

# سنتز سبز نانوذرات نقره با استفاده از عصاره برگ درخت انجیر و حرارت‌دهی با گرمکن همزن‌دار: مقایسه مدلسازی روش‌های شبکه عصبی و طراحی فاکتوریل

امید احمدی<sup>۱</sup>، رضا بیگزاده<sup>۲\*</sup>

۱- استادیار مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

۲- دانشیار مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

R.beigzadeh@uok.ac.ir

## چکیده:

در تحقیق حاضر به مقایسه روش‌های شبکه عصبی و فاکتوریل در سنتز سبز نانوذرات نقره با بهره‌گیری از عصاره برگ درخت انجیر پرداخته شد. متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده شامل دما، زمان، سرعت همزن و pH بودند که هر کدام در ۳ سطح مختلف بررسی گردیده و توسط روش فاکتوریل به طراحی آزمایش پرداخته شد. پاسخ‌های در نظر گرفته شده شامل میانگین اندازه ذرات، پتانسیل زتا و شاخص پراکندگی بودند. نتایج نشان داد که کمترین میانگین اندازه نانوذرات نقره (۲۵ نانومتر) با کمترین شاخص پراکندگی (۰/۱۸۹) و بالاترین پتانسیل زتا یا بیشترین پایداری (۲۰/۱ میلی ولت) در دمای ۴۰ سانتی‌گراد و مدت زمان سنتز ۳۰ دقیقه، با سرعت همزدن ۴۰۰ دور در دقیقه و در pH خنثی (۷) حاصل خواهد شد. همچنین از شبکه عصبی برای پیش‌بینی سه متغیر وابسته در نظر گرفته شده به‌عنوان تابعی از متغیرهای مستقل استفاده گردید. نتایج مدلسازی شبکه عصبی دقت بالایی را به منظور پیش‌بینی متغیر هدف نشان داد. به طوریکه مقادیر متوسط خطای نسبی (MRE) برای سه متغیر وابسته میانگین اندازه ذرات، شاخص پراکندگی و پتانسیل زتا به ترتیب برابر با ۱/۹۹، ۰/۵۱ و ۲/۷۴ درصد بود که در مقایسه با روش فاکتوریل که مقادیر آن برابر با ۲/۴۳، ۰/۴۷ و ۸/۰۵ درصد بودند، باعث بهبود چشمگیر پیش‌بینی پتانسیل زتا و بهبود نسبی میانگین اندازه ذرات گردید. از میان سه خروجی در نظر گرفته شده، دقت شبکه‌ها برای تخمین میانگین اندازه ذرات و بخصوص پتانسیل زتا از مدل فاکتوریل بهتر بوده است. این نتایج مدلسازی شبکه عصبی اهمیت بالایی در بهینه‌سازی فرآیندهای سنتز نانوذرات و تسهیل طراحی تجربیات مکرر فراهم می‌آورد، که می‌تواند به توسعه روش‌های پایدارتر و کارآمدتر در نانو فناوری منجر شود.

واژه‌های کلیدی: سنتز سبز، شبکه عصبی، عصاره برگ انجیر، نانوذرات نقره.

\* سندیج، دانشگاه کردستان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، نانوذرات نقره به سبب ویژگی‌های منحصر به فرد خود، نظیر خواص ضد میکروبی، قابلیت‌های الکترونیکی و ویژگی‌های کاتالیستی، توجه چشمگیری را به خود جلب کرده‌اند [۱]. نانوذرات در حوزه‌های متنوع علمی و صنعتی از جمله پزشکی، الکترونیک و محیط‌زیست، صنعت غذا و دارو کاربردهای بسیاری پیدا کرده‌اند [۲]. به‌ویژه نانوذرات نقره به‌عنوان یک ماده کارآمد در مبارزه با عفونت‌ها و به‌عنوان یک عامل کلیدی در تولید حسگرها شناخته می‌شوند. نانوذرات نقره نه تنها به واسطه کاربردهای وسیع و متنوع خود در صنایع مختلف بلکه به خاطر ویژگی‌های منحصر به فردی که دارا می‌باشند، حائز اهمیت بالایی هستند [۳].

روش‌های متنوعی جهت سنتز نانوذرات نقره وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به چند دسته عمده تقسیم کرد: یکی از این دسته‌ها شامل روش‌های شیمیایی و فیزیکی بوده و گروه دوم شامل روش‌های بیولوژیکی می‌شود. سنتز شیمیایی معمولاً شامل استفاده از مواد شیمیایی مضر است که ممکن است تأثیرات منفی بر محیط زیست داشته باشند. سنتز به روش فیزیکی نیز به دلیل استفاده از تجهیزات و ابزارآلات پیشرفته، معمولاً مقرون به صرفه نمی‌باشد. از سوی دیگر، اهمیت روش سنتز سبز به‌وضوح در حرکت به سوی پایدارسازی محیط زیست و کاهش آلودگی‌ها مشهود است [۴، ۵]. در این روش از منابع طبیعی مانند عصاره‌های گیاهی برای سنتز نانوذرات استفاده می‌شود که علاوه بر عدم استفاده از مواد شیمیایی مضر، می‌تواند تولید نانوذرات را با ویژگی‌های بهتری به همراه داشته باشد [۶].

به‌کارگیری عصاره‌های گیاهی به‌عنوان یک روش پایدار و سازگار با محیط‌زیست، به‌ویژه در دوران تغییرات اقلیمی و آلودگی‌های زیست‌محیطی، اهمیت بیشتری پیدا کرده است. روش‌های سنتز سبز به‌ویژه با بهره‌گیری از عصاره‌های گیاهی، به‌عنوان یک راهکار پایدار و نوآورانه، در تولید این نانوذرات نقش چشمگیری ایفا می‌کنند [۷]. عصاره‌های گیاهی به‌عنوان مواد طبیعی در سنتز سبز نانوذرات به کار گرفته می‌شوند و به‌ویژه عصاره برگ درخت انجیر به خاطر وجود ترکیباتی نظیر کومارین‌ها، فلاونوئیدها و مواد آنتی‌اکسیدانی، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب در سنتز نانوذرات نقره مورد توجه قرار گرفته است [۸، ۹]. این عصاره‌ها در فرآیند سنتز به‌عنوان عامل کاهنده عمل کرده و قادرند نانوذرات نقره را در اندازه‌ها و اشکال مختلف تولید کنند [۱۰].

احمدی و همکاران در مطالعات خود از روش سبز جهت تولید نانوذرات نقره با استفاده از عصاره برگ آلورا استفاده نموده که روش‌های حرارت‌دهی اتوکلاو و مایکروویو به‌عنوان دو روش مورد بررسی توسط پژوهشگران نامبرده مورد استفاده قرار گرفته شد [۱۱، ۱۲].

طراحی آزمایش به‌روش فاکتوریل نیز یکی دیگر از ابزارهای مؤثر در تولید نانوذرات به شمار می‌رود. این روش با تحلیل اثرات فاکتورهای مختلف بر روی تولید نانوذرات می‌تواند در جهت بهینه‌سازی شرایط سنتز بسیار مؤثر واقع شود [۱۳، ۱۴]. این روش این امکان را می‌دهد تا به شناخت بهتری از تعاملات متقابل بین متغیرها دست یافته و پارامترهای کلیدی شناسایی شوند، که در نهایت به تصمیم‌گیری هوشمندانه‌تر برای تعیین بهترین شرایط سنتز نانوذرات نقره منجر می‌شود [۱۵]. مدلسازی فرآیند به‌روش شبکه عصبی ابزاری نوین است که با

بهره‌گیری از توانایی پردازش داده‌ها، به پیش‌بینی و بهینه‌سازی خصوصیات نانوذرات می‌پردازد [۱۶]. شبکه‌های عصبی قابلیت دارند که با تحلیل داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های مختلف الگوهایی را شناسایی کنند که می‌تواند به مدیریت بهینه فرآیند تولید و بهبود کیفیت محصول منتهی شود [۱۷، ۱۸]. در تحقیق حاضر، سنتز سبز نانوذرات نقره با استفاده از عصاره برگ درخت انجیر و حرارت‌دهی با گرمکن همزن‌دار انجام شده است که پارامترهای موثر در این پژوهش شامل دما، زمان، دور همزن و pH است. تهیه مدلی که دارای اعتبار بوده و به‌دقت بتواند در جهت پیش‌بینی نتایج حاصل از سنتز سبز نانوذرات نقره با روش و متغیرهای مذکور عمل نماید حائز اهمیت بوده و می‌تواند در جهت طراحی فرآیندهای سنتز مشابه مفید باشد. هدف از تحقیق حاضر ارائه مدلی بر پایه شبکه عصبی بوده که توانایی پیش‌بینی دقیقی از سنتز سبز نانوذرات نقره را داشته و همچنین بتوان با روش فاکتوریل مقایسه نمود.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱ مواد

در تحقیق حاضر از گیاه برگ درخت انجیر استفاده گردید که از باغ‌های محلی شهرستان سنندج تهیه شد. از آب مقطر (شرکت مروارید پارس) به‌عنوان حلال در بخش عصاره‌گیری استفاده گردید. از هیدروکلریدریک اسید (HCl) و سدیم هیدروکسید (NaOH) جهت تنظیم pH خریداری شده از شرکت سیگما-آلدریج استفاده شد. نمک پایه و اصلی در سنتز نانوذرات نقره در تحقیق حاضر نمک نترات نقره ( $AgNO_3$ ) بوده که از شرکت سیگما-آلدریج خریداری گردید.

### ۲-۲ روش‌ها

#### ۲-۲-۱- تهیه عصاره برگ درخت انجیر

برگ درخت انجیر جمع‌آوری گردیده، با آب مقطر شست‌وشو داده شده و چون ساختار برگ در ابتدا میزان آب زیادی دارد، به مدت ۷ روز در دمای محیط قرار گرفته پس از خشک شدن کامل آن، میزان ۵ گرم از برگ پودر شده به ۱۰۰ میلی‌لیتر آب در حال جوش اضافه گردیده و ۱۵ دقیقه مطابق شکل ۱ فرصت داده شد تا عصاره‌گیری کامل انجام گردد. سپس با عملیات فیلتراسیون با کاغذ صافی واتمن شماره ۱، عصاره برگ درخت انجیر به دست آمده و در دمای یخچال تا زمان استفاده نگهداری شد.



شکل ۱. عصاره گیری از برگ درخت انجیر

Figure 1. Extraction from fig leaves

## ۲-۲-۲- طراحی آزمایش و آنالیز آماری داده‌ها

سنتز نانوذرات نقره در روش حاضر که با استفاده از گرمکن همزن دار انجام شده است. پارامترهای بسیاری می‌توانند بر ویژگی‌ها و خواص نانوذرات تولید شده تأثیر بگذارند. مکانیزم اصلی تشکیل نانوذرات نقره در روش سنتز سبز، احیا یون‌های با بار مثبت فلز نقره ( $Ag^+$ ) توسط عوامل احیاکننده عصاره گیاهی بوده که در نهایت با تبدیل آن‌ها به نقره با بار صفر ( $Ag^0$ ) و تجمع این ذرات، نانوذره نقره شکل می‌گیرد. با استفاده از طراحی آزمایش به روش فاکتوریل، می‌توان به صورت هم‌زمان تأثیر چند پارامتر را بررسی کرد. طراحی آزمایش به روش فاکتوریل یکی از رویکردهای قدرتمند برای بررسی تأثیر چندین پارامتر بر روی پاسخ‌های فرایند می‌باشد. در مورد سنتز نانوذرات نقره با ۴ پارامتر شامل دمای گرمکن، دور همزن، pH و زمان فرایند، می‌توان یک طرح فاکتوریل کامل با ۳ سطح برای هر پارامتر را ایجاد کرد. دمای گرمکن در فرایند سنتز ممکن است بر سرعت واکنش و اندازه نانوذرات تأثیرگذار باشد. سرعت و دور همزن می‌تواند توزیع نانوذرات را تحت تأثیر قرار دهد و در شکل‌گیری نانوذرات مؤثر باشد. پارامتر pH ممکن است بر ایجاد نانوذرات و خاصیت الکتروشیمیایی آن‌ها تأثیر بگذارد و در نهایت زمان سنتز می‌تواند بر رشد و اندازه نانوذرات تأثیرگذار باشد.

با توجه به غلظت‌های مختلف مورد استفاده نمک نیترات نقره در مراجع مختلف از جمله مقالات متعدد احمدی و همکاران [۵، ۱۲، ۱۹] بیشترین و متداول‌ترین غلظت برای نمک نیترات نقره ۱ میلی‌مولار بوده که در تحقیق حاضر، مقدار ۵۰۰ میلی‌لیتر محلول ۱ میلی‌مولار نمک نیترات نقره تهیه گردید. با توجه به در نظر گرفتن ۴ متغیر در ۳ سطح از نظر ترکیب‌های مختلف تعداد آزمایشات به صورت رابطه ۱ محاسبه می‌گردد.

$$\text{تعداد پارامترها} \times \text{تعداد سطوح} = \text{تعداد آزمایشات} \quad (۱)$$

$$۸۱ = ۳^۴ = \text{تعداد آزمایشات}$$

متغیرهای انتخاب شده به همراه سطح‌های آن شامل: ۱- دمای حرارت‌دهی گرمکن (سه سطح ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌گراد، ۲- زمان فرآیند سنتز سه سطح ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه، ۳- دور همزن ۱۰۰، ۲۵۰ و ۴۰۰ دور در دقیقه و ۴- pH با سه سطح ۴، ۷ و ۱۰) می‌باشد. که مجموع کل تعداد آزمایش‌ها ۸۱ نمونه بود که در هر ظرف

به میزان یکسان ۶ میلی‌لیتر عصاره برگ درخت انجیر و ۱۴ میلی‌لیتر محلول نمک نیترات نقره مخلوط شده و در محدوده‌های طراحی شده توسط نرم‌افزار سنتز سبز نانوذرات نقره انجام شد.

جهت تعیین خصوصیات نهایی نانوذرات نقره سنتز شده به روش حرارت‌دهی گرمکن همزن‌دار بررسی اثر متغیرهای در نظر گرفته بر روی میانگین اندازه ذرات، شاخص پراکندگی ذرات (PDI) و پتانسیل زتا آن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. شاخص پراکندگی عددی بین ۰ الی ۱ بوده که هرچه مقدار عددی آن به صفر نزدیکتر باشد، محصولی با اندازه یکسان و پراکندگی بهتر تولید شده است [۲۰]، در رابطه با پتانسیل زتا نیز هرچه مقدار عددی آن بدون توجه به علامت آن مقدار بیشتری داشته باشد، پایداری محصول تولید شده بیشتر می‌باشد [۲۱].

## ۲-۳ آنالیزها و بررسی خواص

جهت تعیین میانگین اندازه ذرات، شاخص پراکندگی و پتانسیل زتا از تجزیه پراکندگی نور پویایی<sup>۲</sup> DLS که روشی غیرمخرب و فیزیکی می‌باشد با دستگاه Malvern ساخت انگلستان استفاده گردید.

## ۲-۴ مدلسازی شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی مورد مطالعه در این تحقیق از نوع پیش‌خور بوده که پارامترهای آن (وزن‌ها و بایاس‌ها) به‌وسیله الگوریتم پس‌انتشار خطا و به روش لونیگ-مارکورت تعیین شده است [۲۲-۲۴]. در این تکنیک پارامترهای شبکه به‌طور مکرر به‌وسیله روش لونیگ-مارکورت بهینه می‌گردند. از داده‌های آزمایشگاهی برای آموزش و تأیید اعتبار مدل استفاده شد. داده‌های آزمایشگاهی مربوط به سنتز نانوذرات نقره به روش حرارت‌دهی گرمکن همزن‌دار برای مدلسازی به‌کار گرفته شدند. سه شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی هر یک از متغیرهای خروجی آموزش داده شد. در مدل‌های مورد مطالعه متغیرهای هدف شامل میانگین اندازه ذرات، شاخص پراکندگی ذرات و پتانسیل زتا، به‌عنوان تابعی از دمای گرمکن، دور همزن، pH و زمان فرآیند در نظر گرفته شدند. شبکه عصبی مصنوعی دارای یک ساختار به‌هم پیوسته است و به هر یک از شاخه‌ها یک وزن (w) تعلق می‌گیرد که در واقع معرف قدرت اتصال است. در نهایت خروجی یک شبکه به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$Y = F_p \left\{ \sum_{j=1}^n w_{kj} \left[ F_t \left( \sum_{i=1}^m w_{ji} x_i + b_j \right) \right] + b_k \right\} \quad (2)$$

در این رابطه Y خروجی نهایی، x اطلاعات ورودی، w وزن، b بایاس، n معرف تعداد نورون‌های پنهان، m تعداد متغیرهای ورودی و a، j، k به ترتیب نشان‌دهنده لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی می‌باشند. F تابع تبدیل است

<sup>1</sup> Poly Dispersity Index

<sup>2</sup> Dynamic Light Scattering

که عمل نرمالیزه کردن اطلاعات خروجی از هر نورون را انجام می‌دهد. در این مطالعه از تابع انتقال تانژانت هایپربولیک سیگموئید و تابع خطی به ترتیب برای لایه پنهان و لایه خروجی استفاده شد. جهت افزایش سرعت آموزش شبکه عصبی مصنوعی از فرمول زیر جهت نرمالیزه کردن داده‌ها بین صفر و یک استفاده شد:

$$(3) \quad \text{داده نرمالیزه شده} = \frac{\text{مینیمم} - \text{داده}}{\text{مینیمم} - \text{ماکزیمم}}$$

در جدول ۱ محدوده متغیرهای مورد مطالعه ارائه شده‌اند. از مجموعه داده‌های بدست آمده از آزمایشات (۸۱ داده)، ۷۵ درصد جهت آموزش مدل و ۲۵ درصد داده‌ها برای اعتبارسنجی شبکه عصبی استفاده شد. در این تحقیق تعداد متفاوتی از نورون‌ها در لایه پنهانی بررسی شده و در نهایت تعداد بهینه برای شبکه انتخاب شد. این تکنیک از حفظ کردن داده‌های آموزشی توسط مدل یا اصطلاحاً بیش‌برازش داده‌ها جلوگیری خواهد کرد [۲۵].

جدول ۱: محدوده متغیرهای استفاده شده در مدلسازی.

Table 1. Range of variables used in modeling	
Variable	Range
Temperature (° C)	20 - 60
Time (min)	15 - 45
Stirrer (rpm)	100 - 400
pH	4 - 10
Mean Particle Size (nm)	25 - 214
PDI	0.189 – 0.986
Zeta Potential (mV)	10.1 – 20.1

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱ تجزیه و تحلیل نتایج روش فاکتوریل

طبق نتایج طراحی آزمایش به روش فاکتوریل، تعداد ۸۱ آزمایش انجام و میانگین اندازه ذرات، شاخص پراکندگی و پتانسیل زتا به‌عنوان پاسخ‌ها در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از آنالیز DLS به همراه نتایج پیش‌بینی شده توسط نرم افزار Minitab با روش فاکتوریل در جدول ۱ گزارش گردید.

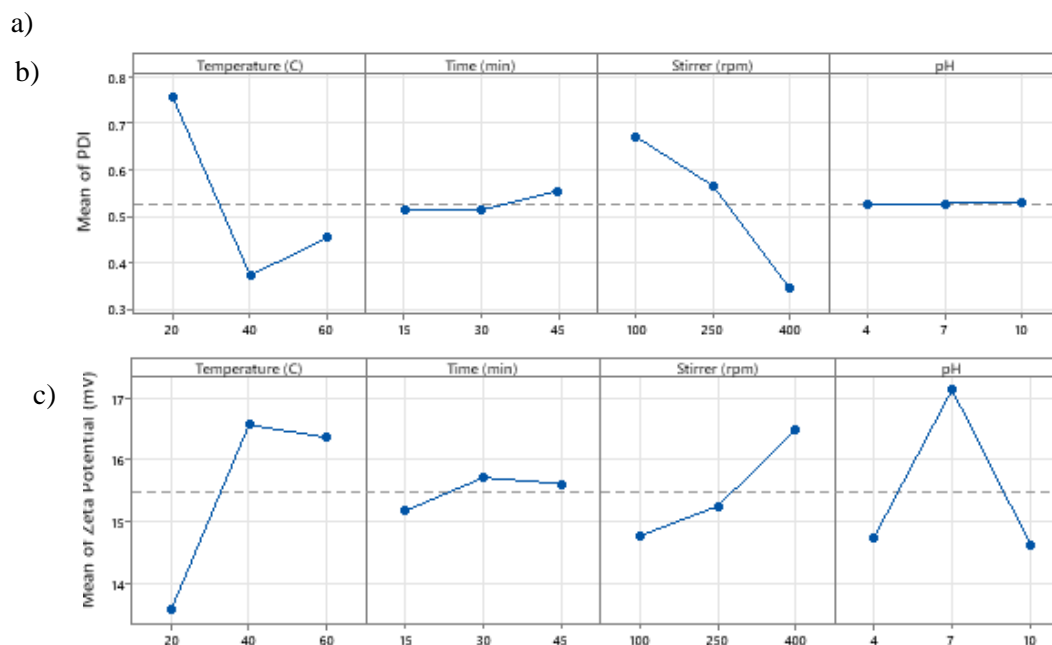
جدول ۲. طراحی آزمایش انجام گرفته و نتایج مربوط به هر کدام از متغیرهای مستقل به همراه نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل

**Table 2. The design of the experiment has been carried out and the results related to each of the independent variables along with the results predicted by the model**

Parameters				Responses					
				Experimental			Predicted		
Temperature (C)	Time (min)	Stirrer (rpm)	pH	Mean Particle Size (nm)	PDI	Zeta Potential (mV)	Mean Particle Size (nm)	PDI	Zeta Potential (mV)
20	15	100	4	195	0.978	10.6	193	0.974	11.3
20	15	100	7	131	0.981	11.6	133	0.98	12.5
20	15	100	10	214	0.986	10.1	210	0.981	11
20	15	250	4	162	0.798	11	162	0.799	11.7
20	15	250	7	118	0.791	12.6	119	0.788	13.9
20	15	250	10	184	0.789	12.4	183	0.784	12.9
20	15	400	4	154	0.532	13.9	155	0.533	14.9
20	15	400	7	106	0.538	15.1	105	0.531	16.9
20	15	400	10	173	0.53	14.4	170	0.529	15.3
20	30	100	4	175	0.91	12.9	169	0.916	13.9
20	30	100	7	116	0.916	13.4	115	0.919	15
20	30	100	10	194	0.918	13.1	191	0.919	14.8
20	30	250	4	142	0.765	14.1	142	0.764	15.9
20	30	250	7	101	0.761	15.9	103	0.763	16.4
20	30	250	10	165	0.763	13.5	169	0.766	14.9
20	30	400	4	141	0.521	14.1	136	0.523	15.5
20	30	400	7	82	0.522	16.2	83	0.529	17.9
20	30	400	10	157	0.526	13.5	156	0.524	15.6
20	45	100	4	163	0.956	13.4	162	0.957	14.8
20	45	100	7	105	0.945	14.1	103	0.946	15.9
20	45	100	10	179	0.944	12.1	176	0.943	13.8
20	45	250	4	129	0.781	12.4	126	0.783	14
20	45	250	7	95	0.788	16.4	91	0.786	17.1
20	45	250	10	151	0.798	13.6	151	0.794	15
20	45	400	4	132	0.565	14.6	132	0.561	15.9
20	45	400	7	72	0.566	17.2	71	0.56	18.4
20	45	400	10	142	0.564	14.4	142	0.563	15.8
40	15	100	4	113	0.512	14.9	113	0.513	16.5
40	15	100	7	58	0.519	18.1	53	0.518	19.4
40	15	100	10	158	0.518	13.7	155	0.518	14.4
40	15	250	4	111	0.351	12.9	109	0.353	13.4
40	15	250	7	48	0.359	18.4	49	0.355	19.9
40	15	250	10	134	0.355	15.5	136	0.354	16.6
40	15	400	4	101	0.201	15.3	100	0.204	16.8
40	15	400	7	44	0.2	19.7	47	0.203	21.1
40	15	400	10	113	0.206	16.1	114	0.209	17.8
40	30	100	4	102	0.498	15.5	107	0.496	16.6
40	30	100	7	37	0.492	19.1	36	0.491	20.5
40	30	100	10	145	0.499	14.6	149	0.498	16.1
40	30	250	4	98	0.345	14.7	94	0.345	15.8
40	30	250	7	31	0.349	18.5	35	0.347	20.1
40	30	250	10	118	0.351	15.1	126	0.354	17
40	30	400	4	83	0.195	15.6	84	0.194	16.3

40	30	400	7	26	0.192	19.9	23	0.188	20.8
40	30	400	10	102	0.192	17.1	109	0.193	18.8
40	45	100	4	115	0.515	16.9	114	0.514	17.7
40	45	100	7	58	0.519	18.6	54	0.517	19.8
40	45	100	10	162	0.51	14.5	164	0.513	15.8
40	45	250	4	106	0.495	14.8	109	0.496	15.9
40	45	250	7	49	0.491	17.9	48	0.494	18.7
40	45	250	10	131	0.492	16.2	133	0.492	17.8
40	45	400	4	99	0.231	17.2	95	0.234	19.1
40	45	400	7	34	0.238	18.9	33	0.237	19.7
40	45	400	10	109	0.231	16.9	108	0.234	17.3
60	15	100	4	109	0.519	15.9	109	0.517	16.7
60	15	100	7	42	0.522	17.8	46	0.524	18.8
60	15	100	10	147	0.518	15.2	145	0.519	17
60	15	250	4	103	0.499	16.9	106	0.496	17.5
60	15	250	7	38	0.498	17.9	37	0.499	18.7
60	15	250	10	123	0.496	16.3	120	0.494	17.5
60	15	400	4	87	0.238	17.1	88	0.236	19
60	15	400	7	35	0.234	19.3	33	0.233	20.8
60	15	400	10	104	0.238	16.8	103	0.236	18.1
60	30	100	4	117	0.564	15.9	117	0.566	16.6
60	30	100	7	61	0.566	17.6	63	0.569	18.4
60	30	100	10	161	0.569	14.6	164	0.57	15.3
60	30	250	4	104	0.512	15.3	105	0.511	16.9
60	30	250	7	52	0.519	17.3	53	0.518	19
60	30	250	10	133	0.516	15.1	133	0.517	17
60	30	400	4	100	0.298	16.1	99	0.296	17.9
60	30	400	7	37	0.297	19.2	39	0.299	20.8
60	30	400	10	109	0.296	15.9	108	0.299	16.7
60	45	100	4	141	0.599	14.8	134	0.596	15.5
60	45	100	7	82	0.597	15.8	83	0.597	16.4
60	45	100	10	173	0.593	13.9	176	0.596	14.7
60	45	250	4	115	0.535	15.4	114	0.534	16.1
60	45	250	7	63	0.534	16.4	64	0.536	17.9
60	45	250	10	141	0.555	15.1	148	0.554	16.8
60	45	400	4	109	0.305	15.5	109	0.304	16.5
60	45	400	7	52	0.307	19	54	0.306	20.4
60	45	400	10	120	0.31	15.3	121	0.309	16.6

پس از انجام آزمایشات مختلف که شامل ۴ متغیر و هر کدام دارای ۳ سطح بود، ۸۱ آزمایش انجام گرفته و پاسخ‌های میانگین اندازه ذرات، شاخص پراکندگی و پتانسیل زتا مورد بحث و بررسی قرار گرفت و اثر هر کدام از پارامترهای انتخاب شده در سطح‌های در نظر گرفته شده بررسی گردید که نتایج آن در شکل ۲ (الف-ج) گزارش شد.



شکل ۲. تغییرات متغیرهای وابسته بر اساس متغیرهای مستقل انتخاب شده (الف) میانگین اندازه ذرات (ب) شاخص پراکندگی (ج) پتانسیل زتا

Figure 2. Figure 2. Changes of dependent variables based on selected independent variables a) Average particle size b) PDI c) Zeta potential

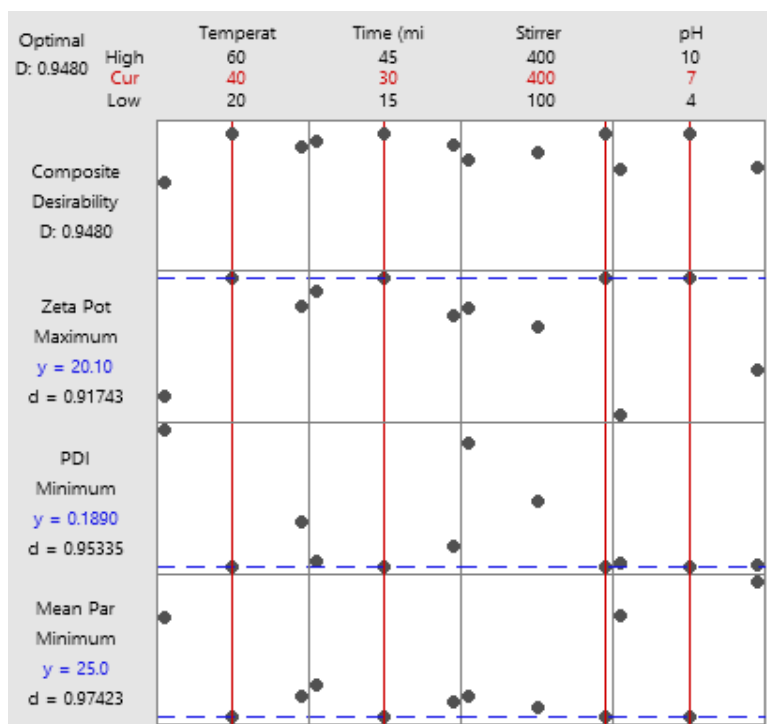
همانطور که در شکل ۲ (الف-ج) مشاهده می‌شود، پاسخ‌های در نظر گرفته شده که شامل میانگین اندازه ذرات، شاخص پراکندگی و پتانسیل زتا می‌باشند، نسبت به متغیرهای انتخابی و افزایش و کاهش آن‌ها، رفتارهای کاملاً متفاوتی نشان داده‌اند، به‌طوریکه در شکل ۲ الف، ارتباط دما و میانگین اندازه ذرات به نحوی می‌باشد که در دماهای پایین (۲۰ سانتی‌گراد) بیشترین میانگین اندازه ذرات حاصل شده که بنظر می‌رسد متاثر از عدم انجام واکنش به طور کامل می‌باشد، دور همزن نیز در مقادیر بالا (۴۰۰ دور در دقیقه) منجر به تولید نانوذراتی با میانگین اندازه ذرات پایین‌تر گردید. بنظر می‌رسد با افزایش دور همزن و هم‌زمان تشکیل نانوذرات نقره، سرعت بالاتر مانع از کلوخه‌شدن و اثر نامطلوب آگلومره شدن ذرات می‌گردد. همچنین متغیر pH در مقادیر اسیدی و بازی به‌عنوان اثر نامطلوب در میانگین اندازه ذرات عمل نموده و مقادیر خنثی بهترین حالت را خواهند داشت. زمان انجام فرایند سنتز نانوذرات اثر معناداری در میانگین اندازه ذرات از خود نشان نداده و دماهای میانه (۴۰ سانتی‌گراد) به طور نسبی منجر به تولید نانوذراتی با میانگین اندازه ذرات پایین‌تر خواهند شد. بنظر می‌رسد زمان بالاتر امکان به هم چسبیدن ذرات را فراهم نموده و در نهایت میانگین اندازه ذرات را افزایش دهد. همچنین در زمان‌های پایین‌تر امکان تشکیل کامل نانوذرات حاصل نخواهد شد.

شکل ۲ ب مربوط به اثرات متغیرهای در نظر گرفته شده بر روی شاخص پراکندگی بوده که در آن نتایج نشان می‌دهد متغیر pH تقریباً هیچگونه اثری بر شاخص پراکندگی نداشته و تقریباً در همه مقادیر اسیدی، بازی و خنثی شاخص پراکندگی مقدار ثابتی خواهد داشت. اما با افزایش دور همزن از ۱۰۰ به ۴۰۰ دور در دقیقه، به طور محسوس شاخص پراکندگی را از مقادیر بالای ۰/۶ به مقادیر کمتر از ۰/۴ رسانده که بنظر می‌رسد متاثر از قدرت هرچه بیشتر پخش نمودن ذرات و یک دست نمودن آن‌ها می‌باشد. اثر دما در مقادیر دمایی پایین به‌عنوان حالت نامطلوب در شاخص پراکندگی عمل نموده است. بنظر می‌رسد در دماهای پایین با توجه به رشد و تولید نانوذرات با سرعت پایین و نرخ کم، ذراتی با اندازه‌های متفاوت تولید شده که در نهایت منجر به شاخص پراکندگی نامطلوب گردید.

در نهایت شکل ۲ ج تغییرات بار سطحی ذرات (پتانسیل زتا) که معیاری از پایداری نانوذرات بوده را نسبت به متغیرهای انتخاب شده نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲ ج گزارش گردیده است، تمامی متغیرهای انتخاب شده بر کاهش یا افزایش پتانسیل زتا اثرگذار می‌باشند، به طوری که در دماهای متوسط (۴۰ سانتی‌گراد) بیشترین پتانسیل زتا و بالاترین پایداری و در دماهای پایین کاهش محسوسی از پتانسیل زتا را نشان می‌دهد. در مقادیر pH بالا و پایین (۴ و ۱۰) پتانسیل زتا بشدت کاهش خواهد یافت. بنظر می‌رسد در pH های بالا و پایین بار سطحی نانوذرات متاثر از وجود عوامل هیدروکلوریدریک اسید و سدیم هیدروکسید بوده و کاهش محسوسی در آن رخ خواهد داد. با مقایسه مابین نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر با سایر پژوهشگران به‌عنوان مثال در پژوهش الشهرانی و همکاران که از سنتز سبز و حرارت‌دهی گرمکن همزن‌دار استفاده نموده اند، نشان می‌دهد عوامل در نظر گرفته شده به‌عنوان پارامترهای عملیاتی اثرات مختلفی بر روی پاسخ های در نظر گرفته شده خواهند داشت که بهینه سازی آن‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۷].

### ۲-۳ بهینه‌سازی نتایج حاصل از طراحی آزمایش

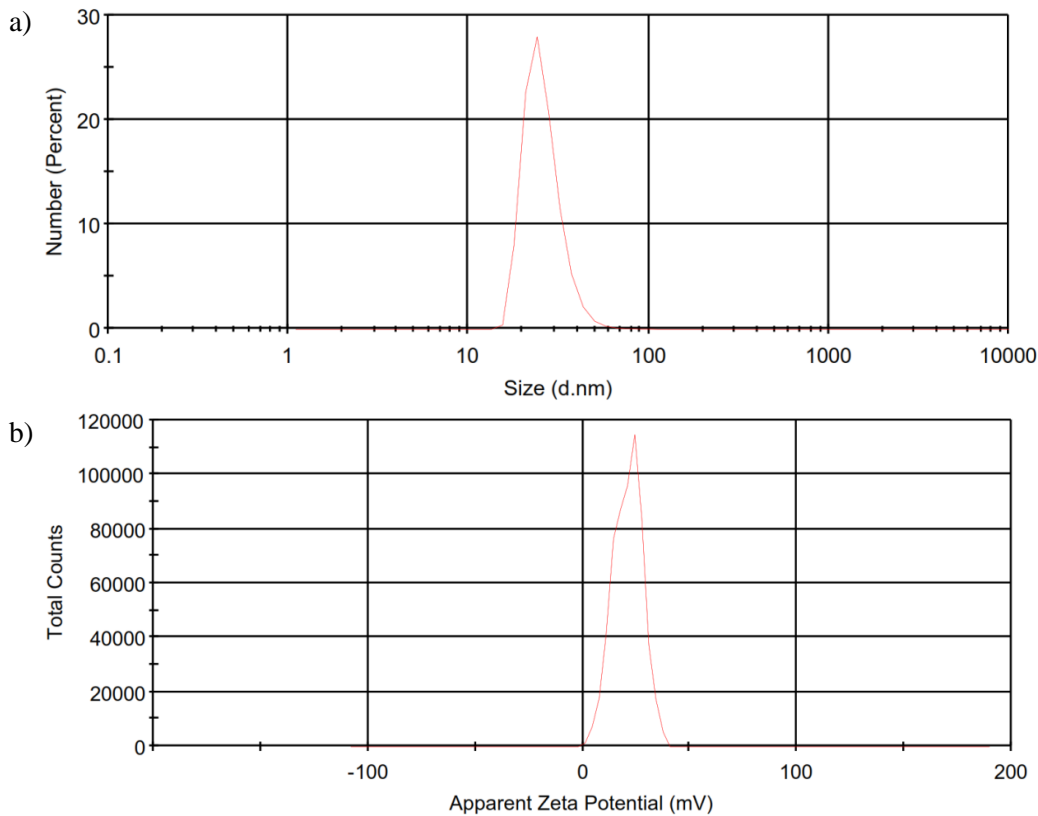
باتوجه به گزارش‌های بدست آمده از طراحی آزمایش و بررسی اثرات و متغیرهای انتخاب شده بر پاسخ‌های در نظر گرفته شده، نتایج نشان داد که هر کدام از متغیرهای انتخاب شده شامل دمای گرمکن، دور همزن، زمان فرایند سنتز و pH اثرات مختلف و متفاوتی بر پاسخ‌های میانگین اندازه ذرات، شاخص پراکندگی و پتانسیل زتا دارند. به همین خاطر بهینه‌سازی نهایی انجام گرفت و نتایج آن در شکل ۳ مشاهده می‌گردد.



شکل ۳. بهینه‌سازی نهایی حاصل از طراحی آزمایش به روش فاکتوریل

Figure 3. The final optimization resulting from the experimental design using the factorial method

همان‌طور که در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد، اثرات متغیرهای مختلف بر پاسخ‌های در نظر گرفته شده بررسی شد و بهینه‌سازی نهایی جهت بدست آوردن کمترین میانگین اندازه ذره (۲۵ نانومتر)، کمترین شاخص پراکندگی (۰/۱۸۹) و بالاترین پتانسیل زتا (۲۰/۱ میلی‌ولت) در دمای و زمان متوسط (۴۰ سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه)، بیشترین دور همزن (۴۰۰ دور در دقیقه) و در pH میانه یا خنثی حاصل گردید. نتایج حاصل می‌تواند به طور قابل اطمینانی منجر به تولید نانوذراتی با خصوصیات مناسب گردد که پس از بدست آوردن نقاط بهینه گزارش شده از نتایج بهینه‌سازی، در شرایط به دست آمده از طراحی آزمایش صحت سنجی نتایج انجام شد که در بخش حاضر، سنتز نانوذرات نقره انجام گردیده و مقادیر مربوط به متغیرهای وابسته (میانگین اندازه ذرات، شاخص پراکندگی و پتانسیل زتا) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. پس از انجام آزمایش‌ها مربوط به صحت‌سنجی طراحی آزمایش، نتایج بدست آمده حاصل از کارهای آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج پیش‌بینی‌شده، اختلاف معناداری نداشتند (میانگین اندازه ذرات ۲۷ نانومتر، شاخص پراکندگی ۰/۱۹۲ و پتانسیل زتا ۲۰ میلی‌ولت). بنابراین مدل‌های به دست آمده با انجام صحت سنجی نهایی، تأیید گردیده و به‌درستی توانستند اثرات متغیرهای در نظر گرفته شده را بر روی پاسخ‌های انتخاب شده در محدوده موردنظر مشخص نمایند. در شکل ۴ الف وب آنالیزهای انجام‌شده در نقطه بهینه گزارش شده است.



شکل ۴. خواص نانوذرات نقره سنتز شده در نقطه بهینه الف) میانگین اندازه ذرات ب) پتانسیل زتا  
**Figure 4. Properties of silver nanoparticles synthesized at the optimal point a) Average particle size b) Zeta potential**

### ۳-۲ نتایج مدلسازی شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد بررسی در این تحقیق برای تخمین خصوصیات نهایی نانوذرات نقره سنتز شده، دارای یک لایه پنهان است. در شکل ۵ ساختار شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده در این مطالعه نشان داده شده است. جهت مشخص نمودن تعداد بهینه نورون‌ها در لایه میانی (پنهان) از روش سعی و خطا استفاده شد. همچنین از معیار متوسط خطای نسبی (Mean relative errors, MRE) برای بررسی دقت مدل‌ها استفاده شد:

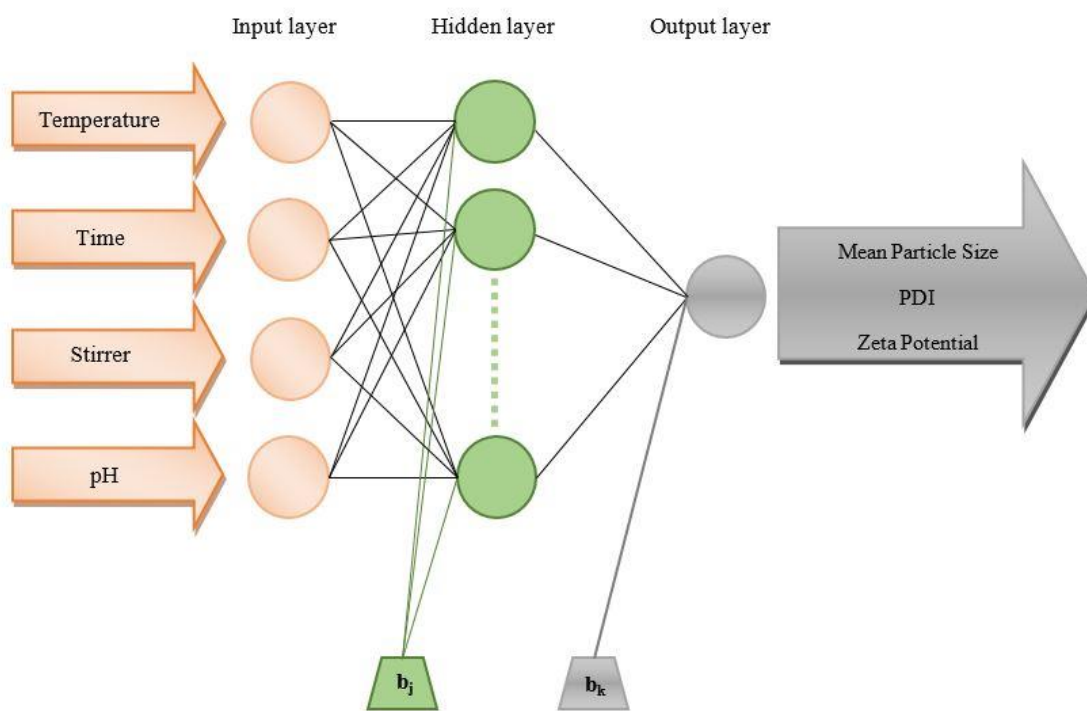
$$MRE(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{|t_i - y_i|}{t_i} \right) \quad (4)$$

در این رابطه N تعداد کل داده‌ها، t داده هدف (آزمایشی) و y داده خروجی شبکه است.

در جدول ۲ مقادیر متوسط درصد خطای نسبی برای ساختارهای متفاوت شبکه عصبی (تعداد متفاوت نورون‌ها در لایه پنهان) برای تخمین خصوصیات نهایی نانوذرات نقره سنتز شده مشاهده می‌شود. شبکه با ساختار ساده‌تر (تعداد کم نورون‌ها) باعث دقت پایین پیش‌بینی شده و ساختار پیچیده‌تر (تعداد بالای نورون‌ها) منجر به حفظ کردن داده‌های ورودی توسط شبکه عصبی خواهند شد. همان‌طور که در جدول ارائه شده است، شبکه‌هایی با

تعداد ۹، ۷ و ۵ نورون در لایه پنهان به ترتیب برای تخمین میانگین اندازه ذرات، شاخص پراکندگی ذرات و پتانسیل زتا دارای بهترین ساختار هستند.

با توجه به توضیحات موجود، رابطه‌ای معکوس بین سادگی ساختار شبکه و دقت پیش‌بینی آن مشاهده می‌شود. ساختارهای ساده‌تر که به تعداد کمتری نورون در لایه پنهان متکی هستند، در عمل نمی‌توانند تمام پیچیدگی‌های موجود در داده‌های ورودی را مدلسازی کنند و بنابراین دقت کمتری در پیش‌بینی‌ها به دست می‌آورند. این امر به اصطلاح کم‌آموزی (Underfitting) را نشان می‌دهد، به عبارت دیگر، این شبکه‌ها نمی‌توانند ویژگی‌های کلیدی داده‌ها را شناسایی کنند و از این‌رو در ارائه نتایج دقیق ناکام می‌مانند. از طرف دیگر، ساختارهای پیچیده‌تر با تعداد بیشتری نورون، به دلیل توانایی بالای خود در یادگیری و ذخیره‌سازی داده‌های ورودی، می‌توانند به دقت بالاتری در پیش‌بینی دست یابند. اما نیاز به احتیاط وجود دارد؛ زیرا اگر تعداد نورون‌ها بیش از حد افزایش یابد، خطر بیش‌آموزی (Overfitting) نیز ممکن است افزایش یابد، به طوری که شبکه فقط قادر به حفظ داده‌های آموزشی باشد و توانایی کمتری در تعمیم به داده‌های جدید پیدا کند. بنابراین، انتخاب تعداد مناسبی از نورون‌ها در لایه پنهان اهمیت بالایی دارد.



شکل ۵. ساختار شبکه عصبی مصنوعی.

Figure 5. Artificial neural network structure.

جدول ۳. مقدر MRE بدست آمده برای ANNS با تعداد متفاوتی از نورون‌ها

Table 3. MRE values obtained for the ANNS trained with different number of neurons.

Number of neurons	Target variable		
	Mean Particle Size	PDI	Zeta Potential
2	15.05	5.62	6.50
3	5.83	4.22	3.71
4	4.23	2.00	3.71
5	4.06	1.73	<b>2.74</b>
6	3.83	1.08	2.89
7	3.28	<b>0.51</b>	2.84
8	2.67	0.83	2.76
<b>9</b>	<b>1.99</b>	0.60	
10	2.06	0.99	
11	2.34		
12	2.37		

پارامترهای (وزن‌ها و بایاس‌ها) مربوط به هریک از شبکه‌های آموزش داده شده در جداول ۴ تا ۶ ارائه شده‌اند. با جایگزینی این پارامترها در فرمول (۲) می‌توان هر یک از متغیرهای هدف (میانگین اندازه ذرات، شاخص پراکندگی ذرات و پتانسیل زتا) را برحسب متغیرهای ورودی (دمای گرمکن، دور همزن، pH و زمان فرایند) بدست آورد. این فرایند امکان پیش‌بینی دقیق‌تر خصوصیات نانوذرات را با استفاده از داده‌های ورودی مشخص فراهم کرده و به پژوهشگران کمک می‌کند تا تأثیر تغییرات متغیرهای ورودی بر خصوصیات نانوذرات را بهتر درک کنند.

جدول ۴. پارامترهای مدل برای پیش‌بینی میانگین اندازه ذرات

Table 4. Parameters of the model to predict Mean Particle Size

Neuron	W <sub>ji</sub>				b <sub>j</sub>	b <sub>k</sub> =1.4985 W <sub>kj</sub>
	T	t	s	pH		
1	-3.955	-2.615	-2.890	0.032	7.049	0.051
2	3.845	3.731	-1.473	0.764	-5.866	0.071
3	3.095	0.628	-3.820	4.115	-1.470	-0.043
4	-0.904	0.289	-1.982	1.930	1.247	-0.137
5	-3.195	-3.379	-1.006	0.110	5.207	-0.130
6	-3.758	-0.052	-0.299	1.174	0.374	0.251
7	0.381	0.339	0.551	3.256	-1.168	-0.356
8	0.145	-0.230	-0.338	1.877	-2.043	0.938
9	-0.3314	-1.2156	-4.4418	5.5271	1.9893	0.0938

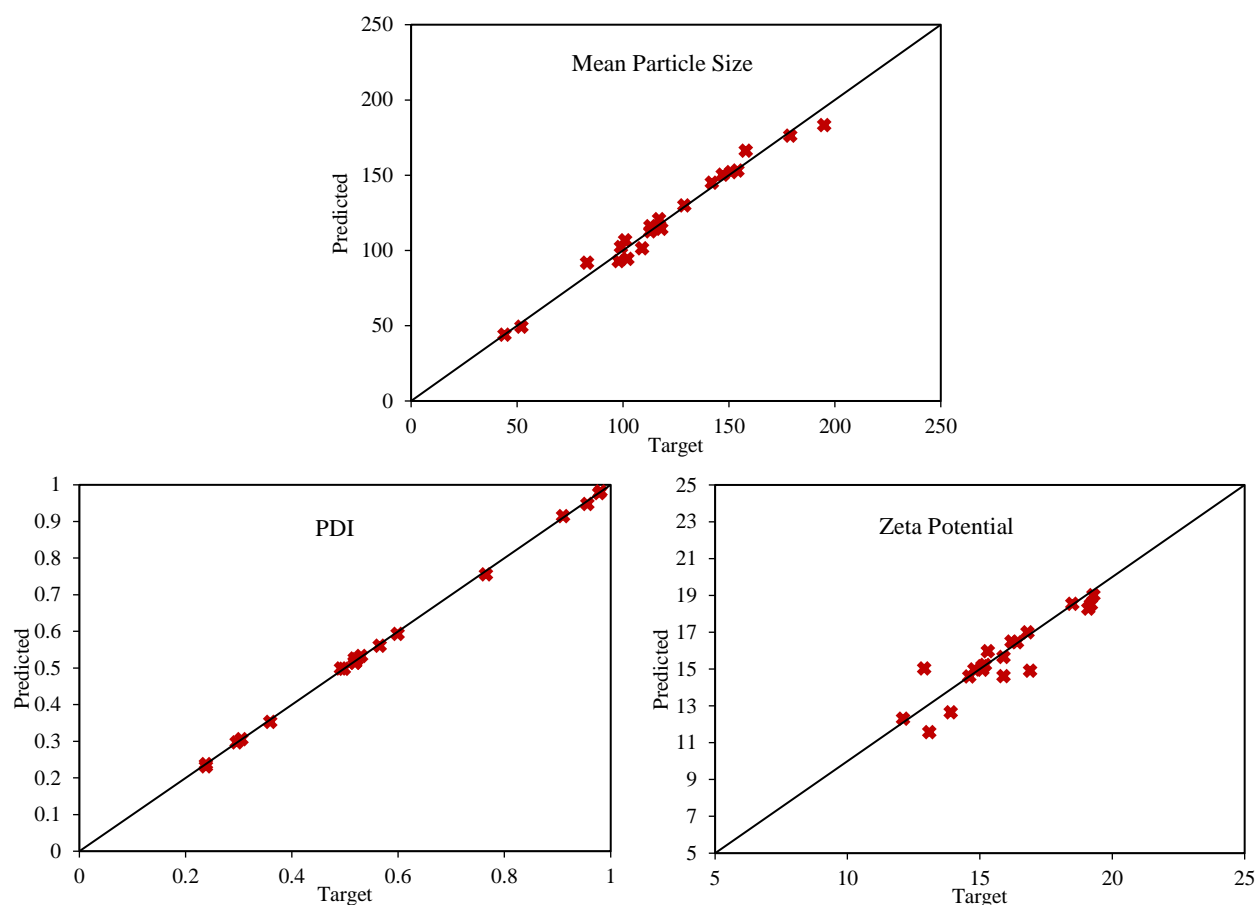
جدول ۵. پارامترهای مدل برای پیش‌بینی PDI  
**Table 5.** Parameters of the model to predict PDI

Neuron	$W_{ji}$				$b_j$	$b_k=0.6899$ $W_{kj}$
	T	t	s	pH		
1	0.272	0.905	5.723	-0.012	-7.00899	-0.382
2	-1.338	5.067	-0.194	-0.006	-1.68433	0.075
3	-4.215	-2.614	1.343	0.053	3.442908	-0.146
4	-3.903	4.040	5.254	-0.033	-0.37243	-0.091
5	-0.189	1.586	-3.938	-0.309	0.726407	-0.051
6	-3.146	-1.186	-1.168	-0.015	0.973791	0.497
7	6.825	-2.319	-0.251	-0.034	1.668068	-0.259

جدول ۶. پارامترهای مدل برای پیش‌بینی پتانسیل زتا  
**Table 6.** Parameters of the model to predict Zeta Potential

Neuron	$W_{ji}$				$b_j$	$b_k=-0.8383$ $W_{kj}$
	T	t	s	pH		
1	1.216	2.636	0.785	0.820	0.431938	0.488
2	-1.476	-0.352	-0.114	0.403	1.489967	0.816
3	-0.375	0.285	1.287	1.270	-1.71071	0.549
4	1.867	0.244	0.226	3.682	-1.59229	0.450
5	0.640	0.017	-0.224	-0.940	0.590166	1.651

اعتبار مدل شبکه عصبی هنگامی تأیید می‌شود که مدل قادر باشد داده‌هایی که در فرایند آموزش نقش نداشته‌اند را نیز با دقت بالا پیش‌بینی کند. در همین راستا از ۲۵ درصد داده‌های آزمایشگاهی جهت تأیید اعتبار مدل استفاده شد. شکل ۶ تطابق مقادیر خروجی مدل با داده‌های آزمایشی مربوط به سه شبکه عصبی برای مجموعه داده‌های ارزیابی را نشان می‌دهند. مجموعه نقاط مربوطه به نحو بسیار مطلوبی به خط ۴۵ درجه (این خط معرف پیش‌بینی کامل می‌باشد) نزدیک هستند. بالا بودن دقت شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مجموعه داده‌های ارزیابی اعتبار مدل را تأیید می‌کند. این نتایج نشان‌دهنده توانایی مدل در تعمیم نتایج به داده‌های جدید است و به معنای عدم وابستگی مدل به داده‌های خاص آموزشی می‌باشد.



شکل ۶. مقایسه بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده ANN مربوط به مجموعه داده‌های اعتبارسنجی.

Figure 6. Comparison between the experimental and predicted data of ANN related to the validation data set.

جدول ۷ مقادیر متوسط خطای نسبی مدل‌های شبکه عصبی و روابط طراحی آزمایشات برای سه متغیر هدف مورد بررسی را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول مشخص است، دقت شبکه‌های عصبی آموزش داده‌شده برای تخمین میانگین اندازه ذرات و بخصوص پتانسیل زتا از مدل فاکتوریل بهتر بوده است.

استفاده از مدل شبکه عصبی در این مطالعه به‌عنوان یک ابزار مدرن و کارآمد، اهمیت و مزایای زیادی را در فرایند سنتز و تحلیل نانوذرات نقره به ارمغان آورده است. شبکه‌های عصبی به دلیل توانایی بالای خود در یادگیری از داده‌ها و شناسایی الگوها، می‌توانند روابط پیچیده و غیرخطی بین متغیرهای ورودی (مانند دما، زمان، سرعت همزدن و pH) و ویژگی‌های نهایی نانوذرات (مانند اندازه ذرات و پتانسیل زتا) را به طور مؤثری مدل‌سازی کنند. مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی، به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که نه تنها نتایج حاصل از آزمایشات خود را پیش‌بینی کنند، بلکه تقدم و تأخر پارامترهای مختلف را با دقت بیشتری شناسایی نمایند. این امر به بهینه‌سازی فرآیندهای عملیاتی کمک کرده و می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌ها و زمان در سنتز نانوذرات گردد. مزیت دیگر شبکه عصبی، قابلیت تعمیم‌پذیری آن است، به این معنی که نتایج کسب شده می‌تواند به فرآیندهای مشابه در سنتز نانوذرات دیگر یا مواد مختلف نیز تسری یابد. این ویژگی، افق‌های

جدیدی را در پژوهش‌های کاربردی و تحقیقاتی فراهم می‌آورد و شاخصه‌ای مهم در تحلیل و کنترل فرایندهای صنعتی به شمار می‌رود.

جدول ۷. مقایسه مقدر (MRE (% بدست آمده توسط ANN و فاکتوریل  
**Table 7.** Comparison of MRE (%) values obtained by ANN and Factorial

Target	Model	MRE (%)
Mean Particle Size	ANN	1.99
	Factorial	2.43
PDI	ANN	0.51
	Factorial	0.47
Zeta Potential	ANN	2.74
	Factorial	8.05

#### ۴. نتیجه گیری

پژوهش حاضر شامل بخش‌های مختلفی از جمله سنتز سبز نانوذرات نقره با استفاده عصاره برگ درخت انجیر، طراحی آزمایش و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی (دما، زمان، سرعت همزدن و pH) با طراحی فاکتوریل و در نهایت استفاده از شبکه عصبی جهت تهیه مدلی که دارای اعتبار بوده و بتواند نتایج حاصل از تحقیق حاضر را پیش‌بینی نماید بود. نتایج حاصل از تحقیق حاضر نشان داد که عصاره برگ درخت انجیر به‌عنوان عامل احیاکننده در سنتز نانوذرات نقره موثر عمل نمود، پارامترهای عملیاتی متعدد اثرگذاری‌های متفاوتی در خواص نهایی نانوذرات نقره از خود نشان دادند، همچنین روش فاکتوریل به‌عنوان یکی از روش‌های طراحی آزمایش در جهت یافتن نقاط بهینه عملیاتی در فرآیند سنتز نانوذرات نقره به خوبی عمل کرد. در نهایت استفاده از شبکه عصبی جهت پیش‌بینی نتایج حاصل از پژوهش‌های آزمایشگاهی به خوبی توانایی مدل نمودن خروجی با درصد اطمینان بالا را داشته، به طوری‌که در تحقیق حاضر در مقایسه با روش فاکتوریل در میان ۳ پاسخ وابسته در نظر گرفته شده، به بهبود نتایج ۲ متغیر وابسته پتانسیل زتا و میانگین اندازه ذرات منجر گردید.

#### مراجع

1. Esmaili, S., Zinsaz, P., Ahmadi, O., Najian, Y., Vaghari, H., and Jafarizadeh-Malmiri, H. (2022). Screening of four accelerated synthesized techniques in green fabrication of ZnO nanoparticles using Willow leaf extract. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*. 236(11-12): 1567-1581.
2. Mirzakhani, L., Jafarizadeh-Malmiri, H., and Ahmadi, O. (2024). Three accelerated methods based on microwave, hydrothermal and conventional heating in the green synthesis of selenium nanoparticles using garlic aqueous extract: Screening and characterization. *Nano-Structures & Nano-Objects*. 38: 101162.
3. Eshghi, M., Kamali-Shojaei, A., Vaghari, H., Najian, Y., Mohebian, Z., Ahmadi, O., and Jafarizadeh-Malmiri, H. (2021). Corylus avellana leaf extract-mediated green synthesis of antifungal silver nanoparticles using microwave irradiation and assessment of their properties. *Green Processing Synthesis*. 10(1): 606-613.

4. Ahmadi, O., Sayyar, Z., and Jafarizadeh Malmiri, H. (2023). Optimization of Processing Time, Temperature, and Stirring Rate to Synthesize the Ag Nanoparticles Using Oregano Extract. *Iran. J. Chem. Chem. Eng.* 42(10).
5. Ahmadi, O., Seifi, M., and Jafarizadeh-Malmiri, H. (2021). Simulation of Silver Nanoparticles Green Synthesis Using Aloe Vera leaf Extract and Microwave Heating, and Evaluation of their Characteristics. *Iranian Chemical Engineering Journal.* 20(114): 82-96.(In Persian)
6. Mohammadi-Aghdam, S. and Ahmadi, O. (2023). Optimization of operating conditions and the role of ultrasound waves in the green synthesis of silver nanoparticles using apple tree leaf extract. *Journal of applied research in chemisry.* 17(1). (In Persian)
7. Hamoud Alshahrani, S., Alameri, A.A., Zabibah, R.S., Turki Jalil, A., Ahmadi, O., and Behbudi, G. (2022). Screening method synthesis of AgNPs using *Petroselinum crispum* (parsley) leaf: Spectral analysis of the particles and antibacterial study. *Journal of the Mexican Chemical Society.* 66(4): 480-487.
8. Ulug, B., Turkdemir, M.H., Cicek, A., and Mete, A. (2015). Role of irradiation in the green synthesis of silver nanoparticles mediated by fig (*Ficus carica*) leaf extract. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular Biomolecular Spectroscopy.* 135: 153-161.
9. Acay, H. (2019). Biosynthesis and characterization of silver nanoparticles using fig (*Ficus carica*) leaves: a potential antimicrobial activity. *Applied Ecology Environmental Research.* 17(6).
10. Serdar, G. (2021). Biosynthesis of Silver Nanoparticles Using Extract of Fig (*Ficus carica*) Leaf by Microwave Extraction. *Bulletin of Biotechnology.* 2(2): 44-50.
11. Ahmadi, O., Jafarizadeh-Malmiri, H., and Jodeiri, N. (2018). Eco-friendly microwave-enhanced green synthesis of silver nanoparticles using Aloe vera leaf extract and their physico-chemical and antibacterial studies. *Green Processing and Synthesis.* 7(3): 231-240.
12. Ahmadi, O., Jafarizadeh-Malmiri, H., and Jodeiri, N. (2019). Optimization of processing parameters for hydrothermal silver nanoparticles synthesis using Aloe vera leaf extract and estimation of their physico-chemical and antifungal properties. *Zeitschrift für Physikalische Chemie.* 233(5): 651-667.
13. Ahmadi, O. and Jafarizadeh-Malmiri, H. (2021). Intensification and optimization of the process for thyme oil in water nanoemulsions preparation using subcritical water and xanthan gum. *Zeitschrift für Physikalische Chemie.* 235(5): 629-648.
14. Rigopoulos, N., Gkaliouri, C.M., Sakavitsi, V., and Gournis, D.J.R. (2023). Full factorial design synthesis of silver nanoparticles using *origanum vulgare*. *Reactions.* 4(3): 505-517.
15. Ibrahim, M., Agboola, J., Abdulkareem, A., Adedipe, O., and Tijani, J. *Optimization of green synthesis of silver nanoparticles using Response Surface Method (RSM).* in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020. IOP Publishing.
16. Uthayakumar, H. and Thangavelu, P. (2023). Prediction of the size of green synthesized silver nanoparticles using RSM-ANN-LM hybrid modeling approach. *Chemical Physics Impact.* 6: 100231.
17. Khayati, G.R. (2020). A predictive model on size of silver nanoparticles prepared by green synthesis method using hybrid artificial neural network-particle swarm optimization algorithm. *Measurement.* 151: 107199.
18. Ozairy, R., Beigzadeh, R., and Rastegar, S. (2022). Neural Network Modeling of the Process of Extraction from Mobile Printed Circuit Boards by Lemon Juice Organic Acids. *Iranian Chemical Engineering Journal.* 21(121): 21-32.
19. Ahmadi, O., Jafarizadeh-Malmiri, H., and Jodeiri, N. (2018). Eco-friendly microwave-enhanced green synthesis of silver nanoparticles using Aloe vera leaf extract and their physico-chemical and antibacterial studies. *Green Processing Synthesis.* 7(3): 231-240.
20. Hashemilar, H., Jafarizadeh-Malmiri, H., Ahmadi, O., and Jodeiri, N. (2023). Enzymatically preparation of starch nanoparticles using freeze drying technique–gelatinization, optimization and characterization. *International Journal of Biological Macromolecules.* 237: 124137.

21. Khalilnejad, A., Lashkari, R., Iravani, M., and Ahmadi, O. *Application of synthesized silver nanofluid for reduction of oil-water interfacial tension*. in *Saint Petersburg 2020*. 2020. European Association of Geoscientists & Engineers.
22. Hussain, M.A. (1999). Review of the applications of neural networks in chemical process control—simulation and online implementation. *Artificial intelligence in engineering*. 13(1): 55-68.
23. Cybenko, G. (1989). Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of control, signals systems*. 2(4): 303-314.
24. Hagan, M.T. and Menhaj, M.B. (1994). Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE transactions on Neural Networks*. 5(6): 989-993.
25. Liu, Y., Starzyk, J.A., and Zhu, Z. (2008). Optimized approximation algorithm in neural networks without overfitting. *IEEE transactions on neural networks*. 19(6): 983-995.

# Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Fig Leaf Extract and Heating with a Stirred Heater: Comparative Evaluation of Neural Network Modeling and Factorial Design Techniques

Omid Ahmadi<sup>1</sup>, Reza Beigzadeh<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

\*Corresponding Author Email: R.beigzadeh@uok.ac.ir

## Abstract

In this research, neural network and factorial methods were compared for the green synthesis of silver nanoparticles using fig leaf extract. The examined independent variables included temperature, time, stirrer speed, and pH, each assessed at three distinct levels. The experimental design employed the factorial method. The responses analyzed encompassed average particle size, dispersity index, and zeta potential. The results indicated that the smallest average size of silver nanoparticles (25 nm), alongside the lowest dispersion index (0.189) and the highest zeta potential (20.1 mV), was attained at a temperature of 40 °C, a synthesis time of 30 minutes, a stirring speed of 400 rpm, and neutral pH (7). Furthermore, a neural network was utilized to predict the three dependent variables based on the independent variables. The results of the neural network modeling demonstrated high accuracy in predicting the target variables, with average relative error (MRE) values for mean particle size, dispersion index, and zeta potential being 1.99, 0.51, and 74.2, respectively. In contrast, the factorial method yielded MRE values of 2.43, 0.47, and 8.05, highlighting a significant improvement in the prediction of zeta potential and a relative enhancement in the prediction of average particle size. Among the three considered outputs, the accuracy of the ANNs for estimating the average particle size and especially the zeta potential was better than the factorial model. These results of neural network modeling provide great importance in optimizing nanoparticle synthesis processes and facilitating the design of repeated experiments, which can lead to the development of more stable and efficient methods in nanotechnology.

**Keywords:** Fig leaf extract, Green synthesis, Neural network, Silver nanoparticles.