بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

فرایند موجبری با ضریب شکست تناوبی به وجود آمده در یک گاز مشتعل

یحیی نگین تاجی، مسعود رضوانی جلال*

گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه ملایر، ملایر

***rezvanijalal@malayeru.ac.ir**

چکیده - در این مقاله، انتشار نور (لیزر هلیوم-نئون و یا لامپ معمولی) از میان شعله های متناوب گاز بوتان-پروپان یا گاز شهری مورد تحقیق آزمایشگاهی قرار می گیرد. توزیع دمایی تناوبی ناشی از اشتعال باعث به وجود آمدن ضریب شکست دوره ای در گاز مشتعل می شود. این محیط اپتیکی متناوب همانند یک موجبر الکترومغناطیسی عمل می کند و نور را از لایه هایی که دارای شرط بازتابش داخلی کامل باشند هدایت کرده و به پرده مقابل می رساند. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می دهند که ضریب شکست مرکز شعله گاز بوتان-پروپان قدری از ضریب شکست هوا بیشتر است ولی در گاز متان ضریب شکست هسته اشتعال کمتر از هوا می باشد. با این آزمایش به سادگی می توان مقدار ضریب شکست گازهای مشتعل را با دقت بالایی پیدا کرد.

کلید واژه: گاز بوتان-پروپان مشتعل، متان، گرادیان دمایی، موجبری.

Wave-guiding Process with Periodic Refractive Index Induced in a Flaming Gas

Yahya Negintaji, Masoud Rezvani Jalal*

Department of Optics and Laser Engineering, Malayer University, Malayer

Abstract- In this paper, light propagation (He-Ne laser and a simple lamp) within periodic flames of Butane-Propane gas or natural gas (methane) is investigated experimentally. Periodic temperature distribution induced by combustion leads to a periodical refractive index in the burning gas. This periodic optical medium behaves like an electromagnetic waveguide and conducts the light to the upstream screen through layers that have total internal reflection condition. Experimental observation shows that refractive index in the center of Butane-Propane gas is slightly higher than that of air, but in the methane, refractive index of the flame core is lower than air. By this experiment, the refractive index of burning gasses can be found easily with high precision.

Keywords: Flaming Butane-Propane gas, Methane, Thermal gradient, Wave-guiding.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

مقدمه

با ایجاد گرادیان ضریب شکست در یک محیط و انتشار دادن نور در آن می توان پدیده های زیبا و حتی جدیدی از اپتیک را مشاهده کرد. تارهای نوری و بلورهای فوتونیکی دو مورد از بارزترین افزاره های اپتیکی هستند که در آنها تغییرات فضایی ضریب شکست نقش اساسی ایفا می کند و منجر به فرایندهایی همچون موجبری نوری و نیز ظهور گاف نواری اپتیکی می شود. راه های زیادی برای به وجود آوردن گرادیان ضریب شکست در محیط های نوری وجود دارد که از آن جمله می توان به گرمایش اشاره کرد. به عبارت دیگر، با ایجاد گرادیان دمایی می توان انتظار به وجود آمدن ضریب شکست وابسته به مکان را داشت. یکی از جاهایی که به سادگی می شود در آن توزیع دمایی پیدا کرد شعله ها می باشند زیرا نواحی مختلف یک شعله دارای دماهای متفاوتی هستند. برای مطالعه تغییرات مکانی ضریب شکست شعله می توان نوری به آن تاباند و نحوه انتشار آنرا را بررسی کرد. برهمکنش نور (مخصوصاً لیزر) با محیط های مشتعل در زمینه های مختلفی مانند تحقیقات احتراق همواره مورد توجه بوده است [۱و۲].

مقالات متنوعی در حوزه برهمکنش نور با شعله و مشخصه یابی آن در مراجع به چشم می خورد [۳و۴]. اکثر آنها به مطالعه یک شعله واحد پرداخته اند و به ندرت می توان تحقیقاتی راجع به انتشار نور در فضایی که شامل دسته ای از شعله ها باشد پیدا کرد. این در حالی است که برای شعله های کنار هم بحث گرادیان دمایی و ضریب شکست تناوبی پیش خواهد آمد و مسلماً عبور نور از آنها می تواند جنبه مطالعاتی ارزشمندی داشته باشد. در مقاله حاضر عبور لیزر هلیوم-نئون از شعله های متناوب گاز پروپان-بوتان و نیز نور معمولی از یک دسته شعله گاز شهری (متان) مورد بررسی تجربی قرار می گیرد و اثر ضریب شکست ناشی از اشتعال دوره ای مطالعه می شود.

چیدمان آزمایش و نتایج تجربی

برای بررسی انتشار نور در فضایی که شامل یک دسته شعله باشد از مشعلی که دارای سوراخ های متعدد است استفاده می شود. در شکل ۱-بالا تصویری از آن آورده شده است. وقتی که مخزن گاز به این مشعل وصل شود و روشن گردد از هر منفذ آن یک ستون گازی مشتعل تولید می گردد. جهت تاباندن نور به این شعله ها از چیدمانی که در شکل ۱ نشان داده شده است استفاده می شود.



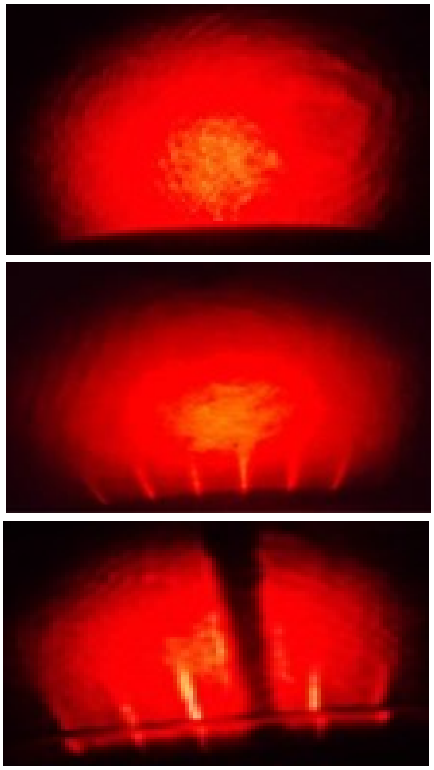
شکل ۱: (بالا) عکسی از سر مشعل که دارای منافذ متعدد است. (پایین) عکسی از چیدمان آزمایش برای بررسی انتشار نور لیزر هلیوم-نئون از یک دسته شعله گاز بوتان-پروپان.

باریکه لیزر ابتدا از یک پهن کننده عبور می کند تا قطرش افزایش یابد. سپس، این باریکه پهن طوری به مشعل گازی در حال احتراق تابانده می شود که اکثر شعله ها را پوشش دهد. نور خروجی از شعله ها به سمت پرده حرکت کرده و آنجا را روشن می کند. با مطالعه توزیع شدت نور در محل پرده می توان به تاثیر دسته شعله بر انتشار نور پی برد.

برای انجام آزمایش ابتدا از یک کپسول حاوی گاز ترکیبی بوتان-پروپان استفاده می شود. وقتی که مشعل خاموش باشد نور عبوری از آن توزیع یکنواختی همانند شکل ۲-بالا بر روی پرده خواهد داشت.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]



شکل ۲: (بالا) توزیع شدت نور لیزر هلیوم-نئون روی پرده وقتی که مشعل خاموش است. (وسط) نور عبور کرده از دسته شعله های گاز بوتان-پروپان موقعی که شعله ها به صورت ردیفی پشت سر هم قرار دارند. (پایین) نور لیزر خروجی از مشعل وقتی که یک ردیف از شعله ها مسدود باشد.

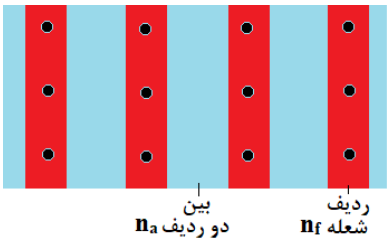
با روشن شدن مشعل، شعله های آبی (کمرنگ) در هر یک از منفذها تشکیل می شود. وقتی نور پهن لیزر به این شعله ها می رسد با آنها برهمکنش کرده و از طرف دیگر خارج می شود و روی پرده می افتد. اگر سر مشعل طوری قرار گیرد که منافذ آن پشت سر هم و به صورت ردیفی بیافتند (شکل ۱-بالا-راست) آنگاه پرده مثل شکل ۲-وسط روشن خواهد شد. کاملاً واضح است که نور رسیده به پرده دارای ستون های روشن متناوب می باشد. این طرح فقط به خاطر مشتعل بودن گاز تشکیل شده است زیرا وقتی که مشعل خاموش باشد چنین توزیعی وجود نخواهد داشت.

برای اینکه معلوم شود ستون های روشن از کجای مشعل خارج می شوند یکی از ردیف های شعله ای مسدود شد و توزیع نور عبوری از مابقی ردیف ها همانند شکل ۲-پایین ثبت گردید. مشخص است که ستون های روشن مشهود در شکل ۲ دقیقاً در راستای هر ردیف واقع هستند. به عبارت دیگر، نور فرودی به مشعل ترجیح داده که از ردیف شعله ها عبور کند و انتشار ضعیفی از بین ردیف ها داشته باشد.

در آزمایش دیگر، از گاز شهری (متان) و یک نور غیر لیزری (چراغ قوه معمولی) استفاده گردید. نتایج این آزمایش (که در اینجا آورده نشده است) نشان می دهد که باز هم طرح هایی مشابه با شکل ۲ به وجود می آید با این تفاوت که ستون های روشن در گاز مشتعل متان (بر خلاف گاز بوتان-پروپان) دقیقاً ما بین ردیف ها قرار می گیرند.

بحث و بررسی نتایج

همانطور که قبلاً اشاره شد گاز مشتعل تغییراتی در ضریب شکست هوای درون شعله و پیرامون آن ایجاد می کند. انتظار می رود که ضریب شکست در ردیف های شعله (شکل ۲-بالا-راست) با ضریب شکست هوای بین ردیف ها برابر نباشد و به عبارت دیگر، لایه های متناوبی از ضریب شکست کم و زیاد در فضای اشتعال به وجود آید. در شکل ۳ شماتیکی از این اتفاق نشان داده شده است.



شکل ۳: شماتیکی از لایه های تناوبی ضریب شکست در فضای اشتعال (نقاط بیانگر موقعیت شعله ها می باشند).

طبق این مدل برای نوری که به موازات ردیف های شعله (و یا با زاویه کمی نسبت به آنها) وارد فضای ضریب شکستی شکل ۳ می شود شرط بازتابش داخلی کامل در لایه هایی با ضریب شکست بالاتر مهیّا می گردد. بنابراین، مشابه آنچه که در یک دسته تار نوری اتفاق می افتد نور در لایه های با ضریب شکست بالا به دام افتاده و موجبری می شود و از محیط اشتعال عبور می کند. در عوض، لایه هایی که ضریب

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

شکست پایین دارند از هدایت نور عاجز هستند و نور کمتری به ناحیه مقابل آنها در پرده می رسد. با این تفسیر، اگر ضریب شکست ردیف شعله ای (n_f) از ضریب شکست فضای بین ردیفی (n_a) بیشتر باشد آنگاه نور از ردیف شعله ها عبور خواهد کرد. وقتی هم $n_f<n_a$ باشد هدایت از لایه های بین ردیفی انجام خواهد شد. با این بحث معلوم می شود که در گاز مشتعل بوتان-پروپان (که خطوط روشن در امتداد ردیف ها قرار دارند) ضریب شکست شعله از فضای بین شعله ای بیشتر است ولی در گاز متان برعکس می باشد.

گاز مشتعل از دو طریق ضریب شکست شعله و پیرامون آنرا تغییر می دهد: ۱) توزیع دمایی، و ۲) محصولات شیمیایی. بالا رفتن دمای گاز معمولاً با کاهش ضریب شکست همراه است پس انتظار می رود که در اشتعال بوتان-پروپان و متان، با توجه به اینکه مرکز شعله داغ تر از فضای اطراف است ضریب شکست ردیف شعله در آنها کمتر از بین ردیف ها باشد. سهم محصولات احتراق در ضریب شکست را هم باید لحاظ کرد. احتراق گازها غالباً با مصرف اکسیژن و تولید آب و CO_2 همراه است و کم و زیاد شدن غلظت آنها باعث تغییر ضریب شکست هوا می شود. از آزمایش گاز بوتان-پروپان و متان می توان این گونه استدلال کرد که اگرچه دمای بالاتر مرکز شعله در هر دو گاز منجر به کاهش ضریب شکست آن می شود ولی اثر محصولات احتراق طوری است که در نهایت منجر به افزایش ضریب شکست شعله بوتان-پروپان شده و نور را از ردیف های شعله ای آن موجبری می کند.

مدل موجبری ارائه شده را می توان جور دیگری هم تایید کرد. اگر واقعاً بازتابش داخلی دلیل هدایت نور بوده باشد آنگاه چرخاندن مشعل (تا مقداری که از زاویه حد خارج شود) باید هدایت نور را متوقف کند. آزمایش بوتان-پروپان نشان می دهد که با چرخاندن لیزر تا زاویه ۵ درجه همچنان هدایت نور وجود دارد ولی برای زوایای بیشتر عملاً طرح شکل ۲-وسط از بین می رود. طبق رابطه زاویه حد به شکل $\sin(90-5)=n_a/n_f$ اگر ضریب شکست هوا $n_a=۱/۰۰۰۳$ لحاظ شود آنگاه ضریب شکست مرکز شعله $n_f=۱/۰۰۴$ به دست می آید. به عبارت دیگر با یک آزمایش ساده اختلاف ضریب شکستی به میزان ۰/۰۰۳۷ بین مرکز شعله و بیرون آن در گاز بوتان-پروپان قابل ثبت است.

نتیجه گیری

در این مقاله، عبور نور از دسته شعله های گازی مورد بررسی قرار گرفت. معلوم شد که لایه های تناوبی ضریب شکست در ردیف شعله ها و مابین آنها ایجاد می شود که موجبری نور از لایه هایی با ضریب شکست بالاتر را در پی دارد. در گاز بوتان-پروپان ضریب شکست مرکز شعله از ضریب شکست بین دو شعله بیشتر بود ولی در متان عکس آن اتفاق افتاد. این رخداد را می توان به تاثیر دما و محصولات احتراق در تغییر ضریب شکست نسبت داد بدین معنی که اثر برآیند آنها باعث بالا بودن ضریب شکست شعله بوتان-پروپان از هوا می شود ولی در گاز متان موجب کاهش ضریب شکست شعله می گردد. انجام این آزمایش برای گازهای دیگر و دسته بندی آنها برحسب کاهش یا افزایش ضریب شکست شعله و کاربردی کردن آن جزء کارهای در حال انجام نویسندگان مقاله می باشد.

مرجع ها

[1] Alan C. Eckbreth, *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*, CRC Press; First edition, 1996.

[2] CHUYU WEI et al, "Tomographic laser absorption imaging of combustion species and temperature in the mid-wave infrared", OPTICS EXPRESS, Vol. 26, No. 16, 20944, 2018.

[3] Francesca De Domenico et al, "Temperature and water measurements in flames using 1064 nm Laser-Induced Grating Spectroscopy (LIGS)", Combustion and Flame, 205, 336–344, 2019.

[4] Hualei ZHANG et al, "Investigation of flame structure in plasma assisted turbulent premixed methane-air flame", Plasma Sci. Technol., 20, 024001, 2018.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]