

بنام خدا

به یاد عزیزانی که در راه رسیدن به آرمانهای مقدس شان از خون خود گذشتند.



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی هوافضا  
پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان پایان نامه:

شبیه سازی سیستمهای کنترلی موتور توربو بوجت و تاثیر آن بر عملکرد موتور

ارائه دهنده:

علیرضا عبدالهی طرقله

استاد راهنما:

دکتر طوسی

استاد مشاور:

دکتر برومند

مهر ۱۳۸۶

بسمه تعالی

شماره: .....

تاریخ: .....

معاونت پژوهشی  
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

فرم اطلاعات پایان نامه  
کارشناسی ارشد و دکترا



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

مشخصات دانشجوی

معادل  بورسیه  دانشجوی آزاد

نام و نام خانوادگی: علیرضا عبدالمهی

شماره دانشجویی: ۸۴۱۲۹۰۰۳

رشته تحصیلی: مهندسی هوافضا (جلوبرندگی) دانشکده مهندسی هوافضا

نام و نام خانوادگی استاد راهنما: دکتر مسگر پور طوسی

عنوان به فارسی: شبیه سازی سیستمهای کنترلی موتور توربوجت و تاثیر آن بر عملکرد موتور

Simulation and Analysis of Turbojet Engine Control System

عنوان به انگلیسی:

on Transient Performance

کاربردی  بنیادی  توسعه‌ای  نظری

نوع پروژه  
کارشناسی ارشد \*  
دکترا

تعداد واحد: ۶

تاریخ خاتمه: 86/۸/1

تاریخ شروع: 85/۷/۱۵

سازمان تأمین کننده اعتبار:

واژه‌های کلیدی به فارسی: موتور توربین گاز - سرج - شبکه عصبی - منطق فازی - هوش مصنوعی

واژه‌های کلیدی به انگلیسی: Surge-Neural Network-Fuzzy Logic-Artificial Intelligence

Gas Turbine Engine

نظرها و پیشنهادهای به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه:

استاد راهنما: دکتر مسگر پور طوسی

دانشجو: علیرضا عبدالمهی

تاریخ:

امضاء استاد راهنما:

نسخه ۱: معاونت پژوهشی

نسخه ۲: کتابخانه و به انضمام دو جلد پایان نامه به منظور تسویه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

تقدیم به همسر مهربانم

با تشکر صمیمانه از جناب آقای دکتر طوسی که با پیشنهاد این پایان نامه به من، و تلاشها و راهنماییهای ایشان در زمینه پیشبرد این پایان نامه، و ایجاد مقدمات حضورم در "کنفرانس سیستمهای کنترل در هوافضا، ۲۰۰۷ DASIA" در کشور ایتالیا، آغاز گر فصل نوینی از زندگی آکادمیکم بودند.

از زحمات و راهنمایی های سازنده جناب آقای دکتر برومند، در زمینه شبیه سازی مدل های توربین گاز، صمیمانه تقدیر و تشکر می نمایم.

از راهنماییهای پروفیسور سیامک نوروزی، ریاست محترم دانشکده ریاضی و کامپیوتر دانشگاه بریستول ، انگلستان، در زمینه سیستم فازی استفاده شده در این پایان نامه کمال تشکر و قدر دانی را می نمایم.

از همکاریهای بی دریغ پروفیسور SHI ، از اساتید محترم دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه توکیو ، در زمینه شبیه سازی و کنترل توسط شبکه های عصبی، قدردانی می نمایم.

در این پایان نامه به مدلسازی و کنترل موتور توربین گاز (توربوجت) پرداخته می شود. در آنالیز کنترلی موتور، از دو فرض استفاده شده است. فرض اول این است که مدل شبیه سازی شده موتور توسط نرم افزار GSP، ارائه شده است و سپس به آنالیز کنترل موتور پرداخته می شود و فرض دوم این است که مدل ریاضی دقیقی برای سیستم موتور توربین گاز وجود ندارد که در این حالت از مفهوم هوش مصنوعی برای مدلسازی و کنترل این سیستم غیر خطی استفاده شده است و صحت نتایج حاصله از این آنالیز، توسط نرم افزار GSP مورد آزمایش قرار می گیرد. در آنالیز استفاده از هوش مصنوعی برای مدلسازی و کنترل موتور، از دو شبکه عصبی مصنوعی روبه جلو استفاده خواهد شد. از یک شبکه برای بیان رابطه غیر خطی سرعت چرخشی موتور و میزان جریان سوخت، و از شبکه دیگر برای بیان رابطه غیر خطی دمای ورودی به توربین و میزان جریان سوخت، استفاده می شود. در ادامه نیز به کمک نرم افزار مطلب<sup>۱</sup> و جعبه ابزار سیمولینک<sup>۲</sup> و با استفاده از مفهوم منطق فازی به طراحی یک کنترل کننده حلقه باز برای کنترل سیستم سوخت موتور، در فاز گذرای موتور، پرداخته می شود که وظیفه آن جلوگیری از بروز پدیده هائی همچون سرج در کمپرسور، افزایش درجه حرارت توربین و خاموشی شعله در محفظه احتراق است. و در نهایت هم ترکیب مفاهیم کنترل کننده های فازی و عصبی، به آنالیز کنترل موتور توسط روش تطبیقی فازی-عصبی پرداخته می شود.

کلمات کلیدی: هوش مصنوعی<sup>۳</sup>، شبکه های روبه جلو<sup>۴</sup>، شبکه عصبی<sup>۵</sup>، منطق فازی<sup>۶</sup>، تطبیقی فازی-عصبی<sup>۷</sup>.

---

<sup>۱</sup> MATLAB

<sup>۲</sup> Simulink

<sup>۳</sup> Artificial Intelligence

<sup>۴</sup> Feedforward

<sup>۵</sup> Neural Network

<sup>۶</sup> Fuzzy Logic

<sup>۷</sup> Adaptive Neuro – Fuzzy controller

## فهرست علائم

$N$	سرعت چرخشی موتور
$m_3$	دبی جرمی در توربین
$T_{03}$	دمای ورودی به توربین
$P_{03}$	فشار گازهای ورودی به توربین
$m_1$	دبی جرمی در کمپرسور
$T_{01}$	دمای ورودی به کمپرسور
$P_{01}$	فشار ورودی به کمپرسور
$P_{02}$	فشار خروجی از کمپرسور
$\Delta P_b$	افت فشار در محفظه احتراق
$\eta_t$	بازده آیزنتروپیک توربین
$\eta_c$	بازده آیزنتروپیک کمپرسور
$C_{pa}$	نسبت گرمایی گازهای سرد در فشار ثابت
$C_{pg}$	نسبت گرمایی گازهای داغ در فشار ثابت
$\eta_m$	بازده مکانیکی موتور
$\rho$	چگالی گاز
$A$	سطح مقطع
$v$	سرعت
$P$	فشار
$h$	آنتالپی ویژه
$\dot{m}$	جریان جرمی
$M_v$	جرم گاز در واحد حج
$\gamma$	نسبت گرمای ویژه
$H$	آنتالپی

$V$	حجم گاز
$U$	انرژی داخلی
$RR$	ضریب بازیافت رم
$\rho_4$	چگالی مخلوط سوخت و هوا
$W_3$	جرم هوای ورودی به محفظه احتراق
$W_4$	جرم خروجی از محفظه احتراق
$\dot{m}_f$	دبی جرمی سوخت
$V_{CC}$	حجم محفظه احتراق
$h_{PR}$	آنتالپی مخصوص سوخت و هوا
$T_{03}$	دمای گازهای ورودی به محفظه احتراق
$Cp_t$	ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط سوخت و هوا
$T_{04}$	دمای گازهای خروجی از محفظه احتراق
$J$	ژاکوبین
$E(x)$	تابع خطا
$PR$	نسبت فشار



## فهرست زیر نویسها

<i>Map</i>	منحنی مشخصه
<i>C</i>	کمپرسور
<i>t</i>	توربین
<i>RR</i>	ضریب فشار بازیافت
<i>rel</i>	نسبی
<i>des</i>	شرایط نقطه طراحی
<i>0</i>	شرایط نقطه سکون
<i>in</i>	ورودی
<i>out</i>	خروجی
<i>CC</i>	محفظه احتراق
<i>amb</i>	هوای آزاد

## فهرست مطالب

IV	چکیده
V	فهرست علائم
VII	فهرست زیر نویسها
VIII	فهرست مطالب
XIV	فهرست شکلها
XXI	فهرست جدول ها
۱	فصل اول : تاریخچه تکنولوژی کنترل در سیستمهای پیشرانس
۲	۱-۱-مقدمه
۱۰	۲-۱- بررسی تاریخی فازهای مختلف پیشرفت سیستمهای کنترل موتورهای توربین گاز هوائی
۱۰	۱-۲-۱ فاز آغازین : سالهای ۱۹۴۲ تا ۱۹۴۹
۱۰	۱-۲-۱-۱ توصیف سیستمهای کنترلی
۱۱	۲-۱-۲-۱ روش طراحی سیستمهای کنترلی در دوره اول
۱۱	۳-۱-۲-۱ قابلیت مدلسازی
۱۲	۲-۲-۱ فاز تکاملی : سالهای ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۹
۱۳	۱-۲-۲-۱ روش طراحی سیستم کنترل در دوره دوم
۱۴	۲-۲-۲-۱ قابلیت مدلسازی

۱۵	۱-۲-۳ فاز الکترونیک : سالهای ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۹
۱۵	۱-۳-۲-۱ روش طراحی سیستم کنترل
۱۷	۱-۲-۳-۲ قابلیت مدل سازی
۱۹	۱-۲-۴ فاز پیشرفته : سالهای ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۶
۱۹	۱-۲-۴-۱ روش طراحی سیستم کنترل
۲۱	۱-۲-۴-۱ قابلیت مدل سازی
۲۲	۳-۱ کاربرد سیستمهای هوشمند در شبیه سازی و کنترل موتورهای توربین گاز.
۲۳	۴-۱ مقدمات لازم برای آنالیزکنترلی موتور توربین گاز
۲۶	فصل دوم: آنالیز شبیه سازی موتور توربین گاز
۲۷	۱-۲ مقدمه
۲۹	۲-۲ الگوریتم نیوتن-رافسون در شبیه سازی موتور توربین گاز
۳۲	۳-۲ شبیه سازی سیستمهای توربین گاز توسط نرم افزار GSP
۳۲	۱-۳-۲ نرم افزار GSP چیست؟
۳۳	۲-۳-۲ روش شبیه سازی در نرم افزار GSP
۳۳	۱-۲-۳-۲ فرایند ترمودینامیکی حاکم برای شبیه سازی موتور
۳۸	۲-۲-۳-۲ فرایند حل

- ۴۰ ۴-۲ مدل سازی ریاضی موتور
- ۴۰ ۱-۴-۲ آنالیز بررسی نقاط عملکرد موتور در حالت پایا
- ۴۵ ۲-۴-۲ الگوریتم محاسبه نقاط کاری موتور در محدوده خارج از نقطه طراحی
- ۴۹ ۵-۲ بررسی عملکرد موتور در فاز گذرا
- ۵۴ ۱-۵-۲ الگوریتم بدست آوردن نقاط کاری موتور در فاز گذرا
- ۵۷ ۶-۲ اجزای توربین گاز و مدی سازی آنها
- ۵۷ ۱-۶-۲ شفتها
- ۵۷ ۲-۴-۲ جریان های هوای ثانویه ( هوادهی و خنک کاری)
- ۵۸ ۳-۶-۲ ورودی موتور توربین گاز
- ۵۸ ۱-۳-۶-۲ شرایط هوای آزاد ورودی به موتور
- ۵۹ ۲-۳-۶-۲ اثر بازیافت فشار رم
- ۶۱ ۴-۶-۲ کمپرسور
- ۶۱ ۵-۶-۲ محفظه احتراق
- ۶۲ ۶-۶-۲ توربین
- ۶۵ ۷-۲ بررسی روشهای جابجا کردن خط کاری موتور در منحنی مشخصه کمپرسور
- ۶۵ ۱-۷-۲ استفاده از سیستم هوادهی برای کنترل موتور
- ۶۸ ۲-۷-۲ استفاده از نازل متغیر برای کنترل موتور

۷۱	فصل سوم: مدل سازی موتور توسط نرم افزار GSP
۷۲	۱-۳ مقدمه
۷۲	۲-۳ شبیه سازی موتور
۸۱	۳-۳ شبیه سازی موتور در فاز گذرا
۸۶	فصل چهارم: شبیه سازی و کنترل موتور توربین گاز توسط منطق فازی و سیستم کنترل فازی
۸۷	۱-۴ مقدمه
۸۹	۲-۴ سیستمهای فازی چگونه سیستم هایی هستند؟
۹۵	۳-۴ سیستم های فازی کجا و چگونه استفاده می شوند؟
۹۷	۱-۳-۴ ماشین شستشوی فازی
۹۷	۲-۳-۴ تثبیت کننده تصویر دیجیتال
۹۸	۳-۳-۴ سیستم های فازی در اتومبیل
۹۹	۴-۴ زمینه های تحقیق عمده در تئوری فازی
۱۰۰	۵-۴ تاریخچه مختصری از تئوری فازی و کاربردهای آن
۱۰۴	۶-۴ مجموعه های فازی و عملیات اساسی بر روی مجموعه های فازی
۱۰۶	۷-۴ برهان فازی
۱۱۱	۸-۴ عملیات بر روی مجموعه های فازی
۱۱۳	۹-۴ عملگرهای فازی

۱۱۳	۱-۹-۴ مکمل فازی
۱۱۳	۲-۹-۴ اجتماع فازی، S- نرم ها
۱۱۴	۳-۹-۴ اشتراک فازی، T- نرم ها
۱۱۷	۱۰-۴ قواعد اگر و آنگاه فازی
۱۱۹	۱-۱۰-۴ تفسیر قواعد اگر-آنگاه فازی
۱۲۱	۱۱-۴ روش ممدانی در طراحی سیستم کنترل فازی
۱۲۱	۱۲-۴ روش سوگنو در طراحی سیستم کنترل فازی
۱۲۲	۱۳-۴ فازی سازها و غیر فازی سازها
۱۲۲	۱-۱۳-۴ فازی سازها
۱۲۳	۲-۱۳-۴ غیر فازی ساز
۱۲۴	۱۴-۴ کنترل موتور توربین گاز بوسیله منطق فازی
۱۲۷	۱-۱۴-۴ کنترل موتور در فاز افزایش شتاب
۱۳۶	۲-۱۴-۴ کنترل موتور در فاز کاهش شتاب
۱۴۳	فصل پنجم: شبیه سازی و کنترل موتور توربین گاز توسط شبکه های عصبی مصنوعی
۱۴۴	۱-۵ مقدمه
۱۴۵	۲-۵ مدل نرونهاى عصبى انسان
۱۴۹	۳-۵ تعريف شبکه های عصبی مصنوعی

۱۴۹	۱-۳-۵ تاریخچه شبکه های عصبی مصنوعی
۱۵۱	۴-۵ معرفی مدل نرون ساده خطی
۱۵۵	۵-۵ انواع روشهای آموزش در شبکه های عصبی مصنوعی
۱۵۵	۱-۵-۵ یادگیری به روش نظارتی
۱۵۶	۲-۵-۵ یادگیری به روش غیر نظارتی
۱۵۶	۳-۵-۵ یادگیری به روش تقویتی
۱۵۷	۶-۵ تکنیکهای تعیین پارامترهای نرون خطی
۱۵۷	۱-۶-۵ تعیین مستقیم
۱۵۸	۲-۶-۵ روالهای تکرار شوند
۱۶۱	۷-۵ شبکه های پرسپترون چند لایه
۱۶۲	۱-۷-۵ الگوریتم یادگیری انتشار به عقب در شبکه های پرسپترون
۱۷۰	۸-۵ مدل سازی و کنترل موتور توربوجت توسط شبکه های عصبی مصنوعی
۱۷۳	۹-۵ نتایج
۲۰۷	فصل ششم : شبیه سازی و کنترل موتور توربین گاز توسط سیستم کنترل فازی - عصبی تطبیقی
۲۰۸	۱-۶ مقدمه
۲۲۵	نتیجه گیری و پیشنهادات

## فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱. نمائی از موتور توربوجت ۳
- شکل ۱-۲. نمائی از موتور توربوپراپ ۴
- شکل ۱-۳. نمائی از موتور توربوفن ۴
- شکل ۱-۴. نمائی از موتور رم جت ۵
- شکل ۱-۵. دیاگرام سیستم کنترل موتور توربوجت ۶
- شکل ۱-۶. دیاگرام کنترلی سیستم کنترل سوخت موتور توربین گاز ۷
- شکل ۱-۷. فرایند ساخت و طراحی موتور توربین گاز و نقش سیستمهای کنترل در این فرایند ۲۴
- شکل ۲-۱. منحنی مشخصه کمپرسور و خطوط مهم روی آن ۲۸
- شکل ۲-۲. در شکل بالا منحنی مشخصه کمپرسور نشان داده شده است ۴۱
- شکل ۲-۳. در شکل بالا منحنی مشخصه توربین نشان داده شده است ۴۲
- شکل ۲-۴. در شکل بالا الگوریتم یافتن نقاط کاری موتور در حالت پایا نشان داده شده است. ۴۶
- شکل ۲-۵. در شکل بالا منحنی افزایش شتاب در منحنی مشخصه کمپرسور نشان داده شده است ۵۲
- شکل ۲-۶. در شکل بالا منحنی های مختلفی که برای آنالیز کنترلی بکار می روند نشان داده شده است. ۵۲
- شکل ۲-۷. خطوط افزایش و کاهش شتاب و خط کاری موتور و خط چاک و خط سرچ، بر روی منحنی مشخصه کمپرسور نشان داده شده است. ۵۳
- شکل ۲-۸. الگوریتم کلی محاسبه نقاط کاری موتور در فاز گذرا ۵۶



- شکل ۲-۹. در شکل بالا منحنی تغییرات دما بر حسب نسبت فشار برای کمپرسور نشان داده شده است. ۶۶
- شکل ۲-۱۰. در شکل بالا، اثر افزایش سطح نازل خروجی موتور بر روی منحنی مشخصه توربین. ۶۸
- شکل ۳-۱. مدل شبیه سازی شده موتور توربوچت توسط نرم افزار GSP ۷۲
- شکل ۳-۲. خط کاری موتور در حالت پایا در منحنی مشخصه کمپرسور ۷۷
- شکل ۳-۳. تغییرات پارامترهای موتور بر حسب دور موتور در حالت پایا ۷۸
- شکل ۳-۴. تغییرات پارامترهای موتور بر حسب دور موتور در حالت پایا در دو حالت استاتیک و در سطح دریا ( منحنی صاف) و در حالت پرواز هواپیما در ارتفاع ۲۰۰۰ متر و ماخ ۰,۳ ( منحنی خط چین) ۷۸
- شکل ۳-۵. منحنی کاری موتور با افزایش مساحت نازل خروجی در حالت پایا ۷۹
- شکل ۳-۶. منحنی کاری موتور با ثابت بودن مساحت نازل خروجی در حالت پایا ۷۹
- شکل ۳-۷. منحنی کاری موتور با وجود سیستم هوادهی در کمپرسور و در حالت پایا ۸۰
- شکل ۳-۸. تغییرات دبی سوخت موتور برای بررسی فاز گذرای موتور ۸۱
- شکل ۳-۹. خط کاری موتور در فاز گذرا بر روی منحنی مشخصه کمپرسور نشان داده شده است. ۸۲
- شکل ۳-۱۰. اثر افزایش مساحت نازل خروجی موتور بر روی خط کاری موتور نشان داده شده است. ۸۳
- شکل ۳-۱۱. اثر وجود سیستم هوادهی در کمپرسور بر روی خط کاری موتور نشان داده شده است. ۸۳
- شکل ۳-۱۲. تغییرات پارامترهای موتور بر حسب زمان در حالت گذرا ۸۴
- شکل ۳-۱۳. تغییرات پارامترهای موتور بر حسب زمان در حالت گذرا در دو حالت استاتیک و در سطح دریا ( منحنی با شماره ۱ ) و در حالت پرواز هواپیما در ارتفاع ۲۰۰۰ متر و ماخ ۰,۳ ( منحنی با شماره ۲) ۸۵
- شکل ۴-۱. در شکل بالا، تابع تعلق مربوط به بیان " زیاد" برای سرعت اتوموبیل نشان داده شده است. ۸۹
- شکل ۴-۲. در شکل بالا، تابع تعلق مربوط به بیان " زیاد" برای سرعت اتوموبیل نشان داده شده است. ۸۹
- شکل ۴-۳. ساختار یک سیستم کنترل فازی خالص ۹۲

- شکل ۴-۴. مدل سیستمهای فازی تاکاگی. سوگنو وکانگ ۹۳
- شکل ۴-۵. در شکل بالا سیستم فازی که شامل فازی ساز و غیر فازی ساز است نشان داده شده است. ۹۴
- شکل ۴-۶. سیستم فازی بعنوان کنترل کننده حلقه باز ۹۵
- شکل ۴-۷. سیستم فازی بعنوان کنترل کننده حلقه بسته ۹۵
- شکل ۴-۸. مقایسه توابع تعلق در نظریه فازی و توابع کلاسیک ریاضی ۱۰۵
- شکل ۴-۹. دو نمونه از توابع تعلق که در سیستم کنترل فازی بکار می رود. مثلثی و دوزنقه ای ۱۰۵
- شکل ۴-۱۰. فلوچارت کنترل کننده فازی ۱۰۶
- شکل ۴-۱۱. متغیرهای ورودی در سیستم فازی ۱۰۷
- شکل ۴-۱۲. یک تابع تعلق برای مجموعه " اعداد نزدیک به صفر " بصورت سیگموئید ۱۰۹
- شکل ۴-۱۳. تابع تعلق دیگری برای مجموعه " اعداد نزدیک به صفر " بصورت مثلثی ۱۰۹
- شکل ۴-۱۴. خط سرج، خط کاری موتور، منحنی افزایش شتاب و کاهش شتاب و خط چاک نشان داده شده است ۱۲۷
- شکل ۴-۱۵. دیاگرام حلقه باز سیستم کنترلی طراحی شده برای موتور توربین گاز، نشان داده شده است. ۱۲۸
- شکل ۴-۱۶. در شکل بالا، ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی نشان داده شده است ۱۲۹
- شکل ۴-۱۷. توابع تعلق ورودی سیستم کنترل فازی که مربوط به سرعت چرخشی موتور است و در فاز افزایش شتاب ۱۳۰
- شکل ۴-۱۸. در شکل بالا، توابع تعلق خروجی سیستم کنترل فازی که مربوط به نسبت سوخت موتور است و در فاز افزایش شتاب می باشد، نشان داده شده است. ۱۳۰
- شکل ۴-۱۹. در شکل بالا ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای توابع تعلق اول و دوم ۱۳۲
- شکل ۴-۲۰. در شکل بالا ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای تابع تعلق سوم ۱۳۲
- شکل ۴-۲۱. در شکل بالا ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای تابع تعلق چهارم و پنجم ۱۳۳

- شکل ۴-۲۲. در شکل بالا ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای توابع تعلق ششم و هفتم ۱۳۳
- شکل ۴-۲۳. در شکل بالا ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای تابع تعلق هفتم ۱۳۴
- شکل ۴-۲۴. در شکل بالا ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای توابع تعلق هفتم و هشتم ۱۳۴
- شکل ۴-۲۵. مدل شبیه سازی شده سیستم کنترل فازی توسط سیمولینک ۱۳۵
- شکل ۴-۲۵. خروجی سیستم کنترل فازی در فاز افزایش شتاب در مقایسه با نتایج نرم افزار GSP. ۱۳۵
- شکل ۴-۲۶. در شکل بالا، ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی نشان داده شده است ۱۳۷
- شکل ۴-۲۷. در شکل بالا، توابع تعلق ورودی سیستم کنترل فازی که مربوط به سرعت چرخشی موتور است و در فاز کاهش شتاب می باشد ۱۳۷
- شکل ۴-۲۸. در شکل بالا ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای توابع تعلق اول و در نوک تابع تعلق ۱۳۹
- شکل ۴-۲۹. در شکل بالا ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای تابع تعلق اول و با فاصله از نوک تابع تعلق ۱۳۹
- شکل ۴-۳۰. در شکل بالا ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای تابع تعلق اول و دوم ۱۴۰
- شکل ۴-۳۱. در شکل بالا ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای تابع تعلق دوم و سوم ۱۴۰
- شکل ۴-۳۲. در شکل بالا ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای توابع تعلق سوم و در نوک تابع تعلق ۱۴۱
- شکل ۴-۳۳. در شکل بالا، سیستم کنترل فازی توسط سیمولینک مدل سازی شده است ۱۴۲
- شکل ۴-۳۴. خروجی سیستم کنترل فازی در فاز کاهش شتاب در مقایسه با نتایج نرم افزار GSP. ۱۴۲
- شکل ۵-۱. مدلی از نرون طبیعی انسان ۱۴۵
- شکل ۵-۲. در شکل های بالا نیز ساختار نرون طبیعی انسان ۱۴۵
- شکل ۵-۳. ساختار یک نرون مصنوعی با نرون طبیعی انسان مقایسه شده است ۱۴۷
- شکل ۵-۴. ساختار یک نرون مصنوعی نشان داده شده است. ۱۴۷
- شکل ۵-۵. نرون مصنوعی با وجود بایاس در نرون ۱۵۱
- شکل ۵-۶. نرون مصنوعی بدون بایاس در نرون ۱۵۱

- شکل ۷-۵. در شکل بالا، یک نرون ساده خطی به همراه ورودیها و وزندهای آن و تابع فشرده سازی  
 ۱۵۱
- شکل ۸-۵. در شکل بالا، نمونه ای از تابع فشرده سازی سیگموئید نشان داده شده است.  
 ۱۵۳
- شکل ۹-۵. در شکل بالا، نمونه ای از یک شبکه پرسپترون نشان داده شده است  
 ۱۶۱
- شکل ۱۰-۵. مدلی از یک شبکه عصبی یک لایه که از نرونهای پنهان داخلی تشکیل شده است  
 ۱۶۸
- شکل ۱۱-۵. در شکل بالا مدلی از یک شبکه عصبی مصنوعی چند لایه نشان داده شده است  
 ۱۶۹
- شکل ۱۲-۵. در شکل بالا، مدل شبکه عصبی بکار رفته برای شبیه سازی و کنترل موتور توربوجت  
 ۱۷۲
- شکل ۱۳-۵. مدل شبیه سازی شده شبکه عصبی استفاده شده، توسط سیمپولینک  
 ۱۷۲
- شکل ۱-۶. اطلاعات مربوط به فازهای آزمایش و ارزیابی و تست برای پارامتر دور موتور و نسبت سوخت  
 ۲۱۰
- شکل ۲-۶. قوانین سیستم کنترل فازی - عصبی تطبیقی برای پارامتر دور موتور و نسبت سوخت  
 ۲۱۱
- شکل ۳-۶. توابع تعلق مربوط به ورودی سیستم برای پارامتر دور موتور و نسبت سوخت  
 ۲۱۱
- شکل ۴-۶. در شکل بالا ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای تابع تعلق اول و دوم، و برای پارامتر  
 دور موتور و نسبت سوخت.  
 ۲۱۲
- شکل ۵-۶. در شکل بالا ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای تابع تعلق دوم، و برای پارامتر دور  
 موتور و نسبت سوخت  
 ۲۱۲
- شکل ۶-۶. در شکل بالا ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای تابع تعلق سوم، و برای پارامتر دور  
 موتور و نسبت سوخت  
 ۲۱۳
- شکل ۷-۶. در شکل بالا ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای تابع تعلق سوم و چهارم، و برای پارامتر  
 دور موتور و نسبت سوخت  
 ۲۱۳
- شکل ۸-۶. ورودی و خروجی سیستم کنترل فازی، برای تابع تعلق چهارم و پنجم، و برای پارامتر دور موتور  
 و نسبت سوخت  
 ۲۱۴