NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP NÂNG CAO ĐỘ CHÍNH XÁC THIẾT KẾ NGƯỢC CẶP TRỤC VÍT MÁY NÉN KHÍ NHẰM TĂNG ĐỘ CHÍNH XÁC ĐỘNG HỌC VÀ ÁP SUẤT

STUDY ON SOLUTIONS TO IMPROVE THE REVERSE ENGINEERING ACCURACY OF AIR COMPRESSOR SCREW PAIRS TO INCREASE THE KINEMATIC ACCURACY AND PRESSURE

Nguyễn Văn Thường, Hoàng Long*
Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
**Email: long.hoang@hust.edu.vn*

TÓM TẮT

Thiết kế ngược bằng quét 3D là phổ biến trong việc phục hồi cũng như phân tích tính năng của máy nén khí trục vít. Sự tồn tại của sai số trong quá trình thiết kế này là do sai số của bản thân thiết bị quét, cũng như sự định vị và hiệu chỉnh dữ liệu giữa các lần đo của kỹ thuật viên, dẫn đến rung động và làm giảm hiệu quả của máy nén khí. Bài báo đưa ra giải pháp tổng thể để khắc phục sai số này thông qua các bước: tham số hóa biên dạng mặt cắt ngang của trục đực (male rô-to), xác định biên dạng đối tiếp của trục cái (female rô-to) dựa trên phương trình ăn khớp của cặp trục vít, mô phỏng động học và dòng chảy để đánh giá sai số động học và hiệu quả nén khí. Những kết quả mô phỏng số kiểm chứng trên máy nén khí Airman PDS50 cho hai mô hình (thiết kế ngược truyền thống và áp dụng giải pháp đề xuất) cho thấy sai lệch tương đối lớn nhất của tỷ số truyền giảm từ 6% xuống 1,2% và áp suất cực đại trong buồng nén tăng 5%.

Từ khóa: *Máy nén khí; Thiết kế ngược; Phương trình ăn khớp.*

ABSTRACT

Reverse engineering using 3D scanning is widely employed to reproduce and analyse the performance of screw compressors. Errors in this design process arise from the scanning equipment itself, as well as from alignment and data-correction errors between successive technician measurements, leading to vibrations and reduced compressor efficiency. This paper presents a comprehensive solution to overcome these errors through the following steps: parameterising the cross-sectional profile of the male rotor; determining the female rotor profile based on the screw pair's meshing equation; and performing kinematic and fluid-flow simulations to evaluate kinematic errors and compressor efficiency. Numerical verification results for the Airman PDS50 air compressor for two models (traditional reverse engineering and the proposed solution) showed a reduction in the transmission ratio error from 6% to 1.2% and a 5% increase in outlet pressure.

Keywords: *Screw compressor; Reverse-engineering; Meshing equation.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Máy nén trục vít là những máy nhỏ gọn, hoạt động ở tốc độ cao, trong khi vẫn duy trì hiệu suất cao trong phạm vi áp suất và lưu lượng rộng [1, 2]. Cơ chế chính bao gồm hai rô-tô ăn khớp với nhau được đặt bên trong một vỏ kín. Do cơ chế hoạt động này, hiệu suất của máy nén trục vít chủ yếu phụ thuộc vào hình dạng rôto và độ chính xác gia công [3, 4].

Kỹ thuật thiết kế ngược (Reverse Engineering – RE) đã được áp dụng rộng rãi trong sản xuất phục hồi máy nén trục vít đôi hoặc trong nghiên cứu, phân tích và so sánh hiệu suất với các sản phẩm tương tự. Bằng cách sử dụng công nghệ quét bề mặt, sự tồn tại sai số trong quá trình thiết kế này là do sai số của bản thân thiết bị quét cũng như sự định vị, hiệu chỉnh dữ liệu giữa các lần đo của kỹ thuật viên dẫn đến rung động và giảm hiệu quả máy nén, sự thiếu chính xác này còn gây khó khăn cho việc phân tích tiếp theo về phân bố khe hở dọc theo biên dạng rôto [5]. Hơn nữa, mặc dù tồn tại những sai số đo nhỏ trong dữ liệu RE, máy nén trục vít vẫn yêu cầu độ chính xác đến mức micromet [2, 6].

Trong bài toán thiết kế thuận, nghĩa là cho trước biên dạng của một rô-to, xác định biên dạng đối ứng của rô-to còn lại dựa trên lý thuyết bao hình của cặp động học mà lời giải của nó có thể được phân ra như sau: phương pháp giải tích thuần túy [7, 8], các phương pháp số [9-11] và các phương pháp bao hình dựa trên CAD [12-15] bằng cách sử dụng toán tử Boolean hoặc chiếu vuông góc trục quay tức thời của cặp động học lên bề mặt ăn khớp để thu được đường tiếp xúc. Mỗi phương pháp có những ưu, nhược điểm riêng và phù hợp với đối tượng và mục đích nghiên cứu cụ thể. Phương pháp giải tích cung cấp lý thuyết nền tảng cho các phương pháp khác, nhưng khó áp dụng cho các tình huống phức tạp như xuất hiện điểm kỳ dị hoặc cắt lẹm, và chỉ có thể giải chính xác trong một số trường hợp; đồng thời, phương pháp này đòi hỏi bề mặt phải được diễn tả thông qua một hệ phương trình. Bên cạnh đó, các phương pháp số cũng gặp phải những thách thức tương tự vì đều xuất phát từ phương trình ăn khớp mà phương pháp giải tích đưa ra. Các phương pháp bao hình dựa trên toán tử Boolean [12, 13] mô phỏng quá trình bao hình vật lý nên vẫn áp dụng được trong trường hợp cắt lẹm và điểm kỳ dị nhưng tốn thời gian khi muốn đạt độ chính xác cao và tốn nhiều bộ nhớ của file kết quả khiến việc sử dụng sau đó gặp khó khăn. Phương pháp chiếu vuông góc trên CATIA [14, 15] là khá đơn giản cho việc áp dụng, nhưng sẽ không thực hiện được nếu có sai số dù nhỏ trên biên dạng đã cho, dẫn đến đường tiếp xúc của cặp động học sẽ đứt gãy thành nhiều phân đoạn không liên tục do đó không thể tạo ra bề mặt đối tiếp.

Dựa trên những phân tích trên đây, mục tiêu của bài báo này là phát triển một phương pháp thiết kế lai (PIRE) bao gồm cả thiết kế ngược và thiết kế thuận nhằm rút ngắn thời gian thiết kế ngược, đồng thời cải thiện độ chính xác và khắc phục hiện tượng cắt lẹm và điểm kỳ dị. Công việc thiết kế này bao gồm ba giai đoạn: (1) tham số hóa dữ liệu rôto đực từ dữ liệu thiết kế ngược; (2) tạo ra biên dạng đối tiếp của rôto cái bằng phương pháp chiếu vuông góc trên CATIA; và (3) phân tích mô phỏng số để đánh giá hiệu quả của phương pháp đề xuất.

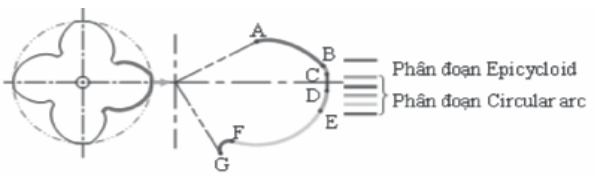
2. PHƯƠNG PHÁP ĐỀ XUẤT NÂNG CAO ĐỘ CHÍNH XÁC THIẾT KẾ NGƯỢC

2.1. Tham số hóa dữ liệu rôto đực từ dữ liệu thiết kế ngược

Biên dạng rôto đực bao gồm các đoạn cong lặp lại theo các răng. Do đó, việc xác định

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 342, tháng 6 năm 2026
cokhivietnam.vn

tham số được thực hiện trên một răng đại diện, như thể hiện trong Hình 1. Trong các máy nén trục vít điển hình [16, 17], các phân đoạn bao gồm đường cong epicycloid, các cung tròn và elip, với các phương trình được xác định dưới đây. Các đoạn được tạo ra phải đáp ứng một số tiêu chí, bao gồm tính liên tục về vị trí và đạo hàm cấp 1, cấp 2; tránh bị cắt lẹm trong bước tiếp theo (xác định biên dạng đối tiếp); và tuân thủ các ràng buộc hình học [18]. Để lấy biên dạng mặt cắt ngang của trục đực từ mô hình thiết kế ngược trục đực, sử dụng lệnh "Section" trong AutoCAD. Để xác định các điểm trên biên dạng thiết kế ngược trục đực, sử dụng hàm vlax-curve-getPointAtParam trong ngôn ngữ Visual Lisp chạy trên AutoCAD. Tất cả các phân đoạn đều được xác định tham số bằng phương pháp bình phương tối thiểu phi tuyến có trọng số để xác định các tham số hình học của biên dạng rô-tô đực. Hệ số trọng số riêng được gán cho mỗi điểm dữ liệu rời rạc để kiểm soát ảnh hưởng của nó đến hàm mục tiêu. Quy trình được thực hiện trong MATLAB bằng cách sử dụng hàm lsqnonlin với thuật toán Levenberg–Marquardt. Phân đoạn cong epicycloid được thực hiện đầu tiên bằng cách gán các hệ số trọng số cao cho hai điểm đầu - cuối của phân đoạn và các điểm lân cận của chúng, nhằm duy trì tính liên tục hình học với đoạn biên dạng tiếp theo. Để đảm bảo tính liên tục hình học giữa đoạn đường cong epicycloid và cung tròn tiếp theo, một ràng buộc hình học bổ sung được sử dụng sao cho tâm của cung tròn nằm trên vectơ pháp tuyến tại điểm cuối của đoạn đường cong epicycloid. Quy trình tương tự được lặp lại cho các phân đoạn còn lại.



Hình 1. Các phân đoạn trên biên dạng rô-to đực

2.2. Xác định biên dạng trục cái theo phương pháp bao hình

Theo lý thuyết bao hình [1, 2], mỗi mặt răng là hình bao của họ các bề mặt răng đối tiếp trong chuyển động tương đối. Tại mỗi thời điểm, hai mặt răng sẽ có một đường tiếp xúc có thể coi là giao tuyến của cặp bề mặt gần nhau vô cùng nhỏ và có thể được xác định bằng cặp phương trình dưới đây.

$$F(x,y,z,\theta) = 0$$
$$F(x,y,z,\theta + \varepsilon) = 0 \quad (1)$$

Trong đó, x, y, z là tọa độ của một điểm trên bề mặt, và θ là tham số chuyển động tương đối. Khi ε rất nhỏ, giao tuyến trở thành đường tiếp xúc. Đường tiếp xúc cũng được tìm thấy theo truyền thống bằng hệ phương trình được đưa ra dưới đây:

$$\begin{aligned} F(x,y,z,\theta) &= 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \theta} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Hệ phương trình 2 được gọi là hệ phương trình ăn khớp. Một cách diễn giải khác dưới dạng động học vectơ tham số như sau:

$$r(u,v,t) = 0 \quad (3)$$

$$\vec{N} \cdot \vec{V} = 0 \quad (4)$$

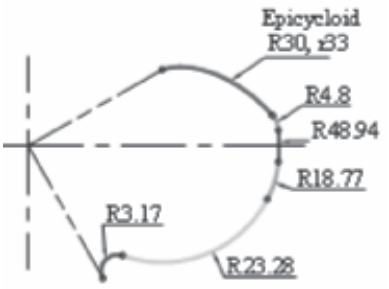
Trong đó, r là véc tơ vị trí, $\vec{N}$ là véc tơ pháp tuyến chung của bề mặt cặp động học.

Từ phương trình 4, có thể chứng minh rằng đường tiếp xúc của cặp bề mặt răng đối tiếp sẽ là hình chiếu vuông góc của trục quay tức thời trong chuyển động tương đối của hai bánh răng, điều này có thể thực hiện trong phần mềm CATIA thông qua lệnh "project" sẽ được làm rõ trong phần dưới đây. ☞

3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM KIỂM CHỨNG VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả tham số hóa biên dạng trục đực

File thiết kế ngược trục đực dưới dạng *.IGS được đưa vào trong AutoCAD, sau đó thực hiện việc xác định tham số của các phân đoạn như đã nói ở phần 2.1, thu được kết quả như trên Hình 2 dưới đây.



Hình 2. Tham số của biên dạng trục đực

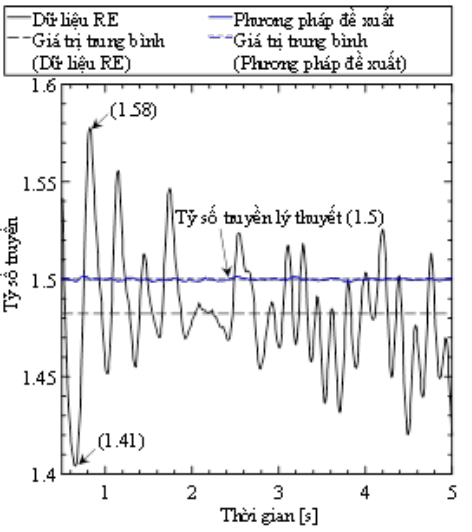
3.2. Xác định biên dạng trục cái

Biên dạng đã được tham số hóa được sử dụng để tạo mô hình 3D của trục đực, sau đó được đưa vào môi trường CATIA. Thực hiện lệnh Project trục quay tức thời sẽ thu được kết quả như trên Hình 3 (đường màu trắng là đường tiếp xúc của cặp răng đối tiếp). Sau đó sử dụng lệnh Sweep sẽ tạo ra bề mặt răng đối tiếp của trục cái.

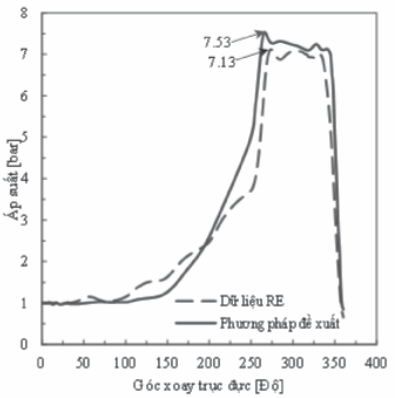
Hình 3. Đường tiếp xúc được tạo ra bằng lệnh Project trong CATIA

3.3. Mô phỏng sai số động học và áp suất máy nén

Phân tích chuyển động trong SolidWorks [19] được sử dụng để phân tích động học của hai cặp trục vít (cặp từ dữ liệu thiết kế ngược nguyên bản và cặp sử dụng phương pháp đề xuất), kết quả thu được như trên Hình 4a. Để đánh giá ảnh hưởng của biên dạng rôto đến hiệu suất máy nén, các mô phỏng CFD đã được thực hiện bằng cách sử dụng phần mềm Simerics-MP+ (trước đây gọi là PumpLinx) [20-23], với kết quả như trên Hình 4b.



(a) Mô phỏng động học



(b) Mô phỏng dòng chảy

Hình 4. Kết quả mô phỏng động học và dòng chảy.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 342, tháng 6 năm 2026
cokhivietnam.vn

Tỷ số truyền thực tế i(t) được xác định từ kết quả mô phỏng động học tại từng thời điểm t, trong khi tỷ số truyền lý thuyết i_{lt} được xác định dựa trên các thông số thiết kế. Sai lệch tương đối lớn nhất của tỷ số truyền được tính theo công thức:

$$\delta_{i,max} = max\left(\frac{|i(t) - i_{lt}|}{i_{lt}}\right) \times 100\% \quad (5)$$

Trong đó, $\delta_{i,max}$ là sai số tương đối lớn nhất của tỷ số truyền (%), i(t) là tỷ số truyền thực tế và $i_{lt} = 1.5$ là tỷ số truyền lý thuyết của rặp trục vít cấu hình 4/6.

Hình 4a cho thấy sai lệch tương đối lớn nhất của tỷ số truyền giữa phương pháp đề xuất và phương pháp thiết kế ngược truyền thống đã giảm xuống từ 6% còn 1,2%. Hình 4b cho thấy áp suất cực đại trong buồng nén của phương pháp đề xuất đã tăng khoảng 5% so với phương pháp thiết kế ngược truyền thống khi áp suất cổng ra là 7 bar, như trong Bảng 1. Kết quả trên chỉ ra những hạn thế của phương pháp truyền thống là do không xuất phát từ phương trình ăn khớp. Điều này dẫn đến sai lệch điều kiện ăn khớp, khiến tỷ số truyền tức thời dao động quanh giá trị lý thuyết. Sự dao động này làm phát sinh gia tốc và lực quán tính, gây rung động trong quá trình vận hành. Bên cạnh đó, phương pháp truyền thống không đảm bảo điều kiện tiếp xúc lý tưởng giữa hai cặp rôto. Do đó, khe hở vẫn tồn tại, làm tăng tổn thất và làm giảm áp suất nén cực đại.

Bảng 1. Áp suất cực đại trong buồng nén khi áp suất cổng ra 7 bar.

Biên dạng trục vít	Áp suất (bar)	Chênh lệch so với dữ liệu RE (%)
Từ dữ liệu RE	7.13	–
Phương pháp đề xuất	7.53	+5

Phương pháp đề xuất đã đơn giản hóa việc giải phương trình ăn khớp theo phương pháp giải tích [7, 8] và phương pháp số [9-11] cũng như khắc phục trạng thái cắt lẹm và xuất hiện điểm kỳ dị thông qua việc tham số hóa biên dạng trục đực nên có thể sử dụng trực tiếp lệnh chiếu trong CATIA mà không cần kết hợp với lập trình trên AutoCAD [15].

4. KẾT LUẬN

Bài báo đưa ra giải pháp tổng thể nhằm khắc phục sai số thiết kế ngược thông thường thông qua các bước: tham số hóa biên dạng mặt cắt ngang của trục đực; xác định biên dạng đối tiếp của trục cái dựa trên phép chiếu vuông góc để tìm đường tiếp xúc; mô phỏng động học và dòng chảy để đánh giá sai số động học và hiệu quả nén khí. Những kết quả mô phỏng số kiểm chứng trên máy nén khí Airman PDS50 cho hai mô hình (thiết kế ngược truyền thống và áp dụng giải pháp đề xuất) cho thấy sai lệch tương đối lớn nhất của tỷ số truyền giảm từ 6% xuống 1,2% và áp suất cực đại trong buồng nén tăng 5%.❖

Ngày nhận bài: **18/5/2026**
Ngày phản biện: **04/6/2026**

Tài liệu tham khảo:

[1]. N. Stosic and K. Hanjalic, "*General Method for Screw Compressor Profile Generation*". International Compressor Engineering Conference. http://docs.lib.purdue.edu/icec/1099, 1996.

[2]. N. Stosic, I. Smith, and A. Kovacevic, Eds., "*Screw Compressors: Mathematical Modelling and Performance Calculation*". Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.

[3]. J. D. Suh and D. G. Lee, "*Manufacture of composite screw rotors for air compressors by RTM process*". Journal of Materials Processing Technology, vol. 113, no. 1, pp. 196-201, June 2001.

[4]. Y.-R. Wu and Z.-H. Fong, "*Optimisation design of an explicitly defined rack for the generation of* ☞

rotors for twin-screw compressors". Mechanism and Machine Theory, vol. 44, no. 1, pp. 66-82, 2009.

[5]. R.-H. Hsu, Y.-R. Wu, and Z.-A. Chen, "*A Numerical Method for Reversely Generating a Pair of Conjugated Rotor Profiles of Twin-screw Compressor from the Measured Profile Data*". Procedia CIRP, vol. 63, pp. 483-487, 2017.

[6]. S. Abdan, S. Patil, N. Stosic, A. Kovacevic, and I. Smith, "*Experimental validation of the screw compressor oil drag model for various rotor profiles*". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, vol. 238, no. 6, pp. 2740-2749, 2024.

[7]. F. L. Litvin and A. Fuentes, "*Gear Geometry and Applied Theory*". Cambridge University Press, 2004.

[8]. N. Stosic, I. K. Smith, A. Kovacevic, and E. Mujic, "*Geometry of screw compressor rotors and their tools*". Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, vol. 12, no. 4, pp. 310-326, 2011.

[9]. L. Liu, F. Meng, and J. Ni, "*A novel non-involute gear designed based on control of relative curvature*". Mechanism and Machine Theory, vol. 140, pp. 144-158, 2019.

[10]. J. Wang, H. Liang, S. Luo, and R. Y. Wu, "*Active design of tooth profiles using parabolic curve as the line of action*". Mechanism and Machine Theory, vol. 67, pp. 47-63, Sept. 2013, https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.04.002.

[11]. S. Cao, X. He, R. Zhang, J. Xiao, and G. Shi, "*Study on the reverse design of screw rotor profiles based on a B-spline curve*". Advances in Mechanical Engineering, vol. 11, no. 10, p. 1687814019883782, Oct. 2019, https://doi.org/10.1177/1687814019883782.

[12]. L. V. Mohan and M. S. Shunmugam, "*CAD approach for simulation of generation machining and identification of contact lines*". International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.02.013.

[13]. L. Hoang, T. L. Banh, and T.-L. Nguyen, "*A new method for designing and machining air compressor screw pairs*". International Journal of Modern Physics B, vol. 34, no. 22n24, p. 2040128, Sept. 2020, https://doi.org/10.1142/S0217979220401281.

[14]. L. Hoang and T.-T. Nguyen, "*A New Computational Envelope Solution for Helical Gear Disc Tool Profiling*". Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 14, no. 4, pp. 15373-15377, Aug. 2024, https://doi.org/10.48084/etasr.7814.

[15]. L. Hoang, "*A New Envelope Computational Method for Meshing Heliacal Gears Profiling Applied to Air Compressor Screw Pair*". Advances in Science and Technology Research Journal, vol. 18, no. 4, pp. 347-354, Aug. 2024, https://doi.org/10.12913/22998624/189674.

[16]. X. M. He, H. Y. Liu, Y. Lu, and M. Han, "*Positive and Reverse Design of Screw Rotor Profiles with Freeform Curve*". Applied Mechanics and Materials, vol. 184-185, pp. 372-375, 2012, https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.184-185.372.

[17]. V.-Q. Tran and Y.-R. Wu, "*A Flexible Application for Generating of Screw Rotor Profile*". In: New Advances in Mechanisms, Transmissions and Applications, vol. 192, Y.-R. Wu, T. Essomba, K.-L. Hsu, and M. A. Laribi, Eds. Cham: Springer Nature Switzerland, 2026, pp. 14-23.

[18]. Y.-R. Wu and Z.-H. Fong, "*Improved rotor profiling based on the arbitrary sealing line for twin-screw compressors*". Mechanism and Machine Theory, vol. 43, no. 6, pp. 695-711, June 2008, https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2007.05.008.

[19]. Y. Li, L. Wang, Y. Song, and P. Zhao, "*Rigid body dynamics analysis in design of cantilever beam of entertainment equipment based on SolidWorks-Motion*". In: 2017 8th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT), Feb. 2017, pp. 69-73, https://doi.org/10.1109/ICMIMT.2017.7917437.

[20]. I. Malael and V. Petrescu, "*Computational Fluid Dynamics Evaluation of an Oil-flooded Screw Compressor*". Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 13, no. 5, pp. 11533-11539, Oct. 2023, https://doi.org/10.48084/etasr.6122.

[21]. H. Ding and Y. Jiang, "*CFD simulation of a screw compressor with oil injection*". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 232, p. 012020, Aug. 2017, https://doi.org/10.1088/1757-899X/232/1/012020.

[22]. T. Wang, Q. Qi, W. Zhang, and D. Zhan, "*Research on Optimization of Profile Parameters in Screw Compressor Based on BP Neural Network and Genetic Algorithm*". Energies, vol. 16, no. 9, p. 3632, Apr. 2023, https://doi.org/10.3390/en16093632.

[23]. A. Kovacevic, S. Rane, N. Stosic, Y. Jiang, and S. Lowry, "*Influence of approaches in CFD Solvers on Performance Prediction in Screw Compressors*". International Compressor Engineering Conference, Purdue University, United States, 2014.