

مدل سازی و شبیه سازی حرکت ساچمه و تور در یک سامانه پدافندی ضد ریز پرنده مجهز به سیستم پرتاب تور

علی فاطمی پارسا، علیرضا رضایی مایانی

۱- کارشناسی ارشد هوافضا-دینامیک پرواز، دانشگاه صنعتی شریف
۲- کارشناسی ارشد هوافضا، پژوهشگر

چکیده

در این مقاله حرکت سیستم ساچمه و تور در یک سامانه شکار ریز پرنده به منظور محاسبه زمان لازم جهت باز شدن کامل تور بررسی شده است. به این منظور ابتدا معادله های انتقالی حاکم بر رفتار سیستم استخراج شده است. در استخراج این معادله ها به علت تراکم پایین تور و قطر نازک نخ، اثرات نیروی درگ تور در مقایسه با ساچمه ناچیز در نظر گرفته شده است. همچنین برای استخراج معادله ها از روش تنسوری نامتغیر استفاده گردیده است. سپس معادله های به دست آمده در محیط نرم افزار سیمولینک شبیه سازی شدند. نتایج شبیه سازی نشان دادند که برای باز شدن کامل تور با مساحت ۹ متر مربع زمانی برابر با ۰,۰۱۵۲ ثانیه مورد نیاز است.

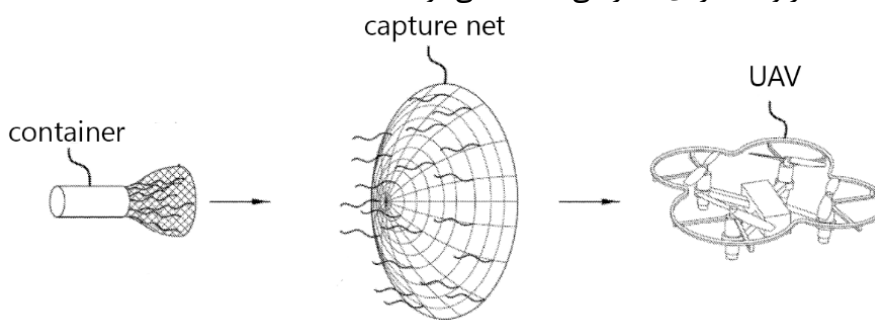
واژگان کلیدی: سامانه ضد ریز پرنده، سیستم پرتاب تور، برد مؤثر تور

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر ریز پرنده‌ها به یکی از تهدیدات مهم امنیتی برای عموم کشورها تبدیل شده‌اند. ریز پرنده‌ها که در ابتدا غالباً کاربردهای غیرنظامی داشتند، به تدریج وارد حوزه نظامی شدند و به دلیل قابلیت‌ها و متعاقباً موفقیت‌هایی که داشتند، به سرعت به یکی از دسته‌های کارآمد و پرکاربرد تسلیحات نظامی تبدیل شدند. از جمله قابلیت‌های آن‌ها می‌توان به صدای کم (اختفای صوتی)، ابعاد کوچک (اختفای بصری و راداری)، حملات گروهی، هزینه پایین، سهولت حمل و عملیات و ... اشاره کرد.

ویژگی‌های مذکور، ریز پرنده‌ها را به گزینه مناسبی برای عملیات شناسایی و انتحاری موفق علیه اماکن حساس درون شهری تبدیل کرده است. طوری که عامل دشمن می‌تواند به راحتی یکی از انواع این تسلیحات را در نزدیکی اماکن حساس درون شهری به پرواز درآورد و با هدایت آن به سمت هدف، مأموریت مورد نظر را انجام دهد. با توجه به این توضیحات، تهدید فزاینده این دسته از پرنده‌ها خطری جدی برای اماکن حساس کشور هم از نظر عملیات انتحاری و هم از نظر عملیات شناسایی محسوب می‌شود. یکی از مسائل مهم در مقابله شهری با این تهدیدات، ایمن بودن عملیات مقابله با آن‌ها است؛ به طوری که در مقابله با آن‌ها آسیبی متوجه شهروندان نشود.

از جمله راهکارهای مقابله ایمن با ریز پرنده‌ها استفاده از سیستم پرتاب تور و فرود توسط چتر است. در این سیستم با پرتاب به موقع تور (با ابعاد مشخص) از یک محفظه مخصوص، هدف مورد نظر تسخیر می‌شود که نمونه شماتیک و طراحی شده این مجموعه در شکل آمده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود روی شبکه توری نیز یک سری ریسمان‌های جانبی به صورت آویز متصل شده که معمولاً هدف از این کار درهم تنیدگی بیشتر در سیستم موتور پهناد و عبور از منافذ گارد محافظتی (در صورت وجود) آن می‌باشد. جهت تأمین نیروی لازم در ابتدای پرتاب از یک عامل پیشران مانند هوای فشرده، یک فنر و یا آهنربای الکتریکی استفاده می‌شود [۱].



شکل ۱- شماتیک فرآیند گیر انداختن یک نمونه پهناد با پرتاب تور دایروی [۱]

۲- استخراج معادله‌های حرکت

در این بخش، معادله حرکت ساچمه و تور به شکل نامتغیر تنسوری استخراج می‌شوند [۲]. این شکل استخراج معادله‌ها، این امکان را فراهم می‌کند که بتوان معادله‌ها را در هر دستگاه مختصات

دلخواهی بیان کرد. مدل سازی حرکت ساچمه و تور از لحظه پرتاب انجام می شود. در مسئله مورد نظر، در ابتدای حرکت، چهار ساچمه با فاصله زاویه ای ۹۰ درجه حول یک دایره مینا قرار دارند و هر ساچمه به نخی متصل است. فرض می شود که تکه های نخ، صلب هستند و حالت ارتجاعی ندارند. طول هر نخ برابر با ۱ است و هر چهار نخ در قسمت انتهایی به دایره مینا متصل هستند. لازم به ذکر است، نخ ها در ابتدا به صورت یک کلاف روی دایره قرار دارند و با حرکت ساچمه، به تدریج باز می شوند. حرکت ساچمه و تور از شکل ۴ شروع شده و نهایتاً مانند شکل ۶ باز خواهد شد. فرض شده است که نخ در مسیر جریان قرار می گیرد و حرکت نوسانی نخواهد داشت.

برای توسعه معادله ها پرواز سیستم ساچمه و تور از قانون دوم نیوتن شروع می کنیم

$$mD^I v_B^I = f_a + mg \quad (1)$$

سمت راست معادله فوق، نیروهای آیرودینامیکی (f_a) و وزن (mg) را شامل می شود. سمت چپ آن، مشتق دورانی نسبت به قاب اینرسی I است که به v_B^I (سرعت جسم نسبت به قاب اینرسی I) اعمال شده است $(D^I v_B^I)$. همچنین، m نشان دهنده جرم جسم است. از آنجا که تجسم و درک سرعت و موقعیت اینرسی جسم $([v_B^I]^T)$ و $([s_{BI}]^T)$ بسیار دشوار و غیرممکن است، مطابق اغلب مراجع، در ادامه، معادله ها حرکت را برحسب سرعت و موقعیت جغرافیایی جسم $([v_B^E]^T)$ و $([s_{BE}]^T)$ بیان می کنیم. برای این کار، ابتدا مشتق دورانی موجود در معادله **Error! Reference source not found.** را به قاب زمین (E) و سپس به قاب مرتبط با سرعت جغرافیایی (V) منتقل می کنیم. برای انتقال به قاب زمین از انتقال اویلر استفاده می کنیم.

$$D^I v_B^I = D^E v_B^E + \Omega^{EI} v_B^E \quad (2)$$

از طرفی، رابطه بین سرعت اینرسی (v_B^I) و سرعت جغرافیایی (v_B^E) به صورت زیر نوشته می شود:

$$v_B^I = v_B^E + \Omega^{EI} s_{BI} \quad (3)$$

در عبارت فوق، $\Omega^{EI} s_{BI}$ بیانگر ضرب خارجی بردار ω^{EI} و s_{BI} است. از طرفی، ω^{EI} بردار سرعت زاویه ای زمین است. با کمک معادله **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** داریم:

$$D^I v_B^I = D^E v_B^E + D^E (\Omega^{EI} s_{BI}) + \Omega^{EI} v_B^E + \Omega^{EI} \Omega^{EI} s_{BI} \quad (4)$$

با استفاده از قاعده زنجیره ای و با توجه به این نکته که سرعت زاویه ای زمین ثابت است می توان نوشت:

$$D^E (\Omega^{EI} s_{BI}) = D^E \Omega^{EI} s_{BI} + \Omega^{EI} D^E s_{BI} = \Omega^{EI} D^E s_{BI} \quad (5)$$

حال با استفاده از مثلث برداری $s_{BI} = s_{BE} + s_{EI}$ و با توجه به اینکه $s_{EI} = 0$ (زیرا مرکز قاب زمین و قاب اینرسی I در یک نقطه قرار دارند) رابطه فوق به صورت زیر نوشته می شود:

$$\Omega^{EI} D^E s_{BI} = \Omega^{EI} (D^E s_{BE} + D^E s_{EI}) = \Omega^{EI} D^E s_{BE} = \Omega^{EI} v_B^E \quad (6)$$

با استفاده از معادله **Error! Reference source not found.** و معادله فوق داریم:

$$D^I v_B^I = D^E v_B^E + \gamma \Omega^{EI} v_B^E + \Omega^{EI} \Omega^{EI} s_{BI} \quad (7)$$

اکنون مشتق دورانی موجود در معادله فوق را از قاب E به قاب V انتقال می‌دهیم.

$$D^I v_B^I = D^V v_B^E + \Omega^{VE} v_B^E + \gamma \Omega^{EI} v_B^E + \Omega^{EI} \Omega^{EI} s_{BI} \quad (8)$$

با ترکیب معادله **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.**

found. شکل نهایی معادله نیوتن که در آن شتاب موشک به قاب سرعت ارجاع داده شده است، به‌دست می‌آید.

$$D^V v_B^E + \Omega^{VE} v_B^E = \frac{1}{m} f_a + g - \gamma \Omega^{EI} v_B^E - \Omega^{EI} \Omega^{EI} s_{BI} \quad (9)$$

انتقال قاب اینرسی I به قاب سرعت V باعث ظاهر شدن عبارت سرعت زاویه‌ای ω^{VE} (بردار سرعت دوران قاب سرعت نسبت به قاب زمین) شده است. با فرض زمین مسطح و غیر دوار (که برای کاربرد مورد استفاده در این مقاله کاملاً فرض درستی است)، سرعت زاویه‌ای قاب E نسبت به قاب I برابر صفر خواهد بود ($\Omega^{EI} = 0$). در نتیجه معادله **Error! Reference source not found.** به‌صورت زیر نوشته می‌شود.

$$D^V v_B^E + \Omega^{VE} v_B^E = \frac{1}{m} f_a + g \quad (10)$$

معادله فوق در هر دستگاه مختصاتی معتبر است؛ اما، عبارت v_B^E ، در دستگاه مختصات مسیر پرواز (V) به‌صورت ساده $[v_B^E]^V = [v \cdot 0]$ نوشته می‌شود. بنابراین، سایر عبارت‌ها را نیز در این دستگاه مختصات بیان می‌کنیم. مقدار سرعت زاویه‌ای قاب سرعت نسبت به قاب زمین (ω^{VE}) در دستگاه مذکور از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$[\omega^{VE}]^V = \begin{bmatrix} -\dot{\chi} \sin \gamma \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\chi} \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (11)$$

از طرفی

$$[D^V v_B^E]^V = [\dot{v} \quad . \quad .] \quad (12)$$

که در آن γ زاویه مسیر و χ زاویه هدینگ است. با ترکیب معادله‌های **Error! Reference source not found.**

not found. و **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.**

معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\chi} v \cos \gamma \\ -v \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \frac{1}{m} [f_a]^V + [T]^V [g]^L \quad (13)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه فوق، می‌توان موقعیت جسم نسبت زمین را محاسبه کرد:

$$\left[\frac{ds_{BE}}{dt}\right]^L = [\bar{T}]^{VL} [v_B^E]^V \quad (14)$$

با استفاده از ماتریس تبدیل $[T]^{VL}$ می توان بردار سرعت ساچمه در دستگاه محلی را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$[v_B^E]^L = [\bar{T}]^{VL} [v_B^E]^V \quad (15)$$

ماتریس تبدیل موجود در روابط فوق از رابطه زیر به دست می آید

$$[T]^{VL} = \begin{bmatrix} \cos\chi \cos\chi & \cos\chi \sin\chi & -\sin\chi \\ -\sin\chi & \cos\chi & \cdot \\ \sin\chi \cos\chi & \sin\chi \sin\chi & \cos\chi \end{bmatrix}$$

در معادله **Error! Reference source not found.** نیروهای در نظر گرفته شده برای جسم به صورت زیر است. نیروهای آیرودینامیکی ساچمه در دستگاه مسیر پرواز به صورت زیر نوشته می شود:

$$[f_a]^V = \bar{q} S \begin{bmatrix} -C_D \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

در این پژوهش، ضرایب درگ در معادله فوق به صورت زیر تابع ماخ و شکل در نظر گرفته می شوند.

$$C_D = f(\text{mach\&shape}) \quad (18)$$

از طرفی با حرکت ساچمه، نخ متصل به آن (که در ابتدای حرکت به صورت یک کلاف قرار دارد) تدریجاً باز می شود؛ در نتیجه جرم لحظه ای ساچمه و نخ متصل به آن از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$m(t) = m_{\cdot} + \int_{\cdot}^t \dot{m}_n dt \quad (19)$$

با توجه به این نکته که در طول مسیر حرکت ساچمه، هر المان نخ، در راستای جریان قرار می گیرد، می توان زاویه نخ نسبت به افق را با استفاده از سرعت جغرافیایی ساچمه در دستگاه افق محلی $([v_B^E]^L)$ ، از روابط زیر محاسبه کرد

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{-v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \right) \quad (1)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{v_y}{v_x} \right)$$

مقادیر فوق در واقع همان زوایای مسیر و زاویه سمت ساچمه هستند که از مستقیماً از معادله های **Error! Reference source not found.** قابل محاسبه هستند؛ بنابراین، نیازی به حل مستقل معادله های (۱) نیست. با توجه به اینکه المان های نخ صلب هستند و نسبت به هم کشیده نمی شوند، موقعیت هر گره از تور با داشتن موقعیت ساچمه از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$[s_{NE}]^L = [s_{BE}]^L - n[\bar{T}]^{VL} \begin{bmatrix} l \\ . \end{bmatrix} \quad (20)$$

که در عبارت فوق، n شماره هر گره (با فرض قرار گرفتن اولین گره، بلافاصله بعد از لانچر) و l طول هر المان نخ است.

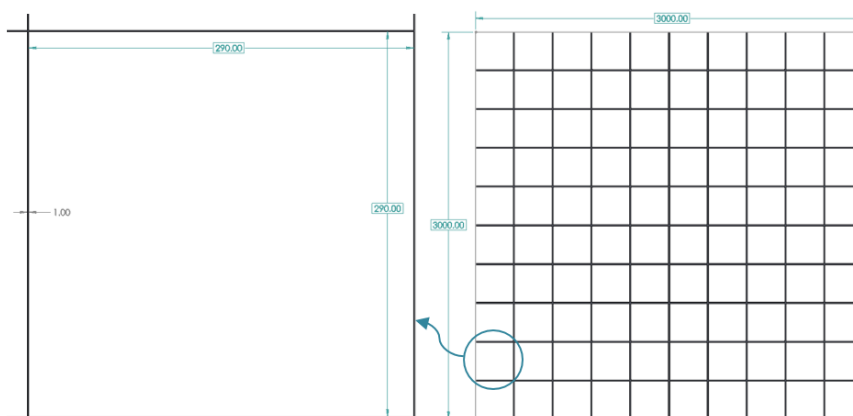
۳- شبیه‌سازی حرکت

در این بخش، معادله‌های استخراج‌شده در بخش قبل، شبیه‌سازی شده است. پارامترهای ساچمه و نخ متصل به آن در جدول (۱) آورده شده است.

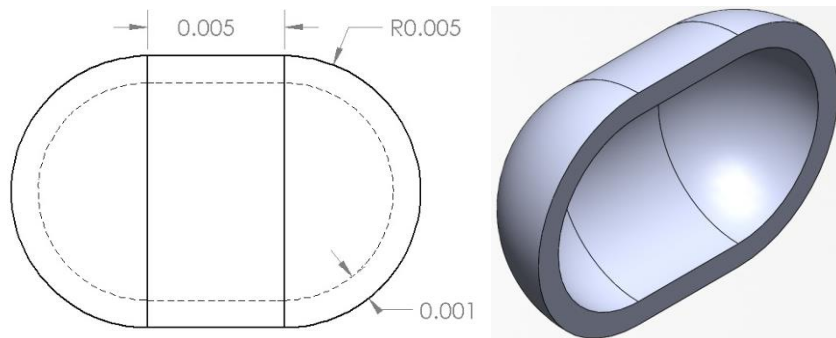
جدول ۱- مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای اجرای شبیه‌سازی

پارامتر	واحد	مقدار
جرم ساچمه	kg	۰,۰۰۳
قطر ساچمه	m	۰,۰۰۱
ضریب پسای ساچمه	-	۰,۴
جرم تور	kg	۰,۰۰۵
ابعاد تور	$\underline{m}$	۳×۳
ضخامت نخ	m	۰,۰۰۱

هندسه و ابعاد تور و ساچمه به ترتیب در شکل و شکل ۳ نشان داده شده است.

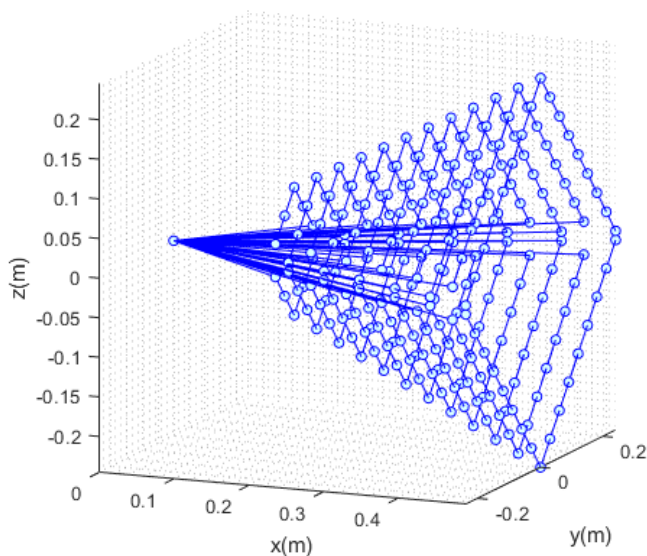


شکل ۲- هندسه و ابعاد تور



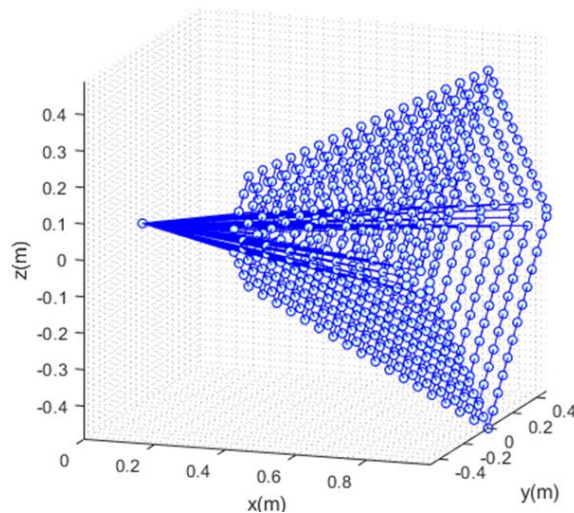
شکل ۳- هندسه و ابعاد ساچمه

شرایط اولیه سرعت با توجه به نیازهای عملیاتی پروژه، به صورت $\vec{v}_B^E = [100 \quad 100 \quad 200]^T$ در نظر گرفته شده است. در ادامه منحنی تور در زمانی که ساچمه در $x = 0.5$ ، $x = 1$ و $x = 2$ قرار دارد به ترتیب در شکل (۴ و ۵ و ۶) آورده شده است.

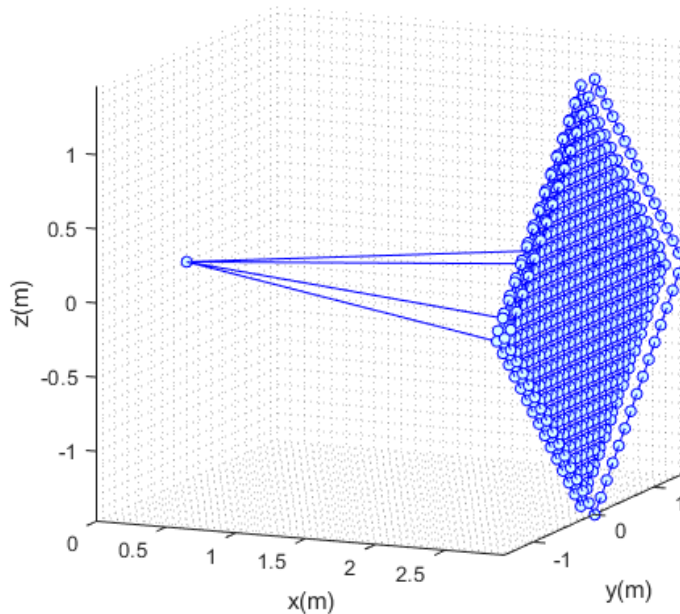


شکل ۴- شکل سه بعدی تور در حالتی که به اندازه $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ باز شده است

این شکل موقعیت تور را در ابتدای باز شدن نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل پیداست، تور به علت قرار گرفت در مسیر جریان، در حین باز شدن، به سمت عقب انحنای پیدا می‌کند. این پدیده در شکل نیز مشاهده می‌شود. به تدریج با جلو رفت ساچمه، تور کم‌کم باز شده و این انحنا کاهش می‌یابد (شکل ۵).

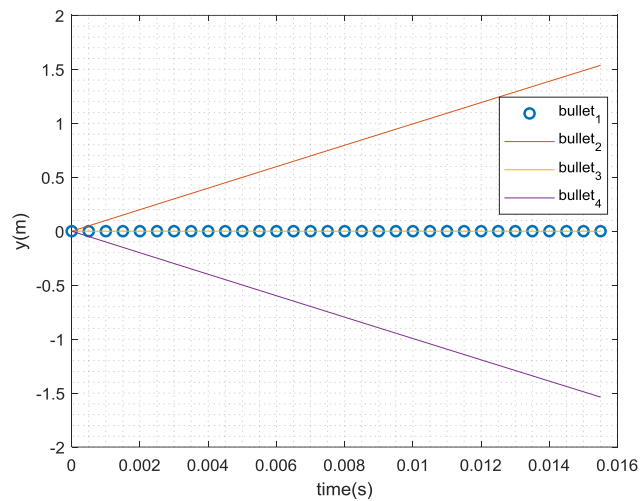


شکل ۵- شکل سه بعدی تور در حالتی که به اندازه $0.45 \text{ m} \times 0.45 \text{ m}$ باز شده است



شکل ۶- شکل سه بعدی تور در حالتی که به اندازه $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ باز شده است

شکل (۷) تور را در حالت باز شده نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل پیداست، برای اینکه تور به طور کامل باز شود و یک مربع 3×3 را تشکیل دهد، باید با فرضیات مطرح‌شده در جدول ۱-، مسافتی معادل $x = 2$ را طی کند. اهمیت این مسافت در طراحی فیوز مشخص می‌شود. مطابق شکل، ساچمه برای پیمودن این مسافت به زمانی برابر با $t = 0.0152$ نیاز دارد.



شکل ۷- نمودار حرکت جانبی ساچمه‌ها بر حسب زمان

۴- نتیجه گیری

همان طور که اشاره شد به منظور تعیین زمان و فاصله مناسب پرتاب تور و نیز حداکثر فاصله مجاز جهت پرتاب تور نیاز به مدل سازی و شبیه سازی حرکت سیستم ساچمه و تور می باشد. در این پژوهش مشخص شد در صورت پرتاب ساچمه ها با شرایط اولیه سرعت $[100 \quad 100 \quad 200]$ ، زمان مورد نیاز جهت باز شدن کامل تور برابر با $t = 0.0152$ است که تور در این زمان ۳ متر را طی می نماید تا به طور کامل باز گردد.

۵- منابع و مراجع

- [1] Klein, M.E., Nets and devices for facilitating capture of unmanned aerial vehicles. 2019, Google Patents.
- [2] P. Zipfel, (2007). Modeling and simulation of aerospace vehicle dynamics, American Institute of Aeronautics and Astronautics.