

طراحی، شبیه‌سازی و ساخت آنتن نمونه‌بردار پهن باند با قطبش دوگانه

عاطفه خیری^۱، سید حسین محسنی ارمکی^{۲*}، رضا ترینیا^۳

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استاد، ۳- پژوهشگر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۲، انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1403.15.2.4.3>

چکیده

در این مقاله، بر اساس اصول و مطالعات نظریه حاکم بر آنتن‌های نمونه‌بردار برای اندازه‌گیری میدان نزدیک، یک نمونه آنتن نمونه‌بردار پهن باند با قطبش دوگانه طراحی و ساخته شده است. طراحی آنتن نمونه‌بردار به این صورت است که ابتدا یک ترکیب‌کننده توان جهت خنثی نمودن مد TEM در ساختار آنتن قرار داده شده است که دارای اختلاف فاز صفر و ۱۸۰ درجه بین دو درگاه خروجی است. سپس، تأثیر حضور بارهای تطبیق و خم‌های جانبی در آنتن نمونه‌بردار مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. در نهایت استفاده از خم‌های جانبی به علت وجود تقسیم‌کننده توان موجب شده است که موج دوبار تشعشع کند، یکبار در پرتو اصلی و بار دیگر در گلب‌های فرعی که باعث افزایش بهره، سطح گلب‌های فرعی و قطبش متعامد در آنتن نمونه‌بردار شده است. آنتن نمونه‌بردار برگزیده شده جهت ساخت در باند فرکانسی X، با استفاده از دو آداپتور موج‌بری که برای ایجاد اختلاف فاز ۱۸۰ درجه نسبت به هم در جهت معکوس نصب شده‌اند، ساخته شده است. آنتن ساخته شده دارای دو قطبش عمود بر هم خطی است. نتایج حاکی از آن است که میزان سطح قطبش متعامد کم و تلفات بازگشتی زیر ۱۰dB- برای هر درگاه است.

کلیدواژه‌ها: میدان نزدیک، آنتن پهن باند، آنتن نمونه‌بردار با قطبش دوگانه، اندازه‌گیری آنتن

Designing, Simulation and Fabrication of a Wideband Sampling Antenna with Dual Polarization

A. Kheiri, S. H. Mohseni Armaki*, R. Toreinia

Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 2024/05/05, Revised: 2024/07/06, Accepted: 2024/08/02, Published: 2024/08/22)

Abstract

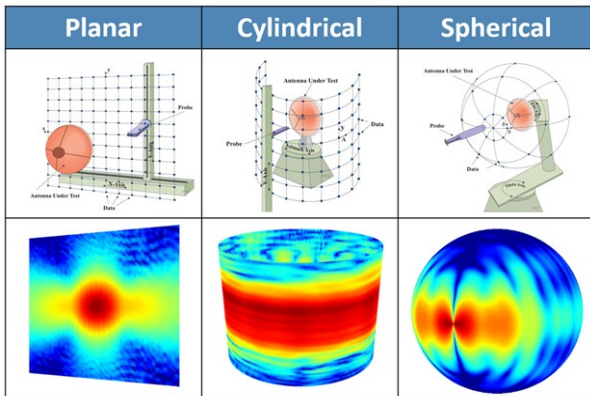
In this article, based on the principles and theoretical studies governing sampling antennas for near field measurement, a dual polarization broad band sampling antenna has been designed, simulated and fabricated. The sampling antenna design is such that first a power combiner has been designed to neutralize the TEM mode by defining a phase difference of zero and 180 degrees between two input ports. Then, the effect of the presence of matching loads and side bends in the sampling antenna has been evaluated. Finally, the use of side bends due to the presence of the power divider has caused the wave to radiate twice, once in the main lobe and once in the sidelobes which it has increased the gain, sidelobe level and cross polarization in the sampling antenna. The sampling antenna chosen has been fabricated in the X frequency band by placing two waveguide adapters in the reverse direction with each other to create a 180 degree phase difference. The fabricated antenna has two orthogonal linear polarizations. The results indicate that the cross polarization level is low and the return loss is below -10 dB for each port.

Keywords: Near-Field, Wide-Band Antenna, Sampling Antenna with Dual-Polarization, Antenna Measurement.

*Corresponding Author E-mail: mohseni@mut.ac.ir

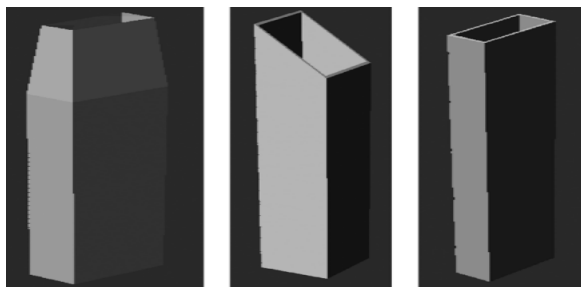
۱. مقدمه

جهت آنتن نمونه‌بردار باید به گونه‌ای انتخاب شود که، در میدان دید از صفر شدن یا سطوح پایین میدان جلوگیری کند [۷].



شکل ۱. روش‌های اندازه‌گیری میدان نزدیک [۸]

یک آنتن نمونه‌بردار بهینه دارای یک الگوی ثابت در جهت آنتن آزمایشی و یک الگو صفر در خارج است. زیرا صفرهای الگوی تابشی آنتن نمونه‌بردار، باعث می‌شوند که آنتن نمونه‌بردار در آن زاویه حساسیت نداشته باشد و سیگنالی دریافت نکند و یا به اصطلاح نقطه کور آن محسوب می‌شوند. در این حالت الگوی تابشی آنتن نمونه‌بردار مستعد دریافت نویز است [۹]. باین‌حال، برای شکل‌دادن الگوی تابشی به یک آنتن نمونه‌بردار بزرگ نیاز است که باعث ایجاد سطح بالایی از بازتاب‌های متعدد بین آنتن نمونه‌بردار و آنتن آزمایشی شود. [۱۰]. مدل هندسی اولین آنتن نمونه‌بردار در شکل (۲) نشان داده شده است. اشکال اصلی این آنتن‌ها خلوص قطبش ضعیف در طول سه برش اصلی است. [۱۱].



شکل ۲. مدل‌های هندسی اولین آنتن‌های نمونه‌بردار طراحی شده [۱۱]

هدف از این پژوهش طراحی و شبیه‌سازی و ساخت آنتن نمونه‌بردار پهن باند با قطبش دوگانه، جهت اندازه‌گیری میدان نزدیک آنتن می‌باشد که در آزمایشگاه آنتن دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر انجام شده است. ویژگی آنتن طراحی شده از جمله حضور ترکیب‌کننده توان در ساختار آنتن نمونه‌بردار است که برای خنثی نمودن مد TEM با تعریف اختلاف‌فاز صفر و ۱۸۰ درجه استفاده شده است. در نهایت استفاده از خم‌های موج‌بری و بارهای تطبیق در ساختار آنتن نمونه‌بردار که هر یک تاثیر بسزایی در نتایج الگوی تابشی آنتن و قطبش متعامد آنتن دارد. الگوی تابشی آنتن

زمینه‌های کاربردی استفاده از آنتن‌ها در همه صنایع اعم از نظامی یا غیرنظامی گسترش یافته است [۱]. به لطف پیشرفت‌های مختلف انواع فناوری‌ها، پیشرفت آنتن‌ها به سرعت رشد پیدا کرده است و برای اطمینان از استفاده بدون خطر آنتن و همچنین رعایت هنجارهای سازگاری الکترومغناطیسی بین‌المللی (EMC)، شناخت دقیق میدان الکترومغناطیسی آنتن بسیار مهم است [۲-۳]. به طور کلی الگوی تابشی آنتن، به دو روش میدان نزدیک و میدان دور اندازه گرفته می‌شود. برای انتخاب هر کدام از این دو روش در یک کاربرد خاص، ملاحظات متفاوتی وجود دارد. اما در حالت کلی می‌توان گفت که روش میدان دور برای کاربردهای فرکانس پایین وقتی که الگوی تابشی در صفحات ساده، و روش میدان نزدیک برای کاربردهای فرکانس بالا وقتی الگوی تابشی کامل و قطبش مورد نظر است، مناسب هستند [۴].

از سوی دیگر، استفاده روزافزون از آنتن‌های با کارایی بالا به‌عنوان آنتن‌هایی که در سیستم‌های راداری و ماهواره‌ای به کار می‌روند، نیازمند اندازه‌گیری دقیق ویژگی‌های تابشی آنتن‌ها است. بنابراین دقت اندازه‌گیری بالا برای تأیید اینکه، آنتن تمام مشخصات را برآورده می‌کند، الزامی است. یکی از روش‌های اندازه‌گیری آنتن که از سال ۱۹۵۰ مورد توجه قرار گرفته است، اندازه‌گیری به روش میدان نزدیک است [۳]. اندازه‌گیری‌های میدان نزدیک ممکن است در یک محیط کنترل شده به فرد اجازه دهد بر معایی که به دلیل شرایط آب‌وهوایی یا تداخل الکترومغناطیسی و یا موارد دیگر که نمی‌توان آن‌ها را برطرف نمود، غلبه کرد. علاوه بر این، استفاده از جاروبرگرهای میدان نزدیک زمانی که الگوی تابشی کامل و اندازه‌گیری قطبش مورد نیاز است انتخاب بهتری می‌باشد تا اطلاعات لازم را برای تعیین میدان در سطح آنتن ارائه دهد [۵]. اندازه‌گیری‌های میدان نزدیک به سه روش مسطح، استوانه‌ای، کروی انجام می‌شود که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند (شکل ۱). همچنین استفاده از روش اندازه‌گیری میدان نزدیک مبتنی بر استفاده از آنتن نمونه‌برداری است که میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی یا ترکیبی از هر دو را در یک نقطه ثابت از فضا جمع‌آوری کند [۶]. آنتن نمونه‌بردار و آنتن آزمایشی (AUT) با استفاده از یک سیستم مختصات مرجع تعبیه شده طوری جهت‌گیری می‌شوند که به راحتی با مکانیسم جاروبرگرها تراز شوند. اغلب آنتن‌های نمونه‌بردار طوری طراحی می‌شوند، که یک سیستم مختصات را تعریف کنند و سیستم مختصات تعریف شده معمولاً موازی با روزه آنتن نمونه‌بردار انتخاب می‌شود. سیستم مختصات آنتن نمونه‌بردار مکان ریاضی و فیزیکی آنتن نمونه‌بردار را مشخص می‌کند. باید توجه کرد که در هر پیکربندی اندازه‌گیری میدان نزدیک (مسطح، کروی، صفحه‌ای)،

می‌دهد (شکل ۴). نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد که تقارن الگو در همه فرکانس‌ها بسیار خوب است، اما سطوح قطبش متعامد روی محور بالاتر از حد انتظار است [۱۵].

طرح‌های کلی آنتن‌های نمونه‌بردار اغلب از نظر پهنای باند محدود هستند و اندازه الکتریکی بزرگ آن‌ها منجر به پراکندگی زیاد در اندازه‌گیری‌های میدان نزدیک مسطح می‌شود. برای به حداقل رساندن پراکندگی توسط یک روزنه کوچک الکتریکی و متقارن محوری با قطر 0.4λ در کمترین باند فرکانسی استفاده شده است [۱۶]. روزنه یک جهت‌دهی تقریباً ثابت و قطبش متعامد بسیار کمی را فراهم می‌کند. این آنتن نمونه‌بردار نیز توسط حالت اتصال (OMJ) تغذیه می‌شود تا خلوص قطبش بالا به دست آید (شکل ۵).

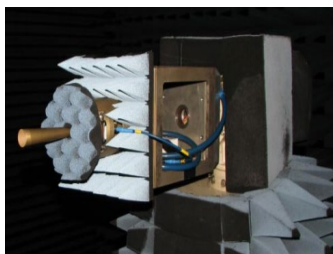


(ب)

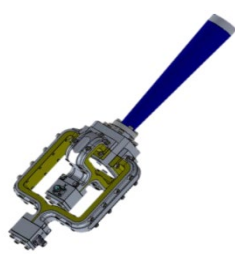


(الف)

شکل ۳. الف) آنتن نمونه‌بردار با قطبش خطی دوگانه در پهنای باند فرکانس ۵/۱۸-۸GHz [۱۳] ب) آنتن‌های نمونه‌بردار با قطبش دوگانه ساخته شده در چند باند فرکانس [۱۴]

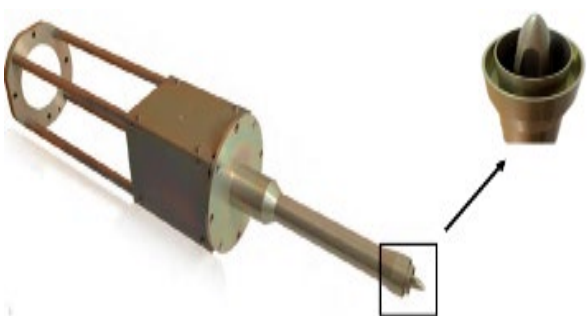


(ب)



(الف)

شکل ۴. الف) ساختار کلی آنتن نمونه‌بردار با قطبش دوگانه (ب) تنظیم تست در میدان نزدیک کروی DTU [۱۵]



شکل ۵. آنتن نمونه بردار با حداقل پراکندگی با قطبش دوگانه برای اندازه‌گیری میدان نزدیک مسطح [۱۶]

در کل باند فرکانسی دارای یک گلبرگ اصلی است. همچنین آنتن ساخته شده می‌تواند به‌عنوان یک آنتن نمونه‌بردار، در باند X مورد استفاده قرار گیرد. البته سایر امکانات مورد نیاز برای پیاده‌سازی کل سامانه میدان نزدیک فراهم نیست. لازم به ذکر هست تمام مراحل شبیه‌سازی در نرم افزار CST MICROWAVE STUDIO انجام شده است.

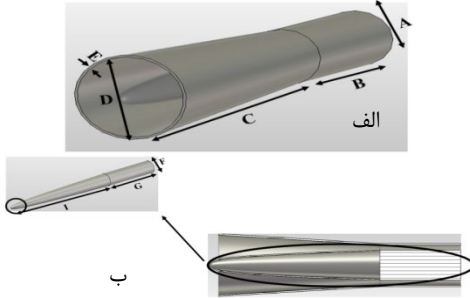
۲. مروری بر آنتن نمونه‌بردار با قطبش دوگانه

آنتن‌های نمونه‌بردار با قطبش دوگانه برای سیستم‌های اندازه‌گیری بادقت بالا استفاده می‌شوند و از نظر شکل الگو، خلوص قطبش، تلفات بازگشتی و تفکیک درگاه به درگاه الزامات سخت‌گیرانه‌ای دارند. به عنوان یک ویژگی مطلوب پهنای باند قابل استفاده برای آنتن‌های نمونه‌بردار با قطبش دوگانه باید از پهنای باند آنتن آزمایشی فراتر رود طوری که نصب و تراز آنتن نمونه‌بردار تنها یک بار در طول اندازه‌گیری انجام شود [۱۲]. اخیراً برای آنتن‌های نمونه‌بردار با طراحی یک حالت اتصال (OMJ) که به عنوان مبدل Orthomode (OMT) شناخته می‌شود و یک جزء حیاتی در سیستم‌های میکروویو و فرکانس رادیویی است که برای کنترل دو موج الکترومغناطیسی قطبی متعامد طراحی شده است که امکان جداسازی یا ترکیب سیگنال‌ها را فراهم می‌کند و در عین حال ویژگی‌های قطبش آن‌ها را حفظ می‌کند. آنتن نمونه‌بردار طراحی شده با استفاده از اتصال OMJ، و بر اساس چهار نقطه تغذیه با فازبندی صفر و ۱۸۰ درجه مدهای عمود برهم را تحریک می‌کند. در ادامه به چند نمونه آنتن نمونه‌بردار پرداخته شده است. در [۱۳] عملکرد تابشی آنتن نمونه‌بردار با قطبش خطی دوگانه در سیستم کروی میدان نزدیک در فرکانس ۵/۱۸-۸/۲GHz اندازه‌گیری شده است. سطح قطبش متعامد در انتها و ابتدای باند فرکانسی ۴۶/۵۷ و ۷۴/۳۷ درجه است (شکل ۳-الف). دو آنتن شیپوری با چهار موجبر تیغه‌دار در [۱۴] برای نمونه برداری در محدوده فرکانسی ۱GHz-۳ و ۰/۴-۱/۲GHz طراحی و اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج اندازه‌گیری حاکی از آن است که تلفات بازگشتی زیر -۱۰dB و سطح قطبش متعامد این دو آنتن کمتر از ۳۵dB است، که در حد انتظار می‌باشد (شکل ۳-ب).

در اندازه‌گیری میدان نزدیک کروی، یکی از دغدغه‌های اساسی برای تبدیل میدان دور به نزدیک این است که الگوی آنتن نمونه‌بردار در جهت عمودی با وابستگی $\mu = \pm 1$ رفتار کند. (یعنی فقط شامل مدهای کروی $\mu = \pm 1$ باشد). این الزام محدودیتی برای جهت دهی آنتن نمونه‌بردار ایجاد نمی‌کند. و با مد غالب TE_{11} در یک موجبر دایره‌ای تحریک می‌شوند [۱۰]. مفهوم حالت اتصال (OMJ) مبتنی بر استفاده از ساختار موجبری است. طراحی آنتن نمونه‌بردار را در پهنای باند ۱۸GHz-۴۰ با استفاده از موجبر تیغه‌دار تکی و موجبر تیغه‌دار دوتایی پوشش

$$k_c a = 2\pi f_c \frac{a}{b} = \frac{2}{1 - \tau} \quad (1)$$

که در معادله (۱)، f_c فرکانس قطع و $\tau = \frac{b}{a}$ که شعاع رسانای داخلی و a شعاع رسانای بیرونی می‌باشد. شکل هندسی و ابعاد آنتن شیپوری هم‌محور طراحی شده به ترتیب در شکل (۸-الف)، (ب) و جدول (۲) قرار داده شده است.



شکل ۸. الف) نمای کامل آنتن شیپوری هم‌محور (ب) نمای رسانای داخلی آنتن شیپوری هم‌محور در صفحه Y

جدول ۲- ابعاد آنتن شیپوری هم‌محور

پارامتر	پارامتر طراحی	مقدار (mm)
A	قطر رسانای بیرونی	۲۰
B	طول موج‌بر	۵۰
C	طول بازشدگی	۱۰۰
D	قطر بازشدگی	۳۰
E	ضخامت آنتن	۰/۷۵
F	قطر رسانای داخلی	۱۵
G	طول مغزی	۵۰
I	ابعاد منحنی‌وار رسانای داخلی	$x(t) = t$ $y(t) = t^{3/4}$ $\min(t) = 0$ $\max(t) = 7.5$

ویژگی اصلی آنتن شیپوری هم‌محور این است که پارامتر τ یک روش اضافی برای تغییر الگوی تشعشی را فراهم می‌کند. از جمله معایبی که دارند: ۱- بالا بودن سطح گلب‌رگ‌های جانبی ۲- عدم تطبیق روزه با افزایش τ است. پهنای پرتو صفحه H تقریباً مانند یک آنتن شیپوری مخروطی است، در حالی که پهنای پرتو صفحه E با افزایش τ افزایش می‌یابد. موجبرهای هم‌محور می‌تواند علاوه بر مد TE_{mn} ، مدهای موجبر TE و TM را نیز منتقل کنند. طول موج قطع مد TE_{mn} آنتن شیپوری هم‌محور به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$\lambda_c \cong \frac{\pi(a+b)}{m} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

طول موج قطع مد TM_{mn} :

$$\lambda_c \approx \frac{2(a-b)}{(n-1)} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

یک نوع از آنتن شیپوری نمونه‌بردار [۱۷] برای استفاده در باند فرکانسی ۱۸-۱۲/۴ GHz در شکل (۶) نشان داده شده است. باید دقت کرد که هنگام اندازه‌گیری کروی آنتن نمونه‌بردار، عملکرد قطبش متعامد آن و نسبت محوری دقیق مهم است.



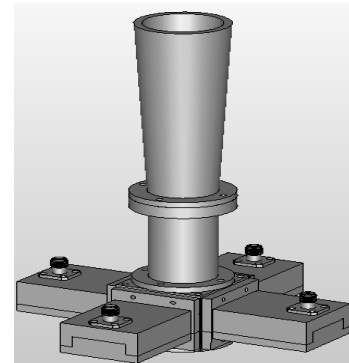
شکل ۶. آنتن شیپوری نمونه‌بردار باند Ku، الف) SN 401، ب) SN 1057 [۱۷]

۱-۲. آنتن نمونه‌بردار طراحی شده

مشخصات الکتریکی آنتن نمونه‌بردار طراحی شده برای اندازه‌گیری میدان نزدیک در جدول (۱) آورده شده است. آنتن نمونه‌بردار طراحی شده با استفاده از اتصال OMJ، و بر اساس چهار نقطه تغذیه با فازبندی صفر و ۱۸۰ درجه مدهای عمود برهم را تحریک می‌کند. استفاده از موجبر هم‌محور در آنتن‌های شیپوری برای عملکرد فرکانس بالا استفاده شده است [۱۴].

جدول ۱- مشخصات الکتریکی آنتن نمونه‌بردار طراحی شده

پارامتر	مقدار
پهنای باند	۱۵-۶ GHz
قطبش	دوگانه - خطی
تلفات بازگشتی	$< -10 \text{ dB}$
پهنای پرتو	$> 30 \text{ deg}$
جداسازی پورت به پورت	$> -30 \text{ dB}$
اتصال‌دهنده	SMA یا N
قطبش متعامد	$> 30 \text{ dB}$



شکل ۷. شکل مهندسی شده آنتن نمونه‌بردار طراحی شده

یکی از ویژگی‌های آنتن شیپوری هم‌محور این است که پهنای باند عملیاتی این نوع از آنتن‌ها بیشتر از آنتن شیپوری دایره‌ای است، زیرا فرکانس قطع مد غالب آن کمتر از موجبر دایره‌ای است [۱۸].

برای محاسبه طول موج قطع مد TM_{mn} طبق رابطه (۳) داریم:

$$TM_{11} \rightarrow \lambda_c \cong \frac{2(10 - 7.5)}{1} = 5mm$$

$$F_c = \frac{C}{\lambda_c} \xrightarrow{c=3 \times 10^8 \frac{m}{s}} F_c = 60GHz \quad (۶)$$

طبق محاسبه فرکانس قطع برای مد TM_{mn} چون فرکانس قطع به دست آمده در محدوده فرکانسی تعیین شده نیست، پس مد TM_{mn} نداریم. از این معادلات مشهود است که مد TE_{11} مد غالب TE در موجبر هم‌محور است. همچنین موجبر هم‌محور امکان کنترل تطابق امپدانس و تبدیل مودال را با استفاده از باریک شدن تدریجی رسانای داخلی و دیواره‌های خارجی روزنه را فراهم کرده است. برتری آنتن‌های موجبر هم‌محور این است که در مد TE_{11} کار می‌کند و نسبت به موجبر دایره‌ای پهنای تابش وسیع‌تری دارد و از این ویژگی می‌توان برای تقارن الگو و سطح قطبش متعامد کم در آنتن موجبر هم‌محور استفاده کرد. حداقل قطبش متقاطع با افزایش τ کاهش می‌یابد. برای یک آنتن شیپوری هم‌محور با لبه بزرگ، این شرایط برای $\tau \leq 0.8$ تقریباً برابر است با [۱۸]:

$$ka = 3.52 - 1.13\tau - 8.81\tau^2 + 1.634\tau^3 - 8.26\tau^4 \quad (۷)$$

آنتن موجبر هم‌محور مد TE_{11} این مزیت را دارد که می‌توان با استفاده از حلقه‌های اضافی بیرونی برای دستیابی به پهنای پرتو و تقارن الگو استفاده کرد. با این حال تفاوت‌های قابل توجهی با موجبر دایره‌ای دارد که عمدتاً توسط رسانای داخلی ایجاد می‌شود. اولین تفاوت این است که مد TEM خوب تابش نمی‌کند و به شدت از انتهای باز موجبر بازتاب می‌شود. مطابق نتایج الگوی تشعشعی شکل (۱۰)، با افزایش فرکانس بهره آنتن شیپوری هم‌محور و پهنای پرتو ۳dB در صفحه E به ترتیب به میزان ۵/۱۳dBi به میزان ۶/۵۰ درجه افزایش یافته است، و همچنین سطح گلبرگ فرعی به میزان ۳/۷dB کاهش یافته است. اختلاف سطح الگوی تشعشعی قطبش مطلوب و قطبش متعامد آنتن شیپوری هم‌محور در فرکانس ۶GHz برابر ۴۹/۹۳dB- در فرکانس ۱۵GHz برابر ۴۱/۲۰dB- است (شکل ۱۱). طراحی ترکیب کننده توان چهارطرفه به این صورت می‌باشد که شامل، چهار موجبر تیغه‌دار تکی است که در هر چهار طرف ترکیب کننده قرار دارند. ابعاد موجبر تیغه‌دار مطابق با استاندارد WRD580d28 رسم شده است. در مرکز ساختار ترکیب کننده یک موجبر هم‌محور قرار دارد که تلفات بازگشتی بسیار کمی (زیر ۵۰dB-) در باند فرکانسی مربوطه دارد. استفاده از ترکیب کننده به دلیل تحریک دو شاخه با فاز ۰ و ۱۸۰ درجه مانع تحریک مد TEM

از این معادلات مشهود است که مد TE_{11} مد غالب TE در موجبر هم‌محور است، و طول موج قطع مد TE_{01} با مد TM_{11} یکسان است. توزیع میدان الکتریکی در دهانه آنتن مشخص کننده شکل الگوی تابشی آنتن است و مدهای مختلف موجب ایجاد آرایش‌های مختلف میدان در دهانه آنتن می‌شود و هر مود آرایش‌های مخصوص به خود را دارد. همانطور که در شکل (۹-الف) نمایان است، مد اول موجب تولید الگوی تشعشعی با جهت محوری صفر می‌شود، و شکل (۹-ب،ج) مود دوم و سوم با توجه به آرایش مدها، موجب ایجاد الگوی تشعشعی جمع در دو جهت عمود بر هم می‌شوند. شکل (۹-د،ه) مد چهارم و پنجم نیز موجب ایجاد الگوی تشعشعی تفاضلی چهارگانه عمود بر هم می‌شود، نکته جالب در خصوص میدان‌های مد چهارم و پنجم این است که این میدان‌ها نسبت به هم چرخش ۴۵ درجه‌ای دارند و متعامد هستند. با توجه به توزیع میدان الکتریکی مختلف که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، مد اول معادل مد TEM است و فرکانس قطع آن برابر صفر است و مد دوم و سوم چون از لحاظ آرایش میدانی باهم برابرند ولی متعامدند معادل با مد TE_{11} و مد چهارم و پنجم نیز از لحاظ آرایش میدانی باهم برابرند و عمودند معادل TE_{21} است.

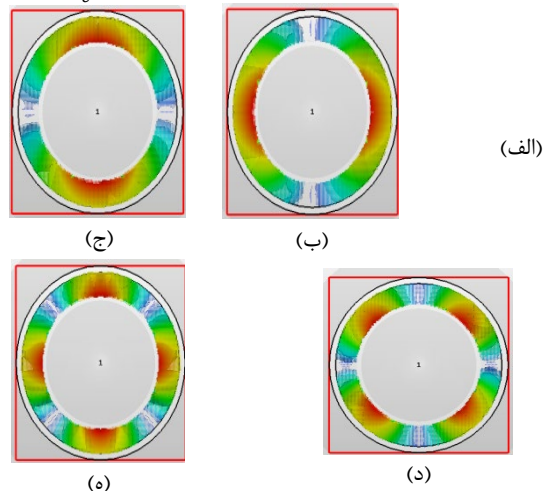
طول موج قطع و فرکانس قطع مد TE_{m1} را می‌توان طبق رابطه (۲) به دست آورد:

$$TE_{11} \rightarrow \lambda_c \cong \frac{\pi(7.5 + 10)}{1} = 57.977mm$$

$$F_c = \frac{C}{\lambda_c} \xrightarrow{c=3 \times 10^8 \frac{m}{s}} F_c = 5.4709GHz \quad (۴)$$

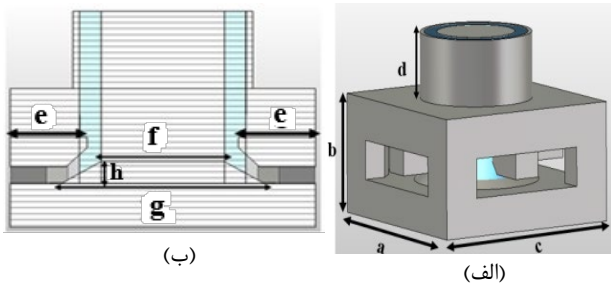
$$TE_{21} \rightarrow \lambda_c \cong \frac{\pi(7.5 + 10)}{2} = 28.98mm$$

$$F_c = \frac{C}{\lambda_c} \xrightarrow{c=3 \times 10^8 \frac{m}{s}} F_c = 10.349GHz \quad (۵)$$



شکل ۹. توزیع میدان الکتریکی در دهانه آنتن شیپوری هم‌محور: الف) اولین توزیع میدان الکتریکی (ب) دومین توزیع میدان الکتریکی (ج) سومین توزیع میدان الکتریکی (د) چهارمین توزیع میدان الکتریکی (و) پنجمین توزیع میدان الکتریکی

در آنتن نمونه‌بردار طراحی شده از اتصال دهنده نوع SMA استفاده شده است. انتقال بین آنتن شیپوری هم‌محور و موج‌بر تیغه دار تکی برای عملکرد تلفات بازگشتی آنتن شیپوری مهم است.



شکل ۱۲. الف) نمای کلی ترکیب کننده توان ب) نمای برش خورده ترکیب کننده توان در صفحه y

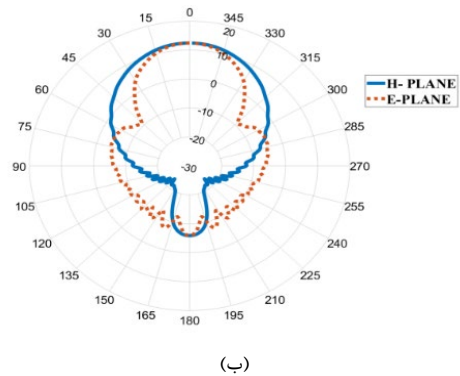
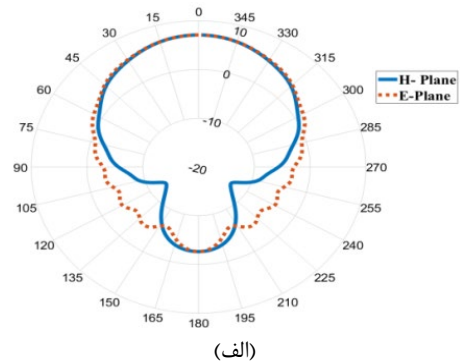
جدول ۳- ابعاد ترکیب کننده توان

پارامتر	پارامترهای طراحی	مقدار (mm)
A	طول ترکیب کننده توان	۳۶
B	ارتفاع ترکیب کننده توان	۱۸
C	عرض ترکیب کننده توان	۳۶
D	ارتفاع موج‌بر هم‌محور	۱۰
E	طول تیغه	۹/۱۰
F	قاعده کوچک مخروط	۷/۵
G	قاعده بزرگ مخروط	۱۲
H	ارتفاع مخروط	۲/۷۸۹

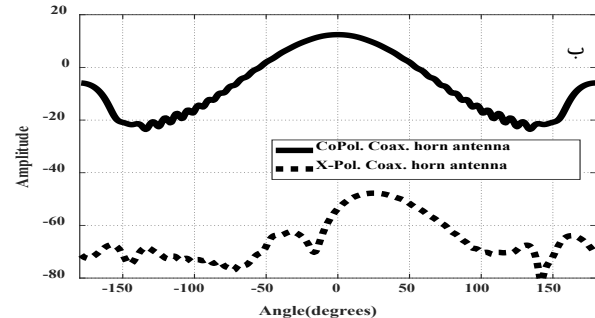
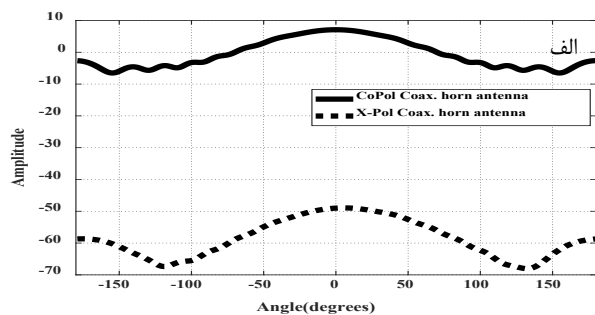
جدول ۴- ابعاد اتصال دهنده کابل هم‌محور به موج‌بر تیغه‌دار تکی

پارامتر	پارامتر طراحی	مقدار (mm)
A	طول موج‌بر	۲۲/۶۶
B	ارتفاع موج‌بر	۶/۰۳
S	پهنای تیغه	۳
l_1	طول تیغه اول	۳
l_2	طول تیغه دوم	۸/۳۱
l_3	طول تیغه سوم	۸/۴۷
l_4	طول تیغه چهارم	۷/۷۰
l_5	طول تیغه پنجم	۱۰/۹۳
l_6	طول تیغه ششم	۱/۷۹
d_1	قطر بیرونی	۴
d_2	قطر مغزی	۱/۲۷
h_p	ارتفاع پین	۱۳/۳۲
h_1	ارتفاع تیغه اول	۳
h_2	ارتفاع تیغه دوم	۳/۳۳
h_3	ارتفاع تیغه سوم	۳/۵۴
h_4	ارتفاع تیغه چهارم	۴/۱۱
h_5	ارتفاع تیغه پنجم	۴/۹۹
h_6	ارتفاع تیغه ششم	۰/۵۱

می‌شود. ساختار ترکیب کننده توان با در نظر گرفتن چهار موج‌بر تیغه‌دار و یک موج‌بر هم‌محور مطابق با شکل (۱۲) است. ابعاد ترکیب کننده توان مطابق با جدول (۳) است. اتصال دهنده مورد استفاده در آنتن نمونه‌بردار، یک انتقال از موج‌بر هم‌محور به یک موج‌بر تیغه‌دار تکی است.

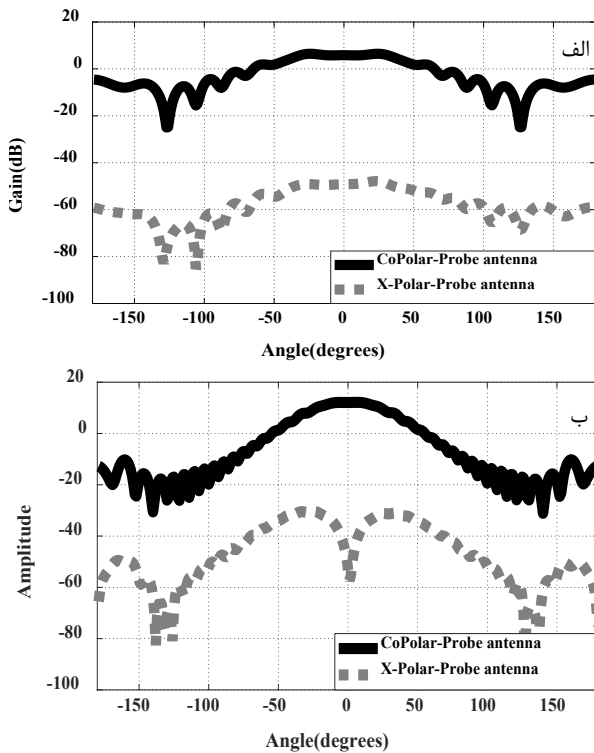


شکل ۱۰. نمودار الگوی تشعشعی آنتن شیپوری هم‌محور در صفحات E و H در فرکانس‌های الف) ۶GHz ب) ۱۵GHz

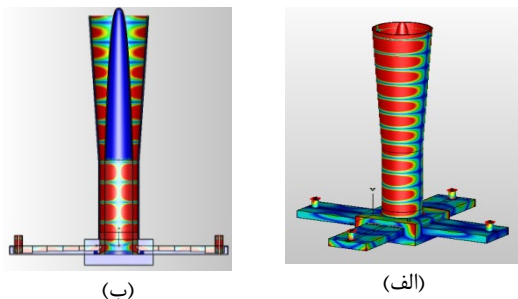


شکل ۱۱. نمودار الگوی تشعشعی قطبش مطلوب و قطبش متعامد آنتن شیپوری هم‌محور در فرکانس‌های الف) ۶GHz ب) ۱۵GHz

نمودار الگوی تشعشعی قطبش مطلوب و متعامد آنتن نمونه‌بردار در فرکانس‌های ابتدا و انتهای باند به ترتیب در شکل (۱۵) آورده شده است. اختلاف سطح الگوی تشعشعی قطبش و قطبش متعامد آنتن نمونه‌بردار پهن باند، در فرکانس ۶GHz برابر با $-۴۳/۸۸\text{dB}$ و در فرکانس ۱۵GHz میزان تفاوت سطح قطبش مطلوب و متعامد آنتن نمونه‌بردار برابر با $-۳۸/۹۶۸\text{dB}$ است.



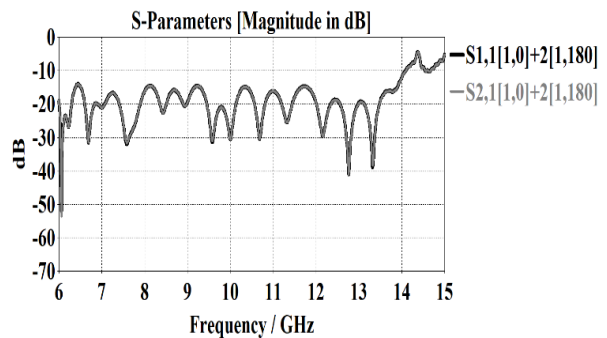
شکل ۱۵. نمودار الگوی تشعشعی قطبش مطلوب و قطبش متعامد آنتن نمونه‌بردار پهن باند در فرکانس الف) ۶GHz ب) ۱۵GHz توزیع میدان الکتریکی آنتن نمونه‌بردار نیز در فرکانس ۶GHz مطابق شکل (۱۶) است. طرح کلی آنتن نمونه‌بردار را با در نظر گرفتن: ۱- بارهای تطبیق ۲- خم‌های جانبی مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۱۶. توزیع میدان الکتریکی در الف) نمای کامل آنتن نمونه‌بردار و ب) نمای برش خورده آنتن نمونه‌بردار در صفحه y

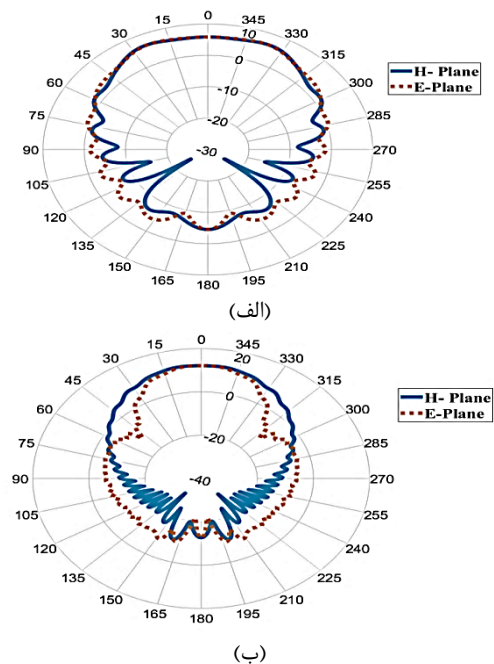
نتایج شبیه‌سازی حاصل از حضور بارهای تطبیق در شکل (۱۷) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود حضور بار تطبیق تاثیر چشمگیری در نتایج پارامتر پراکندگی ندارد.

هدف اصلی به دست آوردن سطوح پایین نسبت موج ایستایی (VSWR) در طول تبدیل مد TEM به مد TE در موج‌بر است. ابعاد اتصال دهنده مطابق جدول (۴) است. نتایج پراکندگی آنتن نمونه‌بردار پهن باند طراحی شده در شکل (۱۳) آورده شده است. برای ایجاد اختلاف فاز صفر و ۱۸۰° درجه نتایج پراکندگی حاصل از درگاه‌های روبه‌رو را با تعریف دامنه و فاز ترکیب شده است.

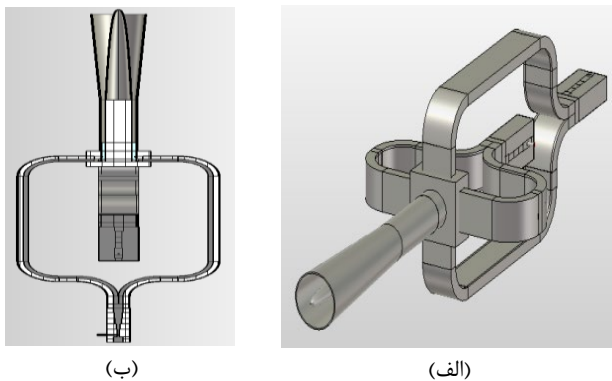


شکل ۱۳. نمودار پراکندگی درگاه روبه‌رو در آنتن نمونه‌بردار

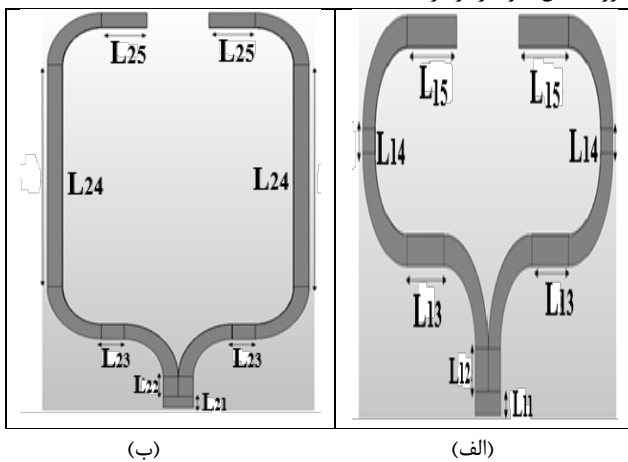
الگوی تشعشعی آنتن نمونه‌بردار پهن باند در فرکانس‌های ابتدایی و انتهایی را در شکل (۱۴) آورده شده است. باتوجه به الگوی تشعشعی آنتن نمونه‌بردار در صفحه E، بهره و سطح گلبه‌های فرعی در کل باند فرکانس افزایش یافته است، ولی پهنای پرتو ۳dB در کل باند فرکانس کاهش یافته است. میزان افزایش بهره در صفحه H آنتن نمونه‌بردار، مانند صفحه E است، ولی پهنای پرتو ۳dB در صفحه H نسبت به صفحه E به میزان کمتری کاهش یافته است. سطح گلبه‌های فرعی نیز نسبت به صفحه E به میزان کمتری افزایش پیدا کرده است.



شکل ۱۴. مقایسه الگوی تابشی آنتن نمونه‌بردار در فرکانس های الف) ۶GHz ب) ۱۵GHz



شکل ۱۹. الف) نمای کامل آنتن نمونه‌بردار با خم‌های جانبی ب) نمای برش خورده آنتن نمونه‌بردار در صفحه y-z

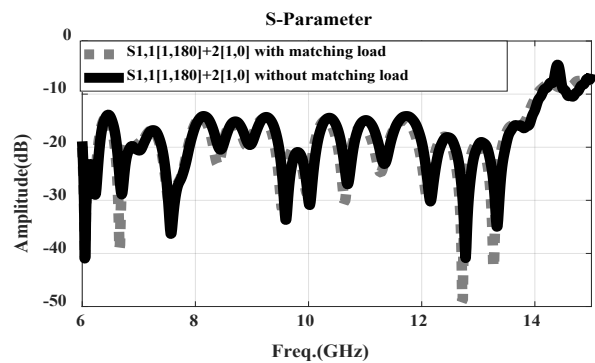


شکل ۲۰. شکل خم‌های جانبی الف) خم موجبری کوچک ب) خم جانبی بزرگ

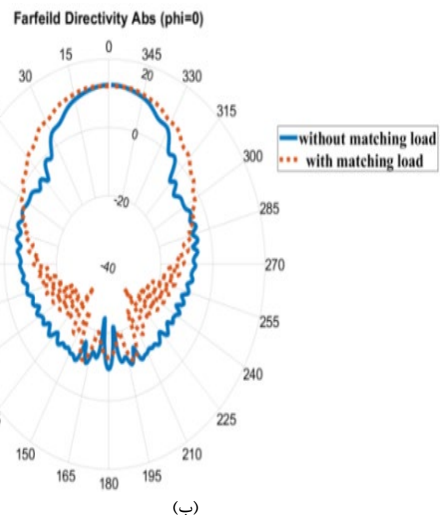
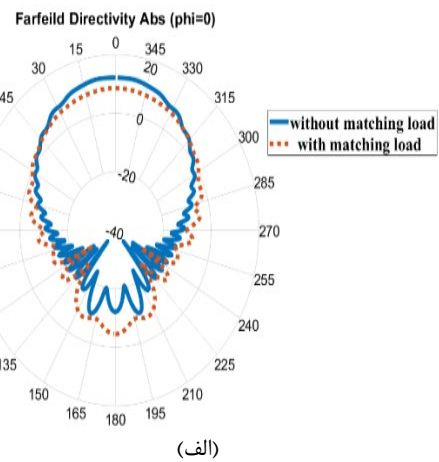
از آنجاکه آنتن نمونه‌بردار در نزدیکی آنتن تحت تست قرار می‌گیرد، بازدهی آنتن تنها در صورتی مشکل‌آفرین است که خیلی کم باشد و یا اینکه به واسطه عدم تطبیق موج دریافتی دوباره به آنتن تحت آزمون بازتاب پیدا کند. عوامل کاهش‌دهنده بازدهی آنتن شامل عدم تطبیق در درگاه ورودی، استفاده از عناصر تلفاتی در ساختار آنتن و اتلاف توان داخل آن، ایجاد قطبش متقاطع در ساختار و وزن‌دهی توزیع میدان دهانه است. در واقع باتوجه به عدم وجود عناصر تلف‌کننده در ساختار و تطبیق قابل‌قبول بازدهی نیز مناسب است. رابطه (۸) مقدار بازدهی را به دست می‌دهد.

$$Efficiency = (\lambda \pi D)^2 (10) G_{10} \quad (۸)$$

که در آن G بهره آنتن، D قطر آنتن و $\lambda = CF$ که C سرعت نور است که برابر با: $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ [۱] با توجه به رابطه (۸) مقدار بازدهی در فرکانس ۶GHz برابر ۹۷ درصد و در فرکانس ۱۵GHz برابر ۷۶ درصد است. اندازه خم‌های مسیر مستقیم مطابق با جدول (۵) مقداردهی شده است. در این بخش اتصال کابل هم‌محور به موجبر تیغه‌دار دوتایی وصل شده است که در شکل (۲۰) نمایش داده شده است و ابعاد آن نیز در جدول (۶) آمده است.



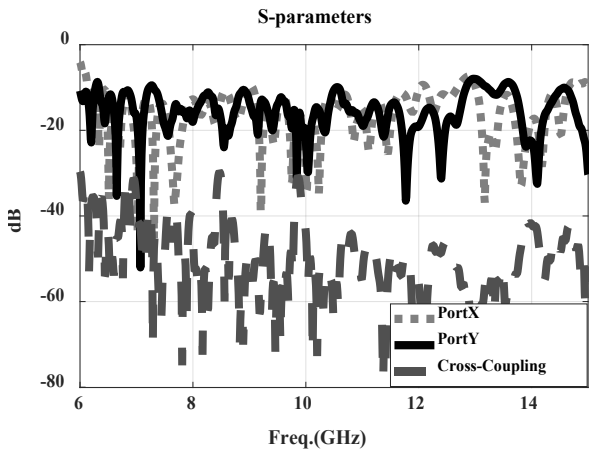
شکل ۱۷. مقایسه پارامتر پراکندگی آنتن نمونه‌بردار با حضور و بدون حضور بارهای تطبیق



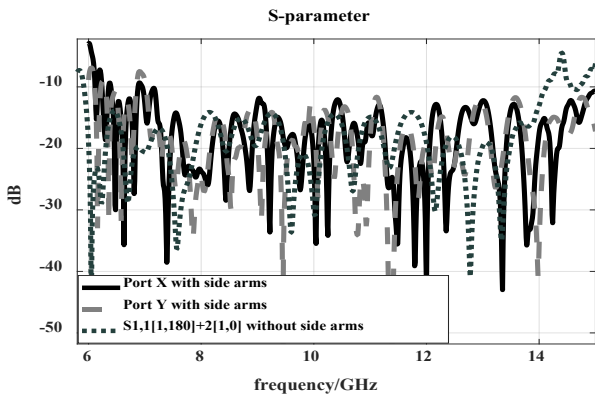
شکل ۱۸. مقایسه الگوی تشعشی آنتن نمونه‌بردار با وجود بار تطبیق با آنتن نمونه‌بردار بدون بار تطبیق در فرکانس‌های الف) ۶GHz ب) ۱۵GHz

همچنین مطابق شکل (۱۹) ساختار ریزموجی هر کانال آنتن با حضور خم‌های جانبی شامل: تقسیم‌کننده صفحه E، خم‌های موجبری (دو خم برای هر قطبش)، اتصال‌دهنده مناسب این ساختار. تقسیم‌کننده طراحی شده، موجبر تیغه‌دار دوتایی را به دو موجبر تیغه‌دار تکی با سطح مقطع یکسان تقسیم می‌کند (شکل ۲۰).

ب) نمای برش اتصال کابل هم‌محور به موجبر تیغه‌دار دوتایی در صفحه y شبیه‌سازی ساختار کلی آنتن نمونه‌بردار با خم‌های موج‌بری با تعیین دو درگاه PortX-PortY (که PortX درگاه خم بزرگ و PortY درگاه خم کوچک است) انجام شده است. همان‌طور که در شکل (۲۱) نمایان است، تلفات بازگشتی خم‌های جانبی تقریباً زیر 10 dB - و تزویج متقابل زیر 30 dB - است. با مقایسه آنتن نمونه‌بردار با حضور خم‌های جانبی با آنتن نمونه‌بردار بدون حضور خم‌های جانبی در شکل (۲۲) نمودار پراکندگی آنتن نمونه‌بردار بدون خم‌های جانبی، در فرکانس 14 GHz - بالای 10 dB - که این عدم تطبیق در بازه فرکانس 14 GHz - را می‌توان با استفاده از خم‌های جانبی در این باند فرکانسی برطرف کرد. الگوی تشعشعی آنتن نمونه‌بردار با حضور خم‌های جانبی در شکل (۲۳) آورده شده است. تاثیر دو خم جانبی در الگوی تشعشعی باعث تغییراتی در بهره می‌شود از جمله اینکه، وجود خم بزرگ (PortX) و خم کوچک (PortY) باعث افزایش میزان بهره در کل باند فرکانسی نسبت به آنتن نمونه‌بردار بدون حضور خم‌های جانبی می‌شود.



شکل ۲۱. نمودار پراکندگی آنتن نمونه‌بردار با حضور خم‌های جانبی



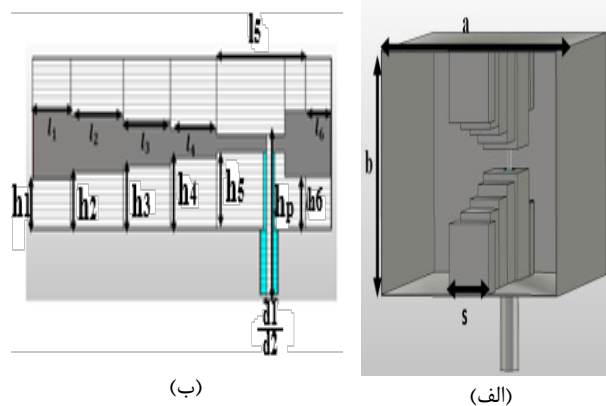
شکل ۲۲. مقایسه نمودار پراکندگی آنتن نمونه‌بردار با حضور خم‌های جانبی و بدون حضور خم‌های جانبی

جدول ۵- ابعاد دو خم جانبی آنتن نمونه‌بردار

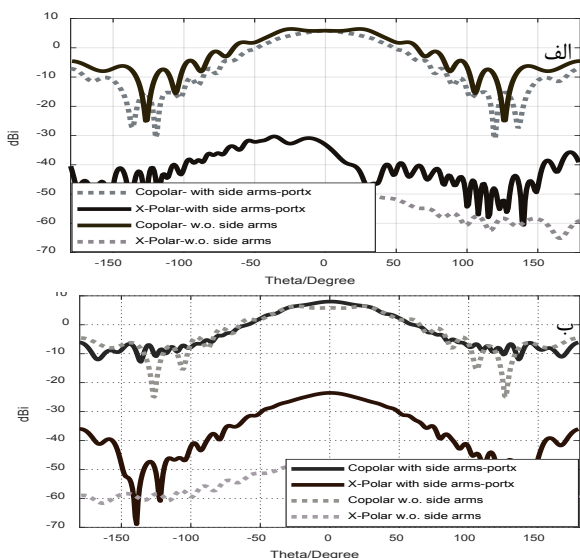
مقدار (mm)	خم کوچک
۵	L_{11}
۹	L_{12}
۲۰	L_{13}
۵	L_{14}
۲۷	L_{15}
مقدار (mm)	خم بزرگ
۵	L_{21}
۹	L_{22}
۱۰	L_{23}
۱۰۰	L_{24}
۱۰	L_{25}

جدول ۶- ابعاد اتصال کابل هم‌محور به موجبر تیغه‌دار دوتایی

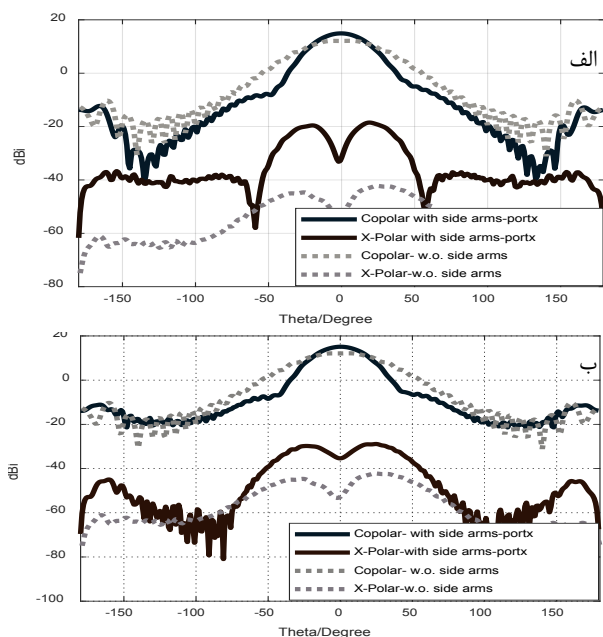
پارامتر	پارامتر طراحی	مقدار (mm)
A	طول موجبر	۲۲/۶۶
B	ارتفاع موجبر	۱۳/۲۹
پارامتر	پارامتر طراحی	مقدار (mm)
S	پهنای تیغه	۳
l_1	طول تیغه اول	۵/۰۸
l_2	طول تیغه دوم	۷
l_3	طول تیغه سوم	۶/۲۳
l_4	طول تیغه چهارم	۷/۷۰
l_5	طول تیغه پنجم	۱۱/۱
l_6	طول تیغه ششم	۳/۳۹
d_1	قطر بیرونی	۴
d_2	قطر مغزی	۱/۲۷
h_p	ارتفاع پین	۱۲/۳۰
h_1	ارتفاع تیغه اول	۳/۸۲
h_2	ارتفاع تیغه دوم	۳/۷۸
h_3	ارتفاع تیغه سوم	۴/۸۰
h_4	ارتفاع تیغه چهارم	۳/۷۸
h_5	ارتفاع تیغه پنجم	۵/۸۸
h_6	ارتفاع تیغه ششم	۳/۹۹



شکل ۲۰. الف) نمای کلی اتصال کابل هم‌محور به موجبر تیغه‌دار دوتایی



شکل ۲۴. تفاوت سطح قطبش مطلوب و متعامد آنتن نمونه‌بردار با حضور و بدون حضور بار الف) خم جانبی بزرگ ب) خم کوچک در فرکانس ۶GHz



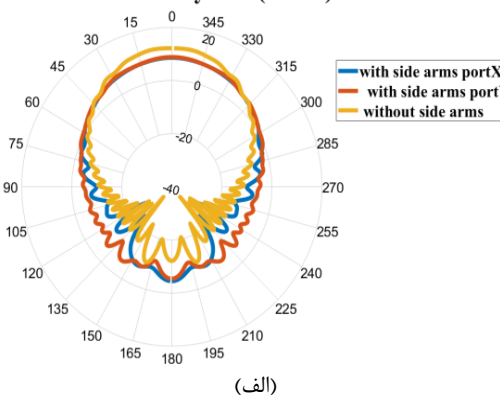
شکل ۲۵. تفاوت سطح قطبش مطلوب و متعامد آنتن نمونه‌بردار با حضور و بدون حضور بار الف) خم جانبی بزرگ ب) خم کوچک در فرکانس ۱۵GHz

۳. نتایج و بحث

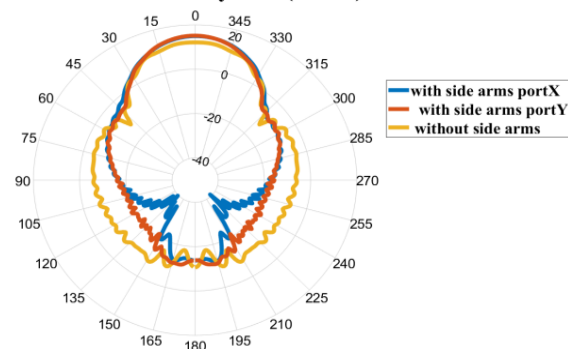
پس از طی مراحل، شبیه‌سازی و انتخاب ساختار مطلوب به‌منظور بررسی عملکرد و بر اساس مقادیر بهبود یافته اقدام به ساخت نمونه عملیاتی گردید. آنتن ساخته شده به‌عنوان آنتن نمونه‌بردار میدان نزدیک در باند X مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۲۶) نمای آنتن ساخته شده را نشان می‌دهد. در ابتدا به منظور اندازه‌گیری مقدار پارامترهای پراکندگی پس از کالیبراسیون

وقتی که خم‌های موج‌بری در ساختار قرار داده می‌شوند، با استفاده از تقسیم‌کننده توانی که در ساختار آنتن قرار دارد، موج دوبار برمی‌گردد و مجدد تشعشع می‌شود که همین عامل موجب افزایش بهره در آنتن می‌شود. همچنین حضور دو خم جانبی موجب کاهش میزان پهنای پرتو ۳dB در کل باند فرکانسی نسبت آنتن نمونه‌بردار بدون حضور خم‌های جانبی می‌شود. به طور کلی سطح گلبیگ‌های فرعی با حضور خم‌های جانبی باعث افزایش سطح گلبیگ فرعی نسبت به آنتن نمونه‌بردار بدون حضور خم‌های جانبی می‌شود. تفاوت سطح قطبش مطلوب و قطبش متعامد آنتن در فرکانس‌های ۶-۱۵GHz نشان داده شده است. که به ترتیب در شکل (۲۴-الف و ب) نشان داده شده‌اند. در شکل (۲۴-الف) با ۲۷/۳۳dB که این اختلاف سطح قطبش و قطبش متعامد در خم بزرگ به میزان ۱۶/۳۳dB نسبت به ساختار بدون خم افزایش یافته است، ولی در شکل (۲۴-ب) این اختلاف در خم کوچک برابر است با ۱۵/۵۲dB که این میزان اختلاف سطح قطبش و قطبش متعامد در خم بزرگ به میزان ۲۸/۱۴dB افزایش پیدا می‌کند.

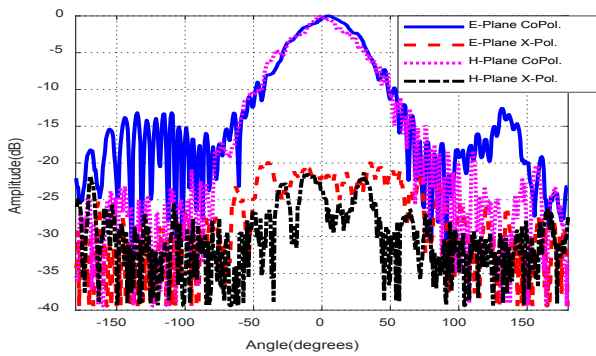
Farfield Directivity Abs (Phi=0)



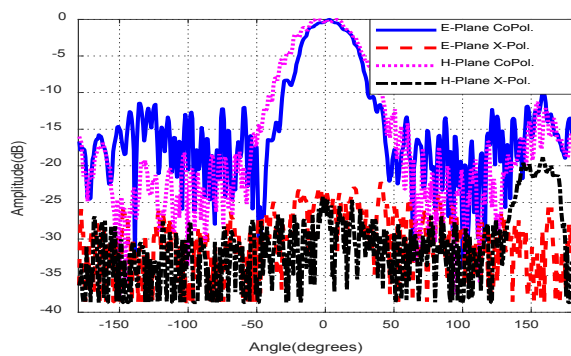
Farfield Directivity Abs (Phi=0)



شکل ۲۶. مقایسه الگوی تشعشعی آنتن نمونه‌بردار با وجود خم جانبی با آنتن نمونه‌بردار بدون خم جانبی در فرکانس‌های الف) ۶GHz ب) ۱۵GHz



شکل ۲۹. الگوهای تشعشعی بهنجار شده آنتن نمونه‌بردار ساخته شده در فرکانس ۱۱GHz

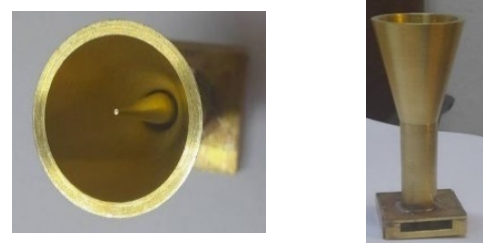


شکل ۳۰. الگوهای تشعشعی بهنجار شده آنتن نمونه‌بردار ساخته شده در فرکانس ۱۵ GHz

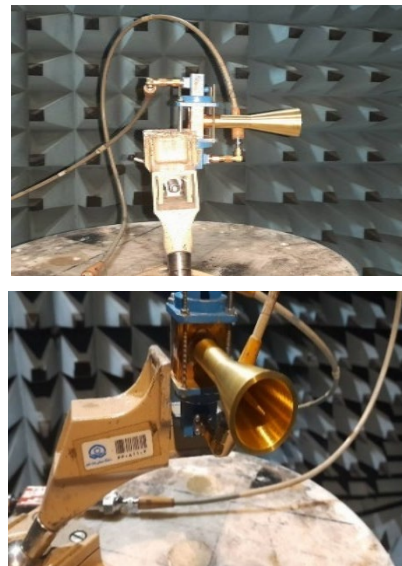
۴. نتیجه گیری

اندازه‌گیری الگوی تشعشعی و تعیین پارامترهای مختلف آنتن یکی از نیازهای ضروری در صنایع مختلف کشور است. چون این اندازه‌گیری‌ها در فاصله میدان دور آنتن انجام می‌شود، اگر ابعاد آنتن بزرگ باشد پیاده‌سازی آن مشکل است. در چنین مواقعی روش‌هایی ارائه شده است که بتوان این اندازه‌گیری را در فاصله نزدیک آنتن انجام داد و الگوی میدان دور آنتن را با محاسبه به دست آورد. در سال‌های اخیر با توجه به استفاده از آنتن‌های با فرکانس بالا، که در رادار و یا سیستم‌های ماهواره‌ای استفاده می‌شوند، استفاده از این روش بیش از پیش ضروری است. استفاده از این روش اندازه‌گیری مبتنی بر استفاده از آنتن نمونه‌بردار است. طراحی، شبیه‌سازی و ساخت آنتن نمونه‌بردار پهن باند با قطبش دوگانه جهت اندازه‌گیری میدان نزدیک آنتن در این مقاله انجام شده است. آنتن نمونه‌بردار طراحی شده در باند فرکانسی متفاوت تری نسبت [۱۵] و همچنین در ابعاد کوچکتری طراحی و بهینه سازی شده و سپس ساخته شده است. نتایج شبیه‌سازی و اندازه گیری نشان می‌دهد که در کل پهنای باند الگوی تشعشعی آن دارای یک گلبرگ اصلی است. و از جمله ویژگی‌های مطلوب آن می‌توان به قطبش متعامد خوب آن اشاره کرد. هم چنین با استفاده از دو خم موجبری که در ساختار آنتن نمونه‌بردار قرار داده شده، موج در ساختار این آنتن با استفاده از تقسیم‌کننده

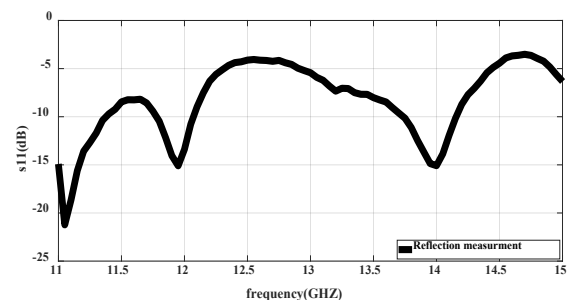
دستگاه Analyzer Network Vector، دو درگاه آنتن را به دستگاه متصل کرده و پارامتر بازتاب کلی حاصل از ایجاد اختلاف‌فاز اندازه‌گیری شده است. در ادامه برای اندازه‌گیری پارامترهای تشعشعی آنتن نمونه‌بردار از جمله: بهره، پهنای پرتو ۳dB و سطح گلبرگ‌های جانبی و مقایسه سطح قطبش مطلوب و قطبش متعامد درون اتاق تست آنتن و از طریق نصب معکوس آداپتور موجبری (برای ایجاد فاز ۰ و ۱۸۰ درجه) به تجهیزات اندازه‌گیری متصل و نتایج اندازه‌گیری ثبت و ذخیره‌سازی شد (شکل ۲۷). نتایج اندازه‌گیری پارامتر پراکندگی آنتن اندازه‌گیری شده در شکل (۲۸) قابل مشاهده است. نتایج اندازه‌گیری پارامترهای تشعشعی در فرکانس‌های ۱۱GHz و ۱۵GHz در دو صفحه E و H در شکل‌های (۲۹-۳۰) قابل مشاهده است.



شکل ۲۶. نماهای مختلف آنتن نمونه‌بردار ساخته شده



شکل ۲۷. اندازه‌گیری پارامتر تشعشعی آنتن نمونه‌بردار در اتاق آنتن دانشگاه صنعتی مالک اشتر



شکل ۲۸. بازتاب کلی آنتن اندازه‌گیری شده

Newsletter, vol. 31, no. 3, pp. 35-36, June 1989 Doi: 10.1109/MAP.1989.6102052

[11] Tayebi, A. ; Gomez Perez, J. ; E. Garcia, I. ; Gonzalez Diego and Catedra Perez M. F. "Optimized Design of a Compact Probe for Accurate Near Field Measurements "; in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 59, no. 6, pp. 2429-2433, June 2011, Doi: 10.1109/TAP.2011.2143659.

[12] "IEEE Standards Test Procedure for Antennas, IEEE Standard"; 149-1955 (ANSI C16.11-1971), Apr. 1955, pp. 1-29, Doi: 10.1109/IEEESTD.1965.7368066.

[13] Foged, L. J. ; Giacomini, A. ; and Morbidini, R. "Dual polarized probe for wideband planar near field measurement applications"; Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). IEEE, 2011.

[14] Kim, O. S. ; Pivnenko, S.; and Breinbjerg, O. "Wideband scalable probe for Spherical Near-Field Antenna measurements"; Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Rome, Italy, 2011, pp. 1781-1785.

[15] Foged, L. J. ; et al. "Dual polarized near field probe based on OMJ in waveguide technology achieving more than octave bandwidth"; AMTA 2014.

[16] Foged, L. J. ; Giacomini, A.; and Morbidini, R.; Tancioni, L.; Estrada, J.; Acree, J. "Minimum Scattering Probe for High Accuracy Planar NF Measurements"; AMTA 2016, Oct. 30 – Nov. Doi:10.23919/AMTAP.2017.8123716

[17] Wittmann.; Ronald C.; Michael H. Francis. "Near-Field Spherical Scanning Antenna Measurements: Probe Deconvolution and Sensitivity"; International Journal of Antennas and Propagation 2014.

[18] Volakis, J. "Antenna Engineering Handbook Fourth Edition"; US: McGraw-Hill Professional, 2007.

توان دوبار تشعشع می‌شود یکبار در پرتو اصلی و بار دیگر در جهات کنترل نشده که موجب افزایش بهره و سطح گلببرگ فرعی در آنتن نمونه‌بردار با حضور خم‌های جانبی می‌شود. همچنین استفاده از این خم‌ها موجب تولید همزمان قطبش عمودی و افقی در ساختار آنتن نمونه‌بردار می‌شود. نتایج حاصل از اندازه‌گیری آنتن ساخته شده مطابقت خوبی با آنتن طراحی شده دارد، از جمله برخی از عدم تطابق‌ها در الگوی تشعشعی و پارامتر پراکندگی آنتن ساخته شده با آنتن طراحی شده می‌تواند ناشی از نحوه‌ی تحریک و نحوه‌ی اندازه‌گیری آنتن نمونه‌بردار باشد. آنتن طراحی شده دارای بازدهی نسبتاً خوبی در ابتدا و انتها باند فرکانسی دارد، که به دلیل عدم وجود عناصر تلف‌کننده در ساختار آنتن است.

۵. مراجع‌ها

[1] Balanis, C. A. "Antenna Theory : Analysis and Design"; JOHN WILEY & SONS, Canada, 2005.

[2] Slater, D. "Near-field antenna measurement techniques"; Artech House. Boston, 1990.

[3] A. D. Yaghjian. "An overview of near-field antenna measurements"; IEEE Transactions on antennas and propagation, vol. 34, no. 1, pp. 30-45, 1986.

[4] _ Chamani, S.; Nasari, S. "Applying MLPSO algorithm in the computations of planar near-field antenna measurement"; Journal of Applied Electromagnetic. vol. 1, no. 1, pp. 19-26, 2013. (In persian).
Dor:20.1001.1.26455153.1392.1.1.3.4

[5] Ferrara, F. ; Gennarelli, C. ; Guerriero, R. "Near-Field Antenna Measurement"; Handbook of Antenna Technologies. Springer, Singapore(2016). Doi: 10.1007/978-981-4560-44-3_117.

[6] M. A. Moutaouekkil, Ch. Taybi and A. Ziyat, "Probes characterization for antennas near field measurement"; Conference: IEEE 14th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), 2014, Doi:10.1109/MMS.2014.7088986

[7] Kalashnikov.; Vadim Serafimovich, et al. "Near-Field Antenna Measurements, Calculations and Facility Design"; Springer Singapore, 2021. Doi:10.1007/978-981-33-6436-3

[8] "IEEE Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements "; in IEEE Std 1720-2012 , vol, no, pp. 1-102, 5 Dec. 2012, doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6375745.

[9] Gregson, S.; McCormick, J.; and Parini, C. "Principles of planar near-field antenna measurements "; IET, January 2007 Doi:10.1049/PBEW053E

[10] Glisson, A. "Spherical near-field antenna measurements, edited by J.E. Hansen "; in IEEE Antennas and Propagation Society