

آنالیز خطای یک سیستم کنترل آتش

علی کارساز^۱، حمید خالوزاده^۲

^۱دانشجوی دکتری برق - کنترل دانشگاه فردوسی مشهد، ^۲استادیار گروه کنترل دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

'a_karsaz1@yahoo.com, 'h_khaloozadeh@kntu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، پس از معرفی مقدماتی سیستم کنترل آتش ۴۲ به شناسایی منابع ایجاد خطا در یک سیستم کنترل آتش هواپایه ۴۳ خاص پرداخته می شود. روشهای مختلف آنالیز خطای یک سیستم چند ورودی چند خروجی ۴۴ معرفی و با توجه به پیچیدگی معادلات حاکم بر سیستم از روش مونت کارلو که مبتنی بر داده های آماری ورودی و خروجی می باشد، برای استخراج داده های اولیه استفاده می شود. این داده ها نشان دهنده چگونگی تاثیر عوامل ایجاد خطا در احتمال اصابت نهانی و در سناریوهای مختلف شلیک موشک می باشند و به عنوان مجموعه داده های خام اولیه جهت استخراج ضرائب اهمیت هر یک از منابع خطا به صورت کلی استفاده می گردد. تاثیر منابع ایجاد خطا در یک سیستم کنترل آتش بر محاسبه زمان روشن شدن جستجوگر تلویزیونی ۴۵ موشک و زاویه سمت ۴۶ تصحیح موشک بررسی می گردد (ایندو پارامتر قبل از شلیک موشک می بایست در موشک وارد شوند تا در محاسبات آن بکار روند لذا دقت و صحت تخمین این دو پارامتر بسیار حائز اهمیت است). در نهایت با حل معادلات مربوط به حرکت موشک، احتمال اصابت بدست آمده و میزان حساسیت تابع احتمال اصابت نسبت به منابع مختلف خطای سیستم رتبه بندی می شود. دسته بندی خطاهای شناسایی شده در هر یک از زیر سیستمهای تشکیل دهنده یک سیستم کنترل آتش به ترتیب اهمیت و میزان تاثیر آنها در تابع احتمال اصابت نهایی موشک، کمک شایانی به طراحان نظامی جهت بهبود سیستم و خرید قطعات آن با علم به میزان دقت مورد نیاز می نماید. عدم شناخت کافی از میزان تاثیر عوامل ایجاد خطا و یا بزرگی هر کدام از آنها می تواند باعث کاهش احتمال اصابت و در نهایت عدم موفقیت موشک در برخورد به هدف را در پی داشته باشد.

واژه های کلیدی: آنالیز خطای موشک، سیستم کنترل آتش (FCS)، احتمال اصابت، خطاهای زیر سیستم رادار، خطاهای بادسنج، روش مونت کارلو، آنالیز حساسیت سیستم سلاح.

Abstract: In this paper an airborne fire control system (FCS) is described. All sources of error in three important FCS subsystems are determined. Two main approaches that exist for error analysis are analytical methods and stochastic simulation methods. Since the first approach needs a mathematical model for error analysis purposes, in this paper a stochastic simulation based on random input variables (Monte-Carlo method) is used for analysis of a fire control system. The main objective of this paper is to obtain the Hit Probability function which is dependent on FCS input variables accuracy. At first, input variables error in a FCS are determined, simulated and analyzed based on Monte Carlo simulation method. The input variables errors in missile fire control director (MFCD) affect the two important output variables of MFCD which must be set directly in the missile before launching process. Therefore the two perturbed output variables can be degrade the Hit Probability (HP) significantly. The proposed FCS error analysis consist two important steps. In the first step the effects of three subsystem errors are analyzed on MFCD outputs, and in the second step the effects of the MFCD outputs are analyzed on the HP function. In the end these two steps are

⁴² - Fire Control System (FCS)

⁴³ - Airborne Fire Control System (AFCS)

⁴⁴ - Multi-Input Multi-Output (MIMO)

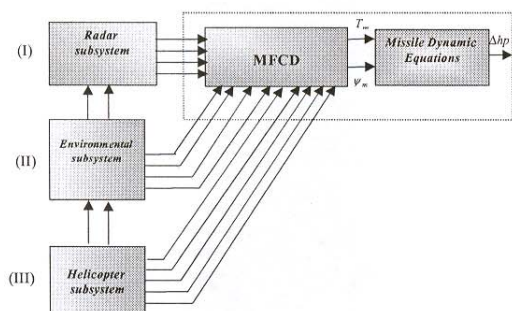
⁴⁵ - TV Seeker

⁴⁶ - Azimuth

combined together to obtain the important factor of each input variables on the HP function. Determination and ranking the percentage of important factors for each FCS inputs as a result of FCS error analysis are expected to be a powerful tool for assisting the military sensor designers. The best combination of the sensors and the minimum requirement accuracy of the sensors are also accessible to have a pre-specified hit probability function.

Keywords: Missile Error Analysis, Fire Control System, Hit Probability, Radar Errors, Monte-Carlo Method.

این منابع خطا به شکل متغیرهای تصادفی مدل شده و پارامترهای واریانس، میانگین و تابع چگالی آنها بر اساس اطلاعات تیرانس و میزان دقت معرفی شده در کاتالوگهای هر دستگاه قابل حصول است. پس از معرفی لیست منابع خطا در یک سیستم کنترل آتش، به معرفی روش به کار رفته در آنالیز خطا که بر اساس شبیه سازی اتفاقی^{۵۵} و یا مونت کارلو^{۵۶} است، پرداخته می شود، در نهایت نتایج شبیه سازیها میزان و چگونگی تاثیر خطاهای اندازه گیری پارامترهای ورودی به MFCD را بر احتمال اصابت نهانی موشک و بر دو پارامتر وارد شونده در موشک تعیین می کند.



شکل (۱) سیستم کنترل آتش هواپایه

نتایج حاصله از آنالیز خطا در بخش نتایج شبیه سازی به نقطه کار و یا سناریوی پرواز موشک (اعم از پارامترهای هدف، وضعیت عوامل محیطی و زوایا و مشخصات پرواز بالگرد) وابسته بوده و با اجراء برنامه آنالیز خطا در سناریوهای مختلف که در ادامه بخش نتایج شبیه سازی عنوان می گردد، می توان به نتایج قابل قبولی بدون وابستگی به نقطه کار دست یافت.

۲. شناسایی منابع خطای مجموعه FCS

خطاها از حیث ماهیت به دسته بندی های سیستماتیک^{۵۷} و تصادفی^{۵۸} و از حیث عوامل ایجاد کننده به خطاهای تجهیزات، اغتشاشات کنترل نشده و خطاهای دینامیکی تقسیم بندی می شوند [2,3,4]. هر یک از عوامل ایجاد

۱. مقدمه

موشک مورد مطالعه در این تحقیق، به دسته خاصی از موشکها به نام شلیک کن - فراموش کن^{۴۷} تعلق دارد. بنابر این پس از شلیک موشک از ایستگاه مربوطه هیچ گونه دسترسی و کنترلی از خارج بر موشک وجود نداشته و تنها قبل از پرواز با توجه به وضعیت هدف مانند برد^{۴۸}، سمت، کورس^{۴۹} و سرعت آن، وضعیت و شرایط عوامل محیطی مانند باد، فشار، رطوبت و غیره، موقعیت پرواز حامل (که موشک بر روی آن قرار دارد) مانند رول^{۵۰}، پیچ^{۵۱}، یاء^{۵۲}، و پس از حل یکسری از معادلات موسوم به معادلات اصابت^{۵۳} پارامترهایی در موشک تنظیم می شود، این پارامترها عبارتند از دو پارامتر T_m و ψ_m (شکل ۱). پارامتر T_m به مدت زمانی پس از شلیک موشک اشاره دارد که جستجوگر تلویزیونی موشک روشن شده و به جستجوی هدف می پردازد. به این ترتیب جستجوگر تلویزیونی پس از پیدا کردن هدف، در صورت وجود اختلاف زاویه بین سمت موشک نسبت به هدف، فرمان تغییر جهت موشک را به سمت هدف صادر می کند، تا هدف را در مقابل خود ببیند. ψ_m مقدار زاویه سمت تصحیحی موشک می باشد [1].

همانگونه که اشاره شد و در شکل (۱) دیده می شود، پارامترهای اندازه گیری در سه زیر سیستم عمده به همراه خطاهای هر کدام از این عوامل در محاسبات بلوک مدیر کنترل آتش موشک (MFCD)^{۵۴} وارد می شوند. در این تحقیق ابتدا کلیه عوامل ایجاد خطا در یک سیستم کنترل آتش شناسایی می شوند، بدین منظور سیستم کنترل آتش را به سه زیرسیستم عمده رادار، عوامل محیطی و جغرافیایی و زیر سیستم حامل که در اینجا یک بالگرد است تقسیم نموده و کلیه منابع خطا در این سه زیر سیستم شناسایی می شوند، اغلب

⁴⁷ - Fire & Forget

⁴⁸ - Range

⁴⁹ - Course

⁵⁰ - Roll

⁵¹ - Pitch

⁵² - Yaw

⁵³ - Combat Equations

⁵⁴ - Missile Fire Control Director

⁵⁵ - Stochastic Simulation

⁵⁶ - Monte Carlo Simulation

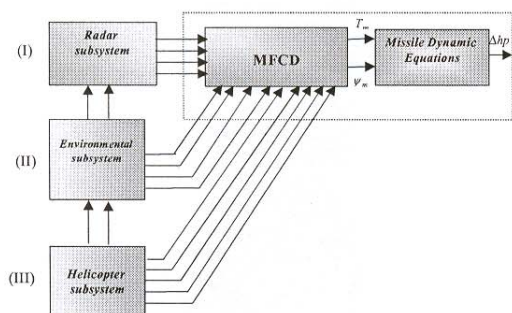
⁵⁷ - Systematic Error

⁵⁸ - Stochastic Error

combined together to obtain the important factor of each input variables on the HP function. Determination and ranking the percentage of important factors for each FCS inputs as a result of FCS error analysis are expected to be a powerful tool for assisting the military sensor designers. The best combination of the sensors and the minimum requirement accuracy of the sensors are also accessible to have a pre-specified hit probability function.

Keywords: Missile Error Analysis, Fire Control System, Hit Probability, Radar Errors, Monte-Carlo Method.

این منابع خطا به شکل متغیرهای تصادفی مدل شده و پارامترهای واریانس، میانگین و تابع چگالی آنها بر اساس اطلاعات تیرانس و میزان دقت معرفی شده در کاتالوگهای هر دستگاه قابل حصول است. پس از معرفی لیست منابع خطا در یک سیستم کنترل آتش، به معرفی روش به کار رفته در آنالیز خطا که بر اساس شبیه سازی اتفاقی^{۵۵} و یا مونت کارلو^{۵۶} است، پرداخته می شود، در نهایت نتایج شبیه سازیها میزان و چگونگی تاثیر خطاهای اندازه گیری پارامترهای ورودی به MFCD را بر احتمال اصابت نهائی موشک و بر دو پارامتر وارد شونده در موشک تعیین می کند.



شکل (۱) سیستم کنترل آتش هواپایه

نتایج حاصله از آنالیز خطا در بخش نتایج شبیه سازی به نقطه کار و یا سناریوی پرواز موشک (اعم از پارامترهای هدف، وضعیت عوامل محیطی و زوایا و مشخصات پرواز بالگرد) وابسته بوده و با اجراء برنامه آنالیز خطا در سناریوهای مختلف که در ادامه بخش نتایج شبیه سازی عنوان می گردد، می توان به نتایج قابل قبولی بدون وابستگی به نقطه کار دست یافت.

۲. شناسایی منابع خطای مجموعه FCS

خطاها از حیث ماهیت به دسته بندی های سیستماتیک^{۵۷} و تصادفی^{۵۸} و از حیث عوامل ایجاد کننده به خطاهای تجهیزات، اغتشاشات کنترل نشده و خطاهای دینامیکی تقسیم بندی می شوند [2,3,4]. هر یک از عوامل ایجاد

۱. مقدمه

موشک مورد مطالعه در این تحقیق، به دسته خاصی از موشکها به نام شلیک کن - فراموش کن^{۴۷} تعلق دارد. بنابر این پس از شلیک موشک از ایستگاه مربوطه هیچ گونه دسترسی و کنترلی از خارج بر موشک وجود نداشته و تنها قبل از پرواز با توجه به وضعیت هدف مانند برد^{۴۸}، سمت، کورس^{۴۹} و سرعت آن، وضعیت و شرایط عوامل محیطی مانند باد، فشار، رطوبت و غیره، موقعیت پرواز حامل (که موشک بر روی آن قرار دارد) مانند رول^{۵۰}، پیچ^{۵۱}، یاو^{۵۲}، و پس از حل یکسری از معادلات موسوم به معادلات اصابت^{۵۳} پارامترهایی در موشک تنظیم می شود، این پارامترها عبارتند از دو پارامتر T_m و ψ_m (شکل ۱). پارامتر T_m به مدت زمانی پس از شلیک موشک اشاره دارد که جستجوگر تلویزیونی موشک روشن شده و به جستجوی هدف می پردازد. به این ترتیب جستجوگر تلویزیونی پس از پیدا کردن هدف، در صورت وجود اختلاف زاویه بین سمت موشک نسبت به هدف، فرمان تغییر جهت موشک را به سمت هدف صادر می کند، تا هدف را در مقابل خود ببیند. ψ_m مقدار زاویه سمت تصحیحی موشک می باشد [1].

همانگونه که اشاره شد و در شکل (۱) دیده می شود، پارامترهای اندازه گیری در سه زیر سیستم عمده به همراه خطاهای هر کدام از این عوامل در محاسبات بلوک مدیر کنترل آتش موشک (MFCD)^{۵۴} وارد می شوند. در این تحقیق ابتدا کلیه عوامل ایجاد خطا در یک سیستم کنترل آتش شناسایی می شوند، بدین منظور سیستم کنترل آتش را به سه زیرسیستم عمده رادار، عوامل محیطی و جغرافیایی و زیر سیستم حامل که در اینجا یک بالگرد است تقسیم نموده و کلیه منابع خطا در این سه زیر سیستم شناسایی می شوند، اغلب

⁴⁷ - Fire & Forget

⁴⁸ - Range

⁴⁹ - Course

⁵⁰ - Roll

⁵¹ - Pitch

⁵² - Yaw

⁵³ - Combat Equations

⁵⁴ - Missile Fire Control Director

⁵⁵ - Stochastic Simulation

⁵⁶ - Monte Carlo Simulation

⁵⁷ - Systematic Error

⁵⁸ - Stochastic Error

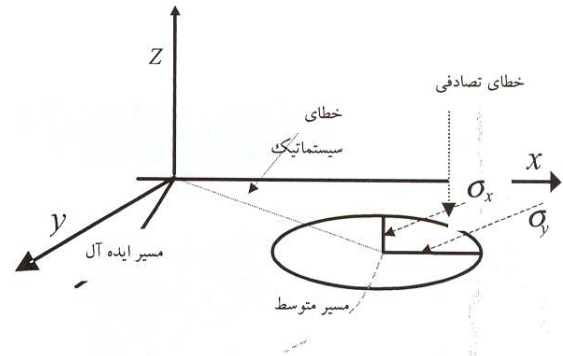
۲-۱. خطاهای موجود در زیر سیستم رادار

کارهای متعددی برای شناسایی دقیق پارامترهای خطا در رادار بر اساس شبیه سازیهای متفاوتی از هدف انجام شده است که در نهایت به رتبه بندی عوامل ایجاد خطا در رادار به صورت زیر منجر شده است [5].

- ۱- خطای سنجش سمت هدف
 - ۲- خطای سنجش برد هدف
 - ۳- خطای سنجش سرعت هدف
 - ۴- خطای سنجش کورس هدف
 - ۵- خطای تنظیم صفر آنتن رادار
 - ۶- خطای ناشی از اینکدر^{۶۰} رادار
 - ۷- خطای ناشی از احتمال آشکارسازی
 - ۸- خطای دینامیکی ناشی از موتور DC
 - ۹- قابلیت تفکیک^{۶۱}
 - ۱۰- خطای ساخت آنتن رادار
 - ۱۱- خطاهای مربوط به مدارات داخلی رادار
 - ۱۲- خطاهای الگوریتمهای محاسباتی رادار
 - ۱۳- خطای نصب پایه آنتن رادار
 - ۱۴- خطای تراز سطح نصب رادار
 - ۱۵- خطای ناشی از وزش باد و تاثیر آن بر آنتن رادار (در صورت عدم وجود پوشش آنتن رادار)
 - ۱۶- خطای مربوط به ارتعاشات^{۶۲} حامل رادار
 - ۱۷- خطای مربوط به شوکهای^{۶۳} اعمالی به رادار
 - ۱۸- خطای تاخیر در ارسال و دریافت اطلاعات
 - ۱۹- خطای مربوط به بازه های زمانی ارسال و دریافت اطلاعات از رادار
- به کامپیوتر مرکزی

رادار به عنوان یک سنسور وظیفه اندازه گیری موقعیت هدف را بر عهده داشته و دو پارامتر اصلی برد و سمت هدف را در اختیار می گذارد. سایر پارامترهای کورس و سرعت هدف (موارد ۳، ۴) توسط الگوریتم های ردیابی هدف بدست می آید. در کاتالوگهای رادار اعم از نظامی و یا تجاری برخی از خطاها مانند خطاهای سنجش برد و سمت ذکر شده و برخی دیگر از خطاها مانند موارد (۵ الی ۱۴) تاثیر خود را در سنجش دو پارامتر اصلی برد و سمت حرکت هدف نشان می دهند. سایر خطاها (موارد ۱۵- ۱۹) در خطاهای برد

کننده خطا می توانند دارای هر دو نوع خطای سیستماتیک و تصادفی باشند. به عنوان مثال خطا در هر یک از تجهیزات سیستم کنترل آتش به دو دسته سیستماتیک و تصادفی تقسیم می شوند. خطاهای تصادفی بوسیله جملاتی از پارامترهای استاتیکی نظیر واریانس σ^2 و انحراف استاندارد σ شناخته می شود. چگونگی تاثیر این خطاها بر روی مسیر پرواز موشک متفاوت است (شکل ۲).



شکل ۲) تاثیر خطاهای سیستماتیک و تصادفی بر جابجایی موشک از مسیر ایده آل

در شکل (۲) دو مسیر ایده آل و متوسط آورده شده است در صورتی که مجموعه سیستم کنترل آتش دارای هیچ گونه خطائی نبوده و موشک نیز ایده آل فرض شود موشک مسیر ایده آل را طی کرده و به مرکز مختصات اصابت صورت می پذیرد. خطاهای سیستماتیک که اغلب به عنوان خطای انحراف تلقی می شود موجب انحراف موشک از مسیر اصلی خود به شکل یک جابجایی می گردد و نیز خطاهای تصادفی باعث پراکندگی در برخورد به ازای شلیک های زیاد در مختصات دو بعدی x و y می شود. در تحلیل چگونگی تاثیر خطاها بر انحراف موشک و آنالیز حساسیت، هر دو تاثیر انحراف از میانگین و پراکندگی حول نقطه برخورد در نظر گرفته شده است. بهمین خاطر از معیار میانگین مربعات خطا^{۵۹} (mse) در تحلیلهای بخش آنالیز خطا استفاده شده است که در بخش خود توضیح داده خواهد شد. یک FCS هواپایه در این تحلیل به سه زیر سیستم اصلی تقسیم می گردد. این سه زیر سیستم اصلی عبارتند از:

- ۱- زیر سیستم رادار
 - ۲- زیر سیستم عوامل محیطی
 - ۳- زیر سیستم حامل (بالگرد) و سنسورهای اندازه گیری زوایا و موقعیت آن
- کلیه خطاهایی که در یک FCS هواپایه نوعی وجود دارد، را می توان به شکل زیر بیان نمود:

- 60 - Encoder Error
- 61 - Resolution Error
- 62 - Vibrations Error
- 63 - Shock Error

- 59 - Mean Square Error

جستجوگر موشک^{۶۸}، به عنوان دو عامل موثر بر احتمال اصابت نهائی سیستم سلاح هستند. برای دست یابی به این منظور خطاهای موشک، جستجوگر موشک و رادار *FCS* را با واریانسها و میانگین های مستقل و به شکل گوسی فرض می نمایند و با بهره گیری از مدل های آماری میزان خطاهای مجاز رادار *FCS* با توجه به سناریوهای مختلف حرکات موشکهای ضد کشتی تعیین می شود [7]. بهینه سازی سیستم کنترل آتش بویژه در ایستگاههای هوایی که در آن سرعت پرتاب موشک و مانور هدف بسیار زیاد است، اهمیت فوق العاده ای دارد. به عنوان مثال در دفاع ضد هوایی تنظیم تاخیر زمانی انفجار موشک با توجه به فواصل مختلف قرار گیری موشک و هدف و زاویه حمله آن در لحظه برخورد بسیار اهمیت دارد. با استفاده از سناریوهای مختلف حمله، فواصل مختلف قرار گیری هدف و موشک و سایر پارامترهای موثر و نیز با توجه به احتمال های تخریب در هر وضعیت که از شبیه سازی فرایند بدست می آید، می توان تاخیر زمانی انفجار موشک را بهینه سازی نمود این مسئله با استفاده از روشهای مختلف بهینه سازی، از جمله الگوریتمهای ژنتیک برای ماکزیم نمودن احتمال تخریب حاصل می گردد [8]. یکی از مقالات موفق در زمینه رهگیری موشکهای ضد سطحی با استفاده از آنالیز اتفاقی توسط *Lipman* و همکارانش صورت پذیرفته است [9]. یکی دیگر از دستاوردهای مهم از مباحث آنالیز خطا، بهینه سازی سیستم کنترل و هدایت موشک و اتخاذ یک استراتژی موثر جهت بالا بردن احتمال تخریب سیستم سلاح است [10,11]. بکارگیری نتایج آنالیز سیستمهای کنترل آتش نه تنها باعث شناخت ترکیب موثر قطعات و سنسورها برای دستیابی به یک احتمال اصابت مشخص شده بلکه جهت ساخت یک سیستم موثر پشتیبان خلبان^{۶۹} در کابین هدایت می تواند کمک شایانی را بنماید [12]. در تعیین احتمال اصابت نهائی موشک به دو روش تحلیلی^{۷۰} و روش شبیه سازی اتفاقی میسر می باشد.

۳-۱. روش تحلیلی آنالیز خطا

برای شکل دادن به فرایند آنالیز خطا، در ابتدا ضروری است که انواع خطاهای تصادفی و استاتیکی شناخته و طبقه بندی شوند، برای هر منبع خطا و هر زیر سیستم باید اینکار صورت پذیرد.

اساس آنالیز خطاهای تصادفی، تئوری ایستائی است که بر این اساس واریانس مجموع یک تعداد متغیرهای تصادفی مستقل ایستا برابر با مجموع واریانسهای متغیرهای مستقل می باشد [13].

$$\sigma_s^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \quad (1)$$

σ_i^2 : واریانس آمین متغیر تصادفی مستقل

⁶⁸ - Seeker Detection Probability

⁶⁹ - Decision Support System

⁷⁰ - Analytical Technique

وسمت با توجه به شرایط استاندارد تست رادار دیده نشده است. و باید به شکل جداگانه در نظر گرفته شوند.

۲-۲. خطاهای موجود در زیر سیستم عوامل محیطی

تحلیل و شبیه سازی عوامل محیطی نظیر باد و نیز خطای تجهیزات مربوط به سنجش باد، فشار و رطوبت در یک سیستم کنترل آتش به عنوان عواملی مهم و تاثیر گذار بر احتمال اصابت، صورت گرفته است [6]. کلیه عوامل ایجاد خطا به شکل زیر قابل دسته بندی هستند:

۲۰- خطای سنجش دما توسط دماسنج

۲۱- خطای سنجش فشار توسط فشارسنج

۲۲- خطای سنجش مقدار باد یا همان سرعت وزش باد

۲۳- خطای سنجش جهت باد

۲۴- خطاهای مربوط به تاخیر کلیه سنسورهای این زیر سیستم

۳-۲. خطاهای موجود در زیر سیستم بالگرد و یا حامل

۲۵- خطاهای اندازه گیری یاب پرواز توسط سیستم هدایت مرجع

AHRS^{۶۴}

۲۶- خطاهای اندازه گیری رول پرواز توسط *AHRS*

۲۷- خطاهای اندازه گیری پیچ پرواز توسط *AHRS*

۲۸- خطای اندازه گیری سرعت توسط رادار داپلر^{۶۵}

۲۹- خطای اندازه گیری ارتفاع حامل توسط ارتفاع سنج^{۶۶}

۳۰- کلیه خطاهای نصب لاینچر^{۶۷} بر روی حامل

۳۱- خطای عدم همراستائی ریل پرتاب و موشک

۳۲- خطاهای مربوط به تاخیر سنسورهای حامل

همه این عوامل خطا در برنامه کامل آنالیز خطا لحاظ شده اند و مقادیر خطاهای مورد نظر از کاتالوگهای مربوطه استخراج گردیده است. از ۳۲ مورد خطای ذکر شده در بالا تنها یازده مورد به عنوان ورودی به *MFCD* جهت حل معادلات اصابت بوده و سایر موارد اثر خود را در این یازده پارامتر خطا نشان می دهند.

۳. آنالیز خطا و احتمال اصابت

طراحان سیستم دفاع موشکی ناوگانهای دریائی، برای تقویت مکانیزم دفاع موشکی خود، در صدد تعیین خطاهای موشک و احتمال آشکار سازی

⁶⁴ - Attitude Heading Reference System

⁶⁵ - Doppler

⁶⁶ - Altimeter

⁶⁷ - Launcher

در سیستم ایدآل $f_i(\dots)$ را به سیستم غیر ایدآل $h_i(\dots)$ تبدیل می نماید. رابطه ورودیها و خروجیها در المان غیر ایده آل از فرمول زیر قابل استخراج است.

$$h_i(\dots) = h_i(x_1, \dots, x_r, y_1, \dots, y_i^*, \dots, y_q, e_i) = 0. \quad (۳)$$

$$y_i^* = y_i + \varepsilon_{yi}. \quad (۴)$$

y_i : خروجی سیستم ایده آل بدون وجود خطا در ورودیها

ε_{yi} : انحراف در خروجی y_i ناشی از خطا در سیستم

رابطه بین e_i و ε_{yi} را با نوشتن بسط تیلور برای توابع چند بعدی می توان بدست آورد.

(بسط حول نقطه $(p_0 = (x_{10}, \dots, x_{r0}, y_{10}, \dots, y_{q0}))$)

$$\begin{aligned} h_i(\dots) = & h_i(p_0) + (x_1 - x_{10}) \frac{\partial h_i(p_0)}{\partial x_1} + \frac{1}{2} (x_1 - x_{10})^2 \frac{\partial^2 h_i(p_0)}{\partial x_1^2} + \dots \\ & + (y_i - y_{i0}) \frac{\partial h_i(p_0)}{\partial y_i} + \frac{1}{2} (y_i - y_{i0})^2 \frac{\partial^2 h_i(p_0)}{\partial y_i^2} + \dots \\ & + (\varepsilon_{yi} - \varepsilon_{yi0}) \frac{\partial h_i(p_0)}{\partial \varepsilon_{yi}} + \frac{1}{2} (\varepsilon_{yi} - \varepsilon_{yi0})^2 \frac{\partial^2 h_i(p_0)}{\partial \varepsilon_{yi}^2} + \dots \\ & + (e_i - e_{i0}) \frac{\partial h_i(p_0)}{\partial e_i} + \frac{1}{2} (e_i - e_{i0})^2 \frac{\partial^2 h_i(p_0)}{\partial e_i^2} + \dots \end{aligned}$$

از آنجا که $h_i(\dots)$ در حول وحوش نقطه کاری p_0 ایده آل و بدون خطا است، لذا مقادیر ε_{yi0} و e_{i0} صفر هستند و جمله $h_i(p_0)$ با فرض کوچک بودن خطاها، صفر می شود و نیز با فرض صفر بودن جملات از درجه ۲ و بالاتر در معادله فوق می توان نوشت:

$$h_i(\dots) = f_i(p_0) + \varepsilon_{yi} \frac{\partial h_i(p_0)}{\partial \varepsilon_{yi}} + e_i \frac{\partial h_i(p_0)}{\partial e_i} \quad (۵)$$

که در آن $f_i(p_0)$ فرم نرمال برای آیین المان ایده آل به شکل زیر است:

$$f_i(x_1 \dots x_r, y_1 \dots y_q) = y_i - g_i(x_1 \dots x_r, y_1 \dots y_q) = 0$$

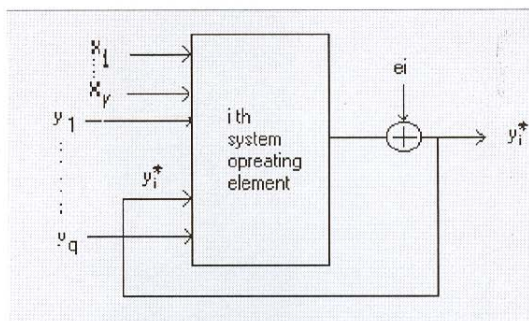
چنانچه مشاهده گردید در اثر وجود خطا در سیستم روابط ورودی و خروجی از فرم غیر ایده آل (۳) تبعیت می کنند. با توجه به رابطه بدست آمده بین فرم ایده آل و غیر ایده آل در فرمول (۵) داریم:

$$\varepsilon_{yi} \frac{\partial h_i(p_0)}{\partial \varepsilon_{yi}} + e_i \frac{\partial h_i(p_0)}{\partial e_i} = 0 \quad (۶)$$

و با استفاده از قانون زنجیره ای می توان نوشت:

N: تعداد متغیرهای تصادفی مستقل ایستا

در روش تحلیلی جهت آنالیز خطای یک سیستم کنترل آتش، کلیه سنسورهای FCS به شکل یک سیستم چند ورودی و چند خروجی در نظر گرفته می شود. به این ترتیب اگر کل سیستم FCS دارای r ورودی و q خروجی باشد، مسئله آنالیز خطا با فرض مشخص بودن معادلات حاکم بر ورودیها و خروجیها به حل یک مسئله چند ورودی و چند خروجی باز می گردد. شکل (۳) آیین المان از این سیستم چند ورودی و چند خروجی را نشان می دهد. این المان نشان دهنده سیستمی با r ورودی خارجی (که از خارج به سیستم اعمال می شود) و q ورودی داخلی (که از خروجی سایر المانهای سیستم فیدبک گرفته شده است)، است. e_i خطای جمع شونده با خروجی المان i ام می باشد. با توجه به تئوری ایستایی، معادله (۱) را می توان به شکل زیر نوشت.



شکل (۳) المان i ام از یک سیستم چند ورودی چند خروجی

$$\sigma_{y_i}^2 = \sum_{\ell=1}^r (C_{x_{i\ell}})^2 \sigma_{x_\ell}^2 + \sum_{m=1}^q (C_{e_{im}})^2 \sigma_{e_m}^2. \quad (۲)$$

$\sigma_{y_i}^2$: واریانس خطای خروجی در المان i

$\sigma_{x_i}^2$: واریانس خطا در l آیین ورودی خارجی

$\sigma_{e_m}^2$: واریانس خطا در m آیین ورودی داخلی

$C_{x_{i\ell}}$: ضریب تناسبی بین آیین ورودی خارجی و i آیین خروجی

$C_{e_{im}}$: ضریب تناسبی بین آیین ورودی داخلی و i آیین خروجی

e_i : خطای جمع شونده با المان i ام

y_i^* : خروجی آیین المان سیستم

ضرایب تناسبی در معادلات بالا از روابط مشتق جزئی بین ورودیها و خروجیها بدست می آید. رابطه ورودیها و خروجیها برای المان i ام از یک سیستم MIMO به دو شکل ایده آل و غیر ایده آل به ترتیب با توابع $f_i(\dots)$ و $h_i(\dots)$ نمایش داده می شود. در واقع وجود خطاهای مختلف

تر و البته با صرف زمان بیشتر صورت می پذیرد. روشهای تحلیلی بر خلاف روشهای مونت کارلو یک جواب بسته و کاملاً مشخص را در اختیار می گذارند حال آنکه روشهای مونت کارلو جواب ریاضی مشخص و بسته ای را در اختیار نگذاشته و جوابها به شکل تقریبی بوده و با افزایش تعداد تکرار برنامه به سمت معانهای صحیح همگرا می گردد. این روش که مبتنی بر تکرار زیاد است برای آنالیز خطای سیستم کنترل آتش مورد نظر به علت پیچیدگی معادلات و عدم وجود مشتقات جزئی، در تحقیق حاضر استفاده شده است [13,14,15]. به این ترتیب داده های اندازه گیری شده از سنسورهای مختلف که در سیستم کنترل آتش دخیلند، به کامپیوتر مرکزی ارسال شده و پارامترهای تنظیم شونده در موشک محاسبه می گردند. داده ها دریافتی از سنسورها و دو پارامتر محاسباتی توسط کامپیوتر مرکزی در موشک قرار می گیرند، سپس موشک شلیک و به میزان محاسبه شده تغییر سمت می دهد و در زمان محاسبه شده جستجوگر تلویزیونی موشک روشن می شود و این فرآیند برای نقاط مختلف با توجه به مدلسازی صورت گرفته در مورد هر خطا تکرار می گردد. برنامه آنالیز بر اساس این روش شامل دو مرحله عمده می باشد: اولین مرحله آنالیز تأثیرات خطاهای *FCS* بر خروجیهای *MFCD* و در دومین مرحله تحلیل دو پارامتر خروجی *MFCD* بر احتمال اصابت انجام می گیرد. تمامی خطاهای ذکر شده در بخش دوم در یازده پارامتر ورودی به *MFCD* خود را نشان می دهند. برای تولید ورودیهای متغیر و تصادفی از معیار میانگین حداقل مربعات (*mse*) به شکل زیر استفاده می شود [4].

$$mse = E\{(X_i - \hat{X})^2\} \quad (10)$$

که در آن X_i پارامتر مورد نظر در تکرار i ام است و $\hat{X}$ مقدار این پارامتر با فرض صفر بودن خطا است. اگر فرمول بالا را به شکل زیر بنویسیم خواهیم داشت:

$$E\{(X_i - \hat{\mu} + \hat{\mu} - X)^2\} = E\{(X_i - \hat{\mu})^2\} + E\{(X - \hat{\mu})^2\} + 2E\{(X_i - \hat{\mu})(\hat{\mu} - X)\}$$

واضح است که:

$$E(X_i - \hat{\mu}) = 0$$

$$mse = E\{(X_i - X)^2\} = E\{(X_i - \hat{\mu})^2\} + E\{(X - \hat{\mu})^2\} \quad (11)$$

$$= Var(X_i) + bias^2(X_i)$$

دید می شود که در این معیار هر دو پارامتر انحراف از میانگین (خطای سیستماتیک) و واریانس (خطای تصادفی) دخالت دارند. به این ترتیب به ازاء خطا در محاسبه یک پارامتر از دو پارامتر خروجی *MFCD* مثلاً T_m کاهش

$$\varepsilon_{y_i} \frac{\partial h_i(p_0)}{\partial y_i^*} \frac{\partial y_i^*}{\partial \varepsilon_{y_i}} + e_i \frac{\partial h_i(p_0)}{\partial e_i} = 0$$

$$y_i^* = y_i + \varepsilon_{y_i} \Rightarrow \frac{\partial y_i^*}{\partial \varepsilon_{y_i}} = 1$$

$$\frac{\partial h_i(p_0)}{\partial y_i^*} = \frac{\partial f_i(p_0)}{\partial y_i}$$

$$\varepsilon_{y_i} \frac{\partial f_i(p_0)}{\partial y_i} + e_i \frac{\partial h_i(p_0)}{\partial e_i} = 0 \quad (7)$$

تا اینجا مسئله انحراف در خروجی المان i ام به ازای خطای جمع شونده با آن خروجی مورد بررسی قرار گرفت. اگر ورودیها به المانهای غیر ایده آل نیز دارای ترکیبات خطا باشند، تابع عمومی در رابطه (۳) به شکل زیر خواهد بود.

$$h_i(x_{1,000}, x_{1,000}, x_r, \varepsilon_{x_1,000}, \varepsilon_{x_1,000}, \varepsilon_{x_r}, y_{1,000}, y_{m,000}, y_q, \varepsilon_{y_1,000}, \varepsilon_{y_m,000}, \varepsilon_{y_1}, e_i) = 0 \quad (8)$$

ε_{x_i} : خطای در i امین ورودی خارجی

ε_{y_m} : خطای در m امین ورودی داخلی

و معادلات گسترش خطا در فرمول (۷) به شکل زیر در می آید:

$$\sum_{k=1}^q \varepsilon_{y_k} \frac{\partial f_i(p_0)}{\partial y_k} = - \sum_{r=1}^r \varepsilon_{x_r} \frac{\partial f_i(p_0)}{\partial x_r} - e_i \frac{\partial h_i(p_0)}{\partial e_i} \quad (9)$$

برای یک سیستم متشکل از تعداد زیادی المان روابط فوق بسط یافته و تأثیر هر نوع خطای المانهای ورودی بر هر خروجی دلخواه بدست می آید.

۳-۲. روش شبیه سازی اتفاقی

بسیاری از سیستمها بخاطر پیچیدگی و یا عدم قطعیت زیاد و عدم شناخت کامل، با روابط معادلات دیفرانسیل بین ورودیها و خروجیها بیان نمی شوند. در برخی دیگر از موارد سیستم به عنوان یک جعبه سیاه مطرح است که تنها قابلیت دادن ورودی و دریافت خروجی را دارد. برای آنالیز یک چنین سیستمهایی روشهای تحلیلی کارآمد نبوده و یا با پیچیدگی های خاص خود همراه است. با توجه به اینکه معادلات اصابت معادلات پیچیده و غیر خطی هستند و معادلات دینامیکی موشک و قوانین هدایت و کنترل نیز پیچیدگی خاص خود را دارند، لذا برای تحلیل تأثیرات این عوامل بر پارامترهای محاسبه شونده و تنظیم شونده در موشک از روش تحلیلی صریح بآسانی نمی توان بهره برد. روش شبیه سازی اتفاقی و یا روش شبیه سازی مونت کارلو که مبتنی بر ورودیهای اتفاقی و تصادفی می باشد، بهترین روش بررسی و تحلیل در این موارد می باشد. در هر صورت هر دو روش جهت آنالیز خطا در سیستمهای کنترل آتش قابل استفاده است. روش تحلیلی در سیستمهای با معادلات مشخص و دارای پیچیدگی کم که بتوان به راحتی مشتقات جزئی را محاسبه نمود، قابل بکارگیری است. روش مونت کارلو در سیستمهای پیچیده

گانه ورودی سیستم MFCD به فضای ایجاد کننده پارامترهای T_m و ψ_m که خروجی سیستم MFCD است باشد می توان نوشت:

$$IF_{ij} = \frac{mse_j}{\delta_i} \quad \text{for } j=1,2 \quad i=1,\dots,11$$

δ_i : انحراف معیار i امین ورودی به MFCD

mse_j : میانگین مربعات خطا در j امین خروجی MFCD
(mse_{T_m}, mse_{ψ_m})

$$\theta: R^{11} \rightarrow R^2$$

$$\begin{bmatrix} mse_{T_m} \\ mse_{\psi_m} \end{bmatrix} = \theta_{2 \times 11} [\delta_1 \dots \delta_{11}]^T \quad (16)$$

$$\theta_{2 \times 11} = \begin{bmatrix} IF_{T_m,1} & IF_{T_m,2} & \dots & IF_{T_m,11} \\ IF_{\psi_m,1} & IF_{\psi_m,2} & \dots & IF_{\psi_m,11} \end{bmatrix}$$

همچنین با توجه به اینکه احتمال اصابت نهایی تابعی از پارامترهای دو گانه تنظیم شونده در موشک (ψ_m, T_m) است مجدداً می توان نگاشت $\Phi: R^2 \rightarrow R^1$ را به آن اختصاص داد و نوشت:

$$\Phi: R^2 \rightarrow R^1$$

$$\Delta hp = \Phi_{1 \times 2} \begin{bmatrix} mse_{T_m} \\ mse_{\psi_m} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\Phi_{1 \times 2}: \begin{bmatrix} IF_{hT_m} & IF_{h\psi_q} \end{bmatrix}$$

روش مونت کارلو با اعمال ورودیهای اتفاقی برای این دو پارامتر و بدست آوردن تاثیر آن بر احتمال اصابت نیز اجرا می شود. بنابراین طبق تعریف فاکتور اهمیت در فرمول (۱۴) برای این نگاشت خواهیم داشت:

$$IF_{hj} = \frac{\Delta hp}{mse_j} \quad j=1,2. \quad (18)$$

برای محاسبه کاهش احتمال اصابت Δhp از معیار احتمال خطای دایره‌ای با شعاعی متناسب با ابعاد هدف که در بسیاری از مراجع استفاده می شود، می توان بهره برد [16]. شکل (۴) چگونگی محاسبه احتمال اصابت با توجه به نقاط انتهایی برخورد موشک نسبت به هدف را نشان میدهد. شعاع موثر تخریب هدف ۲۰۰ متر در نظر گرفته شده است. به این ترتیب کلیه موشکهای شلیک شده که در دایره ای به شعاع ۲۰۰ متر نسبت به نقطه قرار گیری نهایی هدف قرار دارند دارای احتمال اصابت ۱۰۰٪ و اصابت‌های خارج

احتمال اصابتی معادل Δhp_{T_m} را خواهیم داشت و این کار را برای پارامتر دیگر نیز انجام داده و کاهش احتمال اصابت در هر مورد محاسبه می شود.

برای اینکه میزان تاثیر تغییر پارامترهای T_m, ψ_m در احتمال اصابت با همدیگر مقایسه شوند با سعی و خطا در اجرای برنامه تلاش می شود که Δhp (در اینجا Δhp ها، ۵٪ انتخاب شده اند) به ازاء کلیه خطاها (که بصورت جداگانه اعمال شده اند) یکسان گردند و لذا شرایطی را ایجاد می کنیم که:

$$\Delta hp_{T_m} = \Delta hp_{\psi_m} = 5\%. \quad (12)$$

پس از اجرای برنامه mse ها به ازای پارامترهای دو گانه فوق به شکل زیر رتبه بندی می شود:

$$mse_{\psi_m} (\Delta hp = 5\%) < mse_{T_m} (\Delta hp = 5\%). \quad (13)$$

بدین ترتیب تابع احتمال اصابت نسبت به پارامتری که mse بیشتری دارد (بازای یک Δhp ثابت مثلاً پنج درصد) حساسیت کمتری دارد. با تعریف ضریب اهمیت 71 (IF) به شکل:

$$IF_x = \frac{\Delta hp_x}{mse_x} \quad (14)$$

و با توجه به اینکه در اینجا Δhp ها برابر ۵٪ انتخاب شده اند، وزن و اهمیت هر یک از این پارامترها برابر عکس mse های نظیر می باشد بنابراین:

$$IF_{\psi_m} > IF_{T_m}. \quad (15)$$

در جدول (۲) بخش نتایج میزان حساسیت تابع احتمال اصابت نسبت به هر یک از عوامل یازده گانه خطا محاسبه و رتبه بندی شده است. چنانچه در بخش شناسایی منابع خطا ذکر شد، تعداد ورودیها به جعبه MFCD یازده عامل ایجاد خطا می باشد و تعداد خروجیها از این جعبه دو پارامتر اصلی تنظیم شونده در موشک می باشد. بر اساس تعریف (۱۴) میزان تاثیر پارامترهای خطادار ورودی بر خروجی MFCD زمانی که فقط خطای پارامتر مورد نظر اعمال می گردد و سایر پارامترها بدون خطا هستند را مشخص می کند. در این بخش خروجیهای برنامه بازای اجراها و تکرارهای زیاد و نیز بازای مقادیر مختلف و متنوع mse_{T_m}, mse_{ψ_m} بدست می آید. در این مرحله می توان میزان اثر هر خطا در دو پارامتر مورد نظر را بدست آورد. واضح است که رابطه:

$$IF_{jx} > IF_{jy}$$

نشانگر تاثیر بیشتر پارامتر x نسبت به پارامتر y می باشد. اگر نگاشت ناشناخته $\theta: R^{11} \rightarrow R^2$ معرف نگاشتی از فضای عوامل خطای یازده

⁷¹ -Important Factor

تعریف:

$$PIF_i = \frac{IF_i}{\sum_{i=1}^{11} IF_i} \times 100 \quad (23)$$

درصد اهمیت هر یک از پارامترهای ورودی به MFCD بر احتمال اصابت توسط فرمول (23) بدست می آید.

4. نتایج شبیه سازی

اولین مرحله انجام فرایند آنالیز خطا تعیین سناریوی شلیک می باشد. تعیین این سناریو از آن جهت حائز اهمیت است که چگونگی تاثیر خطاها بر احتمال اصابت تابعی از نقطه کار پارامترها و یا همان سناریوی شلیک می باشد. جدول (1) سناریوی مربوط به شلیک موشک (پارامترهای هدف و سایر پارامترهای لحظه شلیک موشک) را نشان می دهد. در مرحله بعد یکی از عوامل ایجاد خطا (یازده متغیر ایجاد خطا) را جهت تحلیل انتخاب نموده و با تولید یک خطای تصادفی بر روی این متغیر، برنامه شبیه سازی معادلات اصابت حل شده پارامترهای تنظیم شونده در موشک محاسبه می شوند. جهت آنالیز میزان تاثیر این پارامتر بر برنامه معادلات اصابت به تعداد 200 مرتبه برای هر یک از خطاهای یازده گانه ورودی به MFCD حل می شود. لذا 200 مقدار مختلف برای دو پارامتر تنظیمی در موشک بدست می آید. شکل (5) مقادیر بدست آمده برای ψ_m و شکل (6) مقادیر بدست آمده برای T_m را برای یک سناریو نوعی نشان می دهد.

با توجه به سناریوهای مختلف برد، زاویه دید هدف و نیز سرعت و جهت های مختلف وزش باد برنامه آنالیز خطا طراحی و اجرا شده است، لازم به ذکر است تعداد خطاهای لحاظ شده یازده نوع بوده و برای هر نوع سه مقدار مختلف خطا در هر پارامتر اعمال شده است ضمناً جهت مقایسه، حالت بدون خطا نیز در هر سناریو اجرا می گردد، همچنین برای بدست آوردن ارتباط میان T_m و ψ_m با Δhp اعمال خطا در T_m و ψ_m نیز به شکل مستقل صورت پذیرفته است. در نهایت 13 خطا به همراه حالت بدون خطا (14 حالت) را در هر سناریو خواهیم داشت. به عنوان مثال برای سناریوی $R = 48.44 (km)$ و زاویه دید هدف $\gamma = 13(deg)$ ، سرعت وزش باد $wind-speed = 8.5 (km/h)$ ، جهت وزش باد $wind-direction = 100^\circ$ یازده نوع خطای ذکر شده در جدول (مثلاً خطای ارتفاع پرواز در جدول شماره (1)) و به ازاء هر خطا سه رنج مختلف (مثلاً خطای سنجش ارتفاع (m) 1, 2, 3) و به صورت خطای تصادفی با توزیع گوسی در نظر گرفته شده است و در هر مورد خطا کل برنامه 200 بار اجرا شده است به این ترتیب برای هر ردیف و تعیین سهم خطاهای آن سناریو به تعداد زیر اجرا برنامه را داریم (باید توجه داشت که هر یک از 13 خطای ذکر شده دارای 3 سناریو بوده بعلاوه یک سناریو بدون خطا)

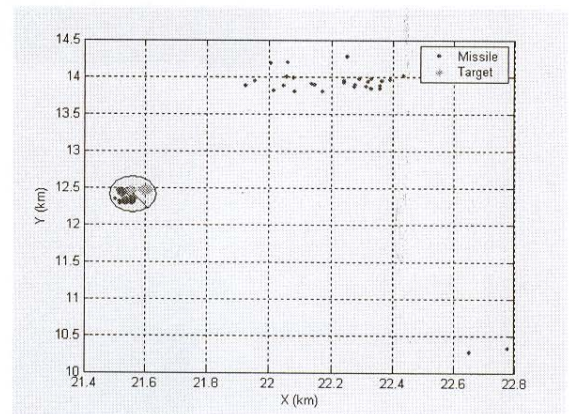
این دایره دارای احتمال اصابت صفر خواهند بود. هر چه تعداد نقاط داخل دایره بیشتر باشد احتمال اصابت بالاتر خواهد بود.

کاهش احتمال اصابت، نسبت تعداد عدم برخوردهای صورت گرفته به تعداد کل شلیکها (تکرارهای برنامه) می باشد:

$$\Delta hp = \frac{N_i}{N} \quad (19)$$

N_i : تعداد عدم برخورد

N : تعداد کل تکرار و اجراء برنامه



شکل 4) نقاط نهایی اصابت موشک و قرار گیری هدف و شعاع مفید تخریب

با تلفیق دو مرحله ذکر شده می توان به فرمول بندی کلی سیستم دست یافت.

$$\Delta hp = \Phi_{1 \times 2} \begin{bmatrix} mse_{T_m} \\ mse_{\psi_m} \end{bmatrix} = \Phi_{1 \times 2} \times \theta_{2 \times 11} [\delta_1 \dots \delta_{11}]^T \quad (20)$$

$$= \begin{bmatrix} IF_{hT_m} & IF_{h\psi_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} IF_{T_m,1} & IF_{T_m,2} & \dots & IF_{T_m,11} \\ IF_{\psi_m,1} & IF_{\psi_m,2} & \dots & IF_{\psi_m,11} \end{bmatrix} [\delta_1 \dots \delta_{11}]^T$$

$$hp = 100 - \Delta hp \quad (21)$$

فرمول (20) بیان می کند که میزان کاهش احتمال اصابت برای خطای پارامتر i ام از مجموع دو بخش تشکیل یافته است. بخش اول چگونگی تاثیر آن عامل خطا بر دو پارامتر T_m و ψ_m و بخش دوم میزان تاثیر این دو پارامتر بر کاهش احتمال اصابت است. فرمول (16) فاکتورهای اهمیت خطاهای یازده گانه نسبت به دو پارامتر T_m و ψ_m را نشان می دهد. فرمول (17) فاکتورهای اهمیت T_m و ψ_m را نسبت به کاهش احتمال اصابت نشان می دهد. فاکتورهای اهمیت هر یک از خطاهای یازده گانه نسبت به کاهش احتمال اصابت به شکل مستقیم از فرمول (20) قابل استخراج است:

$$IF_i = IF_{h1} \times IF_{1i} + IF_{h2} \times IF_{2i} \quad i = 1, 2, \dots, 11 \quad (22)$$

72 - Target Line of Sight

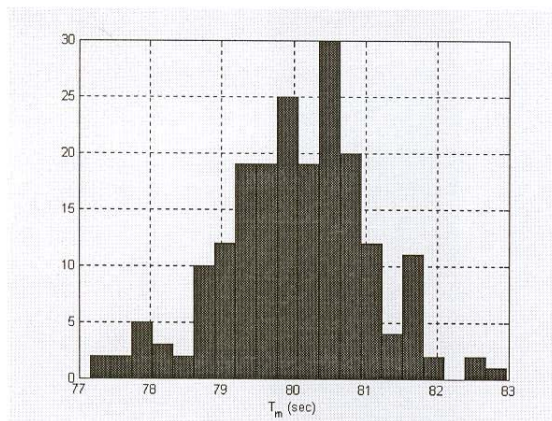
سناریوهای (سناریوهای برد هدف) $\times$ (سناریوهای جهت باد) $\times$ (سناریوهای سرعت باد) $\times$ (زاویه دید) $= 7 \times 3 \times 3 \times 3 = 189$

لذا زمان بری کلی تهیه جداول تعیین سهم خطاها به مقدار زیر می باشد.

Total Computation Time = (Computation Time (one row) $\times$ (Scenarios Number) $= 2.22 \times 189 = 420$ (hour) $= 17.5$ (day)

چنانچه مشاهده گردید، دقت در تهیه جداول خطا با توجه به حجم بالای اجراء آن در حد بسیار مطلوبی می باشد، لذا جداول فرمول بندی احتمال اصابت که در ادامه می آید، با دقت بسیار خوبی تهیه شده اند.

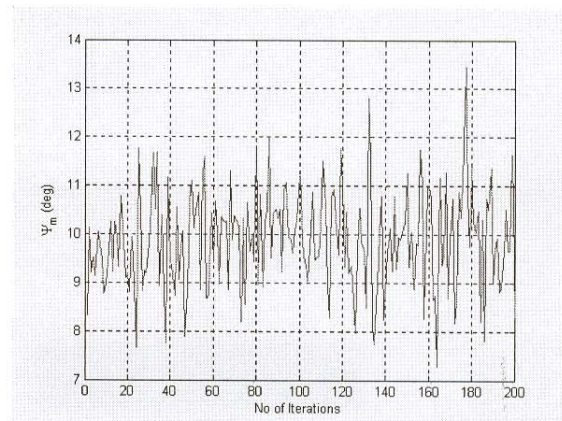
تا این مرحله از آنالیز خطا، با استفاده از فرمول (16) می توان فاکتورهای اهمیت هر یک از پارامترهای بازده گانه را بر اساس میزان تاثیر آن بر دو پارامتر تنظیم شونده در موشک، بدست آورد. شکل (۷) و (۸) تابع چگالی توزیع پراکندگی این دو پارامتر را نشان می دهد.



شکل (۷) تابع چگالی توزیع پراکندگی T_m برای یک عامل ایجاد خطا به ازای ۲۰۰ تکرار برنامه

مرحله بعدی آنالیز خطا اجرای شبیه سازی موشک و بدست آوردن نقاط برخورد نهانی موشک نسبت به نقطه انتهائی قرار گیری هدف است. شکل (۹) مسیرهای پرواز موشک به ازای اعمال یکی از خطاهای بازده گانه ورودی و به ازای ۲۰۰ مقدار پارامترهای تنظیم شونده (دو پارامتر ψ_m و T_m) در موشک را نشان می دهد.

با توجه به تعریف رابطه (19) نیاز به نقاط انتهائی برخورد جهت بدست آوردن احتمال اصابت وجود دارد. شکل (۴) نقاط انتهائی برخورد موشک را نسبت به هدف نشان می دهد. فرمول (17) فاکتور اهمیت ψ_m و T_m را نسبت به کاهش احتمال اصابت (Δhp) بدست می دهد. با توجه به واریانس خطاهای ذکر شده در جدول (۲) ماتریسهای Φ , θ قابل استخراج هستند:

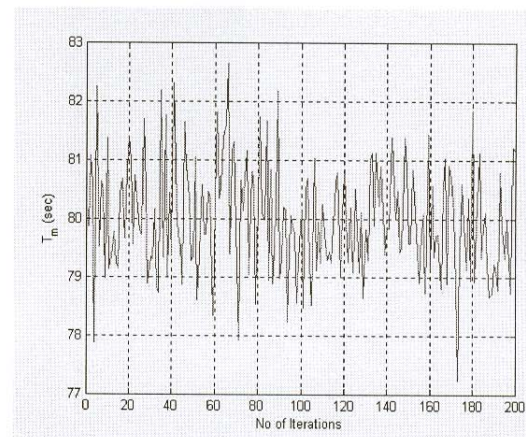


شکل (۶) مقادیر ψ_m برای یک عامل ایجاد خطا به ازای ۲۰۰ تکرار برنامه

Iteration Number $= 200 \times (3 \times 13 + 1) = 8000$

زمانبری هر بار اجراء برنامه که متناظر با قرار گرفتن اطلاعات T_m و ψ_m از طریق MFCD در موشک و حل معادلات دینامیکی پرواز موشک و معادلات اصابت می باشد، در حدود 1 ثانیه می باشد (بخش عمده ای از این زمان، مربوط به حل معادلات شش درجه آزادی شبیه سازی موشک و معادلات دینامیکی پرواز موشک می باشد، در حدود ۹۹٪ کل زمان)، لذا برای اجرای یک ردیف جدول تعیین سهم خطاها (و یا جدول فرمول احتمال اصابت) زمان زیر را خواهیم داشت.

Computation Time (one row) $= 8000 \times 1/60 \times 1/60 = 2.22$ (hour)



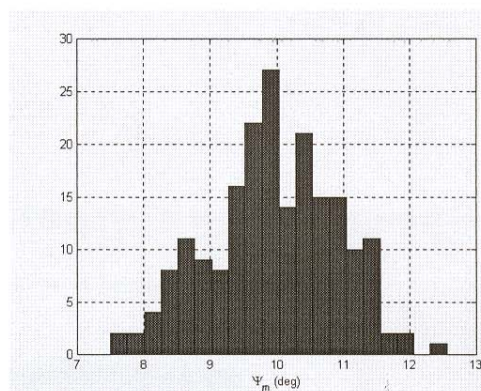
شکل (۵) مقادیر T_m برای یک عامل ایجاد خطا به ازای ۲۰۰ تکرار برنامه

مطابق جدول (جدول ۳) تعداد سناریوها در بردها، زوایای دید، سرعت و جهت های مختلف وزش باد به تعداد زیر است:

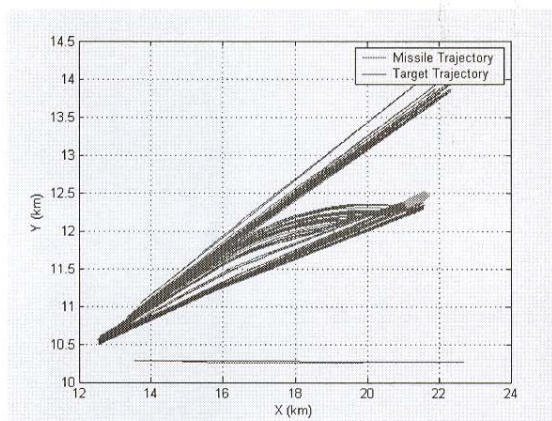
نظر برنامه آنالیز خطا اجرا و از نتایج حاصله میانگین گیری می گردد. به عنوان مثال بر اساس θ ذکر شده در فرمول فوق، دما در این سناریو دارای نسبت تاثیر ۵۰ برابر کوچکتر از سمت هدف بر روی پارامتر T_m و نیز دارای تاثیر حدوداً ۱۲ برابر کوچکتر نسبت به سمت هدف بر روی پارامتر ψ_m است ولیکن معیار قضاوت بر اساس میانگین کلیه سناریوها خواهد بود. جدول (۲) نتایج اجرای برنامه آنالیز خطا، احتمال اصابت نهائی موشک، تاثیر هر پارامتر خطا بر mse های ψ_m و T_m و فاکتورهای اهمیت برای هر عامل خطا که با استفاده از فرمول (۲۲) و با میانگین گیری از کلیه سناریوها صورت پذیرفته، را نشان می دهد. نتایج به ترتیب درجه اهمیت (میزان Δhp) رتبه بندی شده اند. به عنوان مثال شکل (۱۰) برای تشریح چگونگی خروجیهای برنامه مربوط به ردیف اول جدول (۲)، و در یک سناریوی خاص آورده شده است، که تحلیل بر روی خطای اندازه گیری سمت هدف می باشد. شکل (۱۰.a) محل اصابت موشک نسبت به هدف به ازای ۲۰۰ اجرای برنامه آنالیز خطا را نشان می دهد. چنانچه مشاهده می شود تمامی اصابتها جز برخی از آنها در نقاط نزدیک به هدف صورت پذیرفته و احتمال اصابت محاسبه شده از فرمول (21) ۹۱.۵٪ است، در شکلهای (10.b, 10.c) زوایای سمت داده شده به موشک و هیستوگرام زوایای سمت داده شده به موشک آمده است، شکل (10.d) مسیرهای پرواز موشک و حرکت هدف را نسبت به یکدیگر نشان می دهد، شکلهای (10.e, 10.f) نیز زمانهای روشن شدن جستجوگر موشک و هیستوگرام زمان روشن شدن جستجوگر موشک را نشان می دهد. با توجه به جدول (۲) می توان درصد تاثیر کلیه عوامل ایجاد خطا را با استفاده از فرمول (۲۳) در شکل (۱۱) مشاهده نمود. با جمع درصد تاثیر عوامل در هر زیر سیستم می توان شکل (۱۲) را (میزان اهمیت هر زیر سیستم را نشان می دهد) بدست آورد.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، بر روی سهم هر یک از خطاهای سیستم کنترل آتش و میزان تاثیر هر یک از این خطاها در پائین آوردن احتمال اصابت نهائی موشک، با استفاده از روش مونت کارلو مطالعه صورت پذیرفت. با اجرای برنامه و اعمال عوامل ایجاد خطا به شکل متغیرهای تصادفی با تکرار زیاد در سناریوهای مختلف جداولی بدست آمد که این جداول طبق تعریفی که در این مقاله از فاکتور اهمیت و نیز معیار میانگین مربعات خطا شد قادر به رتبه بندی عوامل ایجاد خطا در سیستم مورد مطالعه می شود. جداول بدست آمده از این تحلیل می توانند در طراحی و انتخاب سنسورهای تشکیل دهنده یک سیستم کنترل آتش بسته به میزان دقت مورد نیاز بکار روند. جهت بهبود سیستم کنترل آتش موجود با توجه به در اختیار داشتن درصد تاثیر خطای اندازه گیری سنسورها در احتمال اصابت نهائی موشک می توان چیدمان مناسبی از قطعات و سنسورها را برای داشتن احتمال اصابتی بیشتر از یک حد آستانه مطلوب داشت. همچنین به شکل معکوس با داشتن المانها و سنسورهای مشخص می



شکل ۸) تابع چگالی توزیع پراکندگی ψ_m برای یک عامل ایجاد خطا به ازای ۲۰۰ تکرار برنامه



شکل ۹) مسیرهای پرواز موشک برای یک عامل ایجاد خطا به ازای ۲۰۰ تکرار برنامه

$$\theta_{2*11} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.02016 \\ 0.02 & 0.0024 \\ 0.08 & 0.01 \\ 0.006 & 0.08004 \\ 0.02 & 0.106 \\ 0.05 & 0.0058 \\ 0.030 & 0.0106 \\ 0.109 & 0.013 \\ 0.0441 & 0.003 \\ 0.001 & 0.004 \\ 0.008 & 0.004 \end{bmatrix}^T, \phi_{1*2} = [1.01 \quad 9.98]$$

ذکر مجدد این نکته حائز اهمیت است که مقادیر بدست آمده برای ماتریسهای بالا بستگی به سناریوی تعریف شده برای شلیک موشک دارد. برای دستیابی به نتایج قابل قبول در تعیین سهم نهائی هر پارامتر ورودی به MFCD بدون وابستگی به سناریو و یا نقطه کار در کلیه سناریوهای مورد

[8] H. O. Nyongesa, "Generation of time-delay algorithm for anti-air missiles using genetic programming," *In Applications of Evolutionary Computing*, Vol. 2037, pp. 243-247, Lake Come Italy, April 18-20, 2001, Springer-Verlag.

[9] Y. Lipman, J. Shinar, and Y. Oshman, "Stochastic analysis of the interception of maneuvering antisurface missile," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 20, No. 4, July-August 1997.

[10] W. Lidong, W. Hongjing, "The research in influences of bodywork attitude's measuring error on the fire control system to calculate shoot factors," 4th World Congress on Intelligent Control Automation, June 10-14, 2002.

[11] L. N. Lillard, H. E. Evans and J. J. Spaulding, "Minimum variance missile launch and impact estimation by fusing observations from multiple sensors," *IEEE Aerospace Conf*, Feb. 1-8, 1997, U.S.A.

[12] C. R. Aragon, "Using visualization in cockpit decision support systems," *IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 3, Oct, 2005, pp. 2396 – 2401.

[13] محسن رضائیان، قابلیت اطمینان سیستمهای مهندسی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۷۹.

[14] I. M. Hammersley, D. C. Handscomb, Monte Carlo Methods, John Wiley & Son's, 1964.

[15] J. Endrenyi, "Reliability modeling in electric power systems", John Wiley & Son's, 1978.

[16] J. T. Gillis, "Computation of Circular Error Probability Integral", *IEEE Transaction on aerospace and electronic systems* Vo., 29, No. 3, July 1993.

توان احتمال اصابت نهایی را با تخمینی که از ماتریسهای θ, Φ بدست می آید، مشخص نمود.

۶. مراجع

[55] A. Karsaz and H. Khaloozadeh, "Error analysis of airborne fire control system radar via Monte Carlo Approach," 1st International Symposium of Systems and Control in Aerospace and Astronautics, IEEE-ISSCAA 2006, Korea.

[56] A. M. Papoulis, Probability, Random Variables and Stochastic Processes, McGraw-Hill, 1965.

[3] جعفر نویری حیرانی، تحلیل و آنالیز خطا و بهینه سازی سیستم هدایت کنترل یک موشک زمین به هوا، رساله دکتری رشته کنترل، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۹.

[4] F. C. Schweppe, Uncertain Dynamic Systems, Prentice-Hall, 1973.

[5] حمید خالوزاده، علی کارساز، آنالیز منابع خطای رادار و پارامترهای تشخیص هدف با استفاده از روش مونت کارلو، دوازدهمین کنفرانس مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد، اردیبهشت ۸۳.

[6] علی کارساز، حمید خالوزاده، آنالیز خطای تابع احتمال اصابت در یک سیستم کنترل آتش هوا- پایه ناشی از عامل باد، چهاردهمین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه امیر کبیر، اردیبهشت ۱۳۸۵.

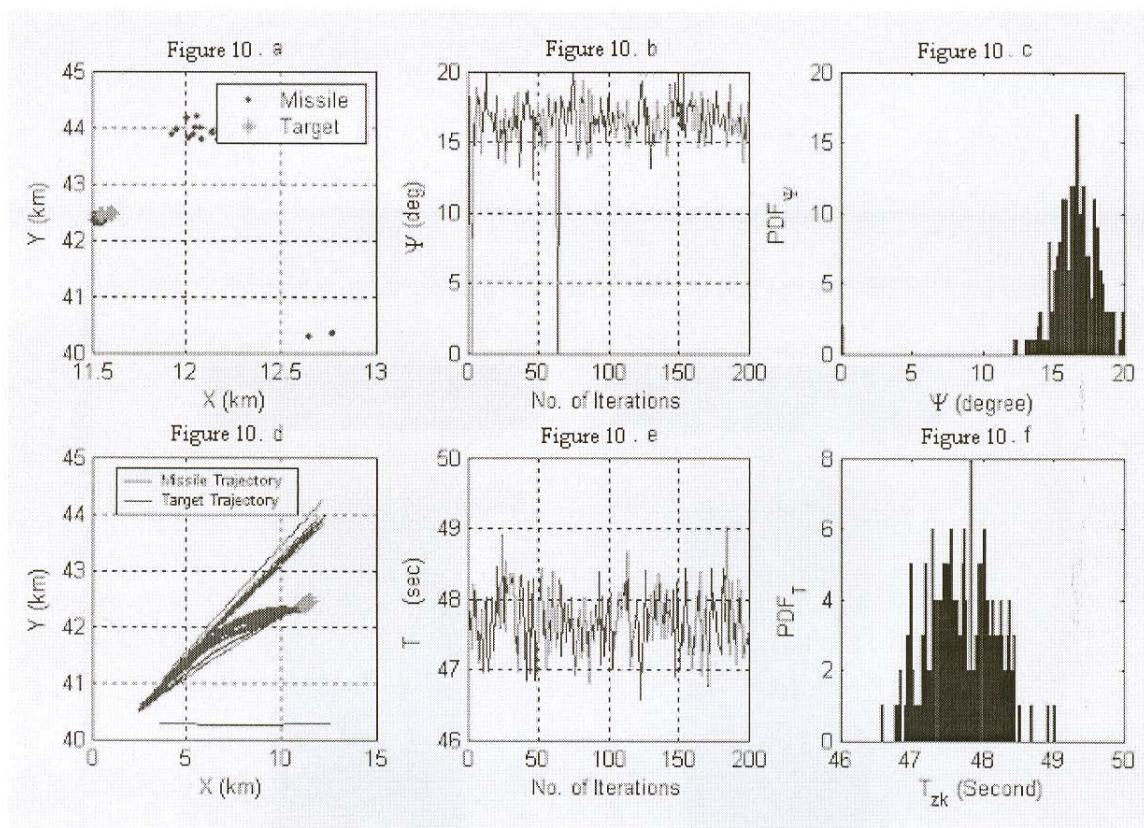
[7] L. W. Fong, J. S. Dai and C. C. Liu, "Analysis and design of shipboard defense missile system via statistical error approach," *IECON' 97 23rd Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, Vol. 1, pp. 132-137, 1997.

جدول ۱- سناریوی پرواز موشک					
مقدار پارامتر	پارامتر تنظیم شده	مقدار پارامتر	پارامتر تنظیم شده	مقدار پارامتر	پارامتر تنظیم شده
8.5	سرعت وزش باد (km/h)	48.44	برد هدف (km)	۸۰۰	ارتفاع پرواز حامل (m)
100	جهت وزش باد (deg)	30.00	سمت هدف (deg)	۱۷	زاویه سمت حامل (deg)
1009	فشار هوا (mbar)	13.0023	کورس هدف (deg)	3	زاویه رول حامل (deg)
32.437	دمای هوا (c)	35.979	سرعت هدف (km/h)	-10	زاویه پیچ پرواز حامل (deg)

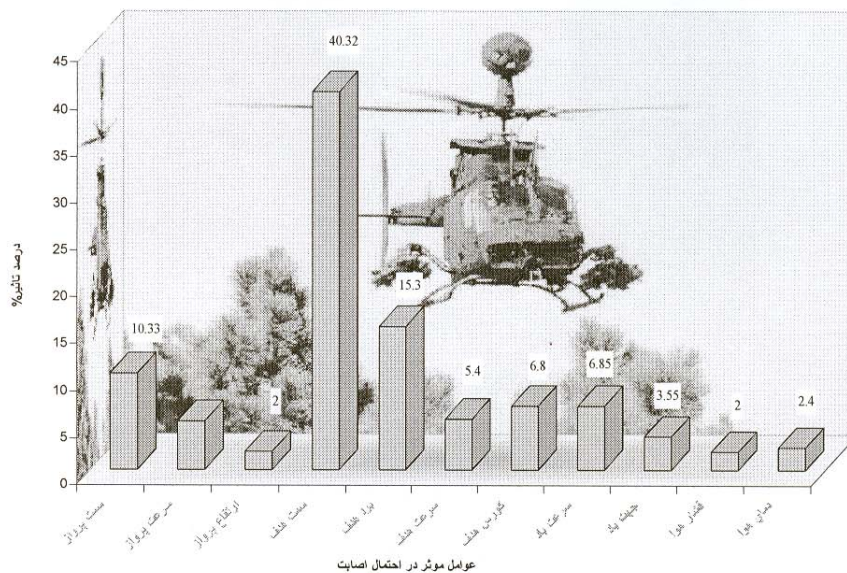
جدول ۲- مقایسه و ارزیابی نتایج تاثیر منابع خطای FCS بر احتمال اصابت موشک									
احتمال اصابت	فاکتور اهمیت	زاویه چرخش موشک ψ_m			زمان روشن شدن سیکر موشک T_m			میزان خطا	پارامترهای خطا
$hp\%$	IF_i	mse_{ψ_m}	$\sigma_{\psi_m} (deg)$	$bias_{\psi_m}$	mse_{T_m}	$\sigma_{T_m} (sec)$	$bias_{T_m}$	rms^{73}	
۹۱.۵	40.3	0.048	2.42	0.74	0.0036	1.22	1.10	0.6 deg	۱. سمت هدف
۹۶.۷	15.2	1.06	0.19	1.7	2	.038	2.6	100 m	۲. برد هدف
۹۷.۹	10.3	0.01008	0.25	1.1	0.025	0.3	2.1	0.5 deg	۳. سمت پرواز
۹۸.۵	6.8	0.026	0.33	0.8	0.2096	0.23	0.85	2 m/sec	۴. سرعت باد
۹۸.۵	6.8	0.0093	0.9	0.1423	0.0243	0.17	0.1	0.81 deg	۵. کورس هدف
۹۸.۹	5.4	0.02	0.8	0.132	0.016	0.16	0.11	2 m	۶. ارتفاع پرواز
۹۸.۹	5.4	0.0116	0.72	0.08	0.1	0.1	0.09	2 m/sec	۷. سرعت هدف
۹۹.۳	3.5	0.006	0.65	0.08	0.0882	0.17	0.11	2 deg	۸. جهت باد
۹۹.۴	2.4	0.008	0.64	0.079	0.016	0.05	0.1	2 °c	۹. دمای هواد
۹۹.۵	2.2	0.0072	0.4	0.1	0.06	0.22	0.2	3 m/sec	۱۰. سرعت پرواز
۹۹.۶	2	0.012	0.33	0.11	0.003	0.3	0.2	3 mbar	۱۱. فشار هوا

جدول ۳- سناریوهای پرواز موشک			
مقادیر	تعداد سناریو		
30-35-40-45-50-55-60 (km)	۷	برد هدف (R)	۱.
-13, 0, 13 (deg)	۳	زاویه دید هدف (LOS)	۲.
0-5-10 (km/h)	۳	سرعت وزش باد	۳.
0-45-90 (deg)	3	جهت وزش باد	۴.

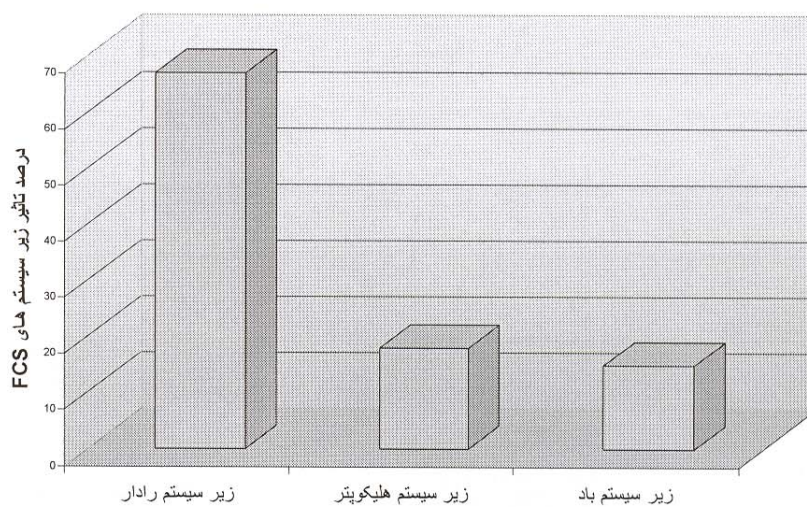
⁷³ -Root Mean Square



شکل ۱۰ (a) محل اصابت موشک نسبت به هدف، (b,c) زوایای سمت داده شده به موشک و هیستوگرام مربوطه بازای ۲۰۰ بار شلیک تصادفی، (d) مسیرهای پرواز موشک و حرکت هدف، (e,f) زمانهای روشن شدن سیکر موشک و هیستوگرام مربوطه



شکل ۱۱ درصد تاثیر عوامل یازده گانه موثر بر احتمال اصابت یک موشک خاص



شکل ۱۲: درصد تاثیر زیر سیستمهای FCS بر احتمال اصابت یک موشک خاص