

استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی (انفیس) در مدل سازی استخراج ترکیبات فنولی از گیاه

شاه اسپرم (*Tanacetum Balsamita*) با کمک امواج فراصوت

سهند غفورزاده^۱، مهدی قره خانی^{۱*}، حمید بخش آبادی^۲

^۱ گروه علوم و صنایع غذایی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

^۲ گروه کشاورزی، مرکز آموزش عالی میناب، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

مسئول مکاتبات: m.gharekhani@iaut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش مدل سازی استخراج ترکیبات فنولی از گیاه شاه اسپرم (*Tanacetum Balsamita*) با کمک امواج فراصوت و با استفاده از سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (انفیس) بررسی شد. بدین منظور، مقدار فرکانس دستگاه فراصوت، نسبت نمونه به حلال و زمان فرایند به عنوان ورودی و بازده استخراج عصاره، مقدار ترکیبات فنولی کل، توانایی به دام اندازی رادیکال آزاد و ظرفیت آنتی اکسیدانی براساس احیاء آهن به عنوان خروجی در نظر گرفته شد. سه تابع عضویت گوسی، مثلثی و دوزنقه ای با ۲-۲-۲، ۳-۳-۳ و ۴-۴-۴ تابع عضویت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تابع مثلثی با ۲-۲-۲ و ۳-۳-۳ تابع عضویت به ترتیب برای متغیر خروجی بازده استخراج و ظرفیت آنتی اکسیدانی براساس احیاء آهن، تابع گوسی با ۴-۴-۴ تابع عضویت برای متغیر ترکیبات فنولی کل و در نهایت تابع دوزنقه ای با ۲-۲-۲ تابع عضویت برای توانایی به دام اندازی رادیکال آزاد به عنوان مدل بهینه انتخاب گردید. از طرفی مشخص شد که استفاده از امواج فراصوت منجر به بهبود یا افزایش سایر پارامترها شد و با افزایش فرکانس امواج فراصوت در ابتدا میزان بازده استخراج، میزان ترکیبات فنولی، توانایی به دام اندازی رادیکال آزاد (DPPH) و ظرفیت آنتی اکسیدانی براساس احیاء آهن افزایش و سپس کاهش یافت. با افزایش زمان و همچنین کاهش نسبت حلال به نمونه، میزان بازده استخراج، میزان ترکیبات فنولی و ظرفیت آنتی اکسیدانی براساس احیاء آهن افزایش یافت. در پایان می توان بیان داشت که میزان ضرایب همبستگی بالا بین نتایج آزمایشگاهی و خروجی های مدل بیانگر دقت قابل قبول و قابلیت استفاده از این مدل ها در کنترل فرایند استخراج ترکیبات فنولی از گیاه شاه اسپرم با کمک امواج فراصوت بود.

کلیدواژه: استخراج ترکیبات آنتی اکسیدانی، فراصوت، شاه اسپرم، مدل سازی

روغن‌های خوراکی حاوی مواد مغذی ضروری بدن بوده و نقش مهمی در رژیم غذایی برای حفظ عملکرد طبیعی فیزیولوژیکی بدن دارند. از طرفی با افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان، کیفیت و سلامت روغن‌های خوراکی مورد توجه قرار گرفته است. عوامل کیفی موثر بر روغن‌های خوراکی شامل ترکیب اسیدهای چرب، مواد مغذی و پایداری اکسایشی آنها می‌باشد. اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه رژیم غذایی برای سلامتی انسان بسیار ضروری هستند ولی متأسفانه این روغن‌ها به اکسیداسیون حساس هستند.

اکسیداسیون اسیدهای چرب می‌تواند این ترکیبات را به‌عنوان مواد مغذی از دسترس خارج کند و همچنین طعم نامطلوب و ترکیبات سمی تولید کند. (۱۱). اکسیداسیون روغن‌ها علاوه بر تغییر ویژگی‌های ارگانولپتیکی ماده غذایی، ارزش غذایی و عمر نگهداری روغن‌ها را کاهش می‌دهد و به دلیل تولید ترکیبات نامطلوب در روغن برای سلامتی مصرف‌کنندگان تأثیر سوئی دارند (۱۸).

برای جلوگیری از اکسیداسیون، روش‌های متعددی وجود دارد که یکی از این موارد افزودن موادی به نام آنتی‌اکسیدان‌ها است. آنتی‌اکسیدان‌ها ترکیباتی هستند که گسترش بد طعمی و تندشوندگی را با توسعه زمان پایداری به تأخیر می‌اندازند. آنتی‌اکسیدان‌ها با مکانیسم‌های مختلفی مانند کنترل سوبستراهای اکسایش، کنترل پرواکسیدان و همچنین غیر فعال نمودن رادیکال‌های آزاد سبب به تأخیر انداختن اکسایش لیپیدها می‌شوند (۲۷). از طرفی استفاده از آنتی‌اکسیدان‌های سنتزی نظیر بوتیل هیدروکسی تولوئن^۱، بوتیل هیدروکسی آنیزول^۲ و ترسیو بوتیل هیدروکینون^۳ در مواد غذایی به دلیل اثرات مخرب آنها بر سلامت انسان‌ها به مخاطره افتاده است. در سال‌های اخیر تلاش برای یافتن منابع جدید آنتی‌اکسیدانی طبیعی به دلیل اثرات سوء ناشی از مصرف آنتی‌اکسیدان‌های سنتزی گسترش یافته است (۲۸).

شاه اسپرم از خانواده (Asteraceae) و با نام علمی (*Tanacetom Balsamita*) گیاهی است علفی، ریزوم دار، چندساله و دارای ساقه راست با شیارهای طولی مشخص روی ساقه که روی ریزوم خزنه آن، پیوسته پایه‌های متعددی در محل رویش به وجود می‌آید (۲). گیاه شاه اسپرم حاوی متابولیت‌های ثانویه متعددی نظیر اسانس‌ها یا روغن‌های فرار، مشتقات فنیل پروپان، فلاونوئیدها،

^۱ Butylated hydroxytoluene (BHT)

^۲ Butylated hydroxyanisole (BHA)

^۳ tert-Butylhydroquinone (TBHQ)

سزکوئی‌ترین لاکتون‌ها^۱، تانن‌ها و الیگوالمنت‌ها می‌باشند. اسانس این گیاه، مایعی بی‌رنگ تا زرد روشن می‌باشد که به روش تقطیر با آب یا بخار آب از قسمت‌های هوایی گیاهان به‌دست می‌آید (۳۱).

امواج فراصوت با فرکانس بیش از یک مگاهرتز و قدرت کمتر از 1 W/cm^2 برای آنالیزهای غیرتخریبی نظیر تجزیه و تحلیل مواد غذایی استفاده می‌شود. در حالی که امواجی با فرکانس ما بین ۲۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز و قدرت بیش از 5 W/cm^2 برای حفاظت، امنیت و پردازش مواد غذایی استفاده می‌شود (۹). امواج فراصوت حباب‌های کاویتاسیون در حلال ایجاد می‌کند، این حباب‌ها به فرکانس بستگی دارد که با افزایش فرکانس امواج، مدت زمان انبساط و انقباض کاهش می‌یابد، پس باید شدت این امواج کمتر شود تا میزان کاویتاسیون مشابه‌ای به‌دست آید. با افزایش امواج، کاویتاسیون به سختی انجام می‌شود چون مدت زمان لازم برای غلبه به نیروی بین ملکولی وجود نخواهد داشت (۳). این حباب‌ها با ایجاد شوک و آسیب‌هایی به دیواره سلولی باعث انتشار محتوای سلولی به حلال می‌شود که بدین ترتیب می‌توان ترکیبات بیشتری را استخراج و اندازه‌گیری کرد (۱۴). رازقندی و همکاران (۲۰۲۴)، نشان دادند که استفاده از امواج فراصوت منتج به افزایش استخراج ترکیبات فنولی از گیاه بومادران می‌شود (۲۶ و ۲۷). طبق مطالعه‌ای که توسط آلتیمی و همکاران (۲۰۱۶) روی استخراج ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدانی کدو تنبل و هلو به کمک فراصوت انجام گرفت، مشخص گردید که شرایط بهینه برای استخراج ترکیبات فنولی از کدو تنبل در دمای $41/45$ درجه سانتی‌گراد و قدرت $44/60$ درصد و زمان $25/1$ دقیقه و همچنین برای استخراج ترکیبات فنولی از هلو نیز دمای $41/53$ درجه سانتی‌گراد، قدرت $43/99$ درصد و مدت زمان $27/86$ دقیقه می‌باشد (۴). از دیگر محققینی که از فراصوت برای استخراج ترکیبات موثره گیاهان استفاده کرده بودند، می‌توان به مقیمی و همکاران (۲۰۱۸)، رازقندی و همکاران (۲۰۲۴)، یاسمین و همکاران (۲۰۲۴) و ابراهیمی و همکاران (۲۰۲۴) که به‌ترتیب به استخراج از گیاه دان‌سیاه، بومادران، لوبیا قرمز و پیراکانتا پرداخته بودند، اشاره نمود (۱۲، ۲۵، ۲۶ و ۳۴).

از آنجا که خطاهای موجود در فرایند و توانایی کنترل برخط^۲ فرایند بسیار ضروری بوده ولی غیرهمگنی و متغیر بودن مواد اولیه و میزان بالای کاهش و افزایش تولید، ابزارهای مناسب برای کنترل فرایندهای صنعت غذا را محدود ساخته است. به علاوه بسیاری از فرایندها در صنعت غذا به صورت غیرخطی و اغلب با دینامیک‌های زمانی متنوع می‌باشند که باعث ایجاد پیچیدگی‌هایی در این صنعت شده است که حتی در سیستم‌های کامپیوتری مدرن نیز مشکلاتی برای اتومات کردن این فرایندها وجود دارد. ابزارهای هوش مصنوعی

^۱ . Sesquiterpene lactones

^۲ On line

(AI)^۱ مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)^۲، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)^۳، منطق فازی، سامانه‌های عصبی- فازی تطبیقی (ANFIS)^۴، الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی هندسی در زمینه‌های شبیه‌سازی و مدل‌سازی پارامترهای ورودی و خروجی ماشین بسیار مفید بوده‌اند. با این حال، استفاده ناکارآمد از پارامترهای شبکه‌های عصبی مصنوعی یک چالش بزرگ در به دست آوردن یک مدل بسیار دقیق برای فرآیندها می‌باشد. به همین دلیل، محققین بیان داشتند که سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی با توجه به موفقیت‌های اخیر کاربرد بیشتری در اغلب زمینه‌های مهندسی در مقایسه با سایر روش‌های عددی و بهتر از شبکه‌های عصبی عمل می‌نماید (۱۶ و ۲۹). یک مدل آماری که اخیراً توجه بسیاری را به خود معطوف کرده است، سامانه‌های عصبی- فازی تطبیقی است که از تلفیق ساختارهای فازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی حاصل می‌شوند که برای شناسایی سیستم‌ها، پیش‌بینی سری‌های زمانی و موارد متنوع دیگر به کار می‌روند. این مدل مزایای خاص خود را دارد که از آن جمله می‌توان به توانایی شبیه‌سازی سامانه‌های غیرخطی، دقت زیاد و زمان کمتر ساخت مدل و محاسبات آن اشاره کرد (۸ و ۲۲). در گذشته برخی از محققین اقدام به ارائه مدل‌های مختلف جهت پیش‌بینی پارامترهای کیفی مهم در تولید محصولات مختلف صنایع غذایی کردند که از آن جمله می‌توان به مطالعات فرزانه و همکاران (۲۰۱۷)، جوهان و همکاران (۲۰۲۱) و ابراهیمی و همکاران (۲۰۲۴) که به ترتیب برای مدل‌سازی استخراج روغن از دانه‌های کلزا در مقیاس صنعتی، استخراج عصاره از دانه چیا و شرایط نگهداری انگوره‌های پوشش داده شده با مالتودکسترین حاوی نانوکربنات پتاسیم و عصاره پیراکانتا از سامانه انفیس استفاده نمودند، اشاره کرد (۱۳، ۱۵ و ۲۱).

هدف از انجام این مطالعه بررسی کاربرد فراصوت در استخراج ترکیبات فنولی گیاه شاه اسپرم و همچنین مدل‌سازی این فرایند با استفاده از سامانه انفیس بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد اولیه

¹ Artificial intelligence

² Artificial neural networks

³ Particle swarm optimization

⁴ Neural-based fuzzy interference system

در این مطالعه گیاه شاه اسپرم از منطقه طلا تپه ارومیه جمع آوری و توسط مرکز ملی ذخایر ژنتیکی و زیستی ایران تایید شد و مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از: توسط اتانول، متانول، معرف فولین - سیوکالته، کربنات سدیم، اسید گالیک، اسید آسکوربیک، ¹DPPH، استات سدیم بدون آب و کلرید آهن (III) شش آبه که همگی از شرکت مرک (آلمان) تهیه گردیدند.

۲-۲- آماده سازی نمونه و اندازه گیری ترکیبات شیمیایی آن

ابتدا برگ های این گیاه از ساقه جدا و تحت شرایط طبیعی محیطی و با استفاده از جریان هوای طبیعی در سایه خشک گردید. برگ های خشک شده با استفاده از دستگاه آسیاب (پارس خزر، ایران) به پودر تبدیل شده و از الک با مش ۴۰ عبور داده شدند. سپس نمونه های خشک شده در بسته های دولایه نایلونی و مقوایی به منظور جلوگیری از نفوذ رطوبت قرار گرفتند و تا زمان آزمایش در فریز ۱۸- درجه سانتی گراد نگهداری شدند و طبق روش های AOAC (۱۹۹۰) میزان رطوبت، پروتئین، چربی و خاکستر این نمونه ها اندازه گیری شد (۶) که به ترتیب برابر ۱۰/۹۸، ۱۹/۳۵، ۱/۹۸ و ۱۸/۳۱ درصد بود.

۲-۳- استخراج عصاره از گیاه شاه اسپرم

مقداری نمونه پودر گیاهی با نسبت ۱:۱۰ و ۱:۳۰ با حلال (اتانول ۷۰ درصد) مخلوط گردید و سپس در یک حمام فراصوت (الماسونیک، آلمان) در زمان های مختلف ۰/۱۶، ۰/۳۳ و ۰/۵ ساعت در معرض امواج فراصوت در دو فرکانس ۳۷ و ۸۰ کیلوهرتز قرار گرفت. برای نمونه هایی که از فراصوت استفاده نشده بود از دو زمان ۲۴ و ۷۲ ساعت استفاده گردید. سپس عصاره استخراج شده با استفاده از کاغذ صافی از مواد جامد گیاهی جدا و به وسیله دستگاه تبخیر کننده چرخان (ایکا، آلمان)، حلال تبخیر شد و عصاره تغلیظ گردید در نهایت عصاره ها در یخچال نگهداری شدند (۲۵ و ۲۷).

۲-۴- محاسبه بازده استخراج (Y)

بازده استخراج با ریختن مقدار ۱۰ میلی گرم از عصاره ها (m_1) کف پلیت هایی که کاملاً تمیز، خشک و به دقت توزین شده، صورت گرفت و در نهایت با قرار دادن آن ها در آون الکتریکی (ممرت، آلمان) در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد تا رسیدن به وزن ثابت (m_2) بازده استخراج با استفاده از رابطه ۱، محاسبه شد (۱۹).

$$Y = (m_2/m_1) \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

¹ 2,2-diphenyl-2-picryl hydrazyl radical

۲-۵- اندازه گیری مقدار کل ترکیبات فنولی (TP)

مقدار کل ترکیبات فنولی موجود در عصاره این گیاه توسط رنگ سنجی به روش فولین - سیوکالته مورد بررسی قرار گرفت. در این روش در واقع تعداد گروه‌های فنولی که قابل اکسید شدن هستند، اندازه گرفته می‌شود. پس از تهیه عصاره‌ها، ۰/۵ میلی لیتر از عصاره در لوله آزمایش ریخته شده و با ۵ میلی لیتر معرف فولین - سیوکالته (که به نسبت ۱۰:۱ با آب مقطر رقیق شده بود) و ۴ میلی لیتر محلول کربنات سدیم یک مولار به خوبی مخلوط شد. نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در دمای اتاق قرار گرفتند. سپس مقدار جذب محلول توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (Hach، آمریکا) در طول موج ۷۶۵ نانومتر خوانده شد. مقدار کل ترکیبات فنولی بر مبنای اسید گالیک و به صورت میلی گرم در ۱۰۰ گرم نمونه خشک بیان گردید (۲۶).

۲-۶- ارزیابی میزان توانایی به دام اندازی رادیکال آزاد (DPPH)

۲ و ۲- دی فنیل ۱- پیکریل هیدرازین (DPPH)، رادیکالی چربی دوست است که دارای جذب بیشینه در طول موج ۵۱۷ نانومتر است. در آزمون DPPH، رادیکال‌های DPPH با آنتی‌اکسیدان‌ها یا دیگر گونه‌های رادیکالی واکنش می‌دهند و مقدار آن کاهش می‌یابد. در نتیجه جذب در طول موج ۵۱۵-۵۱۷ نانومتر کاهش می‌یابد. کاهش مولکول‌های DPPH با تعداد گروه‌های هیدروکسیل در دسترس نسبت مستقیم دارد. گروه‌های هیدروکسیل با دادن هیدروژن به رادیکال‌های DPPH آن‌ها را از رنگ بنفش تیره به زرد روشن تبدیل می‌کنند. جذب در طول موج ۵۱۷ نانومتر بیانگر مقدار DPPH باقی‌مانده است. در این روش به ۱ میلی لیتر از نمونه استخراج شده ۱ میلی لیتر محلول متانولی ۰/۱ میلی مولار DPPH اضافه شد و مخلوط حاصل به خوبی تکان داده شد و به مدت ۱۵ دقیقه در مکان تاریک در دمای اتاق قرار داده شد. سپس جذب مخلوط توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۱۷ نانومتر قرائت گردید. آسکوربیک اسید به عنوان کنترل مثبت استفاده شد و میزان IC₅₀ به معنی غلظتی از هر عصاره که لازم است تا ۵۰ درصد رادیکال‌های آزاد DPPH پاک‌سازی شود، برای عصاره‌ها تعیین شد. در نهایت از رابطه زیر درصد به دام‌اندازی رادیکال آزاد DPPH به دست آمد (۲۴).

$$\text{درصد فعالیت دام اندازی رادیکال های آزاد DPPH} = \frac{AS-AC}{AC} \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در رابطه (۱) AS: جذب نوری نمونه و AC: جذب نوری شاهد بود.

¹. Inhibition Concentration

۲-۷- ظرفیت آنتی اکسیدانی براساس احیاء آهن^۱ (FRAP)

در روش FRAP از یک واکنش اکسیداسیون- احیا استفاده می شود که با تغییر رنگ همراه است. زمانی که احیاء کننده واکنش (آنتی اکسیدان) الکترون خود را اهدا می کند، ماده ای تولید می شود که رنگی بوده و به راحتی می توان شدت رنگ تولید شده که نشان دهنده پیشرفت واکنش است را اندازه گرفت. ۱۰۰ میکرولیتر عصاره رقیق شده را با ۹۰۰ میکرولیتر از معرف FRAP مخلوط و به خوبی تکان داده شد و در دمای ۳۷ درجه سانتی گراد به مدت ۴۰ دقیقه در یک مکان تاریک قرار داده شد و برای تهیه نمونه شاهد (بلانک) ۱۰۰ میکرولیتر متانول با ۹۰۰ میکرولیتر معرف FRAP مخلوط شد و سپس جذب مخلوط توسط دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۹۳ نانومتر با بلانک متانولی قرائت شد و میزان آنتی اکسیدانی با استفاده از معادله خط رسم شده بر مبنای میلی گرم ترولکس^۲ در گرم نمونه عصاره بیان شد (۲۶).

۲-۸- مدل سازی به روش انفیس

در آموزش ساختار انفیس از روش هیبرید که ترکیب روش حداقل مربعات و روش پس انتشار می باشد استفاده شد و حد خطا که برای ایجاد یک معیار توقف آموزش مورد استفاده قرار می گیرد روی صفر تنظیم گردید. برای بهینه سازی مدل از انواع و تعداد متفاوتی تابع عضویت استفاده شد تا تعداد و نوع بهینه آن مشخص شود. فرکانس دستگاه فراصوت، نسبت نمونه به حلال و زمان فرایند به عنوان ورودی و بازده استخراج عصاره، مقدار ترکیبات فنولی کل، توانایی به دام اندازی رادیکال آزاد و ظرفیت آنتی اکسیدانی براساس احیاء آهن به عنوان خروجی در مدل انفیس مشخص گردید. از سیستم استنتاج فازی نوع سوگنو استفاده گردید و جهت یافتن مدل بهینه، توابع عضویت مثلثی، دوزنقه ای و گوسی و با ۲، ۳ و ۴ تابع عضویت مورد بررسی قرار گرفت و کارایی مدل های به دست آمده به وسیله مقادیر ضریب همبستگی (R^2) و میانگین مجذور مربع خطا (MSR) که به ترتیب با استفاده از روابط ۲ و ۳ تعیین می شوند، ارزیابی گردیدند.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{pi} - X_{ei})^2}{\sum_{i=1}^N (X_{pi} - \bar{X})^2} \quad (\text{رابطه ۲})$$

^۱ Ferric Ion Reducing Antioxidant Power

^۲ Trolox

$$\text{رابطه ۳)} \quad \text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{pi} - X_{ei})^2$$

در این معادلات X_{pi} متغیر پیش‌بینی شده توسط شبکه X_{ei} مقدار واقعی حاصل از انجام آزمایشات و $\bar{X}$ میانگین مقادیر آزمایشگاهی و N تعداد کل مشاهدات است (۱۵ و ۲۶). برای مقایسه میانگین‌ها از نرم‌افزار SAS و آزمون چند دامنه‌ای دانکن در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

جهت دستیابی به مدل‌های بهینه‌ی مورد نظر، با در نظر گرفتن ورودی‌های تعریف شده، میزان خروجی‌های متناظر به هر یک از شرایط اعمالی فرکانس دستگاه فراصوت، نسبت نمونه به حلال و زمان فرآیند برای هر یک خروجی‌ها برای مدل‌های مختلف پیش-بینی گردید. با توجه به جدول ۱ و مقادیر ضریب همبستگی و میانگین مربعات خطای ارائه شده برای هر یک از متغیرهای خروجی، نوع و تعداد توابع عضویت بهینه برای متغیرهای ورودی تعیین گردید. در جدول ۱ نوع و تعداد توابع عضویت بهینه برای متغیرهای مختلف خروجی مشخص شده است. بدین ترتیب تابع مثلی با ۲-۲-۲ تابع عضویت برای متغیر خروجی بازده استخراج، تابع گوسی با ۴-۴-۴ تابع عضویت برای متغیر ترکیبات فنولی کل، تابع دوزنقه‌ای با ۲-۲-۲ تابع عضویت برای توانایی به دام‌اندازی رادیکال آزاد و در نهایت تابع مثلی با ۳-۳-۳ تابع عضویت برای ظرفیت آنتی‌اکسیدانی براساس احیاء آهن به عنوان مدل بهینه انتخاب گردید.

جدول ۱- مقایسه اثر تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نورون‌ها در هر لایه پنهان بر دقت پیش‌بینی متغیرهای خروجی

معیار ارزیابی خروجی‌های مورد نظر								نوع و تعداد توابع عضویت متغیرهای ورودی	
FRAP		DPPH		TP		Y		ورودی	
MSE	R ²	MSE	R ²	MSE	R ²	MSE	R ²		
۲/۴۳	۰/۹۶۹	۰/۸۵	۰/۹۲۹	۰/۷۲	۰/۹۸۶	<u>۰/۲۳</u>	<u>۰/۹۹۱</u>	۲۲۲	مثلثی
۰/۹۸	۰/۹۷۳	<u>۰/۱۰</u>	<u>۰/۹۹۷</u>	۰/۸۵	۰/۹۳۵	۰/۹۶	۰/۸۶۳	۲۲۲	دوزنقه
۰/۸۲	۰/۸۹۲	۵/۰۲	۰/۸۹۷	۲/۰۴	۰/۹۶۸	۲/۰۳	۰/۷۳۶	۲۲۲	گوسی
<u>۰/۲۲</u>	<u>۰/۹۹۳</u>	۲/۰۲	۰/۹۲۷	۲/۲۲	۰/۹۷۹	۲/۲۵	۰/۹۷۲	۳۳۳	مثلثی
۰/۹۸	۰/۹۷۸	۲/۰۲	۰/۸۹۳	۲/۲۳	۰/۹۳۲	۲/۹۳	۰/۹۲۸	۳۳۳	دوزنقه
۰/۷۳	۰/۸۸۲	۰/۳۲	۰/۹۹۲	۰/۹۴	۰/۹۸۵	۲/۶۲	۰/۹۷۸	۳۳۳	گوسی
۰/۸۷	۰/۹۳۳	۳/۰۲	۰/۹۳۹	۰/۵۲	۰/۹۸۷	۰/۵۶	۰/۹۵۳	۴۴۴	مثلثی
۰/۲۴	۰/۹۶۸	۲/۰۳	۰/۹۷۵	۲/۰۲	۰/۹۶۹	۰/۷۶	۰/۹۷۹	۴۴۴	دوزنقه
۲/۲۴	۰/۹۲۶	۲/۵۲	۰/۹۳۶	<u>۰/۲۲۵</u>	<u>۰/۹۹۰</u>	۲/۰۳	۰/۸۳۲	۴۴۴	گوسی

براساس نتایج به دست آمده، اغلب مدل‌ها از دقت تخمین مناسبی جهت پیش‌بینی خروجی‌های مورد نظر برخوردار بودند. در جدول ۲ نیز اطلاعات کامل شامل تعداد توابع عضویت برای هر ورودی، تعداد قوانین، تعداد دوره‌های آموزش و نوع توابع عضویت ورودی و خروجی و جزئیات کامل دیگر لیست شده است.

جدول ۲- پارامترهای مدل‌های انفیس بهینه‌ی انتخاب شده

خروجی‌های مورد نظر				پارامتر مورد نظر
FRAP	Y	DPPH	TP	
۳	۳	۴	۲	تعداد توابع عضویت برای فرکانس
۳	۳	۴	۲	تعداد توابع عضویت برای نسبت
۳	۳	۴	۲	تعداد توابع عضویت برای زمان
ذوزنقه‌ای	ذوزنقه‌ای	گوسی	مثلثی	نوع توابع عضویت ورودی‌ها
۲۷	۸	۶۴	۸	تعداد قوانین
خطی	خطی	خطی	خطی	نوع تابع عضویت خروجی‌ها
Wtaver	Wtaver	Wtaver	Wtaver	روش غیرفازی سازی
Sum	Sum	Sum	Sum	روش اجتماع خروجی
۷۸	۳۴	۱۵۸	۳۴	تعداد گره
۲۷	۸	۶۴	۸	تعداد پارامترهای خطی
۲۷	۲۴	۲۴	۱۸	تعداد پارامترهای غیر خطی
۵۴	۳۲	۸۸	۲۶	تعداد کل پارامترها

برای ارزیابی نوع و چگونگی تأثیر گذاری پارامترهای ورودی بر روند تغییرات میزان خروجی‌ها از مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون دانکن که به‌طور همزمان تأثیر متقابل سه متغیر را بر پارامترهای خروجی ارائه می‌دهد، استفاده شد (جدول ۳). همانطور که جدول ۳ نشان داد استفاده از امواج فراصوت و همچنین افزایش فرکانس آن در ابتدا میزان بازده استخراج را افزایش داد ولی با افزایش بیشتر فرکانس میزان بازده استخراج کاهش یافت. امواج فراصوت حباب‌های کاویتاسیون در حلال ایجاد می‌کنند که این حباب‌ها به فرکانس بستگی دارند و با افزایش فرکانس امواج، میزان ایجاد حباب‌های کاویتاسیون کاهش می‌یابد پس باید میزان

فرکانس در حد ۲۰ الی ۴۰ کیلوهرتز باشد (۳). با افزایش زمان و همچنین کاهش نسبت حلال به نمونه میزان بازده استخراج افزایش یافت. دلیل افزایش میزان استخراج ترکیبات (بازده استخراج) تشدید انتقال جرم ناشی از فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون در نزدیکی دیوار سلولی است که منجر به تماس بهتر بین حلال و مواد گیاهی می‌شود. به علاوه در زمان فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون یک جریان سریع امواج فراصوت تولید می‌کنند که به عنوان یک میکرو پمپ عمل کرده و می‌تواند به اجبار حلال به درون سلول رانده و ترکیبات مورد نظر را حل نماید (۵). در واقع در اثر انتشار امواج صوتی در فاز جامد-مایع، چرخه انقباض و انبساط در محیط ایجاد می‌شود که موجب تشکیل حباب‌ها شده و این حباب‌ها رشد می‌کنند و در نهایت متلاشی می‌شوند. این عمل باعث نوسان ذرات جامد و مایع شده و تحت عمل فراصوت سرعت پیدا می‌کنند در نتیجه مواد حل شونده سریع از فاز جامد به حلال انتشار پیدا می‌کنند. علاوه بر این، اثرات دیگری مثل امولسیفیکاسیون، انتشار و صدمه به بافت نیز به افزایش استخراج اجزای مورد نظر از مواد خام کمک می‌کنند. همچنین می‌توان چنین بیان کرد که اثر حلال در زمان تماس طولانی موجب استخراج ترکیبات ناخالص می‌شود (۱۰). همانطور که در جدول ۳ آورده شده است، استفاده از امواج فراصوت منجر به افزایش ترکیبات فنولی کل شد و با افزایش بیشتر فرکانس این امواج از میزان ترکیبات فنولی کاسته شد. با گذشت مدت زمان تماس حلال با نمونه، احتمالاً به دلیل انتشار بیشتر مواد داخل سلول به حلال و تخریب بیشتر سلول میزان ترکیبات فنولی با افزایش مدت زمان افزایش یافته است و همچنین با کاهش نسبت نمونه به حلال نیز به دلیل بالا بودن مقدار نمونه پودر گیاهی در حلال، استخراج ترکیبات فنولی افزایش یافت. با افزایش فرکانس امواج فراصوت، مراحل انقباض و انبساط کاهش می‌یابد پس در نتیجه ایجاد پدیده کاویتاسیون مشکل خواهد بود چرا که زمان لازم برای غلبه بر نیروی بین مولکولی کم می‌شود یا از بین می‌رود به همین دلیل در فرکانس‌های پایین‌تر میزان تخریب بیشتر شده و مقدار استخراج افزایش یافته است. آرچانا و همکاران (۲۰۱۵) از مدت زمان‌های ۱۰، ۲۵ و ۴۰ دقیقه و از دماهای ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد و حلال‌های متانولی و اتانولی ۳۰٪، ۶۰٪ و ۹۰٪ برای استخراج ترکیبات فنولی گیاه کاپسیکوم آنوم^۱ به کمک فراصوت استفاده کردند، بهینه‌ترین مدت زمان استخراج ترکیبات فنولی زمان ۱۰ دقیقه و دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد بود (۷). نتایج نشان داد (جدول ۳) که با افزایش فرکانس و همچنین نسبت حلال به نمونه، میزان توانایی به دام اندازی رادیکال آزاد (DPPH) ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. با افزایش غلظت ترکیبات فنولی، میزان توانایی به دام اندازی رادیکال آزاد افزایش می‌یابد، زیرا در غلظت‌های بالاتر ترکیبات فنولی به دلیل افزایش تعداد گروه‌های هیدروکسیل موجود در محیط واکنش، احتمال اهدای هیدروژن به رادیکال‌های آزاد DPPH و به دنبال آن قدرت مهار کنندگی عصاره

¹ *Capcicum annum*

افزایش می‌یابد و نتایج با تحقیق حاضر تطابق داشت (۳۰). گنجه و همکاران (۲۰۲۵) نیز نشان دادند که استفاده از فراصوت به علت پدیده حفره‌زایی منتج به افزایش استخراج ترکیبات فنولی از میوه جامون می‌گردد و همچنین این محققین نشان دادند که استفاده از زمان‌های طولانی فراصوت ممکن است، منجر به تخریب ترکیبات فنولی گردد که همراستا با نتایج این بخش بود (۱۷).

جدول ۳ همچنین نشان داد که با افزایش فرکانس تغییرات زیادی در ظرفیت آنتی‌اکسیدانی براساس احیاء آهن روی داد. به طوری که ابتدا میزان آن افزایش و سپس کاهش یافت ولی با افزایش نسبت حلال به نمونه ظرفیت آنتی‌اکسیدانی براساس احیاء آهن کاهش و در نهایت با افزایش زمان استخراج میزان آن افزایش یافت.

طبق مطالعه انجام گرفته بر گلبرگ زعفران برای استخراج ترکیبات فنولی و آنتی‌اکسیدانی به کمک فراصوت از سه مدت زمان ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه استفاده شد. مدت زمان ۱۰ دقیقه و شدت صوت ۱۰۰٪ بیشترین میزان ترکیبات فنولی و قدرت احیاء کنندگی آهن (III) را داشت از این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که رابطه نزدیکی بین قدرت احیاء کنندگی آهن (III) و ترکیبات فنولی وجود دارد (۱). حسین و همکاران (۲۰۱۲) بر استخراج ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و فنولی گیاه مرزن جوش به کمک فراصوت از مدت زمان ۵-۱۵ دقیقه و دمای ۱۵-۳۵ درجه سانتی‌گراد استفاده کردند. بیشترین میزان ترکیبات فنولی و قدرت احیاء کنندگی آهن (III)، در مدت زمان ۱۵ دقیقه و دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد بود، مشخص گردید که همبستگی بین قدرت احیاء کنندگی آهن (III) و ترکیب فنولی وجود دارد (۱۹).

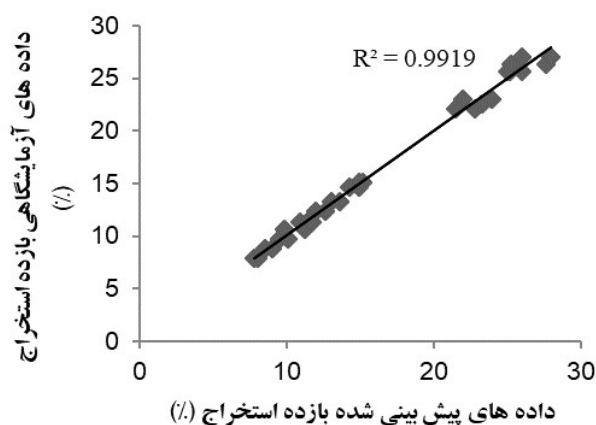
جدول ۳- تأثیر پارامترهای عملیاتی بر خصوصیات اندازه‌گیری شده عصاره شاه اسپرم

ردیف	فرکانس	نسبت	زمان	راندمان عصاره‌گیری (%)	DPPH (%)	پلی فنول	FRAP
	(کیلوهرتز)		(ساعت)			(میلی گرم در گرم نمونه)	(میلی گرم ترولکس در گرم نمونه)
۱	۰	۱۰	۲۴	$14/6 \pm 0/4^c$	$325/4 \pm 1/6^c$	$16/7 \pm 0/4^m$	$28/0 \pm 0/5^l$
۲	۰	۱۰	۷۲	$15/0 \pm 0/3^c$	$307/2 \pm 1/0^d$	$20/7 \pm 0/5^l$	$19/75 \pm 0/3^n$
۳	۰	۳۰	۲۴	$7/9 \pm 0/3^h$	$382/1 \pm 3/5^a$	$10/6 \pm 0/9^n$	$30/25 \pm 0/9^k$
۴	۰	۳۰	۷۲	$8/75 \pm 0/1^{gh}$	$358/1 \pm 2/1^b$	$11/9 \pm 1/0^n$	$22/7 \pm 0/6^m$
۵	۳۷	۱۰	۰/۱۶	$25/6 \pm 1/5^a$	$58/8 \pm 0/4^m$	$55/7 \pm 0/5^c$	$67/7 \pm 1/2^a$
۶	۳۷	۱۰	۰/۳۳	$26/5 \pm 1/1^a$	$87/9 \pm 0/9^l$	$69/18 \pm 0/9^b$	$57/5 \pm 0/7^b$
۷	۳۷	۱۰	۰/۵	$27/0 \pm 1/0^a$	$109/9 \pm 1/2^k$	$74/8 \pm 1/1^a$	$52/5 \pm 0/3^{cd}$
۸	۳۷	۳۰	۰/۱۶	$11/3 \pm 0/4^{ef}$	$159/3 \pm 0/6^h$	$38/7 \pm 0/7^h$	$47/25 \pm 0/4^c$
۹	۳۷	۳۰	۰/۳۳	$12/3 \pm 0/2^{de}$	$159/3 \pm 0/8^h$	$43/5 \pm 0/1^f$	$43/25 \pm 0/5^g$
۱۰	۳۷	۳۰	۰/۵	$13/3 \pm 0/2^{cd}$	$193/7 \pm 0/4^g$	$51/6 \pm 0/8^d$	$40/7 \pm 0/5^h$
۱۱	۸۰	۱۰	۰/۱۶	$22/1 \pm 0/7^b$	$131/5 \pm 1/1^j$	$52/6 \pm 0/6^d$	$53/5 \pm 0/5^c$
۱۲	۸۰	۱۰	۰/۳۳	$22/5 \pm 0/7^b$	$144/1 \pm 0/5^i$	$46/2 \pm 0/6^c$	$52/3 \pm 0/7^d$
۱۳	۸۰	۱۰	۰/۵	$23/0 \pm 0/5^b$	$158/1 \pm 1/5^h$	$41/3 \pm 0/2^g$	$45/0 \pm 0/2^f$
۱۴	۸۰	۳۰	۰/۱۶	$9/8 \pm 0/4^{fg}$	$149/9 \pm 0/7^g$	$29/7 \pm 0/3^i$	$36/7 \pm 0/4^i$
۱۵	۸۰	۳۰	۰/۳۳	$10/5 \pm 0/2^{efg}$	$209/7 \pm 0/9^f$	$26/9 \pm 0/1^j$	$34/7 \pm 0/7^j$
۱۶	۸۰	۳۰	۰/۵	$11/5 \pm 0/3^{def}$	$224/5 \pm 0/5^e$	$25/3 \pm 0/5^k$	$28/7 \pm 0/7^l$

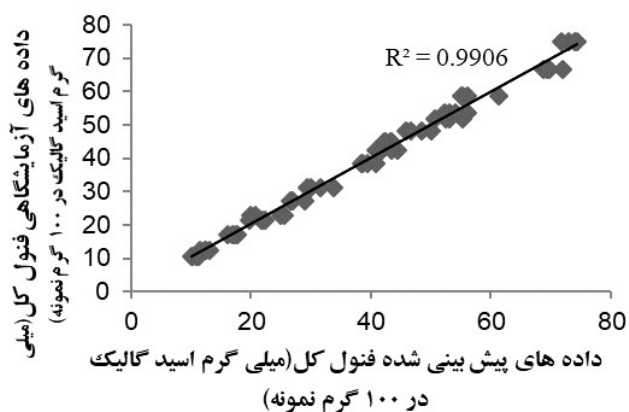
حروف یکسان در هر ستون نشان از عدم معنی‌داری در سطح ۵ درصد

ضریب رگرسیون مقایسه‌ی مقادیر خروجی‌های مورد نظر محاسبه شده در آزمایشگاه و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های بهینه‌ی انتخاب شده در این مطالعه، در شکل ۱ آورده شده است. مقادیر ضریب R^2 بالا در این شکل‌ها، نشان دهنده کارایی و دقت مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی پارامترهای مورد نظر می‌باشد. کارامان و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که مدل سیستم‌های عصبی فازی تطبیقی دارای توانایی بیشتری ($R^2 = 0/99$) نسبت به مدل شبکه عصبی ($R^2 = 0/899$) و رگرسیون چند

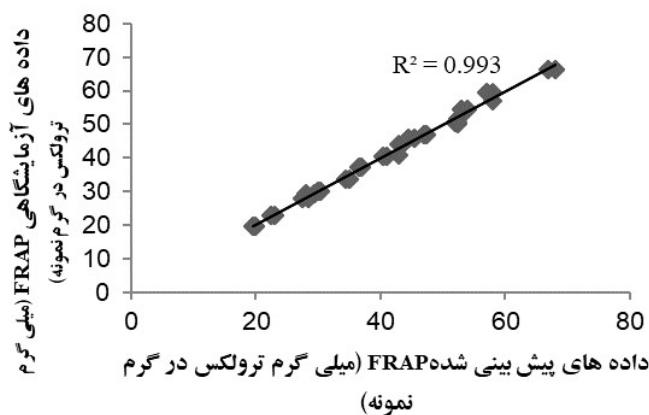
متغیری خطی ($R^2 = 0/63$) برای پیش‌بینی پارامترهای اکسایشی به‌ویژه عدد پراکسید در روغن آفتابگردان است. واثقیان و همکاران در سال ۲۰۱۶، از شبکه عصبی و انفیس برای مدل‌سازی استخراج روغن از پسته با کمک آنزیم استفاده نمودند. مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با پیش‌بینی شده نشان داد که برای استخراج روغن از دانه‌های پسته مدل شبکه‌های عصبی، مدل بهتری نسبت به روش انفیس می‌باشد (۳۳). کارامان و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که مدل سیستم‌های عصبی فازی تطبیقی دارای توانایی بیشتری ($R^2 = 0/99$) نسبت به مدل شبکه عصبی ($R^2 = 0/899$) و رگرسیون چند متغیری خطی ($R^2 = 0/63$) برای پیش‌بینی پارامترهای اکسایشی به‌ویژه عدد پراکسید در روغن آفتابگردان است (۲۳). در پژوهشی فرزانه و همکاران (۲۰۱۷) به مدل‌سازی مرحله‌ی پخت در فرایند صنعتی استخراج روغن کلزا با استفاده از سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی پرداختند که در پایان بیان داشتند با توجه به میزان ضرایب همبستگی بالای بین نتایج آزمایشگاهی و خروجی‌های مدل، بیان‌گر دقت قابل قبول و قابلیت استفاده از این مدل‌ها در کنترل فرایندهای صنعتی می‌باشد (۱۵). در مطالعه‌ای که با هدف بهینه‌سازی و مدل‌سازی فرایند کواسرواسیون موسیلاژ دانه شاهی با بتالاکتوگلوپین با کمک روش سطح پاسخ و سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی توسط طاهری و همکاران (۲۰۲۲) صورت پذیرفته بود، مشخص گردید که سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی کارایی بیشتری در مدل‌سازی این فرایند نسبت به روش سطح پاسخ دارد (۳۲).



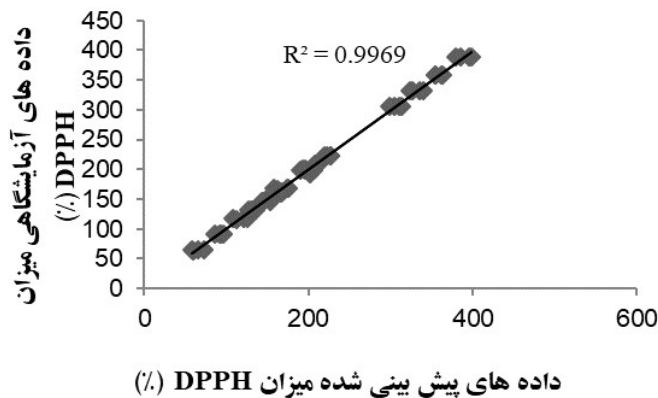
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱- مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل انفیسی برای فنول کل (الف)، بازده استخراج (ب)، DPPH (ج)، FRAP (د)

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، امکان پیش بینی خروجی‌های مختلف استخراج ترکیبات آنتی‌اکسیدانی با کمک امواج فراصوت با استفاده از سامانه استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (انفیسی) بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که، سامانه انفیسی ابزار مفیدی برای پیش‌بینی و یافتن نگاشت غیرخطی میان پارامترهای مورد نظر است. همه مدل‌ها کارایی خوبی با مقادیر R^2 بیش از ۰/۹۹ داشته و دارای میانگین مجذور مربع خطای مطلوبی بودند. با توجه به امکان استفاده از این مدل‌ها در طراحی کنترل‌های بر خط می‌توان استفاده از آن‌ها را برای کنترل بهتر فرایندهای صنعتی، کاهش هزینه‌ها و وقت و از طرفی بهبود محصول نهایی توصیه نمود. از طرفی نتایج نشان داد که با افزایش فرکانس امواج فراصوت در ابتدا میزان بازده استخراج، میزان ترکیبات فنولی، توانایی به دام اندازی رادیکال آزاد (DPPH) و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی براساس احیاء آهن افزایش و سپس کاهش یافت. با افزایش زمان و همچنین کاهش نسبت حلال به نمونه، میزان بازده استخراج، میزان ترکیبات فنولی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی براساس احیاء آهن افزایش یافت.

۵- منابع

- ۱- روحانی رکسانه، عین افشار سودابه، احمدزاده قوبدل، ریحانه. استخراج ترکیبات آنتوسیانینی و آنتی اکسیدانی پرچم گل زعفران به کمک فناوری امواج فراصوت. *پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران*. ۱۳۹۴؛ ۱۱(۲): ۱۶۱-۱۷۰.

- 3- Abid M, Jabbar S, Wu T, Hashim MM, Hu B, Lei S, Zhang X. and Zeng, X. Effect of ultrasound on different quality parameters of apple juice. *Ultrasonics sonochemistry*. 2013; 20(5): 1182-1187.
- 4- Altemimi A, Watson DG, Choudhary R, Dasari MR, Lightfoot DA.. Ultrasound Assisted Extraction of Phenolic Compounds from Peaches and Pumpkins. *PloS one*. 2016; 11 (2):98-112.
- 5- Albu S, Joyce E, Paniwnyk L, Lorimer, JP, Mason TJ. Potential for the use of ultrasound in the extraction of antioxidants from *Rosmarinus officinalis* for the food and pharmaceutical industry. *Ultrasonics sonochemistry*. 2004; 11(3): 261-265.
- 6- AOAC. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, 15th ed. Washington, DC., USA. 1990.
- 7- Archana A, Divya Bharathi V, Saraboji S, Thirunavukkarasu A, Nithya R. Optimization and Extraction of Phenolic Compounds from *Capcicum annuum* Using Response Surface Methodology. *Emerging Research in Management &Technology*. 2015; 4(7): 204-210.
- 8- Ashrafi, KH., Hoshyaripour, GH., Nadjar Araabi, B and Keshavarzi shirazi, H. 2012. Prediction of daily carbon monoxide concentration using hybrid FS-ANFIS model based on atmospheric stability analysis; case study: city of Tehran. *Journal of Earth and Space Physics*. 38(2):183-201.
- 9- Bendicho C, Lavilla I. Ultrasound extractions. Encyclopedia of separation science. *Academic Press*: 2000; 1448-1454.
- 10- Chan SW, Lee CY, Yap CF, Wan Mustapha WA, Ho CW. Optimisation of extraction conditions for phenolic compounds from limau purut (*Citrus hystrix*) peels. *International Food Research Journal*. 2009; 16 (2): 203-213.
- 11- Chang K, Gao P, Wang S, Wei W, Yin J, Zhong W, Reaney MJ. Tailoring oil blends for specific purposes: A study on nutritional and antioxidant properties of soybean oil mixed with corn, sunflower, and flaxseed oils. *LWT- Food Science and Technology*. 2024; 206, 116628.
- 12- Ebrahimi M, Karimi R, Daraei Garmakhany A. The effect of maltodextrin edible coating containing pyracantha extract and potassium nano-carbonate on secondary metabolites, antioxidant capacity and microbiological properties of grape during cold storage. *Heliyon*. 2024; 10(13).
- 13- Ebrahimi M, Karimi R, Daraei Garmakhany A, Aghajani N, Shayeganfar A. Using the adaptive fuzzy-neural system (ANFIS) in modeling storage conditions of grape fruits coated with maltodextrin containing potassium nanocarbonate and Pyracantha extract. *Journal of food science and technology (Iran)*. 2024; 20(144): 242-262.
- 14- Esclapez MD, García-Pérez JV, Mulet A, Cárcel JA. Ultrasound-assisted extraction of natural products. *Food Engineering Reviews*. 2011; 3(2): 108-120.

- 15- Farzaneh V, Bakhshabadi H, Gharekhani M, Ganje M, Farzaneh F, Carvalho IS. Application of an adaptive neuro_fuzzy inference system (ANFIS) in the modeling of rapeseeds' oil extraction. *Food process engineering*. 2017; 125: 1-8.
- 16- Farzaneh V, Ghodsvai A, Bakhshabadi H, Ganje M, Dolatabadi Z, Carvalho I. Modelling of the selected physical properties of the Fava bean with various moisture contents Using Fuzzy logic design. *Journal of Food Process Engineering*. 2017; 40(2), e12366.
- 17- Ganje M., Gharibi S, Nejatpour F, Deilampour M, Goshadehrou K, Saberyan S, Abdi G. The ANFIS-RSM based multi-objective optimization and modelling of ultrasound-assisted extraction of polyphenols from jamun fruit (*Syzygium cumini*). *Ultrasonics Sonochemistry*. 2025; 107227.
- 18- Halliwell B, Aeschbach R, Loliger J, Arouma OI. The characterization of antioxidants. *Journal of the Food Chemistry*. 1995; 33: 601-617.
- 19- Hossain MB, Brunton NP, Patras A, Tiwari BO, Donnell CP, Martin-Diana AB, Barry-Ryan V. Optimization of ultrasound assisted extraction of antioxidant compounds from marjoram (*Origanum majorana L.*) using response surface methodology. *Ultrasonics sonochemistry*. 2012; 19(3): 582-590.
- 20- Hosseini SM, Bojmehrani A, Zare E, Zare Z, Hosseini SM, Bakhshabadi H. Optimization of antioxidant extraction process from corn meal using pulsed electric field-subcritical water. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021; 45(6): e15458
- 21- Johann G, dos Santos CS, Montanher PF, de Oliveira RAP, Carniel AC. Fuzzy inference systems for predicting the mass yield in extractions of chia cake extract. *Software Impacts*. 2021; 10: 100145, ISSN 2665-9638. <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2021.100145>.
- 22- Jyh S, Jang R. ANFIS: Adaptive Network- Based Fuzzy Inference Systems" IEEE Trans. *On Systems, Man and Cybernetics*. 1993; 23 (3). 665-685.
- 23- Karaman S, Ozturk I, Yalcin H, Kayacier A, Sagdi O. Comparison of adaptive neuro fuzzy inference system and artificial neural networks for estimation of oxidation parameters of sunflower oil added with some natural byproduct extracts. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2012; 92(1), 49-58.
- 24- Koleva II, Van Beek TA, Linssen GA, Evstatieva LN. Screening of plant extracts for antioxidant activity: a comparative study on three testing methods. *Phytochemical Analysis*. 2002; 13(1): 8-17
- 25- Moghimi M, Farzaneh V, Bakhshabadi H. The effect of ultrasound pretreatment on some selected physicochemical properties of black cumin (*Nigella Sativa*). *Nutrire*. 2018; 4(18): 2-8.
- 26- Razghandi E, Elhami Rad AH, Jafari SM, Saiedi Asl MR, Bakhshabadi H. Application of Pulsed Electric Field-Ultrasound Technique for Antioxidant Extraction from Yarrow: ANFIS Modeling and Evaluation of Antioxidant Activity. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2024; (1): 2951718.

- 27- Razghandi E, Elhami Rad AH, Jafari SM, Saiedi Asl MR, Bakhshabadi H. Combined pulsed electric field-ultrasound assisted extraction of yarrow phenolic-rich ingredients and their nanoliposomal encapsulation for improving the oxidative stability of sesame oil. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2024; 110: 1-11.
- 28- Razghandi E, Elhami Rad AH, Jafari SM, Saiedi Asl MR, Bakhshabadi H. Investigating the effect of nanoliposomes containing yarrow (*Achillea millefolium*) antioxidant extract on oxidative properties and fatty acid profile of sesame oil. *Journal of food science and technology (Iran)*. 2024; 21(153): 75-87.
- 29- Sada SO, Ikpeseni, SC. Evaluation of ANN and ANFIS modeling ability in the prediction of AISI 1050 steel machining performance. *Heliyon*, 2021; 7(2).
- 30- Sun T, Powers JR, Tang J. Evaluation of the antioxidant activity of asparagus, broccoli and their juices. *Food chemistry*. 2007; 105 (1): 101-106.
- 31- Todorova MN, Ognyanov IV. Sesquiterpene lactones in a population of *Balsamita major* cultivated in Bulgaria. *Phytochemistry*. 1989; 28 (4):1115-1117.
- 32- Taheri A, Kashaninejad M, Tamaddon AM, Ganjeh M, Jafari SM. Complexation of cress seed mucilage and β -lactoglobulin; optimization through response surface methodology and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2022; 228, 104615.
- 33- Vasseghian Y, Zahedi GH, Ahmadi M. Oil Extraction from Pistacia Khinjuk - Experimental and Prediction by Computational Intelligence Models. *Journal of Food Biosciences and Technology*. 2016; 6(1): 1-12.
- 34- Yeasmin F, Prasad P, Sahu JK. Effect of ultrasound on physicochemical, functional and antioxidant properties of red kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) proteins extract. *Food Bioscience*. 2024; 57. 103599. ISSN 2212-4292. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103599>.

The use of the fuzzy-neural inference system (ANFIS) in modeling the extraction of phenolic compounds from *Tanacetum balsamita* with the assistance of ultrasound waves.

Sahand Ghafoorzadeh¹, Mehdi Gharekhani^{1*}, Hamid Bakhshabadi²

¹Department of Food Science and Technology, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

²Department of Agriculture, Minab Higher Education Center, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

Corresponding Author: m.gharekhani@iaut.ac.ir

Abstract:

This study investigated the modeling of phenolic compound extraction from the *Tanacetum Balsamita* plant using ultrasound waves and the fuzzy-neural inference system (ANFIS). Input variables included the frequency of the ultrasonic device, the sample to solvent ratio, and process time. Output variables included extraction efficiency, total phenolic compounds, free radical trapping ability, and antioxidant capacity based on iron reduction. Three types of membership functions (Gaussian, triangular, and trapezoidal) with varying numbers of membership functions were examined. Results indicated that the most optimal models were triangular functions with 2-2-2 and 3-3-3 membership functions for extraction efficiency and antioxidant capacity, Gaussian function with 4-4-4 membership function for total phenolic compounds, and trapezoidal function with 2-2-2 membership function for free radical trapping ability. Ultrasound was found to improve or increase various parameters, with higher ultrasound frequencies leading to increased extraction efficiency, phenolic compounds, free radical trapping ability, and antioxidant capacity before eventually decreasing. Additionally, increasing process time and decreasing solvent to sample ratio resulted in higher extraction efficiency, phenolic compounds, and antioxidant capacity. The high correlation coefficients between laboratory results and model outputs suggest the accuracy and potential use of these models in controlling the extraction process of phenolic compounds from the *Tanacetum Balsamita* plant using ultrasound waves.

Keywords: Antioxidant compound extraction, Ultrasound, *Tanacetum Balsamita*, Modeling