



**Research Paper**

# **Provide a Predictive Model for The Preliminary Design of Swirl Injectors Based on Neuro-Fuzzy Model Thruster**

**H. Karimaie<sup>1\*</sup>**

Aerospace Research Institute, Ministry of Science Research and Technology, Tehran, IRAN

\* [karimaie@ari.ac.ir](mailto:karimaie@ari.ac.ir)

*In this paper the effect of the internal geometry of the injector of a low-thrust monopropellant thruster on the characteristics of the outlet liquid sheet, such as the liquid sheet thickness, the spray cone angle, the average output velocity, and its mass flow rate is studied. In this regard, simulation of the internal flow based on computational fluid dynamics was performed to predict the output flow characteristics, then parametric studies were conducted to investigate the effect of geometry. for the purpose of extracting a predictive model for the preliminary design of injector, a neural fuzzy network model was used. By using this model, the results of parametric analyzes were used to obtain geometric specifications without geometric modeling and computational fluid dynamics analysis or the use of initial design methods. The purpose of the implementation of the neural network model is to obtain an estimate of internal geometry of injector by entering the desired macroscopic characteristics of the output flow.*

**Keywords:** Swirl injector, Monopropellant, Spray cone, Low thrust, Neural fuzzy network

---

1. Assistant Professor (Corresponding Author)

مقاله علمی - پژوهشی

# ارائه یک مدل پیش‌بینی کننده برای طراحی اولیه انژکتورهای جریان پیچشی مبتنی بر مدل فازی - عصبی - تطبیقی

حدیثه کریمایی<sup>\*۱</sup>

۱- پژوهشکده سامانه‌های فضانوردی، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

\* karimaei@ari.ac.ir

در این مقاله، تاثیر هندسه داخلی انژکتور یک رانشگر تک‌مولفه‌ای کم-پیشران بر مشخصه‌های لایه سیال خروجی از آن نظیر ضخامت لایه، زاویه مخروط پاشش، سرعت میانگین و همچنین دبی جرمی آن، مطالعه شده است. بدین منظور، شبیه‌سازی جریان داخلی انژکتور بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی به‌منظور پیش‌بینی مشخصه‌های جریان با تکیه بر مطالعات پارامتریک برای بررسی تاثیر هندسه صورت گرفت. به منظور استخراج یک مدل پیش‌بینی کننده برای طراحی اولیه انژکتور، از مدل شبکه فازی-عصبی-تطبیقی ANFIS استفاده شد. به کمک این مدل از نتایج تحلیل‌های پارامتریک استفاده گردید تا بتوان بدون مدلسازی هندسی و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی و یا استفاده از روش‌های طراحی اولیه، یک پیش‌بینی از مشخصات هندسی بدست آورد. بر این اساس اثر پارامترهای گوناگون شامل طول و قطر محفظه چرخش، نسبت طول به قطر نازل، نسبت طول به قطر مجرای ورودی، نسبت شعاع گردش به شعاع نازل و نسبت شعاع گردش به شعاع مجرای ورودی بر روی کمیت‌های هدف شامل دبی جرمی، ضخامت لایه، زاویه اسپری و سرعت میانگین لایه سیال مطالعه گردیدند و این پارامترها به عنوان خروجی‌های مدل ANFIS در نظر گرفته شدند. آموزش شبکه به نحو بسیار خوبی انجام گرفت و داده‌های مدل ANFIS و آموزش کاملاً بر هم منطبق شدند. بنابراین با درج مشخصات دلخواه ماکروسکوپی یک اسپری، به یک برآورد اولیه از مشخصات هندسه داخلی انژکتور قابل دستیابی شد. هدف از پیاده‌سازی مدل شبکه فازی-عصبی-تطبیقی بدست آوردن تخمینی از هندسه داخلی انژکتور با وارد کردن مشخصات ماکروسکوپی دلخواه جریان خروجی از آن است. با این هدف، توابع مورد نظر از این تحلیل، ایجاد شدند که می‌توان از آنها به‌خوبی بهره گرفت.

واژه‌های کلیدی: لایه سیال، رانشگر تک‌مولفه‌ای، مخروط اسپری، هندسه داخلی انژکتور، شبکه فازی-عصبی-تطبیقی

		علائم و اختصارات	
$B_i$	مجموعه فازی		
$f_i$	خروجی مشخص شده توسط قواعد فازی		
$P_i$	پارامتر طراحی	$x$	ورودی مدل انفیس
$q_i$	پارامتر طراحی	$y$	ورودی مدل انفیس
$r_i$	پارامتر طراحی	$A_i$	مجموعه فازی
$h$	فاصله مجرای ورود تا نازل خروج		
$l_c$	طول نازل		

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)

همکارانش ۲۰۰۳ [۶] جریان دوفازی داخل نوعی انژکتور هوادمشی<sup>۶</sup> را به صورت سه بعدی شبیه سازی کردند. در آن مطالعه، ضخامت و یکنواختی سرعت فیلم سیال و زاویه خروج از اریفیس بررسی شد. آنها روش حجم سیال را برای مدلسازی جریان دوفازی استفاده نمودند که نتایج آنها با نتایج تجربی انطباق خوبی داشت. نقید و همکاران ۲۰۱۱ [۷] مطالعه تحلیلی و تجربی روی شکست لایه مایع انجام دادند و اثرات شکل انژکتور و اختلاف فشار دو سر انژکتور را بر مشخصه های لایه مایع برای چهار انژکتور مختلف بررسی کردند. برخی از متخصصان تلاش کردند تا جریان چند فازی درون نازل را با اسپری مرتبط سازند. این مطالعات ناچاراً همگی نیمه تجربی هستند. سار<sup>۷</sup> ۱۹۹۹ [۸] مدل جریان سیال در نازل را به منظور شبیه سازی تأثیر هندسه نازل بر فرآیند اسپری در کد کیوا<sup>۸</sup> ایجاد کرد. روش او مشخصه های جریان را پیش بینی می کرد. این مدل، پارامترهایی چون شکل ورودی راهگاه، افت مسیر، کاویتاسیون و فشار پاشش را مورد توجه قرار داده و ضریب عبور جریان انژکتور، سرعت مؤثر خروجی و اندازه قطرات اولیه را محاسبه می کرد.

کلین<sup>۹</sup> ۲۰۰۳ [۹] مشخصه های سرعت جریان خروجی از نازل و آشفتگی آن را با دو روش مدل کرد. در روش اول از شبیه سازی عددی مستقیم جت مغشوش صفحه ای استفاده کرد و تأثیر جریان داخلی نازل را بررسی کرد. در روش دوم اتمیزاسیون را مستقل از جریان داخل نازل در نظر گرفت. بر اساس نظر کلین نتایج حل عددی مستقیم جت سیال، لایه مرزی آن و شکست اولیه لایه سیال به شرایط جریان داخلی بسیار حساس است. حسینعلی پور و همکاران ۲۰۱۳ [۱۰] به کمک تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی، عملکرد یک انژکتور دوفازی Y شکل را که به عنوان انژکتور سوخت مازوت در نیروگاه استفاده می شد بررسی نمودند. آنها از روش حجم سیال برای پیدا کردن سطح مشترک مازوت و بخار در داخل انژکتور استفاده نمودند. حسینعلی پور و همکاران ۲۰۱۴ [۱۱] به کمک تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی، تأثیر دبی جرمی سوخت را بر روی مشخصه های لایه سیال خروجی از یک نوع انژکتور گریز از مرکز مربوط به انژکتور اکسیدکننده در موتورهای دومولفه ای بررسی نمودند و نشان دادند که چگونه ضخامت لایه سیال خروجی و همچنین زاویه بازشدگی مخروط پاشش با دبی جرمی تغییر می کند. حسینعلی پور و کریمائی ۲۰۱۶ [۱۲]، [۱۳] اثر هندسه داخلی انژکتور را به توزیع پاشش مرتبط نمودند. کریمائی ۲۰۱۸ [۱۴] طراحی و شبیه سازی انژکتور سوخت یک میکرو-رانسگر تک مولفه ای هیدرازینی با پیشران

$d_c$	قطر نازل
$l_{Bx}$	طول مجرای ورود
$d_{Bx}$	قطر مجرای ورود
$R_Z$	شعاع چرخش
$r_c$	شعاع نازل
$r_{Bx}$	شعاع مجرای ورود
$\Psi$	نیم زاویه پخ ورودی به نازل

## مقدمه

در رانشگرهای تک مولفه ای، واکنش احتراق با عبور جریان پیشران از محفظه کاتالیست صورت می پذیرد. رانشگرهای تک مولفه ای در سیستم های پیشران ماهواره ها با هدف انجام مأموریت های نظیر کنترل ارتفاع و وضعیت ماهواره لازم بوده و بسیار استفاده می شود. رانشگر تک مولفه ای شامل شیر کنترل جریانی، سیستم پاشش، کاتالیست، محفظه یا بستر کاتالیست، گرم کن و نازل است. در این رانشگرها، پیشران با عبور از شیر کنترل جریان و پاشش به کمک انژکتور روی سطح کاتالیست پیش گرم، طی یک فرآیند گرمازا تبخیر و تجزیه شده و با عبور از خروجی نازل، نیروی رانش تولید می کند [۱][۱]. از اینرو انژکتور به عنوان یک المان مهم در این تکنولوژی برای پودر نمودن سوخت عمل می کند.

وارد شدن سیال با سرعت زاویه ای بالا به درون محفظه چرخش انژکتور، باعث ایجاد چرخش سیال در آن می گردد که در نتیجه، یک لایه نازک سیال از آن خارج شده و به صورت یک اسپری مخروطی شکل توخالی پخش می شود [۲]. رویز<sup>۲</sup> ۱۹۹۱ [۳] فرض کرد که پروفیل سرعت لایه خروجی از انژکتور یکنواخت باشد و میزان افت به کمک اختلاف مومنتوم بین خروجی و قسمت متراکم شده جریانی بدست می آید که در این مدل مومنتوم زیادی در اثر جریان روی دیواره تلف می شود. در مقابل مدل قبلی، سنکال<sup>۳</sup> ۱۹۹۹ [۴] فرض کرد که پروفیل سرعت در خروجی نازل غیر یکنواخت بوده و بطور شعاعی تغییر کند ولی در عوض از برش دیواره ها صرف نظر کرد. سار<sup>۴</sup> ۱۹۹۹ [۵] مدل جریان سیال در نازل را به منظور شبیه سازی تأثیر هندسه نازل بر فرآیند اسپری در کد کیوا<sup>۵</sup> ایجاد کرد. روش او با استفاده از هیدرولیک جریان در نازل، مشخصه های جریان را پیش بینی می کند. در طی دهه اخیر، با افزایش امکانات سخت افزاری و قابلیت های محاسباتی، تلاش بسیاری در توسعه مدلسازی های عددی دقیق، شده است. بیلو و

6. Airblast  
7. Sarre  
8. Kiva II  
9. Klein

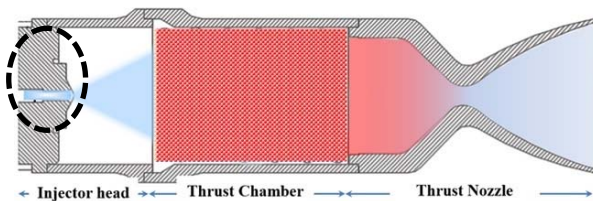
2. Ruiz  
3. Schmidt  
4. Sarre  
5. Kiva II

NNs در تنظیم کردن قواعد پایه‌ای سیستم فازی، این سیستم منجر به پردازش داده‌ها می‌شود. یک شیوه خاص در بسط فازی-عصبی، سیستم انطباق استنتاجی فازی-عصبی (ANFIS) می‌باشد که نتایج بسیار شگفت‌انگیزی در مدل‌سازی توابع غیرخطی از خود نشان می‌دهد. در ANFIS پارامترهای توابع عضو از مجموعه داده‌هایی استخراج می‌شود که این داده‌ها رفتار سیستم را توصیف می‌کنند. فهم ANFIS باعث ترکیب مجموعه داده‌ها و تنظیم پارامترهای سیستم بر اساس خطای محتوای داده‌ها می‌باشد [۱۶].

در مقاله حاضر، تاثیر هندسه داخلی انژکتور سوخت یک رانشگر تک‌مولفه‌ای هیدرازینی ۱۰ نیوتنی بر مشخصه‌های لایه سیال خروجی از آن ارائه شده است. این انژکتور از نوع جریان پیچشی با دو ورودی مماسی می‌باشد. مدلسازی و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی برای آن انجام شد و مشخصه‌های لایه سیال خروجی از انژکتور استخراج شد. هدف از این مطالعه پارامتریک، یافتن میزان تاثیر کیفی و کمی پارامترهای هندسی انژکتور بر مشخصه‌های لایه سیال خروجی و میزان دبی جرمی عبوری است. با بررسی پارامتریک تاثیر هندسه بر مشخصه‌های لایه سیال خروجی، مشخص شد که این اثر چشم‌گیر است. بنابراین از یک مدل فازی عصبی تطبیقی برای استخراج یک مدل پیش‌بینی‌کننده مشخصات هندسی انژکتور بر مبنای مشخصات ماکروسکوپیک دلخواه اسپری خروجی، استفاده شد.

### انژکتور مورد مطالعه

انژکتور مورد مطالعه، انژکتور سوخت یک رانشگر تک‌مولفه‌ای هیدرازینی کم‌پیشران (به صورت شکل ۱) از نوع جریان پیچشی می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده‌اند. شماتیک انژکتور طراحی شده در نرم‌افزار سالید ورک<sup>۱۰</sup> که به صورت ماژولار (دو تکه) تهیه شده است به صورت شکل ۲ می‌باشد. شکل ۳ نمای انفجاری از نمونه نهایی انژکتور طراحی شده را نشان می‌دهد. این انژکتور از اینرو به صورت ماژولار طراحی شده است که قابلیت جانمایی روی تراسترهای کم‌پیشران و همینطور قابلیت نصب روی صفحه انژکتور ستاپ‌های آزمایشگاهی برای انجام تست‌های سرد و گرم را داشته باشد.



شکل ۱- طرح‌واره‌ای از یک رانشگر تک پیش‌رانه کاتالیستی

۱۰ نیوتن را انجام داد. او از روش حجم سیال VOF<sup>۱۱</sup> برای شبیه‌سازی جریان استفاده کرد و اثر آشفتگی جریان را نیز با مدل k-ε مدل نمود و سپس مشخصه‌های لایه سیال خروجی را استخراج نمود. شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۱۱</sup> که الهام گرفته از ساختار مغز انسان هستند، در سال‌های اخیر چه در بعد توسعه ساختاری و چه در بعد پیاده‌سازی سخت‌افزاری، از نظر کیفی، کمی و توانایی در حال رشد و پیشرفت هستند و تکنیک‌های مختلف محاسبات عصبی از لحاظ تعداد، همچنان در حال افزایش است [۱۵]. در سالیان اخیر شاهد حرکتی مستمر، از لحاظ تحقیقات صرفاً تئوری به سمت تحقیقات کاربردی به خصوص برای مسائلی که برای آن‌ها راه حلی موجود نیست و یا به راحتی قابل حل نیستند بوده‌ایم. شبکه‌های عصبی مصنوعی با پردازش روی مجموعه‌ای از داده‌ها، دانش یا قانون نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کنند. به همین خاطر به این سیستم‌ها هوشمند گویند، چرا که بر اساس محاسبات بر روی داده‌های عددی یا مثال‌ها، قوانین کلی را فرا می‌گیرند. شبکه‌های عصبی به صورت گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف نظیر بهینه‌سازی، تشخیص الگو و غیره به کار برده می‌شوند. برنامه‌های رایانه‌ای تحلیلی جهت ارائه جواب‌های دقیق نیاز به انجام محاسبات زیادی دارند که مستلزم صرف زمان و استفاده از رایانه‌های قدرتمندی می‌باشد. در صورتی که تعداد پارامترهای مورد بررسی افزایش یابد، زمان و حجم محاسبات به صورت نمایی افزایش می‌یابد. در نتیجه برای طراح، انتخاب حالت بهینه سیستم مشکل می‌گردد، لذا از شبکه‌های عصبی با قابلیت یادگیری الگوهای مختلف استفاده می‌گردد. شبکه‌های عصبی جهت غلبه بر محدودیت‌های روش‌های مرسوم جهت حل مسائل پیچیده آموزش دیده می‌شوند. اصلی‌ترین جزء شبکه عصبی، نرون نام دارد. اساساً نرون‌های بیولوژیکی با دریافت ورودی‌ها از برخی منابع، آن‌ها را از طرق مختلفی با یکدیگر ترکیب می‌نمایند و سپس با انجام عملیات خطی و یا غیرخطی بر روی ورودی‌ها، خروجی‌های نهایی را ارائه می‌نمایند [۱۶].

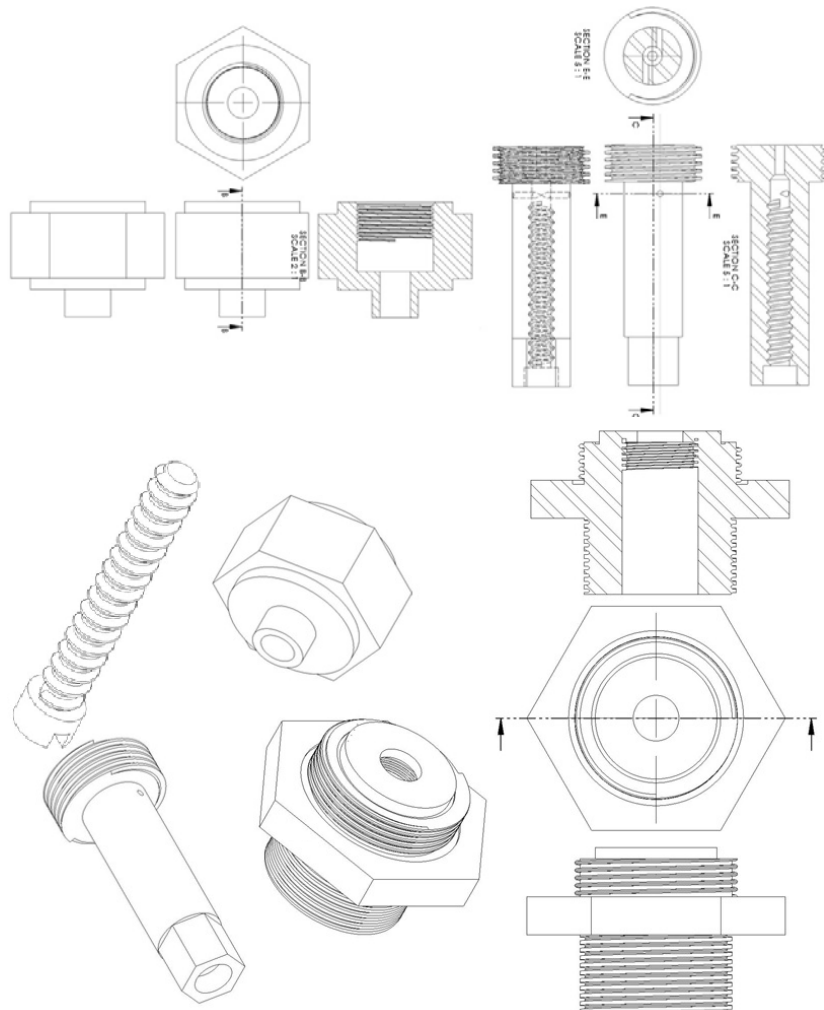
تئوری مجموعه فازی یک نقش بسیار مهم در هنگام تصمیم‌گیری عدم قطعیتها در فعالیتهای فضایی بازی می‌کند. بنابراین مجموعه فازی باعث جذب افراد و توجه بسیاری در تکنولوژی اطلاعات، تکنیک‌های تولید، تصمیم‌گیری‌ها، تشخیص الگوها، تشخیص عیب و آنالیز داده‌ها و غیره شده است. سیستم فازی-عصبی یک سیستم فازی می‌باشد که از شبکه عصبی (NNs) به منظور تعیین مجموعه فازی و قواعد فازی با پردازش نمونه داده‌ها استفاده می‌کند. با استفاده از خاصیت‌های ریاضی

10. Volume of fluid

11. Artificial neural network

جدول ۱- مشخصات عملکردی و هندسه پایه انزکتور

مقدار	مشخصه
$\approx 0.058$	دبی جرمی $\dot{m}_\phi$ (kg/s)
۴/۰	اختلاف فشار دو سر انزکتور (bar)
۶۵	زاویه مخروط پاشش ( $^\circ$ )
۱/۰	قطر نازل انزکتور $r_c$ (mm)
۰/۶	قطر مجراهای ورودی $r_{Bx}$ (mm)
۲/۰	قطر محفظه پیچش $D_k$
۱.۵	طول محفظه پیچش h (mm)



شکل ۲- طرحواره انزکتور طراحی شده برای رانشگر تک پیشران

لایه آخر را لایه خروجی و لایه‌های میانی را اصطلاحاً لایه‌های پنهان<sup>۱۳</sup> می‌نامند. در نمایش، به طور معمول نرون‌های هر لایه به کلیه نرون‌های لایه مجاور از طریق یک خط، متصل می‌باشند. در شکل ۴ نمونه‌ای از ساختار یک شبکه عصبی چند لایه نشان داده شده است [۱۷] اطلاعات بین نرون‌ها از طریق این اتصالات منتقل

### مدل فازی-عصبی- تطبیقی ANFIS

یک شبکه عصبی مصنوعی از چند لایه و هر لایه از تعدادی اجزاء کوچک داده‌پردازی به نام نرون، سلول، واحد یا گره تشکیل شده است. ساختار یک شبکه، شامل لایه‌های مختلف به همراه تعداد نرون‌های مربوطه می‌باشد. اولین لایه هر شبکه را لایه ورودی،

13. Hidden Layer

اعتباربخشی و بقیه برای تست شبکه به کار می‌رود. در مورد داده‌های اعتباربخشی، خطای این داده‌ها در طول فرآیند آموزش شبکه به دست می‌آید. وقتی خطای اعتباربخشی شروع به افزایش کند، فرآیند آموزش متوقف خواهد شد. بنابراین داده‌های اعتباربخشی در طول آموزش، اما داده‌های تست بعد از آموزش برای سنجش کارایی شبکه به کار می‌رود. بهترین ساختار شبکه عصبی بر اساس کمترین اختلاف بین خروجی‌های شبکه و نتایج آزمایش‌ها انتخاب می‌شود.

این بخش شامل دو قسمت معماری سیستم انطباق فازی-عصبی و یادگیری الگوریتم انفیس می‌باشد. سیستم انطباق استنتاجی یک مدل فازی می‌باشد که خود را در چهارچوب سیستم انطباقی برای فراگیری و انطباق فراهم می‌کند. این چهارچوب باعث سیستماتیک شدن بیشتر انفیس و کاهش اتکا به دانش تخصصی می‌شود. پایگاه داده در انفیس باعث شکل‌گیری توابع عضو<sup>۱۶</sup>، تولید قواعد فازی<sup>۱۷</sup> و همچنین مکانیزم استدلال باعث اجرای مراحل استنتاج می‌شود. پایه قواعد سیستم انطباق فازی (FIS) شامل دو قاعده فازی if-then می‌باشد. دستگاه زیر برای بیان معماری انفیس دو قاعده فازی if-then براساس مدل سوگنو درجه اول بیان شده است [۱۵].

$$\text{Rule 1: If } (x \text{ is } A_1) \text{ and } (y \text{ is } B_1) \text{ then } \quad (1)$$

$$(f_1 = P_1x + q_1y + r_1)$$

$$\text{Rule 2: If } (x \text{ is } A_2) \text{ and } (y \text{ is } B_2) \text{ then } \quad (2)$$

$$(f_2 = P_2x + q_2y + r_2)$$

که در اینجا  $x$  و  $y$  ورودی،  $A_i$  و  $B_i$  مجموعه فازی،  $f_i$  خروجی مشخص شده توسط قواعد فازی و همچنین  $P_i$ ،  $q_i$  و  $r_i$  پارامترهای طراحی هستند که در طول آموزش داده‌ها مشخص شده‌اند. فرآیند تکاملی معماری انفیس در شکل ۵ بیان شده است. به این ترتیب که دایره نشان‌دهنده گره ثابت و مربع نشان‌دهنده گره انطباقی می‌باشد. در لایه اول، تمامی گره‌ها انطباقی می‌باشند و خروجی لایه اول، ورودی‌های درجه عضوهای فازی هستند که به صورت زیر نشان داده شده‌اند [۱۹]:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad i = 1 \text{ و } 2 \quad (3)$$

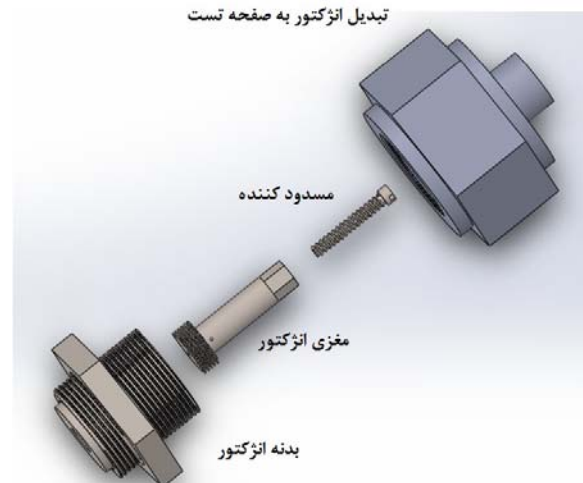
$$O_i^1 = \mu_{B_{i-2}}(y) \quad i = 3 \text{ و } 4 \quad (4)$$

که در اینجا  $\mu_{A_i}(x)$  و  $\mu_{B_{i-2}}(y)$  می‌توانند خود را با توابع عضو انطباقی دهند.

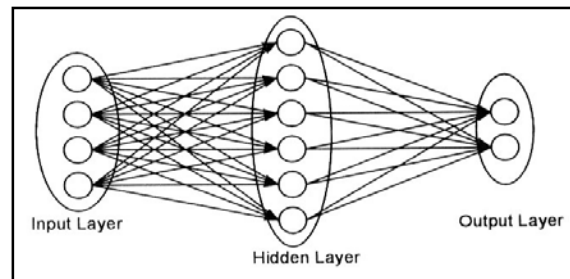
در لایه دوم، گره‌های ثابت وجود دارد که با حرف لاتین  $M$  نشان داده شده‌اند. از این گره‌ها به عنوان ضربدر استفاده می‌شود که خروجی این لایه عبارت است از:

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y) \quad i = 1 \text{ و } 2 \quad (5)$$

می‌شود. هریک از این اتصالات دارای مشخصه‌ای (وزن<sup>۱۴</sup>) مختص به خود هستند که در اطلاعات انتقال یافته از یک نرون به نرون دیگر ضرب می‌گردد. هریک از نرون‌ها نیز برای محاسبه خروجی خود، یک تابع تحریک<sup>۱۵</sup> را که معمولاً غیرخطی است به ورودی‌ها (جمع اطلاعات وزن‌دار شده) اعمال می‌نماید [18][۱۸].



شکل ۳- نمای انفجاری از نمونه نهایی انژکتور طراحی شده

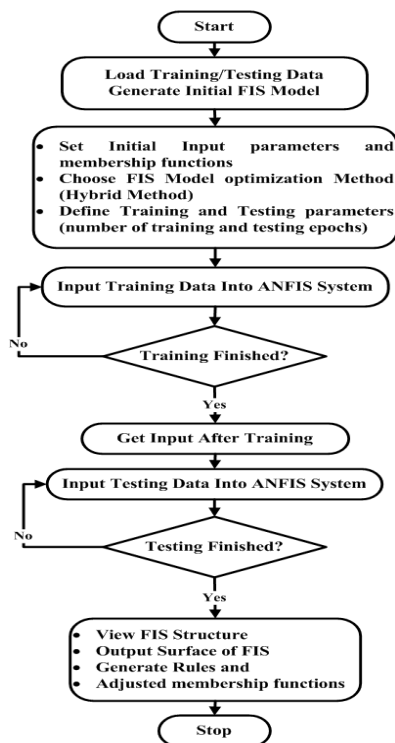


شکل ۴- ساختار یک شبکه عصبی معمولی

ایجاد یک شبکه عصبی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی شامل سه مرحله می‌باشد؛ ایجاد داده‌های مورد نیاز برای آموزش شبکه، ارزیابی ساختارهای مختلف شبکه عصبی جهت انتخاب ساختار مناسب و در پایان، تست شبکه عصبی توسط داده‌هایی که قبلاً در آموزش شبکه به کار نرفته‌اند. یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی، ایجاد داده‌های مورد نیاز است به طوری که شبکه ایجاد شده به خوبی بتواند فرآیند مورد نظر را پیش‌بینی کند. جهت تولید داده، شناخت اولیه از پارامترهای حاکم بر مدل ضروری است. بازه ورودی‌ها طوری باشد که تغییرات پارامترهای مدل بر حسب ورودی‌های یاد شده را به خوبی پوشش دهد. انتخاب مناسب شبکه، قدم دوم در مدل‌سازی است که باید با دقت انجام شود. از مجموع داده‌های بدست آمده، یک سری برای آموزش، یک سری برای

که یک ترکیب خطی از پارامترهای پیامدی تغییرپذیر  $p_1$  و  $q_1$  و  $r_1$  و  $p_2$  و  $q_2$  و  $r_2$  می‌باشد.

[۱۸] در اینجا به طراحی کنترل‌کننده ANFIS براساس مدل دینامیک سیالاتی شناسایی شده انژکتور پرداخته می‌شود. این کنترل‌کننده از عملکرد قابل قبولی نسبت به غیرخطی بودن تغییرات مشخصه‌های سیال خروجی از انژکتور و پارامترهای هندسه داخلی انژکتور برخوردار است. کنترل‌کننده ANFIS در حقیقت یک سیستم استنتاج فازی است که در چارچوب شبکه‌های عصبی-تطبیقی ارائه شده است. در این ساختار، به منظور آموزش مدل استنتاج فازی-عصبی -تطبیقی از الگوریتم یادگیری ترکیبی استفاده می‌شود. در لایه اول، تمام ورودی‌ها به بازه  $[-1, 1]$  نگاشت داده می‌شوند. در لایه‌های وسط، فرایند فازی‌سازی از روش گرادیان نزولی به منظور تنظیم پارامترهای غیرخطی (پارامترهای توابع عضویت فازی) و همچنین به منظور به روزرسانی پارامترهای خطی (پارامترهای قسمت استنتاج قوانین فازی) از روش تخمین حداقل مربعات بازگشتی استفاده می‌شود. در نهایت، عمل فازی‌زدایی در لایه آخر انجام می‌شود.

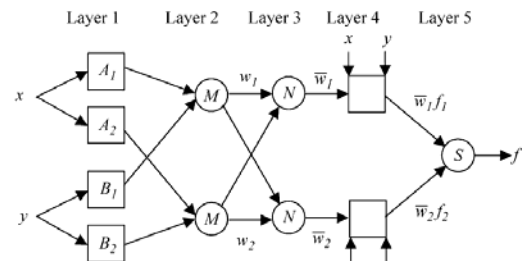


شکل ۶- روش آنفیس [۲۰]

## تحلیل پارامتریک

### مدل عددی دینامیک سیالات محاسباتی

از آنجا که در انژکتور مورد نظر، جریان دوفازی است، برای تحلیل آن نیاز به استفاده از یک مدل جریان دوفازی است. برای حل



شکل ۵- معماری آنفیس

که به قدرت آتش معروف است. در لایه سوم، گره‌ها ثابت می‌باشند که با N نشان داده شده است. خروجی این لایه عبارت است از:

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

که عبارت بالا به نام نرمالیزه قدرت آتش معروف می‌باشد. در لایه چهارم، گره‌های انطباقی وجود دارد که خروجی هر یک از این گره‌ها در این لایه تولید ساده‌ای از قدرت آتش نرمالیزه شده است که به صورت درجه اول مطرح می‌شود (درجه اول مدل سوگنو). خروجی این لایه عبارت است از:

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

در لایه پنجم، تنها یک گره ثابت وجود دارد که با S نشان داده شده است. که این گره مجموع تمامی این سیگنال‌های ورودی را نشان می‌دهد. خروجی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$O_i^5 = \sum_{i=1}^2 \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_{i=1}^2 w_i f_i}{w_1 + w_2} \quad (8)$$

همان‌طور که نشان داده شد، تنها دو لایه انطباقی در این معماری آنفیس وجود دارد که عبارتند از لایه اول و چهارم. در لایه اول سه پارامتر تغییرپذیر  $\{a_i, b_i, c_i\}$  وجود دارد که به توابع عضویت ورودی بستگی دارند. در لایه چهارم سه پارامتر تغییرپذیر  $\{p_i, q_i, r_i\}$  وجود دارد که به چند جمله‌ای درجه اول وابسته هستند که به پارامترهای پیامدی معروف می‌باشند [۲۰].

چنانچه روش آنفیس در شکل ۶ نشان داده شده است، هدف فراگیری روش آنفیس براساس معماری شکل ۵، تنظیم کردن تمامی پارامترهای تغییرپذیر می‌باشد که به بیان دیگر  $\{a_i, b_i, c_i\}$  و  $\{p_i, q_i, r_i\}$  باعث تطابق خروجی آنفیس با پردازش داده‌ها می‌شود. زمانی که پارامترهای اولیه  $c_i$  و  $b_i$  و  $a_i$  تابع عضویت، ثابت باشند خروجی مدل آنفیس به صورت زیر بیان می‌شود [۱۷]:

$$f = \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2 \quad (9)$$

$$f = \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 \quad (10)$$

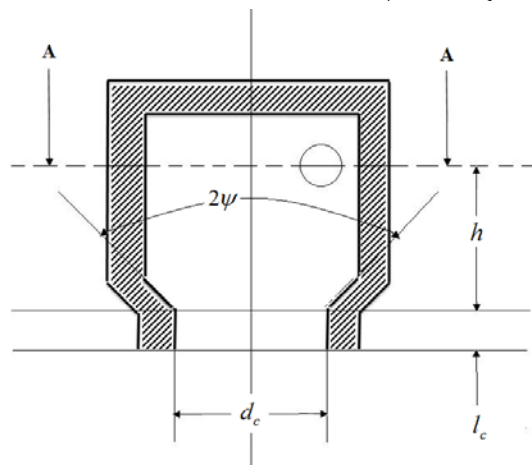
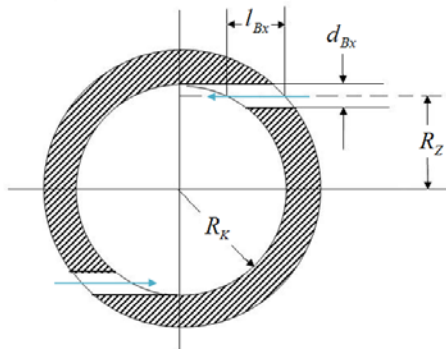
$$f = \bar{w}_1 (p_1 x + q_1 y + r_1) + \bar{w}_2 (p_2 x + q_2 y + r_2) \quad (11)$$

$$f = (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 + (\bar{w}_2 y) q_2 + (\bar{w}_2) r_2 \quad (12)$$

۵. زاویه پخ ورودی به نازل ( $2\psi$ )

این پارامترها در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. بر این اساس، اثر زاویه پخ همگراکننده انژکتور، نسبت طول به قطر نازل انژکتور، نسبت طول مجرای ورود به قطر مجرا، نسبت شعاع گردش به شعاع نازل، نسبت شعاع گردش بر روی مشخصه‌های لایه سیال خروجی اعم از ضخامت لایه، زاویه مخروط پاشش، سرعت میانگین و همچنین دبی جرمی آن بررسی شده است.

نتایج تعدادی از تحلیل‌های پارامتریک در جدول ۲ ارائه شده است. در این داده‌ها برای آموزش مدل فازی-عصبی-تطبیقی استفاده شده است. در هر ستون مربوط به نتایج، به منظور طبقه‌بندی کمی نتایج، طیف رنگی از سبز تا قرمز (از زیاد به کم به صورت نزولی) بر روی نتایج اعمال شده است. بر این اساس اثر پارامترهای گوناگون شامل طول و قطر محفظه چرخش، نسبت طول به قطر نازل، نسبت طول به قطر مجرای ورودی، نسبت شعاع گردش به شعاع نازل و نسبت شعاع گردش به شعاع مجرای ورودی بر روی کمیت‌های هدف شامل دبی جرمی، ضخامت لایه، زاویه اسپری و سرعت میانگین لایه سیال مطالعه شد.



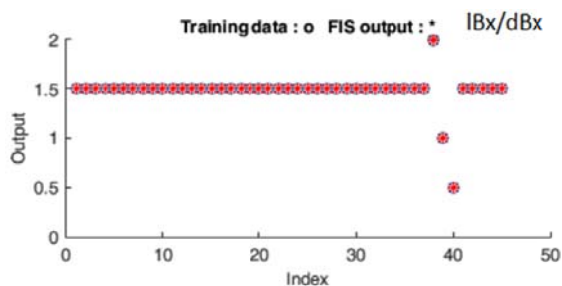
شکل ۷- فاکتورهای طراحی انژکتور جریان پیچشی

جدول ۲- پارامترها و نتایج تحلیل پارامتریک

Case study	پارامترها						نتایج تحلیل پارامتریک				
	$h=D_k$	$l_c/d_c$	$l_{Bx}/d_{Bx}$	$R_z/r_c$	$R_z/r_{Bx}$	$2\theta$	دبی جرمی (کیلوگرم بر ثانیه)	ضخامت لایه (میلی‌متر)	زاویه اسپری (درجه)	سرعت میانگین (متر بر ثانیه)	ضریب سطح (-)
1	2	1	1.5	1.4	2.33	90	0.00639	0.150	61.8	21.03	0.5096
2	2	2	1.5	1.4	2.33	90	0.00657	0.156	60.6	19.15	0.5263
3	2	3	1.5	1.4	2.33	90	0.00651	0.161	58.7	18.95	0.5390
4	2	0.5	1.5	1.4	2.33	90	0.00670	0.159	66.9	21.56	0.5352
5	3	2	1.5	2.4	4.00	90	0.00566	0.195	57.8	13.95	0.6273



پارامترها							نتایج تحلیل پارامتریک				
Case study	$h=D_k$	$l/d_c$	$l_{BX}/d_{BX}$	$Rz/r_c$	$Rz/r_{BX}$	$2\theta$	دبی جرمی (کیلوگرم بر ثانیه)	ضخامت لایه (میلی متر)	زاویه اسپری (درجه)	سرعت میانگین (متر بر ثانیه)	ضریب سطح (-)
6	3	3	1.5	2.4	4.00	90	0.00564	0.197	56.3	13.67	0.6320
7	3	0.5	1.5	2.4	4.00	90	0.00574	0.195	66.6	15.73	0.6600
8	4	2	1.5	3.4	5.67	90	0.00611	0.462	65.6	9.30	0.9942
9	4	3	1.5	3.4	5.67	90	0.00611	0.500	60.8	8.43	1.0000
10	4	0.5	1.5	3.4	5.67	90	0.00617	0.500	74.9	11.20	1.0000
11	2	2	1.5	1.4	2.33	60	0.00668	0.165	60.9	19.66	0.5506
12	2	3	1.5	1.4	2.33	60	0.00648	0.170	56.3	18.20	0.5636
13	2	0.5	1.5	1.4	2.33	60	0.00673	0.169	65.4	20.40	0.5608
14	3	2	1.5	2.4	4.00	60	0.00586	0.205	58.7	14.35	0.6516
15	3	3	1.5	2.4	4.00	60	0.00584	0.227	55.5	13.07	0.7028
16	3	0.5	1.5	2.4	4.00	60	0.00593	0.219	67.5	15.59	0.6845
17	4	2	1.5	3.4	5.67	60	0.00634	0.500	65.3	9.58	1.0000
18	4	3	1.5	3.4	5.67	60	0.00633	0.500	64.7	9.26	1.0000
19	4	0.5	1.5	3.4	5.67	60	0.00640	0.500	76.5	11.69	1.0000
20	2	2	1.5	1.4	2.33	120	0.00649	0.157	60.7	19.03	0.5286
21	2	3	1.5	1.4	2.33	120	0.00651	0.160	55.5	18.59	0.5387
22	2	0.5	1.5	1.4	2.33	120	0.00659	0.158	69.8	21.31	0.5326
23	3	2	1.5	2.4	4.00	120	0.00559	0.191	59.7	14.15	0.6190
24	3	3	1.5	2.4	4.00	120	0.00556	0.195	55.2	13.49	0.6279
25	3	0.5	1.5	2.4	4.00	120	0.00567	0.203	65.7	15.69	0.6465
26	4	2	1.5	3.4	5.67	120	0.00603	0.453	67.3	9.60	0.9910
27	4	3	1.5	3.4	5.67	120	0.00602	0.484	62.0	8.89	0.9989
28	4	0.5	1.5	3.4	5.67	120	0.00608	0.478	73.6	10.98	0.9980
29	2	2	1.5	1.4	2.33	150	0.00620	0.156	56.7	18.81	0.5257
30	2	3	1.5	1.4	2.33	150	0.00628	0.161	57.3	17.69	0.5397
31	2	0.5	1.5	1.4	2.33	150	0.00648	0.154	63.8	21.64	0.5214
32	3	2	1.5	2.4	4.00	150	0.00559	0.191	58.2	13.99	0.6179
33	3	3	1.5	2.4	4.00	150	0.00557	0.195	52.4	13.47	0.6277
34	3	0.5	1.5	2.4	4.00	150	0.00566	0.205	63.4	15.45	0.6520
35	4	2	1.5	3.4	5.67	150	0.00601	0.453	65.2	9.73	0.9912
36	4	3	1.5	3.4	5.67	150	0.00600	0.460	62.5	8.87	0.9935
37	4	0.5	1.5	3.4	5.67	150	0.00607	0.500	77.2	11.32	1.0000
38	2	1	2	1.4	2.33	90	0.00635	0.151	64.3	21.27	0.5132
39	2	1	1	1.4	2.33	90	0.00676	0.149	63.5	21.11	0.5082
40	2	1	0.5	1.4	2.33	90	0.00696	0.156	64.0	21.45	0.5272
41	3	1	1.5	2.4	4.00	90	0.00570	0.195	60.2	15.04	0.6282
42	4.6	1	1.5	4	6.67	90	0.00648	0.500	76.2	10.69	1.0000
43	2	1	1.5	1.4	2.33	60	0.00661	0.155	63.8	21.01	0.5240
44	2	1	1.5	1.4	2.33	120	0.00634	0.146	64.9	20.22	0.4977
45	2	1	1.5	1.4	2.33	150	0.00643	0.145	61.7	20.51	0.4963



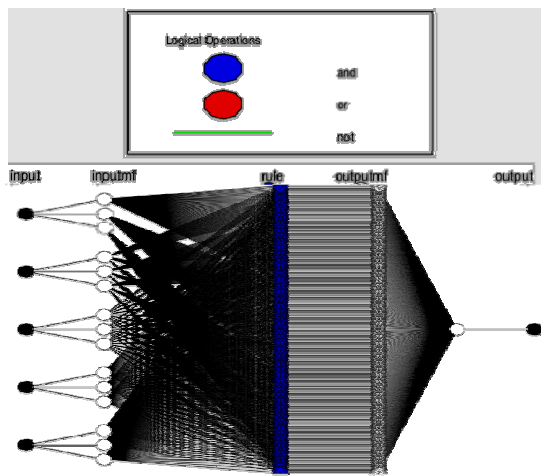
شکل ۱۰- آموزش مدل فازی-عصبی-تطبیقی برای داده‌های جدول ۲، نتایج تحلیل پارامتریک به‌عنوان ورودی مدل،  $I_{Bx}/d_{Bx}$  به‌عنوان خروجی



شکل ۱۱- آموزش مدل فازی-عصبی-تطبیقی برای داده‌های جدول ۲، نتایج تحلیل پارامتریک به‌عنوان ورودی مدل،  $R_z/r_c$  به‌عنوان خروجی



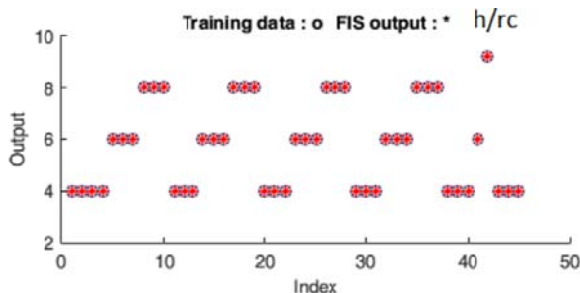
شکل ۱۲- آموزش مدل فازی-عصبی-تطبیقی برای داده‌های جدول ۲، نتایج تحلیل پارامتریک به‌عنوان ورودی مدل انقیس و  $R_z/r_{Bx}$  به‌عنوان خروجی



شکل ۱۳- لایه‌های کنترل‌کننده شبکه ANFIS برای مورد اول

## نتایج مدل فازی-عصبی-تطبیقی (ANFIS)

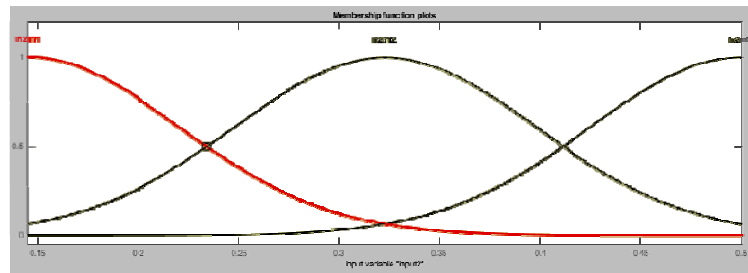
آموزش شبکه عصبی نیازمند به داده‌های آموزشی است. شکل ۸ تا شکل ۱۲ آموزش شبکه فازی-عصبی-تطبیقی را در نرم‌افزار متلب<sup>۱۸</sup> به کمک ماژول neuroFuzzyDesigner و همچنین یک کد متلب که برای استفاده از تابع بدست آمده تهیه شده است، نشان می‌دهد. نتایج تحلیل پارامتریک ارائه شده در جدول ۲ به‌عنوان ورودی‌های مدل فازی-عصبی-تطبیقی در نظر گرفته شدند و هر بار هر کدام از مشخصات هندسی به‌عنوان یکی از خروجی‌های مدل فازی-عصبی-تطبیقی در نظر گرفته شد و تابع حاکم بر آن بدست آورده شد. یعنی در شکل ۸ تا شکل ۱۲ پارامترهای هندسی  $d_c/d_c$ ،  $h/r_c$ ،  $d_{Bx}/d_{Bx}$ ،  $R_z/r_c$  و  $R_z/r_{Bx}$  به‌ترتیب به‌عنوان خروجی‌های مدل ANFIS در نظر گرفته شدند. نهایتاً بهترین آموزش زمانی حاصل شد که تابع عضویت از نوع Gussmf و تعداد توابع عضویت ۳ عدد انتخاب گردید. همانطور که مشخص است، آموزش به نحو بسیار خوبی انجام گرفته و داده‌های مدل ANFIS و آموزش کاملاً بر هم منطبقند. لایه‌های کنترل‌کننده شبکه ANFIS به‌عنوان نمونه، تنها برای مورد اول (یعنی  $h/r_c$  به‌عنوان خروجی مدل ANFIS) در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. شکل ۱۴ نیز نمونه‌ای از توابع عضویت را نشان می‌دهد. شکل ۱۵ خطای آموزش را نشان می‌دهد. خطا از تکرار دوم به بعد به صفر رسیده است.



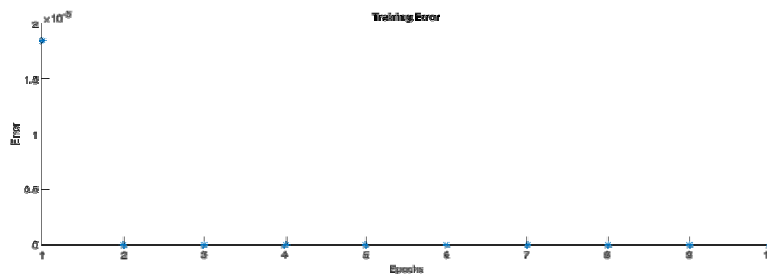
شکل ۸- آموزش مدل فازی-عصبی-تطبیقی برای داده‌های جدول ۲، نتایج تحلیل پارامتریک به‌عنوان ورودی مدل،  $h/r_c$  به‌عنوان خروجی



شکل ۹- آموزش مدل فازی-عصبی-تطبیقی برای داده‌های جدول ۲، نتایج تحلیل پارامتریک به‌عنوان ورودی مدل،  $l_c/d_c$  به‌عنوان خروجی



شکل ۱۴- نمونه‌ای از توابع عضویت



شکل ۱۵- خطای آموزش

از نوع Gussmf و تعداد توابع عضویت ۳ عدد انتخاب گردید. آموزش به نحو بسیار خوبی انجام گرفت و داده‌های مدل ANFIS و آموزش کاملاً بر هم منطبق شدند. بنابراین می‌توان با درج مشخصات دلخواه ماکروسکوپی یک اسپری، به یک برآورد اولیه از مشخصات هندسه داخلی انژکتور رسید. توابع عضویت بدست آمده، آنقدر پیچیدگی دارند که امکان اینکه به شکل یک فرمول قابل ارائه باشند وجود ندارد. بنابراین با تهیه یک کد در متلب و فراخوان کردن توابع بدست آمده از پیاده‌سازی این مدل، می‌توان با دادن ورودی‌های دلخواه به خروجی رسید.

توابع عضویت بدست آمده، آنقدر پیچیدگی دارند که امکان اینکه به شکل یک فرمول قابل ارائه باشند وجود ندارد. بنابراین با تهیه یک کد در متلب و فراخوان کردن توابع بدست آمده از پیاده‌سازی این مدل، می‌توان با دادن ورودی‌های دلخواه به خروجی (به عنوان جواب) رسید. یعنی به کمک این مدل، می‌توان به ازای مشخصه‌های دلخواه ماکروسکوپی اسپری، یک تخمین اولیه از مشخصات هندسی را بدست آورد.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر هندسه داخلی انژکتور سوخت یک رانشگر تک‌مولفه‌ای هیدرازینی ۱۰ نیوتنی بر مشخصه‌های لایه سیال خروجی از آن به کمک شبیه‌سازی جریان داخلی آن ارائه شد. جریان داخلی این انژکتور ترکیبی از دو جریان مختلف جدای از هم با سطح تماس مشترک و در فازهای مایع و گاز است. با بررسی پارامتریک تأثیر هندسه بر مشخصه‌های لایه سیال خروجی مشخص شد که این اثر چشم‌گیر است. بنابراین از یک مدل فازی-عصبی- تطبیقی به منظور استخراج تابع حاکم بر این فرآیند یا به نوعی مدل پیش‌بینی کننده مشخصات هندسی انژکتور بر مبنای مشخصات ماکروسکوپی دلخواه اسپری خروجی از آن، استفاده شد. با پیاده‌سازی مدل فازی-عصبی-تطبیقی، و آموزش مناسب این مدل، توابع عضویت حاکم بر فرآیند، استخراج شدند. پارامترهای هندسی  $d_B/d_C$ ،  $dh/r_c$  و  $R_z/r_{Bx}$  و  $R_z/r_c$  به ترتیب به عنوان خروجی‌های مدل ANFIS در نظر گرفته شدند. نهایتاً بهترین آموزش زمانی حاصل شد که تابع عضویت

## مراجع

- [1] Yang, A.S., "Satellite hydrazine propulsion system design trades", *Journal of Da-Yeh University*, 10, 2001, PP. 41-50.
- [2] L. Bayvel, z. Orzechovski, *liquid atomization*, Taylor & Francis, 1993.
- [3] Ruiz, F. and Chigier, N., Parametric Experiments on Liquid Jet Atomization Spray Angle, *Atomization Sprays 1*, 1991, pp. 23-45.
- [4] Senecal, PK., Schmidt, DP., Nouar, I., Ruthland, CJ., Reitz, RD. and Corradini, ML., *Modeling highspeed viscous liquid sheet atomization*, *Int. J. Multiphase Flows*, 25, 1073-1097, 1999.
- [5] Kuensberg Sarre, C., Kong, S.C., Reitz, R.D., "Modeling the Effects of Injector Nozzle Geometry on Diesel Sprays," *SAE International*, SAE paper, 1999.
- [6] Buelow, Ph. E. O., Ch. Mao, Smith, S. and Bretz, D., "two-phase computational fluid dynamics analysis applied to prefilming pure-airblast atomizer," *Journal of Propulsion and Power*, 19, 2003, pp. 235-241.

- [15] Yixing, L., Wang, Y., Weng, Sh. and Wang, Y.H., "Application of artificial neural network in countercurrent spray saturator." *International Symposium on Neural Networks*, 2006, pp. 1277-1282. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [16] Wei, Huiming, G. H. Su, S. Z. Qiu, Weifeng Ni, and Xingbo Yang. "Applications of genetic neural network for prediction of critical heat flux." *International Journal of Thermal Sciences* Vol. 49, No. 1, 2010, pp. 143-152.
- [17] Wei, Huixian, Fang Zhong, Jianguo, Ma. and Zhengwu Wang., "Formula optimization of emulsifiers for preparation of multiple emulsions based on artificial neural networks." *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 29, No. 32008, pp. 319-326.
- [18] Huixian, W., Zhong, F., Ma, J. and Wang, Zh., "Formula optimization of emulsifiers for preparation of multiple emulsions based on artificial neural networks." *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 29, No. 3, 2008, pp. 319-326.
- [19] Rosa, E. S., Salgado, R. M., Ohishi, T. and Mastelari, N., "Performance comparison of artificial neural networks and expert systems applied to flow pattern identification in vertical ascendant gas-liquid flows." *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 36, No. 9, 2010, pp. 738-754.
- [20] Roozgard, J., "Design of Space Thrusters Subsystems Based on artificial intelligence methods", Dissertations and Theses, 2004, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran.
- [21] Karimaei, H., "Effect of the internal geometry of the fuel injector of a 10N Monopropellant Hydrazine Thruster on the liquid sheet characteristics", *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 10, 2018, pp. 59-65 (in persian).
- [7] El-Sayed Negeed, R., Hidaka, S., Kohno, M. and Takata, Y. "Experimental and analytical investigation of liquid sheet breakup characteristics", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32, 2011, pp. 95-106.
- [8] Sarre, C.K., Kong, S.C. and Reitz, R.D., "modeling the effects of injector nozzle geometry on diesel sprays", *SAE Congress*, 1999.
- [9] Klein, M. and Sadiki, A., "A digital filter Based generation of inflow data for spatially developing direct numerical or large eddy simulations", *J. Computational Physics*, 186, 2003, pp. 652-665.
- [10] Hosseinalipour, S. M., Karimaei, H. and Ghorbani, R., "Study the Y-atomizer performance of a power plant in order to extract mean droplet diameter range", 2<sup>nd</sup> proceeding of gas turbine, Iran University of Science and Technology, Tehran, 29-30 May 2013 (in persian).
- [11] Hosseinalipour, S.M., Karimaei, H. and Ommi, F., "Numerical study the effect of mass flow rate on liquid sheet properties resulting from a swirl injector", 3<sup>rd</sup> proceeding of gas turbine, Iran University of Science and Technology, Tehran, 13-15 May 2014 (in persian).
- [12] Hosseinalipour, S. M. and Karimaei, H., "a new model based on coupling of mep/cfd/ilia for prediction of primary atomization", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 94, 2016, pp. 792-802.
- [13] Hosseinalipour, S.M. and Karimaei, H., Movahednejad E., OmmiF., "application of maximum entropy principle for estimation of droplet-size distribution using internal flow analysis of a swirl injector", *International Journal of Spray and Combustion Dynamic*, 8, 2016, pp. 205-216.
- [14] Karimaei, H., "design and simulation of fuel injector of a 10n monopropellant hydrazine thruster", *Journal of Space Science and Technology*, 10, 2018, pp. 59-65 (in persian).

