

## آنتن شکافی حفره‌ای با پهنای باند زیاد در فناوری موجبر فاصله هوایی

محمد حسین استوار زاده

استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، mh.ostovarzadeh@kgut.ac.ir

### چکیده:

در این مقاله یک آنتن شکافی حفره‌ای در فناوری موجبر فاصله هوایی پیشنهاد شده است. برای افزایش پهنای باند آنتن یک اختلال مثلثی در دو گوشه حفره ریح در فناوری موجبر فاصله هوایی ایجاد شده است. اختلال باعث انحراف فرکانس تشدید مدهای  $TM_{100}$  و  $TM_{010}$  حفره از هم می‌شود. سپس بمنظور ایجاد عملکرد تشعشی یک شکاف در صفحه فلزی بالایی حفره مربعی تعبیه می‌شود. حفره توسط یک موجبر فاصله هوایی ریح که با یک گذر پله مانند به دهانه  $WR62$  متصل شده است تغذیه می‌شود. با استفاده از شبیه‌سازی توسط نرم افزار HFSS ابعاد و محل شکاف و ابعاد اختلال و گذر ذکر شده بهینه می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده پهنای باند حدود ۱۰ در صد برای  $S_{11} < -10 \text{ dB}$  و گین حدود  $6 \text{ dBi}$  در این پهنای باند می‌باشد. آنتن مورد طراحی ساخته شده و پارامترهای آن مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. نتایج اندازه‌گیری تایید کننده نتایج شبیه‌سازی آنتن پیشنهادی می‌باشد. آنتن پیشنهادی در مقایسه با آنتن شکافی حفره‌ای پیشنهادی اخیر در فناوری موجبر فاصله هوایی پهنای باند بیشتری دارد.

### کلید واژه:

آنتن شکافی، حفره، اختلال، افزایش پهنای باند، موجبر فاصله هوایی.

### مقدمه

چند لایه استفاده از این تکنولوژی به سادگی ساخت و در نتیجه مقرون به صرفه بودن منجر خواهد شد. همچنین این تکنولوژی نسبت به موجبر مجتمع شده در زیر لایه دارای مزیت‌های قابلیت حمل توان بالا و عدم وجود تلفات دی‌الکتریک است. در مرجع [۶] یک آنتن شکافی حفره‌ای در فناوری  $GGW^4$  طراحی شده است. در مرجع [۷] از فناوری  $IMGW^5$  برای طراحی و ساخت آنتن شکافی حفره‌ای استفاده شده است که باعث کاهش تلفات آنتن و فراهم شدن امکان استفاده از آن در فرکانسهای بالا می‌باشد. استفاده از فناوری موجبر فاصله هوایی ریح<sup>۶</sup> در این آنتن باعث می‌شود که بتوان از مود  $TM_{100}^7$  استفاده کرد که باعث داشتن فرکانس تشدید پایین باعث می‌شود ابعاد حفره کوچکتر گردد.

در این مقاله هدف افزایش پهنای باند آنتن شکافی حفره‌ای طراحی شده در فناوری موجبر فاصله هوایی ریح می‌باشد. برای این منظور از مفهوم ایجاد اختلال در حفره مربعی جهت انحراف فرکانس تشدید دو مود تبهگون اول استفاده می‌شود [۸].

در این مقاله ابتدا یک حفره مربعی تعبیه شده در فناوری موجبر فاصله هوایی ریح در نرم افزار شبیه‌سازی می‌شود. ابعاد

امروزه آنتن‌های شکافی حفره‌ای بعلا داشتن مزایایی چون گین زیاد، تشعش یکطرفه و بازدهی بالا بطور وسیع در سیستم‌های مخابراتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. آنتن شکافی حفره‌ای در سال ۱۹۸۹ توسط هیروکاوا با استفاده از مسئله مقدار مرزی به شکل معادلات انتگرالی در فناوری موجبر فلزی تحلیل شد [۱]. این آنتن با استفاده از مفهوم تحریک مود  $TE_{120}$  حفره که باعث ایجاد جریانی در جهت عمود بر شکاف می‌شود طراحی می‌گردد. سپس این آنتن در فناوری موجبر مجتمع در زیر لایه با استفاده از توزیع میدانهای مدهای  $TE_{120}$  نیز طراحی گردید [۲]. مزیت فناوری  $SIW^8$  در صفحه‌ای بودن، ارزان بودن و سادگی ساخت می‌باشد. همچنین برای کاهش بیشتر حجم از فناوری  $HMSIW^9$  برای طراحی این آنتن استفاده شده است [۳].

فناوری موجبر فاصله هوایی در سال ۲۰۰۹ توسط کیلدال معرفی گردید [۴-۵]. این فناوری نسبت به موجبرهای فلزی دارای مزیت عدم نیاز به اتصال الکتریکی صفحه بالایی موجبر می‌باشد که باعث می‌شود در فرکانسهای بالا ساخت موجبر فاصله هوایی مقرون به صرفه‌تر باشد. همچنین در ساختارهای

<sup>۴</sup> Groove gap waveguide

<sup>۵</sup> Inverted microstrip gap waveguide

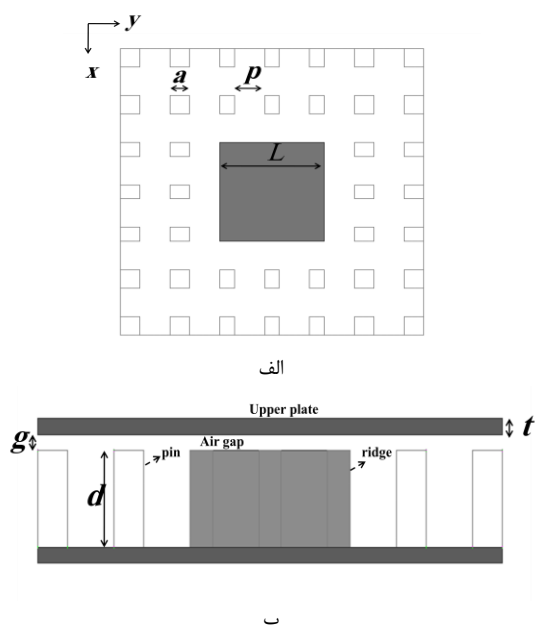
<sup>۶</sup> Ridge

<sup>۷</sup> Transverse magnetic

<sup>۱</sup> Transverse Electric

<sup>۲</sup> Substrate Integrated Waveguide

<sup>۳</sup> Half mode substrate integrated waveguide



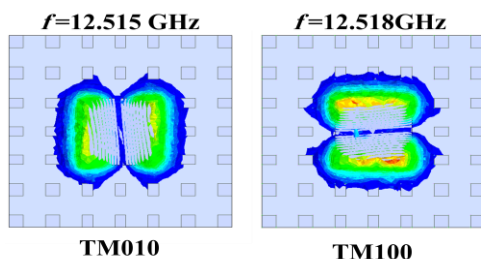
شکل ۱. حفره مربعی در فناوری RGW، الف. دید از بالا، ب. دید از پهلو

جدول ۱. ابعاد حفره ایجاد شده در فناوری RGW

ابعاد	mm	ابعاد	mm
$L$	۱۰٫۷	$d$	۶
$a$	۲	$g$	۱
$p$	۳٫۱	$t$	۱

### ایجاد اختلال

بمنظور افزایش پهنای باند آنتن مورد طراحی دو اختلال به شکل مثلث متساوی الساقین به ضلع  $c$  مطابق شکل ۳ در راستای یکی از قطرهای ریج و در دو سمت آن ایجاد می‌شود. با شبیه‌سازی این حفره توسط تحلیل مقدار ویژه نرم افزار HFSS مدهای رزونانسی آن بدست می‌آیند. شکل ۲ توزیع دامنه میدانهای الکتریکی مربوط به دو مود  $TM_{100}$  و  $TM_{010}$  حفره که مدهای اول حفره و تبهگون می‌باشند را نشان می‌دهد.



شکل ۲. توزیع دامنه میدانهای الکتریکی دو مود اول حفره

شکل ۳ توزیع میدانهای الکتریکی دو مود اول حفره را پس از ایجاد اختلال در دو سمت ریج نشان می‌دهد. این اختلال باعث

ساختار باید بگونه‌ای باشد که فرکانس تشدید مدهای تبهگون اول در باند توقف سطح  $PMC^A$  ایجاد شده باشد. سپس به مشاهده توزیع میدانهای مدهای حفره پرداخته می‌شود. با قرار دادن شکاف مستطیلی با توجه به توزیع مدهای حفره ایجاد شده در فناوری موجبر فاصله هوایی، سعی می‌شود آنتنی بهینه طراحی شود به گونه‌ای که بیشترین بهره را در ابعاد ثابت حفره داشته باشد. سپس با بررسی مدهای موجبر فاصله هوایی ریج و استفاده از اختلال در حفره پهنای باند آنتن را افزایش می‌دهیم. پس از طراحی و بهینه‌سازی آنتن توسط نرم افزار تجاری HFSS به ساخت و اندازه‌گیری آن پرداخته و نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری با هم و با نتایج کارهای قبلی مقایسه می‌گردند.

### تئوری حفره

شکل ۱ یک حفره مربعی را در فناوری موجبر فاصله هوایی ریج نشان می‌دهد. طبق این شکل یک ریج مربعی فلزی بطول  $L$  توسط دو ردیف پین فلزی که نقش  $PMC$  را ایفا می‌کنند احاطه شده است. طول پینهای مربعی  $a$  و فاصله بین پینها  $p$  و ارتفاع آنها  $d$  می‌باشد. یک صفحه فلزی با ضخامت  $t$  با فاصله هوایی  $g$  بالای پینها و ریج قرار داده می‌شود [۴-۶].

بنابراین حفره بین صفحه بالایی و ریج تشکیل می‌شود که حفره  $RGW^9$  نام دارد. شرایط مرزی این حفره بصورت دیواره  $PEC^{10}$  برای سطوح بالا و پایین و دیواره  $PMC$  برای سطوح جانبی می‌باشد که مشابه مدل حفره پچ<sup>۱۱</sup> ریزنواری می‌باشد [۹]. بنابراین مدهای رزونانسی این حفره مشابه مدهای رزونانسی<sup>۱۲</sup> پچ ریزنواری می‌باشند.

ابعاد و فاصله پینها و  $g$  بگونه‌ای در نظر گرفته می‌شوند که فرکانس تشدید مدهای اول حفره در باند توقف سطح  $PMC$  ایجاد شده توسط پینها قرار بگیرد [۱۰-۱۲]. ابعاد حفره و پینها در جدول ۱ داده شده‌اند.

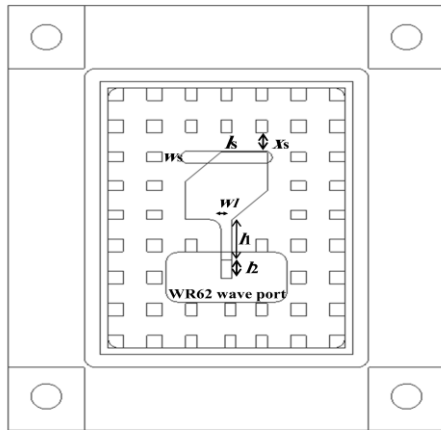
<sup>A</sup> Perfect magnetic conductor

<sup>9</sup> Ridge gap waveguide

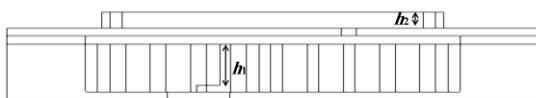
<sup>10</sup> Perfect electric conductor

<sup>11</sup> Patch

<sup>12</sup> Resonant modes



ب



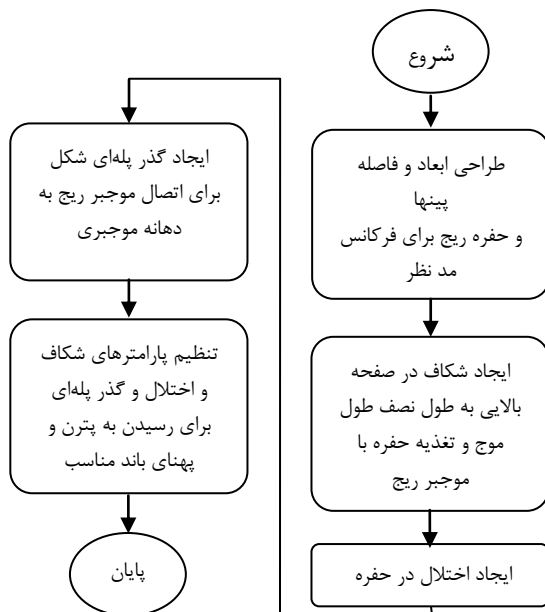
ج

شکل ۴. آنتن شکافی حفره‌ای در فناوری RGW-الف- نمای سه بعدی ب- دید از بالا ج- دید از پهلو

جدول ۲. ابعاد آنتن پیشنهادی

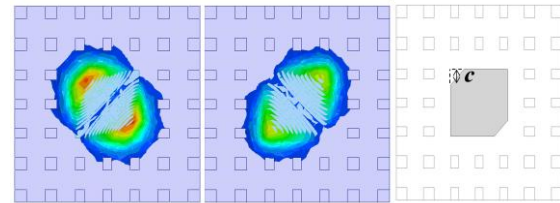
ابعاد	mm	ابعاد	mm
$x_s$	۲/۹	$l_1$	۶/۴
$l_s$	۱۲	$l_2$	۳
$w_1$	۱/۵	$h_1$	۵/۲

شکل ۵. فلوجارت روند طراحی آنتن را نشان می‌دهد که می‌توان از آن برای طراحی برای سایر باندهای فرکانسی استفاده کرد.



شکل ۵. فلوجارت روند طراحی آنتن

انحراف فرکانسهای رزونانس دو مود اول حفره می‌شود زیرا مطابق شکل ۳ این اختلال در محل ماکزیمم میدانهای یک مود و صفر میدانهای مود دیگر قرار دارد. بنابراین بر فرکانس تشدید یک مود تاثیر می‌گذارد در حالی که بر مد دیگر تاثیری ندارد. دلیل استفاده از اختلال مثلثی آسان‌تر بودن ساخت آن می‌باشد.



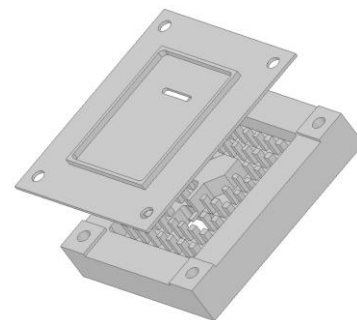
ب

الف

شکل ۳. الف- اختلال ایجاد شده در حفره RGW و ب- توزیع دامنه میدانهای الکتریکی دو مود اول آن پس از ایجاد اختلال

## طراحی آنتن

بمنظور تشعشع مناسب آنتن یک شکاف مستطیلی باریک به طول  $l_s$  و عرض  $w_s$  مطابق شکل ۴ به فاصله  $x_s$  از پینهای ردیف وسط در صفحه فلزی بالایی ایجاد می‌شود. طول ابتدایی شکاف برابر با نصف طول موج فضای آزاد و عرض آن برابر با ۲ میلیمتر که کمترین عرض قابل ساخت بود انتخاب شدند. همچنین بمنظور تغذیه آنتن یک خط RGW که از طریق یک گذر پله‌ای شکل که ابعاد آن در شکل ۴ نشان داده شده است به دهانه موجبری WR62 متصل می‌شود در نظر گرفته شدند. طول و محل شکاف و ابعاد پله و اختلال برای رسیدن به بیشترین پهنای باند و بهره توسط نرم افزار HFSS بهینه شدند. جدول ۲ ابعاد نهایی آنتن طراحی شده را نشان می‌دهد.

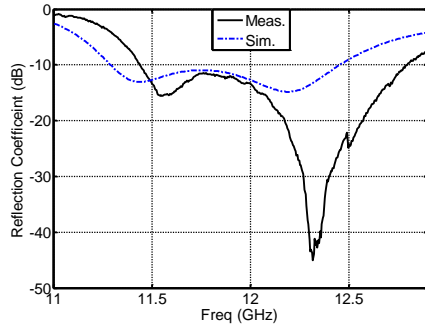


الف

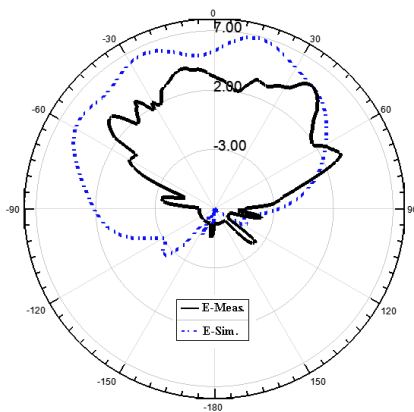
## نتایج

آنتن طراحی شده در بخش قبل توسط نرم افزار HFSS شبیه سازی شد. همچنین بمنظور تایید نتایج شبیه سازی، آنتن طراحی شده ساخته شد. شکل ۶ تصویری از آنتن ساخته شده را نشان می دهد. سپس به اندازه گیری مشخصات آنتن ساخته شده پرداخته شد. برای اندازه گیری از دستگاه تحلیل گر شبکه HP 8410C و مولد سیگنال HP 8340B استفاده شده است.

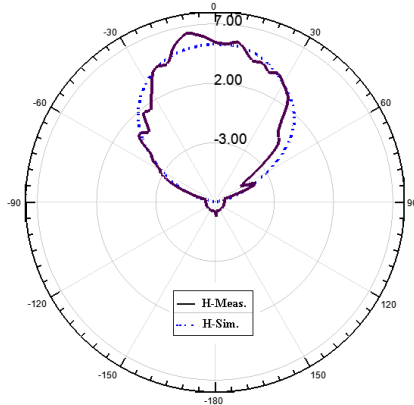
شکل ۷ نتایج شبیه سازی و اندازه گیری ضریب انعکاس آنتن پیشنهادی را نشان می دهد. همانطور که از این شکل مشخص است ضریب انعکاس در پهناهای باند نسبی بیش از ۱۰ درصد کمتر از  $-10$  dB می باشد. شیفیت کوچک فرکانسی بین نتایج شبیه سازی و ساخت دلیل عدم دقت ساخت می باشد.



شکل ۷. نتایج شبیه سازی و اندازه گیری آنتن شکافی حفره‌ای طراحی شده

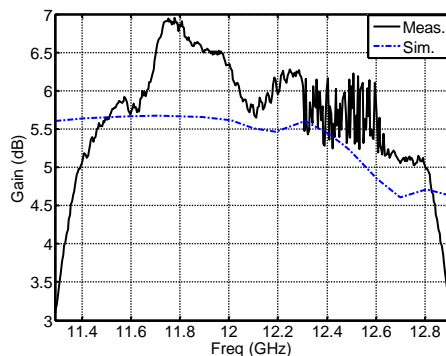


الف

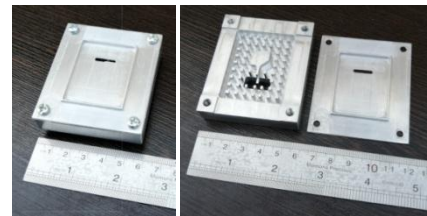


ب

شکل ۸. الگوی تشعشی آنتن در صفحات الف) E ب) H



شکل ۹. تغییرات بهره آنتن نسبت به فرکانس



شکل ۶. آنتن ساخته شده

بمنظور کاهش اثر لبه صفحه بالایی حفره RGW بر الگوی تشعشی و بهره آنتن لبه‌ای به ارتفاع  $h_2 = 2$  mm مطابق شکل ۴ روی این صفحه در نظر گرفته می شود. شکل ۸ الگوی تشعشی آنتن را در فرکانس  $11/9$  GHz در صفحات E ( $xz$ ) و H ( $yz$ ) نشان می دهد. همانطور که از این شکل مشخص است آنتن پیشنهادی دارای الگوی تشعشی جهتی و برادساید<sup>۱۳</sup> می باشد. تفاوت کم بین نتایج شبیه سازی و اندازه گیری دلیل عدم دقت ساخت و خطای اندازه گیری می باشد.

شکل ۹ تغییرات بهره آنتن را نسبت به فرکانس نشان می دهد. همانطور که از شکل مشاهده می شود آنتن در یک پهناهای باند وسیع دارای بهره حدود  $6$  dBi می باشد.

جدول ۳ مقایسه پهناهای باند نسبی و بازدهی آنتن شکافی حفره‌ای پیشنهادی را با آنتن ارائه شده در [۷] نشان می دهد. همانطور که از این جدول مشاهده می شود پهناهای باند و بازدهی آنتن پیشنهادی بیشتر از آنتن ارائه شده در [۷] می باشد.

- [3] S. A. Razavi and M. H. Neshati, "Development of a linearly polarized cavity backed antenna using HMSIW technique," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett.*, vol. 11, pp. 1307-1310, 2012.
- [4] P.-S. Kildal, "Three metamaterial-based gap waveguides between parallel metal plates for mm/submm waves," 3rd European Conference on Antennas and Propagation EUCAP, 2009.
- [5] P.-S. Kildal, E. Alfonso, A. Valero-Nogueira and E. Rajo-Iglesias, "Local metamaterial-based waveguides in gaps between parallel metal plates," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett.*, vol. 8, pp. 84-87, 2009.
- [6] A. Moghimizadeh, S. Ali. Razavi and M. H. Ostovarzadeh, "Cavity backed slot antenna based on groove gap waveguide technology," *International Conference on New Perspective in Electrical & Computer Engineering*, 2016.
- [7] A. Moghimizadeh, S. Ali. Razavi and M. H. Ostovarzadeh, "Development of A Compact and Low Profile Cavity Backed Slot Antenna Using Microstrip Gap Waveguide Technology" *Journal of Communication Engineering*, vol. 8, no. 2, 2019.
- [8] N. hassani, M. H. Ostovarzadeh, and S. A. Razavi, "Realization of a Dual Mode Filter in Ridge Gap Waveguide (RGW) Technology," *Microwave Optical Tech. Lett.*, vol. 60, pp. 1975-1979, 2018.
- [9] C. A. Balanis, *Antenna theory analysis and design*, John Wiley & Sons, 2005.
- [10] P.-S. Kildal, A. U. Zaman, E. Rajo-Iglesias, E. Alfonso, and A. Valero Nogueira, "Design and experimental verification of ridge gap waveguide in bed of nails for parallel-plate mode suppression," *IET Microwaves Antennas Propag.* vol. 5, no. 3, pp. 262-270, Feb. 2011.
- [11] A. Valero-Nogueira, M. Baquero, J. I. Herranz, J. Domenech, E. Alfonso, and A. Vila, "Gap waveguides using a suspended strip on a bed of nails," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 10, pp. 1006-1009, 2011.
- [12] E. Rajo-Iglesias and P.-S. Kildal, "Numerical studies of bandwidth of parallel-plate cut-off realized by a bed of nails, corrugations and mushroom-type electromagnetic bandgap for use in gap waveguides," *IET Microwaves Antennas Propag.* vol. 5, iss. 3, pp. 282-289, 2011.

جدول ۳. مقایسه پهنای باند نسبی و بازدهی آنتن پیشنهادی با کار اخیر

بازدهی	پهنای باند نسبی	فناوری	آنتن
≈/۹۴	≈/۲	GGW	[۷]
≈/۹۶	≈/۱۰	RGW	این مقاله

آنتن پیشنهادی می تواند بعنوان یک نمونه اولیه یا آزمایشگاهی برای یک آنتن شکافی حفره‌ای با پهنای باند زیاد باشد که می تواند بعنوان یک عنصر در آنتنهای آرایه‌ای مورد استفاده قرار گیرد که در این باند فرکانسی کاربردهایی چون مخابرات نقطه به نقطه، رادار، ستاره شناسی رادیویی و ... دارند.

### نتیجه گیری

در این مقاله یک آنتن شکافی حفره‌ای در فناوری موجبر فاصله هوایی ریح پیشنهاد شد. آنتن پیشنهادی از دو مود تبهگون اول حفره استفاده می‌نماید بدین صورت که با ایجاد اختلال در حفره فرکانس تشدید این دو مود از هم دور می‌شود. سپس با قرار دادن یک شکاف در صفحه بالایی حفره در جهت عمود بر جریانهای سطحی تشعشع آنتن شکل می‌گیرد. بمنظور تغذیه آنتن یک خط تغذیه موجبر فاصله هوایی ریح از حفره به دهانه موجبری WR62 متصل شده است. بمنظور تطبیق امپدانس آنتن یک گذر پله‌ای شکل برای اتصال خط ریح به دهانه موجبری استفاده شده است. پس از بهینه‌سازی آنتن توسط نرم افزار HFSS، این آنتن ساخته شد. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری نشان‌دهنده پهنای باند نسبی حدود ۱۰٪ و بهره حدود ۶ dBi در این پهنای باند می‌باشد.

### تصدیق

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی شماره ۷/ص/۹۹/۱۲۹ با استفاده از اعتبارات پژوهشی- پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران انجام شده است

### مراجع

- [1] J. Hirokawa, H. Arai, and N. Goto, "Cavity-backed wide slot antenna," *IEE Proceedings*, vol. 136, no. 1, pp. 29-33, 1989.
- [2] G. Q. Luo, Z. F. Hu, L. X. Dong, and L. L. Sun, "Planar slot antenna backed by substrate integrated waveguide cavity," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett.*, vol. 7, pp. 236-239, 2008.