

## محاسبه سریع انتگرالهای تشعشی با روش FFT جهت کاربرد در تحلیل آنتنهای بازتابنده شکل یافته

حمید میرمحمد صادقی\*\*

ابوالقاسم زیدآبادی نژاد\*

ذاکر حسین فیروزه<sup>۱</sup>\*

\*دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

\*\*پژوهشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه صنعتی اصفهان

### چکیده

در این مقاله، روشی سریع برای محاسبه پترن تشعشی میدان دور آنتنهای بازتابنده<sup>۲</sup> با تحریک دلخواه در محل تغذیه ارائه می‌گردد. آنتن بازتابنده با روش نور هندسی<sup>۳</sup> GO تحلیل شده، سپس میدانهای تشعشی با روش میدان دریچه<sup>۴</sup> AFM بدست آمده و انتگرالهای تشعشی با تبدیل فوریه دوبعدی FFT مبتنی بر مش بندی بهینه دریچه محاسبه می‌شوند. براساس روش ارائه شده، نرم‌افزاری مبتنی بر MATLAB طراحی و پیاده‌سازی شده است که قابلیت شبیه‌سازی آنتنهای بازتابنده شکل یافته با ابعاد بزرگ نسبت به طول موج و تغذیه جابجا شده از کانون را دارد. به عنوان نمونه، دو آنتن مورد استفاده در صنایع نظامی از جمله آنتن رادار مراقبت هوایی و رادار تاکتیکی TPS-۴۳ تحلیل شده و با نتایج شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزار FEKO و اندازه‌گیری مقایسه شده است. این روش در عین سادگی، سرعت و دقت مناسبی در تحلیل آنتنهای بازتابنده شکل یافته دارد. لذا نرم‌افزار حاصل در طراحی آنتنهای بازتابنده با تغذیه جابجا شده، می‌تواند یک ابزار مناسب جهت تعیین اولیه کارایی آنتن و مشخصات تشعشی

موردنیاز باشد و در صورت حصول پارامترهای طراحی موردنظر، شبیه‌سازی دقیق‌تر با نرم‌افزارهایی نظیر FEKO یا NEC انجام شود و بدین صورت زمان موردنیاز در روند طراحی کمتر شود.

**کلید واژگان:** آنتنهای بازتابنده، انتگرالهای تشعشی، FFT.

### ۱- مقدمه

امروزه انواع آنتنهای بازتابنده در صنایع مخابراتی و نظامی بکار برده می‌شوند و متناسب با کاربردهای شکل و تغذیه متفاوتی دارند. بویژه آنتنهای بازتابنده شکل یافته با تغذیه جابجا شده<sup>۱</sup> از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند زیرا دارای SLL<sup>۲</sup> بسیار پایین و انسداد تغذیه<sup>۳</sup> کم هستند و در نتیجه، آنتنهای مناسبی برای کاربرد در مخابرات ماهواره‌ای می‌باشند. همچنین به جای روشهای مکانیکی پرهزینه جهت حرکت کل سیستم آنتنی می‌توان بازتابنده‌های با تغذیه جابجا شده و آنتنهای چند پرتو<sup>۴</sup> با تغذیه چندگانه را جهت پوشش پرتو اصلی استفاده نمود [۱-۷]. تاکنون مقالات زیادی برای تحلیل آنتنهای بازتابنده جهت محاسبه میدانهای تشعشی و پارامترهای آنتنی ارائه شده است.

۱. نویسنده عهده‌دار مکاتبات (zhfirouzeh@aut.ac.ir)

۱. Deplaced feeds

۲. Side Lobe Level

۳. Feed blockage

۴. Multi-beam

۲. Reflector antennas

۳. Geometrical Optics

۴. Aperture Field Method

این روش می‌توان جریانهای سطحی روی بازتابنده را سریعتر از روش متداول MoM محاسبه نمود [۱۲-۱۴].

بعد از انتخاب روش تحلیل آنتن بازتابنده، محاسبه دقیق و سریع پترن تشعشعی بسیار اهمیت دارد. روش مستقیم که انتگرالهای تشعشعی را بصورت عددی محاسبه می‌نماید، بسیار زمان‌بر است. البته می‌توان از بسط انتگرالهای تشعشعی به یک سری مانند روش Jacobi-Bessel نیز استفاده کرد [۱۵]. روش Jacobi-Bessel برای محاسبه پترن آنتنهایی که دارای دریچه تصویر شده دایروی<sup>۱</sup> هستند، بسیار مناسب هستند. زیرا چندجمله‌ای Jacobi، نوع خاصی از رابطه بازگشتی استفاده می‌کند که برای محاسبه پترن تشعشعی آنتنهای بازتابنده سهمی<sup>۲</sup> بسیار مناسب هستند.

در اینجا یک الگوریتم سریع برای محاسبه انتگرالهای تشعشعی آنتن بازتابنده دلخواه با روش FFT ارائه می‌گردد. روش پیشنهادی برای تمام آنتنهای بازتابنده شکل یافته با تغذیه جابجاشده از کانون قابل استفاده است. در این روش، ابتدا توسط نور هندسی GO میدانهای انعکاسی از روی سطح بازتابنده حاصل از تغذیه دلخواه بدست آمده، یعنی با ردگیری شعاع<sup>۳</sup> انعکاسی، توزیع میدان روی دریچه<sup>۴</sup> بازتابنده محاسبه می‌گردد. انتگرالهای تشعشعی بدست آمده از AFM با روش FFT محاسبه شده تا پترن تشعشعی آنتن و سایر پارامترهای تشعشعی نظیر بهره، پهنای پرتو نیم توان، SLL و نسبت F/B<sup>۵</sup>... حاصل گردد. نرم‌افزاری مبتنی بر MATLAB براساس روش مذکور طراحی و تهیه شده که قابلیت تحلیل و شبیه‌سازی آنتنهای بازتابنده شکل یافته با ابعاد بزرگ نسبت به طول موج را دارد. در سراسر این مقاله به نرم‌افزار تهیه شده براساس روش مذکور، عنوان "نرم‌افزار پیشنهادی" اطلاق می‌گردد.

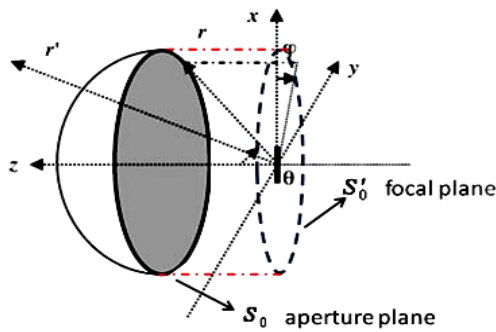
در ادامه، روش محاسبه سریع انتگرالهای تشعشعی با FFT در بخش دو ارائه می‌گردد. گسسته‌سازی بهینه سطح بازتابنده جهت محاسبه انتگرالهای تشعشعی با دقت مطلوب و زمان کم در بخش سه بررسی می‌شود. برای تایید و اعتبار روش پیشنهادی، آنتنهای

بطور کلی روشهای محاسبه میدانهای تشعشعی حاصل از آنتن بازتابنده به دو دسته تقسیم می‌شود؛ میدان دریچه AFM و جریان القایی<sup>۱</sup>. روش میدان دریچه AFM حل دقیقی روی محور و بخش جلوی آنتن و در اطراف پرتو اصلی<sup>۲</sup> نسبت به محور می‌دهد. در این روش، تقریب نور فیزیکی PO<sup>۳</sup> و نور هندسی GO برای محاسبه توزیع میدان روی دریچه<sup>۴</sup> سطح بازتابنده بکار رفته و معمولاً برای آنتنهای بازتابنده بزرگ نسبت به طول موج، معتبر است. این روش برای ناحیه سایه<sup>۵</sup> آنتن بازتابنده مناسب نیست زیرا از جریانهای لبه و پشت بازتابنده صرف‌نظر می‌کند. لذا برای در نظر گرفتن آثار مذکور، از روشهای تفرق لبه<sup>۶</sup> استفاده نموده و پاسخ بدست آمده را به حل روش AFM می‌افزایند [۸ و ۹]. برای در نظر گرفتن تفرق لبه از روشهایی مانند GTD<sup>۷</sup> یا UTD<sup>۸</sup> استفاده کرده زیرا نتایج معتبری در ناحیه سایه بازتابنده داشته و جریانهای لبه را در نظر می‌گیرد ولی پیچیدگی محاسباتی بیشتری به روش AFM می‌افزاید [۱۰ و ۱۱]. در روش جریان القایی، برای محاسبه توزیع جریان روی سطح بازتابنده از روشهایی نظیر روش ممان MoM<sup>۹</sup> استفاده می‌گردد. اگرچه روشهایی دقیق هستند اما محاسبات پیچیده و زمان‌بری دارند. اخیراً، از روشهای ممان- موج WBMM<sup>۱۰</sup> جهت تحلیل آنتنهای بازتابنده بزرگ استفاده شده است. در روش ممان MoM<sup>۱۱</sup> متداول با استفاده از توابع بسط و آزمون برای تبدیل معادلات انتگرال EFIE<sup>۱۲</sup> به معادلات جبری، ماتریسهای امپدانس متراکم حاصل می‌شود. در صورتیکه در روش موجک، توابع موجک به عنوان توابع بسط و آزمون استفاده شده و باعث تنک<sup>۱۳</sup> شدن ماتریسهای امپدانس شده و زمان محاسبات را کاهش می‌دهد. با

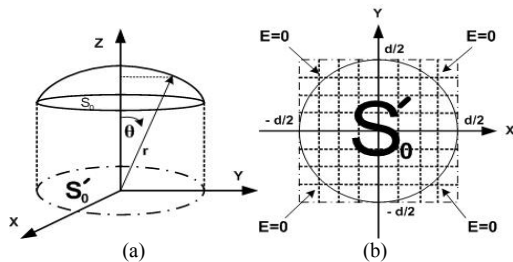
۱. Induced current
۲. Main beam
۳. Physical Optics
۴. Aperture
۵. Shadow region
۶. Edge diffraction
۷. Geometrical Theory of Diffraction
۸. Uniform Theory of Diffraction
۹. Method of Moments
۱۰. Wavelet-Based Moment Method
۱۱. Method of Moments
۱۲. Electric Field Integral Equation
۱۳. Sparse

۱. Circular projected aperture
۲. Parabolic reflector antenna
۳. Ray tracing
۴. Aperture
۵. Front to Back

روش پیشنهادی اگرچه برای آنتن بازتابنده سهموی توضیح داده می‌شود اما برای سایر آنتنهای بازتابنده نیز قابل استفاده است. ویژگی مهم این روش، انتگرال‌گیری سریع روی صفحه درجه برای هرنوع تغذیه بامحل دلخواه هست در صورتیکه، انتگرال‌گیری روی سطح بازتابنده زمانیکه تغذیه از کانون افست<sup>۲</sup> داشته باشد یا پترن تشعشعی تغذیه نامتقارن باشد، بسیار زمان‌بر است. برای محاسبه میدان



شکل ۱: هندسه سه‌بعدی آنتن بازتابنده سهموی متقارن



شکل ۲: (a) صفحه  $S'_0$  تصویر سطح رفلکتور روی صفحه کانونی است. (b) یک شبکه مش مستطیلی روی صفحه  $S'_0$  ایجاد می‌شود.

انعکاسی از بازتابنده، صفحه کانونی  $S'_0$  مطابق شکل ۲a مش‌بندی شده است. با استفاده از تقریب نور فیزیکی PO میدانهای انعکاسی در خارج از صفحه  $S'_0$  برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

تبدیل فوریه دوبعدی FFT<sup>۲</sup> برای محاسبه انتگرالهای ۱a و ۱b بکار می‌رود [۱۷]. لذا انتگرالهای  $P_x$  و  $P_y$  بصورت زیر تعریف می‌گردند:

بسیاری شبیه‌سازی شده‌اند اما در اینجا دو نوع آنتن بازتابنده شکل‌یافته عملی در صنایع نظامی از جمله رادار مراقبت هوایی و رادار تاکتیکی AN/TPS-۴۳ با نرم‌افزار پیشنهادی، شبیه‌سازی شده و در بخشهای چهار و پنج با نتایج حاصل از نرم‌افزار FEKO و اندازه‌گیری مقایسه شده است. در بخش ششم، نتیجه‌گیری و توضیحات پایانی آمده است.

## ۲- محاسبه انتگرالهای تشعشعی با FFT

در شکل ۱ هندسه سه‌بعدی یک آنتن بازتابنده سهموی متقارن<sup>۱</sup> نشان داده شده است. تغذیه در محل کانون قرار گرفته و تصویر سطح بازتابنده روی صفحه درجه - دهانه بازتابنده - را  $S_0$  و روی صفحه کانونی  $S'_0$  نامیده می‌شود. انتگرالهای تشعشعی روی سطح  $S'_0$  برای محاسبه میدان دور بصورت زیر هستند [۱۶]:

$$E_{\theta S} = \frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r} (1 - \cos\theta) \iint_{S'_0} (-E_{ax} \cos\phi - E_{ay} \sin\phi) \exp(j\beta(x' \sin\theta \cos\phi + y' \sin\theta \sin\phi)) dx' dy' \quad (1a)$$

$$E_{\phi S} = \frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r} (1 - \cos\theta) \iint_{S'_0} (-E_{ax} \sin\phi + E_{ay} \cos\phi) \exp(j\beta(x' \sin\theta \cos\phi + y' \sin\theta \sin\phi)) dx' dy' \quad (1b)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad u = \sin\theta \cos\phi, \quad v = \sin\theta \sin\phi \quad (1c)$$

در معادلات (۱)،  $E_{ax}$  و  $E_{ay}$  مولفه‌های میدان الکتریکی انعکاسی روی صفحه کانونی  $S'_0$  می‌باشد. اگر تغذیه در محل کانون آنتن سهموی قرار داشته باشد، اشعه حاصل در امتداد محور اصلی خواهد بود. بنابراین اختلاف بین میدان روی صفحات  $S_0$  و  $S'_0$  تنها اختلاف فاز حاصل از فاصله بین دو صفحه مذکور است و محاسبه انتگرالهای تشعشعی روی هر دو صفحه مذکور معتبر است. در صورتیکه تغذیه از محل کانون جابجا شود، یک اختلاف و اغتشاش فازی بین دو صفحه  $S_0$  و  $S'_0$  بوجود می‌آید. بنابراین انتگرالهای تشعشعی تنها روی صفحه درجه  $S_0$  بایستی محاسبه گردد.

$$\theta_{kl} = \sin^{-1} \left[ \left[ \left( \frac{k}{-A} \right)^2 + \left( \frac{l}{-B} \right)^2 \right]^{1/2} \right] \quad (6a)$$

$$\varphi_{kl} = \tan^{-1} \left( \frac{-Al}{-Bk} \right) \quad (6b)$$

با استفاده از تبدیل فوریه دوبعدی FFT<sup>۲</sup>، روابط (۵) بصورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$P_x = \exp \left( -j\beta u \frac{d}{2} \right) \exp \left( -j\beta v \frac{d}{2} \right) dx' dy' \text{ FFT } 2(E_{ax})$$

$$P_y = \exp \left( -j\beta u \frac{d}{2} \right) \exp \left( -j\beta v \frac{d}{2} \right) dx' dy' \text{ FFT } 2(E_{ay}) \quad (7)$$

سرانجام میدانهای تشعشعی  $E_{\theta S}$  و  $E_{\phi S}$  براساس FFT<sup>۲</sup> بصورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$E_{\theta S} = \frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r} (1 - \cos\theta_{kl}) \{-\cos\phi_{kl} P_x - \sin\phi_{kl} P_y\}$$

$$E_{\phi S} = \frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r} (1 - \cos\theta_{kl}) \{-\sin\phi_{kl} P_x + \cos\phi_{kl} P_y\} \quad (8)$$

براساس معادلات (۷) و (۸) میدانهای دور  $E_{\theta S}$  و  $E_{\phi S}$  محاسبه می‌گردد و  $\theta_{kl}$  مطابق رابطه (۶b) بدست می‌آید. مقادیر منفی ۱ و k برای یافتن میدانها در سایر نواحی بکار می‌رود. علاوه براین تعداد نقاط روی پرتو اصلی به دلیل استفاده از FFT محدود است، لذا از درونیایی<sup>۱</sup> برای بدست آوردن تمام نقاط فضا استفاده می‌گردد. پترنهای تشعشعی صفحات E و H به ترتیب به ازای  $\phi = 0$  و  $\phi = \frac{\pi}{2}$  قابل محاسبه است. سمتگرایی<sup>۲</sup> آنتن بصورت زیر محاسبه می‌گردد [۱۸]:

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

$$\Omega_A = \iint_{u^2+v^2 \leq 1} |F(u,v)|^2 \frac{dudv}{\sqrt{1-u^2-v^2}} \quad (9)$$

۱. Interpolation

۲. Directivity

$$P_x = \iint_{S'_0} E_{ax} e^{j\beta(x'u+y'v)} dx' dy' \quad (2)$$

$$P_y = \iint_{S'_0} E_{ay} e^{j\beta(x'u+y'v)} dx' dy'$$

در روابط مذکور  $E_{ax}$  و  $E_{ay}$  مولفه‌های میدان انعکاسی روی صفحه  $S'_0$  است. با استفاده از روابط (۲) میدانهای تشعشعی  $E_{\theta S}$  و  $E_{\phi S}$  بصورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$E_{\theta S} = \frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r} (1 - \cos\theta) \{-P_x \cos\phi - P_y \sin\phi\} \quad (3)$$

$$E_{\phi S} = \frac{j\beta e^{-j\beta r}}{4\pi r} (1 - \cos\theta) \{-P_x \sin\phi + P_y \cos\phi\}$$

شبکه مش با کمک روابط زیر ایجاد می‌گردد:

$$dx' = \frac{d}{M-1}, \quad x' = -d/2 + m dx', \quad m = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (4)$$

$$dy' = \frac{d}{N-1}, \quad y' = -d/2 + n dy', \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

M و N به ترتیب تعداد نقاط توزیع شده بطور یکنواخت در امتداد x و y روی صفحه  $S'_0$  می‌باشد. قطر دریاچه بازتابنده سهموی برابر d است. با جایگذاری روابط (۴) در معادلات (۲)،  $P_x$  و  $P_y$  بصورت زیر در می‌آید:

$$P_x = \exp \left( -j\beta u \frac{d}{2} \right) \exp \left( -j\beta v \frac{d}{2} \right) dx' dy'$$

$$\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} E_{ax}(m,n) e^{j\beta v \frac{nd}{N-1}} e^{j\beta u \frac{md}{M-1}} \quad (5)$$

$$P_y = \exp \left( -j\beta u \frac{d}{2} \right) \exp \left( -j\beta v \frac{d}{2} \right) dx' dy'$$

$$\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} E_{ay}(m,n) e^{j\beta v \frac{nd}{N-1}} e^{j\beta u \frac{md}{M-1}}$$

$E_{ax}(m,n)$  و  $E_{ay}(m,n)$  میدانهای الکتريکی در نقاط مش  $(m,n)$  ام صفحه  $S'_0$  هستند. با مقایسه روابط (۵) با فرمولهای FFT،  $\theta_{kl}$  و  $\varphi_{kl}$  زوایای مختصات کروی بوده که میدانهای تشعشعی در آن نقاط محاسبه می‌شوند:

$$A = \frac{d}{\lambda} \frac{M}{M-1}, \quad k = -A \sin\theta_{kl} \cos\phi_{kl}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, M-1$$

$$B = \frac{d}{\lambda} \frac{N}{N-1}, \quad l = -B \sin\theta_{kl} \sin\phi_{kl}, \quad l = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

$$0 \leq \theta_{kl} \leq \pi, \quad 0 \leq \varphi_{kl} \leq 2\pi \text{ or } -\pi \leq \varphi_{kl} \leq \pi$$

$$\Delta T \leq \frac{1}{f_{\max}} \quad (13)$$

مشاهده می‌شود که انتگرالهای تشعشی تبدیل فوریه مکانی میدانهای الکتریکی روی دریچه هستند لذا  $k_x$  و  $k_y$  فرکانسهای طیفی متناظر با مکانهای  $x$  و  $y$  می‌باشند. با استفاده از رابطه (۱۳) و (۶a) اندازه مش بهینه حاصل می‌گردد:

$$\Delta x < \frac{1}{k_x}, \quad k_x = \frac{u}{\lambda} \Rightarrow \Delta x < \frac{\lambda}{u}, \quad \text{Max}(u) = 1 \Rightarrow \Delta x < \lambda \quad (14)$$

بطور مشابه می‌توان  $\Delta y < \lambda$  را اثبات کرد. بنابراین برای اینکه میدانهای الکتریکی دریچه بطور صحیح نمونه‌برداری گردد تا محاسبات حاصل از FFT معتبر باشد، لازم است که اندازه مش‌ها کمتر از طول موج شبیه‌سازی باشد. اگر تعداد نقاط نمونه‌برداری از مقدار مذکور بیشتر گردد، اطلاعات بیشتری از میدان بدست نمی‌آید و تنها زمان شبیه‌سازی بدون افزایش کارایی محاسباتی، زیاد می‌گردد.

برای مشاهده اثر نمونه‌برداری صحیح و اندازه مش‌ها در محاسبه پترن تشعشی، یک آنتن بازتابنده سهموی با آنتن هورن<sup>۱</sup> واقع در کانون تحریک شده است. فرکانس کاری آنتن ۱.۳GHz و قطر دهانه بازتابنده و فاصله کانونی آن به ترتیب ۱۳.۵m و ۵.۳۱m است. نتایج شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف مش‌بندی با نرم‌افزار پیشنهادی در جدول ۱ نشان داده شده است. برای اندازه مش‌های بزرگتر از  $\lambda = 23.08 \text{cm}$  پارامترهای تشعشی آنتن نظیر بهره و پهنای پرتو نیم‌توان<sup>۲</sup> HP<sup>۲</sup> مقادیر قابل قبولی نیستند. ولی برای اندازه مش‌های کمتر از  $\lambda$  شرط رابطه (۱۴) محقق می‌گردد و مشخصات تشعشی آنتن به درستی محاسبه می‌شود. وقتی که نقاط مش‌بندی  $M=128$  و  $N=128$  انتخاب می‌گردند، پرتو اصلی در زاویه  $\theta=180^\circ$  قرار داشته و بهره برابر  $38.91 \text{dB}$  بدست می‌آید. پهنای پرتو نیم‌توان در صفحه E برابر  $2.34^\circ$  و در صفحه H برابر  $0.9^\circ$  است و سطح گلبرگهای کناری SLL در صفحات E و H، به ترتیب،

$F(u, v)$  پترن تشعشی آنتن بازتابنده برحسب متغیرهای  $u$  و  $v$  است. در این بخش، معادلات اصلی برای تحلیل بازتابنده سهموی و محاسبه پارامترهای تشعشی آنتن بدست آمده است. روش بکار رفته با کمی تغییر با نرم‌افزار پیشنهادی در محیط MATLAB قابل اعمال به تمام آنتنهای بازتابنده شکل‌یافته با تغذیه جابجاشده می‌باشد به شرط آنکه ابعاد دهانه بازتابنده نسبت به طول موج بزرگ باشد.

### ۳- محاسبه مش‌بندی بهینه

اگر  $x(t)$  تابعی پیوسته از متغیر  $t$  در بازه  $[a, b]$  باشد، زوج تبدیل فوریه  $x(t)$  بصورت زیر تعریف می‌گردد [۱۷]:

$$\begin{cases} x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{+j2\pi ft} df \\ X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \end{cases} \quad (10)$$

برای اینکه بتوان انتگرالهای فوریه را بصورت عددی محاسبه کرد بازه  $[a, b]$  با  $N$  نقطه، به  $N-1$  جزء مساوی  $\Delta T$  تقسیم می‌گردد.

$$\Delta T = \frac{b-a}{N-1} \quad (11)$$

$$t = a + n\Delta T, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

بعد از جایگزینی رابطه (۱۱) در انتگرالهای فوریه و مقایسه با تبدیل فوریه گسسته<sup>۱</sup>، می‌توان نوشت:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (12a)$$

$$k = N \Delta T f \Rightarrow f_k = \frac{k}{N \Delta T} \Rightarrow f_{\max} = \frac{N-1}{N \Delta T} \quad (12b)$$

رابطه (۱۲b) نشان می‌دهد که  $\Delta T$  بایستی کمتر از  $\frac{N-1}{N f_{\max}}$  باشد تا ماکزیمم فرکانس موجود در  $x(t)$  با تبدیل فوریه گسسته قابل آشکارسازی باشد. چون  $N$  مقدار بزرگی دارد، رابطه (۱۲b) را می‌توان بصورت زیر ساده کرد:

۱. Horn antenna

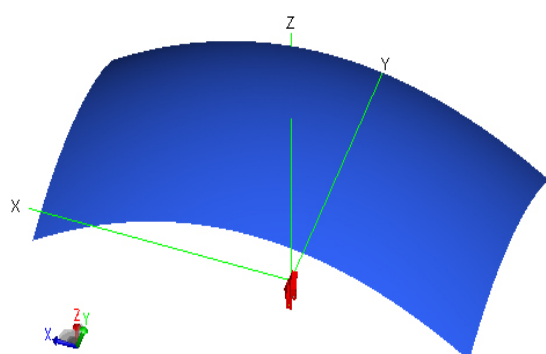
۲. Half Power beamwidth

۱. Discrete Fourier Transform

#### ۴- تحلیل و شبیه‌سازی آنتن بازتابنده شکل یافته با تغذیه‌های هورن جابجاشده

یک آنتن بازتابنده شکل یافته که توسط دو هورن جابجاشده تغذیه می‌گردد در شکل ۴ نمایش داده شده است. فرکانس کاری برابر ۱.۴GHz و طول و عرض دهانه بازتابنده به ترتیب برابر ۱۳.۵m و ۷.۰m با فاصله کانونی ۵.۳۱m است. منحنی پروفایل سمت<sup>۱</sup> بازتابنده، سهمی و منحنی پروفایل ارتفاع<sup>۲</sup> بازتابنده، از نوع شکل یافته است. تابع سه‌بعدی توصیف کننده سطح رفلکتور بصورت زیر است:

$$z = -0.0471x^2 + 5.3100 \cos^{0.6364} \left( \frac{y}{4.9267} \right) \quad (15)$$

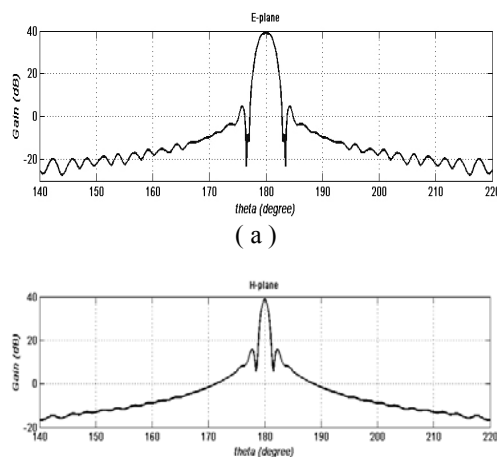


شکل ۴: آنتن شکل یافته تغذیه شده با دو هورن

هورنهای تغذیه در امتداد محور Y بصورت متقارن نسبت به مبدا مختصات (کانون آنتن بازتابنده) قرار گرفته‌اند. هورن قرار گرفته در محل (۰,۰,-۰.۱۸۵m) ایجاد پرتو بالایی و هورن دیگر واقع در (۰,۰,+۰.۱۸۵) پرتو پایینی را تولید می‌کند.

نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار پیشنهادی در جدول ۳ ارائه شده است. تعداد نقاط مش برای M و N برابر ۱۲۸ است. نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار FEKO در جدول ۴ آورده شده است. به دلیل ابعاد بزرگ آنتن، پترن تشعشعی و بهره در سایت فضای باز<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شده است. بهره پرتو

برابر ۳۵dB- و ۲۵dB- است. پترن تشعشعی در صفحات E و H در شکل ۳ نمایش داده شده است. آنتن سهموی مذکور با نرم‌افزار FEKO با ترکیب روش ممان و PO تحلیل شده است و نتایج حاصل از آن در جدول ۲ با نرم‌افزار تهیه شده در MATLAB مقایسه شده است. اختلافات مشاهده شده به دو دلیل می‌باشد؛ اختلافات حاصل در گلبه‌های کناری بخاطر صرف نظر کردن از اثرات لبه در نرم‌افزار پیشنهادی می‌باشد اما اختلافات در بهره و پهنای پرتو نیم توان به دلیل خطای درونیابی در پیوسته نمودن پترن تشعشعی است. نکته قابل توجه آن است که زمان شبیه‌سازی در نرم‌افزار FEKO سه برابر



شکل ۳: (a) پترن تشعشعی در صفحه E و (b) پترن تشعشعی در صفحه H

زمان شبیه‌سازی در نرم‌افزار پیشنهادی است. در طراحی آنتنهای بازتابنده بزرگ اگر یک پیش شبیه‌سازی امکان پذیر باشد تا اعتبار طراحی در پارامترهای حساس و مهم آنتن نظیر بهره، پهنای پرتو نیم توان در صفحات E و H و سطح گلبه‌های کناری تعیین گردد، می‌توان زمان زیادی را در فرآیند طراحی و شبیه‌سازی کاهش داد و سپس برای نهایی کردن طراحی، از نرم‌افزارهای دقیق نظیر FEKO یا NEC استفاده شود. در بخش بعدی دو آنتن کاربردی در صنایع نظامی با نرم‌افزار پیشنهادی، شبیه‌سازی شده و با نرم‌افزار FEKO و نتایج اندازه‌گیری شده، مقایسه می‌گردد.

۱. Azimuth profile

۲. Elevation profile

۱. Open site

### ۵- تحلیل و شبیه‌سازی آنتن رادار AN/TPS-۴۳

رادار AN/TPS-۴۳ یک رادار تاکتیکی سه‌بعدی مراقبت هوایی بوده که در باند فرکانسی ۲.۹GHz تا ۳.۱GHz تا برد ۲۰۰mile کار می‌کند [۱]. آنتن بازتابنده از نوع سهموی با دهانه بیضوی است. طول و عرض دهانه، به ترتیب، ۶.۲۰m و ۴.۲۷m با فاصله کانونی ۲.۶m است.

بالایی برابر ۳۵.۵dB و بهره پرتو پایینی برابر ۳۴.۵dB است. پهنای پرتو نیم‌توان صفحه سمت  $HP_H^\circ$  برابر  $1.2^\circ$  و صفحه ارتفاع  $HP_E^\circ$  برابر  $10.5^\circ$  است. نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار پیشنهادی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی با FEKO و اندازه‌گیری تطبیق خوبی دارد. اما زمان شبیه‌سازی با نرم‌افزار پیشنهادی کمتر از یک-سوم زمان شبیه‌سازی با FEKO می‌باشد.

جدول ۱: نتایج شبیه‌سازی برای اندازه‌های مختلف مش‌بندی

M	N	dx (cm)	dy (cm)	Main beam $\theta$ (deg.)	$HP_E^\circ$	$HP_H^\circ$	Gain (dB)
۳۲	۳۲	۴۳.۵۵	۴۳.۵۵	۱۸۰	۶۲.۸۹	۳۲.۴۲	۱۱.۰۶
۴۸	۴۸	۲۸.۷۲	۲۸.۷۲	۱۸۰	۲۴.۶۲	۱۴.۱۲	۱۸.۷۳
۵۶	۵۶	۲۴.۵۵	۲۴.۵۵	۱۸۰	۵.۲۴	۲.۳۲	۳۳.۳۰
۶۴	۶۴	۲۱.۴۷	۲۱.۴۷	۱۸۰	۲.۳۴	۰.۹	۳۸.۸۳
۱۲۸	۱۲۸	۱۰.۶۳	۱۰.۶۳	۱۸۰	۲.۳۴	۰.۹	۳۸.۹۱

جدول ۲: مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزارهای پیشنهادی و FEKO

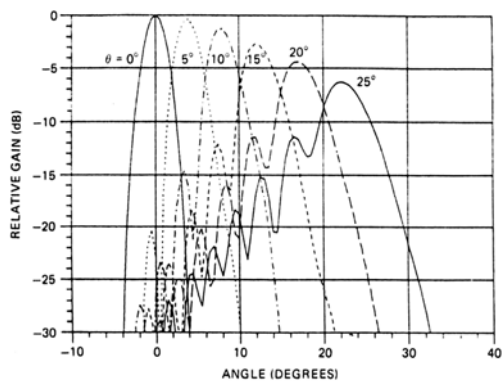
	Main beam $\theta$ (deg.)	$HP_H^\circ$	$HP_E^\circ$	Gain (dB)	SLL <sub>E</sub> (dB)	SLL <sub>H</sub> (dB)
Proposed Method	۱۸۰	۲.۳۴	۰.۹	۳۸.۹۱	-۳۵	-۲۵
FEKO	۱۸۰	۲.۵	۱.۱	۳۹.۲	-۳۳	-۲۲

جدول ۳: نتایج شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزار پیشنهادی

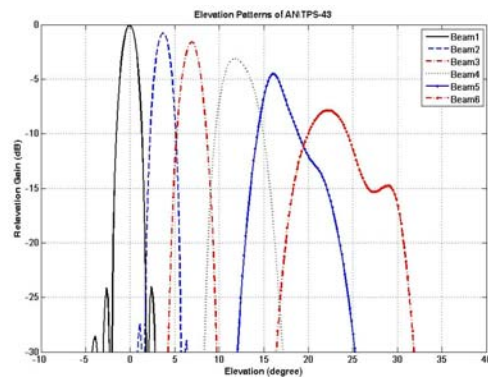
Beam	Y (m)	Elevation(deg.)	Azimuth(deg.)	Gain (dB)	$HP_E^\circ$	$HP_H^\circ$	SLL <sub>E</sub> (dB)	SLL <sub>H</sub> (dB)
Low	+۰.۱۸۵	-۱.۸۵	+۹۰	۳۴.۱	۱۱.۱	۱.۰	-۴۰	-۳۵
High	-۰.۱۸۵	+۱.۸۵	+۹۰	۳۴.۱	۱۱.۱	۱.۰	-۴۰	-۳۵

جدول ۴: نتایج شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزار FEKO

Beam	Y (m)	Elevation (deg.)	Azimuth(deg.)	Gain (dB)	$HP_E^\circ$	$HP_{XOZ}^\circ$	SLL <sub>E</sub> (dB)	SLL <sub>XOZ</sub> (dB)
Low	+۰.۱۸۵	-۲	+۹۰	۳۳.۴	۱۲.۲	۰.۸	-۳۴	-۳۲
High	-۰.۱۸۵	+۲	+۹۰	۳۳.۴	۱۲.۲	۰.۸	-۳۴	-۳۲



شکل ۶: پترنهای تشعشعی ارتفاع آنتن AN/TPS-۴۳ گزارش شده توسط M. I. Skolnik [۱]



شکل ۵: پترنهای تشعشعی ارتفاع آنتن AN/TPS-۴۳ حاصل از نرم‌افزار پیشنهادی

و زمان شبیه‌سازی بدست آمده و با روابط و نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است که کوچکترین مش بایستی دارای ابعادی کمتر از یک طول موج داشته باشد. بر اساس روش پیشنهادی، نرم‌افزاری در محیط MATLAB تهیه شده که می‌تواند تمام آنتنهای بازتابنده شکل‌یافته با ابعاد بزرگ نسبت به طول موج را در فرکانس موردنظر شبیه‌سازی نماید. به عنوان نمونه دو آنتن مورد استفاده در صنایع نظامی از جمله آنتن رادار مراقبت هوایی و رادار تاکتیکی TPS-۴۳ تحلیل شده و با نتایج شبیه‌سازی حاصل از نرم‌افزار FEKO و اندازه‌گیری تطبیق خوبی داشته است. روش ارائه شده در عین سادگی، سرعت و دقت مناسبی در تحلیل بازتابنده‌های شکل‌یافته - که دارای ابعاد بزرگ نسبت به طول موج هستند- دارد. لذا نرم‌افزار پیشنهادی در طراحی آنتنهای بازتابنده با تغذیه افست‌دار می‌تواند یک ابزار مناسب جهت تعیین اولیه کارایی آنتن و مشخصات تشعشعی موردنیاز باشد و در صورت احراز پارامترهای طراحی موردنظر، شبیه‌سازی دقیق‌تر با نرم‌افزارهایی نظیر FEKO یا NEC - که زمان زیادی برای شبیه‌سازی نیاز دارند- انجام شود و بدین صورت زمان موردنیاز در روند طراحی کمتر شود. همچنین نرم‌افزار پیشنهادی، دارای کتابخانه‌ای از آنتنهای بازتابنده رایج بوده و امکان تعریف بازتابنده دلخواه را دارد.

## مراجع

- [۱] Skolnik, M. I., Radar Handbook, ۲<sup>nd</sup> ed, McGraw-Hill, New York, ۱۹۹۰.
- [۲] Chu, T. S. and R. H. Turrin, "Depolarization properties of offset reflector antennas," IEEE Trans. Antennas & Propagation, Vol. ۲۱, May ۱۹۷۳
- [۳] Rudge, A. W., "Offset reflector antennas with offset feeds," Electronic Letters, ۶۱۱-۶۱۳, Nov. ۱۹۷۳.
- [۴] Janken, J. A., W. J. English and D. F. DiFonzo, "Radiation from multimode reflector antennas," G-AP Symp. Digest, ۳۰۶-۳۰۹, ۱۹۷۳.
- [۵] Ingerson, P.G. and W. C. Wong, "Focal region characteristics of offset fed reflectors," IEEE/AP-S Symp. Program & Digest, ۱۲۱-۱۲۳, June ۱۹۷۴.

آنتن بازتابنده با یک آرایه ۱۵ تایی از آنتنهای هورن که بر روی یک منحنی از بالا تا پایین قرار گرفته‌اند، تغذیه می‌گردد. هورن دوم (از بالا) در کانون رفلکتور قرار گرفته است. خروجی هورنها وارد یک ماتریس استریپ‌لاین<sup>۱</sup> شده و شش پرتو جهت ارتفاع‌یابی بدست می‌آید. پترن تشعشعی فرستندگی رادار از نوع پرتو بادبزی<sup>۲</sup> برای عملیات جستجو ولی پترن تشعشعی گیرندگی یک پشته از پرتوها<sup>۳</sup> می‌باشد که ارتفاع هدف را نیز آشکارسازی می‌کند.

آنتن AN/TPS-۴۳ با نرم‌افزار پیشنهادی، شبیه‌سازی شده و نتایج آن در جدول ۵ و شکل ۵ نمایش داده شده است. به علت عدم دسترسی به دفترچه راهنمای رادار مذکور، نتایج شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده مرجع [۱] - که توسط M. I. Skolnik گزارش شده- در شکل ۶ مقایسه شده است. اختلافات بین شکلهای ۵ و ۶ به دلیل یکسان نبودن آنتنها و نیز درنظر نگرفتن تفرق لبه بازتابنده می‌باشد. بخشهای مورد توجه نتایج شبیه‌سازی محل شش پرتو در صفحه ارتفاع، پهنای پرتو نیم‌توان در صفحه ارتفاع، سطح گلبرگ کناری هر پرتو و محل‌های تقاطع اول<sup>۱</sup> و دوم<sup>۲</sup> پرتوهای مجاور هم می‌باشد. زمان شبیه‌سازی هر پرتو با نرم‌افزار پیشنهادی بسیار کمتر از زمان شبیه‌سازی موردنیاز با نرم‌افزار FEKO می‌باشد.

	Elevation (deg.)	Azimuth (deg.)	Gain (dB)	HP <sub>E</sub> (deg.)	HP <sub>H</sub> (deg.)
Beam ۱	۰	۰	۳۹.۰۵	۱.۸۰	۰.۹
Beam ۲	۴.۳۲	۹۰	۳۸.۱۲	۱.۹۸	۰.۹
Beam ۳	۷.۱۵	۹۰	۳۷.۰۶	۱.۹۸	۰.۹
Beam ۴	۱۲.۳۰	۹۰	۳۶.۱۰	۳.۷۸	۰.۹
Beam ۵	۱۷.۵۰	۹۰	۳۵.۰۳	۴.۳۰	۰.۹
Beam ۶	۲۳.۴۰	۹۰	۳۱.۲۰	۵.۲۲	۱.۲۶

## ۶- نتیجه‌گیری

محاسبه سریع پترن تشعشعی میدان دور آنتنهای بازتابنده با تغذیه دلخواه در محل مطلوب با روش FFT ارائه شده است. بازتابنده با روش نور هندسی GO تحلیل شده، سپس میدانهای تشعشعی با روش میدان دریاچه AFM بدست آمده و انتگرالهای تشعشعی با تبدیل فوریه دوبعدی FFT محاسبه شده‌اند. اندازه مش بهینه از لحاظ دقت شبیه‌سازی

۱. Stripline Matrix

۲. Fan beam

۳. Stacked beams

۱. First cross-over

۲. Second cross-over

- In Electromagnetics Research M, Vol. ۲, ۱۸۹-۲۰۰, ۲۰۰۸.
- [۱۳] Lashab, M., F. Benabdelaziz and C. Zebiri, "Analysis of electromagnetic scattering from reflector and cylindrical antennas using wavelet-based moment method," Progress In Electromagnetics Research, PIER ۷۶, ۳۵۷-۳۶۸, ۲۰۰۷.
- [۱۴] Herzberg, Thomas, Rodica Ramer and Stuart Hay, "Antenna analysis using wavelet representations," Progress In Electromagnetics Research Symposium ۲۰۰۶, Hangzhou, China, August ۲۲-۲۶.
- [۱۵] Galindo-Israel, V. and R. Mittra, "A new series representation for the radiation integral with application to reflector antennas," IEEE Trans. Antennas & Propagation, Vol. ۲۰, No. ۶, ۶۳۱-۶۴۱, Sept. ۱۹۷۲.
- [۱۶] Balanis, C. A., Antenna Theory, Analysis and Design, John Wiley & Sons, ۱۹۸۲.
- [۱۷] Bracewell, R. N., The Fourier Transform and Its Applications, ۲nd ed., McGraw-Hill, New York, ۱۹۷۶.
- [۱۸] Stutzman, W. L. and G. A. Thiele, Antenna Theory and Design, ۲nd ed., John Wiley & Sons, ۱۹۹۷.
- [۱۹] Karimkashi, S. and J. Rashed-Mohassel, "Sidelobe level reduction in symmetric dual-reflector antennas using a small lens antenna", J. of Electromagn. Waves and Appl., Vol. ۲۰, No. ۱۳, ۱۸۰۷-۱۸۱۶, ۲۰۰۶.
- [۲۰] Tian, Y., Y. H. Zhang and Y. Fan, "The analysis of mutual coupling between paraboloid antennas," J. of Electromagn. Waves and Appl., Vol. ۲۱, No. ۹, ۱۱۹۱-۱۲۰۳, ۲۰۰۷.
- [۲۱] Rusch, W. V. T. and P. D. Potter, Analysis of Reflector Antennas, New York, Academic Press, New York, ۱۹۷۰.
- [۲۲] Kauffman, J. F., W. F. Croswell, and L. J. Jowers, "Analysis of the radiation patterns of reflector antennas," IEEE Trans. Antennas & Propagation, Vol. ۲۴, ۵۳-۶۵, Jan. ۱۹۷۶.
- [۲۳] Love, A. W., Reflector Antennas, John Wiley & Sons, ۱۹۷۸.
- [۲۴] Kouyoumjian, R.G. and P. H. Pathak, "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," Proceedings of the IEEE, Vol. ۶۲, No. ۱۱, ۱۴۴۸-۱۴۶۱, Nov. ۱۹۷۴.
- [۲۵] Lashab, M., C. Zebiri and F. Benabdelaziz, "Wavelet-based moment method and physical optics use on large reflector antennas," Progress