بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

مطالعه محاسباتی موج صوتی الکتروتنگشی تولید شده در عبور پالس لیزری TEM_{01} از داخل فیبر نوری

مهدیس بیات، مسعود رضوانی جلال*، مسعود پیشدست، علیرضا عبدی کیان

گروه فیزیک و فوتونیک، دانشگاه ملایر، ملایر

rezvanijalal@malayeru.ac.ir

چکیده – در این مقاله، به محاسبه عددی تولید موج صوتی با مکانیسم الکتروتنگش در عبور پالس لیزر از داخل یک فیبر نوری پرداخته می‌شود. برای انجام مطالعات از معادله موج هیدرودینامیکی استفاده می‌گردد. فرض می‌شود که اختلال اولیه چگالی متناسب با توان دوم میدان الکتریکی باشد. برای مشاهده انتشار دو بعدی صوت از مد لیزری TEM_{01} استفاده می‌شود. با حل عددی معادله، فرکانس‌های صوتی تشدیدی تار نوری و ویژه توابع مربوطه به دست می‌آیند. با استفاده از قضیه بسط، انتشار عرضی موج صوتی با استفاده از یک برنامه متمتیکا مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. مشاهده می‌شود که اکوهای صوتی تولید شده در نقاط مختلف تار دارای ساختار زمانی متفاوت هستند.

کلید واژه- شبیه‌سازی، صوت الکتروتنگشی، مد لیزری TEM_{01}، معادله موج هیدرودینامیکی.

Computational Study of Electrostriction Sound Wave Generated in Transmission of TEM_{01} Laser through an Optical Fiber

Mahdis Bayat, Masoud Rezvani Jalal, Masoud Pishdast, Alireza Abdikian

Physics and Photonics Department, Malayer University, Malayer

rezvanijalal@malayeru.ac.ir

Abstract- In this paper, numerical computation of sound wave generation by electrostriction mechanism in propagation of a laser pulse within an optical fiber is considered. To accomplish the study, the hydrodynamic wave equation is used. It is assumed that, the initial density perturbation is proportional to the second power of the electric field. In order to observe the two-dimensional propagation of the sound, TEM_{01} laser mode is incorporated. By numerical solving of the equation, resonant sound frequencies of the fiber and related eigen-functions are obtained. Using the expansion theorem, the transverse propagation of the sound is simulated by a Mathematica code. Acoustic echoes in different points are observed with different temporal structure.

Keywords: Electrostriction sound, Hydrodynamic wave equation, Simulation, TEM_{01} laser mode.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

برانگیزش صوت در داخل مواد با استفاده از نور به آکوستواپتیک معروف است [۱]. در این اثر، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی نور در برهمکنش با محیط باعث ایجاد تنش مکانیکی و ایجاد صوت می‌شوند. شاید بتوان گفت اولین کسی که کارهای تخصصی روی آکوستواپتیک انجام داده است الکساندر گراهام بل در حدود سال ۱۸۸۰ می‌باشد. اگرچه اپتوآکوستیکِ سنتی قدمت زیادی دارد اما با ظهور لیزرهای پرقدرت این اثر وارد حوزه‌های پژوهشی نوینی شده است و اخیراً به نام اپتوآکوستیک لیزری شناخته می‌شود [۲]. سازوکارهای مختلفی برای تولید صوت در برهمکنش لیزر با ماده کشف شده است که از آنها می‌توان به اثر گرماکشسانی، پتانسیل تغییر شکل، اثر پیزوالکتریک وارون و اثر الکترونتگش اشاره کرد [۳]. اثر الکترونتگش در محیط‌های اپتیکی شفاف ظاهر می‌شود و ناشی از تغییر شکل موضعی ماده در برهمکنش با میدان الکتریکی نور می‌باشد. یکی از جاهایی که این اثر بروز پیدا می‌کند در انتقال پالس لیزری قوی از درون فیبرهای نوری می‌باشد. البته الکترونتگش در این حالت یک عامل اتلافی است و سعی در کاهش آن می‌باشد. اثر الکترونتگش لزوماً همیشه یک عامل مزاحم و اتلاف‌کننده نیست و می‌توان از آن در طراحی حسگرها و طیف‌سنج‌ها بر اساس پراکندگی بریلوئن القایی نیز استفاده کرد [۴].

مطالعه پدیده فوتوآکوستیک لیزری با منشأ الکترونتگش در داخل تارهای نوری اهمیت مطالعاتی و کاربردی زیادی دارد. در مقاله حاضر، تولید و انتشار صوت الکترونتگشی در عبور پالس لیزر با مُد TEM_{01} از داخل یک تار نوری مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. انتظار می‌رود که اکوهای صوتی ظاهر شده در قسمت‌های مختلف تار دارای ساختار زمانی متفاوت ولی توزیع فرکانسی یکسان باشند.

تئوری و فرمول‌بندی

برای مطالعه اثر الکترونتگش لیزری در داخل فیبر نوری، از یک تار با مقطع دایروی که دارای شعاع غلاف b و شعاع هسته a (و $b \gg a$) است استفاده می‌گردد. یک پالس لیزر به هسته تار وارد می‌شود و در طول آن منتشر می‌گردد. برهمکنش نور با محیط شیشه‌ای تار باعث ایجاد تغییرات در چگالی آن می‌شود. اگر چگالی تعادلی شیشه تار با ρ_0 و تغییرات آن با ρ نشان داده شود، آنگاه معادله حاکم بر ρ با تقریب هیدرودینامیکی به صورت زیر خواهد بود [۴]:

$$\nabla^2\rho - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\rho}{\partial t^2} = \boldsymbol{\nabla}.\boldsymbol{F} \qquad (۱)$$

که در آن v سرعت صوت و $\boldsymbol{F}$ نیز چگالی حجمی نیروی الکترونتگشی است که به شکل زیر می‌باشد:

$$\boldsymbol{F} = \frac{\rho_0}{8\pi}\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\right)\boldsymbol{\nabla}E^2 \qquad (۲)$$

ε تابع دی‌الکتریک تار و E نیز اندازه میدان الکتریکی لیزر است. هنگامی که نور لیزر به هسته تار وارد می‌شود یک موج صوتی در آنجا تولید می‌کند. این صوت وارد غلاف شده و در آن پیش می‌رود و به وجه بیرونی غلاف رسیده و به خاطر تفاوت چگالی تار با محیط بیرون آن بازتاب می‌شود. نویسندگان مقاله حاضر، در کار قبلی خود لیزر با مُد TEM_{00} را در نظر گرفتند و تولید، انتشار و بازتاب صوت الکترونتگشی را مورد بررسی قرار دادند [۵]. از آنجا که مد TEM_{00} دارای تقارن شعاعی است، موج صوتی و اکوهای آن دارای وابستگی سمتی نیستند. در مقاله حاضر فرض می‌گردد که نور لیزر دارای مد عرضی TEM_{01} باشد. بنابراین، می‌توان وابستگی سمتی صوت الکترونتگشی را نیز مطالعه کرد. اندازه میدان الکتریکی مد لیزری TEM_{01} در یک باریکه لاگر-گاوس (که برای هندسه دایروی مقطعِ تار نوری مناسب‌تر است) به شکل زیر انتخاب می‌شود:

$$E(r,\theta) = B\, e^{-\left(\frac{r}{\sqrt{2}s}\right)^2} Cos(\theta) \qquad (۳)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

که منظور از s شعاع مؤثر باریکه لیزری است که تقریباً با شعاع هسته تار نوری برابر می‌باشد. میدان الکتریکی فوق طبق رابطه (۲) به نیروی الکتروتنگشی منجر می‌گردد. این نیرو باعث می‌شود که یک اختلال چگالی در مغزی تار ایجاد گردد. با تقریب خوبی می‌توان اختلال اولیه چگالی شیشه را متناسب با توان دوم میدان الکتریکی لیزر در نظر گرفت. با این فرض، تغییرات چگالی در زمان (t=0) در قسمت‌های مختلف تار به صورت زیر خواهد بود:

$$\rho(r, t=0)=\begin{cases} C\, e^{-(\frac{r}{a})^2}\cos^2\theta & 0<r<a \\ 0 & a<r<b \end{cases} \quad (۴)$$

هدف بعدی یافتن چگالی تار بر حسب زمان و مکان می‌باشد. برای انجام این کار از قسمت همگن معادله (۱) استفاده می‌شود که شکل آن نهایتاً به معادله هلمهولتز می‌انجامد. جواب شعاعی معادله هلمهولتز هم در سیستم مختصات استوانه‌ای شامل توابع بسل $J_m(kr)$ است. برای یافتن مقادیر قابل قبول k باید شرط مرزی مناسب اعمال کرد. در مقاله قبلی چون چگالی فقط وابسته به مختصه شعاعی r بود، شرط مرزی به صورت $\frac{d\rho}{dr}\Big|_{r=a}=0$ لحاظ گردید. در این مقاله چگالی اختلالی هم وابسته به مختصه شعاعی و هم وابسته به زاویه سمتی می‌باشد. شرط مرزی مناسب در این وضعیت به صورت زیر اعمال می گردد:

$$(\boldsymbol{\nabla}_{\boldsymbol{r}}\rho)_{\mathrm{r=b}}=0 \quad (۵)$$

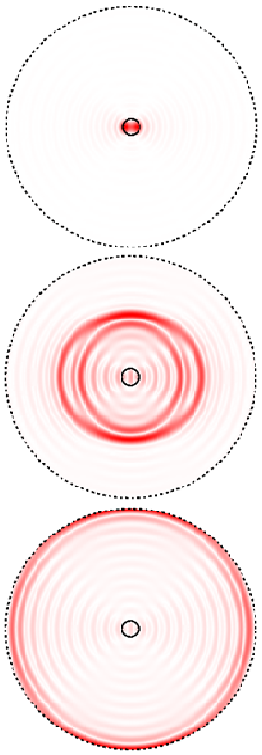
که با توجه به جواب‌های شعاعی که همان توابع بسل هستند به نتیجه زیر منجر می‌شود:

$$\frac{dJ_m(kr)}{\mathrm{dr}}\Big|_{\mathrm{r=b}}=0 \quad (۶)$$

با این شرط می‌توان اعداد موج قابل قبول k را به دست آورد. این اعداد موج از صفرهای مشتق تابع بسل به دست می‌آیند که می‌توان آنها را با $x_{m,n}$ نمایش داد. با داشتن این مقادیر، $k_{m,n}$ و نیز فرکانس تشدیدی $\omega_{mn}=vk_{m,n}$ پیدا می‌شوند. با داشتن اعداد موج، فرکانس‌های تشدیدی و نیز ویژه توابع مربوطه، می‌توان از قضیه بسط استفاده کرد و اختلال اولیه را بر حسب آنها بسط داد و انتشار زمانی آنرا شبیه‌سازی کرد. برای انجام این کار یک برنامه در محیط متمتیکا توسط نویسندگان مقاله نوشته شده است که در ادامه به نتایج حاصل این برنامه پرداخته می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی و بررسی آنها

برای انجام شبیه‌سازی از یک تار نوری سیلیکای گداخته استفاده می‌شود. شعاع مغزی و غلاف تار a=8.8μm و b=125μm انتخاب گردید [۴و۵]. سرعت موج صوتی در داخل تار v=5.996 km/s می‌باشد. نمودارهای دوبعدی چگالی موج صوت در زمان‌های مختلف در مقطع دلخواهی از تار در شکل ۱ نشان داده شده است:

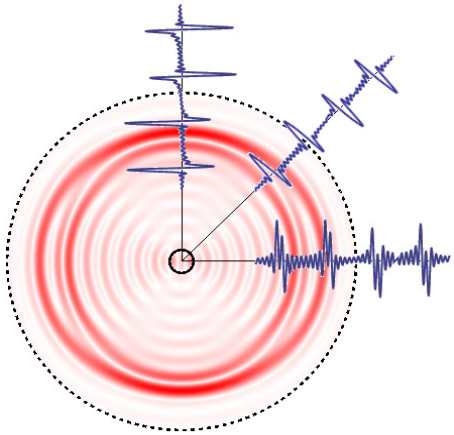


شکل ۱: تولید و انتشار پالس صوتی الکتروتنگشی در داخل تار.

از این شکل به وضوح معلوم است که با تزریق لیزر به هسته تار، موج صوتی در آنجا تولید می‌شود. این موج به قسمت غلاف نفوذ کرده و در آنجا انتشار پیدا می‌کند و به

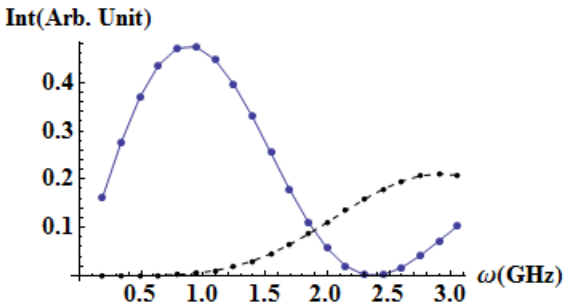
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

جداره خارجی آن می‌رسد و از آنجا هم بازتاب شده و به سمت هسته بر می‌گردد. نکته جالبی که از جبهه موج صوتی دیده می‌شود این است که متشکل از دو پالس صوتی شدید به همراه پالس‌های میانی خفیف می‌باشد. این پدیده ناشی از شکل اولیه پالس صوتی است که دارای دو لُب شدتی (TEM_{01}) می‌باشد. رفت و برگشت‌های مکرر موج صوتی (که تعداد آنها به خاطر لحاظ نکردن اثرات میرایی بی‌نهایت است) باعث می‌شود که در هر نقطه از تار یک اکوی صوتی ایجاد گردد. در شکل ۲ تعدادی از اکوها در نقاطی به فاصله $b/2$ از مرکز تار آورده شده است.



شکل ۲: اکوهای صوتی دریافت شده در سه راستای مختلف.

فاصله زمانی بین اکوها ۲۱ ns است که برابر با v/b می‌باشد. اکوهای صوتی تک فرکانس نیستند و به صورت پالس‌های صوتی می‌باشند. در شکل ۳ نمودار توزیع فرکانسی این موج صوتی ترسیم شده است. معلوم است که بیشترین شدت مربوط به فرکانس ۱ GHz می‌باشد.



شکل ۳: توزیع فرکانسی پالس صوتی الکترونتگشی.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به تولید موج صوتی در عبور پالس لیزری لاگر-گاوس TEM_{01} از داخل یک تار نوری با سازوکار الکترونتگش پرداخته شد. مشاهده گردید که توزیع اولیه شدت لیزر که دارای دو لُب است منجر به ایجاد دو جبهه پالسی صوتی با شکل بیضوی عمود بر هم می‌شود. صوت در حال انتشار، اکوهای متفاوتی در نقاط مختلف تار ایجاد می‌کند. از این شبیه‌سازی استنباط می‌شود که تولید و انتشار دو بعدی صوت الکترونتگش در داخل تار نوری، پیچیدگی‌های بیشتری نسبت به انتشار یک بعدی دارد. با تحریک موج صوتی دو بعدی در داخل تار می‌توان جزئیات بیشتری از اثر الکترونتگش را مطالعه کرد. یافته‌های حاصل از این مقاله می‌تواند در پیشرفت اثر فوتوآکوستیک لیزری در داخل تارهای نوری مفید واقع شود.

سپاسگزاری

از دانشگاه ملایر به خاطر حمایت پژوهشی تشکر می‌شود.

مرجع‌ها

[1] C. Rossignol et al, "Generation and detection of shear acoustic waves in metal submicrometric films with ultrashort laser pulses", Phys. Rev. Lett. 94, 166106, 2005.

[2] P. Ruello and V.E. Gusev, "Physical mechanisms of coherent acoustic phonons generation by ultrafast laser action", Ultrasonics 56, 21–35, 2015.

[3] X. Huang and S. Fan, "Complete all-optical silica fiber isolator via stimulated Brillouin scattering" J. of Lightwave Technology, 29 (15), 226, 2011.

[4] A.S. Biryukov, M.E. Sukharev and E.M. Dianov, "Excitation of sound waves upon propagation of laser pulses in optical fibres", Quantum Electronics 32 (9), 765-775, 2002.

[۵] مهدیس بیات، مسعود رضوانی جلال، مسعود پیشدست، علیرضا عبدی کیان، اولین کنفرانس ملی حسگرهای فیبر نوری، ۶ آبان ۱۴۰۰.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

با عرض سلام خدمت مسئولین محترم کنفرانس اپتیک و فوتونیک و تشکر از داوران گرامی به خاطر زحمتی که برای داوری مقاله داشته اند. احتراماً نظرات داوران محترم به شرح زیر اعمال گردید:

۱- بهتر است در متن مقاله آورده شود که چرا موج صوتی وقتی به انتهای غلاف میرسد بازتاب میشود.

جواب: بازتاب موج صوتی به خاطر اختلاف چگالی بین درون تار و بیرون تار رخ می دهد که توضیحاتی به مقاله اضافه شد. البته در کنار بازتاب، مقداری هم عبور وجود دارد که برای سادگی کار فرض شده است که بازتاب کامل رخ می دهد و عبور صوت از داخل تار به بیرون خیلی ضعیف باشد.

۲- رفت و برگشتهای مکرر موج صوتی تا چه زمانی ادامه خواهد داشت؟

جواب: از آنجایی که هیچ اتلافی برای صوت در نظر گرفته نشده است به همین خاطر تعداد بازتاب ها بی نهایت است. اگر اتلاف لحاظ می شد و یا عبور صوت به بیرون تار در نظر گرفته می شد آنگاه تعداد بازتاب ها و رفت و برگشت ها محدود بود. توضیحاتی در این خصوص به مقاله اضافه شد.

۳- چرا باریکه لاگر-گاوس انتخاب شده است؟

جواب: از آنجایی که برای هندسه مشدد با تقارن دایروی استفاده از باریکه لاگر گاوس مناسب تر است به همین خاطر استفاده شده است چون تار نوری دارای مقطع دایروی است. اگر تاری باشد که دارای مقطع مستطیلی باشد بهتر است که از باریکه لاگر هرمیت استفاده شود که در اینجا مقطع تار نوری دایروی لحاظ شده است.

۴- در رفرنسهای انگلیسی، نام کوچک افراد همه به یک فرمت نوشته شود. برای مثال رفرنس ۲ و ۳ با رفرنس ۱ و ۴ متفاوت است. همچنین در قسمت عنوان مقالات، در رفرنس ۱ و ۳ حروف ابتدای هر کلمه بزرگ نوشته شده لمل در رفرنس ۲ و ۴ فقط اولین حرف عنوان بزرگ نوشته شده است. لطفا مطابق با فرمت کنفرانس تصحیح شود.

جواب: مراجع طبق قالب مقاله و نظر داوران محترم اصلاح گردید.

با تشکر مجدد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]