

## کاربرد نوار گرافنی جهت طراحی آنتن چاپی با قطبش قابل تنظیم در باند X

افسانه صدیقی<sup>۱</sup>، جواد قالیبافان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد برق مخابرات، دانشگاه صنعتی شاهرود

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، jghalibafan@shahroodut.ac.ir

### چکیده

در این مقاله دو آنتن مایکرواستریپ جدید با قابلیت تنظیم قطبش بین دو حالت قطبش خطی و دایروی پیشنهاد گردیده است. ایده اصلی در طراحی آنتن های پیشنهادی، استفاده از چندین نوار باریک از جنس گرافن به عنوان سطوح با امپدانس متغیر، در قسمت های میانی و لبه های یک ساختار یچ مربعی ساده است. نوارهای گرافنی به وسیله دو سطح ولتاژ DC متفاوت فعال و غیرفعال می گردند. با استناد به روابط حاکم بر رسانایی سطحی گرافن، امپدانس سطحی نوارهای گرافنی در دو حالت فعال و غیرفعال بدست آمده اند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد آنتن های پیشنهادی قابلیت تغییر قطبش تشعشی را در دو یا سه حالت مختلف در باند فرکانسی X دارند. این در حالی است که تغییر ولتاژ تحریک گرافن، بر الگوی تابشی و امپدانس ورودی آنتن تاثیر مخربی ندارد. از جمله دیگر مزایای آنتن های پیشنهادی عدم نیاز به سطح ولتاژ بالا برای تحریک گرافن می باشد.

### کلیدواژه

آنتن مایکرواستریپ، قطبش خطی، قطبش دایروی، گرافن

### مقدمه

مستقل دارند که نیازمند شبکه تغذیه پیچیده و فضای زیاد می باشد [۱]. در این مقاله بنا داریم تا با به کارگیری لایه های گرافنی به عنوان سطوح امپدانس متغیر با ولتاژ تحریک، ساختار آنتنی با قابلیت تنظیم قطبش بین حالات خطی و دایروی را پیشنهاد دهیم. به طور کلی گرافن یک لایه تک اتمی از اتم های کربن است که به شکل شبکه لانه زنبوری به یکدیگر متصل شده اند. نخستین بار در سال ۲۰۱۰ از سطوح گرافن در طراحی و ساخت آنتن ها استفاده شده است [۲]. امروزه با استفاده از پیشرفت های نوین امکان تولید سطوح گرافن در ابعاد بزرگ جهت استفاده در کاربردهای مایکروویوی و آنتنی فراهم است [۳].

عموما در فرکانس های باند پایین (کمتر از ۱۰۰ گیگاهرتز) از سطوح گرافن بیشتر به عنوان سطح بازتابنده و یا سطح امپدانس بالا جهت طراحی آنتن های چند فرکانسی [۴]، شکل دهی به الگوی تشعشی آنتن [۵] و تغییر جهت پرتو [۶] استفاده شده است. در این میان آنتن های با قطبش قابل تنظیم به طور معمول نیاز به دو تغذیه

بحث کوچک سازی سیستم های ارتباط بی سیم در دنیای امروز به یکی از چالش های جدی طراحان حوزه صنعت تبدیل شده است. حوزه طراحی آنتن از این امر مستثنا نمی باشد. یکی از راه های رسیدن به این مقصود، متمرکز نمودن چند آنتن در یک آنتن با استفاده از طراحی آنتن های تنظیم پذیر است. امروزه آنتن های با قطبش خطی به طور وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند ولی در مواردی که آنتن ها در دید مستقیم هم نباشند به دلیل وجود پدیده هایی همچون چرخش فارده و یا پدیده چندمسیره شدن، قطبش دایروی کاربرد بیشتری پیدا می کند.

وجود آنتن هایی که قابلیت عملکرد در دو حالت قطبش خطی و دایروی را داشته باشند می تواند علاوه بر کاهش هزینه، سبب افزایش کارایی سیستم های مخابراتی نیز گردد. آنتن های مایکرواستریپ با قطبش قابل تنظیم به طور معمول نیاز به دو تغذیه

<sup>۱</sup> Polarization

در مراجع مختلف با یک تقریب ساده زمان استراحت ( $\tau$ ) در رابطه (۱) مستقل از پتانسیل شیمیایی ( $\mu_c$ ) فرض شده است [۹]. تعداد حامل‌های القاشده در گرافن به‌طور مستقیم بر روی زمان استراحت اثر دارند. در چگالی حامل زیاد هنگامی که ولتاژهای بایاس DC نسبتاً بالا اعمال می‌شود فوتون‌های طولی حداقل مقاومت سطحی را محدود می‌کنند. در این حالت زمان استراحت ایجاد شده توسط فوتون‌های طولی معادل رابطه زیر می‌باشد.

$$\tau = \frac{4h^2 \rho_m v_{ph}^2 v_f}{\sqrt{n\pi D^2 k_B T}} \quad (3)$$

که  $D$  پتانسیل تغییر شکل،  $\rho_m = 7.16 \times 10^{-7}$  چگالی جرمی دوبعدی گرافن (برحسب واحد کیلوگرم بر متر مربع) و  $v_{ph} = 2.1 \times 10^4$  سرعت فوتون‌های طولی در گرافن است. مقدار دقیق  $D$  هنوز در مقالات متعددی مورد بحث است. این مقدار بین ۴ تا ۳۰ الکترون‌ولت می‌باشد.

به‌طور کلی، جهت کاربرد لایه‌های گرافن در ساختارهای چاپی همانند آنتن‌های پیشنهادی در این مقاله، از روش لایه نشانی استفاده می‌شود که در مرجع [۶] بیان شده است.

در سطح گرافنی استفاده شده در این مقاله، دو مقدار ولتاژ DC محرک گرافن، حدوداً صفر و ۵ ولت انتخاب شده است که به ترتیب معرف دو حالت خاموش (غیرفعال) و روشن (فعال) است. با استفاده از روابط ذکر شده و محدودیت‌های عنوان شده، رسانایی و امپدانس سطحی گرافن برای ۲ حالت روشن و خاموش به شرح داده شده در جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات گرافن استفاده شده در دو حالت روشن و خاموش

حالت	خاموش (غیرفعال)	روشن (فعال)
ولتاژ بایاس DC (ولت)	۰/۰۳	۵
$\sigma_s$ رسانایی سطحی	$1.0 \times 10^{-6} (416-j119)$	$(0.045-j0.025)$
$R_s$ امپدانس سطحی	$2400+j11/4$	$22/3+j1/3$

### طراحی آنتن

در این بخش از مقاله با استفاده از لایه‌نازکی از گرافن با مشخصات داده شده در جدول ۱، دو ساختار آنتن با قابلیت تنظیم قطبش معرفی می‌گردد.

#### آنتن با قابلیت تنظیم دو قطبش (خطی- دایروی راست‌گرد)

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، به‌عنوان اولین ساختار پیشنهادی در این مقاله یک آنتن پچ مربعی با قابلیت تنظیم قطبش بین دو حالت خطی و دایروی راست‌گرد معرفی می‌شود. زیرلایه مورد استفاده در این آنتن از نوع Rogers RO4003C با ضریب

به‌طوری که می‌توان گفت آنتن ذکر شده در مرجع [۷] تنها تحقیق انجام شده در این زمینه است. در این مرجع از لایه گرافن در دو لبه انتهایی پچ مستطیلی برای تنظیم قطبش آنتن استفاده شده است. آنتن پیشنهادی در این مقاله بر مبنای یک پچ مربعی مرسوم است که به کمک سطوح نازک گرافنی در میانه پچ، امکان تنظیم قطبش در دو حالت خطی و دایروی را فراهم می‌سازد. از مزایای دیگر این آنتن می‌توان به تغذیه راحت با پراب و طراحی ساده این آنتن اشاره کرد. در ادامه ابتدا به معرفی گرافن و روابط حاکم بر رسانایی آن به عنوان یک سطح با امپدانس متغیر می‌پردازیم و سپس ساختار آنتن پیشنهادی ارائه خواهد شد.

### رسانایی گرافن

در این مقاله تغییر قطبش آنتن با به‌کارگیری سطح گرافنی در دو وضعیت فعال و غیرفعال فراهم شده است. در حالت غیرفعال یا خاموش، امپدانس سطحی گرافن مقداری بزرگ است درحالی که در حالت فعال یا روشن این امپدانس سطحی کوچک می‌گردد. در محدوده فرکانسی این مقاله، گرافن به‌عنوان ساختاری تک لایه در نظر گرفته شده است بنابراین رسانایی سطحی گرافن با رابطه (۱) تقریب زده می‌شود [۲]:

$$\sigma_s = \frac{-jq^2 k_B T}{\pi h^2 (\omega - j\tau^{-1})} \left( \frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln(e^{\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1) \right) \quad (1)$$

در این رابطه  $\hbar$  ثابت کاهش یافته پلانک،  $q$  بار الکترون و  $k_B$  ثابت بولتزمن می‌باشند. چهار پارامتر  $T$  دما،  $\omega$  فرکانس زاویه ای،  $\tau$  زمان استراحت در فرآیند ساخت گرافن و  $\mu_c$  پتانسیل شیمیایی؛ عوامل تعیین کننده رسانایی سطحی گرافن می‌باشند. بنابراین در یک فرکانس مشخص، رسانایی سطحی و متعاقباً مقاومت سطحی گرافن وابسته به دمای محیط، کیفیت ساخت گرافن و پتانسیل شیمیایی است. پتانسیل شیمیایی در گرافن ( $\mu_c$ ) مطابق رابطه (۲) قابل بیان است [۸].

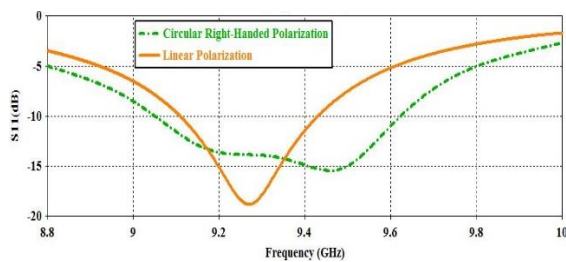
$$\mu_c = \hbar v_f \sqrt{\frac{\pi \epsilon_0 \epsilon V_b}{dq}} \quad (2)$$

در اینجا  $v_f$  برابر با  $1000000$  بوده و سرعت فرمی در گرافن بر حسب متر بر ثانیه نام دارد و  $\epsilon$  ضریب گذردهی خلأ،  $V_b$  ولتاژ بایاس DC،  $d$  و  $\epsilon$  ضخامت و ضریب گذردهی نسبی دی‌الکتریک جداکننده صفحه گرافن و نیمه‌هادی ( $n$  یا  $p$ ) گیت پستی آن می‌باشند. با توجه به روابط فوق، رسانایی گرافن با اعمال ولتاژهای بایاس DC مختلف می‌تواند تغییر کند. این ولتاژ بایاس DC بین صفحه گرافن و نیمه‌هادی پستی که با یک دی‌الکتریک جدا شده‌اند، اعمال می‌گردد.

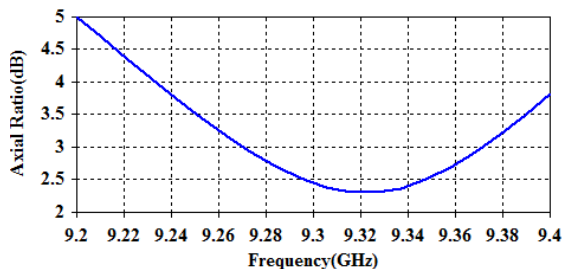
شکل ۱ با در نظر گرفتن ملاحظات فوق، به منظور تحقق فرکانس کار آنتن در باند X تعیین شده است که در جدول ۲ ارائه می‌گردد. شکل ۲ نتایج شبیه سازی آنتن پیشنهادی در شکل ۱ را نشان می‌دهد. به طور خلاصه نتایج حاصل از تغییر قطبش در آنتن پیشنهادی در جدول ۳ بیان شده است. با توجه به نتایج داده شده در این جدول، آنتن پیشنهادی در شکل ۱ به صورت یک آنتن با قابلیت تنظیم قطبش در باند X می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۳ نتایج شبیه سازی الگوی تابشی آنتن پیشنهادی را در یک فرکانس مشترک در هر دو قطبش خطی و دایروی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه هر سه نوار گرافنی استفاده شده در آنتن شکل ۱، به پیچ اصلی متصل می‌باشند و از طرفی جهت تغییر قطبش، هر سه نوار به صورت همزمان خاموش و روشن می‌شوند؛ لذا جهت تحریک DC نوارهای گرافنی در این آنتن می‌توان از تحریک DC پیچ اصلی به طور مستقیم استفاده کرد. با توجه به توضیحات فوق، تحریک DC آنتن پیشنهادی از نظر عملی به کمک یک اتصال سیمی نازک متصل به پیچ اصلی قابل تحقق است. این اتصال حتی می‌تواند توسط خود پراب تغذیه آنتن نیز فراهم شود. به عبارت دیگر پراب تغذیه علاوه بر وظیفه تغذیه RF، تحریک DC آنتن را نیز فراهم می‌کند. از مزیت های دیگر این انتخاب، عدم تاثیر بخش تحریک DC بر الگوی تشعشعی آنتن است.

جدول ۲. ابعاد آنتن پیچ پیشنهادی در شکل ۱ برحسب میلی متر

L	Ls	Ws	S	Wstub	Lstub
۷/۸	۲/۲	۰/۲	۲/۷	۰/۱	۱/۵



الف) تلفات بازگشتی



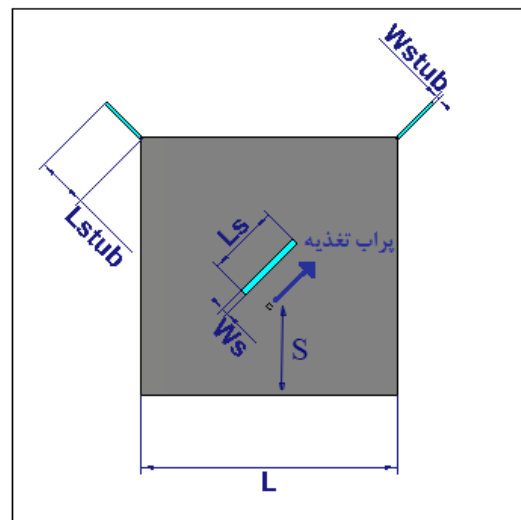
ب) نسبت محوری (AR) در مد قطبش دایروی راست گرد

شکل ۲. نتایج شبیه سازی آنتن شکل ۱

گذردهی نسبی ۳/۳۸ و تانژانت تلفات ۰/۰۰۲۷ و ضخامت ۰/۸۱۳ میلی متر می‌باشد. تغذیه این آنتن به صورت یک پراب هم محور<sup>۱</sup> است که به فاصله S از لبه به پیچ متصل شده است. تمامی نتایج ارائه شده در ادامه بر اساس شبیه سازی با استفاده از نرم افزار CST Studio Suite می‌باشد.

مطابق با شکل ۱، زمانی که لایه گرافنی مورب در حالت خاموش (غیرفعال) باشد، لایه گرافن امیدانس بالایی داشته و همانند یک شکاف عمل می‌کند و لذا آنتن با تغییر اندکی توزیع جریان در دو مد اصلی پیچ مربعی مواجه خواهد شد. انتخاب مناسب ابعاد و ولتاژ تحریک گرافن سبب می‌شود تا این تغییر توزیع جریان باعث اختلاف فاز ۹۰ درجه بین دو مد تشعشعی متعامد پیچ اصلی شده و لذا قطبش دایروی حاصل گردد.

این در حالی است که در حالت فعال (روشن) لایه گرافن به دلیل رسانایی بالا تقریباً شبیه یک سطح فلزی اتصال کوتاه رفتار کرده و لذا ساختار کلی آنتن به صورت یک پیچ مربعی ساده با قطبش خطی رفتار می‌کند. نکته حائز اهمیت در ساختار پیشنهادی در شکل ۱ وجود دو شاخک در لبه های پیچ مربعی از جنس گرافن (شبیه لایه گرافن درون پیچ) است.



شکل ۱. آنتن پیچ مربعی دارای قطبش خطی و دایروی راست گرد

دلیل حضور این دو قطعه گرافنی در لبه های پیچ، همسان سازی فرکانس کاری آنتن در هر دو مد قطبش خطی و دایروی است. به عبارت دیگر حضور دو لایه گرافنی سبب می‌شود فرکانس کار آنتن در قطبش خطی با فرکانس کار آنتن در قطبش دایروی (فرکانسی با تلفات بازگشتی S11 کمتر از ۱۰- دسیبل و نسبت محوری AR کمتر از ۳ دسیبل) منطبق باشد. ابعاد آنتن داده شده در ساختار

<sup>۳</sup> Stub

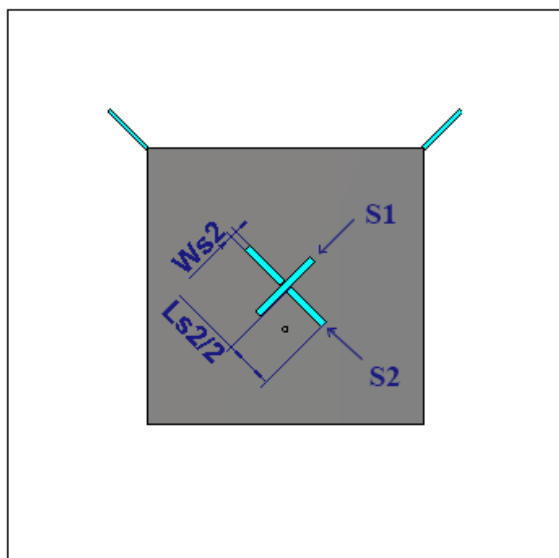
<sup>۲</sup> Coaxial Probe

جدول ۳. بازه عملکرد آنتن پیشنهادی در شکل ۱

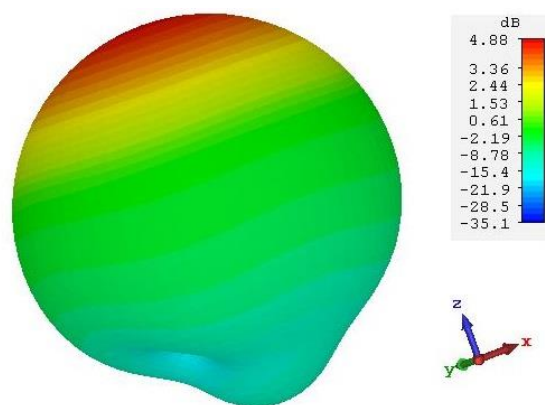
حالت	هر سه سطح گرافنی خاموش	هر سه سطح گرافنی روشن
نوع قطبش	دایروی راست‌گرد	خطی
پهنای باند فرکانسی ( $S_{11} < -10$ dB)	۹/۰۵-۹/۶۲GHz	۹/۹-۱۱/۴۳GHz
پهنای باند فرکانسی قطبش	۹/۹-۲۷/۳۷GHz	۹/۹-۱۱/۴۳GHz
مقدار نسبت محوری AR	کمتر از ۳ دسیبل	بیشتر از ۴۰ دسیبل

تغذیه آنتن فراهم شود. دو لایه عمود بر هم گرافنی در مرکز پیچ مربعی در شکل ۴ هیچ اتصالی با یکدیگر و پیچ اصلی ندارند و در واقع بین نوار  $S_1$  و دو بخش نوار  $S_2$  در طرفین و بخش فلزی پیچ اصلی شیار بسیار نازکی وجود دارد. دلیل این انتخاب آن است که با توجه به نوع قطبش دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد، در هر مرحله تنها یکی از این لایه‌های گرافنی در میانه پیچ فعال است (جدول ۴ مشاهده شود) لذا برای تحقق ولتاژ DC تحریک، لازم است دو لایه گرافن به یکدیگر و به بخش فلزی پیچ اصلی اتصال الکتریکی نداشته باشند. هر چند این انتخاب، تحریک DC این آنتن را در مقایسه با آنتن بخش قبل مشکل تر می کند. یک روش جهت تحریک مستقل نوارهای گرافنی در آنتن شکل ۴، استفاده از چندین میله عمودی شبیه پراب تغذیه جهت تحریک هر نوار به صورت مستقل می باشد. این نوع تحریک ساختار کلی پیچ آنتن در شکل ۴ را تغییر نمی دهد و لذا بر الگوی تابشی آنتن اثری نخواهد داشت.

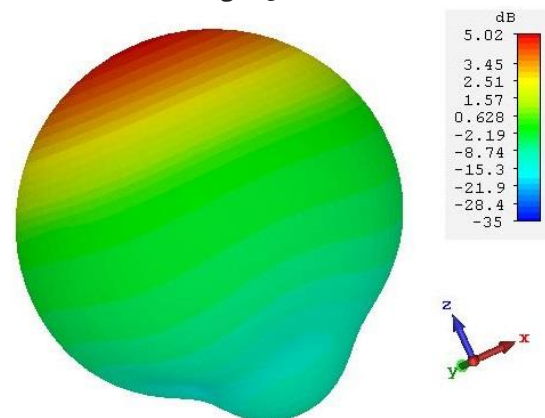
ابعاد آنتن شکل ۴ مشابه ابعاد ساختار آنتن بخش قبل در شکل ۱ است با این تفاوت که در این ساختار ابعاد دومین نوار گرافنی در مرکز پیچ برابر با  $Ls_2 = 2/8$  و  $Ws_2 = 0/2$  میلیمتر می باشد. با توجه به نتایج داده شده در جدول ۴ و شکل ۵، آنتن پیشنهادی در شکل ۴ به صورت یک آنتن با قابلیت تنظیم سه قطبش خطی، دایروی راست‌گرد و دایروی چپ‌گرد در باند X می تواند مورداستفاده قرار گیرد. پترن تشعشی آنتن که در شکل ۶ نشان داده شده است نشان دهنده یکسان بودن عملکرد آنتن پیشنهادی در هر سه قطبش می باشد.



شکل ۴. آنتن پیچ مربعی دارای سه قطبش خطی، دایروی چپ‌گرد و دایروی راست‌گرد



الف) قطبش خطی

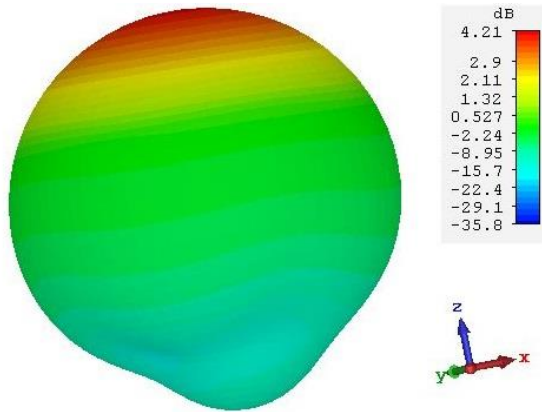


ب) قطبش دایروی راست‌گرد

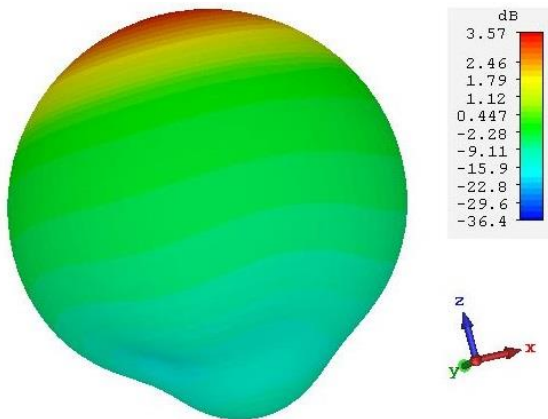
شکل ۳. پترن تشعشی آنتن پیشنهادی شکل ۱ در فرکانس ۹/۳۴GHz در دو قطبش خطی و دایروی راست‌گرد

### آنتن با قابلیت تنظیم سه قطبش (خطی - دایروی چپ‌گرد - دایروی راست‌گرد)

با توجه به ساختار آنتن پیشنهادی در بخش قبل، می توان با اضافه کردن یک لایه گرافنی دیگر در مرکز پیچ آنتن شکل ۱ علاوه بر قطبش دایروی راست‌گرد، قطبش دایروی چپ‌گرد نیز در کنار قطبش خطی برای آنتن فراهم کرد. شکل ۴ ساختار آنتن پیشنهادی با قابلیت تحقق سه قطبش را نشان می دهد. باید توجه داشت دو نوار گرافنی در گوشه آنتن به پیچ متصل هستند و تحریک DC آنها می تواند شبیه آنتن بخش قبل از طریق پراب

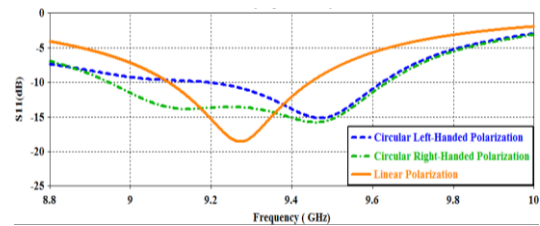


ب) قطبش دایروی راست گرد

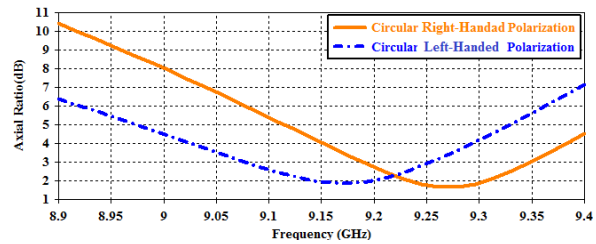


ج) قطبش دایروی چپ گرد

شکل ۶. پترن تشعشعی آنتن پیشنهادی شکل ۴ در فرکانس ۹/۲۲GHz در سه قطبش خطی، دایروی چپ گرد و دایروی راست گرد



الف) تلفات بازگشتی



ب) نسبت محوری (AR) در مد قطبش دایروی راست گرد و

دایروی چپ گرد

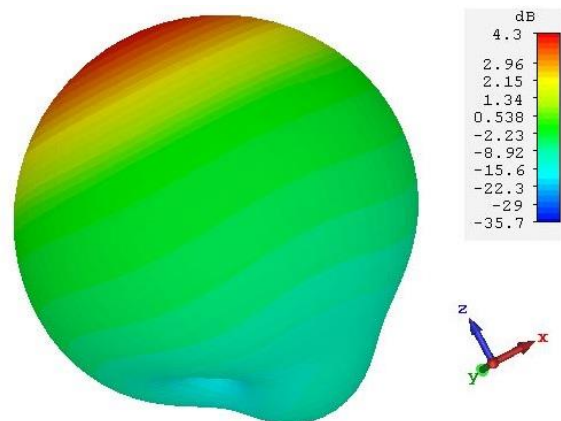
شکل ۵. نتایج شبیه سازی آنتن شکل ۴

جدول ۴. بازه عملکرد آنتن پیشنهادی در شکل ۴

حالت	سطح گرافنی S2 روشن، مابقی سطوح گرافنی خاموش	سطح گرافنی S1 روشن، مابقی سطوح گرافنی خاموش	تمامی سطوح گرافنی روشن
نوع قطبش	دایروی راست گرد	دایروی چپ گرد	خطی
پهنای باند فرکانسی (S11 < -10 dB)	۸/۹-۹۵/۶۳GHz	۹/۹-۱۹/۶۲GHz	۹/۹-۱/۴۴ GHz
پهنای باند فرکانسی قطبش	۹/۹-۱۹/۳۵ GHz	۹/۹-۰۸/۲۵ GHz	۹/۹-۱/۴۴ GHz
مقدار نسبت محوری	کمتر از ۳ دسیبل	کمتر از ۳ دسیبل	بیشتر از ۴۰ دسیبل

### نتیجه گیری

در ساختار آنتن های مایکرواستریپی ارائه شده در این مقاله با استفاده از گرافن امکان تنظیم قطبش در دو یا سه حالت مختلف فراهم شد. از جمله مزیت های آنتن پیشنهادی صفحه ای بودن ساختار آنتن در مقایسه با سایر روش های تنظیم قطبش می باشد. نکته حائز اهمیت دیگر در آنتن پیشنهادی عدم نیاز به ولتاژ تحریک بالا برای لایه های گرافن است. نتایج شبیه سازی نشان داد استفاده از گرافن جهت تنظیم قطبش در این آنتن، بر سایر پارامترهای تشعشعی از جمله پترن و تلفات بازگشتی، تأثیر مخربی نداشته است.



الف) قطبش خطی

## مراجع

- [6] C. N. Alvarez ,R. Cheung and J. S. Thompson, “Performance analysis of hybrid metal-graphene frequency reconfigurable antennas in the microwave regime,” IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 65, No. 4, pp. 1558 – 1569, 2017.
- [7] C. N. Alvarez ,R. Cheung and J. S. Thompson, “Polarization reconfigurable antennas using graphene for microwave applications”, IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB), Montreal, Canada, 2015.
- [8] N. M. R. Peres, “Colloquium: the transport properties of graphene: An introduction,” Rev. Mod. Phys., vol. 82, pp. 2673–2700, 2010.
- [9] K. S. Novoselov , “Electric field effect in atomically thin carbon films,” Sci., vol. 306, no. 5696, pp. 666–669, 2004.
- [1] K. F. Lee and K. M. Luk, Microstrip Patch Antenna. London, UK: Imperial College Press, 2011.
- [2] J. R. Gong, Graphene – Synthesis Characterization, Properties and Applications, InTech, 2011.
- [3] S. Bae, H. Kim, Y. Lee, X. Xu, J.S. Park, Y. Zheng, J. Balakrishnan, T. Lei, H. Ri Kim, Y. Il Song, Y.J. Kim, K. S. Kim, B. Özyilmaz, J.H. Ahn, B. H. Hong and S. Iijima, “Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes,” Nat. Nanotechnol., vol. 5, no. 8, pp.574–578, 2010.
- [4] D. Li and E.P. Li, “A tunable antenna based on loaded graphene sheets for GHz application”URSI AP-RASC, South Korea, pp.21-25, 2016.
- [5] H. Chen, Z.G. Liu, W.B. Lu, A.Q. Zhang, X.B. Li and J. Zhang, “Microwave Beam Reconfiguration Based on Graphene Ribbon” IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 66 , No. 11, pp. 6049 - 6056, 2018.