

## Electronic Beam Steering of Reflector Antenna Using Reconfigurable Digital Metasurface Sub-Reflector

M.Afzali<sup>1</sup>, M.Movahhedi<sup>2\*</sup>, S.E.Hosseininejad<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Master's degree, Yazd University, Yazd, Iran.

<sup>2</sup> Associate Professor, Yazd University, Yazd, Iran.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

### ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 18 February 2020

Received in revised form: 09 April 2020

Accepted: 06 May 2020

Available online: 21 May 2020

**Keywords:** Antenna beam steering, Dual reflector antenna, Reconfigurable digital metasurface

### ABSTRACT

Reflector antennas with mechanical beam steering ability are usually used to scan the surrounding space in telecommunication applications such as radars and satellites. On the other hand, mechanical rotation of antennas is difficult, slow and costly with low accuracy. Also, mechanical beam steering method is not suitable for applications that require changing beam direction with high speed. In this paper a dual reflector Cassegrain antenna with electronic beam steering capability is designed. A two-bit reconfigurable digital metasurface is used as a sub-reflector where its tunable unit cells are designed with varactors and beam steering is realized through controlling the phase profile of the metasurface. Results show that the proposed antenna with a high gain of 30 dB has 20 degrees beam steering range with 0.1 degrees resolution. This antenna can be considered as an applicable solution for the next generation of telecommunication systems due to the elimination of the mechanical beam steering problems of the reflector antennas.

**Cite this article:** M.Afzali, M.Movahhedi, S.E.Hosseininejad "Electronic Beam Steering of Reflector Antenna Using Reconfigurable Digital Metasurface Sub-Reflector" AppliedElectromagnetics, vol. 13(1), pp. 20-34, 2020.

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26450103.14.4.13.1.2.7>



© The Author(s).

Publisher: Imam Hossein

## چرخش الکترونیکی پرتو آنتن انعنتظیکاسی با استفاده از بازتابنده فرعی بر پایه فرا سطح دیجیتال تنظیم پذیر

مصطفی افضل<sup>۱</sup>، مسعود موحدی<sup>۲</sup>، سید احسان حسینی نژاد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، یزد، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

<sup>۳</sup> استادیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

### چکیده

در کاربردهای مخابراتی همچون رادارها و ماهواره‌ها، معمولاً آنتن‌های انعکاسی با قابلیت چرخش پرتو برای پوشش فضای اطراف استفاده می‌شود که استفاده از فن‌های چرخش مکانیکی برای تأمین این نیاز متداول است. از سوی دیگر، چرخش مکانیکی آنتن برای رسیدن به این هدف، کاری دشوار، هزینه‌بر، آهسته و با دقت کم است. همچنین برای کاربردهایی که نیاز است پرتو آنتن در کسری از ثانیه تغییر جهت داشته باشد، چرخش مکانیکی آنتن مناسب نیست. هدف از این مقاله، طراحی یک آنتن انعکاسی کسگرین دارای دو بازتابنده است که چرخش الکترونیکی پرتو را محقق می‌کند. در این آنتن، از یک فرا سطح دیجیتالی دوبیتی تنظیم‌پذیر به‌عنوان بازتابنده فرعی استفاده می‌شود که سلول‌های تنظیم شونده الکترونیکی آن با دیود خازنی طراحی شده و چرخش پیوسته پرتو آنتن اصلی از طریق کنترل توزیع فاز این فرا سطح، امکان‌پذیر شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که آنتن پیشنهادی با بهره بالای ۳۵ dB دارای بازه چرخش پرتو ۲۰ درجه با تفکیک‌پذیری ۰.۱ درجه است. این آنتن به دلیل حذف مشکلات چرخش مکانیکی پرتو آنتن انعکاسی، می‌تواند راهکار مناسبی برای دستگاه‌های مخابراتی نسل آینده باشد.

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱

کلیدواژه‌ها:

آنتن انعکاسی با دو بازتابنده، بازتابنده فرعی  
فرا سطح، چرخش پرتو آنتن، فرا سطح  
دیجیتال تنظیم‌پذیر.

**استناد:** افضل، مصطفی، موحدی، مسعود، حسینی نژاد، سید احسان. چرخش الکترونیکی پرتو آنتن انعکاسی با استفاده از بازتابنده فرعی بر پایه فرا سطح دیجیتال تنظیم‌پذیر. الکترومغناطیس کاربردی، (۱۴۰۴)؛ ۱۳(۱): ۳۴-۲۵.

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۴۵۵۱۵۳.۱۴۰۴.۱۳.۱.۲۷>

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).



OPEN ACCESS

## ۱- مقدمه

مسطح جایگزین می‌شود بسیار زیاد مورد توجه قرار گرفته است. اما جایگزینی سطح بازتابنده اصلی با یک آنتن آرایه انعکاسی [۸] با قابلیت کنترل الکترونیکی پرتو برای چرخش الکترونیکی پرتو آنتن انعکاسی در ابعاد بزرگ آنتن‌های انعکاسی، بسیار هزینه‌بر و پیچیده است [۹]. در برخی از مقالات [۱۰، ۱۱] با استفاده از جایگزینی بازتابنده فرعی<sup>۲</sup> هذلولوی یا بیضوی در آنتن‌های انعکاسی دارای دو بازتابنده، با معادل آرایه انعکاسی<sup>۳</sup> آن (به صورت ثابت نه تغییرپذیر)، توانسته‌اند تا حدودی پرتو آنتن انعکاسی را منحرف کنند. در این پژوهش‌ها، بازتابنده آرایه انعکاسی فرعی ثابتی، برای چرخش پرتو در چند زاویه خاص، پیشنهاد شده است که قابلیت پوشش زاویه‌ای پیوسته پرتو آنتن را ندارد. لذا در کاربردهایی که سرعت بالا در چرخش پرتو نیاز است، عملاً بلااستفاده خواهد بود.

همگام با پیشرفت آنتن‌های آرایه انعکاسی، فرا سطوح که شکل دوبعدی فرا مواد هستند، جهت مهندسی امواج الکترومغناطیس به سرعت توسعه یافته‌اند. از این سطوح برای کاهش تلفات و هزینه ساخت، بهبود بازدهی و افزایش بهره آنتن استفاده می‌شود [۱۲]. ترکیب فرا سطوح با آنتن‌های رایج دیگر می‌تواند بهبودهایی در مشخصات آنتن ایجاد و یا قابلیت‌های جذابی به آن اضافه کند. ایده استفاده از فرا سطوح تغییرپذیر دیجیتالی به عنوان بازتابنده فرعی در ساختار آنتن‌های انعکاسی کسگرین یا گریگورین، که در این مقاله مطرح و پیاده‌سازی شده است می‌تواند چرخش پرتو در آنتن‌های انعکاسی بزرگ را با هزینه کم و تلفات بسیار ناچیز فراهم آورد.

در این مقاله ابتدا به شرح کلی ساختار آنتن مورد بررسی و مفهوم بازتابنده فرعی بر پایه فرا سطح دیجیتالی پرداخته و بازتابنده فرعی فرا سطح یک بیتی و دوبیتی را طراحی و با یکدیگر مقایسه می‌کنیم؛ در ادامه رابطه‌ای جهت طراحی توزیع فاز بازتابنده فرا سطح برای چرخش الگوی تشعشعی آن به دست آورده و به بررسی و تحقق چرخش پرتو در آنتن انعکاسی با ساختار کسگرین می‌پردازیم. در نهایت با طراحی و پیشنهاد سلول دوبیتی تنظیم‌پذیر، ساختار بازتابنده فرعی بر پایه فرا سطح را تحقق می‌بخشیم.

## ۲- ساختار آنتن و بازتابنده فرعی بر پایه فرا سطح دیجیتالی یک بیتی و دوبیتی

آنتن‌های انعکاسی ساختارهای متنوعی دارند که در برخی از این ساختارها برای تغذیه بازتابنده اصلی از یک بازتابنده فرعی استفاده می‌شود. بازتابنده‌های فرعی منحنی شکل معمولاً به دو صورت بیضوی و هذلولوی ساخته می‌شوند که به

امروزه مخابرات و انتقال داده‌ها از راه دور یک فناوری اجتناب‌ناپذیر بوده و بخشی مهمی از زندگی انسان‌ها وابسته به آن است. علاوه بر این هرروزه به حجم داده‌ها و سرعت مورد نیاز برای انتقال اطلاعات افزوده می‌شود؛ تا جایی که نسل‌های جدید مخابرات (۵G) و فراتر از آن) برای مدیریت و پاسخ به این نیازهای جدید، مطرح شده‌اند. از چالش‌های مهم و کاربردی در دستگاه‌های مخابراتی نوین امروزی، شکل‌دهی و چرخش پرتو آنتن است. در آنتن‌های مخابراتی برای جلوگیری از چرخش‌های مکانیکی آنتن که نیاز به زمان فراوان، هزینه و ساختار پیچیده مکانیکی دارد، نیازمند چرخش الکترونیکی پرتو آنتن هستیم.

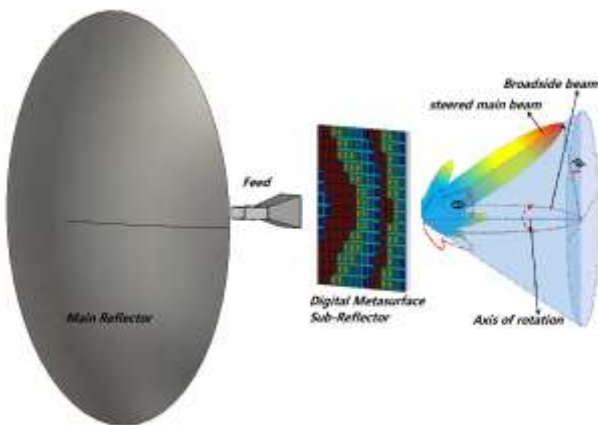
آنتن‌های انعکاسی سهموی که در کاربردهایی با بهره بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱-۳]، به دلیل ساختار مکانیکی (خصوصاً در ابعاد بزرگ آن) و سیستم پیچیده تغذیه آنتن، چرخش مکانیکی آنتن کار دشوار و زمان‌بری است. همچنین در کاربردهایی که نیاز به چرخش سریع پرتو آنتن است، استفاده از روش مکانیکی عملاً غیرممکن خواهد بود. از این رو در چنین کاربردهایی چرخش الکترونیکی پرتو آنتن بسیار حائز اهمیت است. برای چرخش الکترونیکی پرتو آنتن انعکاسی، دو روش متداول وجود دارد؛ در روش اول به جای استفاده از یک آنتن تغذیه از چند آنتن تغذیه در نزدیکی نقطه کانونی بازتابنده اصلی<sup>۱</sup> و در فواصل معین استفاده می‌شود که هر آنتن می‌تواند به صورت الکترونیکی سوئیچ شده و پرتو آنتن را در جهت خاصی منحرف نماید [۴، ۵]. بدیهی است که این روش محدودیت چرخش پرتو داشته و فقط در زوایای خاصی می‌تواند پرتو آنتن را منحرف کند. در روش دوم برای چرخش الکترونیکی پرتو آنتن‌های انعکاسی، از دستگاه‌های آرایه فازی با قابلیت چرخش پرتو، جهت تغذیه بازتابنده اصلی استفاده می‌شود [۶، ۷]. اما آنتن‌های آرایه فازی نیز معایبی داشته و پیاده‌سازی آن‌ها دشوار و هزینه‌بر است و به دلیل سیستم تغذیه پیچیده، تلفات بالایی به خصوص در فرکانس‌های بالا خواهند داشت. همچنین تعدد تجهیزات مورد استفاده در شبکه شکل‌دهی پرتو این آنتن‌ها، مثل شیفت دهنده‌های فاز و تضعیف‌کننده‌ها، سبب بالا رفتن دمای نویز این آنتن‌ها شده و نسبت سیگنال به نویز را کاهش می‌دهد. این مشکلات در فرکانس‌های بالای مخابرات نسل جدید، چالش‌های بزرگی را ایجاد می‌کنند.

در سال‌های اخیر استفاده از آنتن‌های آرایه انعکاسی که سطح منحنی شکل بازتابنده اصلی آنتن‌های انعکاسی با یک سطح

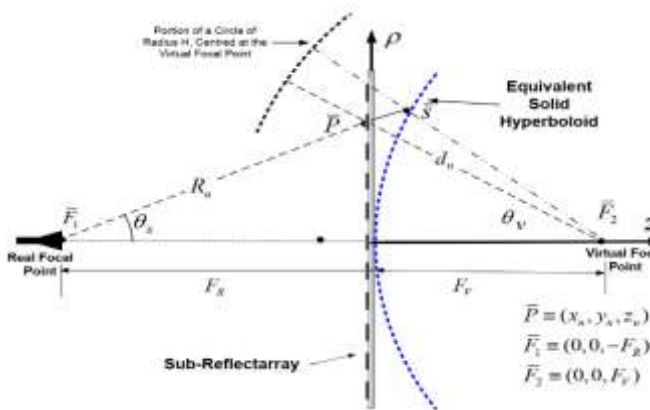
<sup>۲</sup>- Sub-reflector.

<sup>۳</sup>- Reflectarray.

<sup>۱</sup>- Main reflector.



شکل (۱). ساختار کلی آنتن انعکاسی مورد بررسی



شکل (۲). ساختار بازتابنده فرعی هذلولوی و معادل آرایه انعکاسی آن [۱۳].

$$\psi_n = k(R_n - d_n) + 2\pi N \quad (1)$$

این رابطه بر اساس مسیره‌های فضایی پیموده شده توسط موج الکترومغناطیس در شکل (۲) نوشته شده که در آن  $N$  یک عدد صحیح است تا فاز محاسبه شده را قابل پیاده سازی کند. همچنین  $k$  عدد موج الکترومغناطیس و پارامترهای  $R_n$  و  $d_n$  نیز در شکل (۲) توصیف شده‌اند. در شکل (۳-الف)، سطح بازتابنده انعکاسی مربع شکل با عرض ۷۰ سانتی متر به سلول‌های واحد تقسیم بندی شده و به هر سلول، فاز جبران ساز محاسبه شده از رابطه (۱)، اختصاص داده شده است. نکته قابل تأمل در بازتابنده فرا سطح دیجیتال، دیجیتال بودن آن است، به این مفهوم که باید توزیع فاز سطح بازتابنده آرایه انعکاسی فرعی که در شکل (۳-الف) نشان داده شده، به فرم یک فرا سطح دیجیتال یک بیتی یا دوبیتی تقریب زده شود. سلول‌های فرا سطوح دیجیتال یک بیتی، دارای فاز ۰ یا ۱۸۰ درجه هستند (اختلاف فاز ۱۸۰ درجه سلول‌ها) و در فرا سطوح دیجیتال دوبیتی هر سلول فقط مقادیر فاز ۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه را می‌تواند اتخاذ کند (اختلاف فاز ۹۰ درجه). با استفاده از این

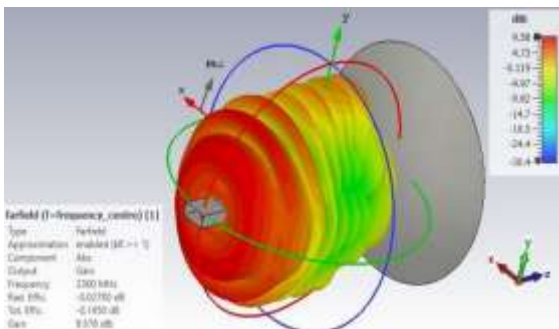
آنتن‌های کسگرین (هذلولوی) و گریگورین (بیضوی) معروف‌اند. بازتابنده فرعی بر پایه آرایه انعکاسی<sup>۱</sup> یک آنتن آرایه انعکاسی است که رفتار بازتابنده فرعی منحنی شکل را شبیه سازی می‌کند. بازتابنده‌های فرعی آرایه انعکاسی در آنتن‌های انعکاسی دارای دو بازتابنده، برخلاف آنتن‌های آرایه انعکاسی با جبهه موج صفحه‌ای، دارای جبهه موج کروی شکل هستند تا موج انعکاسی از آن‌ها تمام سطح انعکاسی اصلی را به صورت یکنواخت روشن کند. این بازتابنده‌های فرعی آرایه انعکاسی به علت ابعاد کوچکشان نسبت به آنتن‌های آرایه انعکاسی، علاوه بر مزایای آنتن‌های آرایه انعکاسی، از پهنای باند مناسب تری نیز برخوردارند [۱۳]. همچنین این ابعاد کوچک باعث کاهش تعداد المان‌ها و کنترل راحت تر پرتو سطح انعکاسی اصلی می‌شود.

ویژگی تنظیم پذیری الکترونیکی بازتابنده فرعی به وسیله فرا سطحی با قابلیت برنامه گذاری، در آنتن‌های انعکاسی دارای دو بازتابنده، ایده جذابی است که معایب چرخش مکانیکی پرتو آنتن را پوشش می‌دهد. این بازتابنده، به صورت الکترونیکی کنترل شده و در کسری از ثانیه، تغییرات لازم در الگوی تشعشعی آنتن انعکاسی را بدون هیچ گونه حرکت مکانیکی ایجاد می‌کند. هدف نویسندگان در این مقاله، طراحی یک آنتن کسگرین با قابلیت چرخش پرتو است که بازتابنده اصلی آن یک آنتن انعکاسی سهموی با  $d = 3m$  و  $f = 1.2m$  در فرکانس کاری ۲.۳GHz و بهره‌ای در حدود ۳۵dB است. بازتابنده فرعی این آنتن از نوع فرا سطح دیجیتال تنظیم پذیر بوده که قابلیت کنترل الکترونیکی سلول‌ها را دارد. این فرا سطح با ابعاد  $70 \times 70$  سانتی متر مربع، از زیر لایه RO4003C با ضریب دی الکتریک  $(\epsilon_r = 3.55)$  و تانژانت تلفات  $(\delta = 0.0021)$  و ضخامت ۱.۵۲۴ میلی متر تشکیل شده که ابعاد سلول‌های آن  $5 \times 5$  سانتی متر مربع است. طرح واره این آنتن در شکل (۱) نشان داده شده، که از یک بازتابنده اصلی، یک بازتابنده فرعی بر پایه فرا سطح دیجیتال و یک آنتن هورن - با بهره‌ای برابر با ۱۱.۵ dB و پهنای پرتو نیم توان در حدود ۴۸ درجه در هر دو صفحه E و H - به عنوان تغذیه کننده بازتابنده فرعی تشکیل شده است. قدم اول در طراحی بازتابنده فرعی فرا سطح آنتن کسگرین مورد نظر، محاسبه فاز سلول‌های آن است. رابطه (۱) برای به دست آوردن فاز هر یک از سلول‌های بازتابنده فرعی آرایه انعکاسی در حالت کسگرین (هذلولوی) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳]:

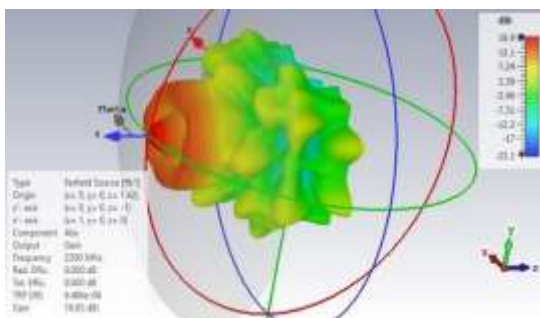
۱- Sub-Reflectarray.

[۱۴]. با توجه به شباهت زیاد آنتن‌های آرایه انعکاسی با فرا سطوح، این روابط را برای تحلیل بازتابنده فرعی بر پایه فرا سطح دیجیتالی نیز می‌توان استفاده نمود. از این رو با استفاده از کد نویسی این روابط در نرم‌افزار MATLAB، الگوی تشعشعی بازتابنده فرا سطح را بدون نیاز به شبیه‌سازی تمام موج در نرم‌افزارهای رایج الکترومغناطیسی با تقریب مناسبی به دست آوردیم. سپس با استفاده از قابلیت تعریف منبع خارجی در CST میدان‌های محاسبه‌شده از نرم‌افزار MATLAB برای بازتابنده فرعی فرا سطح، به سطح انعکاسی اصلی آنتن تابنده شد و پاسخ ساختار کلی آنتن به دست آمد. در این روش با استفاده از یک کامپیوتر با سرعت پردازنده ۲.۳ گیگاهرتز Corei۷ با رم ۸ گیگابایت، کاهش چشمگیر زمان پردازش و تحلیل آنتن موردنظر از ۳ روزه ۵ دقیقه را خواهیم داشت. از مزایای دیگر روش مذکور این است که در کد نوشته‌شده مشخصات زیر لایه، ابعاد و تعداد سلول‌های بازتابنده فرا سطح را می‌توان با سرعت و به صورت دلخواه تغییر داد که این کار در نرم‌افزارهای رایج شبیه‌سازی الکترومغناطیسی با توجه به تغییر فیزیک مسئله، امری زمان‌بر بوده و با خطاهای کاربری مواجه است.

شکل (۴) الگوی تشعشعی یک بازتابنده فرعی معمولی و الگوی تشعشعی بازتابنده فرعی فرا سطح طراحی‌شده را نمایش می‌دهد که تحلیل بازتابنده فرعی معمولی با نرم‌افزار CST و تحلیل بازتابنده فرعی فرا سطح با استفاده از کد نوشته‌شده در نرم‌افزار MATLAB به دست آمده در نرم‌افزار CST نشان داده شده است.



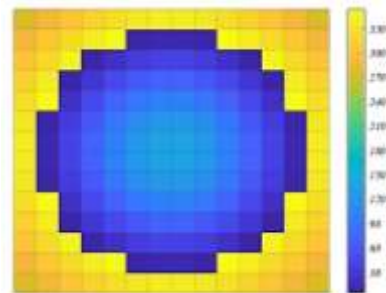
(الف)



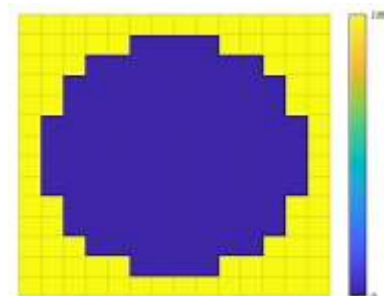
(ب)

شکل (۴). الگوی تشعشعی بازتابنده فرعی معمولی (الف) و بازتابنده فرعی بر پایه فرا سطح طراحی‌شده (ب)

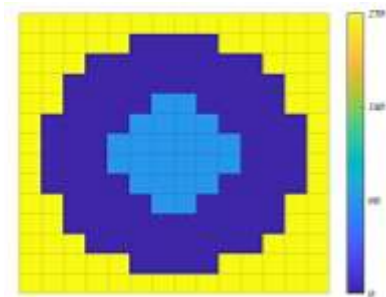
تعاریف، شکل‌های (۳-ب و ۳-ج) توزیع فازهای یک بیتی و دوبیتی بازتابنده فرعی بر پایه فرا سطح دیجیتال را نمایش می‌دهند.



(الف)



(ب)

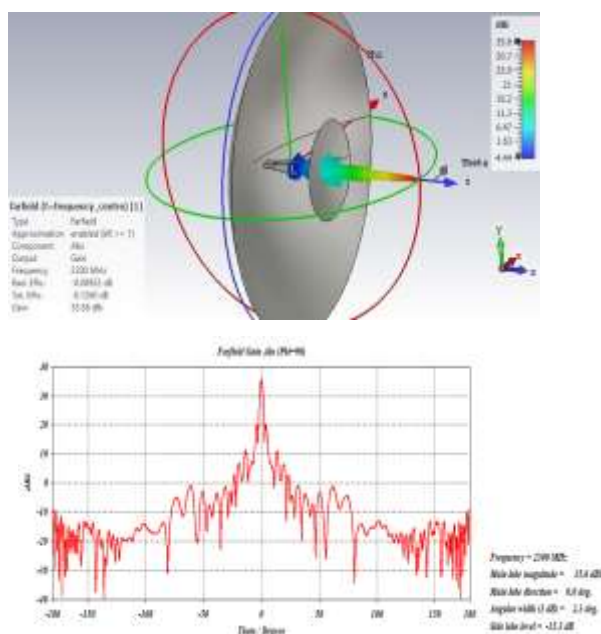


(ج)

شکل (۳). توزیع فاز پیوسته (الف)، یک بیتی (ب) و دوبیتی (ج) بازتابنده فرعی آنتن انعکاسی کسگرین بر پایه فرا سطح

### ۳- تحلیل بازتابنده فرعی فرا سطح دیجیتالی

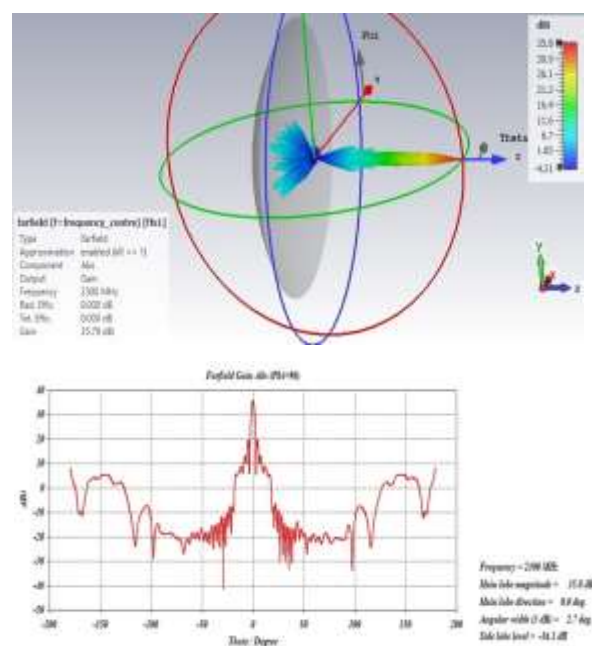
با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز الکترومغناطیسی تجاری مانند CST یا HFSS می‌توان هرگونه ساختار و یا آنتن الکترومغناطیسی را تحلیل و شبیه‌سازی نمود و پارامترهای موردنیاز آن را به دست آورد. اما مشکل شایع این نرم‌افزارها خصوصاً در کارهای پژوهشی که نیاز به شبیه‌سازی مکرر ساختارهای حجیم و دارای شکل هندسی پیچیده دارد، زمان‌بر بودن آن‌ها و نیاز به منابع محاسباتی و دستگاه‌های قوی پردازشی است. البته این معضل در مورد ساختارهایی که روابط تحلیلی مناسب و دقیقی برایشان وجود ندارد، اجتناب‌ناپذیر است. خوشبختانه برای بررسی رفتار آرایه انعکاسی، روابط تحلیلی مناسبی وجود دارد



شکل (۶). الگوی تشعشعی آنتن کسگرین معمولی

به همین روش فرا سطوح یک بیتی و دوبیتی نشان داده شده در شکل (۳-ب و ۳-ج) نیز شبیه‌سازی شد که شکل‌های (۷) و (۸) پاسخ آنتن انعکاسی به هر کدام از این توزیع فازها را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل (۵) (حالتی که هیچ‌گونه تقریبی در فاز سلول‌های بازتابنده فرا سطح لحاظ نشده) و تقریب‌های یک بیتی و دوبیتی آن در شکل‌های (۷) و (۸)، مشاهده می‌شود که این تقریب‌ها سبب کاهش بهره آنتن و افزایش سطح گلبرگ‌های فرعی و سطح گلبرگ پشتی (BLL) شده است. همان‌گونه که در شکل‌های (۵)-(۸) دیده می‌شود BLL به صورت فراوان، با کاهش تعداد بیت فرا سطح افزایش می‌یابد. این موضوع به علت تغییر مشخصات تشعشعی سطح انعکاسی فرعی و تحریک شدیدتر لبه‌های سطح انعکاسی اصلی رخ می‌دهد. اما این تغییرات در تقریب دوبیتی (شکل ۸)، قابل‌اغماض بوده و الگوی تشعشعی ناشی از این تقریب با دقت خوبی منطبق بر حالت بازتابنده فرا سطح پیوسته بدون تقریب است. از این رو تقریب دوبیتی برای ساخت بازتابنده فرعی فرا سطح دیجیتال بسیار مناسب بوده و با استفاده از یک سلول دوبیتی به راحتی پیاده‌سازی می‌شود. شکل (۹) الگوی تشعشعی دوبعدی سه آنتن انعکاسی متفاوت با سطح انعکاسی فرعی جایگزین شده با فرا سطح با فاز پیوسته، فاز دوبیتی و فاز تک‌بیتی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، هرچقدر دقت فاز سلول‌ها کمتر می‌شود میزان بهره کاهش یافته و سطح BLL و SLL نیز کاهش می‌یابد.

همچنین شکل (۵) پاسخ آنتن، بعد از تابیده شدن میدان‌های به دست آمده از MATLAB به سطح انعکاسی اصلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این ساختار سمت گرایبی بیشتر از ۳۵dB دارد. این موضوع بیانگر دو مطلب بسیار مهم است: اول اینکه فاز سلول‌های فرا سطح دیجیتالی به درستی طراحی شده و برنامه MATLAB به درستی الگوی تشعشعی آن را محاسبه نموده و دوم اینکه طراحی آنتن انعکاسی و محل قرارگیری بازتابنده فرا سطح، نیز به درستی انجام شده است؛ چراکه محل قرارگیری بازتابنده فرعی فرا سطح در توزیع جریان‌های القایی روی سطح انعکاسی اصلی و در نتیجه سمت گرایبی و الگوی تشعشعی آن بسیار تأثیرگذار است. این دو عامل سبب شده تا آنتن، بهره ۳۵dB مورد نظر را محقق نماید که گویای صحت عملکرد کد نوشته شده و فرآیند شبیه‌سازی و همچنین طراحی آنتن مورد نظر است. قابل ذکر است بهره آنتن انعکاسی مورد نظر با بازتابنده فرعی معمولی برابر با ۳۵.۶dB است.



شکل (۵). الگوی تشعشعی پاسخ سطح انعکاسی اصلی به بازتابنده فرعی فرا سطح با توزیع فاز پیوسته

برای بررسی بیشتر صحت نتایج به دست آمده از روش شبیه‌سازی پیشنهادی، در آنتن طراحی شده، بازتابنده فرعی هذلولوی شکل معمولی را به جای بازتابنده فرعی بر پایه فرا سطح قرار داده و به صورت تمام موج در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی کردیم که شکل (۶) الگوی تشعشعی به دست آمده را نمایش می‌دهد. با مقایسه شکل (۵) و (۶) مشاهده می‌شود که الگوهای تشعشعی به دست آمده از هر دو روش با دقت خوبی بر هم منطبق بوده و بهره یکسانی دارند.

#### ۴- چرخش پرتو آنتن

اکنون که بازتابنده فرعی فرا سطح دیجیتالی برای تابش در راستای عمود بر سطح آنتن (جهت  $\theta = 0$ ) را طراحی و بررسی نمودیم نوبت به چرخش پرتو آنتن در زوایای دیگر است. یکی از روش‌های مرسوم چرخش پرتو آنتن‌های دارای بازتابنده، انحراف مکانیکی بازتابنده فرعی است، از این‌رو برای دستیابی به هدف چرخش پرتو، تابش زاویه‌دار الگوی تشعشی بازتابنده فرا سطح دیجیتالی به آنتن انعکاسی را انتخاب نمودیم. در این راستا اولین قدم محاسبه فاز سلول‌های بازتابنده فرا سطح دیجیتال برای تغییر جهت الگوی تشعشی آن است. فاز جبرانی هر المان تشعشی آنتن آرایه انعکاسی برای ایجاد یک پرتو پهلو تاب باریک در جهت دلخواه، از رابطه (۲) به دست می‌آید [۱۷]:

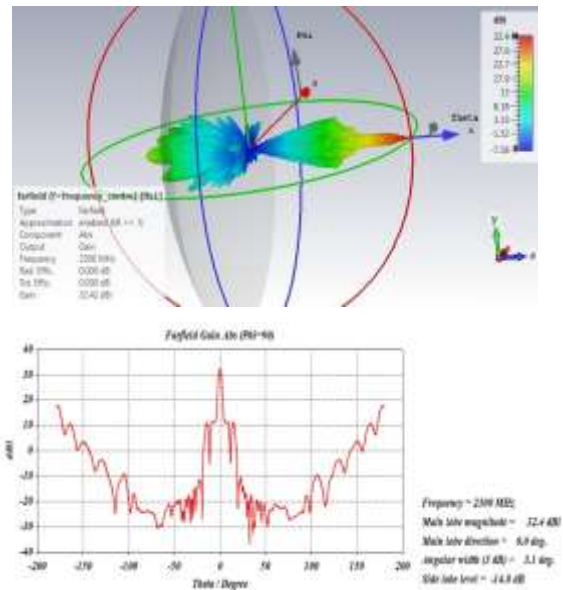
$$\psi_n = k \{R_n - \sin \theta_0 (x_n \cos \phi_0 + y_n \sin \phi_0)\} \quad (2)$$

که در آن  $x_n$  و  $y_n$  مختصات مرکز المان  $n$ ام و  $k$  عدد موج فضای آزاد است و  $\theta_0$  و  $\phi_0$  نیز زاویه بیم اصلی بازتاب شده از آنتن آرایه انعکاسی در دستگاه مختصات کروی است.

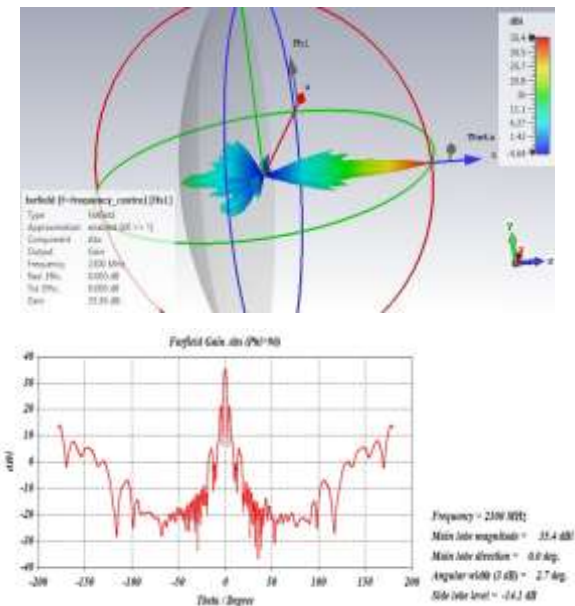
از آنجایی که الگوی تشعشی بازتابنده فرعی آرایه انعکاسی (جبهه موج کروی) با الگوی تشعشی یک آنتن آرایه انعکاسی (جبهه موج صفحه‌ای) متفاوت است، برای محاسبه فاز هر یک از سلول‌های بازتابنده فرعی فرا سطح جهت چرخش پرتو آن، از رابطه (۱) استفاده و با ترکیب ایده چرخش پرتو آنتن آرایه انعکاسی از رابطه (۲) فاز موردنیاز سلول‌های بازتابنده فرعی فرا سطح برای چرخش پرتو را محاسبه نمودیم. این رابطه تحلیلی کلیدی، به فرم زیر خواهد بود:

$$\psi_n = k \{R_n - d_n - \sin \theta_0 (x_n \cos \phi_0 + y_n \sin \phi_0)\} \quad (3)$$

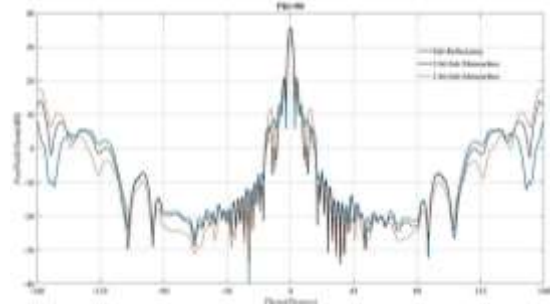
رابطه (۳) برای اولین بار جهت چرخش پرتو بازتابنده آرایه انعکاسی فرعی مطرح می‌شود که پارامترهای آن در روابط (۱) و (۲) تعریف شد. با استفاده از این رابطه می‌توان تغییر جهت الگوی تشعشی بازتابنده فرعی فرا سطح دیجیتال، در راستاهای  $\theta_0$  و  $\phi_0$  را ایجاد نمود. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) دو نمونه، توزیع فاز بازتابنده فرا سطح دیجیتال دوبیتی، برای ایجاد الگوی تشعشی زاویه‌دار که از رابطه (۳) به دست آمده به همراه الگوی تشعشی پاسخ سطح انعکاسی اصلی به آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۷). الگوی تشعشی پاسخ سطح انعکاسی اصلی به بازتابنده فرعی فرا سطح یک بیتی



شکل (۸). الگوی تشعشی پاسخ سطح انعکاسی اصلی به بازتابنده فرعی فرا سطح دوبیتی



شکل (۹). الگوی تشعشی پاسخ سطح انعکاسی اصلی به بازتابنده فرعی فرا سطح با فاز پیوسته، فاز تک‌بیتی و دوبیتی

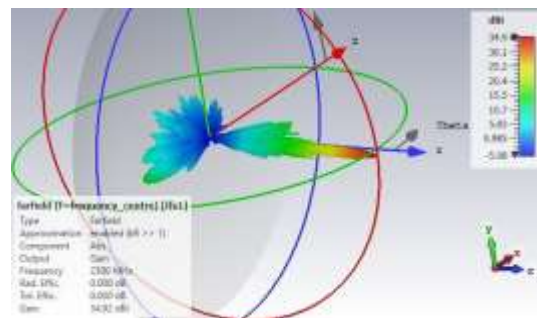
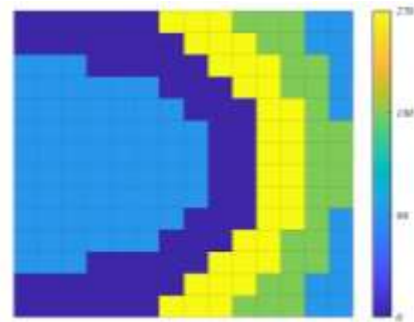
می توان ایجاد کرد، الگوی تشعشی بازتابنده فرا سطح دیجیتال را به میزان ۹۰ درجه چرخانیم که پرتو آنتن به میزان ۱۰۶ درجه انحراف پیدا کرد. نکته دوم بهره آنتن انعکاسی است که با چرخش الگوی تشعشی بازتابنده فرعی فرا سطح دیجیتال کاهش می یابد. دلیل این امر، عدم برخورد همه امواج زاویه دار منعکس شده از بازتابنده فرعی فرا سطح به سطح انعکاسی اصلی و عدم روشن شدن یکنواخت این سطح است. همان طور که می دانیم بهره آنتن انعکاسی با سطح مؤثر آن که در معرض تشعشع بازتابنده فرعی قرار می گیرد، رابطه مستقیمی دارد. به عبارت دیگر، زاویه دار شدن الگوی تشعشی بازتابنده فرا سطح دیجیتال سبب شده تا همه سطح آنتن انعکاسی به صورت یکنواخت روشن نشود. همین امر موجب کاهش جهت دهی و بهره آنتن انعکاسی شده است. این کاهش بهره برای چرخش های بیشتر از ۴۵ درجه به صورت ناگهانی و چشمگیر خواهد بود، چراکه علاوه بر عدم روشن شدن یکنواخت سطح انعکاسی اصلی، تلفات امواج انعکاسی از بازتابنده فرعی فرا سطح را نیز خواهیم داشت و امواج منعکس شده از آن در زوایای بیشتر از ۴۵ درجه به فضای پشت سطح انعکاسی اصلی هدایت شده و به سطح بازتابنده اصلی برخورد نمی کنند.

#### ۴-۱- بررسی میزان تفکیک پذیری<sup>۱</sup> چرخش پرتو آنتن

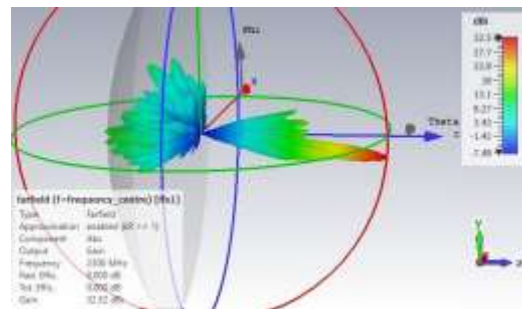
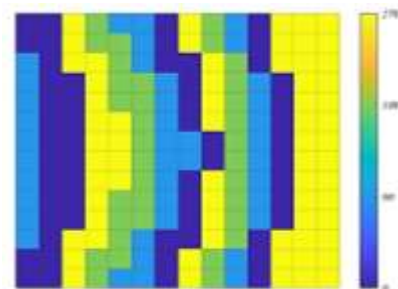
##### آنتن

نکته قابل تأمل دیگر که معمولاً در مبحث چرخش پرتو آنتن ها مطرح می شود، وضوح یا میزان تفکیک پذیری چرخش پرتو آنتن است. از آنتن انعکاسی و ساختار مورد بررسی، واضح است که میزان تفکیک پذیری چرخش در همه زوایای انحراف پرتو بازتابنده فرا سطح، مقدار ثابتی نیست و به صورت غیر خطی تغییر خواهد کرد. برای بررسی این موضوع زوایای مختلف را بررسی و شبیه سازی نمودیم که نتایج آن در جدول (۱) گزارش شده است. در این جدول، ستون انحراف، میزان انحراف قرار داده شده در الگوی تشعشی بازتابنده فرعی فرا سطح و ستون انحراف پاسخ، میزان انحراف ایجاد شده در پاسخ بازتابنده اصلی را بر حسب درجه، نشان می دهد. همان طور که از داده های جدول (۱) واضح است، میزان تفکیک پذیری با دقت ۰.۱ درجه برای آنتن پیشنهادی میسر است؛ البته همان طور که قابل پیش بینی بود، میزان چرخش الگوی تشعشی بازتابنده فرا سطح برای رسیدن به تفکیک پذیری مذکور در زوایای مختلف، متفاوت است.

جدول (۱). بررسی میزان تفکیک پذیری چرخش پرتو آنتن



شکل (۱۰). توزیع فاز بازتابنده فرعی فرا سطح برای زاویه انحراف ۱۰ درجه و الگوی تشعشی سه بعدی پاسخ آنتن

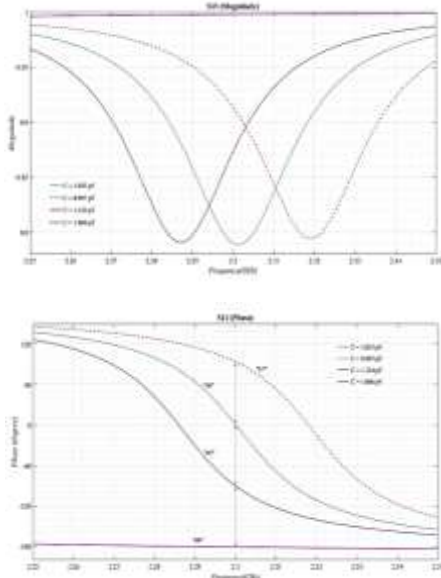


شکل (۱۱). توزیع فاز بازتابنده فرعی فرا سطح برای زاویه انحراف ۳۵ درجه و الگوی تشعشی سه بعدی پاسخ آنتن

مشاهده دقیق پاسخ آنتن انعکاسی به این الگوهای تشعشی زاویه دار چند نکته مهم را نشان می دهد: نکته اول اینکه به میزان زاویه چرخش در الگوی تشعشی بازتابنده فرعی فرا سطح دیجیتال، چرخش در پرتو آنتن انعکاسی اصلی ایجاد نخواهد شد. دلیل این رفتار غیر خطی، هندسه آنتن انعکاسی و مأموریتی که برای آن طراحی شده، یعنی برای تمرکز امواج و ایجاد جبهه موج صفحه ای در راستای  $\theta = 0$  است. برای بررسی این موضوع و اینکه حداکثر چه میزان چرخش در پرتوی آنتن

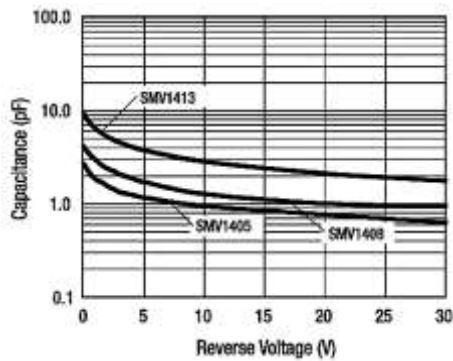
1- Resolution.

پارامترهای سلول	L1	L2	a	h	t	W
اندازه بر حسب میلی‌متر	20.75	42.5	50	1.524	0.017	1



شکل (۱۲). سلول دوبیتی تغییرپذیر و پارامترهای مدار معادل آن و مشخصه‌های دامنه و فاز سلول

با در نظر گرفتن دیود ورکتور مدل SMV1405 برای پیاده‌سازی سلول و شبیه‌سازی آن، مطابق برگه داده این دیود ورکتور، مقدار مقاومت را ۰.۳ اهم و مقدار سلف را ۰.۷ نانوهرنی در نظر گرفتیم. همچنین مشخصه دامنه این سلول، حاکی از تضعیف قابل چشم‌پوشی آن در فرکانس مرکزی است. مشخصه این دیود بر اساس تغییرات ولتاژ در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



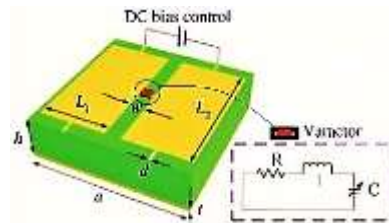
شکل (۱۳). تغییرات ظرفیت خازن دیود ورکتور پیشنهادی با ولتاژ

در انتها، برای صحت سنجی روش تحلیل مورد استفاده و نتایج به دست آمده، یک شبیه‌سازی تمام موج در نرم‌افزار CST انجام گرفت که نتایج آن در شکل (۱۴) ارائه شده است. به این منظور ابتدا فاز سلول‌های مختلف فرا سطح برای ایجاد زاویه انحراف ۴ درجه با استفاده از رابطه (۳) محاسبه گردید. سپس با استفاده از سلول پیشنهادی، ساختار نهایی فرا سطح طراحی گردیده و در مقابل یک آنتن هورن مناسب قرار داده شد (شکل ۱۴-الف)). شکل (۱۴-ب) الگوی تشعشی فرا سطح را در مقابل

بهره [dB]	انحراف پاسخ [درجه]	انحراف [درجه]	تعداد سلول	ابعاد سلول	ابعاد بازتابنده فرعی
35.4	0	0	14*14	50*50	700*700 (mm)
35.3	-0.1	0.25			
35.2	-0.2	0.5			
35.2	-0.3	1.5			
35.2	-0.4	1.75			
35.1	-0.5	2			
35.1	-0.6	3			
35.1	-0.7	3.25			
35	-0.8	3.5			
35	-0.9	4			
35	-1	5			
35	-1.1	5.5			
35.1	-1.2	6			
35.1	-1.3	6.5			
35	-1.4	7			
35	-1.5	7.25			
35	-1.6	7.5			
34.9	-1.7	8			
35	-1.8	8.25			
34.9	-1.9	8.5			
35	-2	9.5			
32.7	-7	30			
32.7	-7.4	39			
32	-7.5	49			
31.8	-8.3	45			

### ۵- سلول دوبیتی تنظیم‌پذیر پیشنهادی

پایه و اساس بازتابنده فرا سطح دیجیتال پیشنهادی، سلول واحد تشکیل‌دهنده آن است. همان‌طور که دیدیم تقریب دوبیتی فاز سلول‌ها، دقت خوبی را برای پیاده‌سازی آنتن دوانعکاسی برای چرخش پرتو ارائه می‌دهد. برای پیاده‌سازی این بازتابنده فرا سطح دیجیتال که قابلیت چرخش پرتو آنتن به صورت لحظه‌ای را دارد، سلولی با ساختار بسیار ساده که پیاده‌سازی آن را تسهیل می‌کند، پیشنهاد دادیم. ساختار سلول تغییرپذیر پیشنهادی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. این سلول از یک دیود ورکتور جهت کنترل پاسخ فاز سلول استفاده می‌کند. همان‌طور که از مشخصه‌های فاز سلول در شکل (۱۳) پیداست، با کنترل ولتاژ بایاس معکوس دیود ورکتور و در نتیجه تغییر ظرفیت خازنی آن، به پاسخ فازهای متفاوت خواهیم رسید و اختلاف‌فازهای ۹۰ درجه در فرکانس کاری، برای تحقق سلول دوبیتی فراهم شده است. به عبارت دیگر باید ۴ ولتاژ بایاس به‌گونه‌ای انتخاب شود که خازن‌هایی با ظرفیت‌های ۰.۹۸۷ pF، ۱.۰۳۳ pF، ۱.۰۶۶ pF و ۱.۳۳۴ pF به دست آید. شکل (۱۲) نمایی از مدار معادل این دیود ورکتور که شامل یک مدار سری متشکل از یک مقاومت ناچیز، یک سلف و یک خازن متغیر است را نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی این سلول استفاده شده است.



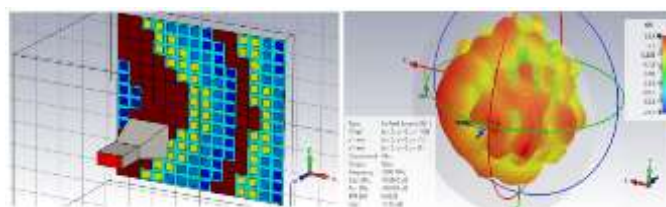
میزان تفکیک پذیری چرخش پرتو آنتن را بررسی نموده و دیدیم که در بازه چرخش ۲۰ درجه‌ای محقق شده چرخش پرتو با دقت ۰.۱ درجه میسر است و در نهایت با پیشنهاد یک سلول دیجیتالی دوبیتی تنظیم پذیر، بازتابنده فرعی فرا سطح تنظیم پذیر را تحقق بخشیدیم.

با توجه به تنظیم پذیری سلول پیشنهادی و قابلیت کنترل فاز آن، می توان در راستای تحقق فرا سطح چندکاربره، با طراحی فاز سلول های بازتابنده فرعی فرا سطح پیشنهادی، پرتو آنتن انعکاسی را مهندسی نموده و قابلیت هایی همچون شکل دهی پرتو آنتن را به صورت همزمان با چرخش پرتو، پیاده سازی کرد و بسیاری از نیازهای مخابرات نسل جدید را پاسخ داد.

## ۷- مراجع

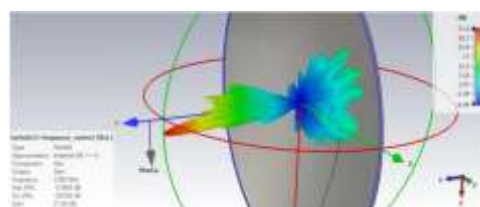
- [۱] M. Ebrahimi, S. H. Mohseni Armaki, A. Erfaniyan, "Design and implementation of Cassegrain antenna with ۳۷ dB gain in millimeter wave spectrum," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. ۲, no. ۳, pp. ۱۱-۲۰, ۲۰۱۵ (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/۲۰۱۰۰۱۱.۲۶۴۵۵۱۵۳.۱۳۹۳.۲.۳.۲۴>.
- [۲] M. Fartookzadeh, S. H. Mohseni Armaki, "Millimeter wave near-field focusing Cassegrain Reflector Antenna," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. ۲, no. ۳, pp. ۴۱-۴۹, ۲۰۱۵ (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/۲۰۱۰۰۱۱.۲۶۴۵۵۱۵۳.۱۳۹۳.۲.۳.۵۷>.
- [۳] S. A. Hadadi, A. Ghorbani, "Surface distortion compensation in reflector antennas using a shaped sub-reflector," *Scientific Journal of Radar*, vol. ۵, no. ۱, pp. ۱-۱۴, ۲۰۱۷, (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/۲۰۱۰۰۱۱.۲۳۴۵۴۰۲۴.۱۳۹۶۵.۱.۱.۵>.
- [۴] O. Yurduseven and D. Smith, "Symmetric/asymmetric h-plane horn fed offset parabolic reflector antenna with switchable pencil/fanbeam radiation characteristics", in *Proc. IEEE ISAPE ۲۰۱۲*, pp. ۸۲-۸۵, ۲۰۱۲.
- [۵] F. Arpin, J. Shaker, and D. McNamara, "Multifeed single beam power combining reflectarray antenna", *Electronics Letters*, vol. ۴۰, no. ۱۷, pp. ۱۰۳۵-۱۰۳۷, ۲۰۰۴. DOI: ۱۰.۱۰۴۹/el:۲۰۰۴۵۲۱۲.
- [۶] L. Greda and A. Dreher, "Beamforming capability of arrayfed reflector antennas", in *Proc. IEEE European conference on antenna and propagation*, pp. ۲۸۵۱-۲۸۵۶, ۲۰۱۱.
- [۷] Y. Rahmat-Samii, J. Huang, B. Lopez, M. Lou, E. Im, S. L. Durden, and K. Bahadori, "Advanced precipitation radar antenna: Array fed offset membrane cylindrical reflector antenna", *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. ۵۳, no. ۸, pp. ۲۵۰۳-۲۵۱۵, ۲۰۰۵. DOI: ۱۰.۱۱۰۹/TAP.۲۰۰۵.۸۵۲۵۹۹.
- [۸] F. Etesami, S. Khorshidi, H. Abiri, "Design of a broadband dual-beam reflect-array antenna with a single feed," *Scientific Journal of Radar*, vol. ۹, no. ۲, pp. ۷۹-۸۸, ۲۰۲۱, (in Persian). <https://dor.isc.ac/dor/...>
- [۹] T. Carolina, J. Encinar, M. Arrebola, M. Barba, and E. Carrasco. "Design, manufacturing and test of a dual-reflectarray antenna with improved bandwidth and reduced cross-polarization," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. ۶۱, no. ۳, pp. ۱۱۸۰-۱۱۹۰, ۲۰۱۲. DOI: ۱۰.۱۱۰۹/TAP.۲۰۱۲.۲۲۲۸۶۲۰.

آنتن هورن نشان می دهد. سپس با قرار دادن مجموعه فرا سطح و آنتن هورن در مقابل سطح انعکاسی اصلی، شبیه سازی موج کامل کل ساختار انجام شده و نتایج نشان داده شده در شکل های (۱۴-ج و د) به دست می آید. همان گونه که در شکل (۱۴-د) دیده می شود پرتو به میزان ۵.۳ درجه چرخیده است که تفاوت زیادی با میزان چرخش ۴ درجه نداشته و نشان دهنده دقت مناسب روش تحلیل پیشنهادی در این مقاله است.

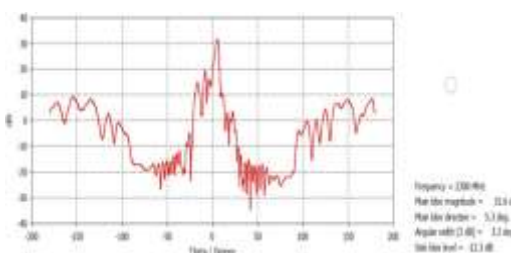


(ب)

(الف)



(ج)



(د)

شکل (۱۴). شبیه سازی تمام موج ساختار آنتن انعکاسی با بازتابنده فرعی فرا سطح برای زاویه انحراف ۴ درجه. (الف) فرا سطح طراحی شده با سلول پیشنهادی در مقابل آنتن هورن مناسب. (ب) الگوی تشعشعی فرا سطح. (ج) الگوی تشعشعی سه بعدی پاسخ بازتابنده اصلی در مقابل فرا سطح. (د) الگوی تشعشعی دوبعدی پاسخ بازتابنده اصلی

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله مفهوم بازتابنده فرعی بر پایه فرا سطح دیجیتالی تنظیم پذیر را معرفی کرده و دیدیم که این بازتابنده فرعی فرا سطح می تواند جایگزین خوبی برای بازتابنده فرعی معمولی در آنتن های کسگرین یا گریگورین باشد؛ به ویژه در کاربردهایی که نیاز به مهندسی پرتو آنتن اصلی داریم. در ادامه رابطه تحلیلی مناسبی برای تعیین فاز سلول های بازتابنده فرعی جهت چرخش پرتو آنتن انعکاسی دارای دو بازتابنده به دست آوردیم که دیدیم با این روش می توان در راستاهای  $\theta$  و  $\Phi$  تا ۲۰ درجه، پرتو آنتن را بدون حرکت مکانیکی و به صورت پیوسته چرخاند. سپس با استفاده از روش شبیه سازی پیشنهادی،

- [۱۰] W. Hu, M. Arrebola, R. Cahill, J. A. Encinar, V. Fusco, H. S. Gamble, Y. Alvarez, and F. LasHeras, "۹۴ GHz dual-reflector antenna with reflectarray subreflector," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. ۵۷, no. ۱۰, pp. ۳۰۴۳-۳۰۵۰, ۲۰۰۹. DOI: ۱۰.۱۱۰۹/TAP.۲۰۰۹.۲۰۲۹۲۷۵.
- [۱۱] M. Arrebola, L. De Haro, and J. A. Encinar, "Analysis of dual reflector antennas with a reflectarray as subreflector," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. ۵۰, no. ۶, pp. ۳۹-۵۱, ۲۰۰۸. DOI: ۱۰.۱۱۰۹/MAP.۲۰۰۸.۴۷۶۸۹۲۱.
- [۱۲] F. Liu, A. Ptilakis, M. S. Mirmoosa, O. Tsilipakos, X. Wang, A. C. Tasolamprou, S. Abadal, A. Cabellos-Aparicio, E. Alarcon, C. Liaskos, and et al., "Programmable metasurfaces: State of the art and prospects," in *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, ۲۰۱۸.
- [۱۳] E. Almajali. *Contributions to the Design of Sub-reflectarrays*. University of Ottawa, ۲۰۱۱.
- [۱۴] J. Huang and J. A. Encinar. *Reflectarray antennas*, vol. ۳۰. John Wiley & Sons, ۲۰۰۷.
- [۱۵] E. Carrasco, J.A. Encinar, Y. Rahmat-Samii. "Reflectarray antennas: A review". In *Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Technologies (FERMAT)*, ۲۰۱۶ Aug (Vol. ۱۶).
- [۱۶] D. M. Pozar, S. D. Targonski, and H. Syrigos, "Design of millimeter wave microstrip reflectarrays," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. ۴۵, no. ۲, pp. ۲۸۷-۲۹۶, ۱۹۹۷. DOI: ۱۰.۱۱۰۹/۸.۵۶۰۳۴۸.
- [۱۷] Du, Bozhou. *Analysis and design of simple, low loss and low cost reconfigurable reflectarrays*, PhD diss., University of Toronto (Canada), ۲۰۱۷.