# آنتن آرايهبازتابي بهرهبالاي ارزان خودپوشا

بابک هنربخش<sup>۱</sup>، استادیار

honarbakhsh@sbu.ac.ir–دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی-تهران- ایران– ایران

چکیده: در این مقاله، آنتنی آرایهبازتابی معرفی می شود که علاوه بر تأمین بهره بالا، هزینه ساخت آن اندک است. این آنتن نیازی به رادوم ندارد. عایق استفاده شده در این آنتن، FR4 بوده که قیمت آن کم و مقاومت مکانیکی آن زیاد است. پیکربندی آنتن پیشنهادی چنان است که FR4 با فاصلهای هوایی از صفحه زمین قرار گرفته و عناصر بازتشعشع کننده بر سطح داخلی آن قرار دارند. برتری آنتن پیشنهادی بر طرح مشابهی که پیش تر معرفی شده، به اثبات رسیده است. برای طرح پیشنهادی، تحلیلِ حساسیتِ مشخصه تأخیرِ فاز، تعدادِ عنا صر و بهره نسبت به ختامت FR4 انجامشده است. همچنین، تأثیرِ خطایِ ساختِ عایق و فاصله هوایی بر بهره آنتن بررسی شده است.

واژههای کلیدی: آنتن، آرایهبازتابی، بهرهبالا، ارزان، رادوم.

# High-Gain Low-Cost Self-Covered Reflectarray Antenna

Babak Honarbakhsh, Assistant Proffesor<sup>1</sup>

1- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Email: b\_honarbakhsh@sbu.ac.ir

**Abstract:** In this paper, a high-gain low-cost reflectarray antenna is proposed. This antenna does not need radome. The exploited dielectric is the FR4 epoxy which is both low-cost and mechanically robust. Reflector of the proposed antenna consists of a layer of FR4, suspended above the ground plane by spacer, with its re-radiating elements on its interior side. Superiority of the suggested antenna over the similar previously reported design is shown. For the proposed design, sensitivity of the phase-delay characteristic, number of elements and gain to the FR4 thickness is studied. In addition, effect of design tolerance for the dielectric and the air gap on the antenna gain is investigated.

Keywords: Antenna, reflectarray, high-gain, low-cost, radome.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۱۸ تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۰۲ نام نویسنده مسئول: ایران - تهران - ولنجک - دانشگاه شهید بهشتی- دانشکده مهندسی برق.

#### ۱– مقدمه

تأمين بهره بالا، سادگی فرآيند ساخت به همراه ساختار تخت و وزن کم، ویژگیهایی اســـت که آنتنهای آرایهبازتابی را در برخی کاربردها جایگزین آنتنهای بشـقابی کرده اسـت. شـایانذکر اسـت که بهره آنتنهای آرایهبازتابی از انواعی نظیر یاگی- یودا و مایکرواستتریپ، به مراتب بیشتر است [۱، ۲]. علی رغم مزایای یاد شده، کاستی هایی چون پهنه فرکانسیی اندک و قیمت زیاد چنین آنتنهایی، مانع از منسوخ شدن آنتنهای بشقابی شده است [۳]. منشأ قیمت زیاد آنتنهای آرایه بازتابی، گرانبودن عایق های کمتلف است. تاکنون، تلاش هایی برای كاهش هزينه تمام شده اين آنتن ها انجام شده است [۱۱-۴]. ازجمله راه کارهای پیشینهادشیده، به کارگیری عایق ارزان FR4 اسیت. به طور مشــخص، در [۵]، بازتاب کننده از یک لایه FR4 تشــکیل شــده و در فرکانس ۱۲/۵ گیگاهرتز، بهره ۳۰ دسیبل را فراهم کرده است. در [۸]، از ساختاری دولایه برای تحقق بازتاب کننده استفاده شده که لایه اول مادهای با گذردهی نسبی ۱/۰۶ و لایه دوم، FR4 است. همچنین، فرکانس طراحی، ۵ گیگاهرتز و بهره حاصل، ۲۲ د سیبل گزارش شده است. ساختار عایقی استفادهشده در [۹، ۱۰] مشابه [۸] است. فرکانس طراحی و بهره گزارش شده در [۹]، بهترتیب، ۵/۲ گیگاهرتز و ۲۱ دسی بل و برای [۱۰]، ۱۰ گیگاهرتز و ۲۴/۴ دسیبل است.

ثابت عایقی و تانژانت تلفات FR4 در فرکانسهای مایکروویو، به ترتیب، حدود ۴/۴ و ۲/۰۲ است. درنتیجه، استفاده از این عایق، به دو علت، موجب کاهش بهره می شود. اولاً، ثابت عایقی نسبتاً بزرگ آن باعث تحریک امواج سطحی می شود که حبس شدن سهمی از انرژی الکترومغناطیسی و عدم تشع شع آنرا در پی دارد. ثانیاً، تلفات نسبتاً زیاد آن موجب تبدیل انرژی الکترومغناطیسی به گرمایی شده که علاوه بر کاهش بهره، منجر به افزایش دمای نویز آنتن می شود [17].

شایان ذکر است که هر دوی آنتن های بشقابی و آرایه بازتابی برای استفاده در فضای آزاد، به پوششی موسوم به رادوم<sup>۱</sup> نیاز مندند تا سطح آن ها را در برابر عوامل مخرب محیطی محافظت کند. از آنجا که رادوم می بایست از لحاظ الکترومغناطیسی شفاف باشد، قیمت انواع مرغوب آن گران است.

در این مقاله، آنتنی آرایهبازتابی پیشنهاد می شود که اولاً بهره آن بالا است، ثانیاً ارزان بوده و ثالثاً، به رادوم نیاز ندارد؛ ازاینرو، خودپوشا<sup>۲</sup> خوانده میشود. برای کاهش هزینه، مانند [۵، ۱۰–۸]، از عایق FR4 استفاده شده است. برای افزایش بهره، اولاً، عایق با فاصله هوایی از صفحه زمین قرار گرفته و ثانیاً، عناصر بازتشعشع کننده<sup>۲</sup> فلزی (که ازاین پس، برای اختصار از آنها با عنوان عناصر فلزی یاد می شود) بر سطح داخلی آن قرار داده شدهاند که نوآوری اصلی مقاله به شمار می آید. چنین طرحی تاکنون گزارش نشده است. درنتیجه، عایق مقاوم FR4 با حایل شدن بین عناصر فلزی و فضای آزاد، همچون رادوم عمل کرده و از آسیب دیدگی آنها در برابر عوامل مخرب محیطی جلوگیری می کند. در [۵] به مسئله تأمین رادوم برای آنتنهای آرایهبازتابی و بررسی تأثیر

آن بر بهره پرداخته شده است. در مقاله یادشده، از دو ماده غیر از FR4 برای این منظور استفاده شده است. بهعلاوه، برخلاف طرح پیشنهادی، رادوم بخشی مجزا از بازتاب کننده است.

از ایجاد فاصله هوایی بین عایق و صفحه زمین در [۱۱–۷] استفاده شده است ولی در تمام این موارد، عنا صر فلزی بر سطح خارجی عایق قرار گرفتهاند. ازاینرو، روش پیشنهادی، رقیب روش یادشده محسوب و از جنبههای مختلف با آن مقایسه شده است. ترفندی که در این مقاله به کاررفته، پیش تر برای تحقق آنتنهای مایکرواستریپ بهرهبالا پیشنهاد شده [۱۴، ۱۴] و اخیراً، کارایی آن در آنتنهای آرایهای مایکروا ستریپ به اثبات ر سیده است [۱۵]. در این پژوهش، به برر سی کارایی همین ترفند در بهبود عملکرد آنتنهای آرایهازتابی پرداخته شــده است. شایان کر است که اطلاق "بهرهبالا" به طرح پیشنهادی، به علت بیش تربودن بهره آن نسبت به و ضعیتی است که زیرلایه بازتاب کننده خلأ باشـد که دراین صورت، تلفات حاصل از قطبش عایق و تحریک امواج بیش حفی صفر است. با توجه به تانژانت تلفات نسبتاً بزرگ FR4، پیش بینی چنین بهبودی دور از انتظار است.

ساختار مقاله حاضر بدین شرح است: در بخش دوم، چهار سلول واحد ازلحاظ مشخصه تأخیر فاز بررسی می شوند که ساختار عایقی آن ها عبارت است از لایهای از هوا، لایهای از FR4، لایهای از FR4 روی لایهای از هوا با عناصر فلزی بر سطح خارجی FR4، لایهای از FR4 روی روی لایهای از هوا با عناصر فلزی بر سطح داخلی FR4، برای سادگی و بدون ازد ستدادن عمومیت طرح، عناصر فلزی سلول ها، مربعی در نظر گرفته شدهاند. بخش سوم، به طراحی آنتن تغذیه و تعیین فاصله بهینه آن نسبت به بازتاب کننده اختصاص یافته است. در بخش چهارم، بهره مقایسه شده است. بخش شرم به تحلیل حساسیت مشخصه تأخیر فاز، داده شده است. در بخش ششم به تحلیل حساسیت مشخصه تأخیر فاز، تعداد عناصر و بهره نسبت به ضحامت FR4 پرداخته شده است. همچنین، تأثیر خطا در شاخصهای ساختمندی <sup>+</sup> عایق و فاصله هوایی بر بهره بررسی شدهاند.

تمام طراحیها حول فرکانس ۵/۸ گیگاهرتز، که یکی از مشهورترین فرکانسهای سیستمهای وایمکس<sup>۵</sup> است، انجامشده است. نتایج گزارش شده با استفاده از نرمافزار فِکو<sup>۶</sup> بهدست آمدهاند.

### ۲- سلولهای واحد

همانند [۱۵]، از چهار ساختار عایقی برای طراحی سلول واحد بازتاب کننده و مقایسه عملکرد آنها استفاده شده است. ازاین پس،  $s_i$ نماینده هریک از این ساختارها و سلول واحد نظیر آن و i شماره متناظرش است. در  $s_1$  و  $s_2$ ، فقط یک لایه عایق وجود دارد که، به ترتیب، عبارتاند از هوا و FR4. محیط عایقی  $s_2$  و  $s_3$ ، دو لایه است و در هر دوی آنها هوا، لایه اول و FR4 لایه دوم است. در  $s_3$ ، عناصر فلزی بر سطح خارجی FR4 قرار دارند و FR4 بخشی از زیرلایه است. در  $s_4$  که ساختار پیشنهادی است، عناصر فلزی بر سطح داخلیFR4

قرار دارند و FR4 بخشی از رولایه ٔ است. ساختار اول، ساختاری ایدهآل است که در آن هر دوی تلفات ناشی از قطبش و تحریک امواج سطحی صفر است. چنین ساختاری، در قالب آنتن مایکرواستریپ تکلایه، بیش ترین بهره ممکن را تأمین میکند و با توجه به این پیشزمینه فکری، تأمین کننده کران بالای بهره آنتن آرایهبازتابی مایکرواســـتریپ به نظر می سد. ساختار دوم، ساده ترین نحوه استفاده از FR4 در آنتن های آرایهبازتابی است و ملاکی است برای توجیه استفاده از فا صله هوایی. ساختار سوم، سادهترین تغییری است که در آن فقط از FR4 استفاده شده که البته، پیشتر در آنتنهای آرایهبازتابی به کار گرفته شده است. درنهایت، ساختار چهارم سادهترین تغییری است که میتوان به ساختار سوم اعمال کرد و موجه بودن آن برای آنتنهای مایکرواستریپ به اثبات رسیده است. سلولهای واحد متناظر با ساختارهای یاد شده در شکل ۱ نمایش داده شدهاند. برای ایجاد فا صله هوایی می توان از انواع فاصلهدهنده^ استفاده كرد. ثابت عايقي و تانژانت تلفات FR4، بهترتيب، ۴/۴ و ۰/۰۲ فرض شده است. ضخامت لایههای هوا و FR4، بهترتیب، با  $h_0$  و h نمایش داده می $m_0$ ند. در طول مقاله همواره  $h_0$  برابر یک میلیمتر در نظر گرفته شده است. شاخصهای طول موج فضای آزاد، طول موج هدایتی و گذردهی الکتریکی مؤثر نسبی، بهترتیب با ۵۵، 🔏  $\lambda_{g} = \lambda_{0} / \sqrt{\varepsilon_{r, eff}}$  و  $\varepsilon_{r, eff}$  نشان داده می شوند که  $\varepsilon_{r, eff}$ 

روش معمول برای تعیین مشخصه تأخیر فاز، قرار دادن سلول در ساختاری با تناوب دوبعدی است [۳]. ضلع سلول واحد، *۹*، طبق پیشنهاد [۳]، نود و پنج درصد طول موج هدایتی فرض شده است. مقدار *۹* میتواند کوچک تر نیز انتخاب شود. مقدار یادشده، امکان تغییر ضلع سلول واحد را در محدودهای و سیع، بدون ایجاد همپو شانی میان عناصر فلزی، فراهم می کند. مقدار و چگونگی محاسبه *آم بو* در [۱۵] آمده که در اینجا، برای اختصار تغییرات آن نسبت به ضخامت FR4 در شکل ۲ نشان داده شده است. شایان ذکر است که این تغییرات برای د<sup>3</sup> فلزی از سطح خارجی به داخلی FR4، میتوان به طور قابل ملاحظهای از تحریک امواج سطحی و به تبع آن، از کاهش بهره آنتن کاست.

مشخصه تأخیر فاز سلولهای واحد در فرکانس ۵/۸ گیگاهرتز در شکل ۳ نشان دادهشده که در آن ضخامت FR4 برابر ۱/۶ میلیمتر فرض شده است. برای تولید هریک از مشخصههای فاز، سلول متناظر با موجی صفحهای با فاز صفر درجه تحریک شده و فاز موج پراکنده شده بهازای محدودهای از طول ضلع سلول محاسبه شده است. سپس، برای منطبق شدن مرجع فاز هر چهار مشخصه، ابتدا مقادیر فاز واپیچیده <sup>۹</sup> شده است و سپس در راستای محور عمودی، انتقال یافته تا مقدار شده است و سپس در راستای محور عمودی، انتقال یافته تا مقدار توافق است؛ اولاً، مشخصه <sub>1</sub>۶ و ۶4 به هم نزدیک است که FR4 را در پیکربندی پیشنهادی، محیطی مناسب برای تحقق عناصر فلزی معرفی می کند. دلیل مطلوب بودن <sub>1</sub>۶۱، عدم تحریک امواج سطحی در آن ا ست که درنهایت، افزایش بهره آنتن را در پی خواهد دا شت [۱۶]. ثانیاً، ابعاد

متوسط عناصر مذکور در s2 از بقیه کمتر است که علت آن، بزرگی نسبیِ ثابتِ عایقیِ مؤثرِ آن نسبت به دیگر حالتها است.

پس از تعیین موقعیت آنتن تغذیه و جهت بازتاب، اختلاف فازی که هر یک از سلولهای بازتاب کننده می بایست تأمین کنند تعیین می شود. سپس، با استفاده از مشخصه تأخیر فاز، طول ضلع هر سلول تعیین می گردد [۳]. در این مقاله، موقعیت آنتن تغذیه و جهت بازتاب، عمود بر بازتاب کننده و در امتداد مرکز آن است. روند تعیین موقعیت تغذیه در بخش ۳ بیان شده است.



شکل ۱: نمای جانبی سلولهای واحد با باز تشعشع کننده مربعی به ضلع a: (الف) a، (ب) 28 (پ) 33 (ت (ت) 43





شکل ۳: مشخصه تأخیر فاز سلولهای واحد برای حالتهای چهارگانه.

#### ۳- آنتن تغذیه

آنتنی که برای تغذیه بازتاب کننده استفاده شده، آنتنی است مایکرواستریپ، با زیرلایه هوا و زمین محدود. دلیل چنین انتخابی، کاهش زمان تحلیل تمامموج مجموعه آنتن، شامل تغذیه و بازتاب کننده است. با توجه به این که هدف این مقاله، اثبات کارایی سلول واحد پیشنهادی، خصوصاً برمبنای مقایسه بهره آن با دیگر حالتهاست، این انتخاب از اعتبار نتایج نمی کاهد. شمای آنتن مذکور در شکل ۴ نمایش داده شده که تشکیل شده است از آرایهای از چهار تشعشع کننده مربعی با تغذیه مستقل و همفاز که در فا صله یک میلی متری از صفحه زمین قرار گرفتهاند.

مطابق با [۳]، برای تعیین فاصله بهینه آنتن تغذیه از بازتاب کننده، الگوی تشعشعی راه دور آن بر تابع  $\theta^{r}$ cos برازش شده است (شکل ۵). بازدهیهای رو شنایی ۰٬۰ سرریز ۱٬۰ و کلی ۱٬ که، بهترتیب، با  $\eta_s$ ،  $\eta_s$ ، و  $\eta_s$ نشان داده می شوند، بر اساس روابط زیر محاسبه و در شکل ۶ گزارش شدهاند [۳]:

$$\begin{cases} \eta_i = \frac{\left[\left(1 - \cos^{n+1}\theta_e\right)/(n+1) + \left(1 - \cos^n\theta_e\right)/n\right]^2}{2\tan^2\theta_e\left[\left(1 - \cos^{2n+1}\theta_e\right)/(n+1)\right]} \\ \eta_s = 1 - \cos^{2n+1}\theta_e \\ \eta_t = \eta_i\eta_s \\ \theta_e = \tan^{-1}(D/2F) \end{cases}$$
(1)

که در آن D و F، بهترتیب، عبارتاند از قطر مؤثر و فاصله کانونی بازتابکننده. درنتیجه، مقدار بهینه F/D ، مقدار ۱/۲ است.



شکل ۴: دید از بالای آنتن تغذیه:  $L_s$  برابر ۷/۶ میلیمتر،  $L_p$  و b برابر ۲/۶ میلیمتر، نقاط قرمزرنگ: موقعیت تحریک با کابل هممحور.



شکل ۵: الگوی تشعشعی راه دور آنتن تغذیه و برازششده آن با تابع 6″cos در صفحه: (الف) میدان الکتریکی (قوای n برابر ۱۳/۷)، (ب) میدان مغناطیسی (قوای n برابر ۱۲/۹).



شکل ۶: منحنیهای بازدهی برای آنتن تغذیه در صفحه: (الف) میدان الکتریکی، (ب) میدان مغناطیسی.

MRA<sub>3</sub> و MRA4 خوانده می شوند. طرحبندی بازتاب کنندههای یاد شده در شکل ۷ نمایش داده شده است. بازتاب کنندهها با آنتن طراحی شده در بخش سـوم، در پیکربندی تغذیهمیانی<sup>۱۲</sup> از فاصـله عمودی پنجاه سانتیمتری، تحریک و الگوی بهره آنها در شکل ۸ گزارش شده است.

نتیجه اول نشاندهنده آن است که کران بالای بهره در آنتنهای آرایه باز تابی را ثابت عایقی واحد تعیین نمی کند؛ رولایه غلیظ، حتی تلفاتی، عملکردی عدسی گونه داشته و میتواند بر بهره آنتنهایی از این دست بیفزاید. بر اساس دو نتیجه دیگر، 33 و به خصوص 54، گزینههای مناسبی برای تحقق آنتنهای آرایه بازتابی ارزان هستند. همان طور که پیش تر ذکر شد، سابقاً از 33 برای این منظور استفاده شده است. بررسی حاصل از آن بیش تر است، ثانیاً، به علت قرارداشتن عناصر فلزی در سطح داخلی FR4، باز تاب کننده نظیر آن نیازی به رادوم ندارد و به تعبیری، خودپوشا است.

در جدول ۱، شاخصهای MRA4 و برخی از طراحیهای مشابه [۵، ۱۰–۸] گزارش شده است. منابع دیگر، از عایقی غیر از FR4 استفاده کردهاند. آخرین شاخص این جدول، ملاکی است از مقدار متوسط بهرهای که بازتاب کننده در واحد سطح تأمین می کند. باتوجهبه اختلاف موجود در فرکانسهای طراحی، مقایسه منصفانه ایجاب می کند که طول ضلع بازتاب کننده نسبت به طول موج کاری به هنجار شود. شایان ذکر است که برای محاسبه شاخص یادشده، ابتدا بهره به مقیاس خطی تبدیل شده و پس از محاسبه مقدار متوسط آن، برحسب دسی بل گزارش شده است.

نتایج جدول در توافق با نتایج مقاله حاضر است. به خصوص، طراحی گزارش شده در [۵]، که در آن از یک لایه FR4 استفاده شده است، نسبت به بقیه موارد، که همگی از فاصله هوایی میان عایق و صفحه زمین بهره جستهاند، دارای بهره متوسط کمتر و تعداد عناصر به مراتب بیشتری است.



شکل ۷: طرحبندی باز تابکنندهها برای: (الف) MRA1، (ب) MRA2، (پ) MRA3، (ت) MRA4.

#### ۴– مقایسه کارایی

بر اساس سلولهای واحد معرفی شده در بخش دوم، چهار بازتاب کننده تخت مربعی طراحی شـدهاند که ضـلع همگی آن ها، *L*، برابر ۴۰ سانتیمتر و تعداد عناصـر آنها، *N*، برای حالتهای چهارگانه سـلول واحد، بهترتیب، برابرند با ۹×۹، ۱۸×۱۸، ۲۶×۱۹، و ۱۱×۱۱. ازاین پس، آنتن های متناظر با این منعکس کننده ها، بهترتیب، MRA<sub>1</sub> MRA1



جدول ۱: شاخصهای طراحیهای مشابه با طرح پیشنهادی

این مقاله	[۱۰]	[٩]	[٨]	[۵]	مرجع
۵/۸	١٠	۵/۲	۵	۱۲/۵	f(GHz)
١	٣	۱۸	۱۸	•	$h_0 \text{ (mm)}$
۱/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۶	1/574	<i>h</i> (mm)
۴/۴	۴/۴	۴/۴	۴/۴	۴/۴۵	$\mathcal{E}_r$
•/•٢	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱۶	tg δ
١/٢	۱/•	۰/۵	۰/۵	1/1	F/L
171	۵۷۶	208	208	۹۸۰۱	Ν
4	197	۳۲۰	۳۲۰	۳۹۶	<i>L</i> (mm)
۲۵/۱	24/4	۲۱	77	۳۰	G (dBi)
٧/٣٧	٨/٧۵	۶/۱	٧/۵	۵/۶	$G/(L/\lambda)^2$ (dBi)

#### ۵- اعتبارسنجی

در این بخش به اعتبارسنجی نتایج گزارششده پرداخته میشود. این نتایج بااستفاده از نرمافزار فکو و برپایه روش ممان<sup>۱۵</sup> بهدست آمدهاند که روشی است تمامموج و مبتنی بر مشبندی [۱۶]. بر اساس [۱۸]، با دو ملاک می توان بر نتیجه حاصل از چنین روش هایی صحه گذاشت؛ اول، تحلیل هم گرایی و دوم، توافق پاسخ هم گراشده با پیش بینیهای نظری. در شکل ۹، تغییرات بهره MRA4 برحسب اندازه مش گزارش شده است که طبق آن، پاسخ برای مشهای کوچکتر از یکدهم طول موج هم گراست. شایان ذکر است که در تنظیمات نرمافزار، اندازه مش در تمام شبیهسازیها، بجز آنچه در شکل ۹ گزارش شده است، برابر یکدهم طول موج فضاى آزاد است. همچنين، با توجه بهاين كه طول ضلع بازتاب کننده تقریباً ۸ برابر طول موج فضای آزاد است، بین هایت فرض کردن گسترش عرضی زیرلایه تقریبی مجاز است. درنتیجه، در تنظيمات نرمافزار از زيرلايه چندلايه مسطح براى توصيف محيط عايقي منعکس کننده استفاده شده است. با توجه به شکل ۶، مقدار بهینه F طبق محاسبات تحلیلی، حدود پنجاه سانتیمتر است. در شکل ۱۰، تغييرات بهره آنتن يادشده نسبت به محل آنتن تغذيه رسم شده است که در توافق آشکار با پیشبینی نظری است. به طور مشخص، شکل (۶) از (۱) حاصل شده که نتیجه محاسبات تحلیلی است. از سوی دیگر، شکل (۱۰) از تحلیل عددی بهدست آمدهاست. طبق شکل (۶)، مقدار بهیه ۲/D که منجر به حداکثر بهره می شود، برابر ۱/۲ است. طبق نتایج عددی شکل (۱۰) نیز، بهره حداکثر بهازای فاصله کانونی پنجاه و پنج سانتیمتر حاصل می شود که متناظر با F/D برابر با ۱/۲۵ است.





شكل ۱۰: تغييرات بهره ₄MRA نسبت به محل آنتن تغذيه.

#### ۶- تحلیل حساسیت

در این بخش، از جنبههای مختلف به تحلیل حساسیت MRA4 پرداخته می شود. تأثیر h بر مشخصه تأخیر فاز برای  $s_3$  و  $s_4$  در شکل ۱۱ گزارش شده که در آن، یاسخ فاز  $s_1$  برای مقایسه گنجانده شده است. روند محاسبه این مشخصه ها در بخش ۲ بیان شده است. باتوجه به این شکل، کاهش گستره فاز با افزایش h در s4 نسبت به s3 کمتر است که برتری s4 را، بهخصوص در تحقق بازتاب کنندههای بزرگ، نشان میدهد [۳]. درنتیجه، می توان بدون نگرانی از تخریب یاسخ فاز، بر ضخامت عایق در MRA4 افزود تا توأماً رادوم مقاومي براي آن تأمين شود. اين قابليت، دغدغه تغییر حالت عایق در اثر تابش توانهای زیاد را از بین می برد. البته در این صورت، می بایست بر ضخامت عناصر فلزی نیز افزورده شود. حائز اهمیت است که، حداقل برای بازتابکنندههای بزرگ مایکرواستریپ با تعداد عناصر زیاد، توان فرودی بر هر سلول کمتر از میزانی است که بتواند عملکرد آنرا مختل کند [۳]. این ویژگی، یکی دیگر از مزایای آنتنهای آرایهبازتابی مایکرواستریپ بر آنتنهای آرایهای مایکرواستریپ است که در آنها تحریک در اتصال الکتریکی مستقیم با ساختار تشعشع كننده است.

شکل ۱۲، نشاندهنده تأثیر *h* بر تعداد عناصر با فرضِ آرایشِ مربعیِ منظم است که از آن می توان نتیجه گرفت اولاً، با افزایش *h* بهطور یکنوا بر *N* افزوده می شود. ثانیاً، رشد *N* با افزایش ضخامت FR4 در MRA3 نسبت به MRA4، بهمراتب، سریع تر است. هر دوی این نتایج باتوجهبه شکل ۲ قابل توجیهاند. شایان ذکر است که افزایش *N* در مساحت ثابت، همارز کاهش ابعاد آن ها و به تبع آن، افزایش حساسیت ساخت است.

اثر h بر بهره آنتن در شکل ۱۳ گزارش شده است که باتوجهبه آن، اولاً، با افزایش h بهطورکلی، از بهره کاسته می شود. این نتیجه قابل پیش بینی است زیرا با افزایش ضخامت FR4، هم بر تلف حرارتی افزوده می شود و هم بر میزان تحریک امواج سطحی. ثانیاً، بهره MRA4، بهطور متوسط، از بهره MRA3 بیش تر است. درنتیجه، MRA4 نسبت به MRA3 ارجح است. به خصوص، طرح بندی MRA4 چنان است که برخلاف (MR43، نیازی به رادوم ندارد. ویژگی های یادشده، ۶۵ را گزینه مناسبی برای تحقق آنتن های آرایه بازتابی بهره بالای ارزان معرفی می کند.



شکل ۱۱: تغییرات مشخصه تأخیر فاز نسبت به ضخامت FR4 برای: (الف) ۵3 (ب) ۶4



شکل ۱۲: تغییرات تعداد عناصر نسبت به ضخامت FR4.





پس از اثبات برتری MRA4 بر MRA3، در ادامه به تأثیر خطای ساخت بر بهره MRA4 پرداخته میشود. باتوجهبه این که شاخصهای ساخت مندی FR4 دقیقاً معلوم نیست، حساسیت بهره MRA4 نسبت به گذردهی نسبی و تانژانت تلفات FR4 بررسی و در شکل ۱۴ گزارش شده است. درنتیجه، اگر هریک از مقادیر فرضشده برای عایق تا ده درصد

خطا داشتهباشد، تغییرات بهره حدود نیم دسیبل است که خطای قابل تحملی است. بنابراین، MRA4 نسبت به خطای ساخت FR4 مقاوم است. یکی دیگر از عوامل خطا، فاصله هوایی  $h_0$  است که ممکن است هنگام ساخت یا پس از آن، بهعلت عوامل محیطی، تغییر کند. تأثیر این عامل بر بهره آنتن یادشده در شکل ۱۵نشان داده شده است. همانند بررسی قبل، تغییرات بهره نسبت به خطای تحقق h<sub>0</sub> تا ده درصد، حداکثر نیم دسیبل است. درنتیجه، MRA4نسبت به خطای فاصله هوایی نیز مقاوم ست.







مندی FR4: (الف) گذردهی نسبی ، (ب) تانژانت تلفات.



شكل ۱۵: تغييرات بهره MRA₄ نسبت به فاصله هوايي.

## ۷- نتیجهگیری

با ایجاد فاصله هوایی میان صفحه زمین و عایق ارزان FR4، می توان آنتن هايي آرايه باز تابي طراحي كرد كه على رغم قيمت كم، بهره آن ها بالا است. کارایی آنتنی که عناصر فلزی آن در وجه داخلی عایق قرار

دارند از جنبههای بهره و سطح گلبرگ کناری نسبت به حالتی که عناصر یاد شده در وجه خارجی با شند، بهتر است. بهعلاوه، حساسیت مشخصه فاز نسبت به ضخامت FR4 اندک است. درنتیجه، می توان با افزایش ضخامت عایق، به رادومی مقاوم د ست یافت و امکان رو شنایی باز تاب کننده را با توان های بالا فراهم کرد. همچنین، تغییرات بهره نسبت به خطای ده درصدی در شاخصهای ساختمندی FR4 و فاصله هوایی، حدود نیم د سیبل ا ست. درنتیجه، آنتن پیشنهادی نسبت به خطای ساخت، مقاوم است.

#### مراجع

- [۱] وحید نجفی، محمّد بمانی، «طرّاحی و ساخت آنتن یاگییودا ریزنواری با قابلیّت کار در دو باند فرکانسی ۰/۹۱۵ و ۲/۴۴۰ گیگاهرتز»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۲، صفحه ۷۳۵-۷۳۹،
- [۲] فرهاد خسروی افوسی، محمّدنقی آذرمنش، جواد نورینیا، «بهکارگیری ساختارهای EBG بهمنظور افزایش یهنای باند و دایرکتیویته آنتن میکرواستریپ»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۳، شماره ۲، صفحه ۱–۸، ۱۳۹۲.
- [3] J. Huang and A. Encinar, Reflectarray Antennas, New York: IEEE/John Wiley, 2008.
- [4] Y. Pan, Y. Zhang and S. Karimkashi, "Broadband low-cost reflectarray for multi-mission radar applications,"IEEE Radar Conf. (RADAR), Atlanta, GA, pp. 613-617, 2012.
- [5] J. Ethier, M. R. Chaharmir, J. Shaker, and D. Lee, "Development of novel low-cost reflectarray,"IEEE Antennas Propagat. Mag., vol. 54, no. 3, pp. 277-287, 2012.
- [6] L. Haitio, S. Gao, and L. Tian-Hong, "Low-cost beam switchable reflectarray antenna,"Int. Workshop Smart Antennas (WSA), Dresden, pp. 8-11, 2012.
- [7] E. Carrasco, M. Barba, J. A. Encinar, and M. Arrebola, "Design, manufacture and test of a low-cost varying-sized printed dipoles,' IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 61, no. 6, pp. 3077-3085, 2012.
- [8] K. Zhang, L. Jianzhou, W. Gao, and X. Jiadong, "Low-cost singlelayer broadband reflectarray for satellite communications," Antennas Propagat. Conf. (LAPC), Loughborough, pp. 78-83, 2013.
- [9] K. Zhang, F. Yangyu, X. Jiadong, and Q. Chen, "Design of broadband, low cost single layer reflectarray using phoenix cell," IEEE Region 10 TENCON Conf., Xi`an, pp. 1-4, 2013.
- [10] Q. Wang, H. S. Zhen, C. J. Yu, and L. K. Peng, "Broadband lowcost reflectarray using modified double-square loop loaded by spiral stubs," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 63, no. 9, pp. 4224-4229, 2015.
- [11] D. R. Prado, A. Campa, M. R. Pino, J. Encinar, and F. Las-Heras, "Design, manufacture and measurement of a low-cost reflectarray for global earth coverage,"IEEE Wireless Propagat. Lett., vol. 14, pp. 1-4, 2015.
- [12] R. E. Collin, Antennas and Radiowave Propagation, Mc-Graw Hill, 1987.
- [13] J. B. Ness, "Microstrip antenna," US patent no. US4697189A, 1987.
- [14] F. Lalezari, "Microstrip antenna structure having an air gap and method of constructing same," US patent, no. US5444453 A,
- [15] B. Honarbakhsh, "High-gain low-cost microstrip antennas and arrays based on FR4 epoxy,"AEU Int. J. Electron C., vol. 75, pp. 1-7, 2017.
- [16] J. R. Mosig, "Arbitrarily shaped microstrip structures and their analysis with a mixed potential integral equation," IEEE Trans. Micoro. Theory Tech., vol. 36, no. 2, pp. 314-323, 1988.

- [18] J. C. Rautio, "The microwave point of view on software validation," *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, vol. 38, no. 2, pp. 68-71, 1996
- [17] R. F. Harrington, Field Computation by Moment Methods, New York: Macmillan, 1968.

زيرنويسها

- <sup>9</sup> unwrap
- <sup>10</sup> illumination <sup>11</sup> spillover
- <sup>12</sup> total
- $^{\scriptscriptstyle 13}$  center-fed
- <sup>14</sup> sidelobe level
  <sup>15</sup> method of moments

<sup>1</sup>radome <sup>2</sup>self-covered 3 re-radiating <sup>4</sup>constitutive parameters <sup>5</sup> WiMAX <sup>6</sup> FEKO <sup>7</sup> superstrate <sup>8</sup> spacer