# بررسی اثرات گرادیان دما و فاصله از منبع گرمایی بر ناهمسانگردی تلاطم همرفتی با استفاده از حسگر ماره‌ای دوکاناله جبهه موج

ابراهیم محمدی رازی[۱و۲]، رضا شکوهی قهفرخی[۱]

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

**چکیده – در این مقاله همسانگردی محیط متلاطم همرفتی آزمایشگاهی در فواصل مختلف از منبع گرمایی و نیز در حضور گرادیان‌های دمایی متفاوت با رهیافت بررسی تابع ساختار فاز جبهه موج نور عبوری از محیط متلاطم همرفتی بررسی می‌شود. بدین منظور با استفاده از یک گرم‌کن برقی محیط متلاطم همرفتی مشابه لایه‌های نزدیک زمین تولید شده و با استفاده از حسگر ماره‌ای دوکاناله جبهه موج، جبهه موج عبوری از محیط متلاطم بازسازی می‌شود. سپس تابع ساختار فاز این جبهه موج در دو راستا عمود بر راستای انتشار تعیین می‌گردد. با مقایسه تابع ساختار در دو راستا، همسانگردی محیط متلاطم در دماهای مختلف سطح گرم‌کن و نیز در فواصل مختلف از آن بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که محیط متلاطم همرفتی، محیطی ناهمسانگرد است. بعلاوه میزان ناهمسانگردی با افزایش دمای سطح گرم‌کن و نیز کاهش فاصله تا گرم‌کن افزایش می‌یابد.**

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

# Investigation the effects of temperature gradients and distance from heat source on isotropy of convective air turbulent medium using moiré based wave front sensor

Ebrahim Mohammadi Razi[1, 2], Reza Shokoohi [1]

[1]Faculty of Physics, Department of Basic sciences, 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

Abstract- In this paper the isotropy of convective air turbulence in different heights from heat source and in presence of different temperature gradients has been investigated using study of phase structure function (PSF). Accordingly for having controlled conditions, the convective air turbulence similar to atmospheric mode was produced using electrical heater in the lab. The plane wave was propagated through the turbulent medium. 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 two directions, perpendicular to the light beam path. Comparison of PSF in two directions, the isotropy of turbulent medium has been studied in presence of different temperature gradients and in different height from heat source. Experimental results show that the laboratory convective air turbulence is anisotropic medium. In addition, the anisotropy was strong in high temperature gradients and near the heat source.

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



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]

## ۱- مقدمه

تئوری تلاطم با مدل‌های مختلفی ارائه شده است که مدل تلاطمی کلموگروف رایج‌ترین آن‌هاست. همه‌ی مدل‌های تلاطمی از جمله مدل کلموگروف بر پایه همگن و همسانگرد بودن تلاطم استوارند. مطالعه تلاطم جوی با توجه به نقش آن در بسیاری از حوزه‌های سنجش و ارتباطات حائز اهمیت است. در عبور نور از لایه‌های جو به صورت عمودی این فرضیات اعتبار بالایی دارند. با این وجود در انتشار باریکه‌ی نوری از میان جو در مسیرهای افقی بخصوص در لایه‌های نزدیک سطح زمین انحراف‌های قابل ملاحظه‌ای از این مدل گزارش شده است[۱-۳]. چنین به نظر می‌رسد، آنچه باعث عدم تطابق رفتار تلاطم جوی با مدل‌های تلاطمی از جمله مدل کلموگروف است، فرضیات همگنی و همسانگردی تلاطم است که این مدل‌ها بر پایه‌ی آن استوارند. بررسی عوامل موثر بر میزان ناهمگنی و ناهمسانگردی جو متلاطم نظیر گرادیان‌های دمایی مختلف، وجود بادهای برشی با سرعت و جهت‌های متفاوت با توجه به غیر قابل کنترل بودن تلاطم جوی بسیار دشوار است. در این پژوهش سعی شده است تا با ایجاد شرایط کنترل شده تلاطم مشابه لایه‌های نزدیک سطح زمین تاثیر گرادیان‌های دمایی مختلف و نیز تاثیر فاصله از منبع گرمایی را بر میزان ناهمسانگردی بررسی نماییم.

## ۲- چیدمان آزمایش

شکل ۱ طرحواره‌ای از چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد[۴]. در این چیدمان نور لیزر Nd-YAG با طول موج ۵۳۲ نانومتر با استفاده از تلسکوپ اول موازی شده و وارد محیط متلاطم همرفتی می‌شود. از یک گرم‌کن برقی با ابعاد ۱۰۰×۲۰۰ سانتیمتر مربع با دمای قابل تنظیم برای ایجاد گرادیان دما و نیز ایجاد محیط متلاطم همرفتی مشابه لایه‌های نزدیک سطح زمین استفاده شده است. اثرات محیط متلاطم بر نور عبوری از آن به صورت افت و خیز فاز جبهه‌ی موج عبوری از آن قابل بررسی است. نور عبوری از محیط متلاطم توسط تلسکوپ دوم دریافت می‌شود. این نور با استفاده از یک عدسی که کانون آن بر کانون تلسکوپ دوم منطبق است با قطر کمتر وارد حسگر ماره‌ای دو کاناله‌ی جبهه موج می‌شود. نحوه‌ی کار این حسگر به طور مفصل در مرجع[۵] بیان شده است. با استفاده از داده‌های این حسگر، جبهه‌ی موج نور عبوری از محیط تلاطمی در دهانه‌ی تلسکوپ دوم بازسازی می‌شود. بعد از بازسازی جبهه‌ی موج تابع ساختار فاز آن به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود. برای بررسی تاثیر فاصله از منبع گرمایی بر میزان ناهمسانگردی محیط متلاطم، نور لیزر از ارتفاع‌های ۳، ۲۰، ۸۰ و۲۰۰ سانتیمتری نسبت به منبع از محیط متلاطم عبور می‌کند. در هر ارتفاع دمای گرم‌کن را در بازه ۲۸-۱۶۰ درجه سانتیگراد با تغییرات ۱۰ درجه بالا می‌بریم. دمای ۲۸ درجه مربوط به حالتی که گرم‌کن خاموش است. در هر دما ۱۰۰۰۰ تصویر از فریز ماره عمودی و افقی توسط حسگر ماره‌ای دوکاناله جبهه‌ی موج با سرعت ۳۰ تصویر در ثانیه ثبت می‌شود در نتیجه ۱۰۰۰۰ جبهه‌ی موج با سرعت ۳۰ جبهه موج در ثانیه قابل بازسازی است. سپس تابع ساختار فاز جبهه‌ی موج با استفاده از جبهه‌ی موج محاسبه شده و تحلیل‌ها بر روی آن انجام می‌شود.

## ۳- ملاحظات نظری و روش کار

پس از بازسازی جبهه موج در دهانه‌ی تلسکوپ دوم، تابع ساختار فاز آن طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود[۶]

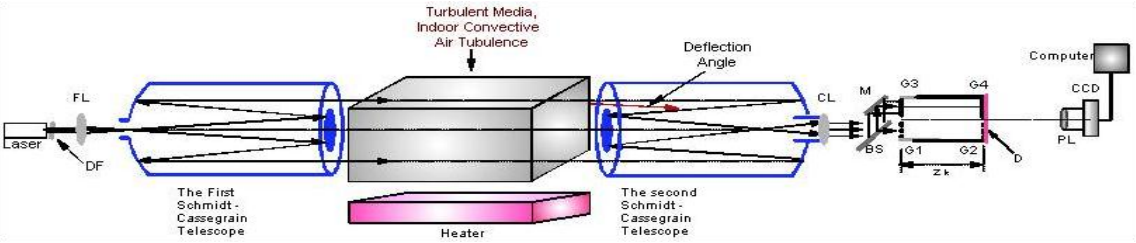
$$D_{\varphi}(\vec{r}) = \left\langle \left| \varphi(\vec{R}+\vec{r}) - \varphi(\vec{R}) \right|^2 \right\rangle, \qquad (۱)$$

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. برای بررسی همسانگردی محیط متلاطم، دو راستا (راستای موازی و عمود بر سطح گرم‌کن که به ترتیب با x و y مشخص می‌شوند) تعیین می‌شود. در راستای y به علت فاصله گرفتن از منبع گرما، گرادیان دمای عمودی خواهیم داشت. بعلاوه با توجه به اینکه سطح گرم‌کن به طور کاملاً یکنواخت گرم نمی‌شود در راستای x نیز گرادیان دما داریم[۷]. گرادیان دما در دو راستا با هم متفاوت‌اند. گرادیان دما در راستای عمود بر سطح گرم‌کن به مراتب بیشتر از گرادیان در جهت موازی سطح گرم‌کن می‌باشد. به علت وجود دمای متفاوت در ارتفاع‌های مختلف از گرم‌کن شدت تلاطم نیز در ارتفاع‌های مختلف متفاوت است. همانگونه که در بالا اشاره شد برای بازسازی جبهه‌ی موج از داده‌های حسگر ماره‌ای دوکاناله جبهه موج استفاده می‌شود. این حسگر از دو انحراف سنج ماره‌ای عمود بر هم تشکیل شده است که هر کانال انحراف زاویه فرود در یک راستا(عمود بر راستای انتشار ) را اندازه‌گیری می‌نماید. با استفاده از الگوریتم هودگین فاز جبهه‌ی موج در نقاط مختلف سطح تلسکوپ دوم از روی شیب جبهه موج استخراج می‌شود. در نهایت تابع ساختار فاز در این دو راستا تعیین می‌شود. برای این کار نقاطی از جبهه موج را که در یک راستا به یک فاصله از هم قرار دارند انتخاب و مربع اختلاف فاز آن‌ها را محاسبه می‌کنیم. سپس میانگین‌گیری آنسامبلی برای هر فاصله معین برای جبهه موج انجام می‌شود. در نهایت میانگین‌گیری را بر روی تعداد جبهه موج‌های بازسازی شده در هر دما انجام می‌دهیم. لذا در هر دما دو تابع



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]

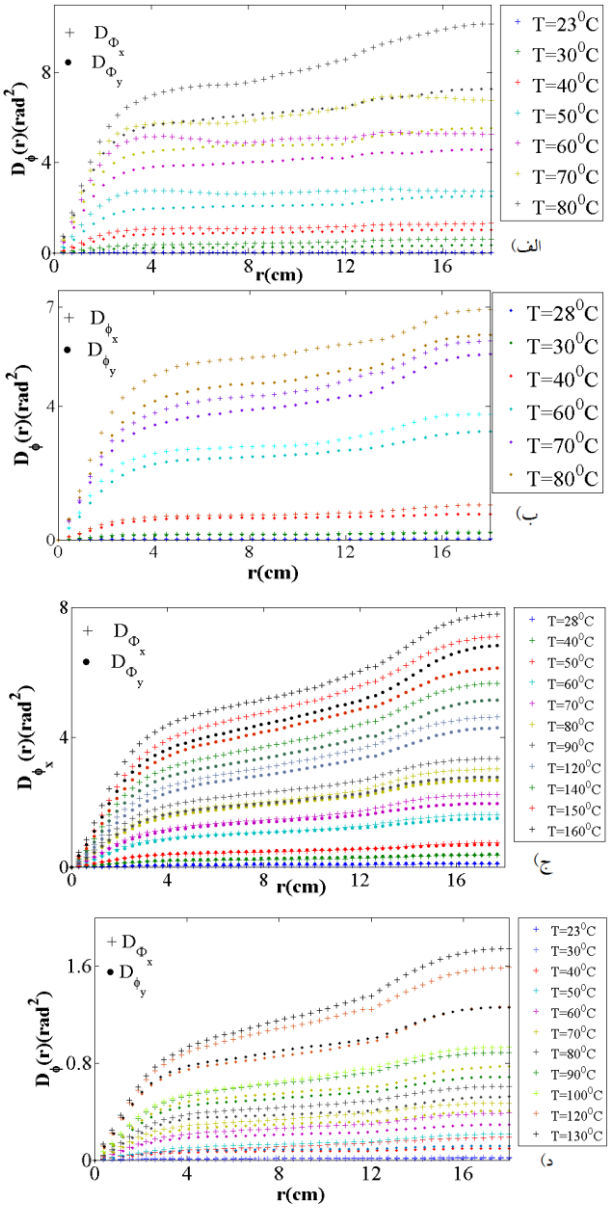



شکل ۱: طرحواره‌ای از چیدمان آزمایش: استفاده از دو تلسکوپ رو در رو و حسگر ماره‌ای دو کاناله‌ی جبهه‌ی موج برای بازسازی جبهه موج. BS ،CL ، G،M به ترتیب عدسی کانونی کننده، پرتوشکاف، آینه و توری است.

ساختار در دو جهت مختلف خواهیم داشت که با مقایسه این دو تابع ساختار فاز، همسانگردی محیط متلاطم بررسی می‌شود. به طور کلی رفتار تابع ساختار فاز را می‌توان به سه ناحیه تقسیم نمود. ناحیه‌ای که در آن فاصله بین دو نقطه کوچکتر از مقیاس درونی تلاطم است( $r < l_0$)، ناحیه لختی( $l_0 < r < L_0$) و ناحیه‌ای که فاصله بین نقاطی که تابع ساختار را محاسبه می‌کنیم بزرگتر از مقیاس بیرونی تلاطم است( $r > L_0$). در یک محیط همگن و همسانگرد که در بازه لختی نیز از مدل کلموگروف تبعیت می‌کند تابع ساختار در ناحیه اول، دوم و سوم به ترتیب به صورت $D_\varphi(\vec{r}) \propto r^2$، $D_\varphi(\vec{r}) \propto r^{5/3}$ و ثابت $= D_\varphi(\vec{r})$ خواهد بود. در این آزمایش به علت اینکه کمترین فاصله قابل اندازه‌گیری در روی جبهه موج در حدود ۳ میلیمتر است و این فاصله از مرتبه مقیاس درونی تلاطم است لذا رفتار تابع ساختار در ناحیه اول قابل مشاهده نیست. اما ناحیه دوم و سوم را می‌توان در شکل ۲ مشاهده نمود.

## ۴- نتایج

شکل۲ تابع ساختار فاز محاسبه شده در دو راستا در ارتفاع‌های مختلف از گرم‌کن و نیز در دماهای مختلف سطح آن را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ارتفاع توابع ساختار در راستاهای مختلف با افزایش دما و نیز کاهش فاصله از گرم‌کن افزایش می‌یابد. ارتفاع تابع ساختار با شدت تلاطم، $C_n^2$، رابطه مستقیم دارد. بعبارت دیگر شدت تلاطم در سطوح نزدیک به گرم‌کن و در دماهای بالای سطح آن بیشتر است. بعلاوه تابع ساختار در دو راستا در هیچ یک از دماهای سطح گرم‌کن برهم منطبق نیستند که این امر نشان دهنده ناهمسانگردی محیط متلاطم در حضور گرادیان دما است. برای بررسی بهتر تاثیر فاصله از گرم‌کن بر میزان ناهمسانگردی در دماهای مختلف در شکل ۳، تابع ساختار در دو راستا در دمای مختلف سطح گرم‌کن و در دو ارتفاع مختلف رسم شده است. با توجه به شکل دیده می‌شود که هنگامی که نور از ارتفاع ۳ سانتیمتری از سطح




شکل ۲: تابع ساختار فاز جبهه موج در دو راستای x و y در فواصل الف) ۳ ب)۲۰ ج)۸۰ و د)۲۰۰ سانتیمتری از گرم‌کن برقی و در دماهای متفاوت سطح آن.

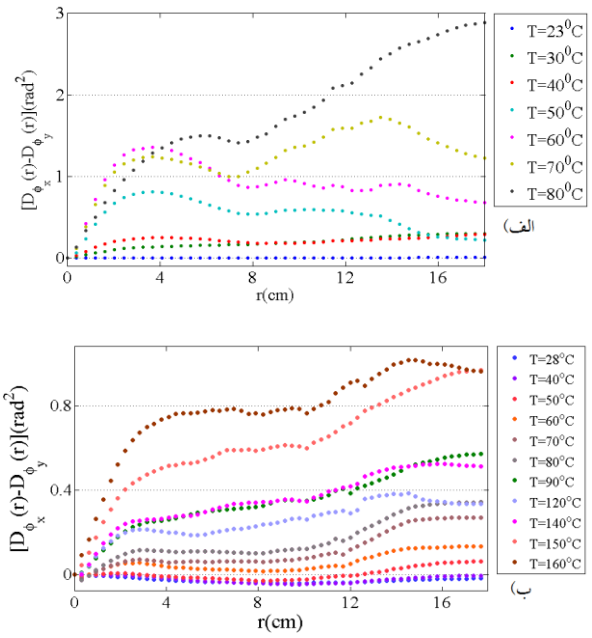
گرم‌کن می‌گذرد ناهمسانگردی بیشترین مقدار را دارا است. از طرفی در یک دما و ارتفاع هرچه فاصله بین نقاط بیشتر باشد



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]

ناهمسانگردی نیز بیشتر است. در مدل تلاطمی کلموگروف و تمام مدل‌های دیگر که برای بررسی تلاطم ارائه شده‌اند محیط تلاطمی را در بازه لختی همگن و همسانگرد در نظر می‌گیرند. بازه لختی بازه‌ایست که در آن تابع ساختار افزایش می‌یابد. آنچه از نتایج بر می‌آید این است که حتی در این بازه نیز تلاطم ناهمسانگرد است. لذا انتظار می‌رود داده‌های تجربی از مدل تلاطمی کلموگروف تبعیت نکنند. با توجه به اینکه جو متلاطم بخصوص در لایه‌های سطح زمین نیز شرایطی مشابه تلاطم ایجاد شده در آزمایشگاه دارد لذا انتظار می‌رود نور هنگام انتشار در مسیرهای افقی در این لایه، محیطی ناهمسانگرد را تجربه کند. از طرفی انتظار می‌رود که در این لایه‌ها نیز داده-های تجربی از مدل کلموگروف تبعیت نکند.




شکل ۳: اختلاف تابع ساختار فاز جبهه موج در دو راستا در فواصل الف) ۳ سانتیمتری ب) ۸۰ سانتیمتری از گرم‌کن برقی و در دماهای متفاوت سطح آن.

## ۵- 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 مارهای دوکاناله جبهه‌ی موج نور در ابتدای تلسکوپ دوم و بعد از محیط متلاطم بازسازی شد. با استفاده از داده‌های این حسگر جبهه‌ی موج نور عبوری بعد از محیط متلاطم بازسازی شد. سپس تابع ساختار فاز در دو راستای موازی سطح گرم‌کن تعیین گردید. با تغییر دمای سطح گرم‌کن محیط متلاطمی با گرادیان‌های دمایی مختلف ایجاد شد. هنگامی که محیط متلاطم همسانگرد باشد انتظار داریم که تابع ساختار به جهت وابسته نباشد و فقط تابعی از فاصله بین نقاط باشد. با مقایسه تابع ساختار فاز در دو راستا مشاهده شده است که تابع ساختار در هیچ دمایی و در هیچ فاصله‌ای بر یکدیگر منطبق نیستند. به عبارت دیگر محیط متلاطم یک محیط ناهمسانگرد است. بعلاوه میزان ناهمسانگردی با افزایش دمای گرم‌کن و نیز کاهش فاصله از آن افزایش می‌یابد. این تحقیق نشان می‌دهد که برای تحلیل محیط‌های متلاطم همرفتی نمی‌توان از مدل کلموگروف استفاده نمود. بعلاوه بررسی‌های تئوری اینکه چرا گرادیان دمای بیشتر و نیز فاصله نزدیک به منبع گرمایی باعث افزایش ناهمسانگردی است در حال انجام است.

## مراجع


[1] M. Bertolotti, M. Carnevale, B. Crosignani, P. Di Porto, "*Influence of Thermal Turbulence in a Convective Ascending Stream on Phase Fluctuations of a Laser Beam*", J. Appl. Opt. Vol. 8, No. 6, pp.1111-1114, 1969.

*[2]* V. P. Lukin, "Investigation of some peculiarities in the structure of large scale atmospheric turbulence", Proc. SPIE, Vol. 2200, pp. 384-395, 1994.

[3] G. Funes, D. Gulich, L. Zunino, D. G. Perez, M. Garavaglia, "Behavior of the laser beam wandering variance with the turbulent path length", Opt Commun. Vol. 272, pp. 476-479, 2007.

[۴] محمدی رازی. ابراهیم ، رسولی. سیف اله، دشتی. محسن، "تعیین ابیراهی‌های جبهه موج باریکه نور عبوری از محیط متلاطم همرفتی و تاثیر گرادیان‌های دمایی دوبعدی بر آن"، سومین کنفرانس بین المللی لیزر و کاربردهای آن، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۳.

[5] 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.

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

[۷] محمدی رازی. ابراهیم ، رسولی. سیف اله، "بررسی آمار تلاطم همرفتی با استفاده از انحراف‌سنج مارهای دو کاناله"، کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۴.




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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]