

## آنتن چند گلبگی سیمی دارای تشعشع همه جهته با قطبش دایروی در باند S

مرتضی نادى آييز<sup>۱</sup>، محمد خلیج امیرحسینی<sup>\*۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استاد، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۵/۱۲/۱۷، پذیرش: ۹۶/۰۹/۲۰)

**چکیده:** در این مقاله آنتن قطبش دایروی همه جهته با ساختاری ساده و ارزان قیمت که ترکیبی از شبه حلقه‌های کج می‌باشد برای ارتباطات هوایی بدون سرنشین از جمله پهبادها و کوادکوپترها معرفی شده است. محیط هر حلقه آنتن، یک طول موج است و حلقه‌ها با زاویه مشخص از هم به دور محور آنتن تکرار شده‌اند. ۹۰ درجه شیفت فاز بین دو میدان عمود بر هم که لازمه ایجاد قطبش دایروی است، ذاتا توسط خود آنتن و بدون نیاز به تغییر فاز بین حلقه‌های آنتن ایجاد می‌شود. قطبش دایروی به دلیل تقارن ساختاری آنتن در هر دو صفحه azimuth و elevation ایجاد می‌گردد. پهنای باند امیدانسی اندازه‌گیری شده ۱۰ dB حدود ۳۹۰ MHz در فرکانس مرکزی ۲/۴۵ GHz و پهنای باند نسبت محوری کمتر از ۳ dB در بازه فرکانسی ۲/۱ GHz تا ۲/۵ GHz ایجاد شده است. آنتن دارای قطبش دایروی راستگرد است و تفاوت بین الگو دایروی راست گرد و چپ گرد در تمام جهات حدود ۲۰ dB است. همچنین بهره دایروی راست گرد این آنتن حدود ۱/۵ dBi است.

**کلیدواژه‌ها:** نسبت محوری، قطبش دایروی، الگوی تشعشعی همه جهته، ساختار ساده، ارتباطات هوایی بدون سرنشین

### ۱- مقدمه

پهنای باند قطبش دایروی آنتن را افزایش می‌دهد اما، منجر به پیچیدگی طراحی و افزایش هزینه آنتن می‌گردد. برای نمونه آنتن معرفی شده در [۳]، قطبش دایروی را با استفاده از چهار دو قطبی کج که توسط شبکه تغذیه اختلاف فاز ۹۰ درجه‌ای بین دو قطبی‌ها را ایجاد می‌کند به وجود می‌آورد.

آنتن‌های مورد بحث قبلی، تنها در صفحه عمود بر محور آنتن یعنی صفحه  $\theta=90^\circ$  قطبش دایروی را ایجاد می‌کنند. متأسفانه برای ارتباط هوایی نظیر کوادکوپترها که دائما در حال چرخش هستند، مناسب نیست. برای غلبه به این مشکل به آنتنی که قطبش دایروی را در همه زوایا  $\theta$  به جز زاویه  $\theta=0,180^\circ$  ایجاد می‌کند، نیاز است.

در این مقاله آنتن قطبش دایروی جدیدی که از آنتن کلورلیف الگوبرداری شده است، ارائه گردیده. آنتن کلورلیف تنها در صفحه عمود بر محور آنتن قطبش دایروی ایجاد می‌کند، برای ایجاد قطبش دایروی در زوایا بیشتری از  $\theta$ ، آنتن در راستای محور z متقارن گردیده و همچنین با بهینه‌سازی قسمت قوسی شکل و پارامترهای آنتن نه تنها در صفحه عمود بر محور آنتن بلکه در زوایای بیشتری از  $\theta$  قطبش دایروی ایجاد گردیده است. آنتن پیشنهادی نیازی به شبکه تغذیه ندارد و تنها از یک تغذیه برای ایجاد قطبش دایروی در همه زوایا  $\theta$  به جز زاویه  $\theta=0,180^\circ$  با نسبت محوری کمتر از ۳ dB استفاده می‌کند. ساختار پیشنهادی ضمن داشتن مشخصات لازم، پروسه ساخت آنتن ساده است و

آنتن‌های قطبش دایروی در مقایسه با آنتن‌های خطی، مزایای متعددی از قبیل کاهش اثر چرخش فاراده در ارتباطات ماهواره ای، غلبه بر پدیده چند مسیریگی و عدم نیاز به همسویی آنتن‌های فرستنده و گیرنده در پهبادها و کوادکوپترها که دائما و به‌طور تصادفی به دور محور خود در حال چرخش هستند، دارند.

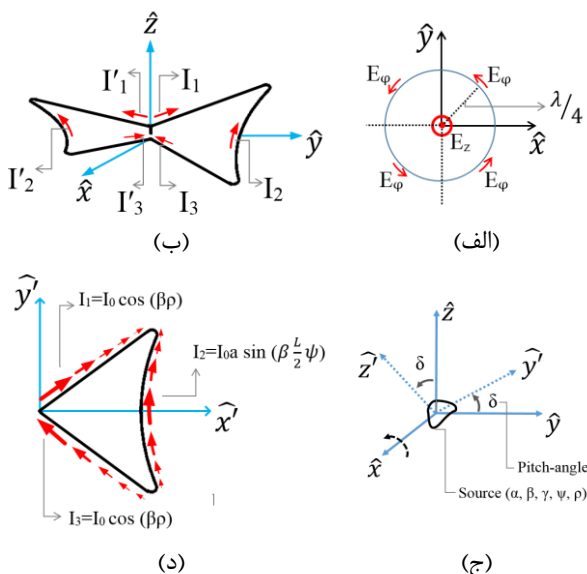
آنتن‌های قطبش دایروی همه جهته برای کاربردهای متعدد ارتباطات بی‌سیم نظیر سامانه‌های موقعیت جهانی (GPS)، شناسایی فرکانس رادیویی (RFID)، شبکه‌های بی‌سیم محلی (WLAN) و ارتباطات هوایی بدون سرنشین (UAV)، مناسب‌اند.

در سال‌های اخیر نیز کارهای زیادی جهت طراحی آنتن‌های قطبش دایروی همه جهته مطرح شده است [۱-۱۰]. برای ایجاد قطبش دایروی همه جهته دو راه متداول وجود دارد. اولین راه ایجاد قطبش دایروی همه جهته توسط آنتن‌هایی که ذاتا قطبش دایروی را ایجاد می‌کنند، صورت می‌گیرد. برای نمونه آنتن معرفی شده در [۱] با استفاده از تشدید مرتبه صفر خط انتقال با گذردهی الکتریکی منفی قطبش دایروی را ایجاد کرده است. آنتن بایفیلار مارپیچ معرفی شده در [۲] نیز دارای خلوص قطبش خوبی در صفحه عمودی آنتن است. روش دیگر ایجاد قطبش دایروی همه جهته، استفاده از دو مود قطبش خطی متعامد با دامنه مساوی و اختلاف فاز ۹۰ درجه است. به‌کارگیری این روش گرچه

۹۰ درجه باشد. برای بیان این تئوری که آنتن چگونه قطبش دایروی ایجاد می‌کند. مطابق شکل (۲-ب) تنها نقاط بیشینه توزیع جریان روی دو حلقه متناظر نشان داده شده است.

مطابق توزیع جریان در مرکز آنتن می‌توان نتیجه گرفت که جهت جریان مولفه‌های  $x$  و  $y$  مربوط به جریان‌های  $I_1$  و  $I_2$  مخالف هم هستند در نتیجه میدان راه دور ایجاد شده آنها همدیگر را خنثی می‌کنند و منجر به ایجاد صفر در الگو تشعشعی در راستای محور  $z$  می‌شود. به‌طور مشابه میدان راه دور ناشی از مولفه‌های  $x$  و  $y$  مربوط به جریان‌های  $I_3$  و  $I'_3$  نیز یکدیگر را در راستای محور  $z$  حذف می‌کنند. تنها میدان ایجاد شده توسط مولفه  $z$  جریان، نقش اصلی را در میدان راه دور ایفا می‌کند، که با  $E_z$  نشان داده می‌شود.

مولفه‌های  $z$  جریان‌های  $I_2$  و  $I'_2$  دارای جهت یکسان بوده و اختلاف فازی از لحاظ تحریک نسبت به یکدیگر ندارند. با این‌که مولفه  $z$  جریان  $I_2$  و  $I'_2$  نسبت به یکدیگر اختلاف فاز ندارند، اما به دلیل وجود فاصله  $\lambda/2$  بین این دو جریان، میدان ایجاد شده توسط این دو مولفه‌های یکدیگر را در راه دور حذف می‌کنند. در حالی که مخالف بودن جهت مولفه‌های  $x$  و  $y$  جریان‌های  $I_2$  و  $I'_2$  باعث ایجاد اختلاف فاز  $\pi$  بین مولفه  $x$  جریان‌های  $I_2$  و  $I'_2$  و همچنین بین مولفه  $y$  جریان‌های  $I_2$  و  $I'_2$  می‌شود. به‌طور کلی، فاز ناشی از فاصله مکانی با فاز ناشی از جهت‌های مخالف مولفه‌های جریان یکدیگر را حذف می‌کنند. به دنبال آن میدان تشعشعی ناشی از جهت جریان در راستای  $x$  و  $y$  دارای تفاوت فاز صفر هستند و منجر به ایجاد مولفه‌های  $E_x$  و  $E_y$  می‌شوند.

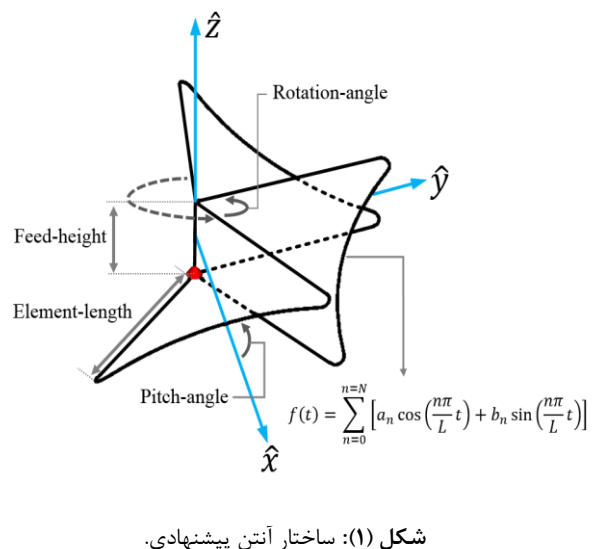


شکل (۲): (الف) میدان‌های متعامد (ب) بیشینه جریان رو آنتن (ج) مختصات دوران یافته (د) جریان رو هر حلقه.

تولید انبوه آنتن با توجه امکانات موجود ساده و کم هزینه می‌باشد. به این منظور آنتن پیشنهادی از سیم مسی به قطر یک میلی‌متر که از طریق یک خط کوکس تغذیه می‌شود، ساخته شده است. ابتدا آنتن تحلیل و طراحی می‌شود و سپس شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای آنتن صورت می‌گیرد تا مشخصات آنتن شامل نسبت محوری، تلفات بازگشتی و الگو تشعشعی در بهترین حالت به دست آیند. در نهایت آنتن مورد نظر ساخته شد و پارامترهای آن اندازه‌گیری شده است. نتایج اندازه‌گیری از تطابق خوبی با نتایج شبیه‌سازی برخوردار است.

## ۲- طراحی و تحلیل آنتن

ساختار کلی آنتن قطبش دایروی همه جهته در شکل (۱) نشان داده شده است. این ساختار شامل  $\Pi$  شبه حلقه مشابه که حول محور  $x$  به اندازه زاویه پیچ، دوران یافته است، هر کدام از حلقه‌ها شامل دو میله شعاعی و یک میله قوسی شکل است معادله میله قوسی شکل از توزیع سری فوریه که در شکل (۱) نشان داده شده است به دست می‌آید. زاویه هر حلقه نسبت به حلقه مجاورش برابر زاویه چرخش (rotation) است. محیط هر حلقه تقریباً یک طول موج می‌باشد، از این رو دامنه و فاز جریان در طول حلقه تغییر می‌کند. بنابراین، منطقی است که فرض کنیم که توزیع جریان بر روی حلقه یک موج ایستا کسینوسی است. ساختار کلی به وسیله کابل کوکسیال تحریک می‌شود و نیازی به مبدل امپدانس برای تطبیق ندارد.



شکل (۱): ساختار آنتن پیشنهادی.

## ۱-۲- تئوری ساختار پیشنهادی

قطبش دایروی زمانی به دست می‌آید که دو مولفه میدان با دامنه برابر و اختلاف فاز زمانی بین این دو مولفه مضرب فردی از

رابطه بردار پتانسیل بر حسب تابع گرین به صورت زیر است.

$$A(x, y, z; t) = \frac{e^{-i(\omega t - kr)}}{4\pi\mu_0^{-1}R} \int_V J(\alpha, \beta, \gamma) e^{-i\omega l} dv \quad (۴)$$

$$G(\theta', \varphi') = \int_V J(\alpha, \beta, \gamma) e^{-i\omega l} d\alpha d\beta d\gamma$$

در رابطه (۴) فاصله نقطه مشاهده و نقاط روی آنتن طبق رابطه زیر و صرف نظر از مراتب بالاتر  $r^{-1}$  به دست می آید.

$$R = [(x' - \alpha)^2 + (y' - \beta)^2 + (z' - \gamma)^2]^{0.5}$$

$$= r' - (\alpha \sin\theta' \cos\varphi' + \beta \sin\theta' \sin\varphi' + \gamma \cos\theta') + \dots$$

همچنین جمله  $l$  به صورت زیر تعریف می گردد.

$$l = \alpha \sin\theta' \cos\varphi' + \beta \sin\theta' \sin\varphi' + \gamma \cos\theta'$$

اکنون می توان با استفاده از رابطه (۴) برای هر قسمت جریانی تابع پتانسیل را به دست آورد. که به صورت زیر است:

بازو ۱

$$A_{x'} = \frac{e^{-i(\omega t - kr)}}{4\pi\mu_0^{-1}r'} I_0 a \cos\delta$$

$$\times \int_0^{\frac{\lambda}{4}} \cos(\beta\rho) e^{i\beta\rho \sin\theta' \cos(\delta - \varphi')} d\rho$$

$$A_{y'} = \frac{e^{-i(\omega t - kr)}}{4\pi\mu_0^{-1}r'} I_0 a \sin\delta \quad (۵)$$

$$\times \int_0^{\frac{\lambda}{4}} \cos(\beta\rho) e^{i\beta\rho \sin\theta' \cos(\delta - \varphi')} d\rho$$

$$A_{z'} = 0$$

بازو ۲

$$A_{x'} = -\frac{e^{-i(\omega t - kr)}}{4\pi\mu_0^{-1}r'} I_0 a$$

$$\times \int_0^{\delta} \sin(\beta \frac{L}{2} \psi) \sin\psi e^{i\beta a \sin\theta' \cos(\psi - \varphi')} d\psi$$

$$A_{y'} = \frac{e^{-i(\omega t - kr)}}{4\pi\mu_0^{-1}r'} I_0 a \quad (۶)$$

$$\times \int_0^{\delta} \sin(\beta \frac{L}{2} \rho) \cos\psi e^{i\beta a \sin\theta' \cos(\psi - \varphi')} d\psi$$

$$A_{z'} = 0$$

در نهایت میدان  $E_z$  ناشی از مرکز آنتن و میدان های  $E_x$  و  $E_y$  ناشی از جریان  $I_2$  مطابق شکل (۲-الف) در میدان راه دور نقش دارند و از آنجا که فاصله بین مرکز آنتن و جریان  $I_2$  تقریباً  $\lambda/4$  است منجر به ایجاد اختلاف فاز ۹۰ درجه ای بین میدان  $E_z$  با میدان های  $E_x$  و  $E_y$  در راه دور می شوند. در نتیجه قطبش دایروی در دو صفحه azimuthal و elevation ایجاد می گردد. نسبت محوری به ترتیب برای این دو صفحه از روابط (۱ و ۲) به دست می آید.

در صفحه  $\theta=90$  داریم:

$$AR = \left( 20 \log \left| \frac{E_\theta}{E_\varphi} \right| \right)$$

$$AR = \left( 20 \log \left| \frac{E_z}{\sqrt{(-\sin\varphi E_z)^2 + (\cos\varphi E_y)^2}} \right| \right) \quad (۱)$$

در صفحات  $\varphi=0,90$  داریم:

$$AR = \left( 20 \log \left| \frac{-\sin\theta E_z}{E_{x,y}} \right| \right) \quad (۲)$$

همان طور که گفته شد توزیع جریان هر حلقه، کسینوسی است. پس می توان نسبت به نقاط کمینه توزیع جریان در حلقه، توزیع جریان را به سه بخش مطابق شکل (۲-د) تقسیم کرد که دو بخش شعاعی هر حلقه دارای جریان کسینوسی و قسمت قوسی هر حلقه جریان سینوسی دارد که در حالت زاویه  $\text{pitch angle}=0$  میدان الکتریکی برای این سه جریان به دست می آید. جریان بر روی هر المان به صورت زیر است. به طور پیش فرض نقاط روی منبع را  $(\alpha, \beta, \gamma, \psi, \rho)$  و نقاط مشاهده را  $(x', y', z', \varphi', r')$  در نظر می گیریم.

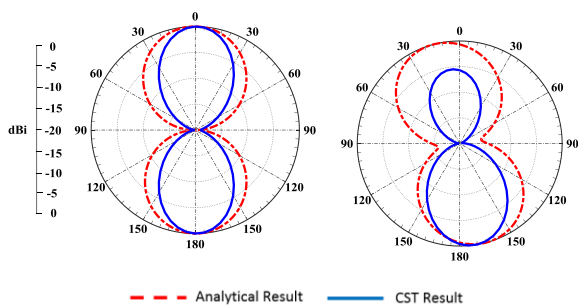
$$I_1 = I_0 \cos(\beta\rho) [\cos\delta \hat{x}' + \sin\delta \hat{y}'] d\rho$$

$$I_1 = I_0 a \sin(\beta \frac{L}{2} \psi) [-\sin\psi \hat{x}' + \cos\psi \hat{y}'] d\psi \quad (۳)$$

$$I_1 = I_0 \cos(\beta\rho) [-\cos\delta \hat{x}' + \sin\delta \hat{y}'] d\rho$$

در ابتدا برای هر بازو تابع گرین را در مختصات  $(x', y', z')$  به دست می آوریم و سپس از روی تابع گرین به بردار پتانسیل می رسیم و در نهایت با استفاده از تبدیل دوران مختصات  $(x, y, z)$  را به مختصات  $(x', y', z')$  تبدیل می کنیم.

شکل (۳) مقایسه الگو را در دو صفحه با استفاده از نرم افزار متلب و همچنین نرم افزار تمام موج CST نشان می دهد.



شکل (۳): الگوی تشعشی شبه حلقه در دو صفحه، (الف) azimuthal، (ب)  $(\theta=90^\circ)$ ، (ج)  $(\phi=0^\circ)$ .

با مشاهده شکل (۱) می توان نشان داد که حلقه های آنتن در فضا با زاویه pitch-angle نسبت به محور x دوران نموده است. بدین منظور ابتدا باید تبدیل دوران را یافته و سپس با استفاده از تبدیل دوران بردارهای پتانسیل الکتریکی را به مختصات جدید تبدیل کنیم. برای یافتن تبدیل دوران، نقطه مشاهده را در هر دو دستگاه ثابت در نظر می گیریم. همچنین به دلیل این که دوران حول محور x است؛ پس این محور در هر دو مختصات ثابت است. به این ترتیب ابتدا تصویر بردار R را بر روی دستگاه مختصات قدیم و جدید به دست می آوریم.

$$\begin{aligned} R_z &= R \cos\theta \\ R_y &= R \sin\theta \sin\phi \end{aligned} \quad (10)$$

$$R_x = R \sin\theta \cos\phi$$

$$\begin{aligned} R_z &= R \cos\theta' \hat{z}' \\ R_\rho &= R \sin\theta' \hat{\rho}' \end{aligned} \quad (11)$$

$$\rightarrow R(\cos\theta' \hat{z}' + \sin\theta' \cos\phi' \hat{x}' + \sin\theta' \sin\phi' \hat{y}')$$

در رابطه (۱۱) با تبدیل مختصات  $x'y'z'$  به مختصات xyz داریم.

$$R_x = R \sin\theta' \cos\phi' \quad (12)$$

$$R_y = R(-\cos\theta' \sin\phi' + \sin\theta' \sin\phi' \cos\gamma)$$

$$R_z = R(\cos\theta' \cos\gamma + \sin\theta' \sin\phi' \sin\gamma)$$

نتایج حاصل از رابطه (۱۲) و (۱۰) باید باهم برابر باشند به دلیل این که هر دو در یک دستگاه مختصان قرار دارند. در نهایت می توان زاویه های  $\theta'$  و  $\phi'$  بر حسب زاویه های  $\theta$  و  $\phi$  به دست آورد.

بازو ۳

$$\begin{aligned} A_{x'} &= -\frac{e^{-i(\omega t - kr)}}{4\pi\mu_0^{-1}r'} I_0 a \cos\delta \\ &\times \int_0^{\frac{\lambda}{4}} \cos(\beta\rho) e^{i\beta\rho \sin\theta' \cos(\delta - \phi')} d\rho \\ A_{y'} &= \frac{e^{-i(\omega t - kr)}}{4\pi\mu_0^{-1}r'} I_0 a \sin\delta \\ &\times \int_0^{\frac{\lambda}{4}} \cos(\beta\rho) e^{i\beta\rho \sin\theta' \cos(\delta - \phi')} d\rho \end{aligned} \quad (7)$$

$$A_{z'} = 0$$

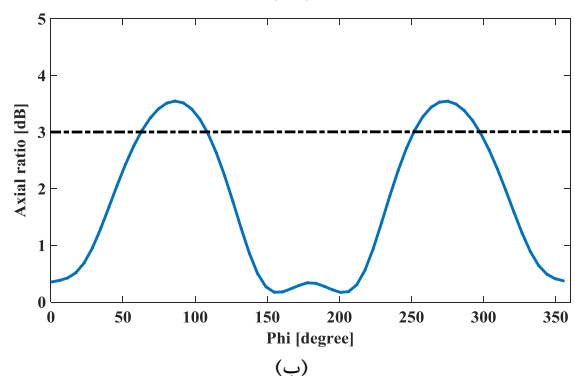
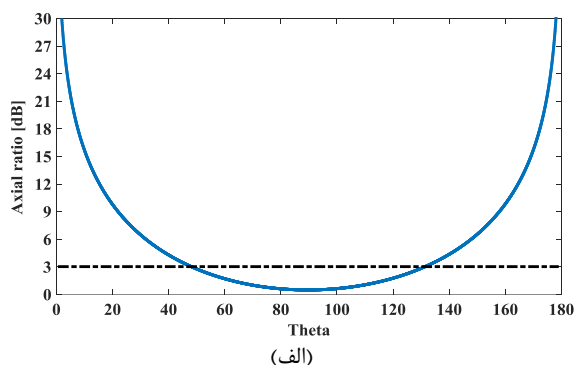
با استفاده از رابطه میدان الکتریکی با پتانسیل الکتریکی می توان میدان کلی حلقه را در صفحات  $\phi=0^\circ$  و  $\theta=0^\circ$  به دست آورد که به صورت زیر است.  
در صفحه  $\phi=0^\circ$  داریم:

$$\begin{aligned} E_\theta &= -i \frac{\eta_0 I_0}{4\pi r} e^{-i(\omega t - kr)} \cos\theta' \\ &\times \int_0^\delta \sin\left(\beta \frac{L}{2} \psi\right) \sin\psi e^{i\sin\theta' \cos\psi} d\psi \\ E_\phi &= -i \frac{\eta_0 I_0}{4\pi r} e^{-i(\omega t - kr)} [2\sin\delta \\ &\times \int_0^{\frac{\lambda}{4}} \cos(\beta\rho) e^{i\beta\rho \sin\theta' \cos(\delta)} d\rho \\ &+ \int_0^\delta \sin\left(\beta \frac{L}{2} \rho\right) \cos\psi e^{i\sin\theta' \cos(\psi)} d\psi] \end{aligned} \quad (8)$$

در صفحه  $\theta=90^\circ$  داریم.

$$\begin{aligned} E_\theta &= 0 \\ E_\phi &= -i \frac{\eta_0 I_0}{4\pi r} e^{-i(\omega t - kr)} \\ &\times \left[ \sin\phi' \int_0^\delta \sin\left(\beta \frac{L}{2} \psi\right) \sin\psi e^{i\cos(\psi - \phi')} d\psi + \right. \\ &\left. \cos\phi' (2\sin\delta \int_0^{\frac{\lambda}{4}} \cos(\beta\rho) e^{i\beta\rho \cos(\delta - \phi')} d\rho \right. \\ &\left. + \int_0^\delta \sin\left(\beta \frac{L}{2} \rho\right) \cos\psi e^{i\cos(\psi - \phi')} d\psi \right] \end{aligned} \quad (9)$$

شکل (۴- الف و ب) نسبت محوری را در دو صفحه azimuthal و elevation طبق روابط (۱) و (۲) با استفاده از نرم افزار متلب به ترتیب نشان می‌دهد.



شکل (۴): الگوی تشعشعی شبه حلقه در دو صفحه (الف) elevation azimuthal (ب)

امپدانس ورودی آنتن با این فرض که آنتن یک شبکه  $n$  دهانه‌ای است. همچنین  $n$  تعداد حلقه می‌باشد می‌توان محاسبه کرد. با ذکر این نکته که در این شبکه تمام دهانه‌ها یکی هستند و از یک نقطه تحریک می‌شوند. پس اختلاف پتانسیل الکتریکی تمامی دهانه‌ها یکسان و برابر دهانه ورودی آنتن  $(V_1=V_2=...=V)$  است. همچنین به دلیل این که تمامی حلقه‌های آنتن مشابه هستند پس جریان ورودی آنتن بین حلقه‌ها تقسیم می‌شود  $(I_1=I_2=...=I/n)$  در نهایت می‌توان امپدانس ورودی آنتن را طبق رابطه زیر محاسبه کرد.

$$Z_{in} = \frac{1}{n^2} \sum_{i,j=1}^n [Re(Z_{i,j}) + iIm(Z_{i,j})] \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)،  $Z_{ii}$  امپدانس خودی هر حلقه در حضور حلقه‌های تحریک نشده دیگر و همچنین  $Z_{ij}$  امپدانس متقابل بین حلقه‌ها می‌باشد که مقدار امپدانس ورودی آنتن را می‌توان با استفاده از زاویه دوران حلقه‌ها نسبت به محور  $x$  به امپدانس  $50$  اهم تطبیق کرد.

$$\theta' = \cos^{-1}(\cos\gamma \cos\theta - \sin\gamma \sin\theta \sin\varphi) \quad (13)$$

$$\varphi' = \cos^{-1}\left(\frac{\sin\theta \cos\varphi}{\sin(\cos^{-1}(\cos\gamma \cos\theta - \sin\gamma \sin\theta \sin\varphi))}\right) \quad (14)$$

بردارهای یکه دستگاه مختصات جدید نیز باید به مختصات قدیم تبدیل شوند.

$$\begin{aligned} \hat{x}' &= \hat{x} \\ \hat{y}' &= \hat{z} \sin\gamma + \hat{y} \cos\gamma \\ \hat{z}' &= \hat{z} \cos\gamma - \hat{y} \sin\gamma \\ \hat{\varphi}' &= -\sin\varphi' \hat{x}' + \cos\varphi' \hat{y}' \\ \hat{\theta}' &= \cos\theta' \cos\varphi' \hat{x}' + \cos\theta' \sin\varphi' \hat{y}' - \sin\theta' \hat{z}' \end{aligned}$$

سرانجام با استفاده از میدان الکتریکی ناشی از این سه جریان و استفاده از تبدیل دوران حول محور  $x$  می‌توان به میدان‌های ناشی از حلقه کج در فضا دست یافت که میدان الکتریکی کلی آنتن به صورت زیر است.

$$E = kf(\theta', \varphi')\hat{x} + k\cos\gamma g(\theta', \varphi')\hat{y} + k\sin\gamma \cos\delta h(\theta', \varphi')\hat{z} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵) داریم:

$$\begin{aligned} k &= -i\omega \frac{\mu_0 I_0 a}{4\pi r} \\ f(\theta', \varphi') &= -\int_0^\delta \sin(\beta \frac{L}{2} \rho) \sin\psi e^{i\beta a \sin\theta' \cos(\psi - \varphi')} d\psi \\ g(\theta', \varphi') &= \int_0^\delta \sin(\beta \frac{L}{2} \rho) \cos\psi e^{i\beta a \sin\theta' \cos(\psi - \varphi')} d\psi \\ h(\theta', \varphi') &= \int_0^{\frac{\lambda}{4}} \cos(\beta \rho) e^{i\beta \rho \cos(\delta - \varphi')} d\rho \end{aligned}$$

تبدیلات ناشی از تبدیل دوران دو مختصات در دو صفحه به صورت زیر است.

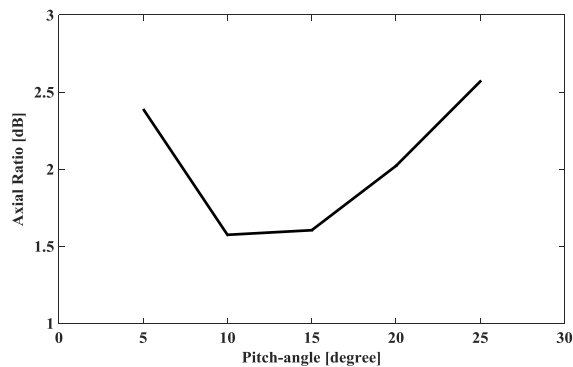
$$\theta = 90^\circ$$

$$\begin{aligned} \theta' &= \cos^{-1}(\sin\gamma \sin\varphi) \\ \varphi' &= \cos^{-1}\left(\frac{\cos\varphi}{\sin(\cos^{-1}(-\sin\gamma \sin\varphi))}\right) \end{aligned}$$

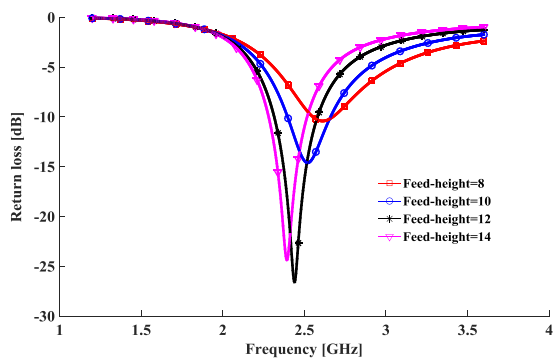
$$\varphi = 0, 90^\circ$$

$$\begin{aligned} \theta' &= \gamma + \theta \\ \varphi' &= \frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

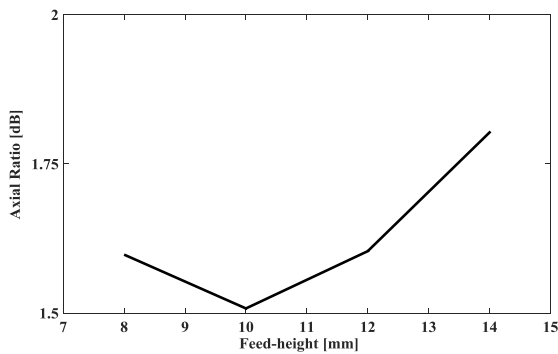
و نقاط کمینه جریان در نقاط نزدیک به انتها دو بازوی شعاعی قرار گرفته است.



شکل (۶): نتایج نسبت محوری بر اساس تغییرات پارامتر Pitch-angle.



شکل (۷): نتایج ضریب بازگشتی بر اساس تغییر پارامتر Feed-height.



شکل (۸): نتایج نسبت محوری بر اساس تغییر پارامتر Feed-height.

جدول (۲): مقادیر بهینه پارامترهای آنتن.

ابعاد	ابعاد (mm)	پارامتر	پارامتر
۷۲°	۱۲	Rotation-angle	Feed-height
۱۵°	۲۱	Pitch-angle	Element-base-length
۰	-۲/۲۶۲	b <sub>۱</sub>	a <sub>۰</sub> ۲۳/۳۵
		a <sub>۱</sub>	

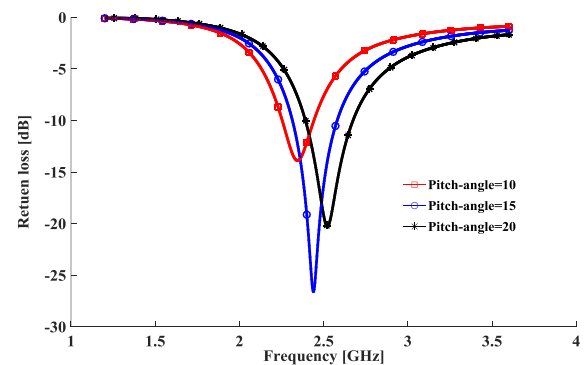
شکل (۱۰) الگو تشعشی سه‌بعدی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت بهره قطبش دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد حدود ۲۰ dB در تمام جهات است که این ویژگی، نشان‌دهنده کیفیت خوب قطبش در تمام جهات می‌باشد.

## ۲-۲- شبیه‌سازی آنتن

این بخش نتایج شبیه‌سازی آنتن موردنظر که دارای پنج حلقه است و هر حلقه به اندازه یک طول موج با قطر یک میلی‌متر است را برای فرکانس ۲/۴۵ GHz نشان می‌دهد.

نتایج تغییرات افت برگشتی و نسبت محوری بر اساس تغییرات پارامتر موثر آنتن، شامل Feed-height فاصله دو بازوی شعاعی بالا و پایین در مرکز آنتن و Pitch-angle زاویه دوران حلقه‌ها نسبت به محور x، به‌ازای مقادیر مختلف فرکانسی زمانی که پارامترهای دیگر آنتن ثابت است، به ترتیب در شکل‌های (۵-۸) نشان داده شده است.

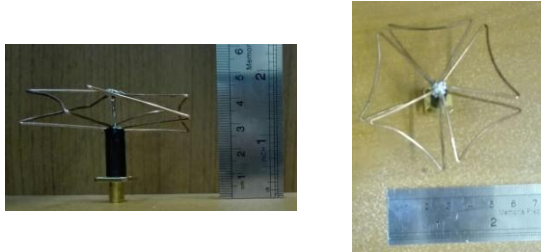
نتایج به‌دست‌آمده در شکل‌های (۵-۶) نشان می‌دهد که تغییر پارامتر pitch-angle طبق توضیحات بخش قبل باعث تغییر در امپدانس ورودی و در نتیجه باعث تغییر در فرکانس تشدید می‌گردد. همچنین تغییر این پارامتر باعث می‌شود که حلقه‌ها به مرکز آنتن نزدیک‌تر شده و فاصله‌ای کمتر از  $\lambda/4$  بگیرند که این امر موجب افزایش نسبت محوری آنتن می‌گردد. شکل‌های (۷-۸) تاثیر پارامتر Feed-height را بر روی عملکرد آنتن نشان می‌دهد. تغییرات این پارامتر باعث تغییر در دامنه جریان ورودی و همچنین تغییر نسبت جریان ورودی آنتن به جریان بر روی هر بازو قوسی شکل هر حلقه می‌شود که نتیجه آن تغییر امپدانس ورودی و نسبت محوری آنتن می‌گردد. بنابراین، انتخاب مناسب این پارامترها مصالحه‌ای بین قطبش دایروی و امپدانس ورودی می‌باشد.



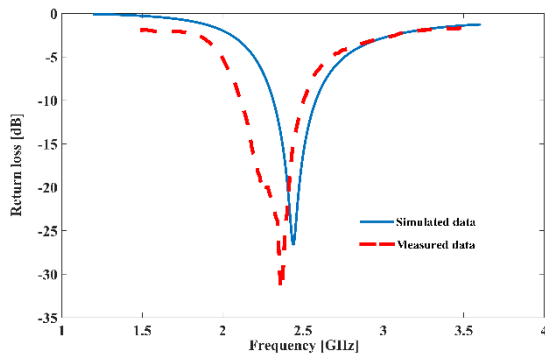
شکل (۵): نتایج ضریب بازگشتی بر اساس تغییر پارامتر Pitch-angle.

البته هدف ما در این مقاله ایجاد قطبش دایروی در تمام صفحات  $\theta$  است. می‌توان با استفاده از الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار CST پارامترهای آنتن را بهینه کرد. و به نتایج مطلوب دست یافت پارامترهای بهینه آنتن پنج حلقه‌ای در جدول یک نشان داده شده است. شکل (۹) توزیع جریان بر روی آنتن را توسط نرم‌افزار CST نشان می‌دهد، همان‌طور که انتظار داشتیم بیشینه توزیع جریان در مرکز آنتن و مرکز بازوی منحنی شکل قرار دارد

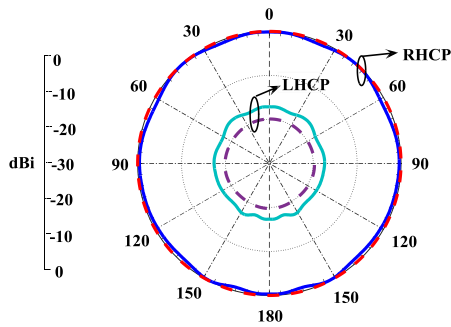
نسبت به فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد. نسبت محوری شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در پهنای باند امیدانس به ترتیب برابر ۱/۵ dB و ۲/۴۴ dB است. همچنین میانگین بهره آنتن در بازه فرکانسی حدود ۱/۵ dBi می‌باشد.



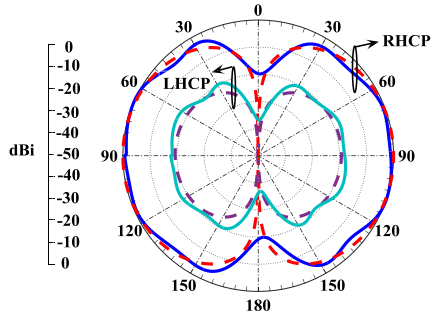
شکل (۱۱): آنتن قطبش دایروی همه جهته پیشنهادی ساخته شده.



شکل (۱۲): ضریب بازگشت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی.



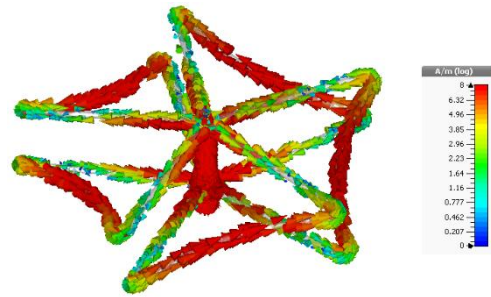
(الف)



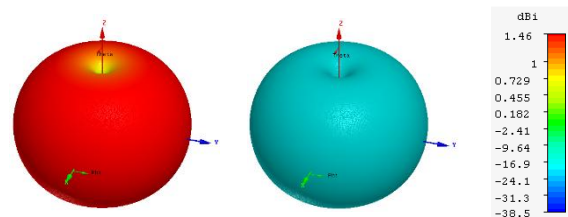
(ب)

--- Simulated RHCP    --- Simulated LHCP  
 --- Measured RHCP    --- Measured LHCP

شکل (۱۳): الگوی تشعشعی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در فرکانس ۲/۳۷GHz، (الف) صفحه azimuthal، (ب) elevation.



شکل (۹): توزیع جریان بر روی آنتن.



شکل (۱۰): الگوی تشعشعی بهره قطبش دایروی، (الف) راست‌گرد، (ب) چپ‌گرد.

### ۳- نتایج ساخت و اندازه‌گیری

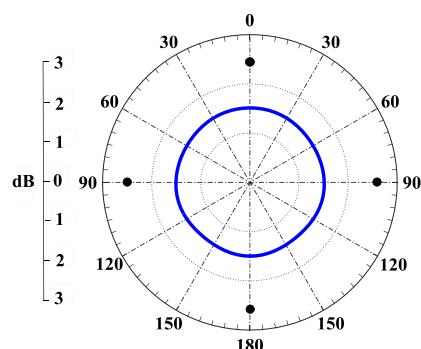
آنتن دایروی همه جهته با سیم مسی به قطر یک میلی‌متر و همچنین کابل RG58 با کانکتور SMA مطابق شکل (۱۱) ساخته شده است. ضریب بازگشت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در شکل (۱۲) نشان داده شده است. جابه‌جایی در ضریب بازگشت اندازه‌گیری شده نسبت به حالت شبیه‌سازی ناشی از خطای ساخت است. پهنای باند ۱۰ dB اندازه‌گیری و شبیه‌سازی به ترتیب برابر ۳۹۰ MHz (از رنج فرکانسی ۲/۱۱ GHz تا ۲/۵ GHz) و ۲۷۰ MHz (از رنج فرکانسی ۲/۳۱ GHz تا ۲/۵۸ GHz) می‌باشد. الگو تشعشعی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در شکل (۱۳) برای دو صفحه  $\theta=90^\circ$  و  $\phi=0^\circ$  نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود آنتن دارای قطبش راست‌گرد دایروی است و تفاوت بین الگو دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد در تمام جهات حدود ۲۰ dB است. ریب‌های کمتر از ۱ dB در الگو در حالت اندازه‌گیری نشان‌دهنده مطابقت نتایج اندازه‌گیری با نتایج شبیه‌سازی است.

نسبت محوری شبیه‌سازی در صفحه  $\theta=90^\circ$  و  $\phi=0^\circ$  در شکل (۱۴) نشان داده شده است که به علت محدودیت در اندازه‌گیری فقط در صفحه  $\theta=90^\circ$  نسبت محوری اندازه‌گیری شده است. می‌توان مشاهده کرد که نسبت محوری در دو صفحه در تمام زوایا البته به جز زوایای  $\theta$  نزدیک به صفر کمتر از ۳ dB است. این امر باعث می‌شود که نتایج نشان می‌دهد قطبش دایروی نه تنها در صفحه عمود بر محور آنتن بلکه در کل فضا ایجاد گردد.

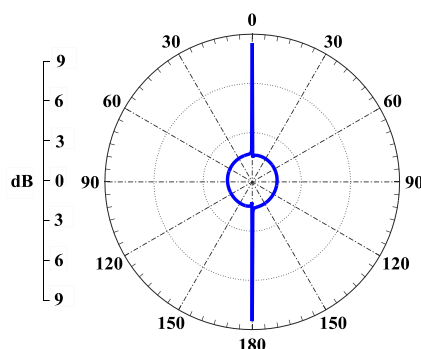
شکل (۱۵) نسبت محوری و بهره آنتن را در زاویه  $\theta=0^\circ$  را

## ۶- مراجع

- [1] Yang, Long, et al, "A Novel Single Feed Omnidirectional Circularly Polarized Antenna with Wide AR Bandwidth," Progress in Electromagnetics Research C 51 pp. 35-43, 2014.
- [2] M. Amin, J. Yousef, and S. Iqbal, "Single Feed Circularly Polarized Omnidirectional Bifilar Helix Antennas with Wide Axial Ratio Beam Width," in IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 7, no. 10, pp. 825-830, July 2013.
- [3] Y. Fan, X. Quan, Y. Pan, Y. Cui, and R. Li, "Wideband Omnidirectional Circularly Polarized Antenna Based on Tilted Dipoles," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 12, pp. 5961-5966, Dec. 2015.
- [4] M. Khalily, M. R. Kamarudin, M. Mokayef, and M. H. Jamaluddin, "Omnidirectional Circularly Polarized Dielectric Resonator Antenna for 5.2-GHz WLAN Applications," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 13, pp. 443-446, 2014.
- [5] Y. M. Pan, K. W. Leung, and K. Lu, "Omnidirectional Linearly and Circularly Polarized Rectangular Dielectric Resonator Antennas," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 2, pp. 751-759, Feb. 2012.
- [6] X. Quan, R. Li, and M. M. Tentzeris, "A Broadband Omnidirectional Circularly Polarized Antenna," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, no. 5, pp. 2363-2370, May 2013.
- [7] D. Yu, S. X. Gong, Y. T. Wan, and W. F. Chen, "Omnidirectional Dual-Band Dual Circularly Polarized Microstrip Antenna Using  $TM_{01}$  and  $TM_{02}$  Modes," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 13, pp. 1104-1107, 2014.
- [8] B. C. Park and J. H. Lee, "Omnidirectional Circularly Polarized Antenna Utilizing Zeroth-Order Resonance of Epsilon Negative Transmission Line," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 59, no. 7, pp. 2717-2721, July 2011.
- [9] Y. M. Pan, S. Y. Zheng, and B. J. Hu, "Wideband and Low-Profile Omnidirectional Circularly Polarized Patch Antenna," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, no. 8, pp. 4347-4351, Aug. 2014.
- [10] W. Q. Cao, "Compact dual-band dual-mode circular patch antenna with broadband unidirectional linearly polarized and omnidirectional circularly polarized characteristics," in IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 10, no. 2, pp. 223-229, 2016.



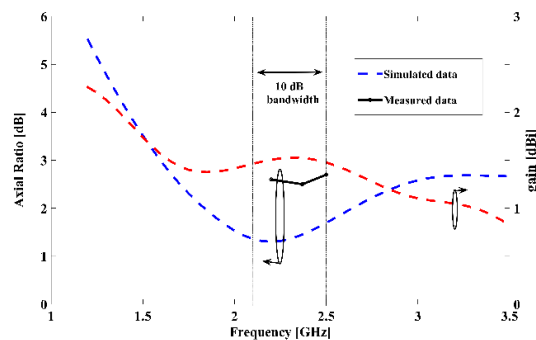
(الف)



(ب)

— Simulated Result ● Measured Result

شکل (۱۴): الگوی نسبت محوری برای دو صفحه، الف) azimuthal elevation (ب)



شکل (۱۵): نسبت محوری و بهره آنتن شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، آنتن قطبش دایروی همه جهته با روش ساده و ارزان قیمت که ترکیبی از حلقه‌های سیمی است ارائه شد. پهنای باند امپدانس ۱۰ dB اندازه‌گیری شده حدود ۳۰۰ MHz و همچنین نسبت محوری حدود ۲/۵ dB در صفحه  $\theta=90^\circ$  به دست آمد. همان‌طور که نشان دادیم این آنتن نه تنها در صفحه  $\theta=90^\circ$  بلکه در کل فضا قطبش دایروی را ایجاد می‌کند.



---

**Multi-Petal Antenna with Omnidirectional Radiation Using a Circular Polarization in the S Band**

**M. Nadi Abiz, M. Khalaj Amirhoseini\***

**Iran University Of Science and Technology**

(Received: 07/03/2017, Accepted: 11/12/2017)

**Abstract**

*This paper presents a novel omnidirectional circularly polarized antenna with simple and low cost configuration designed by a combination of tilted semi loops antenna for unmanned aerial vehicle such as drone and quadcopter. Length of each semi loop is one wavelength that has been repeated around antenna axis with a specific angle. The 90° phase difference between two equally orthogonal polarized components is inherently provided by semi-loops and without the need for exciting semi-loops 90° out of phase. Symmetric configuration antenna yields in circular polarization in both the azimuthal and elevation plane. The measured results show that the 10-dB impedance bandwidth is 390MHz (range from 2.1GHz to 2.5GHz) at frequency of 2.45GHz and axial ratio bandwidth for less than 3dB is 400MHz (range from 2.1GHz to 2.5GHz). Also this antenna has a right hand circular polarization whose difference between the measured left hand circular polarization and the right and circular polarization gain is about 20 dB. The right hand circular polarized gain is about 1.5dBi.*

**Keywords:** Axial Ratio, Circularly Polarized, Omnidirectional Pattern, Simple Structure, Unmanned Aerial Vehicle

---

\* Corresponding author E-mail: khalaja@iust.ac.ir