

## بررسی رفتار پترن دامنه و فاز دو آنتن هرمی پهن باند و تأثیرات ابعاد فیزیکی در مشخصه تشعشی

سعید منشاری<sup>۱</sup>، فرخ حجت کاشانی<sup>۲</sup>، محمد ساریجلو<sup>۳</sup> و غلامرضا مرادی<sup>۴</sup>

دانشجوی دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، manshari@elec.iust.ac.ir

استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

آکارشناسی ارشد، پژوهشگاه مخابرات و الکترونیک نصر

دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

این مقاله به رابطه ابعاد دهانه، زاویه بازشدگی دهانه شیپور و تأثیر خطای فاز تربیعی برای آنتن‌های شیپوری هرمی پهن باند بر روی پترن دامنه و پترن فاز می‌پردازد. در این مطالعه سعی بر آن بوده است با بررسی رفتار پترن دامنه آنتن‌های شیپوری پهن باند در دو صفحه میدان الکتریکی و مغناطیسی در پهنای باند وسیع، تأثیر توزیع جریان مغناطیسی و توزیع فاز این جریان در دهانه بر روی پترن دامنه و پترن فاز را نشان دهیم. در این مطالعه دو آنتن شیپوری با ابعاد فیزیکی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته شده است.

با توجه به اینکه در طراحی آنتن‌های شیپوری پهن باند (۹:۱) معمولاً فقط به رفتار امپدانس آنتن‌ها  $V_{SWR}$  توجه می‌شود، در این نگارش برای دو طرح متفاوت با توجه به روابط تحلیلی پترن دامنه و فاز دو آنتن که دارای ماکزیمم خطای فاز تربیعی متفاوتی می‌باشند، در دو صفحه اصلی در چهار فرکانس محاسبه می‌شود. سپس برای تصدیق نتایج محاسبه شده، آنتن‌های مذکور با ابعادی مشابه در دو نرم افزار  $HFSS$  و  $CST$  شبیه‌سازی می‌گردد. همچنین نتایج اندازه‌گیری پترن دامنه یکی از آنتن‌ها در انتها آورده شده است.

نتایج حاصله حاکی از آن است که با افزایش فرکانس تغییرات پهنای باند بییم ۳ دسی بل، پترن دامنه صفحه میدان الکتریکی نسبت به پهنای بییم پترن دامنه صفحه میدان مغناطیسی بیشتر است. اما تغییرات پترن فاز صفحه میدان الکتریکی تغییرات کمتری نسبت به صفحه میدان مغناطیسی دارد.

### کلیدواژه

پترن دامنه، پترن فاز، خطای فاز تربیعی، مرکز فاز و آنتن هرمی شیپوری.

### مقدمه

نامطلوب در فرکانس‌های بالا اشاره شده است [۱۲-۱۳]. همچنین اخیراً توجه به رفتار فازی انواع آنتن‌های دیگر از جمله دهانه‌ای نیز در مقالات مورد توجه قرار گرفته شده است [۱۷-۱۹].

در این نوشتار به تغییرات پترن دامنه در بازه فرکانسی پهن باند (۹:۱) در دو صفحه اصلی و رابطه آن با خطای فاز تربیعی توجه شده است. علاوه بر پترن دامنه در این مطالعه توجه ویژه‌ای به پترن فاز پیوسته شده در دو صفحه اصلی شده است. در اکثر رابطه‌هایی که جهت محاسبه مرکز فاز ارائه شده است، نیاز به دانستن پترن فاز در حوالی محور آنتن است [۳-۴] و [۱۷].

نیاز به دانستن مرکز فاز در کاربردهایی مانند اینترفرومتری و یا استفاده از بازتابنده‌های سهموی مشخص است [۱] و [۶-۹]. در آنتن‌های بازتابی در حالت گیرندگی، امواج صفحه‌ای که به سطح سهموی برخورد می‌کند در نقطه مشخصی به نام نقطه

آنتن‌های شیپوری به علت بهره نسبتاً بالا، سادگی در ساخت، توانایی حمل توان‌های بالا و دقت به خصوصی که دارند، به یکی از پرکاربردترین انواع آنتن‌ها مبدل شده اند [۱-۱۶]. رفتار پترن دامنه این نوع آنتن‌ها از دیر باز بسیار مورد توجه بوده است [۱-۳]. توجه به رفتار فازی این نوع آنتن‌ها نیز منحصراً به محاسبه مرکز فاز این نوع آنتن‌ها معطوف بوده است [۴-۱۱].

در این مطالعه تأثیر توزیع فاز دهانه، و خطای فاز تربیعی بر روی رفتار پترن دامنه و فاز بررسی شده است. با توجه به ابعاد فیزیکی آنتن از جمله دهانه آنتن و شعاع باز شدگی آنتن، میزان خطای فاز تربیعی و تأثیر آن بر روی انتگرال توزیع جریان دهانه به ازای فرکانس‌های مختلف بر روی پترن دامنه اشاره شده است. در مقالاتی که به آنتن‌های پهن باند پرداخته شده، به تغییرات

<sup>1</sup> Unwrap

$\hat{a}$  بردار واحد می‌باشد. جملات که  $E(\theta, \varphi)$  و  $\psi(\theta, \varphi)$  تغییرات دامنه و فاز را نشان می‌دهند، که می‌توان آن را به ترتیب پترن دامنه و فاز عنوان کرد. همانطور که اشاره شد در اکثر روابطی که جهت محاسبه مرکز فاز آنتن‌های شیپوری هرمی ارائه شده است، از مشتقات پترن فاز در حوالی محور آنتن استفاده می‌شود [۴-۵] و [۱۴].

در مورد آنتن‌های شیپوری که یکی از رایج‌ترین آنتن‌های مایکروویو می‌باشند، مرکز فاز معمولاً در دهانه قرار ندارد بلکه بیشتر بین رأس فرضی آنتن و دهانه قرار دارد. محل دقیق مرکز فاز به ابعاد شیپور به خصوص زاویه بازشدگی شیپور بستگی دارد. در مطالعه‌ای که بر روی آنتن‌های قطاعی صورت گرفته شده است نشان داده شده است، در صورت کوچک شدن زاویه بازشدگی مرکز فاز به دهانه و در صورت بزرگ شدن زاویه بازشدگی مرکز فاز به رأس فرضی نزدیک می‌شود [۳]. جهت محاسبه تشعشع میدان دور آنتن شیپوری هرمی، از جریان‌های سطحی استفاده شده است. در روابط زیر انتگرال‌های فرنل جهت محاسبه انتگرال بر روی سطح دهانه استفاده شده است [۱].

(۲)

$$E\theta \approx \frac{-jke^{-jkr}}{4\pi r} (L\varphi + \eta N\theta) = j \frac{ke^{-jkr}}{4\pi r} [\sin\varphi (1 + \cos\theta) I_1 I_2]$$

$$E\varphi \approx \frac{-jke^{-jkr}}{4\pi r} (L\theta - \eta N\varphi) = j \frac{ke^{-jkr}}{4\pi r} [\cos\varphi (1 + \cos\theta) I_1 I_2]$$

که در آن  $I_1$  و  $I_2$  به صورت زیر می‌باشد [۱]:

(۳)

$$I_1 = \left( \frac{\pi R_1}{k} \right) \left\{ e^{j \left( \frac{k_y^2 R_1}{2k} \right)} ([C(t_2) - C(t_1)] - j[S(t_2) - S(t_1)]) \right\}$$

$$I_2 = \left( \frac{\pi R_2}{k} \right) \left\{ e^{j \left( \frac{k_x^2 R_2}{2k} \right)} ([C(t_2') - C(t_1')] - j[S(t_2') - S(t_1')]) \right. \\ \left. + e^{j \left( \frac{k_x^2 R_2}{2k} \right)} ([C(t_2'') - C(t_1'')] - j[S(t_2'') - S(t_1'')]) \right\}$$

و  $t_1$  و  $t_2$  از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱]:

(۴)

$$t_1 = \left( \frac{1}{\pi k R_1} \right) \left( k \frac{-b_1}{2} - k_y R_1 \right)$$

$$t_2 = \left( \frac{1}{\pi k R_1} \right) \left( k \frac{+b_1}{2} - k_y R_1 \right)$$

$$k_y = k \sin\theta \cos\varphi$$

$t_1'$ ،  $t_2'$ ،  $t_1''$  و  $t_2''$  از روابط زیر:

(۵)

کانونی متمرکز می‌گردد و به طور برعکس فرستندگی امواج کروی منتشر شده از نقطه کانونی پس از بازتاب از سطح سهموی به صورت امواج صفحه‌ای منتشر می‌شوند [۱].

در یک تعریف کلی برای مرکز فاز، در حالت فرستندگی آنتن مرکز منحنی‌های سطوح هم‌فاز مرکز فاز می‌باشد و در حالت گیرندگی مکانی که نسبت به آن فاز دریافتی آنتن هیچ‌گونه وابستگی به  $\theta$  و  $\varphi$  نداشته باشد یا به عبارت دیگر پترن فاز آنتن عدد ثابت باشد [۱] و [۴-۵].

برای آنتن‌های شیپوری که آنتن‌های جهت‌دهی می‌باشند نمی‌توان عملاً یک مرجع مختصاتی یافت که تشعشع نسبت به  $\theta$  و  $\varphi$  وابستگی نداشته باشد. به همین دلیل برای این نوع آنتن‌ها مرکز به زاویه دید وابسته می‌باشد. در عمل برای محاسبه مرکز فاز آنتن‌ها از جمله آنتن‌های شیپوری هرمی نقطه مرجع طوری در نظر گرفته می‌شود که فاز دریافتی ثابت بوده (تقریباً ثابت) یا حداقل در بازه زاویه ای لب اصلی ثابت باشد. به هر حال بعضی آنتن‌ها در بازه‌های فضایی خاصی طوری رفتار می‌کنند که دارای جبهه موج هم‌فاز می‌گردند. این آنتن‌ها اگر به عنوان تغذیه یک بازتابنده استفاده شوند، مرکز فاز آن‌ها بایستی منطبق بر کانون باشد. تغییرات محل تغذیه از نقطه کانونی منجر به کاهش محسوس بهره می‌شود [۶-۸].

با توجه به نکاتی که ذکر شد در این مطالعه برای آنتن پهن باند علاوه بر توجه به پترن دامنه در پهنای باند (۹:۱) در دو صفحه اصلی رفتار پترن فاز آنتن بررسی می‌شود. برای نشان دادن میزان تغییرات فاز به ازای زاویه مشاهده  $\theta$  در صفحات اصلی میدان الکتریکی و مغناطیسی به صورت پترن فاز حاصله به صورت پیوسته رسم شده است. در ادامه نتایج شبیه‌سازی در دو نرم افزار تجاری CST و HFSS در بازه فرکانسی ۱ الی ۹ گیگاهرتز (باند S، C و L) با ابعاد مشابه قسمت تحلیلی آورده شده است تا نتایج مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به نکات مطرحه در این مقاله می‌توان از نتایج حاصله از این مطالعه در طراحی آنتن‌های پهن باند بهره برد.

## تئوری

هر تشعشع میدان دور یک آنتن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

(۱)

$$E_a = \hat{a} E(\theta, \varphi) e^{j\psi(\theta, \varphi)} \frac{e^{-jkr}}{r}$$

شعاع باز شدگی متفاوت مورد توجه و استناد قرار گرفته شده است. برای نشان دادن رفتار پترن دامنه و فاز دو آنتن با ابعاد دهانه و شعاع باز شدگی متفاوت در نظر گرفته شده است تا مقایسه بهتری صورت گرفته شود. آنتن شیپوری هرمی شماره ۱ با ابعاد دهانه و شعاع باز شدگی در جدول ۱ و خطای فاز تریبیعی دهانه در جدول ۲ آورده شده است. همچنین آنتن شماره ۲ با ابعاد دهانه و شعاع باز شدگی در جدول ۳ و خطای فاز تریبیعی دهانه در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۳. ابعاد آنتن ۲ در بازه فرکانسی ۹:۱

Frequency	$a_1$	$b_1$	$R_1$	$R_2$
$f_1$	$0.917\lambda_{f1}$	$0.458\lambda_{f1}$	$0.33\lambda_{f1}$	$0.33\lambda_{f1}$
$f_3=3f_1$	$2.75\lambda_{f3}$	$1.375\lambda_{f3}$	$1\lambda_{f3}$	$1\lambda_{f3}$
$f_6=6f_1$	$5.5\lambda_{f6}$	$2.75\lambda_{f6}$	$2\lambda_{f6}$	$2\lambda_{f6}$
$f_9=9f_1$	$8.25\lambda_{f9}$	$4.125\lambda_{f9}$	$3\lambda_{f9}$	$3\lambda_{f9}$

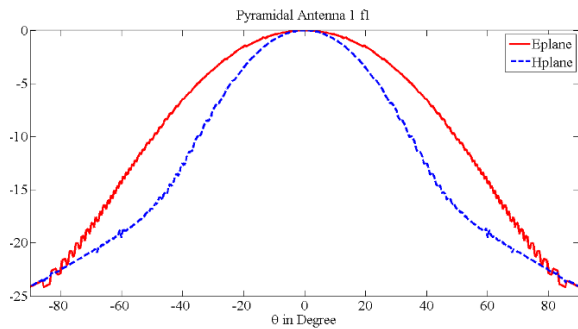
جدول ۴. میزان بیشینه خطای فاز دهانه آنتن ۲

Freq	$\Delta_{H-plane}$	$\Delta_{E-plane}$
$f_1$	0.318	0.079
$f_3$	0.945	0.23
$f_6$	1.89	0.473
$f_9$	2.83	0.71

با توجه به روابط ۱ و ۲ پترن دامنه و فاز آنتن‌های ۱ و ۲ به دست آورده شده است.

### پترن دامنه و فاز محاسبه شده آنتن‌ها

با توجه به ابعاد دهانه و ساختارهای تشعشع کننده برای مود غالب رفتار تشعشعی آنتن‌ها استخراج می‌شود و نتیجه حاصله در شکل‌های زیر نشان داده شده است.



شکل ۲. رفتار پترن دامنه آنتن ۱ در فرکانس  $f_1$

$$t_1' = \left( \sqrt{\frac{1}{\pi k R_2}} \right) \left( k \frac{-a_1}{2} - k_x' R_2 \right)$$

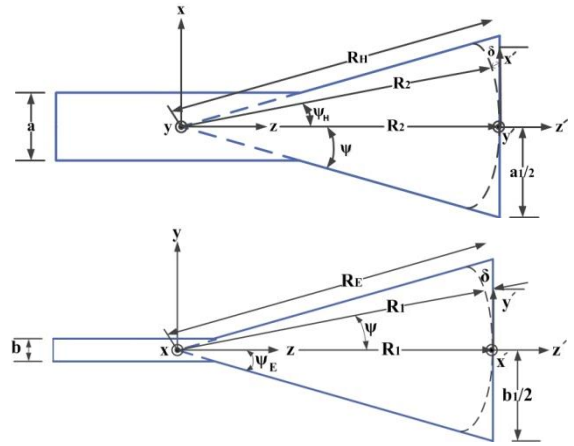
$$= \left( \sqrt{\frac{1}{\pi k R_2}} \right) \left( k \frac{a_1}{2} - k_x' R_2 \right)$$

$$k_x' = k \sin \theta \cos \varphi + \frac{\pi}{a_1}$$

$$t_1'' = \left( \sqrt{\frac{1}{\pi k R_2}} \right) \left( k \frac{-a_1}{2} - k_x'' R_2 \right)$$

$$t_2'' = \left( \sqrt{\frac{1}{\pi k R_2}} \right) \left( k \frac{a_1}{2} - k_x'' R_2 \right)$$

$$k_x'' = k \sin \theta \cos \varphi - \frac{\pi}{a_1}$$



شکل ۱. نمای آنتن در صفحه میدان مغناطیسی (بالا) و میدان الکتریکی (پایین)

با توجه به شکل ۱، برای محاسبه خطای فاز تریبیعی برای صفحه میدان الکتریکی می‌توان به رابطه تقریبی زیر اشاره کرد [۱]:

(۶)

$$\Delta_{E-plane} = \delta(y') / \lambda = \frac{1}{2\lambda} \left( \frac{y'}{R_1} \right)^2$$

و برای صفحه میدان مغناطیسی می‌توان بجای  $y'$  از  $x'$  و بجای  $R_1$  از  $R_2$  استفاده نمود. در اینجا طرح آنتن‌های ۱ و ۲ در جداول زیر معرفی می‌شود.

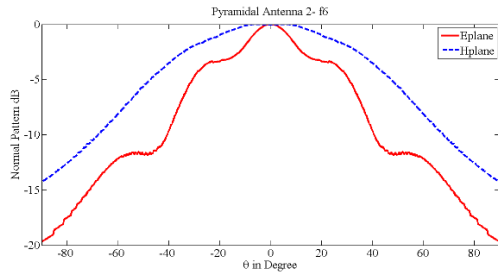
جدول ۱. ابعاد آنتن ۱ در بازه فرکانسی ۹:۱

Frequency	$a_1$	$b_1$	$R_1$	$R_2$
$f_1$	$1.84\lambda_{f1}$	$0.917\lambda_{f1}$	$2\lambda_{f1}$	$2\lambda_{f1}$
$f_3=3f_1$	$5.5\lambda_{f3}$	$2.75\lambda_{f3}$	$6\lambda_{f3}$	$6\lambda_{f3}$
$f_6=6f_1$	$11\lambda_{f6}$	$5.5\lambda_{f6}$	$12\lambda_{f6}$	$12\lambda_{f6}$
$f_9=9f_1$	$16.5\lambda_{f9}$	$8.25\lambda_{f9}$	$18\lambda_{f9}$	$18\lambda_{f9}$

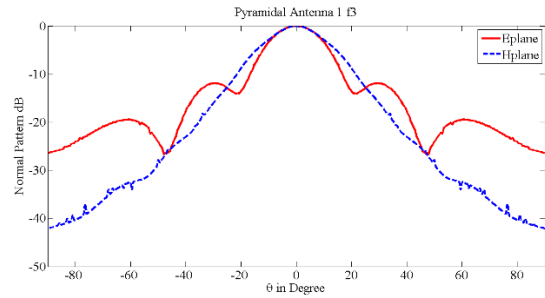
جدول ۲. میزان بیشینه خطای فاز دهانه آنتن ۱

Freq	$\Delta_{H-plane}$	$\Delta_{E-plane}$
$f_1$	0.21	0.052
$f_3$	0.63	0.157
$f_6$	1.26	0.315
$f_9$	1.89	0.473

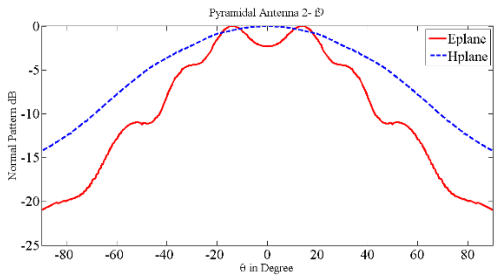
جهت بررسی ابعاد آنتن به ویژه توزیع فاز بر روی دهانه، بر روی رفتار پترن دامنه و فاز آنتن در اینجا دو آنتن با ابعاد دهانه و



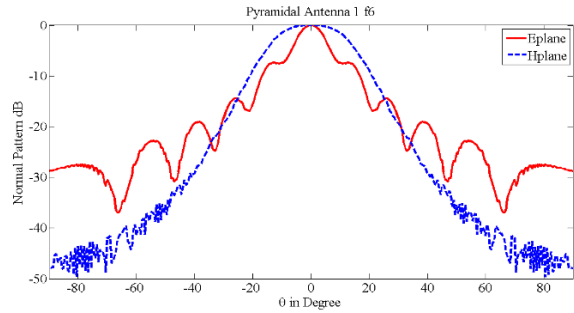
شکل ۸. رفتار پترن دامنه آنتن ۲ در فرکانس  $f_6$



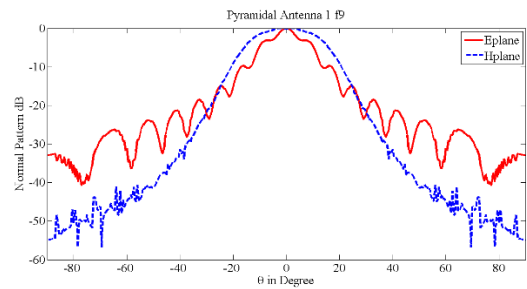
شکل ۳. رفتار پترن دامنه آنتن ۱ در فرکانس  $f_3$



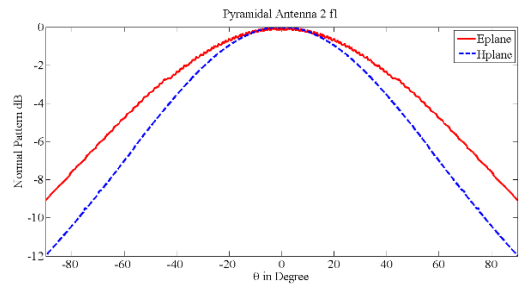
شکل ۹. رفتار پترن دامنه آنتن ۲ در فرکانس  $f_9$



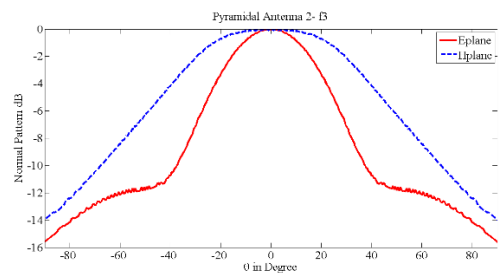
شکل ۴. رفتار پترن دامنه آنتن ۱ در فرکانس  $f_6$



شکل ۵. رفتار پترن دامنه آنتن ۱ در فرکانس  $f_9$



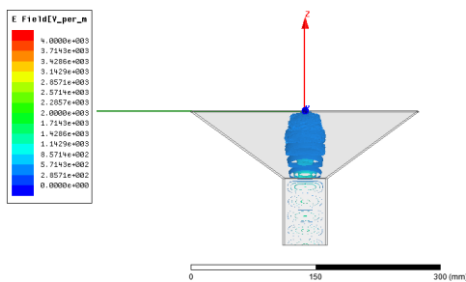
شکل ۶. رفتار پترن دامنه آنتن ۲ در فرکانس  $f_1$



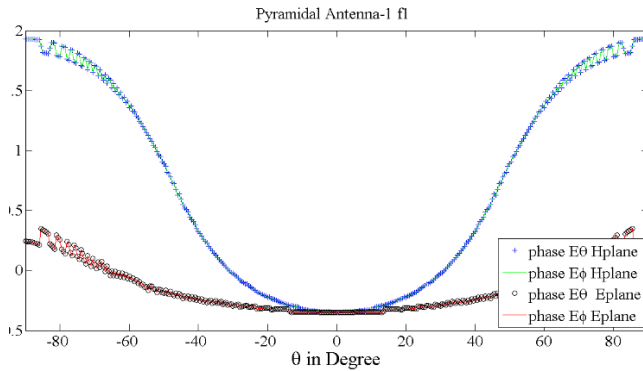
شکل ۷. رفتار پترن دامنه آنتن ۲ در فرکانس  $f_3$

در هر دو آنتن در ابتدای باند (فرکانس  $f_1$ ) پهنای باند ۳ سی‌بلی صفحه میدان الکتریکی بزرگتر از پهنای باند مذکور در صفحه میدان مغناطیسی می‌باشد. از آنجا که طول دهانه نیز در صفحه میدان الکتریکی کمتر از صفحه مغناطیسی است این رفتار قابل انتظار است اما با افزایش فرکانس این روند تغییر می‌نماید. توزیع میدان در دهانه آنتن در مود غالب  $TE_{10}$  در راستای صفحه میدان الکتریکی از صفحه میدان مغناطیسی بیشتر است، در فرکانس‌های بالاتر، با آنکه بعد در راستای صفحه میدان الکتریکی از بعد در راستای میدان مغناطیسی کمتر است، پترن دامنه صفحه میدان الکتریکی باریک‌تر از صفحه مغناطیسی می‌گردد.

در شکل‌های ۱۰ توزیع میدان الکتریکی در دو صفحه میدان الکتریکی و مغناطیسی آنتن شماره ۲ در فرکانس ۹ گیگاهرتز که در نرم افزار HFSS شبیه‌سازی شده است، نشان داده است. در ادامه بیشتر در رابطه با شبیه سازی آنتن‌ها صحبت شده است.

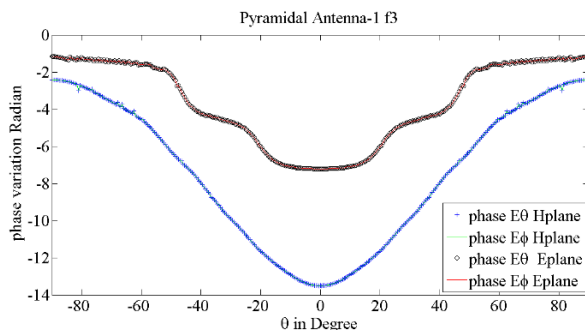


می‌یابد. اما علت آنکه اثر تخریبی خطای فاز تربیعی در صفحه میدان الکتریکی نسبت به میدان مغناطیسی محسوس تر است، به همان تمرکز شدت میدان الکتریکی در راستای صفحه میدان مغناطیسی ربط دارد (میزان خطای فاز تربیعی موثر در صفحه میدان مغناطیسی کمتر از بیشینه خطای فاز تربیعی است).

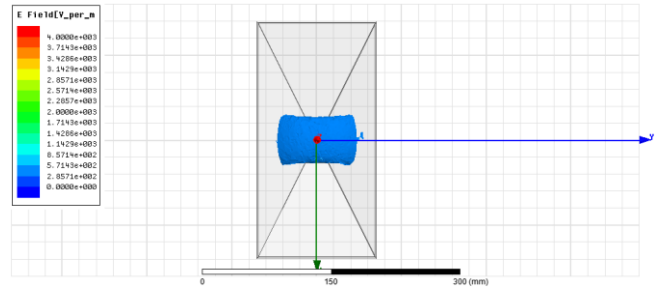


شکل ۱۲. رفتار فاز آنتن ۱ در فرکانس  $f_1$

در شکل ۱۲ الی ۱۵ به رفتار پترن فازی پیوسته آنتن ۱ پرداخته شده است. همانطور که مشهود است در فرکانس ابتدایی تغییرات پترن برای صفحه میدان الکتریکی کمتر از یک رادیان و برای صفحه میدان مغناطیسی هم کمتر از ۳ رادیان است. برای فرکانس  $f_3$  تغییرات پترن فاز صفحه میدان مغناطیسی کمتر از ۱۲ رادیان و برای میدان الکتریکی حدود ۶ رادیان است. برای فرکانس  $f_6$  تغییرات مذکور برای صفحه مغناطیسی ۲۵ رادیان و صفحه الکتریکی ۱۲ رادیان می‌گردد. در فرکانس  $f_9$  هم تغییرات پترن فاز برای صفحات میدان الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب ۴۰ و ۲۰ رادیان است.

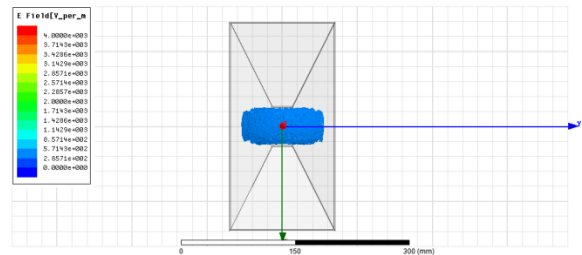


شکل ۱۳. رفتار فاز آنتن ۱ در فرکانس  $f_3$

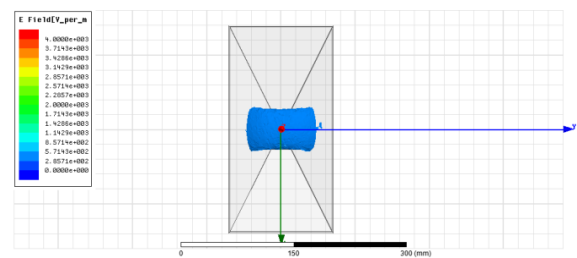


شکل ۱۰. توزیع میدان الکتریکی مود غالب در دو صفحه میدان الکتریکی و مغناطیسی

با افزایش فرکانس، همانطور که ذکر شد، ابعاد آنتن (دهانه) نسبت به طول موج بزرگتر می‌شود. از آنجا که تمرکز میدان در صفحه مغناطیسی فقط در مرکز دهانه است، با افزایش فرکانس (نسبت ابعاد بطول موج) میدان در صفحه مغناطیسی در کسری کوچکتر نسبت به صفحه الکتریکی متمرکز است و این موضوع در فرکانس‌های بالاتر آشکار می‌گردد، رفتار آنتن در فرکانس‌های بالاتر به همین دلیل شبیه رفتار آنتن قطاعی صفحه میدان الکتریکی می‌گردد.



شکل ۱۱. الف. توزیع میدان در دهانه آنتن ۲ در فرکانس ۹ گیگاهرتز

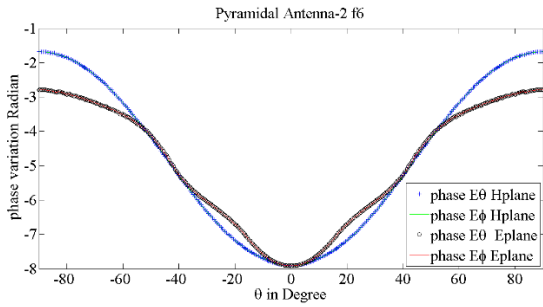


شکل ۱۱. ب. توزیع میدان در دهانه آنتن ۲ در فرکانس ۶ گیگاهرتز

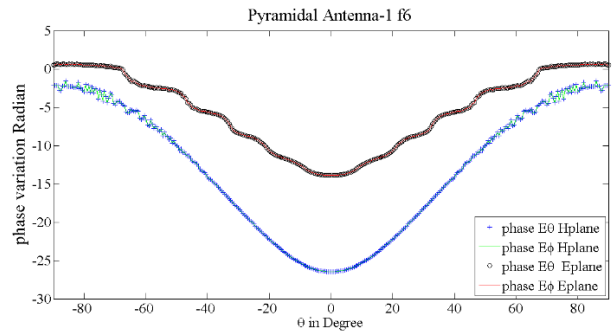
با افزایش فرکانس میزان گلبرگ جانبی آنتن‌ها در صفحه میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد. در آنتن دوم در انتهای باند (فرکانس  $f_9$ ) تشعشع دو شاخه شده و در محور اصلی آنتن یک صفر<sup>۵</sup> به وجود می‌آید. همانطور که در جداول ۲ و ۴ نشان داده شده است، با افزایش فرکانس میزان خطای فاز افزایش

۵ null

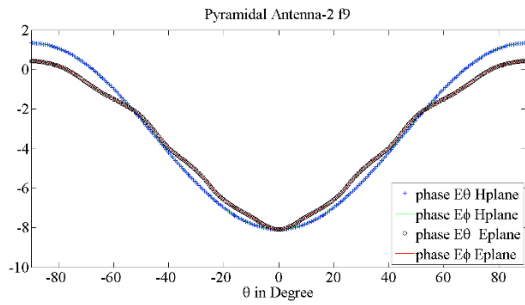
۶ Side lobe level  
۷ Bore sight



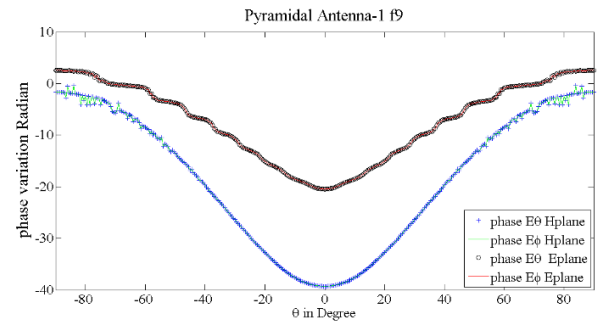
شکل ۱۸. رفتار فاز آنتن ۲ در فرکانس  $f_6$



شکل ۱۴. رفتار فاز آنتن ۱ در فرکانس  $f_6$



شکل ۱۹. رفتار فاز آنتن ۲ در فرکانس  $f_9$

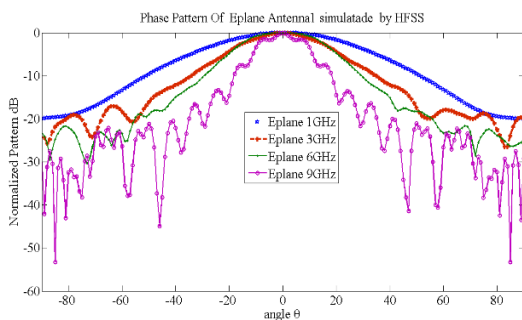


شکل ۱۵. رفتار فاز آنتن ۱ در فرکانس  $f_9$

برای آنتن دوم تغییرات پترن فاز در صفحه میدان مغناطیسی کمی بیشتر از تغییرات پترن فاز در میدان الکتریکی است. نکته شایان ذکر دیگر اینکه، با افزایش فرکانس در هر دو صفحه تغییرات پترن فاز افزایش می‌یابد.

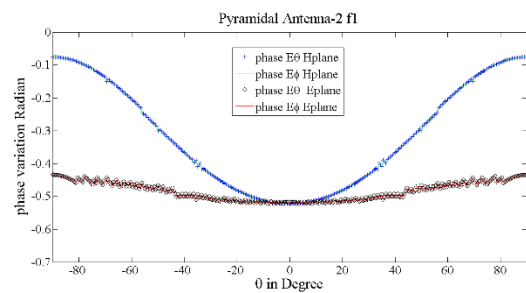
### شبیه سازی

در این قسمت برای آنکه نتیجه حاصل از بررسی پترن آنتن‌های مذکور را اثبات نماییم نتایج حاصله از شبیه‌سازی آنتن‌های مذکور در دو نرم افزار تجاری CST و HFSS ارائه می‌شود.

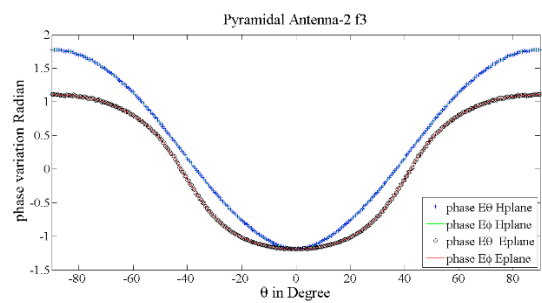


شکل ۲۰. رفتار پترن دامنه آنتن ۱ صفحه الکتریکی شبیه‌سازی شده در HFSS. آنتن ۱ با ابعاد دهانه ۵۵ سانتی‌متر در  $27/5$  سانتی‌متر با زاویه باز شدگی صفحه مغناطیسی و الکتریکی به ترتیب  $9/12^\circ$  و  $6/24^\circ$  در نرم افزارهای HFSS و CST شبیه‌سازی شده‌اند. ابعاد دهانه و

برای آنتن دوم رفتار پترن فاز پیوسته در شکل‌های ۱۶ الی ۱۹ رسم شده است. تغییرات پترن فاز در صفحات میدان الکتریکی در فرکانس‌های  $f_1, f_3, f_6, f_9$  به ترتیب کمتر از یک دهم رادیان، ۲، ۵ و ۸ رادیان است. برای صفحه میدان مغناطیسی نیز به ترتیب برای فرکانس‌های فوق‌الذکر کمتر از نیم رادیان، ۳، ۶ و ۱۰ رادیان است.

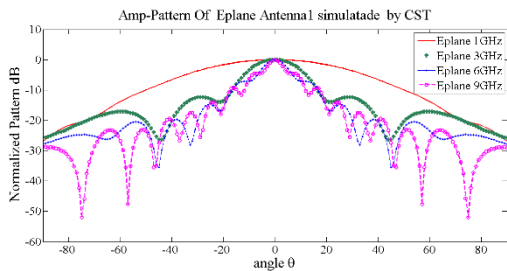


شکل ۱۶. رفتار فاز آنتن ۲ در فرکانس  $f_1$

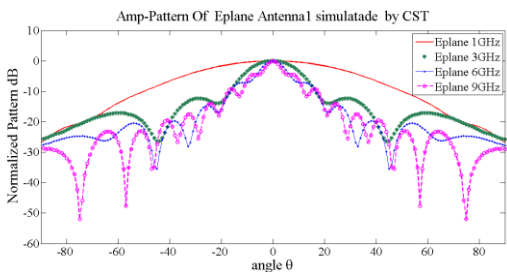


شکل ۱۷. رفتار فاز آنتن ۲ در فرکانس  $f_3$

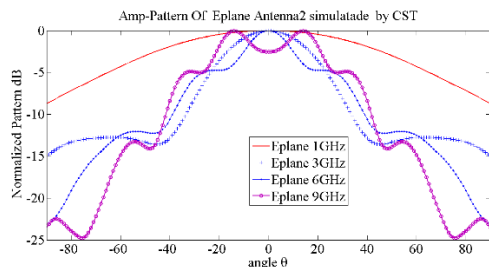
در شکل‌های ۲۴ الی ۲۷ نیز شبیه‌سازی رفتار آنتن ۲ و مجدداً در نرم افزار CST آورده شده است. همانطور که در قسمت قبل ذکر شد با افزایش فرکانس پهنای باند پترن دامنه میدان الکتریکی کاهش می‌یابد. و در آنتن ۲ در انتهای باند پترن صفحه میدان الکتریکی دو شاخه (دچار تخریب) می‌گردد.



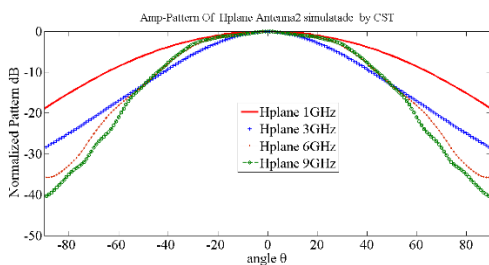
شکل ۲۴. رفتار پترن دامنه آنتن ۱ صفحه الکتریکی شبیه‌سازی شده در CST



شکل ۲۵. رفتار پترن دامنه آنتن ۱ صفحه مغناطیسی شبیه‌سازی شده در CST



شکل ۲۶. رفتار پترن دامنه آنتن ۲ صفحه الکتریکی شبیه‌سازی شده در CST

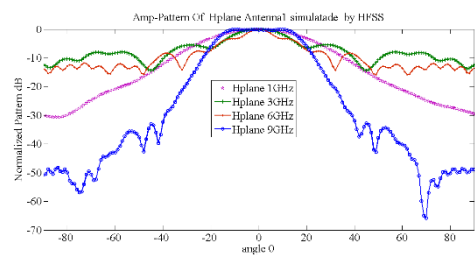


شکل ۲۷. رفتار پترن دامنه آنتن ۲ صفحه مغناطیسی شبیه‌سازی شده در CST

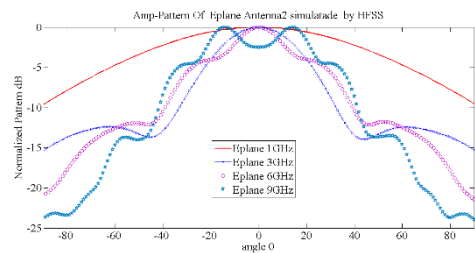
در ادامه نتایج شبیه‌سازی فازی آنتن آورده شده است همانطور که اشاره شد، برای درک بهتر تغییرات فاز دریافتی آنتن به ازای زاویه مشاهده پترن فاز به صورت پیوسته مانند قسمت قبل رسم شده است. جهت محاسبه مرکز فاز مرکز محور مختصات به عنوان

زاویه بازشدگی طوری در نظر گرفته شده است تا مشابه تحلیل آنتن ۱ گردد.

در شکل ۲۰ و ۲۱ نتایج شبیه‌سازی رفتار پترن دامنه نرمالیزه شده آنتن ۱ به ازای فرکانس‌های ۱، ۳، ۶ و ۹ گیگاهرتز آورده شده است. این شبیه‌سازی صحت تحلیل رفتار پترن دامنه آنتن ۱ قسمت قبل را در فرکانس  $f_1, f_3, f_6, f_9$  را می‌نماید.



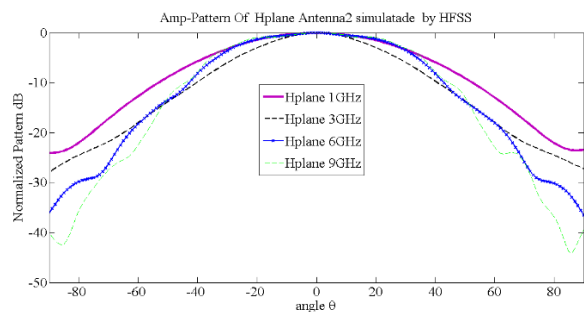
شکل ۲۱. رفتار پترن دامنه آنتن ۱ صفحه مغناطیسی شبیه‌سازی شده در HFSS



شکل ۲۲. رفتار پترن دامنه آنتن ۲ صفحه الکتریکی شبیه‌سازی شده در HFSS

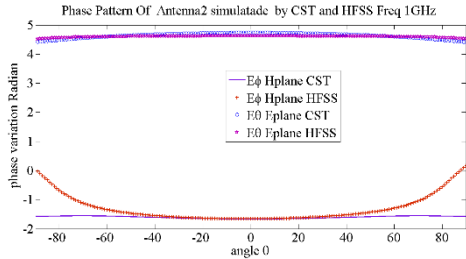
به طور مشابه برای آنتن ۲ نیز شبیه‌سازی صورت گرفته شده است. آنتن ۲ با ابعاد دهانه  $27/5$  سانتی‌متر در  $13/75$  سانتی‌متر با زاویه بازشدگی صفحه مغناطیسی و الکتریکی به ترتیب  $34.5^\circ$  و  $53.9^\circ$  در نرم افزارهای HFSS و CST مورد شبیه‌سازی قرار گرفته شده است. ابعاد دهانه و زاویه بازشدگی طوری در نظر گرفته شده است تا مشابه تحلیل آنتن ۲ گردد.

در شکل ۲۳ و ۲۴ نتایج شبیه‌سازی رفتار پترن دامنه نرمالیزه شده آنتن ۲ به ازای فرکانس‌های ۱، ۳، ۶ و ۹ گیگاهرتز آورده شده است. این شبیه‌سازی نیز صحت تحلیل رفتار پترن دامنه آنتن ۲ قسمت قبل را در فرکانس  $f_1, f_3, f_6, f_9$  را نشان می‌دهد.

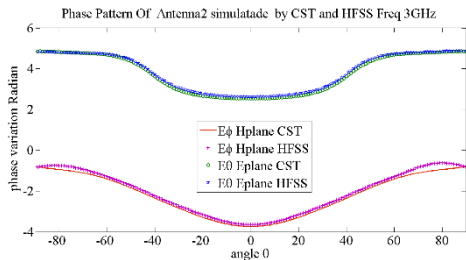


شکل ۲۳. رفتار پترن دامنه آنتن ۲ صفحه مغناطیسی شبیه‌سازی شده در HFSS

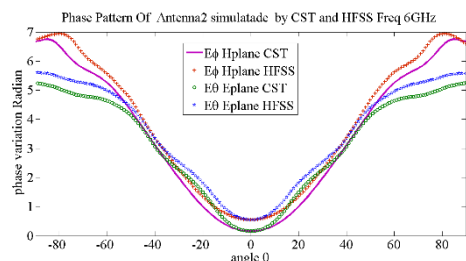
الکتریکی کمتر از یک، ۱۰، ۲۶ و ۴۰ رادیان و در صفحه مغناطیسی نیز کمتر از یک، ۵، ۱۰ و ۱۵ رادیان است. مشابهت نتایج شبیه‌سازی برای دو نرم افزار مشخص است. این ارقام تقریباً مشابه نتایج تحلیلی قسمت قبل است.



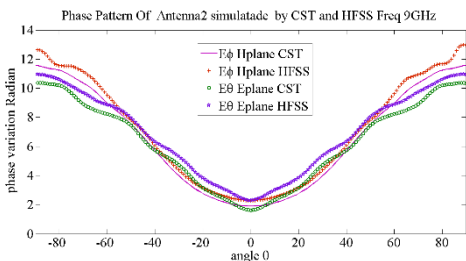
شکل ۳۲. رفتار پترن فاز آنتن ۲ در دو نرم افزار CST و HFSS در فرکانس ۱ گیگاهرتز (f<sub>1</sub>)



شکل ۳۳. رفتار پترن فاز آنتن ۲ در دو نرم افزار CST و HFSS در فرکانس ۳ گیگاهرتز (f<sub>3</sub>)



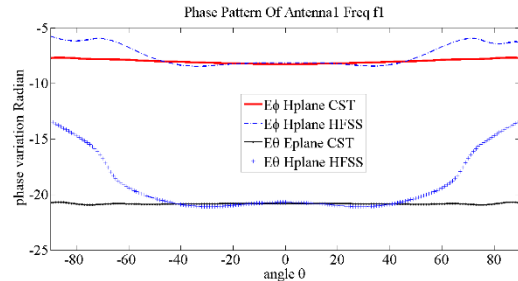
شکل ۳۴. رفتار پترن فاز آنتن ۲ در دو نرم افزار CST و HFSS در فرکانس ۶ گیگاهرتز (f<sub>6</sub>)



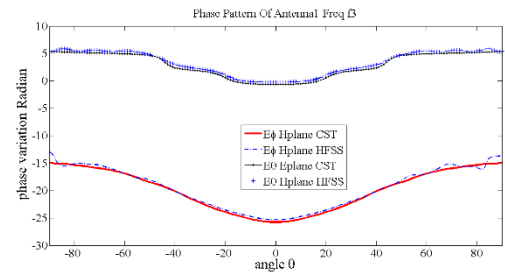
شکل ۳۵. رفتار پترن فاز آنتن ۲ در دو نرم افزار CST و HFSS در فرکانس ۹ گیگاهرتز (f<sub>9</sub>)

با بررسی اشکال ۳۲ الی ۳۵ مشاهده می‌شود که رفتار فازی آنتن در دو صفحه الکتریکی و مغناطیسی دارای مشابهت به یکدیگر می‌باشند. اگر چه در صفحه میدان مغناطیسی تغییرات پترن فاز

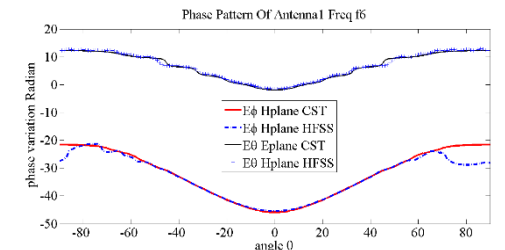
مرجع در نظر گرفته شده است و دهانه آنتن‌ها بر روی صفحه XY قرار داده شده اند و مرکز مستطیل دهانه بر مرکز مختصات انطباق داده شده است. جهت انتشار در جهت مثبت Z می‌باشد.



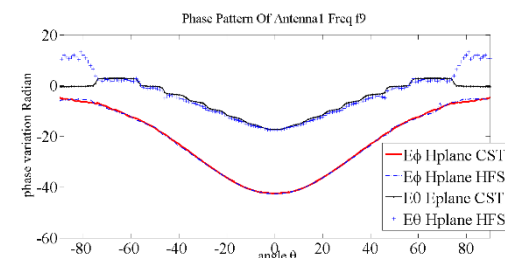
شکل ۲۸. رفتار پترن فاز آنتن ۱ در دو نرم افزار CST و HFSS در فرکانس ۱ گیگاهرتز (f<sub>1</sub>)



شکل ۲۹. رفتار پترن فاز آنتن ۱ در دو نرم افزار CST و HFSS در فرکانس ۳ گیگاهرتز (f<sub>3</sub>)



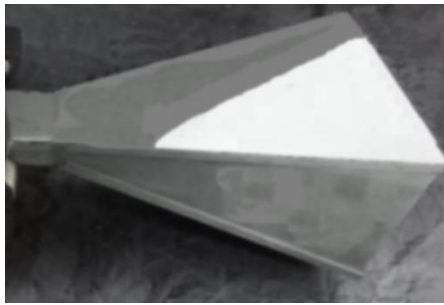
شکل ۳۰. رفتار پترن فاز آنتن ۱ در دو نرم افزار CST و HFSS در فرکانس ۶ گیگاهرتز (f<sub>6</sub>)



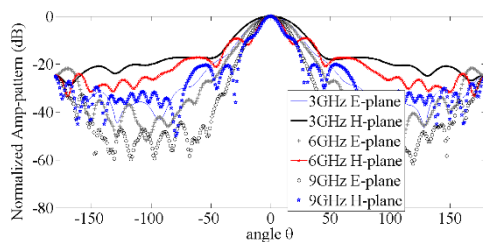
شکل ۳۱. رفتار پترن فاز آنتن ۱ در دو نرم افزار CST و HFSS در فرکانس ۹ گیگاهرتز (f<sub>9</sub>)

شبیه سازی رفتار پترن فاز آنتن ۱ در شکل‌های ۲۸ الی ۳۱ نشان داده شده است. همانطور که مشهود است تغییرات فاز از ابتدای باند در فرکانس‌های ۱، ۳، ۶ و ۹ گیگاهرتز به ترتیب در صفحه

با افزایش فرکانس پهنای بیم پترن دامنه هر دو صفحه کاهش می‌یابد. نسبت تغییرات عرض پترن دامنه صفحه میدان الکتریکی به صفحه میدان مغناطیسی بیشتر است و در فرکانس‌های انتهایی پهنای بیم صفحه میدان الکتریکی باریکتر از پهنای بیم صفحه میدان مغناطیسی می‌شود. نتایج حاصله تطبیق قابل قبولی با اشکال ۳ الی ۵ و شبیه سازی‌ها دارد.



شکل ۳۶. نمای آنتن ۱ مورد اندازه گیری



شکل ۳۷. نتایج تست پترن دامنه آنتن ۱ برای دو صفحه میدان الکتریکی و مغناطیسی

## نتایج

رفتار دو آنتن هرمی با ابعاد دهانه و زاویه بازشدگی متفاوت به ازای فرکانس‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته شد. علاوه بر رفتار پترن دامنه در دو صفحه میدان الکتریکی و مغناطیسی رفتار فازی آنتن‌های مذکور در بازه فرکانسی ۹:۱ بررسی شد. برای اثبات صحت نتایج تحلیلی در دو نرم افزار HFSS و CST نتایج استخراج گردید. پترن دامنه در صفحه میدان الکتریکی نسبت به تغییرات فرکانس حساس‌تر می‌باشد. و ممکن است در انتهای باند به علت تأثیر خطای فاز تربیعی و افزایش گلبرگ‌های جانبی چند شاخه گردد.

همچنین رفتار فازی آنتن‌ها نشان می‌دهد در فرکانس‌های پایین مرکز فاز بر روی دهانه آنتن منطبق است. تغییرات پترن فاز در صفحه مغناطیسی نسبت به تغییرات صفحه الکتریکی بیشتر است.

بیشتر است. برای صفحه میدان الکتریکی از ابتدای باند تا انتهای باند تغییرات فاز کمتر از نیم، ۲،۶ و ۱۰ رادیان و برای صفحه مغناطیسی نیز کمتر از نیم، ۳، ۷ و ۱۲ رادیان مشاهده می‌شود که با نتایج تحلیلی مطابقت خوبی دارد. همانطور که ذکر شد در اکثر روابط ارائه شده برای محاسبه مرکز فاز به مشتق پترن فاز نسبت به زاویه مشاهده  $\theta$  یا  $\cos\theta$  نیاز است [۴-۵] و [۱۷].

در صورتی که تغییرات پترن فاز به ازای زاویه مشاهده کم باشد می‌توان گفت مرجع محاسبه فاز منطبق بر مرکز فاز در آن صفحه است. در فرکانس‌های پایین مرکز فاز منطبق بر دهانه و بر روی محور اصلی آنتن می‌باشد. با افزایش فرکانس از آنجا که تغییرات مرکز فاز افزایش می‌یابد، مرکز فاز از دهانه فاصله گرفته و به رأس فرضی هرم نزدیک تر می‌گردد. در جداول زیر به کمک شبیه سازی صورت گرفته در نرم افزار CST می‌توان تغییرات مرکز فاز را نشان داد که ادعای فوق را اثبات می‌کند.

جدول ۵. تغییرات مرکز فاز آنتن ۱ با افزایش فرکانس از دهانه آنتن به سمت رأس فرضی آنتن تغییر می‌کند.

فرکانس	E-plane مرکز فاز (میلی متر)	H-plane مرکز فاز (میلی متر)
1GHz	-۶٫۵	-۴۷
3GHz	-۲۶۳	-۴۸۵
6GHz	-۴۵۴	-۵۷۶
9GHz	-۵۶۹	-۵۹۰

جدول ۶. تغییرات مرکز فاز آنتن ۲ با افزایش فرکانس از دهانه آنتن به سمت رأس فرضی آنتن تغییر می‌کند.

فرکانس	Eplane مرکز فاز (میلی متر)	Hplane مرکز فاز (میلی متر)
1GHz	-۷٫۷۹	-۱۳
3GHz	-۳۸	-۷۶
6GHz	-۱۵۱	-۱۰۷
9GHz	-۱۶۹	-۱۱۶

## اندازه گیری

با توجه به نتایج حاصل شده از شبیه سازی آنتن‌های ۱ و ۲ نتایج حاصل شده برای پترن آنتن ۱ در باند فرکانسی مذکور قابل قبول می‌باشد. در ادامه نتایج اندازه گیری آنتن فیزیکی با ابعاد دهانه و شعاع بازشدگی آنتن ۱ شبیه سازی شده، (شکل ۳۶) ارائه می‌شود. از شکل ۳۷ تغییرات پترن دامنه در صفحات میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی را مشاهده نمود.

- [13] M. A. Azimi, F. Arazm and R. F. Dana, "Design and optimization of a high frequency EMC wideband horn antenna", *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 1, no. 3, pp. 580-585, Jun. 2007.
- [14] K Rong, L Qiuyan and S Donglin, "Analysis for phase center of pyramidal horn antennas for out of band", 2010 9<sup>th</sup> International symposium on Antennas propagation and EM Theory (ISAPE), PP49-52 2010
- [15] P M Fernandez, J L Padilla, G E Dominguez, M Seirra-Castner and B Galocha, "Comparison Of Different Methods For The Experimental Antenna Phase Center Determination Using A Planar Acquisition System", *Progress In Electromagnetics Research* Vol.135, 331-346 2013.
- [16] S. Manshari, F. H. Kashani, GH. Moradi and M. Sarijloo, "Design and simulation of corrugated conical and pyramidal horn antenna in 6-18 GHz", Fourth Iranian National Conference on Engineering Electromagnetic, Iran (Islamic Republic of), 13 April 2016 \_ 14 April 2016
- [17] S. R. Best, "Distance-measurement Error Associated with Antenna Phase center Displacement Time reference radio positioning systems", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol.46, NO.2 April 2004.
- [18] S. Manshari, F. H. Kashani, GH. Moradi, "Mutual Coupling Reduction in CBS Antenna Arrays by Utilizing Tuned EM-EBG and Non-planar", *The Applied Computational Electromagnetics Society (ACES)*, July 2016
- [19] A. S. Arezoomand, R. A. Sadeghzadeh, and M. Naser-Moghadasi, "Novel Techniques in tapered slot antenna for linearity and gain enhancement", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Accepted 14 June 2016
- [20] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, 2012, John Wiley
- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2005, John Wiley.
- [2] Silver, *Microwave Antenna Theory and Design*. New York: McGraw-Hill, 1949.
- [3] J. Maybell and P. S. Simon, "Pyramidal Horn Gain Calculation with Improved Accuracy", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-41, pp. 884-889, July 1993.
- [4] Hu, "A method of determining phase centers and its application to electromagnetic horns", *Journal of the Franklin Institute*, p. 31-39 Jan. 1961.
- [5] E. L. Muehldorf, "The Phase Center of Horn Antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-18, no. 6, pp. 753-760, November 1970.
- [6] P.-S. Kildal, "Combined E-and H-Plane Phase Centers Of Antenna Feeds", *IEEE Trans.* No.1: p. 199-302, Jan. 1983. AP. Vol. Ap-31.
- [7] Rush and Potter, *Analysis Of Reflector Antennas*, in New York, Academic. 1791
- [8] L. Shafai and K. Rao, "Phase Center Calculation Of Reflector Antenna Feeds", *IEEE Trans. AP*, Vol AP-32, p. 740-742, No.7, 1984.
- [9] H. Ujiie, T. Yoneyama and S. Nishida, "A Consideration of the Phase Center of Aperture Antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-15, no. 3, pp. 478-480, May 1967.
- [10] E. R. Nagelburg, "Fresnel Region Phase Centers of Circular Aperture Antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-13, no. 3, pp. 479-481, May 1965.
- [11] D. Carter, "Phase Centers Of Microwave Antennas", *IRE Trans. AP*, p. 597-600, Oct 1956.
- [12] C. Bruns, P. Leuchtmann and R. Vahldieck, "Analysis and Simulation of a 1-18-GHz Broadband Double-Ridged Horn Antenna", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 45, pp. 55-60, February 2003.