

# تحلیل، طراحی و ساخت آنتن بوقی TEM

محمد خلیج امیرحسینی و رضا درخشنده

غیریکنواخت باریک شونده<sup>۴</sup> استفاده شده است.

در بخش ۲، میدانهای دور و منحنی تشعشی آنتن بدست می‌آیند. در بخش ۳، سمتگرایی<sup>۵</sup> آنتن و نحوه بهینه شدن آن و نیز سمتگرایی بهینه برحسب فرکانس بررسی شده و پهنای باند آنتن بدست می‌آید. در بخش ۴، ضریب انعکاس آنتن و نحوه تغییرات آن برحسب فرکانس مشخص می‌شود. نهایتاً در بخش ۵، دو نمونه آنتن بوقی TEM طراحی شده و یکی از آنها توسط یک نرم‌افزار قوی شبیه‌سازی شده و دیگری ساخته و آزمایش می‌شود.

## ۲- میدانها و منحنی تشعشی آنتن بوقی TEM

آنتن بوقی TEM یک آنتن روزنه‌ای<sup>۶</sup> می‌باشد که توسط یک موجبر صفحه موازی تغذیه می‌شود. برای یافتن میدانهای الکترومغناطیسی ناحیه دور یک آنتن روزنه‌ای کافیهست که میدانهای الکتریکی مماسی روی سطح روزنه را بدانیم. آنتن بوقی TEM را می‌توان همانند یک موجبر صفحه موازی دانست که صفحات آن همزمان هم پهن‌تر شده و هم از یکدیگر دورتر می‌شوند. لذا می‌توان فرض نمود که میدان الکتریکی بین صفحات همانند میدانهای یک خط انتقال غیریکنواخت بصورت TEM می‌باشند. بعلاوه اگر این آنتن با فضای آزاد نیز تطبیق داده شود، میدانهای مذکور به صورت موج رونده<sup>۷</sup> نیز خواهند بود. شکل ۲، توزیع تقریبی میدان الکتریکی این آنتن را روی دهانه و دیواره‌های جانبی آن نشان می‌دهد. در واقع می‌توان میدانهای الکتریکی داخل آنتن را به صورت کروی و در حال حرکت به سمت دهانه آن دانست. در نتیجه، توزیع میدان روی سطح دهانه به علت اختلاف طول مسیرها غیریکنواخت بوده و دارای فاز و دامنه متفاوت در نقاط مختلف آن می‌باشد. البته با تقریب خوبی می‌توان از تغییرات دامنه میدان دهانه صرف‌نظر نمود و تنها تقریب اول تغییرات فاز را در نظر گرفت. بر همین اساس، رابطه زیر با توجه به پارامترهای شکل ۱، بیانگر میدان الکتریکی روی سطح دهانه آن می‌باشد

$$\vec{E}_a(x, y, z) \approx E_0 e^{-jk \left( \frac{x^2}{2R_1} + \frac{y^2}{2R_2} \right)} \hat{u}_y \quad (2)$$

که در آن  $k = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$  عدد موج فضای آزاد می‌باشد. البته با توجه به وجود اختلاف فاز خطی در میدانهای دیواره‌های جانبی آنتن، تشعش آنها همانند تشعش آنتنهای موج رونده در جهتی غیر از راستای آنها خواهد بود. علاوه بر این، بین راستای دیواره‌های جانبی و راستای اصلی این آنتن، اختلاف زاویه  $\phi$  وجود دارد. بنابراین تشعش میدانهای دیواره‌های جانبی آنتن، از راستای اصلی آنتن (روبروی آنتن) دور بوده و ضمناً از تشعش میدانهای هم‌فاز دهانه آنتن ضعیف‌تر خواهد بود. لذا با تقریب خوبی می‌توان از تشعش میدانهای دیواره‌های جانبی صرف‌نظر نمود و تنها میدانهای دهانه آنتن را در نظر گرفت. این تقریب، از پیچیدگی روابط

چکیده: در این مقاله پس از معرفی آنتن بوقی TEM به عنوان یک آنتن فوق پهن باند (UWB) به تحلیل و طراحی آن پرداخته می‌شود. ابتدا میدانهای ناحیه دور، منحنی‌های تشعشی، سمتگرایی و پهنای باند تشعشی این آنتن بدست آمده‌اند. سپس با استفاده از رفتار خط انتقالی آنتن، امپدانس مشخصه و ضریب انعکاس ورودی آن برحسب فرکانس ارائه شده‌اند. در ادامه با توجه به روابط حاصله برای این آنتن، یک روش طراحی بهینه برای آن ارائه شده و بر همین اساس دو آنتن طراحی شده‌اند. در خاتمه با استفاده از شبیه‌سازی یا ساخت و آزمایش آنتنهای طراحی شده، صحت روابط حاصله تأیید شده‌اند.

کلیدواژه: آنتن بوقی TEM، آنتن فوق پهن باند، منحنی تشعشی، مدل خط انتقالی باریک شونده، طراحی و ساخت.

## ۱- مقدمه

آنتن بوقی TEM<sup>۱</sup> یک آنتن فوق پهن باند<sup>۲</sup> است و می‌تواند برای ارسال و دریافت پالسهای باریک با عرض چند صد پیکوثانیه به کار رود و کاربردهای زیادی از جمله به عنوان آنتن رادارهای نفوذکننده زمینی<sup>۳</sup> دارد. این آنتن در واقع از یک خط انتقال "دو صفحه موازی" تشکیل شده است به طوری که پهنای صفحات و فاصله آنها از یکدیگر به تدریج و بصورت خطی زیاد می‌شوند. بنابراین چون این آنتن می‌تواند امواج TEM منتشر کند آن را آنتن بوقی TEM می‌گویند. از طرف دیگر می‌توان تصور نمود که آنتن بوقی TEM یک آنتن روزنه‌ای با ابعاد  $A \times B$  است که توسط یک موجبر صفحه موازی تغذیه می‌شود. شکل ۱، ساختار کلی این آنتن را نشان می‌دهد. طول فیزیکی این آنتن عبارتست از

$$R = R_E = R_H \quad (1)$$

تاکنون گزارشهایی در مورد چگونگی استفاده از این آنتن‌ها و نیز خصوصیات آنها ارائه شده است [۱] تا [۴]. از جمله خصوصیات ذکر شده برای این آنتن‌ها پهنای باند زیاد آنها  $f_U/f_L \geq 2$  می‌باشد. البته اکثر این گزارشها حاصل کارهای عملی و اندازه‌گیری می‌باشند و کمتر حاوی تحلیل و بویژه طراحی تئوریک این آنتن‌ها هستند. در این مقاله سعی شده است تا روابطی کامل و در عین حال ساده برای تحلیل و طراحی این آنتن‌ها ارائه شود. برای تحلیل منحنی تشعشی و بهره از تحلیل آنتنهای روزنه‌ای و برای تحلیل ضریب انعکاس ورودی از مبحث خطوط انتقال

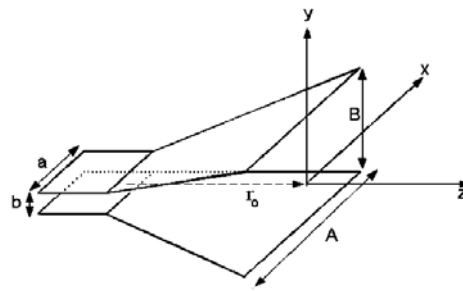
این مقاله در تاریخ ۱۹ اسفند ماه ۱۳۸۲ دریافت و در تاریخ ۲۸ آبان ماه ۱۳۸۳ بازنگری شد.

محمد خلیج امیرحسینی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک تهران کدپستی ۱۶۸۴۴ (email: khalaja@iust.ac.ir)

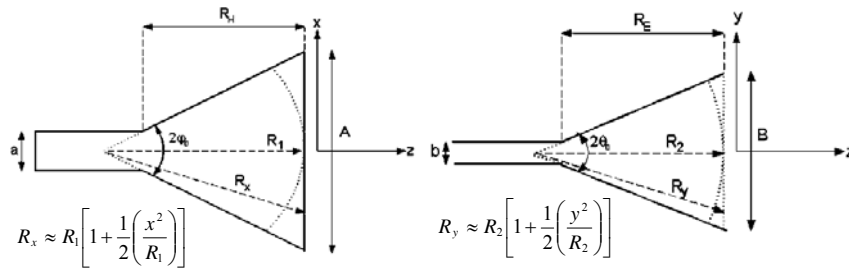
رضا درخشنده، دانشکده مهندسی برق، مخابرات، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک تهران کدپستی ۱۶۸۴۴

4. Tapered Transmission Lines  
5. Directivity  
6. Aperture Antenna  
7. Traveling Wave

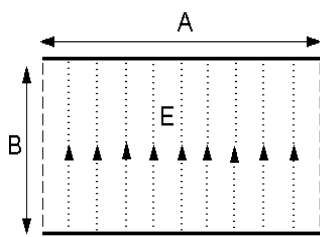
1. TEM Horn  
2. Ultra Wide Band Antenna  
3. Ground Penetrating Radars



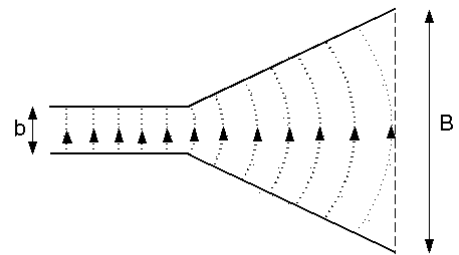
$$R_E = R_H = R$$



شکل ۱: آنتن بوقی TEM، ساختار سه بعدی و دو دید از بالا و کنار آن.



(ب)



(ف)

شکل ۲: توزیع تقریبی میدان الکتریکی در آنتن بوقی TEM، (الف) روی دیواره‌های جانبی آنتن، (ب) روی سطح دهانه آنتن.

که در آن  $I_\parallel$  و  $I_\perp$  توابعی بدین صورت هستند.

$$I_\parallel(\theta, \varphi) = e^{j\frac{\pi R_1}{\lambda} u^2} [C(m_\parallel) - jS(m_\parallel) - C(n_\parallel) + jS(n_\parallel)] \quad (۶)$$

$$I_\perp(\theta, \varphi) = e^{j\frac{\pi R_\perp}{\lambda} v^2} [C(m_\perp) - jS(m_\perp) - C(n_\perp) + jS(n_\perp)]$$

در رابطه (۶)

$$m_\parallel = \frac{1}{\sqrt{2\lambda R_1}} (A - r R_1 \sin \theta \cos \varphi)$$

$$m_\perp = \frac{1}{\sqrt{2\lambda R_\perp}} (B - r R_\perp \sin \theta \sin \varphi)$$

(۷)

$$n_\parallel = \frac{-1}{\sqrt{2\lambda R_1}} (A + r R_1 \sin \theta \cos \varphi)$$

$$n_\perp = \frac{-1}{\sqrt{2\lambda R_\perp}} (B + r R_\perp \sin \theta \sin \varphi)$$

و  $C(x)$  و  $S(x)$  نیز انتگرالهای فرنل<sup>۲</sup> به شرح زیر هستند.

$$C(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi x^2}{2}\right) dx$$

(۸)

$$S(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi x^2}{2}\right) dx$$

مربوط به تحلیل و بویژه طراحی این آنتن می‌کاهد. بعلاوه با به کارگیری جاذبه‌های میکروویو، می‌توان تشعشع میدانهای دیواره‌های جانبی را تا حد زیادی از بین برد.

با استفاده از میدان الکتریکی دهانه آنتن، (۲)، میدانهای ناحیه دور توسط روش هویگنس<sup>۱</sup> چنین خواهند بود [۵]

$$E_\theta = jk \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (1 + \cos \theta) P_y \sin \varphi \quad (۳)$$

$$E_\varphi = jk \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (1 + \cos \theta) P_y \cos \varphi$$

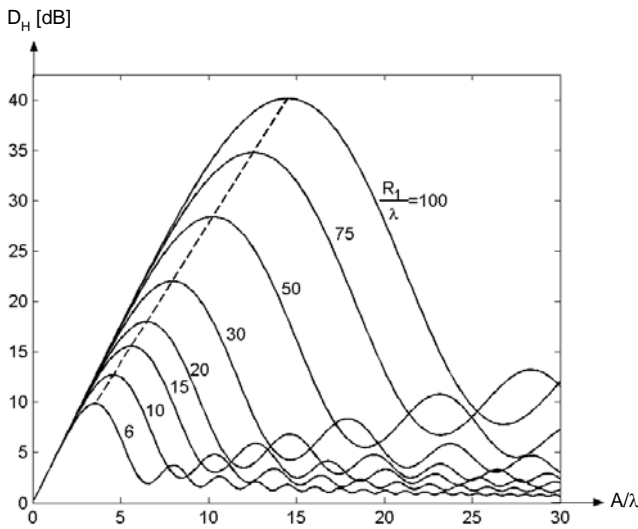
که در آن

$$P_y = \int_{-A/2}^{+A/2} \int_{-B/2}^{+B/2} E_{ay} \exp(jk(x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi)) dy dx \quad (۴)$$

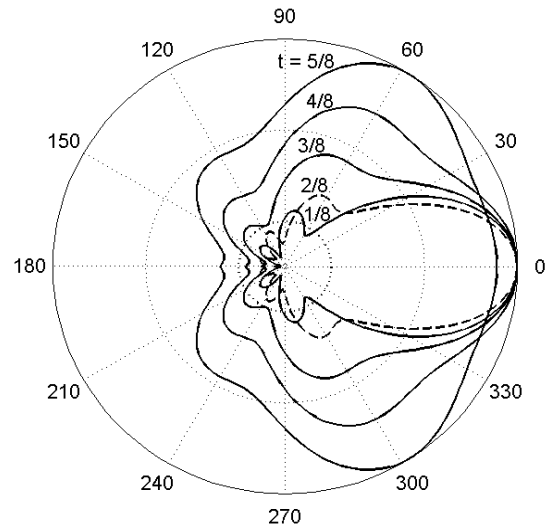
با انجام چند عملیات ریاضی ساده، نهایتاً میدانهای ناحیه دور به صورت زیر بدست می‌آیند.

$$E_\theta = jE_o \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \sqrt{R_1 R_\perp} (1 + \cos \theta) \cdot \sin \varphi \cdot I_\parallel(\theta, \varphi) \cdot I_\perp(\theta, \varphi) \quad (۵)$$

$$E_\varphi = jE_o \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \sqrt{R_1 R_\perp} (1 + \cos \theta) \cdot \cos \varphi \cdot I_\parallel(\theta, \varphi) \cdot I_\perp(\theta, \varphi)$$



شکل ۴: سمتگرایی  $D_H$  نسبت به  $A/\lambda$  برای مقادیر مختلف  $R_1/\lambda$ .



شکل ۳: منحنی تشعشی نرمالیزه E-plane یا H-plane به ازاء  $t$  های مختلف.

$$q_1 = \frac{A}{\sqrt{2\lambda R_1}} \quad (12)$$

$$q_2 = \frac{B}{\sqrt{2\lambda R_2}}$$

رابطه سمتگرایی (۱۱) را می‌توان بصورت  $D = D_H D_E$  نوشت که در آن  $D_H$  و  $D_E$  دو سمتگرایی مستقل از یکدیگر مربوط به صفحات E-plane و H-plane می‌باشند. شکل ۴، یکی از این سمتگراییها،  $D_E$  را برحسب  $A/\lambda$  و برای چند  $R_1/\lambda$  نشان می‌دهد. با توجه به این شکل (منحنی خطچین) می‌توان دید که حداکثر بهره برای ابعاد محدود آنتن، بازاء مقادیر بهینه زیر بدست می‌آید.

$$A = \sqrt{2\lambda R_1} \quad (13)$$

$$B = \sqrt{2\lambda R_2}$$

با توجه به (۱۱)، سمتگرایی بهینه آنتن بوقی TEM به ازای  $q_1 = q_2 = 1$  (یا  $t_1 = t_2 = 1/4$ ) بدست می‌آید که با جایگذاری در آن، حداکثر سمتگرایی آنتن بهینه چنین خواهد شد.

$$D_{\max} = 4\pi \frac{AB}{\lambda^2} (\cdot/64) \approx 8 \frac{AB}{\lambda^2} \quad (14)$$

در صورتیکه آنتن برای فرکانس  $f$  طراحی شده باشد، آنگاه با جایگزینی (۱۳) بازاء  $f$  در (۱۲) متغیر، مقادیر  $q_1$  و  $q_2$  برابر با  $\sqrt{f/f_0}$  خواهند شد و در نتیجه با توجه به (۱۱) و (۱۴)، مقدار سمتگرایی بهینه برحسب فرکانس بدست خواهد آمد.

$$D_{opt} = 4\pi \frac{AB}{\lambda^2} \left[ C^2 \left( \sqrt{\frac{f}{f_0}} \right) + S^2 \left( \sqrt{\frac{f}{f_0}} \right) \right]^2 \quad (15)$$

$$= 1/56 \left[ C^2 \left( \sqrt{\frac{f}{f_0}} \right) + S^2 \left( \sqrt{\frac{f}{f_0}} \right) \right]^2 D_{\max}$$

شکل ۵، تابعیت فرکانسی سمتگرایی بهینه را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان در مورد پهنای باند بهره آنتن بوقی TEM چنین نتیجه گرفت.

منحنی تشعشی صفحه  $xz$  (H-plane) به ازاء  $\varphi = 0, \pi$  و منحنی تشعشی صفحه  $yz$  (E-plane) به ازاء  $\varphi = \pi/2, 3\pi/2$  در رابطه (۵) حاصل می‌شود. بنابراین منحنیهای نرمالیزه چنین خواهند شد.

$$F_E(\theta) = \left( \frac{1 + \cos \theta}{2} \right) \cdot \frac{I_2(\theta, \varphi = 90^\circ)}{I_2(\theta = 0^\circ, \varphi = 90^\circ)} \quad (9)$$

$$F_H(\theta) = \left( \frac{1 + \cos \theta}{2} \right) \cdot \frac{I_1(\theta, \varphi = 0^\circ)}{I_1(\theta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ)}$$

با توجه به (۹) دیده می‌شود که منحنیهای نرمالیزه شده  $F_H(\theta)$  و  $F_E(\theta)$  مشابه یکدیگر هستند با این توضیح که منحنی تشعشی H-plane به پهنای صفحات (A) و منحنی تشعشی E-plane به فاصله بین صفحات (B) بستگی دارد. این تشابه منحنیها به علت تشابه دامنه و اختلاف فاز ایجاد شده روی سطح روزه در هر دو جهت  $x$  و جهت  $y$  می‌باشد. شکل ۳، منحنیهای تشعشی نرمالیزه شده را به ازاء چند "حداکثر اختلاف فاز نسبی"  $(t_1 = \frac{1}{4} \frac{A}{\lambda}; t_2 = \frac{1}{4} \frac{B}{\lambda})$  نشان می‌دهد. از ضرب  $(1 + \cos \theta)/2$  در این شکل صرفنظر شده است. همانطور که در بخش بعدی خواهیم دید، منحنی تشعشی بهینه بازاء  $t_1, t_2 = 0.25$  حاصل می‌شود که در شکل ۳ بصورت نقطه چین آمده است.

### ۳- سمتگرایی آنتن بوقی TEM

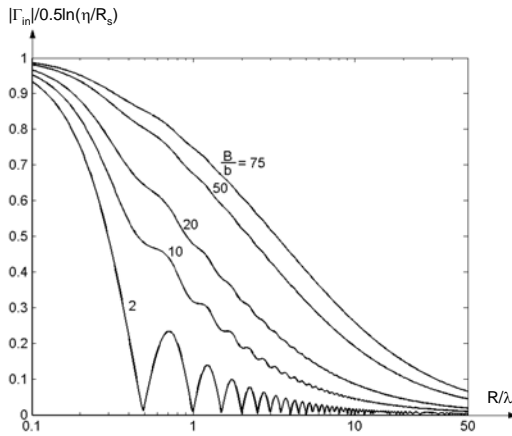
سمتگرایی یک آنتن روزه‌ای را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد [۵].

$$D = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot \frac{\left| \int_S \bar{E}_a ds \right|^2}{\int_S |\bar{E}_a|^2 ds} \quad (10)$$

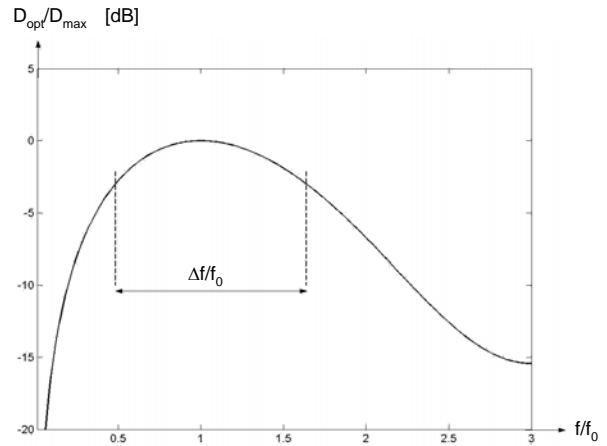
با استفاده از جایگذاری میدان الکتریکی روزه  $\bar{E}_a$  از (۲) در (۱۰) و پس از انجام چند عملیات ریاضی مربوط به انتگرالگیری، رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$D = 4\pi \frac{AB}{\lambda^2} \cdot \frac{[C^2(q_1) + S^2(q_1)][C^2(q_2) + S^2(q_2)]}{q_1^2 q_2^2} \quad (11)$$

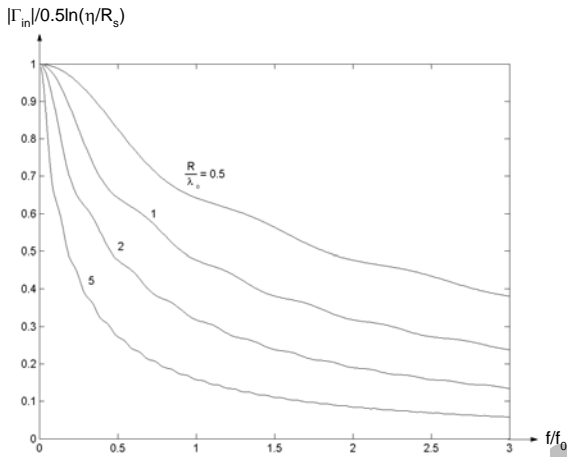
که در آن  $q_1$  و  $q_2$  چنین تعریف شده‌اند.



شکل ۶: ضریب انعکاس آنتن بوقی TEM برحسب طول نسبی آن.



شکل ۵: سمتگرایی بهینه نسبی برحسب فرکانس نسبی.



شکل ۷: ضریب انعکاس آنتن برحسب فرکانس نسبی

با جایگزینی (۱۷) در (۲۰)، انتگرال زیر حاصل می‌شود.

$$\Gamma_{in} = \frac{1}{2} \int_0^R e^{-j\gamma kz} \frac{(Ba - bA)R}{((B-b)z + Rb)(A-a)z + Ra} dz \quad (21)$$

این انتگرال با روشهای معمولی قابل حل نیست ولی می‌توان آنرا برحسب تابع انتگرال نمائی نوشت.

$$\Gamma_{in} = \frac{1}{2} e^{j\gamma kR \frac{1}{B/b-1}} \left[ E_i \left( j\gamma kR \frac{1}{B/b-1} \right) - E_i \left( j\gamma kR \frac{B/b}{B/b-1} \right) \right] - \frac{1}{2} e^{j\gamma kR \frac{1}{A/a-1}} \left[ E_i \left( j\gamma kR \frac{1}{A/a-1} \right) - E_i \left( j\gamma kR \frac{A/a}{A/a-1} \right) \right] \quad (22)$$

که در آن تابع انتگرال نمائی به صورت زیر معروف است.

$$E_i(x) = \int_1^{\infty} \frac{e^{-xt}}{t} dt \quad (23)$$

در شکل ۶ ضریب انعکاس یک آنتن بوقی TEM که ورودی آن با کابل  $R_s = 100 \Omega$  و دهانه آن با فضای آزاد تطبیق شده‌اند، برحسب طول نسبی آنتن و بازاء چند نسبت  $B/b$  رسم شده است. شکل ۷ نیز ضریب انعکاس همین آنتن را با  $B/b = 20$  برحسب فرکانس نشان می‌دهد.

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_H - f_L}{f_0} = 1/637 - 0/483 = 1/154 \quad (16)$$

$$\frac{f_H}{f_L} = 3/39$$

#### ۴- ضریب انعکاس آنتن بوقی TEM

یکی از مهمترین ویژگیهای آنتن بوقی TEM، رفتار خط انتقالی آن است. همانطور که قبلاً گفته شد آنتن بوقی TEM در واقع یک خط انتقال صفحه موازی است که پهنا و فاصله بین صفحات آن به تدریج زیاد می‌شود. در این صورت می‌توان با تقریب خوبی از تئوری خطوط انتقال برای بدست آوردن امپدانس مشخصه این آنتن استفاده کرد [۶]. برای یک خط انتقال صفحه موازی متشکل از صفحاتی با پهنای  $W$  و با فاصله  $d$  از یکدیگر، امپدانس مشخصه از رابطه  $Z_c = (d/W)\eta$  برای امپدانس دست می‌آید. بنابراین با توجه به شکل ۱، رابطه زیر را برای امپدانس مشخصه آنتن بوقی TEM خواهیم داشت (با فرض مبدأ مختصات در ابتدای آنتن).

$$Z_c(z) = \frac{\frac{B-b}{R}z + b}{\frac{A-a}{R}z + a} \eta = \frac{(B-b)z + Rb}{(A-a)z + Ra} \eta \quad (17)$$

که در آن  $R = R_E = R_H$  می‌باشد. از رابطه فوق امپدانس مشخصه ابتدا و انتهای چنین خواهند بود.

$$Z_c(0) = \frac{b}{a} \eta \quad (18)$$

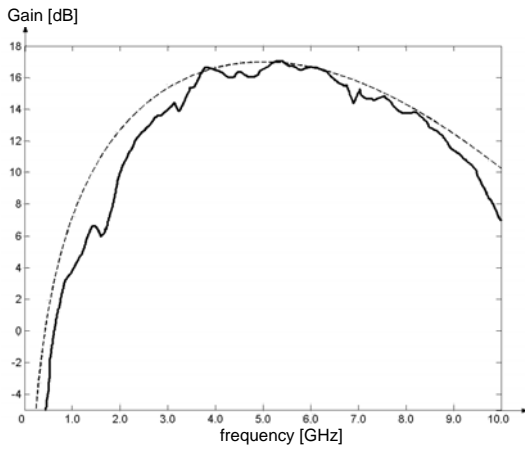
$$Z_c(R) = \frac{B}{A} \eta$$

بنابراین برای تطبیق دهانه آنتن با فضای آزاد و تطبیق ورودی آن با مقاومت تغذیه  $R_s$  می‌بایستی روابط زیر برقرار شوند.

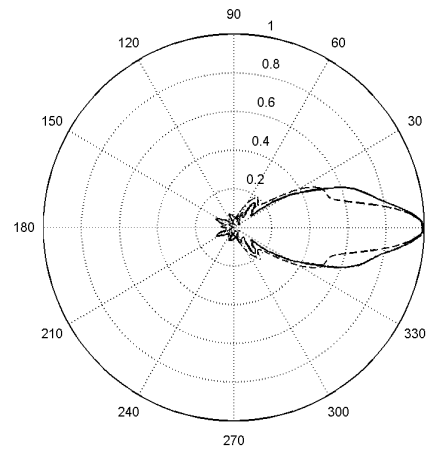
$$\begin{aligned} B &= A \\ \frac{b}{a} \eta &= R_s \end{aligned} \quad (19)$$

ضریب انعکاس آنتن بعنوان یک خط انتقال غیریکنواخت با تغییرات تدریجی عبارت است از [۶]

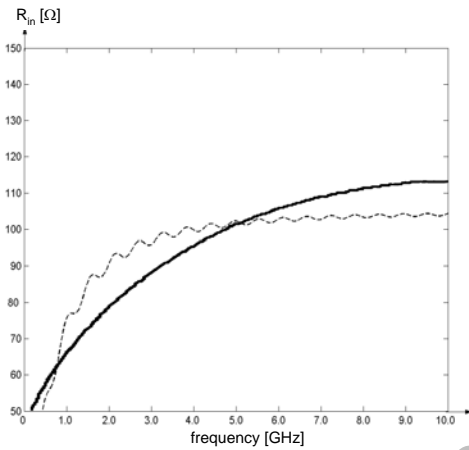
$$\Gamma_{in} = \frac{1}{2} \int_0^R e^{-j\gamma kz} \frac{d}{dz} [\ln(Z_c(z)/R_s)] dz \quad (20)$$



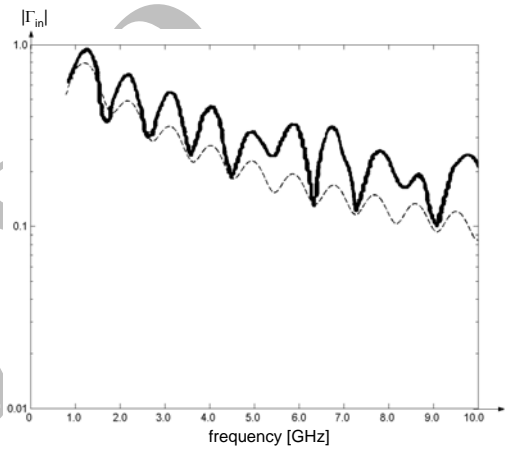
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸: نتایج حاصل از شبیه‌سازی (خطوط پیوسته) و تئوری (خطوط مقطع) برای آنتن بوقی TEM طراحی شده، (الف) منحنی تشعشی در فرکانس ۵/۰ GHz، (ب) بهره بر حسب فرکانس، (ج) ضریب انعکاس بر حسب فرکانس، (د) مقاومت ورودی بر حسب فرکانس.

انتخابی و کمی بزرگتر از یک است تا سه رابطه (۲۶)–(۲۹) با توجه به (۲۳) جواب داشته باشند. در اینصورت با ادغام سه رابطه (۲۴)، (۲۷) و (۲۸)، رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$a = \frac{K-1}{K-R_S/\eta} A \quad ; \quad K > 1 \quad (29)$$

البته می‌توان  $K$  را یک انتخاب نمود ولی بین صفحات آنتن از عایق با ضریب دی‌الکتریک  $\epsilon_r$  استفاده نمود که در اینصورت  $B = \sqrt{\epsilon_r} A$  خواهد شد.

در اینجا یک آنتن بوقی TEM با بهره ۱۷ dB برای کار در فرکانس ۵/۰ GHz و با خط تغذیه  $R_S = 100 \Omega$  طراحی می‌کنیم. با استفاده از (۲۴)–(۲۸) و با انتخاب  $K = 1/1$  ابعاد آنتن چنین بدست می‌آیند.

$$\begin{aligned} A &= 15/1 \text{ cm} \\ B &= 15/1 \text{ cm} \\ a &= 1/79 \text{ cm} \\ b &= 0/47 \text{ cm} \\ R &= 16/52 \text{ cm} \end{aligned}$$

جهت اطمینان از طراحی انجام شده و نیز بررسی صحت روابط بدست آمده در این مقاله برای تحلیل آنتنهای بوقی TEM، آنتن طراحی شده فوق بوسیله نرم‌افزار HFSS<sup>®</sup> در محدوده فرکانسی ۲۰۰ MHz تا ۱۰ GHz شبیه‌سازی شد. شکل ۸، نتایج حاصل از شبیه‌سازی آنتن را به

### ۵- طراحی، شبیه‌سازی و ساخت آنتن بوقی TEM

هدف از طراحی یک آنتن بوقی TEM بدست آوردن ابعاد ابتدائی ( $a$  و  $b$ ) و انتهائی ( $A$  و  $B$ ) و طول ( $R$ ) آن جهت کار در فرکانسی مشخص و با بهره‌ای معین و همچنین با امپدانس ورودی  $R_S$  می‌باشد. این طراحی بهتر است بصورت بهینه انجام شود تا ابعاد آنتن طراحی شده حداقل شود. روابط موجود بین ابعاد آنتن بهینه و تطبیق شده در ابتدا و انتهای آن با توجه به (۱)، (۱۳)، (۱۴) و (۱۹) و نیز شکل آنتن عبارتند از

$$A = B \quad (24)$$

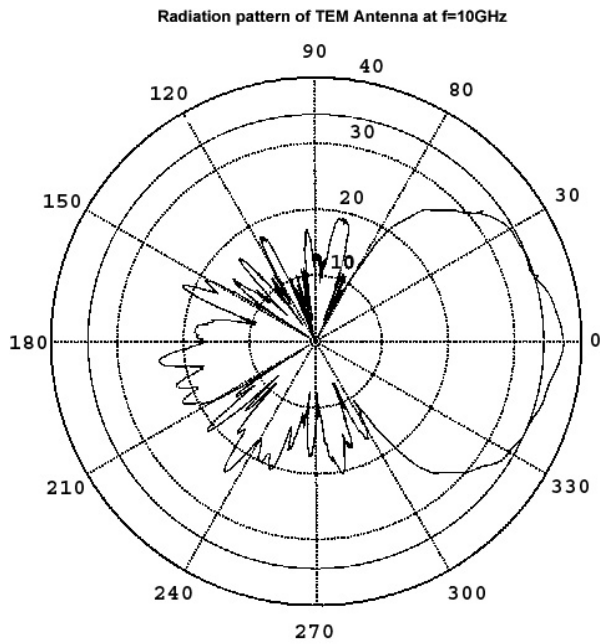
$$D_{\max} \cong \lambda \frac{A \cdot B}{\lambda^2} \quad (25)$$

$$\frac{a}{b} = \frac{\eta}{R_S} \quad (26)$$

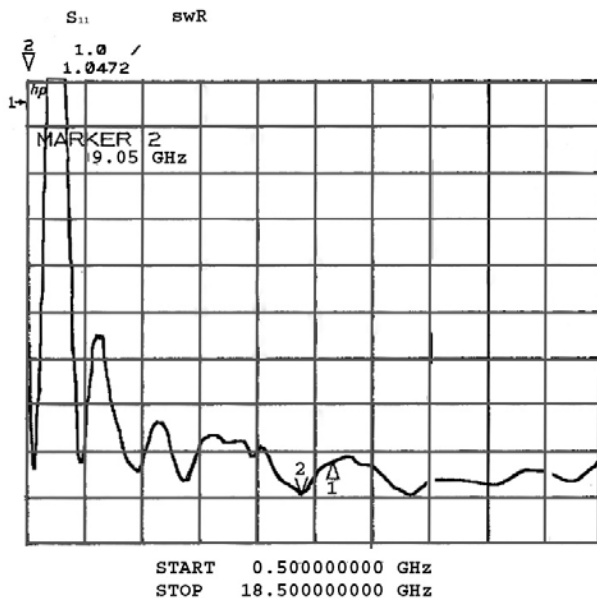
$$R = R_H = \frac{A-a}{A} KR_{opt} = \frac{A-a}{A} \frac{A^2}{2\lambda} K \quad (27)$$

$$R = R_E = \frac{B-b}{B} R_{opt} = \frac{B-b}{B} \frac{B^2}{2\lambda} \quad (28)$$

از دو رابطه (۲۴) و (۲۵)، مقادیر  $A$  و  $B$  و سپس توسط سه رابطه (۲۶)–(۲۸) مقادیر  $a$ ،  $b$  و  $R$  به دست می‌آیند. ضریب  $K$  عددی



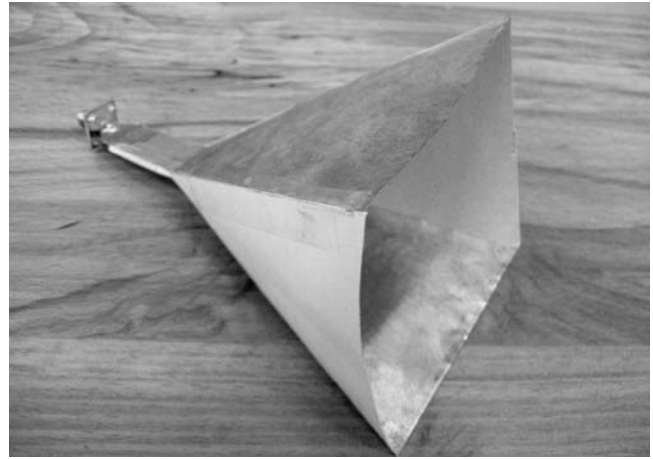
شکل ۱۰: منحنی تشعشی E-plane اندازه‌گیری شده در فرکانس ۱۰ GHz.



شکل ۱۱: SWR اندازه‌گیری شده بر حسب فرکانس.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی میدانهای تشعشی ناحیه دور و منحنیهای تشعشی آنتن بوقی TEM پرداخته شد و سمتگرایی بهینه و پهنای باند بهره آن بدست آمد. همچنین با استفاده از مدل خط انتقالی، ضریب انعکاس ورودی آنتن برحسب فرکانس بدست آمد. آنتن بوقی TEM دارای یک طراحی بهینه می‌باشد که طبق آن راندمان دهانه آنتن ۶۴٪ با پهنای باند نسبی ۱۱۵/۴٪ خواهد بود. همچنین این آنتن از نظر میزان تطبیق در ورودی، همانند یک فیلتر بالاگذر می‌باشد که با افزایش طول آنتن کارایی بهتری می‌یابد. بر اساس روابط حاصله برای تحلیل آنتنهای بوقی TEM یک روش برای طراحی بهینه آنها ارائه شده است. صحت روابط حاصله توسط شبیه‌سازی یک آنتن و نیز ساخت و آزمایش آنتنی دیگر تأیید گردید.



شکل ۹: تصویر آنتن بوقی TEM ساخته شده.

همراه نتایج حاصل از روابط تئوری (توسط نرم‌افزار MATLAB<sup>®</sup>) نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود هم نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی با تقریب خوبی با نتایج تئوریک مطابقت دارند و هم آنتن طراحی شده دارای خصوصیات مورد نظر می‌باشد. پهن‌تر بودن کناره‌های منحنی تشعشی حاصل از شبیه‌سازی نسبت به منحنی تشعشی حاصل از روابط تئوری و نیز اختلافهای موجود بین ضرایب انعکاس می‌تواند ناشی از تشعشع میدانهای دیواره‌های جانبی آنتن باشد که در تئوری از آنها صرف نظر شده بود.

در یک طرح دیگر یک آنتن بوقی TEM با بهره ۱۷ dB برای کار در فرکانس ۱۰ GHz و با خط تغذیه  $R_S = 50 \Omega$  طراحی می‌کنیم. با استفاده از روابط (۲۴)–(۲۸) و با انتخاب  $K = 1/22$  ابعاد آنتن چنین بدست می‌آیند.

$$A = 7/5 \text{ cm}$$

$$B = 7/5 \text{ cm}$$

$$a = 0/15 \text{ mm}$$

$$b = 0/20 \text{ mm}$$

$$R = 9/13 \text{ mm}$$

آنتن طراحی شده فوق با استفاده از دو ورق نازک مسی و دو ورق نازک کاغذی و یک کانکتور نوع SMA بسادگی ساخته شد که تصویر آن در شکل ۹ آورده شده است. شکل ۱۰ منحنی تشعشی H-plane (صفحه افقی) آنتن را در فرکانس اندازه‌گیری ۱۰ GHz نشان می‌دهد. بهره آنتن هم با استفاده از اندازه‌گیری زوایای نیم-توان ( $\theta_E$  و  $\theta_H$ ) منحنی تشعشی و رابطه تقریبی

$$D_{\max} \cong \frac{26000}{\theta_E \theta_H} \quad (30)$$

حدود ۱۵ dB به دست آمد. کمتر بودن بهره عملی آنتن می‌تواند ناشی از تقریب در (۳۰) و نیز صرفنظر نمودن از تشعشع میدانهای کناری آنتن باشد. همچنین نسبت امواج ساکن SWR در محدوده فرکانسی ۰/۵–۱۸/۵ GHz توسط دستگاه آنالایزر مدار<sup>۱۰</sup> اندازه‌گیری شد که نتایج در شکل ۱۱ آمده است. همانطور که دیده می‌شود مقدار SWR با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد و از فرکانس حدود ۷/۵ GHz به بعد به کمتر از ۱/۲ می‌رسد. البته اگر فرکانس خیلی زیادت‌تر شود انتظار می‌رود SWR افزایش یابد که علت آن پاسخ فرکانسی محدود کانکتور SMA و نیز کاهش دقت تقریب خط انتقال برای آنتن می‌باشد.

- [5] Warren L. Stutzman and Gary A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, John Wiley and Sons, NewYork, 1981, Chapters 6 and 8.  
 [6] Robert E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, McGraw-Hill, NewYork, 1966, Chapter 5.

محمد خلج امیرحسینی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق-مخابرات به ترتیب در سالهای ۱۳۷۰، ۱۳۷۳ و ۱۳۷۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده است و هم اکنون عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی برق همین دانشگاه می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: الکترومغناطیس، آنتن، میکروویو و مدارهای فرکانس بالا.

**رضا درخشنده** در سال ۱۳۵۸ در شهر تهران دنیا آمد. در سال ۱۳۸۲ وی موفق به اخذ مدرک کارشناسی مهندسی برق-مخابرات از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید.

## ۷- قدرتانی

بدینوسیله از زحمات متخصصین آزمایشگاه آنتن دانشگاه مالک اشتر جهت آزمایش آنتن ساخته شده قدرتانی می‌شود.

## مراجع

- [1] L. -C. T. Chang and W. D. Burnside, "An ultrawide-bandwidth tapered resistive TEM horn antenna", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 12, pp. 1848-1857, Dec. 2000.
- [2] K. L. Schlager and G. S. Smith, "TEM Horn antenna for pulse radiation: an improved design", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 12, pp. 86-90, Jun. 1996.
- [3] M. Kanda, "Transients in a resistively loaded linear antenna which compared with those in a conical antenna and a TEM horn", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 28, no. 1, pp. 132-136, Jan. 1980.
- [4] A. G. Yarovoy, A. D. Schukin, and L. P. Ligthart, "Development of dielectric filled TEM-horn", in *Proc. Millenium Conference on Antennas and Propagation*, pp. 1-4, Davos, Switzerland, Apr. 2000.

Archive of SID