

*Research Article***Finite element simulation and development of a LED-based photoacoustic spectroscopy system for quality assessment of some food liquids****Fatemeh Sharifi¹, Mojtaba Naderi Boldaji^{2*}, Mohsen Ghasemi³, Mahdi Ghasemi-Varnamkhasti², Ali Maleki²**

1. PhD student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahrekord University
2. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahrekord University
3. Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Shahrekord University

(Received 28 April 2022, Received in revised form 7 June 2022, Accepted 15 June 2022)

Abstract

The photoacoustic method is a sensing technique resulting from combination of optical and ultrasonic methods. The photoacoustic effect is the product of local heating with absorption of light energy, instantaneous expansion of matter and generation of pressure and sound propagation in the matter. In this study, in order to develop a photoacoustic spectroscopy system with LED light sources, in the first step, the photoacoustic interaction with a cuvette filled with liquid was simulated using Comsol Multiphysics 5.5. In the second step, a photo-acoustic spectroscopy system with light sources at eight wavelengths from 395-940 nm was designed and constructed. Finally, in order to evaluate the photoacoustic system, three samples i.e. milk, water and olive oil were subjected to photoacoustic spectroscopy and the measurement results were compared with the simulation results for the same samples. The results showed that the intensity of the acoustic response of the samples at different wavelengths varied significantly with the light absorption coefficient, so that the maximum amplitude of the acoustic signal was obtained for milk, water and olive oil at the wavelengths of 450, 395 and 450 nm with values of 0.34, 0.22 and 0.74 Pa, respectively. This was in agreement with the simulation results in terms of relative differences. Moreover, the adulteration of adding water to milk at volume ratios of 5, 10, 15 and 20% was evaluated with the system and analyzed with principal component analysis (PCA) which showed a satisfactory discrimination of adulterated samples from pure milk. The system developed in this study can be used to assess the quality of food liquids.

Keywords: photoacoustic, piezoelectric, finite element, food liquids, quality**How to cite this article:**

Sharifi F., Naderi Boldaji M., Ghasemi M., Ghasemi-Varnamkhasti M., Maleki A. (2022). Finite element simulation and development of a LED-based photoacoustic spectroscopy system for quality assessment of some food liquids. *Innov. Food Technol.*, 9(4), 383-405.

* Corresponding author: naderi.mojtaba@sku.ac.ir

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی اجزا محدود و توسعه یک سامانه طیف‌نگاری نوری-صوتی بر پایه LED برای ارزیابی کیفی برخی مایعات غذایی

فاطمه شریفی^۱، مجتبی نادری بلداجی^{۲*}، محسن قاسمی^۳، مهدی قاسمی ورنامخواستی^۲، علی ملکی^۲

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۳. دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهرکرد

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۲/۰۸، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۵)

چکیده

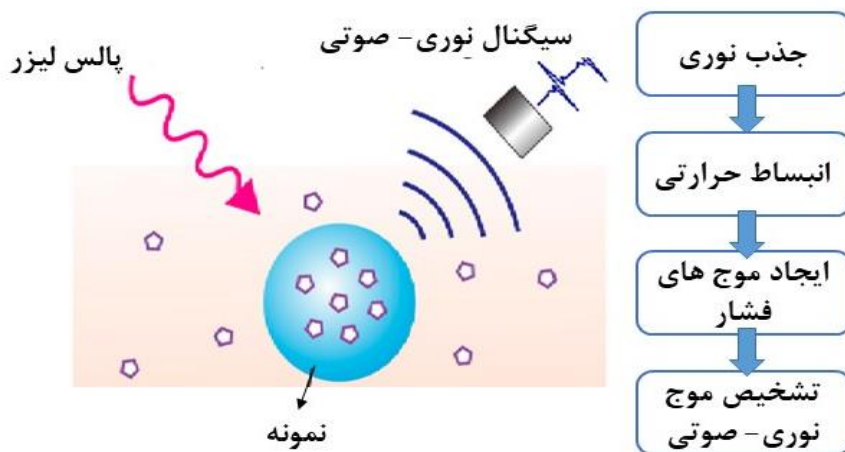
روش نوری-صوتی، یک روش حسگری، حاصل ترکیب روش‌های نوری (اپتیکی) و صوتی می‌باشد. اثر نوری-صوتی حاصل ایجاد گرمای محلی در اثر جذب انرژی نور، انبساط آبی ماده، ایجاد فشار و تولید نشر صوتی در ماده است. در این مطالعه به منظور توسعه یک سامانه طیف‌نگاری نوری-صوتی با منابع نوری دیود نشر نوری برای سنجش کیفی مایعات غذایی، در گام اول اثر متقابل نوری-صوتی با یک ظرف نمونه حاوی مایعات به روش اجزا محدود و با استفاده از نرم‌افزار Comsol Multiphysics 5.5 شبیه‌سازی شد. در گام دوم، سامانه طیف‌نگاری با منابع نوری در هشت طول‌موج از ۳۹۵-۹۴۰ nm طراحی و ساخته شد. در آخر به منظور ارزیابی سامانه نوری-صوتی، سه نمونه شیر، آب و روغن زیتون مورد سنجش طیف‌نگاری نوری-صوتی قرار گرفت و نتایج اندازه‌گیری با نتایج شبیه‌سازی برای همین نمونه‌ها مقایسه شد. نتایج نشان داد که شدت پاسخ صوتی نمونه‌ها در طول موج‌های متفاوت بسته به ضریب جذب نور تغییرات قابل توجهی دارد، به طوری که بیشینه دامنه سیگنال فشار صوتی به ترتیب برای شیر، آب و روغن زیتون در طول موج‌های ۴۵۰، ۳۹۵ و ۴۵۰ nm با مقادیر ۰/۳۴ Pa، ۰/۲۲ و ۰/۷۴ به دست آمد که از نظر تفاوت‌های نسبی با نتایج شبیه‌سازی در توافق بود. همچنین، تقلب اضافه نمودن آب به شیر در سطوح ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ حجمی با استفاده از این سامانه مورد ارزیابی قرار گرفت و نتیجه تحلیل مؤلفه‌های اصلی قابلیت تمایز بسیار خوب نمونه‌های حاوی تقلب آب از شیر خالص را نشان داد. سامانه توسعه داده شده در این مطالعه می‌تواند برای ارزیابی کیفیت و تشخیص تقلب در مایعات غذایی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: نوری-صوتی، پیزوالکتریک، روش اجزا محدود، مایعات غذایی، کیفیت.

۱. مقدمه

تصاویر عمقی از ساختار ماده اشاره کرد [۵]. اثر نوری-صوتی اولین بار توسط گراهام بل در سال ۱۸۸۰ معرفی شد [۶]. وی دریافت که جذب امواج الکترومغناطیس توسط مواد می‌تواند منجر به تولید امواج صوتی شود. با اینکه تولید امواج فراصوت توسط لیزر، سالیان زیادی در آزمون‌های غیرمخرب مواد مورد استفاده قرار گرفته است؛ اما اولین نشانه‌های اینکه بافت‌های بیولوژیک نیز می‌توانند با جذب گرما یک منبع تولیدکننده فراصوت باشند در سال ۱۹۹۹ مشاهده شد [۷]. پالس نوری با انرژی بالا که توسط نمونه مورد بررسی جذب می‌شود، یک منطقه‌ی متمرکز با دمای افزایش‌یافته را ایجاد می‌کند که موجب انبساط ترموالاستیک و تولید موج‌های الاستیک (به شکل فراصوت) می‌شود که این اثر با اندازه‌گیری صدای تشکیل‌شده، توسط حسگرهای صوتی به شکل کمی ثبت می‌گردد (شکل ۱). تمام ناحیه طیف الکترومغناطیس از اشعه گاما و ایکس تا امواج ماکروویو و رادیویی می‌تواند اثر نوری-صوتی ایجاد کند، اما اکثر محققان بر استفاده از محدوده بینایی و نزدیک فروسرخ متمرکز شده‌اند [۸]. لازم به ذکر است که هر نوع مولکول موجود در ماده می‌تواند طول‌موج‌های خاصی از نور را جذب کند که همین امر، طیف‌نگاری نوری-صوتی را به یک ابزار قدرتمند برای تشخیص ترکیبات ماده تبدیل می‌کند.

تلفیق دو روش طیف‌نگاری نوری و فراصوت به صورت روش نوری-صوتی (فوتوآکوستیک)^۱ می‌تواند عیوب هرکدام از این روش‌ها را تا حدودی برطرف نماید. در دهه‌های اخیر روش نوری-صوتی (PA) مورد توجه ویژه محققین در حوزه‌های پزشکی تا مهندسی و کشاورزی قرار گرفته است [۱]. این روش که اساساً بر تبدیل انرژی جذب‌شده توسط ماده به گرما متکی است، بررسی خصوصیات نوری و حرارتی نمونه‌ها را تقریباً در هر شرایطی ممکن می‌سازد [۲]. ساخت ابزار دقیق تجاری PA که اغلب پیچیدگی کمتری نسبت به روش‌های مرسوم دارد، طی سال‌های اخیر به تدریج گسترش یافته است [۳]. روش PA نسبت به روش‌های فراصوت دارای مزایایی شامل جذب طول‌موج‌های خاص برای هر نوع مولکول موجود در ماده و عدم ایجاد کواپتاسیون در نمونه-های مایع (حتی در سطوح پایین انرژی) که می‌تواند امواج فراصوت را تضعیف و مانع عبور موج گردد، می‌باشد [۴]. از عیوب روش‌های نوری، قیمت بسیار زیاد حسگرهای نوری و عدم ایجاد تصاویر عمقی به دلیل تضعیف فوتون‌های نوری ناشی از پراکندگی این فوتون‌ها درون ماده است؛ در مقابل، از مزایای روش PA می‌توان به جایگزینی حسگرهای نوری با حسگرهای صوتی با قیمت مناسب و همچنین امکان تهیه



شکل (۱) طرح‌واره مراحل وقوع اثر نوری-صوتی [۹]

Figure 1. A schematic of occurrence stages of photoacoustic effect [9]

در تحقیقی توسط مارتل و همکاران (۱۹۸۷)، امکان استفاده از روش طیف‌سنجی نوری-صوتی جهت تجزیه و تحلیل مقدار پروتئین موجود در شیر با درصد‌های چربی متفاوت و همچنین مقدار چربی موجود در فرآورده‌های شیر مانند ماست و پنیر مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از منبع نوری لامپ زنون با توان ۱۰۰۰ W در طیف فرابنفش، جهت مدوله کردن نور از یک مسدودکننده مکانیکی نور و جهت دریافت سیگنال‌های صوتی ایجادشده، از یک میکروفون استفاده شد. نتایج نشان داد که در کلیه آزمون‌های انجام‌شده مقدار ضریب تعیین در برآورد تغییرات پروتئین با استفاده از این روش، در بهترین طول‌موج جذبی (۲۸۰ nm) بزرگ‌تر از ۹۹٪ بوده است [۱۵].

بیکانی و همکاران (۲۰۱۰) در ارزیابی ماده مغذی لیکوپن در محصولات غذایی فرآوری شده از گوجه‌فرنگی از روش نوری-صوتی استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که همبستگی بالایی با ضریب $r = 0.97$ بین مقدار لیکوپن موجود در نمونه و سیگنال‌های نوری-صوتی ایجادشده، وجود دارد [۱۶]. همچنین ولاسکو و همکاران (۲۰۱۱) برای سنجش خواص گرمایی گوجه‌فرنگی در طول سه مرحله از دوره رشد از یک سلول نوری-صوتی باز استفاده نمودند. نتایج نشان داد که در فرکانس مدولاسیون منبع نوری زیر ۴۰ Hz پالس‌های صوتی قوی‌تری دریافت شد [۱۳]. طیف‌نگاری نوری-صوتی به‌عنوان یک روش غیرمخرب در تعیین مقدار سموم باقی‌مانده از آفت‌کش دی متیل دیکلوروئیل فسفات در پوست سیب توسط لیو و همکاران (۲۰۱۵) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ضریب همبستگی ۰/۹۹ و حد تشخیص ۰/۲ ppm برای مقدار سموم را نشان داد که بیانگر توانمندی روش طیف‌نگاری نوری-صوتی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای سنجش باقی‌مانده سموم در میوه‌ها است [۱۷].

تاهودیر و همکاران (۲۰۱۶) یک سیستم قابل‌حمل برای تشخیص خصوصیات کیفی مواد غذایی مایع با استفاده از اثر نوری-صوتی طراحی کردند. در این سامانه از یک آرایه شامل ۱۶ LED در ناحیه ماوراءبنفش، مرئی و فروسرخ به‌عنوان منبع نور و از دو حسگر پیزوالکتریک جهت دریافت پالس-های صوتی استفاده شد. در این پژوهش تعیین غلظت

منابع نوری مورد استفاده در روش نوری-صوتی عمدتاً به شکل لیزر بوده که دارای توان زیاد و قیمت‌های نسبتاً گران خصوصاً در طول موج‌های بالا (مثلاً در محدوده NIR) می‌باشند که همین امر باعث تمایل و کاربرد بیشتر جهت بهره‌برداری از منابع نوری دیود نشر نوری (LED) شده است که علی‌رغم توان نوری پایین‌تر دارای قیمت مناسب‌تر و امکان دسترسی آسان‌تر می‌باشند. منابع نوری دیگر مورد استفاده شامل لامپ‌های با باند کامل طیفی مانند لامپ هالوژن می‌باشد که باید با استفاده از فیلتر، طول‌موج‌های مشخصی انتخاب و به نمونه تابانده شود که همین امر باعث پیچیده و هزینه‌بر شدن این سیستم خواهد شد.

جهت تحریک نمونه‌ها توسط منبع نوری با استفاده از روش نوری-صوتی، نیاز به مدولاسیون نور می‌باشد تا شرایط سرد و گرم شدن متوالی نمونه فراهم گردد که این کار به دو روش الکترونیکی و مکانیکی (با استفاده از انسداد نوری) امکان‌پذیر است. با توجه به مزایایی که مدولاسیون الکترونیکی نسبت به روش مکانیکی دارد، این روش بیشتر مورد توجه است. اندازه‌گیری و ثبت موج‌های فشاری صوتی بسته به فرکانس پالس ایجادشده با استفاده از حسگرهای صوتی مانند میکروفون و پیزوالکتریک انجام می‌گیرد. حسگرهای پیزوالکتریک با توجه به محدوده فرکانسی گسترده‌تر و حساسیت بالاتر عموماً در تشخیص فشارهای نوری-صوتی استفاده می‌شود.

ازجمله کاربردهای روش نوری-صوتی در حوزه‌های مختلف علمی می‌توان به مواردی همچون سنجش میزان و نوع گازهای متصاعد شده از محصولات کشاورزی در زمان انبارداری به‌منظور تعیین کیفیت و رسیدگی محصول [۱۰]، آزمون‌های غیرمخرب مواد و یا تشخیص غیرتهاجمی بافت‌های زنده در پزشکی [۱۱]، شناسایی و پایش گازهای سمی و آلوده‌کننده در هوا [۱۲]، سنجش خواص گرمایی مواد همچون ظرفیت گرمایی ویژه، نفوذ گرمایی و رسانایی گرمایی [۱۳] و طیف‌سنجی نوری-صوتی تقویت‌شده کوآرتز با پرتو LED جهت اندازه‌گیری اوزون در اتمسفر هوا [۱۴] اشاره نمود.

برای تشخیص تقلب در زعفران مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سامانه نوری-صوتی با منبع نور لیزر قادر است مواد تقلبی را در نسبت‌های جرمی ۲٪ در کمتر از دو دقیقه تشخیص دهد [۲۲].

مدلسازی تحلیلی یا عددی می‌تواند به رابطه بین پارامترهای ورودی منبع نوری و امواج فراصوت تولیدشده بپردازد، یعنی قادر است بین ورودی حرارتی و امواج مکانیکی تولیدشده، بینش فیزیکی ایجاد نماید [۲۳]. جهت بررسی امواج نوری-صوتی تولیدشده در مواردی که نمی‌توان از روش‌های تحلیلی استفاده کرد، از شبیه‌سازی اجزا محدود^۱ (FEM) استفاده می‌شود [۲۴]. مطالعات متنوعی نیز در خصوص شبیه‌سازی اثر نوری-صوتی با روش اجزا محدود گزارش شده است. وانگ و همکاران (۲۰۰۳) سیگنال‌های فراصوت و تنش تولیدی در مواد غیرفلزی در اثر تابش لیزر را با استفاده از شبیه‌سازی روش اجزا محدود بررسی کردند. در این مدل اثر نفوذ گرما و عمق نفوذ منبع نوری برای لیزر در نظر گرفته شده و همچنین رابطه بین تنش و امواج فراصوت تحلیل شد [۱۱]. شبیه‌سازی اجزا محدود اثر نوری-صوتی در بافت‌های بیولوژیک توسط وانگ و همکاران (۲۰۰۵) بررسی شد. این شبیه‌سازی مبتنی بر اطلاعات کسب‌شده از روش نوری-صوتی که شامل انتشار نور، تولید سیگنال صوتی و انتشار موج صدا در بافت‌های نرم است، انجام شده و در مقایسه با سایر مدل‌های شبیه‌سازی شناخته‌شده مانند روش مونت کارلو و مدل فشار-گرما ارزیابی شد [۲۵]. در پژوهشی توسط فیروزی و همکاران (۲۰۱۵) برای بررسی تصویربرداری نوری-صوتی از تومورهای مغزی از شبیه‌سازی اجزا محدود استفاده شد. در این پژوهش بافت مغز با استفاده از روش اجزا محدود شبیه‌سازی شد و موج صوتی ایجادشده توسط معادلات موج مرتبه اول خطی مدل‌سازی گردید [۲۶].

مطالعات انجام‌شده با روش طیف‌نگاری نوری-صوتی با منبع نوری LED برای سنجش کیفی مایعات غذایی را می‌توان محدود به مطالعه انجام‌شده توسط تاهودیر و همکاران (۲۰۱۶) دانست که در آن به‌منظور توسعه یک سامانه طیف‌نگاری نوری-صوتی قابل حمل برای هر طول موج از یک

پروتئین شیر و بررسی وجود تقلب‌ها (دترجنت، نمک، نشاسته و آب) و نیز غلظت الکل در بعضی نوشیدنی‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که غلظت پروتئین شیر با ضریب همبستگی ۰/۹ قابل تشخیص است. سامانه ارائه‌شده در این مطالعه دارای یک LED برای هر طول موج بوده که نتایج آن نشان‌دهنده سیگنال‌های بسیار ضعیف نوری-صوتی به دلیل عدم کفایت توان LED ها است که نیاز به توسعه سامانه‌های با توان نوری بالاتر را ایجاب می‌نماید [۱۸]. در تحقیقی دیگر، پوپا و پتروس (۲۰۱۷) غلظت گازهای اتیلن و آمونیاک تولیدشده در تنفس گیاه در مرحله جوانه‌زنی بذر تحت تأثیر حضور و غلظت برخی فلزات سنگین را با استفاده از فناوری طیف‌سنجی نوری-صوتی بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد روش نوری-صوتی توانایی تشخیص غلظت گازهای مذکور با دقت‌های در حد واحد در میلیارد را داشته، همچنین روند تغییر غلظت این گازها در زمان جوانه‌زنی به‌خوبی تشخیص داده شد [۱۹].

هراندز و همکاران (۲۰۲۰) برای تشخیص مقدار زردچوبه در نان از روش طیف‌سنجی نوری-صوتی استفاده کرد. جهت تحریک نمونه‌ها از یک لامپ زنون با فرکانس مدولاسیون Hz ۱۷ استفاده گردید. نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش مقدار زردچوبه در نان دامنه سیگنال‌های نوری-صوتی افزایش پیدا می‌کند و سیگنال‌های نوری-صوتی با اندازه فعالیت آنتی‌اکسیدانی و همچنین بافت و رنگ نان‌ها مرتبط بوده است [۲۰]. برای بررسی وجود تفاوت بین آرد برنج‌های مختلف نیز از طیف‌نگاری نوری-صوتی استفاده گردید. در این پژوهش که توسط پویو و همکاران (۲۰۲۱) انجام شد، پنج نمونه مختلف برنج در یک سلول نوری-صوتی با قرارگیری در مقابل منبع نوری لیزر آبخاری کوانتومی با فرکانس Hz ۲۱۵ تحریک و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد با استفاده از این روش می‌توان تمامی نمونه‌ها را با خطای استاندارد کمتر از دو درصد تشخیص داد [۲۱]. در تحقیقی دیگر فیورانی و همکاران (۲۰۲۱) برای تشخیص تقلب در مواد غذایی از یک لیزر آبخاری کوانتومی استفاده کردند. در این پژوهش، توان روش طیف‌سنجی نوری-صوتی



دریافت انرژی پالسی نور با رابطه (۱) بیان می‌شود [۲۸]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - v_s^2 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{v_s^2 \beta}{C_p} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن P فشار صوتی، v_s سرعت صوت در نمونه، C_p ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، β ضریب انبساط حجمی نمونه جاذب، z و t به ترتیب متغیرهای مکان و زمان در نمونه و H تابع تغییرات دمای موضعی می‌باشد که به صورت انرژی جذب شده در واحد زمان در واحد حجم بیان می‌شود [۲۸].

همان‌طور که ذکر گردید طیف‌سنجی نوری-صوتی یک روش تحلیلی در فازهای مختلف ماده می‌باشد که به خصوص برای مایعات با جذب نوری کم مناسب است، طوری که می‌توان حساسیت بسیار بیشتری نسبت به طیف‌سنجی جذبی نوری به دست آورد [۲۹]. نظریه‌هایی برای پیش‌بینی شکل موج صوتی تولیدشده در مایعات به‌ویژه توسط لای و یانگ (۱۹۸۲) توسعه یافته است [۳۰]. معادله فشار امواج طولی (P) ناشی از پالس لیزر با شدت آنی (I) در مایعات با رابطه (۲) بیان می‌شود [۳۱]:

$$\left(\frac{1}{v_a^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) P = \left(K_A \frac{\partial}{\partial t} - K_E \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) I \quad (2)$$

در سمت چپ رابطه v_a سرعت صوت در نمونه و ∇^2 دیفرانسیل مرتبه دوم است. اولین قسمت در سمت راست معادله بیانگر جذب گرما است که ضریب آن با رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$K_A = \alpha \beta / C_p \quad (3)$$

که α ضریب جذب نوری، β ضریب انبساط حجمی و C_p ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت است. در رابطه (۲) مقدار K_E به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_E = \gamma / 2ncv_a^2 \quad (4)$$

که c سرعت نور در خلأ، n ضریب شکست نور و γ تابعی از ضریب شکست نور می‌باشد.

براساس این نظریه، تولید امواج صوتی در مایع به دلیل جذب نوری که توسط یک پالس منبع نوری ایجاد می‌شود، یک

LED استفاده شده است [۱۸]. توان تابشی کم این منابع نوری منجر به تولید پالس‌های صوتی نسبتاً ضعیفی شده که قابلیت تشخیص و اندازه‌گیری آن را محدود نموده است. لذا در این مطالعه، توسعه یک سامانه آزمایشگاهی طیف‌نگاری نوری-صوتی با محدوده طول‌موج مرئی-نزدیک فروسرخ با استفاده از آرایه‌ای از LED برای هر طول‌موج مد نظر قرار گرفت. هدف از این مطالعه شبیه‌سازی اجزا محدود اثر متقابل نوری-صوتی امواج الکترومغناطیس با یک ظرف نمونه^۱ حاوی نمونه مایع جهت بررسی برخی پارامترهای طراحی مانند جهت مناسب نصب حسگر پیزوالکتریک، اثر باز یا بسته بودن ظرف نمونه و همچنین اثر فاصله سطح حسگر پیزوالکتریک از جداره ظرف نمونه بر شدت پالس صوتی تولیدی و بررسی پارامتریک خصوصیات نمونه بر سیگنال صوتی بود. در ادامه، ساخت سامانه نوری-صوتی و ارزیابی و صحت‌سنجی عملکرد سامانه با برخی نمونه‌های مایع غذایی مدنظر قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. نظریه نوری-صوتی و معادلات حاکم بر آن

فشار اولیه P_0 که به وسیله یک جذب‌کننده نور تولید می‌شود را می‌توان به صورت $P_0 = T\mu_a F$ بیان نمود که در آن F شار نوری در ماده‌ی جاذب، μ_a ضریب جذب نور و T عامل گرینزین^۲ نمونه است که توانایی نمونه برای تبدیل شار نوری به فشار مکانیکی را نشان می‌دهد و معمولاً به صورت تجربی مشخص می‌شود. امواج فراصوت تولیدشده در اثر پدیده نوری-صوتی در مواد نه‌تنها به ویژگی‌های منبع نوری شامل شکل، فرکانس موج، شعاع پرتو نور و زمان پالس نور، بلکه به عمق نفوذ نور، خواص فیزیکی و الاستیک ماده نیز ارتباط دارد. اصولاً موج فراصوت تولیدشده در روش نوری-صوتی حاوی اطلاعات مفیدی از ویژگی‌های نوری-حرارتی نمونه جاذب است [۲۷].

معادله دیفرانسیل حاکم بر فشار صوتی ایجادشده در اثر

1. Cuvette
2. Greensin

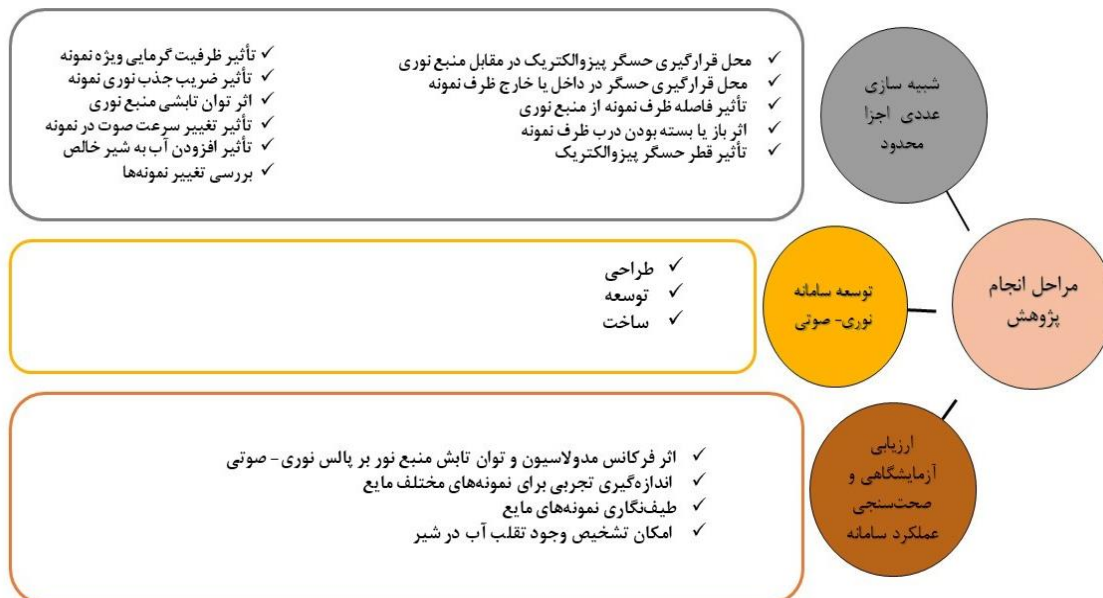
حرارتی نمونه با استفاده از نرم‌افزار Comsol Multiphysics 5.5 بررسی و شدت سیگنال صوتی دریافت شده توسط حسگر واقع بر جداره ظرف نمونه که در ارتفاع ۱۵ mm از کف ظرف نمونه قرار دارد، شبیه‌سازی شد (شکل ۳). پس از توسعه مدل اجزا محدود، در ابتدا اثر موقعیت حسگر پیزوالکتریک از نظر زاویه قرارگیری نسبت به جهت تابش، اثر تغییر فاصله ظرف نمونه نسبت به منبع نوری، تماس یا عدم تماس حسگر پیزو با نمونه، اثر باز یا بسته بودن ظرف نمونه و همچنین قطر سطح مقطع حسگر پیزو در تولید پالس صوتی مورد بررسی قرار گرفت. دو وضعیت موازی و عمود نسبت به جهت تابش برای حسگر پیزو مدنظر قرار گرفت؛ در حالت اول حسگر در تماس با جداره ظرف نمونه و در مقابل منبع نوری و در حالت دوم حسگر در تماس با جداره ظرف نمونه ولی با زاویه 90° نسبت به جهت تابش قرار گرفت. فاصله ظرف نمونه از منبع نوری در محدوده ۰-۲ mm و قطر سطح مقطع حسگر در محدوده ۲۰-۱۷ mm تغییر داده شد و اثر آن بر پالس صوتی تولیدی شبیه‌سازی شد.

تعامل پیچیده است که مرتبط با پارامترهای فیزیکی، گرمای ویژه، انبساط حرارتی، سرعت صوت و ضریب جذب نوری نمونه است [۳۲]. از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی که ذکر شد می‌توان به ضریب پخش حرارتی^۱ و ضریب جذب حرارتی^۲ اشاره کرد.

مراحل انجام این پژوهش به طور کلی در سه مرحله شامل شبیه‌سازی عددی اجزا محدود، توسعه سامانه نوری-صوتی و ارزیابی آزمایشگاهی و صحت‌سنجی عملکرد سامانه، انجام گردید که در شکل (۲) به صورت طرح‌واره قابل مشاهده می‌باشد.

۲.۲. شبیه‌سازی عددی اجزا محدود

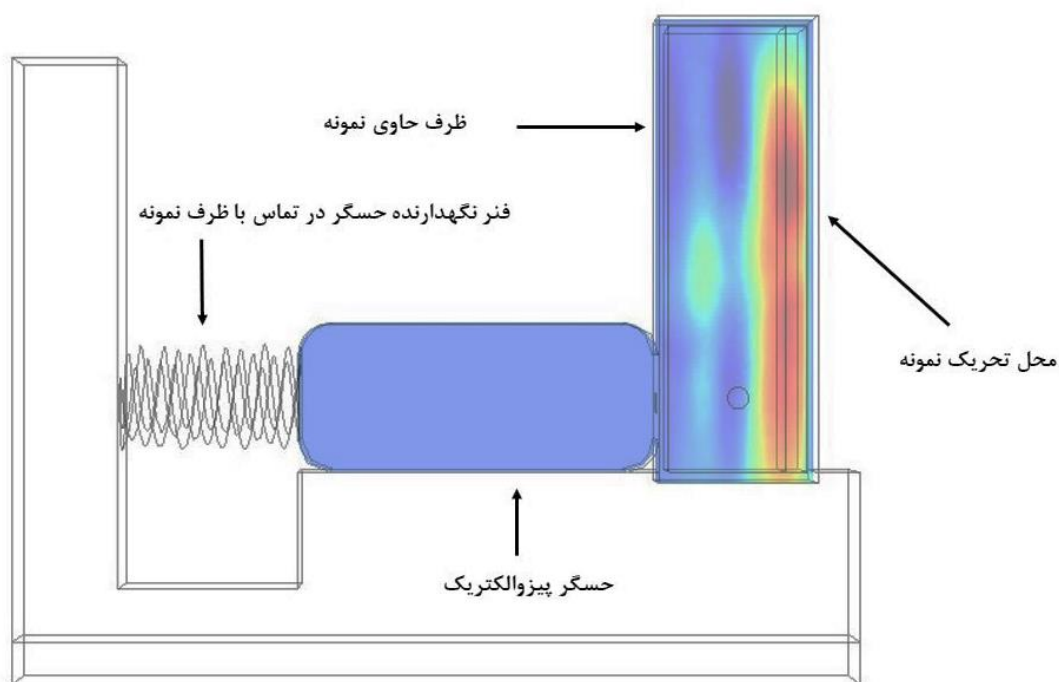
در این شبیه‌سازی اثر متقابل نوری-صوتی تابش نور به یک ظرف نمونه با ابعاد سطح مقطع ۱۳ mm و ارتفاع ۴۵ mm که با نمونه مایع پر می‌شود، مدل‌سازی شد. انتشار امواج ناشی از منبع نوری با استفاده از روابط ریاضی بیان شده در بخش قبل و حل مسئله با روش اجزا محدود در حوزه‌ی زمان و تعیین خصوصیات چگالی، سرعت صوت و خصوصیات



شکل (۲) طرح‌واره مراحل انجام پژوهش

Figure 2. The work flow of the study

1. Thermal effusivity
2. Thermal diffusivity



شکل (۳) شبیه‌سازی اجزا محدود اثر متقابل صوتی-نوری یک نمونه مایع در ظرف نمونه پس از تحریک نوری با استفاده از نرم‌افزار Comsol Multiphysics 5.5

Figure 3. FEM simulation of the photoacoustic interaction of a liquid sample in a cuvette after light excitation using Comsol Multiphysics 5.5

در گام بعدی تغییر خصوصیات نمونه مانند ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب جذب نوری بررسی شد. بدین منظور مقدار اولیه گرمای ویژه $3/93 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$ معادل گرمای ویژه شیر در نظر گرفته شد و این متغیر با مقادیری از ۲-۵ برابر مقدار اولیه مورد آزمون قرار گرفت. همچنین ویژگی‌هایی از منبع نوری مانند شدت تابش نوری (توان تابشی) با توان تابشی مبنای 121 W/m^2 در پنج سطح و سرعت صوت در نمونه با سطح مبنای سرعت صوت در شیر معادل 1548 m/s در چهار سطح و تأثیر اختلاط شیر با آب در چهار سطح مورد بررسی قرار گرفت که در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱) عوامل مورد بررسی و سطوح شبیه‌سازی شده در نمونه

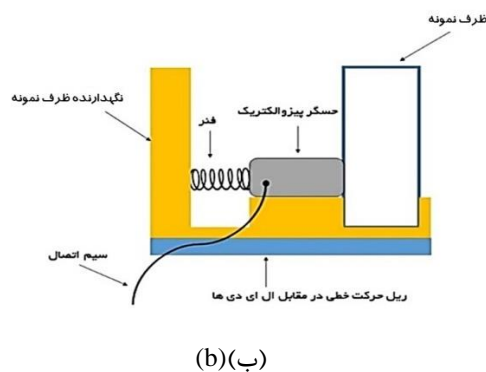
Table 1. Factors and levels investigated simulated in the sample

سطح مورد بررسی					عامل مورد بررسی در شبیه‌سازی
5	4	3	2	1	
-	17	20	23	25	قطر حسگر پیزوالکتریک (mm)
19/65	15/72	11/79	7/86	3/93	ظرفیت گرمایی ($\text{kJ/kg}^\circ\text{K}$)
0/025	0/02	0/015	0/01	0/005	ضریب جذب نوری (بدون واحد)
605	484	363	242	121	توان تابشی (W/m^2)
-	4638	3092	1548	778	سرعت صوت (m/s)
-	10	5	2	۰	میزان اختلاط آب با شیر (درصد حجمی)

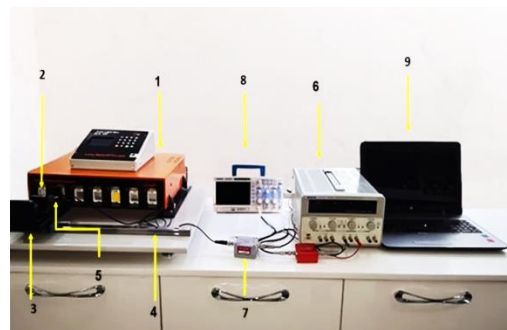
برای تولید سیگنال‌های قدرتمند صوتی، ظرف نمونه با منابع نوری فاصله‌ای نداشته و در تماس مستقیم با منابع نوری می‌باشد، زیرا نتایج شبیه‌سازی نشان داد که حتی وجود کمترین فاصله بین ظرف نمونه و منابع نوری به شدت باعث تضعیف سیگنال صوتی خواهد شد. منابع نور توسط یک برد کنترلی خاموش و روشن می‌شوند. این مدار کنترلی قابلیت کنترل فرکانس مدولاسیون تا ۱۰۰ Hz و همچنین کنترل شدت نور در هر طول موج تا هفت سطح را در اختیار می‌گذارد. در این سامانه از یک حسگر پیزوالکتریک مدل VS75-V تولید شرکت والن آلمان^۴ که دارای محدوده فرکانسی تا ۱۲۰ kHz می‌باشد، جهت دریافت سیگنال‌های صوتی استفاده شد. این حسگر توسط منبع تغذیه با ولتاژ ۲۸۷ تغذیه و سیگنال‌های صوتی دریافت شده پس از تقویت توسط آمپلی‌فایر با ضریب بهره ۳۴ dB به یک اسیلوسکوپ دیجیتال (DSO5200, Megatek, Taiwan) جهت ثبت منتقل می‌شود. اسیلوسکوپ قابلیت ذخیره داده‌های شکل موج پالس‌ها بر روی کامپیوتر را دارد.

۳.۲. توسعه سامانه طیف‌نگاری نوری-صوتی

به‌طور کلی این سامانه متشکل از دو بخش منابع نوری و مدار کنترل آن و بخش اندازه‌گیری سیگنال صوتی می‌باشد که در شکل (۴-الف) تصویر واقعی آن نشان داده شده است. منابع نوری این سامانه در هر طول موج متشکل از آرایه‌ای از LED می‌باشد که اندازه هر آرایه $(15 \times 50 \text{ mm}^2)$ برابر با ابعاد ظرف نمونه می‌باشد که ویژگی‌های آن در جدول (۲) نشان داده شده است. طول موج‌های تعبیه‌شده در این سامانه شامل یک طول موج در محدوده ماوراء بنفش (UV)^۱، پنج طول موج در محدوده مرئی (Vis)^۲ و تعداد دو طول موج در محدوده فرورسوخ نزدیک (NIR)^۳ می‌باشد. برای نگه‌داشتن ظرف نمونه در مقابل منابع نوری به شکل ثابت، مکانیزمی مطابق با شکل (۴-ب) طراحی شد. محل قرارگیری ظرف نمونه در این نگاه‌دارنده به نحوی در نظر گرفته شد که حسگر پیزوالکتریک تحت نیروی فشاری فنر نگاه‌دارنده در تماس با جداره ظرف نمونه قرار بگیرد. برای جابجایی این نگاه‌دارنده ظرف نمونه در مقابل منابع نوری، از یک ریل نوری استفاده شد که امکان جابجایی با دقت میلی‌متر را فراهم می‌نماید.



(ب) (ب)



(الف) (الف)

شکل (۴) الف) سامانه نوری- صوتی (۱- منبع نوری و مدار کنترل، ۲- ظرف نمونه حاوی نمونه، ۳- نگاه‌دارنده ظرف نمونه، ۴- ریل نوری حرکت ظرف نمونه، ۵- حسگر پیزوالکتریک، ۶- منبع تغذیه، ۷- تقویت‌کننده، ۸- اسیلوسکوپ، ۹- رایانه)، ب) طرح‌واره مکانیزم نگاه‌دارنده ظرف نمونه در مقابل منابع نوری

Figure 4- a) A real photo of the photoacoustic system (1- the light sources and control board, 2- cuvette, 3- cuvette holder, 4- optical guide rail of cuvette, 5- piezoelectric sensor, 6- power supply, 7- amplifier, 8- oscilloscope, 9- computer) , b) schematic of the mechanism of cuvette holding in front of light source

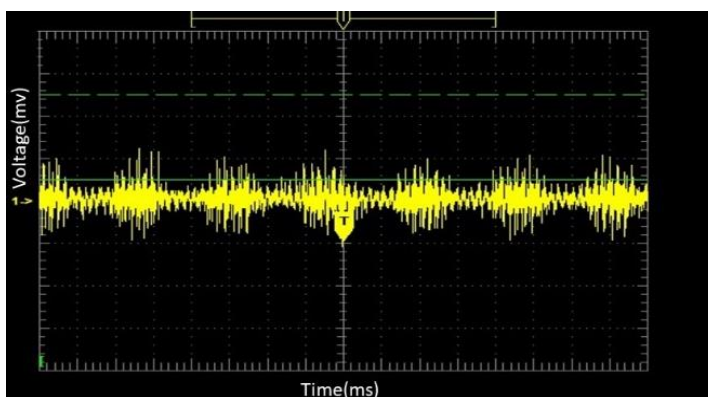
1. Ultraviolet
2. visible
3. Infrared

جدول (۲) مشخصات منابع نوری مورد استفاده در سامانه نوری-صوتی جهت تحریک نمونه‌ها
Table 2. Specifications of light sources used in the photoacoustic system to stimulate the samples

8	7	6	5	4	3	2	1	شماره LED
NIR	NIR	Red	Yellow	Green	Blue	Blue-White	UV	رنگ
940	840	615	560	530	470	450	395	طول موج (nm)
1540	1230	891	1228	683	533	1168	121	بیشینه توان تابشی (W/m^2)

سیگنال‌ها جهت مقایسه بود. بدین منظور با استفاده از نتایج کالیبراسیون حسگر پیزوالکتریک منتشرشده توسط سازنده برای تبدیل واحد از میلی ولت به شدت فشار صوت استفاده شد. قبل از هر چیز، جهت حذف نویز از سیگنال، از ابزار نویزگیری Wavelet Signal Denoiser موجود در R2020b Matlab استفاده شد.

شکل (۵) یک نمونه سیگنال نوری-صوتی حاصل از نمونه آب تحت تحریک نوری با طول موج ۳۹۵ nm با فرکانس پالسی یک هرتز را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه خروجی سیگنال‌های دریافت شده در اندازه‌گیری تجربی و شبیه‌سازی به ترتیب برحسب ولتاژ (میلی ولت) و فشار صوت (پاسکال) به دست آمد، نیاز به همسان‌سازی واحد دامنه



شکل (۵) پالس صوتی تولیدشده در نمونه آب در اثر تحریک منبع نوری با طول موج ۳۹۵ نانومتر و فرکانس پالسی یک هرتز
Figure 5. Acoustic pulse generated in a water sample by excitation of a light source with a wavelength of 395 nm and a pulse frequency of 1 Hz

با فرکانس‌های تابش مختلف از ۱-۴ Hz با توان تابشی ثابت به نمونه شیر تابانده شد و سیگنال‌های نوری-صوتی ایجادشده ثبت گردید. در گام بعد شدت توان تابشی منابع نوری در هر طول موج در فرکانس‌های ثابت تغییر داده شد. براساس نتایج به دست آمده فرکانس و شدت توان تابشی که سیگنال‌های قوی‌تری را ایجاد کردند انتخاب و ارزیابی‌های بیشتری بر روی نمونه‌های مختلف انجام شد. در ابتدا نمونه‌های شیر، آب، روغن زیتون و هوا (ظرف نمونه

۴.۲. ارزیابی آزمایشگاهی و صحت‌سنجی عملکرد سامانه
 آزمون‌های آزمایشگاهی جهت ارزیابی عملکرد سامانه و مقایسه برخی نتایج با نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شد. جهت صحت‌سنجی سامانه طیف‌نگاری نوری-صوتی، آزمون‌هایی بر روی یک نمونه شیر خالص با فرکانس مدولاسیون منبع و شدت توان‌های تابشی متفاوت انجام و سیگنال نوری-صوتی حاصل مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا منابع نوری

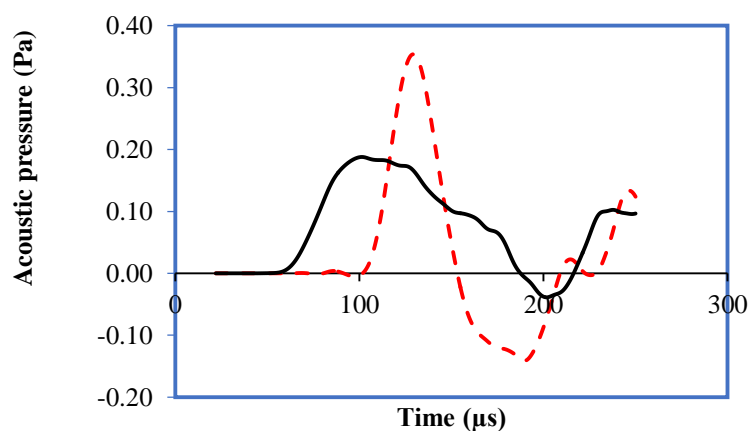
۳.۱.۱. محل قرارگیری حسگر پیزوالکتریک در مقابل منبع نوری

شکل (۶) موج‌های حاصل از آزمون‌های شبیه‌سازی شده برای موقعیت قرارگیری حسگر در مقابل و عمود بر جهت منبع نوری را نشان می‌دهد. مشخص است که سیگنال صوتی ایجاد شده در حالتی که حسگر پیزوالکتریک در مقابل منبع نور قرار دارد قوی‌تر بوده و فشار صوتی بیشتری را ایجاد می‌نماید. این نتیجه به این دلیل است که حسگر در مقابل منبع نوری به صورت مستقیم پالس‌های صوتی ایجاد شده که در راستای تحریک منبع نوری می‌باشد را دریافت می‌کند در حالی که حسگر عمود بر جهت منبع نوری سیگنال‌هایی که از نورهای پراکنده و منحرف شده به وجود آمده یا سیگنال‌های صوتی تغییر مسیر داده در نمونه را دریافت می‌کند که سیگنال‌های ضعیف‌تری هستند.

خالی) در مقابل منبع نوری در طول موج ۳۹۵ nm قرار داده شد و سیگنال‌های نوری-صوتی آن ثبت گردید. سپس، طیف‌نگاری نوری-صوتی نمونه‌ها بر اثر تحریک نوری در هفت طول‌موج، اندازه‌گیری و بیشینه دامنه پالس به صورت تابعی از طول موج برای نمونه‌ها مقایسه شد. در گام بعد، شیر خالص و مخلوط شیر و آب با درصد‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ حجمی، در سه تکرار و تحت تحریک هشت طول‌موج مورد ارزیابی و نتایج آن مورد تحلیل قرار گرفت. برای تحلیل نتایج، مقدار دامنه بیشینه^۱ سیگنال صوتی ایجاد شده استخراج و از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۲ (PCA) جهت بررسی قابلیت تمایز بین نمونه‌ها استفاده شد. در این آزمون‌ها از شیر با چربی ۳/۵٪ استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. بررسی پارامترهای مؤثر بر سیگنال نوری-صوتی با استفاده از مدل اجزا محدود

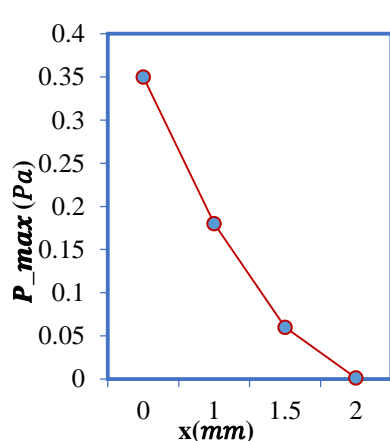


--- In front of the light source — Perpendicular to the light source

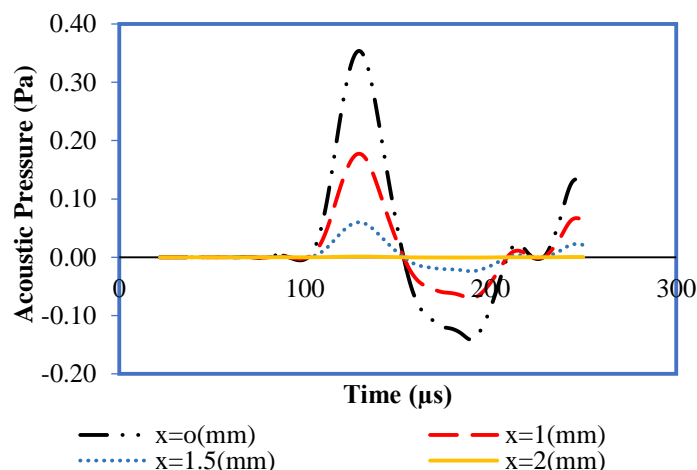
شکل (۶) تأثیر جهت قرارگیری حسگر پیزوالکتریک نسبت به جهت تابش منبع نوری بر دامنه بیشینه پالس نوری-صوتی
Figure 6. The effect of positioning the piezoelectric sensor relative to the direction of the light source radiation on the maximum amplitude of the photoacoustic pulse

1. Peak Amplitude
2. Principal Component Analysis

می‌شود که باعث پراکندگی نور و تضعیف شدید سیگنال صوتی به دلیل میرایی بالای هوا می‌شود. این نتیجه در آزمون‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت و ظرف نمونه حاوی نمونه همواره در تماس با منابع نوری تحریک گردید.



(ب)(ب)



(الف)(الف)

شکل (۷) - الف) فشار صوت تابعی از زمان و فاصله حسگر پیزوالکتریک از دیواره ظرف نمونه، ب) اثر فاصله حسگر پیزوالکتریک از دیواره ظرف نمونه بر دامنه بیشینه پالس نوری-صوتی

Figure 7. a) Sound pressure as a function of time and distance of piezoelectric sensor from the wall of the cuvette, b) Effect of the distance of the piezoelectric sensor from the wall of the cuvette on the maximum amplitude of the photoacoustic pulse

سیگنال در صورت تماس حسگر با جداره بیرونی ظرف نمونه، نیاز است همواره کوپلینگ صوتی بین حسگر پیزو و جداره ظرف نمونه وجود داشته باشد که هوا به دلیل میرایی شدید صوتی باعث تضعیف سیگنال نشود. بدین منظور در همه اندازه‌گیری‌ها از یک ژل کوپلینگ فراصوتی در محل اتصال بین حسگر پیزو و جداره ظرف نمونه استفاده شد. اصولاً در شرایط استفاده از حسگرهای پیزو کوپل شده با هوا (Air-coupled) می‌توان حتی با وجود فاصله بین حسگر پیزو و جداره ظرف نمونه سیگنال‌های قوی دریافت نمود.

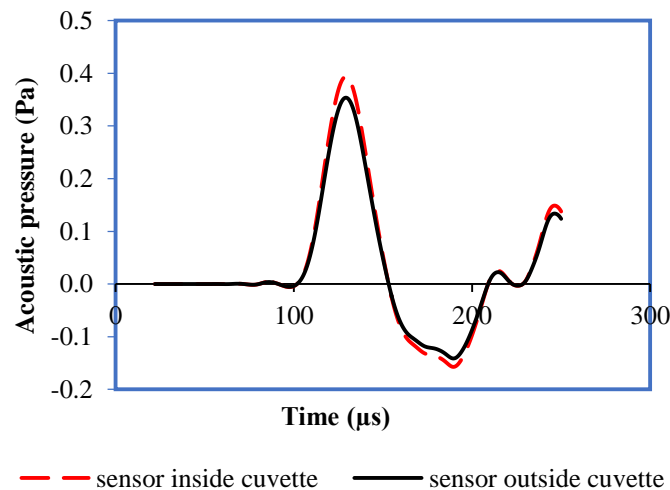
۳.۱.۳. تأثیر فاصله ظرف نمونه از منبع نوری

در شکل (۷) مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله ظرف نمونه از منبع نوری در فاصله ۰-۲ mm سیگنال‌های نوری-صوتی به شدت تضعیف شده و بیشینه فشار صوت آن از Pa ۰/۳۵ به صفر می‌رسد. این نتیجه به این دلیل می‌باشد که با فاصله گرفتن از منبع نوری، این فاصله با هوای اطراف پر

۳.۱.۳. محل قرارگیری حسگر در داخل یا خارج ظرف

نمونه

شکل (۸) نشان می‌دهد که هنگامی که حسگر پیزو در داخل ظرف نمونه و در تماس با نمونه قرار داشته باشد، سیگنال‌های کمی قوی‌تر با فشار صوتی بالاتری دریافت می‌کند که این نتایج با توجه به تماس مستقیم حسگر با نمونه تحریک شده منطقی به نظر می‌رسد، ولی غوطه‌ور کردن حسگر در نمونه‌های مایع نیاز به حسگرهای پیزوالکتریک با ابعاد کوچک و مقاوم در برابر نفوذ مایع داشته که در دسترس نبود. باین حال جهت جلوگیری از تضعیف



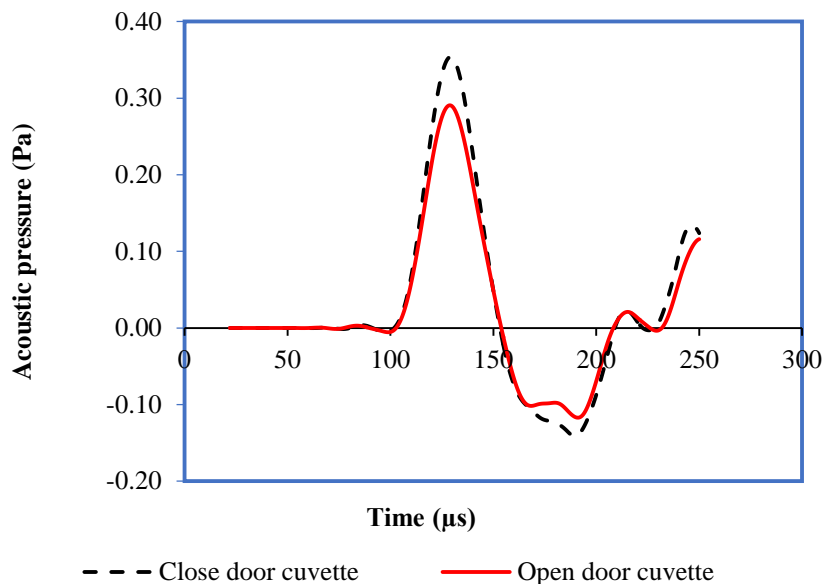
شکل (۸) تأثیر محل قرارگیری حسگر در داخل یا خارج ظرف نمونه بر دامنه بیشینه پالس نوری-صوتی

Figure 8. The effect of sensor location inside or outside the cuvette on the maximum amplitude of the photoacoustic pulse

نماید که این فشار به دیواره ظرف نمونه نیز منتقل شده و بر شدت پالس نوری-صوتی می‌افزاید. با این حال اندازه‌گیری با حالت ظرف نمونه باز به لحاظ عملیاتی راحت‌تر بوده چرا که بستن درب ظرف نمونه نیاز به گازبندی محکم برای دستیابی به اندازه‌گیری مطمئن دارد که می‌توان در مطالعات دیگر مد نظر قرار داد.

۴.۱.۳. اثر باز یا بسته بودن درب ظرف نمونه

شکل (۹) نشان می‌دهد که فشار صوتی ایجاد شده در حالتی که درب ظرف نمونه بسته است به میزان قابل توجهی بیشتر از حالتی است که درب ظرف نمونه باز می‌باشد. اصولاً در شرایط ظرف نمونه بسته، انبساط نمونه مایع درون ظرف نمونه (در اینجا شیر)، فشاری بر هوای مجاور خود ایجاد می-



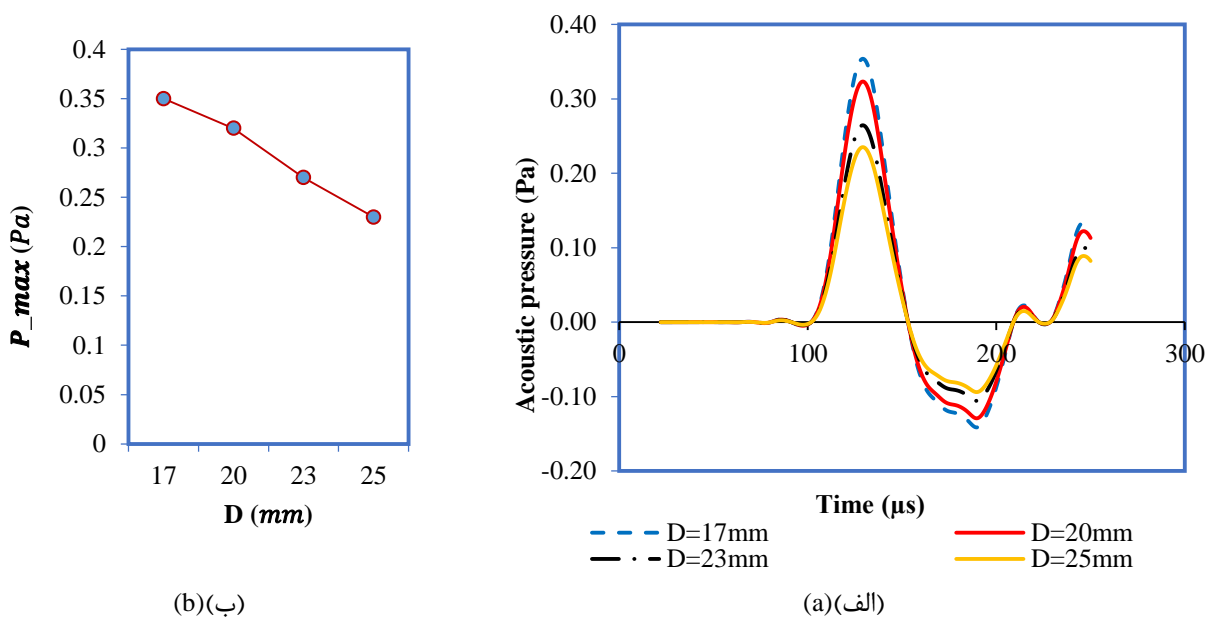
شکل (۹) تأثیر باز یا بسته بودن درب ظرف نمونه بر دامنه بیشینه پالس نوری-صوتی

Figure 9. The effect of opening or closing the cuvette door on the maximum amplitude of the photoacoustic pulse

۵.۱.۳. تأثیر قطر حسگر پیزوالکتریک

بررسی توانایی روش نوری-صوتی در کیفیت‌سنجی مایعات غذایی انجام شد نیز تأثیر قطر حسگر پیزوالکتریک بر نتایج فشار صوت بررسی شد و نتایج مشابه با این پژوهش به دست آمد که با کاهش قطر حسگر فشار صوتی بزرگ‌تری ثبت شد. در واقع فشار صوت بیانگر نیرو در واحد سطحی است که از طرف موج صوتی بر سطح حسگر پیزوالکتریک اعمال می‌شود؛ لذا برای یک موج مشخص با افزایش قطر حسگر پیزو فشار صوتی کاهش می‌یابد.

شکل (۱۰) تغییرات فشار صوت بر اثر تغییرات قطر حسگر پیزو را نشان می‌دهد. با کاهش قطر حسگر از ۲۵ - ۱۷ mm دامنه پالس نوری-صوتی از مقدار $0.35 - 0.23$ Pa افزایش یافته که این امر با توجه به تعریف فشار صوت که نسبت خطی عکس با مساحت سطح مقطع اعمال فشار دارد منطقی می‌باشد. در پژوهشی که توسط تاهودیر و همکاران (۲۰۱۶) جهت

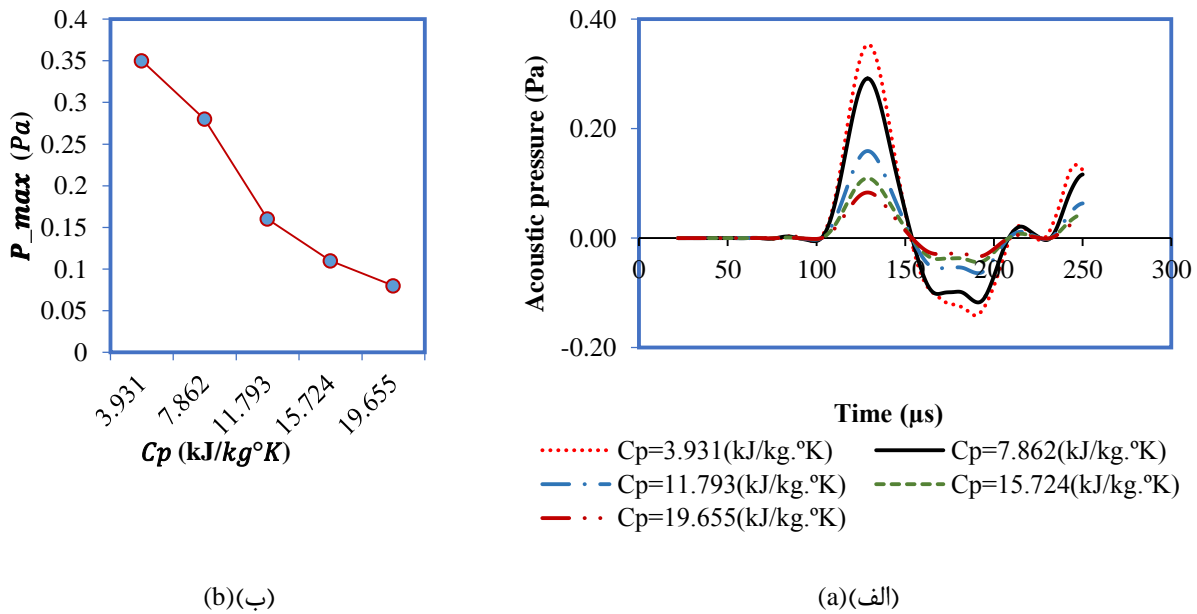


شکل (۱۰) الف) فشار صوت تابعی از قطر حسگر پیزوالکتریک، ب) اثر قطر حسگر پیزوالکتریک بر دامنه بیشینه پالس نوری-صوتی
Figure 10. a) Sound pressure as a function of piezoelectric sensor diameter, b) The effect of piezoelectric sensor diameter on the maximum amplitude of the photoacoustic pulse

صوت از $0.35 - 0.23$ Pa کاهش پیدا می‌کند. ظرفیت گرمایی ویژه بیانگر مقدار گرمایی است که باید به یک کیلوگرم از ماده داده شود تا دمای آن یک درجه سلسیوس افزایش یابد؛ لذا با در نظر گرفتن توان تابش در یک حد ثابت، افزایش ظرفیت گرمایی ویژه باعث افزایش دمای کوچک‌تر در ماده می‌شود و انبساط و تغییر شکل کوچک‌تری در ماده ایجاد می‌کند و نهایتاً پالس نوری-صوتی ضعیف‌تری تولید خواهد کرد.

۶.۱.۳. تأثیر ظرفیت گرمایی ویژه نمونه

از آنجا که این خاصیت حرارتی از ویژگی‌های مهم فیزیکی ماده می‌باشد و به شدت تحت تأثیر ترکیب و ساختار نمونه است، چندین روش گرماسنجی درگذشته برای اندازه‌گیری این پارامتر در مواد گزارش شده است [۳۳]. اثر تغییرات ظرفیت گرمایی بر سیگنال نوری-صوتی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش ظرفیت گرمایی ویژه از مقدار $19/65 - 3/93$ $\text{kJ/kg}^\circ\text{K}$ ، فشار

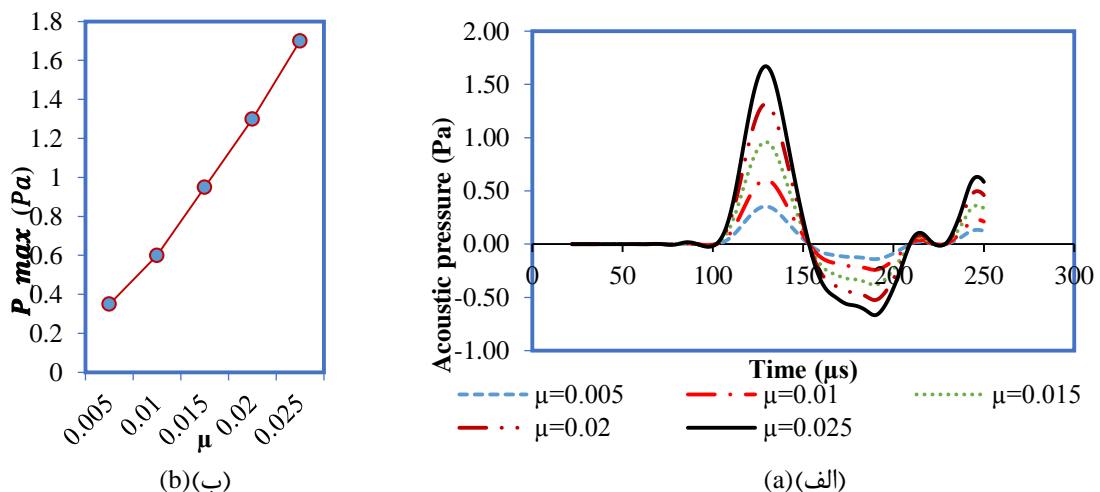


شکل (۱۱) الف) فشار صوت تابعی از ظرفیت ویژه گرمایی، ب) اثر ظرفیت گرمایی ویژه بر دامنه بیشینه پالس نوری- صوتی
Figure 11. a) Sound pressure as a function of specific heat capacity, b) Effect of specific heat capacity on the maximum amplitude of the photoacoustic pulse

۰/۰۰۵ تا مقدار ۱/۷ Pa در ضریب جذب نوری ۰/۰۲۵ افزایش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که هرچه میزان جذب نور در ماده بالاتر باشد فشار صوتی بیشتر و سیگنال قوی‌تری به وجود می‌آید زیرا با جذب نور بیشتر، در نمونه گرمای بیشتری ایجاد شده و در نتیجه به علت انبساط بیشتر، افزایش حجم بیشتر و فشار صوتی بیشتری را تولید می‌کند.

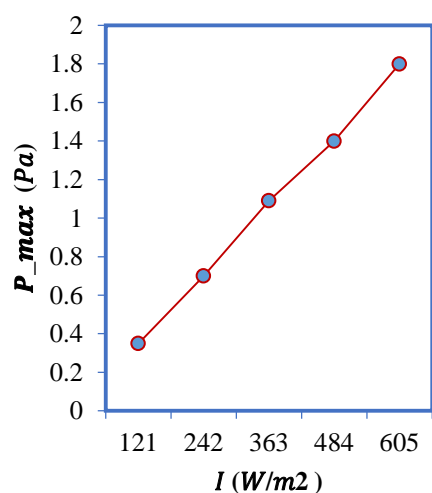
۷.۱.۳. تأثیر ضریب جذب نوری نمونه

در شکل (۱۲) اثر تغییرات ضریب جذب نوری نمونه نشان داده شده است. این نتایج بیانگر این است که گرم شدن نمونه و انقباض و انبساط آن کاملاً به مقدار نور جذب شده بستگی دارد. فشار صوت با ضریب جذب نوری به‌طور خطی افزایش یافته و از مقدار ۰/۳۵ Pa در ضریب جذب نوری

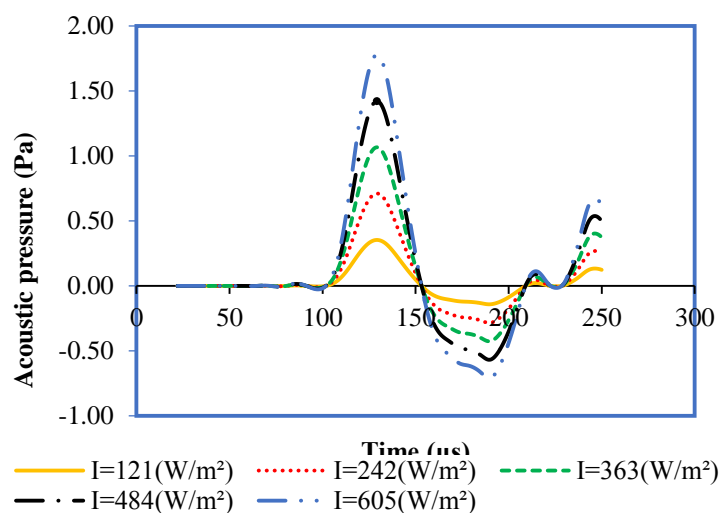


شکل (۱۲) الف) فشار صوت تابعی از ضریب جذب نوری، ب) اثر ضریب جذب نوری بر دامنه بیشینه پالس نوری- صوتی
Figure 12. a) Sound pressure as a function of optical absorption coefficient, b) Effect of optical absorption coefficient on the maximum amplitude of photoacoustic pulse

۶۰۵ - ۱۲۱، در واقع انرژی بیشتری در واحد زمان و سطح به نمونه وارد شده و این افزایش انرژی باعث تحریک قوی‌تر نمونه‌ها و در نتیجه افزایش فشار صوتی نوری از مقدار Pa $1/8 - 0/35$ به پاسکال با یک رابطه خطی شده است. این نتیجه با نتایج آزمایش‌های تجربی توسط [۱۸] انطباق دارد.



(ب) (ب)



(الف) (ا)

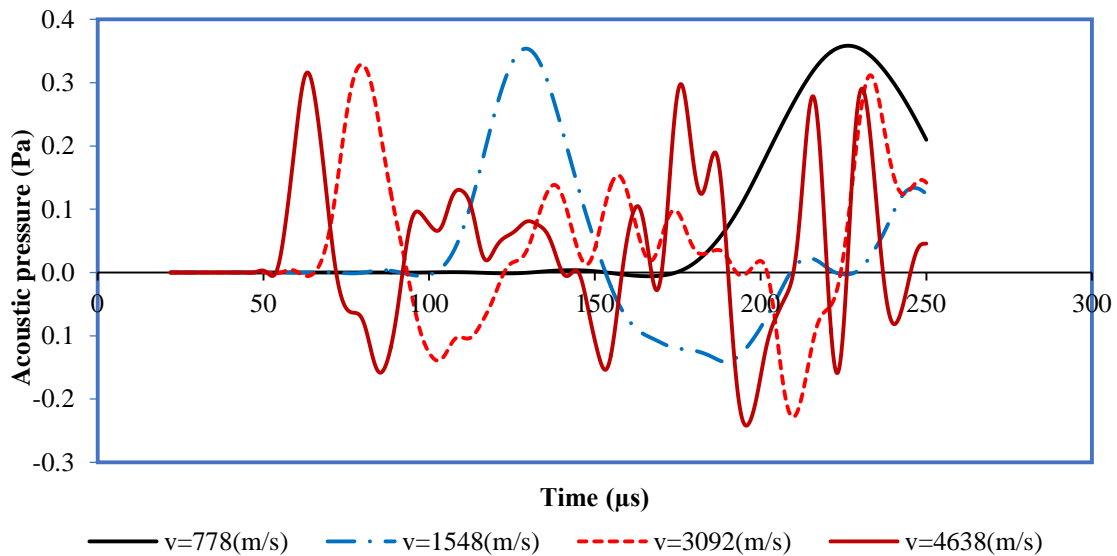
شکل (۱۳) الف) فشار صوت تابعی از شدت تابش نوری یا توان تابشی، ب) اثر شدت تابش نوری یا توان تابشی بر دامنه بیشینه پالس نوری-صوتی
Figure 13. a) Sound pressure as a function of light intensity or radiant power, b) The effect of light intensity or radiant power on the maximum amplitude of a photoacoustic pulse

۱.۳.۱۰. تأثیر افزودن آب به شیر خالص

در شکل (۱۵) اثر افزودن آب به شیر خالص، بر پالس نوری-صوتی نشان داده شده است. نمودار نشان می‌دهد که با اضافه کردن آب با درصدهای مختلف به شیر، دامنه پالس نوری-صوتی کاهش یافته است. البته تفاوت در درصدهای اختلاط پایین بسیار کوچک است ولی با افزایش مقدار آب به ۱۰٪ می‌توان کاهش قابل توجهی در دامنه سیگنال مشاهده نمود. کاهش دامنه صوت با افزایش آب به شیر به دلیل بالا رفتن ظرفیت گرمایی ترکیب آب - شیر با افزایش آب در نمونه است چرا که ظرفیت گرمایی آب ($4/183 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$) از شیر ($3/931 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$) بزرگ‌تر است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که روش نوری-صوتی می‌تواند توانایی قابل توجهی در تشخیص تقلب در مایعات غذایی داشته باشد.

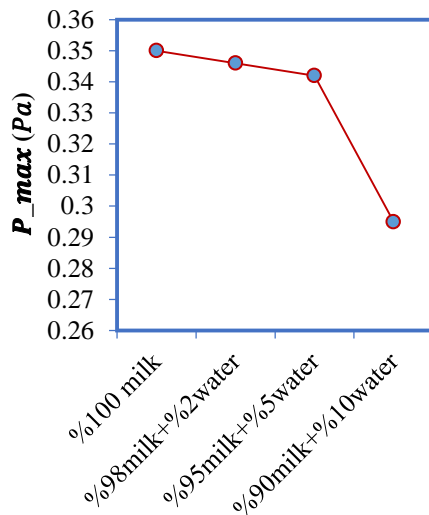
۱.۳.۹. تأثیر تغییر سرعت صوت در نمونه

تغییرات فشار صوتی در اثر تغییرات سرعت صوت در شکل (۱۴) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییر در سرعت صوت در نمونه اثر بسیار واضحی بر فرکانس پالس تولیدی داشته ولی تغییر معناداری در بیشینه دامنه صوت ایجاد نکرده است. اصولاً با افزایش سرعت صوت در ماده، زمان کمتری برای عبور صوت در یک فاصله مشخص (در اینجا ضخامت ظرف نمونه حاوی نمونه) نیاز خواهد بود. با محاسبه فرکانس هر پالس معادل یک نوسان کامل تقسیم بر زمان پالس، فرکانس پالس در سرعت‌های $1548, 778 \text{ m/s}$ ، $4638, 3092$ به ترتیب برابر $6, 10, 16$ و 25 kHz است.

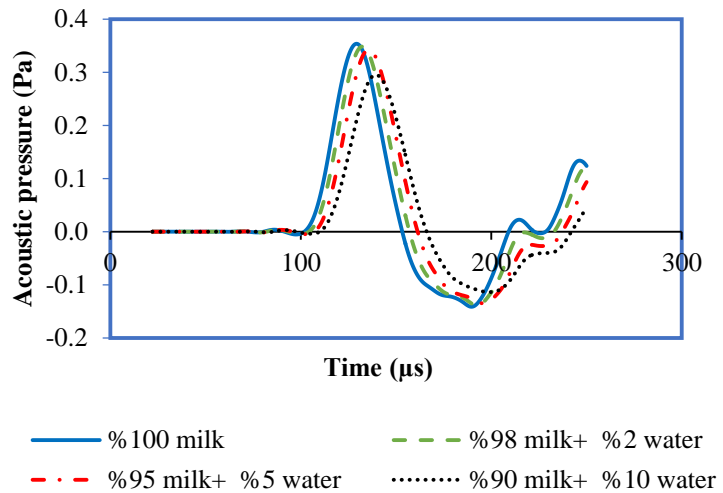


شکل (۱۴) اثر تغییر سرعت صوت بر دامنه بیشینه پالس نوری-صوتی

Figure 14. The effect of changing the speed of sound on the maximum amplitude of the photoacoustic pulse



(ب)(ب)



(الف)(الف)

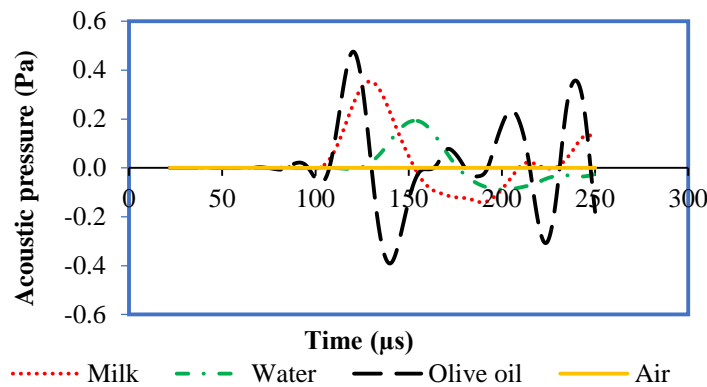
شکل (۱۵) الف) فشار صوت تابعی از زمان برای درصدهای مختلف اختلاط آب و شیر، ب) اثر افزودن آب به شیر بر دامنه بیشینه پالس نوری-صوتی

Figure 15. a) Sound pressure as a function of time for different percentages of water and milk mixing, b) The effect of adding water to milk on the maximum amplitude of the photoacoustic pulse

اختلاف فرکانس نیز در هر چهار نمونه وجود دارد و مقادیر آن در آب، شیر و روغن زیتون به ترتیب برابر ۷، ۱۰ و ۳۳ بوده که با توجه به ویژگی‌های حرارتی و نوری و همچنین سرعت‌های صوتی متفاوت منطقی به نظر می‌رسد.

۱۱.۱.۳ بررسی تغییر نمونه‌ها

نتایج شبیه‌سازی تغییر نمونه مورد آزمایش برای شیر، آب و روغن زیتون به همراه هوا (ظرف نمونه خالی) در شکل (۱۶) نشان داده شده است. فشار صوتی در روغن زیتون بالاترین مقدار و در هوا کمترین میزان را نشان داده است، همچنین



شکل (۱۶) اثر تغییر نمونه مایع (شیر، آب، روغن زیتون و هوا) بر شکل موج نوری-صوتی شبیه‌سازی شده

Figure 16. The effect of changing the liquid sample (milk, water, olive oil and air) on the simulated photoacoustic waveform

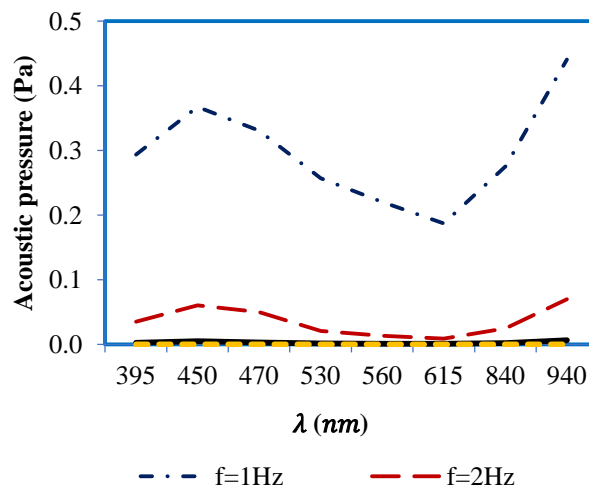
بیشینه فشار صوت خروجی در هر سیگنال به صفر نزدیک شده است. این نتایج با منطق نظری حاکم بر پدیده نوری-صوتی منطبق است چرا که با افزایش فرکانس مدولاسیون منبع نور، زمان تابش به نمونه در هر بار روشن و خاموش شدن منبع کاهش یافته و تحریک حرارتی ضعیف‌تری در نمونه ایجاد می‌نماید.

۲.۳. آزمون‌های آزمایشگاهی

۲.۳.۱. اثر فرکانس مدولاسیون و توان تابش منبع نور

بر پالس نوری-صوتی

شکل (۱۷) نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس مدولاسیون منبع نور، سیگنال‌های نوری-صوتی ضعیف‌تری به دست می‌آید به گونه‌ای که در فرکانس‌های بالاتر از دو هرتز مقدار

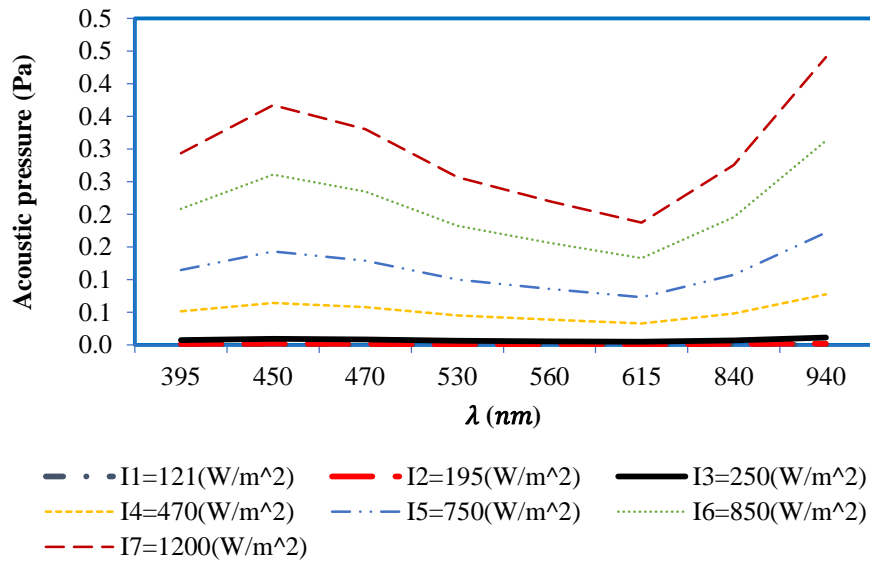


شکل (۱۷) اثر تغییر فرکانس مدولاسیون منبع نور بر دامنه بیشینه پالس نوری-صوتی، در طول موج‌های مختلف

Figure 17. The effect of changing the frequency of light source modulation on the maximum amplitude of the photoacoustic pulse at different wavelengths

نتایج نشان داده شده تحت تأثیر فرکانس مدولاسیون و شدت تابش منبع نور بیانگر صحت عملکرد سامانه مطابق با نظریه نوری-صوتی می‌باشد.

شکل (۱۸) نشان می‌دهد که با افزایش شدت توان تابشی در طول موج‌های مختلف، سیگنال‌های نوری-صوتی قوی‌تری تولید شده که با نتایج شبیه‌سازی نیز مطابقت دارد.



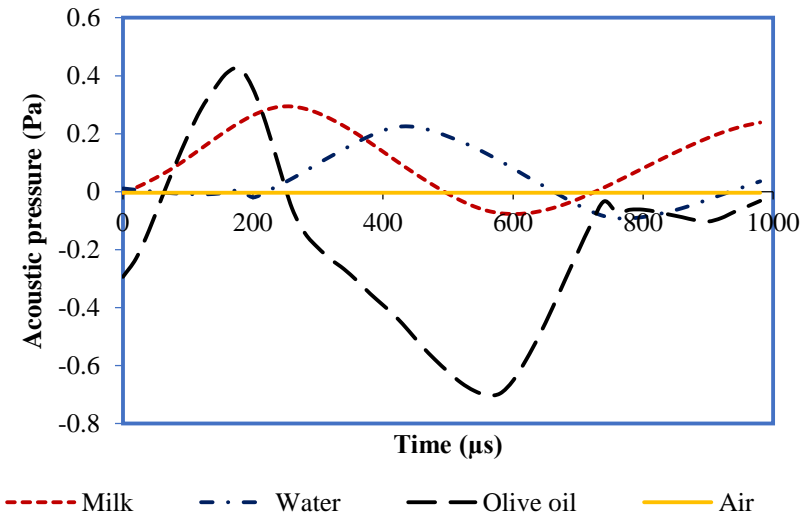
شکل (۱۸) نتایج آزمایشگاهی اثر تغییر شدت توان تابشی بر دامنه بیشینه پالس نوری-صوتی

Figure 18. Experimental results of the effect of changing the intensity of radiative power on the maximum amplitude of the photoacoustic pulse

شامل هوا که در شبیه‌سازی نیز بررسی شد مورد آزمایش عملی قرار گرفت. نمونه‌ها در مقابل منبع نوری با طول موج ۳۹۵ nm (مطابق شبیه‌سازی) در ۴ تکرار قرار گرفت و پالس‌های نوری-صوتی پس از حذف نویز به دست آمد.

۳.۲.۲. نتایج اندازه‌گیری تجربی برای نمونه‌های مختلف مایع

در شکل (۱۹) نتایج اندازه‌گیری تجربی روش نوری-صوتی در نمونه‌های مختلف مایع را نشان می‌دهد. در این بخش نمونه‌های مایع شیر، آب، روغن زیتون و ظرف نمونه خالی



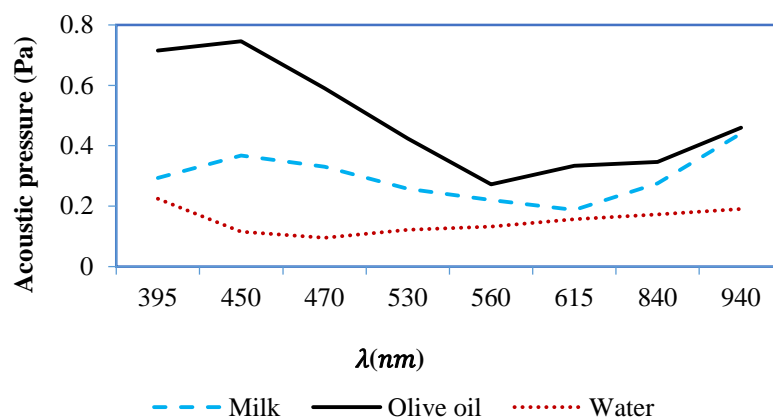
شکل (۱۹) نتایج آزمایشگاهی آزمون شیر، آب، روغن زیتون و هوا در شرایط مشابه با شبیه‌سازی (در طول موج ۳۹۵ nm)

Figure 19. Laboratory results of milk, water, olive oil and air tests under conditions similar to simulation (at 395 nm)

شکل (۲۰) نتایج طیف‌نگاری نوری-صوتی نمونه‌های آب، شیر و روغن زیتون با ۸ طول موج مختلف از ۳۹۵-۹۴۰ nm را نشان می‌دهد. بیشینه فشار صوتی ایجاد شده در شیر، آب و روغن زیتون به ترتیب در طول‌موج‌های ۴۵۰، ۳۹۵ و ۴۵۰ با مقادیر ۰/۳۴، ۰/۲۲ و ۰/۷۴ به دست آمد. همچنین در کلیه طول‌موج‌ها روغن زیتون بیشترین و آب کمترین دامنه و در نتیجه فشار صوت را نشان می‌دهد. با طیف‌نگاری نوری-صوتی اصولاً متغیرهای بیشتری جهت مقایسه نمونه‌ها فراهم می‌گردد که امکان تشخیصی روش در ارزیابی کیفی مایعات غذایی را افزایش می‌دهد.

قوی‌ترین پالس از نمونه روغن زیتون و سپس به ترتیب از شیر و آب به دست آمده که از نظر ترتیب مطابق نتایج شبیه‌سازی است و دلالت بر صحت عملکرد سامانه نوری-صوتی دارد. در نتایج آزمایشگاهی، بیشینه فشار صوتی به دست آمده تا حدی از نتایج شبیه‌سازی کمتر بوده که می‌تواند به دلیل افت‌های انرژی ناشی از انتقال از منبع نور به نمونه و تضعیف صوتی از جداره ظرف نمونه به حسگر پیزوالکتریک باشد.

۳.۲.۳. طیف‌نگاری نمونه‌های مایع



شکل (۲۰) طیف‌های نوری-صوتی آزمایشگاهی برای نمونه‌های شیر، روغن زیتون و آب
Figure 20. Laboratory photoacoustic spectra for milk, olive oil and water samples

مؤلفه‌های اصلی بر روی این نمونه‌ها را نمایش می‌دهد که تمایز واضحی بین نمونه شیر خالص و نمونه‌های شیر دارای تقلب آب با درصد‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش مقدار آب، نمونه‌ها به سمت راست و بالاتر روی محور PC-1 و PC-1 حرکت کرده و از شیر خالص فاصله می‌گیرند.

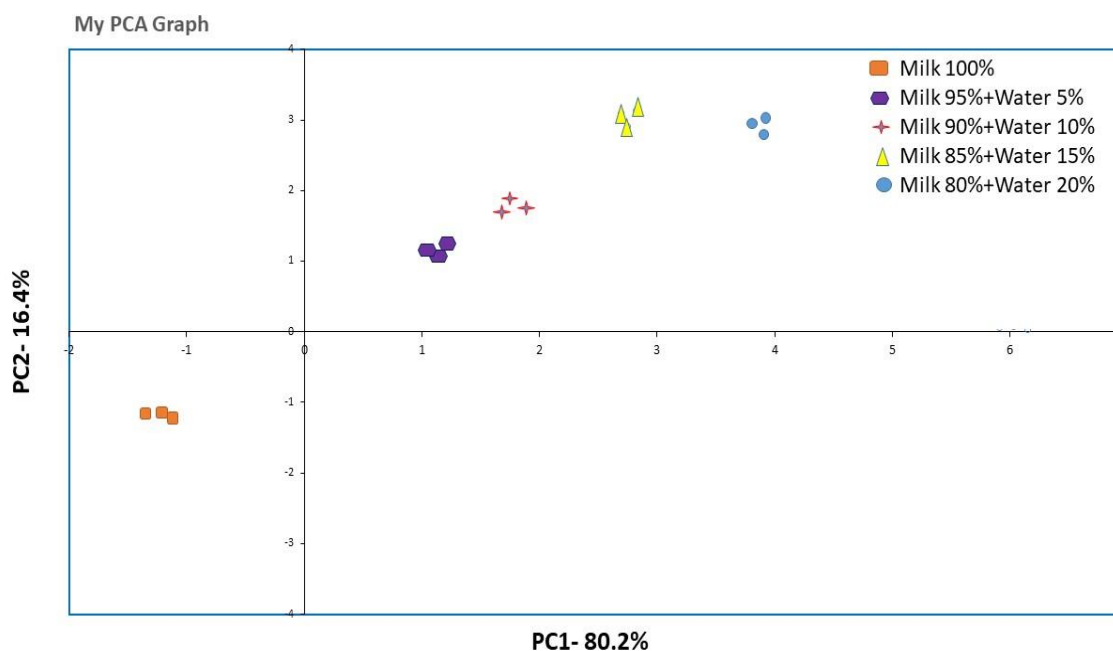
۴.۲.۳. امکان تشخیص وجود تقلب آب در شیر
جدول (۳) بیشینه دامنه فشار صوتی نمونه‌های شیر خالص و نمونه‌های مختلط با آب در سطوح مختلف در طول موج-های از ۳۹۵-۹۴۰ nm را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در هر طول موج، افزایش مقدار آب در شیر باعث کاهش دامنه بیشینه فشار صوت شده است. شکل (۲۱) نتایج تحلیل

جدول (۳) مقدار بیشینه دامنه فشار صوتی سیگنال (Pa) نمونه‌های شیر در طول موج‌های مختلف

Table 3. Maximum value of signal acoustic pressure range (Pa) of each sample at eight different wavelengths

طول موج (nm)	شیر خالص	شیر + ۹۵٪ آب	شیر + ۹۰٪ آب	شیر + ۸۵٪ آب	شیر + ۸۰٪ آب
۳۹۵	۰/۲۹۳	۰/۲۸۷	۰/۲۸۴	۰/۲۷۲	۰/۲۶۰
۴۵۰	۰/۳۶۷	۰/۳۵۹	۰/۳۵۵	۰/۳۴۰	۰/۳۲۵
۴۷۰	۰/۳۳۰	۰/۳۲۳	۰/۳۲۰	۰/۳۰۶	۰/۲۹۲

۵۳۰	۰/۲۵۷	۰/۲۵۱	۰/۲۴۸	۰/۲۳۸	۰/۲۲۷
۵۶۰	۰/۲۲۰	۰/۲۱۵	۰/۲۱۳	۰/۲۰۴	۰/۱۹۴
۶۱۵	۰/۱۸۷	۰/۱۸۳	۰/۱۸۱	۰/۱۷۳	۰/۱۶۵
۸۴۰	۰/۲۷۵	۰/۲۶۹	۰/۲۵۵	۰/۲۵۵	۰/۲۴۳
۹۴۰	۰/۴۴۰	۰/۴۳۱	۰/۴۰۹	۰/۴۰۹	۰/۴۰۹



شکل (۲۱) تحلیل مؤلفه‌های اصلی تقلب آب با درصد‌های مختلف در شیر

Figure 21. Analysis of the main components of water adulteration with different percentages in milk

۴. نتیجه‌گیری

در مقابل منبع نور قرار می‌گیرد، افزایش دامنه سیگنال را در پی داشت، بنابراین قرارگیری حسگر در وجهی از ظرف نمونه که در مقابل منبع نور قرار می‌گیرد توصیه می‌گردد. همچنین نیاز است تماس مستقیم بین کووت و منبع نور و همچنین کوپلینگ آکوستیکی بین حسگر پیزوالکتریک و جداره کووت برقرار باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد با بسته بودن درب ظرف نمونه نسبت به وضعیت باز، فشار صوتی بزرگ‌تری تولید می‌شود. افزایش ظرفیت گرمایی ویژه نمونه باعث کاهش شدت کاهش شدت سیگنال دریافتی گردید. همچنین افزایش ضریب جذب نوری نمونه و شدت تابش منبع نوری، شدت سیگنال دریافتی توسط حسگر را بیشتر کرد. افزایش سرعت صوت در نمونه باعث افزایش فرکانس پالس آکوستیکی گردید. نتایج آزمایشگاهی عملکرد سامانه

در این پژوهش اثر متقابل نوری-صوتی بین منبع نور و نمونه مایع داخل یک کووت تحت تأثیر عوامل اثرگذار از چیدمان اندازه‌گیری و خصوصیات نمونه با روش اجزا محدود شبیه‌سازی شد. این عوامل شامل چگونگی محل قرارگیری حسگر پیزوالکتریک در مقابل منبع نور، فاصله ظرف نمونه از منبع نور، محل قرارگیری حسگر در داخل یا خارج ظرف نمونه، باز یا بسته بودن درب ظرف نمونه، قطر حسگر پیزوالکتریک، ظرفیت ویژه گرمایی نمونه، ضریب جذب نوری نمونه، شدت تابش نوری یا توان تابشی منبع نور، و تغییر سرعت صوت در نمونه بوده است. تغییر زاویه قرارگیری حسگر پیزو در مقابل منبع نور از حالت عمود به حالتی که

هم در حوزه فرکانس ایجاد می‌شود که بر مبنای آن می‌توان از این روش برای آزمون نمونه‌های مایع و کیفیت‌سنجی آن استفاده نمود. در صورت استفاده از طول‌موج‌های مختلف نور در ناحیه مرئی و فرورسرخ نزدیک می‌توان طیف نوری-صوتی هر نمونه را به‌عنوان یک اثرانگشت مورد مقایسه و مبنای تشخیص قرار داد. از این روش می‌توان در تشخیص وجود تقلب در مایعات غذایی گوناگون استفاده نمود.

نوری-صوتی نشان داد که با افزایش فرکانس و کاهش شدت توان تابشی مقدار بیشینه دامنه سیگنال کاهش پیدا کرده که این نتایج مطابق با منطبق نظری نوری-صوتی و موید صحت عملکرد سامانه می‌باشد. همچنین افزودن آب با درصدهای مختلف به شیر خالص با استفاده از روش مذکور و با استفاده از نتایج بیشینه دامنه سیگنال و تحلیل PCA به‌خوبی تشخیص داده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که با تغییر نمونه‌ها، تغییراتی در سیگنال دریافتی هم در حوزه زمان و

منابع

- [1] Almond, P., & Patel, P. (1996). *Photothermal Science & Techniques* (4th ed). New York: Springer.
- [2] Wang, L. (2009). *Photoacoustic Imaging & Spectroscopy* (2nd ed). New York: Hilger.
- [3] Bicanic, D. (2011). On the photoacoustic, photothermal & colorimetric quantification of carotenoids & other phytonutrients in some foods: a review. *J. Mol. Struct.*, 993, 9–14.
- [5] Jafarian Dehkordi, F., Pashazadeh, A., & Asadi, M. Photoacoustic molecular imaging. (2015). *ISMJ.*, 1, 209-200. (In Farsi).
- [6] Bell, AG. (1880). On the production and reproduction of sound by light. *Am. J. Sci.*, 20, 305-324.
- [7] Roome, K., Payne, P., & Dewhurst, R. (1999). Towards a sideways looking intravascular laser ultrasound probe. *Sens. Actuators, A.*, 76, 197–202.
- [8] Scruby, C., & Drain, L. (1990). *Laser ultrasonics: techniques & applications* (2nd ed). New York: Hilger.
- [9] Zhang, Yuqi., Yu, Jicheng., Kahkoska, Anna. & Gu, Zhen. (2017). Photoacoustic Drug Delivery. *J. Sens.*, 17, 1400, 50-63.
- [10] Popa, C., Dumitras, D., Patachia, M. & Banita, C. (2014). Testing fruits quality by laser photoacoustic spectroscopy assay. *Laser Phys.*, 24, 1144-1149.
- [11] Wang, X., Pang, Y., Ku, G., Xie, X., Stoica, G., & Wang, L. (2003). Non-invasive laser-induced photoacoustic tomography for structural & functional imaging of the brain in vivo. *Nat. Biotechnol.*, 21, 803-806.
- [12] Mohebifar, M., Khalilzadeh, J., & Dibai, b. (2011). Measurement of collision time of SO_2 and F_6 gases using laser photoacoustic spectroscopy. *J. Appl. Phys.*, 1, 35. (In Farsi).
- [13] Velasco, D., Baesso, M., Medina, A., Bicanic, D., Koehorst, R., Hooft, J., & Carlos, A. (2011). Thermal diffusivity of periderm from tomatoes of different maturity stages as determined by the concept of the frequency-domain open photoacoustic cell. *J. Appl. Phys.*, 109, 347-385.
- [14] Bottger, S., Kohring, M., Willer, U., & Schade, W. (2013). Off-beam quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy with LEDs. *Phys. B.*, 113, 227–232.
- [15] Martel, R., Soukpoe-Kossi., Paquin, C., & Leblanc, R. (1987). Photoacoustic analysis of some milk products in ultraviolet & visible light. *J. Dairy Sci.*, 70, 1822–1827.
- [16] Bicanic, D., Skenderovich, C., Markovic, K., Dokad, O., Pichlerb, L., Pichlerb, G., & Luterottie, S. (2010). Quantification of lycopene in the processed tomato-based products by means of the light-emitting diode (LED) & compact photoacoustic (PA) detector. *J. Phys. Conf. Ser.*, 214, 25-35.
- [17] Liu, L., Wang, Y., Gaong, C., Huan, H., Zhao, B., & Yan, L. (2015). Photoacoustic spectroscopy as a non-destructive tool for quantification of pesticide residue in apple cuticle. *Int. J. Thermophys.*, 36, 868–872.
- [18] Tauhidur, R., Alex&er, T., Perry, S., Aadhar, J., David, E., & Tanzeem, C. (2016). Nutrilizer: a mobile system for characterizing liquid food with photoacoustic effect. In: *Proceedings of 14th Association for computing machinery Conference (ACM)*, 14-16 Nov. Stanford, United State of America, pp., 125-139.
- [19] Popa, C., & Petrus, M. (2017). Heavy metals impact at plants using photoacoustic spectroscopy technology with tunable CO_2 laser in the quantification of gaseous molecules. *Microchem. J.*, 134, 390–399.



- [20] Hernandez, C., Dominguez, A., Valderrama, C., Cruz, A., Martinez, E., & Ordonez, M. (2020). Photoacoustic spectroscopy in the characterization of bread with turmeric addition. *Food Bioprocess Technol.*, 13, 2104-2119.
- [21] Puiu, A., Fiorani, L., Giubileo G, Lai, A., Mannori, S., & Saleh, W. (2021). Quantum cascade laser photoacoustic spectroscopy applied to rice flour analysis. *Food Sci. Eng.*, 2, 79-91.
- [22] Fiorani, L., Artuso, F., Giardina, I., Lai, A., Mannori, S., & Puiu, A. (2021). Photoacoustic laser system for food fraud detection. *J. Sens.*, 21, 4178-4189.
- [23] Lee, J. H., & Burger, C. P. (1995). Finite element modeling of laser generated lamb waves. *Computers & Structures.*, 54, 499-514.
- [24] Strohm, E., Gorelikov, I., Matsuura, N., & Kolios, M. (2014). Modeling photoacoustic spectral features of micron-sized particles. *Phys. Med. Biol.*, 59, 57-74.
- [25] Wang, J., Shen, Zh., Xu, B., Ni, X., Guan, J., & Lu, J. (2012). Simulation on thermoelastic stress field & laser ultrasound waveform in non-metallic materials by using FEM. *J. Appl. Phys.*, 84, 301-307.
- [26] Firouzi, K., & Saffari, N. (2015). A numerical model for the study of photoacoustic imaging of brain tumours. *Med. Phys.*, 85, 12-29.
- [27] Montigny, E. (2015). Photoacoustic tomography principles & applications. *Anal. Chem.*, 50, 875-882.
- [28] Aminolislami, S., & Maquli, K. (2016). A review of photoacoustic imaging and its biomedical applications. In: *Proceedings of 2th International Conference and the 3th National Conference on the Application of New Technologies in Engineering Sciences*. 26 Feb, Torbat-e-Heydariyeh Universit, Iran. pp., 53-58. (In Farsi).
- [29] Oda, S., Sawada, T., & Kamada, H. (1978). Determination of ultratrace cadmium by laser-induced photoacoustic absorption spectrometry. *Anal. Chem.*, 50, 865-872.
- [30] Lai, H., & Young, K. (1982). Theory of the pulsed photoacoustic technique. *J. Acoust. Soc. Am.*, 72, 200-216.
- [31] Hand, D., Hodgson, P., Carolan, T., Quan, K., Mackenzie, H., & Jones, J. (1993). Detection of photoacoustic waves in liquids by fibre optic interferometry. *Opt. Commun.*, 104, 1-6.
- [32] Quan, K., MacKenzie, H., Hodgson, P., & Christison, G. (1993). Photoacoustic generation in liquids with low optical absorption. *Opt. Commun.*, 104, 1-7.
- [33] Touloukian, Y.S. (1970). *Thermophysical Properties of Matter (2nd ed)*. New York: Purdue University.