

# طراحی و شبیه‌سازی هادی‌های مغناطیسی برای بهبود مشخصات آنتن‌های ماهواره و کاهش اثرات تشعشعات فضایی

میرشهرام حسینی پناه<sup>۱\*</sup> و فریدون عبدالله میانجی<sup>۲</sup>

۱ و ۲- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

\*تهران، انتهای کارگر شمالی

srhosseini@aeoi.org.ir

در این مقاله، به منظور بهبود عملکرد آنتن‌های ماهواره، استفاده از سطوح با امپدانس بالا پیشنهاد می‌شود. سطوح با امپدانس بالا اغلب با نام هادی‌های مغناطیسی مصنوعی شناخته می‌شوند. هادی مغناطیسی طراحی شده، شامل آرایه‌ای از سطوح انتخابگر فرکانسی JC-FSS است که با چهار پایه رسانا به صفحه زمین متصل می‌شود. کلیه قطعات رسانای آن از جنس آلومینیوم و دی‌الکتریک از نوع آزلون ای دی ۲۷۰ (Arlon AD 270) است که فضای بین سطوح انتخابگر فرکانسی و زمین را پر می‌کند. این دی‌الکتریک از فایبر گلاس تقویت شده با (PTFE) ساخته می‌شود. با بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری شرایط به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که در محدوده‌های فرکانسی ۴/۷۳ گیگاهرتز و ۷/۴۳ گیگاهرتز، این ساختار تبدیل به یک هادی مغناطیسی با مشخصات ویژه شود. به منظور اثبات برتری این هادی مغناطیسی، مشخصات آن با یکی از متداول‌ترین انواع هادی‌های مغناطیسی مقایسه می‌شود. آلومینیوم و دی‌الکتریک با زنجیره پلیمری از کربن و فلوتور، از جمله مواد نسبتاً سبک محسوب می‌شوند که با به‌کارگیری آنها در ساختار هادی مغناطیسی علاوه بر بهبود مشخصات آنتن، می‌توان پرتوهای ثانویه حاصل از تشعشعات کیهانی را به میزان قابل قبولی کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: سطوح با امپدانس بالا، هادی‌های مغناطیسی، کاهش ابعاد آنتن، کاهش تشعشعات کیهانی

## علائم و اختصارات

$\eta$	امپدانس فضای آزاد	$\mu$	ضریب نفوذ مغناطیسی
$\lambda$	طول موج	$\varepsilon$	قابلیت گذردهی
$Z_s$	امپدانس صفحه	$E_{T1}$	میدان الکتریکی مماسی در محیط یک
$W_{90^\circ}$	پهنای باند بین ۹۰ و ۹۰- درجه	$E_{T2}$	میدان الکتریکی مماسی در محیط دوم
$\Delta f$	اختلاف فرکانسی	E	میدان الکتریکی
		H	میدان مغناطیسی
		R	دامنه و فاز موج بازتابیده

## مقدمه

امروزه، فراماده‌ها کاربردهای فراوانی در فناوری‌های مرتبط با امواج الکترومغناطیس به‌ویژه در محدوده میکروویو پیدا کرده‌اند. در طبیعت مواد با ضریب نفوذ مغناطیسی ( $\mu$ ) و قابلیت گذردهی

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)  
۲. استادیار

بسیار زیاد است ( $Z_s \gg 377\Omega$ ) که در نتیجه آن امواج میکروویو سطحی با مدهای TE و TM و جریان‌های سطحی امکان انتشار روی سطح هادی مغناطیسی را ندارند. همانگونه که در شکل (۲a) نشان داده شده است، در رفلکتورهای آنتن که از جنس هادی‌های الکتريکی هستند، انتشار امواج در سطح رفلکتور و تابش از لبه‌ها، سبب تخریب پترن آنتن می‌شود. شکل (۲b) نمایش‌دهنده مزیت استفاده از هادی‌های مغناطیسی است. با استفاده از رفلکتورهای از جنس هادی مغناطیسی، انتشار امواج از لبه‌های رفلکتور به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد و به دنبال آن کیفیت پترن آنتن بهبود می‌یابد.

با قراردادن امپدانس سطحی بسیار بالای هادی مغناطیسی در رابطه (۲)، مشخص می‌شود که اختلاف فاز موج تابیده و بازتابیده از هادی مغناطیسی مصنوعی صفر است [۳-۴].

همان‌طور که در شکل (۳a) نشان داده شده است، در شرایطی که آنتن مونوپل یا دیپل به صورت افقی روی رفلکتور از جنس هادی الکتريکی قرار گیرد، برای افزایش بازدهی و کارایی آنتن، موج بازتاب شده از رفلکتور باید هم فاز با موج تابیده از آنتن باشد. با توجه به اینکه هادی الکتريکی اختلاف فاز  $180^\circ$  درجه بین موج تابیده و بازتابیده ایجاد می‌کند، در شرایطی که فاصله آنتن و رفلکتور بسیار کم باشد موج منتشر شده به وسیله آنتن و موج بازتاب شده از آنتن، یکدیگر را خنثی می‌کنند و در نتیجه کارایی و بازده آنتن کاهش شدیدی خواهد داشت. در عمل برای جلوگیری از بروز این پدیده فاصله‌ای معادل  $\lambda/4$  بین آنتن و رفلکتور در نظر گرفته می‌شود تا اختلاف فاز موج تابیده از آنتن و موج بازتابیده از صفحه رفلکتور صفر شود و در نتیجه یکدیگر را تقویت کنند. در محدوده بالای فرکانس‌های میکروویو که طول موج کوچک است، فاصله  $\lambda/4$  اهمیت ندارد اما در پایین محدوده فرکانس‌های میکروویو، این فاصله بزرگ‌تر می‌شود و باعث افزایش حجم کلی آنتن و رفلکتور خواهد شد. در بسیاری از کاربردها در پایین محدوده فرکانس میکروویو، استفاده از هادی‌های مغناطیسی به منظور کاهش حجم کلی آنتن و رفلکتور اهمیت ویژه‌ای دارد. شکل (۳b) وضعیت‌های قرارگیری آنتن دیپل یا مونوپل را روی رفلکتوری از جنس هادی مغناطیسی نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود فاصله آنتن از رفلکتور بسیار کوچک‌تر از  $\lambda/4$  و تقریباً در مجاورت آن است.

با توجه به مزایای ذکر شده برای هادی‌های مغناطیسی، در این مقاله طراحی نوع جدیدی از هادی‌های مغناطیسی با کاربرد فضایی ارائه می‌شود.

الکتريکی ( $\epsilon$ ) بزرگ‌تر از صفر وجود دارند. در سال‌های اخیر قطعات به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند تا در یک محدوده فرکانسی کوچک، دارای ضریب نفوذ مغناطیسی منفی یا قابلیت گذردهی الکتريکی منفی یا هر دو منفی شوند. در داخل هادی‌های الکتريکی میدان الکتريکی صفر است و با در نظر گرفتن شرایط مرزی هادی‌های الکتريکی ( $E_{t2} = E_{t1}$ )، مؤلفه مماسی شدت میدان الکتريکی در سطح صفر است. امپدانس سطحی برای امواج ایستا توسط رابطه (۱) به دست می‌آید، بنابراین امپدانس سطحی هادی ناچیز خواهد شد.

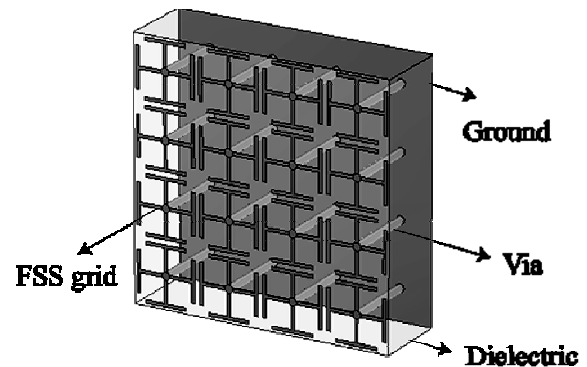
$$Z_s = \frac{E}{H} \quad (\Omega) \quad (1)$$

که در آن  $E$ ، شدت میدان الکتريکی و  $H$  شدت میدان مغناطیسی است. با استفاده از قوانین الکترومغناطیس، دامنه و فاز موج بازتابیده شده از سطح، با رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱ و ۲].

$$R = \frac{Z_s - \eta}{Z_s + \eta} \quad (2)$$

$\eta$ ، امپدانس فضای آزاد است.

اولین بار در سال ۱۹۹۹، دسته جدیدی از فراماده‌ها با عنوان سطوح با امپدانس بالا با تمامی ویژگی‌های یک هادی مغناطیسی ساخته شدند. برای ساخت هادی مغناطیسی مصنوعی در محدوده فرکانسی میکروویو، همانگونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، صفحات انتخابگر فرکانس<sup>۳</sup> از جنس هادی الکتريکی به وسیله اتصال‌دهنده‌ها<sup>۴</sup> از میان لایه دی‌الکتريک عبور می‌کند و به هادی الکتريکی زمین<sup>۵</sup> که در پشت آن قرار داده شده است متصل می‌شوند.



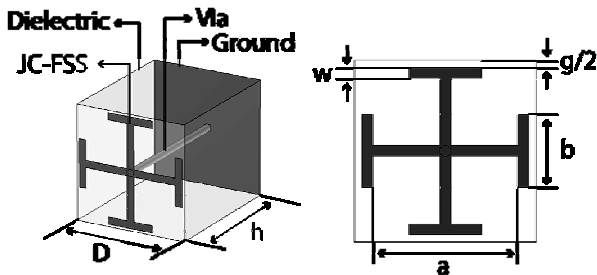
شکل ۱- ساختار هادی مغناطیسی مصنوعی

برخلاف هادی‌های الکتريکی که شدت میدان الکتريکی روی آن‌ها صفر است، در محدوده فرکانسی مشخصی، شدت میدان مغناطیسی در سطح هادی‌های مغناطیسی صفر است. بنابراین طبق رابطه (۱) امپدانس سطحی هادی‌های مغناطیسی نسبت به فضای آزاد

3. Frequency Selective Surface (FSS)
4. Vias
5. Ground

## طراحی هادی مغناطیسی

طراحی و شبیه‌سازی هادی مغناطیسی مصنوعی به وسیله نرم‌افزار CST Microwave Studio Ver.9 انجام شد و به منظور معتبرسازی نتایج از نرم‌افزار دیگری با عنوان HFSS Ver.13 استفاده شد. امروزه در طراحی رفلکتور آنتن، استفاده از هادی مغناطیسی JC<sup>۶</sup> متداول است. شکل (۴) ساختار یک سلول JC را نشان می‌دهد.

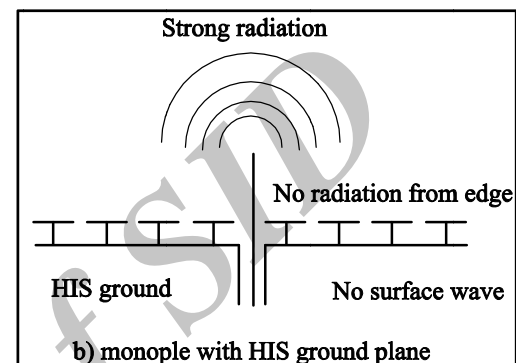
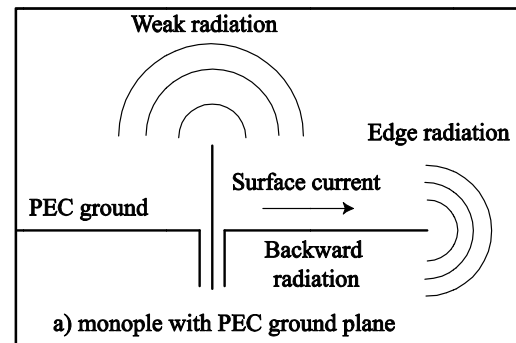


شکل ۴- یک سلول از هادی مغناطیسی با ساختار JC-AMC

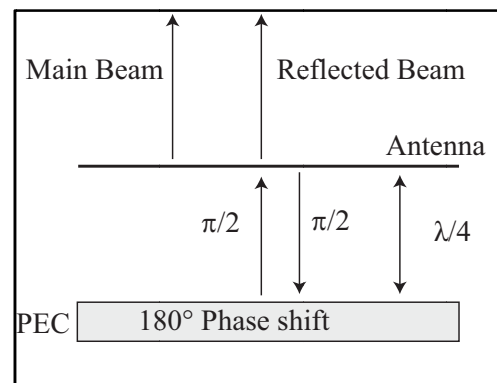
در عمل برای ساخت هادی مغناطیسی تعداد زیادی از این سلول‌ها در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند تا ساختاری مانند شکل (۱) را ایجاد کنند. ابعاد در نظر گرفته شده برای ساختار سلولی شکل (۴) عبارت است از:  $w=0/3$ ,  $a=4$ ,  $g=0/2$ ,  $b=2$ ,  $h=6$  میلی‌متر و  $D=4/8$  میلی‌متر است. قابلیت گذردهی نسبی دی‌الکتریک،  $2/7$  و قطر  $\text{via}$  برابر  $0/3$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای امواج تابیده شده به آرایه‌ای از سلول‌های JC، با مدهای TE و TM با زاویه‌های صفر،  $30^\circ$  و  $60^\circ$  درجه، فاز امواج بازتابیده شده از آرایه سلولی هادی مغناطیسی JC در شکل (۵) نشان داده شده است. به منظور بررسی بهتر منحنی‌ها، جدول (۱) مشخصات موج بازتابیده شده را برای سه زاویه تابشی در مدهای TE و TM ارائه می‌دهد. پارامترهای داخل جدول عبارتند از:  $f_0$  فرکانس رزونانس فرکانسی است که در آن ساختار JC مانند هادی مغناطیسی عمل می‌کند.  $BW_{\pm 90}$  پهنای باند هادی مغناطیسی بین  $+90^\circ$  و  $-90^\circ$  درجه در نظر گرفته می‌شود.  $\Delta f$  اختلاف بین فرکانس رزونانس برای موج تابیده شده با زاویه صفر و  $6^\circ$  درجه است.  $\delta f\%$  از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta f\% = \frac{BW_{\pm 90}}{f_r} \times 100 \quad (3)$$

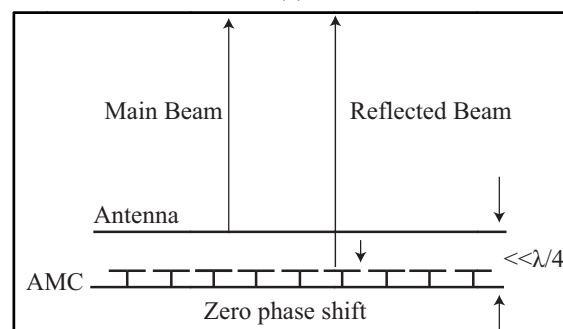
مقدار  $\delta f\%$  نشان‌دهنده میزان حساسیت هادی مغناطیسی به تغییرات زاویه است. در عمل  $\delta f\%$ ‌های کوچک مطلوب است.



شکل ۲- وضعیت آنتن و رفلکتور (a) انتشار امواج سطحی روی رفلکتور از جنس هادی الکتریکی (b) عدم انتشار امواج سطحی روی رفلکتور از جنس هادی مغناطیسی



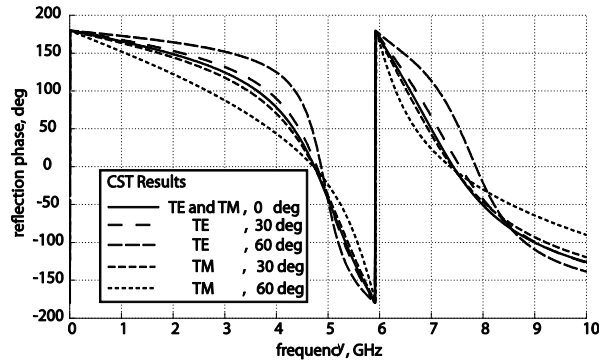
(a)



(b)

شکل ۳- آنتن افقی روی رفلکتور (a) رفلکتور از نوع هادی الکتریکی (b) رفلکتور از نوع هادی مغناطیسی مصنوعی

شکل (۷) فاز امواج بازتابیده شده آرایه‌ای از سلول‌های SJC برای تابش با مدهای TE و TM در صفر، ۳۰ و ۶۰ درجه برای دو فرکانس رزونانس را نشان می‌دهد.



شکل ۷- فاز امواج بازتابیده شده برای زاویه‌های مختلف تابش

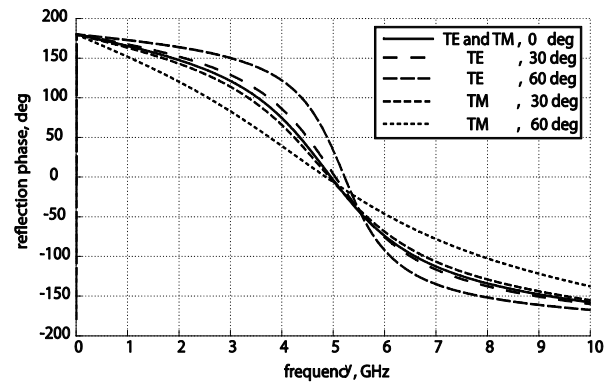
برای موج‌های تابشی TE و TM، جدول‌های (۲) و (۳) عملکرد را به ترتیب برای محدوده‌های فرکانس رزونانس اول و دوم ارائه می‌کنند. با دقت در جدول (۲) می‌توان دریافت که فرکانس رزونانس اول SJC نسبت به فرکانس رزونانس JC کاهش پیدا کرده است. به علاوه حساسیت نسبت به تغییر زاویه تابشی موج در SJC کمتر از JC است. فرکانس رزونانس دوم SJC برای امواج تابشی مد TE حساسیتی تقریباً برابر با JC دارد ولی برای مد TM این حساسیت به مراتب کمتر است. بنابراین SJC به علت کارایی در دو محدوده فرکانسی و حساسیت کمتر نسبت به زاویه تابش موج، در عمل می‌تواند جایگزین مناسبی برای JC محسوب شود.

جدول ۲- مشخصه‌های امواج بازتابیده شده از سطح هادی مغناطیسی با ساختار SJC-AMC برای فرکانس رزونانس اول

Mode	$\theta^\circ$	$f_r$ (GHz)	$Bw_{\pm 90^\circ}$ (GHz)	$\Delta f$	$\delta f\%$
TE	۰	۴/۷۳	۱/۴۹	-۰/۱۳	۲/۷٪
	۳۰	۴/۷۸	۱/۲۶		
	۶۰	۴/۸۶	۰/۷		
TM	۰	۴/۷۳	۱/۴۹	-۰/۰۲	۰/۴٪
	۳۰	۴/۷۲	۱/۶۷		
	۶۰	۴/۷۱	۲/۵۷		

جدول ۳- مشخصه‌های امواج بازتابیده شده از سطح هادی مغناطیسی با ساختار SJC-AMC برای فرکانس رزونانس دوم

Mode	$\theta$	$f_r$ (GHz)	$Bw_{\pm 90^\circ}$ (GHz)	$\Delta f$	$\delta f\%$
TE	۰	۷/۴۲	۲/۰۷	-۰/۴۳۶	۵/۸٪
	۳۰	۷/۵۵	۱/۹۷		
	۶۰	۷/۸۶	۱/۴۱		
TM	۰	۷/۴۲	۲/۰۷	۰/۰۵	۰/۶۷٪
	۳۰	۷/۳	۲/۳۹		
	۶۰	۷/۳۷	۲/۶۳		

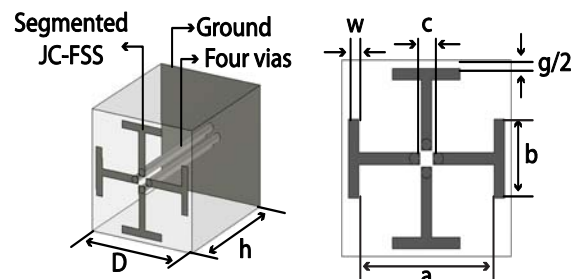


شکل ۵- فاز امواج بازتابیده شده برای زاویه‌های مختلف تابش

جدول ۱- مشخصه‌های امواج بازتابیده شده از سطح هادی مغناطیسی با ساختار JC-AMC

Mode	$\theta^\circ$	$f_r$ (GHz)	$Bw_{\pm 90^\circ}$ (GHz)	$\Delta f$	$\delta f\%$
TE	۰	۴/۹۵	۲/۶	-۰/۲۷	۵/۴٪
	۳۰	۵/۰۴	۲/۳۵		
	۶۰	۵/۲۱	۱/۴۶		
TM	۰	۴/۹۵	۶۲	-۰/۱	۲٪
	۳۰	۴/۹۲	۲/۹۴		
	۶۰	۴/۸۵	۴/۶۶		

حال یک سلول هادی مغناطیسی با ساختار JC-AMC به گونه‌ای تغییر داده می‌شود تا با حفظ ابعاد کلی، فرکانس رزونانس و مقدار حساسیت هادی مغناطیسی نسبت به زاویه تابش پرتو، کاهش یابند. طراحی جدید از بهبود در ساختار JC-AMC حاصل می‌شود. استفاده از چهار پین اتصال‌دهنده (via)، سبب افزایش اندوکتانس هادی مغناطیسی شده و در نتیجه آن فرکانس رزونانس کاهش می‌یابد. لایه JC-FSS به چهار قسمت تقسیم می‌شود و هر قسمت به یک via متصل می‌شود، هادی مغناطیسی تغییر یافته (SJC) نامگذاری می‌شود. شکل (۶) ساختار سلولی SJC را نمایش می‌دهد. ابعاد و مقادیر داده شده در شکل (۳)، عیناً برای شکل (۶) در نظر گرفته شده است.



شکل ۶- سلول هادی مغناطیسی با ساختار SJC-FSS

## 7. Segmented Jerusalem Cross

جدول ۵- تخریب جابه‌جایی

پرتوهای اولیه	پروتون‌های گیرافتاده، الکترون‌های گیرافتاده و پروتون‌های خورشیدی		
	LEO	MEO	GEO
مأموریت ماهواره	نوترون‌های ثانویه	نوترون‌های ثانویه	-
پرتوهای ثانویه	-	-	-

جدول ۶- اثر تک‌رویدادی

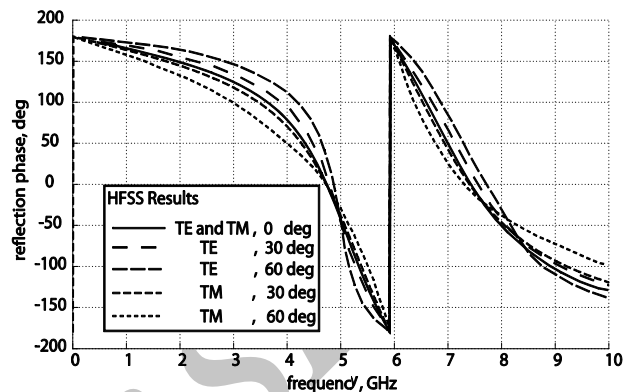
پرتوهای اولیه	پروتون‌های گیرافتاده، ذرات پرانرژی خورشیدی و اشعه کیهانی		
	LEO	MEO	GEO
مأموریت ماهواره	نوترون‌های ثانویه	-	-
پرتوهای ثانویه	-	-	-

زمانی که پرتو کیهانی به لایه‌های محافظ برخورد می‌کند، پرتوهای ثانویه از جنس نوترون، ایکس و پروتون ایجاد می‌شود که ممکن است به داخل فضاپیما یا ماهواره نفوذ کنند. برای حفاظت در برابر ذرات کیهانی پرانرژی استفاده از عناصر با عدد جرمی کمتر مناسب‌تر است، چراکه احتمال خردشدن و تبدیل آنها به ذرات ثانویه کوچک‌تر کمتر از عناصر سنگین است [۷]. هادی‌های مغناطیسی به‌عنوان رفلکتور با امپدانس سطحی زیاد در طراحی آنتن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند تا سبب کاهش حجم کلی آنتن‌ها و حذف امواج سطحی شوند. در طراحی هادی مغناطیسی SJC از آلومینیوم و دی‌الکتریک آرلون ای‌دی ۲۷۰<sup>۱۴</sup> استفاده شده است. دی‌الکتریک آرلون ای‌دی ۲۷۰<sup>۱۴</sup> از فایبرگلاس تقویت‌شده با زنجیره پلیمری پلی‌تترافلورواتیلن<sup>۱۵</sup> تشکیل شده است. این پلیمر از ترکیب کربن و فلئور ساخته می‌شود. هنگامی که پرتوهای کیهانی به آلومینیوم و پلیمر برخورد می‌کند به‌علت سبکی عناصر کربن و فلئور تابش ثانویه کاهش چشمگیری می‌یابد. عناصر سبک هرچند که نمی‌توانند به‌طور کامل جلوی تابش‌های کیهانی را بگیرند اما می‌توانند آثار زیانبار این پرتوها را به مقدار زیاد کاهش دهند.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، هادی مغناطیسی و ویژگی‌های آن در مقایسه با هادی الکتریکی توضیح داده شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار سی‌اس‌تی مایکروویو استودیو<sup>۱۶</sup> شبیه‌سازی بر روی نمونه‌ای از هادی‌های مغناطیسی از نوع JC صورت گرفت و مشخصاتی نظیر فرکانس رزونانس، پهنای باند و حساسیت نسبت به تغییر زاویه

به‌منظور معتبرسازی داده‌های به‌دست آمده، با استفاده از نرم‌افزار HFSS، امواج بازتابیده شده آرایه‌ای از سلول‌های SJC شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از HFSS برای تابش با مدهای TE و TM در زوایای صفر، ۳۰ و ۶۰ درجه برای دو فرکانس رزونانس در شکل (۸)، نشان داده شده است.



شکل ۸- شبیه‌سازی فاز امواج بازتابیده شده با نرم‌افزار HFSS برای زاویه‌های مختلف تابش

مقایسه شکل‌های (۷) و (۸)، بیانگر یکسان‌بودن فرکانس‌های رزونانس به‌دست آمده به‌وسیله شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای CST و HFSS است. تفاوت حداکثر ۵٪ منحنی‌ها در زاویه ۶۰ درجه، تأثیر چندانی در طراحی و عملکرد SJC نخواهد داشت.

## نقش SJC-AMC برای حفاظت در برابر

### پرتوهای کیهانی

سه پدیده TID<sup>۸</sup>، DD<sup>۹</sup> و SEE<sup>۱۰</sup> در حفاظت‌سازی ماهواره‌ها نقش مهمی ایفا می‌کنند. در جدول‌های (۴)، (۵) و (۶) پرتوهای اولیه و ثانویه تولیدشده در مدارهای LEO<sup>۱۱</sup>، MEO<sup>۱۲</sup> و GEO<sup>۱۳</sup> آورده شده است [۶].

جدول ۴- پرتوهای یونیزان کلی

پرتوهای اولیه	پروتون‌های گیرافتاده، الکترون‌های گیرافتاده و پروتون‌های خورشیدی		
	LEO	MEO	GEO
مأموریت ماهواره	اشعه ایکس ناشی از الکترون‌ها	اشعه ایکس ناشی از الکترون‌ها پروتون‌های ثانویه	اشعه ایکس ناشی از الکترون‌ها
پرتوهای ثانویه	-	-	-

8. Total Ionizing Dose
9. Displacement Damage
10. Single-Event Effects
11. Low Earth Orbit
12. Mid Earth Orbit
13. Geostationary Earth Orbit

14. Arlon AD 270  
15. Poly-tetrafluorethylene  
16. CST Microwave Studio

## مراجع

- [1] Balanis, C. A., *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3<sup>rd</sup> Edition, Wiley Interscience, 2005.
- [2] Pozar, D.M., *Microwave Engineering*, 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley and Sons, 2005.
- [3] Hosseinipناه, M., Design of Artificial Magnetic Conductors, (Ph.D. Thesis), Harbin Institute of Technology, Dept. Astronomy, Harbin, China, Magnetic Fields and Microwave Technology, 2010.
- [4] Sievenpiper, D., Zhang, L. J., Broas, R. F. J., Alexopolous, N. G. and Yablonovitch, E., "High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 47, No. 1, 1999, pp. 2059-2074.
- [5] Sievenpiper, D., High-Impedance Electromagnetic Surfaces. (Ph.D. Thesis), Department Electronic Engineering, University of California at Los Angeles, Los Angeles, CA, 1999.
- [6] "Space Engineering Methods for the Calculation of Radiation Received and its Effects, and a Policy for Design Margins," *European Cooperation for Space Standardization*, ECSS-E-10-12 Draft 0.11, 2005.
- [7] Bell, J., Lail, D., Martin. C. and Nguyen, P., "Initial Report on Radiation Shielding for a Lunar Base," *United State NASA*, February 28, 2011.

تابش به دست آمد. سپس به منظور بهبود مشخصات، ساختار جدیدی با عنوان SJC ایجاد شد که دارای چهار کانکتور اتصال دهنده چهار بازوی جدا شده از JC به زمین است. آرایه‌ای از SJC شبیه‌سازی و مشخصات آن بررسی شد. مقایسه مشخصات آن با JC نشانگر این مطلب است که هادی مغناطیسی SJC دارای فرکانس رزونانس پایین‌تر و حساسیت کمتر نسبت به تغییر زاویه تابش موج است. اعتبار با استفاده از نرم‌افزار HFSS Ver. 13 بررسی و تأیید شد. ضمناً با تغییر در ابعاد سلولی هادی مغناطیسی طراحی شده، می‌توان در محدوده فرکانسی متفاوتی هادی مغناطیسی را طراحی کرد. در ساختار هادی مصنوعی SJC از آلومینیوم و دی‌الکتریک پلی‌تترافلورواتیلن استفاده شده است. کوچک بودن عدد جرمی آلومینیوم و عدد جرمی عناصر تشکیل دهنده زنجیره پلیمر (شامل کربن و فلورین)، سبب می‌شود که بر اثر برخورد پرتوهای پرانرژی کیهانی به این عناصر سبک، خرد و شکسته شدن اتم‌ها به قطعات کوچک‌تر و پرتوهای ثانویه صورت نگیرد. بنابراین هادی مغناطیسی SJC راندمان و کارایی آنتن را بهبود می‌بخشد و در عین حال سبب کاهش نفوذ پرتو به داخل ماهواره می‌شود. استفاده از هادی مغناطیسی طراحی شده سبب کاهش فاصله آنتن و رفلکتور می‌شود. علاوه بر این با حذف امواج سطحی سبب بهبود کیفیت پترن آنتن می‌شود.

Archive