بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

# شبیه سازی عددی انتشار پرتو لیزر در جو آشفته با استفاده از چند جمله‌ای‌های زرنیک برای طول موج‌های مختلف

شیوا موذن دهکردی [۱]، محمد مرادی [۱] و محمد رشیدی حاتمی [۲]

[۱] گروه فیزیک، دانشگاه شهرکرد

[۲] گروه کامپیوتر، دانشگاه آزاد شهرکرد

**چکیده – در این مقاله هدف بررسی اثرجو آشفته بر انتشار باریکه لیزر است. به این منظور ابتدا با فرض گاوسی بودن باریکه لیزر، این پرتو شبیه سازی می‌شود. سپس با استفاده از چندجمله‌ای‌های زرنیک، جو آشفته شبیه‌سازی می‌گردد. نهایتا پارامترهای شدت و *PSF* برای چهار طول موج λ=1024, 633, 527, 450 nm ، برای $C_n^2$ های مختلف اندازه گیری می‌شود.**

کلید واژه- انتشار پرتو لیزر، صفحات فازی، جو آشفته، چندجمله‌ای‌های زرنیک .

# Numerical Simulation of Laser Beam Propagation through Turbulent Atmosphere by using Zernike polynomials for Different Wavelengths

Shiva Moazen Dehkordi[1], Mohammad Moradi[1] and Mohammad Hatami Rashidi[2]

[1]Department of Physics, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

[2]Department of Computer, Shahrekord Azad University, Shahrekord, Iran

Abstract- In this article, propagation of a laser beam through turbulent atmosphere is evaluated. At first the laser beam is simulated and then turbulent atmosphere will be simulated by using Zernike polynomials. Some parameter like intensity, PSF will be measured for four wavelengths in different $C_n^2$.

Keywords: Laser beam propagation, Phase screen, Turbulent atmosphere, Zernike polynomials.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]

## ۱- مقدمه

امواج اپتیکی حین انتشار در جو آشفته در هم پیچیده می‌شوند. مشاهدات ستاره شناسی و انتشار لیزر در جو از مهمترین بخش‌هایی هستند که تحت تاثیر پدیده آشفتگی قرار می‌گیرند [۱]. انتشار پرتو لیزر در جو آشفته طی سال‌های متمادی مورد بررسی قرار گرفته است [۲] و [۳]. زمانی که پرتو لیزر کم توان در جو منتشر می‌شود، تحت تاثیر پدیده‌های جذب، آشفتگی و پراکندگی قرار می‌گیرد. اساسا تاثیر آشفتگی به دلیل تغییرات تصادفی در ضریب شکست نور است [۴]. برای توصیف انتشار پرتو لیزر در جو آشفته، ابتدا جو آشفته شبیه‌سازی می‌شود که در این مطالعه، جو آشفته با استفاده از چندجمله‌ای‌های زرنیک شبیه‌سازی می‌گردد. چندجمله‌ای‌های زرنیک دارای سه ویژگی منحصر بفرد هستند:۱- ضرایب چند-جمله‌ای به طور مستقیم تولید کننده ابیراهی‌های نوری هستند. ۲- چندجمله‌ای‌ها متعامد و کامل هستند. ۳- ضرایب چندجمله‌ای برای مدل آشفتگی کاکماگروف قابل محاسبه هستند [۵]. در این مطالعه مدل آشفتگی بر پایه نظریه آشفتگی کالماگروف است که تاثیر شرایط آشفتگی مختلف با بکارگیری مقادیر متفاوت $C_n^2$ و طول موج‌های مختلف و تاثیر آنها بر روی شدت لیزر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- شبیه سازی انتشار پرتو لیزر در جو آشفته

### ۲-۱- شبیه سازی باریکه لیزر

در اپتیک پرتو گاوسی، پرتو الکترومغناطیسی است که شدت تابش و میدان الکتریکی عرضی آن توسط توابع گاوسی، به‌خوبی تقریب زده شود.

بسیاری از لیزرها پرتوهایی را منتشر می‌کنند که به-صورت تقریبی از مشخصات گاوسی است. پرتو گاوسی منتشر شده در این حالت مد عرضی پایه یا "$TEM_{00}$" تشدید کننده لیزر است. زمانی‌که نور توسط لنز پراش محدود پراشیده شود، پرتو گاوسی به پرتو گاوسی دیگری که با مجموعه پارامترهای دیگر توصیف می‌شود، تبدیل می‌گردد. تابع ریاضی که پرتو گاوسی را توصیف کند، جواب معادله پیرامحوری هلمهولتز است. پاسخ، در شکل تابع گاوسی، دامنه مختلط میدان الکتریکی پرتو است. میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی هر دو به‌عنوان موج الکترومغناطیس منتشر می‌شوند. معادله پرتویی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است به صورت زیر است:

$$u(r) = A_0 exp\,[-r^2/w^2] \qquad (۱)$$

که در اینجا $A_0$=1 ، کمر پرتو $w$=0.04$m$ و $r$ شعاع انحنای پرتو است.

### ۲-۲- تولید صفحات فازی کاتوره ای

تولید صفحات فازی مهمترین نقش را در شبیه‌سازی انتشار پرتو در جو آشفته بازی می‌کند. روش‌های تولید صفحه فازی عبارتند از: روش فوریه، روش ساب هارمونیک و روش زرنیک. از آنجایی که روش زرنیک تمامی بسامدها را شامل می‌شود و در بردارنده ابیراهی های نوری است، در این مطالعه از روش زرنیک استفاده شده است. همانطور که قبلا ذکر شد در این شبیه سازی از طیف کالماگوروف استفاده شده است:

$$\Phi_n(K,z) = 0/033 C_n^2(z) K^{-\frac{11}{3}} \qquad (۲)$$

$$1/L_0 \ll k \ll 1/l_0$$

که در این معادله $C_n^2$ ضریب ساختار جو، $l_0$ مقیاس درونی، $L_0$ مقیاس بیرونی و $k$ عدد موج است. یک صفحه فازی زرنیک به وسیله ضرب ضرایب وزنی در مجموعه چندجمله‌ای‌های زرنیک به دست می‌آید که مقادیر ضرایب از ماتریس کوواریانس زرنیک برای $D/r_0$ مشخص به دست می آید که در آن $D$ قطر دهانه و $r_0$ طول همدوسی آشفتگی است. نمونه های کاتوره ای با استفاده از عامل چالسکی $A = CHOL(Ka)' * G$ در فضای نرم افزار متلب به دست می‌آید که $Ka$ ماتریس کواریانس زرنیک، $G$ یک بردار ناهمبسته، میانگین صفر، وردایی واحد و متغیر کاتوره ای گاوسی است. همچنین ماتریس کواریانس برای $D/r_0$ دلخواه با ضرب $(D/r_0)^{5/3}$ در ماتریس کواریانس تولید می‌شود [۶] و [۷]. مراحل تولید صفحه فازی زرنیک به صورت خلاصه عبارتست از[۱۰- ۸] :

۱- محاسبه چندجمله‌ای‌های زرنیک $Zi$ بر روی دایره واحد.

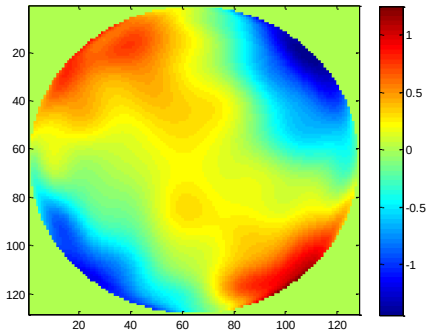


[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]

۲- تولید ماتریس کواریانس زرنیک $Ka$.

۳- محاسبه ضرایب وزنی و ضرب آن در $Zi$ .

۴- به دست آوردن مجموع ضرب ضرایب وزنی در $Zi$ ها.



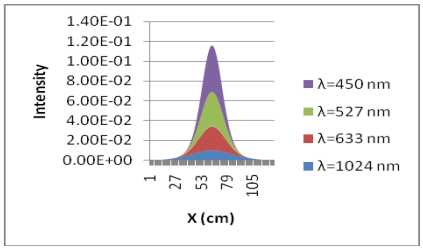

شکل ۱: صفحه فازی تولید شده با استفاده از چندجمله‌ای های زرنیک برای $D/r_0$ واحد شامل جملات ۲ تا ۱۲۸ زرنیک برای تعداد نقاط شبکه ۱۲۸*۱۲۸.

## ۲-۳ انتشارپرتو لیزر در جو آشفته

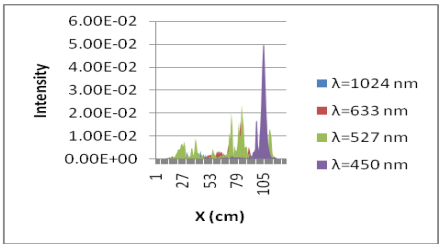
در این شبیه سازی جو در راستای افق همگن فرض شده است. پارامترهای پرتو گاوسی عبارتند از کمر پرتو $w_0$=0.04، λ=1024, 633, 527, and 450 nm . تعداد نقاط شبکه 128*128. تعداد صفحات فازی 100 عدد و فاصله انتشار 10 km است.

## ۳- مشاهدات

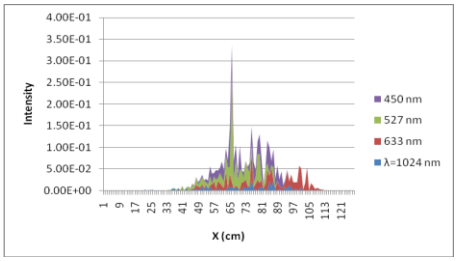
نتایج شبیه سازی شامل تاثیر میزان آشفتگی بر روی شدت و $PSF$ می باشد. شکل ۲ نشان دهنده نتایج انتشار پرتو لیزر در جو در شرایط: (الف) FSO ، (ب) آشفتگی ضعیف ($C_n^2$=$10^{-15}$)، (ج) آشفتگی متوسط ($C_n^2$=$10^{-13}$) و (د) آشفتگی قوی ($C_n^2$=$10^{-11}$) است. در این شکل ها کمر پرتو $w_0$=0.04، طول موج ها λ=1024, 633, 527, 450 nm و فاصله انتشار z=10 km است. همان گونه که مشاهده می‌شود با افزایش میزان شاخص آشفتگی شدت کمتری در صفحه مشاهده دریافت می‌گردد و نمودار شدت، تغییرات سریعتری را نشان می‌دهد که بیشترین میزان افت و خیزها متعلق به λ=1024 nm است که این به معنای این است که در این مطالعه با افزایش طول موج، افت و خیزها افزایش می‌یابد. شکل۳ نتایج انتشار پرتو لیزر بعد از انتشار در خلا و جو آشفته با میزان آشفتگی های مختلف: آشفتگی ضعیف ($C_n^2$=$10^{-15}$)، آشفتگی متوسط ($C_n^2$=$10^{-13}$) و آشفتگی قوی ($C_n^2$=$10^{-11}$) را نشان می‌دهد. در این شکل کمر پرتو $w_0$=0.04، طول موج λ=1024 و فاصله انتشار z=10 km است.



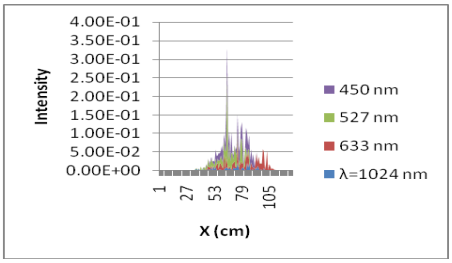

(الف)




(ب)




(ج)




(د)

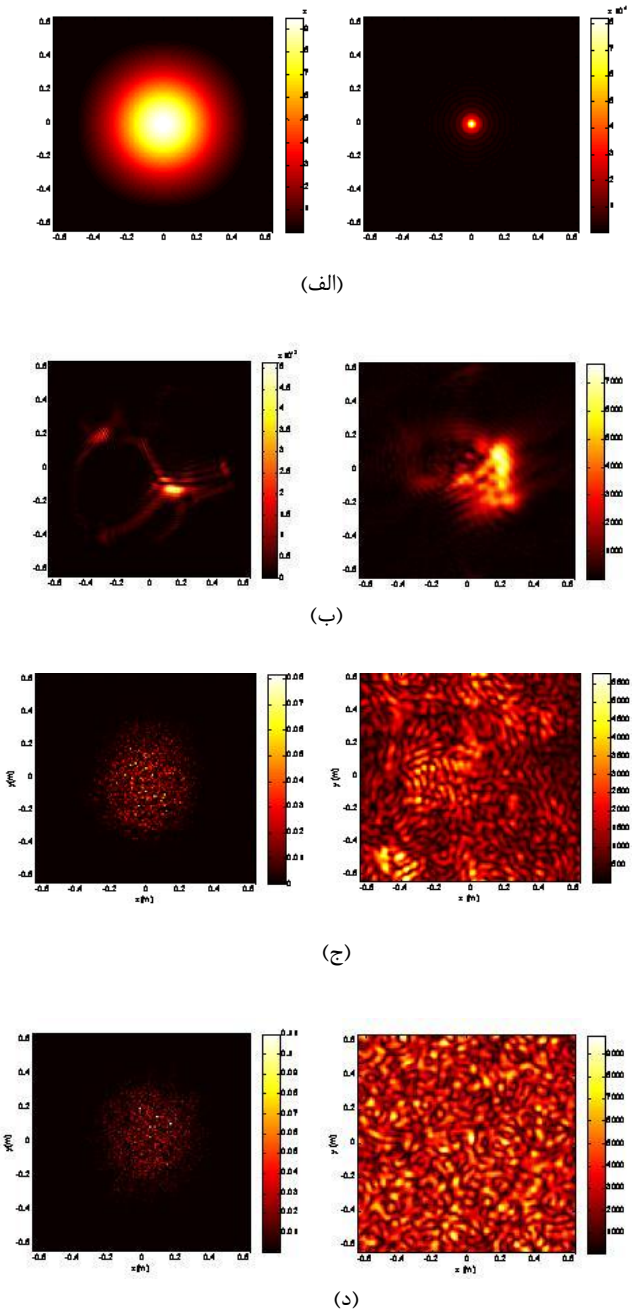
شکل۲: نمودار پرتو لیزر منتشر شده در فاصله z=10 km (الف) شرایط خلا (ب) آشفتگی ضعیف($C_n^2$=$10^{-15}$) (ج) آشفتگی متوسط ($C_n^2$=$10^{-13}$) (د) آشفتگی قوی ($C_n^2$=$10^{-11}$).



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]

## ۴- نتیجه گیری

با افزایش میزان شاخص آشفتگی($C_n^2$) شدت دریافتی در صفحه مشاهده کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش میزان آشفتگی و افزایش طول موج، میزان افت و خیزهای نمودار شدت افزایش می‌یابد که در این مطالعه آشفتگی در ناحیه IR بیشترین مقدار افت و خیز را داشت.



(الف)

(ب)

(ج)

(د)

شکل۳ : نمودار دو بعدی شدت پرتو لیزر منتشر شده (ستون سمت چپ) و *PSF* متناظر (ستون سمت راست) در فاصله z=10 km (الف) شرایط خلا (ب) آشفتگی ضعیف ($C_n^2$=$10^{-15}$) (ج) آشفتگی متوسط ($C_n^2$=$10^{-13}$) (د) آشفتگی قوی ($C_n^2$=$10^{-11}$).

## مراجع


[1] Tyson R. K., *Principle of Adaptive Optic*, **New York: Academic Press**, 1991.

[2] Burlaamacchi P., Consortini A., Francia G. D., *Phase Reconstruction of the Focused Gaussian Beam whit Optical Vortex*, **Quantum Electron**. 3 (1967) 234.

[3] Consortin A. I., Ronchi L, *Choice of the Model of Atmospheric Turbulence* , **Appl. Opt**., 9 (1970).

[4] Moradi M, *Simulation of Anisoplantism of Adaptive Optical System in Inhomogeneous Turbulent Atmosphere*, **Optical Review**, 15 (2005) 125-129.

[5] Sjoqvist L., Henriksson M., Steinvall O, *Simulation of Laser Beam Propagation over Land and Sea using Phase*, **Proc. of SPIE**, 5989 (2005) 59890D-1.

[6] Noll R., *Zernike Polynomials and Atmospheric Turbulence*, **Opt. Soc. Am**. 66 (1976) 207-211.

[7] Roggman M. C., Welsh B. M., *Imaging through Turbulence*, **New York: CRC Press, Boca Roten**, 1996.

[8] Eckert R. J., *Polar Phase Screen*, **Department of Air Force University**.

[9] Massie N. A., *Low-Cost, High-Resolution, Single-Structure Array Telescope of Low-Earth –Orbit Satellites*, **Appl. Opt**. 31 (1992) 447.

[10] Welsh B. M., Gardner C. S., *Effect of Turbulence-Induced Anisoplantism on the Imaging Performance of adaptive Astronomical Telescope using Laser guide Star*, Opt**. Soc. Am**. 8 (1991) 69-80.




[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]