

طراحی و پیاده سازی سیستم کنترل کننده فازی یک نازل تونل باد مافوق صوت ST2

حسام الدین ابن الدین حمیدی^۳

دانشکده علوم و مهندسی
دانشگاه امام حسین(ع)

محمد رضا حسنی آهنگر^۱ و ناصر مزینی^۲

دانشکده مهندسی کامپیوتر
دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

برای داشتن طیف وسیعی از اعداد ماخ مافوق صوت در یک تونل باد، دارا بودن یک نازل همگرا-واگرا متغیر و دقیق با کنترل پذیری اتوماتیک مناسب و قابلیت اتکاپذیری بالا لازم است. در این تحقیق، عملکرد یک نازل همگرا-واگرا و نقش آن در تونل باد مافوق صوت ST2 مورد تحلیل و ارزیابی واقع شده و بر اساس نتایج این ارزیابی، یک سیستم کنترل اتوماتیک تنظیم نازل طراحی و پیاده سازی شده است. برای بهینه سازی عملکرد این سیستم کنترلی، یک کنترل کننده فازی طراحی و پیاده سازی شده و رفتار آن در چند آزمون در عدد ماخهای مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج این ارزیابی و تحلیل نشان از سرعت بالاتر، دقت و پایداری مناسب و قابلیت اطمینان بالای آن دارد. این امر علاوه بر موارد ذکر شده سبب افزایش کارایی کلی تونل باد شده که نقش عمده‌ای در اعتماد بیشتر کاربران آن و کاهش هزینه‌های انجام آزمون را به همراه داشته است.

واژه‌های کلیدی: تونل باد مافوق صوت، نازل همگرا-واگرا، سیستم فازی، کنترل کننده فازی

Design and Implementation of a Fuzzy Control System for a ST2 Supersonic Wind Tunnel Nozzle

M.R. Hassani-Ahangar and N. Mozayani

Comp. Eng. Dep't.
Iran Univ. of Science & Tech.

H.E. Hamidi

School of Science and Eng.
Imam Hossein Univ.

ABSTRACT

An automatically controlled variable converging-diverging supersonic nozzle with high dependability is required for wide range of Mach numbers in a supersonic wind tunnel. In this work, the performance of a converging-diverging nozzle of the ST2 supersonic wind tunnel was evaluated and analyzed. Based on our results, an automatic control system for adjustment of the nozzle was designed and implemented. Then, a fuzzy control system was used to optimize the wind tunnel's performance and behavior. The results show that, it is superior in speed, precision, stability, and reliability. In addition, the new system has caused better wind tunnel overall performance, enhancing its reliability and reducing its cost.

Key Words: Wind Tunnel, Converging-diverging Nozzle, Fuzzy System, Fuzzy Control

۱- دانشجوی دکترا (نویسنده پاسخگو): mrhassani@iust.ac.ir

۲- استادیار

۳- استادیار

فهرست علائم

F_{ij}	مجموع نیروی وارده بر جک i ام از صفحه j ام نازل
$F_{\Delta p}$	مقدار نیروی ناشی از اختلاف فشار بالا و پایین صفحات نازل
F_f	نیروی اصطکاک دیواره و جک ها
F_{bi}	نیروی ناشی از خمش غیر خطی
η_g	راندمان گیربکس
E	ضریب کشسانی فولاد
Y_{maxi}	بیشترین مقدار جابجایی ناشی از خمش جک i ام
L	حداقل فاصله بین نقاط اول و سوم
Φ	ضریب اصطکاک
N	دور موتور
W_{ei}	توان الکتریکی مورد نیاز برای جک i ام
M_i	گشتاور مورد نیاز برای غلبه بر نیروی وارده به جک i ام
P_{atm}	فشار اتمسفر
F_i	نیروی وارده به جک i ام
r_m	شعاع مفید پیچ جک
p_i	فشار معادل با عدد ماخ مورد نظر
A_i	سطح مابین دو جک مجاور
I	گشتاور اینرسی
g	نیروی جاذبه
α	زاویه مرتبط با گام پیچ
P_i	توان لازم برای جک i ام
i	نسبت تبدیل دور گیربکس
η_m	راندمان موتور
K	ماتریس ضرائب سختی سازه ای

۱- مقدمه

امروزه به علت گسترش روز افزون کاربرد وسایل پرنده در جامعه انسانی و خصوصاً نقش تعیین کننده آنها در ابعاد مختلف اجتماعی، اقتصادی و دفاعی، نیاز تحقیقات در زمینه آیرودینامیک بیشتر احساس می شود. بهترین، ارزان ترین و مؤثرترین روش تجربی برای تحقیقات در این

زمینه آن است که جریان هوای کنترل شده‌ای را از روی نمونه جسم در یک تونل باد عبور داده و اطلاعات مورد نیاز از چگونگی عبور جریان هوا، از اطراف جسم مورد آزمون را به وسیله یک سیستم اخذ اطلاعات به دست آورد [۱ - ۳]. از اوایل سال ۱۹۵۰ میلادی، یعنی در نخستین سال های به وجود آمدن کامپیوتر، استفاده از کامپیوتر در مراکز تحقیقاتی هوا فضا معمول شد. این مسأله در همان سالهای اول کمک بزرگی به محققین در زمینه جمع آوری اطلاعات از آزمایشات در تونل باد نمود. با پیشرفت کامپیوترها استفاده از آنها به منظور برنامه ریزی و کنترل سیستم تونل باد و مطالعات در شاخه آیرودینامیک نظری و حل معادلات پیچیده حاکم بر فرآیند انتقال حرارت و جریان سیال که به کدهای عددی موسوم است، مطرح شد [۲ و ۵].

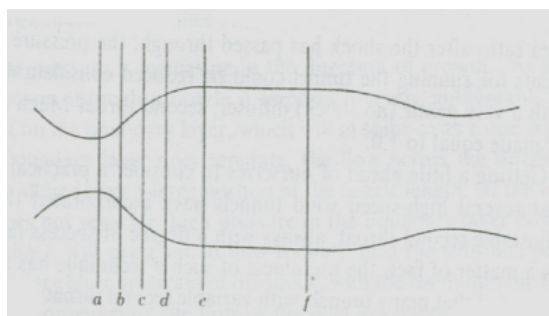
نیاز به افزایش دقت در فرآیندهای صنعتی همزمان با پیشرفت تکنولوژی باعث شده تا کاربرد علم کنترل با توجه به غنای تئوریک و توانایی های عملی آن در کنترل بازوهای مکانیکی و به تبع آن دقت کنترل ها نسبت به سادگی آنها، روز به روز اهمیت بیشتری پیدا کند، به گونه ای که اکنون طراحان، با بالا بردن دقت مدل و پیچیده تر شدن کنترلر سعی در بهبود عملکرد سیستم دارند. در سال های اخیر اشتیاق فراوانی برای بهره گیری از تئوری مجموعه های فازی^۱ برای کنترل فرآیندهای موجود در صنایع مختلف بوجود آمده است [۶ - ۷]. سیستم های فازی امروزه در طیف وسیعی از علوم، کاربرد پیدا کرده است. تئوری فازی و کنترل فازی در ترکیب با شبکه های عصبی^۲، سیستم های خبره^۳ و سیستم های کنترلی، نتایج خوب و قابل توجهی ارائه نموده است. یکی از مهم ترین کاربردهای سیستم های فازی در حل مسائل و مشکلات کنترلی است [۸ - ۶].

این مقاله در تکمیل پژوهش های قبلی و به ویژه [۱] است. ساختار مقاله در ادامه بدین شرح است که ابتدا سیستم تونل باد سه منظوره ST2 معرفی شده، سپس ارزیابی عملکرد و نقش نازل همگرا- واگرا در تونل باد بیان

1-Fuzzy Set
2- Neural Network
3-Expert System

روی مدل مورد آزمون باید با جریان روی پرنده اصلی مشابه باشد. یکی از پارامترهایی که در تونل باد از اهمیت بسزایی برخوردار است و تأثیر زیادی بر روی قابلیت و کارایی آن دارد، قلمرو عدد ماخ آن است [۲]. معمولاً برای دستیابی به طیفی از اعداد ماخ در تونل باد از نازل همگرا-واگرا متغیر استفاده می کنند. برای تست مدل در محدوده مادون صوت، شکل نازل پس از گلوگاه ثابت بوده و فقط با کاهش فشار در مقطع خروجی می توان عدد ماخ را افزایش داد. در این محدوده هیچ موج ضربه ای رخ نمی دهد [۲، ۸ و ۹]. در سرعت های مافوق صوت وضعیت پیچیده تر می شود. به این صورت که برای افزایش عدد ماخ از ماخ یک به ماخ های بالاتر، باید هندسه مناسب نازل و نسبت فشار ورودی به خروجی کافی را ایجاد کرد که این هندسه برای هر عدد ماخ شکل یگانه ای است و نسبت فشار با افزایش عدد ماخ به صورت نمایی رشد می کند [۲ - ۹].

در هنگام شروع به کار تونل باد در تمام طول آن جریان مادون صوت حاکم بوده و هیچ موج ضربه ای رخ نمی دهد. با افزایش نسبت فشار ورود به خروج در عدد ماخ یک، موج ضربه ای ضعیفی در گلوگاه ایجاد می گردد. با افزایش بیشتر نسبت فشار، موج ضربه ای ایجاد شده به تدریج در مقاطع "b"، "c" و ... "f" ظاهر شده و در هر مقطع جدید به قدرت موج ضربه ای افزوده می شود (شکل ۲)،



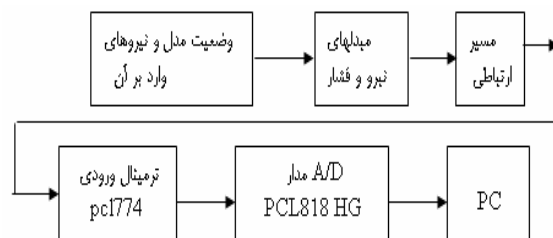
شکل ۲: شمای کلی نازل به همراه محل موج ضربه ای روی مقاطع آن در زمان فرآیند استارت تونل باد.

به گونه ای که در مقطع "f" (محفظه آزمون) موج ضربه ای بیشترین قدرت خود را دارد. نکته قابل توجه این است که جریان در پشت موج ضربه ای همواره مادون صوت بوده و

می شود. بر اساس نتیجه ارزیابی، چگونگی طراحی و پیاده سازی کنترل کننده اتوماتیک صفحات نازل و نیاز به آن تشریح می شود. در نهایت برای بهینه سازی پارامترهای سیستم کنترلی، ساختار کنترل کننده فازی مورد نظر ارائه و با خلاصه و نتیجه گیری به پایان می رسد.

۲- سیستم تونل باد ST2

تونل باد مورد نظر از نوع مدار باز مکنده و پیوسته است که دو موتور توربو فن پر قدرت انرژی آنرا تأمین می کند. این تونل باد توانایی انجام آزمون در سه رژیم مادون صوت، گذر صوت و مافوق صوت را دارد و قادر است ضرایب آیرودینامیکی مدلی از جسم پرنده و توزیع فشار بر روی آن را در حالت های استاتیکی و دینامیکی و دینامیکی در زوایای حمله ۸- تا ۲۰+ درجه و زوایای جانبی ۳- تا ۱۵+ درجه، به وسیله سیستم اخذ اطلاعات، به همراه بالانس اندازه گیری نماید [۴-۵] (شکل ۱)، یا بوسیله دستگاه شیلیرین وضعیت جریان عبوری از روی مدل جسم پرنده مورد آزمون را مشاهده، عکس و فیلمبرداری نماید. از زیر سیستم های، این تونل باد می توان به سیستم اخذ اطلاعات، سیستم های کنترلی، سیستم نازل همگرا-واگرا و محفظه آزمون اشاره کرد [۳-۴].

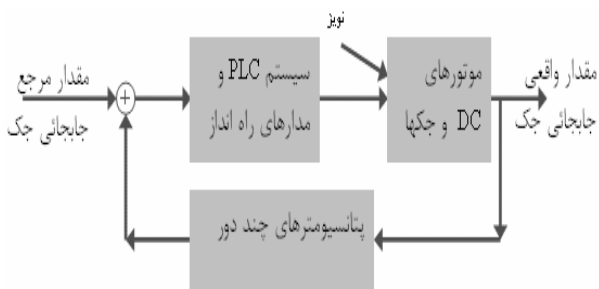


شکل ۱: شمای کلی سیستم اخذ اطلاعات تونل باد ST2.

۲-۱- نازل همگرا - واگرا

در بسیاری مواقع حرکت یک جسم پرنده اعم از هواپیما یا موشک را به دلیل پیچیدگی در مدل سازی ریاضی، درون تونل باد شبیه سازی نموده و ضرایب نیرو و لنگر مورد نظر طراح اندازه گیری می شود. نکته حائز اهمیت این است که دامنه عدد ماخ و سایر شرایط جریان شبیه سازی شده

با توجه به نحوه عملکرد صفحات نازل و ارزیابی نیرویی، سیستم کنترل اتوماتیک فیدبک نشان داده شده در شکل ۴ طراحی و پیاده‌سازی شده است.



شکل ۴: شمای سیستم کنترل اتوماتیک فیدبکدار.

۳-۱-۱- تحلیل نیرویی جکهای نازل

برای طراحی و پیاده‌سازی سیستم کنترل اتوماتیک صفحات نازل، باید از تمامی جوانب آن برای انتخاب پارامترهای سیستم کنترلی شناخت دقیق داشت. در این راستا در ادامه، به ارزیابی و تحلیل نیرویی آن پرداخته می‌شود. یعنی نیروی وارده به هریک از جکها در زمان جابجایی در حالت تونل روشن چه میزان بوده و چه اثری روی جکهای مجاور خواهند داشت. نتایج این ارزیابی نشان می‌دهد که صفحات نازل در هر عدد ماخ دارای هندسه منحصربفردی است و در اکثر موارد در حین تنظیم جک‌ها وضعیت یک جک بین دو جک مجاور به صورت غیر خطی قرار می‌گیرد. نیروهای وارده نیز به شکل ترکیبی و از رابطه (۱) به دست می‌آید در ادامه، به تشریح هر یک از آنها پرداخته و نتایج حاصل از محاسبات برای انتخاب پارامترهای سیستم کنترل اتوماتیک در جدولی ارائه خواهد شد.

$$F_{ij}(kg) = F_{\Delta p} + F_{bi} + F_f \quad (1)$$

$i=1, \dots, 7$ (شماره جک) ، $j=1, 2$ (شماره صفحه)

۳-۱-۱-۱- نیروی ناشی از اختلاف فشار بالا و پایین صفحات نازل مقدار نیرو ناشی از اختلاف فشار بالا و پایین صفحات نازل ($F_{\Delta p}$) که روی شکل ۳ مشخص شده است را تابعی از عدد ماخ در نظر گرفته و فرض می‌کنیم که بیشترین نیروی فشاری که در محل محفظه آزمون به وجود می‌آید،

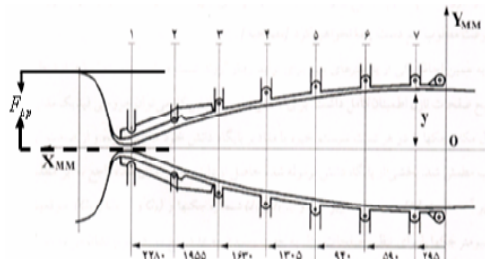
در نتیجه هنوز در محفظه آزمون جریان مادون صوت است [۲ و ۹].

بنابراین ضروریست با افزایش بیشتر نسبت فشار موجب خروج کامل موج ضربه‌ای از محفظه آزمون و استقرار در دیفیوزر تونل باد شود. در این صورت نسبت فشار مورد نیاز کاهش یافته و می‌توان با کاهش نسبت فشار ورود به خروج در مصرف انرژی صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای کرد. در نتیجه یکی از اقدامات اصلی بهینه‌سازی در طراحی تونل باد، کاهش بار راه اندازی است.

۳- طراحی و پیاده‌سازی سیستم کنترل اتوماتیک صفحات نازل

برای رسیدن به عدد ماخ‌های مافوق صوت در تونل باد مورد نظر، نازل آن از دو صفحه فولادی انعطاف پذیر که در یک ترکیب همگرا-واگرا قرار گرفته اند استفاده شده است. مشکل عمده ای که وجود دارد این است که بدلیل کوچک بودن قطر گلوگاه نازل همگرا-واگرا در عدد ماخ‌های بالاتر از یک و بالا بودن بار استاتیکی، امکان استارت تونل باد وجود ندارد و نیاز به سیستم کنترل اتوماتیک برای تنظیم هندسه نازل به هنگام استارت برای عدد ماخ مورد نظر را با سرعت و دقت مطلوب دارد. شکل ۳ تصویر کلی و محل قرارگرفتن جکهای روی آن که با شماره یک الی هفت مشخص شده را نشان می‌دهد.

با تنظیم این صفحات به وسیله جک‌هایی که به صورت دستی تنظیم می‌شوند، می‌توان به اعداد ماخ مورد نظر در داخل محفظه آزمون دست یافت. این جک‌ها در چهارده نقطه نازل نصب شده‌اند. هفت عدد از این جک‌ها با حرکت خود صفحه بالا و هفت عدد دیگر صفحه پایین نازل را برای عدد ماخ موردنظر تنظیم می‌کنند.



شکل ۳: شمای کلی صفحات نازل همگرا-واگرا تونل باد ST2.

هیچ گشتاور خارجی به سیستم وارد نمی شود. با فرض مشخص بودن نیروها، می توان از روی انتگرال توزیع تنش برشی در طول تیر، خمش را در هر نقطه به دست آورده و در نهایت جابجایی ها را مشخص نمود. تقریب خطی جابجایی یک تیر در اثر خمش به صورت رابطه (۳) قابل مدل سازی است [۹].

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad M(x) = \int V(x)dx + M_0 \quad (3)$$

که در رابطه بالا، V نیروی برشی در هر مقطع و $M(x)$ خمش می باشد با دو بار انتگرال گیری از خمش می توان جابجایی ها را به دست آورد که برای صفحات نازل به صورت رابطه (۴) است.

$$Y_i = \frac{d^3}{EI} \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i V_k, \quad V_k = \sum_{i=K}^7 F_i \quad (4)$$

این رابطه به صورت خطی بوده و قابل محاسبه بر اساس ابعاد و مشخصات صفحات نازل است. d فاصله بین جک ها، Y_1 تا Y_7 جابجایی هر جک و F_1 تا F_7 نیروی وارده می باشد که با معکوس کردن رابطه می توان میزان نیروی به وجود آمده در حین جابجایی را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$Y = \frac{1}{EI} KF \quad Y = [y_1 \dots y_7], \quad (5)$$

$$F = [f_1 \dots f_7], EI = 1.788 * 10^4 \text{ NM}^2, d = 33 \text{ cm}$$

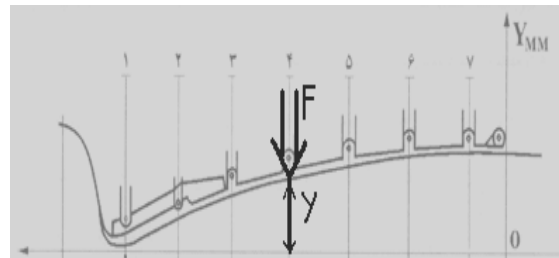
$$K = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 3 & 6 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 4 & 8 & 12 & 16 & 16 & 16 & 16 \\ 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 25 & 25 \\ 6 & 12 & 18 & 24 & 30 & 36 & 36 \\ 7 & 14 & 21 & 28 & 35 & 42 & 49 \end{bmatrix}$$

روی همه جک ها اعمال می شود. ضمن اینکه برای کاهش این نیرو به میزان نصف آن. از یک سیستم مکش هوا از پشت صفحات نازل استفاده شده است. با شرایط فوق، مقدار نیروی ناشی از اختلاف فشار از رابطه (۲) و با استفاده از جدول آیزنروپیک محاسبه می شود [۹].

$$F_{\Delta_i} = \left\{ \frac{P_{atm}}{2} - \left(\frac{P_i}{P_{atm}} \right) \times P_{atm} \right\} \times A_i \quad (2)$$

۳-۱-۲- نیروی ناشی از خمش غیر خطی صفحات نازل

برای محاسبه نیروهای وارده به هر جک و در نهایت بار وارده به موتورهای DC صفحات نازل به عنوان یک تیر منشوری مدل شد. در این بخش نیروهای وارده در اثر تغییر شکل سازه صفحات نازل محاسبه شده تا در نهایت به بارهای وارده در اثر اختلاف فشار بالا و پایین صفحات و گشتاورهای اصطکاکی چرخ دنده اضافه شود.



شکل ۵: تغییر شکل ها و نیروها.

مدل سازه ای در نظر گرفته شده، به صورت یک تیر منشوری است که از هشت نقطه، مفصل گردیده است. اولین نقطه که در شکل ۵ مشخص است، مفصل ابتدای صفحات نازل بوده و بقیه هفت نقطه بکمک جک ها قابل جابجایی، می باشد. در اثر جابجایی نیروهایی به جک ها وارده می شود که با فرض خطی بودن و کوچک بودن تغییر شکل ها به کمک تئوری های مربوط به خمش خالص تیر قابل محاسبه هستند. برای محاسبه فرض می شود در هشت نقطه هشت بار نقطه ای F_0 تا F_7 به سازه وارد می شود و به دلیل مفصلی بودن نقاط اتکا.

در این صورت نیروها بر اساس جابجایی به صورت رابطه (۶) قابل محاسبه هستند.

$$F = \left(\frac{EI}{d^3}\right)K^{-1}Y. \quad (۶)$$

$$K^{-1} = \begin{bmatrix} 2 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1/3 & 1/4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 1/4 & 1/5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/4 & 1/5 & 1/6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/5 & 2/6 & 1/7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/6 & 1/7 \end{bmatrix}.$$

جدول ۱: نیروهای وارد بر هر جک بر حسب نیوتن.

شماره جک \ عدد ماخ	1	2	3	4	5	6	7
1.2	-1.74E+03	2.27E+02	1.67E+02	1.10E+02	1.21E+02	1.44E+02	-4.21E+02
1.4	-1.74E+03	2.27E+02	3.73E+02	3.72E+02	3.12E+02	-3.41E+02	-5.95E+02
1.6	-1.74E+03	2.27E+02	7.84E+02	7.92E+02	-1.37E+02	-4.50E+02	-8.68E+02
1.8	-1.74E+03	3.83E+02	1.10E+03	7.86E+02	-3.33E+01	-6.13E+02	-1.28E+03
2	-1.74E+03	6.93E+02	1.23E+03	7.94E+02	7.95E+01	-9.20E+02	-1.53E+03
2.2	-1.74E+03	1.31E+03	8.58E+02	9.58E+02	2.77E+01	-1.02E+03	-1.79E+03
2.4	-1.39E+03	1.34E+03	8.38E+02	7.86E+02	1.40E+02	-1.11E+03	-2.00E+03
2.6	-6.97E+02	9.25E+02	6.66E+02	8.86E+02	7.09E+01	-9.99E+02	-2.25E+03
2.8	-1.39E+03	1.21E+03	5.96E+02	6.49E+02	1.66E+02	-9.45E+02	-2.37E+03
3	-1.74E+03	8.93E+02	6.70E+02	4.37E+02	4.60E+02	-1.15E+03	-2.36E+03
3.2	-1.74E+03	-1.74E+01	9.92E+02	3.29E+02	3.73E+02	-1.20E+03	-2.22E+03
3.4	-3.48E+03	3.65E+02	9.64E+02	2.46E+02	4.85E+02	-1.43E+03	-2.02E+03
3.6	-5.57E+03	1.19E+03	8.84E+02	3.56E+02	8.69E+01	-1.36E+03	-1.85E+03
3.8	-3.48E+03	1.41E+03	1.09E+03	1.06E+03	8.07E+02	9.07E+01	-4.46E+03
4	-3.83E+03	1.09E+03	9.60E+02	9.03E+02	9.80E+02	4.10E+01	-4.33E+03
4.2	-4.18E+03	6.25E+02	1.13E+03	5.97E+02	1.15E+03	-8.63E+00	-4.19E+03
4.4	-3.13E+03	-5.41E+02	1.09E+03	6.54E+02	1.19E+03	1.11E+01	-4.14E+03
4.6	-3.83E+03	-5.70E+02	1.20E+03	3.35E+02	1.44E+03	-1.42E+02	-4.00E+03

جک ها را برحسب عدد ماخ محاسبه کردیم که نتیجه کار به صورت منحنی حرکتی هر جک در شکل ۷ آمده است [۱۱].

۳-۲- تعیین پارامترهای سیستم کنترلی

براساس نیروی به دست آمده برای هر جک، گشتاور متناسب با آن را از رابطه (۷) به دست می آید [۱۰].

$$M_i = F_i \cdot r_m \cdot \text{tg}(\Phi + \alpha) \quad (7)$$

توان متناسب مورد نیاز، با جایگذاری مقدار (M_i) در رابطه (۸) محاسبه می شود [۱۰].

$$P_i = M_i g \left(\frac{2\pi n}{60i} \right) \quad (8)$$

در نهایت با در نظر گرفتن راندمان موتورهای الکتریکی و ضریب اطمینان توان الکتریکی مورد نیاز برحسب وات از رابطه (۹) محاسبه کرده و نتایج آن در جدول ۳ آمده است.

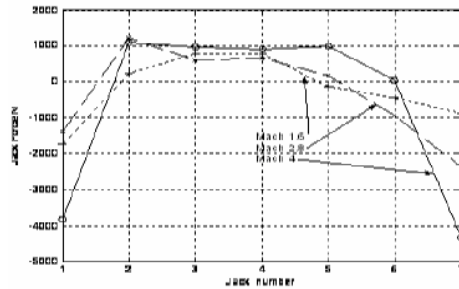
$$W_{ei} = \frac{P_i}{\eta_m \eta_g} \times 1.35 \quad (9)$$

جدول ۳: پارامترهای موردنیاز سیستم کنترلی.

پارامترها	1	2	3	4	5	6	7
W _e (kw)	1.08	1.17	1.17	0.93	0.81	0.27	0.28
P(w)	405	438	290	231	202	45	47
M(kg.m)	2.4	3.8	5.0	3.3	3.1	2.1	2.2

جدول ۴: مشخصات موتور، گیربکس و پیچهای هر جک.

پارامترها	1	2	3	4	5	6	7
توان موتور (KW)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0.4	0.4
نسبت تبدیل گیربکس	1/15	1/15	1/25	1/25	1/25	1/35	1/35
گام حرکت پیچ (mm)	3.1	2.8	5.75	4.75	3.5	7	4



شکل ۶: نیروهای وارده به هر جک در سه عدد ماخ.

با توجه به جابجایی لازم برای هر عدد ماخ نیروهای وارد به هر جک به صورت جدول ۱ و نمودار شکل ۶ قابل محاسبه است

۳-۱-۳- نیروی اصطکاک دیواره و جک ها

محاسبه دقیق نیرو (F_f) بسیار دشوار است بنابراین لذا در این مرحله بدون در نظر گرفتن مقدار نیروی اصطکاک و وزن صفحات ۳۵٪ به اعداد به دست آمده برای توان مورد نیاز برای جبران این نیروها و دامنه ضریب اطمینان برای موتورهای الکتریکی در نظر می گیریم.

جدول ۲: محدوده نیروهای وارده بر جک ها.

محدوده نیروی	1	2	3	4	5	6	7
Fmin (kg)	-557	-734	-157	-147	-105	-87	-77
Fmax (kg)	1700	2300	2500	2200	2000	1250	1100

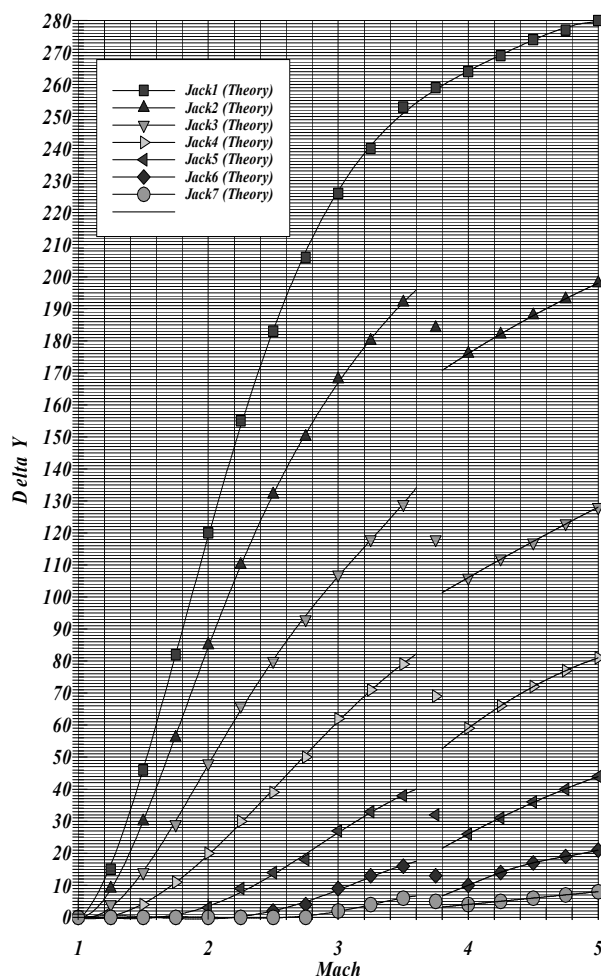
حداکثر مقدار نیروی کل وارده به هر جک مطابق با فرمول های فوق برای تک تک جک های صفحات بالا و پائین محاسبه شده و با در نظر گرفتن دامنه ضریب اطمینان (۳۵٪) در جدول ۲ آمده است.

همانطوری که در جدول ۲ ملاحظه می شود گاهی روی جک های اول و نیروهای منفی یعنی نیرویی به سمت خارج نازل وجود دارد که با لحاظ کردن تمهیداتی در مکانیزم این دو جک (نصب دو بلبینگ کف گرد) برطرف شد. همچنین براساس روش مشخصه ها میزان جابجایی مورد نیاز هر یک از

تبدیل گیربکس ها و گام حرکتی پیچها رعایت شده است. جدول ۴ مشخصات مکانیزم های انتخابی را نشان می دهد.

علاوه بر مشخصات سیستم های فوق که در قالب سیستم کنترل شونده وظیفه جابجایی صفحات نازل را بر عهده دارند، سیستم کنترل کننده ای که طراحی و پیاده سازی شده نیز از مدار راه انداز الکترونیکی موتورها در قالب PLC و نرم افزار کنترلی تشکیل شده است و از پتانسیومترهای چند دور خطی برای کنترل میزان جابجایی در مسیر فیدبک استفاده شد. این سیستم کنترلی توانسته تا حدی هدف مسئله را برآورده نماید. ولی به دلیل تعدد نقاط کنترلی، رفتار غیرخطی و پیچیدگی حرکتی جک های نازل که علاوه بر حرکت در مسیر محور عمودی در مسیر محور افقی نیز کمی در راستای رسیدن به هندسه لازمه صفحات نازل حرکت دارند، سیستم مورد نظر دارای سرعت مناسب نیست و حدود پانزده (۱۵) دقیقه زمان برای تنظیم صفحات از یک عدد ماخ به عدد ماخ بعدی نیاز دارد که به لحاظ سوخت مصرفی بسیار زیاد و سایر شرایط، مقرون به صرفه نیست. به همین دلیل برای بهینه سازی سیستم و افزایش دقت و سرعت آن باید از روشی استفاده نمود که بتوان تجربه و رفتار انسان خیره را در تنظیم صفحات نازل مدل نمود.

منطق فازی و روش استنتاج فازی در مهندسی کنترل، روش تفکر انسانی را تقلید کرده و در بسیاری از سیستم های مینی بر کاربر انسانی بهتر از روش های کنترل کلاسیک عمل می کند. قسمت اساسی کنترل کننده مبتنی بر منطق فازی (FLC) شامل مجموعه ای از قوانین شناختی^۱ است که فرآیند تحت کنترل را مدل می کند. بنابراین FLC الگوریتمی در برای تبدیل استراتژی زبان شناختی کنترل است که مبتنی بر اطلاعات یک خبره کاربر از مسائل سیستم های کنترل اتوماتیک است [۶، ۷، ۸]. در ادامه مقاله چگونگی انجام این کار تشریح می شود.



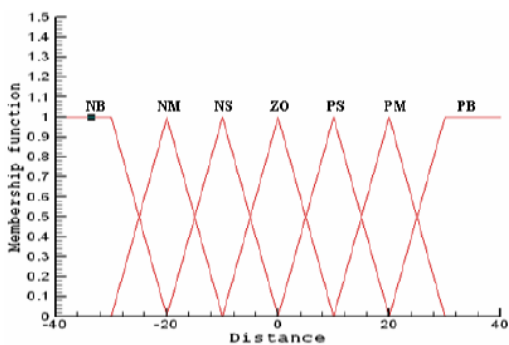
شکل ۷: نمودار موقعیت جک های نازل نسبت به عدد ماخ.

بر اساس تجربه کنترل دستی برای جلوگیری از قفل کردن موتورها و افزایش سرعت کنترل و تنظیم صفحات نازل، بهترین حالت این است که به جای کنترل تک تک جک ها، تمام جک های یک صفحه با هم ولی با سرعت های مختلف حرکت نموده و کنترل شوند. این مطلب سبب کاهش نیروی خمش و افزایش سرعت تنظیم صفحات نازل همگرا-واگرا و درنهایت کاهش زمان و هزینه انجام آزمون می شود. با توجه به پارامترهای جدول ۳ و این نکته که میزان جابجایی هر یک از جک ها متفاوت است. برای رسیدن به این توانمندی بسیار حیاتی، الزاماتی در محاسباتی که قبلا بیان شد و همچنین در انتخاب موتورها به لحاظ توان خروجی و دور، نسبت

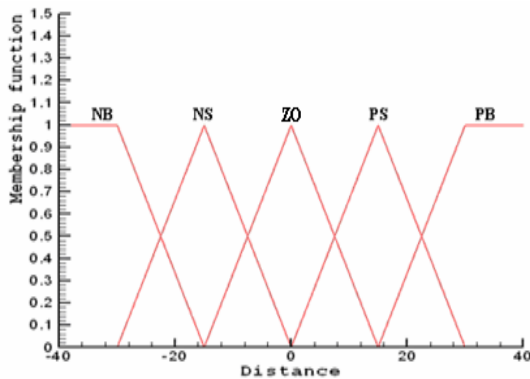
۴- ساختار کنترل کننده فازی

در طی دو دهه اخیر کنترل کننده های با منطق فازی به عنوان یک ابزار قدرتمند در کنار کنترل کننده های کلاسیک در حضور عدم قطعیت در ساختار سیستم، معرفی شده اند. استفاده از کنترل کننده فازی نسبت به کنترل کننده کلاسیک مطرح شده در کنترل صفحات نازل همگرا - واگرا دارای مزایای زیر است [۸، ۱۵، ۱۶]:

- ۱- سیستم بسیار سریع عمل نموده (Rising Time) سیستم کم و بسیار مطلوب است) و سریع تر به پاسخ مطلوب می رسد (Settling Time سیستم بسیار کم است)،
- ۲- سیستم در مقابل تغییرات ناگهانی مثل نویز، بسیار مطلوب عمل نموده و دارای دقت مناسبی است و
- ۳- این سیستم کنترلی پایدارتر، ارزان تر و به لحاظ اجرایی میسرتر است.

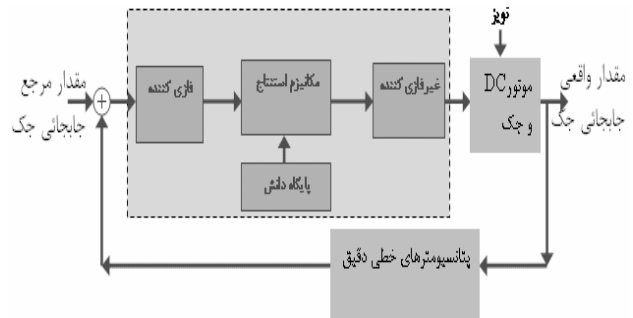


شکل ۹: تابع عضویت برای ترم های فازی ورودی کنترل کننده فازی



شکل ۱۰: تابع عضویت برای ترم های خروجی کنترل کننده فازی.

پایگاه دانش قلب یک کنترلر فازی بوده که از قواعد، اگر- آنگاه فازی تشکیل شده است [۱۲ و ۱۳]. در طراحی و پیاده سازی این سیستم از ترکیب دو روش مدل ریاضی فرآیند و استفاده از تجربه کاربر برای استخراج و ساخت پایگاه دانش استفاده شده است و با رفتار انسان خبره سعی شده است که نحوه فعالیت آن در کنترل صفحات نازل مدل سازی شود. همچنین از الگوریتم استنتاج فازی



شکل ۸: شمای سیستم کنترل کننده فازی.

کنترل کننده فازی را می توان هم به صورت حلقه بسته و هم حلقه باز به کار گرفت. کنترل فازی مخصوصاً زمانی که سیستم مورد نظر پیچیده بوده و تجزیه و تحلیل آن با مشکلات فراوانی همراه باشد، کارایی خود را به خوبی نشان داده است. کنترل کننده فازی سیستم ها مبتنی بر دانش هستند [۸ - ۶]. ساختار یک کنترل کننده فازی شامل چهار بلوک فازی کننده، ماشین استنتاج، پایگاه دانش و غیر فازی کننده است [۶، ۹ و ۱۰]. شکل ۸ شمای کلی آن را در قالب سیستم کنترلی شکل ۴ نشان می دهد. برای افزایش سرعت تنظیم صفحات نازل و افزایش پیوستگی در پاسخ سیستم از توابع عضویت مثلثی با میزان همپوشانی مناسب بین دو ترم مجاور به عنوان تابع

جدول ۵: پنج نمونه از قوانین فازی کنترل صفحات نازل.

(x_i) ورودی (y) خروجی	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
PS	PB	PB	PM	PM	PM	Z	Z
PB	PB	PB	PB	PM	PM	Z	Z
NB	NB	NB	NM	NM	NM	Z	Z
PM	PB	PM	PM	PM	PM	PM	Z

نحوه عملکرد این سیستم کنترلی به این شکل است که جدول به دست آمده از تنظیم صفحات در پایگاه دانش سیستم ذخیره شده است و در وضعیت فعلی و نهایی موتور جک ها، روی منوی اصلی برای کاربر در نظر گرفته شده است. با انتخاب عدد ماخ تنظیمی که با عدد ماخ فعلی ماکزیمم ۰/۲ فاصله دارد، سیستم ابتدا کنترل می کند که در چه عدد ماخی قرار داشته، در صورت تفاوت داشتن عدد ماخ در خواستی با وضعیت فعلی، با فرمان حرکت مثبت زیاد (PB) یا منفی زیاد (NB) جک ها را به نزدیک عدد مورد نظر ساخته و سپس در گام دوم همانند انسان خبره با فیدبک گرفتن از پتانسیومترهای خطی بسیار دقیق با دقت (۰/۰۱) که از شرکت جفران تهیه شده، به میزان مثبت کم (PS) یا منفی کم (NS) سیستم را تنظیم نهایی می نماید و در صورت برابری با عدد ماخ قبلی از قانون اول فوق استفاده نموده و مقدار صفر (ZE) را برای خروجی (y) در نظر می گیرد.

۵- ارزیابی و تحلیل عملکرد کنترل کننده فازی

این ارزیابی و تحلیل روی عملکرد واقعی سیستم در حالت تونل باد روشن برای تنظیم صفحات نازل همگرا-واگرا برای عددماخ ۰/۱، ۲ و ۲/۴ انجام می گیرد. با آزمون سیستم به دفعات زیاد در حالت خاموش تونل باد، سرعت و دقت جابجایی آنرا اندازه گیری کرده و مورد بررسی قرار دادیم. نتایج این بررسی نشان می دهد که برای تنظیم

ممدانی^۱ برای مکانیزم استنتاج استفاده شده است [۱۲ و ۱۳]. در این استنتاج قانون به صورت زیر نوشته می شود.

If x_1 is A_{1i} and ... and x_7 is A_{7i} then y is c_i
که x_1, x_2, \dots, x_7 متغیرهای ورودی قسمت مقدم، y متغیر خروجی قسمت تالی قانون $A_{1i}, A_{2i}, \dots, A_{7i}$ و $A_{1i}, A_{2i}, \dots, A_{7i}$ و C_i مجموعه های فازی برای قانون $A_{1i}, A_{2i}, \dots, A_{7i}$ هستند. مرحله غیر فازی سازی^۲، از روش سازگاری مرکز ثقل^۳ (COG) استفاده می کند [۱۵ و ۱۲]. بنابراین خروجی از رابطه (۱۰) محاسبه می شود:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^7 W_i C_i}{\sum_{i=1}^7 W_i} \quad (10)$$

همان طور که بیان شد زمان لازم برای تغییر عدد ماخ باید دارای کمترین مقدار باشد زیرا در حالتی که موتورهای تونل باد روشن هستند اگر زمان تنظیم صفحات طولانی باشد به لحاظ هزینه سوخت مصرفی، صرفه اقتصادی نداشته و سیستم تونل باد از کارآیی مطلوبی برخوردار نخواهد بود. در نتیجه باید راهکاری را در نظر گرفت که سیستم بدون مشکل در سریع ترین زمان ممکن بتواند صفحات را تنظیم نماید. راهکارهای مختلفی مورد بررسی واقع شد که بهترین راهکار برای کاهش نیروی خمشی ناشی از حرکت جک ها تغییر عدد ماخ و تنظیم شیبور با گامهای ۰/۱ و ۰/۲ ماخ است. این مقدار برای گام های حرکتی بر اساس تجربه و نیاز مشتریان انتخاب شده است. بنابراین بر این اساس هندسه نازل با کمک انسان خبره بصورت دستی در حالت خاموش در عدد ماخ های مختلف تنظیم و نتایج آن در جدولی ثبت شد. در حین تنظیم صفحات و استخراج جدول به وسیله چند نفر خبره محیط، قوانین تنظیم حرکت جک ها استخراج شده، که مشتمل بر بیست و پنج (۲۵) قانون بوده و در پایگاه دانش ذخیره شده است. پنج نمونه از این قوانین در جدول ۵ آمده است:

1. Mamdani
2. Defuzzification
3. Center of Gravity

۶- نتیجه گیری

در طراحی و بهینه سازی شکل آیرودینامیکی هواپیما، موشک و دیگر اجسام متحرک داشتن تونل بادی که بتواند طیفی از اعداد ماخ، مخصوصاً مافوق صوت، را پوشش دهد برای کاربران بسیار حائز اهمیت است. برای ایجاد جریان مافوق صوت در تونل باد، داشتن نازل همگرا-واگرا با هندسه لازم برای عددماخ مورد نظر به عنوان یک تنگنای اساسی محسوب می شود. برای رفع این تنگنا در سیستم مورد بررسی، یک سیستم کنترل اتوماتیک نازل همگرا-واگرا طراحی و پیاده سازی شده است. این سیستم کنترلی به دلیل تعدد نقاط کنترلی، رفتار غیرخطی و پیچیدگی حرکتی جکهای نازل از سرعت و پایداری مناسبی برخوردار نبوده، زیرا برای تنظیم هندسه نازل از یک عدد ماخ به عدد ماخ بعدی نیاز به حداقل پانزده دقیقه زمان داشته که با هدف بیان شده فاصله دارد. در این تحقیق، برای بهینه سازی سرعت سیستم و افزایش دقت و پایداری آن از روشی که تجربه انسان خیره را در تنظیم صفحات نازل تقلید و مدل سازی نموده، استفاده شده است. استفاده از این کنترل کننده فازی نسبت به کنترل کننده کلاسیک مطرح شده در کنترل صفحات نازل همگرا - واگرا ضمن تحقق هدف بیان شده، نتیجه مهم تر دیگری چون کاهش زمان تنظیم صفحات نازل از پانزده دقیقه به حدود دقیقه با دقت یک میلی متر خطا برای جک ها را دارد که سبب صرفه جویی مناسبی در سوخت مصرفی و کاهش زمان اجرای آزمون و هزینه آن و نیز نهایتاً کارایی بهتر تونل باد شده است.

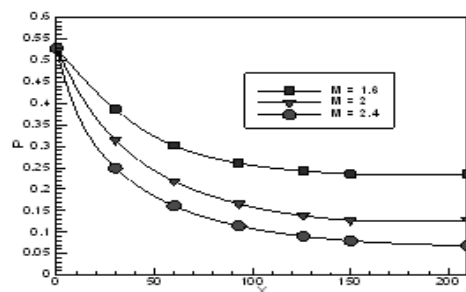
مراجع

۱. حسنی آهنگر، م.ر.، مزینبی، ن. و ربیعی ع. " ارزیابی عملکرد شیپوره همگرا-واگرای تونل باد سه منظوره ST2 و طراحی کنترلر فازی آن " چهاردهمین کنفرانس بین-المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، صص. ۴۲۲، ۱۳۸۵.
2. Pope, A. and Goin K.L. "High Speed Wind Tunnel Testing", Third Ed., John Wiley & Sons, New York, 1999.
3. Edwards, A.T. "Comparison of Strain Gage and Fiber Optic Sensors on a Sting Balance in a

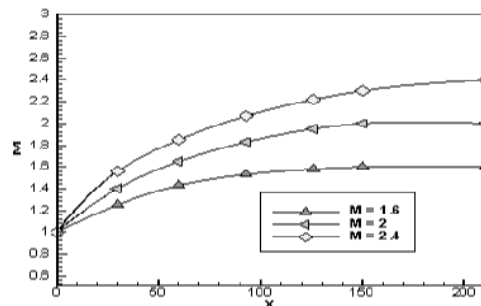
موقعیت صفحات از یک مرحله به مرحله بعدی نیاز به زمان کمتر از دو (۲) دقیقه و خطای درحد کمتر از یک (۱) میلی متر است.

پس از اینکه عملکرد سیستم در حالت خاموش تونل باد مورد تأیید قرار گرفت، برای ارزیابی و تحلیل عملکرد سیستم در حالت واقعی (روشن بودن تونل باد)، از ابتدا تا انتهای نازل در هفت نقطه با فاصله مساوی با استفاده از سیستم اخذاطلاعات و سنسورهای دقیق فشار، توزیع فشار را در طول نازل اندازه گیری نموده و براساس آن توزیع عددماخ را نیز به دست آوردیم. شکل های ۱۱-الف و ۱۱-ب، نتایج کار که از روند و دقت مناسبی برخوردار است را نشان می دهد.

با استفاده از این سیستم زمان تنظیمی هندسه نازل از یک عدد ماخ به عدد ماخ بعدی نیاز به حدود دو دقیقه زمان دارد و تنظیم آن بسیار سریع تر از حالت قبل شده و با دقت قابل قبول (یک میلی متر) امکان پذیر شده است. این سیستم کنترلی نقش عمده و اساسی در میزان کاهش سوخت مصرفی و زمان انجام آزمون و نهایت کارایی سیستم تونل باد دارد.



الف) توزیع فشار در طول نازل در چند عدد ماخ.



ب) توزیع عدد ماخ در طول نازل.

شکل ۱۱: نتایج خروجی کنترل کننده فازی در چند عدد ماخ.

- Supersonic Wind Tunnel”, Master of Science Thesis, Computer & Electronic Eng. Dep’t., Virginia University, 2000.
۴. حسنی آهنگر، م.، دهقان، م. و واحدی، خ. ”ارزیابی و تحلیل عملکرد یک بالانس نیرویی در تونل باد از دید قابلیت اطمینان“، مجله مکانیک و هوافضا، دانشگاه امام حسین (ع)، جلد ۱، شماره ۲، صص ۳۰-۲۱، ۱۳۸۴.
5. Hassani-Ahangar, M.R, Kangavari M.R., and Berangi R. “Investigation of Error Sources on the Balance and the Standard Dynamic Model in the Wind Tunnel”, ICAS Conference, Hamburg, Germany, 2006.
 6. Tanaka, K. and Wang. H.O. “Fuzzy Control Systems Design and Analysis-A Linear Matrix Inequality Approach”, John Wiley & Sons, New York, 2001.
 7. Zimmerman, H.J., “Fuzzy Set Theory and Its Applications”, 2nd Ed., Kluwer, Boston, 1991.
 8. Driankov, D., Hellendoorn, H. and Reinfrank, M. “An Introduction to Fuzzy Control”, 2nd Ed., Springer-Verlag, Berlin, 1996.
 9. Anderson, J.D. “Fundamentals of Aerodynamics”, 3rd Ed., McGraw Hill, New York, 2001.
 10. Johnson, E.R. “Mechanical of Materials”, 3rd Ed., Mc Graw-Hill, New York, 2002.
 11. Anderson, J.D. “Modern Compressible Flow”, 3rd Ed., McGraw Hill , 2003.
 12. Ruey, J.L. and Lin, B.F. “Design of a Mixed Fuzzy Controller for Multiple-input Multiple-Output Systems”, Mechatronics, Vol. 15, No. 10, pp.1225-1252, 2005.
 13. Belarbi K., Titel. F., Bourebia W., and Benmahammed K. “Design of Mamdani Fuzzy Logic Controllers With Rule Base Minimisation, Using Genetic Algorithm”, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 18, No. 7, pp. 875-880, 2005.
 14. Silva, F.V., Filho L.C.N, and Silveira, V. “Experimental Evaluation of Fuzzy Controllers for the Temperature Control of the Secondary Refrigerant in a Liquidchiller”, J. Food Eng., Vol. 35, No.1, 2005.
 15. Lam, H.K., Leung F.H.F. and Lee Y.S., “Design of a Switching Controller for Non-linear Systems with Unknown Parameters Based on a Fuzzy Logic Approach”, IEEE Trans. Systems Man Cybernetics, Part B: Cybernetics, Vol. 34, No. 2, pp. 1068–1074, 2004.
 16. Lee, C.C. “Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller—Part I”, IEEE Trans, Systems, Man Cyber., Vol. 20, No. 2, pp. 404–18, 1999.