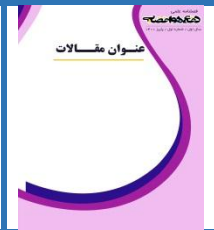




فصلنامه علمی ((دفاع هوافضایی))  
دوره ۲، شماره ۲، شهریور ۱۴۰۲



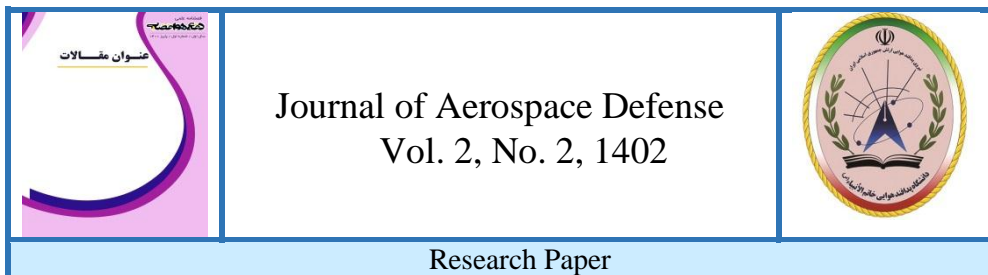
مقاله پژوهشی

## آنتن میکرواستریپ بهینه جهت کاربرد رکتانا در باند GSM

جعفر خلیل پور<sup>۱</sup>، احمد تاجور<sup>۲</sup>

۱. دانشیار مهندسی برق مخابرات دانشگاه خاتم الانبیا(ص) پدافند هوایی
۲. کارشناس ارشد مهندسی برق مخابرات دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری.

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>در این مقاله یک آنتن رکتانا میکرواستریپ با ابعاد بهینه در باند GSM جهت برداشت انرژی RF و تبدیل آن به انرژی الکتریسیته، پیشنهاد شده است. آنتن پیشنهادی، مدل خاصی از آنتن پاپیونی می باشد که مثلث های آن به صورت ۹۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته اند و با کانکتور SMA به صورت دایپل تغذیه می شود. ابعاد آنتن ۱۰×۱۰ سانتیمتر با زیر لایه FR4 با ضخامت ۱/۶ میلیمتر است که برای دریافت در باند فرکانسی GSM یعنی ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگا هرتز طراحی شده است. گین آنتن پیشنهادی ۱/۸dBi می باشد. مزیت آنتن پیشنهادی نسبت به آنتن های بررسی شده، بالا بودن ضریب بازدهی مدار مبدل RF به DC و کم حجم بودن آن می باشد. بطوریکه ضریب بازدهی بدست آمده برای آن ۷۶٪ است که ۱۲٪ بیش از نمونه های قبلی است. همچنین حجم اشغال شده توسط ساختار پیشنهادی حداقل ۸۷/۲٪ کمتر از ساختارهای ارائه شده در سایر مراجع برای این باند فرکانسی می باشد. از سوی دیگر به دلیل مسطح بودن ساختار پیشنهادی، این آنتن قابلیت بکارگیری در سطوح تخت مانند دیواره یا بدنه اجسام مختلف را دارد درحالی که آنتن های پیشنهادی در سایر مراجع ۳ بعدی بوده و فاقد این قابلیت می باشند.</p>	<p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۵</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰</p> <p>کلمات کلیدی: آنتن رکتانا، آنتن پاپیونی، آنتن میکرواستریپ، فرکانس GSM</p> <hr/> <p>doi</p> <p>نویسنده مسئول: جعفر خلیل پور ایمیل: J_khalilpour@yahoo.com</p>
<p>استناد به مقاله: جعفر خلیل پور، احمد تاجور، آنتن میکرواستریپ بهینه جهت کاربرد رکتانا در باند GSM، مجله علمی دفاع هوافضایی، دوره ۲، شماره ۲، شهریور ۱۴۰۲</p>	



## Optimum microstrip antenna for the use of rectana in the band GSM

jafar khalil poor<sup>1</sup> ahmad tajvar<sup>2</sup>

1.Associate Professor of Electrical and Telecommunication Engineering, Khatam Al-Anbia Air Defense University.

2.Senior Expert in Telecommunication Electrical Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences and Technology.

### Article Information

Accepted: 1402/06/05

Received: 1402/03/20

### Keywords:

Rectana antenna, bowtie antenna, microstrip antenna, GSM frequency.



### Corresponding author:

jafar khalil poor

Email:

[J\\_khalilpour@yahoo.com](mailto:J_khalilpour@yahoo.com)

### Abstract

In this article, a rectana microstrip antenna with optimal dimensions in the GSM band is proposed to harvest Rf energy and convert it into electricity. The proposed antenna is a special model of bow-tie antenna whose triangles are placed at 90 degrees to each other and it is fed in dipole form with SMA connector. The dimensions of the antenna are 10 x 10 cm with an FR4 substrate with a thickness of 1.6 mm, which is designed to receive in the GSM frequency band, i.e. 900 and 1800 MHz. The recommended antenna gain is 1.8dBi. The advantage of the proposed antenna compared to the examined antennas is the high efficiency of the RF to DC converter circuit and its small size. So that the efficiency factor obtained for it is 76%, which is 12% more than the previous examples. Also, the volume occupied by the proposed structure is at least 87.2% less than the structures presented in other references for this frequency band. On the other hand, due to the flatness of the proposed structure, this antenna has the ability to be used on flat surfaces such as the wall or body of various objects, while the antennas proposed in other references are 3D and lack this capability.

**HOW TO CITE:** jafar khalil poor, ahmad tajvar, Optimum microstrip antenna for the use of rectana in the band GSM, Journal of Aerospace Defense, Vol. 2, No 2, 1402

## ۱. مقدمه

در مناطق شهری فضا به شدت با امواج الکترومغناطیسی در طیف های مختلف پر شده است. این امواج، در همه جا توسط فرستنده های رادیویی و تلویزیونی، تلفن های همراه، وسایل ارتباط شخصی، بی شمار ایستگاه های Wi-fi، تجهیزات بلوتوث، تولید و منتشر می شوند که روز به روز در حال افزایش اند [۱]. بخشی از انرژی این امواج را می توان بازیافت کرد و برای سیستم های الکترونیکی با قدرت فوق العاده کم، نظیر سنسورهای الکترونیکی استفاده نمود. فرایند برداشت انرژی، توسط تکنولوژی جدیدی بنام رکتانا (Rectenna) صورت می گیرد. با توجه به انواع آنتن ها که برای باندهای مختلف فرکانسی طراحی شده اند، می توان مدار با ابعاد کوچک و کارایی بیشتر، برای استحصال این انرژی طراحی کرد [۲].

نمونه های اولیه رکتانا را باید در تلاش های نیکولا تسلا برای انتقال توان از طریق امواج رادیویی در اوایل سال ۱۹۰۰ جستجو کرد. در ادامه در این زمینه در سالهای اخیر، با ظهور نیمه هادی و دیودهای شاتکی، تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. بسیاری از محققان به بررسی برداشت انرژی امواج در یک فرکانس جهت کاربردی خاص از جمله استفاده این فناوری در RFID، پرداختند. جهت برداشت انرژی، برای کاربردهای کلی، با توجه به جغرافیایی منطقه مورد نظر و یافتن بالاترین مقدار چگالی توان امواج دائمی و پیوسته موجود در فضا، می بایست آنتن مناسب در باند فرکانسی فوق طراحی و ساخته شود.

آنتن های میکرو استریپ کاربرد های متنوع و متفاوتی دارند [۳]. در کاربردهای رکتانا آنتن میکرو استریپ پهن باند مورد نیاز می باشد. نمونه های متعددی از آنتن های میکرو استریپ پهن باند با ساختار و کاربردهای متفاوت ارائه شده اند [۴-۵]. در مرجع [۵] آنتن ریز نواری پاپیونی به عنوان مرجع آنتن های پهن باند ارائه گردیده است که با تغییراتی در هندسه آن در این مقاله مشخصات مطلوبی حاصل گردید.

آنتن های رکتانای مختلفی در باند های مختلف فرکانسی طراحی و ساخته شده اند که از جمله آنها مقاله [۶] می باشد که از آنتن فراکتال کانتور خطی جهت استحصال انرژی در باند فرکانسی GSM استفاده شده است. این مقاله به بررسی یک آنتن ریز نواری سه بعدی به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  cm پرداخته که در فرکانس های مورد نظر تقریباً دارای پارامتر  $S_{11}$  مناسبی است. توان کسب شده با توجه به آرایه ای بودن، حدود ۱۵ میکرووات می باشد.

همچنین در مقاله [۷] نیز نوعی آنتن رکتانا بصورت آرایه ای طراحی بررسی شده که در ابعاد  $10 \times 10$  cm بصورت ریز نواری ساخته شده که آرایه خاص آن به شکل مکعب می باشد. البته در این مقاله غیر باند GSM یک آنتن مجزا نیز در باند FM جهت دریافت انرژی امواج رادیویی طراحی شده است که برای افزایش دریافت توان از آرایه ها از مدار ترکیب کننده استفاده شده است. توان دریافتی حدود ۱۲ میکرووات بیان شده است.

در مرجع [۸] نیز یک رکتانا پهن باند در فرکانس ۱۲ گیگاهرتز مورد بررسی قرار گرفته که توان ارائه شده حدود ۵ میکرووات بوده است. این رکتانا جهت کاربرد خاص می باشد.

همچنین در مرجع [۹] یک آنتن باند فرکانسی ۵ تا ۸ گیگاهرتز مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است که توان کسب شده در حدود ۶ میکرووات بیان گردید.

در مرجع [۱۰] نیز فرکانس ۵/۸ گیگاهرتز مد نظر بوده و هدف اصلی شبکه های Wlan بوده است. توان آن حدود ۵ میکرووات آمده است.

برای طراحی و ساخت یک آنتن رکتانا، ابتدا لازم است محدوده فرکانسهای حاوی بیشترین انرژی فضای آزاد پیرامون ما مشخص گردد تا آنتن متناسب آن طراحی گردد.

در این مقاله با استفاده از نتایج تحقیقات مقالات گوناگون، توان منابع RF پیرامون، بررسی و مناسبترین منابع انتشار امواج انتخاب می شود. البته مقدار حداکثر توانی که فرستندهها مجازند در محیط منتشر کنند، با توجه به مضراتی که برای سلامتی انسان دارند، محدود می باشد.

با اندازه گیری توان امواج در محدوده شهری، مشخص شده که ۵ باند فرکانسی ۱۰۰، ۹۰۰، ۱۸۰۰، ۲۱۰۰ و ۲۴۰۰ مگا هرتز دارای بالاترین سطح توان هستند که به ترتیب توان ماکزیمم  $-3\text{ dBm}$  (در  $100\text{ MHz}$ )،  $-15\text{ dBm}$  (در  $900\text{ MHz}$ )،  $-20\text{ dBm}$  (در  $1800\text{ MHz}$ )،  $-35\text{ dBm}$  (در  $2100\text{ MHz}$ ) و  $-40\text{ dBm}$  (در  $2400\text{ MHz}$ ) است. این فرکانسها در محدوده باند GSM FM، 3G و WiFi قرار دارند [۷]. در این مقاله یک مدل خاص آنتن پاپیونی مورد بررسی، شبیه سازی و ساخت قرار گرفته که در باند فرکانسی مربوط به GSM و GPRS یعنی ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگا هرتز دارای پارامترهای مطلوب می باشد.

با تعیین باند های فرکانسی، مدل های خاصی از آنتن پهن باند [۱۲] در باند ۵۰۰ تا ۳۰۰۰ مگا هرتز قابل بررسی، شبیه سازی و مقایسه قرار می گیرد. طراحی این آنتن ریزنواری بر اساس محاسبات مرجع [۱۳] انجام شده است.

این آنتن به صورت ریز نواری با ابعاد  $10 \times 10\text{ cm}$  روی زیر لایه FR4 با ضخامت  $1/6\text{ mm}$ ، طراحی و ساخته شده است. ایجاد شکافهایی در ساختار آن، سبب بهبود پارامترها گردید. گین  $1/85\text{ dBi}$ ، پهنای بیم مناسب، پارامتر  $S_{11}$  مناسب و افزایش بازده از جمله مزایای این آنتن می باشد. با طراحی مدار یکسوساز و تطبیق امپدانس مناسب توان تا ۱۰ میکرووات قابل استحصال است. با بکار بردن آنتن به صورت آرایه ای می توان به توان بالاتر دست یافت.

در مقالات [۱۴] و [۱۵] نیز روش های مختلف برای افزایش بازده مورد توجه قرار گرفته است.

در این مقاله یک آنتن میکرواستریپ مسطح با ابعاد بهینه و ضریب بازدهی بالا جهت تبدیل انرژی Rf به ولتاژ DC پیشنهاد شده است. آنتن پیشنهادی پس از طراحی، شبیه سازی و ساخته شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی و اندازه گیری عملی آنتن و مقایسه آن با تحقیقات گذشته در ادامه آورده شده است.

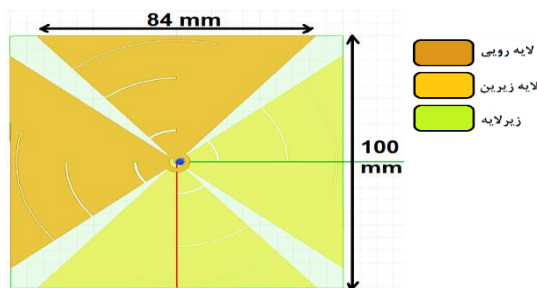
## ۲- هندسه و محاسبات آنتن

مدل آنتن انتخابی جهت این تحقیق، الگویی بر گرفته از آنتن های دو مخروطی با مشخصه های پهن باند

هستند. که از [۹] گرفته شده اما برای اکثر فرکانس‌ها، ساختار توپر یا ورقه‌ای دو مخروطی بیان شده، بسیار سنگین و حجیم است و برای استفاده، غیرعملی است. به دلیل مشخصه‌های تشعشی خوب آن نسبت به آنتن‌های دیگر، تغییراتی برای ساختار مکانیکی آن جستجو شده است تا اینکه اکثر مشخصه‌های الکتریکی و تشعشی مطلوب را شامل باشد [۹]. از این نمونه آنتن، برای طراحی و ساخت آنتن رکتانای این مقاله، الگوبرداری شده است.

مدل انتخابی آنتن، نوع ریز نواری پاپیونی (مثلثی) ۹۰ درجه است که به شکل دایپل با کانکتور و کابل هم محور SMA تغذیه شده است.

هندسه و ابعاد این آنتن در شکل ۱ آمده است.



شکل (۱). هندسه کلی آنتن پاپیونی ۹۰ درجه

در شکل ۱ مربع سبز روشن زیر لایه FR4 می باشد. مثلثهای نارنجی روشن روی سطح بالایی زیر لایه و مثلثهای تیره سطح زیرین زیر لایه می باشد. زاویه مثلثها نسبت به هم ۹۰ درجه است. ابعاد زیر لایه  $100 \times 100 \text{ mm}$  و به ارتفاع  $1/6 \text{ mm}$  می باشد.

زاویه راس پاپیون نیز برابر ۸۰ درجه انتخاب شده است ( $Z_{in}$  برحسب زاویه نیم مخروطی) [۹]. در واقع چون آنتن به صورت هم محور ۵۰ اهم تغذیه می‌شود، با انتخاب زاویه راس ۸۰ درجه به امپدانس ۵۰ اهم می‌رسد که برای طراحی مطلوب خواهد بود [۳]. ابعاد هندسی کلی نیز بر اساس فرکانس‌های کار در نظر گرفته شده است. طول موثر آنتن نیز برابر  $\lambda/4$  خواهد بود. طبق رابطه (۱)، ابعاد patch متناسب هر فرکانس در جدول ۱ آمده است [۱۳].

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1) \quad \frac{3 \times 10^8}{2 \times 900 \times 10^6 \sqrt{\frac{4.3 + 1}{2}}} = 0.10 \text{ m} = 10 \text{ cm}$$

در رابطه (۱) ابعاد مناسب آنتن بر حسب متر در فرکانس  $f_0$  بر حسب هرتز با زیر لایه ای با ضریب دی الکتریک  $\epsilon_r$  می باشد.

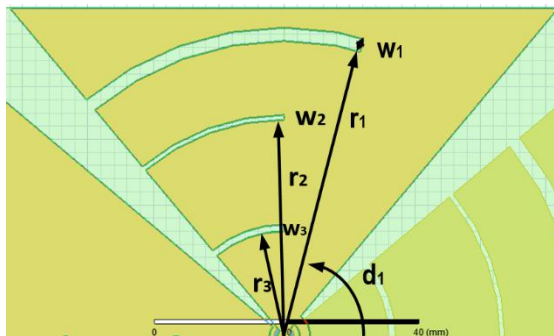
جدول (۱) ابعاد patch و طول موثر آنتن در فرکانسها

ابعاد patch	طول موثر آنتن	$\lambda$ (cm)	f (MHz)
۱۰ × ۱۰	۸/۳۲	۳۳/۳۳	۹۰۰
۵ × ۵	۴/۱۶	۱۶/۶	۱۸۰۰

بدین ترتیب که اندازه آنتن مطابق کمترین فرکانس ( معادل بیشترین طول موج) و ضخامت زیر لایه نیز ۱/۶ میلیمتر مطابق استاندارد موجود، انتخاب شده است. بدین ترتیب ابعاد آنتن  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 1/6 \text{ mm}$  روی سطح زیر لایه FR4 در نظر گرفته شده است.

بعد از طرح کلی هندسه به شکل پاپیونی ۹۰ درجه، با ایجاد شکافهایی در شعاع های مختلف ( $r$ )، با نسبت طول قوس ( $d$ ) و عرض ( $w$ ) حالت بهینه در دریافت سیگنال در باند های مورد نظربه بدست آمده است. هر شکاف مربوط به فرکانس خاص می باشد.

این پارامترهای متغیر در شکل ۲ آمده اند که شامل ۱۰ متغیر مستقل است. قوسها بخشی از محیط دایروی هستند.



شکل (۲). پارامترهای متغیر رکتانا

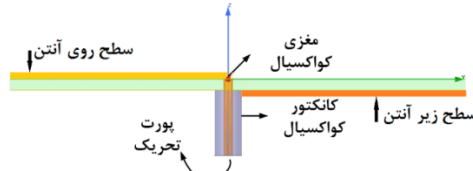
شکاف با عرض  $w_1$  مربوط به فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز و عرض  $w_2$  فرکانس ۱۸۰۰ مگا هرتز و عرض  $w_3$  فرکانس ۲۴۰۰ مگاهرتز می باشد. در جدول ۲ مقادیر بهینه شده پارامترهای هندسه آنتن آمده است. طول قوس بر حسب درجه برای هر شکاف در واقع تفاضل مقدار  $d$  از ۱۳۰ درجه می باشد.

جدول (۲). مقدار بهینه پارامترها

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$r_1$	۴۸mm	$d_2$	۹۰ درجه
$w_1$	۰/۵ mm	$r_3$	۱۲mm
$d_1$	۷۵ درجه	$w_3$	۱ mm
$r_2$	۳۳mm	$d_3$	۹۰ درجه

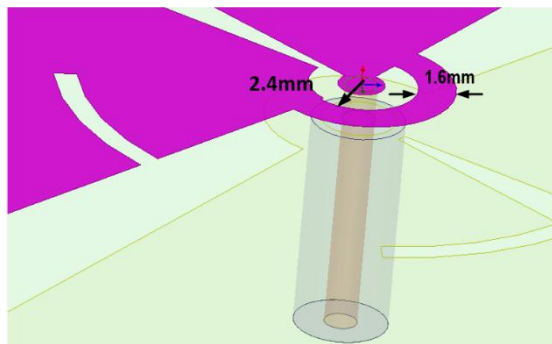
$w_2$	۰/۷ mm	k	۳۶ ضلعی منتظم
-------	--------	---	---------------

تاثیر تغییر پارامترها بر مقدار  $s_{II}$  در شکل ۷ در بخش شبیه سازی نشان داده شده است. در شکل ۳ نیز پورت تحریک کواکسیال یا کانکتور از نمای جانبی (SMA) نشان داده شده است.



شکل (۳). پورت تغذیه نمای جانبی

در شکل ۴ نمای نزدیک اتصال پورت تحریک به آنتن را نشان می دهد. حلقه موجود در گیرندگی تاثیر مثبت داشته است که سطح رویی آنتن به مغزی کانکتور و سطح زیرین آنتن به شیلد کانکتور متصل می شود.



شکل (۴). اتصال تغذیه آنتن

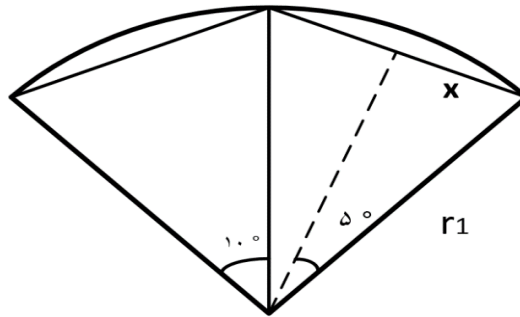
شکاف با عرض  $w_1$  مربوط به ایجاد بهینه طول موثر آنتن در باند ۹۰۰ مگا هرتز است. شعاع موثر از رابطه (۲) و طول قوس این شکاف طبق رابطه (۳) بدست می آید مجموع این دو، طول موثر آنتن در این فرکانس را نشان می دهد.

$$(2) \quad r_{\text{eff}} = r_1 - w_2 - w_3 - 4$$

$$r_{\text{eff}} = 48 - 0.7 - 1 - 4 = 42.3 \text{ mm}$$

مقدار  $4\text{mm}$  نیز شعاع حلقه تغذیه می باشد که از طول آنتن کم شده است.

محاسبه طول قوس این شکاف بر اساس محیط ۳۶ ضلعی منتظم انجام شد. هر ضلع این شکل هندسی برابر ۱۰ درجه زاویه ای خواهد بود. شکل ۵ محاسبه طول قوس را نشان می دهد. با توجه به محاسبه مثلثاتی زیر به سادگی طول قوس بدست می آید.



شکل (۵). محاسبه طول قوس

$$\sin 5^\circ = \frac{x}{r1}$$

$$x = 0.0871 \times r1 \quad (3)$$

یعنی طول قوس به ازای هر ۵ درجه مقدار زاویه ای از رابطه (۳) بدست می آید. مثلا برای شکاف  $W_1$  که اندازه زاویه قوس آن برابر ۵۵ درجه است ( $130 - 75 = 55$ ) مقدار طول قوس در فرکانس ۹۰۰ مگا هرتز برابر خواهد بود با:

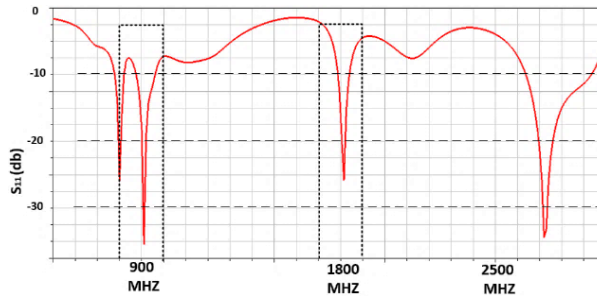
$$\frac{55}{5} \times (0.0871) \times 42.3 = 40.52 \text{ mm}$$

در این صورت طول موثر آنتن برای فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز برابر مجموع طول قوس و شعاع موثر است که با تقریب مطلوبی جوابگوی نیاز مسئله می باشد.

$$40.52 + 42.3 = 82.82 \text{ mm}$$

### ۳- شبیه سازی با نرم افزار HFSS

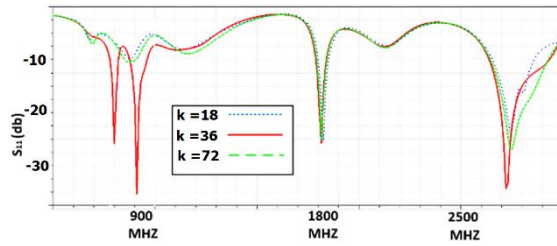
با توجه به فرکانس برداشت انرژی امواج در بازه حدود ۵۰۰ مگاهرتز تا ۳ گیگاهرتز، برای تنظیمات نرم افزاری جهت آنالیز، فرکانس مرکزی ۱۸۰۰ مگاهرتز همچنین تنظیمات جاروب فرکانسی نیز با گامهای ۱۰ مگاهرتز در نظر گرفته شد. شکل ۶ نمودار پارامتر  $S_{11}$  آنتن پاپیونی ۹۰ درجه طراحی شده را در بازه فرکانسی ۵۰۰ تا ۳۰۰۰ مگا هرتز نشان می دهد. که در باند مورد نظر مقادیر  $S_{11}$  مطلوبی دارد.



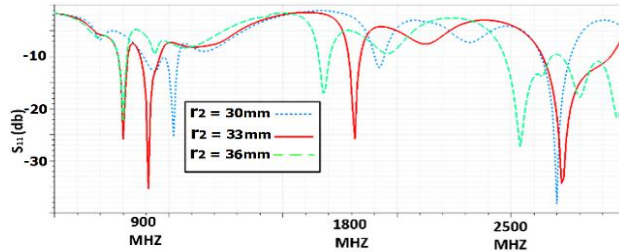
شکل (۶). پارامتر  $S_{11}$  آنتن پاپیونی

تاثیر تغییر متغیرها بر  $S_{11}$  در شکل ۷ آمده است.

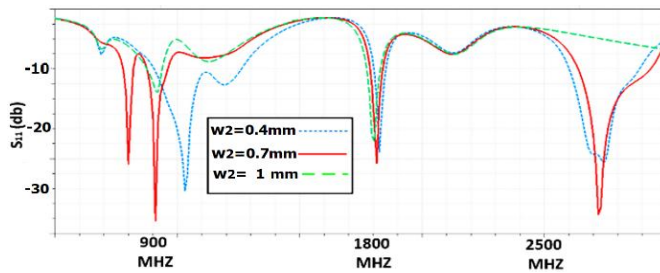




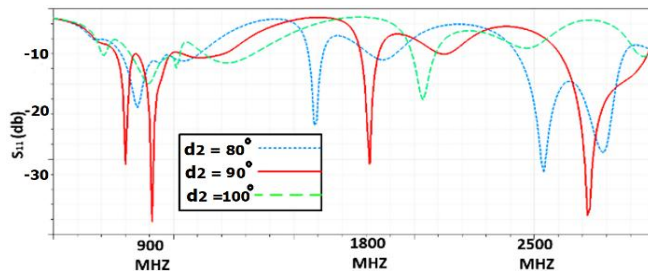
(الف)



(ب)

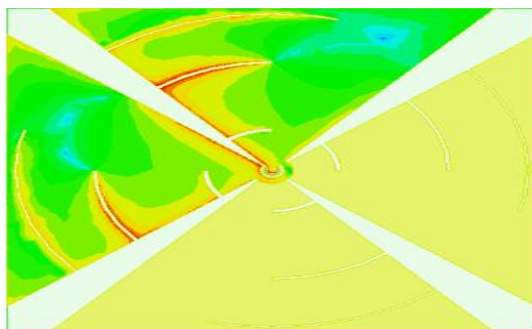


(ج)

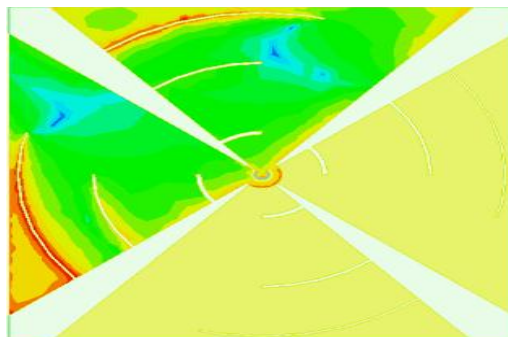


(د)

شکل (۷). تاثیر تغییر متغیرها بر  $S_{11}$ . (الف) اضلاع چند ضلعی منظم. (ب) اندازه شعاع. (ج) عرض شکاف. (د) طول قوس توزیع میدان الکتریکی روی سطح آنتن در شکل ۸ نشان داده شده است.



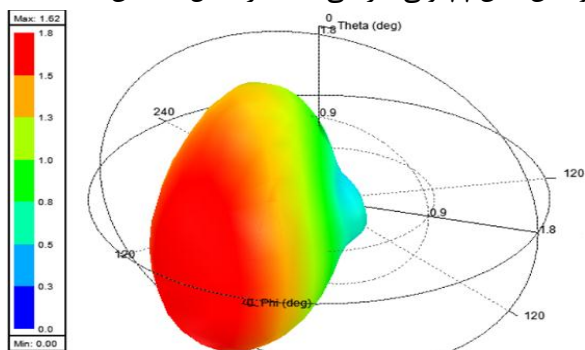
(الف)



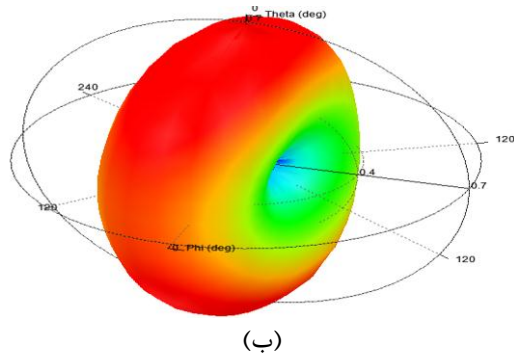
(ب)

شکل (۸). توزیع میدان الکتریکی روی سطح آنتن. (الف) ۱۸۰۰ مگاهرتز. (ب) ۹۰۰ مگاهرتز

پترن تشعشعی آنتن و گین آنتن پاپیونی طراحی شده در شکل ۹ نشان داده شده است.



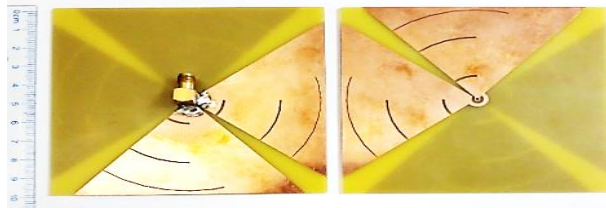
(الف)



شکل (۹). پترن تشعشعی آنتن. (الف) ۱۸۰۰ مگاهرتز (ب) ۹۰۰ مگاهرتز

#### ۴- ساخت و اندازه گیری پارامترها در اتاق آنتن

بعد از طراحی آنتن و ساخت آن، کانکتور به تغذیه متصل شد. شکل ۱۰ نمونه ساخته شده واقعی به کانکتور SMA نشان می دهد.

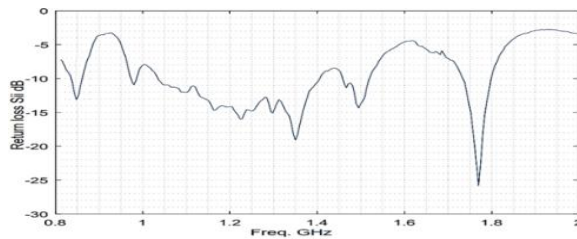


(ب)

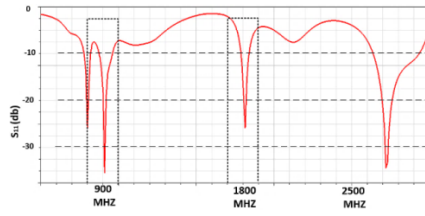
(الف)

شکل (۱۰). آنتن ساخته شده. (الف) سطح روی آنتن. (ب) سطح زیرین آنتن

نتایج حاصل از اندازه گیری عملی و شبیه سازی آنتن در شکل های ۱۵-۱۱ آورده شده است. مقایسه نتایج حاصل، نشان دهنده ی تطبیق خوب مقادیر حاصل از شبیه سازی و ساخت در فرکانس های GSM می باشد.

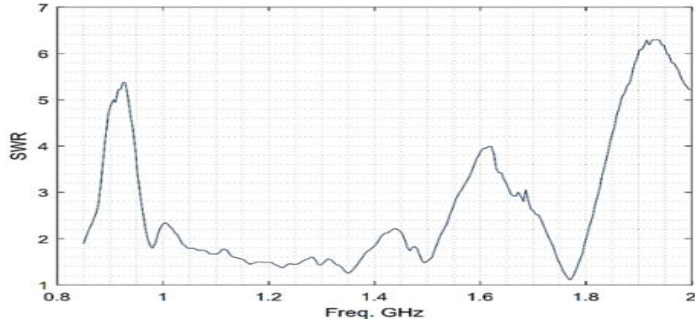


(الف)

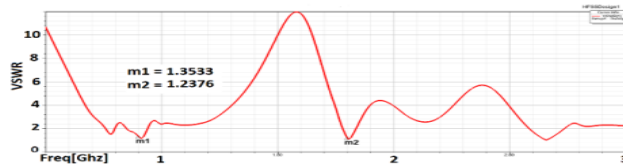


(ب)

شکل (۱۱). پارامتر  $S_{11}$ . (الف) اندازه گیری شده. (ب) شبیه سازی شده

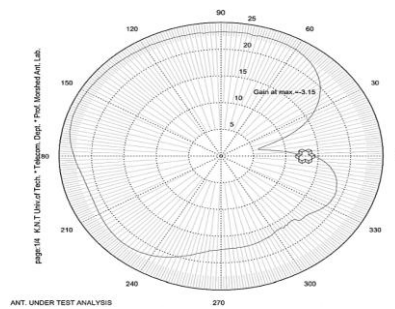


(الف)

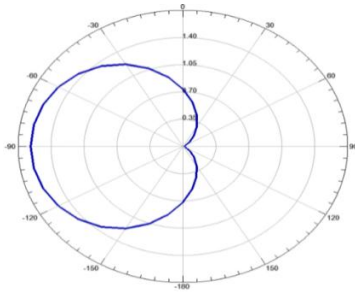


(ب)

شکل (۱۲). نمودار VSWR. (الف) اندازه گیری شده. (ب) شبیه سازی شده

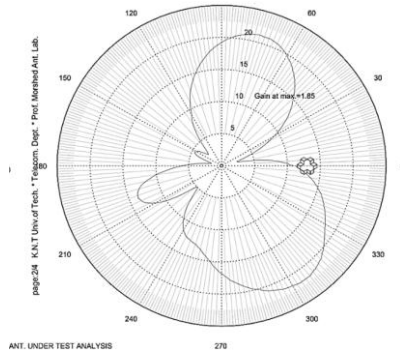


(الف)

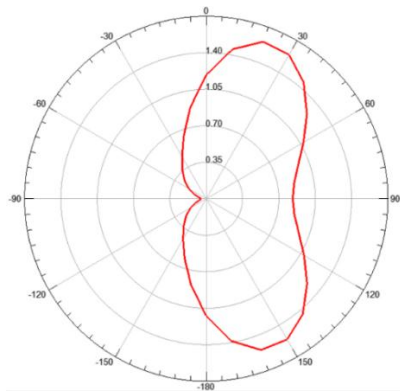


(ب)

شکل (۱۳). الگوی تشعشعی ۹۰۰ مگاهرتز. (الف) اندازه گیری شده. (ب) شبیه سازی شده

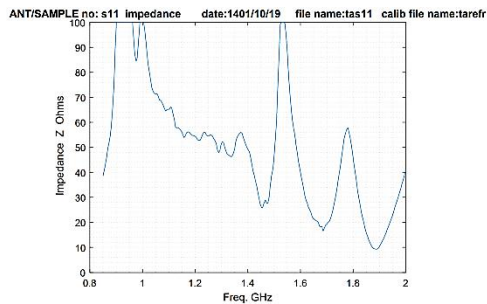


(الف)

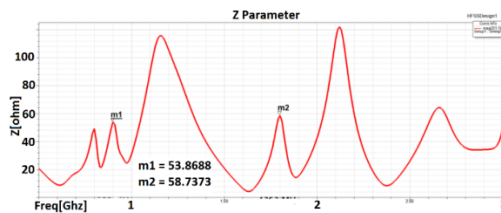


(ب)

شکل (۱۴). الگوی تشعشعی ۱۸۰۰ مگاهرتز. (الف) اندازه گیری شده. (ب) شبیه سازی شده



(الف)

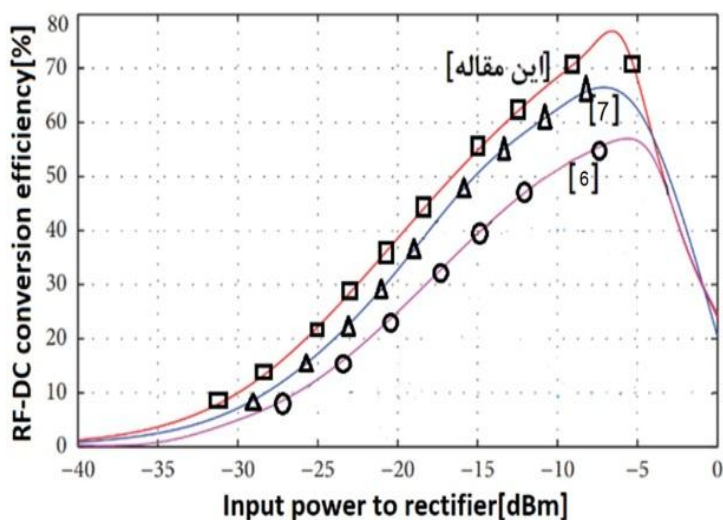


(ب)

شکل (۱۵). نمودار امپدانس. (الف) اندازه گیری شده. (ب) شبیه سازی شده

همان طور که مشاهده می گردد مقایسه نتایج شبیه سازی و ساخت تطبیق خوبی در فرکانس های GSM دارد و علت خطا شامل کیفیت زیر لایه مورد استفاده و کیفیت ساخت آنتن ریز نواری و اتصال کانکتور SMA می باشد. خطای کاربر آزمایشگاه آنتن نیز علل دیگر می باشد.

مقایسه بازده مبدل RF به DC ساختار پیشنهادی این تحقیق و رکتاناهای بررسی شده در تحقیقات سایر محققین در باند GSM در نمودار شکل ۱۶ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۱۶ دیده می شود ضریب بازدهی ساختار پیشنهادی در این مقاله حداقل ۱۲٪ بیشتر از بازده سایر آنتن های این باند می باشد. همچنین مشاهده می شود که بهترین بازده در توان بین  $-5\text{dbm}$  تا  $-10\text{dbm}$  بدست آمده است.



شکل ۱۶: مقایسه بازده RF-DC

در جدول ۳ مقایسه آنتن پیشنهادی و آنتن‌های بررسی شده در تحقیقات سایر محققین در باند GSM آورده شده است.

جدول (۳). مقایسه رکتاناهای مورد بررسی با آنتن پیشنهادی

مقاله مرجع	اند فرکانسی	هندسه رکتانا	ان $\mu W$	بازده % RF-DC	ابعاد آنتن (cm)
[۶]	GSM	آرایه‌ای ۳ بعدی	۱۵	۵۷	۵×۵×۵
[۷]	GSM/FM	آرایه‌ای ۳ بعدی	۱۲	۶۸	۱۰×۱۰×۱۰
تن پیشنهادی	GSM	تک آنتن مسطح	۱۰	۷۶	۱۰×۱۰

همانطور که از جدول ۳ دیده می‌شود با محاسبه حجم رکتانای پیشنهادی این تحقیق و ساختارهای بررسی شده در تحقیقات قبلی این باند، حجم اشغال شده توسط ساختار پیشنهادی حداقل ۸۷/۲٪ کمتر از ساختارهای ارائه شده در سایر مراجع برای این باند فرکانسی می‌باشد. همچنین به دلیل مسطح بودن ساختار پیشنهادی، این آنتن قابلیت بکارگیری در سطوح تخت مانند دیواره یا بدنه اجسام مختلف را دارد در حالی که آنتن‌های پیشنهادی در سایر مراجع ۳ بعدی بوده و فاقد این قابلیت می‌باشند.

## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق یک آنتن رکتانای مسطح با ابعاد بهینه و ضریب بازدهی بالا در باند GSM ارائه شده است. آنتن پیشنهادی، مدل خاصی از آنتن پاپیونی می باشد که مثلث‌های آن به صورت ۹۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته‌اند و با کانکتور SMA به صورت دایپل تغذیه می‌شود. ابعاد آنتن ۱۰×۱۰ سانتیمتر با زیر لایه FR4 با ضخامت ۱/۶ میلی‌متر است که برای دریافت در باند فرکانسی GSM یعنی ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگا هرتز طراحی شده است. گین آنتن پیشنهادی dBi ۱/۸ می‌باشد. مزیت آنتن پیشنهادی نسبت به آنتن‌های بررسی شده، بالا بودن ضریب بازدهی مدار مبدل RF به DC و کم حجم بودن آن می‌باشد. بطوریکه ضریب بازدهی بدست آمده برای آن ۷۶٪ است که ۱۲٪ بیش از آنتن‌های باند GSM بررسی شده در مراجع است.

همچنین حجم اشغال شده توسط ساختار پیشنهادی حداقل ۸۷/۲٪ کمتر از ساختارهای ارائه شده در سایر مراجع برای این باند فرکانسی می‌باشد. از سوی دیگر به دلیل مسطح بودن ساختار پیشنهادی، این آنتن قابلیت بکارگیری در سطوح تخت مانند دیواره یا بدنه اجسام مختلف را دارد درحالی که آنتن‌های پیشنهادی در سایر مراجع ۳ بعدی بوده و فاقد این قابلیت می‌باشند.

## ۶- مراجع

- [1] Manuel Piñuela, Paul D. Mitcheson, Stepan Lucyszyn, " Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments ", IEEE Trans On Microwave Theory and Techniques, Vol. 61, No. 7, pp 2715-2726, July 2013
- [2] Ivan K. Ivanov, Radio frequency energy harvesting for autonomous systems, Ph.D. Thesis, University of Bedfordshire April 2018
- [3] J. Khailpour, E. Zarezadeh and M. Hajebi, "Design and Fabrication of Microstrip Antenna Using Log-Periodic Array for Bandwidth Enhancement with Inset and Proximity Feed" Journal of Applied Electromagnetics, vol. 4, no. 3 ,Serial no. 12, 2016. ( In Persian)
- [4] H.R. Dalil Oskouei , M. Khoshcheshm and M.Mohammadi Shirkolaei, "Design and manufacture of broadband Spiral antenna with elimination of left circular polarization and tapering microstrip balloon of 50 ohms," Journal of Information and communication Technology in policing (JICTP), vol. 3, no.3 ,Serial no.11, 2022. ( In Persian)
- [5] Renato Cicchetti, Emanuela Miozzi, Orlandino Testa "Wideband and UWB Antennas for Wireless Applications", Hindawi International Journal of Antennas and Propagation, Vol 2017, pp 1-46, 2017.



- [6] A. Bakytbekov, T. Q. Nguyen, C. Huynh, K. N Salama, and A. Shamim, "Fully Printed 3D Cube-Shaped Multiband Fractal Rectenna For Ambient Rf Energy Harvesting," *Nano Energy*, vol. 53, pp. 587–595, 2018.
- [7] Fatima Khalid, Warda Saeed, Noshewan Shoaib, Muhammad U. Khan, Hammad M. Cheema, " Quad-Band 3D Rectenna array for Ambient RF Energy Harvesting", *Hindawi International Journal of Antennas and Propagation Vol 2020*, pp 1-23, 2020.
- [8] AbderrahimOkba, AlexandruTakacs; "Multiband rectenna for microwave applications", *Reports of the Academy of Sciences. Vol 4*, pp 1-10, 2016.
- [9] T. Matsunaga, E. Nishiyama, I. Toyoda; "5.8-GHz stacked differential rectenna suitable for large-scale Rectenna arrays with DC connection," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 63, No. 12, pp. 5944–5949, 2015.
- [10]Milad Nosrati, Hamidreza Dalili Oskouei, Jafar Khalilpour; "Parallel-Series Connected Rectenna Array Using Frequency Selective Surface (FSS) For Power Harvesting Applications At 5.8 GHz", *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*. 2019.
- [11]C.A.Balanis, "Advanced engineering electromagnetics", 2nd Edition,Wiley Publishing, 2012.
- [12]C.A.Balanis, "ANTENNA THEORY", 3rd Edition,Wiley Publishing, 2005.
- [13]D.M. Pozar; "Microwave engineering", 4th Edition, Prentice Hall Publishing, 2012.
- [14]Xinping Cao, Wen-Ren Chiang, Ya-Chin King, Yi-Kuen Lee1; "Electromagnetic energy harvesting circuit with feedforward and feedback dc- dc PWM boost converter for vibration power generator system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 679–685, 2007.
- [15]Ugur Olgun, Chi-Chih Chen, John L. Volakis, "Investigation of Rectenna Array Configurations For Enhanced RF Power Harvesting," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 262–265, 2011.