

## **Design and Simulation of X-Band Microstrip Butler Matrix for Feeding the Narrow Beam-Width Phase Array Antenna**

**H. Moazami Goodarzi<sup>\*</sup>, A. Dolatabady**

<sup>\*</sup> Assistant Professor, Faculty of Engineering, Ayatollah Borujerdi University, Borujerd, Iran

(Received: 23/04/2021; Accepted: 27/06/2021)

### **Abstract**

*Flight systems, have extensive applications in various scientific, industrial, and commercial fields. One component utilized in flight systems' structure is radar. In various applications of these systems, it is required to track specific targets and directions in a narrow angular region. This feature is achievable by utilizing the narrow beam-width antennas. Array antennas, besides providing the demanded gain, can fulfill such requirement. Also, the beam-width should be tunable in an acceptable range of different directions. Such a tunability can be realized using the phased array antennas. The capability of change in main lobe direction of these antennas is provided using the active phase shifting components as feeders of the phased arrays, such as PIN diodes and ferrite devices. However, using the passive Butler matrix components is considered as simpler and cheaper tool to realize the approach. Utilizing the Butler matrix with more input-output ports, leads to narrower beam-width radiation pattern. In this paper, a simple design of  $32 \times 32$  Butler matrix for X-band frequency spectra is proposed, and the simulation results of its performance are presented. The simulations are carried out via Comsol software which is based on finite element method. Finally, after applying the appropriate waves to two specific input ports and connecting the Butler matrix structure to the microstrip array, the beam-width of 3.5 degrees is achieved. The achievement to narrow beam width radiation realized by a microstrip antenna array fed with a  $32 \times 32$  Butler matrix and only based on a single layer board, is the main purpose of the research.*

**Keywords:** Antenna, Butler matrix, Phased array, Microstrip, Radar.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

**Publisher:** Imam Hussein University

© Authors



<sup>\*</sup> Corresponding author E-mail: Moazami@abru.ac.ir

## طراحی و شبیه‌سازی ماتریس باتلر میکرواستریپی باند X برای تغذیه آنتن آرایه فازی با پهنای پرتو باریک

حامد معظمی گودرزی<sup>۱\*</sup>، علیرضا دولت‌آبادی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله العظمی بروجردی، بروجرد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶)

### چکیده

سامانه‌های پروازی متعددی با کاربردهای گسترده در زمینه‌های مختلف علمی، صنعتی، و تجاری وجود دارند. یکی از بخش‌های مورد استفاده در این ساختارها، رادار است. بسیاری از کاربردهای این سامانه‌ها، نیازمند ردگیری اهداف یا جهات در محدوده زاویه‌ای باریک است. این ویژگی با به‌کارگیری آنتن‌هایی دارای پهنای پرتو باریک به دست می‌آید. آنتن‌های آرایه‌ای، می‌توانند در کنار فراهم نمودن بهره مورد نیاز، تحقق بخش چنین نیازی باشند. همچنین، این پهنای پرتو باید در محدوده قابل قبولی از جهات مختلف قابل تنظیم باشد. چنین ویژگی تنظیم‌پذیری به کمک استفاده از آنتن‌های آرایه فازی تحقق‌پذیر است. قابلیت تغییر جهت گلبرگ اصلی یک چنین آنتنی، به کمک ادوات فعال تغییر دهنده فاز تغذیه آنتن‌های موجود در آرایه، مانند دیودهای پین و ادوات فریت، فراهم است. باین‌حال، استفاده از ادوات غیرفعال ماتریس باتلر ابزاری ساده‌تر و ارزان‌تر برای تحقق چنین راهکاری به شمار می‌آید. به‌کارگیری ماتریس باتلر با تعداد درگاه ورودی - خروجی بیشتر منجر به الگوی تشعشعی با پهنای باند باریک‌تر می‌شود. در این مقاله، طرحی ساده از ماتریس باتلر  $32 \times 32$  در طیف فرکانسی باند X معرفی، و نتایج شبیه‌سازی عملکرد آن ارائه می‌شود. این شبیه‌سازی‌ها به کمک نرم‌افزار کامسول که مبتنی بر روش اجزای محدود است اجرا شده‌اند. در نهایت، پس از اعمال موج به دو درگاه ورودی مشخص و اتصال ساختار ماتریس باتلر به آرایه میکرواستریپ، پهنای پرتوی  $3/5$  درجه به دست می‌آید. دست‌یابی به تشعشع با پهنای پرتو باریک بر اساس آرایه آنتن‌های میکرواستریپ تغذیه شده با ماتریس باتلر  $32 \times 32$  و تنها بر پایه بُرد تک‌لایه، هدف اصلی این پژوهش است.

کلیدواژه‌ها: آنتن، آرایه فازی، ماتریس باتلر، رادار، میکرواستریپ.

### ۱- مقدمه

می‌باید. بنابراین، امکان پایش زاویه‌ای فضا در محدوده وسیعی فراهم می‌شود. در یک آنتن آرایه فازی، به کمک ادوات فعال مختلف، مانند عناصر فریتی [۹] و دیودهای پین [۱۰]، می‌توان جهت بیشینه پرتو تشعشعی آنتن را، با تغییر در فاز تغذیه آنتن‌های سازنده آرایه، تغییر داد [۱۱]. رهیافتی مشابه، و البته ساده‌تر و ارزان‌تر، استفاده از ادواتی غیرفعال، موسوم به ماتریس باتلر است [۱۲]. ماتریس باتلر، شبکه‌ای هم‌پاسخ با  $n$  درگاه ورودی و  $n$  درگاه خروجی است که با اعمال تغذیه به درگاه‌های ورودی مشخص، اختلاف‌فاز خطی و مشخصی در درگاه‌های خروجی آن ایجاد می‌شود [۱۳]. با افزایش تعداد درگاه‌های چنین عنصری، که به منزله کوپلر برای اعمال تغذیه به آنتن‌های مورد نظر است، دست‌یابی به پهنای پرتو باریک‌تر، مهیا می‌شود. در این مقاله، نتایج بررسی و شبیه‌سازی ماتریس باتلر از مرتبه  $8 \times 8$  ارائه می‌شود. سپس، باتوجه‌به اینکه دست‌یابی به پهنای پرتوی باریک مدنظر است، به ارائه نتایج شبیه‌سازی ماتریس باتلر  $32 \times 32$  پرداخته می‌شود. از ویژگی‌های طرح نهایی پیشنهادی  $32 \times 32$  ما، علاوه بر پهنای پرتو باریک، پیاده‌سازی آن

امروزه، سامانه‌های پروازی مختلف در بسیاری از زمینه‌های علمی [۱]، صنعتی [۲]، تجاری [۳]، و نظامی [۴]، کاربردهای روبه‌رشدی را به خود اختصاص داده‌اند. در ساختمان یک چنین سامانه‌ای، بخش‌های متنوعی باید طراحی شوند که یکی از این بخش‌ها، رادار است [۵]. بسیاری از کاربردهای این سامانه‌ها، مستلزم ردگیری جهات و یا اهداف در محدوده زاویه‌ای باریکی است که با به‌کارگیری رادارهایی شامل آنتن‌هایی با پهنای پرتو باریک، قابل دستیابی است [۶]. این پهنای پرتو به همراه وجود بهره مناسب، به کمک آرایه‌ای از آنتن‌ها قابل حصول است [۷]. از طرفی، باید امکان تنظیم پرتو باریک یاد شده در محدوده قابل قبولی از جهات مختلف، وجود داشته باشد. این ویژگی، با به‌کارگیری آنتن‌های آرایه فازی قابل دستیابی است [۸]. در چنین آرایه‌ای، به کمک تغییر فاز آنتن‌ها، بیشینه تشعشع در الگوی تشعشعی کل آرایه، موسوم به گلبرگ اصلی<sup>۲</sup>، تغییر

\* رایانامه نویسنده مسئول: Moazami@abru.ac.ir

<sup>2</sup> main lobe



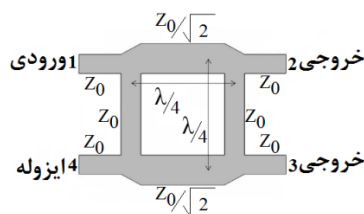
## ۲-۲- ماتریس باتلر و عناصر سازنده آن

### ۲-۲-۱- مقدمه

در حالت کلی، ماتریس باتلر، شبکه‌ای است شامل  $n$  درگاه ورودی و  $n$  درگاه خروجی که از چندین کوپلر هایبرید، تقاطع، و اختلاف‌فاز دهنده تشکیل شده است.

### ۲-۲-۲- کوپلر هایبرید

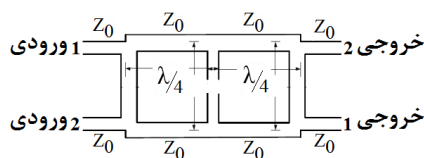
کوپلرها، ادواتی برای تقسیم توان با نسبت دلخواه هستند. کوپلرهای هایبرید، نوع خاصی از کوپلرها با ۴ درگاه هستند. ویژگی اصلی کوپلر هایبرید، تقسیم توان ورودی به دو قسمت با دامنه و فازهای دلخواه و با تطبیق امپدانس نسبت به منبع و بار است [۲۰]. در شکل (۱)، نمایی از یک کوپلر هایبرید، موسوم به خط شاخه‌دار<sup>۱</sup> مشاهده می‌شود. مطابق شکل (۱)، بخش‌های ضخیم‌تر، دارای امپدانس مشخصه‌ای متفاوت با سایر بخش‌ها هستند.



شکل (۱). نمای شماتیک کوپلر خط شاخه‌دار میکرواستریپ [۲۰].

### ۲-۲-۳- تقاطع‌ها

تقاطع‌ها از دیگر عناصر در طراحی ماتریس باتلرها به شمار می‌روند که می‌توان آنها را با پشت سرهم قراردادن دو کوپلر هایبرید ایجاد نمود (شکل (۲)).



شکل (۲). نمای شماتیک یک تقاطع حاصل از دو کوپلر هایبرید [۲۱]. وقتی موجی به یکی از درگاه‌های ورودی آن اعمال می‌شود، تنها به خروجی درگاهی راه می‌یابد که در طرف مخالف درگاه ورودی قرار دارد (مطابق شکل (۲)) و دو درگاه دیگر نسبت به آن ایزوله است. به این قطعه، کوپلر ۰ دسی‌بل هم گفته می‌شود [۲۱].

### ۲-۲-۴- اختلاف‌فاز دهنده

بسته به مرتبه ماتریس باتلر و چگونگی طراحی آن، نیاز به چندین بخش اختلاف‌فاز دهنده در طرح مورد نظر است. این بخش را نیز می‌توان به کمک خطوط میکرواستریپ تحقق

بر یک بُرد تک‌لایه است. هدف طراحی، برای طیف فرکانسی مشخص در باند  $X$  است که کاربردهای گسترده‌ای در پیاده‌سازی رادارهای مختلف دارد. این ساختار، می‌تواند به گونه‌های مختلفی پیاده‌سازی شود که برای پیاده‌سازی آن بر یک بُرد مدارچاپی، طراحی به کمک خطوط انتقال میکرواستریپ پیشنهاد می‌شود [۱۴]. برای بررسی پهنای پرتو حاصل، لازم است اتصال شبکه طراحی شده به آرایه‌ای از آنتن‌ها مطالعه شود. آنتن‌های در نظر گرفته شده در اینجا، آنتن‌هایی میکرواستریپ، با تغذیه خط میکرواستریپ هستند. پس از اعمال موج به دو درگاه ورودی مشخص ماتریس باتلر  $32 \times 32$ ، و اتصال آن به آنتن‌های میکرواستریپ، پهنای پرتوی در حد  $3/5$  درجه به دست می‌آید.

این مقاله، شامل بخش‌های زیر است: در بخش ۲، مروری بر ساختارهای ماتریس باتلر و بخش‌های سازنده آن صورت می‌گیرد. همچنین به اختصار، آنتن میکرواستریپ از نوع تغذیه با خط معرفی می‌شود. در بخش ۳، نتایج شبیه‌سازی ماتریس‌های باتلر ارائه، و الگوی تشعشعی ناشی از تغذیه یک آرایه از آنتن‌های میکرواستریپ معرفی شده در بخش ۲، با اعمال موج به درگاه‌های مختلف ماتریس باتلر نشان داده می‌شود. در بخش ۴ نیز، مقاله با ارائه نتیجه‌گیری، خاتمه می‌یابد.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- مقدمه

کاربرد اصلی یک شبکه ماتریس باتلر، در کوپلاژ تغذیه به آنتن‌های سازنده یک آرایه فازی است. این شبکه، مقادیر دامنه و فاز مورد نیاز برای آرایه‌ای از آنتن‌ها را برای تشعشع در جهت مطلوب، بدون تغییر در ساختار فیزیکی تغذیه آنتن‌ها و یا به‌کارگیری ادوات فعال، فراهم می‌آورد. این شبکه کم اتلاف و جهت ده پرتو، پرتوهایی متعامد بر یکدیگر در درگاه‌های خروجی خود ایجاد می‌کند [۱۵]. درگاه‌های ورودی از یکدیگر ایزوله بوده و پس از اعمال موج به هریک از آنها، موج به طور مساوی بین درگاه‌های خروجی تقسیم می‌شود [۱۶]. این ویژگی باعث می‌شود که بتوان به تعداد درگاه‌های ورودی ماتریس باتلر، پرتو مستقل و در جهتی متفاوت تولید نمود. متعامد بودن پرتوها در این شبکه، امکان کنترل توان هر پرتو مستقل از دیگر پرتوها را نتیجه می‌دهد.

عمده طراحی‌های ماتریس باتلر، بر اساس خطوط انتقال میکرواستریپ است [۱۷]. اگرچه تعداد درگاه‌های شبکه ماتریس باتلر معمولاً به صورت  $2^m$ ، که  $m$  یک عدد صحیح مثبت است، گزارش شده است، با این حال، تعداد درگاه‌های متفاوت با رابطه فوق نیز در مراجع مختلف بررسی شده‌اند [۱۸ و ۱۹].

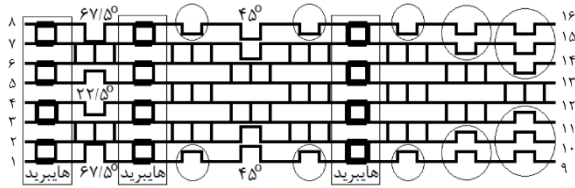
<sup>۱</sup> branch-line

$$\theta_{\max} = -\sin^{-1}\left(\frac{\delta\lambda}{2\pi d}\right) \quad (4)$$

که در آن  $\delta$ ، اختلاف‌فاز بین درگاه‌های خروجی ماتریس باتلر (ورودی آنتن‌ها)، و  $d$  فاصله بین عناصر آنتن‌های مجاور در آرایه است. روند طراحی ماتریس باتلر از مراتب مختلف در مراجع مختلف به تفصیل بیان شده است [۲۲ و ۲۵].

### ۲-۳-۲- ماتریس باتلر ۸×۸

ابتدا نتایج بررسی یک ماتریس باتلر ۸×۸ ارائه می‌شود. بخش‌های اصلی این ماتریس باتلر، ۱۲ کوپلر هایبرید ۹۰ درجه، ۱۶ تقاطع، ۴ اختلاف‌فاز دهنده ۴۵ درجه، ۲ اختلاف‌فاز دهنده ۶۷/۵ درجه و ۲ اختلاف‌فاز دهنده ۲۲/۵ درجه است. طرح مورد نظر، مانند شکل (۴) است. بخش‌های مشخص شده درون کادر دایروی، خطوط گذاری به طول  $\lambda$  هستند که بدون ایجاد اختلاف‌فاز اضافی، باعث هم‌تراز شدن محل درگاه‌های خروجی، و در نتیجه آنتن‌های آرایه، می‌شوند. بخش‌های ضخیم‌تر، خطوطی با امپدانس مشخصه‌ای متفاوت ( $Z_0/\sqrt{2}$ ) هستند.



شکل (۴). طرح شماتیک برای ماتریس باتلر ۸×۸ میکرواستریپ (اعداد ۱ تا ۱۶، بیانگر شماره درگاه هستند).

### ۲-۳-۳- ماتریس باتلر ۳۲×۳۲

گام بعدی، ارائه یک ساختار ۳۲×۳۲ است. بخش‌های اصلی یک ماتریس باتلر، ۸۰ کوپلر هایبرید ۹۰ درجه، ۲۳۲ تقاطع، ۲ اختلاف‌فاز دهنده ۱۶۸/۷۵ درجه، ۴ اختلاف‌فاز دهنده ۱۵۷/۵ درجه، ۲ اختلاف‌فاز دهنده ۱۴۶/۲۵ درجه، ۸ اختلاف‌فاز دهنده ۱۳۵ درجه، ۲ اختلاف‌فاز دهنده ۱۲۳/۷۵ درجه، ۴ اختلاف‌فاز دهنده ۱۱۲/۵ درجه، ۲ اختلاف‌فاز دهنده ۱۰۱/۲۵ درجه، ۱۶ اختلاف‌فاز دهنده ۹۰ درجه، ۲ اختلاف‌فاز دهنده ۷۸/۷۵ درجه، ۴ اختلاف‌فاز دهنده ۶۷/۵ درجه، ۲ اختلاف‌فاز دهنده ۵۶/۲۵ درجه، ۸ اختلاف‌فاز دهنده ۴۵ درجه، ۲ اختلاف‌فاز دهنده ۳۳/۷۵ درجه، ۴ اختلاف‌فاز دهنده ۲۵ درجه و ۲ اختلاف‌فاز دهنده ۱۱/۲۵ درجه است [۲۶].

مطابق روال معرفی شده در [۲۶] برای طرح ماتریس باتلر شامل کوپلر هایبرید ۹۰ درجه، از مرتبه  $N$  و با حضور  $n$  ردیف اختلاف‌فاز دهنده، تعداد کل اختلاف‌فاز دهنده‌ها برابر با  $(n-1)N/2$  است که برای ساختاری از مرتبه ۳۲ و طراحی شده در ۵

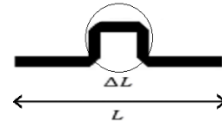
بخشید. مانند شکل (۳)، برای ایجاد اختلاف‌فاز  $\varphi$ ، باید طول کل خط طراحی شده،  $L$ ، در رابطه زیر صادق باشد:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} L \quad (1)$$

که در آن  $\lambda$ ، طول موج انتشار بر خط میکرواستریپ است که مطابق رابطه زیر بر حسب طول موج فضای آزاد  $\lambda_0$  و ثابت دی‌الکتریک مؤثر  $\epsilon_{\text{reff}}$  بیان می‌شود:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (2)$$

در طرح‌های کاربردی، بخشی از خط، به طول ثابت، برای تحقق همه اختلاف‌فاز دهنده‌ها در نظر گرفته می‌شود. سپس برای تعیین اختلاف‌فاز مدنظر، بخشی به طول  $\Delta L$  مطابق شکل (۳) اضافه می‌شود. در طراحی‌های این مقاله، طول ثابت مدنظر،  $3\lambda/4$  است و مقدار  $\Delta L$ ، بسته به میزان اختلاف‌فاز مورد نظر محاسبه و طراحی می‌شود.



شکل (۳). اختلاف‌فاز دهنده میکرواستریپ.

علاوه بر بخش‌های ذکر شده، گاهی برای تحقق شرط تطبیق امپدانس برای تغذیه آنتن‌ها، لازم است تا از خطوط دیگری نیز با طول‌های مشخص در طراحی مدنظر استفاده شود.

### ۲-۳-۲- طراحی ماتریس باتلر

#### ۲-۳-۱- طراحی

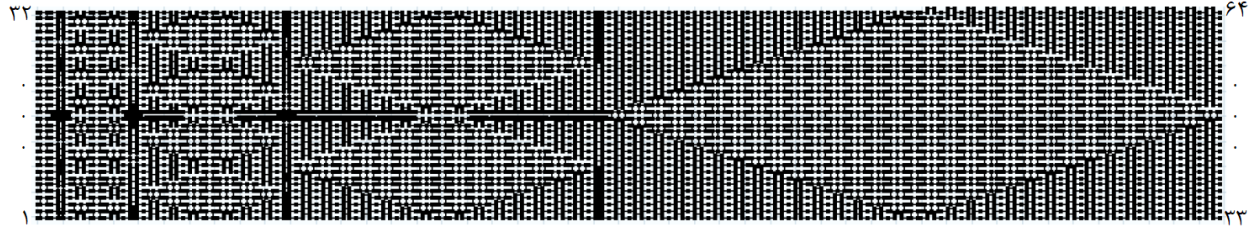
اگر شبکه ماتریس باتلر به یک آرایه از آنتن‌ها وصل شود، می‌تواند باعث تغذیه آنتن‌ها با یک میزان دامنه برابر و اختلاف‌فاز ثابت بین عناصر مجاور شود. این، باعث ایجاد پرتوهایی می‌شود که جهت آن علاوه بر طول موج، به اینکه کدام درگاه ورودی تغذیه شده است، وابسته است [۲۲]. اگر تغذیه تنها به برخی از درگاه‌های ورودی اعمال شود، دیگر درگاه‌های ورودی، به بار ۵۰ اهم مختوم می‌شوند. یک ماتریس باتلر، تغییر فاز پیش‌رونده در درگاه‌های خروجی خود دارد که اختلاف‌فاز بین درگاه‌های خروجی مطابق زیر است [۲۳]:

$$\text{Phase Difference} = \pm \frac{2n-1}{N} \times 180^\circ \quad (3)$$

که  $N$ ، مرتبه ماتریس باتلر (تعداد درگاه‌های ورودی - خروجی)، و  $n$  عددی است که از ۱ تا  $N$  تغییر می‌کند. پس از اتصال ماتریس باتلر به آنتن آرایه فازی، بیشینه الگوی تشعشعی در زاویه زیر مشاهده می‌شود [۲۴]:

ردیف، برابر با ۶۴ می‌شود. در طرح شماتیک معرفی شده در

شکل (۵) نیز، تعداد کل اختلاف فاز دهنده‌ها ۶۴ عدد است.



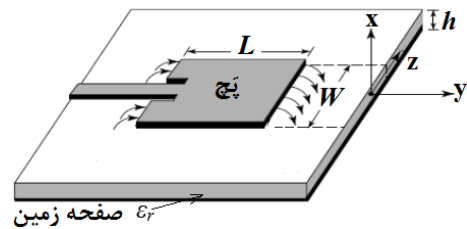
شکل (۵). طرح شماتیک برای ماتریس باتلر ۳۲×۳۲ میکرواستریپ (اعداد ۱، ...، ۶۴، بیانگر شماره درگاه‌ها هستند).

## ۴-۲- آنتن میکرواستریپ از نوع تغذیه با خط

### ۴-۲-۱- معرفی

باتوجه به اینکه باید شبکه ماتریس باتلر طراحی شده به آرایه‌ای از آنتن‌های میکرواستریپ وصل شود، در ادامه به اختصار چنین آنتنی مرور می‌شود.

یکی از انواع متداول و مناسب آنتن‌ها به‌ویژه برای کاربردهای مناسب در پوشش بر سطوح برد مداری و مجتمع‌سازی آنها، آنتن‌های میکرواستریپ است. تغذیه چنین آنتن‌هایی، به طرق مختلف صورت می‌گیرد که شامل تغذیه به کمک کابل هم‌محور، خط میکرواستریپ (شکل (۶))، تزویج از طریق روزنه، و نزدیکی با یک پیچ میکرواستریپ دیگر است. روال طراحی چنین آنتنی در مراجع مختلف ذکر شده است [۲۷].



شکل (۶). تغذیه آنتن میکرواستریپ از طریق خط میکرواستریپ

[۲۷].

از آنتن شکل (۶)، در یک آرایه استفاده می‌شود که آرایه‌ها توسط خروجی‌های ماتریس باتلر تغذیه می‌شوند. الگوی تشعشعی کل آرایه، مطابق اصل حاصل ضرب پرتوها، محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$E_{total} = E_s \times AF \quad (۵)$$

که در آن  $E_s$  میدان تشعشعی مربوط به یکی از آنتن‌ها و  $AF$  ضریب آرایه به صورت زیر است [۲۷]:

$$AF = \sum_{n=1}^N a_n e^{+j(n-1)(kd \cos \theta + \beta_n)} \quad (۶)$$

که در آن  $\theta$  زاویه پرتو،  $d$  فاصله بین عناصر آرایه، و  $\beta_n$  و  $a_n$  فاز و دامنه تحریک  $n$  امین عنصر هستند. در این رابطه، از اثر تزویج متقابل آنتن‌ها صرف نظر شده است. در طرح مورد نظر ارائه شده در این مقاله، فاصله میان آنتن‌ها نصف طول موج است و در این فاصله، اثر تزویج متقابل قابل صرف نظر کردن است. با این حال، در حالت کلی، این اثر، پارامترهای مختلف از جمله امپدانس ورودی، ضریب بازتاب، و بنابراین، عملکرد آرایه آنتن را بر حسب

مشخصات تشعشعی، نسبت سیگنال به نویز، و سطح مقطع اداری، تحت تأثیر قرار می‌دهد. تاکنون روش‌ها و طرح‌های مختلفی برای عملکرد بهینه آرایه فازی، با در نظر گرفتن اثرات تزویج متقابل ارائه شده است. از جمله طرح‌های ارائه شده می‌توان به آنتن‌های پیچ میکرواستریپ با تغذیه یکنواخت و هندسه فرکتال، حذف انتشار امواج سطحی با استفاده از پیاده‌سازی ساختارهای شکاف باند الکترومغناطیس، ساختار صفحه زمین شکاف‌دار، دی‌کوپلرهای خط انتقال، و تشدیدگرهای مغناطیسی بر اساس حلقه‌های بارگذاری شده خازنی، اشاره کرد که نتایج مطالعه آنها در مقالات متعددی ارائه شده است [۲۸].

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- روش شبیه‌سازی

برای اجرای شبیه‌سازی‌ها، از نرم‌افزار کامسول که بر اساس روش اجزای محدود عمل می‌کند استفاده شده است [۲۹]. در برخی از محاسبات نیز از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. مقادیر پارامترهای مداری خطوط انتقال، توسط ابزار محاسبه‌گر خط به دست آمده است. فرکانس کار برای طرح‌های مختلف، ۹/۵ گیگاهرتز انتخاب شده است.

### ۳-۲- زیرلایه مورد استفاده

بخش‌های مختلف تشکیل‌دهنده ساختار ماتریس باتلر و آنتن‌ها، بر روی زیرلایه Rogers RT/duroid 5880 طراحی شده‌اند که دارای ویژگی تلفات الکتریکی بسیار کم، همسان‌گرد بودن، و ثابت ماندن پارامترهای آن با تغییر فرکانس است. پارامترهای مشخص‌کننده این زیرلایه ضریب دی‌الکتریک ۲/۲، تانژانت تلفات ۰/۰۰۰۹، و ضخامت ۳۱ میل (۰/۷۸۷ میلی‌متر) هستند. مقادیر مقاومت، رسانایی، ظرفیت و خودالقایی در واحد طول، توسط ابزار محاسبه‌گر خط به صورت  $12/41 \Omega/m$ ،  $272/9 \text{ nH/m}$ ،  $0 \text{ S/m}$ ، و  $107/1 \text{ pF/m}$  محاسبه شده‌اند که به ترتیب با مقادیر ۰، ۲۵۰، و ۱۰۰ تقریب زده شده‌اند.

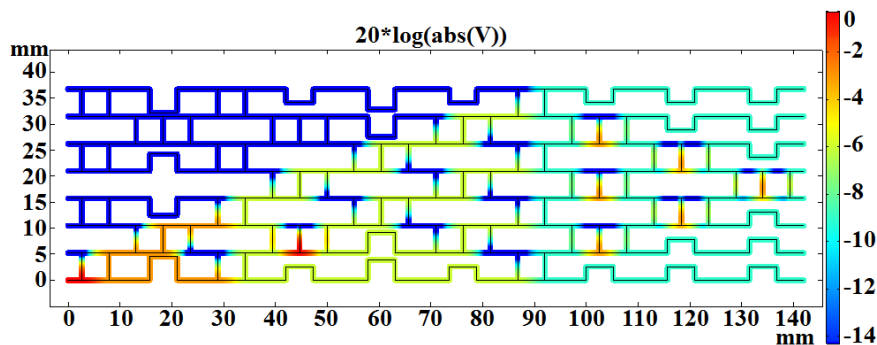
### ۳-۳- شبیه‌سازی ساختارهای ماتریس باتلر

#### ۳-۳-۱- ماتریس باتلر ۸×۸

بر اساس مطالب بخش ۲-۳-۲ و طرح شماتیک شکل (۴)، شکل

مختلف ورودی نشان می‌دهد. از این مقادیر، در مرحله بعدی برای به‌دست‌آوردن الگوی تشعشعی آرایه فازی مورد نظر و نیز زاویه بیشینه تشعشع استفاده می‌شود. ابعاد طرح صورت‌گرفته، همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، ۴۰ در ۱۴۰ میلی‌متر بر زیرلایه معرفی شده در بخش (۲-۳) است. شکل (۸)، طیف انتقال توان در ساختار را برای برخی از پارامترهای پراکندگی، وقتی که موج ورودی به درگاه ۱ اعمال شده است، نشان می‌دهد.

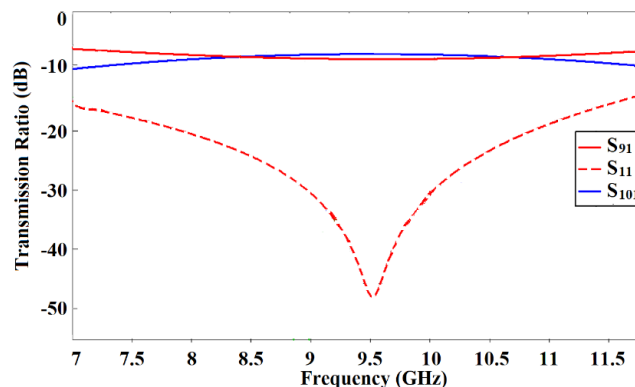
(۷) نتیجه شبیه‌سازی توزیع ولتاژ معادل بر ساختار خط انتقالی ماتریس باتلر  $8 \times 8$  را برای تحریک یکی از درگاه‌های ورودی نشان می‌دهد. باتوجه‌به تقارن ساختار، برای تحریک سایر درگاه‌های ورودی نتیجه مشابهی به دست می‌آید. مطابق شکل، به‌خوبی تقسیم مساوی توان، به میزان ۹ دی‌بی در درگاه‌های خروجی و نیز ایزولاسیون درگاه‌های ورودی، مشاهده می‌شود. در این نتایج، از تلفات ساختار، با صفر در نظر گرفتن دو پارامتر  $R$  و  $G$  در مدل خط انتقال، صرف‌نظر شده است. جدول (۱)، فاز درگاه‌های خروجی و نیز اختلاف‌فاز را به‌زای اعمال موج به درگاه‌های



شکل (۷). نتیجه شبیه‌سازی توزیع ولتاژ معادل خط بر ساختار ماتریس باتلر  $8 \times 8$  وقتی که موجی از درگاه ورودی ۱ (مطابق شکل ۴)، اعمال می‌شود.

جدول (۱). فاز ولتاژ محاسبه شده در هر درگاه خروجی از ماتریس باتلر  $8 \times 8$  بر حسب زاویه.

		شماره درگاه خروجی								اختلاف‌فاز
		۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	
شماره درگاه تحریک	۱	۶۷/۵	۴۵	۲۲/۵	۰	-۲۲/۵	-۴۵	-۶۷/۵	-۹۰	۲۲/۵
	۲	-۲۲/۵	۱۳۵	-۶۷/۵	۹۰	-۱۱۲/۵	۴۵	-۱۵۷/۵	۰	-۱۵۷/۵
	۳	۴۵	-۶۷/۵	-۱۸۰	۶۷/۵	-۴۵	-۱۵۷/۵	۹۰	-۲۲/۵	۱۱۲/۵
	۴	-۴۵	۲۲/۵	۹۰	۱۵۷/۵	-۱۳۵	-۶۷/۵	۰	۶۷/۵	-۶۷/۵
	۵	۶۷/۵	۰	-۶۷/۵	-۱۳۵	۱۵۷/۵	۹۰	۲۲/۵	-۴۵	۶۷/۵
	۶	-۲۲/۵	۹۰	-۱۵۷/۵	-۴۵	۶۷/۵	-۱۸۰	-۶۷/۵	۴۵	-۱۱۲/۵
	۷	۰	-۱۵۷/۵	۴۵	-۱۱۲/۵	۹۰	-۶۷/۵	۱۳۵	-۲۲/۵	۱۵۷/۵
	۸	-۹۰	-۶۷/۵	-۴۵	-۲۲/۵	۰	۲۲/۵	۴۵	۶۷/۵	-۲۲/۵



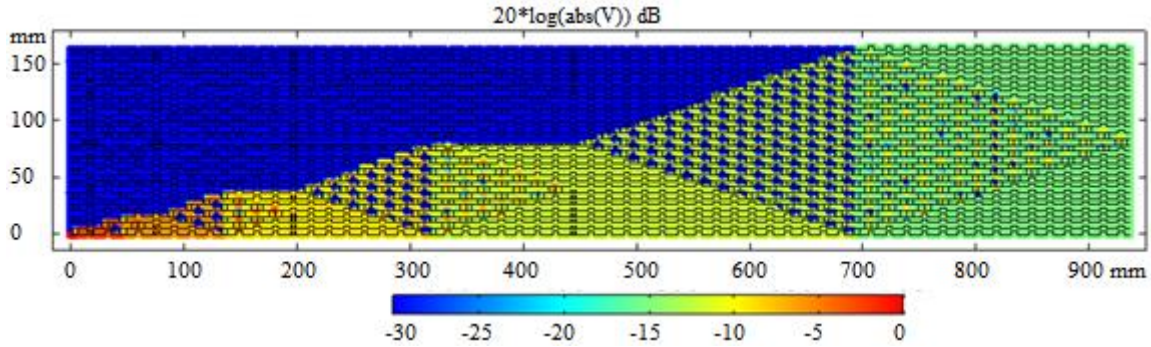
شکل (۸). طیف انتقال توان ساختار شکل (۷) برای اندازه پارامترهای پراکندگی  $S_{11}$ ،  $S_{91}$  و  $S_{101}$ ، وقتی که موج به درگاه شماره ۱ (مطابق شکل ۴) اعمال شده است.



۳-۲- ماتریس باتلر ۳۲×۳۲

شکل (۹)، نتیجه شبیه‌سازی توزیع ولتاژ معادل بر ساختار خط انتقالی ماتریس باتلر ۳۲×۳۲ را برای تحریک یکی از درگاه‌های ورودی نشان می‌دهد. به‌خوبی تقسیم توان مساوی ۱۵ دسی‌بل در درگاه‌های خروجی مشاهده می‌شود.

ابعاد طرح صورت‌گرفته، همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، ۹۴۰ در ۱۶۰ میلی‌متر بر زیرلایه معرفی شده در بخش (۳-۲) است. جدول (۲)، فاز درگاه‌های خروجی و نیز اختلاف‌فاز را به‌ازای اعمال موج به درگاه‌های مختلف ورودی نشان می‌دهد.



شکل (۹). نتیجه شبیه‌سازی توزیع ولتاژ معادل خط بر ساختار ماتریس باتلر ۳۲×۳۲ وقتی که موجی از درگاه ورودی ۱ (مطابق شکل ۵)، اعمال می‌شود.

جدول (۲). فاز ولتاژ محاسبه شده در هر درگاه خروجی از ماتریس باتلر ۳۲×۳۲ بر حسب زاویه.

		شماره درگاه خروجی							
		۳۳	۳۴	۳۵	۳۶	۳۷	۳۸	۳۹	۴۰
شماره درگاه تحریک	۱	-۱۱/۲۵	۶۷/۵	۵۶/۲۵	۱۳۵	۳۳/۷۵	۱۱۲/۵	-۳۳/۷۵	-۱۸۰
	۲	-۱۰/۱۲۵	۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	-۱۵۷/۵	-۱۲۳/۷۵	-۹۰
	۳	۶۷/۵	-۳۳/۷۵	-۴۵	-۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	۱۱/۲۵	-۱۳۵	-۱۰/۱۲۵
	۴	-۲۲/۵	۵۶/۲۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	۲۲/۵	۱۰/۱۲۵	۱۳۵	-۱۱/۲۵
	۵	۱۴۶/۲۵	۱۳۵	۳۳/۷۵	۲۲/۵	۱۱/۲۵	۰	۱۲۳/۷۵	-۱۱۲/۵
	۶	۵۶/۲۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	۱۱۲/۵	-۷۸/۷۵	۹۰	۳۳/۷۵	-۲۲/۵
	۷	۱۳۵	-۵۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۱۱/۲۵	۰	۱۶۸/۷۵	-۶۷/۵	-۱۲۳/۷۵
	۸	۴۵	۳۳/۷۵	۱۱۲/۵	۱۰/۱۲۵	-۹۰	-۱۰/۱۲۵	-۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵
	۹	۱۶۸/۷۵	-۱۵۷/۵	۱۴۶/۲۵	-۱۸۰	۳۳/۷۵	۶۷/۵	۱۱/۲۵	۴۵
	۱۰	۷۸/۷۵	-۶۷/۵	۵۶/۲۵	-۹۰	-۵۶/۲۵	۱۵۷/۵	-۷۸/۷۵	۱۳۵
	۱۱	-۱۵۷/۵	۵۶/۲۵	۰	-۱۴۶/۲۵	۶۷/۵	-۷۸/۷۵	-۱۳۵	۷۸/۷۵
	۱۲	۱۱۲/۵	۱۴۶/۲۵	-۹۰	-۵۶/۲۵	-۲۲/۵	۱۱/۲۵	۱۳۵	۱۶۸/۷۵
	۱۳	-۱۲۳/۷۵	-۱۸۰	۳۳/۷۵	-۲۲/۵	-۷۸/۷۵	-۱۳۵	۷۸/۷۵	۲۲/۵
	۱۴	۱۴۶/۲۵	-۹۰	-۵۶/۲۵	۶۷/۵	-۱۶۸/۷۵	-۴۵	-۱۱/۲۵	۱۱۲/۵
	۱۵	-۱۸۰	-۵۶/۲۵	۱۵۷/۵	-۷۸/۷۵	-۱۳۵	-۱۱/۲۵	-۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵
	۱۶	۹۰	۳۳/۷۵	۶۷/۵	۱۱/۲۵	۱۳۵	۷۸/۷۵	۱۱۲/۵	۵۶/۲۵
	۱۷	۱۴۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۱۶۸/۷۵	-۱۳۵	۱۰/۱۲۵	۱۵۷/۵	۱۲۳/۷۵	-۱۸۰
	۱۸	۵۶/۲۵	-۶۷/۵	۷۸/۷۵	-۴۵	۱۱/۲۵	-۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	-۹۰
	۱۹	-۱۵۷/۵	۷۸/۷۵	۴۵	-۷۸/۷۵	۱۵۷/۵	۳۳/۷۵	۰	-۱۲۳/۷۵
	۲۰	۱۱۲/۵	۱۶۸/۷۵	-۴۵	۱۱/۲۵	۶۷/۵	۱۲۳/۷۵	-۹۰	-۳۳/۷۵
	۲۱	-۱۰/۱۲۵	-۱۳۵	۱۰/۱۲۵	۶۷/۵	۳۳/۷۵	۰	-۱۲۳/۷۵	-۱۵۷/۵
	۲۲	۱۶۸/۷۵	-۴۵	۱۱/۲۵	۱۵۷/۵	-۵۶/۲۵	۹۰	۱۴۶/۲۵	-۶۷/۵
	۲۳	-۱۳۵	۱۱/۲۵	-۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	۰	۱۴۶/۲۵	۲۲/۵	۱۶۸/۷۵
	۲۴	۱۳۵	۱۰/۱۲۵	۱۵۷/۵	۱۲۳/۷۵	-۹۰	-۱۲۳/۷۵	-۶۷/۵	-۱۰/۱۲۵

		شماره درگاه خروجی							
		۳۳	۳۴	۳۵	۳۶	۳۷	۳۸	۳۹	۴۰
۲۵	-۱۲۳/۷۵	۱۱۲/۵	۱۶۸/۷۵	-۱۸۰	۱۱/۲۵	۲۲/۵	-۵۶/۲۵	-۴۵	
۲۶	۱۴۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۷۸/۷۵	-۹۰	-۷۸/۷۵	۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۴۵	
۲۷	-۱۱۲/۵	-۵۶/۲۵	۰	-۱۶۸/۷۵	۲۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۳۳/۷۵	
۲۸	۱۵۷/۵	۳۳/۷۵	-۹۰	-۷۸/۷۵	-۶۷/۵	-۵۶/۲۵	۴۵	۵۶/۲۵	
۲۹	-۱۰/۱۲۵	۴۵	۱۱/۲۵	-۶۷/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۳۳/۷۵	-۱۱۲/۵	
۳۰	۱۶۸/۷۵	۱۳۵	-۷۸/۷۵	۲۲/۵	۱۲۳/۷۵	-۱۳۵	-۱۲۳/۷۵	-۲۲/۵	
۳۱	-۱۸۰	۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۱۲۳/۷۵	۶۷/۵	۱۶۸/۷۵	
۳۲	۹۰	-۱۲۳/۷۵	۲۲/۵	-۵۶/۲۵	۴۵	-۳۳/۷۵	-۲۲/۵	-۱۰/۱۲۵	

		شماره درگاه خروجی							
		۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶	۴۷	۴۸
شماره درگاه نخریک	۱	-۱۱/۲۵	۶۷/۵	۵۶/۲۵	۱۳۵	۳۳/۷۵	۱۱۲/۵	-۳۳/۷۵	-۱۸۰
	۲	-۱۰/۱۲۵	۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	-۱۵۷/۵	-۱۲۳/۷۵	-۹۰
	۳	۶۷/۵	-۳۳/۷۵	-۴۵	-۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	۱۱۲/۵	-۱۳۵	-۱۰/۱۲۵
	۴	-۲۲/۵	۵۶/۲۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	۲۲/۵	۱۰/۱۲۵	۱۳۵	-۱۱/۲۵
	۵	۱۴۶/۲۵	۱۳۵	۳۳/۷۵	۲۲/۵	۱۱/۲۵	۰	۱۲۳/۷۵	-۱۱۲/۵
	۶	۵۶/۲۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	۱۱۲/۵	-۷۸/۷۵	۹۰	۳۳/۷۵	-۲۲/۵
	۷	۱۳۵	-۵۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۱۱/۲۵	۰	۱۶۸/۷۵	-۶۷/۵	-۱۲۳/۷۵
	۸	۴۵	۳۳/۷۵	۱۱۲/۵	۱۰/۱۲۵	-۹۰	-۱۰/۱۲۵	-۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵
	۹	-۱۱/۲۵	۲۲/۵	-۳۳/۷۵	۰	-۱۴۶/۲۵	-۱۱۲/۵	-۱۶۸/۷۵	-۱۳۵
	۱۰	-۱۰/۱۲۵	۱۱۲/۵	-۱۲۳/۷۵	۹۰	۱۲۳/۷۵	-۲۲/۵	۱۰/۱۲۵	-۴۵
	۱۱	۲۲/۵	-۱۲۳/۷۵	-۱۸۰	۳۳/۷۵	-۱۱۲/۵	۱۰/۱۲۵	۴۵	-۱۰/۱۲۵
	۱۲	-۶۷/۵	-۳۳/۷۵	۹۰	۱۲۳/۷۵	۱۵۷/۵	-۱۶۸/۷۵	-۴۵	-۱۱/۲۵
	۱۳	۵۶/۲۵	۰	-۱۴۶/۲۵	۱۵۷/۵	۱۰/۱۲۵	۴۵	-۱۰/۱۲۵	-۱۵۷/۵
	۱۴	-۳۳/۷۵	۹۰	۱۲۳/۷۵	-۱۱۲/۵	۱۱/۲۵	۱۳۵	۱۶۸/۷۵	-۶۷/۵
	۱۵	۰	۱۲۳/۷۵	-۲۲/۵	۱۰/۱۲۵	۴۵	۱۶۸/۷۵	۲۲/۵	۱۴۶/۲۵
	۱۶	-۹۰	-۱۴۶/۲۵	-۱۱۲/۵	-۱۶۸/۷۵	-۴۵	-۱۰/۱۲۵	-۶۷/۵	-۱۲۳/۷۵
	۱۷	-۳۳/۷۵	۲۲/۵	-۱۱/۲۵	۴۵	-۷۸/۷۵	-۲۲/۵	-۵۶/۲۵	۰
	۱۸	-۱۲۳/۷۵	۱۱۲/۵	-۱۰/۱۲۵	۱۳۵	-۱۶۸/۷۵	۶۷/۵	-۱۴۶/۲۵	۹۰
	۱۹	۲۲/۵	-۱۰/۱۲۵	-۱۳۵	۱۰/۱۲۵	-۲۲/۵	-۱۴۶/۲۵	-۱۸۰	۵۶/۲۵
	۲۰	-۶۷/۵	-۱۱/۲۵	۱۳۵	-۱۶۸/۷۵	-۱۱۲/۵	-۵۶/۲۵	۹۰	۱۴۶/۲۵
۲۱	۷۸/۷۵	۴۵	-۷۸/۷۵	-۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	-۱۸۰	۵۶/۲۵	۲۲/۵	
۲۲	-۱۱/۲۵	۱۳۵	-۱۶۸/۷۵	-۲۲/۵	۱۲۳/۷۵	-۹۰	-۳۳/۷۵	۱۱۲/۵	
۲۳	۴۵	-۱۶۸/۷۵	۶۷/۵	-۱۴۶/۲۵	-۱۸۰	-۳۳/۷۵	-۱۵۷/۵	-۱۱/۲۵	
۲۴	-۴۵	-۷۸/۷۵	-۲۲/۵	-۵۶/۲۵	۹۰	۵۶/۲۵	۱۱۲/۵	۷۸/۷۵	
۲۵	-۱۲۳/۷۵	۱۱۲/۵	۱۶۸/۷۵	-۱۸۰	۱۱/۲۵	۲۲/۵	-۵۶/۲۵	-۴۵	
۲۶	۱۴۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۷۸/۷۵	-۹۰	-۷۸/۷۵	۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۴۵	
۲۷	-۱۱۲/۵	-۵۶/۲۵	۰	-۱۶۸/۷۵	۲۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۳۳/۷۵	
۲۸	۱۵۷/۵	۳۳/۷۵	-۹۰	-۷۸/۷۵	-۶۷/۵	-۵۶/۲۵	۴۵	۵۶/۲۵	
۲۹	-۱۰/۱۲۵	۴۵	۱۱/۲۵	-۶۷/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۳۳/۷۵	-۱۱۲/۵	



		شماره درگاه خروجی							
		۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶	۴۷	۴۸
۳۰	۱۶۸/۷۵	۱۳۵	-۷۸/۷۵	۲۲/۵	۱۲۳/۷۵	-۱۳۵	-۱۲۳/۷۵	-۲۲/۵	
۳۱	-۱۸۰	۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۱۲۳/۷۵	۶۷/۵	۱۶۸/۷۵	
۳۲	۹۰	-۱۲۳/۷۵	۲۲/۵	-۵۶/۲۵	۴۵	-۳۳/۷۵	-۲۲/۵	-۱۰/۱۲۵	

		شماره درگاه خروجی							
		۴۹	۵۰	۵۱	۵۲	۵۳	۵۴	۵۵	۵۶
۱	-۱۰/۱۲۵	-۲۲/۵	-۳۳/۷۵	۴۵	-۵۶/۲۵	۲۲/۵	-۱۲۳/۷۵	۹۰	
۲	۱۶۸/۷۵	۶۷/۵	-۱۲۳/۷۵	۱۳۵	-۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	۱۴۶/۲۵	-۱۸۰	
۳	-۲۲/۵	-۱۲۳/۷۵	-۱۳۵	۱۲۳/۷۵	۲۲/۵	-۷۸/۷۵	۱۳۵	۱۶۸/۷۵	
۴	-۱۱۲/۵	-۳۳/۷۵	۱۳۵	-۱۴۶/۲۵	-۶۷/۵	۱۱/۲۵	۴۵	-۱۰/۱۲۵	
۵	۵۶/۲۵	۴۵	-۵۶/۲۵	-۶۷/۵	-۷۸/۷۵	-۹۰	۳۳/۷۵	۱۵۷/۵	
۶	-۳۳/۷۵	۱۳۵	-۱۴۶/۲۵	۲۲/۵	-۱۶۸/۷۵	۰	-۵۶/۲۵	-۱۱۲/۵	
۷	۴۵	-۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	-۷۸/۷۵	-۹۰	۷۸/۷۵	-۱۵۷/۵	۱۴۶/۲۵	
۸	-۴۵	-۵۶/۲۵	۲۲/۵	۱۱/۲۵	-۱۸۰	۱۶۸/۷۵	۱۱۲/۵	-۱۲۳/۷۵	
۹	۷۸/۷۵	۱۱۲/۵	۵۶/۲۵	۹۰	-۵۶/۲۵	-۲۲/۵	-۷۸/۷۵	-۴۵	
۱۰	-۱۱/۲۵	-۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵	-۱۸۰	-۱۴۶/۲۵	۶۷/۵	-۱۶۸/۷۵	۴۵	
۱۱	۱۱۲/۵	-۳۳/۷۵	-۹۰	۱۲۳/۷۵	-۲۲/۵	-۱۶۸/۷۵	۱۳۵	-۱۱/۲۵	
۱۲	۲۲/۵	۵۶/۲۵	-۱۸۰	-۱۴۶/۲۵	-۱۱۲/۵	-۷۸/۷۴	۴۵	۷۸/۷۵	
۱۳	۱۴۶/۲۵	۹۰	-۵۶/۲۵	-۱۱۲/۵	-۱۶۸/۷۵	۱۳۵	-۱۱/۲۵	-۶۷/۵	
۱۴	۵۶/۲۵	-۱۸۰	-۱۴۶/۲۵	-۲۲/۵	۱۰/۱۲۵	-۱۳۵	-۱۰/۱۲۵	۲۲/۵	
۱۵	۹۰	-۱۴۶/۲۵	۶۷/۵	-۱۶۸/۷۵	۱۳۵	-۱۰/۱۲۵	۱۱۲/۵	-۱۲۳/۷۵	
۱۶	۰	-۵۶/۲۵	-۲۲/۵	-۷۸/۷۵	۴۵	-۱۱/۲۵	۲۲/۵	-۳۳/۷۵	
۱۷	-۱۲۳/۷۵	-۶۷/۵	-۱۰/۱۲۵	-۴۵	-۱۶۸/۷۵	-۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	-۹۰	
۱۸	۱۴۶/۲۵	۲۲/۵	۱۶۸/۷۵	۴۵	۱۰/۱۲۵	-۲۲/۵	۱۲۳/۷۵	۰	
۱۹	-۶۷/۵	۱۶۸/۷۵	۱۳۵	۱۱/۲۵	-۱۱۲/۵	۱۲۳/۷۵	۹۰	-۳۳/۷۵	
۲۰	-۱۵۷/۵	-۱۰/۱۲۵	۴۵	۱۰/۱۲۵	۱۵۷/۵	-۱۴۶/۲۵	۰	۵۶/۲۵	
۲۱	-۱۱/۲۵	-۴۵	-۱۶۸/۷۵	۱۵۷/۵	۱۲۳/۷۵	۹۰	-۳۳/۷۵	-۶۷/۵	
۲۲	-۱۰/۱۲۵	۴۵	۱۰/۱۲۵	-۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	-۱۸۰	-۱۲۳/۷۵	۲۲/۵	
۲۳	-۴۵	۱۰/۱۲۵	-۲۲/۵	۱۲۳/۷۵	۹۰	-۱۲۳/۷۵	۱۱۲/۵	-۱۰/۱۲۵	
۲۴	-۱۳۵	-۱۶۸/۷۵	-۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۰	-۳۳/۷۵	۲۲/۵	-۱۱/۲۵	
۲۵	-۳۳/۷۵	-۱۵۷/۵	-۱۰/۱۲۵	-۹۰	۱۰/۱۲۵	۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	۴۵	
۲۶	-۱۲۳/۷۵	-۶۷/۵	۱۶۸/۷۵	۰	۱۱/۲۵	-۱۵۷/۵	-۵۶/۲۵	۱۳۵	
۲۷	-۲۲/۵	۳۳/۷۵	۹۰	-۷۸/۷۵	۱۱۲/۵	-۵۶/۲۵	-۱۳۵	۵۶/۲۵	
۲۸	-۱۱۲/۵	۱۲۳/۷۵	۰	۱۱/۲۵	۲۲/۵	۳۳/۷۵	۱۳۵	۱۴۶/۲۵	
۲۹	-۱۱/۲۵	۱۳۵	۱۰/۱۲۵	۲۲/۵	-۵۶/۲۵	-۱۳۵	۵۶/۲۵	-۲۲/۵	
۳۰	-۱۰/۱۲۵	-۱۳۵	۱۱/۲۵	۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	-۴۵	-۳۳/۷۵	۶۷/۵	
۳۱	-۹۰	-۱۲۳/۷۵	-۱۵۷/۵	-۵۶/۲۵	-۱۳۵	-۳۳/۷۵	۱۵۷/۵	-۱۰/۱۲۵	
۳۲	-۱۸۰	-۳۳/۷۵	۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	۱۳۵	۵۶/۲۵	۶۷/۵	-۱۱/۲۵	

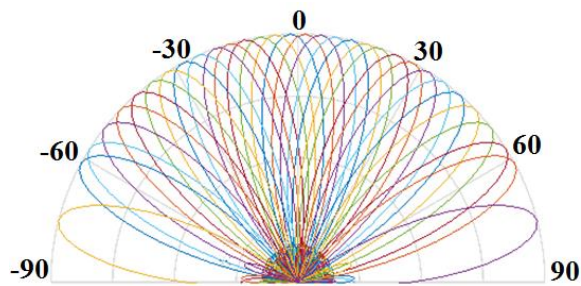
شماره درگاه تحریک

	شماره درگاه خروجی									
	اختلاف فاز	۶۴	۶۳	۶۲	۶۱	۶۰	۵۹	۵۸	۵۷	
شماره درگاه تحریک	۱	۵/۶۲	۹۰	-۱۲۳/۷۵	۲۲/۵	-۵۶/۲۵	۴۵	-۳۳/۷۵	-۲۲/۵	-۱۰۱/۲۵
	۲	-۱۷۴/۳۷	-۱۸۰	۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۱۲۳/۷۵	۶۷/۵	۱۶۸/۷۵
	۳	۱۶۳/۱۲	۱۶۸/۷۵	۱۳۵	-۷۸/۷۵	۲۲/۵	۱۲۳/۷۵	-۱۳۵	-۱۲۳/۷۵	-۲۲/۵
	۴	-۱۵۱/۸۷	-۱۰۱/۲۵	۴۵	۱۱/۲۵	-۶۷/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۳۳/۷۵	-۱۱۲/۵
	۵	۱۴۰/۶۲	۱۵۷/۵	۳۳/۷۵	-۹۰	-۷۸/۷۵	-۶۷/۵	-۵۶/۲۵	۴۵	۵۶/۲۵
	۶	-۱۲۹/۳۷	-۱۱۲/۵	-۵۶/۲۵	۰	-۱۶۸/۷۵	۲۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۳۳/۷۵
	۷	۱۱۸/۱۲	۱۴۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۷۸/۷۵	-۹۰	-۷۸/۷۵	۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۴۵
	۸	-۱۰۶/۸۷	-۱۲۳/۷۵	۱۱۲/۵	۱۶۸/۷۵	-۱۸۰	۱۱/۲۵	۲۲/۵	-۵۶/۲۵	-۴۵
	۹	۹۵/۶۲	۱۳۵	۱۰۱/۲۵	۱۵۷/۵	۱۲۳/۷۵	-۹۰	-۱۲۳/۷۵	-۶۷/۵	-۱۰۱/۲۵
	۱۰	-۸۴/۳۷	-۱۳۵	۱۱/۲۵	-۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	۰	۱۴۶/۲۵	۲۲/۵	۱۶۸/۷۵
	۱۱	۷۳/۱۲	۱۶۸/۷۵	-۴۵	۱۱/۲۵	۱۵۷/۵	-۵۶/۲۵	۹۰	۱۴۶/۲۵	-۶۷/۵
	۱۲	-۶۱/۸۷	-۱۰۱/۲۵	-۱۳۵	۱۰۱/۲۵	۶۷/۵	۳۳/۷۵	۰	-۱۲۳/۷۵	-۱۵۷/۵
	۱۳	۵۰/۶۲	۱۱۲/۵	۱۶۸/۷۵	-۴۵	۱۱/۲۵	۶۷/۵	۱۲۳/۷۵	-۹۰	-۳۳/۷۵
	۱۴	-۳۹/۳۷	-۱۵۷/۵	۷۸/۷۵	۴۵	-۷۸/۷۵	۱۵۷/۵	۳۳/۷۵	۰	-۱۲۳/۷۵
	۱۵	۲۸/۱۲	۵۶/۲۵	-۶۷/۵	۷۸/۷۵	-۴۵	۱۱/۲۵	-۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	-۹۰
	۱۶	-۱۶/۸۷	۱۴۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۱۶۸/۷۵	-۱۳۵	۱۰۱/۲۵	۱۵۷/۵	۱۲۳/۷۵	-۱۸۰
	۱۷	۱۶/۸۷	۹۰	۳۳/۷۵	۶۷/۵	۱۱/۲۵	۱۳۵	۷۸/۷۵	۱۱۲/۵	۵۶/۲۵
	۱۸	-۲۸/۱۲	-۱۸۰	-۵۶/۲۵	۱۵۷/۵	-۷۴/۷۵	-۱۳۵	-۱۱/۲۵	-۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵
	۱۹	۳۹/۳۷	۱۴۶/۲۵	-۹۰	-۵۶/۲۵	۶۷/۵	-۱۶۸/۷۵	-۴۵	-۱۱/۲۵	۱۱۲/۵
	۲۰	-۵۰/۶۲	-۱۲۳/۷۵	-۱۸۰	۳۳/۷۵	-۲۲/۵	-۷۸/۷۵	-۱۳۵	۷۸/۷۵	۲۲/۵
	۲۱	۶۱/۸۷	۱۱۲/۵	۱۴۶/۲۵	-۹۰	-۵۶/۲۵	-۲۲/۵	۱۱/۲۵	۱۳۵	۱۶۸/۷۵
	۲۲	-۷۳/۱۲	-۱۵۷/۵	۵۶/۲۵	۰	-۱۴۶/۲۵	۶۷/۵	-۷۸/۷۵	-۱۳۵	۷۸/۷۵
۲۳	۸۴/۳۷	۷۸/۷۵	-۶۷/۵	۵۶/۲۵	-۹۰	-۵۶/۲۵	۱۵۷/۵	-۷۸/۷۵	۱۳۵	
۲۴	-۹۵/۶۲	۱۶۸/۷۵	-۱۵۷/۵	۱۴۶/۲۵	-۱۸۰	۳۳/۷۵	۶۷/۵	۱۱/۲۵	۴۵	
۲۵	۱۰۶/۸۷	۴۵	۳۳/۷۵	۱۱۲/۵	۱۰۱/۲۵	-۹۰	-۱۰۱/۲۵	-۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵	
۲۶	-۱۱۸/۱۲	۱۳۵	-۵۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۱۱/۲۵	۰	۱۶۸/۷۵	-۶۷/۵	-۱۲۳/۷۵	
۲۷	۱۲۹/۳۷	۵۶/۲۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	۱۱۲/۵	-۷۸/۷۵	۹۰	۳۳/۷۵	-۲۲/۵	
۲۸	-۱۴۰/۶۲	۱۴۶/۲۵	۱۳۵	۳۳/۷۵	۲۲/۵	۱۱/۲۵	۰	۱۲۳/۷۵	-۱۱۲/۵	
۲۹	۱۵۱/۸۷	-۲۲/۵	۵۶/۲۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	۲۲/۵	۱۰۱/۲۵	۱۳۵	-۱۱/۲۵	
۳۰	-۱۶۳/۱۲	۶۷/۵	-۳۳/۷۵	-۴۵	-۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	۱۱/۲۵	-۱۳۵	-۱۰۱/۲۵	
۳۱	۱۷۴/۳۷	-۱۰۱/۲۵	۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	-۱۵۷/۵	-۱۲۳/۷۵	-۹۰	
۳۲	-۵/۶۲	-۱۱/۲۵	۶۷/۵	۵۶/۲۵	۱۳۵	۳۳/۷۵	۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	-۱۸۰	

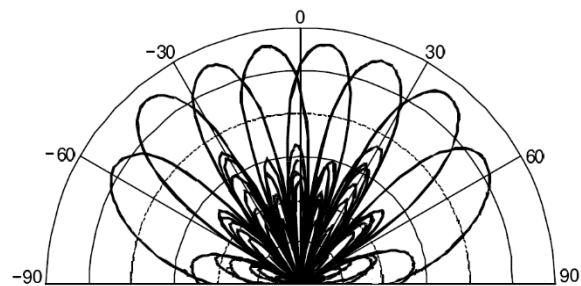
### ۳-۴- شبیه‌سازی ساختارهای کامل

در مرحله بعدی برای به‌دست‌آوردن الگوی تشعشی آرایه فازی مورد نظر و نیز زاویه بیشینه تشعشع، آرایه‌ای از آنتن معرفی شده در بخش ۲-۴ به ماتریس باتلرهای مختلف متصل می‌شوند. همچنین از فازهای به‌دست‌آمده در بخش ۳-۳ استفاده می‌شود. مطابق رابطه (۶)، الگوی تشعشی کل، تحت‌تأثیر ضریب آرایه

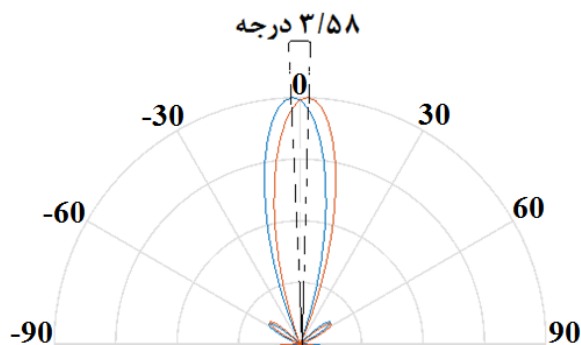
( $AF$ ) است که آن نیز مستقل از نوع آنتن‌های آرایه، به فاصله آنها، و فاز و دامنه تحریکشان وابسته است. در این مقاله، فاصله بین آنتن‌های آرایه  $\lambda/2$  در نظر گرفته شده است. شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، به ترتیب الگوی تشعشی آرایه فازی ۸ و ۳۲ تایی را که به کمک ماتریس باتلرهای متناظر تغذیه شده‌اند نشان می‌دهند. این شکل‌ها، با تغذیه هم‌زمان تمامی درگاه‌های ورودی حاصل



شکل ۱۱. الگوی تشعشعی ناشی از ضریب آرایه، برای یک آرایه ۳۲ تایی تغذیه شده با ماتریس باتلر متناظر.



شکل ۱۲. الگوی تشعشعی حاصل از شبیه‌سازی ساختار ماتریس باتلر ۸×۸ به همراه آرایه آنتن متصل به آن.



شکل ۱۳. نمایش زاویه تفکیک بیشینه‌های دو پرتو مجاور، به اندازه ۳/۵۸ درجه، ناشی از تحریک درگاه‌های ۱ و ۳۲ از یک ماتریس باتلر ۳۲×۳۲.

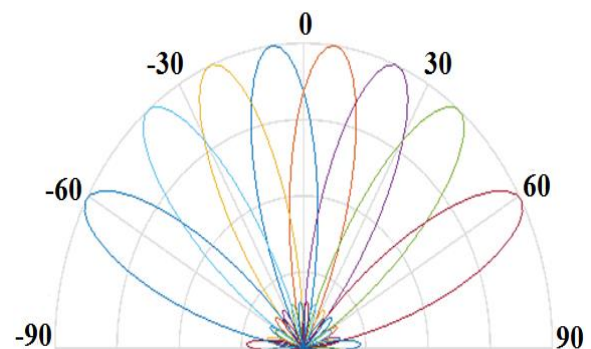
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پس از مروری بر مفاهیم ساختارهای ماتریس باتلر، طرح چند ساختار از مراتب مختلف، و سپس طراحی آرایه فازی میکرواستریپ، نتایج شبیه‌سازی ساختارهای ماتریس باتلر ارائه شد. طراحی‌های صورت گرفته برای فرکانس کار ۹/۵ گیگاهرتز در باند ایکس در نظر گرفته شده است. به کمک به کارگیری ماتریس باتلر ۳۲×۳۲، زاویه تفکیک بیشینه‌های دو پرتو مجاور به اندازه ۳/۵۸ درجه حاصل شد. هدف از طراحی ماتریس باتلر از مرتبه ۳۲، دستیابی به چنان اختلاف‌فازی بین درگاه‌های خروجی است که پس از اعمال به آرایه آنتن‌ها، بتوان زاویه پوشش باریکی را تحقق داد. برخلاف طرح‌های پیچیده پیاده‌سازی شده بر بردهای چندلایه، طرح ارائه شده بر بردی تک‌لایه تحقق یافته

شده‌اند. رنگ‌های مختلف در شکل‌ها، حاصل اعمال تغذیه انفرادی به درگاه‌های ورودی مختلف است. مشاهده می‌شود که به‌ازای اعمال تغذیه به درگاه‌های ورودی مختلف، بیشینه تشعشع به جهت‌های مختلف می‌گردد. نتایج به‌دست‌آمده در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) صرفاً با استفاده از مقادیر دامنه و فاز خروجی‌های ماتریس باتلر به‌عنوان تحریک عناصر آرایه در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، برای بررسی صحت این نتایج، شبیه‌سازی کل ساختار ماتریس باتلر به همراه آنتن صورت گرفته است که نتایج آن در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود. هم‌خوانی قابل قبولی بین نتایج شکل‌های (۱۰) و (۱۲) مشاهده می‌شود. تفاوت عمده، وجود گلبرگ‌های جانبی، در شکل (۱۲) است که منجر به تلفات بخشی از توان می‌شود. همچنین، پهنای پرتوها کمی بیشتر شده است که می‌تواند ناشی از اثرات ناخواسته تزویج بین آنتن‌ها باشد.

اگر در آرایه ۳۲ عنصری، دو ورودی ۱ و ۳۲، تغذیه شوند، پرتو شکل (۱۳) حاصل می‌شود که زاویه تفکیک بیشینه‌های دو پرتو مجاور، به اندازه ۳/۵۸ درجه در آن قابل مشاهده است. زوایای گلبرگ اصلی، مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شوند. در نهایت، الگوی تشعشعی کل آرایه، مطابق رابطه (۵)، پس از محاسبه  $E_s$  به‌دست می‌آید.

باید اشاره کرد که تفاوت در پهنای الگوی تشعشعی، به‌خاطر تفاوت در تعداد آرایه‌ها، یا به عبارتی، مرتبه ماتریس باتلر است. برای آنتن با آرایه بیشتر، تعداد گلبرگ‌های اصلی تشعشعی ایجاد شده، که متناظر با جهت مشخصی هستند، افزایش یافته، و در نتیجه زاویه پوشش کل آرایه افزایش می‌یابد. با این حال، با افزایش مرتبه، فاصله گلبرگ‌های اصلی متوالی تشعشعی کاهش می‌یابد. این به‌خاطر اختلاف‌فاز کمتر خروجی‌های متوالی ماتریس باتلر تغذیه‌کننده آنتن است که با استفاده از رابطه (۴)، منجر به دو زاویه بیشینه تشعشع متوالی بافاصله کمتر می‌شود.



شکل ۱۴. الگوی تشعشعی ناشی از ضریب آرایه، برای یک آرایه ۸ تایی تغذیه شده با ماتریس باتلر متناظر.

- Sintered BST-composite Thick Films,” IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett. vol. 26, pp. 70-72, 2016.
- [12] H.N. Chu and T.G. Ma, “An Extended 4×4 Butler Matrix with Enhanced Beam Controllability and Widened Spatial Coverage,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech. vol. 66, pp. 1301-1311, 2018.
- [13] Y.S. Lin and J.H. Lee, “Miniature Butler Matrix Design Using Glass-based Thin-film Integrated Passive Device Technology for 2.5-GHz Applications,” IEEE Trans. Microw. Theory Techn. vol. 61, pp. 2594-2602, 2013.
- [14] C. Dall’Omo, T. Monediere, B. Jecko, F. Lamour, I. Wolk, and M. Elkael, “Design and Realization of a 4×4 Microstrip Butler Matrix without any Crossing in Millimeter Waves,” Microw. Opt. Technol. Lett. vol. 38, pp. 462-465, 2003.
- [15] C.H. Chen, H. Wu, and W. Wu, “Design and Implementation of a Compact Planar 4×4 Microstrip Butler Matrix for Wideband Application,” Prog. Electromagn. Res. C, vol. 24, pp. 43-55, 2011.
- [16] V.M. Jayakrishnan and S.K. Menon, “Realization of Butler Matrix for Beamforming in Phased Array Aystem,” Procedia Comput. Sci. vol. 93, pp. 223-229, 2016.
- [17] M. Bona, L. Manholm, J.P. Starski, and B. Svensson, “Low-loss Compact Butler Matrix for a Microstrip Antenna,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech. vol. 50, pp. 2069-2075, 2002.
- [18] G.X. Zhang, B.H. Sun, L. Sun, J.P. Zhao, Y. Geng, and R.N. Lian, “Design and Implementation of a 3×3 Orthogonal Beam Forming Network for Pattern-Diversity Applications,” Prog. Electromagn. Res. C, vol. 53, pp. 19-26, 2014.
- [19] J.G.C. Trujillo, M.S. Perez, A.N. Garcia, and M. Vera-Isasa, “3×3 Multibeam Network for a Triangular Array of Three Radiating Elements: Design and Measurement,” IEEE EUROCON-International Conference on Computer as a Tool, Lisbon, Portugal, 2011.
- [20] D.M. Pozar, “Microwave Engineering,” 3<sup>rd</sup> Ed. Wiley, NJ, USA, 2005.
- [21] R.E. Collin, “Foundations for Microwave Engineering,” 2<sup>nd</sup> Ed. McGraw-Hill, NY, USA, 1992.
- [22] M.R. Che Rose, S.R. Mohd Shah, M.F. Abdul Kadir, D. Mismam, M.Z.A. Abdul Aziz, and M.K. Suaidi, “The Mitered and Circular Bend Method of Butler Matrix Design for WLAN Application,” Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics, Melaka, Malaysia, 2007.
- [23] H.J. Moody, “The Systematic Design of the Butler Matrix,” IEEE Trans. Antennas Propag. vol. 12, pp. 786-788, 1964.
- [24] F. Gross, “Smart Antenna for Wireless Communication,” McGraw-Hill, NY, USA, 2005.
- [25] T.M. Macnamara, “Positions and Magnitudes of Fixed Phase Shifters in Butler Matrices Incorporating 90° Hybrids,” IEE P. Microw. Ant. Prop. vol. 135, pp. 359-360, 1988.

است که سادگی ساخت و طراحی از مزایای آن به شمار می‌رود. همچنین تحقق ساختار بر بُرد تک‌لایه، کاهش تلفات دی‌الکتریک انتشار موج را نیز به همراه دارد. البته طرح تک‌لایه، در عوض، فضای بیشتری را اشغال می‌کند. این مطلب در پیاده‌سازی شبکه‌های شکل‌دهنده پرتو برای آرایه‌های قابل کاربرد در شبکه‌های ثابت مشکل‌زا نیست و در طیف‌های فرکانسی بالاتر، از جمله امواج میلی‌متری، که منجر به طراحی مدارها با ابعاد کمتر می‌شود، اهمیت کمتری نیز می‌یابد.

## ۵- مراجع

- [1] J.C. Rosser, V. Vignesh, B.A. Terwilliger, and B.C. Parker, “Surgical and Medical Applications of Drones: A Comprehensive Review,” J. Soc. Laparoend. vol. 22, pp. 3071-3080, 2018.
- [2] R.A. Clothier, D.A. Greer, D.G. Greer, and A.M. Mehta, “Risk Perception and the Public Acceptance of Drones,” Risk Anal. vol. 35, pp. 1167-1183, 2015.
- [3] P. Boucher, “Domesticating the Drone: The Demilitarisation of Unmanned Aircraft for Civil Markets,” Sci. Eng. Ethics, vol. 21, pp. 1393-1412, 2015.
- [4] M. Hassanalian and A. Abdelkefi, “Classifications, Applications, and Design Challenges of Drones: A Review,” Prog. Aerosp. Sci. vol. 91, pp. 99-131, 2017.
- [5] A. Otto, N. Agatz, J. Campbell, B. Golden, and E. Pesch, “Optimization Approaches for Civil Applications of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) or Aerial Drones: A Survey,” Networks, vol. 72, pp. 411-458, 2018.
- [6] T.C. Tang, Y.R. Chuang, and K.H. Lin, “A Narrow Beamwidth Array Antenna Design for Indoor Non-contact Vital Sign Sensor,” Proc. of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Chicago, USA, 2012.
- [7] M. Mahmudi and S. Chamaani, “Design and Fabrication of Dual Polarized Reflectarray in X-band,” J. Appl. Electromagnet. vol. 2, pp. 1-6, 2014 (in Persian).
- [8] J.F. Coward, C.H. Chalfant, and P.H. Chang, “A Photonic Integrated-optic RF Phase Shifter for Phased Array Antenna Beam-forming Applications,” J. Light. Technol. vol. 11, pp. 2201-2205, 1993.
- [9] M. Sazegar, Y. Zheng, H. Maune, C. Damm, X. Zhou, J. Binder, and R. Jakoby, “Low-cost Phased-array Antenna Using Compact Tunable Phase Shifters Based on Ferroelectric Ceramics,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech. vol. 59, pp. 1265-1273, 2011.
- [10] M. Uhlmann, “Cylindrical Phased Array with PIN-diode Controlled Parallel-plate Feeding System,” 5<sup>th</sup> European Microwave Conference, Hamburg, Germany, 1975.
- [11] M. Nikfalazar, C. Kohler, A. Wiens, A. Mehmood, M. Sohrabi, H. Maune, J.R. Binder, and R. Jakoby, “Beam Steering Phased Array Antenna with Fully Printed Phase Shifters Based on Low-temperature

- [28] H. Singh, H.L. Sneha, and R.M. Jha, "Mutual Coupling in Phased Arrays: A Review," Int. J. Ant. Prop. vol. 2013, pp. 1-23, 2013.
- [29] <http://www.comsol.com>.

- [26] T.M. Macnamara, "Simplified Design Procedures for Butler Matrices Incorporating  $90^\circ$  Hybrids or  $180^\circ$  Hybrids," IEE Proc. vol. 134, pp. 50-54, 1987.
- [27] C.A. Balanis, "Antenna Theory," 3<sup>rd</sup> Ed. John Wiley & Sons, NJ, USA, 2005.