فصلنامه فرماندهی و کنترل، سال اول، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۵

بهبود عملکرد سامانه‌های چف بومی از طریق جایگزین نمودن الیاف دوقطبی با المان‌های چف دارای ساختار فرکتال مینکوفسکی حلقوی افزایشی

مهدی خبیر[۱]، مریم حکمت[۲]، حمید دهقانی[۳]

تاریخ دریافت: ۹٤/۷/۷ تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/٤

چکیده

چف، سامانهٔ پدافندی و ضد راداری است که برای فریب و اغتشاش رادارها و موشک های راداری به کار می‌رود. ایجاد سطح مقطع راداری بزرگ و پوشش وسیع باندهای فرکانسی راداری، از پارامترهای مهم در عملکرد مؤثر این سامانه هاست. در سامانه های کنونی برای افزایش پهنای باند فرکانسی، از الیاف چف دوقطبی با اندازه های متناسب با طول موج رادار استفاده می‌شود که این روش کاهش تعداد الیاف مؤثر بازتابش‌کنندهٔ امواج راداری و در نهایت، کاهش سطح مقطع راداری ابر چف را باعث می‌شود. هدف اصلی این تحقیق استفاده از هندسهٔ فرکتالی در طراحی ذرات چف به‌منظور کاهش محدودیت‌های موجود و در نهایت، ارتقای عملکرد این سامانه‌ها می‌باشد، این ایده با الگوبرداری از پیاده‌سازی ساختارهای هندسهٔ فرکتال در طراحی آنتن‌ها که سبب کاهش ابعاد و افزایش پهنای باند آنها شده، شکل گرفته است. روش این تحقیق به این شکل است که ابتدا به بررسی تمامی اقداماتی که تاکنون به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد بر روی سامانه‌های چف انجام شده، پرداخته می‌شود و میزان اثربخشی آنها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، در مرحلهٔ بعد، بر اساس نتایج تحقیقات گذشته دو ساختار متداول و پُرکاربرد در طراحی آنتن‌های فرکتال، انتخاب و این ساختارها با الیاف دوقطبی جایگزین و بر این اساس، شبیه‌سازی‌ها انجام می‌شود و نتایج شبیه‌سازی حاصل از آنها از نقطه‌نظر پهنای باند و سطح مقطع راداری، با چف دوقطبی متداول مورد مقایسه قرار می‌گیرد که از افزایش پهنای باند مؤثر راداری و افزایش سطح مقطع راداری برای ذرات چف فرکتالی نسبت به دوقطبی حکایت می‌کند و در انتها، ساختار فرکتال بهینه به‌عنوان ساختار بومی معرفی می‌گردد که می‌تواند جایگزین مناسبی برای ساختارهای دوقطبی متداول باشد.

واژگان کلیدی: چف، دوقطبی، فرکتال، کوخ، مینکوفسکی

۱. دانشجوی دکتری مهندسی برق گرایش الکترونیک – دانشگاه علم و صنعت، Mehdi_khabir@ymail.com

۲. دانشجوی دکتری فیزیک گرایش ماده چگال – دانشگاه الزهرا، Mhekmat2000@gmail.com

۳. استاد و عضو هیئت علمی دانشگاه مالک اشتر تهران، Hamid_deh@yahoo.com

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-14]

۱. کلیات

فرماندهی و کنترل، سیستمی است که شیوه‌های لازم برای گردآوری، پردازش و انتشار اطلاعات در مورد کارکنان، تجهیزات و تأسیسات نظامی را فراهم می‌کند. این اطلاعات موردنیاز فرماندهان و تصمیم‌گیرندگان بوده و در طرح‌ریزی، سازماندهی، هدایت، هماهنگی، کنترل و نظارت عملیات، به‌منظور اجرای مأموریت، مورد استفاده قرار می‌گیرد. رادار اصلی‌ترین ابزار فرماندهی و کنترل در حوزهٔ جنگ الکترونیک و پدافند هوایی است و اطلاعات کلیدی برای تصمیم‌گیری مراکز فرماندهی و کنترل را فراهم می‌سازد و به همان نسبت سامانه‌های ضدراداری و جنگ الکترونیک، بخش لاینفک این سامانه‌ها می‌باشند.

چف، اولین و شاید قدیمی‌ترین سامانه‌ای است که هنوز هم در رده وسایل ضدراداری و پدافند هوایی مؤثر در ارتش‌های پیشرفته جهان مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. چف اولین بار در سال ۱۹۳۷ به‌عنوان یکی از اقدام‌های ضد راداری توسط ارتش انگلیس ارائه شد، ولی آنها به علت سادگی زیاد این وسیله از ارائه آن بیمناک بودند؛ زیرا چف به اندازه‌ای ساده بود که می‌ترسیدند آلمان‌ها به آن پی برده و علیه مبتکران آن به کار برند. پس از جنگ جهانی دوم معلوم شد که آلمان‌ها نیز از مدت‌ها پیش این وسیله را ساخته بودند، ولی به همان علت از به کار بردن آن خودداری می‌نمودند. در بقیه مدت جنگ این عمل به‌عنوان وسیله‌ای تعرضی مؤثر به‌وسیله هر دو طرف مورد استفاده قرار گرفت و توسعه پیدا کرد (Jones, 1978:1).

۱-۱. بیان مسئله

چف، نوعی کلاتر حجمی است که به‌عنوان وسیله‌ای برای فریب رادارها و موشک‌های راداری به کار می‌رود. یک کارتریج چف از میلیون‌ها الیاف سیلیسی با روکش آلومینیوم تشکیل شده است. این الیاف در حجم زیاد از هواپیما یا ناو به بیرون پرتاب شده و در فواصل زمانی در هوا باز می‌شود. در اثر برخورد با امواج راداری، تشدید حاصل شده و این تشدید باعث برگشت امواج به سمت منبع اصلی و فریب رادار می‌گردد (Ellsworth Air force USA, Aug 2010:2).

از جمله معیارهای مهم جهت عملکرد مؤثر الیاف چف، ایجاد سطح مقطع راداری بزرگ، پوشش وسیع باندهای فرکانسی راداری و ماندگاری بیشتر در هوا می‌باشد. به‌منظور پوشش وسیع باند فرکانسی باید الیاف با اندازه‌های متفاوت و متناسب با طول موج راداری انتخاب شود که این خود باعث کاهش سطح مقطع راداری المان‌های چف خواهد شد؛ دلیل آن کاهش تعداد الیاف اختصاص‌یافته به هر باند فرکانسی در داخل کارتریج چف است، همچنین در سامانه‌های چف کنونی به‌منظور افزایش پایداری الیاف در هوا سعی بر آن است که از طریق استفاده از مواد دی‌الکتریک سبک و پوشش دادن آنها با لایه‌های بسیار نازک فلزی باعث کاهش جرم الیاف شوند، اما به‌دلیل وجود الزاماتی در فناوری ساخت، این فرایندها با محدودیت مواجه می‌شوند (Arnott, 2004:3).

از مشکلاتی که سامانه‌های چف کنونی با آن مواجه هستند، مجهز شدن رادارها به فناوری‌های حذف اهداف مجازی است. با توجه به اینکه ساختار الیاف و الگوی ابر چف حاصل از آنها مشخص و قابل پیش‌بینی

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-14]

است، این فناوری‌ها قادرند که کلاترها را از هدف‌های واقعی تشخیص داده و رادار آنها را حذف کند.

تحقیق و مطالعات زیادی در زمینهٔ ویژگی‌های فیزیکی و رفتار الکترومغناطیسی الیاف چف به‌منظور بهینه‌سازی معیارهای مهم در عملکرد بهینه این سامانه‌ها تاکنون انجام شده است. نتایج حاصل از مجموع این تحقیقات بیانگر این نکته است که با وجود تغییر در مؤلفه‌های مختلف تأثیر بنیادین به‌منظور کاهش محدودیت‌ها مشاهده نمی‌شود، از این‌رو باید حوزه‌ای جدید در این گونه بهینه‌سازی‌ها مطرح شود (Kruger, 2009:4).

در حال حاضر پیاده‌سازی ساختارهای هندسهٔ فرکتال در طراحی آنتن‌ها توانسته مزایای چشمگیری چون کاهش ابعاد و افزایش پهنای باند را برای آنتن‌ها به همراه داشته باشد. ویژگی خودتشابهی ساختارهای فرکتال در طراحی آنتن‌ها، آنها را در چندین فرکانس کاربردی می‌سازند، همچنین با بهره‌گیری از توانایی فضاپرکنی می‌توان آنتن‌های کوچک‌تری طراحی کرد (Gabriele, 2016:5).

با الگوبرداری از تحولی که ساختارهای فرکتالی در طراحی و عملکرد آنتن‌ها به‌وجود آورده‌اند، در این تحقیق، ساختار فرکتال مینکووفسکی بر روی المان‌های چف، پیاده‌سازی شده و با ساختار دوقطبی و ساختار فرکتال متعارف کوخ موجود، مورد شبیه‌سازی و مقایسه قرار گرفته است. ساختار فرکتالی پیشنهادی از منظر معیارهای عملکردی سامانه‌های چف، رفتار بسیار خوبی از خود نشان داده و قابلیت طرح به‌عنوان چف بومی را دارد.

در ادامهٔ این مقاله، ابتدا چگونگی عملکرد سامانه‌های چف و محدودیت‌هایی که آنها برای رسیدن به کارایی و بازدهی بهینه در کاربردهای عملیاتی با آن مواجه هستند و نیز راهکارهای عملی بیان می‌شود که از گذشته تا کنون برای تقلیل این محدودیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، سپس به تشریح ساختارهای کنونی الیاف چف و ساختارهای جدید فرکتالی پرداخته می‌شود که به‌عنوان رویکرد حل مسئله برای پیاده‌سازی بر روی الیاف چف مورد نظر است و فرایند و شرایط شبیه‌سازی ساختارها توضیح داده می‌شود. در نهایت، با تجزیه و تحلیل و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها ساختار بهینه معرفی می‌گردد.

۲-۱. اهمیت و ضرورت موضوع تحقیق

چف از تعداد بسیار زیادی الیاف منعکس‌کننده و پراکنده‌ساز امواج الکترومغناطیسی تشکیل شده است. هنگامی که این الیاف پس از شلیک راکت آن در هوا رها می‌شوند، به صورت گسترده بر اثر انفجار و اثرات باد در هوا پراکنده شده و تشکیل یک ابر از الیاف چف می‌دهند که با ایجاد یک سطح مقطع راداری بزرگ باعث فریب و اغتشاش در رادارهای مراقبتی، ردیاب و موشک‌های راداری می‌شوند. چند معیار مهم در چگونگی عملکرد مناسب و بهینهٔ سامانه‌های چف تأثیر دارد که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

از مؤلفه‌های مهم در عملکرد مناسب و مؤثر پدافندی یک سامانهٔ چف، ایجاد یک سطح مقطع راداری بزرگ می‌باشد که این سطح مقطع راداری نیز تحت تأثیر عواملی مانند طول، قطر الیاف و طول موج سیگنال راداری است. برای تعیین سطح مقطع راداری

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-14]

ابر چف بایستی به بررسی و مدل‌سازی خصوصیات پراکندگی الکترومغناطیسی یک دوقطبی پرداخته شود. برای یک دوقطبی مجزا، سطح مقطع راداری ناشی از یک رادار تک‌ایستا وقتی بیشینه است که قطبش میدان الکتریکی برخوردی به دوقطبی با محور دوقطبی موازی بوده و اندازهٔ دوقطبی برابر نصف طول موج فرکانس تشدید سیگنال راداری باشد. متوسط این سطح مقطع برای یک دو قطبی از رابطهٔ (۱) محاسبه می‌شود:

رابطهٔ (۱) $\delta \text{ chaff- di} = 0.18\,\lambda 2$

که λ طول موج رادار و chaff- di نشان‌دهندهٔ یک المان چف دوقطبی است. برای کل سطح مقطع یک ابر چف از دید رادار وجود دارد.

رابطهٔ (۲)

$$\delta \text{ total} = \frac{0.18\,\lambda^2 V_{cs} N_D}{V_R L_{beam}}$$

در رابطهٔ (۲) Vcs حجم اشغالی ابر چف، ND تعداد کل دو قطبی‌ها، VR حجم قابل تفکیک توسط رادار و Lbeam میزان تلفات بیم آنتن رادار در برخورد با ابر چف می‌باشد. از رابطهٔ (۲) مشخص می‌شود که افزایش حجم ابر چف افزایش RCS را در پی خواهد داشت، همچنین افزایش تعداد دوقطبی‌ها (ND) RCS را افزایش می‌دهد (Dan, 2016:7).

۱-۲-۱. پهنای باند فرکانسی

امکان پوشش وسیع باندهای فرکانسی راداری توسط ابر چف، یکی دیگر از مؤلفه‌های تعیین‌کننده در عملکرد مؤثر سامانه چف می‌باشد. برای این منظور باید الیاف با اندازه‌های متفاوت و مناسب با طول موج‌های مختلف سیگنال‌های راداری بریده و در داخل راکت تعبیه شوند (Ellsworth Air force USA, Aug 2010:2).

۲-۲-۱. پهنای باند فرکانسی

پایداری و ماندگاری الیاف در هوا نیز از دیگر مؤلفه‌های مهم در عملکرد مناسب سامانه‌های چف می‌باشد؛ چون هر چه الیاف سبک‌تر و از ویژگی‌های آیرودینامیکی بهتری برای شناور و معلق ماندن در مدت زمان بیشتر در هوا برخوردار باشند، مدت زمان استفاده از فرصت به‌وجود آمده برای انجام مأموریت خود ناشی از اغتشاش رادار اهدافی مانند هواپیما و ناو، افزایش می‌یابد (Arnott, 2004:3).

مؤلفه‌هایی که تشریح شدند، با محدودیت‌هایی نیز روبه‌رو هستند؛ برای مثال برای دستیابی به ماندگاری بیشتر باید الیاف را تا حد مناسب و ممکن سبک انتخاب نمود، اما به‌دلیل محدودیت در انتخاب مواد تشکیل‌دهنده و شکل هندسی الیاف، ماندگاری آنها در هوا تا مدت زمان زیادی امکان‌پذیر نیست، همچنین جهت پوشش چند باند فرکانسی باید الیاف با اندازه‌های متفاوت و متناسب با طول موج راداری انتخاب شود که این باعث کاهش سطح مقطع راداری المان‌های چف خواهد شد؛ دلیل آن، کاهش تعداد الیاف اختصاص‌یافته به هر باند فرکانسی در داخل راکت چف است، همچنین از آنجا که تعداد الیاف که قابل جاسازی در داخل یک راکت چف محدود می‌باشد، بنابراین در صورتی که حتی تمامی مؤلفه‌های رهاسازی الیاف نیز بهینه باشد، ابعاد ابر چف و در نهایت، سطح مقطع راداری حاصل از آن، محدود است، بنابراین در این تحقیق مسئله اصلی که به آن پرداخته می‌شود ارائه راهکاری جدید است که بتوان به کمک آن این محدودیت‌ها را به حداقل رساند. بدیهی است به هر میزان که محدودیت‌های موجود در عملکرد

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-14]

سامانه‌های چف کاهش یابد، ارتقای عملکرد آنها را به دنبال خواهد داشت.

۳-۱. پیشینهٔ تحقیق

به‌منظور بهینه‌سازی و ارتقای معیارهای بیان شده تحقیقات و مطالعات زیادی بر روی سامانه‌های چف انجام شده است که بیشتر در زمینهٔ رفتار الکترومغناطیسی الیاف چف و مرتبط با بهینه‌سازی ویژگی‌های فیزیکی الیاف آنها بود که در این قسمت به آن اشاره می‌شود.

تغییر در نوع مواد به‌کار رفته در ساخت الیاف چف یک از حوزه‌هایی بود که منجر به ساخت انواع مختلف سامانه‌های چف شد که شامل موارد زیر است.

(۱) چف کروی که دارای ابعاد بسیار کوچک بودند، اما به‌دلیل محدودیت در فرکانس کاربردی زیاد کاربرد نداشتند.

(۲) چف با رشتهٔ نایلونی و پوشش نقره که کارایی بهتری نسبت به چف کروی داشت، اما تاحدی احتمال مواجه شدن با پدیدهٔ لانهٔ پرنده و در هم قفل‌شدگی الیاف در هنگام رها شدن را داشت.

(۳) چف فیبر کربنی با پوشش فلزی که دارای استحکام بالا بود و بیشتر از آن در چفِ طنابی استفاده می‌شد، اما این نوع نیز مشکل مواجه شدن با پدیدهٔ لانهٔ پرنده و در هم قفل‌شدگی الیاف در هنگام رها شدن را داشت.

(٤) چف هستهٔ فلزی با پوشش پلیمری که بسته‌بندی و رهاسازیِ ساده‌تری نسبت به دیگر انواعِ چف را داشت، اما یک مشکل آن به علتِ ابعادِ کوچک، محدودیتِ فرکانسی داشت و همچنین این نوع چف نسبت به دیگر انواع بیشتر در معرض پدیدهٔ لانهٔ پرنده و قفل شدنِ ذرات بود.

(۵) چف هستهٔ شیشه‌ای با پوشش فلزی که بسته‌بندی و رهاسازیِ ساده‌تری نسبت به دیگر انواعِ چف ارائه داد، اما همچنان مشکل قفل‌شدگی الیاف هنگام رهاسازی در آن مشاهده می‌شد.

از میان انواع چف بیان‌شده الیافِ چفِ شیشه‌ای با پوشش آلومینیومی، در حال حاضر یکی از پُرکاربردترین انواع چف می‌باشد. ضمن آنکه تولید و بسته‌بندی چف با ساختار فیزیکیِ دوقطبی، مقرون به صرفه‌تر و با سهولت بیشتری انجام می‌شود. در بیشتر تحقیقات در حوزهٔ چف نیز به این نوع از چف پرداخته شده است (Arnott, 2004:3).

۱-۳-۱. بهینه‌سازی جنس مواد و ترکیبات تشکیل‌دهندهٔ الیاف دوقطبی

در این حوزهٔ تحقیق بر روی چف، از طریق انتخاب مواد و آلیاژهای مختلف سازندهٔ یک المان چف که شامل هستهٔ دی‌الکتریک و روکش فلز است، سعی بر این است که تا حد ممکن این الیاف سبک و نیز بازتاب‌کنندهٔ مناسبی برای امواج راداری باشند، اما تحقیقات انجام‌شده در این زمینه نشان می‌دهد که به‌دلیل محدودیت در انتخاب مواد تشکیل‌دهندهٔ هسته و روکش الیاف چف این گونه بهینه‌سازی‌ها تا یک حد مشخص امکان‌پذیر خواهد بود (Ellsworth Air force USA, Aug 2010:2).

۲-۳-۱. بهینه‌سازی پهنای باند مؤثر الیاف

در ابتدا برای اینکه سامانه‌های چف بتوانند در چند فرکانس راداری مؤثر واقع شوند، در داخل کارتریج آنها از چند دسته از الیاف با اندازه‌های متفاوت متناسب با طول

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-14]

موج سیگنال راداری استفاده می‌شد که به این ترتیب هر دسته از الیاف طول آن متناسب با نصف طول موج یک فرکانس راداری خاص باشد. مشکل این روش یکی عدم پیش‌بینی فرکانس رادار دشمن و دیگری تعداد محدود الیاف اختصاص‌یافته به یک فرکانس خاص بود که کاهش سطح مقطع راداری ابر چف حاصل را در پی داشت. تحقیق‌های انجام شده در این حوزه منجر به معرفی نسل دیگری از سامانه‌های چف شد که به این صورت عمل می‌کردند که در ابتدا تنها یک دسته الیاف با یک طول مشخص در داخل کارتریج چف تعبیه می‌شد و پس از اینکه حمل‌کنندهٔ محموله چف، فرکانس راداری دشمن را تشخیص می‌داد، سامانهٔ چف به طور خودکار اقدام به برش الیاف یکپارچه به چندین بخش و به اندازهٔ نصف طول موج سیگنال راداری می‌کرد تا به این طریق، همهٔ الیاف حاصل پس از پخش شدن در هوا در ایجاد بیشترین انعکاس امواج و در نهایت، بیشترین سطح مقطع راداری شرکت داشته باشند (Ellsworth Air force USA, Aug 2010:2).

۳-۳-۱. استفاده از سامانهٔ چف متناسب با نوع مأموریت

سامانه‌های چف بر حسب نوع مأموریت، تغییراتی در ساختار آنها ایجاد شده تا بتوانند بیشترین بازده در آن شرایط عملکرد و مانور داشته باشند؛ برای مثال مواد سازندهٔ کارتریج چف مدل RR-170A/AL مشابه کارتریج مدل RR-188 می‌باشد، اما به‌دلیل نوع مأموریت، اندازه برش الیاف دوقطبی چف در کارتریج RR-170A/AL با کارتریج مدل RR-188 متفاوت است. هواپیمای مدل B52از کارتریج چف مدل RR-112/AC استفاده می‌کند. الیاف چف در این نوع چف به‌صورت رولی می‌باشد. هواپیمای F-22از چف‌هایی با مواد مشابه بهره می‌گیرد، اما به‌دلیل خروج و شلیک بهتر الیاف، تغییراتی در ساختمان کارتریج انجام شده است (Ellsworth Air force USA, Aug 2010:2).

٤-۳-۱. ایجاد تغییر در قسمت‌های پرتاب و پخش‌کنندهٔ سامانه‌های چف

چف از هواپیما به صورت اشتعالی و با استفاده از کارتریج انفجاری رها می‌شود. برای این خروج از گازهای گرم تولیدشده توسط کارتریج انفجاری بهره می‌گیرند. این گازها به پیستون کوچک تعبیه‌شده در پایین تیوب چف فشار آورده و کلاهک پلاستیکی انتهایی به همراه الیاف چف به بیرون پرتاب می‌کنند. در این فرایند، تیوب پلاستیکی در داخل هواپیما باقی مانده و پیستون کلاهک انتهایی و جداکننده نمدی از هواپیما خارج می‌شود. از مشکلات احتمالی سیستم‌های پرتاب و پخش‌کننده، این است که در فرایند انفجار و بیرون رانش کارتریج، تعدادی از الیاف آسیب‌دیده و از حالت طبیعی خود خارج می‌شوند و نمی‌توانند عملکرد مناسبی در برخورد با امواج راداری از خود نشان دهند که این مشکل تا حدودی به‌وسیلهٔ طراحی و ساخت سامانه‌های پخش‌کنندهٔ فنری و اختلاف فشاری مرتفع گردید (Arnott, 2004:3).

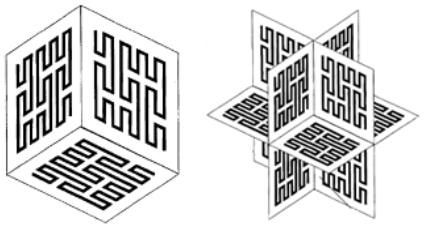
۵-۳-۱. تغییر در ساختار و شکل هندسی الیاف

یکی از زمینه‌هایی که در راستای بهینه‌سازی سامانه‌های چف کمتر به آن پرداخته شده است، تغییر در ساختار هندسی و شکل الیاف متداول کنونی است. در راستای بهینه‌سازی المان‌های چف، یکی دیگر از تکنیک‌های استفاده‌شده، به‌کارگیری ساختارهای هندسه چند سطحی در طراحی هندسه ذرات چف می‌باشد. این ساختارها می‌توانند از فویل آلومینیومی، یا صفحات مس و

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-14]

یا چاپ و پوشش یک ماده رسانا بر روی یک زیرلایهٔ نازک باشند. زیرلایهٔ یادشده می‌تواند از یک ماده پیشنهادی با افت‌های پایین در یک فرکانس راداری خاص باشد. این ساختارها به‌دلیل لبه‌های تیز زیادی که دارند، سطح مقطع راداری بالایی را تولید می‌کنند، اما مشکلاتی مانند سنگینی و عدم استفاده در فرکانس‌های مختلف راداری را با خود به همراه دارند (Baliarda, 2007:6).

شکل ۱. چف با ساختارهای چندسطحی (Baliarda, 2007:6)



به طور کلی نتایج حاصل از مجموع تحقیق‌های انجام‌شده بیانگر این مطلب است که روش‌های بهینه‌سازی بالا که در راستای کاهش محدودیت‌های سامانه‌های چف کنونی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بیشتر آنها مشابه و تقریبا با وجود تغییر در مؤلفه‌های مختلف یک سامانه چف، در یک نقطه همگرایی دارند.

در این مقاله، هدف ارائهٔ راهکاری است که بتواند معیارهای اساسی و تعیین‌کنندهٔ سامانه‌های چف یعنی ایجاد بیشترین سطح مقطع راداری، بیشترین پهنای باند مؤثر را با هم و به میزان مناسب تأمین نمایند، بنابراین به‌جای پرداختن به بهینه‌سازی رفتارهای الکترومغناطیسی الیاف چف، تمرکز بر روی ساختار هندسی الیاف چف می‌باشد و در حقیقت، یک الگوبرداری از دستاوردهایی است که هندسهٔ فرکتالی در بهبود ابعاد و پهنای باند آنتن‌ها داشته است (Gabriele, 2016:5).

٤-١. پرسش تحقیق

از محدودیت‌هایی که آنتن‌های حلقوی پیروی‌کننده از هندسه متداول و اقلیدسی دارند، این است که در حال تشدید نیاز، به فضای زیادی دارند که این مشکل را می‌توان با پیاده‌سازی هندسهٔ فرکتالی در طراحی آنها مرتفع نمود. حلقه‌های فرکتالی این مشخصه را دارند که محیط آنها تا بی‌نهایت افزایش پیدا می‌کند، در حالی که می‌توان حجم اشغال‌شده را ثابت نگه داشت. این افزایش طول، حجم اشغال‌شدهٔ مورد نیاز برای آنتنی که در حال تشدید است را کاهش می‌دهد و ابعاد آنتن کوچک‌تر می‌شود، همچنین هر چه محیط آنتن به یک طول موج نزدیک‌تر شود، وابستگی مشخصات آن به اندازه و شکل افزایش می‌یابد (Narinder, 2016:8).

طبیعت خودتشابهی در هندسهٔ فرکتالی را می‌توان برای عملکرد یک آنتن در فرکانس‌های متعدد به کار بُرد. فرکتال‌ها ویژگی خودتشابهی در هندسه‌شان دارند. این خاصیت موجب ایجاد ویژگی‌های چندباندی در آنتن‌های فرکتالی شده است و باعث می‌شود آنتن، رفتارهای مشابهی در فرکانس‌های متفاوت از خود نشان دهد. درک اینکه چه قسمتی از آنتن در هر فرکانس مورد استفاده قرار می‌گیرد، به جریان‌های سطحی آنتن بستگی دارد. این توزیع جریان با هندسهٔ شبه‌سلفی آنتن مطابقت دارد (Narinder, 2016:8).

در اینجا این پرسش مطرح می‌شود که این هندسه‌های فرکتالی به‌کار رفته در آنتن‌های فرکتالی و با همان خصوصیات ساختارهای چندسطحی و فضاپرکنی

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-14]

فرکتال‌ها در طراحی آنتن که باعث کاهش اندازه و ایجاد رفتار چندباندی در آنها می‌شد، آیا در مورد الیاف چف نیز صدق می‌کند؟ چون نکتهٔ حائز اهمیت این است که الیافی که با این هندسه طراحی می‌شوند، آنتن نیستند و الزام‌های آنتن‌ها با آنچه برای الیاف چف راداری لازم است، تفاوت دارد. اغلب آنتن‌ها از چندین بخش مانند المان‌های تشعشعی، صفحات زمین و مرجع و کانکتورهای ورودی و خروجی تشکیل شده‌اند. در حالی که المان‌های چف برای ارسال و دریافت سیگنال و وابسته شدن به یک گیرنده و نیز همراه بودن با یک صفحه زمین و یا کانکتور به‌کار نمی‌روند. مشخصه‌های فنی در طراحی یک آنتن عبارت است از بهره، الگوی تشعشعی و امپدانس در حالی که طراحی هندسی الیاف چف راداری به هیچکدام از این پارامترها حساس نیست و به آن توجه نمی‌شود. مهم‌ترین مشخصه فنی در رابطه با طراحی هندسی چف راداری، بحث سطح مقطع راداری است که با قابلیت بازتابش الیاف آن ارتباط دارد. این طراحی می‌تواند شامل بازتاب‌کننده‌های امواج الکترومغناطیسی ساخته شده از مواد رسانا، نیم‌رسانا و یا ابررسانایی باشد که هدف از اعمال هندسه‌های فرکتالی در طراحی الیاف آن، بهبود خصوصیات سامانه چف است. قابلیت این هندسه جدید، باید موجب افزایش سطح مقطع راداری الیاف در مقایسهٔ نمونه‌های متداول در همان اندازه و یا یک سطح مقطع راداری مشابه با نمونه‌های متداول، اما در اندازه‌های بزرگ‌تر باشد (Narinder, 2016:8).

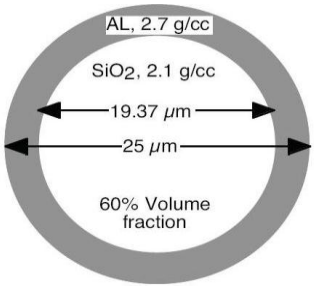
۱-۵. روش تحقیق

در این مرحله از تحقیق برای رسیدن به درکی درست از فرایندی ادامه کار، بهتر است الگوها و ساختارهای الیاف چف موجود و متداول و پیشنهادی تشریح شود.

۱-۵-۱. ساختار دوقطبی

الیاف چف دوقطبی که در حال حاظر در داخل کارتریج‌های چف مورد استفاده قرار می‌گیرند، هستهٔ آن از جنس اکسید سیلیسیوم به ضخامت حدود 19 µm است. سطح خارجی الیاف با لایهٔ آلومینیومی نازکی به ضخامت حدود 3 µm پوشانده شده است. در بیشتر موارد ضخامت نهایی یک دوقطبی‌ها به حدود 25 µm می‌رسد. این الیاف در اندازه‌های متفاوت و متناسب با طول موج سیگنال رادار، بریده در داخل راکت چف تعبیه می‌شوند که در شکل۲ نشان داده شده است.

شکل ۲. سطح مقطع الیاف چف دوقطبی (Arnott, 2004:3)



در هنگام استفاده از سامانهٔ چف یکی از عوامل مؤثر در میزان سطح مقطع راداری، اندازهٔ الیاف و غلظت ابر چف ایجاد شده می‌باشد. هنگامی که طول الیاف برابر نصف طول موج سیگنال رادار باشد، در این حالت ابر چف بیشترین سطح مقطع را به‌وجود می‌آورد. متوسط این سطح مقطع برای یک دوقطبی از رابطهٔ ۱ محاسبه می‌شود (Jones, 1978:2).

$$\text{chaff-di} = 0.18\,\lambda 2 \quad (1)$$

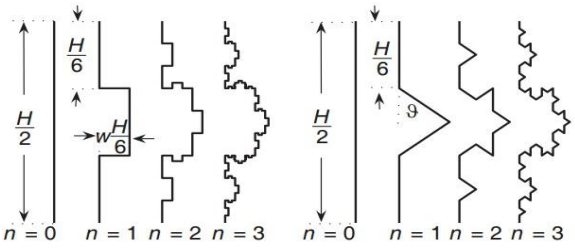
[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-14]

λ طول موج رادار و chaff- di نشان‌دهندهٔ یک المان چف دوقطبی است.

۲-۵-۱. ساختار فرکتال کوخ دانه‌برفی

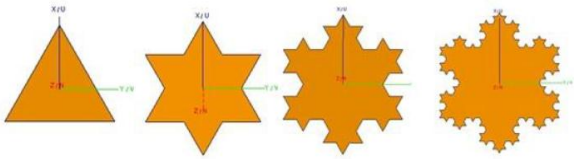
الگوی آغازین برای کوخ دانه‌برفی یک مثلث است. هر ضلع از الگوی اولیه، نقش یک آغازگر را دارد. شکل هندسی مستخرج در تکرار نخست معروف به ژنراتور است که از تقسیم آغازگر به سه قسمت مساوی مطابق شکل ۳ به دست می‌آید. قسمت وسطی برداشته شده، به‌وسیلهٔ دو قطعه مستقیم با طول یکسان جایگزین می‌شود. این قطعات در آن فاصلهٔ اصلی به مانند یک مثلث متساوی‌الاضلاع قرار می‌گیرند. تکرار برای جایگزینی هر قطعه در هر شکل جدید ادامه پیدا می‌کند. برای یک فرکتال حقیقی این فرایند به تعداد بی‌نهایت بار می‌تواند انجام شود.

شکل ۳. ساختار فرکتال مینکوفسکی افزایشی و ساختار کوخ به ترتیب از چپ به راست و با مراتب صفر، یک، دو و سه (Arnott, 2004:3)



حلقه‌های فرکتالی این ویژگی را دارند که حجم آنها با وجود افزایش طول و محیط آنها در شرایط تشدید ثابت می‌ماند. به همین دلیل در این تحقیق از ساختارهای حلقوی فرکتال‌ها در شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شود. در شکل ٤ مراتب تکرار فرکتال کوخ حلقوی نشان داده شده است (Ioannis, 2012:9).

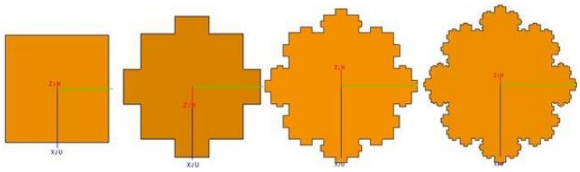
شکل ٤. ساختار کوخ به ترتیب از چپ به راست؛ مرتبه صفر، یک، دو و سه.



۳-۵-۱. ساختار فرکتال مینکوفسکی افزایشی

اولین عنصر این ساختار فرکتال، که متناظر با تکرار صفرم (n=0) است، عنصری به نام آغازگر می‌باشد. شکل هندسی مستخرج در تکرار نخست معروف به ژنراتور است که از تقسیم آغازگر به سه قسمت مساوی مطابق شکل ۲ به دست می‌آید. در اینجا W میزان برآمدگی (پهنای دندانه) مقادیری بین ۰ و ۱ می‌پذیرد. به همین ترتیب، شکل هندسی فرکتال nام از جایگزینی مولد به جای خطوط مستقیم در فرکتال n-1ام به دست می‌آید. در شکل ۵ مراتب تکرار فرکتال حلقوی مینکوفسکی افزایشی نشان داده شده است (Patel, 2017:10).

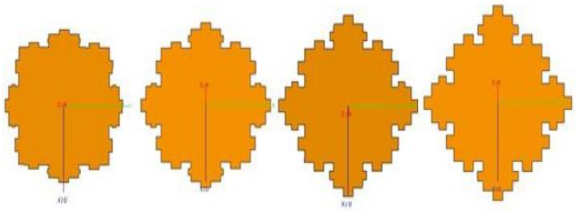
شکل۵. ساختار مینکوفسکی افزایشی به ترتیب از چپ به راست؛ مرتبه صفر، یک، دو و سه



تغییرات پهنای دندانه بر روی ابعاد ساختارهای فرکتالی اثر می‌گذارد هرچه پهنای دندانه بزرگ‌تر شود، ابعاد فرکتال بزرگ‌تر می‌شود (Patel, 2017:10). ابعاد فرکتال قابلیت پُرشدن فضایی فرکتالی را در پی دارد که در شکل ٦ نشان داده شده است.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-14]

شکل ٦. ساختار مینکوفسکی افزایشی با پهنای دندانهٔ متفاوت.
پهنای دندانه‌ها به ترتیب از چپ به راست؛ ۱/۳ و ۱/۲ و ۲/۳ و ۳/٤



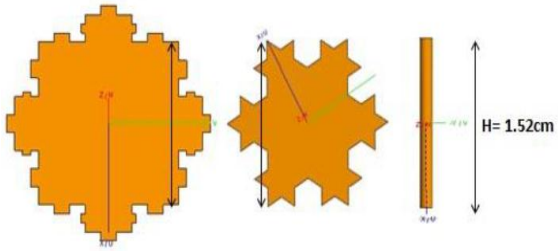
پس از معرفی ساختارها باید مراحل و شرایط شبیه‌سازی از نقطه‌نظر پهنای باند و سطح مقطع راداری در مورد ساختارهای فرکتالی پیشنهادی و نیز ساختار دوقطبی را انجام داد تا امکان مقایسه برای گزینش ساختار بهینه فراهم شود و نیز بتوان به‌طور دقیق میزان اثربخشی هندسهٔ جدید را نسبت به ساختارها و روش‌های گذشته را بیان کرد.

۲. ادبیات تحقیق

اصول و مبانی شبیه‌سازی و مقایسهٔ پارامترهای تک المان چف فرکتالی مینکوفسکی افزایشی با چف دوقطبی و المان چف فرکتالی کوخ دانه‌برفی با استفاده از واسطهای کاربری CAD FEKO و POST FEKO نرم‌افزار تحلیل الکترومغناطیس FEKO انجام می‌شود و پارامترهای شبیه‌سازی مطابق موارد زیر می‌باشد:

۲-۱. مطابق شکل ۷ انجام مراحل شبیه‌سازی و مقایسه برای هر سه ساختار با طول یکسان H=1.52 cm است.

شکل ۷. ابعاد ساختارهای شبیه‌سازی



۲-۲. انجام مراحل شبیه‌سازی در فرکانس 9GHz، بازهٔ 3-18GHz و با گام 1GHz.

۲-۳. انجام شبیه‌سازی‌ها برای هر کدام از ساختارها در حالت تک‌المان.

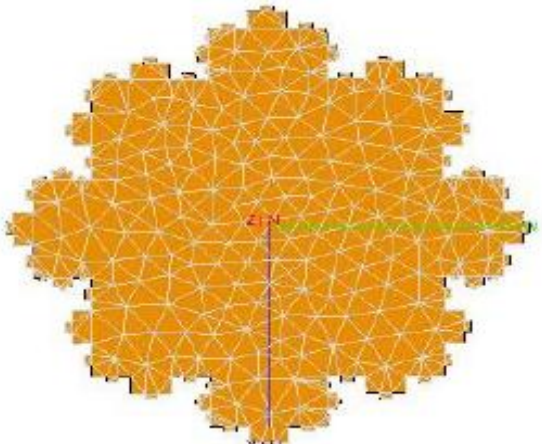
۲-٤. شبیه‌سازی به کمک موج تخت با شرایط

$$\varphi = 0^{\circ} \text{ ، } \theta = 10^{o} \text{ ، Magnitude} = 1\text{v/m}$$

و پلاریزاسیون خطی.

۲-۵. مطابق شکل ۸ مش‌بندی همهٔ ساختارها پیش از تحلیل الکترومغناطیسی مطابق با کوچک‌ترین ابعاد موجود در هر ساختار به‌منظور انجام محاسبات جریان‌های سطحی.

شکل ۸. ساختار مش‌بندی‌شده مینکوفسکی افزایشی مرتبهٔ سوم



۳. یافته‌های تحقیق

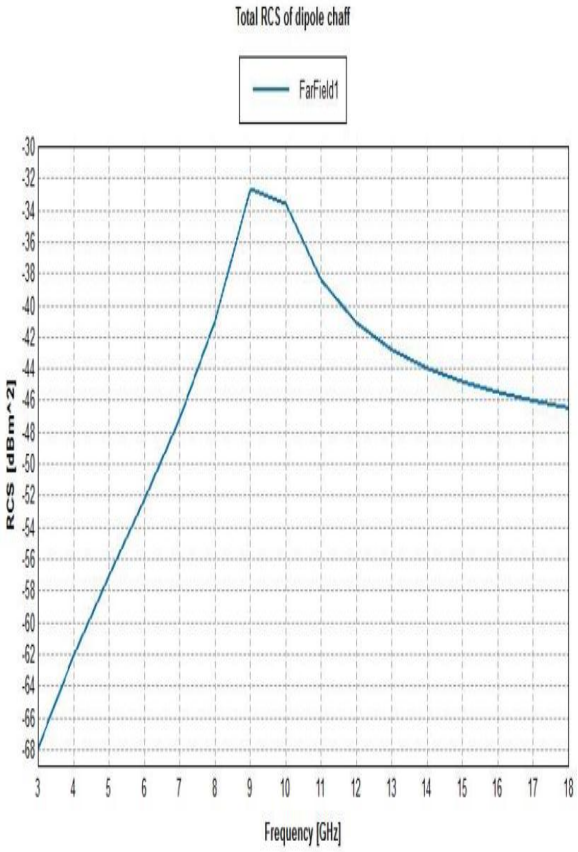
حاصل مراحل شبیه‌سازی، ساختارهای دوقطبی، فرکتال کوخ دانه‌برفی و فرکتال مینکوفسکی افزایشی در مراتب تکرار صفر، یک، دو و سه، نمودارهای سطح مقطع راداری بر حسب فرکانس می‌باشد، بنابراین با توجه به نمودارها می‌توان گفت:

۳-۱. مطابق شکل ۹ نمودار چف دوقطبی نشان می‌دهد، میزان RCS از ابتدای باند به تدریج افزایش پیدا

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-14]

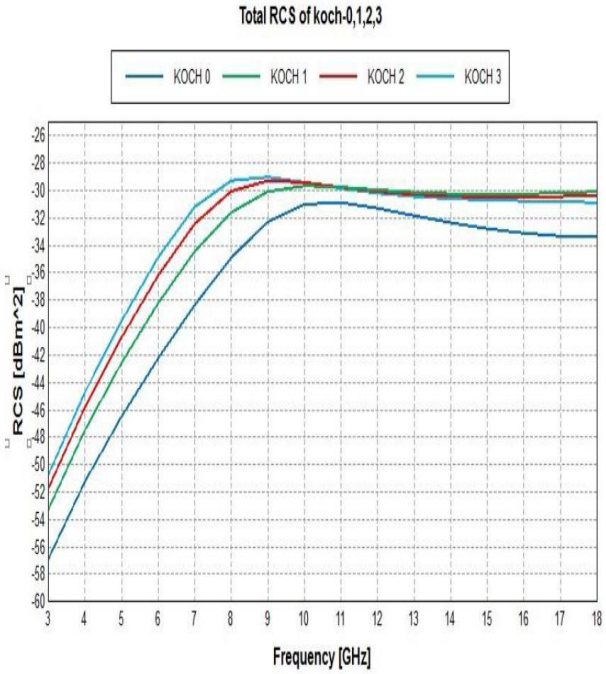
کرده و به بیشترین مقدار خود در بازهٔ 8-9GHz می‌رسد و پس از آن تا انتهای باند سیر نزولی دارد. بنابراین در این شرایط دوقطبی تنها در یک بازه 8-9GHz عملکرد قابل قبولی دارد.

شکل ۹. سطح مقطع و پهنای باند مؤثر راداری دوقطبی چف



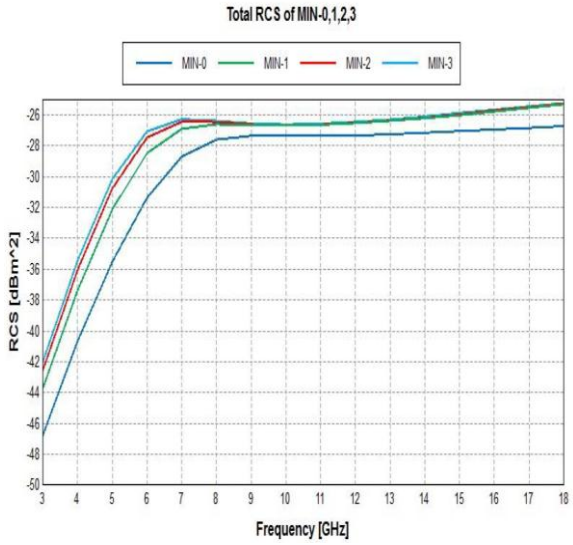
۲-۳. مطابق شکل ۱۰ در ساختار کوخ میزان RCS و پهنای باند مؤثر المان‌ها با افزایش مرتبهٔ فرکتال افزایش می‌یابد. ضمن اینکه RCS ساختار کوخ مرتبهٔ سوم در فرکانس 9GHz به میزان $3dBm^2$ در مقایسه با دوقطبی افزایش یافته و میزان افت سطح مقطع راداری ساختار کوخ در بازهٔ 9-18GHz نسبت به ساختار دوقطبی $15dBm^2$ کمتر است.

شکل ۱۰. مقایسهٔ سطح مقطع و پهنای باند مؤثر راداری المان چف فرکتال کوخ در مرتبه‌های صفر، یک، دو و سه



۳-۳. مطابق شکل ۱۱ در ساختار مینکوفسکی میزان RCS و پهنای باند مؤثر المان‌ها با افزایش مرتبهٔ فرکتال افزایش می‌یابد.

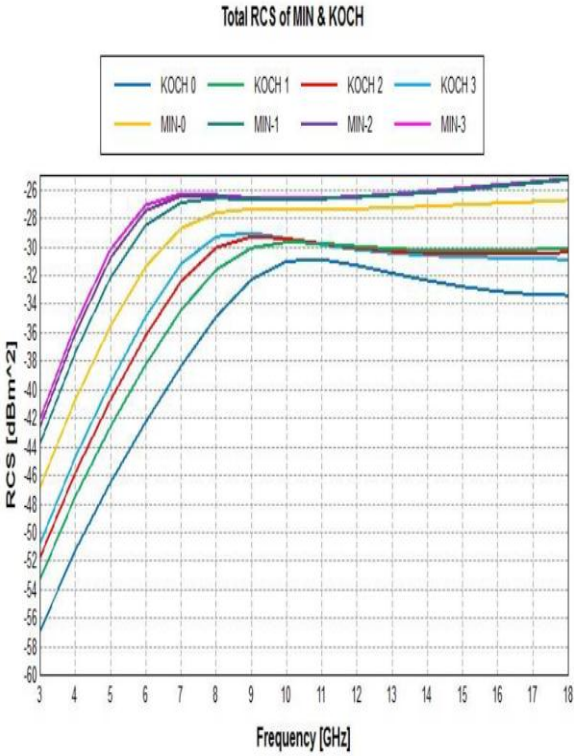
شکل ۱۱. مقایسهٔ سطح مقطع و پهنای باند مؤثر راداری المان چف فرکتال مینکوفسکی افزایشی در مرتبه‌های صفر، یک، دو و سه



[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-14]

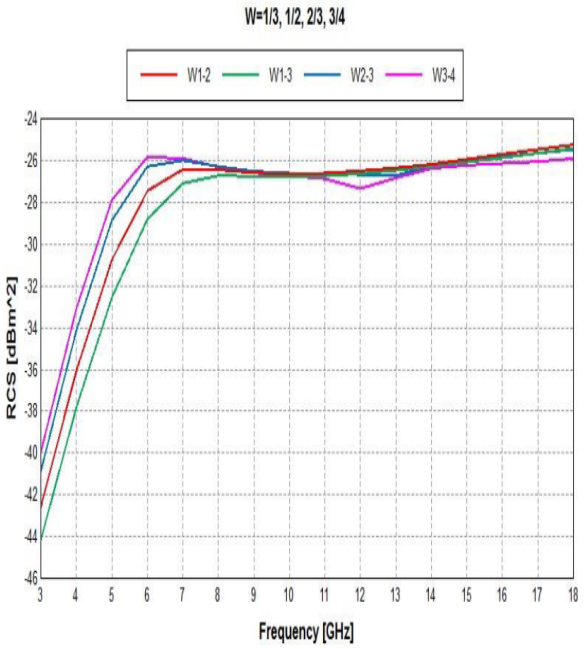
۴-۳. مطابق شکل ۱۲ دیده می‌شود که ساختار مینکوفسکی حلقوی افزایشی در همهٔ مرتبه‌ها در مقایسه با کوخ از RCS و سطح مقطع راداری بهتری برخوردار است؛ به‌گونه‌ای که RCS ساختار مینکوفسکی مرتبهٔ سوم در فرکانس 9GHz حدود $4dBm^2$ و پهنای باند آن حدود 2GHz از کوخ مرتبهٔ سوم بیشتر است.

شکل ۱۲. مقایسهٔ سطح مقطع و پهنای باند مؤثر راداری المان چف فرکتال کوخ و مینکوفسکی افزایشی در مرتبه‌های صفر، یک، دو و سه



۵-۳. مطابق شکل ۱۳ مقایسهٔ سطح مقطع و پهنای باند مؤثر راداری المان چف فرکتال مینکوفسکی مرتبهٔ دوم با پهنای دندانه‌های ۱/۳ و ۱/۲ و ۲/۳ و ۳/٤ حاکی از این است که باوجود اینکه این ساختار با پهنای دندانه‌های ۲/۳ و ۳/٤ در بازهٔ 3-8GHz از RCS بالاتری نسبت به پهنای دندانه ۱/۲ برخوردار هستند، اما این روند از بازهٔ 8-18GHz عوض شده و ساختار مینکوفسکی با پهنای دندانهٔ ۱/۲ نتایج بهتری را نشان می‌دهد، بنابراین ساختار مینکوفسکی با پهنای دندانهٔ ۱/۲ در این تحقیق اساس مقایسه با دیگر ساختارها است.

شکل ۱۳. مقایسهٔ سطح مقطع و پهنای باند مؤثر راداری المان چف فرکتال مینکوفسکی مرتبهٔ دوم با پهنای دندانه‌های ۱/۳ و ۱/۲ و ۲/۳ و ۳/٤



۶-۳. نمودار شکل ۱٤ نشان می‌دهد که سطح مقطع راداری المان چف مینکوفسکی حلقوی افزایشی مرتبهٔ سوم در فرکانس 9GHz، به میزان 6dB نسبت ساختار چف دوقطبی و 3dB نسبت به ساختار کوخ دانه برفی مرتبه سوم افزایش یافته است، همچنین از نقطه‌نظر پهنای باند در بازهٔ شبیه‌سازی شده (3-18GHz) ساختار مینکوفسکی ۷٤ درصد نسبت به ساختار دوقطبی و ۱٤ درصد نسبت به ساختار کوخ بهبود پهنای باند را نشان می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

ایجاد سطح مقطع راداری بزرگ توسط ابر چف و پوشش وسیع باندهای فرکانسی راداری از مهم‌ترین

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-14]

پارامترها در عملکرد مؤثر سامانه‌های چف می‌باشند. در سامانه‌های کنونی برای افزایش پهنای باند فرکانسی، الیاف چف دوقطبی با اندازه‌های متفاوت و متناسب با طول موج سیگنال راداری استفاده می‌شوند که کاهش تعداد الیاف مؤثر بازتابش‌کنندهٔ امواج الکترومغناطیسی و در نهایت، کاهش سطح مقطع راداری ابر چف را به همراه دارد. افزون بر این، در حال حاضر رادارها مجهز به سامانه‌های حذف کلاتر شده‌اند و می‌توانند هدف‌های کاذبی مانند ابرچف را از هدف واقعی تشخیص داده و آن را حذف کنند.

در این مقاله، نسل جدیدی از سامانه‌های چف بومی معرفی شده است که در شکل هندسی المان‌های چف آنها تغییر ساختاری ایجاد شده و ساختارهای فرکتال بر روی المان‌ها، پیاده‌سازی و شبیه‌سازی شده است که توانایی کاهش محدودیت‌ها را داشته و به‌دلیل جدید بودن می‌توانند در برابر سامانه‌های حذف کلاتر رادارها مقاوم‌تر باشند.

در این تحقیق به کمک نرم‌افزار تحلیل الکترومغناطیسی فکو، تک المان چف پیشنهادی دارای ساختار فرکتال مینکوفسکی افزایشی در مرتبه‌های صفر، یک، دو و سه با چف دوقطبی متداول و نمونهٔ تحقیقاتی موجود در دنیا که تک المان چف فرکتالی کوخ دانه‌برفی در مراتب صفر، یک، دو و سه می‌باشد، شبیه‌سازی و مقایسه شده است. با اعمال ساختار فرکتال مینکوفسکی حلقوی افزایشی مرتبهٔ سه بر الیاف چف، به‌دلیل بهره‌گیری از خاصیت فضاپرکنی می‌توان به سطح مقطع راداری بزرگ‌تری در مقایسه با نمونه‌های دوقطبی دست یافت، همچنین باند فرکانسی المان‌ها در حالت فرکتالی به‌دلیل خاصیت خودتشابهی این ساختارها در مقایسه با ساختارهای دوقطبی افزایش می‌یابد. این ساختار، در مقایسه با ساختار کوخ که به‌عنوان آخرین دستاورد غیربومی در این حوزه می‌باشد، از سطح مقطع و پهنای باند راداری بهتری برخوردار است؛ به‌گونه‌ای که در شرایط یکسان شبیه‌سازی، سطح مقطع راداری آن به میزان 6dB نسبت ساختار چف دوقطبی و 3dB نسبت به ساختار کوخ دانه‌برفی مرتبهٔ سوم افزایش را نشان می‌دهد و از نقطه‌نظر پهنای باند در بازهٔ شبیه‌سازی شده (3-18GHz) ساختار مینکوفسکی ۷٤ درصد نسبت به ساختار دوقطبی و ١٤ درصد نسبت به ساختار کوخ افزایش را نشان می‌دهد، بنابر این نتایج، پاسخ پرسش اصلی تحقیق که کم کردن محدودیت‌های کنونی سامانه‌های چف از طریق جایگزینی ساختارهای فرکتال با ساختار دوقطبی بود، داده شده است.

به‌طور کلی از این مقاله نتیجه‌گیری می‌شود که اعمال ساختار فرکتال بر الیاف چف دوقطبی کنونی باعث بهبود عملکرد و خاصیت پدافندی سامانه‌های چف می‌شود و می‌توان آن را به‌عنوان یک ساختار جدید در طراحی سامانه‌های چف بومی معرفی کرد.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-14]

فهرست منابع

1. Jones, RV (1978), ***Most Secret War***, London, Hamish Hamilton Ltd.
2. Ellsworth Air force USA (Aug 2010), ***Appendix C characteristics of chaff***, AFD-121022-061hdk.
3. Arnott, Patric, Huggins, A, Cilles, J (2004), ***Determination of Radar Chaff Diameter Distribution Function, Fall Speed and Concentration in the Atmosphere by Use of NEXRAD Radar***, Reno, Desert Reearch Institute
4. Kruger, Neil (Dec 2009), ***Modeling the EM Properties of Dipole Reflections With Application to Uniform Chaff Clouds***, South Africa, Department of Electrical and Electronic Engineering University of Stellenbosch.
5. Gabriele, Losa (March 2016), ***From Fractal Geometry to Fractal Analysis***, Switzerland, Locarno, Institute of Scientific Interdisciplinary Studies.
6. Baliarda, C (April 2007), ***US Patent, Space-Filling Miniature Antennas***, Barcelona, **US 7202822 B2** ,Verlening.
7. Dan, Jin, Cha Hao and Zuo Lei (2016), "A Simulation Study of Chaff Echo Signal Based on LFM", ***International Journal of Signal Processing***, Vol.9, No.4
8. Sharma, Narinder (Nov 2016), Fractal Antenna Geometries,***https://www.researchgate.net/publication/310757530***
9. Xenidis, Ioannis, Jason, Dauby, Maung, Myat and David Scholfield (8 Dec 2012), "Applications, Methodology, Technology", ***The Journal of Defense Modeling and Simulation***, DOI: 10.1177/1548512911430967online IEEE Trans Aerosp Electron Syst 1984; AES-20: 128–140. ,
10. Patel, Shanu, Dhubkaria, D (Feb 2017), "Design of Dual-band Minkowski Fractal Antenna by using Coupling for Wireless Communication System", ***International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology***, Vol. 6, Issue 2.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-10-14]