تحلیل رفتار دینامیکی مکانیزم تأخیر در یک کنترل‌کننده‌ی وضعیت پرتابه، با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود سه‌بعدی

سلمان نادری اشکفتکی[۱]، مهدی سلمانی تهرانی[۲] و کوروش حسن پور[۳]
Sajad1378@gmail.com

(دریافت مقاله: ۸۸/۰۸/۲۵ پذیرش مقاله: ۸۹/۰۳/۱۳)

چکیده

در این مقاله، رفتار دینامیکی مکانیزم تأخیر یک کنترل‌کننده‌ی پرتابه، با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود سه‌بعدی در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی و بررسی می‌شود. کنترل‌کننده‌ی مورد بررسی در این مقاله جزو کنترل‌کننده‌های مکانیکی مربوط به پرتابه‌های با شتاب بالا است. شتاب‌های خطی و زاویه‌ای بالای پرتابه، محدودیت‌هایی را برای ایجاد شرایط آزمایشگاهی مناسب، برای بررسی عملکرد مکانیزم‌های این‌گونه کنترل‌کننده‌ها ایجاد می‌کند. از این‌رو استفاده از شبیه‌سازی عددی به‌کمک رایانه، ابزار باارزشی در طراحی این‌گونه کنترل‌کننده‌ها است. پیچه‌ی فلزی و کمربند فلزی، که از قطعات اصلی مکانیزم تأخیر هستند، به‌صورت تغییرشکل‌پذیر در نظر گرفته شده، چگونگی تغییر شکل پلاستیک آنها در حین حرکت پرتابه و اثر آن بر رفتار کلی کنترل‌کننده بررسی شده است. در این راستا برای بررسی اثر رفتار مادی پیچه‌ی فلزی و به‌منظور بررسی تأثیرات کارسختی، با فرض منحنی تنش-کرنش دوخطی برای پیچه‌ی فلزی، رفتار پیچه در سه تنش تسلیم مختلف بررسی شده است. همچنین زمان‌بندی عملکرد این مکانیزم از جهت تأثیر آن بر عملکرد مجموعه دارای اهمیت زیادی است که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود. نتیجه‌ی قابل توجه در این شبیه‌سازی‌ها عملکرد مطلوب مکانیزم در تنش تسلیم (Mpa) ۲۸۵ است که نشان‌دهنده‌ی وابستگی شدید عملکرد مکانیزم به رفتار مادی پیچه‌ی فلزی است.

کلیدواژه:

کنترل‌کننده- مکانیزم ایمنی- مکانیزم تأخیر- شبیه‌سازی اجزای محدود

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد
۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، Tehrani-m@eng.sku.ac.ir
۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، kourosh_hasanpur@yahoo.com

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

به‌طور کلی کنترل کننده‌ی مربوط به یک پرتابه، یک وسیله‌ی مکانیکی، الکتریکی، مغناطیسی یا ترکیبی از این‌هاست که منجر به انجام عملی، در زمان مشخص و به‌ترتیب مطلوبی در پرتابه می‌شود [۱]. طبقه‌بندی کنترل‌کننده در پرتابه‌ها می‌تواند بر اساس عامل عملکرد، محل قرارگیری و نوع مکانیزم، انجام شود. محل قرارگیری کنترل‌کننده‌ی مورد بررسی در این تحقیق، در نوک پرتابه، مکانیزم آن از نوع مکانیکی و عامل عملکرد آن ضربه است. شکل (۱) نمونه‌ای از یک کنترل‌کننده‌ی مکانیکی را نشان می‌دهد. شکل (۲) نمای برش‌خورده‌ی کنترل‌کننده‌ی مورد بررسی در این مقاله را نشان می‌دهد.

از نظر کاربرد، کنترل‌کننده‌ها برای تخریب اهداف هوایی به‌کار می‌روند. وظیفه‌ی اصلی کنترل‌کننده، کنترل انفجار پرتابه قبل از پرتاب و پس از آن است. یک کنترل‌کننده باید در درجه‌ی اول ایمن باشد. یعنی نباید باعث وارد آمدن خسارات جانی و مالی شود. در درجه‌ی دوم باید در صورت مجاورت با هدف، زمینه‌ی انفجار پرتابه را فراهم و باعث انهدام هدف شود. بر اساس این اهداف کلی، در کنترل‌کننده‌ی مورد بررسی سه مکانیزم گنجانده شده که در ارتباط با یکدیگر موجب تنظیم عملکرد مطلوب می‌شوند. این مکانیزم‌ها عبارتند از:

۱- مکانیزم ایمنی[1]

۲- مکانیزم تأخیر

۳- مکانیزم خودتخریب[2]

اولین مکانیزمی که در این کنترل‌کننده وارد عمل می‌شود مکانیزم ایمنی است. این مکانیزم به‌این منظور طراحی و ساخته شده است که از امکان عمل کردن کنترل‌کننده تا قبل از پرتاب جلوگیری کند. به این صورت که از انفجار پرتابه در اثر ضربات ناشی از حمل و نقل و همچنین چرخش روتور در حین مونتاژ جلوگیری می‌کند. مکانیزم ایمنی از سه جزو اصلی زیر تشکیل شده است:

۱- روتور

۲- انبری

۳- نگهدارنده‌ی روتور

در شکل (۲) موقعیت این سه قطعه در مجموعه مشخص شده است همچنین یک نوع آغازگر (پیش‌چاشنی) حساس به ضربه در وسط روتور قرار دارد که در اثر ضربه‌ی سوزن عمل می‌کند و انفجار ضعیف آن از طریق تشدید کننده به خرج اصلی داخل پرتابه منتقل می‌شود. یکی از ملزومات ایمنی این است که این آغازگر قبل از پرتاب پرتابه در راستای سوزن قرار نگیرد. سوزن به‌واسطه‌ی پیش‌بار فشاری فنر خودتخریبی که در نوک کنترل‌کننده قرار گرفته است بر روی روتور فشار وارد می‌کند. قطعه‌ی انبری که از فلزی نرم ساخته می‌شود بر روی نشیمن‌گاه خود بر روی روتور قرار می‌گیرد. این انبری از هرگونه حرکت دورانی اتفاقی روتور جلوگیری می‌کند. موقعیت روتور و انبری نسبت به درپوش این مطلب را روشن‌تر می‌کند. اکنون اگر پرتابه پرتاب شود، روتور در اثر شتاب‌های خطی و زاویه‌ای بالای پرتابه و به‌واسطه‌ی موقعیت مرکز جرم خود نسبت به محور طولی کنترل‌کننده و نیروهای اینرسی و اصطکاکی دوران می‌کند و باعث ایجاد تغییر شکل در انبری، رهایی از آن و قرار گرفتن آغازگر در راستای سوزن می‌شود. لازم به ذکر است که اگر انبری به هر دلیلی از دوران روتور جلوگیری کند، کنترل‌کننده مأموریت خود را به پایان نخواهد رساند.

مکانیزم دیگری که در این کنترل‌کننده به‌کار رفته مکانیزم تأخیر است. مکانیزم تأخیر استفاده شده در این کنترل‌کننده از نوع اینرسی است که شامل یک رول از فلزی نرم و نازک است و باعث ایجاد تأخیر چند میلی‌ثانیه‌ای بعد از پرتاب می‌شود. برای اینکه مکانیزم خودتخریب وارد عمل شود، یعنی ساچمه‌ها بر روی سطح شیب‌دار بوش راهنما بالا روند، به یک زمان تأخیر چند میلی‌ثانیه‌ای نیاز است که توسط مکانیزم تأخیر تأمین می‌شود. اجزای اصلی این مکانیزم شامل پیچه‌ی فلزی، کمربند فلزی و واشر است. هرکدام از این اجزا در شکل (۳) نشان داده شده است.

چنان‌که در شکل (۲) دیده می‌شود پیچه‌ی فلزی از طریق واشر با نگهدارنده‌ی روتور در تماس است. نگهدارنده‌ی روتور در بین بدنه‌ی کنترل‌کننده و توپی دندانه‌دار تثبیت شده به‌طوری‌که سرعت آن با سرعت پرتابه برابر است. اهمیت نیروهای تماسی و اینرسی و استفاده‌ی مفید از آن‌ها در این کنترل‌کننده و به‌طور کلی در کنترل‌کننده‌های مکانیکی نمود پیدا می‌کند. اثر حرکت پرتابه از طریق نیروهای تماسی به پیچه‌ی فلزی منتقل می‌شود. حرکت تند شونده‌ی پرتابه در زمان‌های اولیه‌ی حرکت باعث تمایل حرکت نسبی اجزای داخلی کنترل‌کننده به‌سمت عقب پرتابه می‌شود. این تمایل حرکت باعث فشرده شدن این اجزا بر روی هم و ایجاد نیروهای تماسی می‌شود. پس از رسیدن پرتابه به یک سرعت معین، ابتدا کمربند فلزی و سپس پیچه‌ی فلزی به‌تدریج باز می‌شوند. پس از باز شدن پیچه‌ی فلزی مسیر حرکت سوزن به‌سمت آغازگر باز می‌شود.

در بین قطعات مکانیزم تأخیر، پیچه‌ی فلزی و کمربند فلزی تغییرشکل‌پذیر در نظر گرفته شده‌اند. به‌طور کلی قطعاتی به‌صورت

1- Safety Mechanism
2- Self Destruct Mechanism

Archive of SID

www.SID.ir

تغییرشکل‌پذیر مدل می‌شوند که یا استحکام آن‌ها در مجموعه اهمیت دارد و یا اثر تغییرشکل آن‌ها در سیستم مهم است.

خودتخریبی یک مکانیزم کمکی است که در پرتابه‌های معینی تعبیه می‌شود تا در صورت خطای حرکت پرتابه یا عمل نکردن مکانیزم‌های دیگر کنترل‌کننده، پرتابه را منهدم کند. اجزای اصلی تشکیل‌دهنده‌ی این مکانیزم عبارتند از:

۱- سوزن

۲- ساچمه‌ها

۳- فنر خودتخریبی

۴- بوش راهنما

این مکانیزم چهار عدد ساچمه دارد که در داخل سوراخ‌های جانبی نگهدارنده‌ی ضارب قرار می‌گیرند. سوزن تحت پیش‌بار فنر بر روی روتور فشرده می‌شود. هنگامی‌که پرتابه پرتاب می‌شود وادار به دوران می‌شود. در اثر دوران و سرعت‌های زاویه‌ای بالا و نیروهای گریز از مرکز حاصل از آن‌ها ساچمه‌ها در راستای سوراخ‌های جانبی نگهدارنده‌ی ضارب حرکت کرده و مقداری بر روی سطح شیب‌دار بوش راهنما بالا می‌روند و در نتیجه بر نیروهای اینرسی و نیروی فنر غلبه و از حرکت سوزن به‌سمت آغازگر جلوگیری می‌کنند.

با توجه به توضیحات بالا برای آغاز عمل مکانیزم خودتخریب باید پرتابه به سرعت زاویه‌ای معینی برسد که این نیاز به زمان دارد و این زمان توسط مکانیزم تأخیر تأمین می‌شود. عمل نکردن ساچمه‌ها که می‌تواند به‌خاطر نقص در مکانیزم تأخیر باشد موجب برخورد پیش از موعد سوزن با آغازگر روتور و در نتیجه عمل کردن پرتابه در محل پرتاب و یا قبل از فاصله‌ی مناسب از محل پرتاب می‌شود. همچنین باید این اطمینان حاصل شود که مکانیزم تأخیر عمل می‌کند. چراکه باز نشدن پیچه‌ی فلزی از برخورد سوزن با آغازگر روتور جلوگیری می‌کند و در نتیجه کنترل‌کننده عمل نکرده و اهداف کنترل‌کننده برآورده نمی‌شود.

دوناهیو و همکارانش[3] در سال ۱۹۷۱ کنترل‌کننده‌ی تأخیری را در پرتابه‌های AA (mm)۴۰ مورد بررسی قرار دادند. زمان تأخیر در این کنترل‌کننده ناشی از اینرسی است که در شکل (۴) نشان داده شده است [۳].

دان[4] در سال ۱۹۸۳ نوعی مکانیزم تأخیر را تحلیل و شبیه‌سازی کرد. این مکانیزم شامل یک نوار فلزی است که حول یک جسم به‌صورت چندین دور پیچیده شده است. این پیچه‌ی فلزی در اثر دوران پرتابه به دور خود به‌تدریج باز می‌شود و در طی باز شدن کامل یک زمان تأخیر برای عمل جسمی که روی آن پیچیده شده به‌وجود می‌آورد [۴].

جان تیتوس[5] در سال ۱۹۸۴ یک مدل ریاضی برای مکانیزم‌های کنترل‌کننده‌ی M734 ارائه کرد. این کنترل‌کننده یک کنترل‌کننده‌ی الکتریکی- مکانیکی و از نوع مجاورتی است. در شکل ۵ کنترل‌کننده‌ی M734 دیده می‌شود. چنان‌که در شکل (۵) دیده می‌شود، این کنترل‌کننده از سه زیر مجموعه‌ی اصلی شامل مجموعه‌ی الکترونیکی، توربین و مولد جریان، و مجموعه‌ی ایمنی و فعال‌کننده تشکیل شده است [۵].

در کنترل‌کننده‌ی مورد بررسی در این مقاله، با توجه به سرعت بالای مجموعه، هندسه‌ی پیچیده و تماس‌های متعدد در بین پیچه‌ی فلزی و کمربند فلزی و قابلیت‌های نرم‌افزار ABAQUS، برای شبیه‌سازی‌ها از حل‌گر صریح[6] نسخه‌ی ۶/۷ این نرم‌افزار استفاده شده است. در شبیه‌سازی انجام شده، شرایط سینماتیکی مشخصی به‌صورت شتاب و در دو مرحله بر مجموعه اعمال شد و در طی آن رفتار کلی و تغییر شکل پیچه‌ی فلزی و کمربند فلزی مورد بررسی قرار گرفت. زمان‌بندی عملکرد این مکانیزم و ارتباط آن با مکانیزم‌های دیگر دارای اهمیت زیادی است که در این مقاله به آن پرداخته شده است. برای اطلاع از رفتار دقیق تنش-کرنش پیچه‌ی فلزی و همچنین به‌منظور بررسی تأثیرات کارسختی، رفتار پیچه‌ی فلزی در سه تنش تسلیم مختلف بررسی شده است.

۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

۲-۱- هندسه‌ی مدل

اجزایی که برای شبیه‌سازی مکانیزم تأخیر در نرم‌افزار ABAQUS در نظر گرفته شده شامل نگهدارنده‌ی روتور، واشر، پیچه‌ی فلزی، کمربند فلزی، بوش راهنما و بخش مورد نیاز از نگهدارنده‌ی ضارب و نگهدارنده‌ی سوزن است. برای ایجاد مدل هندسی پیچه‌ی فلزی و کمربند فلزی از نرم‌افزار CATIA استفاده شده و سپس به محیط ABAQUS وارد شده‌اند. در شکل (۶) نمای مونتاژی و انفجاری اجزای مدل‌سازی شده نشان داده شده است.

۲-۲- رفتار مادی قطعات

جنس ماده‌ی کمربند فلزی فولاد ضدزنگ X12CrNi18-8 است که معادل AISI302 می‌باشد. در جدول (۱) خواص این فولاد آمده است. نتایج آزمون کششی مربوط به این ماده در شکل (۷) آمده است.

3- W. J. Donahue, J. M. Douglas
4- W. P. Dunn
5- John. D. Titus
6- Explicit Solver

Archive of SID

www.SID.ir

جنس پیچه‌ی فلزی ماده‌ی C11000 است. این ماده در واقع همان نوار مسی صنعتی الکترولیتی است. ترکیب عناصر تشکیل‌دهنده و خصوصیات مکانیکی پایه‌ی آن در جدول‌های (۲ و ۳) آمده است [۶].

همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود محدوده‌ی تنش تسلیم این ماده از ۶۹(MPa) تا ۳۶۵(MPa) متغیر است که دامنه‌ی وسیعی را تشکیل می‌دهد. تغییرات تنش تسلیم در این محدوده، وابسته به میزان کار سختی انجام شده در ماده است.

شکل ۸ نمودار تنش-کرنش ماده‌ی C11000 را در پنج کارسختی مختلف و در محدوده‌ی کرنش‌های کمتر از ۰/۶٪ نشان می‌دهد. برای اطلاع از رفتار دقیق تنش-کرنش پیچه‌ی فلزی و همچنین به‌منظور بررسی تأثیرات کارسختی، رفتار پیچه‌ی فلزی در سه تنش تسلیم مختلف بررسی شده است.

شکل (۸) سه رفتار مادی در نظر گرفته شده برای پیچه‌ی فلزی را نشان می‌دهد. در حالت اول که تقریباً متناظر با حالت تنش‌زدایی شده‌ی C11000 است، تنش تسلیم ۱۰۰(MPa) (منحنی ۳) درنظر گرفته شده است. در حالت دوم تنش تسلیم ۲۰۰(MPa) (منحنی ۲) در نظر گرفته شده که مربوط به درجه سختی تجاری ۱۱٪ است. حالت سوم (منحنی۱) با تنش تسلیم ۲۸۵(MPa)، مربوط به درجه‌ی سختی ۲۰/۷٪ است. میزان کار سختی در نظر گرفته شده برای حالت اول و دوم ۳٪ و حالت سوم ۵٪ است. سایر خصوصیات استخراج شده برای C11000 در جدول (۴) بیان شده است.

۲-۳- مدل‌سازی تماس

در Abaqus/Explicit تعریف تماس‌ها و خواص آن‌ها در "واحد برهم‌کنش"[7] انجام می‌شود. مدل‌سازی تماس با تعریف ویژگی‌های تماس و انتخاب نوع الگوریتم تماس و سپس انتخاب سطوحی که با یکدیگر در تماس هستند، انجام می‌شود. در این بخش برای سطوح تماسی رفتار مماسی[8] تعریف می‌شود. رفتار مماسی معرف اصطکاک و عوامل مختلف وابسته به آن است. برای بیان نوع تماس‌ها و خواص آن‌ها از روش سینماتیک[9] و پنالتی[10] استفاده شده است. در شبیه‌سازی این بخش با توجه به مدل رفتار تماسی بالا، مجموعاً ۷ تماس شامل شش زوج تماسی ویک تماس کلی[11] ایجاد شده که در جدول (۵) آورده شده است.

تماس کلی این خاصیت را دارد که در جفت تماس‌ها دخالت نمی‌کند. یعنی در هرجا که زوج تماسی تعریف شده باشد، تماس کلی اعمال نمی‌شود [۷]. از این جهت تماس کلی برای مواردی که تماس‌ها پیچیده بوده و سطوحی از قطعه با یکدیگر در تماس هستند مناسب است. پیچه‌ی فلزی و کمربند فلزی قطعاتی هستند که دارای هندسه و تماس‌های پیچیده‌ای هستند.

۲-۴- نوع و گام‌های تحلیل

با توجه به این‌که تغییر شکل‌ها و تماس‌ها زیاد و پیچیده بوده و مسأله دینامیکی است، به‌منظور بررسی تغییر شکل‌ها، مدل اجزای محدود باید قابلیت تحلیل تغییر شکل پیچیده و زیاد را داشته باشد. از این‌رو این شبیه‌سازی‌ها توسط حل‌گر صریح (Explicit) نرم‌افزار ABAQUS انجام شده که مبنای آن بر اساس روش انتگرال‌گیری زمانی صریح در استخراج معادلات اجزای محدود است.

نوع تحلیل در "واحد قدم"[12] تعریف می‌شود. با توجه به این‌که مسأله دینامیکی است، باید زمان هر قدم به‌طور دقیق تعریف شود که به‌علت شرایط مرزی سینماتیکی مسأله است. تحلیل این مکانیزم در دو مرحله انجام شده است. مدت زمان شبیه‌سازی در مرحله‌ی اول ۴(ms) و در مرحله‌ی دوم ۴۰(ms) است. در نتیجه کل مدت زمان این شبیه‌سازی برابر ۴۴(ms) خواهد بود.

۲-۵- بارگذاری و شرایط مرزی

شرایط مرزی سینماتیکی در نظر گرفته شده در این مدل‌سازی، شتاب زاویه‌ای و شتاب خطی مجموعه‌ی قطعات نگهدارنده‌ی روتور، بوش راهنما و سوزن است. مقدار شتاب خطی و شتاب زاویه‌ای در پایان مرحله‌ی اول به‌ترتیب برابر با $۴/۸\times۱۰^{۸}(mm/s^2)$ و $۴/۷۱\times۱۰^{۶}(rad/s^2)$ خواهد بود. مقدار شتاب خطی در ابتدای مرحله‌ی دوم به $-۲۰۰\times۱۰^{۳}(mm/s^2)$ کاهش می‌یابد و سپس به‌صورت خطی تا $-۱۸۰\times۱۰^{۳}(mm/s^2)$ افزایش می‌یابد. مقدار شتاب زاویه‌ای هم در ابتدای مرحله‌ی دوم به $-۱۷۴۴(rad/s^2)$ رسیده و سپس به‌صورت خطی تا $-۱۳۶۶(rad/s^2)$ ادامه می‌یابد. نمودار این شتاب‌ها بر حسب زمان، در شکل ۹ نشان داده شده است.

۲-۶- المان انتخابی و شبکه‌بندی

نوع المان استفاده شده برای المان‌بندی قطعات صلب، المان صلب چهار وجهی چهار گرهی[13] است که مرتبه‌ی هندسی آن خطی است. نوع المان استفاده شده برای المان‌بندی قطعات تغییرشکل‌پذیر یعنی پیچه‌ی فلزی و کمربند فلزی، المان پوسته‌ای پیوسته[14] است

7- Interactiom module
8- Tangential Behavior
9- Kinematic
10- Penalty
11- General Contact

12- Step module
13- R3D4 (Discrete Rigid Element)
14- SC8R (Continuum shell)

Archive of SID

www.SID.ir

که مرتبه‌ی هندسی آن خطی است. در شکل (۱۰) شبکه‌بندی قطعات مکانیزم تأخیر آمده است.

۳- نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی مکانیزم تأخیر به‌ازای سه تنش تسلیم (MPa)۱۰۰، (MPa)۲۰۰ و (MPa)۲۸۵ برای پیچه‌ی فلزی تکرار شد. نکته‌ی قابل توجه در این شبیه‌سازی‌ها، وابستگی رفتار مکانیزم به تنش تسلیم و رفتار پلاستیک پیچه‌ی فلزی است. مناسب‌ترین رفتار در بین این سه ماده مربوط به تنش تسلیم (MPa)۲۸۵ به‌دست آمد. به‌این جهت در ابتدا به بررسی رفتار مکانیزم در تنش تسلیم (MPa)۲۸۵ می‌پردازیم.

کمربند فلزی به‌عنوان جزیی از مجموعه‌ی مکانیزم تأخیر، باعث تأخیر بیشتر در باز شدن پیچه‌ی فلزی می‌شود. باز شدن پیچه‌ی فلزی با شروع تغییر شکل پلاستیک کمربند فلزی تسریع می‌شود. در شکل (۱۱) چگونگی تغییر شکل پلاستیک در پیچه‌ی فلزی و کمربند فلزی در تنش تسلیم (MPa)۲۸۵ مربوط به پیچه و در زمان‌های مختلف شبیه‌سازی نشان داده شده است. در این شکل جهت دید بهتر، قطعات صلب حذف شده‌اند.

در شکل (۱۲) محیط خارجی کمربند فلزی در حالت شروع و پایان شبیه‌سازی با هم مقایسه شده است. در این شکل می‌توان به‌خوبی چگونگی و میزان باز شدن کمربند فلزی را مشاهده کرد. نمودار خط‌چین شکل اولیه‌ی محیط خارجی کمربند فلزی و نمودار خط پیوسته، شکل نهایی آن‌را نشان می‌دهد.

در شکل (۱۳) وضعیت ابتدایی و نهایی مسیر انتخابی بر روی نوار پیچه‌ی فلزی نسبت به محیط نگهدارنده‌ی ضارب نشان داده شده است. چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود، حلقه‌های داخلی نوار پیچه به‌اندازه‌ای باز شده‌اند که نگهدارنده‌ی ضارب می‌تواند از داخل آن عبور کند و به آغازگر روتور ضربه بزند. عبور سوزن از پیچه به‌معنای انفجار پرتابه در اثر برخورد با هدف و یا خودانهدامی پرتابه در صورت برخورد نکردن با هدف است. دست‌یابی به چنین رفتاری در مکانیزم تأخیر اهمیت حیاتی دارد که در محدوده‌ی تنش‌های تسلیم انتخابی برای پیچه، تنش تسلیم (MPa)۲۸۵ چنین رفتار مناسبی را نشان می‌دهد.

در شکل (۱۴) کانتور توزیع تنش میزز برای پیچه‌ی فلزی و کمربند فلزی در زمان باز شدن کامل نشان داده شده است. در شبیه‌سازی با دو تنش تسلیم دیگر اعوجاج نوار پیچه‌ی فلزی باعث اختلال در عملکرد مکانیزم می‌گردد. نامنظم شدن وضعیت حلقه‌های داخلی پیچه‌ی فلزی مانع عبور سوزن و برخورد آن با آغازگر می‌شود. از این‌رو انتخاب ماده‌ی مناسب برای پیچه‌ی فلزی از اهمیت خاصی برخوردار است. شکل (۱۵) وضعیت پیچه‌ی فلزی را در دو تنش تسلیم دیگر نشان می‌دهد.

برای بررسی کمی درستی نتایج به‌دست آمده از این شبیه‌سازی باید آنها را با نتایج حاصل از آزمایش تجربی مقایسه کنیم. از طرفی شتاب خطی شبیه‌سازی از مرتبه‌ی $10^{6}(m/s^2)$ است. ایجاد این شتاب بسیار بزرگ در فاصله‌ی زمانی بسیار کوتاه از مرتبه‌ی $10^{-3}(s)$، نیاز به توان بسیار زیادی دارد. از سوی دیگر، ادوات دستگاه آزمایش که شتاب خطی مذکور را تحمل کنند، حتی با داشتن جرم‌های کم، نیروهای بسیار زیادی را متحمل می‌شوند. به‌نظر می‌رسد ایجاد شتاب خطی لازم امکان‌پذیر نیست. شتاب زاویه‌ای اجزای مکانیزم نیز از مرتبه‌ی $10^{6}(rad/s^2)$ است. یاتاقان‌هایی که در دستگاه آزمایش، این شتاب را تحمل می‌کنند، باید یاتاقان‌های خاصی باشند. همچنین ابعاد کوچک اجزای مکانیزم (بزرگترین بعد (cm)۵ مربوط به بدنه‌ی کنترل‌کننده) در اندازه‌گیری متغیرهای اجزای مکانیزم‌ها محدودیت‌هایی ایجاد می‌کند. بنابراین شبیه‌سازی به‌کمک کامپیوتر را باید به‌عنوان یک ابزار مناسب و ارزشمند در بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد کنترل‌کننده‌ها دانست. بررسی درستی نتایج شبیه‌سازی‌ها از مقایسه‌ی کیفی عملکرد مکانیزم‌ها با نتایج شبیه‌سازی امکان‌پذیر است. چنان‌که در مقدمه بیان شد انتظار می‌رود پیچه‌ی فلزی در اثر نیروهای اینرسی و تماسی به‌مرور باز شده و مسیر سوزن را باز کند که نتایج شبیه‌سازی نیز این مطلب را نشان می‌دهد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

هدف از انجام این تحقیق در درجه‌ی اول ارائه‌ی یک شبیه‌سازی مناسب برای بررسی عملکرد مکانیزم تأخیر بود. پس از ارائه‌ی این شبیه‌سازی برای اطلاع از رفتار دقیق تنش-کرنش پیچه‌ی فلزی و همچنین به‌منظور بررسی اثر تنش تسلیم، رفتار پیچه‌ی فلزی در سه تنش تسلیم مختلف بررسی شد. نکته‌ی قابل توجه در این شبیه‌سازی‌ها، وابستگی رفتار مکانیزم به تنش تسلیم و رفتار پلاستیک پیچه‌ی فلزی است. چنان‌که نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در محدوده‌ی تنش‌های تسلیم انتخابی نشان می‌دهد، پیچه‌ی فلزی در تنش تسلیم (MPa)۲۸۵ به‌طرز قابل قبول و خوش‌رفتاری باز می‌شود. ولی در تنش‌های تسلیم (MPa)۲۰۰ و (MPa)۱۰۰ اعوجاج نوار پیچه از باز شدن مناسب پیچه جلوگیری می‌کند. از این‌رو جهت اطمینان از عملکرد مطلوب مکانیزم، توجه به انتخاب ماده‌ی مناسب برای پیچه‌ی فلزی دارای اهمیت فراوانی است.

برای بررسی کمی درستی نتایج به‌دست آمده از این شبیه‌سازی باید آنها را با نتایج حاصل از آزمایش تجربی مقایسه کنیم. با توجه به

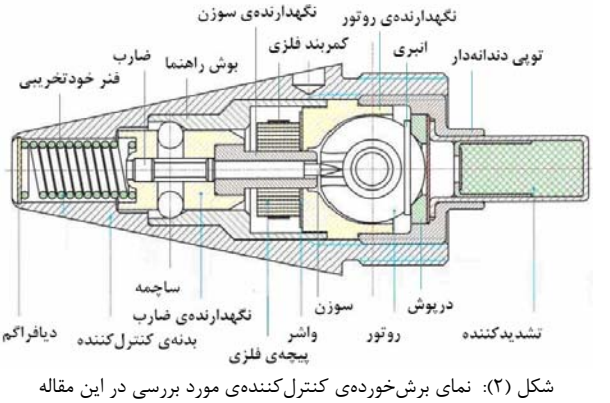
Archive of SID

www.SID.ir

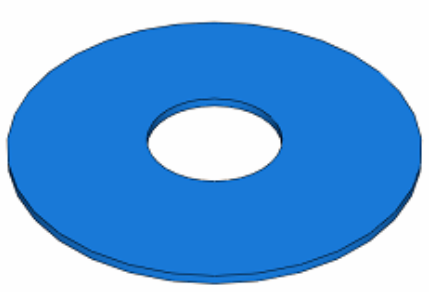
محدودیت‌های یاد شده در بخش قبل، اصولاً اندازه‌گیری کمیت‌ها در حین عملکرد از مکانیزم‌های کنترل‌کننده امکان‌پذیر نیست. کارکرد طرح نهایی کنترل‌کننده به‌وسیله‌ی پرتاب واقعی پرتابه‌ی حامل کنترل‌کننده ارزیابی می‌شود که به آن یک آزمایش اثبات‌کننده می‌گویند. یعنی برای اطمینان از عملکرد مطلوب کنترل‌کننده، باید نمونه‌ی نهایی پرتاب شود و عملکرد آن در طی مسیر بررسی شود. از این‌رو شبیه‌سازی به‌کمک کامپیوتر ابزار ارزشمندی در طراحی کنترل‌کننده‌ها است.

۵- شکل‌ها و جدول ها

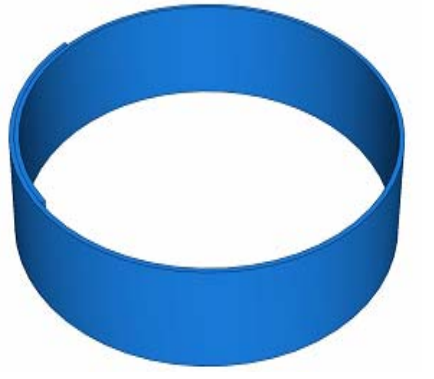
شکل (۱): کنترل‌کننده‌ی MTF3 [۲]



شکل (۲): نمای برش‌خورده‌ی کنترل‌کننده‌ی مورد بررسی در این مقاله



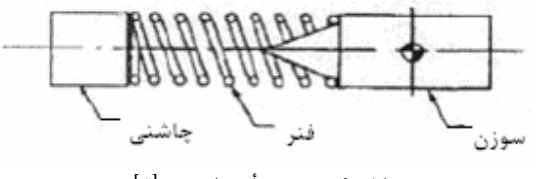
واشر



کمربند فلزی

پیچه‌ی فلزی

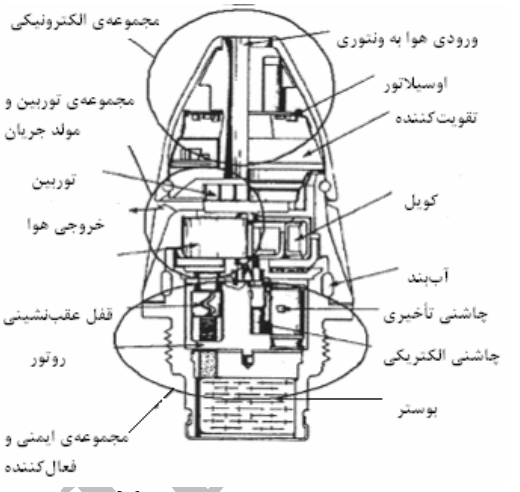
شکل (۳): اجزای اصلی مکانیزم تأخیر



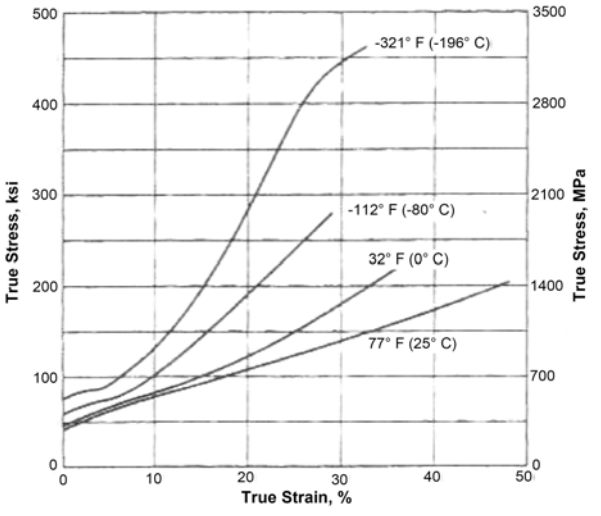
شکل (۴): سیستم تأخیر اینرسی [۳]

Archive of SID

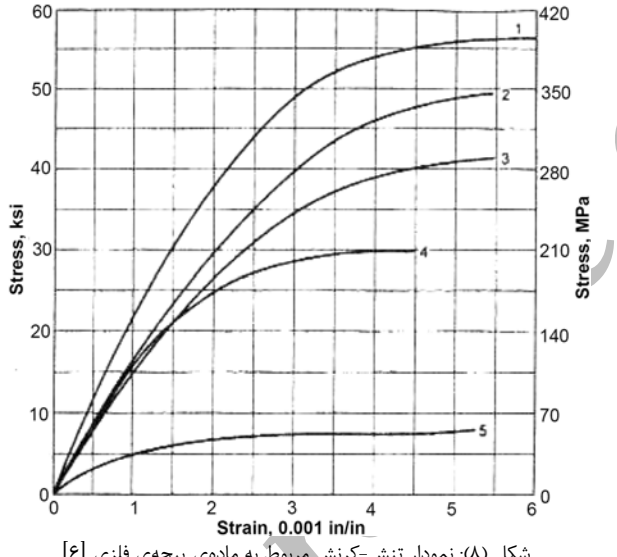
www.SID.ir



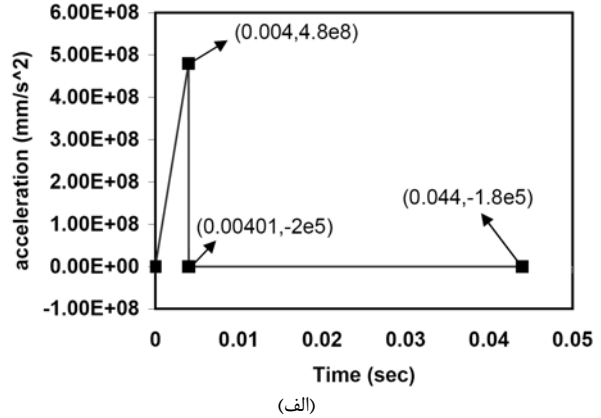
شکل (۵): کنترل‌کننده‌ی M734 [۵]



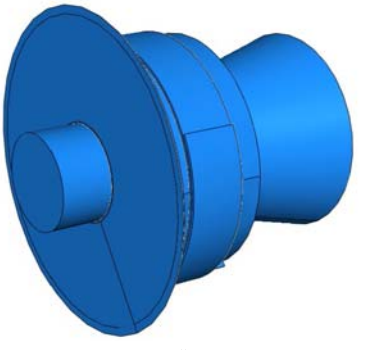
شکل (۷): منحنی تنش-کرنش واقعی در دمای اتاق و دماهای پایین‌تر مربوط به ماده‌ی کمربند فلزی، فولاد ضدزنگ UNS S30200 [۶]



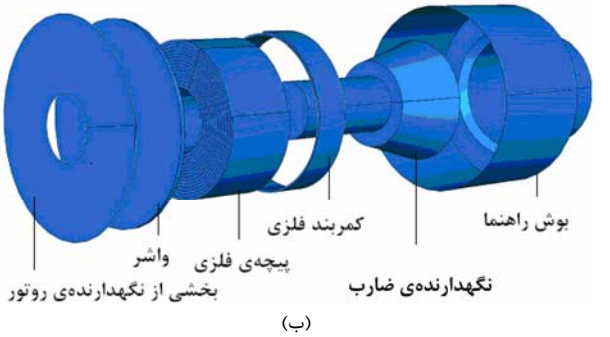
شکل (۸): نمودار تنش-کرنش مربوط به ماده‌ی پیچه‌ی فلزی [۶]



(الف)



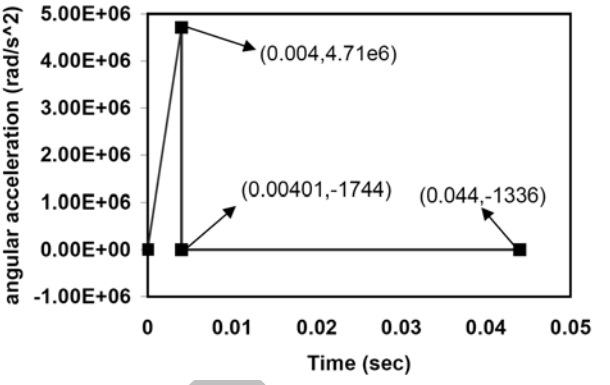
(الف)



(ب)

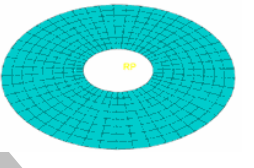
شکل (۶): نمای انفجاری و سوارشده‌ی مکانیزم تأخیر، الف- نمای سوارشده، بدون بوش راهنما، ب- نمای انفجاری

Archive of SID
www.SID.ir

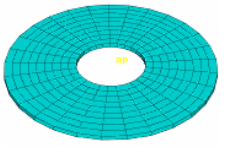


(ب)

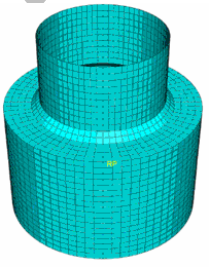
شکل (۹): شرایط سینماتیکی اعمال شده در شبیه‌سازی مکانیزم تأخیر، الف- شتاب خطی، ب- شتاب زاویه‌ای



نگهدارنده‌ی روتور

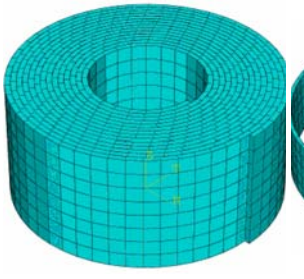


واشر

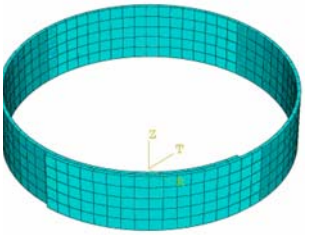


بوش راهنما

نگهدارنده‌ی سوزن و بخش مورد نیاز از نگهدارنده‌ی ضارب

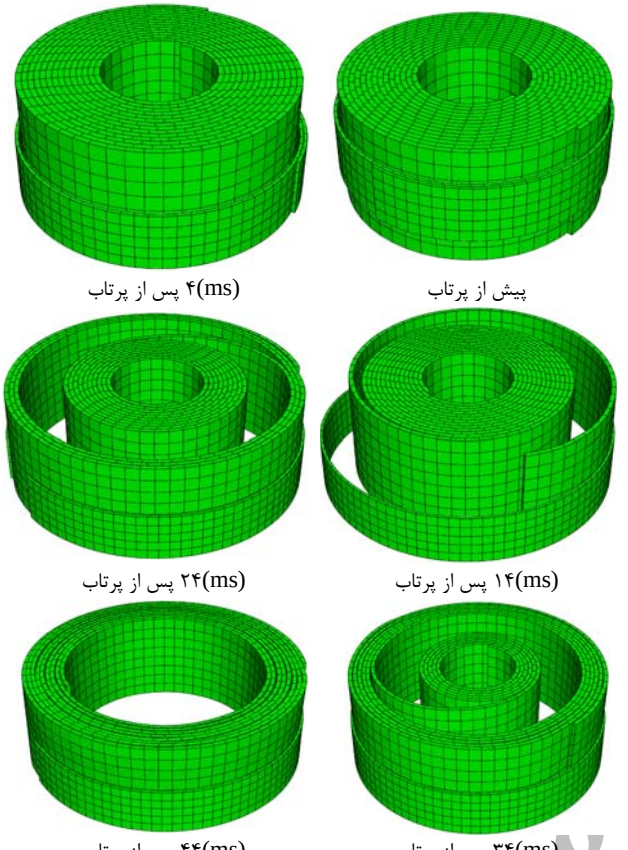


پیچه‌ی فلزی



کمربند فلزی

شکل (۱۰): مدل شبکه‌بندی شده‌ی قطعات مکانیزم تأخیر

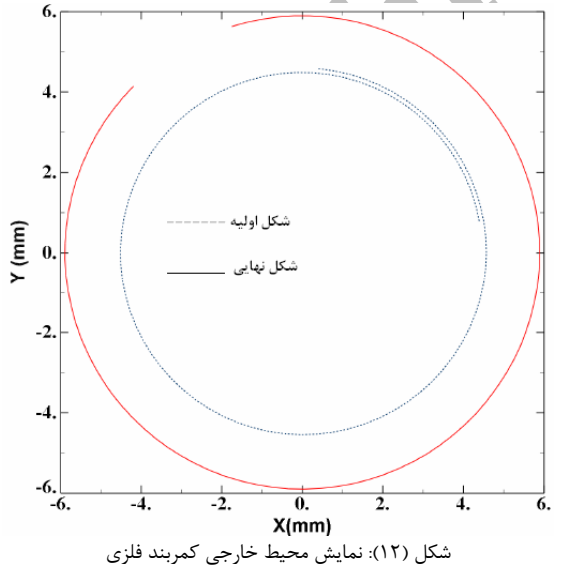


پیش از پرتاب — ۴(ms) پس از پرتاب

۱۴(ms) پس از پرتاب — ۲۴(ms) پس از پرتاب

۳۴(ms) پس از پرتاب — ۴۴(ms) پس از پرتاب

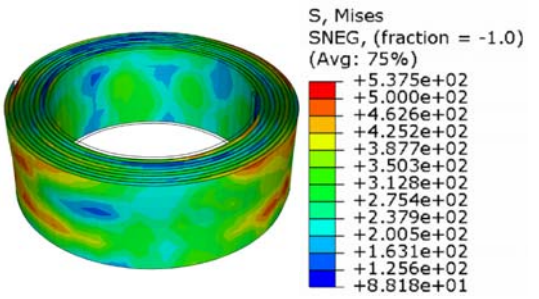
شکل (۱۱): وضعیت پیچه‌ی فلزی و کمربند فلزی دور آن، در زمان‌های مختلف شبیه‌سازی



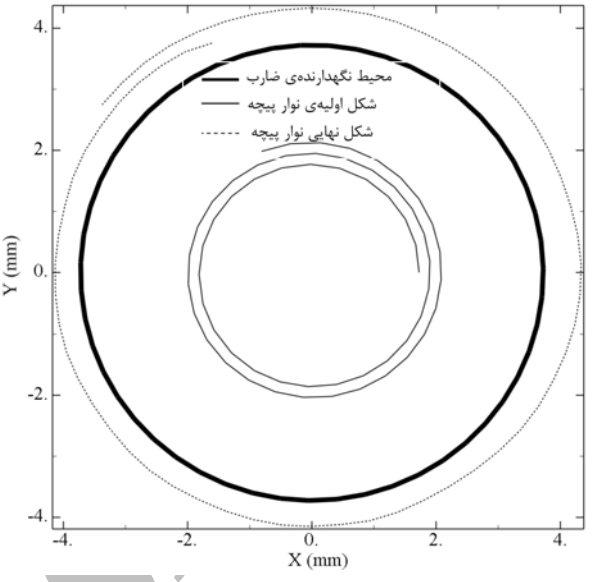
شکل (۱۲): نمایش محیط خارجی کمربند فلزی

Archive of SID

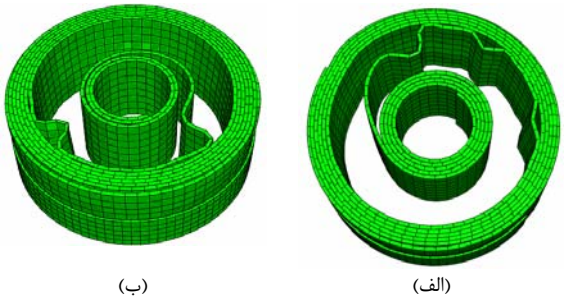
www.SID.ir



شکل (۱۴): کانتور تنش ون‌میزز برای پیچه‌ی فلزی و کمربند فلزی

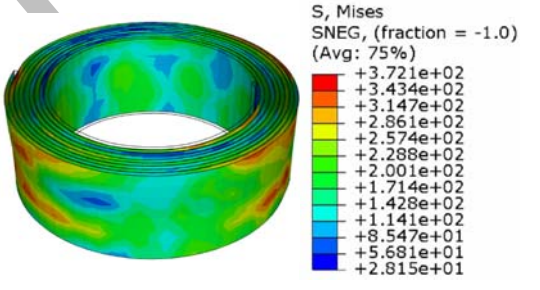


شکل (۱۳): وضعیت ابتدایی و نهایی مسیر انتخابی بر روی نوار پیچه‌ی فلزی نسبت به محیط سوزن



(ب) (الف)

شکل (۱۵): وضعیت پیچه‌ی فلزی برای دو تنش تسلیم دیگر، الف- تنش تسلیم ۱۰۰(MPa) در لحظه‌ی ۲۸/۵(ms) پس از پرتاب ، ب- تنش تسلیم ۲۰۰(MPa) در لحظه‌ی ۲۹/۸(ms) پس از پرتاب



جدول (۱): خواص فولاد مربوط به ماده‌ی کمربند فلزی [۶]

تنش تسلیم (Mpa)	چگالی (Kg/m^3)	مدول الاستیک (Gpa)	ضریب پواسون
۳۱۰	۷۸۵۰	۲۱۰	۰/۳

جدول (۲): ترکیب عناصر تشکیل‌دهنده‌ی C11000 [۶]

Copper No	Designation	Description	Composition, wt%						
			Cu% (including Ag), min	Ag, min	As	Sb	P	Te	Other named elements
C11000	ETP	Electrolytic pitch	99.90	…	…	…	…	…	(e)

جدول (۳): خصوصیات مکانیکی پایه‌ی C11000 [۶]

Alloy No.	Commercial forms[a]	Mechanical properties				Elongation in 50mm(2in)[b], %	Mechinability rating, %
		Tensile strength		Yield strength			
		Mpa	Ksi	Mpa	Ksi		
C11000	F, R, W, T, P, S	221-455	32-66	69-365	10-53	55-4	20

Archive of SID

www.SID.ir

جدول (۴): خواص مربوط به ماده‌ی پیچه‌ی فلزی [۶]

تنش تسلیم (Mpa)	چگالی (Kg/m^3)	مدول الاستیک (Gpa)	ضریب پواسون
۱۰۰	۸۹۶۰	۱۰۰	۰/۳
۲۰۰	۸۹۶۰	۱۰۰	۰/۳
۲۸۵	۸۹۶۰	۱۴۲	۰/۳

جدول (۵): تماس‌ها و ضرایب اصطکاک تعریف‌شده در مکانیزم تأخیر

قطعات	نوع تماس	ضریب اصطکاک [۸]
نگهدارنده‌ی روتور- واشر	زوج تماسی	۰/۲
واشر- پیچه‌ی فلزی	زوج تماسی	۰/۴
پیچه‌ی فلزی- کمربند فلزی	زوج تماسی	۰/۴
واشر- کمربند فلزی	زوج تماسی	۰/۲
بوش راهنما- پیچه‌ی فلزی	زوج تماسی	۰/۲
بوش راهنما- کمربند فلزی	زوج تماسی	۰/۲
پیچه‌ی فلزی- سوزن	زوج تماسی	۰/۲
پیچه‌ی فلزی- پیچه‌ی فلزی و کمربند فلزی- کمربند فلزی	تماس کلی	۰/۲

۶-مراجع

[1] Mil-Hdbk-757(AR), "Military Handbook", fuzes, 13 November 2001.

[2] Amcp-706-210, "Engineering Design Handbook", fuzes, 15 April 1994.

[3] Donahue, W. J., Douglas, J. M., "Delay Fuze for 40mm AA Projectile (U)", NOLTR 71-44, Naval Ordnance Laboratry, Silver Spring, MD, 5 February 1971.

[4] Dunn, W. P., "Analysis and Simulation of the unwinding Ribbon", A Delay Arming Device, TRARLCD-TR-83001, Picatinny Arsenal Dover, NJ, 11 March 1983.

[5] Titus, J. D., "M734 Fuze Mechanical Arming: A Mathematical Model", TM 84-10, Harry Diamond Laboratory, Adelphi, MD, 13 August 1984.

[6] Atlas of stress-strain curves (2^{nd}Ed.), ASM International, November 2002.

[7] ABAQUS Analysis User Manual, Version 6.7, Getting Started with ABAQUS: Interactive Edition.

[۸] مسگر هروی، م.، "تحلیل و طراحی مکانیزم‌ها با ADAMS"، چاپ اول، مؤسسه‌ی فرهنگی و هنری دیباگران تهران، تهران، ۱۳۸۶.

Archive of SID

www.SID.ir