بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

بررسی ناهمسانگردی تلاطم زیر آب با استفاده از پایش حرکت تصویر نور عبوری از آن

ابراهیم محمدی رازی[۱]، مرتضی بهبودی[۲] و سیفاله رسولی[۳و۴]

[۱]گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

[۲]گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

[۳] دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان، زنجان ایران

[۴]مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

چکیده – در این مقاله با استفاده از پایش حرکت تصویر نور عبوری از محیط متلاطم زیر آب، ناهمسانگردی این محیط مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بر این اساس باریکه نور لیزر با طول موج ۵۳۲ نانومتر پس از موازی سازی با قطر ۱ سانتیمتر وارد محیط متلاطم زیر آبی می‌شود. محیط متلاطم زیر آب را آکواریومی با ابعاد ۲۰×۲۰×۳۰ سانتیمترمکعب تشکیل می‌دهد. در انتهای مسیر، زاویه فرود نور در دو راستای عمود بر انتشار باریکه نور اندازه‌گیری شده و افت و خیزهای آن در دو راستا تعیین می‌شود. با تحلیل وردش زاویه فرود نور در دو رستا ناهمسانگردی محیط بررسی می‌شود. در نهایت تاثیر گرادیان دمای متفاوت حاصل از آب با دماهای متفاوت بر میزان ناهسانگردی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند که محیط تلاطم زیر آبی یک محیط متلاطم ناهمسانگرد بوده و میزان ناهمسانگردی با افزایش گرادیان دما افزایش می‌یابد.

کلید واژه- تلاطم زیر آب، پایش حرکت تصویر، گرادیان دما

Investigation of anisotropy of underwater turbulence using image motion monitoring method

Ebrahim Mohammadi Razi[1], Morteza Behbodi[2], Saifollah Rasouli[3,4]

[1]Faculty of physics, Department of Basic Sciences, university of Bojnord, Bojnord, Iran

[2]Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering, university of Bojnord, Bojnord, Iran

[3]Department of physics, Institute of Advance Studies in Basic Science, Zanjan, Iran

[4]Optics Research Center, Institute of Advance Studies in Basic Science, Zanjan, Iran

Abstract-In this paper, the anisotropy of underwater turbulence was investigated using image motion monitoring method. Accordingly a beam of light with 532 nm wavelength after collimating with a diameter of 1 cm enters the underwater turbulence. The underwater turbulence is made up of an water-filled aquarium with dimensions of 20×20×30 cm^3. The angle of arrival, AA, of light beam was measured at the end of the turbulence path at two directions perpendicular to propagation direction. Comparing the variances of AA in two directions, the anisotropy of underwater turbulence and influence of different temperature gradients on it were investigated. Results show the underwater turbulence is an anisotropic medium. In addition the anisotropy increases as temperature gradient increases.

Keywords: Underwater turbulence, Image motion monitoring, Temperature gradient

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

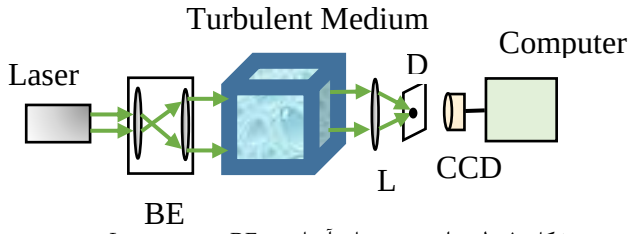
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-08-16]

مقدمه

در چند دهه اخیر مطالعه انتشار پرتو نوری در محیط‌های متلاطم به دلیل کاربردهای فراون آن در مباحثی نظیر مخابرات اپتیکی فضای آزاد برای لینک‌های زمینی، فضایی و زیر آب با توجه به حجم بالای انتقال اطلاعات، دقت و سرعت بالای آن مورد توجه محققان بوده است. تاکنون مطالعات بسیاری برای بررسی تلاطم غیر آبی نظیر تلاطم جوی و تاثیرات آن بر انتشار باریکه نور عبوری از آن صورت گرفته است. اما به علت پیچیدگی‌های تلاطم زیر آبی تاکنون بررسی‌های جامع در این حوزه کمتر انجام شده است[۱]. مطالعه محیط متلاطم جوی و زیر آبی در دو حوزه کلی دسته‌بندی می‌شود. دسته اول مطالعاتی که تاثیر محیط متلاطم را بر شدت نور عبوری از آن بررسی کرده و دسته دوم که تاثیر این محیط را بر جبهه‌موج نور عبوری از آن مورد مطالعه قرار داده‌اند. شدت و جبهه‌موج نور هنگام انتشار در محیط زیر آب تحت تاثیر ویژگی‌ها و اجزای تشکیل دهنده نظیر مولکول‌ها و مواد آلی و معدنی محلول در آب و نیز تلاطم اپتیکی است. منشا تلاطم اپتیکی تغییرات تصادفی ضریب شکست نور است که از افت و خیزهای دمایی و افت و خیزهای شوری آب ناشی می‌شود. در اکثر مطالعات انجام شده از افت و خیزهای شوری در مقابل افت و خیزهای دمایی صرف نظر شده است[۲]. برای بررسی تلاطم از مدل‌های مختلفی استفاده می‌شود که اکثر این مدل-های بر پایه همگنی و همسانگردی تلاطم استوارند. تاکنون مطالعات بسیاری این فرضیات را برای تلاطم جوی با تردید روبرو نموده‌اند[۳] اما این فرضیات در تلاطم زیر آبی مورد بررسی قرار نگرفته است. با توجه به اهمیت بررسی آزمایشگاهی تلاطم اپتیکی زیر آب و همچنین تعداد اندک مطالعات صورت گرفته در این زمینه، در این مقاله تاثیر نوسانات دمایی محیط متلاطم آبی بر آمار افت و خیزهای زاویه فرود نور هنگام انتشار آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از تحلیل وردش زاویه فرود نور در دو راستای عمود بر جهت انتشار فرضیه همسانگردی محیط تلاطم زیر آبی بررسی می‌شود. بر این اساس درابتدا چیدمان آزمایش مورد استفاده توضیح داده می‌شود. در ادامه تئوری اندازه‌گیری زاویه فرود در دو راستای عمود بر جهت انتشار نور بیان خواهد شد. در نهایت نتایج ارائه و تفسیر می‌شود.

چیدمان آزمایش

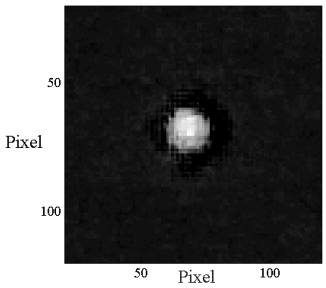
شکل ۱ طرح واره‌ی چیدمان آزمایش برپا شده در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه بجنورد را نشان می دهد. نور لیزر با طول موج ۵۳۲ نانومتر با استفاده از یک سیستم تلسکوپی موازی و با قطر ۱ سانتیمتر وارد محیط متلاطم آبی می‌شود. محیط متلاطم آبی از یک آکوایوم با ابعاد ۲۰×۲۰×۳۰ سانتیمتر مکعب تشکیل شده است. آکواریوم از آب با دمای معین پر می‌شود. نور لیزر پس از عبور از محیط متلاطم در مسیر ۳۰ سانتیمتری توسط عدسی کانونی ساز با فاصله کانونی ۲,۵ سانتیمتر بر روی یک صفحه مات متمرکز می‌شود. مکان تمرکز باریکه نوری در اثر افت و خیزهای دمایی و در نتیجه تلاطم اپتیکی در زمان افت و خیز می‌کند. با استفاده از یک عدسی تصویرساز، تصاویر بر روی صفحه حساس یک دروبین CCD ثبت می‌شده و سپس برای تحلیل به کامپیوتر منتقل می‌شود. سرعت داده‌برداری دوربین CCD ۶۰ تصویر در ثانیه و زمان نوردهی ۰,۲۵ میلی ثانیه است. برای بررسی تاثیر گرادیان دما بر افت و خیز زاویه فرود، آکواریوم از آب با دماهای ۲۴/۲، ۴۶/۵ و ۵۲ درجه سانتیگراد پر می‌شود. در هر آزمایش نور لیزر از محیط متلاطم عبور کرده و در انتهای مسیر زاویه فرود نور چنانچه در بخش بعد خواهد آمد در دو راستای عمود بر راستای انتشار محاسبه می‌شود. در نهایت واریانس افت و خیز زاویه فرود نور در دو راستا تعیین می‌شود. برای محاسبه واریانس زاویه فرود نور از ۶۰۰۰ تصویر ثبت شده استفاده می‌شود.



شکل ۱: طرحواره‌ی چیدمان آزمایش، BE: پرتو کستر، L: عدسی، D: صفحه مات.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-08-16]



شکل ۲: نمونه ای از تصویر گرفته شده توسط دوربینCCD

تئوری

برای تحلیل داده‌ها در ابتدا با استفاده از کد نوشته شده در محیط متلب مرکز شدت تصویر تعیین می‌شود، اگر $I(x,y)$ توزیع شدت نور در صفحه کانونی عدسی L باشد، مرکز شدت لکه در راستای x طبق رابطه زیر داده می‌شود

$$x_G = I_{tot}^{-1}\iint xI(x,y)dxdy \qquad (1)$$

که I_{tot} شدت کل تصویر لکه است. رابطه مشابهی را می‌توان برای مرکز شدت در راستای y نوشت. برای تصاویر گسسته CCD، انتگرال به جمع روی پیکسل‌های CCD تبدیل می‌شود. در محاسبه انتگرال ابتدا مرکز پرشدت‌ترین پیکسل را مشخص می‌کنیم سپس به مرکز آن و به شعاع قرص ایری که برابر $\boldsymbol{r = 1.22\,\lambda/D}$ (که $\boldsymbol{\lambda}$ طول موج و D قطر لکه است) دایره‌ای رسم می کنیم. سپس انتگرال را در این محدود محاسبه می‌کنیم. با محاسبه $\boldsymbol{x_G}$ و $\boldsymbol{y_G}$ ، زاویه فرود طبق رابطه ۲ بدست می آید.

$$\alpha_x = \frac{l_x \times (x_{Gi} - \bar{x}_{Gi})}{F} \qquad (2)$$

که l_x، x_{Gi}، $\bar{x}_{Gi}$ و F به ترتیب اندازه پیکسل **CCD** در راستای **x**، مکان مرکز جرم تصویر**i**ام، میانگین مولفه **x** مکان مرکز جرم تصاویر مختلف و فاصله کانونی عدسی **L** است. پس از محاسبه زاویه فرود نور در دو راستا، وردش این کمیت تعیین می‌شود.

نتایج

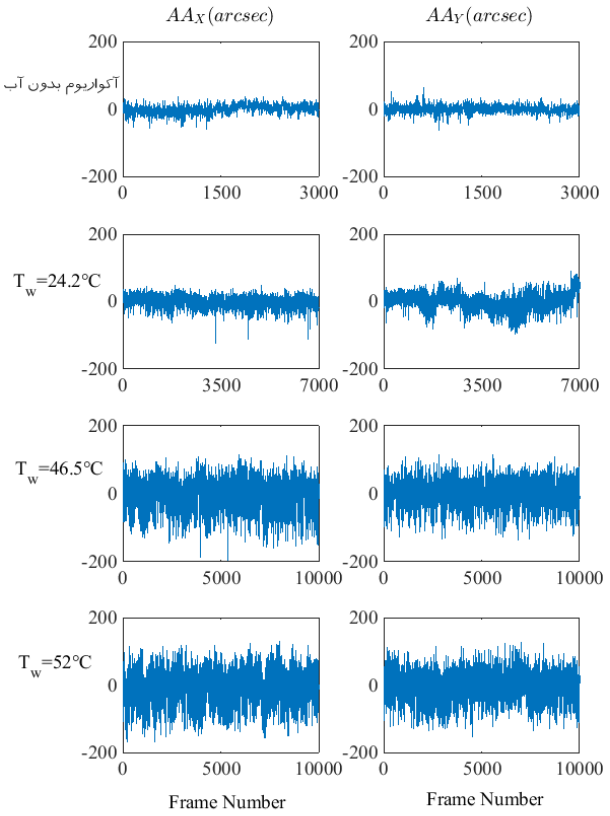
برای بررسی ناهمسانگردی تلاطم زیر آب و نیز بررسی تاثیر گرادیان دمایی بر آن، افت و خیز زاویه فرود نور عبوری از محیط متلاطم در انتهای مسیر و در دو راستای عمود بر راستای انتشار، راستای x و راستای y، برای دماهای مختلف آب تعیین می شود. شکل ۳ سری زمانی افت و خیزهای زاویه فرود نور را برای چهار حالت آکواریوم بدون آب، آکواریوم با دمای ۲۴/۲، ۴۶/۵ و ۵۲ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۳ دیده می شود با افزایش دمای آب میزان افت و خیزهای زاویه فرود نور در دو راستا افزایش می‌یابد. افت و خیزهای آکواریوم بدون آب از تلاطم هوا و نیز لرزش چیدمان اپتیکی ناشی می‌شود. هنگامی که نور از محیط آبی عبور می‌کند تاثیر لرزش‌های بر افت و خیز زاویه فرود در مقایسه با تاثیر گرادیان دما ناچیز است. این ادعا را می‌توان با رسم همبستگی زمانی زاویه فرود نور در حالت‌های مختلف نشان داد (شکل۴). همانگونه که از شکل پیداست افت و خیز زاویه فرود نور برای هوا در زمان‌های طولانی‌تر همبسته است اما میزان همبستگی برای محیط آبی در دمای بالا در هر دو راستا بسیار کوچک است. وردش زاویه فرود نور برای دماهای مختلف آب با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma_{AAx}^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(AA_{xi} - A\bar{A}_x\right)^2 \qquad (3)$$

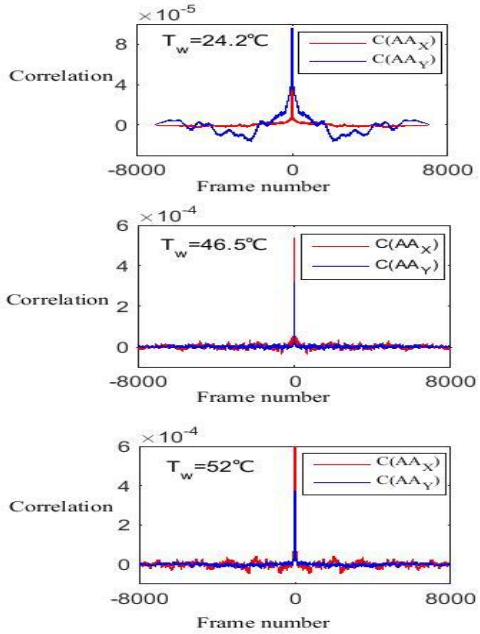
وردش زاویه فرود نور در دو راستا در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش گرادیان دما میزان وردش زاویه فرود نور در دو راستا افزایش می‌یابد. وردش زاویه فرود نور رابطه مستقیمی با شدت تلاطم محیط دارد لذا با افزایش دما شدت تلاطم افزایش می‌یابد. با مقایسه واریانس زاویه فرود نور در دو راستا مشاهده می‌شود که محیط تلاطم زیر آبی یک محیط ناهمسانگرد است. که میزان ناهمسانگردی با افزایش دما افزایش می‌یابد. با توجه به ناهمسانگردی تلاطم انتظار می‌رود آمار افت و خیز زاویه فرود و به تبع آن جبهه موج نور عبوری از محیط متلاطم زیر ابی از مدل کلموگروف تبعیت نکند.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-08-16]



شکل ۳: سری زمانی افت و خیز زاویه فرود نور در دو راستای عمود بر راستای انتشار، برای تلاطم آبی با دمای ۲۴/۲، ۴۶/۵ و ۵۲ درجه سانتیگراد.



شکل ۴: تابع همبستگی زمانی زاویه فرود نور در دو راستای عمود بر جهت انتشار، برای تلاطم آبی با دماهای مختلف.

جدول شماره ۱: واریانس زاویه فرود نور در دو راستای مختلف

	$\sigma^2_{AA_x}(rad^2)$	$\sigma^2_{AA_y}(rad^2)$
آکواریوم بدون آب	$4/01\times10^9$	$2/88\times10^9$
آب با دمای ۲۴/۲	$6/04\times10^9$	$1/37\times10^8$
اب با دمای ۴۶/۵	$5/37\times10^8$	$3/19\times10^8$
آب با دمای ۵۲	$6/49\times10^8$	$3/75\times10^8$

نتیجه‌گیری

در این مقاله ویژگی آماری زاویه فرود نور پس از عبور از محیط متلاطم زیر آبی محاسبه شد. بر این اساس نور لیزر از یک محیط متلاطم زیر آب با ابعاد ۲۰×۲۰×۳۰ سانتیمتر مکعب عبور داده شد. در انتهای مسیر افت و خیز زاویه فرود نور در دو راستا اندازه‌گیری و وردش آن محاسبه شد. نتایج نشان دادند که با افزایش دمای آب میزان وردش افت و خیز زاویه فرود نور افزایش می‌یابد که نشان دهنده آنست که با افزایش دمای آب شدت تلاطم بیشتر می‌شود. بعلاوه با مقایسه وردش زاویه فرود نور در دو راستا مشاهده شد محیط متلاطم ناهمسانگرد است. میزان ناهمسانگردی با افزایش دما ا فزایش می‌یابد.

مرجع‌ها

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

[2] A. V. Kanaev, W. Hou, S. R. Restaino, S. Matt, S. Gladysz, "Correction methods for under water turbulence degraded imaging', Proc. SPIE 9242, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIX, Vol. 9442, pp9442p1-9442p9, 2014.

[3] E. M. Razi, S. Rasouli, " Investigation of inhomogeneity and anisotropy in near ground layer of atmospheric air turbulence using image motion monitoring method", Opt. Commun, 383, pp 255-259, 2017.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-08-16]