

تحلیل و طراحی تأخیر زمانی بهینه در انفجار سرجنگی

زهراء پارسانژاد^۱، جعفر حیرانی نوبری^۲، سعید عباداللهی^۳

^۱ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، zparsanezhad@gmail.com

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، nobari@eetd.kntu.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه علم و صنعت ایران، s_ebadollahi@iust.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۲/۶/۴، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۲/۸/۱۱)

چکیده: فیوز یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر احتمال کشندگی سامانه‌ی سلاح محسوب می‌شود. نقش اصلی فیوز مشاهده‌ی هدف در نزدیکی موشک و انفجار سرجنگی با تأخیر مناسب می‌باشد، به گونه‌ای که حداکثر خسارت به هدف وارد شود. در این مقاله، مسئله‌ی تأخیر زمانی موردنیاز از لحظه‌ی آشکارسازی هدف توسط سنسور فیوز تا لحظه‌ی انفجار سرجنگی در دستگاه اینرسی دو بعدی حل شده است. با در نظر گرفتن مرکز سنسور فیوز به عنوان نقطه‌ی اینرسی، رابطه‌ی ساده‌ای برای تأخیر زمانی حاصل شده که نحوه‌ی اثرگذاری پارامترهای دخل در آن به خوبی مشاهده می‌شود. بدلیل ناتوانی در اندازه‌گیری تمامی پارامترهای مؤثر سعی شده است تا با استفاده از پارامترهای محدود تخمینی بهینه از تأخیر زمانی ارائه شود. بدین منظور در ابتدا با توجه به معیار $t_d > 0$ ، مقداری مناسب برای زاویه‌ی مایل فیوز انتخاب می‌شود. سپس مقدار ثابتی برای تأخیر زمانی ارائه خواهد شد. آن‌جا که این مقدار ثابت به ازای تمام ستاریوهای ممکن به برخورد ترکش‌ها به هدف منجر نخواهد شد، در ادامه تأخیر زمانی به صورت تابعی از سرعت نسبی طراحی می‌شود.

کلمات کلیدی: زاویه‌ی مایل فیوز، سرعت نسبی، تأخیر زمانی.

Analysis and Design of Optimum Time Delay in Warhead Detonation

Zahra Parsanezhad, Jafar Heyrani Nobari, Saeed Ebadollahi

Abstract: Fuse is one of the most important factors on killing probability of weapon system. The function performed by the proximity fuse is to sense the presence of a target and detonate the warhead at a suitable point to maximize the probability of destroying the target. In this paper, time delay problem is solved since detection time to detonation time in tow-dimensional inertial system. Considering the fuse sensor center as inertial point, simple equation is derived for time delay which the way of influence the factors can be seen well. Due to the inability on measure all influential factors, this present research is going to offer optimal estimation of time delay with less factors. Primarily, according to the criterion $t_d > 0$, suitable value for lean angle fuse is selected. Next, constant value is offered for time delay. By this constant value, fragments won't strike to target at all possible engagement scenarios. So, time delay would be designed as function of missile and target relative velocity.

Keywords: Fuse lean angle, Relative velocity, Time delay.

فهرست علامت:

θ : زاویه‌ی عبور موشک و هدف	V_0 : بردار سرعت اولیه‌ی ترکش
L_t : طول هدف	V_0 : اندازه‌ی سرعت اولیه‌ی ترکش
α_i : زاویه‌ی مایل سنسور فیوز	V_M : بردار سرعت موشک
R_d : بردار مکان هدف نسبت به موشک در لحظه‌ی آشکارسازی	V_m : اندازه‌ی سرعت موشک
R_d : فاصله‌ی موشک و هدف در لحظه‌ی آشکارسازی	V_T : بردار سرعت هدف
t_{go} : مدت زمان حرکت هدف از لحظه‌ی آشکارسازی تا لحظه‌ی برخورد	V_t : اندازه‌ی سرعت هدف
t_f : مدت زمان پرواز ترکش‌ها از لحظه‌ی انفجار تا برخورد به هدف	V_{MT} : بردار سرعت نسبی موشک و هدف
t_d : تأخیر زمانی از لحظه‌ی آشکارسازی تا لحظه‌ی انفجار سرجنگی	V_{mt} : اندازه‌ی سرعت نسبی موشک و هدف

یک ستاریوی در گیری خاص با فرض زاویه‌ی مایل فیوز برابر ۶۰ درجه، بازه‌ای از مقادیر ثابت مجاز برای تأخیر زمانی ارائه شده است.

در ادامه بعد از توضیح عملکرد فیوز، انواع فیوز شرح داده می‌شود. سپس سینماتیک در گیری بین موشک و هدف ترسیم شده و فرض‌های موردنیاز برای محاسبه‌ی تأخیر زمانی عنوان می‌شود. در بخش پنجم با تغیر نقطه‌ی ایترسی به مرکز سنسور فیوز، مسئله‌ی تأخیر زمانی موردنیاز از لحظه‌ی آشکارسازی هدف توسط سنسور فیوز تا لحظه‌ی انفجار سرجنگی در دستگاه اینترسی دو بعدی حل شده و معادله‌ی برای تأخیر زمانی بهینه ارائه می‌شود. قسمت ششم به طراحی تأخیر زمانی اختصاص دارد. در این قسمت در ابتدا مقدار بهینه‌ای برای زاویه‌ی مایل فیوز انتخاب می‌شود. سپس مقدار ثابتی برای تأخیر زمانی تخمین زده می‌شود. این مقدار ثابت به ازای تمام ستاریوهای ممکن به برخورد ترکش‌ها به هدف منجر نخواهد شد. بنابراین در ادامه تأخیر زمانی به صورت تابعی از سرعت نسبی بین موشک و هدف طراحی می‌گردد.

۲- عملکرد فیوز

فیوز یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر احتمال کشندگی سامانه سلاح محسوب می‌شود که وظیفه‌ی آن ارسال به موقع فرمان انفجار به سرجنگی است، به گونه‌ای که حداقل خسارت به هدف وارد شود.

فیوز شامل تجهیزاتی برای آشکارسازی نزدیکی به هدف و آماده‌سازی زنجیره‌ی انفجار است که TDD^1 نام دارد. همچنین فیوز شامل یک یا تعداد بیشتری مکانیزم اینمنی برای جلوگیری از انفجار سه‌هی خروج اصلی است و از انفجار سرجنگی به هنگام پرواز تا فاصله مطمئن و اینمنی از سایت جلوگیری می‌کند.

دو بخش فیوز و سرجنگی در کنار یکدیگر حساس‌ترین قسمت از مأموریت سامانه در مقابله با مهاجم را به عهده دارند. نحوه آغاز به کار فیوز و برنامه‌ریزی تأخیر زمانی مربوطه جهت فعل کردن سرجنگی از مؤلفه‌های اساسی است که به طور مستقیم در میزان اثرباری سرجنگی و نهایتاً احتمال کشندگی لحظه‌ی می‌شود. نقش اصلی فیوز، مشاهده‌ی هدف در نزدیکی موشک و انفجار سرجنگی با تأخیر مناسب می‌باشد [۱].

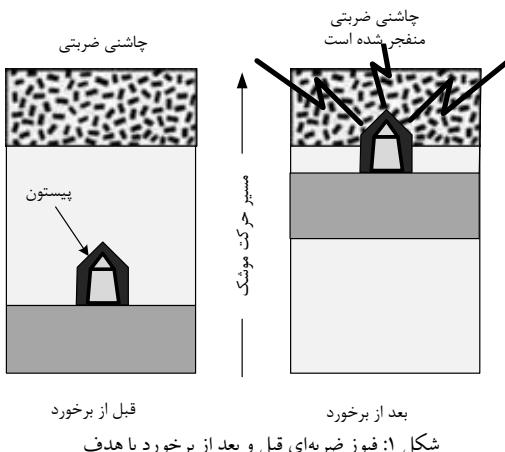
در این مقاله سعی شده است تا با نگاه سیستمی به فیوز، تأخیر زمانی موردنیاز از لحظه‌ی آشکارسازی هدف تا لحظه‌ی انفجار سرجنگی محاسبه شود. هندسه‌ی در گیری موشک و هدف برای حل مسئله‌ی تأخیر زمانی، دو بعدی در نظر گرفته می‌شود.

در [۲] و [۳] مسئله‌ی تأخیر زمانی در سیستم ایترسی که نقطه‌ی مرجع آن، نقطه‌ای چسیبده به زمین می‌باشد، حل شده است. از آن جا که معادله‌ی تأخیر زمانی حاصل شده، تابع عوامل متعددی بوده که ممکن است در دسترس نباشد، در این مقاله سعی بر این است تا با تغییر نقطه‌ی ایترسی رابطه‌ی ساده‌تری برای تأخیر زمانی بدست آورده شود.

لازم به ذکر است که سیستم ایترسی از یک دستگاه و یک نقطه‌ی مرجع اینترسی تشکیل شده است. دستگاه اینترسی دو بعدی به صورت یک دستگاه چسیبده به زمین تقریب زده می‌شود. محور اول این دستگاه در راستای افق و محور دوم آن در راستای شتاب گرانش است. نقطه‌ی مرجع اینترسی نیز که موقعیت دیگر نقاط در دستگاه اینترسی نسبت به آن سنجیده می‌شود، در این مقاله نقطه‌ای چسیبده به موشک در نظر گرفته می‌شود.

از دیگر دستاوردهای این مقاله، بدست آوردن معیاری برای انتخاب زاویه‌ی مایل فیوز و همچنین طراحی تأخیر زمانی به صورت تابعی از سرعت نسبی بین موشک و هدف می‌باشد. در [۲] تنها به ازای

¹ Target Detection and Detonation

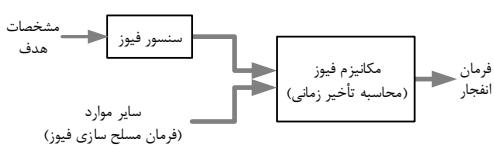


۳-۲- فیض تا خیز ماند

این فیوز طوری طراحی شده تا سرجنگی را پس از طی زمانی از پیش تعیین شده بعد از پرتاب موشک، منفجر کند. این بازه زمانی غیر قابل تغییر است، بنابراین این نوع فیوزها در سرجنگی‌های موشک‌های هدایت شونده به ندرت به کار برده می‌شوند [۶].

۳-۳- فیوز مجاورتی

- حساسه‌ای با پهنانی دید قطبی که هدف را در جلوی موشک آشکار کند.
- مکانیسم ایجاد ثابت زمانی که سرجنگی را مدت زمانی پس از آشکارسازی هدف منفجر نماید تا ترکش‌ها به طور مناسبی



شکل ۲: نمودار بلوکی فیوز به همراه ورودی‌ها و خروجی

با شناسایی هدف توسط سنسور فیوز، در صورتی که فیوز مسلح باشد، بعد از گذشت تأخیر زمانی محاسبه شده، فرمان انفجار به سرجنگی ارسال می‌شود این تأخیر زمانی تابعی از مشخصات سینماتیکی موشک و هدف از جمله سرعت نزدیک شوندگی موشک و هدف (در هدایت تناسبی)، زاویه‌ی بردار سرعت هدف و خط دید موشک و هدف (در هدایت فرمان به خط دید) و ... می‌باشد. معمولاً هم زمانی که فاصله‌ی موشک و هدف از حدی کمتر شود و یا پنج ثانیه از شلیک موشک گذشته باشد و یا ... فیوز مسلح می‌شود [۱].

چاشنی هم جزوی از مکانیزم فیوز است و برای این منابع فیوز،
تا زمانی که مورد نیاز نباشد، در داخل آن قرار نمی‌گیرد. اغلب فیوز
به گونه‌ای شکل داده می‌شود که چاشنی برای اتصال به خرج اصلی در
مسیر انفجار باستی از مجرای فیزیکی کوچکی عبور کند. این مجراء تا
زمانی که سرجنگی، مورد نیاز نباشد، مسدود می‌شود. برای مثال، فیوز
ممکن است شامل دو صفحه‌ی دور با حفره‌های خارج مرکز باشد.
وقتی صفحه‌ها تنظیم شده باشند، حفره‌ها در امتداد هم قرار گرفته و
اجازه عملکرد داده می‌شود. به این مکانیزم، مسلح‌سازی فیوز گفته
می‌شود. در غیر این صورت حفره‌ها تنظیم نبوده و فیوز این خواهد
ماند. مکانیزم فوق همراه با صفحه‌ها، وسیله‌ی این سازی و مسلح‌سازی^۱

-٣- انواع فيوز

انواع مختلفی از فیوز در دسترس است. نوع فیوز برای یک کاربرد
داده شده به مشخصات هدف، موشک و سر جنگی سنتگی دارد. فیوز
در سه نوع ضربه‌ای^۳، تأخیر زمانی^۴ و مجاورتی وجود دارد که در ادامه
توضیح داده می‌شوند.

۱-۳ فیوز ضربه‌ای

این نوع فیوز با نیروی اینرسی که بواسطهٔ برخورد موشک به هدف ایجاد می‌شود، فعال می‌شود. نمایش فیزیکی آن به صورت شکل ۱ است. همان طور که در شکل سمت چپ نشان داده شده، چاشنی ضربتی در قسمت بالای فیوز قرار گرفته است. یک پیستون متجر ک هم در انتهای دیگر آن نصب شده که بواسیلهٔ فتر یا قطعه‌ی مناسب دیگری نگاه داشته شده است. در طول پرواز موشک، پیستون در انتهای فیوز باقی می‌ماند. با برخورد موشک به هدف شتاب موشک به طور ناگهانی کاهش یافته و اینرسی پیستون آن را به سمت جلو منتقل می‌کند. سپس پیستون به ماده‌ی منفجره ضربه‌ای وارد کرده و آن را منفجر می‌کند که در شکل سمت راست نشان داده شده است. با انفجار چاشنی، خرج اصلی هم منفجر می‌شود. اغلب المان تأخیرداری در اتصال فیوز ضربه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد تا سرجنگی قبل از انفجار در هدف نفوذ کند که نتیجه‌ی آن ایجاد خسارت بیشتری در هدف توسط ترکش و یا موج انفجار می‌باشد [۵].

¹ safing and arming device

² Impact fuse

Impact fuse

Time-Delay fuses

در شکل فوق R_F شعاع آشکارسازی فیوز است. هنگامی که هدف وارد محدوده دید فیوز شود، به شرط وجود سیگنال کافی، توسط سنسور فیوز آشکار می‌شود.

V_T و V_M به ترتیب بردار سرعت موشک و بردار سرعت هدف از دید دستگاه اینرسی هستند. فرض می‌شود که هدف در راستای افق در حال حرکت است. بنابراین سرعت هدف در راستای محور دوم برابر با صفر است. همچنین اندازه‌ی سرعت‌های موشک و هدف در این سینماتیک در گیری ثابت در نظر گرفته شده که با توجه به کوتاه بودن زمان در گیری، فرضی قابل پذیرش است. زاویه‌ی θ نیز برابر زاویه‌ی بین بردار سرعت موشک و محور اول دستگاه اینرسی است.

۵- محاسبه تأخیر زمانی بهینه

با آشکارسازی هدف توسط سنسور فیوز، پس از طی تأخیر زمانی مناسب، فرمان انفجار به سرجنگی ارسال می‌شود. استفاده از این تأخیر زمانی به منظور جهت گیری مناسب ترکش‌ها به سمت هدف در راستای حداکثر تخریب آن می‌باشد.

برای محاسبه تأخیر زمانی، زاویه‌ی حمله‌ی موشک برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین فرض شده که سنسور فیوز و بدنه‌ی موشک هم محورند. ترکش‌ها هم با سرعت ثابت V_0 و زاویه‌ی ثابت θ از سرجنگی خارج شده و به طور هم‌زمان به هدف برخورد می‌کنند.

با توجه به این که مرکز سنسور فیوز نسبت به نقطه‌ی اینرسی چسبیده به زمین، با سرعت ثابت V_{∞} از دید دستگاه اینرسی، حرکت می‌کند، می‌توان این نقطه را به عنوان نقطه‌ی اینرسی در نظر گرفت [۷]. در ادامه تحلیل‌های انجام شده در سیستم اینرسی جدید که در آن مرکز سنسور فیوز نقطه‌ی مرجع است، ارائه می‌شود.

سینماتیک در گیری موشک و هدف در سیستم اینرسی جدید در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، R_d بردار مکان هدف نسبت به نقطه‌ی اینرسی جدید در لحظه‌ی آشکارسازی هدف می‌باشد.

پس با تغییر نقطه‌ی اینرسی، بردار سرعت هدف از دید دستگاه اینرسی به صورت زیر قابل بیان خواهد بود،

$$\mathbf{V}_{MT} = \mathbf{V}_T - \mathbf{V}_M \quad (1)$$

همچنین در این سیستم اینرسی، سرعت موشک صفر بوده، بنابراین انفجار سرجنگی در حالت استاتیک صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر با انفجار سرجنگی ترکش‌ها در راستای بردار سرعت \mathbf{V}_0 از سرجنگی خارج می‌شوند.

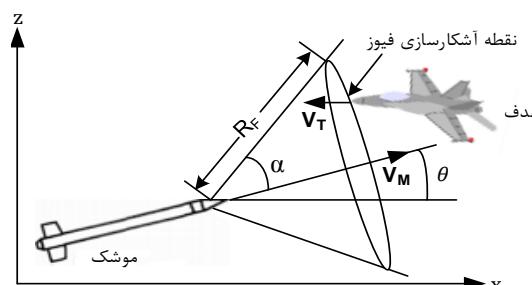
چندین نوع فیوز مجاورتی وجود دارد؛ فوتالکتریک، صوتی، رادیویی و الکترواستاتیکی. هر کدام از این فیوزها می‌توانند از قبل تنظیم شوند تا زمانی که شدت مشخصه‌های هدف به مقدار آستانه‌ای که فیوز به آن حساس است، دست یافت، عمل کنند. این فیوزها طوری طراحی می‌شوند که سرجنگی در مؤثرترین زمان و مکان نسبت به هدف منفجر شود.

اگر چه انواع فیوزهای مجاورتی به طور آزمایشگاهی استفاده شده‌اند، اما فیوز مجاورتی رادیویی مؤثرتر از انواع دیگر است. با نزدیک شدن موشک به هدف، انعکاس امواج رادیویی فرکانس بالای برخوردی به هدف، توسط گیرنده فیوز دریافت می‌شود. در فیوز رادیویی فعال، فیوز علاوه بر گیرنده دارای فرستنده نیز می‌باشد. اما در حالت نیمه‌فعال، منع انتشار امواج رادیویی در سایت زمینی قرار گرفته است. سیگنال معکس شده وقتی که توسط موشک دریافت می‌شود، به علت حرکت نسبی موشک و هدف، در فرکانس بالاتری نسبت به سیگنال ارسالی قرار دارد. این دو سیگنال وقتی با هم ترکیب می‌شوند، با توجه به پدیده‌ی دایلر می‌توانند اختلاف فازی ایجاد کنند که دامنه‌ی آن تابعی از فاصله‌ی موشک تا هدف است. وقتی این دامنه به سطح از پیش تعیین شده‌ای برسد، فیوز فعال می‌شود. در ادامه فیوز مجاورتی مینا قرار داده می‌شود.

۴- سینماتیک در گیری موشک و هدف در لحظه‌ی

آشکارسازی هدف

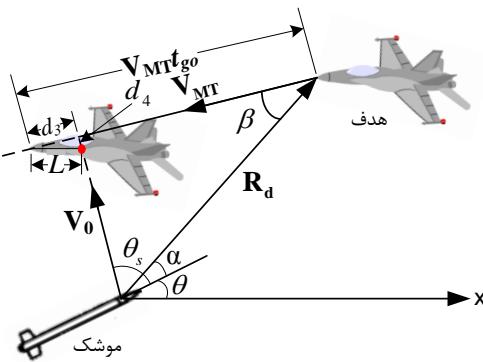
همان‌طور که گفته شد، در همه‌ی فیوزهای مجاورتی سنسوری با پهناهی دید قطبی وجود دارد که هدف را در جلوی موشک آشکار می‌کند. مشخصه‌ی این پهناهی دید، زاویه‌ی α است که به زاویه‌ی مایل^۱ مشهور می‌باشد. در شکل ۳، سینماتیک در گیری موشک و هدف در لحظه‌ی آشکارسازی هدف توسط فیوز مجاورتی با زاویه‌ی مایل ثابت در دستگاه اینرسی نشان داده شده است.



شکل ۳: آشکارسازی هدف توسط فیوز با زاویه مایل ثابت

^۱ Lean angle

نوك هدف باشد، مورد اصابت ترکشها قرار بگیرد، بایستی معادله‌ی t_d را اصلاح کرد. بدین منظور شکل ۵ در نظر گرفته می‌شود.



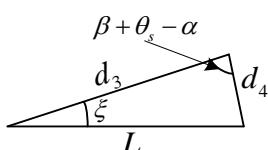
شکل ۵: سینماتیک درگیری در حالتی که نقطه برخورد به فاصله‌ی L از نوك هدف قرار دارد.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، هدف از لحظه‌ی آشکارسازی تا لحظه‌ی برخورد، فاصله‌ی $V_{mt}t_{go}$ را در راستای بردار سرعت نسبی طی کرده است. نقطه‌ی برخورد ترکش‌ها به هدف نیز به فاصله‌ی L عقب تراز نوك هدف قرار دارد. در دو مثبت ترسیم شده در شکل فوق می‌توان روابط زیر را نوشت،

$$\frac{V_{mt}t_{go} - d_3}{\sin(\theta_s - \alpha)} = \frac{R_d}{\sin(\beta + \theta_s - \alpha)} = \frac{t_f V_0 + d_4}{\sin \beta} \quad (7)$$

$$\frac{L}{\sin(\beta + \theta_s - \alpha)} = \frac{d_4}{\sin \xi} = \frac{d_3}{\sin(\beta + \theta_s - \alpha + \xi)} \quad (8)$$

برای نوشتند رابطه‌ی (۸)، از بزرگ‌نمایی انجام شده در شکل ۶ استفاده شده است.



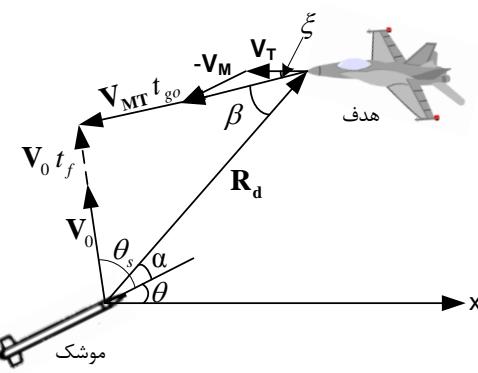
شکل ۶: بزرگ‌نمایی مثبت کوچک‌تر در شکل ۵

با محاسبه t_f از معادله‌های بالا، تأخیر زمانی برحسب تأخیر زمانی محاسبه شده در رابطه‌ی (۶)، به صورت زیر قابل بیان خواهد بود [۱]،

$$t_{d_{new}} = t_d + \frac{L}{\sin(\beta + \theta_s - \alpha)} \left(\frac{\sin(\theta + \theta_s)}{V_{mt}} + \frac{\sin \xi}{V_0} \right) \quad (9)$$

۶- طراحی تأخیر زمانی بهینه

با توجه به رابطه‌ی بدست آمده برای تأخیر زمانی در بخش قبل، ملاحظه می‌شود که t_d تابعی از فاصله‌ی بین موشک و هدف در لحظه‌ی آشکارسازی، سرعت نسبی بین موشک و هدف، سرعت و زاویه‌ی خروج ترکش و زاویه‌ی مایل فیوز می‌باشد. به دلیل در دسترس



شکل ۴: سینماتیک درگیری مفروض با لحاظ کردن زاویه‌ی خروج ترکش در سناریوی دوم

متغیر t_{go} مدت زمان حرکت هدف از لحظه‌ی آشکارسازی آن توسط فیوز تا لحظه‌ی برخورد ترکش‌ها به آن و t_f مدت زمان پرواز ترکش‌ها می‌باشد. ξ زاویه‌ی بین بردارهای سرعت نسبی و سرعت هدف بوده و برابر است با $\tan^{-1}(\frac{V_m \sin \theta}{V_m \cos \theta + V_i})$. با معلوم شدن زاویه‌ی ξ ، زاویه‌ی β را نیز به صورت زیر می‌توان محاسبه کرد،

$$\beta = \alpha + \theta - \xi \quad (2)$$

در شکل ۴ مثبتی که اصلاح آن بردارهای \mathbf{R}_d ، \mathbf{V}_0 و $t_f \mathbf{V}_{MT}$ هستند، در نظر گرفته می‌شود. در این مثبت زاویه‌ی بین بردارهای \mathbf{R}_d و \mathbf{V}_0 $\theta_s - \alpha$ است. بنابراین زاویه‌ی بین بردارهای \mathbf{V}_0 و \mathbf{V}_{MT} ، برابر می‌شود با $\theta_s - \alpha - \beta = \pi - \theta$. حال با استفاده از قانون سینوس‌ها در مثبت فوق می‌توان رابطه‌ی زیر را نوشت،

$$\frac{R_d}{\sin(\beta + \theta_s - \alpha)} = \frac{t_{go} V_{mt}}{\sin(\theta_s - \alpha)} = \frac{t_f V_0}{\sin \beta} \quad (3)$$

با برابر قرار دادن تساوی اول و سوم (از سمت چپ)، مدت زمان پرواز ترکش‌ها به صورت زیر حاصل می‌شود،

$$t_f = \frac{R_d}{V_0} \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \theta_s - \alpha)} \quad (4)$$

حال تساوی اول و دوم رابطه‌ی (۳) را برابر هم قرار می‌دهیم،

$$t_{go} = \frac{R_d}{V_{mt}} \frac{\sin(\theta_s - \alpha)}{\sin(\beta + \theta_s - \alpha)} \quad (5)$$

بنابراین تأخیر زمانی موردنیاز به کمک رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است،

$$t_d = t_{go} - t_f \\ = \frac{R_d}{\sin(\beta + \theta_s - \alpha)} \left(\frac{\sin(\theta_s - \alpha)}{V_{mt}} - \frac{\sin \beta}{V_0} \right) \quad (6)$$

با اعمال تأخیر زمانی محاسبه شده، ترکش‌ها به اولین نقطه‌ای از هدف که توسط فیوز آشکار می‌شود، برخورد می‌کنند. برای این که قسمت آسیب‌پذیر هدف که ممکن است به فاصله‌ی L عقب تراز

با فرض این که بردار سرعت موشک در راستای بردار سرعت هدف قرار داشته و زاویهٔ خروج ترکش از سرجنگی در حالت استاتیکی 90° درجه باشد، رابطه‌ی (۱۰) به صورت زیر ساده می‌شود،

$$\frac{\cos \alpha}{V_{mt}} > \frac{\sin \alpha}{V_0} \quad (11)$$

پس زاویهٔ مایل فیوز طبق رابطهٔ زیر محدود خواهد شد،

$$\alpha < \tan^{-1}\left(\frac{V_0}{V_{mt}}\right) \quad (12)$$

چنانچه سرعت استاتیک ترکش‌ها $3000 m/s$ و بازهٔ

تغییرات سرعت نسبی $500 m/s$ تا $1500 m/s$ در نظر گرفته شود، آن‌گاه کران بالای زاویهٔ مایل 63.43° می‌شود.

اکنون حالت بررسی می‌شود که در آن θ برابر صفر نیست. در این حالت زاویهٔ β برابر زاویهٔ α نبوده و بایستی بر حسب دیگر پارامترها محاسبه شود. با تعریف زاویهٔ ψ به صورت

$$\tan \psi = \frac{\tan \theta - \tan \xi}{1 + \tan \theta \tan \xi} = \frac{\tan \theta - \frac{V_m \sin \theta}{V_m \cos \theta + V_t}}{1 + \tan \theta \frac{V_m \sin \theta}{V_m \cos \theta + V_t}} \quad (13)$$

لازم به ذکر است که زاویهٔ ψ زاویهٔ نزدیکشوندگی موشک و هدف بوده که برابر با زاویهٔ بین بردار سرعت نسبی و محور طولی موشک می‌باشد. با استفاده از روابط مثبتانی، رابطهٔ فوق را به صورت مناسب‌تری می‌توان بیان نمود،

$$\tan \psi = \frac{\sin \theta}{\cos \theta + V_m/V_t} \quad (14)$$

$\sin \beta$ را نیز به صورت زیر می‌توان نوشت،

$$\sin \beta = \sin(\alpha + \psi) = \sin \alpha \cos \psi + \cos \alpha \sin \psi \quad (15)$$

با جایگذاری رابطهٔ (۱۵) در رابطهٔ (۱۰) و کمی مرتب‌سازی، این نامساوی به صورت زیر حاصل می‌شود [۱]،

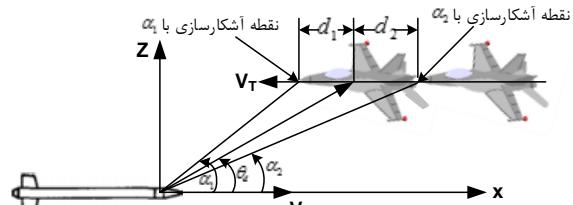
$$\alpha < \tan^{-1}\left(\frac{V_0/V_{mt} - \sin \psi}{\cos \psi}\right) \quad (16)$$

در شکل ۸ نحوهٔ تغییرات کران بالای زاویهٔ مایل فیوز بر حسب زاویهٔ θ مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌شود که به ازای θ های مختلف کوچک‌ترین کران بالای α ، برابر با 61.58° است.

نبودن تمامی پارامترهای ذکر شده، بایستی بتوان با استفاده از ورودی‌های محدود، تخمینی بهینه از t_d ارائه نمود. بدین منظور در ابتدا مقدار مناسبی برای زاویهٔ مایل فیوز در جهت افزایش احتمال آشکارسازی هدف انتخاب می‌گردد. در ادامه مقدار ثابتی برای تأخیر زمانی در راستای افزایش احتمال برخورد ترکش‌ها به هدف تخمین زده می‌شود. سپس تأخیر زمانی به صورت تابعی از بعضی پارامترهای قابل اندازه‌گیری مانند سرعت نزدیکشوندگی طراحی می‌گردد.

۱-۶- انتخاب زاویهٔ مایل مناسب

اولین نکته‌ای که در طراحی زاویهٔ مایل فیوز باید مورد توجه قرار داد، مقدار زاویهٔ دینامیکی خروج ترکش (θ_d) است. در انفجار دینامیکی سرجنگی بردار سرعت نسبی به صورت برداری به بردار سرعت استاتیک ترکش‌ها اضافه شده و زاویهٔ دینامیکی خروج ترکش نسبت به هدف حاصل می‌شود. اگر زاویهٔ دینامیکی خروج ترکش کمتر از زاویهٔ مایل باشد (α_1)، ترکش‌ها مطابق شکل ۷، به فاصله‌ی d_1 عقب تراز نوک هدف به آن برخورد خواهند کرد. حال اگر زاویهٔ مایل فیوز به زیر زاویهٔ θ_d کاهش یابد (α_2)، آن‌گاه ترکش‌ها مسافتی (d_2) جلوتر از هدف، از امتداد بردار سرعت آن عبور می‌کنند. فاصله‌ی d_2 را نیز می‌توان با افزودن تأخیر زمانی از زمان آشکارسازی تا زمان انفجار، کاهش داد.



شکل ۷: مقایسهٔ زوایای مایل مختلف فیوز

بنابراین می‌توان زاویهٔ خروج استاتیکی ترکش را به گونه‌ای طراحی کرد که زاویهٔ خروج دینامیکی از زاویهٔ مایل فیوز بزرگ‌تر شود و با افزودن تأخیر زمانی مناسب، ترکش‌ها به قسم آسیب‌پذیر هدف برخورد کنند.

انتخاب زاویهٔ مایل فیوز به گونه‌ای که کوچک‌تر از زاویهٔ خروج ترکش‌ها باشد، موجب می‌شود تا زمان لازم برای تصمیم‌گیری جهت انفجار به موقع سرجنگی وجود داشته باشد. به عبارت دقیق‌تر در این حالت می‌توان تأخیر زمانی بین لحظه‌ی آشکارسازی هدف تا لحظه‌ی انفجار سرجنگی تعریف کرد. بنابراین یک معیار برای انتخاب مقداری مناسب برای این زاویه آن است که تأخیر زمانی محاسبه شده در رابطهٔ (۶) بزرگ‌تر از صفر باشد. برای این که $t_d > 0$ باشد، کافی است رابطهٔ زیر برقرار باشد،

$$\frac{\sin(\theta_s - \alpha)}{V_{mt}} > \frac{\sin \beta}{V_0} \quad (10)$$

۲-۶- طراحی تأخیر زمانی ثابت

در این قسمت به ازای ستاریوی پروازی با مسیر موازی ($\theta = 0^\circ$) تأخیر زمانی ثابتی طراحی می‌شود. فرض می‌شود که زاویه خروج ترکش‌ها در حالت استاتیکی برابر 90° درجه است. پس مطابق رابطه (۹) تأخیر زمانی مورد نیاز به ازای 0° و $\theta_s = 90^\circ$ از رابطه زیر محاسبه می‌شود،

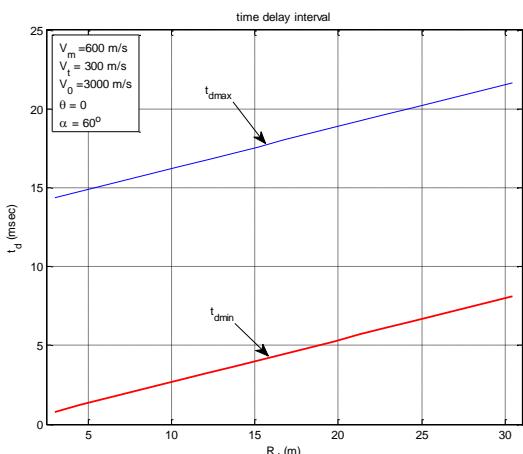
$$t_d = \frac{R_d \cos \alpha}{V_{mt}} - \frac{R_d \sin \alpha}{V_0} + \frac{L}{V_{mt}} \quad (17)$$

اگر متغیر L صفر در نظر گرفته شود، اولین نقطه‌ی آشکارشده توسط فیوز مورد اصابت ترکش‌ها قرار می‌گرد. در این حالت کوچک‌ترین تأخیر زمانی قابل اعمال توسط فیوز حاصل می‌شود. همچنین با برابر قرار دادن متغیر L با طول هدف (L_t)، بزرگ‌ترین تأخیر زمانی مجاز بدست می‌آید. پس داریم،

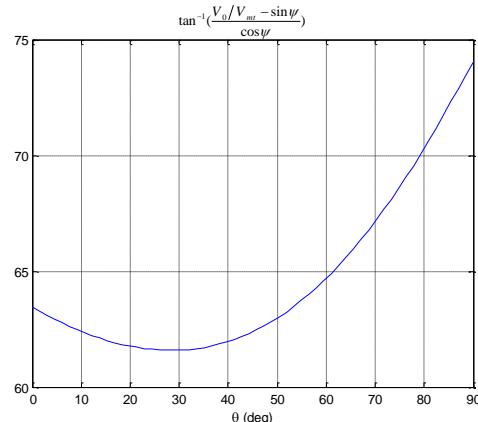
$$t_{d_{\min}} = \frac{R_d \cos \alpha}{V_{mt}} - \frac{R_d \sin \alpha}{V_0} \quad (18)$$

$$t_{d_{\max}} = \frac{R_d \cos \alpha}{V_{mt}} - \frac{R_d \sin \alpha}{V_0} + \frac{L_t}{V_{mt}} \quad (19)$$

در شکل ۱۰ بازه‌ی مجاز تأخیر زمانی که منجر به برخورد ترکش‌ها به هدف می‌شود، بر حسب فاصله موشک و هدف در لحظه‌ی آشکارسازی نشان شده است. در ترسیم این شکل سرعت نسبی بین موشک و هدف برابر با $900 m/s$ در نظر گرفته شده است. با توجه به این منحنی‌ها می‌توان انتظار داشت که با اعمال یک تأخیر زمانی 8 تا 14 میلی‌ثانیه، پرتو ترکش به هدف اصابت کند. چنین منحنی‌هایی را می‌توان برای سرعت نسبی‌های مختلف ترسیم کرد. در شکل ۱۱ منحنی‌های کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین تأخیر زمانی بر حسب R_d به ازای سرعت‌های نسبی مختلف ترسیم شده است.

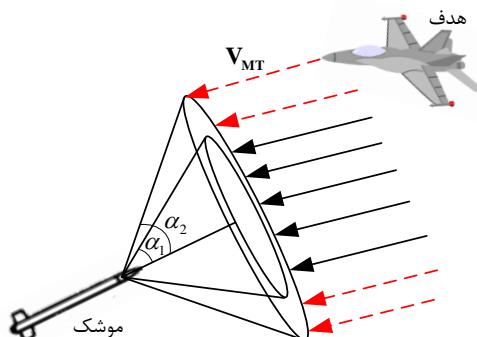


شکل ۱۰: نحوه تغییرات بازه‌ی تأخیر زمانی مجاز بر حسب R_d



شکل ۸: نحوه تغییرات کران بالای زاویه مایل بر حسب زاویه θ

بنابراین برای این که تأخیر زمانی از لحظه‌ی آشکارسازی هدف تا لحظه‌ی انفجار قابل تعریف باشد ($t_d > 0$)، زاویه مایل فیوز بایستی کوچک‌تر از مقدار ثابتی انتخاب شود که این مقدار ثابت به ازای تغییرات سرعت نسبی در بازه‌ی $1500 m/s$ تا $500 m/s$ و 61.58° ، $3000 m/s$ بددست آمد. اما نکته‌ی دیگری که در انتخاب این زاویه باید مورد توجه قرار داد این است که هر چه مقدار این زاویه بزرگ‌تر باشد، مطابق شکل ۹، سنسور فیوز قادر به آشکارسازی ستاریوهای پیشتری خواهد بود.



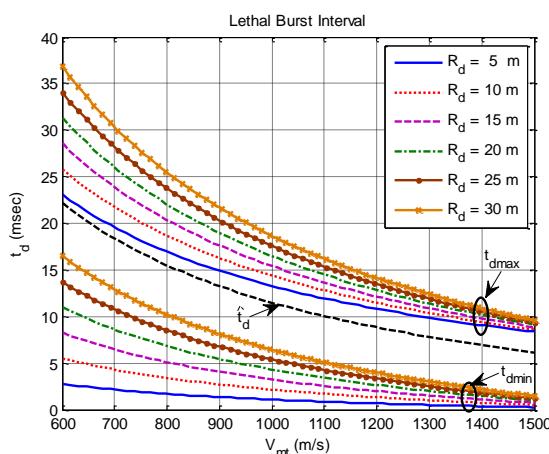
شکل ۹: تأثیر مقدار زاویه مایل فیوز بر ستاریوهای آشکارشده توسط فیوز

دسته خطوط ترسیم شده در شکل ۹، مسیرهای در گیری نسبی بین موشک و هدف می‌باشند که از لحظه کمترین فاصله بین موشک و هدف در طول پرواز متفاوت هستند. مشاهده می‌شود که برخی از این ستاریوها در محدوده دید فیوز با زاویه مایل α_1 قرار نگرفته و توسط این فیوز آشکار نخواهند شد. این ستاریوهای آشکار نشده با خط‌چین ترسیم شده‌اند.

با توجه به توضیحات ارائه شده، مقدار 60° به عنوان مقداری مناسب برای زاویه مایل فیوز انتخاب می‌شود.

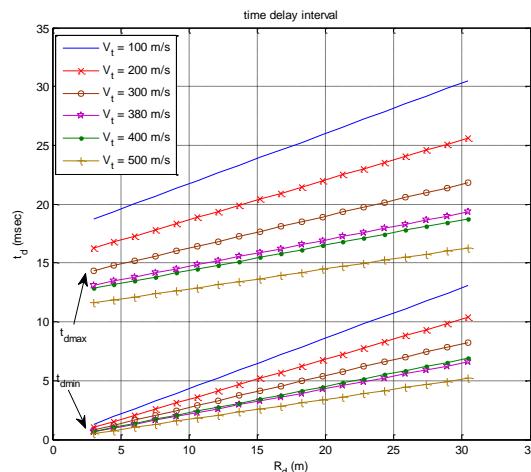
به صورت رابطه‌ی (۲۱)، همواره ترکش‌ها به هدف برخورد خواهد

کرد.



شکل ۱۲: بازه تأخیر زمانی بر حسب سرعت نسبی و به ازای R_d های مختلف

در طراحی تأخیر زمانی بهینه فرض شد که با انفجار سرجنگی، همهی ترکش‌ها در یک راستا (عمود بر محور طولی موشک) از سرجنگی خارج می‌شوند. در ادامه با حذف این فرض (در نظر گرفتن الگوی پخش ترکش‌ها)، تأخیر زمانی ارائه شده در رابطه‌ی (۲۱) ارزیابی قرار می‌گیرد.



شکل ۱۱: بازه تأخیر زمانی مجاز بر حسب فاصله موشک و هدف در زمان و به ازای سرعت‌های نسبی مختلف

همان‌طور که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است، اگر سرعت هدف بزرگ‌تر از 380 m/s شود، نمی‌توان تأخیر زمانی ثابتی تخمین زد. پس چنانچه تأخیر زمانی ثابتی در نظر گرفته شود، امکان برخورد ترکش‌ها به هدف در تمام سناریوهای ممکن وجود نخواهد داشت. در ادامه تأخیر زمانی به صورت تابعی از سرعت نسبی بین موشک و هدف تخمین زده می‌شود.

۳-۶- طراحی تأخیر زمانی به صورت تابعی از سرعت نسبی

با توجه به معادله‌ی تأخیر زمانی در رابطه‌ی (۱۷) ملاحظه می‌شود که تأخیر زمانی با سرعت نسبی رابطه‌ی عکس دارد. بنابراین t_d را می‌توان به صورت زیر به صورت تابعی از سرعت نسبی طراحی کرد،

$$\hat{t}_d = \frac{k_1}{V_{mt}} - k_2 \quad (20)$$

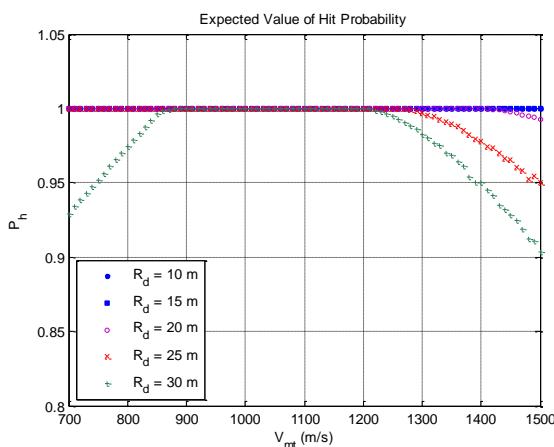
پارامترهای k_1 و k_2 را بایستی طوری تخمین زد که تأخیر زمانی به ازای تمام سناریوهای ممکن، بهینه باشد. نحوه تغییرات کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین تأخیر زمانی بر حسب سرعت نسبی در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. با انتخاب پارامترهای k_1 و k_2 به صورت زیر خواهد شد،

$$\hat{t}_d = \frac{16}{V_{mt}} - 0.0045 \quad (21)$$

در رابطه‌ی فوق V_{mt} بر حسب m/s و \hat{t}_d بر حسب ثانیه است. منحنی تأخیر زمانی تخمین زده شده در شکل ۱۲ با خط چین ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که به ازای مقادیر مختلف سرعت نسبی و فاصله موشک و هدف در لحظه‌ی آشکارسازی، با اعمال تأخیر زمانی

ترکش‌ها به صورت شکل ۱۳ در قطاع زاویه‌ای $(\theta_{s2} - \theta_{s1})$ توزیع می‌شوند که θ_{s1} و θ_{s2} به ترتیب زاویه‌ی خروج استاتیکی اولين و آخرین ردیف ترکش‌ها می‌باشند. با فرض اینکه ترکش‌ها در الگوی نشان داده شده به صورت یکنواخت توزیع شده باشند، می‌توان تابع احتمال برخورد ترکش‌ها به هدف (P_h) را تعریف نمود. چنانچه همهی ترکش‌ها به هدف برخورد کنند، مقدار این تابع برابر یک شده، در غیر این صورت P_h از نسبت ترکش‌های برخورده به کل ترکش‌ها محاسبه می‌شود. با اعمال تأخیر زمانی‌های مختلف، تعداد ترکش‌های برخورده کننده به هدف نیز متفاوت خواهد شد. در شکل ۱۴ تابع احتمال برخورد بر حسب تأخیر زمانی به ازای مقادیر متفاوت بردا آشکارسازی ترسیم شده است. سرعت نسبی برابر با 900 m/s و طول هدف 12 m فرض شده است. زوایای خروج ترکش‌ها نیز به صورت 120° و $\theta_{s1} = 80^\circ$ و $\theta_{s2} = 100^\circ$ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش بردا آشکارسازی، بازه‌ای از تأخیر زمانی که منجر به برخورد همهی ترکش‌ها به هدف می‌شود ($P_h = 1$ ، کاهش یافته است. همچنین در شکل ۱۴ مقدار احتمال برخورد به ازای تأخیر زمانی تخمین زده شده در رابطه‌ی (۲۱) مشخص شده است. ملاحظه می‌شود که تأخیر زمانی طراحی شده به ازای همهی مقادیر در نظر گرفته شده‌ی R_d ، احتمال برخورد یک را نتیجه می‌دهد.

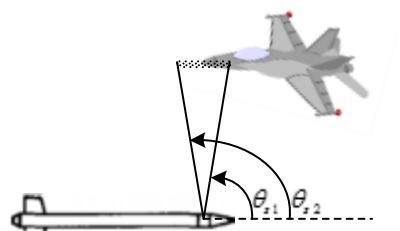
زاویه‌ی θ به صورت یک متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه‌ی $(0^\circ, 50^\circ)$ در نظر گرفته شود، می‌توان به کمک روش مونت‌کارلو، صحت تأخیر زمانی طراحی شده را بررسی نمود. در این شبیه‌سازی به ازای هر V_{mt} ، معادلات مربوطه ۱۰۰۰ بار حل شده است. سپس به ازای هر مقدار از سرعت نسبی، ۱۰۰۰ داده برای احتمال برخورد وجود دارد که با میانگین گیری از این داده‌ها تابع احتمال برخورد متضاظر با هر V_{mt} حاصل می‌شود. نتیجه‌ی شبیه‌سازی مونت‌کارلو به ازای مقادیر متضاظر برد آشکارسازی در شکل ۱۶ دیده شود. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که تأخیر زمانی طراحی شده در این مقاله در سناریوهای درگیری مختلف با احتمال بیشتر از ۰.۹ منجر به برخورد ترکش‌ها به هدف خواهد شد.



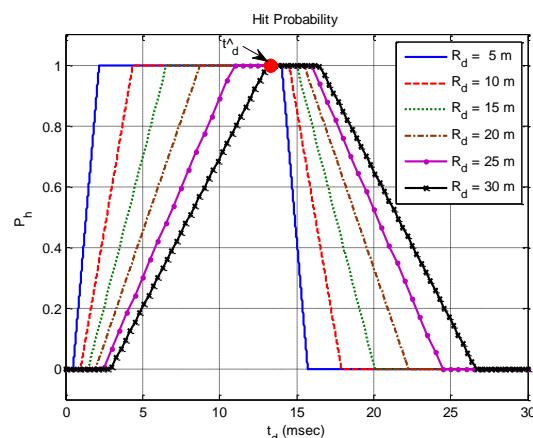
شکل ۱۶: مقدار میانگین تابع احتمال برخورد به ازای توزیع یکنواخت زاویه θ

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، عملکرد فیوز به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر احتمال کشندگی سامانه‌ی سلاح بررسی شد. با تغییر نقطه‌ی اینترسی به مرکز سنسور فیوز، مسئله‌ی تأخیر زمانی موردنیاز از لحظه‌ی آشکارسازی هدف توسط سنسور فیوز تا لحظه‌ی انفجار سرجنگی در دستگاه اینترسی دو بعدی حل شده و رابطه‌ی ساده‌ای برای تأخیر زمانی بدست آمد که نهودی اثر گذاری هر یک از پارامترهای دخیل در آن از جمله سرعت نسبی بین موشک و هدف به خوبی دیده می‌شود. سپس معیار $P_h > t_d$ برای انتخاب بهینه‌ی زاویه‌ی مایل فیوز معرفی شد. مشاهده شد که با توجه به این معیار، زاویه‌ی α نباید بزرگ‌تر از یک مقدار مشخصی انتخاب شود. کران بالای زاویه‌ی مایل فیوز تابعی از سرعت نسبی، سرعت استاتیک ترکش و زاویه‌ی نزدیک‌شوندگی موشک و هدف است. در ادامه به دلیل در دسترس نبودن تمامی پارامترهای مؤثر بر تأخیر زمانی، بازه‌ای ثابت برای تأخیر زمانی ارائه شد. از آن‌جا که این مقادیر ثابت به ازای تمام سناریوهای درگیری ممکن به برخورد ترکش‌ها به هدف منجر نمی‌شوند، در ادامه تأخیر زمانی به صورت تابعی از سرعت نزدیک‌شوندگی بین موشک و هدف طراحی شد. در پایان نیز با حذف گام به گام فرض‌های در نظر

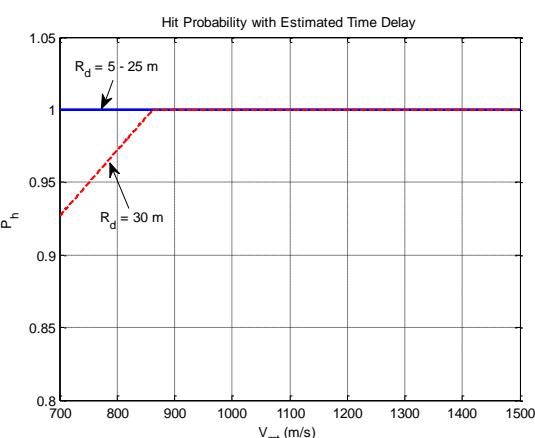


شکل ۱۳: الگوی پخش ترکش‌ها در لحظه‌ی برخورد



شکل ۱۴: نحوه تغییرات تابع احتمال برخورد بر حسب تأخیر زمانی به ازای R_d های مختلف

در شکل ۱۵ نحوه تغییرات تابع احتمال برخورد بر حسب سرعت نسبی و به ازای چند R_d مختلف نشان داده شده است. تأخیر زمانی متضاظر با هر سرعت نسبی نیز از رابطه (۲۱) تخمین زده شده است. مشاهده می‌شود که ترکش‌ها به ازای R_d های ۵ متر تا ۲۵ متر همواره با احتمال ۱۰۰ درصد به هدف برخورد می‌کنند. تنها به ازای $R_d = 30m$ تابع P_h با کاهش سرعت نسبی تا حدود ۷ درصد از مقدار یک کمتر شده است.



شکل ۱۵: نحوه تغییرات تابع احتمال برخورد به ازای تأخیر زمانی تخمینی بر حسب سرعت نسبی

اما موضوع دیگری که در طراحی تأخیر زمانی فرض شده بود، موازی بودن مسیر موشک و هدف است ($\theta = 0$). حال چنانچه

- [3] Richard M. Lloyd, "Conventional Warhead Systems Physics and Engineering Design", American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 1998
- [4] CDR, Joseph Hall, "Principles of Naval Weapons Systems", USN.
- [5] "Principles of Guided Missile and Nuclear Weapons", U. S. Navy Training Publications Center, under direction of the Bureau of Naval Personnel, 1959.
- [6] "Fuzes", Engineering Design Handbook, Ammunition Series, AMCP 706-210, 1969.
- [V] حیرانی نویری، ج، "جزوه درس ناوبری"، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی برق، بهار ۱۳۹۰.

گرفته شده، دیده شد که تأخیر زمانی طراحی شده در ستاریوهای در گیری مختلف، منجر به برخورد ترکش‌ها به هدف با احتمال بزرگتر از ۰.۹ می‌شود.

-۸- مراجع

- [1] پارسانزاد، ز، "تحلیل توزیع احتمال در ناحیه انهدام یک سامانه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی برق، دی ماه ۱۳۹۱.
- [2] Macfadzean, Robert H.M, "Surface based air defense system analysis", Artech House, Norwood, MA, 1992.