بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی
نوشیروانی بابل
دانشکده مهندسی مکانیک

عنوان:

کنترل رفتارهای دینامیکی غیرخطی لنگ-لغزنده انعطاف پذیر با در نظر گرفتن لقی‌های مفاصل

ارائه‌شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
رشته مهندسی مکانیک-گرایش طراحی کاربردی

نگارش:
صادق یعقوبی

اساتید راهنما:
دکتر مرتضی دردل
دکتر حمیدرضا محمدی دانیالی

استاد مشاور:
دکتر محمدحسن قاسمی

تابستان ۱۳۹۳

سپاس خداوند متعال را که به من فرصت آموختن عطا فرمود و این شور و هیجان را در من ایجاد نمود که بتوانم بیاموزم، بخوانم، یاد بگیرم و از تلاش کردن باز نایستم.

مراتب سپاس و قدردانی خود را از راهنمایی های عالمانه و ارزشمند اساتید ارجمند و گرامی، جناب آقایان **دکتر مرتضی دردل** و **دکتر حمیدرضا محمدی** **دانیالی** که با دقت، سعه صدر و گشاده رویی در کلیه مراحل تدوین این پایان نامه مرا مرهون ارشاد و راهنمایی های فراوان خویش قرار دادند اعلام می دارم. همچنین بر خود لازم می دانم که از زحمات ارزشمند استاد بزرگوار جناب آقای **دکتر حسن قاسمی** تشکر و قدردانی نمایم.

از دوستان خوبم که در مدت تحصیل در دانشگاه سختی و مشکلات گذراندن واحدهای درسی و انجام پایان نامه را به لحظات خوش و خاطره انگیز تبدیل نمودند تشکر می کنم.

صادق یعقوبی

تابستان ۱۳۹۳

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

خواهر و برادر عزیزم

که در تک تک لحظات زندگی، مرا همراه و پشتیبان بوده اند

و دکتر دردل عزیز

که در این سال ها، برای من آموزگار علم و اخلاق بود

چکیده

در تحقیق حاضر، رفتار دینامیکی مکانیزم‌های لنگ-لغزنده صفحه‌ای صلب و انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن لقی مفاصل در حالات یک و دو مفصل لق مطالعه می‌شود. برای بررسی تأثیر لقی مفاصل در حالت یک لقی فرض شده است که مفصل میان لنگ و شاتون به صورت لق بوده و در حالت دو لقی علاوه بر مفصل ذکرشده، مفصل میان شاتون و لغزنده نیز به صورت لق در نظر گرفته می‌شود. از نظریه لنکرانی-نیک روش برای تخمین نیروی تماسی بین اعضا در مفاصل لق استفاده گردیده است. به علت در نظر گرفتن اثر پخش انرژی در کنار نیروی الاستیک، نتایج به دست آمده با استفاده از این روش از دقت بالایی برخوردار هستند. مشاهده می‌شود که لقی مفاصل موجب اختلالاتی در پاسخ مکانیزم گردیده که این اختلالات با افزایش تعداد مفاصل لق شدیدتر می‌شوند. دینامیک غیرخطی سیستم توسط ابزار مرتبط همچون مقاطع پوآنکاره و نمودارهای انشقاق تحلیل می‌شود. اثرات اصطکاک در مفاصل نیز در این تحقیق بررسی گردیده‌اند. بررسی پارامتری چندین مؤلفه هندسی و مکانیکی موثر بر حرکت سیستم در حالت‌های مختلف انجام شده است. به منظور تحلیل اثر انعطاف‌پذیری لینک در رفتار مکانیزم‌های لق، لینک واسطه (شاتون) به صورت انعطاف‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن لینک انعطاف‌پذیر به صورت یک تیر اویلر-برنولی با قابلیت ارتعاشات عرضی، سیستم به صورت دینامیکی مدل‌سازی می‌شود. در حالت انعطاف‌پذیر، با تفکیک معادلات با مشتق‌های جزئی با استفاده از روش گالرکین، دسته های معادلات دیفرانسیلی عادی با تعداد محدود به دست آمده و سیستم با استفاده از آن‌ها شبیه‌سازی می‌گردد. با مقایسه پاسخ‌های سیستم‌های انعطاف‌پذیر و صلب، مشاهده می‌شود که انعطاف‌پذیری لینک در سیستم‌های با مفاصل لق نقش تعلیق را داشته و موجب بهبود عملکرد به وسیله کاهش نیروهای تماسی در لقی مفاصل می‌گردد. تحلیل‌های غیرخطی و پارامتری مربوطه در این قسمت نیز انجام‌شده‌اند. به منظور مقابله با اثرات ناخواسته لقی مفاصل، روشی برای کنترل مکانیزم به وسیله نگاه‌داشتن ژورنال‌ها و بیرینگ‌های مرتبط با مفاصل لق در حالت تماس دائم ارائه گردیده است. همچنین پیشنهاد می‌شود تا به منظور کاهش بار کاری فعال‌ساز و کنترل دقیق‌تر، از یک فعال‌ساز اضافی نصب‌شده بر روی شاتون به منظور فراهم آوردن تماس دائم در مفصل لق استفاده شود. روش ذکرشده با و بدون در نظر گرفتن فعال ساز اضافی نصب شده بر روی شاتون تحلیل شده و نتیجه شده است که در مکانیزم های با مفصل لق، استفاده از یک فعال‌ساز اضافی می‌تواند در کنترل مناسب مکانیزم نقش بسیار قابل‌توجهی داشته باشد.

کلمات کلیدی: مکانیزم لنگ-لغزنده، لقی مفاصل، انعطاف‌پذیری لینک ، روش گالرگین، دینامیک غیرخطی، مقطع پوآنکاره، اصطکاک مفاصل، تحلیل پارامتری، کنترل.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	ه
فهرست مطالب	و
فهرست اشکال	ی
فهرست جداول	ف
فهرست علائم	ص
فصل اول: مقدمه و مرور کارهای انجام‌شده	۱
۱-۱- مقدمه	۱
۱-۲- اهمیت تحقیق	۲
۱-۳- مرور بر کارهای انجام‌شده	۴
۱-۳-۱- مدل لینک بدون جرم	۴
۱-۳-۲- نیروهای برخورد	۵
۱-۳-۲-۱- مدل هرتز	۵
۱-۳-۲-۲- مدل لنکرانی – نیک‌روش	۷
۱-۳-۲- انعطاف‌پذیری لینک در مکانیزم‌های لق	۱۰
۱-۳-۳- اصطکاک مفاصل	۱۱
۱-۳-۴- کنترل مکانیزم‌های لق	۱۳

۱-۴- فرضیات مسئله ۱۴
۱-۵- اهداف تحقیق ۱۵

فصل دوم: مدل‌سازی و روش کنترل ۱۶
۲-۱- مقدمه ۱۶
۲-۲- مدل‌سازی مکانیزم ۱۷
۲-۲-۱- مکانیزم لنگ – لغزنده صلب با یک مفصل لق ۱۷
۲-۲-۲- مکانیزم لنگ-لغزنده صلب با مفاصل لق چند گانه ۱۹
۲-۲-۳ مکانیزم لنگ-لغزنده انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق ۲۱
۲-۲-۳-۱ استخراج معادلات حاکم بر حرکت مکانیزم لنگ-لغزنده انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق ۲۱
۲-۲-۳- ۲ تفکیک معادلات حاکم بر حرکت مکانیزم لنگ-لغزنده انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق با استفاده از روش گالرکین ۲۵
۲-۲-۴ مکانیزم لنگ-لغزنده انعطاف‌پذیر با مفاصل لق چند گانه ۳۰
۲-۲-۴-۱ استخراج معادلات حاکم بر حرکت مکانیزم لنگ-لغزنده انعطاف‌پذیر با مفاصل لق چند گانه ۳۰
۲-۲-۴-۲ تفکیک معادلات حاکم بر حرکت مکانیزم لنگ-لغزنده انعطاف‌پذیر با مفاصل لق چند گانه با استفاده از روش گالرکین ۳۴
۲-۳ روش کنترل سیستم ۳۸
۲-۳-۱- کنترل مکانیزم لنگ – لغزنده صلب با یک مفصل لق ۳۹
۲-۳-۲- کنترل مکانیزم لنگ – لغزنده صلب با مفاصل لق چند گانه ۴۰
۲-۳-۳- کنترل مکانیزم لنگ – لغزنده انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق ۴۱
۲-۳-۴- کنترل مکانیزم لنگ – لغزنده انعطاف‌پذیر با مفاصل لق چندگانه ۴۳

فصل سوم: شبیه‌سازی و تحلیل نتایج ۴۶

۳-۱- مقدمه ۴۶
۳-۲- بررسی اثر لقی مفصل و تعدد مفاصل لق ۴۷
۳-۲-۱- حرکت اعضا در مفاصل لق ۴۹
۳-۲-۲- اختلالات در پاسخ نسبت به مکانیزم ایده آل ۵۲
۳-۲-۳- دینامیک غیرخطی ۵۵
۳-۲-۴- تحلیل اثر اصطکاک مفاصل ۶۱
۳-۲-۵- تحلیل پارامتری ۶۴
۳-۳- تحلیل اثر انعطاف‌پذیری لینک در مکانیزم با مفصل لق ۶۷
۳-۳-۱- حرکت اعضا در مفصل لق در مکانیزم انعطاف‌پذیر ۶۸
۳-۳-۲- بهبود رفتار دینامیکی سیستم در اثر انعطاف پذیری لینک ۶۹
۳-۳-۳- دینامیک غیرخطی مکانیزم انعطاف‌پذیر ۷۱
۳-۳-۴- اثر اصطکاک مفاصل در مکانیزم انعطاف‌پذیر ۷۷
۳-۳-۵- تحلیل پارامتری مکانیزم انعطاف‌پذیر ۷۸
۳-۳-۶- اثر میزان انعطاف‌پذیری مکانیزم ۸۱
۳-۳-۷- تأثیر تعداد شکل مدهای انتخابی برای تفکیک گالرکین بر پاسخ‌های حاصل‌شده توسط شبیه‌سازی ۸۲
۳-۴- بررسی حرکت مکانیزم با در نظر گرفتن مفاصل لق چند گانه و انعطاف‌پذیری لینک ۸۳
۳-۵- کنترل سیستم ۹۳
۳-۵-۱- کنترل مکانیزم بدون استفاده از فعال‌ساز اضافی ۹۳
۳-۵-۱-۱- کنترل مکانیزم صلب با یک مفصل لق بدون استفاده از فعال‌ساز اضافی ۹۳
۳-۵-۱-۲- کنترل مکانیزم صلب با دو مفصل لق بدون استفاده از فعال‌ساز اضافی ۹۶
۳-۵-۱-۳- کنترل مکانیزم انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق بدون استفاده از فعال‌ساز اضافی ۹۸

۳-۵-۱-۴- کنترل مکانیزم انعطاف‌پذیر با دو مفصل لق بدون استفاده از فعال‌ساز اضافی ۱۰۱
۳-۵-۲- کنترل مکانیزم با استفاده از فعال‌ساز اضافی ۱۰۳
۳-۵-۲-۱- کنترل مکانیزم صلب با یک مفصل لق با استفاده از فعال‌ساز اضافی ۱۰۴
۳-۵-۲-۲- کنترل مکانیزم صلب با دو مفصل لق با استفاده از فعال‌ساز اضافی ۱۰۶
۳-۵-۲-۳- کنترل مکانیزم انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق با استفاده از فعال‌ساز اضافی ۱۰۸
۳-۵-۲-۴- کنترل مکانیزم انعطاف‌پذیر با دو مفصل لق با استفاده از فعال‌ساز اضافی ۱۱۲

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۴
۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۱۴
۵-۲- پیشنهادات برای تحقیقات آتی ۱۱۶
ضمایم ۱۱۷
منابع و مراجع ۱۲۲
چکیده انگلیسی ۱۲۷

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل (۱-۱): (الف) اتصال دو لینک توسط مفصل ایده آل ($\vec{r}_1 + \vec{r}_2 = \vec{r}_3$)، (ب) اتصال دو لینک توسط یک مفصل حقیقی ($\vec{r}_1 + \vec{r}_2 \neq \vec{r}_3$) ۲

شکل (۱-۲): شماتیک مفصل لق ۶

شکل (۱-۳): حرکت آزاد در مفصل لق ۷

شکل (۱-۴): برخورد در مفصل لق ۸

شکل (۱-۵): حالت حرکتی تماس پیوسته در مفصل لق ۸

شکل (۲-۱): مکانیزم لنگ-لغزنده صفحه‌ای صلب با یک مفصل لق ۱۷

شکل (۲-۲): مکانیزم لنگ-لغزنده صفحه‌ای صلب با دو مفصل لق ۱۹

شکل (۲-۳): مکانیزم لنگ-لغزنده صفحه‌ای انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق ۲۱

شکل (۲-۴): مکانیزم لنگ-لغزنده صفحه‌ای انعطاف‌پذیر با دو مفصل لق ۳۰

شکل (۲-۵): تماس پیوسته در مفصل لق ۳۹

شکل (۳-۱): مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ در مکانیزم لنگ – لغزنده صلب با یک مفصل لق ۴۹

شکل (۳-۲): مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ در مکانیزم لنگ – لغزنده صلب با دو مفصل لق و در (الف) مفصل لق اول (ب) مفصل لق دوم ۵۰

شکل (۳-۳): شعاع لقی نسبت به زمان و تغییر حرکت از حالت گذرا به حالت پایا در (الف) مکانیزم با یک مفصل لق (ب) مفصل لق اول در مکانیزم با لقی چند گانه (ج) مفصل لق دوم در مکانیزم با لقی چند گانه ۵۱

شکل (۳-۴): پاسخ دینامیکی مکانیزم‌های ایده آل، با یک مفصل لق و با لقی‌های چند گانه (الف) موقعیت (ب) سرعت (ج) شتاب لغزنده (د) زاویه (ه) سرعت زاویه‌ای ۵۳

(و) شتاب زاویه‌ای شاتون

شکل (۳-۵): نمودارهای فاز مکانیزم‌های ایده آل، با یک مفصل لق و با لقی‌های چند گانه (الف) $\dot{x}(x)$ (ب) $\dot{\theta}_3(\theta_3)$ ۵۳

شکل (۳-۶): نیروهای تماسی در (بالا) مفصل لق در مکانیزم با لقی منفرد (وسط) اولین مفصل لق در مکانیزم با لقی‌های چند گانه (پایین) دومین مفصل لق در مکانیزم با لقی‌های چند گانه ۵۴

شکل (۳-۷): گشتاور ورودی مورد نیاز برای فراهم آوردن حرکت مورد نظر سیستم در حالت‌های مکانیزم با (الف) یک مفصل لق (ب) دو مفصل لق ۵۵

شکل (۳-۸): نمودار انشقاق برای (الف) θ_3 (ب) $\dot{\theta}_3$ برای تغییر شعاع لقی بین ۰.۴۹۶ تا ۰.۵۰۴ میلی متر ۵۶

شکل (۳-۹): نمودار انشقاق برای (الف) θ_3 (ب) $\dot{\theta}_3$ برای تغییر شعاع لقی بین ۰تا ۱ میلی متر ۵۷

شکل (۳-۱۰): مقطع پوآنکاره به ازای اندازه لقی (الف) ۰.۵ میلی متر(ب) ۰.۶ میلی متر (ج) ۰.۷ میلی متر (د) ۰.۸ میلی متر در مکانیزم لنگ-لغزنده با لقی‌های چند گانه ۵۸

شکل (۳-۱۱): شتاب لغزنده در مکانیزم لنگ-لغزنده با دو مفصل لق (الف) اندازه لقی ۰.۵ میلی متر (رفتار نوسانی) (ب) اندازه لقی ۰.۶ میلی متر (رفتار آشوبناک) ۵۹

شکل (۳-۱۲): مسیر حرکت مرکز ژورنال نسبت به بیرینگ بین سومین و پنجمین ثانیه برای اندازه لقی۰.۵ میلی متر (الف) مفصل لق اول (ب) مفصل لق دوم۰.۶ میلی متر (ج) مفصل لق اول (د) مفصل لق دوم ۶۰

شکل (۳-۱۳): شتاب لغزنده و مقطع پوآنکاره برای مکانیزم صلب با دو مفصل لق و ضریب اصطکاک ۰.۲ ۶۱

شکل (۳-۱۴): شتاب لغزنده و مقطع پوآنکاره برای مکانیزم صلب با دو مفصل لق و ضریب اصطکاک ۰.۴ ۶۲

شکل (۳-۱۵): نمودار فاز برای حالت پایا مکانیزم با دو مفصل لق به ازای اندازه لقی ۰.۵ میلی متر و (الف) بدون اصطکاک (ب) ضریب اصطکاک مفاصل ۰.۲ (ج) ضریب اصطکاک مفاصل ۰.۴ ۶۳

شکل (۳-۱۶): مسیرهای حرکت بی بعد مرکز ژورنال نسبت به بیرینگ در (الف) مفصل لق اول (ب) مفصل لق دوم و (ج) مقطع پوآنکاره بی بعد – به ازای $\overline{K} = 100\ \overline{K}_0$ ۶۶

شکل (۳-۱۷): مسیرهای حرکت بی بعد مرکز ژورنال نسبت به بیرینگ در (الف) مفصل لق اول (ب) مفصل لق دوم و (ج) مقطع پوآنکاره بی بعد – به ازای $\overline{K} = 0.25\ \overline{K}_0$ ۶۶

شکل (۳-۱۸): مسیر حرکت مرکز ژورنال نسبت به بیرینگ در مکانیزم (الف) صلب (ب) انعطاف‌پذیر ۶۹

شکل (۳-۱۹): پاسخ دینامیکی مکانیزم‌های صلب با مفاصل ایده آل، صلب با یک مفصل لق، و انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق ۷۰

شکل (۳-۲۰): نمودارهای فاز مکانیزم‌های ایده آل، صلب با یک مفصل لق و انعطاف پذیر با یک مفصل لق (الف) $\dot{x}(x)$ (ب) $\dot{\theta}_3(\theta_3)$ ۷۱

شکل (۳-۲۱): مقاطع پوآنکاره برای (الف) مکانیزم صلب با مفاصل ایده آل (ب) مکانیزم صلب با مفصل لق (ج) مکانیزم انعطاف‌پذیر با مفصل لق ۷۲

شکل (۳-۲۲): شتاب لغزنده در طول حرکت برای مکانیزم های ایده آل، صلب با یک مفصل لق و انعطاف پذیر با یک مفصل لق ۷۲

شکل (۳-۲۳): نیروی تماسی در مفصل لق در مکانیزم های صلب و انعطاف پذیر ۷۳

شکل (۳-۲۴): گشتاور ورودی برای فراهم آوردن سرعت دورانی ثابت لنگ در مکانیزم های صلب و انعطاف پذیر ۷۳

شکل (۳-۲۵): شتاب لغزنده در مکانیزم انعطاف‌پذیر برای اندازه لقی (الف) ۰.۴ میلی متر (ب) ۰.۵ میلی متر (ج) ۰.۶ میلی متر ۷۵

شکل (۳-۲۶): مقطع پوآنکاره در مکانیزم انعطاف‌پذیر برای اندازه لقی (الف) ۰.۴ میلی متر (ب) ۰.۵ میلی متر (ج) ۰.۶ میلی متر ۷۵

شکل (۳-۲۷): نمودار انشقاق برای (الف) θ_3 – مکانیزم صلب (ب) $\dot{\theta}_3$ – مکانیزم صلب (ج) θ_3 - مکانیزم انعطاف‌پذیر (د) $\dot{\theta}_3$ - مکانیزم انعطاف‌پذیر ۷۶

شکل (۳-۲۸): شتاب لغزنده در مکانیزم انعطاف‌پذیر برای اندازه لقی ۰.۵ میلی متر و ضرایب اصطکاک متفاوت ۷۷

شکل (۳-۲۹): مقاطع پوآنکاره در مکانیزم انعطاف‌پذیر برای اندازه لقی ۰.۵ میلی متر و ضرایب اصطکاک متفاوت (الف) $c_f = 0$ (ب) $c_f = 0.1$ (ج) $c_f = 0.2$ ۷۸

$c_f = 0.3$(د)

شکل (۳-۳۰): (الف) مسیر حرکت بی بعد مرکز ژورنال نسبت به بیرینگ (ب) مقطع پوآنکاره برای $\overline{K} = 100\ \overline{K}_0$ در مکانیزم انعطاف پذیر ۸۰

شکل (۳-۳۱): (الف) مسیر حرکت بی بعد مرکز ژورنال نسبت به بیرینگ (ب) مقطع پوآنکاره برای $\overline{K} = 0.25\ \overline{K}_0$ در مکانیزم انعطاف پذیر ۸۱

شکل (۳-۳۲): انیمیشن ارتعاش شاتون انعطاف‌پذیر یک سر لولا – یک سر آزاد ۸۳

شکل (۳-۳۳): مسیر حرکت مرکز ژورنال نسبت به بیرینگ در مکانیزم صلب (الف) مفصل لق اول (ب) مفصل لق دوم مکانیزم انعطاف‌پذیر (ج) مفصل لق اول (د) مفصل لق دوم ۸۴

شکل (۳-۳۴): پاسخ دینامیکی مکانیزم‌های صلب با مفاصل ایده آل، انعطاف‌پذیر با دو مفصل لق، صلب با دو مفصل لق، و انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق: (الف) موقعیت (د) زاویه (و) سرعت زاویه‌ای (ه) شتاب زاویه‌ای شاتون (ب) سرعت (ج) شتاب لغزنده ۸۵

شکل (۳-۳۵): نمودارهای فاز مکانیزم‌های ایده آل، انعطاف پذیر با دو مفصل لق، صلب با دو مفصل لق و صلب با یک مفصل لق (الف) $\dot{x}(x)$ (ب) $\dot{\theta}_3(\theta_3)$ ۸۶

شکل (۳-۳۶): مقاطع پوآنکاره برای (الف) مکانیزم صلب با مفاصل ایده آل (ب) مکانیزم انعطاف‌پذیر با دو مفصل لق (ج) مکانیزم صلب با دو مفصل لق ۸۷

شکل (۳-۳۷): گشتاور ورودی برای فراهم آوردن سرعت دورانی ثابت لنگ در مکانیزم های انعطاف پذیر با دو مفصل لق، صلب با دو مفصل لق، و انعطاف پذیر با یک مفصل لق ۸۷

شکل (۳-۳۸): شتاب لغزنده در مکانیزم انعطاف پذیر با لقی های چند گانه به ازای اندازه‌های مختلف لقی ۸۸

شکل (۳-۳۹): مقطع پوآنکاره مکانیزم انعطاف پذیر با لقی های چند گانه برای اندازه لقی (الف) ۰.۴ میلی متر (ب) ۰.۵ میلی متر (ج) ۰.۶ میلی متر ۸۸

شکل (۳-۴۰): شتاب لغزنده در مکانیزم انعطاف پذیر با لقی های چند گانه به ازای اندازه لقی ۰.۵ میلی متر و ضرایب اصطکاک متفاوت ۸۹

شکل (۳-۴۱): مقاطع پوآنکاره در مکانیزم انعطاف‌پذیر با مفاصل لق چند گانه برای اندازه لقی ۰.۵ میلی متر و ضرایب اصطکاک متفاوت (الف) $c_f = 0$ (ب) $c_f = 0.1$ ۹۰

(ج) $c_f = 0.2$ (د) $c_f = 0.3$

شکل (۳-۴۲): انیمیشن ارتعاش شاتون انعطاف‌پذیر دو سر آزاد ۹۳

شکل (۳-۴۳): کنترل مکانیزم صلب با یک مفصل لق (کنترل شده بدون استفاده از فعال‌ساز اضافی، اندازه لقی ۰.۱ میلی متر) (الف) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ (ب) سرعت لغزنده (ج) نیروی تماسی (د) شتاب لغزنده (و) گشتاور ورودی (ه) مقطع پوآنکاره ۹۴

شکل (۳-۴۴): کنترل مکانیزم صلب با یک مفصل لق (کنترل شده بدون استفاده از فعال‌ساز اضافی، اندازه لقی ۰.۵ میلی متر) (الف) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ (ب) سرعت لغزنده (ج) نیروی تماسی (د) شتاب لغزنده (و) گشتاور ورودی (ه) مقطع پوآنکاره ۹۴

شکل (۳-۴۵): کنترل مکانیزم صلب با دو مفصل لق (کنترل شده بدون استفاده از فعال‌ساز اضافی، اندازه لقی ۰.۱ میلی متر) (الف) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ در مفصل لق اول (ب) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ در مفصل لق دوم (ج) سرعت لغزنده (د) شتاب لغزنده (ه) نیروی تماسی در مفصل لق اول (و) نیروی تماسی در مفصل لق دوم (ز) گشتاور ورودی (ح) مقطع پوآنکاره ۹۷

شکل (۳-۴۶): کنترل مکانیزم صلب با دو مفصل لق (کنترل شده بدون استفاده از فعال‌ساز اضافی، اندازه لقی ۰.۵ میلی متر) (الف) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ در مفصل لق اول (ب) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ در مفصل لق دوم (ج) سرعت لغزنده (د) شتاب لغزنده (ه) نیروی تماسی در مفصل لق اول (و) نیروی تماسی در مفصل لق دوم (ز) گشتاور ورودی (ح) مقطع پوآنکاره ۹۸

شکل (۳-۴۷): کنترل مکانیزم انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق (کنترل شده بدون استفاده از فعال‌ساز اضافی، لقی ۰.۱ میلی متر) (الف) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ (ب) سرعت لغزنده (ج) نیروی تماسی (د) شتاب لغزنده (ه) گشتاور ورودی (و) مقطع پوآنکاره ۹۹

شکل (۳-۴۸): کنترل مکانیزم انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق (کنترل شده بدون استفاده از فعال‌ساز اضافی، لقی ۰.۵ میلی متر) (الف) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ (ب) سرعت لغزنده (ج) نیروی تماسی (د) شتاب لغزنده (ه) گشتاور ورودی (و) مقطع پوآنکاره ۱۰۰

شکل (۳-۴۹): کنترل مکانیزم انعطاف‌پذیر با دو مفصل لق (کنترل شده بدون استفاده از فعال‌ساز اضافی، اندازه لقی ۰.۱ میلی متر) (الف) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ در مفصل لق اول (ب) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ در مفصل لق دوم (ج) سرعت لغزنده (د) شتاب لغزنده (ه) نیروی تماسی در مفصل لق اول (و) نیروی تماسی در مفصل لق دوم (ز) گشتاور ورودی (ح) مقطع پوآنکاره ۱۰۲

شکل (۳-۵۰): کنترل مکانیزم انعطاف‌پذیر با دو مفصل لق (کنترل شده بدون استفاده از فعال‌ساز اضافی، اندازه لقی ۰.۵ میلی متر) (الف) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ در مفصل لق اول (ب) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ در مفصل لق دوم (ج) سرعت لغزنده (د) شتاب لغزنده (ه) نیروی تماسی در مفصل لق اول (و) نیروی تماسی در مفصل لق دوم (ز) گشتاور ورودی (ح) مقطع پوآنکاره ۱۰۳

شکل (۳-۵۱): کنترل مکانیزم انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق (کنترل شده با استفاده از فعال‌ساز اضافی، اندازه لقی ۰.۵ میلی متر) (الف) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ (ب) سرعت لغزنده (ج) شتاب لغزنده (د) مقطع پوآنکاره (ه) گشتاور فعال ساز اول (و) گشتاور فعال ساز دوم ۱۰۴

شکل (۳-۵۲): گشتاورهای ورودی در روش کنترل مکانیزم با فعال ساز اضافی ۱۰۵

شکل (۳-۵۳): مقایسه اندازه گشتاور ورودی در حالت کنترل بدون استفاده از فعال‌ساز اضافی با مجموع گشتاورهای ورودی در حالت کنترل با استفاده از فعال‌ساز اضافی ۱۰۶

شکل (۳-۵۴): کنترل مکانیزم صلب با دو مفصل لق (کنترل شده با استفاده از فعال‌ساز اضافی، اندازه لقی ۰.۵ میلی متر) (الف) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ در مفصل لق اول (ب) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ در مفصل لق دوم (ج) سرعت لغزنده (د) شتاب لغزنده (ه) نیروی تماسی در مفصل لق اول (و) نیروی تماسی در مفصل لق دوم (ز) گشتاور کنترلی اول (ح) گشتاور کنترلی دوم ۱۰۷

شکل (۳-۵۵): : مقایسه گشتاورهای کنترلی مورد نیاز در حالت‌های یک و دو مفصل لق ۱۰۸

شکل (۳-۵۶): کنترل مکانیزم انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق (کنترل شده با استفاده از فعال‌ساز اضافی، لقی ۰.۵ میلی متر) (الف) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ (ب) سرعت لغزنده (ج) شتاب لغزنده (د) مقطع پوآنکاره (ه) گشتاور فعال ساز ۱ (و) گشتاور فعال ساز ۲ ۱۰۹

شکل (۳-۵۷): مجموع اندازه گشتاورهای ورودی در حالت‌های کنترل بدون استفاده از فعال ساز اضافی و با استفاده از فعال ساز اضافی در مکانیزم انعطاف پذیر با یک مفصل لق ۱۱۰
شکل (۳-۵۸): مقایسه ارتعاشات نوک تیر در حالت‌های کنترل بدون استفاده از فعال ساز اضافی و با استفاده از فعال ساز اضافی ۱۱۱
شکل (۳-۵۹): اثر مدول الاستیک بر مجموع اندازه‌های گشتاورهای ورودی ۱۱۱
شکل (۳-۶۰): کنترل مکانیزم صلب با دو مفصل لق (کنترل شده با استفاده از فعال‌ساز اضافی، اندازه لقی ۰.۵ میلی متر) (الف) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ در مفصل لق اول (ب) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ در مفصل لق دوم (ج) سرعت لغزنده (د) شتاب لغزنده (ه) نیروی تماسی در مفصل لق اول (و) نیروی تماسی در مفصل لق دوم (ز) گشتاور کنترلی اول (ح) گشتاور کنترلی دوم ۱۱۳
شکل (ض-۱): پاسخ‌های به دست آمده برای مکانیزم لنگ-لغزنده صلب با یک مفصل لق توسط اولیایی و قازوی [11] (الف) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ (ب) سرعت لغزنده (ج) شتاب لغزنده (د) گشتاور ورودی ۱۱۷
شکل (ض-۲): مقایسه پاسخ دینامیکی مکانیزم های صلب و انعطاف پذیر توسط ارکایا و اورمای [۴۳] (الف) مسیر حرکت ژورنال نسبت به بیرینگ (ب) سرعت لغزنده (ج) شتاب لغزنده (د) گشتاور ورودی ۱۱۹
شکل (ض-۳): (بالا) شاب لغزنده در مکانیزم صلب (پایین) گشتاور ورودی در مکانیزم صلب ۱۲۰
شکل (ض-۴): (بالا) شاب لغزنده در مکانیزم انعطاف پذیر (پایین) گشتاور ورودی در مکانیزم انعطاف پذیر ۱۲۱

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱: ویژگی‌های فیزیکی مکانیزم صلب ۴۸

جدول ۳-۲: ویژگی‌های مفاصل لق در مکانیزم صلب ۴۸

جدول ۳-۳: تأثیرات سختی کلی، اندازه لقی و ضریب برخورد در مکانیزم صلب با مفاصل لق چند گانه ۶۴

جدول ۳-۴: ویژگی‌های فیزیکی مکانیزم انعطاف‌پذیر ۶۷

جدول ۳-۵: ویژگی‌های مفصل لق در مکانیزم انعطاف پذیر ۶۸

جدول ۳-۶: اثر سختی کلی، اندازه لقی و ضریب برخورد بر پاسخ مکانیزم انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق ۷۹

جدول ۳-۷: اثر مدول الاستیک بر پاسخ مکانیزم انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق ۸۱

جدول ۳-۸: اثر تعداد شکل مدهای انتخابی بر پاسخ مکانیزم انعطاف‌پذیر با یک مفصل لق ۸۲

جدول ۳-۹: اثر سختی کلی، اندازه لقی و ضریب برخورد بر پاسخ مکانیزم انعطاف‌پذیر با دو مفصل لق ۹۰

جدول ۳-۱۰: اثر مدول الاستیک بر پاسخ مکانیزم انعطاف‌پذیر با دو مفصل لق ۹۱

جدول ۳-۱۱: اثر تعداد شکل مدهای انتخابی بر پاسخ مکانیزم انعطاف‌پذیر با دو مفصل لق ۹۲

فهرست علائم

عنوان	علامت
مؤلفه عمودی نیروی تماسی	F_N
سختی نسبی تماس	K
شعاع لقی	r_i
شعاع ژورنال و بیرینگ	R_B, R_J
نسبت پوآسون	ν
مدول یانگ	E
عمق نفوذ	δ
سرعت اولیه برخورد	$\dot{\delta}(-)$
ضریب برخورد	C_e
سرعت مماسی	v_T
تلورانس‌های پایین و بالای سرعت مماسی	ν_0, ν_1
ضریب اصطکاک	C_f
ضریب تصحیح اصطکاک	C_d
مؤلفه مماسی نیروی تماسی	F_T
نیروی تماسی کل	F_N
اندازه نیروی تماسی	Q_c
زاویه نیروی تماسی	α

زاویه نیروی اصطکاک	φ
زاویه اعمال نیروی کل	ψ
سرعت زاویه‌ای	ω
طول لینک iام	L_i
جرم لینک iام	m_i
موقعیت مرکز جرم لینک iام نسبت به نقطه آغاز لینک در راستای طول آن	$a_i L_i$
زاویه لینک iام	θ_i
گشتاور دوم جرمی لینک iام	I_i
موقعیت افقی لغزنده	x
گشتاور ورودی به لینک iام	T_i
انرژی جنبشی	T
انرژی پتانسیل	V
کار	W
مختصه تعمیم‌یافته	q
مختصه بی بعد شده	$-$
مشتق نسبت به زمان	$\cdot$
مشتق نسبت به مکان	$'$
فرکانس طبیعی	ω_n
موقعیت افقی مرکز جرم لینک iام	X_{G_i}
موقعیت عمودی مرکز جرم لینک iام	Y_{G_i}
متغیر پوچ در راستای طول لینک	ξ
اندازه ارتعاش	w

گشتاور دوم سطح لینک iام	I_{s_i}
تابع زمانی در تفکیک گالرکین	$q_i(t)$
تابع مکانی در تفکیک گالرکین	$\varphi_i(x)$