تعیین تابع ساختار فاز باریکه نور عبوری از محیط متلاطم همرفتی با استفاده از حسگر ماره‌ای دوکاناله جبهه موج و بررسی تاثیر گرادیان دمایی بر آن

ابراهیم محمدی رازی[۱و۲]، سیفاله رسولی[۲و۳]

[۱] گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران
[۲] دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان، زنجان، ایران
[۳] مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

چکیده – در این مقاله تابع ساختار فاز جبهه موج نور عبوری از محیط متلاطم همرفتی با استفاده از حسگر ماره‌ای دو کانالهی جبهه موج بررسی شده است. برای بررسی دقیقتر تاثیرات جو بر نور عبوری از آن ابتدا با استفاده از یک گرم‌کن برقی تلاطم همرفتی مشابه تلاطم لایه‌های نزدیک سطح زمین در آزمایشگاه تولید می‌شود. با استفاده از داده‌های حسگر ماره‌ای دو کاناله جبهه موج، جبهه موج پرتو نور پس از عبور باریکه از محیط متلاطم بازسازی شده و سپس تابع ساختار فاز در فاصله ۰-۱۸ سانتمیتر در دو راستای عمود بر جهت انتشار محاسبه می‌شود. با تغییر دمای سطح گرم‌کن در بازه ۰-۱۶۰ درجه سانتیگراد تاثیر گرادیان‌های دمایی مختلف بر روی تابع ساختار مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت مدل‌های تلاطمی متفاوتی به تابع ساختار برازش می‌شود. مقایسه تابع ساختار فاز در دو راستا نشان می-دهد که تلاطم همرفتی ناهمسانگرد است. بعلاوه مدل ون کارمان بیشترین انطباق را با داده‌های تجربی دارد.

کلید واژه- تابع ساختار فاز، تلاطم همرفتی، حسگر جبهه موج، مدل تلاطمی

Determination of phase structure function of the light propagating through indoor convective air turbulence using moiré based deflectometry wave front sensor and study the effects of temperature gradients on it

Ebrahim Mohammadi Razi[1, 2], Saifollah rasouli[2, 3]

[1]Faculty of Physics, Department of Basic science, University of Bojnord, Bojnord, Iran, P. O. Box:1339

[2]Department of physics, Institute of advance Studies in Basic Science, Zanjan, Iran, P. O. Box: 14195-1159

[3]Optics Research Center, Institute of advance Studies in Basic Science, Zanjan, Iran, P. O. Box: 14195-1159

Abstract- In this paper phase structure function, PSF, of light beam propagating through indoor convective air turbulence has been investigated. Accordingly for having controlled conditions, the convective air turbulence similar to atmospheric mode was produced using electrical heater in the lab. The light's Wave front was reconstructed using moiré based wave front sensor at the end of the turbulence path. Using the wave front sensor data, the phase structure function of the light was calculated in range of 0-18cm in two directions, perpendicular to the light beam path. Changing the heater's temperature, the effect of different temperature gradients on the PSF was studied. Experimental results show that the laboratory convective air turbulence is no isotropic. In addition, the Von Karman model has maximum compatibility with the experimental data of phase structure function in range of 0-10 cm.

Keywords: Phase Structure Function, Convective air turbulence, Wave front sensor, Turbulence model

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-18]

۱- مقدمه

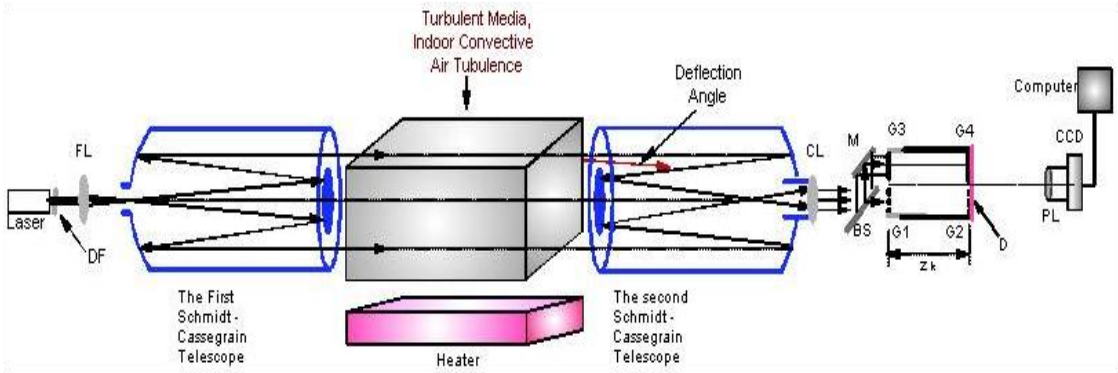
حرکت سیال را می‌توان در سه حالت دسته‌بندی نمود. در حالت اول توزیع سرعت سیال یکنواخت بوده و با تغییرات آن به صورت منظم اتفاق می‌افتد. این حالت حرکت را حالت لایه‌ای گویند. در حالت دوم میدان سرعت حالت یکنواختی خود را از دست داده و حالت تصادفی به خود می‌گیرد. این حالت حرکت را حالت تلاطمی می‌نامند. تغییر حالت سیال از حالت لایه‌ای به حالت تلاطمی را حالت گذار می‌نامند. حالت تلاطمی با عدد رینولدرز که کمیتی بی بعد است مشخص می‌شود. عدد رینولدز به صورت $\mathrm{Re}=\frac{VL}{\nu}$ تعریف می‌شود. که L ،V و ν به ترتیب سرعت مشخصه سیال ، طول مشخصه و ویسکوزیته دینامیکی سیال است. در حالتی که $\mathrm{Re}>4000$ سیال حالت متلاطم دارد. در تلاطم جوی $\mathrm{Re}\approx 10^5$ است[۱]. به عبارت دیگر جو یک محیط کاملاً تلاطمی است. در چند دهه اخیر به سبب اهمیت استفاده از انتشار پرتو لیزر از جو و بهره‌گیری از آن در ارتباطات نوری، تصویر برداری‌های نوری و مخابرات فضای آزاد بسیاری از محققان انتشار پرتو نور در این محیط را مورد بررسی قرار داده‌اند[۱و۲]. اثرات محیط متلاطم بر نور در دو دسته تغییرات شدت و تغییرات جبهه‌ی موج تقسیم‌بندی می‌شود. برای بررسی این تاثیرات مدل‌های مختلفی ارائه شده‌اند. از آن جمله می‌توان مدل کلموگروف، تاتارسکی، گرین وود، گاوسین و ون کارمان را اشاره نمود[۱]. بجز مدل کلموگروف که از یک تحلیل ابعادی حاصل شده است ما بقی مدل‌های اساس تجربی دارند. تمامی این مدل‌ها در ناحیه لختی بر مدل کلموگروف منطبق هستند. به عبارت دیگر، مدل کلموگروف اساسی‌ترین مدل ارائه شده در تلاطم است. این مدل بر همگن و همسانگرد بودن تلاطم در بازه لختی استوار است. در مطالعات تجربی بسیاری نشان داده شده است که جو به خصوص هنگام عبور نور از این محیط در مسیرهای موازی سطح زمین از مدل کلموگروف تبعیت نمی‌کند[۳]. بررسی علل انحراف جو متلاطم از مدل کلموگروف به علت کنترل‌ناپذیری شرایط حاکم بر آن بسیار سخت و دشوار است. بر این اساس در این تحقیق ابتدا توسط یک گرم‌کن برقی شرایط تلاطمی مشابه سطح زمین ایجاد می‌شود. سپس در چیدمانی جدید با روش اپتیکی مبتنی بر تکنیک ماره جبهه موج نور پس از عبور از محیط متلاطم بازسازی می‌شود. با مطالعه اختلالات ایجاد شده در جبهه‌ی موج اطلاعات محیط متلاطم استخراج می‌شود. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که از میان مدل‌های مختلف مدل تلاطم ون کارمان بهترین انطباق را با داده‌های تجربی دارد.

۲- چیدمان آزمایش

شکل ۱ طرحواره‌ای از چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. این چیدمان که برای اولین بار برای بررسی محیط متلاطم استفاده شده است شامل لیزر، عدسی اسفریک، دو عدد تلسکوپ، گرم‌کن برقی، حسگر ماره‌ای دوکاناله جبهه‌ی موج، دوربین CCD و رایانه است. باریکه لیزر Nd-YAG پیوسته با دمش دیودی با توان ۵۰ میلی وات و طول موج ۵۳۲ نانومتر توسط یک عدسی کانونی می‌شود. محل عدسی اسفریک به گونه‌ای تنظیم می‌شود تا کانون آن بر کانون تلسکوپ اول منطبق گردد. پرتو لیزر توسط این تلسکوپ پهن و موازی شده و بعد از عبور از محیط متلاطم وارد تلسکوپ دوم می‌شود. دو تلسکوپ کاملاً هم خط شده‌اند قطر تلسکوپ اول و دوم به ترتیب ۸ و ۱۴ اینچ است. از یک گرم‌کن برقی با سطح مقطع ۲۰۰×۱۰۰ سانتیمتر مربع برای ایجاد گرادیان دما و ایجاد محیط همرفتی مشابه سطح زمین استفاده شده است. ناحیه متلاطم توسط دو دیوار پلاستیکی از دیگر بخش‌ها جدا شده‌اند. دو تلسکوپ در ارتفاع ۸۰ سانتیمتری از گرم‌کن قرار گرفته اند. یک عدسی موازی سازی به گونه‌ای پشت تلسکوپ دوم قرار گرفته است که کانون آن بر کانون تلسکوپ منطبق است. باریکه لیزر پس از کانونی شدن توسط تلسکوپ بوسیله این عدسی موازی شده و با قطری کوچکتر وارد حسگر جبهه‌ی موج می‌شود. سپس توسط باریکه شکن به دو قسمت با شدت یکسان تقسیم شده و هر قسمت وارد یک کانال می‌شود. در هر کانال یک انحراف سنج ماره‌ای متشکل از دو توری به فاصله تالبوت از هم قرار دارند. با قرار دادن توری دوم در مکان خود تصویر توری اول طرح ماره در هر کانال تشکیل می‌شود. راستا خطوط توری در هر کانال به گونه‌ایست که در یکی طرح ماره افقی و در دیگری طرح ماره عمودی تشکیل خواهد شد. با استفاده از یک عدسی تصویر ساز مناسب

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-18]



شکل ۱: طرحواره‌ای از چیدمان آزمایش: استفاده از دو تلسکوپ رو در رو و حسگر ماره‌ای دو کانالهی جبههی موج.G،M، BS،CL به ترتیب عدسی کانونی کننده، پرتوشکاف، آینه و توری است.

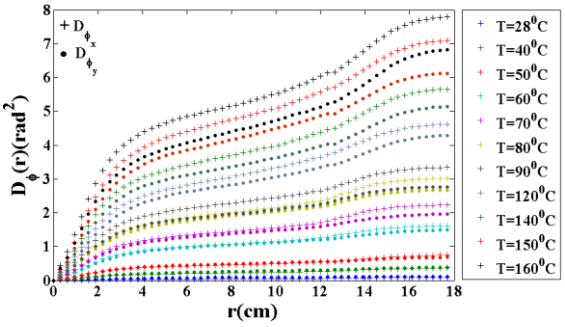
نقش فریز ماره بر روی صفحه‌ی حساس دوربین CCD تصویر شده و توسط آن به رایانه منتقل می‌شود تا مورد تحلیل قرار گیرد. گام توری‌های مورد استفاده در این حسگر ۰/۱ میلیمتر و فاصله تالبوت ۳۷/۵ میلیمتر است. برای انجام آزمایش دمای گرم‌کن در بازه ۲۸ تا ۱۶۰ درجه سانتیگراد با تغییرات ۱۰ درجه تغییر داده و برای هر دما ۵ بار آزمایش تکرار شده سپس از نتایج میانگین-گیری می‌شود. دمای محیط آزمایشگاهی هنگامی که گرم‌کن خاموش است ۲۸ درجه سانتیگراد می‌باشد. دمای سیال متلاطم مرکز پرتو لیزر یعنی در فاصله۸۰ سانتیمتری از سطح گرم کن در دما ۴۰، ۱۰۰ و ۱۶۰ درجه به ترتیب ۲۹/۲، ۳۲/۲ و ۳۳/۹ درجه سانتیگراد می‌باشد. سرعت داده‌برداری توسط دوربین CCD ۳۰ تصویر در ثانیه و زمان نوردهی ۱ میلی ثانیه تنظیم می-شود. با استفاده از تحلیل داده‌های حسگر جبهه‌ی موج جبهه‌ی موج در دهانه تلسکوپ دوم یعنی بعد از عبور از محیط متلاطم بازسازی می‌شود[۴].

۲-۱- محاسبه تابع ساختار فاز

پس از محاسبه فاز جبهه‌ی موج تابع ساختار آن را می-توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود [۲]

$$D_{\varphi}(\vec{r}) = \left\langle \left| \varphi(\vec{R}+\vec{r}) - \varphi(\vec{R}) \right|^2 \right\rangle \qquad (۱)$$

که در آن $\varphi(\vec{R})$ و $\varphi(\vec{R}+\vec{r})$ به ترتیب مقادیر فاز در دو نقطه $\vec{R}$ و $\vec{R}+\vec{r}$ می‌باشند. در عمل برای استفاده از این رابطه در تعیین تابع ساختار فاز، همه نقاطی را که بر روی جبهه‌ی موج در جهت x(y)،موازی(عمود بر) سطح گرم‌کن، به یک فاصله از هم قرار دارند انتخاب و مربع اختلاف فاز آن‌ها را محاسبه می‌کنیم. سپس میانگین-گیری آنسامبلی برای هر فاصله معین انجام می‌دهیم. به این ترتیب تابع ساختار فاز در دو جهت عمود بر سطح گرم‌کن و موازی آن محاسبه می‌شود. طبق مدل کلموگروف در بازه لختی یعنی هنگامی که فاصله دو نقطه در جبهه موج بین مقیاس بیرونی تلاطم، L_0، و مقیاس درونی تلاطم، l_0، باشد $D_{\varphi}(\vec{r}) \propto r^{\frac{5}{3}}$ خواهد بود. شکل۲ تابع ساختار محاسبه شده در دو راستا را در دماهای مختلف گرم‌کن نشان می‌دهد که در آن فاصله مرکز پرتو تا منبع گرمایی ۸۰ سانتیمتر است.



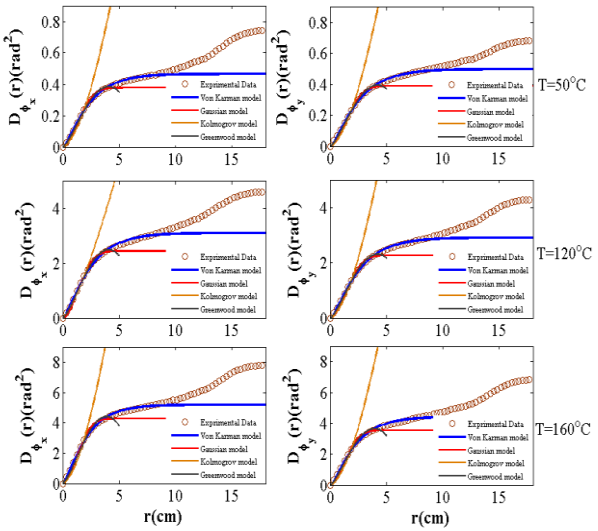
شکل ۲: محاسبه تابع ساختار فاز در دو راستای موازی سطح گرم‌کن و عمود بر آن

در این آزمایش فاصله نقاط مرجع روی جبهه‌ی موج ۳ میلیمتر است که بزرگتر(یا در حدود مقیاس درونی تلاطم است)، لذا نمی‌توان رفتار تابع ساختار را در ناحیه کوچکتر از مقیاس درونی تلاطم مورد بررسی قرار داد. بر اساس مدل کلموگروف تلاطم در بازه لختی همگن و همسانگرد است. همسانگردی محیط متلاطم را می‌توان با استفاده از تابع ساختار مورد بررسی قرار داد. هرگاه تابع ساختار در

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-18]

دو راستای متفاوت یکسان باشد محیط متلاطم همسانگرد است.



شکل ۳: برازش مدل‌های مختلف تلاطمی به تابع ساختار فاز جبهه‌ی موج عبوری از محیط متلاطم در دماهای مختلف و در دو راستای موازی سطح گرم‌کن و عمود بر آن.

با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که تابع ساختار در دماهای مختلف در تمام فواصل در دو راستا یکسان نیست. این امر نشان از ناهمسانگردی محیط متلاطم دارد. همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد همگنی و همسانگردی محیط متلاطم دو رکن اساسی مدل کلموگروف است. در نتیجه انتظار می‌رود داده‌های تجربی از این مدل تبعیت نکند. در شکل ۳ مدل‌های مختلف تلاطمی به داده‌های تجربی تابع ساختار فاز برازش شده است. این مدل‌ها عبارتند از مدل کلموگروف، ون کارمان، گاوسین و گرین-وود که در زیر بیان شده‌اند.

$$D_{\varphi K}(\vec{r}) = 6.88\left(\frac{r}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \qquad 0 < r < +\infty$$

$$D_{\varphi V}(\vec{r}) = 0.391 C_n^2 k^2 L \left(\frac{2\pi}{L_0}\right)^{-\frac{5}{3}} \times \left\{1 - \frac{2^{1/6}}{\Gamma(5/6)}\left(\frac{2\pi}{L_0} r\right)^{\frac{5}{6}} K_{5/6}\left(\frac{2\pi}{L_0} r\right)\right\}$$

$$D_{\varphi Ga}(\vec{r}) = 6.88\left(\frac{r}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} + 20.56 (x_{01} r_0)^{-5/3} \times \left\{1 - {}_1F_1\left(\frac{-5}{6}; 1; \frac{-r^2 x_{01}^2}{4}\right)\right\}$$

$$D_{\varphi Gr}(\vec{r}) = 1.303 C_n^2 k^2 L k_l^{-5/3} \times \left\{\Gamma(-5/6)\left[1 - {}_1F_1\left(\frac{-5}{6}; 1; \frac{-k_l^2 r^2}{4}\right)\right] + 71.802\Gamma\left(\frac{-1}{3}\right)\left[1 - {}_1F_1\left(\frac{-1}{3}; 1; \frac{-k_l^2 r^2}{4}\right)\right] + 0.254\Gamma\left(\frac{-1}{4}\right)\left[1 - {}_1F_1\left(\frac{-1}{4}; 1; \frac{-k_l^2 r^2}{4}\right)\right] - \frac{9}{5} k_l^{5/3} k_0^{1/3} r^2\right\}$$

با توجه به شکل ۳ مدل ون کارمان در بازه ۰-۱۰ سانتیمتری بهترین انطباق را با داده‌های تجربی دارد.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از یک گرم‌کن برقی محیط متلاطمی نظیر محیط تلاطمی جوی در آزمایشگاه تولید شد. با استفاده از دو تلسکوپ جبهه موج تخت ایجاد و از محیط متلاطم عبور داده شد. با استفاده از حسگر جبهه‌ی موج دوکاناله مارپیچ جبهه‌ی موج نور در ابتدای تلسکوپ دوم و بعد از محیط متلاطم بازسازی شد. با استفاده از داده‌های جبهه‌ی موج تابع ساختار فاز در دو راستای موازی سطح گرم‌کن و عمود بر آن محاسبه شد. توابع ساختار فاز مدل‌های مختلف تلاطمی به تابع ساختار برازش شد. نتایج نشان دادند که تلاطم ایجاد شده یک تلاطم ناهمسانگرد است. بعلاوه مدل تلاطمی ون کارمان بهترین انطباق را در بازه ۰-۱۰ سانتیمتری با داده‌های تجربی دارند.

مراجع

[1] L. C. Andrews, R. L Philips, *Laser beam propagation through random media*, SPIE Press, 2005.

[2] V. L. Tatarskii, *wave propagation in a turbulent medium*, New York, McGraw-hill Press, 1969.

[3] V. P. Lukin; "*Investigation of some peculiarities of large scale atmospheric turbulence*"; *Pros. SPIE*, **2200** (1994).

[4] M. Dashti, S. Rasouli, "Measurement and statistical analysis of the wave front distortion induced by atmospheric turbulence using two channel wave-front sensor moiré deflectometry ", J. Opt., Vol. 14, 095704, 2012.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-18]