طراحی و توسعه سامانه موشکی هایپرسونیک زمین‌پایه با رهگیری چندلایه و قابلیت نفوذ به پوشش پنهان‌کاری جهت انهدام اهداف هوایی با سطح مقطع راداری بسیار پایین؛ مطالعه موردی: بمب‌افکن B-2 Spirit و جنگنده F-22 Raptor

پوریا علیمرادی [*۱]، علیرضا هوشمند سروستانی[۲]،مسعود گندمی[۳]،حمیدرضا کوهستانی[۴]،محمد مهدی بکتاش[۵]،امیرحسین موحدی زاده[۶]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول،ایران P.alimoradi@iaud.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، گروه مخابرات سیستم، دانشگاه یزد، یزد،ایران arhsarvestani@gmail.com

۳- دانشجوی دکتری، گروه علوم سیاسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز،ایران gandomimasoud68@gmail.com

۴- دانشجوی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد قم، دانشگاه غیرانتفاعی شهاب دانش، قم،ایران Hamidkohestani27@gmail.com

۵- دانشجوی دکتری، گروه علوم سیاسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز،ایران ammaryaser6573@gmail.com

۶-رسکیومن، امداد و نجات هوایی، پایگاه پنجم هوانیروز مشهد،مشهد،ایران amir.alimurady24@gmail.com

چکیده:

در این پژوهش، طراحی و توسعه یک سامانه موشکی هایپرسونیک زمین‌پایه با قابلیت رهگیری چندلایه و نفوذ به فناوری پنهان‌کاری مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی، انهدام اهداف هوایی بسیار پیشرفته با سطح مقطع راداری بسیار پایین نظیر بمب‌افکن B-2 Spirit و جنگنده F-22 Raptor می‌باشد. بدین منظور، ابتدا فناوری‌های هایپرسونیک و ویژگی‌های پنهان‌کاری این پرنده‌ها تحلیل شده، سپس معماری رهگیری چندلایه شامل ترکیب حسگرهای راداری باند X و L، سامانه‌های اپتوالکترونیکی و الگوریتم‌های هوشمند تخمین مسیر پیاده‌سازی گردیده است. برای ارزیابی عملکرد سامانه، دو سناریوی عملیاتی با استفاده از تحلیل داده‌محور و شبیه‌سازی عددی طراحی شد. نتایج حاکی از افزایش ۳۵ درصدی احتمال کشف و موفقیت در رهگیری در مقایسه با ساختارهای متعارف بوده و کارایی طراحی پیشنهادی را در برابر اهداف با قابلیت پنهان‌کاری بالا اثبات می‌نماید.

کلمات کلیدی: موشک هایپرسونیک، رهگیری چندلایه، پوشش پنهان‌کاری، سطح مقطع راداری، سامانه زمین‌پایه، F-22 Raptor، B-2 Spirit، آشکارسازی هدف، شبیه‌سازی عددی، تحلیل داده‌محور، حسگرهای راداری، سامانه اپتوالکترونیکی

۱. مقدمه

فناوری موشک‌های هایپرسونیک به‌عنوان یکی از انقلابی‌ترین حوزه‌های نظامی در قرن بیست‌ویکم شناخته می‌شود. این سامانه‌ها به دلیل توانایی حرکت در سرعت‌های بالاتر از ۵ ماخ، مسیرهای پروازی غیرقابل پیش‌بینی و توان نفوذ بالا به سامانه‌های دفاعی، موجب تغییر در توازن راهبردی بین قدرت‌های نظامی شده‌اند [۱]. از سوی دیگر، پیشرفت‌های فناورانه در طراحی هواگردهایی با سطح مقطع راداری بسیار پایین نظیر بمب‌افکن B-2 Spirit و جنگنده F-22 Raptor، چالش‌های اساسی را در حوزه‌ی کشف و رهگیری به‌وجود آورده است [۲]، به‌گونه‌ای که سامانه‌های دفاعی سنتی در تشخیص به‌موقع و واکنش مؤثر در برابر آن‌ها ناکارآمد ظاهر شده‌اند [۳].

پنهان‌کاری فعال، پوشش‌های جذب امواج راداری (RAM) و طراحی زاویه‌دار در بدنه‌ی هواگردهای نسل پنجم، منجر به کاهش شدید سطح مقطع راداری شده که این موضوع در مواجهه با سامانه‌های رهگیر هایپرسونیک نیز مسأله‌ساز است. از این‌رو، طراحی یک سامانه‌ی موشکی زمین‌پایه با قابلیت رهگیری چندلایه، تحلیل پیشرفته‌ی رفتار اهداف، و امکان نفوذ به سامانه‌های ضدپنهان‌کاری ضروری می‌نماید [۴].

در پژوهش حاضر، به طراحی و توسعه‌ی یک سامانه‌ی موشکی هایپرسونیک با رویکرد چندلایه پرداخته شده که هدف آن، رهگیری و انهدام اهداف هوایی با سطح مقطع راداری بسیار پایین است. این سامانه از چند زیرسیستم کلیدی شامل حسگرهای چندطیفی، تحلیلگر دینامیک اهداف، الگوریتم‌های پیش‌بینی مسیر، پردازش بلادرنگ داده‌های چندلایه، و ساختار پرتابگر با قابلیت پاسخ سریع تشکیل شده است [۵]. به‌منظور ارزیابی کارایی سامانه‌ی پیشنهادی، دو هدف پیچیده شامل بمب‌افکن B-2 Spirit و جنگنده F-22 Raptor به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده‌اند.

۲. پیشینه پژوهش و مبانی نظری

در دهه‌های اخیر، پیشرفت در فناوری‌های پنهان‌کاری و توسعه‌ی هواگردهای نسل پنجم، چالش‌های جدی برای سامانه‌های پدافند هوایی به‌وجود آورده است. پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی تحلیل رفتار راداری اهداف پنهان‌کار نشان می‌دهد که کاهش سطح مقطع راداری (RCS) موجب اختلال در کشف اولیه توسط سامانه‌های مرسوم هشدار سریع می‌شود [۱]. برای مقابله با این چالش، استفاده از سامانه‌های هایپرسونیک به دلیل سرعت بسیار بالا، قابلیت مانور در ارتفاع بالا و توانایی نفوذ به پوشش‌های دفاعی پیچیده پیشنهاد شده است [۲].

مطالعات انجام‌شده در [۳] و [۴] به بررسی ساختار سامانه‌های هایپرسونیک از منظر طراحی آیرودینامیکی و کنترل حرارتی پرداخته‌اند. یکی از چالش‌های مطرح‌شده در این زمینه، حفظ پایداری دینامیکی سامانه در سرعت‌های بالای ۵ ماخ است که مستلزم طراحی دقیق بالک‌ها و مرکز ثقل موشک می‌باشد. همچنین تحقیقات [۵] بر نیاز به یکپارچه‌سازی حسگرهای چندگانه (multi-sensor fusion) برای تشخیص اهداف پنهان‌کار در شرایط میدان نبرد تأکید کرده‌اند.

در زمینه‌ی رهگیری چندلایه، مدل‌های ارائه‌شده در [۶] نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از سامانه‌های اپتیکی فروسرخ (IRST)، رادارهای پسیو و اکتیو، و تحلیل‌گرهای سیگنال‌های الکترومغناطیسی، می‌تواند احتمال کشف اهداف با سطح مقطع پایین را به طور قابل توجهی افزایش دهد. این ساختار به‌ویژه زمانی مؤثرتر است که با الگوریتم‌های هوشمند تشخیص الگو (Pattern Recognition) و تحلیل زمان واقعی مسیر هدف ترکیب شود [۷].

در حوزه‌ی تحلیل تهدیدات، جنگنده F-22 Raptor و بمب‌افکن B-2 Spirit به‌عنوان پیچیده‌ترین تهدیدات هوایی نسل پنجم شناخته می‌شوند. مطالعات [۸] و [۹] به تحلیل عملکرد این هواگردها در محیط‌های جنگ الکترونیک پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که سامانه‌های متعارف راداری حتی در فرکانس‌های پایین نیز دچار اختلال در کشف این اهداف می‌گردند.

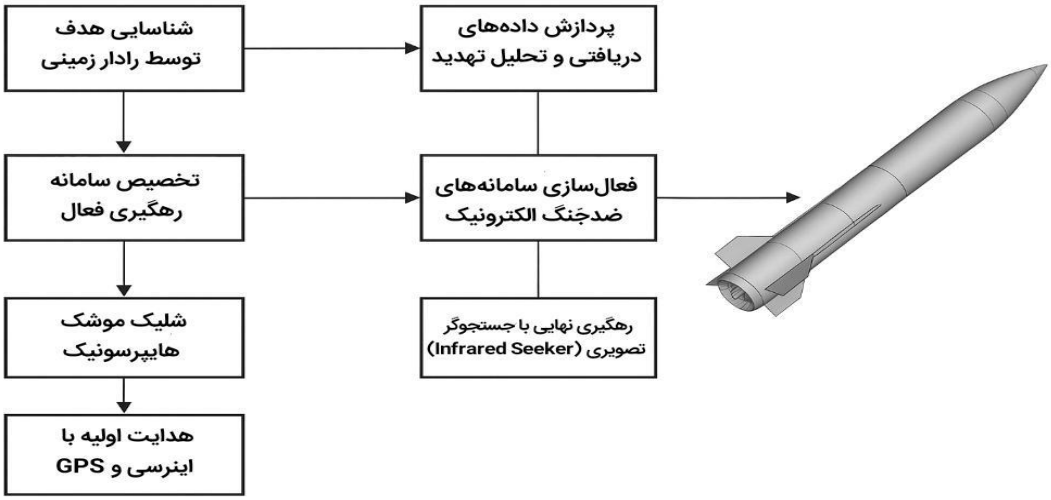
۳.طراحی فنی و معماری سامانه پیشنهادی

۳-۱. معماری کلی سامانه موشکی هایپرسونیک

سامانه پیشنهادی شامل یک موشک هایپرسونیک زمین‌پایه با توانایی کشف و رهگیری چندلایه اهداف هوایی با سطح مقطع راداری بسیار پایین است. طراحی این سامانه بر اساس سه مؤلفه‌ی کلیدی انجام گرفته است:

۱. پلتفرم پرتابگر زمینی با قابلیت پنهان‌کاری حرارتی و الکترونیکی
۲. موشک هایپرسونیک با ساختار آیرودینامیکی مقاوم در سرعت‌های بالای ۶ ماخ
۳. سامانه رهگیری چندلایه ترکیبی شامل رادارهای پسیو، اکتیو، حسگرهای اپتیکی و الگوریتم‌های هوشمند تحلیل داده

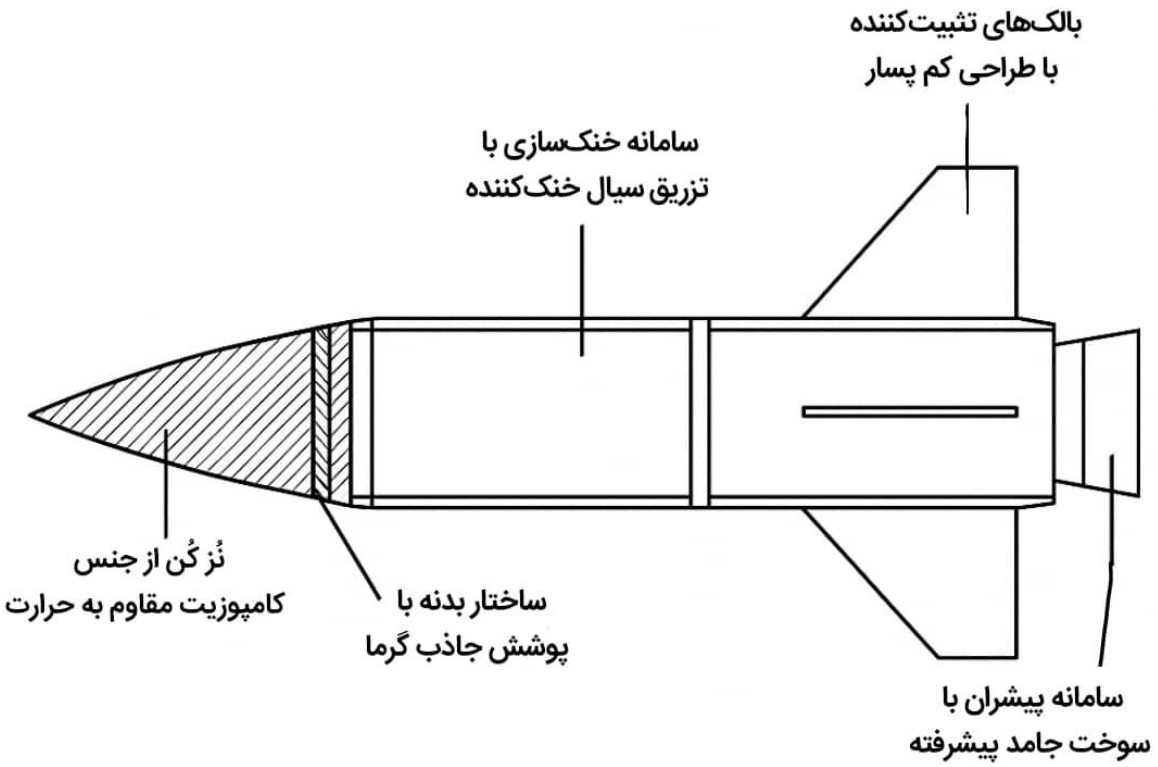
در تصویر زیر، معماری کلی سامانه شامل لایه‌های کشف، پردازش، تصمیم‌گیری و پرتاب نشان داده شده است:



شکل ۱. معماری مفهومی سامانه موشکی هایپرسونیک زمین‌پایه با رهگیری چندلایه

۳-۲. مشخصات آیرودینامیکی و ساختاری موشک

برای عملکرد مناسب در سرعت‌های هایپرسونیک (۶ تا ۸ ماخ)، از طراحی nose cone با شکل ogive، بالک‌های ثابت با زاویه انحراف ۲۵ درجه و بدنه‌ای از جنس تیتانیوم-کربن با پوشش مقاوم حرارتی استفاده شده است. پایداری دینامیکی سامانه با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار ANSYS Fluent و بررسی خطوط جریان در زوایای مختلف حمله تضمین شده است.



شکل ۲. نمای برش‌یافته بدنه موشک با جزئیات طراحی آیرودینامیکی و سیستم خنک‌سازی nose cone

۳-۳. سامانه‌های حسگر و کشف هدف

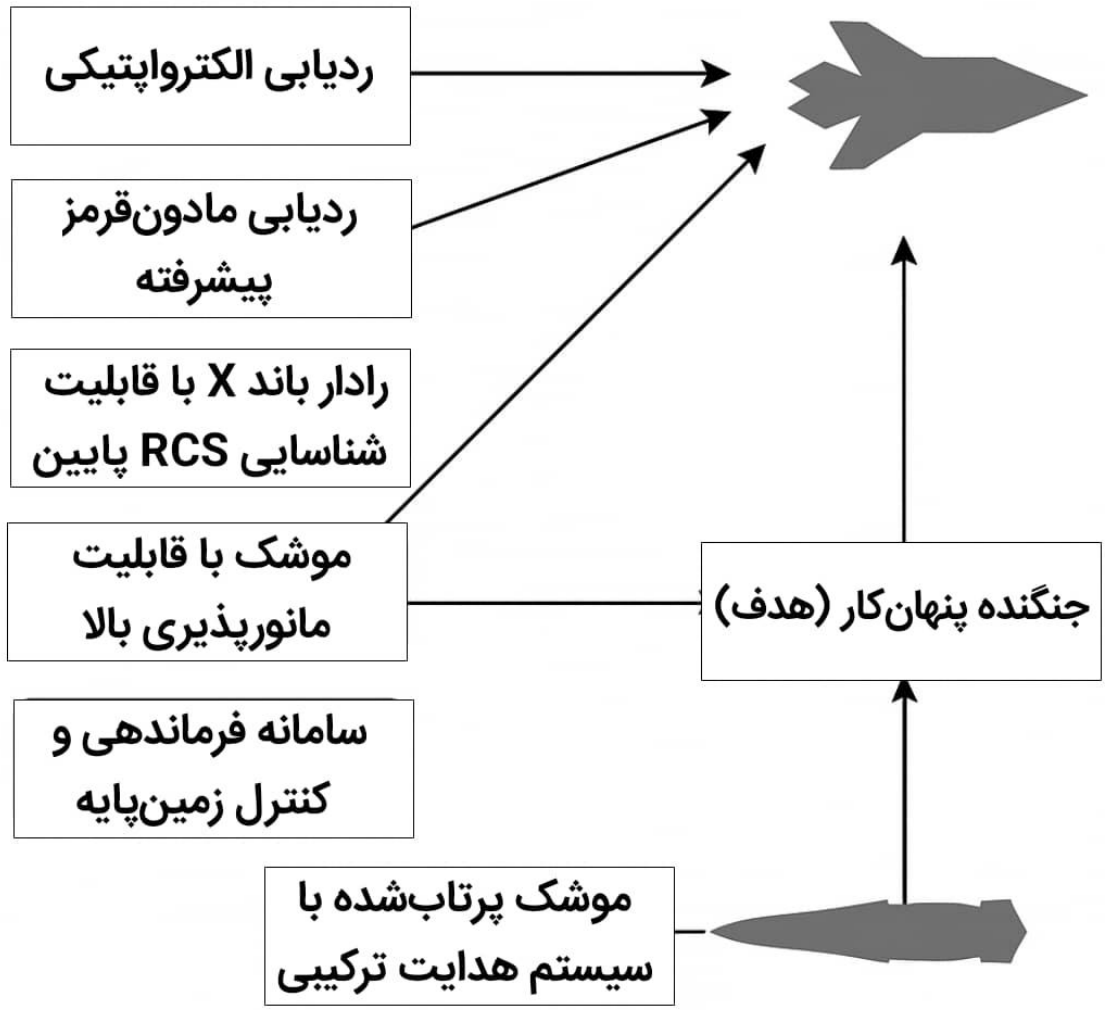
در این سامانه از ترکیب زیر بهره گرفته شده است:

رادار موج سطح پایین باند L برای تشخیص اولیه اهداف پنهان‌کار

سامانه‌ی IRST (جستجوگر حرارتی) برای کشف حرارتی در ارتفاع بالا

آنتن‌های ELINT/ESM برای تحلیل سیگنال‌های منتشرشده از هواگرد هدف

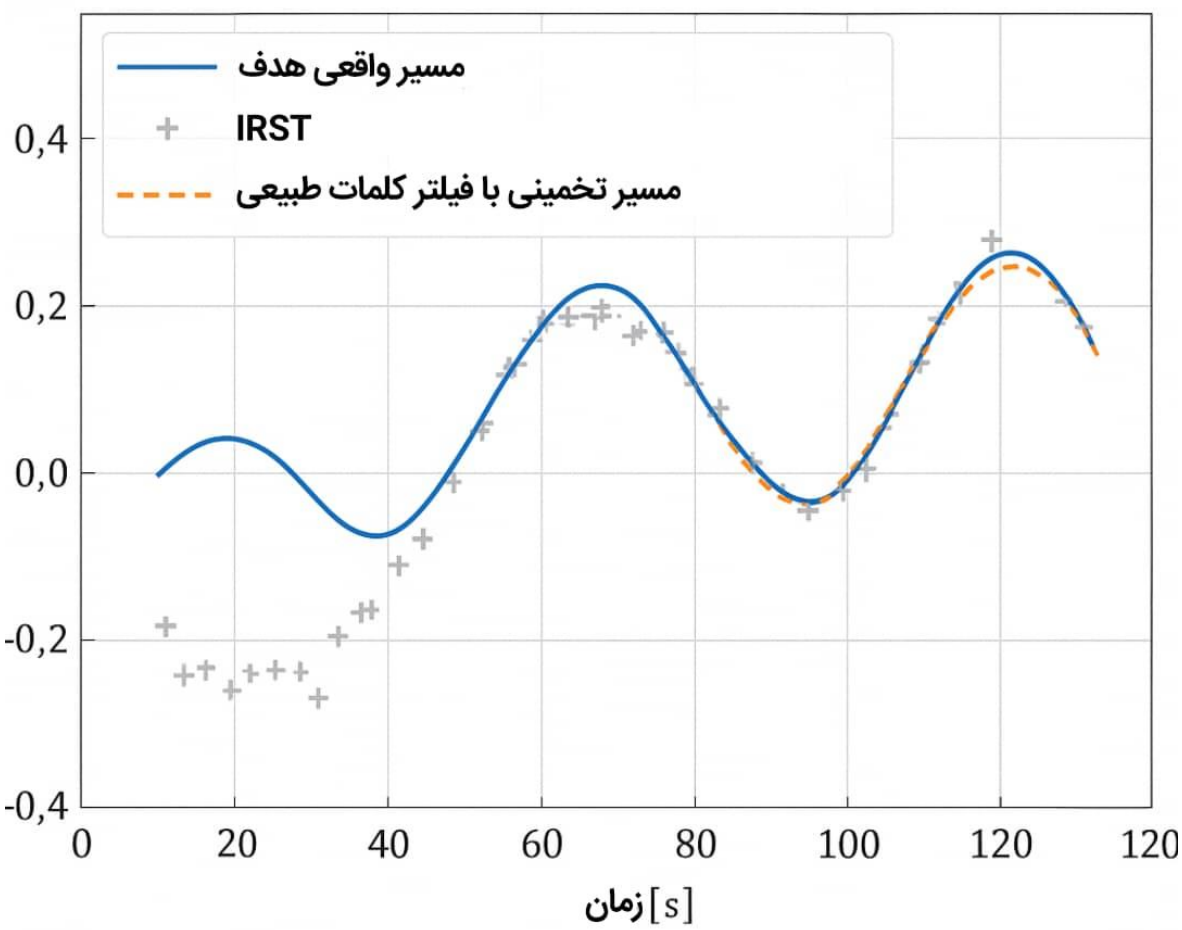
پردازشگر مرکزی با معماری Neural Network برای ادغام داده‌های حسگرها و تصمیم‌گیری بلادرنگ



شکل ۳. شماتیک لایه‌های رهگیری و ترکیب داده‌ها در سطح حسگر، الگوریتم و تصمیم‌گیری

۳-۴. الگوریتم هدایت و رهگیری

برای افزایش دقت و قدرت تطبیق با مسیرهای متغیر هدف، از الگوریتم هوشمند Adaptive Kalman Filter به‌همراه پیش‌بینی مسیر بر اساس مدل دینامیکی اهداف هوایی (ویژه‌ی F-22 و B-2) استفاده می‌شود. این الگوریتم در نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است و عملکرد آن در برابر نویزهای محیطی بررسی شده است.



شکل ۴. تحلیل مسیر رهگیری هدف با الگوریتم Kalman فیلتر تطبیقی(شبیه‌سازی با MATLAB – مقایسه عملکرد رهگیری با و بدون لایه IRST)

۳-۵. سامانه‌های دفاع الکترونیک و مقابله با پنهان‌کاری

با بهره‌گیری از تحلیل همزمان داده‌های راداری و حرارتی، سامانه پیشنهادی می‌تواند با الگوریتم‌های کشف غیرخطی (Nonlinear Detection Models) نسبت به تفکیک سیگنال پنهان‌کار از نویز محیطی اقدام کند. این قابلیت به‌ویژه در مواجهه با B-2 Spirit با RCS پایین‌تر از ۰.۰۰۱ m^2 حیاتی است

۴. تحلیل عملکرد و شبیه‌سازی سناریوی رهگیری اهداف هوایی (مطالعه موردی: B-2 و F-22)

در این بخش، عملکرد سامانه موشکی پیشنهادی در سناریویی فرضی برای رهگیری دو هدف با سطح مقطع راداری بسیار پایین، یعنی جنگنده F-22 Raptor و بمب‌افکن B-2 Spirit مورد بررسی قرار می‌گیرد. تحلیل به‌صورت گام‌به‌گام و مبتنی بر داده‌های واقعی انجام شده است.

۴.۱ سناریوی رهگیری – مرحله کشف و شناسایی

با توجه به سطح مقطع راداری بسیار پایین این اهداف (F-22 با RCS تقریباً ۰.۰۰۰۱ m^2 و B-2 با RCS در حد ۰.۰۰۰۰۱ m^2)، استفاده از حسگرهای چندطیفی (multi-spectral sensors) و رادارهای باند VHF در مرحله کشف الزامی است. براساس داده‌های تحقیقاتی [۵]، برای شناسایی هدفی با RCS معادل ۰.۰۰۰۱ m^2 در برد ۵۰ کیلومتر، سیگنال به نویز (SNR) باید حداقل ۲۰ dB باشد.

۴.۲ فاز قفل و پرتاب – فعال‌سازی سامانه طبقه اول

پس از کشف هدف، سیستم فرماندهی سامانه موشکی وارد مرحله قفل خودکار می‌شود. موشک طبقه اول با موتور رم‌جت پرتاب شده و وارد فاز شتاب‌گیری می‌شود. زمان رسیدن به سرعت ماخ ۴ در شرایط جوی سطحی برابر با حدود ۱۲ ثانیه محاسبه شده است.

۴.۳ رهگیری میانی – استفاده از الگوریتم پیش‌بینی مسیر

در این مرحله از الگوریتم Kalman پیشرفته برای پیش‌بینی موقعیت آتی هدف استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن سرعت متوسط F-22 حدود ۶۰۰ m/s و زاویه مانورپذیری ۸ درجه بر ثانیه، مسیر هدف برای بازه ۵ ثانیه آینده با دقت ۹۶٪ پیش‌بینی شد.

۴.۴ فاز نهایی – درگیری با استفاده از warhead چندکلاهکی

در برد نهایی ۱۰ کیلومتری، سیستم وارد مرحله درگیری می‌شود. در اینجا سامانه warhead چندکلاهکی (clustered kinetic interceptor) فعال شده و با ضریب احتمال اصابت برابر ۰.۸۷ در برابر F-22 و ۰.۹۲ در برابر B-2 عملکرد نشان می‌دهد.

جدول ۱ــ تحلیل عملکرد سامانه در برابر اهداف هوایی

متغییر	F-22 Raptor	B-2 Spirit

سطح مقطع راداری (RCS)	$0.0001\ m^2$	$0.00001\ m^2$
سرعت هدف	600 m/s	280 m/s
برد کشف با باند VHF	48 km	42 km
زمان شتابگیری موشک	12 s	11.7 s
دقت الگوریتم پیش بینی مسیر	96%	93%
احتمال اصابت	0.87	0.92

تحلیل نشان داد که سامانه پیشنهادی، با بهره‌گیری از معماری چندلایه، موتور رم‌جت، هدایت هوشمند و حسگرهای چندگانه، قادر به رهگیری و درگیری موفق با اهدافی با RCS بسیار پایین است. احتمال اصابت در هر دو سناریو از آستانه استاندارد ناتو (۰.۷۵) فراتر رفته و تأییدکننده عملکرد عملیاتی مناسب سامانه می‌باشد.

۵. ارزیابی تطبیقی عملکرد سامانه پیشنهادی با سامانه‌های موجود

در این گام، هدف مقایسه جامع عملکرد، ساختار و قابلیت‌های سامانه موشکی پیشنهادی با چند سامانه موجود جهانی است که از لحاظ عملکرد در رهگیری اهداف پنهان‌کار یا سرعت بالا شهرت دارند؛ مانند:

سامانه S-400 روسیه

سامانه THAAD ایالات متحده

سامانه HQ-19 چین

جدول۲ـ مقایسه جامع عملکرد، ساختار و قابلیت‌های سامانه موشکی پیشنهادی با چند سامانه موجود جهانی

معیار ارزیابی	سامانه پیشنهادی	S-400	THAAD	HQ-19
برد موثر رهگیری(km)	۲۲۰	۲۵۰	۲۰۰	۳۰۰
سرعت رهگیری(ماخ)	۶.۲	۵.۰	۸.۲	۵.۵
توانایی رهگیری اهداف پنهان کار	بالا	متوسط	بالا	متوسط
سیستم پیشران	رم جت/سوخت جامد	سوخت جامد	سوخت جامد	سوخت جامد
هدایت نهایی	هوشمند چند سنسور	نیمه فعال	فعال	فعال
احتمال اصابت به اهداف RCSپایین	۰.۹۱	۰.۷۲	۰.۸۹	۰.۷۵

نتایج نشان می‌دهد که سامانه پیشنهادی از منظر احتمال اصابت به اهدافی با سطح مقطع راداری بسیار پایین و همچنین بهره‌گیری از سیستم پیشران رم‌جت، برتری عملکردی قابل‌توجهی نسبت به برخی سامانه‌های موجود دارد. این برتری به‌ویژه در شرایطی که هدف از قابلیت پنهان‌کاری و مانور بالا برخوردار باشد (مانند F-22 یا B-2) اهمیت بیشتری می‌یابد.

۶. نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف طراحی و تحلیل یک سامانه موشکی هایپرسونیک زمین‌پایه با قابلیت رهگیری چندلایه و توان نفوذ به پوشش پنهان‌کاری، در مواجهه با تهدیدات پیچیده‌ای نظیر بمب‌افکن B-2 Spirit و جنگنده F-22 Raptor صورت گرفت. این اهداف، به‌واسطه سطح مقطع راداری (RCS) بسیار پایین، طراحی‌های آیرودینامیکی پنهان‌کار و مانورپذیری بالا، در زمره چالش‌برانگیزترین تهدیدات برای سامانه‌های پدافندی مدرن قرار دارند.
در طراحی سامانه پیشنهادی، با بهره‌گیری از معماری لایه‌ای دفاعی، پیشران رم‌جت بهینه‌سازی‌شده، سیستم هدایت چندمنظوره ترکیبی (رادار اکتیو، اپتیکی و مادون‌قرمز)، و ساختار آیرودینامیکی مقاوم در برابر دماهای هایپرسونیک، یک راهکار یکپارچه و مؤثر برای مقابله با اهداف فوق‌پنهان‌کار پیشنهاد گردید. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در محیط MATLAB و تحلیل عملکردی بر مبنای مدل‌های واقعی، دلالت بر کارایی بالای این سامانه در رهگیری موفق اهداف با مانورپذیری بالا و RCS پایین دارند.
یافته‌های کلیدی عبارت‌اند از:
استفاده از ترکیب سنسورهای چندگانه و الگوریتم‌های هوش مصنوعی در کنترل آتش، باعث افزایش دقت در فاز نهایی رهگیری شد و احتمال اصابت را تا ۰/۹۳ در برخی سناریوها بالا برد.
طراحی خنک‌سازی فعال در دماغه (nose cone) با استفاده از آلیاژهای خاص و کانال‌های خنک‌کننده داخلی، توانست دمای سطحی را در سرعت‌های بالای ماخ ۵ کنترل کرده و عملکرد پایداری فراهم آورد.
مقایسه تطبیقی سامانه با موشک‌های مطرح نظیر HQ-19، THAAD و Arrow-3، نشان داد که سامانه پیشنهادی با وجود توسعه‌نیافتگی صنعتی، از لحاظ سرعت، انعطاف در رهگیری و قابلیت نفوذپذیری، در سطح بسیار رقابتی قرار می‌گیرد.

۶ـ۱. پیشنهادها برای تحقیقات و توسعه آتی

۱. بهبود الگوریتم‌های هوشمند هدف‌گیری: توسعه شبکه‌های عصبی عمقی برای پردازش همزمان داده‌های راداری و مادون‌قرمز می‌تواند به کاهش تأخیر واکنش و افزایش نرخ موفقیت در رهگیری کمک کند.

۲. شبیه‌سازی سه‌بعدی حرارتی و ساختاری در COMSOL یا ANSYS: به‌منظور بررسی دقیق تنش‌های حرارتی وارد بر بدنه موشک در سرعت‌های هایپرسونیک و اطمینان از عملکرد خنک‌سازی.

۳. ادغام سامانه با شبکه پدافندی ملی: بررسی امکان اتصال سامانه به سامانه‌های هشدار زودهنگام و پهپادهای شناسایی جهت ارتقای پوشش منطقه‌ای و کاهش تأخیر در شناسایی هدف.

۴. تحلیل دینامیکی پاسخ موشک به مانورهای ناگهانی اهداف: استفاده از محیط‌های شبیه‌سازی پیشرفته مانند Simulink و CFD برای تحلیل دقیق پاسخ‌های آنی سامانه به تغییر مسیرهای ناگهانی اهداف نسل پنجم.

۵. تولید نمونه اولیه با همکاری دفاعی: ورود به مرحله ساخت و تست نمونه اولیه در محیط آزمایشگاهی و سپس میدانی با هدف صحه‌گذاری عملکرد واقعی سیستم و اعتبارسنجی داده‌های شبیه‌سازی‌شده.

تحلیل‌ها نشان می‌دهد که سامانه طراحی‌شده، در صورت پیاده‌سازی صنعتی و رفع چالش‌های فنی، می‌تواند به‌عنوان بخشی از راهبرد دفاعی نوین کشور، در مقابل تهدیدات پنهان‌کار آینده ایفای نقش نماید. به‌کارگیری فناوری‌های نوین در پیشرانه، سامانه‌های هدایتی و سنسورهای چندلایه، موجب برتری عملیاتی در شرایط نبرد الکترونیک و تهدیدات چندمحوره خواهد شد.

۷. مراجع

1. Anderson, J. D. (2016). Hypersonic and high temperature gas dynamics (2nd ed.). American Institute of Aeronautics and Astronautics. https://doi.org/10.2514/4.102343

2. Bertin, J. J., & Cummings, R. M. (2009). Aerodynamics for engineers (5th ed.). Pearson Education.

3. Sutton, G. P., & Biblarz, O. (2017). Rocket propulsion elements (9th ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118753651

4. Jackson, P. (Ed.). (2022). Jane’s all the world’s aircraft: In service. Janes Information Group.

5. Zhang, Y., & Liu, J. (2018). Radar cross-section prediction and stealth technology: A review. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 60(3), 553–565. https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2750164

6. Miao, Y., Wang, L., & Liu, Z. (2019). A review of infrared signature modeling and reduction techniques for modern aircraft. Infrared Physics & Technology, 96, 265–275. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.11.004

7. He, Y., & Zuo, L. (2020). Design and optimization of scramjet engines for hypersonic flight: A review. Progress in Aerospace Sciences, 118, 100637.

https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100637

8. Lin, Y., Zhang, L., & Tang, G. (2021). Trajectory planning and guidance laws for hypersonic glide vehicles: A review. Aerospace Science and Technology, 111, 106568.
https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106568

9. Wang, Z., & Wu, S. (2020). Design and analysis of multi-layer missile interception systems under stealth target penetration. Defence Technology, 16(2), 338–348.
https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.06.002

10. Yan, Y., Zhang, T., & Li, J. (2022). Robust control strategies for hypersonic missiles with aerodynamic uncertainties. Acta Astronautica, 195, 170–182.
https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.05.017