

## طراحی و شبیه‌سازی و ساخت آنتن هوشمند مقرون به صرفه با تنوع الگوی تشعشی بسیار زیاد

علی نفر<sup>۱</sup>، امیرعلی حبیبی درونکلا<sup>۲</sup>، یعقوب قانع قره‌باغ<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- پژوهشگر، ۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>

(دریافت: ۹۷/۱۰/۱۷، پذیرش: ۹۷/۱۲/۱۵)

### چکیده

در این مقاله آنتن هوشمند کوچک مقرون به صرفه‌ای با گین زیاد و تنوع الگوی تشعشی بسیار زیاد ارائه می‌شود. این آنتن در واقع نمونه پیشرفته آنتن ESPAR مرسوم است. این آنتن از یک "مونوپل کوچک" و ۱۲ مونوپل "خم‌شده" تشکیل شده است. مونوپل کوچک در وسط قرار می‌گیرد و به‌عنوان المان تحریک‌کننده استفاده می‌شود و ۱۲ مونوپل خم‌شده به‌عنوان المان‌های پارازیتی استفاده می‌شوند. توزیع بین المان تحریک‌کننده و المان‌های پارازیتی، بار خازنی برای المان تحریک‌کننده ایجاد می‌کند که باعث کوچک‌تر شدن آنتن می‌شود. با خاموش و روشن کردن ۱۲ "دیود پین" در انتهای المان‌های پارازیتی امکان چرخش پرتو به‌وجود می‌آید. ابعاد آنتن ساخته‌شده در باند S نسبت به آنتن‌های هوشمند مرسوم این باند ۳۰ درصد کوچک‌تر شده است. ارتفاع آنتن کمتر از ۲۴mm ( $\lambda/4$  @ ۰/۱۸۶ GHz) می‌باشد و این آنتن دارای نسبت جلو به عقب ۲۲/۴ dB و بیشینه گین ۸/۲۶ dBi در فرکانس ۲/۴ GHz است.

**کلیدواژه‌ها:** آنتن هوشمند، اسپار، مونوپل، دیود پین، نسبت جلو به عقب زیاد، گین زیاد

### ۱. مقدمه

فناوری آنتن هوشمند یکی از اصلی‌ترین فناوری‌های پیشنهادی برای نسل بعدی ارتباطات بی‌سیم و ارتباطات ماهواره‌ای می‌باشد. آنتن هوشمند با چرخاندن پرتوی اصلی به سمت مورد نظر و با قرار دادن صفر در جهت سیگنال مزاحم، می‌تواند ظرفیت کانال‌های بی‌سیم را افزایش دهد و باعث بهبودی کیفیت ارتباطات شود. آنتن هوشمند می‌تواند از طریق آرایه شکل‌دهی پرتو آنالوگ [۴-۱] یا به‌صورت آرایه شکل‌دهی پرتو دیجیتال<sup>۱</sup> [۷-۵] تحقق پذیرد. این آنتن‌های هوشمند مرسوم سنگین و گران قیمت هستند و نیاز به توان بالا دارند. برای مثال یک آنتن هوشمند با شکل‌دهی پرتو آنالوگ، هر المان تشعشع‌کننده نیاز به یک شیفت‌دهنده فاز ماکروویوی، یک تقویت‌کننده فرکانس رادیویی یا یک تقویت‌کننده کم‌نویز<sup>۲</sup>، یک ضرب‌کننده، یک مبدل آنالوگ به دیجیتال و دیگر ادوات ماکروویوی دارد. برای استفاده‌های تجاری لازم است تا سایز، میزان توان مورد نیاز و هزینه آنتن کاهش بیابد.

آنتن‌های تابش‌کننده آرایه‌ای غیرفعال هدایت‌پذیر الکترونیکی (اسپار) کم‌هزینه هستند و مصرف توان آن‌ها کم است

[۹-۸]. یک آنتن اسپار متداول از یک المان تحریک‌شده و چند المان پارازیتی که توسط بار راکتیو تغذیه شده‌اند، تشکیل شده است. فقط المان تحریک‌شده به سیگنال RF متصل می‌باشد. این کار می‌تواند طراحی شبکه تغذیه را آسان کند. المان‌های پارازیتی توسط قطعات راکتیو تغذیه می‌شوند و چرخش پرتو با کنترل ولتاژ مستقیم که به قطعات راکتیو همانند دیود و رکتور<sup>۳</sup> یا دیود پین<sup>۴</sup> متصل است، به‌دست می‌آید. بنابراین، آنتن اسپار تنها به یک مسیر RF و یک مبدل آنالوگ به دیجیتال نیاز دارد. هیچ شیفت‌دهنده فاز ماکروویوی مورد نیاز نمی‌باشد که منجر به کاهش قابل توجهی در هزینه و مصرف انرژی آنتن هوشمند می‌شود. آنتن‌های تشکیل‌شده از المان‌های مونوپل در [۱۶-۸] مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. به‌طور معمول آن‌ها از مونوپل یک چهارم طول موج تشکیل شده است که المان تحریک‌شده در مرکز قرار دارد و ۶ مونوپل به‌عنوان المان‌های پارازیتی به‌صورت دایره‌ای در اطراف آن قرار دارد. المان‌های پارازیتی به‌صورت مساوی در یک دایره به شعاع یک چهارم طول موج توزیع شده‌اند و با دیود و رکتور به صفحه زمین متصل شده‌اند. و رکتور می‌تواند یک تغییرات پیوسته ظرفیت را تأمین کند و شکل‌دهی پرتو را تأمین کند. ولتاژ مستقیم مورد نیاز دیودهای و رکتور بالا می‌باشد

\* نویسنده پاسخگو: yqane@ihu.ac.ir

<sup>3</sup> Varactor Diode

<sup>4</sup> PIN Diode

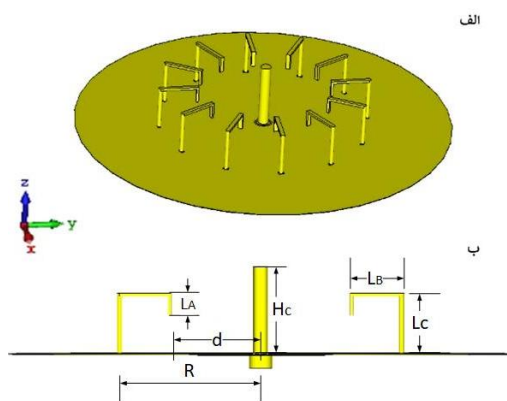
<sup>1</sup> Digital Beamforming (DBF)

<sup>2</sup> Low-Noise Amplifier (LNA)

تشعشعی ایجاد کند. بنابراین، با کنترل کردن ولتاژ DC که به دیودها اعمال می‌شود، شکل‌دهی پرتو اجرا می‌شود.

مزیت استفاده از دیود پین، قابلیت کنترل ولتاژها می‌باشد که سازگار با منطق کنترل TTL می‌باشد که در اغلب سامانه‌های تجاری توان پایین سامانه‌های بی‌سیم استفاده می‌شود.

برای کاهش ارتفاع آنتن، المان تحریک‌کننده، یک مونوپل کوچک با قطر ۴ mm در نظر گرفته شده است. المان تحریک‌کننده در وسط قرار گرفته است و تنها المانی می‌باشد که به منبع RF متصل است و پلاریزاسیون نهایی ناشی از این المان می‌باشد که در اینجا به دلیل استفاده از مونوپل، خطی می‌باشد. ۱۲ المان پارازیتی با فاصله مشخص از یکدیگر به دور مرکز می‌باشند. المان‌های پارازیتی به سمت مرکز خم شده‌اند و تغذیه خازنی را برای المان مرکزی (المان تحریک‌کننده) فراهم می‌کنند. با تغذیه خازنی که به وسیله مونوپل‌های خم شده فراهم می‌شود، ارتفاع المان مرکزی به ۲۳/۶۵ mm کاهش می‌یابد که در واقع  $\lambda/18.6$  در فرکانس ۲/۴ GHz می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است،  $L_A$ ،  $L_B$  و  $L_C$  به ترتیب فاصله بین المان مرکزی و المان‌های پارازیتی، طول قسمت خم شده مونوپل خم شده، طول قسمت افقی مونوپل خم شده می‌باشد. آنتنی که در شکل (۱-الف) مشخص شده است، شامل المان تحریک شده و ۱۲ المان پارازیتی می‌باشد. ۱۲ المان پارازیتی با ۳۰ درجه فاصله بین المان‌های مجاور، المان تحریک شده را احاطه کرده‌اند. همچنین در شکل (۱-ب) نشان داده شده است  $H_C$  بیانگر ارتفاع المان مرکزی می‌باشد. سنتز الگوی تشعشعی توسط جریان سطحی المان‌های تشعشع‌کننده مشخص می‌شود [۸]. نمای بالا آنتن که توزیع ۱۲ المان پارازیتی آنتن همراه با مختصات زاویه‌ای برای بیم، در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل (۱): (الف) نمای سه‌بعدی آنتن، (ب) نمای کنار آنتن و ابعاد المان‌ها.

که به‌طور معمول ۲۲ ولت است که ورکتورها را ناسازگار با اکثر دستگاه‌های قابل حمل می‌کند. به‌علاوه اکثر آنتن‌های اسپار پهنای باند کم و گین پایین دارند.

هدف‌های این مقاله عبارت‌اند از: ۱- دست‌یابی به آنتن اسپار کنترل‌شده با شکل‌دهی پرتوی باینری به‌وسیله دیود پین که با منطق ترانزیستور-ترانزیستور<sup>۱</sup> سازگار است و کوچک و کم‌هزینه می‌باشد. ۲- گسترش کارهای گذشته که در [۹] روی آنتن‌های اسپار کوچک الکتریکی انجام شده است. هدف این مقاله دستیابی به پهنای باند بیشتر و گین بیشتر می‌باشد.

قسمت‌های دیگر این مقاله عبارت‌اند از: قسمت دوم که ساختار آنتن پیشنهادی و طراحی و تحلیل آن را بیان می‌کند. قسمت سوم الگوهای تشعشعی<sup>۲</sup> شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد و قسمت چهارم الگوهای تشعشعی اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

## ۲. طراحی و تحلیل آنتن

آنتن هوشمند پیشنهادی در باند S کار می‌کند که نمونه بهبودیافته آنتن اسپار [۹] می‌باشد. آنتن پیشنهاد شده دارای ساختار متقارن چرخشی با یک مونوپل کوچک به‌عنوان المان تحریک‌کننده می‌باشد که توسط ۱۲ مونوپل خم شده به‌صورت دایره‌ای احاطه شده است. به این المان‌ها، المان پارازیتی می‌گوییم. مونوپل‌ها به سمت مرکز خم شده و بدین وسیله بار خازنی برای المان تحریک‌شده تأمین شده است. با بار خازنی، ارتفاع المان تحریک‌شده به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است. هیچ شیفت‌دهنده فاز ماکروویوی استفاده نشده است. انرژی RF از المان مرکزی به المان‌های پارازیتی از طریق تزویج الکترومغناطیسی توزیع می‌شود. هر المان پارازیتی با یک دیود پین برای تنظیم جریان سطح آن تغذیه می‌شود و الگوی تابشی نتیجه حاصل از سنتز فاز این جریان‌های سطح می‌باشد. در مقایسه با دیود پین در حالت بایاس معکوس جریان سطحی القا شده در مونوپل خم شده وقتی بایاس مستقیم است، بیشتر می‌باشد. میزان تفکیک نسبی فاز در معادله (۲) بیان شده است. با ترکیب‌های مختلف از بایاس مستقیم و معکوس دیود پین، شکل‌دهی پرتو قابل دستیابی خواهد بود. در مقایسه با آنتن اسپار که در [۹] توضیح داده شده است و شامل ۶ المان پارازیتی و ۶ دیود پین می‌باشد که می‌تواند  $\alpha = 64$  الگوی تشعشعی ایجاد کند، آنتن اسپاری پیشنهادی از ۱۲ المان پارازیتی و ۱۲ دیود پین تشکیل شده است و می‌تواند  $\alpha = 40.96$  الگوی

<sup>۱</sup> Transistor-Transistor Logic (TTL)

<sup>۲</sup> Pattern

الگوی تشعشعی آنتن را می‌چرخانند. جهت‌گیری<sup>۲</sup> آنتن در صفحه افقی در ناحیه دور<sup>۳</sup> به صورت ذیل می‌باشد [۱۷]:

$$D(\phi) = \frac{4\pi r^2}{\eta P_{input}} |E(I^T \times \alpha(\phi))|^2 \quad (3)$$

که در آن،  $r$  فاصله آنتن از جایی که انرژی ناحیه دور حساب می‌شود، می‌باشد.  $P_{input}$  میزان توانی است که به آنتن اسپار می‌رسد.

$I$  بیان‌کننده جریان سطحی بر روی المان‌های تشعشع‌کننده می‌باشد و  $\alpha(\phi)$  بردار چرخش می‌باشد که توسط مختصات زاویه‌ای که در شکل (۲) و فاصله نسبی که در شکل (۱) نشان داده شده است، مشخص می‌شود.

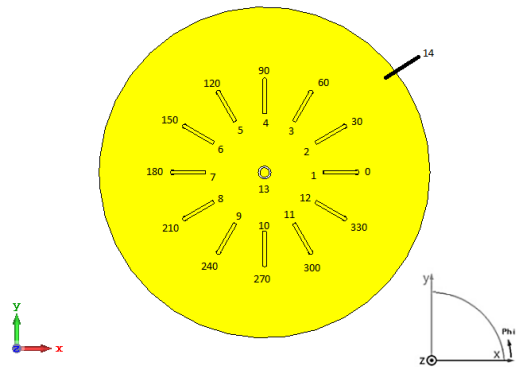
$$I = [i_0 \ i_1 \ i_2 \ i_3 \ i_4 \ \dots \ i_{11} \ i_{12}]^T \quad (4)$$

$$\alpha(\phi) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j \frac{(d+L_B)}{\lambda} 2\pi \cos(\phi)} \\ e^{j \frac{(d+L_B)}{\lambda} 2\pi \cos(\phi - \frac{\pi}{6})} \\ e^{j \frac{(d+L_B)}{\lambda} 2\pi \cos(\phi - \frac{2\pi}{6})} \\ \dots \\ e^{j \frac{(d+L_B)}{\lambda} 2\pi \cos(\phi - \frac{11\pi}{6})} \end{bmatrix} \quad (5)$$

در این مقاله، تنها محیط دید مستقیم<sup>۴</sup> برای انتشار موج برای شکل‌دهی پرتو در نظر گرفته شده است. الگوی تشعشع نرمالیزه شده در صفحه افقی که با استفاده از معادله ۱ تا ۳ چگالی جریان سطحی آنتن به دست آمده است، با الگوی تشعشعی شبیه‌سازی شده از نرم‌افزار CST مقایسه شده است.

### ۳. نتایج شبیه‌سازی

آنتنی که در شکل (۱) نشان داده شده است با نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شده و سپس ساخته شده و اندازه‌گیری شده است. هر المان پارازیتی ولتاژ کنترلی مستقل و یکسانی دارد که توسط دیود پین، اتصال کوتاه و یا مدار باز می‌شود و همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، از عدد ۱ تا ۱۲ شماره‌گذاری شده است. بردار ولتاژ DC ۱۲ المانه با  $H$  و  $L$  نشان داده می‌شود که به ترتیب ولتاژ ۵ ولت و ۰ ولت را نشان می‌دهند. برای مثال بردار ولتاژ به صورت  $[L, L, L, L, L, L, L, H, H, H, H, H]$  نشان می‌دهد



شکل (۲): آنتن از نمای بالا و مختصات زاویه‌ای.

در این شکل، اعداد ۱-۱۲ نشان‌دهنده ۱۲ المان پارازیتی می‌باشند و عدد ۱۳ بیانگر المان مرکزی و عدد ۱۴ صفحه زمین می‌باشد. تحلیل و بهینه‌سازی آنتن با کمک ماکروویو استودیوی نرم‌افزار CST<sup>۱</sup> انجام شده است. فاصله بهینه‌شده المان مرکزی و المان‌های پارازیتی،  $d$ ، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است برابر است با:  $d = 25/44 \text{ mm}$ . دیگر پارامترهای بهینه شده برای المان‌های پارازیتی عبارت‌اند از:  $L_A = 6/1 \text{ mm}$  و  $H_C = 23/65 \text{ mm}$  و  $L_C = 16/28 \text{ mm}$  و  $L_B = 15/26 \text{ mm}$  و  $R = 40 \text{ mm}$ .

شکل‌دهی پرتو آنتن شامل سنتز جریان سطحی المان تحریک شده و المان‌های پارازیتی می‌باشد. که این جریان‌ها برابرند با:

$$i_{driven} = I_{driven}^Z \cos(\omega t - 30^\circ) \quad (1)$$

$$i_{para} = \begin{cases} I_{PIN\_open}^Z \cos(\omega t - 30^\circ) \\ I_{PIN\_short}^Z \cos(\omega t - 280^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

که  $I_{driven}^Z$  اندازه جریان سطحی روی المان تحریک‌شده می‌باشد.  $I_{PIN\_open}^Z$  و  $I_{PIN\_short}^Z$  به ترتیب اندازه جریان‌های سطحی روی المان‌های پارازیتی در حالتی که دیود پین سری شده در بایاس معکوس و بایاس مستقیم باشد، می‌باشند.

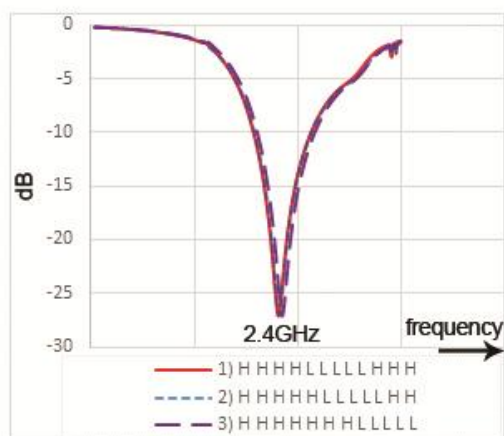
چگالی جریان سطحی خطی جریان سطحی آنتن مونوپل از نرم‌افزار CST استخراج شده است که به وسیله تعریف مختصات که بیشینه جریان سطحی مشاهده می‌شود، تعریف می‌شود. اندازه جریان القاشده به المان‌های پارازیتی وقتی که دیود پین مستقیم بایاس شده است، بسیار بیشتر از حالتی است که به صورت معکوس بایاس شده است. بنابراین، المان‌های پارازیتی که به صورت مستقیم بایاس شده‌اند، شکل‌دهی پرتو را کنترل کرده

<sup>2</sup> Directivity

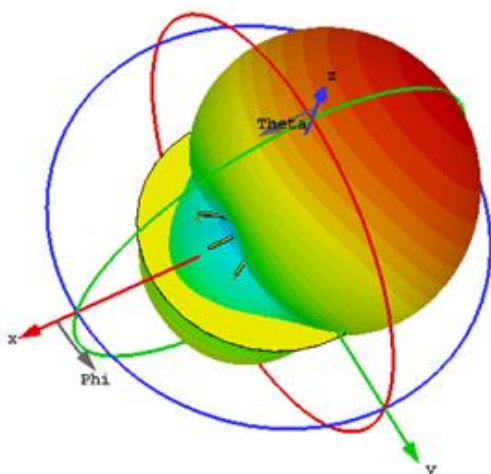
<sup>3</sup> Farfield

<sup>4</sup> Line Of Sight (LOS)

<sup>1</sup> Computer Simulation Technology



شکل (۳):  $S_{11}$  شبیه‌سازی به ازای ولتاژهای مختلف کنترل DC.



شکل (۴): نمای سه‌بعدی الگوی تشعشعی شبیه‌سازی شده.

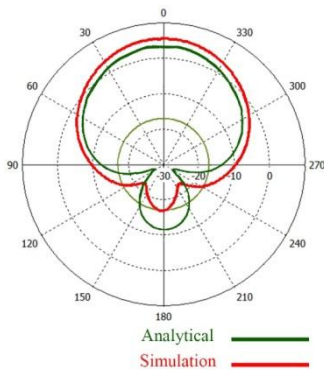
که دیود بین متناظر با مونوپل‌های خم‌شده ۱ تا ۷ مستقیم بایاس شده‌اند و دیودهای پین متناظر با مونوپل‌های خم‌شده ۸ تا ۱۲ به صورت معکوس بایاس شده‌اند. با شیفت مناسب بردار ولتاژ کنترل الگوی تشعشعی آنتن می‌تواند از ۰ تا ۳۶۰ درجه را در صفحه افقی با گام‌های ۳۰ درجه‌ای جاروب کند. رابطه بین مختصات زاویه‌ای تعریف شده برای پرتو (مراجعه به شکل (۲)) و وضعیت ولتاژها در جدول (۱) آورده شده است.

در شبیه‌سازی آنتن پیشنهادی، از مدل مداری دیود پین استفاده شده است. این دیود در زمان وصل بودن ظرفیت خازنی ۰/۱۵ pF و در زمان قطع بودن ۰/۰۱ pF از خود نشان می‌دهد. از تلفات اهمی دیود پین نیز صرف نظر شده است.

ضریب انعکاس شبیه‌سازی شده برای آنتن با بردارهای ولتاژ کنترل DC مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است که نشان دهنده تحمل بالای امپدانس ورودی آنتن در زمان متفاوت بودن بردار ولتاژ کنترل است که برای چرخش پرتو به این مساله نیاز است. الگوی تشعشعی شبیه‌سازی شده سه‌بعدی در شکل (۴) و الگوی تشعشعی شبیه‌سازی شده دوبعدی در صفحه عمودی در شکل (۵) نشان داده شده است. حداکثر مقدار، در زاویه عمودی ۵۰ درجه‌ای مشاهده شده است و این ویژگی از سطح زمین ناشی می‌شود. الگوی تشعشعی شبیه‌سازی شده با زاویه عمودی ۹۰ درجه در سطح افقی در شکل (۶) نشان داده شده است. الگوهای تابش در شکل (۴) با استفاده از بردار ولتاژ کنترل DC حالت هشتم جدول (۱) ایجاد شده‌اند که این ولتاژ کنترل زاویه ۱۸۰ درجه را مطابق شکل (۱) ایجاد می‌کند. با انتقال به راست این بردار ولتاژ، الگوی تابش می‌تواند به صورت بیان شده در جدول (۱)، در صفحه افقی دچار چرخش شود. در شکل (۷) مقایسه الگوی تشعشعی شبیه‌سازی شده با الگوی تحلیلی انجام شده است.

جدول (۱): جهت‌گیری پرتو.

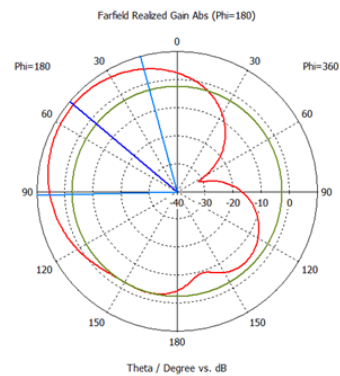
شماره دیود	زاویه پرتو											
	۳۰	۶۰	۹۰	۱۲۰	۱۵۰	۱۸۰	۲۱۰	۲۴۰	۲۷۰	۳۰۰	۳۳۰	۳۶۰
۱	H	H	L	L	L	L	L	L	L	H	H	H
۲	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	H	H
۳	H	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	H
۴	H	H	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L
۵	L	H	H	H	H	H	L	L	L	L	L	L
۶	L	L	H	H	H	H	H	L	L	L	L	L
۷	L	L	L	H	H	H	H	H	L	L	L	L
۸	L	L	L	L	H	H	H	H	H	L	L	L
۹	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	L	L
۱۰	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	L
۱۱	L	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H
۱۲	H	L	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H



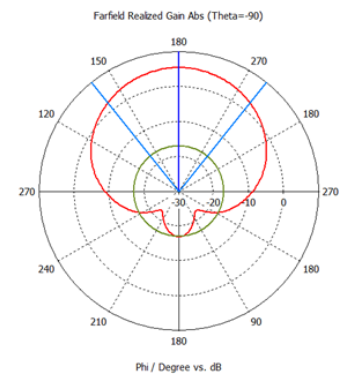
شکل (۷): مقایسه الگوی تشعشی شبیه‌سازی شده با تحلیلی.

در مقایسه با آنتن ESPAR که شامل ۶ المان پارازیتی می‌باشد، آنتن پیشنهاد شده در این مقاله پهنای پرتوی بسیار باریک‌تر دارد که این مسئله می‌تواند تنوع الگوی تشعشی یک سیستم ارتباطات بی‌سیم را افزایش دهد.

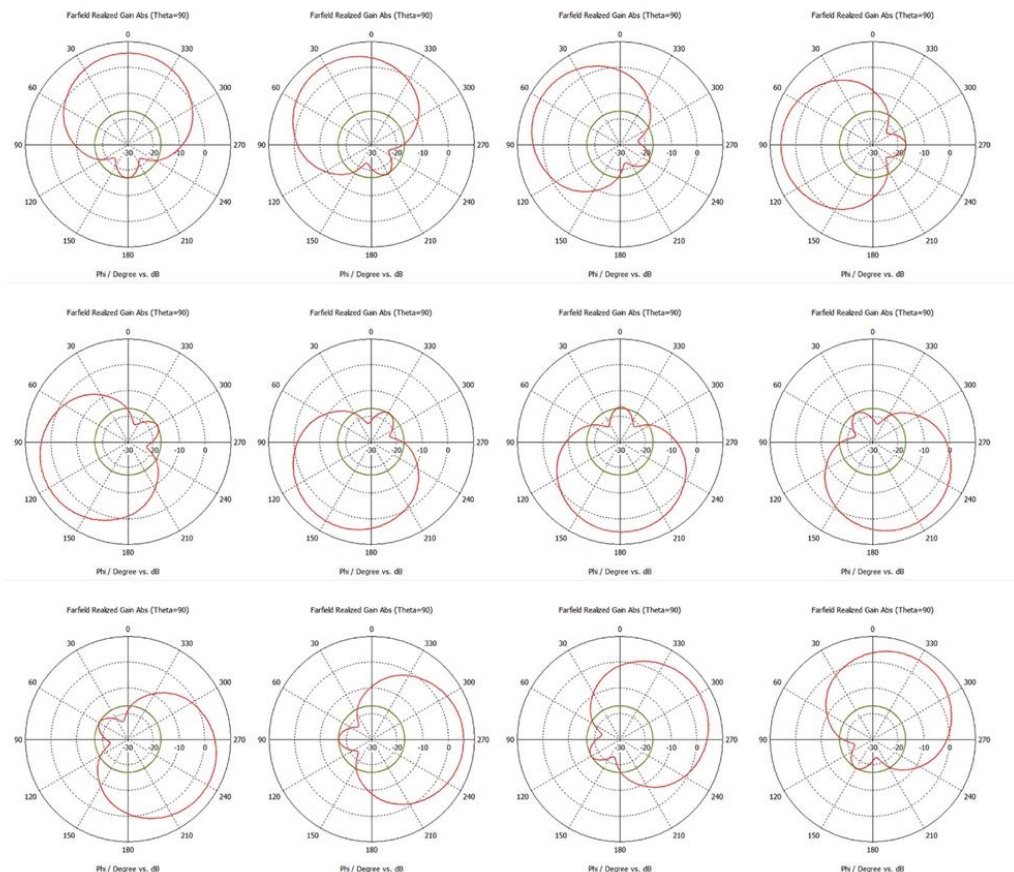
از آنجایی که ۱۲ عنصر پارازیتی در آنتن پیشنهادی به‌کار گرفته شده است، در نتیجه تعداد کل الگوهای تشعشی قابل تحقق برابر ۲<sup>۱۲</sup> یعنی ۴۰۹۶ حالت خواهد بود. الگوی تشعشی شبیه‌سازی شده با فاصله زاویه‌های ۳۰ درجه از هم در شکل (۸) نمایش داده شده است. نتایج شبیه‌سازی، مطابق انتظار، تقارن آنتن را تایید می‌کند.



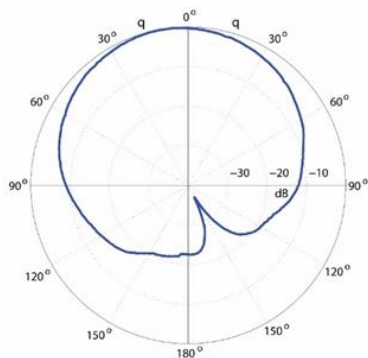
شکل (۵): الگوی تشعشی شبیه‌سازی شده در صفحه عمودی.



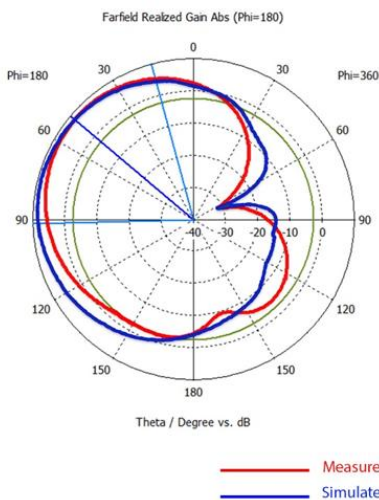
شکل (۶): الگوی تشعشی شبیه‌سازی شده با زاویه عمودی ۹۰ درجه در صفحه افقی.



شکل (۸): دوازده الگوی تشعشی شبیه‌سازی شده با فاصله زاویه‌ای ۳۰ درجه.



شکل (۱۰): الگوی تشعشی اندازه‌گیری شده در فرکانس ۲/۴ GHz.



شکل (۱۱): نتایج انطباق آنتن تست شده و شبیه‌سازی شده.

### ۵. نتیجه گیری

ترکیب یک مونوپل کوچک و ۱۲ مونوپل پارازیتی خم شده به‌عنوان یک روش مفید برای کاهش ارتفاع آنتن ESPAR شبیه‌سازی و ساخته شد. ابعاد آنتن اسپار مرسوم، یک چهارم طول موج می‌باشد. ارتفاع المان مرکزی آنتن اسپار پیشنهادی در حدود یک پنجم طول موج می‌باشد که کمتر از ابعاد آنتن اسپار مرسوم است. آنتن اسپار پیشنهادی دارای نسبت جلو به عقب بیشتری نسبت به آنتن‌های مشابه می‌باشد.

استفاده از ۱۲ عنصر پارازیتی در مقایسه با آنتن‌های ESPAR که تنها از شش عنصر پارازیتی استفاده می‌کنند، تفکیک زاویه‌ای پرتوی بیشتر و تعداد الگوی تشعشی بیشتری دارد. نتایج ارزیابی نشان می‌دهند که آنتن قادر به تشکیل پرتو و اسکن پرتو بر روی بازه  $360^\circ$  در صفحه افقی است. همچنین این نتایج نشان می‌دهند که تنوع الگوهای تشعشی سامانه‌های ارتباطی با به‌کارگیری آنتن هوشمند پیشنهادی، به‌طور قابل توجهی بهبود خواهد یافت.

تعداد الگوی تابشی و گین این آنتن از آنتن‌های مقاله‌های [۹] و [۲۰-۱۸] بیشتر است. آنتن پیشنهادی در این مقاله در مقایسه با آنتن مقاله [۱۹] که ارتفاع المان پارازیتی آن یک چهارم طول موج است، دارای گین بیشتری می‌باشد و ارتفاع کمتری نیز دارد. نتایج مقایسه این آنتن با آنتن‌های مشابه در جدول (۲) آورده شده است.

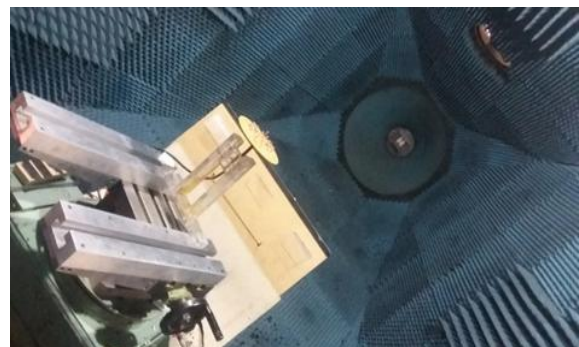
جدول (۲): مقایسه بین آنتن‌های اسپار مشابه.

گین صفحه افقی	تعداد پرتو ها	Front to Back ratio	Best null	ارتفاع المان اکتیو	ارتفاع المان پارازیتی
4.5 dBi [18]	$2^\circ=64$	_____	_____	0.14 $\lambda$	0.176 $\lambda$
8.1 dBi [19]	$2^\circ=64$	_____	_____	0.25 $\lambda$	0.25 $\lambda$
4 dBi [20]	$2^\circ=16$	14dBi	_____	0.088 $\lambda$	0.088 $\lambda$
4.01 dBi [9]	$2^\circ=64$	14dBi	_____	0.125 $\lambda$	0.125 $\lambda$
5.44dBi Proposed Antenna	$2^{12}=4096$	22.4 dB	-32 dB	0.186 $\lambda$	0.128 $\lambda$

### ۴. نتایج اندازه‌گیری

الگوهای تابش در اتاق آنتن مرکز مخابرات ایران و تست پارامترهای S با استفاده از یک آنالایزر شبکه بردار (VNA) انجام شد. در این تست ولتاژهای کنترل برای دیودهای پین با استفاده از یک منبع ولتاژ مستقیم (باطری) تأمین شد.

در محل تست الگوی تشعشی آنتن، جاذب موج قرار گرفته است تا اثرات دیوارها و چند مسیر بودن موج به حداقل برسد. تنظیمات اندازه‌گیری و اتاق آنتن در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۹): اتاق تست آنتن مرکز مخابرات ایران.

نتیجه الگوی تشعشی اندازه‌گیری شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است. فرکانس مرکزی در این تست ۲/۴ GHz در نظر گرفته شد و بر نتایج شبیه‌سازی صحت گذاشته شد. شکل (۱۱) نشان‌دهنده تطبیق نتایج شبیه‌سازی بر نتایج تست می‌باشد.

<sup>1</sup> Electronically Steerable Parasitic Array Radiator

maximum directionality at the frequencies of 1.8, 1.9 and 2.4 ghz with the aid of genetic algorithms,” in 2008 Loughborough Antennas and Propagation Conference, LAPC, no. March, pp. 253–256, 2008.

- [12] J. Lu, D. Ireland, and R. Schlub, “Dielectric embedded ESPAR (DE-ESPAR) antenna array for wireless communications,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 8I, pp. 2437–2443, 2005.
- [13] O. Shibata and T. Furuhi, “Dual-band ESPAR antenna for wireless LAN applications,” In *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, vol. 2B, pp. 605–608, 2005.
- [14] H. Scott and V. F. Fusco, “360° Electronically Controlled Beam Scan Array,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 1, pp. 333–335, 2004.
- [15] Y. Yusuf and X. Gong, “A low-cost patch antenna phased array with analog beam steering using mutual coupling and reactive loading,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 81–84, 2008.
- [16] M. Liu, J. Wang, and Z. Feng, “Parasitic patch antennas for omni-directional radiation application,” *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, no. 1, pp. 2682–2685, 2007.
- [17] C. Sun, A. Hirata, T. Ohira, and N. C. Karmakar, “Fast beamforming of electronically steerable parasitic array radiator antennas: Theory and experiment,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 7, pp. 1819–1832, 2004.
- [18] J. Lee, Y. Lee, Y. Lee, and T. Kim, “ $\lambda/16$  Spaced ESPAR Antenna Using Analog RF Switches for Single RF Chain,” pp. 840–841, 2016.
- [19] A. Kausar and M. A. Cheema, “ESPAR Antenna System Designing & Simulation Adaptive Beam Forming Antenna System for Target Tracking,” pp. 156–159, 2014.
- [20] H. Liu, S. Gao, and T. Loh, “Electrically Small and Low Cost Smart Antenna for Wireless Communication,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 3, pp. 1540–1549, 2012.

## ۶. مراجع

- [1] X. Ding, Y. F. Cheng, W. Shao, H. Li, B. Z. Wang, and D. E. Anagnostou, “A wide-angle scanning planar phased array with pattern reconfigurable magnetic current element,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 3, pp. 1434–1439, 2017.
- [2] R. J. Mailloux, “Phased Array Antenna Handbook,” p. 3, 1994.
- [3] P. J. Bevelacqua and C. A. Balanis, “Minimum sidelobe levels for linear arrays,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 12, pp. 3442–3449, 2007.
- [4] S. Zhang, G. H. Huff, J. Feng, and J. T. Bernhard, “A pattern reconfigurable microstrip parasitic array,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 10, pp. 2773–2776, 2004.
- [5] S. R. Rengarajan, M. S. Zawadzki, and R. E. Hodges, “Design, analysis, and development of a large Ka-band slot array for digital beam-forming application,” *Antennas Propagation, IEEE Trans.*, vol. 57, no. 10, pp. 3103–3109, 2009.
- [6] G. Sadowy, B. Heavey, D. Moller, E. Rignot, M. Zawadzki, and S. Rengarajan, “Technology demonstration of Ka-band digitally-beamformed radar for ice topography mapping,” *IEEE Aerosp. Conf. Proc.*, 2007.
- [7] S. Chandran, “Wideband adaptive beamforming array with improved radiation characteristics,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 4, no. 5, pp. 1969–1973, 2005.
- [8] R. F. Harrington, “Reactively Controlled Directive Arrays,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 26, no. 3, pp. 390–395, 1978.
- [9] H. Liu, S. Gao, and T. H. Loh, “Compact-size electronically steerable parasitic array radiator antenna,” *Loughbrgh. Antennas Propag. Conf. LAPC 2009 - Conf. Proc.*, pp. 265–268, 2009.
- [10] S. U. N. Chen, “Smart antennas for 3G and future wireless communications: algorithms and implementations,” 2005.
- [11] T. D. Dimousios, C. I. Tsitouri, S. C. Panagiotou, and C. N. Capsalis, “Design and optimization of a multipurpose tri-band Electronically Steerable Passive Array Radiator (ESPAR) antenna with steerable-beam-pattern for

---

**Design, Simulation And Fabrication of A Low-Cost Smart Antenna with High Radiation Pattern Diversity**

**A. Nafar, A. Habibi Daronkola, Y. Ghane Gharebagh \***

**Imam Hussain University**

(Received: 07/01/2019, Accepted: 16/03/2019)

**Abstract**

*In this paper a low profile, low-cost smart antenna which has a high gain and high radiation pattern diversity is presented. This antenna is actually an advanced ESPAR antenna which is made up of a "short monopole" and 12 "folded monopoles". The short monopole is in the center and is used as the driven element and the 12 folded monopoles are used as parasitic elements. The coupling between the driven element and the parasitic elements creates a capacitive load for the driven element, which causes the antenna to become low-profile. By turning on and off 12 "PIN diodes" at the bottom of the parasitic elements, the beam can be rotated. The dimensions of the proposed antenna fabricated in the S band are reduced by 30% compared to the conventional smart antennas of this band. The antenna height is less than 24mm ( $0.186\lambda$  @ 2.4 GHz), the front to back ratio is 22.4dB and antenna's maximum gain at 2.4GHz is 8.26dBi.*

**Keywords:** Smart Antenna, ESPAR, Monopole, PIN Diode, High front-to-back ratio, High Gain

---

\* Corresponding author E-mail: yqane@ihu.ac.ir