

Application of Stimulated Brillouin Scattering in Distributed-Temperature Sensors Using Single-Mode Optical Fibers¹

Mohammadreza Rezazadeh Shirazi²

Abstract

This research investigates one of the stimulated Brillouin scattering applications related to distributed-temperature sensors that utilize common single-mode optical fibers. The aim is to find a relation between the Brillouin frequency shift (BFS) and temperature up to 1500⁰C in these distributed-temperature sensors. At first, a linear approximation of the acoustic wave velocity and a reported polynomial of the refractive index with temperature are employed to calculate BFS. A comparison of the obtained BFS with two independent sets of recent experimental data shows that the linear relation between acoustic wave velocity and temperature, which is generally considered valid, is not valid, especially at high temperatures. Then, using a curve-fitting method based on another reported experimental data set, different-order polynomials of degrees up to six are considered for the acoustic wave velocity with temperature. The results show that the proposed second and third-order polynomials of the acoustic wave velocity can be used to calculate BFSs that align more closely with experimental data, even at elevated temperatures.

Keywords: *Stimulated Brillouin Scattering, Sensor, Optical Fiber, Temperature, Strain.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2025.48617.1429

² Assistant Professor, Physics Department, Faculty of Science, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran. Email: behshirazi@yahoo.com

کاربرد پراکندگی برانگیخته بریلوئین در حسگرهای توزیعی دما با استفاده از فیبرهای نوری تک مد^۱ محمد رضا رضازاده شیرازی^۲

چکیده:

در این پژوهش، یکی از کاربردهای پراکندگی برانگیخته بریلوئین در رابطه با حسگرهای توزیعی دما که فیبرهای نوری تک مد مرسوم را به کار می‌برند بررسی می‌شود. هدف یافتن رابطه‌ای بین جابه‌جایی‌های بسامدی بریلوئین و دما تا حدود ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در این حسگرهای توزیعی دما است. در ابتدا تقریب خطی سرعت موج آکوستیک و یک چندجمله‌ای گزارش شده نمارشکست برحسب دما برای محاسبه جابه‌جایی بسامدی بریلوئین به کار می‌روند. مقایسه جابه‌جایی بسامدی بریلوئین بدست آمده با دو دسته مستقل داده‌های آزمایشگاهی کنونی نشان می‌دهد که رابطه خطی مورد نظر بین سرعت موج آکوستیک و دما به خصوص در دماهای زیاد معتبر نمی‌باشد. سپس از راه برازش منحنی داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده دیگری، چند جمله‌ای‌هایی با مراتب مختلف تا درجه شش برای سرعت موج آکوستیک برحسب دما پیشنهاد می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که چند جمله‌ای‌های پیشنهادی مرتبه دوم و سوم سرعت موج آکوستیک را می‌توان در محاسبه جابه‌جایی‌های بسامدی بریلوئین به کار برد، به صورتی که آن‌ها حتی در دماهای زیاد به داده‌های آزمایشگاهی بسیار نزدیک‌تر باشند.

واژگان کلیدی: پراکندگی برانگیخته بریلوئین، حسگر، فیبر نوری، دما، کرنش.

^۱ DOI: 10.22051/ijap.2025.48617.1429

^۲ استادیار، بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران. Email: behshirazi@yahoo.com

۱. مقدمه

حسگرهای نوری در جامع‌ترین طبقه‌بندی از نظر نحوه عملکرد، کاربرد آن‌ها و مکان عملیات به سه دسته تقسیم می‌شوند. از نظر روش عملکرد، عملیات حسگری به اختلالات محیطی بستگی دارد که سبب تغییر یکی از کمیت‌های پرتو نور فرودی چون شدت، فاز، بسامد و قطبش می‌شود و بنابراین حسگرهای نوری را می‌توان بر اساس آنکه بر اثر اختلالات محیطی چه کمیتی از پرتو نور فرودی تغییر می‌کند، در نظر گرفت. از طرف دیگر از نظر مکان عملیات، حسگرهای نوری به دو گروه درونی (ذاتی) و بیرونی تقسیم می‌شوند. در حسگرهای نوری درونی، عنصر حسگر بخشی از یک فیبر نوری است و اختلالات خارجی سبب تغییر یک یا چند کمیت نور در حال انتشار در فیبر می‌شود اما در حسگرهای نوری خارجی، فیبر نوری تنها نور را به عنصر حسگر منتقل کرده و در آنجا اختلالات بر نور فرودی صورت می‌گیرند. همچنین می‌توان از نظر مکان حسگری، حسگرهای نوری را به صورت حسگرهای محلی چون تداخل سنج‌ها، حسگرهای شبه‌توزیعی نظیر حسگرهای توری براگ فیبری که بر یک یا چند قسمت از فیبر نوری مانند یک فیلتر بر نور فرودی عمل می‌کنند و حسگرهای توزیعی تقسیم کرد [۱-۵]. حسگرهای توزیعی یکی از جالب‌ترین و مهمترین حسگرهای امروزی می‌باشند که بر خلاف حسگرهای محلی امکان اندازه‌گیری متغیرهای فیزیکی نظیر دما و کرنش^۱ را از فواصل دور از هر نقطه در طول فیبر نوری با دقت زیادی فراهم می‌کنند [۵-۶]. ویژگی‌هایی نادر چون ابعاد ناچیز، تحمل دمای زیاد و ایمنی آن‌ها در محیط‌های پرخطر و حتی انفجاری، این حسگرها را پر کاربرد کرده است [۷-۹]. اساس کار این حسگرها تغییر مشخصات طیف نور پس پراکنده شده در اثر پراکندگی بریلوئین یا رامان است، به صورتی که با اندازه‌گیری جابه‌جایی بسامد موج پراکنده و توان آن می‌توان دما و کرنش را اندازه‌گیری کرد [۱۰-۱۲]. امروزه حسگرهای تحلیل حوزه زمانی پراکندگی بریلوئین^۲ جهت اندازه‌گیری دما و کرنش توجه زیادی را جلب کرده‌اند [۱۳-۲۴]. در این حسگرها پراکندگی برانگیخته بریلوئین و جابه‌جایی بسامد موج بریلوئین^۳ مورد استفاده قرار می‌گیرد. با آنکه در شرایط یکسان محیطی نظیر دما و فشار، جابه‌جایی بسامد بریلوئین ثابت در نظر گرفته می‌شود، افت و خیزهای جابه‌جایی بریلوئین در شرایط محیطی ثابت اخیراً مورد بررسی قرار گرفت [۲۵]. رابطه بین جابه‌جایی بسامد بریلوئین و دما در دو مقاله پژوهشی اخیر تا دمای 800°C و 400°C بررسی شده است [۱۷، ۳۰]. با این وجود این پژوهش به یافتن تابعی می‌پردازد که بتوان با داشتن جابه‌جایی بسامدی بریلوئین، دما را تا محدوده دماهای

¹ Strain

² Brillouin Optical Time-Domain Analysis (BOTDA)

³ Brillouin Frequency Shift (BFS)

زیادتر یعنی تا حدود 1500°C با استفاده از فیبر نوری مرسوم تک مد^۱ مشخص کرد. با توجه به وابستگی جابه‌جایی بسامد بریلوئین به سرعت موج آکوستیک و نمارشکست در هر طول موج، در ابتدا رابطه خطی سرعت موج آکوستیک همراه با یک چندجمله‌ای نمارشکست بر حسب دما در فیبر تک مد برای محاسبه جابه‌جایی بسامد بریلوئین به کار برده می‌شود. به دلیل انحراف جابه‌جایی بسامد بریلوئین بدست آمده در دماهای زیاد از نتایج اعلام شده آزمایش‌های آخر، این نتیجه بدست می‌آید که رابطه خطی سرعت موج آکوستیک تنها در بازه دماهای کم در محاسبه جابه‌جایی بسامدی بریلوئین معتبر است. سپس با استفاده از روش برازش منحنی داده‌های تجربی، چندجمله‌ای‌های مرتبه دوم و سومی برای سرعت موج آکوستیک تا دمای 1500°C پیشنهاد می‌شود به صورتی که به همراه چندجمله‌ای گزارش شده نمارشکست فیبر سیلیکونی مورد نظر می‌توان دما را با دقت بسیار زیادی بدست آورد. چالش این پژوهش عدم دسترسی امکانات آزمایشگاهی مورد نیاز است. اگرچه، در نهایت با استفاده از منابع و ارائه روابطی جهت محاسبه جابه‌جایی بسامدی بریلوئین (BFS) و اندازه‌گیری دما پژوهشی موفق است به صورتی که می‌تواند برای پژوهشگران در به کارگیری حسگرهای توزیعی بریلوئین برای مشخص کردن دما تا حدود 1500°C با استفاده از فیبرهای رایج (SMF) و در غیاب منابع دیگر، منبعی راهگشا باشد.

۲. چیدمان تجربی و اساس کار

شکل (۱) اساس چیدمان تجربی یک حسگر تحلیل حوزه زمانی پراکنده‌گی بریلوئین را نشان می‌دهد. پرتو خروجی حاصل از دیود لیزر^۲ با شدت I_{BP} به کمک یک مدوله‌ساز الکترواپتیکی^۳ با کنترل مولد سیگنال^۴ به صورت پالس درآمده و به کمک چرخاننده نوری^۵ از درگاه ۱ به ۲ و یکسر فیبر تک مد (SMF) با ضریب تضعیف 0.2 dB/km در طول موج 1550 nm و به طول 25 km ارسال می‌شود. حرکت پرتو دیود لیزر به عنوان پمپ بریلوئین^۶ در محیط فیبر، یک موج آکوستیک یا توری پراش در حال حرکت در جهت پمپ بریلوئین را در اثر پدیده‌ای به نام انقباض الکتریکی^۷ سبب می‌شود که بسامدی برابر با جابه‌جایی بسامد بریلوئین دارد. پراکنده‌گی بریلوئین

¹ Singl-Mode Fiber (SMF)

² Laser Diode (LD)

³ Electro Optical Modulator (EOM)

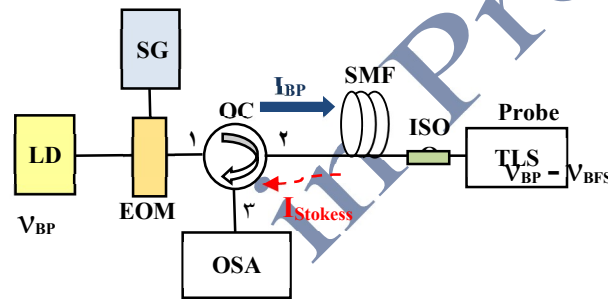
⁴ Signal Generator (SG)

⁵ Optical Circulator (OC)

⁶ Brillouin Pump (BP)

⁷ Electrostriction

بدست آمده از برخورد پرتو پمپ بریلوئین با توری پراش یک موج استوکس بریلوئین با شدت I_{Stokes} در جهت مخالف پمپ بریلوئین را در فیبر ایجاد می کند. حال اگر از سر دیگر فیبر، پرتو کاوشگر^۱ از راه منبع لیزر قابل کوک^۲ با بسامدی بیشتر از پمپ بریلوئین به مقدار $\nu_{BP} + \nu_{BFS}$ گسیل شود، دچار اتلاف می شود در حالی که اگر بسامد $\nu_{BP} - \nu_{BFS}$ در حدود بسامد موج استوکس بریلوئین^۳ داشته باشد، در اثر زنش بین پرتوهای کاوشگر و پمپ بریلوئین، موج آکوستیک تقویت می شود. این امر سبب پراکندگی بیشتر پرتو پمپ بریلوئین و تقویت موج استوکس شده و پدیده غیرخطی پراکندگی برانگیخته بریلوئین^۴ را ایجاد می کند.



شکل ۱ نمای اساسی چیدمان تجربی حسگر تحلیل حوزه زمانی پراکندگی بریلوئین (BOTDA).

Fig. 1 Principal configuration for BOTDA sensor.

در حقیقت، پراکندگی برانگیخته بریلوئین یک پدیده غیرخطی است که در آن نور پراکنده شده از یک لیزر تحت تأثیر امواج صوتی قرار می گیرد و تغییراتی را در بسامد نور پراکنده ایجاد می کند. تقویت اپتیکی پراکندگی برانگیخته بریلوئین با فرض آن است که پهنای طیف پمپ بریلوئین کمتر از پهنای نواری موثر تقویت باشد. از آنجا که پدیده برانگیخته بریلوئین بر اساس تشدید موج آکوستیک کار می کند، تنها پهنای نواری موثر تقویت برابر 20 MHz در فیبر سیلیکونی خالص در اطراف بسامد موج استوکس بریلوئین را ایجاد می کند. این پهنای نواری موثر تقویت در فیبر سیلیکونی آلاینده^۵ می تواند تا 100 MHz افزایش یابد [۱۸-۱۹]. ایزولاتور^۶ منبع لیزر قابل کوک (TLS) را از ورود هر پرتو از خروجی آن حفاظت می کند. در صورتی که با وجود چرخاننده نور،

¹ Probe

² Tunable Laser Source (TLS)

³ Brillouin Stokes

⁴ Stimulated Brillouin Scattering (SBS)

⁵ Silica Doped Fiber

⁶ Isolator

دیود لیزر (LD) هم خودبه‌خود حفاظت می‌شود. با جایگذاری یک تحلیلگر طیف الکترونیکی^۱ در عوض تحلیلگر طیف نوری^۲ جابه‌جایی بسامد بریلوئین از راه بسامد زنش بین امواج پمپ و استوکس مستقیماً قابل اندازه‌گیری است. با محاسبه بهره تقویت بریلوئین برای بسامدهای متفاوت کاوشگر در بازه چند مگاهرتز همراه با برازش منحنی^۳ لورنتسی^۴، قله منحنی بهره بریلوئین و بنابراین جابه‌جایی بسامد بریلوئین قابل اندازه‌گیری می‌شود [۲۰]. هر انحراف جابه‌جایی بسامد بریلوئین از مقدار مرجع اولیه نشانگر تغییر دما یا کرنش در طول فیبر حسگر است. اگر V_g سرعت گروه پرتو لیزر درون فیبر باشد، با اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت پالس لیزر می‌توان محل برهمکنش پراکندگی برانگیخته بریلوئین را محاسبه کرد ($Z=V_g t/2$). عیب مهم این روش آن است که پمپ پالس بریلوئین در برابر لیزر پیوستار پرتو کاوشگر توان ناچیزی دارد و به سرعت به دلیل انتقال انرژی بدست آمده از پراکندگی بریلوئین تهی می‌شود. در مقابل در چیدمان اتلاف بریلوئین، با تعویض مکان منبع پالس و منبع لیزر قابل کوک در شکل (۱) می‌توان این مشکل را رفع نمود و در این صورت پرتو کاوشگر یک منبع پالس و پمپ بریلوئین یک لیزر پیوستار است. با استفاده از چیدمان اتلاف بریلوئین، حسگری با جداسازی^۵ فضایی ۱/۵m از فاصله ۳۰ km بدست آمده است [۲۰]. پرتو دریافتی یک تحلیلگر طیف نوری (OSA) در چیدمان اتلاف بریلوئین وقتی که منبع کاوشگر پالس خاموش باشد در شکل (۲) نشان داده شده است. با استفاده از لیزر قابل کوک به عنوان پمپ بریلوئین با توان خروجی ۶ dBm و ۸ dBm و با طول موج ۱۵۵۰ nm، موج استوکس در اثر پراکندگی خودبه‌خود بریلوئین در جابه‌جایی بسامد بریلوئین اولیه در حدود ۱۰/۸ GHz نسبت به پمپ بریلوئین در دمای اولیه در حدود ۲۲/۵ °C ایجاد می‌شود. با افزایش توان پمپ بریلوئین به ۱۰ dBm و عبور از توان آستانه، افزایش زیادی در توان قله موج استوکس در اثر پراکندگی برانگیخته بریلوئین به وجود می‌آید [۲۱].

از طرف دیگر با ارسال منبع پالس با طول موج ۱۵۵۰/۰۸ nm یا ۱۰/۸ GHz کمتر از بسامد منبع پمپ بریلوئین از سر دیگر فیبر، می‌توان دوباره پدیده پراکندگی برانگیخته بریلوئین را ایجاد کرد که اینبار سبب تقویت پالس منبع کاوشگر می‌شود. با افزایش دما جابه‌جایی بسامد بریلوئین افزایش یافته و بسامد کمتری باید برای پالس منبع کاوشگر انتخاب شود. همچنین در نتیجه اثر پدیده

¹ Electro Spectrum Analyzer

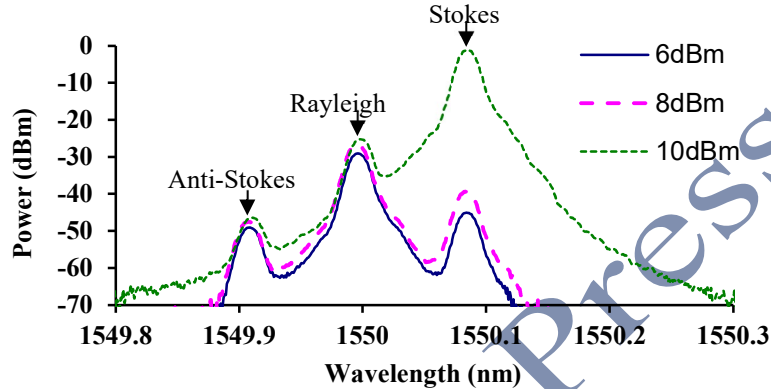
² Optical Spectrum Analyzer (OSA)

³ Curve Fitting

⁴ Lorentzian

⁵ Resolution

غیرخطی دیگری به نام ترکیب تبهگن چهارموج^۱، موجی با بسامد بیشتر و برابر با $\nu_{BP} + \nu_{BFS}$ تولید شده و پرتو بازتابش از راه چرخاننده نوری ولی از درگاه ۲ به درگاه ۳ رسانده شده و از راه تحلیلگر طیف نوری (OSA) با جداسازی 0.2 nm در خروجی آشکار می شود.



شکل ۲ بازتابش امواج استوکس، ریلی و آنتی استوکس در چیدمان اتلاف وقتی منبع کاوشگر پالس خاموش است. موج استوکس در اثر پراکندگی برانگیخته بریلوئین با افزایش توان پمپ بریلوئین از ۸ dBm به ۱۰ dBm تقویت می شود.

Fig. 2 The reflection of Stokes, Rayleigh, and anti-Stokes waves when the pulse power is off in the loss configuration. The Stokes wave is amplified due to SBS by increasing the BP power from 8 dBm to 10 dBm.

پرتو بازتابش مطابق شکل (۲) ترکیبی از پرتو نور پمپ بریلوئین بدون تغییر بسامد بدست آمده از پراکندگی ریلی، موج استوکس بریلوئین و موج آنتی استوکس بریلوئین است.

۳. نتایج و بحث

در توصیف کوانتومی پراکندگی بریلوئین، از نابودی یک فوتون از پرتو پمپ بریلوئین با بسامد و تکانه به ترتیب (ν_{BP}, K_{BP}) ، یک فوتون جدید استوکس $(\nu_{Stokes}, K_{Stokes})$ همراه با یک فوتون آکوستیک (ν_a, K_a) خلق می شوند. طول عمر 10 ns فوتون آکوستیک قیدی بر پهنای پالس قرار می دهد و بدین دلیل پالس با پهنای کمتر از 10 ns برهمکنش و پهنای بهره بریلوئین را به صورت مخربی کاهش می دهد [۲۰]. قوانین پایستگی انرژی و پایستگی تکانه خطی و تقریب یکسانی طول موجهای پمپ و استوکس بریلوئین $(\lambda_{BP} \approx \lambda_{Stokes})$ شرط $K_a = 2K_{BP}$ را ایجاب می کند و بنابراین رابطه زیر بدست می آید [۲۱]:

¹ Four-Wave Mixing

$$v_{BFS} = 2n_{eff}V_a/\lambda_{BP} \quad (1)$$

که در این رابطه، n_{eff} ضریب شکست موثر فیبر و V_a سرعت موج آکوستیک درون فیبر می‌باشد. در توصیف کلاسیک، این رابطه را می‌توان در نتیجه اثر دوپلر از بازتابش پرتو پمپ بریلوئین توسط توری پراشی که در همان جهت با سرعت موج آکوستیک V_a در حال حرکت است بدست آورد. از طرفی از راه بسط تیلور جابه‌جایی بسامد بریلوئین چنین نتیجه‌ای بدست می‌آید:

$$v_{BFS} = v_{BFS0} + C_T \Delta T + C_\varepsilon \Delta\varepsilon + \text{مراتب بالاتر} \quad (2)$$

در این عبارت، v_{BFS0} جابه‌جایی بسامد بریلوئین در دمای T و کرنش ε ، $C_T = \delta v_{BFS}/\delta T$ و $C_\varepsilon = \delta v_{BFS}/\delta\varepsilon$ ضریب دما و کرنش ε_0 و T_0 در دمای T_0 و کرنش ε_0 و $\delta v_{BFS}/\delta T$ و $\Delta\varepsilon$ تغییرات دما و کرنش می‌باشند [۱۹، ۲۹-۳۰].

به دلیل آنکه مقدار کرنش ناچیز است، واحد میکروکرنش ($\mu\varepsilon$) برای کرنش به کار می‌رود. هرچند کرنش که نسبت افزایش طول به طول اولیه ($\varepsilon = \Delta L/L_0$) است، کمی بدون بعد می‌باشد. با صرف نظر از جملات مراتب بالاتر قسمت خطی رابطه بالا به صورت مرسوم اساس سنجش دما و کرنش بوده است. مطالعات نشان داده‌اند که جابه‌جایی بسامد بریلوئین به تقریب بهتر با توان دوم دما متناسب‌اند و این منحنی‌ها در کرنش‌های مختلف کمابیش موازی‌اند [۱۷].

پژوهش‌ها همچنین نشان می‌دهند که صرف نظر کردن از جملات مراتب بالاتر تنها برای دمای عادی درست است. همچنین نمارشکست موثر فیبر تک مد از رابطه زیر مشخص می‌شود [۲۶]:

$$n_{eff} = n_0(1 + 5.327 \times 10^{-6}T + 4.773 \times 10^{-9}T^2 - 1.391 \times 10^{-12}T^3) \quad (3)$$

که، $n_0 = 1.4669$ نمار شکست موثر فیبر تک مد در طول موج 1569.26 nm در دمای صفر سلسیوس می‌باشد. با در نظر گیری تغییرات بسیار ناچیز نمار شکست به ویژه در دمای عادی، تغییرات سرعت موج آکوستیک درون فیبر نقش بسیار مهمی در جابه‌جایی بسامد بریلوئین پیدا می‌کند و انتخاب تابع سرعت موج آکوستیک نسبت به دما، در دماسنجی به روش محاسبه جابه‌جایی بسامد بریلوئین بسیار پراهمیت می‌شود. در یک فیبر سیلیکونی برای دماهای عادی سرعت موج آکوستیک به صورت خطی زیاد می‌شود، به صورتی که ضریب آکوستیکی - حرارتی $1 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} 0.555 \text{ m/s}$ می‌باشد [۲۷ و ۲۸]:

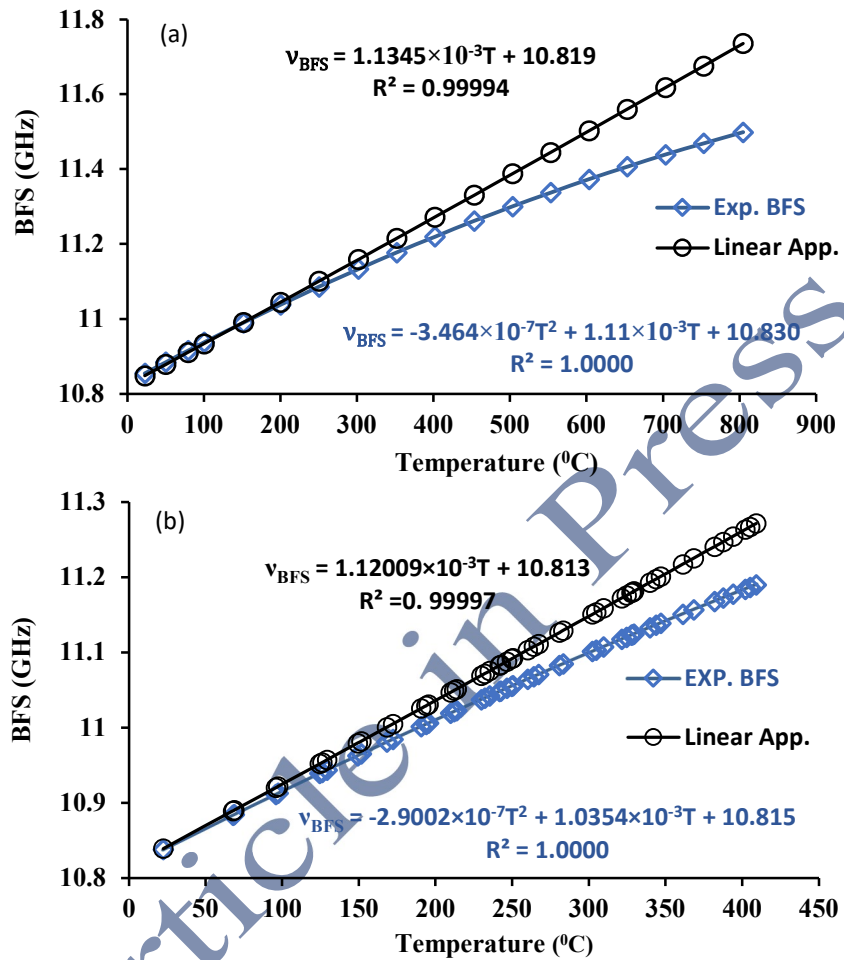
¹ Thermo-Acoustic Coefficient

$$V_a = 0.555(T - T_0) + V_{a0} \quad (۴)$$

که در این رابطه، $V_{a0} = 5800 \text{ m/s}$ سرعت موج آکوستیک در دمای اولیه $T_0 = 22.5^\circ\text{C}$ درون فیبر تک مد می باشد. آهنگ افزایش سرعت موج آکوستیک در دماهایی در حدود 1000°C به صورت چشمگیری کاهش می یابد به صورتی که در دماهای بیشتر از 1500°C سرعت موج آکوستیک به مقداری در حدود 6335 m/s می رسد [۲۸]. بنابراین از روابط قبل می توان جابه جایی بسامدی موج بریلوئین نسبت به دما را چنین مشخص کرد:

$$v_{BFS} = 2n_0(1 + 5.327 \times 10^{-6}T + 4.773 \times 10^{-9}T^2 - 1.391 \times 10^{-12}T^3) (0.555(T - T_0) + V_{a0})/\lambda_{BP} \quad (۵)$$

پس ضریب دما $C_T = 1/0.97 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ می باشد که با مقدار تجربی $1/0.86 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ همخوانی دارد که در تقریب خطی جابه جایی بسامد بریلوئین در دماهای کمتر از 200°C در کرنش صفر بدست آمده است [۳۰]. شکل (۳) هماهنگی و درستی این رابطه با معادلات داده شده در دو پژوهش تجربی جداگانه که در سال های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۹ ارائه شده اند را نشان می دهد [۱۷ و ۳۰]. V_{a0} چنان انتخاب شده است که جابه جایی بسامد بریلوئین در دمای اولیه T_0 با مقادیر تجربی یکسان شود. در شکل (۳-a) کاربرد تقریب خطی سرعت موج آکوستیک در دمای 200°C به اختلافی به مقدار 0.1 GHz در جابه جایی بسامدی موج بریلوئین منجر می شود، در حالی که همین مقدار اختلاف در دمای 100°C در شکل (۳-b) دیده می شود. این امر یادآور وابستگی ضریب بهره بریلوئین به نوع فیبر و متغیرهای فیزیکی آن است. مطابق هر دو شکل (۳-a) و (۳-b) در دمای بالا، اختلاف زیادی بین معادلات داده شده تجربی جابه جایی بسامدی موج بریلوئین و نتیجه بدست آمده از رابطه خطی سرعت موج آکوستیک وجود دارد. این اختلاف بیانگر آن است که رابطه خطی سرعت موج آکوستیک در دمای بالا نمی تواند جهت پیش بینی دما از راه جابه جایی بسامد بریلوئین بکار رود. نزدیک بودن مقدار R^2 به یک به معنی همخوانی معادله و الگوی مورد نظر با نتایج تجربی است. دایره سیاه مقادیر محاسبه شده جابه جایی بسامدی بریلوئین (BFS) بدست آمده از رابطه (۵) برای هر مقدار متناظر دمای بکار رفته در نتایج تجربی [۳۰] و [۱۷] می باشند. همچنین کاربرد تقریب خطی سرعت موج آکوستیک نسبت به دما به معنی خطی بودن جابه جایی بسامدی بریلوئین (BFS) مطابق رابطه (۵) نبوده و بنابراین همخوانی تقریب خطی با رابطه (۵) کامل نیست ($R^2 = 0.99997$, $R^2 =$

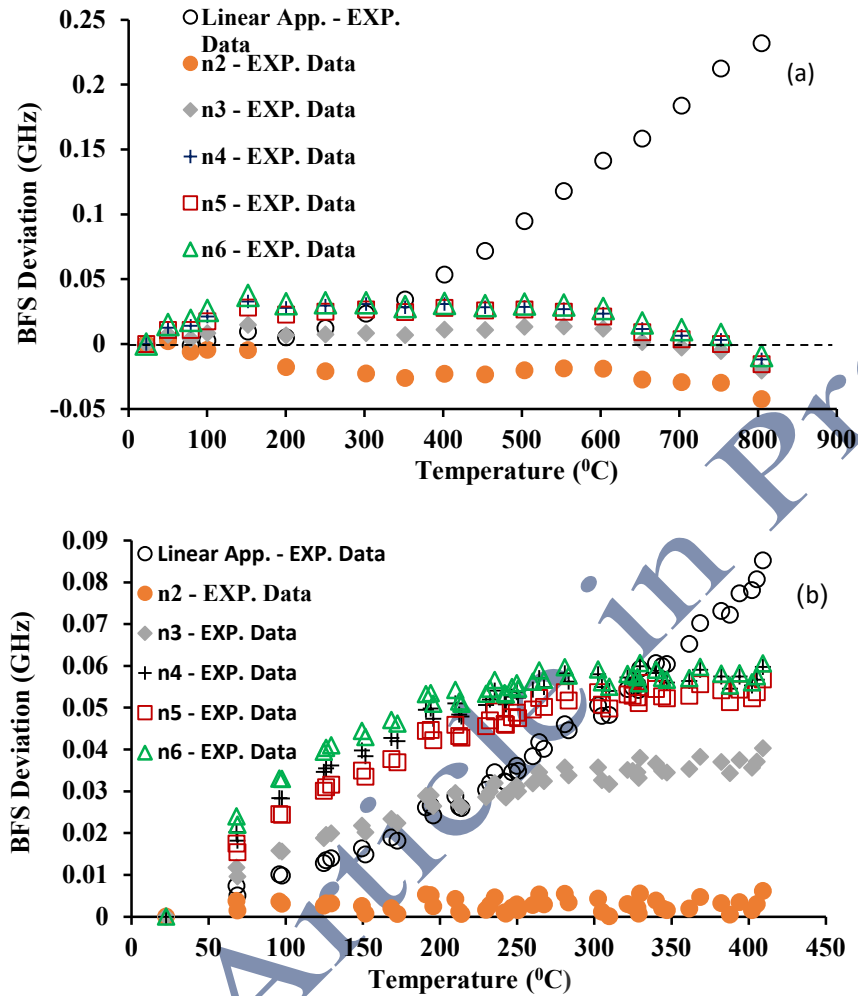


شکل ۳ مقایسه بین جابه‌جایی بسامدی موج بریلوئین محاسبه شده از تقریب خطی موج آکوستیک و دو معادله کاملاً همخوان ($R^2 = 1$) گزارش شده از مقادیر تجربی (a) [۳۰] و (b) [۱۷].

Fig. 3 The comparison between the calculated BFS using the linear approximation of the acoustic wave velocity and two perfectly consistent equations ($R^2 = 1$) reported from experimental data (a) [30], and (b) [17].

داده‌های تجربی سرعت موج آکوستیک نسبت به دما در محیط سیلیکونی تا دمای حدود 150°C ارائه شده است [۲۸]. با استفاده از روش برازش منحنی این داده‌ها در تقریب چندجمله‌ای، روابطی برای سرعت موج آکوستیک نسبت به دما با مراتب مختلف بدست می‌آید. شکل (۴-ا) اختلاف جابه‌جایی بسامدی بریلوئین با نتایج تجربی داده شده در مرجع [۳۰] و پیش‌بینی بدست آمده از

بکارگیری روابط حاصل از برازش منحنی سرعت موج آکوستیک در تقریب چندجمله‌ای از مرتبه دوم ($n=2$) تا مرتبه ششم ($n=6$) را نشان می‌دهد.



شکل ۴ انحراف جابه‌جایی بسامدی موج بریلوئین بدست آمده از برازش منحنی در تقریب‌های مراتب مختلف چندجمله‌ای‌های سرعت موج آکوستیک با مقادیر تجربی منابع (a) [۳۰] و (b) [۱۷]. خط چین افقی جهت مقایسه بهتر جابه‌جایی بسامدی موج بریلوئین بدست آمده از کاربرد تقریب‌های مختلف چند جمله‌ای‌ها با تجربه [۳۰] آمده است.

Fig. 4 The deviation of the calculated Brillouin frequency shifts (BFSs) using different order polynomial approximations of the acoustic wave velocity and the two independent published experimental data (a) [30] and (b) [17]. The dashed line is depicted for a better comparison of BFSs using the different polynomial approximations and the experimental data (a) [30].

همچنانکه در شکل (۴-a) دیده می‌شود، در تجربه این گروه که تا دمای 800°C انجام شده است، تقریب چندجمله‌ای مرتبه سوم سرعت موج آکوستیک نسبت به دما کمینه انحراف جابه‌جایی بسامد بریلوئین از داده‌های تجربی را دارد. بنابراین در این بازه دمایی با توجه به امکانات آزمایشگاهی استفاده شده در آن تجربه، تقریب چندجمله‌ای مرتبه سوم مناسب‌تر است. در حالی که در مورد داده‌های تجربی گروه پژوهشی [۱۷] تا دمای 400°C ، تقریب چندجمله‌ای مرتبه دوم در برازش منحنی سرعت موج آکوستیک مطابق شکل (۴-b) کمینه انحراف جابه‌جایی بسامد بریلوئین نسبت به این داده‌ها را نشان می‌دهد.

معادلات تقریب چندجمله‌ای‌های مرتبه دوم و سوم سرعت موج آکوستیک نسبت به دما که حاصل از برازش منحنی سرعت موج آکوستیک در محیط سیلیکونی و در شکل (۴-a) و (۴-b) بکار گرفته شده‌اند مطابق قبل با انتخاب سرعت موج آکوستیک درون فیبر تک مد $V_{a0} = 5800 \text{ m/s}$ در دمای اولیه‌ای در حدود $22,5^{\circ}\text{C}$ و آنکه جابه‌جایی بسامد بریلوئین با مقدار تجربی داده شده سازگار باشد، در رابطه (۶) داده می‌شوند:

$$V_a = -1.952 \times 10^{-4}T^2 + 0.53T + V_{a0}$$

$$R^2 = 0.9963$$

$$V_a = 7.502 \times 10^{-8}T^3 - 3.691 \times 10^{-4}T^2 + 0.639T + V_{a0}$$

$$R^2 = 0.9985$$

(۶)

پس به صورت خلاصه تقریب خطی سرعت موج آکوستیک خطای بزرگی را در اندازه‌گیری دمای بالا در محاسبه جابه‌جایی بسامد بریلوئین نشان می‌دهد. با استفاده از تقریب چندجمله‌ای بالا برای سرعت موج آکوستیک که تا حدود دمای 1500°C معتبرند و با توجه به تغییرات بسیار کوچک نمار شکست، می‌توان این روابط را برای محاسبه جابه‌جایی بسامد بریلوئین و اندازه‌گیری دما به خصوص در دمای بالا بکار گرفت. انتخاب هر کدام از این تقریب‌ها برای هر دستگاه حسگر توزیعی بریلوئین بر اساس مقایسه با داده‌های حقیقی در راه‌اندازی اولیه دستگاه می‌باید انجام گیرد. این پژوهش در کرنش صفر فیبر نوری انجام گرفت و بنابراین در آینده می‌توان در حالت کرنش غیر صفر این پژوهش را ادامه داد.

۴. نتیجه‌گیری

رفتار جابه‌جایی بسامد بریلوئین در فیبر تک مد سیلیکونی جهت حسگرهای توزیعی دما در کرنش صفر بررسی شد. با توجه به تغییرات کوچک نمار شکست فیبر تک مد نسبت به دما، بررسی تغییرات سرعت موج آکوستیک نسبت به دما اهمیت زیادی در کاربرد جابه‌جایی بسامد بریلوئین جهت دماسنجی پیدا می‌کند. بررسی داده‌های آزمایشگاهی جابه‌جایی بسامد بریلوئین در دو تجربه جداگانه قبل و معادلات کاملاً همخوان گزارش شده آن‌ها نشان می‌دهند که تقریب خطی سرعت موج آکوستیک نسبت به دما در پیش‌بینی دمای بالا خطای زیادی را نتیجه می‌دهد. با بکارگیری توابع پیشنهادی چند جمله‌ای‌های مرتبه دوم و سوم سرعت موج آکوستیک، می‌توان با خطای بسیار کمتری از راه استفاده از جابه‌جایی بسامد بریلوئین، دما را حتی در دماهای زیاد اندازه‌گیری کرد. این پژوهش از گزارش منحنی داده‌های گزارش شده سرعت موج آکوستیک تا دمای 1500°C در محیط سیلیکونی و در کرنش صفر شکل گرفت. نتایج بدست آمده از محاسبه جابه‌جایی بسامد بریلوئین، با یافته‌های گزارش شده تجربی اخیر تا دماهای 800°C و 400°C مقایسه شدند. در آینده می‌توان در حالت کرنش غیر صفر و به صورت تجربه مستقیم این پژوهش را ادامه داد.

۵. سپاسگزاری

در اینجا بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات ویراستار محترم و همکاران جهت پیگیری مقاله تشکر نمایم. همچنین از راهنمایی‌های استاد عزیز جناب آقای دکتر مسعودی بینه‌ایت سپاسگزار هستم و سلامتی و توفیق همگی را از خداوند منان خواستارم.

مراجع

- [1] Bahrampour, A.R., Tofighi, S., Bathaee, M. and Farman, F., "Optical fiber interferometers and their applications", *Interferometry-Research and Applications in Science and Technology* **1**, 3-30, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5772/34346>
- [2] Islam, M.R., Ali, M.M., Lai, M.H., Lim, K.S. and Ahmad, H., "Chronology of Fabry-Perot interferometer fiber-optic sensors and their applications: a review", *Sensors* **14(4)**, 7451-7488, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/s140407451>
- [3] Rajan, G. ed., *Optical fiber sensors: advanced techniques and applications*. CRC press, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1201/b18074>
- [4] Hisham, H.K., "Optical fiber sensing technology: basics, classifications and applications", *Am. J. Remote Sens* **6(1)**, 1-5, 2018. DOI: [10.11648/j.ajrs.20180601.11](https://doi.org/10.11648/j.ajrs.20180601.11)
- [5] Hartog, A.H., *An introduction to distributed optical fibre sensors*. CRC press, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315119014>
- [6] Katrenova, Z., Alisherov, S., Abdol, T., Yergibay, M., Kappassov, Z., Tosi, D. and Molardi, C., "Investigation of high-resolution distributed fiber sensing system embedded in flexible silicone carpet for 2D pressure mapping", *Sensors* **22(22)**, 8800, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22228800>

- [7] Chai, J. and Du, W., "Experimental study on the application of BOTDA in the overlying strata deformation monitoring induced by coal mining", *Journal of Sensors* **2019(1)**, 3439723, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/3439723>
- [8] Zeni, L., Picarelli, L., Avolio, B., Coscetta, A., Papa, R., Zeni, G., Di Maio, C., Vassallo, R. and Minardo, A., "Brillouin optical time-domain analysis for geotechnical monitoring", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* **7(4)**, 458-462, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.01.008>
- [9] Zhao, M., Yi, X., Zhang, J. and Lin, C., "PPP-BOTDA distributed optical fiber sensing technology and its application to the Baishuihe landslide", *Frontiers in Earth Science* **9**, 660918, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.660918>
- [10] Krohn, D. and Nicholls, P., "Fiber optic sensor applications in transportation infrastructure protection", In *Photonics in the Transportation Industry: Auto to Aerospace II*, **7314**, 54-62. SPIE, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.820797>
- [11] Rovera, A., Tancau, A., Boetti, N., Dalla Vedova, M.D., Maggiore, P. and Janner, D., "Fiber optic sensors for harsh and high radiation environments in aerospace applications", *Sensors* **23(5)**, 2512, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23052512>
- [12] Zhou, D., Dong, Y., Wang, B., Pang, C., Ba, D., Zhang, H., Lu, Z., Li, H. and Bao, X., "Single-shot BOTDA based on an optical chirp chain probe wave for distributed ultrafast measurement", *Light: Science & Applications* **7(1)**, 32, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0030-0>
- [13] Urricelqui Polvorinos, J., Zornoza Indart, A., Sagüés García, M. and Loayssa Lara, A., "Dynamic BOTDA measurements based on Brillouin phase-shift and RF demodulation", *Optics Express*, **20(24)**, 26942-26949, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.20.026942>
- [14] Jia, X.H., Chang, H.Q., Ao, L., Ji, X.L., Xu, C. and Zhang, W.L., "BOTDA sensors enhanced using high-efficiency second-order distributed Brillouin amplification", *Optics Express* **24(13)**, 14079-14085, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1364/oe.24.014079>
- [15] Jin, C., Wang, L., Chen, Y., Guo, N., Chung, W., Au, H., Li, Z., Tam, H.Y. and Lu, C., "Single-measurement digital optical frequency comb-based phase-detection Brillouin optical time domain analyzer", *Optics express* **25(8)**, 9213-9224, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1364/oe.25.009213>
- [16] Lu, P., Lalam, N., Badar, M., Liu, B., Chorpening, B.T., Buric, M.P. and Ohodnicki, P.R., "Distributed optical fiber sensing: Review and perspective", *Applied Physics Reviews* **6(4)**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5113955>
- [17] Shen, J., Li, T., Zhu, H., Yang, C. and Zhang, K., "Sensing properties of fused silica single-mode optical fibers based on PPP-BOTDA in high-temperature fields", *Sensors* **19(22)**, 5021, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19225021>
- [18] Feng, C., Kadum, J.E. and Schneider, T., *The state-of-the-art of Brillouin distributed fiber sensing*. London, UK: IntechOpen, 84684, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.84684>
- [19] Dong, Y., "High-performance distributed Brillouin optical fiber sensing", *Photonic sensors* **11**, 69-90, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13320-021-0616-7>
- [20] Bao, X., Zhou, Z. and Wang, Y., "distributed time-domain sensors based on Brillouin scattering and FWM enhanced SBS for temperature, strain and acoustic wave detection", *Photonix* **2(1)**, 14, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43074-021-00038-w>
- [21] Agrawal, G.P., "Nonlinear fiber optics." In *Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century*, pp. 195-211. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [22] Hu, D.J.J., Humbert, G., Dong, H., Zhang, H., Hao, J. and Sun, Q., "Review of specialty fiber-based Brillouin optical time domain analysis technology", In *Photonics* **8(10)**, 421. MDPI, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics8100421>
- [23] Hoshino, K., Saito, D., Endo, Y., Hasegawa, T. and Tanaka, Y., "Brillouin gain spectrum manipulation using multifrequency pump and probe for slope-assisted BOTDA with wider dynamic range", *Applied Physics Express* **15(2)**, 022009, 2022. DOI: <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ac4a0c>

- [24] Endo, M., Kimura, S., Tani, S. and Kobayashi, Y., "Coherent control of acoustic phonons in a silica fiber using a multi-GHz optical frequency comb", *Communications Physics* **4**(1), 73, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42005-021-00581-9>
- [25] Shirazi, M.R., "Fluctuations in Brillouin shifts and acoustic-phonon speeds in multiwavelength Brillouin Raman erbium-doped fiber laser generation", *Applied Optics* **59**(32), 10102-10106, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.409805>
- [26] Wang, W., Yu, Y., Geng, Y. and Li, X., "Measurements of thermo-optic coefficient of standard single mode fiber in large temperature range", In *2015 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Sensors and Applications*, 9620, 234-239. SPIE, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2193091>
- [27] Law, P.C., Liu, Y.S., Croteau, A. and Dragic, P.D., "Acoustic coefficients of P 2 O 5-doped silica fiber: acoustic velocity, acoustic attenuation, and thermo-acoustic coefficient", *Optical Materials Express* **1**(4), 686-699, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1364/OME.1.000686>
- [28] Le Parc, R., Levelut, C., Pelous, J., Martinez, V. and Champagnon, B., "Influence of fictive temperature and composition of silica glass on anomalous elastic behaviour", *Journal of Physics: Condensed Matter* **18**(32), 7507, 2006. DOI: <http://doi.org/10.1088/0953-8984/21/7/079802>
- [29] Dragic, P. and Ballato, J., "A brief review of specialty optical fibers for Brillouin-scattering-based distributed sensors", *Applied Sciences* **8**(10), 1996, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8101996>
- [30] Bao, Y. and Chen, G., "Temperature-dependent strain and temperature sensitivities of fused silica single mode fiber sensors with pulse pre-pump Brillouin optical time domain analysis", *Measurement Science and Technology* **27**(6), 065101, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/6/065101>

Article in Press