



## مدل سازی ریزپوشانی اسانس آویشن باغی (*Thymus vulgaris*) در پوشش کازئینات سدیم، مالتودکستروزین و نشاسته اصلاح شده با استفاده از دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی

فائزه شاهکل<sup>۱</sup>، هاجر عباسی<sup>۱\*</sup>، محسن نوروزی مبارکه<sup>۲</sup>

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲- گروه محیط زیست، دانشکده کشاورزی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
	تاریخ های مقاله :
	تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۹
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۹
	<b>کلمات کلیدی:</b>
	اسانس آویشن باغی، خشک کردن انجمادی، راندمان ریزپوشانی، ظرفیت آنتی اکسیدانی، کروماتوگرافی گازی.
	<b>DOI: 10.22034/FSCT.19.125.225</b>
	<b>DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.125.1.0</b>
	* مسئول مکاتبات: H.Abbasi@khuis.ac.ir
ریزپوشانی با هدف حفاظت ترکیبات فرار و حساس به واکنش های شیمیایی صورت می گیرد. مدلسازی فرایند می تواند در ارزیابی و پیش بینی تاثیر شرایط موثر بر ویژگی های کیفی محصول مناسب کارآمد باشد. برای بررسی تأثیر غلظت مواد دیواره، نسبت پروتئین به پلی ساکارید و مدت زمان اعمال امواج فراصوت بر راندمان ریزپوشانی، فنولیک کل، ظرفیت آنتی اکسیدانی و ترکیبات فرار ریزکپسول ها، نانوامولسیون اسانس آویشن باغی در فاز آبی حاوی ترکیب پروتئین (کازئینات سدیم) و پلی ساکارید (مالتودکستروزین و نشاسته اصلاح شده) با کمک امواج فراصوت فراهم شد. مدل سازی متغیرهای وابسته به روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی صورت گرفت. نتایج نشان داد افزایش غلظت مواد دیواره و نسبت پروتئین به پلی ساکارید باعث بهبود حفظ ترکیبات فرار و ظرفیت آنتی اکسیدانی اسانس ریزپوشانی شده گردید. با افزایش نسبت پروتئین به پلی ساکارید و مدت زمان امواج فراصوت، راندمان ریزپوشانی افزایش یافت. نتایج مدل های حاصل از اثر متقابل سطح پاسخ و شبکه عصبی بیانگر حفظ و ابقای ترکیبات فنولیک کل، ظرفیت آنتی اکسیدانی و افزایش راندمان ریزپوشانی در مقادیر بالاتر متغیرها بود. ریز کپسول تولیدی شامل ۲۰٪ مواد دیواره، ۳۱٪ نسبت پروتئین به پلی ساکارید و ۹۷٪ زمان امواج فراصوت از نقطه نظر راندمان ریزپوشانی و ترکیبات فرار به عنوان بهترین تیمار معرفی شد. نتایج تجربی حاصل از آزمایشات با شرایط بهینه نشان دهنده عملکرد مناسب و هم سویی هر دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی و برتری شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی متغیرهای مورد نظر است.	

## ۱- مقدمه

امروزه طیف وسیعی از افزودنی‌ها با اهداف مختلف در تهیه فرآورده‌های غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اهمیت این افزودنی‌ها به حدی است که بدون بهره‌گیری از آنها، تولید و مصرف بسیاری از فرآورده‌های غذایی تقریباً غیر ممکن می‌شود. طعم دهنده‌ها و نگهدارنده‌ها از جمله افزودنی‌های غذایی هستند که به‌طور گسترده در فرآوری مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نگرانی‌ها ناشی از مصرف ترکیبات سنتزی به لحاظ مسائل مربوط به سلامت و ایمنی و نیز محدودیت در حدود مجاز مصرف، مصرف کنندگان مواد غذایی را به استفاده از ترکیبات با منشأ طبیعی و گیاهی در مواد غذایی ترغیب نموده است. بر این اساس استفاده از اسانس‌های گیاهی به عنوان مواد طبیعی مولد عطر و طعم، نگهدارنده و آنتی‌اکسیدان در فرآوری مواد غذایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اسانس‌ها (روغن‌های معطر) ترکیبات چربی دوست معطر و فرار استخراج شده از گیاهان هستند که به‌علت وجود ترکیبات فرار و حساسیت به اکسیداسیون، نیاز است با یک روش مناسب محافظت شوند تا از تبخیر و تخریب ترکیبات فرار جلوگیری شود و در زمان معین آزاد گردند. روش‌های مختلفی به‌منظور پایدارسازی و سهولت در نگهداری و حمل و نقل مطمئن این ترکیبات پیشنهاد شده است که از جمله آنها می‌توان به روش ریزپوشانی<sup>۱</sup> محصور کردن در نانولیپوزوم‌ها<sup>۲</sup> و تکنیک نانو رسوب دهی اشاره نمود [۱]. ریزپوشانی تکنیک بسته بندی اجزاء و ترکیبات حساس مانند ویتامین‌ها، ترکیبات مولد طعم و بو و عصاره‌ها و اسانس‌های گیاهی در داخل یک پوشش یا دیواره است، تا مانعی بین مواد زیست فعال حساس و محیط بیرونی فراهم آورد و آنها را از تأثیر شرایط محیطی نامطلوب مانند تأثیرات نور، اکسیژن و رطوبت حفظ کند. با استفاده از این روش ضمن جلوگیری از دست رفتن ترکیبات فرار و حساس به شرایط محیطی، آنها تحت شرایط کنترل شده‌ای رها می‌شوند [۲]. مواد مختلفی شامل پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها، لیپیدها، صمغ‌ها و سلولز می‌توانند به عنوان دیواره و یا پوشش در فرایند ریزپوشانی مورد استفاده قرار گیرند. هر یک از این مواد دارای معایب و مزایایی می‌باشند. برای انتخاب ماده دیواره عواملی

نظیر نوع ترکیب هدف (هسته)، روش ریزپوشانی، مباحث اقتصادی، نوع مصرف فرآورده تولیدی و نیز شرایط پیش‌بینی شده در قوانین نظارتی مد نظر قرار می‌گیرند. از طرف دیگر باید توجه داشت که در فرایند ریزپوشانی باید ترکیبات مولد طعم و بو و مواد دیواره نباید واکنشی با ماده هسته انجام دهد و کار با آن نیز آسان باشد [۳]. از نشاسته طبیعی و مشتقات آن (نشاسته اصلاح شده)، مالتودکسترین‌ها و بتا سیکلودکسترین‌ها به‌طور گسترده‌ای در صنایع غذایی به‌منظور حفظ ترکیبات فرار و مولد عطر و طعم استفاده می‌شود. پروتئین‌های غذایی نظیر کازئینات سدیم، ایزوله پروتئین آب پنیر و ایزوله پروتئین سویا هم به همین منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند. دارا بودن گروه‌های عاملی مختلف، خصوصیات آمفی‌فیلیک، توانایی خود تجمعی و خود ساختارسازی و برهم‌کنش با انواع گوناگونی از ترکیبات، وزن مولکولی بالا و انعطاف پذیری زنجیره مولکولی پروتئین‌ها سبب شده است تا خواص عملکردی مطلوبی نظیر حلالیت، گرانروی، امولسیون‌کنندگی و تشکیل لایه را پیدا کنند و از این‌رو در فرایند ریزپوشانی مورد توجه قرار گرفته‌اند. آدامیک و کلمبیا<sup>۳</sup> (۲۰۰۴)، در ریزپوشانی روغن نعناع فلفلی به روش خشک کردن پاششی دریافتند، راندمان این فرایند تحت تأثیر مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ مالتودکسترین متفاوت بوده، اما در کلیه نسبت‌های به‌کار رفته، روغن نعناع با راندمان بالایی حفظ گردیده است [۴]. تور<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، روغن زنجبیل را با مالتودکسترین (DE=۱۸) و پروتئین آب پنیر ریزپوشانی نمودند. نتایج این تحقیق مشخص کرد که بهترین ریزپوشانی روغن زنجبیل در شرایطی انجام گردید که نسبت ۱:۱ از مالتودکسترین و پروتئین آب پنیر و فشار هموزنایزر ۳۰ مگا پاسکال و دمای ورودی ۱۲۰ درجه و خروجی ۶۰ درجه سانتی‌گراد مورد استفاده قرار گرفت [۵]. فرنالدر<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۴)، در پژوهش خود نشان دادند که صمغ عربی و نشاسته اصلاح شده در حفظ مواد فرار روغن رزماری دارای بازده بیشتری در مقایسه با مالتودکسترین و اینولین هستند. حضور اینولین جذب رطوبت را بهبود بخشید، خاصیت هیگروسکوپی محصول تحت رطوبت نسبی بالا را کاهش داد اما باعث کاهش بازده انکپسولاسیون گردید [۶].

3. Adamic and Kalemba  
4. Touré  
5. Fernandes

1. Micro-encapsulation  
2. Nanoliposome

قاعدگی اشاره نمود [۱۲، ۱۳].

مدل‌های ریاضی توسعه یافته در صنعت غذا را می‌توان به دو گروه مدل‌های نظری و تجربی تقسیم بندی کرد. مدل‌های نظری به وسیله‌ی فرضیاتی که پیرامون یک پدیده وجود دارد ایجاد شده و توسط داده‌های آزمایشگاهی اعتبار آنها تأیید می‌شود. این مدل‌ها اطلاعات جزئی در مورد متغیرهای فرایند ارائه می‌دهند و تعیین پارامترهای مجهول توسط آنها به محاسبات ریاضی پیچیده نیاز دارد و بسیار وقت‌گیر می‌باشد. مدل‌های تجربی نیز بر اساس داده‌های آزمایشگاهی شکل می‌گیرند و کاربرد آنها به دلیل اینکه فقط در همان شرایط آزمایشگاهی که ایجاد شده‌اند جوابگو هستند، محدود می‌باشد. در صنعت غذا، مدل‌های غیرخطی به دلیل متغیر بودن و رفتار غیرخطی مواد طبیعی بسیار مناسب‌تر هستند. لذا در سال‌های اخیر مدل‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی جایگاه قابل توجهی در مدل‌سازی و کنترل فرایندهای صنعت غذا به خود اختصاص داده‌اند. شبکه‌های عصبی مصنوعی نوعی سیستم پردازش موازی اطلاعات هستند که حاصل نتیجه تحقیقات دانشمندان بر هوش مصنوعی می‌باشند و سعی بر درک رفتار و مدل‌سازی عملکرد مغز انسان دارد. هدف یک شبکه عصبی در مدل‌سازی صحیح بین الگوهای ورودی الگوهای خروجی مرتبط با آنها است. از مزایای منحصر به فرد شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان به توزیع اطلاعات در بین گره‌ها و قدرت پردازش موازی، توانایی یادگیری، ذخیره‌سازی و دسترسی سریع به حجم زیادی از اطلاعات و توانمندی تشخیص الگوهای چند متغیره غیرخطی و پیچیده را نام برد [۱۴]. روش سطح پاسخ وسیله‌ی آماری مفید و شناخته شده‌ای جهت مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایندها است. این روش مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری است که در مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایندهایی به کار می‌رود که پاسخ مورد نظر توسط چندین متغیر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. با این روش شرایط آزمایشگاهی که می‌تواند منجر به بهترین کیفیت محصول در یک ویژگی خاص شود، قابل برآورد است. در واقع، در این روش برای هر متغیر خروجی یک معادله خواهیم داشت که میزان تأثیر هر یک از عوامل مؤثر در فرایند روی آن متغیر را مشخص می‌کند و کلیه ضرایب مدل رگرسیونی و اثر متقابل فاکتورها، قابل برآورد هستند [۱۵].

با توجه به اثبات کارایی شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی

امروزه از روش‌های مختلفی از جمله خشک کردن پاششی، خشک کردن انجمادی، سرد کردن پاششی، پوشش‌دهی با اکستروژن، خشک کردن در بستر سیال و روش تبلور (کوکریستالیزاسیون) جهت فرایند ریزپوشانی استفاده می‌شود که خشک کردن انجمادی یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای خشک کردن و ریزپوشانی ترکیبات حساس به حرارت محسوب می‌شود. اساس این روش شامل انجماد امولسیون حاوی ترکیب هدف در پایین‌تر از دمای یونکتیک آن و سپس تصعید یخ در خلاء بالا می‌باشد. فرایند ریزپوشانی روغن حاصل از پرس سرد پرتقال با مواد دیواره صمغ عربی و نشاسته اصلاح شده و روش‌های مختلف خشک‌کن غلطکی، کابینتی، پاششی و انجمادی نشان داد که ریزکپسول‌های تولید شده به روش خشک‌کن انجمادی دارای خصوصیات مطلوب‌تری نسبت به سایر روش‌ها از جمله خشک‌کن پاششی بود [۷]. نتایج حاصل از ریزپوشانی اسانس لیمون با مواد دیواره صمغ عربی - ساکارز - ژلاتین (نسبت وزنی ۱:۱:۱) توسط خشک‌کن انجمادی، نشان داد که ماده طعم‌زای ریزپوشانی شده، ساختاری شبیه پولک، بدون گودی و تورفتگی و چروکیدگی دارد [۸].

آویشن باغی با نام علمی *Thymus Vulgaris L.* از خانواده نعناعیان<sup>۱</sup>، گیاهی بوته‌ای و چندساله با ساقه‌های چوبی و ارتفاع ۵۰-۳۰ سانتی‌متر می‌باشد [۹]. این گیاه بومی مناطق مدیترانه بوده و در دامنه‌های کوه میان تخت سنگ‌ها در نواحی مختلف مدیترانه مخصوصاً در کشورهای فرانسه، پرتغال، اسپانیا، ایتالیا، یونان و برخی نواحی آسیا می‌روید. خواص ضد عفونی کننده، ضد اسپاسم، ضد نفخ، معرق، خلط‌آور، آرام بخش و خصوصیات آنتی‌اکسیدانی این گیاه سبب شده تا در زمره گیاهان دارویی ارزشمند قرار گیرد. این گیاه حاوی پنتوزان‌ها، تانن‌ها، پلی‌متوکسی فلاوون، تری‌ترپن‌ها، رزین‌ها و ساپونین است [۱۰]. نسبت اجزای تشکیل دهنده اسانس این گیاه بسته به شرایط زراعی متغیر است [۱۱]. اسانس آویشن باغی دارای مواد آروماتیک متعددی است که هر یک در ایجاد آرومای مطبوع در اسانس حاصل از این گیاه مؤثر هستند. از کاربردهای دارویی اسانس این گیاه نیز می‌توان به تقویت معده، رفع ضعف عمل دستگاه هضم، نیرو دهنده، ضد تشنج، رفع بیماری‌های تنفسی، سیاه سرفه، آسم و رفع دردهای

## ۲-۲- تهیه نانوامولسیون اسانس آویشن باغی

محلول کازئینات سدیم، مالتودکسترین و نشاسته اصلاح شده با نسبت‌های مختلف مطابق با مقادیر جدول [۱] در آب دیونیزه (pH=۷) تهیه شدند. عملیات هم‌زدن به مدت یک ساعت، در دمای اتاق به کمک همزن مغناطیسی انجام گرفت. سپس محللول‌های تهیه شده برای حداکثر جذب آب به مدت ۲۴ ساعت در دمای یخچال نگهداری گردیدند. اسانس آویشن باغی با نسبت وزنی ۵ درصد و توئین-۸۰ به عنوان امولسیفایر در غلظت ۰/۵ درصد به محللول‌ها اضافه شدند. عملیات هم‌زدن و همگن‌سازی اولیه به کمک همزن مغناطیسی به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۵۰۰۰ دور بر دقیقه انجام گرفت. به‌منظور تهیه نانوامولسیون، مقدار مشخصی از مخلوط به یک مخزن فلزی دو جداره منتقل گردید و سپس سونوتروود دستگاه مولد امواج فراصوت (مدل Vibracl 750VCX، ساخت شرکت Sonics کشور آمریکا) به قطر ۱۹ میلی‌متر در عمق ۱ سانتی‌متری زیر سطح مخلوط غوطه‌ور گردید. سونیکاسیون و تولید نانوامولسیون در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز به‌طور مداوم و در بازه زمانی ۱۲۰-۳۰ ثانیه در حداکثر شدت امواج فراصوت انجام شد. دمای محللول در طول مدت اعمال امواج فراصوت از طریق سیرکولاسیون آب در جداره مخزن در ۲۰ درجه سانتی‌گراد حفظ گردید [۳].

سیستم‌های پیچیده در اکثر فرایندهایی که فاکتورهای غیرخطی بسیاری در تغییر ویژگی‌های آنها مؤثر هستند و همچنین با توجه به تأثیر غلظت مواد دیواره، نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید و مدت زمان اعمال امواج فراصوت بر راندمان ریزپوشانی اسانس آویشن باغی و برخی خصوصیات کیفی آن، هدف از این پژوهش ارائه رویکردی جدید با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و یافتن توپولوژی بهینه شبکه‌های عصبی مصنوعی برای کپسوله کردن اسانس آویشن باغی و همچنین مدل‌سازی این فرایند با استفاده از روش سطح پاسخ و مقایسه میزان دقت آن با مدل عصبی می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد

اسانس آویشن باغی به روش تقطیر با آب توسط کلونجر تهیه شد. کازئینات سدیم (حاوی ۹۰٪ پروتئین و ۰/۰۱٪ کلسیم) از شرکت سیگما-آلد ریچ کشور آلمان و نشاسته اصلاح شده موسمی از کمپانی Nationalstarch & Chemical Limited انگلستان خریداری گردید. مالتودکسترین و سایر مواد آزمایشگاهی مورد نیاز، با درجه خلوص بالا از شرکت مرک آلمان خریداری شدند. برای تهیه و آماده‌سازی کلیه محللول‌ها از آب دیونیزه استفاده شد.

Table 1 Quantities of independent variables in different treatments

Ultrasonic apply time (S)	Ratio of protein to polysaccharide (%)	Wall concentration (%)	Treatment number
75	20	10	1
105	6/67	13/33	2
75	20	20	3
45	6/67	26/67	4
75	20	20	5
45	33/33	13/33	6
75	20	20	7
75	20	20	8
75	20	20	9
105	40	20	10
105	33/33	13/33	11
120	20	20	12
75	0	20	13
45	33/33	26/67	14
75	20	20	15
30	20	20	16
105	6/67	26/67	17
105	33/33	26/67	18
45	6/667	13/33	19
75	20	30	20

**۲-۳- تهیه ریزکپسول**

امولسیون‌های تهیه شده به مدت ۱۹ ساعت در دمای ۷۰- درجه سانتی‌گراد منجمد شده و پس از آن در خشک کن انجمادی (مدل FDB-5503، شرکت ایران کره) در دمای ۴۰- درجه سانتی‌گراد و فشار ۰/۷ میلی‌بار به مدت ۲۴ ساعت خشک گردیدند. پودرهای حاصل در ظروف پلاستیکی درب بسته در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند تا آزمایشات فیزیکوشیمیایی لازم بر روی آنها انجام گیرد [۳].

**۲-۴- ارزیابی کیفیت اسانس آویشن کپسوله شده****۲-۴-۱- راندمان ریزپوشانی**

میزان راندمان ریزپوشانی (ME) به کمک تعیین مقدار روغن کل و روغن سطحی، و بر اساس استخراج روغن کل و روغن آزاد با استفاده از حلال هگزان طبق رابطه (۱) محاسبه گردید [۱۶].

رابطه (۱)

=راندمان ریز پوشانی(%)

$$100 \times \frac{\text{روغن میکروکپسوله (گرم در ۱۰۰ گرم پودر)}}{\text{روغن کل (گرم در ۱۰۰ گرم پودر)}}$$

**۲-۵- تعیین فنولیک کل**

محتوی فنولیک کل بر اساس روش رنگ سنجی و با استفاده از معرف فولین سیوکالتو مطابق با روش ارائه شده توسط پینلو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۵) با اندکی تغییرات تعیین گردید. بدین‌منظور، مقدار ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره تهیه شده از پودر با ۵ میلی‌لیتر از معرف فولین- سیوکالتو (۱۰ برابر رقیق شده با آب) مخلوط و به مدت ۳-۶ دقیقه در حالت سکون قرار داده شد. در ادامه، ۴ میلی‌لیتر سدیم کربنات ۷/۵ درصد به آن اضافه و مخلوط گردید. جذب نوری محلول‌ها پس از گذشت ۶۰ دقیقه در تاریکی در طول موج ۷۶۵ نانومتر قرائت گردید. مقدار فنولیک کل موجود در نمونه‌ها بر حسب میلی‌گرم گالیک اسید بر گرم وزن خشک نمونه گزارش شد [۱۷].

**۲-۶- تعیین درصد بازدارندگی رادیکال آزاد DPPH**

برای اندازه‌گیری میزان مهار رادیکال آزاد DPPH توسط

ریزکپسول‌ها، به ۰/۲۵ میلی‌لیتر از عصاره متانولی، ۴ میلی‌لیتر محلول متانولی ۲،۲- دی فنیل -۱- پیکریل هیدرازیل (۰/۱ درصد) اضافه شد. پس از گذشت ۳۰ دقیقه در تاریکی، میزان جذب نوری محلول‌ها در طول موج ۵۱۷ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (شرکت CECIL، ساخت انگلستان) اندازه‌گیری شد. درصد مهار رادیکال آزاد DPPH توسط آنتی اکسیدان‌ها با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید [۱۸].

رابطه (۲)

=درصد بازدارندگی فعالیت رادیکال آزاد DPPH

(جذب شاهد/ جذب نمونه- جذب شاهد) × ۱۰۰

**۲-۷- شناسایی و اندازه‌گیری مهم‌ترین ترکیبات موجود در اسانس**

شناسایی و اندازه‌گیری ترکیبات فرار ریزکپسول‌ها با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی طیف سنجی جرمی (مدل 5975C-7890، شرکت اگلینت، ساخت آمریکا) دارای ستون موئینه با طول ۶۰ متر، قطر داخلی ۰/۲ میلی‌متر، ضخامت لایه داخلی ۰/۲۵ میکرون، برنامه دمایی ۲۳۰-۱۶۰ درجه سانتیگراد با گرادیان دمایی ۷ درجه در هر دقیقه انجام شد. دمای محل تزریق ۲۵۰ درجه سانتیگراد و گاز حامل، هلیوم و سرعت آن ۱ میلی‌متر بر دقیقه مورد استفاده قرار گرفت. شناساگر EI با انرژی یونیزاسیون ۷۰ الکترون ولت و دمای منبع یونیزاسیون ۲۳۰ درجه جهت شناسایی ترکیبات استفاده شد [۱۹].

**۲-۸- مقایسه خصوصیات کیفی نمونه‌های بهینه**

پس از مدل‌سازی و بررسی تأثیر متغیرهای مستقل بر تغییرات متغیرهای وابسته، بهینه‌یابی با هدف بالاترین راندمان ریزپوشانی و بهبود حفظ محتوی فنولیک کل، ترکیبات فرار و ظرفیت آنتی اکسیدانی انجام گرفت، و نمونه‌های بهینه از حیث راندمان ریزپوشانی و برخی خصوصیات کیفی اسانس از جمله محتوی فنولیک کل، ترکیبات فرار و ظرفیت آنتی اکسیدانی مقایسه شدند.

**۳- تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها**

در این تحقیق، متغیرهای مستقل این پژوهش شامل غلظت مواد دیواره (۳۰-۱۰ درصد) و نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید

1. Pinelo

(۴۰-۰ درصد) و مدت زمان اعمال امواج فراصوت (۱۲۰-۳۰ ثانیه) در نظر گرفته شدند. ۲۰ تیمار توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت<sup>۱</sup> پیشنهاد گردید (جدول ۱)، که در این جدول سطوح متغیرهای مستقل در تیمارهای مختلف نمایش داده شده است. به منظور بررسی تأثیر متغیرهای مستقل شامل غلظت مواد دیواره (A)، نسبت پروتئین به پلی ساکارید (B) و مدت زمان اعمال امواج فراصوت (C) بر تغییرات راندمان ریزپوشانی و خصوصیات کیفی ریزکپسول‌ها (فنولیک کل، ترکیبات فرار، ظرفیت آنتی اکسیدانی) از نرم افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۹ و روش سطح پاسخ در قالب طرح مرکب مرکزی با  $\alpha$  برابر ۱/۵ و ۶ نقطه مرکزی استفاده شد. کلیه بررسی‌های آماری در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت.

ارزیابی آماری آنالیز نمونه‌های بهینه در قالب طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم افزار SPSS ver: 9.1 صورت گرفت. مقایسه میانگین‌ها و بررسی معنی‌دار بودن اختلاف بین آنها، بر مبنی حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) انجام شد.

شبکه عصبی مورد استفاده برای آموزش، شبکه پرسپترون چند لایه (Multilayer Perceptron) و روش آزمون آن، پس انتشار خطا می‌باشد. از نرم افزار NeuroPower ورژن ۲،۵ جهت مدل‌سازی شبکه عصبی داده استفاده شد. ۷۵٪ داده‌ها برای فاز آموزش، ۱۰٪ برای فاز اعتبار سنجی و ۱۵٪ برای فاز تست در نظر گرفته شد. به منظور ارزیابی نتایج از آماره‌های مختلف مانند ضریب تعیین ( $R^2$ ) و میانگین مربعات خطا (MSE) استفاده گردید.

## ۴-نتایج و بحث

### ۴-۱-شناسایی ترکیبات تشکیل دهنده اسانس آویشن باغی

در این پژوهش راندمان اسانس‌گیری از گیاه آویشن باغی ۱/۳ درصد بر مبنی وزن خشک گیاه ارزیابی شد. نتایج اندازه‌گیری ترکیبات اصلی اسانس آویشن باغی توسط دستگاه GS/MS، حاکی از وجود ۲۰ نوع ترکیب در اسانس این گیاه بود که عمده‌ترین آنها سیمن (۳۸/۲۷ درصد)، گاما- ترپینن (۲۷/۱۵ درصد)، پینن (۶/۴۳ درصد) و آلفا- پینن (۲/۰۴ درصد)

گزارش شدند که در مجموع ۹۹/۹۱ درصد کل ترکیبات را تشکیل دادند. در مطالعه انجام شده توسط Asllani and Toska (۲۰۰۳)، ۸۶ ترکیب در اسانس گیاه آویشن باغی که به روش تقطیر با بخار آب از اندام‌های هوایی به دست آمده بود، شناسایی شد و عمده‌ترین ترکیب‌ها پارا- سیمن (۴۳/۷۵٪)، گاما- ترپینن (۲۷/۶۲٪) و تیمول (۶۰/۱۵٪) گزارش شدند [۱۲]. برخی از محققان، ۸۶ نوع ترکیب را در اسانس آویشن باغی شناسایی و عمده ترکیبات آن را تیمول (۴۴/۷٪)، پارا- سیمن (۱۸/۶)، گاما- ترپینن (۱۶/۵) و کارااکرول (۲/۴٪) معرفی کرده و اثرات آنتی اکسیدانی و ضد میکروبی اسانس این گیاه را به تیمول موجود در آن نسبت دادند [۲۰]. در تحقیقی دیگر نیز نتایج نشان داد که درصد اسانس آویشن باغی ۱/۲۵٪ وزن خشک گیاه به دست آمده و مهم‌ترین ترکیبات آن تیمول (۴۷/۵۹٪)، گاما- ترپینن (۳۰/۹۰٪) و پارا- سیمن (۸/۴۱٪) معرفی شد. تنوع در نوع و میزان ترکیبات اسانس گیاه آویشن باغی به عوامل مختلفی از جمله منطقه جغرافیایی، تنوع فصل، تنوع ژنتیکی، نحوه خشک کردن اندام‌های هوایی گیاه، شرایط برداشت و نگهداری پس از آن و همچنین شرایط اسانس‌گیری (نوع حلال و مدت زمان استخراج) وابسته است [۲۱].

### ۴-۲-بررسی خصوصیات کیفی ریزکپسول‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ و شبکه عصبی

#### مصنوعی

برای به دست آوردن مدل تجربی برای پیش‌بینی متغیرهای پاسخ (راندمان ریزپوشانی، فنولیک کل، ترکیبات فرار، ظرفیت آنتی اکسیدانی) ابتدا رابطه‌های چند جمله‌ای خطی، دو فاکتوریلی (تعاملی) و درجه دو بر داده‌های به دست آمده از این پاسخ برازش داده شدند و سپس این مدل‌ها مورد آنالیز آماری قرار گرفتند. از نظر آماری مدلی مناسب است که آزمون عدم برازش آن معنی‌دار نبوده و دارای بالاترین ضریب تبیین و ضریب تبیین اصلاح شده باشد. نتایج نشان داد مدل مناسب برای پیشگویی تغییرات فنولیک کل، ترکیبات فرار و ظرفیت آنتی اکسیدانی در اثر تغییر کمیت متغیرهای مورد بررسی (غلظت مواد دیواره، نسبت پروتئین به پلی ساکارید، مدت زمان اعمال امواج فراصوت)، مدلی درجه دو با ضریب تبیین ( $R^2 > 0.85$ )، و مناسب‌ترین مدل برای پیشگویی تغییرات راندمان ریزپوشانی، مدل خطی در نظر گرفته شد.

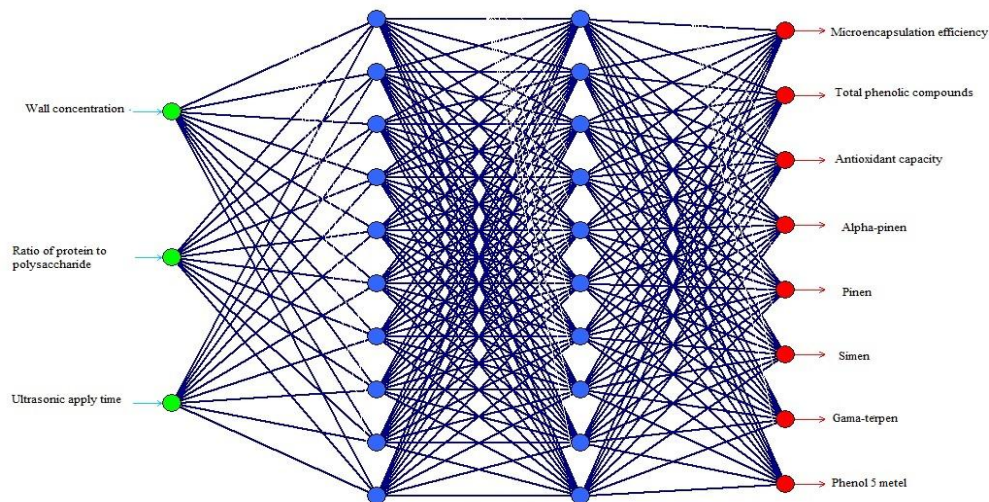


**Table 2** Coefficients of developed models using Response Surface Methodology

Response							Coefficient
Gama-terpen (%)	Simen (%)	Pinen (%)	Alpa-pinen (%)	Antioxidant capacity(%)	Total phenolic compounds (mgGAE/g)	Microencapsulati on efficiency(%)	
+26912/21	+2036/80	-1155/30	-146/36	+24/34	+52/52	+71/22	$\beta_0$
-834/50**	+676/19**	+249/21**	+30/27*	+2.15**	-0/0708**	-	$\beta_1$
-50/49**	+235/75**	+31/18 <sup>ns</sup>	+16/66*	+0/58**	-0/736**	+0/073**	$\beta_2$
-	+191/53**	-	-	-	-0/36**	+0/061**	$\beta_3$
-	-9/77**	-1/64**	-0/52**	-0/008**	+0/012**	-	$\beta_{12}$
-	-	-	-	-	+0/003**	-	$\beta_{13}$
+1/07**	-	-	-	-	-	-	$\beta_{23}$
-	-10/73**	-4/53**	-0/45**	-0/033**	+0/019**	-	$\beta_{11}$
-	-	-	-0/17**	-0/006**	+0/013**	-	$\beta_{22}$
-	-1/16**	-	-	+0/002**	-	-	$\beta_{33}$
0/12 <sup>ns</sup>	0/11 <sup>ns</sup>	0/13 <sup>ns</sup>	0/53 <sup>ns</sup>	0/27 <sup>ns</sup>	0/41 <sup>ns</sup>	0/17 <sup>ns</sup>	Lack of Fit
0/98	0/93	0/87	0/89	0/96	0/97	0/83	R- Squared
0/93	0/90	0/84	0/86	0/95	0/96	0/82	Adj R- Squared
5/61	2/01	5/86	5/75	2/03	1/54	1/00	C.V.%

مصنوعی پرسپترون چند لایه با تابع انتقال لگاریتم سیگموئید، یک لایه ورودی با ۳ نرون، دو لایه پنهان با ۱۰ نرون و یک لایه خروجی با ۸ نرون با ضریب همبستگی بیش از ۰/۹۰ به عنوان بهترین شبکه عصبی آموزش داده شده، در نظر گرفته شد.

شکل (۱) شبکه عصبی چند لایه طراحی شده در این مقاله را نشان می‌دهد که پارامترهای غلظت مواد دیواره، نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید و مدت زمان اعمال امواج فراصوت در لایه ورودی و فاکتورهای راندمان ریزپوشانی، فنولیک کل، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، ترکیبات فرار پینن، آلفا- پینن، سیمن و گاما- ترپینن در لایه خروجی قرار دارند. شبکه عصبی



**Figure1** A schema of developed neural networks for prediction of qualitative properties of microencapsulated thyme essential oil

#### ۴-۳-راندمان ریزپوشانی

نتایج بررسی راندمان ریزپوشانی نشان دهنده تأثیر مثبت و معنی‌دار ( $P < 0.001$ )، نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید و مدت زمان اعمال امواج فراصوت بر تغییرات راندمان ریزپوشانی بود (جدول ۲). به‌طوریکه افزایش نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید و مدت زمان اعمال امواج فراصوت باعث افزایش راندمان ریزپوشانی گردید. نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی نشان داد اثر متقابل برخی متغیرها در مقادیر بالا منجر به افزایش راندمان ریزپوشانی اسانس آویشن باغی شد (شکل ۳-الف).

#### ۴-۴-ترکیبات فنولیک کل و ظرفیت آنتی

##### اکسیدانی ریزکپسول‌ها

مطابق با ضرایب حاصل شده از مدل‌ها (جدول ۲)، اثرات برخی متغیرهای مستقل بر تغییرات فنولیک کل و ظرفیت آنتی اکسیدانی ریزکپسول‌ها معنی‌دار بود ( $P < 0.001$ ). به‌طوریکه افزایش غلظت مواد دیواره و نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید موجب بهبود حفظ ظرفیت آنتی اکسیدانی ریزکپسول‌ها شد، و در مقادیر بالاتر متغیرها نیز همین روند برای محتوی فنولیک کل اسانس ریزپوشانی شده، مشاهده گردید. با توجه به نتایج جدول (۲)، در مدت زمان بالاتر امواج فراصوت ظرفیت آنتی اکسیدانی ریزکپسول‌ها مثبت و افزایش‌دهنده ارزیابی شد.

اثرات متقابل برخی متغیرهای مورد بررسی در سطح احتمال ۰/۰۰۱ درصد معنی‌دار بود که نشان دهنده تأثیر همزمان متغیرها بر محتوی فنولیک کل و ظرفیت آنتی اکسیدانی ریزکپسول‌ها می‌باشد. نتایج حاصل از هر دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی نشان داد اثر متقابل برخی متغیرها در مقادیر بالا سبب بهبود حفظ ترکیبات فنولیک شد (شکل ۲-الف و ۳-ب)، که این امر بیانگر شباهت عملکرد روش سطح پاسخ و شبکه عصبی در برآورد تأثیر متغیرهای مورد بررسی بر محتوی فنولیک کل اسانس ریزپوشانی شده، بود. همانطور که

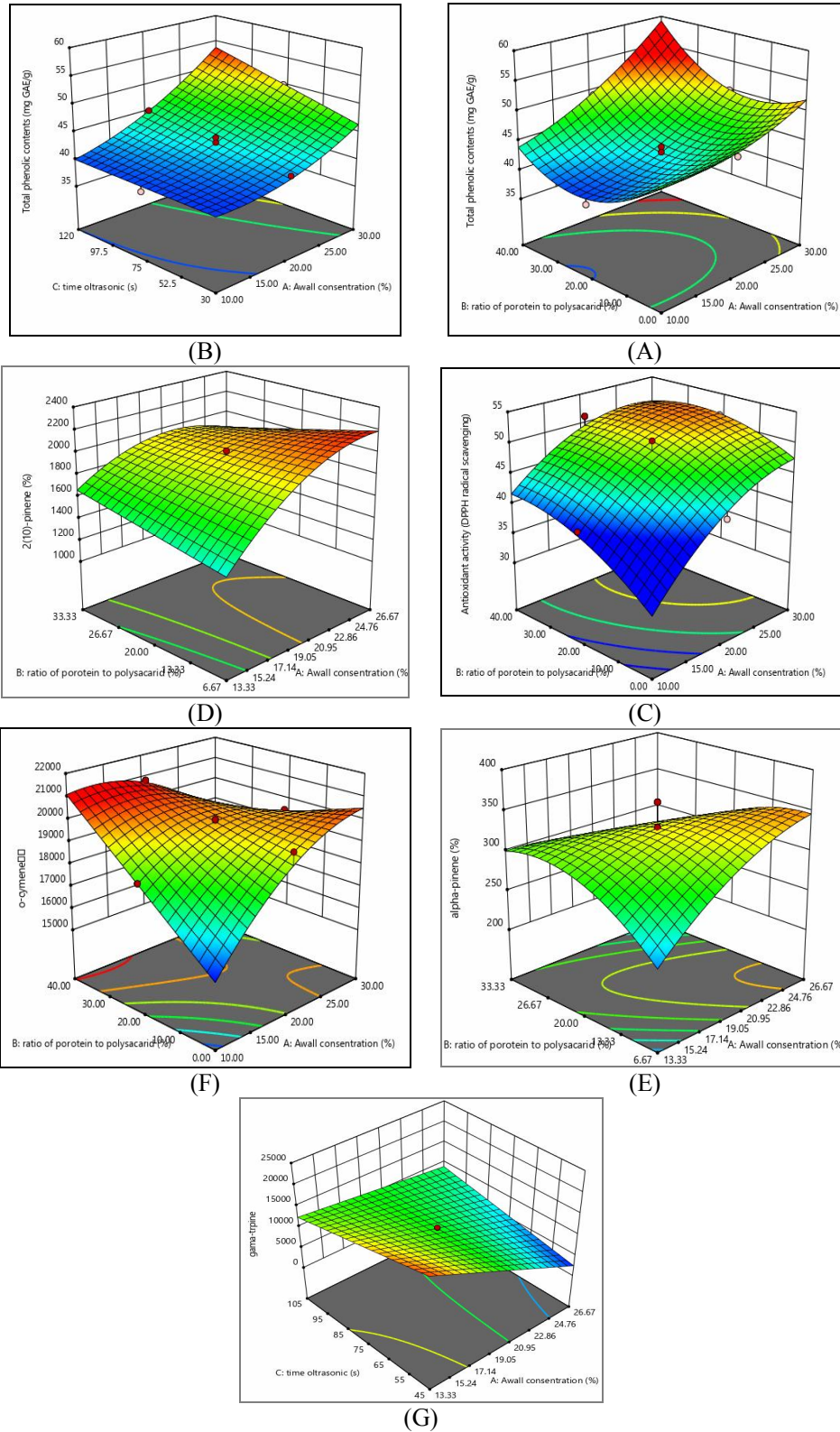
در شکل (۲-ب) مشاهده می‌شود اثر متقابل غلظت مواد دیواره و نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید تا سطوح متوسط بر حفظ بهتر ظرفیت آنتی اکسیدانی اسانس ریزپوشانی شده، مثبت و معنی‌دار بود. در حالیکه اثر متقابل متغیرهای ورودی به شبکه نشان داد اثر متقابل متغیرها در مقادیر بالا منجر به بهبود حفظ ظرفیت آنتی اکسیدانی ریزکپسول‌ها گردید (شکل ۳-ج).

#### ۴-۵-ترکیبات فرار ریزکپسول‌ها

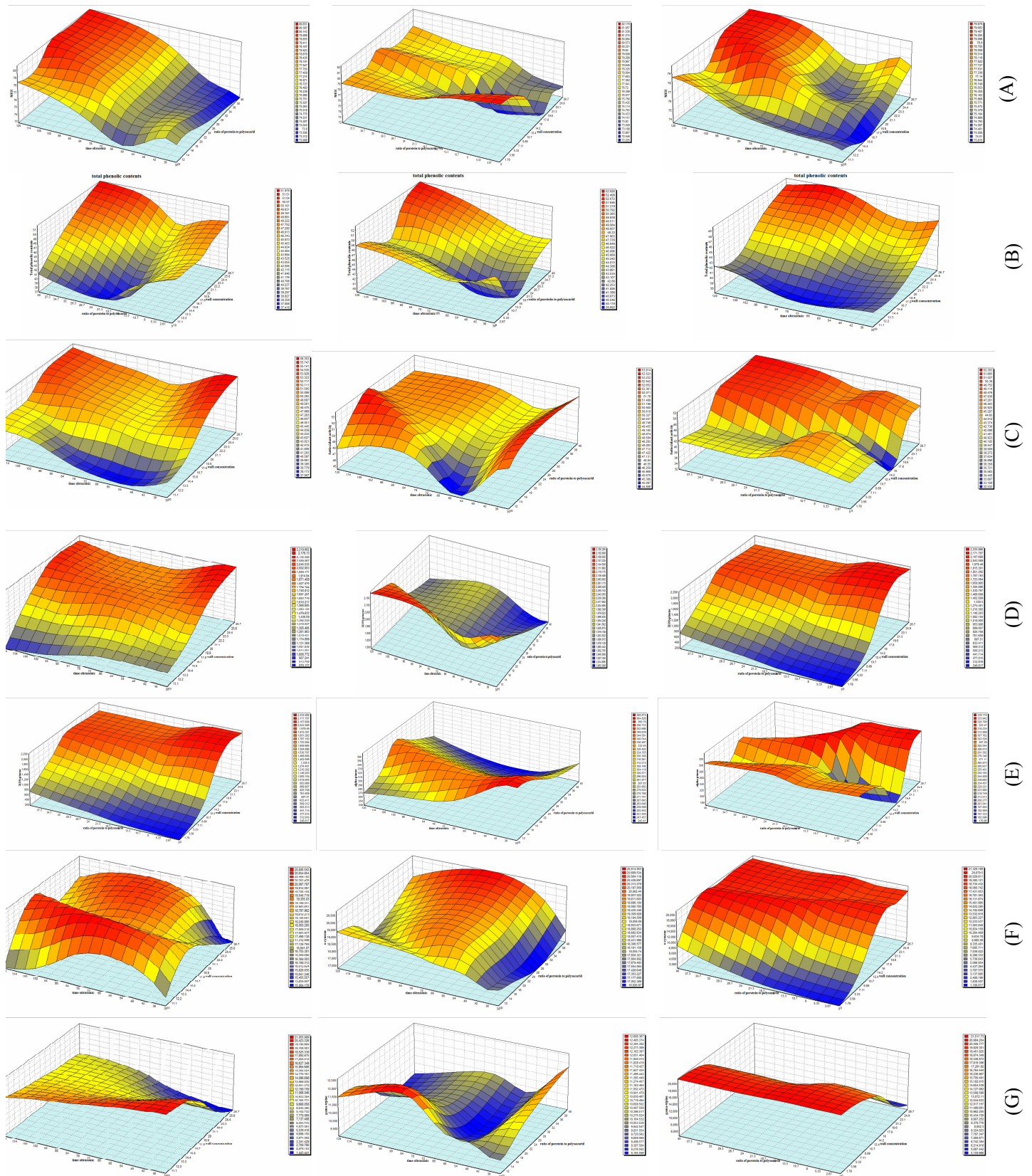
بر اساس نتایج به‌دست آمده می‌توان چنین بیان کرد که افزایش غلظت مواد دیواره باعث بهبود حفظ و ابقای ترکیبات مؤثره فرار پینن، آلفا-پینن و سیمین ریزکپسول‌ها شد (جدول ۲). تأثیر افزایش نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید بر حفظ و ابقای آلفا-پینن و سیمین، و اثر مدت زمان اعمال امواج فراصوت بر بهبود حفظ سیمین ریزکپسول‌ها نیز مثبت و افزایش‌دهنده ارزیابی گردید ( $P < 0.001$  و  $P < 0.05$ ).

اثرات متقابل متغیرهای مورد بررسی در سطح احتمال ۰/۰۰۱ درصد معنی‌دار بود که نشان دهنده تأثیر توأم متغیرهای مستقل بر تغییرات ترکیبات فرار ریزکپسول‌ها می‌باشد. نتایج حاصل از هر دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی نشان داد اثر متقابل غلظت مواد دیواره و نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید تا سطوح متوسط باعث حفظ بهتر ترکیبات فرار پینن، آلفا-پینن و سیمین اسانس ریزپوشانی شده، گردید (شکل ۲-ج، د، ه و شکل ۳-د، ه، و)، که این امر بیانگر شباهت عملکرد هر دو مدل در پیش‌بینی تأثیر متغیرها بر ترکیبات فرار موجود در اسانس ریزپوشانی شده، بود. نتایج حاصل از روش سطح پاسخ حاکی از آن بود که اثر متقابل غلظت مواد دیواره و مدت زمان اعمال امواج فراصوت در مقادیر بالا موجب بهبود حفظ گاما-تریپنین شد (شکل ۲-و). تأثیر مثبت و افزایش‌دهنده سطوح متوسط برخی متغیرهای ورودی به شبکه بر تغییرات گاما-تریپنین ریزکپسول‌ها نیز مشاهده گردید (شکل ۳-ی).





**Fig 2** Interaction of independent variables on changes of the qualitative of microencapsulated thyme essential oil according to response surface model properties



**Fig 3** Interaction effect of independent variables entering the neural network on changes of the qualitative properties of microencapsulated thyme essential oil according to the neural network model

## ۴-۶- بهینه‌سازی و اعتبارسنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی مدل‌های حاصل، نمونه‌های بهینه مطابق با مقادیر جدول (۳) تولید گردید. نتایج ویژگی‌های کیفی

نمونه‌های تولید شده و پیش‌بینی شده توسط مدل و درصد خطای برآورد هر ویژگی در جدول (۴) نشان داده شده است که بیانگر صحت عملکرد مدل‌های حاصل است.

Table 3 The values of the variables of optimum samples

Ultrasonic apply time (S)	Ratio of protein to polysaccharide (%)	Wall concentration (%)	Treatment
97	31	20	1
75	40	13	2

Table 4 Prediction accuracy of optimum samples quality using neural network and response surface models

percentage error		Experimental value		The predicted value		Test
Artificial neural network	Response surface	Artificial neural network	Response surface	Artificial neural network	Response surface	
Treatment2	Treatment1	Treatment2	Treatment1	Treatment2	Treatment1	
3/22	2/56	76/98	81/5	79/46	79/416	Microencapsulation efficiency (%)
4/26	5/001	52/36	44/05	50/129	46/235	Total phenolic (mg/g GAE)
3/15	5/2	52/95	48/25	51/28	50/785	Antioxidant capacity (%)
0/99	2/88	1895/32	1921/65	1914/255	1977/078	Pinen (%)
4/28	0/8	273/25	298/85	284/897	296/337	Alpha-pinen (%)
5/7	4/54	18384/32	21165/85	19432/37	20203/96	Simen (%)
2/27	8/6	10000/23	14250/65	9772/83	10313/69	Gama-terpen (%)

## ۴-۷- مقایسه راندمان ریزپوشانی و خصوصیات

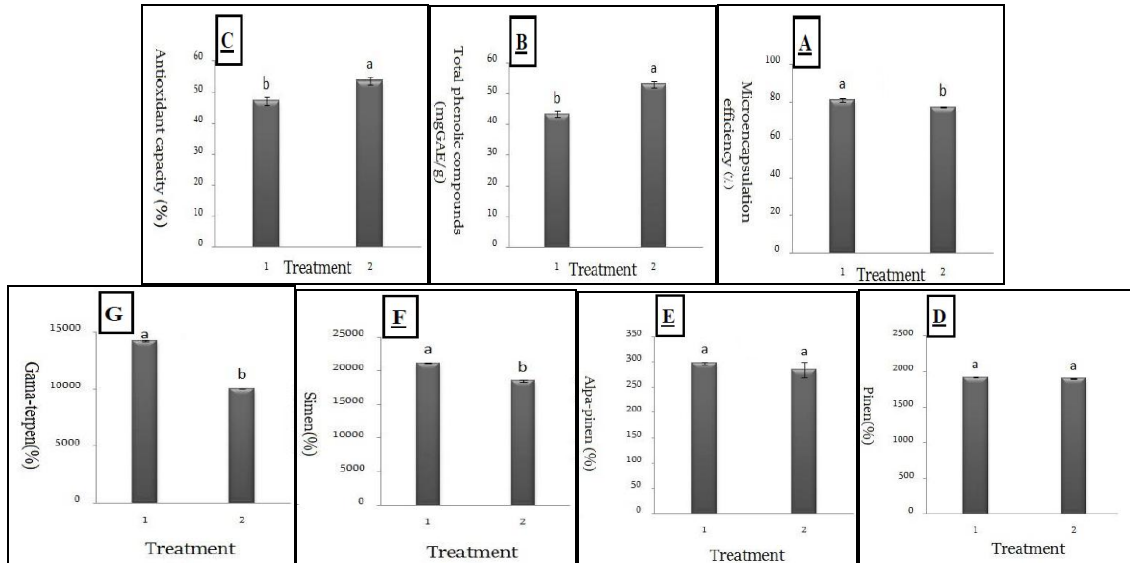
## کیفی نمونه‌های بهینه

بررسی نتایج به دست آمده نشان داد که راندمان ریزپوشانی و میزان سیمن و گاما- ترپین تیمار ۱ به طور معنی‌داری ( $P < 0.05$ )، بالاتر از تیمار ۲ بود (شکل ۴ الف، و، ی). به عبارت دیگر، استفاده از غلظت بالاتر مواد دیواره و امواج فراصوت در زمان‌های طولانی نه تنها باعث افزایش راندمان ریزپوشانی شد بلکه موجب بهبود حفظ سیمن و گاما- ترپین اسانس ریزپوشانی شده، گردید. نتایج شکل (۴- د، ه)، بیانگر عدم معنی‌داری اثر تیمار بر پینن و آلفا- پینن بود ( $P > 0.05$ ). همانطور که از شکل (۴- ب، ج) مشخص است ریزکپسول تولید شده با نسبت بالاتر پروتئین به پلی‌ساکارید و امواج فراصوت در زمان کوتاه (تیمار ۲)، از محتوی فنولیک کل و

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی قابل توجهی نسبت به تیمار ۱ برخوردار بود ( $P < 0.05$ )، که این مسأله احتمالاً به افزایش ویسکوزیته و پایداری امولسیون و قابلیت تشکیل فیلم توسط پروتئین‌ها مرتبط می‌باشد [۲۲].

راندمان ریزپوشانی یکی از فاکتورهای مهم در تعیین پایداری ترکیبات کپسوله شده می‌باشد، و بیانگر وجود روغن سطحی بر سطح ذرات پودر و توانایی دیواره‌ها در جلوگیری از خروج روغن درونی است. دو عامل اصلی در تعیین راندمان ریزپوشانی، اندازه قطرات امولسیون و غلظت مواد دیواره هستند که هرچه اندازه ذرات امولسیون کوچک‌تر باشد، در هنگام خشک شدن بدون آنکه شکسته شوند، خشک شده و میزان انتقال به سطح کاهش می‌یابد و در نتیجه منجر به افزایش راندمان ریزپوشانی می‌گردد [۲۳].





**Fig 4** Comparison of qualitative properties of optimal samples  
Columns with different letters have different statistical means ( $P < 0.05$ )

امولسیون باعث توزیع یکنواخت اندازه ذرات امولسیون، افزایش پایداری امولسیون و در نتیجه افزایش راندمان ریزپوشانی اسانس د- لیمونن می‌شود [۲۵]. یازسقلو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، با بررسی میکرو کپسوله کردن روغن جوانه گندم با استفاده از مالتودکسترین و کنسانتره پروتئین آب پنیر با نسبت‌های ۱:۳، ۲:۲ و ۳:۱ و اعمال امواج فراصوت با شدت ۲۰ کیلوهرتز به مدت ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه گزارش نمودند که افزایش نسبت پروتئین در دیواره و مدت زمان استفاده از امواج فراصوت منجر به افزایش راندمان ریزپوشانی و کاهش اندازه ذرات نانوامولسیون گردید. میکرو کپسول‌های آماده شده با نسبت ۱:۳ مالتودکسترین و پروتئین، بالاترین راندمان ریزپوشانی را داشتند [۲۷]. در تحقیقی دیگر نتایج نشان داد افزایش غلظت ایزوله پروتئین آب پنیر نسبت به اینولین در فرایند ریزپوشانی اسانس رزماری موجب افزایش کارایی و راندمان ریزپوشانی گردید [۶].

نوع و غلظت مواد دیواره کپسول از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار بر میزان احتباس ترکیبات زیست فعال دارای خاصیت آنتی اکسیدانی هستند. از طرفی، عوامل مختلفی مانند خواص امولسیفایری، کشش سطحی، پیوندهای بین مولکولی، حلالیت ترکیبات در دیسپرسیون، ساختار و ظرفیت آنها جهت

افزایش راندمان ریزپوشانی در اثر افزایش نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید را می‌توان به این امر نسبت داد که بیوپلیمرهایی مانند کازئینات سدیم به دلیل داشتن رفتار پلاستیکی، خواص امولسیفایری مناسب و توانایی تشکیل فیلم در اطراف قطرات روغن، مانع از تجمع ذرات یا قطرات روغن شده و پایداری امولسیون و کارایی و راندمان ریزپوشانی را افزایش می‌دهند [۲۴]. از سوی دیگر، ویسکوزیته امولسیون نیز یکی از عوامل مؤثر بر راندمان ریزپوشانی می‌باشد، و بدین ترتیب، افزایش ویسکوزیته ناشی از حضور پروتئین در امولسیون باعث کاهش حرکت مواد فرار به سطح کپسول‌های در حال خشک شدن و کاهش از دست رفتن آنها و در نتیجه افزایش راندمان ریزپوشانی می‌شود [۲۵]. نکته جالب توجه دیگر این است که راندمان ریزپوشانی با کوچک‌تر شدن اندازه ذرات امولسیون، افزایش می‌یابد زیرا در امولسیون‌های دارای اندازه ذرات بزرگ‌تر، به دلیل طولانی‌تر بودن زمان تشکیل پوسته میزان رهاسازی و از دست رفتن ترکیبات فرار طی خشک کردن بیشتر است و بدین ترتیب، راندمان ریزپوشانی آنها کمتر می‌باشد [۲۶]. لذا در تحقیق حاضر، شاهد افزایش راندمان ریزپوشانی اسانس آویشن باغی با افزایش زمان همگن‌سازی امولسیون با امواج فراصوت بودیم.

در همین راستا، قهرمانی‌فر و همکاران (۱۳۸۹)، اذعان داشتند که افزایش غلظت پروتئین آب پنیر و زمان همگن‌سازی

1. Yazicioglu

تشکیل فیلم و خصوصا ویسکوزیته نیز تأثیر شگرفی بر اثر بخشی مواد به کار رفته به عنوان دیواره کپسول بر حفظ ترکیبات زیست فعال در فرایند ریزپوشانی دارند [۲۸]. مطالعات قبلی نشان داده است که با افزایش غلظت مواد دیواره کپسول، مقدار اسانس بیشتری در ریز کپسول‌ها باقی می‌ماند که این امر بدلیل افزایش سرعت تشکیل پوسته و ضخامت مواد دیواره در اطراف ماده هسته می‌باشد که باعث کاهش میزان اتلاف ترکیبات هسته می‌گردد. تأثیر افزایش غلظت مواد دیواره بر حفظ و ابقای ترکیبات فنولیک و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی اسانس ریزپوشانی شده را می‌توان به تئوری انتشار انتخابی نسبت داد. مطابق این تئوری با کاهش محتوی آب در سطح قطره، ضریب انتشار ترکیبات فرار چندین برابر بیشتر از آب کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در حین فرایند خشک کردن، آب با سرعت معینی به‌طور مداوم از میان پوسته تشکیل شده خارج می‌شود، در حالیکه ترکیبات فرار و پلی فنول‌ها در فاز روغنی با سرعتی بسیار کم به خارج از کپسول انتشار می‌یابند زیرا در توده‌ای از مواد جامد (مواد دیواره) گرفتار شده‌اند. این پوشش جامد به عنوان یک غشاء نیمه تراوا اجازه خروج به مولکول‌های آب را می‌دهد در حالیکه باعث کاهش و یا حتی توقف خروج ترکیبات فنولیک و مواد مؤثره فرار از درون ریز کپسول‌ها می‌شود [۲۹]. در مطالعه‌ی انجام شده توسط تانون<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۹)، در رابطه با بررسی ویژگی‌های کیفی پودر توت سیاه تولید شده با استفاده از مالتودکسترین (با اکی‌والان دکستروز ۱۰ و ۲۰)، صمغ عربی و نشاسته تاپوکا به روش خشک کردن پاششی، نتایج نشان داد پودرهای تولید شده با مالتودکسترین و صمغ عربی محتوی فنولیک و فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری پس از گذشت ۱۵ روز نگهداری داشتند. همچنین، پودرهای تولید شده با مالتودکسترین با اکی‌والان دکستروز ۲۰ و صمغ عربی کمترین اندازه ذره و بیشترین خاصیت هیگروسکوپیک را نشان دادند [۳۰].

بر اساس نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، به نظر می‌رسد که اثر مثبت افزایش نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید به‌ویژه در مقادیر بالاتر بر حفظ محتوی فنولیک کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی ریزکپسول‌ها ناشی از اثر حفاظتی بهتر کازئینات سدیم و ابعاد مولکولی آن بر ممانعت از خروج ترکیبات از

پوسته اطراف ریز کپسول‌ها و جابه‌جایی آنها به سطح باشد [۳]. برخی از محققان نیز بر این باورند که حفظ بهتر پلی فنول‌ها در اثر کپسوله کردن با پروتئین‌ها می‌تواند به این دلیل باشد که پروتئین‌ها توانایی و قابلیت بسیار خوبی برای واکنش با سایر عوامل پوشش دهنده از جمله پلی‌ساکاریدها [مالتودکسترین] دارند و با تشکیل ذرات کلئیدی، ترکیبات پلی فنولی را محصور کرده و از آنها در برابر اکسید شدن محافظت می‌کنند [۳۱]. از سوی دیگر، نقش مؤثر و مثبت استفاده از امواج فراصوت در کاهش ابعاد ذرات امولسیون و امکان پوشش دهی بهتر ترکیبات زیست فعال موجود در عصاره‌ها و اسانس‌های گیاهی غیرقابل انکار است [۲۵]. این رو اعمال زمان‌های طولانی‌تر امواج فراصوت موجب بهبود حفظ ترکیبات فنولیک، ترکیبات فرار و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی اسانس ریزپوشانی شده، گردید.

تأثیر مثبت غلظت مواد دیواره بر حفظ و ابقای ترکیبات فرار را به می‌توان اینگونه توضیح داد که با افزایش سهم ماده دیواره، سرعت تشکیل و ضخامت غشاء نیمه تراوا در اطراف ترکیبات به‌ویژه ترکیبات فرار موجود در اسانس‌ها نیز افزایش یافته و در نتیجه مقدار از دست رفتن این ترکیبات مطابق با تئوری انتشار انتخابی کاهش می‌یابد [۳۲]. نتایج تحقیقات سوتیان<sup>۲</sup> و همکاران، (۲۰۰۵)، نشان داد که با افزایش غلظت مواد دیواره، مقدار منتول باقی مانده در ریز کپسول‌ها افزایش یافت [۲۳]. نتایج مطالعه‌ای مشخص کرد که مقدار اتیل بوتیرات باقی مانده در ریزکپسول‌ها به غلظت مالتودکسترین به‌کار رفته در دیواره ریزکپسول بستگی داشته، به‌طوری‌که با افزایش غلظت مالتودکسترین میزان ابقای اتیل بوتیرات نیز افزایش یافت [۳۲]. وادیا<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۶)، نیز در مطالعه خود به بررسی اثر مواد دیواره (صمغ عربی، مالتودکسترین و نشاسته اصلاح شده) بر میزان احتباس ترکیبات فرار اولئورزین دارچین میکروکپسوله شده پرداختند، و دریافتند که میزان احتباس سینامالدئید کل و ترکیبات فرار در اولئورزین دارچین ریزپوشانی شده با استفاده از مخلوط صمغ عربی و مالتودکسترین با نسبت ۵۰:۵۰ در مقایسه با سایر نسبت‌های دیواره (۰:۱۰۰، ۲۵:۷۵، ۷۵:۲۵ و ۱۰۰:۰) چشمگیرتر بوده است [۳۳]. باید تذکر داشت که احتمالا حفظ بهتر ترکیبات فرار ریزکپسول‌ها در اثر افزایش نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید ناشی از برهم‌کنش‌های

2. Soottitantawat  
3. Vaidya

1. Tonon

نرون و لایه خروجی با ۸ نرون) با ضریب همبستگی بیشتر از ۰/۹۰ به عنوان شبکه عصبی بهینه انتخاب شد. اثر متقابل متغیرهای مستقل مطابق مدل‌های حاصل از شبکه عصبی و سطح پاسخ در مقادیر بالاتر سبب حفظ بهتر محتوی فنولیک کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و افزایش راندمان ریزپوشانی ریزکپسول‌ها شد. همچنین، اثر متقابل برخی متغیرها تا سطوح متوسط متغیرها باعث بهبود حفظ ترکیبات فرار ریزکپسول‌ها گردید. مقایسه ویژگی‌های تیمارهای بهینه دلالت بر این داشت که ریزکپسول‌های تولید شده با فرمولاسیون حاوی ۲۰٪ مواد دیواره، ۳۱٪ نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید و ۹۷٪ زمان اعمال امواج فراصوت از نظر راندمان ریزپوشانی و حفظ و ابقای ترکیبات فرار ارجح بود.

## ۵- منابع

- [1] Serra, S., Fuganti, C., Brenna, E. 2005. Biocatalytic Preparation of Natural Flavours and Fragrances. Trends Biotechnol; 23: 193–198.
- [2] Lokuwan, J. 2007. Characteristics of Microencapsulated  $\beta$ -carotene Formed by Spray Drying with Modified Tapioca Starch, Native Tapioca Starch and Maltodextrin. Food Hydrocolloids; 21(5): 928-935.
- [3] Najaf, M., Kadkhodae, R., Mortazavi, SA. 2010. Effect of Drying Process and Wall Material on the Properties of Encapsulated Cardamom Oil. Food Biophysics; 6(4): 254-262 [in persian].
- [4] Adamiec, J., Kalemb, D. 2006. Analysis of Microencapsulation Ability of Essential Oils during Spray Drying. Dry Technol; 24: 127–1132.
- [5] Touré, A., Bo Lu, H., Zhang, X., Xueming, X. 2011. Microencapsulation of Ginger Oil in 18-DE Maltodextrin/Whey Protein Isolate. Herbs Spices Med Plants; 17(2): 183-195.
- [6] Fernandes, RV., Borges, SV., Botrel, DA. 2014. Gum Arabic/Starch/Maltodextrin/Inulin as Wall Materials on the Microencapsulation of Rosemary Essential Oil. Carbohydrate Polymers; 101: 524–532.
- [7] Buffo, RA., Reiceccius, GA. 2001. Comparison Among Assorted Drying [processes for the Encapsulation of Flavors. Perfum Flavor; 26: 58-67.

هیدروفوبی و واندروالسی که در غلظت‌های بالای پروتئین ایجاد می‌شود، باشد که این امر به نوبه خود باعث افزایش پایداری امولسیون و کارایی ریزپوشانی می‌گردد [۳۴]. از طرف دیگر، پروتئین‌ها به واسطه‌ی افزایش ویسکوزیته و متعاقباً پایداری امولسیون و همچنین، به دلیل داشتن خاصیت جذب سطحی، اتصال دهندگی، به دام انداختن و یا پوشش‌دهی ترکیبات زیست‌فعال، موجب بهبود حفظ ترکیبات فرار شده و به عنوان مانعی در برابر نفوذ عوامل اکسیدکننده عمل نموده و از تخریب آنها جلوگیری می‌کنند [۲۷]. نتایج تحقیقی حاکی از افزایش میزان ترکیبات مؤثره فرار اسانس روغنی نعنای فلفلی در روغن سطحی ریزکپسول‌ها در اثر استفاده از غلظت‌های بالای مالتودکسترین در دیواره ریزکپسول بود [۴].

با توجه به نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که مقادیر متغیرهای مستقل در نمونه‌های بهینه معرفی شده توسط روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی، بسیار نزدیک به هم بوده است که این امر معیاری از مشابهت مدل‌های حاصل می‌باشد.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر غلظت مواد دیواره، نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید و مدت زمان امواج فراصوت بر برخی از ویژگی‌های (راندمان ریزپوشانی، محتوی فنولیک کل، ترکیبات فرار و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی) ریزکپسول‌های تولید شده بررسی شد. نتایج نشان داد که در هر دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی، غلظت مواد دیواره، نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید و مدت زمان امواج فراصوت بر ویژگی‌های کیفی ریزکپسول‌ها مؤثر بود. نتایج حاصل از روش سطح پاسخ نشان داد که افزایش غلظت مواد دیواره و نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید باعث بهبود حفظ ترکیبات فرار و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی ریزکپسول‌ها شد، و در مقادیر بالاتر متغیرها نیز همین روند برای محتوی فنولیک کل اسانس ریزپوشانی شده، مشاهده گردید. افزایش نسبت پروتئین به پلی‌ساکارید و زمان فراصوت نیز باعث افزایش راندمان ریزپوشانی گردید، اما غلظت مواد دیواره اثر معنی‌داری بر راندمان ریزپوشانی نداشت. بهترین عملکرد مدل‌سازی برای ریزپوشانی اسانس، تابع فعال‌سازی لگاریتم سیگموئیدی با تابع یادگیری پیش‌رونده و توپولوژی شامل (لایه ورودی با ۳ نرون، دو لایه پنهان با ۱۰

- Ultrasound with a Response Surface Methodology. *Ultrason Sonochem*; 19(6): 1144–1149.
- [19] Duman, E., Ozcan, MM. 2017. The Chemical Composition of *Achillea wilhelmsii*, *Leucanthemum vulgare* and *Thymus citriodorus* Essential Oils. *J Essent Oil Bear Pl* ; 20(5): 1310-1319.
- [20] Porte, A., Godoy ,RLO. 2008. Chemical Composition of *Thymus vulgaris* L. (Thyme) Essential Oil from the Rio de Janeiro State (Brazil). *J Serb Chem Soc*; 73(3): 307–310.
- [21] Jianu, C., Misca, C., Lukinich-Gruia, AT., Horhat, FG. 2014. *Thymus vulgaris* Essential Oil: Chemical Composition and Antimicrobial Activity. *J Med Life*; 7(3): 56-60.
- [22] Dickinson, E. 2003. Hydrocolloids at Interfaces & the Influence on the Properties of Dispersed Systems. *Food Hydrocoll*; 17(1): 25-39.
- [23] Soottitantawat, A., Yoshii, H., Furuta, T., Ohkawara, M., Linko, P. 2003. Microencapsulation by Spray Drying: Influence of Emulsion Size on the Retention of Volatile Compounds. *J Food Sci*; 68(7): 2256-62.
- [24] Cano-Higuita, DM., Villa Vélez, HA., Nicoletti Telis, VA. 2015. Microencapsulation of Turmeric Oleoresin in Binary and Ternary Blends of Gum Arabic, Maltodextrin and Modified Starch. *Ciênc Agrotec Lavras*; 39: 173-182.
- [25] Ghahramanifar, A., Mohammadsani ,A., Najaf najafi, M., Ghahramanifar ,M. 2010. The Effect of Emulsions Properties on the Characteristics of Microencapsulated Powders .*Innov Food Sci Technol*; 2(5): 46-54 [in persian].
- [26] Sheu, TY., Rosenberg ,MJ. 1993. Microencapsulation of Volatiles by Whey Proteins. *J Dairy Sci*; 76: 2868-2877.
- [27] Yazicioglu, B., Sahin, S., Sumnu, G. 2015. Microencapsulation of Wheat Germ Oil. *J Food Sci Technol*; 52(6): 3590–3597.
- [28] Madene, A., Jacquot ,M., Scher, J., Desobry, S. 2006. Flavour encapsulation and controlled release-a review. *Food science and Technology*; 41: 1-21.
- [29] Zuidam, NJ., Shimoni, E. 2010. Overview of Microencapsulates for Use in Food Products or Processes and Methods to Make them. in: *Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing*, Zuidam NJ, Nedovic A, editors.
- [8] Kaushik ,V., Roos ,YH. 2007. Limonene Encapsulation in Freeze drying of Gum Arabic, Sucrose and Gelatin Systems. *Lwt-Food Sci Technol*; 40: 1381-1391.
- [9] Yadegari, M. 2014. Foliar Application of Micronutrients Improves Growth, Yield, and Essential Oil Yield of Thyme (*Thymusvulgaris* L.). *Res Crop*; 15(1) (Publishing).
- [10] Omidbaigi, R., Rezaei Nejad, A. 2000. The Influence of Nitrogen Fertilizer and Harvest Time on the Productivity of *Thymus vulgaris*. *Int J Horti Sci*; 6: 43-46.
- [11] Naghdi Badi ,H., Yazdani, D., Sajedi ,M., Nazari, F. 2004. Effects of Spacing and Harvesting Time on Herbage Yield and Quality of Oil in Thyme, *Thymus vulgaris* L. *Ind Crops Prod*; 19(3): 231-238.
- [12] Asllani ,U., Toska, V. 2003. Chemical Composition of Albanian Thyme Oil (*Thymus vulgaris* L.). *J Essent Oil Res*; 15: 165-167.
- [13] Segvic Klaric, M., Kosalec, I., Mastelic, J., Pieckova, E., Pepeljnak ,S. 2007. Antifungal Activity of Thyme (*Thymus Vulgaris* L.) Essential Oil and Thymol Against Moulds from Damp Dwellings. *J Appl Microbiol*; 44: 36–42.
- [14] Abbasi, H., Mohammadifar, MA. 2015. Prediction of Fundamental Rheological Properties of Dough with Artificial Neural Networks-Genetic Algorithm. *Iran J Nutr Sci Food Technol*; 10(3): 68-77 [in persian].
- [15] Manivannan, P., Rajasimman, M. 2008. Osmotic Dehydration of Beetroot in Salt Solution: Optimization of Parameters through Ststistical Experimental Design. *Int j chem Biol Eng*; 1: 11-18.
- [16] Klinkesorn,U., Sophanodora,P., Chinachoti, P., Decker, EA., McClements, DJ. 2006. Characterization of Spray-Dried Tuna Oil Emulsified in Two-Layered Interfacial Membranes Prepared using Electrostatic Layer-by-Layer Deposition. *Food Res Int*; 39(4): 449-457.
- [17] Pinelo ,M., Rubilar, M., Jerez, M., Sineiro, J., Núñez, MJ. 2005. Effect of Solvent, Temperature, and Solvent-to-Solid Ratio on the Total Phenolic Content and Antiradical Activity of Extracts from Different Components of Grape Pomace. *J Agric Food Chem*; 53(6): 2111–2117.
- [18] Morelli, LLL., Prado, MA. 2012. Extraction optimization for antioxidant phenolic compounds in Red Grape Jam using



- Zukauskaitė, J., Venskutonis, RP. 2007. Flower Retention of Peppermint (*Mentha piperita* L.) Essential Oil Spray-Dried in Modified Starches during Encapsulation and Storage. *Food Chem*; 55: 3027-3036.
- [33] Vaidya, S., Bhosale, R., Singhal, RS. 2006. Microencapsulation of Cinnamon oleoresin by spray drying using different wall materials. *Dry Technol*; 24: 983-992.
- [34] Drusch, S., Berg, S. 2008. Extractable Oil in Microcapsules Prepared by Spray Drying: Localisation, Determination & Impact on Oxidation Stability. *Food Chem*; 109(1): 17-24.
- Springer: USA, p. 3-29.
- [30] Tonon, RV., Brabet, C., Pallet, D., Brat, P., Hubinger, MD. 2009. Physicochemical and Morphological Characterisation of Acai (*Euterpe oleracea* Mart.) Powder Produced with Different Carrier Agents. *Int J Food Sci Technol*; 44: 1950-1958.
- [31] Papoutsis, K., Golding, JB., Vuong, Q., Pristijono, P., Stathopoulos, CE., Scarlett, CJ., Bowyer, M. 2018. Encapsulation of Citrus By-Product Extracts by Spray-Drying and Freeze-Drying Using Combinations of Maltodextrin with Soybean Protein and Carrageenan. *Foods*; 7(115): 1-12.
- [32] Baranauskienė, R., Bylatyte, E.,



## 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)

Shahkol, F. <sup>1</sup>, Abbasi, H. <sup>1\*</sup>, Norouzi Mobarakeh, M. <sup>2</sup>

1. Department of Food Science and Technology, College Agriculture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
2. Department of environment, College Agriculture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

## ARTICLE INFO

## ABSTRACT

**Article History:**

Received 2020/ 10/ 30  
Accepted 2022/ 04/ 18

**Keywords:**

*Thymus vulgaris* essential oil,  
Freeze drying,  
Microencapsulation efficiency,  
Antioxidant capacity,  
Gas Chromatography.

**DOI:** 10.22034/FSCT.19.125.225  
**DOR:** 20.1001.1.20088787.1401.19.125.1.0

\*Corresponding Author E-Mail:  
H.Abbasi@khuisf.ac.ir

Microencapsulation process is down in protecting volatile and sensitive compounds to chemical reactions. Process modeling can be effective in assessing and predicting the impact of conditions affecting the qualitative properties of the product. In order to investigate the effect of wall material concentration, protein/polysaccharide ratio and ultrasound waves time on the microencapsulation efficiency, total phenolics, antioxidant capacity and volatile compounds, nano-emulsion of *Thymus vulgaris* essential oil in aqueous phase containing protein (sodium caseinate) and polysaccharide (maltodextrin and modified starch) was prepared by ultrasound waves. Modeling of dependent variables was done by response surface methodology and artificial neural network. The results showed that increasing the wall concentration and protein/polysaccharide ratio improved the retention of volatile compounds and antioxidant capacity of the encapsulated essential oil, and at higher values of variables the same trend was observed for the phenolic content. Increasing the protein/polysaccharide ratio and ultrasound waves resulted in increased the microencapsulation efficiency. Models obtained from the interaction effects of neural network and Response Surface Method at higher values resulted in better preservation of total phenolic, antioxidant activity and increased of Microencapsulation efficiency of microcapsules. Microencapsulation produced containing of 20% wall material, 31% protein/polysaccharide ratio and 97s ultrasound time were the best treatment in terms of the microencapsulation efficiency and volatile compounds. Experimental results of the experiments indicative appropriate and uniform function of both response surface and neural network methods and the superiority of the artificial neural network in predicting the desired variables.