بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی مکانیک

بکارگیری روش ژنتیک- فازی برای طراحی سیستم کنترل سوخت موتور توربوجت

امیـر صفـری

ارائه شده به دانشکدهٔ مهندسی مکانیک

جهت دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد

مهندسی هوا-فضا

تحت نظر:

دکتر مرتضی منتظری

زمستان ۱۳۸۵

تقدیم می‌کنم به دو وجود عزیز؛

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

متواضعانه قدردانی می‌کنم از

استاد گرامی‌ام جناب **دکتر مرتضی منتظری**؛

که افتخار شاگردی‌شان را به بنده داده و در انجام این پروژه راهنمائی‌ام فرمودند..

چکیــده

برای هر سیستم دینامیکی و بمنظور عملکرد با کارایی و دوامِ مورد نظر طراح، باید از کارکرد پایدار و هماهنگ اجزاء مختلف آن اطمینان حاصل کرد. موتورها و بطور خاص موتورهای توربین گاز نیز از این قاعده مستثنی نیستند. ناپایداریهای دینامیک و گذرا که یک توربین گاز را به فراسوی محدودیتهای فیزیکی‌اش می‌رانند، می‌توانند موجب افت در بازدهٔ موتور شده و یا خسارتهایی را بخاطر ناپایداری جریان، بارهای حرارتی و تنشهای بالا به آن وارد سازند. بنابراین یک سیستم کنترل مناسب که به مدیریت محدودیتها و تنظیم موتور بپردازد، یک بخش اصلی از هر موتور توربین گاز بحساب می‌آید.

در بین روشهای کنترل، کنترل منطق فازی بخاطر مدلسازی فرآیند تصمیم‌سازیِ بشر توسط مجموعه‌ای از قواعد، روشی مفید و جذاب است. این روش کنترلی مخصوصاً برای سیستمهای پیچیده‌ای همچون یک موتور توربین گاز که تجربیات اپراتوری برای ایجاد قواعد کیفی مناسب جهت کنترل در دسترس است، اهمیت پیدا می‌کند.

علیرغم تمام تلاشهای صورت گرفته برای فرموله کردن تنظیم کارایی کنترل‌کننده‌های فازی با روشهای استاندارد، این مسأله همچنان ماهیتی سعی و خطایی داشته و این در حالیست که این نوع فرآیند تنظیم، زمانبر بوده و از اعتبار چندانی هم برخوردار نیست. از همین رو، در سالهای اخیر، به تنظیم و بهینه‌سازی این کنترل‌کننده‌ها توسط الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش جستجوی قدرتمند و شبکهٔ عصبی مصنوعی به عنوان یک الگوریتم یادگیرنده، پرداخته شده است. از این متودولوژیها و ترکیبهای مختلف آنها تحت عنوان کلی رایانش نرم یاد می‌شود، که برای توسعهٔ سیستمهای ترکیبی در مدلسازی، شبیه‌سازی و کنترل سیستمهای دینامیکی غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این پایان‌نامه، طراحی کنترل‌کنندهٔ سوخت موتور توربین گاز هوایی، به عنوان اصلی‌ترین نیازمندی کنترلی چنین سیستمهایی، بر اساس روش ژنتیک- فازی ارائه شده است. برای این کار، پس از بررسی موتورهای توربین گاز هوایی و مبحث کنترل آنها، ابتدا و بر اساس روابط ترمودینامیکی موتور، مدل ریاضی توربین گاز مورد نظر توسعه یافته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل بدست آمده، تطبیق خوبی با داده‌های آزمایش موتور در حالت کارکرد پایا نشان می‌دهد. سپس، بر اساس تجربیات و شناختی که از فیزیک سیستم وجود دارد، یک کنترل‌کنندهٔ فازی اولیه برای موتور در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، توسط الگوریتم ژنتیک، یک سیستم ژنتیک- فازی برای بهینه‌سازی فرآیند کنترل سوخت موتور طراحی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی کامپیوتری نشان‌دهندهٔ تأثیر مناسب کنترل‌کنندهٔ ژنتیک- فازی بر افزایش سرعت گذار و رسیدن به کارایی قابل قبول همزمان با جلوگیری از قرارگرفتن موتور درون محدودیتهای فیزیکی‌اش همچون فرارفت دما در توربین و ایجاد سرج در کمپرسور می‌باشد.

فهرست

عنوان	شماره صفحه
فصل ۱- مباحث مقدماتی	**۱**
۱-۱ مقدمه	۱
۱-۲ روشهای رایانش نرم و کاربرد آنها	۲
۱-۲-۱ ابزارها و روشهای اصلی رایانش نرم	۲
۱-۲-۲ ترکیب روشهای مختلف رایانش نرم	۶
۱-۲-۳ نوآوریهای صنعتی با استفاده از روشهای رایانش نرم	۹
۱-۳ کارهای انجام شدهٔ مرتبط با موضوع پایان‌نامه در دنیا	۱۰
۱-۴ فصل‌بندی مطالب پایان‌نامه	۱۳
فصل ۲- موتورهای توربین گاز هوایی و استراتژیهای کنترلی آنها	**۱۴**
۲-۱ مقدمه	۱۴
۲-۲ موتورهای توربین گاز هوایی	۱۵
۲-۲-۱ انواع موتورهای توربین گاز هوایی	۱۵
۲-۲-۲ تئوری موتورهای توربوجت	۱۶
۲-۲-۲-۱ تراکم در ورودی	۱۷
۲-۲-۲-۲ سیستم تراکم	۱۸
۲-۲-۲-۳ سیستم احتراق	۲۰
۲-۲-۲-۴ سیستم انبساط	۲۱
۲-۲-۲-۵ سیستم خروجی	۲۲
۲-۳ کنترل موتورهای توربین گاز هوایی	۲۲
۲-۳-۱ نیازمندیهای کنترلی موتورهای توربین گاز هوایی	۲۳
۲-۳-۲ پارامترهای کنترلی موتورهای توربوجت	۲۶
۲-۳-۳ سیستم کنترل سوخت موتورهای توربوجت	۲۸
۲-۳-۴ الگوریتمهای کنترلی	۳۰
۲-۳-۴-۱ کنترل سرعت روتور	۳۱
۲-۳-۴-۲ کنترل تغییرات سرعت روتور (شتاب)	۳۱
۲-۳-۴-۳ تنظیم تراست	۳۲

فصل ۳- مدلسازی و شبیه‌سازی عملکرد موتور توربوجت ۳۳
۳-۱ مقدمه ۳۳
۳-۲ موتور در نقطهٔ طرح و خارج از نقطهٔ طرح ۳۴
۳-۳ مدلسازی ریاضی اجزاء موتور توربوجت ۳۴
۳-۴ عملکرد موتور در حالت پایا ۳۹
۳-۴-۱ الگوریتم محاسبه نقاط عملکردی پایای موتور ۴۰
۳-۴-۲ شبیه‌سازی کامپیوتری عملکرد پایای موتور ۴۲
۳-۵ عملکرد موتور در حالت گذرا ۴۷
۳-۵-۱ روابط حاکم بر اجزاء موتور در حالت گذرا ۴۸
۳-۵-۲ شبیه‌سازی کامپیوتری عملکرد گذرای موتور ۵۰
۳-۵-۲-۱ بررسی پاسخ گذرای موتور به ورودی پلهٔ سوخت ۵۲

فصل ۴- طراحی کنترل‌کنندهٔ سوخت موتور توربوجت توسط منطق فازی ۶۳
۴-۱ مقدمه ۶۳
۴-۲ سیستمهای کنترل فازی ۶۴
۴-۲-۱ منطق فازی ۶۴
۴-۲-۱-۱ مدل فازی متغیرها ۶۴
۴-۲-۱-۲ توابع عضویت فازی ۶۶
۴-۲-۲ سیستمهای منطق فازی ۶۷
۴-۲-۲-۱ فازی‌سازی ۶۸
۴-۲-۲-۲ استنتاج فازی و پایگاه قواعد ۶۹
۴-۲-۲-۳ غیر فازی‌سازی ۷۰
۴-۲-۳ انواع کاربرد سیستمهای کنترل فازی ۷۱
۴-۳ طراحی کنترل‌کنندهٔ سوخت موتور توربوجت ۷۲
۴-۳-۱ سیستم کنترل سوخت موتور و استراتژی طراحی شده ۷۳
۴-۳-۱-۱ حس‌کننده‌ها، تحریک‌کننده‌ها ۷۵
۴-۳-۱-۲ الگوریتم کنترلی موتور ۷۷
۴-۳-۲ طراحی کنترل‌کنندهٔ سوخت پایا ۸۰
۴-۳-۳ طراحی کنترل‌کنندهٔ منطق فازی برای تنظیم سوخت گذرا ۸۰
۴-۴ شبیه‌سازی عملکرد گذرای موتور با حضور کنترل‌کنندهٔ منطق فازی ۸۵

فصل ۵- روش ژنتیک- فازی و کنترل بهینهٔ سوخت موتور توربوجت **۹۲**
۵-۱ مقدمه ۹۲
۵-۲ الگوریتم ژنتیک ۹۳
۵-۲-۱ عملگرهای اصلی ۹۳
۵-۲-۲ نحوهٔ کار الگوریتم ۹۵
۵-۲-۳ بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک ۹۹
۵-۳ سیستمهای ژنتیک- فازی ۱۰۳
۵-۳-۱ بهینه‌سازی کنترل‌کننده‌های فازی بوسیلهٔ الگوریتم ژنتیک ۱۰۳
۵-۴ تنظیم الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی کنترل‌کنندهٔ فازی سوخت ۱۰۵
۵-۴-۱ فرموله کردن فرآیند بهینه‌سازی کنترل‌کنندهٔ فازی طراحی شده ۱۰۶
۵-۴-۲ تابع برازندگی الگوریتم ژنتیک ۱۰۷
۵-۴-۳ کدینگ پارامترهای کنترل‌کننده برای اعمال اپراتورهای ژنتیک ۱۰۸
۵-۴-۳-۱ کدینگ برای بهینه‌یابی پایگاه قواعد FLC ۱۰۹
۵-۴-۳-۲ کدینگ برای بهینه‌یابی توابع عضویت FLC ۱۱۴
۵-۵ شبیه‌سازی عملکرد توربوجت با حضور کنترل‌کننده فازی بهینه ۱۱۶

نتیجه گیری **۱۲۹**

مراجع **۱۳۱**

فهرست علائم

A	مساحت، m^2
C_i	تابع جریمه i ام
C_p	گرمای ویژه در فشار ثابت، J/kg°C
F	تابع برازندگی الگوریتم ژنتیک
h_{PR}	انرژی گرمایی سوخت، J /kg
I	تابع هدف مسأله بهینه‌سازی
J	ممان اینرسی روتور، $kg.m^2$
$\dot{m}_f$	نرخ جریان سوخت، kg/s
N	سرعت روتور، rpm
n_{con}	تعداد محدودیتهای مسأله بهینه‌سازی
N_{dmd}	سرعت مطلوب حاصل از فرمان دسته گاز، rpm
P	فشار، kPa
sim_time	زمان شبیه سازی، second
T	دما، °C
V	حجم، m^3
w	دبی هوا، kg/s

علائم یونانی

α_i	فاکتور جریمه
β	ضریب وزنی تابع هدف بهینه سازی
γ	نسبت گرماهای ویژه
η	بازده، ٪
π	نسبت فشار
ρ	دانسیته، kg/m^3
τ	نسبت دما

زیرنویس

c	کمپرسور
cc	محفظهٔ احتراق
Ref	شرایط مرجع
t, tur	توربین

فصل اول

مباحث مقدماتی

۱- ۱ مقدمه

مباحث این تحقیق از لحاظ موضوعی به دو دستهٔ کلی قابل تفکیک‌اند. دستهٔ اول، مباحث مربوط به موتورهای توربین گاز هوایی، مدلسازی و شبیه‌سازی آنهاست و دستهٔ دوم مطالب، به مسایل کنترلی و بهینه‌سازی بر اساس روشهای نوین هوشمند یا همان رایانش نرم، مربوط می‌شود.

از آنجاییکه پرداختن به مبحث موتورهای توربینی و کنترل آنها از اهمیت زیادی در این پروژه برخوردار است، پیرامون این موضوع مفصلاً در فصل دوم بحث خواهد شد. بنابراین در این فصل، توضیحاتی مقدماتی دربارهٔ روشهای رایانش نرم داده می‌شود. ضمناً، جهت آشنایی با دیگر کارهایی که تاکنون در دنیا در زمینهٔ کنترل توربینهای گاز بر اساس روشهای هوشمند انجام شده است، به مرور آنها می‌پردازیم. در نهایت نیز برای آشنایی با ساختار پایان‌نامه، فصل‌بندی مطالب آن ارائه می‌گردد.

۲- ۱ روشهای رایانش نرم و کاربرد آنها

رایانش نرم[1] (SC)، خانواده‌ای از روشهای محاسباتی است و طبق گفته پروفسور لطفی زاده[2]، "پردازش نرم چیزی متفاوت از محاسبات و پردازش نوع قدیمی یا رایانش سخت[3] (HC) است و برخلاف آن، در برابر عدم دقت و صراحت، عدم قطعیت و تقریبهای نه همیشه درست، از خود انعطاف نشان می‌دهد [۱]". این در حالیست که رایانش سخت یا همان پردازش معمول، نیازمند یک مدل تحلیلی نسبتاً دقیق و در اغلب مواقع، زمان محاسباتِ زیاد می‌باشد. مدلهای تحلیلی برای موارد ایده‌آل، مناسب هستند؛ اما مسایل دنیای واقعی ما در یک محیط غیر ایده‌آل و با پیچیدگیهای فراوان قرار دارند.

در مهندسی نیز همزمان با افزایش پیچیدگی سیستمها، توانایی بشر در شرح دقیق و قابل توجه رفتار آنها کاهش می‌یابد و این مشکل تا زمانیکه بخواهیم تحلیل‌های ما، هم دقت زیاد و هم دست‌آورد قابل اتکاء داشته باشند، باقی خواهد ماند. مگر اینکه فرآیند حل مسأله را یک فرآیند دو طرفه بدانیم که یک سر آن دقت و طرف دیگر آن نتیجه است. تکنیکهای رایانش نرم، به عنوان روشهایی نتیجه‌گرا، راه حلی برای فائق آمدن بر همین مشکل است.

در این مورد توجه کنیم که برخی کارهای عادی که انسانها به طور روزمره انجام می‌دهند مثل پارک کردن اتومبیل کنار جدول و به اصطلاح سنگ‌چین کردن آن، اگر به ماشین سپرده شود، بسیار پیچیده شده و نیازمند کارکرد خیلی دقیق ماشین است. در صورتیکه خودِ انسان (یا ماشینی که بتواند کاملاً شبیه انسان فکر کند!) قادر است با چشمپوشی از برخی دقتهای غیر مفید و یا به اصطلاح آمیانه، مته به خشخاش نگذاشتن، اتومبیلش را به راحتی سنگ‌چین کند. بنابراین در حل مسایل مهندسی توسط روشهای رایانش نرم، قدم اول تعیین تلرانس یا محدودهٔ مجاز بی‌دقتی یک مسأله است که در واقع یک جواب غیر دقیق و البته در این محدوده، حلی مفید، منطقی و قابل اعتماد برای مسأله می‌باشد.

نهایتاً اینکه نکته کلیدی در جایگزینی رایانش نرم به جای روشهای قدیمی پردازش این است که در برخی مواقع در حل مسایل، لازم است دقت زیاد را فدای اقتصادی بودن حل، سرعت و امکان‌پذیری آن کرده و در عین حال تمام پیچیدگیهای مسأله واقعی را نیز منظور نمائیم.

۱-۲-۱ ابزارها و روشهای اصلی رایانش نرم

هنگامیکه زاده- به عنوان پدر منطق فازی- باب این نوع پردازش را گشود، SC به طور کلی به چهار دسته تقسیم شد: منطق فازی، محاسبات تکاملی، شبکه‌های عصبی و استدلال احتمالی. امروزه تکنیک‌های اصلی مورد استفاده در پردازش نرم عبارتند از:

[1] Soft Computing
[2] Lotfi Zadeh
[3] Hard Computing

- **منطق فازی[1] (FL)**

کلمه فازی در لغت به معنی مبهم، بغرنج و نادقیق است و تمامی این مفاهیم همانطور که پیداست به بسیاری پدیده‌های طبیعی قابل نسبت‌اند. *لطفی‌زاده*، در سال ۱۹۶۵میلادی، برای اولین بار نظریهٔ مجموعه‌های فازی را مطرح کرد [۲]. در فضایی که دانشمندان علوم مهندسی به دنبال روشهای ریاضی برای حل مسایل دشوارتر بودند، نظریه فازی به گونه‌ای دیگر از مدل‌سازی اقدام کرده بود.

منطق فازی تا کنون در شاخه‌های مختلف علوم به کار رفته است. اما شاید مهم‌ترین کاربردهای آن را در سیستمهای کنترل بیابیم. کنترل‌کننده‌های فازی اولین بار توسط *ممدانی* معرفی شدند [۳]. او خودش راجع به کنترل‌کننده فازی می‌گوید: "فکر اصلی در این روش، استفاده از تجربیات اپراتور متخصص در طراحی کنترل‌کننده است. از یک مجموعه قوانین زبانی که استراتژی کنترل را شرح می‌دهند، یک الگوی کنترل سیستم ساخته می‌شود. به نظر می‌رسد مزیت اصلی این روش، امکان اجرای قوانین حسی، تجربی و ذهن‌گرایانه است که در آن احتیاج به مدلی از سیستم نیست. "

امروزه در هر کجا می‌توان اثر منطق فازی را دید؛ از کنترل ترافیک یک شهر بزرگ گرفته تا کنترل موشکها و فضاپیماها. حتی اثاثیه خانه‌ها هم امروزه فازی شده‌اند؛ جاروبرقی فازی، اجاق گاز فازی، ماشین لباس‌شویی فازی و غیره.

- **محاسبات عصبی (NC)- شبکه‌های عصبی[2] (NNs)**

شبکه‌های عصبی مصنوعی سیستمهایی هوشمند هستند که از شبکه‌های عصبی طبیعی الهام گرفته شده است و ساز و کار آنها ملهم از سیستمهای عصبی بیولوژیکی می‌باشد. شبکه‌های عصبی از تعدادی واحدهای پردازش متصل به هم، که نرون نامیده می‌شوند، تشکیل یافته‌اند.

قابلیت مهم شبکه‌های عصبی یادگیری می‌باشدکه مانند انسان، از روی مثال است. شبکه‌های عصبی مصنوعی در واقع تلاشی برای حرکت از سمت مدل محاسباتی فون نیومن به سمت مدلی است که با توجه به عملکرد و ویژگیهای مغز انسان طراحی شده است. برخی از مزایای ماشین محاسباتی مبتنی بر شبکه‌های عصبی نسبت به ماشین محاسباتی دیگر عبارتند از:

- استفاده از توازی محاسباتی بین المانهای محاسبه‌گر
- توان محاسباتی توزیع شده
- توانایی یادگیری
- توانایی تشخیص محرکهای مشابه (تعمیم)
- مقاومت در برابر خطا

نخستین کاربرد عملی شبکه‌های عصبی در اواخر دههٔ ۵۰ قرن بیستم مطرح شد؛ زمانی که فرانک روزنبلات در سال ۱۹۵۸ " شبکهٔ پرسپترون[3] " را معرفی نمود. روزنبلات و همکارانش شبکه‌ای ساختند که قادر بود

[1] Fuzzy Logic
[2] Neural Computing – Neural Networks
[3] Perceptron Network

الگوها را از هم شناسایی نماید. در همین زمان بود که برنارد ویدرو در سال ۱۹۶۰ ″ شبکهٔ آدالاین[1] ″ را با قانون یادگیری جدید مطرح نمود که از لحاظ ساختار، شبیه شبکهٔ پرسپترون بود.

پیشرفت شبکه‌های عصبی تا دههٔ ۷۰ قرن بیستم ادامه یافت. در ۱۹۷۲ تئو کوهنن و جمیز اندرسون بطور مستقل و بدون اطلاع از هم، شبکه‌های عصبی جدیدی را معرفی نمودند که قادر بودند به عنوان عناصر ذخیره ساز عمل کنند. استفان گروسبرگ در این دهه روی شبکه‌های خودسازمانده فعالیت می‌کرد. درخلال دههٔ ۸۰، رشد تکنولوژی میکروپروسسورها روند صعودی داشت و تحقیقات روی شبکه‌های عصبی فزونی یافت و ایده‌های بسیار جدیدی مطرح شد که منجر به رونسانسی در شبکه‌های عصبی گردید. در این زایش دوبارهٔ شبکه‌های عصبی دو نگرش جدید قابل تأمل می‌باشد. یکی استفاده از مکانیسم تصادفی جهت توضیح عملکرد یک طبقهٔ وسیع از شبکه‌های برگشتی که می‌توان آنها را جهت ذخیره سازی اطلاعات استفاده نمود. این ایده توسط جان هاپفیلد، فیزیکدان آمریکایی، در سال ۱۹۸۲ مطرح شد. دومین ایدهٔ مهم که کلید توسعهٔ شبکه‌های عصبی در دههٔ ۸۰ شد، ″الگوریتم پس انتشار خطا″ می‌باشد که توسط دیوید راملهارت و جمیز مکلند در سال ۱۹۸۶ مطرح گردید. با بروز این دو ایده بود که شبکه‌های عصبی متحول شدند [۴].

در سالهای اخیر هزاران مقاله در این زمینه نوشته شده است و شبکه‌های عصبی کاربردهای زیادی در رشته‌های مختلف علوم پیدا کرده‌اند. پژوهشگران از شبکه‌های عصبی برای حل بسیاری از مسائل در زمینه‌های تشخیص الگو، پیش‌بینی حالات سیستم، بهینه‌سازی، حافظه انجمنی و کنترل استفاده کرده‌اند.

- **محاسبات تکاملی[2] (EC)**

پردازش تکاملی یک نام کلی برای مجموعه‌ای از تکنیک‌های حل مسأله است که بر قوانین تکامل طبیعی مثل انتخاب طبیعی و ارث‌بری ژنتیکی استوار هستند. ایده به‌کارگیری اصل داروین در حل مسایل به دهه چهل، خیلی قبل‌تر از شکوفایی کامپیوترها برمی‌گردد.

در سال ۱۹۴۸، تورینگ ″جستجوی تکاملی یا ژنتیکی″ را پیشنهاد کرد و در ۱۹۶۲، برمرمن آزمایش‌های کامپیوتری واقعی را برای بهینه‌سازی از طریق تکامل و ترکیب ژنی انجام داد. در سال‌های دههٔ ۱۹۶۰ و در آمریکا، پژوهشگران برنامه‌ریزی تکاملی را مطرح کردند و جان هلند نام روش خود را ″الگوریتم‌های ژنتیکی″ نامید. در همین دوره، دو پژوهشگر آلمانی روشی به نام ″استراتژی تکاملی″ را ابداع نمودند.

برای پانزده سال، این مفاهیم به طور جداگانه گسترش یافت. اما از ابتدای دههٔ ۱۹۹۰، همه آنها به صورت روش‌های مختلفی از یک تکنولوژی به نام ″پردازش تکاملی″ در نظر گرفته شدند. در اوایل دههٔ ۹۰، کوزا نوع چهارم از پردازش تکاملی با نام ″برنامه‌سازی ژنتیک″ را معرفی نمود.

همانطور که می‌دانیم روشهای بهینه‌سازی و جستجوی گرادیانی ممکن است در اکسترمم‌های محلی گیر بیفتند و این در حالیست که در مورد تکنیکهای جستجوی کلی و مطلق اینگونه نیست. البته توجه ما بیشتر روی نوع تصادفی این نوع روش جستجو است که به آنها محاسبات تکاملی (EC) اطلاق می‌شود و بخشهای مختلفی با کاربردهای متفاوت دارند:

- استراتژیهای تکاملی[1] (ES) ؛ برای بهینه‌سازی توابع پیوسته [۵،۶].

[1] Adaline Network
[2] Evolutionary Computing

- برنامه‌های تکاملی[2](EP) ؛ به منظور تولید ماشینهای خودکار با کارائی محدود که توصیف‌کنندهٔ استراتژیها و رفتارها می‌باشند[۷،۸].
- الگوریتم‌های ژنتیک(GAs)؛ برای بهینه‌سازی توابع پیوسته و گسسته، تنظیم، ترکیب و تست سیستمها [۹].
- برنامه‌سازی ژنتیک[3](GP) ؛ جهت ساختن برنامه‌های کامپیوتری برای حل تقریبی مسایل مثل پیش‌بینی سریهای زمانی [۱۰].

سه بخش اصلی محاسبات تکاملی (یعنی الگوریتم ژنتیک، استراتژیهای تکاملی و برنامه‌نویسی تکاملی) شباهتهای زیادی با هم دارند؛ تمامی آنها شامل جمعیتی از حلهای بالقوه و اولیه هستند. در همه آنها تغییراتی تصادفی به این مجموعه حل اولیه تحمیل می‌شود و بالاخره اینکه در تمام موارد انتخاب می‌کنیم کدام جوابها باید در نسلهای آینده باقی بمانند [۱۱].

- **محاسبات آشفته (CC)- مجموعه‌های نامنظم[4] (CS)**

فرآیند آشفتگی یا هرج و مرج[5] ، در دنیای عجیب ما متناوباً و در زمینه‌های مختلف در حال وقوع است. در مدارهای الکتریکی، سیستمهای مکانیکی، در بیولوژی و حتی در مناسبات آدمی در جوامع بشری. اما علی رغم این گستردگی، آشفتگی چیزیست که توسط تمام مهندسان و دانشمندان در حل مسایل مختلف، صرف نظر می‌شده و می‌شود. تنها اخیراً توجه ویژه‌ای به آن شده و به عنوان پایه‌ای بسیار مهم (فیزیک کوچ) در ایجاد یک تکنولوژی کاملاً نو مورد توجه قرار گرفته است [۱۲]. آشفتگی در واقع بیانگر خط سیر یک سیستم دینامیکی غیر خطی خاص است.

- **الگوریتم‌های ژنتیک[6] (GAs)**

الگوریتم‌های ژنتیک، در واقع زیر مجموعه‌ای از الگوریتم‌های تکاملی به حساب می‌آیند. شروع الگوریتم ژنتیک مربوط به اوایل دههٔ ۱۹۵۰ می‌باشد که چندین بیولوژیست از کامپیوتر برای شبیه‌سازی سیستمهای زیستی استفاده کردند. به هر حال آنچه به الگوریتم ژنتیک امروزی منتهی شد کاری بود که *هلند*[7] و همکارانش در اواخر دهه ۱۹۶۰ و اوایل دهه ۱۹۷۰ در دانشگاه میشیگان انجام دادند. هر چند پس از آنها، *گلدبرگ*[8] بود که در تز دکترای خود به توسعهٔ این الگوریتم پرداخت.

GA ها، الگوریتم‌های جستجویی هستند که بر اساس مکانیزم ژنتیک و انتخاب طبیعی کار می‌کنند. این الگوریتمها، چند ویژگی خاص دارند که آنها را از دیگر روشهای بهینه‌سازی متمایز می‌کند:

[1] Evolutionary Strategies
[2] Evolutionary Programming
[3] Genetic Programming
[4] Chaotic Computing- Chaos Sets
[5] Chaos
[6] Genetic Algorithms
[7] John Holland
[8] Goldberg

- GA فقط از تابع هدف استفاده می‌کند و نه هیچ نوع اطلاعات دیگری مثل مشتق هدف و غیره. این مسأله در مواردی که مثلاً تابع، گسسته است یا شامل چندین متغیر، بسیار با اهمیت می‌باشد.
- GA درآنِ واحد روی مجموعه‌ای از نقاط تابع هدف، جستجو می‌کند و این عمل را بر روی چندین مجموعه به صورت موازی انجام می‌دهد که موجب فراهم شدن رِنج وسیعی از اطلاعات رفتار تابع هدف می‌گردد و نیز از گیر افتادن الگوریتم در اکسترممهای محلی جلوگیری می‌کند. این درحالیست که روشهای قدیمی‌ترِ جستجو، مثل روش گرادیان، چنین مزیتی ندارند.
- GA از قانون‌هایی که امکان تغییر دارند استفاده می‌کند و نه از قواعد مشخص و ثابت. درکنار این مسأله، کاری که این الگوریتم‌ها انجام می‌دهند برای کامپیوتر قابل درک و ساده است.

با وجود اینکه مکانیزم عمل الگوریتم ژنتیک، بسیار ساده است، اما این الگوریتم در پیشرفت به سوی جواب بهینه دارای قدرت زیادی بوده و یک روش جستجوی قوی است [۱۳].

توجه: به علت ارتباط مستقیم مطالب مربوط به "سیستمهای فازی" و "الگوریتم ژنتیک" با موضوع این پایان‌نامه، این دو مبحث از رایانش نرم به ترتیب در فصلهای چهارم و پنجم، قبل از پرداختن به بحث طراحی و بهینه‌سازی، مفصلاً آورده شده‌اند.

۲-۲-۱ ترکیب روشهای مختلف رایانش نرم

برای حل مسائل مختلف مهندسی و به منظور داشتن حلی مؤثرتر، ممکن است ترکیبهایی متفاوت از روشهای فوق استفاده گردد. در چند سال اخیر، شاهد افزایش سریع اینگونه الگوریتمهای ترکیبی بوده‌ایم، که در آنها دو یا چند استراتژی رایانش نرم (FL , NN, GA) با هم ترکیب می‌شوند. معمولترین موارد ترکیب تکنیکهای رایانش نرم با یکدیگر عبارتند از:

- **تنظیم الگوریتم‌های ژنتیک توسط منطق فازی**

قدرت منطق فازی در تفسیر و اصلاح قواعد برای مدیریت الگوریتم‌های ژنتیک (اندازه جمعیت و فشار انتخاب) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴].

برای اولین بار و در تز دکترای لی، یک کنترل‌کنندهٔ فازی برای تنظیم سه پارامتر از پارامترهای یک GA مورد استفاده قرار گرفت؛ بطوریکه کنترل‌کننده با دریافت سه پارامتر به عنوان ورودی، حالت جاری روند تکامل GA را مشخص می‌کرد [۱۵]: نسبت متوسط برازندگی‌ها به بهترین برازندگی، نسبت بدترین برازندگی به متوسط برازندگی‌ها و بالاخره نرخ تغییرات بهترین برازندگی. خروجیهای کنترل‌کننده عبارت بودند از:

(احتمال جهش) Δ ، (احتمال ترکیب) Δ ، (اندازه جمعیت) Δ

که Δ همان تغییرات است و به نحوی مقید شده بودند که مقادیر قبلی بیش از ۵۰٪ تغییر نکنند. علاوه بر این، پارامترهای سه‌گانه خروجی، مقید شده بودند تا در رنج قابل استفاده خودشان باقی بمانند، که این تنظیمات به شرایط طراحی و خواست طراح بستگی دارند. نتایج تجربی نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در

عملکرد الگوریتم بود که در ازای صرف وقت زیاد برای انجام محاسبات حجیم خارج خط جهت اجرای کنترل‌کنندهٔ فازی، بدست آمده بود.
در کل، تصحیح پارامترهای GA توسط منطق فازی، سرعت همگرایی و میزان کارائی الگوریتم را بالا می‌برد، اما بایستی بین حجم محاسبات خارج خط و زمان و هزینه صرف شده با میزان اصلاح الگوریتم ژنتیک توازنی منطقی برقرار کرد که این با توجه به احتیاجات مسأله‌ای که قرار است حل شود و میزان تطبیق‌پذیری کنترل‌کننده مورد استفاده با انواع مسایل مشابه، صورت می‌گیرد.
توجه شود که روشهای دیگری نیز برای کنترل و بهبود پارامترهای یک GA وجود دارد که از آن جمله استفاده از GA های دیگر است [۱۶].

- **تنظیم کنترل‌کننده‌های فازی به وسیله شبکه‌های عصبی**

از پیشگامان این نوع ترکیب در رایانش نرم، لی بود. او در سال ۱۹۷۴ یک مدل نرون چند ورودی- چند خروجی را در مقابله با مدلهای اواسط دهه هفتاد (مثل مدل تابع خروجی باینری) ارائه داد [۱۷]. بعدها ترکیبهای متنوعی از FL-NNs با جامعیت بیشتر ارائه گردید [۱۸].
ANFIS از حالتهای خاص و کاربردی در تنظیم کنترل‌کننده‌های فازی با شبکه‌های عصبی است [۱۹]، که شامل یک شبکه تعمیم یافته شش لایه است. اولین و ششمین لایه به ورودیها و خروجیهای سیستم مربوط‌اند. لایه دوم، اجزاء فازی را در فضای ورودی تعریف می‌کند و این در حالیست که لایه سوم، کارائی – Tنرم تشخیص پذیر را دارد. لایه چهارم وظیفه نرمالیزه کردن سمت چپ هر قاعده فازی را بر عهده داشته و بالاخره لایه پنجم به محاسبه ضرائب چند جمله‌ای مربوط به سمت راست قواعد تاکاگی- سوگنو می‌پردازد.
تحقیقات جانگ بر اساس فرآیند بهینه‌سازی دو مرحله‌ای بنا شده است که در حرکت رو به جلو الگوریتم، اجزاء لایه دوم برابر با مقادیر تکرار قبلی‌شان نگه داشته می‌شوند، در حالیکه ضرائب لایهٔ پنجم با استفاده از روش حداقل مربعات محاسبه می‌شوند. با این دید، ANFIS یک خروجی تولید می‌کند که مقداری خطا دارد. اطلاعات مربوط به تغییرات خطا در تکرارهای مختلف، در حرکت رو به عقب الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد تا پارامترهای فازی لایه دوم را اصلاح نماید. این فرآیند تا وقتی که به همگرائی برسیم، ادامه می‌یابد.

- **شبکه‌های عصبی تولید شده توسط الگوریتم ژنتیک**

شکلهای زیادی از الگوریتم‌های ژنتیک وجود دارد که می‌توانند برای ترکیب یا تنظیم شبکه‌های عصبی بکار روند. برای استنتاج توپولوژی شبکه (تعداد لایه‌های مخفی، تعداد گره‌های مخفی و تعداد لینکها)، برای یافتن مجموعه بهینه وزنها در یک توپولوژی داده شده و بالاخره برای تطبیق‌پذیر ساختن تابع فعالسازی.
کروموزمهای GA نیاز دارند که هم توپولوژی و هم پارامترهای یک شبکه عصبی را کدگذاری کنند که این مسأله آنقدر حجیم است که کارایی GA را در جستجو مؤثر، تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. بنابراین این نوع ترکیب در مباحث رایانش نرم (مثل انواع دیگر)، امری دو سویه است .
مونتانا و دیویس جزء اولین کسانی بودند که استفاده از GA را برای تنظیم یک شبکه پیشخور با توپولوژی داده شده پیشنهاد دادند[۲۰].

شبکه‌های عصبی، با استفاده از " انتشار رو به عقب" و بخاطر انتفاع از دانش محلی‌شان، نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک، همگرایی سریعتری دارند. اما این جستجو محلی باعث می‌شود تا شبکه‌های عصبی در اکسترممهای محلی گیر بیفتند. این درحالیست که GA ها جستجو با دانه‌بندی درشت را به صورت بسیار مؤثر انجام می‌دهند تا ناحیه محتمل برای وجود اکسترمم مطلق را بیابند. اما GA در جستجو دانه‌بندی ریز برای یافتن اکسترممهای محلی ناتوان است.

مجموعهٔ این ویژگیها، اولین جرقه‌ها را در ذهن کیتانو زد تا با پیشنهاد یک الگوریتم ترکیبی جالب، از GA برای یافتن ناحیه‌ای با پارامترهای خوب استفاده کند که بعدها برای شروع به کارِ NN ها مورد استفاده قرار گرفت[۲۱]. در این روش، انتشار رو به عقب، وظیفه تنظیم نهایی پارامترها را بر عهده داشت.

محققان دیگری با اصلاح الگوریتم پیشنهادی کیتانو، از GA برای فرار از اکسترممهای محلی پیدا شده در طی آموزش شبکه‌های عصبی، استفاده کردند[۲۲]. اطلاعات با جزئیات بیشتر در مراجع [۲۳،۲۴] آمده است.

- **استفاده از GA برای بهینه‌سازی، میزان کردن و وفق دادن FLC**

در اینجا به بررسی مواردی از ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک (به عنوان بخشی از انواع محاسبات تکاملی) با منطق فازی (به عنوان یک روش رایانش نرم)، می‌پردازیم.

از ابتدای دهه ۱۹۹۰ میلادی و در اواخر قرن بیستم، محققان و دانشمندان بسیاری از الگوریتم‌های ژنتیک برای بهینه‌سازی انواع سیستمهای فازی (مخصوصاً کنترل کننده‌ها) بهره برده‌اند و نتایج بدست آمده، خوب و بعضاً فوق تصور بوده است. از پیشگامان این زمینه، *کار* بود که GA را به منظور اصلاح توابع عضویت متغیرهای استفاده شده در کنترل‌کننده‌های فازی استفاده کرد [۲۷]-[۲۵]. *کار*، از کدگذاری باینری برای تعریف پارامترهای مقادیر عضویت بهره جست و تابع برازندگی (تابع معیار)، خطای درجه دوم محاسبه شده از چهار شرط اولیه بود که به صورت تصادفی انتخاب شده بودند.

هررا، *لوزانو* و *وردگی* قواعد مورد استفادهٔ کنترل‌کنندهٔ فازی را مستقیماً تنظیم و بهینه کردند [۲۸]. آنها از کدگذاری حقیقی برای بهینه‌سازی مقادیر عضویت ذوزنقه‌ای، که چهار پارامتر مشخصه دارند (چهار گوشه ذوزنقه)، استفاده کردند. این مقادیر عضویت مربوط به بردار حالت (بخش مقدم قواعد فازی) و متغیر کنترلی (بخش تالی قواعد فازی) بوده و جمعیت، مجموعه‌ای با تعداد مشخص از این کروموزومها بود که در واقع تمام قواعد فازی بودند. تابع معیار نیز مجموع مربع خطاها درنظر گرفته شد.

کینزل و *کروس*، تنظیم قواعد فازی و توابع عضویت را به صورت همزمان انجام دادند[۲۹]. آنها از یک ماتریس با درایه‌های رشته‌ای برای کد کردن مجموعه قواعد استفاده کردند. همچنین پیشنهاد نوعی خاص از اپراتور ترکیب را دادند (ترکیب نقطه- شعاع) که شبیه به ترکیب دونقطه‌ای[1] بود. آنها ابتدا پایگاه قاعد را توسط GA بهینه کردند و سپس به تنظیم توابع عضویت این پایگاه بهینه شده پرداختند.

[1] Two point Crossover

لی و *تاکاگی* نیز پایگاه قواعد و توابع عضویت را بهینه کردند [۳۰]. آنها نیز از کدگذاری باینری برای کد کردن رئوس توابع عضویت مثلثی استفاده نمودند که هر کروموزوم بیان کننده یک قاعدهٔ تاکاگی- سوگنو[1] بود [۳۱].

بررسیهای *زنگ* نشان می‌دهد حالت ایده‌آل این است که ابتدا ضرائب اندازه[2] متغیرهای کنترلی و حالتهای کنترل‌کننده‌های فازی تنظیم شود و در این حالت پایگاه قواعد، ثابت و توابع عضویت، استاندارد و یکنواخت باشند [۳۲]. بعد از حصول بهترین ضرائب اندازه، اقدام به تنظیم توابع عضویت می‌کنیم. سرانجام و اگر اصلاحات بیشتر موردنیاز بود، پایگاه قواعد کنترل‌کننده را تنظیم و بهینه می‌کنیم. فقط مهم است توجه شود، مراحل سه گانهٔ گفته شده، به ترتیب، تأثیرات ماکروسکوپی (بزرگ)، متوسط و میکروسکوپی (کوچک) روی عمل کنترل‌کننده دارند و این البته به نوع کنترل‌کننده و کاربرد خاص آن نیز بسیار وابسته است.

توجه: ترکیب الگوریتمهای ژنتیک با سیستمهای فازی و ایجاد یک سیستم ژنتیک- فازی دقیقاً همان کاری است که در این تحقیق بمنظور بهینه‌سازی کنترل‌کننده فازی انجام شده است. بنابراین توضیحات تفصیلی آن در فصل پنجم پایان‌نامه آورده می‌شود.

۳-۲-۱ نوآوریهای صنعتی با استفاده از روشهای رایانش نرم

به کارگیری رایانش نرم در صنعت از سال ۱۹۸۷ میلادی با ساخت کنترل‌کننده‌های فازی صنعتی در ژاپن آغاز شد. در اواخر دهه هشتاد میلادی، " کنترل‌کننده‌های نِرو- فازی[3] " در ساخت روباتها در صنایع هوا- فضا و نیز در کنترل فرآیندهای شیمیایی در امریکا بکار گرفته شدند [۳۳]. SC برای ساخت نسل جدیدی از هوشهای مصنوعی در صنعت (ماشینهای پیشرفته هوشمند و پردازش اطلاعات شبیه به آنچه انسان انجام می‌دهد) و نیز برای حل سیستمهای غیرخطی که مدل ریاضی ندارند، بکار گرفته شد [۳۴].

- **کاربردهای هوا- فضائی**

استفاده از SC در صنعت هوا- فضا بخاطر درجه بالای غیرخطی بودن سیستمهای آن، بسیار مؤثر است. به این ویژگی، عدم قطعیت‌ها و پیچیدگیهای خاص مسایل هوا- فضایی را نیز اضافه کنید.

در دهه ۹۰ قرن بیستم، *وربوس* کنترل‌کننده‌های عصبی را جهت کنترل بهینه سیستمهای غیرخطی در صنایع هوا- فضا و ساخت سیستمهای کنترل هواپیما بکار گرفت. کنترل عصبی در علم آئرودینامیک به خاطر عدم قطعیتها و ویژگیهای غیرخطی موجود در این علم، می‌تواند کاربرد زیادی داشته باشد، و در نهایت جائیکه انسان به عنوان اپراتور نیاز است حضور داشته باشد، از منطق فازی بهره‌مند می‌شویم [۳۵].

اسچندر و دیگران نیز با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک، کارهای مشابهی انجام دادند. تمام این مسایل وقتی قرار است با محاسبات و پردازش نوع معمول یعنی HC حل شوند، بسیار مشکل خواهند شد [۳۶].

[1] Takagi- Sugeno rule
[2] Scaling Factors
[3] Neuro – Fuzzy Controller

برنجی رایانش نرم را در پروژه‌های فضائی ناسا همچون کنترل ارتفاع شاتل‌های فضایی بکـار گرفـت. *آلـوارز* و همکارانش نیز تحقیقات مشابهی را در زمینه کنترل سفینه‌ها با استفاده از منطق فازی انجام دادند.
شاید در حال حاضر از فعال‌ترین محققان این زمینه، پروفسور *فلمینگ* باشد که استاد گروه مهندسی سیستم و کنترل دانشگاه شفیلد انگلستان است. وی پـروژه‌هـای متعـددی در زمینـه کـاربرد روشـهای رایـانش نـرم (بخصوص کنترل فازی و الگوریتم ژنتیک) برای شبیه‌سازی، کنترل و بهینـه‌سـازی عملکـرد توربینهـای گـاز انجام داده است. کارفرمای این پروژه‌ها اکثراً کمپانی بزرگ رولز- رویس می‌باشد [۴۲-۳۷].
فهرستی از کاربردهای رایانش نرم در مهندسی هوا-فضا در مرجع [۴۳] آمده است.

- **مصارف خانگی**

در مورد کاربرد رایانش نرم در ساخت وسایل خانگی، معمولاً کمتر کار دانشگاهی و پژوهشی انجام می‌گیرد و مقالات محدودی نیز که در این زمینه وجود دارد، خاستگاه صنعتی دارند.
تا کنون از رایانش نرم در تولید لوازم خانگی، تقریباً تنها در ژاپن و کره جنوبی استفاده شده است و صنایع مشابه در اروپا و امریکا در ابتدای راه هستند. در ژاپن تقریباً مردم عادی نیز با مزایای استفاده از منطق فازی و شبکه‌های عصبی در سیستمهای هوشمند خانگی آشنا هستند[۴۳].
زمینه‌های اصلی کاربرد SC در مصارف روزمره عبارتند از: سیستمهای گرمایش و سرمایش منازل و اماکن عمومی، سیستمهای شستشو (ماشین لباسشوئی، ماشین ظرفشوئی، حمام و توالت)، سیستمهای پخت وپز (ماکروویو، برنج پز).

- **سیستمهای تولید توان**

از آنجائیکه سیستمهای تولید توان الکتریکی بسیار عظیم و پیچیده هستند، رایانش نرم (و بخصوص محاسبات تکاملی) در بخشهای مختلفی از جمله کنترل، تشخیص، پیش‌گویی، عملکرد، پایداری و برنامه پذیری در اینگونه سیستمها کاربرد وسیعی دارند [۴۶]-[۴۴].
از دیگر کاربردهای متنوع روشهای رایانش نرم در صنایع، می‌توان از استفاده در سیستمهای حمل و نقل، مهندسی فرآیند و مهندسی مخابرات نام برد.

۳- ۱ کارهای انجام شدهٔ مرتبط با موضوع پایان‌نامه در دنیا

زمان زیادی از کاربرد سیستمهای الکترونیکی و دیجیتال در کنترل موتورهای توربین گاز هوایی در دنیا نمی‌گذرد. گذر از سیستمهای مکانیکی کنترل به سیستمهای الکترونیکی از دهۀ ۱۹۸۰ میلادی شروع شد، که IC هایی با اندازه‌های بزرگ و قابل برنامه ریزی در دسترس بودند. این کنترل‌کننده‌های دیجیتال، اجرای الگوریتمهای کنترلی پیچیده‌تری را که با سیستمهای مکانیکی قابل پیاده‌سازی نبودند، امکان پذیر می‌کردند. از این به بعد بود که استراتژیهای کنترلی جدیدتری (مثل استراتژی Ndot) که بیشتر با نسل تازۀ

کنترل‌کننده‌ها تطابق داشتند، ابداع شدند. علاوه بر این، از دهۀ ۱۹۹۰ بود که تحقیقات بر روی روشهای کنترلی مورد استفاده در کنترل‌کننده‌های الکترونیکی و سودمند برای موتورهای توربینی، آغاز شد.
به منظور کنترل موتورهای توربین گاز، چندین روش کنترل شامل روشهای خطی و غیرخطی وجود دارد. یک روش مرسوم جهت طراحی نرم‌افزارهای کنترل‌کننده‌های دیجیتال، روش کنترل PID[1] است. اما از آنجاییکه PID یک روش کنترل خطی است و جهت استفاده از آن به خطی‌سازی سیستم و صرف نظر از برخی دقتها نیاز است، بنابراین محققان همواره به فکر استفاده از روشهای ترکیبی دیگری منطبق با پیچیدگی و غیرخطی بودن موتورهای توربینی بوده‌اند. در میان روشهای کنترل غیرخطی، کنترل منطق فازی بخاطر مدلسازی فرآیند تصمیم‌سازی بشر توسط مجموعه‌ای از قواعد بیانی، یک روش مناسب و قابل تأمل است. این مساله مخصوصاً برای سیستمهای پیچیده‌ای همچون یک موتور توربین گاز که تجربیات اپراتوری مناسبی در قالب یک سری قوانین کیفی در دسترس است، اهمیت می‌یابد [۴۷].
به نظر می‌رسد تا کنون تحقیقات بسیاری در زمینۀ بکارگیری بهینۀ کنترل‌کننده‌های منطق فازی برای کنترل موتورهای توربین گاز در مراکز تحقیقاتی و صنعتی دنیا انجام شده است. با این همه، به دلایل خاصی، تعداد انگشت‌شماری از آنها در قالب مقالات علمی منتشر شده‌اند. در ادامه، به برخی از این تحقیقات و متودولوژی بکار رفته در آنها اشاره‌ای می‌شود.

- در مقاله‌ای تحت عنوان *طراحی کنترل‌کنندۀ PI فازی برای یک موتور توربین گاز*، کنترل کننده تناسبی- انتگرالی سرعت و دما با روش فازی برای یک موتور توربین گاز طراحی شده است [۴۸]. برای بهبود عملکرد، قواعد کنترل فازی خاصی برای کنترل‌کننده PI فازی در نظر گرفته شده است. ضمناً جهت کارکرد دقیقتر کنترل‌کننده وقتی به موتور وصل می‌شود، تمام بهره‌های مربوط به ورودی و خروجی FLC توسط الگوریتم ژنتیک بهینه می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری نشان دهنده بهبود عملکرد موتور نسبت به زمانیست که از کنترل‌کنندۀ PI معمولی و نه فازی استفاده می‌شده است. این کار توسط کیم و همکارانش در سال ۲۰۰۳ میلادی منتشر شده است.

- در تحقیق دیگری که توسط پروفسور فلمینگ و همکارانش در سال ۲۰۰۲ میلادی تحت عنوان *کنترل موتور توربین گاز هوایی با استفاده از جدولبندی فازی* انجام شده است [۴۹]، یک کنترل‌کننده با استفاده از روش جدولبندی فازی و بر اساس ویژگیهای عملکردی یک نوع موتور توربینی طراحی شده است.

- جورادو و همکارانش در یک کار تحقیقاتی تحت عنوان *کنترل‌کنندۀ نرو- فازی برای توربین گاز تولید توان* که در سال ۲۰۰۲ میلادی انجام شد [۵۰]، به طراحی کنترل‌کننده‌های فازی خاصی برای توربین گازی که برای تولید توان الکتریکی بکار می‌رفت، پرداختند. وظیفه این کنترل‌کننده، تنظیم توربین گاز و همچنین ژنراتور آن بود. بدین منظور، دو FLC با استفاده از سرعت روتور و تغییرات توان مکانیکی طراحی شد، که توسط شبکه عصبی مصنوعی و بر اساس شرایط کاری موتور

[1] Proportional- Integral- Derivative Control