



## Wideband Reduction of Radar Cross Section in Compact Coupled Antenna Array by Loading an Array of Sequential Slots

R. Zaker<sup>1\*</sup>, T. Paifeshordeh<sup>2</sup>

\*Associate Professor, Shahid Madani University of Azerbaijan, Tabriz, Iran

(Received: 2024/04/28 revised: 2024/06/25 Accepted:2024/06/30 published: 2023/07/14)

### Abstract

*In this article, an effective method to reduce the radar cross section with wide frequency band coverage in both in-band and out-band for a microstrip E-plane linear antenna array is presented. In this study, radiation patches are defined close to each other so that in addition to array compression and impedance matching control, mutual-coupling should also be considered in reducing the radar cross section. In the presented method, unlike most space-consuming and multi-layered methods with high thickness and complexity in construction and design, including all types of metasurfaces and parasitic frequency selective structures, an array of consecutive slots is used in the body of the patches, so that a set of reflected waves with variable and controllable amplitude and phase towards the receiving radar can be obtained. Studies on the key parameters, such as the number, length, and distances between the slots, show that the result of reflected waves to the radar can be minimized in a wide frequency band around the resonance frequency of the antenna. Also, to maintain the impedance and radiation characteristics, a new positioning is done for the feeding coaxial cable. To validate this method, two arrays with and without slots are fabricated and measured. The measurement of the radar cross-section in monostatic mode shows a reduction of at least 10dB in the frequency range of 1.9 to 11.2GHz, impedance matching over 25dB and efficiency and gain more than 75% and 4.5dB, respectively. The reduction of the radar cross section for the incident angle up to 30degrees and in bi-static mode can be seen in the entire band.*

**Keywords:** Array Antenna, Radar Cross Section (RCS), Monostatic, Mutual Coupling

\* Corresponding author E-mail: zaker@azaruniv.ac.ir

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

**Publisher:** Imam Hussein University

© Authors



علمی - پژوهشی

## کاهش باند وسیع سطح مقطع راداری در آرایه آنتنی تزویج شده فشرده

### به وسیله بارگذاری آرایه‌ای از شکاف‌های متوالی

رضا ذاکر\*<sup>ID</sup>، تورج پای فشرده<sup>ID</sup>

۱- دانشیار، ۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۰۵، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳)



\* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان ©

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

### چکیده

در این مقاله، یک روش مؤثر برای کاهش سطح مقطع راداری با پوشش باند وسیع فرکانسی در دو ناحیه داخل و خارج باند برای یک آرایه آنتنی خطی صفحه E میکرواستریپی ارائه می‌گردد. در این مطالعه، پیچ‌های تشعشی نزدیک به هم تعریف شده که علاوه بر فشرده‌سازی آرایه و کنترل تطبیق امپدانس، تزویج متقابل نیز در کاهش سطح مقطع راداری لحاظ شود. در روش ارائه شده، برخلاف اکثریت روش‌های فضاگیر و چندلایه با ضخامت و پیچیدگی بالا در ساخت و طراحی، اعم از انواع فرا صفحه‌ها و ساختارهای فرکانس گزین پارازیتی، از آرایه‌ای از شکاف‌های متوالی در بدنه پیچ‌ها استفاده می‌شود تا مجموعه‌ای از امواج بازتابی با دامنه و فاز متغیر و قابل کنترل را به سمت گیرنده رادار حاصل کنیم. مطالعات روی پارامترهای کلیدی، اعم از تعداد، طول و فواصل بین شکاف‌ها نشان می‌دهد که برآیند امواج بازگشتی به سمت رادار می‌تواند در یک باند فرکانسی وسیعی در اطراف فرکانس تشدید آنتن کمینه شود. همچنین برای حفظ مشخصات امپدانس و تشعشی، موقعیت‌یابی جدیدی برای کابل تغذیه انجام می‌شود. برای اعتبارسنجی این روش، دو آرایه با و بدون شکاف، ساخته و اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری سطح مقطع راداری در حالت مونو استاتیک، کاهش حداقل ۱۰ دسی‌بل در بازه ۱/۹ تا ۱۱/۲ گیگاهرتز، تطبیق بالای ۲۵ دسی‌بل و راندمان و بهره‌ای بالاتر از ۷۵٪ و ۴/۵ دسی‌بل را نشان می‌دهد. کاهش سطح مقطع راداری برای زاویه تابشی تا حد ۳۰ درجه و در حالت بی-استاتیک در کل باند قابل رویت است.

### کلیدواژه‌ها: آنتن آرایه‌ای، سطح مقطع راداری، مونو استاتیک، تزویج متقابل.

#### ۱- مقدمه

جذب امواج برخوردی به هدف و تلف کردن آن می‌باشد [۲]. در صنایع مخابراتی و نظامی، کاهش RCS می‌تواند در دو نگرش مختلف مطرح شود: کاهش برای اهداف با حضور آنتن و بدون آنتن. تفاوت عمده در این دو نگرش، حفظ عملکرد امپدانس و تشعشی آنتن با حضور ساختار

با توسعه سریع فناوری‌های رادار گریزی و ضدرادار گریزی، تمرکز بر روی طراحی آنتن‌هایی با سطح مقطع راداری<sup>۱</sup> کم در یک باند فرکانسی وسیع جهت بهره‌برداری در سلاح‌های رادار گریز تاکتیکی نظیر: هواپیماهای جنگنده، تانک‌ها، هواپیماهای بدون سرنشین و موشک‌ها افزایش یافته است [۱]. RCS، اندازه‌گیری میزان توانایی یک هدف در بازتاب سیگنال‌های راداری در جهت گیرنده رادار بوده و به صورت نسبت چگالی توان بازتابی از هدف ( $E_s$ ) به چگالی توان برخوردی به هدف ( $E_i$ ) قابل محاسبه است. بالطبع، روش‌های بنیادی برای کاهش RCS، تغییر جهت امواج بازتابش شده از هدف جهت نرسیدن امواج به گیرنده راداری و

کاهنده RCS می‌باشد. به معنای دیگر، باید کاهش RCS هم‌زمان با حفظ شکل الگوی تشعشی، سطح بهره و راندمان تشعشی و البته تطبیق امپدانس در فرکانس تشدید اصلی آنتن باشد. در نتیجه، این نگرش، طراحی بسیار پیچیده‌تری را می‌طلبد و بالطبع باید مطالعات پارامتری و بهینه‌سازی به صورت چندجانبه و هم‌زمان صورت گرفته و تعادل مابین رفتار تشعشی و امپدانس و دامنه کمینه RCS برقرار گردد. همچنین، در جهت افزایش کارایی ساختار کاهنده RCS،

\* رایانامه نویسنده مسئول: zaker@azaruniv.ac.ir

<sup>1</sup> Radar Cross Section (RCS)

[۲۰]، ساختارهای با خاصیت فیلترینگ الکترومغناطیسی<sup>۱۱</sup> [۲۱] و یا هادی الکتریکی کامل<sup>۱۲</sup> [۲۲]. معایب این روش‌ها این است که ساختار بازتابی معمولاً بسیار بزرگ‌تر از آنتن اصلی بوده و مساحت اشغال شده نهایی بسیار بزرگ شده و در نتیجه کاربری آن را محدود می‌کند. در عین حال پهنای باند فرکانسی آنتن را نیز بسیار کاهش می‌دهد که محدودیت اضافی ایجاد می‌کند. در روش PCM، تعداد زیادی از سلول‌های واحد چرخش دهنده قطبش در اطراف آنتن تعبیه می‌شوند تا قطبش امواج بازتابشی را تغییر داده و به طور هم‌زمان RCS را در راستای گیرنده راداری برای رادار مونو استاتیک و در جهت مختلف برای رادار بای-استاتیک کاهش دهند. در مرجع [۲۳]، برای اولین بار مفهوم فراماده کدگذاری شده<sup>۱۳</sup>، پیشنهاد شده و از ساختار سلولی آرایه-ای ۱ بیتی و ۲ بیتی برای کاهش RCS استفاده کردند. سپس در مرجع [۲۴]، فرا صفحه کدگذاری شده به صورت چند بیتی برای کاربردهای تراهرتزی طراحی شدند. در مراجع [۲۵-۲۷]، دو AMC با ضرایب بازتاب ۱۸۰ درجه نسبت به هم به عنوان عناصر صفر و یک به حالت آرایه ۱ بیتی با زمینه فرا صفحه‌ای کدگذاری شده، برای کاهش RCS معرفی شدند. برای این روش‌ها، یعنی فرا صفحه مبدل قطبش و کدگذاری شده، محدودیت‌هایی از جمله افزایش اندازه کلی آنتن و وابستگی RCS به زاویه برخوردی موج ارسالی رادار و نوع قطبش،<sup>۱۴</sup> TE و<sup>۱۵</sup> TM وجود دارند.

با توجه به مباحث مذکور، مشخص است که برای کاهش RCS یک آنتن آرایه‌ای، روش‌های بسیار اندکی ارائه شده و مهم‌تر اینکه تمامی روش‌های پیشنهادی تاکنون، بسیار فضاگیر بوده و یا ضخامت مجموعه آنتنی را افزایش می‌دهند. در این مقاله، این چالش‌ها مورد هدف قرار گرفته و کاهش RCS به طور هم‌زمان در In-band و Out-band آنتن پوشش داده خواهد شد. به معنای دیگر، هدف طراحی یک کاهنده RCS در باند فرکانسی وسیع می‌باشد. در بخش بعدی، یک ساختار آرایه خطی ۲ عنصری از آنتن‌های پچ میکرواستریبی با تغذیه کابل کوکسیال ارائه می‌شود. برای طراحی یک آرایه فشرده، عناصر آرایه به هم نزدیک شده و اثر تزویج الکترومغناطیسی متقابل بین پچ‌های تشعشی نیز لحاظ می‌شود. البته فاصله بین پچ‌ها جهت کنترل امپدانس ورودی آنتن‌ها و بالطبع تطبیق امپدانس تنظیم می‌گردد. در واقع کاهش RCS با فرض وجود تزویج بالا مطالعه می‌شود که نکته جدید و حائز اهمیتی در

باید کاهش RCS در دو محدوده فرکانسی داخل باند<sup>۱</sup> تحت پوشش آنتن و خارج باند<sup>۲</sup> کاری، به طور هم‌زمان پوشش داده شود؛ بنابراین، نیاز به ساختار کاهنده RCS پهن باند فرکانسی داریم که هم‌زمان بتواند مشخصات تشعشی و امپدانس آنتن را نیز حفظ کند. در نتیجه، دستیابی به چندین هدف مذکور بر پایه یک ساختار مهندسی شده، بسیار چالش برانگیز است.

در یک دهه گذشته، روش‌های مختلفی برای کاهش RCS اهداف با و بدون آنتن ارائه شده است که می‌توان آنها را به پنج گروه مختلف تقسیم کرد که عبارت‌اند از: بهینه‌سازی شکل هدف و آنتن<sup>۳</sup> [۳]، بکارگیری مواد جاذب میکروویوی<sup>۴</sup> [۴-۷]، حذف به وسیله مهندسی فازهای بازگشتی<sup>۵</sup> [۸-۱۲]، استفاده از فراصفحه‌های مبدل قطبش (PCM)<sup>۶</sup> [۱۳-۱۵] و کدگذاری فراصفحه‌ای<sup>۷</sup> [۱۶]. روش‌های بهینه‌سازی شکل آنتن و مواد جاذب میکروویوی با اینکه ساده‌ترین رویکردها برای کاهش سطح مقطع راداری آنتن می‌باشند ولیکن دارای محدودیت‌هایی بزرگ هستند. با مهندسی شکل و اضلاع آنتن، امواج برخوردی در جهت‌های غیر از جهت تابش موج اصلی در فضا انتشار خواهند یافت که باعث کاهش RCS مونواستاتیک<sup>۸</sup> خواهد شد [۱۷]. البته این رفتار می‌تواند موجب افزایش دامنه سیگنال در حالت رادار بای‌استاتیک<sup>۹</sup> شود. همچنین بکارگیری این روش‌ها مستلزم بهینه‌شدن شکل آنتن هم به صورت الکترومغناطیسی و هم آیرودینامیکی است. از سوی دیگر طیف وسیعی از فراموادها و مواد جاذب راداری به شدت مضر و دارای هزینه‌های هنگفتی می‌باشند [۱۸]. همچنین عناصر تشدید کننده و کامپوزیت‌های پلیمری، می‌توانند به عنوان جاذب میکروویوی به کار گرفته شوند اما بهره آنتن را کاهش می‌دهند [۱۹].

اصل اساسی در روش مهندسی فاز، کنترل فاز امواج منعکس شده می‌باشد به طوری که با امواج برخوردی اولیه تداخل مخرب داشته و برآیند توان بازگشتی به سمت فرستنده اصلی کمینه گردد. بدین منظور می‌توان از ساختارهای خاص الکترومغناطیسی برای ایجاد فاز بازتابشی مورد نیاز بهره برد که نمونه‌هایی از آنها عبارت‌اند از: هادی مغناطیسی مصنوعی<sup>۱۰</sup>

<sup>1</sup> In-band

<sup>2</sup> Out-band

<sup>3</sup> Shape Optimization

<sup>4</sup> Microwave Absorbing Materials

<sup>5</sup> Phase Cancellation

<sup>6</sup> Polarization Conversion Meta-Surfaces (PCM)

<sup>7</sup> Coding Metasurfaces

<sup>8</sup> Monostatic radar

<sup>9</sup> Bistatic radar

<sup>10</sup> Artificial magnetic conductor (AMC)

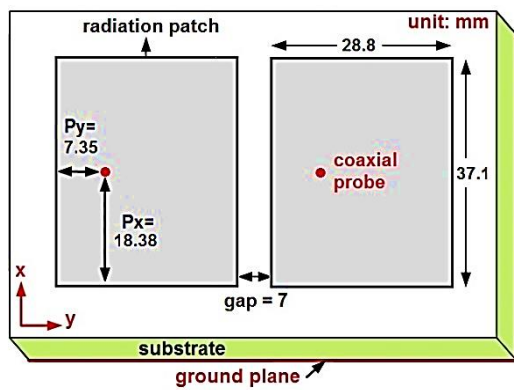
<sup>11</sup> Electromagnetic band gap (EBG)

<sup>12</sup> Perfect Electrical Conductor (PEC)

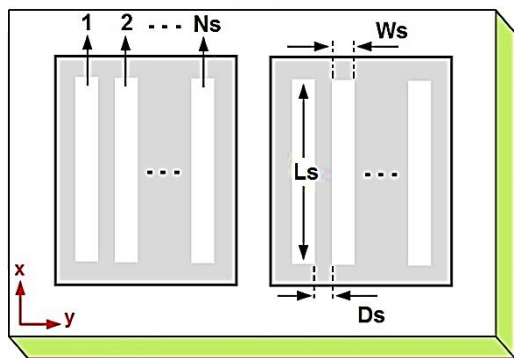
<sup>13</sup> Coding Meta-Materials

<sup>14</sup> Transverse electric (TE) polarization

<sup>15</sup> Transverse magnetic (TM) polarization



(الف)



(ب)

شکل (۱). ساختار، ابعاد و پارامترهای آنتن آرایه‌ای ارائه شده (الف) بدون شکاف‌های موازی و (ب) با حضور شکاف‌های موازی

جدول (۱). پارامترهای S آرایه بدون شکاف به‌ازای مقادیر مختلف gap

gap [mm]	۳	۷	۱۲	۱۶
$ S_{11} $ [dB]	۲۴	۳۰	۲۵	۲۶
$ S_{12} $ [dB]	۱۵	۲۴	۲۹	۳۳

ابعاد پچ در شکل (۱-الف) مشخص بوده و برای دستیابی به فرکانس تشدید در  $۲/۴$  گیگاهرتز به‌طور پارامتری بهینه شده‌اند. باید توجه شود که در این طراحی، برای حفظ پهنای باند مناسب به‌همراه قطبش متعامد<sup>۲</sup> کمتر، ابعاد پچ تشعشعی دوباره تنظیم شده‌اند. زیرلایه (عایق) استفاده شده در این طراحی، FR4 بوده که یک انتخاب متداول و کم‌هزینه و مناسب برای امور آنتنی است. این زیرلایه با ضخامت ۱ میلی‌متری دارای ثابت دی الکتریک  $۴/۴$  و تانژانت تلفات حدوداً  $۰/۰۲$  می‌باشد. قابل توجه است که صفحه زمین در این طراحی، کامل بوده و هیچ ساختاری مشابه DGS بکار برده نشده است. در تصویر (۱-الف) مشخص است که نوع آرایه خطی، چیدمان صفحه E می‌باشد که یعنی لبه‌های تشعشعی در کنار هم قرار می‌گیرند. فاصله این لبه‌ها طبق شکل با پارامتر gap تعریف شده، که برای داشتن ساختار آرایه‌ای فشرده و تطبیق امپدانس بالا برای امپدانس هر پورت ورودی، مورد مطالعه پارامتری قرار گرفته است. شایان ذکر است که

امر کاهش RCS در ساختار آرایه‌ای فشرده می‌باشد. روش جدید برای کاهش RCS، استفاده از مجموعه‌ای از شکاف‌های آرایه‌ای در بدنه هر دو پچ تشعشعی می‌باشد که منجر به ایجاد نوارهای هادی موازی هم در بدنه پچ شده و ما شاهد ایجاد مجموعه‌ای از امواج بازتابش شده با دامنه و فاز مختلف خواهیم بود. هدف اصلی، کمینه‌کردن تابع هدف است که به‌صورت دامنه مجموعه بردار امواج بازتابشی با دامنه و فاز متغیر تعریف می‌شود. با مطالعات دقیق بر روی پارامترهای کلیدی، از جمله تعداد، طول و فاصله شکاف‌ها از یکدیگر، نشان می‌دهیم که کاهش RCS حداقل به‌اندازه ۱۰ دسی‌بل در دو محدوده داخل باند فرکانسی آنتن در  $۲/۴$  گیگاهرتز و خارج باند تا فرکانس ۱۲ گیگاهرتز قابل‌دستیابی است. نتایج بهینه و بحث روی نتایج نیز ارائه می‌شود. در فرآیند طراحی، موقعیت جدیدی برای تغذیه کابل کوکسیال معرفی می‌شود تا کمترین اختلاف مابین مشخصات امپدانس و تشعشعی قبل و بعد از به‌کارگیری شکاف حاصل شود. در نهایت، دو نمونه آرایه با و بدون شکاف، ساخته شده، نتایج اندازه‌گیری مقایسه و بحث شده و مزایا و معایب مشخص می‌شود.

## ۲- ساختار و طراحی آنتن پچ آرایه‌ای میکرواستریپی

گام اول، طراحی یک آنتن آرایه‌ای می‌باشد که برای طراحی آن از یک آنتن پچ میکرواستریپی با یک‌شکل شبه مستطیلی و تغذیه کابل کوکسیال استفاده می‌شود که یک انتخاب متداول برای انواع کاربردها می‌باشد. ساختار اولیه آنتن آرایه‌ای در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. موقعیت پروب تغذیه روی هر پچ مشخص شده که بر مبنای دستیابی به بهترین تطبیق امپدانس ورودی به‌دست آمده است. قرارگیری پروب در مرکز یکی از اضلاع پچ (ضلع موازی محور  $x$ ) و بهینه‌سازی موقعیت آن در طول ضلع دیگر (ضلع موازی محور  $y$ ) منجر به ایجاد قطبش خطی می‌شود. علاوه بر این، بر اساس این نوع موقعیت‌گیری پروب و با در نظر گرفتن مختصات  $x-y$  نشان داده شده، مود تحریک و تشعشع در فرکانس تشدید غالب برابر  $TM_{01}^1$  خواهد بود که مدنظر این طراحی می‌باشد. در این مود، لبه‌های پچ موازی با محور  $x$  لبه‌های تشعشعی بوده و دارای میدان الکتریک ثابت می‌باشد. در مقابل، لبه‌های دیگر، لبه‌های غیر تشعشعی بوده و میدان الکتریکی دارای یک تغییر نصف طول موج خواهد بود [۲۸].

<sup>۲</sup> Cross polarization

<sup>۱</sup> Transverse magnetic mode

توسط میدان القایی دایپل‌ها، رخ داده و در نهایت تعداد  $2(I+Ns)$  موج بازگشتی با لحاظ شدن تزویج متقابل، از این آرایه حاصل می‌شود. برآیند این مجموعه از بازتابش‌ها را می‌توان بصورت زیر نشان داد:

$$S_{tot,r} = \left| \sum_{i=1}^{(Ns+1)} A_{r,1i} e^{jph_{r,1i}} + A_{r,2i} e^{jph_{r,2i}} \right| \quad (1)$$

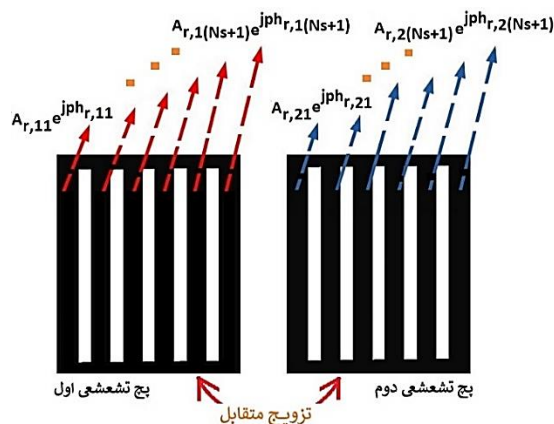
هدف اصلی در این طراحی، کاهش تاحدامکان  $S_{tot,r}$  یا همان دامنه توان بازگشتی  $E_s$  بوده تا در نهایت پارامتر RCS کمینه شود. قطعاً این هدف، با بهینه‌سازی مشخصات شکاف‌ها انجام می‌شود. نکته مهمی که در مرحله طراحی باید به آن اشاره کنیم این است که رفتار تشعشعی بازتابشی مربوط به دایپل‌های معادلی که در بدنه پچ‌ها بعد از اضافه شدن شکاف‌ها، تشکیل شده و بهم متصل شده‌اند، می‌تواند براساس ضریب آرایه<sup>۱</sup> آن مجموعه دایپل باشد. به معنای دیگر، دو پارامتر  $Ws$  و  $Ds$  می‌توانند نقش فاصله عناصر آرایه را بازی کرده و بنابراین، براساس نظریه تحلیل آرایه با AF، به‌طور قابل ملاحظه‌ای بر روی دامنه موج بازگشتی اثر بگذارند. مشابه همین تفسیر را می‌توان برای پارامترهای تعداد و طول شکاف استفاده کرد. در ادامه، RCS آرایه آنتنی با و بدون شکاف‌ها با یکدیگر مقایسه شده، مطالعه کاملی بر روی پارامترهای کلیدی مورد نظر در یک بازه منطقی، انجام شده و در نهایت مقادیر بهینه تعیین می‌شود. قابل ذکر است که در فرآیند شبیه‌سازی، نوع قطبش ارسالی، موج موازی محور  $x$  است.

امپدانس ورودی هر پورت در این حالت آرایه‌ای را می‌توان بصورت رابطه  $Z_{in} = Z_{Re} + jZ_{Im}$  نشان داد که در آن،  $Z_{Im}$  تابع بخش موهومی امپدانس تک پچ تشعشعی بصورت مستقل (یعنی  $\{Im\{Z_{11}\}$ ) و مقدار معادل تزویج الکترومغناطیسی مابین دو پچ (یعنی  $Z_{12}$ ) می‌باشد. این تزویج نیز تابعیت شدید به فاصله پچ‌ها یعنی gap دارد. نتایج مطالعه روی gap در جدول (۱)، نشان می‌دهد که بهترین انتخاب در حدود ۷ میلی‌متر (یعنی حدود  $0.056\lambda_0$  در فرکانس تشدید  $2/4$  گیگاهرتز) می‌باشد. در این حالت، فاصله مراکز پچ‌ها از یکدیگر در حدود  $0.28\lambda_0$  بوده که کوچکتر از فاصله متداول یعنی نصف طول موج است. بنابراین، آرایه آنتنی فشرده‌تری طراحی شده است. علاوه بر این، میزان تزویج متقابل بین پچ‌ها برابر با ۲۴ دسی بل است که مقدار بالایی نبوده و خللی در عملکرد آرایه ایجاد نمی‌کند ولی در عین حال، این تزویج در فرآیند کاهش RCS دخالت داده خواهد شد.

ساختار آرایه‌ای پیشنهاد شده جهت کاهش RCS در شکل (۱-ب) ارائه شده است. در روش پیشنهادی، آرایه‌ای از شکاف‌های موازی یکدیگر و موازی محور  $x$  به تعداد  $Ns$ ، به طول  $L_s$  و عرض  $Ws$  در بدنه پچ‌ها تعبیه می‌شود. فاصله شکاف‌ها نیز  $Ds$  تعریف می‌شود که همگی این پارامترها موثر بوده و در بخش‌های بعدی بصورت پارامتری آنالیز شده، اثرات بر روی نمودارهای RCS ارائه شده و مقادیر بهینه پارامترها تعیین خواهد شد.

### ۳- تشریح تئوری جدید برای کاهش RCS و طراحی

همان‌طور که در بخش قبلی و بر اساس شکل (۱-ب) تشریح شد، روش پیشنهادی برای کاهش RCS، تعبیه شکاف‌های موازی در بدنه پچ‌ها می‌باشد. اگر در شکل (۲) دقت کنیم، در این روش، هر پچ به تعداد  $Ns$  بعلاوه ۱ دایپل موازی محور  $x$  و بسیار نزدیک بهم تبدیل می‌شود که از دو انتها به یکدیگر متصل شده‌اند. در این حالت واضح است که در هنگام برخورد موج ارسالی عمود بر پچ‌ها و با قطبش موازی با محور  $x$ ، هر کدام از این دایپل‌ها موج برگشتی مستقل خود را با دامنه و فاز مستقل در راستای گیرنده رادار برای حالت مونواستاتیک ایجاد می‌کنند. بنابراین ما شاهد مجموعه‌ای از امواج بازگشتی به سمت رادار با دامنه و فاز متغیر خواهیم بود که قطعاً ابعاد شکاف‌ها و فاصله بینشان، روی آنها تاثیر به‌سزایی خواهد داشت. با توجه به شکل (۲) و بالفرض برای پچ تشعشعی اول، دامنه و فاز بازتابی را به ترتیب با پارامترهای  $A_{r,1}$  و  $ph_{r,1}$  تعریف می‌کنیم. اندیس دوم تعریف شده در کنار عدد ۱ نیز شماره دایپل را از عدد ۱ تا  $1+Ns$  برای هر پچ نشان می‌دهد. باید توجه داشته باشیم که در این تئوری، بعد از برخورد موج مسطح ارسالی توسط رادار روی پچ‌ها، تزویج متقابل بین پچ‌ها



شکل (۲). مجموعه امواج بازتابشی از پچ‌های شکافدار تزویج شده

### ۴- مطالعات پارامتری، بهینه‌یابی و بحث روی نتایج

برای کل شبیه‌سازی‌ها و مطالعات پارامتری، از نرم‌افزار Ansys HFSS (نسخه ۱۵) در حالت تمام موج استفاده کرده‌ایم. در گام اول و قبل از آنالیز پارامتری، نمودارهای امپدانس یعنی  $S_{11}$  و  $S_{21}$

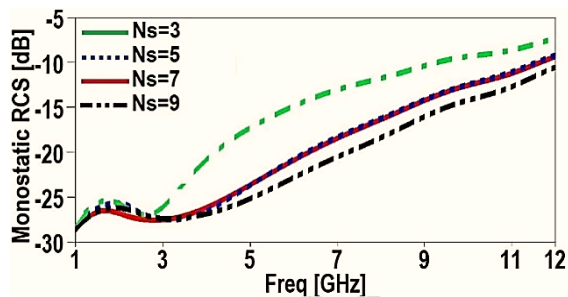
<sup>1</sup> Array Factor (AF)

پوشش می‌دهد. این مشخصات، مزایای اصلی روش پیشنهادی در این مقاله می‌باشند.

در این مرحله، چهار پارامتر کلیدی آرایه شکاف‌ها،  $Ls$ ،  $Ns$ ،  $Ws$  و  $Ds$  به ترتیب مطالعه پارامتری می‌شوند تا بهترین مقادیر میزان تأثیرگذاری آنها بر روی RCS را تعیین کنیم. مقادیر بهینه این پارامترها در جدول (۲) ارائه شده است. باید خاطرنشان کنیم که در فرآیند مطالعات پارامتری، پارامتر موردنظر در بازه فیزیکی منطقی خود بر اساس ساختار پیچ‌ها و ابعاد آنها تغییر کرده و دیگر پارامترها در مقدار بهینه خود ثابت فرض می‌شوند. شکل (۴) نمودار RCS مونو استاتیک را به‌ازای مقادیر مختلف  $Ns$  و به‌ازای تابش عمود بر پیچ‌ها نشان می‌دهد. این مطالعه مشخص می‌کند که ایجاد شکاف در بدنه پیچ‌ها باعث کاهش چشمگیر RCS شده و با افزایش تعداد شکاف‌ها، محدوده فرکانسی ۳ تا ۱۱ گیگاهرتز، بیشتر پوشش داده می‌شوند. مقدار بهینه تعداد شکاف‌ها در این حالت ۹ انتخاب می‌شود که مساحت اشغال شده آنها از فضای کلی یک پیچ فراتر نرود.

جدول (۲). مقادیر بهینه پارامترهای شکاف‌ها در آرایه ثانویه

پارامتر	$Ns$	$Ls$	$Ws$	$Ds$
مقدار	۹	۳۲Mm	۱/۳mm	۲mm

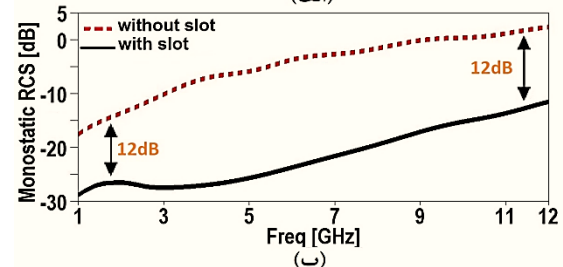
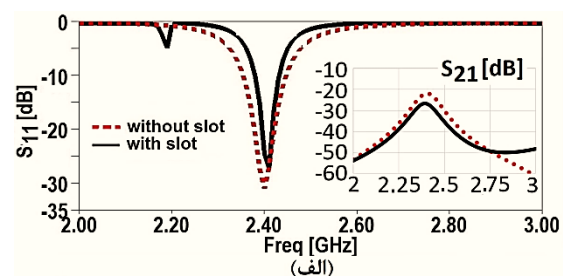


شکل (۴). نمودار RCS مونواستاتیک آرایه آنتنی با پیچ‌های شکافدار در حالت شبیه‌سازی بازای مقادیر مختلف  $Ns$

مطالعه پارامتری بر روی  $Ls$  در شکل (۵) نشان می‌دهد که برخلاف تعداد شکاف‌ها، طول شکاف‌ها به طور مستقیم بر روی دامنه RCS در بازه فرکانسی میانی و پایین تأثیرگذار است. مشخص است که با افزایش طول شکاف‌ها، RCS به طور قابل‌توجهی افت کرده و این کاهش به طور آشکار در اطراف فرکانس ۲/۸ گیگاهرتز حاصل شده است؛ بنابراین، این پارامتر، پارامتری بسیار اساسی در کنترل دامنه RCS در محدوده فرکانسی داخل باند محسوب می‌شود. مقدار بهینه، ۳۲ میلی‌متر است که از طول پیچ کوتاه‌تر است.

در شکل (۶)، عرض شکاف‌ها مطالعه می‌شود. نتایج مشخص می‌کند که این پارامتر صرفاً روی باند بالا تأثیر گذار بوده و محدوده فرکانسی ۶ تا ۱۱ گیگاهرتز تحت پوشش است. البته کاهش RCS

و RCS مونو استاتیک در حالت بهینه و برای دو حالت از آرایه، با و بدون شکاف‌های موازی در شکل (۳-الف و ب) ارائه می‌شود. در شکل (الف) مشخص است که محل رزونانس در دو حالت آرایه با و بدون شکاف تقریباً ثابت مانده و حوالی ۲/۴ گیگاهرتز است. البته تطبیق امیدانسی با حضور شکاف در حدود ۳ دسی‌بل و پهنای باند در حد ۲ درصد تضعیف شده که قابل‌اغماض است. باید خاطرنشان کنیم که بعد از تعبیه‌شدن شکاف‌ها بر روی پیچ‌ها، رزونانس آنها به طور هم‌زمان تغییر می‌کند که با انجام یک مطالعه پارامتری دقیق بر روی موقعیت تغذیه، یعنی  $Px$  و  $Py$  (طبق شکل (۱-الف))، مقادیر جدید آنها جهت بازگرداندن فرکانس رزونانس به موقعیت قبلی، حفظ تطبیق امیدانسی و مشخصات تشعشعی، تعیین گردیدند.



شکل (۳). (الف) نمودار  $S_{11}$  و  $S_{21}$  و (ب) RCS مونواستاتیک برای آرایه‌های با و بدون شکاف (slot) در حالت شبیه‌سازی

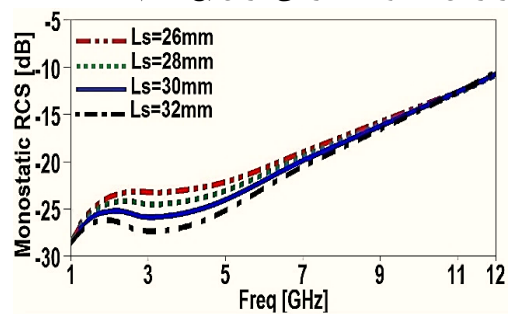
مقادیر بهینه به ترتیب برابر با ۱۸/۳۸ و ۱/۹ میلی‌متر برای  $Px$  و  $Py$  می‌باشد که نتیجه  $S_{11}$  و  $S_{21}$  آرایه بعد از اضافه شدن شکاف‌ها در شکل (۳-الف)، بر اساس این مقادیر حاصل شده است. نمودار تزویج متقابل نیز نشان می‌دهد که اندکی کاهش در دامنه  $S_{21}$ ، بعد از اضافه شدن شکاف مشهود است. براساس شکل (ب) و بازای تابش عمود بر پیچ‌ها، دامنه RCS مونواستاتیک با حضور شکاف‌ها، باندازه قابل‌توجهی کاهش یافته و این کاهش در بازه ۲ تا ۹ گیگاهرتز بیشتر از ۱۵ دسی‌بل است. همچنین در بازه فرکانسی ۱/۵ تا ۱۱ گیگاهرتز، حداقل کاهش ۱۲ دسی‌بل را برای RCS مونواستاتیک شاهد هستیم که نه تنها اطراف فرکانس تشدید را پوشش می‌دهد بلکه تا هارمونیک چهارم را نیز لحاظ می‌کند. این نتیجه نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای کاهش RCS، دارای رفتار پهن باند فرکانسی بوده و نه تنها کیفیت بالایی در کاهش RCS دارد، بلکه داخل و خارج باند موردنظر را بخوبی

بعد از مطالعه پارامتری، اثر زوایای مختلف تابش موج ارسالی بر روی نمودار RCS مونو استاتیک بررسی می‌شود. در این مطالعه، زاویه برخوردی به سطح آرایه ( $\theta_{inc}$ ) از حالت عمود بر سطح آرایه (یعنی صفر درجه) تا میزان ۴۵ درجه تغییر می‌کند تا توانایی ساختار در کاهش RCS در کل باند برای زوایای مختلف مشخص شود. نتایج در شکل (۸) مشخص است. روشن است که با افزایش زاویه یا کج تابیدن موج، میزان کاهش RCS کاهش یافته و در زاویه ۴۵ درجه، کاهش حداقل ۱۰ دسی‌بل صرفاً در محدوده ۲/۵ تا ۴ گیگاهرتز قابل حصول است. باتوجه به این نمودارها، می‌توان نتیجه گرفت که ساختار پیشنهادی می‌تواند تا حداکثر ۳۰ درجه موج برخوردی، کاهش قابل توجه و پهن باند RCS را حفظ نماید.

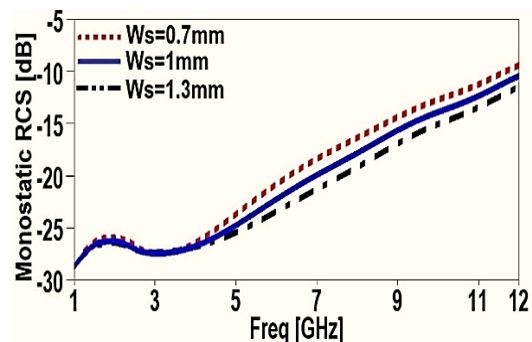
در ادامه، RCS بای‌استاتیک ساختار ارائه شده در ۳ فرکانس مختلف برای حالت آرایه با و بدون شکاف مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج این شبیه‌سازی در فرکانس‌های مود اصلی و دو هارمونیک آن در شکل (۹) ارائه شده است. میزان کاهش RCS بای‌استاتیک در هر ۳ فرکانس مشهود است که نشان‌دهنده رفتار پهن باند فرکانسی این ساختار است. البته با تمرکز در محدوده زاویه منفی ۳۰ تا مثبت ۳۰ درجه و در هر ۳ فرکانس، مشخص می‌شود که کاهش قابل توجه RCS صرفاً در این محدوده زاویه‌ای به دست آمده و در انحراف بیشتر، کاهش قابل توجه نیست.

در این مرحله مشخصات تشعشی آرایه نهایی در مقایسه با آرایه اولیه بدون شکافها ارائه می‌شود. هدف از این مقایسه، مشخص کردن میزان تأثیرگذاری شکافها بر روی پارامترهای تشعشی است تا میزان تخریب معین شود. الگوی تشعشی آرایه آنتنی بهینه برای هر دو صفحه  $x-z$  و  $y-z$  در شکل (۱۰) نشان داده شده است. میزان تخریب روی مؤلفه قطبش اصلی (CO-pol.) پایین بوده و اندکی عرض بیم نصف توان با حضور شکافها افزایش یافته است بخصوص در صفحه  $y-z$  که در آن نمایش، شکافها به صورت آرایه قرار گرفته‌اند. همچنین تشعشع به اطراف نیز اندکی افزایش یافته است یا به معنای دیگر همه جهته‌تر شده است. تخریبی که کاملاً مشخص است بر روی مؤلفه قطبش متعامد (cross-pol. یا X-pol.) به وقوع پیوسته است. در هر دو صفحه، این مؤلفه قطبشی اندکی افزایش یافته و در نتیجه منجر به کاهش خلوص قطبش<sup>۱</sup> شده است. بر اساس شکل (۱۱)، با اضافه شدن شکافها، بهره تشعشی<sup>۲</sup> تحقق‌ی و راندمان به ترتیب ۱ دسی‌بل و ۶ درصد کاهش یافته است. مشخص است که آرایه بهینه با حضور شکاف، حداقل ۴/۵ دسی‌بل بهره و راندمانی بالاتر از ۷۵ درصد دارد.

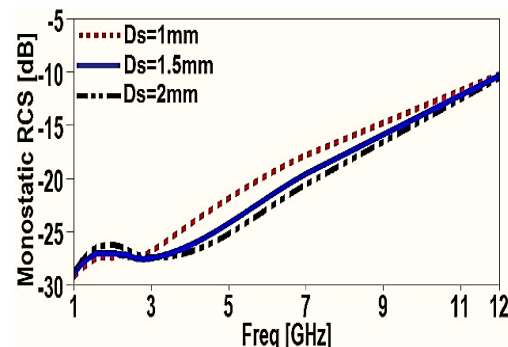
خیلی مشهود نیست و بیشینه افتی در حد ۵ دسی‌بل اطراف ۷ گیگاهرتز را شاهد هستیم. بهینه مقدار این پارامتر ۱/۳ میلی‌متر انتخاب شده تا با توجه به تعداد شکافها و فاصله بینشان، عرض بیشتری از عرض پچ (یعنی ۲۸/۸ میلی‌متر) را اشغال نکند. پارامتر کلیدی نهایی،  $Ds$  است که نتایج مطالعه آن در شکل (۷) ارائه شده است. بر اساس نتایج، فاصله شکافها بیشتر در باند میانی در محدوده ۳ تا ۹ گیگاهرتز می‌تواند بر روی RCS اثر بگذارد. در اطراف ۵ گیگاهرتز که هارمونیک دوم رزونانس اصلی ما می‌باشد، بیشینه افتی معادل ۶ دسی‌بل را شاهد هستیم. بهینه مقدار انتخاب شده ۲ میلی‌متر می‌باشد که دوباره این انتخاب با در نظر گرفتن محدودیت فیزیکی عرض پچ انجام شده است.



شکل (۵). نمودار RCS مونواستاتیک آرایه آنتنی با پچ‌های شکافدار در حالت شبیه‌سازی بازای مقادیر مختلف  $Ls$



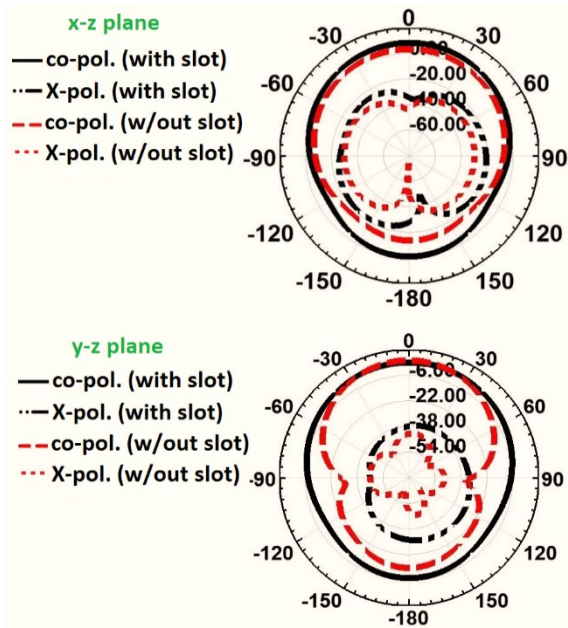
شکل (۶). نمودار RCS مونواستاتیک آرایه آنتنی با پچ‌های شکافدار در حالت شبیه‌سازی بازای مقادیر مختلف  $Ws$



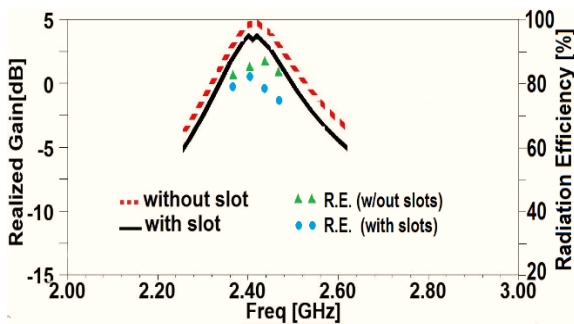
شکل (۷). نمودار RCS مونواستاتیک آرایه آنتنی با پچ‌های شکافدار در حالت شبیه‌سازی بازای مقادیر مختلف  $Ds$

<sup>۱</sup> Polarization Purity (co-pol./X-pol.)

<sup>۲</sup> Realized Gain



شکل (۱۰). الگوی تشعشعی آنتن آرایه‌ای بهینه در حالات با و بدون شکاف‌ها در حالت شبیه‌سازی برای هر دو صفحه  $x-z$  و  $y-z$

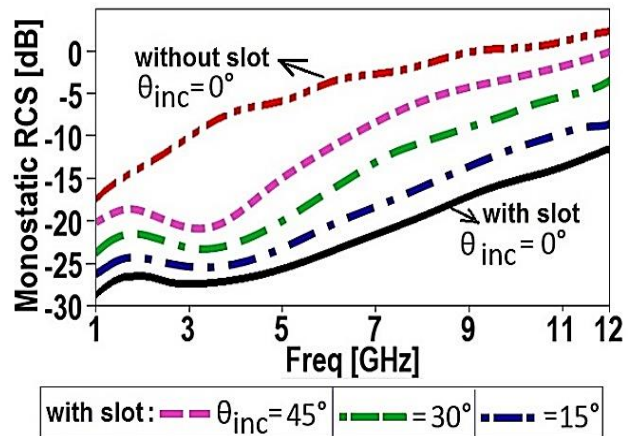


شکل (۱۱). بهره تحقیقی و راندمان تشعشعی آرایه بهینه با و بدون شکاف در حال شبیه‌سازی

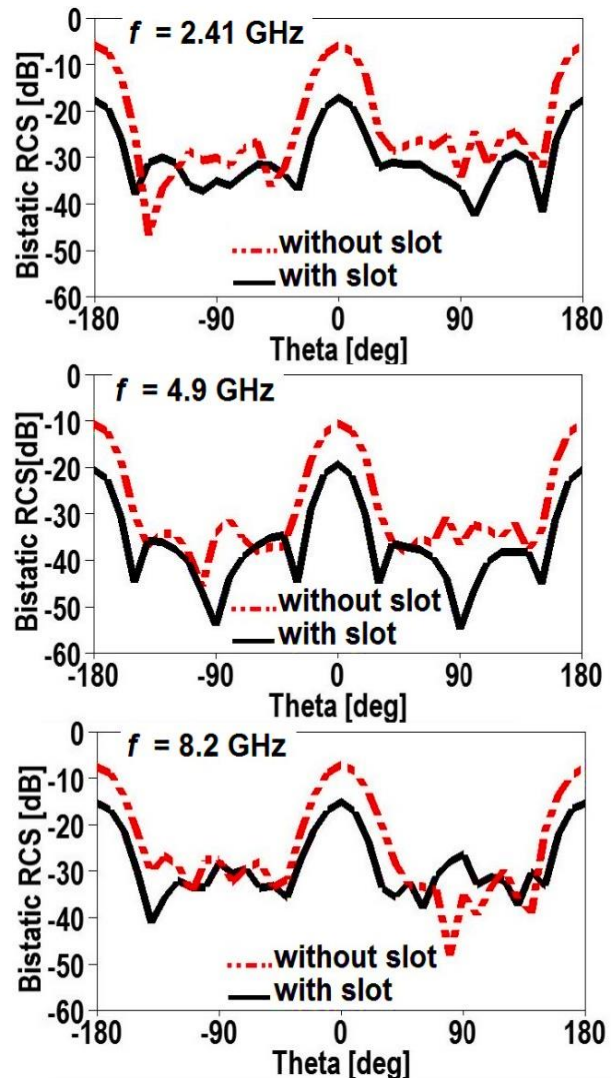
متذکر می‌شویم که دلیل استفاده از بهره تحقیقی این است که این پارامتر می‌تواند تطبیق امپدانسی ورودی هر پورت تغذیه (یا ضریب انعکاس) را نیز در محاسبه بهره نهایی لحاظ کند و بنابراین، نتایج به واقعیت نزدیک‌تر خواهد شد.

### ۵- ساخت آرایه‌های آنتنی بهینه، اندازه‌گیری و نتایج

در این بخش، دو نمونه آرایه آنتنی دو عنصری با ابعاد بهینه شده، ساخته و اندازه‌گیری می‌شود. شکل (۱۲-الف) تصویر آرایه اولیه بدون شکاف را نشان می‌دهد. آرایه نهایی با پیچ‌های تشعشعی شکاف‌دار در شکل (۱۲-ب) ارائه شده است. برای ساخت، از دو اتصال دهنده SMA<sup>۱</sup> کوچک استفاده شده و پروب آن از داخل عایق عبور داده شده و طبق شکل در روی پیچ به آن لحیم شده است.



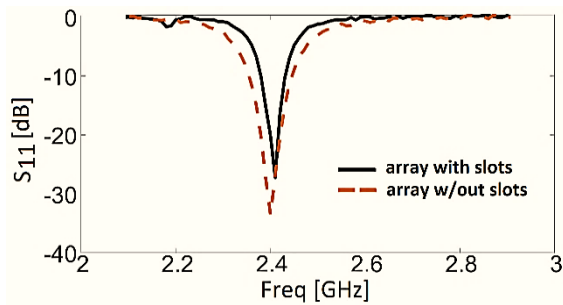
شکل (۸). نمودار RCS مونواستاتیک برای آرایه‌های با و بدون شکاف در حالت شبیه‌سازی بازای زوایای برخوردی مختلف ( $\theta_{inc}$ )



شکل (۹). نمودار RCS بای‌استاتیک آرایه‌های با و بدون شکاف در حالت شبیه‌سازی در ۳ فرکانس مختلف، ۲/۴۱، ۴/۹ و ۸/۲ گیگاهرتز.

<sup>۱</sup> SMA connector





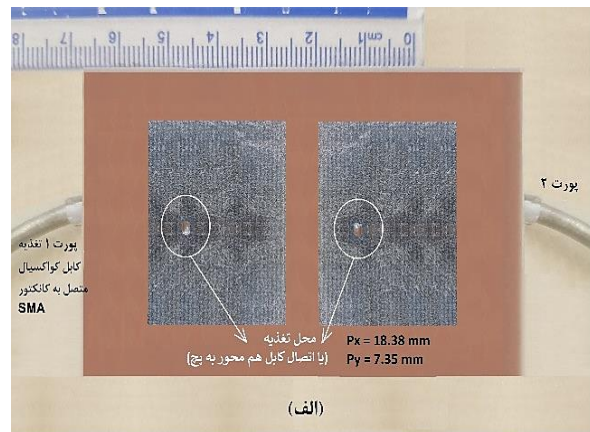
شکل (۱۳).  $S_{11}$  اندازه‌گیری شده برای آرایه‌های با و بدون شکاف

جدول (۳). مقایسه پارامترهای امپدانس اندازه‌گیری شده دو آرایه در حالت با و بدون شکاف

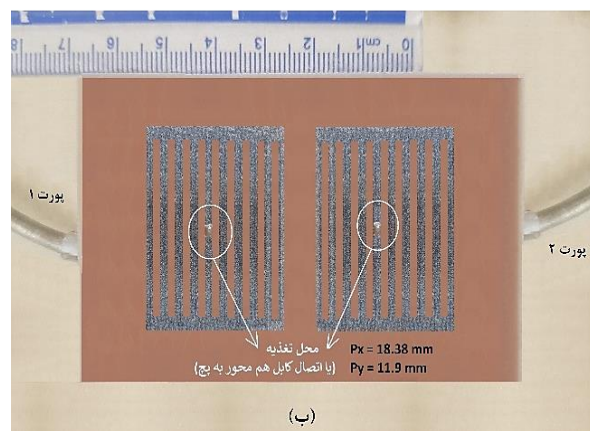
پارامترها	بدون شکاف	با شکاف
فرکانس تشدید (معادل با بهترین تطبیق امپدانس) [GHz]	۲/۴	۲/۴۱
محدوده [GHz] و پهنای باند امپدانس با معیار $ S_{11}  \geq 10 \text{ dB}$	۲/۳۷ - ۲/۴۳	۲/۳۸ - ۲/۴۲
دامنه تطبیق $ S_{11} $ [dB]	۳۲	۲۶

همچنین طبق انتظار بعد از به‌کارگیری شکاف، پهنای باند فرکانسی بر اساس معیار  $|S_{11}| \geq 10 \text{ dB}$  اندکی کاهش یافته است. تطبیق امپدانس در هر دو حالت مناسب بوده و بالای ۲۶ دسی‌بل می‌باشد. باید توجه داشته باشیم که در این اندازه‌گیری، پورت دوم با بار ۵۰ اهمی تطبیق یافته است. برای انجام مقایسه دقیق‌تر، مقادیر دقیق پارامترهای امپدانس در جدول (۳) جمع‌آوری شده و تخریب‌های حاصل شده قابل اغماض هستند. شکل (۱۴) نمودار RCS مونواسانتیک آرایه‌های ساخته شده با و بدون شکاف را برای حالت اندازه‌گیری در مقایسه با شبیه‌سازی نشان می‌دهد. در نگاه اول، روشن است که تطابق قابل قبولی مابین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری وجود دارد. البته که دامنه RCS برای آرایه با شکاف در حالت اندازه‌گیری کمی افزایش یافته است، ولی کماکان کاهش حداقل ۱۰ دسی‌بل را در یک باند وسیع نشان می‌دهد. براساس شکل (۱۴)، در محدوده ۱/۹ گیگاهرتز تا ۱۱/۲ گیگاهرتز، حداقل کاهش ۱۰ دسی‌بل را نسبت به RCS آرایه اولیه بدون شکاف شاهد هستیم. بیشترین کاهش RCS نیز در محدوده ۲/۵ تا ۹ گیگاهرتز حاصل شده است که حداقل ۱۵ دسی‌بل را پوشش می‌دهد.

در گام آخر، مشخصات کلیدی طرح پیشنهادی با چندین مقاله جدید مقایسه می‌شود که نتایج در جدول (۴) جمع‌آوری شده است. این داده‌ها کاملاً مشخص می‌کند که در مقایسه با نمونه‌های مشابه، ساختار ارائه شده در این مقاله دارای اندازه و ضخامت پایین‌تر بوده و پهنای باند RCS کاهش یافته آن، بالاتر است. می‌توان نتیجه گرفت که طراحی پیشنهاد شده دارای



(الف)



(ب)

شکل (۱۲). تصاویر نمونه آرایه‌های آنتنی ساخته شده، (الف) بدون شکافها (نمونه اولیه) و (ب) با شکافها (نمونه بهینه نهایی) از عایق خانواده FR4-Epoxy با ضخامت ۱ میلی‌متر، مساحت حدودی ۵۰ در ۹۰ میلی‌متر مربع و ثابت دی‌الکتریک حدود ۴/۴ برای هر دو نمونه استفاده شده است. همچنین برای اندازه‌گیری پارامترهای S آرایه از تحلیل‌گر شبکه<sup>۱</sup> ZVA-67 استفاده شده است. قبل از اندازه‌گیری، کالیبراسیون دقیقی در باند فرکانسی ۲ تا ۱۲ گیگاهرتز انجام شده است. برای اندازه‌گیری پارامتر RCS، از یک محفظه جاذب الکترومغناطیسی با استاندارد تست میدان راه نزدیک و البته با حفظ نسبی قیود میدان راه دور استفاده شده است. یک آنتن بوقی استاندارد<sup>۲</sup> نیز با بهره تقریباً ثابت در باند فرکانسی مذکور، برای اندازه‌گیری دامنه موج مونواسانتیک بازگشتی از سطح آرایه‌ها استفاده شده است. برای ایجاد چیدمان اندازه‌گیری توان بازگشتی مونواسانتیک و در نتیجه دامنه RCS در راستای عمود بر سطوح بیچها، از دو آنتن بوقی هم‌جوار هم در یک فاصله یکسان نسبت به سطح آرایه‌ها استفاده می‌کنیم. هر دو آنتن استاندارد با بهره ثابت هستند.

نمودار  $S_{11}$  آرایه‌های ساخته شده با و بدون شکاف در شکل (۱۳) ارائه شده است. مشاهده می‌کنیم که محل فرکانس تشدید بعد از حضور شکافها، کمی به فرکانس بالاتر حرکت کرده است.

<sup>1</sup> Network Analyzer  
<sup>2</sup> Standard Horn Antenna

### ۶- نتیجه‌گیری

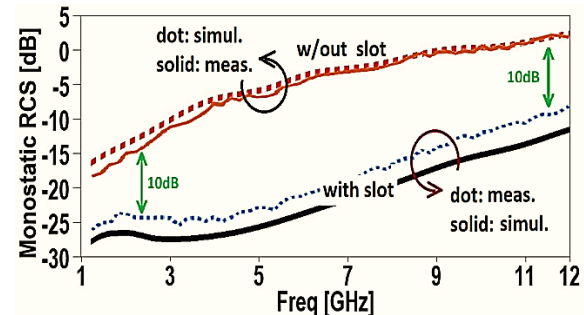
در این مقاله، یک آرایه آنتنی دو عنصری خطی با ساختار چاپی ارائه شد که دارای قابلیت کاهش RCS در یک باند فرکانسی بسیار وسیع بود. به مفهوم دیگر، نه تنها بازه فرکانسی اطراف رزونانس اصلی در ۲/۴ گیگاهرتز پوشش داده شد، بلکه همچنین تا حدود بالاتر از ۱۱ گیگاهرتز نیز کاهش قابل توجه سطح مقطع راداری مشاهده شد. این بدان معناست که روش پیشنهادی هم داخل و هم خارج باند را تا حد هارمونیک چهارم پوشش می‌دهد و کاهش حاصل شده برای RCS حداقل ۱۰ دسی‌بل است. این مشخصه یکی از نوآوری‌های مطرح شده در این مقاله است.

روش پیشنهادی برعکس اکثریت روش‌های متداول، فضاگیر نبوده و یا حجم ساختار آرایه را افزایش نمی‌دهد. این مشخصه نیز یکی دیگر از ویژگی‌های جالب طراحی پیشنهاد شده می‌باشد. در روش ارائه شده در این مقاله، آرایه‌ای از شکاف‌های باریک و موازی هم در بدنه پیچ‌ها تعبیه شده و نشان داده شد که از این طریق مجموعه‌ای از امواج با دامنه و فاز متغیر و قابل کنترل از سطح پیچ‌ها بازتابش می‌یابند. توانستیم با بهینه‌سازی ابعاد و موقعیت شکاف‌ها، برآیند کل امواج بازگشتی را کمینه کنیم و در نتیجه RCS را نسبت به دو پیچ آرایه‌ای اولیه، به طور قابل توجهی کاهش دهیم. اثبات این مورد از طریق مطالعات پارامتری کامل بر روی ۴ پارامتر کلیدی انجام شد. نکته حائز اهمیت، پوشش‌دادن تزویج متقابل بین پیچ‌های نزدیک به هم بود که در فرآیند کاهش RCS دخالت داده شد. این مورد، جدید و چالش‌برانگیز است بخصوص برای آرایه‌های فشرده. البته باید اضافه کرد که در طراحی آرایه‌های بزرگ‌تر که تزویج متقابل پیچیده‌تر می‌شود و مبحث نحوه طراحی شبکه تغذیه اهمیت پیدا می‌کند، می‌توان شبکه تغذیه را در طرف دیگر صفحه زمین تعبیه کرده و توسط پروب کابل کوکسیال، پیچ‌ها را تغذیه کرد؛ بنابراین، دوباره می‌توان با کنترل پارامترهای شکاف‌ها به طور مستقل در هر پیچ، دامنه برآیند امواج بازگشتی را کمینه کرد.

نتایج اندازه‌گیری دو آرایه ساخته شده با و بدون شکاف‌ها، اثبات کرد که روش پیشنهادی می‌تواند بازه فرکانسی وسیعی از حدود ۲ تا ۱۱ گیگاهرتز را با حداقل ۱۰ دسی‌بل کاهش برای RCS، با تخریب جزئی روی مشخصات امپدانس و تشعشعی پوشش دهد.

همچنین مشاهده کردیم که این کاهش RCS تا حداکثر زاویه انحراف ۳۰ درجه برای موج تابشی می‌تواند حفظ شود. نمودارهای RCS بای‌استاتیک نیز در ۳ فرکانس داخل باند مطالعه شده و کاهش آن مشاهده شد.

پیچیدگی کمتری بوده و ساخت آسان‌تری دارد. البته که باید خاطر نشان کرد



شکل (۱۴). RCS مونواستاتیک برای دو آرایه بهینه ساخته شده در حالت مقایسه شبیه‌سازی با اندازه‌گیری

جدول (۴). مقایسه طرح آرایه‌ای پیشنهادی با کارهای مشابه جدید

مرجع چیدما ن	روش کاهش RCS	پیچیدگی طراحی	ابعاد $[\lambda_0^2]$ ضخامت $[\lambda_0]$	پهنای باند RCS کاهش‌یافته
[۱] ۳×۳	FSS- جاذب فراماده	بالا	۰/۰۵ ۰/۱۵	۱۱/۳ GHz - ٪ ۲۰۰
[۸] ۴×۴	پیچ‌های غیریکسان	متوسط	۴ ۰/۱۰	۸ GHz - ٪ ۶۷
[۹] ۲×۴	شیفتر فازی و کنترل فاز بازگشتی	بالا	-- --	۱۰/۰۴-۰/۹۶ GHz ٪ ۸
[۱۶] ۸×۸	کدگذاری فرا صفحه‌ای	متوسط	۱۶ ۸/۳	۶ GHz-۴/۴ ٪ ۳۱
[۲۱] ۲×۲	تغییر قطبش	متوسط	۳/۲۷ ۰/۰۵	۵/۸-۴/۷ GHz ٪ ۲۱
این کار	پیچ‌های شکاف‌دار	پایین	۰/۲۸۸ ۰/۰۰۸	۱۱ GHz-۲ ٪ ۱۳۸

که ساختارهای دیگر انتخاب شده در جدول، دارای تعداد عناصر بالاتری بوده و مقایسه بر اساس سایز کلی خیلی منطقی نیست. ولیکن ضخامت طرح پیشنهاد شده پایین‌تر است. نکته حائز اهمیت این است که روش ارائه شده نه فضای اشغال شده را افزایش می‌دهد و نه ضخامت کلی آرایه را و همچنین از عناصر اضافی جهت کاهش RCS استفاده نمی‌کند. عدم تخریب مشخصات امپدانس و تشعشعی نیز در بخش‌های قبلی مشخص شد که بسیار اهمیت دارد. در نهایت باید متذکر شویم که طرح ارائه شده نمی‌تواند امواج ارسالی برای هر دو قطبش موازی محورهای  $x$  و  $y$  را پوشش دهد که محدودیت طرح محسوب می‌شود. بر اساس راستای شکاف‌ها، صرفاً قطبش موازی محور  $x$  پوشش داده می‌شود.

- [8] Y. Liu, Y. Jia, W. Zhang, Y. Wang, S. Gong, and G. Liao, "An integrated radiation and scattering performance design method of low-RCS patch antenna array with different antenna elements," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 67, no. 9, pp. 6199-6204, 2019. DOI: 10.1109/TAP.2019.2925194
- [9] N. Nakamoto, T. Takahashi, T. Fukasawa, N. Yoneda and H. Miyashita, "RCS synthesis of array antenna with circulators and phase shifters and measurement method for deterministic RCS reduction," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 69, no. 1, pp. 135-145, 2021. DOI: 10.1109/TAP.2020.3008627
- [10] M. Pazokian, N. Komjani and M. Karimipour, "Broadband RCS reduction of microstrip antenna using coding frequency selective surface," *IEEE Antennas and Wire. Propag. Letters*, vol. 17, no. 8, pp. 1382-1385, 2018. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2846613
- [11] R. Zaker and A. Sadeghzadeh, "Wideband radar cross section reduction using a novel design of artificial magnetic conductor structure with a triple-layer chessboard configuration", *Int. J. RF Microwave Computer-Aided Eng.*, vol. 29, no. 2, Feb. 2019. DOI: 10.1002/mmce.21545
- [12] R. Zaker and A. Sadeghzadeh, "Double-layer ultra-thin artificial magnetic conductor structure for wideband radar cross-section reduction", *IET Microwave Antennas Propag.*, vol. 12, no. 9, pp. 1601-1607, Jul. 2018. DOI:10.1049/iet-map.2017.1019
- [13] J. Yu, W. Jiang, and S. Gong, "Low-RCS beam-steering antenna based on reconfigurable phase gradient metasurface," *IEEE Antennas and Wire. Propag. Letters*, vol. 18, no. 10, pp. 2016-2020, 2019. DOI: 1109/LAWP.2019.2936300
- [14] Y. Fan, J. F. Wang, Y. F. Li, J. Q. Zhang, Y. Q. Pang, Y. J. Han, S. B. Qu, "Low-RCS multi-beam metasurface-inspired antenna based on Pancharatnam-Berry phase," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 1899-1906, 2020. DOI: 10.1109/TAP.2019.2929573
- [15] R. Zaker and A. Sadeghzadeh, "A Low-Profile Design of Polarization Rotation Reflective Surface for Wideband RCS Reduction," *IEEE Antennas and Wire. Propag. Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 1794-1798, Sept. 2019. DOI: 10.1109/LAWP.2019.2930130
- [16] Y. Liu, W. Zhang, Y. Jia, and A. Wu, "Low RCS antenna array with reconfigurable scattering patterns based on digital antenna units," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 69, no. 1, pp. 572-577, 2021. DOI: 10.1109/TAP.2020.3004993
- [17] W. He, X. L. Weng, W. Luo, H. Y. Chen, X. Y. Wu, K. Li, Y. Huang, B.P. Liu, and L. Li, "Investigation of radar cross section reduction for dihedral corner reflectors based on camouflage grass," *IEEE Antennas and Wire. Propag. Letters*, vol.20, no.12, pp. 2447-2451, 2021. DOI: 10.1109/LAWP.2021.3114302
- [18] Q. Wang, X. Tang, D. Zhou, Z. Du, and X. Huang, "A dual-layer radar absorbing material with fully embedded square-holes frequency selective surface," *IEEE Antennas and Wire. Propag. Letters*, vol. 16, pp. 3200-3203, 2017. DOI: 10.1109/LAWP.2017.2768441
- [19] Y. Wang, K. Chen, Y. Li, and Q. Cao, "Design of nonresonant metasurfaces for broadband RCS reduction," *IEEE Antennas and Wire. Propag. Letters*, vol. 20, no. 3, pp. 346-350, 2021. DOI: 10.1109/LAWP.2021.3049882

در فرآیند طراحی ساختار پیشنهاد شده، چیدمان عمودی پچ‌ها یا همان آرایه صفحه H نیز مورد مطالعه قرار گرفته و بالطبع آرایه‌ای از شکاف‌های موازی محور  $\gamma$  داخل پچ‌ها تعبیه شدند. نتایج قابل قبول و مشابهی به دست آمد البته با کاهش اندکی در پهنای باند کاهش RCS. این نتایج به دلیل جلوگیری از اضافه‌گویی و تکرار مکررات و گزیده‌گویی کلی، در این مقاله ارائه نشده است. در نهایت می‌توان به‌عنوان پیشنهادات برای طراحی آینده در این راستا، آرایه‌های دوبعدی را نیز مورد مطالعه قرار داد. علاوه بر این، یک توزیع مناسب و هوشمندانه از قبیل توزیع نرمال یا گوسی برای تعداد، طول و موقعیت شکاف‌ها ارائه داده و بهینه‌سازی‌های لازم، برای حصول پهنای باند بالا در یک آرایه بزرگ‌تر انجام داد. در نهایت می‌توان ساختاری مرکب برای پوشش هم‌زمان قطبش‌های خاص امواج ارسالی (TE و TM) ارائه داد.

## ۷- مراجع

- [1] X. Ding, Y. -F. Cheng, W. Shao, and B. Z. Wang, "Broadband low-RCS phased array with wide-angle scanning performance based on the switchable stacked artificial structure," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 67, no. 10, pp. 6452-6460, 2019. DOI: 10.1109/TAP.2019.2925202
- [2] R. Zaker and A. Sadeghzadeh, "Passive techniques for target radar cross section reduction: A comprehensive review", *Inter. J. RF and Microwave Computer-Aided Eng.*, vol. 30, no. 11, pp. e22411, 11 2020. DOI: 10.1002/mmce.22411
- [3] L. Zhou, F. Yang, "Radar cross section reduction for microstrip antenna using shaping technique," *IEEE Inter. Conference on Microwave and Millimeter Wave Tech. (ICMMT)*, Beijing, China, 2016, pp. 871-873. DOI: 10.1109/ICMMT.2016.7762470
- [4] J. Yu, W. Jiang, and S. Gong, "Wideband angular stable absorber based on spoof surface plasmon polariton for RCS reduction," *IEEE Antennas and Wire. Propag. Letters*, vol. 19, no. 7, pp. 1058-1062, 2020. DOI: 10.1109/LAWP.2020.2988089
- [5] J. Ren, S. Gong, and W. Jiang, "Low-RCS monopolar patch antenna based on a dual-ring metamaterial absorber," *IEEE Antennas and Wire. Propag. Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 102-105, 2018. DOI: 10.1109/LAWP.2017.2776978
- [6] A. Malakzadeh, F. Khangheshlaghi, and M. Rezayatfam, "A new light and broadband metamaterial absorber with 1.4 mm thickness for reducing the radar cross section of objects," *J. Appl. Electromagn.*, vol. 8, no. 1, pp. 27-33, 2020. (In Persian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1399.8.1.4.4>
- [7] J. khalilpour, H. R. Dalili Oskouyi, S. A. Taghavi, "Design, Simulation and Fabrication of Ultra-Wide-Band Electro-magnetic Waves Absorber with Optimal Dimensions Based on Metamaterial," *Applied. Electromag.*, vol.9 no. 1, pp. 55-61, 2020 (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/DOR:20.1001.1.26455153.1400.9.1.20.7>

- vol. 4, no. 9, pp. e324, 2015. DOI: 10.1038/lsa.2015.97
- [25] Y. Zhao, X. Y. Cao, J. Gao, X. Yao, T. Liu, W. Q. Li, and S. J. Li, "Broadband low-RCS metasurface and its application on antenna," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 64, no. 7, pp. 2954- 2962, 2016. DOI: 10.1109/TAP.2016.2562665
- [26] Y. Zhao, X. Cao, J. Gao, X. Yao, and X. Liu, "A low-RCS and high-gain slot antenna using broadband metasurface," *IEEE Antennas and Wire. Propag. Letters*, vol. 15, pp. 290-293, 2016. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2442257
- [27] F. Samadi and A. Sebak, "Wideband, very low RCS engineered surface with a wide incident angle stability," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 69, no. 3, pp. 1809-1814, 2021. DOI: 10.1109/TAP.2020.3015040
- [28] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, third ed. John wiley & sons, 2005.
- [20] D. Sang, Q. Chen, L. Ding, M. Guo, and Y. Fu, "Design of checkerboard AMC structure for wideband RCS reduction," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 67, no. 4, pp. 2604-2612, 2019. DOI: 10.1109/TAP.2019.2891657
- [21] Q. Zheng, C. Guo, G. A. E. Vandenbosch and J. Ding, "Low-profile circularly polarized array with gain enhancement and RCS reduction using polarization conversion EBG structures," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 2440-2445, 2020. DOI: 10.1109/TAP.2019.2943693
- [22] Y. -H. Cho and I. -S. Choi, "General mode-matching analysis of a 2-D truncated PEC wedge covered with a magnetodielectric semicircular boss," *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, vol. 68, no. 12, pp. 8033-8043, 2020. DOI: 10.1109/TAP.2020.2998921
- [23] T. J. Cui, M. Q. Qi, X. Wan, J. Zhao and Q. Cheng, "Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials," *Light: Scientific Application*, vol. 3, pp. 1-9, 2014. DOI: 10.1038/lsa.2014.99
- [24] L. H. Gao, Q. Cheng, J. Yang, S. J. Ma, J. Zhao, and S. Liu, "Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces," *Light: Scientific Application*,