

# اصلاح سیستم هدایت یک موشک آشیانه‌یاب مادون قرمز با استفاده از سیستم فازی برای مقابله با اهداف کاذب

محمد فرخی  
دانشگاه علم و صنعت ایران  
[farrokhi@iust.ac.ir](mailto:farrokhi@iust.ac.ir)

علی محرم‌پور  
سازمان صنایع هوافضا  
صنایع شهید شاه‌آبادی  
[rmo\\_afr@iust.ac.ir](mailto:rmo_afr@iust.ac.ir)

موشک‌ها به عنوان یک مسئله اصلی ذهن طراحان اهداف هوائی (هواپیماها و هلیکوپترها) را بخود مشغول ساخت. یک روش ساده مقابله با این موشک‌ها پرتاب فلیر (هدف کاذب) از اهداف هوائی می‌باشد. یک فلیر مادون قرمز معمولاً از هدف هوائی مهاجم پرتاب می‌گردد و دارای تشعشعی چندین برابر تشعشع هدف است. با توجه به این که معمولاً سرجستجوگر این موشک‌ها منابع با شدت بیشتر را ردیابی می‌نماید، بنابراین سرجستجوگر، هدف کاذب (فلیر) را ردیابی می‌کند و در ردیابی هدف واقعی دچار اختلال می‌گردد.

در این مقاله از سه روش مختلف فازی برای مقابله با اهداف کاذب استفاده شده است. نتایج بدست آمده از سه روش مذکور با استفاده از شبیه‌سازی شش درجه آزادی، با یکدیگر و با حالت هدایت خاموش مقایسه شده است.

## ۲- موشک‌های آشیانه‌یاب مادون قرمز

در حال حاضر، بیشتر موشک‌های تاکتیکی با ابعاد کوچک، از سیستم هدایت مادون قرمز استفاده می‌نمایند. یکی از مهمترین اجزای این موشک‌ها، جستجوگر مادون قرمز آن می‌باشد. مختصات یاب هدف که بخش عمده جستجوگر

**چکیده:** مطالعه و تحقیق در مورد روش‌های مقابله با جمینگ‌های مادون قرمز امروزه جزء اصلی‌ترین کارهای طراحان سیستم‌های موشکی مادون قرمز می‌باشد. در این مقاله با استفاده از تخمین سری زمانی آشوبگونه با سیستم فازی ساختار موازی<sup>۱</sup>، سه روش مختلف برای اصلاح سیستم هدایت یک موشک آشیانه‌یاب مادون قرمز جهت مقابله با اهداف کاذب ارائه می‌گردد. سیستم‌های فازی شامل قوانین فازی از نوع سوگنو هستند که بوسیله آموزش داده‌های ورودی-خروجی مدل شده‌اند. آموزش سیستم‌های فازی بصورت خارج - خط صورت می‌گیرد. با استفاده از شبیه‌سازی شش درجه آزادی، عملکرد این سه روش در حالت روی-خط با هم مقایسه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** تخمین سری زمانی، موشک آشیانه‌یاب مادون قرمز، هدف کاذب، سیستم فازی ساختار موازی، جمینگ.

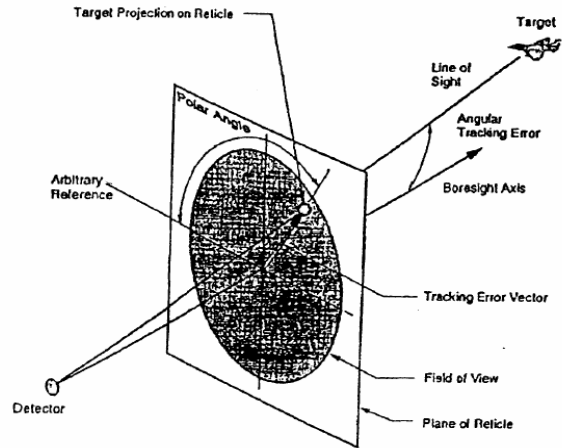
## ۱- مقدمه

بعد از پیدایش نسل اول موشک‌های آشیانه‌یاب مادون قرمز و موفقیت آنها بر علیه هواپیماهای مهاجم، ایده مقابله با این نوع

<sup>1</sup> Parallel-Structure Fuzzy System (PSFS)



شکل ۲: یک نمونه فلیر



شکل ۱: بردار خطای روی صفحه رتیکل

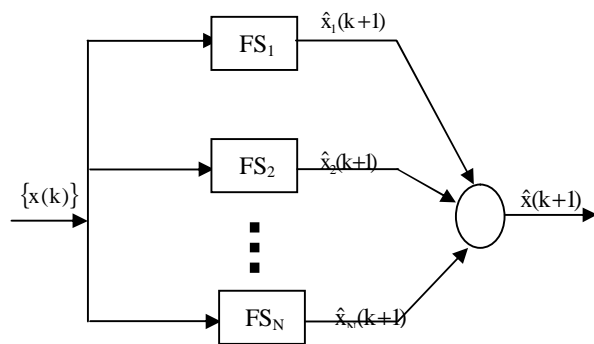
به موشک وارد شود متناسب با اندازه بردار خطا روی صفحه رتیکل و امتداد آن به موازات این بردار خطا خواهد بود. بر این اساس، سیگنالی که دامنه آن حاوی اطلاعات مربوط به بزرگی بردار شتاب و فاز آن، فاز شتاب در صفحه ۷۰٪ بدنی موشک را تعیین می‌کند، سیگنال ورودی به واحد اتوپیلوت موشک خواهد بود که جهت هدایت موشک استفاده می‌گردد [۱].

### ۳- تأثیرات جمینگ های مادون قرمز بر روی سرجستجوگر

یکی از مشکلاتی که این موشک‌ها در برخورد با اهداف با آن روبرو می‌شوند پرتاب اهداف کاذب توسط هدف می‌باشد. این اهداف موجب انحراف سرجستجوگر از مسیر درست و از دست دادن هدف می‌شوند. روش متداول جهت انحراف موشک‌های مادون قرمز استفاده از اهداف کاذب شامل: فلیر (شکل ۲) و دیکوی‌های حرارتی می‌باشد. معمولاً اهداف کاذبی که هدف در فواصل زمانی مختلف و بصورت منقطع پرتاب می‌کند فلیر نامیده می‌شود. اگر اهداف کاذب بصورت توده‌ای پرتاب شوند تولید ابر حرارتی نموده و دیکوی حرارتی نامیده می‌شود. دیکوی حرارتی در حقیقت انتشار سطوح فلزی داغ (فلیر) بصورت انبوه مطابق با شعله هواپیما می‌باشد که موجب انحراف جستجوگر می‌گردد. علت اصلی بکارگیری روش پرتاب فلیر یا ایجاد دیکوی حرارتی، ارزان بودن آنها و قابلیت نصب آسان این سیستم‌ها روی هواپیماها و هلیکوپترها می‌باشد [۲ و ۳].

مادون قرمز را تشکیل می‌دهد، اخذ اطلاعات ساطع شده از هدف، تعیین موقعیت نسبی هدف و موشک و بالاخره ردگیری هدف (قفل شدن روی هدف) را بر عهده دارد. مختصات یاب هدف دارای یک سیستم اپتیکی است. سیستم اپتیکی شامل لنزهای اپتیکی، آینه‌ها و رتیکل می‌باشد. این مجموعه، حرکت دو درجه آزادی روتور ژایرو را دارا می‌باشد به این معنی که همواره به طرف هدف حرکت می‌کند. تشعشعات مادون قرمز هدف توسط سیستم اپتیکی بر روی صفحه‌ای به نام رتیکل متمرکز می‌گردند. رتیکل دارای قسمت های مات و شفاف می‌باشد. نواحی شفاف و تیره به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که موقعیت هدف را نسبت به محور اپتیکی (محور جستجوگر) مدوله می‌کنند. سیگنال خروجی حاصل از مدولاسیون اپتیکی رتیکل، وارد دتکتور می‌گردد. نهایتاً سیگنالی، که دامنه و فاز آن به ترتیب دامنه و فاز بردار خطا روی صفحه رتیکل (شکل ۱) می‌باشد، تولید می‌گردد.

هدایت این نوع موشک‌ها بر اساس روش هدایت متناسب می‌باشد. در این روش می‌بایست در هر لحظه، در صفحه‌ای شامل موشک و هدف شتابی عمود بر خط دید بر موشک وارد کرد که با فرض ثابت ماندن مؤلفه سرعت نسبی موشک و هدف در امتداد خط دید، اندازه آن متناسب با نرخ چرخش دید خواهد بود. نشان داده می‌شود که برای پیاده سازی این روش هدایتی کافی است که در هر لحظه شتاب موشک در راستای بردار خطا روی صفحه رتیکل اعمال گردد. یعنی اندازه شتابی که می‌بایست



شکل ۳. ساختار سیستم PSFS

را نشان می‌دهد. PSFS شامل  $N$  زیرسیستم فازی  $FS_1, FS_2, \dots, FS_N$  می‌باشد که بصورت موازی بهم وصل شده‌اند. هر سیستم فازی برای یک زمان مشخص با اندیس  $k+1$  مقداری را برای سری زمانی پیش‌بینی می‌کند. تحت یک تصمیم‌گیری خاص، خروجی PSFS مقدار نهایی  $\hat{x}(k+\tau)$  را پیش‌بینی می‌کند.

پیش‌بینی سری زمانی با استفاده از PSFS با پارامترهای  $m$  و  $\tau$  مشخص می‌گردد. بعد محاط شده<sup>۱</sup>  $m$  تعداد ورودی‌های سیستم فازی را مشخص کرده و مقدار  $\tau$  بازه زمانی داده ورودی را مشخص می‌کند.  $P$  امین سیستم فازی  $FS_P$  در PSFS دارای  $m$  و  $\tau$  متفاوت می‌باشد.

فرض کنید که PSFS،  $\hat{x}_P(k+\tau)$  که مقدار داده آینده در گام زمانی  $(k+\tau)$  ام می‌باشد را پیش‌بینی کند.  $P$  امین زیرسیستم فازی دارای خروجی  $\hat{x}_P(k+\tau)$  می‌باشد که بر اساس داده‌های گذشته  $\hat{x}(k+\tau-2p), \dots$  و  $\hat{x}(k+\tau-(m-1)p)$  بنا شده است. PSFS مقدار نهایی  $\hat{x}(k+\tau)$  را از روی خروجی‌های هر یک از زیرسیستم‌های فازی  $\hat{x}_1(k+\tau), \hat{x}_2(k+\tau), \dots, \hat{x}_N(k+\tau)$  بدست می‌آورد. PSFS مقدار نهایی پیش‌بینی شده  $\hat{x}(k+\tau)$  را از روی میانگین خروجی هر یک از زیرسیستم‌های فازی به استثنای می‌نیم و ماکزیمم بدین صورت محاسبه می‌کند:

$$\hat{x}(k+\tau) = \frac{1}{N-2} \left[ \sum_{i=1}^N \hat{x}_i(k+\tau) - \max_i \hat{x}_i(k+\tau) - \min_i \hat{x}_i(k+\tau) \right] \quad (1)$$

#### ۴- استفاده از سیستم‌های فازی برای مقابله با جمینگ‌های

##### حرارتی مادون قرمز

پیش‌بینی رفتار آینده یک سیستم با توجه به رفتار گذشته آن، یکی از هدف‌های اساسی علوم مدرن می‌باشد. در این راستا دو رویکرد ساده وجود دارد: روش مدل-پایه و روش‌های آماری. رویکرد مدل-پایه بر این فرض استوار است که اطلاعات قبلی به اندازه کافی موجود است که بتوان بر اساس آنها یک مدل دقیق برای پیش‌بینی بدست آورد. رویکرد آماری مستقیماً سعی می‌کند که یک رشته از مشاهدات که توسط سیستم بدست آمده است را تجزیه و تحلیل کرده و بدینوسیله رفتار آینده سیستم را پیش‌بینی کند. بسیاری از نظریه‌های پیش‌بینی متعارف، بعلت پیچیدگی در ساختن یک مدل دقیق، بر اساس رویکرد آماری توسعه یافته‌اند.

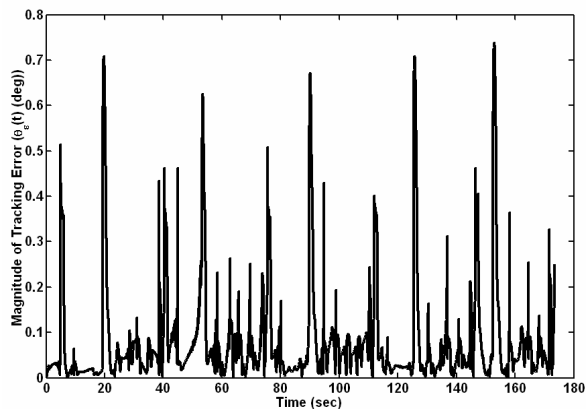
سیستم‌های فازی می‌توانند نامعینی‌هایی را که در رفتار سیستم‌های فیزیکی پیچیده وجود دارند را آسان‌تر از الگوریتم‌هایی نظیر: پیش‌بینی خطی، شبکه‌های عصبی [4] و الگوریتم‌های تطبیقی [5] نمایش دهند. هنگامی که دانش کافی از سیستم در دسترس نباشد و اطلاعات به فرم داده‌های عددی ورودی-خروجی داده شده باشد، الگوریتم‌های یادگیری تطبیقی قادر به تولید قوانین فازی برای پیش‌بینی سری زمانی آشوبگونه می‌باشند [6].

پیش‌بینی سری زمانی بر اساس سیستم فازی ساختار موازی (PSFS) یکی از روش‌های بکار رفته برای این منظور است [7]. PSFS از سیستم‌های فازی متعددی تشکیل شده که بطور موازی بهم متصلند. هر سیستم فازی مقادیر آینده سیگنال را بر اساس داده‌های گذشته با نمونه‌های زمانی متفاوت پیش‌بینی می‌کند. PSFS مقدار نهایی پیش‌بینی را بر اساس میانگین خروجی‌های هر یک از سیستم‌های فازی با استثنا کردن مقادیر ماکزیمم و می‌نیم، تعیین می‌کند.

##### ۴-۱- ساختار PSFS

PSFS از تعدادی زیرسیستم‌های فازی که بصورت موازی بهم متصل شده‌اند، تشکیل شده است که برای پیش‌بینی سری زمانی بکار می‌رود. شکل ۳ ساختار زیرسیستم فازی ساختار موازی

<sup>1</sup> Embedding Dimension



شکل ۴: سری زمانی اطلاعات دامنه خطای ردیابی برای روش اول و دوم

*ANFIS* یک شبکه تطبیقی بر اساس سیستم استنتاج فازی است که توانایی مدل‌سازی توسط مجموعه‌ای از قواعد اگر- آنگاه (*IF-THEN*) با پارامترهای تطبیق‌پذیر را دارد، بطوری که با استفاده از روش تعلیم مناسب می‌توان این پارامترها را بر اساس جفت‌های ورودی- خروجی تنظیم نمود [8]. این ساختار توسط راجر جنگ ارائه شده است [9] و از مدل فازی تاکاگی- سوگنو- کانگ (*TSK*) بهره می‌گیرد [10].

با استفاده از کنار هم قرار دادن اطلاعات خطای ردیابی برای تمام سناریوها (۴۰ سناریو) یک سری زمانی آشوبگونه بدست خواهد آمد. این سری‌های زمانی برای هر سه روش در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند.

این سری‌ها همگرا یا واگرا نیستند و بدون دوره تناوب مشخصی‌اند. در پیش‌بینی سری زمانی، ما از اطلاعات گذشته مقادیر سری زمانی تا لحظه کنونی  $t$  جهت پیش‌بینی مقدار سیگنال در آینده  $t+p$  استفاده می‌کنیم.

در هر سه روش ارائه شده، سیستم‌های فازی موجود در ساختارهای *PSFS*، از شبکه‌های *ANFIS* بصورت شبکه‌ای با شش ورودی و یک خروجی استفاده می‌نمایند. این شبکه‌ها از نوع سوگنو می‌باشند. تعداد توابع عضویت هر یک از ورودی‌های شبکه دو عدد بوده و از نوع مثلثی می‌باشند و تعداد قواعد ۶۴ عدد است. در این شبکه‌ها از ضرب جبری برای توابع *AND* ماکزیمم برای توابع *OR*، ضرب برای استنباط قواعد فازی و ماکزیمم برای ترکیب قواعد فازی استفاده شده است.

*PSFS* اثر خطای انباشتگی را با میانگین‌گیری از خروجی‌های پیش‌بینی شده هر زیرسیستم فازی، پس از حذف ماکزیمم و می‌نیمم مقدار پیش‌بینی شده، کاهش می‌دهد.

#### ۴-۲- تخمین سیگنال ردیابی

همانگونه که قبلاً گفته شد، سیگنال اساسی که در بازه جمینگ مخدوش می‌شود و کاربرد بسیار اساسی در سیستم هدایت و کنترل یک موشک آشیانه‌یاب مادون قرمز دارد، سیگنال ردیابی می‌باشد. بنابراین اساس تخمین‌زننده طراحی شده بر اساس اطلاعات سیگنال خطای ردیابی (دامنه و فاز) بنا شده است. اطلاعات خطای ردیابی با استفاده از کد شبیه‌سازی شش درجه آزادی موجود برای ۴۰ سناریوی مختلف و حتی‌الامکان جامع (شامل اهداف بدون شتاب و شتاب‌دار در جهتهای مختلف) با فرض عدم وجود جمینگ استخراج گشته و پردازش بر روی این اطلاعات انجام می‌گیرد. سناریوهای طراحی شده برای آموزش سیستم‌های فازی با توجه به محدودیت‌های عملی یک موشک آشیانه‌یاب مادون قرمز بگونه‌ای پیش‌بینی شده‌اند که تمامی حالت‌های ممکن برای پرواز یک موشک آشیانه‌یاب مادون قرمز را در برگیرند.

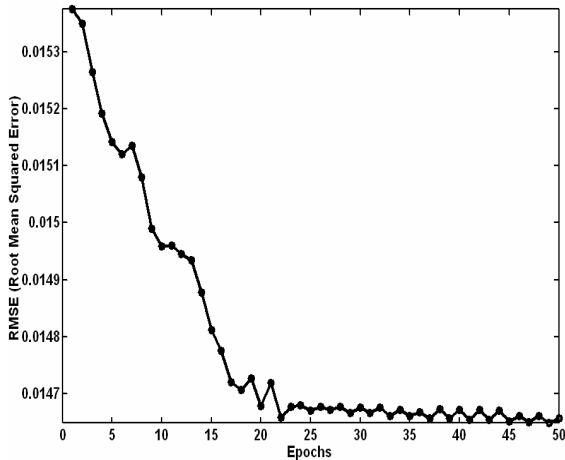
طراحی تخمین‌زننده با استفاده از سیستم فازی در سه روش انجام گرفته است:

۱- تخمین دامنه سیگنال خطای ردیابی و فرض ثابت ماندن فاز سیگنال خطای ردیابی در مقدار فاز به هنگام شروع جمینگ.

۲- تخمین دامنه سیگنال خطای ردیابی و فرض ثابت ماندن شیب فاز سیگنال خطای ردیابی در مقدار شیب فاز به هنگام شروع جمینگ.

۳- تخمین اندازه مولفه‌های خطای ردیابی بر روی محورهای  $X$  و  $Y$  دستگاه جستجوگر (بدون حرکت موشک) و سپس استخراج دامنه و فاز خطا از روی این مقادیر تخمین زده شده.

برای طراحی تخمین‌زننده در هر سه حالت فوق از سیستم فازی ساختار موازی (*PSFS*) استفاده شده است. هر یک از زیرسیستم‌های فازی استفاده شده در این ساختار از شبکه عصبی- فازی *ANFIS* استفاده می‌نمایند. بطور خلاصه، شبکه



شکل ۶: یک منحنی نمونه خطای آموزش (زیرسیستم  $FS_1$ )

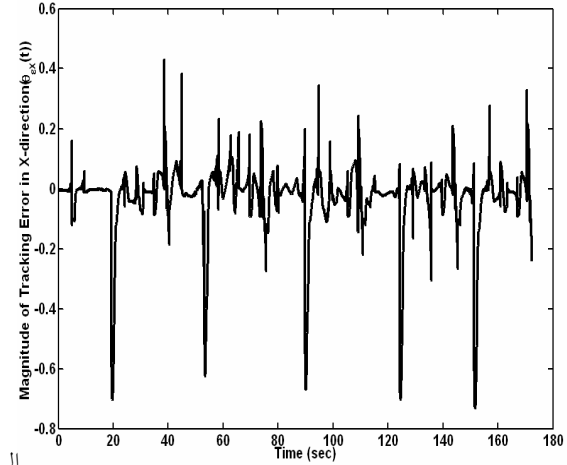
برنامه شبیه‌سازی شش درجه آزادی) فرض شده است. همانگونه که گفته شد، در هر سه روش از ساختار موازی  $PSFS$  استفاده شده است که این ساختارها در هر سه روش یکسان بوده و بصورت شکل ۳ می‌باشند ( $N = 4$ ). سیستم‌های فازی استفاده شده در این ساختار، مشابه بوده ولی پارامتر  $P$  در آنها متفاوت می‌باشند که این پارامترها برای چهار سیستم فوق بصورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$P_1 = 5, P_2 = 10, P_3 = 15, P_4 = 20 \quad (5)$$

خروجی نهایی از مقایسه خروجی هر یک از این زیرسیستم‌ها با توجه به رابطه ۱ محاسبه می‌گردد.

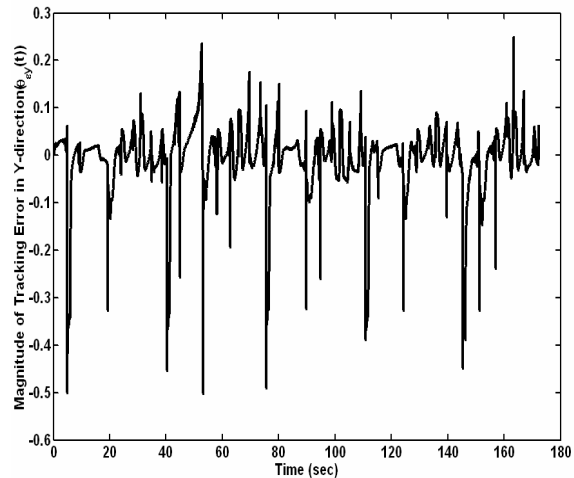
سیگنال آموزش برای روش اول و دوم در شکل ۴ نشان داده شد.  $PSFS$  طراحی شده برای این دو روش یکسان بوده و ساختار آن بصورت شکل ۳ می‌باشد. پارامترهای  $P$  در نظر گرفته شده بصورت رابطه ۵ می‌باشند و در شکل ۶ یک منحنی نمونه خطای آموزش برای یکی از زیرسیستم‌های موجود در  $PSFS$  نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است پس از حدود ۵۰ دوره از آموزش، تغییرات خطا بسیار اندک می‌شود زیرسیستم‌های دیگر نیز رفتار مشابه دارند که شکل آنها آورده نشده است.

در روش سوم، برای دو مولفه  $X$  و  $Y$  تخمین زده می‌شود ولی تنها آموزش برای کانال  $X$  کافی است. سیگنال آموزش مشابه شکل ۶ می‌باشد. ساختار  $PSFS$  بصورت شکل ۳ و پارامترهای  $P$  در نظر گرفته شده بصورت رابطه ۵ می‌باشند.



ا

ف- سری زمانی اطلاعات تصویر شده خطای ردیابی بر روی محور  $X$



ب- سری زمانی اطلاعات تصویر شده خطای ردیابی بر روی محور  $Y$

شکل ۵ الف و ب: سری زمانی اطلاعات خطای ردیابی برای روش سوم

ورودی این شبکه‌ها بصورت:

$$W(t) = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6] \quad (2)$$

و خروجی آن‌ها بصورت:

$$S(t) = x(t + p) \quad (3)$$

می‌باشد که در روابط فوق مقادیر پارامترها بصورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\begin{aligned} x_1 &= x(t) & x_2 &= x(t-p) & x_3 &= x(t-2p) \\ x_4 &= (x_2 - x_1) / \Delta t & x_5 &= (x_3 - x_2) / \Delta t \\ x_6 &= (x_5 - x_4) / \Delta t \end{aligned} \quad (4)$$

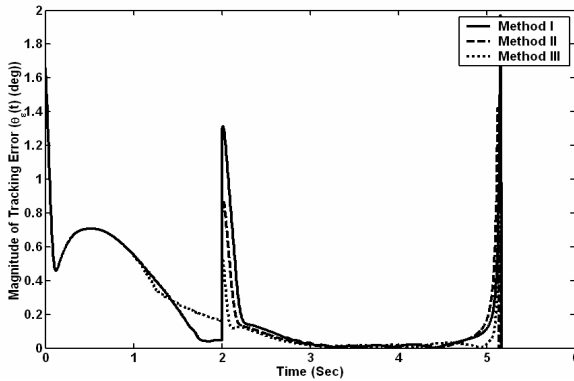
در این روابط  $\Delta t = 0.005$  Sec (Step) چاپ خروجی‌های

## ۵- شبیه‌سازی و نتایج

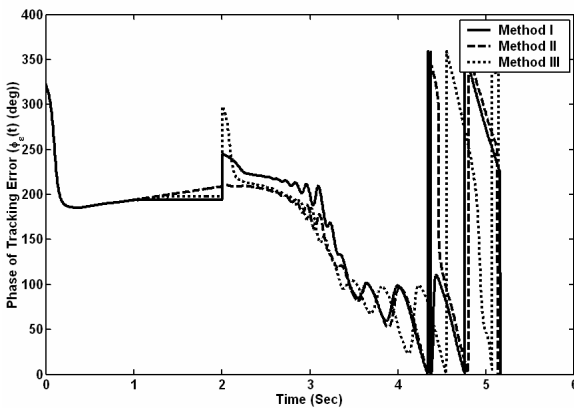
با استفاده از شبیه‌سازی شش درجه آزادی یک موشک آشیانه‌یاب مادون، نتایج شبیه‌سازی برای کل سناریوهای مورد استفاده قرار گرفته بررسی شده است. لازم به یادآوری می‌باشد که این نتایج بصورت روی-خط می‌باشند.

در شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی با استفاده از برنامه شبیه‌سازی شش درجه آزادی برای یک سناریو دلخواه نشان داده شده است. همچنین برای تمامی سناریوها و با استفاده از تخمین‌زن‌های طراحی شده، شبیه‌سازی با استفاده از برنامه شش درجه آزادی انجام گرفته است. در جدول ۱، فاصله از دست‌دهی بعنوان معیار مقایسه این روش‌ها آورده شده است.

همچنین اطلاعات مربوط به هدایت خاموش، یعنی فرض صفر بودن سیگنال خطای ردیابی در بازه جمینگ، نیز آورده شده است. با توجه به این نتایج، برای دقت بهتر عملکرد استفاده از روش سوم توصیه می‌گردد. البته باید توجه داشت که در روش سوم به دو سیستم فازی، یکی برای تخمین مولفه X و دیگری برای تخمین مولفه Y، نیاز است.



الف- منحنی اندازه خطای ردیابی



ب- منحنی فاز خطای ردیابی

شکل ۷ الف و ب: مقایسه نتایج خروجی تخمین‌زن‌های طراحی شده بصورت روی-خط برای یک سناریو نمونه و فرض جمینگ در بازه ۱ تا ۲ ثانیه

جدول ۱: مقایسه نتایج بین روش‌های مختلف

فاصله از دست‌دهی	کوچکتر	بین	بیشتر از
از ۱ متر	۱ تا ۱۰ متر	۱۰ متر	بیشتر از ۱۰ متر
هدایت خاموش	٪۳۲	٪۴۰	٪۲۸
هدایت با Method I	٪۵۶	٪۲۲	٪۲۲
هدایت با Method II	٪۵۸	٪۲۵	٪۱۷
هدایت با Method III	٪۶۰	٪۲۶	٪۱۴

## مراجع

- [4] D. Lowe and A. R. Webb, "Time Series Prediction by Adaptive Networks: A Dynamical Systems Perspective," IEE Proceedings F, Vol. 1, pp. 17-24, 1991.
- [5] M. Casagal, "Nonlinear Prediction of Chaotic Time Series," Physica D, pp. 335-356, 1989.
- [6] J.-S. R. Jang and C.-T. Sun, "Neuro-Fuzzy Modeling and control," IEEE Proceedings, Mar. 1995.
- [7] M. Kim and S. Kong, "Time Series Prediction using the Parallel-Structure Fuzzy System," IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings, pp. 934-938, 1999.
- [8] J. Shing, R. Jang, "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System," IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, no. 3, May/June 1993.
- [9] J. S. Roger Jang, "Fuzzy Modelling using Generalized Neural Networks and Kalman Filter Algorithm," Proc. Ninth Nat. Conf. Artificial Intell. (AAAI-91), pp. 762-767, July 1991.
- [10] T. Takagi and M. Sugeno, "Derivation of Fuzzy Control Rules from Human Operator's Control Actions," Proc. IFAC Symp. Fuzzy Inform., Knowledge Representation and Decision Analysis, pp. 55-60, July 1983.

[۱] علی محرم‌پور، "بررسی و تحلیل سیستم هدایت و کنترل یک موشک آشیانه‌یاب غیرفعال"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۷.

[۲] محمود اسدپور، "مدلسازی یک روش مقابله با جمینگ‌های مادون قرمز در سر جستجوگر IR"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۲.

[۳] محمد تقی حاجی‌علی‌نجانر، "جمینگ‌های حرارتی و روش‌های مقابله با آنها در موشک‌های آشیانه‌یاب مادون قرمز"، دومین کنفرانس سازمان هوافضا، ۱۳۸۲.