

# طراحی عناصر نوری پراشی دریاچه - محدود دوبعدی با تعمیم روش طیف زاویه‌ای تکراری

سیدحسین کاظمی، میرمجتبی میرصالحی و امیررضا عطاری

در روش اسکالری تقریب تنها فاز، اثر عنصر فقط به صورت تأخیردهنده در فاز میدان تابشی در نظر گرفته می‌شود و از اثر آن بر دامنه و همچنین پدیده‌هایی مانند تشدید و بازتاب‌های داخلی چشم‌پوشی می‌شود. در روش‌های تحلیل اغلب از یک روش اضافی برای شبیه‌سازی انتشار موج از صفحه خروجی عنصر نوری پراشی تا صفحه مشاهده، که می‌تواند دقیق یا تقریبی باشد، مانند روش‌های تقریبی فرنل و فرانهافر یا روش دقیق طیف زاویه‌ای<sup>[۱۱]</sup> بهره می‌برند. روش‌های بهینه‌سازی مانند ریز-ژنتیک<sup>[۸]</sup>، تبرید شبیه‌سازی شده<sup>[۱۰]</sup> یا فلیپ-فلاپ<sup>[۱۲]</sup>، فضای پارامترهای ساختمانی مجهول در عنصر نوری پراشی را با استفاده از تابع شایستگی جستجو می‌کنند.

روش یک‌طرفه دیگری که با سایر روش‌های این دسته متفاوت است، روش زاویه چرخش بهینه<sup>[۸]</sup> (ORA) است [۱۳] و [۱۴]. در این روش عنصر نوری پراشی به قسمت‌های کوچک‌تری به نام سلول تقسیم می‌شود و فاز هر سلول به‌طور بهینه برای بیشینه‌کردن شدت در نقاط مطلوب تغییر می‌کند. این روش از تقریب تنها فاز برای شبیه‌سازی عنصر نوری پراشی و از حل عددی انتگرال کیرشلف - هلم هولتز برای شبیه‌سازی انتشار موج در پشت این عنصر بهره می‌برد. از آنجا که افزایش نقاط مطلوب در این روش زمان طراحی را به‌طور نمایی افزایش می‌دهد، کاربرد این روش به طراحی منشعب‌کننده‌ها محدود شده است و طراحی عنصری با الگوی توزیع شدت دلخواه در این روش ممکن نیست.

روش‌های دوطرفه با بهره‌گیری مکرر از روش‌های تحلیل مستقیم و تحلیل معکوس، ساختار عنصر نوری پراشی را برای رسیدن به توزیع شدت مطلوب در هر تکرار، بهبود می‌بخشند. روش گرشبرگ - ساکستون [۱۵]، الگوریتم تبدیل فوریه تکراری<sup>[۱۶]</sup> (IFTA)، روش پیشنهادشده توسط دی [۱۷] و روش طیف زاویه‌ای تکراری [۱۸] از جمله این روش‌ها هستند.

اکثر روش‌های تکراری ذکر شده امکان طراحی عنصر نوری پراشی یک‌بعدی را فراهم می‌کنند، حال آن که در برخی از کاربردها مانند ریزقطبی‌کننده‌ها، شکل‌دهنده‌های پرتو و جفت‌گرها نیاز به عنصر نوری پراشی دوبعدی وجود دارد. البته در مواردی که در توزیع مطلوب تقارن‌های خاصی مانند تقارن دایروی وجود دارد می‌توان ساختار دوبعدی را از طرح یک‌بعدی آن به‌دست آورد و نیازی به استفاده از روش طراحی دوبعدی نیست.

در بخش بعد روش طیف زاویه‌ای تکراری را به‌منظور طراحی ساختارهای دوبعدی تعمیم می‌دهیم. بخش سوم را به بررسی نمونه‌های طراحی شده با این روش اختصاص داده‌ایم. دقت روش را بر پایه طراحی

چکیده: روش طیف زاویه‌ای تکراری<sup>[۱]</sup> (IAS) برای طراحی عناصر نوری پراشی دریاچه - محدود یک‌بعدی<sup>[۲]</sup> (۱D - FADOE) توسط ملین و نوردین ارائه شده است. ما این روش را برای طراحی عناصر نوری پراشی دریاچه - محدود دوبعدی، گسترش داده و با استفاده از آن چند نمونه قطعه اپتیکی طراحی کرده‌ایم. نمونه اول یک منشعب‌کننده ۱ به ۷ است که یک پرتو تابشی را در مود اصلی، به هفت تار نوری تک مود با بازده پراش ۸۴ درصد جفت می‌کند. نمونه دوم یک تخت‌کننده پرتو گوسی لیزری با بازده پراش ۷۴/۸ درصد و نمونه سوم یک منشعب‌کننده پرتو ۱ به ۳ نامتقارن است. نمونه چهارم شامل سه ریزعدسی با فواصل کانونی مختلف است. الگوی مطلوب توزیع شدت برای این نمونه‌ها در میدان راه نزدیک قرار گرفته است. در ادامه دقت روش تعمیم‌یافته را با مقایسه نتایج با روش سه‌بعدی تفاضل محدود در حوزه زمان<sup>[۳]</sup> (۳D - FDTD) با شرایط مرزی جاذب PML<sup>[۴]</sup> بررسی کرده‌ایم. همچنین یک نمونه منشعب‌کننده ۱ به ۵ ساخته شده و نتایج آزمایش آن ارائه شده است.

کلید واژه: عنصر نوری پراشی دریاچه محدود، روش طیف زاویه‌ای تکراری، شکل‌دهنده پرتو، ۳D - FDTD.

## ۱- مقدمه

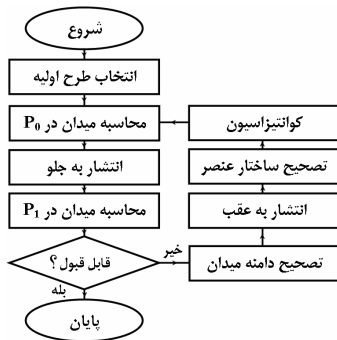
عناصر نوری پراشی دریاچه - محدود به‌خاطر این که می‌توانند در ابعاد بسیار کوچکی ساخته شوند، برای فن‌آوری اپتیک مجتمع بسیار مناسب هستند. این عناصر کاربردهای متنوعی از جمله در ریزقطبی‌کننده‌ها، جفت‌گرها، منشعب‌کننده‌ها و شکل‌دهنده‌های پرتو نوری دارند [۱] تا [۷]. روش‌های طراحی این عناصر به دو دسته یک‌طرفه و دوطرفه تقسیم می‌شود [۸]. روش‌های یک‌طرفه ترکیبی از روش‌های تحلیل عناصر نوری پراشی (DOE) و روش‌های بهینه‌سازی هستند. به‌عنوان نمونه‌هایی از روش‌های تحلیل می‌توان به روش اسکالری تقریب تنها فاز و روش‌های برداری مانند روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) [۹] و روش عنصر مرزی<sup>[۱۰]</sup> (BEM) اشاره کرد.

این مقاله در تاریخ ۲۶ تیر ماه ۱۳۸۷ دریافت و در تاریخ ۲۷ تیر ماه ۱۳۸۸ بازنگری شد.

سیدحسین کاظمی، گروه برق دانشکده مهندسی و مرکز پژوهشی مخابرات و کامپیوتر، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران (email: kazemi@ymail.com).  
میرمجتبی میرصالحی، گروه برق دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران (email: mirsalehi@um.ac.ir).  
امیررضا عطاری، گروه برق دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران (email: attari50@um.ac.ir).

1. Iterative Angular Spectrum
2. Finite Aperture Diffractive Optical Element
3. Finite Difference Time Domain
4. Perfect Matched Layer
5. Boundary Element Method

6. Phase Only Approximation
7. Simulated Annealing
8. Optimal Rotation Angle
9. Iterative Fourier Transform Algorithm



شکل ۲: روندنمای نرم‌افزار نوشته‌شده برای طراحی عنصر نوری پراشی.

با استفاده از تبدیل فوریه سریع FFT،  $U$  را می‌توان محاسبه نمود. با فرض یک دریچه مربعی  $L_x = L_y = L$ ، فاصله میان دو نقطه مجاور در حوزه فرکانس فضایی برابر  $\delta f = \delta f_x = \delta f_y = 1/L$  است که برای بهبود تفکیک‌پذیری در این حوزه ما FFT را بر روی سطحی بزرگ‌تر از سطح دریچه ورودی محاسبه نموده‌ایم. این کار مخصوصاً وقتی که منحنی توزیع شدت مطلوب در صفحه مشاهده مساحت بیشتری از مساحت دریچه دارد مفید است.

توزیع میدان در صفحه مشاهده،  $u_1$ ، را می‌توان از (۴) محاسبه کرد

$$u_1(x, y) = \iint U \exp[jk_z z_{obs} \sqrt{1 - (\lambda_v f_x)^2 - (\lambda_v f_y)^2}] \times \exp[jz\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y \quad (4)$$

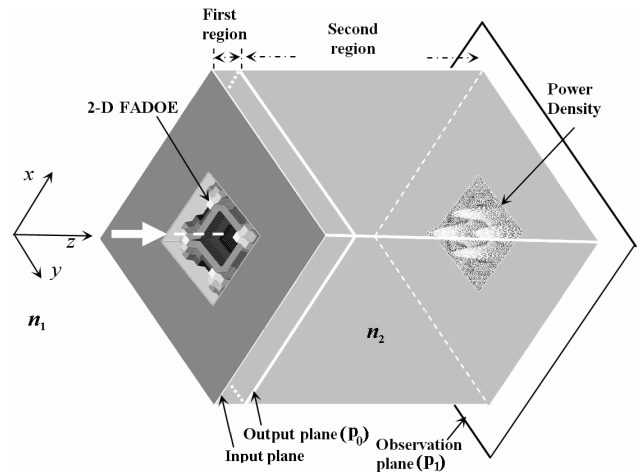
که  $k_v = n_v k$  و  $\lambda_v = \lambda / n_v$  به ترتیب عدد موج و طول موج در ناحیه طیف زاویه‌ای هستند. با بهره‌گیری از عکس تبدیل فوریه سریع (IFFT)،  $u_1$  می‌تواند به صورت  $u_1 = \text{IFFT}(HU)$  محاسبه شود که در آن

$$H(f_x, f_y) = \exp[jk_v z_{obs} \sqrt{1 - (\lambda_v f_x)^2 - (\lambda_v f_y)^2}] \quad (5)$$

تابع تبدیل طیف زاویه‌ای است.

با توجه به تبدیل فوریه سریع، حداکثر فرکانس فضایی ( $f_x$  یا  $f_y$ ) برابر  $f_{max} = 1/2\delta$  است که  $\delta$  فاصله نقاط مجاور در حوزه مکان است. برای در نظر گرفتن همه امواج انتشاری با توجه به (۵)، شرط  $f_{max} > 1/\lambda_v$  ایجاد می‌کند که فاصله نقاط مجاور،  $\delta$ ، کوچک‌تر از  $\lambda_v/2$  انتخاب شود. اگر توزیع شدت در صفحه مشاهده خصوصیات مورد قبول را داشته باشد، عنصر به‌دست آمده به‌عنوان عنصر مطلوب استفاده می‌شود و فرآیند طراحی پایان می‌یابد. در غیر این صورت دامنه (و نه فاز) میدان در صفحه مشاهده به‌گونه‌ای تصحیح می‌شود که اختلاف آن با دامنه مطلوب کمتر شود و این میدان بهبودیافته برای یافتن توزیع میدان در صفحه خروجی عنصر به طرف عقب منتشر می‌شود. تابع تبدیل در فرایند انتشار به عقب با قرینه کردن  $k_v$  در (۵) حاصل می‌شود. با توجه به فاز میدان برگشتی، ساختار عنصر برای نزدیک‌شدن به توزیع میدان جدید تصحیح می‌شود. در ادامه عنصر بهبودیافته چندی (کوآنتیزه) شده و برای تکرار فرآیند فوق استفاده می‌شود. ما بر اساس روش فوق، نرم‌افزاری برای طراحی عناصر نوری پراشی به زبان Matlab نوشتیم و با استفاده از آن چند نمونه که در بخش بعد شرح داده می‌شود را طراحی کرده‌ایم.

هرچند با توجه به روند فوق به نظر می‌رسد طراح در انتخاب منحنی شدت نور مطلوب آزاد است، ولی از آنجا که فرکانس‌های مکانی تابع تبدیل در (۵) به  $1/\lambda_v$  محدود هستند، فرکانس‌های مکانی بالاتر از این مقدار در منحنی شدت مطلوب نظر گرفته نخواهند شد. به‌عبارت دیگر تابع تبدیل در اینجا مانند یک فیلتر پایین‌گذر عمل می‌کند و تغییرات سریع شدت نور در صفحه مشاهده را فیلتر می‌کند.



شکل ۱: هندسه عنصر نوری پراشی دریچه-محدود دوبعدی به همراه دو ناحیه استفاده‌شده در روش طیف زاویه‌ای تکراری.

چند نمونه در بخش چهارم بررسی کرده‌ایم. در بخش پنجم ساخت و آزمایش یک نمونه توضیح داده شده است و سرانجام در بخش ششم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پرداخته‌ایم.

## ۲- روش طیف زاویه‌ای تکراری تعمیم‌یافته

هندسه یک عنصر نوری پراشی دریچه-محدود دوبعدی در شکل ۱ نشان داده شده است. صفحه ورودی که شامل دریچه است در جلوی این عنصر و صفحه مشاهده در  $z = z_{obs}$  قرار دارد. فرض بر این است که یک موج مسطح که در جهت محور  $z$  منتشر می‌شود در صفحه ورودی با عنصر نوری پراشی مواجه شده و با تأثیرپذیری از آن در صفحه مشاهده الگوی مطلوبی را ایجاد می‌کند. فضای بین صفحه ورودی و صفحه مشاهده به دو ناحیه تقسیم شده است، ناحیه عنصر نوری پراشی و ناحیه طیف زاویه‌ای. ناحیه عنصر نوری پراشی از صفحه ورودی تا صفحه خروجی ( $P$ ) گسترده شده و ضخامت آن برابر با حداکثر عمق خوردگی ( $d_{max}$ ) است. ناحیه طیف زاویه‌ای نیز از صفحه خروجی  $P$  در  $z = 0$  تا صفحه مشاهده ( $P_1$ ) را شامل می‌شود. ضریب شکست ماده دی‌الکتریک  $n_v$  است و موج تابشی از محیط فضای آزاد ( $n_1 = 1$ ) به عنصر تابیده می‌شود. تابع انتقال عنصر با توجه به تقریب تنها فاز به صورت

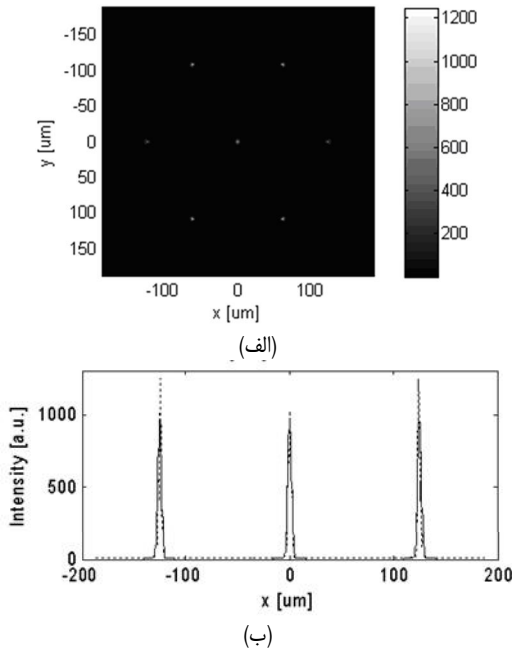
$$t(x, y) = \tau \exp[j\phi(x, y)] \prod \left( \frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y} \right) \quad (1)$$

تعریف می‌شود که  $\tau = 2n_v / (n_1 + n_v)$  ضریب عبور دامنه فرنل و تابع  $\prod(x/L_x, y/L_y)$  برای نقاط درون دریچه مستطیلی به ابعاد  $L_x \times L_y$  برابر یک و برای نقاط خارج صفر است. تابع فاز به صورت (۲) است

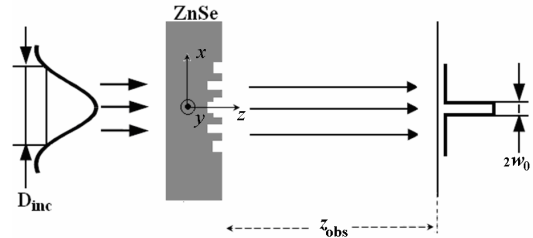
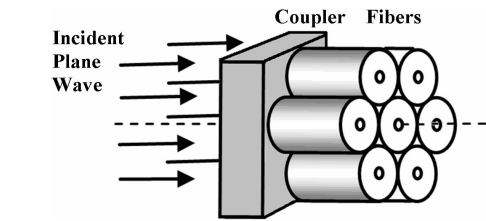
$$\phi(x, y) = k \Delta n d(x, y) \quad (2)$$

که  $\Delta n$  اختلاف میان دو ضریب شکست،  $k = 2\pi/\lambda$ ،  $\lambda$  طول موج در فضای آزاد و  $d(x, y)$  عمق خوردگی است. ما جهت انتشار موج مسطح تابشی  $u_{inc}$  را به‌طور عمود نسبت به دریچه در نظر گرفته‌ایم. آن‌طور که روندنمای شکل ۲ نشان می‌دهد، پس از انتخاب طرح اولیه برای عنصر نوری پراشی، موج در صفحه خروجی در ناحیه اول به‌صورت  $u = t(x, y) u_{inc}$  محاسبه می‌شود. طیف زاویه‌ای  $u$  که آن را با  $U$  نمایش می‌دهیم به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۱]

$$U(f_x, f_y) = \iint_P u(x, y) \exp[-jz\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (3)$$



شکل ۳: آرایش جفت‌گر نوری.



شکل ۵: آرایش شکل‌دهنده پرتو.

### ۳- طراحی چند نمونه عنصر نوری پراشی

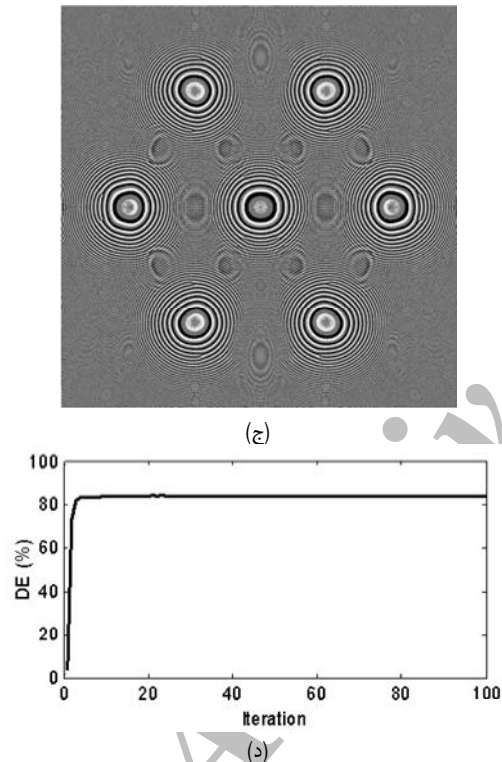
#### ۱-۳ جفت‌گر نوری مخابراتی

یک نمونه جفت‌گر نوری مخابراتی ( $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ ) از جنس سیلیکا با ضریب شکست ۱,۴۴ را می‌خواهیم به‌گونه‌ای طراحی کنیم که توان یک پرتو تخت را به هفت تار نوری که در کنار هم قرار گرفته‌اند، به‌طور مساوی منتقل نماید. تارهای نوری از نوع تک‌مود با قطر پوسته ۱۲۵ میکرون و قطر هسته ۱۰ میکرون هستند. توزیع مطلوب هر یک از هفت پرتو جفت‌شونده به‌گونه‌ای انتخاب شده است که مود اصلی تار نوری را تحریک نماید. صفحه مشاهده در فاصله  $z_{obs} = 68\lambda$  قرار دارد. قبلاً نمونه‌ای مشابه با استفاده از روش تبدیل فوریه تکراری (IFTA) توسط تامسون [۶] در محدوده میدان راه دور طراحی شده است. در این روش طراحی، ضخامت جفت‌گر یا فاصله تارهای نوری از عنصر نوری پراشی، بایستی آن قدر بزرگ انتخاب شود که تقریب راه دور قابل قبول باشد و این امر باعث بزرگی ضخامت قطعه می‌شود. در طراحی بر مبنای روش طیف زاویه‌ای تکراری که قابلیت طراحی در میدان راه نزدیک را دارد، امکان دسترسی به قطعات کوچک‌تر که برای فناوری مدارهای مجتمع اپتیکی مناسب‌ترند، امکان‌پذیر است. شکل ۳ آرایش جفت‌گر را که پرتو یکنواخت تابشی را به هفت تار نوری جفت می‌کند، نشان می‌دهد. شکل‌های ۴- الف و ۴- ب به‌ترتیب توزیع توان در ورودی تارها و برشی از آن را نمایش می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۴- ب مشاهده می‌شود انطباق خوبی بین منحنی توزیع مطلوب و توزیع به‌دست آمده وجود دارد. شکل ۴- ج عنصر نوری پراشی را که حداکثر عمق خوردگی در آن  $3,5 \mu\text{m}$  است و به چهار سطح کوانتیزه شده است، نشان می‌دهد.

در شکل ۴- د روند تغییر بازده پراش با افزایش شماره تکرارها و نحوه نزدیک شدن آن به مقدار نهایی ۸۴٪ نشان داده شده است. بازده پراش را برابر نسبت توان موجود در پنجره مطلوب ( $W$ ) به کل توان در صفحه مشاهده ( $All$ ) تعریف کرده و به‌صورت (۶) محاسبه می‌کنیم

$$DE = \frac{\iint W I(x, y) dx dy}{\iint All I(x, y) dx dy} \quad (6)$$

که در آن  $I$  توزیع شدت محاسبه‌شده در صفحه مشاهده می‌باشد. در این نمونه پنجره  $W$  منطبق بر سطح هسته تارها است و انتگرال مخرج روی



شکل ۴: (الف) توزیع توان در ورودی تارها، (ب) برش مرکزی در راستای  $y = 0$  برای توزیع مطلوب (خط پر) و توزیع به‌دست آمده (خط چین)، (ج) عنصر نوری پراشی که در این شکل رنگ‌های تیره و روشن به‌ترتیب متناظر با عمق خوردگی بیشتر و کمتر هستند و (د) روند تغییرات بازده پراش.

تمام صفحه مشاهده محاسبه شده است. طراحی این عنصر نوری پراشی به‌وسیله رایانه‌ای با سرعت پردازشگر ۲,۲۱ GHz در محیط MATLAB در حدود ۱۳,۸ ساعت طول کشید. در این طراحی  $\delta = 0,268 \mu\text{m}$  و تابع تبدیل طیف زاویه‌ای ( $H$ ) به‌صورت ماتریسی با عناصر مختلط و به ابعاد  $7000 \times 7000$  در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۳ شکل‌دهنده پرتوی لیزری

شکل ۵ آرایش یک شکل‌دهنده لیزری را نشان می‌دهد. پرتو تابشی گوسی، نور یک منبع لیزر  $\text{CO}_2$  با طول موج ۱۰,۶ میکرون و با توان ۱۰ وات است که قطر آن در سطح  $1/e^2$  برابر شدت ماکزیمم،

$D_{inc} = 10\text{ mm}$  در نظر گرفته شده است. شدت مطلوب به صورت (۷) فرض شده است

$$I_t = \exp\left[-\left(\frac{x}{w}\right)^2 - \left(\frac{y}{w}\right)^2\right] \quad (7)$$

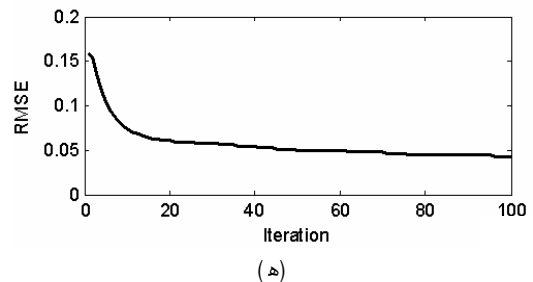
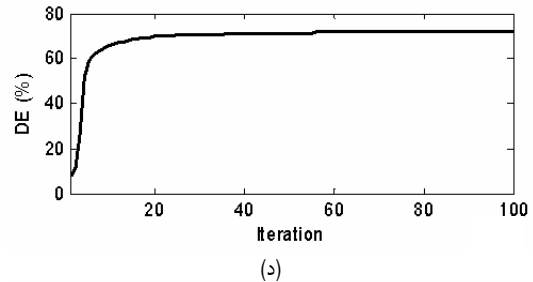
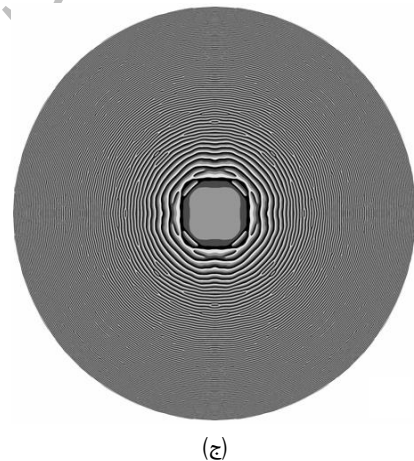
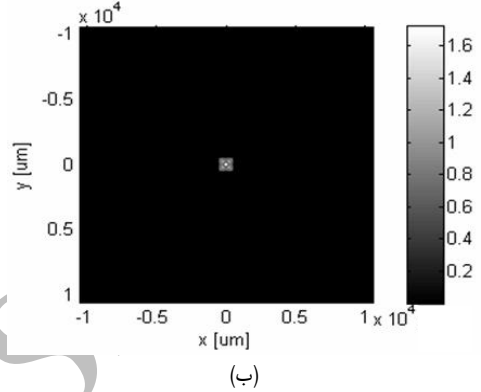
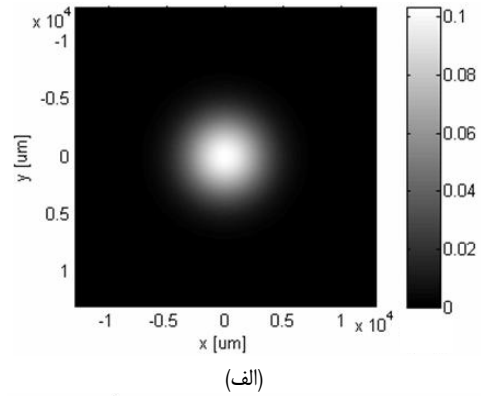
که در آن  $w = 1\text{ mm}$  است. شکل دهنده قرار است در یک دیسک سلناید روی (ZnSe) به ضخامت  $1\text{ mm}$  و شعاع  $13\text{ mm}$  با ضریب شکست  $n_r = 2.4$  (که به صورت تجاری در دسترس است) و سطوح آن با لایه‌ای از ضد بازتاب پوشانده شده، طراحی شود. ناحیه طیف زاویه‌ای در این نمونه، فضای آزاد ( $n_1 = 1$ ) در نظر گرفته شده است. از (۳)، (۴) و (۵) با تعویض  $k_r$  با  $k$ ،  $\lambda_r$  با  $\lambda$ ، برای طراحی این نمونه استفاده شده است. انتخاب سلناید روی در اینجا به خاطر آستانه توان بالا و محدوده طیف عبوری مناسب آن است. صفحه کانونی در فاصله  $z_{obs} = 6.35\text{ cm}$  از دیسک قرار گرفته است. شکل‌های ۶-۶ و ۶-۶ به ترتیب توزیع شدت پرتوی ورودی و شدت نور در صفحه مشاهده، شکل ۶-۶ ج شکل دهنده پرتو طراحی شده با حداکثر عمق خوردگی  $7.57\text{ }\mu\text{m}$  میکرون و کوانتیزه شده در چهار سطح، شکل ۶-۶ د روند تغییرات بازده پراش با مقدار نهایی  $74.8\%$  و شکل ۶-۶ ه روند تغییرات جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) را نشان می‌دهند. جذر میانگین مربعات خطا به صورت (۸) تعریف شده است

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{S_w} \iint [I(x, y) - I_t(x, y)]^2 dx dy} \quad (8)$$

که  $I_t$  توزیع شدت مطلوب و  $S_w$  مساحت پنجره است. مقدار نهایی RMSE در شکل ۵-۵ ه برابر  $0.044$  است. پنجره  $W$  در این رابطه دایره‌ای به شعاع  $w$  در صفحه مشاهده و به مرکز مبدأ مختصات است. نمایش روند تغییرات بازده پراش و RMSE در کنار هم برای این نمونه، به ترتیب نسبت توان موجود در پنجره و مقدار شباهت شکل توزیع شدت محاسبه شده را به شکل مطلوب نشان می‌دهند. این عنصر با تنظیم پهنای توزیع مطلوب در کاربردهایی مانند نگاشت مستقیم موجر در سیلیکون و سوراخ کاری فیبرهای مدار چاپی کاربرد دارد. پرتوی خروجی لیزر اغلب قطری در حد چند میلی‌متر دارد که چند هزار برابر طول موج نور است. بنابراین این عناصر در مقایسه با طول موج نور، قطعات بزرگی هستند. به علت بزرگی ابعاد زمان طراحی این عنصر نوری پراشی با پردازشگر مورد اشاره در بخش قبل، حدود  $31$  ساعت طول کشید. در این طراحی  $\delta = 5.3\text{ }\mu\text{m}$  و تابع تبدیل طیف زاویه‌ای ( $H$ ) به صورت ماتریسی با عناصر مختلط و به ابعاد  $8000 \times 8000$  در نظر گرفته شده است. در طراحی‌های انجام شده توسط جابور [۵] این مورد در نظر گرفته نشده و قطر پرتوی لیزر کوچک و تنها چند برابر طول موج فرض شده است.

### ۳-۳ منشعب کننده با توزیع دلخواه

برای نشان دادن توانایی روش تعمیم یافته، یک نمونه پرتو شکاف ۱ به ۳، با آرایشی شبیه شکل ۱ ولی با پرتوهایی با توان نابرابر طراحی کرده‌ایم. نقاط تمرکز پرتوها در رئوس یک مثلث قائم‌الزاویه متساوی‌الساقین با طول وتر  $7.07\lambda$  قرار گرفته‌اند و صفحه مشاهده در فاصله  $z_{obs} = 10.0\lambda$  قرار دارد. این سه پرتو بایستی در حالت مطلوب به گونه‌ای باشند که نسبت توان موجود در پرتو با کمترین توان، به دو پرتو دیگر دو سوم ( $67\%$ ) و



شکل ۶: (الف) توزیع توان پرتوی تابشی، (ب) توزیع توان روی صفحه کانونی، (ج) عنصر نوری پراشی، در این شکل رنگ‌های تیره و روشن به ترتیب متناظر با عمق خوردگی بیشتر و کمتر هستند، (د) روند افزایش بازده پراش و (ه) روند کاهش خطای جذر میانگین مربعات.

جدول ۱: بازده پراش ریزعدسی‌های طراحی شده با روش IAS.

فاصله کانونی	DE (%)	
	تحلیل با IAS	تحلیل با FDTD
۲λ	۴۲	۴
۱۰λ	۷۷	۳۹
۸۰λ	۸۰	۷۲

### ۳-۴ ریزعدسی

ریزعدسی یک عنصر نوری پراشی برای متمرکز کردن پرتو تابشی یکنواخت در یک نقطه به نام کانون در صفحه کانونی (صفحه مشاهده) است. برخی از عناصر نوری مانند منشعب‌کننده‌ها را می‌توان به‌طور ساده و تقریبی، با کنار هم قراردادن ساختار چند ریزعدسی طراحی نمود. البته این امر زمانی قابل انجام است که کانون هر انشعاب به اندازه کافی از کانون انشعاب دیگر دور باشد. در اینجا سه ریزعدسی با فواصل کانونی متفاوت طراحی کرده‌ایم که این فواصل به ترتیب ۲λ، ۱۰λ و ۸۰λ است. ریزعدسی‌ها در یک دریچه مربعی شکل به ابعاد ۱۰λ × ۱۰λ محدود شده‌اند.  $\lambda = 5 \mu\text{m}$ ،  $n_r = 3.4$ ، گام عمق خوردگی  $\delta = 0.2 \mu\text{m}$  و ماکزیم عمق خوردگی  $d_{\text{max}} = 2 \mu\text{m}$  در نظر گرفته شده است. شکل ۸ در قسمت‌های الف تا ج، برش‌های عرضی توزیع شدت را در صفحه کانونی در کنار شکل ریزعدسی نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش فاصله کانونی از میزان پراش در فاز ریزعدسی کاسته شده و منحنی توزیع به‌دست آمده از روش طیف زاویه‌ای تکراری به توزیع واقعی که با استفاده از روش FDTD به‌دست آمده، نزدیک‌تر می‌شود.

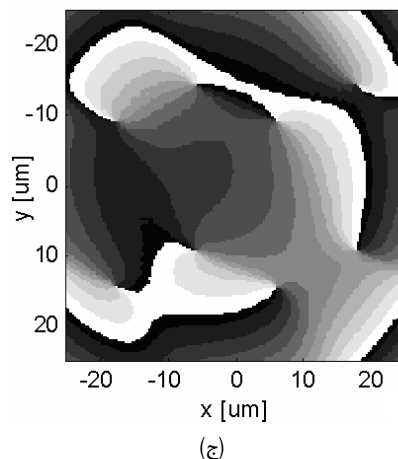
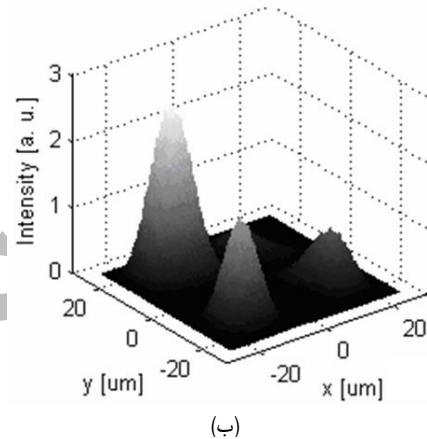
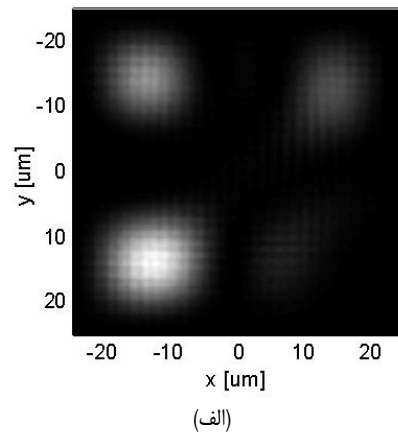
برای محاسبه بازده پراش، سطح پنجره  $W$  در (۶) منطبق بر سطح لوب (کلبرگ) اصلی انتخاب شده است. در جدول ۱ بازده پراش حاصل از روش طراحی (مبتنی بر تقریب تنها فاز) را با بازده به‌دست آمده از روش تحلیل FDTD مقایسه نموده‌ایم. نتیجه‌گیری در مورد این مقایسه در بخش بعد ارائه خواهد شد.

### ۴- بررسی دقت در طراحی

هرچند از بررسی دقت در مورد چند نمونه طراحی شده نمی‌توان نتیجه‌ای کلی گرفت، اما از آنجا که عامل کاهش دقت عموماً افزایش تعداد پراش‌های فاز (به‌خاطر عبور از ۳۶۰ درجه) در سطح عنصر نوری پراشی است، بررسی دقت روش را برای دسته‌ای از ریزعدسی‌ها و منشعب‌کننده‌های ۱ به ۳ نامتقارن با مشخصات ارائه شده به ترتیب در بخش‌های ۳-۳ و ۳-۴ انجام داده‌ایم.

میدان راه دور برای این نمونه‌ها در فاصله بیش از  $40\lambda = 2D^2/\lambda$  است که  $D$  قطر دریچه است. فاصله کانونی ریزعدسی‌ها در محدوده میدان راه نزدیک و از ۲λ تا ۳۰λ و فاصله صفحه مشاهده برای منشعب‌کننده‌ها از ۳۰λ تا ۱۲۰λ انتخاب شده است. پس از طراحی نمونه‌ها، به‌منظور بررسی دقت از روش FDTD برای تحلیل ساختار و محاسبه میدان‌ها در صفحه خروجی ریزعدسی و از روش طیف زاویه‌ای برای انتشار موج از صفحه خروجی تا صفحه کانونی و محاسبه توزیع میدان‌ها در این صفحه استفاده کرده‌ایم.

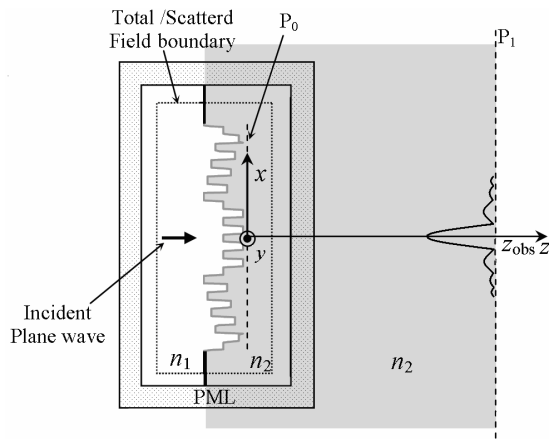
ناحیه محاسباتی FDTD شامل عنصر نوری پراشی است و در شکل ۹ برش طولی آن نشان داده شده است. در این شکل به‌منظور اعمال یک موج به ساختار، دو ناحیه میدان کل و میدان پراکندگی تعریف شده است. برای ایجاد شرط مرزی جاذب نیز از روش لایه منطبق کامل غیر



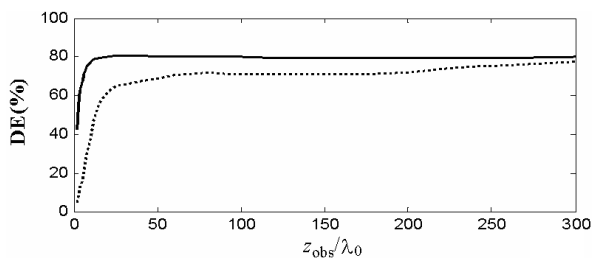
شکل ۷: (الف) توزیع توان روی صفحه مشاهده، (ب) نمایش سه‌بعدی توزیع توان در صفحه مشاهده و (ج) عنصر نوری پراشی (نقاط تیره نشان‌دهنده عمق بیشتر است).

دو پنجم (۴۰٪) باشد. عنصر نوری پراشی در یک دریچه مربعی شکل به ابعاد  $10\lambda \times 10\lambda$  محدود شده است و طراحی با فرض  $\lambda = 5 \mu\text{m}$ ،  $n_r = 3.4$  (سیلیکون)، گام عمق خوردگی  $\delta = 0.2 \mu\text{m}$  و ماکزیم عمق خوردگی  $d_{\text{max}} = 2 \mu\text{m}$  انجام شده است. پس از طراحی ساختار نسبت‌های یادشده با استفاده از روش FDTD، که در بخش چهارم به بررسی دقیق‌تر آن خواهیم پرداخت، محاسبه شده و به ترتیب مقادیر ۶۵/۵٪ و ۳۶/۴٪ به‌دست آمده است. شکل‌های ۷-الف و ۷-ب توزیع شدت به‌دست آمده از روش FDTD و شکل ۷-ج عنصر طراحی شده را نشان می‌دهد. زمان لازم برای طراحی این عنصر نوری پراشی به‌دلیل کوچکی آن در حد ۳ دقیقه و زمان تحلیل نتایج به‌وسیله روش FDTD حدود ۳۰ دقیقه است. در این طراحی تابع تبدیل طیف زاویه‌ای ( $H$ ) به‌صورت ماتریسی با عناصر مختلط و به ابعاد  $2500 \times 2500$  تعریف شده است.

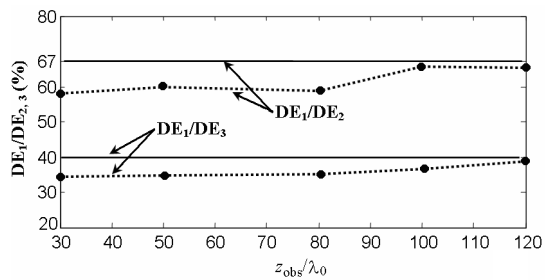




شکل ۹: برش طولی از ناحیه محاسباتی FDTD و ناحیه انتشار.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰: (الف) تغییرات بازده پراش محاسبه شده با روش تعمیم یافته (خط پر) و روش FDTD (خط چین) با فاصله کانونی (یا فاصله صفحه مشاهده) برای ریزعدسی‌ها و (ب) نسبت بازده پراش پرتوی ۱ به پرتوی ۲ و پرتوی ۳ محاسبه شده با روش تعمیم یافته (خط پر) و روش FDTD (خط چین)، برای منشعب کننده‌های (ب) به ۳ بر حسب فاصله صفحه مشاهده.

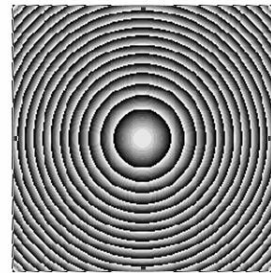
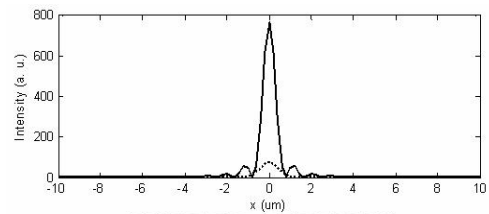
انتخاب گردید. میدان تابشی یک موج مسطح یکنواخت با قطبش خطی در جهت  $x$  به صورت (۹) در نظر گرفته شده است

$$E_{xinc} = \exp\left\{\frac{-(t-t_d)^2}{\tau w^2}\right\} \quad (9)$$

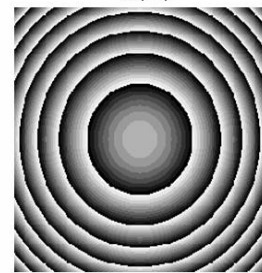
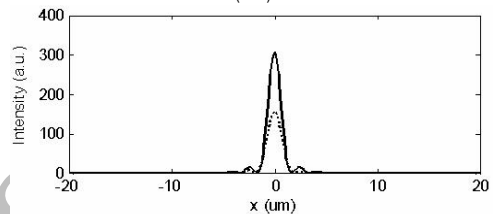
که در آن  $w_t = \delta_t$  و  $t_d = 4\delta_t$  به ترتیب زمان تأخیر و پهنای پالس هستند. با بهره‌گیری از FDTD توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ( $H$  و  $E$ ) تا  $200\delta_t$  در صفحه خروجی  $P$  به دست آمده و سپس تبدیل فوریه میدان‌ها در این صفحه محاسبه می‌شود. در مرحله بعد با بهره‌گیری از روش طیف زاویه‌ای، برای هر کدام از مؤلفه‌های میدان به‌طور مجزا، توزیع میدان در صفحه کانونی  $P_1$  به دست می‌آید. توزیع شدت در صفحه کانونی با استفاده از (۱۰) محاسبه می‌شود

$$I(x, y) = \frac{1}{\eta} \text{Real}\{E \times H^*\} \cdot \hat{a}_z \quad (10)$$

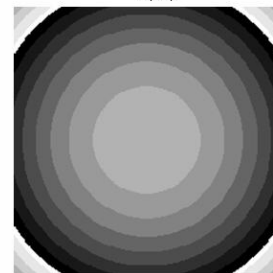
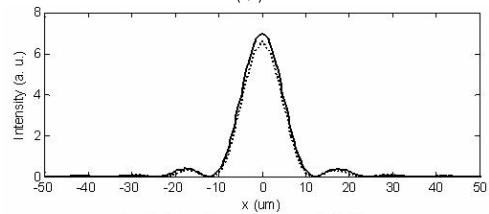
شکل ۱۰-الف امکان مقایسه مقادیر بازده پراش ریزعدسی‌ها و شکل ۱۰-ب امکان مقایسه نسبت بازده پراش‌ها را فراهم می‌نماید. این شکل‌ها



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸: مقاطع عرضی توزیع شدت در صفحه کانونی (شکل بالا) و ریزعدسی‌های طراحی شده (شکل پایین) با فواصل کانونی (الف)  $2\lambda$ ، (ب)  $10\lambda$  و (ج)  $80\lambda$  (منحنی‌های خط پر شدت به دست آمده از روش تعمیم یافته IAS و منحنی‌های خط چین شدت محاسبه شده از روش FDTD را نشان می‌دهند).

تفکیک شده<sup>۱</sup> بهره برده ایم [۱۹] و [۲۰]. اندازه مش در FDTD برای سه بعد مساوی و برابر  $\delta_x = \delta_y = \delta_z = \delta$  انتخاب شده است. گام زمان نیز برابر  $\delta_t = \delta/2c$  انتخاب شده است که  $c$  سرعت نور در فضای آزاد است. عمق ناحیه پراکندگی و لایه PML مساوی و هر کدام برابر  $7\delta$

1. Unsplit Step Perfect Matched Layer



شکل ۱۲: توزیع شدت نور در صفحه مشاهده.

طول موج در طراحی برابر  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  انتخاب گردید تا امکان آزمایش با لیزر هلیوم-نئون فراهم باشد. در این طول موج الگوی شدت در صفحه مشاهده به آسانی قابل مشاهده است و بازده پراش با بهره‌گیری از توان سنج نوری قابل اندازه‌گیری است. بازده پراش در شبیه‌سازی ۸۹٪ و در آزمایش ۸۷٫۸٪ به دست آمد که ۱٫۳٪ خطا را نشان می‌دهد. شکل ۱۲ تصویر شدت نور را در صفحه مشاهده نشان می‌دهد.

## ۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

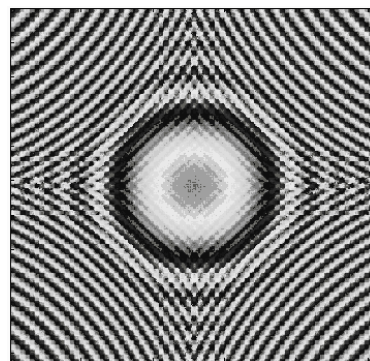
با توسعه روش طیف زاویه‌ای و روش تقریب تنها فاز و ترکیب آنها به صورت یک روش طراحی تکراری، روش طیف زاویه‌ای تکراری را برای طراحی عناصر دریچه- محدود دوبعدی تعمیم داده و آن را برای طراحی چندین نمونه عنصر دوبعدی استفاده کردیم. توانایی این روش با طراحی عناصر متنوع شامل منشعب‌کننده متقارن (جفت‌گر) و نامتقارن، شکل‌دهنده پرتو و ریزعدسی به اثبات رسید. طراحی کلیه این عناصر در میدان راه نزدیک انجام شد تا مزیت روش پیشنهادی بر روش‌هایی مانند IFTA و روش گرشبرگ - ساکستون که این توانایی را ندارند، مشخص شود. در بررسی دقت روش نیز مشاهده شد که برای نمونه‌هایی با مشخصات یادشده در متن، در فاصله کمتر از ۸۰  $\mu\text{m}$ ، افزایش پراش‌های فاز در سطح عنصر باعث کاهش دقت می‌شود. هنگامی که صفحه مشاهده (کانونی) در فاصله‌ای بیش از مقدار یادشده قرار داشته باشد، دقت طراحی در حد قابل قبول خواهد بود و این دقت با افزایش فاصله بهبود می‌یابد.

## سپاس‌گزاری

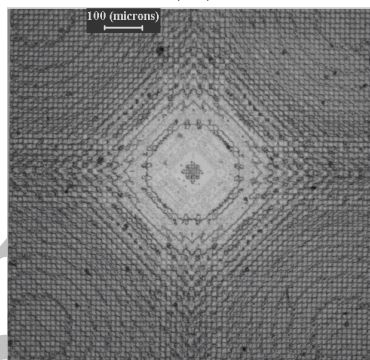
از آقای دکتر تقی‌زاده و گروه پژوهشی ایشان در دانشگاه هریوت-وات به‌خاطر ساخت نمونه منشعب‌کننده ۱ به ۵ سپاسگزاریم. همچنین از مرکز تحقیقات مخابرات ایران به‌خاطر حمایت مالی این پروژه قدردانی می‌کنیم.

## مراجع

- [1] G. Nordin, J. Meier, P. Deguzman, and M. Jones, "Micropolarizer array for infrared imaging polarimetry," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 16, no. 5, pp. 1168-1174, 1 May 1999.
- [2] G. P. Nordin, J. T. Meier, P. C. Deguzman, and M. W. Jones, "Diffractive optical element for stokes vector measurement with a focal plane array," in *Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing II*, Dennis H. Goldstein, David B. Chenault, Editors, *Proc. of SPIE*, vol. 3754, pp. 169-177, 1999.
- [3] D. W. Prather, "Design and application of subwavelength diffractive lenses for integration with infrared photodetectors," *Opt. Eng.*, vol. 38, no. 5, pp. 870-878, 1 May 1999.
- [4] M. Karlsson and F. Nikolajeff, "Fabrication and evaluation of a diamond diffractive fan-out element for high power lasers," *Optics Express*, vol. 11, no. 3, pp. 191-198, 10 Feb. 2003.
- [5] T. G. Jabbour and S. M. Kuebler, "Vectorial beam shaping," *Optics Express*, vol. 16, no. 10, pp. 7203-7213, 12 May 2008.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱: (الف) منشعب‌کننده طراحی شده و (ب) منشعب‌کننده ساخته‌شده.

نشان می‌دهند به‌جز در فاصله کمتر از ۸۰  $\mu\text{m}$  که خطای نسبی آن بیش از ۱۰٪ است در سایر فواصل دقت در حد قابل قبولی است. با یادآوری این نکته که میدان راه دور برای ریزعدسی مورد بررسی در فاصله بیش از ۴۰۰  $\mu\text{m}$  قرار دارد، دستیابی به دقت قابل قبول در فاصله بزرگ‌تر از ۸۰  $\mu\text{m}$  به معنی کارایی روش در میدان راه نزدیک است.

## ۵- ساخت و آزمایش یک نمونه منشعب‌کننده

هرچند استفاده از الگوریتم FDTD برای محاسبه دقت در ساختارهایی با ابعاد کوچک نسبت به طول موج معمول است اما برای ساختارهای بزرگ مانند نمونه‌های طراحی‌شده در بخش‌های ۱-۳ و ۲-۳ که نیاز به حافظه و زمان بالایی دارند، قابل استفاده نیست. در این گونه موارد ساخت قطعه و آزمایش آن دقت را مشخص می‌نماید. بدین منظور ما یک نمونه منشعب‌کننده ۱ به ۵ برای ساخت با تکنیک خوردگی یون غیر فعال<sup>۱</sup> و به‌وسیله ماسک‌های چندگانه طراحی نمودیم. صفحه مشاهده در فاصله ۵ cm و نقاط تمرکز انشعاب‌ها در مرکز و گوشه‌های مربعی به ضلع ۲ mm انتخاب شده است. به‌علت بزرگ‌بودن قطر عنصر، فاصله ۵ cm در محدوده میدان نزدیک قرار دارد. در این طراحی محدودیت‌های ساخت و آزمایش قطعه را در نظر گرفته‌ایم. برای ساخت، ابعاد کوچک‌ترین جزء در سطح عنصر نبایستی از  $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$  کوچک‌تر باشد. همچنین کوانتیزاسیون عمق خوردگی بایستی توانی از دو باشد، که در اینجا ۱۶ سطح را انتخاب نمودیم. نوع ماده سیلیکا با ضریب شکست ۱٫۴۵۷ از پیش انتخاب شده است. ساخت این قطعه با استفاده از فرایند توضیح داده شده در [۲۱] در دانشگاه هریوت-وات<sup>۲</sup> انگلستان صورت گرفته است. شکل ۱۱ - الف نمونه طراحی شده و ۱۱ - ب نمونه ساخته‌شده را نشان می‌دهد.

1. Reactive Ion Etching
2. Heriot-Watt University

- [20] D. M. Sullivan, *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method*, IEEE Press Series on RF and Microwave Technology, 2000.
- [21] A. J. Clay, M. Braun, A. J. Waddie, and M. R. Taghizadeh, "Analysis of multimask fabrication errors for diffractive optical elements," *Applied Optics*, vol. 46, no. 12, pp. 2180-2188, 20 Apr. 2007.
- سیدحسین کاظمی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی الکترونیک از دانشگاه یزد و کارشناسی ارشد مخابرات از دانشگاه فردوسی مشهد به ترتیب در سالهای ۱۳۷۶ و ۱۳۷۹ و در مقطع دکتری مخابرات در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه فردوسی مشهد پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار موسسه آموزش عالی خراسان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی و ساخت عناصر نوری پراشی، روشهای عددی در الکترومغناطیس، فیلتر و فیبر نوری.
- میرمجتبی میرصالحی** در سال ۱۳۵۳ مدرک کارشناسی مهندسی برق را از دانشگاه صنعتی شریف دریافت کرد و پس از سه سال کار در آموزشگاه فنی الکترونیک شیراز و مرکز پژوهشهای خواص و کاربرد مواد و نیرو، برای ادامه تحصیل به آمریکا رفت. او در سال ۱۳۵۸ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق را از انستیتو تکنولوژی فلوریدا و در سال ۱۳۶۳ مدرک دکترای مهندسی برق را از انستیتو تکنولوژی جورجیا دریافت کرد. دکتر میرصالحی از ۱۳۶۳ تا ۱۳۶۹ به عنوان استادیار در انستیتو تکنولوژی جورجیا و دانشگاه آلاباما در هانتسویل مشغول تدریس و تحقیق بود. او در سال ۱۳۶۹ به دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد پیوست و در حال حاضر استاد گروه برق آن دانشکده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه وی مخابرات نوری، قطعات غیرفعال نوری و شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد.
- امیررضا عطاری** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مخابرات به ترتیب در سال های ۱۳۷۲ و ۱۳۷۵ به پایان رسانده و در سال ۱۳۸۱ مدرک دکترای خود را در گرایش مخابرات میدان به صورت مشترک از دانشگاه صنعتی شریف و دانشگاه UIF فرانسه دریافت نموده است. ایشان در حال حاضر دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد می باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: روش‌های عددی در الکترومغناطیس، آنتن و مخابرات نوری.
- [6] M. J. Thomson, J. Liu, and M. R. Taghizadeh, "Iterative algorithm for the design of free-space diffractive optical elements for fiber coupling," *Applied Optics*, vol. 43, no. 10, pp. 1996-1999, 1 Apr. 2004.
- [7] J. Caley, M. J. Thomson, J. Liu, A. J. Waddie, and M. R. Taghizadeh, "Diffractive optical elements for high gain lasers with arbitrary output beam profiles," *Optics Express*, vol. 15, no. 17, pp. 10699-10704, 20 Aug. 2007.
- [8] J. Jiang and G. P. Nordin, "A rigorous unidirectional method for designing finite aperture diffractive optical elements," *Optics Express*, vol. 7, no. 6, pp. 237-242, 11 Sep. 2000.
- [9] D. W. Prather, M. S. Mirotznik, and J. N. Mait, "Boundary integral methods applied to the analysis of diffractive optical elements," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 14, no. 1, pp. 34-43, 1 Jan. 1997.
- [10] D. W. Prather, J. N. Mait, M. S. Mirotznik, and J. P. Collins, "Vector-based synthesis of finite aperiodic subwavelength diffractive optical elements," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 15, no. 6, pp. 1599-1607, 1 Jun. 1998.
- [11] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, Roberts & Company, Englewood, 2005.
- [12] S. H. Kazemi, M. M. Mirsalehi, and A. R. Attari, *Design of two-dimensional finite aperture diffractive optical elements using the flip-flop method of optimization*, Photon08, Abstract book, Edinburgh, Heriot-Watt University, UK, p. 7, Aug. 2008.
- [13] J. Bengtsson, "Design of fan-out kinoforms in the entire scalar diffraction regime with an optimal-rotation-angle method," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 32, pp. 8435-8444, 10 Nov. 1997.
- [14] J. Stigwall and J. Bengtsson, "Design of array of diffractive optical elements with inter-element coherent fan-outs," *Optics Express*, vol. 12, no. 23, pp. 5675-5683, 15 Nov. 2004.
- [15] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, "Practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures," *Optik*, vol. 35, no. 7, pp. 237-250, 2 Apr. 1972.
- [16] F. Wyrowski and O. Bryngdahl, "Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 5, no. 7, pp. 1058-1065, Nov. 1988.
- [17] F. Di, Y. Yingbai, J. Guofan, T. Qiaofeng, and H. Liu, "Rigorous electromagnetic design of finite-aperture diffractive optical elements by use of an iterative optimization algorithm," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 20, no. 9, pp. 1739-1746, Sep. 2003.
- [18] S. D. Mellin and G. P. Nordin, "Limits of scalar diffraction theory and an iterative angular spectrum algorithm for finite aperture diffractive optical element design," *Optics Express*, vol. 8, no. 13, pp. 705-722, 18 Jun. 2001.
- [19] D. M. Sullivan, "An unsplit step 3-D PML for use with the FDTD method," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 7, no. 7, pp. 184-186, Jul. 1997.