

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI**

**LƯU TRƯỜNG GIANG**

**PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ SỰ SUY GIẢM KHẢ NĂNG  
CHỊU TẢI VÀ TUỔI THỌ CỦA KẾT CẤU NHỊP CẦU  
DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP ĐANG KHAI THÁC**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ**

**HÀ NỘI - 2026**

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO**  
**TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI**

**LƯU TRƯỜNG GIANG**

**PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ SỰ SUY GIẢM KHẢ NĂNG  
CHỊU TẢI VÀ TUỔI THỌ CỦA KẾT CẤU NHỊP CẦU  
DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP ĐANG KHAI THÁC**

**Ngành: Kỹ thuật Xây dựng Công trình Đặc biệt**  
**Mã số: 9.58.02.06**

**NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC**

- 1. PGS.TS. Trần Việt Hùng**
- 2. TS. Nguyễn Việt Khoa**

**HÀ NỘI - 2026**

## LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng mình. Tất cả những nội dung, số liệu, báo cáo cũng như kết quả nghiên cứu trong luận án này được đảm bảo tính trung thực tuyệt đối. Đồng thời, nội dung của công trình nghiên cứu này chưa được công bố ở bất kì đâu.

*Hà Nội, ngày tháng năm 2026*

Tác giả luận án

**Lưu Trường Giang**

## LỜI CẢM ƠN

Để có thể hoàn thành được luận án tiến sĩ của mình, Tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành đến PGS.TS. Trần Việt Hùng và TS. Nguyễn Việt Khoa đã dành quỹ thời gian quý báu, tâm sức và trí tuệ để hướng dẫn tôi trong suốt thời gian vừa qua.

Tôi xin cảm ơn Ban giám hiệu trường Đại học Giao thông vận tải, Phòng Đào tạo Sau đại học, Khoa Công trình, Bộ môn Công trình giao thông thành phố và Công trình thủy đã giúp đỡ tôi xuyên suốt quá trình học tập, nghiên cứu cũng như hoàn thành đề tài luận án tiến sĩ.

Tôi xin chân thành cảm ơn sự góp ý quý báu của các quý thầy cô, các chuyên gia, nhà khoa học trong ngành đặc biệt là các ý kiến của GS.TS. Trần Đức Nhiệm, PGS.TS. Nguyễn Hữu Hưng. Những sự góp ý, phản biện này giúp cá nhân tôi có cái nhìn toàn diện và sâu hơn về chủ đề luận án mình nghiên cứu cũng như các vấn đề ứng dụng chuyên môn vào thực tiễn.

Xin gửi lời cảm ơn chân thành tới bạn bè, đồng nghiệp đã tạo những điều kiện để tôi có thể hoàn thành những nghiên cứu của riêng mình. Và cuối cùng, Tôi xin gửi lời cảm ơn đến tất cả thành viên trong gia đình về sự động viên to lớn mà họ đã dành cho tôi suốt thời gian tôi học tập và nghiên cứu.

*Hà Nội, ngày tháng năm 2026*

Tác giả luận án

**Lưu Trường Giang**

## MỤC LỤC

<b>LỜI CAM ĐOAN .....</b>	<b>i</b>
<b>LỜI CẢM ƠN .....</b>	<b>ii</b>
<b>MỤC LỤC .....</b>	<b>iii</b>
<b>DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT .....</b>	<b>vii</b>
<b>DANH MỤC CÁC BẢNG.....</b>	<b>viii</b>
<b>DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ .....</b>	<b>ix</b>
<b>MỞ ĐẦU.....</b>	<b>1</b>
<b>CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ CẦN NGHIÊN CỨU .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1. Tổng quan chung .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2. Đặc điểm và các dạng hư hỏng của công trình cầu ở Việt Nam .....</b>	<b>7</b>
1.2.1. Đặc điểm công trình cầu ở Việt Nam .....	7
1.2.2. Hư hỏng và suy giảm cường độ điển hình của cầu BTCT .....	9
<b>1.3. Tổng quan nghiên cứu về đánh giá sự xuống cấp và suy giảm tuổi thọ kết cấu nhịp cầu BTCT .....</b>	<b>12</b>
1.3.1. Giới thiệu chung .....	12
1.3.2. Tình hình nghiên cứu ở ngoài nước.....	15
1.3.3. Tình hình nghiên cứu ở trong nước .....	17
<b>1.4. Tổng quan nghiên cứu về các tác nhân ảnh hưởng đến sự xuống cấp của kết cấu nhịp cầu BTCT .....</b>	<b>18</b>
1.4.1. Giới thiệu chung .....	18
1.4.2. Tác nhân ảnh hưởng đến sự suy giảm cường độ của kết cấu BTCT .....	18
1.4.2.1. Ăn mòn cốt thép.....	19
1.4.2.2. Hình thái ăn mòn cốt thép.....	20
1.4.2.3. Ảnh hưởng của ăn mòn đến cường độ chịu uốn.....	21
<b>1.5. Tổng quan nghiên cứu về các phương pháp dự đoán tuổi thọ kết cấu nhịp cầu BTCT .....</b>	<b>22</b>
1.5.1. Giới thiệu chung .....	22
1.5.2. Tổng quan về mô hình dự đoán tuổi thọ kết cấu nhịp cầu BTCT .....	25
1.5.3. Tổng quan về các mô hình sự xuống cấp của cầu .....	27
1.5.3.1. Mô hình tất định.....	27
1.5.3.2. Mô hình ngẫu nhiên .....	28
1.5.3.3. Mô hình cơ học .....	28
1.5.3.4. Các mô hình dựa trên trí tuệ nhân tạo (AI).....	30
1.5.4. Tổng quan về mạng nơ-ron nhân tạo trong mô hình hóa sự xuống cấp của cầu .....	33
<b>1.6. Định hướng nghiên cứu của Luận án .....</b>	<b>35</b>
<b>1.7. Kết luận Chương 1 .....</b>	<b>36</b>

<b>CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ VÀ DỰ ĐOÁN SUY GIẢM TUỔI THỌ CỦA KẾT CẤU NHỊP DÀM BTCT .....</b>	<b>38</b>
<b>2.1. Cơ sở lý thuyết đánh giá khả năng chịu tải của kết cấu nhịp cầu BTCT và xu hướng ứng dụng trí tuệ nhân tạo.....</b>	<b>38</b>
2.1.1. Cơ sở lý thuyết về ứng dụng trí tuệ nhân tạo.....	38
2.1.2. Xây dựng phương pháp đánh giá dựa trên trí tuệ nhân tạo .....	41
2.1.3. Các thuộc tính và quá trình xử lý thông tin của ANN.....	43
2.1.4. Thiết lập trọng số .....	45
2.1.5. Hàm kích hoạt.....	46
2.1.6. Phân loại mạng nơ-ron.....	48
<b>2.2. Cơ sở lý thuyết xác định sức kháng của mặt cắt kết cấu nhịp cầu BTCT và các hiệu ứng tải trọng thực tế theo xu hướng trí tuệ nhân tạo.....</b>	<b>53</b>
2.2.1. Khái niệm chung .....	53
2.2.2. Phương pháp theo độ cứng kết cấu.....	54
2.2.2.1. Trường hợp dầm có EI là không đổi .....	54
2.2.2.2. Trường hợp dầm có EI thay đổi .....	54
2.2.2.3. Sơ đồ mạng ANN .....	56
<b>2.3. Cơ sở lý thuyết phân tích, xác định tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu BTCT .....</b>	<b>58</b>
2.3.1. Đánh giá tuổi thọ cầu do gia tăng tải trọng khai thác.....	58
2.3.2. Đánh giá tuổi thọ cầu qua điều kiện môi trường .....	60
2.3.2.1. Giai đoạn khởi đầu ăn mòn ( $t_1$ ) .....	60
2.3.2.2. Giai đoạn lan truyền ăn mòn ( $t_2$ ) .....	61
<b>2.4. Kết luận Chương 2 .....</b>	<b>62</b>
<b>CHƯƠNG 3: PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ SỰ SUY GIẢM CỦA KẾT CẤU NHỊP CẦU BTCT BẰNG PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ DAO ĐỘNG.....</b>	<b>63</b>
<b>3.1. Giới thiệu chung .....</b>	<b>63</b>
<b>3.2. Phương pháp phát hiện suy giảm kết cấu bằng cách thay đổi tần số tự nhiên.....</b>	<b>64</b>
<b>3.3. Mô hình hóa kết cấu cầu đang khai thác .....</b>	<b>69</b>
3.3.1. Mô hình cầu FEA.....	70
3.3.1.1. Định nghĩa phần tử .....	70
3.3.1.2. Định nghĩa các đặc trưng vật liệu và gán mô hình.....	70
3.3.2. Phân tích mô hình cầu.....	71
3.3.2.1. Phân tích tần số.....	71
3.3.2.2. Xác thực mô hình FEA.....	71
3.3.3. Đánh giá điều kiện cầu .....	72
3.3.3.1. Phân tích mô hình.....	72
3.3.3.2. Phân tích động của hệ thống dầm.....	73

3.3.3.3. Biến đổi Fourier nhanh.....	74
3.3.3.4. Phương pháp chọn đỉnh.....	76
3.3.3.5. Thuật toán phần mềm ứng dụng.....	76
3.3.4. Phân tích ứng xử cầu.....	79
<b>3.4. Kết luận Chương 3.....</b>	<b>80</b>
<b>CHƯƠNG 4: XÁC ĐỊNH TUỔI THỌ CỦA KẾT CẤU NHỊP CẦU BTCT BẰNG PHƯƠNG PHÁP ANN.....</b>	<b>81</b>
<b>4.1. Lập tập dữ liệu và mô tả kết cấu.....</b>	<b>81</b>
<b>4.2. Phương pháp xác định tuổi thọ còn lại của kết cấu nhịp cầu BTCT dựa trên trí tuệ nhân tạo.....</b>	<b>83</b>
4.2.1. Lựa chọn các tham số đầu vào.....	84
4.2.1.1. Kiểm tra tương quan.....	84
4.2.1.2. Đánh giá kỹ thuật.....	84
4.2.1.3. Lựa chọn biến đầu vào cuối cùng.....	84
4.2.2. Cấu trúc mạng lưới.....	84
4.2.2.1. Các lớp đầu vào và đầu ra.....	85
4.2.2.2. Lớp ẩn và chức năng kích hoạt.....	85
4.2.2.3. Chức năng học tập và đào tạo.....	85
4.2.3. Đánh giá hiệu suất của mô hình.....	87
4.2.3.1. Phương pháp hồi quy.....	87
4.2.3.2. Hệ số tương quan Pearson.....	87
4.2.4. Xây dựng thuật toán ứng dụng trí tuệ nhân tạo trên nền Matlab để xác định tuổi thọ còn lại.....	87
4.2.4.1. Mô hình nơ-ron.....	88
4.2.4.2. Cấu trúc mạng.....	89
4.2.4.3. Cơ sở tính toán thuật toán lan truyền ngược.....	91
<b>4.3. Xác định mô hình dự báo tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu BTCT.....</b>	<b>92</b>
<b>4.4. Xác định tuổi thọ còn lại của kết cấu nhịp cầu BTCT theo phương pháp ANN.....</b>	<b>97</b>
<b>4.5. Kết luận Chương 4.....</b>	<b>100</b>
<b>CHƯƠNG 5: THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ SỰ SUY GIẢM KHẢ NĂNG CHỊU TẢI VÀ DỰ BÁO TUỔI THỌ CỦA KẾT CẤU NHỊP CẦU DÂM BÊ TÔNG CỐT THÉP ĐANG KHAI THÁC.....</b>	<b>101</b>
<b>5.1. Giới thiệu chung.....</b>	<b>101</b>
<b>5.2. Trường hợp nghiên cứu 1: cầu Thạch Quả (tuyến cao tốc Hà Nội - Thái Nguyên).....</b>	<b>101</b>
5.2.1. Giới thiệu về công trình cầu.....	101
5.2.2. Mô hình cầu FEA.....	101
5.2.2.1. Định nghĩa các phần tử.....	103
5.2.2.2. Định nghĩa các đặc trưng vật liệu.....	103

5.2.2.3. Gán mô hình .....	103
5.2.2.4. Xác thực mô hình FEA.....	103
5.2.3. Thục nghiệm đánh giá với cầu đang khai thác .....	104
5.2.3.1. Mô tả quá trình đo đạc.....	104
5.2.3.2. Kết quả phân tích, đo đạc .....	104
5.2.4. Nhận xét trường hợp nghiên cứu 1: .....	110
<b>5.3. Trường hợp nghiên cứu 2: cầu Vân Đồn 2 và 3 (Vân Đồn – Quảng Ninh)</b>	
.....	<b>110</b>
5.3.1. Giới thiệu chung về cầu .....	110
5.3.2. Thí nghiệm, đo đạc hàm lượng Clo <sup>-</sup> đối với dầm cầu .....	110
5.3.2.1. Mục tiêu và công tác lấy mẫu thí nghiệm .....	111
5.3.2.2. Kết quả thí nghiệm .....	112
5.3.3. Đánh giá sự suy giảm sức chịu tải bằng phương pháp dao động .....	113
5.3.3.1. Đánh giá sự suy giảm sức chịu tải bằng phương pháp dao động - cầu Vân Đồn 2 .....	113
5.3.3.2. Đánh giá sự suy giảm sức chịu tải bằng phương pháp dao động - cầu Vân Đồn 3 .....	114
5.3.4. Xác định tuổi thọ sử dụng của kết cấu nhịp cầu BTCT DUL theo phương pháp ANN.....	116
5.3.4.1. Đối với cầu Vân Đồn 2:.....	116
5.3.4.2. Đối với cầu Vân Đồn 3:.....	117
5.3.5. Nhận xét trường hợp nghiên cứu 2: .....	118
<b>5.4. Kết luận Chương 5 .....</b>	<b>118</b>
<b>KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....</b>	<b>120</b>
<b>DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ.....</b>	<b>132</b>
<b>CÁC BỘ CODE MATLAB SỬ DỤNG .....</b>	<b>134</b>
<b>HƯỚNG DẪN SỬ DỤNG CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN .....</b>	<b>139</b>
<b>TUỔI THỌ SỬ DỤNG (<math>t_1</math>).....</b>	<b>139</b>
<b>BỘ DỮ LIỆU HUẤN LUYỆN ANN .....</b>	<b>143</b>
<b>BỘ DỮ LIỆU XÁC ĐỊNH <math>T_2</math> .....</b>	<b>151</b>

**DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT**

AASHTO	: Hiệp hội Đường bộ Hoa kỳ
AI	: Trí tuệ nhân tạo
ANN	: Phương pháp mạng nơ-ron nhân tạo
BGTVT	: Bộ Giao thông vận tải
BMS	: Hệ thống quản lý cầu, BMS (Bridge Management System)
BTCT	: Bê tông cốt thép
GTVT	: Giao thông vận tải
MLP	: Multi-Layer Perceptron
NBI	: National Bridge Inventory
ISO	: Tiêu chuẩn ISO
TCCS	: Tiêu chuẩn cơ sở
TCVN	: Tiêu chuẩn Việt Nam
NCHRP	: National Cooperative Highway Research Program
PTTH	: Phần tử hữu hạn

## DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 1.1. Số lượng các cầu trên hệ thống VBMS chia theo đơn vị quản lý ( <a href="http://www.vbms.vn/">http://www.vbms.vn/</a> ). .....	7
Bảng 1.2. Nguyên nhân gây hư hỏng kết cấu BTCT.....	9
Bảng 1.3. Cơ chế xuống cấp, nguyên nhân, hiện tượng và các chỉ số của xuống cấp. .	11
Bảng 1.4. Thành phần hoá học chủ yếu của nước biển (Trần Đức Hạ, 2011)[3] .....	14
Bảng 1.5. Độ mặn của nước biển ở Việt Nam, g/l .....	14
Bảng 1.6. Các loại khí có phản ứng hóa học với bê tông.....	15
Bảng 1.7. Ảnh hưởng của các yếu tố tác động khác nhau đối với quá trình ăn mòn. ...	21
Bảng 2.1. Phân loại mạng nơ-ron .....	48
Bảng 3.1. Các tần số cơ bản của dầm với các điều kiện gối khác nhau.....	74
Bảng 3.2. Các tần số cơ bản của dầm.....	77
Bảng 4.1. Tổng hợp các tham số cần thiết tính toán $t_1$ .....	82
Bảng 4.2. Kết quả tính toán $t_1$ từ ANN.....	97
Bảng 4.3. Kết quả tính toán $t_2$ từ ANN.....	98
Bảng 5.1. Kiểm tra hàm lượng Cl- trong mẫu bê tông cầu Vân Đồn 2 (Bê tông C45) .....	113
Bảng 5.2. Kiểm tra hàm lượng Cl- trong mẫu bê tông cầu Vân Đồn 3 (Bê tông C45) .....	113
Bảng 5.3. Trường hợp giải định có sự thay đổi chiều dày lớp bê tông bảo vệ.....	116
Bảng 5.4. Trường hợp giải thiết giữ nguyên chiều dày lớp bê tông bảo vệ 45mm.....	116
Bảng 5.5. Trường hợp giải thiết giữ nguyên chiều dày lớp bê tông bảo vệ 40mm.....	117
Bảng 5.7. Trường hợp giải thiết giữ nguyên chiều dày lớp bê tông bảo vệ 35mm.....	117
Bảng 5.8. Trường hợp giải định có sự thay đổi chiều dày lớp bê tông bảo vệ.....	117
Bảng 5.9. Trường hợp giải thiết giữ nguyên chiều dày lớp bê tông bảo vệ 45mm.....	118
Bảng 5.10. Trường hợp giải thiết giữ nguyên chiều dày lớp bê tông bảo vệ 45mm...	118

## DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

Sơ đồ 1. Sơ đồ nghiên cứu của luận án. ....	5
Hình 1.1. Một sơ đồ điển hình của BMS (Steele và cộng sự, 2000)[114] .....	6
Hình 1.2. Phân loại theo vật liệu làm cầu [ <a href="http://www.vbms.vn/">http://www.vbms.vn/</a> ]. ....	7
Hình 1.3. Trình tự cơ bản cho việc xác định cơ chế xuống cấp. ....	9
Hình 1.4. Ví dụ về các hư hỏng của kết cấu công trình cầu. ....	12
Hình 1.5. Tác động của ăn mòn cốt thép trong dầm BTCT. ....	13
Hình 1.6. Suy thoái/xuống cấp kết cấu BTCT (Bertolini, 2004)[33]. ....	19
Hình 1.7. Quá trình ăn mòn thép (Beeby, 1983) [32] .....	20
Hình 1.8. Các loại ăn mòn cốt thép: (a) cacbonat hóa, (b) tấn công clorua và (c) nứt do ăn mòn ứng suất.....	21
Hình 1.13. Mối quan hệ giữa ăn mòn với suy giảm khả năng chịu lực của kết cấu (Uomoto và cộng sự, 1984). ....	22
Hình 1.14. Quá trình hư hỏng bê tông (Tuuti, 1982)[117].....	23
Hình 1.15. Tình trạng công trình theo thời gian (Duracrete, 2000)[54].....	23
Hình 1.16. Nguyên tắc suy thoái của kết cấu BTCT. ....	26
Hình 1.17. Thời điểm kiểm tra, bảo trì cầu BTCT. ....	26
Hình 1.18. Các giai đoạn xuống cấp.....	27
Hình 1.21. Xác suất bắt đầu ăn mòn và mô hình lan truyền (Morcous et al., 2010)[90] .....	29
Hình 1.22. Mô hình dự đoán ngược (Lee và cộng sự, 2008) [74].....	30
Hình 1.23. Perceptron nhiều lớp với 2 lớp ẩn (Haykin, 2014)[67]. ....	31
Hình 1.24. Perceptron đa lớp với hai lớp ẩn và chức năng kích hoạt Softmax.....	32
Hình 1.25. Sơ đồ phân tích dự báo sự suy giảm kết cấu sử dụng ANN.....	34
Hình 2.1. Cấu trúc của một mạng nơ ron nhân tạo được sử dụng để dự đoán sự suy giảm của cầu (Pengyong, 2021) ( <a href="https://doi.org/10.1155/2021/4598337">https://doi.org/10.1155/2021/4598337</a> )[87].....	40
Hình 2.3. Lưu đồ của mô hình dựa trên ANN để tìm dữ liệu còn thiếu.....	42
Hình 2.4. Quá trình xử lý thông tin của một ANN.....	43
Hình 2.5. Mô tả hàm tổng của một nơ-ron.....	45

Hình 2.6. Mô tả hàm tổng của một và nhiều nơ-ron. ....	45
Hình 2.7. Tạo mạng, khai báo đầu vào, mục tiêu, mẫu huấn luyện .....	49
Hình 2.8. Tạo mạng, khai báo đầu vào, mục tiêu, mẫu huấn luyện .....	49
Hình 2.9. Khai báo các đặc trưng của mạng.....	50
Hình 2.10. Quá trình xử lý huấn luyện.....	50
Hình 2.11.. Kết quả quá trình thực hiện .....	51
Hình 2.12. Các trạng thái huấn luyện .....	51
Hình 2.13. Minh họa lỗi trong quá trình phân tích.....	52
Hình 2.14.. Biểu đồ hồi quy .....	52
Hình 2.15. Sơ đồ xác định sức kháng và hiệu ứng tải từ mạng ANN .....	53
Hình 2.16. Tải trọng tác dụng và độ võng tương ứng .....	54
Hình 2.17. Minh họa đoạn dầm có các độ cứng khác nhau.....	55
Hình 2.18. Biểu đồ huấn luyện mạng ANN .....	57
Hình 2.19. Sơ đồ đánh giá tải trọng thông qua ANN .....	58
Hình 2.20. Sơ đồ xác định hệ số xếp hạng tải trọng đối với cầu.....	59
Hình 3.1. Mô tả hệ thống xác định hư hỏng theo [20] .....	64
Hình 3.2. Trạng thái của cầu như một hệ đàn dẻo.....	68
Hình 3.3. Ví dụ mô hình tổng thể kết cấu nhịp cầu dầm I. ....	70
Hình 3.4. Tần số dao động của kết cấu tính toán bằng FEA .....	72
Hình 3.5. Lý tưởng hóa cầu đang khai thác.....	73
Hình 3.6. Ví dụ kết quả đo biến dạng trên và dưới trục trung hòa của dầm cầu.....	75
Hình 3.7. Ví dụ kết quả đo gia tốc của dầm cầu.....	75
Hình 3.8. Ví dụ phân tích phổ tần số của dầm cầu.....	76
Hình 3.9. Dạng dao động của dầm trong mô hình FEA .....	78
Hình 3.10. Kết quả dao động của nhịp cầu.....	78
Hình 3.11. Phổ tần số của dầm 3 và dầm 4 .....	79
Hình 4.1. Sơ đồ của MLP với một lớp ẩn .....	85
Hình 4.2. Mô hình Nơ-ron đầu vào vô hướng.....	88
Hình 4.3. Cấu trúc mạng nơ-ron cơ bản .....	89

Hình 4.4. Dạng giản đơn mô hình .....	89
Hình 4.5. Cấu trúc mạng một lớp .....	90
Hình 4.6. Sơ đồ mạng nơ-ron một lớp rút gọn .....	90
Hình 4.7. Sơ đồ mạng nơ-ron chuyên tiếp nguồn cấp dữ liệu nhiều lớp.....	91
Hình 4.8. Minh họa sơ đồ mạng .....	91
Hình 4.10. Mô hình được huấn luyện với bộ dữ liệu như đã trình bày trong Chương 2. .....	94
Hình 4.11. Kết quả lựa chọn số nơ ron lớp ẩn.....	95
Hình 4.12. Sai số giữa các số lần phân tích.....	95
Hình 4.13. Kết quả huấn luyện.....	96
Hình 4.14. Kết quả lỗi .....	96
Hình 5.1. Cầu Thạch Quả trên tuyến cao tốc Hà Nội – Thái Nguyên.....	102
Hình 5.2. Bố trí chung cầu Thạch quả (tuyến cao tốc Hà Nội – Thái Nguyên).....	102
Hình 5.3. Mô hình tổng thể kết cấu nhịp cầu .....	103
Hình 5.4. Do biến dạng động và dao động cầu Thạch Quả.....	104
Hình 5.9. Kết hợp biến dạng thứ trên và thứ dưới của dầm 3 và dầm 4 .....	106
Hình 5.13. Kết quả gia tốc của dầm 3 .....	107
Hình 5.14. Kết quả gia tốc của dầm 3 .....	107
Hình 5.16. Kết quả gia tốc của dầm 4 .....	108
Hình 5.17. Kết quả phổ tần số của dầm 4.....	109
Hình 5.18. Kết quả phổ tần số của dầm 3.....	109
Hình 5.19. Vị trí và dạng kết cấu nhịp cầu Vân Đồn 2 và 3 .....	111
Hình 5.20. Mô tả quá trình lấy mẫu, thí nghiệm và đo gia tốc.....	112
Hình 5.21. Thí nghiệm xác định hàm lượng Cl- .....	112

## MỞ ĐẦU

### 1. Đặt vấn đề

Hệ thống hạ tầng trong đó có hạ tầng giao thông là một trong những tài sản quan trọng cho sự phát triển kinh tế-xã hội của Việt Nam cũng như các quốc gia trên thế giới. Việc đảm bảo độ bền lâu cho các cây cầu đang khai thác là một nhiệm vụ quan trọng đối với các đơn vị quản lý bảo trì. Từ năm 1990 vấn đề độ bền là vấn đề được quan tâm trong quá trình sử dụng công trình. Trong các thiết kế trước đây tuổi thọ sử dụng từ 50 đến 75 năm. Hiện nay tuổi thọ khai thác kì vọng là 100 năm do độ bền của kết cấu bê tông đang ngày được cải thiện.

Tuổi thọ của công trình được coi là khoảng thời gian mà công trình đó ở trạng thái an toàn chấp nhận được. Tuy nhiên, trong suốt vòng đời, kết cấu BTCT chịu nhiều ảnh hưởng từ môi trường, khí hậu, tải trọng như: cacbonat hóa, sự xâm nhập của clorua, sự suy giảm sinh học, nhiệt độ, độ ẩm, tải trọng và lưu lượng tăng,... Việc nghiên cứu tuổi thọ của cầu đang sử dụng là rất khó do thiếu hồ sơ lưu trữ gốc, thiếu quan trắc và đánh giá thường xuyên.

Hiện nay, các mô hình suy giảm thường được áp dụng để bảo trì cầu theo một thứ tự ưu tiên xác định. Trong đó được phân loại thành các mô hình tất định và ngẫu nhiên. Cơ sở dữ liệu với số lượng lớn các hạng mục bảo trì được thu thập và được đưa vào các phương pháp xử lý mới như sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo (Artificial Neural Network - ANN) để dự đoán khả năng làm việc của kết cấu trên cơ sở các yếu tố ảnh hưởng tác động.

Các cấu trúc ANN có thể được đào tạo từ việc đo đạc trong quá trình quản lý cầu để dự đoán các tình huống xuống cấp trong tương lai. Thực tế rất khó tìm được sự ảnh hưởng của mỗi yếu tố vào một tính toán cụ thể. Do đó, các mối quan hệ do ANN thiết lập trở thành một “hộp đen”. Mặc dù mô hình ANN có thể dự đoán và cho hiệu suất tốt hơn, nhưng nó cũng bị hạn chế do khó khăn trong việc đánh giá tác động của từng yếu tố. Như vậy, không chỉ nên thiết lập mô hình dự đoán sử dụng ANN để xác định các tình huống xuống cấp mà còn nghiên cứu xác định mức độ tác động của từng yếu tố dẫn đến hiện tượng xuống cấp của kết cấu. Ngoài ra, khi xây dựng cơ sở dữ liệu cần tìm kiếm những dữ liệu có giá trị để xây dựng mô hình dự đoán hư hỏng với hiệu suất tối ưu và đưa ra những giải thích thuyết phục.

Luận án này sẽ nghiên cứu các nội dung về các tác nhân gây ra sự suy giảm kết cấu, đề xuất khung đánh giá sự suy giảm kết cấu kết hợp việc phân tích đo đặc dao động của cầu, so sánh khả năng làm việc của kết cấu tại thời điểm đánh giá với thời điểm ban đầu theo thiết kế thông qua đánh giá sự suy giảm khả năng chịu tải bằng phương pháp PTHH. Ngoài ra đối với các tác nhân do môi trường nghiên cứu này sẽ phát triển phương pháp dự đoán sự xuống cấp của cầu thông qua ANN để thiết lập mô hình để dự đoán cấp độ hư hỏng của kết cấu. Việc dự đoán chính xác và nhanh chóng về sự xuống cấp của cầu từ các dữ liệu thu thập được là cần thiết để lập kế hoạch kiểm tra, bảo dưỡng và sửa chữa tiếp theo. Dữ liệu ban đầu càng tin cậy thì cho dự báo kết quả càng chính xác. Số liệu ban đầu cần thiết là loại kết cấu cầu, các đặc trưng hình học của kết cấu, vật liệu được sử dụng, các điều kiện môi trường, điều kiện tải trọng khai thác và các tác nhân khác sẽ ảnh hưởng đến quá trình suy thoái của kết cấu. Mặc dù sự suy thoái của kết cấu thường là sự tích hợp của nhiều nguyên nhân với nhiều yếu tố ảnh hưởng, nhưng điều này không có nghĩa là tất cả các yếu tố đều có tác động như nhau đến sự xuống cấp của cầu.

Với các ý nghĩa quan trọng nêu trên, NCS đã lựa chọn luận án “*Phân tích, đánh giá sự suy giảm khả năng chịu tải và tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu dầm bê tông cốt thép đang khai thác*” làm đối tượng để nghiên cứu xác định sự suy giảm khả năng chịu tải của kết cấu nhịp cầu dầm bê tông cốt thép đang khai thác ở nước ta. Việc nghiên cứu sự đánh giá sự suy giảm khả năng chịu tải và tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu dầm bê tông cốt thép do tác động của các yếu tố và tải trọng có ý nghĩa khoa học cao và cần thiết.

Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học có độ tin cậy để tiến tới ứng dụng trong quá trình quản lý, bảo trì công trình cầu BTCT đang khai thác.

## **2. Mục đích nghiên cứu**

Hoàn thiện lý thuyết khoa học, áp dụng vào thực tiễn việc nghiên cứu đánh giá sự suy giảm khả năng chịu tải và dự đoán tuổi thọ kết cấu nhịp cầu BTCT hiện đang khai thác.

## **3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

- Đối tượng: Kết cấu nhịp cầu BTCT đang khai thác.
- Phạm vi: Nghiên cứu, phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến sự suy giảm tuổi thọ kết cấu dưới các tác động của môi trường và tải trọng đang khai thác.

#### 4. Phương pháp nghiên cứu:

- Nghiên cứu tổng hợp kết hợp phân tích tài liệu: Tham khảo và nghiên cứu các đề tài NCKH, luận án, bài báo khoa học và ứng dụng của nhận dạng, phân tích, đánh giá rủi ro công trình,...

- Phương pháp kế thừa: Kế thừa các nghiên cứu trước đây,...

- Phương pháp khảo sát thực tế: Khảo sát thực tế các công trình cầu thông qua việc thu thập số liệu hình học, đo đạc dao động kết cấu.

- Phương pháp sử dụng trí thông minh nhân tạo: Xây dựng và thiết lập thuật toán; sử dụng học máy (machine learning) trong xác định tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu BTCT đang khai thác.

#### 5. Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn của luận án

##### \* Ý nghĩa khoa học:

- Nghiên cứu các phương pháp tiên tiến nhất để xác định suy giảm tuổi thọ của các kết cấu dầm cầu BTCT. Đề xuất xây dựng thuật toán, mô hình và chương trình đánh giá tuổi thọ kết cấu cầu cũ dưới tác động kết hợp của môi trường và tải trọng.

- Đề xuất phương pháp mới để nhận dạng, đánh giá sự suy giảm của kết cấu nhịp theo thời gian.

- Phân tích ảnh hưởng của các thông số chi phối của các điều kiện, trong đó có ảnh hưởng của môi trường.

- Trên cơ sở nghiên cứu các nguyên nhân có thể gây suy giảm tuổi thọ kết cấu. Đề xuất phương pháp dự báo tuổi thọ dựa trên ANN phát triển trên nền tảng MATLAB để dự đoán tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu BTCT.

##### \* Ý nghĩa thực tiễn:

Luận án đã phân tích sự suy giảm khả năng chịu tải và tuổi thọ của kết cấu nhịp dầm BTCT đang khai thác thông qua các phương pháp hiện đại để phân tích, đánh giá tuổi thọ kết cấu. Kết quả nghiên cứu có thể sử dụng để lập kế hoạch bảo trì trong quá trình quản lý công trình cầu đang khai thác. Các nghiên cứu của luận án có thể triển khai áp dụng thực tiễn tại các đơn vị khác trong ngành GTVT.

#### 6. Bố cục của luận án:

Luận án được tóm tắt như mô tả trong **Sơ đồ 1**, cụ thể như sau:

Mở đầu.

Chương 1: Tổng quan về vấn đề cần nghiên cứu.

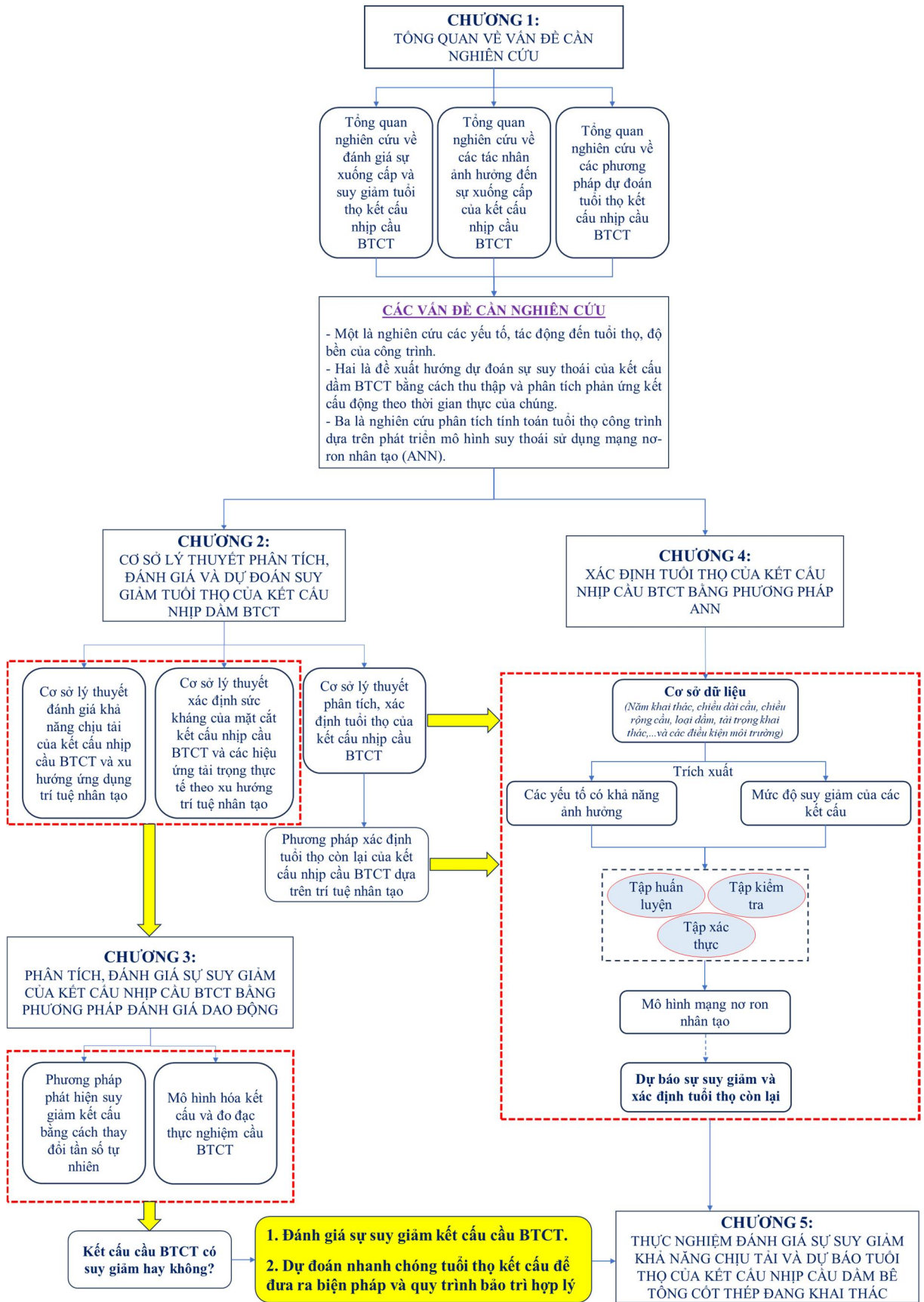
Chương 2: Cơ sở lý thuyết phân tích, đánh giá và dự đoán suy giảm tuổi thọ của kết cấu nhịp dầm BTCT.

Chương 3: Phân tích, đánh giá khả năng suy giảm của kết cấu nhịp cầu BTCT bằng phương pháp đánh giá dao động.

Chương 4: Xác định tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu BTCT bằng phương pháp ANN

Chương 5: Thực nghiệm đánh giá sự suy giảm khả năng chịu tải và dự báo tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu dầm bê tông cốt thép đang khai thác.

Kết luận và kiến nghị.

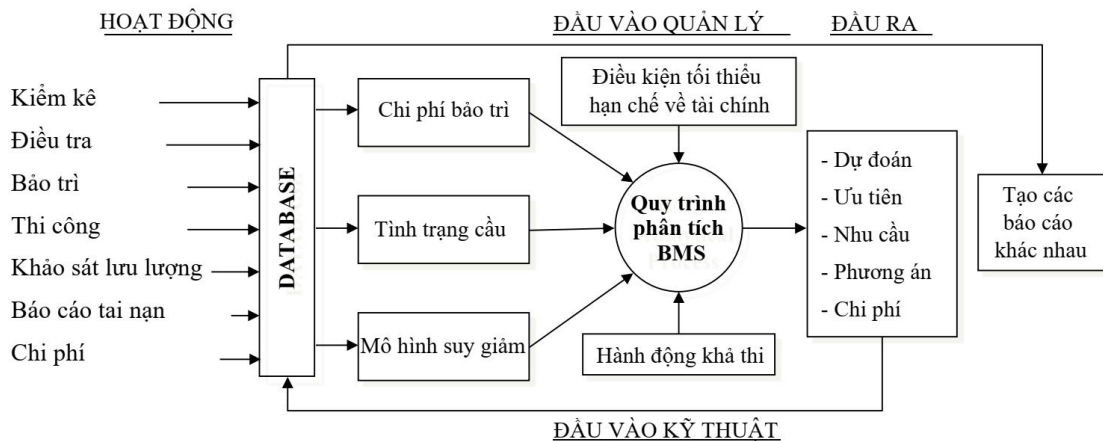


Sơ đồ 1. Sơ đồ nghiên cứu

## CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ CẦN NGHIÊN CỨU

### 1.1. Tổng quan chung

Tuổi thọ khai thác của công trình cầu hay kết cấu nhịp cầu phụ thuộc vào nhiều yếu tố từ thiết kế, thi công, chất lượng vật liệu, quản lý, bảo trì công trình. Tuy nhiên, các kết cấu khác nhau có thể bị xuống cấp không giống nhau. Dựa trên những thông tin thu được thông qua việc thu thập dữ liệu trong quá trình kiểm tra cầu định kỳ, xếp hạng tình trạng được gán cho các bộ phận kết cấu để đánh giá khả năng hoạt động và dự đoán tốc độ xuống cấp. Quá trình kiểm tra, có thể phát hiện nhu cầu thực hiện bất kỳ hành động khẩn cấp, bảo trì hoặc thay thế. Do vậy, cần thiết phải xây dựng một hệ thống quản lý nhằm giúp cơ quan quản lý đưa ra các quyết định về bảo dưỡng, sửa chữa, phục hồi một cách hợp lý. Hệ thống này cũng cung cấp các dự đoán phân tích hiệu quả về xếp hạng tình trạng và tỷ lệ xuống cấp,... ngoài việc ra quyết định về lập ngân sách cho việc bảo trì sắp tới và chiến lược bảo trì tối ưu. Hệ thống quản lý cầu thường bao gồm 05 nội dung: (a) lưu trữ dữ liệu (cơ sở dữ liệu), (b) mô hình đánh giá tình trạng, (c) mô hình suy giảm, (d) mô hình chi phí và (e) mô hình tối ưu hóa cho vận hành hệ thống. Một khung kiến trúc điển hình của một hệ thống quản lý cầu (BMS) được miêu tả như trong **Hình 1.1**.



Hình 1.1. Một sơ đồ điển hình của BMS (Steele và cộng sự, 2000)[114]

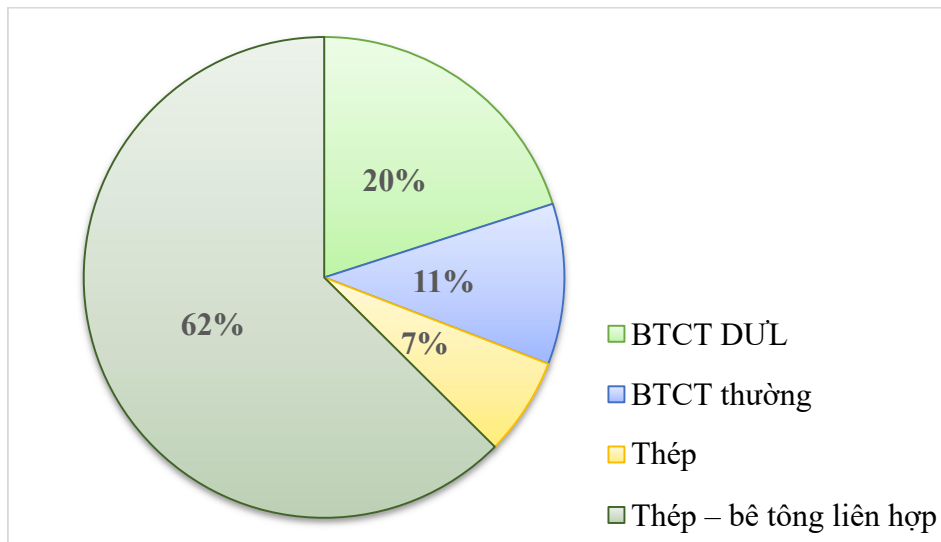
Vì vậy, trong phần này nghiên cứu tổng quan về quản lý cầu, đánh giá nguyên nhân và các tác động gây ra suy giảm tuổi thọ cầu, cũng như các phương pháp dự đoán tuổi thọ khai thác. Trong chương này cũng nêu ra những vấn đề nghiên cứu hiện tại và khoảng trống nghiên cứu trong lĩnh vực quản lý cầu, góp phần định hướng nghiên cứu cho luận án này.

## 1.2. Đặc điểm và dạng hư hỏng công trình cầu ở Việt Nam

### 1.2.1. Đặc điểm công trình cầu ở Việt Nam

Theo dữ liệu quản lý từ hệ thống quản lý cầu “VBMS” (<http://www.vbms.vn/>) của Cục đường bộ Việt Nam, dữ liệu bao gồm nhiều thông tin như loại kết cấu cầu, loại kết cấu dầm, loại kết cấu nhịp, năm khai thác, lưu lượng xe trung bình... và đặc biệt là chỉ số rủi ro đánh giá mức độ hư hỏng của cầu tại thời điểm khảo sát. Các nghiên cứu ở nước ta với mục đích áp dụng để sửa chữa và bảo vệ kết cấu BTCT trong các công trình cầu được thực hiện gần đây tập trung về khá nhiều về lĩnh vực vật liệu mới và công nghệ sửa chữa [4],[12-14]. Tuy nhiên, các nghiên cứu vẫn chưa được áp dụng rộng rãi và chưa có quy trình công nghệ chi tiết. Các nghiên cứu về vật liệu và công nghệ để sửa chữa cầu bê tông đều nhằm giải quyết về mặt đảm bảo cường độ, duy trì và tăng khả năng chịu lực. Hầu như chưa có phân tích, đánh giá về tuổi thọ (độ bền lâu) của kết cấu sau sửa chữa và trong quá trình duy tu bảo trì trong các điều kiện khai thác.

Theo thống kê có tất cả 59 thuộc tính được thu thập cho mỗi cây cầu. Hiện tại, trên hệ thống quản lý VBMS có thông tin của 11.823 cây cầu trong cả nước trong đó bao gồm nhiều loại cầu khác nhau. Số lượng của mỗi cầu tương ứng với từng đơn vị quản lý được trình bày trong **Hình 1.2** và **Bảng 1.1** sau đây.



Hình 1.2. Phân loại theo vật liệu làm cầu [<http://www.vbms.vn/>].

Bảng 1.1. Số lượng các cầu trên hệ thống VBMS chia theo đơn vị quản lý (<http://www.vbms.vn/>).

STT	Đơn vị quản lý	Số lượng cầu
1	Cục quản lý đường bộ I (nay là Khu QLĐB I)	901

2	Cục Quản lý đường bộ II (nay là Khu QLDB II)	988
3	Cục Quản lý đường bộ III (nay là Khu QLDB III)	890
4	Cục Quản lý đường bộ IV (nay là Khu QLDB IV)	1.393
5	Do Cục QLDB cao tốc quản nay trước đây (nay chuyển về các Khu QLDB đường bộ quản lý)	643
6	Sở GTVT các tỉnh thành phố	7.008
	<b>Tổng số</b>	<b>11.823</b>

Đặc điểm chung về hệ thống cầu ở Việt Nam:

❖ Có chiều dài và số lượng tương đối lớn phân bố cả hệ thống tỉnh lộ, quốc lộ và đường cao tốc.

❖ Đa dạng về chủng loại: (i) đa dạng về kết cấu nhịp: cầu treo dây võng; dạng giàn, dạng vòm, dạng liên tục, dạng giản đơn,... (ii) đa dạng về vật liệu: bê tông, bê tông cốt thép, bê tông cốt thép dự ứng lực, thép, gạch, đá...

❖ Thời gian xây dựng qua nhiều thời kỳ và nhiều loại yêu cầu tải trọng khác nhau.

❖ Được thiết kế, thi công theo các Tiêu chuẩn và Quy chuẩn khác nhau.

❖ Đối với các cầu, ngoài tải trọng bản thân còn chịu tác động của hoạt tải. Đặc biệt ở nước ta, khối lượng vận chuyển đã tăng lên rất nhanh, làm cho mật độ xe ở nhiều nơi tăng cao và số lượng xe có tải trọng lớn xuất hiện ngày càng nhiều, vì thế nhiều cầu cũ đã xuống cấp rất nhanh. Tại những nơi ứng suất tập trung, hiệu ứng do tải trọng xe gây ra sẽ làm cho tổng ứng suất vượt quá giới hạn cho phép. Kết quả là kết cấu bị biến dạng, cấu trúc của vật liệu thay đổi và dẫn đến hình thành các vết nứt. Khi vết nứt phát triển đến một độ lớn nhất định, công trình sẽ bị phá hoại. Thêm nữa, vấn đề hết sức quan trọng là năng lực khai thác của các cầu trên cùng một tuyến rất khác nhau. Vì vậy để tối ưu giá trị sử dụng các cầu đang khai thác cần phải bảo đảm an toàn cho công trình, các cấu kiện chịu lực trong công trình không những phải được kiểm tra về cường độ và ổn định mà còn dự báo tuổi thọ sử dụng còn lại của chúng để có chiến lược bảo trì, khai thác hoặc thay thế.

❖ Có nhiều công trình xuất hiện hiện tượng hư hỏng kết cấu làm suy giảm khả năng khai thác như:

- Gỉ cốt thép.

- Nứt trong kết cấu BTCT và BTCT DUỖ.

- Bong, tróc, hư hỏng bề mặt bê tông.
- Hư hỏng gôi cầu và khe co giãn.

### 1.2.2. Suy giảm cường độ và các hư hỏng điển hình

Cơ chế xuống cấp của công trình không chỉ được xác định dựa trên các kết quả của kết quả điều tra, khảo sát tại thực địa công trình mà phải được xem xét kỹ lưỡng từ các bản vẽ thiết kế, các vật liệu đã được sử dụng, các hồ sơ quản lý và xác nhận quá trình xây dựng, các điều kiện môi trường và điều kiện khai thác.

Các chỉ số suy giảm là hệ số để đánh giá tiến trình hoặc mức độ xuống cấp của kết cấu. Công tác điều tra, khảo sát, đánh giá để xác định các cơ chế suy giảm, các mục điều tra nên được lựa chọn theo **Bảng 1.2**.



Hình 1.3. Trình tự cơ bản cho việc xác định cơ chế xuống cấp.

Bảng 1.2. Nguyên nhân gây hư hỏng kết cấu BTCT.

Phân loại / Hạng mục			Nguyên nhân gây nứt
Vật liệu	Vật liệu được sử dụng	Xi măng	Sự ninh kết bất thường của xi măng
			Nhiệt thủy hoá xi măng
			Sự trương nở bất thường của xi măng
		Cốt liệu	Bùn chứa trong cốt liệu
			Cốt liệu chất lượng thấp

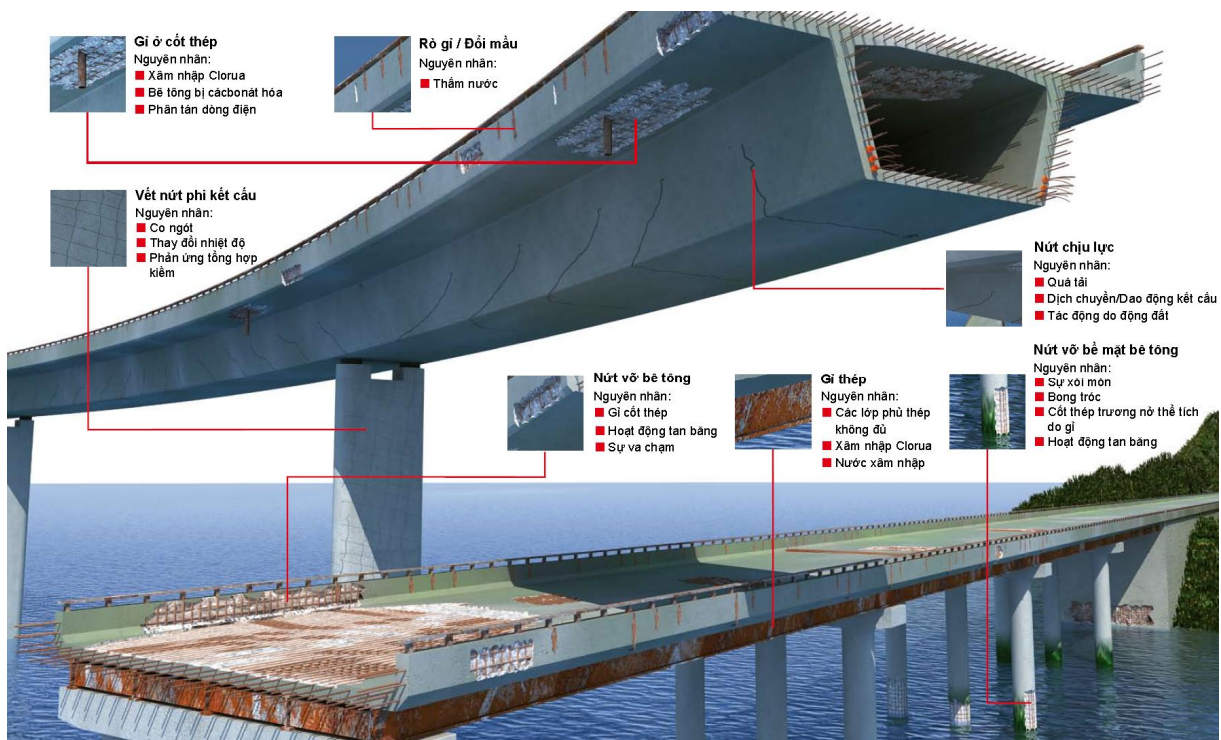
Phân loại / Hạng mục			Nguyên nhân gây nứt
	Bê tông	—	Cốt liệu hoạt tính
			Ion clorua chứa trong bê tông
			Sự sụt lún và tách nước bê tông
			Co ngót của bê tông
Thi công	Bê tông	Mê trộn	Mê trộn tối ưu lỗi
		Trộn	Sự phân tán không đồng nhất của phụ gia
			Thời gian trộn dài
		Vận chuyển	Thay đổi tỷ lệ pha trộn trong suốt quá trình bơm bê tông
		Công tác đổ	Trình tự không phù hợp
			Công tác đổ bê tông nhanh
		Đàn nén	Đàn nén không đầy đủ
		Bảo dưỡng	Rung động hoặc chát tải trước khi bê tông đông cứng
			Độ lún và độ tách nước bê tông
	Sự tấn công của băng giá ở tuổi sớm của bê tông		
	Công tác tạo các lớp BT	Công tác tạo các lớp bê tông không phù hợp	
	Thanh tăng cường	Bố trí các thanh tăng cường	Bố trí các thanh tăng cường không phù hợp
			Không đủ chiều dày bê tông bảo vệ
	Ván khuôn	Ván khuôn	Sức nặng của ván khuôn
			Rò rỉ nước từ ván khuôn xuống nền đường
			Sự dịch chuyển sớm của ván khuôn
Các thiết bị hỗ trợ	Độ lún của các thiết bị hỗ trợ		
Điều kiện môi trường	Cơ lý	Nhiệt độ và độ ẩm	Sự khác biệt về nhiệt độ và độ ẩm trên cả hai bên của cấu kiện
			Đóng băng và tan băng theo chu kỳ
			Cháy
	Sự mài mòn	Độ mài mòn	
	Hoá học	Phản ứng hoá học	Phản ứng hóa học của axit và clorua
			Ăn mòn cốt thép bên trong do cacbonat
Ăn mòn cốt thép bên trong do các ion clorua			
Kết cấu		Tĩnh tải	Tác động trong khi cường độ bê tông vẫn còn thấp

Phân loại / Hạng mục			Nguyên nhân gây nứt
và ngoại lực	Tải trọng	Tải trọng biến thiên	Tải trọng quá mức trong quy mô và tần số
		Tải trọng do tai nạn	Tải trọng quá mức mà không được coi là tải trọng thiết kế
	Thiết kế kết cấu		Diện tích mặt cắt ngang thiếu
		—	Thanh cường
	Điều kiện hỗ trợ		Sự sụt lún không đều
		—	Độ lún khác biệt của kết cấu

Bảng 1.3. Cơ chế xuống cấp, nguyên nhân, hiện tượng và các chỉ số của xuống cấp.

Cơ chế xuống cấp	Yếu tố xuống cấp	Hiện tượng xuống cấp	Ví dụ về các chỉ số xuống cấp
Cacbonat	Cacbon đioxit	Giảm độ pH trong dung dịch lỗ rỗng do phản ứng hóa học giữa cacbon đioxit và hydrat trong xi măng gây ra sự ăn mòn của thép và nó gây ra các vết nứt hoặc bong tróc bê tông hoặc giảm tiết diện của thép.	- Chiều sâu cacbonat. - Khối lượng thép ăn mòn, ăn mòn-nứt.
Clorua gây ra xuống cấp	Ion Clo	Ăn mòn cốt thép	- Nồng độ ion clo. - Khối lượng thép ăn mòn, ăn mòn-nứt.
Vượt tải	Tác động do vượt tải	Theo thời gian, tải trọng khai thác có chiều hướng tăng.	Vượt tải công trình gây ra các khuyết tật trầm trọng và có thể gây ra những sự cố đáng tiếc.
Sự tấn công của hoá học	Các chất có tính axit ion Sunfat	Bê tông tiếp xúc với các chất có tính axit hay ion sulfat được hòa tan, hoặc bê tông bị xuống cấp do áp lực trương nở, do sự hình thành các chất hóa học.	- Chiều sâu thâm nhập của các chất có hại. - Chiều sâu cacbonat. - Khối lượng thép ăn mòn.
Phản ứng kiềm-silic	Cốt liệu hoạt tính	Các khoáng chất silicat hoạt tính chứa trong cốt liệu hoặc các loại đá cacbonat hóa học kết hợp với các dung dịch lỗ rỗng mà độ pH cao và nó gây ra sự trương nở hay nứt không đều trong bê tông.	Mức độ trương nở (nứt).
Hiện tượng mỏi của bản	Lưu lượng xe tải trọng	Tải trọng theo chu kỳ trên bản mặt cầu gây ra các vết nứt hoặc sự sụt	Mật độ các vết nứt. Võng.

Cơ chế xuống cấp	Yếu tố xuống cấp	Hiện tượng xuống cấp	Ví dụ về các chỉ số xuống cấp
mặt cầu	lớn	trong BTCT.	
Hiện tượng mỏi của cầu kiện dầm	Tải trọng theo chu kì	Tải trọng theo chu kỳ trên bản mặt cầu đường sắt gây ra nứt trong cốt thép chịu kéo trong dầm và nó dẫn đến nứt gãy của cốt thép.	- Sự hư hỏng tích lũy. - Độ dài của vết nứt của thép.
Mài mòn	Sự mài mòn	Sự mài mòn bởi nước chảy hoặc bánh xe gây ra sự mất mát dần dần của bê tông theo thời gian.	- Khối lượng mài mòn. - Tỷ lệ mài mòn.



Hình 1.4. Ví dụ về các hư hỏng của kết cấu công trình cầu.

### 1.3. Tổng quan nghiên cứu về đánh giá sự xuống cấp và suy giảm tuổi thọ kết cấu nhịp cầu BTCT

#### 1.3.1. Giới thiệu chung

Thời gian qua đã có nhiều sự cố liên quan đến hàng trăm cây cầu như sụp đổ hoàn toàn hay một phần trên các tuyến giao thông của đường bộ và đường sắt trên thế giới. Ở hầu hết các cây cầu này, kết cấu chịu lực bị sập khi đang khai thác thường xuyên và thường xảy ra khi ùn tắc giao thông nghiêm trọng khi hậu quả của những vụ sập cầu đó đối với tính mạng con người là vô cùng lớn [103]. Có nhiều yếu tố dẫn đến sập cầu và

chúng thường được chia thành các yếu tố tự nhiên (lũ lụt, động đất, gió tốc độ cao, lở đất,...) và các yếu tố do hành động của con người (thiếu bảo trì hoặc kiểm tra cầu đúng cách). Ngoài ra, trong một số năm gần đây đã có sự gia tăng đáng kể về lưu lượng giao thông và sự gia tăng trọng lượng của xe tải. Nhiều nghiên cứu và dự án được thực hiện trong những năm gần đây cho rằng tình trạng kết cấu cầu chịu lực ở châu Âu cũng như trên thế giới là đáng lo ngại [43, 50, 126].

Nghiên cứu được thực hiện ở một số nước châu Âu thông qua dự án BRIME [126] cho thấy 39% cầu trên đường cao tốc của Pháp bị hư hỏng, trong khi 3% có nguy cơ sụp đổ cao. Thiệt hại cũng xảy ra trên 37% cầu ở Đức (1,8% trong tình trạng hoàn toàn không đạt yêu cầu), 30% cầu ở Anh và 26% cầu ở Na Uy. Thiệt hại phổ biến nhất liên quan đến sự cố nứt và lớp bê tông bảo vệ bị tách do cốt thép bị ăn mòn [126]. Ngoài ra, 30% cầu đường cao tốc ở Hoa Kỳ được đánh giá là thiếu công tác bảo trì được khuyến nghị [43].

Tác động của ăn mòn cốt thép là một trong những vấn đề quan trọng nhất liên quan đến độ bền của kết cấu bê tông. Hậu quả của ăn mòn là gây ra các vết nứt ban đầu trong bê tông và làm tách lớp bảo vệ như mô tả trong **Hình 1.5**.



*Hình 1.5. Ảnh hưởng của ăn mòn cốt thép trong dầm BTCT.*

Hầu hết các công trình cầu BTCT tại Việt Nam được thiết kế theo tiêu chuẩn ASSHTO của Mỹ. Các cầu BTCT của Việt Nam có tuổi thọ trung bình từ 40 đến 60 năm. Một số cây cầu có tuổi thọ lên tới 100 năm, tuy nhiên cũng có những cây cầu tuổi thọ rất thấp chỉ khoảng 20 năm. Nếu không xét đến các hư hỏng do tải trọng, môi mà chỉ xét đến hư hỏng lâu dài do môi trường xâm thực thì các hư hỏng thường xuất hiện ở những nơi có nồng độ hóa chất gây ăn mòn cao. Theo TCVN 11823:2017 [11], tuổi thọ công trình cầu BTCT theo thiết kế có thể đạt tới 100 năm trong điều kiện môi trường tiêu chuẩn. Tuy nhiên, các nghiên cứu tại vùng biển Việt Nam cho thấy thời gian cốt thép bắt đầu bị ăn mòn có thể xảy ra sớm, khiến tuổi thọ của các công trình không có

biện pháp bảo vệ chuyên biệt giảm mạnh xuống còn 20 đến 30 năm [6]. Năm 1987, cầu Rào (Hải Phòng), dạng dầm khung T dầm đeo nhịp chính 64m bị sập đổ ngày ngày 16/6/1987, sau chưa đầy 7 năm đưa vào sử dụng. Nguyên nhân được xác định là do rỉ, đứt cáp DUL đột ngột khiến khả năng chịu lực bị suy giảm đáng kể.

Tuổi thọ của cầu BTCT phụ thuộc vào mức độ suy giảm khả năng chịu lực của cốt thép và khả năng liên kết của thép với bê tông. Vì vậy, để có thể đưa ra biện pháp tốt bảo vệ công trình cần nghiên cứu các hiện tượng nứt, rỗng và ăn mòn của lớp bê tông bảo vệ. Đầu vào lựa chọn ở đây là các thông tin về kích thước hình học, môi trường bao gồm các tham số ảnh hưởng như: (1) *chiều dày lớp bê tông bảo vệ*, (2) *hệ số khuếch tán clo D28*, (3) *độ ẩm H(%)*, (4) *nồng độ Clo bề mặt*, (5) *giá trị ngưỡng nồng độ Clo*,...

Theo nghiên cứu, độ mặn và thành phần hoá học của nước biển Việt Nam có sự tương đồng với nước biển trên thế giới. Ở vùng gần bờ, do ảnh hưởng của nước sông nên độ mặn có suy giảm. Thành phần hoá học của nước biển ở một số vùng biển nước ta như trong **Bảng 1.4** dưới đây.

Trong thực tế, hiện tượng ăn mòn đối với kết cấu bê tông là một vấn đề rất nghiêm trọng. Phản ứng hóa học của bê tông với môi trường không khí chứa các tác nhân gây xâm thực, có tác dụng hóa học, gây ăn mòn đối với bê tông được trình bày trong **Bảng 1.6**.

*Bảng 1.4. Thành phần hoá học chủ yếu của nước biển (Trần Đức Hạ, 2011)[3]*

Chỉ tiêu	Đơn vị	Vùng biển Hòn Gai	Vùng biển Hải Phòng	Biển Đà Nẵng
pH	-	7,8 – 8,4	7,5 – 8,3	7,7
Cl <sup>-</sup>	g/l	6,5 – 18,0	9,0 – 17,8	0,4 – 12,1
Na <sup>+</sup>	g/l	-	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	g/l	0,2 – 1,2	0,002 – 1,1	0,2 – 0,9

Độ mặn nước biển ở tầng mặt ở vùng biển Việt Nam được nêu trong **Bảng 1.5**.

*Bảng 1.5. Độ mặn của nước biển ở Việt Nam, g/l*

Trạm	Tháng						Trung bình năm
	Mùa đông			Mùa hè			
	12	1	2	6	7	8	
Cửa ông	29,2	30,0	30,4	25,3	23,4	21,3	26,6
Hòn Gai	30,8	31,5	31,6	32,2	30,8	29,3	30,9
Hòn Dấu	26,3	28,1	28,1	17,1	11,9	10,9	21,2

Văn Lý	25,9	18,3	29,5	25,4	20,1	19,0	24,4
Cửa Tùng	22,8	27,2	29,3	31,8	31,3	31,7	17,4
Sơn Trà	8,7	17,6	22,8	-	21,2	26,9	-
Vũng Tàu	30,4	33,1	34,7	29,8	29,8	27,6	30,1

*Bảng 1.6. Các loại khí có phản ứng hóa học với bê tông*

STT	Loại khí
1	Cacbon đioxit (CO <sub>2</sub> )
2	Anhydric sunfuro (SO <sub>2</sub> )
3	Hydro sunfua (H <sub>2</sub> S)
4	Dioxit nitric (NO <sub>2</sub> )
5	Khí clo (Cl <sub>2</sub> )
6	Hydro clorua (HCl)

Tùy theo nồng độ của thành phần hóa học của các loại khí trên mà phản ứng hóa học xảy ra ở điều kiện phải có hơi ẩm (không khí ẩm). Phản ứng của bê tông (cụ thể là Ca(OH)<sub>2</sub> trong bê tông) với khí CO<sub>2</sub> để tạo thành CaCO<sub>3</sub>.

Dưới tác dụng của hiện tượng ăn mòn và xâm thực do môi trường làm cho kết cấu suy giảm về cường độ chịu lực. Quá trình khai thác, tải trọng và tần xuất lưu thông cao của các loại phương tiện làm cho quá trình suy giảm nhanh hơn. Tại những nơi tập trung ứng suất, có thể hình thành các vết nứt. Khi vết nứt phát triển đến một độ lớn nhất định, công trình sẽ bị hư hỏng hoặc sụp đổ. Do đó liên quan đến xác định ảnh hưởng của tải trọng đối với cầu BTCT, ngoài việc cần phải đo được hoạt tải thực tế đang khai thác thường xuyên thì cần có bộ số liệu liên quan đến kết cấu như: (1) Chiều dài nhịp, (2) chiều cao dầm, (3) số lượng dầm, (4) khoảng cách dầm, (5) số lượng và phân bố dầm ngang, (6) góc chéo của cầu, (7) cường độ bê tông f'c, (8) hồ thiết kế cầu (nếu có), (9) năm xây dựng cầu, (10) lưu lượng xe, tải trọng thiết kế,...

### **1.3.2. Nghiên cứu ở nước ngoài**

Nghiên cứu chuyên sâu về sự hư hỏng kết cấu BTCT do điều kiện môi trường bắt đầu vào đầu những năm 1980 và được phát triển cùng với Tiêu chuẩn Châu Âu EN 206. Tuutti nghiên cứu quá trình diễn biến sự xuống cấp và tác động đến tuổi thọ kết cấu BTCT [117]. Các suy giảm tính năng của kết cấu với các ứng dụng thực tế đã được phát triển trong dự án nghiên cứu DuraCrete do EU tài trợ, được ứng dụng rất nhiều trong các nghiên cứu về độ bền của kết cấu cầu BTCT trên thế giới.

Về dự đoán tuổi thọ của cầu, Wang và Liu (2010) [121] đã trình bày phương pháp

sử dụng các đặc tính vật liệu bị hư hỏng và tính đến thời gian ăn mòn một phần và lượng ăn mòn để ước tính tuổi thọ còn lại của dầm BTCT. Pan và Wang (2011) [97] đã nghiên cứu tuổi thọ của kết cấu BTCT theo ba bước chính, đó là: xâm nhập hóa học, ăn mòn thép và nứt bê tông. Đề xuất dựa trên điện trở suất đã được Andrade và Andrea (2010) [21] thực hiện để tính toán thời gian bắt đầu và lan truyền ăn mòn, cũng như dự đoán sự lão hóa bê tông liên quan đến độ bền. Okasha và Frangopol (2010) [95] đã trình bày phương pháp sử dụng phân tích PTHH phi tuyến gia tăng để tính toán, dự đoán vòng đời và ước tính tuổi thọ của các cây cầu.

Cheung và cộng sự (2009) [41] đã nghiên cứu mô hình kết hợp PTHH hai chiều để đánh giá quá trình thâm nhập clorua trong môi trường khác nhau để dự đoán thời gian bắt đầu ăn mòn. Theo Conciatori và cộng sự (2009) [45] thời kỳ bắt đầu ăn mòn cốt thép gây ra trong BTCT do clorua là thời gian để các ion clorua xâm nhập từ bề mặt và di chuyển qua lớp phủ bê tông. Sự ăn mòn của các cấu trúc bê tông có thể được mô tả như là một quá trình hai giai đoạn của Zhang và Lounis (2009) [129] là giai đoạn bắt đầu và lan truyền ăn mòn.

Bên cạnh các tác nhân do môi trường, nhiều nghiên cứu về độ suy giảm kết cấu trên điều kiện chịu tải trọng của kết cấu nhằm phát triển phương pháp dự đoán tuổi thọ của các cấu kiện BTCT [23-26, 48, 64]. Thực tế cho thấy nhiều công trình bê tông sớm hư hỏng và không đạt tuổi thọ kỳ vọng do tiếp xúc với môi trường khắc nghiệt. Dù việc đánh giá sự xuống cấp và mô hình hóa tuổi thọ kết cấu BTCT là nhiệm vụ đầy thách thức vì chứa đựng nhiều yếu tố ngẫu nhiên, nhưng đây lại là lĩnh vực đang được quan tâm.

Trong xu hướng gần đây, việc mô hình hóa tuổi thọ chủ yếu sử dụng các phương pháp như phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (FEA), phương pháp sai phân hữu hạn (FDM), mạng nơ ron nhân tạo (ANN),... trong đó mạng ANN là phương pháp được ưa chuộng để mô hình hóa tuổi thọ sử dụng của kết cấu BTCT bị xuống cấp [22]. Ngày nay, rất nhiều nghiên cứu quan tâm đến việc đánh giá hư hỏng, xác định hư hỏng và đánh giá khả năng chịu tải của kết cấu thông qua áp dụng các phương pháp hiện đại như việc sử dụng các ANN để giảm bớt phép tính và số lượng dữ liệu đầu vào [17, 70, 89, 96, 98, 102, 123]. Mạng lưới nơ-ron nhân tạo thường được sử dụng để dự đoán kết quả riêng lẻ, là một hướng tiếp cận tương đối mới để đánh giá mối quan hệ giữa các biến tác động và kết quả. Tuy nhiên, phương pháp này đặc biệt hiệu quả trong những trường hợp các giá trị của biến khó kiểm soát, chẳng hạn như với nhiều biến ảnh hưởng đến tình trạng suy thoái [73] [59].

### 1.3.3. Tình hình nghiên cứu ở trong nước

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về kết cấu BTCT nói chung và ngành cầu nói riêng đã bước đầu được quan tâm và công bố đến các vấn đề ăn mòn ở những công trình cầu ven biển để đưa ra giải pháp giảm thiểu tình trạng nguy hiểm đến kết cấu công trình [13]. Trước đó, một số tác giả trong nước đã phân tích tình trạng hư hỏng của kết cấu BTCT bao gồm đánh giá về mức độ, tính chất và nguyên nhân của hư hỏng. Từ đó đưa ra các giải pháp sửa chữa, bảo dưỡng thích hợp [5, 12, 13, 15]. Luận án tiến sĩ “Dự báo tuổi thọ sử dụng của cầu BTCT ven biển Việt Nam do xâm nhập clo” của Đào Văn Đình (2014) đã nghiên cứu về sự xâm nhập clo gây ra ăn mòn cốt thép đối với các cầu BTCT ven biển [2].

Nhóm nghiên cứu Trường Đại học GTVT thực hiện đề tài “Nghiên cứu đánh giá chất lượng và suy đoán tuổi thọ dầm Super-T ở một số cầu ven biển Việt Nam” [4] để đánh giá chất lượng và dự đoán tuổi thọ kết cấu dầm. Tuy nhiên, kết cấu dùng đánh giá chất lượng trong nghiên cứu này là kết cấu mới, nhóm tác giả chưa có phương pháp dự đoán cụ thể tuổi thọ của kết cấu.

Nguyễn Văn Tươi và cộng sự (2018) trình bày kết quả thí nghiệm xác định hệ số carbonat hóa, độ chống thấm ion clo của bê tông trong một số công trình giao thông bằng BTCT ven biển khu vực Đà Nẵng. Kết quả thí nghiệm được sử dụng để tính toán dự báo tuổi thọ do carbonat hóa và xâm nhập ion clo của các công trình này [14].

Hồ Văn Quân (2016) [9] nghiên cứu bê tông sử dụng cốt liệu ở Đà Nẵng với phụ gia muối silic và kết hợp giữa phụ gia muối silic, tro bay làm kết cấu mặt đường ở vùng duyên hải Nam Trung Bộ, đã dự báo tuổi thọ của kết cấu mặt đường sử dụng bê tông muối silic và tro bay do xâm nhập ion clo.

Hồ Văn Quân (2020) [8] dựa trên phân tích xác suất đã nghiên cứu ảnh hưởng của sự suy giảm hệ số khuếch tán clorua đến tuổi thọ của kết cấu BT.

Hồ Xuân Ba (2020) [1] nghiên cứu độ bền thấm nước và khuếch tán ion  $Cl^-$  của bê tông có xét đến yếu tố ứng suất nén, ứng dụng trong kết cấu cầu. Nghiên cứu thực nghiệm, phân tích tính thấm ion  $Cl^-$  của bê tông chịu ảnh hưởng của tải trọng qua đó đề xuất công thức tính toán hệ số khuếch tán ion  $Cl^-$  và hệ số thấm nước của bê tông có xét đến ảnh hưởng của ứng suất.

Ngô Văn Thức (2020) [10] nghiên cứu bê tông chất lượng cao sử dụng nano silica phục vụ cho kết cấu công trình cầu ở điều kiện Việt Nam. Nghiên cứu đã xác định được các đặc tính cơ học (cường độ nén, cường độ kéo khi uốn, mô đun đàn hồi)

của bê tông sử dụng nano silica và xác định đặc điểm phá hủy của bê tông chất lượng cao sử dụng nano silica. Qua đó nghiên cứu sức kháng nứt và cường độ dự trữ sau nứt đầm bê tông chất lượng cao sử dụng nano silica dựa trên phương pháp cơ học phá hủy.

Nguyễn Tấn Khoa (2021) [7] nghiên cứu bê tông cát sử dụng phụ gia khoáng tro bay, xỉ lò cao cho kết cấu công trình trong môi trường biển miền trung, đã đưa ra cấp phối bê tông cát sử dụng hỗn hợp tro bay, xỉ lò cao cấp B45 có độ thấm ion clo <1000 Cu lông ở 28 ngày.

Đối với tính pháp lý của các biện pháp đánh giá chất lượng kết cấu BTCT, Bộ KH&CN đã ban hành một số tiêu chuẩn liên quan đến công tác đánh giá chất lượng và bảo trì kết cấu BTCT. Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 12041:2017 Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Yêu cầu chung về thiết kế độ bền lâu và tuổi thọ trong môi trường xâm thực đã quy định yêu cầu chung về thiết kế độ bền lâu và tuổi thọ của kết cấu bê tông và BTCT trong các môi trường xâm thực.

#### **1.4. Tổng quan nghiên cứu về các tác nhân ảnh hưởng đến sự xuống cấp của kết cấu nhịp cầu BTCT**

##### **1.4.1. Giới thiệu chung**

Basheer và cộng sự (1996) [30] đã nghiên cứu thông qua tổng hợp nhiều khảo sát của hơn 400 bài báo về sự suy giảm của bê tông, theo đó, hầu hết đặt sự xâm thực của cacbonat và clorua dẫn đến ăn mòn cốt thép là nguyên nhân chính.

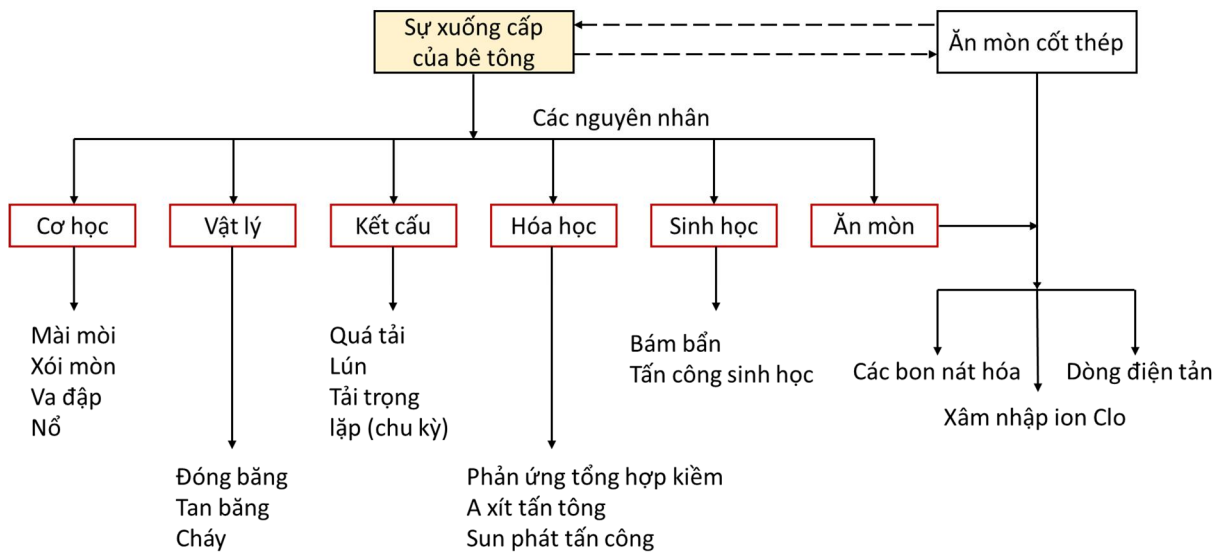
Mutsuyoshi (2001) [93] đã thảo luận về các nguyên nhân gây hư hại cầu cầu BTCT DUL ở Nhật Bản. Sau khi kiểm tra 120 cây cầu BTCT dự ứng lực, nguyên nhân chính là do xâm nhập ion clorua (66%), các bon nát hóa (5%). Do đó, sự xâm nhập của cacbonat và clorua là nguyên nhân chính gây ra ăn mòn cốt thép trong bê tông. Tuy nhiên, phạm vi và tầm quan trọng của các tác nhân này rất khác nhau tùy theo loại khí hậu, vị trí địa lý, thời gian trong năm và thậm chí trong một khu vực tương đối nhỏ.

Nhìn chung, sự xuống cấp của các đặc tính vật liệu chủ yếu xảy ra dưới tác động kết hợp của nhiều yếu tố trong và ngoài. Các điều kiện môi trường cũng có ảnh hưởng đến quá trình hư hỏng.

##### **1.4.2. Tác nhân ảnh hưởng đến sự suy giảm cường độ của kết cấu BTCT**

Các yếu tố ảnh hưởng đến độ bền, quá trình xuống cấp của của bê tông gồm rất nhiều yếu tố như: hàm lượng xi măng, chất lượng cốt liệu, chất lượng nước, đầm bê tông; thời gian bảo dưỡng, tính thấm, độ ẩm, nhiệt độ, ăn mòn, cacbonat hóa, chu trình

làm ướt và làm khô, đóng băng và tan băng, phản ứng tổng hợp kiềm, tấn công sunfat, a-xít hữu cơ. Các yếu tố này thường xảy ra đồng thời, tạo ra tác động cộng hưởng.



Hình 1.6. Suy thoái/xuống cấp kết cấu BTCT (Bertolini, 2004)[33].

Các quá trình xuống cấp của bê tông và ăn mòn cốt thép có mối liên hệ chặt chẽ với nhau (**Hình 1.6**). Các yếu tố gây ra sự phá hủy lớp phủ bê tông hoặc gây ra các vết nứt. Mặt khác, ăn mòn tấn công sẽ tạo ra vết nứt hoặc tách lớp bê tông và làm giảm độ bám dính của bê tông với cốt thép.

#### 1.4.2.1. Ăn mòn cốt thép

Sự ăn mòn của các thanh cốt thép có thể xảy ra do sự hư hỏng cục bộ của màng thụ động trên thép bởi các ion clorua hoặc sự hư hỏng chung của sự thụ động bằng cách trung hòa bê tông do phản ứng với carbon dioxide từ khí quyển. Các yếu tố chính chịu trách nhiệm cho sự ăn mòn của các thanh cốt thép là:

- Mất độ kiềm do cacbonat hóa: Khi bề mặt thép không được bảo vệ trong khí quyển, rỉ sét bắt đầu hình thành trên bề mặt thép và dần dần bong ra.

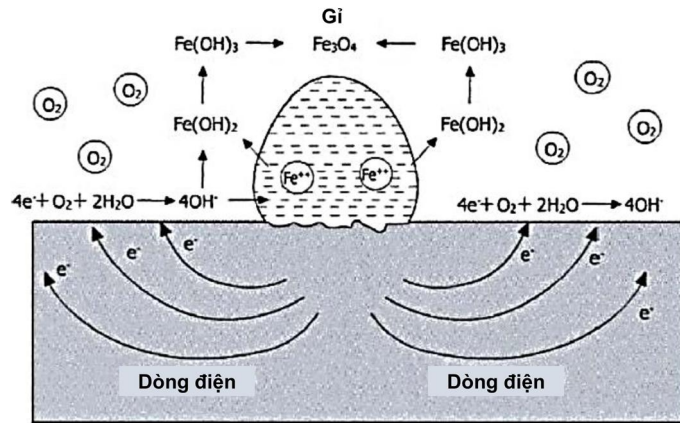
- Mất độ kiềm do clorua: Các ion clorua có xu hướng khử thụ động bề mặt thép bằng cách phá hủy độ kiềm của bê tông.

- Các vết nứt trên bê tông: Các vết nứt có thể khiến các thanh thép tiếp xúc với khí quyển và do đó làm tăng quá trình cacbonat hóa.

- Đường ẩm: Bê tông bị ướt thường xuyên dẫn đến nước khuếch tán qua lỗ rỗng và các vết nứt để đến các thanh cốt thép. Rỉ sét của các thanh thép theo sau đó.

- Lớp bê tông bảo vệ không đủ dày: Lớp phủ bê tông không đủ kích thước.

Quá trình ăn mòn và các sản phẩm cũng có thể bị ảnh hưởng bởi các dấu vết ion âm - ion anomi ( $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , ...) tồn tại trong khí quyển hoặc lượng mưa. Các rào cản vật lý của bê tông bảo vệ không phải là hoàn hảo. Hai nguyên nhân chính gây ra phá vỡ màng thụ động là do sự tích tụ các ion clo trên bề mặt màng thụ động và độ pH dung dịch lỗ rỗng giảm do các bon nát hóa. Quá trình ăn mòn được thể hiện trong **Hình 1.7**.



Hình 1.7. Quá trình ăn mòn thép (Beeby, 1983) [32]

#### 1.4.2.2. Hình thái ăn mòn cốt thép

Khi cốt thép bắt đầu bị ăn mòn, cấu kiện BTCT bắt đầu xuống cấp qua các giai đoạn:

- Hình thành các mảng trắng: Khí carbon dioxide trong khí quyển phản ứng với canxi hydroxit có trong hồ xi măng tạo thành canxi cacbonat. Canxi cacbonat này được mang theo hơi ẩm và lắng đọng trên bề mặt bê tông tạo thành các mảng trắng.

- Các mảng màu nâu dọc theo cốt thép: Khi các thanh thép bắt đầu bị ăn mòn, một lớp oxit sắt được hình thành trên đó. Oxit sắt này cũng được mang lên bề mặt bê tông bởi độ ẩm.

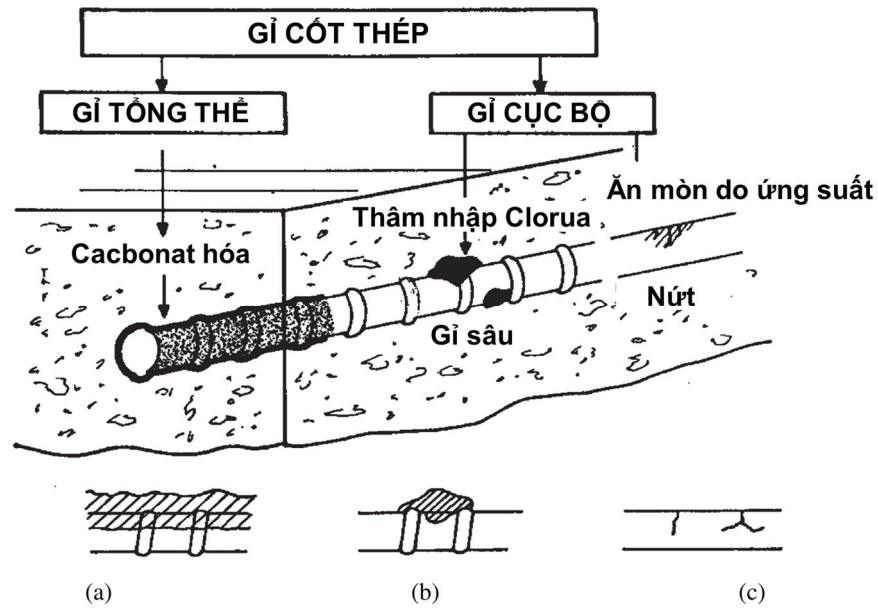
- Hình thành các vết nứt: Khi các sản phẩm ăn mòn có thể tích lớn dần lên so với ban đầu, chúng gây áp lực và làm nứt bê tông. Với sự ăn mòn xảy ra nhiều hơn, các vết nứt ngày càng rộng hơn được hình thành.

- Bong tróc lớp phủ bê tông: bê tông bắt đầu hình thành nhiều lớp vảy và bong ra do liên kết giữa bê tông và thép bị suy giảm. Các thanh thép cũng được giảm kích thước.

- Bê gãy các thanh: Do giảm kích thước của các thanh thép, cuối cùng chúng sẽ bị gãy. Ngoài ra, có sự giảm đáng kể về kích thước của các thanh chính.

- Thanh bị vênh: Vỏ bê tông bị nứt và gãy thanh dẫn đến các thanh chính bị vênh.

Điều này làm phồng bê tông ở khu vực đó và cuối cùng toàn bộ cấu trúc sụp đổ.



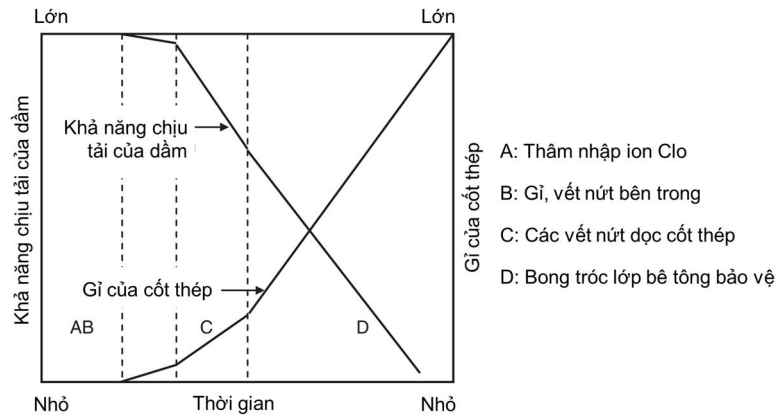
Hình 1.8. Các loại ăn mòn cốt thép: (a) cacbonat hóa, (b) tấn công clorua và (c) nứt do ăn mòn ứng suất

Bảng 1.7. Ảnh hưởng của các yếu tố tác động khác nhau đối với quá trình ăn mòn.

Tham số	Ảnh hưởng
Độ ẩm	Độ ẩm cần thiết ban đầu cho phản ứng cực âm, hình thành gỉ ở cực dương. Nếu không có đủ độ ẩm, tốc độ ăn mòn sẽ là không đáng kể.
O-xy	Oxy phải được cung cấp cho phản ứng cực âm và sau đó hình thành gỉ ở cực dương. Oxy cung cấp không đủ, tỷ lệ ăn mòn sẽ là không đáng kể.
Điện trở suất của bê tông	Điện trở suất càng cao, dòng điện ăn mòn sẽ thấp. Điện trở suất tăng theo nhiệt độ, và giảm với sự gia tăng hàm lượng ẩm.

#### 1.4.2.3. Ảnh hưởng của ăn mòn đến cường độ chịu uốn

Nghiên cứu cho thấy ăn mòn dẫn đến giảm khả năng chịu uốn của cấu kiện. Sự suy giảm cường độ chịu uốn do ăn mòn được thể hiện trong **Hình 1.13**



Hình 1.9. Mối quan hệ giữa ăn mòn với suy giảm khả năng chịu lực của kết cấu (Uomoto và cộng sự, 1984).

Việc giảm diện tích mặt cắt ngang của thép do ăn mòn dẫn đến suy giảm cường độ. Khi các vùng neo dầm bị ăn mòn, liên kết bị tách ra và độ võng tăng lên (Uomoto và cộng sự, 1984[118]; Mangat và Elgarf, 1999 [81]; El Maaddawy và cộng sự, 2005 [56]).

## 1.5. Tổng quan nghiên cứu về các phương pháp dự đoán tuổi thọ kết cấu nhịp cầu BTCT

### 1.5.1. Giới thiệu chung

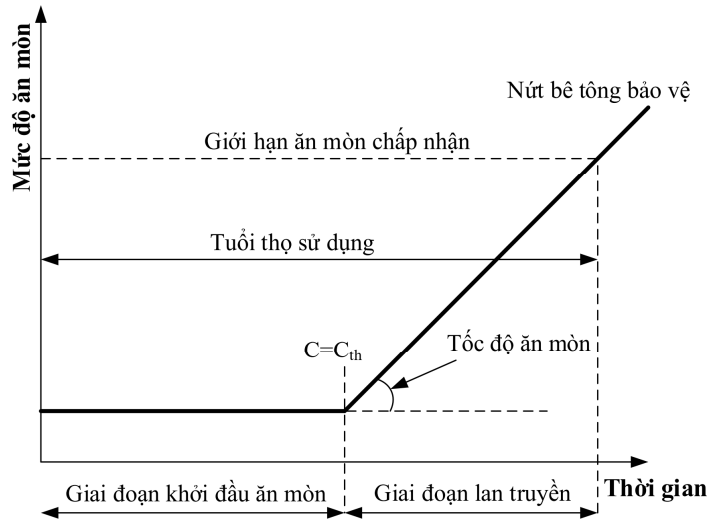
Theo ASTM E 632, vòng đời sử dụng « service life » được xem là khả năng của các cấu kiện để thực hiện chức năng mà chúng được thiết kế và xây dựng; độ bền «durability» là khả năng duy trì sử dụng của sản phẩm, cấu kiện, kết cấu trong một thời gian xác định.

Điểm cuối của tuổi thọ cần xác định để dự báo tuổi thọ sử dụng của kết cấu bê tông. Hiện nay có hai quan điểm lớn về nội dung này: một là xem điểm cuối của tuổi thọ sử dụng là khi ăn mòn gây nứt hoàn toàn bê tông bảo vệ, hai là khi ăn mòn làm giảm diện tích tiết diện cốt thép gây nguy hiểm cho trạng thái giới hạn chịu lực.

Theo Tuutti (1982) [117], tuổi thọ sử dụng của kết cấu BTCT gồm hai giai đoạn: Giai đoạn khởi đầu ăn mòn ( $t_i$ ) và giai đoạn lan truyền ăn mòn ( $t_p$ ) (Hình 1.14).

Giai đoạn đầu được đặc trưng bởi sự xâm nhập của clorua vào bê tông và kết thúc bằng sự khử thụ động của cốt thép bằng cách đạt đến nồng độ ngưỡng của các ion clorua tự do trong dung dịch lỗ rỗng của bê tông tiếp xúc với bề mặt thép. Giai đoạn lan truyền bao gồm các quá trình điện hóa hòa tan sắt, trực tiếp dẫn đến giảm tiết diện cốt thép và hình thành các sản phẩm của quá trình ăn mòn như gỉ sét. Thể tích của các sản phẩm

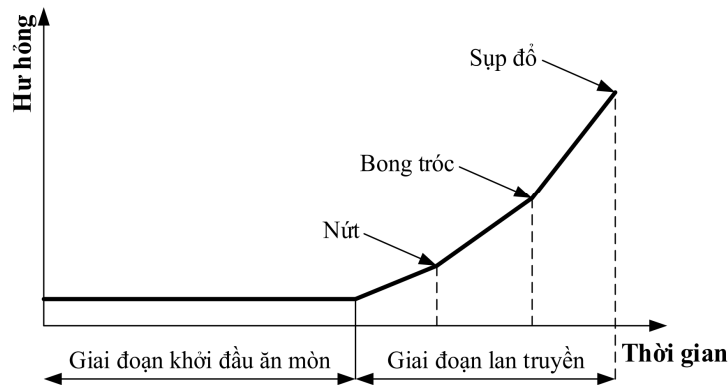
tạo ra từ ăn mòn lớn hơn thể tích chất phản ứng từ 2 đến 7 lần, dẫn đến nứt bê tông cục bộ và giảm liên kết giữa bê tông và cốt thép [14, 33] làm bong tróc lớp phủ bê tông.



Hình 1.10. Quá trình hư hỏng bê tông (Tuuti, 1982)[117]

Chúng ta sẽ tính cho cả hai trường hợp sau:

1. Điểm kết thúc của tuổi thọ khai thác là khi ăn mòn gây nứt bê tông bảo vệ.
2. Điểm kết thúc của tuổi thọ khai thác là khi ăn mòn cốt thép gây nguy hiểm ở trạng thái giới hạn chịu lực.



Hình 1.11. Tình trạng công trình theo thời gian (Duracrete, 2000)[54].

Đối với dự án Duracrete (2000) [54] đã chi tiết hóa giai đoạn lan truyền ăn mòn thành các giai đoạn nhỏ: nứt, vỡ, sụp đổ (Hình 1.15).

Hầu hết các nhà nghiên cứu dựa vào định luật Fick 2 về khếch tán để đưa ra dự báo về thời gian khởi đầu ăn mòn. Chiều dày lớp bê tông bảo vệ, tính chất cơ học của bê tông, tốc độ ăn mòn, đường kính cốt thép, ... được sử dụng để tính toán thời gian lan truyền ăn mòn.

Một số nghiên cứu trước đây đã đề xuất mô hình dự đoán như sau:

- Mô hình Bazant (1979) [31]: đã trình bày một mô hình toán học để dự đoán tuổi thọ của kết cấu BTCT do chịu ăn mòn cốt thép. Do tính chất mở rộng của gỉ ngậm nước, gỉ sẽ nở ra gấp bốn lần thể tích của thép chủ. Cuối cùng, do sự hình thành gỉ ngậm nước, ứng suất hướng tâm ra bên ngoài được tạo ra trên bê tông xung quanh. Ứng suất hướng tâm gây ra tương tự như sự gia tăng đường kính cốt thép  $\Delta D$  do tăng thể tích của nó cho đến khi lớp phủ bê tông tách ra.

- Mô hình của Morinaga (1988) [91]: đề xuất đo sự ăn mòn của cốt thép trong bê tông mà tại đó lớp bảo vệ bê tông bị vỡ do gỉ.

- Mô hình của Wang và Zhao: Wang và Zhao (1997) [127] đã đề xuất một phương pháp tập trung vào chiều dày của sản phẩm ăn mòn  $D$  và so sánh với thời gian bê tông nứt trên bề mặt. Hơn nữa, với sự trợ giúp của quy mô lớn thông tin thu thập từ nhiều cơ sở nghiên cứu, một biểu thức chính xác để tập trung tỷ lệ giữa độ dày sản phẩm ăn mòn  $D$  và độ sâu xuyên thấu  $H$  của thép cây đã được thiết lập.

- Mô hình của Hội đồng đường Ấn Độ (IRC): Khoảng thời gian lan truyền ăn mòn trong mô hình IRC được ước tính dựa trên pH giảm (IRC-SP60, 2002) [46].

- Mô hình của Liu: Youping Liu (1996) đã đưa ra mô hình tính toán thời gian lan truyền ăn mòn gây nứt bê tông bảo vệ và so sánh với thí nghiệm [78].

- Gregory Williamson và các cộng sự (2007) [124] đã kết luận do sử dụng muối làm tan băng trong mùa đông nên tuổi thọ sử dụng của bê tông mặt cầu tại Virginia bị ảnh hưởng bởi sự ăn mòn cốt thép do clo gây ra. Một mô hình ăn mòn do clo gây ra tính toán cho các tham số đầu vào biến đổi sử dụng mô phỏng Monte Carlo đã được phát triển.

- Weyers (1998) [122] đã đưa ra mô hình tuổi thọ sử dụng của các kết cấu BTCT do ảnh hưởng của clo gồm các giai đoạn nối tiếp nhau: Giai đoạn khuếch tán clo vào cốt thép và giai đoạn ăn mòn gây nứt vỡ, giai đoạn ăn mòn đến nguy hiểm cho kết cấu.

- Behrouz Shafei và cộng sự (2012) [110] sử dụng phương pháp PTHH để nghiên cứu ăn mòn cốt thép trong bê tông và đánh giá ảnh hưởng của các thông số quan trọng nhất tới quá trình ăn mòn. Một số các thông số, chẳng hạn như các thuộc tính bê tông và đặc tính khuếch tán trong bê tông, được phân loại như thông số bên trong. Các thông số về độ ẩm tương đối, nhiệt độ, nồng độ của các ion  $\text{CO}_2$  hoặc Clo xem là thông số bên ngoài.

- Dự án DuraCrete (2000) [54] dựa trên tính năng kết cấu bê tông đưa ra thiết kế độ bền. Trên mô hình môi trường và vật liệu thực tế có khả năng dự đoán ứng xử của kết cấu bê tông. Trong đó mô hình xác suất, các trạng thái giới hạn và mô hình hóa các cơ chế suy giảm được xây dựng. Mô hình vật lý cho quá trình suy giảm có liên quan và kết quả các thí nghiệm phù hợp trong dữ liệu đầu vào cần thiết đã được lựa chọn. Các thí nghiệm phù hợp trên một số thành phần bê tông đã được thực hiện.

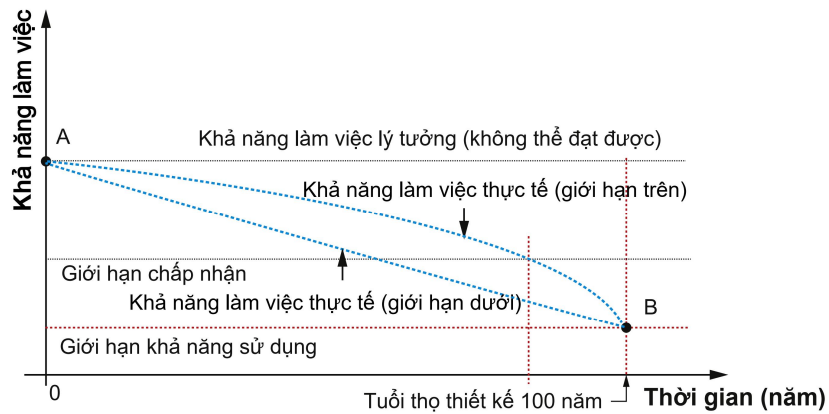
- Ở Phần Lan có nghiên cứu được tài trợ bởi Liên minh châu Âu trong Chương trình Tăng trưởng cạnh tranh và bền vững “D3.2, Service Life Models-Life Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability” (2003) viết tắt là LIFECON [77] dựa trên mô hình bán xác suất và xác suất đầy đủ của xâm nhập ion Clo và CO<sub>2</sub> để đưa ra mô hình tuổi thọ sử dụng, xác định tuổi thọ sử dụng của kết cấu bê tông hiện có.

- Tại Mỹ hiện có nghiên cứu của Ủy ban ACI 365 có tên “Life 365” (2012) “Mô hình dự báo tuổi thọ sử dụng của các kết cấu BTCT tiếp xúc với Clo” [76]. Theo đó, tuổi thọ sử dụng cũng được phân thành 2 giai đoạn: Giai đoạn khởi đầu ăn mòn và giai đoạn lan truyền ăn mòn.

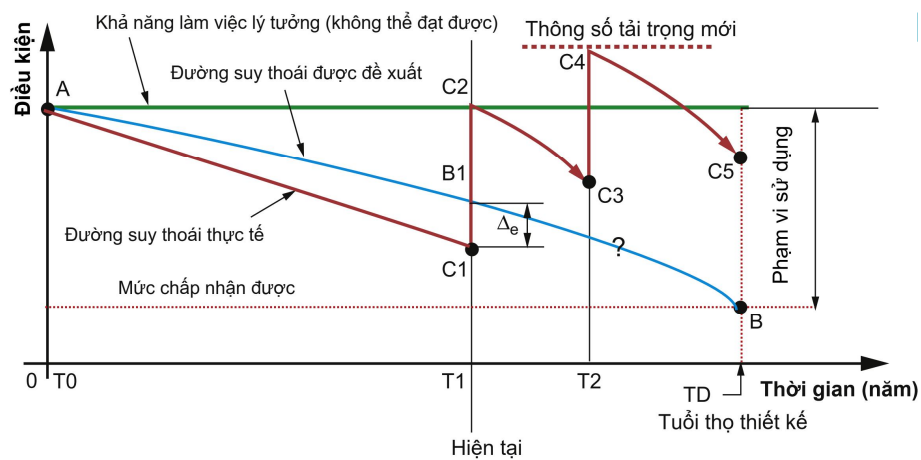
### ***1.5.2. Tổng quan về mô hình dự đoán tuổi thọ kết cấu nhịp cầu BTCT***

Để có được một mô hình dự báo tổng thể đối với sự xuống cấp của kết cấu BTCT là rất khó thực hiện hoặc gần như không thể thực hiện được bởi vì có quá nhiều tác nhân được đưa ra để xem xét cho vào mô hình. Tuy nhiên, nhằm tìm ra một mô hình cục bộ, đơn lẻ phù hợp với những gì đang xảy ra trên cầu có thể kiểm tra qua các cơ chế xuống cấp kết cấu khi chịu tác động của môi trường đặc biệt như môi trường khắc nghiệt. Nếu đạt được, có thể đưa ra các dự đoán về tình trạng của một cây cầu trong tương lai và các giải pháp phòng ngừa trong giai đoạn thiết kế để đảm bảo kiểm soát tốt nhất sự xuống cấp.

**Hình 1.16** mô tả nguyên tắc suy thoái của kết cấu BTCT, trong đó đường cong suy giảm đi xuống từ A đến B thể hiện một cách tổng quát sự xuống cấp của vật liệu, của một bộ phận của kết cấu cầu hay của tổng thể một cầu. Nếu biết chính xác cơ chế xuống cấp, thì các điểm trên đường cong này sẽ đại diện cho tình trạng của cầu tại mọi thời điểm. Một câu lý tưởng (tức là hiệu suất 100%) sẽ được biểu diễn dưới dạng một đường nằm ngang.



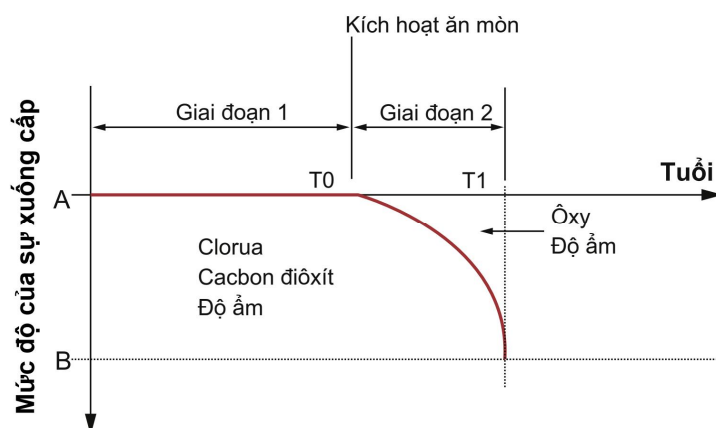
Hình 1.12. Nguyên tắc suy thoái của kết cấu BTCT.



Hình 1.13. Thời điểm kiểm tra, bảo trì cầu BTCT.

Trong cơ sở dữ liệu của hệ thống quản lý cầu (BMS-Bridge Management System) đối với các cầu đã được khai thác trong nhiều năm, dữ liệu về tình trạng của cầu được thu thập thường xuyên. Đường cong hư hỏng có thể được vẽ chính xác cho đến thời điểm hiện tại. Điểm khác biệt giữa điều kiện giữa điều kiện lý thuyết (C1) với điều kiện thực tế (B1) sẽ được chỉ ra ( $\Delta_e$ ) (Hình 1.17). Đơn vị quản lý cần có sự can thiệp để hạn chế xuống cấp. Đó là thời điểm đưa ra quyết định khi cây cầu không bảo đảm yêu cầu tối thiểu về khả năng sử dụng và an toàn.

Quá trình xuống cấp của các kết cấu BTCT này được mô tả theo 2 giai đoạn như trong Hình 1.18.



Hình 1.14. Các giai đoạn xuống cấp.

### 1.5.3. Tổng quan về các mô hình sự xuống cấp của cầu

Mô hình xuống cấp dựa trên các điều kiện lịch sử và hiện tại để ước tính về tình trạng cầu trong tương lai. Cơ chế của quá trình suy giảm của bê tông rất phức tạp. Các mô hình dự đoán hoặc suy giảm tình trạng cầu đã được phát triển bằng nhiều kỹ thuật khác nhau như các mô hình ngẫu nhiên, mô hình dự báo hồi quy dựa trên kỹ thuật ANN.

Các phương pháp tiếp cận để tính toán tốc độ suy giảm cho các bộ phận cầu chủ yếu phân loại thành ba loại: phương pháp xác định, phương pháp ngẫu nhiên và mô hình dựa trên ANN. Mô hình xác định có thể được thực hiện bằng các phương pháp hồi quy, điều chỉnh đường cong và ngoại suy.

Các mô hình xuống cấp của cầu BTCT có thể được phân loại thành các mô hình tất định và ngẫu nhiên. Các mô hình cơ học (hoặc mô hình vật lý) cũng như các mô hình dựa trên trí tuệ nhân tạo (AI), mỗi mô hình trong số đó có thể mang tính chất ngẫu nhiên hoặc tất định.

#### 1.5.3.1. Mô hình tất định

Các mô hình tất định giả định rằng xu hướng của quá trình xuống cấp của cầu là xác thực và dựa trên phân tích hồi quy của dữ liệu điều kiện. Các mô hình này phụ thuộc vào quan hệ thực nghiệm giữa hai hoặc nhiều biến theo điều kiện cầu với một biến phụ thuộc và một hoặc nhiều biến độc lập. Các mô hình hồi quy tuyến tính không cung cấp đủ độ chính xác cho hiệu suất lâu dài của cầu và có thể đánh giá thấp hoặc đánh giá quá cao tình trạng cầu tại một thời điểm cụ thể không giống như các mô hình hồi quy phi tuyến tính. Một đường cong đa thức cho trạng thái điều kiện cung cấp ước tính tốt cho hầu hết các cây cầu bê tông [35], [116].

Mô hình tất định có ưu nhược điểm như sau:

Ưu điểm: i) cách tiếp cận đơn giản nhất để dự đoán tình trạng tương lai của cầu; và ii) tính thực tiễn ở cấp độ mạng.

Hạn chế: i) bỏ qua sự không chắc chắn do tính chất ngẫu nhiên vốn có của sự xuống cấp cơ sở hạ tầng; ii) phải tính toán nhiều hơn để cập nhật các mô hình tất định khi thu được dữ liệu mới; và iii) bỏ qua sự tương tác giữa sự xuống cấp của các bộ phận cầu khác nhau, chẳng hạn như mặt cầu và mối nối mặt cầu.

### 1.5.3.2. Mô hình ngẫu nhiên

Mô hình ngẫu nhiên đã được áp dụng để mô hình hóa sự xuống cấp của cơ sở hạ tầng theo thời gian. Một quy trình ngẫu nhiên được áp dụng rộng rãi là quy trình chuỗi Markov. Nó đơn giản hóa xác suất chuyển đổi bằng cách xác định rằng trạng thái tiếp theo chỉ phụ thuộc vào trạng thái hiện tại chứ không phụ thuộc vào chuỗi các trạng thái trước đó, như được minh họa trong phương trình (1.1).

$$P(X_{t+1} = j | X_t = i) = P(i, j) \quad (1.1)$$

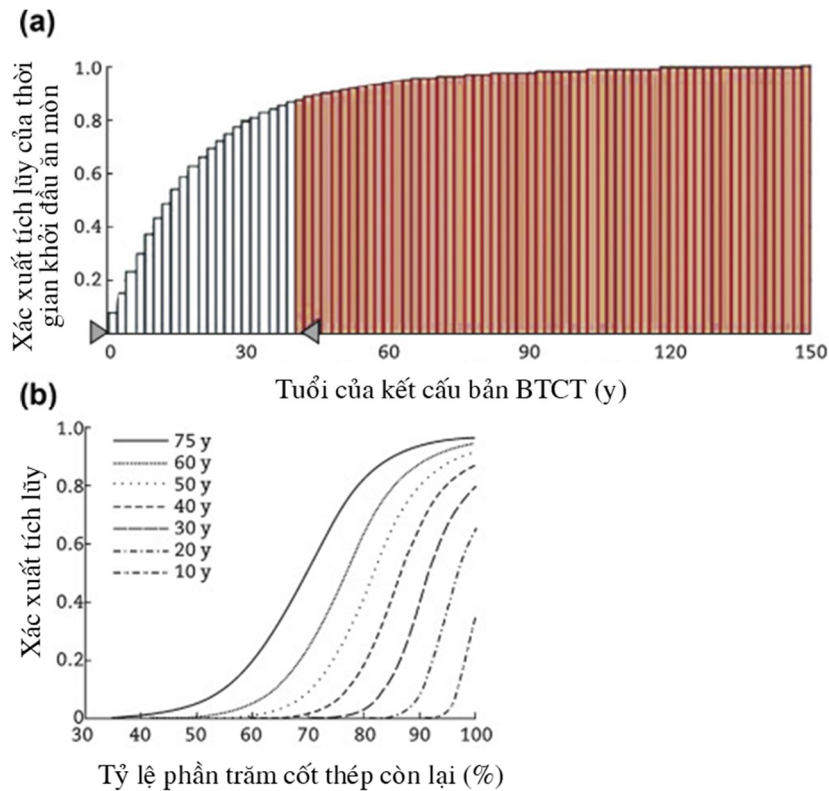
Trong đó, các giá trị được giả định bởi  $i$  và  $j$  được gọi là trạng thái điều kiện.

Các mô hình ngẫu nhiên coi quá trình xuống cấp của cầu là một hoặc nhiều biến ngẫu nhiên (tức là thời gian, trạng thái điều kiện của các kết cấu cầu) và do đó có thể nắm bắt được tính không chắc chắn và ngẫu nhiên của quá trình xuống cấp. Các mô hình ngẫu nhiên được phân thành 02 loại: (i) mô hình dựa trên trạng thái hoặc (ii) dựa trên thời gian. Đối với mô hình dựa trên trạng thái, quá trình suy giảm được mô hình hóa thông qua xác suất chuyển từ trạng thái này sang trạng thái khác trong một khoảng thời gian. Đối với mô hình dựa trên thời gian, khoảng thời gian mà một cấu kiện của cầu duy trì ở trạng thái điều kiện cụ thể được mô hình hóa như một biến ngẫu nhiên sử dụng các phân phối xác suất, chẳng hạn như phân phối Weibull, phân phối Gamma, v.v., để mô tả quá trình hư hỏng (Kotze và cộng sự, 2015) [72].

### 1.5.3.3. Mô hình cơ học

Các mô hình cơ học khắc phục hạn chế của mô hình chuỗi Markov về khả năng liên kết phép đo định tính của trạng thái điều kiện với các tham số vật lý định lượng của cầu như tính chất vật liệu, điều kiện ứng suất, ứng xử kết cấu, v.v. Các tham số này là dữ liệu quan trọng để đánh giá khả năng kết cấu, có độ tin cậy đối với việc đánh giá cầu. Morcouc và cộng sự (2010) [90] đã minh họa một ví dụ về mô hình cơ học cho mặt cầu BTCT dựa trên mô hình bắt đầu và xác suất lan truyền ăn mòn. **Hình 1.21(a)** (vùng bóng mờ giữa các mũi tên) cho thấy xác suất bắt đầu ăn mòn là 86% sau 40 năm. **Hình 1.21(b)**

cho thấy xác suất tích lũy của phần trăm thép còn lại ở các năm khác nhau. Ví dụ, xác suất mất 30% thép (tức là 70% diện tích thép còn lại) được ước tính là 10% sau 50 năm, khoảng 25% sau 60 năm và 50% sau 75 năm. Barone và Frangopol (2014) [29] đã đề xuất một kỹ thuật tối ưu hóa đa mục tiêu liên quan đến độ tin cậy, rủi ro, nguy cơ và chi phí. Gần đây, Zambon và cộng sự (2019) [128] đã trình bày tổng quan chi tiết về sự ăn mòn do cacbonat hóa.



Hình 1.15. Xác suất bắt đầu ăn mòn và mô hình lan truyền (Morcoux et al., 2010)[90]

Ưu điểm và hạn chế của mô hình cơ học như sau:

- Ưu điểm:

i) Mô hình cơ học phù hợp để phân tích ở cấp độ dự án;

ii) Cung cấp dự đoán hư hỏng định lượng dựa trên độ tin cậy đối với các bộ phận của cầu.

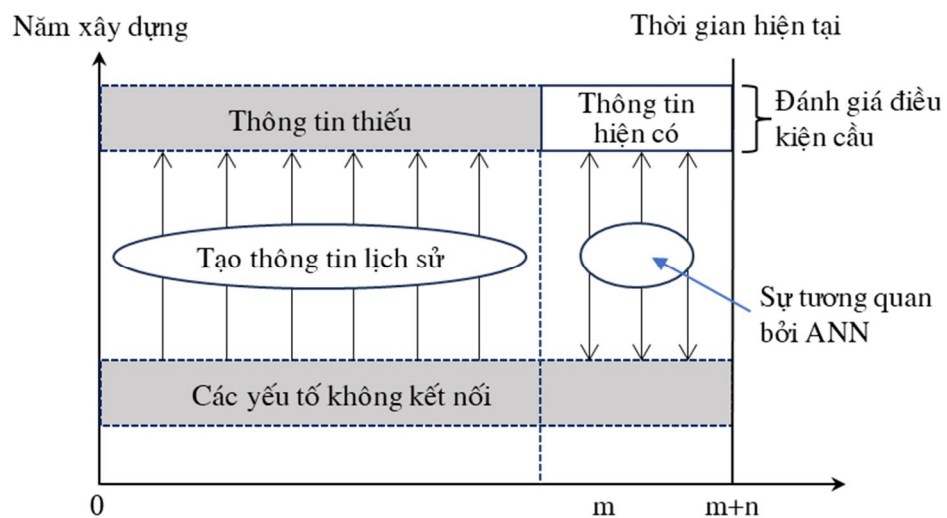
- Hạn chế:

i) Mô hình suy giảm này tốn kém về yêu cầu dữ liệu và mô hình hóa, không hiệu quả đối với mạng lưới cầu lớn;

ii) Các mô hình này không thể được tích hợp trực tiếp vào BMS do chi phí cao liên quan đến việc thu thập dữ liệu bằng các kỹ thuật kiểm tra tại chỗ có sẵn.

#### 1.5.3.4. Mô hình dựa trên trí tuệ nhân tạo

Các mô hình dựa trên trí tuệ nhân tạo bao gồm phương pháp tiếp cận tối đa hóa kỳ vọng (EM) (Mašović và Hajdin, 2014) [82], thuật toán tiến hóa, di truyền (Elbehairy và cộng sự., 2006) [58] và tối ưu hóa bầy đàn (Elbehairy, 2007) [57]. Các mô hình dựa trên AI cũng bao gồm các mô hình ANN như phương pháp hàm truyền ngược với bộ phân loại Perceptron nhiều lớp (BP-MLP) (Huang, 2010) [68] và Mô hình dự đoán ngược (BPM) (Lee và cộng sự, 2011) [75].

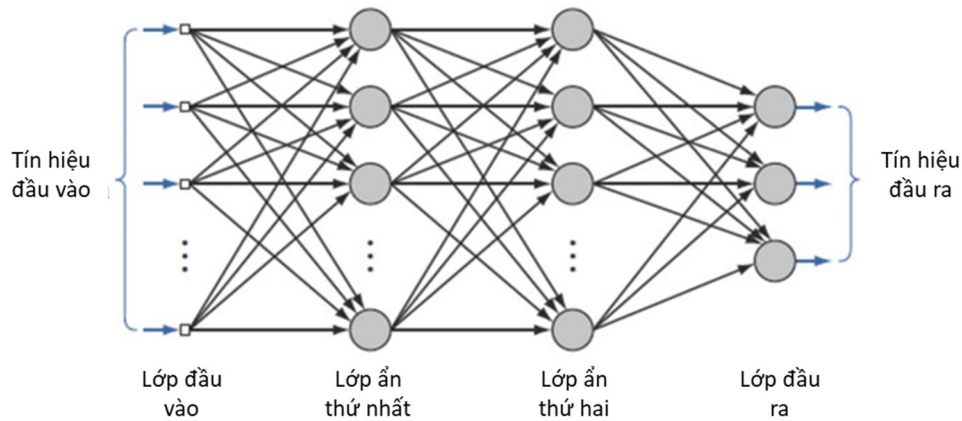


Hình 1.16. Mô hình dự đoán ngược (Lee và cộng sự, 2008) [74]

Mašović và Hajdin (2014) [82] đã mô hình hóa sự xuống cấp của các bộ phận dầm bê tông của cầu ở Serbia dựa trên chuỗi Markov. Các tác giả đã áp dụng thuật toán EM để điều kiện hóa từ dữ liệu của cầu ở Serbia để tính toán xác suất chuyển tiếp. Thuật toán EM cung cấp mô hình suy giảm hợp lý ngay cả khi hồ sơ kiểm tra bị hạn chế. Sử dụng BPM dựa trên ANN, có thể tạo ra các trạng thái điều kiện cầu lịch sử nhân tạo (Lee và cộng sự, 2008)[74]. Bu và cộng sự (2015) [36] đã phát triển một mô hình kết hợp cả mô hình dựa trên thời gian và trạng thái với phương pháp dự đoán ngược để dự đoán sự xuống cấp lâu dài của các bộ phận cầu.

ANN là các mô hình tính toán phát triển từ cảm hứng mạng nơ-ron sinh học. Có nhiều mô hình ANN khác nhau, trong đó, Multi-Layer Perceptron (MLP) được sử dụng rộng rãi, bao gồm ít nhất ba lớp: lớp đầu vào, lớp ẩn và lớp đầu ra. MLP sử dụng hàm truyền ngược (BP) để huấn luyện mạng nơ-ron (Winn, 2011) [125]. MLP là một mạng có tính kết nối cao gồm nhiều bộ xử lý tuyến tính hoặc phi tuyến tính đơn giản (nghĩa là các hàm) được phân phối song song (**Hình 1.23**). Mạng có thể học hỏi kinh nghiệm và

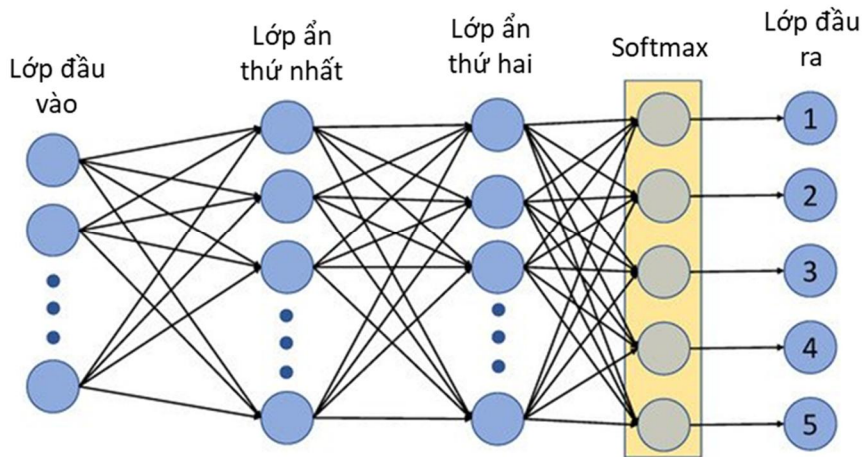
sau đó áp dụng kiến thức để thực hiện các phép tính phức tạp nhằm tìm giá trị cho dữ liệu bị thiếu. Mỗi đơn vị xử lý nhận nhiều đầu vào thông qua các kết nối có trọng số từ các nơ-ron ở lớp trước. Nó thực hiện các tính toán thích hợp và truyền đầu ra đến các đơn vị xử lý khác. Mạng thực hiện các hoạt động bằng cách truyền các thay đổi trong quá trình kích hoạt (nghĩa là trạng thái của nơ-ron được truyền qua chức năng kích hoạt) thông qua các kết nối có trọng số giữa các bộ xử lý (Winn, 2011) [125].



Hình 1.17. Perceptron nhiều lớp với 2 lớp ẩn (Haykin, 2014)[67].

ANN có được kiến thức thông qua giai đoạn đào tạo. Trong giai đoạn học, hệ thống sẽ học và xác định các tham số đầu vào và tham số đầu ra. Mỗi quan hệ được xác định bằng cách sử dụng cường độ kết nối giữa các nút được gọi là trọng số khớp nơ-ron. Các trọng số được sử dụng để lưu trữ kiến thức từ quá trình đào tạo. Khi đã biết trọng số và kiến thức được lưu trữ, mạng đã phát triển có thể được sử dụng để giải các bài toán cho một tập dữ liệu chưa biết (Hasan, 2015)[65].

ANN là một bộ xử lý phân tán song song khổng lồ bao gồm các đơn vị xử lý đơn giản, có thiên hướng lưu trữ kiến thức thực nghiệm và sẵn sàng sử dụng. ANN là một kỹ thuật thống kê phi tuyến có khả năng giải quyết các vấn đề phức tạp, có thể học và do đó, dễ tổng quát hóa. Tổng quát hóa đề cập đến thực tế là mạng nơ-ron tạo ra các đầu ra thích hợp cho các đầu vào không có trong quá trình đào tạo. Các khả năng xử lý thông tin này cho phép mạng nơ-ron giải quyết các vấn đề phức tạp. Mô hình dự đoán ANN có thể được thiết kế để dự đoán tình trạng của cầu. **Hình 1.24** mô tả một mạng nơ-ron phân loại đa lớp để phát triển mô hình dự đoán ANN.



Hình 1.18. Perceptron đa lớp với hai lớp ẩn và chức năng kích hoạt Softmax

Tất cả các nơ-ron trong các lớp ẩn đều sử dụng chức năng kích hoạt tiếp tuyến hypebol. Lớp đầu ra sử dụng hàm softmax (Phương trình (1.2)). Hồi quy softmax là hồi quy logistic chuẩn hóa giá trị đầu vào thành một vector tuân theo phân phối xác suất có tổng lên đến 1. Ngoài ra, vì nội dung không thể tự cải thiện, một hàm bổ sung đã được tạo để tính toán lại đầu ra vector xác suất, áp đặt 0 xác suất cho bất kỳ đầu ra xác suất nào cải thiện trạng thái điều kiện của công trình. Do đó, đầu ra là một vector  $[P(5), P(4), P(3), P(2), P(1)]$ , trình bày các trạng thái điều kiện xác suất trong tương lai 5, 4, 3, 2 và 1, tương ứng.

$$\sigma\left(\vec{z}\right)_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^K e^{z_j}} \quad (1.2)$$

Trong đó,  $\sigma$  là hàm softmax,  $\vec{z}$  là vector đầu vào,  $e^{z_i}$  là hàm mũ tiêu chuẩn cho mỗi phần tử của vector đầu vào,  $K$  là số lớp trong bộ phân loại đa lớp và  $e^{z_i}$  là hàm mũ tiêu chuẩn cho đầu ra vector.

Ưu điểm và hạn chế của các mô hình dựa trên AI như sau:

- Ưu điểm:

i) Kỹ thuật dựa trên ANN có thể tạo dữ liệu trạng thái điều kiện bị thiếu để lấp đầy khoảng trống do kiểm tra bất thường;

ii) Kỹ thuật CBR có thể được sử dụng để thực hiện phân tích “nếu như” cho các kịch bản bảo trì khác nhau bằng cách thay đổi các quyết định bảo trì và truy xuất các trường hợp có quyết định tương tự dựa trên dữ liệu bảo trì có sẵn.

- Hạn chế:

i) ANN chỉ là một cách tiếp cận để tạo ra dữ liệu bị thiếu một cách giả tạo và nó cần các công cụ bổ sung để sử dụng thông tin được tạo ra để mô hình hóa sự xuống cấp của cầu;

ii) việc thực hiện phương pháp CBR phụ thuộc vào quy mô của thư viện trường hợp và tính đầy đủ của mô tả trường hợp, thiết lập chính xác trọng số thuộc tính mang tính chủ quan và sự sẵn có của kiến thức để điều chỉnh trường hợp.

#### ***1.5.4. Tổng quan về mạng nơ-ron nhân tạo trong mô hình hóa sự xuống cấp của cầu***

Trí tuệ nhân tạo (AI) xuất phát từ các lĩnh vực khoa học đa dạng bổ sung cho nhau. Kỹ thuật AI chia thành hai loại là hệ thống chuyên gia và học máy (ML-Machine learning). Một số kỹ thuật học máy (ML) là Thuật toán di truyền, Logic mờ và Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN). Các mô hình hư hỏng và quản lý bảo trì là những mô hình rất phức tạp có nhiều biến số.

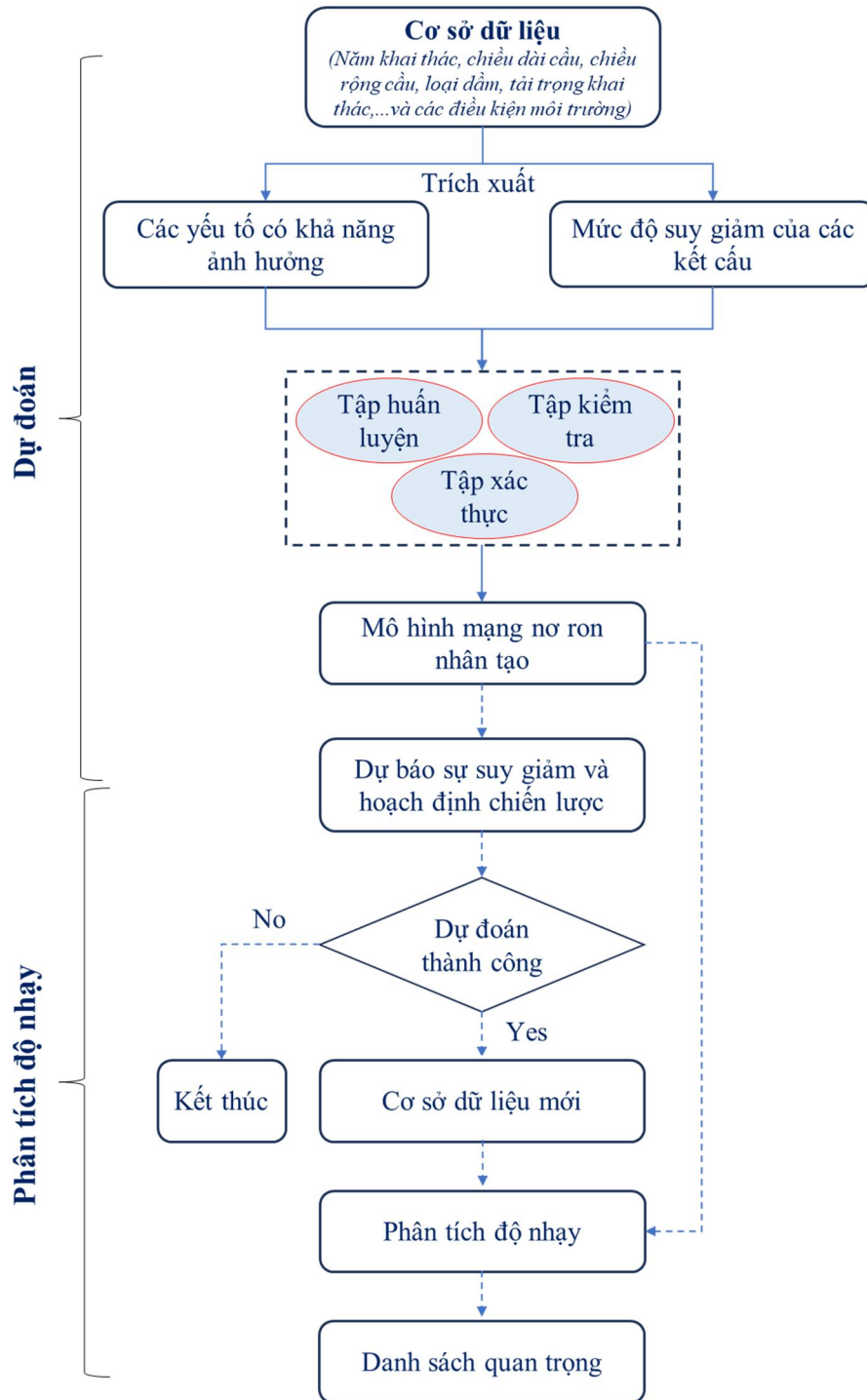
Đối với sự suy giảm cường độ của kết cấu BTCT có thể được coi là một trong những nguy cơ phụ thuộc vào các điều kiện, vị trí và loại kết cấu khác nhau. Mặc dù, hiện cũng có nhiều mô hình dự báo đáng tin cậy để ước tính tuổi thọ của kết cấu BTCT, nhưng cần rất nhiều điều kiện biên, làm tăng chi phí và thời gian nghiên cứu phân tích. Để khắc phục nhược điểm này, ANN đã được ứng dụng để thu được kết quả đáng tin cậy trong khi có thể giảm các bước phân tích, các công thức toán học phức tạp. Về nguyên tắc, ANN là một mạng phi tuyến thể hiện khả năng tổng quát hóa và quá trình tự học từ các ví dụ được xác định trước mà không cần có bất kỳ kiến thức nào về hệ thống toán học phức tạp. Do đó, để mô hình hóa một hệ thống vật lý dự đoán tuổi thọ của kết cấu BTCT với độ chính xác hợp lý và quy trình tính toán nhanh chóng, một mô hình ANN được đào tạo đã được sử dụng (Imam và cộng sự 2015)[69].

Hasan và cộng sự. (2013) [66] đã nghiên cứu và xây dựng thành công một mô hình dựa trên ANN để dự đoán tình trạng hư hỏng của cầu. Tham số đầu vào của mạng nơ-ron gồm tuổi của cây cầu, chiều dài, thời gian xây dựng, tải trọng và tỷ lệ tải trọng nặng. Trong quá trình phát triển này, 70% tham số đầu vào được chọn ngẫu nhiên mà không thay thế chúng để tạo ra mạng Perceptron nhiều lớp (MLP), 15% để kiểm tra mạng và 15% còn lại để xác thực.

Ali và cộng sự (2019) [20] đã nghiên cứu và xây dựng thành công mô hình tất định sự hư hỏng của ANN để điều tra sự suy giảm cường độ của các bộ phận cầu.

Về cơ bản, mô hình ANN áp dụng một số lớp xử lý toán học để “phân loại” dữ liệu

được cung cấp cho nó. Một mô hình ANN có thể bao gồm rất nhiều, thậm chí hàng triệu nơ-ron nhân tạo. Nó có một lớp đầu vào nhận nhiều loại thông tin và được đưa vào các đơn vị xử lý. Sau khi qua đơn vị đầu vào, thông tin sẽ đi vào một đơn vị khác ẩn trong mạng. Đơn vị ẩn sẽ chuyển đổi dữ liệu từ đơn vị đầu vào thành dạng mà đầu ra có thể hiểu được.



Hình 1.19. Sơ đồ phân tích dự báo sự suy giảm kết cấu sử dụng ANN.

Như vậy, cơ sở dữ liệu cho mạng là một vấn đề rất quan trọng giúp cho mạng có thể nhận biết chính xác sự làm việc của kết cấu với số liệu đơn giản nhất. Đặc trưng của ANN là khả năng tự học. Sau khi tự học, ANN có thể tính toán kết quả đầu ra tương ứng với bộ số liệu đầu vào mới. **Hình 1.25** mô tả sơ đồ phân tích sử dụng ANN, nó có thể được áp dụng để giải các bài toán có biến số lớn.

### 1.6. Định hướng nghiên cứu của Luận án

Từ các tổng quan tình hình nghiên cứu ở trên rút ra được một số nhận xét chính như sau:

- Tác nhân ảnh hưởng chính đến độ bền của kết cấu BTCT là do điều kiện môi trường và do tải trọng khai thác. Các nguyên nhân dẫn đến suy giảm khả năng chịu tải và tuổi thọ thể chia thành các nguyên nhân theo cơ chế vật lý, hóa học, sinh học, ăn mòn điện hóa, sự gia tăng tải trọng,... Các nguyên nhân thường xảy ra đồng thời, cùng lúc, đan xen làm cho kết cấu BTCT bị hư hỏng nhanh. Mặc dù đã có các hệ thống quản lý nhưng các vấn đề liên quan đến độ bền của kết cấu BTCT, khả năng chịu tải trọng thực tế và ước tính sự suy giảm kết cấu cũng chưa được tích hợp.

- Nhiều nghiên cứu tập trung đến ảnh hưởng của các yếu tố ăn mòn bê tông và cốt thép do carbonat hóa và xâm nhập ion clo đến khả năng chịu lực và tuổi thọ của cấu kiện, kết cấu công trình nhưng vẫn còn hạn chế khi các khu vực nghiên cứu đơn lẻ, chưa có nhiều số liệu để các nghiên cứu có đủ độ tin cậy cao. Các nghiên cứu thường dùng phương pháp toán học về giải tích để tính toán tuổi thọ sử dụng của kết cấu BTCT dưới tác động ăn mòn clorua. Từ đó thay đổi cấp phối bê tông và tiếp cận tính toán độ bền của kết cấu BTCT trong môi trường ăn mòn.

- Một số mô hình đánh giá tuổi thọ dựa theo xác suất, dựa vào dữ liệu quan trắc được. Việc dự báo tuổi thọ theo các mô hình này khá chặt chẽ và có độ tin cậy cao về lý thuyết. Tuy nhiên khi áp dụng thực tế gặp nhiều khó khăn vì đòi hỏi dữ liệu về các đặc trưng của vật liệu và kết cấu theo thời gian là rất khó để thực hiện.

- Một số phương pháp ngẫu nhiên, tắt định và mô hình AI đã được đề xuất áp dụng cho hệ thống quản lý cầu. Tuy nhiên, khoảng trống nghiên cứu vẫn tồn tại trong việc tìm các yếu tố ảnh hưởng đến mô hình suy giảm ngẫu nhiên của các bộ phận cầu. Quá trình Markov hoặc Gamma yêu cầu phân cụm dữ liệu để tính đến các thông số ảnh hưởng khác nhau.

- Phương pháp ANN là một trong những phương pháp khả thi. Tuy nhiên, ANN có hạn chế là một “hộp đen” không có mối quan hệ toán học rõ ràng giữa đầu vào và

đầu ra đối với người dùng.

Trong công việc nghiên cứu của luận án này đã cố gắng phát triển một khung đánh giá sử dụng các mô hình xuống cấp để hỗ trợ các kỹ sư cầu đường cho cơ quan quản lý vận tải đường bộ đưa ra các quyết định bảo trì chủ động với chi phí hiệu quả. Với định hướng nghiên cứu trên, luận án đã tiếp cận và tập trung nghiên cứu 3 vấn đề chính như sau:

- Một là nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến tuổi thọ, độ bền của công trình.
- Hai là đề xuất hướng dự đoán sự suy thoái của kết cấu dầm BTCT bằng cách thu thập và phân tích phản ứng kết cấu động theo thời gian thực của chúng.
- Ba là nghiên cứu dự đoán tuổi thọ công trình dựa trên phát triển mô hình suy thoái sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo (ANN). Trong đó trả lời câu hỏi:
  - + Các thông số cần thiết để cải thiện mô hình suy thoái cầu sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo là gì?
  - + Kiến trúc và triển khai mạng nơ-ron nhân tạo nào có thể cải thiện độ chính xác của dự đoán suy thoái cầu?

Luận án thiết lập mạch suy luận từ các chỉ số dao động kết cấu, thông qua sự suy giảm độ cứng tổng thể, đến đánh giá khả năng chịu tải và dự báo tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu BTCT. Cách tiếp cận này cho phép liên kết thông tin ở cấp độ kết cấu với các quá trình suy thoái ở cấp độ vật liệu và cốt thép. Trong nghiên cứu này, mối liên hệ giữa các tham số động lực học và quá trình xâm nhập ion clo, ăn mòn cốt thép được giả thiết là gián tiếp và mang tính khái quát, thông qua mức độ suy giảm độ cứng tổng thể của kết cấu. Các quá trình suy thoái vật liệu và đáp ứng động lực học có thể không hoàn toàn đồng biến và chịu ảnh hưởng của các yếu tố độc lập cũng như sai số trong quá trình đo đạc. Do đó, kết quả dự báo trong luận án phù hợp cho đánh giá xu hướng suy giảm tổng thể, trong khi việc xây dựng mô hình liên kết đa cấp có xét đến tương quan và bất định giữa các tham số là hướng nghiên cứu tiếp theo cần được phát triển.

### **1.7. Kết luận Chương 1**

Từ các nghiên cứu tổng quan, luận án đã tổng hợp và phân tích các nghiên cứu hiện có về cơ chế hư hỏng và quá trình suy giảm tuổi thọ của các kết cấu nhịp cầu bê tông cốt thép trong điều kiện khai thác. Một số nội dung đã được nghiên cứu như sau:

- Sự suy giảm kết cấu BTCT chủ yếu do clorua gây ra, trên cơ sở một quá trình phức tạp phụ thuộc vào nhiều yếu tố như: tính chất vật liệu, điều kiện thời tiết, môi trường, tải trọng, v.v. và được kiểm soát bởi các nguyên lý khuếch tán, điện hóa và cơ

học. Quá trình hư hỏng kết cấu BTCT là kết quả của sự tương tác giữa: (1) sự xâm nhập clorua, (2) ăn mòn cốt thép, (3) nứt bê tông và (4) ăn mòn-mỏi cốt thép.

- Các kỹ thuật AI đã được sử dụng và thử nghiệm để mô hình hóa tình trạng xuống cấp của cầu. Trong kỹ thuật AI, hầu hết các mô hình hiện có đều yêu cầu đủ thông tin để thiết lập mối quan hệ giữa tình trạng xuống cấp của cầu và các yếu tố có thể ảnh hưởng đến tình trạng cầu như số lượng lớn hồ sơ kiểm tra, lịch sử bảo trì, lưu lượng giao thông, môi trường và tải trọng cầu,... Tuy nhiên, những thông tin như vậy thường không có sẵn và đầy đủ, do đó rất khó sử dụng các mô hình suy thoái dựa trên AI để dự đoán tình trạng cầu trong tương lai với độ chính xác tương đối.

- Dự đoán tuổi thọ sử dụng cho các kết cấu BTCT là một lĩnh vực được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm. Tuổi thọ công trình kết cấu được coi là một quá trình phụ thuộc vào thời gian cho đến một thời điểm mà sau thời điểm đó việc khôi phục kết cấu trở nên tốn kém. Đối với các kết cấu BTCT tiếp xúc với môi trường ăn mòn như vùng biển, vấn đề ảnh hưởng của môi trường đến sự suy thoái và giảm độ bền của công trình vẫn chưa được quan tâm đúng mức. Vấn đề dự báo tuổi thọ sử dụng của kết cấu cầu chưa được đặt ra một cách đầy đủ trong khi thiết kế cũng như khi đánh giá công trình.

Do đó, luận án đã xác định các tác nhân môi trường chủ chốt như cacbonat hóa và sự xâm nhập clorua là nguyên nhân chính gây ăn mòn cốt thép, dẫn đến suy giảm khả năng chịu lực và tuổi thọ công trình. Các phương pháp dự đoán tuổi thọ đã được đề xuất và phân tích, tạo tiền đề lý thuyết cho các chương tiếp theo.

## **CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ VÀ DỰ ĐOÁN SUY GIẢM TUỔI THỌ CỦA KẾT CẤU NHỊP DÀM BTCT**

### **2.1. Cơ sở lý thuyết đánh giá khả năng chịu tải của kết cấu nhịp cầu BTCT và xu hướng ứng dụng trí tuệ nhân tạo**

#### **2.1.1. Cơ sở lý thuyết về ứng dụng trí tuệ nhân tạo**

Trong số các công cụ trí tuệ nhân tạo, mạng nơ-ron nhân tạo là mô hình phổ biến nhất. Nó dựa trên sự mô phỏng cấu trúc và cơ chế xử lý thông tin của hệ thống nơ-ron sinh học. Tương tự như bộ não con người, ANN có khả năng tích lũy tri thức qua quá trình huấn luyện và sử dụng các kinh nghiệm để dự đoán chính xác những dữ liệu mới, chưa biết (unseen data). Điểm ưu việt của ANN là khả năng tổng quát hóa và tự học hỏi từ các mẫu dữ liệu mà không cần xác định trước các công thức toán học phức tạp. Đặc biệt, việc ứng dụng ANN trong dự đoán tuổi thọ vật liệu do ăn mòn đang trở thành một hướng đi mới mang lại giá trị thực tiễn cao hơn các phương pháp truyền thống (Chojaczyk và cộng sự 2015)[42].

Để đánh giá sức chịu tải của kết cấu nhịp cầu BTCT theo hướng ứng dụng trí tuệ nhân tạo, tập dữ liệu cần thiết để xây dựng được ANN phải bao gồm dữ liệu, thông số điều tra của rất nhiều công trình cầu BTCT tại nước ta. Đây là vấn đề rất khó để thu thập được dữ liệu trong tình trạng quản lý cầu hiện nay, do đó đây là khó khăn đối với quá trình nghiên cứu và lập tập dữ liệu nghiên cứu. Như chúng ta đã đề cập đến ở Chương 1, việc xác định, lựa chọn các tham số đầu vào trong những yếu tố ảnh hưởng đóng một vai trò quan trọng trong đánh giá trạng thái làm việc của công trình cầu. Các yếu tố như thời gian khai thác, lưu lượng và tải trọng (thiết kế và khai thác), chiều dài nhịp, số lượng dầm có ảnh hưởng trực tiếp đến tình trạng hiện tại của kết cấu. Để xây dựng mô hình ANN, cần thiết lập bộ dữ liệu huấn luyện chuẩn hóa bao gồm các cặp đầu vào và đầu ra tương ứng. Quá trình lựa chọn biến đầu vào và đầu ra chủ yếu dựa trên cơ sở lý thuyết và kinh nghiệm chuyên môn để xác định các thông số. Bản thân mạng ANN cũng có khả năng tự xác định mức độ và tính hữu ích của từng biến số đối với kết quả dự báo. Vì vậy, ở giai đoạn đầu, việc xem xét toàn diện các biến số có khả năng ảnh hưởng đến công trình là thực sự cần thiết.

ANN hoạt động dựa trên việc xử lý dữ liệu số trong một phạm vi giới hạn xác định. Điều đó tạo ra vấn đề đáng kể khi gặp phải các tập dữ liệu nằm ngoài phạm vi như dữ liệu khuyết thiếu hoặc dữ liệu phi số. Tuy nhiên, để giải quyết vấn đề này, dựa trên nền tảng của ANN, nhiều phương pháp tiếp cận hiệu quả đã được phát triển. Đối với dữ liệu số thường được phân chia thành các khoảng phù hợp cho kiến trúc mạng. Các giá trị trung bình hoặc giá trị thống kê được thay thế cho các giá trị khuyết thiếu (missing values) thông qua việc sử dụng các biến khác đã được huấn luyện. Việc xử lý dữ liệu phi số (non-numerical data), phổ biến nhất là biến danh nghĩa, điển hình là giới tính (nam, nữ) thì phức tạp hơn. Mặc dù ANN có khả năng hỗ trợ mã hóa các biến danh nghĩa thành dạng số để biểu diễn, tuy nhiên những trường hợp biến danh định là một tập nhiều giá trị thì ANN làm việc tốt hơn.

Hiện nay, có một vài hướng dẫn nhằm xác định mối liên hệ giữa số lượng mẫu và cấu trúc mạng Neuron, phương pháp phổ biến là duy trì số lượng mẫu gấp 10 lần số kết nối trong mạng. Khi các biến số đầu vào tăng lên thì số lượng mẫu cũng cần tăng theo, trong thực tế có thể cần đến hàng trăm, hàng ngàn mẫu. Trường hợp dữ liệu đầu vào ít hơn thì có thể sử dụng mạng tuyến tính để tính toán.

Trong thực tiễn xuất hiện trường hợp dữ liệu bị hỏng do nhiễu, dữ liệu không đáng tin cậy hoặc bị xung đột với nhau, ANN có khả năng sử dụng các giá trị thống kê khác hoặc giá trị trung bình để xử lý dữ liệu bị mất, nó cũng có khả năng chịu được nhiễu nhưng trong một giới hạn nhất định. Trường hợp có giá trị vượt quá vùng giá trị thông thường thì ANN cũng chỉ xác định trong một ngưỡng nhất định. Đối với trường hợp này nên loại bỏ những giá trị vượt ngưỡng và coi nó là giá trị bị mất.

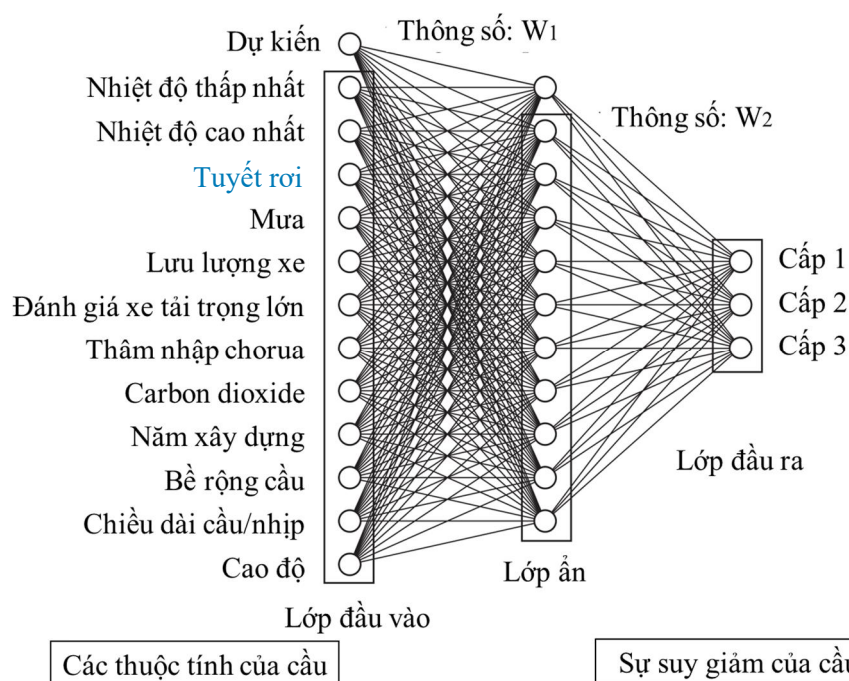
Một số phương pháp thu thập dữ liệu của ANN như sau:

- Lựa chọn dữ liệu có tác dụng.
- Lựa chọn các dữ liệu số và danh định mà ANN có thể xử lý trực tiếp, đồng thời chuyển hóa những dữ liệu dạng khác sang dạng này.

Mạng neuron Perceptron đa lớp (Multilayer Perceptron - MLP) là một trong những mô hình được ứng dụng phổ biến nhất trong thực tế. Để tối ưu hóa hiệu suất của mạng cần quan tâm đến 3 yếu tố quan trọng bao gồm chuẩn hóa dữ liệu đầu vào, kiểm soát

vấn đề học chưa đủ hoặc học quá và lựa chọn cấu trúc mạng. ANN vận hành như một hệ thống gồm các nút liên kết với nhau. Mỗi nút tiếp nhận đầu vào, thực hiện phép tính và truyền kết quả đến các đơn vị xử lý tiếp theo. Đặc tính hoạt động độc lập của các nút cho phép thiết lập cấu trúc xử lý song song, giúp mạng tận dụng tối đa lợi thế về khả năng tính toán. Trong hệ thống này, các trọng số tại mỗi liên kết đóng vai trò bộ nhớ của mạng, chúng liên tục được cập nhật để tối ưu hóa khả năng dự báo. Nhờ cơ chế này, ANN có khả năng rút ngắn đáng kể thời gian tính toán trong khi vẫn duy trì sai số trong phạm vi cho phép.

ANN có thể được đào tạo để dự đoán kết quả đầu ra cho các tình huống đầu vào tương tự, đồng thời có thể tính toán với các hàm đa chiều, phi tuyến phức tạp mà không cần kiến thức cơ bản cũng như bản chất các mối quan hệ. Giảm đồ của mạng nơ-ron với kiến trúc truyền thẳng nhiều lớp được thể hiện trong **Hình 2.1**.



Hình 2.1. Cấu trúc của một mạng nơ-ron nhân tạo được sử dụng để dự đoán sự suy giảm của cầu (Pengyong, 2021) (<https://doi.org/10.1155/2021/4598337>)[87]

Khả năng tổng quát hóa của mạng ANN phụ thuộc chính vào tính đại diện của tập dữ liệu huấn luyện đồng thời cũng bị ảnh hưởng bởi các tham số như trọng số, độ lệch. Độ phức tạp của hàm cơ bản được thể hiện trong các mẫu huấn luyện (mối quan hệ thực giữa các đầu vào và đầu ra) và kiến trúc mạng được chọn. Do đó kết quả đầu ra một

ANN sẽ khác nhau với mỗi lần khởi tạo ngẫu nhiên. Như vậy để huấn luyện được mạng ANN có độ tin cậy cao cần phải lựa chọn các tham số mạng một cách tối ưu.

Trong **Hình 2.1**, mỗi nút tròn đại diện cho một nơ-ron và mũi tên đại diện cho luồng dữ liệu giữa chúng. Hệ thống được tổ chức thành 03 phân lớp: lớp đầu vào (input), lớp ẩn (hidden) và lớp đầu ra (output). Lớp đầu tiếp nhận dữ liệu từ nguồn bên ngoài. Lớp ẩn đóng vai trò trung gian, thực hiện các phép tính trên cơ sở thiết lập trọng số và hàm kích hoạt. Lớp đầu ra tổng hợp và cung cấp kết quả dự báo.

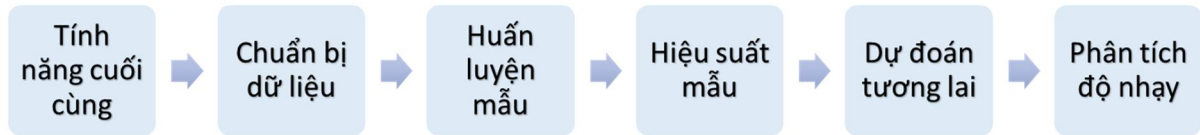
Nhiều công trình nghiên cứu trên thế giới đã chứng minh khả năng vượt trội của mạng ANN trong việc dự báo các chuỗi dữ liệu phức tạp. Đây là các tiền đề quan trọng để xây dựng các mô hình nhằm giải quyết các bài toán thực tiễn. Kỹ thuật này đã trở thành một phần không thể thiếu trong nền tảng công nghệ hiện đại, hỗ trợ đắc lực cho việc xử lý những vấn đề dự báo thách thức nhất trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật, bao gồm cả kỹ thuật xây dựng. Hiện nay, việc ứng dụng trí tuệ nhân tạo để đánh giá khả năng chịu tải của kết cấu nhịp cầu BTCT đang là hướng tiếp cận đầy triển vọng. Để đánh giá khả năng chịu tải của kết cấu nhịp cầu BTCT đòi hỏi phải đánh giá nhiều yếu tố liên quan trong một khoảng thời gian dài, tổng hợp dữ liệu dựa trên các giá trị dự đoán về tính năng của cầu. Do đó, yêu cầu về các mô hình dự báo có độ tin cậy cao trở nên cấp thiết. Khác với phương pháp truyền thống, ANN mang lại khả năng xử lý linh hoạt và chính xác hơn với các tổ hợp biến số phức tạp này.

### ***2.1.2. Xây dựng phương pháp đánh giá dựa trên trí tuệ nhân tạo***

Việc đánh giá sự suy giảm của kết cấu và dự báo tuổi thọ công trình để đưa ra kết luận bảo trì hợp lý thường khó chuẩn xác nên nhiều nghiên cứu tập trung vào phát triển phương pháp hợp lý nhất để mô hình hóa sự suy giảm. Hiện nay, hệ thống quản lý cầu (BMS) chưa tương thích để kết hợp mô hình suy thoái do dữ liệu chưa đầy đủ. Do đó, một số nhà nghiên cứu sử dụng ANN để dự đoán tuổi thọ sử dụng bằng cách tạo ra lịch sử tình trạng cầu từ hồ sơ kiểm tra cầu. Sau khi tạo ra dữ liệu lịch sử, ANN sử dụng độ trễ thời gian để dự báo hiệu năng sử dụng của các bộ phận kết cấu. Tuy nhiên, vẫn tồn tại mâu thuẫn giữa dữ liệu lịch sử ban đầu và dữ liệu do mô hình dự đoán ngược ANN tạo ra.

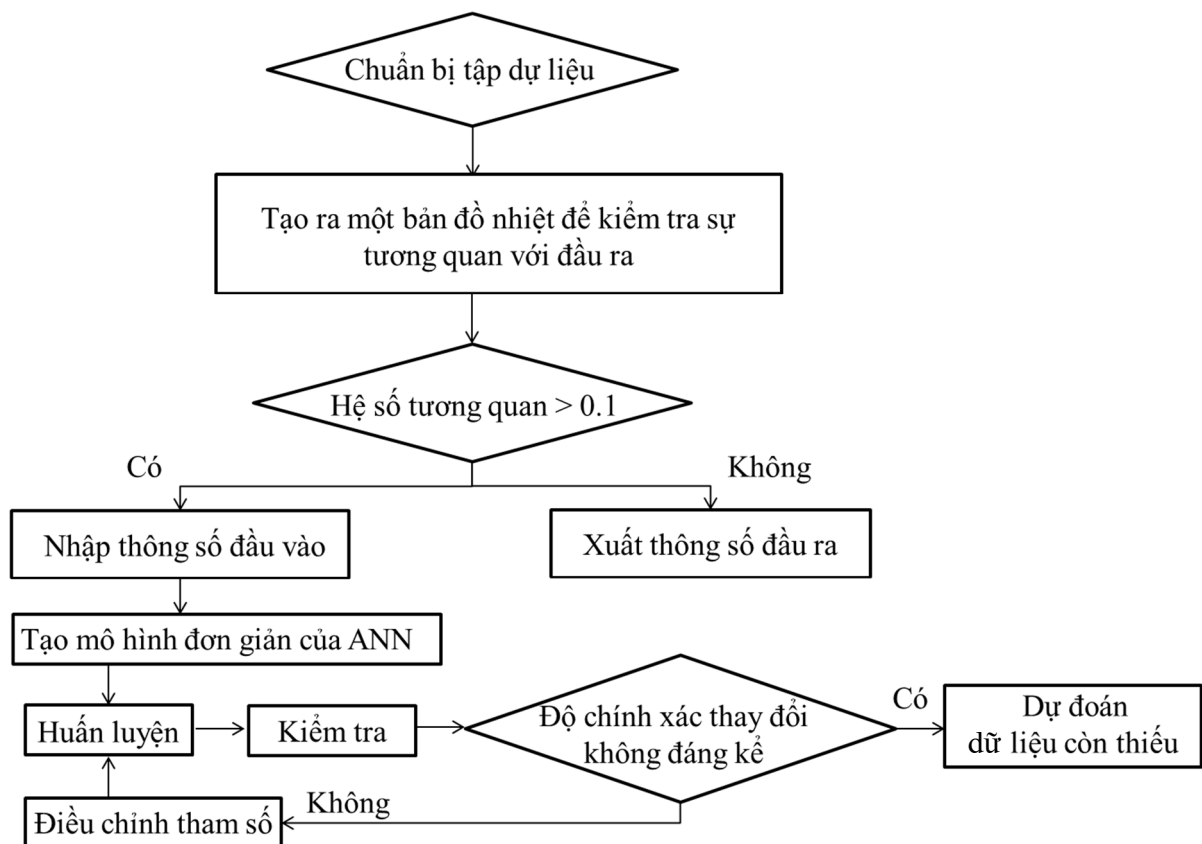
Thiết kế cho mô hình ANN tập trung vào và bao gồm các vấn đề như sau: a) lựa

chọn các biến đầu vào cuối cùng, b) Chuẩn bị dữ liệu, c) Huấn luyện mẫu, d) hiệu suất, đ) Phân tích độ nhạy và e) Dự đoán điều kiện trong tương lai. Các bước liên quan để thực hiện mô hình ANN được thể hiện trong **Hình 2.2**.



Hình 2.2. Sơ đồ cơ bản của mô hình ANN

Trong phần này, nghiên cứu giả thiết sức kháng của mặt cắt sẽ suy giảm sau thời gian khai thác nghĩa là so sánh kết quả từ tính toán lý thuyết với kết quả đo đạc. Các vết nứt có thể làm cho sức kháng mặt cắt thay đổi. Giá trị đo đạc yêu cầu phải chính xác để có thể đưa vào so sánh. Trong cách tiếp cận này, đặc điểm thông tin đã biết (đầu vào) và các trạng thái tương ứng (đầu ra) của hư hỏng kết cấu được lấy làm mẫu để huấn luyện. Các thông tin hư hỏng là mẫu huấn luyện thu được bằng thí nghiệm hoặc mô phỏng số cho kết cấu được phát hiện. Khi nơ-ron được huấn luyện tốt, chúng có thể làm căn cứ thực nghiệm đầu vào, giá trị đầu ra của nơ-ron được huấn luyện có thể đánh giá mức độ hư hỏng và vị trí hư hỏng của kết cấu.



Hình 2.3. Lưu đồ của mô hình dựa trên ANN để tìm dữ liệu còn thiếu.

Phương pháp được đề xuất gồm hai bước như sau:

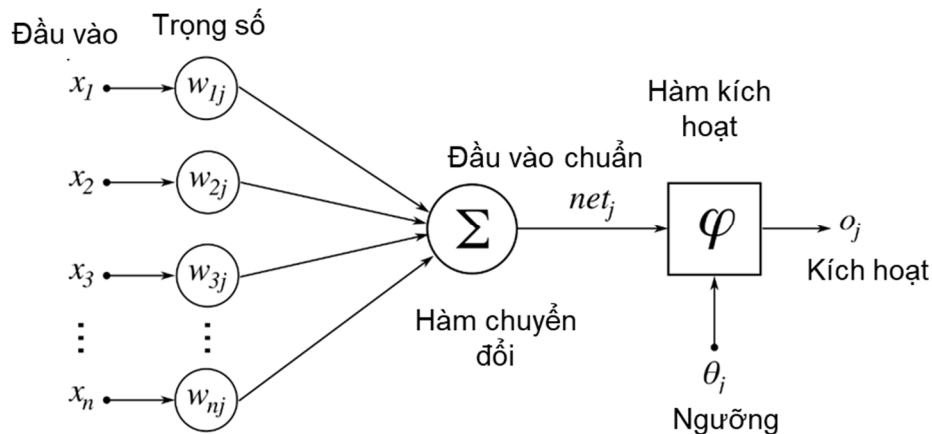
**Bước 1 - Nhận dạng hệ thống:** nhận dạng hệ thống nơ-ron được sử dụng để xác định các trạng thái hư hỏng và không hư hỏng của kết cấu.

**Bước 2 - Xác định hư hỏng kết cấu:** sử dụng các mạng nhận dạng hệ thống nơ-ron để tạo ra các phản ứng dao động tự do có cùng điều kiện ban đầu hoặc lực đẩy. So sánh các chu kỳ và biên độ dao động tự do của các trạng thái bị hư hỏng và không bị hư hỏng để đánh giá mức độ thay.

Cuối cùng, dữ liệu từ đặc trưng dao động của kết cấu bị hư hỏng được đo đạc thực nghiệm và tính toán các chỉ số đặc trưng hư hỏng tương ứng.

### 2.1.3. Thuộc tính và quá trình xử lý thông tin

ANN có nhiều loại và nhiều yếu tố để lựa chọn khi xây dựng mạng. Chúng có thể bao gồm từ kiến trúc đơn giản đến kiến trúc rất phức tạp. Có rất nhiều thiết kế ANN nhưng tất cả các mạng nơ-ron đều có các bước giống nhau để mô hình hóa, các bước này phải được tuân thủ để đảm bảo thiết kế phù hợp. Thu thập và xử lý trước dữ liệu là bước đầu tiên trong việc tạo mạng. Tiếp theo là thiết lập cấu hình mô hình mạng. Các bước huấn luyện và xác nhận là bước cuối cùng để thiết kế mạng nơ-ron nhân tạo trong nghiên cứu này.



Hình 2.4. Quá trình xử lý thông tin của một ANN.

**Inputs (dữ liệu vào):** Mỗi nút đầu vào tương ứng với 1 thuộc tính (attribute) của dữ liệu (patterns). Trong nghiên cứu này, mỗi nút là giá trị về kích thước hình học, cấu tạo và vật liệu để đánh giá tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu.

*Output (kết quả)*: Trong nghiên cứu này, kết quả là giá trị tuổi thọ dự báo của kết cấu nhịp cầu.

*Connection Weights (Trọng số liên kết)*: là thành phần then chốt trong cấu trúc ANN. Quá trình huấn luyện là quá trình tối ưu hóa trong đó các trọng số liên kết luôn được điều chỉnh trên cơ sở dữ liệu đầu vào. Mục tiêu là thiết lập ra các trọng số tối ưu và giảm thiểu sai số. Từ đó đạt được kết quả chính xác nhất có thể.

*Summation Function (hàm tổng)*: được sử dụng để tính tổng trọng số của tất cả các input được đưa vào mỗi nơ-ron được xác định theo công thức sau:

$$Y = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (2.1)$$

Trong đó:

- $X_i$  là giá trị của thông số đầu vào.
- $W_i$  là các trọng số tương ứng với các khớp thần kinh liên kết đến nơ-ron.

Hàm tổng đối với nhiều nơ-ron trong cùng một Layer:

$$Y_j = \sum_{i=1}^n X_i W_{ij} \quad (2.2)$$

Trong đó:

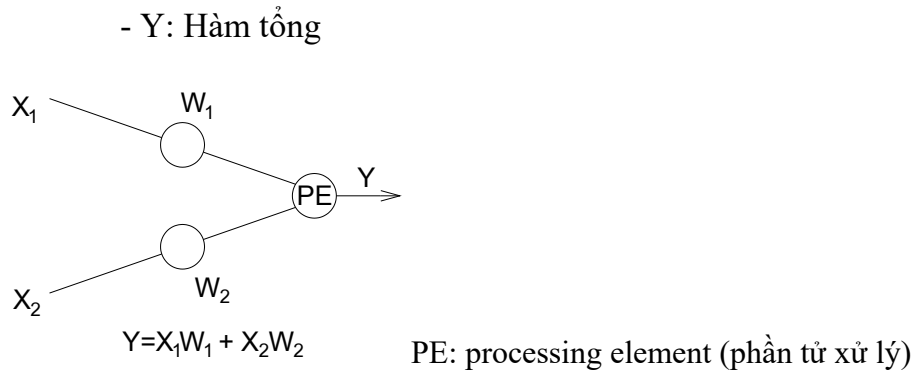
- $X_i$  là giá trị của các thông số đầu vào.
- $W_{ij}$  là các trọng số tương ứng với các khớp thần kinh liên kết đến nơ-ron có nhãn  $i$ .

*Transfer Function (hàm chuyển đổi)*

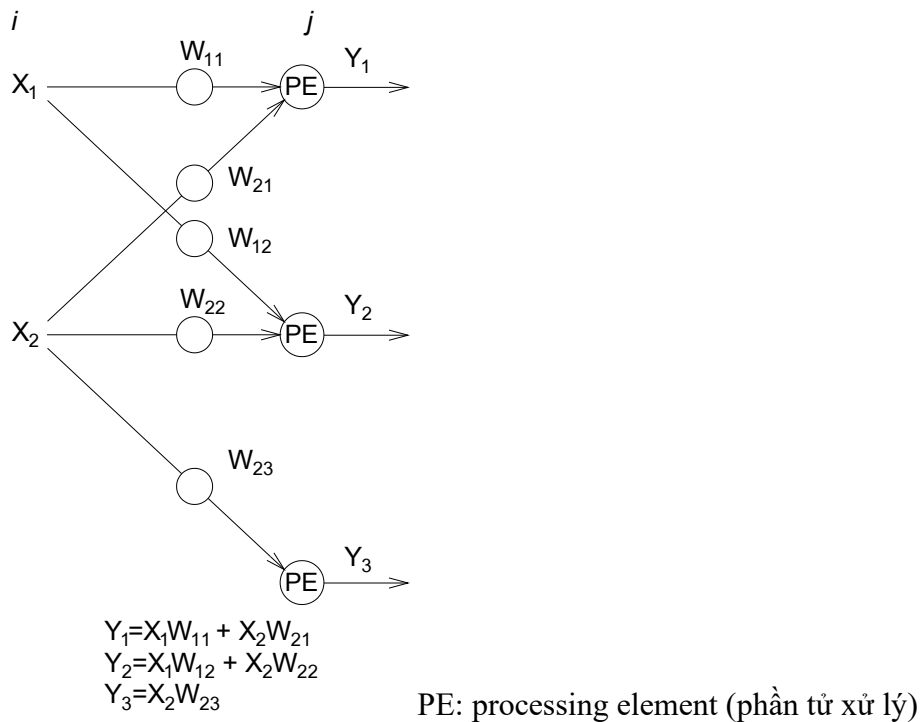
Hàm tổng của một nơ-ron đại diện cho khả năng kích hoạt của nơ-ron hay còn gọi là hàm kích hoạt bên trong (Internal Activation). Mối quan hệ giữa kích hoạt bên trong và kết quả (output) được thể hiện bằng hàm chuyển đổi (Transfer Function). Việc lựa chọn hàm chuyển đổi có tác động lớn đến kết quả của ANN. Hàm chuyển đổi phi tuyến được sử dụng trong ANN là hàm sigmoid (logical activation).

$$Y_T = 1 / (1 + e^{-Y}) \quad (2.3)$$

Trong đó: -  $Y_T$  : Hàm chuyển đổi



Hình 2.5. Mô tả hàm tổng của một nơ-ron



Hình 2.6. Mô tả hàm tổng của một và nhiều nơ-ron.

Hàm chuyển đổi được sử dụng để xử lý đầu ra trước khi chuyển đến lớp tiếp theo do đôi khi kết quả xử lý tại các nơ-ron rất lớn. Vì vậy, thay vì sử dụng hàm chuyển đổi có thể sử dụng giá trị ngưỡng (Threshold value) để kiểm soát các output trước khi chuyển các output này đến các layer tiếp theo. Nếu output nào đó nhỏ hơn ngưỡng thì sẽ không được chuyển đến lớp tiếp theo.

#### 2.1.4. Thiết lập trọng số

Phương pháp xác định các trọng số (gọi là thuật toán học/huấn luyện).

- Huấn luyện có giám sát (Supervised Learning).
- Huấn luyện không giám sát (Unsupervised Learning).

- Trọng số cố định.

Các phương pháp huấn luyện sẽ được áp dụng tương ứng với kiến trúc mạng, trong đó phương pháp huấn luyện có giám sát được áp dụng phổ biến nhất. Theo đó, các cặp giá trị đầu vào và đầu ra được mạng ANN cung cấp thông qua một tập huấn luyện từ các kết quả thực nghiệm hoặc theo dữ liệu lịch sử. ANN sẽ liên tục điều chỉnh các trọng số và ngưỡng để tối ưu hóa, giảm thiểu sai số. Sau khi đạt độ chính xác theo yêu cầu, ANN sẽ thiết lập được hàm xấp xỉ để thể hiện quan hệ giữa các biến số. Từ đó có thể thiết lập bổ sung các tín hiệu đầu vào chưa biết để đưa ra các dự báo có độ tin cậy cao hơn.

➤ **Huấn luyện có giám sát (Supervised Learning)**

- Véc tơ huấn luyện (mẫu) kèm véc tơ mục tiêu
- Thuật toán huấn luyện để điều chỉnh trọng số
- Thường dùng cho các bài toán phân loại, dự đoán
- Ví dụ: mạng lan truyền ngược (Backpropagation), mạng Perceptron

➤ **Huấn luyện không giám sát (Unsupervised Learning)**

- Tự tổ chức
- Nhóm các véc tơ đầu vào với nhau, không cần quan tâm đặc điểm của mỗi nhóm
- Không có véc tơ mục tiêu
- Tự tạo ra véc tơ đặc trưng của từng nhóm

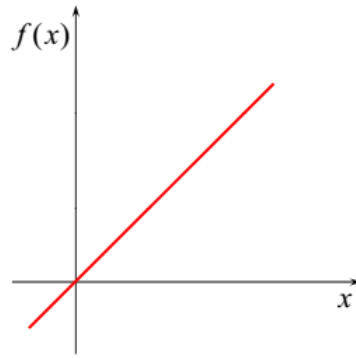
➤ **Trọng số cố định**

- Sử dụng trong trường hợp khó huấn luyện

### 2.1.5. Hàm kích hoạt

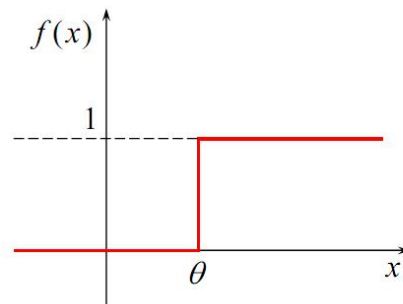
Hàm kích hoạt có bốn loại bao gồm:

- Hàm đồng nhất (tuyến tính)



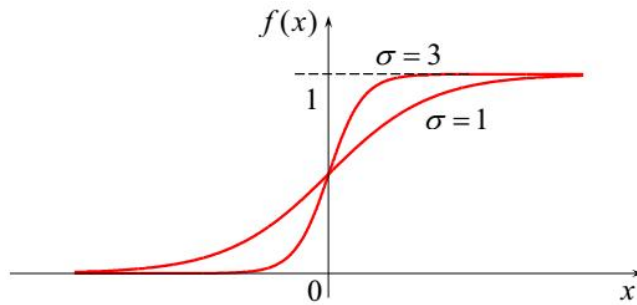
$$f(x) = x$$

- Hàm bước nhị phân



$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{nếu } x \geq \theta \\ 0 & \text{nếu } x < \theta \end{cases}$$

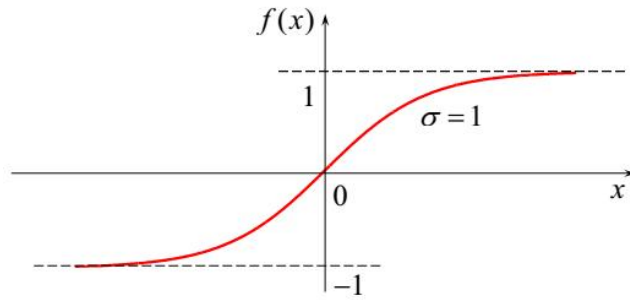
- Hàm sigmoid nhị phân



$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\sigma x}}$$

$$f'(x) = \sigma f(x)[1 - f(x)]$$

- Hàm sigmoid lưỡng cực



$$g(x) = 2f(x) - 1 = \frac{2}{1 + e^{-\sigma x}} - 1 = \frac{1 - e^{-\sigma x}}{1 + e^{-\sigma x}}$$

$$g'(x) = \frac{\sigma}{2} [1 + g(x)][1 - f(x)]$$

### 2.1.6. Phân loại mạng nơ-ron

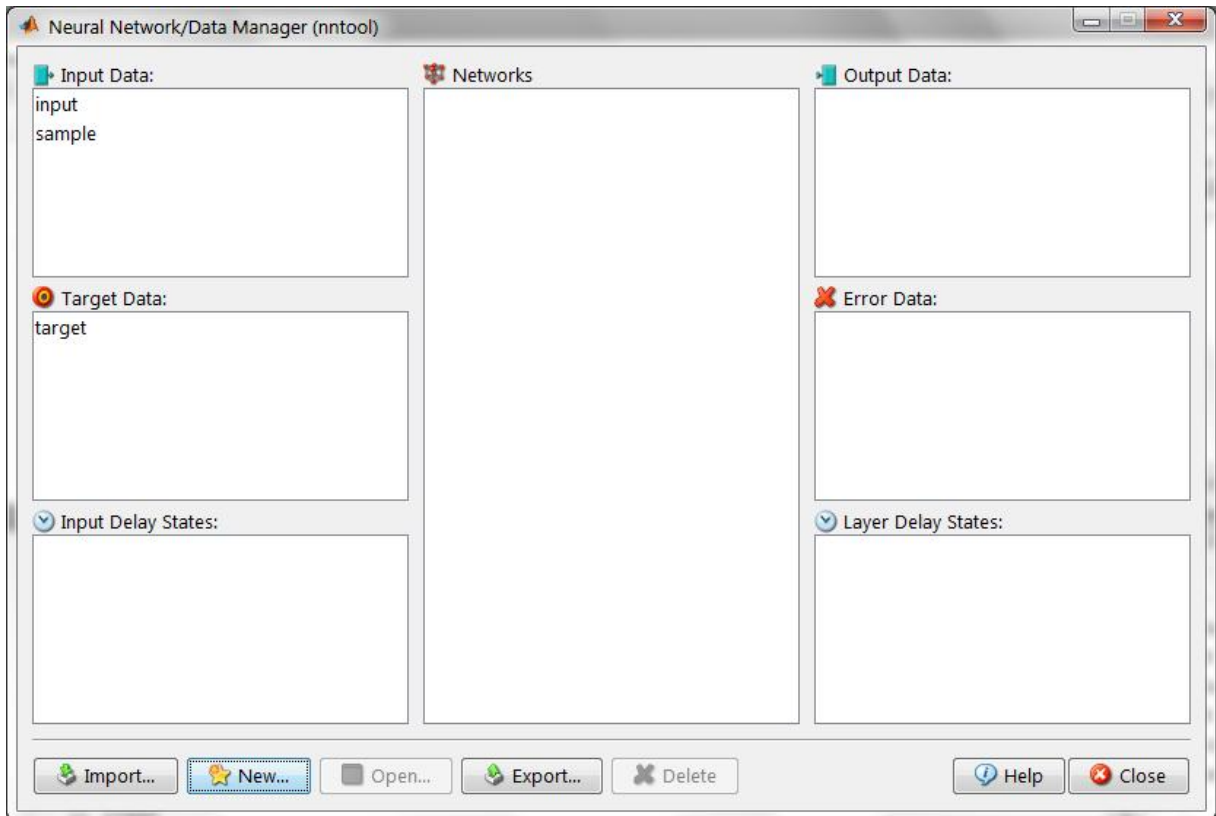
Có thể phân loại điển hình mạng nơ-ron như trong **Bảng 2.1**.

*Bảng 2.1. Phân loại mạng nơ-ron*

Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN)	- Truyền thẳng	- Nhiều lớp	- Backpropagation
		- Một lớp	- Perceptron - Adaline
	- Phản hồi	- Brain State-in Box	
		- Cohen Grossberg	
		- Máy Boltzmann	
		- Mc Culloch Pitts	
	- Tự tổ chức	- Hopfield	
		- Ánh xạ đặc trưng	
		- ART	

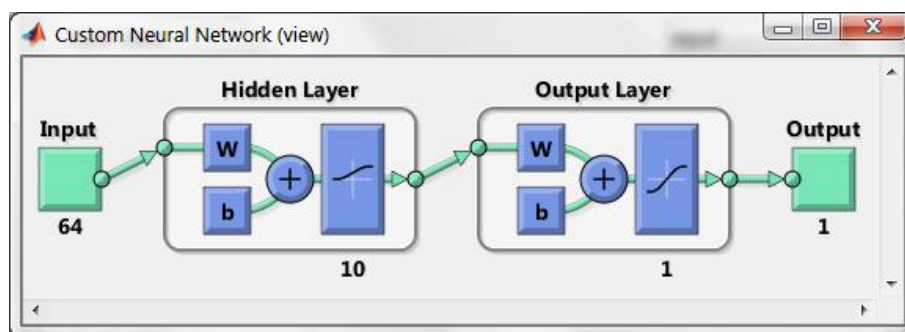
Trong Luận án này, NCS sử dụng mô hình ANN kết hợp với dữ liệu giả định và dữ liệu thu thập được của các công trình cầu theo thực nghiệm để xây dựng mô hình dự báo tuổi thọ còn lại của công trình cầu với các bước thực hiện như sau:

- Tạo mạng bằng cách khai báo các biến đầu vào, mục tiêu, mẫu huấn luyện.

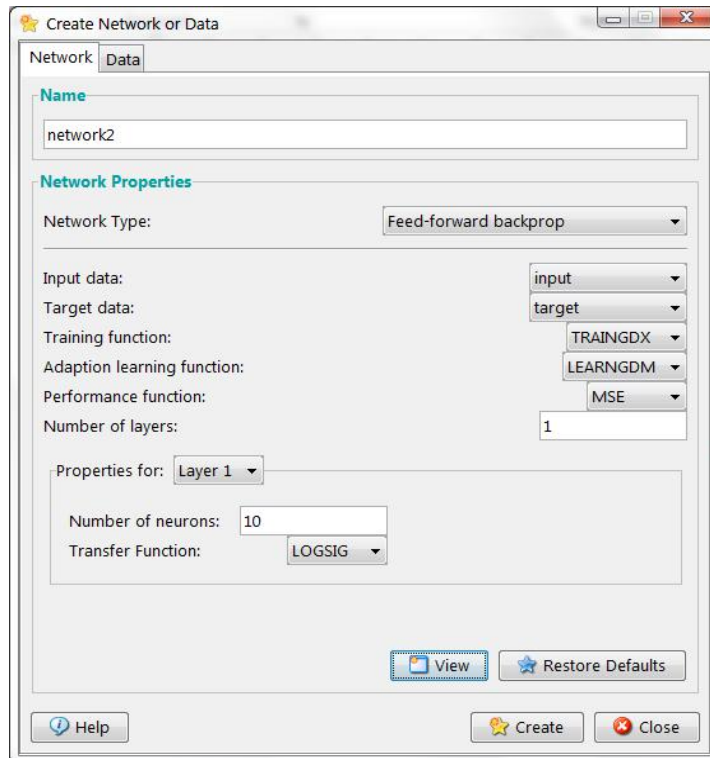


Hình 2.7. Tạo mạng, khai báo đầu vào, mục tiêu, mẫu huấn luyện

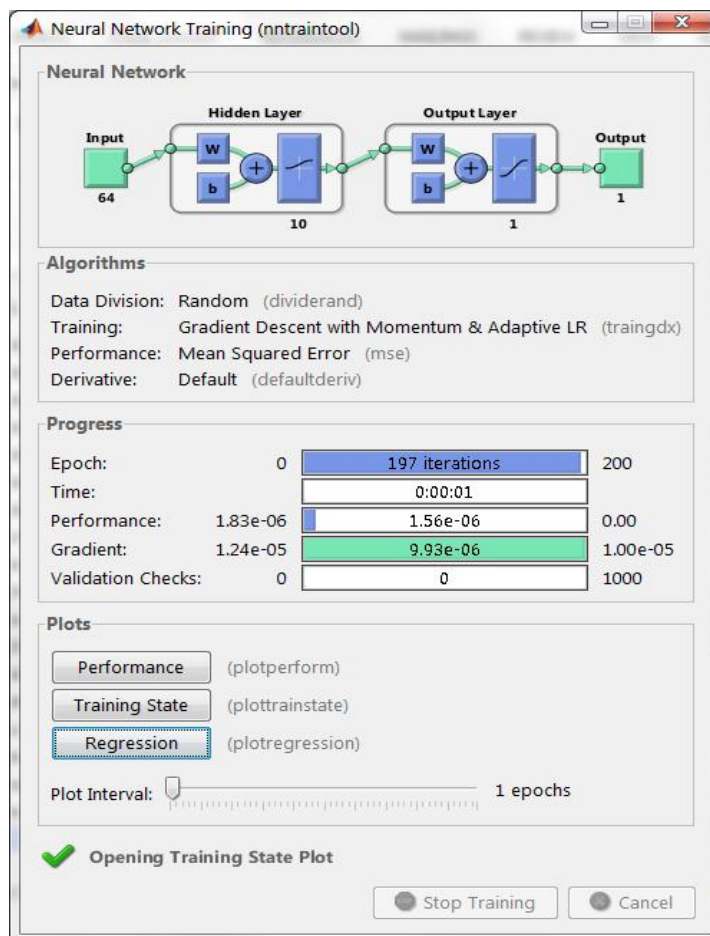
- Lựa chọn các thông số mạng, số lượng nơ-ron đầu vào, số lượng nơ-ron trong lớp ẩn và đầu ra.



Hình 2.8. Tạo mạng, khai báo đầu vào, mục tiêu, mẫu huấn luyện

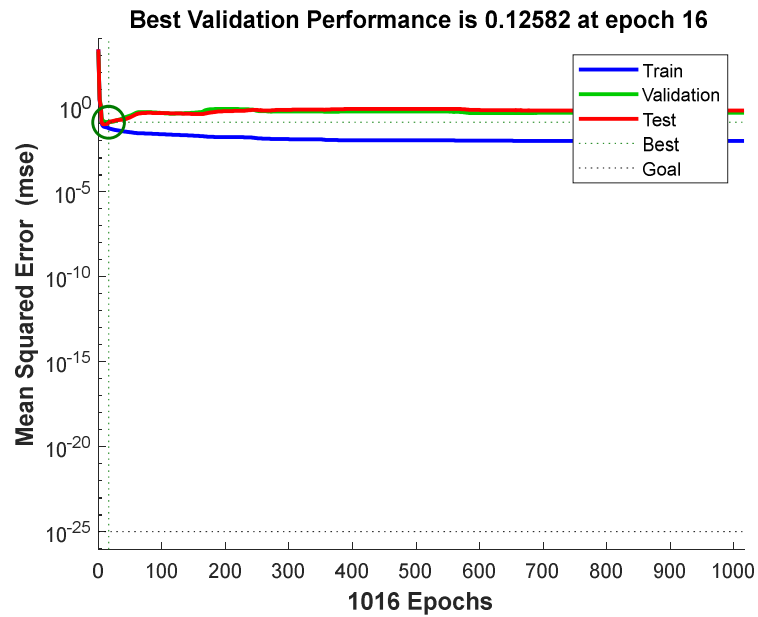


Hình 2.9. Khai báo các đặc trưng của mạng



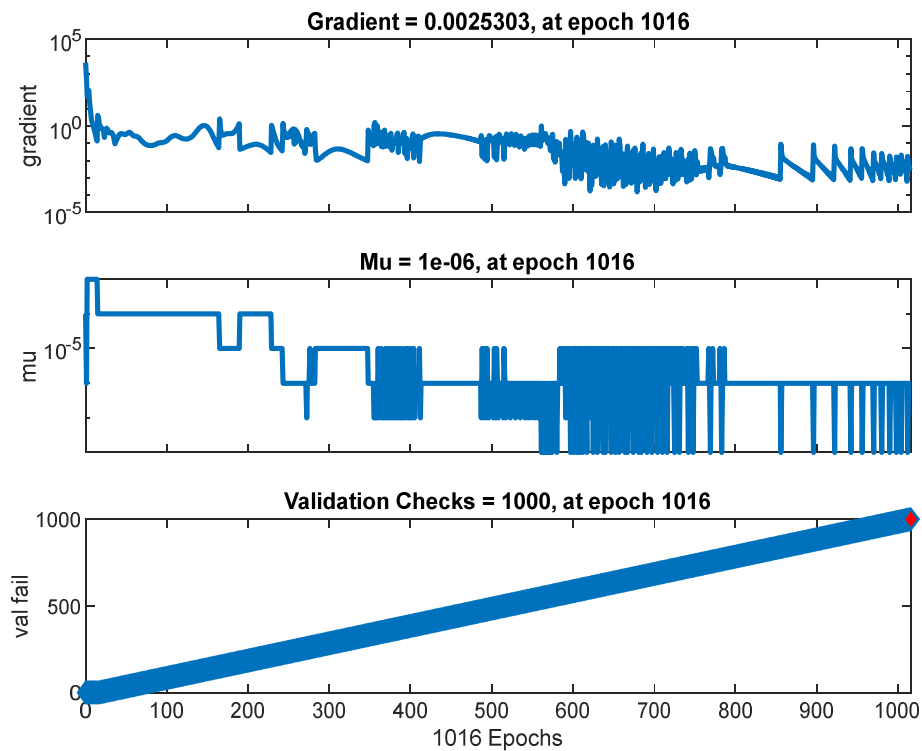
Hình 2.10. Quá trình xử lý huấn luyện

- Biểu đồ thực hiện.

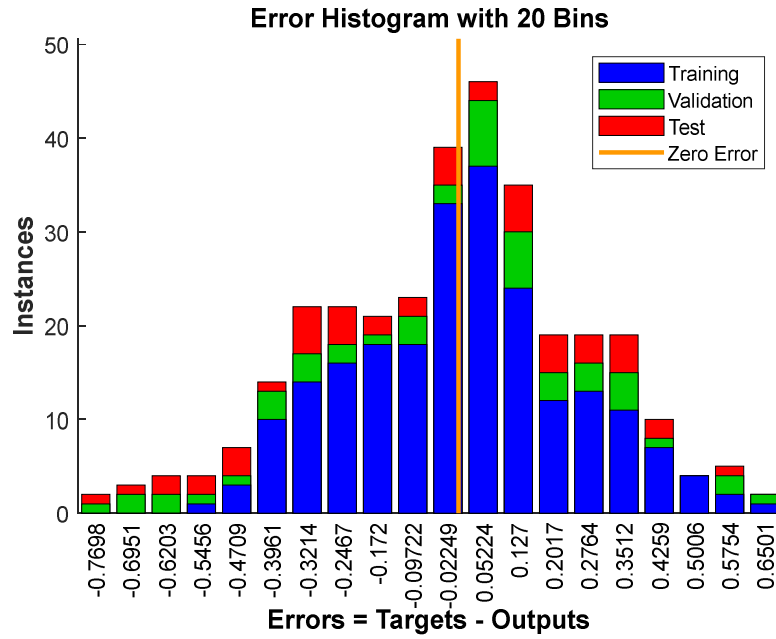


Hình 2.11.. Kết quả quá trình thực hiện

- Biểu đồ các trạng thái huấn luyện.

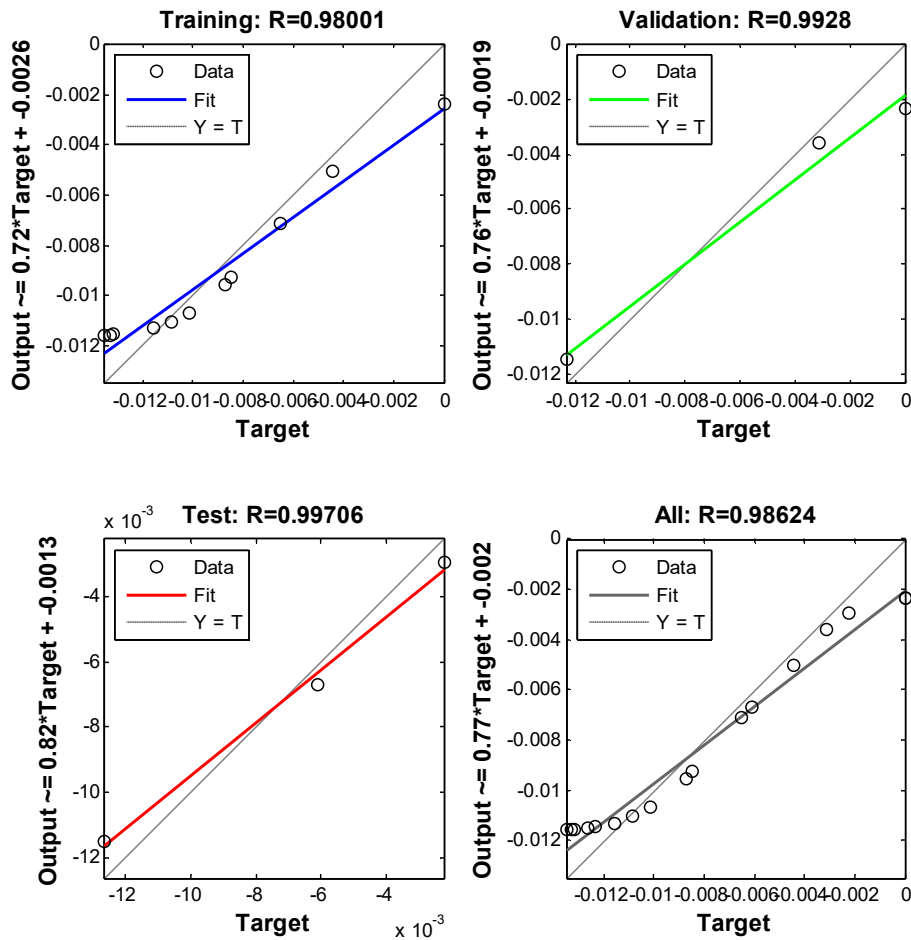


Hình 2.12. Các trạng thái huấn luyện



Hình 2.13. Minh họa lỗi trong quá trình phân tích

- Biểu đồ hồi quy (Regression).



Hình 2.14.. Biểu đồ hồi quy

## 2.2. Cơ sở lý thuyết xác định sức kháng của mặt cắt kết cấu nhịp cầu BTCT và các hiệu ứng tải trọng thực tế theo xu hướng trí tuệ nhân tạo

### 2.2.1. Khái niệm chung

Hiện nay, phương pháp sử dụng trí tuệ nhân tạo có thể thay thế phương pháp truyền thống để tính toán dự báo khả năng chịu tải của cầu như **Hình 2.15** gồm các bước:

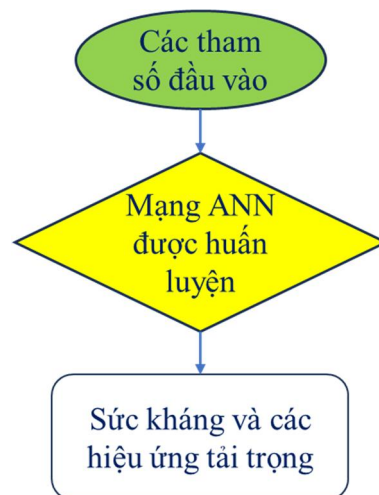
1. Thu thập dữ liệu về các bộ phận của kết cấu cầu; tải trọng tác động bao gồm cả tải trọng thiết kế và tải trọng đang khai thác.

2. Kiểm tra thông tin bằng ANN.

3. Đánh giá sức kháng của mặt cắt kết cấu nhịp cầu.

Cơ sở dữ liệu để thiết lập tham số đầu vào gồm (1) Chiều dài nhịp, (2) chiều cao dầm, (3) số lượng dầm chủ, (4) khoảng cách giữa các dầm chủ, (5) số lượng và phân bố dầm ngang, (6) góc chéo của cầu, (7) cường độ bê tông, (8) rỉ của cốt thép,...các tham số đầu ra là các giá trị về sức kháng, hiệu ứng tải trọng được tính toán từ mô hình cập nhật.

Với hướng này, khi đã có mạng ANN được huấn luyện thì việc tính toán các hiệu ứng tải hay sức kháng sẽ không còn phụ thuộc vào các công thức tính toán như đối với trường hợp theo độ cứng kết cấu (**Hình 2.15**).



Hình 2.15. Sơ đồ xác định sức kháng và hiệu ứng tải từ mạng ANN

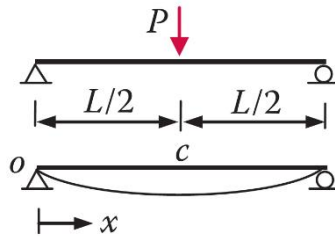
## 2.2.2. Phương pháp theo độ cứng kết cấu

### 2.2.2.1. Trường hợp dầm có EI là không đổi

Giả thiết dầm giản đơn, chiều dài L, tải trọng P tác dụng tại vị trí L/2; độ cứng EI như hình (Hình 2.16).

Độ võng dầm xác định theo công thức sau:

$$v = \iint \frac{M(x)}{EI} dx dx \quad (2.3)$$



Hình 2.16. Tải trọng tác dụng và độ võng tương ứng

Mô men ( $M(x)$ ) là hàm có dạng sau:

$$M(x) = \begin{cases} \frac{P}{2}x & \text{khi } 0 \leq x \leq L/2 \\ \frac{P}{2}(L-x) & \text{khi } L/2 \leq x \leq L \end{cases} \quad (2.4)$$

Thay (2.4) vào (2.3) có kết quả góc xoay và độ võng của dầm như sau:

$$\theta(x) = -\frac{P}{16EI}(L^2 - 4x^2), \quad 0 \leq x \leq L/2 \quad (2.5)$$

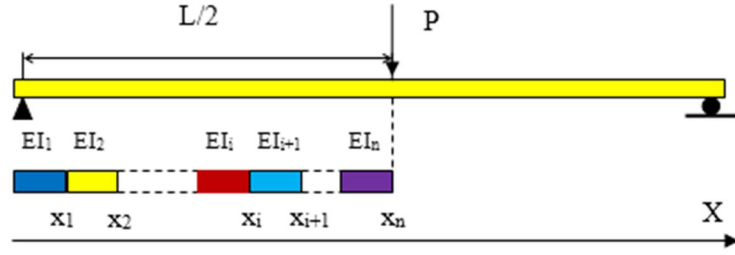
$$v(x) = -\frac{P}{48EI}(3L^2x - 4x^3), \quad 0 \leq x \leq L/2 \quad (2.6)$$

### 2.2.2.2. Trường hợp dầm có EI thay đổi

Trường hợp này đánh giá trên một nửa dầm có n đoạn có độ cứng là  $EI_1, EI_2, \dots, EI_n$  như Hình 2.17. Trên cơ sở lý thuyết như trên tính toán được góc xoay và chuyển vị đối với đoạn dầm thứ  $i$  như sau:

$$\theta^{(i)}(x) = \frac{P}{4EI_i}x^2 + C_1^{(i)}, \quad x_{i-1} \leq x \leq x_i \quad (2.7)$$

$$v^{(i)}(x) = \frac{P}{12EI_i} x^3 + C_1^{(i)} x + C_2^{(i)}, \quad x_{i-1} \leq x \leq x_i \quad (2.8)$$



Hình 2.17. Minh họa đoạn dầm có các độ cứng khác nhau

Đổi chiều điều kiện biên ta có  $C_2^{(1)} = 0$ ;  $C_1^{(n)} = -\frac{P}{4EI_n} \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2 = -\frac{P.L^2}{16EI_n}$  (giả sử

trường hợp hư hỏng đối xứng, trường hợp không đối xứng sẽ sử dụng điều kiện biên tại hai đầu dầm). Trong đó,  $C_1^{(i)}$ ,  $C_2^{(i)}$  là hằng số tích phân thứ nhất và thứ hai của đoạn dầm thứ  $i$  hình thành từ việc lấy tích phân ở công thức (2.3).

Để xác định và chuyển vị chuyển vị của cả dầm thì cần phải xác định được hệ số  $C_1^{(i)}$ ,  $C_2^{(i)}$  tương ứng. Từ mối quan hệ liên tục về chuyển vị và góc xoay ta có được các phương trình sau;

$$\theta^{(i)}(x_i) = \theta^{(i+1)}(x_i) \quad \text{và} \quad v^{(i)}(x_i) = v^{(i+1)}(x_i) \quad (2.9)$$

thay các phương trình trên vào nhận được

$$\theta^{(i)}(x_i) = \frac{P}{4EI_i} x_i^2 + C_1^{(i)} = \frac{P}{4EI_{i+1}} x_i^2 + C_1^{(i+1)} = \theta^{(i+1)}(x_i) \quad (2.10)$$

$$v^{(i)}(x_i) = \frac{P}{12EI_i} x_i^3 + C_1^{(i)} x_i + C_2^{(i)} = \frac{P}{12EI_{i+1}} x_i^3 + C_1^{(i+1)} x_i + C_2^{(i+1)} = v^{(i+1)}(x_i) \quad (2.11)$$

Từ phương trình trên rút ra được mối quan hệ giữa  $C_1^{(i)}$ ,  $C_2^{(i)}$  và  $C_1^{(i+1)}$ ,  $C_2^{(i+1)}$  tương ứng:

$$C_1^{(i)} = \frac{P}{4EI_{i+1}} x_i^2 - \frac{P}{4EI_i} x_i^2 + C_1^{(i+1)} \quad \text{với} \quad C_1^{(n)} = -\frac{P.L^2}{16EI_n} \quad (2.12)$$

qua đó xác định được:

$$C_2^{(i+1)} = \frac{P}{12EI_i} x_i^3 + C_1^{(i)} x_i - \left( \frac{P}{12EI_{i+1}} x_i^3 + C_1^{(i+1)} x_i \right) = \left( \frac{P}{6EI_{i+1}} x_i^3 - \frac{P}{6EI_i} x_i^3 \right) + C_2^{(i)} \quad \text{với} \quad C_2^{(1)} = 0 \quad (2.13)$$

qua đó xác định được  $C_2^{(i)}$ .

Như vậy:

$$C_1^{(i)} = \sum_{j=i}^{n-1} \left( \frac{P}{4EI_{j+1}} x_j^2 - \frac{P}{4EI_j} x_j^2 \right) + \left( -\frac{P.L^2}{16EI_n} \right) C_1^{(i)} \quad (2.14)$$

$$C_2^{(i)} = \sum_{j=2}^i \left( \frac{P}{6EI_j} x_{j-1}^3 - \frac{P}{6EI_{j-1}} x_{j-1}^3 \right) + 0 \quad (2.15)$$

Như vậy, trong thành phần hệ số tích phân  $C_1^{(i)}$ ,  $C_2^{(i)}$  bằng hằng số tích phân của trường hợp EI không đổi cộng thêm các cụm tương ứng  $\sum_{j=i}^{n-1} \left( \frac{P}{4EI_{j+1}} x_j^2 - \frac{P}{4EI_j} x_j^2 \right)$  và  $\sum_{j=2}^i \left( \frac{P}{6EI_j} x_{j-1}^3 - \frac{P}{6EI_{j-1}} x_{j-1}^3 \right)$

Từ kết quả trên cho thấy từ dữ liệu về độ võng và góc xoay trong trường hợp tĩnh tải có thể nhận ra sự khác biệt về độ cứng của các đoạn dầm. Từ đó có thể xây dựng được kho dữ liệu làm cơ sở cho việc sử dụng mạng nơ ron nhân tạo để đánh giá hư hỏng hay những thay đổi độ cứng (EI) trong dầm.

### 2.2.2.3. Sơ đồ mạng ANN

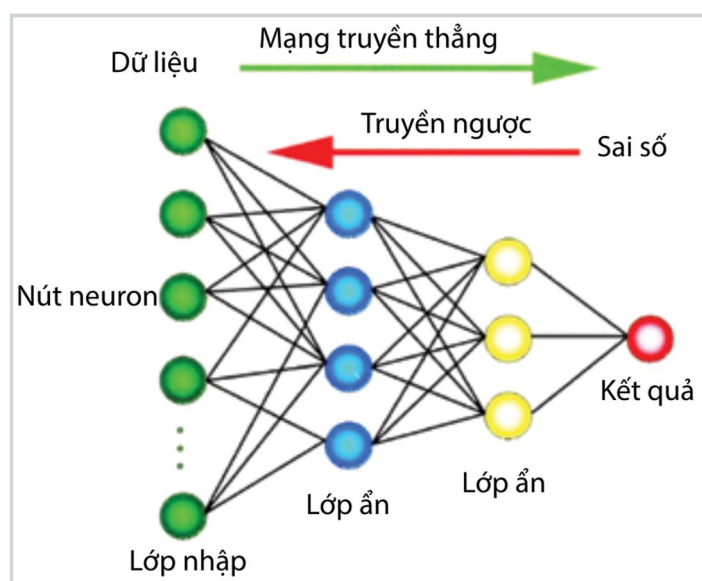
Thông thường để nhận ra các hư hỏng trong kết cấu cần có quá trình kiểm tra chi tiết. Để bắt đầu cho việc phát hiện hư hỏng sử dụng mạng nơ-ron cần phải chuẩn bị các số liệu, thông số đầu vào của dầm cầu, có thể là một công trình cầu thật hoặc loại dầm có kích thước điển hình. Bước tiếp theo là mô hình phần tử hữu hạn, nghiên cứu này dùng phần mềm Matlab để lập trình và đưa ra được chuyển vị của các nút dầm giản đơn mô hình; cũng có thể sử dụng các phần mềm phân tích kết cấu như Abaqus, Midas,... Mô hình PTHH dưới tác dụng của tải trọng, điểm đặt tải trọng ở các vị trí khác nhau trên kết cấu, thu thập được các số liệu từ phản ứng của dầm dưới tác dụng của tải trọng.

Để có thể thu được các phản ứng khác nhau, đa dạng về số liệu nghiên cứu, mức độ hư hỏng dầm được giả thiết bằng cách thay đổi giá trị độ cứng chống uốn EI của dầm. Ngoài ra, có thể thêm các điều kiện nhiễu loạn có ảnh hưởng lớn đến độ tin cậy của kết quả phát hiện hư hỏng.

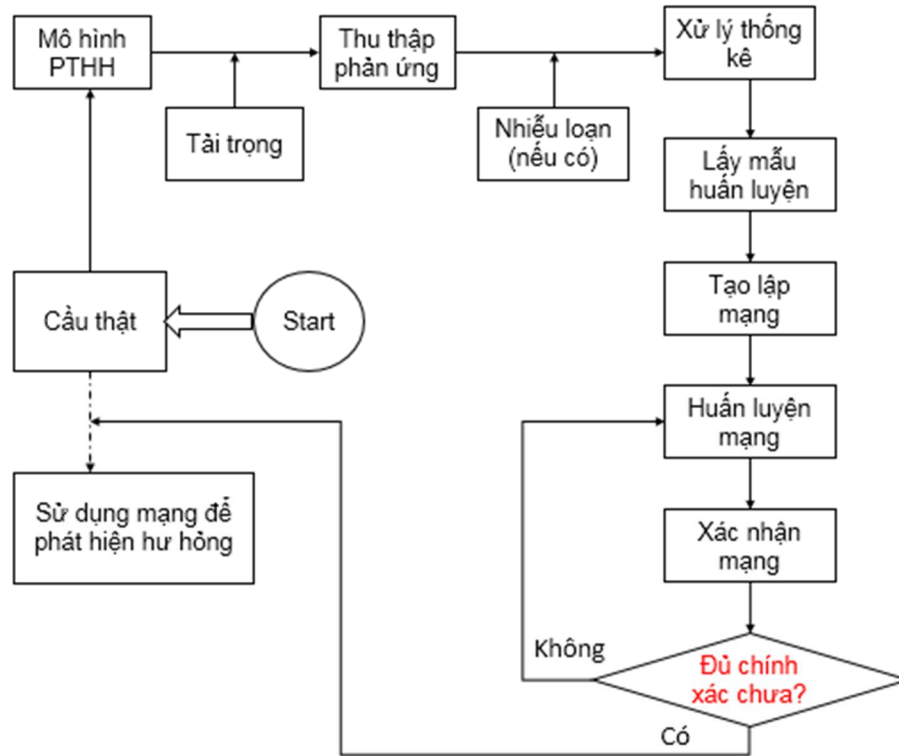
Vì vậy, để tăng tính chính xác của việc xác định, kiểm soát nhiễu loạn phép đo và

hiệu chỉnh mô hình PTHH 3D khi cần thiết, lưu ý rằng do thời gian hạn chế nên trong nghiên cứu này không đề cập đến nhiều loạn. Sau khi có các phản ứng của dầm, sẽ thu được một ngân hàng cơ sở dữ liệu phục vụ cho việc huấn luyện mạng. Bước tiếp theo rất quan trọng đó là xử lý thống kê và lấy các mẫu huấn luyện. Do cơ sở dữ liệu rất lớn, nên sẽ lấy những mẫu số liệu điển hình, với dầm giản đơn đó là các vị trí  $L/4$ ,  $L/2$  và  $3L/4$ . Các tập dữ liệu này sẽ là cơ sở để tạo lập mạng nơ-ron, phương pháp bình phương tối thiểu được lựa chọn để tìm giá trị cực tiểu, có nghĩa là sai số giữa giá trị đo được từ mô hình PTHH và giá trị từ cơ sở dữ liệu là nhỏ nhất thì sẽ xác định được vị trí hư hỏng của dầm. Khi các ANN là được huấn luyện tốt và có thể phát hiện tình trạng hư hỏng chính xác. Phản ứng đặc trưng dao động từ cầu thật cần được chuẩn bị để sử dụng trong mạng nơ-ron. Mô hình ANN dựa trên phương pháp luận riêng về nhận diện mẫu. Sơ đồ mạng nơ-ron bao gồm 3 tầng/lớp chính: “lớp đầu vào” tương ứng với các điều kiện có sẵn, “lớp ẩn” xác định các hoạt động không rõ ràng và liên quan tới điều kiện có sẵn do đó có thể tác động đến chúng, “lớp đầu ra” mô tả hoạt động kết quả từ hành vi của hai lớp đầu vào và lớp ẩn. Các lớp được mô tả cụ thể như sau:

- Lớp đầu vào: Được thiết lập bằng cách cung cấp các độ hư hỏng cho các phân tử.
- Lớp ẩn: Các kích bản hư hỏng ở vị trí khoảng  $L/4$ ,  $L/2$  và  $3L/4$ , nhằm mục đích huấn luyện.
- Lớp đầu ra: Xác định được vị trí và cấp độ hư hỏng



Hình 2.18. Biểu đồ huấn luyện mạng ANN



Hình 2.19. Sơ đồ đánh giá tải trọng thông qua ANN

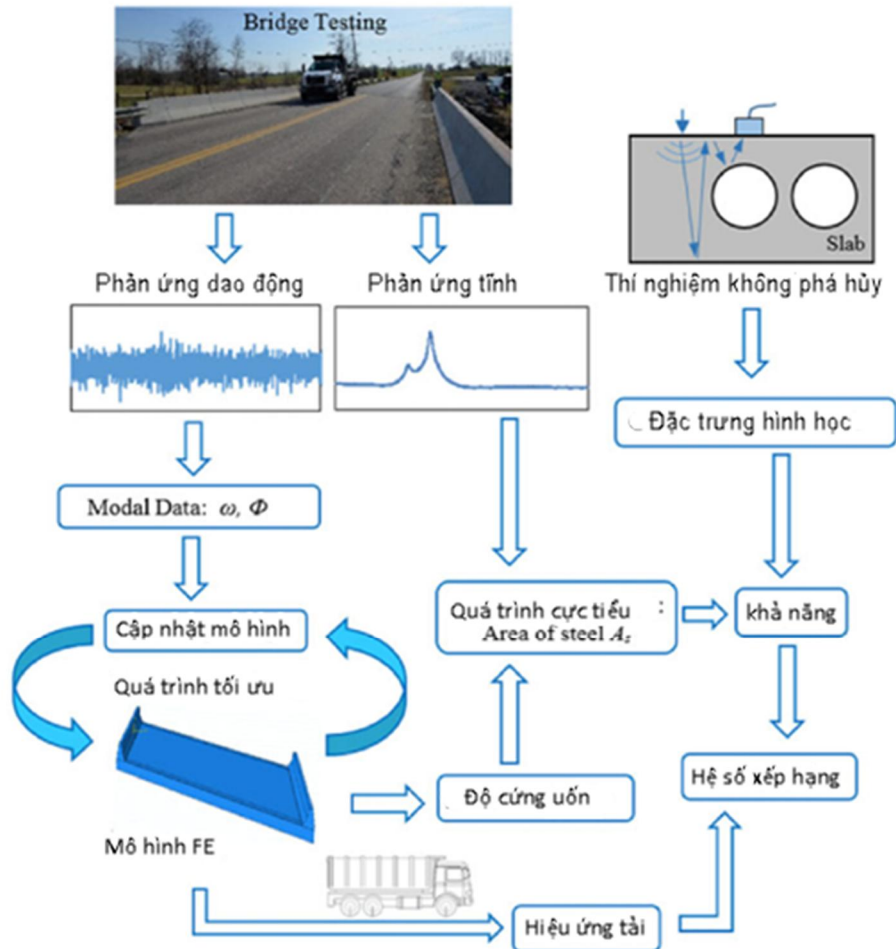
## 2.3. Cơ sở lý thuyết phân tích, xác định tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu BTCT

### 2.3.1. Đánh giá tuổi thọ cầu do gia tăng tải trọng khai thác

Đối với trường hợp đánh giá sự suy giảm tuổi thọ cầu do việc gia tăng tải trọng khai thác, sự xuống cấp của cầu ở một mức độ nào đó bị thúc đẩy nhanh bởi lưu lượng xe tải tăng lên. Sự tăng lên này sẽ bao gồm cả về số lượng xe tải và trọng lượng tổng xe tăng cao hơn. Tốc độ cao hơn cũng làm tăng tỷ lệ hư hỏng cầu, đáng kể nhất của hư hỏng cầu do xe tải lưu thông là hư hỏng mặt cầu, với tỷ lệ hư hỏng các bộ phận kết cấu khác ít đáng kể. Thiệt hại trên mặt cầu có thể có nhiều dạng, tuy nhiên, các cơ chế hư hỏng quan trọng nhất là nứt ngang và nứt dọc. Nứt mặt cầu liên quan đến tải trọng bánh xe nguy hại hơn đối với các kết cấu có tỷ lệ tải trọng tĩnh trên tổng tải trọng thấp hơn. Các nguyên nhân do xe quá trọng tải gây ra đối với cầu, đặc biệt là nứt mặt cầu, có liên quan đến các cơ chế hư hỏng cấp tiến khác một cách phức tạp. Bên cạnh đó, sự ăn mòn cốt thép ngày càng gia tăng ngày càng tăng xe quá tải và sự nứt vỡ của lớp bê tông bảo vệ do cốt thép bị ăn mòn.

Ngày nay hệ thống giám sát sức khỏe kết cấu cầu (SHM) đã áp dụng rộng rãi cho đối với công tác quản lý, bảo trì cầu. Hệ thống SHM được sử dụng để thu nhận và cung

cấp các dữ liệu cần thiết để xếp hạng tải trọng, vì xếp hạng tải trọng được chấp nhận rộng rãi thông qua chỉ số "sức khỏe" của kết cấu. Do đó, một phương pháp sử dụng dữ liệu từ hệ thống SHM kết hợp với các phương trình đánh giá tải trọng thông thường được nghiên cứu phát triển để tính toán các hệ số đánh giá liên tục trong suốt vòng đời của cầu.



Hình 2.20. Sơ đồ xác định hệ số xếp hạng tải trọng đối với cầu

Chuanzhi Dong và cộng sự (2020) [52] sử dụng kết quả thử nghiệm tải tĩnh được thực hiện để xác định hệ số phân phối tải trọng hoạt tải (DF) và hệ số xếp hạng tải trọng (RF) cũng như khả năng sử dụng bằng các giới hạn độ võng. Đặc điểm phương thức về tần số kết cấu và hình dạng mode và hệ số xung kích (IM) được xác định từ thử tải động cho các trường hợp tải trọng và tốc độ khác nhau, và mô hình phần tử hữu hạn (FE). DF và hệ số xếp hạng (RF) cũng được so sánh với những chỉ số được tính toán theo tiêu chuẩn AASHTO và mô hình FE. Kết quả cho thấy DF được tính toán theo tiêu chuẩn AASHTO cho kết quả thận trọng hơn khi so sánh với phương pháp thử nghiệm và

phương pháp FEM. Tương tự, hệ số xếp hạng tải trọng (RF) được tính toán theo tiêu chuẩn AASHTO mang lại kết quả thận trọng hơn so với các phương pháp FEM thực nghiệm sử dụng DF thực tế. Độ võng tối đa trong trường hợp tĩnh và trường hợp động được tìm thấy nằm trong giới hạn được tính bằng  $(L/800)$  cho trong tiêu chuẩn AASHTO. Các hệ số xung kích trong số tất cả các trường hợp thu được nhỏ hơn nhiều so với mức khuyến nghị của tiêu chuẩn AASHTO (33%). Các thuộc tính của phương thức thu được để theo dõi những thay đổi trong sự làm việc động do độ cứng và hiệu ứng biên cũng như để hiệu chuẩn mô hình phần tử hữu hạn. Mô hình FE đã được hiệu chỉnh của cầu cũng cho thấy sức chịu tải của cầu sau khi sửa chữa là đáp ứng.

### 2.3.2. Đánh giá tuổi thọ cầu qua điều kiện môi trường

Đối với trường hợp đánh giá tuổi thọ của công trình cầu BTCT theo điều kiện của môi trường, quá trình hư hại của các kết cấu BTCT theo Tuuti (1982) [117], quá trình gồm hai giai đoạn: Giai đoạn khởi đầu ăn mòn và giai đoạn lan truyền ăn mòn như công thức sau:

$$t = t_1 + t_2 \quad (2.16)$$

Trong đó:

- $t_1$  là giai đoạn khởi đầu ăn mòn;
- $t_2$  là giai đoạn lan truyền ăn mòn.

#### 2.3.2.1. Giai đoạn khởi đầu ăn mòn ( $t_1$ )

Giai đoạn khởi đầu ăn mòn là thời gian kể từ khi kết cấu bắt đầu tiếp xúc với ion clo cho đến khi ion clo xâm nhập vào bê tông tập trung trên bề mặt cốt thép đạt đến ngưỡng nồng độ gây ăn mòn. Độ dài của giai đoạn này phụ thuộc chủ yếu vào:

- 1) Nồng độ clo trên bề mặt bê tông;
- 2) Nhiệt độ, độ ẩm của môi trường;
- 3) Chiều dày lớp bảo vệ;
- 4) Chất lượng của bê tông bảo vệ thông qua hệ số khuếch tán clo;
- 5) Ngưỡng nồng độ clo gây ăn mòn của cốt thép;

Quá trình clo xâm nhập vào bê tông là một quá trình rất phức tạp, là tổng hợp của nhiều cơ chế xâm nhập khác nhau chẳng hạn như cơ chế khuếch tán, cơ chế hút thấm bề mặt, cơ chế thẩm thấu,... nhưng cơ chế lan truyền khuếch tán được chứng minh là

cơ chế quyết định.

### 2.3.2.2. Giai đoạn lan truyền ăn mòn ( $t_2$ )

Giai đoạn lan truyền ăn mòn là thời gian kể từ khi cốt thép bắt đầu bị ăn mòn tới khi ăn mòn gây nứt hoàn toàn bê tông bảo vệ hoặc tới khi diện tích tiết diện cốt thép bị giảm do ăn mòn dẫn đến kết cấu không còn thỏa mãn trạng thái giới hạn chịu lực. Khi ăn mòn xảy ra và phát triển, các sản phẩm ăn mòn là gỉ, thể tích tăng khoảng 2-6 lần thể tích của thép bị gỉ, tạo áp lực lên bê tông xung quanh và cuối cùng dẫn đến sự thiệt hại cho các kết cấu theo hình thức nứt (theo chiều dọc và ngang), vỡ và tách lớp của bê tông bảo vệ và mất diện tích tiết diện cốt thép gây nguy hiểm cho kết cấu.

Bê tông đã nứt làm cho các tác nhân ăn mòn khuếch tán nhanh hơn đến bề mặt cốt thép, tốc độ ăn mòn sẽ nhanh hơn gây nguy hiểm cho kết cấu. Vì vậy sự xuất hiện của vết nứt ăn mòn đầu tiên có thể là dấu hiệu quan trọng xác định điểm cuối của tuổi thọ sử dụng của kết cấu BTCT.

Độ dài của giai đoạn này phụ thuộc chủ yếu vào:

- 1) Mật độ dòng điện ăn mòn,
- 2) Chiều dày lớp bảo vệ,
- 3) Chất lượng cơ học của bê tông bảo vệ thông qua cường độ chịu kéo của bê tông, mô đun đàn hồi, hệ số từ biến.

Yếu tố thứ nhất, mật độ dòng điện ăn mòn phản ánh tốc độ của phản ứng ăn mòn điện hóa. Phản ứng ăn mòn tạo ra sản phẩm gỉ sinh ra ứng suất kéo trong bê tông bảo vệ. Mật độ dòng điện ăn mòn phụ thuộc vào chất lượng của bê tông (điện trở suất của bê tông), nồng độ clo tại bề mặt cốt thép, nhiệt độ và độ ẩm môi trường. Một yếu tố không thể thiếu trong quá trình trên là độ ẩm và ô xy cần được cung cấp.

Yếu tố thứ hai và thứ ba thể hiện sức kháng nứt của bê tông bảo vệ.

Việc áp dụng các mô hình trí tuệ nhân tạo nhằm xác định tuổi thọ khai thác của hệ thống cầu giao thông tại Việt Nam đang nhận được sự quan tâm lớn từ cộng đồng khoa học. Là một công cụ tính toán mô phỏng cơ chế hoạt động của não bộ, mạng nơ-ron nhân tạo có khả năng tự thích nghi và xử lý các mẫu dữ liệu phi tuyến phức tạp. Thông qua hệ thống các nút liên kết tương tác, mô hình này chuyển đổi các thông số đầu vào

thành những giá trị dự báo có độ tin cậy cao, hỗ trợ đắc lực cho công tác quản lý và bảo trì hạ tầng giao thông bền vững..

## **2.4. Kết luận Chương 2**

Trong chương này đã nghiên cứu các mô hình xuống cấp và dự đoán tuổi thọ kết cấu. Nghiên cứu cơ sở lý thuyết đánh giá sức chịu tải của kết cấu nhịp BTCT và xu hướng sử dụng trí tuệ nhân tạo trong việc thiết lập các dự báo. Tập trung mô tả các cơ sở lý thuyết xác định tuổi thọ của kết cấu, một trong những phương pháp mới, hiện đại là phương pháp dự đoán sử dụng mô hình mạng nơ ron nhân tạo ANN. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc ứng dụng mạng nơ ron nhân tạo ANN để dự đoán tuổi thọ sử dụng của kết cấu bê tông đang rất tiềm năng và nhiều triển vọng.

Nghiên cứu xây dựng mô hình xác định tuổi thọ sử dụng của kết cấu và mô hình suy thoái cầu dựa trên mô hình ANN. Thiết lập phương pháp xác định tuổi thọ còn lại của kết cấu nhịp BTCT dựa trên các tham số đầu vào, cấu trúc mạng lưới,....

Tuổi thọ công trình kết cấu là một quá trình cần được theo dõi và lựa chọn thời điểm phù hợp, mà sau thời điểm đó việc phục hồi trở nên rất tốn kém. Ngoài ra, sự xâm nhập của clorua được đánh giá là nguyên nhân quan trọng nhất gây ra sự xuống cấp của kết cấu BTCT. Trong luận án này, khả năng liên kết dữ liệu phức tạp của ANN là lý do lựa chọn cho các mô hình dự báo.

Chương này cũng thiết lập cơ sở lý thuyết để đánh giá khả năng chịu tải của kết cấu nhịp cầu BTCT, sử dụng AI (ANN) để định lượng sức kháng và phân tích tải trọng. Đồng thời, cơ sở lý thuyết dự đoán tuổi thọ còn lại cũng được phát triển làm cơ sở cho các mô hình dự báo.

## CHƯƠNG 3. PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ SỰ SUY GIẢM CỦA KẾT CẤU NHỊP CẦU BTCT BẰNG PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ DAO ĐỘNG

### 3.1. Giới thiệu chung

Tình trạng và chức năng của cầu xuống cấp theo thời gian do nhiều yếu tố, chẳng hạn như: giảm độ bền vật liệu, thay đổi phân bố tải trọng, đặc điểm giao thông cũng như các thành phần phi kết cấu khác. Các yếu tố này cũng liên quan đến phản ứng động của kết cấu cầu. Do đó, một phương pháp mới để ước tính xếp hạng tải trọng của cầu bằng cách thu thập và phân tích phản ứng động của kết cấu theo thời gian thực của chúng đã được nghiên cứu ở đây. Phương pháp này sẽ ước tính được khả năng chịu tải dầm cầu dạng giản đơn và có thể giúp tránh đánh giá quá thận trọng.

Trong các kết cấu BT DƯỠ, việc cáp dự ứng lực bị ăn mòn ở giai đoạn đầu dẫn đến các vết nứt nhỏ, suy giảm liên kết giữa các sợi cáp và bê tông sẽ làm suy giảm lực dự ứng lực. Ở giai đoạn nặng hơn, sự ăn mòn có thể dẫn đến đứt các sợi cáp [80, 120].

Kiểm tra trực quan là một phương pháp truyền thống để đánh giá tình trạng của kết cấu BTCT. Tuy nhiên, tồn tại một số hạn chế như khó tiếp cận các vị trí hư hỏng. Tương tự như vậy, vị trí thiệt hại cần phải được biết trước và quá trình ứng dụng tốn nhiều thời gian và dễ xảy ra lỗi do phân tích chủ quan từ con người [55]. Hơn nữa, quá trình ăn mòn khó được phát hiện bằng kiểm tra trực tiếp trước khi xuất hiện các vết nứt.

Ngoài việc kiểm tra trực tiếp, để đánh giá tình trạng của kết cấu BTCT, có thể xác định các thông số ăn mòn bằng bất kỳ phương pháp điện hóa nào [100]. Tuy nhiên, các phép đo như vậy thường bao trùm một diện tích thử nghiệm nhỏ hơn và thu được thông tin cục bộ về tình trạng cốt thép trong BT. Ngoài ra, các phương pháp này không áp dụng được cho BT DƯỠ do không thể kết nối điện bằng cáp dự ứng lực. Do đó, việc đánh giá kết cấu BTCT bằng các phương pháp phát hiện hư hỏng dựa trên sự thay đổi các thông số động học trở nên quan trọng [119].

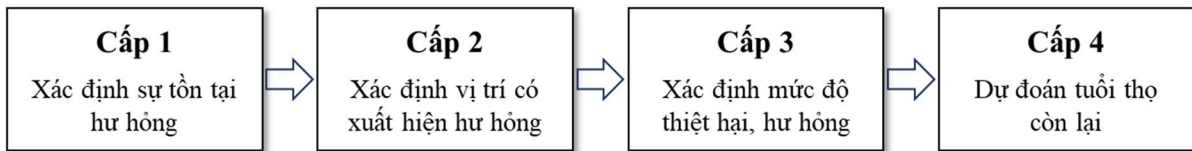
Mục đích của Chương này đưa ra quan điểm toàn diện về các tài liệu liên quan đến việc xác định mức độ ăn mòn của cốt thép dẫn đến suy giảm độ cứng dựa trên các thông số động. Đánh giá tải trọng lý thuyết hiện nay của cầu là một cách tiếp cận rất thận trọng

và đôi khi đề xuất năng lực chịu tải thấp hơn nhiều so với thực tế làm việc của kết cấu.

Sau đây là tổng quan về các phương pháp xác định hư hỏng căn cứ vào sự thay đổi các thông số động.

### 3.2. Phương pháp phát hiện suy giảm kết cấu bằng cách thay đổi tần số tự nhiên

Sự thay đổi của hàm số của độ cứng, khối lượng hoặc sự tiêu tán năng lượng của kết cấu là một trong những phương pháp phát hiện hư hỏng phổ biến nhất [51]. Mục tiêu là phát hiện hư hỏng ở giai đoạn sớm nhất có thể để tránh sự sụp đổ đột ngột của công trình đồng thời có thể ước tính được tuổi thọ còn lại của công trình [60, 71]. Quá trình phát hiện hư hỏng (**Hình 3.1**) bao gồm việc xác định sự xuất hiện của hư hỏng (cấp 1), vị trí hư hỏng (cấp 2), mức độ hư hỏng (cấp 3) và ước tính tuổi thọ còn lại của công trình (cấp 4) [105]. Đánh giá mở rộng về các phương pháp phát hiện hư hỏng dựa trên sự thay đổi của các tham số động khác nhau được đưa ra trong [51, 60, 71, 92, 106, 119].



Hình 3.1. Mô tả hệ thống xác định hư hỏng theo [20]

Sự xuất hiện hư hỏng dẫn đến độ cứng giảm và tần số riêng giảm [106, 108]. Việc áp dụng tần số tự nhiên để phát hiện hư hỏng đã được lên ý tưởng và đề xuất vào những năm 1970 [16]. Phương pháp này là một trong những phương pháp phổ biến nhất để xác định sự tồn tại của hư hỏng [86]. Tuy nhiên, nếu chỉ áp dụng tần số tự nhiên thì rất khó xác định được vị trí hư hỏng [106]. Ngoài ra, khi có hư hỏng đối xứng đối với kết cấu, không thể phân biệt được chính xác hư hỏng đó là gì với sự thay đổi tần số tự nhiên [111]. Tỷ số tần số tự nhiên có thể biểu thị ảnh hưởng tổng thể của hư hỏng đến độ cứng kết cấu [28] theo công thức sau:

$$\delta_i = \frac{(f_i^* - f_i)}{f} \times 100[\%] \quad (3.1)$$

Trong đó:  $\delta_i$  là chỉ số về việc thay đổi tần số tự nhiên đối với hình dạng mode thứ  $i$ ,  $f_i$  là tần số của hình dạng mode thứ  $i$  ở trạng thái không bị hư hại và  $f_i^*$  là tần số của hình dạng mode thứ  $i$  ở trạng thái bị hư hỏng. Nếu chúng ta quan sát số lượng tần số tự

nhiên lớn hơn, giá trị trung bình số học của chúng có thể được tính [28]:

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (3.2)$$

Trong đó:  $\delta_i$  biểu thị chỉ số thay đổi của tất cả tần số tự nhiên đối với n hình dạng mode.

Từ việc xem xét tài liệu ở trên, có thể khẳng định sự thay đổi tần số tự nhiên là một chỉ báo tin cậy trong việc phát hiện hư hỏng và rất hữu ích trong việc kiểm tra thường xuyên. Việc giám sát sức khỏe của cầu có thể đánh giá từ phản ứng động dựa trên dấu hiệu dao động dưới tác dụng động của tải trọng xe. Các đặc điểm của dữ liệu phản hồi động thường rất phức tạp để phân tích và rất khó sử dụng làm công cụ chẩn đoán liên quan đến tình trạng của kết cấu, điều này đôi khi yêu cầu các kỹ sư thực hiện các biện pháp và phương pháp khác nhau. Việc lựa chọn phương pháp phụ thuộc vào các yếu tố liên quan đến hiệu suất của kết cấu, chẳng hạn như: tuổi công trình, mức độ quan trọng, khả năng tiếp cận, lưu lượng giao thông, thời gian, chi phí, môi trường, v.v.

Đánh giá tình trạng cầu hiện tại bao gồm kiểm tra trực tiếp các bộ phận của cầu để đánh giá hiệu suất và tính toàn vẹn kết cấu của chúng. Kiểm tra trực quan là phương pháp chính và phổ biến nhất để đánh giá tình trạng cầu đã được sử dụng trong một thời gian khá dài. Những điều cơ bản của phương pháp này phụ thuộc vào các dấu hiệu hư hỏng và/hoặc sự cố đáng chú ý, chẳng hạn như: nứt, vỡ, lỏng lẻo kết nối, lệch, v.v. mà kết cấu đã trải qua trong suốt thời gian sử dụng. Một cây cầu đã được kiểm tra được đánh giá từ “0” (không đạt) đến “9” (xuất sắc) tùy thuộc vào điều kiện vật chất hiện tại của các bộ phận của nó. Tuy nhiên, việc kiểm tra trực quan riêng lẻ, tùy thuộc vào đánh giá kỹ thuật của người kiểm tra và các dấu hiệu hư hỏng có thể nhìn thấy, có thể không phát hiện ra những thiếu sót thực tế về kết cấu và/hoặc hư hỏng bên trong mà cây cầu có thể đã trải qua trong nhiều năm. Vì vậy, độ tin cậy của phương pháp này không được đảm bảo. Ngoài ra, việc đánh giá tình trạng dựa trên các phương pháp kiểm tra trực quan có mức độ chủ quan do thiếu khả năng tiếp cận các bộ phận quan trọng của cầu.

Cách tiếp cận để đạt được các mục tiêu đã nêu là thu thập phản ứng động của cầu dầm giản đơn dưới một phương tiện đang di chuyển với trọng lượng và tốc độ đã biết, phân tích dữ liệu phản hồi và xác định mối quan hệ giữa dữ liệu phản hồi và tải trọng

phương tiện để đánh giá tình trạng cầu và khả năng chịu tải vận hành an toàn. Giả thuyết rằng phản ứng động là một chỉ số nhạy cảm và quan trọng về tính toàn vẹn vật lý và tình trạng của một kết cấu. Các nhà nghiên cứu cũng nhận thấy rằng phản ứng tổng thể của một cây cầu đối với tải trọng phương tiện có liên quan trực tiếp đến tình trạng kết cấu tổng thể của nó. Do đó, điều kiện hiện tại và khả năng chịu tải của cầu giản đơn có thể được ước tính với độ chính xác chấp nhận được từ phân tích phản ứng động của nó, chẳng hạn như gia tốc. Việc đánh giá tình trạng của một cây cầu hiện được thực hiện bằng kiểm tra trực quan trong khi xếp hạng tải trọng được thực hiện trên lý thuyết bằng phần mềm, chẳng hạn như BARS và VIRTIS. Thông thường, những phương pháp này không phù hợp, hoặc có lẽ không hiệu quả, từ góc độ tổng thể về sự xuống cấp của cầu trong những năm qua do sự cố môi trường và xe cộ. Một cách tiếp cận mới để đánh giá tính toàn vẹn kết cấu tổng thể và khả năng chịu tải của một cây cầu được đề xuất ở đây, có thể rất nhanh chóng và tiết kiệm chi phí.

Nhiều thuật toán phát hiện hư hỏng do cộng đồng kỹ thuật kết cấu đề xuất coi những thay đổi về đặc điểm rung động toàn cầu của kết cấu là chỉ số hư hỏng và xuống cấp của cầu. Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá tình trạng và xếp hạng tải của cầu giản đơn sử dụng đầu đo gia tốc và biến dạng. Để theo đuổi những mục tiêu này, hai nhịp cầu giản đơn một nhịp ở chiều đi, một nhịp chiều về đã được trang bị hai bộ cảm biến để thu thập dữ liệu gia tốc thời gian thực từ mỗi cây cầu ở các tốc độ và trọng lượng khác nhau của xe tải.

Phần mềm ứng dụng được phát triển từ nghiên cứu này sẽ có thể nhanh chóng đánh giá tình trạng và tải trọng của cầu giản đơn một nhịp bằng cách thu thập phản ứng động theo thời gian thực của chúng. Kỹ thuật mới này về cơ bản có thể thay đổi cách tiếp cận lý thuyết hiện tại về đánh giá tình trạng cầu.

Các bước sau đây đã được thực hiện để hoàn thành việc đánh giá tình trạng cầu dựa trên phương pháp này:

1. Phát triển mạng cảm biến để thu thập phản ứng gia tốc theo thời gian thực của cầu dưới tác động của hoạt tải đang di chuyển trên cầu.

2. Thực hiện Biến đổi Fourier nhanh (FFT) của dữ liệu gia tốc trong miền thời gian, đồng thời xác định biên độ cực đại và tần số cơ bản tương ứng của cầu hiện trường trong điều kiện hiện tại (sau đây gọi là “Cầu đang khai thác”).

3. Xây dựng mô hình phân tích PTTH 3D (FEA) với đầy đủ thông số của cầu từ các bản vẽ xây dựng ban đầu, thể hiện cây cầu ở điều kiện mới nhất (sau đây gọi là “Cầu FEA”).

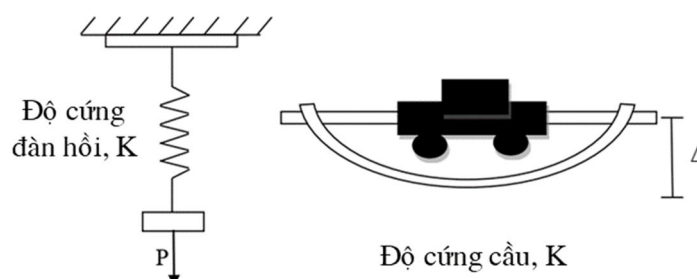
4. Chạy mô phỏng các mô hình cầu dưới cùng các điều kiện hiện trường để xác định biên độ cực đại và tần số cơ bản tương ứng của cầu FEA.

5. Xác định sự khác biệt giữa phản ứng động của cầu FEA và cầu đang khai thác, đồng thời liên hệ chúng với việc giảm tình trạng chung của cầu.

6. Tính toán độ cứng chống uốn của cầu cầu đang khai thác bằng lý thuyết về động lực học cùng với các số liệu giải tích và các thông số hình học của cầu.

7. Ước tính khả năng chịu tải của cầu dựa trên quan hệ tải trọng - chuyển vị và độ cứng chống uốn tính toán.

Việc đánh giá tình trạng của một cây cầu dựa trên phản ứng động của nó có thể có hiệu quả trong việc phát hiện sớm hư hỏng của cây cầu. Lynch (2006) [79] theo dõi hiệu suất của sự khác biệt về phản ứng động cho phép họ tính toán độ cứng uốn khi đang sử dụng của từng cây cầu. Cawley và Adams (1979) [38] liên quan đến sự thay đổi của tần số mode kế tiếp với sự tồn tại và vị trí của sự suy giảm kết cấu trong dầm. Salawu và Williams (1995) [107] đã báo cáo một nghiên cứu về dao động cường bức của cầu trước và sau khi sửa chữa. Các kết quả thử nghiệm đã chứng minh những thay đổi về tần số tự nhiên do sửa chữa gây ra. Mazurek và DeWolf (1990) [85] đã chỉ ra trong các thử nghiệm trong phòng thí nghiệm rằng những thay đổi trong điều kiện gối và sự phát triển vết nứt ảnh hưởng đến tần số tự nhiên và biên độ modal.



*Hình 3.2. Trạng thái của cầu như một hệ đàn dẻo*

Một số nghiên cứu sử dụng phản ứng động của cầu để ước tính độ cứng và khả năng chịu tải. Chen et al. (2002) [40] đã phát triển một phương pháp để đánh giá tải trọng của cầu; sử dụng công nghệ đo rung động xung quanh, giả định rằng một cây cầu hoạt động giống như một lò xo đàn hồi, như trong **Hình 3.2**, và khả năng chịu tải của một cây cầu có liên quan đến độ cứng của lò xo. Khi biết tần số rung động ( $f$ ) và khối lượng ( $m$ ), có thể tính toán được độ cứng của cầu ( $K$ ) theo phương trình (3.3). Theo thời gian, độ cứng của kết cấu giảm dần do sự xuống cấp của vật liệu và tính toàn vẹn của kết cấu. Một cây cầu sẽ mềm dẻo hơn và sẽ có tần số rung động thấp hơn. Độ cứng giảm của cây cầu hiện tại ( $K^*$ ) cũng có thể được tính toán theo Phương trình (3.3) để xác định sự thay đổi độ cứng ( $\Delta K = K - K^*$ ).

$$K = f^2 * m \quad (3.3)$$

Trong đó:  $f$  là tần số dao động;  $m$  là khối lượng của dầm cầu.

Để xác minh phương pháp này, Chen et al. (2002) [40] đã xây dựng một mô hình cây cầu thu nhỏ, bao gồm bốn dầm nhựa được liên kết với mặt cầu Plexiglas với độ nghiêng 20 độ. Cả hai thử nghiệm tĩnh và động đều được thực hiện trên một mô phỏng cầu thu nhỏ. Sau khi cắt qua nhịp giữa, các thí nghiệm tĩnh và động được lặp lại để mô phỏng sự xuống cấp. Một mô hình FEA cũng được tạo ra để xác minh kết quả từ các thử nghiệm. Samali và cộng sự (2003) [109] đã tìm ra một quy trình mới, đơn giản, không tốn kém và an toàn để xác định khả năng chịu tải của cầu gỗ nhịp ngắn. Họ đã gắn các máy đo gia tốc có độ nhạy cao bên dưới cây cầu và sử dụng một chiếc búa tác động mô hình để kích thích cây cầu. Phản ứng động của cầu được ghi lại trong hai trường hợp: (1) có tải trọng phụ tác dụng tại nhịp giữa cầu và (2) không có tải trọng bên ngoài tác dụng lên cầu. Từ phản ứng của cầu, các tần số tự nhiên đầu tiên,  $\omega_1$  và  $\omega_2$  tương ứng cho các trường hợp (1) và (2), đã được xác định. Khi biết trọng lượng tăng thêm,  $\Delta M$ , độ cứng uốn,  $K$ , của cầu có thể được tính bằng Phương trình (3.4).

$$K = \frac{\omega_1^2 * \omega_2^2}{\omega_1^2 - \omega_2^2} * \Delta M \quad (3.4)$$

Khả năng chịu tải được ước tính từ mối quan hệ giữa độ cứng đo được thực tế,  $E.I$ , và khả năng chịu uốn của kết cấu. Chowdhury (1999) [44] đã đề xuất một phương pháp

động không phá hủy để ước lượng khả năng chịu tải của dầm. Phương pháp này bao gồm một máy rung để kích thích các dầm và ghi lại ba phản ứng cưỡng bức, chẳng hạn như độ dịch chuyển, vận tốc và gia tốc, sử dụng bốn loại cảm biến khác nhau để đo hiệu quả của từng cảm biến. Phản ứng động của dầm được phân tích để ước tính độ cứng tĩnh của chúng. Độ cứng tính toán của dầm được sử dụng để ước tính khả năng chịu tải của chúng bằng cách sử dụng mối quan hệ tải trọng-chuyển vị. Ví dụ, khả năng chịu tải của dầm có độ võng giới hạn ở  $L/400$  có thể được tính bằng phương trình (3.5).

$$\text{Khả năng chịu tải} = K * \frac{L}{400} \quad (3.5)$$

Chowdhury (1999) [44] kết luận rằng phương pháp đề xuất có thể ước tính độ cứng uốn của dầm. Cũng kết luận rằng độ cứng đo được là một chỉ số nhạy cảm về những thay đổi vật lý, có thể được sử dụng để theo dõi hoạt động của cầu trong suốt thời gian sử dụng. Trong tất cả các nỗ lực trên, mục tiêu của các nhà nghiên cứu là tìm ra một phương pháp có thể chấp nhận được để dự đoán khả năng chịu tải của kết cấu từ phản ứng động của nó. Các nhà nghiên cứu trong các tài liệu tham khảo được liệt kê ở trên đã sử dụng phản ứng động để xác định độ cứng và độ cứng tính toán để xác định khả năng chịu tải của kết cấu. Chowdhury (1999) [44] và Chen et al. (2002) [40] đã tìm thấy độ cứng của kết cấu bằng phương pháp bậc tự do tổng quát (SDOF). Samali et al. (2003) [109] đã tìm thấy độ cứng của kết cấu bằng cách sử dụng các tần số tự nhiên đầu tiên của phản ứng động, như thể hiện trong Phương trình (3.5). Phương pháp đánh giá tải trọng được đề xuất trong nghiên cứu này bao gồm phân tích đáp ứng động của cầu giản đơn một nhịp để tìm biên độ cực đại và tần số tương ứng của chúng. Sử dụng phương pháp SDOF và dữ liệu phân tích, có thể xác định độ cứng uốn của cầu. Bằng cách sử dụng mối quan hệ tải trọng-chuyển vị, khả năng chịu tải của một cây cầu cũng có thể được ước tính.

### 3.3. Mô hình hóa kết cấu cầu đang khai thác

Phân tích phần tử hữu hạn (FEA) là một phương pháp kỹ thuật số, được sử dụng để mô hình hóa và giải quyết các vấn đề kỹ thuật phức tạp trong môi trường ảo. Với sự tiến bộ trong công nghệ và sự gia tăng đáng kể về khả năng xử lý của máy tính, FEA đã trở thành một lựa chọn phổ biến để giải quyết bằng số nhiều loại vấn đề mà nếu không

sẽ yêu cầu thử nghiệm tốn kém.

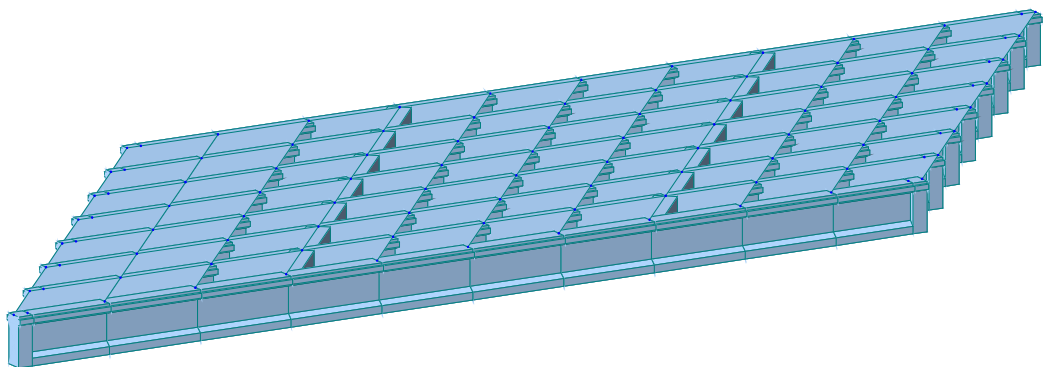
Trong nghiên cứu này, phần mềm FEA MIDAS CIVIL đã được sử dụng để xây dựng mô hình phần tử hữu hạn 3D (FE) quy mô đầy đủ của cầu. MIDAS CIVIL cung cấp một giao diện đơn giản để tạo nhiều loại hình dạng và kết cấu. Tính nhất quán của mô hình hóa trong MIDAS CIVIL làm cho nó trở thành một công cụ dễ sử dụng, hiệu quả cao và hấp dẫn đối với người dùng FEA. Một số mô-đun phổ biến trong MIDAS CIVIL là: kết cấu, vật liệu, mặt cắt, xây dựng mô hình, yêu cầu đầu ra, tương tác và ràng buộc, tải trọng, các điều kiện biên, chia phần tử, phân tích và hậu xử lý.

### 3.3.1. Mô hình cầu FEA

Cầu FEA được lựa chọn mô hình hóa tổng nghiên cứu cứu này là các cầu nhịp giản đơn mặt cắt ngang chữ I. Mô hình hóa và mô phỏng phần tử hữu hạn của cầu FEA được thực hiện bằng phần mềm thương mại có sẵn MIDAS CIVIL. Các mô tả ngắn gọn của mô hình như sau:

#### 3.3.1.1. Định nghĩa phần tử

Các phần tử “dầm 3D” tuyến tính hai nút được sử dụng cho dầm, phần tử tấm được dùng mô tả bản mặt cầu. Kích thước của các phần tử trong lưới được xác định là 3,3m. Kích thước mắt lưới này đã chia mô hình cầu thành 164 phần tử. Các bộ phận khác nhau của mô hình phần tử hữu hạn được thể hiện trong **Hình 3.3**.



Hình 3.3. Ví dụ mô hình kết cấu nhịp cầu dầm I.

#### 3.3.1.2. Định nghĩa các đặc trưng vật liệu và gán mô hình

Mô-đun thuộc tính được sử dụng để xác định các thuộc tính vật liệu và các phần. Các thuộc tính vật liệu đã được tạo ra để xác định bê tông dự ứng lực, bê tông bản mặt

cầu. Các đặc tính vật liệu được sử dụng trong mô hình FEA được lấy theo Hồ sơ thiết kế. Mô-đun lắp ráp được sử dụng để tạo các phiên bản bộ phận và định vị các phiên bản tương đối với nhau trong một hệ tọa độ toàn cầu. Các trường hợp bộ phận được định vị cùng nhau bằng cách áp dụng tuần tự các ràng buộc vị trí để căn chỉnh các mặt hoặc cạnh đã chọn hoặc bằng cách áp dụng các phép tịnh tiến và xoay đơn giản.

Mô-đun tương tác được sử dụng để xác định và quản lý sự tương tác và ràng buộc giữa các phiên bản bộ phận.

### **3.3.2. Phân tích mô hình cầu**

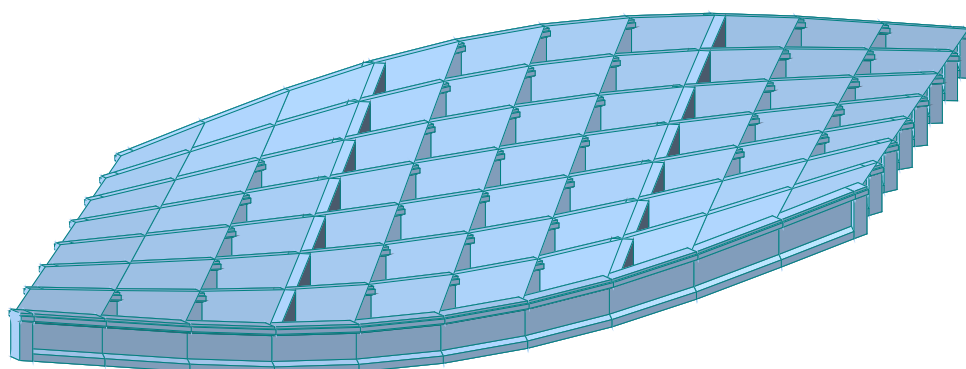
#### *3.3.2.1. Phân tích tần số*

Phân tích tần số cũng được thực hiện để trích xuất tần số tự nhiên và hình dạng mode tương ứng của cầu FEA. Phân tích tần số sau đó được sử dụng để xác nhận mô hình FEA của cây cầu. Phần mềm MIDAS CIVIL cung cấp hai phương pháp trích xuất giá trị riêng: Lanczos và phép lặp không gian con. Phương pháp Lanczos được sử dụng để thực hiện phân tích tần số nhằm tìm ra sáu tần số tự nhiên đầu tiên và dạng mode tương ứng của chúng.

#### *3.3.2.2. Xác thực mô hình FEA*

Nhiệm vụ khó khăn nhất trong mô hình hóa và phân tích phần tử hữu hạn là xác nhận một mô hình phần tử hữu hạn được giả định là đại diện cho một kết cấu thực. Mô hình FEA trong nghiên cứu này được xác thực bằng hai phương pháp: xác thực thực nghiệm bằng cách sử dụng phân tích tần số và xác thực lý thuyết bằng cách sử dụng phân tích tĩnh.

Mô-đun đàn hồi (MOE) của bê tông là một biến số đóng vai trò quan trọng trong phản ứng động của cầu. Nó là thuộc tính vật liệu chính của cây cầu trong mô phỏng FEA. MOE của cầu đang khai thác đã được tính toán. Một mô hình FE được tạo dựa trên MOE hiện tại của cầu và phân tích tần số được thực hiện để trích xuất tần số cơ bản của cầu.



MEDAS/CIVIL POST-PROCESSOR VIBRATION MODE	
FREQUENCY (CYCLE/SEC)	1.947729
NATURAL PERIOD (SEC)	0.252033
HWR(%)	
DX=	0.000624
DY=	1.013553
DZ=	0.000004
EX=	1.871546
EY=	0.009972
EZ=	0.000000
MODE 2	
MAX : 28	
MIN : 1	
FILE: TRAC.QUA	
UNIT: MM, H	
DATE: 06/18/2023	
VIEW-DIRECTION	
X: -0.483	
Y: -0.837	
Z: 0.259	

Hình 3.4. Tần số dao động của kết cấu tính toán bằng FEA

### 3.3.3. Đánh giá điều kiện cầu

#### 3.3.3.1. Phân tích mô hình

Phân tích phương thức (modal) được áp dụng trên một kết cấu trong các điều kiện động về tần số, giảm chấn và hình dạng mode của nó. Biên độ dao động trong kết cấu giảm đi nếu lực kích thích bị loại bỏ. Việc giảm biên độ rung là do đặc tính giảm chấn của kết cấu. Tuy nhiên, nó nằm ngoài phạm vi của nghiên cứu này. Mặt khác, tần số và hình dạng mode của một kết cấu bị ảnh hưởng bởi khối lượng và độ cứng của nó. Khối lượng của kết cấu không thay đổi theo thời gian một cách đáng kể cho thấy sẽ không có sự mất mát lớn trong mặt cắt ngang của nó. Ở cầu Thạch Quả, không nhận thấy tổn thất đáng kể nào về mặt cắt ngang. Do đó, có thể nhận thấy khối lượng của cầu không thay đổi theo thời gian. Tham số quyết định đánh giá sức khỏe của kết cấu là độ cứng hoặc độ cứng uốn được xác định thông qua kích thước hình học và vật liệu. Độ cứng của một kết cấu giảm dần theo thời gian do sự xuống cấp của kết cấu và các vết nứt. Hiện tượng này làm giảm khả năng chịu lực của kết cấu. Hơn nữa, tần số tự nhiên của một kết cấu tỷ lệ thuận với căn bậc hai của độ cứng của nó. Do đó, bất kỳ sự thay đổi nào về độ cứng đều gây ra sự thay đổi về tần số và khả năng chịu lực của kết cấu. Bằng cách xác định tần số thay đổi của kết cấu giữa tình trạng mới và cũ, mức độ xuống cấp và tình trạng sức khỏe của kết cấu có thể được tính toán. Bằng cách sử dụng phân tích phương thức, các đặc tính động dưới tác động của rung động có thể được xác định.

Phương trình được mô tả bằng Ta có phương trình (3.6) mô tả chuyển động của hệ đàn hồi tuyến tính chịu tác dụng của ngoại lực như sau:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f(t)\} \quad (3.6)$$

Trong đó:  $[M]$  là ma trận độ cứng,  $[C]$  là ma trận cản,  $[K]$  là ma trận độ cứng,  $\{f(t)\}$  là vectơ lực nút,  $\{x\}$  là vectơ dịch chuyển nút,  $\{\dot{x}\}$  là vectơ vận tốc nút,  $\{\ddot{x}\}$  là vectơ gia tốc nút.

Trong trường hợp dao động không có lực,  $\{f(t)\} = 0$  và phương trình 3.4 trở thành phương trình (3.7).

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (3.7)$$

Sau một số tính toán, tần số vòng tự nhiên ( $\omega$ ) của hệ thống có thể được biểu thị bằng phương trình (3.8).

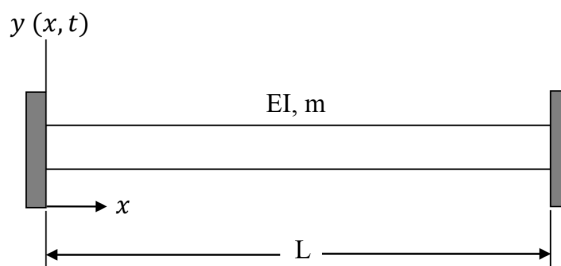
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{rad/s}) \quad (3.8)$$

Từ động lực kết cấu, tần số modal,  $f$ , của một hệ thống bằng tần số vòng của nó chia cho  $2\pi$  và được cho bởi phương trình (3.9).

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{Hz}) \quad (3.9)$$

### 3.3.3.2. Phân tích động của hệ thống dầm

Lý tưởng hóa một kết cấu thực phức tạp thành một hệ thống đơn giản hóa là một phần thiết yếu trong lý thuyết về kỹ thuật kết cấu. Một hệ liên tục có khối lượng phân bố có vô số bậc tự do và vô số dạng biến dạng.



Hình 3.5. Lý tưởng hóa cầu đang khai thác

[11] Phân tích một hệ thống phức tạp như vậy là không thực tế. Cầu được lý tưởng hóa dưới dạng dầm giản đơn, như trong **Hình 3.5**, với khối lượng phân bố, độ cứng uốn và các điều kiện gối cố định - di động để phân tích động lực học.

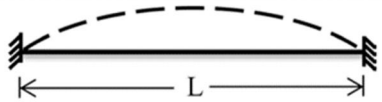
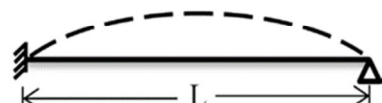
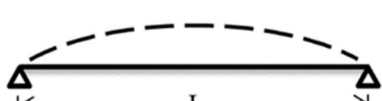
Độ võng của dầm được xác định theo phương trình (3.10) phụ thuộc vào khoảng cách và thời gian như sau:

$$y(x,t) = \Phi(x)f(t) \quad (3.10)$$

Trong đó:  $x$  là khoảng cách dọc theo chiều dài dầm,  $y$  là độ võng thẳng đứng,  $t$  là thời gian,  $\Phi(x)$  là chức năng hình dạng.

Bằng cách giải phương trình (3.10), có thể tìm thấy tần số cơ bản của dầm. **Bảng 3.1** cho thấy các tần số cơ bản và hình dạng mode của dầm với các điều kiện biên khác nhau (Paz, 1985)[99].

*Bảng 3.1. Tần số cơ bản của dầm trong các điều kiện khác nhau về gối*

Điều kiện gối	Tần số cơ bản, Hz	Dạng Mode
2 đầu cố định	$f = 3.5608 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	
1 đầu cố định – 1 đầu chốt	$f = 2.4529 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	
Gối 2 đầu	$f = 1.5708 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$	

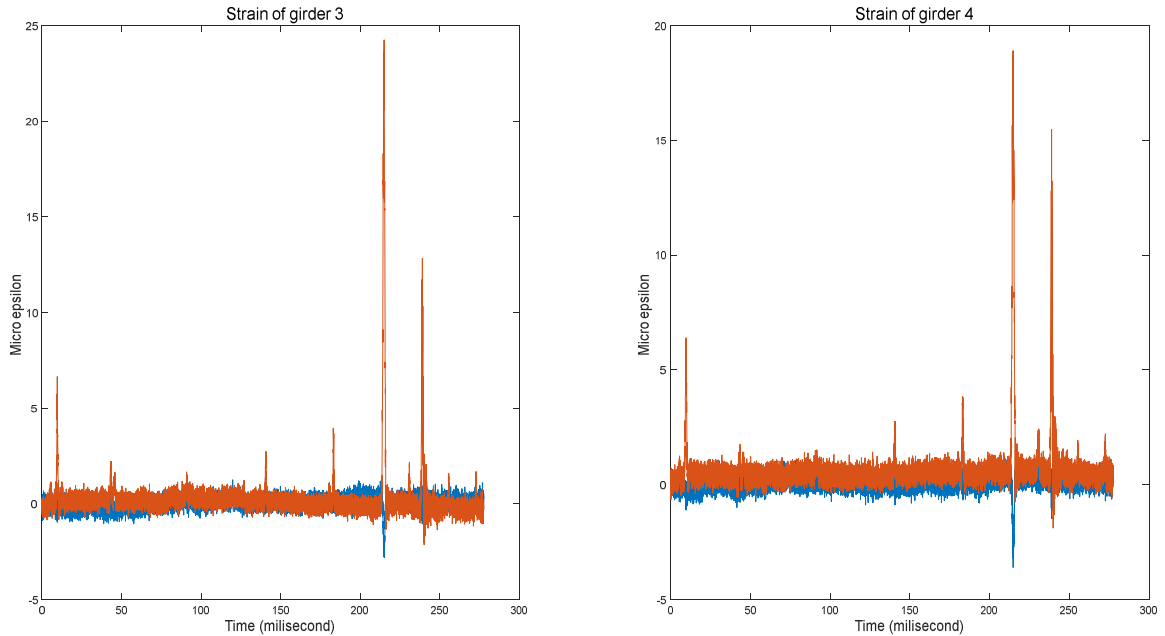
(Trong đó:  $f$  là tần số cơ bản,  $E$  là mô đun đàn hồi,  $I$  là mô men quán tính,  $L$  là chiều dài dầm,  $m$  là khối lượng cho 1 đơn vị chiều dài.)

Tần số cơ bản của cầu đang khai thác được xác định bằng cách phân tích dữ liệu gia tốc theo thời gian thực. Mặt khác, tần số cơ bản của cầu FEA có thể được tìm thấy từ phân tích bằng mô hình FEA hoặc phân tích lý thuyết được trình bày trong **Bảng 3.1**. Việc thay đổi tần số giữa cầu đang khai thác và cầu FEA cho thấy sự xuống cấp của cây cầu trong suốt thời gian sử dụng. Loại và vị trí hư hỏng nằm ngoài phạm vi của nghiên cứu này; thay vào đó, sự thay đổi tổng thể về tần số là trọng tâm chính. Từ sự thay đổi này, tình trạng kết cấu tổng thể của cây cầu được ước tính và tương quan với việc giảm đánh giá tình trạng tiêu chuẩn của công trình cầu.

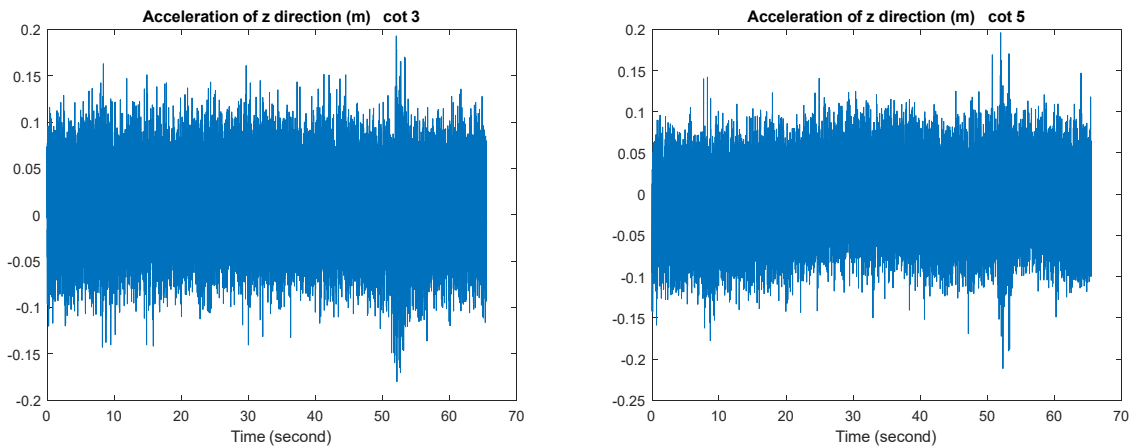
### 3.3.3.3. Biến đổi Fourier nhanh

Gia tốc đo được từ mỗi vị trí cảm biến đặt trên cầu phụ thuộc vào thời gian. Tuy nhiên, biên độ cực đại và tần số cơ bản tương ứng của nó là cần thiết để đánh giá tình trạng kết cấu tổng thể của cây cầu. Do đó, dữ liệu gia tốc trong miền thời gian cần được chuyển đổi sang miền tần số để xác định biên độ cực đại và tần số tương ứng. Phép biến

đổi dữ liệu miền thời gian này có thể được thực hiện bởi biến đổi Fourier rồi rạc sử dụng thuật toán biến đổi Fourier nhanh (FFT) do các tác giả Cooley và Tukey phát triển và đề xuất vào năm 1965 (Cooley et al., 1965) [47]. Thuật toán FFT yêu cầu số điểm dữ liệu phải có lũy thừa bằng 2, chẳng hạn như 256, 512 hoặc 1024.



Hình 3.6. Ví dụ kết quả đo biến dạng trên và dưới trục trung hòa của dầm cầu

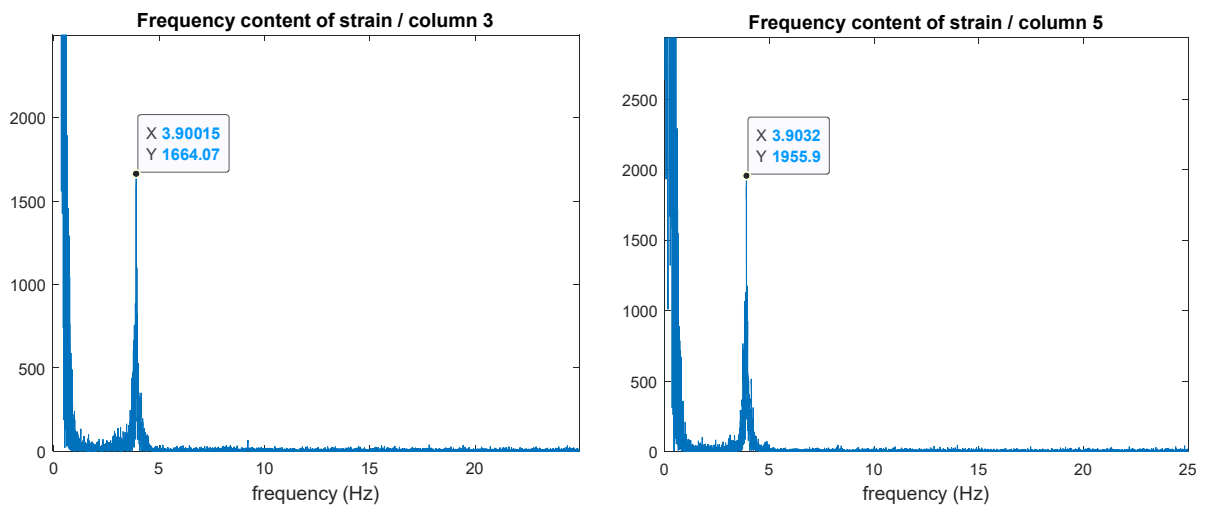


Hình 3.7. Ví dụ kết quả đo gia tốc của dầm cầu

Hình 3.6 và Hình 3.7 là ví dụ về dữ liệu miền thời gian và miền tần số tương ứng từ một công trình cầu. NCS thu thập được kết quả trên khi đo dầm thực tế tại công trình đang khai thác. Vị trí đo tại các vị trí  $L/2$  của dầm, các cảm biến gắn ở đáy dầm và cánh trên dầm.

### 3.3.3.4. Phương pháp chọn đỉnh

Đối với dữ liệu gia tốc trong miền tần số, phương pháp chọn đỉnh được sử dụng để chọn biên độ cực đại và tần số cơ bản tương ứng của chúng. Chọn đỉnh là một phương pháp để xác định các đặc điểm phương thức của một cây cầu một cách nhanh chóng. Đây là một phương pháp không tham số, chủ yếu được sử dụng cho dữ liệu gia tốc trong miền tần số. Khái niệm của phương pháp này dựa trên thực tế là đáp ứng tần số của một kết cấu đi qua các giá trị cực đại xung quanh các tần số tự nhiên. Tần số tại các giá trị cực đại này là ước tính tốt về tần số của hệ thống. Tần số cơ bản của cây cầu được xác định là tần số tương ứng với biên độ cực đại chiếm ưu thế đầu tiên. **Hình 3.8** cho thấy phương pháp chọn đỉnh trong việc chọn biên độ đỉnh và tần số cơ bản tương ứng của chúng tại các vị trí cảm biến khác nhau trên dầm cầu đang khai thác, ở đây lấy ví dụ đo của cầu Thạch Quả trên tuyến cao tốc Hà Nội – Thái Nguyên.



Hình 3.8. Ví dụ phân tích phổ tần số của dầm cầu

Các tần số cơ bản tương ứng với các biên độ cực đại từ dầm cầu đo được thể hiện tương ứng trong **Hình 3.8** ở trên.

### 3.3.3.5. Thuật toán phần mềm ứng dụng

Để ước tính tình trạng của một cây cầu, hai tần số cơ bản được yêu cầu để tính phần trăm giảm tần số cơ bản: một từ tình trạng hiện tại của cây cầu, và một từ tình trạng ban đầu của cây cầu. Tần số cơ bản hiện tại có thể thu được từ dữ liệu gia tốc hiện trường được thu thập qua các đầu đo gia tốc. Tần số cơ bản ở điều kiện ban đầu có thể được xác định bằng hai phương pháp: mô phỏng FE và lý thuyết động lực học kết cấu. Do đó, lý thuyết động lực học kết cấu được sử dụng để xác định tần số cơ bản của cầu ở điều kiện mới nhất. Tuy nhiên, phân tích phần tử hữu hạn đã được sử dụng trong nghiên cứu này để tìm ra tần số cơ bản của cầu FEA (cầu Thạch Quả mới). Do đó, tần số cơ bản được

tìm thấy bởi lý thuyết động lực học kết cấu cần phải tương quan với tần số của cầu FEA. Mối quan hệ giữa hai tần số này đã được xác định để phát triển các thuật toán cho phần mềm ứng dụng.

Tần số cơ bản của cầu ở điều kiện mới nhất có thể được xác định từ lý thuyết động lực học kết cấu bằng cách sử dụng các phương trình trong **Bảng 3.1**. Đối với một dầm có các điều kiện biên gối cố định – gối di động, tần số cơ bản được đưa ra bởi phương trình (3.11).

$$f = 3.5608 * \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (3.11)$$

Giả sử,

$$mL = m_t \quad (3.12)$$

Trong đó:  $m_t$  là tổng khối lượng của dầm.

Từ phương trình (3.11) và (3.12) có thể viết lại như phương trình (3.13):

$$f = 3.5608 * \sqrt{\frac{EI}{m_t L^3}} \quad (3.13)$$

Trong phương trình trên, tần số cơ bản là một hàm của tổng khối lượng, độ cứng uốn và chiều dài của cây cầu. Tổng khối lượng của cầu thay đổi không đáng kể theo thời gian. Do đó, nó được giả định là hằng số và được tìm thấy từ đầu ra của mô hình FEA.

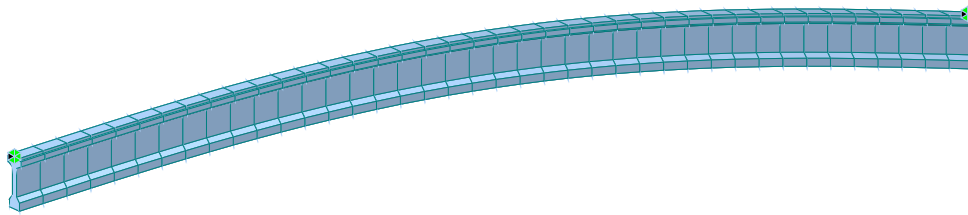
Bằng cách sử dụng phương trình (3.13), tần số cơ bản lý thuyết của cầu được tính là 2.9903 Hz. Tần số trên áp dụng cho trường hợp một dầm, dùng để kiểm chứng mô hình FEA. Kết quả mô hình bằng phần tử hữu hạn của một dầm cho kết quả 2.9561 Hz lệch 1% so với công thức giải tích.

Bảng số liệu các thông số tính dao động dầm như được thể hiện ở Bảng 3.2.

*Bảng 3.2. Các tần số cơ bản của dầm*

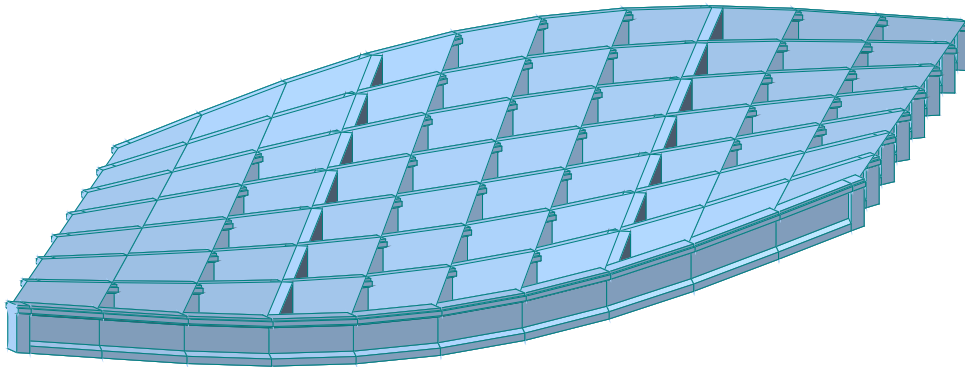
Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Diện tích mặt cắt	A	0.6725	m <sup>2</sup>
Khối lượng phân bố	m	1.6160175	kN/m/g
Mô đun đàn hồi	E	33238000	kN/m <sup>2</sup>
Mô men quán tính	I	0.20895	m <sup>4</sup>
Chiều dài dầm	L	33	m

Từ kết quả đáng tin cậy ở trên, tiến hành mô hình toàn bộ nhịp cầu gồm 8 dầm với các thông số dầm như trên kết hợp với bản mặt cầu và dầm ngang lấy từ hồ sơ thiết kế. Kết quả phân tích dao động toàn cầu sẽ kết hợp với kết quả đo đặc tần số dao động ngoài hiện trường để đánh giá tình trạng công trình cầu.



MIDAS/Civil POST-PROCESSOR	
VIBRATION MODE	
FREQUENCY (CYCLE/SEC)	2.956207
NATURAL PERIOD (SEC)	0.338283
NPM(1)	
DX=	1.126626
DY=	0.000000
DZ=	82.610464
RX=	0.000000
RY=	1.129984
RZ=	0.000000
MODE 2	
MAX :	91
MIN :	1
FILE :	TRAC_QUA_10.M
UNIT :	AN, m
DATE :	06/12/2024
VIEW-DIRECTION	
X :	-0.483
Y :	-0.837
Z :	0.259

Hình 3.9. Dạng dao động của dầm trong mô hình FEA



MIDAS/Civil POST-PROCESSOR	
VIBRATION MODE	
FREQUENCY (CYCLE/SEC)	3.967729
NATURAL PERIOD (SEC)	0.252083
NPM(1)	
DX=	0.000624
DY=	1.013553
DZ=	0.000004
FX=	1.871546
FY=	0.009972
FZ=	0.000000
MODE 2	
MAX :	28
MIN :	1
FILE :	TRAC_QUA
UNIT :	AN, m
DATE :	06/18/2023
VIEW-DIRECTION	
X :	-0.483
Y :	-0.837
Z :	0.259

Hình 3.10. Kết quả dao động của nhịp cầu

Sự khác biệt phần trăm giữa các tần số cơ bản của cây cầu FEA tìm thấy và lý thuyết được tính là 1,27%. Tần số giảm 1,27% thay vào phương trình (3.14) để xác định được G.

$$G = \Delta f * \frac{1000}{123} \quad (3.14)$$

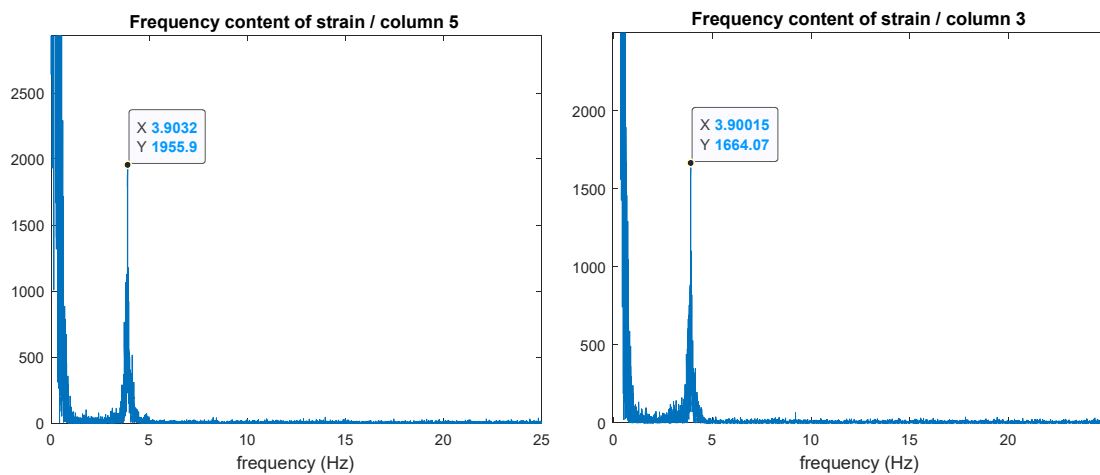
Trong đó:  $\Delta f$  là viết tắt của phần trăm khác về tần số giữa cầu FEA và cầu đang khai thác. Một cây cầu đã được kiểm tra được đánh giá từ “0” (không đạt) đến “9” (xuất sắc) tùy thuộc vào điều kiện vật chất hiện tại của các bộ phận của nó. Hiện tại điều kiện đánh giá cầu đang khai thác được tính toán bởi phương trình (3.15).

$$\text{Điều kiện đánh giá cầu} = \text{số nguyên } (9 - G) \quad (3.15)$$

Từ phương trình 3.12 xác định được giá trị  $G = 0,1029$ ; từ phương trình 3.13 thu được điều kiện đánh giá cầu ở thang điểm 8, có nghĩa là cầu có tình trạng tương đối tốt.

### 3.3.4. Phân tích ứng xử động của cầu

Biên độ cực đại và tần số cơ bản của cầu dưới tác động của dao động cường độ bức là hai thông số quan trọng để ước tính khả năng chịu tải của cầu. Phản ứng động của cầu dưới các rung động cường độ bức được ghi lại dưới dạng gia tốc trong miền thời gian. Dữ liệu gia tốc của cầu đang khai thác được chuyển thành miền tần số bằng cách thực hiện FFT. Thuật toán chọn đỉnh được sử dụng để chọn biên độ cực đại và tần số tương ứng của chúng từ dữ liệu FFT của đo đạc tại cầu thí nghiệm và kết cấu từ phân tích FEA.



Hình 3.11. Phổ tần số của dầm 3 và dầm 4

Dữ liệu gia tốc trong miền tần số có thể có nhiều đỉnh đại diện cho các mode chuyển động khác nhau, nhưng đỉnh chiếm ưu thế nhất sẽ đại diện cho mode quan trọng nhất. Dữ liệu FFT cho thấy phản ứng động của cầu thí nghiệm có các đỉnh vượt trội rõ ràng cho tất cả các cảm biến. Hình 3.11 cho thấy phản ứng động của cầu đang khai thác trong miền tần số do rung động gây ra bởi xe tải. Bằng cách sử dụng thuật toán chọn đỉnh, các biên độ đỉnh và tần số tương ứng của chúng đối với cầu thí nghiệm đã được ghi lại và hiển thị.

### 3.4. Kết luận Chương 3

Công tác khảo sát được tiến hành tại cầu, các thông số đo được như: biến dạng, dao động của công trình bên cạnh số liệu thu thập từ các công trình kiểm định thử tải và số liệu quan trắc dài hạn thì số liệu quan trắc ngắn hạn cũng góp phần đánh giá tình trạng hiện tại và dự báo sức khỏe của công trình đang khai thác.

Kết quả đo dầm thông qua đo biến dạng và đo gia tốc cho thấy kết quả tần số dao động trung bình từ kết quả nhận được từ đầu đo gia tốc và đầu đo biến dạng theo thời gian cho kết quả tương đồng.

Từ kết quả đo biến dạng theo thời gian cho thấy sau khi các tải trọng đi qua, các biến dạng đều quay lại trạng thái ban đầu. Điều này cho thấy dầm đang làm việc trong miền đàn hồi. Kết quả phân tích so sánh với kết quả tính toán lý thuyết cho thấy dầm đang làm việc trong khả năng khai thác với tải trọng thiết kế phù hợp với điều kiện đánh giá cầu ở thang điểm 8/9, có nghĩa là cầu có tình trạng tương đối tốt.

Thông qua kết quả đo ở hai dầm khác nhau cho kết quả tương đồng cho thấy các dầm có mức độ suy giảm cường độ giống nhau.

Chương này tập trung vào việc nghiên cứu về kỹ thuật phân tích dao động. Đây là một phương pháp đánh giá không phá hủy, nhằm phát hiện và định lượng mức độ suy giảm của kết cấu. Sự thay đổi tần số tự nhiên của kết cấu được chứng minh là một chỉ dấu nhạy bén cho các hư hỏng tiềm ẩn. Luận án đã tiến hành mô hình hóa và thực nghiệm trên các công trình cầu hiện có để xác nhận tính hiệu quả của phương pháp này trong việc đánh định trạng thái kết cấu.

## CHƯƠNG 4. XÁC ĐỊNH TUỔI THỌ CỦA KẾT CẤU NHỊP CẦU BTCT BẰNG PHƯƠNG PHÁP ANN

### 4.1. Lập tập dữ liệu và mô tả kết cấu

Tuổi thọ thiết kế của một kết cấu được chỉ rõ trong tiêu chuẩn thiết kế. Theo Tiêu chuẩn TCVN 11823-2017, tuổi thọ thiết kế của công trình cầu BTCT vĩnh cửu có thể đạt tới 100 năm trong điều kiện môi trường tiêu chuẩn [11]. Thời gian này thường dựa trên thời gian ước tính theo sự suy giảm các chức năng của kết cấu. Các hệ số tải trọng và các hệ số của sức kháng đã dùng được kiểm chứng trên tuổi thọ thiết kế và điều này thiết lập chỉ số an toàn cho kết cấu. Theo thời gian, chỉ số an toàn của kết cấu cầu bị giảm do nhiều nguyên nhân. Có hai hoạt động chủ yếu dẫn đến sự suy giảm của kết cấu đó là suy giảm trực tiếp và suy giảm gián tiếp. Suy giảm trực tiếp là sự suy thoái của pha xi măng và pha cốt liệu của bê tông do tiếp xúc với các yếu tố độc hại.

- Sự suy giảm trực tiếp do các nguyên nhân như: xâm nhập của Sun phat; hư hại hóa học do các axit; hư hại hóa học do muối; phản ứng kiềm cốt liệu.

- Sự suy giảm gián tiếp được xác định xảy ra do quá trình ăn mòn cốt thép gây ra nứt và vỡ bê tông. Trong trường hợp này vữa xi măng không bị ảnh hưởng trực tiếp bởi các chất có hại xâm nhập vào bê tông. Ăn mòn cốt thép còn làm mất tiết diện ngang của cốt thép và dẫn đến giảm sức kháng của kết cấu. Cốt thép bị ăn mòn do hai nguyên nhân là xâm nhập clo và các bon nát hóa.

Để mô hình hóa dự báo tuổi thọ sử dụng của các kết cấu BTCT do xâm nhập clo gây ra, cần thiết diễn giải quá trình ăn mòn cốt thép cơ bản như sau:

- 1) Tích lũy bề mặt: các ion  $\text{Cl}^-$  từ môi trường tích tụ trên bề mặt cầu kiện.
- 2) các ion clorua thẩm thấu vào trong lớp bê tông bảo vệ, trong đó cơ chế chủ đạo là quá trình khuếch tán phân tử.
- 3) Nồng độ clo tăng dần theo thời gian.
- 4) Khi đạt tới ngưỡng, màng thụ động bảo vệ thép bị phá vỡ, đánh dấu sự bắt đầu của giai đoạn ăn mòn tích cực.
- 5) Quá trình điện hóa xảy ra tạo ra các sản phẩm ăn mòn (gỉ thép) và tăng thể tích theo thời gian gây ra ứng suất kéo trong bê tông bảo vệ.
- 6) Xuất hiện các vết nứt và hình thành tách lớp giữa bê tông và thép.

7) Sự suy giảm khả năng chịu tải xuất hiện khi các vết nứt tạo thành rạn nứt hoặc vỡ.

8) Sự hao hụt diện tích tiết diện ngang của cốt thép và sự mất bám dính giữa thép và bê tông dẫn đến việc kết cấu không còn thỏa mãn các điều kiện về trạng thái giới hạn chịu lực.

Để dự đoán tuổi thọ của kết cấu cần xác định điểm kết thúc. Hiện nay có nhiều quan điểm về điểm kết thúc của kết cấu trong đó có hai quan điểm lớn:

1. Điểm kết thúc của tuổi thọ được xem là khi ăn mòn gây nứt hoàn toàn bê tông bảo vệ;
2. Khi ăn mòn làm giảm diện tích tiết diện cốt thép gây nguy hiểm cho trạng thái giới hạn chịu lực.

Quá trình hư hại của các kết cấu BTCT là quá trình gồm hai giai đoạn: Giai đoạn khởi đầu và giai đoạn lan truyền theo phương trình 2.16 như đã trình bày ở Chương 2.

#### **- Giai đoạn khởi đầu ăn mòn ( $t_1$ ):**

Giai đoạn khởi đầu ăn mòn là thời gian kể từ khi kết cấu bắt đầu tiếp xúc với ion clo cho đến khi ion clo xâm nhập vào bê tông tập trung trên bề mặt cốt thép đạt đến ngưỡng nồng độ gây ăn mòn. Thời gian hoạt động của giai đoạn này phụ thuộc chủ yếu vào 5 yếu tố:

- 1) Nồng độ clo trên bề mặt bê tông;
- 2) Nhiệt độ, độ ẩm của môi trường;
- 3) Chiều dày lớp bảo vệ;
- 4) Chất lượng của bê tông bảo vệ thông qua hệ số khuếch tán clo;
- 5) Ngưỡng nồng độ clo gây ăn mòn của cốt thép;

Mặc dù tốc độ xâm nhập của clo vào bê tông là một quá trình rất phức tạp, là tổng hợp của nhiều cơ chế xâm nhập khác nhau chẳng hạn như cơ chế khuếch tán, cơ chế hút thấm bề mặt, cơ chế thẩm thấu,... nhưng cơ chế lan truyền khuếch tán được chứng minh là cơ chế quyết định. Tổng hợp các tham số cần thiết để tính toán  $t_1$  từ phần mềm Life-365 như Bảng 4.1 dưới đây.

*Bảng 4.1. Tổng hợp các tham số cần thiết tính toán  $t_1$*

Chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm)	W/C	D <sub>28</sub> 10 <sup>-12</sup> (m <sup>2</sup> /s)	T(°C)	H(%)	C <sub>s</sub> (%)	C <sub>th</sub> (%)	t <sub>1</sub> (năm) theo Life 365
20	0.35	6.026	20	75	0.6	0.05	4.60

#### - Giai đoạn lan truyền ăn mòn (t<sub>2</sub>)

Giai đoạn lan truyền ăn mòn là thời gian kể từ khi cốt thép bắt đầu bị ăn mòn tới khi ăn mòn gây nứt hoàn toàn bê tông bảo vệ hoặc tới khi diện tích tiết diện cốt thép bị giảm do ăn mòn dẫn đến kết cấu không còn thỏa mãn trạng thái giới hạn chịu lực. Khi ăn mòn xảy ra và phát triển, các sản phẩm ăn mòn là gỉ, thể tích tăng khoảng 2-6 lần thể tích của thép bị gỉ, tạo áp lực lên bê tông xung quanh và cuối cùng dẫn đến sự thiệt hại cho các kết cấu theo hình thức nứt (theo chiều dọc và ngang), vỡ và tách lớp của bê tông bảo vệ và mất diện tích tiết diện cốt thép gây nguy hiểm cho kết cấu.

Bê tông đã nứt làm cho các tác nhân ăn mòn khuếch tán nhanh hơn đến bề mặt cốt thép, tốc độ ăn mòn sẽ nhanh hơn gây nguy hiểm cho kết cấu. Vì vậy sự xuất hiện của vết nứt ăn mòn đầu tiên có thể là dấu hiệu quan trọng xác định điểm cuối của tuổi thọ sử dụng của kết cấu BTCT.

Độ dài của giai đoạn lan truyền ăn mòn phụ thuộc chủ yếu vào:

- 1) Mật độ dòng điện ăn mòn,
- 2) Chiều dày lớp bảo vệ,
- 3) Chất lượng cơ học của bê tông bảo vệ thông qua cường độ chịu kéo của bê tông, mô đun đàn hồi, hệ số từ biến.

#### 4.2. Phương pháp xác định tuổi thọ còn lại của kết cấu nhịp cầu BTCT dựa trên trí tuệ nhân tạo.

Chương trình ứng dụng trí tuệ nhân tạo sẽ bao gồm thuật toán và dữ liệu để đưa vào huấn luyện mạng ANN. Do vậy công việc xây dựng chương trình ứng dụng sẽ bao gồm công việc xây dựng thuật toán, thu thập hoặc tạo ra các bộ dữ liệu đầu vào và đầu ra cho thuật toán đưa vào huấn luyện tạo ra được mạng tối ưu và cuối cùng là chạy mạng tối ưu đã xây dựng để ra các kết quả cần thiết. Trong phần này sẽ trình bày thuật toán sử dụng phương pháp truyền thẳng nhiều lớp (Multi layer Perceptron - MLP) để xây dựng mô hình. Phần này giới thiệu phương pháp tiếp cận Perceptron đa lớp (BP-MLP)

dựa trên lan truyền ngược để tạo dữ liệu điều kiện bị thiếu, có thể được sử dụng để phát triển đường cong suy giảm thông qua phân tích hồi quy (hoặc các phương pháp khác) cho cả phân tích mức dự án và mức mạng về tình trạng kết cấu cầu.

#### **4.2.1. Lựa chọn các tham số đầu vào**

Việc lựa chọn các tham số thích hợp cho ANN mô hình là rất quan trọng để tối ưu độ chính xác và hiệu suất. Một mạng nơ-ron có khả năng mô hình hóa các mối quan hệ phi tuyến phức tạp giữa các biến và đơn giản kiểm tra thống kê có thể không xác định được tất cả các mối quan hệ đầu vào - đầu ra thích hợp.

##### *4.2.1.1. Kiểm tra tương quan*

Phân tích tương quan có khả năng xác định độ mạnh của tuyến tính mối quan hệ giữa hai hoặc nhiều biến. Thông qua phân tích tương quan, mức độ ảnh hưởng của một hoặc nhiều biến để dự đoán giá trị của một biến khác có thể xác định. Giá trị của hệ số tương quan nằm trong khoảng từ -1 đến 1. Càng gần giá trị là -1 hoặc 1, thì mối tương quan giữa các biến càng mạnh đã điều tra. Thông thường, hệ số tương quan Pearson được chọn để xác định mối tương quan giữa các tham số cơ sở dữ liệu khác nhau và điều kiện xếp hạng. Khi so sánh các giá trị hệ số được tính toán, người ta coi rằng nếu hai các biến có giá trị hệ số tương quan nhỏ hơn giá trị tuyệt đối 0,3, chúng độc lập về mặt thống kê và do đó không có đóng góp tuyến tính cho nhau.

##### *4.2.1.2. Đánh giá kỹ thuật*

Sau khi thực hiện phân tích thống kê sẽ quyết định chọn một hoặc nhiều biến làm tham số đầu vào cho mạng.

##### *4.2.1.3. Lựa chọn biến đầu vào cuối cùng*

Với sự trợ giúp của phân tích thống kê và đánh giá kỹ thuật, lựa chọn các tham số để xem xét làm tham số đầu vào. Lựa chọn “đầu vào” này các tham số được áp dụng cho tất cả các mô hình.

#### **4.2.2. Cấu trúc mạng lưới**

Sau khi xác định các tham số đầu vào và đầu ra, quá trình lọc được thực hiện để hoàn thiện bộ dữ liệu. Quá trình này giúp hiểu kích thước của đầu vào và đầu ra các lớp. Tuy nhiên, nhiều khía cạnh khác của kiến trúc mạng vẫn được xác định. Kiến trúc mạng có ảnh hưởng lớn đến hiệu suất của mô hình ANN dự đoán và yêu cầu xem xét cẩn thận.

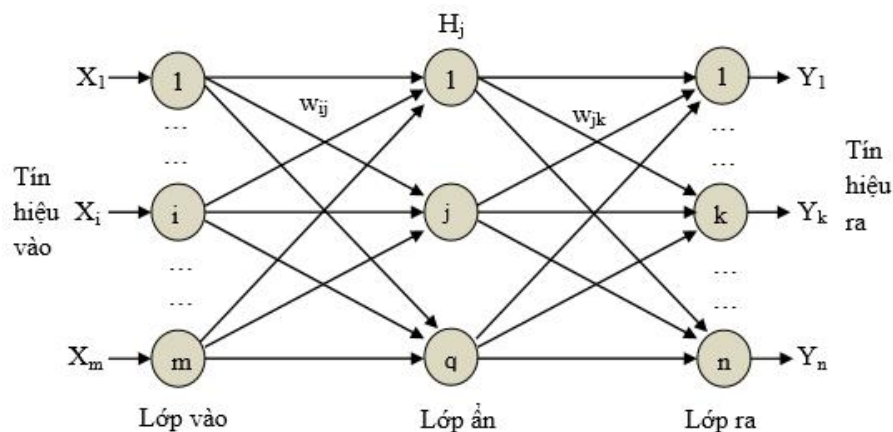
Kiến trúc bổ sung các tham số sẽ được xác định bao gồm số lớp ẩn trong mạng, số lượng nút trên (các) lớp ẩn, số lượng kỹ nguyên đào tạo, chức năng kích hoạt, chức năng học tập và chức năng đào tạo. Sự phát triển của các mô hình ANN sử dụng hộp công cụ mạng nơ-ron MATLAB và lựa chọn các tham số kiến trúc mạng nói trên được mô tả trong các phần sau.

#### 4.2.2.1. Các lớp đầu vào và đầu ra

Số lượng đầu vào quyết định kích thước, tức là số lượng nút, trên lớp đầu vào của mô hình MLP. Đầu ra cho các mô hình ANN là xếp hạng tình trạng mặt cầu tương ứng. Do quy mô số nguyên của hệ thống xếp hạng, đầu ra là một biến rời rạc. Đầu ra phải được định dạng giống như các biến rời rạc đầu vào. Do đó, lớp đầu ra của mạng có các nút, với mỗi nút đại diện cho một xếp hạng tình trạng riêng lẻ. Có nghĩa là, các nút riêng lẻ đại diện cho tỷ lệ phần trăm của các thành phần trong mỗi điều kiện.

#### 4.2.2.2. Lớp ẩn và chức năng kích hoạt

Ban đầu, các mô hình MLP được thử nghiệm với một lớp ẩn. Sau đó, việc gia tăng lớp ẩn và số lượng nơ-ron trong lớp ẩn đã được chọn để tối ưu hóa kết quả. Phương pháp ANN xác lập mối quan hệ giữa các biến đầu vào ( $X_i$  ( $i = 1 \div m$ )) với các biến đầu ra ( $Y_k$  ( $k = 1 \div n$ )) dựa vào dữ liệu trong quá khứ. Lớp ẩn (hidden layer) có tác dụng liên kết giữa lớp vào và lớp ra của mạng nơ-ron.



Hình 4.1. Sơ đồ của MLP với một lớp ẩn

#### 4.2.2.3. Chức năng học tập và đào tạo

Một mạng nơ-ron BP-MLP chuyên tiếp được phát triển để dự đoán tình trạng của các thành phần cầu. Để mạng với dữ liệu đào tạo, một chức năng quy tắc hoá của Bayes

(Foresee và Hagan, 1997) [49] đã được sử dụng, phù hợp với dữ liệu diện rộng có nhiễu âm. Hàm này cập nhật các giá trị trọng số và độ lệch theo tối ưu hóa Levenberg-Marquardt (Roweis, 1996) [104]. Quá trình chính quy hóa Bayes đánh giá tối thiểu sự kết hợp của các sai số và trọng số bình phương, sau đó xác định sự kết hợp chính xác để tạo ra một mạng tổng quát hóa tốt cho dự đoán được tối ưu hóa.

Khoảng 70% dữ liệu được phân bổ cho việc huấn luyện mạng bằng chức năng ngẫu nhiên có sẵn trong Matlab, và phần còn lại của dữ liệu đầu vào được phân bổ cho quá trình kiểm tra mạng. Số lượng tế bào nơ-ron trong lớp ẩn đã được chọn là tám sau khi thử nghiệm và kiểm tra lỗi với hiệu suất đào tạo tốt nhất. Vì dữ liệu tương ứng với một chuỗi thời gian, tốt hơn nên đặt lấy mẫu như một quá trình ngẫu nhiên. Các phương pháp khác sẽ chỉ sử dụng một phần cụ thể của chuỗi thời gian để đào tạo, điều này có thể làm mất thông tin về việc tiếp xúc lâu dài.

Chức năng “trainbr” đã được chọn làm chức năng huấn luyện. Chức năng này chịu trách nhiệm đào tạo mạng nơ-ron, dựa trên một loạt các tham số bao gồm động lượng và tốc độ học. Giá trị cho tất cả các tham số cần thiết đã được chỉ định trước khi huấn luyện mạng. Hàm học tập chịu trách nhiệm tính toán những thay đổi trong giá trị trọng số và độ lệch. Giá trị mặc định của ‘learningngdm’ đã được chọn cho chức năng học thiên vị và trọng số lan truyền ngược.

Việc đào tạo mạng nơ-ron khởi tạo các trọng số và độ lệch. Lệnh Matlab ‘newff’ chỉ định trọng số và độ lệch kết nối ngẫu nhiên cho mạng đã khởi tạo. Huấn luyện mạng được triển khai bằng cách sử dụng hàm ‘train’, hàm này lấy mạng đã phát triển, dữ liệu đầu vào huấn luyện và dữ liệu đầu ra huấn luyện làm đối số. Sau khi hoàn thành quá trình huấn luyện, hàm ‘train’ trả về mạng nơ-ron đã được huấn luyện (trọng số và độ lệch của trình kết nối được tối ưu hóa) và lỗi mạng. Quá trình đào tạo bị dừng khi một trong những điều sau đây xảy ra:

- Số epochs tối đa đạt được.
- Vượt quá lượng thời gian tối đa.
- Mục tiêu hiệu suất là tối thiểu.
- Gradient hiệu suất giảm xuống dưới giá trị quy định nhỏ nhất.

### 4.2.3. Đánh giá hiệu suất

#### 4.2.3.1. Phương pháp hồi quy

Các chỉ số được nghiên cứu này sử dụng để đánh giá tính chính xác của mạng ANN như sau:

- Sai số RMSE (Root Mean Square Error):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (Y_k - \hat{Y}_k)^2}{n}} \quad (4.1)$$

Trong đó:  $Y_k$ : Giá trị thực tế;

$\hat{Y}_k$ : Giá trị dự báo của mạng (Giá trị tính toán).

- Hệ số hồi quy giữa giá trị thực tế và giá trị dự báo của mạng  $R^2$ :

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (Y_k - \bar{Y}_k)(\hat{Y}_k - \bar{\hat{Y}}_k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (Y_k - \bar{Y}_k)^2 (\hat{Y}_k - \bar{\hat{Y}}_k)^2}} \quad (4.2)$$

Trong đó:  $\bar{Y}_k$ : Giá trị thực tế trung bình;  $\bar{\hat{Y}}_k$ : Giá trị dự báo trung bình

Giá trị bình phương R là một chỉ báo về độ chính xác của dự đoán, trong đó giá trị gần 1 cho biết độ chính xác cao hơn và 0 là dự đoán hoàn hảo.

#### 4.2.3.2. Hệ số tương quan Pearson

Thử nghiệm này có thể được sử dụng cho các mô hình suy giảm ANN được phát triển trong nghiên cứu này để đo lường hiệu suất. Độ tin cậy 95% được coi là xác nhận tính phù hợp của mô hình đã phát triển.

### 4.2.4. Xây dựng thuật toán ứng dụng trí tuệ nhân tạo trên nền MATLAB để xác định tuổi thọ còn lại

Các ANN đã được phát triển và đào tạo bằng hộp công cụ mạng nơ-ron có sẵn trong MATLAB. Kiến trúc của mạng là thứ cần được quyết định trước giai đoạn đào tạo và nó phụ thuộc chủ yếu vào lượng dữ liệu có sẵn, dữ liệu này được tạo ra cho nghiên cứu này bằng cách mô phỏng mô hình FE được mô tả ở trên một số lượng lớn mẫu. Việc lựa chọn cấu trúc mạng rất quan trọng và liên quan đến kết quả dự đoán. Trong thử

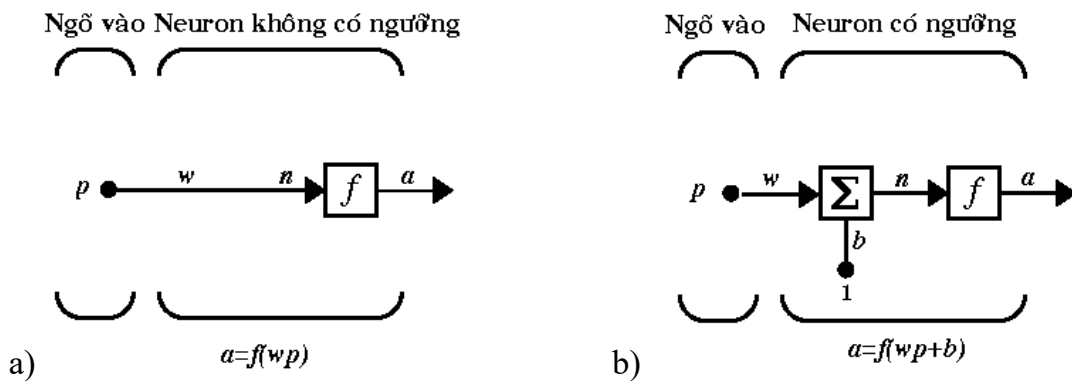
nghiệm ban đầu, dữ liệu được phân chia thành các nhóm để huấn luyện và được sử dụng để thử nghiệm và xác nhận mạng đã được huấn luyện.

#### 4.2.4.1. Mô hình nơ-ron

##### a. Cấu trúc một Nơ-ron

Dữ liệu đầu vào của một nơ-ron có thể là đại lượng vô hướng hoặc có hướng, được nhân với trọng số tương ứng hoặc có thể cộng thêm ngưỡng (*bias*), thường bằng 1.

Dưới đây là **Hình 4.2** mô tả mô hình một nơ-ron với đầu vào vô hướng  $p$ . Trong đó **Hình 4.2a** không có ngưỡng  $b$  và **Hình 4.2b** có ngưỡng  $b$ . Sau đó  $p$  nhân với trọng số vô hướng  $w$  thành  $wp$ , qua hàm truyền  $f$  cho kết quả đầu ra là vô hướng  $a = f(wp)$  (hình trái).



Hình 4.2. Mô hình Nơ-ron đầu vào vô hướng

**Hình 4.2b** là nơ-ron có ngưỡng  $b$ , giá trị  $b$  được cộng với  $wp$  rồi qua hàm truyền  $f$  cho kết quả đầu ra là vô hướng  $a = f(wp + b)$ . Có thể điều chỉnh những thông số của nơ-ron như trọng số và ngưỡng ( $w$  và  $b$ ) để đạt được yêu cầu mong muốn nghĩa là “huấn luyện” mạng.

##### b. Hàm truyền

Ba hàm truyền thường sử dụng nhất trong áp dụng ANN là **Hard Limit**, **Linear**, **Log-Sigmoid**.

Đầu ra tổng quát với một hàm truyền có đầu vào là một hoặc một nhóm vector là:

$$a = f(p * w + b)$$

Trong đó  $f$  là hàm truyền;  $p$  là đầu vào;  $w$  là trọng số;  $b$  là ngưỡng cho kết quả  $a$  là đầu ra.

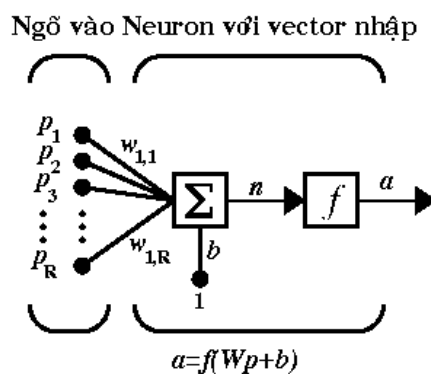
Các kết quả khác nhau sẽ được thu nhận với một đầu vào với hàm truyền khác nhau. Để tìm ra giải pháp tối ưu thì cần phải xác định hàm truyền phù hợp dựa trên kinh nghiệm hoặc thời gian thử nghiệm.

Hình 4.3 dưới đây mô tả Neuron với vector nhập

Một neuron với vector nhập  $p = [p_1, p_2, \dots, p_R]$ , trọng số  $W = [w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,R}]$ , ngưỡng  $b$  và hàm truyền  $f$ . Theo đó, ta có tổng đối số và ngưỡng tạo ở đầu ra  $n$  là:

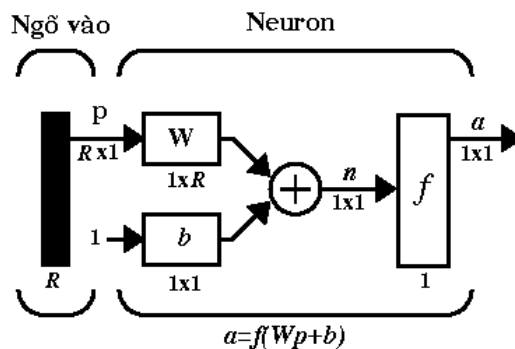
$$n = w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + \dots + w_{1,R}p_R + b$$

$$\text{hay } n = \mathbf{W}^* \mathbf{p} + b$$



Hình 4.3. Cấu trúc mạng neuron cơ bản

Ngoài ra, để hiệu quả hơn ta có thể định nghĩa một lớp gồm nhiều neuron như hình 4.4 dưới đây



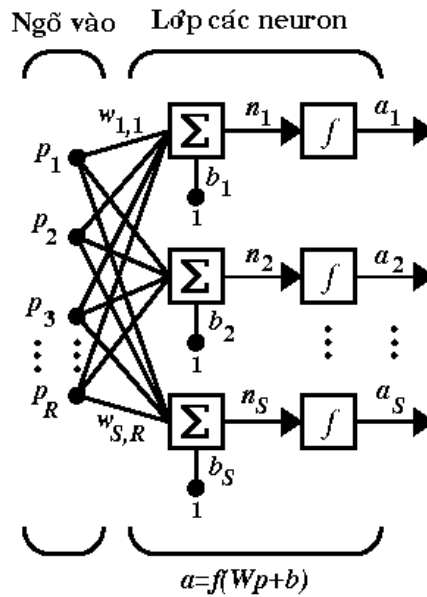
Hình 4.4. Dạng giản đơn mô hình

#### 4.2.4.2. Cấu trúc mạng

Một mạng có thể chứa một hay nhiều lớp và một lớp có thể bao gồm hai hay nhiều neuron.

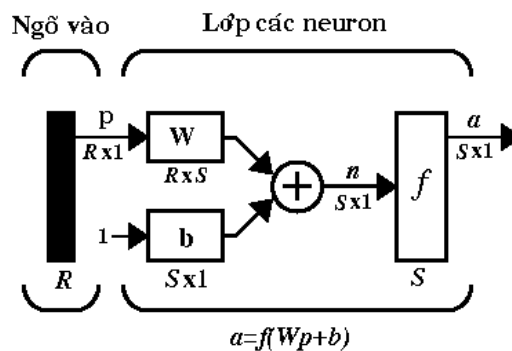
a. Mạng một lớp nơ-ron

Trong **Hình 4.5** và **Hình 4.6** dưới đây mô tả mạng một lớp nơ-ron



Hình 4.5. Cấu trúc mạng một lớp

Một lớp mạng được vẽ gọn như sau:



Hình 4.6. Sơ đồ mạng nơ-ron một lớp rút gọn

$R$  là số phần tử của vectơ đầu vào,  $S$  là số nơ-ron trong lớp và  $a$  là vectơ đầu ra.

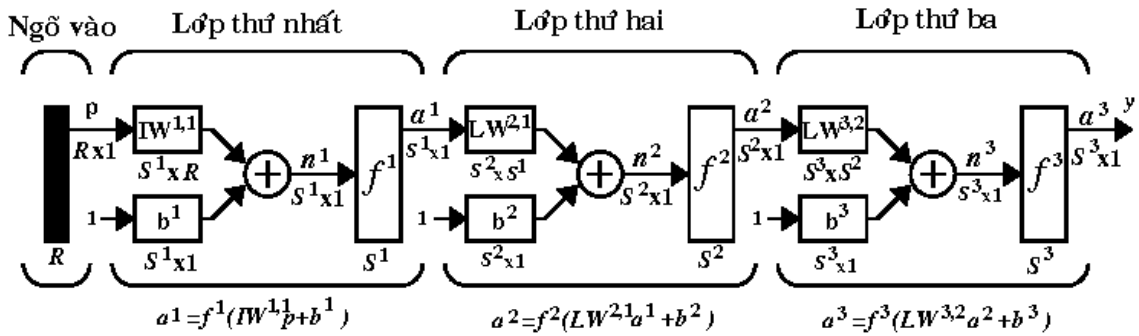
Ma trận trọng số  $W$ :

$$W = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \dots & w_{1,R} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \dots & w_{2,R} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{S,1} & w_{S,2} & \dots & w_{S,R} \end{bmatrix}$$

b. Mạng nhiều lớp nơ-ron

**Hình 4.7.** dưới đây mô tả sơ đồ mạng nơ-ron nhiều lớp, giá trị đầu vào của lớp tiếp theo thường là giá trị đầu ra của lớp trước đó. Lớp cho kết quả được gọi là lớp đầu ra,

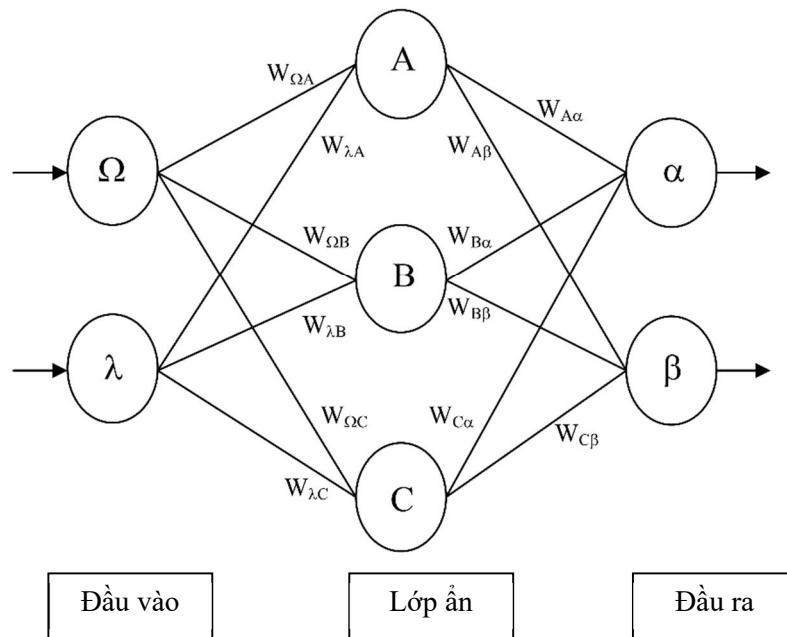
lớp còn lại là lớp ẩn. Mạng nhiều lớp có khả năng xử lý dữ liệu rất lớn đồng thời có thể áp dụng các hàm truyền khác nhau giữa từng lớp và có thể huấn luyện để có hàm tối ưu.



Hình 4.7. Sơ đồ mạng nơ-ron chuyển tiếp nguồn cấp dữ liệu nhiều lớp

4.2.4.3. Cơ sở tính toán thuật toán lan truyền ngược

Hình 4.8 dưới đây mô tả cho việc tính toán một mạng cụ thể



Hình 4.8. Minh họa sơ đồ mạng

+) Tính toán các lỗi của các nơ-ron đầu ra

$$\begin{aligned} \delta_\alpha &= out_\alpha (1 - out_\alpha) (Target_\alpha - out_\alpha) \\ \delta_\beta &= out_\beta (1 - out_\beta) (Target_\beta - out_\beta) \end{aligned} \tag{4.3}$$

+) Thay đổi các trọng số lớp đầu ra

$$\begin{aligned}
W_{A\alpha}^+ &= W_{A\alpha} + \eta\delta_\alpha out_A & W_{A\beta}^+ &= W_{A\beta} + \eta\delta_\beta out_A \\
W_{B\alpha}^+ &= W_{B\alpha} + \eta\delta_\alpha out_B & W_{B\beta}^+ &= W_{B\beta} + \eta\delta_\beta out_B \\
W_{C\alpha}^+ &= W_{C\alpha} + \eta\delta_\alpha out_C & W_{C\beta}^+ &= W_{C\beta} + \eta\delta_\beta out_C
\end{aligned} \tag{4.4}$$

+) Tính toán lan truyền ngược các lỗi lớp ẩn

$$\begin{aligned}
\delta_A &= out_A (1 - out_A) (\delta_\alpha W_{A\alpha} + \delta_\beta W_{A\beta}) \\
\delta_B &= out_B (1 - out_B) (\delta_\alpha W_{B\alpha} + \delta_\beta W_{B\beta}) \\
\delta_C &= out_C (1 - out_C) (\delta_\alpha W_{C\alpha} + \delta_\beta W_{C\beta})
\end{aligned} \tag{4.5}$$

+) Thay đổi các trọng số lớp ẩn

$$\begin{aligned}
W_{\lambda A}^+ &= W_{\lambda A} + \eta\delta_A & W_{\Omega A}^+ &= W_{\Omega A} + \eta\delta_A \\
W_{\lambda B}^+ &= W_{\lambda B} + \eta\delta_B & W_{\Omega B}^+ &= W_{\Omega B} + \eta\delta_B \\
W_{\lambda C}^+ &= W_{\lambda C} + \eta\delta_C & W_{\Omega C}^+ &= W_{\Omega C} + \eta\delta_C
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Hằng số  $\eta$  (được gọi là tốc độ học và thường bằng 1) được đưa vào để tăng tốc hoặc giảm tốc độ học.

### 4.3. Xác định mô hình dự báo tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu BTCT

Theo nhiều nghiên cứu và qua các cuộc điều tra trên các mô hình khác nhau, việc dự đoán tuổi thọ sử dụng áp dụng mô hình Bazant là tốt nhất. Tiếp theo, các biện pháp thống kê như độ nhạy và độ đặc hiệu của mô hình mạng nơ-ron đã được kiểm tra được áp dụng đánh giá hiệu suất của mạng được đào tạo. Bazant (1979) [31] đã đưa ra mô hình để dự đoán tuổi thọ của kết cấu BTCT do ăn mòn cốt thép trong bê tông. Sự phá hủy do ăn mòn có xét đến thể tích giãn nở do sự sắp xếp của gỉ ngậm nước trên bề mặt cốt thép. Do tính chất mở rộng của gỉ ngậm nước, gỉ sẽ nở ra gấp bốn lần thể tích của thép mẹ. Cuối cùng, do sự hình thành gỉ ngậm nước, ứng suất hướng tâm ra bên ngoài được tạo ra trên bê tông xung quanh. Ứng suất hướng tâm gây ra tương tự như sự gia tăng đường kính cốt thép  $\Delta D$  do tăng thể tích của nó cho đến khi lớp phủ bê tông tách ra. Theo mô hình của Bazant, sự lan truyền ăn mòn có thể được biểu thị như sau:

$$t_{corr} = \rho_{cor} \frac{D\Delta D}{pj_r} \tag{4.7}$$

Trong đó:

$t_{corr}$  là khoảng thời gian từ khi bắt đầu ăn mòn tới khi ăn mòn gây nứt bê tông (năm).

$\rho_{cor}$  là hàm của mật độ khối lượng của thép và  $g_i = 3600\text{kg/m}^3$ .

$D$  là đường kính của thanh thép (mm).

$\Delta D$  là tăng đường kính của thanh do gỉ (mm).

$p$  là khoảng cách giữa các thanh (mm).

$j_r$  là tốc độ tạo gỉ ( $\text{g/m}^2\text{s}$ ).

Tốc độ ăn mòn tức thời do gỉ được biểu thị bằng:

$$j_r = \frac{W}{F} i_{corr} \quad (4.8)$$

Trong đó:

$w$  là khối lượng tương đương của thép = 27,925.

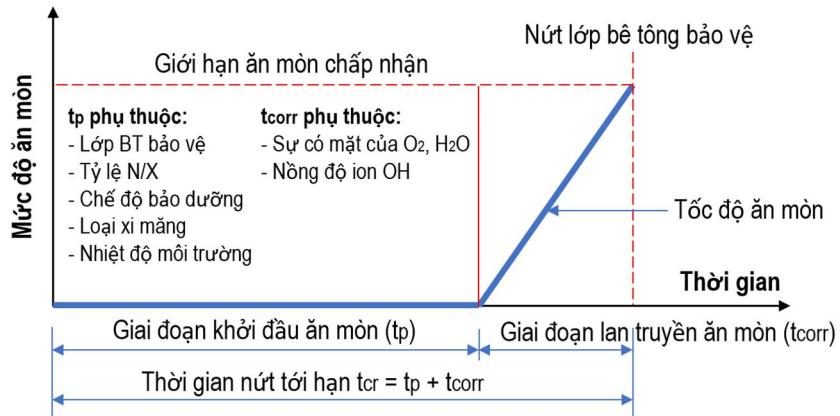
$F$  là hằng số Faradays = 96,847 C.

$i_{corr}$  là mật độ dòng ăn mòn ( $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ ).

Thời gian nứt tới hạn  $t_{cr}$  có thể phát sinh do sự ăn mòn trên toàn bộ vỏ và được tính như sau:

$$t_{cr} = t_p + t_{corr} \quad (4.9)$$

Trong đó:  $t_p$ : Thời gian khởi đầu ăn mòn (năm);  $t_{corr}$ : Thời gian ăn mòn lan truyền (năm).



Hình 4.9. Mô hình tuổi thọ sử dụng của kết cấu bị ăn mòn

Theo Bazant và cộng sự. thời gian khởi đầu ăn mòn  $t_p$  có thể được tính như sau:

$$t_p = \frac{1}{12D_{app}} \left( \frac{C_v}{1 - \sqrt{\frac{C_{th}}{C_s}}} \right) \quad (4.10)$$

Trong đó:

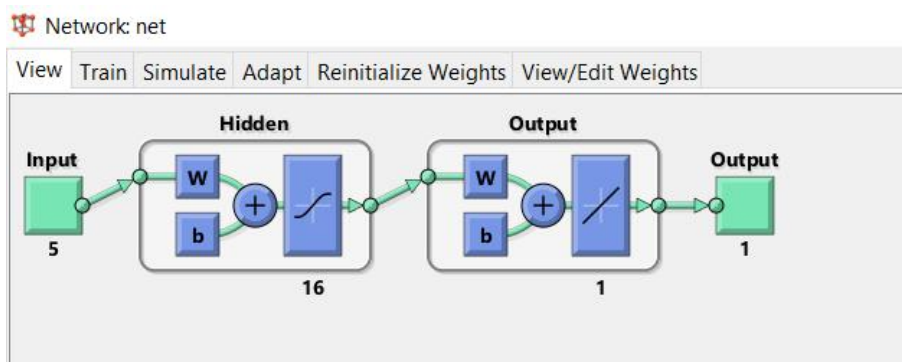
$C_v$  : chiều dày lớp phủ (mm).

$C_{th}$  : giá trị ngưỡng clo tập trung (kg/m<sup>3</sup> của bê tông).

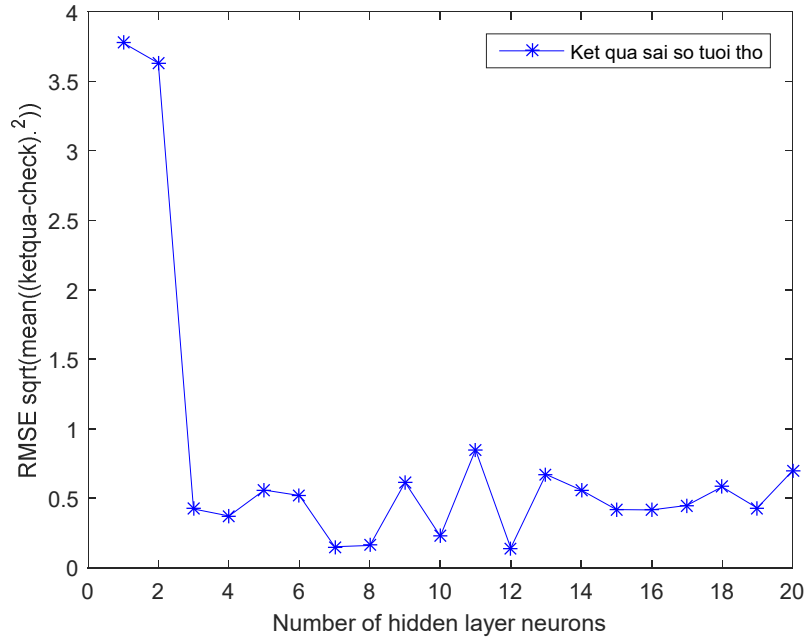
$C_s$  : ion clo tập trung trên bề mặt (kg/m<sup>3</sup> của bê tông).

$D_{app}$  : Hệ số khuếch tán Clo biểu kiến (cm<sup>2</sup>/s).

Mô hình dự báo tuổi thọ còn lại của kết cấu nhịp cầu BTCT dựa trên mạng ANN như sau:

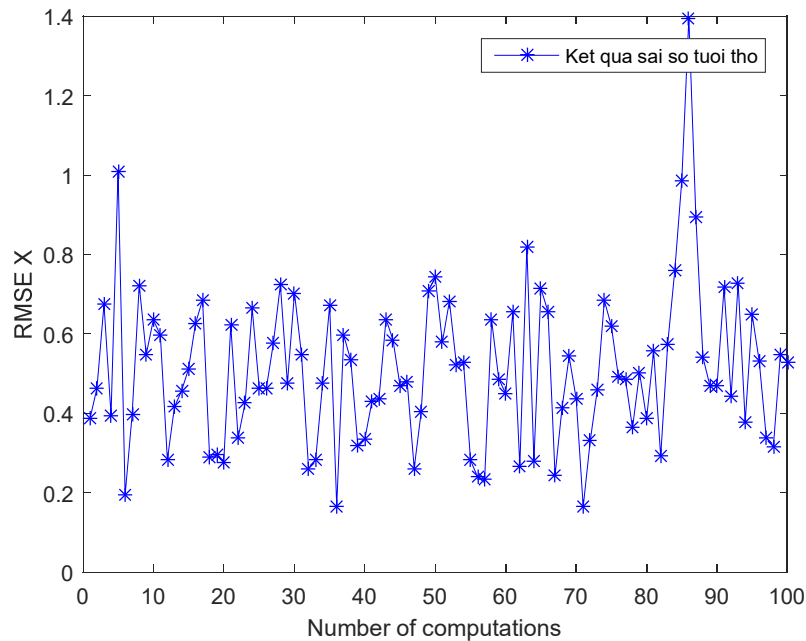


Hình 4.10. Mô hình được huấn luyện với bộ dữ liệu như đã trình bày trong Chương 2.

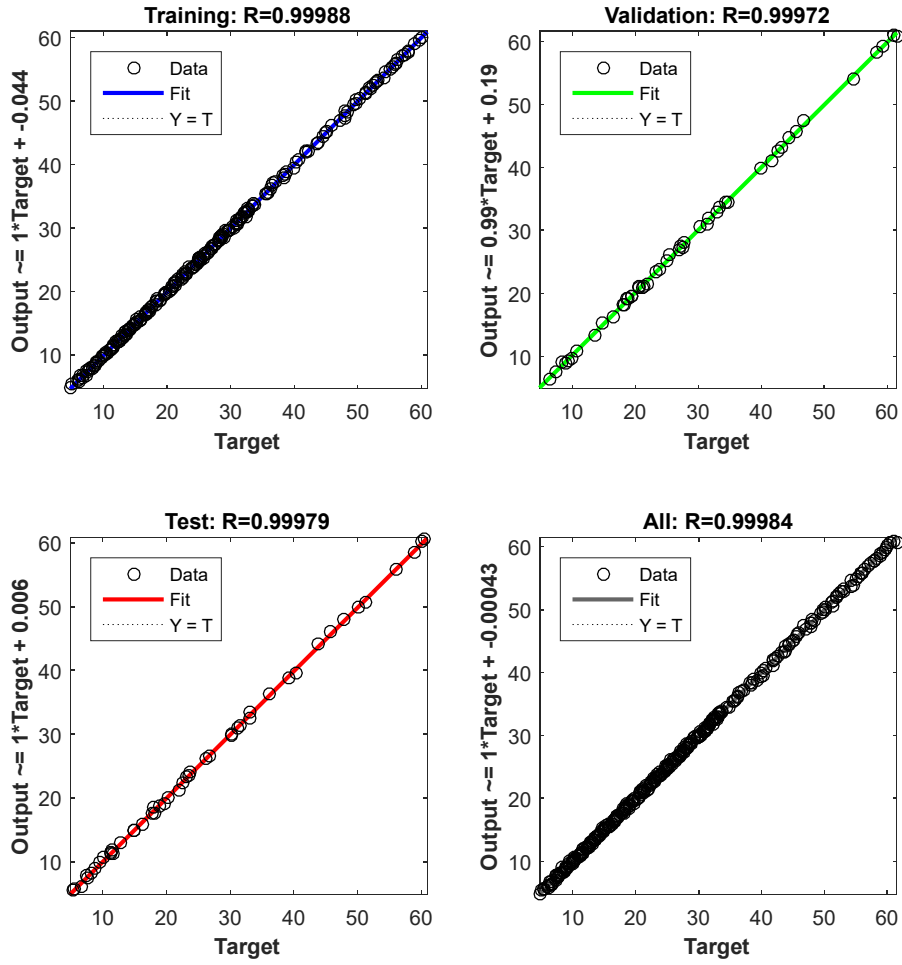


Hình 4.11. Kết quả lựa chọn số nơ ron lớp ẩn

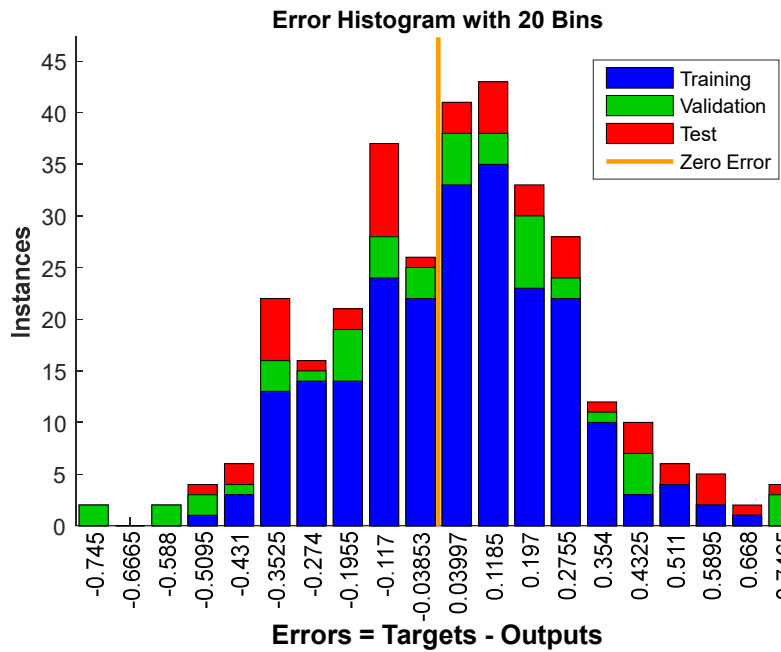
Như kết quả huấn luyện trên, trường hợp lớp ẩn có 12 nơ ron sẽ có sai số nhỏ nhất, với kết quả này luận án chọn mạng ANN với sơ đồ 5-12-1 cho trường hợp dự đoán  $t_1$ . Tương tự cách làm như trên luận án chọn mạng ANN với sơ đồ 4-8-1 cho trường hợp dự đoán  $t_2$ . Kết quả  $t = t_1 + t_2$  là tuổi thọ của kết cấu bê tông cần tìm.



Hình 4.12. Sai số giữa các số lần phân tích



Hình 4.13. Kết quả huấn luyện



Hình 4.14. Kết quả lỗi

Sau khi có được kiến trúc mạng và các trọng số của các lớp tương ứng, ANN có thể biểu diễn dưới dạng phép toán của ma trận để đưa ra kết quả như dưới đây:

$$\begin{aligned} [value_{hidelayer}] &= [f_1([inputs]*[Weights_1]+[bias_1])] \\ [output] &= f_2([value_{hidelayer}]*[Weights_2]+bias_2) \end{aligned}$$

Trong đó:  $f$  là các hàm chuyển transfer, trong trường hợp này  $f_1$  là hàm tansig ( $tansig(x) = 2/(1+\exp(-2*x))-1$ );  $f_2$  là hàm purelin( $n$ ) =  $n$ ).

#### 4.4. Xác định tuổi thọ còn lại của kết cấu nhịp cầu BTCT theo phương pháp ANN

Xác định tuổi thọ trên cơ sở mạng huấn luyện với các thông số đầu vào như sau:

Chương trình ANN tính toán thời gian khởi đầu an toàn  $t_1$

=====

Các tham số đầu vào

01. Nhập giá trị chiều dày lớp bê tông bảo vệ ( $20 < L < 100\text{mm}$ ) (vd: 38.5mm)  $L = 38.5$

02. Nhập giá trị hệ số khuếch tán clo ( $6 < D < 7\text{m}^2/\text{s}$ ) (vd: 6.044)  $D = 6.044$

03. Độ ẩm ( $70\% < H < 100\%$ ) (vd: 75)  $H = 75$

04. Nhập thông số nồng độ clo bề mặt ( $0.6\% < C_s < 0.7\%$ ) (vd: 0.679)  $C_s = 0.679$

05. Nhập giá trị ngưỡng nồng độ clo ( $0.05\% < C_{th} < 0.06\%$ ) (vd: 0.0513)  $C_{th} = 0.0513$

=====

$t_1$  gia đình với số liệu trên là (vidu = 19.585): = 19.585

Vào số mạng huấn luyện tốt nhất (vidu = 16): = 71

=====

Kết quả tính  $t_1$  từ ANN là: 19.5643

Kết quả đưa vào tính  $t_1$  từ ANN là: 19.585

Sai số kết quả tính  $t_1$  từ ANN là: -0.10587%

Kết quả tính toán được minh họa đối với bộ số liệu trong Bảng 4.2 sau đây.

Bảng 4.2. Kết quả tính toán  $t_1$  từ ANN

STT	Chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm)	$D_{28}$ ( $10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ )	H (%)	$C_s$ (%)	$C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) theo mô hình xây dựng
37	38.50	6.044	75	0.679	0.0513	19.585

Như kết quả tính toán ở trên cho thấy kết quả dự đoán từ mạng ANN sai số -0.1% so với kết quả tính toán theo công thức lý thuyết.

Tương tự cách làm trên tính toán  $t_2$  với bộ số liệu trong Bảng 4.3 sau đây.

*Bảng 4.3. Kết quả tính toán  $t_2$  từ ANN*

STT	Chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm)	d (mm)	H (%)	$i_{\text{corr}}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$t_2$ (năm)
17	38.50	16	75	1.47	4.95

Kết quả thu được từ ANN là 5.01 sai số 1% so với kết quả tính toán.

Như vậy với trường hợp có các thông số như trên tuổi thọ của kết cấu dự đoán theo ANN sẽ là:  $t = t_1 + t_2 = 19.59 + 5.01 = 24.6$  năm.

Trong công trình này, mô hình ANN được tạo bằng công cụ MATLAB. Để đưa vào ANN, tổng cộng có hơn 200 mẫu dữ liệu giả định ngẫu nhiên phù hợp các thông số kỹ thuật của cầu trong thực tế được sử dụng. Chẳng hạn như chiều dày lớp bê tông bảo vệ từ 20-100mm; hệ số khuếch tán ion Clo khoảng từ  $6-7 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s; Độ ẩm từ 70-100%; thông số nồng độ clo bề mặt từ 0,6-0,7%; giá trị ngưỡng nồng độ Clo từ 0,05-0,06%.

Mạng được đào tạo ở mức độ sao cho sai số tối thiểu thu được đối với một tập hợp các đầu vào và mục tiêu nhất định. Mức độ tương quan, R của dữ liệu đào tạo, kiểm tra và xác nhận là trên 99% như được thể hiện trong biểu đồ hồi quy của **Hình 4.13**. Dựa trên các giá trị tương quan cao này, người ta nhận thấy rằng độ chính xác của dự đoán có thể chấp nhận được và ANN mô hình trở nên thành công trong việc tìm hiểu vấn đề. Xem xét vấn đề overfitting, mặc dù có sẵn một số kỹ thuật để khắc phục vấn đề overfitting trong mạng nơ-ron, nhưng nghiên cứu hiện tại giải quyết vấn đề overfitting bằng phương pháp cổ điển. Phương pháp cổ điển dựa trên việc chia các tập dữ liệu thành ba nhóm tức là tập huấn luyện, tập thử nghiệm và tập xác nhận. Tập huấn luyện là tập dữ liệu về các ví dụ được mạng sử dụng để học. Trong quá trình học tập, mạng có xu hướng phù hợp quá mức với dữ liệu. Để tránh điều này, cần phải có một bộ xác thực sẽ điều chỉnh kiến trúc (tức là trọng số) của bộ phân loại bằng cách bắt đầu một quá trình dừng sớm khi quá trình huấn luyện mạng dừng lại khi lỗi trong bộ xác thực tăng lên.

Mặt khác, tập kiểm tra là một tập dữ liệu độc lập tuân theo cùng một phân phối xác suất như của tập huấn luyện. Để việc trang bị quá mức tối thiểu diễn ra, sự vừa vặn của bộ huấn luyện cũng phải vừa khít với bộ thử nghiệm.

Dựa trên các nghiên cứu so sánh về các mô hình hư hỏng do ăn mòn, người ta đã quan sát thấy rằng thời gian bắt đầu ăn mòn trung bình (tức là thời gian lắng đọng của lớp phủ bê tông) thay đổi trong khoảng 15–20 năm, điều này cũng chỉ ra rằng thời gian nứt tới hạn trung bình sẽ xảy ra ở giai đoạn sau của thời gian tồn tại của cấu trúc, khoảng thay đổi trong khoảng từ 35 đến 40 năm. Sự gần đúng có sự đồng ý tốt với kết quả thu được từ mô hình Bazant (1979) [31]. Ngoài ra, so với các mô hình khác, mô hình của Bazant tránh đánh giá thấp và đánh giá quá cao tuổi thọ sử dụng của kết cấu đã xuống cấp.

Do đó, mô hình của Bazant được coi là mô hình tốt nhất để dự đoán tuổi thọ sử dụng đáng tin cậy của các kết cấu BTCT chịu sự ăn mòn do clorua gây ra. Đồng thời, nghiên cứu cũng nhấn mạnh rằng mặc dù các mô hình dự báo đáng tin cậy có sẵn để ước tính tuổi thọ sử dụng của kết cấu BTCT, nhưng nó không có khả năng cắt ngắn thời gian tính toán ở mức độ hợp lý và do đó đòi hỏi một thời gian dài và tẻ nhạt quá trình tính toán. Để tránh điều này, một mạng nơ-ron truyền ngược nguồn cấp dữ liệu đơn giản đã được sử dụng trong đó các vấn đề mô hình liên quan đến các biến phi tuyến. Hơn nữa, ANN là một mạng phi tuyến tính cao có khả năng tổng quát hóa và học hỏi từ các ví dụ được xác định trước mà không cần có bất kỳ kiến thức nào về nền tảng toán học phức tạp. Mô hình mạng nơ-ron được đào tạo để dự đoán thời điểm nứt vỡ quan trọng mang lại kết quả rất tốt và gần với kết quả đầu ra được tính toán thực tế. Điều này làm cho ANN trở thành một mạng có độ tin cậy cao để dự đoán sự xuống cấp của cấu trúc phụ thuộc vào thời gian. Ngoài ra, việc sử dụng ANN trở thành một quy trình được tối ưu hóa được sử dụng để tính toán các vấn đề mạnh mẽ trong một khoảng thời gian rất nhỏ với độ chính xác cao. Để đánh giá hiệu suất của mạng được đào tạo, các biện pháp thống kê như độ nhạy và độ đặc hiệu của mô hình ANN được đánh giá về cơ bản xác định hiệu quả của mạng được đào tạo trong dự đoán chính xác về tuổi thọ của cấu trúc. Do đó, với việc áp dụng tính toán mềm, một hệ thống vật lý được tạo ra sẽ giúp giải quyết các vấn đề phức tạp liên quan đến ước tính tuổi thọ sử dụng của các kết cấu BTCT bị xuống cấp.

#### 4.5. Kết luận Chương 4

Sự suy giảm khả năng làm việc của kết cấu BTCT do ăn mòn gây ra trong cốt thép là một vấn đề nghiêm trọng về độ bền trên toàn thế giới. Về cơ bản, nó xảy ra khi cốt thép chịu ảnh hưởng của môi trường biển hoặc xâm thực. Mục đích của công việc hiện tại là dự đoán tuổi thọ sử dụng của kết cấu BTCT một cách tin cậy, giảm thiểu sai số nhất bằng cách xem xét các mô hình ăn mòn nổi bật khác nhau và so sánh đầu ra với đầu ra dự đoán của mô hình ANN. Các nghiên cứu tham số đã được thực hiện trên bốn mô hình khác nhau để nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số khác nhau như tốc độ ăn mòn, chiều dày lớp phủ, đường kính thanh và chu vi thanh tham gia tích cực vào thời gian xuống cấp của kết cấu BTCT.

Kết quả của việc kiểm tra tham số của mô hình suy thoái Bazant đã chọn được trình bày trong nghiên cứu này. Khả năng chấp nhận của các mô hình dự báo trong dự báo tuổi thọ của kết cấu BTCT được thể hiện thông qua phân tích minh họa tình huống và mô hình phù hợp nhất được sắp xếp. Tuy nhiên, với việc áp dụng tính toán mềm như ANN, một dự đoán đã được đưa ra để xác định tuổi thọ của kết cấu BTCT và các đầu ra dự đoán được xác nhận với các đầu ra dự định, do đó mang lại kết quả tốt để hình dung tuổi thọ của kết cấu BTCT.

Chương này trình bày chi tiết phương pháp luận và các kết quả đạt được trong việc xác định tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu bê tông cốt thép thông qua phương pháp ANN. Quy trình xây dựng tập dữ liệu, mô hình hóa ANN để dự đoán tuổi thọ còn lại đồng thời tiến hành đánh giá hiệu suất của mô hình. Thuật toán ứng dụng AI được phát triển trên môi trường MATLAB và minh họa bằng các ví dụ cụ thể về đánh giá suy giảm khả năng chịu tải và dự báo tuổi thọ. Chương này chứng minh tính khả thi và tiềm năng của ANN trong việc hỗ trợ các quyết định quản lý và bảo trì cầu.

## **CHƯƠNG 5. THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ SỰ SUY GIẢM KHẢ NĂNG CHỊU TẢI VÀ DỰ BÁO TUỔI THỌ CỦA KẾT CẤU NHỊP CẦU DÀM BÊ TÔNG CỐT THÉP ĐANG KHAI THÁC**

### **5.1. Giới thiệu chung**

Phần này sẽ đưa ra các ví dụ minh họa cụ thể để đánh giá sự suy giảm khả năng chịu tải và dự báo tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu dầm bê tông cốt thép nhằm kiểm chứng tính khả thi và hiệu quả của phương pháp Mạng Nơ-ron Nhân tạo (ANN) được đề xuất. Các ví dụ này thể hiện quy trình áp dụng mô hình ANN từ bước chuẩn bị dữ liệu đầu vào, thông qua quá trình xử lý của mô hình, đến việc đưa ra các kết quả dự báo định lượng về tình trạng và tuổi thọ còn lại của cầu. Thông qua các phân tích chi tiết từng trường hợp, phần này sẽ làm rõ cách thức mô hình ANN có thể hỗ trợ các kỹ sư và nhà quản lý trong việc đưa ra các quyết định bảo trì, sửa chữa một cách hiệu quả, góp phần tối ưu hóa tuổi thọ khai thác và đảm bảo an toàn cho các công trình cầu hiện hữu. Trong phần này, luận án sẽ sử dụng nhưng mô hình, thuật toán và công cụ AI đã xây dựng ở phần trên để đánh giá sự suy giảm khả năng chịu tải và dự báo tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu BTCT đang khai thác.

### **5.2. Trường hợp nghiên cứu 1: cầu Thạch Quả (tuyến cao tốc Hà Nội - Thái Nguyên)**

#### **5.2.1. Giới thiệu**

Cầu Thạch quả nằm tại vị trí thôn Thạch Quả trên tuyến cao tốc Hà Nội - Thái Nguyên, cầu bắc qua sông Ngũ Huyện Khê thuộc huyện Đông Anh, Hà Nội (cũ).

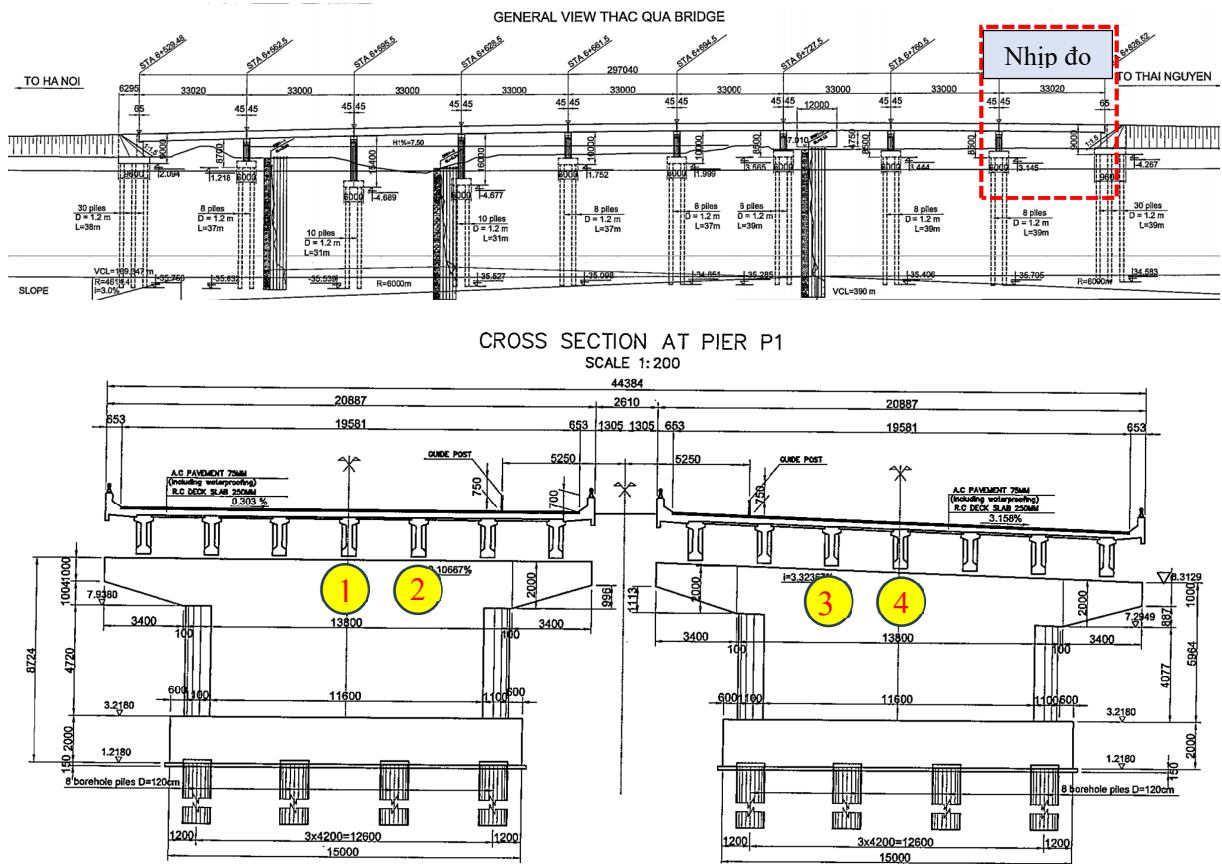
#### **5.2.2. Mô hình cầu FEA**

Phân tích phần tử hữu hạn (FEA) là thường được sử dụng để mô hình hóa và giải quyết các vấn đề kỹ thuật phức tạp trong môi trường ảo. Với sự tiến bộ trong công nghệ và sự gia tăng đáng kể về khả năng xử lý của máy tính, FEA đã trở thành một lựa chọn phổ biến để giải quyết bằng số nhiều loại vấn đề mà nếu không sẽ yêu cầu thử nghiệm tốn kém. Ở đây, NCS sử dụng phần mềm MIDAS để thiết lập mô hình PTHH 3D (FE) của cầu Thạch Quả trên tuyến đường cao tốc Hà Nội - Thái Nguyên. Mô hình đại diện cho cầu FEA, đề cập đến cầu Thạch Quả ngay sau khi xây dựng. MIDAS cung cấp một giao diện đơn giản để tạo nhiều loại hình dạng và kết cấu. Một số mô-đun phổ biến trong

MIDAS là: kết cấu, vật liệu, mặt cắt, xây dựng mô hình, yêu cầu đầu ra, tương tác và ràng buộc, tải trọng, các điều kiện biên, chia phân tử, phân tích và xử lý kết quả.



Hình 5.1. Cầu Thạc Quả trên tuyến cao tốc Hà Nội – Thái Nguyên

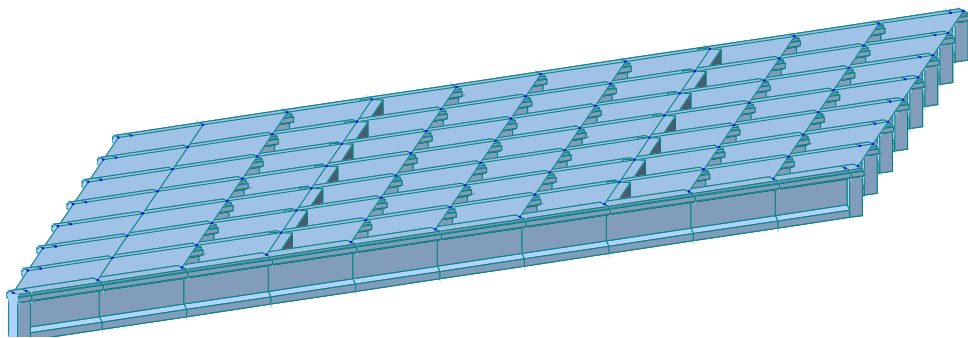


Hình 5.2. Bố trí chung cầu Thạc quả (tuyến cao tốc Hà Nội – Thái Nguyên)

Thông số Cầu FEA được mô hình hóa từ cầu Thạch Quả, như thể hiện trong **Hình 5.1** và **Hình 5.2**. Ứng suất dự ứng lực cũng được mô hình hóa từ các bản vẽ cầu. Kết quả mô hình chi tiết ngắn gọn của mô hình được mô tả như sau đây.

#### 5.2.2.1. Định nghĩa các phần tử

Các phần tử “dầm 3D” tuyến tính hai nút được sử dụng cho dầm, phần tử tấm được dùng mô tả bản mặt cầu. Kích thước của các phần tử trong lưới được xác định là 3,3m. Kích thước mắt lưới này đã chia mô hình cầu thành 164 phần tử. Các bộ phận khác nhau của mô hình PTTH được thể hiện trong **Hình 5.3**.



Hình 5.3. Mô hình tổng thể kết cấu nhịp cầu

#### 5.2.2.2. Định nghĩa các đặc trưng vật liệu

Mô-đun thuộc tính cụ thể được gán cho các loại vật liệu và các thành phần kết cấu như bê tông dự ứng lực, bê tông bản mặt cầu.

#### 5.2.2.3. Gán mô hình

Mô-đun lắp ráp được gán cho các bộ phận và định vị trong một hệ tọa độ toàn cầu..

Mô-đun tương tác được sử dụng để xác định và quản lý sự tương tác và ràng buộc giữa các phiên bản bộ phận.

#### 5.2.2.4. Xác thực mô hình FEA

Nhiệm vụ khó khăn nhất trong mô hình hóa và phân tích PTTH là xác nhận một mô hình PTTH sẽ đại diện cho một kết cấu thực. Mô hình FEA trong nghiên cứu này được xác thực bằng hai phương pháp: xác thực thực nghiệm bằng cách sử dụng phân tích tần số và xác thực lý thuyết bằng cách sử dụng phân tích tĩnh. Từ kết quả phân tích từ mô hình FEA, tần số cơ bản của cầu theo mô hình FEA tính toán được là 3,9529 Hz. Kết quả này rất gần với tần số cơ bản 3,90 Hz đo được của cầu đang khai thác.

### 5.2.3. Thực nghiệm đánh giá với cầu đang khai thác

#### 5.2.3.1. Mô tả quá trình đo đạc

Kết quả thực nghiệm tại hiện trường đối với một nhịp cầu trên tuyến cao tốc Hà Nội-Thái Nguyên, các thiết bị đo được bố trí cho dầm thứ 3 và thứ 4 trong mặt cắt ngang bao gồm đất tríc đo biến dạng theo thời gian (điểm gắn đáy dầm và điểm gắn mặt cầu), đầu đo gia tốc theo hai phương thẳng đứng và phương ngang cầu. Đầu đo được sử dụng là cảm biến Kyowa KFGS-5-120-C1-11 M1L3R; phần mềm ghi dữ liệu động DCS-100A của KYOWA.



Hình 5.4. Đo dao động và biến dạng cầu Thạch Quả

#### 5.2.3.2. Kết quả phân tích, đo đạc

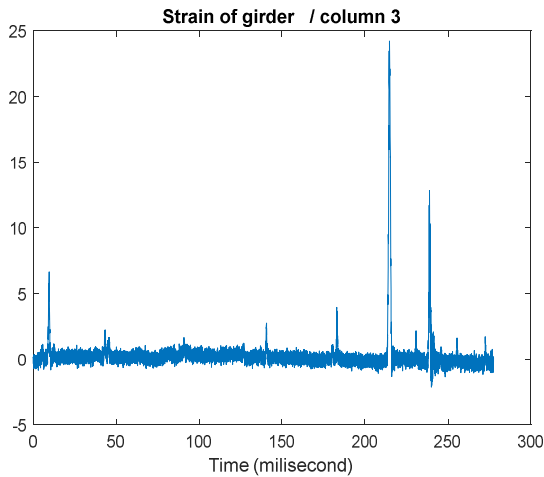
Một số kết quả đo biến dạng động của các dầm như đã mô tả trong Hình 5.2 được tổng hợp như trong các Hình 5.5 đến 5.8 sau đây.

Kết quả đo biến dạng trên cho thấy biến dạng lớn nhất xuất hiện trong dầm là  $25 \times 10^{-6}$ , kết hợp với mô đun đàn hồi bê tông dầm  $E=33238\text{Mpa}$ , thu được ứng biến

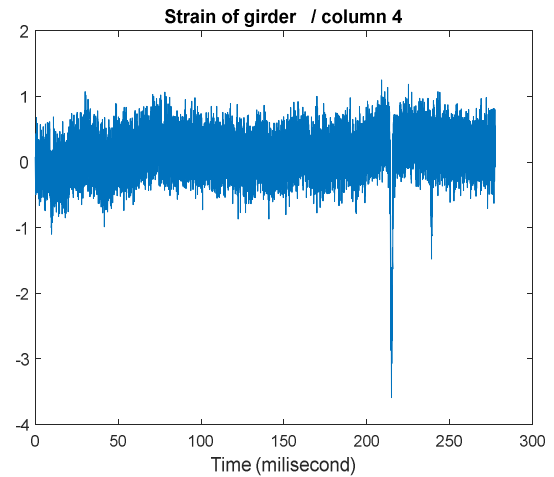
xuất hiện trong dầm lớn nhất (ứng suất thứ dưới) là 0,83Mpa. Kết quả tính toán ứng suất do hoạt tải thiết kế là 2,87Mpa. Như vậy, có thể nhận xét rằng:

- Ứng suất thực tế chỉ bằng khoảng 29% so với ứng suất tính toán từ hoạt tải thiết kế (0,83 / 2,87). Kết quả này chứng minh rằng kết cấu dầm hiện tại đang làm việc trong giai đoạn đàn hồi và có dự trữ cường độ rất lớn so với tải trọng thử nghiệm.

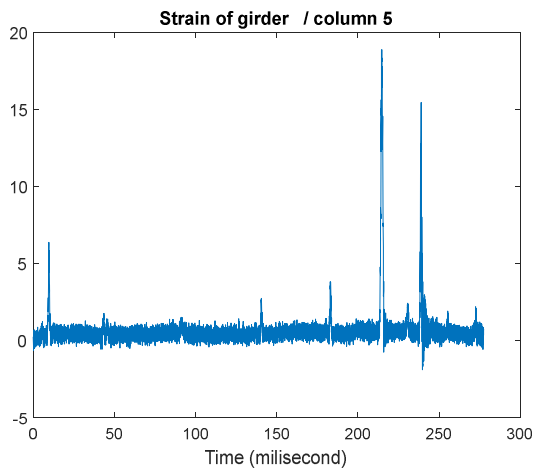
- Dưới ảnh hưởng của tải trọng động gây ra trong quá trình khai thác, Dầm được đo hoàn toàn đáp ứng khả năng chịu lực và nằm an toàn trong giới hạn thiết kế.



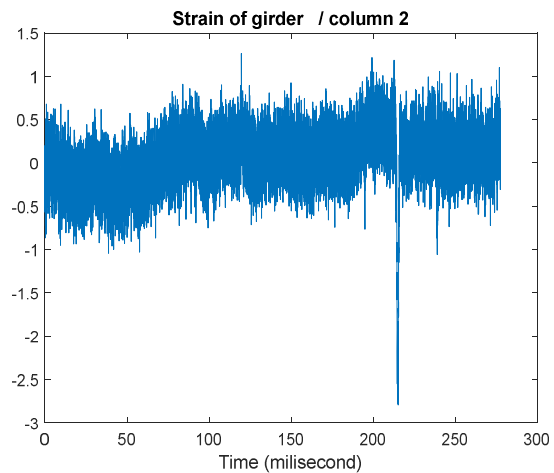
Hình 5.5. Biến dạng theo thời gian của thớ dưới dầm 3



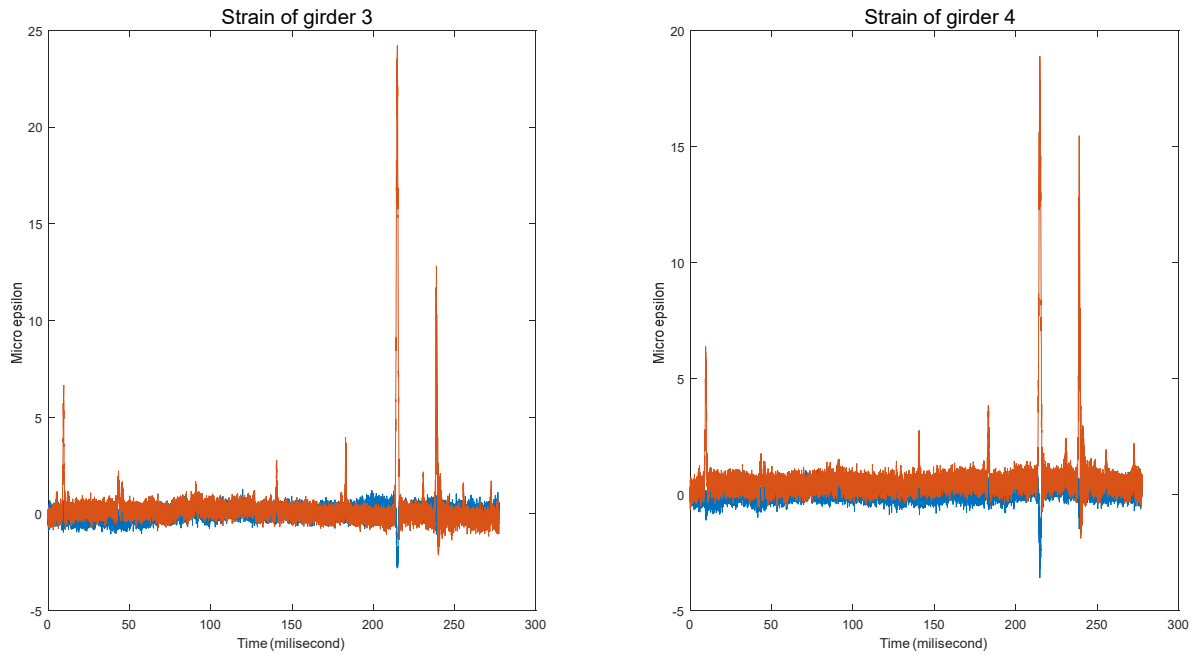
Hình 5.6. Biến dạng theo thời gian thớ trên của dầm 4



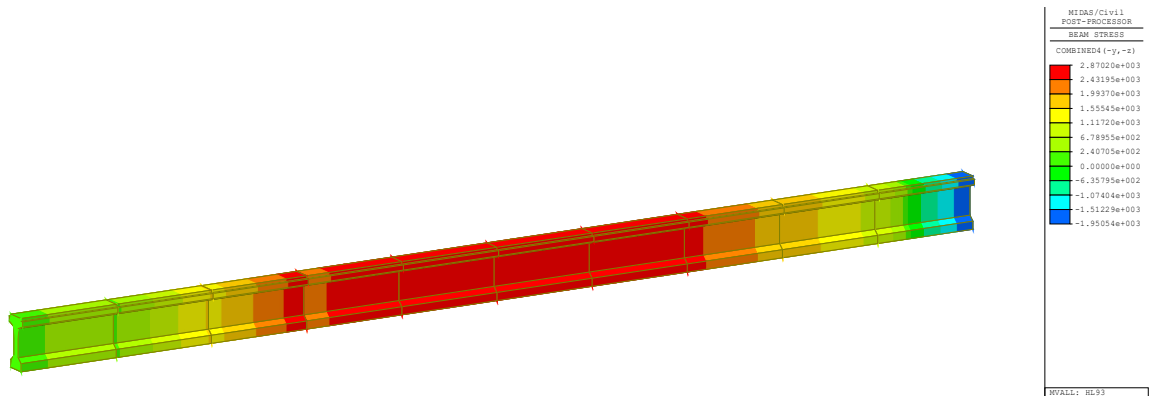
Hình 5.7. Biến dạng theo thời gian thớ dưới của dầm 4



Hình 5.8. Biến dạng theo thời gian của thớ trên dầm 3

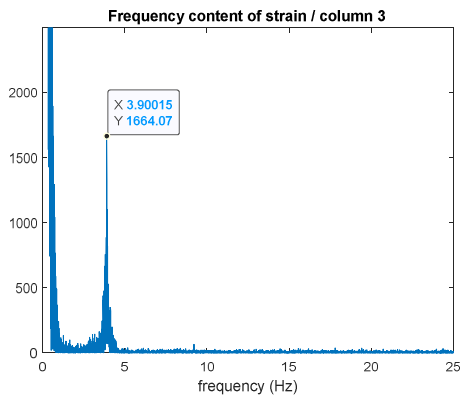


Hình 5.9. Kết hợp biến dạng thớ trên và thớ dưới của dầm 3 và dầm 4

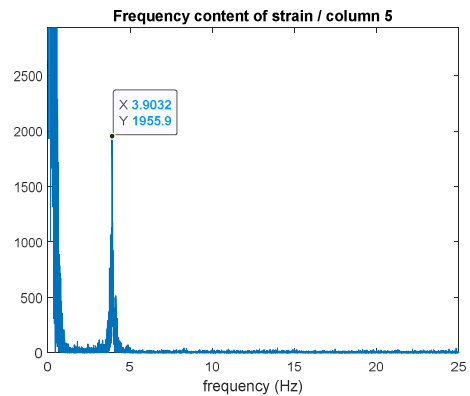


Hình 5.10. Kết quả phân tích ứng suất trong dầm do tải thiết kế

Tần số phân tích được từ kết quả đo biến dạng như sau:

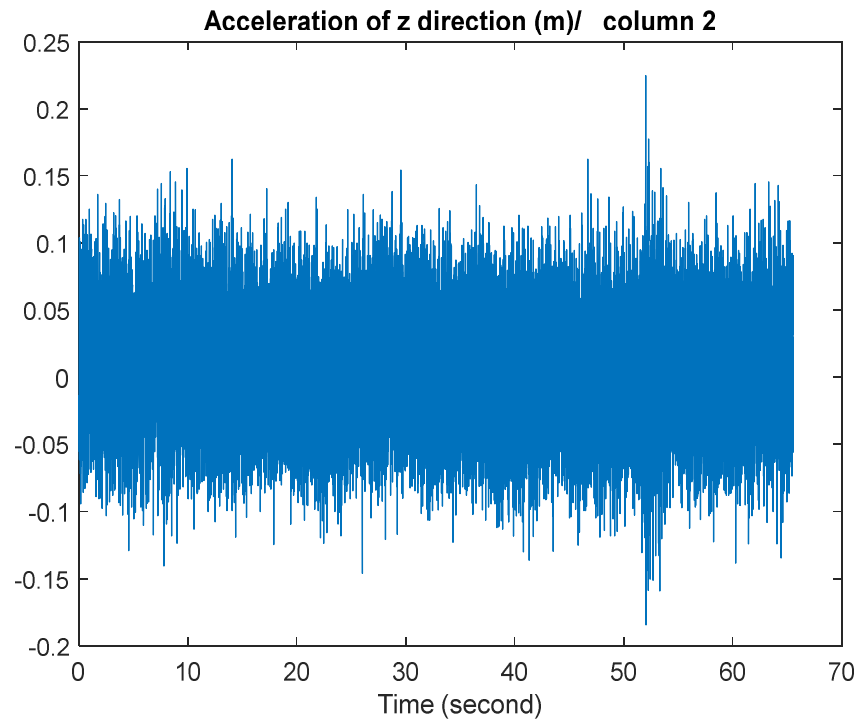


Hình 5.11. Kết quả phân tích phổ của dầm 3

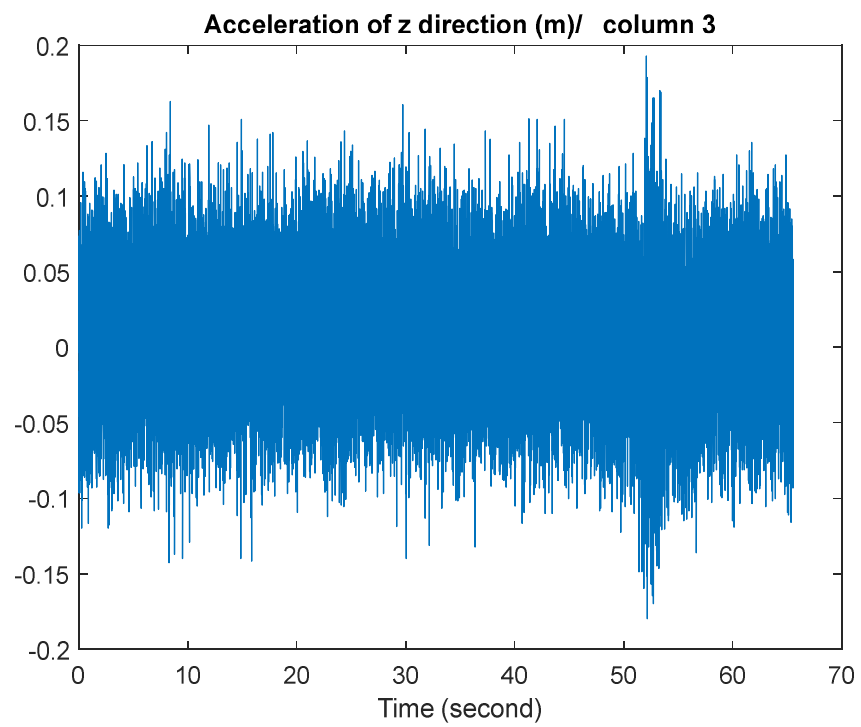


Hình 5.12. Kết quả phân tích phổ của dầm 4

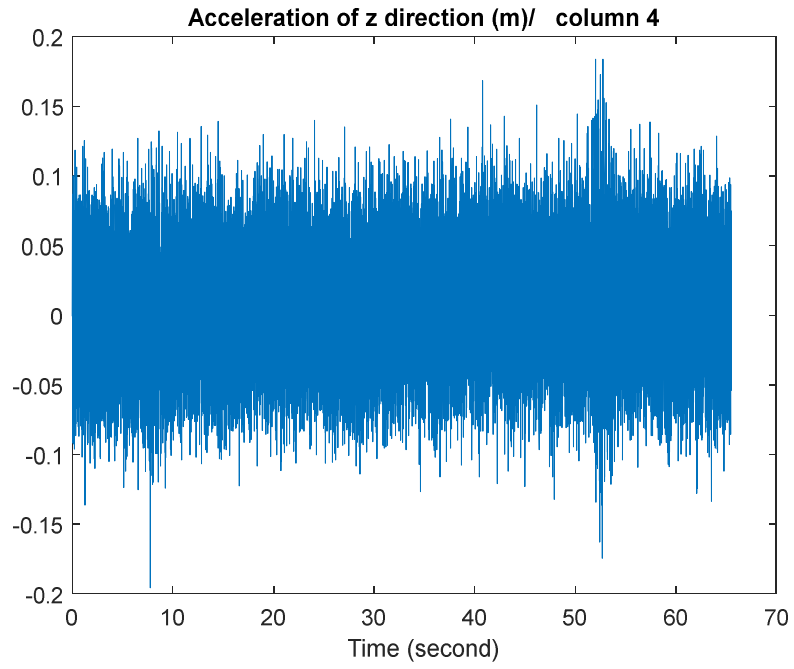
Kết quả thu được từ đo gia tốc:



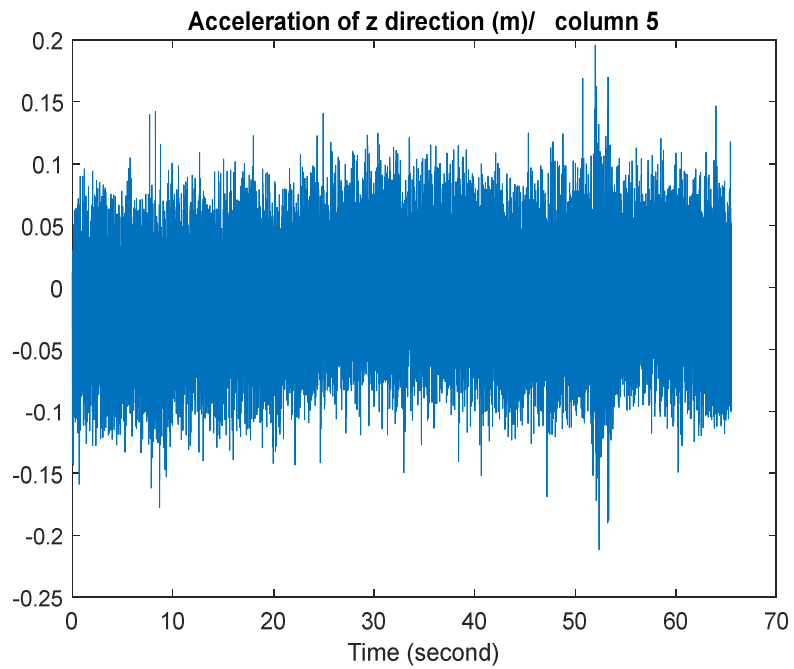
*Hình 5.13. Kết quả gia tốc của dầm 3*



*Hình 5.14. Kết quả gia tốc của dầm 3*

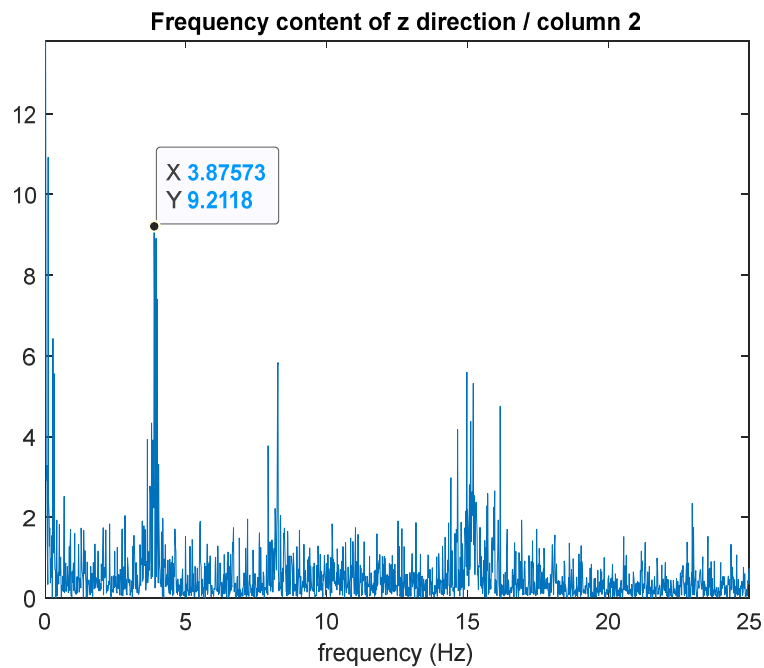


*Hình 5.15. Kết quả gia tốc của dầm 4*

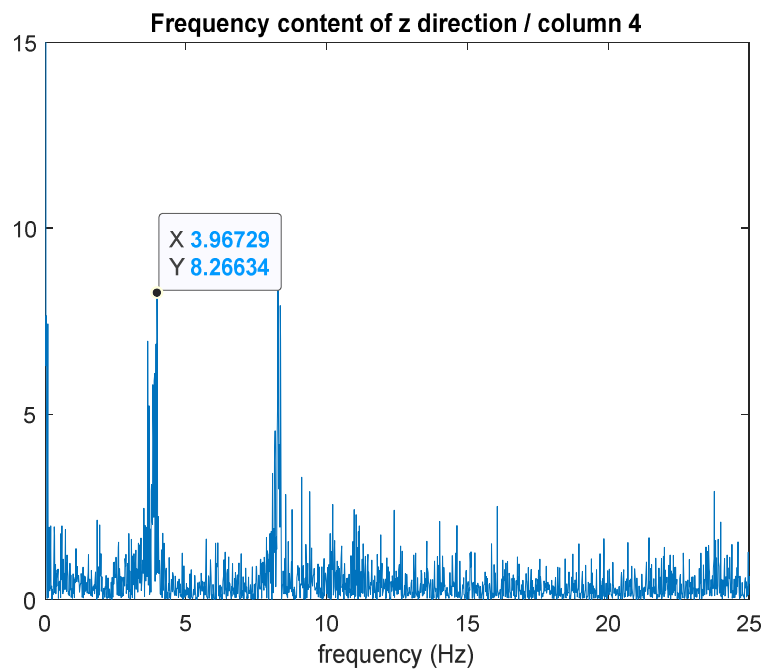


*Hình 5.16. Kết quả gia tốc của dầm 4*

Kết quả tần số tính ra từ số liệu gia tốc đo được:



Hình 5.17. Kết quả phổ tần số của dầm 4



Hình 5.18. Kết quả phổ tần số của dầm 3

Ghi chú:

- Column 2, 3: tương ứng với giá trị đo cho dầm 3.
- Column 4, 5: tương ứng với giá trị đo cho dầm 4.

#### **5.2.4. Nhận xét trường hợp nghiên cứu 1:**

Bên cạnh việc so sánh tần số dao động cơ bản giữa mô hình PTHH và kết quả đo đạc thực nghiệm, các kết quả đo biến dạng và ứng suất động cũng được sử dụng để kiểm chứng tính hợp lý của mô hình tính toán. Cụ thể, ứng suất lớn nhất xác định từ kết quả đo biến dạng động của dầm cầu thấp hơn đáng kể so với ứng suất tính toán do tải trọng thiết kế, cho thấy kết cấu nhịp đang làm việc trong giới hạn đàn hồi và chưa thấy dấu hiệu suy giảm về khả năng chịu tải một cách nghiêm trọng.

Sự phù hợp giữa tần số dao động cơ bản của mô hình FEA và kết quả đo thực tế, kết hợp với sự tương thích giữa kết quả ứng suất khai thác và ứng suất thiết kế, cho thấy mô hình PTHH có khả năng phản ánh hợp lý trạng thái làm việc tổng thể của kết cấu nhịp cầu. Điều này tạo cơ sở tin cậy cho việc sử dụng các chỉ số dao động làm đại lượng đại diện trong đánh giá suy giảm độ cứng và khả năng chịu tải của cầu trong các phân tích tiếp theo.

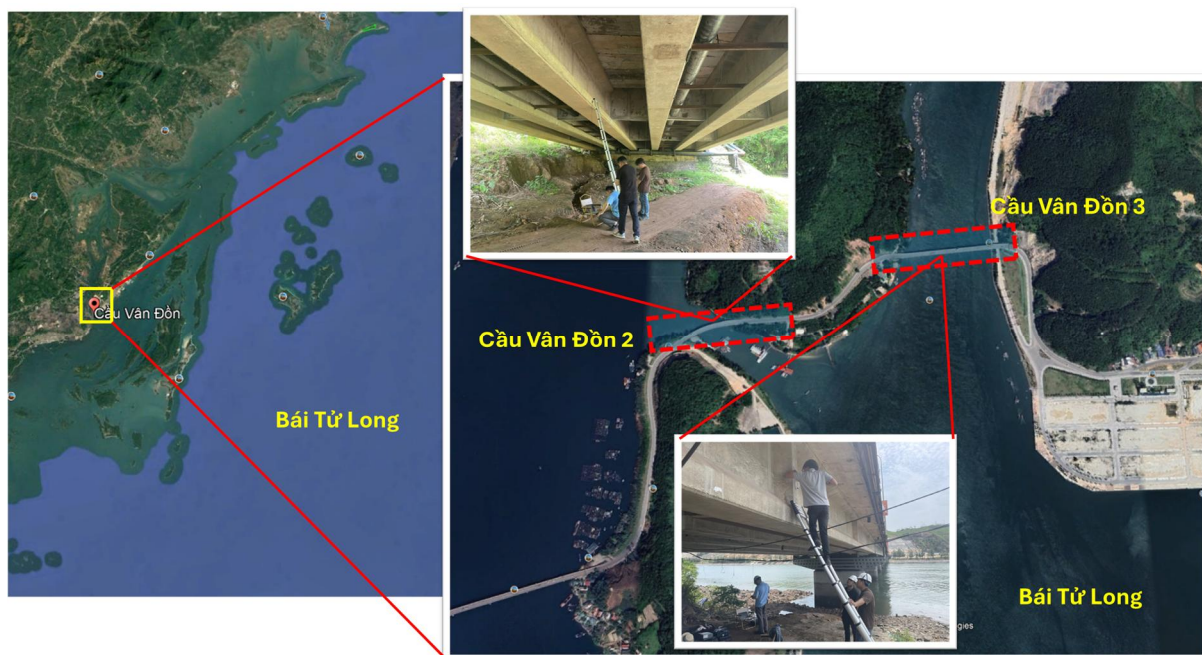
### **5.3. Trường hợp nghiên cứu 2: cầu Vân Đồn 2 và 3 (Vân Đồn – Quảng Ninh)**

#### **5.3.1. Giới thiệu chung về cầu**

Cầu Vân Đồn 2 và 3 là hai trong ba cây cầu BTCT có chiều rộng cầu 12m bắc qua vịnh Bái Tử Long, có vai trò quan trọng trong việc kết nối các đảo của huyện Vân Đồn, tỉnh Quảng Ninh. Khởi công xây dựng vào năm 2002 và đưa vào khai thác từ năm 2006. Đây là 2 cầu nằm sát biển do đó bị ảnh hưởng bởi khí hậu và thâm nhập của môi trường biển rất rõ nét. Sau 18 năm khai thác cầu đã được sửa chữa tăng cường phần trụ BTCT, tuy nhiên, khi khảo sát cầu vào tháng 8/2024, phần dầm cầu có dạng chữ I BTCT DƯL dài 33m có chất lượng còn tốt, gần như không nhìn thấy hiện tượng hư hỏng.

#### **5.3.2. Thí nghiệm, đo đạc hàm lượng $Cl^-$ đối với dầm cầu**

Trong nghiên cứu này, NCS tiến hành kiểm tra đo đạc hàm lượng  $Cl^-$  trong mẫu bê tông dầm cầu Vân Đồn 2 và 3 theo ASTM C 1152 [37]. NCS thực hiện lấy mẫu bột bằng cách khoan tại cầu, hướng lấy mẫu hướng ra phía biển và dầm ngoài cùng. Thí nghiệm xác định hàm lượng  $Cl^-$  được thực hiện tại Phòng thí nghiệm hoá - vật liệu xây dựng LAS - XD 201 thuộc Viện chuyên ngành vật liệu xây dựng & bảo vệ công trình - Viện Khoa học và Công nghệ GTVT (ITST).



Hình 5.19. Vị trí và dạng kết cấu nhịp cầu Vân Đồn 2 và 3

#### 5.3.2.1. Mục tiêu và công tác lấy mẫu thí nghiệm

Thí nghiệm được thực hiện nhằm xác định hàm lượng ion clorua ( $Cl^-$ ) tổng có khả năng hòa tan trong môi trường axit của mẫu vữa hoặc bê tông, theo phương pháp chuẩn ASTM C1152/C1152M – Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. Mục tiêu chính bao gồm:

- Xác định tổng hàm lượng ion clorua ( $Cl^-$ ) có trong bê tông, bao gồm cả phần hòa tan trong nước và phần chỉ hòa tan trong axit, nhằm đánh giá mức độ xâm nhập của clorua vào trong cấu kiện bê tông.

- Cung cấp cơ sở định lượng để đánh giá nguy cơ ăn mòn cốt thép trong môi trường có chứa clorua.

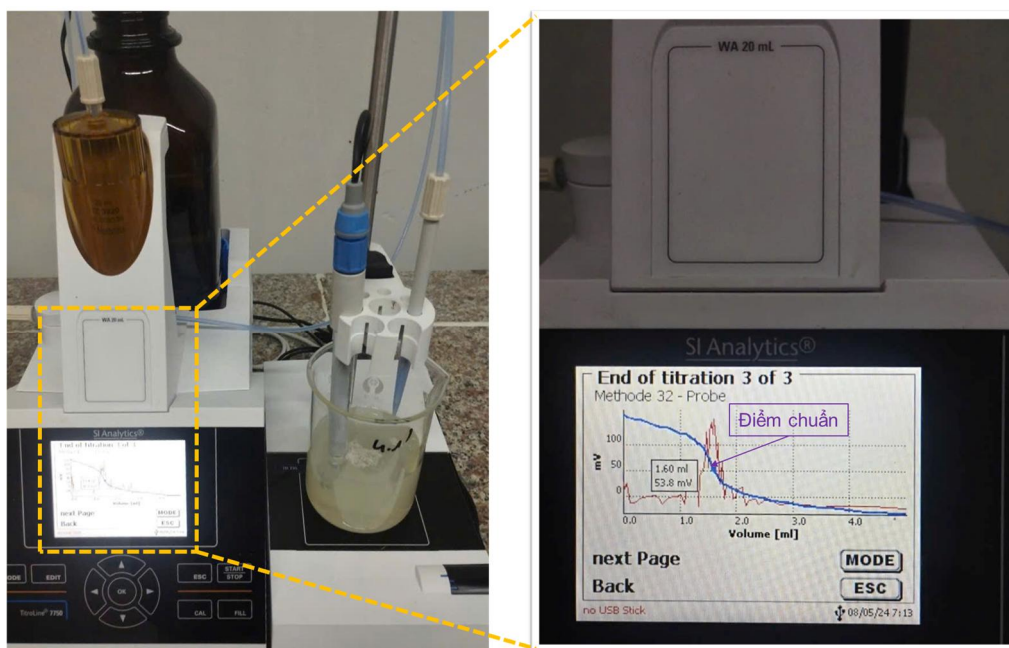
- Có thể sử dụng trong các chương trình kiểm định, khảo sát hiện trạng công trình nhằm phục vụ công tác sửa chữa, bảo trì nhằm kéo dài tuổi thọ kết cấu.

Theo dữ liệu được điều tra, chiều dày lớp bê tông bảo vệ của dầm khoảng từ dầm từ 4 - 4,5cm, do đó, NCS lấy mẫu thí nghiệm bằng cách khoan lấy bột bê tông theo từng chiều dày 1cm – 2cm – 3cm – 4cm. **Hình 5.20** mô tả quá trình lấy mẫu thí nghiệm và tiến hành đo dao động dầm cầu bằng đầu đo gia tốc. Đầu đo được sử dụng là cảm biến Kyowa KFGS-5-120-C1-11 MIL3R; phần mềm ghi dữ liệu động DCS-100A của KYOWA.



Hình 5.20. Mô tả quá trình lấy mẫu, thí nghiệm và đo gia tốc

### 5.3.2.2. Kết quả thí nghiệm



Hình 5.21. Thí nghiệm xác định hàm lượng Cl-

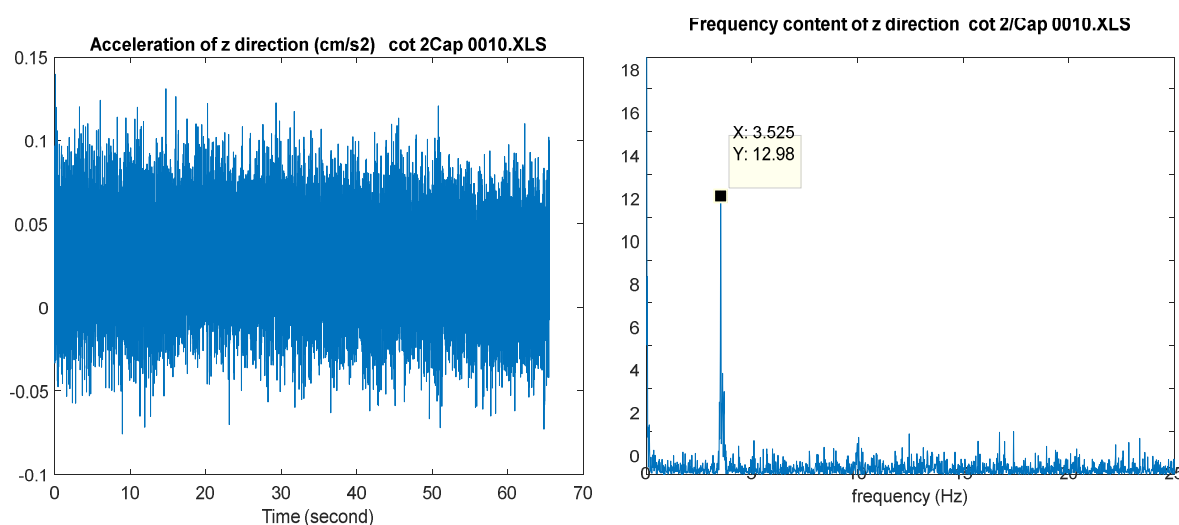
**Hình 5.21** mô tả thí nghiệm xác định hàm lượng Cl<sup>-</sup> bằng máy chuẩn độ tự động SI Analytics (Đức). Trục hoành (Volume [ml]) là thể tích dung dịch để xác định hàm lượng ion clorua, trục tung (mV) là điện thế đo trong quá trình chuẩn độ. Đỉnh cao nhất màu đỏ (điểm chuyển của màu xanh) chính là điểm chuẩn - tương ứng lượng dung dịch chuẩn cần thiết để xác định lượng ion clorua.

Kết quả thí nghiệm đo được với 2 bộ mẫu tại cầu Vân Đồn 2 và 3 như trong Bảng 5.1 và 5.2 sau đây.



Hình 5.22. Mô hình và kết quả phân tích dao động lý thuyết cầu Vân Đồn 2

Kết quả đo dao động cầu Vân Đồn 2 được mô tả trong Hình 5.23.



Hình 5.23. Kết quả đo dao động và phân tích FFT cầu Vân Đồn 2

Từ kết quả trên cho thấy, theo lý thuyết là 3,74Hz, kết quả đo thực tế là 3,53Hz. Sự khác biệt giữa tần số cơ bản lý thuyết và tần số đo thực tế là 5,62%. Tần số giảm 5,62% thay vào phương trình 3.14 (Chương 3) để xác định được G:

$$G = \Delta f * \frac{1000}{123} \quad (3.1\text{-Chương 3})$$

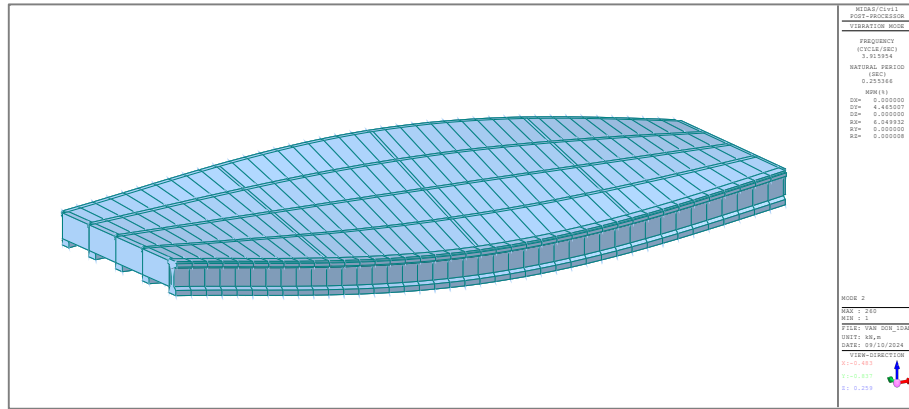
Trong đó:  $\Delta f$  là viết tắt của phần trăm khác về tần số giữa cầu FEA và cầu đang khai thác. Một cây cầu đã được kiểm tra được đánh giá từ “0” (không đạt) đến “9” (xuất sắc) tùy thuộc vào điều kiện vật chất hiện tại của các bộ phận của nó. Hiện tại điều kiện đánh giá cầu đang khai thác được tính toán bởi phương trình 3.13 (Chương 3).

$$\text{Điều kiện đánh giá cầu} = \text{số nguyên } (9 - G) \quad (3.2\text{-Chương 3})$$

Từ phương trình 3.12 (Chương 3) xác định được giá trị  $G = 0,4565$ ; từ phương trình 3.13 (Chương 3) thu được điều kiện đánh giá cầu ở thang điểm 8, có nghĩa là cầu có tình trạng tương đối tốt.

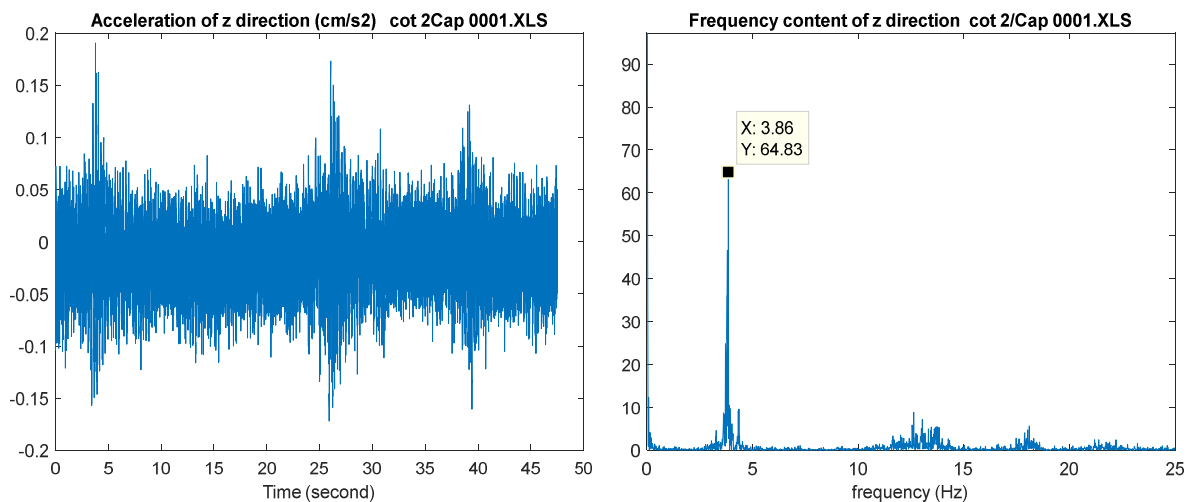
### 5.3.3.2. Đánh giá sự suy giảm sức chịu tải dầm cầu bằng phương pháp dao động - cầu Vân Đồn 3

Kết quả phân tích lý thuyết cầu Vân Đồn 3 như Hình 5.24.



Hình 5.24. Mô hình và kết quả phân tích dao động lý thuyết cầu Vân Đồn 3

Kết quả đo dao động cầu Vân Đồn 3 được mô tả trong Hình 5.25.



Hình 5.25. Kết quả đo dao động và phân tích FFT cầu Vân Đồn 3

Từ kết quả trên cho thấy theo lý thuyết là 3,92Hz, kết quả đo thực tế là 3,86Hz. Sự khác biệt giữa tần số cơ bản lý thuyết và tần số đo thực tế là 1,53%. Tần số giảm 1,53% thay vào phương trình 3.14 (Chương 3) để xác định được G:

$$G = \Delta f * \frac{1000}{123} \quad (3.3\text{-Chương 3})$$

Trong đó:  $\Delta f$  là viết tắt của phần trăm khác về tần số giữa cầu FEA và cầu đang khai thác. Một cây cầu đã được kiểm tra được đánh giá từ “0” (không đạt) đến “9” (xuất sắc) tùy thuộc vào điều kiện vật chất hiện tại của các bộ phận của nó. Hiện tại điều kiện đánh giá cầu đang khai thác được tính toán bởi phương trình 3.13 (Chương 3).

$$\text{Điều kiện đánh giá cầu} = \text{số nguyên } (9 - G) \quad (3.4\text{-Chương 3})$$

Từ phương trình 3.12 (Chương 3) xác định được giá trị  $G = 0,1244$ ; từ phương trình 3.13 (Chương 3) thu được điều kiện đánh giá cầu ở thang điểm 8, có nghĩa là cầu có tình trạng tương đối tốt.

#### 5.3.4. Xác định tuổi thọ sử dụng của kết cấu nhịp cầu BTCT DUL theo phương pháp ANN

Sau khi có được kiến trúc mạng và các trọng số của các lớp tương ứng, ANN có thể biểu diễn dưới dạng các phép toán của ma trận để đưa ra kết quả, như dưới đây:

$$[value_{hidelayer}] = [f_1([inputs] * [Weights_1] + [bias_1])] \\ [output] = f_2([value_{hidelayer}] * [Weights_2] + bias_2)$$

Trong đó:  $f$  là các hàm transfer, trong trường hợp này  $f_1$  là hàm tansig ( $tansig(x) = 2/(1+exp(-2*x))-1$ );  $f_2$  là hàm purelin ( $purelin(n) = n$ ).

##### 5.3.4.1. Đối với cầu Vân Đồn 2:

Xác định tuổi thọ trên cơ sở mạng huấn luyện với các thông số đầu vào của công trình cầu Vân Đồn 2 với các trường hợp nghiên cứu giả định như được tính toán minh họa đối với bộ số liệu/trường hợp nguyên cứu như trong các Bảng sau:

Bảng 5.3. Trường hợp giả định có sự thay đổi chiều dày bê tông bảo vệ

STT	Chiều dày bê tông bảo vệ (mm)	$D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	H (%)	$C_s$ (%)	$C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) ANN
1	50	6.044	80	0.0283	0.0513	18.73
2	45	6.044	80	0.0283	0.0513	15.73
3	40	6.044	80	0.0283	0.0513	12.80
4	35	6.044	80	0.0283	0.0513	9.94
5	30	6.044	80	0.0283	0.0513	7.18

Bảng 5.4. Trường hợp giả thiết giữ nguyên chiều dày bê tông bảo vệ 45mm

STT	Chiều dày bê tông bảo vệ (mm)	$D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	H (%)	$C_s$ (%)	$C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) ANN
1	45	6.044	80	0.0283	0.0513	15.73
2	45	6.044	80	0.0088	0.0513	15.46
3	45	6.044	80	0.0071	0.0513	15.44

Bảng 5.5. Trường hợp giải thiết giữ nguyên chiều dày bê tông bảo vệ 40mm

STT	Chiều dày bê tông bảo vệ (mm)	$D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	H (%)	$C_s$ (%)	$C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) ANN
1	40	6.044	80	0.0283	0.0513	12.80
2	40	6.044	80	0.0088	0.0513	12.56
3	40	6.044	80	0.0071	0.0513	12.54

Bảng 5.6. Trường hợp giải thiết giữ nguyên chiều dày bê tông bảo vệ 35mm

STT	Chiều dày bê tông bảo vệ (mm)	$D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	H (%)	$C_s$ (%)	$C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) ANN
1	35	6.044	80	0.0283	0.0513	9.94
2	35	6.044	80	0.0088	0.0513	9.74
3	35	6.044	80	0.0071	0.0513	9.72

## 5.3.4.2. Đối với cầu Vân Đồn 3:

Xác định tuổi thọ trên cơ sở mạng huấn luyện với các thông số đầu vào của công trình cầu Vân Đồn 3 với các trường hợp nghiên cứu giả định như được tính toán minh họa đối với bộ số liệu/trường hợp nguyên cứu như trong các Bảng sau:

Bảng 5.7. Trường hợp giải thiết giữ nguyên chiều dày bê tông bảo vệ 35mm

STT	Chiều dày bê tông bảo vệ (mm)	$D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	H (%)	$C_s$ (%)	$C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) ANN
1	35	6.044	80	0.0354	0.0513	10.01
2	35	6.044	80	0.0035	0.0513	9.69
3	35	6.044	80	0.0025	0.0513	9.68

Bảng 5.8. Trường hợp giải định có sự thay đổi chiều dày bê tông bảo vệ

STT	Chiều dày bê tông bảo vệ (mm)	$D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	H (%)	$C_s$ (%)	$C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) ANN
1	50	6.044	80	0.0354	0.0513	18.84
2	45	6.044	80	0.0354	0.0513	15.83
3	40	6.044	80	0.0354	0.0513	12.88
4	35	6.044	80	0.0354	0.0513	10.01

5	30	6.044	80	0.0354	0.0513	7.23
---	----	-------	----	--------	--------	------

Bảng 5.9. Trường hợp giải thiết giữ nguyên chiều dày bê tông bảo vệ 40mm

STT	Chiều dày bê tông bảo vệ (mm)	$D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	H (%)	$C_s$ (%)	$C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) ANN
1	40	6.044	80	0.0354	0.0513	12.88
2	40	6.044	80	0.0035	0.0513	12.49
3	40	6.044	80	0.0025	0.0513	12.48

Bảng 5.10. Trường hợp giải thiết giữ nguyên chiều dày bê tông bảo vệ 45mm

STT	Chiều dày bê tông bảo vệ (mm)	$D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	H (%)	$C_s$ (%)	$C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) ANN
1	45	6.044	80	0.0354	0.0513	15.83
2	45	6.044	80	0.0035	0.0513	15.38
3	45	6.044	80	0.0025	0.0513	15.37

### 5.3.5. Nhận xét đối với nghiên cứu 2:

Đối với nghiên cứu 2, các phương pháp phân tích dao động lý thuyết, xử lý tín hiệu FFT từ số liệu đo thực nghiệm và mô hình dự báo tuổi thọ ứng dụng ANN được sử dụng. Kết quả phân tích dao động lý thuyết và kết quả FFT từ số liệu đo gia tốc được so sánh để xác định mức độ suy giảm tần số dao động cơ bản của kết cấu nhịp cầu. Sự suy giảm này được quy đổi thành chỉ số suy giảm độ cứng tổng thể G, để đánh giá tình trạng làm việc của cầu.

Chỉ số G cùng với các tham số môi trường và vật liệu đặc trưng cho điều kiện xâm nhập ion clorua được sử dụng làm đầu vào cho mô hình ANN để dự báo tuổi thọ sử dụng của kết cấu nhịp. Như vậy, kết quả phân tích dao động và FFT đóng vai trò là cầu nối giữa đánh giá trạng thái kết cấu hiện tại và mô hình dự báo tuổi thọ. Việc liên kết các phương pháp này cho phép đánh giá đồng thời mức độ suy giảm hiện tại và xu hướng suy giảm của kết cấu nhịp cầu BTCT môi trường biển trong tương lai.

## 5.4. Kết luận Chương 5

Chương 5 đã đưa ra các ví dụ cụ thể về việc áp dụng mô hình ANN để đánh giá sự suy giảm khả năng chịu tải và dự báo tuổi thọ sử dụng để đánh giá một công trình trong

thực tế về kết cấu nhịp cầu dầm BTCT đang trong quá trình khai thác. Qua đó đã chứng minh và tính khả thi và hiệu quả thực tiễn trong việc dự báo định lượng về tình trạng kết cấu của phương pháp ANN. Các kết quả này là cơ sở quan trọng để hỗ trợ công tác quản lý, bảo trì và đưa ra các quyết định can thiệp kịp thời nhằm kéo dài tuổi thọ khai thác của công trình.

## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### 1. Kết luận

Luận án đã tiến hành nghiên cứu, phân tích ảnh hưởng của các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng xuống cấp kết cấu BTCT và hệ thống được các mô hình xuống cấp, các mô hình dự đoán độ bền của kết cấu BTCT. Từ đó, ứng dụng kỹ thuật phân tích hiện đại để đánh giá và dự đoán tuổi thọ của kết cấu nhịp dầm BTCT cũ hiện đang khai thác.

Kết quả của Luận án đạt được cụ thể như sau:

- Luận án tiến hành đo đạc, khảo sát thực tế cầu đang khai thác, sử dụng phương pháp đo động để phân tích sự suy giảm của kết cấu thông qua phân tích FFT. Sự thay đổi của các đặc trưng mặt cắt có thể được nhận biết và so sánh với phân tích lý thuyết thông qua phân tích FEA.

- Luận án đã tiến hành xây dựng và tối ưu mạng nơ ron nhân tạo ANN và ứng dụng trong đánh giá tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu BTCT. Thông qua kết quả khảo sát được cho thấy thuật toán mang tính tổng quát, có thể áp dụng dự đoán tuổi thọ kết cấu nhịp cầu BTCT nếu có được các bộ số liệu đủ tin cậy.

- Thông qua kết quả nghiên cứu cho thấy sự cần thiết xây dựng bộ dữ liệu có độ tin cậy cao đồng thời cho thấy tiềm năng ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong việc giải quyết các bài toán về giao thông nói chung. Mặc dù vậy, việc dự đoán tuổi thọ là bài toán rất phức tạp phụ thuộc rất nhiều tham số khó kiểm soát đặc biệt là khó có thể kiểm nghiệm lại kết quả, do vậy khi tính toán tuổi thọ cần lưu ý các vấn đề sau:

- Xây dựng bộ dữ liệu đủ tin cậy để huấn luyện mạng ANN.

#### (1) Đầu vào:

+ Ảnh hưởng của điều kiện tải trọng đối với cầu BTCT, ngoài việc cần phải đo được hoạt tải thực tế đang khai thác thường xuyên thì cần có bộ số liệu liên quan đến kết cấu thông qua khảo sát tại hiện trường như: (1) Chiều dài nhịp, (2) chiều cao dầm, (3) số lượng dầm chủ, (4) khoảng cách giữa các dầm chủ, (5) số lượng và phân bố dầm ngang, (6) góc chéo của cầu, (7) cường độ bê tông  $f'c$ , (8) hồ thiết kế cầu (nếu có), (9) năm xây dựng cầu, (10) lưu lượng xe, tải trọng thiết kế,...

+ Ảnh hưởng của điều kiện môi trường đối với cầu BTCT ở đây là các thông tin về kích thước hình học, môi trường bao gồm các tham số ảnh hưởng như: (1) chiều dài

*lớp bê tông bảo vệ, (2) hệ số khuếch tán clo D28, (3) độ ẩm H(%), (4) nồng độ Clo bề mặt, (5) giá trị ngưỡng nồng độ Clo,...*

**(2) Đầu ra:** Kết quả dự đoán tuổi thọ.

- Lựa chọn tham số cập nhật mô hình từ các kết quả đo ngoài thực tế.
- Cần đối chiếu với kết quả tính bằng nhiều phương pháp khác nhau.

**Các điểm mới của Luận án:**

❖ Đề xuất phân tích suy giảm của kết cấu dầm BTCT dựa trên kết hợp đánh giá hiện trạng và phương pháp đo động thông qua tần số dao động và sự thay đổi đặc trưng của mặt cắt kết cấu nhịp.

❖ Nghiên cứu phân tích tính toán tuổi thọ công trình dựa trên ứng dụng mạng ANN. Luận án đã đề xuất xây dựng thuật toán, mô hình và chương trình đánh giá tuổi thọ kết cấu cầu cũ dưới tác động kết hợp của môi trường và tải trọng.

❖ Phát triển mô hình dự báo tuổi thọ kết cấu nhịp dựa trên trí tuệ nhân tạo. Giúp người quản lý dự đoán nhanh chóng tuổi thọ kết cấu để đưa ra biện pháp và quy trình bảo trì hợp lý.

## **2. Kiến nghị**

Do thời gian thực hiện và việc thu thập số liệu còn hạn chế, nghiên cứu mới chỉ đề xuất phương pháp đánh giá tình trạng kết cấu thông qua sự suy giảm sức kháng của mặt cắt mà chưa đề cập đầy đủ các thông tin dữ liệu khác để đưa vào mô hình ANN. Trong thời gian tới, khi thu thập được đầy đủ dữ liệu của các tham số đầu liên quan đến sức kháng mặt cắt, nghiên cứu sinh sẽ tiếp tục nghiên cứu để tích hợp vào mô hình, từ đó sẽ phát triển nghiên cứu theo hướng sức kháng kết cấu kết hợp với các tác nhân môi trường sẽ giúp đánh giá tuổi thọ của kết cấu một cách tổng thể, hoàn chỉnh và chính xác hơn.

Theo đó, kiến nghị các cơ quan quản lý chuyên ngành cần thiết phải xây dựng bộ đề cương bảo trì, đánh giá, kiểm định kết cấu cầu BTCT đang sử dụng với các thông tin cơ bản cần thiết về điều kiện môi trường tác động đến công trình, tình trạng thực tế của kết cấu,... để có thông tin, số liệu nhằm từng bước hoàn chỉnh các phương pháp đánh giá cầu.

Bên cạnh các kết quả đạt được, luận án cũng tồn tại một số giới hạn cần được làm rõ nhằm xác định phạm vi áp dụng của phương pháp nghiên cứu.

Thứ nhất, trong quá trình phân tích dao động kết cấu, nghiên cứu giả thiết rằng các dữ liệu đo đạc có độ tin cậy cao và chưa xét đến ảnh hưởng của nhiễu loạn phép đo. Trên thực tế, các yếu tố như nhiễu thiết bị, điều kiện môi trường, tác động của dòng xe khai thác và nhiễu tín hiệu có thể ảnh hưởng đến việc xác định chính xác các tham số dao động, đặc biệt là tần số riêng. Việc bỏ qua ảnh hưởng của nhiễu đo có thể làm giảm độ chính xác của quá trình nhận dạng trạng thái kết cấu và hiệu chỉnh mô hình phân tích tải trọng thực tế 3D.

Thứ hai, phương pháp đánh giá suy giảm kết cấu trong luận án chủ yếu dựa trên sự thay đổi tổng thể của các tần số dao động riêng nhằm phản ánh sự suy giảm độ cứng toàn cục của kết cấu nhịp. Do đó, nghiên cứu chưa đi sâu phân tích loại hình và vị trí hư hỏng cụ thể. Trong trường hợp xảy ra hư hỏng cục bộ tại một số vị trí nhạy cảm như vùng giữa nhịp hoặc khu vực liên kết, gối cầu, sự thay đổi của các tần số dao động bậc thấp có thể không phản ánh đầy đủ mức độ của hư hỏng. Đây là giới hạn chung của các phương pháp đánh giá dựa trên chỉ số động lực học.

Thứ ba, trong mô hình dự báo tuổi thọ sử dụng của kết cấu nhịp cầu BTCT dựa trên mạng nơ-ron nhân tạo (ANN), các tham số đầu vào như hệ số khuếch tán clo, nồng độ clo bề mặt, ngưỡng clo tới hạn và điều kiện môi trường được giả định. Tuy nhiên, trong thực tế các tham số này có bản chất ngẫu nhiên và tồn tại độ không chắc chắn đáng kể. Luận án chưa thực hiện phân tích bất định và lan truyền sai số của các biến đầu vào, cũng như chưa đánh giá độ tin cậy thống kê của kết quả dự báo tuổi thọ thông qua các phương pháp xác suất.

Các giới hạn nêu trên cho thấy các kết quả của luận án phù hợp chủ yếu cho việc đánh giá mức độ suy giảm tổng thể và dự báo xu hướng tuổi thọ của kết cấu nhịp cầu bê tông cốt thép đang khai thác. Đây đồng thời cũng là cơ sở để định hướng các nghiên cứu tiếp theo nhằm hoàn thiện phương pháp theo hướng xét đến nhiễu đo, hư hỏng cục bộ và phân tích bất định một cách toàn diện hơn.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### TIẾNG VIỆT

1. Hồ Xuân Ba (2020), *Đánh giá độ bền thấm nước và khuếch tán ion clorua của bê tông có xét đến yếu tố ứng suất nén, ứng dụng trong kết cấu cầu*.
2. Đào Văn Dinh (2014), "Dự báo tuổi thọ sử dụng của cầu bê tông cốt thép ven biển Việt Nam do xâm nhập Clo".
3. Trần Đức Hạ and Nguyễn Quốc Hòa (2011), "Đánh giá chất lượng nước vùng cửa sông và biển ven bờ để định hướng giải pháp công nghệ xử lý phù hợp cho mục đích cấp nước sinh hoạt", *Tạp chí Khoa học công nghệ xây dựng*. Số 10/9 - 2011, pp. 89-98.
4. Trần Việt Hùng (2018), "Nghiên cứu đánh giá chất lượng và suy đoán tuổi thọ dầm super-T ở một số cầu ven biển Việt Nam", *Đề tài khoa học Công nghệ*.
5. Phạm Duy Hữu, Nguyễn Thanh Sang, Phạm Duy Anh, and Nguyễn Lộc Kha (2011), "Nghiên cứu vật liệu chế tạo bê tông cường độ siêu cao (UHPC)," *Tạp chí GTVT*. 07.
6. Nguyễn Long Khánh and Nguyễn Thị Tuyết Trinh (2021), "Dự báo tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép trong môi trường biển bằng phần mềm Life-365", *Tạp chí GTVT*.
7. Nguyễn Tấn Khoa (2021), *Nghiên cứu tính năng bê tông cát sử dụng tro bay, xỉ lò cao cho kết cấu công trình trong môi trường biển miền trung*.
8. Hồ Văn Quân (2020), "Ảnh hưởng của sự suy giảm hệ số khuếch tán clorua đến tuổi thọ của kết cấu bê tông dựa trên phân tích xác suất", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại Học Đà Nẵng*. 18(5.2).
9. Hồ Văn Quân, Phạm Duy Hữu, and Nguyễn Thanh Sang (2016), "Nghiên cứu tác dụng kết hợp của muối silic và tro bay đến các đặc trưng cường độ của bê tông xi măng dùng trong xây dựng mặt đường ô tô", *Tạp chí Cầu đường Việt Nam*. 7, pp. 25-30.
10. Ngô Văn Thúc (2020), *Nghiên cứu tính chất cơ học và đặc điểm phá hủy của bê tông cường độ cao sử dụng nano silica ứng dụng trong công trình cầu*.
11. 11823-2017 Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN (2017), Thiết kế cầu đường bộ.
12. Nguyễn Viết Trung, Phạm Duy Hữu, Hoàng Hà, Mai Đình Lộc, and Phạm Duy Anh (2001), "Nghiên cứu giải pháp tăng cường cầu bằng tấm Polimer cốt sợi carbon (PCSC)," *Thông tin khoa học kỹ thuật*, p. 91.
13. Nguyễn Viết Trung, Phạm Duy Hữu, and Mai Đình Lộc (1994), "Nghiên cứu thực nghiệm về khả năng dán tôn tăng cường tuổi thọ kết cấu BTCT", *Thông tin Khoa học kỹ thuật*, p. 88.
14. Nguyễn Văn Tươi, Hồ Văn Quân, Trần Thế Truyền, Phạm Thái Tuyết, and Nguyễn Trung (2018), "Dự báo tuổi thọ của các kết cấu bê tông cốt thép theo tiêu chí ăn mòn cốt thép do cacbonat hóa và xâm nhập ion clo", *Tạp chí GTVT*, pp. 45-50.
15. Viện Khoa Công nghệ Xây dựng (1999), *Nghiên cứu các điều kiện kỹ thuật đảm bảo độ bền lâu cho kết cấu bê tông và bê tông cốt thép xây dựng ở vùng ven biển Việt Nam*, Báo cáo tổng kết đề tài độc lập cấp Nhà nước.

## TIẾNG ANH

16. Adams Robert D, Cawley Peter, Pye Christopher J, and Stone Brain J (1978), "A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures", *Journal of mechanical engineering science*. 20(2), pp. 93-100.
17. Adeli Hojjat (2001), "Neural networks in civil engineering: 1989–2000", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 16(2), pp. 126-142.
18. Agrawal Anil K, Kawaguchi Akira, and Chen Zheng (2010), "Deterioration rates of typical bridge elements in New York", *Journal of Bridge Engineering*. 15(4), pp. 419-429.
19. Ahmad Shamsad (2003), "Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review", *Cement and concrete composites*. 25(4-5), pp. 459-471.
20. Ali Gasser, Elsayegh Amr, Assaad Rayan, El-Adaway Islam H, and Abotaleb Ibrahim S (2019), "Artificial neural network model for bridge deterioration and assessment".
21. Andrade Carmen and d'Andrea Renata (2010), Electrical resistivity as microstructural parameter for the modelling of service life of reinforced concrete structures, *2nd International symposium on service life design for infrastructure*, pp. 379-388.
22. Anjith, Kanchi, and Manjunath (2015), "Service Life Modeling of Reinforced Concrete Structures-Computational Methods", *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. 8 (2), pp. 477-484.
23. Anoop MB and Balaji Rao K (2007), "Application of fuzzy sets for remaining life assessment of corrosion affected reinforced concrete bridge girders", *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 21(2), pp. 166-171.
24. Anoop MB, Balaji Rao K, and Appa Rao TVSR (2003), "A methodology for durability-based service life design of reinforced concrete flexural members", *Magazine of Concrete Research*. 55(3), pp. 289-303.
25. Anoop MB, Raghuprasad BK, and Balaji Rao K (2012), "A refined methodology for durability-based service life estimation of reinforced concrete structural elements considering fuzzy and random uncertainties", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 27(3), pp. 170-186.
26. Anoop MB, Rao K Balaji, and Rao TVSRA (2002), "Application of fuzzy sets for estimating service life of reinforced concrete structural members in corrosive environments", *Engineering structures*. 24(9), pp. 1229-1242.
27. Anusha G and Rajan Dineshkumar (2025), "An integrated service life prediction model for chloride-induced corrosion in reinforced concrete structures", *EUROPEAN JOURNAL OF ENVIRONMENTAL AND CIVIL ENGINEERING*.
28. Baktiari-Nejad F, Esfandiari A, and Rahai A (2005), Structural damage detection and assessment using measured natural frequencies, *Proceedings of the 23rd International Modal Analysis Conference, Orlando, FL, USA*.

29. Barone Giorgio, Frangopol Dan M, and Soliman Mohamed (2014), "Optimization of life-cycle maintenance of deteriorating bridges with respect to expected annual system failure rate and expected cumulative cost", *Journal of Structural Engineering*. 140(2), p. 04013043.
30. Basheer PAM, Chidiact SE, and Long AE (1996), "Predictive models for deterioration of concrete structures", *Construction and Building Materials*. 10(1), pp. 27-37.
31. Bažant Zdeněk P (1979), "Thermodynamics of solidifying or melting viscoelastic material", *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 105(6), pp. 933-952.
32. Beeby AW (1983), "Cracking, cover, and corrosion of reinforcement", *Concrete international*. 5(2), pp. 35-40.
33. Bertolini Luca, Elsener Bernhard, Pedferri Pietro, and Polder RB (2004), "Carbonation-induced corrosion", *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany*, pp. 79-90.
34. Betti Ricardo (2010), Infrastructure Protection and Disaster Management Division, *Aging Infrastructure: Issues, Research, and Technology*, Editor^Editors.
35. Bolukbasi Melik, Mohammadi Jamshid, and Arditi David (2004), "Estimating the future condition of highway bridge components using national bridge inventory data", *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 9(1), pp. 16-25.
36. Bu GP, Chanda S, Guan H, Jo J, Blumenstein M, and Loo YC (2015), "Crack detection using a texture analysis-based technique for visual bridge inspection", *Electronic Journal of Structural Engineering*. 14(1), pp. 41-48.
37. C1152/C1152M ASTM (2012), Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete (Phương pháp xác định clorua tan trong axit của vữa và bê tông), Editor^Editors.
38. Cawley Peter and Adams Robert Darius (1979), "The location of defects in structures from measurements of natural frequencies", *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 14(2), pp. 49-57.
39. Cesare Mark A, Santamarina Carlos, Turkstra Carl, and Vanmarcke Erik H (1992), "Modeling bridge deterioration with Markov chains", *Journal of Transportation Engineering*. 118(6), pp. 820-833.
40. Chen Xinzhong and Kareem Ahsan (2002), "Advances in modeling of aerodynamic forces on bridge decks", *Journal of Engineering Mechanics*. 128(11), pp. 1193-1205.
41. Cheung Moe M, Zhao Juan, and Chan Yui Bun (2009), "Service life prediction of RC bridge structures exposed to chloride environments", *Journal of Bridge Engineering*. 14(3), pp. 164-178.
42. Chojaczyk Agnieszka A, Teixeira Angelo P, Neves Luis C, Cardoso Joao B, and Soares C Guedes (2015), "Review and application of artificial neural networks models in reliability analysis of steel structures", *Structural safety*. 52, pp. 78-89.
43. Choudhury Jamilur Reza and Hasnat Ariful (2015), Bridge collapses around the world: Causes and mechanisms, *IABSE-JSCE joint conference on advances in bridge engineering-III, Dhaka, Bangladesh*, pp. 26-34.

44. Chowdhury Sanaul (1999), "Damping characteristics of reinforced and partially prestressed concrete beams".
45. Conciatori David, Laferrière Francine, and Brühwiler Eugen (2010), "Comprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state for real climate", *Cement and Concrete Research*. 40(1), pp. 109-118.
46. Congress Indian Roads (2002), "An approach document for assessment of remaining life of concrete bridges", *IRC: SP-60*.
47. Cooley James W and Tukey John W (1965), "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series", *Mathematics of computation*. 19(90), pp. 297-301.
48. Cusson D, Lounis Z, and Daigle L (2011), "Monitoring life cycle performance of aging concrete highway bridges built in corrosive environments", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 26(7), pp. 524-41.
49. Dan Foresee F and Hagan Martin T (1997), Gauss-Newton approximation to Bayesian learning, *Proceedings of international conference on neural networks (ICNN'97)*, IEEE, pp. 1930-1935.
50. Deng Lu, Wang Wei, and Yu Yang (2016), "State-of-the-art review on the causes and mechanisms of bridge collapse", *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 30(2), p. 04015005.
51. Doebbling Scott W, Farrar Charles R, and Prime Michael B (1998), "A summary review of vibration-based damage identification methods", *Shock and vibration digest*. 30(2), pp. 91-105.
52. Dong Chuanzhi, Bas Selcuk, Debees Marwan, Alver Ninel, and Catbas F Necati (2020), "Bridge load testing for identifying live load distribution, load rating, serviceability and dynamic response", *Frontiers in Built Environment*. 6, p. 46.
53. DuraCrete (1998), "Modeling of degradation", *Gouda CUR*.
54. DuraCrete (2000), "Final technical report", *Gouda CUR*.
55. Duvnjak I (2015), "Damage assessment on plate structures using dynamic parameters", *University of Zagreb Faculty of Civil Engineering*.
56. El Maaddawy Tamer, Soudki Khaled, and Topper Timothy (2005), "Long-term performance of corrosion-damaged reinforced concrete beams", *ACI Structural Journal*. 102(5), p. 649.
57. Elbehairy Hatem Elbehairy Elbehairy (2007), "BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM WITH".
58. Elbehairy Hatem, Elbeltagi Emad, Hegazy Tarek, and Soudki Khaled (2006), "Comparison of two evolutionary algorithms for optimization of bridge deck repairs", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 21(8), pp. 561-572.
59. Faris Nour, Zayed Tarek, and Fares Ali (2025), "Review of condition rating and deterioration modeling approaches for concrete bridges", *Buildings*. 15(2), p. 219.

60. Fayyadh Moatasem Mohammed and Razak Hashim Abdul (2013), "Damage identification and assessment in RC structures using vibration data: a review", *Journal of Civil Engineering and Management*. 19(3), pp. 375-386.
61. Ferreira Miguel, Jalali Said, and Gjørsv Odd E (2003), Probability-based approach to service life analysis of concrete harbour structures, *Proceedings of the 2nd International RILEM Workshop on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures (Naus DJ (ed.))*. RILEM Publications SARL, Bagneux, France, pp. 319-328.
62. Frangopol Dan M and Imai Kiyohiro (2004), "Reliability of long span bridges based on design experience with the Honshu–Shikoku bridges", *Journal of Constructional Steel Research*. 60(3-5), pp. 373-392.
63. Ghodoosi Farzad, Bagchi Ashutosh, Zayed Tarek, and Zaki Adel R (2014), "Reliability-based condition assessment of a deteriorated concrete bridge", *Structural monitoring and maintenance*. 1(4), p. 357.
64. Hae-chang Jo, Deok-haeng Lee, Hyun-jin Joo, Kang-soo Kim, Ki-hyun Kim, and Monteiro Paulo JM (2014), "Remaining service life estimation of reinforced concrete buildings based on fuzzy approach", *Computers and Concrete*, pp. 879-902.
65. Hasan Md Saeed (2015), *Deterioration Prediction of Concrete Bridge Components Using Artificial Intelligence and Stochastic Methods*, RMIT University, Melbourne.
66. Hasan Md Saeed, Setunge Sujeeva, Law David W, and Molyneaux Tom CK (2013), "Predicting life expectancy of concrete septic tanks exposed to sulfuric acid attack", *Magazine of concrete research*. 65(13), pp. 793-801.
67. Haykin Simon (2009), *Neural networks and learning machines, 3/E*, Pearson Education India.
68. Huang Ying-Hua (2010), "Artificial neural network model of bridge deterioration", *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 24(6), pp. 597-602.
69. Imam Ashhad, Anifowose Fatai, and Azad Abul Kalam (2015), "Residual strength of corroded reinforced concrete beams using an adaptive model based on ANN", *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 9(2), pp. 159-172.
70. Ji Tao, Lin Tingwei, and Lin Xujian (2006), "A concrete mix proportion design algorithm based on artificial neural networks", *Cement and Concrete Research*. 36(7), pp. 1399-1408.
71. Kong Xuan, Cai Chun-Sheng, and Hu Jiexuan (2017), "The state-of-the-art on framework of vibration-based structural damage identification for decision making", *Applied Sciences*. 7(5), p. 497.
72. Kotze Rudolph, Ngo Hanson, and Seskis Joshua (2015), *Improved bridge deterioration models, predictive tools and costs*.
73. Lam Heung-Fai, Yuen Ka-Veng, and Beck James L (2006), "Structural health monitoring via measured Ritz vectors utilizing artificial neural networks", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 21(4), pp. 232-241.

74. Lee Jaeho, Sanmugarasa Kamalarasa, Blumenstein Michael, and Loo Yew-Chaye (2008), "Improving the reliability of a Bridge Management System (BMS) using an ANN-based Backward Prediction Model (BPM)", *Automation in Construction*. 17(6), pp. 758-772.
75. Lee LS (2011), "Rehabilitation and service life estimation of bridge superstructures", *Service life estimation and extension of civil engineering structures*, Elsevier, pp. 117-142.
76. Life-365 (2012), Service life prediction model and computer program for predicting the service life and life-cycle cost of reinforced concrete exposed to chlorides, Editor^Editors.
77. Lifecon Deliverable D (2003), "3.2 service life models: life cycle management of concrete infrastructures for improved sustainability, final report by Dipl-Ing", *Sascha Lay, Technical Research Centre (VTT)*, p. P169.
78. Liu Youping (1996), "Modeling the time-to corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures".
79. Lynch Jerome P, Wang Yang, Loh Kenneth J, Yi Jin-Hak, and Yun Chung-Bang (2006), "Performance monitoring of the Geumdang Bridge using a dense network of high-resolution wireless sensors", *Smart Materials and Structures*. 15(6), p. 1561.
80. Ma Yafei, Peng Anyin, Su Xiaochao, Wang Lei, and Zhang Jianren (2021), "Modeling constitutive relationship of steel bar removed from corroded PC beams after fatigue considering spatial location effect", *Journal of Materials in Civil Engineering*. 33(4), p. 04021019.
81. Mangat Pritpal S and Elgarf Mahmoud S (1999), "Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement", *Structural Journal*. 96(1), pp. 149-158.
82. Mašović Snežana and Hajdin Rade (2014), "Modelling of bridge elements deterioration for Serbian bridge inventory", *Structure and Infrastructure Engineering*. 10(8), pp. 976-987.
83. Mašović Snežana, Stošić Saša, and Hajdin Rade (2015), Application of semi-Markov decision process in bridge management, *IABSE Conference Geneva 2015: Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges*.
84. Mauch Michael and Madanat Samer (2001), "Semiparametric hazard rate models of reinforced concrete bridge deck deterioration", *Journal of Infrastructure Systems*. 7(2), pp. 49-57.
85. Mazurek David F and DeWolf John T (1990), "Experimental study of bridge monitoring technique", *Journal of Structural Engineering*. 116(9), pp. 2532-2549.
86. Messina Arcangelo, Williams EJ, and Contursi T (1998), "Structural damage detection by a sensitivity and statistical-based method", *Journal of sound and vibration*. 216(5), pp. 791-808.
87. Miao Pengyong (2021), "Prediction-Based Maintenance of Existing Bridges Using Neural Network and Sensitivity Analysis", *Advances in Civil Engineering*. 2021(1), p. 4598337.

88. Mishalani Rabi G and Madanat Samer M (2002), "Computation of infrastructure transition probabilities using stochastic duration models", *Journal of Infrastructure systems*. 8(4), pp. 139-148.
89. Morcoux G and Lounis Z (2005), "Prediction of onset of corrosion in concrete bridge decks using neural networks and case-based reasoning", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 20(2), pp. 108-117.
90. Morcoux George, Lounis Z, and Cho Yong (2010), "An integrated system for bridge management using probabilistic and mechanistic deterioration models: Application to bridge decks", *KSCE Journal of Civil Engineering*. 14(4), pp. 527-537.
91. Morinaga M, Yukawa N, Adachi H, and Mura T (1988), "Electronic state of interstitial atoms (C, N, O) in FCC Fe", *Journal of Physics F: Metal Physics*. 18(5), p. 923.
92. Moughty John J and Casas Joan R (2017), "A state of the art review of modal-based damage detection in bridges: Development, challenges, and solutions", *Applied Sciences*. 7(5), p. 510.
93. Mutsuyoshi H (2001), "Present situation of durability of post-tensioned PC bridges in Japan", *Bulletin-Fib*. 15, pp. 75-88.
94. Nielsen A (1985), "Durability", *Beton Bogen, Aalborg Cement Company, Aalborg, Portland*, pp. 200-243.
95. Okasha Nader M and Frangopol Dan M (2010), "Advanced modeling for efficient computation of life-cycle performance prediction and service-life estimation of bridges", *Journal of Computing in Civil Engineering*. 24(6), pp. 548-556.
96. Öztaş Ahmet, Pala Murat, Özbay Erdogʻan, Kanca Erdogʻan, Caglar Naci, and Bhatti M Asghar (2006), "Predicting the compressive strength and slump of high strength concrete using neural network", *Construction and building materials*. 20(9), pp. 769-775.
97. Pan Tongyan and Wang Linbing (2011), "Finite-element analysis of chemical transport and reinforcement corrosion-induced cracking in variably saturated heterogeneous concrete", *Journal of Engineering Mechanics*. 137(5), pp. 334-345.
98. Parthiban Thirumalai, Ravi R, Parthiban GT, Srinivasan S, Ramakrishnan KR, and Raghavan M (2005), "Neural network analysis for corrosion of steel in concrete", *Corrosion Science*. 47(7), pp. 1625-1642.
99. Paz Mario (1986), "Microcomputer-aided engineering: structural dynamics", (*No Title*).
100. Raupach Michael, Reichling Kenji, Broomfield John, Gulikers Joost, Schneck Ulrich, Serdar Marijana, and Pепенar Ioan (2013), "Inspection strategies for reinforcement corrosion surveys", *Materials and corrosion*. 64(2), pp. 111-115.
101. Richardson Glenn E (2002), "The metatheory of resilience and resiliency", *Journal of clinical psychology*. 58(3), pp. 307-321.
102. Roberts Craig A and Attoh-Okine Nii O (1998), "A comparative analysis of two artificial neural networks using pavement performance prediction", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 13(5), pp. 339-348.

103. Rostam S (2005), "Service life design of concrete structures-A challenge to designers as well as to owners".
104. Roweis Sam (1996), "Levenberg-marquardt optimization", *Notes, University Of Toronto*. 52(1027), p. 6.
105. Rytter Anders (1993), "Vibrational based inspection of civil engineering structures".
106. Salawu Olusegun S (1997), "Detection of structural damage through changes in frequency: a review", *Engineering structures*. 19(9), pp. 718-723.
107. Salawu Olusegun S and Williams Clive (1995), "Bridge assessment using forced-vibration testing", *Journal of structural engineering*. 121(2), pp. 161-173.
108. Salehi Mehdi, Ziaeirad Saeed, Ghayour Mostafa, and Vazirizanjani Mohamad Ali (2010), "A structural damage detection technique based on measured frequency response functions", *Contemporary Engineering Sciences*. 3(5), pp. 215-226.
109. Samali Bijan, Crews Keith, Li Jianchun, Bakoss Steve, and Champion Chris (2003), Assessing the load carrying capacity of timber bridges using dynamic methods, *Proceedings*, Citeseer.
110. Shafei Behrouz, Alipour Azadeh, and Shinozuka Masanobu (2012), "Prediction of corrosion initiation in reinforced concrete members subjected to environmental stressors: A finite-element framework", *Cement and Concrete Research*. 42(2), pp. 365-376.
111. Shih Hoi Wai, Thambiratnam DP, and Chan THT (2009), "Vibration based structural damage detection in flexural members using multi-criteria approach", *Journal of sound and vibration*. 323(3-5), pp. 645-661.
112. Shin K-J, Kim J-S, and Lee K-M (2011), "Probability-based durability design software for concrete structures subjected to chloride exposed environments", *Computers and Concrete*. 8(5), pp. 511-524.
113. Sobanjo John O and Thompson Paul David (2011), "Enhancement of the FDOT's project level and network level bridge management analysis tools".
114. Steele KNP, Cole G, Parke GAR, Clarke B, and Harding JE (2000), "Bridge maintenance strategy and sustainability", *Bridge Management 4: inspection, maintenance, assessment and repair*, Thomas Telford Publishing, pp. 361-369.
115. Thompson Paul David and Ford Kevin Matthew (2012), *Estimating life expectancies of highway assets*, Vol. 1, Transportation Research Board.
116. Tolliver Denver and Lu Pan (2012), "Modeling bridge condition levels in the United States", *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 6(4), p. 415.
117. Tuutti Kyösti (1982), "Corrosion of steel in concrete".
118. Uomoto T, Tsuji K, and Kakizawa T (1984), "Deterioration mechanism of concrete structures caused by corrosion of reinforcing bars", *Trans. Jpn. Concr. Inst.* 6, pp. 163-170.
119. Wang Frank and Chan Tommy (2009), Review of vibration-based damage detection and condition assessment of bridge structures using structural health monitoring, *Proceedings of the Second Infrastructure Theme Postgraduate Conference: Rethinking sustainable development-planning, infrastructure*

*engineering, design and managing urban infrastructure*, Queensland University of Technology, pp. 35-47.

120. Wang Lei, Li Tang, Dai Lizhao, Chen Wen, and Huang Ke (2020), "Corrosion morphology and mechanical behavior of corroded prestressing strands", *Journal of Advanced Concrete Technology*. 18(10), pp. 545-557.
121. Wang Xiao-Hui and Liu Xi-La (2010), "Simplified methodology for the evaluation of the residual strength of corroded reinforced concrete beams", *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 24(2), pp. 108-119.
122. Weyers Richard E (1998), "Service life model for concrete structures in chloride laden environments", *Materials Journal*. 95(4), pp. 445-453.
123. Wieland Dominik, Wotawa Franz, and Wotawa Gerhard (2002), "From neural networks to qualitative models in environmental engineering", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 17(2), pp. 104-118.
124. Williamson Gregory Scott (2007), "Service life modeling of Virginia bridge decks".
125. Winn Emily K (2011), Artificial neural network models for the prediction of bridge deck condition ratings, *Masters Abstracts International*.
126. Woodward R, et al. (2001), "Bridge management in Europe (BRIME)-deliverable D14-final report".
127. Xu Zhao-Yong, Wang Bin, Zhao Jin-Ming, Hu Yi-Li, and Mei Shi-Rong (1997), "An experimental study on fractural features of concrete samples containing hard inclusion", *Acta Seismologica Sinica*. 10(1), pp. 97-105.
128. Zambon Ivan, Vidović Anja, Strauss Alfred, and Matos Jose (2019), "Condition prediction of existing concrete bridges as a combination of visual inspection and analytical models of deterioration", *Applied Sciences*. 9(1), p. 148.
129. Zhang Jieying and Lounis Zoubir (2009), "Nonlinear relationships between parameters of simplified diffusion-based model for service life design of concrete structures exposed to chlorides", *Cement and Concrete Composites*. 31(8), pp. 591-600.
130. Zhang Weiping, Song Xiaobin, Gu Xianglin, and Li Shibin (2012), "Tensile and fatigue behavior of corroded rebars", *Construction and Building Materials*. 34, pp. 409-417.

## DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

TT	Tên công trình	Tên các tác giả	Năm công bố	Tên tạp chí
1	Đánh giá chất lượng và giải pháp nâng cao độ bền dầm bê tông cốt thép trong môi trường ven biển.	Trần Việt Hùng, <b><u>Lưu Trường Giang</u></b>	2018	Tạp chí Giao thông Vận tải, Bộ Giao thông Vận tải. Vol. 12 (59), tr. 109-112, 2018 (ISSN: 2354-0818).
2	Ứng dụng mạng nơ ron nhân tạo dự đoán tuổi thọ sử dụng của kết cấu bê tông cốt thép.	<b><u>Lưu Trường Giang</u></b> , Nguyễn Hữu Hưng, Trần Việt Hùng	2022	Tạp chí Giao thông Vận tải, Bộ Giao thông Vận tải. Vol. 8 (63), tr. 32-35, 2022 (ISSN: 2354-0818).
3	Risk identification and prediction for highway bridge projects using an Artificial Intelligence Model.	Dao Duy Lam, Le Duc Anh, <b><u>Lưu Trường Giang</u></b> , Hoang Ha	2023	Proceedings of the 4th International Conference on Sustainability in Civil Engineering ICSCE 2022, 25-27 November, Hanoi, Vietnam (ISSN: 2366-2557).
4	Nghiên cứu đánh giá chất lượng và suy đoán tuổi thọ dầm super-T ở một số cầu ven biển Việt Nam	Thành viên	2018	Đề tài Khoa học và Công nghệ cấp trường. MS: T2018-KDN-002.
5	Nghiên cứu đánh giá tuổi thọ còn lại của kết cấu nhịp cầu bê tông cốt thép trên đường ô tô	Thành viên	2021	Đề tài Khoa học và Công nghệ cấp Bộ GTVT. MS: DT214001.

**PHỤ LỤC**

## CÁC BỘ CODE MATLAB SỬ DỤNG

*Lưu ý: Người dùng có thể chuyển đổi sang ngôn ngữ lập trình khác*

### 1. Chương trình lựa chọn số nơ ron

```

clear all; fclose all; clc; close all
if isdir('networks3')==0
    mkdir('networks3');
end
%x=0:0.01:100;
%y=x.^2;
%x=input; % có thể là vec to hoặc ma tran
%y=target; % có thể là vec to hoặc ma tran
%ouput=sample; % có thể là vec to
%x1=textread('input.txt','%f');
x1=dlmread('Input_data1.txt', '\t', 0, 0); %input data
%y1=textread('target.txt','%f');
y1=dlmread('Target_data1.txt', '\t', 0, 0); %target data
%ouput1=textread('sample.txt','%f');
ouput1=dlmread('KiemtraANN1.txt', '\t', 0, 0);
check1=dlmread('Ketqua_sosanh1.txt', '\t', 0, 0);
inputs=x1';
targets=y1';
ouput=ouput1';
check=check1';
trainFcn = 'trainlm'; %use the Levenberg-Marquardt algorithm
ii=1; % số neurons min
jj=20; % số neurons max
%Train the networks
for i=ii:jj %vary number of hidden layer neurons from 1 to 100
    hiddenLayerSize = i; %number of hidden layer neurons
    net = fitnet([hiddenLayerSize],trainFcn); %create a fitting
network
    % net=newff(minmax(inputs),[ii
5],{'logsig','purelin'},'trainlm');
    net.divideParam.trainRatio = 70/100; %use 70% of data for
training
    net.divideParam.valRatio = 15/100; %15% for validation
    net.divideParam.testRatio = 15/100; %15% for testing

```

```

net.trainparam.epochs=10000;
net.trainParam.max_fail=1000;
net.trainparam.goal=1e-25;
net.trainparam.lr=0.01;
net.trainParam.mu=0.0001;
net.trainParam.mu_dec=0.01;
net.trainParam.mu_inc=10;
net.trainParam.mu_max=1e10;
[net,tr] = train(net,inputs,target); % train the network
% The hien ket qua
display([' Xong lan lan lap thu: ' num2str(i)])
ketqua = net(ouput) ;%simulate 15% test data
toadoX(:)=ketqua(:);
%toadoY(i,:)=ketqua(2,:);
%toadoZ(i,:)=ketqua(3,:);
rmseX(i)=sqrt(mean((toadoX(:)-check(:)).^2)); %RMSE for X data
%rmseY(i)=sqrt(mean((toadoY(i,:)-check(2,:)).^2)); %RMSE for Y
data
%rmseZ(i)=sqrt(mean((toadoZ(i,:)-check(3,:)).^2)); %RMSE for Z
data
% outputs2016 = net(inputs2016); %simulate year 2016 data
%rmse15(i)=sqrt(mean((outputs-targets(tr.testInd)).^2)); %RMSE
for 15% random test data
%rmse2016(i) = sqrt(mean((outputs2016-targets2016).^2)); %RMSE
for year 2016 test data
%r15(i)=regression(targets(tr.testInd), outputs);
%r2016(i)=regression(targets2016, outputs2016);
save(['networks3\net' num2str(i)],'net'); %save the network in
networks folder
end

%Plot the RMSEs
figure
plot(ii:jj,rmseX, 'b*-'); %hold on; plot(1:100, rmse2016, 'ro-');
legend('Ket qua sai so tuoi tho'); xlabel('Number of hidden layer
neurons');
ylabel('RMSE sqrt(mean((ketqua-check).^2))');
[Xmin,csX] =timmin(rmseX);
display([' So no ron lop an toi uu la: ' num2str(csX)])

```

## 2. Chương trình tối ưu mạng nơ ron

```

clear all; fclose all; clc; close all
if isdir('networks4')==0
    mkdir('networks4');
end
%x=0:0.01:100;
%y=x.^2;
%x=input; % co the la vec to hoac ma tran
%y=target; % co the la vec to hoac ma tran
%ouput=sample; % co the la vec to
%x1=textread('input.txt','%f');
num_nn=input('Nhap gia tri so Noron toi uu: = ');
lap_max=input('Nhap gia tri toi da lap:(<1000):=');
x1=dlmread('Input_data1.txt', '\t', 0, 0); %input data
y1=textread('target.txt','%f');
y1=dlmread('Target_data1.txt', '\t', 0, 0); %target data
%ouput1=textread('sample.txt','%f');
ouput1=dlmread('KiemtraANN1.txt', '\t', 0, 0);
check1=dlmread('Ketqua_sosanh1.txt', '\t', 0, 0);
inputs=x1';
targets=y1';
ouput=ouput1';
check=check1';
trainFcn = 'trainlm'; %use the Levenberg-Marquardt algorithm
ii=1; % so neurons min
jj=lap_max; % so neurons max
%Train the networks
for i=ii:jj %vary number of hidden layer neurons from 1 to 100
    hiddenLayerSize = num_nn; %number of hidden layer neurons
    net = fitnet([hiddenLayerSize],trainFcn); %create a fitting
network
    % net=newff(minmax(inputs),[ii
5],{'logsig','purelin'},'trainlm');
    net.divideParam.trainRatio = 70/100; %use 70% of data for
training
    net.divideParam.valRatio = 15/100; %15% for validation
    net.divideParam.testRatio = 15/100; %15% for testing
    net.trainparam.epochs=10000;

```

```

net.trainParam.max_fail=1000;
net.trainparam.goal=1e-25;
net.trainparam.lr=0.01;
net.trainParam.mu=0.0001;
net.trainParam.mu_dec=0.01;
net.trainParam.mu_inc=10;
net.trainParam.mu_max=1e10;
[net,tr] = train(net,inputs,targets); % train the network

display([' Xong lan lan lap thu: ' num2str(i)])
ketqua = net(ouput); %simulate 15% test data
toadoX(i,:)=ketqua(:);
%toadoY(i,:)=ketqua(2,:);
%toadoZ(i,:)=ketqua(3,:);
rmseX(i)=sqrt(mean((toadoX(i,:)-check1(:)).^2)); %RMSE for X
data
%rmseY(i)=sqrt(mean((toadoY(i,:)-check(2,:)).^2)); %RMSE for Y
data
%rmseZ(i)=sqrt(mean((toadoZ(i,:)-check(3,:)).^2)); %RMSE for Z
data
% outputs2016 = net(inputs2016); %simulate year 2016 data
%rmse15(i)=sqrt(mean((outputs-targets(tr.testInd)).^2)); %RMSE
for 15% random test data
%rmse2016(i) = sqrt(mean((outputs2016-targets2016).^2)); %RMSE
for year 2016 test data
%r15(i)=regression(targets(tr.testInd), outputs);
%r2016(i)=regression(targets2016, outputs2016);
save(['networks4\net' num2str(i)],'net'); %save the network in
networks folder
end

%Plot the RMSEs
figure
plot(ii:jj,rmseX, 'b*-'); %hold on; plot(1:100, rmse2016, 'ro-');
legend('Ket qua sai so tuoi tho'); xlabel('Number of computations');
ylabel('RMSE X');
[Xmin,csX] =timmin(rmseX);
display([' So lan huan luyen toi uu la: ' num2str(csX)])

```

### 3. Chương trình tính toán tuổi thọ

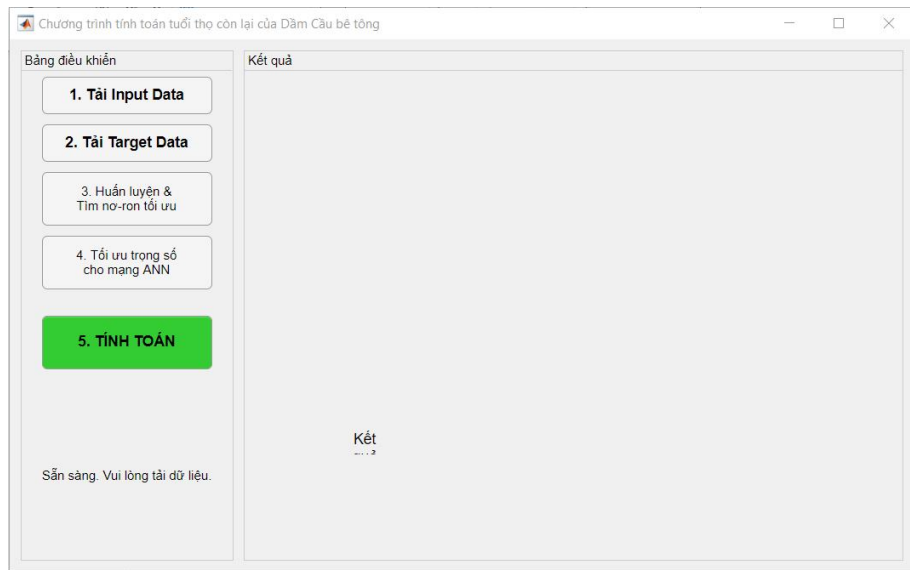
```

% Chuong trinh tinh toan tuoi tho
clear all; fclose all; clc; %close all;
display('Chuong trinh ANN tinh toan thoi gian khoi dau an mon t1')
display('NCS: Luu Truong Giang')
display('=====')
display('Cac tham so dau vao')
X1=input('01. Nhap gia tri chieu day lop be tong bao ve (20<L<100mm)
(vd: 38.5mm) L: = ');
X2=input('02. Nhap gia tri he so khuech tan clo (6<D<7m^2/s) (vd:
6.044) D: = ');
X3=input('03. Do am (70%<H<100%) (vd: 75) H: = ');
X4=input('04. Nhap thong so nong do clo be mat (0.6%<Cs<0.7%) (vd:
0.679)Cs: = ');
X5=input('05. Nhap gia tri nguong nong do clo (0.05%<Cth<0.06%) (vd:
0.0513) Cth: = ');

display('=====')
kqgt=input('t1 gia dinh voi so lieu tren la (vidu =19.585): = ');
numnet=input('Vao so mang huan luyen tot nhat (vidu =16): = ');
slktra=[X1 X2 X3 X4 X5]';
load(['networks4\net' num2str(numnet) '.mat']) % doc mang huan luyen
toi uu
kq=net(slktra);
%kqgt=4.92843;
display('=====')
display([' Ket qua tinh t1 tu ANN la: ' num2str(kq)])
display([' Ket qua dua vao tinh t1 tu ANN la: ' num2str(kqgt)])
saiso=(kq-kqgt)/kq*100;
display([' Sai so ket qua tinh t1 tu ANN la: ' num2str(saiso) '%'])
for numnet=1:100
load(['networks4\net' num2str(numnet) '.mat'])
kq(numnet)=net(slktra);
end
figure
plot(kq)
legend('Ket qua t1'); xlabel('Number of net');
ylabel('t1');

```

## HƯỚNG DẪN SỬ DỤNG CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN TUỔI THỌ SỬ DỤNG ( $t_1$ )

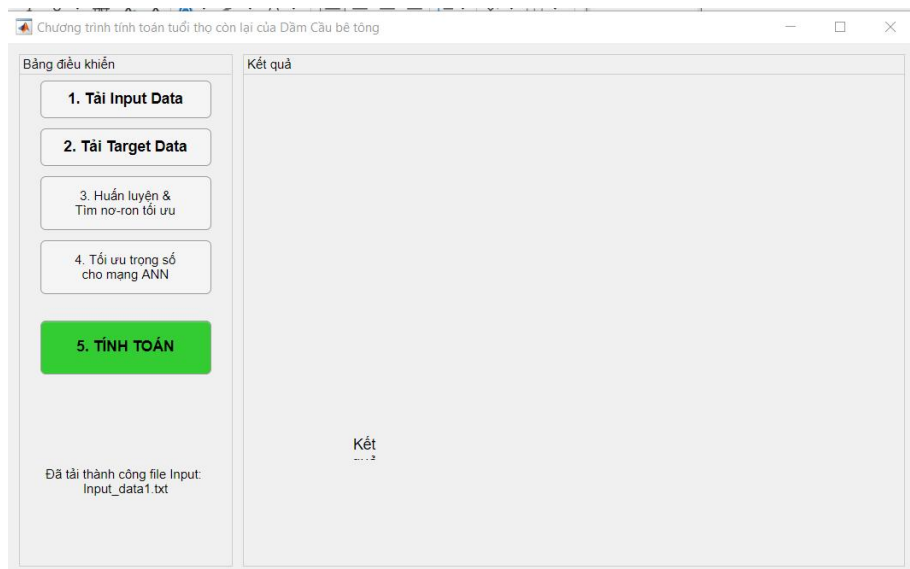


Hình PL1. Giao diện chính của chương trình

### Bước 1: Tải dữ liệu đầu vào (Input Data)

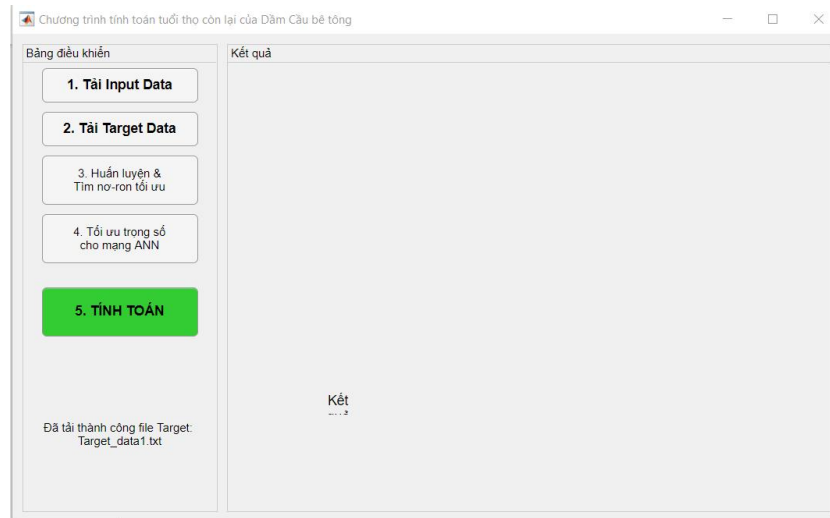
Dữ liệu đầu vào có các thông tin:

01. Chiều dày lớp bê tông bảo vệ
02. Giá trị hệ số khuếch tán Clo
03. Độ ẩm
04. Thông số nồng độ Clo bề mặt
05. Ngưỡng nồng độ Clo



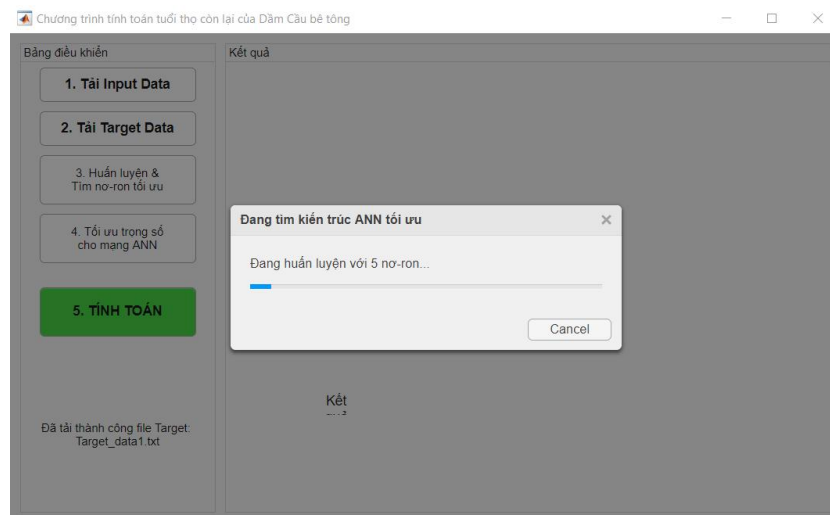
## Bước 2: Nhập dữ liệu mục tiêu (Target Data)

Dữ liệu mục tiêu là tuổi thọ  $t_1$ :

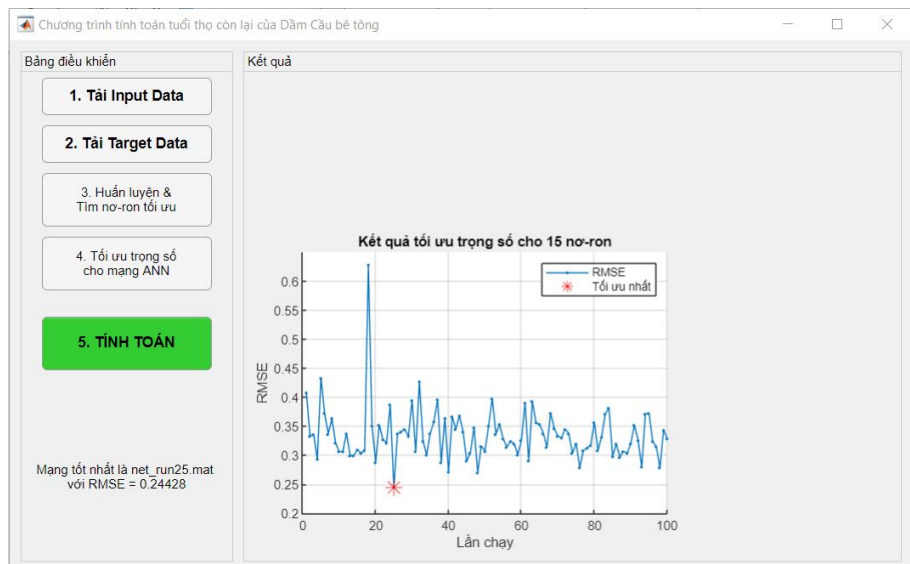
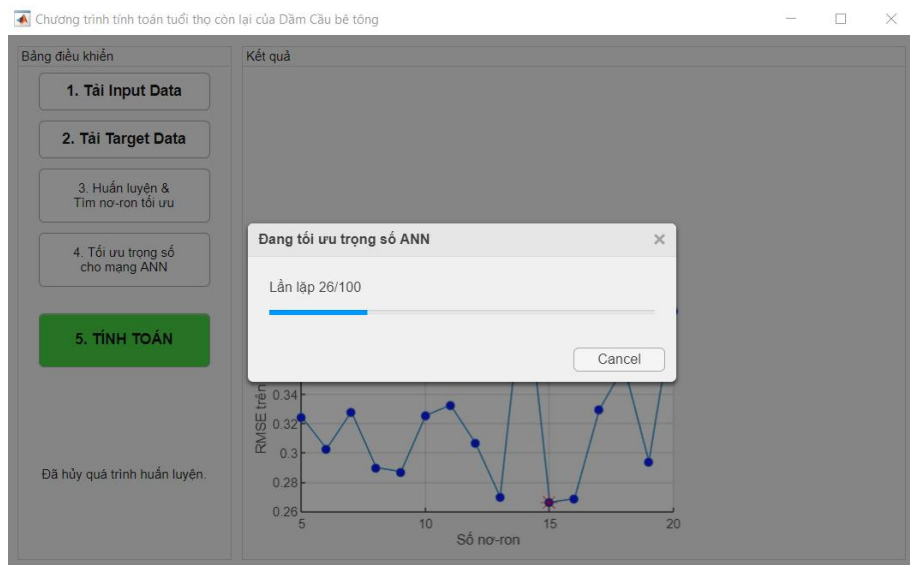


## Bước 3: Tiến hành xây dựng kiến trúc mạng và huấn luyện

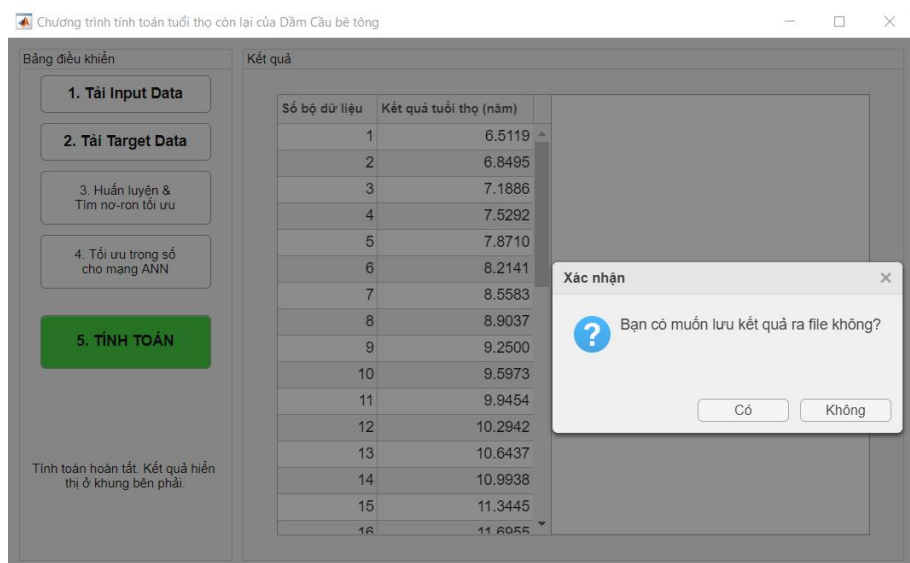
Bước này mục tiêu tìm ra số nơ-ron lớp ẩn tối ưu nhất.



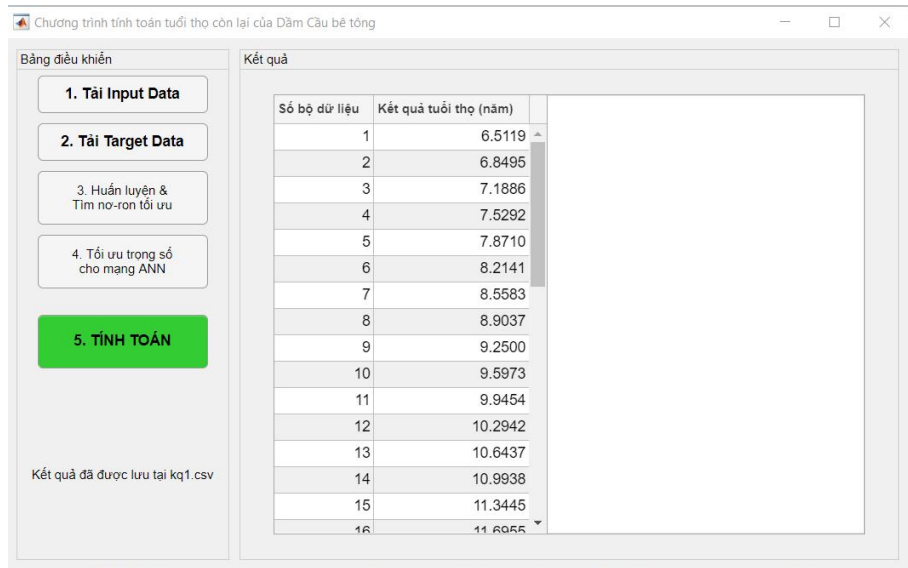
## Bước 4: Tìm các trọng số tối ưu nhất với kiến trúc đã chọn



## Bước 5: Tính toán tuổi thọ



## Kết quả tính toán có thể lưu ra file \*.csv



Chương trình tính toán tuổi thọ còn lại của Dầm Cầu bê tông

**Bảng điều khiển**

1. Tải Input Data
2. Tải Target Data
3. Huấn luyện & Tìm nơ-ron tối ưu
4. Tối ưu trong số cho mạng ANN
5. TÍNH TOÁN

Kết quả đã được lưu tại kq1.csv

**Kết quả**

Số bộ dữ liệu	Kết quả tuổi thọ (năm)
1	6.5119
2	6.8495
3	7.1886
4	7.5292
5	7.8710
6	8.2141
7	8.5583
8	8.9037
9	9.2500
10	9.5973
11	9.9454
12	10.2942
13	10.6437
14	10.9938
15	11.3445
16	11.6955

**BỘ DỮ LIỆU HUẤN LUYỆN ANN**

STT	Chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm)	Hệ số khuếch tán Clo $D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	Độ ẩm H(%)	Nồng độ Clo bề mặt $C_s$ (%)	Giá trị ngưỡng nồng độ Clo $C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) theo mô hình xây dựng
1	20.50	6.028	75	0.684	0.0567	6.617
2	21.00	6.082	75	0.654	0.0597	7.447
3	21.50	6.090	75	0.633	0.0576	7.898
4	22.00	6.029	75	0.674	0.0560	7.674
5	22.50	6.118	75	0.603	0.0530	8.351
6	23.00	6.053	75	0.626	0.0583	9.145
7	23.50	6.047	75	0.657	0.0580	8.855
8	24.00	6.045	75	0.699	0.0571	9.499
9	24.50	6.082	75	0.632	0.0571	9.526
10	25.00	6.055	75	0.622	0.0590	10.187
11	25.50	6.114	75	0.658	0.0562	10.274
12	26.00	6.083	75	0.648	0.0564	10.950
13	26.50	6.076	75	0.644	0.0546	11.418
14	27.00	6.073	75	0.653	0.0576	11.330
15	27.50	6.030	75	0.601	0.0566	11.545
16	28.00	6.104	75	0.693	0.0539	11.946
17	28.50	6.031	75	0.647	0.0512	12.294
18	29.00	6.066	75	0.686	0.0518	13.088
19	29.50	6.086	75	0.671	0.0558	13.145
20	30.00	6.103	75	0.652	0.0575	13.598
21	30.50	6.076	75	0.654	0.0599	14.022
22	31.00	6.107	75	0.670	0.0508	14.266
23	31.50	6.106	75	0.643	0.0506	14.958
24	32.00	6.072	75	0.674	0.0576	14.884
25	32.50	6.125	75	0.637	0.0554	15.130
26	33.00	6.086	75	0.662	0.0581	15.806
27	33.50	6.049	75	0.681	0.0578	15.686
28	34.00	6.049	75	0.621	0.0572	16.687
29	34.50	6.061	75	0.642	0.0556	16.632
30	35.00	6.078	75	0.682	0.0533	16.722
31	35.50	6.056	75	0.678	0.0540	17.053
32	36.00	6.112	75	0.660	0.0547	17.417
33	36.50	6.038	75	0.689	0.0521	18.326
34	37.00	6.071	75	0.610	0.0560	17.980
35	37.50	6.045	75	0.686	0.0558	19.036
36	38.00	6.112	75	0.629	0.0535	18.591
37	38.50	6.044	75	0.679	0.0513	19.585
38	39.00	6.084	75	0.610	0.0580	19.708
39	39.50	6.113	75	0.694	0.0576	19.630
40	40.00	6.118	75	0.670	0.0577	20.265

STT	Chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm)	Hệ số khuếch tán Clo $D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	Độ ẩm H(%)	Nồng độ Clo bề mặt $C_s$ (%)	Giá trị ngưỡng nồng độ Clo $C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) theo mô hình xây dựng
41	40.50	6.064	75	0.619	0.0573	21.229
42	41.00	6.058	75	0.645	0.0597	20.654
43	41.50	6.094	75	0.674	0.0556	21.882
44	42.00	6.110	75	0.671	0.0540	22.009
45	42.50	6.093	75	0.631	0.0580	22.327
46	43.00	6.054	75	0.664	0.0546	22.245
47	43.50	6.110	75	0.625	0.0576	23.054
48	44.00	6.089	75	0.609	0.0529	23.547
49	44.50	6.120	75	0.677	0.0501	23.735
50	45.00	6.036	75	0.667	0.0579	24.269
51	45.50	6.060	75	0.605	0.0554	23.761
52	46.00	6.030	75	0.647	0.0583	24.889
53	46.50	6.071	75	0.687	0.0572	25.002
54	47.00	6.078	75	0.675	0.0579	24.850
55	47.50	6.126	75	0.652	0.0591	25.127
56	48.00	6.035	75	0.653	0.0577	25.874
57	48.50	6.095	75	0.671	0.0548	26.342
58	49.00	6.056	75	0.650	0.0581	26.844
59	49.50	6.075	75	0.650	0.0513	26.926
60	50.00	6.121	75	0.674	0.0510	27.442
61	50.50	6.092	75	0.692	0.0561	27.105
62	51.00	6.084	75	0.623	0.0527	28.155
63	51.50	6.099	75	0.636	0.0584	28.265
64	52.00	6.084	75	0.692	0.0506	28.649
65	52.50	6.033	75	0.638	0.0528	28.529
66	53.00	6.049	75	0.691	0.0519	29.258
67	53.50	6.099	75	0.641	0.0527	29.797
68	54.00	6.038	75	0.639	0.0541	30.159
69	54.50	6.032	75	0.649	0.0553	30.302
70	55.00	6.057	75	0.659	0.0597	30.900
71	55.50	6.118	75	0.670	0.0588	30.901
72	56.00	6.089	75	0.667	0.0523	30.942
73	56.50	6.066	75	0.641	0.0597	31.695
74	57.00	6.110	75	0.685	0.0567	31.854
75	57.50	6.080	75	0.699	0.0550	32.791
76	58.00	6.064	75	0.664	0.0511	32.991
77	58.50	6.116	75	0.633	0.0559	32.600
78	59.00	6.047	75	0.653	0.0566	33.114
79	59.50	6.096	75	0.619	0.0555	33.396
80	60.00	6.074	75	0.654	0.0533	33.604
81	60.50	6.065	75	0.643	0.0586	34.436
82	61.00	6.043	75	0.638	0.0522	34.780

STT	Chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm)	Hệ số khuếch tán Clo $D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	Độ ẩm H(%)	Nồng độ Clo bề mặt $C_s$ (%)	Giá trị ngưỡng nồng độ Clo $C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) theo mô hình xây dựng
83	61.50	6.039	75	0.666	0.0582	35.487
84	62.00	6.105	75	0.609	0.0595	35.612
85	62.50	6.062	75	0.645	0.0531	35.814
86	63.00	6.069	75	0.620	0.0577	36.191
87	63.50	6.066	75	0.633	0.0546	36.185
88	64.00	6.087	75	0.668	0.0575	36.438
89	64.50	6.089	75	0.630	0.0581	36.707
90	65.00	6.121	75	0.654	0.0564	37.099
91	65.50	6.045	75	0.636	0.0567	38.338
92	66.00	6.030	75	0.683	0.0530	38.553
93	66.50	6.111	75	0.668	0.0527	38.201
94	67.00	6.042	75	0.607	0.0570	39.267
95	67.50	6.117	75	0.693	0.0537	38.761
96	68.00	6.080	75	0.623	0.0573	39.967
97	68.50	6.122	75	0.648	0.0580	40.281
98	69.00	6.115	75	0.662	0.0563	39.983
99	69.50	6.079	75	0.615	0.0546	40.277
100	70.00	6.080	75	0.603	0.0510	40.644
101	70.50	6.123	75	0.666	0.0548	41.781
102	71.00	6.032	75	0.646	0.0593	41.838
103	71.50	6.055	75	0.655	0.0553	41.881
104	72.00	6.084	75	0.645	0.0568	42.181
105	72.50	6.041	75	0.658	0.0550	42.578
106	73.00	6.049	75	0.657	0.0586	43.497
107	73.50	6.073	75	0.634	0.0563	43.175
108	74.00	6.116	75	0.676	0.0544	43.814
109	74.50	6.032	75	0.658	0.0572	43.883
110	75.00	6.026	75	0.684	0.0515	44.465
111	75.50	6.036	75	0.645	0.0549	44.384
112	76.00	6.110	75	0.615	0.0507	44.930
113	76.50	6.031	75	0.630	0.0545	45.130
114	77.00	6.117	75	0.635	0.0538	45.545
115	77.50	6.053	75	0.654	0.0569	45.712
116	78.00	6.047	75	0.654	0.0539	45.946
117	78.50	6.123	75	0.613	0.0535	47.181
118	79.00	6.037	75	0.616	0.0590	46.663
119	79.50	6.102	75	0.666	0.0542	47.905
120	80.00	6.034	75	0.668	0.0566	47.895
121	80.50	6.093	75	0.653	0.0595	47.792
122	81.00	6.049	75	0.619	0.0562	48.059
123	81.50	6.090	75	0.606	0.0502	48.362
124	82.00	6.057	75	0.684	0.0574	49.392

STT	Chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm)	Hệ số khuếch tán Clo $D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	Độ ẩm H(%)	Nồng độ Clo bề mặt $C_s$ (%)	Giá trị ngưỡng nồng độ Clo $C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) theo mô hình xây dựng
125	82.50	6.080	75	0.687	0.0505	49.798
126	83.00	6.058	75	0.674	0.0583	50.174
127	83.50	6.031	75	0.682	0.0560	49.776
128	84.00	6.119	75	0.691	0.0563	50.284
129	84.50	6.079	75	0.620	0.0528	51.266
130	85.00	6.061	75	0.698	0.0522	51.322
131	85.50	6.044	75	0.601	0.0520	51.158
132	86.00	6.090	75	0.689	0.0561	51.946
133	86.50	6.069	75	0.677	0.0513	51.863
134	87.00	6.034	75	0.671	0.0584	52.333
135	87.50	6.055	75	0.628	0.0552	52.721
136	88.00	6.114	75	0.628	0.0552	53.029
137	88.50	6.115	75	0.661	0.0530	53.191
138	89.00	6.035	75	0.601	0.0556	54.192
139	89.50	6.026	75	0.656	0.0550	54.663
140	90.00	6.092	75	0.674	0.0559	54.219
141	90.50	6.067	75	0.651	0.0513	55.078
142	91.00	6.101	75	0.690	0.0553	55.522
143	91.50	6.041	75	0.608	0.0588	55.812
144	92.00	6.090	75	0.638	0.0531	55.969
145	92.50	6.099	75	0.626	0.0588	56.077
146	93.00	6.086	75	0.625	0.0513	56.320
147	93.50	6.049	75	0.633	0.0538	56.995
148	94.00	6.059	75	0.647	0.0522	57.409
149	94.50	6.059	75	0.642	0.0573	57.907
150	95.00	6.035	75	0.678	0.0600	57.940
151	95.50	6.101	75	0.669	0.0523	58.357
152	96.00	6.055	75	0.604	0.0506	58.987
153	96.50	6.075	75	0.654	0.0521	59.016
154	97.00	6.083	75	0.612	0.0520	59.319
155	97.50	6.099	75	0.665	0.0500	59.609
156	98.00	6.109	75	0.695	0.0576	59.988
157	98.50	6.058	75	0.659	0.0559	60.122
158	99.00	6.083	75	0.668	0.0538	60.410
159	99.50	6.097	75	0.635	0.0587	61.543
160	100.00	6.048	75	0.674	0.0512	61.105
161	20.5	6.051	100	0.606	0.0503	4.689
162	21	6.036	100	0.661	0.0583	5.368
163	21.5	6.086	100	0.663	0.0512	5.068
164	22	6.091	100	0.699	0.0598	6.089
165	22.5	6.039	100	0.631	0.0525	5.424
166	23	6.113	100	0.688	0.0570	5.888

STT	Chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm)	Hệ số khuếch tán Clo $D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	Độ ẩm H(%)	Nồng độ Clo bề mặt $C_s$ (%)	Giá trị ngưỡng nồng độ Clo $C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) theo mô hình xây dựng
167	23.5	6.110	100	0.654	0.0530	6.613
168	24	6.096	100	0.671	0.0525	6.661
169	24.5	6.106	100	0.646	0.0501	6.471
170	25	6.105	100	0.602	0.0538	6.210
171	25.5	6.059	100	0.641	0.0592	6.392
172	26	6.065	100	0.667	0.0540	7.366
173	26.5	6.028	100	0.686	0.0591	7.400
174	27	6.072	100	0.664	0.0540	7.421
175	27.5	6.028	100	0.650	0.0554	7.638
176	28	6.037	100	0.690	0.0520	7.371
177	28.5	6.083	100	0.668	0.0597	8.308
178	29	6.063	100	0.690	0.0538	8.150
179	29.5	6.096	100	0.631	0.0566	8.172
180	30	6.105	100	0.666	0.0566	8.629
181	30.5	6.034	100	0.678	0.0560	8.426
182	31	6.064	100	0.631	0.0567	8.882
183	31.5	6.110	100	0.652	0.0574	8.850
184	32	6.124	100	0.648	0.0559	9.089
185	32.5	6.095	100	0.668	0.0575	9.464
186	33	6.038	100	0.692	0.0583	9.858
187	33.5	6.084	100	0.640	0.0504	9.990
188	34	6.026	100	0.669	0.0526	10.061
189	34.5	6.029	100	0.637	0.0509	10.289
190	35	6.048	100	0.611	0.0590	10.166
191	35.5	6.108	100	0.682	0.0588	10.611
192	36	6.038	100	0.628	0.0583	11.096
193	36.5	6.067	100	0.640	0.0501	11.232
194	37	6.060	100	0.623	0.0587	10.754
195	37.5	6.042	100	0.621	0.0535	11.173
196	38	6.107	100	0.627	0.0502	11.592
197	38.5	6.072	100	0.640	0.0589	11.512
198	39	6.045	100	0.680	0.0583	11.519
199	39.5	6.031	100	0.689	0.0506	12.154
200	40	6.059	100	0.620	0.0577	12.500
201	40.5	6.031	100	0.653	0.0508	12.428
202	41	6.043	100	0.611	0.0540	12.567
203	41.5	6.067	100	0.600	0.0529	12.827
204	42	6.099	100	0.682	0.0536	12.769
205	42.5	6.034	100	0.604	0.0536	13.337
206	43	6.097	100	0.651	0.0599	12.854
207	43.5	6.065	100	0.639	0.0576	13.565
208	44	6.072	100	0.681	0.0581	13.477

STT	Chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm)	Hệ số khuếch tán Clo $D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	Độ ẩm H(%)	Nồng độ Clo bề mặt $C_s$ (%)	Giá trị ngưỡng nồng độ Clo $C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) theo mô hình xây dựng
209	44.5	6.080	100	0.661	0.0566	13.454
210	45	6.060	100	0.618	0.0548	13.879
211	45.5	6.070	100	0.691	0.0514	14.215
212	46	6.049	100	0.667	0.0550	14.003
213	46.5	6.111	100	0.697	0.0525	14.545
214	47	6.080	100	0.652	0.0587	14.797
215	47.5	6.042	100	0.642	0.0514	14.870
216	48	6.059	100	0.616	0.0534	15.086
217	48.5	6.073	100	0.643	0.0510	14.772
218	49	6.066	100	0.638	0.0521	15.737
219	49.5	6.095	100	0.613	0.0590	15.874
220	50	6.054	100	0.659	0.0561	15.236
221	50.5	6.097	100	0.622	0.0519	16.213
222	51	6.120	100	0.647	0.0503	16.549
223	51.5	6.085	100	0.692	0.0592	16.537
224	52	6.102	100	0.649	0.0586	16.468
225	52.5	6.061	100	0.667	0.0598	17.047
226	53	6.115	100	0.634	0.0578	16.743
227	53.5	6.124	100	0.643	0.0519	17.262
228	54	6.093	100	0.696	0.0592	17.040
229	54.5	6.108	100	0.649	0.0522	17.800
230	55	6.113	100	0.607	0.0595	17.714
231	55.5	6.085	100	0.644	0.0562	18.146
232	56	6.114	100	0.610	0.0592	18.160
233	56.5	6.106	100	0.691	0.0581	18.231
234	57	6.110	100	0.643	0.0535	18.081
235	57.5	6.062	100	0.674	0.0592	18.312
236	58	6.042	100	0.689	0.0558	18.855
237	58.5	6.082	100	0.663	0.0505	18.348
238	59	6.038	100	0.680	0.0503	18.895
239	59.5	6.035	100	0.696	0.0589	18.893
240	60	6.044	100	0.664	0.0571	19.650
241	60.5	6.075	100	0.689	0.0528	19.359
242	61	6.048	100	0.695	0.0536	19.489
243	61.5	6.029	100	0.690	0.0545	19.773
244	62	6.094	100	0.656	0.0525	20.411
245	62.5	6.086	100	0.628	0.0520	20.466
246	63	6.098	100	0.683	0.0562	20.635
247	63.5	6.027	100	0.629	0.0595	20.626
248	64	6.090	100	0.673	0.0502	20.856
249	64.5	6.105	100	0.637	0.0512	21.315
250	65	6.032	100	0.668	0.0562	20.645

STT	Chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm)	Hệ số khuếch tán Clo $D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	Độ ẩm H(%)	Nồng độ Clo bề mặt $C_s$ (%)	Giá trị ngưỡng nồng độ Clo $C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) theo mô hình xây dựng
251	65.5	6.114	100	0.634	0.0534	21.354
252	66	6.072	100	0.651	0.0520	21.165
253	66.5	6.119	100	0.645	0.0562	21.298
254	67	6.037	100	0.661	0.0550	21.381
255	67.5	6.101	100	0.601	0.0515	21.659
256	68	6.080	100	0.629	0.0589	22.530
257	68.5	6.059	100	0.661	0.0528	22.384
258	69	6.097	100	0.610	0.0578	22.758
259	69.5	6.041	100	0.644	0.0519	22.426
260	70	6.094	100	0.668	0.0560	23.053
261	70.5	6.113	100	0.656	0.0527	22.876
262	71	6.088	100	0.675	0.0531	23.201
263	71.5	6.045	100	0.605	0.0584	23.924
264	72	6.064	100	0.686	0.0587	23.265
265	72.5	6.040	100	0.618	0.0548	23.380
266	73	6.089	100	0.695	0.0597	23.918
267	73.5	6.110	100	0.682	0.0514	24.514
268	74	6.052	100	0.624	0.0541	24.495
269	74.5	6.083	100	0.665	0.0587	24.701
270	75	6.030	100	0.645	0.0581	24.977
271	75.5	6.078	100	0.629	0.0582	25.182
272	76	6.100	100	0.692	0.0544	25.316
273	76.5	6.030	100	0.683	0.0525	24.889
274	77	6.081	100	0.614	0.0565	25.758
275	77.5	6.056	100	0.628	0.0581	25.208
276	78	6.105	100	0.692	0.0584	25.766
277	78.5	6.033	100	0.615	0.0559	25.465
278	79	6.071	100	0.690	0.0507	26.385
279	79.5	6.066	100	0.669	0.0595	26.131
280	80	6.087	100	0.639	0.0551	26.473
281	80.5	6.077	100	0.694	0.0546	26.802
282	81	6.097	100	0.644	0.0558	27.075
283	81.5	6.103	100	0.676	0.0570	27.056
284	82	6.101	100	0.620	0.0529	27.143
285	82.5	6.062	100	0.604	0.0569	27.652
286	83	6.039	100	0.634	0.0591	27.446
287	83.5	6.057	100	0.623	0.0545	27.613
288	84	6.077	100	0.690	0.0517	27.681
289	84.5	6.096	100	0.602	0.0544	27.989
290	85	6.069	100	0.626	0.0574	28.204
291	85.5	6.074	100	0.647	0.0510	28.930
292	86	6.071	100	0.670	0.0590	28.167

STT	Chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm)	Hệ số khuếch tán Clo $D_{28}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	Độ ẩm H(%)	Nồng độ Clo bề mặt $C_s$ (%)	Giá trị ngưỡng nồng độ Clo $C_{th}$ (%)	$t_1$ (năm) theo mô hình xây dựng
293	86.5	6.078	100	0.609	0.0565	28.424
294	87	6.110	100	0.613	0.0514	28.570
295	87.5	6.057	100	0.672	0.0512	28.776
296	88	6.029	100	0.609	0.0552	29.785
297	88.5	6.027	100	0.690	0.0501	29.765
298	89	6.116	100	0.625	0.0501	29.472
299	89.5	6.028	100	0.661	0.0589	29.800
300	90	6.046	100	0.660	0.0512	30.476
301	90.5	6.046	100	0.653	0.0580	30.187
302	91	6.072	100	0.617	0.0513	30.866
303	91.5	6.108	100	0.637	0.0520	30.257
304	92	6.041	100	0.658	0.0540	30.990
305	92.5	6.072	100	0.669	0.0541	31.243
306	93	6.112	100	0.641	0.0591	31.448
307	93.5	6.052	100	0.684	0.0565	31.486
308	94	6.079	100	0.688	0.0585	31.481
309	94.5	6.111	100	0.604	0.0533	31.326
310	95	6.087	100	0.625	0.0576	31.665
311	95.5	6.118	100	0.605	0.0515	32.357
312	96	6.087	100	0.695	0.0519	32.105
313	96.5	6.035	100	0.612	0.0553	32.365
314	97	6.050	100	0.644	0.0536	32.219
315	97.5	6.124	100	0.619	0.0511	32.598
316	98	6.039	100	0.635	0.0545	32.850
317	98.5	6.033	100	0.650	0.0557	33.087
318	99	6.090	100	0.673	0.0510	33.400
319	99.5	6.031	100	0.683	0.0530	33.433
320	100	6.059	100	0.651	0.0558	33.679

**BỘ DỮ LIỆU XÁC ĐỊNH  $T_2$** 

STT	Chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm)	d (mm)	H(%)	$i_{corr}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$t_2$ (năm)
1	30.5	16	75	1.47	4.78
2	31	16	75	1.47	4.79
3	31.5	16	76	1.47	4.80
4	32	16	76	1.47	4.80
5	32.5	16	76	1.47	4.81
6	33	16	76	1.47	4.82
7	33.5	16	76	1.47	4.83
8	34	16	77	1.47	4.84
9	34.5	16	77	1.47	4.85
10	35	16	77	1.47	4.86
11	35.5	16	77	1.47	4.87
12	36	16	78	1.47	4.87
13	36.5	16	78	1.47	4.88
14	37	16	78	1.47	4.89
15	37.5	16	78	1.47	4.90
16	38	16	78	1.47	4.91
17	38.5	16	79	1.47	4.92
18	39	16	79	1.47	4.93
19	39.5	16	79	1.47	4.93
20	40	16	79	1.47	4.94
21	40.5	16	79	1.47	4.95
22	41	16	80	1.47	4.96
23	41.5	16	80	1.47	4.97
24	42	16	80	1.47	4.98
25	42.5	16	80	1.47	4.99
26	43	16	80	1.47	5.00
27	43.5	16	81	1.47	5.00
28	44	16	81	1.47	5.01
29	44.5	16	81	1.47	5.02
30	45	16	81	1.47	5.03
31	45.5	16	81	1.47	5.04
32	46	16	82	1.47	5.05
33	46.5	16	82	1.47	5.06
34	47	16	82	1.47	5.06
35	47.5	16	82	1.47	5.07
36	48	16	83	1.47	5.08
37	48.5	16	83	1.47	5.09
38	49	16	83	1.47	5.10
39	49.5	16	83	1.47	5.11
40	50	16	83	1.47	5.12
41	50.5	16	84	1.47	5.13
42	51	16	84	1.47	5.13

STT	Chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm)	d (mm)	H(%)	$i_{corr}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$t_2$ (năm)
43	51.5	16	84	1.47	5.14
44	52	16	84	1.47	5.15
45	52.5	16	84	1.47	5.16
46	53	16	85	1.47	5.17
47	53.5	16	85	1.47	5.18
48	54	16	85	1.47	5.19
49	54.5	16	85	1.47	5.19
50	55	16	85	1.47	5.20
51	55.5	16	86	1.47	5.21
52	56	16	86	1.47	5.22
53	56.5	16	86	1.47	5.23
54	57	16	86	1.47	5.24
55	57.5	16	86	1.47	5.25
56	58	16	87	1.47	5.26
57	58.5	16	87	1.47	5.26
58	59	16	87	1.47	5.27
59	59.5	16	87	1.47	5.28
60	60	16	88	1.47	5.29
61	60.5	16	88	1.47	5.30
62	61	16	88	1.47	5.31
63	61.5	16	88	1.47	5.32
64	62	16	88	1.47	5.32
65	62.5	16	89	1.47	5.33
66	63	16	89	1.47	5.34
67	63.5	16	89	1.47	5.35
68	64	16	89	1.47	5.36
69	64.5	16	89	1.47	5.37
70	65	16	90	1.47	5.38
71	65.5	16	90	1.47	5.39
72	66	16	90	1.47	5.39
73	66.5	16	90	1.47	5.40
74	67	16	90	1.47	5.41
75	67.5	16	91	1.47	5.42
76	68	16	91	1.47	5.43
77	68.5	16	91	1.47	5.44
78	69	16	91	1.47	5.45
79	69.5	16	91	1.47	5.45
80	70	16	92	1.47	5.46
81	70.5	16	92	1.47	5.47
82	71	16	92	1.47	5.48
83	71.5	16	92	1.47	5.49
84	72	16	93	1.47	5.50
85	72.5	16	93	1.47	5.51
86	73	16	93	1.47	5.52

STT	Chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm)	d (mm)	H(%)	$i_{\text{corr}}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$t_2$ (năm)
87	73.5	16	93	1.47	5.52
88	74	16	93	1.47	5.53
89	74.5	16	94	1.47	5.54
90	75	16	94	1.47	5.55
91	75.5	16	94	1.47	5.56
92	76	16	94	1.47	5.57
93	76.5	16	94	1.47	5.58
94	77	16	95	1.47	5.58
95	77.5	16	95	1.47	5.59
96	78	16	95	1.47	5.60
97	78.5	16	95	1.47	5.61
98	79	16	95	1.47	5.62
99	79.5	16	96	1.47	5.63
100	80	16	96	1.47	5.64
101	80.5	16	96	1.47	5.65
102	81	16	96	1.47	5.65
103	81.5	16	96	1.47	5.66
104	82	16	97	1.47	5.67
105	82.5	16	97	1.47	5.68
106	83	16	97	1.47	5.69
107	83.5	16	97	1.47	5.70
108	84	16	98	1.47	5.71
109	84.5	16	98	1.47	5.71
110	85	16	98	1.47	5.72
111	85.5	16	98	1.47	5.73
112	86	16	98	1.47	5.74
113	86.5	16	99	1.47	5.75
114	87	16	99	1.47	5.76
115	87.5	16	99	1.47	5.77
116	88	16	99	1.47	5.78
117	88.5	16	99	1.47	5.78
118	89	16	100	1.47	5.79
119	89.5	16	100	1.47	5.80
120	90	16	100	1.47	5.81