

# الگوریتمی جدید برای تبدیل آنتن‌های لنز روتمن از حالت سه‌کانونی به غیرکانونی به منظور کاهش خطای فاز برای استفاده در تغذیه آنتن‌های آرایه فازی

مجتبی رجبعلیان<sup>۱</sup>، بیژن ذاکری<sup>۲</sup>

## چکیده

آنتن‌های لنز روتمن به دلیل خصوصیات منحصر به فرد خود به صورت گسترده به عنوان تغذیه آنتن‌های آرایه فازی استفاده می‌شوند. این لنز معمولاً با سه درگاه کانونی طراحی می‌شود. یکی از اصلی‌ترین مشکلات این روش خطای فاز می‌باشد مخصوصاً برای لنزهای با دهانه بزرگ. تلاش‌های زیادی برای کاهش این خطا صورت گرفته است. اخیراً لنز روتمن غیرکانونی ارائه شده است که خطای فاز را به طور محسوسی کاهش می‌دهد. اما مشکل این روش، جایگاه نامناسب درگاه‌های ورودی و خروجی می‌باشد. این درگاه‌ها فقط برای کاهش خطای فاز بهینه شده‌اند اما برای پیاده‌سازی و ساخت مناسب نیستند زیرا مشکلات تطبیق و تزویج ایجاد می‌کنند. در این مقاله روش جدیدی برای طراحی لنز روتمن ارائه شده است که این لنز سه‌کانونی را تبدیل به غیرکانونی نموده، خطای فاز را به خوبی کاهش داده و قابلیت پیاده‌سازی را نیز دارا می‌باشد. لنزی با ۷ درگاه ورودی و ۱۶ درگاه خروجی توسط روش ارائه شده‌ی جدید، طراحی شده است. خطای فاز و قابلیت پیاده‌سازی توسط شبیه‌سازی تمام موج ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که ماکزیمم و میانگین خطای فاز درگاه‌های ورودی و خروجی به خوبی کاهش پیدا کرده و مشکلی برای پیاده‌سازی این لنز موجود نمی‌باشد.

## کلیدواژه

آنتن‌های آرایه فازی، خطای فاز، لنز روتمن، لنز غیرکانونی

## مقدمه

آنتن‌های لنز روتمن به عنوان یکی از لنزهای مایکروویوی چندین دهه است که مورد استفاده بسیار زیادی قرار گرفته است. این لنز مایکروویوی که برای تغذیه کردن آنتن‌های آرایه-ای، به منظور تولید شبکه‌های پرتویی، طراحی می‌شود به دلیل خاصیت‌های منحصر به فرد و جذابی که دارد، روز به روز بر پیشرفت‌ها و کاربردهای آن اضافه شده است. از جمله این خصوصیات می‌توان به پهن باند بودن، وابسته نبودن پرتوهای تولیدی به فرکانس، پیاده‌سازی ساده، ارزان بودن، فشرده بودن، قابلیت جست‌وجوی الکترونیکی پرتوها، قابلیت پیاده‌سازی بر روی مایکرواستریپ و موجبر اشاره کرد.

این لنز توسط Rotman در سال ۱۹۶۳ معرفی شد که بر روی موجبر طراحی شده بود [۱]. از زمانی که طراحی لنز روتمن روی صفحات مایکرواستریپ معرفی شد کاربردهای آن به سرعت گسترش یافت و پیشرفت‌های زیادی حاصل شد [۲]. از جمله این کاربردها می‌توان به: استفاده در انواع سیستم‌های

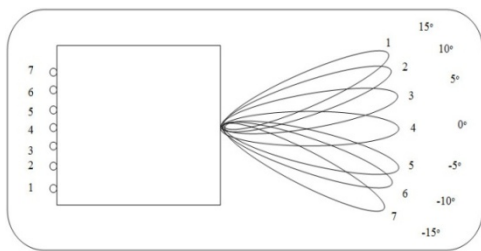
راداری نظامی و تجاری، سنجش از راه دور، استفاده در انواع سنسورها مانند سنسورهای جلوگیری از تصادفات اتومبیل [۳]، جست‌وجوگرهای نوری [۴] و [۵]، سیستم‌های شبکه‌های پرتویی، برقراری ارتباطات نقطه به نقطه، برقراری ارتباطات ماهواره‌ای، جهت‌دهی پرتوهای تولیدی، جهت یابی پهن باند و... اشاره کرد.

در سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی در این زمینه حاصل شده. در سال ۲۰۰۸ طرح جدیدی برای کاهش تلفات ارائه شد [۶]، همچنین پیاده‌سازی روی SIW در سال ۲۰۰۸ که دو خصوصیت فشرده بودن و گین بالا در آن همزمان استفاده شده است [۷]. لنز روتمن در سال ۲۰۱۰ بر روی ویفر سیلیکون پیاده‌سازی شده است که می‌تواند دنیای جدیدی در این زمینه به وجود آورد [۸]. استفاده از لنز روتمن به عنوان سوئیچ و مالتیپلکس در سال ۲۰۱۲ معرفی شد [۹-۱۱]. لنز روتمن در پیکره بنده چندلایه (خصوصیت فشرده‌گی) به عنوان تولید کننده‌ی پرتو استفاده شده است [۱۲] و [۱۳].

یکی از مشکلات و چالش‌های طراحی این نوع لنز، خطای فاز می‌باشد. هرچه تعداد درگاه‌های خروجی زیاد و به طبع آن دهانه خروجی بزرگ شود، خطای فاز بیشتری ایجاد می‌شود که

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد برق الکترونیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، zakeri@nit.ac.ir



شکل ۱: لنز روتمن با ۷ درگاه ورودی در حالت کلی

### طراحی لنز روتمن

از زمان ابداع این لنز تا کنون ۳ نوع طراحی کلی مطرح شده است. اول طراحی با ۳ درگاه کانونی، دوم طراحی با ۴ درگاه کانونی و سوم طراحی بدون درگاه کانونی. در طراحی لنز روتمن با ۳ درگاه کانونی، ابتدا ۳ درگاه ایده‌آل انتخاب می‌شود که در این درگاه‌ها خطای فاز صفر می‌باشد اما در بقیه درگاه‌ها که روی درگاه‌های کانونی قرار ندارند، خطای فاز زیادی به وجود می‌آید که روش‌هایی نیز برای کم کردن این خطاها مطرح شده است [۱۶-۱۴] و [۱۸]. طراحی لنز روتمن با استفاده از ۴ درگاه کانونی، در واقع به منظور تغذیه کردن سه بعدی آرایه‌ها می‌باشد که در آن ۴ درگاه ایده‌آل وجود دارد که خطای فاز در آن‌ها صفر می‌باشد اما خطای فاز در بقیه درگاه‌ها که بر روی درگاه کانونی قرار ندارند، بسیار زیاد می‌باشد. این نوع طراحی به دلیل مشکلات زیاد و خطای فاز و سختی طراحی، مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و عملاً طرد شده است. در طراحی غیر کانونی، در حقیقت دیگر درگاه کانونی وجود ندارد یعنی درگاه‌هایی وجود ندارند که در آن خطای فاز صفر باشد اما در مجموع همگی درگاه‌های ورودی و خروجی به نحوی طراحی می‌شوند که بیشترین خطای فاز ممکن و یا میانگین خطای فاز به وجود آمده، کمترین شود و این بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد. لذا بیشترین خطای فاز به وجود آمده در طراحی غیرکانونی، در مقایسه با دیگر روش‌ها کمینه می‌باشد. اما در این نوع طراحی مشکلاتی وجود دارد که در ادامه بررسی خواهد شد و طرح جدیدی برای برطرف کردن این مشکلات ارائه خواهد شد. در ادامه فرمول‌ها و روش طراحی لنز روتمن سه کانونی و غیرکانونی ارائه خواهد شد و در قسمت بعدی، طرح جدیدی که در این مقاله ارائه شده است، بررسی خواهد شد.

### طراحی با سه درگاه کانونی

شکل (۲) در واقع ساختار کلی لنز روتمن سه کانونی را نشان می‌دهد. در شکل (۲) سه درگاه کانونی  $F1, F2, G1$  مشاهده می‌شود. اگر هرکدام از این درگاه‌ها تحریک شوند، خطای فاز به وجود آمده در خروجی صفر خواهد بود. پارامترهای اصلی طراحی، زاویه درگاه‌های کانونی  $\alpha$ ، زاویه جست‌وجو  $\phi$  و اندازه-

عملکرد لنز را با مشکل مواجه می‌کند. در مقالات [۱۶-۱۴] تلاش‌هایی در جهت بهبود خطای فاز صورت گرفته است اما مشکل خطای فاز زیاد برای دهانه درگاه‌های خروجی بزرگ وجود دارد. Dong در سال ۲۰۰۹ روشی برای بهینه‌سازی خطای فاز ارائه داده است که میانگین این خطا به طور چشمگیری کاهش یافته است اما مشکل این طرح در این می‌باشد که قابل پیاده‌سازی نبوده و فقط در حالت تئوری خطای فاز را کاهش می‌دهد و مشکل دیگر آن روند طولانی طراحی و مشخص نبودن جایگاه درگاه‌های ورودی و خروجی در طراحی می‌باشد که می‌تواند محدودیت‌هایی را از جمله محدودیت در ساخت و شبیه‌سازی تمام موج ایجاد کند [۱۷].

در این مقاله روشی برای بهینه‌سازی خطای فاز با استفاده از الگوریتم پرندگان و همچنین تغییر در روند طراحی لنزهای کانونی ارائه شده است که می‌تواند خطای فاز لنز روتمن را، به خصوص لنز روتمن با دهانه‌ی پهن، در حد چشمگیری کاهش داده، طراحی آسان تر شده و همچنین مشکل پیاده‌سازی و قابلیت شبیه‌سازی و ساخت که در طرح Dong وجود دارد به طور کامل رفع شده باشد.

### ساختار و عملکرد لنز روتمن

لنز روتمن از دو صفحه موازی فلزی تشکیل شده است که موج را هدایت کرده و مجبور می‌کند که از مسیرهای طراحی شده متفاوتی عبور کند که دارای طول‌های مختلف و لذا شیفیت فاز متفاوت می‌باشد [۱]. این لنز به طور کلی دارای تعدادی درگاه ورودی و تعدادی درگاه خروجی می‌باشد. درگاه‌های خروجی به خطوط انتقال ۵۰ اهم با طول حساب شده‌ای متصل هستند که انتهای این خطوط به آنتن‌های آرایه فازی متصل می‌شوند. با تحریک هرکدام از درگاه‌های ورودی، موج هدایت شده در لنز وقتی به المان‌های تشعشی می‌رسد، دچار شیفیت فاز مشخصی در هرکدام از ورودی این المان‌ها می‌شود. این اختلاف فاز در درگاه‌های خروجی، باعث می‌شود تشعشع آنتن‌های آرایه فازی در جهت متفاوتی صورت گیرد. لذا با تحریک هرکدام از درگاه‌های ورودی، اختلاف فاز ایجاد شده بین المان‌های تشعشی متفاوت بوده و تشعشع صورت گرفته در جهت متفاوتی خواهد بود. شکل (۱) لنز روتمنی با ۷ درگاه ورودی را در حالت کلی نشان می‌دهد که قادر است ۷ پرتو بین  $-15^\circ$  درجه و  $+15^\circ$  درجه تولید کند. با داشتن دامنه و فاز درگاه‌های خروجی، می‌توان فاکتور آرایه را محاسبه نمود.

$$\frac{(F_1P)^2}{F^2} = 1 + x^2 + y^2 + 2a_0x - 2b_0y \quad (7)$$

$$\frac{(F_2P)^2}{F^2} = 1 + x^2 + y^2 + 2a_0x + 2b_0y \quad (8)$$

$$\frac{(G_1P)^2}{F^2} = (g+x)^2 + y^2 \quad (9)$$

لذا:

$$\frac{(F_1P)^2}{F^2} = \left(1 - \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{\epsilon_r} w - \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} b_1 n\right)^2 \quad (10)$$

دو درگاه F1 و F2 نسبت به درگاه مرکزی G1 متقارن می‌باشند. و لذا هندسه کلی شکل، نسبت به محور درگاه مرکزی، متقارن می‌باشد. لذا به خاطر این تقارن، رابطه‌ی (10) دست نخورده باقی می‌ماند و می‌تواند جدا شود به دو معادله مستقل با تبدیل کردن n به -n و y به -y. لذا داریم:

$$-2b_0y = -2\frac{b_1n}{\sqrt{\epsilon_r}} + 2\frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{\epsilon_r} b_1nw \quad (11)$$

$$y = \frac{b_1}{b_0} n \left( \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} - \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{\epsilon_r} w \right) \quad (12)$$

$$x^2 + y^2 + 2a_0x = \frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_r} w^2 + \frac{b_1n}{\epsilon_r} - 2\frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{\epsilon_r} gw \quad (13)$$

لذا با توجه به فرمول‌های (3) و (6):

$$x^2 + y^2 + 2gx = \frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_r} w^2 - 2\frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{\epsilon_r} gw \quad (14)$$

با استفاده از عملیات جبری و ساده سازی، می‌توانیم بنویسیم:

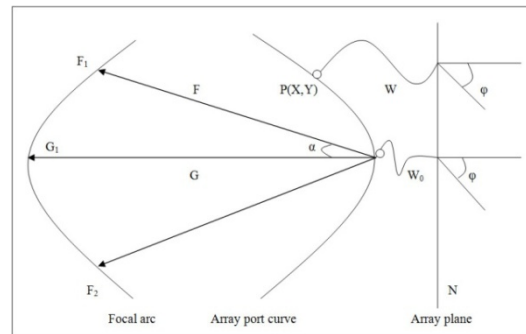
$$aw^2 + bw + c = 0 \quad (15)$$

لذا با مشخص بودن پارامترهای  $\alpha$ ,  $\varphi$ ,  $g$ ,  $\epsilon_r$  و  $\epsilon_{eff}$  که بستگی به طراحی ما دارد، می‌توان با استفاده از فرمول‌های (12) و (14) و (15)، پارامترهای  $x$ ,  $y$  و  $w$  را بدست آورد.

### محاسبه خطای فاز به عنوان تابع هدف

با تحریک شدن هرکدام از درگاه‌های ورودی، جبهه موج یکتایی در فضا به وجود می‌آید. هر نقطه روی این جبهه موج دارای فاز یکسانی می‌باشد و لذا بیشترین توان تولید شده توسط المان‌های آرایه‌ای هم جهت با این جبهه موج خواهد بود زیرا فازها باهم برابر بوده و دامنه‌ها باهم جمع شده و بیشترین توان تشعشعی را در همان جهت ایجاد می‌کند. با تحریک هرکدام از درگاه‌های ورودی، باید پرتویی در جهت طراحی شده تشعشع شود. لذا با تحریک هرکدام از درگاه‌های ورودی، باید مسیر طی شده موج که باعث به وجود آمدن شیفت فاز می-

ی G/F می‌باشد. در واقع نسبت اندازه‌ی درگاه کانونی وسط به اندازه درگاه کانونی کناری می‌باشد. طبق شکل (2) دو منحنی وجود دارد. منحنی درگاه‌های ورودی که در سمت چپ قرار دارند و منحنی درگاه‌های خروجی که در سمت راست می‌باشند. درگاه‌های ورودی با  $(X, Y)$  نسبت به مبدا مشخص می‌شوند. مکان‌هایی که در خط مستقیم سمت راست شکل (2) قرار دارند و با N مشخص می‌شوند، در واقع بیانگر مکان المان‌های آرایه‌ای می‌باشند. با تحریک درگاه‌های F1, F2, G1 تشعشع این المان‌ها در زاویه‌های  $-\alpha$  و  $+\alpha$  درجه خواهد بود که خطای فاز تحریک این درگاه‌های کانونی صفر می‌باشد و در واقع درگاه‌های کانونی یا ایده‌آل نامیده می‌شوند.



شکل 2. ساختار لنز روتمن، منحنی درگاه‌های ورودی، منحنی درگاه‌های خروجی، خطوط انتقال و المان‌های آرایه‌ای

با توجه به این ملاحظات، رابطه‌ی زاویه تشعشع المان‌های آرایه‌ای و فاصله اپتیکی درگاه‌های ورودی و درگاه‌های خروجی به صورت زیر خواهد بود [2]:

$$(F_1P)\sqrt{\epsilon_r} + W\sqrt{\epsilon_{eff}} + N \sin \varphi = F\sqrt{\epsilon_r} + W_0\sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (1)$$

$$(F_2P)\sqrt{\epsilon_r} + W\sqrt{\epsilon_{eff}} = G\sqrt{\epsilon_r} + W_0\sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (2)$$

$$(G_1P)\sqrt{\epsilon_r} + W\sqrt{\epsilon_{eff}} = G\sqrt{\epsilon_r} + W_0\sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (3)$$

$$(F_1P)^2 = F^2 + X^2 + Y^2 + 2FX \cos \alpha - 2FY \sin \alpha \quad (4)$$

$$(F_2P)^2 = F^2 + X^2 + Y^2 + 2FX \cos \alpha + 2FY \sin \alpha \quad (5)$$

$$(G_1P)^2 = (G+X)^2 + Y^2 \quad (6)$$

که در آن  $\epsilon_r$  ثابت دی‌الکتریک لنز،  $\epsilon_{eff}$  ثابت دی‌الکتریک تاثیرگذار خطوط انتقال لنز بین درگاه‌های خروجی و المان‌های تشعشعی،  $\varphi$  زاویه تشعشع المان‌های آرایه‌ای،  $\alpha$  زاویه درگاه‌های کانونی می‌باشد. برای راحتی، پارامترها نسبت به طول کانونی نرمالیزه شده اند و به صورت زیر در آمده اند:

$$n=N/F, x=X/F, y=Y/F, w=(W-W_0)/F, g=G/F$$

همچنین:

$$a_0 = \cos \alpha, b_0 = \sin \alpha, a_1 = \cos \varphi, b_1 = \sin \varphi$$

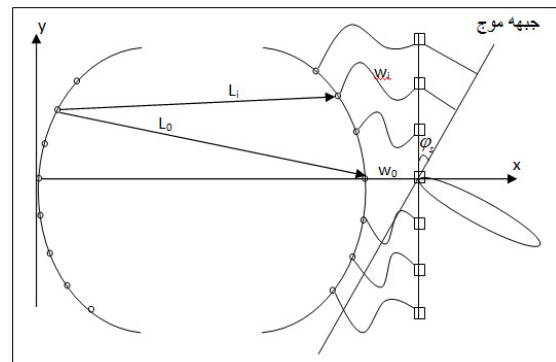
لذا فرمول‌های (4)، (5) و (6) به صورت زیر می‌شوند:

خروجی مشخص می‌شود. سپس زوایایی که می‌خواهیم المان‌های آرایه‌ای در آن راستا تشعشع کنند. در مرحله بعدی، مقدار  $G/D$  (بیانگر طول المان‌های آرایه‌ای می‌باشد) مشخص می‌شود. زیرا بهینه‌سازی خطای فاز و مقایسه آن‌ها با یکدیگر باید بر اساس  $G/D$  ثابت باشد [۱۹] سپس طراحی از آخر شروع می‌شود. یعنی با توجه به فرمول (۱۶) که بیانگر خطای فاز می‌باشد، مقادیرهای اولیه‌ای برای مکان درگاه‌های ورودی، مکان درگاه‌های خروجی و اندازه‌ی طول خطوط انتقال در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی، این مکان‌ها در چرخه‌ای قرار می‌گیرند تا کمترین خطای فاز ممکن حاصل شود. این چرخه آنقدر تکرار می‌شود تا به خطای فاز مورد انتظار رسیده یا اینکه تعداد چرخه‌های به روزرسانی، به تعداد تعریف شده برسد. در واقع الگوریتم مورد نظر را می‌توان در شکل (۴) مشاهده کرد.

مزیت این روش نسبت به حالت سه کانونی پایین بودن خطای فاز می‌باشد. به خصوص وقتی که تعداد درگاه‌های لنز مورد نظر زیاد باشد و دهانه درگاه‌های خروجی بزرگ باشد. اما مسئله‌ای که باید در اینجا توجه کرد، این می‌باشد که در اینجا هم درگاه‌های ورودی، هم درگاه‌های خروجی و هم طول خطوط انتقال در فرایند بهینه‌سازی خطای فاز دخالت دارند. یعنی بعد از بهینه‌سازی، مکان‌هایی برای درگاه‌های خروجی و ورودی و مقادیرهایی برای طول خطوط انتقال بدست می‌آید اما هیچ تضمینی وجود ندارد که مکان این درگاه‌ها قابل پیاده‌سازی باشد. به این معنا که ممکن است مکان‌هایی از درگاه‌های ورودی بدست آیند که در عمل نتوان آن‌ها را پیاده‌سازی کرد. در مقاله [۱۷] که این روش ارائه شده است، حتی شبیه‌سازی از این نوع لنز صورت نگرفته و تمامی کارها به صورت تئوری انجام شده است. طبق بررسی‌هایی که انجام شده در این نوع طراحی از لنز روتمن، عملاً می‌توان گفت قابلیت پیاده‌سازی برای این نوع لنز وجود ندارد. به واقع مکان‌های بدست آمده از درگاه‌های ورودی و خروجی خطای فاز را به خوبی کاهش می‌دهد اما ممکن است این مکان‌ها خیلی نزدیک به هم و یا دور از هم باشند. اگر هم در فرآیند بهینه‌سازی محدودیت‌هایی در این مکان‌ها ایجاد شود، باز هم مشکلاتی وجود خواهد داشت از جمله اینکه این محدودیت‌ها باید بسیار زیاد باشد و با توجه به طراحی‌های مختلف، باید متفاوت باشد. اما حتی در اینصورت هم نمی‌توان پیاده‌سازی را تضمین نمود زیرا فاصله درگاه‌ها از

شود، تا جبهه‌ی موج یکسان باشد و پرتو در جهت طراحی شده بیشترین مقدار خود را داشته باشد. لذا طبق شکل (۳) با تحریک درگاه دلخواه ورودی، پرتو در جهت  $\phi_s$  قرار خواهد گرفت که همان جهت جبهه موج می‌باشد. با توجه به مطالب گفته شده و شکل (۳)، خطای فاز از طریق فرمول (۱۶) محاسبه می‌شود. این فرمول خطای فاز را بر حسب درجه محاسبه می‌کند. (۱۶)

$$\frac{360}{\lambda} [(L_i \sqrt{\epsilon_r} + W_i \sqrt{\epsilon_{eff}} + y \sin \phi_i) - (L_o \sqrt{\epsilon_r} + W_o \sqrt{\epsilon_{eff}})]$$



شکل ۳. جبهه موج در لنز روتمن و خطای فاز

وقتی یک درگاه ورودی تحریک می‌شود، فازی که در ابتدای المان‌های آرایه‌ای ایجاد می‌شود، با توجه به زاویه‌ای که می‌خواهیم تشعشع صورت بگیرد، باید عدد مشخصی باشد. هرچه فاز ایجاد شده از این عدد انحراف بیشتری داشته باشد، خطای فاز ایجاد شده بزرگتر خواهد بود. در این نوع طراحی، به دلیل اینکه درگاه‌های غیر کانونی و طول خطوط انتقال بر اساس معادله‌ی درگاه‌های کانونی محاسبه می‌شوند، خطای فاز در درگاه‌های کانونی صفر و هرچه فاصله دیگر درگاه‌ها از درگاه‌های کانونی بیشتر شود، خطای فاز آن‌ها بیشتر خواهد بود. لذا در لنزهایی که دهانه درگاه‌های خروجی بزرگ باشد و تعداد المان‌های آرایه‌ای زیاد باشد، این خطای فاز زیاد شده و عملکرد لنز را دچار اشکال می‌کند. خطای فاز می‌تواند باعث تغییر در جهت پرتوهای تولیدی، عریض کردن پهنای پرتو و کاهش دادن سطح قله‌ی پرتو شود. هرچه خطای فاز بیشتر باشد، انحراف زاویه تشعشع در عمل، از زاویه تشعشعی که لنز بر اساس آن طراحی شده، بیشتر خواهد بود.

### طراحی غیر کانونی

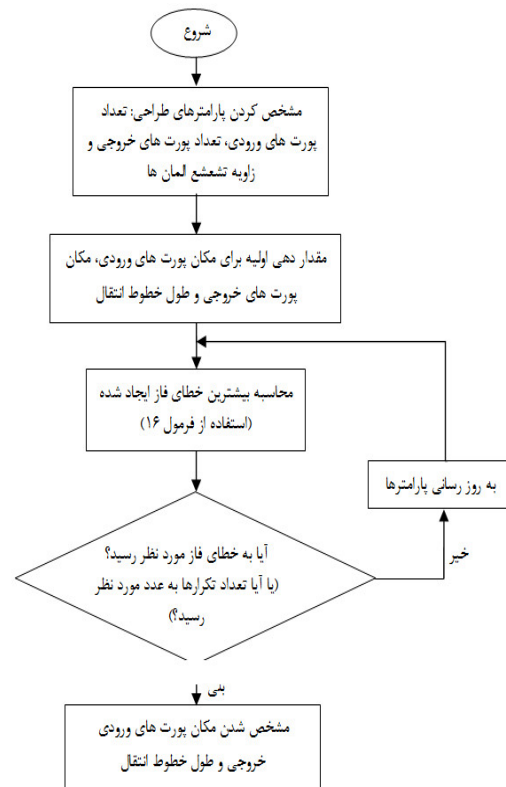
این طراحی در سال ۲۰۰۹ ارائه شد [۱۷]. هدف از این طراحی کمینه کردن بیشترین خطای فاز ایجاد شده در دهانه درگاه‌ها می‌باشد. در این نوع طراحی، ابتدا تعداد درگاه‌های ورودی و

خطوط انتقال بهینه می‌شود تا خطای فاز کاهش پیدا کند. در این روش، طول خطوط انتقال به نحوی انتخاب می‌شوند که تابع هدف یعنی فرمول شماره (۱۶) کمینه شود. برای بهینه‌سازی طول خطوط انتقال، از هر روش بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک، PSO ویا ... می‌توان استفاده کرد. چگونگی روند این طراحی در ادامه به طور کامل توضیح داده شده است.

با توجه به فرمول‌های (۱۲)، (۱۴) و (۱۵) مشخص است که ابتدا باید با استفاده از فرمول (۱۵)، طول خطوط انتقال محاسبه شود و سپس با استفاده از فرمول‌های (۱۲) و (۱۴) مکان درگاه‌ها مشخص شوند. فرمول طول خطوط انتقال در واقع بر اساس معادله‌های سه کانون موجود در این نوع لنز محاسبه شده است و این بدین معناست که در درگاه‌های غیر کانونی، طول خطوط انتقال کاملاً صدق نمی‌کند و در همین ابتدای امر خطا ایجاد می‌شود. Rotman این طراحی را بر اساس سه معادله‌ی موجود در درگاه‌های کانونی ارائه داده اند و لذا هرچه از درگاه‌های کانونی دورتر شویم، خطای فاز بیشتر خواهد شد [۱]. اما در فرمول‌های (۱۲) و (۱۴)، مکان درگاه‌ها به خوبی با استفاده از مقادیری که از طول خطوط انتقال به دست آمده، محاسبه خواهد شد و این مکان‌ها کاملاً مشخصات لازم برای پیاده‌سازی را خواهند داشت. زیرا با استفاده از فرمول‌های بدست آمده مشخص شده‌اند و این فرمول‌ها با توجه به زاویه تشعشعی، مکان درگاه‌ها و فاصله آنها از یکدیگر را در نظر می‌گیرند. با توجه به مطالب گفته شده، می‌توان روشی ارائه داد که هم خطای فاز را بهینه نمود و هم خیالمان از بابت قابلیت پیاده‌سازی راحت باشد.

فرض کنید  $N$  درگاه ورودی و  $M$  درگاه خروجی موجود می‌باشد (شکل ۵). لذا تعداد خطوط انتقال نیز برابر با تعداد  $M$  می‌باشد. با تحریک هر کدام از درگاه‌های ورودی، خطای فازی بر روی تمامی درگاه‌های خروجی به وجود می‌آید. اگر همه‌ی درگاه‌های ورودی تحریک شوند، یعنی اگر  $N$  درگاه ورودی باهم تحریک شوند، بر روی هر کدام از درگاه‌های خروجی،  $N$  خطای فاز متفاوت به وجود خواهد آمد.

یکدیگر بسیار مهم هستند در فرایند تطبیق امپدانس و نمی‌توان درگاه‌هایی با فاصله‌های متفاوت داشت زیرا باید طول تطبیق به نسبت طول دهانه درگاه باشد و طول‌های متفاوت، باعث خراب شدن فاز هنگام تحریک درگاه‌ها می‌شود. اگر بخواهیم در یک جمله خلاصه کنیم: این نوع طراحی از لنز قابلیت پیاده‌سازی عملی ندارد و حتی در خود مقاله و مقالات مختلف تا کنون، طراحی برای پیاده‌سازی این نوع لنز ارائه نشده است. در قسمت بعدی، روشی ارائه خواهیم داد که هم خطای فاز را بهبود دهد و هم قابلیت پیاده‌سازی داشته باشد.



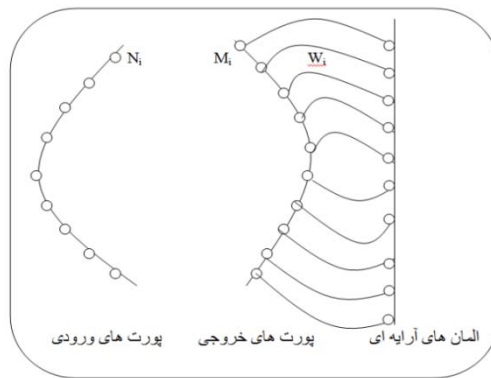
شکل ۴. الگوریتم طراحی لنز روتمن غیر کانونی توسط J. Dong

## طراحی لنز غیر کانونی با استفاده از رابطه بازگشتی در معادلات کانونی

با توجه به مطالب گفته شده در قسمت قبلی، لنز غیر کانونی ارائه شده توسط دانگ [۱۷]، خطای فاز را کاهش می‌دهد اما قابلیت پیاده‌سازی را دارد. روش ارائه شده در این مقاله، لنز روتمن سه کانونی را تبدیل به غیر کانونی نموده و باعث می‌شود خطای فاز کاهش پیدا کرده و بهینه شود. در واقع روند طراحی لنزهای روتمن در این روش، تغییر کرده و لنزهای روتمن با سه کانون، تبدیل به لنز روتمن غیر کانونی شده و با استفاده از روابط بازگشتی مکان درگاه‌ها تغییر کرده و طول

### طراحی، پیاده‌سازی و شبیه‌سازی تمام موج

در این قسمت با استفاده از روش جدید ارائه شده در این مقاله، لنزی طراحی شده است تا بتوان این روش جدید را ارزیابی نمود و مقایسه کرد. همچنین این لنز توسط شبیه‌ساز تمام موج شبیه‌سازی شده است تا قابلیت پیاده‌سازی و ساخت آن مشخص شود. این لنز دارای ۷ درگاه ورودی، ۱۶ درگاه خروجی و لذا دارای ۱۶ المان آرایه‌ای و ۱۶ خط انتقال می‌باشد. همچنین  $F/D$  برابر با ۱.۴ و  $G1/F1$  برابر با ۱ در نظر گرفته شده است تا بهترین حالت ممکن برای بهینه شدن خطای فاز در حالت طراحی سه کانونی باشد. همچنین زاویه تشعشع المان‌ها ۱۶ درجه در نظر گرفته شده است. این لنز بر روی بورد Rogers 5870 با  $\epsilon_r=2.33$  و ارتفاع دی‌الکتریک ۰.۵۰۸ میلی‌متر پیاده‌سازی شده است.



شکل ۵. شکل کلی لنز روتمن غیر کانونی

لذا اگر طول خط انتقال در هر کدام از درگاه‌های خروجی را بهینه کنیم به نحوی که با تحریک تمامی درگاه‌ها، کمترین خطای فاز ممکن برای هر کدام بدست آید، می‌توانیم در مجموع خطای فازی بهینه برای تمامی درگاه‌ها داشته باشیم. در اینجا می‌توان دو نوع بهینه‌سازی انجام داد. می‌توان ماکزیمم خطای به وجود آمده را کمینه کرد و یا اینکه میانگین خطای به وجود آمده کمینه شود. مکان درگاه‌ها در اینجا دقیقا همان مکان‌هایی می‌باشد که از فرمول (۱۲) و (۱۴) محاسبه خواهد شد. اما در اینجا نکته‌ای وجود دارد. توجه شود که برای بهینه نمودن خطای فاز، ابتدا باید مکان درگاه‌ها مشخص باشد تا بتوان طول خطوط انتقال را بهینه کرد (طبق فرمول (۱۶)). لذا ابتدا باید لنز را با توجه به فرمول سه کانونی طراحی کرد و مکان درگاه‌های ورودی و خروجی را محاسبه نمود. سپس با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، طول خطوط انتقال را بهینه نمود تا کمترین خطای فاز ممکن به وجود آید. بعد از بدست آوردن مقدار بهینه طول خطوط انتقال، می‌توان عملیات طراحی را متوقف نمود زیرا هم طول خطوط انتقال بدست آمده و هم مکان درگاه با توجه به طراحی سه کانونی مشخص شده است. اما در اینجا می‌توان بعد از بهینه‌سازی طول خطوط انتقال، دوباره مقادیر بدست آمده از طول را در فرمول‌های (۱۲) و (۱۴) قرار داد تا مکان درگاه‌ها با استفاده از طول خطوط انتقال بهینه شده بدست آید. و این روند را همینطور ادامه داد تا به مقدار خطای فاز ثابت و بهینه رسیده شود. در حقیقت ابتدا طول خطوط انتقال بهینه می‌شود. از این طول‌های بهینه شده، مکان‌های جدید از درگاه‌ها بدست می‌آید (که به دلیل استفاده از همان روابط هندسی، فاصله درگاه‌ها و اندازه‌ها رعایت می‌شود و مشکلی برای ساخت به وجود نخواهد آمد). دوباره با استفاده از این مکان‌های جدید، طول خطوط انتقال بهینه‌تر شده و این روند همینطور ادامه پیدا می‌کند تا به روند ثابتی رسیده و مقادیر کاملا بهینه شوند. الگوریتم این بهینه‌سازی در شکل (۶) مشخص شده است.



شکل ۶. الگوریتم تبدیل لنز روتمن سه کانونی با استفاده از رابطه بازگشتی از معادلات کانونی

این لنز ابتدا با استفاده از فرمول‌های سه کانونی، طراحی شده است و مقادیر درگاه‌های ورودی، خروجی و طول خطوط انتقال

تعداد تکرارها	۱۰۰۰
Wmin	۰.۳
Wmax	۰.۸
C1	۲
C2	۲

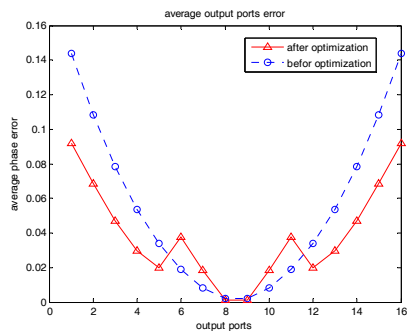
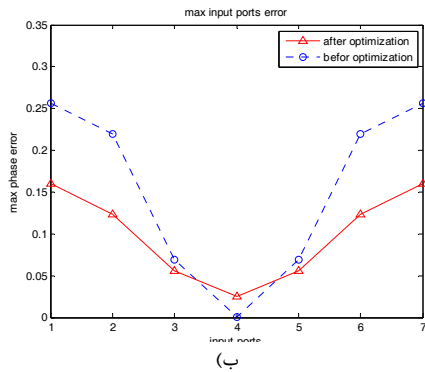
طبق شکل ۸ (الف تا د) مشاهده می‌شود که هرچه به مرکز درگاه‌ها نزدیکتر می‌شویم، مقادیر خطای فاز قبل و بعد از بهینه‌سازی به هم نزدیکتر شده تا جایی که در درگاه وسط، عملاً بهینه‌سازی خطای فاز بیشتری را نسبت به حالت عادی نشان می‌دهد. باید به این نکته توجه داشت که نسبت این اختلاف در درگاه وسط به درگاه کناری بسیار کم می‌باشد (به خصوص وقتی دهانه لنز بسیار گسترده می‌شود) و لذا در مجموع اگر بررسی کنیم، خواهیم دید که بهینه‌سازی بسیار موثر بوده است. در واقع بهینه‌سازی برای تمامی درگاه‌ها موثر واقع می‌شود مگر درگاه‌های وسط. در واقع عملکرد درگاه‌های وسط کمی بدتر می‌شود نسبت به حالت عادی اما همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، اختلاف این خرابی نسبت به بهینه شدن خطا در درگاه‌های کناری بسیار ناچیز می‌باشد. دلیل بد شدن عملکرد خطای فاز در درگاه وسط، در واقع درگاه‌های کانونی می‌باشد. در درگاه‌های کانونی، خطای فاز در روش سه کانونی صفر می‌باشد و هرچه از درگاه‌های کانونی فاصله گرفته شود، این خطا بیشتر خواهد شد. در روش ارائه شده، هدف کمینه شدن خطای فاز برای همه درگاه‌ها می‌باشد. یعنی هدف بهینه شدن عملکرد لنز در مجموع می‌باشد. اما در روش سه کانونی، فقط برای درگاه‌های کانونی خطا بسیار ناچیز است. حال اگر تعداد درگاه‌ها زیاد شود، خطای فاز برای درگاه‌های غیر کانونی به شدت زیاد می‌شود. در واقع روش ارائه شده، برای لنزهایی بسیار کاربرد خواهد داشت که دارای تعداد درگاه‌های ورودی و خروجی زیادی و زاویه تولید پرتو پهنی باشد. در روش ارائه شده، خطای فاز نسبت به روش سه کانونی، در درگاه‌های کانونی بیشتر می‌باشد اما در درگاه‌های غیر کانونی و دورتر از آن، بهتر بوده و در مجموع عملکرد فاز لنز را بهبود می‌دهد. در شکل (۸) این واقعیت به وضوح دیده می‌شود. جدول شماره (۲) و (۳) میزان بهبود خطای فاز درگاه‌های ورودی و خروجی را با درصد بیان می‌کند. این جدول‌ها عملکرد خطای فاز را به صورت کمی و دقیق نشان می‌دهند. این جداول نشان می‌دهند که خطای فاز در روش ارائه شده نسبت به حالت سه کانونی، در درگاه‌های کناری  $+30\%$  تا  $+50\%$  درصد بهبود داشته و این خطا در درگاه‌های وسطی بدتر شده و بهبودی نداشته است. در مجموع برای درگاه‌های ورودی حدود  $20\%$  و برای درگاه‌های خروجی  $19\%$  بهبود خطای فاز اتفاق افتاده است. در لنز طراحی شده به دلیل زاویه تولید پرتو کوچک و همچنین تعداد درگاه‌های ورودی و خروجی کم،

محاسبه شده است. سپس ماکزیمم مقدار خطای فاز به وجود آمده و میانگین خطای فاز محاسبه شده است. در ادامه برای بهینه کردن خطای فاز، از روش جدید ارائه شده در این مقاله استفاده شده است. با استفاده از الگوریتم شکل (۶) و توضیحات مربوطه، طول خطوط انتقال بهینه شده است به نحوی که ماکزیمم خطای فاز، کمینه شود. سپس از این طول‌ها استفاده شده و مکان درگاه‌ها با استفاده از فرمول‌های (۱۲) و (۱۴) به روز رسانی شد و دوباره طول خطوط با توجه به مقادیر به روز شده، بهینه شد و این روند همینطور ادامه داشت تا به مقدار ثابتی از خطای فاز رسیده شد. شکل (۷) مکان درگاه‌های ورودی و خروجی را بعد از بهینه‌سازی نمایش می‌دهد. همینطور که مشاهده می‌شود، درگاه‌ها نسبت به هم فاصله مشخصی داشته و از نظم خاصی پیروی می‌کنند و قابل پیاده‌سازی می‌باشند به طوری که مشکلی در تطبیق اتفاق نیفتد. برای بدست آوردن طول خطوط انتقال بهینه به منظور کاهش خطای فاز، از الگوریتم PSO استفاده شده است. جدول (۱) پارامترهای اولیه الگوریتم را نشان می‌دهد. از هر الگوریتم بهینه‌سازی برای بدست آوردن طول بهینه می‌توان استفاده نمود و به دلیل ساده بودن تابع هدف یعنی معادله شماره (۱۶) حساسیت خاصی جهت تنظیم پارامترهای این الگوریتم‌ها وجود ندارد.

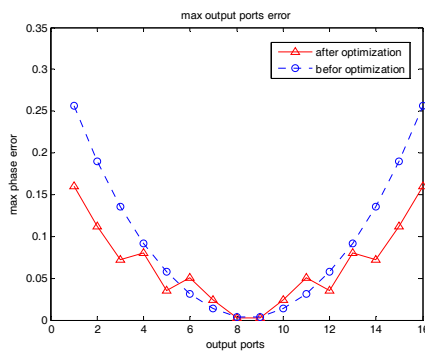
شکل (۸ الف) میانگین خطای موجود بر اثر تحریک درگاه‌های ورودی را قبل و بعد از بهینه‌سازی نشان می‌دهد. شکل (۸ ب) ماکزیمم خطای فاز موجود بر اثر تحریک درگاه‌های ورودی را نشان می‌دهد. شکل (۸ ج) میانگین خطای فاز موجود بر روی درگاه‌های خروجی را نشان می‌دهد و شکل (۸ د) ماکزیمم این خطا را. طبق این شکل‌ها کاملاً مشخص است که هرچه از مرکز لنز به سمت بیرون حرکت کنیم، بهینه‌سازی‌های انجام شده توسط این روش بیشتر و بهتر انجام شده است و این یعنی هرچه لنز طراحی شده دهانه‌ی بزرگتر و پهن‌تری داشته و تعداد المان‌ها افزایش یابد، بهینه‌سازی ارائه شده بیشتر و مؤثرتر خواهد بود. همانطور که قبلاً اشاره شد، یکی از مشکلات طراحی لنز روتمن زیاد بودن خطای فاز برای لنزهایی با دهانه پهن و المان‌های زیاد می‌باشد و لذا مشاهده می‌شود که توسط این بهینه‌سازی، دقیقاً می‌توان با این مشکل مقابله نمود به طوری که خطای فاز در درگاه‌های کناری تقریباً نصف می‌شود و با توجه به این که معمولاً درگاه‌های کناری دارای بیشترین خطای فاز هستند، لذا روش ارائه شده می‌تواند بسیار مفید باشد.

جدول ۱. مقدار دهی پارامترهای الگوریتم PSO

پارامترهای الگوریتم PSO	مقدار
تعداد ذرات	۳۰
محدوده ذرات	$[-1, 1]$ طول موج فرکانس طراحی



(ج)



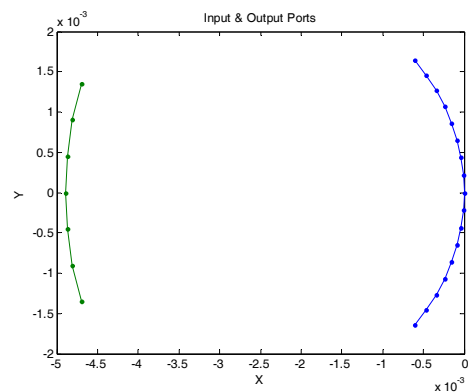
(د)

- شکل ۸. الف) میانگین خطای فاز درگاه‌های ورودی بر حسب درجه
- ب) ماکزیم خطای فاز درگاه‌های ورودی بر حسب درجه
- ج) میانگین خطای فاز درگاه‌های خروجی بر حسب درجه
- د) ماکزیم خطای فاز درگاه‌های خروجی بر حسب درجه

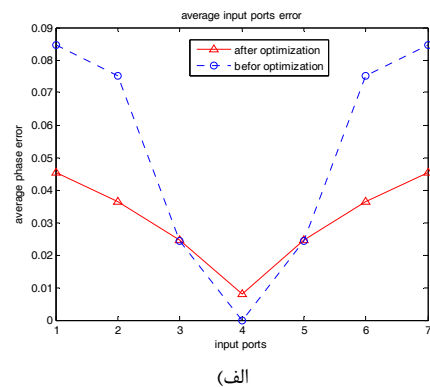
جدول ۲. درصد بهبود خطای فاز درگاه‌های ورودی (\* این علامت نشان دهنده درصد بد شدن خطای فاز می‌باشد که به صورت منفی نشان داده شده است).

درصد بهینه‌سازی میانگین خطای فاز به وجود آمده درگاه‌های ورودی	درصد بهینه‌سازی بیشترین خطای فاز به وجود آمده درگاه‌های ورودی	شماره درگاه ورودی
٪۴۶.۵۱	٪۳۷.۳۴	۱
٪۵۱.۴۶	٪۴۳.۵۸	۲
٪۱.۲۶	٪۱۹.۴۷	۳
_*	_*	۴
٪۱.۲۶	٪۱۹.۴۷	۵
٪۵۱.۴۶	٪۴۳.۵۸	۶
٪۴۶.۵۱	٪۳۷.۳۴	۷

بهبود خطای فاز به صورت عددی، بسیار ناچیز می‌باشد اما درصد بهبود خطای فاز این واقعیت را نشان می‌دهد که روش ارائه شده بسیار کارآمد و مفید بوده مخصوصاً برای لنزهایی که دارای تعداد درگاه‌های زیادی هستند. شکل (۹) فاکتور آرایه المان‌های تشعشعی را با استفاده از روش قدیمی و روش ارائه شده مقایسه می‌کند. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که در روش ارائه شده، زاویه تولید پرتوها، نسبت به روش سه کانونی، به حالت ایده آل نزدیک‌تر بوده و عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد. البته در پرتو وسطی، روش سه کانونی در موقعیت ایده‌آل‌تری نسبت به روش ارائه شده قرار دارد. اما در مجموع می‌توان بهبود زاویه تولید پرتو را در روش ارائه شده مشاهده نمود. البته با توجه به اینکه زاویه تولید پرتو کوچک بوده و همچنین تعداد درگاه‌های ورودی کم می‌باشد، لذا اختلاف زاویه تولید شده توسط روش ارائه شده و روش سه کانونی به خوبی محسوس نمی‌باشد. اما با توجه به بهبود ارائه شده، مخصوصاً در پرتوهای کناری،



شکل ۷. مکان درگاه‌های ورودی و خروجی بدست آمده



(الف)

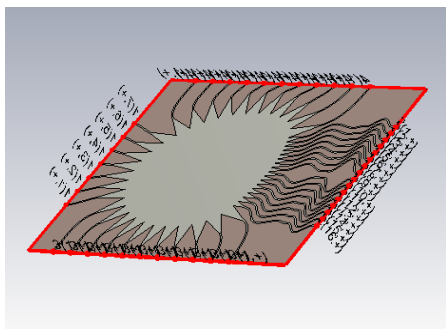
جدول ۳. درصد بهبود خطای فاز درگاه‌های ورودی (\* این علامت نشان دهنده درصد بد شدن خطای فاز می‌باشد که به صورت منفی نشان داده شده است).

شماره درگاه خروجی	درصد بهینه‌سازی بیشترین خطای فاز به وجود آمده درگاه‌های خروجی	درصد بهینه‌سازی میانگین خطای فاز به وجود آمده درگاه‌های خروجی
۱	٪۳۷.۳۴	٪۳۵.۹۵
۲	٪۴۰.۹۵	٪۳۶.۷۶
۳	٪۴۷.۰۷	٪۳۹.۶۲
۴	٪۱۲.۹۵	٪۴۴.۳۶
۵	٪۳۷.۷۵	٪۴۱.۵۷
۶	٪-۴۵.۸*	٪-۵۲*
۷	٪-۵۲.۱۴*	٪-۶۲.۷۲*
۸	٪۱۷.۳۱	٪۴۵.۸۰
۹	٪۱۷.۳۱	٪۴۵.۸۰
۱۰	٪-۵۲.۱۴*	٪-۶۲.۷۲*
۱۱	٪-۴۵.۸*	٪-۵۲*
۱۲	٪۳۷.۷۵	٪۴۱.۵۷
۱۳	٪۱۲.۹۵	٪۴۴.۳۶
۱۴	٪۴۷.۰۷	٪۳۹.۶۲
۱۵	٪۴۰.۹۵	٪۳۶.۷۶
۱۶	٪۳۷.۳۴	٪۳۵.۹۵

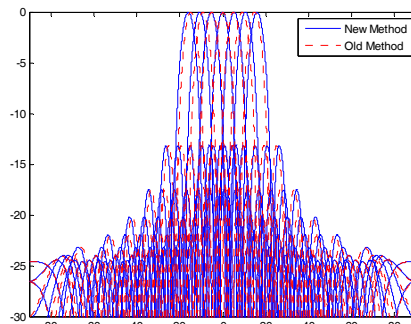
این نتیجه حاصل می‌شود که برای لنزهایی با زاویه جست‌وجو بزرگ و همچنین تعداد ورودی‌های زیاد، روش ارائه شده بسیار موثر واقع خواهد شد. زیرا در لنزهای بزرگ و دارای درگاه‌های زیاد، زاویه تولید پرتو به خصوص پرتوهای کناری، به دلیل خطای فاز، اختلاف زیادی نسبت به حالت تئوری داشته و محدودیت‌هایی را ایجاد می‌کند. جدول شماره (۳) زاویه پرتو تولید شده توسط روش ارائه شده و روش سه کانونی را نشان می‌دهد. طبق این جدول، مشاهده می‌شود که بهبود زاویه تولید پرتو در همه درگاه‌ها به جز درگاه وسط، ایجاد شده است و در مجموع زاویه تولید پرتو در روش ارائه شده، بهبود داشته است. در طراحی لنز روتمن، تا زمانی که تعداد درگاه‌های زیاد و یا زاویه تولید پرتو بزرگ نباشد، لنز طراحی شده کوچک خواهد بود و لذا در طراحی سه کانونی، خطای فاز کمی به وجود می‌آید و اگر با روش ارائه شده در این مقاله طراحی شود، خطای فاز نسبت به حالت سه کانونی بهینه تر شده اما این بهینه‌سازی به خوبی محسوس نمی‌باشد. لذا هرچه تعداد درگاه‌های لنز روتمن بیشتر و زاویه تولید پرتو بزرگ‌تر شود، روش ارائه شده تاثیر بیشتری داشته و می‌تواند خطای فاز را در مجموع کمتر از نصف در روش سه کانونی کرده و زاویه تولید پرتو را هرچه بیشتر به مقدار ایده‌آل برای طراحی نزدیک کند. لذا میزان بهینه‌سازی خطای فاز در این روش وابستگی مستقیم به تعداد درگاه‌ها (یا اندازه دهانه لنز) و زاویه تولید پرتو دارد.

#### شبیه‌سازی تمام موج لنز طراحی شده

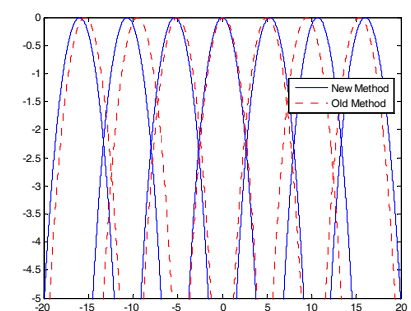
برای بررسی عملکرد لنز به منظور مطمئن شدن جهت قابلیت پیاده‌سازی، لنز بهینه شده را در شبیه‌ساز تمام موج CST توسط روش FIT شبیه‌سازی نمودیم. طبق مقالات [۲۰-۲۳] می‌توان به این نتیجه رسید که شبیه‌سازی تمام موج لنز روتمن، با تقریب بسیار خوبی می‌تواند عملکرد عملی آن را در واقعیت پیش‌بینی کند و می‌توان مطمئن بود که این پیش‌بینی تطبیق بسیار خوبی با اندازه‌گیری عملی دارد. زیرا شبیه‌سازی تمام موج، تمامی تزویج‌های به وجود آمده بین خطوط انتقال و درگاه‌ها و همچنین منطبق نبودن دهانه‌ی درگاه‌ها را به خوبی مد نظر قرار داده و در واقع عملکرد لنز را تا حد بسیار مطلوبی به صورت واقعی نشان می‌دهد. برای شبیه‌سازی تمام موج ابتدا شکل کامل لنز (درگاه‌های ورودی، درگاه‌های خروجی، خطوط انتقال، درگاه‌های جاذب، تطبیق درگاه‌ها) در نرم افزار Matlab کشیده شد و سپس این طراحی به شبیه‌ساز تمام موج CST انتقال داده شد. شکل (۱۰) لنز طراحی شده را در Matlab نشان می‌دهد. شکل (۱۱) شبیه‌سازی این لنز در نرم افزار CST را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. پیاده‌سازی و شبیه‌سازی لنز طراحی شده در محیط CST  
 زیرا در حالت تئوری پارامترهای گفته شده در نظر گرفته نمی‌شود و لذا دامنه و گلبرگ‌های فرعی در مقایسه انجام شده، دارای تفاوت بسیاری می‌باشد که کاملاً طبیعی است. در واقع عملکرد دامنه در فاکتور آرایه در حالت تئوری، ایده آل فرض شده است یعنی همه المان‌ها دارای دامنه یکسان فرض شده‌اند اما در عمل و شبیه‌سازی این گونه نبوده و لذا شکل (۱۲) از لحاظ گلبرگ‌های کناری دارای تفاوت‌های زیادی می‌باشد. همانطور که در قسمت قبلی گفته شد، لنز غیر کانونی ارائه شده توسط دانگ [۱۷] خطای فاز را کاهش می‌دهد اما قابلیت پیاده‌سازی را دارا نمی‌باشد و حتی در مقاله ارائه شده توسط دانگ، این لنز شبیه‌سازی و ساخته نشده است. به دلیل مشکلاتی که روش دانگ در طراحی غیر کانونی ارائه داده است، قابلیت پیاده‌سازی در آن روش موجود نمی‌باشد. زیرا تمامی درگاه‌های ورودی و خروجی و طول خطوط انتقال از ابتدا در رهن بینه‌سازی برای کاهش خطای فاز قرار می‌گیر که باعث می‌شود مکان‌های انتخابی برای درگاه‌های ورودی و خروجی فقط برای کاهش خطای فاز بینه‌سازی شود و ملاحظات مربوط به ساخت رعایت نشود. در روش ارائه شده در این مقاله، علاوه بر تبدیل لنز سه کانونی به غیر کانونی و کاهش خطای فاز، لنز ارائه شده قابلیت ساخت و پیاده‌سازی را نیز دارا می‌باشد که در این مقاله این قابلیت با شبیه‌سازی تمام موج نشان داده شده است. همانطور که در شکل شماره (۱۲) مشاهده می‌شود، فاکتور آرایه و زاویه پرتوها در حالت تئوری و شبیه‌سازی تطابق بسیار خوبی داشته و بیانگر این حقیقت است که روش ارائه شده به خوبی قابلیت ساخت را دارا می‌باشد. همچنین جدول شماره (۴) نیز زاویه پرتو تولید شده در روش‌های مختلف را نشان می‌دهد. طبق این جدول و شکل شماره (۱۲)، شبیه‌سازی تمام موج انجام شده، تطبیق بسیار خوبی با تئوری ارائه شده در این مقاله برای طراحی لنز روتن را دارد. زوایای تشعشع بسیار نزدیک به زوایای بدست آمده در حالت تئوری است و این بدین معناست که هم خطای فاز موجود بسیار ناچیز می‌باشد و هم لنز مورد نظر قابلیت پیاده‌سازی خود را به خوبی نشان داده است.



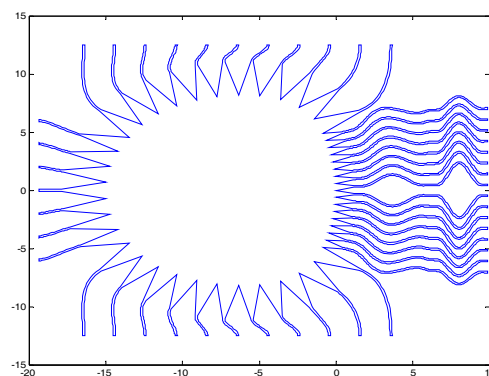
الف) فاکتور آرایه به صورت کلی



ب) فاکتور آرایه نزدیک شده

شکل ۹. مقایسه فاکتور آرایه بین روش سه کانونی و روش ارائه شده

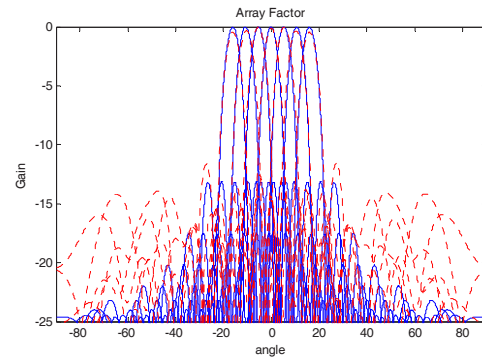
شکل (۱۲) فاکتور آرایه لنز طراحی شده توسط روش جدید را در حالت تئوری و شبیه‌سازی تمام موج نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مشخص است که زاویه تولید پرتو در شبیه‌سازی و تئوری تطبیق بسیار خوبی داشته و عملکرد لنز را ثابت می‌کند.



شکل ۱۰. لنز طراحی شده در محیط Matlab

با توجه به اینکه در شبیه‌سازی تمام موج، اثرات تزویج و برگشت موج و انعکاس‌های داخلی و عدم تطبیق امپدانس در نظر گرفته می‌شود و نسبت به حالت اندازه‌گیری و ساخت قابل پیش بینی می‌باشد، لذا در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که از لحاظ دامنه و فاکتور آرایه، لنز شبیه‌سازی شده با حالت تئوری متفاوت می‌باشد.

- [2] J. Herd and D. Pozar, "Design Of A Microstrip Antenna Array Fed By A Rotman Lens," pp. 729-732, 1984.
- [3] J. Dong, and A. I. Zaghoul, "EHF Electrically Steerable Lens-Fed Antenna for Vehicular Sensor Applications," IET Microwaves, Antennas & Propagation, (under review), 2009.
- [4] H. Steyskal, C. Cox and E. Ackerman, "Digital And Optical Beam Forming Techniques," p.616, 2003.
- [5] R. Rotman, "Considerations For A Photonic Beam Former Using An LFM Wave-Forming Transmit," in Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE, 2004.
- [6] L. Schulwitz, A. Mortazawi, "A New Low Loss Rotman Lens Design Using a Graded Dielectric Substrate" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 56, NO. 12, pp. 2734-2741, 2008.
- [7] Y. J. Cheng, W. Hong, K. Wu, Z. Q. Kuai, C. Yu, J. X. Chen, J. Y. Zhou, and H. J. Tang, "Substrate Integrated Waveguide (SIW) Rotman Lens And Its Ka-Band Multibeam Array Antenna Applications" IEEE Transactions on Antennas and Propagation, VOL. 56, NO. 8, pp. 2504-2513, 2008.
- [8] W. Lee, J. Kim, C. Cho, Y. J. Yoon, "Beam Forming Lens Antenna On A High Resistivity Silicon Wafer For 60 GHz WPAN" IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, NO. 3, pp. 706-713, 2010.
- [9] Y. Zhang, V. Fusco, "Rotman lens used as a demultiplexer/multiplexer," Microwave Conference (EuMC), 2012 42nd European, vol., no., pp.164,167, Oct. 29 2012-Nov. 1, 2012.
- [10] H. I Lin; W. J. Liao, "A Beam Switching Array Based On Rotman Lens For MIMO Technology" Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2012 International Conference on, vol.2, no., pp.1,4, 2012.
- [11] Y. Zhang, V. Fusco, "N-way switch based on Rotman lens," Electronics Letters, vol.48, no.5, pp.270,271, 2012.
- [12] J. Kim, W. Lee, Y. J. Yoon, "Multilayer Rotman Lens Fed Antenna Array For System Packaging" Antennas and Propagation (ISAP), 2012 International Symposium on, vol., no., pp.664,667, 2012.
- [13] H. Nishiwaki, K. Sakakibara, N. Kikuma, H. Hirayama, "Design of Rotman-lens feeding circuit for multi-layer beam-scanning microstrip antenna in millimeter-wave band," Antennas and Propagation (ISAP), International Symposium on, vol., no., pp.255,258, 2012.
- [14] T. Katagi, S. Mano, S. Sato, S. Tahara, and E. Tomimatsu, "An Improved Design Method of Rotman Lens Antennas," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 20, pp. 136-139, 1982.
- [15] M. S. Smith, "Design Considerations for Ruze and Rotman Lens," The Radio and Electronic Engineer, vol. 52, pp. 181-187, 1982.
- [16] T. Katagi, S. Mano, and S. Sato, "An Improved Design Method of Rotman Lens Antennas," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 32, pp. 524-527, 1984.
- [17] J. Dong, A. I. Zaghoul, and R. Rotman, "Non-Focal Minimum-Phase-Error Planar Rotman Lens," in URSI National Radio Science Meeting Colorado, 2008.
- [18] R. C. Hansen, "Design Trades for Rotman lenses," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 39, pp. 464-472, 1991.
- [19] J. Rao, 'Multifocal Three-Dimensional Bootlace Lenses', IEEE Trans. Antennas Propag, 30, pp. 1050-1056, 1982.



شکل ۱۲. مقایسه فاکتور آرایه لنز طراحی شده توسط روش جدید در حالت تئوری و شبیه‌سازی (منظور از تئوری حالتی است که فاکتور آرایه با استفاده از روش جدید اما بدون ملاحظات دامنه رسم شده است و دامنه همه المان‌ها یکسان در نظر گرفته شده است)

## نتیجه‌گیری

طرح ارائه شده در این مقاله، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجماع پرندگان می‌تواند لنزهای روتمن سه‌کانونی را تبدیل به غیرکانونی نموده تا خطای فاز را به خوبی کاهش دهد. در این روش هرچه از درگاه‌های مرکزی به سمت درگاه‌های کناری حرکت کنیم، خطای فاز کاهش بیشتری یافته و مشکل زیاد بودن خطای فاز در لنزهای دارای دهانه‌ی بزرگ تا حد زیادی بهبود یافته است. در واقع با استفاده از روش استفاده شده در این مقاله و الگوریتم استفاده شده، می‌توان خطای فاز لنزهای مایکروویوی Rotman را به خوبی کاهش داده و می‌توان لنز روتمن با درگاه‌های زیاد و خطای فاز کم طراحی نمود. همچنین این روش نسبت به روش غیرکانونی ارائه شده در سال ۲۰۰۹ [۱۷] روندی ساده‌تر داشته و نسبت به آن قابلیت پیاده‌سازی دارد زیرا درگاه‌های ورودی و خروجی بعد از بهینه‌سازی طول خطوط انتقال، توسط فرمول‌های هندسی سه‌کانونی به روز می‌شوند که باعث می‌شود فاصله درگاه‌ها از هم حفظ شده و مشکلی برای طراحی درگاه‌ها، تطبیق و تزویج وجود نداشته باشد. برای ارزیابی قابلیت پیاده‌سازی و همچنین کاهش خطای فاز، لنزی با ۷ درگاه ورودی و ۱۶ درگاه خروجی ارائه شده است. لنز مورد نظر با استفاده از شبیه‌سازی تمام موج مورد ارزیابی کامل قرار گرفته. بیشترین خطای فاز درگاه‌های ورودی در مجموع بیشتر از ۰.۵ درجه، درگاه‌های خروجی ۰.۸ درجه نسبت به حالت سه‌کانونی (که این سه‌کانونی در بهینه‌ترین حالت ممکن طراحی شده است) بهبود داشته و همچنین فاکتور آرایه بدست آمده از شبیه‌سازی تمام موج این لنز بیان می‌کند که روش ارائه شده به خوبی قابلیت پیاده‌سازی دارد.

## مراجع

- [1] W. Rotman, and R. Turner, "Wide-angle Microwave Lens for Line Source Applications," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 11, pp. 623-632, 1963.