

# Optoelectronic

Open  
Access

## ORIGINAL ARTICLE

# Calculation of Superdomes in an Arrayed Optical Waveguide Coupler of Chalcogenide Materials

Younes Abedian Khorasani<sup>1\*</sup>, Mohsen Hatami<sup>2</sup>

1 M.Sc. Student, Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.

2 Associate Professor, Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.

### Correspondence

Younes Abedian Khorasani

Email: [skyabedian@gmail.com](mailto:skyabedian@gmail.com)

### How to cite

Abedian Khorasani, Y., Hatami, M. (2023). Calculation of Superdomes in an Arrayed Optical Waveguide Coupler of Chalcogenide Materials, *Optoelectronic*, 5(2), 35-44.

### ABSTRACT

In recent times, array waveguides have garnered significant attention in the realm of ultra-fast optical processor design, particularly within the field of artificial intelligence. In this article, we embark on a two-fold process. Firstly, we derive the individual propagation constants of each waveguide using Lumerical software. Subsequently, employing MATLAB software, we delve into the computation of supermodes for a waveguide array comprising six waveguides. Employing coupled mode theory, we craft a six-waveguide array, characterized by a chalcogenide core atop an insulator, and subsequently ascertain its corresponding supermodes. Our findings underscore the versatility of chalcogenide materials in optical circuit integration, offering the potential for shorter circuit lengths. Furthermore, the notably high non-linear coefficient of chalcogenide materials opens doors to the design of non-linear optical devices.

### KEYWORDS

Chalcogenides, Supermode, Array of Waveguides.

© 2023, by the author(s). Published by Payame Noor University, Tehran, Iran.

This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://jphys.journals.pnu.ac.ir>

دوفصلنامه علمی  
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

## محاسبه سوپر مدها در آرایه‌ای از موجبرهای جفت شده متشکل از مواد چالکوجناید

یونس عابدیان خراسانی<sup>1\*</sup>، محسن حاتمی<sup>2</sup>

### چکیده

اخیرا موجبرهای آرایه‌ای برای طراحی پردازشگرهای فوق سریع نوری، خصوصا در زمینه هوش مصنوعی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مقاله ابتدا با نرم‌افزار لومریکال ثابت انتشار هر موجبر را به صورت جداگانه به‌دست آورده، و با استفاده از نرم‌افزار متلب به محاسبه سوپر مدهای یک آرایه موجبری متشکل از 6 موجبر پرداخته‌ایم. با استفاده از نظریه مد جفت‌شده موجبر آرایه‌ای با 6 موجبر متشکل از هسته چالکوجناید بر روی عایق را طراحی و سوپر مدهای متناظر را به‌دست آوردیم. نشان داده‌ایم که استفاده از مواد چالکوجناید می‌تواند با طول کوچکتری برای مجتمع‌سازی مدارهای نوری استفاده شده و علاوه بر این برای طراحی ابزارهای نوری غیرخطی به علت ضریب غیرخطی زیاد می‌توان مواد چالکوجناید استفاده کرد.

### واژه‌های کلیدی

چالکوجناید، سوپر مد، آرایه‌ای از موجبرها.

1 دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران.  
2 دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران.

نویسنده مسئول:

یونس عابدیان خراسانی

رایانامه: [skyabedian@gmail.com](mailto:skyabedian@gmail.com)

استناد به این مقاله:

یونس عابدیان خراسانی، محسن حاتمی (1402). محاسبه سوپر مدها در آرایه‌ای از موجبرهای جفت شده متشکل از مواد چالکوجناید. دوفصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 5(2)، 44-35.

## مقدمه

کاهش اثر قانون مور باعث شده تا واحدهای محاسباتی و پردازشگرهای الکترونیکی معمولی به سمت ترکیب‌هایی از سیستم‌های الکترونیکی و فوتونیک برای طراحی واحدهای محاسباتی با کارایی بالا و قدرت موثر بروند [1-7]. پردازشگرهای نوری می‌توانند به صورت یک بخش مشترک به وظایفی که برای الکترونیک ناکارآمد است مانند ضرب ماتریسی، استفاده شوند [8-18]. یک پردازشگر نوری خطی می‌تواند با استفاده از ضرب ماتریسی خطی داده‌های ورودی را بر مبنای ماتریس انتقال طراحی شده به خروجی‌های مورد نظر تغییر دهد. این تغییرها بر اساس یک ماتریس یکانی و با استفاده از چند درگاه (D) و تغییر دهنده فاز و ارسال نور اطلاعات رمزنگاری شده به ورودی‌ها است. با انتشار نور در این پردازشگر نوری، ضرب ماتریسی به طور خودکار برای خروجی‌ها انجام می‌شود. چنین پردازشگری نوری نیازی به استخراج اطلاعات خروجی برای تکمیل عملیات منطقی و محاسباتی ندارد. بنابراین می‌تواند محدودیت راندمان اعمال شده توسط طراحی فون نویمان را نقض کند. پس چنین پردازشگر نوری خطی پتانسیل زیادی در افزایش سرعت یادگیری [8]، مخابرات نوری، [19-21] و تجزیه و تحلیل اطلاعات کوانتومی دارد [22-40]. سوپر مدها قسمت اصلی ماتریس D هستند [41].

اولین ساختار برای هدایت امواج توسط جی‌جی‌توماس<sup>1</sup> در سال 1893 پیشنهاد [42] و اولین بار به شکل تجربی توسط لودج<sup>2</sup> در سال 1894 آزمایش شد [43]. موجرها، امواج را در یک کانال محدود می‌کنند تا در یک بعد انتشار یافته و در شرایط ایده‌آل توان خود را هنگام انتشار از دست ندهند.

شیشه‌های چالکونجاید، به دلیل خواص الکترونیکی و نوری منحصر به فردی که دارند، به عنوان یکی از مواد اصلی در تکنولوژی‌های نوری و الکترونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند و یکی از بسترهای تولید مدارهای مجتمع سیلیس و سیلیکا است و چون ما در طول موج مخابراتی کار کردیم در این طول موج ضریب جذب سیلیکا خیلی کمتر از سیلیس است و در بسیاری از مقالات از سیلیکا استفاده شده بود پس تصمیم به استفاده از سیلیکا (SiO<sub>2</sub>) گرفتیم. در اینجا موجرهای چالکونجاید روی عایق سیلیکا (SiO<sub>2</sub>) و مدارهای

روی تراشه نوری با خلوص و ضریب شکست بالا بین هسته (چالکونجاید  $As_2S_3$ ,  $n=2.65$ ) و روکش (سیلیسیم‌دی‌اکسید  $SiO_2$ ,  $n=1.46$ ) است.

تفاوت سوپرمد با مد معمولی در این است که رفتار موجرها در حالت کلی را میتوان با تعدادی مد بیان کنیم که نتیجه رفتار دسته جمعی همه موجرها است به این مورد سوپرمد می‌گوییم ولی هر موجر به تنهایی خودش یک مد به حساب می‌آید پس وقتی سوپر مد می‌شود که متعلق به کلیه این موجرها است و دارای یک ثابت انتشار است که تمام رفتارهای موجر را می‌توان با ترکیبی از این مدها که سوپر مد نامیده می‌شود بررسی کرد، رفتار جمعی با یک سرعت هستند ولی موجرهای تک‌مد هر کدام یک سرعت و ثابت انتشاری مخصوص دارند و وقتی با هم ترکیب می‌شوند به علت تبادل انرژی با موجرهای کناری دارای مد جداگانه نیستند. مدها رفتار جمعی پیدا می‌کنند و مد انتشاری آنها با مد تک تک آنها متفاوت می‌شود.

در این مقاله، ما محدودیت‌های نظریه مد جفت شده  $CMT^3$  در طراحی جفت‌کننده‌های  $SiO_2$  با خلوص بالا و موجرهای آریه‌ای را بررسی و مقارنه می‌کنیم. نظریه مد جفت شده یک رویکرد ساده و اغلب قابل اعتماد برای طراحی چنین سازه‌هایی، که در آن ضریب جفت را می‌توان بر حسب انتگرال‌های همپوشانی حالت‌های موجر مجزا و توزیع ضریب شکست  $n(x,y)$  در سطح مقطع صفحه نوشت [44-46]. اصلاحات دقیق‌تر نظریه مد جفت شده برای باریکه‌های موجر توسط چیانگ<sup>4</sup> [47] و پین<sup>5</sup> [48] در میان دیگران مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اهمیت این نتایج، در ساده‌سازی فرآیند طراحی مزدوج‌های موازی موجر  $SiO_2$  با خلوص بالا و ساختارهای موجر جفت‌شده، ارائه نمودارها و تخمین‌های قاعده‌ای سرانگشتی برای اعتبار و بی‌اعتباری نظریه مد جفت شده ساده به جای تکیه بر شبیه‌سازی‌های عددی از ابتدا و زمان بر در هر مورد بوده است [49].

## معادلات

برای به دست آوردن سوپر مد باید موجر را تشریح کنیم، انتشار امواج در امتداد محورهای موجر توسط معادله موج

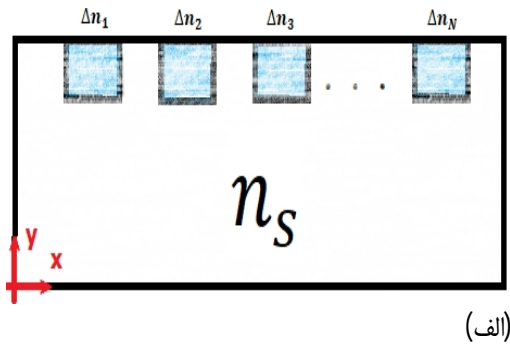
3 CMT: Coupled-Mode Theory

4 Chiang

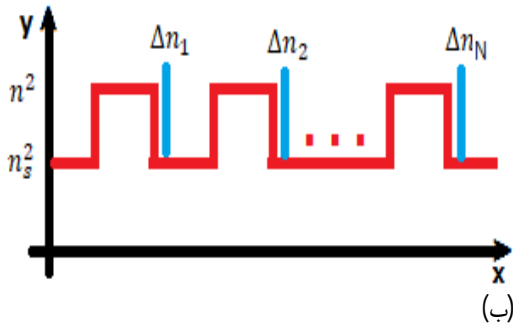
5 Payne

1 J.J.Tomas

2 Lodge



(الف)



(ب)

**شکل 2.** (الف) نمایه ضریب شکست در صفحه عرضی  $n(x, y)$  برای ساختار  $N$  موجبر آرایه شده. (ب) نمایه ضریب شکست یکسان ممکن است، از نظر ریاضی، به مجموع قطعات،  $\Delta n_l^2 = n_l^2 - n_s^2$  تجزیه شود، که هر کدام در معادله انتگرال برای ضرایب جفت ظاهر می‌شوند.

می‌توان  $n^2(x, y)$  را به صورت مجموع سهم هر موجبر به

صورت جداگانه نوشت

$$n^2(x, y) = n_s^2(x, y) + \sum_{l=1}^N \Delta n_l^2(x, y) \quad (3)$$

که  $n_s$  ضریب شکست پوسته و  $n_l$  کران هر یک از موجبرهای هسته و  $n$  ضریب شکست کل موجبر است.

حال معادله هلمهولتز را در میدان الکتریکی اعمال می‌کنیم

$$\nabla_t^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \Rightarrow -\beta^2 \quad (4)$$

برای هر یک از موجبرها، باید معادله لاپلاس و معادله هلمهولتز به صورت جداگانه اعمال شوند.

$$\left( \nabla_{\perp}^2 + \frac{\omega^2}{c^2} [n_s^2(x, y) + \right. \quad (5)$$

$$\left. \Delta n_l^2(x, y) \right] - \beta_l^2 \times \varepsilon_l(x, y) = 0$$

سپس دو معادله (2) و (3) را در معادله موج (1) جایگذاری

می‌کنیم

$$\left( \nabla_{\perp}^2 + \frac{\omega^2}{c^2} [n_s^2(x, y) + \sum_{l=1}^N \Delta n_l^2(x, y) \right] - \beta^2 \times \left[ \sum_{l=1}^N A_l \varepsilon_l(x, y) \right] = 0 \quad (6)$$

$$\beta^2 \times \left[ \sum_{l=1}^N A_l \varepsilon_l(x, y) \right] = 0$$

معادله را باز می‌کنیم

$$\nabla_t^2 \sum_{l=1}^N A_l \varepsilon_l(x, y) - \beta^2 \sum_{l=1}^N A_l \varepsilon_l(x, y) + \quad (7)$$

$$\frac{\omega^2}{c^2} [n_s^2(x, y) + \sum_{l=1}^N \Delta n_l^2(x, y)] \sum_{l=1}^N A_l \varepsilon_l(x, y) = 0$$

از  $A_l$  عامل مشترک گرفته و چون دو شمارشگر با مؤلفه  $l$

داریم شمارشگر  $\Delta n_l$  را به  $\Delta n_m$  تغییر می‌دهیم

تشریح می‌شود. ابتدا یک موجبر تکی را در نظر گرفته سپس تاثیرات آن را بر اساس ضرایب جفت‌شدگی که نشان دهنده تاثیرات آن‌ها بر روی هم است در نظر می‌گیریم. این یک روش تحت عنوان نظریه مد جفت شده که برای بررسی این موجبرها خیلی کارآمد است و روش‌های دیگری هم وجود دارد ولی ما از این روش استفاده کردیم حال ابتدا فرض می‌کنیم آرایه‌ای از موجبرها، که هر موجبر ثابت انتشار و میدان الکتریکی مخصوص خود را که روی هم اثر نمی‌گذارند داریم

Waveguide	propagation constant	Electrical Field
1	$\beta_1$	$\hat{y} A_1 \varepsilon_1(x, y)$
2	$\beta_2$	$\hat{y} A_2 \varepsilon_2(x, y)$
3	$\beta_3$	$\hat{y} A_3 \varepsilon_3(x, y)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$N$	$\beta_N$	$\hat{y} A_N \varepsilon_N(x, y)$

**شکل 1.** آرایه‌ای از موجبرها [50]

برای توصیف حالت‌های موجبرهای چند شکافی، با معادله

موج شروع می‌کنیم [50]

$$\nabla^2 E + \frac{\omega^2}{c^2} n^2(x, y) E = 0 \quad (1)$$

فرض می‌کنیم همه موجبرها یک موجبر و موج‌ها در

داخل آن در حرکت هستند و میدان داخل این موجبر ترکیبی

از میدان‌های عرضی تک تک موجبرها با یک ضریب  $e^{i\beta z}$

که این  $\beta$  ثابت انتشار موجبر کلی و  $A_l$  دامنه و  $\varepsilon_l$  میدان

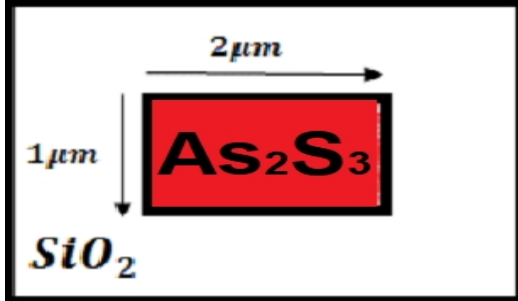
هرکدام از موجبرها است.

$$\hat{E} = \hat{y} E(x, y) e^{-i\beta z} = \hat{y} \left[ \sum_{l=1}^N A_l \varepsilon_l(x, y) \right] e^{-i\beta z} \quad (2)$$

شکل 2 نمایه ضریب شکست در صفحه عرضی  $n(x, y)$

برای  $N$  ساختار موجبر آرایه‌ای است.

$I_{jl}$  انتگرال همپوشانی حالت‌های دو موجبر که متعامد با یکدیگر نیستند (به ویژه در جداسازی موجبر کوچک) و  $\kappa$  ضرایب خود جفت‌شدگی و جفت متقابل (جفت تبادلی) هستند که از نظریه مد جفت شده متشکل شده‌اند [50]. معادله (11) را به صورت ماتریسی به عنوان مسئله مقدار ویژه می‌نویسیم.



شکل 3. موجبر ساخته شده از هسته چالکونجناید و صفحه سیلیس

### محاسبات

ابتدا مد انتشاری و ثابت انتشار در یک موجبر که از هسته چالکونجناید و زمینه سیلیکا تشکیل شده را با استفاده از نرم‌افزار لومریکال به دست می‌آوریم در شکل 3 ابعاد هسته این موجبر مشخص شده که دارای عرض  $1\mu m$  و طول  $2\mu m$  است. که به صورت یک موجبر مربع مستطیل در شکل 4 با ضریب شکست  $n = 2.65$  با استفاده از معادله سلمیر برای ماده چالکونجناید  $As_2S_3$  در طول موج  $\lambda = 1.55\mu m$  به دست آمده است.

$$\sum_{i=1}^N A_i \left( \nabla_i^2 \varepsilon_i(x,y) - \beta^2 \varepsilon_i(x,y) + \frac{\omega^2}{C^2} [n_s^2(x,y) + \sum_{m=1}^N \Delta n_m^2] \varepsilon_i(x,y) \right) = 0 \quad (8)$$

بخش اولیه معادله (8) مقدار اولیه آن را از حل معادله (5) برداشته و جایگذاری می‌کنیم

$$\sum_{i=1}^N A_i \left( \beta_i^2 \varepsilon_i(x,y) - \frac{\omega^2}{C^2} [n_s^2(x,y) + \Delta n_i^2(x,y)] \varepsilon_i(x,y) - \beta^2 \varepsilon_i(x,y) + \frac{\omega^2}{C^2} [n_s^2(x,y) + \sum_{m=1}^N \Delta n_m^2] \varepsilon_i(x,y) \right) = 0 \quad (9)$$

معادله را ساده و  $\Delta_1 = \beta_1^2 - \beta^2$  را در معادله قرار می‌دهیم

$$\sum_{i=1}^N A_i \left( \Delta_1 + \frac{\omega^2}{C^2} \left[ \sum_{m=1, m \neq i}^N \Delta n_m^2 \right] \varepsilon_i(x,y) \right) = 0 \quad (10)$$

$N$  معادله با ضرب معادله (10) در  $\varepsilon_j^*$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) ترکیب کردن هر یک از این معادلات روی  $x$  و  $y$  تشکیل می‌شود. حال از کل معادله انتگرال می‌گیریم.

$$\sum_{i=1}^N A_i \left( \Delta_1 \iint \varepsilon_j^* \varepsilon_i dx dy + \frac{\omega^2}{C^2} \sum_{m=1, m \neq i}^N \iint \varepsilon_j^* \Delta n_m^2 \varepsilon_i(x,y) dx dy \right) = 0 \quad (11)$$

$(j = 1, 2, \dots, N)$

ما انتگرال‌های همپوشانی مودال را به صورت زیر تعریف

می‌کنیم:

$$I_{jl} = \Delta_1 \iint \varepsilon_j^* \varepsilon_l dx dy \quad (a12)$$

$$\kappa_{jl} = \frac{\omega^2}{C^2} \sum_{m=1, m \neq l}^N \iint \varepsilon_j^* \Delta n_m^2 \varepsilon_l(x,y) dx dy \quad (b12)$$

با بهنجارش میدان داریم:

$$\iint \varepsilon_i^* \varepsilon_i dx dy = 1 \quad (c12)$$

$$\begin{pmatrix} \beta_1^2 + \kappa_{11} & \Delta_2 I_{12} + \kappa_{12} & \dots & \Delta_{N-1} I_{1,N-1} + \kappa_{1,N-1} & \Delta_N I_{1N} + \kappa_{1N} \\ \Delta_1 I_{21} + \kappa_{21} & \beta_2^2 + \kappa_{22} & \dots & \Delta_{N-1} I_{2,N-1} + \kappa_{2,N-1} & \Delta_N I_{2N} + \kappa_{2N} \\ \Delta_1 I_{31} + \kappa_{31} & \Delta_2 I_{32} + \kappa_{32} & \dots & \Delta_{N-1} I_{3,N-1} + \kappa_{3,N-1} & \Delta_N I_{3N} + \kappa_{3N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \Delta_1 I_{N1} + \kappa_{N1} & \Delta_2 I_{N2} + \kappa_{N2} & \dots & \Delta_{N-1} I_{N,N-1} + \kappa_{N,N-1} & \beta_N^2 + \kappa_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \beta^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \beta^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \beta^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_N \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$M = \begin{pmatrix} (14.55 \times 10^6 + 0.18) & 1.476 \times 10^6 + 0.18 \\ 1.476 \times 10^6 + 0.18 & (14.55 \times 10^6 + 0.18) \\ 0 & 1.476 \times 10^6 + 0.18 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1.476 \times 10^6 + 0.18 & 0 \\ (14.55 \times 10^6 + 0.18) & 1.476 \times 10^6 + 0.18 \\ 1.476 \times 10^6 + 0.18 & (14.55 \times 10^6 + 0.18) \\ 0 & 1.476 \times 10^6 + 0.18 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1.476 \times 10^6 + 0.18 & 0 \\ 14.55 \times 10^6 + 0.18 & 1.476 \times 10^6 + 0.18 \\ 1.476 \times 10^6 + 0.18 & (14.55 \times 10^6 + 0.18) \end{pmatrix} \times 10^6 \quad (14)$$

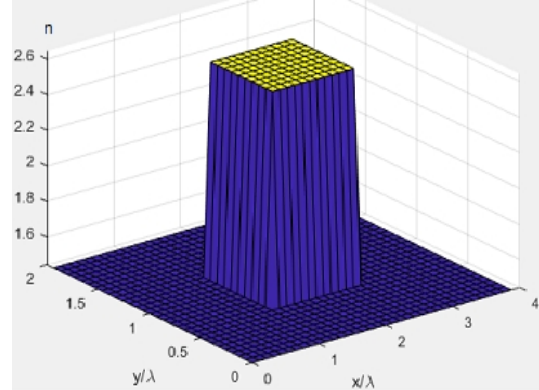
$\beta$  به ازای ویژه مقادیرهای سوپر مد که به صورت زیر به دست می‌آید

جدول 2. $\beta$ برای مقادیر ویژه سوپر مد است			
$\beta$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
الف) $3.4482 \times 10^6$	0.2319	-0.4179	0.5211
ب) $3.5650 \times 10^6$	-0.4179	0.5211	-0.2319
پ) $3.7273 \times 10^6$	-0.5211	0.2319	0.4179
ت) $3.8996 \times 10^6$	0.5211	0.2319	-0.4179
ث) $4.0485 \times 10^6$	-0.4179	-0.5211	-0.2319
ج) $4.1485 \times 10^6$	0.2319	0.4179	0.5211
$\beta$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$3.4482 \times 10^6$	-0.5211	0.4179	-0.2319
$3.5650 \times 10^6$	-0.2319	0.5211	-0.4179
$3.7273 \times 10^6$	-0.4179	-0.2319	0.5211
$3.8996 \times 10^6$	-0.4179	0.2319	0.5211
$4.0485 \times 10^6$	0.2319	0.5211	0.4179
$4.1485 \times 10^6$	0.5211	0.4179	0.2319

شکل دامنه هر سوپر مد را با استفاده از جدول 2 در شکل 6 با کد نویسی و فرمول نویسی به وسیله متلب، که در بالا فرمول‌های استفاده شده را اثبات و ساده‌سازی کردیم در متلب شبیه‌سازی کردیم

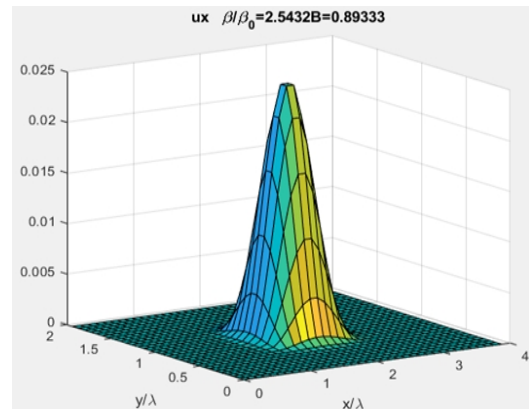
جدول 1. پارامترهای مربوط به محاسبه سوپر مد در 6 آرایه جفت شده

ازای $\beta_l$	$I_{ji}$ $i=j$	$I_{ij}$ $i=j \neq 1$	$K_{ii}$	$K_{ij}$ $i=j \neq 1$
تمام ها $l$	1	0.12	0.18 $\times 10^6$	$0.2 \times 10^6$



شکل 4. پروفایل ضریب شکست موجبر یک موجبر مربع مستطیلی

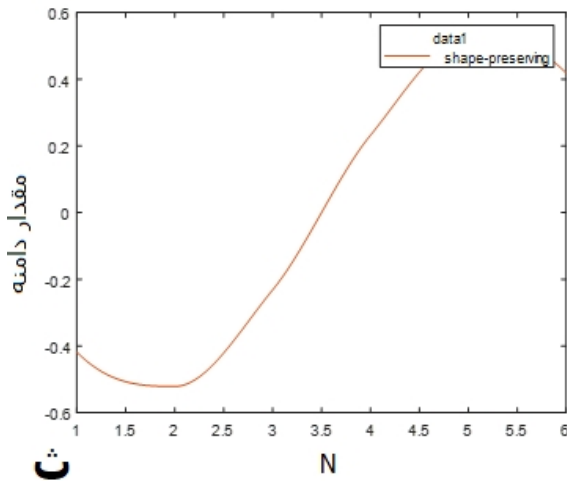
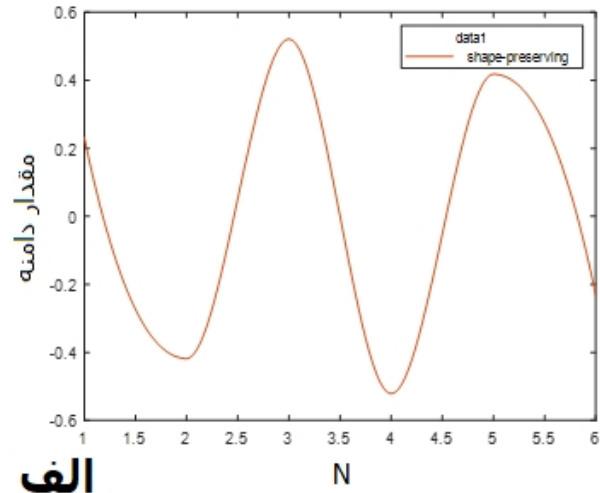
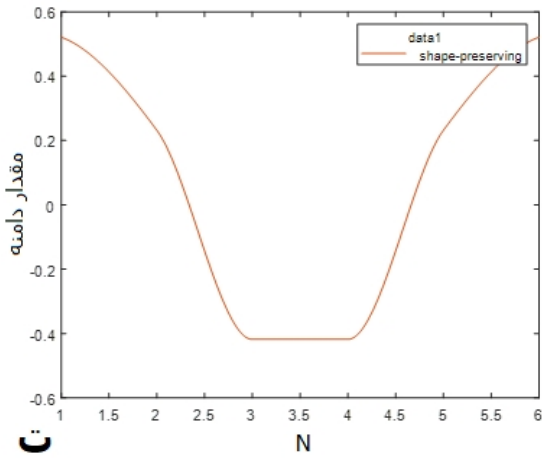
مد انتشاری برای موجبر که از هسته چالکونجناید و زمینه سیلیکا تشکیل شده در شکل 5 آمده است



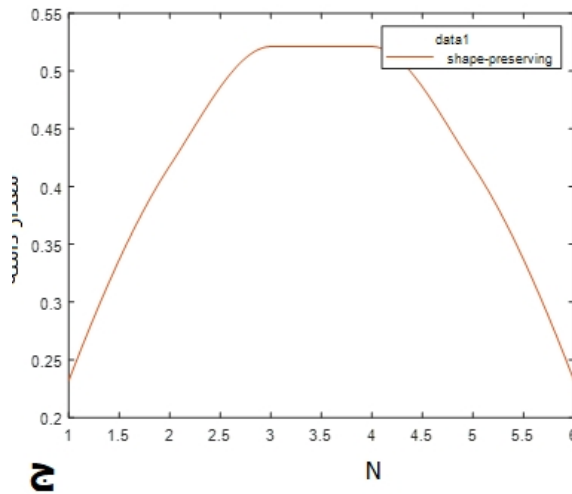
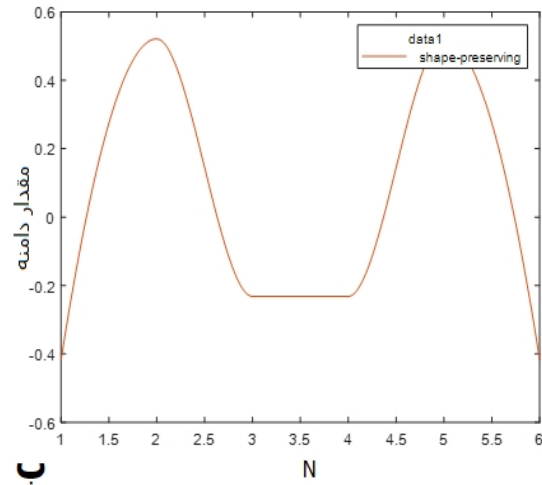
شکل 5. مد انتشاری برای موجبر چالکونجناید

با توجه به اینکه برای محاسبه سوپر مد به انتگرال‌های هم پوشانی و جفت شدگی نیاز است این کار با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام و نتایج به دست آمده در جدول شماره 1 آورده شده است برای آرایه‌ای از موجبرها که با آرایه یکسان و فاصله یکسان هستند.

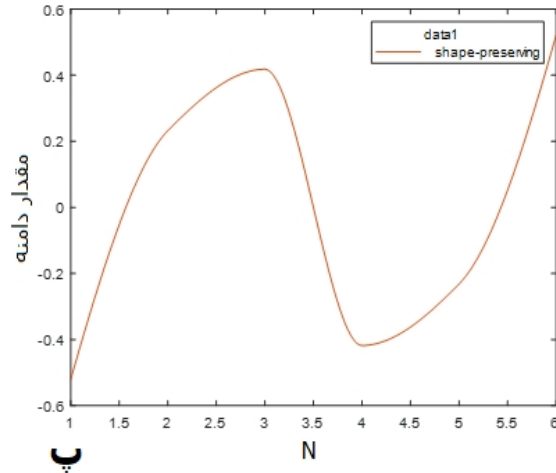
با فرض اینکه آرایه موجبر 6 تایی از درجه‌های کاملاً یکسان تشکیل شده با استفاده از پارامترهای جدول 1 به محاسبه سوپر مد می‌پردازیم برای حالتی که اثر موجبرهای یکسان و فقط اثرات موجبرهای کنار هم در نظر گرفته شود با توجه به مقادیر جدول 1 می‌توان ماتریس  $M$  را به صورت زیر نوشت



الف



ب



ج

شکل 6. شکل دامنه هر سوپر مد شبیه‌سازی شده با متلب که مقدار آن در جدول 2 آمده است.

حالت‌های یک آرایه موجبر موج جفت شده  $N = 6$  برای  $\lambda = 1550nm$  با استفاده از نظریه مد جفت شده محاسبه می‌شود. محاسبات نظریه مد جفت شده با روش محاسبه انتگرال‌های همپوشانی، حل معادله (13) انجام شد. ارتفاع موجبر برابرست با 2 میکرومتر، عرض برابرست با 1 میکرومتر،

شده مقدار 4 و 6 و 10 موجبر بوده که مورد بررسی قرار گرفته شده است پس ما به طور معمول 6 موجبر را مورد بررسی قرار دادیم ولی می‌توان بقیه را در صورت نیاز بر اساس همین مدل انجام داد؛ و در مقایسه با کارهای قبلی که انجام شده بود در این مقاله استفاده از مواد چالکونجاید می‌تواند با طول کوچکتری برای مجتمع‌سازی مدارهای نوری استفاده شده و علاوه بر این برای طراحی ابزارهای نوری غیرخطی به علت ضریب غیرخطی زیاد مواد چالکونجاید می‌توان استفاده کرد. این محاسبات برای برنامه‌ریزی‌ها و تدبیرهای مختلف در محاسبه موجبرهای آرایه‌ای برای پردازشگرهای فوق سریع نوری و به خصوص در زمینه هوش مصنوعی و ترکیبی از سیستم‌های الکترونیک و فوتونیک برای طراحی واحدهای محاسباتی با کارایی بالا و قدرت موثر کاهش زمان بر بودن محاسبات مناسب است. همچنین اهمیت این نتایج، در ساده‌سازی فرآیند طراحی مزدوج‌های موازی و ساختارهای موجبر جفت‌شده برای اعتبار و بی‌اعتباری نظریه مد جفت‌شده ساده به جای تکیه بر شبیه‌سازی‌های عددی از ابتدا و زمان بر در هر مورد است.

ضریب شکست هسته برابرست با 2. 65 و ضریب شکست روکش برابرست با 1. 46 بوده است. تحت جفت نزدیک‌ترین همسایه به اندازه کافی دامنه میدان را در هر موجبر پیش‌بینی می‌کند.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، ما اعتبار نظریه مد جفت شده را برای ساختارهای هدایت موج نوری با خلوص بالا مبتنی بر چالکونجاید، مورد مطالعه قرار داده‌ایم. شیشه‌های چالکونجاید، به دلیل خواص الکترونیکی و نوری منحصر به فردی که دارند، از جمله شفافیت بالا، پایداری حرارتی، عدم جذب نور در محدوده طول موج مورد نظر، عدم تغییر شکل و اندازه، به عنوان یکی از مواد اصلی در تکنولوژی‌های نوری و الکترونیکی و پردازشگرهای نوری و برای انتقال سیگنال‌های نوری مناسب است و انعطاف‌پذیر و قوی برای برنامه‌ریزی‌ها و تدبیرهای مختلف در یادگیری عمیق، مخبرات نوری و تجزیه و تحلیل اطلاعات کوانتومی استفاده می‌شوند.

دلیل استفاده از 6 موجبر در این مقاله به این دلیل بوده است که در بسیاری از مدارهایی که در مقالات متفاوت دیده

### منابع

- [1] Tsang M. Efficient superoscillation measurement for incoherent optical imaging. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2022 Oct 5.
- [2] Atabaki AH, Moazeni S, Pavanello F, Gevorgyan H, Notaros J, Alloatti L, Wade MT, Sun C, Kruger SA, Meng H, Al Qubaisi K. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip. *Nature*. 2018 Apr 19;556(7701):349-54.
- [3] Shainline JM, Buckley SM, Mirin RP, Nam SW. Superconducting optoelectronic circuits for neuromorphic computing. *Physical Review Applied*. 2017 Mar 23;7(3):034013.
- [4] Paquot Y, Duport F, Smerieri A, Dambre J, Schrauwen B, Haelterman M, Massar S. Optoelectronic reservoir computing. *Scientific reports*. 2012 Feb 27;2(1):287.
- [5] Bangari V, Marquez BA, Miller H, Tait AN, Nahmias MA, De Lima TF, Peng HT, Prucnal PR, Shastri BJ. Digital electronics and analog photonics for convolutional neural networks (DEAP-CNNs). *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2019 Oct 4;26(1):1-3.
- [6] Ying Z, Feng C, Zhao Z, Dhar S, Dalir H, Gu J, Cheng Y, Soref R, Pan DZ, Chen RT. Electronic-photonic arithmetic logic unit for high-speed computing. *Nature communications*. 2020 May 1;11(1):2154.
- [7] Hamerly R, Bernstein L, Sludds A, Soljačić M, Englund D. Large-scale optical neural networks based on photoelectric multiplication. *Physical Review X*. 2019 May 16;9(2):021032.
- [8] Shen Y, Harris NC, Skirlo S, Prabhu M, Baehr-Jones T, Hochberg M, Sun X, Zhao S, Larochelle H, Englund D, Soljačić M. Deep learning with coherent nanophotonic circuits. *Nature photonics*. 2017 Jul;11(7):441-6.
- [9] Hughes TW, Minkov M, Shi Y, Fan S. Training of photonic neural networks through in situ backpropagation and gradient measurement. *Optica*. 2018 Jul 20;5(7):864-71.
- [10] Harris NC, Carolan J, Bunandar D, Prabhu M, Hochberg M, Baehr-Jones T, Fanto ML, Smith AM, Tison CC, Alsing PM, Englund D. Linear programmable nanophotonic processors. *Optica*. 2018 Dec 20;5(12):1623-31.
- [11] Pérez D, Gasulla I, Capmany J. Programmable multifunctional integrated nanophotonics. *Nanophotonics*. 2018 Jul 28;7(8):1351-71.
- [12] Pérez-López D, López A, DasMahapatra P, Capmany J. Multipurpose self-configuration



- of programmable photonic circuits. *Nature communications*. 2020 Dec 11;11(1):6359.
- [13] Williamson IA, Hughes TW, Minkov M, Bartlett B, Pai S, Fan S. Reprogrammable electro-optic nonlinear activation functions for optical neural networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2019 Jul 23;26(1):1-2.
- [14] Pai S, Bartlett B, Solgaard O, Miller DA. Matrix optimization on universal unitary photonic devices. *Physical review applied*. 2019 Jun 19;11(6):064044.
- [15] Pérez D, Capmany J. Scalable analysis for arbitrary photonic integrated waveguide meshes. *Optica*. 2019 Jan 20;6(1):19-27.
- [16] Bogaerts W, Pérez D, Capmany J, Miller DA, Poon J, Englund D, Morichetti F, Melloni A. Programmable photonic circuits. *Nature*. 2020 Oct 8;586(7828):207-16.
- [17] Spall J, Guo X, Barrett TD, Lvovsky AI. Fully reconfigurable coherent optical vector-matrix multiplication. *Optics Letters*. 2020 Oct 15;45(20):5752-5.
- [18] Tanomura R, Tang R, Sukanuma T, Okawa K, Kato E, Tanemura T, Nakano Y. Monolithic InP optical unitary converter based on multi-plane light conversion. *Optics Express*. 2020 Aug 17;28(17):25392-9.
- [19] Annoni A, Guglielmi E, Carminati M, Ferrari G, Sampietro M, Miller DA, Melloni A, Morichetti F. Unscrambling light—automatically undoing strong mixing between modes. *Light: Science & Applications*. 2017 Dec;6(12):e17110-.
- [20] Melati D, Alippi A, Melloni A. Reconfigurable photonic integrated mode (de) multiplexer for SDM fiber transmission. *Optics express*. 2016 Jun 13;24(12):12625-34.
- [21] Chakravarty S, Teng M, Safian R, Zhuang L. Hybrid material integration in silicon photonic integrated circuits. *Journal of Semiconductors*. 2021 Apr 1;42(4):041303.
- [22] Harris NC, Steinbrecher GR, Prabhu M, Lahini Y, Mower J, Bunandar D, Chen C, Wong FN, Baehr-Jones T, Hochberg M, Lloyd S. Quantum transport simulations in a programmable nanophotonic processor. *Nature Photonics*. 2017 Jul 1;11(7):447-52.
- [23] Carolan J, Mohseni M, Olson JP, Prabhu M, Chen C, Bunandar D, Niu MY, Harris NC, Wong FN, Hochberg M, Lloyd S. Variational quantum unsampling on a quantum photonic processor. *Nature Physics*. 2020 Mar 2;16(3):322-7.
- [24] Carolan J, Harrold C, Sparrow C, Martín-López E, Russell NJ, Silverstone JW, Shadbolt PJ, Matsuda N, Oguma M, Itoh M, Marshall GD. Universal linear optics. *Science*. 2015 Aug 14;349(6249):711-6.
- [25] Taballione C, Wolterink TA, Lugani J, Eckstein A, Bell BA, Grootjans R, Visscher I, Geskus D, Roeloffzen CG, Renema JJ, Walmsley IA.  $8 \times 8$  reconfigurable quantum photonic processor based on silicon nitride waveguides. *Optics express*. 2019 Sep 16;27(19):26842-57.
- [26] Taballione C, van der Meer R, Snijders HJ, Hooijschuur P, Epping JP, de Goede M, Kassenberg B, Venderbosch P, Toebes C, Vlekkert HV, Pinkse PW. A 12-mode universal photonic processor for quantum information processing. *arXiv preprint arXiv:2012.05673*. 2020 Dec 10.
- [27] Kim JH, Aghaeimeibodi S, Carolan J, Englund D, Waks E. Hybrid integration methods for on-chip quantum photonics. *Optica*. 2020 Apr 20;7(4):291-308.
- [28] Bravo-Prieto C, García-Martín D, Latorre JI. Quantum singular value decomposer. *Physical Review A*. 2020 Jun 4;101(6):062310.
- [29] Adcock JC, Bao J, Chi Y, Chen X, Bacco D, Gong Q, Oxenløwe LK, Wang J, Ding Y. Advances in silicon quantum photonics. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2020 Sep 24;27(2):1-24.
- [30] Wang J, Paesani S, Ding Y, Santagati R, Skrzypczyk P, Salavrakos A, Tura J, Augusiak R, Mančinska L, Bacco D, Bonneau D. Multidimensional quantum entanglement with large-scale integrated optics. *Science*. 2018 Apr 20;360(6386):285-91.
- [31] Flamini F, Spagnolo N, Sciarrino F. Photonic quantum information processing: a review. *Reports on Progress in Physics*. 2018 Nov 13;82(1):016001.
- [32] Wang J, Sciarrino F, Laing A, Thompson MG. Integrated photonic quantum technologies. *Nature Photonics*. 2020 May;14(5):273-84.
- [33] Flamini F, Spagnolo N, Viggianiello N, Crespi A, Osellame R, Sciarrino F. Benchmarking integrated linear-optical architectures for quantum information processing. *Scientific Reports*. 2017 Nov 9;7(1):15133.
- [34] Pant M, Towsley D, Englund D, Guha S. Percolation thresholds for photonic quantum computing. *Nature communications*. 2019 Mar 6;10(1):1070.
- [35] Dyakonov IV, Pogorelov IA, Bobrov IB, Kalinkin AA, Straupe SS, Kulik SP, Dyakonov PV, Evlashin SA. Reconfigurable photonics on a glass chip. *Physical Review Applied*. 2018 Oct 19;10(4):044048.

- [36] Armstrong S, Morizur JF, Janousek J, Hage B, Treppe N, Lam PK, Bachor HA. Programmable multimode quantum networks. *Nature communications*. 2012 Jan;3(1):1026.
- [37] Erhard M, Krenn M, Zeilinger A. Advances in high-dimensional quantum entanglement. *Nature Reviews Physics*. 2020 Jul 14;2(7):365-81.
- [38] Smith AM, Jacinto HS. Reconfigurable integrated optical interferometer network-based physically unclonable function. *Journal of Lightwave Technology*. 2020 May 20;38(17):4599-606.
- [39] Sparrow C, Martín-López E, Maraviglia N, Neville A, Harrold C, Carolan J, Joglekar YN, Hashimoto T, Matsuda N, O'Brien JL, Tew DP. Simulating the vibrational quantum dynamics of molecules using photonics. *Nature*. 2018 May 31;557(7707):660-7.
- [40] Knill E, Laflamme R, Milburn GJ. A scheme for efficient quantum computation with linear optics. *nature*. 2001 Jan 4;409(6816):46-52.
- [41] Tang R, Tanomura R, Tanemura T, Nakano Y. Ten-port unitary optical processor on a silicon photonic chip. *ACS Photonics*. 2021 Jun 11;8(7):2074-80.
- [42] Thomson JJ. Notes on recent researches in electricity and magnetism: intended as a sequel to Professor Clerk-Maxwell's Treatise on electricity and magnetism. Cambridge University Press; 1893.
- [43] Ramsay JF. Microwave antenna and waveguide techniques before 1900. *Proceedings of the IRE*. 1958 Feb;46(2):405-15.
- [44] Kogelnik H, Shank CV. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers. *Journal of applied physics*. 1972 May;43(5):2327-35.
- [45] Hardy A, Streifer W. Coupled mode theory of parallel waveguides. *Journal of lightwave technology*. 1985 Oct;3(5):1135-46.
- [46] Huang WP. Coupled-mode theory for optical waveguides: an overview. *JOSA A*. 1994 Mar 1;11(3):963-83.
- [47] Chiang KS. Coupled-zigzag-wave theory for guided waves in slab waveguide arrays. *Journal of lightwave technology*. 1992 Oct;10(10):1380-7.
- [48] Payne FP. An analytical model for the coupling between the array waveguides in AWGs and star couplers. *Optical and quantum electronics*. 2006 Jan;38:237-48.
- [49] Cooper ML, Mookherjea S. Numerically-assisted coupled-mode theory for silicon waveguide couplers and arrayed waveguides. *Optics Express*. 2009 Feb 2;17(3):1583-99.
- [50] Yeh P, Hendry M. Optical waves in layered media. *Physics Today*. 1990 Jan;43(1):77.