بسم الله الرحمن الرحيم

٢٠٣٣
ع ح ب د ر
(٢)

٣٨٧١٨

۱۳۸۰ /۱۰/ ۱۲

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکدهٔ فنی و مهندسی

رسالهٔ دکتری مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی)

تحلیل دینامیکی و ارتعاشی رباتهای انعطاف پذیر سه بعدی بامفاصل لولائی و کشوئی

علی اکبر پیرمحمدی

015607

استاد راهنما

دکتر سیامک اسماعیل زاده خادم

۳۸۷۱۵

تابستان ۱۳۸۰

۳۸۷۱۵

دانشگاه‌تربیت مدرس

تاییدیه هیات داوران

آقای **علی‌اکبر پیرمحمدی** رساله دکتری ۲۴ واحدی خود را با عنوان **تحلیل دینامیکی و ارتعاشی رباتهای انعطاف‌پذیر سه بعدی با مفاصل لولائی و کشوئی** در تاریخ **۸۰/۷/۲۵** ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهائی این رساله را از نظر فرم و محتوی تایید و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی **مکانیک** باگرایش **طراحی‌کاربردی** پیشنهاد می‌کنند. ۱۸ب۷

اعضای هیات داوران	نام و نام خانوادگی	امضاء
۱ـ استاد راهنمـــا:	آقای دکتر اسماعیل‌زاده‌خادم	
۲ـ استادان مشـــاور:	ـــــ	
	ـــ	
۳ـ استادان ممتحن:	آقای دکتر بهروش	
	آقای دکتر مقدم	
	آقای دکتر بختیاری‌نژاد	
	آقای دکتر غفاری	
۴ـ مدیـــر گـــروه :	آقای دکتر قضاوی	
(یا نماینده گروه تخصصی)		

بسمه تعالی

آیین‌نامهٔ چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس، مبیّن بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

مادّهٔ ۱ در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

مادّهٔ ۲ در صفحهٔ سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد/رسالهٔ دکتری نگارنده در رشتهٔ ..... است که در سال ..... در دانشکدهٔ ..... دانشگاه تربیت مدرّس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ..... ، مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ..... و مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ..... از آن دفاع شده است.»

مادّهٔ ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

مادّهٔ ۴ در صورت عدم رعایت مادّهٔ ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرّس، تأدیه کند.

مادّهٔ ۵ دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در مادّهٔ ۴ را از محلّ توقیف کتابهای عرضه‌شدهٔ نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

مادّهٔ ۶ اینجانب [illegible] دانشجوی رشته [illegible] مقطع دکتری تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام‌خانوادگی:

تاریخ و امضا: ۲۸/ ۶/ ۸۰

تقدیم

به اولین معلمانم، پدر و مادر عزیزم

به خاطر تشویقها و حمایتهای بیدریغشان

به همسر مهربانم

به خاطر همکاری، همراهی و فداکاریش

تقدیر و تشکر

با سپاس از خداوند متعال و با ارج نهادن به مقام شـــهدای اسـلام بـه ویـژه شـهدای میـهن اسلامیمان که حضور در موقعیت کنونی مرهون ایثار و فداکاری آنـها اسـت؛ بـر خـود لازم می‌دانم که از زحمات بی‌دریغ جناب آقای دکتر اسماعیل زاده خادم که راهنمـائی رسـاله را بر عهده داشته‌اند تشکر نموده و توفیقات روز افزون ایشان را از ایزد منان مسئلت نمایم.

وظیفهٔ خود می‌دانم که از دوست و همکلاسی خود جنـاب آقـای مـهندس موسـی رضـائی بخاطر همراهی و راهنمائیهای ارزشمندشان تشکر نمایم.

در پایان از تمامی اساتیدی که افتخار شاگردی آنها را داشته و آنچه نگاشته‌ام به مدد و یاری آنها بوده صمیمانه سپاسگزارم.

چکیده

در این رساله مدلی برای ربات انعطاف پذیر سه بعدی ارائه شده و با استفاده از آن، معادلات سینماتیک و دینـامیک استخراج گردیده‌اند. ربات به گونه‌ای مدلسازی شده که در آن ارتعاشات طولی، عرضی در دو صفحهٔ عمود بـر هـم و همچنین ارتعاشات پیچشی در نظر گرفته شود. در مدل مذکور مفاصل کشوئی نیز در ساختار ربات در نظـر گرفتـه شده است. مدلسازی با استفاده از بازوهای مجازی صلب انجام شده‌است به این ترتیب که حرکـت ربـات ترکیبـی از دو حرکت صلب و الاستیک می‌باشد. بازوهای مجازی صلب، حرکت خود را از مفاصل و محرکهای متصل به مفـاصل گرفته و تغییر مکان، سرعت و شتاب نقطهٔ انتهائی آنها تحت تاثیر تغییر مکان الاستیک بازوی واقعی قرار می‌گیرد و این تغییرات در حرکت بازوهای دیگر موثر خواهد بود.

معادلات استخراج شده رفتار دینامیکی و ارتعاشاتی رباتهای انعطاف پذیر سه بعدی را بیان می‌کنند. ایـن معـادلات وابسته به هم بوده و دستگاه معادلاتی را تشکیل می‌دهند که دارای معادلات دیفرانسیل جزئـی غـیر خطـی و غـیر همگن با ضرایب وابسته به زمان بیان می‌باشد. شرایط مرزی این دستگاه معادلات نیز غیر خطی بوده و تـابع زمـان می باشند.

در صورت وجود یک بازوی متصل به مفصل کشوئی در پیکره یک ربات، نمی تـوان معـادلات دیفرانسـیل را بـه دو بخش زمانی ومکانی تجزیه کرد زیرا فرکانسهای طبیعی و مدهـای ارتعاشـی تـابعی از زمـان خواهنـد بـود. در ایـن تحقیق با استفاده از تئوری اغتشاشات روش نوینی ارائه شده که بتـوان بـا اسـتفاده از آن معـادلات ارتعاشـی را بـه صورت پارامتری حل نمود. در این رساله نشان داده شده است که می توان مدهای ارتعاشی بازوی متصل به مفصـل کشوئی را در هر لحظه با تیر یک سرگیردار معادل مدل نموده و با دقت خوبی از آن مدلها برای حل مساله اسـتفاده کرد. برای نشان دادن نحوه کاربرد این روش، چند ربات انعطاف پذیر سه بعدی با مفاصل لولائی و کشـوئی در نظـر گرفته شده و معادلات دینامیکی آن با روش تئوری اغتشاشات حل شده است. با استفاده از نتایج حاصلـه، رباتـهای مذکور شبیه سازی شده و رفتار ارتعاشی آن توسط نمودارهائی نشان داده شده است.

با استفاده از MAPLE برنامه‌هائی نوشته شده است که جهت استخراج و حل معادلات دینامیکی و ارتعاشی رباتـها بکار می‌رود. این برنامه‌ها حتی‌الامکان به صورت کلی نوشته شده و کافی است که پارامترهای مربوط به یـک ربـات در اول برنامه وارد شود. با تغییرات جزئی در برنامه می‌توان آنرا برای ربات دلخواه دیگر مورد استفاده قرار داد.

کلید واژه: ***ربات سه بعدی، انعطاف پذیر، دینامیک، ارتعاشات، مفاصل لولائی و کشوئی.***

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول- کلیات	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۲ مروری بر مطالعات انجام گرفته	۵
۱-۳ جزئیات بیشتر در باره مطالب مورد مراجعه در رساله	۹
۱-۳-۱ بررسی تیرها با تکیه گاههای کشوئی	۹
۱-۳-۲ بررسی رباتهای سه بعدی	۱٤
فصل دوم – مروری بر ارتعاشات تیرهای الاستیک با شرایط مرزی مختلف و روشهای گسسته سازی و عددی	۱۹
۲-۱ مقدمه	۲۰
۲-۲ بررسی ارتعاش پیچشی بازوی ربات	۲۱
۲-۳ توابع ویژهٔ یک تیر با شرایط مرزی Fixed-Mass	۲۲
۲-۳-۱ پیچش تیر باشرایط مرزی Fixed - Mass	۲۲
۲-۳-۲ خمش تیر اویلر برنولی	۲۳
۲-٤ توابع ویژه برای مفاصل کشوئی	۲٤
۲-۵ حل تحلیلی و محاسبهٔ جواب معادلهٔ دیفرانسیل	۲٤
۲-٦ روش ایستگاهی برای حل بازوی انعطاف پذیر با مفصل کشوئی	۲٦
۲-۷ ترکیب ارتعاش خمشی و پیچشی	۳۲

۲-۸ ترکیب ارتعاش خمشی و پیچشی تیری با مفصل کشوئی ۳۵

۲-۹ نتایج عددی ۴۰

۲-۱۰ جمع بندی و نتیجه‌گیری ۴۴

فصل سوم - استخراج معادلات دینامیکی و ارتعاشی رباتهای انعطاف پذیر سه بعدی ۴۶

۳-۱ مقدمه ۴۷

۳-۲ سینماتیک رباتهای انعطاف‌پذیر سه بعدی ۴۷

۳-۲-۱ حرکت حاصل از تغییر شکل بازوها ۴۸

۳-۲-۲ حرکت ربات به صورت یک جسم صلب ۵۲

۳-۳ دینامیک ۵۹

۳-۳-۱ روش حل مساله ۶۰

۳-۳-۲ معادلات دینامیکی ۶۳

۳-۲-۳-۱ حرکت مفصلی ربات ۶۶

۳-۲-۳-۲ ارتعاش طولی ۶۶

۳-۲-۳-۳ ارتعاش پیچشی ۶۶

۳-۲-۳-۴ ارتعاش عرضی در صفحهٔ xy ۶۷

۳-۲-۳-۵ ارتعاش عرضی در صفحهٔ xz ۶۷

۳-۴ جمع بندی و نتیجه‌گیری ۶۸

فصل چهارم – حل معادلات دینامیکی و ارتعاشی رباتهای انعطاف پذیر سه بعدی ۷۰

۴-۱ مقدمه ۷۱

۴-۲ مدلسازی ریاضی ربات سه بعدی ۷۲

۴-۲-۱ معادلات حرکت دینامیکی ربات انعطاف پذیر ۷۳

٤-٣ ساده سازی معادلات دینامیکی حاکم بر ربات سه بعدی انعطاف پذیر ٧٦

٤-٤ حل تحلیلی معادلات دینامیکی ربات سه بعدی با دو درجه آزادی ٨٦

٤-٥ حل بخش زمانی معادلات ارتعاشی با استفاده از روش تئوری اغتشاشات ٩٢

٤-٦ معادلات دینامیکی ربات سه درجه آزادی با مفاصل لولائی و کشوئی ٩٨

٤-٧ حل معادلات دینامیکی ربات از طریق تئوری اغتشاشات ١٠٢

٤-٨ معادلات دینامیکی ربات سه درجه آزادی با جرم متمرکز در مچ ربات ١١٠

٤-٩ بحث و نتیجه گیری ١٢٤

فصل پنجم ـ بحث و نتیجه گیری ١٢٦

٥-١ مقدمه ١٢٧

٥-٢ بررسی دقت روش ١٢٧

٥-٣ مقایسه با رباتهای صلب ١٣٠

٥-٤ نتایج حاصل از رساله ١٣٣

٥-٥ پیشنهاد برای ادامهٔ تحقیق ١٣٥

منابع و مراجع ١٣٦

فهرست علائم انگلیسی

$\bar{a}$ بردار شتاب

A_k سطح مقطع بازوی k

D_k انرژی شتاب المان جرم برروی بازوی k

dm_k المان جرم برروی بازوی k

EI سختی خمشی

E_k مدول یانگ

$\bar{f}_{const}$ نیروهای قیدی

$\bar{f}_{ext}$ نیروی خارجی موثر بر سیستم

G انرژی شتاب سیستم

$\bar{g}$ بردار شتاب جاذبه

G_i مدول برشی

GJ(x) سختی پیچشی

G_k مدول برشی

I(x) ممان اینرسی قطبی جرم بر واحد طول

I_D ممان اینرسی قطبی جرم

I_k نقطه ای واقع بر روی بازوی مجازی صلب

I_{pi} ممان قطبی سطح مقطع بازوی k

I_{yk} ممان دوم سطح از سطح مقطع بازوی k

I_{zk} ممان دوم سطح از سطح مقطع بازوی k

J(x) ممان اینرسی قطبی سطح مقطع

J_k نقطه ای واقع بر روی بازوی انعطاف پذیر

J_L مقدار اینرسی جرم متمرکز در انتهای تیر

K_k انرژی جنبشی المان جرم برروی بازوی k

L طول تیر

M ممان خمشی

m جرم بر واحد طول

M_L مقدار جرم متمرکز در انتهای تیر

M_T گشتاور پیچشی

Q نیروی برشی

q_k بیانگر تغییر محرک بازو (دوران در مفاصل لولائی و تغییر مکان خطی در مفاصل کشوئی)

S_i نقطهٔ منطبق بر مرکز جرم بازوی صلب مجازی

S_{irot} نقطهٔ منطبق بر مرکز جرم رتور

T نیروی محوری

t زمان

U(t) سرعت تغییر طول تیر

u_{flex} توان نیروهای الاستیک

u_{grav} توان نیروهای جاذبه

u_k تغییر مکان طولی بازوی k

$\vec{V}$ بردار سرعت

v_k تغییر مکان عرضی بازوی k

w_k تغییر مکان عرضی بازوی k

$x_k y_k z_k$ دستگاه مختصات متصل شده بر ابتدای بازوی k

فهرست علائم یونانی

$\vec{\varepsilon}_k$ شتاب زاویه ای دستگاه مختصات

$\vec{\varphi}_k$ بردار دوران سطح مقطع بازوی k

$\vec{\varphi}_{xk}$ بردار دوران سطح مقطع بازوی k در راستای محور x (پیچش بازو)

$\vec{\varphi}_{yk}$ بردار دوران سطح مقطع بازوی k در راستای محور y

$\vec{\varphi}_{zk}$ بردار دوران سطح مقطع بازوی k در راستای محور z

$\vec{\gamma}_k$ سرعت زاویه ای سطح مقطع بازوی k

$\vec{\kappa}_k$ بردار تغییر مکان الاستیک بازوی k

$\vec{\kappa}_{k1}$ بخشی از $\vec{\kappa}_k$ که حاصل تغییر مکان خط مرکزی تیر است

$\vec{\kappa}_{k2}$ بخشی از که حاصل دوران نسبی سطح مقطع حول محور x_k است

ρ_k جرم حجمی بازوی k

τ گشتاور محرکهٔ هر بازو

ω فرکانس طبیعی

$\xi_k\eta_k\zeta_k$ دستگاه مختصات متصل شده بر انتهای بازوی صلب مجازی k

$\xi_k\eta_k\zeta_k$ دستگاه مختصات متصل شده بر انتهای بازوی

فهرست اشکال

عنوان شکل	صفحه
شکل ۱-۱: مدل ساده‌ای از یک ربات با مفصل کشوئی	۱۰
شکل ۲-۱: مدلی از ربات با دو ارتعاش خمشی در دو راستای عمود برهم	۱۱
شکل۳-۱: مدل توسعه یافته از بازوی متصل به مفصل کشوئی با دو ارتعاش خمشی عمود بر هم	۱۲
شکل ٤-۱: المانی از یک تیر	۱۳
شکل ٥-۱: تیر متصل به مفصل کشوئی با شرط مرزی Clamped-Mass	۱٤
شکل ٦-۱: دستگاه مختصات متصل بر ربات بر اساس Denavit-Hartenberg	۱٦
شکل ۷-۱: ربات کروی RRP	۱۷
شکل ۸-۱: نمونه‌ای از یک ربات ٦ درجه آزادی با مفاصل لولائی و کشوئی	۱۸
شکل ۱-۲: تیری با شرایط مرزی Clamped-Mass	۲۲
شکل ۲-۲: ایستگاه i	۲٦
شکل ۳-۲: میدان i	۲٦
شکل ٤-۲: دیاگرام آزاد باقیماندهٔ تیر	۲۸
شکل ٥-۲: تیر مدلسازی شده با دو میدان	۳۱
شکل ٦-۲: میدان i برای ترکیب ارتعاش خمشی و پیچشی	۳۲
شکل ۷-۲: ایستگاه i برای ترکیب ارتعاش خمشی و پیچشی	۳۲
شکل ۸-۲: میدان i برای ترکیب ارتعاش خمشی و پیچشی با طول متغیر	۳٥
شکل ۹-۲: ایستگاه i برای ترکیب ارتعاش خمشی و پیچشی با طول متغیر	۳٥
شکل۱۰-۲: تیر مدلسازی شده با سه میدان	۳۹
شکل ۱۱-۲ مقایسه شکل مد ارتعاشی اول	٤۱

عنوان شکل	صفحه
شکل ۱۲-۲ مقایسه شکل مد ارتعاشی دوم	٤١
شکل ۱۳-۲ مقایسه شکل مد ارتعاشی سوم	٤٢
شکل ١٤-٢: تغییر فرکانس طبیعی اول برای تیر با طول متغییر	٤٣
شکل ١٥-٢: تغییر فرکانس طبیعی دوم برای تیر با طول متغییر	٤٣
شکل ١-٣: مدلسازی تغییر شکل بازو	٤٨
شکل ٢-٣: دستگاههای مختصات متصل به ربات	٥٣
شکل ٣-٣: نمای جانبی بازوی ربات	٥٣
شکل ١-٤: نحوهٔ مدلسازی بازوی ربات	٧٢
شکل٢-٤: نحوهٔ اتصال دستگاه‌های مختصات به بازوهای ربات	٧٣
شکل ٣-٤: نمای جانبی بازوی انعطاف پذیر ربات	٧٦
شکل ٤-٤: ساختار یک ربات دو درجه آزادی	٨٦
شکل ٥-٤: نمای جانبی بازوی دوم	٨٦
شکل ٦-٤: رفتار توابع جزء h_r و g_r	٩٦
شکل ٧-٤: دامنهٔ ارتعاشی در دو صفحهٔ عمود برهم برای مد ارتعاشی اول	٩٦
شکل ٨-٤: رفتار توابع جزء برای مد ارتعاشی دوم	٩٧
شکل ٩-٤: دامنهٔ ارتعاشی در دو صفحهٔ عمود برهم برای مد ارتعاشی دوم	٩٧
شکل ١٠-٤: ارتعاشات بازوی ربات	٩٨
شکل ١١-٤ شماتیک یک ربات سه درجه آزادی با یک مفصل کشوئی و دومفصل لولائی	٩٨
شکل ١٢-٤: تغییر فرکانسهای طبیعی برحسب زمان	١٠٦
شکل ١٣-٤: دامنه ارتعاشات بازوی ربات که به تفکیک ترسیم شده اند	١٠٧