

# طراحی کنترل کننده اتوپایلوت موشک به روش جدول بندی بهره فازی

علی اکبرزاده کلات و حمیدرضا مؤمنی

جدول بندی به کار می‌روند.

جدول بندی بهره فازی به دنبال معرفی منطق فازی و کنترل فازی به عنوان یک روش نوین و مؤثر جدول بندی در سیستم‌های غیرخطی مطرح شده است. در این روش متغیرهای جدول بندی به عنوان مقدم یا ورودی‌های یک سیستم استنتاج فازی بوده و پارامترهای قانون کنترل به عنوان نتیجه یا خروجی آن می‌باشند. در این میان آنچه باید مورد توجه قرار گیرد انتخاب نوع توابع عضویت و موقعیت مراکز آنها می‌باشد که مراکز توابع عضویت در واقع بیانگر نقاط کاری هستند که مدل خطی شده سیستم جهت طراحی کنترل کننده‌ها استفاده می‌شود و نوع توابع عضویت و سیستم استنتاج فازی به مفهوم مکانیزم یا تابع درون‌یابی پارامترهای قانون کنترل برای نقاط بین مراکز انتخابی می‌باشد.

جدول بندی بهره فازی در طیف وسیعی از مسائل کنترل غیرخطی و سیستم‌های متغیر با پارامتر به کار گرفته شده است.

از روش جدول بندی فازی با طراحی کنترل کننده‌های کلاسیک نظیر PID در انواع مختلف سیستم‌های غیرخطی و خطی متغیر با پارامتر استفاده شده است [۱] تا [۶]. در [۱] از یک پایگاه قواعد فازی بر اساس سیگنال خطا و نرخ تغییر آن در تنظیم روی خط پارامترهای یک کنترل کننده PID استفاده شده است و با استفاده از نتایج شبیه‌سازی مؤثر بودن آن نسبت به روش‌های زیگلر- نیکلز<sup>۲</sup> و روش کیتاموری<sup>۳</sup> نشان داده شده است. در [۲] از یک برنامه‌ریز بهره فازی و دو کنترل کننده PID کلاسیک و PID بر اساس پیشگویی مدل در کنترل یک فرآیند غیرخطی استفاده شده است. در [۳] با پیشنهاد طراحی PID برای نقاط کار مختلف یک سیستم غیرخطی و سپس جدول بندی بهره فازی بین آنها بر اساس سیگنال خروجی سیستم تحت کنترل و ورودی مرجع سیستم به عنوان متغیرهای جدول بندی، باعث نیل به رفتار مناسبی به ازاء ورودی‌های مرجع با دامنه‌های مختلف در یک سیستم غیرخطی شده است.

یکی از کاربردهای جدول بندی فازی در سیستم‌های کنترل پرواز است، جایی که در آن نیروها و گشتاورهای آیرودینامیک تغییرات وسیعی با شرایط پروازی داشته و یک سیستم دینامیکی متغیر با پارامتر را ایجاد می‌کنند. در [۷] از یک جدول بندی فازی ساده به منظور کنترل سیستم پرواز  $F/A=18$  استفاده شده است. در [۸] طراحی کنترل کننده مقاوم  $H_{\infty}$  با تکنیک نامعادله خطی ماتریسی<sup>۴</sup> (LMI) به همراه جدول بندی بهره فازی با استفاده از فیدبک شتاب و سرعت زاویه‌ای بر روی یک موشک انجام گرفته است. از جدول بندی بهره فازی با الگوریتم دسته بندی فازی برای متغیرهای جدول بندی و طراحی کنترل کلاسیک در نقاط انتخابی برای یک سیستم پرواز هواپیما نیز استفاده شده است [۹] و اینکه از یک روش تطبیقی در جدول بندی بهره فازی برای خود خلبان یک موشک

چکیده: در این مقاله یک کنترل کننده به روش جدول بندی بهره فازی برای کانال‌های هدایتی موشک‌های تاکتیکی طراحی گردیده است به نحوی که در کلیه شرایط پروازی پاسخ مناسبی داشته باشد. دیدگاه این طراحی تعیین مراکز نواحی جدول بندی بهره فازی با آموزش یک سیستم فازی بر اساس اطلاعات فشار دینامیکی و سرعت موشک و ضرایب مدل خطی سیستم در سراسر نقاط کاری آن می‌باشد. آموزش سیستم فازی با استفاده از یک روش مبتنی بر ترکیب حداقل مربعات خطی و الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود تا هم رسیدن به بهینه کلی میسر شود و هم سرعت همگرایی خوبی حاصل شود. به علاوه در سیستم فازی استفاده شده، توابع عضویت با خصوصیات مناسبی به کار گرفته می‌شوند تا طراحی ساده‌تر و مؤثرتر انجام گیرد. کارایی این روش با نتایج شبیه‌سازی نشان داده می‌شود.

کلید واژه: جدول بندی بهره فازی، اتوپایلوت، ضرایب آیرودینامیکی، الگوریتم ژنتیک، حداقل مربعات خطی.

## ۱- مقدمه

طراحی کنترل کننده برای سیستم‌های غیرخطی که بتواند تمام فضای تحت پوشش سیستم را پاسخگو باشد، یکی از موضوعات مورد توجه محققین است. در چند دهه اخیر با پایه‌گذاری تئوری‌های جدیدی نظیر منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی و ارائه روش‌های آموزشی گوناگون در سیستم‌های مبتنی بر آنها، روش‌های نوینی برای طراحی کنترل سیستم‌های غیرخطی ابداع و پیاده‌سازی شده است. جدول بندی بهره یکی از روش‌های مفید و مؤثر در کنترل سیستم‌های غیرخطی و سیستم‌های متغیر با پارامتر<sup>۱</sup> می‌باشد. در این روش، ابتدا در چند نقطه کار از سراسر فضای عملیاتی سیستم، برای مدل خطی شده آن، کنترل کننده معمولاً با ساختار ثابت و چند پارامتر متغیر طراحی شده و سپس پارامترهای مذکور در بقیه نقاط کاری سیستم، درون‌یابی می‌گردند. درون‌یابی بر اساس یک تعداد متغیر به نام متغیرهای جدول بندی انجام می‌شود، که می‌توانند متغیرهای داخلی و یا پارامترهای سیستم باشند.

در سیستم‌های کنترل پروازی نظیر موشک جدول بندی بهره یکی از پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده برای غلبه بر آثار غیرخطی سیستم است. در این سیستم‌ها نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی از مهمترین آثار غیرخطی و عوامل تغییرات وسیع پارامترهای سیستم بوده و متغیرهایی نظیر سرعت، ارتفاع، فشار دینامیکی و زاویه حمله به عنوان متغیرهای

این مقاله در تاریخ ۲۴ دی ماه ۱۳۸۴ دریافت و در تاریخ ۱۱ مرداد ماه ۱۳۸۵ بازنگری شد.

علی اکبرزاده کلات، بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (email: akbarzaa@modares.ac.ir).

حمیدرضا مؤمنی، بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (email: momenih@modares.ac.ir).

1. Parameter Varying

2. Ziegler - Nichols

3. Kitamori

4. Linear Matrix Inequality

شده است [۲۱].

آنچه که تاکنون در مورد انتخاب نواحی جدول‌بندی انجام گرفته است آموزش ضرایب مدل سیستم بر اساس رابطه ریاضی آنها در مدل آن با استفاده از توابع مشخص یعنی توابع پایه شعاعی است و به علاوه در آن برای تعیین ضرایب کنترل‌کننده الزاماً نیاز به طراحی کنترل‌کننده در یک تعداد نقاط کافی علاوه بر نقاط مراکز نواحی جدول‌بندی می‌باشد. در این مقاله از روش جدول‌بندی بهره‌فازی با هدف تعیین بهترین مراکز نواحی جدول‌بندی بر اساس خصوصیات مهم سیستم تحت کنترل و بکارگیری توابع عضویت با ویژگی‌های خاص (نه توابع عضویت مشخص) استفاده شده است که باعث مدل‌سازی ساده‌تر شده و به علاوه در آن برای تعیین ضرایب کنترل‌کننده تنها نیاز به طراحی کنترل‌کننده در نقاط مراکز نواحی جدول‌بندی می‌باشد. در واقع در این روش تقریب سیستم با تقسیم‌بندی به نواحی که تغییرات پارامترها یا ضرایب مدل سیستم نسبت به متغیرهای جدول‌بندی یکنوا هستند، انجام می‌گیرد و سپس برای رئوس نواحی، کنترل‌کننده طراحی شده و در بقیه نقاط از درون‌یابی کنترل‌کننده‌ها استفاده می‌شود.

همچنین با استفاده از خصوصیات پیشنهادی، یک روش تحلیل پایداری ساده نیز برای سیستم‌هایی که بدین روش مدل‌سازی و کنترل می‌شوند، ارائه شده است.

برای تعیین مراکز جدول‌بندی با استفاده از داده‌های کافی از نقاط کار سراسر فضای عملکرد فرآیند، یک سیستم فازی آموزش داده می‌شود. روش آموزش جدیدی به صورت ترکیب الگوریتم ژنتیک و حداقل مربعات خطی استفاده می‌شود. در این روش از خصوصیت سرعت همگرایی خوب که در روش‌های مبتنی بر مشتق و خصوصیت نیل به بهینه جامع که در روش‌های مستقل از مشتق وجود دارد به طور هم‌زمان بهره‌برداری می‌شود.

## ۲- سیستم مورد مطالعه

فرآیند تحت کنترل می‌تواند هر سیستم متغیر با پارامتر یا غیرخطی باشد. در اینجا هر یک از کانال‌های یک موشک هدایت‌شونده، به عنوان سیستم تحت کنترل در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال کانال فراز<sup>۴</sup> با معادلات زیر مفروض است

$$\begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{\alpha} & Z_q \\ M_{\alpha} & M_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_{\delta} \\ M_{\delta} \end{pmatrix} \delta_e \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} a_z \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_T Z_{\alpha} & V_T (Z_q - 1) \\ \cdot & \cdot \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_T Z_{\delta} \\ \cdot \end{pmatrix} \delta_e$$

که در روابط فوق  $\alpha$  زاویه حمله،  $q$  سرعت زاویه‌ای بدنه حول مرکز جرم،  $\delta_e$  انحراف بالک<sup>۵</sup> (ورودی کنترل) و  $a_z$  شتاب جانبی موشک در کانال مورد بحث می‌باشد.  $V_T$  سرعت موشک و تابع  $M_{\alpha}, M_q, M_{\delta}, Z_{\alpha}, Z_q, Z_{\delta}$  پارامترهای آیرودینامیکی سیستم و تابع شرایط پروازی موشک بوده که در جدول ۱ حدود مقادیر آنها و ارتباط آنها با ضرایب آیرودینامیکی سازه برای یک موشک خاص آورده شده است.

استفاده شده است [۱۰]. در روش اخیر کنترل‌کننده به صورت دو بهره قابل تنظیم بوده که خروجی‌های مدل فازی جدول‌بندی می‌باشند و ورودی‌های جدول‌بندی فازی سرعت موشک و زاویه حمله آن می‌باشند و به علاوه توابع عضویت متغیرهای جدول‌بندی ثابت و هم‌فاصله بوده و تنها خروجی‌های مدل فازی (بهره‌های کنترل‌کننده) به طور تطبیقی به هنگام می‌شوند.

بحث پایداری در جدول‌بندی بهره فازی، بسیار مهم بوده و از موضوعات در حال تحقیق می‌باشد، زیرا تاکنون شرایط لازم و کافی در مورد پایداری سیستم‌های فازی ابداع نشده و تنها شرایط کافی در این مورد توسط محققین ارائه شده است. این شرایط یکتا نیستند و تاکنون سعی در پیدا کردن شرایطی بوده است که ساده‌تر و راحت‌تر و با محدودیت کمتر، بتوان پایداری سیستم‌های فازی را بررسی کرد [۱۰] تا [۱۸]. برای حصول این شرایط از روش‌های پایداری مقاوم و روش‌های لیاپانوف [۱۴] و [۱۵] و تکنیک‌هایی نظیر نامعادله خطی ماتریسی [۱۱] و [۱۶] استفاده شده است. در [۱۷] ردیابی مسیر مرجع یک سیستم غیرخطی خودمختار<sup>۱</sup> به روش جدول‌بندی بهره فازی با تقسیم ناحیه تغییرات پارامترهای جدول‌بندی به صورت هم‌فاصله، به همراه تحلیل پایداری مقاوم سیستم جدول‌بندی فازی بررسی شده است و سپس با شبیه‌سازی و مقایسه جدول‌بندی معمولی و فازی، مؤثر بودن و بهبود عملکرد در حالت فازی نشان داده شده است.

نکته مهم دیگر در جدول‌بندی بهره فازی انتخاب تعداد و موقعیت مراکز توابع عضویت در فضای متغیرهای جدول‌بندی و انتخاب نوع توابع عضویت و یا به طور کلی چگونگی پوشش فضای متغیرهای جدول‌بندی توسط توابع عضویت می‌باشد. در این زمینه تاکنون از روش‌های دسته‌بندی فازی بر روی متغیرهای جدول‌بندی جهت انتخاب بهترین نقاط یا مراکز جدول‌بندی استفاده شده است [۹] و [۱۸]. البته روش دیگری نیز جهت انتخاب مراکز توابع عضویت ارائه شده است. در [۱۹] سعی شده است که با استفاده از پارامترهای مشخصه سیستم غیرخطی و با استفاده از یک تعداد متغیر جدول‌بندی یک شبکه توابع پایه شعاعی<sup>۲</sup> (RBFN) آموزش داده شود تا پارامترهای مشخصه آن تخمین زده شوند. آنگاه پس از طراحی کنترل‌کننده‌ها در مراکز توابع شعاعی و نقاط کمکی دیگر، با روش حداقل مربعات خطی<sup>۳</sup> وزن‌های لایه خروجی شبکه تابع پایه شعاعی برحسب پارامترهای کنترل‌کننده‌های طراحی شده محاسبه می‌شوند. بدین ترتیب در نقاطی که کنترل‌کننده طراحی شده است، ضرایب با تقریب خوبی حاصل می‌شوند. سپس عملکرد سیستم در تمام ناحیه بررسی می‌گردد و در صورت نیاز به افزودن نقاط مراکز جدول‌بندی یا تنظیم دوباره به شبکه تابع پایه شعاعی مراجعت خواهد شد. البته در این زمینه از روش‌های تکاملی جهت بهینه‌سازی ساختار و تنظیم پارامترهای توابع عضویت و کنترل‌کننده فیدبک حالت با روش جدول‌بندی بهره فازی استفاده و برای سیستم پاندول معکوس شبیه‌سازی شده است [۲۰] و اینکه از روش برنامه‌ریزی بهره فازی بر اساس مدل فازی و با ایده دسته‌بندی فازی برای یافتن بهترین نقاط جدول‌بندی و همچنین با استفاده از مدل فازی معکوس سیستم برای تولید سلسله ورودی‌های مرجع و استفاده از یک روش تطبیقی سعی در تصحیح سیگنال ورودی کنترل برای ردیابی مسیر مطلوب یک سیستم غیرخطی

4. Pitch

5. Angle of Attack

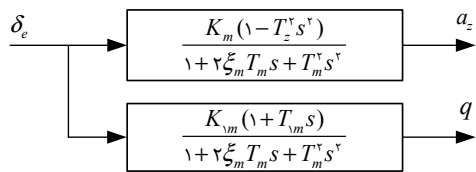
6. Pitch Rate

7. Fin Deflection

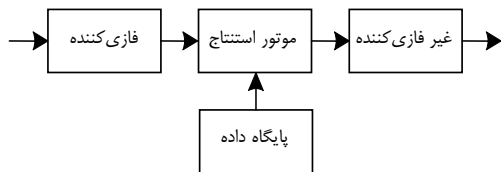
1. Autonomous

2. Radial Basis Functions Network

3. Linear Least Square



شکل ۱: توابع تبدیل خطی سیستم در یک نقطه کار.



شکل ۲: نمودار بلوکی یک سیستم فازی.

بررسی خواهد شد. در سیستم مورد مطالعه، تغییرات زاویه حمله از ۲۰- تا ۲۰+ درجه و تغییرات سرعت از ۱/۵ تا ۴ ماخ می باشد.

### ۳- سیستم های فازی و الگوریتم ژنتیک

#### ۳-۱ سیستم های فازی

یک سیستم فازی عبارت از یک سیستم استنتاج<sup>۲</sup> بر مبنای دانش و اطلاعات می باشد که با دریافت ورودی و با استفاده از یکسری قوانین<sup>۳</sup> به صورت "اگر- آنگاه"<sup>۴</sup> و بکارگیری منطق فازی، خروجی در سیستم فازی تولید می کند. در شکل ۲ قسمت های مختلف یک سیستم استنتاج فازی<sup>۵</sup> (FIS) نشان داده شده است.

این سیستم در حالت کلی شامل سه قسمت فازی سازی<sup>۶</sup>، استنتاج (پایگاه داده و موتور استنتاج) و غیر فازی سازی<sup>۷</sup> است.

#### ۳-۱-۱ فازی سازی

در یک سیستم فازی باید ورودی ها خود از نوع فازی باشند و چون معمولاً ورودی ها غیر فازی هستند، برای این منظور از یک فازی کننده استفاده می شود. در این قسمت هر ورودی با توجه به مقدار آن به یک یا چند تابع عضویت با درجات تعلق خاص نسبت داده می شود، که بیانگر تأثیر آن در قوانین مربوط به آن توابع عضویت نیز می باشد. این قسمت که درجه تعلق را محاسبه می کند، فازی کننده نام دارد. پس از فازی شدن مقدار متغیر نادیده گرفته می شود و درجه تعلق آن در محاسبات بعدی استفاده می شود.

#### ۳-۱-۲ استنتاج فازی

استنتاج فازی بر مبنای قواعد "اگر- آنگاه" که شامل گزاره های فازی است و درجه تعلق محاسبه شده در قسمت فازی سازی انجام می گیرد، در هر یک از قواعد "اگر- آنگاه" متغیرهای فازی ورودی (متعلق به یک مجموعه فازی) به متغیر فازی خروجی مرتبط می گردد که نشان دهنده یک ارتباط فازی<sup>۸</sup> و استنتاج فازی می باشد.

روش های استنتاج فازی بر اساس اینکه در قواعد فازی، نتیجه (یا خروجی) به صورت گزاره فازی و یا تابعی از ورودی باشد، دسته بندی

جدول ۱: پارامترهای مدل سیستم و حدود تغییرات آنها.

پارامتر سیستم	رابطه ریاضی	حداقل	حداکثر
$M_\alpha$	$\frac{QSD}{I_y} C_{M\alpha}$	-۳۴۱٫۵	-۱۵٫۴
$M_q$	$\frac{QSD^v}{I_y V_T} C_{Mq}$	-۱٫۶	-۰٫۰۵
$M_\delta$	$\frac{QSD}{I_y} C_{M\delta}$	-۱۵۳٫۲	-۴٫۱
$Z_\alpha$	$\frac{QS}{m V_T} C_{Z\alpha}$	-۵٫۱	-۰٫۱۳
$Z_q$	$\frac{QSD}{m V_T^v} C_{Zq} + ۱$	۱	۱٫۰۰۳
$Z_\delta$	$\frac{QS}{m V_T} C_{Z\delta}$	-۰٫۳	-۰٫۰۰۳

در جدول فوق  $m$  جرم موشک،  $Q$  فشار دینامیکی،  $D$  قطر مرجع،  $S$  سطح مقطع مرجع،  $I_y$  ممان اینرسی کانال و بقیه ضرایب آیرودینامیکی نرمالیزه و تابعی از سرعت موشک، عدد رینولدز<sup>۱</sup> و زاویه حمله می باشند. واضح است که با توجه به تغییرات وسیع پارامترهای آیرودینامیکی، یک کنترل کننده ثابت قادر به پاسخگویی سیستم در تمام شرایط کاری آن نیست. همانطور که قبلاً هم متذکر شدیم، در این سیستم ها متغیرهایی نظیر سرعت، ارتفاع، فشار دینامیکی و زاویه حمله (در موشک های با زاویه حمله زیاد) به عنوان متغیرهای جدول بندی به کار می روند، که با توجه به جدول ۱ انتخاب آنها به عنوان متغیر جدول بندی بسیار بدیهی است. پارامترهای مهم و متغیر سیستم فوق عبارتند از  $M_\alpha, M_q, M_\delta, Z_\alpha, Z_\delta$  که در صورتی که زاویه حمله کوچک باشد (پارامترهای  $C$  در جدول ۱ تابعی از سرعت موشک و زاویه حمله آن می باشند) توابعی از متغیرهای فشار دینامیکی و سرعت موشک می باشند. بنابراین برای تعیین نقاط جدول بندی می توان متغیرهای فشار دینامیکی و سرعت موشک را به عنوان سیگنال های خارجی (متغیرهای جدول بندی)، ورودی های سیستم استنتاج فازی و پارامترهای آیرودینامیکی فوق الذکر را خروجی های سیستم فازی در نظر گرفت. در این تحقیق از توابع تبدیل فرآیند در هر نقطه کار استفاده شده است. با استفاده از (۱) می توان توابع تبدیل شکل ۱ را به دست آورد [۲۲]، که در آن داریم

$$K_m = \frac{V_m (M_\alpha Z_\delta - Z_\alpha M_\delta)}{Z_\alpha M_q - M_\alpha}, \quad K_{vm} = \frac{(M_\alpha Z_\delta - Z_\alpha M_\delta)}{Z_\alpha M_q - M_\alpha}$$

$$T_m = \frac{1}{\sqrt{Z_\alpha M_q - M_\alpha}}, \quad T_{vm} = \frac{-M_\delta}{M_\alpha Z_\delta - Z_\alpha M_\delta} \quad (2)$$

$$\xi_m = \frac{-(Z_\alpha + M_q)}{2\sqrt{Z_\alpha M_q - M_\alpha}}, \quad T_z = \frac{-Z_\delta}{\sqrt{M_\alpha Z_\delta - Z_\alpha M_\delta}}$$

توابع تبدیل فوق در هر نقطه کار، رابطه بین ورودی انحراف بالک با خروجی های سرعت زاویه ای و شتاب جانبی در کانال را بدست می دهد. در معادله فوق ضرایب  $K_m, T_m, \xi_m, T_z, K_{vm}, T_{vm}$  بیان کننده رفتار سیستم می باشند. در این تحقیق، اتوپیلوت در هر نقطه کار بر اساس مدل خطی طراحی می شود و در واقع برای موشک های با زاویه حمله کوچک در نظر گرفته شده است و بنابراین از زاویه حمله به عنوان متغیر جدول بندی استفاده نمی شود، اما عملکرد سیستم در حداکثر تغییرات زاویه حمله

2. Reasoning
3. Fuzzy Rules
4. IF - THEN
5. Fuzzy Inference System
6. Fuzzification
7. Defuzzification
8. Fuzzy Connective

۳- برای تولید نسل بعد از میان کروموزم‌های نسل فعلی متناسب با درجه شایستگی آنها یک جفت انتخاب می‌شوند.

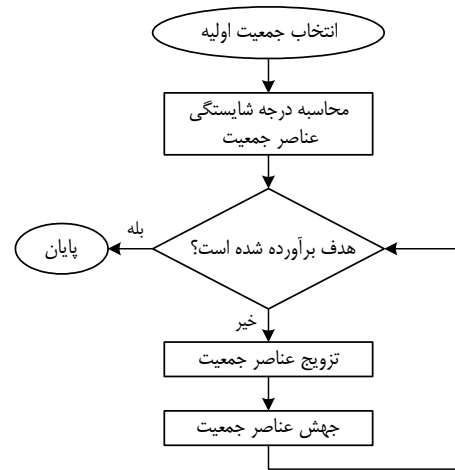
۴- بر روی کروموزم‌های انتخابی تزیوج<sup>۵</sup> انجام می‌گیرد بدین صورت که یک تعداد از ژن‌های دو کروموزم با هم تعویض می‌شوند.

۵- با توجه به اینکه تزیوج به تنهایی باعث ایجاد کروموزم‌های بهتر نمی‌شود، بعضی از ژن‌های کروموزم‌ها به طور مستقیم تغییر داده می‌شود که به این عمل جهش<sup>۶</sup> گویند.

مراحل ۲ تا ۵ تا کامل شدن جمعیت جدید ادامه می‌یابد. به طور معمول برای اینکه درجه شایستگی جمعیت جدید کاهش نیابد، یک تعداد از کروموزم‌های با بالاترین درجه شایستگی از نسل فعلی به نسل جدید منتقل می‌شود که به آن نخبه<sup>۷</sup> گویند.

جمعیت‌ها یا نسل‌های جدید به روش فوق تا برآورده شدن یک معیار توقف انجام می‌گیرد.

در شکل ۳ نمودار گردش الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است.



شکل ۳: نمودار گردش الگوریتم ژنتیک.

روش‌های استنتاج فازی بر اساس اینکه در قواعد فازی، نتیجه (یا خروجی) به صورت گزاره فازی و یا تابعی از ورودی باشد، دسته‌بندی می‌شوند. در صورتی که در قواعد فازی نتیجه به صورت گزاره فازی باشد، به آن سیستم فازی نوع ممدانی گویند و در صورتی که در قواعد فازی نتیجه به صورت تابعی از ورودی بیان شود به آن سیستم فازی نوع TSK<sup>۱</sup> گفته می‌شود [۲۳].

### ۳-۱-۳ غیر فازی سازی

غیر فازی سازی فقط در سیستم فازی نوع ممدانی استفاده می‌شود. اگر خروجی سیستم فازی برای یک محیط فازی به کار رود، غیر فازی سازی وجود ندارد اما معمولاً همان‌طور که ورودی‌ها غیر فازی هستند و ابتدا فازی می‌شوند، خروجی‌ها نیز پس از حصول، باید غیر فازی شوند تا قابل استفاده شوند. هدف از غیر فازی کردن پیدا کردن بهترین یا برزنده ترین مقدار غیر فازی برای خروجی فازی است و از روش‌های مختلفی در این زمینه استفاده می‌شود. یکی از پرکاربردترین آنها، روش مرکز ثقل<sup>۲</sup> می‌باشد [۲۳]. در سیستم استنتاج فازی نوع TSK، غیر فازی ساز وجود ندارد و خروجی سیستم فازی به صورت فشرده است و به طور مستقیم از میانگین وزن دار خروجی‌ها به دست می‌آید.

### ۳-۲ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه‌سازی مستقل از مشتق است که بر اساس مفاهیم فرآیندهای تکاملی و انتخاب طبیعی می‌باشد و اولین بار در سال ۱۹۷۵ و در دانشگاه میشیگان توسط جان هلند معرفی شد. در این روش به جای اینکه فقط یک نقطه اولیه برای شروع بهینه‌سازی انتخاب شود، یک مجموعه نقاط که به آن جمعیت گفته می‌شود در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از روش‌های تزیوج و تکثیر نژادی جمعیت نسل‌های بعدی ساخته می‌شود [۲۴]. مراحل تولید نسل جدید به صورت زیر است:

- ۱- هر یک از نقاط به صورت یک رشته بیتی که به آنها کروموزم<sup>۳</sup> گفته می‌شود، تبدیل می‌شوند. هر یک از بیت‌ها یک ژن نامیده می‌شوند.
- ۲- برای هر یک از نقاط جمعیت با توجه به معیار بهینگی یک درجه شایستگی<sup>۴</sup> تعریف می‌شود.

### ۴- روش تعیین مراکز نواحی جدول بندی بهره فازی

برای تعیین بهترین نقاط مراکز جدول بندی فازی، ابتدا ضرایب مدل خطی سیستم دینامیکی تحت کنترل (شکل ۱) در تعداد کافی از نقاط کار یعنی در سرعت‌ها و فشارهای دینامیکی مختلف پروازی محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده، یک سیستم استنتاج فازی از نوع TSK مرتبه صفر با استنتاج ضرب در ورودی آموزش داده می‌شود به نحوی که ضرایب توابع تبدیل در شکل ۱ یا به عبارتی مدل خطی سیستم در آن نقاط کاری با دقت خوبی تقریب زده شوند.

تقریب‌گر فازی در مثال مورد بحث دارای قواعدی به صورت زیر است

$$R_{ij} : IF q_d \text{ is } Q_i \text{ and } v \text{ is } V_j, THEN K_m = K_{m_{ij}} \quad (3)$$

$$and \xi_m = \xi_{m_{ij}} \text{ and } T_m = T_{m_{ij}} \text{ and } K_{vm} = K_{vm_{ij}}$$

$$and T_{vm} = T_{vm_{ij}} \text{ and } T_z = T_{z_{ij}}$$

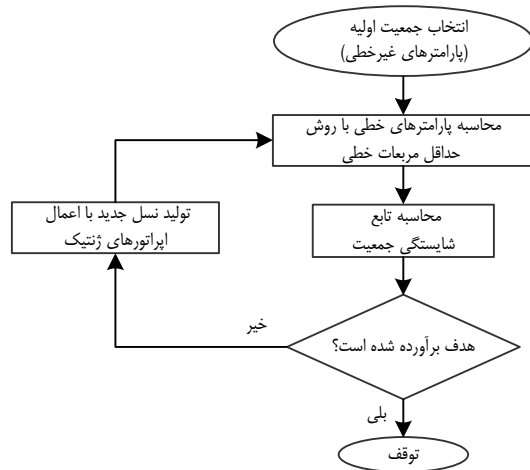
که در قواعد فوق  $q_d$  فشار دینامیکی و  $v$  سرعت موشک متغیرهای جدول بندی، به عنوان ورودی‌های سیستم فازی و  $K_m, T_m, \xi_m, T_z, K_{vm}, T_{vm}$  ضرایب مدل خطی فرآیند در هر نقطه کار (شکل ۱)، خروجی‌های آن می‌باشند. هر خروجی در سیستم فازی فوق‌الذکر به صورت زیر محاسبه می‌گردد

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \alpha_i(q_d) \beta_j(v) K_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \alpha_i(q_d) \beta_j(v)} \quad (4)$$

که در آن  $m$  و  $n$  به ترتیب تعداد توابع عضویت مربوط به متغیرهای فشار دینامیکی و سرعت موشک،  $\alpha_i$  و  $\beta_j$  نیز توابع عضویت آنها و  $K_{ij}$  مقدار تابع عضویت خروجی  $K$  در مرکز  $\alpha_i$  و  $\beta_j$  می‌باشد. در هر صورت مدل فازی مذکور یک مدل چندخروجی است و بر اساس نقاط کار مختلف سیستم (داده‌های مربوط به شرایط پروازی مختلف) باید بگونه‌ای آموزش انجام شود که تقریب مناسبی برای همه ضرایب مدل خطی به طور هم‌زمان حاصل شود. در شکل ۴ نمودار بلوکی مدل فازی مورد نظر نشان داده شده است.

5. Crossover  
6. Mutation  
7. Elite

1. Takagi – Sugeno - Kang  
2. Center of Gravity  
3. Chromosome  
4. Fitness



شکل ۵: نمودار گردش روش ترکیبی الگوریتم ژنتیک و حداقل مربعات خطی.

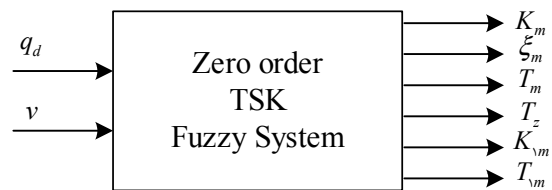
- ۲- محاسبه پارامترهای توابع عضویت خروجی (پارامترهای خطی) با روش حداقل مربعات خطی برای هر عنصر جمعیت با استفاده از داده‌های آموزشی.
- ۳- محاسبه تابع شایستگی برای هر یک از عناصر جمعیت (پارامترهای غیرخطی).
- ۴- اگر هدف برآورده شده است توقف (پایان).
- ۵- تولید نسل بعد با اعمال اپراتورهای ژنتیک بر روی جمعیت فعلی (پارامترهای غیرخطی).
- ۶- بازگشت به مرحله ۲.

شکل ۵ نمودار گردش این روش را نشان می‌دهد.

بدین ترتیب سرعت همگرایی بسیار خوب بوده و مقدار محاسبات بسیار کم خواهد شد، زیرا تعداد زیادی از پارامترهای سیستم با یک محاسبه (حداقل مربعات خطی) یکبار حاصل می‌شوند، بدون اینکه در جمعیت داده‌های هر نسل شرکت داشته باشند. این روش به هر مسئله بهینه‌سازی که ترکیبی از پارامترهای خطی و غیرخطی باشد قابل اعمال است.

## ۶- انتخاب توابع عضویت ورودی

در انتخاب توابع عضویت ورودی، از ویژگی‌های خاصی استفاده می‌کنیم که بسیار مناسب و مؤثر در حالت جدول بندی بهره می‌باشند. همان‌طور که ذکر شد، در این روش، طراحی کنترل کننده تنها در چند نقطه از فضای تحت پوشش سیستم انجام می‌گیرد و در بقیه نقاط از درونیابی بین این کنترل کننده‌ها استفاده می‌شود. از طرف دیگر به طور معمول درونیابی ضرایب کنترل کننده در یک نقطه بین دو مرکز ناحیه متوالی به بقیه نواحی وابستگی ندارد و حتی بهتر است که نواحی دیگر اثری در این درونیابی نداشته باشند. بنابراین بقیه توابع عضویت در بین دو نقطه مرکز متوالی بهتر است که صفر باشند. به علاوه در حول و حوش هر مرکز ناحیه ضرایب کنترل کننده طراحی شده در آن نقطه پاسخ مناسب را داراست. برای داشتن چنین خصوصیتی، بسیار مناسب و مفید است که مجموعه توابع عضویت، طبیعی و متعامد انتخاب شوند. یعنی در نقاط مراکز نواحی جدول بندی بهره، فقط تابع عضویت همان ناحیه واحد بوده و بقیه توابع در آن نقطه صفر باشند و به علاوه مجموع توابع عضویت در هر نقطه نیز، مقدار واحد باشد. در این صورت در هر نقطه از فضای ورودی یک یا دو تابع عضویت غیر صفر وجود دارد. این خصوصیات، بسیار



شکل ۴: سیستم فازی جهت تعیین نقاط مراکز جدول بندی بهره.

تابع هزینه به طور معمول می‌تواند مجموع مربعات خطاهای خروجی‌ها و یا مقدار مؤثر آن به صورت (۵) باشد که در آن  $N$  تعداد داده‌های آموزشی هر خروجی، اندیس  $m_i$  بیانگر خروجی سیستم فازی حاصل از داده  $i$ ام ورودی و اندیس  $d_i$  بیانگر خروجی مطلوب می‌باشد. حال آنچه مهم است انتخاب روش آموزش مدل فازی فوق، انتخاب تعداد و نوع توابع عضویت فازی مربوط به پارامترهای ورودی و انتخاب ویژگی‌های مناسب مجموعه‌های فازی مورد استفاده می‌باشد.

## ۵- آموزش مدل فازی

از میان دو دسته کلی روش‌های آموزشی، روش‌های مبتنی بر مشتق سرعت همگرایی خوبی داشته (خصوصاً نوع ترکیبی) اما پاسخ به شدت به شرایط اولیه وابسته است و اغلب موارد تنها به بهینه محلی همگرا می‌شود. به علاوه در حالت چندخروجی معادلات بهنگام‌سازی پارامترها پیچیده‌تر از حالت تک‌خروجی است. در مقابل روش‌های مستقل از مشتق سرعت همگرایی کم داشته ولی با اتخاذ روش‌های مناسب می‌توان به بهینه کلی رسید. در این روش‌ها چندخروجی بودن به هیچ وجه باعث پیچیدگی بیشتر روند عملکرد نمی‌شود. از معروف‌ترین روش‌های مذکور الگوریتم ژنتیک است که بر اساس نظریه تکاملی و تزویج و تکثیر نژادی موجودات زنده می‌باشد. در این روش به جای اینکه فقط یک عنصر تکامل یابد تا بهینه شود، یک جمعیت متکامل گشته و نسل‌های بهتر می‌سازد. اما به هر حال این روش‌ها نسبت به روش‌های بر اساس مشتق بسیار کند هستند. به همین دلیل برای اینکه هم از مزایای روش الگوریتم ژنتیک که باعث نیل به بهینه کلی می‌گردد و در حالت بهینه‌سازی چندخروجی بدون هیچ پیچیدگی خاصی عمل می‌کند، استفاده کنیم و هم سرعت همگرایی خوبی داشته باشیم، روش ترکیبی الگوریتم ژنتیک با حداقل مربعات خطی را معرفی می‌کنیم. در این روش از الگوریتم ژنتیک برای تعیین پارامترهای توابع عضویت ورودی استفاده کرده و جمعیت اولیه را بر اساس آنها تعیین می‌کنیم. حال با استفاده از روش حداقل مربعات خطی بهترین مقادیر توابع عضویت خروجی (در حالت TSK مرتبه صفر، مقادیر ثابت و در حالت TSK مرتبه یک مقادیر ثابت و ضرایب ثابت متغیرهای ورودی در توابع عضویت خروجی) را به دست آورده و برای هر عنصر جمعیت، مقدار مؤثر مجموع مربعات خطاهای خروجی‌ها را به عنوان معیار (یا هر معیار مناسب دیگر) بهینگی محاسبه می‌کنیم. پس از این، نسل بعدی از تزویج کروموزوم‌های جمعیت فعلی که همان پارامترهای توابع عضویت ورودی می‌باشند، تولید شده و هر بار با روش حداقل مربعات خطی پارامترهای توابع عضویت خروجی محاسبه و تابع شایستگی هر عنصر جمعیت جدید محاسبه می‌شود.

بنابراین مراحل بهینه‌سازی با استفاده از روش فوق به صورت زیر است:  
 ۱- انتخاب جمعیت اولیه با استفاده از پارامترهای توابع عضویت ورودی (پارامترهای غیرخطی).

$$rmsE = \sqrt{\frac{1}{\epsilon N} \left( \sum_{i=1}^N (K_{d_i} - K_{m_i})^2 + \sum_{i=1}^N (K_{v_i} - K_{vm_i})^2 + \sum_{i=1}^N (\xi_{d_i} - \xi_{m_i})^2 + \sum_{i=1}^N (T_{d_i} - T_{m_i})^2 + \sum_{i=1}^N (T_{v_i} - T_{vm_i})^2 + \sum_{i=1}^N (T_{zd_i} - T_{z_i})^2 \right)} \quad (5)$$

خصوصیت دیگر در این روش پیشنهادی جدول بندی بهره، تغییرات یکنوای ضرایب کنترل کننده (پارامترهای خروجی جدول بندی فازی) نسبت به هر یک از متغیرهای جدول بندی، بین دو مرکز توابع عضویت متوالی است. این خصوصیت توسط لم زیر بیان شده است.

لم ۲: اگر در یک سیستم فازی TSK مرتبه صفر، توابع عضویت ورودی با خصوصیات ذکر شده در لم ۱ یکنوا باشند، آنگاه خروجی سیستم استنتاج فازی بین دو مرکز توابع عضویت متوالی، نسبت به هر یک از متغیرهای ورودی یکنوا خواهد بود.

اثبات: برای یک سیستم دو ورودی، با توجه به دارا بودن خصوصیات لم ۱ داریم

$$\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n \mu_{k_l}(x_1) \mu_{l_l}(x_2) = \sum_{k=i}^{i+1} \sum_{l=j}^{j+1} \mu_{k_l}(x_1) \mu_{l_l}(x_2) = 1 \quad (6)$$

که در آن  $\mu_{k_l}$  و  $\mu_{l_l}$  توابع عضویت مربوط به متغیرهای  $x_1$  و  $x_2$  می باشند. حال خروجی ناشی از ورودی های بین دو مرکز توابع عضویت متوالی  $i$  و  $i+1$  (برای ورودی اول) و  $j$  و  $j+1$  (برای ورودی دوم) را محاسبه می کنیم، خواهیم داشت

$$y = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n \mu_{k_l}(x_1) \mu_{l_l}(x_2) y_{kl}}{\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n \mu_{k_l}(x_1) \mu_{l_l}(x_2)} = \frac{\sum_{k=i}^{i+1} \sum_{l=j}^{j+1} \mu_{k_l}(x_1) \mu_{l_l}(x_2) y_{kl}}{\sum_{k=i}^{i+1} \sum_{l=j}^{j+1} \mu_{k_l}(x_1) \mu_{l_l}(x_2)}$$

$$= \mu_{i_l}(x_1) \mu_{j_l}(x_2) y_{ij} + \mu_{i_l}(x_1) (1 - \mu_{j_l}(x_2)) y_{i(j+1)}$$

$$+ (1 - \mu_{i_l}(x_1)) \mu_{j_l}(x_2) y_{(i+1)j}$$

$$+ (1 - \mu_{i_l}(x_1)) (1 - \mu_{j_l}(x_2)) y_{(i+1)(j+1)}$$

$$= k_1(x_1) \mu_{i_l}(x_1) + k_2(x_2) = k_1(x_1) \mu_{j_l}(x_2) + k_2(x_2)$$

با توجه به رابطه فوق بدیهی است اگر توابع عضویت  $\mu_{i_l}(x_1)$  و  $\mu_{j_l}(x_2)$  یکنوا باشند، آنگاه خروجی  $y$  نسبت به هر یک از متغیرهای  $x_1$  و  $x_2$  صعودی یا نزولی (یکنوا) خواهد بود.

### ۷- طراحی کنترل کننده

ساختار کنترل کننده برای طراحی در هر یک از مراکز جدول بندی در شکل ۷ آمده است که به صورت یک بهره برای حلقه داخلی (فیدبک سرعت زاویه ای) به منظور پایداری بهتر سیستم و کنترل کننده PI برای حلقه شتاب می باشد.

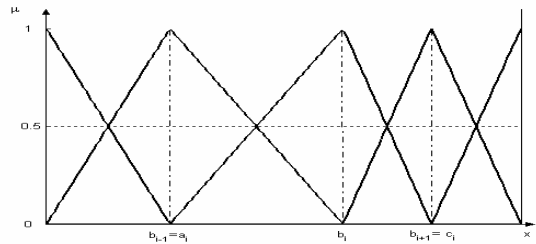
عملگر یا سیستم سرومکانیزم مورد استفاده با تابع تبدیل حلقه بسته زیر می باشد

$$G_{act}(s) = \frac{1}{1 + 2\xi_a T_a s + T_a^2 s^2} \quad (8)$$

$$\omega_a = \frac{1}{T_a} = 150 \text{ rad/s}, \quad \xi_a = 0.7$$

برای تعیین ضرایب کنترل کننده در نقاط مراکز نواحی جدول بندی، از روش جایابی قطبها استفاده کرده ایم (در هنگام طراحی کنترل کننده از دینامیک عملگر صرف نظر شده است). در پایان هر طراحی، پاسخ سیستم به ورودی پله ۱g نباید سرعت عملگر بیش از ۳۰deg/sec نیاز داشته باشد.

نمودار بلوکی کامل سیستم و کنترل کننده با جدول بندی بهره فازی در شکل ۸ آمده است.



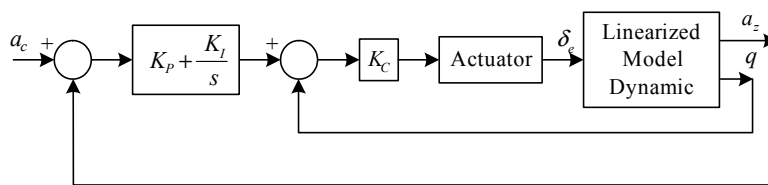
شکل ۶: توابع عضویت مثلثی طبیعی و متعامد.

مناسب روش جدول بندی بهره است. زیرا باعث تغییرات یکنوای ضرایب کنترل کننده، بین دو مرکز توابع عضویت متوالی می گردد و به علاوه نیازی به انتخاب نقاط کمکی خارج از مراکز توابع عضویت ورودی ندارد. اما آیا این خصوصیات را توسط هر نوع از توابع عضویت می توان برآورده کرد. به عنوان مثال مجموعه توابع گوسی دارای خصوصیت تعامد نیستند و به علاوه به علت تقارن نسبت مرکز تابع، توانایی پوشش مستقل در طرفین آن را ندارند، که ویژگی اخیر (توانایی پوشش مستقل در طرفین مرکز تابع عضویت) از خصوصیات مهم و مورد نیاز توابع عضویت در جدول بندی بهره است. لم زیر این توابع عضویت را مشخص می کند.

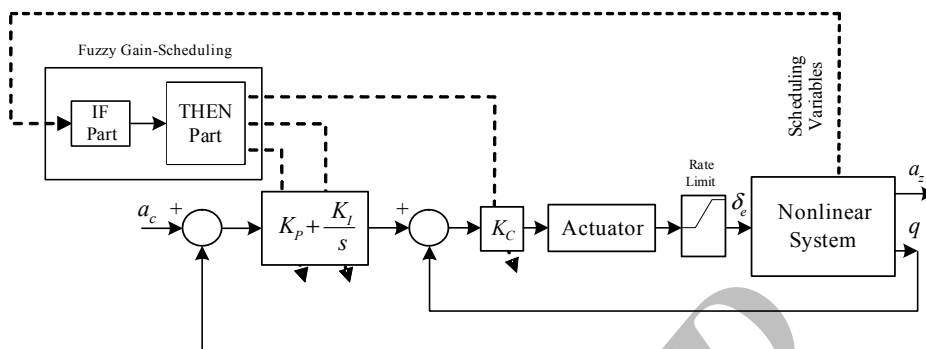
لم ۱: اگر  $n$  تابع عضویت  $A_1$  تا  $A_n$  طبیعی و متعامد باشند، آنگاه یک ترتیب به صورت  $A_{i_1} < A_{i_2} < \dots < A_{i_n}$  بین آنها وجود داشته و توابع عضویت مذکور از نوع شبه دوزنقه ای می باشند.

تعریف توابع شبه دوزنقه ای در [۲۳] آمده است. اثبات لم فوق بسیار ساده و واضح است. با توجه به طبیعی و متعامد بودن توابع عضویت در هر نقطه ای که یک تابع عضویت مقدار واحد داشته باشد تمام توابع دیگر مقدار صفر خواهند داشت و بنابراین یک ترتیب یکتا بین آنها وجود خواهد داشت و به علاوه دامنه هر تابع عضویت نیز محدود خواهد بود، یعنی توابع مذکور شبه دوزنقه ای می باشند. در این صورت در هر نقطه از فضای متغیر فازی حداکثر دو تابع عضویت مخالف صفر با مقدار مجموع واحد وجود خواهد داشت که این دو تابع عضویت متوالی می باشند.

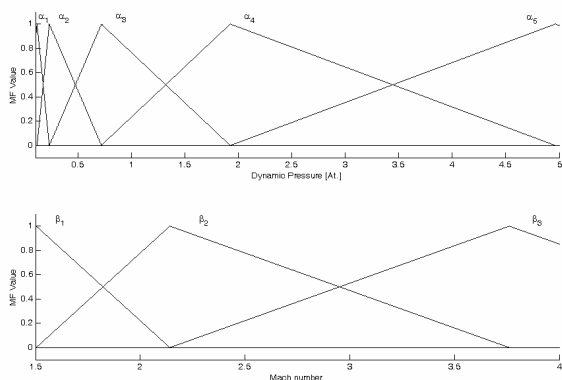
با توجه به لم مذکور باید از توابع عضویت طبیعی با بازه تغییرات محدود که طرفین مرکز آنها به طور مستقل و مجزا قابل تعریف و تغییر می باشند، استفاده کرد. خصوصیات فوق باعث وابستگی بین پارامترهای توابع عضویت متوالی و کاهش تعداد پارامترهای سیستم فازی می گردد. این موضوع در هنگام آموزش آن، بسیار اهمیت داشته و باعث کاهش حجم محاسبات خواهد شد. توابع عضویتی مانند توابع مثلثی و دوزنقه ای (در هنگام درونیابی خطی) به راحتی در این حالت قابل کاربرد می باشند. به عنوان مثال اگر از توابع مثلثی استفاده کنیم، همانند شکل ۶، برای داشتن خواص فوق الذکر، تعداد پارامترهای توابع عضویت ورودی (نسبت به حالت بدون تعامد) به یک سوم کاهش می یابد، زیرا پارامتر مرکز هر ناحیه، همان پارامتر دو انتهای ناحیه های طرفین آن می باشد و بنابراین پارامترهای توابع عضویت در این حالت فقط مراکز نواحی جدول بندی می باشند. می توان دریافت که اگر از توابع دوزنقه ای استفاده کنیم، تعداد پارامترهای توابع عضویت ورودی دو برابر تعداد مراکز نواحی و در واقع نصف پارامترهای حالت غیرمتعامد می باشد. ویژگی های مذکور علاوه بر جامعیت و مؤثر بودن باعث کاهش حجم محاسبات و ازدیاد سرعت آموزش می گردند. البته با تقریب هایی می توان از توابع عضویتی نظیر توابع گوسی دوطرفه در این مورد استفاده کرد. در این صورت باید خصوصیت تعامد را با تحمل درصدی خطا در نظر گرفت.



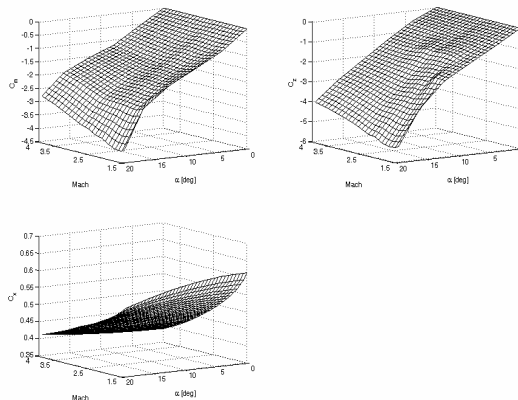
شکل ۷: سیستم حلقه بسته اتوپیلوت در یک نقطه کار.



شکل ۸: نمودار بلوکی سیستم و کنترل کننده با برنامه ریزی بهره فازی.



شکل ۱۰: توابع عضویت آموزش یافته بر اساس ضرایب مدل خطی سیستم و متغیرهای جدول بندی در نقاط کار مختلف.



شکل ۹: ضرایب  $C_x$  و  $C_z$  و  $C_m$  برحسب  $\alpha$  و عدد ماخ.

$$m = 350 \text{ kg}, I_y = 900 \text{ kg.m}^2$$

$$D = 0.45 \text{ m}, S = 0.16 \text{ m}^2$$

در شکل ۹ ضرایب آیرودینامیک  $C_x, C_z, C_m$  در صفحه عمودی (سه درجه آزادی) بر حسب زاویه حمله و سرعت موشک نشان داده شده است. در این تحقیق با نرمالیزه کردن خروجی‌ها، آموزش با ۳۰۰ داده یکنواخت در بازه  $[0.1 \ 5]$  اتمسفر برای ورودی فشار دینامیکی و بازه  $[1.5 \ 5]$  ماخ برای ورودی سرعت موشک، با جمعیت ۱۰ عنصری و مشخصات ژنتیکی برش ۵ نقطه‌ای و جهش ۰.۵٪ و انتخاب نخه ۱ عنصر در جمعیت، به تعداد ۵۰ نسل انجام شده است. شکل ۱۰ توابع عضویت سیستم فازی آموزش یافته را نشان می‌دهد. پس از آموزش سیستم فازی، مقدار خطای مؤثر خروجی‌ها در (۵) به ازای ۱۲۷۶۶ داده ارزیابی که به طور یکنواخت از فضای ورودی انتخاب شده است، ۰.۱۹۸ به دست آمده است. شکل ۱۱ قدر مطلق خطای خروجی‌های نرمالیزه سیستم فازی آموزش یافته را به ازای ۱۲۷۶۶ داده ارزیابی نشان می‌دهد.

لازم به توضیح است که با روش اتخاذی ترکیب حداقل مربعات خطی و الگوریتم ژنتیک، همگرایی اولیه بسیار سریع است و به جمعیت اولیه زیاد نیاز ندارد و برای تنظیم دقیق در نزدیکی جواب، معمولاً بهتر است که نرخ جهش بیشتری نسبت به آنچه در الگوریتم ژنتیک مرسوم استفاده می‌شود، به کار رود. چون در واقع جواب‌های چند نسل اولیه سریعاً به

در شکل ۸ قسمت مقدم سیستم فازی معادل قسمت مقدم مدل آموزش یافته بر اساس ضرایب مدل خطی سیستم در (۳) می‌باشد و ضرایب کنترل کننده در قسمت نتیجه آن، بر اساس ضرایب کنترل کننده‌های طراحی شده در مراکز جدول بندی، درونیابی می‌شوند. در واقع در نمودار بلوکی شکل ۸، بلوک کنترل کننده فازی شامل پایگاه قواعدی به صورت زیر است

$$R_{ij} : \text{IF } q_d \text{ is } Q_i \text{ and } v \text{ is } V_j, \text{ THEN}$$

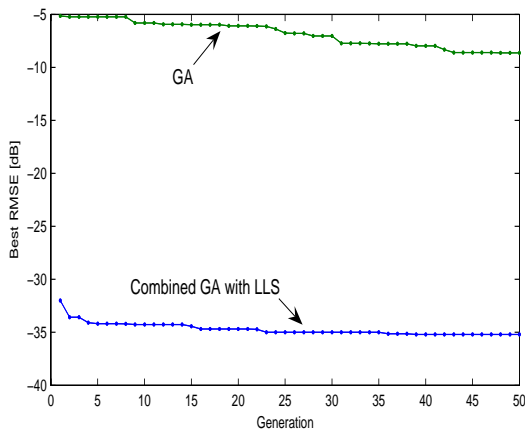
$$K_p = K_{p_{ij}} \text{ and } K_I = K_{I_{ij}} \text{ and } K_C = K_{C_{ij}} \quad (9)$$

$$i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

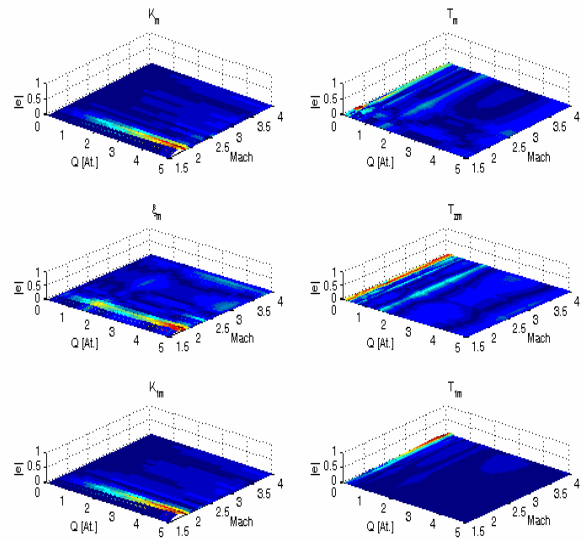
که در آن  $m$  و  $n$  همان مقادیر در (۴) می‌باشند و  $K_{p_{ij}}, K_{I_{ij}}, K_{C_{ij}}$  ضرایب کنترل کننده در مرکز  $i$ ام و  $j$ ام توابع عضویت ورودی (متغیرهای جدول بندی) می‌باشند که هر یک از آنها مانند (۴) درونیابی می‌شوند.

### ۸- نتایج شبیه سازی

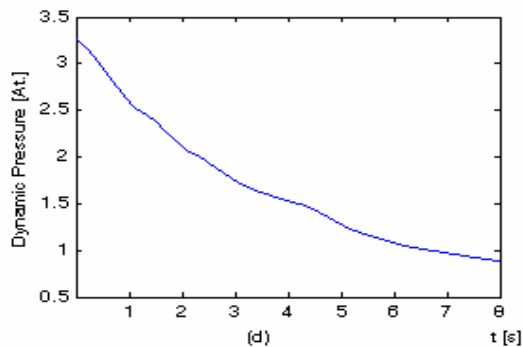
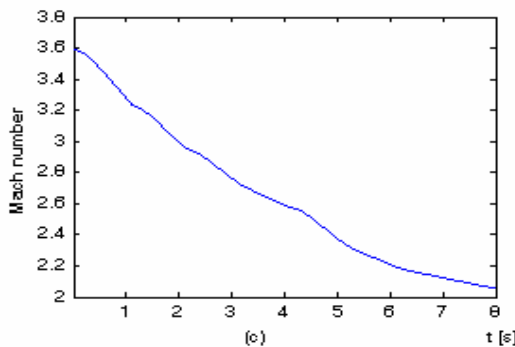
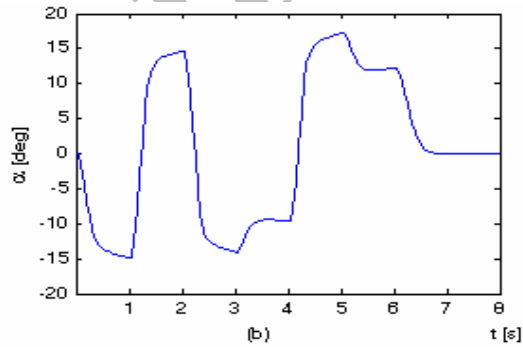
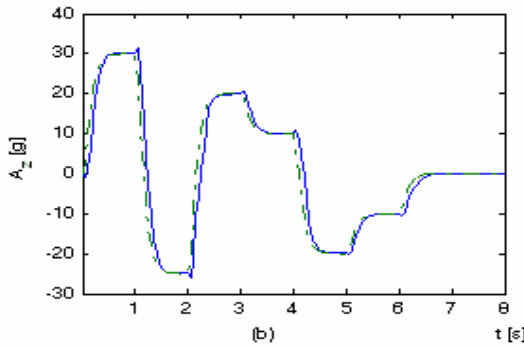
با جمع آوری داده‌های کافی از شرایط پروازی، آموزش مدل فازی با استفاده از فشار دینامیکی و سرعت موشک به عنوان ورودی‌ها و پارامترهای فرآیند به صورت زیر است



شکل ۱۲: مقایسه روش الگوریتم ژنتیک و روش ترکیبی پیشنهادی.



شکل ۱۱: قدرمطلق خطای خروجی‌های نرمالیزه سیستم فازی آموزش یافته به ازای داده ارزیابی ۱۲۷۶۶.



شکل ۱۳: پاسخ اتوپایلوت در کانال فراز، (الف) شتاب خروجی (خط) و سیگنال مرجع (خط چین)، (ب) زاویه حمله، (ج) سرعت موشک و (د) فشار دینامیکی.

دینامیکی، به نحو مطلوبی سیگنال مرجع را دنبال می‌کند.

### ۹- تحلیل پایداری

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، پایداری سیستم‌های فازی از موضوعات در حال تحقیق می‌باشد و تاکنون تنها شرایط کافی پایداری مختلفی در این زمینه ارائه شده است [۱۱] تا [۱۷]. در مسئله مورد بحث ما، تحلیل پایداری مجانبی امکان‌پذیر است. با توجه به اینکه ضرایب مدل خطی فرآیند و در واقع تقریب مدل سیستم تحت کنترل و مدل کنترل‌کننده هر دو توسط دو مدل فازی TSK مرتبه صفر با توابع عضویت مقدم یکسان بیان می‌شود، می‌توان سیستم حلقه بسته را یک سیستم فازی که از ترکیب مستقیم دو مدل فازی مذکور در (۳) و (۹) حاصل می‌شود با قواعد زیر بیان کرد (از دینامیک عملگر صرف نظر شده است)

بهینه‌های محلی همگرا می‌شوند و بنابراین برای رهایی از آنها باید نرخ جهش را زیاد انتخاب کرد. (یک روش تطبیقی در این حالت این است که در صورتی که مقادیر شایستگی جمعیت نزدیک به هم هستند، نرخ جهش را زیاد کنیم و در صورتی که مقادیر شایستگی متفاوتند، آنرا کاهش داده و یا تغییر ندهیم). در شکل ۱۲ مقایسه بین دو روش الگوریتم ژنتیک و روش ترکیبی پیشنهادی آمده است.

حال در مراکز توابع عضویت ورودی (در این مثال ۱۵ نقطه کار)، کنترل‌کننده طراحی شده و جدول‌بندی بهره فازی اعمال می‌شود. در شکل ۱۳ نتیجه شبیه‌سازی پروازی در صفحه عمودی (سه درجه آزادی) با ضرایب آیرودینامیکی متغیر در طول پرواز آورده شده است. این شبیه‌سازی در ارتفاع ۱۰ کیلومتر و در حالت موتور خاموش انجام شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود شتاب خروجی در محدوده زاویه حمله (۲۰- تا ۲۰) درجه) و با وجود تغییرات وسیع در سرعت و فشار



تحلیل پایداری مجانبی سیستم با قواعد (۱۰) با توجه به توابع عضویت طبیعی و متعامد  $Q_i$  و  $V_j$  توسط روش هورویتز امکان پذیر است. زیرا هر یک از پارامترهای سیستم حلقه باز و کنترل کننده در (۱۱) بین دو مرکز توابع عضویت متوالی  $i$  و  $i+1$  (برای ورودی اول) و  $j$  و  $j+1$  (برای ورودی دوم) به صورت زیر قابل محاسبه می باشد

$$p = \sum_{k=i}^{i+1} \sum_{l=j}^{j+1} \alpha_k(q_d) \beta_l(v) p_{kl} = \alpha_i(q_d) \beta_j(v) p_{ij} + \alpha_i(q_d) (1 - \beta_j(v)) p_{i(j+1)} + (1 - \alpha_i(q_d)) \beta_j(v) p_{(i+1)j} + (1 - \alpha_i(q_d)) (1 - \beta_j(v)) p_{(i+1)(j+1)} \quad (12)$$

که در آن  $\alpha_i$  و  $\beta_j$  توابع عضویت مربوط به متغیرهای جدول بندی  $q_d$  و  $v$  می باشند. مقدار تابع عضویت خروجی پارامتر  $p$  در مرکز  $k$  ام تابع عضویت ورودی اول و مرکز  $l$  ام تابع عضویت ورودی دوم، در قانون  $R_{kl}$  مطابق (۳) یا (۹) می باشد. رابطه (۱۲) را به صورت ساده شده زیر می نویسیم

$$p = (p_{ij} - p_{i(j+1)} - p_{(i+1)j} + p_{(i+1)(j+1)}) \alpha_i \beta_j + (p_{i(j+1)} - p_{(i+1)(j+1)}) \alpha_i + (p_{(i+1)j} - p_{(i+1)(j+1)}) \beta_j + p_{(i+1)(j+1)} \quad (13)$$

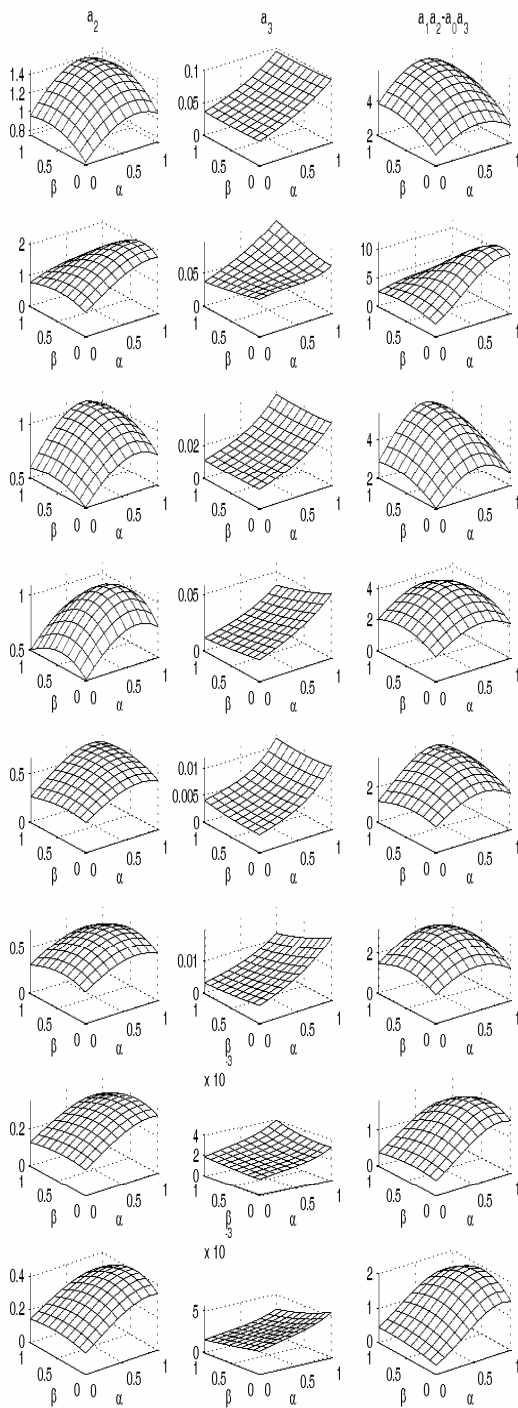
با قرار دادن هریک از مقادیر پارامترهای (۱۱) بین دو مرکز متوالی ورودی ها، به صورت (۱۳)، ضرایب  $a$  تا  $a_r$  توابعی چند جمله ای از  $\alpha_i$  و  $\beta_j$  خواهند شد. پایداری سیستم حلقه بسته در ناحیه مذکور با توجه به معیار هورویتز معادل برآورده شدن توأم نامساوی های زیر به ازای  $0 \leq \alpha_i \leq 1$  و  $0 \leq \beta_j \leq 1$  می باشد

$$a_r > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0, a_1 a_2 - a_3 a_r > 0 \quad (14)$$

با توجه به (۱۱) مثبت بودن  $a$  و  $a_1$  بدیهی است. حال اگر سه نامعادله باقیمانده در (۱۴) برقرار باشند، آنگاه ریشه های تابع تبدیل حلقه بسته در ناحیه فوق همواره سمت چپ محور موهومی بوده و طبق قضیه دوم لیاپانوف سیستم غیرخطی در این ناحیه پایدار مجانبی خواهد بود. البته برای تحلیل پایداری در سراسر نقاط کاری، باید پایداری فوق در تمام بازه های بین دو مرکز متوالی توابع عضویت ورودی ها بررسی گردد که تعداد این بازه ها  $(m-1) \times (n-1)$  (در مثال مورد بحث ۸ ناحیه) می باشد. در این مثال درستی سه نامعادله (۱۴) در ناحیه  $0 \leq \alpha_i \leq 1$  و  $0 \leq \beta_j \leq 1$  را با ترسیم رویه آنها می توان بررسی کرد. در شکل ۱۴ رویه سه رابطه فوق در هر هشت ناحیه (هر سطر برای یک ناحیه) ترسیم شده است. همان طور که ملاحظه می شود در تمام نواحی نامعادلات (۱۴) برقرار می باشند و بنابراین سیستم غیرخطی در سراسر نقاط کاری پایدار مجانبی است.

### ۱۰- جمع بندی

در این تحقیق با یک دیدگاه جدید مراکز نواحی جدول بندی بهره فازی بر اساس متغیرهای جدول بندی و تغییرات ضرایب مدل خطی فرآیند تحت کنترل طراحی و تعیین گردید و از توابع عضویت با خصوصیات و ویژگی هایی مناسب استفاده شد. برای تعیین نواحی جدول بندی فازی از توابع تبدیل فرآیند به جای فضای حالت آن در هر نقطه کار استفاده شد که می توان نشان داد که در این صورت برای رسیدن به یک دقت خاص در تخمین خروجی های مدل فازی به تعداد مراکز جدول بندی (توابع عضویت ورودی) کمتری نسبت به مدل فضای حالت نیاز می باشد. به



شکل ۱۴: رویه های هشت ناحیه برای (۱۴) (هر سطر برای یک ناحیه).

$R_{ij} : IF q_d \text{ is } Q_i \text{ and } v \text{ is } V_j, THEN$

$$G_{cl}(s) = \frac{K_{mij} K_{Cij} (1 - T_{zij}^v s^v) (K_{Pij} s + K_{Iij})}{a_r s^r + a_1 s^{r-1} + a_2 s^{r-2} + a_3 s^{r-3} + \dots} \quad (10)$$

$$i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

که در (۱۰) ضرایب  $a$  تا  $a_r$  عبارتند از

$$\begin{aligned} a_r &= K_{Cij} K_{mij} K_{Iij} \\ a_1 &= 1 + K_{Cij} K_{mij} (1 + K_{Pij}) \\ a_2 &= v \xi_{mij} T_{mij} + K_{Cij} K_{vmij} T_{vmij} - K_{Cij} K_{mij} K_{Iij} T_{zij}^v \\ a_3 &= T_{mij}^v - K_{Cij} K_{mij} K_{Pij} T_{zij}^v \end{aligned} \quad (11)$$

- [16] K. Tanaka and H. O. Wang, "Fuzzy regulators and fuzzy observers: a linear matrix inequality approach," in *Proc. of the 36th IEEE Conf. on Decision and Control*, vol. 2, pp. 1315-1320, Dec. 1997.
- [17] D. Driankov, R. Palm, and U. Rehfuess, "A takagi-sugeno fuzzy gain-scheduler," in *Proc. 5th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, vol. 2, pp. 1053-1059, Sep. 1996.
- [18] M. Alata and K. Demirli, "Fuzzy control and gain scheduling-case study: robust stabilization of an inverted pendulum," in *Proc. IFSA World Congress and 20th NAFIPS Int. Conf.*, vol. 5, pp. 3015-3020, Jul. 2001.
- [19] D. McGrane, "Determination of design regions for fuzzy gain-scheduled robust controllers," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, vol. 1, pp. 384-389, May 1998.
- [20] B. Wu and X. Yu, "Evolutionary design of fuzzy gain scheduling controllers," in *Proc. Congress on Evolutionary Computation*, vol. 3, pp. 2139-2144, 1999.
- [21] R. Palm and C. Stutz, "Generation of control sequences for a fuzzy gain scheduler," *International J. of Fuzzy Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 1-10, 2003.
- [22] P. Zarchan, *Tactical and Strategic Missile Guidance*, 4th Edition, AIAA, pp. 468-474, 2002.
- [23] L. X. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall, International Inc., 1997.
- [24] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.

**علی اکبرزاده کلات** در سال ۱۳۷۰ کارشناسی مهندسی برق خود را در گرایش الکترونیک از دانشگاه علم و صنعت ایران و در سال ۱۳۷۶ کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را در گرایش کنترل از دانشگاه فردوسی مشهد دریافت نمود. پس از آن در سال ۱۳۸۵ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق گرایش کنترل از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه‌های علمی مورد علاقه وی شامل سیستم‌های کنترل فازی و عصبی، کنترل لغزشی، کنترل تطبیقی و رباتیک می‌باشد.

**حمیدرضا مؤمنی** در سال ۱۳۵۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی شریف و در سال ۱۳۵۸ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه ویسکانسین در مدیسون آمریکا دریافت نمود. از سال ۱۳۵۸ الی ۱۳۶۲ نامبرده به عنوان عضو هیئت علمی دانشگاه‌های چمران اهواز و صنعتی اصفهان به کار مشغول بود و پس از آن به دوره دکتری مهندسی برق و کامپیوتر در دانشگاه امپریال کالج لندن در انگلستان وارد گردید و در سال ۱۳۶۶ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی کنترل از دانشگاه مذکور گردید. دکتر مؤمنی از سال ۱۳۶۶ در دانشگاه‌های صنعتی شریف و تربیت مدرس فعالیت داشته و در حال حاضر دانشیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند اتوماسیون، هدایت و ناوبری اجسام پرنده، شناسایی سیستم‌ها، کنترل تطبیقی، کنترل حرکت از راه دور و کنترل از طریق اینترنت می‌باشد.

علاوه استفاده از مدل تابع تبدیل و توابع عضویت با ویژگی‌های معرفی‌شده باعث سادگی در تحلیل پایداری سیستم می‌گردد و بالاخره اینکه در آموزش مدل فازی چندخروجی از روش ترکیبی الگوریتم ژنتیک و حداقل مربعات خطی به منظور سرعت همگرایی مناسب و نیل به بهینه کلی استفاده گردید.

## مراجع

- [1] Z. Zhao, M. Tomizuka, and S. Isaka, "Fuzzy gain scheduling of PID controllers," *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 23, no. 5, pp. 1392-1398, Sep./Oct. 1993.
- [2] J. Chen, "An integration design approach in PID controller," in *Proc. Int. Conf. on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials*, vol. 2, pp. 901-907, 1999.
- [3] P. Viljamaa and H. N. Koivo, "Fuzzy logic in PID gain scheduling," in *Proc. 3rd European Congress on Fuzzy and Intelligent Technologies*, vol. 2, pp. 927-931, Aachen, Germany, Aug. 1995.
- [4] H. Koivo, "Fuzzy gain scheduling of MIMO PID controllers for nonlinear multivariable systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 1, pp. 320-325, Oct. 2002.
- [5] S. Tzafestas and N. P. Papanikolopoulos, "Incremental fuzzy expert PID control," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 37, no. 5, pp. 365-371, Oct. 1990.
- [6] T. Pattaradej, P. Jundang, G. Chen, and P. Sooraksa, "A speed evaluation for conventional PID and fuzzy controllers," in *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Intelligent Technologies*, pp. 91-96, Bangkok, Thailand, Nov. 2001.
- [7] P. G. Gonsalves and G. L. Zacharias, "Fuzzy logic gain scheduling for flight control," in *Proc. of the 3rd IEEE Conf. on Fuzzy Systems*, vol. 2, pp. 952-957, Jun. 1994.
- [8] P. Bergsten, M. Persson, and B. Iliev, "Fuzzy gain scheduling for flight control," in *Proc. 26th IEEE Conf. on Industrial Electronics Society, IECON 2000*, vol. 1, pp. 271-276, 2000.
- [9] M. Osterom and R. Babuska, "Fuzzy gain scheduling for flight control laws," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, vol. 2, pp. 716-719, Dec. 2001.
- [10] C. L. Lin, "On the design of an adaptive fuzzy gain-scheduled autopilot," in *Proc. American Control Conf.*, vol. 2, pp. 1567-1572, 2002.
- [11] K. Tanaka, T. Ikeda, and H. O. Wang, "Fuzzy regulators and fuzzy observers: relaxed stability conditions and LMI-based designs," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 250-265, May 1998.
- [12] P. Myszkorowski and R. Longchamp, "On the stability of fuzzy control systems," in *Proc. of the 32nd Conf. on Decision and Control*, vol. 2, pp. 1751-1752, Dec. 1993.
- [13] J. H. Chou and C. H. Hsieh, "Stability conditions of fuzzy gain scheduling systems," *International J. of Fuzzy Systems*, vol. 4, no. 3, pp. 843-848, 2002.
- [14] K. Zhou and P. Khargonekar, "Stability robustness bounds for linear state-space models with structured uncertainty," *IEEE Tran. on Automatic Control*, vol. 32, no. 7, pp. 621-623, Jul. 1987.
- [15] M. A. Leal and J. S. Gibson, "A first-order Lyapunov robustness method for linear systems with uncertain parameters," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 35, no. 9, pp. 1068-1070, Sep. 1990.