

تحلیل اجزای محدود مکانیزم خودتخریب در یک کنترل کننده مکانیکی

کوروش حسن پور^۱، مهدی مساح^۲، مهرداد پورسینا^۳ و مهدی سلمانی تهرانی^۴
Mehdi.massah@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق رفتار دینامیکی مکانیزم خودتخریب مربوط به یک کنترل کننده به کمک روش اجزاء محدود سه بعدی در نرم افزار آدامز شبیه سازی شده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. این تحقیق بر روی کنترل کننده مربوط به پرتابه های با شتاب بالا تمرکز دارد. این کنترل کننده از نوع مکانیکی بوده و در نوک پرتابه قرار می گیرد. هدف از انجام این تحقیق، بررسی نحوه عملکرد مکانیزم خودتخریب یعنی حرکت قطعات سوزن و ساچمه ها به سمت بالا و بازگشت آنها می باشد. همچنین بدست آوردن زمان و سرعت زاویه ای آغاز حرکت قطعات سوزن و ساچمه ها به سمت بالا و نیز بازگشت آنها که پارامترهای مهمی در این مکانیزم هستند، مورد بررسی قرار می گیرند. در پایان، موارد رخ داده در خلال این شبیه سازی از نظر کیفی با اطلاعات موجود مقایسه شده است. این مقایسه درستی این شبیه سازی را تأیید می نماید.

کلیدواژه:

مکانیزم خودتخریب - کنترل کننده - اجزاء محدود سه بعدی - آدامز

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، مدعو دانشگاه آزاد اسلامی واحد مجلسی

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان

۴- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد

تحلیل اجزای محدود مکانیزم خودتخریب در یک کنترل کننده مکانیکی

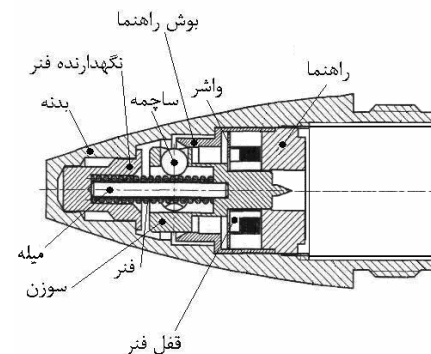
۱- مقدمه

کنترل کننده‌های حرکت پرتابه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار هستند. به علت تنوع اجسام پرتاب شونده، به طور طبیعی شکل، اندازه، و نحوه عملکرد این کنترل کننده‌ها نیز بسیار متنوع است [۱]، [۲]. کنترل کننده به انواع وسایلی گفته می‌شود که برای رسیدن به اهداف، ایمن سازی، تنظیم زنجیره عملکرد و عملکرد نهایی به کار می‌روند [۳]، [۴]. کنترل کننده‌ها در انواع پرتابه‌ها کاربرد دارند. در شکل (۱)، یک نوع کنترل کننده مکانیکی نشان داده شده است.



شکل (۱): کنترل کننده مکانیکی ام ۷۱۳ [۵]

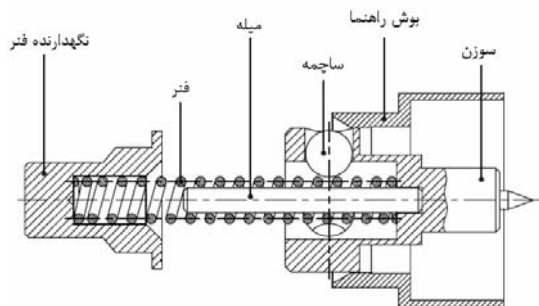
کنترل کننده مورد نظر در این تحقیق، یک کنترل کننده مکانیکی است که در نوک پرتابه قرار می‌گیرد. همچنین این تحقیق بر روی کنترل کننده مربوط به پرتابه‌های با شتاب بالا تمرکز دارد. در شکل (۲) نمای برش خورده کنترل کننده مربوط به این تحقیق همراه با قطعات آن مشاهده می‌شود.



شکل (۲): نمای برش خورده کنترل کننده مربوط به این تحقیق

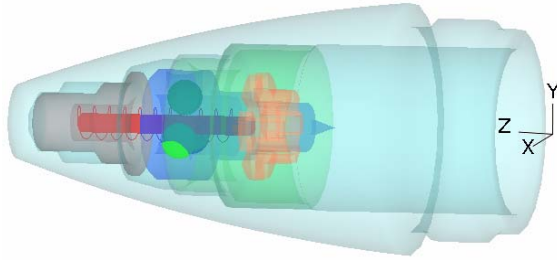
کنترل کننده‌ی حرکت پرتابه دارای مکانیزم‌های مختلفی بوده که هر کدام وظیفه خاصی را بر عهده دارند [۶]، [۵]. یکی از مکانیزم‌های مهم در این کنترل کننده‌ها، مکانیزم خودتخریب است. مکانیزم‌های خودتخریب بر اساس نوع مکانیزم یا اصول به کار رفته در آن متنوع بوده و در اینجا از نوع ضربه‌ای می‌باشد [۷]. خودتخریبی یک مکانیزم کمکی است که در پرتابه‌های خاص جاسازی می‌شود تا در صورت خطای حرکت پرتابه، آن را کنترل کند [۸].

در شکل (۳) نمای برش خورده مکانیزم خودتخریب به همراه قطعاتش مشاهده می‌شود. این مکانیزم دارای سه عدد ساچمه است که در داخل سوراخ‌های جانبی سوزن قرار می‌گیرند. فنر، بین سوراخ نگهدارنده فنر و سوزن قرار داشته و داخل فنر، میله قرار می‌گیرد. میله هم از کمانش فنر جلوگیری می‌کند و هم میزان حرکت سوزن به سمت نوک کنترل کننده و یا به عبارت دیگر حرکت ساچمه‌ها روی سطح شیب‌دار را محدود می‌نماید. سوزن تحت پیش بار فنر، تمایل دارد به سمت ته کنترل کننده در شکل (۳) حرکت کند ولی به علت قرار گرفتن روی قفل فنر مقید شده و جلوی حرکت آن به سمت ته کنترل کننده گرفته می‌شود [۹]، [۱۰].



شکل (۳): نمای برش خورده مکانیزم خودتخریب

پرتابه به هنگام پرتاب حول امتداد پرتاب به دوران در می‌آید. در اثر دوران و در سرعت‌های زاویه‌ای بالا، ساچمه‌ها در راستای سوراخ‌های جانبی سوزن حرکت کرده و باز می‌شوند تا به سطح شیب‌دار بوش راهنما می‌رسند. پس از اینکه سرعت زاویه‌ای پرتابه به یک مقدار معین افزایش یافت، ساچمه‌ها می‌توانند بر نیروی پیش بار فنر غلبه کرده و نیروی ناشی از تماس سوزن و قفل فنر را به صفر برسانند. با افزایش سرعت زاویه‌ای، ساچمه‌ها روی سطح شیب‌دار بوش راهنما به سمت بالا حرکت می‌نمایند. در اثر حرکت ساچمه‌ها به سمت بالای سطح شیب‌دار، فشردگی فنر افزایش یافته و نیروی بیشتری را بر ساچمه‌ها وارد می‌کند. به این ترتیب با افزایش و کاهش سرعت زاویه‌ای، ساچمه‌ها روی سطح شیب‌دار به سمت نوک یا ته



شکل (۴): مدل هندسی مکانیزم خودتخریب

جدول (۱): جنس و چگالی قطعات

قطعه	جنس	چگالی (Kg/m^3)
بدنه	آلومینیوم	۲۸۹۰
راهنما	آلومینیوم	۲۸۹۰
بوش راهنما	آلومینیوم	۲۸۹۰
سوزن	آلومینیوم	۲۸۹۰
نگهدارنده فنر	آلومینیوم	۲۸۹۰
ساجمه	فولاد	۷۸۵۰
میله	فولاد	۷۸۵۰

۲-۲- تعریف تماس‌ها و ایجاد فنر

برای بیان نوع تماس‌ها و خواص آن‌ها از حالت تماس جسم سه‌بعدی با جسم سه‌بعدی^۲ استفاده شده است. در جدول (۲) لیست تماس‌ها و ضرائب اصطکاک مربوطه آمده است [۱۱].

جدول (۲): تماس‌ها و ضرائب اصطکاک

ضرب اصطکاک [۱۱]	قطعات
۰/۱۴	بوش راهنما- ساجمه
۰/۱	میله- ساجمه
۰/۱۴	میله- نگهدارنده فنر
۰/۲	سوزن- قفل فنر
۰/۲	سوزن- بوش راهنما
۰/۲	بدنه- نگهدارنده فنر
۰/۲	سوزن- راهنما

پارامترهای مربوط به فنر در این مکانیزم که بین سوزن و نگهدارنده فنر قرار دارد در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳): پارامترهای فنر

ضرب سختی	δ (N/mm)
پیش‌بار	۲۷ (N)
طول فنر	۱۶/۵ (mm)

کنترل‌کننده حرکت نموده و فشردگی فنر را زیاد یا کم می‌کنند. با توجه به توضیحات بالا برای آغاز عمل مکانیزم خودتخریب باید پرتابه به سرعت زاویه‌ای معینی برسد [۱۰].

در اثر افزایش سرعت زاویه‌ای به مقدار مورد اشاره، قفل فنر باز شده و راه عبور سوزن به سمت ته کنترل‌کننده را باز می‌نماید. بنابراین در صورت کاسته شدن از سرعت زاویه‌ای و حرکت ساجمه‌ها به سمت ته کنترل‌کننده در این مرحله، سوزن در اثر نیروی فنر به‌شدت به سمت ته کنترل‌کننده پرتاب می‌شود. به عبارت دیگر در صورت عدم برخورد پرتابه با هدف، با ادامه حرکت آن از سرعتش کاسته شده و وقتی سرعت آن از حد معینی کمتر شود، ساجمه‌ها نمی‌توانند بر نیروی فنر غلبه کنند و این موجب بازگشت ساجمه‌ها و سوزن به سمت راست و در نهایت از بین رفتن پرتابه می‌شود [۱۰]. در این تحقیق مکانیزم خودتخریب به روش اجزاء محدود سه بعدی در نرم‌افزار آدامز شبیه‌سازی می‌شود. در این شبیه‌سازی، نحوه عملکرد مکانیزم خودتخریب یعنی حرکت قطعات سوزن و ساجمه‌ها به سمت بالا و بازگشت آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین بدست آوردن زمان و سرعت زاویه‌ای آغاز حرکت قطعات سوزن و ساجمه‌ها به سمت بالا و نیز بازگشت آن‌ها که پارامترهای مهمی در این مکانیزم هستند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. در پایان، موارد رخ داده در خلال این شبیه‌سازی از نظر کیفی با اطلاعات موجود مقایسه شده است.

۲- فرایند شبیه‌سازی مکانیزم خودتخریب با نرم‌افزار

آدامز

آدامز یکی از قوی‌ترین و معروف‌ترین نرم‌افزارهای مهندسی در تحلیل دینامیکی قطعات صلب و طراحی مکانیزم‌ها است [۱۱].

۲-۱- مدل‌سازی هندسی و تعریف جنس قطعات

برای مدل‌سازی هندسی مکانیزم خودتخریب، قطعات از همان ابتدا در محل مورد نظر خود در مکانیزم ساخته می‌شوند. در شکل (۴) مدل هندسی سه‌بعدی ساخته شده در نرم‌افزار آدامز نمایش داده شده است. در این شکل با استفاده از خاصیت شفافیت^۱ سعی شده که قطعات داخل نیز دیده شود. در نرم‌افزار آدامز قطعات، صلب در نظر گرفته می‌شوند. همچنین در جدول (۱) جنس‌های به کاررفته برای قطعات در نرم‌افزار آدامز به همراه چگالی آن‌ها آمده است.

۳-۲- تعریف قیود

در این شبیه‌سازی به طور کلی از دو نوع و تعداد شش قید استفاده شده است. این قیود شامل اتصال درگیر^۱ و استوانه‌ای^۲ می‌باشند. قید درگیر، یک مفصل ثابت ایجاد کرده که دو قطعه را به هم قفل می‌کند و به آنها اجازه حرکت نسبت به یکدیگر را نمی‌دهد. اثر آن شبیه معرفی دو قطعه به عنوان یک قطعه است. قید استوانه‌ای، یک مفصل استوانه‌ای ایجاد کرده که امکان حرکت انتقالی و حرکت چرخشی را برای یک قطعه نسبت به قطعه‌ی دیگر فراهم می‌سازد. به عبارت دیگر این قید دارای دو درجه آزادی می‌باشد. این قید روی محوری قرار می‌گیرد که قطعه‌ها می‌توانند روی آن حرکت کرده و یا حول آن بچرخند [۱۱]. لیست قیود مورد استفاده در این شبیه‌سازی در جدول (۴) آمده است.

جدول (۴): قیود استفاده شده در شبیه‌سازی

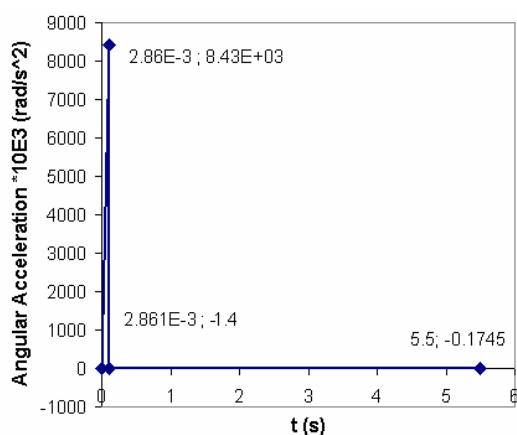
ردیف	قطعات	نوع قید
۱	میله- سوزن	درگیر
۲	بدنه- بوش راهنما	درگیر
۳	بدنه- راهنما	درگیر
۴	ساقچه‌ها- سوزن	استوانه‌ای

۴-۲- توابع حرکت

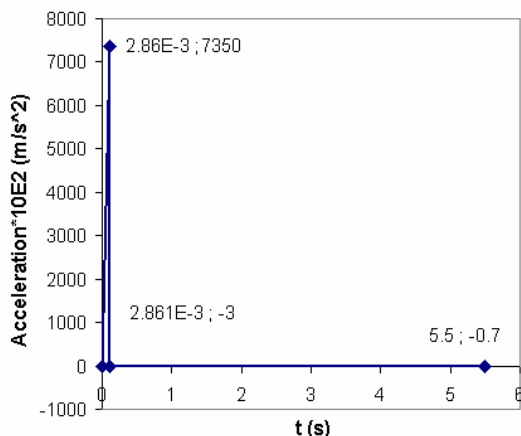
توابع حرکت از نوع شتاب خطی و زاویه‌ای در امتداد و حول محور Z (در شکل ۳) بوده و توسط دستور حرکت نقطه‌ای کلی^۳ در نرم‌افزار آدامز به بدنه کنترل‌کننده اعمال شده‌اند. این توابع در نرم‌افزار آدامز با استفاده از تابع پله^۴ و در دو مرحله تعریف شده‌اند. در مرحله اول که مربوط به ایجاد شتاب لازم برای طی تمام مسیر حرکت پرتابه است، شتاب خطی و زاویه‌ای با نرخ بسیار زیادی به صورت خطی افزایش می‌یابد، سپس در پایان مرحله اول در اثر حذف عامل شتاب‌دهنده به صورت ناگهانی کاهش یافته و منفی می‌شود. در مرحله دوم به سبب نیروی مقاومت هوا، شتاب خطی و زاویه‌ای منفی بوده و با کاهش سرعت، شتاب منفی ناشی از مقاومت هوا به سمت صفر میل می‌کند. توابع شتاب خطی و زاویه‌ای در شکل (۵) آمده است. این شبیه‌سازی برای مدت زمان $\Delta t_{tot} = 5.5 s$ انجام می‌شود.

شتاب خطی در مرحله اول از مقدار صفر در زمان $t = 0$ به مقدار $0.735 \times 10^6 m/s^2$ در زمان $t = 2.86 \times 10^{-3} s$ و شتاب زاویه‌ای

از مقدار صفر در زمان $t = 0$ به مقدار $8.43 \times 10^6 rad/s^2$ در زمان $t = 2.86 \times 10^{-3} s$ می‌رسد. مقدار شتاب خطی در مرحله دوم نیز به صورت خطی از مقدار $-300 m/s^2$ در زمان $t = 2.861 \times 10^{-3} s$ به مقدار $-70 m/s^2$ در زمان $t = 5.5 s$ و شتاب زاویه‌ای از $-1400 rad/s^2$ در زمان $t = 2.861 \times 10^{-3} s$ به مقدار $-174.5 rad/s^2$ در زمان $t = 5.5 s$ تغییر می‌کند [۹].



الف: شتاب زاویه‌ای



ب: شتاب خطی

شکل (۵): تغییرات شتاب نسبت به زمان [۹]

۳- نتایج و بحث

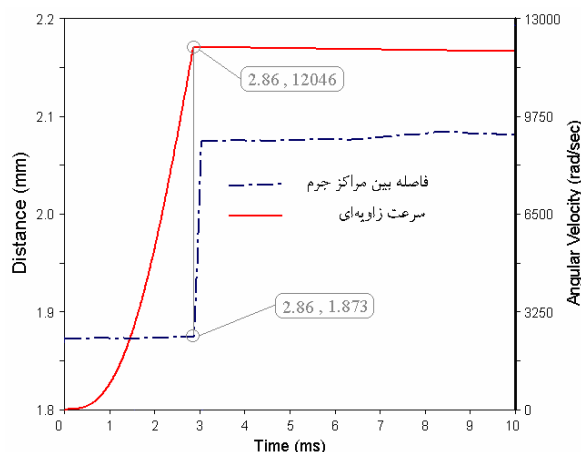
در این بخش نتایج مربوط به چگونگی و زمان حرکت مکانیزم خودتخریب به سمت بالا و بازگشت آن و سرعت زاویه‌ای متناظر با آن‌ها و همچنین نیروی وارد بر قفل فنر از طرف سوزن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

4- Fixed Joint
5- Cylindrical
6- General Point Motion
7- Step

۳-۲- زمان شروع حرکت مکانیزم خودتخریب به سمت بالا و سرعت زاویه‌ای مورد نیاز برای آن

در شکل (۷)، نمودار تغییرات فاصله بین مراکز جرم سوزن-بوش راهنما نسبت به زمان و نمودار سرعت زاویه‌ای پرتابه نسبت به زمان آمده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود در زمان $t = 2.86\text{ms}$ بعد از شروع شبیه‌سازی یا بعد از پرتاب و در سرعت زاویه‌ای $\omega = 12046\text{ rad/s}$ ، مکانیزم خودتخریب شروع به حرکت به سمت بالا یا نوک کنترل‌کننده می‌کند. در این زمان مشاهده می‌شود که فاصله بین مراکز جرم سوزن و بوش راهنما به صورت ناگهانی مقداری افزایش یافته که نشانه حرکت سوزن به سمت نوک کنترل‌کننده و جدا شدن سوزن از قفل فتراست.

حداکثر حرکت سوزن به سمت نوک کنترل‌کننده برابر 0.2mm می‌باشد. در این زمان مؤلفه قائم نیروی وارد از سطح شیب‌دار بر ساچمه‌ها بر نیروی فنر و نیروی اینرسی ناشی از شتاب خطی سوزن غلبه کرده و از حرکت سوزن به سمت پایین جلوگیری می‌کند. به علت نیروی اینرسی ناشی از شتاب خطی سوزن کنترل‌کننده تا قبل از زمان $t = 2.86\text{ms}$ ، ساچمه‌ها روی سطح شیب‌دار بوش راهنما بالا نمی‌روند.



شکل (۷): نمودار تغییرات فاصله بین مراکز جرم سوزن-بوش راهنما نسبت به زمان و نمودار سرعت زاویه‌ای پرتابه

۳-۳- نیروی وارد بر قفل فنر از طرف سوزن

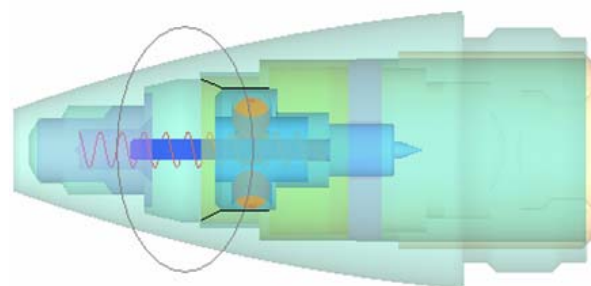
در شکل (۸)، نمودار تغییرات نیروی وارد بر قفل فنر از طرف سوزن آمده است.

در ابتدا نیروی وارد بر قفل فنر به اندازه نیروی فنر خطی که بر سوزن وارد می‌شود، سپس با افزایش شتاب خطی، عکس‌العمل نیروی وارد از سوزن بر قفل فنر، نیروی لازم برای شتاب‌گیری

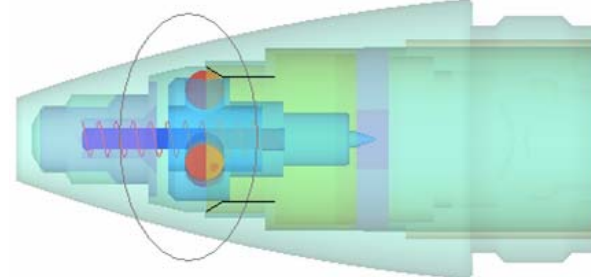
۳-۱- حرکت مکانیزم خودتخریب به سمت بالا و بازگشت آن به سمت پایین

در شکل (۶) وضعیت مکانیزم خودتخریب در سه حالت آورده شده است. شکل (۶-الف)، حالت قبل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد که در آن سوزن به خاطر نیروی پیش‌بار فنر به قفل فنر چسبیده و با آن در تماس است. شکل (۶-ب) حالت پس از بالا رفتن مکانیزم خودتخریب را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در این حالت ساچمه‌ها باز شده و پس از افزایش سرعت زاویه‌ای به یک مقدار مشخص روی سطح شیب‌دار بالا رفته و سوزن را تا اندازه‌ای که جا داشته به سمت نوک کنترل‌کننده برده‌اند. پس در این حالت تماس بین سوزن با قفل فنر قطع شده است.

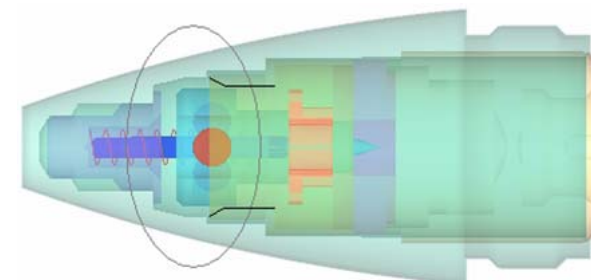
شکل (۶-ج) حالت پس از بازگشت مکانیزم خودتخریب به سمت پایین را نشان می‌دهد. در این حالت مسیر سوزن باز شده و به همین علت قفل فنر حذف شده است [۹].



الف) پس از بازگشت به سمت پایین

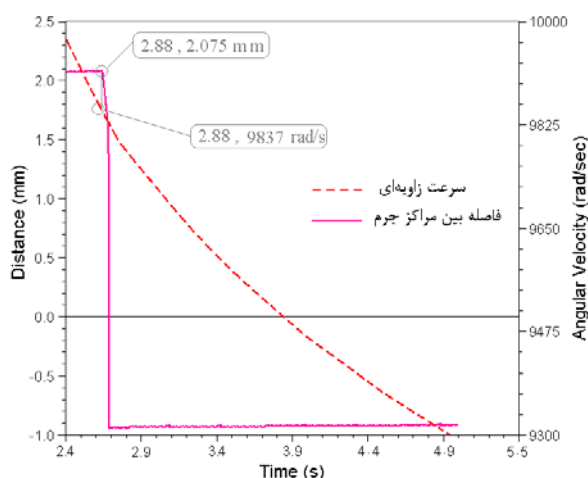


ب) پس از بالا رفتن



ج) قبل از شبیه‌سازی
شکل (۶): وضعیت مکانیزم خودتخریب

به سمت پایین سطح شیبدار می‌کند.



شکل (۹): نمودار تغییرات فاصله بین مراکز جرم سوزن و بوش راهنما نسبت به زمان و نمودار سرعت زاویه‌ای پرتابه

۴- تطبیق شبیه‌سازی‌ها با نتایج واقعی

در این بخش تطبیق شبیه‌سازی‌ها با نتایج واقعی از نظر کیفی و کمی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱- موارد رخ داده در خلال شبیه‌سازی

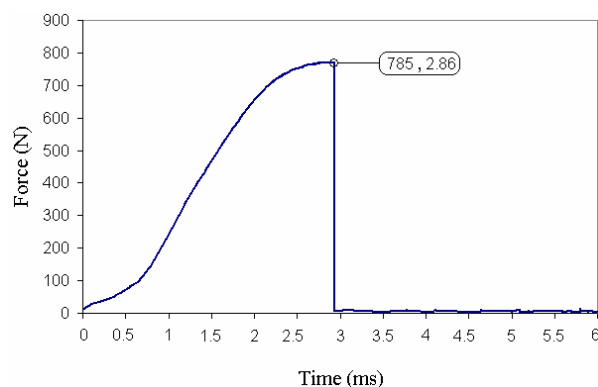
در شبیه‌سازی مکانیزم خودتخریب، در اثر دوران و سرعت‌های زاویه‌ای بالا، ساچمه‌ها در راستای سوراخ‌های جانبی سوزن حرکت کرده و باز شده تا به سطح شیبدار بوش راهنما رسیدند. پس از اینکه سرعت زاویه‌ای پرتابه به یک مقدار معین افزایش یافت، ساچمه‌ها بر نیروی فنر پشت سوزن غلبه کرده و سوزن را تا جایی که امکان داشت به سمت نوک کنترل‌کننده برده و از حرکت سوزن به سمت پایین جلوگیری کردند. با ادامه حرکت پرتابه، از سرعت آن کاسته شده و وقتی سرعت آن از حد معین کمتر شد، دیگر ساچمه‌ها بر نیروی فنر غلبه نکرده و در نتیجه ساچمه‌ها و سوزن در اثر نیروی فنر به سمت پایین حرکت کردند و این به معنی کامل شدن عمل کنترل‌کننده است. موارد رخ داده شده در خلال این شبیه‌سازی، مشابه با نتایج موجود از صنعت و استانداردهای مربوطه در مورد عملکرد مکانیزم خودتخریب می‌باشد [۹]، [۱۰]. بنابراین با توجه به موارد گفته شده در این بخش، عملکرد مکانیزم خودتخریب در شبیه‌سازی از نظر کیفی تأیید می‌شود.

۴-۲- بررسی امکان اندازه‌گیری کمیت‌ها

برای بررسی صحت کمی نتایج بدست آمده از این شبیه‌سازی بایستی آن‌ها را با نتایج حاصل از تست تجربی مقایسه نمود. با

سوزن را فراهم می‌آورد. افزایش سرعت و شتاب زاویه‌ای سوزن که توأم با افزایش سرعت و شتاب خطی آن است، باعث می‌شود که ساچمه‌ها درون شیارهای سوزن به سمت بیرون شیار متمایل گشته و به سطح شیبدار نیرو وارد نمایند. عکس‌العمل این نیرو باعث می‌گردد که از شیب افزایش نیرو در شکل (۸) کاسته شود تا اینکه مرحله اول به پایان رسیده و در اثر تغییر شتاب نیروی مذکور به صفر برسد.

نیروی وارده بر قفل فنر از طرف سوزن در زمان 2.86ms بعد از شروع شبیه‌سازی صفر شده که این نشان‌دهنده جدایی این دو قطعه از هم می‌باشد. به عبارت دیگر، زمانی که مکانیزم خودتخریب شروع به حرکت به سمت بالا یا نوک کنترل‌کننده می‌کند نیروی وارد بر قفل فنر به صفر می‌رسد.



شکل (۸): نیروی وارد بر قفل فنر از طرف سوزن

۳-۴- زمان و سرعت زاویه‌ای شروع بازگشت مکانیزم خودتخریب به سمت پایین

در شکل (۹)، نمودار تغییرات فاصله بین مراکز جرم سوزن- بوش راهنما نسبت به زمان و نمودار سرعت زاویه‌ای پرتابه نسبت به زمان آمده است.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود در زمان $t = 2.88\text{s}$ بعد از پرتاب و در سرعت زاویه‌ای $\omega = 9837\text{ rad/s}$ ، مکانیزم خودتخریب شروع به حرکت به سمت پایین می‌کند. در این زمان مشاهده می‌شود که فاصله بین مراکز جرم سوزن و بوش راهنما به صورت ناگهانی تغییر کرده که نشانه بازگشت سوزن به سمت پایین می‌باشد. به عبارت دیگر با کاهش سرعت زاویه‌ای در مرحله دوم شبیه‌سازی، نیروی وارد از طرف سطح شیبدار بر ساچمه‌ها به اندازه‌ای نیست که مؤلفه قائم آن قادر به غلبه بر نیروی فنر بوده و سوزن را در موقعیت خود نگه دارد. بنابراین سوزن شروع به حرکت

روش اجزای محدود را از نظر کیفی تأیید می‌نماید و این شبیه‌سازی می‌تواند به‌عنوان یک روش مناسب و ساده برای تحلیل این مکانیزم استفاده شده و تغییرات پارامترهای مختلف روی آن مورد بررسی قرار گیرد.

۶- مراجع

- [1] Ben-Dor, G., Dubinsky, A. and Elperin T., "Ballistic Impact: Recent Advances in Analytical Modeling of Plate Penetration Dynamics—a Review", *Appl Mech*, No. 58, 2005, pp. 355–371.
- [2] Galanov, B. A., Kartuzov, V. V. and Lyanov, S. M., "Numerical-Analytical Model of Penetration of Long Elastically Deformable Projectiles in to Semi-Infinite Targets", *International Journal of Impact Engineering*, No. 34, 2007, pp.1009-1021.
- [3] Gazonas, G. A., Segletes, S. B., Boyle, V. M. and Stegall, S. R., "Oblique Impact Modeling of Fuzes", *International Journal of Impact Engineering*, 2002.
- [4] Anderson, C. E., Sharron, T. R., Walker, J. D. and Freitas, C. J., "Simulation and Analysis of a 23-mm HEI Projectile", *International Journal of Impact Engineering*, No. 22, 1999, pp. 981-997.
- [5] Davis, H. J., Kraft, J. H., "Design Safety And Arming Device", *Harry Diamond Laboratory*, Adelphi, MD, 25 July 1976.
- [6] Silvers, L. D., "Mechanical Zero G Device", *Noltr* 64127, *Naval Ordnance Laboratory*, Silver, MD, 31 December 1994.
- [7] Ziemba, R. T., Wolf, J. W., "Fuze with Improved Time Delay and Self-Destruct Mechanism", *South Burlington, Vt., General Electric Company*, 1999.
- [8] Budge, A. M., "Aerodynamic Fuze Characteristics for Trajectory Control", *Massachusetts Institute of Technology, University of California*, June 1998.
- [۹] مساح، م.، "تحلیل اجزا محدود مکانیزم‌های کنترل کننده‌ی حرکت پرتابه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی)، دانشکده فنی و مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد خمینی شهر، مرداد ۱۳۸۸.
- [10] Mil-Hdbk-757(AR), *Military Handbook*, fuzes, New York, 2001, pp.757, 826.
- [۱۱] مسگر هروی، م.، "تحلیل و طراحی مکانیزم‌ها با ADAMS"، مؤسسه فرهنگی هنری دیباگران تهران، تهران، چاپ اول، ۱۳۸۶.

این‌حال به دلایل زیر استخراج نتایج تجربی مورد نظر امکان‌پذیر نیست.

شتاب خطی شبیه‌سازی مورد نیاز از مرتبه $10^6 m/s^2$ است. ایجاد این شتاب فوق‌العاده در فاصله زمانی بسیار کوتاه از مرتبه $10^{-3} s$ نیاز به توان بسیار زیادی دارد.

از سوی دیگر، ادوات دستگاه آزمایش که شتاب خطی مذکور را تحمل نمایند، حتی با داشتن جرم‌های کم، نیروهای بسیار زیادی را متحمل می‌شوند. به نظر می‌رسد ایجاد شتاب خطی فوق در یک دستگاه آزمایش امکان‌پذیر نیست.

همچنین سرعت زاویه‌ی اجزاء مکانیزم از مرتبه $10^4 rpm$ می‌باشد. یاتاقان‌هایی که در دستگاه آزمایش، این سرعت زاویه‌ای را تحمل می‌کنند، باید یاتاقان‌های خاصی باشند.

چنانچه ایجاد شتاب‌های خطی و زاویه‌ای فوق نیز امکان‌پذیر باشد، در اندازه‌گیری متغیرهای اجزاء مکانیزم‌ها محدودیت‌هایی وجود دارد.

با توجه به محدودیت‌های ذکر شده در این بخش، اصولاً اندازه‌گیری نتایج تجربی مورد نظر از مکانیزم‌های کنترل‌کننده امکان‌پذیر نیست.

۵- نتیجه‌گیری

مکانیزم خودتخریب در یک کنترل‌کننده مکانیکی به روش اجزاء محدود سه‌بعدی در نرم‌افزار آدامز شبیه‌سازی شد. همان‌طور که انتظار می‌رفت ساچمه‌ها در سوراخ‌های جانبی سوزن باز شده و پس از افزایش سرعت زاویه‌ای به مقدار معینی، شروع به حرکت روی سطح شیب‌دار کرده و سوزن را به سمت نوک کنترل‌کننده بردند.

پس از کاهش سرعت زاویه‌ای به مقدار معینی، ساچمه‌ها در سوراخ‌های جانبی سوزن به سمت داخل رفته و سوزن در اثر نیروی فنر به سمت پایین کنترل‌کننده برگشت. همچنین زمان و سرعت زاویه‌ای متناظر با شروع حرکت مکانیزم خودتخریب به سمت نوک کنترل‌کننده و بازگشت آن به عنوان پارامترهای مهمی در مکانیزم تأخیر و در کنترل‌کننده مورد بررسی قرار گرفت.

در پایان نتایج حاصل از این شبیه‌سازی یعنی موارد رخ داده در خلال شبیه‌سازی برای این مکانیزم از نظر کیفی و همچنین تقدم و تأخر زمانی عملکرد این مکانیزم با مکانیزم‌های دیگر کنترل‌کننده با منابع موجود مقایسه گردید. این مقایسه درستی نتایج حاصل از