



دانشگاه تبریز

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه مهندسی ساخت و تولید

پایاننامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید

بررسی ارتعاشات اجباری میز ماشین ابزار هگزاپاد تحت نیروهای ماشینکاری

استاد راهنما:

دکتر مهران محبوب خواه

استاد مشاور:

دکتر محمد زادشکویان

پژوهشگر:

سیامک پدram مهر

بهمن ۱۳۸۹

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

نام خانوادگی: پدram مهر	نام: سیامک
عنوان پایاننامه: بررسی ارتعاشات اجباری میز ماشین ابزار هگزپاد تحت نیروهای ماشینکاری	
استاد راهنما: دکتر مهران محبوب خواه	
استاد مشاور: دکتر محمد زادشکویان	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی مکانیک گرایش: ساخت و تولید دانشگاه: دانشگاه تبریز	
دانشکده: مهندسی مکانیک تاریخ فراغت از تحصیل: ۱۳۸۹/۱۱/۱۸ تعداد صفحه: ۹۰	
کلید واژه‌ها: مکانیزم موازی، مکانیزم استوارت، هگزپاد، سینماتیک، دینامیک، ارتعاشات، ماشین ابزار	
<p><b>چکیده</b></p> <p>در این تحقیق، روابط سینماتیکی، دینامیکی و ارتعاشاتی یک مکانیزم موازی با شش درجه آزادی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. تحلیل سینماتیک و دینامیک معکوس مکانیزم مورد نظر با در نظر گرفتن تمامی نیروهای گرانشی، اصطکاکی، کریولیس، اینرسی و نیروهای خارجی با استفاده از روش نیوتن- اویلر انجام شده است. با توجه باینکه در مقالات متعدد ارائه شده توسط محققان، معادلات دینامیکی مکانیزم مورد نظر در نتیجه کاربرد فرضیهایی برای ساده سازی پیچیدگی مسأله دارای برخی اشکالات فنی می باشد؛ در این تحقیق معادلات سینماتیکی و دینامیکی مکانیزم، با کاربرد فرضیهای دقیق و نیز با اصلاح تمام اشکالات فنی و علمی موجود در تحقیقات پیشین ارائه شده است. معادلات دینامیکی بدست آمده در کار حاضر، از نقطه نظر تئوریک، دقیقتر از معادلات دینامیکی حاصل از مطالعات پیشین می باشد. مدلسازی سینماتیکی و دینامیکی مکانیزم مورد نظر با برنامه نویسی در محیط نرم افزار MATLAB انجام شده و اختلاف میان نتایج بدست آمده از این تحقیق و کارهای پیشین مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.</p> <p>ارتعاشات آزاد مکانیزم به دو روش تحلیلی و اجزاء محدود مورد مطالعه قرار گرفته و فرکانسهای طبیعی برای دامنه گسترده ای از تغییرات پیکربندی مکانیزم محاسبه شده اند. در روش تحلیلی از جرم پایه ها صرف نظر شده و فقط استهلاک و سفتی معادل آنها در دستگاه معادلات ارتعاشی مربوط به سکوی متحرک در نظر گرفته شده است. در روش اجزاء محدود نیز تحلیل مودال مکانیزم در محیط Workbench نرم افزار ANSYS انجام شده است. جرم و لختی سکوی متحرک و بار روی آن از جمله متغیرهایی هستند که موجب تغییر در ماتریس جرم سکوی می شوند؛ تغییر در موقعیت و جهتگیری سکوی نیز موجب تغییر در ماتریسهای استهلاک و سفتی آن می شود. بدین ترتیب، با توجه به نقش متغیرها و عوامل مذکور در تغییر فرکانسهای طبیعی، در هر دو روش فرکانسهای طبیعی و شکل مودهای مکانیزم برای موقعیتهای و جهتگیریهای مختلف سکوی در فضای کاری و با در نظر گرفتن جرمهای مختلف روی آن بررسی شده اند.</p>	

ادامه چکیده پایاننامه:

با در نظر گرفتن نیروی خارجی اعمال شده روی سکوی متحرک بصورت یک نیروی سینوسی متغیر با زمان و با فرکانس و دامنه ثابت، ارتعاش اجباری سکو با دو روش تحلیلی و اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفته و میزان جابجاییها و نوسانهای سکو در جهات مختلف حرکتی و با هر دو روش محاسبه شده‌اند. از آنجاییکه شناخت رفتار ارتعاشی و بخصوص پاسخ اجباری مکانیزم حین عملیات ماشینکاری، حائز اهمیت ویژه‌ای در جلوگیری از بروز پدیده تشدید می‌باشد؛ با مدلسازی نیروهای هارمونیک حاصل از عملیات فرزکاری، ارتعاش اجباری مکانیزم تحت نیروهای هارمونیک خشنکاری و پرداختکاری در روشهای فرزکاری مخالف و موافق مورد مطالعه قرار گرفته و دامنه ارتعاشات و فرکانسهای تشدید حاصل از این نیروها نیز محاسبه شده‌اند. با شناخت فرکانسهای تشدید و دامنه نوسانات سکو در اثر نیروهای ماشینکاری اعمال شده روی آن، موقعیتهای مختلفی که قرارگیری سکو در آنها موجب بروز ناپایداری دینامیکی سیستم می‌شود مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت موقعیتهای مناسب برای قرارگیری مرکز سکوی متحرک در شرایط مختلف ماشینکاری ارائه شده است.

تقدیم بہ

پدر عزیزم، مادر فداکارم و ہمسر مہربانم

## تقدیر و تشکر

از راهنماییهای مستمر و دوستانه جناب آقای دکتر محبوب خواه و از مشاوره و همکاری بی دریغ جناب آقای دکتر زادشکویان کمال تشکر را دارم. از تمامی اساتید و دوستان عزیز که در مراحل انجام پایاننامه یاری ام نموده‌اند، سپاسگزارم.

	فهرست مطالب
ج	فهرست شکلها
ه	فهرست جداول
و	فهرست علائم و اختصارات
	<b>بخش اول: مقدمه و پیشینه تحقیق</b>
	<b>فصل اول: مقدمه</b>
۲	۱-۱- مقدمه
۴	۲-۱- پیشینه تحقیق در تحلیل سینماتیک و دینامیک مکانیزم
۵	۳-۱- پیشینه تحقیق در تحلیل ارتعاشات مکانیزم
۹	۴-۱- معرفی مکانیزم موازی تحت بررسی
	<b>بخش دوم: مبانی و روشها</b>
	<b>فصل دوم: تحلیل سینماتیک معکوس مکانیزم</b>
۱۲	۱-۲- مقدمه
۱۲	۲-۲- سینماتیک معکوس موقعیت پایهها
۱۳	۳-۲- سینماتیک معکوس سرعت پایهها
۱۴	۴-۲- سینماتیک معکوس شتاب پایهها
۱۵	۵-۲- سینماتیک نقاط مفصلی
۱۶	۶-۲- تعیین روابط سرعت و شتاب زاویه‌ای هر کدام از پایهها
۲۳	۷-۲- تعیین روابط شتاب خطی مراکز جرم قسمت‌های مختلف هر کدام از پایهها
	<b>فصل سوم: تحلیل دینامیک معکوس مکانیزم</b>
۲۷	۱-۳- مقدمه
۲۷	۲-۳- تحلیل دینامیک معکوس
۲۷	۱-۲-۳- تحلیل دینامیکی یک پایه از مکانیزم
۳۱	۲-۲-۳- تحلیل دینامیکی سکوی متحرک
۳۴	۳-۳- شبیه‌سازی دینامیکی مکانیزم
	<b>فصل چهارم: تحلیل ارتعاشات آزاد مکانیزم</b>
۳۹	۱-۴- مقدمه

۳۹-۲-۴ مدل ارتعاشی مکانیزم تحت بررسی

۴۱-۳-۴ استخراج معادله ارتعاشی مکانیزم بروش تحلیلی

۴۶-۴-۴ بررسی رفتار ارتعاشی مکانیزم به دو روش تحلیلی و اجزاء محدود

۴۶-۵-۴ بررسی فرکانسهای طبیعی سکو با استفاده از نتایج آنالیز مودال تجربی پایه‌ها

### فصل پنجم: تحلیل ارتعاشات اجباری مکانیزم

۵۲-۱-۵ مقدمه

۵۲-۲-۵ بررسی ارتعاش اجباری مکانیزم تحت یک نیروی معین

۵۶-۳-۵ ارتعاش اجباری مکانیزم تحت نیروهای هارمونیک ماشینکاری

۵۷-۱-۳-۵ مدلسازی نیروهای هارمونیک فرزکاری

۵۷-۲-۳-۵ مدلسازی ارتعاشات اجباری مکانیزم تحت نیروهای فرزکاری

### بخش سوم: بحث و نتیجه‌گیری

### فصل ششم: نتایج و پیشنهادها

۶۴-۱-۶ نتایج

۶۶-۲-۶ پیشنهادها

### پیوستها

### پیوست الف: مشخصات فیزیکی مکانیزم

۷۰-الف-۱ مشخصات ابعادی و فیزیکی مکانیزم مورد بررسی در تحلیل سینماتیکی و دینامیکی

۷۲-الف-۲ مشخصات ابعادی و فیزیکی مکانیزم مورد بررسی در تحلیل ارتعاشی

### پیوست ب: محاسبه ماتریس دوران

۷۶-ب-۱ روشهای محاسبه ماتریس دوران

۷۶-ب-۲ محاسبه ماتریس دوران با استفاده از قرارداد مجموعه زوایای اویلری

### پیوست ج: قوانین ضرب داخلی و خارجی

۸۰-ج-۱ قوانین ضرب داخلی و خارجی بردارها و ماتریسها

### پیوست د: محاسبه نیروهای ماشینکاری

۸۲-د-۱ محاسبه نیروهای فرزکاری

۸۶ مراجع



## فهرست شکلها

- شکل ۱-۱- مکانیزم تست تایر گوج [۱۶] ۳
- شکل ۲-۱- مکانیزم موازی تحت بررسی ۹
- شکل ۱-۲- زنجیره برداری یک پایه از مکانیزم ۱۲
- شکل ۲-۲- تصویر شماتیک کامل پایه و محورهای دورانی آن به همراه سینماتیک مفصل یونیورسال ۱۷
- شکل ۳-۲- اندازه سرعت زاویه‌ای پایه‌ها و مؤلفه‌های آن حول محورهای مفصل یونیورسال ۱۹
- شکل ۴-۲- اندازه سرعت زاویه‌ای پایه‌ها و مؤلفه‌های آن حول امتداد پایه و حول امتدادی عمود بر پایه ۱۹
- شکل ۵-۲- اندازه سرعت زاویه‌ای بدست آمده از دو مدل مورد بررسی و اختلاف بین آنها ۲۰
- شکل ۶-۲- اندازه شتاب زاویه‌ای پایه‌ها و مؤلفه‌های آن حول محورهای مفصل یونیورسال ۲۲
- شکل ۷-۲- اندازه شتاب زاویه‌ای پایه‌ها و مؤلفه‌های آن حول امتداد پایه و حول امتدادی عمود بر پایه ۲۲
- شکل ۸-۲- اندازه شتاب زاویه‌ای بدست آمده از دو مدل مورد بررسی و اختلاف بین آنها ۲۳
- شکل ۹-۲- بردارهای موقعیت مراکز جرم قسمت‌های مختلف پایه در چارچوبهای محلی ۲۴
- شکل ۱۰-۲- بردارهای موقعیت مراکز جرم قسمت‌های مختلف پایه در چارچوبهای مفصل یونیورسال و مرجع ۲۴
- شکل ۱-۳- دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر یک پایه از مکانیزم ۲۸
- شکل ۲-۳- دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر قسمت بالای یک پایه از مکانیزم ۲۹
- شکل ۳-۳- زنجیره برداری مربوط به مرکز هندسی و مرکز جرم سکوی متحرک بارگذاری شده ۳۱
- شکل ۴-۳- دیاگرام آزاد سکوی متحرک ۳۲
- شکل ۵-۳- نیروی پایه‌ها در مسیر I، حاصل از دو مدل مورد بررسی و اختلاف بین آنها ۳۵
- شکل ۶-۳- نیروی پایه‌ها در مسیر II، حاصل از دو مدل مورد بررسی و اختلاف بین آنها ۳۵
- شکل ۷-۳- مسیر I، ترمهای مختلف نیرویی در پایه‌ها ۳۶
- شکل ۸-۳- مسیر II، ترمهای مختلف نیرویی در پایه‌ها ۳۶
- شکل ۱-۴- مدل ارتعاشی مکانیزم ۴۰
- شکل ۲-۴- دیاگرام آزاد ارتعاشی مکانیزم ۴۱
- شکل ۳-۴- مدل مش‌بندی شده مکانیزم با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی ۴۶
- شکل ۴-۴- شکل‌های مود مربوط به فرکانسهای طبیعی اول تا ششم مکانیزم حاصل از روش اجزاء محدود (سکوی متحرک در بالاترین موقعیت، بدون جهتگیری و با حداکثر بار) ۴۷

- شکل ۵-۱- مدل مش‌بندی شده مکانیزم به‌مراه شرایط تکیه‌گاهی و نیروهای خارجی اعمال شده روی سکو ۵۳
- شکل ۵-۲-الف- جابجایی سکوی متحرک در راستای محور  $X$ ، در اثر نیروی معین و در فرکانس ۰ تا ۷۰۰ هرتز ۵۴
- شکل ۵-۲-ب- جابجایی سکوی متحرک در راستای محور  $Y$ ، در اثر نیروی معین و در فرکانس ۰ تا ۷۰۰ هرتز ۵۴
- شکل ۵-۲-ج- جابجایی سکوی متحرک در راستای محور  $Z$ ، در اثر نیروی معین و در فرکانس ۰ تا ۷۰۰ هرتز ۵۴
- شکل ۶-۱- محدوده‌های بحرانی برای سرعت دورانی در ابزارهای با تعداد لبه‌های مختلف ۶۶
- شکل ب-۱- زوایای اوپلری  $Z-Y-X$  ۷۷
- شکل د-۱- هندسه برش در عملیات فرزکاری مخالف و موافق ۸۲

## فهرست جداول

- جدول ۴-۱- پیکربندیهای منتخب برای بررسی ارتعاشی مکانیزم ۴۸
- جدول ۴-۲- فرکانسهای طبیعی سکو (Hz) در پیکربندیهای مختلف، حاصل از روشهای تحلیلی و اجزاء محدود ۴۹
- جدول ۴-۳- پیکربندیهای منتخب برای بررسی ارتعاشات مکانیزم با استفاده از نتایج آنالیز مودال تجربی پایه‌ها ۴۹
- جدول ۴-۴- فرکانسهای طبیعی سکو (Hz) در پیکربندیهای مختلف، با استفاده از نتایج آنالیز مودال تجربی پایه‌ها ۵۰
- جدول ۵-۱- فرکانسهای تشدید سکو (Hz) در پیکربندیهای مختلف، حاصل از روشهای تحلیلی و اجزاء محدود ۵۵
- جدول ۵-۲- محدوده حداکثر دامنه‌های ارتعاشات سکو، حاصل از روشهای تحلیلی و اجزاء محدود ۵۶
- جدول ۵-۳- دامنه نیروها و ممانهای فرزکاری اعمال شده به سکو در شرایط ماشینکاری مختلف ۵۸
- جدول ۵-۴- فرکانسهای تشدید سکو (Hz) در شرایط ماشینکاری و پیکربندیهای مختلف ۵۹
- جدول ۵-۵- حداکثر دامنه‌های ارتعاشات سکو در شرایط ماشینکاری و پیکربندیهای مختلف ۵۹
- جدول الف-۱- مشخصات ابعادی و سفتی اجزاء مختلف مکانیزم [۵۰] ۷۳
- جدول الف-۲- نتایج آنالیز مودال تجربی برای استهلاک و سفتی یک پایه از مکانیزم ۷۴

## فهرست علائم و اختصارات

عمق بار محوری	$a$
عمق بار عرضی	$a_e$
نقطه مفصلی نام در محل اتصال سکوی متحرک به پایه	$a_i$
بردار موقعیت نقطه مفصلی نام در محل اتصال سکوی متحرک به پایه در چارچوب مرجع	$\mathbf{a}_i$
بردار موقعیت نقطه مفصلی نام در محل اتصال سکوی متحرک به پایه در چارچوب متحرک	${}^P \mathbf{a}_i$
سرعت نقطه مفصلی نام در محل اتصال سکوی متحرک به پایه	$\dot{\mathbf{a}}_i$
شتاب نقطه مفصلی نام در محل اتصال سکوی متحرک به پایه	$\ddot{\mathbf{a}}_i$
بردار موقعیت مرکز جرم قسمت پایینی پایه نام در چارچوب مرجع	$\mathbf{a}_{di}$
سرعت مرکز جرم قسمت پایینی پایه نام	$\dot{\mathbf{a}}_{di}$
شتاب مرکز جرم قسمت پایینی پایه نام	$\ddot{\mathbf{a}}_{di}$
بردار موقعیت مرکز جرم قسمت بالایی پایه نام در چارچوب مرجع	$\mathbf{a}_{ui}$
سرعت مرکز جرم قسمت بالایی پایه نام	$\dot{\mathbf{a}}_{ui}$
شتاب مرکز جرم قسمت بالایی پایه نام	$\ddot{\mathbf{a}}_{ui}$
سطح مقطع	$A$
نقطه مفصلی نام در محل اتصال سکوی ثابت به پایه	$b_i$
بردار موقعیت نقطه مفصلی نام در محل اتصال سکوی ثابت به پایه در چارچوب مرجع	$\mathbf{b}_i$
مشتق بردار $\mathbf{b}_i$ نسبت به زمان	$\dot{\mathbf{b}}_i$
ضریب اصطکاک ویسکوز در مفصل کشویی	$C_p$
ضریب اصطکاک ویسکوز در مفصل کروی	$C_s$
ضریب اصطکاک ویسکوز در مفصل یونیورسال	$C_u$
ضریب استهلاک مفصل کشویی نام	$C_{ai}$
ضریب استهلاک سکوی ثابت	$C_b$
ضریب استهلاک قسمت پائینی پایه نام	$C_{di}$
ضریب استهلاک مفصل کروی نام	$C_{si}$
ضریب استهلاک قسمت بالایی پایه نام	$C_{ui}$
ضریب استهلاک مفصل یونیورسال نام	$C_{uni}$
مرکز جرم قسمت بالایی هر پایه	$CG_d$
مرکز جرم قسمت پایینی هر پایه	$CG_u$
$\cos(\theta_i)$	$C\theta_i$
بردار نرمال صفحه متشکل از بردارهای $\mathbf{u}_i$ و $\mathbf{v}_i$	$\mathbf{c}_i$
بردار نرمال صفحه متشکل از بردارهای $\mathbf{n}_i$ و $\mathbf{v}_i$	$\mathbf{c}'_i$
قطر ابزار	$D$

چارچوب محلی در پایینترین قسمت هر پایه	$\{D\}$
مدول الاستیسیته	$E$
فرکانس نیروی تحریک در ابزار	$f$
پیشروی بازا هر لبه ابزار	$f_z$
مؤلفه محوری نیروی برشی	$F_a(\varphi)$
نیروی محرک لازم برای پایه نام	$F_{acti}$
مؤلفه شعاعی نیروی برشی	$F_r(\varphi)$
مؤلفه مماسی نیروی برشی	$F_t(\varphi)$
مؤلفه نیروی برشی در امتداد محور X	$F_x(\varphi)$
مؤلفه نیروی برشی در امتداد محور Y	$F_y(\varphi)$
مؤلفه نیروی برشی در امتداد محور Z	$F_z(\varphi)$
فرم ماتریسی نیروی محرک $F_{acti}$ ، نیروهای محرک لازم برای پایهها	$F$
نیروی خارجی اعمال شده روی سکوی متحرک	$F_{ext}$
بردار نیروی وارد بر پایه نام	$F_i$
ماتریس مقدار نیروی محرک لازم برای غلبه بر نیروهای گرانشی، اینرسی، کریولیس، اصطکاکی و خارجی اعمال شده به سکوی متحرک	$F_p$
نیروی اعمال شده از جانب محرکه	$F_{pi}$
ماتریس مقدار نیروی محرک لازم برای غلبه بر نیروهای گرانشی، اینرسی، کریولیس، اصطکاکی و خارجی اعمال شده به پایهها	$F_{podi}$
بردار شتاب جاذبه	$G$
تغییرات ضخامت براده	$h(\varphi)$
ماتریس همانی $3 \times 3$	$I_3$
تانسور لختی قسمت پایینی پایه نام در مختصات مفصل یونیورسال	$I_{di}$
تانسور لختی قسمت بالایی پایه نام در مختصات مفصل یونیورسال	$I_{ui}$
تانسور لختی قسمت پایینی پایه نام در مختصات محلی واقع در مرکز جرم آن قسمت	$I_{doi}$
تانسور لختی قسمت بالایی پایه نام در مختصات محلی واقع در مرکز جرم آن قسمت	$I_{uoi}$
تانسور لختی سکوی متحرک در چارچوب مرجع	$I_p$
تانسور لختی سکوی متحرک در چارچوب متحرک	${}^p I_p$
ماتریس ژاکوبین معکوس	$J^{-1}$
ترانزاده ماتریس ژاکوبین معکوس	$J^{-T}$
سفتی	$K$
ضریب نیروی برشی در جهت محوری	$K_a$
ضریب نیروی برشی در جهت شعاعی	$K_r$

ضریب نیروی برشی در جهت مماسی	$K_t$
ضریب سفتی مفصل کشویی $\bar{\lambda}$ ام	$K_{ai}$
ضریب سفتی سکوی پایینی	$K_b$
ضریب سفتی قسمت پائینی پایه $\bar{\lambda}$ ام	$K_{di}$
ضریب سفتی مفصل کروی $\bar{\lambda}$ ام	$K_{si}$
ضریب سفتی قسمت بالایی پایه $\bar{\lambda}$ ام	$K_{ui}$
ضریب سفتی مفصل یونیورسال $\bar{\lambda}$ ام	$K_{uni}$
طول	$l$
طول پایه $\bar{\lambda}$ ام	$l_i$
اندازه سرعت خطی پایه $\bar{\lambda}$ ام	$\dot{l}_i$
اندازه شتاب خطی پایه $\bar{\lambda}$ ام	$\ddot{l}_i$
ماتریس سرعت خطی پایه‌ها	$\dot{\mathbf{l}}$
ماتریس شتاب خطی پایه‌ها	$\ddot{\mathbf{l}}$
بردار طولی پایه $\bar{\lambda}$ ام در امتداد محور مفصل کشویی مربوط به آن	$\mathbf{L}_i$
جابجایی سکوی پائین در امتداد طولی پایه $\bar{\lambda}$ ام	$\mathbf{l}_{bi}$
جابجایی مرکز جرم قسمت پائینی پایه $\bar{\lambda}$ ام در امتداد طولی آن	$\mathbf{l}_{di}$
جابجایی مرکز مفصل کروی در امتداد طولی پایه $\bar{\lambda}$ ام	$\mathbf{l}_{pi}$
جابجایی مرکز جرم قسمت بالایی پایه $\bar{\lambda}$ ام در امتداد طولی آن	$\mathbf{l}_{ui}$
جرم سکوی ثابت	$m_b$
جرم قسمت پایینی هر پایه	$m_d$
اندازه ممان حول برداری عمود بر محورهای چرخشی مفصل یونیورسال	$m_i$
جرم سکوی متحرک بهمراه جرم بار روی آن	$m_p$
جرم قسمت بالایی هر پایه	$m_u$
ماتریس اینرسی مکانیزم	$\mathbf{M}$
گشتاور خارجی اعمال شده روی سکوی متحرک	$\mathbf{M}_{ext}$
ممان قابل تحمل توسط مفصل یونیورسال حول بردار عمود بر محورهای چرخشی مفصل یونیورسال	$\mathbf{M}_i$
ماتریس اینرسی مربوط به سکوی متحرک	$\mathbf{M}_p$
ماتریس اینرسی مربوط به پایه‌ها	$\mathbf{M}_{pod i}$
سرعت دورانی اسپیندل	$n$
برداریکه پایه $\bar{\lambda}$ ام در امتداد محور مفصل کشویی مربوط به آن	$\mathbf{n}_i$
مشتق بردار $\mathbf{n}_i$ نسبت به زمان	$\dot{\mathbf{n}}_i$
ترانهادۀ $\mathbf{n}_i$	$\mathbf{n}_i^T$
ماتریس پاد متقارن مربوط به بردار $\mathbf{n}_i$	$\tilde{\mathbf{n}}_i$

چارچوب متحرک	$\{P\}$
توصیفی از بردار ${}^P \mathbf{a}_i$ در چارچوب مرجع	$\mathbf{q}_i$
مشتق بردار $\mathbf{q}_i$ نسبت به زمان	$\dot{\mathbf{q}}_i$
ماتریس پاد متقارن مربوط به بردار $\mathbf{q}_i$	$\tilde{\mathbf{q}}_i$
بردار موقعیت مرکز جرم سکوی متحرک به همراه بار روی آن در چارچوب مرجع	$\mathbf{r}$
بردار موقعیت مرکز جرم سکوی متحرک به همراه بار روی آن در چارچوب متحرک	$\mathbf{r}_o$
ماتریس پاد متقارن مربوط به بردار $\mathbf{r}$	$\tilde{\mathbf{r}}$
بردار موقعیت مرکز جرم قسمت پایینی پایه در مختصات مفصل یونیورسال	$\mathbf{r}_{di}$
بردار موقعیت مرکز جرم قسمت بالایی پایه با مبدأ منطبق بر مبدأ مختصات مفصل	$\mathbf{r}_{ui}$
بردار موقعیت مرکز جرم قسمت بالایی پایه در مختصات مفصل یونیورسال	$\mathbf{r}'_{ui}$
بردار موقعیت مرکز جرم قسمت پایینی پایه در چارچوب محلی	$\mathbf{r}_{doi}$
بردار موقعیت مرکز جرم قسمت بالایی پایه در چارچوب محلی	$\mathbf{r}_{uoi}$
ماتریس دوران $3 \times 3$ نشان دهنده جهتگیری چارچوب متحرک نسبت به چارچوب مرجع ( $\mathbf{R}_{Z'Y'X'}$ )	$\mathbf{R}$
ماتریس دوران حول محور X باندازه $\theta_x$	$\mathbf{R}_X(\theta_x)$
ماتریس دوران حول محور Y باندازه $\theta_y$	$\mathbf{R}_Y(\theta_y)$
ماتریس دوران حول محور Z باندازه $\theta_z$	$\mathbf{R}_Z(\theta_z)$
$\sin(\theta_i)$	$S\theta_i$
زمان	$t$
ممان برشی لحظه‌ای اسپیندل	$T_c(\varphi)$
ماتریس انتقال	$\mathbf{T}_i$
بردار یکه نشان دهنده محور ثابت مفصل یونیورسال	$\mathbf{u}_i$
ماتریس پاد متقارن مربوط به بردار $\mathbf{u}_i$	$\tilde{\mathbf{u}}_i$
ترانهاده $\mathbf{u}_i$	$\mathbf{u}_i^T$
چارچوب محلی در بالاترین قسمت هر پایه	$\{U\}$
سرعت برشی	$\mathbf{V}_c$
بردار یکه در محور دیگر مفصل یونیورسال و عمود بر بردارهای $\mathbf{u}_i$ و $\mathbf{n}_i$	$\mathbf{v}_i$
چارچوب مرجع	$\{W\}$
بردار موقعیت مرکز سکوی متحرک در چارچوب مرجع	$\mathbf{X}$
سرعت خطی مرکز سکوی متحرک در چارچوب مرجع	$\dot{\mathbf{X}}$
شتاب خطی مرکز سکوی متحرک در چارچوب مرجع	$\ddot{\mathbf{X}}$
بردار موقعیت مرکز جرم سکوی متحرک به همراه بار روی آن در چارچوب مرجع با مبدأ منطبق بر مبدأ	$\mathbf{X}_g$
چارچوب مرجع	
شتاب مرکز جرم سکوی متحرک به همراه بار روی آن	$\ddot{\mathbf{X}}_g$

تعداد لبه‌های برشی ابزار	$Z$
اندازه مؤلفه شتاب زاویه‌ای پایه نام حول امتداد پایه	$\alpha_{ti}$
اندازه مؤلفه شتاب زاویه‌ای پایه نام حول محور $\mathbf{u}_i$	$\alpha_{ui}$
اندازه مؤلفه شتاب زاویه‌ای پایه نام حول محور $\mathbf{v}_i$	$\alpha_{vi}$
شتاب زاویه‌ای سکوی متحرک در چارچوب مرجع	$\boldsymbol{\alpha}$
شتاب زاویه‌ای پایه نام	$\boldsymbol{\alpha}_{li}$
مؤلفه شتاب زاویه‌ای پایه نام حول امتدادی عمود بر پایه	$\boldsymbol{\alpha}_{ni}$
زاویه لحظه‌ای درگیری ابزار با قطعه	$\varphi$
زاویه خروج ابزار از قطعه	$\varphi_{ex}$
زاویه گام ابزار یا فاصله زاویه‌ای بین دو لبه مجاور ابزار	$\varphi_p$
زاویه جاروب در ناحیه برش	$\varphi_s$
زاویه خروج ابزار به قطعه	$\varphi_{st}$
ماتریس شامل نیروهای گرانشی، اینرسی، کریولیس و اصطلاحی مکانیزم	$\boldsymbol{\eta}$
ماتریس شامل نیروهای گرانشی، اینرسی، کریولیس و اصطلاحی وارد به سکوی متحرک	$\boldsymbol{\eta}_p$
ماتریس شامل نیروهای گرانشی، اینرسی، کریولیس و اصطلاحی وارد به سکوی پایه‌ها	$\boldsymbol{\eta}_{pod i}$
زوایای اوپلری	$\theta_x, \theta_y, \theta_z$
فرکانس مربوط به نیرو و ممان سینوسی	$\omega$
اندازه مؤلفه سرعت زاویه‌ای پایه نام حول امتداد پایه	$\omega_{ti}$
اندازه مؤلفه سرعت زاویه‌ای پایه نام حول محور $\mathbf{u}_i$	$\omega_{ui}$
اندازه مؤلفه سرعت زاویه‌ای پایه نام حول محور $\mathbf{v}_i$	$\omega_{vi}$
سرعت زاویه‌ای سکوی متحرک در چارچوب مرجع	$\boldsymbol{\omega}$
سرعت زاویه‌ای پایه نام	$\boldsymbol{\omega}_{li}$
مؤلفه سرعت زاویه‌ای پایه نام حول امتدادی عمود بر پایه	$\boldsymbol{\omega}_{ni}$



بخش اول: مقدمه و پیشینه تحقیق

## فصل اول: مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

در این تحقیق، سینماتیک، دینامیک و ارتعاشات یک مکانیزم موازی<sup>۱</sup> بر پایه سکوی استوارت<sup>۲</sup> [۱] مورد بررسی قرار گرفته است. مکانیزم مورد نظر با داشتن قابلیت‌های فراوانی چون سفتی زیاد، دقت زیاد، نسبت تحمل بار به وزن زیاد، دارا بودن شش درجه آزادی حرکتی و مانورپذیری زیاد، در زمینه‌های مختلف صنعتی نظیر گذاشت و برداشت دقیق قطعات، استفاده از آن بعنوان مستهلک کننده ارتعاشات، شبیه‌سازهای پرواز و بخصوص در ساخت ماشینهای ابزار پیشرفته مورد استفاده قرار گرفته و بعنوان یکی از ابزارهای متحول کننده سیستمهای ساخت و تولید محسوب می‌شود. ساختارهای مکانیزم موازی آن دسته از سازه‌هایی می‌باشند که شامل تعدادی میله (پایه) با اتصال موازی بوده و ارتباط دو سکو توسط این میله‌ها برقرار می‌گردد. کنترل و موقعیت دهی سکو می‌تواند با روشهای مختلف صورت پذیرد، که توسط محققین مختلف روابط حاکم بر هر کدام نیز ارائه شده است.

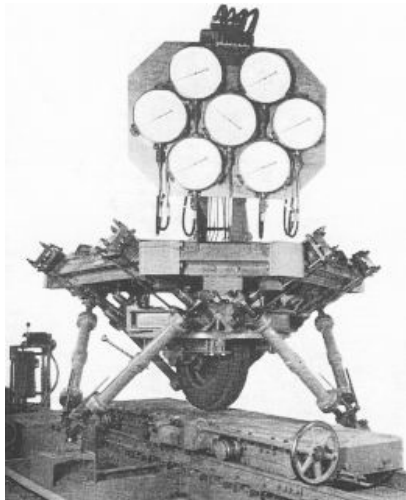
از پرکاربردترین نوع این مکانیزم‌ها، هگزاپادهایی می‌باشند که در آن از شش پایه که بصورت مفاصل کشویی در هم حرکت کرده و تغییر طول می‌دهند (عملگرهای خطی)، استفاده شده است. این دسته از هگزاپادهای بدلیل استفاده از ترتیب مفاصل یونیورسال، کشویی و کروی بنام مکانیزم موازی UPS نیز معروفند. در این نوع مکانیزم‌های موازی حرکت خطی عملگرها بواسطه شش مفصل یونیورسال (با دو درجه آزادی) که به سکوی پایین متصلند و شش مفصل کروی (با سه درجه آزادی) که به سکوی بالا متصلند به حرکت خطی سکوی متحرک در سه راستا و دوران حول سه محور بطور همزمان تبدیل می‌شود.

در سال ۱۸۰۰ میلادی تحقیقاتی در زمینه سفتی این مکانیزم توسط کوشی<sup>۵</sup> انجام گرفت. طبق همان منبع بعدها در سال ۱۹۴۹، گوج<sup>۶</sup> شبیه به چنین مکانیزمی را بمنظور تست تایر ماشین مورد استفاده قرار داد. در سال ۱۹۶۵، مطابق

- 
1. Parallel mechanism
  2. Stewart platform
  3. Cauchy
  4. Gough

منبع [۱] بطور کاملاً گسترده تر، در شبیه ساز هواپیما از این مکانیزم استفاده نمود و از آن به بعد، این مکانیزم بنام سکوی استوارت معروف شد.

اولین وسیله بر پایه مکانیزم موازی، مطابق همان منبع یک روبات کوچک بود که توسط مک کالیون<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۹ ساخته شد. در دهه های بعدی همراه با پیشرفت علوم و تکنولوژی، از این مکانیزم بعنوان یک جانشین بسیار کارا برای بازوهای روباتهای سری استفاده شد.



شکل ۱-۱- مکانیزم تست تایر گوج [۱۶]

از جمله موارد استفاده روباتهای با ساختار مکانیزم موازی، استفاده در شبیه سازها، جراحی های دقیق، موقعیت دهی آنتنهای مخابراتی، ماشینهای ابزار و ماشینکاریهای دقیق و... می باشد.

در زمینه بکارگیری هگزاپادها در ماشینهای ابزار، در سطح کشور تا کنون تحقیق و مطالعه جدی صورت نگرفته است. در حالیکه در بخش استفاده در شبیه ساز، تحقیقاتی در دانشگاههای مطرح کشور صورت پذیرفته است. گمان می رود علت عمده نپرداختن به استفاده از این مکانیزم در ماشینهای ابزار، دقت میکرونی است که در هنگام ماشینکاری از مجموعه انتظار می رود. در حالیکه در سایر موارد، دقت در حد میلیمتر نیز برای کاربر بسنده می نماید. حال آنکه در سطح بین المللی سازندگان بزرگ ماشینهای ابزار، مانند هگزل<sup>۱</sup> و اینگرسول<sup>۲</sup> و همچنین دانشگاههای صنعتی و مراکز تحقیقاتی صاحب نام نظیر انیستیتو فدرال سوییس، طی چند سال اخیر به این مسئله پرداخته اند.

---

1. Mc Callion  
2. Hexel  
3. Ingersol