

# ارائه روشی جدید برای طراحی و پیاده سازی آنتن موج نشستی موجبری مبتنی بر موجبر مستطیلی دارای شکاف طولی بلند به کمک کامپیوتر

هادی فائزی<sup>۱</sup>، سجاد صادقی<sup>۲</sup>، کریم محمد پور اقدم<sup>۲</sup>، فرخ حجت کاشانی<sup>۱</sup> و مجید طیرانی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت، Faezi@iust.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران Sajjadsadeqi@alumni@ut.ac.ir

چکیده - در این مقاله روش ساده‌ای برای طراحی آنتن موج نشستی متشکل از یک موجبر مربعی و شکاف طولی بلند بر روی دیواره پهن آن به کمک شبیه‌سازی کامپیوتری ارائه شده است. در این روش که به کمک نرم افزار HFSS انجام می‌شود، ابتدا تضعیف موجبر به ازای محل قرار گیری شکاف نسبت به مرکز موجبر توسط HFSS محاسبه شده و در ادامه با بهره گیری از نرم افزار مطلب، محل دقیق شکاف نسبت به طول موجبر برای توزیع دلخواه روزه تشعشعی انجام می‌شود. در پایان یک نمونه آنتن شکافی با توزیع تیلور در باند فرکانسی Ku طراحی و ساخته شده است. با مقایسه نتایج شبیه سازی و اندازه گیری، درستی این روش تأیید می‌شود. کلید واژه- آنتن موج نشستی، شکاف طولی بلند، طراحی به کمک کامپیوتر و HFSS

خود نشان می‌دهند [۷]. تلاشهای زیادی برای وزن دهی روزه تشعشعی و رسیدن به سطح گلبه‌های جانبی مورد نظر انجام شده است که عموماً بر مبنای محاسبات پیچیده یا روشهای عددی استوار هستند [۷ و ۸]. امروزه با پیدایش و همگانی شدن کامپیوتر پیاده سازی این روشها به کمک کامپیوتر انجام می‌شود که نیازمند داشتن دانش عمیق و تسلط بر مباحث مربوطه است. در این مقاله به کمک نرم افزار HFSS روشی برای طراحی و پیاده سازی این نوع از آنتن‌ها با توزیع مناسب روزه تشعشعی و دستیابی به سطح گلبه‌های جانبی دلخواه ارائه می‌شود که بسیار ساده و قابل فهم می‌باشد. در ادامه این مقاله ابتدا مبانی تئوری این آنتن‌ها به صورت خلاصه بررسی شده و سپس روش طراحی پیشنهادی ما ارائه می‌شود. در پایان با شبیه سازی ساختار طراحی شده و مقایسه آن با نتایج حاصل از اندازه گیری عملکرد نمونه ساخته شده، درستی این روش تأیید می‌شود.

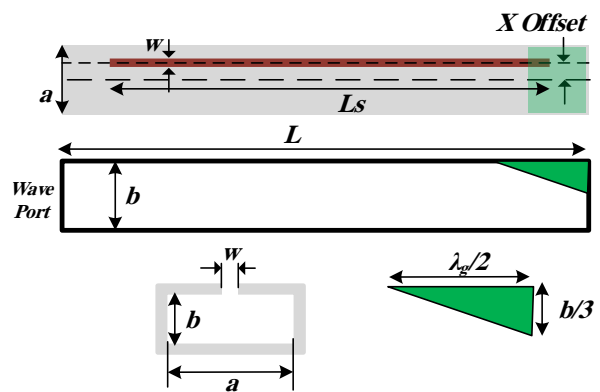
## ۲- مبانی تئوری

ساختار فیزیکی یک آنتن موج نشستی متشکل از یک موجبر نشستی به طول  $L$  است که نشت توان در طول آن سبب تشعشع توان می‌شود. ویژگیهای انتشاری مودهای نشستی در جهت طولی توسط ثابت فاز  $\beta$  و ثابت نشت  $\alpha$  تعیین می‌گردد که  $\alpha$  معیاری از میزان نشت توان یا به عبارت دیگر میزان تشعشع توان بر واحد طول است. طول  $L$  ایجاد کننده روزه‌ی آنتن است و دامنه و فاز موج رونده در طول روزه بوسیله‌ی مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  به عنوان

## ۱- مقدمه

آنتن‌های موج نشستی از سال ۱۹۴۰ که معرفی شدند [۱] تا به امروز کاربردهای زیادی در انواع سیستم‌های مخابراتی و راداری داشته‌اند. این نوع از آنتن‌ها از ساختاری ساده تشکیل شده‌اند که قابلیت‌های جذابی از قبیل سمتگرایی بالا، پهنای باند زیاد و توانایی جاروب پترن تشعشعی با فرکانس را دارند [۲، ۳ و ۴]. این آنتن‌ها از ابتدای معرفی تا کنون در ساختارهای مختلفی پیاده سازی شده‌اند و تا امروز تحقیقات زیادی را به خود اختصاص داده‌اند [۵، ۶، ۷ و ۸]. آنتن شکافی موجبری ساده ترین و پر کاربردترین نوع از آنتن‌های موج نشستی می‌باشد که با ایجاد یک یا چند شکاف در دیواره‌های موجبرهای دایروی یا مستطیلی، بوجود می‌آید. ایجاد یک شکاف طولی بلند در یکی از دیواره‌های کناری یا بالایی موجبر مستطیلی، یک آنتن پر کاربرد با ساختاری ساده و قابلیت‌های فراوان از نوع موج نشستی را تشکیل می‌دهد. امروزه برای کاربردهای موج میلیمتری و به منظور یکپارچه سازی آنتن با دیگر ادوات رادیویی ساختارهای SIW معرفی شده‌اند که معادل موجبرهای مستطیلی می‌باشند [۶]. به این ترتیب آنتن شکافی طولی در ساختارهای SIW هم قابلیت پیاده سازی داشته و بسیار پر کاربرد می‌باشد. آنتن‌های شکافی تشکیل شده از یک شکاف طولانی در دیواره پهن موجبر مستطیلی در صورتیکه روزه تشعشعی وزن دهی نشود، مثلاً وقتیکه یک شکاف طولی یکنواخت داشته باشیم، سطح گلبه‌های جانبی بالایی از

تابعی از  $z$  تعیین می‌گردد. مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  به هندسه‌ی سطح مقطع موجبر وابسته هستند و تعیین  $\alpha$  و  $\beta$  چه به صورت تئوری یا آزمایشگاهی در اکثر موارد مشکل‌ترین بخش طراحی است [۲]. در صورت مشخص بودن این مقادیر به عنوان تابعی از فرکانس و هندسه‌ی سطح مقطع موجبر، ویژگیهای آنتن موج نشستی شامل جهت بیم اصلی، عرض بیم، بازدهی تشعشعی و تغییرات زاویه‌ی اسکن با فرکانس و تغییرات مورد نیاز برای  $\alpha$  به منظور کنترل سطح لوب کناری به راحتی قابل حصول است [۲]. در طراحی‌ها سعی میشود که در حدود ۹۰ درصد توان در طول مسیر تا انتهای موجبر تشعشع کند و توان باقیمانده نیز توسط یک بار تطبیق در انتهای موجبر جذب شود. در یک آنتن موج نشستی با مقادیر معلوم برای افت و ثابت فاز، ویژگیهای تشعشعی آنتن با تقریب خوبی با روابط ساده  $\sin\theta_m = \beta/k_0$  و  $\Delta\theta \approx 1/(L/\lambda_0 \cos\theta_m)$  قابل بیان است. در اینجا  $\theta_m$  زاویه‌ی بیم ماکزیمم نسبت به broadside،  $L$  طول آنتن موج نشستی،  $\Delta\theta$  عرض بیم و  $k_0$  عدد موج فضای آزاد است. دیده می‌شود که با تغییر ثابت فاز در داخل موجبر، زاویه بیم اصلی به سمت انتهای آنتن یا end fire تغییر می‌کند. به این ترتیب با طراحی مناسب آنتنی خواهیم داشت که با تغییر فرکانس پرتوی اصلی اش از راستای broadside به سمت end fire جاروب می‌شود.



شکل ۱: ساختار آنتن تست در محیط HFSS

### ۳- روال طراحی پیشنهادی

مهمترین پارامتر در طراحی آنتن موج نشستی متشکل از یک موجبر مستطیلی و یک شیار طولی بلند در دیواره آن، زاویه بیم اصلی یا محدوده اسکن بیم می‌باشد. با توجه به زاویه بیم اصلی نسبت به محور broadside آنتن، یعنی  $\theta_m$ ، ابعاد سطح مقطع موجبر مورد نظر مشخص می‌شود. با مشخص شدن ابعاد سطح مقطع با توجه به پهنای بیم مورد نیاز طراحی، طول تقریبی آنتن

بدست خواهد آمد. با مشخص شدن ساختار موجبر اصلی از قبیل ابعاد سطح مقطع و طول آنتن در قدم بعدی لازم است که شکل و ابعاد شکاف یا شیار آنتن که مسوول تشعشع از آنتن است، محاسبه شود.

از آنجاییکه با تغییر محل شکاف از مرکز دیواره پهن به سمت دیواره جانبی، میزان توان تشعشع شده از آنتن و به تبع آن تضعیف موجبر زیاد می‌شود، می‌توان با تغییر محل شکاف روی دیواره پهن، توزیع روزه تشعشعی آنتن را کنترل نمود. محاسبه دقیق محل قرار گیری شکاف روی دیواره بالایی نسبت به طول آنتن مهمترین و مشکل‌ترین بخش طراحی این آنتن است. برای این منظور لازم است که میزان تلفات توان بر واحد طول، بر حسب انحراف یک شکاف طولی یکنواخت از مرکز دیواره موجبر را داشته باشیم. با توجه به اینکه ایجاد شکاف در موجبر تا حدی می‌تواند توزیع میدانهای داخل موجبر را به هم بزند، برای محاسبه این تلفات اغلب از روشهای عددی پیچیده استفاده می‌شود [۷]. با ظهور کامپیوترها و نرم افزارهای تخصصی طراحی و تحلیل آنتن، در سالهای اخیر به کمک نرم افزارهای مرتبط و اغلب با سعی و خطا، این طراحی‌ها انجام می‌شود. در این مقاله به کمک نرم افزار HFSS میزان تلف شکاف واقع بر دیواره پهن موجبر به ازای فاصله آن از مرکز دیواره را محاسبه می‌کنیم. برای این منظور به کمک نرم افزار HFSS یک آنتن تست با طول محدود (مثلاً  $5\lambda$ ) که یک شکاف طولی یکنواخت روی آن قرار گرفته مطابق شکل (۱)، شبیه‌سازی شده و با تغییر میزان انحراف شکاف از مرکز موجبر، تلفات آن به صورت نرمالیزه شده در واحد طول، محاسبه می‌شود. برای محاسبه تلفات باید دقت کنیم که فقط تلفات به خاطر قرار گیری شکاف روی موجبر محاسبه شود و بقیه منابع تلف از قبیل جنس بدنه یا جنس دی الکتریک داخل موجبر را تا حد ممکن حذف کنیم. در مرجع [۸] برای این منظور در دو سر موجبر پورت تعریف شده و به منظور حذف بقیه تلفات، جنس دیواره ها PEC و تلفات دی الکتریک صفر در نظر گرفته شده است. تلفات بین پورت ۱ و ۲ را معادل تلفات شکاف یا توان تشعشع شده از شکاف در نظر گرفته است. این در حالی است که یک منبع دیگر برای تلفات در چنین سیستمی وجود دارد که در مرجع [۸] به آن اشاره‌ای نشده است و به همین دلیل پس از محاسبات صورت گرفته لازم است که به صورت دستی بهینه‌سازیهایی به منظور رسیدن به عملکرد بهتر به صورت سعی و خطا انجام شود. با حرکت امواج داخل موجبر، بخشی از توان داخل موجبر توسط شکاف به بیرون تشعشع می‌کند و با توجه به ضخامت هرچند اندک دیواره بالایی در داخل شکاف میدانهایی

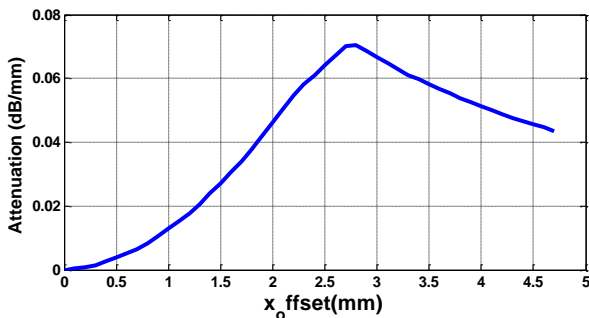
با توجه به رابطه  $\sin\theta_m = \beta/k_0$  با افزایش  $\beta$  زاویه خم شدگی نسبت به محور broadside افزایش خواهد یافت. برای شروع طراحی، فرض می‌کنیم در فرکانس 16.5 GHz باید زاویه کج شدگی آنتن ۴۰ درجه باشد. به این ترتیب طبق رابطه زیر [۲] خواهیم داشت:

$$\beta = k \times \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} = k_0 \sqrt{\epsilon_r} \times \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda/\sqrt{\epsilon_r}}{\lambda_c}\right)^2}$$

$$\sin\theta_m = \frac{\beta}{k_0} = \sqrt{\epsilon_r - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}$$

$$a = \lambda_c/2 = \frac{\lambda_0}{2 \times \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_m}}$$

که در آن  $a$  مطابق شکل (۱) اندازه دیواره پهن موجبر و  $\epsilon_r$  ثابت گذردگی الکتریکی ماده داخل موجبر است. برای موجبر پر شده از هوا مقدار  $\epsilon_r$  برابر یک قرار داده می‌شود. به ازای  $\theta_m=40$  در رابطه فوق  $a = 11.8 \text{ mm}$  حاصل می‌شود و مقدار  $b$  با توجه به محدودیت‌های جانمایی 3mm در نظر گرفته شده است. طول روزنه تشعشعی با توجه به رابطه  $\Delta\theta \approx 1/(L/\lambda_0 \cos\theta_m)$  مشخص می‌شود. با توجه به حداقل پهنای پرتوی ۳ درجه در فرکانس 16.5 GHz مقدار تقریبی این طول 430 یا  $23\lambda$  بدست می‌آید. البته با توجه به حدود دو سانتیمتر فاصله از ابتدا و انتهای موجبر تا شکاف، طول کلی آنتن 450 mm خواهد بود.



شکل ۲: میزان تضعیف شکاف بر واحد طول به ازای انحراف از مرکز

با شبیه سازی آنتن تست به طول  $L=100 \text{ mm}$  و طول شکاف  $L_s=90 \text{ mm}$  و پهنای شکاف  $w=3 \text{ mm}$  دیده می‌شود که حداکثر زاویه نشستی اندکی با ۴۰ درجه متفاوت است. علت این امر می‌تواند به دلیل وجود شکاف در دیواره موجبر و تغییر ثابت فاز موجبر نسبت به موجبر بسته باشد که قابل پیش بینی بود. برای جبران این اثر طول دیواره پهن را اندکی تغییر داده شده و به کمک شبیه سازی مقدراری بهینه  $(a=12.5 \text{ mm})$  برای آن انتخاب می‌شود. با تغییر میزان انحراف مرکز شکاف از مرکز

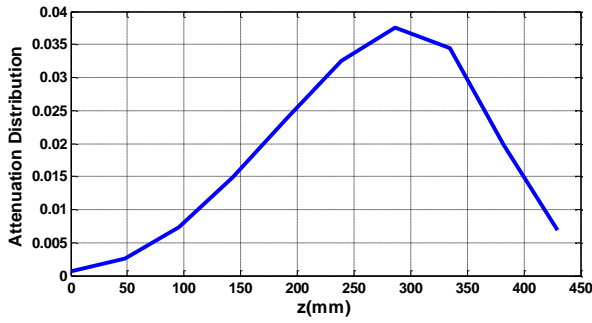
تشکیل می‌شوند. با پایان یافتن شکاف در انتهای موجبر این امواج به یک اتصال کوتاه می‌رسند که باعث برگشت توان به سمت اول موجبر شده و منجر به تشعشع در جهت  $\theta_m$  - خواهد شد. در این صورت میزان انعکاس از لبه شکاف در محاسبات HFSS آورده نشده و در پایان لازم است با سعی و خطا بهینه-سازیهایی در طراحی انجام شود. پیشنهاد این مقاله حذف این عامل تلف علاوه بر دیگر عوامل تلف است که نتیجه آن رسیدن به یک روال طراحی بدون نیاز به بهینه سازی می‌باشد. برای این منظور پیشنهاد می‌شود مطابق شکل (۱) انتهای شکاف با یک جاذب پوشانده شود تا امواج برگشتی از انتهای شکاف به مقدار لازم تضعیف شوند. در این روش به جای استفاده از دو پورت برای تحریک آنتن تست از یک پورت استفاده می‌شود و سر دیگر موجبر به صورت مناسب با جاذب پر شده و بعد از آن اتصال کوتاه می‌شود. با محاسبه بازدهی تشعشعی و قرار دادن آن در رابطه (۱) میزان تلف به ازای هر انحراف شکاف از مرکز موجبر بدست می‌آید. واضح است که بازدهی تشعشعی محاسبه شده فقط مربوط به تشعشع از شکاف طولی بلند در جهت  $\theta_m$  است و پیرو آن تلف به دست آمده فقط به دلیل نشت توان از شکاف در جهت جلو است.

$$\alpha = 10 \log(1 - R.E) \quad (1)$$

مطابق آنچه در شکل (۱) نشان داده شده است، برای جلوگیری از برگشت موج به دلیل اتصال کوتاه شدن انتهای شکاف، لازم است که جاذب حداقل به میزان  $\lambda_g/4$  انتهای شکاف را بپوشاند. شکل جاذب در انتهای موجبر باید به گونه‌ای انتخاب شود که توان برگشتی در پورت ورودی حداقل شده باشد. با توجه به بهینه سازی‌های انجام شده لازم نیست که جاذب انتهای موجبر را به صورت کامل پر کند. استفاده از یک ساختار گوه‌ای شکل با قاعده‌ای در حدود یک سوم ارتفاع موجبر و طولی در حدود  $\lambda_g/2$  می‌تواند نتایج خوبی به همراه داشته باشد، شکل (۱). در طراحی‌های این مقاله از جاذب شماره MF-124 از شرکت Emerson-Coming استفاده شده است.

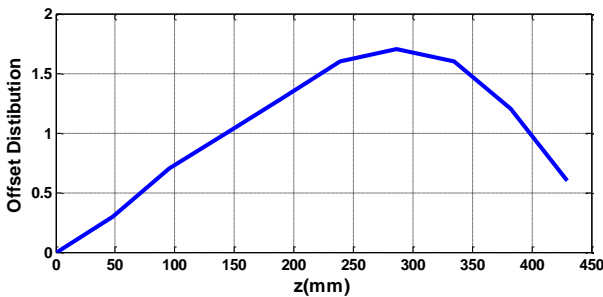
### ۳-۱- پیاده سازی روال طراحی پیشنهادی

با توجه به روال طراحی گفته شده در بخش قبل، یک نمونه آنتن موج رونده در باند Ku مبتنی بر موجبر شکاف دار طراحی شده است. آنتن مورد نظر در بازه فرکانسی 13.5 ~ 16.5 GHz باید تا ۴۰ درجه نسبت به محور broadside را بتواند جاروب نماید. می‌دانیم با افزایش فرکانس موج، مقدار  $\beta$  افزایش می‌یابد.

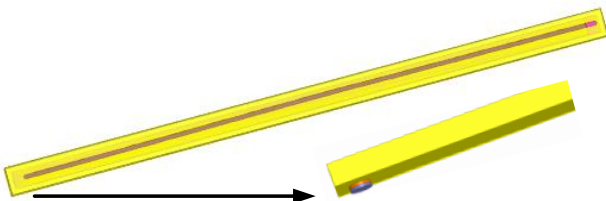


شکل ۴: توزیع تضعیف مورد نیاز در طول روزنه متناظر با شکل ۳

بخش اصلی طراحی تطبیق منحنی بدست آمده در شکل (۴) به منحنی بدست آمده در شکل (۲) است که به راحتی توسط نرم افزاری مانند مطلب قابل پیاده سازی است. با تلفیق این دو منحنی با یکدیگر منحنی انحراف شکاف از مرکز بر حسب طول روزنه بدست می آید که در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به ابعاد بدست آمده برای آنتن شامل:  $a=12.5mm$  و  $b=3mm$  و  $L=450mm$  و توزیع مکان شکاف مطابق شکل (۳) ساختار اصلی آنتن مانند شکل (۶) در محیط HFSS مدل شده و پس از مشاهده نتایج و رضایت بخش بودن آنها اقدام به ساخت یک نمونه از آنتن شده است. نتایج شبیه سازیها در شکل (۷) آورده شده است، که نشان دهنده جاروب پترن تشعشعی در ناحیه مورد نظر و با سطح گلبرگ جانبی بهتر از 27dB در بازه فرکانسی 13.5 ~ 17.5 GHz می باشد. در شکل (۸) نتایج اندازه گیری آورده شده است که تطبیق خوبی با نتایج شبیه سازی دارد. از این مقایسه می توان نتیجه گرفت که روش پیشنهاد شده در این مقاله مورد تأیید می باشد.



شکل ۵: توزیع انحراف شکاف از مرکز موجبر در طول روزنه متناظر با شکل ۴



شکل ۶: نمایی از ساختار آنتن در محیط HFSS - در مدل شبیه سازی شده آنتن به کمک کانکتور SMA تحریک شده است.

موجبر به میزان 4.5 mm در پله های 0.5 mm و شبیه سازی آنتن تست مطابق شکل (۱) و مقادیر جدول (۱)، به کمک نرم افزار HFSS، مقدار بازدهی تشعشعی برای هر پله بدست می آید. با جایگزین کردن بازدهی تشعشعی هر پله در رابطه (۱) میزان تضعیف برای طول شکاف بر حسب مقدار انحراف از مرکز بدست می آید. با نرمالیزه کردن این تضعیف به طول شکاف مطابق شکل (۲) منحنی تضعیف بر حسب میزان انحراف شکاف از مرکز موجبر بدست می آید.

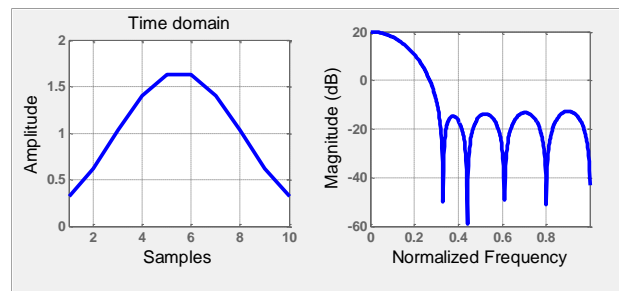
جدول ۱: مقادیر پارامترهای آنتن تست برای شبیه سازی در HFSS

$a$	12.5 mm	عرض موجبر تست
$b$	3 mm	ارتفاع موجبر تست
$L$	100 mm	طول موجبر تست
$Ls$	90 mm	طول شکاف یکنواخت
$w$	3 mm	عرض شکاف یکنواخت

با داشتن منحنی شکل (۲)، توزیع دلخواه برای روزنه آنتن هدف انتخاب می شود. برای آنتن این مقاله توزیع تیلور با سطح لوبهای جانبی  $SLL=-35 dB$  مطابق شکل (۳) انتخاب شده است. برای تبدیل توزیع انتخاب شده به تضعیف مورد نیاز در طول آنتن از رابطه شناخته شده زیر استفاده می شود [۳ و ۲].

$$\alpha(l) = \frac{0.5|A(l)|^2}{\frac{1}{1-R} \int_0^L |A(\xi)|^2 d\xi - \int_0^L |A(\xi)|^2 d\xi}$$

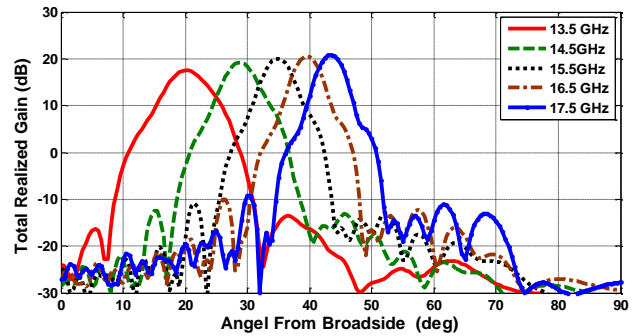
در این رابطه R میزان توانی است که به جاذب یا بار انتهای آنتن می رسد و A توزیع روزنه (در اینجا توزیع تیلور) و L طول روزنه یا همان طول شکاف می باشد. با محاسبه این عبارت توزیع تلف روی روزنه یا شکاف بر حسب طول آن بدست می آید. این منحنی در شکل (۴) محاسبه شده است.



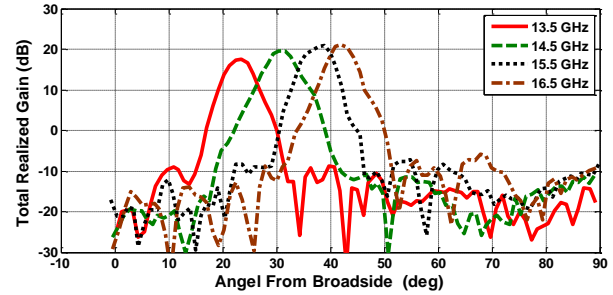
شکل ۳: توزیع ده نقطه ای تیلور برای رسیدن به  $SLL=-35dB$

## مراجع

- [1] W. W. Hansen, BRadiating electromagnetic waveguide, U.S. Patent 2.402.622, 1940.
- [2] A. A. Oliner and D. R. Jackson, BLeaky-wave antennas, in Antenna Engineering Handbook, J. L. Volakis, Ed. New York: McGraw-Hill, 2007
- [3] D. R. Jackson and A. A. Oliner, BLeaky-wave antennas, in Modern Antenna Handbook, C. Balanis, Ed. New York: Wiley, 2008.
- [4] C. H. Walter, Traveling Wave Antennas, New York: McGraw-Hill, 1965.
- [5] J. L. Gómez-Tornero, A. T. Martínez, D. C. Rebenaque, M. Gugliemi, and A. Álvarez-Melcón, "Design of tapered leaky-wave antennas in hybrid waveguide-planar technology for millimeter wave band applications," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 53, no. 8, pp. 2563–2578, Aug. 2005.
- [6] D. Deslandes and K. Wu, "Substrate integrated waveguide leaky-wave antenna: concept and design considerations," presented at the Asia-Pacific Microwave Conf., 2005.
- [7] F. Whetten and C. A. Balanis, "Meandering long slot leaky-wave antennas," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 39, no. 11, pp. 1553–1559, Nov. 1991.
- [8] Y. J. Cheng, W. Hong, K. Wu, and Y. Fan, "Millimeter-wave substrate integrated waveguide long slot leaky-wave antennas and two-dimensional multibeam applications," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 59, no. 1, pp. 40–47, Jan. 2011.



شکل ۷: پترن های شبیه سازی شده در چند فرکانس مختلف



شکل ۸: پترن های اندازه گیری شده در چند فرکانس مختلف

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله روش جدیدی برای طراحی و پیاده سازی آنتن موج نشستی مبتنی بر موجبر مستطیلی با یک شکاف طولی بلند در دیواره پهن موجبر ارائه شده است. در این روش به کمک نرم افزار HFSS میزان تلف شکاف طولی بلند بر واحد طول به ازای انحراف مرکز شکاف از مرکز دیواره پهن موجبر به روشی جدید محاسبه شده و سپس با تطبیق این تلف به تلف مورد نیاز برای توزیع روزنه تشعشعی، مکان شکاف بر حسب طول موجبر محاسبه شده و به کمک آن آنتن مورد نظر پیاده سازی می شود. در روش پیشنهادی به کمک یک جاذب در انتهای موجبر و انتهای شکاف، تلفات موج برگشتی از موج پیش رونده تفکیک شده و با دقت خوبی تلف شکاف به ازای انحراف از مرکز موجبر محاسبه شده است. بررسی نتایج شبیه سازی و اندازه گیری نشان دهنده درستی روش پیشنهادی می باشد.

## سپاسگزاری

نویسندگان مقاله سپاس و تشکر خود را از آزمایشگاه تأیید نمونه آنتن دانشگاه تهران به خاطر انجام اندازه گیری ها ابراز می دارند.