

## طراحی بهینه آنتن FZPA چند لایه با کارایی بالا

عباس پیرهادی

بخش برق - دانشگاه تربیت مدرس و مرکز تحقیقات مخابرات ایران گروه آنتن و انتشار امواج

محمد حکاک

بخش برق - دانشگاه تربیت مدرس و مرکز تحقیقات مخابرات ایران گروه آنتن و انتشار امواج

فرخ آرزوم

مرکز تحقیقات مخابرات ایران - گروه آنتن و انتشار امواج

دانشیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۱/۱/۳۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۲/۳/۱۷، تاریخ تصویب ۸۲/۳/۲۰)

### چکیده

یکی از عوامل مهم در افزایش کارایی آنتن FZPA، ضریب کارایی فاز این نوع ساختار است. این ضریب متناسب با تعداد لایه های بکار رفته شده در ساختار FZPA چند لایه و تنوع دی الکتریک مورد استفاده در ساختار چنددی الکتریکی بوده و افزایش آن منجر به افزایش کارایی آنتن می شود. البته در افزایش ضریب کارایی فاز باید محدودیتهای عملی و تئوری را نیز مدنظر داشت لذا طراحی بهینه آنتن منوط به انتخاب مناسب پارامترهای آن می باشد. در این مقاله، ضمن معرفی اجمالی روشهای مختلف تحلیل این ساختارها، سعی شده است که در هر قطر مشخص از آنتن روش طراحی مناسبی ارائه شود بطوریکه برای هر تغذیه با پترن تشعشی متقارن بتوان محل تغذیه و شعاع نواحی را به گونه ای تعیین نمود که حداکثر بهره آنتن حاصل شود. در نهایت نیز با در نظر گرفتن یک تغذیه طراحی مناسب بر مبنای آن ارائه شده و نتایج حاصل از اندازه گیری با نتایج تئوری مربوطه مقایسه می شود.

**واژه های کلیدی:** نواحی فرنل، آنتن FZPA چندلایه، آنتن FZPA چند دی الکتریک، کارایی

### مقدمه

بر روی این ساختار از سر گرفته شود و تلاش ها در این زمینه در جهت افزایش بهره و کارایی برای رسیدن به حد قابل قبول متمرکز شود [۲]. در این راستا ساختار FZP با تصحیح فاز<sup>۱</sup> پیشنهاد شد و برای پیاده سازی این ساختار طرحهای مختلفی ارائه شد که می توان به ساختار FZP چند لایه<sup>۲</sup>، ساختار FZP چند دی الکتریکی<sup>۳</sup> و ساختار FZP با حلقه های فلزی نصب شده<sup>۴</sup> در نواحی فرنل اشاره کرد. از این ساختارها بعنوان نسل دوم آنتنهای FZPA نام برده می شود [۳]. امروزه کار بر روی آنتنهای FZPA در دو زمینه در حال انجام است. الف- بررسی و تحلیل رفتار امواج الکترومغناطیسی در حضور ساختارهای مختلف FZP اشاره شده در بالا با روشهای تحلیلی و عددی مناسب.

FZP یک ساختار صفحه ای است که برای متمرکز کردن امواج الکترومغناطیسی در یک نقطه (کانون) بکار برده می شود. استفاده از این ساختار از محدوده فرکانسی RF تا محدوده امواج اشعه X امکان پذیر است. یکی از پر کاربردترین استفاده ها از این ساختار در محدوده امواج میلیمتری و مایکروویوی است، که می توان از آن بعنوان جایگزینی برای عدسیها و یا آنتنهای بازتابنده سهموی استفاده کرد. اولین کاربرد این ساختار در طول موج های مایکروویوی در سال ۱۹۳۰ و در طول موجهای میلیمتری در سال ۱۹۶۰ بوده است [۱]. در ابتدا بدلیل کارایی پایین این ساختار در طول موجهای مایکروویوی و میلیمتری استقبال چندانی از آن نشد لذا تا سالهای مدیدی در حد کارهای آزمایشگاهی باقی ماند. ساخت آسان، وزن کم و هزینه ساخت پایین باعث شد که کار

برای تحلیل ساختارهای FZP چند لایه بکار گرفته می شود روش BIM است نکته مهم دراستفاده از این روش، باتوجه به اصول تئوری مرتبط با آن، این است که برای کاهش حجم محاسبات می بایست که طول الکتریکی ساختار تحت بررسی کوچک باشد.

### روش تحلیل ساختار FZPA

از آنجایی که هدف نهایی دستیابی به طراحی بهینه یک ساختار FZP با کارایی بالاست، لازم است که در ابتدا روش مناسب برای بدست آوردن مشخصه های موردنظر مانند بهره، کارایی، SLL<sup>۱</sup> و ... انتخاب شود. با توجه به روشهای مختلف معرفی شده در قسمت قبل برای تحلیل ساختار FZP روش PO، روش مناسبی برای شروع کار است. زیرا می توان براحتی به موارد خواسته شده که می بایست بهینه شوند دست یافت. مناسب بودن این روش به دو دلیل می باشد. اول آنکه همانگونه که در قسمت قبل اشاره شد این روش برای نواحی روی محور اصلی آنتن و زوایای مشاهده نزدیک به آن به نتایج خوبی منتهی

می شود که از این مزیت می توان برای محاسبه بهره روی محور و مقدار SLL استفاده کرد و دوم آنکه در بررسی تئوری موضوع مورد بحث با استفاده از خاصیت تقارنی این ساختارها می توان انتگرالهای دو گانه روی سطح روزنه را به انتگرالهای ساده تبدیل کرد و حجم محاسبات را به میزان قابل توجهی کاهش داد.

### محاسبه میدان تشعشی

در این قسمت میدانهای تشعشی ناشی از ساختار FZP در حالت تصحیح فاز با روش انتخابی، محاسبه می شود. برای این منظور به طریق زیر عمل می شود.

مرحله اول: تعیین نواحی فرنل روی سطح روزنه مورد نظر است. از آنجایی که امواج ناشی از تغذیه آنتن که به سطح روزنه آنتن می رسند دارای جبهه فازکروی هستند، لذا فاز امواج رسیده به نقاط مختلف روی سطح آنتن به دلیل تخت بودن سطح آنتن یکنواخت نخواهند بود. مهمترین اثر این عدم یکنواختی فاز در ضریب کارایی فاز و در نتیجه

ب- بررسی روشهای بهینه سازی این ساختارها با تغییرمشخصه های فیزیکی و نیزمشخصه های تغذیه آنها برای دستیابی به مقادیرمورد نظر مانند بهره، کارایی، SLL و غیره... در این مقاله پس ازانتخاب روش مناسب برای تحلیل و بدست آوردن مشخصه های لازم آنتن توسط آن، لگوریتمی مناسب برای طراحی بهینه پیشنهاد می شود و در نهایت طراحی صورت گرفته با استفاده از ساختار FZPA چند لایه پیاده سازی می شود.

### مروری بر روشهای تحلیل ساختارهای FZPA

[۴]

روشهای مختلفی برای تحلیل و بررسی ساختارهای FZP وجود دارد که می توان از آن جمله به روشهای PO<sup>۵</sup>، UTD/GTD<sup>۶</sup>، PTD<sup>۷</sup> و BIM<sup>۸</sup> اشاره کرد. روش PO بر مبنای تئوری انتگرالی کرشف-هویگنس می باشد، که نسبت به سایر روشها بیشتر بکار می رود. این روش برای محاسبه میدانهای تشعشی روی محور آنتن و زوایای مشاهده نزدیک به محور اصلی آن، به نتایج خوبی منتهی می شود ولی در زوایای مشاهده بزرگ نسبت به محور آنتن بدلیل پراکندگی ناشی از لبه های نواحی، چندان دقیق نخواهد بود. برای رفع این نقص در ساختارهای ساده و تک لایه از روش GTD/UTD استفاده می شود. در بررسی ساختار FZP با استفاده از این روش از اثرات حلقه های نواحی فرنل مجاور بر یکدیگر صرفنظر می شود و فقط پراکندگی موج از لبه های داخلی و خارجی هر حلقه و اثر آنها بر یکدیگر در نظر گرفته می شود. از مزایای این روش کاهش حجم محاسبات و دقت محاسبه میدان های تشعشی برای زوایای مشاهده بزرگ است. از محدودیتهای استفاده از این روش عدم امکان محاسبه میدان تشعشی روی محور آنتن و زوایای نزدیک به آن در اثر محدودیتهای تئوریک است. روش PTD از لحاظ کلی در برگیرنده هر دو روش PO و UTD است ولی محدودیت استفاده از این روش حجم بسیار بالای محاسبات عددی است. در این روش برای بررسی میدانهای پراکندگی ناشی از لبه ها، از جریانهای معادل که روی لبه نواحی در نظر گرفته می شود، استفاده می شود. این جریانهای معادل با برقراری شرایط مرزی محاسبه می شوند. روش دیگری که

می توان شعاع نواحی را تعیین نمود. که در اینصورت شعاعها از رابطه (۲) محاسبه میشوند [۵].

$$r_m = \left( \frac{2m\lambda}{P} \left( F + \frac{m\lambda}{P} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

مرحله دوم: تعیین میدان روی روزنه آنتن است. در این مرحله ابتدا باید تغذیه مناسبی را انتخاب کرد و با مدل کردن میدان ناشی از تغذیه با پلاریزاسیون مشخص میدان را روی سطح روزنه آنتن تعیین کرد. معمولا تغذیه را در آنتنهای بازتابنده و عدسی به این صورت مدل می کنند [۶].

$$U_f(\psi, n) = \begin{cases} C_n \cos^n(\psi) & 0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \psi \geq \pi/2 \end{cases} \quad (3)$$

که  $\psi$  زاویه مشاهده نسبت به محور آنتن و  $U_f$  شدت تشعشع ناشی از تغذیه است.  $C_n$  بگونه ای تعیین می شود که  $\iint U \cdot d\Omega = 4\pi$  که با استفاده از این خاصیت:

$$D = \frac{U}{U_{av}} = \frac{U}{\frac{1}{4\pi} \iint U \cdot d\Omega} = U \quad (4)$$

و  $C_n = 2(n+1)$  بنابراین بفرض یک بودن مقدار کارایی تغذیه برای آن داریم:

$$G_F(\psi, n) = \begin{cases} 2(n+1) \cos^n(\psi) & 0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \psi < 0 \end{cases} \quad (5)$$

با توجه به رابطه (۳) می توان اندازه میدان ناشی از تغذیه را نیز بدست آورد [۶]:

$$|\bar{E}(\psi, \xi)| = [2Z_0 U(\psi, \xi)]^{1/2} = \left[ \frac{Z_0 P_t}{2\pi} G_f(\psi, \xi) \right]^{1/2} \quad (6)$$

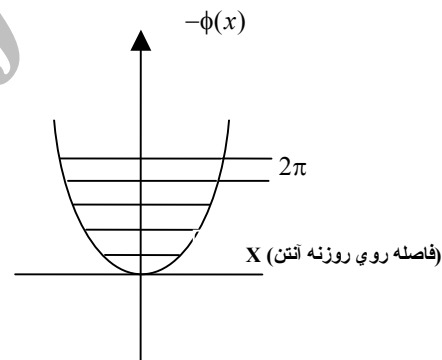
که  $P_t$  کل توان تشعشع شده از تغذیه است. با توجه به شکل (۲) پلاریزاسیون تغذیه برای دارا بودن پلاریزاسیون قائم عبارتست از:

$$\hat{e}_f = -\cos\psi \hat{\psi} + \sin\psi \hat{\xi} \quad (7)$$

که این رابطه برای اکثر آنتنهای شیپوری تقریب خوبی

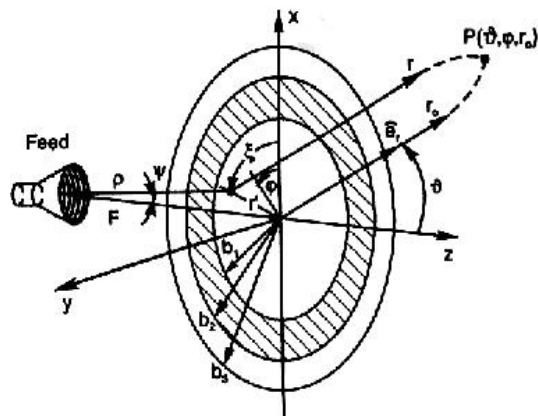
درکارایی کل آنتن ظاهری شود و موجب پایین آمدن آن می شود لذا باید این تغییرات فاز بنحوی جبران شود. این عمل در آنتنهای سهموی با توجه به خواص هندسی ساختار بازتابنده صورت می گیرد بطوریکه در این نوع آنتنها در محل سطح روزنه معادل آنتن بدلیل آنکه دسته اشعه ناشی از تغذیه فواصل یکسان طی نموده اند همه نقاط سطح روزنه معادل همفاز خواهند بود. در ساختارهای FZPA این تصحیح فاز با تعیین نواحی فرنل روی سطح روزنه آنتن و قرار دادن مواد دی الکتریک به صورت مناسب و مشخص در مسیر حرکت امواج الکترومغناطیسی صورت می پذیرد. فازموج رسیده به سطح روزنه آنتن نسبت به مرکز آن، شکل (۱)، عبارتست از:

$$\phi(x) = -k(\sqrt{F^2 + x^2} - F) \quad (1)$$



شکل ۱: فازموج رسیده به روزنه.

که در فرمول فوق  $F$  فاصله کانونی است با توجه به نکات عنوان شده تعیین شعاع نواحی فرنل و تصحیح فاز مناسب در هر ناحیه باید بگونه ای باشد که در نقاط مختلف آن فاز جبران شود. شعاع نواحی با توجه به این موضوع تعیین می شوند که اختلاف فاز هرناحیه نسبت به ناحیه مجاورش می بایست به اندازه  $\frac{2\pi}{P}$  باشد، که  $P$  ضریب تصحیح فاز نامیده می شود و به این وسیله کاهش فاز امواج رسیده به آن ناحیه جبران می شود و در نهایت بطور تقریبی امواج رسیده به تمام نقاط روی روزنه همفاز می شوند. با توجه به اختلاف فاز امواج رسیده به هرناحیه



شکل ۲: شکل آنتن FZPA چگونه قرار گرفتن نواحی فرنل.

در روابط فوق  $J_0$  و  $J_2$  بترتیب توابع بسل مرتبه صفر و مرتبه دوم هستند و:

$$N(\psi, \theta) = K F \tan \psi \sin \theta$$

$$\psi_m = \tan^{-1}(b_m / F)$$

$$O(\psi, n) = \sqrt{G_f(\psi, n)}, \quad \frac{F \tan(\psi)}{\cos(\psi)}$$

$$M(\psi) = -\frac{jkF}{\cos \psi}$$

$$e^{Q(m,p)} = e^{-\frac{2m\pi}{p}} \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

### بررسی کارایی آنتن FZP

در محاسبه بهره که در قسمت ۳ بیان شد مقادیر و پارامترهای مختلف ساختار دخالت دارند، بعنوان مثال ضریب (illumination Factor)  $n$  مربوط به تغذیه مدل شده،  $P$  ضریب تصحیح فاز نواحی و همچنین انتگرال گیریها محدود به سطح روزنه آنتن می باشند، می توان گفت تمامی ضرایب کارایی مانند ضرایب کارایی فاز<sup>۱</sup>، روشن شدگی<sup>۱۱</sup> و سرریز<sup>۱۲</sup> در محاسبات بهره منظور شده اند که می توان در نهایت آنها را به صورت کارایی کلی  $e$  نمایش داد. از آنجائیکه رابطه بهره آنتن روزنه ای با کارایی [۶]. آن به صورت زیر بیان می شود:

$$G = e \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

(۱۲)

می باشد. بنابراین میدان در محل روزنه آنتن به این صورت خواهد بود.

$$\bar{E}_f(\psi, \xi) = C_f \sqrt{G_f(\psi, \xi)} \frac{e^{-jk\rho}}{\rho} \hat{e}(\psi, \xi)$$

$$C_f = \sqrt{\frac{Z_0 P_t}{2\pi}} \quad (۸)$$

که در مرحله سوم با استفاده از تئوری انتگرالی کرشف- هوینگس و با کارگیری تقریبات مناسب در آن برای میدانهای دور [۷] می توان میدان دور تشعشعی ناشی از یک روزنه را به صورت زیر بیان کرد.

$$\bar{E}_{radiation} = -\frac{jke^{-jkr}}{2\pi r} \hat{r} \times \int_{Aperture} (\hat{n} \times \bar{E}_{aperture}) e^{jk\hat{r}.r'} ds \quad (۹)$$

با توجه به مشخص بودن میدان در محل روزنه (۸) برای هر ناحیه فرنل و منظور داشتن مقدار تصحیح فاز میدان در آن ناحیه می توان با استفاده از (۹) میدان تشعشعی ناشی از هر ناحیه فرنل را محاسبه کرد و در نهایت میدان کل تشعشعی را از جمع میدانهای هر ناحیه فرنل بدست آورد پس از انجام محاسبات لازم می توان نتایج کلی را بصورت زیر بیان کرد [۸].

$$E_\theta = -\pi \sum_m \cos \phi C(r) e^{Q(m,p)}$$

$$\int_{\psi_m}^{\psi_{m+1}} O(\psi, n) e^{M(\psi)} I_\theta(\psi) d\psi$$

$$E_\phi = -\pi \sum_m \sin \phi \cos \theta C(r) e^{Q(m,p)}$$

$$\int_{\psi_m}^{\psi_{m+1}} O(\psi, n) e^{M(\psi)} I_\phi(\psi) d\psi$$

$$I_\theta = -(\cos \psi + 1) J_0(N(\theta, \psi) +$$

$$(\cos \psi - 1) J_2(N(\theta, \psi))$$

$$I_\phi = -(\cos \psi + 1) J_0(N(\theta, \psi)) +$$

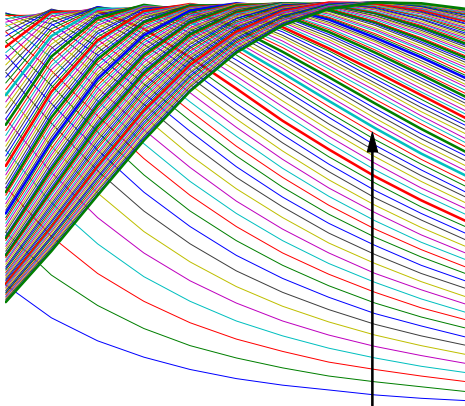
$$(\cos \psi - 1) J_2(N(\theta, \psi)) \quad (۱۰)$$

با توجه به (۱۰) بهره برابر است با:

$$G(\theta, \phi) = 10 \log \left( \frac{2\pi r^2}{Z_0 P_t} |E_\theta \hat{\theta} + E_\phi \hat{\phi}|^2 \right)$$

(۱۱)

روی محور آنتن حداکثر می شود. بازاء یک  $n$  مشخص می توان نقطه ای روی محور آنتن یافت که حاصلضرب دو ضریب اشاره شده و در نتیجه بهره آنتن حداکثر شوند. چگونگی این تغییرات بر حسب فاصله کانونی و  $n$  های مختلف در شکل (۳) نمایش داده شده اند.



شکل ۳: تغییرات حاصلضرب کارایی سرریزوروشن شدگی روزنه بر حسب فاصله کانونی برای مقادیر مختلف  $n(1,2,\dots,120)$ .

تفاوت مهمی که این ساختار با آنتنهای بازتابنده سهموی دارد اثرات ضریب کارایی فاز در ضریب کارایی نهایی است. اثر این پارامتر در آنتنهای سهموی وابسته به دقت ساخت ساختار بازتابنده سهموی و نیز دقت ایجاد موج کروی تابیده شده به سطح آن است. به همین دلیل با در نظر گرفتن نکات فوق، این ضریب در آنتنهای بازتابنده سهموی در حد بسیار بالایی است ولی در ساختار FZP این ضریب وابسته به پارامتر  $P$ ، ضریب تصحیح فاز است. برای مشاهده اثر این ضریب می توان جدول (۱) را مشاهده کرد. این جدول تاثیر مقادیر مختلف  $P$  را بر مقدار  $e_p$  نشان می دهد. اثر دیگر ضریب کارایی فاز  $e_p$  تغییر آن با تغییر فرکانس طراحی است که چگونگی این تغییرات بر حسب فرکانس بطور نمونه در شکل (۴) مشاهده می شود. دلیل کاهش ضریب کارایی فاز در فرکانس غیر از فرکانس طراحی وابستگی شعاع نواحی فرنل به مقدار ضریب تصحیح فاز می باشند. با توجه به تغییرات ضریب کارایی کل روزنه آنتن نسبت به فرکانس می توان محدوده فرکانسی کار

$$e_{sp} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\psi_{max}} U_f(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U_f(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} = 1 - \cos^n(\psi_{max})$$

$$e_i = \frac{1}{\pi a^2} \frac{\left[ \int_0^{2\pi} \int_0^{D/2} |E_x| \rho d\rho d\phi \right]^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^a |E_x|^2 \rho d\rho d\phi}$$

$$\frac{\left| \int_0^{\psi_{max}} (\cos(\psi) + 1) \sqrt{2(n+1) \cos^n(\psi)} \frac{\sin(\psi)}{\cos^2(\psi)} F d\psi \right|^2}{D^2 (1 - \cos^{n+1}(\psi_{max}))}$$

$$e_p = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^{D/2} E_x \rho d\rho d\phi \right|^2}{\left[ \int_0^{2\pi} \int_0^{D/2} |E_x| \rho d\rho d\phi \right]^2} =$$

$$\frac{\left| \sum_{m=0}^{1,2,\dots,\psi_m} \int_0^{\psi_m} (\cos(\psi) + 1) \sqrt{2(n+1) \cos^n(\psi)} \frac{\sin(\psi)}{\cos^2(\psi)} F e^{-jkF/\cos(\psi) + jm\pi} d\psi \right|^2}{\left| \int_0^{\psi_{max}} (\cos(\psi) + 1) \sqrt{2(n+1) \cos^n(\psi)} \frac{\sin(\psi)}{\cos^2(\psi)} F d\psi \right|^2}$$

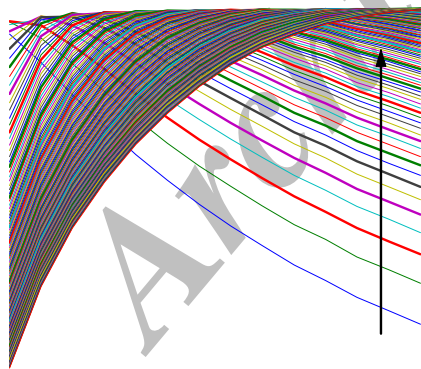
(۱۳)

لذا می توان ضریب کارایی کل را با توجه به مقادیر  $G$  و  $D$  (قطر آنتن) و  $\lambda$  تعیین نمود. برای درک بهتر این ساختار و تعیین اثر پارامترهای مختلف بر کارایی آن می توان هریک از ضرایب کارایی را نیز جداگانه مورد بررسی قرارداد لذا در این قسمت با توجه به تعاریف ارائه شده از این ضرایب [۹] به بررسی آنها می پردازیم. بررسی جداگانه این ضرایب به ما در راستای طراحی یک ساختار بهینه کمک می کند. با معلوم بودن میدانهای الکترومغناطیسی در محل روزنه ساختار می توان ضرایب کارایی را برای ساختار FZP با تصحیح فاز بصورت زیر نمایش داد. با توجه به دستگاه مختصات در نظر گرفته شده در شکل (۲) منظور از  $E_x$  مولفه قائم میدان الکتریکی است.

تاثیر حاصلضرب  $e_{sp} e_i$  شبیه به تاثیری است که در آنتنهای بازتابنده سهموی دارد. البته مقدار آن با توجه به ماهیت هندسی ساختار FZP با آنتن بازتابنده سهموی متفاوت خواهد بود ولی چگونگی تغییرات آن شبیه حالت آنتنهای بازتابنده سهموی است. تغییرات  $e_i$  و  $e_{sp}$  عکس یکدیگر هستند و بنابراین حاصلضرب آنها در یک محل

به محدودیت عملی دستیابی به مواد مورد نظر عملاً افزایش  $P$  برای مقادیر بزرگتر از ۵ ممکن نیست زیرا از طرف دیگر کاهش ضخامت از لحاظ اجرا و پیاده سازی ساختار نیز، مشکلات عدیده ای را ایجاد می کند. ۳- با توجه به جدول (۱) میزان کارایی فاز برای مقادیر (P) ۴ و ۶ تفاوت چندانی ندارد لذا با توجه به مطالب ذکر شده در ۱ و ۲ انتخاب  $P=4$  ارجحیت دارد پس از انتخاب  $P$  با توجه به روابط (۱۰) و (۱۱) بهره آنتن روی محور آن بازاء  $n$  های مختلف در شکل (۵) نشان داده شده است همانگونه که مشاهده می شود بازاء هر  $F$  مقداری برای  $n$  وجود دارد که در آن بهره حداکثر است این مقادیر  $F$  و  $n$  را  $F_{opt}$  و  $n_{opt}$  می نامیم می توان به ازاء تمام نقاط کانون روی محور اصلی آنتن این  $n$  ها را تعیین نمود. که در حقیقت منحنی پوش منحنیهای شکل (۵) میباشد و در شکل (۶) نمایش داده شده است.

با توجه به مقادیر بدست آمده  $F_{opt}$  و  $n_{opt}$  نظیر آن می توان  $\psi_{opt}$ ، حداکثر زاویه مشاهده صفحه FZP در حالت بهینه را از رابطه  $\psi_{opt} = \tan^{-1} \left( \frac{D}{2F_{opt}} \right)$  محاسبه کرد، تغییرات  $\psi_{opt}$  بر حسب  $n_{opt}$  در شکل (۷) مشاهده می شود.



شکل ۵: تغییرات بهره بر حسب فاصله کانونی برای مقادیر مختلف (1, 2, ..., 120) n.

همچنین اگر مقدار نرمالیزه شده بهره تغذیه آنتن را در این زاویه  $\psi_{opt}$  بدست آوریم این مقدار با توجه به مدل انتخابی برای تغذیه (۵) بصورت زیر نمایش داده می شود.

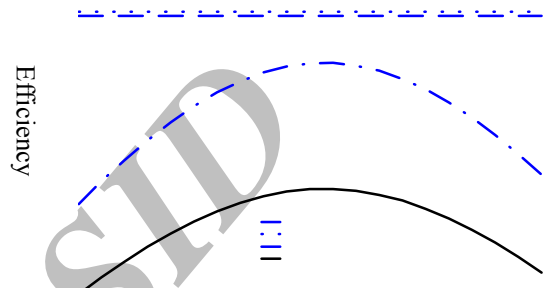
$$EIL_{feed} = -10 \log(\cos^{n(opt)}(\psi_{max(opt)})) \quad (14)$$

آنتن را مشخص نمود و با توجه به سطح کارایی مطلوب پهنای باند آنتن را مشخص نمود.

جدول ۱: مقادیر کارایی فاز برای

$$n=11.7788, F=4.619m, f=11.629GHz, D=6m$$

P	۲	۳	۴	۵	۶	۷
$e_p$	٪۴۰	٪۶۸	٪۸۱	٪۸۷	٪۹۱	٪۹۳



شکل ۴: تغییرات انواع مختلف ضرایب کارایی با تغییر فرکانس.

### روش طراحی بهینه

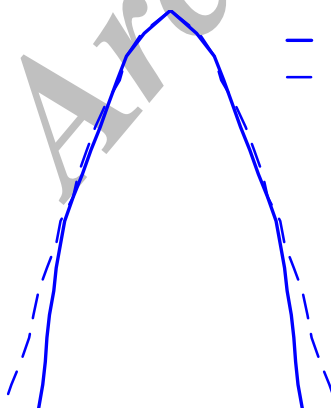
پس از بررسی میدانهای تشعشی و ضرایب کارایی مختلف آنتن FZPA که در قسمتهای ۳ و ۴ مطرح شدند، متوجه می شویم که ضریب کارایی فاز در این ساختار نقش بسزایی در افزایش کارایی کل این نوع آنتن دارد. در افزایش  $P$  باید نکاتی چند مورد توجه قرار گیرد. ۱- هر ناحیه تمام موج ( ناحیه ای که تغییرات فاز جبهه موج در آن  $2\pi$  است) به  $P$  زیر ناحیه تقسیم می شود در نهایت تعداد کل نواحی برابر  $P \times$  (تعداد نواحی تمام موج) است که با افزایش قطر آنتن تعداد نواحی تمام موج و در نتیجه تعداد کل نواحی نیز افزایش می یابد که این خود منجر به باریکتر شدن نواحی فرنل و در نتیجه ساخت و پیاده سازی مشکلتر ساختار می شود. ۲- ضخامت صفحات دی الکتریک مورد استفاده برای پیاده سازی ساختار از رابطه  $t = \frac{\lambda}{2P\sqrt{\epsilon_r}}$ ، [۲]، [۳] و [۱۱] بدست می آید که در آن ضخامت صفحات دی الکتریک با  $P$  نسبت عکس دارد لذا افزایش آن منجر به کاهش ضخامت صفحات دی الکتریک می شود لذا با توجه

مقدار میدان نرمالیزه شده در محل لبه صفحه روزنه آنتن نیز به این صورت محاسبه می شود [۹].

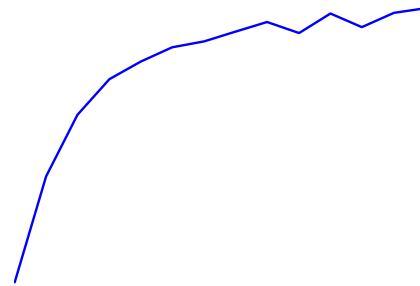
$$EIL_{Aperture} = -20 \log(\cos^{n+3} \psi_{max}) \quad (15)$$

تغییرات این دو مشخصه برحسب  $n_{opt}$  در شکل (۸) مشاهده می شود.

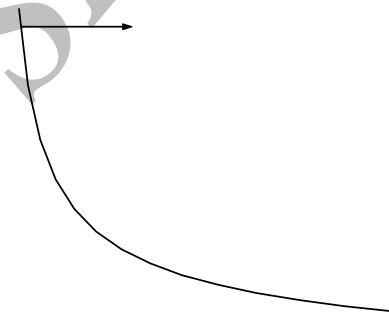
نکته ای که در شکل (۸) قابل توجه است وازنقطه نظر عملی بسیارمهم است، این است که به ازاء  $n$  های بزرگ نمودار  $(EIL-n_{opt})$  تقریباً حالتی ثابت به خود می گیرد. این عدد با مقداری که در طراحی آنتنهای سهموی مشاهده می شود [۹]، بدلیل تفاوت ساختاری با آنتن FZPA متفاوت می باشد. همانگونه که مشاهده می شود به ازاء  $n$  های بهینه مختلف نسبت EIL برای تغذیه تقریباً در حدود ۸-۱۱ دسی بل تغییر می یابد و در رنج وسیعی از مقادیر  $n$  نیز در حد تقریباً ۱۰/۵ دسی بل ثابت می ماند. لذا در هنگام طراحی باید تغذیه در محلی قرار گیرد که در آن محل مقادیر  $\psi_{max}$  و  $n$  نظیر منطبق بر مقادیر  $n_{opt}$  و  $\psi_{opt}$  شوند. برای دستیابی به چنین هدفی به این طریق عمل می شود. (نکته مهم در استفاده از تغذیه این است که حتی الامکان پترن تشعشی آن دارای شکل متقارن باشد، لذا از یک آنتن مخروطی شیاربندی شده با موجبر دایره ای استفاده می شود بطوریکه بتواند پترن متقارن مورد نیاز را فراهم آورد. در شکل (۹) پترن تشعشی این تغذیه نشان داده شده است.)



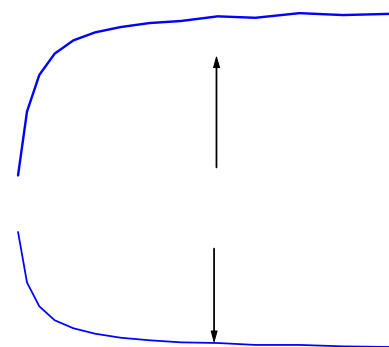
شکل ۹: پترن تشعشی اندازه گیری شده تغذیه (صفحات H<sub>0</sub>E).



شکل ۶: منحنی تغییرات حداکثر بهره بر حسب فاصله کانونی F و n های بهینه.



شکل ۷: چگونگی تغییرات حداکثر زاویه مشاهده سطح روزنه آنتن FZP در حالت بهینه بر حسب مقادیر n.



شکل ۸: تغییرات مقادیر EIL برای تغذیه و روزنه FZP در حالت بهینه بر حسب مقادیر n بهینه.

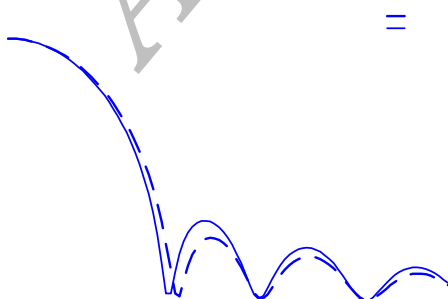
می نماییم. نقطه حاصله بروی شکل (۱۰) بیانگر مقدار  $\psi_{op}$  است.

۱- با استفاده از شکل (۷) و مقدار بدست آمده  $\psi_{op}$  می توان  $n_{opt}$  را تعیین نمود.

۲- با توجه به معلوم بودن قطر آنتن  $D$  و مقدار  $\psi_{op}$  می توان مقدار  $F$  فاصله کانونی مناسب برای قرار دادن تغذیه را تعیین کرد.

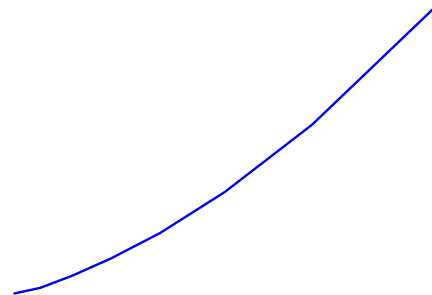
۵- از رابطه ۲ شعاع نواحی و از رابطه ۵ با توجه به مقدار  $n_{opt}$  مدل مناسب برای تغذیه مورد استفاده بدست می آید و از روابط ۱۰ و ۱۱ میدانهای تشعشی ساختار بدست می آیند. که مقدار بهره در این حالت روی محور آنتن با توجه به مشخصات تغذیه مورد استفاده حداکثر مقدار ممکن است.

در پروسه طراحی باید توجه داشت که مقدار  $F$  در محدوده مجاز برای آن باشد. در غیر این صورت تغذیه بکار رفته مناسب نمی باشد. حد پایین محدوده  $F$  مقدار اندازه فاصله میدان دور آنتن تغذیه است و حد بالای آن با توجه به حداقل تعداد نواحی و محدودیت‌های عملی مشخص می شوند. پس از تعیین مقدار  $F$ ، می توان پترن تشعشی آنتن را با توجه بروابط (۱۰، ۱۱) برای دو صفحه  $\phi = \pi/2$ ،  $\phi = 0$  رسم کرد. اگر مقدار SLL بدست آمده در این حالت در حد قابل قبولی باشد، کار طراحی تمام است در غیر این صورت باید از تغذیه ای استفاده کرد که دارای  $n$  بزرگتری باشد [۱۰] تا بتوان مقدار SLL را افزایش داد و همان مراحل قبل را تکرار کرد. تا به نتیجه دلخواه دست یافت. در شکل (۱۱) پترن تشعشی آنتن برای دو صفحه اشاره شده مشاهده می شود



شکل ۱۱: پترن تشعشی آنتن برای  $\phi = 0$ ،  $\phi = \pi/2$

همانگونه که اشاره شد  $n$  از مشخصه های تغذیه مدل شده است و  $F$  محل قرار گرفتن آن می باشد اگر  $F$  فاصله کانونی در محدوده مجاز باشد می توان از نمودارهای بدست آمده  $n_{opt}$  را تعیین نمود و با توجه به آن تغذیه مناسب را طراحی کرد که این موضوع مقوله ای جداگانه می باشد. سوالی که مطرح می شود این است که چگونه می توان با تغذیه های مشخص به طراحی بهینه دست یافت و یا آیا با تغذیه در دسترس می توان به طراحی بهینه دست یافت؟ برای این منظور به این طریق عمل می شود، با توجه به نمودارهای بدست آمده پس از تعیین مقادیر  $F_{opt}$ ،  $n_{opt}$  و معلوم بودن قطر آنتن  $D$  می توان مقادیر  $\psi_{op}$  نظیر را تعیین نمود و سپس مقادیر ضریب  $(\psi_{Opt})^{n(Opt)} = 10 \log EIL$  را بدست آورده و تغییرات آنرا بر حسب تغییرات  $\psi_{op}$  بدست آورد، این تغییرات در شکل (۱۰) مشاهده می شود.



شکل ۱۰: تغییرات ضریب EIL بر حسب  $\psi$  در حالت بهینه برای  $D=6m$ .

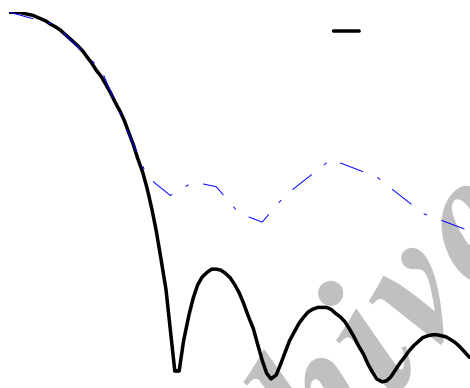
با توجه به گرافها و نمودارهای اشاره شده می توان مراحل طراحی را به صورت زیر خلاصه کرد.

۱- تعیین شکل پترن تشعشی میدان نرمالیزه شده تغذیه بروش تحلیلی و یا از طریق اندازه گیری آن که روش دوم بدلیل انطباق بیشتر با واقعیت توصیه می شود شکل (۹).

۲- با استفاده از گراف شکل (۱۰) و گراف بدست آمده در شکل (۹) ناشی از تغذیه نقطه تلاقی دو منحنی را تعیین



به روش انتخابی برای بررسی تئوری ساختار مورد نظر (PO) و با توجه به مفاهیم مرتبط با این روش و اثر پراکندگی ناشی از لبه‌ها این روش برای مقادیر زاویه مشاهده بزرگ به نتایج خوبی منجر نمی‌شود و برای بدست آوردن میدان تشعشعی برای زوایای مشاهده بزرگ باید از روشهای مناسب دیگر استفاده کرد. مخصوصاً اینکه ماهیت ساختاری آنتن به گونه‌ای است که بدلیل تعدد زیاد لبه‌های روزنه‌های آن پراکندگی ناشی از لبه‌ها بالا است که این خود می‌تواند منجر به عدم تطبیق بیشتر مقادیر اندازه‌گیری و تئوری، مخصوصاً برای زوایای مشاهده بزرگ شود لذا در نمودار شکل پترن تشعشعی در حالت اندازه‌گیری و تئوری مقداری تفاوت دیده می‌شود. در نهایت کلیه مراحل طراحی در فلوچارت نشان داده شده در شکل (۱۴) خلاصه می‌شوند.



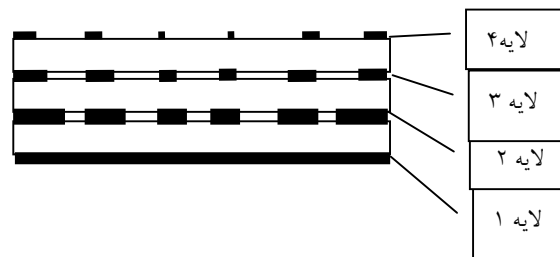
شکل ۱۳-الف: میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده برای صفحه  $\phi = 0$ .

### نتیجه‌گیری

با توجه به تنوع ساختارهای FZP و روشهای مختلفی که برای بررسی و تحلیل این ساختارها وجود دارند، روش طراحی بهینه ارائه شده در این مقاله به عنوان یکی از روشهای ممکن برای طراحی بهینه این نوع ساختارها که در آن طراحی بر مبنای ویژگیها و مشخصات تغذیه آنتن صورت می‌پذیرد مطرح است. در این روش با توجه به مشخصات تغذیه بکار رفته محلی روی محور آنتن (فاصله کانونی) که در آن محل بهره آنتن حد اکثر

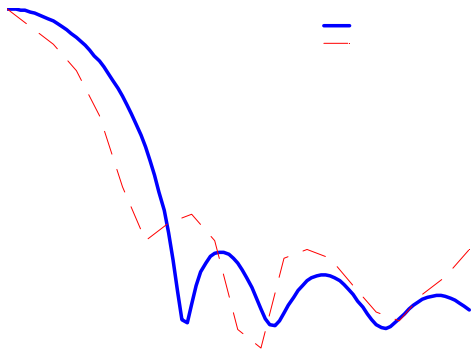
## پیاده‌سازی طراحی انجام شده و مقایسه نتایج تئوری و اندازه‌گیری

پس از طراحی بهینه ساختار FZP حال باید این طراحی را پیاده‌سازی کرد. همانگونه که در قسمتهای قبل اشاره شد روشهای مختلفی برای پیاده‌سازی طرح وجود دارد که با توجه به امکانات و سادگی اجرا روش ساخت آنتن FZP چند لایه انتخاب می‌شود. از مزایای این ساختار استفاده از یک نوع ماده دی‌الکتریک در آن و ساخت ساده آن است. ابتدا باید که برای تعیین پارامترها و مشخصه‌های آن مقادیر ثابت دی‌الکتریک بکار گرفته شده در ساخت آن و ضخامتهای موجود از صفحات دی‌الکتریک بکار رنده و همچنین فرکانس طراحی تعیین شوند که مفصلاً در [۱۱] مورد بررسی قرار گرفته است. باتوجه به نکات بیان شده می‌توان برای صفحه دی‌الکتریک، از جنس پلگسی گلاسی با ابعاد ۶/۶ متر ضخامت ۲ میلی‌متر و  $\epsilon_r = 2.5996 - j.07$  در فرکانس ۶۲۹ GHz /  $f = 11$  و  $P = 4$  به کارائی مناسب، شکل (۴)، دست یافت. برای تغذیه آنتن نیز از یک آنتن شیپوری شیاریندی شده با موجبردایره‌ای استفاده می‌شود. شعاع نواحی فرنل نیز با توجه به رابطه (۲) محاسبه می‌شود و با ترتیب مشخص روی سه صفحه ورق پلاگسی گلاس با استفاده از فویل آلومینیومی نصب می‌شوند. شکل (۱۲)



شکل ۱۲: شکل مقطع ساختار FZPA چهار لایه  $P = 4$ .

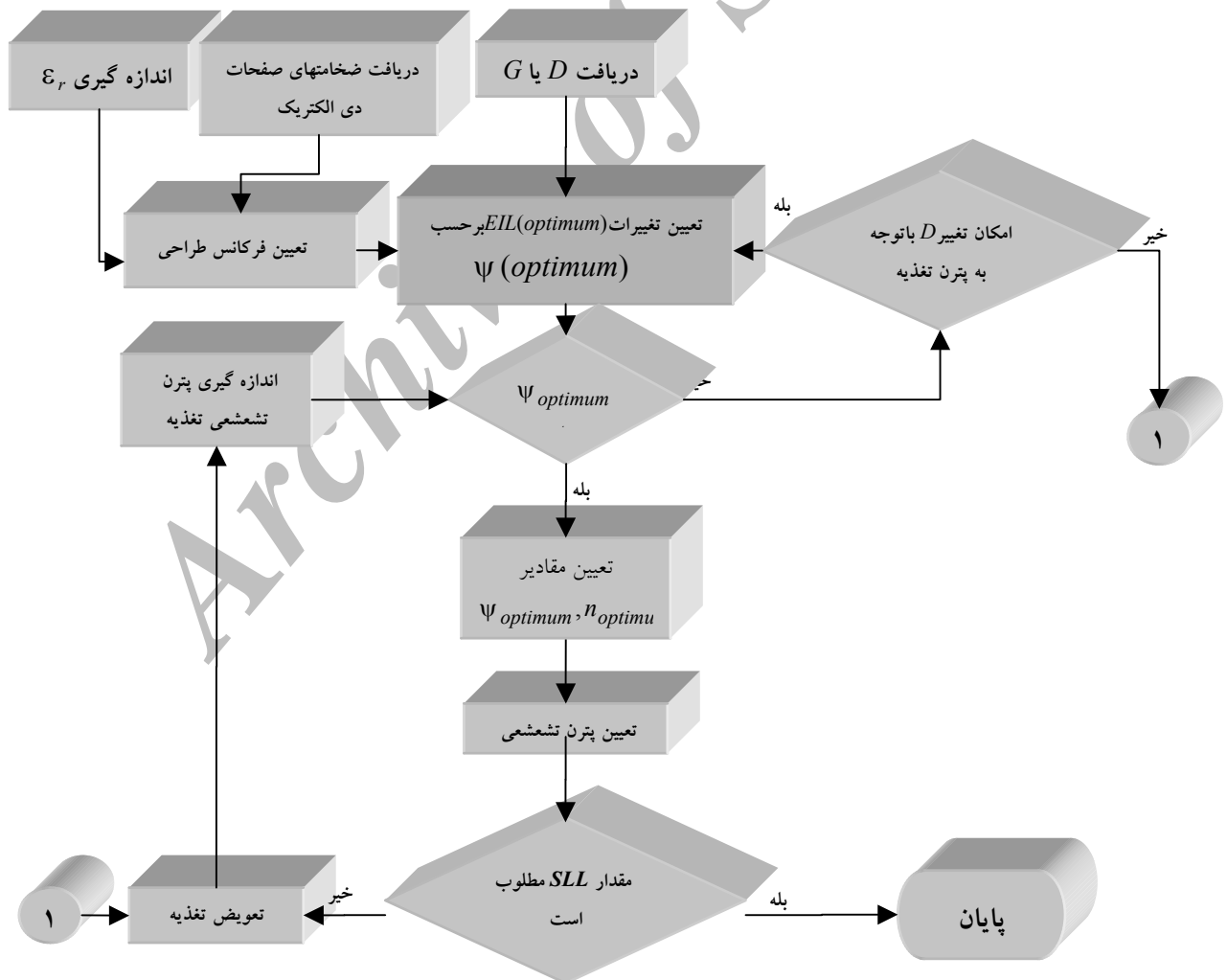
میدانهای الکتریکی اندازه‌گیری شده برای دو صفحه  $\phi = 0$ ,  $\phi = \frac{\pi}{2}$  در شکل‌های (۱۳-الف و ب) مشاهده می‌شوند. منابع خطای مشاهده شونده عبارتند از: الف- اندازه‌گیری پترن تشعشعی بصورت دستی و در فضای باز انجام پذیرفته است ب- بدلیل در دسترس نبودن امکانات کافی اندازه‌گیریهای صورت گرفته در شرایط متفاوت زمانی و محیطی صورت گرفته است. ج- با توجه



مقدار را دارا است یافته می شود و سپس با استفاده از آن شعاع نواحی فرنل تعیین می شود. البته باید توجه داشت که طراحی بهینه برای دستیابی به مقادیر SLL دلخواه و یا سایر مشخصات آنتن نیاز به تغییر مشخصه های تغذیه آنتن به همراه سایر مشخصه های آن دارد که در روش ارائه شده در این مقاله تنها در صورت استفاده از تغذیه های مختلف امکان پذیر است.

شکل ۱۳-ب: میدان الکتریکی اندازه گیری شده برای

$$\text{صفحه } \phi = \frac{\pi}{2} .$$



شکل ۱۴: فلوچارت مراحل طراحی .

## مراجع

- 1 - Wiltse, J. C. (1999). "History and evolution of fresnel zone plate antennas for microwaves and millimeter waves." *IEEE Int. Antenna and Propagation. Symp*, Vol. 2, PP. 722 –725.
- 2 – Herben, M. H. A. J. and Hristov, H. D. (1992). "Some developments in Fresnel Zone Plate Lens Antennas." *IEEE Int. Antenna and Propagation Symp*, Vol. 2, PP. 726-729.
- 3 - Wiltse, J. C. (1999). "Second-generation zone plate antenna design." *Proceedings of SPIE*, Vol. 3795, PP. 287-294.
- 4 - Jiang, G. Z. and Zhang, W. X. (1999). "Theoretical and experimental studies of the Fresnel Zone Plate Lens Antenna." *Electromagnetics*, Vol. 19, No. 4, PP. 385-99.
- 5 – Wiltse, J. C. and Garrett, J. E. (1991). "The fresnel zone plate antenna." *Microwave Journal*, Vol. 34, No. 1, PP. 101- 2,104,106,108-10,112,114.
- 6 - Balanis, C. A. (1997). *Antenna theory*, John Wiley & Sons.
- 7 - Silver, S. (1984). *Microwave antenna theory and design*, John Wiley & Sons.
- 8 - Leyten, L. and Herben, M. H. A. J. (1992). "Vectorial far-field analysis of the fresnel zone plate antenna: a comparison with the parabolic reflector antenna." *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 5, No. 2, PP. 49-56.
- 9 - Collin, R. E. (1985). *Antennas and radio wave propagation*, McGraw-Hill.
- 10 - Guo, Y. J. and Barton, S. K. (1992). "On the side lobe performance of fresnel zone plate antennas." *IEEE Int. Antenna and Propagation. Symp*, Vol.4, PP. 2175 -2178.

۱۱ - بیرهادی، ع. "طراحی و ساخت آنتن مایکروویو FZPA با کارایی بالا،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی مهندسی، استاد راهنما دکتر محمد حکاک، زمستان (۱۳۸۰).

## واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 – Phase Correcting Zone Plate Antenna
- 2 – Multilayer FZPA
- 3 – Multi Dielectric FZPA
- 4 – Incorporating Ring FZPA
- 5 – Physical Optic
- 6 – Uniform/Geometrical Theory of Diffraction
- 7 – Physical Theory of Diffraction
- 8 – Boundary Integral Method
- 9 – Side Lobe Level
- 10 – Phase Efficiency
- 11 – Illumination Efficiency
- 12 – Spillover Efficiency