

**(Research Article)**  
**Simulation and fabrication of optical sound sensor based on suspended  
fiber-optic beam**

**A. Allahi<sup>1</sup>, A. Ghasemi Yeklangi<sup>\*2</sup>, S. Esmaealzadeh Khadem<sup>3</sup>**

1. Photonic group, Laser and plasma research center, Shahid Beheshti University

2. Nanomaterials group, Material engineering department, Tarbiat Modares University

3. Mechanical engineering department, Tarbiat Modares University

Received: 2021/08/26, Accepted: 2022/09/11

DOR 20.1001.1.23455748.1401.10.1.12.1

**Abstract**

Sound waves provide useful information about the environment that requires sensitive and environmentally sensitive sensors to receive this information. Among the various audio sensors that have been built, sensors based on optical equipment benefit from a high signal-to-noise ratio and high sensitivity. In this research, an optical sound sensor with very high sensitivity and small dimensions was designed and built for use in complex environmental conditions such as solution or atmosphere. The tip of a fiber optic as a suspended beam can detect very small vibrations of the environment. The light coming out of the fiber is focused on a light beam position sensor and the vibrations of the fiber tip are tracked. The intensity of the detected vibrations can be used to determine the frequency and intensity of sound waves in the environment. The simulation results show the ability to detect sound waves up to zero decibels.

**Keywords:** Fiber optic sensor, Cantilever fiber, Very low intensity acoustic sensor.

pp. 112-120 (In Persian)

---

\* Corresponding author E-mail: Akbarghasemi2@gmail.com

## شبیه‌سازی و ساخت حسگر نوری امواج صوتی براساس تیرک الیاف نوری معلق

علی الهی<sup>۱</sup>، اکبر قاسمی یک‌لنگی<sup>۲\*</sup>، سیامک اسماعیل‌زاده<sup>۳</sup>

۱. پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی

۲. دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۰

### چکیده

امواج صوتی اطلاعات مفیدی از محیط به همراه دارند که برای دریافت این اطلاعات به حسگرهای حساس و مقاوم به محیط‌های مختلف نیاز است. در بین حسگرهای صوتی متنوعی که ساخته شده‌اند حسگرهای بر پایه تجهیزات نوری از نسبت علامت به نوفه بالا و حساسیت زیاد بهره می‌برند. در این پژوهش یک حسگر صوتی نوری با حساسیت بسیار بالا و ابعاد کوچک برای کاربرد در شرایط محیطی پیچیده مانند محلول یا جو طراحی و ساخته شد. نوک یک الیاف نوری به عنوان تیرک معلق می‌تواند ارتعاشات بسیار ریز محیط را شناسایی کند. نور خارج شده از الیاف روی یک حسگر موقعیت لکه‌ی پرتو نوری، متمرکز شده و ارتعاشات نوک الیاف پیگیری می‌شود. از شدت ارتعاشات شناسایی شده می‌توان به بسامد و شدت امواج صوتی موجود در محیط پی برد. نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده قابلیت آشکارسازی امواج صوتی تا شدت صفر دسی‌بل را نشان می‌دهند.

**کلیدواژه‌ها:** حسگر الیاف نوری، الیاف کانتیلور، حسگر شدت‌های بسیار پایین صوتی.

### ۱. مقدمه

استفاده از روش‌های نوری برای اندازه‌گیری‌های دقیق، روز به روز گسترده‌تر می‌شود. این رشد سریع به چند عامل اصلی مربوط می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: دقت بالا، مقاومت در برابر نوفه محیط و هزینه پایین. با رشد سریع فن‌آوری فوتونیک<sup>۱</sup> در دهه‌های گذشته، دقت ابزارهای فوتونیک بسیار بیش‌تر شده است. در حالی که تا اواخر قرن بیستم دقت اندازه‌گیری جابجایی چند آنگسترم بود، امروزه ابزارهای به‌کار رفته در داخل سامانه‌های نوری امکان رصد امواج گرانشی که تنها چند فمتومتر در فضا اعواج ایجاد می‌کنند را دارند. برای دیگر کمیت‌های فیزیکی مانند دما، زمان، نیرو و غیره نیز دقت اندازه‌گیری به‌وسیله ابزارهای نوری چندین برابر ابزارهای غیرنوری است. عدم تاثیرپذیری امواج نوری از میدان‌های برقی و مغناطیسی محیط دلیل بسیار خوبی برای توسعه این

ابزارها برای کار در محیط‌های بسیار خشن و سخت بوده است. به دلیل همین توانایی‌ها تلاش زیادی برای کاهش قیمت تمام شده ساخت ابزارهای فوتونیک شده است که تا حدود بسیار زیادی این امر نیز محقق شده است [۱-۳]. موضوع مورد اهمیت دیگر در طراحی آشکارساز، نوع آشکارسازی است. تا اواسط قرن نوزدهم روش‌های آشکارسازی صوتی بر جابجایی رسانا در میدان مغناطیسی و تولید جریان برقی استوار بودند. با افزایش دانش مهندسان مکانیک از خواص پیزوالکتریک، این اثر به سرعت جایگاه وسیعی در آشکارسازی صوتی پیدا کرد. مهمترین مشکل در این سال‌ها که باعث کاهش استفاده از این روش‌ها در آشکارسازی امواج صوتی می‌شد، نوفه‌پذیری بالای ابزارهایی بر پایه مدارهای برقی است. این مشکل به خصوص در زمانی که شدت‌ها کاهش می‌یابد، بیش‌تر نمایان می‌شود. ایزوله کردن یک آشکارساز از امواج الکترومغناطیسی محیط نیز کار بسیار سخت و در شرایط ناممکن است. جریان برقی خود نیز امواج الکترومغناطیسی تولید می‌کند که می‌تواند در کارکرد این ابزارها تاثیر منفی

\* نویسنده پاسخگو: asgharzarei1993@gmail.com

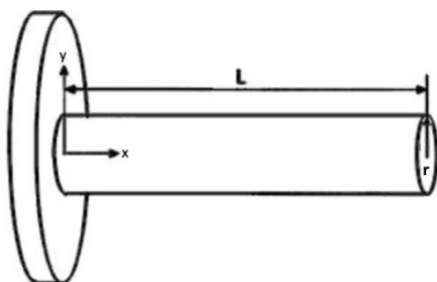
<sup>1</sup> Photonic

داشته باشد.

تحقیقات متنوع نورصوتیات را ممکن کرده است. در بخش دوم اصول فیزیکی نوسان تیرک با شکل الیاف نوری و ماده سیلیکای مورد بررسی مطالعه شده و توسط نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شده است. در بخش سوم چیدمان و نتایج تجربی برای بسامد بازآوایش (تشدید) الیاف مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

## ۲. مواد و روش‌ها

امواج صوتی به دلیل ماهیت فشاری خود، در عبور از محیط به اجرام موجود در مسیر خود نیرو وارد می‌کنند. این نیرو به شدت امواج صوتی وابسته است، بدین صورت که با افزایش شدت امواج صوتی نیروی وارد شده به محیط بیش‌تر خواهد شد. بسامد امواج صوتی نیز در اثرگذاری آن بر محیط موثر است، یعنی اگر بسامد بسیار بیش‌تر از بسامد بازآوایش باشد تقریباً اثری روی جسم ندارد. علت این است که قبل از آنکه جسم بتواند حرکتی کند نیروی ناشی از امواج صوتی روی جسم جهت خود را عوض می‌کند و در نتیجه جسم جابجایی نخواهد داشت. پس برای آشکارسازی امواج صوتی باید شدت و بسامد امواج صوتی مورد توجه قرار گیرد به‌طوری‌که فیزیک حسگر طراحی شده با شرایط امواج صوتی هم‌سازی مناسب را داشته باشد. تیرک الیاف نوری ماهیت مشابه هر تیرک دیگر را دارد و تنها شکل و ماده مختص به خود را دارد. از آن‌جایی که جابجایی نوک تیرک (شکل ۱) بسیار کوچک است رابطه بین نیروی ناشی از فشار و جابجایی نوک تیرک، خطی است و در نتیجه بهترین روش توصیف تیرک، تقریب زدن آن با یک جرم متصل به فنر است (دقت شود که این معادلات تنها برای جابجایی نوک تیرک درست است) [۱۳].



شکل ۱ تیرک شامل استوانه‌ای به طول  $L$  و شعاع  $r$  است که از یک سر محکم به محلی متصل شده است.

آشکارسازی امواج صوتی توسط نور نیز در این سال‌ها مورد توجه بوده است. برای این کار انواع آشکارسازهای شتاب، جابجایی و کرنش ساخته شده‌اند [۴-۹]. از موفق‌ترین روش‌های نوری که با روش‌های دیگر قابل دسترسی نیست آشکارسازی تغییرات نوری ناشی از برخورد امواج صوتی با الیاف نوری است که به آن دی‌اف‌اس<sup>۱</sup> می‌گویند [۱۰]. بیش‌تر این ابزارها برای آشکارسازی امواج صوتی در محیطی با ابعاد معمولی طراحی شده‌اند. برای کار در ابعاد میکروسکوپی و آشکارسازی عوامل میکرو و نانو (به‌طور مثال نورصوتیات<sup>۲</sup> مولکول‌ها و یاخته‌ها) با کمک تغییرات ناشی از پراکندگی نور از نانوذرات آشکارسازی انجام شده است [۱۰]، که پرهزینه و با فن‌آوری بسیار بالا هستند. یک روش نوری استفاده از تیرک<sup>۳</sup> های معلق برای مشاهده اثر امواج صوتی است. تیرک‌های نانومکانیکی نیروهای وارد آمده را تا حد پیکونیوتن، جابجایی را تا حد انگستروم و زمان پاسخ‌دهی را تا حد میلی‌ثانیه تشخیص می‌دهند. حساسیت بالای این حسگرها به دلیل اندازه بسیار کوچک‌شان است که تحقیقات جدید تلاش می‌کنند اندازه‌های کوچک‌تر از آن‌ها را نیز بسازند. تیرهای نانومکانیکی در حالت‌های استاتیک و دینامیک می‌توانند عمل کنند. استفاده از نور برای رصد جابجایی تیرک بسیار متداول است، ولی تنظیم دقیق آن بسیار مشکل خواهد بود. اگر از الیاف نوری به‌عنوان تیرک استفاده شود از هر دو برتری تیرک و اندازه‌گیری نوری استفاده شده است [۱۱].

کاری که در این مقاله ارائه شده، مشابه مقاله [۱۲] است با این تفاوت که اثر جابجایی با یک سامانه ساده نوری چندین برابر شده است. در این مقاله آشکارساز امواج صوتی نوری بر پایه الیاف نوری معلق بررسی شده است. این روش از نظر ابزارهای مورد نیاز بسیار ساده و از نظر دقت قابل رقابت با روش‌های بسیار حساس است. ابعاد کوچک حسگر و امکان قرار دادن آن در شرایط بسیار سخت فیزیکی و شیمیایی امکان استفاده از آن در

<sup>۱</sup> DFS; Distributed Acoustic Sensor

<sup>۲</sup> Photoacoustic

<sup>۳</sup> Cantilever

$$y(\omega) = \frac{1/28 \times LrP_{Ac}}{\omega \cdot \gamma} \quad (6)$$

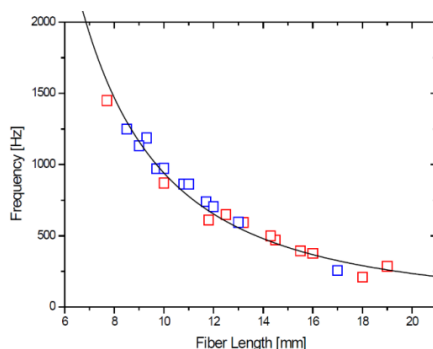
اکنون برای یک تیرک به طول ۱ سانتی‌متر و شعاع ۵۰ میکرون از جنس سیلیکا (مدول یانگ ۷۰ گیگاپاسکال و چگالی ۲۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) در یک امواج صوتی با فشار صوتی  $10^{-6}$ ، مقدار بیش‌تر جابجایی در حالت بازآوایش برابر با ۱۷ نانومتر است. نکته این‌که برای فشار ثابت مقدار جابجایی از مرتبه  $10^{-13}$  است. با توجه به رابطه (۷):

$$y_{res} = Qy_{stat} \quad (7)$$

عامل کیفیت<sup>۲</sup> تیرک الیاف نوری یکسری‌دار از مرتبه  $10^5$  است که عدد بسیار خوبی است. در اینجا یک پوشش الیاف نوری از روی آن جدا شده و سپس از یک نقطه مشخص الیاف محکم ثابت شده است. بسته به مقداری از الیاف که به‌صورت معلق باقی می‌ماند، بسامد بازآوایش الیاف متفاوت خواهد شد. ارتعاشات الیاف به‌صورت یک کانتلیور خواهد بود. بسامد بازآوایش الیاف برای ارتعاشات یک-بعدی با رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$F(n, L) = \frac{k \times a_n^2}{L^3} \quad (8)$$

که ثابت  $k$  به مدول الاستیک، جرم و صفحه ممنوم لختی الیاف وابسته است.  $L$  طول الیاف و  $a_n$  یک ثابت برای مُد ارتعاشی  $n$ -ام است که برای مُدهای اول به‌ترتیب ۱/۸۷۵، ۴/۶۹۴ و ۷/۸۵۵ می‌باشند. برای الیاف به‌کار رفته در آزمایش، نمودار وابستگی بسامد بازآوایش الیاف به طول معلق الیاف در شکل ۲ رسم شده است.



شکل ۲ نمودار رابطه طول الیاف با بسامد ارتعاش؛ برای طول الیاف در حدود ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر بسامد بازآوایش بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز است.

برای این کار باید یک جرم موثر و ثابت فنر معادل تعریف شود. معادله‌ای که نوسانات سامانه معادل را بیان می‌کند عبارتست از:

$$m_{eff} \frac{d^2 y}{dt^2} + \gamma \frac{dy}{dt} + k_{Eq} y = 1/28 \times P_{Ac} Lr \cos(\omega t) \quad (1)$$

در این عبارت دامنه فشار صوتی با بسامد  $\omega$  و  $y$  نشان‌دهنده جابجایی نوک تیرک است. قبل از اینکه جواب رابطه فوق ارائه شود باید مقدار ثابت فنر معادل ( $k_{Eq}$ )، جرم موثر ( $m_{eff}$ ) و ضریب میرایی ( $\gamma$ ) تعیین شوند. ضریب میرایی را می‌توان  $10^{-7}$  در نظر گرفت. ضریب  $1/28$  به این دلیل وارد شده است که فشار به کل سطح تیرک وارد می‌شود و در نتیجه در این عبارت نیروی اعمال‌شده به جرم به صورت نیروی معادل باید در نظر گرفته شود. رابطه بین فشار ثابت و بیش‌تر جابجایی نوک آن یک رابطه خطی است. برای تیرک به شکل استوانه باریک این عبارت به‌صورت زیر است<sup>۱</sup>:

$$\Delta l_{max} = \frac{PL^3}{16\pi E r^3} \quad (2)$$

در این عبارت  $\Delta l_{max}$  بیش‌تر جابجایی نوک الیاف نوری و  $E$  مدول یانگ ماده است. از این رابطه و مقدار نیروی وارد به تیرک ( $2PLr$ ) می‌توان  $k_{Eq}$  را به راحتی محاسبه کرد:

$$k_{Eq} = \frac{32\pi E r^3}{L^3} \quad (3)$$

عبارت فوق نشان می‌دهد هر چقدر الیاف بلندتر باشد یا قطر آن کمتر باشد یا ماده با مدول کوچک‌تر استفاده شود، جابجایی نوک الیاف بیش‌تر خواهد بود. با استفاد از معادلات نوسان جرم پیوسته مقدار جرم موثر عبارتست از:

$$m_{eff} = \frac{32\pi}{1,875} \rho L r^3 \quad (4)$$

که در این جا  $\rho$  چگالی تیرک است. اکنون می‌توان معادله (۱) را حل کرد. حل متعارف این رابطه به‌صورت زیر است:

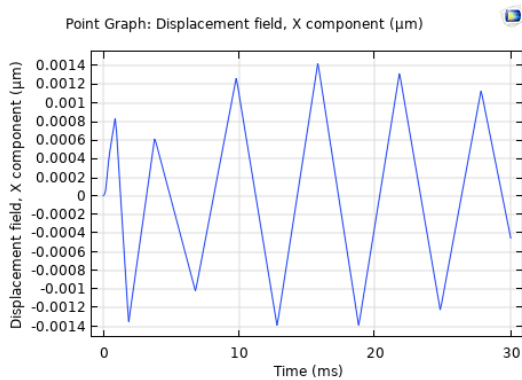
$$y(\omega) = \frac{1/28 \times LrP_{Ac}}{m_{eff} \sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (\omega \gamma / m_{eff})^2}} \quad (5)$$

که در این عبارت  $\omega_0 = \sqrt{k_{Eq} / m_{eff}}$  است. اگر اتلاف نباشد ( $\gamma=0$ ) در بسامد صوتی برابر با بسامد بازآوایش تیرک، مقدار جابجایی به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. اما با وجود اتلاف برای بسامد بازآوایش رابطه زیر به‌دست می‌آید:

<sup>2</sup> Q-factor

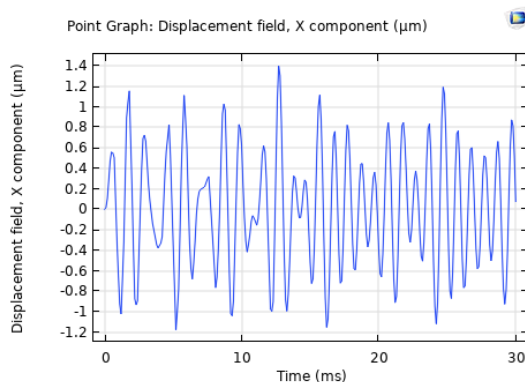
<sup>1</sup> Micro-tip cantilever as low frequency microphone

این بسامدها از این جهت اهمیت دارند که بیش‌ترین جابجایی ممکن برای تیرک در آن‌ها اتفاق می‌افتد. البته باید دقت کرد که افتادگی تیرک با افزایش طول آن افزایش خواهد یافت و این موضوع باعث غیرخطی شدن حرکت الیاف حتی در دامنه جابجایی کوتاه می‌شود. نتیجه شبیه‌سازی برای موج صوتی با بسامد ۸۰۰ هرتز (بسامد بازآوایش اول تیرک) با فشار صوتی  $10^{-6}$  پاسکال در شکل ۴ رسم شده است. مقدار جابجایی بیشینه در این حالت برابر با  $1/4$  نانومتر است. به دلیل تفاوت جزئی بین بسامد بازآوایش و بسامد اعمالی به تیرک، مقداری افت‌وخیز در دامنه نوسانات الیاف مشاهده می‌شود. شدت صوتی که چنین فشاری را تولید می‌کند تقریباً صفر دسی‌بل است.



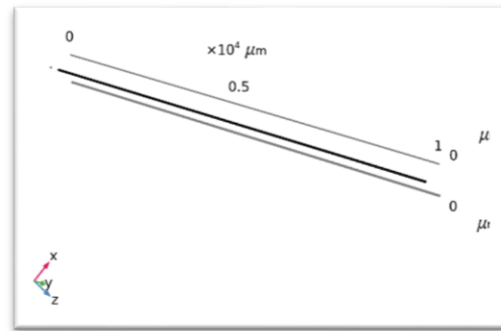
شکل ۴ جابجایی نوک الیاف برای فشار صوتی  $10^{-6}$  پاسکال در بسامد ۸۰۲ هرتز.

برای بسامد ۱۰۰۰ هرتز و فشار  $10^{-3}$  پاسکال جابجایی نوک تیرک در شکل ۵ رسم شده است.



شکل ۵ جابجایی نوک الیاف‌نوری برای فشار صوتی  $10^{-3}$  پاسکال در بسامد ۱۰۰۰.

برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار کامسول استفاده شد. این نرم‌افزار با استفاده از روش عنصر متناهی معادلات ارتعاش تیرک را شبیه‌سازی می‌کند. فضای سه-بعدی برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. همان‌طور که در شکل ۳ رسم شده است، الیاف نوری به‌صورت استوانه به طول ۱ میلی‌متر و شعاع ۵۰ میکرومتر در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۳ تیرک در فضای سه-بعدی.

با ثابت کردن یک انتهای استوانه، تیرک یک سرگیردار درست می‌شود. جنس الیاف از شیشه سیلیکا انتخاب شده که دارای مدول یانگ ۷۰ گیگاپاسکال و چگالی ۲۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب هستند. معادله ارتعاش تیرک به‌صورت معادله زیر است:

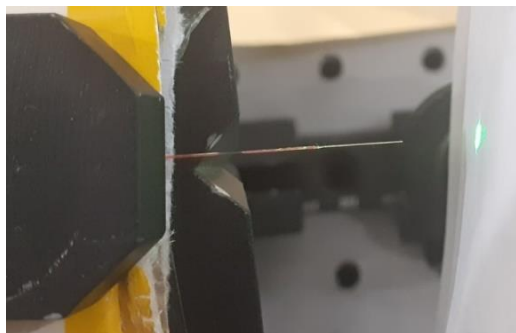
$$EI \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = F(x,t) \quad (9)$$

در این معادله  $u(x,t)$  جابجایی محل  $x$  تیرک در زمان  $t$  را نشان می‌دهد. واضح است که  $u(0,t)$  همواره صفر و  $u(L,t)$  همان جابجایی نوک تیرک است.  $E$  مدول یانگ،  $I$  ممان مرتبه دوم،  $\mu$  چگالی در طول تیرک و  $F(x,t)$  نیروی وارد بر تیرک در طول  $x$  تیرک در زمان  $t$  است. نیروی وارده بر تیرک به‌صورت فشار از سطح رویی تیرک اعمال می‌شود. در جدول ۱ بسامدهای بازآوایش تیرک براساس محاسبات ویژه مقداری آمده است.

جدول ۱ بسامدهای بازآوایش برای تیرک الیاف نوری به طول ۱۰ میلی‌متر و قطر ۵۰ میکرومتر.

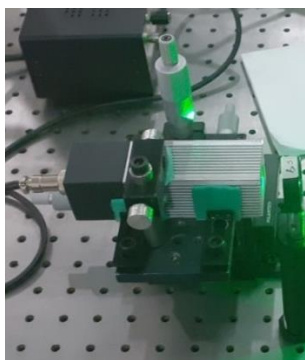
| مرتبۀ بسامد | بسامد (هرتز) |
|-------------|--------------|
| ۱           | ۸۰۲          |
| ۲           | ۵۰۳۰         |
| ۳           | ۱۴۰۷۷        |

الیاف از داخل پوسته محافظ الیاف خارج گردید. این کار با استفاده از دستگاه مخصوص و توسط شرکت تهیه‌کننده الیاف نوری انجام گرفت. سپس با کمک یک گیره فلزی الیاف نوری در فاصله ۱ سانتی‌متری از نوک آن محکم بسته شد. نور خروجی از الیاف بعد از عبور از یک عدسی همگرا به داخل آشکارساز فرستاده می‌شود. با اعمال فشار صوتی به قسمت معلق الیاف نوری، نوسانات بسیار کوچکی در نوک الیاف رخ می‌دهد که در نتیجه آن مکان لکه نور لیزر روی آشکارساز تغییر می‌کند. جابجایی به اندازه چند ده نانومتر در نوک الیاف با کمک لنز به جابجایی چند میکرونی روی آشکارساز تبدیل می‌شود.



شکل ۷ کانتلیور الیاف نوری برای آشکارسازی امواج صوتی.

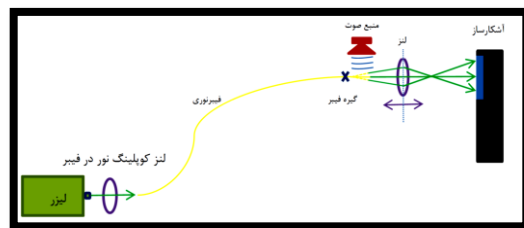
به دلیل کوچک بودن هسته الیاف نوری (حدود ۹ میکرومتر که نور از داخل این هسته عبور می‌کند)، وارد کردن نور به الیاف نوری کار بسیار مشکلی است. در این پژوهش برای انجام این کار ابتدا از یک دستگاه XYZ با دقت جابجایی ۵ میکرون استفاده شد. مطابق شکل ۸ با قرار دادن لیزر روی دستگاه XYZ نور بعد از خروج از لیزر با عبور از داخل یک لنز در نقطه کانونی آن متمرکز می‌شود.



شکل ۸ لیزر روی دستگاه XYZ.

در این حالت جابجایی ۱/۲ میکرومتر ثبت شده است. با افزایش شدت صوتی و در نتیجه فشار امواج صوتی مقدار جابجایی کاملاً افزایش یافته است. افت‌وخیز دامنه نوسان در این حالت نیز ناشی از تفاوت بسامد اعمالی با بسامد بازآوایش است.

در شکل ۶ چیدمان آزمایش رسم شده است. براساس این طرح نور توسط یک عدسی همگرا به داخل الیاف تک‌مد<sup>۱</sup> (یا مولتی‌مد<sup>۲</sup> مناسب) فرستاده می‌شود. به دلیل کوچک بودن دهانه ورودی الیاف (در حدود ۹ میکرومتر) این کار با استفاده از یک استیج zyx انجام گرفت. سمت دیگر الیاف با استفاده از ابزار مخصوص به صورت هسته و روکش در یک گیره محکم می‌شود (روکش محافظ الیاف باید جداسازی شود). قسمت معلق الیاف دارای قطر ۱۲۵ میکرومتر است و ۱ تا ۲ سانتی‌متر می‌تواند طول داشته باشد.



شکل ۶ طرح‌واره چیدمان برپا شده در آزمایشگاه.

### ۳. نتایج

بخش اندازه‌گیری جابجایی در جلوی نوک آزاد الیاف نوری که نور لیزر از آن خارج می‌شود قرار گرفته است. این بخش شامل یک عدسی با عدد کانونی کوچک و یک آشکارساز مکان پرتو (پی‌اس‌دی)<sup>۳</sup> است. نور خارج‌شده از الیاف نوری با عبور از عدسی در فاصله نسبتاً دور روی آشکارساز متمرکز می‌شود. نوفه‌های مکانیکی موجود در این اندازه‌گیری به بسامدهای چند ده هرتز محدود می‌شوند و تقریباً در انجام آزمایش تداخلی ایجاد نمی‌کنند.

برای ایجاد نوک الیاف آزاد، در حدود ۵ سانتی‌متر از نوک

<sup>1</sup> Singlemode

<sup>2</sup> Multimode

<sup>3</sup> PSD

#### ۴. بحث

نور خروجی از نوک الیاف به علت قانون پراکندگی نوری به سرعت واگرا می‌شود. این پراکندگی به‌صورتی است که در فاصله ۱ سانتی‌متری الیاف نوری قطر لکه نوری در حدود ۱ سانتی‌متر است (نور در زمان خروج از الیاف، به شکل یک لکه ۹ میکرومتری است). برای اینکه بتوان لکه نوری با قطر حدود ۵ میلی‌متر (مقداری که برای آشکارساز مناسب است) را روی آشکارساز مکان لکه قرار داد باید نوک الیاف در فاصله کم‌تر از ۱ سانتی‌متری آشکارساز قرار گیرد. این موضوع باعث می‌شود نتوان به‌صورت موثری جابجایی نوک الیاف را بزرگنمایی کرد.

برای رفع این مشکل از یک عدسی با فاصله کانونی ۵ سانتی‌متر استفاده گردید (شکل ۱۱). به این ترتیب می‌توان لکه نوری را در فاصله دلخواه از نوک الیاف به صورت لکه‌ای با قطر کم‌تر از ۹ میلی‌متر درآورد. با توجه به کوچکی محل خروج نور، می‌توان از بزرگنمایی‌های بسیار زیاد برای ایجاد لکه استفاده کرد. با استفاده از رابطه مربوط به عدسی:

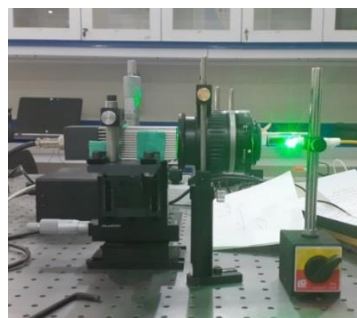
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \quad (10)$$

که در این رابطه  $f$  فاصله کانونی،  $p$  فاصله نوک الیاف تا مرکز عدسی و  $q$  فاصله لکه روی آشکارساز هستند. برای فاصله ۱ میلی‌متر بیش‌تر از فاصله کانونی عدسی ۵۰ میلی‌متری که در آزمایش استفاده شد، فاصله تصویر با قطر ۷ میلی‌متر، ۲۵۵۰ میلی‌متر است که به معنی بزرگنمایی ۵۱ برابری است. یعنی به‌صورت فیزیکی می‌توان کمینه شدت امواج صوتی را ۵۱ برابر کاهش داد که حدود ۱۷ دسی‌بل کاهش در شدت امواج صوتی می‌باشد.

عدسی به شکلی قرار گرفته است تا نور خروجی از الیاف را در فاصله‌ای کمی بیش‌تر از فاصله کانونی دریافت و سپس در فاصله بسیار دور آن را متمرکز کرد. این کار باعث می‌شود جابجایی بسیار کوچک با بزرگنمایی زیادی دیده شود. از روابط نوری به راحتی می‌توان مقدار جابجایی لکه نوری روی آشکارساز را محاسبه کرد. محل تشکیل تصویر که محل تمرکز نور لیزر خروجی از الیاف است به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

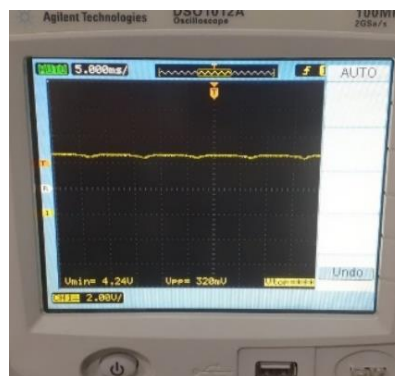
نوک الیاف در فاصله کانونی عدسی قرار گرفت و با جابجایی بسیار آهسته لیزر توسط دستگاه XYZ به‌صورت دقیق نوک الیاف و محل تمرکز نور روی هم قرار گرفتند. با تکرار این روش برای چندین بار حالتی به‌دست آمد که نور به خوبی در داخل الیاف وارد شده و خروجی الیاف به مقدار بیشینه رسید.

با وجود دقت بالا در جفت‌شدگی نور به داخل الیاف باز هم خروجی شدت لازم را نداشت. برای بهتر شدن ورود نور به الیاف از یک لنز دوربین حرفه‌ای با عدد کانونی کوچک استفاده شد. با قرار دادن لنز دوربین جای عدسی (شکل ۹) و تغییر عدد کانونی لنز حالتی به‌دست آمد که نور به شدت بسیار بیش‌تری در الیاف وارد شد.



شکل ۹ استفاده از لنز دوربین برای وارد کردن نور به الیاف.

البته به دلیل اینکه جابجایی عدد کانونی لنز در مکان تمرکز نور جابجایی ایجاد نمی‌کند، نیازی به جابجایی نوک الیاف نیست. فاصله کانونی به‌کار رفته در چیدمان ۱۸ میلی‌متر انتخاب شد. خروجی آشکارساز وقتی از لنز دوربین استفاده گردیده در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ ولتاژ خروجی آشکارساز با استفاده از وارد کردن نور توسط لنز دوربین به مقدار مورد نظر چهار ولت رسید.

حداقل جابجایی قابل اندازه‌گیری ۷۵۰ نانومتر است. این مقدار برای وقتی است که از تمام سطح آشکارساز استفاده شود و مقدار آن تا حدودی قابل کاهش است. از طرفی مشخص شد که ایجاد ۷۲۰ برابر بزرگنمایی به راحتی امکان‌پذیر است و در نتیجه جابجایی نوک الیاف با مقدار تقریباً ۱ نانومتر با استفاده از چیدمان ارائه‌شده قابل اندازه‌گیری است.



شکل ۱۱ جلوگیری از پراکندگی نور با استفاده از عدسی.

در گام نخست با استفاده از یک دستگاه XYZ جابجایی مکان نوک الیاف اندازه‌گیری شد. در شرایطی که از عدسی استفاده نشد و نوک الیاف در فاصله ۱ سانتی‌متری از آشکارساز قرار داشت، با جابجایی نوک الیاف در راستای محور X به اندازه ۵ میکرومتر، مقدار خروجی آشکارساز در ۱۲ میلی‌ولت تغییر کرد (شکل ۱۲). وقتی از عدسی در قرار دادن لکه روی آشکار استفاده شود این مقدار ۱/۵ نانومتر خواهد بود که معادل فشار صوتی ۲۰ میکروپاسکال روی الیاف است.



شکل ۱۲ نوسان ولتاژ آشکارساز در اثر اعمال امواج صوتی به نوک الیاف نوری.

$$q = \frac{pf}{|f - p|} \quad (11)$$

در این رابطه  $p$  و  $q$  به ترتیب فاصله نوک الیاف با عدسی و محل تشکیل تصویر آن (آشکارساز در این محل باید قرار گیرد) هستند. برای عدسی با فاصله کانونی ۱ سانتی‌متر اگر نوک الیاف با دقت در فاصله ۱/۰۰۱ سانتی‌متر قرار گیرد، تصویر در ۱۰۰۱ سانتی‌متر تشکیل می‌شود. بزرگنمایی حاصل‌شده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$M = \frac{q}{p} \quad (12)$$

در این حالت بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر می‌باشد. به این ترتیب مقدار جابجایی قابل اندازه‌گیری آشکارساز هر چقدر باشد تا مقدار یک هزارم آن جابجایی در نوک الیاف قابل اندازه‌گیری است زیرا جابجایی روی آشکارساز هزار برابر جابجایی نوک الیاف است.

باید دقت کرد که دو اتفاق دیگر نیز رخ می‌دهد. اول اینکه قطر لکه روی آشکارساز ۱۰۰۰ برابر قطر هسته الیاف نوری است. برای الیاف نوری تک مد مخابراتی که در آزمایش به کار رفته است قطر هسته ۱۲۵ میکرومتر است و در نتیجه قطر لکه ۱۲۵ میلی‌متر می‌باشد. برای آشکارساز قطر لکه بیشینه ۹۰ میلی‌متر تعریف شده است؛ در نتیجه با الیاف‌های با قطر هسته ۸۰ میکرون باید استفاده کرد، یا مقدار بزرگنمایی را به ۷۲۰ کاهش داد. به‌دلیل در دسترس نبودن الیاف با قطر هسته ۸۰ میکرون (با وجود ارزان بودن) در این آزمایش با زیاد کردن فاصله نوک الیاف نوری از عدسی بزرگنمایی کاهش داده شد.

مسئله دیگر این است که فاصله بین عدسی و آشکارساز برای ۷۲۰ برابر بزرگنمایی، بیش از ۷ متر خواهد بود. البته با استفاده از آینه (آینه باید به خوبی پایدار شده باشد) ایجاد این مقدار فاصله ممکن است. راه دیگر کاهش فاصله بین الیاف و آشکارساز، استفاده از عدسی‌های میلی‌متری است (مشابه عدسی گوشی موبایل). برای یک عدسی با فاصله کانونی ۱ میلی‌متر مقدار بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر در ۱ متری متمرکز می‌شود.

در این کار از آشکارساز پی‌دی‌پی ۱۹۰<sup>۱</sup> شرکت تورلب استفاده شد. براساس کاتالوگ ارائه‌شده برای آشکارساز

<sup>۱</sup> PDP90A

آن به صورت یک تیرک در هوا معلق نگه داشته شده‌اند. معادلات چنین تیرکی مطالعه و شبیه‌سازی شده است که نشان می‌دهد تیرکی با طول ۱ سانتی‌متر بسامد ۸۰۲ هرتز خواهد داشت. با هدایت نور لیزر به داخل الیاف نوری یک خط مستقیم نور از سر تیرک خارج می‌شود. با کمک یک لنز این نور روی یک آشکارساز موقعیت پرتو متمرکز می‌گردد. با جابجاشدن سر الیاف در اثر امواج صوتی مکان پرتو تغییر کرده و امواج صوتی آشکار گردیدند. در بسامد ۹۰۰ هرتز به خوبی امواج صوتی در مکان آشکارساز مشاهده شد. با توجه به نتایج اولیه می‌توان گفت که در اثر اعمال موج صوتی صفر دسی‌بل به تیرک الیاف نوری، جابجایی ۱/۵ نانومتر در نوک الیاف ایجاد می‌شود و این جابجایی با کمک سامانه نوری ۷۲۰ برابر شده به جابجایی لکه نوری حدود ۱ میکرومتر روی آشکارساز منجر می‌شود. از آن جایی که آشکارساز با دقت ۷۵۰ نانومتر جابجایی لکه نور را می‌تواند دنبال کند، به راحتی می‌توان امواج با شدت صفر دسی‌بل و حتی کم‌تر را آشکارسازی کرد.

#### ۶. تقدیر و تشکر

بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه‌های شهید بهشتی و تربیت مدرس تقدیر و تشکر می‌گردد.

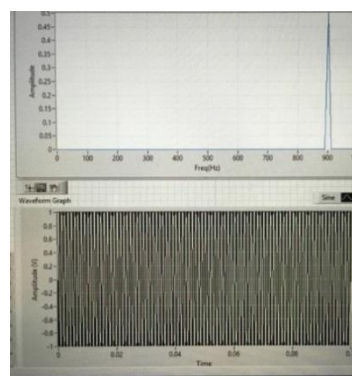
#### ۷. تضاد منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌کنند که هیچ تضاد منافعی در مورد محتویات این مقاله ندارند.

#### فهرست منابع

- [1] L. Wook, N.A. Hall, Z. Zhiping, F.L. Degertekin, "Fabrication and characterization of a micromachined acoustic sensor with integrated optical readout," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 10, no. 3, pp. 643-651, 2004.
- [2] P.G. Westergaard, M. Lassen, "All-optical detection of acoustic pressure waves with applications in photoacoustic spectroscopy," Applied Optics, vol. 55, no. 29, pp. 8266-8270, 2016.
- [3] W. Zhang, P. Lu, Z. Qu, P. Fan, C. Sima, D. Liu, J. Zhang, "High sensitivity and high stability dual fabry-perot interferometric fiber-optic acoustic sensor based on sandwich-structure composite diaphragm," IEEE

در مرحله بعد، امواج صوتی با بسامد ۹۰۰ هرتز (بسامد بازآوایش طول ۱ سانتی‌متری کانتلیور الیاف) و شدت تقریبی صفر دسی‌بل (با توجه به عدم توانایی اندازه‌گیری این شدت توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری تراز فشار صوتی از برون‌یابی نمودار ولتاژ ورودی به فشار تولیدی توسط بلندگو استفاده شد) به الیاف اعمال گردید، که نتیجه آن ارتعاش نوک الیاف و جابجایی لکه روی آشکارساز است. خروجی ولتاژ آشکارساز در این مرحله به صورت شکل ۱۲ دیده شد. همان‌طور که دیده می‌شود در بازه ۵ میلی‌ثانیه بیش از پنج دوره نوسانی ثبت شده است که معادل ۹۰۰ هرتز بسامد صوتی اعمالی است. به دلیل نوفه، دقت اندازه‌گیری به حدود ۳۰ میکروولت محدود شده است. با استخراج ولتاژ خروجی از روی اسکوپ شکل و بسامد امواج صوتی با دقت خوبی استخراج گردیدند (شکل ۱۳).



شکل ۱۳ بسامد ۹۰۰ هرتز برای خروجی ولتاژ آشکارساز شناسایی شده است.

در مقایسه با نتایج تحقیقات انجام‌شده در این زمینه می‌توان به تحقیق تک‌زریا و همکاران در سال ۲۰۱۴ اشاره کرد که به شکل مشابه از یک الیاف نوری با قطر ۱۰۰ میکرومتر برای آشکارسازی صوتی استفاده کردند و توانستند تا فشار صوتی ۱۰ دسی‌بل را آشکارسازی کنند [۱۴]. با توجه به این نتیجه می‌توان گفت که تحقیق انجام‌شده در اینجا نتیجه قابل قبولی داشته است که با استفاده از یک الیاف با قطر ۱۲۵ میکرومتر، قابلیت آشکارسازی تا صفر دسی‌بل را ایجاد کرده است.

#### ۵. نتیجه‌گیری

روکش یک الیاف نوری جداشده و قسمت هسته و غلاف

- Photonics Journal, vol. 13, no. 2, pp. 1-13, 2021.
- [4] X. Li, S. Liu, W. Zhang, F. Zhang, F. Li, Y. Liu, "Study on low-frequency characteristic of double-diaphragm fiber Bragg grating geophone," Journal Optoelectron of Laser, vol. 21, no. 4, pp. 529-532, 2010.
- [5] J. Wang, Y. Zeng, C. Lin, Z. Hu, G. Peng, Y. Hu, "A miniaturized FBG accelerometer based on a thin polyurethane shell," IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 5, pp. 1210-1216, 2015.
- [6] Y. Yang, M. Zhou, L. Hong, "Study on fiber bragg grating vibrating sensors with symmetry push-pull configuration," Semiconductor Optoelectronics, vol. 1, 2011.
- [7] Y. Yu, "Study of Low-Frequency FBG Vibration Sensor System," MS thesis, College Optoelectronic Science Engineering, National University Defense Technol, 2011.
- [8] G.K. Ekechukwu, J. Sharma, "Well-scale demonstration of distributed pressure sensing using fiber-optic DAS and DTS," Scientific Reports, vol. 11, no. 1, pp. 1-18, 2021.
- [9] H. Sayyaadi, M.S. Seif, A.A. Abniki, "Experimental investigation of comparison of optical fiber acoustic sensor with standard hydrophone in shallow water," International Journal of Maritime Technology, pp. 11-15, 2021.
- [10] A. Ohlinger, A. Deak, A.A. Lutich, J. Feldmann, "Optically trapped gold nanoparticle enables listening at the microscale," Physical Review Letters, vol. 108, no. 1, p. 018101, 2012.
- [11] J. Wang, G. Peng, Z. Hu, H. Yang, Y. Hu, "Design and analysis of a high sensitivity FBG accelerometer based on local strain amplification," IEEE Sensors Journal, vol. 15, no. 10, pp. 5442-5449, 2014.
- [12] C. Franciscangelis, W. Margulis, L. Kjellberg, I. Soderquist, F. Fruett, "Real-time distributed fiber microphone based on phase-OTDR," Optics express, vol. 24, no. 26, pp. 29597-29602, 2016.
- [13] Q. Huang, J. Lee, F. Teran Arce, I. Yoon, P. Angsantikul, J. Liu, Y. Shi, J. Villanueva, S. Thamphiwatana, X. Ma, L. Zang, S. Chen, R. Lal, D.J. Sirbulu, "Nanofibre optic force transducers with sub-piconewton resolution via near-field plasmon-dielectric interactions," Nature photonics, vol. 11, no. 6, pp. 352-355, 2017.
- [14] J.G. Teixeira, I.T. Leite, S. Silva, O.J.P.s. Frazão, "Advanced fiber-optic acoustic sensors," Springer, vol. 4, no. 3, pp. 198-208, 2014.