

ỨNG DỤNG ANN TRONG TÍNH TOÁN KẾT CẤU KHUNG MÁY IN 3D BÊ TÔNG KÍCH THƯỚC LỚN

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK (ANN) TO CALCULATE 3D CONCRETE PRINTER LARGE-SIZED

Tạ Đức Hải^{1*}, Nguyễn Bá Thông¹,
Nguyễn Ngọc Bình¹, Phùng Văn Bình¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2024.034>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày về việc ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo ANN tính toán kết cấu khung máy in 3D bê tông dạng cổng kích thước lớn trong ngành xây dựng. Mô hình máy in 3D được thiết kế sơ bộ trên phần mềm Inventor. Mô hình phần tử hữu hạn (FEM) của khung máy được xây dựng trong môi trường NX Nastran để đánh giá sơ bộ sai số của đầu in do biến dạng đàn hồi của kết cấu gây ra. Để ứng dụng ANN trong tính toán kết cấu, nhóm tác giả xây dựng chương trình tự động tính toán, phân tích kết cấu cụm trục di động của máy. Chương trình tính toán chuyển vị và tần số dao động riêng của hệ được xây dựng dựa trên ngôn ngữ ANSYS APDL kết nối với phần mềm MATLAB. Dựa trên chương trình tự động tính toán tự động này, tập dữ liệu huấn luyện mạng ANN đã được tạo. Kết quả của nghiên cứu có ý nghĩa quan trọng trong việc thiết kế phát triển và là tiền đề để tính toán, lựa chọn phương án kết cấu tối ưu máy in 3D kích thước lớn ứng dụng các thuật toán tối ưu.

Từ khóa: Chương trình tự động tính toán, máy in 3D bê tông, mạng nơ-ron nhân tạo, kết cấu cơ khí.

ABSTRACT

The article presents the application of artificial neural network (ANN) to calculate machine frame structure in 3D concrete large-sized gate in the construction industry. 3D model of machine was designed on Inventor software. The finite element model (FEM) of the frame was built in the NX Nastran environment to evaluate the error of different axes caused by the elastic deformation of the structure. In order to apply ANN in computational configuration, the authors build a program to automatically calculate and analyze the structure of the moving component (X and Z axis) of the machine. The program to calculate vibrational frequency and elastic deformation of the structure is built based on ANSYS APDL connected with MATLAB software. Based on this auto-computation program, the ANN network training dataset was generated. The research results have important significance in the design and development and are the premise for calculating and choosing the optimal machine structure option in large-size 3D, applying optimization algorithms.

Keywords: 3D concrete printer, ANN, automated calculation program, mechanical structure.

¹Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

*Email: taduchai@lqdtu.edu.vn

Ngày nhận bài: 12/6/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 18/9/2023

Ngày chấp nhận đăng: 20/01/2024

DANH MỤC VIẾT TẮT/KÝ HIỆU

ANN: Artificial neural network

$u_{X/Y/Z}$: Chuyển vị đầu in theo các phương X/Y/Z

f_1 : Tần số dao động riêng thứ nhất

1. GIỚI THIỆU

Sự phát triển của công nghệ in 3D bê tông đã mang lại hiệu quả tích cực cho ngành xây dựng ở nhiều nước tiên tiến trong thời gian gần đây [1]. Trong số các cấu hình máy in 3D bê tông được phát triển, thì cấu hình cổng trục thường được nhiều hãng công nghệ lựa chọn hơn cả. Một số ưu điểm nổi bật của cấu hình máy in này là kết cấu đơn giản, dễ chế tạo và điều khiển, không gian làm việc lớn và có khả năng mở rộng để in các kết cấu có kích thước khác nhau [2].

Đặc điểm của máy in 3D bê tông là kích thước lớn, khối lượng lớn, có các trục chuyển động và chịu tải trọng động trong quá trình làm việc. Do đó, việc tính toán kết cấu là một bước quan trọng trong quá trình thiết kế máy in [3]. Các kiểu phân tích kết cấu thường được sử dụng như tính toán chuyển vị, ứng suất, phân tích các dạng dao động riêng, tính toán ổn định của kết cấu. Các kết quả tính toán cung cấp cho người thiết kế một bức tranh tổng thể, trợ giúp phân tích, đánh giá khả năng chịu tải của đối tượng trong quá trình làm việc. Nhờ đó có thể lựa chọn được phương án thiết kế đảm bảo về độ bền, độ chính xác, cũng như giúp giảm khối lượng của máy in.

Với cách tiếp cận truyền thống, việc tính toán kết cấu các máy móc trong thực tế thường được sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn nhờ các phần mềm CAE, ví dụ như Ansys, MSC Nastran, Abaqus/CAE... Cách tiếp cận này thường tốn khá nhiều thời gian khi phải tính toán bằng giao diện từng phương án thiết kế mà cũng chỉ khảo sát được số phương án rất hạn chế.

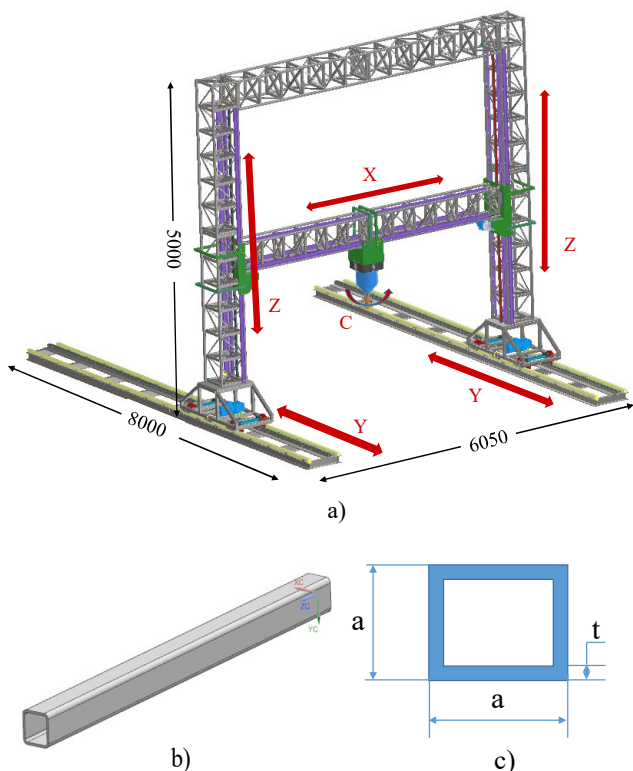
Cách tiếp cận thứ 2, được nhóm tác giả trình bày trong công trình [4] nhờ các chương trình tự động tính toán kết cấu. Chương trình tự động tính toán kết cấu được xây dựng nhờ việc lập trình phát triển trên các phần mềm CAE, tích hợp với các phần mềm lập trình, ví dụ như Matlab/Ansys APDL, Matlab/Abaqus, Python/ Abaqus [5]. Cách tiếp cận

này cho phép tự động tính toán các phương án thiết kế, nhờ đó có thể phân tích, khảo sát được nhiều bộ tham số khác nhau hơn. Tuy nhiên, nhược điểm của cách tiếp cận này là việc tính toán phải sử dụng sự kết nối giữa các phần mềm lập trình và phần mềm CAE phức tạp. Do sự tương tác giữa các phần mềm cũng có độ trễ về thời gian, nên tổng thời gian tính toán một phương án thiết kế vẫn là đáng kể. Hơn thế nữa, để tính toán mỗi đặc tính kết lại cấu phải xây dựng một chương trình tính toán riêng, sử dụng các kiểu phân tích khác nhau của phần mềm CAE. Do đó, trong quá trình tối ưu hóa tham số thiết kế, đặc biệt là với các đối tượng kích thước lớn, kết cấu phức tạp như máy in 3D bê tông, cần phải tính toán lặp lại hàng ngàn đến hàng triệu phép tính, thì thời gian tìm kiếm lời giải tối ưu là rất lớn, thậm chí không khả thi trong thực tế.

Để giải quyết vấn đề nêu ra, trong bài báo này, một cách tiếp cận mới được đề xuất, đó là sử dụng mô hình ANN [6] để dự đoán các đặc tính kết cấu của khung máy in 3D bê tông. Dựa trên bộ dữ liệu tính toán kết cấu được khởi tạo từ các chương trình tính toán tự động cho khung máy in, mô hình ANN sẽ được thiết lập và huấn luyện. Mô hình ANN được phát triển sẽ giúp rút ngắn thời gian tính toán các đặc tính kết cấu của khung máy, là cơ sở cho quá trình tối ưu hóa thiết kế ở giai đoạn tiếp theo.

2. TÍNH TOÁN KẾT CẤU MÁY IN

2.1. Mô tả kết cấu máy in 3D bê tông



Hình 1. Thiết kế sơ bộ máy in 3D bê tông kích thước lớn

a) Mô hình 3D máy in; b) Mô hình 3D thép hộp; c) Thiết diện mặt cắt thép hộp

Một số kết yêu cầu kỹ thuật cơ bản của máy in 3D bê tông kích thước lớn được xác định như sau [4].

- Kích thước kết cấu in lớn nhất có thể đạt 6000x4000x3500mm.

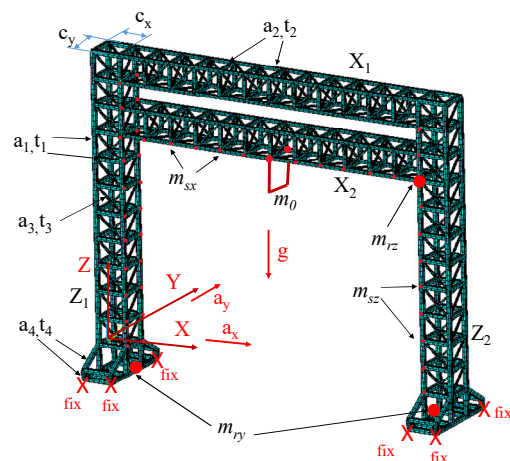
- Vận tốc chuyển động của đầu in V trong khoảng 0 ÷ 20m/ph.

- Sai số của đầu in cần đảm bảo trong khoảng ±5mm theo phương X, Y và ±2mm theo phương Z.

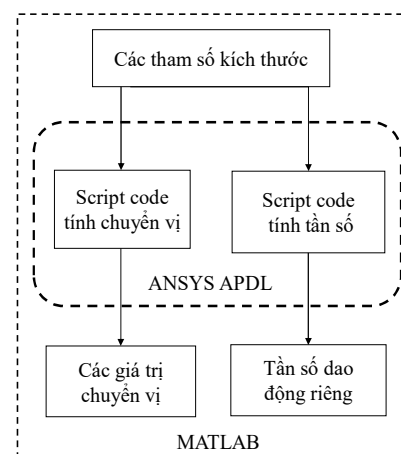
Để giảm khối lượng kết cấu của khung máy in, trong bài báo này, khung máy in sẽ được thiết kế theo hệ khung giàn gian không gian, chứ không sử dụng phương án thép hộp kích thước lớn cho các trục như đã được trình bày ở công trình [4]. Thiết kế sơ bộ của máy in được thể hiện như trên hình 1. Trục X và trục Z có kết cấu giàn được tạo bởi các thanh thép hộp có thiết diện vuông theo kích thước tiêu chuẩn. Các bộ truyền bánh răng được sử dụng để truyền chuyển động cho các trục. Trục C được thiết kế ngay tại vị trí đầu in để tạo chuyển động quay của đầu in trong khi thực hiện in theo biên dạng. Chân máy là hệ thống ray trượt, các ray cố định trực tiếp xuống nền công trình, được chế tạo từ các kết cấu thép hộp chữ I, đảm bảo cứng vững và ổn định trong quá trình làm việc.

2.2. Mô hình tính toán khung máy in 3D bê tông

Khung máy in được tính toán theo phương pháp phần tử hữu hạn trong môi trường ANSYS APDL (hình 2).



Hình 2. Mô hình tính toán khung máy in



Hình 3. Các mô đun tính toán tự động

Thông số của phương án thiết kế sơ bộ được thể hiện trên bảng 1. Chúng được tham số hóa để có thể tính toán, khảo sát tự động với các dải giá trị khác nhau. Có 10 thông số kích thước được tham số hóa. Trong đó c_x, c_y tương ứng là độ rộng của khung trục Z theo phương X, Y; $a_1x_1x_1t_1$ là kích thước mặt cắt của thanh thép hộp theo phương thẳng đứng và phương ngang của trục Z; $a_2x_2x_2t_2$ là kích thước mặt cắt của thanh thép hộp theo phương thẳng đứng và phương ngang của trục X; $a_3x_3x_3t_3$ là kích thước mặt cắt của các thanh thép hộp tăng cứng (đặt chéo) trên cả trục X và Z; $a_4x_4x_4t_4$ là kích thước mặt cắt của các thanh thép hộp ở chân đế trục Z.

Bảng 1. Bộ thông số thiết kế sơ bộ của khung máy in (mm)

c_x	c_y	$a_1x_1x_1t_1$	$a_2x_2x_2t_2$	$a_3x_3x_3t_3$	$a_4x_4x_4t_4$
460	460	60x60x3	50x50x2.5	25x25x1	60x60x3

Các thanh thép hộp của khung máy được mô hình hóa bởi các phần tử dầm BEAM188. Khối lượng của đầu in và động cơ trục X là $m_0 = m_{di} + m_{rx} = 250\text{kg}$, và được mô hình hóa bởi một phần tử khối lượng tập trung. Tổng khối lượng các thanh ray dẫn động và dẫn hướng của trục Z là $m_{sz} = 140\text{kg}$, khối lượng này được coi như phân bố đều vào các nút của khung trục Z. Tổng khối lượng các thanh ray dẫn động và dẫn hướng của X là $m_{sx} = 100\text{kg}$, được phân bố đều vào các nút trên khung trục X. Khối lượng mỗi động cơ trục Y là $m_{ry} = 25\text{kg}$, động cơ trục Z là $m_{rz} = 15\text{kg}$ và chúng được mô hình hóa bởi các phần tử khối lượng tập trung.

Để đơn giản hóa quá trình phân tích, khung máy được coi là đứng yên (Chân máy bị ngàm cố định), tải trọng động tác dụng vào khung máy trong quá trình chuyển động được quy về hệ lực quán tính tác dụng lên khung máy. Các lực quán tính tác dụng vào kết cấu sẽ được tính toán thông qua giá trị gia tốc lớn nhất trong quá trình máy hoạt động. Theo yêu cầu của thiết kế, tốc độ chuyển động tối đa của đầu in theo phương ngang cần đạt là $V_{max} = 20\text{m/phút} = 0,333\text{m/s}$. Giả sử sau $\Delta t = 0,1\text{s}$ đầu in có thể đạt được vận tốc $V_{max} = 0,333\text{m/s}$, gia tốc tối đa của đầu in sẽ là $a_{max} = 3,33\text{m/s}^2$ (theo phương X và Y). Vị trí khung máy được khảo sát tương ứng với trạng thái kết cấu có thể sinh ra sai số vị trí đầu in lớn nhất (khi trục X nằm ở vị trí cao nhất, đầu in ở vị trí chính trục X nên có thể sinh ra độ võng lớn nhất).

Nhằm rút ngắn thời gian tính toán khảo sát, các mô-đun tính toán tự động ở dạng tệp Script code được thiết lập trên ngôn ngữ Ansys APDL tích hợp với ngôn ngữ lập trình Matlab (hình 3), gồm có mô-đun tính toán chuyển vị ở vị trí đầu in theo phương X, Y, Z và tần số dao động riêng của hệ [4]. Nhờ vậy, các đặc tính kết cấu này sẽ được tính toán, khảo sát tự động.

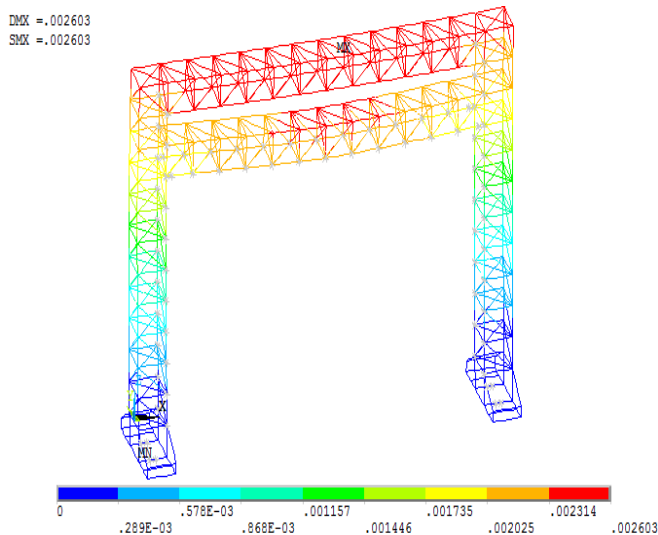
2.3. Khảo sát các kết quả tính toán khung máy in 3D bê tông

Kết quả tính toán khung máy theo phương án sơ bộ được thể hiện trên hình 4. Chuyển vị tổng lớn nhất của đầu in là 2,3mm. Trong khi đó chuyển vị lớn nhất theo các phương lần lượt là $u_x = 1,1\text{mm}$, $u_y = 1,9\text{mm}$, $u_z = 0,8\text{mm}$. Kết quả tính toán chỉ ra rằng, chuyển vị theo phương Y là đáng kể nhất.

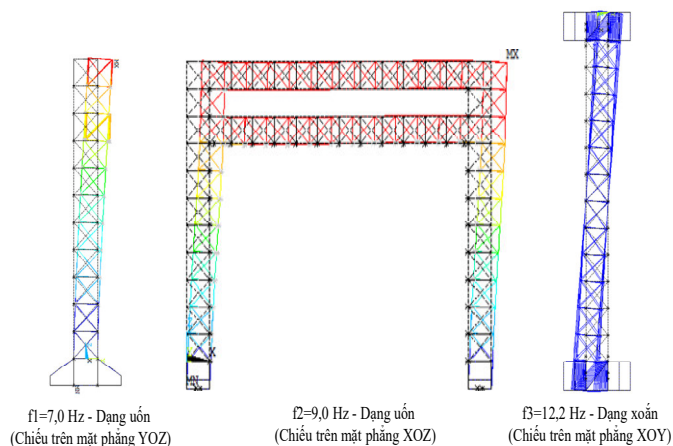
Kết quả tính toán ứng suất khung máy cho thấy, ứng suất lớn nhất theo Von-mises bằng 29,1 (MPa), nhỏ hơn nhiều so với giới hạn bền của thép (khoảng $400 \div 500\text{MPa}$), vì vậy kích thước sơ bộ khung máy in thỏa mãn điều kiện bền và trong quá trình tính toán tiếp theo có thể bỏ qua bước tính ứng suất.

Các dạng dao động đầu tiên của khung máy in được thể hiện trên hình 5. Có 3 dạng dao động chính đầu tiên, đó là dạng uốn nhìn trên mặt phẳng YOZ, XOZ và dạng xoắn nhìn trên mặt phẳng XOY, với các giá trị tần số dao động riêng tương ứng là $f_1 = 7,0\text{Hz}$, $f_2 = 9,0\text{Hz}$, $f_3 = 12,2\text{Hz}$. Có thể thấy các giá trị tần số dao động riêng này là nhỏ và gần với các nguồn rung kích thích trong thực tế, do đó chúng cần được khảo sát kỹ lưỡng trong quá trình thiết kế máy để tránh hiện tượng cộng hưởng dao động xảy ra.

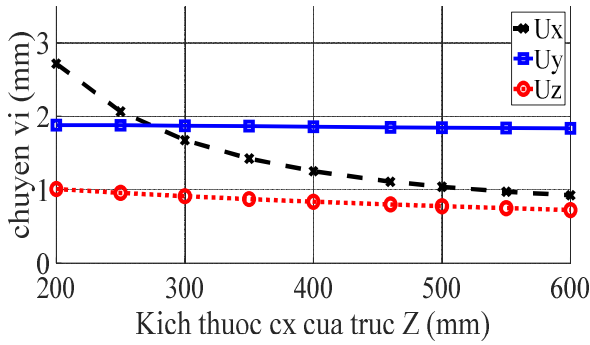
Dựa trên chương trình tự động tính toán đã được xây dựng, sự phụ thuộc của chuyển vị và tần số dao động riêng thứ nhất vào các tham số kích thước được khảo sát thuận tiện. Ví dụ, sự phụ thuộc của chuyển vị vào tham số kích thước c_x, c_y được minh họa trên hình 6, 7. Sự phụ thuộc của tần số dao động riêng f_1 vào tham số kích thước c_x, c_y được minh họa trên hình 8, 9.



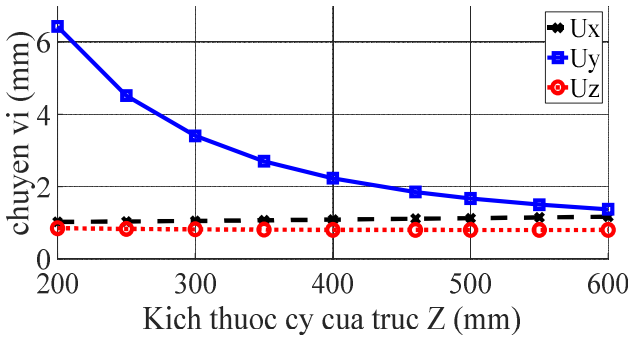
Hình 4. Kết quả tính toán chuyển vị khung máy in 3D



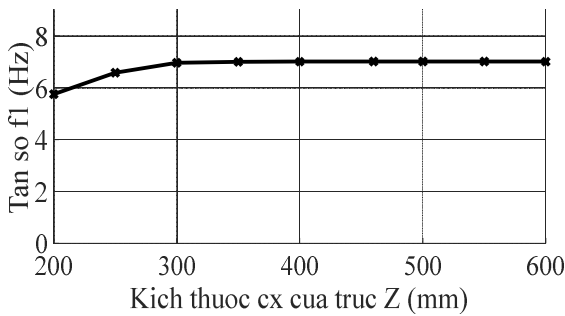
Hình 5. Các dạng dao động đầu tiên của khung máy in 3D



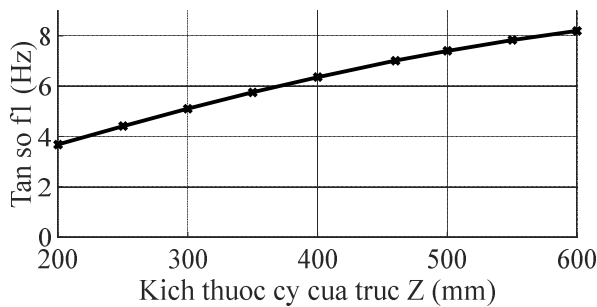
Hình 6. Sự phụ thuộc chuyển vị vào c_x



Hình 7. Sự phụ thuộc chuyển vị vào c_y



Hình 8. Sự phụ thuộc tần số f_1 vào c_x



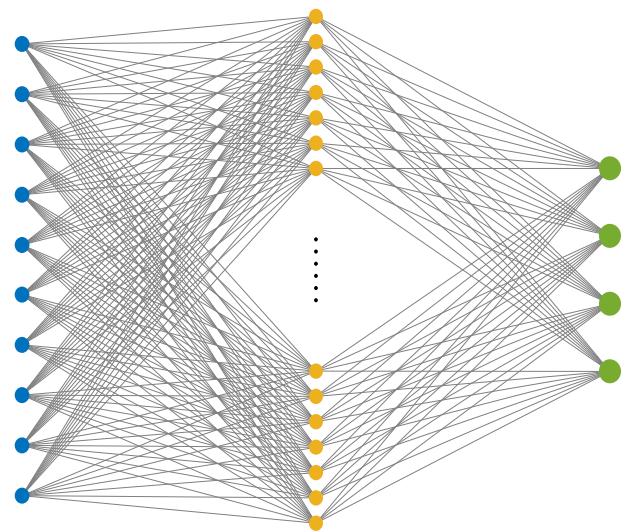
Hình 9. Sự phụ thuộc tần số f_1 vào c_y

3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH ANN ĐỂ DỰ ĐOÁN CÁC ĐẶC TÍNH TOÁN KẾT CẤU KHUNG MÁY IN

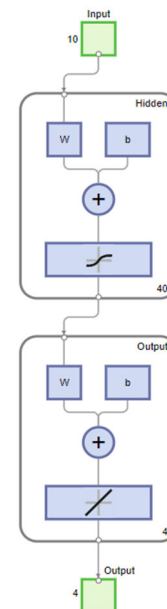
3.1. Xây dựng mô hình ANN

Mạng nơ-ron nhân tạo là một công cụ mạnh để giải quyết các bài toán có tính phi tuyến, phức tạp, mối quan hệ giữa các thông số không dễ thiết lập một cách tường minh. Sử dụng ANN có ưu điểm đáng kể trong xử lý dữ liệu lớn, tốc độ giải nhanh với độ chính xác đảm bảo. Trong phần này, nhóm tác giả sử dụng ANN để tính toán các đặc tính kết cấu của khung máy in 3D bao gồm chuyển vị và tần số dao động

riêng thay cho chương trình Ansys APDL được xây dựng ở mục 2.2. Mạng nơ-ron nhân tạo đa lớp (Multi-layer Perceptron - MLP) và giải thuật lan truyền ngược (Backpropagation algorithm) được lựa chọn cho bài toán này. Để huấn luyện mạng nơ-ron cần chuẩn bị một tập dữ liệu huấn luyện (bao gồm dữ liệu đầu vào và đầu ra). Quá trình huấn luyện mạng nơ-ron sử dụng giải thuật lan truyền ngược là quá trình tối ưu hóa trọng số để đưa sai số về giá trị nhỏ nhất. Hình 10 mô tả cấu trúc mạng MLP với đầu vào là thông số 10 biến: $c_x, c_y, a_1, t_1, a_2, t_2, a_3, t_3, a_4, t_4$; kế tiếp là lớp ẩn, cuối cùng là đầu ra của mạng ANN, 3 tham số chuyển vị u_x, u_y, u_z và tần số dao động riêng f_1 . Số lượng dữ liệu huấn luyện mạng ANN là 50.000 mẫu được xây dựng theo phương pháp lựa chọn ngẫu nhiên cho 10 biến.



Hình 10. Cấu trúc mạng ANN MLP 6 đầu vào và 4 đầu ra

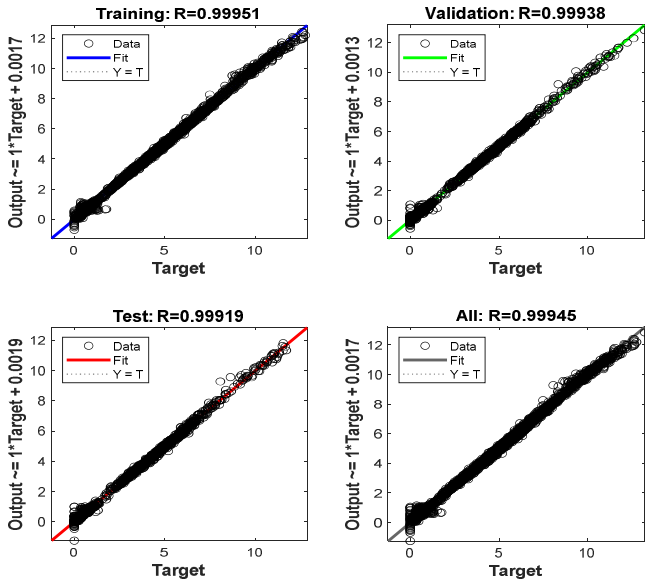


Hình 11. Mạng ANN trên phần mềm Matlab

3.2. Đánh giá kết quả

Mạng ANN được khởi tạo với giải thuật lan truyền ngược (back propagation algorithm) trên phần mềm Matlab, hàm

kích hoạt được lựa chọn là hàm Hyperbolic tangent sigmoid (tansig) và hàm Linear (purelin), số lượng nơ-ron ở lớp ẩn là 40 nơ-ron (hình 11). Dữ liệu huấn luyện mạng chia theo tỷ lệ: tập huấn luyện (training set) chiếm 70%, tập tối ưu (validation set) chiếm 15% và tập thử nghiệm (test set) chiếm 15%. Hình 12 cho thấy quá trình huấn luyện, kiểm định, tính thử nghiệm đạt độ chính xác cao với hệ số tương quan trên 99%.



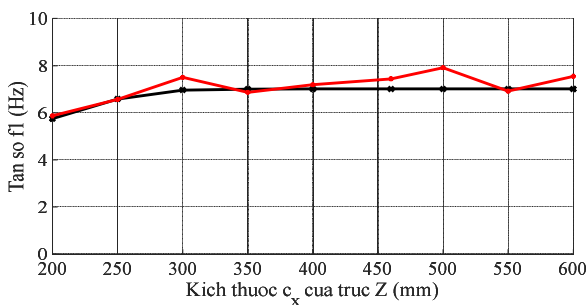
Hình 12. Kết quả huấn luyện mạng ANN MLP 6 đầu vào và 4 đầu ra

Để thấy rõ hơn về hiệu quả của việc sử dụng ANN trong bài toán dự đoán đặc tính kết cấu khung máy, nhóm tác giả tiếp tục sử dụng mạng ANN đã được huấn luyện kể trên dự đoán tần số f_1 của đầu in với đầu vào được lựa chọn theo hai trường hợp như sau:

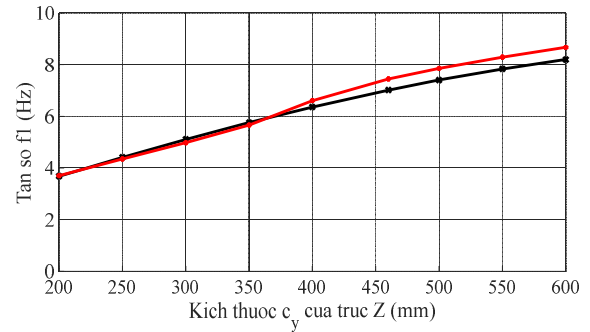
TH1: $c_x = [200\ 250\ 300\ 350\ 400\ 460\ 500\ 550\ 600]$ mm; $c_y = 460$ mm; $a_1 = 60$ mm; $t_1 = 3$ mm; $a_2 = 50$ mm; $t_2 = 2,5$ mm; $a_3 = 25$ mm; $t_3 = 1$ mm; $a_4 = 60$ mm; $t_4 = 3$ mm;

TH2: $c_x = 460$ mm; $c_y = [200\ 250\ 300\ 350\ 400\ 460\ 500\ 550\ 600]$ mm; $a_1 = 60$ mm; $t_1 = 3$ mm; $a_2 = 50$ mm; $t_2 = 2,5$ mm; $a_3 = 25$ mm; $t_3 = 1$ mm; $a_4 = 60$ mm; $t_4 = 3$ mm;

Kết quả dự đoán tần số dao động của đầu in được thể hiện như trong hình 13a và 13b. Đường màu đen là kết quả tính toán tần số dao động dựa trên chương trình Matlab-Ansys APDL, đường màu đỏ là kết quả dự đoán của mạng ANN MLP.



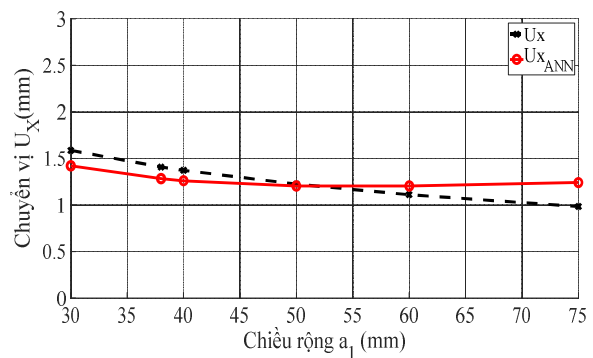
a)



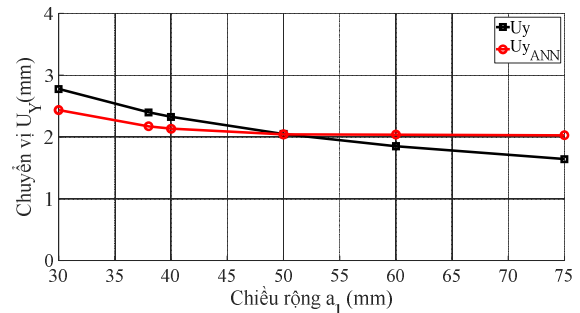
b)

Hình 13. Kết quả dự đoán của mạng ANN sự phụ thuộc tần số f_1 vào c_x và c_y

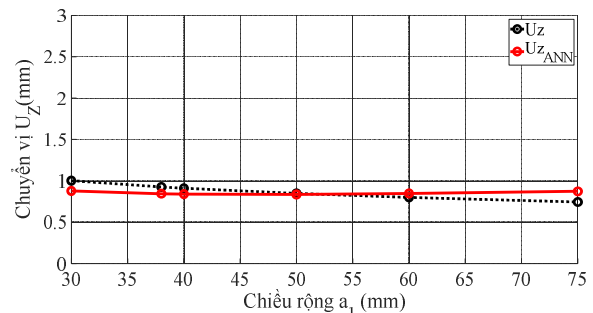
Tương tự như vậy, kết quả dự đoán chuyển vị của đầu in được thể hiện như trong hình 14. Đường màu đen là kết quả tính toán chuyển vị của đầu in dựa trên chương trình Matlab-Ansys APDL, đường màu đỏ là kết quả dự đoán của mạng ANN MLP.



a)



b)



c)

Hình 14. Kết quả dự đoán của mạng ANN sự phụ thuộc chuyển vị vào a_1

Kết quả này cho thấy mô hình mạng ANN làm việc hiệu quả và có thể thay thế cho chương trình tính toán trên phần mềm Matlab-Ansys APDL. Điều này có ý nghĩa rất lớn trong bài toán tối ưu hóa tham số kích thước của cụm di động khi thời gian dự đoán của mạng ANN là rất nhanh so với chương trình tính toán bằng Matlab-Ansys APDL.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã xây dựng mạng nơ-ron nhân tạo MLP với 10 đầu vào và 4 đầu ra nhằm tính toán kết cấu khung máy in 3D bê tông kích thước lớn. Trong quá trình xây dựng tập dữ liệu trình huấn luyện mạng ANN, mô hình tính toán khung máy in 3D và các mô-đun tính toán trên phần mềm Ansys APDL đã được xây dựng. Kết quả cho thấy mạng ANN làm việc hiệu quả và hoàn toàn có thể thay thế chương trình tính toán Matlab-Ansys APDL.

LỜI CẢM ƠN

Bài báo này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài cấp Nhà nước “Nghiên cứu, thiết kế, chế tạo hệ thống in 3D bê tông kích thước lớn ứng dụng trong ngành xây dựng, mã số: 36/2021/ĐTCT-KC-4.0-36/19-25” do Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn chủ trì.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Compos. Part B Eng.*, 143, pp. 172–196, 2018. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [2]. S. C. Paul, G. P. A. G. van Zijl, I. Gibson, “A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects,” *Rapid Prototyp. J.*, 24, 4, 784–798, 2018. doi: 10.1108/RPJ-09-2016-0154.
- [3]. Q. Ji, C. Li, D. Zhu, Y. Jin, Y. Lv, J. He, “Structural design optimization of moving component in CNC machine tool for energy saving,” *J. Clean. Prod.*, 246, 118976, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118976.
- [4]. Phung Van Binh, Hoang Phan Binh, Ta Duc Hai, Phan Dinh Tung, “Mechanical design and structural optimization of the frame of a large-scale gantry 3D concrete printer,” *J. Sci. Tech.*, 18, 1, 38–54, 2023. doi: 10.56651/lqdtu.jst.v18.n01.582.
- [5]. Van Binh Phung, Quoc Anh Nguyen, Trong Hoang Nguyen, Anh Vang Tran, Hoang Minh Dang, “Determination of hyper-elastic material parameters and automatic computation for the soft-robotic gripper (in Vietnamese),” *J. Sci. Technol., Hanoi University of Industry*, 57, 3, 1–11, 2021.
- [6]. A. T. Nguyen, N. D. Tran, T. T. Vu, T. D. Pham, Q. T. Vu, J. H. Han, “A Neural-network-based Approach to Study the Energy-optimal Hovering Wing Kinematics of a Bionic Hawkmoth Model,” *J. Bionic Eng.*, 16, 5, 904–915, 2019. doi: 10.1007/s42235-019-0105-5.

AUTHORS INFORMATION

Ta Duc Hai, Nguyen Be Thong, Nguyen Ngoc Binh, Phung Van Binh
Le Quy Don Technical University, Vietnam