



Application of Neuro-Fuzzy Network for Optimizing Steam Pipeline Expansion Loops in Process Industries

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Shahabi Y.¹,
Mirshekari E.^{1*}

How to cite this article

Shahabi Y, Mirshekari E, Application of neuro-fuzzy network for optimizing steam pipeline expansion loops in Process Industries. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(01):23-32.

¹Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

erfan.mirshekari@gmail.com

Article History

Received: December 17, 2024

Accepted: February 22, 2025

ePublished: March 11, 2025

ABSTRACT

This research examines the optimization of expansion loops in steam pipeline systems using a neuro-fuzzy network. Stress analysis was conducted based on the ASME B31.3 design code using CAESAR II software. Additionally, a neuro-fuzzy network was developed and optimized in MATLAB. The results indicate that the neuro-fuzzy network outperforms traditional methods and the MLP neural network. Combining this network with the Bee Colony Optimization algorithm led to the identification of an optimal loop that minimizes pipeline length and reduces static and thermal stresses. The optimized loop obtained from the Perceptron network increased the loop length by 20 cm (1.14%) and reduced the total sum of standard stresses by 14.6%. In contrast, the optimized loop from the neuro-fuzzy network reduced the loop length by 120 cm (6.78%) and decreased the total sum of standard stresses by 9.5%. These findings demonstrate that the application of artificial intelligence techniques in expansion loop design significantly reduces thermal stresses and enhances design efficiency.

Keywords Optimization, Expansion Loop, Neuro-Fuzzy Network, CAESAR II, Bee Colony Optimization

CITATION LINKS

1- ASME B31.3-2020: Process Piping. 2- An overview on pipe design using Caesar II. 3- Optimization of piping expansion loop in process plant. 4- Design and analysis of piping system with supports using CAESAR-II. 5- Revamping Optimization of a Pressure Piping System Using Artificial Neural Networks. 6- Optimum support arrangement of piping systems using genetic algorithm. 7- The Intelligent Layout of the Ship Piping System Based on the Optimization Algorithm. 8- Numerical evaluation of expansion loops for pipe subjected to thermal displacements. 9- Shortcut method for pipe expansion loop sizing. 10- Fuzzy sets. Similarity relations and fuzzy orderings. 11- A fuzzy-algorithmic approach to the definition of complex or imprecise concepts. 12- A review on Artificial Bee Colony algorithm.

به کارگیری شبکه نوروفازی جهت بهینه‌سازی حلقه‌های انبساط خط لوله بخار در صنایع فرآیندی

یوسف شهابی^۱، عرفان میرشکاری^{۱*}

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران

چکیده

در این پژوهش، بهینه‌سازی حلقه‌های انبساط در خطوط لوله بخار با بهره‌گیری از شبکه نوروفازی بررسی شده است. تحلیل تنش بر اساس استاندارد ASME B31.3 و با استفاده از نرم‌افزار CAESAR II انجام شده است. همچنین، شبکه نوروفازی در نرم‌افزار MATLAB ایجاد و بهینه‌سازی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که شبکه نوروفازی نسبت به روش‌های سنتی و شبکه عصبی پرسپترون (Perceptron) عملکرد بهتری داشته و ترکیب آن با الگوریتم کلونی زنبور عسل (Bee Colony Algorithm) منجر به یافتن حلقه بهینه‌ای شده است که کاهش طول خط لوله و به حداقل رسیدن تنش‌های استاتیکی و حرارتی را در پی دارد. حلقه بهینه شبکه پرسپترون باعث افزایش طول حلقه به میزان ۲۰ سانتی‌متر (۱/۱۴ درصد) و کاهش مجموع تنش‌های معیار به میزان ۱۴/۶ درصد شد. در حالی که حلقه بهینه شبکه نوروفازی موجب کاهش طول حلقه به میزان ۱۲۰ سانتی‌متر (۶/۷۸ درصد) و کاهش مجموع تنش‌های معیار به میزان ۹/۵ درصد گردید. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های هوش مصنوعی در طراحی حلقه‌های انبساط، موجب کاهش تنش‌های حرارتی و افزایش کارایی طراحی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی، حلقه انبساط، شبکه نوروفازی، نرم‌افزار CAESAR II، الگوریتم کلونی زنبور عسل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۴

*نویسنده مسئول: erfana.mirshakari@gmail.com

۱- مقدمه

در صنایع فرآیندی، خطوط بخار نقش کلیدی در تأمین نیروی محرکه برای تجهیزات مختلف از جمله توربین‌های بخار دارند. عملکرد بهینه این سیستم‌ها نیازمند کنترل تنش‌های ناشی از انبساط حرارتی است که می‌تواند تأثیر مستقیمی بر عمر مفید تجهیزات و دستگاه‌ها داشته باشد. یکی از روش‌های مؤثر برای کنترل این تنش‌ها، استفاده از حلقه‌های انبساط در طراحی خطوط لوله بخار است. این حلقه‌ها با جذب تغییرات طولی لوله، از تنش‌های اضافی در اتصالات و تجهیزات جلوگیری کرده و موجب افزایش ایمنی سیستم می‌شوند.

برای نیل به این هدف، قدم اول بررسی و تحلیل شرایط تنش در خط لوله است. با این کار نقاط حساس و پرخطر شناسایی می‌شوند و می‌توان با انجام اصلاحاتی، شرایط خط لوله را بهبود بخشید. یکی از محبوب‌ترین نرم‌افزارهای تحلیل تنش در خطوط لوله، نرم‌افزار سزار است. این نرم‌افزار از جمله برنامه‌های برپایه‌ی المان

محدود است که به صورت تخصصی جهت تحلیل تنش در خطوط لوله طراحی شده و قادر است نتایج را با توجه به معیاری که کاربر انتخاب می‌نماید، بسنجد و ارزیابی کند. طراح قادر است با توجه به خروجی نرم‌افزار، نسبت به اصلاح قیدها اقدام کرده و از صحت عملکرد خط لوله اطمینان حاصل کند. کتابخانه و پایگاه داده این نرم‌افزار، به کلیه استانداردهای مورد نیاز طراحی، در صنایع مختلف مجهز شده است. از جمله این استانداردها می‌توان، کد طراحی ASME B31.3 را نام برد، که مرجع رسمی مشترک برای تمامی مهندسين، در طراحی خطوط لوله‌ی واحدهای فرآیندی است. کد مذکور، تمامی قوانین، روابط، الزامات، استانداردها و مشخصات مکانیکی جهت طراحی لوله، خم، سهراهی و سایر اقلام مورد نیاز لوله کشی را ارائه نموده است.^[1]

در سال‌های گذشته، پژوهش‌هایی با رویکردهای متفاوت و به منظور بهبود عملکرد این حلقه‌های انبساط صورت گرفته است.

بیشتر و جاهان (۲۰۱۴) از نرم‌افزار سزار برای تحلیل تنش در لوله‌ها استفاده کردند و نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که موقعیت و ابعاد حلقه‌های انبساط تأثیر مستقیمی بر کاهش تنش در خطوط لوله بخار دارد.^[2]

سانکار و کوماران (۲۰۱۵) با استفاده از روش سعی و خطا در نرم افزار سزار با تغییر مکرر ابعاد حلقه‌های انبساط، بهترین اندازه در دامنه جستجوی محدود شده را ارائه کردند.^[3]

رانی و راماناتان (۲۰۱۶) نیز با استفاده از همین روش در نرم‌افزار سزار به بررسی چیدمان بهینه پایه‌های نگهدارنده در خطوط لوله پرداختند.^[4]

رابطه بین هندسه حلقه‌های انبساط و توزیع تنش ایجاد شده توسط انبساط و بارهای پایدار (فشار، وزن)، یک رابطه غیر خطی است و فرمول‌بندی آن بسیار دشوار است. بر این اساس کاپونتو و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از شبکه عصبی پیشخور پس‌انتشار و آموزش شبکه بر اساس داده‌ها، یک روش بهینه‌سازی ابعاد با استفاده از کامپیوتر ارائه کردند که یکی از پارامترهای مهم در پژوهش آن‌ها ضخامت خط لوله است.^[5]

تعداد نگهدارنده‌ها (Support) عامل تعیین‌کننده‌ایست که کاهش و یا جانمایی بهتر آن‌ها می‌تواند شرایط طراحی را به میزان قابل قبولی بهبود ببخشد. از این رو چپبا و همکاران (۱۹۹۶) با استفاده از الگوریتم ژنتیک، سعی در بهبود جانمایی نگهدارنده‌ها کردند.^[6] همچنین وی و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از الگوریتم ژنتیک، راهی برای چینش بهتر خطوط لوله در فضای محدود ارائه نمودند.^[7]

مطالعات اخیر نشان داده است که ترکیب روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی با الگوریتم‌های فرا ابتکاری می‌تواند منجر به

خطوط لوله‌ای که به دلیل دمای کاری بالا مسأله انبساط حرارتی در آن‌ها حائز اهمیت است، پس از تعیین جنس و ضخامت مورد نیاز خط لوله، تحلیل تنش در دو مرحله جداگانه صورت می‌گیرد. ابتدا بدون در نظر گرفتن انبساط حرارتی، تنش‌های ناشی از بارهای پایدار محاسبه می‌شوند و سپس بدون در نظر گرفتن بارهای پایداری، تنش حرارتی ناشی از انبساط خط لوله تعیین می‌گردد.

در همه‌ی موارد، تنش کد مربوطه S_{LC} برای بارگذاری LC نباید از تنش مجاز S_A که بر اساس مواد استفاده شده و دمای عملیاتی، در جداول مشخص شده است، تجاوز کند.

برای تعیین نقاط با شرایط تنش بحرانی و محدوده قابل قبول تنش، می‌توان از نسبت تنش $R_{(LC)}$ استفاده کرد که به عنوان نسبت تنش کد $S_{(LC)}$ به تنش مجاز ماده S_A تعریف می‌شود:

$$R_{LC} = \frac{S_{LC}}{S_A} \times 100 \quad (۵)$$

در بررسی بارهای پایدار که ناشی از فشار، وزن لوله و عایق و چگالی سیال است، تنش‌های پایدار شامل تنش‌های مربوط به بارهای طولی، ممان‌های خمشی و فشار داخلی است. در این حالت تنش مجاز ماده در دمای کاری از جداول بخش C استاندارد ASME B31.3 استخراج می‌شود.

در بررسی تأثیر تنشی انبساط حرارتی باید محاسبات انعطاف‌پذیری سیستم مورد مطالعه قرار بگیرد و تحلیل تنش با در نظر گرفتن جابه‌جایی و تغییر مکان سیستم صورت گیرد. در این حالت تنش کد و تنش مجاز انبساطی هر دو باید جداگانه محاسبه شوند. در این حالت تنش کد، تنش انبساطی S_E است و باید با استفاده از رابطه زیر محاسبه شود:

$$S_E = \sqrt{(S_b + |S_a|)^2 + 4S_t^2} \quad (۶)$$

S_b تنش خمشی ناشی از کرنش انبساطی در سطح مقطع انشعابات متصل به خط لوله همچون زانویی‌ها و سه‌راهی‌هاست و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_b = \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{Z} \quad (۷)$$

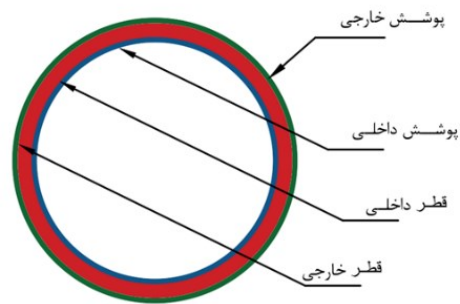
تنش محوری S_a ناشی از کرنش‌های جابجایی و به عنوان تابعی از نیروی محوری F_a ، بر سطح مقطع لوله A_p و ضریب تشدید تنش محوری i_a بیان می‌شود.

$$S_a = \frac{i_a F_a}{A_p} \quad (۸)$$

تنش پیچشی S_t ناشی از کرنش‌های جابجایی به عنوان تابعی از ممان پیچشی M_t و ضریب تشدید تنش پیچشی i_t بیان می‌شود.

$$S_t = \frac{i_t M_t}{2Z} \quad (۹)$$

در روابط فوق M_i ممان خمشی درون صفحه در سطح مقطع، M_o ممان خمشی خارج از صفحه در سطح مقطع، i_i ضریب تشدید تنش متناظر با M_i ، i_o ضریب تشدید تنش متناظر با M_o و Z مدول سطح مقطع است.



شکل ۱) سطح مقطع یک لوله جدار نازک

بهبود کارایی طراحی حلقه‌های انبساط شود. به همین دلیل، در این تحقیق از شبکه نوروفازی و الگوریتم کلونی زنبور عسل برای ارائه یک روش بهینه‌سازی ترکیبی استفاده شده است. این روش علاوه بر کاهش طول حلقه، منجر به کاهش مجموع تنش‌های وارد بر خطوط لوله نیز گردیده است. بهبود عملکرد حلقه‌های انبساط می‌تواند تأثیر به سزایی در کاهش هزینه‌های اولیه اجرای خط لوله و هزینه‌های ثانویه مربوط به تعمیر و نگهداری و همچنین افزایش ایمنی خطوط لوله داشته باشد.

۲- اصول و روش‌های محاسباتی

۲-۱- تنش‌های وارد بر خط لوله

هر شاخه لوله به عنوان یک استوانه توخالی جدار نازک در نظر گرفته می‌شود که تحت نیروهای درونی و بیرونی قرار می‌گیرد و با این فرض تنش‌ها در خط لوله به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$W_{ma} = \frac{wl^2}{12} \quad (۱)$$

$$\sigma_t = \frac{PD}{2t} \quad (۲)$$

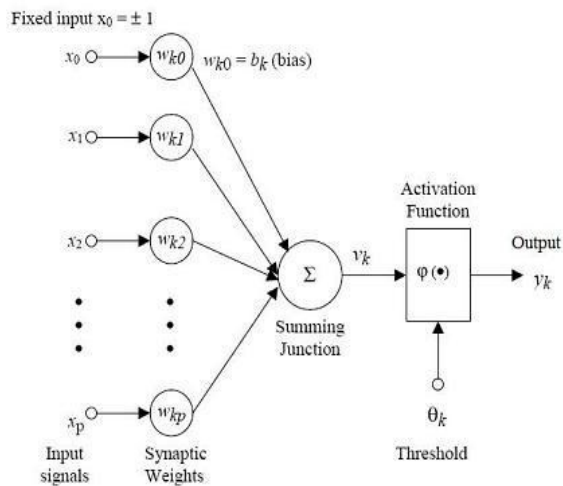
$$\sigma_l = \frac{(P - P_o)}{4t} \quad (۳)$$

$$\sigma_{exp} = E\alpha\Delta T \quad (۴)$$

در این روابط W_{ma} ماکزیمم ممان خمشی، w وزن واحد طول خط لوله، l طول خط لوله، σ_t تنش مماسی در لوله، P فشار داخلی لوله، D قطر داخلی لوله، t ضخامت پوسته لوله، σ_l تنش طولی، P_o فشار خارجی، σ_{exp} تنش حرارتی، E مدول الاستیسیته، ϵ ضریب انبساط حرارتی و ΔT میزان تغییرات دما در خط لوله است.

۲-۲- تنش کد و تنش مجاز در بارگذاری پایدار و انبساطی

تحلیل تنش در خطوط لوله از دو منظر دینامیکی و استاتیکی بررسی می‌گردد. در تحلیل دینامیکی تمرکز بر روی بارهای نوسانی است که بر خط لوله وارد می‌شود. در تحلیل استاتیکی خطوط لوله، تمرکز بر روی نیروهایی است که ماهیت نوسانی و سیکنی ندارند. مبنای تجزیه و تحلیل خطوط لوله در صنایع فرایندی کد طراحی ASME B31.3 می‌باشد. بر اساس دستورالعمل‌های این کد، در



شکل ۲) مدل یک نورون عصبی

اطلاعات نادرست در شبیه‌سازی تصمیم‌گیری‌های انسانی بود. وی با توجه به منطق به کار رفته در دستگاه‌های دیجیتال متوجه شد که این دستگاه‌ها قادر به شبیه‌سازی تفکرات و ایده‌های ذهن انسان نیستند و نمی‌توانند مانند انسان فکر کنند؛ زیرا منطق دیجیتال برای هر تصمیم فقط دو حالت درست (True) و غلط (False) را در نظر می‌گیرد، در حالیکه تفکر انسانی درجاتی از درستی یا نادرستی را برای تصمیم محسوب می‌کند. برخی از مسائل را نمی‌توان تنها با منطق کلاسیک بولی حل کرد. در برخی شرایط، تنها دو مقدار برای حل مشکل کافی نیست.^[10,11] سیستم‌های فازی سیستم‌هایی هستند که اساس کار آن‌ها منطق فازی است. ترکیب استاندارد یک سیستم فازی از چهار بخش تشکیل شده است:

- فازی‌ساز
- موتور استنتاج فازی
- پایگاه دانش
- فرآیند نافازی‌سازی

مقادیر زبانی و یا عددی را می‌توان به عنوان اطلاعات برای یک سیستم فازی استفاده کرد. اگر این داده‌ها اعمال شوند، آنگاه فرآیند استنتاج با فازی‌سازی آغاز می‌شود که امکان ایجاد یک مجموعه فازی مناسب را برای ورودی غیرفازی فراهم می‌کند. پس از این مرحله، محتویات متغیرهای ورودی فازی شده با بهره‌گیری از روش مناسب استدلال تقریبی (موتور استنتاج) به مقادیر فازی خروجی نگاشت می‌شوند. این کار با استفاده از پایگاه دانش، که به عنوان مجموعه‌ای از قوانین شرطی فازی تفسیر می‌شود، صورت می‌گیرد. دست آخر در مرحله نافازی‌سازی، خروجی‌های فازی به شکل مقادیر زبانی و یا عددی قطعی مورد نظر نگاشت می‌شوند. سیستم‌های فازی برای مسائلی که پاسخ ریاضی دقیق آن‌ها در دسترس نیست یا استفاده از مدل دقیق (غیر فازی)، غیراقتصادی یا بسیار نامناسب است، کاربرد دارند.

الزامات ASME B31.3 بیان می‌کند که تنش که نباید از مقدار محدوده تنش انبساطی مجاز تجاوز کند. تنش انبساطی مجاز با توجه به شرایط زیر تعریف می‌شود:

$$S_A = f(1.25S_c + 0.25S_h) \quad \text{for } S_h < S_L \quad (10)$$

$$S_A = f[1.25(S_c - S_h) - S_L] \quad \text{for } S_h > S_L \quad (11)$$

که در آن S_c تنش مجاز در حداقل دمای فلز (شرایط سرد) است و S_h حداکثر دمای فلز (شرایط گرم) مورد انتظار در طول دوره بهره‌برداری لوله و f ضریب کاهش دامنه تنش است که به تعداد چرخه‌های جابجایی کامل در طول عمر مورد انتظار خط لوله بستگی دارد.

اصطلاح S_L تنش ناشی از بارهای پایدار (فشار و وزن) است که با معادله‌ای به شکل (۷) تعریف می‌شود، که در این مورد S_a ، S_b و S_t به ترتیب تنش‌های خمشی، محوری و پیچشی ناشی از بارهای پایدار هستند.

۲-۳- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی، ساختارهای تطبیقی مصنوعی هستند که از سیستم‌های بیولوژیکی الهام گرفته‌اند و بر اساس ایده‌ی تقلید از فرآیندهای مغز انسان عمل می‌کنند. این شبکه‌ها از تعداد دلخواهی سلول، گره یا نورون تشکیل می‌شوند و با ساختن یک مدل، روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را پیدا می‌کنند و با استفاده از داده‌های مشاهداتی و با بهره‌گیری از روش تجربه‌پذیری و آزمون و خطا، اقدام به آموزش خود می‌کنند، درست همان کاری که مغز انسان انجام می‌دهد.^[8] این سیستم‌ها می‌توانند ساختار داخلی خود را در رابطه با خروجی یک تابع تغییر دهند و به ویژه برای حل مسائل از نوع غیر خطی مناسب هستند. علاوه بر این، شبکه‌های عصبی مصنوعی قادر به بازسازی قوانین فازی هستند که راه‌حل بهینه برای مسائل مختلف ارائه می‌دهند.

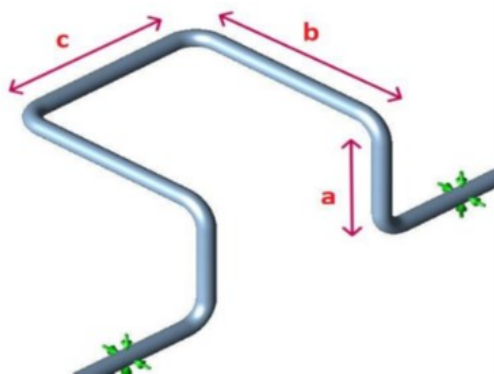
عنصر پردازش اساسی ANN، یک نورون مصنوعی است که درست مانند نورون طبیعی مغز انسان، ورودی‌ها را دریافت، پردازش و خروجی مربوطه را مطابق شکل ۲ تولید می‌کند.^[9]

سه عنصر اصلی سیستم عصبی عبارتند از:

- ۱- مجموعه‌ای از سیناپس‌ها یا پیوندها که به آن‌ها توابع وزنی گفته می‌شود.
- ۲- یک جمع‌کننده که تمام ورودی‌ها را پس از اصلاح شدن به وسیله توابع وزنی با هم جمع می‌کند.
- ۳- یک تابع فعال‌سازی که دامنه خروجی نورون را کنترل می‌کند. محدوده قابل قبول خروجی معمولاً بین ۰ و ۱ یا ۱- و ۱ است.

۲-۴- سیستم‌های فازی

مطالعه در مورد منطق فازی از سال ۱۹۲۰ آغاز شد، ولی عبارت منطق فازی اولین بار توسط پروفیسور لطفی عسگرزاده در سال ۱۹۶۵ در دانشگاه برکلی به کار رفت. انگیزه کار او، گسترده‌ی



شکل ۳) شکل و ابعاد حلقه انبساط

جدول ۱) مشخصات خط لوله تحت مطالعه

کلاس	۶۰۰	ضخامت لوله	۱۴/۲۷ mm
فشار طراحی	۴۸ bar	ضخامت عایق	۱۲۰/۲ mm
دمای طراحی	۴۴۶ °C	خوردگی مجاز	۳ mm
فشار هیدروتست	۷۱ bar	a0	۲۴۷۰ mm
دمای عملیاتی	۴۱۰ °C	b0	۴۲۷۰ mm
جنس	A 335 P11	c0	۴۰۰۰ mm
قطر لوله	۱۴ اینچ	سیال	بخار آب

منابع غذایی را ارزیابی کرده و به نسبت کیفیت آن‌ها، منابع را انتخاب می‌کنند. اگر یک راه‌حل پس از چندین تکرار بهبود نیابد، زنبورهای پیشاهنگ یک راه‌حل جدید به صورت تصادفی تولید می‌کنند، مشابه مرحله اولیه، مراحل فوق تا رسیدن به معیار توقف که می‌تواند تعداد مشخصی از تکرارها و یا دستیابی به سطح معینی از کیفیت باشد تکرار می‌شوند.

۳- سیستم تحت مطالعه

در این تحقیق برای بررسی تأثیر تغییرات ابعاد حلقه انبساط بر روی تنش در سیستم لوله‌کشی، خط لوله بخار پرفشار یکی از شرکت‌های پتروشیمی کشور مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این خط لوله، بخار پرفشار مورد نیاز یک توربین بخار را از محل تولید بخار به نازل ورودی توربین منتقل می‌کند. اطلاعات و مشخصات مکانیکی این خط و ابعاد a_0 , b_0 , c_0 اولیه حلقه‌های انبساط طبق شکل ۳ و جدول ۱ است.

۳-۱- ساخت شبکه عصبی

برای تعریف یک شبکه عصبی کارآمد، نیاز است تا داده‌های کافی برای آموزش و تست شبکه در اختیار داشته باشیم. از آن‌جا که هدف ما در این تحقیق، یافتن ابعاد بهینه حلقه‌های انبساط است، برای هر بعد حلقه انبساط ۵ مقدار در نظر می‌گیریم. به این شکل که مقدار اولیه که در جدول ۱ ذکر شده است، در وسط بازه‌ی گسسته قرار می‌دهیم و با تعیین گام ۲۰۰ میلی متر، ۲ مقدار بزرگتر و ۲ مقدار کوچکتر برای آن بعد ایجاد می‌کنیم. با انجام این کار برای هر ۳ بعد هندسی a , b و c بازه‌ها به شکل زیر تعریف می‌شوند:

۲-۵- شبکه نوروفازی

شبکه‌ی نوروفازی ترکیبی از سیستم فازی و شبکه عصبی مصنوعی است که از ویژگی‌های هر دو بهره می‌برد، به عبارتی این شبکه از قدرت یادگیری و انطباق شبکه‌های عصبی و توانایی تصمیم‌گیری فازی برای حل مسائل نامعین و دارای ابهام بهره می‌گیرد تا به شکل بهینه و دقیق بتواند مسائل پیچیده و غیرخطی را مدل‌سازی کند. در شبکه فازی، توابع عضویت و قوانین فازی با استفاده از ساختار شبکه عصبی بهینه‌سازی می‌شوند. در مقایسه شبکه نوروفازی، با شبکه عصبی مصنوعی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- **تفسیرپذیری** : شبکه نوروفازی به دلیل وجود قوانین فازی، تفسیرپذیرتر از شبکه عصبی است. در شبکه عصبی فرایند یادگیری با تنظیم وزن‌های شبکه انجام می‌شود و به سختی می‌توان فهمید که چرا یک شبکه به خروجی خاصی رسیده است. اما در شبکه نوروفازی، قوانین به شکل مشخص قابل توضیحند.
- **کار با داده‌های نامعین** : شبکه نوروفازی به دلیل استفاده از توابع عضویت و منطق فازی می‌تواند داده‌های نامعین یا غیردقیق را پردازش کند، در حالی که شبکه عصبی معمولاً نیاز به داده‌های عددی دقیق دارد.
- **انعطاف‌پذیر بودن** : شبکه نوروفازی با استفاده از قوانین فازی می‌تواند به سادگی با تغییرات سیستم سازگار شود، در حالی که سیستم عصبی برای تغییرات بزرگ نیاز به بازآموزی گسترده دارد.

۲-۶- الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل

از ترکیب شبکه عصبی با یک الگوریتم بهینه‌سازی می‌توان به منظور بهبود شرایط عملکرد سیستم‌های مکانیکی استفاده کرد. یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی پرکاربرد، الگوریتم کلونی زنبور عسل است که از مجموعه الگوریتم‌های هوش ازدحامی است و رفتار گروهی زنبورها در طبیعت را مد نظر قرار می‌دهد و از رفتار سازمان‌یافته‌ی زنبورها در درون کندو یا خارج از آن الگوبرداری می‌کند. در یک کندوی عسل، زنبورها به سه دسته زنبورهای پیشرو، زنبورهای ناظر و زنبورهای کارگر طبقه‌بندی می‌شوند.^[12]

زنبورهای پیشرو، وظیفه جستجو و یافتن منابع غذایی را بر عهده دارند و به این منظور در نقاط مختلف به بررسی منابع غذایی بالقوه می‌پردازند. پس از یافتن یک منبع غذایی مناسب، به کندو بازگشته و با اجرای نوعی رقص مخصوص ارتعاشی محل منبع غذایی، مقدار غذای موجود در آن و فاصله آن منبع تا کندو را به سایر زنبورها اطلاع می‌دهد.

در ابتدا، یک جمعیت اولیه از راه‌حل‌ها (منابع غذایی) به طور تصادفی تولید می‌شود. سپس هر زنبور کارگر یک راه‌حل جدید در نزدیکی راه‌حل فعلی خود ایجاد می‌کند. در ادامه زنبورهای ناظر

طبق داده‌های جدول ۲، حلقه‌ی بهینه از نظر مقادیر تنش، حلقه شماره ۱۲۱ است؛ ولی حلقه‌ی بهینه از لحاظ طول، حلقه شماره ۱ است. لاکن این دو نمونه تنها حلقه‌های بهینه‌ی محلی هستند و چه بسا مواردی با مشخصات بهتر در نقاطی خارج از داده‌های اولیه موجود باشد که برای یافتن آن‌ها باید از الگوریتم بهینه‌سازی استفاده کنیم. شکل ۴ روند تغییرات تنش بر اثر ایجاد تغییرات در ابعاد حلقه‌های انبساط را نشان می‌دهد.

بر اساس شکل ۴ می‌توان دید که با افزایش تدریجی یک بعد و ثابت بودن دو بعد دیگر، تنش استاتیکی (خط قرمز) افزایش یافته، در حالی که تنش انبساطی (خط آبی) کاهش پیدا کرده است. این روند تا جایی ادامه دارد که تغییر در بعد b صورت می‌گیرد، که در آن نقطه، یک جهش افزایشی در تنش انبساطی و کاهش در تنش استکاکی رخ می‌دهد. این الگو در ادامه به همین شکل تکرار می‌شود. خط نارنجی مقدار تنش مجاز استاتیکی در دما و فشار طراحی است که مقدار ثابت است و خط مشکی مقدار تنش مجاز انبساطی است که مقدار ثابتی نیست و از روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شود.

این داده‌ها به‌عنوان ورودی برای آموزش شبکه نوروفازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند تا بتوان از الگوهای استخراج‌شده برای بهینه‌سازی طراحی حلقه‌های انبساط بهره برد. بر این اساس، روند کاهش یا افزایش تنش‌ها بر اساس ابعاد مختلف حلقه، یکی از معیارهای اصلی برای انتخاب طراحی بهینه در مراحل بعدی بوده است.

در این تحقیق علاوه بر شبکه نوروفازی، با استفاده از داده‌های حاصل، یک شبکه پرسپترون چندلایه نیز تولید گردید و از آن جهت بررسی عملکرد شبکه فازی استفاده شد.

شبکه عصبی پرسپترون با یک لایه پنهان و ۶ نورون تولید شد. این انتخاب به چند دلیل صورت گرفته است:

- سادگی یک شبکه با یک لایه پنهان سبب تفسیر ساده‌تر آن می‌شود و این یک نقطه آغاز مناسب است.
- یک شبکه با تعداد لایه‌ها و نورون‌های کمتر، از لحاظ محاسباتی کارآمدتر است. این موضوع در هنگام آموزش با داده‌های بزرگ و محدودیت محاسبات اهمیت دارد.
- بر اساس قضیه یونیورسال، یک شبکه با یک لایه و تعداد نورون‌های کافی می‌تواند هر تابع پیوسته‌ای را تقریب بزند و شش نورون برای مسائل با پیچیدگی متوسط مناسب است.
- انتخاب شش نورون پس از چندین تلاش با تعداد نورون‌های کمتر و بیشتر صورت گرفت. طبق مشاهدات، شبکه با این تعداد نورون بهترین عملکرد را داشت.
- استفاده از تعداد زیاد لایه مخفی و نورون می‌تواند منجر به بیش‌برازش شود.

تابع انتقال لایه پنهان از نوع سیگموئیدی و تابع انتقال خروجی از نوع خطی در نظر گرفته شد. برای آموزش شبکه از تابع لوبگر

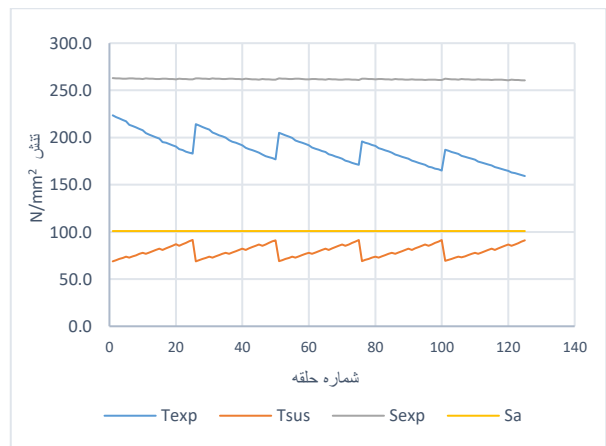
$$a = (2070, 2270, 2470, 2670, 2870)$$

$$b = (3870, 4070, 4270, 4470, 4670)$$

$$c = (3600, 3800, 4000, 4200, 4400)$$

جدول ۲) مشخصات حلقه‌های ویژه

شماره ردیف حلقه	حلقه با کمترین مقدار حاصل جمع تنش‌ها	حلقه با کمترین طول	حلقه اصلی خط لوله در حال بهره‌برداری
۱	۱۲۱	۶۳	
طول حلقه (mm)	۹۵۴۰	۱۱۱۴۰	۱۰۷۴۰
حاصل جمع تنش‌ها (N/mm ²)	۲۹۲/۴	۲۴۸/۳	۲۶۶/۴



شکل ۴) نمودار تغییرات تنش در اثر تغییر ابعاد حلقه‌ها

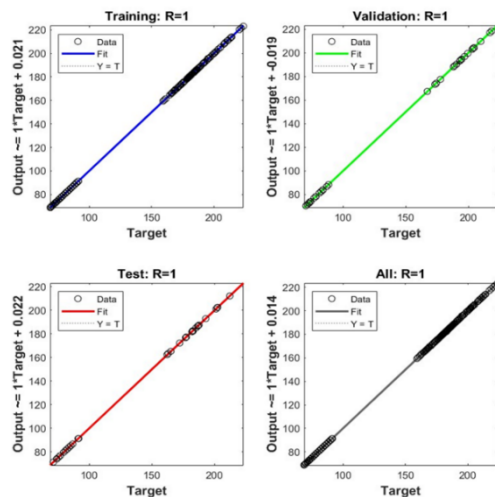
با تشکیل این بازه‌های گسسته و در نظر گرفتن تمام حالت‌های هندسی ممکن، ۱۲۵ هندسه یکتا برای حلقه‌های انبساط ایجاد می‌شود که برای تعریف، آموزش و تست شبکه عصبی بسیار مناسب هستند. این داده‌ها در سیستم عصبی به عنوان داده‌های ورودی تعریف می‌شوند. سپس تمامی این حالت‌ها با استفاده از نرم افزار سزار مدل‌سازی شده و نتایج تحلیل تنش آن‌ها جدول‌بندی می‌گردد.

این داده‌ها جهت ساخت، آموزش و تست شبکه عصبی مناسب هستند و در آن‌ها، ابعاد حلقه‌های انبساط به عنوان ورودی و تنش ناشی از بار مرده و تنش انبساطی به عنوان خروجی‌های شبکه در نظر گرفته می‌شوند.

در میان ۱۲۵ حلقه ایجاد شده، سه حلقه دارای خصوصیات ویژه‌ای هستند که نتایج مرحله بهینه‌سازی باید با مشخصات این سه حلقه مقایسه شود. در حقیقت این ۳ حلقه را می‌توان حلقه‌های معیار در نظر گرفت. این سه حلقه عبارتند از:

- حلقه با کوتاه‌ترین طول
- حلقه با کمترین مقدار حاصل جمع تنش‌ها
- حلقه اصلی خط لوله در حال بهره‌برداری

مشخصات حلقه‌های ویژه در جدول ۲ ذکر شده‌اند.



شکل ۶) نمودار رگرسیون شبکه MLP

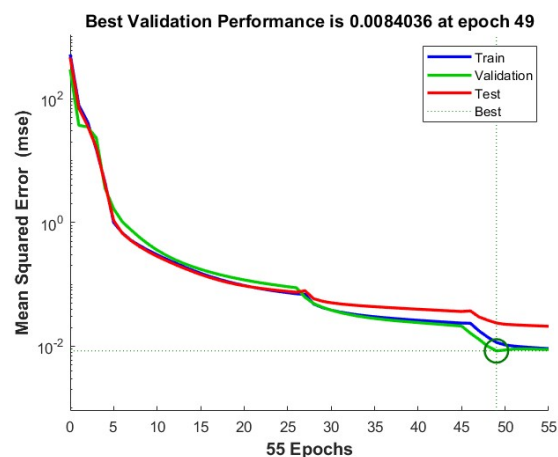
نمودار میزان همبستگی بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه پرسپترون را ارزیابی می‌کند. محور افقی مقادیر واقعی (مقادیر تنش واقعی در داده‌های اولیه) و محور عمودی مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه پرسپترون را نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر این است که خروجی‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه پرسپترون چقدر به مقادیر واقعی نزدیک هستند. قرارگیری نقاط داده روی خط قطری ۴۵ درجه (خط ایده‌آل)، نشان می‌دهد که مدل پرسپترون به درستی مقادیر تنش را پیش‌بینی کرده است.

پس از کامل شدن شبکه پرسپترون، شبکه نوروفازی نیز با استفاده از داده‌های ۱۲۵ گانه تولید می‌شود.

یک سیستم فازی با استفاده از تکنیک‌های یادگیری عصبی، قوانین فازی را بهینه‌سازی می‌کند تا بهترین پیش‌بینی‌ها را برای ورودی‌های داده شده فراهم کند. انفیس به طور خودکار پارامترهای توابع عضویت را تنظیم کرده و بهبود می‌بخشد که این باعث افزایش دقت مدل در پیش‌بینی نتایج می‌شود.

یکی از خصوصیات شبکه فازی این است که به ازای هر تعداد ورودی، یک خروجی را برمی‌گرداند؛ لذا با توجه به اینکه در موضوع تحقیق ما دو خروجی مد نظر است، برای هر خروجی، یک مدل انفیس جداگانه ایجاد شده است.

در این مدل از توابع عضویت گاوسی استفاده شده است که به دلیل شکل نرم و قابلیت تنظیم، برای مدل‌سازی داده‌های غیرخطی مناسب است. همچنین تعداد توابع عضویت برای هر ورودی ۲ عدد در نظر گرفته شده است که به مدل، انعطاف‌پذیری بیشتری می‌دهد. بهینه‌سازی شبکه نیز به شکل ترکیبی و با استفاده از روش پس‌انتشار و حداقل مربعات انجام می‌شود. این روش امکان بهبود پارامترهای مدل را با استفاده از هر دو الگوریتم فراهم می‌کند. تعداد دوره‌های آموزشی برای هر خروجی منحصراً در نظر گرفته شد. داده‌های آموزشی با استفاده از روش خطای میانگین مربعات (MSE) و ریشه میانگین مربعات (RMSE) محاسبه و گزارش شده‌اند.



شکل ۵) عملکرد شبکه پرسپترون

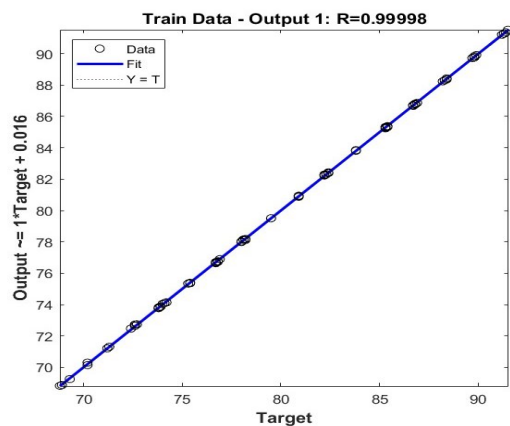
مارکوت استفاده شده است. ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش، ۱۵ درصد برای تست و ۱۵ درصد برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. با توجه به کلیه موارد ذکر شده، کد شبکه پرسپترون تکمیل می‌گردد. معیار اعتبارسنجی میانگین مربعات خطا MSE در نظر گرفته شد. انتخاب تابع عملکرد MSE به دلیل سادگی، کارایی، حساسیت به خطاهای بزرگ و مناسب بودن آن برای مسائل رگرسیون، انتخاب مناسبی برای پروژه بهینه‌سازی ابعاد حلقه انبساط لوله‌های بخار است.

به منظور ساخت شبکه عصبی و در ادامه ادغام آن‌ها با الگوریتم بهینه‌سازی از نرم‌افزار متلب که مناسب‌ترین برنامه محاسباتی برای انجام این نوع بهینه‌سازی‌هاست استفاده می‌کنیم. بخش کد نویسی این نرم‌افزار این امکان را برای کاربر مهیا می‌کند تا داده‌های مورد نظر را وارد کند، حلقه‌های محاسباتی مختلفی طراحی کند و با تعریف توابع مختلف و تنظیم آن‌ها شبکه‌های عصبی مورد نظر را بسازد و در نهایت داده‌های اولیه را برای آموزش و تست شبکه تقسیم بندی کند.

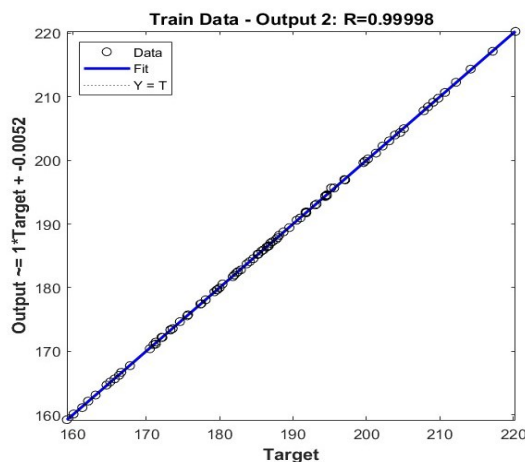
پس از تولید شبکه پرسپترون در نرم افزار متلب پارامترهای آن مطابق شرایطی که پیشتر در نظر گرفته شده بود تنظیم گردید، عملکرد شبکه در شکل ۵ نمایش داده شده است.

شکل ۵ نشان می‌دهد که چگونه شبکه پرسپترون برای تخمین مقادیر بهینه‌ی تنش‌ها، آموزش داده شده است. محور افقی نشان دهنده تعداد تکرارهای آموزش (Epochs) و محور عمودی میزان خطای شبکه یا دقت تخمین‌ها را نشان می‌دهد. در ابتدا خطای شبکه نسبتاً زیاد است، اما با افزایش تکرارهای آموزش، مقدار خطا کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده بهبود یادگیری شبکه است. این روند بیانگر آن است که شبکه پرسپترون توانسته مقادیر تنش‌ها را به خوبی پیش‌بینی کند و در انتها به خوبی همگرا شود.

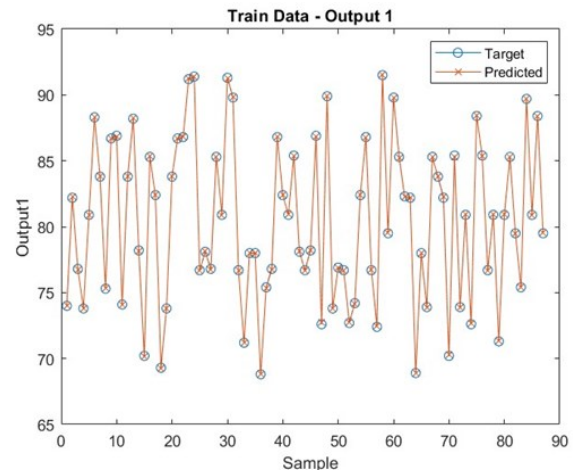
شکل ۶ روند عملکرد شبکه پرسپترون در مرحله آموزش، آزمون و اعتبارسنجی و همچنین عملکرد کلی شبکه را نشان می‌دهد. این



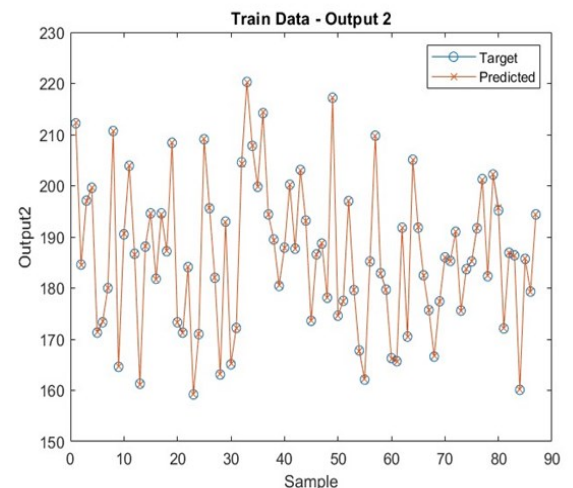
شکل ۹) رگرسیون خطی شبکه نوروفازی برای خروجی اول



شکل ۱۰) رگرسیون خطی شبکه نوروفازی برای خروجی دوم



شکل ۷) نمودار مرحله آموزش شبکه نوروفازی برای خروجی اول



شکل ۸) نمودار مرحله آموزش شبکه نوروفازی برای خروجی دوم

نتایج کلی این نمودار بیانگر عملکرد مناسب شبکه نوروفازی در آموزش و تخمین خروجی‌ها است.

شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایش‌دهنده رابطه بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل در مرحله آموزش هستند. این نمودارها نشان می‌دهند که چقدر داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل نوروفازی (ANFIS) به مقادیر واقعی نزدیک هستند. محور افقی مقادیر واقعی (Targets) و محور عمودی مقادیر پیش‌بینی‌شده (Targets) هستند. خط آبی (Fit) خط برازش داده شده بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده و خط چین (Y=T) خط ایده‌آل است که نشان‌دهنده پیش‌بینی کاملاً دقیق است. ضریب همبستگی (R=0.99998) نشان می‌دهد که مدل نوروفازی توانسته پیش‌بینی بسیار دقیقی از خروجی‌ها ارائه دهد. قرار گرفتن نقاط روی خط آبی نشان‌دهنده میزان تطابق بالای مدل با داده‌های واقعی است و وجود حداقل اختلاف بین مقدار واقعی و مقدار پیش‌بینی‌شده بیانگر عملکرد بسیار مطلوب مدل است.

نتایج این دو نمودار نشان می‌دهد که مدل نوروفازی توانسته ارتباط قوی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها برقرار کند و دقت بالایی در پیش‌بینی مقادیر تنش‌ها داشته باشد.

لازم به ذکر است که پارامترهای فوق پس از تکرار بسیار زیاد و بررسی عملکرد شبکه انتخاب شدند و پس از آزمون‌های فراوان، شبکه با این تنظیمات بهترین عملکرد را نشان داد.

شبکه نوروفازی را بر اساس داده‌های فوق در نرم افزار متلب تولید گردید. در ادامه نمودار عملکرد شبکه نوروفازی قابل مشاهده است. در ادامه با بررسی نمودارهای شبکه نوروفازی در مراحل مختلف، عملکرد این شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شکل ۷ و ۸ عملکرد شبکه نوروفازی (ANFIS) را در مرحله آموزش نشان می‌دهد. این نمودارها میزان تطابق بین مقادیر واقعی (Target) و مقادیر پیش‌بینی‌شده (Predicted) را بررسی می‌کنند. محور افقی شماره نمونه‌های آموزشی و محور عمودی مقدار خروجی موردنظر و مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل را نشان می‌دهند. نقاط دایره‌ای (○) مقادیر واقعی و نقاط ضربدری (×) مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل نوروفازی هستند. تطابق این دو مجموعه داده نشان می‌دهد که مدل توانسته الگوی داده‌ها را به‌درستی یاد بگیرد.

جدول ۳) نتایج بهینه‌سازی با استفاده از شبکه پرسپترون

a	b	c	Texp	Tsus	Texp+Tsus
۳۸۷۰	۳۶۷۰	۲۶۰۰	۱۶۲/۳۸	۶۵	۲۲۷/۳۸

جدول ۴) مقایسه نتایج حاصل از نرم‌افزار سزار با الگوریتم بهینه‌سازی و شبکه پرسپترون

نتایج الگوریتم بهینه‌سازی	تنش ناشی از تنش ناشی از انبساط حرارتی	تنش ناشی از بار مرده	نتایج حاصل از سزار
۲۲۷/۳۸	۱۶۲/۳۸	۶۵	۲۲۷/۴

جدول ۵) نتایج بهینه‌سازی با استفاده از شبکه نوروفازی

a	b	c	Texp	Tsus	Texp+Tsus
۲۷۷۰	۴۵۷۰	۱۶۰۰	۱۷۶/۳۵	۶۹/۱۸	۲۴۵/۷۷

جدول ۶) مقایسه نتایج حاصل از سزار با نتایج بهینه‌سازی با شبکه نوروفازی

نتایج الگوریتم بهینه‌سازی	تنش ناشی از بار مرده	تنش ناشی از انبساط حرارتی	نتایج حاصل از سزار
۲۴۵/۷۷	۶۹/۴۲	۱۷۶/۳۵	۲۴۱/۳

الگوریتم و مقادیر دقیق حاصل از تحلیل تنش نرم‌افزار سزار، صحت عملکرد الگوریتم‌های ارائه شده در این پژوهش را تأیید می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حلقه بهینه حاصل از شبکه نوروفازی موجب کاهش طول حلقه به میزان ۱۲۰ سانتی‌متر (۶/۷۸ درصد) و کاهش مجموع تنش‌های معیار به میزان ۹/۵ درصد گردید، در حالی که حلقه بهینه شبکه پرسپترون سبب کاهش مجموع تنش‌های معیار به میزان ۱۴/۶ درصد شده است ولی این امر سبب افزایش طول خط لوله به میزان ۲۰ سانتی‌متر (۱/۱۴ درصد) است.

این امر گویای این مطلب است که حلقه بهینه حاصل از شبکه نوروفازی هر دو هدف بهینه‌سازی را تأمین کرده است و علاوه بر کاهش طول، تنش‌های وارد بر سیستم لوله‌کشی را نیز کاهش داده‌است در حالی که حلقه بهینه شبکه پرسپترون فقط یک هدف را تأمین کرده است که کاهش تنش‌ها بوده ولی سبب افزایش طول خط لوله گردیده‌است. لذا شبکه نوروفازی نسبت به سایر روش‌ها بهترین نتیجه را نشان می‌دهد. در نتیجه بهینه‌سازی حلقه‌های انبساط با استفاده از شبکه نوروفازی، علاوه بر افزایش ایمنی و بهبود عملکرد خطوط لوله، باعث کاهش هزینه‌های عملیاتی و تعمیر و نگهداری در سیستم‌های صنعتی خواهد شد.

۴- خروجی الگوریتم بهینه‌سازی

با ادغام شبکه‌های عصبی که پیش‌تر ساختیم، با الگوریتم زنبور عسل تلاش می‌کنیم تا نقاطی را که حاصل جمع تنش‌ها در آن‌ها کمینه است، شناسایی کنیم.

۴-۱- حلقه بهینه شبکه پرسپترون

مشخصات حلقه بهینه حاصل از ادغام شبکه پرسپترون با الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل در جدول ۳ بیان شده است. این‌ها نتایج حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی و شبکه پرسپترون هستند. به منظور راستی‌آزمایی این داده‌ها خط لوله را با این ابعاد در نرم‌افزار سزار شبیه‌سازی نمودیم و نتایج در جدول ۴ ذکر شده‌اند.

طبق اطلاعات موجود در جدول ۴، میان داده‌های الگوریتم بهینه‌سازی و خروجی‌های نرم‌افزار سزار اختلاف بسیار کمی وجود دارد و این نشان‌دهنده‌ی عملکرد صحیح و قابل قبول شبکه پرسپترون در پیش‌بینی مقادیر تنش به ازای ابعاد دلخواه حلقه‌هاست. حلقه‌ی بهینه خروجی از این الگوریتم، از حلقه فعال فعلی ۲۰ سانتی‌متر بزرگ‌تر و از نظر تنش‌های وارد بر خط لوله شرایط بهتری دارد و خط لوله با این حلقه در بحرانی‌ترین نقطه 39 N/mm^2 نیروی کمتری تحمل می‌کند.

۴-۲- حلقه بهینه شبکه نوروفازی

مشخصات حلقه بهینه حاصل از ادغام شبکه نوروفازی با الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل در جدول ۵ بیان شده است. همانند بخش قبل حلقه بهینه خروجی از ادغام شبکه فازی و الگوریتم بهینه‌سازی را توسط نرم‌افزار سزار تحلیل تنش نمودیم تا اعتبار نتایج پیش‌بینی شده توسط شبکه نوروفازی را بسنجیم. داده‌ها جهت مقایسه در جدول ۶ ذکر شده‌اند.

اختلاف مقادیر بین نتایج الگوریتم و خروجی‌های سزار کم و منطقی است و لذا نتایج حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی معتبر می‌باشند. حلقه‌ی بهینه‌ای که شبکه نوروفازی معرفی کرده ۱/۲ متر از حلقه فعال فعلی کوتاه‌تر است؛ با این وجود مجموع دو تنش در این حلقه 25.1 N/mm^2 کمتر از حلقه فعال است.

از طرف دیگر این حلقه‌ی بهینه از حلقه شماره ۱ که کوتاه‌ترین حلقه در میان داده‌های اولیه است، ۶۰ سانتی‌متر کوتاه‌تر است؛ با این وجود مجموع تنش‌ها در آن از حلقه‌ی شماره ۱۲۱ داده‌های اولیه که کم‌ترین مجموع تنش‌ها در آن رخ می‌دهد، حدود 3 N/mm^2 کمتر است.

۵- تحلیل و اعتبارسنجی نتایج

به منظور ارزیابی عملکرد روش بهینه‌سازی پیشنهادی، حلقه‌های بهینه استخراج شده از شبکه‌های نوروفازی و پرسپترون چندلایه، توسط نرم‌افزار سزار تحلیل تنش شدند و نتایج حاصل در جداول ۴ و ۶ ذکر شده‌اند. نزدیک بودن مقادیر پیش‌بینی شده توسط

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بهینه‌سازی حلقه‌های انبساط در خطوط لوله بخار با استفاده از شبکه نوروفازی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین یک شبکه پرسپترون جهت مقایسه با شبکه نوروفازی ارائه گردید. نتایج نشان داد که هر دو شبکه در پیش‌بینی تنش‌ها عملکرد مطلوبی داشته‌اند. نمودارهای عملکرد و رگرسیون شبکه پرسپترون (MLP) حاکی از نزدیکی و انطباق بالای داده‌های خروجی شبکه با مقادیر واقعی هستند. همچنین، مقدار خطای میان داده‌های شبکه نوروفازی و مقادیر واقعی بسیار ناچیز بوده و نمودارهای عملکرد و رگرسیون نشان‌دهنده‌ی همخوانی بالای پیش‌بینی‌های شبکه نوروفازی با مقادیر واقعی است.

پس از اطمینان از عملکرد صحیح شبکه‌ها، با ترکیب جداگانه هرکدام از آن‌ها با الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل، حلقه‌های انبساط بهینه شناسایی شدند. در ادامه، جهت اعتبارسنجی نتایج بهینه‌سازی، حلقه‌های بهینه حاصل، با استفاده از نرم‌افزار سزارتحلیل تنش شدند. اختلاف جزئی بین مقادیر تنش محاسبه‌شده با نرم‌افزار سزار و داده‌های خروجی از الگوریتم بهینه‌سازی، نشان‌دهنده‌ی معتبر بودن نتایج است.

بر اساس داده‌ها، شبکه نوروفازی عملکرد مطلوب‌تری دارد و قادر است علاوه بر توزیع متعادل‌تر تنش‌ها، طول حلقه‌های انبساط را نیز کاهش دهد و عملکرد سیستم لوله‌کشی را بهبود بخشد.

حلقه‌ی بهینه‌ی حاصل از شبکه پرسپترون، نسبت به شرایط فعلی خط لوله ۱/۱۴ درصد افزایش طول و ۱۴/۶ درصد کاهش مجموع تنش‌ها را نشان داد. با مقایسه مقادیر تنش، میان حلقه‌های بهینه‌ی حاصل و حلقه‌های اولیه، مشخص شد که وضعیت تنش‌ها در حلقه‌ی بهینه حاصل از شبکه پرسپترون در بهترین حالت قرار دارد. اگر هدف بهینه‌سازی صرفاً کاهش تنش‌ها باشد، این نتیجه مطلوب تلقی می‌شود. با این حال، طول این حلقه ۲۰ سانتی‌متر بیشتر از حلقه‌ی فعال فعلی است.

در مقابل، بررسی دقیق‌تر حلقه‌ی بهینه‌ی حاصل از شبکه نوروفازی، نشان داد که این حلقه ۱۲۰ سانتی‌متر کوتاه‌تر از حلقه‌ی فعال فعلی بوده و مجموع تنش در آن $25/1 \text{ N/mm}^2$ کمتر از حلقه‌ی فعال است. علاوه بر این، طول این حلقه نسبت به حلقه‌ی بهینه‌ی شبکه پرسپترون ۱۴۰ سانتی‌متر کوتاه‌تر است.

در نتیجه، حلقه‌ی بهینه‌ی شبکه نوروفازی نه تنها باعث کاهش طول به میزان ۶/۷۸ درصد شده است، بلکه میزان تنش را نیز ۹/۵ درصد کاهش داده است که نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر این روش در بهبود شرایط خط لوله است. در حقیقت شبکه نوروفازی هر دو هدف بهینه‌سازی یعنی کاهش طول خط لوله و کاهش تنش‌های وارد بر خط لوله را برآورده کرده، در حالی که شبکه پرسپترون تنها موفق به کاهش میزان تنش‌ها شده و طول خط لوله را افزایش داده است.

بر اساس این یافته‌ها، در پژوهش‌های آینده، استفاده از شبکه نوروفازی برای بهبود جانمایی و کاهش تعداد پایه‌های نگهدارنده پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این، طراحی بهینه‌ی خط لوله با در نظر گرفتن سایر متغیرهای تأثیرگذار مانند ضخامت خط لوله و بارهای لرزه‌ای، می‌تواند به‌عنوان یک مسیر تحقیقاتی مورد بررسی قرار گیرد.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- 1- American Society of Mechanical Engineers. ASME B31.3-2020: Process Piping. New York: ASME; 2020.
- 2- Bisht S, Jahan F. An overview on pipe design using Caesar II. International Journal on Emerging Technologies. 2014 Jul 1;5(2):114.
- 3- Sankar KS, Kumaran SS. Optimization of piping expansion loop in process plant. Int. J. Appl. Eng. Res. 2015;10(49):574-8.
- 4- Rani MJ, Ramanathan K. Design and analysis of piping system with supports using CAESAR-II. International Journal of Computer and Systems Engineering. 2016;10(5):980-4.
- 5- Caponetto R, Fargione G, Giudice F, Schiavo M. Revamping Optimization of a Pressure Piping System Using Artificial Neural Networks. Designs. 2022 Nov 1;6(6):103.
- 6- Chiba T, Okado S, Fujii I, Itami K, Hara F. Optimum support arrangement of piping systems using genetic algorithm. American Society of Mechanical Engineers, New York, NY (United States); 1995 Dec 31.
- 7- Wei Z, Wu J, Li Z, Cheng S, Yan X, Wang S. The Intelligent Layout of the Ship Piping System Based on the Optimization Algorithm. Applied Sciences. 2024 Mar 22;14(7):2694.
- 8- Yudo H, Jokosisworo S, Amiruddin W, Pujiyanto P, Tuswan T, Djaeni M. Numerical evaluation of expansion loops for pipe subjected to thermal displacements. Curved and Layered Structures. 2022 Jan 1;9(1):72-80.
- 9- Jaćimović N, Ivošević M. Shortcut method for pipe expansion loop sizing. Journal of Pressure Vessel Technology. 2020 Aug 1;142(4):041505.
- 10- Goguen JA. LA Zadeh. Fuzzy sets. Information and control, vol. 8 (1965), pp. 338–353.-LA Zadeh. Similarity relations and fuzzy orderings. Information sciences, vol. 3 (1971), pp. 177–200. The Journal of Symbolic Logic. 1973 Dec;38(4):656-7.
- 11- Zadeh LA. A fuzzy-algorithmic approach to the definition of complex or imprecise concepts. International Journal of Man-machine studies. 1976 May 1;8(3):249-91.
- 12- Kumar B, Kumar D. A review on Artificial Bee Colony algorithm. International Journal of Engineering & Technology. 2013 Jul 1;2(3):175.