANN با شبکه ۳-۶-۱ MLP (شبکه عصبی پرسپترون چند لایه با تعداد ۳ لایه ورودی، ۶ لایه پنهان و ۱ لایه خروجی) و الگوریتم BFGS 70 (بهینه‌سازی به روش شبه‌نیوتونی) در مقایسه با دو مدل ANN با شبکه ۳-۱۳-۱ RBF (تابع پایه شعاعی با تعداد ۳ لایه ورودی، ۱۳ لایه پنهان و ۱ لایه خروجی) و الگوریتم درخت تصمیم (CART) با ۰/۹۵ =  $R^2$  و  $RMSE=2/85\%$  دارای دقت بیشتری است (جدول ۳). همچنین، نتایج نشان داد از بین ۳ متغیر مستقل مورد بررسی، متغیر زمان با درجه اهمیت ۱/۰۰ بیشترین تاثیر را در پیشبینی پایداری کورکومین داشت.

عصبی مصنوعی با  $R^2$  برابر با ۰/۹۵ به خوبی توانسته است داده‌های پایداری کورکومین را پیشبینی کند.

Table3. Evaluation of test data for Curcumin stability

Algorithm variable	ANN			CART		
	R <sup>2</sup>	RMSE %	network	R <sup>2</sup>	RMSE %	The degree of importance
	0.95	2.85		0.36	11.04	
Algorithm			Effective variables in modeling			
Curcumin stability	BFGS 70		MLP 3-6-1	day		1.00
	R <sup>2</sup>	RMSE %	BIAS %	Cellulose concentration		0.71
	0.74	10.50				
	Algorithm		network	pH		0.34
RBFT		RBF 3-13-1				

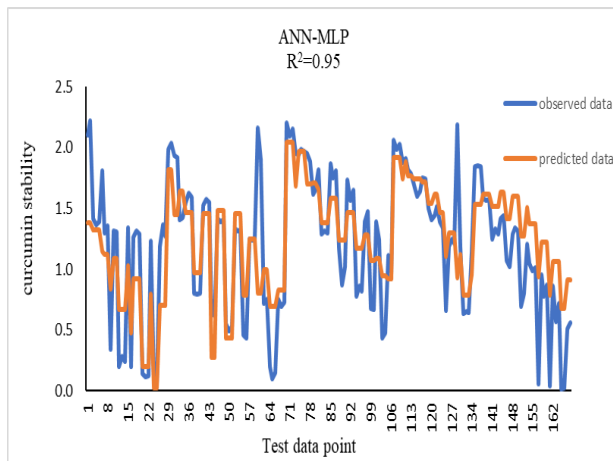


Figure 1. The variation of predicted curcumin stability versus with: ANN model-MLP

یکی از مهمترین فاکتورهای تعیین کننده پایداری امولسیون‌های حاوی ترکیبات ریزپوشانی شده راندمان ریزپوشانی است. این فاکتور نشان دهنده توانایی دیواره‌های پیرامون قطرات امولسیون (نانوذرات سلولز) در ممانعت از خروج روغن درون آنهاست. از

کاهش یافته و از بین می‌رود با این حال، پایداری کورکومین در امولسیون‌های با pH ۷ به صورت قابل توجهی بالاتر از امولسیون‌های اسیدی بود؛ همچنین امولسیون‌هایی که غلظت سلولز بالاتری داشتند نتوانستند پایداری کورکومین را در طول دوره نگهداری افزایش دهند (جدول ۱ و ۲). در همین راستا، Zheng و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که زمان نگهداری اثر منفی بر پایداری امولسیون کورکومین داشته و در طول زمان بخشی از کورکومین موجود در امولسیون تخریب می‌شود [۱۹]. نتایج حاصل از الگوریتم CART در مطالعه حاضر نیز نشان داد که متغیر غلظت سلولز با درجه اهمیت ۰/۷۱، تاثیر قابل توجهی بر پایداری کورکومین و عدم تخریب آن داشت (جدول ۳). اثر افزایش غلظت سلولز بر پایداری کورکومین را می‌توان در نتیجه تاثیر آن بر پایدار کردن قطرات روغن در آب دانست، به بیان بهتر، نانوکریستال‌های سلولز می‌توانند در سطح مشترک قطرات آب:روغن جذب شده و سبب افزایش پایداری کورکومین در امولسیون گردند. این پدیده در مطالعه‌ای که توسط Lu و همکاران (۲۰۲۰) انجام شد نیز تایید گردید [۲۰]. این محققان گزارش کردند که در بافر فسفات با pH خنثی بیش از ۸۵٪ کورکومین آزاد پس از ۳۰ دقیقه از بین می‌رود. این در صورتی بود که کورکومین انکپسوله شده در پیکرینگ امولسیون تهیه شده با سلولز تا ۸۰٪ از پایداری اولیه کورکومین را حفظ می‌کند. همچنین در مطالعه مشابهی که توسط Tikekar و همکاران (۲۰۱۳) انجام شد گزارش گردید که پیکرینگ امولسیون‌های سیلیکا توانستند در pH ۶/۵ تا حدود ۲۴۰ ساعت نیمه عمر کورکومین را افزایش دهند در حالیکه ذرات کورکومین موجود در بافر با pH پایین‌تر (۵/۷) بیش از ۱۰۰ دقیقه پایدار نبودند که مشابه با نتایج حاصل از کار ما بود [۲۱]. با این وجود، احتمالاً تاکنون مطالعه مشابهی روی تاثیر پارامترهای غلظت سلولز، زمان نگهداری و میزان pH بر پایداری کورکومین توسط شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم CART انجام نشده است. نظر به نتایج جدول ۳، شبکه MLP از مدل ANN نسبت به دو مدل مورد بررسی دیگر نتایج مناسبی داشت که در نتیجه با استفاده از داده‌های این مدل شکل ۱ رسم گردید. در شکل ۱ مقادیر مشاهده شده پایداری کورکومین در برابر مقادیر پیشبینی شده توسط نرم‌افزار آورده شده و نشان می‌دهد که شبکه MLP از مدل شبکه

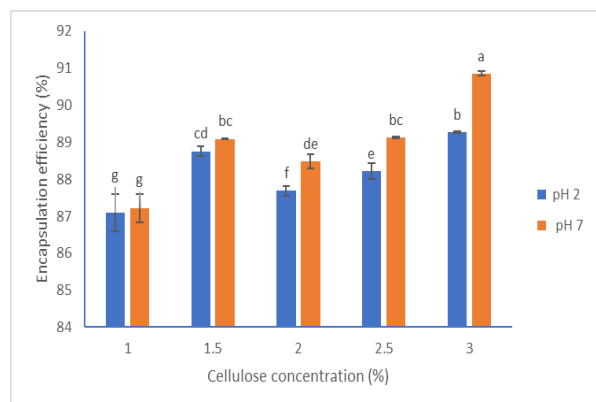


Figure 2. encapsulation efficiency of curcumin in Pickering emulsions at pH 2 and 7

با توجه به توضیحات ارائه شده و بنا بر اهمیت راندمان انکپسولاسیون در پایداری کورکومین، در این مطالعه از دو مدل مختلف جهت پیشبینی این پارامتر استفاده شد. نتایج آورده شده در جدول ۴ نشان دهنده دو مدل MLP و RBF از الگوریتم ANN و CART هستند که بر مبنای مقادیر ضریب تبیین و کمترین درصد مجذور میانگین مربعات خطا بهترین مدل را برای پیشبینی راندمان انکپسولاسیون پیشنهاد می‌دهند. نتایج جدول ۴ نشان داد که ۱-۶-۲ RBF (تابع پایه شعاعی با تعداد ۲ لایه ورودی، ۶ لایه پنهان و ۱ لایه خروجی) با ضریب تبیین ۰/۹۹ و درصد مجذور میانگین مربعات خطا ۹/۹۹ نسبت به MLP نتیجه بهینه‌ای به دست می‌دهد و در نتیجه برای پیشبینی این پارامتر مدل بهتری است. بررسی دو عامل غلظت نانوکریستال سلولوز و pH توسط الگوریتم درخت تصمیم نیز نشان داد که غلظت نانوکریستال سلولوز با درجه اهمیت ۱/۰۰ بیشترین تاثیر را روی درصد انکپسولاسیون کورکومین دارد. این نتایج با پژوهش Shakhkol و همکاران (۲۰۲۲) که از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه با ۳ نرون، دو لایه پنهان با ۱۰ نرون و یک لایه خروجی برای پیشبینی راندمان ریزپوشانی اسانس آویشن باغی استفاده کردند مشابهت داشت [۲۲]. در مطالعه دیگری که توسط Espinosa-Sandoval و همکاران (۲۰۱۹) انجام شد، از شبکه مصنوعی عصبی با ۱۱ لایه ورودی (۹ متغیر مستقل) و ۲ لایه پنهان برای راندمان انکپسولاسیون ترکیبات فنولی استفاده گردید. نتایج راندمان انکپسولاسیون این محققان توسط شبکه عصبی با دو لایه پنهان  $R^2=0/85$  و  $MSE=0/0198$  به دست آمد. متغیرهای

جمله عوامل موثر بر راندمان ریزپوشانی غلظت مواد دیواره‌ای است که افزایش آن (تا یک حد بهینه) باعث افزایش راندمان انکپسولاسیون می‌شود [۲۲]. نتایج راندمان انکپسولاسیون که در شکل ۲ آورده شده است نشان می‌دهد که هم غلظت سلولوز و هم pH روی راندمان انکپسولاسیون اثر معنی‌داری داشته است. کمترین راندمان انکپسولاسیون مربوط به نمونه‌های حاوی ۱٪ سلولوز بود و با افزایش درصد سلولوز راندمان انکپسولاسیون افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که راندمان انکپسولاسیون کورکومین در pH ۷ بالاتر از pH ۲ بود. راندمان انکپسولاسیون بالاتر در pH ۷ سبب حفاظت بهتر این ترکیب زیست‌فعال در طول زمان شده و باعث می‌شود که پایداری آن افزایش یابد که این روند توسط داده‌های حاصل از پایداری کورکومین در طول زمان نیز تایید شد (جدول ۱ و ۲). راندمان انکپسولاسیون کمتر در pH ۲ را می‌توان به کاهش بار منفی ذرات سلولوز نسبت داد. نتایج آزمایشات این مطالعه نشان داد که در pH ۲ نانوذرات سلولوز تمایل به مجتمع شدن داشته و در نتیجه توانایی آنها برای انکپسولاسیون و ایجاد امولسیون پایدار کاهش می‌یابد. این پدیده در مطالعه‌ای که توسط Liu و همکاران (۲۰۱۵) روی سلولزهای سولفونه شده حاصل از فیبر sisal انجام شد مشابهت داشت [۲۳]. این محققان گزارش کردند که در pH پایینتر از ۳ گروه‌های سولفات ( $-SO_3^{2-}$ ) با یون‌های هیدرونیوم موجود در محیط که بار مثبت دارند واکنش داده و در نتیجه توانایی پراکنش آنها در محیط آبی کاهش می‌یابد. کاهش قابلیت پراکنش سلولوز در محیط آبی و تجمع آنها نه تنها می‌تواند روی راندمان انکپسولاسیون تاثیر منفی بگذارد، بلکه سبب ناپایداری امولسیون شده و باعث می‌شود تماس بین قطرات روغن حاوی کورکومین و آب افزایش یابد که به نوبه خود سبب افزایش سرعت تخریب کورکومین در طول زمان می‌شود (جدول ۲).



امولسیون‌های با شرایط مشابه (متغیرهای ورودی مشابه) می‌توان به‌خوبی از این مدل استفاده کرد.

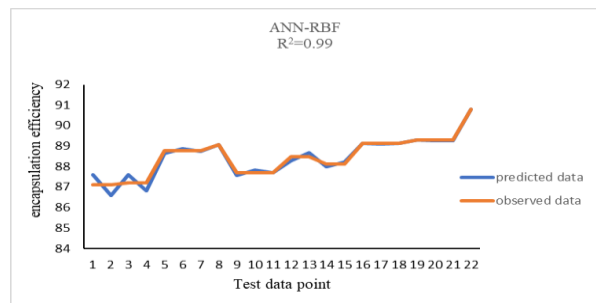


Figure 3. The variation of predicted encapsulation efficiency versus with: ANN model-RBF

#### ۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، پارامترهای غلظت سلولز، pH و زمان نگهداری روی دو پارامتر پایداری کورکومین و راندمان انکپسولاسیون کورکومین در پیکرینگ امولسیون‌های سلولز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که افزایش زمان نگهداری و کاهش pH سبب کاهش پایداری کورکومین در امولسیون شده درحالی که افزایش غلظت سلولز تاثیر مثبتی داشت. همچنین افزایش غلظت سلولز و pH امولسیون هر دو باعث افزایش راندمان انکپسولاسیون کورکومین شد. بررسی دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم درخت تصمیم برای مدل‌سازی پایداری کورکومین و راندمان انکپسولاسیون در امولسیون نشان داد که برای مشخصه پایداری کورکومین الگوریتم شبکه عصبی MLP و برای مشخصه راندمان انکپسولاسیون الگوریتم شبکه عصبی RBF نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی نتایج بهتری داشتند که در نتیجه جهت صرفه جویی در زمان و مواد مصرفی، می‌توان از این دو مدل در مطالعات مشابه آتی نیز استفاده نمود. پیشنهاد می‌شود با توجه به توانایی مدل شبکه عصبی برای بررسی همزمان پارامترهای مختلف با قابلیت تکرار بالا؛ در تحقیقات آتی توسط سایر محققان از متغیرهای مستقل دیگر که در پایداری کورکومین موثر هستند نظیر زمان و توان فراصوت، زمان و شدت هموزنایزر و.. به‌عنوان متغیرهای ورودی این الگوریتم استفاده شود.

مستقل مورد استفاده در مطالعه این محققان شامل غلظت پلیمر مورد استفاده برای انکپسولاسیون، غلظت سورفاکتانت، حجم امولسیون، و زمان و توان فراصوت بود [۲۴]. در مطالعه دیگری که توسط Tao و همکاران (۲۰۱۷) انجام شد، از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک جهت مدل‌سازی راندمان انکپسوله کردن آنتوسیانین با شبکه عصبی مصنوعی با چهار گره در لایه ورودی، یک لایه خروجی (راندمان انکپسولاسیون) و نرون‌های لایه پنهان بین ۵ تا ۲۰ عدد استفاده شد. این محققان  $R^2$  برابر با ۰/۹۹ و RMS برابر با ۰/۵۴۴ را برای راندمان انکپسولاسیون گزارش کردند [۲۵].

Table4. Evaluation of test data for encapsulation efficiency

Algorithm variable	ANN		network	CART		The degree of importance
	R <sup>2</sup>	RMS E%		R <sup>2</sup>	RMS E%	
		0.99	10.00		0.62	
	Algorithm			Effective variables in modeling		
Encapsulation efficiency	BFGS 100		MLP 2-9-1	Cellulose concentration		1.00
	R <sup>2</sup>	RMS E%	pH	pH		0.40
	0.99	9.99				
	Algorithm		network			
RBFT		RBF 2-6-1				

با توجه به این که در مدل‌سازی درصد انکپسولاسیون، شبکه RBF از مدل ANN نتیجه بهتری نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی ارائه داد، داده‌های مشاهده شده درصد انکپسولاسیون در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده آن توسط این مدل در شکل ۳ آورده شده‌اند. با توجه به شکل ۳ و همچنین و  $R^2=0/99$  برای شبکه RBF از مدل ANN می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های حاصل از نرم‌افزار به‌خوبی با داده‌های مشاهده شده مطابقت داشته و در نتیجه جهت پیش‌بینی این پارامتر، در تحقیقات آتی روی

## منابع

- [1] Berton-Carabin, C.C. and K. Schroën, *Pickering emulsions for food applications: background, trends, and challenges*. Annual review of food science and technology, 2015. **6**: p. 263-297.
- [2] Yu, J., M. Ahmedna, and I. Goktepe, *Peanut protein concentrate: Production and functional properties as affected by processing*. Food chemistry, 2007. **103**(1): p. 121-129.
- [3] Capron, I. and B. Cathala, *Surfactant-free high internal phase emulsions stabilized by cellulose nanocrystals*. Biomacromolecules, 2013. **14**(2): p. 29-296-1.
- [4] Miao, C., M.-N. Mirvakili, and W.Y. Hamad, *A rheological investigation of oil-in-water Pickering emulsions stabilized by cellulose nanocrystals*. Journal of Colloid and Interface Science, 2022. **608**: p. 2820-2829.
- [5] Torlopov, M.A., et al., *Pickering emulsions stabilized by partially acetylated cellulose nanocrystals for oral administration: oils effect and in vivo toxicity*. Cellulose, 2021. **28**(4): p. 2365-2385.
- [6] Tagde, P., et al., *The multifaceted role of curcumin in advanced nanocurcumin form in the treatment and management of chronic disorders*. Molecules, 2021. **26**(23): p. 7109.
- [7] Saffarionpour, S. and L.L. Diosady, *Curcumin, a potent therapeutic nutraceutical and its enhanced delivery and bioaccessibility by pickering emulsions*. Drug Delivery and Translational Research, 2022. **12**(1): p. 124-157.
- [8] Li, Z., et al., *The use of bacterial cellulose from kombucha to produce curcumin loaded Pickering emulsion with improved stability and antioxidant properties*. Food Science and Human Wellness, 2023. **12** (2) : p. 669-679.
- [9] Fallah, A., et al., *Modeling the commercial volume of pure and mixed stands of beech trees using non-parametric algorithms in the educational-research Forest of Darabkola, Sari, Iran*. Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 2022. **30**(2): p. 180-192.
- [10] Alehosseini, E., S.M. Jafari, and H. Shahiri Tabarestani, *Evaluating*

*the performance of artificial neural networks (ANNs) for predicting the physical, rheological, and colorimetric properties of chitosan nanoparticles (CSNPs).* Journal of food science and technology (Iran), 2021. **18**(113): p. 77-90.

[11] Mohebbi, M., M. Fathi, and F. Shahidi, *Genetic algorithm-artificial neural network modeling of moisture and oil content of pretreated fried mushroom.* Food and Bioprocess Technology, 2011. **4**(4): p. 603-609.

[12] Cardoso-Daodu, I.M., et al., *Artificial neural network for optimizing the formulation of curcumin-loaded liposomes from statistically designed experiments.* Progress in Biomaterials, 2022. **11**(1): p. 55-65.

[13] Pirich, C.L., et al., *Influence of mechanical pretreatment to isolate cellulose nanocrystals by sulfuric acid hydrolysis.* International journal of biological macromolecules, 2019. **130**: p. 622-626.

[14] Ngwabebhoh, F.A., S.I. Erdagi, and U. Yildiz, *Pickering emulsions stabilized nanocellulosic-based nanoparticles for coumarin and curcumin nanoencapsulations: In*

*vitro release, anticancer and antimicrobial activities.* Carbohydrate polymers, 2018. **201**: p. 317-328.

[15] Kadam, P.V., et al., *Standardization and quantification of curcumin from Curcuma longa extract using UV visible spectroscopy and HPLC.* Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 2018. **7**(5): p. 1913-1918.

[16] Tooke, T.R., et al., *Extracting urban vegetation characteristics using spectral mixture analysis and decision tree classifications.* Remote Sensing of Environment, 2009. **113**(2): p. 398-407.

[17] Lawrence, R.L. and A. Wright, *Rule-based classification systems using classification and regression tree (CART) analysis.* Photogrammetric engineering and remote sensing, 2001. **67**(10): p. 1137-1142.

[18] Tiryaki, S. and A. Aydın, *An artificial neural network model for predicting compression strength of heat treated woods and comparison with a multiple linear regression model.* Construction and Building Materials, 2014 (62): p. 102-108.

[21] Zheng, B., et al., *Impact of delivery system type on curcumin stability: Comparison of curcumin degradation in aqueous solutions, emulsions, and hydrogel beads*. Food Hydrocolloids, 2017. **71**: p. 187-197.

[22] Lu, X. and Q. Huang, *Stability and in vitro digestion study of curcumin-encapsulated in different milled cellulose particle stabilized Pickering emulsions*. Food & function, 2020. **11**(1): p. 606-616.

[23] Tikekar, R.V., Y. Pan, and NNitin, *Fate of curcumin encapsulated in silica nanoparticle stabilized Pickering emulsion during storage and simulated digestion*. Food Research International, 2013. **51**(1): p. 370-377.

[24] Shahkol, F., H. Abbasi, and M. Norouzi Mobarakeh, *Modeling the Encapsulation of Thymus Essential Oil (Thymus vulgaris) in Sodium Caseinate, Maltodextrin and Modified Starch Using Response Surface (RSM) and Artificial Neural Network (ANN)*. Journal of food science and technology(Iran), 2022. **19**(125): p. 225-241.

[25] Liu, H., et al., *Study of Pickering emulsion stabilized by sulfonated cellulose nanowhiskers extracted from sisal fiber*. Colloid and Polymer Science, 2015. **293**: p. 963-974.

[19] Espinosa-Sandoval, L., et al., *Phenolic compound-loaded nanosystems: artificial neural network modeling to predict particle size, polydispersity index, and encapsulation efficiency*. Food and Bioprocess Technology, 2019. **12**(8): p. 1395-1408.

[20] Tao, Y., et al., *Combining various wall materials for encapsulation of blueberry anthocyanin extracts: Optimization by artificial neural network and genetic algorithm and a comprehensive analysis of anthocyanin powder properties*. Powder technology, 2017. **311**: p. 77-87.



## Scientific Research

## Modeling the encapsulation efficiency and stability of curcumin in cellulose Pickering emulsions using artificial neural network (ANN) and classification and regression tree (CART) algorithms

HodaFahim<sup>a</sup>, Ali Motamedzadegan<sup>a\*</sup>, Reza Farahmandfar<sup>a</sup>, Nader Ghaffari Khaligh<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Department of Food Science and Technology, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Po Box 578, Sari, Mazandaran, Iran.

<sup>b</sup>Nanotechnology and Catalysis Research Center, Institute for Advanced Studies (IAS), University of Malaya, Kuala Lumpur 50603, Malaysia.

## ABSTRACT

## ARTICLE INFO

The stability of curcumin and its encapsulation efficiency in emulsion are among the most important factors determining its bioavailability and absorption in the body. For this purpose, parameters affecting these two factors, including time, pH, and cellulose concentration, were used as input variables in the present study. Curcumin stability and encapsulation efficiency were used as response variables in artificial neural networks and decision tree algorithms. In this regard, cellulose nanocrystal obtained from acid hydrolysis was used to prepare curcumin Pickering emulsion with oil:water ratio of 5:95 and cellulose concentration 1, 1.5, 2, 2.5, and 3% (w/v) and the encapsulation efficiency and stability of curcumin were measured during 8 days. The results showed that the encapsulation efficiency significantly increased as cellulose concentration increased. Encapsulation efficiency at pH 7 was higher than at pH 2 ( $p \leq 0.05$ ). The curcumin content in the emulsions prepared at pH 2 drastically decreased during storage, while it was less degraded in emulsions at pH 7 after 8 days of storage. The modelling results for curcumin stability and encapsulation efficiency based on R<sup>2</sup> and RMSE% statistics showed that MLP 3-6-1 (R<sup>2</sup>=0.99; RMSE%=10.00) and RBF 2-6-1 (R<sup>2</sup>=0.99; RMSE%=9.99) were had more accuracy than other models. Finally, the results showed that the artificial neural network algorithm performed better than the decision tree in predicting cellulose Pickering emulsions' encapsulation efficiency and curcumin stability.

## Article History:

Received: 2022/12/19

Accepted: 2023/5/1

## Keywords:

Artificial neural network (ANN),  
Cellulose,  
Classification and regression tree (CART),  
Curcumin,  
Decision tree,  
Pickering emulsion

DOI: 10.22034/FSCT.20.136.38

DOR: 20.1001.1.20088787.1402.20.136.4.2

\*Corresponding Author E-Mail:

[amotgan@yahoo.com](mailto:amotgan@yahoo.com)