

# بررسی تئوریک طراحی و ساخت آنتن موجبری شکافدار برای کاربرد در رادار باند X

دکتر محمد سلیمانی

استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندس شروین امیری

پژوهشگر صنایع مخابرات ایران (صما)

چکیده

امروزه آرایه‌های موجبری شکافدار کاربرد فراوانی دارند و در بسیاری از سیستم‌های رادار و تجهیزات مخابراتی که نیاز به آنتنی با پرتوی باریک دارند به‌کار گرفته شده‌اند. این آنتن‌ها خصوصا " برای هواپیماها و وسایل ناوبری که نیاز به وزن سبک و جارو نمودن حجم کوچکی از فضا دارند، بسیار مناسب می‌باشد. در این مقاله نوع خطی و رزونانسی این نوع آنتن‌ها با شکاف روی دیواره کوچک موجبر مورد بررسی قرار گرفته و مراحل طراحی و ساخت به‌همراه نتایج تست آنتن ساخته ارائه گردیده است.

## The Design and Analysis of Linear Slotted Waveguide Antenna for a X-Band Radar

M. Solimani, Ph. D

Iran Sci. and Tech. Univ.

and

Sh. Amiri, M.Sc.

Ministry of Defence Iran

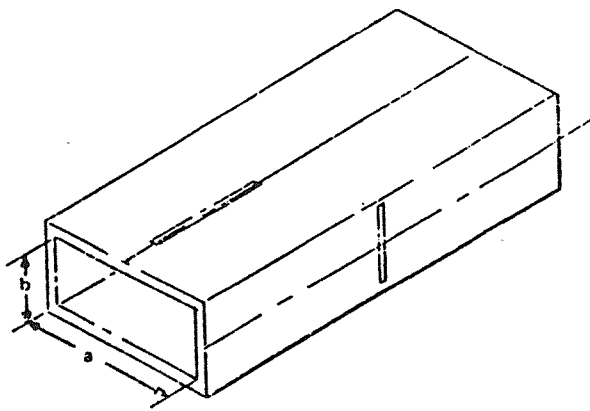
### ABSTRACT

*The slotted waveguide array antennas have found applications in many microwave communication and radar systems requiring narrowbeam or shaped beam patterns. They are particularly useful in airborne and navigation applications where lightweight and small scan volume are important, Discussions in this paper have been limited to linear and resonant slotted waveguide array antenna, with the slots on the narrow side of wave guide, The steps of design analysis along with experimental tests has been discussed.*

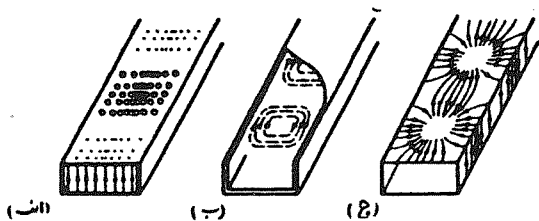
۱- مقدمه

در مقایسه، این آنتن با آنتن سهموی معادل خود مزایای زیر مشخص می‌شود:  
الف) توزیع میدان در دهانه، آن از نظر دامنه و فاز قابل کنترل است.  
ب) به دلیل نداشتن قید اولیه دارای تشعشع به سمت عقب نیست.  
ج) تکنیک ساخت آن ساده‌تر بوده و به صورت مجتمعتری می‌تواند ساخته شود.

آنتن‌های آرایه‌ای موجبر شکافدار از سال ۱۹۴۰ به بعد به‌طور گسترده‌ای در سیستم‌های رادار هواپیماها و وسایل ناوبری و دریایی به‌کار گرفته می‌شوند.  
آرایه‌های موجبری از سال ۱۹۵۰ در بسیاری از کاربردهای عملی و سیستم‌های میکروویو نظامی و تجاری جایگزین آنتن‌های سهموی شده است.



شکل (۲-۲) شکافهای غیرتشنعی برش داده شده روی دیواره‌های موجبر



شکل (۲-۳)

- الف- توزیع میدان الکتریکی
- ب- توزیع میدان مغناطیسی
- ج- توزیع جریان روی دیواره‌ها

در مقابل شکافهای غیرتشنعی طوری روی دیواره‌ها بریده می‌شوند که بعد طولی آنها موازی با خطوط جریان بوده و اعتشاش کمی در توزیع جریان ایجاد نمایند. در این حال توزیع میدان توسط شکاف به فضای آزاد قابل صرفنظر بوده و می‌توان از آن جهت مطالعه، میدانهای داخلی موجبر، اندازه‌گیری امیدانس و یا VSWR استفاده نمود. میدانی که مؤلفه‌های میدان در داخل موجبر را می‌توان به فرم نرمالیزه شده زیر بیان نمود:

$\text{مود } TE_{mn}$ $H_z = JH_{az} e^{\mp \gamma_a z}$ $\vec{H}_t = \vec{H}_{at} e^{\mp \gamma_a z}$ $\vec{E}_t = \vec{E}_{at} e^{\mp \gamma_a z}$	$\text{مود } TM_{mn}$ $E_z = \pm JE_{az} e^{\mp \gamma_a z}$ $\vec{E}_t = \vec{E}_{at} e^{\mp \gamma_a z}$ $\vec{H}_t = \pm \vec{H}_{at} e^{\mp \gamma_a z}$
--	--

(۲-۱)

در روابط (۲-۱) اندیس a مخفف اندیس دوین mn شده است، همچنین داریم:

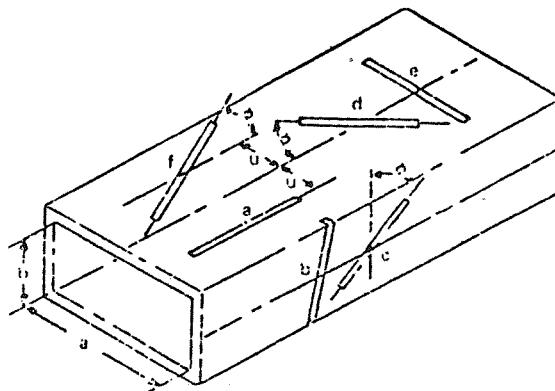
مقایسه آرایه‌های موجبری با آرایه‌های مایکرواستریبی نیز نشان می‌دهد که هرچند آنتنهای مایکرواستریبی دارای ساخت آسان‌تر، قیمت ارزان‌تر و با وزن کمتر می‌باشند. لیکن به دلیل افزایش بیش از حد افت و تغییر رفتار آنها که وابسته به ماده دی‌الکتریک به کار رفته در آن است، به طور محدودتری در سیستمهای راداری به کار گرفته می‌شوند. خصوصاً "در رادارهای اکتیو که وظیفه ارسال و دریافت توام امواج را بر عهده دارند. به دلیل نیاز به ارسال توانهای بالا امکان استفاده از آرایه‌های مایکرواستریبی نیست.

تئوری کار این آنتنها شبیه به تحلیل آرایه‌های دیپلی ایده‌آل است که می‌توان با انتخاب فاصله بین دیپلها و نیز دامنه و فاز تغذیه آنها پرتوی تشعشی دلخواه را به دست آورد.

نیاز به سیستمهای رادار با SLL کمتر و راندمان بالاتر باعث شده است که مشخصات شکافهای ایجاد شده روی موجبر با دقت بیشتری تعیین شده و نیز در مرحله ساخت دقت بالاتری به کار گرفته شود. آنتنهای آرایه‌ای موجبر شکافدار از نظر نوع بهره‌رسانی و غیررزونانسی، خطی و صفحه‌ای دسته‌بندی می‌شوند، که نوع خطی و رزونانسی آن مورد نظر ما می‌باشد.

### ۲- اصول تئوری تشعش از شکافهای با تغذیه موجبری

شکافهای ایجاد شده روی دیواره‌های موجبر را به طور کلی می‌توان به دو دسته تشعشی و غیرتشنعی تقسیم بندی نمود، که به ترتیب در شکل‌های (۲-۱) و (۲-۲) نمایش داده شده‌اند. شکل (۲-۳) نحوه توزیع جریان روی دیواره‌های موجبر و میدانهای الکتریکی و مغناطیسی داخل آن را زمانی که تنها مود  $TE_{10}$  در داخل موجبر منتشر شود را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱) شکافهای تشعش‌کننده برش داده شده روی دیواره‌های موجبر

چنانچه شکاف بریده شده روی موجبر، فلوی جریان سطحی روی دیواره‌ها را قطع نماید، باعث ایجاد اغتشاش قابل توجهی در توزیع جریان شده و سبب کوپل میدان داخلی به فضای خارج خواهد شد. میزان این کوپلاژ وابسته به دانسیته، جریان سطحی در محلی است که شکاف بریده می‌شود. بنابراین میزان کوپلاژ را می‌توان توسط تنظیم جهت شکاف تغییر داد.



سینوسی فرض می‌شود و جهت آن عمود بر بعد بزرگ شکاف است.

$$g = \frac{30}{73\pi} \left( \frac{\lambda g}{\lambda} \right) \frac{\lambda^4}{a^3 b} \left[ \frac{\sin \alpha \cos \left( \frac{\pi \lambda}{2\lambda g} \sin \alpha \right)}{1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda g} \right)^2 \sin^2 \alpha} \right]$$

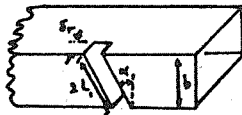
### ۳- بررسی مدل مداری شکافها:

چنانچه شکافهای ایجاد شده دارای طولی حدود نصف طول موج بوده و پهنای آنها بسیار کوچکتر از طول موج باشد، می‌توان آنها را به‌کمک یک مدل مداری بیان نمود. چنانچه شرایط بیان شده برقرار نباشد، مدل مداری پیچیده خواهد شد، که معمولاً "در این حالت از مدل‌های T و π برای بیان شکافها استفاده می‌گردد.

با استفاده از بخش پیش می‌توان به‌نتایج زیر رسید:

(الف) چنانچه شکاف در محلی از موجبر بریده شود که جریان سطحی روی دیواره در جهت Z مؤلفه نداشته باشد، آنگاه وجود شکاف در میدان الکتریکی عرضی ناپیوستگی ایجاد نمی‌کند. ولی باعث ایجاد ناپیوستگی در میدان مغناطیسی عرضی خواهد شد. به عبارت دیگر در این حالت شکاف شبیه به یک المان موازی در مدل خط انتقالی موجبر ظاهر خواهد شد. از انواع شکافهای نشان داده شده در شکل (۲-۱) شکافهای ایجاد شده روی دیواره باریک موجبر و نیز شکافهای موازی روی دیواره پهن موجبر هر دو دارای مدل مداری متشکل از المانهای موازی هستند.

رابطه فوق به‌ازای زوایای انحراف α بزرگتر از ۴۶/۶ برقرار است. برای زوایای کوچکتر از ۴۶/۶ با توجه به ابعاد دیواره باریک موجبر برای رسیدن به طول رزونانسی ناچار هستیم که مقداری در داخل صفحه پهن موجبر ایجاد برش نماییم که عمق برش را می‌توان در این حالت از رابطه  $S_p = L_p - L_1$  به‌دست آورد که در آن  $L_p$  طول رزونانسی و  $L_1$  در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.

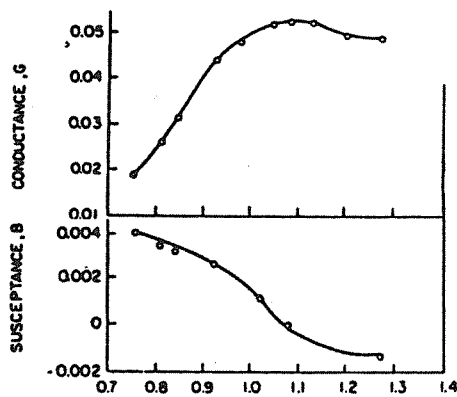


شکل (۳-۴)

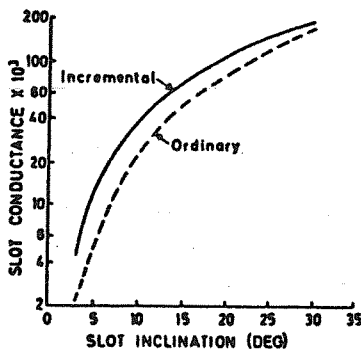
$$S_p = L_p - L_1 = L_p - \frac{b}{2 \cos \alpha} \Rightarrow S_p = \begin{cases} 0.21325 \lambda - \frac{b}{2 \cos \alpha} & \alpha < 46/6^\circ \\ 0 & \alpha \geq 46/6^\circ \end{cases}$$

$$2L_p = 0.4625 \lambda$$

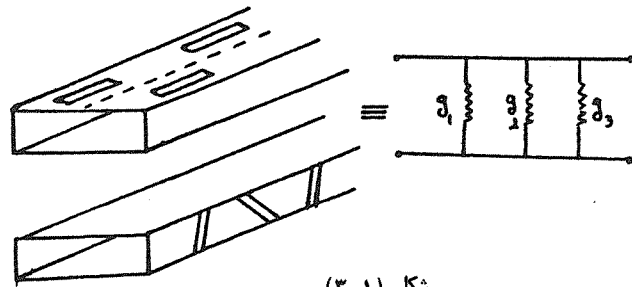
محنی‌های تجربی که کداکتانس شکافها را براساس زاویه انحراف شکافها و عمق برش آنها می‌دهد، به‌صورت زیر می‌باشند.



شکل (۳-۵) تغییرات سوسپتانس و کداکتانس شکافها برحسب تغییر عمق برش (cm)

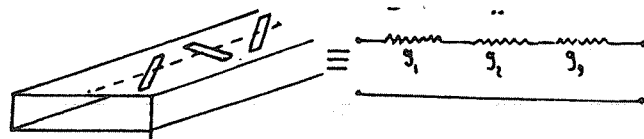


شکل (۳-۶) تغییرات کداکتانس شکافها با تغییر زاویه شکاف



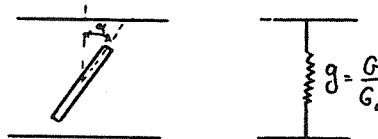
شکل (۳-۱)

(ب) چنانچه شکاف در محلی از موجبر بریده شود که جریان سطحی روی دیواره در جهت Z مؤلفه داشته باشد، آنگاه وجود شکاف باعث ایجاد ناپیوستگی به‌صورت به‌وجود آمدن ۱۸۰ درجه اختلاف فاز در میدانهای الکتریکی عرضی شده، ولی میدانهای مغناطیسی عرضی پیوسته خواهند ماند. بنابراین در این حالت شکاف نسبت به‌مود منتشره در داخل موجبر به‌صورت یک المان سری ظاهر خواهد شد.



شکل (۳-۲)

چنانچه طول شکاف را برابر طول رزونانسی بگیریم، سوسپتانس حاصل از شکاف را می‌توان صفر در نظر گرفت، و کداکتانس آن را به‌دست آورد به‌عنوان نمونه برای شکاف مایل روی دیواره، باریک موجبر داریم:

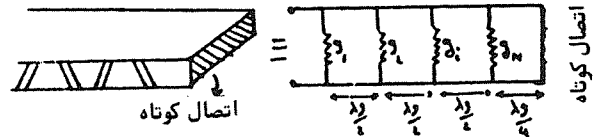


شکل (۳-۳)

#### ۴- آرایه‌های رزونانسی:

آرایه، رزونانسی یک آرایه، بروساید می‌باشد که در آن مطابق شکل زیر شکافها به فاصله  $\frac{\lambda g}{2}$  از یکدیگر و با زاویه انحرافی که از هر شکاف به شکاف بعدی معکوس می‌شود، ایجاد می‌گردد. تغییر زاویه انحراف در شکافهای متوالی اختلاف فازی برابر  $180^\circ$  درجه ایجاد می‌نماید که در کنار  $180^\circ$  درجه اختلاف فاز حاصل از  $\lambda g/2$  فاصله بین شکافها سبب خواهد شد که تمام شکافها به طور همفاز تغذیه شوند.

مدار معادل چنین آرایه‌ای از N کنداکتانس موازی به فاصله  $\lambda g/2$  از یکدیگر که روی یک خط انتقال متصل شده‌اند تشکیل می‌گردد، که در شکل (۴-۱) نمایش داده شده است. قرار می‌گیرد که به صورت یک اتصال باز موازی با آخرین شکاف عمل می‌نماید.



شکل (۴-۱)

چون فاصله تمام شکافها از یکدیگر  $\lambda g/2$  است، لذا کنداکتانس ورودی معادل به سادگی از جمع نمودن کنداکتانس شکافهای روی دیواره به دست می‌آید:

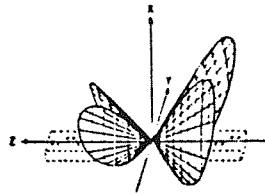
$$g_e = \sum_{i=1}^N g_i$$

در طرح آرایه مورد نظر ما، چون تمام شکافها را با یک زاویه انحراف مشخص برش می‌دهیم، لذا کنداکتانس نسبی همه شکافها با هم برابر خواهد بود، بنابراین خواهیم داشت،  $g_e = N g_i$  از طرفی برای آنکه تمام توان ورودی در دسترس بتواند تشعشع شود لازم است که تطبیق امپدانس وجود داشته باشد، یعنی باید کنداکتانس نرمالیزه شده ورودی برابر واحد باشد ( $g_e = 1$ ) بنابراین کنداکتانس هر شکاف برابر با  $\frac{1}{N}$  خواهد شد که در طراحی آنتن با N شکاف مدنظر قرار خواهد گرفت.

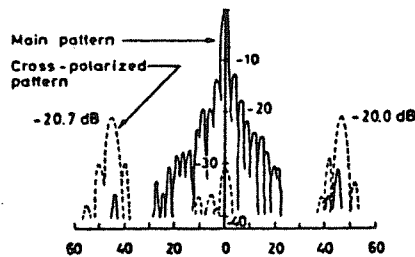
این آرایه به دلیل تابعیت  $\lambda g$  از فرکانس، دارای باند فرکانسی باریکی است، زیرا فاصله  $\lambda g/2$  بین شکافها و نیز فاصله  $\lambda g/4$  اتصال کوتاه از آخرین شکاف تنها برای یک فرکانس صادق هستند. در مقابل آرایه‌های رزونانسی، آرایه‌های غیررزونانسی با موج متحرک قرار می‌گیرند که مورد بحث ما نمی‌باشند.

۵- پلاریزاسیون عرضی (Cross - Polarization) در آنتنهای موجبری پترن تشعشعی یک آرایه خطی به طور ایده‌آل باید دارای پلاریزاسیون یک جهته و یکنواخت باشد. برای مثال آنتن اکثر رادارهای دریایی فقط روی پلاریزاسیون افقی (در بعضی موارد خاص پلاریزاسیون دایره‌ای هم استفاده می‌شود) عمل می‌کند. یکی از نتایج استفاده از شکافهای مایل روی موجبر ایجاد شدن میدانهای ناخواسته و پلاریزاسیون عمودی است. اگر زاویه انحراف شکاف  $\alpha$  باشد، مولفه  $E \cos \alpha$  به صورت عمودی و مولفه  $E \sin \alpha$  به صورت افقی (برای هر شکاف) خواهد بود. در طرح آرایه مورد نظر باید به این مساله توجه داشت که به کمک روشهایی که در بخش طراحی آورده خواهد شد، پلاریزاسیون عمودی را تا حد ممکن حذف خواهیم نمود. نمونه‌ای از پرتوی تشعشعی

آنتنها که میزان ایزولاسیون عرضی را برای آنتنها نمایش می‌دهد در زیر آورده شده است. (شکل ۵-۱)

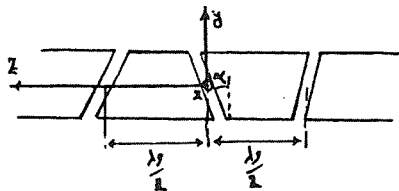


۵-الف) پرتوی با پلاریزاسیون عرضی نمونه



۵-ب) پرتوی تشعشعی با پلاریزاسیون عرضی در مقایسه با پرتوی اصلی برای یک آرایه یکنواخت رزونانسی با ۳۴ شکاف

۶- پرتوی تشعشعی ناحیه دور حاصل از یک آرایه خطی از شکافها: برای محاسبه پرتوی ناحیه دور یک آرایه شکافی مطابق شکل (۶-۱) ابتدا میدان حاصل از دو شکاف متوالی را به دست آورده و سپس رسته‌ای متشکل از این دسته شکافها تشکیل می‌دهیم که فاصله هر دو المان رشته از هم  $\lambda g$  باشد. آنگاه با استفاده از اصل ضرب پرتوها پترن تشعشعی حاصل از کل آرایه را از ضرب نمودن فاکتور رشته در فاکتور هر عنصر این آرایه به دست می‌آوریم. برای محاسبه میدان الکتریکی حاصل از دو شکاف متوالی، ابتدا میدان حاصل از یک شکاف منفرد را به دست آورده و سپس با تبدیل زاویه  $\alpha$  به  $-\alpha$  و با توجه به اختلاف فاز حاصل از فاصله این دو شکاف از هم میدان ناحیه دور شکاف دوم را نیز به دست آورده و با جمع این دو میدان پرتوی تشعشعی یک عنصر از رشته خطی با المانهای یکسان و با فاصله  $\lambda g$  را محاسبه می‌نماییم. توزیع میدان در دهانه شکاف را کسینوسی در نظر می‌گیریم.

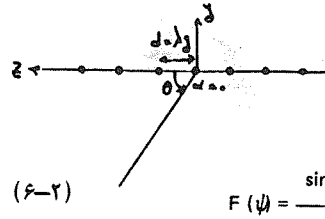


(۶-۱)

از طرفی فاکتور رشته یک آرایه خطی با فواصل یکسان بین المانها و تحریک یکنواخت آنها مطابق شکل (۶-۲) از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$|F(\theta)|_{\text{total}} = \frac{\sin\left(\frac{N\pi}{2} \frac{\lambda g}{\lambda} \cos\theta\right)}{N \sin\left(\pi \frac{\lambda g}{\lambda} \cos\theta\right)} \times \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\alpha \cos\theta\right)}{\cos\alpha (1 - \sin^2\alpha \cos^2\theta)}$$

$$\times \sqrt{\sin^2\alpha \sin^2\theta \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda g}{\lambda} \cos\theta\right) + \cos^2\alpha \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda g}{\lambda} \cos\theta\right)} \quad (6-3)$$



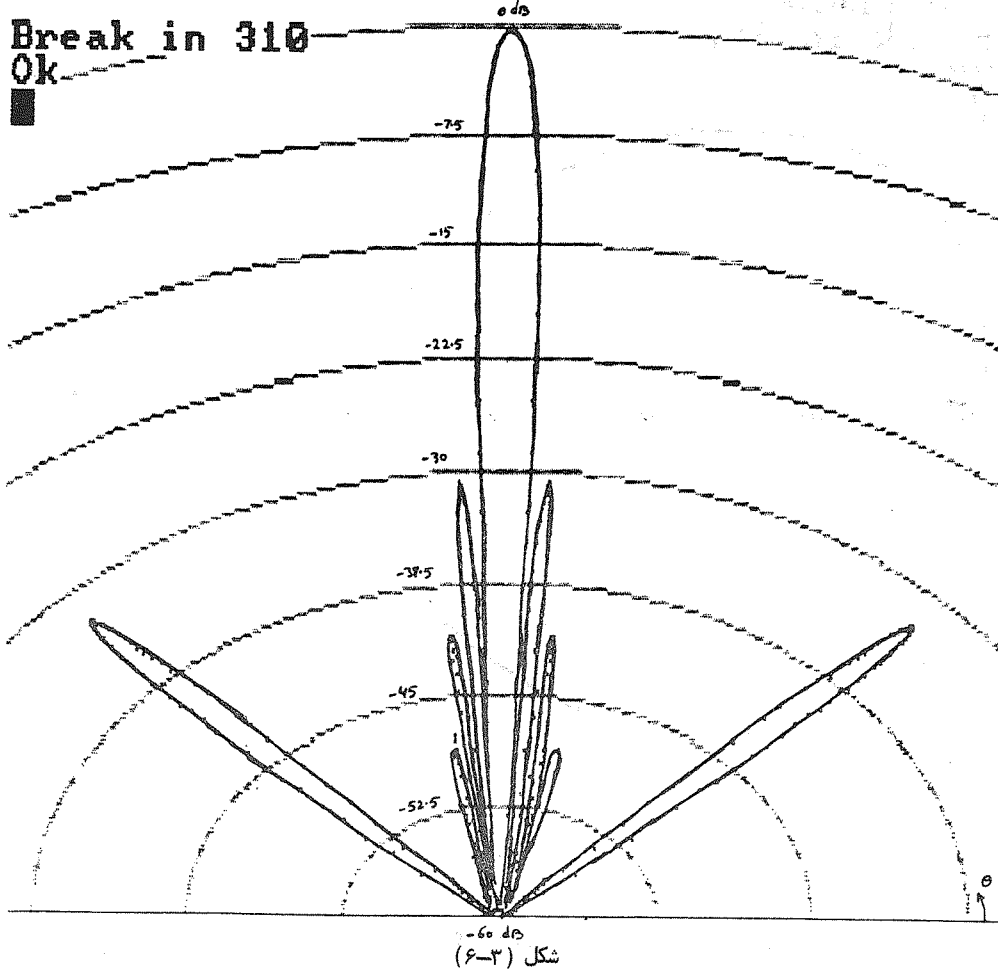
$$F(\psi) = \frac{\sin\left(\frac{N\psi}{2}\right)}{N \sin\left(\frac{\psi}{2}\right)}, \quad \psi = \alpha + \beta d \cos\theta \quad (6-1)$$

مشاهده می‌گردد که پترن تشعشی آرایه شکافی در صفحه E تابعی از زاویه انحراف شکافها و نیز تعداد شکافها است. برنامه کامپیوتری جهت ترسیم این پرتو به ازای  $\alpha$  و  $N$  مشخص نوشته و اجرا شد که رسم این پرتو به ازای مقادیر به دست آمده در طراحی به صورت زیر توسط کامپیوتر انجام شده است. (شکل ۶-۳). همچنین پرتوی تشعشی آرایه شکافی در صفحه H به صورت زیر بدست می‌آید:

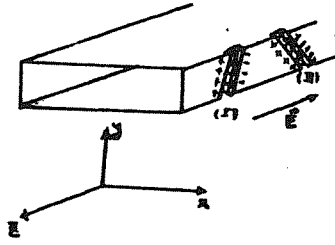
$$F(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \pi \frac{\lambda g}{\lambda} \cos\theta\right)}{N \sin\left(\pi \frac{\lambda g}{\lambda} \cos\theta\right)} \quad (6-2)$$

که در نهایت پرتوی تشعشی ناحیه دور کل آرایه در صفحه میدان الکتریکی (E) به صورت زیر در خواهد آمد:

پرتوی تشعشی آرایه موجبری در صفحه E  
مشخصات آرایه:  $N = 28, \alpha = 16^\circ$



شکل (۶-۳)



شکل (۶-۵)

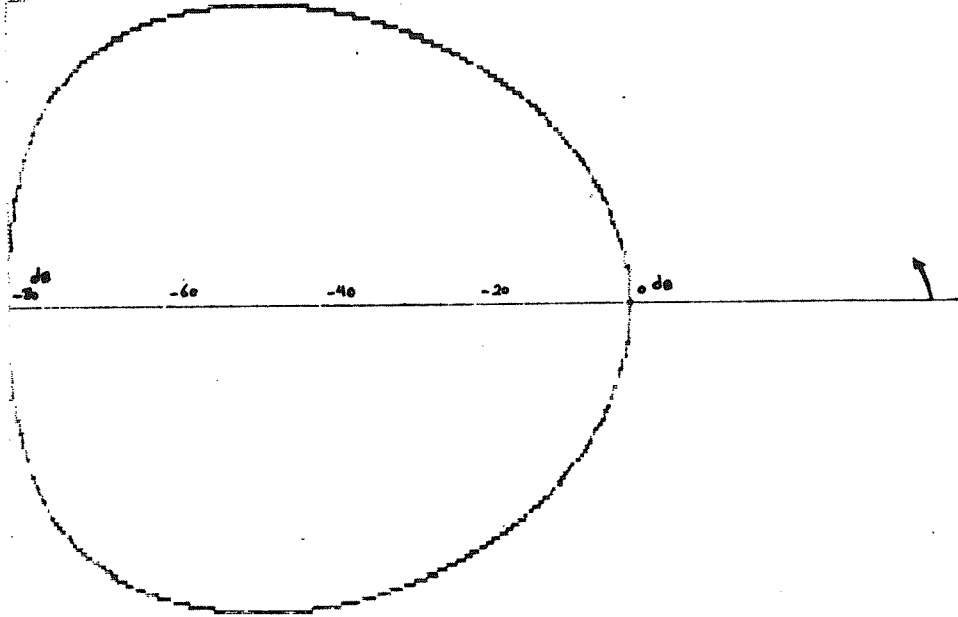
$$\vec{E}_1 = \frac{E_0 w}{\pi} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{e^{-j\beta x}}{x} I(x) \right) (\sin \alpha a y - \cos \alpha a z)$$

$$\vec{E}_2 = \frac{E_0 w}{\pi} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{e^{-j\beta x}}{x} I(x) \right) (-\sin \alpha a y - \cos \alpha a z)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \frac{-2E_0 w}{\pi} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{e^{-j\beta x}}{x} I(x) \right) \cos \alpha a z$$

که  $I(x)$  به صورت  $I(x) = \int_{-\lambda/4}^{\lambda/4} \cos(\beta y) e^{\frac{j\beta y^2}{2x}} dy$  بوده و قابل بیان برحسب توابع فرنل، سینوسی و کسینوسی است.

H-PLANE  
Break in 340  
OK



شکل (۶-۴)

ملاحظه می شود که این پرتو تنها تابعی از زاویه انحراف شکافها بوده و به تعداد شکافها بستگی ندارد. رسم آن به ازای مقادیر طراحی شده به کمک کامپیوتر در شکل (۶-۴) آمده است.

چنانچه پرتوی تشعشی ناحیه دور حاصل از یک زوج شکاف را بدست آورده و ترسیم نماییم، مشاهده می شود که در ناحیه ای از تغییرات زاویه  $\theta$  که در آن لوب اصلی و چند لوب فرعی اول قرار می گیرند، مانند پرتوی حاصل از یک المان ایزوتوپ می باشد.

لذا می توان با تقریب بسیار خوبی آرایه موجبری را همانند یک آرایه خطی با عناصر یکسان و ایزوتوپ با فواصل  $\lambda g$  از هم دانست در این حالت بهره (گین) آرایه را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$G = \frac{N^2}{N + \frac{2}{kd} \sum_{m=1}^{N-1} \left( \frac{N-m}{m} \right) \sin(mkd)}$$

همچنین محاسبه پرتوی تشعشی ناحیه نزدیک دو شکاف مجاور هم نشان می دهد که میدان الکتریکی کوپل شده به بیرون موجبر حاصل از دو شکاف متوالی دارای تنها پلاریزاسیون افقی خواهد بود، هرگاه نحوه کنار هم قرار گرفتن شکافها مطابق شکل (۶-۵) باشد.

SIDE-LOBE-LEVEL Vs. NUMBER OF SLOTS  
\*\*\*\*\*

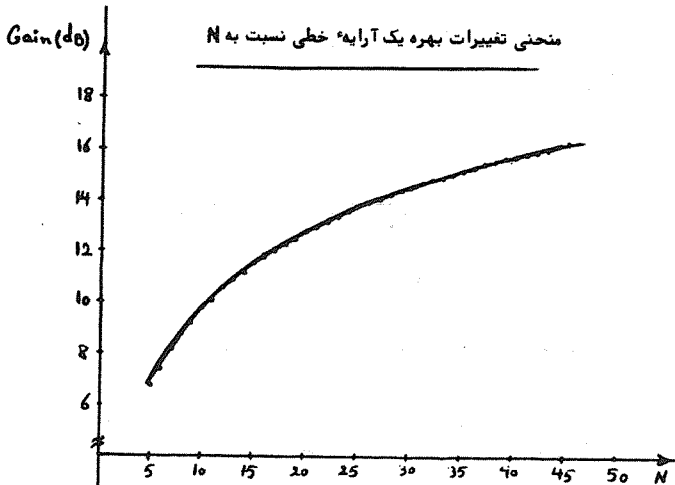
N	ANGLE	SLL	SLL-dB
20	44.7692	.1995708	-13.99806
22	44.7992	.19969	-13.99287
24	44.81919	.1997538	-13.9901
26	44.83919	.1998286	-13.98685
28	44.85919	.1998309	-13.98675
30	44.87919	.1998413	-13.98629
32	44.89919	.1998678	-13.98515
34	44.91918	.1998989	-13.98379
36	44.93918	.1999406	-13.98198
38	44.95918	.1999993	-13.97943
40	44.97918	.2000502	-13.97722

جدول ۳

BEAM-WIDTH VS. NUMBER OF SLOTS IN E-PLANE

N	B-W
10	7.23042
12	6.01108
14	5.14158
16	4.50192
18	3.99220
20	3.59242
22	3.26260
24	2.99276
26	2.76288
28	2.56298
30	2.39308

جدول ۴



شکل (۶-۶)

در محاسبه پرتوی تشعشی ناحیه دور و نزدیک آرایه خطی شکافها، شکافها را باریک در نظر گرفته و نحوه توزیع میدان الکتریکی در دهانه آن را کسینوسی و در جهت عمود بر بعد طولی شکاف در نظر گرفته ایم.

بررسی تغییرات پهنای شعاع تشعشی، گین و SLL آرایه برحسب تغییرات تعداد شکافها نسبت به خط قائم، به کمک چند برنامه کامپیوتری صورت گرفته که نتایج این بررسیها به صورت جداول زیر ارائه می گردد. جدول (۱) تغییرات پهنای شعاع تشعشی صفحه E آرایه را به ازای ۲۸ شکاف برحسب تغییر زاویه انحراف شکافها نشان می دهد. جدول (۲) تغییرات پهنای شعاع تشعشی صفحه H آرایه را برحسب زاویه انحراف شکافها بیان می کند. شکل (۶-۶) تغییرات گین آرایه با تغییر تعداد شکافها به ازای زاویه انحراف ۱۶ درجه را نشان می دهد. جدول (۳) نیز تغییرات SLL را برحسب تعداد شکافها بیان می کند و جدول (۴) تغییرات پهنای شعاع تشعشی صفحه E با تغییر تعداد شکافها را نشان می دهد. ملاحظه می شود که نسبت لوب فرعی آرایه با تغییر تعداد شکافها بطور جزئی تغییر می کند.

BEAM-WIDTH VS. ANGLE OF SLOTS IN E-PLANE

\*\*\*\*\*

ANGLE	B-W
7	2.5649
8	2.5649
9	2.5649
10	2.5649
11	2.5649
12	2.5649
13	2.5649
14	2.5649
15	2.5649
16	2.5649
17	2.5649
18	2.5649
19	2.5649
20	2.5649
21	2.5649
22	2.5649
23	2.5649
24	2.5649
25	2.5649

جدول ۱

CORRECTION OF BEAM-WIDTH IN H-PLANE VS. INCLINED ANGLE OF SLOTS

INCLINED ANGLE	BW
6	78.2
8	78.3
10	78.4
14	78.7
15	78.8
16	78.9
17	79.0
18	79.1
22	79.6
25	80.0
27	80.3
30	80.8
34	81.5
35	81.7

جدول ۲



نتایج حاصل از جدول (۳) و منحنی (۶-۶) بیان می‌کند که پهنای شعاع تشعشی صفحه<sup>۴</sup> آرایه زیاد و گین آن کم است، که باید به نحوی آنها را اصلاح نمود. این عمل به کمک افزودن یک بخش بوقی شکل به آنتن صورت می‌پذیرد که در بخش طراحی خواهد آمد.

#### ۷- طراحی یک آرایه خطی رزونانسی در باند فرکانسی X

هدف طراحی آنتنی با مشخصات زیر است:

- ۱- پهنای بیم افقی ۲/۵ درجه
- ۲- پهنای بیم عمودی ۲۵ درجه
- ۳- گین آنتن بالاتر از ۲۵ دسیبل
- ۴- زاویه بیم اصلی با محور آنتن ۹۰ درجه
- ۵- سطح لوب فرعی زیر ۲۰- دسیبل
- ۶- قدرت حذف پلاریزاسیون عمودی (ایزولاسیون بیش از ۲۵ دسیبل)

#### ۷- فرکانس کار حدود ۹۳۷۵ مگاهرتز

برای رسیدن به این مشخصات الکتریکی، با ایجاد شکافهایی روی موجبر مستطیلی آرایه<sup>۴</sup> رزونانسی را شکل می‌دهیم و به علت آنکه شکافهای کج روی دیواره<sup>۴</sup> باریک موجبر دارای تطبیق امپدانس بهتر و ساخت ساده تری هستند از آنها استفاده می‌نماییم.

به منظور برودساید نمودن آرایه<sup>۴</sup> رزونانسی لازم است که تمام شکافها به طور یکنواخت تحریک شوند و برای آن که گلبیگ فرعی مزاحم و قابل توجهی نداشته باشیم باید فاصله المانها از  $\lambda$  کمتر باشد برای شکافهای مایل روی دیواره<sup>۴</sup> باریک موجبر به منظور هم فاز و یکنواخت نمودن تحریک شکافها فاصله آنها را از هم  $\lambda g/2$  انتخاب می‌نماییم، زیرا با تغییر زاویه<sup>۴</sup> شکافهای مجاور از  $\alpha$  به  $\alpha - \alpha$  جریان سطحی در جهت عمود بر شکاف ۱۸۰ درجه اختلاف فاز ایجاد می‌نماید که قرار دادن فاصله<sup>۴</sup>  $\lambda g/2$  بین شکافها نیز ۱۸۰ درجه اختلاف فاز اضافی ایجاد می‌نماید و باعث همفاز شدن تحریک شکافها خواهد شد و چون طول موج داخل موجبر  $\lambda_0 < \lambda g < \frac{3}{2} \lambda_0$  است، لذا فاصله<sup>۴</sup> مجاز بین المانها در این طرح رعایت می‌شود.

قدم بعدی انتخاب یک موجبر مستطیلی است که بتواند در فرکانس ۹/۳۷۵ گیگاهرتز در مود غالب TE<sub>10</sub> کار کند، که برای ایجاد اطمینان در طرح فرکانس کار را با ۲۵٪ بیشتر از فرکانس قطع مود غالب TE<sub>10</sub> و ۲۵٪ کمتر از فرکانس قطع مود بعدی TE<sub>10</sub> در نظر می‌گیریم. بنابراین با توجه به اینکه داخل موجبر هوا است داریم:

$$\lambda_{CTE_{10}} = 2a \quad F_{CTE_{10}} = \frac{2 \times 10^9}{2a} \quad \text{و} \quad F_{CTE_{01}} = \frac{2 \times 10^9}{2b}$$

$$9/375 \times 10^9 \geq \frac{1/25 \times 2 \times 10^9}{2a} \Rightarrow a \geq 2 \text{ cm} \quad (7-1)$$

$$9/375 \times 10^9 \leq \frac{0/75 \times 2 \times 10^9}{2b} \Rightarrow b \leq 1/2 \text{ cm} \quad (7-2)$$

برای ساختن آنتن یک پروفیل برنجی با ابعاد میلیمتری ۲۲/۸۶×۷/۸۶×۱/۰۷ در دسترس بود که با توجه به شرایط فوق جهت استفاده مناسب تشخیص داده شد. در مرحله بعد با استفاده از نتایج به دست آمده از سنتز آنتن به کمک کامپیوتر که نتایج آن در بخش پیش آورده شد، زاویه<sup>۴</sup> انحراف ۱۶ درجه برای شکافها در نظر گرفته شد.

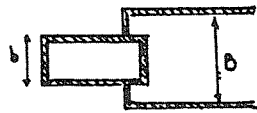
همچنین برای آنکه کندانسانس شکافها حقیقی گردد، طول هر شکاف را معادل با اولین طول رزونانسی یعنی  $\lambda/4 \approx 0/4625$  قرار می‌دهیم و لذا می‌توان میزان عمق نفوذ شکافها در دیواره<sup>۴</sup> پهن موجبر را به کمک روابط (۲-۲) به دست آورد:

$$S_p = 2/198 \text{ mm}$$

همچنین به منظور رسیدن به پهنای بیم افقی ۲/۵ درجه به کمک جدول تعداد شکافها را ۲۸ عدد در نظر می‌گیریم و به منظور رسیدن به قابلیت انعطاف بیشتر در سیستم از یک اتصال کوتاه متغیر در انتهای آرایه استفاده می‌نماییم.

در مرحله بعد به طراحی سیستمی جهت تضعیف پلاریزاسیون عمودی آنتن و نیز انتقال تنها یک مود به فضای آزاد پرداخته و به دنبال آن از یک قسمت بوقی شکل جهت اصلاح بیم عمودی آنتن و نیز افزایش گین آن استفاده می‌نماییم.

اگر خود شکاف را به صورت یک موجبر مستطیلی در نظر بگیریم که طول آن برابر طول رزونانسی وضخامت آن حدود ۱/۰۷ میلی متر باشد، به طوری که به جز چند مود اول TE سایر مودها در همین فاصله<sup>۴</sup> ۱/۰۷ میلی متری کاملاً<sup>۴</sup> میرا شده و به خارج از موجبر کوبلی نخواهند داشت. حال برای آن که مودهای TE<sub>20</sub> به بالا قابل انتشار نباشند از دو صفحه<sup>۴</sup> موازی هم استفاده می‌نماییم و فاصله<sup>۴</sup> آنها را طوری انتخاب می‌کنیم که فرکانس کار از فرکانس قطع مود TE<sub>20</sub> برای دو صفحه<sup>۴</sup> موازی کوچکتر گردد، لذا داریم:



شکل (۷-۱)

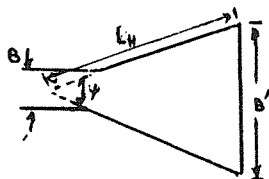
$$\lambda_c(TE_{20}) < \lambda \Rightarrow \frac{2B}{2} < \lambda \Rightarrow B < 3.2 \text{ cm} \Rightarrow B = 2.5 \text{ cm} \quad (7-4)$$

بنابراین در این حالت بین دو صفحه تنها مودهای TEM و TE<sub>10</sub> منتشر می‌شوند. می‌دانیم که میدان الکتریکی برای مود TEM عمود بر صفحات هادی و در مود TE<sub>10</sub> میدان الکتریکی موازی صفحات موازی می‌باشد.

حال اگر از یک سری صفحات هادی موازی به شکل فیلتر در فاصله<sup>۴</sup> مشخصی از شکافها استفاده نماییم، قادر خواهیم بود که مود TEM را که برای آن میدان الکتریکی موازی با صفحات است به شدت تضعیف نماییم، به طوری که تنها مود TE<sub>10</sub> به دهانه<sup>۴</sup> کوچک قسمت بوقی شکل آنتن رسیده و به وسیله<sup>۴</sup> بوق به فضای آزاد کوبل گردد. همچنین با توجه به این که میدان الکتریکی مود TE<sub>10</sub> برای صفحات عمود است، می‌توان صفحات فیلترکننده را از نظر مدار معادل، به شکل یک ردیف خازن موازی در نظر گرفت.

از طرف دیگر برای آنکه مود TE<sub>10</sub> در این فاصله<sup>۴</sup> تضعیف نگردد، باید امپدانس دیده شده در ابتدای دو صفحه<sup>۴</sup> موازی برابر با امپدانس مشخصه<sup>۴</sup> این مود باشد.

با چنین طرحی تنها مود  $TE_{10}$  بدون تضعیف به دهانه کوچک بوق می‌رسد و لذا همین توزیع میدان را در دهانه بزرگ هورن نیز خواهیم داشت. برای رسیدن به گین حدود ۲۸ دسیبل و با استفاده از منحنی‌های هورن می‌توان زاویه باز شدن دهانه هورن و نیز طول هورن را محاسبه نمود.



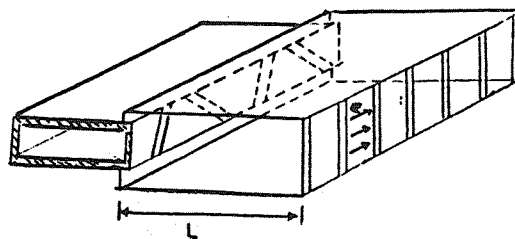
شکل (۷-۳)

$L_H = (B' - B) / 2 \sin \frac{\psi}{2} = 8.7 \text{ cm}$      $B' = 8.8 \text{ cm}$  ,  $\frac{\psi}{2} = 21^\circ$   
 باید توجه داشت که بوق این آنتن از نوع هورن صفحه H می‌باشد. بنابراین طرح کلی آنتن به صورت نشان داده شده در شکل (۷-۴) می‌باشد و مشخصات فیزیکی آنتن در کنار آن آورده شده است.

- تعداد شکافها - ۲۸
- زاویه شکافها - ۱۶ درجه
- فاصله شکافها از هم - ۲۲/۴ میلی‌متر
- فاصله آخرین شکاف از اتصال کوتاه - ۳۳/۶ میلی‌متر
- عمق نفوذ شکافها - ۲/۱۹۸ میلی‌متر
- کنداکتانس معادل هر شکاف  $0.0357$  موهر (نرمالیزه شده)
- طول شکافها - ۱۴/۸ میلی‌متر
- ضخامت شکافها - ۱/۵۸ میلی‌متر

۸- نتایج تست آنتن ساخته شده:

پرتوی تشعشی ناحیه دور در صفحه E آنتن همراه با تست ایزولاسیون پلاریزاسیون عمودی در شکل (الف) و پرتوی تشعشی صفحه H آنتن در شکل (ب) نشان داده شده است.



شکل (۷-۲)

$$Z_{in} = Z_0 TE_{10} \frac{Z_L + jZ_0 TE_{10} \tan \beta L}{Z_0 TE_{10} + jZ_L \tan \beta L}, \quad Z_L = jX_c = \frac{j}{Ceq\omega}, \quad Ceq = NC$$

برای صفر شدن ضریب انعکاس باید

$$|\Gamma| = 0 \Rightarrow |Z_{in}| = Z_0 TE_{10}$$

$$\tan \beta L = \frac{Z_0 + X_c}{Z_0 - X_c} \quad (7-5)$$

و لذا رابطه (۷-۵) به دست می‌آید.

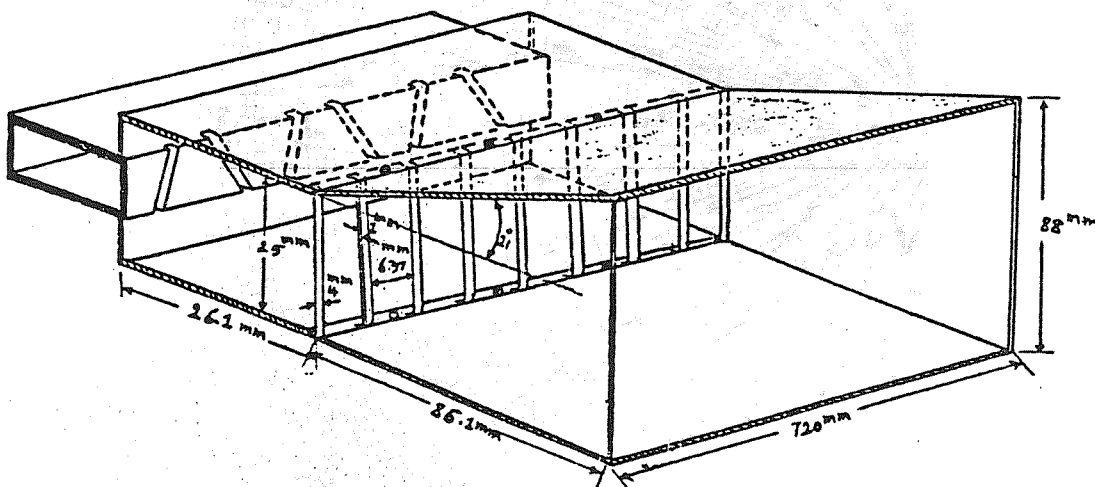
که با توجه به طول کلی آنتن  $720 \text{ mm}$  می‌توان مشخصات فیلتر را به صورت زیر در نظر گرفت:

- تعداد صفحات - ۷۰
- فاصله بین صفحات - ۶/۳۷ میلی‌متر
- طول صفحات - ۲۵ میلی‌متر
- عرض صفحات - ۴ میلی‌متر
- ضخامت صفحات - ۱ میلی‌متر
- از آنجا ظرفیت هر خازن  $C = \frac{\epsilon_r A}{d} = 0.034 \text{ pf}$  خواهد شد، چون  $Ceq = 69 \times 0.034 = 2.396 \text{ pf}$

$$Z_0 TE_{10} = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2B}\right)^2}} = 490/7 \text{ اهم}$$

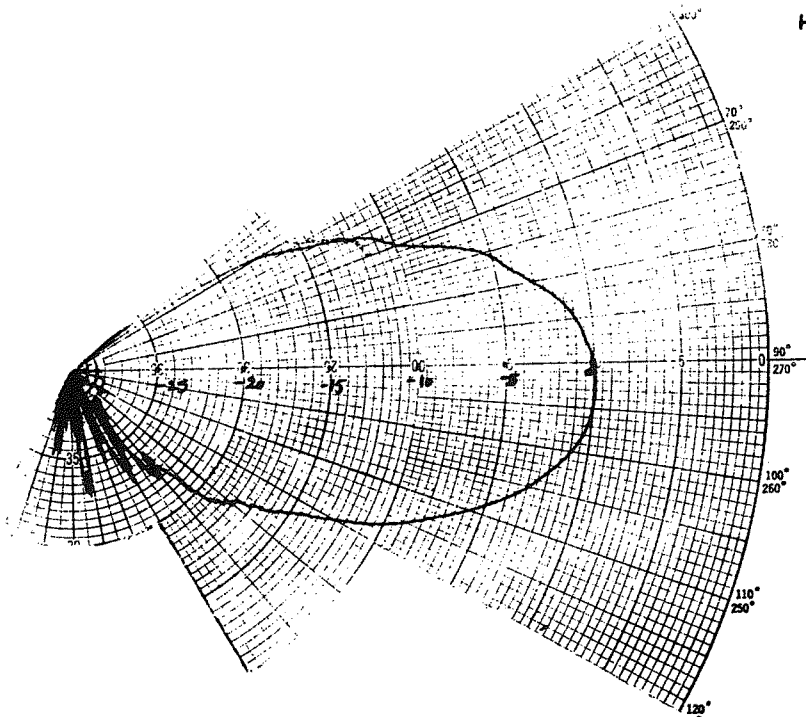
است، لذا بدست می‌آید:

$$L = 26/1 \text{ میلی‌متر} \quad (7-6)$$



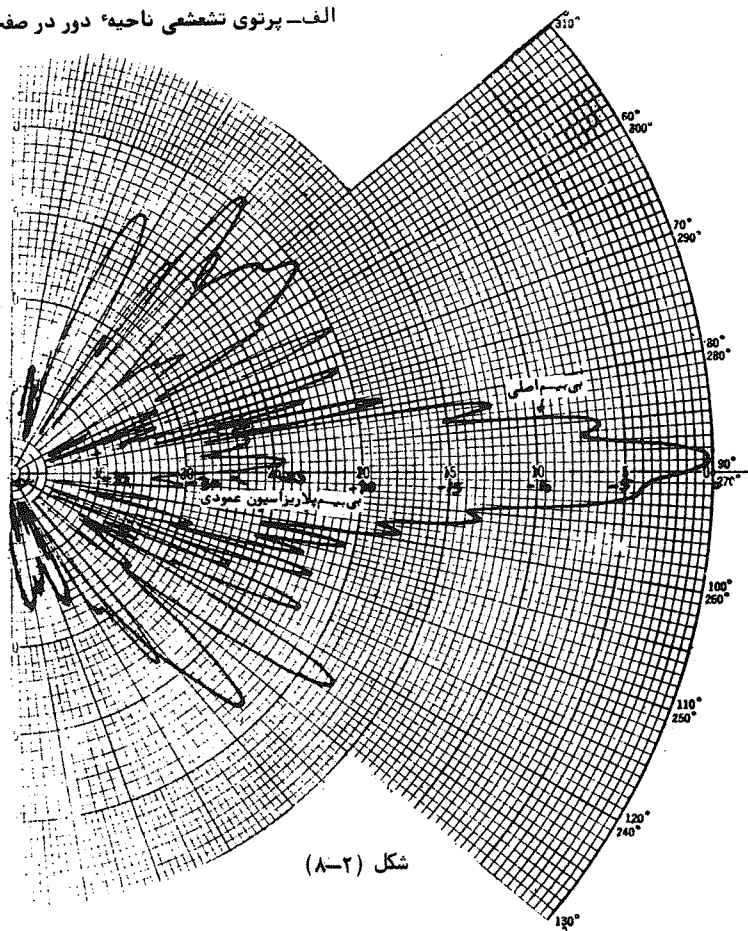
شکل (۷-۴)

ب) پرتوی تشعشعی ناحیه دور آنتن در صفحه H



شکل (۸-۱)

الف- پرتوی تشعشعی ناحیه دور در صفحه E آنتن و تست ایزولاسیون



شکل (۸-۲)

ایزولاسیون

#### ۹- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مقاله

نتایج تست آنتن موافقت تئوری با آزمایش را به‌خوبی نشان می‌دهد. میزان ایزولاسیون در مقابل پلاریزاسیون عمودی برای این آنتن در مقایسه با نمونه داده شده در بخش (۵) کاملاً مطلوب است. مقدار SLL و گین این آنتن نیز با توجه به ابعاد آن و در مقایسه با آنتنهای مشابه که در پیش‌گفتار آورده شد، مناسب می‌باشد. باید توجه داشت که در این آنتن به‌علت فاصله  $\lambda_g/2$  بین شکافها اثرات کوپلاژ متقابل بین المانها قابل صرف‌نظر بوده و به‌همین جهت در محاسبات در نظر گرفته نشده است. با توجه به‌کاربرد این آنتن در سیستمهای راداری و وسایل ناوبری و دریایی و سایر کاربردهای نظامی و تجاری آن و امکان ساخت آن در داخل کشور می‌توان نیاز به‌این نوع آنتن را برطرف نمود.

ملاحظه می‌شود که آنتن ساخته شده توانسته است مشخصات زیر را ایجاد کند:

پهنای بیم افقی - ۳ درجه

پهنای عمودی - ۲۵ درجه

سطح لوب فرعی - ۱۸/۵ - دسیبل

ایزولاسیون با قدرت حذف پلاریزاسیون عمودی - ۲۵ دسیبل

فرکانس کار - ۹۲۳۶ مگاهرتز

البته تست آنتن فوق با توجه به‌طول آن ۷۲۰ mm نیاز به‌اطاق ساکت با ابعاد بیشتر از ۳۲ متر جهت رسیدن به‌مرز واقعی ناحیه دور آنتن ( $r > 2D^2/\lambda$ ) دارد لکن تست آن در فواصل حدود ۵ الی ۶ متر انجام شده است که می‌تواند خطای در آزمایش محسوب شود.

#### منابع

1. Colin, Robert. Antenna & Radiowave Propagation. Cha Chapter 4.
2. Elliott, Robert, S. Antenna Theory of Design. 1985. Chapter 3, 8.
3. H. Y. Lee & P.N. Richardson. Design and Analysis Arrays of Slotted Waveguide Antenna Arrays. Aicrowave Journal. June 1988.
4. Jasik & Johnson. Antenna Engineering Handbook, Chapter 9.
5. M. Alexander. The Improvement of Sidelobe Performance of Slotted Waveguide Arrays. The Marconi Review. 1982.
6. Wolff Edward, A. Antenna Analysis Chapter 5.