



شبیه‌سازی شرایط عملیاتی سنتز سبز نانوذرات نقره با استفاده از عصاره برگ آلوورا و مایکروویو و بررسی خواص آن

امید احمدی^۱، محمدجواد سیفی^۲، هدا جعفری‌زاده مالگیری^{۳*}

۱- دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی، دانشگاه مراغه

۳- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند

پیام نگار: h_jafarizadeh@sut.ac.ir

چکیده

روش سنتز سبز جهت تولید نانوذرات با استفاده از عصاره های گیاهی، روشی کارآمد، سریع و کم هزینه می باشد. جهت سنتز نانوذرات نقره از عصاره آبی گیاه آلوورا، با توجه به توانایی احیاکنندگی و پایدارکنندگی مناسب که توسط آنالیز FTIR وجود مواد مختلفی همچون فلاوونوئیدها و اسیداستیک در آن تأیید شد، و حرارت دهی تشعشعی مایکروویو در توان های مختلف ۴۸۰، ۶۴۰ و ۸۰۰ وات استفاده شد. پس از انجام آنالیز UV-Vis و DLS بروی نمونه نانوذرات نقره سنتز شده نتایج نشان داد که غلظت های ۳۸،۵۸، ۶۱،۵۲ و ۹۱،۳۵ ppm و همچنین میانگین اندازه ذرات ۹۴، ۷۴ و ۶۱ نانومتر برای نانو ذرات نقره سنتز شده در توانهای مختلف بدست آمد. با شبیه سازی شرایط عملیاتی سنتز نانوذرات نقره با نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در توان های مختلف (۸۰۰-۴۸۰ وات)، به منظور بهینه سازی زمان، انرژی و دمای اعمال شده جهت سنتز نانوذرات نقره با خواص مطلوب، میانگین دمای ۳۳۷K، توان مناسب اعمال شده ۸۰۰ وات و زمان فرآیند ۱۷۵ ثانیه بدست آمد.

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۷/۱۳

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۹/۲۳

شماره صفحات: ۸۲ تا ۹۶

کلیدواژه‌ها: حرارت‌دهی

مایکروویو، سنتز سبز، شبیه‌سازی،

شرایط عملیاتی، عصاره آلوورا،

نانوذرات نقره

۱. مقدمه

شیمی‌دان‌ها در پژوهش‌های مختلف، با استفاده از مواد خام موجود در طبیعت و دگرگون ساختن آن‌ها، موادی جدید تولید و سنتز کرده‌اند که به‌سادگی و سریع به چرخه طبیعی مواد باز نمی‌گردند و به‌صورت زباله‌های مضر و آسیرسان، سال‌های زیادی در طبیعت می‌مانند و سلامت آدمی و محیط‌زیست را به خطر می‌اندازند. اما با جایگزینی فرایندها و روند تولید متفاوتی که شیمی‌دان‌های شیمی سبز در پی آن هستند از مواد اولیه سالم‌تر، ارزان‌تر و همچنین

سازگارتر با محیط‌زیست، استفاده و با انجام‌دادن واکنش‌ها در شرایط ایمن‌تر، فرآورده‌های سالم‌تری نیز تولید می‌کنند [۱]. برخی از آن‌ها می‌کوشند تا شیمی را به زیست‌شیمی نزدیک کنند؛ چرا که واکنش‌های زیست‌شیمیایی طی میلیون‌ها سال رخ داده‌اند و چه برای آدمی و چه برای محیط‌زیست، چالش‌های نگران‌کننده‌ای به وجود نیاورده‌اند [۲]. شیمی سبز و علم نانو می‌توانند برای تحقق این هدف که مواد سالم‌تر و ایمن‌تر در اختیار عموم قرار داده شود گام‌های بلندی بردارند [۳]. در تعریفی از نانو: به ذراتی به ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر اطلاق می‌شود [۴]. یکی از شاخه‌های فرعی و مهم

* تبریز، شهر جدید سهند، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی شیمی

مختلف ریزاندام‌ها شامل مخمرها، قارچ‌ها، باکتری‌ها و دیگر ریزاندام‌ها استفاده می‌شود که این روش‌ها را روش سنتز سبز نیز می‌گویند [۹].

با توجه به این که روش سنتز زیستی بازده بالایی دارد و کم‌هزینه، سریع و کارآمد است و در پایان منجر به شکل‌گیری نانوذراتی پایدار می‌شود، اخیراً پژوهشگران متعددی در تلاش برای توسعه این روش‌های سازگار با محیط‌زیست برای سنتز نانوذرات فلزی هستند، که در میان مواد اولیه مختلف مورد استفاده، عصاره گیاهان یا میوه‌ها نقش پررنگ‌تر و تولیدات با بازدهی بالاتری دارند [۱۰ و ۱۱]. در استفاده از ریزاندام‌ها و عصاره گیاهان، سازوکار سنتز نانوذرات مشابه است و در هر دو ماده اولیه، از اختلاط دو ماده: ۱- نمک فلزی متشکل از یون فلزی و ۲- از یک عامل کاهنده که منبع آن مواد موجود در عصاره گیاهان و ریزاندام‌ها است استفاده می‌شود [۱۲].

یکی از گیاهان پخصیت و مناسب که گونه‌های متعددی نیز دارد، آلوورا است. ترکیباتی که در این گیاه یافت شده از پلی ساکاریدها هستند. این ترکیب همچنین دارای ویژگی ضد باکتریایی و ضد قارچی است. ترکیبات موجود در پوست سبز آلوورا دارای فلاونوئیدها، پلی فنول‌ها، اسیدآسکوربیک، اسیدسیتریک، اسیداستیک و سایر مواد کاهنده است که ترکیباتی احیاکننده دارند و پژوهشگران مختلفی از این گیاه در سنتز سبز نانوذرات متنوعی از جمله نانوذرات نقره گزارش‌هایی ارائه داده‌اند [۱۳ و ۱۴]. برای سنتز نانوذرات مختلف و به‌ویژه نانوذرات فلزی مانند نقره، طلا، عوامل و متغیرهای مختلفی از قبیل شرایط عملیاتی (دما، فشار و زمان)، pH، غلظت نمک مورد استفاده و عصاره و دیگر عوامل، در غلظت و اندازه نانوذرات سنتز شده تأثیرگذار است که در این بین، دما و روش اعمال حرارت مهم‌ترین عامل در سنتز نانوذرات فلزی است که روش‌های متنوعی برای اعمال حرارت هم‌چون استفاده از گرم‌کن، اتوکلاو، مایکروویو و دستگاه‌های دیگر در سنتز نانوذرات نقره گزارش شده است [۱۵]. اخیراً حرارت‌دهی با روش مایکروویو برای تهیه نانوذراتی با اندازه ریزتر و پایدارتر گزارش شده است؛ در روش حرارت‌دهی با استفاده از امواج الکترومغناطیسی مایکروویو، زمان واکنش به حداقل زمان ممکن می‌رسد و موجب افزایش تولید و

نانوفناوری، نانوزیست فناوری است که نقشی مهم و کاربردی در حوزه مواد دارویی و غذایی ایفا می‌کند. نانوزیست فناوری رویکردی چندرشته‌ای دارد که نشأت گرفته از کاربرد نانوذرات در سامانه‌های زیستی است. علاوه بر این، نانوزیست فناوری یک رویه غیر سمی و سازگار با محیط زیست برای کاهش فلزات است که به‌وسیله مسیرهای متابولیک به‌طور خاص عمل می‌کند [۵].

بیشتر عناصر از جمله نانوذرات نقره، نانوذرات طلا، نانوذرات آهن و سایر فلزات جامد، می‌توانند در ابعاد نانو تولید شوند که در میان این فلزات، نانوذرات نقره در مقایسه با سایر نانوذرات فلزی دارای کاربردهای متنوع بیشتری است. نانوذرات نقره به‌طور گسترده‌ای برای سالیان طولانی به‌عنوان یک ماده مفید برای خواص ضد میکروبی آن استفاده شده است. دارورسانی^۱، از عمده کاربردهای متنوع نانوذرات نقره می‌توان به بسته‌بندی‌های غذایی، زیست‌سنسورها و دارورسانی اشاره کرد. در حال حاضر خاصیت ضد باکتریایی نانوذرات نقره بسیار مهم و مورد توجه است [۶]. روش‌های مختلفی برای سنتز نانوذرات نقره وجود دارد که به دسته‌های (بالا به پایین و پایین به بالا) تقسیم‌بندی شده و با از دیدگاهی دیگر شامل روش‌های مختلف شیمیایی، فیزیکی و زیستی است، هرچند زیر مجموعه‌های متنوع روش‌های فیزیکی و شیمیایی در سنتز نانوذرات کاربردی‌تر و شناخته‌شده‌تر هستند؛ اما در روش‌های فیزیکی به‌دلیل نیازمندی به انرژی مصرفی بالا و همچنین حجم بزرگی از تجهیزات و در روش‌های شیمیایی سنتز نانوذرات، به‌دلیل استفاده از مواد شیمیایی سمی که کاربردهای نانوذرات را در زمینه‌های دارویی و غذایی محدود می‌سازد، یافتن روش‌های نیازمند انرژی مصرفی پایین‌تر و غیرسمی برای سنتز نانوذرات برای مصرف این محصولات در بخش‌های دارویی و غذایی بسیار حائز اهمیت است [۷]. به‌کارگرفتن روش سنتز زیستی یا سنتز سبز، یکی از راه‌های مفید جایگزین برای سنتز نانوذرات فلزی است که در این روش عوامل مختلف درگیر در واکنش سنتز که شامل مواد کاهنده و پایدارکننده هستند، غیر سمی و سازگار با محیط زیست‌اند از منابع زیست‌شناختی مختلفی مانند استفاده از ریزاندام‌ها و گیاهان هستند [۸]. در این روش از بخش‌های مختلف گیاهان شامل برگ، ساقه، پوسته، ریشه و سایر بخش‌های آن و همچنین از دسته‌های

1. Drug Delivery

۲. مواد و روش‌ها (بخش تجربی و آزمایشگاهی)

۱-۲ مواد

در این پژوهش گیاه آلوورا از بازارهای محلی تبریز خریداری شد. از نمک نیترات نقره ($AgNO_3$) شرکت مرک با خلوص ۹۹٪ به عنوان نمک پایه برای سنتز نانوذرات نقره استفاده شد. آب دو بار تقطیر نیز به عنوان ماده اصلی در استخراج عصاره و همچنین آماده‌سازی نمک نیترات نقره به کار رفت.

۲-۲ روش‌ها

۲-۲-۱ آماده‌سازی عصاره آبی برگ گیاه آلوورا

برای تهیه عصاره آبی به عنوان ماده پیش‌ساز و عامل اصلی احیاکننده در سنتز نانوذرات نقره، پس از جداسازی ژل و برگ گیاه آلوورا از یکدیگر، برگ سبز آلوورا برای افزایش سطح و همچنین استخراج با بازده بالاتر مواد احیاکننده موجود در آن، به قطعات کوچک، بریده و پس از خشک شدن در طی دوره زمانی ۱۰ روزه، آسیاب شد. ۵ گرم از آن به ۱۰۰ میلی‌لیتر آب در حال جوش اضافه شد و پس از ۵ دقیقه در شرایط جوش آب دوبار تقطیر، عصاره‌گیری، انجام و پس از پالودن در یخچال و تحت شرایط دمایی ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد.

۲-۲-۲ آماده‌سازی نمک نیترات نقره

از نمک نیترات نقره همان طور که در پژوهش‌های دیگر احمدی و همکاران گزارش شده است [۱۴]، با غلظت ۱ میلی‌مولار به صورت افزودن ۰/۰۱۷ گرم از این نمک به ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به عنوان نمک پایه برای سنتز نانوذرات نقره استفاده شد.

۲-۲-۳ سنتز نانوذرات نقره با استفاده از حرارت‌دهی مایکروویو

برای سنتز سبز نانوذرات نقره به دو ماده اصلی (نمک فلزی و عصاره گیاهی) نیاز است، مقدار ۵ میلی‌لیتر از عصاره استخراج‌شده آلوورا با مقدار ۲۵ میلی‌لیتر از نمک ۱ میلی‌مولار نیترات نقره مخلوط شد، سپس برای اعمال فرایند حرارت‌دهی و سنتز نانوذرات نقره، به مایکروویو خانگی LG با مدل MG-2312 با توان‌های متغیر (۴۸۰ تا ۸۰۰ وات) در زمان‌های متغیر ۱ تا ۵ دقیقه، برای سنتز نانوذرات نقره انتقال داده شد. این روش در مقایسه با روش‌های

بازده نیز می‌شود که دلیل اصلی آن در سنتز نانوذرات، حرارت‌دهی با سرعت بالا و همچنین اعمال حرارت یکنواخت است و روشی آسان برای سنتز انواع فلزات مانند طلا، نقره، پلاتین و پالادیم است و منجر به تولید انواع شکل‌های مختلف نانوذرات سنتز شده خواهد شد [۱۶ و ۱۷]. با رشد یکنواخت هسته، طی حرارت‌دهی مایکروویو، نانوذرات با اندازه یکنواخت حاصل می‌شوند. در سنتز معمولی با حرارت دهی همرفتی، به دلیل نیاز به حرارت بالا برای آغاز جوانه‌زنی، افزودن پیش‌ماده به محیط واکنش و انتقال حرارت طی فرایند همرفت، از منبع حرارتی خارجی به حلال و سپس به واکنش‌دهنده‌ها باید کنترل شود. این مسیر انتقال حرارت معمولاً منجر به ایجاد شیب حرارتی در بالک و انجام واکنش‌ها به صورت غیریک‌نواخت و ناکارآمد می‌شود [۱۸]. دمای اعمال شده به وسیله مایکروویو از اهمیت بالایی برخوردار است که با شبیه‌سازی آن در حالت‌های مختلف، به پیش‌بینی هرچه بهتر این عامل مهم در سنتز نانوذرات نقره می‌انجامد. شبیه‌سازی و مدل‌سازی، یکی از روش‌های کاربردی، جدید و نوپاست که علاوه بر برآورد کردن نیازها و اهداف علمی، برای انجام امور روزمره انسان باهدف افزایش بازده، به دفعات به کار می‌رود. مدل‌سازی یک مدل و شبیه‌سازی یک فرایند نمایشی ساده از یک سامانه پیچیده است [۱۹]. مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌تواند رفتار، حرکات و واکنش‌های یک سامانه را در اختیار گرفته، به پیش‌بینی گام‌های بعدی سامانه بپردازند. کنترل این حرکات و رفتارها، به صورت طبیعی، امکان‌پذیر نیست و یا در صورت امکان، متحمل صرف هزینه و وقت زیاد است. علاوه بر موارد بیان شده، در علوم مهندسی اغلب با مواردی برخورد می‌شود که طراح سامانه، مایل به جایگزین کردن سامانه جدید به جای سامانه حاضر است تا در نهایت بهترین و بهینه‌ترین انتخاب را داشته باشد که این کار تقریباً غیرقابل اجراست؛ اما با مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌توان با هزینه کم این بررسی‌ها را انجام داد و به بهترین انتخاب رسید [۲۰]. در تحقیق حاضر، شرایط عملیاتی دمایی سنتز نانوذرات نقره با کمک فن حرارت‌دهی مایکروویو به منظور به دست آوردن زمان و دمای بهینه در فرایند سنتز شبیه‌سازی شد. برای حصول اطمینان از درستی سنتز نانوذرات نقره، خواص آن از جمله میانگین اندازه ذرات، پراکندگی، پتانسیل زتا بررسی و ارزیابی شد.

امواج مایکروویو دربرای سنتز نانوذرات نقره و تأثیر توان‌های اعمال‌شده مختلف بر خواص نهایی نانوذرات سنتز شده از نرم‌افزار شبیه‌سازی، که شامل معادلات دیفرانسیل (پارامتری یا جزئی) سامانه‌های غیرخطی است که با مشتق‌های جزئی به روش المان محدود در فضاهای مختلف یک یا چند بعدی (دو و سه‌بعدی) روابط موجود را حل می‌کند، استفاده شد.

مدل‌سازی و شبیه‌سازی با نرم‌افزار موجود شامل پنج مرحله اصلی به صورت زیر است:

- ۱- تئوری و بیان مسئله،
- ۲- فیزیک و هندسه مسئله،
- ۳- معادلات حاکم و روش حل پدیده مورد نظر،
- ۴- شرایط مختلف (مرزی و اولیه)،
- ۵- حل مسئله، شبیه‌سازی فرایند و تفسیر نتایج.

۴-۱ تئوری و بیان مسئله

این پژوهش دو هدف اصلی را دنبال می‌کند: ۱- یافتن دمای اعمال‌شده با روش حرارت دهی مایکروویو ۲- تأثیر توان‌های مختلف اعمال‌شده در زمان‌های مختلف که برای یافتن این شرایط در شبیه‌سازی برای حل مسئله از معادلات انتقال حرارت به‌صورت ناپایا با تلفیق انتقال حرارت هدایت و انتقال حرارت الکترومغناطیس استفاده شد.

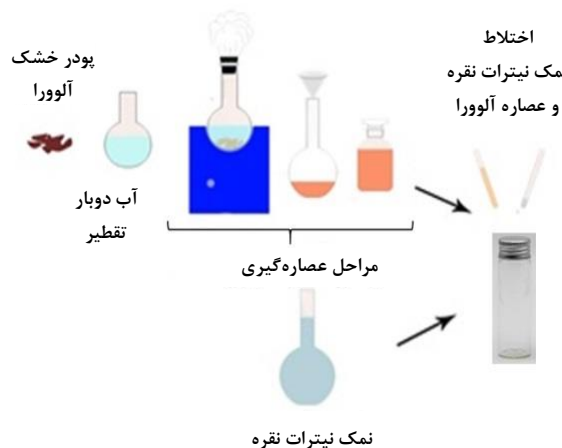
۴-۲ فیزیک و هندسه مسئله

تحقیق حاضر شامل دو بخش، سامانه مورد مطالعه و محیط است، محیط را محفظه داخلی مایکروویو و سامانه مورد مطالعه (شکل هندسی مسئله) یک ظرف (لوله مک کارتی) در نظر گرفته شد؛ که مشخصات و ابعاد آن‌ها در جدول (۱) گزارش شده است.

جدول ۱. ابعاد و اندازه‌های مایکروویو و لوله مک کارتی.

ابعاد (متر)	مایکروویو	ظرف
طول	۰/۳	-
عرض	۰/۳	-
ارتفاع	۰/۲	۰/۰۷
شعاع	-	۰/۰۲۷

متداول حرارت‌دهی، روشی سریع، با بازدهی بالا و همچنین بدون هیچ‌گونه آسیب به مواد احیاکننده موجود در عصاره برگ آلوورا است. طرحواره کلی فرایند سنتز نانوذرات نقره، از مرحله عصاره‌گیری تا اختلاط دو ماده پیش‌ساز در سنتز نانوذرات نقره در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. طرحواره کلی روند سنتز سبز نانوذرات نقره.

۳. تجزیه‌ها و بررسی خواص

تجزیه طیف‌سنجی (FTIR^۱) با دستگاه Bruker مدل 27 tensor با استفاده از ماده بی‌اثر KBr در محدوده عدد موجی 400 cm^{-1} تا 4000 برای تعیین گروه‌های عاملی و پیوندهای موجود در عصاره آلوورا به‌کاربرده شد.

برای شناسایی و اطمینان از شکل‌گیری و سنتز نانوذرات نقره میزان جذب آن در محدوده طول‌موج 400 تا 450 نانومتر باید دارای بیشینه جذب باشد که به کمک تجزیه UV-Vis^۲ با دستگاه Jenway مدل ۶۷۰۵ انجام شد. برای تعیین میانگین اندازه ذرات، شاخص پراکندگی ذرات (PDI^۳) و همچنین مقدار ظرفیت زتای نانوذرات نقره سنتز شده، تجزیه پراکندگی نور دینامیکی^۴ (DLS) که روشی فیزیکی، و غیر مخرب است با دستگاه Nanotracc Wave انجام شد.

۴. شبیه‌سازی

در پژوهش حاضر برای به‌دست‌آوردن دمای فرایند حرارت‌دهی با

1. Fourier Transform Infrared
2. Ultra Violet Visible
3. Polydispersity Index
4. Dynamic Light Scattering

۳-۴ معادلات حاکم و روش حل پدیده مورد نظر

چنان که در بخش تئوری مسئله بیان شد، هدف اصلی مشخص کردن دمای اعمال شده در توان‌های مختلف و زمان‌های مختلف سنتر نانوذرات نقره است، پس برای حل مدل‌سازی و به دست آوردن گرادین دمای انتقال حرارت، با توجه به حالت فیزیکی ظرف شامل (عصاره و نمک نیترات نقره) که استوانه‌ای شکل است، سامانه مختصات مدل‌سازی استوانه‌ای در نظر گرفته شد. سازوکارهای انتقال حرارت ممکن در این پژوهش برای سنتر نانوذرات نقره شامل دو بخش تابش به صورت امواج الکترومغناطیس از مایکروویو به سطح ظرف محتوی مواد و همچنین با سازوکار هدایت از راه سطح ظرف، به مواد موجود در آن است؛ معادلات حاکم بر انتقال حرارت در این بخش بیان شده است.

در معادله (۱) حالت کلی انتقال حرارت متغیر با زمان (ناپایا) نشان داده شده است.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q_e \quad (1)$$

که در این معادله، ρ چگالی (برحسب کیلوگرم بر مترمکعب) C_p ظرفیت گرمایی ویژه (برحسب ژول بر کیلوگرم درجه کلوین)، k ضریب هدایت (برحسب وات بر متر کلوین) و Q_e مجموع دو انرژی Q_{th} و Q_{ml} بوده و واحد آن (وات بر مترمکعب) (معادله (۲)). مؤلفه انرژی از دست رفته در اثر مقاومت و Q_{ml} انرژی تابشی از دست رفته است که خود در جسم به گرما تبدیل می‌شود.

$$q = -k \cdot \nabla T$$

$$Q_e = Q_{th} + Q_{ml} \quad (2)$$

با بیان گسترده گرادین دمای بخش هدایت، معادله کلی انتقال حرارت به معادله (۳) تبدیل خواهد شد.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(kr \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_e \quad (3)$$

برای حل معادله و شبیه‌سازی فرایند، فرضیات ساده‌کننده‌ای به صورت زیر در معادله کلی انتقال حرارت ناپایا انجام شد:

۱- انتقال حرارت رسانشی در جهت ارتفاع (z) بیشترین مقدار را داشت و از بعدهای دیگر یعنی شعاع (r) و بعد زاویه‌ای (ϕ) که کمترین تغییر دما در آن‌ها رخ خواهد داد و با توجه به فیزیک مسئله، دارای ابعاد قابل توجه و زیادی نیستند، می‌توان صرف‌نظر کرد.

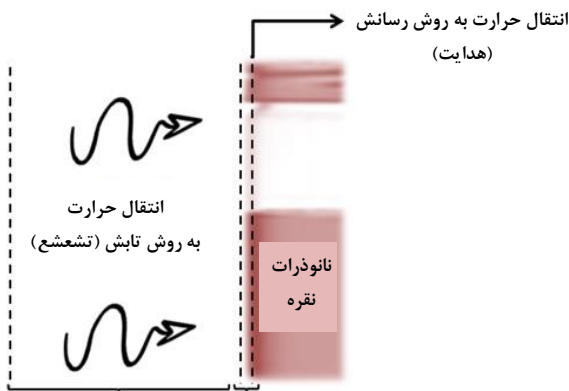
۲- ضریب انتقال حرارت هدایت مستقل از بعدهای مختصاتی است و مقدار ثابتی دارد.

۳- تأثیر انتقال حرارت جابه‌جایی ناچیز است.

پس از اعمال فرض‌های ساده‌کننده در معادله اصلی انتقال حرارت، معادله نهایی برای شبیه‌سازی به صورت زیر (معادله (۴)) ساده شد:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_e \quad (4)$$

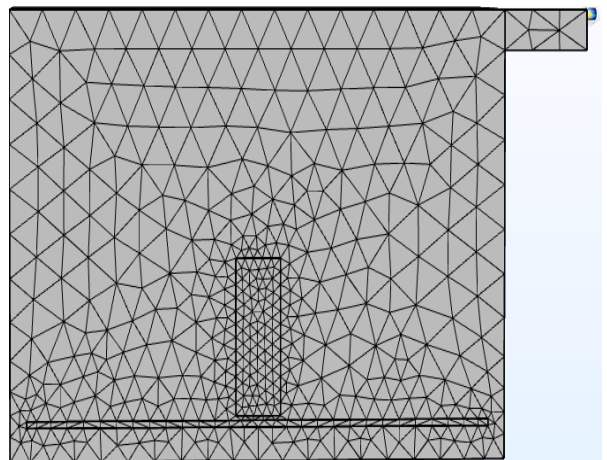
برای شبیه‌سازی فرایند، ابتدا باید حرارت تولیدشده با مایکروویو و همچنین دمای متناسب با این حرارت ایجادشده به سطح خارجی ظرف محتوی نانوذرات تولیدشده که با سازوکار تابش است به دست آید، سپس با سازوکار انتقال حرارت هدایت و با استفاده از مقاومت سطح خارجی ظرف، برای پیدا کردن دمای فرایند اقدام شود. به این ترتیب، طبق قوانین انتقال حرارت، بر اساس مقاومت‌های مختلف افت دما در دو مرحله ایجادشده و مطابق با شکل (۲)، مقاومت‌های ممکن، مربوط به سازوکار انتقال حرارت تابشی و هدایت هستند، توضیح این‌که سازوکار همرفت در مقایسه با تابش ناچیز است و به همین دلیل مقاومت ایجادشده در اثر این سازوکار نیز، مقدار قابل صرف‌نظری است.



شکل ۲. روش‌های انتقال حرارت و مقاومت‌های موجود.

۴-۴ گره‌بندی، روش حل، شرایط مرزی و اولیه

برای حل عددی معادلات گفته‌شده و شبیه‌سازی فرایند گفته‌شده، از روش حل المان محدود^۱ (FEM) استفاده شد؛ از این رو کل سامانه به بخش‌ها و گره‌های کوچک (که هر کدام از این بخش‌ها و گره‌ها (المان‌ها) یک معادله به حساب می‌آیند) مطابق شکل (۳) تقسیم‌بندی و برای این شبیه‌سازی حالت مثلثی برای گره‌بندی‌ها انتخاب شد.



شکل ۳. گره‌بندی کل سامانه مورد مطالعه.

برای حل معادلات حاکم بر مدل بیان شده به منظور به دست آوردن میانگین دمای ظرف در معرض تابش میکروویو نیاز به شرایط مرزی و اولیه مناسب و همچنین خواص مختلف فیزیکی مواد موجود در مسئله است. بدین منظور خواص مختلف ظرف شیشه‌ای شامل چگالی آن (ρ)، 2230 kg/m^3 ظرفیت گرمایی ویژه (C_p) $702 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$ ضریب انتقال حرارت هدایتی (k) هم‌مقدار $2/54 \text{ W/m K}$ با استفاده از مراجع انتخاب شدند. میزان میانگین دما پس از ۵ دقیقه و توان ۸۰۰ وات با فرکانس ۲/۴۵ مگاهرتز دستگاه میکروویو، $361/6 \text{ K}$ ($88/45^\circ\text{C}$) است. همچنین با توجه به نیازمندی به دمای اولیه فرایند به عنوان شرایط مرزی و اولیه برای حل عددی معادلات انتقال حرارت، تمام سطوح شامل: محفظه داخلی میکروویو، سطوح خارجی ظرف محتوی نانوذرات نقره و همچنین محلول کلوئیدی نانوذرات نقره، دمای محیط (دمای 20°C) در نظر گرفته شد.

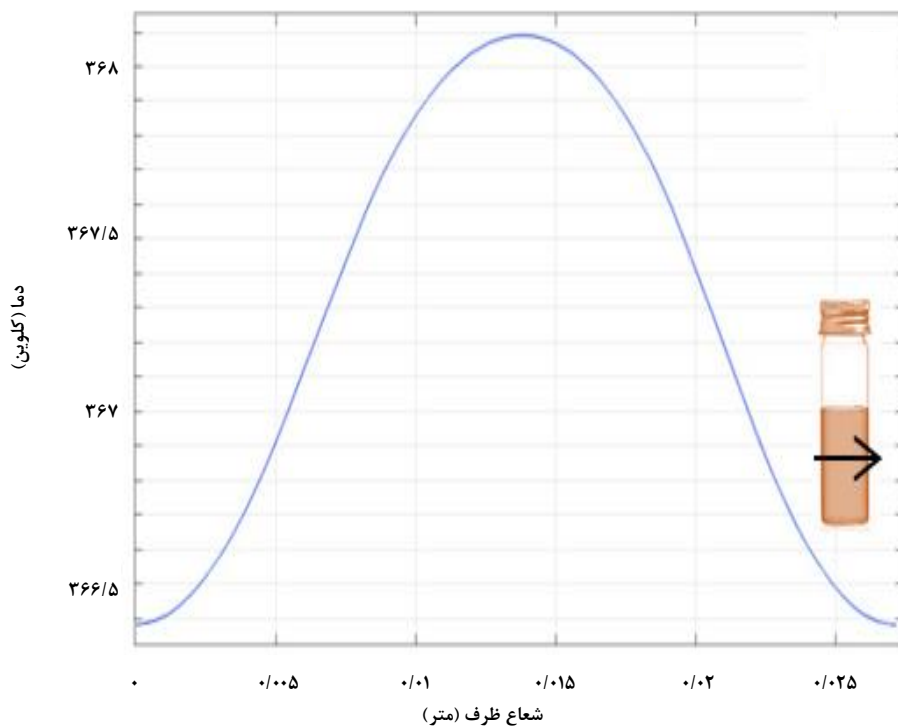
۵. حل مسئله و تفسیر نتایج

۵-۱ حل مسئله شبیه‌سازی

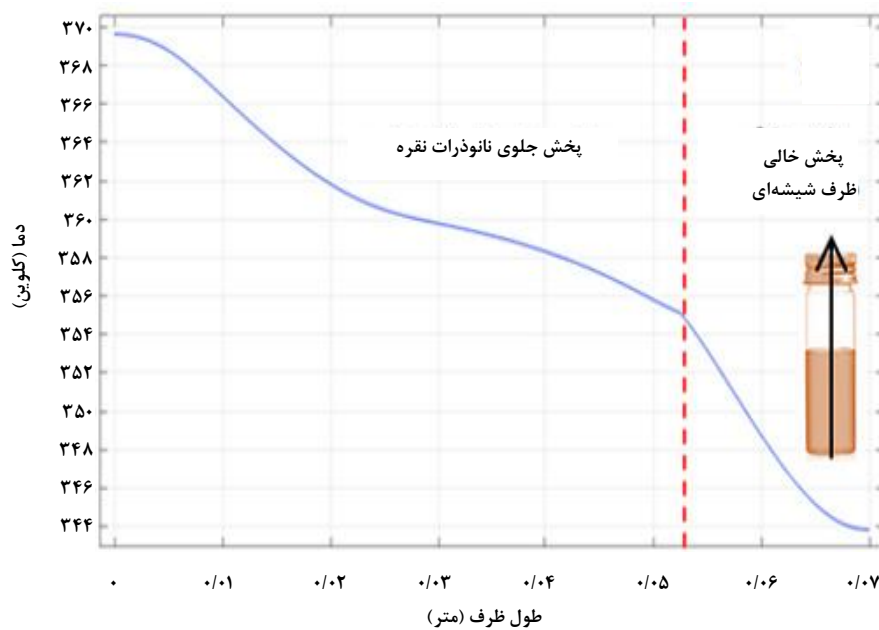
پس از اعمال شرایط مرزی و اولیه برای حل معادلات و شبیه‌سازی فرایند سنتز نانوذرات نقره و همچنین به منظور به دست آوردن میانگین دمای اعمال شده با میکروویو به ظرف محتوی نانوذرات نقره، زمان ۵ دقیقه در توان ۸۰۰ وات و بررسی تغییرات دمایی در جهت‌های مختلف (شعاعی و ارتفاع) نمونه حاوی نانوذرات نقره ارزیابی شد که پس از اجرای نرم‌افزار و حل آن، منحنی‌های تغییرات دما در شکل‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌شود.

در شکل ((۴- الف و ب)) منحنی تغییرات دما در جهت‌های شعاعی (r) و همچنین ارتفاع ظرف (z) نشان داده شده است، که همان‌طور که قابل پیش‌بینی بود تغییرات دما در جهت شعاعی با توجه به قطر اندک ظرف ($0/27$ متر) بسیار نامحسوس و تقریباً $1/5^\circ\text{C}$ بود؛ اما با توجه به فرض اولیه اینکه تغییرات دما بیشتر در جهت ارتفاع رخ خواهد داد، در شکل ((۴- الف)) به درستی این فرضیه اثبات شد. از این رو میانگین دمای به دست آمده در جهت ارتفاع ظرف محتوی نانوذرات باگذشت زمان در شکل ((۴- ب)) رسم شده است که با توجه به این شکل، می‌توان نتیجه گرفت که در زمان ۵ دقیقه اعمال حرارت، تغییرات دمایی حدوداً 15°C در بخش محتوی نانوذرات مشاهده شد و نیز دما به مقدار حداکثری $361/6 \text{ K}$ ($88/45^\circ\text{C}$) رسید، که در مقایسه با سایر روش‌های سنتز نانوذرات مانند استفاده از گرم‌کن، اتوکلاو و دیگر روش‌ها که مدت‌زمان طولانی برای رسیدن به این مقدار دما مورد نیاز است، فرایند سریعی است. همچنین با توجه به دمای به دست آمده کمتر از 100°C ، چون در دماهای بالا، بسیاری از مواد احیاکننده موجود در گیاهان آسیب می‌بینند و توانایی سنتز نانوذرات را از دست خواهند داد، نگرانی این‌که به مواد مؤثر و عوامل کاهنده موجود در عصاره برگ آلوورا آسیب برسد و خواص خود را از دست بدهد، وجود ندارد. برای مشاهده دقیق‌تر و برای درک بهتر و ملموس‌تر بررسی تغییرات دمای ظرف محتوی نانوذرات نقره و میانگین تغییرات دما به صورت منحنی و همچنین به صورت گرافیکی در شکل ((۵- الف و ب)) گزارش شده است.

1. Finite Element Method

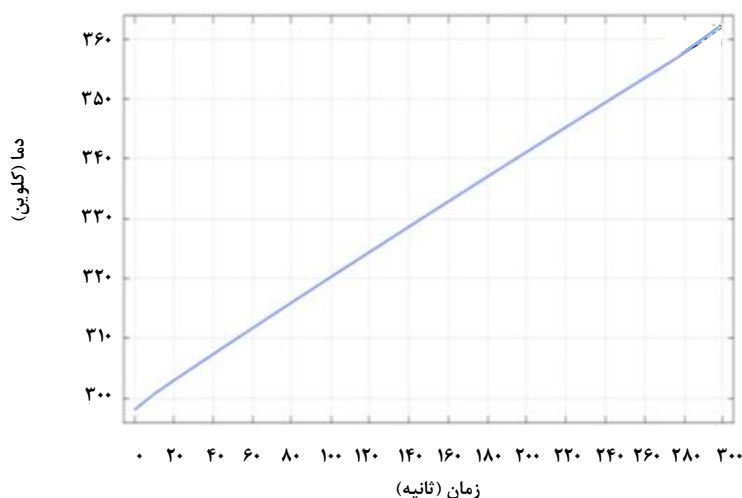


(الف)

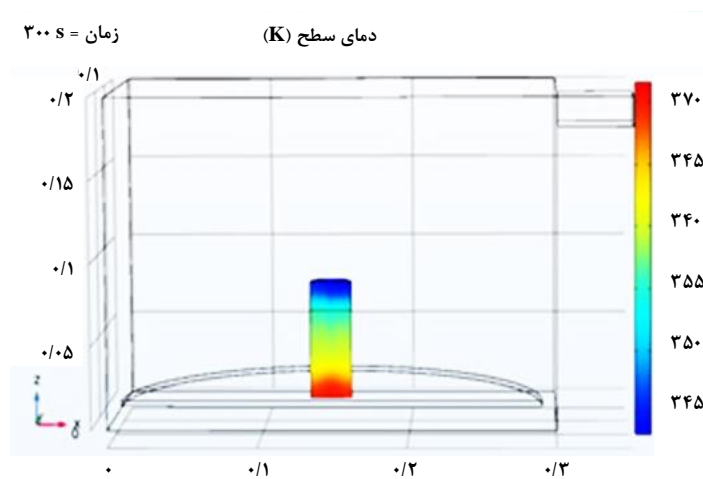


(ب)

شکل ۴. منحنی تغییرات دما در (الف) جهت شعاعی (r) و (ب) جهت ارتفاع (z) ظرف حاوی نانوذرات نقره.



(الف)



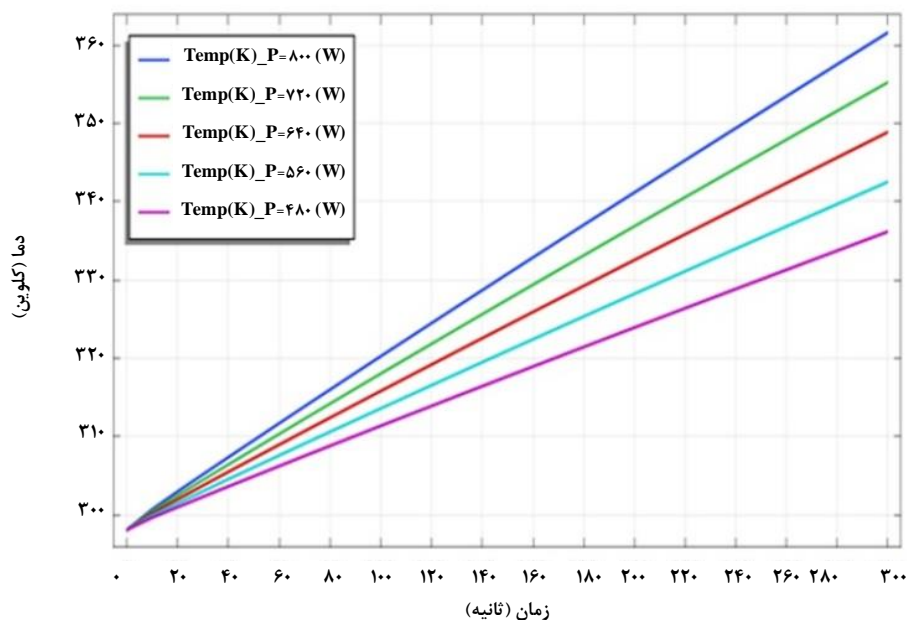
(ب)

شکل ۵. (الف) منحنی میانگین تغییرات دما و (ب) شماییک گرافیکی آن پس از زمان ۵ دقیقه.

رسیدن به این دما امکان‌پذیر نیست، با مقایسه توان ۸۰۰ وات با سایر توان‌های اعمال شده، می‌توان نتیجه گرفت که در مدت زمان کوتاه‌تری شرایط سنتز نانوذرات فراهم شده و می‌توان در وقت نیز صرفه‌جویی کرد؛ چرا که برتری اصلی روش سنتز زیستی و روش حرارت‌دهی با میکروویو، سریع‌تر بودن زمان سنتز نانوذرات است. به‌طور مثال در توان اعمال شده ۴۸۰ وات، پس از ۵ دقیقه، دمای فرایند نهایتاً به دمای تقریباً 337 K ($63\text{ }^{\circ}\text{C}$) خواهد رسید، در حالی که در توان ۸۰۰ وات، رسیدن به این دما، در $2/55$ دقیقه اتفاق خواهد افتاد. پس به دلیل صرفه‌جویی در زمان، سنتز نانوذرات نقره، توان ۸۰۰ وات به‌عنوان فرایند بهینه در نظر گرفته شد.

در ادامه شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته، با توجه به توان قابل تغییر دستگاه میکروویو و اهمیت بالای آن در اعمال حرارت نهایی و دمای وارد شده به مواد، برای بررسی تغییرات دما در فاصله زمانی ۵ دقیقه در توان‌های مختلف ۴۸۰، ۵۶۰، ۶۴۰، ۷۲۰ و ۸۰۰ وات ارزیابی شد و دماهای به دست آمده نهایی در این زمان در شکل (۸) با یکدیگر مقایسه و نتایج آن گزارش شده است.

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، با مقایسه تغییرات دما (در مدت زمان ثابت ۵ دقیقه) در توان‌های مختلف، حرارت اعمال شده در توان ۸۰۰ وات، به دمایی معادل با $361/6\text{ K}$ ($88/45\text{ }^{\circ}\text{C}$) رسیده، درحالی‌که در توان‌های پایین‌تر،



شکل ۶. تغییرات دما در زمان و توان‌های مختلف.

۶-۱- طیف‌سنجی FTIR عصاره برگ آلوورا

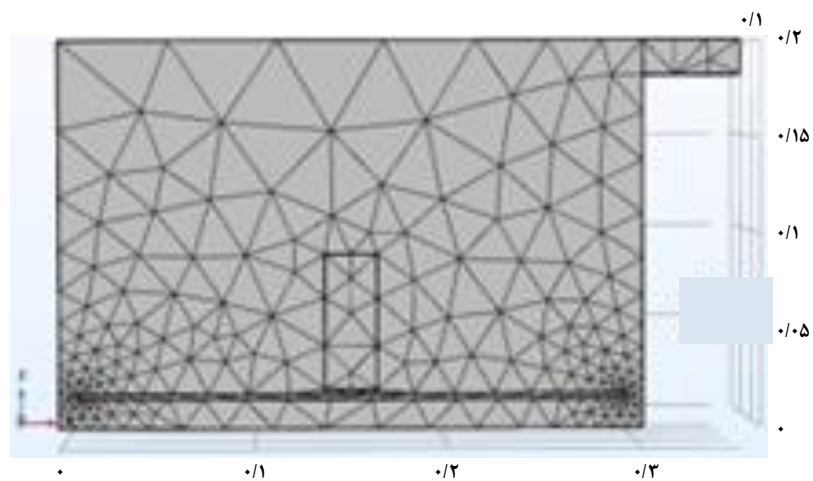
برای پی‌بردن به گروه‌های عاملی احیاکننده موجود در عصاره برگ آلوورای استخراج‌شده از تجزیه طیف عبوری FTIR استفاده شد که نتایج آن در شکل (۸) نشان داده شده است. در عصاره‌های گیاهی هرچقدر پیک‌های شاخص مربوط به مواد احیاکننده بیشتر و دارای شدت بیشتری باشند، توانایی احیای یون‌های فلزی بیشتری هست و در پایان سنتز موفق‌تری انجام خواهد شد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، سه پیک شاخص و اصلی با عددهای موجی ۳۴۵۴، ۱۶۴۱ و 554 cm^{-1} در عصاره برگ آلوورا هست که به ترتیب مربوط به پیوندهای $\text{C}=\text{C}$ ، $\text{C}=\text{O}$ و $\text{C}-\text{O}$ است که این پیوندها در گروه‌های عاملی آب (چون درصد زیادی از ساختار عصاره شامل آب است)، گروه بنزنی مربوط به مواد فلاوونوئیدی و گروه اسیدی است که به صورت حلقه‌های $\text{C}-\text{C}$ و همچنین گروه‌های $\text{C}-\text{O}$ هستند، به این ترتیب در ساختار عصاره برگ آلوورای استخراج‌شده، مواد احیاکننده با درصد بالایی مربوط به موادی مانند اسید استیک، اسید آسکوربیک و فلاوونوئیدهای موجود در آن است.

۵-۲- بررسی استقلال حل از تعداد شبکه و حجم کنترل‌ها

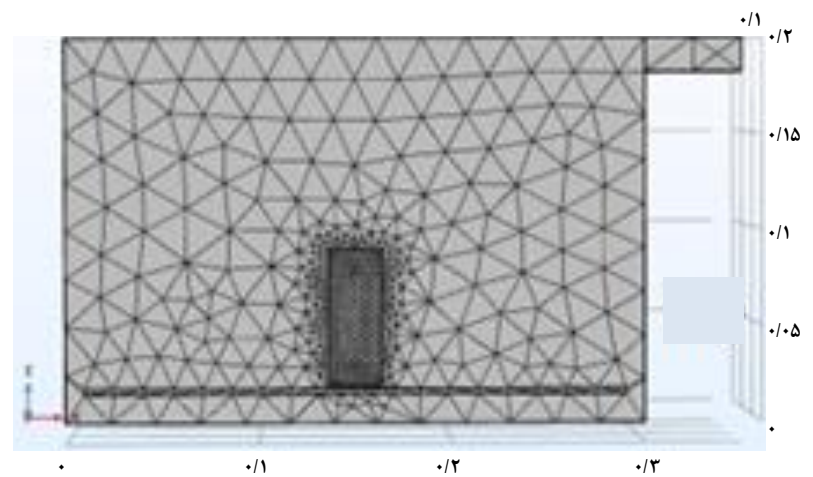
با توجه به وابستگی زیاد دقت حل در نرم‌افزار به تعداد گره‌ها و معادله‌های تعیین‌شده، به طوری که هرچقدر تعداد حجم کنترل‌ها (گره‌ها) بیشتر باشد، پاسخ دقیق‌تر خواهد بود؛ اما این افزایش حجم کنترل‌ها افزایش زمان حل را نیز به دنبال دارد؛ از این رو برای بررسی استقلال حل از تعداد گره‌ها، دو شبکه‌بندی دیگر با اندازه‌های متفاوت و کوچک‌تر مطابق شکل (۶-الف-ب) تهیه شد و تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین نتایج دیده نشد، بنابراین بزرگ‌ترین شبکه‌بندی، برای صرفه‌جویی در وقت و همچنین انجام شبیه‌سازی باحالت سادگی بیشتر و بهتر انتخاب شد.

۶. بحث و نتایج (تجربی و آزمایشگاهی)

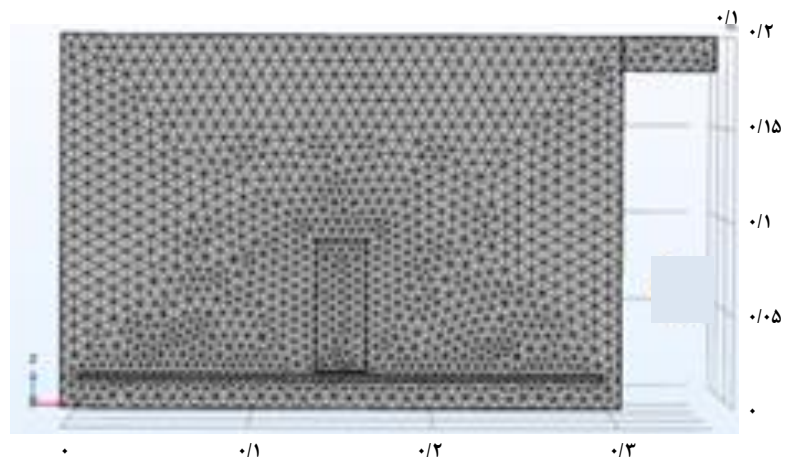
به منظور بررسی و صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی و همچنین مقایسه اثر هم‌زمان زمان و توان اعمال‌شده بر روی سنتز نانوذرات نقره، توان‌ها و زمان‌های مختلف در معرض امواج مایکروویو به صورت توان‌های ۴۸۰، ۶۴۰ و ۸۰۰ وات به ترتیب با زمان‌های ۵ دقیقه (۳۰۰ ثانیه)، ۳/۴۵ ثانیه (۲۲۵ ثانیه) و ۲/۵۵ ثانیه (۱۷۵ ثانیه) برای سنتز نانوذرات نقره در نظر گرفته و در نهایت خواص آن‌ها ارزیابی شد.



(الف)

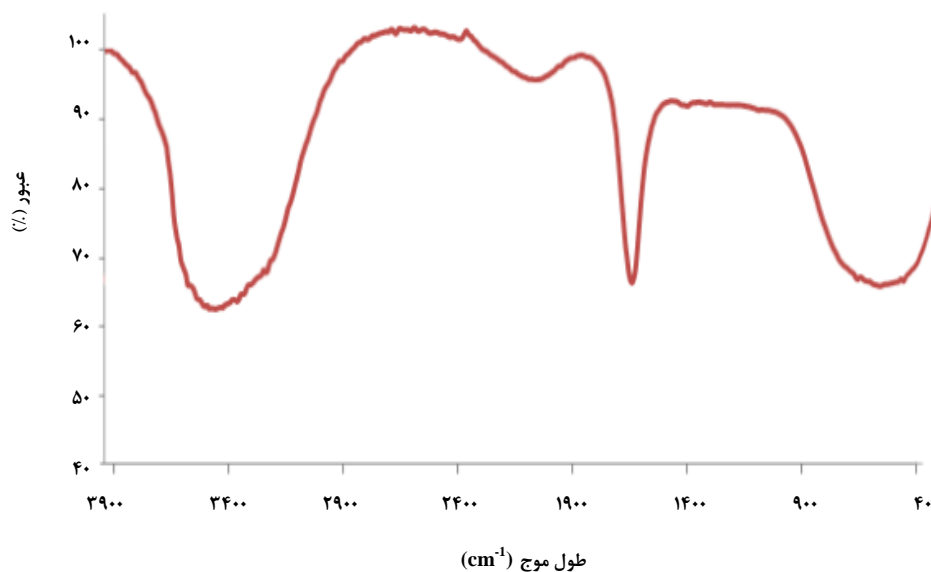


(ب)



(پ)

شکل ۷. گره بندی‌های مختلف برای حل معادلات انتقال حرارت.



شکل ۸. طیف عبوری FTIR عصاره برگ آلوورا.

نور مرئی-فرابنفش در محدوده طول موج ۴۰۰ الی ۴۵۰ نانومتر نور مرئی را جذب می‌کند و دارای بیشینه جذب است، همان‌طور که در شکل (۹-الف-پ) گزارش شده است تمامی مراحل، دارای این شرایط و بیشینه جذب هستند. در شکل مشاهده می‌شود که در هر سه آزمایش نانوذرات نقره سنتز شده‌اند؛ اما با مقایسه میزان جذب آن‌ها که نشانگر غلظت نانوذرات سنتز شده بود و با استفاده از رابطه خطی زیر که در سایر پژوهش‌ها به دست آمده است [۱۴]، میزان جذب به غلظت برحسب ppm به صورت زیر تبدیل می‌شود.

$$C = 32/775 X - 0/7474 \quad (5)$$

که در آن، C غلظت برحسب ppm و X مربوط به میزان جذب در تجزیه UV-Vis است. نتایج نشان می‌دهد که رابطه مستقیمی با توان اعمال شده با غلظت نانوذرات سنتز وجود دارد، به طوری که سنتز نانوذرات با شرایط ۸۰۰ وات، دارای بیشترین میزان جذب و غلظت نانوذرات سنتز شده در این حالت بیشترین مقدار (۹۱/۳۵ ppm) را نسبت به توان ۶۴۰ وات (۶۱/۵۲ ppm) و ۴۸۰ وات (۳۸/۵۸ ppm) داراست.

به نظر می‌رسد که در توان بالای اعمال شده، با توجه به این‌که در مدت زمان کوتاه‌تری به دمای مطلوب سنتز می‌رسد، در نتیجه

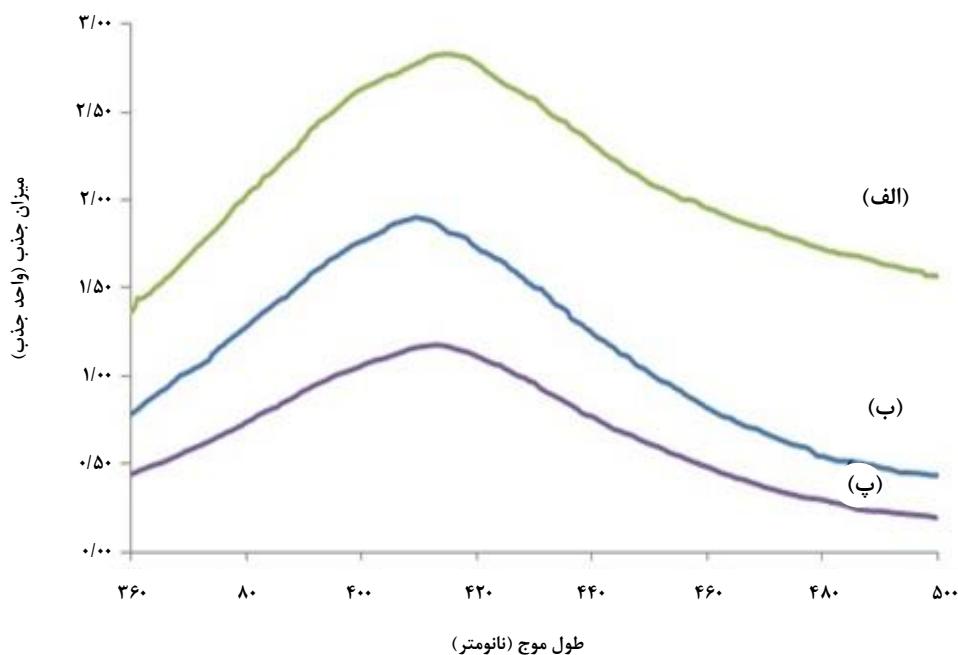
۶-۲ تغییر رنگ و طیف‌سنجی UV-Vis نانوذرات نقره

پس از اختلاط مواد اولیه برای سنتز نانوذرات نقره و انتقال آن‌ها به مایکروویو با هدف فرایند حرارت‌دهی و افزایش سرعت واکنش و تولید نانوذرات نقره، یکی از ابتدایی‌ترین تجزیه‌های ساده که به صورت کیفی انجام خواهد شد، رنگ ایجاد شده مربوط به نانوذرات سنتز شده است، به طوری که با توجه به بی‌رنگ بودن محلول نیترات نقره و تقریباً زردرنگ بودن عصاره آلوورای استخراج شده، تفاوت چشمگیری با نانوذرات نقره که رنگ قهوه‌ای روشن یا خاکستری خواهند داشت دارد. در بسیاری از پژوهش‌های مختلف ابر روی نانوذرات گوناگون فلزی از جمله، نانوذرات سلنیوم سنتز شده به وسیله فردصادق و جعفری‌زاده مالمیری [۱۳]، نانوذرات طلای سنتز شده به وسیله اسکندری و همکاران [۱۰] نیز به اهمیت تغییر رنگ محلول فلزی که به عنوان یکی از ساده‌ترین و ابتدایی‌ترین مشاهدات برای بررسی سنتز صحیح نانوذرات فلزی است، اشاره شده است. برای اطمینان از تشخیص سنتز صحیح نانوذرات نقره و همچنین برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتایج حاصل از سنتز آزمایشگاهی تجزیه UV-Vis برای نمونه‌های انتخاب شده در توان‌های ۸۰۰، ۶۴۰ و ۴۸۰ وات با زمان‌های متغیر (برای یکسان بودن شرایط سنتز) انجام گرفت، همان‌طور که در بخش تجزیه‌ها اشاره شد، برای نانوذرات نقره، تجزیه طیف‌سنجی

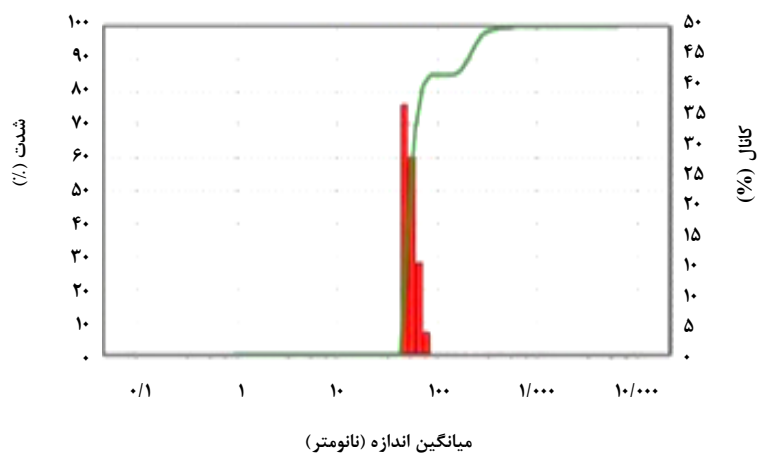
خواص نانوذرات فلزی سنتز شده است استفاده شد. هم‌زمان با این تجزیه، می‌توان به شاخص پراکندگی که معیاری از همگن بودن یا ناهمگن بودن نانوذرات سنتز شده است نیز دست یافت. همچنین از تجزیه پتانسیل زتا که معیاری از پایداری نانوذرات سنتز شده است استفاده شد. نانوذرات سنتز شده با استفاده از توان ۸۰۰ وات، همان طور که قابل پیش‌بینی بود، دارای بهترین نتیجه در میان دو حالت دیگر بود و با متوسط اندازه ذرات مقدار ۶۱ نانومتر، شاخص پراکندگی (PDI) ۰/۴۵۱ و پتانسیل زتای ۱۳/۴ میلی ولت نسبت به توان ۶۴۰ وات با مشخصات میانگین اندازه ذرات ۷۴ نانومتر، شاخص پراکندگی ۰/۴۵۸ و پتانسیل زتای ۱۳/۴ میلی ولت و در نهایت توان ۴۸۰ وات دارای مشخصات، میانگین اندازه ذرات ۹۴ نانومتر، شاخص پراکندگی ۰/۶۲۱ و همچنین پتانسیل زتای ۱۱/۱ میلی ولت برتری نسبی داشت، که توزیع اندازه ذرات نمونه‌های سنتز شده در شکل (۱۰-الف-پ) نشان داده شده است.

نانوذراتی با یک‌نواختی مناسب، تولید و همچنین از واکنش‌های نامطلوب نیز جلوگیری می‌کند؛ اما در توان پایین ۴۸۰ وات، با توجه به این‌که مدت‌زمان بیشتری در معرض حرارت تابشی است، به نظر می‌رسد که سبب تخریب مواد احیاکننده موجود در عصاره می‌شود و در نهایت توان احیاکردن یون‌های فلز نقره را دارا نیست و اگر هم این قدرت در عصاره استخراج شده وجود داشته باشد، با مدت زمان بالایی که در معرض حرارت قرار گرفته، کاهش یافته است، در پژوهش اسکندری و همکاران که سنتز نانوذرات طلا با عصاره قارچ خوراکی انجام شده بود این نتایج به دست آمده و با مدت زمان بیشتر حرارت دهی، قدرت احیاکنندگی عصاره استخراج شده کاهش پیدا کرده بود [۱۷].

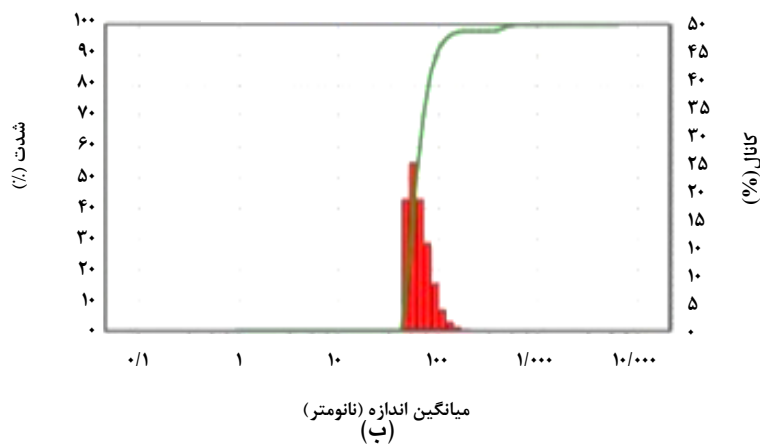
۳-۶ میانگین اندازه نانوذرات، شاخص پراکندگی ذرات و پتانسیل زتا با استفاده از تجزیه DLS
از تجزیه DLS برای میانگین اندازه ذرات که یکی از مهم‌ترین



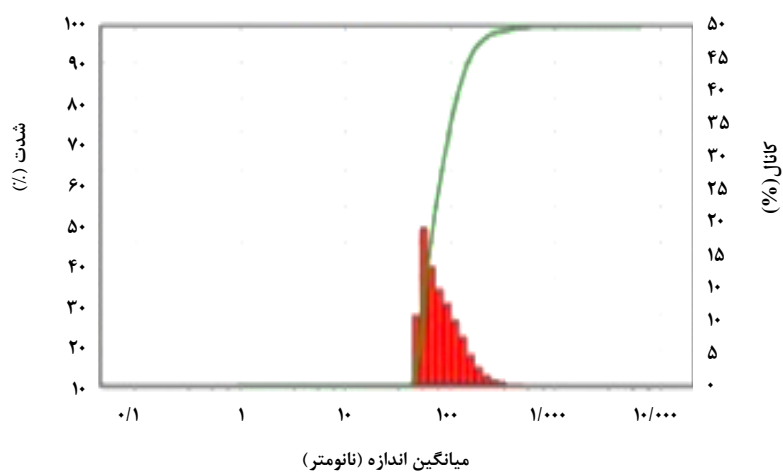
شکل ۹. تجزیه UV-Vis در اعمال حرارت با توان‌های متغیر (الف) ۸۰۰ وات، (ب) ۶۴۰ وات و (پ) ۴۸۰ وات.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۰. منحنی توزیع ذرات در اعمال حرارت با توان‌های متغیر (الف) ۸۰۰ وات، (ب) ۶۴۰ وات و (پ) ۴۸۰ وات.

۷. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با اهداف بررسی و به‌دست آوردن تغییرات دمای فرایند در توان‌های مختلف اعمال‌شده به دستگاه مایکروویو، امکان‌سنجی تولید نانوذرات نقره در شرایط مختلف توان اعمال‌شده و همچنین بررسی اثر افزایش دما (متناسب با افزایش توان) بر خلوص، غلظت و میانگین اندازه ذرات، انجام شد که در آن به بررسی شرایط عملیاتی اعمال حرارت با مایکروویو و سازوکار انتقال حرارت تابشی برای سنتز نانوذرات نقره، مدل‌سازی و شبیه‌سازی پرداخته شد. با انجام شبیه‌سازی و مدل‌سازی از انجام آزمایش‌های اضافه که باعث صرف بیشتر انرژی، وقت و هزینه می‌شوند جلوگیری می‌شود و می‌توان در پیش‌بینی سایر پدیده‌ها و آزمایش‌های دیگر با شرایط مشابه گام مثبتی برداشت. همان‌طور که در این پژوهش با شبیه‌سازی شرایط عملیاتی دمایی، توان مناسب اعمال‌شده به وسیله مایکروویو با زمان مناسب پیش‌بینی شد و با بررسی نتایج آزمایشگاهی و سنتز در شرایط عملی نیز این نتایج، ارزیابی و به تأیید آن‌ها منتهی شد، نتایج این مدل‌سازی، شبیه‌سازی و تجزیه‌های انجام‌گرفته حاکی از آن بود که دمای فرایند سنتز نانوذرات در حرارت‌دهی مایکروویو در بالاترین توان و پایین‌ترین زمان در معرض این حرارت منجر به سنتز و تولید نانوذراتی با غلظت بالاتر و همچنین میانگین اندازه ذرات پایین‌تر می‌شود که برآیند کلی نتایج برای سنتز نانوذرات نقره با حرارت‌دهی مایکروویو با توان بالا در مدت زمان پایین پیشنهاد می‌شود.

۸. تقدیر و تشکر

از دانشگاه صنعتی سهند به‌ویژه از مرکز تحقیقات صنایع غذایی به‌علت پشتیبانی مالی از این تحقیق و به‌دلیل در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی در اجرای این پروژه تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Golabiazar, R., Othman, K. I., Khalid, K. M., Maruf, D. H., Aulla, S. M., Yusif, P. A., "Green Synthesis, Characterization, and Investigation Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles Using Pistacia atlantica Leaf Extract", *Bio Nano Sci.*, 9, pp. 323-333, (2019).

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده شد، تمامی نمونه‌های نانوذرات نقره سنتز شده در محدوده مناسب ۱ الی ۱۰۰ نانومتری است که در بخش مقدمه نیز به آن اشاره شد، اما نانوذرات سنتز شده در حالت اعمال حرارت در توان ۸۰۰ وات دارای نتایج بهتری نسبت به دو حالت دیگر بوده و به نظر می‌رسد که زمان کمتر انجام فرایند و اعمال حرارت، به‌عنوان عاملی اثرگذار است و در سنتز نانوذراتی با میانگین اندازه ذرات پایین، یکنواختی مناسب و پایداری بالا به‌درستی عمل کرده است. به نظر می‌رسد که هر چقدر مواد احیاکننده موجود در عصاره برگ آلوورا مدت زمان بیشتری در معرض حرارت‌دهی الکترومغناطیسی مایکروویو باشند، خواص خود را از دست می‌دهند و در تشکیل و سنتز نانوذراتی با میانگین اندازه ذرات پایین‌تر توانایی کافی را در مقایسه باحالت‌هایی که در توان بالا و زمان پایین انجام می‌شوند، ندارد. در مدت زمان پایین سنتز نانوذرات، احتمال اینکه نانوذرات شکل‌گرفته در کنار هم تجمع یابند و با پدیده‌های نامطلوبی هم‌چون آگلومره شدن، افزایش میانگین اندازه ذرات را در پی داشته باشند، نیز وجود ندارد. چنان که در شکل (۱۰) پیداست، تمامی نمونه‌های نانوذرات نقره سنتز شده در محدوده مناسب ۱ الی ۱۰۰ نانومتری که در بخش مقدمه نیز به آن اشاره شد، هستند؛ اما نانوذرات سنتز شده در حالت اعمال حرارت در توان ۸۰۰ وات دارای نتایج بهتری نسبت به دو حالت دیگر بوده و به نظر می‌رسد که زمان کمتر انجام فرایند و اعمال حرارت، به‌عنوان عاملی اثرگذار است و در سنتز نانوذراتی با میانگین اندازه ذرات پایین، یکنواختی مناسب و پایداری بالا به‌درستی عمل کرده است. به نظر می‌رسد که هر چقدر مواد احیاکننده موجود در عصاره برگ آلوورا مدت زمان بیشتری در معرض حرارت‌دهی الکترومغناطیسی مایکروویو باشند، خواص خود را از دست می‌دهند و در تشکیل و سنتز نانوذراتی با میانگین اندازه ذرات پایین‌تر توانایی کافی را در مقایسه باحالت‌هایی که در توان پایین انجام می‌شوند ندارند، این نتایج در پژوهش احمدی و همکاران در بهینه‌سازی شرایط سنتز نانوذرات نقره با عصاره آلوورا مشاهده شد [۱۶].

- [2] Sánchez, G. R., Castilla, C. L., Gómez, N. B., García, A., Marcos, R., Carmona, E. R., "Leaf extract from the endemic plant *Peumus boldus* as an effective bioproduct for the green synthesis of silver nanoparticles", *Mat. Let.*, 183, pp. 255-260, (2016).
- [3] Khan, M. Z. H., Tareq, F. K., Hossen, M. A., Roki, M. N. A. M., "Green synthesis and characterization of silver nanoparticles using *Coriandrum sativum* leaf extract", *J. Eng. Sci. and Tech.*, 13, pp. 158-166, (2018).
- [4] Torabfam, M., Jafarizadeh-Malmiri, H., "Microwave-enhanced silver nanoparticle synthesis using chitosan biopolymer: optimization of the process conditions and evaluation of their characteristics", *Green Process. and Synth.*, 7, pp. 530-537, (2018).
- [5] Chahardoli, A., Karimi, N., Fattahi, A., "Nigella arvensis leaf extract mediated green synthesis of silver nanoparticles: Their characteristic properties and biological efficacy", *Adv. Powder Tech.*, 29, pp. 202-210, (2018).
- [6] Mohammadlou, M., Jafarizadeh-Malmiri, H., Maghsoudi, H., "Hydrothermal green synthesis of silver nanoparticles using *Pelargonium/Geranium* leaf extract and evaluation of their antifungal activity", *Green Process. and Synth.*, 6, pp. 31-42, (2017).
- [7] Ashtaputrey, S. D., Ashtaputrey, P. D., Rathod, G., "Eco-friendly green synthesis and characterization of silver nanoparticles derived from *Murraya koenigii* leaves extract", *Asian J. of Chem.*, 29, pp. 1966-1968, (2017).
- [8] Ghanbari, S., Vaghari, H., Sayyar, Z., Adibpour, M., Jafarizadeh-Malmiri, H., "Autoclave-assisted green synthesis of silver nanoparticles using *A. fumigatus* mycelia extract and the evaluation of their physico-chemical properties and antibacterial activity", *Green Process. and Synth.*, 7, pp. 217-224, (2018).
- [9] Vijayan, R., Joseph, S., Mathew, B., "Indigofera tinctoria leaf extract mediated green synthesis of silver and gold nanoparticles and assessment of their anticancer, antimicrobial, antioxidant and catalytic properties", *Artifi. Cells, Nanomed. and Biotech.*, 46, pp. 861-871, (2018).
- [10] Eskandari-Nojedehi, M., Jafarizadeh-Malmiri, H., Rahbar-Shahrouzi, J., "Hydrothermal green synthesis of gold nanoparticles using mushroom (*Agaricus bisporus*) extract: physico-chemical characteristics and antifungal activity studies", *Green Process. and Synth.*, 7, pp. 38-47, (2018).
- [11] Vahidi, A., Vaghari, H., Najian, Y., Najian, M. J., Jafarizadeh-Malmiri, H., "Evaluation of three different green fabrication methods for the synthesis of crystalline ZnO nanoparticles using *Pelargonium zonale* leaf extract", *Green Process. and Synth.*, 8, pp. 302-308, (2019).
- [12] Birusanti, A. B., Mallavarapu, U., Nayakanti, D., Espenti, C. S., Mala, S., "Sustainable green synthesis of silver nanoparticles by using Rangoon creeper leaves extract and their spectral analysis and antibacterial studies", *IET Nanobiotech.*, 13, pp. 71-76, (2019).
- [13] Fardsadegh, B., Jafarizadeh-Malmiri, H., "Aloe vera leaf extract mediated green synthesis of selenium nanoparticles and assessment of their In vitro antimicrobial activity against spoilage fungi and pathogenic bacteria strains", *Green Process. and Synth.*, 8, pp. 399-407, (2019).
- [14] Ahmadi, O., Jafarizadeh-Malmiri, H., Jodeiri, N., "Optimization of processing parameters for hydrothermal silver nanoparticles synthesis using Aloe vera leaf extract and estimation of their physico-chemical and antifungal properties", *Zeits. für Physikal. Chem.*, 233, pp. 651-667, (2019).
- [15] Kumar, B., Smita, K., Cumbal, L., Debut, A., "Ficus carica (Fig) fruit mediated green synthesis of silver nanoparticles and its antioxidant activity: a comparison of thermal and ultrasonication approach", *BioNano Sci.*, 6, pp. 15-21, (2016).
- [16] Ahmadi, O., Jafarizadeh-Malmiri, H., Jodeiri, N., "Eco-friendly microwave-enhanced green synthesis of silver nanoparticles using Aloe vera leaf extract and their physico-chemical and antibacterial studies", *Green Process. and Synth.*, 7, pp. 231-240, (2018).
- [17] Eskandari-Nojedehi, M., Jafarizadeh-Malmiri, H., Rahbar-Shahrouzi, J., "Optimization of processing parameters in green synthesis of gold nanoparticles using microwave and edible mushroom (*Agaricus bisporus*) extract and evaluation of their antibacterial activity", *Nanotech. Rev.*, 5, pp. 537-548, (2016).
- [18] Ukkund, S. J., Darshanram, Khan, Z., Sanjay, Patil, R., Udupa, A., Nellerichale, A., Puthiyillam, P., "Microwave assisted green synthesis and characterization of silver nanoparticles from Hibiscus leaf extract and investigation of their antimicrobial activities", in *AIP Conference Proceedings*. (2019).
- [19] Suarez, V., Hernández Wong, J., Nogal, U., Calderón, A., Rojas-Trigos, J. B., Juárez, A. G., Marín, E., "Study of the heat transfer in solids using infrared photothermal radiometry and simulation by COMSOL Multiphysics", *Appl. Rad. and Isotopes*, 83, pp. 260-263, (2014).
- [20] Turgay, M. B. Yazıcıoğlu, A. G., "Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a trapezoidal microchannel with COMSOL multiphysics: A case study", *Num. Heat Trans.; Part A: Appl.*, 73, pp. 332-346, (2018).