

# بهینه‌سازی آنتن کاسگرینی که آنتن تغذیه در پشت منعکس کننده اصلی واقع باشد و بررسی تأثیر ضریب خمش آنتن تغذیه بر روی ویژگیهای آن

علیرضا شریفی

استادیار - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران

[arsharifi@znu.ac.ir](mailto:arsharifi@znu.ac.ir)

**چکیده:** در این مقاله روشی برای طراحی بهینه ابعاد آنتن کاسگرینی و آنتن تغذیه آن ارائه شده است بنحوی که راندمان انسداد بهینه‌سازی شود. حالتی بررسی شده است که آنتن تغذیه در پشت منعکس کننده اصلی قرار گرفته باشد و از آنتن شیپوری شیار داد مخروطی به عنوان آنتن تغذیه استفاده شده باشد. یک معادله ریاضی برای محاسبه زاویه بهینه روشن شدن منعکس کننده جانبی توسط آنتن تغذیه به دست آمده است، سپس این معادله به صورت یک تابع خطا بازنویسی شده و برای بهینه‌سازی آن از توابع موجود در نرم افزار MATLAB استفاده شده است. پس از حل این معادله بقیه ابعاد آنتن با توجه به روابط موجود محاسبه شده و یک مثال طراحی در فرکانس 20 GHz در باند K برای روشن شدن مطلب ارائه شده و با نرم افزار FEKO نیز شبیه‌سازی شده است تا نتایج آن تایید شود. در این مثال ضریب خمش آنتن شیپوری مخروطی به صورت اختیاری برابر با 0.32 فرض شده و ابعاد بهینه آنتن محاسبه شده‌اند. سپس این مثال طراحی به ازای ضرایب خمش متفاوت حل شده و پارامترهای مختلف آنتن از جمله قطر منعکس کننده جانبی، ضریب بزرگنمایی آنتن و شعاع خمش آنتن تغذیه به صورت بهینه به دست آمده و بر حسب ضریب خمش رسم شده‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** راندمان انسداد روزنه، آنتن شیپوری شیاردار مخروطی، آنتن کاسگرینی، بهینه‌سازی.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.29252/jiaeee.18.3.742

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۷

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۲۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علیرضا شریفی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - زنجان - دانشگاه زنجان - دانشکده مهندسی اتاق ۱۱۳

## ۱- مقدمه

آنتن‌ها نقش حیاتی در سامانه‌های مخابراتی ایفا می‌کنند [۱] و [۲]. آنتن‌های منعکس‌کننده در مخابرات فضایی، مخابرات زمینی، مخابرات ماهواره‌ای، تصویربرداری تراهرتزی، سنجش‌ازدور و بسیاری کاربردهای دیگر استفاده می‌شوند. آنتن کاسگرینی<sup>۱</sup> یک آنتن منعکس‌کننده دوگانه است که ایده اصلی ساخت آن از تلسکوپ ساخته‌شده توسط کاسگرین در قرن ۱۷م گرفته شده است. این آنتن از یک منعکس‌کننده اصلی<sup>۲</sup> سهموی و یک منعکس‌کننده هذلولوی که در مقابل منعکس‌کننده اصلی قرار می‌گیرد و منعکس‌کننده فرعی<sup>۳</sup> نامیده می‌شود ساخته شده است. آنتن تغذیه در نزدیکی منعکس‌کننده اصلی قرار می‌گیرد [۳]. این آنتن‌ها به دلیل پهن باند بودن و دارا بودن بهره بالا، در ایستگاههای گیرنده زمینی برای دریافت سیگنالهای ماهواره‌ای کاربرد دارند و همچنین قابلیت تبدیل شدن به رادیوتلسکوپ را دارند [۴]. در [۵] آنتن کاسگرین در محدوده فرکانسی تراهرتز طراحی شده است. این آنتن‌ها همچنین در سیستمهای ردگیری تک‌پالس استفاده می‌شوند [۶]. در سفینه فضایی کاسینی<sup>۴</sup> از آنتن کاسگرین چندباندی برای مقاصد مختلف ارتباطات و رادیومتری برای اندازه‌گیری رطوبت و حرارت سطح سیاره استفاده شده است [۷] و [۸].

در برخی کاربردها لازم است که گیرنده در کنار آنتن تغذیه باشد تا نیازی به استفاده از کابل هم‌محور یا موج‌بر برای انتقال سیگنال از آنتن تغذیه به گیرنده نداشته باشیم و بدین ترتیب تلفات سیگنال مخصوصاً در فرکانس‌های بالا کاهش می‌یابد. در این کاربردها بهتر است از آنتن کاسگرین استفاده شود. همچنین در آنتن کاسگرین آنتن تغذیه به سمت آسمان جهت‌گیری می‌کند نه به سمت زمین بنابراین گلبرگ‌های فرعی آنتن تغذیه، نویز کمتری را دریافت می‌کند و برای سیستمهای حساس مناسب‌تر است [۹].

تاکنون مقالات مختلفی در زمینه طراحی ابعاد آنتن کاسگرین به چاپ رسیده‌اند از جمله در [۱۰] و [۱۱] روابطی ارائه شده است که پارامترهای آنتن کاسگرین معمولی و آنتن کاسگرین باز محاسبه شده‌اند. اما در این مقالات به طراحی آنتن تغذیه اشاره نشده است و فرض شده است که آنتن تغذیه در فضای بین منعکس‌کننده اصلی و منعکس‌کننده فرعی قرار داشته باشد. در [۱۲]، با توجه به تقارن استوانه‌ای، از آنتن‌های شیپوری<sup>۵</sup> مخروطی به‌عنوان تغذیه در آنتن کاسگرین استفاده شده است. اما آنتن شیپوری مخروطی این مشکل را دارد که الگوی میدان صفحات میدانهای الکتریکی و مغناطیسی<sup>۶</sup> در آن باهم متقارن نیستند و مرکز فازهای آن‌ها بر روی هم منطبق نمی‌شود و همچنین میدان الکتریکی آن‌ها مولفه‌های پلاریزاسیون متقاطع<sup>۷</sup> دارند. پلاریزاسیون متقاطع عبارتی است که در مورد مولفه‌های ناخواسته میدان الکتریکی که عمود بر مولفه اصلی هستند بکار برده می‌شود. برای برطرف کردن این مشکلات از آنتن شیپوری مخروطی

شیپاردار<sup>۸</sup> استفاده می‌شود [۱۳]. در دیواره مخروطی این آنتن شیپوری با ایجاد شکاف‌های متوالی، قسمت از انرژی مود غالب TE<sub>11</sub> در گذار از دیواره صاف به دیواره شکافدار به مود TM<sub>11</sub> تبدیل می‌شود و در صورتی که عمق شکافها در حدود یک چهارم طول موج باشد، نسبت مودهای TM<sub>11</sub>، TE<sub>11</sub> با هم برابر می‌شوند و از ترکیب این مودها، مود هیبرید<sup>۹</sup> HE<sub>11</sub> ایجاد می‌شود که مولفه‌های پلاریزاسیون متقاطع خیلی کمتری نسبت به مود TE<sub>11</sub> در موج‌بر استوانه‌ای دارد [۱۴]، [۱۵] و [۱۶]. همچنین دیگر مشکلات ذکر شده در مورد آنتن شیپوری مخروطی با دیواره صاف با بکارگیری این نوع آنتن شیپوری برطرف می‌شوند. در صورتی که از این نوع آنتن تغذیه در ساختمان آنتن کاسگرین استفاده شده باشد لازم است که ابعاد آنتن تغذیه بنحو مناسب طراحی شوند که راندمان آنتن بهینه باشد. در بیشتر کاربردها مناسب‌تر است که آنتن تغذیه در پشت منعکس‌کننده سهموی واقع شود [۱۷].

تا جایی که نویسنده می‌داند تاکنون روشی ساده و سریع برای طراحی دقیق و بهینه ابعاد آنتن تغذیه و آنتن کاسگرین در حالتی که آنتن تغذیه در پشت منعکس‌کننده سهموی واقع شده باشد ارائه نشده است و این مسئله تاکنون بطور جدی بررسی نشده و به چالش کشیده نشده است. در این مقاله در قسمت دوم ابتدا در مورد ساختار هندسی آنتن کاسگرین توضیحاتی ارائه شده سپس در قسمت سوم، ساختار هندسی آنتن شیپوری مخروطی شیپاردار توصیف شده است. در قسمت چهارم مراحل طراحی ابعاد آنتن ذکر شده است و یک رابطه ریاضی به‌دست آورده‌ایم که شرایط ایجاد کمترین میزان انسداد روزنه در این آنتن را محقق می‌سازد. در قسمت پنجم برای روشن شدن بیشتر روش طراحی، از یک مثال طراحی استفاده کرده‌ایم و روش حل معادله غیرخطی به‌دست آمده در قسمت چهارم توضیح داده شده است. در این مثال میزان ضریب خمش آنتن شیپوری مخروطی به‌صورت اختیاری برابر با 0.32 فرض شده. در قسمت ششم، مثال طراحی ارائه شده در قسمت پنجم به ازای مقادیر مختلف از ضریب خمش آنتن شیپوری حل شده و ابعاد بهینه آنتن به‌دست آمده‌اند و برخی از پارامترها و ابعاد آنتن که به‌صورت بهینه محاسبه شده‌اند برحسب متغیر میزان خمش آنتن شیپوری رسم شده و به‌صورت نمودار آمده است.

## ۲- ساختار هندسی آنتن کاسگرین

در شکل (۱) ساختار هندسی آنتن کاسگرین در حالت کلی آمده است. همانطوری که ملاحظه می‌شود، این آنتن از یک منعکس‌کننده سهموی اصلی تشکیل شده که در سمت چپ شکل ملاحظه می‌شود و یک منعکس‌کننده هذلولوی که در وسط شکل دیده می‌شود. قطر منعکس‌کننده اصلی سهموی با  $D$  نشان داده شده است و فاصله کانونی آن با  $F_m$  مشخص شده است. نقطه کانونی سهمی با  $F_2$  نشان داده شده است. قطر منعکس‌کننده فرعی با  $D_s$  نشان داده شده



با توجه به رابطه (۹) و شکل (۱) می‌توان رابطه بین قطر منعکس کننده فرعی و پارامترهای این منعکس کننده را به صورت زیر به دست آورد ( [۱۴] و [۱۸] )

$$D_s = 2\rho \sin(\psi_0) \Rightarrow$$

$$D_s = 2 \sin(\psi_0) \frac{A(e^2 - 1)}{1 + e \cos(\psi_0)} \quad (10)$$

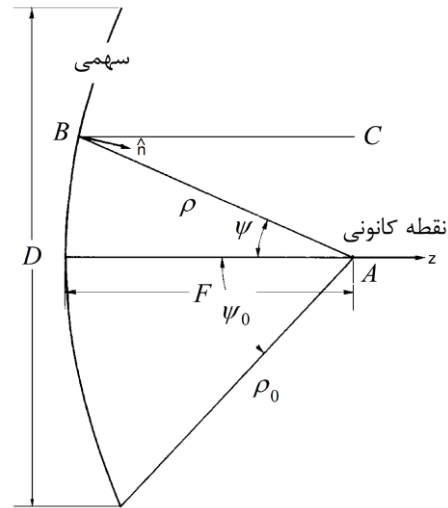
هدف از این مقاله محاسبه ابعاد بهینه منعکس کننده‌های اصلی و فرعی در آنتن کاسگرین برای بهینه‌سازی راندمان تشعشی است. بنابراین در ادامه در مورد راندمان تشعشی آنتن‌های روزنه‌ای و منعکس کننده توضیحاتی ارائه می‌شود. بهره آنتن‌های منعکس کننده از رابطه زیر به دست می‌آید ( [۱۴] و [۱۸] )

$$G = \varepsilon \frac{4\pi}{\lambda^2} A_p \quad (11)$$

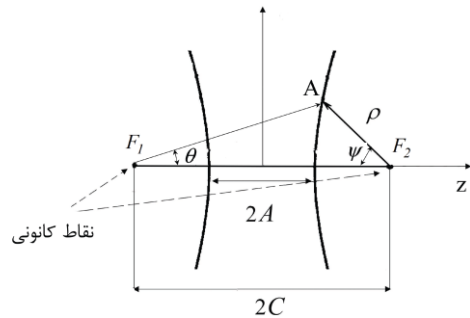
که در این رابطه  $A_p$  مساحت فیزیکی روزنه بوده و  $\lambda$  طول موج فضای آزاد است و  $\varepsilon$  راندمان تشعشی آنتن می‌باشد. سطح روزنه آنتن در آنتن‌های سهموی، یک سطح دایره‌ای است که عمود بر محور تقارن آنتن بوده و از نقطه کانونی آنتن عبور می‌کند. همانطور که اشاره شد در این سطح جبهه موج همفاز<sup>۱۳</sup> است.  $\varepsilon$  بستگی به عوامل مختلفی دارد از جمله توزیع میدان بر روی سطح روزنه و مولفه‌های پلاریزاسیون متقاطع میدان روی این سطح و مواعی که در آنتن در مقابل این سطح قرار گرفته‌اند. در حالت کلی در صورتی که از اثرات ناهمواریهای سطوح منعکس کننده و تلفات اهمی و اثرات پلاریزاسیون متقاطع و از اثرات انسداد ناشی از وجود پایه‌های نگهدارنده منعکس کننده فرعی در مقابل منعکس کننده اصلی صرف نظر شود، راندمان تشعشی از حاصل ضرب راندمان‌های انسداد روزنه  $\varepsilon_{blk}$ ، ناشی از حضور منعکس کننده فرعی در برابر منعکس کننده اصلی، راندمان سرریز<sup>۱۴</sup> میدان به خارج از آنتن  $\varepsilon_s$  و راندمان باریک شونده<sup>۱۵</sup> شدت میدان در لبه‌های آنتن نسبت به مرکز  $\varepsilon_t$  به صورت زیر به دست می‌آید

$$\varepsilon = \varepsilon_{blk} \varepsilon_t \varepsilon_s \quad (12)$$

راندمان‌های  $\varepsilon_s$  و  $\varepsilon_t$  بستگی به توزیع میدان الکتریکی بر روی صفحه روزنه دارند و در [۱۸] نشان داده شده است که حاصل ضرب  $\varepsilon_t \varepsilon_s$  زمانی به حداکثر مقدار خود می‌رسد که شدت میدان الکتریکی در لبه‌های آنتن تقریباً به اندازه 11 dB نسبت به مرکز آنتن کمتر باشد. در این وضعیت حاصل ضرب  $\varepsilon_t \varepsilon_s$  برابر با 0.82 شده و  $\varepsilon_t$  تقریباً برابر با 0.9 می‌شود. راندمان انسداد  $\varepsilon_{blk}$  از رابطه زیر به دست می‌آید ( [۱۸] )



شکل (۲): یک منحنی سهموی که نسبت به محور z ها متقارن است [۱۴].



شکل (۳): یک منحنی هذلولی که نسبت به محور z متقارن است

در هذلولی نسبت  $C/A=e$  بنام ضریب خروج از مرکز نامیده می‌شود. در آنتن کاسگرین، مرکز فاز آنتن تغذیه بر روی یکی از نقاط کانونی واقع شده (نقطه  $F_1$ ) و از منحنی سمت راست شکل (۳) به عنوان سطح منعکس کننده فرعی استفاده می‌شود.

امواجی که از نقطه  $F_1$  خارج می‌شوند پس از برخورد به منعکس کننده بنحوی منعکس می‌شوند که گویی از نقطه  $F_2$  خارج شده‌اند. رابطه بین بزرگنمایی آنتن کاسگرین و ضریب خروج از مرکز  $e$  به صورت زیر است ( [۱۴] و [۱۸] )

$$M = \frac{e+1}{e-1} \text{ و } e = \frac{M+1}{M-1} \quad (8)$$

در صورتی که  $\rho$  طول بردار  $F_2A$  باشد و  $\psi$  زاویه بین این بردار با محور z ها باشد با استفاده از روابط موجود در مورد سطوح مقاطع مخروطی داریم ( [۱۴] و [۱۸] )

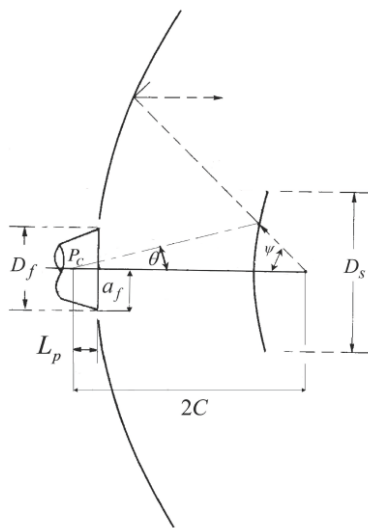
$$\rho = \frac{A(e^2 - 1)}{1 + e \cos(\psi)} \quad (9)$$



در ستون پنجم جدول (۱)، پارامتر  $H_2$  به ازای مقادیر مختلف  $S$  آمده‌است [۱۴].

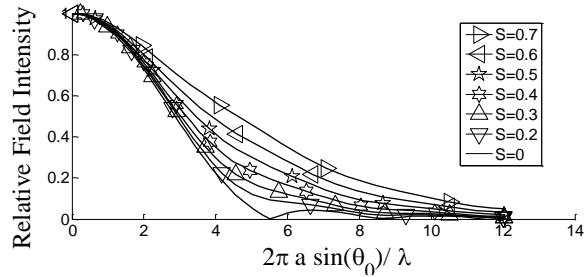
#### ۴- به دست آوردن ابعاد بهینه آنتن کاسگرین و آنتن تغذیه برای حصول راندمان روزنه بهینه

پس از معرفی ساختار هندسی آنتن کاسگرین و آنتن تغذیه از نوع شیپوری شیاردار، در این قسمت روشی برای محاسبه ابعاد بهینه این آنتن‌ها بنحویکه راندمان روزنه بهینه باشد ارائه می‌کنیم. در این مقاله فرض شده‌است که آنتن تغذیه دقیقاً در پشت منعکس‌کننده اصلی واقع شده باشد. بنابراین همانطوریکه در شکل (۶) ملاحظه می‌شود، مرکز دهانه خروجی دایره‌ای آنتن تغذیه بر روی رأس سهمی واقع شده‌است.



شکل (۶): ساختار هندسی آنتن کاسگرین به همراه آنتن تغذیه زمانی که آنتن تغذیه دقیقاً در پشت منعکس‌کننده سهموی واقع شده باشد. با توجه به شکل (۶) ملاحظه می‌شود که در صورتی که قطر منعکس‌کننده فرعی از قطر آنتن تغذیه بزرگ‌تر باشد، قسمتی از امواجی که از تغذیه ساطع شده و توسط منعکس‌کننده اصلی و منعکس‌کننده فرعی به‌طور موازی با محور آنتن هدایت می‌شوند توسط منعکس‌کننده فرعی مسدود می‌شوند. همچنین در صورتی که قطر آنتن تغذیه بزرگ‌تر از قطر منعکس‌کننده فرعی باشد، آن قسمت از امواج که پس از انعکاس از سطح هذلولوی به آنتن تغذیه برخورد می‌کنند نمی‌توانند به‌طور موازی با محور آنتن منتشر شوند و لذا قطر انسداد در این حالت با قطر آنتن تغذیه برابر خواهد شد. در بهترین حالت، قطر آنتن تغذیه باید با قطر منعکس‌کننده فرعی برابر باشد. در شکل (۶) شعاع آنتن تغذیه با  $a_f$  نشان داده شده که مجموع شعاع دهانه شیپور و ضخامت اولین شکاف می‌باشد. با توجه به رابطه (۱۰) داریم

$$2(a+d) = 2a_f = D_s = 2 \sin(\psi_0) \frac{A(e^2 - 1)}{1 + e \cos(\psi_0)} \quad (18)$$



شکل (۵): الگوی تشعشعی میدان الکتریکی نسبی برای آنتن هورن مخروطی چین‌دار به ازای مقادیر مختلف پارامتر خمش [۱۴]

جدول (۱): اندازه پارامترهای  $H_1$  و  $H_2$  به ازای مقادیر مختلف پارامتر  $S$ .

S	مقادیر $H_1$ به ازای اندازه‌های مختلف شدت میدان نسبی در لبه‌های آنتن			$H_2$
	-3 (dB) (0.7079)	-10 (dB) (0.3162)	-11 (dB) (0.2818)	
0.04	2.0791	3.6020	3.7357	0.005
0.08	2.0827	3.6150	3.7496	0.020
0.12	2.0887	3.6371	3.7731	0.045
0.16	2.0974	3.6692	3.8072	0.080
0.20	2.1088	3.7129	3.8538	0.124
0.24	2.1234	3.7699	3.9145	0.178
0.28	2.1415	3.8433	3.9928	0.240
0.32	2.1637	3.9372	4.0930	0.310
0.36	2.1906	4.0572	4.2211	0.386
0.40	2.2231	4.2112	4.3858	0.464
0.44	2.2624	4.4090	4.5975	0.542
0.48	2.3103	4.6578	4.8640	0.614
0.52	2.3688	4.9532	5.1802	0.673
0.56	2.4411	5.2720	5.5206	0.718
0.60	2.5317	5.5878	5.8562	0.753
0.64	2.6469	5.8913	6.1762	0.783
0.68	2.7966	6.1877	6.4855	0.811

همانطوریکه در ابتدای مقاله ذکر شد، مرکز فاز آنتن تغذیه باید در نقطه کانونی سطح هذلولوی یعنی  $F_1$  قرار گیرد. در آنتن‌های تغذیه شیپوری شیاردار، مرکز فاز آنتن همواره نسبت به دهانه مخروط به مقدار  $L_p$  به سمت رأس مخروط جابجا می‌شود. که  $L_p$  به  $R$  و  $S$  بستگی دارد. در این مقاله پارامتر  $H_2$  که متناسب با  $L_p$  است به‌صورت زیر تعریف شده

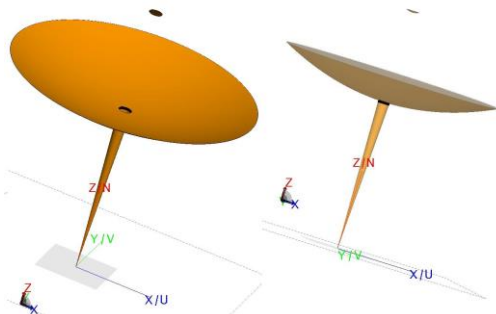
$$H_2 = \frac{L_p}{R} \quad (17)$$

می‌توان از روشهای مختلف عددی استفاده کرد [۱۹]. در اینجا فرض شده‌است که  $err(\theta_0) = g(\theta_0) - h(\theta_0)$  باشد و با کمینه سازی این تابع به پاسخ مطلوب دست می‌یابیم. بنابراین

$$err(\theta_0) = a_f - \sin(\psi_0) \frac{A(e^2 - 1)}{1 + e \cos(\psi_0)} \quad (24)$$

با مینیمم‌سازی این تابع می‌توان  $\theta_0$  بهینه را پیدا کرد. برای مینیمم سازی این تابع می‌توان از توابع موجود در جعبه ابزار بهینه سازی نرم افزار MATLAB استفاده کرد [۲۰].

در این مقاله از تابع `fmincon.m` استفاده شده‌است که در این تابع می‌توان مقدار اولیه برای آغاز بهینه‌سازی و دقت بهینه‌سازی و بازه مربوط که ریشه تابع لازم است در آن بازه جستجو شود را تنظیم نمود. بهینه‌سازی تابع خطا بر روی یک لپتاپ با مشخصات فرکانس CPU برابر با 2.13 GHz و حافظه RAM برابر با 6 GB در کسری از یک ثانیه انجام شده‌است. پس از انجام بهینه‌سازی معادله (۲۴) به ازای  $\theta_0 = 2.16^\circ$  تا  $4 \times 10^{-6}$  کاهش می‌یابد که به اندازه کافی کوچک است. سپس از (۲۰) ضریب خروج از مرکز  $e = 1.0784$  و از (۸)  $M = 26.5$  به دست می‌آید. از (۱۶)  $a = 0.2592$  (m) و از (۱۵)  $R = 7.0004$  (m) می‌شود. از (۱۷)  $L_p = 2.1701$  (m) و از (۱۴)  $d = 0.0038$  (m) و بنابراین از (۱۸)  $a_f = 0.2630$  (m) و  $D_s = 0.5260$  (m) می‌شود. سپس  $C = F_m + L_p = 7.1701$  (m) و  $A = C/e = 6.6488$  (m) به دست می‌آید. در جدول (۲) ابعاد و پارامترهای طراحی منعکس کننده اصلی و منعکس کننده فرعی و آنتن تغذیه با توجه به شکل‌های (۴) و (۶) به طور خلاصه آورده شده‌اند. در شکل (۷) نما از بالا و پهلوئی ساختار آنتن کاسگرینی طراحی شده در مثال طراحی که در نرم افزار FEKO [۲۱] شبیه‌سازی شده‌است مشاهده می‌شود.



شکل (۷): نما از بالا و پهلوئی ساختار آنتن کاسگرینی بررسی شده در مثال طراحی که در نرم افزار FEKO شبیه‌سازی شده‌است.

با توجه به اینکه  $C = Ae$  همچنین با استفاده از (۱۴) رابطه فوق به شکل (۱۹) در می‌آید

$$\left(a + \frac{\lambda}{4} \exp\left(\frac{1}{2.5ka}\right)\right) = \sin(\psi_0) \frac{C(e^2 - 1)}{e(1 + e \cos(\psi_0))} \quad (19)$$

با توجه به شکل (۶)،  $C$  برحسب  $L_p$  و  $F_m$  به دست می‌آید همچنین با توجه به (۶) و (۸)، داریم

$$e = \frac{\tan\left(\frac{\psi_0}{2}\right) + \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\psi_0}{2}\right) - \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right)} \quad (20)$$

با توجه به (۱۶) می‌توان  $a$  را برحسب  $H_1$  در (۱۹) جایگذاری کرد، همچنین با توجه به (۱۷) می‌توان  $L_p$  را برحسب  $H_2$  در (۱۹) جایگذاری کرد. با در نظر گرفتن این ملاحظات رابطه (۱۹) به شکل رابطه (۲۱) در می‌آید. همچنین با توجه به (۱۵) و (۱۶)،  $R$  برحسب  $S$  و  $H_1$  به صورت زیر به دست می‌آید

$$R = \frac{a^2}{2\lambda S} = \left(\frac{H_1}{k \sin(\theta_0)}\right)^2 \frac{1}{2\lambda S} \quad (22)$$

با جایگذاری  $R$  در (۲۱) به رابطه (۲۳) می‌رسیم. همانطوریکه گفته شد قطر منعکس کننده اصلی بر اساس بودجه لینک محاسبه می‌شود و نسبت فاصله کانونی به قطر آنتن نیز معمولاً مشخص است پس در رابطه فوق  $F_m$  معلوم است و از (۴)  $\psi_0$  نیز مشخص می‌شود همچنین با دانستن فرکانس طراحی، مقادیر  $k$ ،  $\lambda$  محاسبه می‌شوند. از جدول (۲) ملاحظه می‌شود که  $H_1$  و  $H_2$  تابعی از  $S$  هستند، بنابراین در صورتی که در رابطه (۲۳)،  $S$  مشخص باشد تنها متغیر مجهول  $\theta_0$  خواهد بود که با محاسبه این متغیر می‌توان بقیه ابعاد هندسی ساختار را نیز به دست آورد. این معادله یک معادله غیرخطی است که به روش‌های مختلف می‌تواند حل شود. در ادامه با بیان یک مثال طراحی، روش حل این معادله و طراحی ابعاد دیگر ساختار توضیح داده شده‌است.

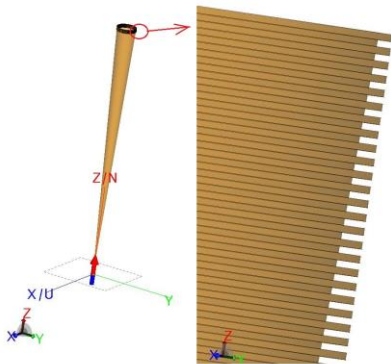
## ۵- مثال طراحی

در این قسمت می‌خواهیم ابعاد آنتن کاسگرینی و آنتن تغذیه هورن چین‌دار را در فرکانس مرکزی 20 GHz برای دریافت سیگنال از فرستنده ماهواره‌ای محاسبه کنیم. در ابتدا فرض بر این است که قطر آنتن با احتساب بودجه لینک و حساسیت گیرنده و توان فرستنده برابر با 10 (m) محاسبه شده باشد و نسبت  $F_m / D = 0.5$  در نظر گرفته شده باشد. با توجه به (۴)  $\psi_0 = 53.1^\circ$  می‌شود. همچنین فرض شده‌است که مقدار  $S$  به طور اختیاری برابر با 0.32 در نظر گرفته شود. در این صورت با توجه به جدول (۱)،  $H_1 = 4.093$  و  $H_2 = 0.31$ . برای حل معادله (۲۳)، با توجه به اینکه این رابطه یک معادله غیر خطی تک متغیره به صورت  $g(\theta_0) = h(\theta_0)$  می‌باشد،

$$\left(\frac{H_1}{k \sin(\theta_0)} + \frac{\lambda}{4} \exp\left(\frac{\sin(\theta_0)}{2.5H_1}\right)\right) = \sin(\psi_0) \frac{(F_m + RH_2) \left( \frac{\tan\left(\frac{\psi_0}{2}\right) + \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\psi_0}{2}\right) - \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right)} \right)^2 - 1}{2 \left( \frac{\tan\left(\frac{\psi_0}{2}\right) + \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\psi_0}{2}\right) - \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right)} \right) \left( 1 + \frac{\tan\left(\frac{\psi_0}{2}\right) + \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\psi_0}{2}\right) - \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right)} \cos(\psi_0) \right)} \quad (21)$$

$$\left(\frac{H_1}{k \sin(\theta_0)} + \frac{\lambda}{4} \exp\left(\frac{\sin(\theta_0)}{2.5H_1}\right)\right) = \sin(\psi_0) \frac{\left( F_m + \left( \frac{H_1}{k \sin(\theta_0)} \right)^2 \frac{1}{2\lambda S} H_2 \right) \left( \frac{\tan\left(\frac{\psi_0}{2}\right) + \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\psi_0}{2}\right) - \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right)} \right)^2 - 1}{2 \left( \frac{\tan\left(\frac{\psi_0}{2}\right) + \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\psi_0}{2}\right) - \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right)} \right) \left( 1 + \frac{\tan\left(\frac{\psi_0}{2}\right) + \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\psi_0}{2}\right) - \tan\left(\frac{\theta_0}{2}\right)} \cos(\psi_0) \right)} \quad (23)$$

با توجه به اینکه ابعاد این ساختار بزرگ بوده و حدود ۱۲ متر در ۱۰ متر می‌باشد، شبیه‌سازی کل سیستم معمولاً با پیغام خطای مربوط به عدم وجود حافظه کافی مواجه می‌شود و برای رفع این مشکل و صرفه جویی در زمان محاسبات و میزان حافظه مورد نیاز میتوان از تکنیکهای مختلفی استفاده کرد. در اینجا ابتدا آنتن تغذیه را با استفاده از روش چندسطحی سریع چند قطبی<sup>۱۷</sup> ( که در کنار روش ممان<sup>۱۸</sup> برای تحلیل ساختارهایی که از لحاظ الکتریکی بزرگ می‌باشند مناسب است) شبیه‌سازی کرده‌ایم. این روش میتواند با حفظ دقت و سرعت محاسبات، در شبیه‌سازی آنتنهای منعکس‌کننده با ابعاد بزرگ بکار گرفته شود. ساختار آنتن تغذیه در شکل (۸) ملاحظه می‌شود. ابعاد این آنتن مطابق با ابعاد ذکر شده در جدول (۲) بوده و شعاع موجبر استوانه‌ای در ورودی هورن برابر با شعاع موجبر استاندارد در باند K در نظر گرفته شده، یعنی  $a_w = 5.5 (mm)$ . طول موجبر ورودی و فاصله عبور از موجبر ورودی تا قسمت چین‌خورده آنتن تغذیه به ترتیب برابر با  $L_t = 6750 (mm)$  و  $L_w = 100 (mm)$  بوده که پارامترهای  $a_w$  و  $L_t$  و  $L_w$  در شکل (۴) مشخص شده‌اند. تعداد چینها برابر با ۲۶ در نظر گرفته شده‌است و فاصله بین نقاط در شبکه مشبندی برای بدنه آنتن به اندازه  $\lambda/2.8$  در نظر گرفته شده که  $\lambda$  طول موج در فرکانس مرکزی 20 GHz میباشد. تعداد چینها و اندازه مشبندی بنحوی انتخاب شده‌است که با مشکل کمبود حافظه مواجه نشویم. شبیه‌سازی این آنتن بر روی یک کامپیوتر دستکتاب با مشخصات Core(TM) i3-3.4 GHz و 16MB (RAM) بیش از دو هفته به طول انجامید و الگوی تشعشعی آنتن تغذیه در صفحات  $\varphi = 0, 90^\circ$  در محدوده  $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  در شکل (۹) ملاحظه می‌شود. الگوی تشعشعی سه بعدی میدان دور برای این ساختار در دستگاه مختصات کروی در محدوده  $0 \leq \theta \leq 180^\circ$  و



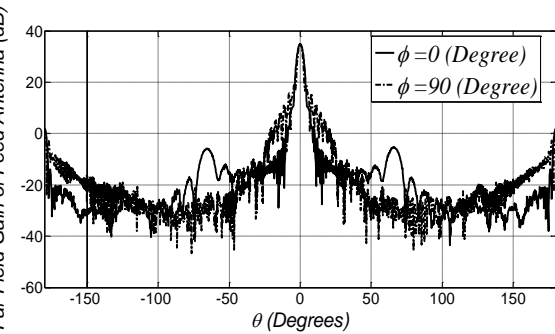
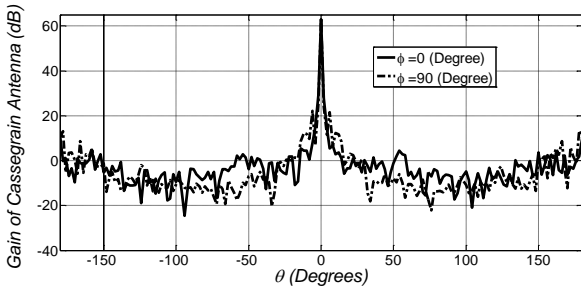
شکل (۸): ساختار آنتن هورن مخروطی در مثال طراحی که در محیط نرم افزار FEKO رسم شده‌است.

همانطوری که از محاسبات تئوری مورد انتظار است میزان روشنایی لبه به اندازه 11dB کمتر از مرکز که توسط آنتن هورن ایجاد شده‌است در صفحات  $\varphi = 0, 90^\circ$  به ازای زاویه‌های  $\theta$  محدوده ۳ تا ۲ درجه اتفاق می‌افتد.

با توجه به اینکه ابعاد این ساختار بزرگ بوده و حدود ۱۲ متر در ۱۰ متر می‌باشد، شبیه‌سازی کل سیستم معمولاً با پیغام خطای مربوط به عدم وجود حافظه کافی مواجه می‌شود و برای رفع این مشکل و صرفه جویی در زمان محاسبات و میزان حافظه مورد نیاز میتوان از تکنیکهای مختلفی استفاده کرد. در اینجا ابتدا آنتن تغذیه را با استفاده از روش چندسطحی سریع چند قطبی<sup>۱۷</sup> ( که در کنار روش ممان<sup>۱۸</sup> برای تحلیل ساختارهایی که از لحاظ الکتریکی بزرگ می‌باشند مناسب است) شبیه‌سازی کرده‌ایم. این روش میتواند با حفظ دقت و سرعت محاسبات، در شبیه‌سازی آنتنهای منعکس‌کننده با ابعاد بزرگ بکار گرفته شود. ساختار آنتن تغذیه در شکل (۸) ملاحظه می‌شود. ابعاد این آنتن مطابق با ابعاد ذکر شده در جدول (۲) بوده و شعاع موجبر استوانه‌ای در ورودی هورن برابر با شعاع موجبر استاندارد در باند K در نظر گرفته شده، یعنی  $a_w = 5.5 (mm)$ . طول موجبر ورودی و فاصله عبور از موجبر ورودی تا قسمت چین‌خورده آنتن تغذیه به ترتیب برابر با  $L_t = 6750 (mm)$  و  $L_w = 100 (mm)$  بوده که پارامترهای  $a_w$  و  $L_t$  و  $L_w$  در شکل (۴) مشخص شده‌اند. تعداد چینها برابر با ۲۶ در نظر گرفته شده‌است و فاصله بین نقاط در شبکه مشبندی برای بدنه آنتن به اندازه  $\lambda/2.8$  در نظر گرفته شده که  $\lambda$  طول موج در فرکانس مرکزی 20 GHz میباشد. تعداد چینها و اندازه مشبندی بنحوی انتخاب شده‌است که با مشکل کمبود حافظه مواجه نشویم. شبیه‌سازی این آنتن بر روی یک کامپیوتر دستکتاب با مشخصات Core(TM) i3-3.4 GHz و 16MB (RAM) بیش از دو هفته به طول انجامید و الگوی تشعشعی آنتن تغذیه در صفحات  $\varphi = 0, 90^\circ$  در محدوده  $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  در شکل (۹) ملاحظه می‌شود. الگوی تشعشعی سه بعدی میدان دور برای این ساختار در دستگاه مختصات کروی در محدوده  $0 \leq \theta \leq 180^\circ$  و



ارائه شده در جدول (۲) بهره از نظر تئوری برابر با همان ۶۳ دسیبل می‌شود که نشان از صحت محاسبات و بهینه بودن راندمان آنتن دارد و نتایج روش تئوری را تایید میکند. راندمان به دست آمده از شبیه‌سازی ساختار، به راندمان بهینه  $\epsilon_t \epsilon_s = 0.82$  که در بخش ۲ (با صرف نظر کردن از اثر انسداد روزنه) بررسی شد، بسیار نزدیک است و اختلافات جزئی ممکن است به دلیل تلفات پاشندگی امواج از لبه‌های آنتن، اثرات انسداد روزنه و اثرات بزرگ انتخاب کردن سایز مش بندی در هنگام تحلیل ساختار و غیره باشد.



شکل (۹): الگوی میدان دور برای آنتن تغذیه شبیه‌سازی شده در

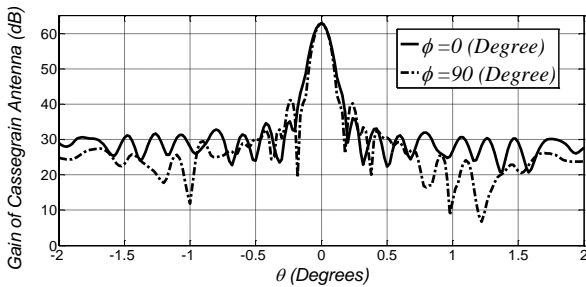
شکل (۸) در محدوده  $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  در صفحات

$$\varphi = 0, 90^\circ$$

در مرحله بعد در شبیه‌سازی از ساختار شکل (۱۰) استفاده شده است که از الگوی میدان دور محاسبه شده آنتن تغذیه برای روشن کردن آنتن کاسگرین در غیاب آنتن تغذیه استفاده شده و الگوی تشعشعی که در مرحله قبل با استفاده از شبیه‌سازی برای آنتن تغذیه به دست آمده بود در این مرحله به صورت یک منبع نقطه‌ای در موقعیت نقطه کانونی سطح هذلولوی قرار داده شده است. با این روش اثرات انسداد روزنه ناشی از وجود منعکس‌کننده ثانویه در مقابل منعکس‌کننده اولیه هم در شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. در اینجا با توجه به بزرگ بودن ابعاد آنتن، برای حفظ سرعت و میزان مصرف حافظه در هنگام محاسبات، از ترکیب روشهای ممان و فیزیک نوری<sup>۱۱</sup> به ترتیب برای تحلیل میدان در سطوح هذلولوی و سهموی استفاده شده است. شبیه‌سازی این آنتن بر روی همان سیستم کامپیوتر معمولاً بیش از دو روز طول می‌کشد. الگوی تشعشعی میدان دور آنتن در صفحات  $\varphi = 0, 90^\circ$  در محدوده‌های  $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  و  $-2^\circ \leq \theta \leq 2^\circ$  به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ملاحظه می‌شوند.

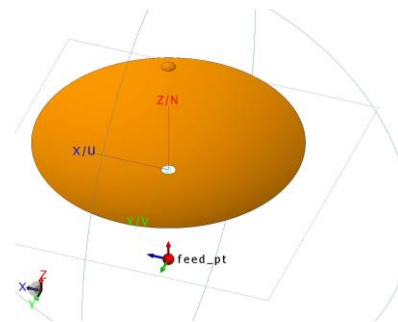
شکل (۱۱): الگوی میدان دور آنتن کاسگرین شبیه‌سازی شده در شکل

$$(۱۰) \text{ در محدوده } -180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$$



شکل (۱۲): الگوی میدان دور آنتن کاسگرین شبیه‌سازی شده در

$$\text{شکل (۱۰) در محدوده } -2^\circ \leq \theta \leq 2^\circ$$



شکل (۱۰): ساختار آنتن کاسگرین که از الگوی تشعشعی میدان دور محاسبه شده برای آنتن تغذیه برای روشن کردن آنتن استفاده شده است

همانطوریکه ملاحظه می‌شود در محدوده  $-0.1^\circ \leq \theta \leq 0.1^\circ$

الگوی تشعشعی در  $\varphi = 0, 90^\circ$  تقریباً متقارن بوده، حداکثر بهره شبیه‌سازی شده در شکل فوق برابر با ۶۳ دسیبل محاسبه شده و با توجه به رابطه (۱۱) در حالتی که  $\epsilon_{ap} \approx 0.7$  باشد به ازای ابعاد

از لحاظ پیاده سازی عملی، با توجه به اینکه آنتن تغذیه و سطوح منعکس‌کننده از یکدیگر جدا هستند می‌توانند به صورت جداگانه ساخته شده و با استفاده از سازه‌های فلزی نگهدارنده در کنار هم مطابق شکل (۷) نصب شوند. ابعاد آنتن در شکل (۷) با توجه به ارقام ذکر شده در جدول (۲) مشخص می‌شود و قطر آنتن سهموی ۶۷۰ برابر طول موج است و فاصله بین ورودی آنتن تغذیه تا منعکس‌کننده ثانویه هم تقریباً ۸۷۰ برابر طول موج است. از لحاظ میزان حساسیت نسبت به خطاهای ساخت هم می‌توان تاثیر تغییرات پارامترهای مختلف آنتن را با شبیه‌سازی و نیز از لحاظ تئوری بررسی نمود. بعنوان نمونه با جابجا کردن محوری مرکز فاز آنتن تغذیه به اندازه  $\pm 2000$  (mm) نسبت به موقعیت فعلی، پس از شبیه‌سازی ملاحظه می‌شود که بهره آنتن تنها 1 dB کاهش یافته و به 62 dB میرسد. این مسئله از لحاظ تئوری بدلیل بزرگ بودن فاصله کانونی معادل در این ساختار بوده که طبق جدول (۲) برابر با 132.5 (m) میباشد و عدم حساسیت زیاد نسبت به جابجایی محوری آنتن تغذیه، یکی از مزایای این سیستم آنتن میباشد.

جدول (۲): خلاصه ابعاد و مشخصات فیزیکی و الکتریکی منعکس‌کننده اصلی و منعکس‌کننده فرعی و آنتن تغذیه.

آنتن تغذیه	منعکس‌کننده فرعی	منعکس‌کننده اصلی
$S=0.32$	$2A=6.6488$ (m)	$D=10$ (m)
$L_p=2.1701$ (m)	$2C=7.1701$ (m)	$F_m=5$ (m)
$R=7.0004$ (m)	$e=1.0784$	$\psi_0=53.1^\circ$
$a=0.2592$ (m)	$D_s=0.5260$ (m)	
$d=0.0038$ (m)	$\theta_0=2.16^\circ$	
$p=0.0037$ (m)	$M=26.5$	
$t=w=0.0019$ (m)	$F_{eq}=132.5$ (m)	

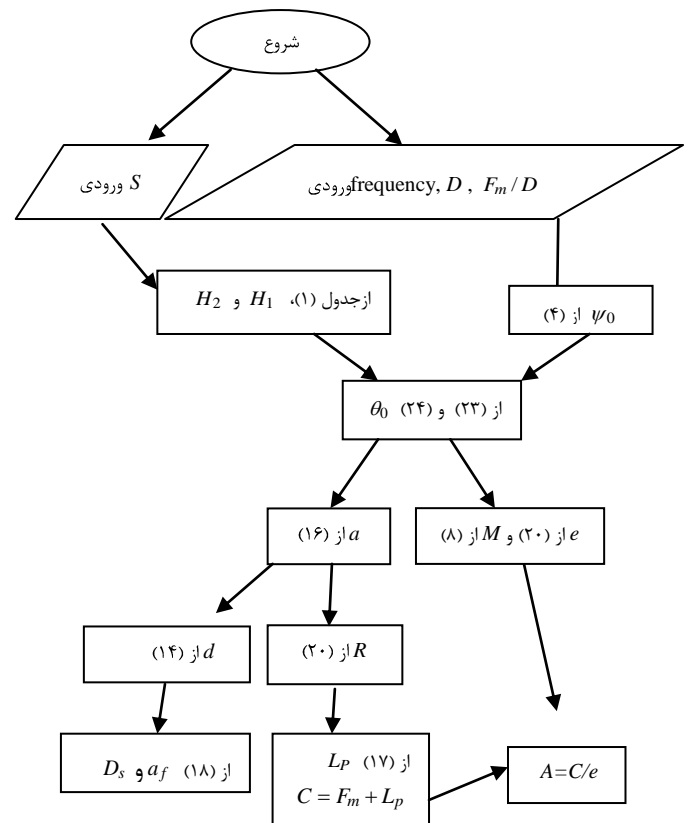
جدول (۳): مقایسه نتایج تحلیل تئوری و نتایج شبیه‌سازی برای آنتن طراحی شده.

نتایج شبیه‌سازی	نتایج تئوری	
20 GHz	20 GHz	فرکانس تحلیل
63 dB	65.7 dB	بهره آنتن
0.7	0.8	راندمان روزنه
42dB	$\approx 43.4$ dB	SLL
$0.1^\circ$	$\approx 0.098^\circ$	HPBW
بیش از دو هفته	کمتر از یک ثانیه	زمان محاسبات

## ۶- بررسی تغییرات پارامتر S بر روی ویژگی‌های آنتن کاسگرین و تغذیه در مثال طراحی بخش ۵

در قسمت قبل در مثال طراحی برای حل معادله (۲۳) مقدار پارامتر S را به‌طور اختیاری برابر با 0.32 در نظر گرفتیم. اما در این قسمت می‌خواهیم با تغییر این پارامتر در محدوده 0.04-0.68 همانطوریکه در جدول (۱) آمده‌است، به ازای مقادیر عددی ارائه شده در مثال طراحی، پس از حل معادله (۲۳) و محاسبه ابعاد بهینه، تغییرات مشخصات و ابعاد آنتن کاسگرین و آنتن تغذیه را بررسی کنیم. ویژگی‌هایی که می‌توانند مورد بررسی واقع شوند عبارت‌اند از تغییرات قطر بهینه منعکس‌کننده فرعی، تغییرات ابعاد آنتن تغذیه از جمله شعاع خمش آن، تغییرات ضریب بزرگنمایی آنتن و غیره نسبت به تغییرات پارامتر S. در ابتدا با توجه به تأثیر مستقیم قطر منعکس‌کننده فرعی بر روی راندمان آنتن، تأثیر پارامتر S را بر روی این ویژگی مطالعه کرده‌ایم. پس از حل معادله (۲۳) به ازای مقادیر مختلف S و محاسبه قطر بهینه منعکس‌کننده فرعی که روش آن در مثال طراحی ذکر شد، این فاکتور در نمودار شکل (۱۴) آمده‌است که روند صعودی را نشان می‌دهد.

شکل (۱۳) مراحل طراحی را به‌صورت فلوجارت برای این مثال طراحی نشان داده‌است. جدول (۳) مقایسه بین نتایج تحلیل تئوری و نتایج شبیه‌سازی را برای برخی مشخصات آنتن طراحی شده نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲ فصل ۹ در مرجع [۱۸]، در صورتی که توزیع میدان بر روی صفحه روزنه در یک آنتن سهموی به‌صورت مجموع یک عدد ثابت و یک تابع باریک شونده سهموی از درجه ۱ در نظر گرفته شود و شدت میدان الکتریکی در لبه‌های آنتن به‌اندازه 10 dB نسبت به مرکز آنتن کمتر باشد، از لحاظ تئوری سطح گلبیگ فرعی  $\psi_0$  (SLL) به اندازه 22.3 dB کمتر از گلبیگ اصلی محاسبه شده‌است و همچنین از لحاظ تئوری، میزان پهنای بیم نصف توان<sup>۲۱</sup> (HPBW) بر حسب رادیان برابر با  $1.14(\lambda/D)$  محاسبه شده‌است. با توجه به تشابه تقریبی توزیع میدان در این مرجع با توزیع میدان در صفحه روزنه آنتن در مقاله کنونی می‌توانیم به‌صورت تقریبی میزان SLL و HPBW را از لحاظ تئوری محاسبه کنیم که نتایج آن در جدول (۳) آمده‌است. مقایسه نتایج تئوری و شبیه‌سازی در این جدول صحت محاسبات را تأیید می‌کنند. در ادامه تأثیر انتخاب پارامتر S بر روی ویژگی‌های مختلف آنتن را بررسی می‌کنیم.



شکل (۱۳): مراحل طراحی به‌صورت فلوجارت برای مثال طراحی مطرح شده در مقاله

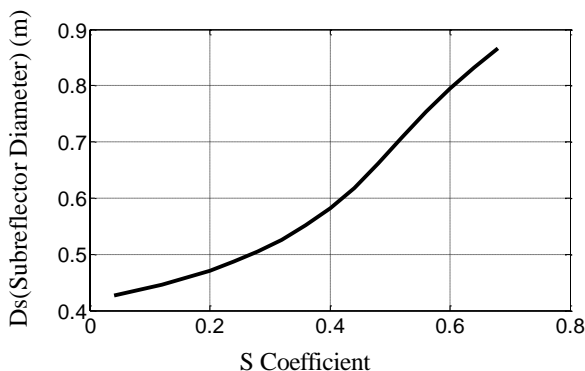
گرفتن منحنی‌های شکل‌های (۱۴) الی (۱۶) برای این مثال طراحی، می‌توان یک مقدار مناسب برای پارامتر  $S$  انتخاب نمود.

## ۷- نتیجه‌گیری

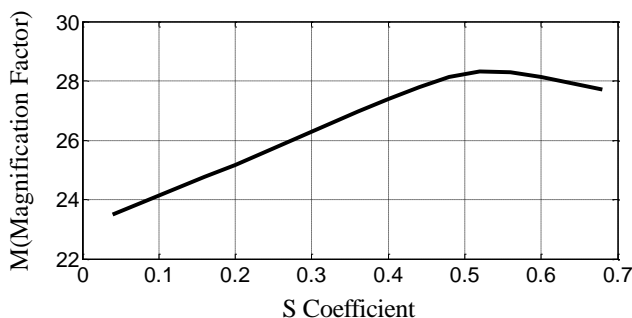
در این مقاله، روشی برای طراحی بهینه ابعاد آنتن کاسگرین ارائه شده‌است، در حالیکه آنتن تغذیه از نوع آنتن شیپوری مخروطی باشد و دقیقاً در پشت منعکس‌کننده سهموی واقع شده باشد. ابتدا ساختار هندسی آنتن کاسگرین ارائه شده و معادلات طراحی آن بررسی شده‌اند. این معادلات در حالتی نوشته می‌شوند که راندمان انسداد روزنه بهینه باشد. برای روشن شدن این روش، یک مثال طراحی ارائه شده‌است که ابعاد بهینه یک آنتن گیرنده ماهواره‌ای را در باند فرکانسی  $K$  در حالتی که ضریب خمش آنتن مخروطی به صورت اختیاری برابر با  $0.32$  باشد محاسبه میکند. برای بررسی صحت نتایج ارائه شده در این مثال، این مسئله با نرم افزار تحلیل الکترومغناطیسی FEKO هم بررسی شده و نتایج آن تایید شده‌است. سپس در قسمت بعد برای مطالعه تاثیر انتخاب ضریب خمش آنتن تغذیه بر ابعاد و ویژگیهای الکتریکی کل آنتن کاسگرین، این مثال طراحی به ازای ضرایب خمش متفاوت در محدوده  $0.04$  تا  $0.68$  بررسی شده و مشخصاتی از قبیل قطر منعکس‌کننده فرعی، ضریب بزرگنمایی آنتن، شعاع خمش آنتن تغذیه بر حسب ضریب خمش آنتن رسم شده‌اند که با مصالحه بین ویژگیهای مکانیکی و الکتریکی آنتن می‌توان مقدار مناسبی را برای ضریب خمش آنتن تغذیه برگزید.

## مراجع

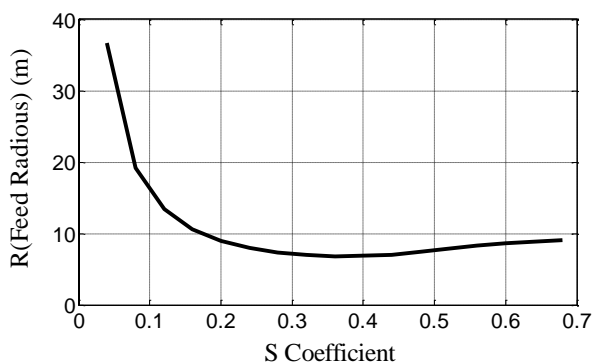
- [۱] جعفرزاد حسین، زهفروش یاشار، "طراحی آنتن مایکرو استریپی مسطح چند ورودی، چند خروجی برای کاربردهای باند LTE"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳۹۸؛ ۱۶ (۴): ۳۵-۴۲.
- [۲] امیری شروین، شریفی مقدم الهام، "طراحی، تحلیل و ساخت آنتن دوبنده برای یک ماهواره LEO کوچک"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳۸۵؛ ۳ (۲): ۳-۱۳.
- [3] M. Richharia, L. D. Westbrook, "Satellite systems for personal applications", John Wiley & Sons, 2010.
- [4] L. Woodburn, T. Natusch, S. Weston, P. Thomasson, M. Goodwin, C. Granet, S. Gulyaev, "Conversion of a New Zealand 30-metre Telecommunications Antenna into a Radio telescope", Publications of the Astronomical Society of Australia (PASA), Vol. 32, e017, 14 pages (2015).
- [5] Xu Xiaofei, et al, "Terahertz Cassegrain reflector antenna," International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). Vol. 2, pp. 969-971, 2013.
- [6] C. Kumar, V. S. Kumar, and V. V. Srinivasan, "Design specs of a compact dual band feed using dielectric rod antennas with multiple element monopulse tracking," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, pp. 4926-4932, 2013.



شکل (۱۴): نمودار تغییرات قطر منعکس‌کننده فرعی بر حسب تغییرات پارامتر  $S$  به ازای مقادیر طراحی در مثال بخش قبل



شکل (۱۵): نمودار تغییرات ضریب بزرگنمایی آنتن بر حسب تغییرات پارامتر  $S$  به ازای مقادیر عددی ارائه شده در مثال طراحی بخش قبل



شکل (۱۶): منحنی تغییرات شعاع خمش آنتن تغذیه مخروطی چین‌دار بر حسب تغییرات ضریب  $S$  به ازای مقادیر عددی در مثال بخش قبل

با توجه به تأثیر مستقیم ضریب بزرگنمایی آنتن،  $M$ ، بر روی کاهش مولفه‌های پلاریزاسیون متقاطع، در نمودار شکل (۱۵) تغییرات این پارامتر نسبت به تغییرات  $S$  به ازای مقادیر عددی ارائه شده در مثال طراحی بخش قبل نیز مطالعه شده است. چنانچه از شکل ملاحظه می‌شود تقریباً به ازای  $S=0.52$  ضریب بزرگنمایی بهینه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در شکل (۱۶) نمودار تغییرات شعاع خمش آنتن تغذیه بر حسب  $S$  آمده است که همانطوریکه نشان داده شده تقریباً به ازای  $S=0.36$  شعاع خمش به حداقل مقدار خود می‌رسد. در انتخاب مقدار مناسب برای پارامتر  $S$  همواره یک مصالحه بین مشخصات الکتریکی و مکانیکی سیستم موردنیاز است و با در نظر

- <sup>16</sup> Slant Factor  
<sup>17</sup> Multilevel Fast Multipole Method (MLFMM)  
<sup>18</sup> Method of Moments (MOM)  
<sup>19</sup> Physical Optics  
<sup>20</sup> Side Lobe Level  
<sup>21</sup> Half Power Beam Width

- [7] R. Mizzoni, "The Cassini High Gain Antenna (HGA): A Survey on Electrical Requirements, Design and Performance", IEE Seminar on Spacecraft Antennas, London, 1994.
- [8] Sudhakar Rao, Lotfollah Shafai, Satish K. Sharma," Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems, Volume3: Applications of Reflectors" , Norwood, MA, Artech House, 2013, p. 247.
- [9] John. S. Seybold, " Introduction to RF propagation", John Wiley & Sons, 2005, p. 53.
- [10] C. Granet, "Designing Axially Symmetric Cassegrain or Gregorian Dual-Reflector Antennas from Combinations of Prescribed Geometric Parameters", IEEE Antennas and Propagation, vol.40, no.2, pp.76-82, Apr. 1998.
- [11] C. Granet. "Designing classical open-Cassegrain dual-reflector antennas from combinations of prescribed geometric parameters", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 54, No. 2, April 2012, pp 136-147.
- [12] Sang Heun Lee, Woo Sang Lee, Byoung Moo Lee, Young Joong Yoon , Joon-ho So," A Design Method of Cassegrain Reflector Antenna for Spillover Suppression", Proceedings of ISAP2005, Seoul, Korea, pp. 729-732.
- [13] C. Dragone, "Reflection, Transmission and Mode Conversion in a Corrugated Feed," Bell Systems Technical Journal, Vol. 56, pp. 835–867, July 1977.
- [14] T. Milligan, "Modern Antenna Design "(McGraw-Hill, New York, 1985).
- [15] B. M. Thomas," Design of corrugated conical horns", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-26, no. 2, March 1978, pp. 367–372.
- [16] T. S. Chu and W. E. Legg, "Gain of corrugated conical horn" , IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-30, no. 4, July 1982, pp. 698–703.
- [17] M. Richharia , L. D. Westbrook, "Satellite systems for personal applications" , John Wiley & Sons, 2010, p. 103.
- [18] W.L. Stutzman and G.A Thiele, "Antenna Theory and Design" , 3<sup>rd</sup> ed., Wiley, 2010.
- [19] S.C. Chapra, "Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists", 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, 2012.
- [20] "Optimization Toolbox of MATLAB 7.4.0.347 (R2009a) Software", The MathWorks, Inc. , February ,12, 2009.
- [21] Altair Engineering, Inc. , Altair Feko2018.2 user manual, <https://altairhyperworks.com>

## زیر نویس‌ها

- <sup>1</sup> Cassegrain Antenna  
<sup>2</sup> Main Reflector  
<sup>3</sup> Subreflector  
<sup>4</sup> Cassini  
<sup>5</sup> Horn  
<sup>6</sup> H-Plane and E-Plane  
<sup>7</sup> Cross polarization  
<sup>8</sup> Conical Corrugated Horn  
<sup>9</sup> Hybrid mode  
<sup>10</sup> Design Factor  
<sup>11</sup> Eccentricity  
<sup>12</sup> Antenna Magnification  
<sup>13</sup> Equiphase  
<sup>14</sup> Spill over  
<sup>15</sup> Taper

