بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

# مطالعه تجربی اثرات تلاطم اپتیکی بر انتشار باریکه لیزر در مخابرات اپتیکی زیرآبی

مسعود یوسفی[۱]، فاطمه دباغ کاشانی[۱]، امیر آقاجانی[۱] و محمدرضا هدایتی راد[۲]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

[۲]دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، تهران، ایران

**چکیده – با توجه به اهمیت بررسی اثرات نوسانات تصادفی ضریب‌شکست آب بر انتشار باریکه‌های لیزری و درنتیجه بر عملکرد سیستم مخابرات نوری زیرآبی، در مقاله حاضر به صورت تجربی تأثیر نوسانات ضریب‌شکست ناشی از نوسانات دمایی بر روی برخی از مهمترین پارامترهای لینک مخابراتی از قبیل میانگین توان دریافتی، نسبت سیگنال به نویز (*SNR*) و واریانس نرمال‌شده توان (ضریب سوسوزنی) مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج آزمایشات دلالت بر آن دارد که وجود نوسانات دمایی در آب نسبت به اتمسفر تأثیر بیشتری بر روی پارامترهای لینک مخابراتی دارد. افزایش فاصله صفحه تلاطم (نوسانات دمایی) از محل فرستنده، سبب افزایش نسبت سیگنال به نویز و کاهش سوسوزنی می‌شود. همچنین افزایش قطر دهانه روزنه در صفحه گیرنده (البته تا حد معینی) موجب کاهش واریانس نرمال‌شده توان و درنتیجه افزایش *SNR* می‌شود.**

کلید واژه- انتشار باریکه لیزر در محیط تلاطمی زیرآبی، مخابرات زیرآبی، نسبت سیگنال به نویز، ضریب سوسوزنی.

# Experimental Investigation of Optical Turbulence Effects on the Laser Beam Propagation through Underwater Communication Link

Masoud Yousefi[1], Fatemeh Dabbagh Kashani[1], Amir Aghajani[1], and Mohammad Reza Hedayati Rad[2]

[1]School of Physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

[2]Department of Electrical Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, regarding the importance of investigation of optical turbulence limiting effects on laser beam propagation through water, and thus on the performance of underwater wireless optical communication systems, the effect of refractive index fluctuations resulting from temperature fluctuations on some of the most important underwater communication link parameters such as the average received power, Signal-to-Noise Ratio (SNR) and normalized power variance (Scintillation index) has been investigated empirically. The experimental results indicate that the temperature fluctuations in water refractive index variations related to atmospheric have greater impact on the parameters of the communication link. Increasing the distance of the turbulence screen generated by temperature fluctuations from the transmitter plane, scintillation index decreased and therefore, SNR increases. Also, increasing aperture diameter of the receiver optics reduces the normalized power variance and therefore increases the SNR.

Keywords: Laser beam propagation through turbulence, SNR, Scintillation index, Underwater optical communication.



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

## ۱- مقدمه

در چند سال اخیر علاقه به مخابرات فضای آزاد اپتیکی(FSO) برای لینک‌های زمینی، فضایی و زیرآبی به دلیل توانایی آن‌ها در فراهم نمودن ارتباط امن و نرخ انتقال داده بالا با توان مصرفی، حجم و وزن کم به طور چشمگیری افزایش یافته‌است. بسیاری از تحقیقات صورت گرفته در این حوزه، بر روی لینک‌های مخابراتی زمینی و فضایی معطوف شده‌است. درحالیکه لینک‌های مخابراتی زیرآبی به دلیل چالش‌های بیشتر نسبت به لینک‌های اتمسفری کمتر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند[۱]. انتقال سیگنال الکترواپتیکی در زیر آب تحت تأثیر ویژگی‌ها و اجزای تشکیل‌دهنده(مولکول‌ها و مواد آلی و معدنی محلول) این محیط قرار می‌گیرد. درحالیکه اکثر مطالعات صورت گرفته در این حوزه بر روی تأثیرات ناشی از عوامل تشکیل‌دهنده محیطی متمرکزند، تحقیقات اخیر حاکی از آن است که تحت شرایط خاص، تنزل مشهود سطح سیگنال دریافتی می‌تواند ناشی از تغییرات تصادفی ضریب‌شکست حاصل از ساختارهای میکروبیی دما و شوری در آب اقیانوس‌ها و دریاها باشد[۲]. در اغلب موارد، به ویژه در محیط دریایی و اقیانوسی(به دور از دهانه خروجی رودخانه‌ها و خورها)، تأثیر شوری مورد اغماض قرار گرفته و به جای آن بر روی اثرات دمایی تمرکز می‌شود[۲]. علیرغم تعداد بسیار اندک تحقیقات صورت گرفته بر روی مشخصه‌سازی محوشدگی(سوسوزنی) سیگنال ناشی از تلاطم اپتیکی آب، به تازگی گزارش‌هایی در زمینه شبیه‌سازی شرایط تلاطم اپتیکی زیر آب به صورت تجربی صورت پذیرفته‌است که در اغلب آن‌ها از نوسانات شوری صرف نظر شده‌است[۳]. تغییرات تصادفی تغییرات ضریب‌شکست در امتداد انتشار باریکه لیزری در محیط زیر آب، سبب نوسانات بزرگ در شدت سیگنال(سوسوزنی) در گیرنده می‌شود. این پدیده به طور آشکار موجب تنزل عملکرد و ناپایداری لینک مخابرات زیرآبی می‌شود[۱]. در برخی از مطالعات، به منظور شبیه‌سازی تلاطم و اثرات آن در فضای تئوری بر انتشار باریکه لیزری، از صفحات فازی استفاده شده‌است[۴]. استفاده از مفهوم صفحه فازی در بررسی‌های تجربی جهت شبیه‌سازی تلاطم اپتیکی زیرآبی، امکان مطالعه اثر تلاطم جایگزیده که در فضای واقعی ممکن است در نقاط مختلف از مسیر انتشار باریکه و به دفعات اتفاق بیفتد را فراهم می‌سازد. از این رو، با توجه به اهمیت بررسی آزمایشگاهی تأثیر تلاطم اپتیکی زیر آب بر پارامترهای مؤثر مخابرات لیزری و همچنین مستندات کم در حوزه مذکور، در مقاله حاضر، تأثیر نوسانات دمایی در ایجاد نوسانات تصادفی ضریب‌شکست و ایجاد پدیده سوسوزنی در شدت باریکه لیزری دریافتی بررسی شده‌است. جهت نیل به این هدف، مقاله حاضر به این صورت سازماندهی شده‌است: در بخش نخست، چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده جهت شبیه‌سازی تلاطم اپتیکی و محیط انتشار زیر آب ارائه می‌شود. سپس، اطلاعات ثبت شده و روش‌های آماری پردازش آن به همراه روابط و معادلات مورد نیاز معرفی خواهد شد. در نهایت داده‌های ثبت شده در شرایط مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نتایج حاصل با استفاده از گراف‌ها و جداول ارائه می‌شوند. نتایج حاصله در بخش آخر جمع‌بندی خواهند شد.

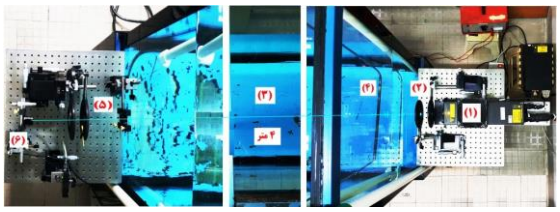
## ۲- چیدمان آزمایشگاهی

چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش شامل یک تانک آکلریک به طول ۴متر و عرض ۰/۵متر و ارتفاع ۱متر است. با استفاده از یک پمپ مناسب که در مسیر آن یک گرمکن برقی قرار دارد، آب در داخل تانک به گردش درآمده و از دو طرف آن به داخل باز می‌گردد. با استفاده از این سیستم گردش سیال، امکان یکنواخت‌سازی و همدما-سازی آب داخل تانک به منظور ایجاد شرایط کنترل‌پذیر فراهم می‌شود. جهت نزدیک شدن به شرایط آزمایش(کمینه کردن اثرات جذب و پراکندگی)، آب در دو مرحله تصفیه شده و به میزان سختی کمتر از ۲۰ می‌رسد. به منظور اندازه‌گیری دمای آب با دقت بالا، در داخل تانک در ۴ نقطه به فواصل یکسان، از حسگرهای دیجیتالی دما استفاده شده-است. با تلفیق ایده صفحه فازی در شبیه‌سازی‌های تئوری و صفحات گرماده و سرماده در بررسی‌های تجربی، در این چیدمان از یک گرمکن میله‌ای خارجی جهت ایجاد گرادیان دما و نوسانات آن به صورت صفحه‌ای استفاده شده‌است. تغییر ولتاژ اعمالی به این گرمکن سبب تغییر در نرخ انتقال حرارت و درنتیجه موجب تغییر دامنه نوسانات دمایی در صفحه می‌شود. شکل(۱) تصویری از سامانه شبیه‌ساز انتشار امواج اپتیکی در زیر آب را نشان می‌دهد.



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]



شکل ۱: چیدمان سامانه شبیه‌ساز انتشار امواج اپتیکی در زیر آب

در فرستنده از لیزر یون آرگون(۱) ساخت شرکت Melles Griot استفاده شده‌است که خروجی پایدار در بازه طول-موجی ۴۵۷ تا ۵۱۴ نانومتر(پنجره سبز-آبی عبوری آب) را فراهم می‌نماید. به منظور پهن و موازی‌سازی باریکه خروجی، پس از لیزر یک سیستم اپتیکی موازی‌ساز و گسترنده(۲) تعبیه شده‌است که اندازه لکه خروجی لیزر را حدود ده برابر نموده و به داخل سامانه شبیه‌ساز(۳) (به همراه گرمکن میله‌ای خارجی(۴)) هدایت می‌کند. در قسمت گیرنده، باریکه لیزر پس از خروج از سامانه شبیه‌ساز، توسط یک لنز با فاصله کانونی ۱۰سانتیمتر و قطر دهانه ۱۵سانتیمتری(۵) بر روی یک توان‌سنج(۶) ساخت شرکت Thorlabs با دقت ±0.5 درصد و نرخ داده‌برداری 30pts/second متمرکز می-شود. تغییرات توان دریافتی در طول مدت زمان ۱۰ دقیقه جمع‌آوری شده و محاسبات آماری مرتبط با پارامترهای لینک مخابراتی بر روی آن صورت می‌پذیرد. در بخش بعد نحوه پردازش داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها و آزمایشات تجربی ارائه می‌شود.

## ۳- پردازش داده‌های حاصل از شبیه‌سازی

همانگونه که ذکر شد، در محیط کنترل شده آب میزان جذب و پراکندگی ثابت بوده و تغییرات ضریب‌شکست در طول مسیر انتشار(ناشی از تغییرات چگالی، شوری و دما در محیط) منجر به نوسانات سیگنال شدت در گیرنده می‌شود. این نوسانات شدت در نقاط مختلف صفحه ورودی اپتیک گیرنده با توجه به استفاده از عدسی همگرا به تغییرات توان بر روی صفحه آشکارساز در زمان تبدیل خواهد شد. با داده-برداری در طی زمان، داده توان بر حسب زمان در شرایط کنترل شده ثبت می‌شود. در قدم نخست محاسبه توان میانگین صورت می‌پذیرد.

$$\langle P\rangle_{avg}=\frac{\sum_{i=1}^{N}P_i}{N},\quad N=\text{number of acquired data} \qquad (۱)$$

با توجه به مفهوم نرخ سیگنال به نویز(SNR) و مقدار توان معادل نویز( $P_{NEP}$ ) آشکارساز که سهم نویز در توان تولیدی داخل آشکارساز را بیان می‌کند(با مقدار $4\times10^{-14}watt$ برای این آشکارساز)، SNR از رابطه زیر بدست می‌آید[۵]:

$$SNR=\frac{\langle P\rangle_{avg}}{P_{NEP}} \qquad (۲)$$

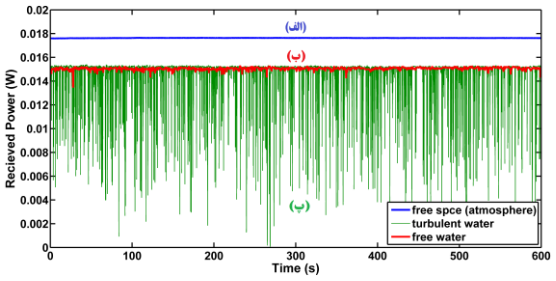
واریانس توان در صفحه آشکارساز که مرتبط با واریانس نرمال‌شده شدت باریکه لیزری در اپتیک گیرنده (ضریب سوسوزنی) است، به صورت زیر توصیف می‌شود[۱]:

$$\sigma_P^2=\frac{\langle P^2\rangle_{avg}-\langle P\rangle_{avg}^{\ 2}}{\langle P\rangle_{avg}^{\ 2}} \qquad (۳)$$

از معادلات (۱) تا (۳) در بررسی آماری تلاطم اپتیکی زیر آب و تأثیر آن بر انتشار امواج اپتیکی و پارامترهای لینک مخابراتی در این محیط استفاده خواهد شد.

## ۴- نتایج تجربی

پس از آماده‌سازی چیدمان آزمایش طبق شکل(۱) در بخش دوم، میزان توان دریافتی بر حسب زمان در طی مدت نمونه-برداری ثبت گردید. شکل(۲) رفتار توان بر حسب زمان در سه حالت مختلف را نمایش می‌دهد.




شکل ۲: رفتار زمانی توان دریافتی در گیرنده در سه حالت مختلف.

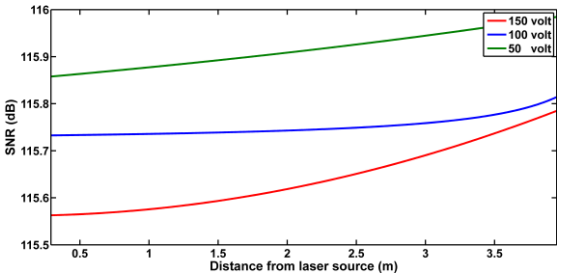
نمودارهای(۲(الف) تا ۲(پ)) به ترتیب توان تانک خالی از آب(فضای آزاد)، تانک پرشده با آب تصفیه شده در دمای همگن و یکنواخت ۲۳ درجه سانتیگراد و تانک پر از آب تصفیه شده به همراه گرمکن خارجی میله‌ای جهت تولید گرادیان دمایی صفحه‌ای در ولتاژ ۱۵۰ ولت و فاصله ۳۰ سانتیمتری از فرستنده را نشان می‌دهند. با توجه به نمودار (الف)، میزان پایداری لیزر به کار رفته در چیدمان به خوبی مشهود است. در شرایطی که فقط آب خالص تصفیه شده در تانک شبیه‌سازی وجود دارد، نوسانات اندکی( $\sigma_P^2=5.5\times10^{-5}$ ) به دلیل ماهیت مولکولی آب مشاهده می‌شود. پس از اعمال گرادیان دمایی جهت ایجاد



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

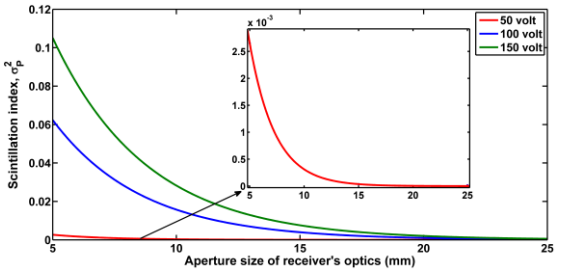
[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

نوسانات تصادفی ضریب‌شکست، به طور آشکار نوسانات نسبتاً شدیدی( $\sigma_P^2 = 0.019$ ) در توان گیرنده به دلیل عبور باریکه لیزری از صفحه تلاطمی و تأثیرپذیری از آن مشاهده می‌شود. در شکل(۳) تأثیر فاصله محل ایجاد تلاطم صفحه‌ای از چشمه لیزری و نوسانات دمایی جایگزیده نسبت به فرستنده بررسی شده‌است.




شکل ۳: مقادیر نرخ سیگنال به نویز بر حسب فاصله محل گرمکن میله‌ای خارجی(صفحه تلاطم) از فرستنده برای سه ولتاژ مختلف.

در این حالت، گرمکن خارجی در فواصل مختلف از ۳۰ تا ۴۰۰ سانتیمتری از صفحه فرستنده قرار داده شده‌است. همچنین به منظور بررسی همزمان اثر تغییر قدرت تلاطم دمایی ایجاد شده، ولتاژهای ۵۰،۱۰۰،۱۵۰ ولت برای تغذیه گرمکن خارجی در نظر گرفته شد و مقدار نرخ سیگنال به نویز محاسبه گردید. مشاهده شد، هرچه نوسانات دمایی جایگزیده(محل موضعی تلاطم صفحه‌ای) به صفحه فرستنده نزدیکتر باشد، تلاطم اپتیکی تأثیر بیشتری بر روی نوسانات توان باریکه لیزری منتشرشونده در آب خواهد گذاشت. علاوه‌بر این، افزایش ولتاژ سبب افزایش نوسانات دمایی و قدرت تلاطم شده و درنتیجه سبب افزایش سوسوزنی و کاهش سطح SNR می‌شود. شکل(۴) واریانس نرمالیزه توان لیزر(ضریب سوسوزنی) را برای سه قطر دهانه مختلف اپتیک گیرنده نشان می‌دهد.




شکل ۴: ضریب سوسوزنی(واریانس نرمال‌شده توان دریافتی) به ازای قطرهای مختلف دهانه اپتیک گیرنده در سه ولتاژ اعمالی مختلف.

از آنجا که با افزایش قطر دهانه(در این حالت از ۵ تا ۲۵ میلیمتر) میزان توان ورودی به آشکارساز افزایش یافته و درنتیجه میزان تأثیرپذیری باریکه و به تبع آن دامنه نوسانات توان دریافتی کاهش می‌یابد، همانگونه که در شکل(۴) نشان داده شده‌است، افزایش قطر دهانه اپتیک گیرنده(با توجه به قطر لکه لیزر در گیرنده( $\approx 30mm$ )) سبب کاهش ضریب سوسوزنی می‌شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

دراین مقاله چیدمان آزمایشگاهی و نتایج تجربی به منظور شبیه‌سازی انتشار امواج اپتیکی از میان شرایط کنترل شده تلاطمی در زیر آب جهت استفاده در طراحی و مشخصه-سازی لینک‌های مخابراتی زیرآبی شرح داده‌شد. نتایج آزمایشات نشان می‌دهند که وجود آب خالص در تانک شبیه‌ساز به تنهایی بدون حضور تلاطم سبب افزایش نوسانات توان نسبت به حالت انتشار در اتمسفر می‌شود. همچنین، وجود نوسانات دمایی سبب افزایش نوسانات توان و درنتیجه ضریب سوسوزنی خواهد شد. نتایج بررسی‌های تجربی این مقاله دلالت بر آن دارد که با دور شدن صفحه تلاطم اپتیکی( نوسانات تصادفی ضریب‌شکست محیط القا شده توسط گرمکن خارجی) نسبت به فرستنده، سبب کاهش تأثیر تلاطم و نوسانات شدت باریکه لیزری و درنتیجه افزایش نسبت سیگنال به نویز خواهد شد. درنهایت با بررسی اثر تغییر قطر دهانه سیستم اپتیک گیرنده با توجه به قطر باریکه لیزر در محل اپتیک گیرنده، مشاهده شد که افزایش قطر دهانه منجر به کاهش تأثیرات تلاطم اپتیکی زیر آب و درنتیجه ضریب سوسوزنی می‌شود. نتایج تجربی حاصل می-تواند می‌تواند در طراحی و ساخت سیستم مخابرات لیزری امن زیرآبی مورد استفاده قرار گیرد.

## مراجع


[1] H. Kaushal, G. Kaddoum, “Underwater optical wireless communication”, IEEE Access, Vol. 4, pp. 1518-1547, 2016.

[2] W. Hou, S. Matt, “EO signal propagation in a simulated underwater turbulence environment”, OCEANS 2014 – TAIPEI IEEE, pp. 1-6, 2014.

[3] A. V. Kanaev, W. Hou, S. R. Restaino, S. Matt, S. Gładysz, “Correction methods for underwater turbulence degraded imaging”, Proc. SPIE 9242, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIX, Vol. 9442, pp. 9442p1-9442p9, 2014.

[4] N. Farwell, “*Optical Beam Propagation in Oceanic Turbulence*”, PHD thesis, University of Miami, 2014.

[5] E. Kazemian, F. D. Kashani, “Reliability analysis of underwater optical communication links in different locations through Caspian Sea”, Optik, Vol. 124, No. 21, pp. 5184-5188, 2013.




این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]