

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

MAI THỊ THÙY DƯƠNG

**XÂY DỰNG MÔ HÌNH TÍCH HỢP CHỈ SỐ
CĂNG THẲNG NGUỒN NƯỚC VÀ PHƯƠNG PHÁP
ĐÁNH GIÁ VÒNG ĐỜI HỖ TRỢ QUẢN LÝ BỀN VỮNG
HỆ THỐNG CẤP NƯỚC THÀNH PHỐ ĐÀ NẴNG**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

ĐÀ NẴNG – 2026

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

MAI THỊ THÙY DƯƠNG

**XÂY DỰNG MÔ HÌNH TÍCH HỢP CHỈ SỐ
CĂNG THẲNG NGUỒN NƯỚC VÀ PHƯƠNG PHÁP
ĐÁNH GIÁ VÒNG ĐỜI HỖ TRỢ QUẢN LÝ BỀN VỮNG
HỆ THỐNG CẤP NƯỚC THÀNH PHỐ ĐÀ NẴNG**

Chuyên ngành : **Kỹ thuật Môi trường**

Mã số : **9520320**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS. VÕ NGỌC DƯƠNG

2. GS. TS. TRẦN THỊ VIỆT NGÀ

ĐÀ NẴNG - 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đề tài luận án tiến sĩ “**Xây dựng mô hình tích hợp chỉ số căng thẳng nguồn nước và phương pháp đánh giá vòng đời hỗ trợ quản lý bền vững hệ thống cấp nước thành phố Đà Nẵng**” là kết quả của cả quá trình học tập, nghiên cứu của riêng tôi. Các dữ liệu được sử dụng trong quá trình thực hiện, tính toán trong luận án hoàn toàn được thu thập từ thực tế, chính xác, đáng tin cậy, có nguồn gốc rõ ràng, được xử lý trung thực và khách quan. Tôi xin cam đoan mọi sự giúp đỡ cho việc thực hiện Luận án đã được cảm ơn và các thông tin trích dẫn trong Luận án đã được chỉ rõ nguồn gốc và trích dẫn đầy đủ.

Nghiên cứu sinh thực hiện Luận án

NCS. Mai Thị Thùy Dương

LỜI CẢM ƠN

Luận án được nghiên cứu sinh thực hiện tại Bộ môn Kỹ thuật Môi trường, Khoa Môi trường, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng dưới sự hướng dẫn khoa học của PGS.TS. Võ Ngọc Dương, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng và GS.TS. Trần Thị Việt Nga, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.

Nghiên cứu sinh xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc về sự hướng dẫn tận tình và quý báu của Quý Thầy Cô hướng dẫn, nhờ sự chỉ bảo sâu sắc cùng những lời động viên thường xuyên của Quý Thầy Cô đã giúp nghiên cứu sinh vượt qua những thử thách và hoàn thiện luận án.

Nghiên cứu sinh xin cảm ơn đến Ban Giám hiệu, Phòng Đào tạo, Khoa Môi trường, Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng đã giúp đỡ và tạo điều kiện thuận lợi cho nghiên cứu sinh trong quá trình học tập và nghiên cứu.

Nghiên cứu sinh cũng xin gửi lời cảm ơn đến các nhà Khoa học đã đóng góp những ý kiến quý báu cho nghiên cứu sinh trong quá trình hoàn thiện luận án.

Nghiên cứu sinh bày tỏ lòng biết ơn đến Lãnh đạo và cán bộ công ty Cổ phần Cấp nước Đà Nẵng đã tạo điều kiện thuận lợi cho nghiên cứu sinh trong quá trình thu thập số liệu, tài liệu liên quan phục vụ cho mục đích nghiên cứu của đề tài luận án.

Nghiên cứu sinh xin bày tỏ lòng biết ơn đến công ty PRé Sustainability (Hà Lan), đã hỗ trợ phần mềm SimaPro trong suốt 3 năm, là công cụ giúp tác giả thực hiện các phân tích đánh giá vòng đời trong luận án này.

Nghiên cứu sinh xin cảm ơn sự tài trợ từ Quỹ phát triển Khoa học và công nghệ Trường Đại học Bách khoa với đề tài mã số T2021-02-24 và T2024-02-19.

Cuối cùng, nghiên cứu sinh xin chân thành cảm ơn gia đình, bạn bè và đồng nghiệp là những người luôn ở bên cạnh, hỗ trợ về mặt tinh thần, chia sẻ với nghiên cứu sinh những lúc khó khăn trong quá trình học tập và nghiên cứu.

Nghiên cứu sinh

NCS. Mai Thị Thùy Dương

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU	1
1. Tính cấp thiết của luận án	1
2. Mục tiêu của luận án	2
3. Đối tượng và Phạm vi nghiên cứu	3
4. Nội dung nghiên cứu	3
5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án..	4
6. Những đóng góp mới của luận án	5
7. Bố cục luận án.....	5
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU	7
1.1. Tổng quan về tài nguyên nước	7
1.2. Khái niệm cơ bản của hệ thống cấp nước đô thị và ranh giới phân tích vòng đời...9	
1.3. Phân tích đặc tính và cấu trúc của hệ thống cấp nước thành phố Đà Nẵng	10
1.3.1. Nguồn nước thô	10
1.3.2. Các nhà máy nước sạch	11
1.3.3. Mạng lưới cấp nước.....	17
1.3.4. Đánh giá tổng hợp.....	17
1.4. Các công cụ đánh giá tình trạng khan hiếm nước và tác động đến môi trường của hệ thống nước.....	19
1.4.1. Chỉ số căng thẳng nguồn nước	19
1.4.2. Một số công cụ hỗ trợ trong việc ra quyết định liên quan đến ngành nước	21
1.4.3. Các kết quả nghiên cứu về LCA trên hệ thống nước đô thị..	24
1.5. Khoảng trống trong nghiên cứu.....	35
1.5.1. Về mặt phương pháp luận và công cụ đặc trưng hóa tác động.....	35
1.5.2. Về đối tượng nghiên cứu và tính đặc thù địa phương.....	35
1.5.3. Cách tiếp cận và hỗ trợ ra quyết định quy hoạch.....	36
1.6. Tiểu kết Chương1	36
CHƯƠNG 2. ĐỐI TƯỢNG VÀ CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA CÁC PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	38

2.1. Đối tượng nghiên cứu	39
2.2. Phương pháp nghiên cứu	39
2.2.1. Phương pháp thống kê và kế thừa	39
2.2.2. Mô hình tính toán dòng chảy về	40
2.2.3. Mô hình Simapro	44
2.2.4. Phương pháp khảo sát thực tế, thu thập và xử lý số liệu	46
2.2.5. Phương pháp đánh giá tác động của việc khai thác nước	50
2.2.6. Phương pháp đánh giá vòng đời (LCA)	50
2.3. Lý thuyết tích hợp WSI và phương pháp LCA	61
2.4. Phân tích độ bất định và giới hạn nghiên cứu	62
2.5. Tiểu kết Chương 2	63

CHƯƠNG 3. THIẾT LẬP VÀ KIỂM ĐỊNH MÔ HÌNH TÍCH HỢP CHỈ SỐ CĂNG THẲNG NGUỒN NƯỚC VÀ PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ VÒNG ĐỜI 64

3.1. Thiết lập mô hình tích hợp chỉ số căng thẳng nguồn nước và phương pháp đánh giá vòng đời	64
3.1.1. Cơ sở thực tiễn xây dựng mô hình tích hợp WSI - LCA	64
3.1.2. Cơ sở khoa học xây dựng mô hình tích hợp WSI - LCA	65
3.1.3. Thiết lập mô hình tích hợp WSI - LCA	65
3.2. Áp dụng mô hình tích hợp WSI - LCA trong đánh giá hiện trạng khai thác và sản xuất nước sạch tại Đà Nẵng	71
3.2.1. Mục tiêu và phạm vi	71
3.2.2. Tính toán chỉ số WSI	72
3.2.3. Kiểm kê vòng đời	85
3.2.4. Đánh giá tác động vòng đời và diễn giải kết quả	88
3.3. Đánh giá độ chính xác và kiểm định mô hình tích hợp WSI - LCA theo ba cấp độ	102
3.3.1. Kiểm định mô hình (Validation)	102
3.3.2. Phân tích độ nhạy của các tham số đầu vào (Sensitivity Analysis)	103
3.3.3. Phân tích tính không chắc chắn của dữ liệu (Uncertainty Analysis)	104

3.4. Tiểu kết Chương 3	111
CHƯƠNG 4. ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ CHO CÁC KỊCH BẢN KHAI THÁC, SẢN XUẤT NƯỚC SẠCH TẠI ĐÀ NẴNG THÔNG QUA MÔ HÌNH TÍCH HỢP WSI - LCA.	113
4.1. Xây dựng các kịch bản cấp nước cho thành phố Đà Nẵng	113
4.1.1. Tóm tắt các nội dung quy hoạch hệ thống cấp nước tại TP Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn 2045	113
4.1.2. Cơ sở xây dựng các kịch bản khai thác và xử lý nước đô thị cho TP Đà Nẵng	114
4.1.3. Các kịch bản khai thác và xử lý nước tại nhà máy nước Cầu Đỏ - TP Đà Nẵng	117
4.2. Áp dụng mô hình tích hợp để so sánh tác động các kịch bản khai thác và sản xuất nước sạch tại TP. Đà Nẵng	123
4.2.1. Mục tiêu và phạm vi	123
4.2.2. Chỉ số WSI với các kịch bản cấp nước cho TP Đà Nẵng trong điều kiện BĐKH	123
4.2.3. Kiểm kê vòng đời.	132
4.2.4. Đánh giá tác động vòng đời và diễn giải kết quả của các kịch bản.....	136
4.3. Tiểu kết chương 4	148
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	150
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ	
TÀI LIỆU THAM KHẢO	
PHỤ LỤC	

DANH MỤC BẢNG

Số hiệu bảng	Tên bảng	Trang
1.1	Tổng hợp công suất các NMN đô thị thành phố Đà Nẵng	12
1.2	Tình trạng nguồn nước thô do Falkenmark đề xuất (1989)	19
1.3	Chỉ số WSI do Smakhtin đề xuất	21
1.4	Phân loại các kịch bản đề xuất	25
1.5	Các điểm chính về phạm vi, đơn vị chức năng, công cụ của các nghiên cứu LCA trên hệ thống nước	28
2.1	Hệ số phát thải của một số nguồn	53
2.2	Ví dụ về loại tác động và điểm kết thúc của loại tác động	55
2.3	Các loại tác động (midpoint) trong ReCiPe 2016	58
3.1	Tóm tắt các giai đoạn của khung đánh giá	69
3.2	Các chỉ số của mô hình MIKE SHE sau khi hiệu chỉnh	75
3.3	Các chỉ số của mô hình MIKE SHE sau khi kiểm định	75
3.4	Tiêu chuẩn dùng nước cho thành phố Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045	77
3.5	Lưu lượng phân bổ ứng với các tần suất khác nhau tại đập An Trạch và cửa thu Cầu Đỏ	83
3.6	Bảng dữ liệu sản xuất của NMN nước Cầu Đỏ	86
3.7	Hệ số phát thải của các nguồn được sử dụng trong mô hình SimaPro	87
3.8	Tác động tổng thể của sản xuất nước tại NMN Cầu Đỏ	90
3.9	Tác động liên quan đến việc sử dụng hóa chất và năng lượng tại NMN Cầu Đỏ - Mùa khô	93

3.10	Các dữ liệu về điện và hóa chất ở dây chuyền 120.000 m ³ cũ	95
3.11	Tác động của từng cụm xử lý trong quá trình vận hành dây chuyền 120.000 m ³ cũ đến môi trường	96
3.12	Tác động trung bình từng tháng trong quá trình vận hành dây chuyền 120.000 m ³ cũ đến môi trường	99
3.13	Kết quả phát thải CO ₂ khi thay đổi tham số đầu vào	104
3.14	Tiêu chí đánh giá chất lượng dữ liệu theo phương pháp ma trận phả hệ Pedigree Matrix	105
3.15 a,b,c,d	Kết quả đánh giá các dòng dữ liệu	106-107
3.16	Các thông số cơ bản của mô phỏng Monte Carlo thực hiện trên dữ liệu dây chuyền 120.000 m ³ /ngày	109
4.1	Tóm tắt các kịch bản đề xuất cho cấp nước đô thị	121
4.2	Tổng hợp giá trị WSI vào mùa khô của 5 kịch bản cấp nước	132
4.3	Dữ liệu kiểm kê của 5 kịch bản cấp nước	134
4.4	Kết quả của các loại tác động đặc trưng cho 5 kịch bản cấp nước tại Đà Nẵng	137
4.5	Kết quả dấu chân khan hiếm nguồn nước (WSF) của 5 kịch bản	140
4.6	Giá trị chỉ báo các đặc trưng điểm kết thúc tác động của các kịch bản	143

DANH MỤC HÌNH

Số hiệu hình	Tên hình	Trang
1.1	Lượng nước khai thác ở các quốc gia trên thế giới (Nguồn: https://data.worldbank.org)	7
1.2	Sơ đồ vùng phục vụ của các NMN hiện trạng	13
1.3	Sơ đồ dây chuyền công nghệ NMN Cầu Đỏ	16
2.1	Khung logic nghiên cứu của luận án	38
2.2	Vị trí NMN Cầu Đỏ và đập dâng An Trạch	39
2.3	Các quá trình thủy văn được mô phỏng bởi MIKE-SHE	42
2.4	Sơ đồ hiệu chỉnh và kiểm định mô hình	43
2.5	Ví dụ về kết quả chạy mô hình	45
2.6	Ví dụ về việc khai báo dữ liệu cho mô hình	46
2.7	Các giai đoạn của LCA	51
2.8	Các giai đoạn của LCA	52
2.9	Sơ đồ tổng quan về các loại tác động được đề cập trong phương pháp luận ReCiPe2016 và mối quan hệ của chúng với các lĩnh vực bảo vệ	60
3.1	Quy trình kết hợp WSI và LCA	70
3.2	Địa hình và sơ đồ mạng lưới sông sử dụng trong mô phỏng	73
3.3	Kết quả hiệu chỉnh mô hình	75
3.4	Kết quả kiểm định mô hình	76
3.5	Kết quả mô phỏng lượng nước có thể sử dụng (WR) của cửa thu Cầu Đỏ và đập dâng An Trạch (1987-2023)	79

3.6	Lượng nước khai thác tại cửa thu NMN Cầu Đỏ và đập An Trạch năm 2023	81
3.7	Tổng lượng nước về và lượng nước sử dụng tại cửa thu Cầu Đỏ (tháng 2-8/2020)	82
3.8	Giá trị WSI tại cửa thu nước Cầu Đỏ	84
3.9	Sơ đồ đầu vào và đầu ra của 1 hệ thống cấp nước	85
3.10	Sơ đồ năng lượng, nguyên liệu đầu vào, đầu ra của hệ thống tính trên 1m ³ nước sạch tại NMN Cầu Đỏ	87
3.11	Tác động của quá trình vận hành NMN Cầu Đỏ đến môi trường	92
3.12	Tác động liên quan đến việc sử dụng hóa chất và năng lượng tại NMN Cầu Đỏ - Mùa khô	94
3.13	Tác động của từng cụm xử lý trong quá trình vận hành dây chuyền 120.000 m ³ cũ đến môi trường	97
3.14	Tác động theo tháng của dây chuyền 120.000 m ³ cũ đến môi trường	100
3.15	Biểu đồ thể hiện sự phân phối xác suất của phát thải KNK (CO ₂ tđ) từ hệ thống sản xuất nước sạch theo mô phỏng Monte Carlo	109
3.16	Kết quả khí thải từ mô phỏng Monte Carlo	110
4.1	Sự thay đổi của lưu lượng nước về ứng với các kịch bản BĐKH trong các tháng mùa kiệt ở cửa thu Cầu Đỏ	124
4.2	Lưu lượng nước về ứng với tần suất 95% ứng với các kịch bản BĐKH	125
4.3	Giá trị WSI tại cửa thu nước Cầu Đỏ theo kịch bản S1	127
4.4	Giá trị WSI tại cửa thu nước Cầu Đỏ theo kịch bản S2	128
4.5	Giá trị WSI tại cửa thu nước Cầu Đỏ theo kịch bản S3	130

4.6	Giá trị WSI tại cửa thu nước Cầu Đỏ theo kịch bản S4	131
4.7	Kết quả 6 tác động của 5 kịch bản cấp nước được xây dựng	138
4.8	Tổng hợp các tác động của các kịch bản S1-S5	140
4.9	Kết quả kết hợp WSF và phát thải Carbon của 5 kịch bản	141
4.10	Các tác động đến sức khỏe của con người từ các kịch bản	144
4.11	Các tác động đến hệ sinh thái từ các kịch bản	145
4.12	Các tác động đến tài nguyên từ các kịch bản	146

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

BĐKH: Biến đổi khí hậu

DAWACO: Công ty Cổ phần Cấp nước Đà Nẵng

DEM: Digital Elevation Model - Mô hình số độ cao

DHI: The Danish Hydraulic Institute - Viện thủy lực Đan Mạch

DWP: Drinking water production - Trạm xử lý nước sạch

DWD: Drinking water distribution - Mạng lưới cấp nước

EIA: Environmental Impact Assessment - Đánh giá tác động môi trường

EWI: Environmental Water Requirements - Lượng nước để duy trì hệ sinh thái

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change - Ủy ban Liên chính phủ về Biến đổi Khí hậu

KNK: Khí nhà kính

HDI: Human Development Index - Chỉ số về sự phát triển của con người

HWI: Hydrological Water Stress Index - Chỉ số Căng thẳng nguồn nước thủy văn

ISO: International Organization for Standardization - Tổ chức Quốc tế về Tiêu chuẩn hóa

LCA: Life Cycle Assessment - Đánh giá vòng đời

LCC: Life Cycle Costing - Phân tích chi phí vòng đời

LCI: Life cycle inventory - Kiểm kê vòng đời

LCIA: Life cycle impact assessment - Đánh giá tác động vòng đời

MAR: Mean Annual Runoff - Tổng lượng nước tái tạo

MCA: Multi Criteria Analysis -Phân tích đa tiêu chí

NMN: Nhà máy nước

QĐ: Quyết định

SEA: Strategic Environmental Assessment - Đánh giá môi trường chiến lược

RA: Risk Assessment - Đánh giá rủi ro

SWI: Social Water Stress Index - Chỉ số căng thẳng nguồn nước có kể đến vấn đề xã hội

TP: Thành phố

VOC: Volatile Organic Compounds - Hợp chất hữu cơ dễ bay hơi

UBND: Ủy ban nhân dân

UNEP: United Nations Environment Programme - Chương trình Môi trường Liên Hợp Quốc

WMO: World Meteorological Organization - Tổ chức khí tượng thế giới

WSF: Water Scarcity Footprint - Dấu chân khan hiếm nguồn nước

WSI: Water stress index - Chỉ số căng thẳng nguồn nước

WTA: Water Withdrawal to Availability - Tỷ lệ khai thác so với khả năng cấp nước

WWC: Waste water collection - Mạng lưới thoát nước

WWT: Waste water treatment - Xử lý nước thải

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Nước là tài nguyên thiết yếu, gắn liền với sự sống, sản xuất và phát triển kinh tế - xã hội. Tuy nhiên, nhu cầu sử dụng nước ngày càng tăng cùng với sự gia tăng dân số toàn cầu, quá trình đô thị hóa nhanh và tác động của biến đổi khí hậu (BĐKH) đã làm gia tăng nguy cơ mất an ninh nguồn nước. Đây là một trong những thách thức nghiêm trọng nhất của thế kỷ 21. Liên Hợp Quốc đã khẳng định tầm quan trọng của nước thông qua việc đề cập đến “*Nước sạch và vệ sinh*” trong Mục tiêu phát triển bền vững số 6 (SDG 6) nhằm bảo đảm tính sẵn có và quản lý bền vững nguồn nước cho mọi người vào năm 2030. Theo Báo cáo Nước Thế giới 2023 của UNESCO [1], nhu cầu nước toàn cầu dự kiến tăng trung bình 1%/năm, tương đương mức tăng tổng cộng 20–30% vào năm 2050. Mặt khác, BĐKH đang làm thay đổi mạnh mẽ chu trình thủy văn, gây bất ổn trong phân bố và khả năng tiếp cận nguồn nước giữa các khu vực và thời điểm khác nhau. Vì vậy, việc xây dựng các mô hình đánh giá và quản lý tài nguyên nước khoa học, thích ứng với BĐKH là yêu cầu cấp bách để bảo đảm phát triển bền vững.

Tại Việt Nam, các đô thị ven biển như Đà Nẵng đang đối mặt với thách thức xâm nhập mặn do suy giảm dòng chảy mùa kiệt và nước biển dâng. Các tác động này không chỉ ảnh hưởng đến nguồn cung cấp nước thô mà còn làm tăng rủi ro, chi phí khi vận hành hệ thống cấp nước, gây thêm áp lực môi trường. Trong khi đó, nhu cầu sử dụng nước phục vụ đô thị hóa và phục hồi du lịch gia tăng, làm mất cân bằng giữa cung và cầu trong hệ thống cấp nước đô thị. Hoạt động sản xuất và cung cấp nước, từ khai thác, xử lý, vận chuyển đến sử dụng và xả thải, đều tiêu tốn năng lượng, hóa chất và tài nguyên và phát sinh các tác động môi trường ở nhiều mức độ khác nhau. Trong bối cảnh toàn cầu hóa các công cụ đánh giá môi trường, phương pháp đánh giá vòng đời (Life Cycle Assessment – LCA) ngày càng được coi là công cụ hữu hiệu để lượng hóa và theo dõi tác động môi trường xuyên suốt toàn bộ chuỗi hoạt động liên quan đến nước. Cùng với đó, các nghiên cứu quốc tế cũng đã nhấn mạnh vai trò của chỉ số căng thẳng nguồn nước (Water Stress Index – WSI) trong phản ánh mức độ khai thác vượt ngưỡng chịu tải sinh thái tại từng địa phương. Tuy nhiên, ở Việt Nam hiện nay, việc ứng dụng LCA trong ngành nước còn sơ khai, chủ yếu dựa trên các hệ số phát thải mặc định của quốc tế, chưa có tính địa phương hóa để phản ánh đúng tác động của xâm nhập mặn và biến động dòng chảy đặc thù của lưu vực miền Trung. Mặt khác, chưa có một mô hình định lượng tích hợp có khả năng đánh giá đồng thời áp lực tài nguyên nước tại nguồn và tác động môi trường của dây chuyền xử lý để hỗ trợ ra quyết định quy hoạch.

Để có cái nhìn tổng thể về hệ thống cấp nước, việc kết hợp các phương pháp nhằm đánh giá ảnh hưởng của quá trình khai thác nước thô và các tác động từ hoạt động của NMN đến môi trường, hệ sinh thái và con người là yêu cầu cấp thiết. Nhu cầu xây dựng một hệ thống cấp nước an toàn, bền vững, thích ứng với BĐKH và giảm phát thải khí nhà kính (KNK) ngày càng trở nên cấp thiết, nhất là trong điều kiện tài nguyên nước ngày càng khan hiếm. Do đó, việc phát triển mô hình tích hợp chỉ số WSI và phương pháp LCA cho hệ thống cấp nước đô thị có ý nghĩa chiến lược cả trước mắt lẫn lâu dài.

Trên cơ sở đó, việc thực hiện luận án tiến sĩ **“Xây dựng mô hình tích hợp chỉ số căng thẳng nguồn nước và phương pháp đánh giá vòng đời hỗ trợ quản lý bền vững hệ thống cấp nước thành phố Đà Nẵng”** nhằm lấp đầy các khoảng trống nghiên cứu và cung cấp một hệ phương pháp luận mới cho quản trị nước đô thị bền vững. Mô hình tích hợp này không chỉ cung cấp cái nhìn toàn diện về tác động môi trường mà còn tạo cơ sở khoa học để lựa chọn kịch bản cấp nước tối ưu, hướng đến phát triển hệ thống cấp nước đô thị thân thiện với môi trường, an toàn và bền vững.

2. Mục tiêu của luận án

a) Mục tiêu chung:

Thiết lập mô hình tích hợp chỉ số căng thẳng nguồn nước và phương pháp đánh giá vòng đời (mô hình tích hợp WSI - LCA) nhằm đánh giá toàn diện các tác động môi trường và mức độ khan hiếm nguồn nước trong quá trình khai thác và sản xuất nước sạch cho hệ thống cấp nước đô thị. Kết quả luận án cung cấp luận cứ khoa học cho việc tối ưu hóa các kịch bản khai thác và sản xuất nước sạch đô thị trong điều kiện BĐKH.

b) Mục tiêu cụ thể:

- Thiết lập mô hình tích hợp WSI - LCA làm cơ sở khoa học cho phân tích hệ thống cấp nước đô thị đặc thù cho từng lưu vực, bảo đảm tính khoa học và khả năng lặp lại.

- Đánh giá tổng thể về mức độ căng thẳng nguồn nước và áp lực môi trường của hệ thống cấp nước đô thị Đà Nẵng thông qua mô hình tích hợp WSI - LCA.

- Mô phỏng các kịch bản khai thác, sản xuất nước sạch theo quy hoạch cấp nước đô thị đến năm 2045: Phân tích định lượng sự đánh đổi giữa an ninh nguồn nước và gánh nặng môi trường nhằm lựa chọn phương án quy hoạch hệ thống cấp nước bền vững, thích ứng với BĐKH.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

a) Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án bao gồm phương pháp luận về mô hình tích hợp WSI - LCA; Quá trình khai thác, vận chuyển nước thô và sản xuất nước sạch.

b) Phạm vi nghiên cứu

Phạm vi nghiên cứu theo không gian: Nghiên cứu được giới hạn từ công đoạn khai thác, truyền tải nước thô đến dây chuyền xử lý và sản xuất nước sạch tại nhà máy nước (NMN) Cầu Đỏ. Ngoài ra, không gian nghiên cứu được mở rộng tới các công trình đầu mối liên quan trực tiếp đến việc điều tiết và cấp nước thô cho nhà máy (đập dâng An Trạch và vùng hạ lưu sông Vu Gia - Thu Bồn). NMN Cầu Đỏ - Thành phố (TP) Đà Nẵng là công trình hạ tầng cấp nước cốt lõi cho TP, chịu ảnh hưởng trực tiếp và sâu sắc bởi các rủi ro thiên tai như xâm nhập mặn và biến động dòng chảy trong mùa kiệt từ lưu vực sông Vu Gia - Thu Bồn. Đây là các khu vực trọng điểm, quyết định đến cấp nước an toàn cho TP.

Phạm vi nghiên cứu theo thời gian: Đối với dòng chảy, dữ liệu được lấy theo chuỗi dữ liệu lịch sử tại các trạm đo trên lưu vực sông Vu Gia – Thu Bồn từ 1987-2023. Các chỉ số WSI tính toán dựa trên giá trị trung bình mùa khô. Dữ liệu hoạt động của NMN được thu thập từ nhật ký hoạt động của NMN tại Đà Nẵng trong 365 ngày của năm 2023. Các kịch bản cấp nước dựa trên quy hoạch đến năm 2030, tầm nhìn 2045, xét trong điều kiện BĐKH theo kịch bản RCP 8.5.

Phạm vi về nội dung nghiên cứu: Việc giới hạn phạm vi đánh giá vào công đoạn khai thác, truyền tải nước thô và sản xuất nước sạch cho hệ thống cấp nước đô thị là một quyết định phù hợp và có cơ sở cho mục tiêu của luận án, cho phép phân tích sâu về các phương án công nghệ và quản lý tại nguồn. Kết quả của luận án là cơ sở khoa học vững chắc để tối ưu hóa khâu khai thác và sản xuất, và các nghiên cứu tiếp theo có thể mở rộng phạm vi để đánh giá tổng thể chu trình nước đô thị tại Đà Nẵng.

Dữ liệu cho các kịch bản được xây dựng trên cơ sở Quy hoạch cấp nước TP. Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn 2050 (QĐ 9018/QĐ-UBND, 28/12/2016) và Điều chỉnh Quy hoạch cấp nước đô thị đến năm 2030, tầm nhìn 2045 do UBND TP. Đà Nẵng phê duyệt (QĐ 372/QĐ-UBND, 5/2/2025).

4. Nội dung nghiên cứu

- Thiết lập mô hình tích hợp WSI - LCA phục vụ đánh giá mức độ khan hiếm nguồn nước và các tác động môi trường của quá trình khai thác và xử lý nước sạch cho hệ thống cấp nước đô thị.

- Ứng dụng mô hình tích hợp WSI - LCA đánh giá hiện trạng: Thực nghiệm định lượng mức độ khan hiếm nguồn nước và các gánh nặng môi trường của hệ thống cấp nước đô thị Đà Nẵng giai đoạn hiện tại.

- Xây dựng các kịch bản khai thác và sản xuất nước sạch cho Đà Nẵng đến năm 2045 dựa trên định hướng quy hoạch phát triển đô thị, xét trong bối cảnh BĐKH và xâm nhập mặn.

- Sử dụng mô hình tích hợp WSI - LCA định lượng để so sánh và nhận diện kịch bản tối ưu đáp ứng đồng thời tiêu chí an ninh nguồn nước và phát thải thấp cho hệ thống cấp nước đô thị Đà Nẵng.

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

a) Ý nghĩa khoa học

Hoàn thiện phương pháp luận:

- Phát triển và chuẩn hóa quy trình tích hợp chỉ số WSI vào phương pháp LCA, áp dụng cho hệ thống cấp nước đô thị trong bối cảnh BĐKH và xâm nhập mặn. Đây là cách tiếp cận lần đầu tiên được áp dụng ở Việt Nam.

- Xây dựng mô hình để phân tích cùng lúc các tác động môi trường và mức độ khan hiếm nước ở quy mô địa phương, khắc phục hạn chế của các nghiên cứu trước đây vốn thường xem xét riêng lẻ hai khía cạnh này.

Bổ sung cơ sở khoa học cho đánh giá tài nguyên nước ở Việt Nam:

- Cung cấp mô hình định lượng và dữ liệu tham chiếu để đánh giá vòng đời hệ thống khai thác – sản xuất nước sạch cho hệ thống cấp nước đô thị gắn với bối cảnh đặc thù (thay đổi theo mùa, xâm nhập mặn, biến động nguồn).

- Áp dụng bộ dữ liệu Ecoinvent v3.11 và phương pháp LCIA ReCiPe 2016 tích hợp chỉ số WSI để phân tích ngành nước, từ đó đưa ra kết quả có thể so sánh với các nghiên cứu quốc tế.

Góp phần phát triển khoa học liên ngành:

- Liên kết giữa khoa học môi trường, quản lý tài nguyên nước và kỹ thuật cấp nước đô thị thông qua một phương pháp phân tích tích hợp, mở ra hướng nghiên cứu mới cho các hệ thống hạ tầng đô thị chịu tác động của BĐKH.

- Kết quả luận án tạo tiền đề cho các nghiên cứu tiếp theo về quản lý vòng đời tài nguyên nước, giảm phát thải KNK và thích ứng với BĐKH ở quy mô địa phương và vùng.

b) Ý nghĩa thực tiễn

Ra quyết định dựa trên bằng chứng khoa học: Cung cấp thông tin định lượng giúp lựa chọn, ưu tiên giải pháp kỹ thuật – công nghệ và quản lý nhằm tiết kiệm năng lượng, giảm thất thoát nước và tăng khả năng thích ứng với xâm nhập mặn và BĐKH.

Hỗ trợ quy hoạch và vận hành hệ thống cấp nước đô thị: Ứng dụng kết quả tích hợp chỉ số WSI và phương pháp LCA để đánh giá, so sánh và tối ưu hóa các phương án cấp nước, góp phần bảo đảm an ninh nguồn nước và giảm thiểu tác động môi trường.

Khả năng nhân rộng và áp dụng thực tiễn: Phương pháp và mô hình nghiên cứu có thể được điều chỉnh, áp dụng cho các đô thị ven biển và vùng hạ lưu sông ở Việt Nam như Huế, Quy Nhơn, Nha Trang, Hải Phòng, Quảng Ninh – nơi cũng chịu ảnh hưởng xâm nhập mặn và BĐKH.

6. Những đóng góp mới của luận án

Luận án đóng góp một cách tiếp cận phương pháp luận mới trong đánh giá vòng đời hệ thống cấp nước đô thị thông qua việc tích hợp chỉ số WSI vào phương pháp LCA, nhằm phản ánh đồng thời tác động môi trường và mức độ căng thẳng tài nguyên nước theo điều kiện địa lý, xã hội cụ thể của từng địa phương.

- Luận án lần đầu tiên xây dựng và kiểm chứng một mô hình tích hợp giữa chỉ số căng thẳng nguồn nước (WSI) và phương pháp đánh giá vòng đời (LCA) dành riêng cho hệ thống cấp nước đô thị trong điều kiện biến động nguồn nước và xâm nhập mặn.

- Luận án áp dụng mô hình tích hợp WSI–LCA để lượng hóa mức độ khan hiếm nước và tác động môi trường đặc thù cho hệ thống cấp nước Đà Nẵng. Kết quả nghiên cứu cho phép xác định kịch bản cấp nước tối ưu trong giai đoạn 2030-2045 thông qua việc giải quyết bài toán cân bằng giữa khai thác nước mặt từ hệ thống Vu Gia – Thu Bồn với việc đa dạng hóa nguồn nước dự phòng, bảo đảm mục tiêu kép về an ninh nước sạch và giảm thiểu phát thải KNK cho TP.

7. Bố cục luận án

Nội dung chính của luận án bao gồm các phần:

Mở đầu

Chương 1. Tổng quan về vấn đề nghiên cứu.

Chương này sẽ trình bày tổng quan về phân bổ, khai thác, sử dụng tài nguyên nước; Hiện trạng hệ thống cấp nước tại TP. Đà Nẵng; Các phương pháp hỗ trợ trong việc ra quyết định liên quan đến ngành nước; Tổng hợp phân tích các công trình

nghiên cứu liên quan đến chỉ số WSI và phương pháp LCA trên hệ thống cấp nước của thế giới và tại Việt Nam.

Chương 2. Đối tượng và cơ sở lý thuyết của các phương pháp nghiên cứu.

Chương này trình bày chi tiết đối tượng, phương pháp nghiên cứu được sử dụng trong luận án.

Chương 3. Thiết lập và kiểm định mô hình tích hợp chỉ số căng thẳng nguồn nước và phương pháp đánh giá vòng đời.

Chương 3 trình bày cơ sở khoa học, cơ sở thực tiễn và các bước xây dựng mô hình tích hợp chỉ số WSI vào phương pháp LCA áp dụng cho hệ thống cấp nước đô thị. Áp dụng mô hình để đánh giá hiện trạng khai thác và sản xuất nước sạch cho hệ thống cấp nước đô thị tại NMN Cầu Đỏ - TP. Đà Nẵng. Đồng thời kiểm định độ tin cậy của mô hình được xây dựng.

Chương 4. Đánh giá hiệu quả cho các kịch bản khai thác, sản xuất nước sạch tại Đà Nẵng thông qua mô hình tích hợp WSI - LCA.

Chương 4 trình bày kết quả áp dụng mô hình tích hợp cho các kịch bản khai thác và sản xuất nước sạch của hệ thống cấp nước đô thị tại Đà Nẵng, áp dụng cho nhà máy lớn nhất tại TP. Đà Nẵng.

Kết luận và kiến nghị

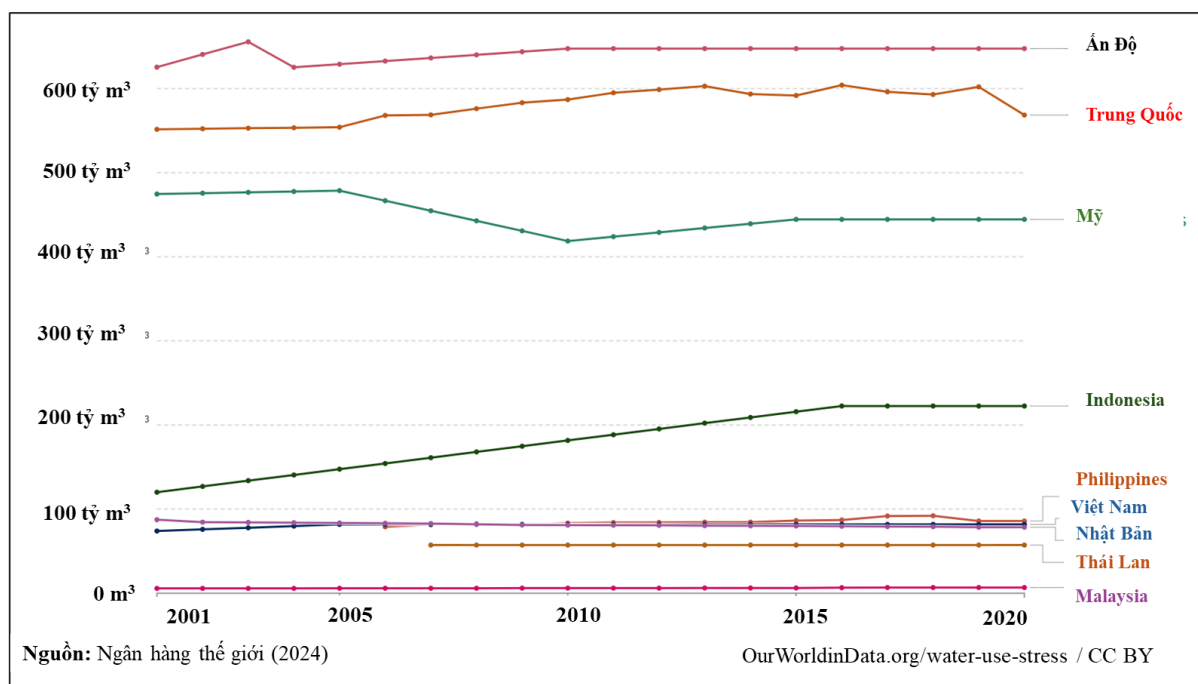
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Tổng quan về tài nguyên nước

Phân bổ tài nguyên nước là quá trình xác định lưu lượng, chất lượng và thời điểm cấp nước cho các mục đích khác nhau (nông nghiệp, công nghiệp, sinh hoạt). Phân bổ tài nguyên nước ảnh hưởng trực tiếp đến giá trị kinh tế, xã hội và sinh thái mà cộng đồng nhận được. Tuy nhiên, tài nguyên nước không được phân bổ đều theo không gian và thời gian. Nguồn nước còn biến động mạnh theo mùa và theo năm, tạo nên sự bất bình đẳng về khả năng tiếp cận tài nguyên nước giữa các quốc gia và vùng lãnh thổ.

Trên phạm vi toàn cầu và tại Việt Nam, sự mất cân bằng giữa cung và cầu tài nguyên nước không còn là rủi ro tiềm tàng mà đã trở thành thách thức mang tính cấu trúc. Theo Báo cáo Phát triển Nước Thế giới 2024 của Liên Hợp Quốc, hiện vẫn có hơn 2,2 tỷ người chưa được tiếp cận nước uống an toàn, trong khi nhu cầu sử dụng nước tiếp tục gia tăng nhanh ở tất cả các lĩnh vực [2]. Các khu vực như Châu Phi cận Sahara, Nam Á và Trung Đông là những điểm nóng dễ tổn thương nhất do khan hiếm nước mang tính cơ cấu.

Dân số toàn cầu ngày càng tăng, cùng với sự chuyển dịch kinh tế theo hướng tiêu thụ nhiều tài nguyên hơn, đã làm gia tăng mạnh việc khai thác nước ngọt phục vụ nông nghiệp, công nghiệp và sinh hoạt. Lượng nước khai thác ở một số quốc gia trong khoảng thời gian từ 2001 đến 2020 được thể hiện ở Hình 1.1.



Hình 1.1. Lượng nước khai thác ở các quốc gia trên thế giới
(Nguồn: <https://data.worldbank.org>)

Dữ liệu thực nghiệm giai đoạn 2001–2020 (Hình 1.1) cho thấy mặc dù một số quốc gia phát triển đã bước đầu kiểm soát được tốc độ gia tăng tiêu thụ thông qua các chính sách giá và công nghệ tiết kiệm, nhưng tổng áp lực lên trữ lượng nước ngọt toàn cầu vẫn ở mức báo động. Thực tế này đặt ra yêu cầu cấp thiết về các công cụ định lượng tác động môi trường tích lũy trong vòng đời hệ thống, thay vì chỉ đánh giá trữ lượng tại nguồn theo cách tiếp cận tĩnh truyền thống.

Tại Việt Nam, tài nguyên nước có đặc trưng là dồi dào về tổng lượng nhưng phân bố không đồng đều và an ninh tài nguyên nước đối mặt với tính dễ bị tổn thương do sự kết hợp giữa đặc thù địa lý tự nhiên và áp lực đô thị hóa. Theo quyết định phê duyệt Quy hoạch Tài nguyên nước Quốc gia 1622/QĐ-TTg [3], tổng lượng nước trung bình khoảng 936 tỷ m³/năm, trong đó 60% là nước từ ngoài lãnh thổ chảy vào. Nguồn nước phân bố không đồng đều: lưu vực Cửu Long chiếm 56%, lưu vực sông Hồng–Thái Bình 18%, lưu vực sông Đồng Nai 4,7%, ... Trong khi đó, nguồn nước ngầm chỉ khoảng 91,5 tỷ m³/năm, tập trung chủ yếu ở đồng bằng sông Cửu Long và đồng bằng Bắc Bộ. Điều này thể hiện mức phụ thuộc cao vào nguồn nước xuyên biên giới và tính mùa vụ rõ rệt (72% lượng nước tập trung trong 3–5 tháng mùa lũ). Thực tế này dẫn đến tình trạng thiếu nước nghiêm trọng vào mùa khô tại nhiều lưu vực, nhất là các lưu vực sông ven biển miền Trung và Nam Trung Bộ.

An ninh tài nguyên nước của Việt Nam trong tương lai phụ thuộc lớn vào khả năng giải quyết cùng lúc nhiều thách thức, bao gồm: (i) tình trạng khan hiếm nước vào mùa khô tại nhiều lưu vực sông; (ii) suy giảm chất lượng nước do ô nhiễm hữu cơ, dinh dưỡng và vi sinh, làm gia tăng chi phí xử lý nước; (iii) cạnh tranh ngày càng gay gắt giữa các ngành sử dụng nước như nông nghiệp, công nghiệp và đô thị; và (iv) tác động của BĐKH, thể hiện qua xu thế giảm dòng chảy kiệt, gia tăng tần suất và cường độ hạn hán, cũng như hiện tượng xâm nhập mặn sâu tại các vùng hạ lưu ven biển.

Lưu vực sông Vu Gia – Thu Bồn là một minh chứng điển hình cho xung đột đa mục tiêu và thách thức an ninh tài nguyên nước ở cấp lưu vực tại Việt Nam. Với diện tích khoảng 10.350 Km², đây là một trong những hệ thống sông lớn ở miền Trung, có vai trò quan trọng trong cung cấp nước cho sinh hoạt đô thị, nông nghiệp, công nghiệp và phát điện. Mặc dù có tổng lượng mưa trung bình năm lớn (khoảng 2.700 mm), dòng chảy trên lưu vực phân bố rất không đều theo thời gian và không gian, dẫn đến tình trạng dư thừa nước vào mùa mưa nhưng thiếu nước nghiêm trọng vào mùa khô. Đặc điểm liên thông phức tạp giữa các nhánh sông ở hạ lưu, cùng với sự can thiệp mạnh của các công trình thủy điện ở thượng nguồn, làm gia tăng tính nhạy cảm của lưu vực trước các hiện tượng hạn hán, xâm nhập mặn và các thay đổi trong quy trình vận hành

liên hồ chứa. Thực trạng này làm gia tăng xung đột lợi ích giữa các mục tiêu sử dụng nước và đặt ra yêu cầu cấp thiết về các công cụ hỗ trợ ra quyết định.

Với mật độ công trình thủy điện dày đặc ở thượng nguồn, cùng với quá trình công nghiệp hóa, đô thị hóa nhanh và tác động ngày càng rõ nét của BĐKH, nguồn nước trên lưu vực Vu Gia – Thu Bồn đang chịu áp lực suy giảm cả về trữ lượng và chất lượng. Vào mùa khô, dòng chảy kiệt suy giảm mạnh, hạn hán kéo dài kết hợp với xâm nhập mặn ở hạ lưu làm gia tăng rủi ro thiếu nước cho các đô thị ven biển, đặc biệt là TP. Đà Nẵng. Trong các năm khô hạn nghiêm trọng, dòng chảy thượng nguồn có thể thiếu hụt từ 20–80% so với trung bình nhiều năm, khiến mực nước hạ lưu xuống thấp kỷ lục và ranh giới xâm nhập mặn lấn sâu vào đất liền. Các hiện tượng này phản ánh rõ tính dễ tổn thương của an ninh tài nguyên nước trước tác động đồng thời của tự nhiên và con người.

Thực trạng nêu trên khẳng định an ninh tài nguyên nước, đặc biệt là các đô thị ven biển nhạy cảm như Đà Nẵng, đang đối mặt với những rủi ro hệ thống ngày càng trầm trọng. Để bảo đảm mục tiêu cấp nước an toàn và bền vững, việc thiết lập các công cụ đánh giá định lượng tích hợp trở thành yêu cầu cấp thiết, nhằm hỗ trợ ra quyết định phân bổ tài nguyên dựa trên bằng chứng khoa học, bảo đảm sự cân bằng giữa phát triển kinh tế, bảo tồn hệ sinh thái và quyền lợi của cộng đồng.

1.2. Khái niệm cơ bản của hệ thống cấp nước đô thị và ranh giới phân tích vòng đời

Để định hình rõ ràng ranh giới hệ thống trong việc áp dụng phương pháp LCA và chỉ số WSI cho trường hợp NMN Cầu Đỏ, các khái niệm cơ bản về hệ thống cấp nước và các cấu phần liên quan được chuẩn hóa dựa trên các tiêu chuẩn hiện hành:

a) Hệ thống cấp nước: Hệ thống cấp nước là một tổ hợp các công trình kỹ thuật có mối liên hệ chặt chẽ với nhau, làm nhiệm vụ khai thác nước từ nguồn, xử lý nước để đạt yêu cầu chất lượng, điều hòa, vận chuyển và phân phối nước đến các đối tượng dùng nước.

b) Các công trình trên hệ thống cấp nước

Một hệ thống cấp nước đô thị hoàn chỉnh bao gồm các công trình chính sau:

- Công trình khai thác: Làm nhiệm vụ thu nước từ nguồn (nước mặt hoặc nước ngầm). Đối với NMN Cầu Đỏ, đây là cửa thu nước thô tại NMN Cầu Đỏ và trạm bơm An Trạch.

- Trạm bơm nước thô (Trạm bơm cấp I): Vận chuyển nước thô từ công trình thu lên trạm xử lý.

- Khu xử lý nước: Tập hợp các công trình (bể trộn, bể phản ứng, bể lắng, bể lọc, bể chứa nước sạch...) nhằm làm sạch nước thô đạt tiêu chuẩn quy định. Đây là tâm

điểm đánh giá của luận án, nơi tập trung phần lớn lượng hóa chất và năng lượng tiêu thụ.

- Trạm bơm nước sạch (Trạm bơm cấp II): Đưa nước sạch từ bể chứa vào hệ thống phân phối và mạng lưới đường ống.

- Công trình điều hòa: Đài nước, bể chứa trung gian nhằm cân bằng giữa NMN và chế độ tiêu thụ không điều hòa của khách hàng.

c) Hệ thống phân phối nước: Hệ thống phân phối nước bao gồm trạm bơm cấp II, các bể chứa điều hòa, các đường ống truyền tải chính, và các thiết bị phụ trợ (van, đồng hồ tổng, trạm bơm tăng áp) có nhiệm vụ vận chuyển nước từ NMN đến các đối tượng sử dụng nước.

d) Mạng lưới cấp nước: Mạng lưới cấp nước là tập hợp các đường ống các cấp (mạng lưới truyền tải, mạng lưới phân phối, và mạng lưới dịch vụ đến tận hộ gia đình) cùng các phụ tùng trên ống được bố trí theo mạng vòng hoặc mạng cụt để trực tiếp đưa nước đến các điểm tiêu thụ. Mạng lưới cấp nước là một phần cốt lõi nằm trong hệ thống phân phối nước.

1.3. Phân tích đặc tính và cấu trúc của hệ thống cấp nước TP. Đà Nẵng

TP. Đà Nẵng là đô thị loại I trực thuộc Trung ương, có tốc độ đô thị hóa và phát triển kinh tế thuộc nhóm cao của khu vực miền Trung. Trong những năm gần đây, cùng với sự gia tăng dân số, phát triển công nghiệp, dịch vụ và du lịch, nhu cầu sử dụng nước sạch của TP tăng nhanh và liên tục. Hệ thống cấp nước đô thị Đà Nẵng hiện bao gồm các nguồn nước thô, công trình thu nước, trạm bơm, các nhà máy xử lý nước sạch, mạng lưới truyền tải và phân phối đến người sử dụng. Trong đó, các NMN chính gồm NMN Cầu Đỏ, NMN Sân Bay, NMN Hòa Liên và một số công trình cấp nước quy mô nhỏ hơn. Tổng công suất cấp nước hiện nay đạt khoảng 350.000 m³/ngày, đáp ứng nhu cầu cấp nước cho khu vực đô thị và một phần vùng phụ cận [4].

1.3.1. Nguồn nước thô

Trong cấu trúc của hệ thống cấp nước Đà Nẵng, nguồn nước thô là thành phần quyết định tính ổn định của toàn bộ chuỗi cấp nước. Hiện nay, hệ thống chủ yếu khai thác nước mặt từ lưu vực sông Vu Gia, sông Cu Đê và hồ Hòa Trung; nguồn nước dưới đất chỉ chiếm khoảng 2% tổng sản lượng khai thác. Tổng lưu lượng khai thác nước mặt trung bình hiện khoảng gần 350.000 m³/ngày, trong khi tổng khai thác nước dưới đất khoảng 6.000 m³/ngày; công suất vận hành bình quân hệ thống (tháng 8/2023) đạt 350.000 m³/ngày, trong đó hệ thống cấp nước đô thị đạt 340.000 m³/ngày [4]. Theo quyết định 211/QĐ-UBND, về việc phê duyệt danh mục, bản đồ phân vùng

hạn chế khai thác nước dưới đất trên địa bàn phần đất liền thuộc phạm vi TP. Đà Nẵng, hạn chế khai thác nước dưới đất nhằm bảo vệ tầng chứa nước, chỉ dùng cục bộ cho hộ gia đình hoặc resort [5]. Tuy nhiên, tính ổn định của cấu hình nguồn nước thô đang đối mặt với những thách thức mang tính hệ thống.

Hiện nay, sông Vu Gia cấp từ 83,6% đến 99,9% lượng nước thô không bị nhiễm mặn cho NMN Cầu Đỏ và NMN Sân Bay tùy tình hình thực tế nguồn nước sông từng năm. NMN Cầu Đỏ với công suất thiết kế là 290.000 m³/ngày, nguồn nước thô được lấy từ sông Cầu Đỏ (thuộc lưu vực Vu Gia) [4]. Sự phụ thuộc cao vào một lưu vực liên tỉnh và một điểm khai thác chính tạo nên rủi ro tập trung nguồn, làm gia tăng mức độ nhạy cảm của hệ thống cấp nước đối với các biến động về lưu lượng và chất lượng nước. Về mặt phương pháp luận LCA, vấn đề này gây ra tính bất định cao trong dữ liệu kiểm kê, vì mỗi biến động của nguồn nước sẽ làm thay đổi hoàn toàn chất lượng và năng lượng cần thiết để xử lý 1 m³ nước đầu ra.

Điểm thu nước Cầu Đỏ là mắt xích nhạy cảm nhất của toàn hệ thống. Sự gia tăng tần suất cũng như mức độ nhiễm mặn (đỉnh điểm 13.568 mg/L ngày 28/7/2015) [4], không chỉ là bài toán chất lượng, mà là bài toán đánh đổi về môi trường. Theo Quy trình vận hành liên hồ chứa 1865/QĐ-TTg, khi độ mặn lớn hơn 1.000 mg/L, hệ thống buộc phải đóng kín cửa thu Cầu Đỏ và vận hành hoàn toàn trạm bơm An Trạch (cách cửa thu Cầu Đỏ 8 Km) [6]. Việc đẩy nước từ khoảng cách xa hơn làm gia tăng đáng kể tiêu thụ điện năng và phát thải KNK tích lũy trên mỗi đơn vị sản phẩm. Đây là lý do cốt lõi khiến việc tích hợp chỉ số WSI vào phương pháp LCA trở nên cần thiết, để phản ánh đúng tác động môi trường thực sự khi hệ thống phải ứng phó với xâm nhập mặn.

1.3.2. Các nhà máy sản xuất nước sạch

Hệ thống cấp nước đô thị Đà Nẵng được quản lý bởi Công ty Cổ phần Cấp nước Đà Nẵng (DAWACO) và một số đơn vị quản lý trạm nhỏ. Tổng công suất thiết kế của hệ thống cấp nước đô thị tại Đà Nẵng là 463.500 m³/ngày. Bảng 1.1 tổng hợp công suất các NMN chính:

Bảng 1.1. Tổng hợp công suất các NMN đô thị TP. Đà Nẵng

STT	NMN	Nguồn nước khai thác	Công suất thiết kế (m ³ /ngày)	Đặc tính vận hành chủ đạo
1	Cầu Đỏ	Sông Vu Gia	290.000	Trung tâm điều tiết, công nghệ truyền thống, nhạy cảm về nhiễm mặn.
2	Sân Bay		30.000	Chức năng trạm tăng áp, phụ thuộc nguồn thô Cầu Đỏ.
3	Hòa Liên	Sông Cu Đê	120.000	Nguồn dự phòng chiến lược, công nghệ hiện đại.
4	Sơn Trà	Suối Đá	7.000	Quy mô nhỏ, phụ thuộc hoàn toàn vào thủy văn mùa khô.
5	Hải Vân	Suối Lương	5.000	
6	Hòa Trung	Hồ Hòa Trung	10.000	Cấp nước cho khu công nghệ cao.
Tổng cộng			463.500	

Nguồn: Công ty DAWACO (Năm 2023)

Hình 1.2 thể hiện các vùng phục vụ của các NMN hiện tại.

Công nghệ xử lý nước cơ bản được áp dụng cho nguồn nước mặt tại các nhà máy. Hệ thống vận hành dựa trên sơ đồ dây chuyền hóa lý truyền thống, bắt đầu bằng công đoạn Clo hóa sơ bộ kết hợp với quá trình keo tụ - tạo bông sử dụng Poly Aluminium Chloride (PAC). Sự tương tác thủy lực và phản ứng tạo bông diễn ra trong hệ thống bể trộn và bể phản ứng và giá trị pH được kiểm soát tối ưu thông qua việc châm Canxi Hydroxit (Ca(OH)_2). Hiệu quả tách loại cặn bẩn được bảo đảm bởi cấu trúc bể lắng và hệ thống bể lọc nhanh trọng lực, trước khi nước được khử trùng sau cùng và chuyển về bể chứa nước sạch phục vụ mạng lưới phân phối.

Dưới góc độ đánh giá vòng đời, các giai đoạn khai thác và sản xuất 1 m³ nước sạch tiêu tốn trung bình 0,25 - 0,35 kWh điện năng và một lượng hóa chất đáng kể (PAC, Vôi, Clo). Đặc biệt, hệ thống xử lý bùn thải là một cấu phần quan trọng trong ranh giới hệ thống, góp phần vào tác động môi trường thông qua quá trình xử lý và vận chuyển bùn khô.

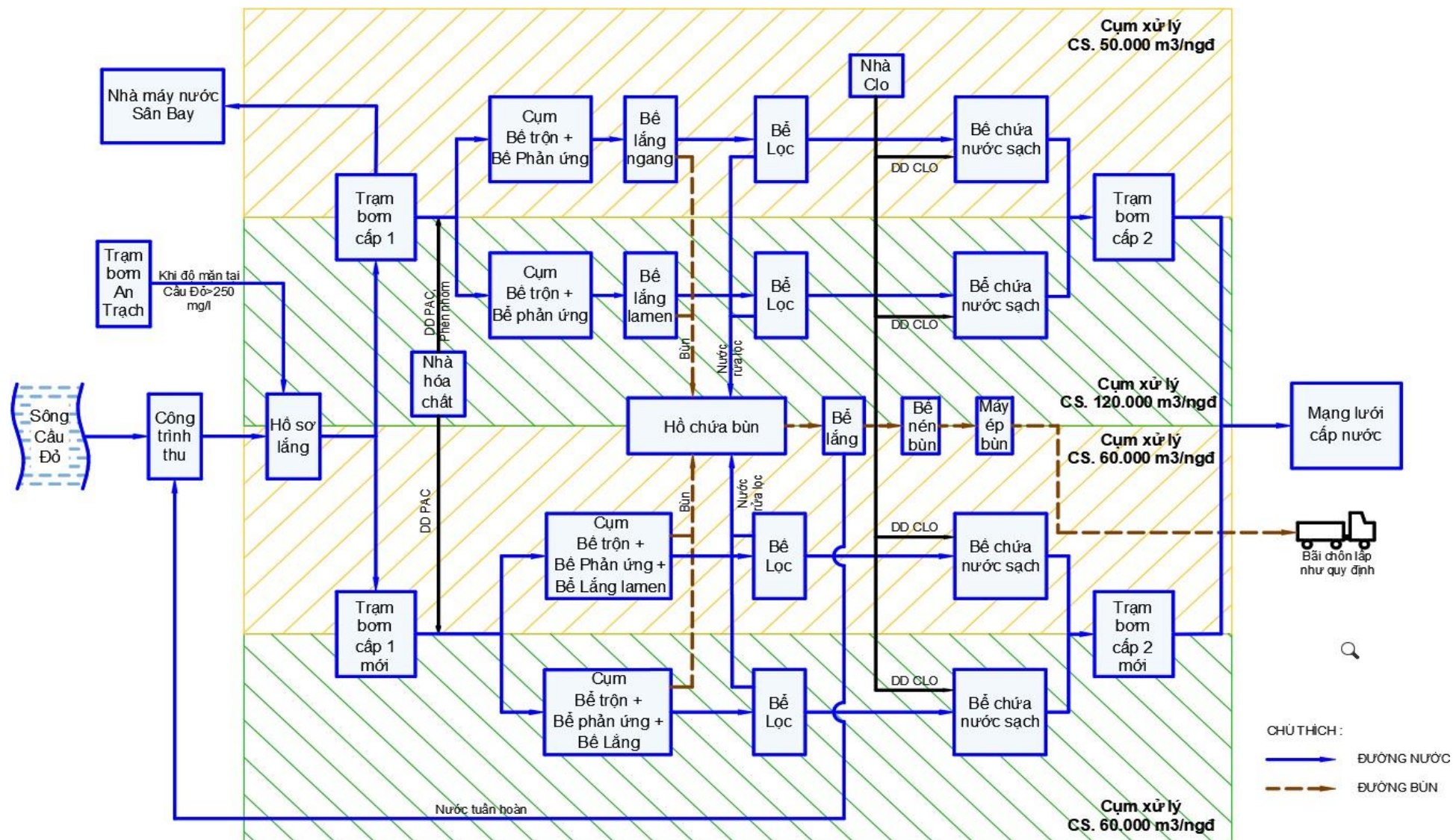
Mặc dù hệ thống gồm nhiều nhà máy, NMN Cầu Đỏ là nhà máy có công suất lớn nhất Đà Nẵng, đóng vai trò là trung tâm điều tiết chiến lược, chiếm hơn 60% tổng công suất thiết kế của TP. Lượng nước khai thác tại cửa thu Cầu Đỏ chiếm gần 70% tổng lượng nước khai thác toàn hệ thống. NMN Cầu Đỏ là nguồn cấp chủ yếu cho khu vực trung tâm, nơi tập trung dân cư, thương mại, dịch vụ và các hoạt động kinh tế trọng điểm. Vì vậy, tính ổn định của toàn bộ hệ thống cấp nước đô thị phụ thuộc rất lớn vào khả năng vận hành an toàn của NMN Cầu Đỏ.

Chính vì vậy, trong phạm vi của luận án, NMN Cầu Đỏ được lựa chọn là đối tượng nghiên cứu đại diện cho hệ thống cấp nước đô thị Đà Nẵng. Việc lựa chọn này bảo đảm tính đại diện vì đây là công trình quyết định đến an ninh cấp nước của TP và là nơi thể hiện rõ nhất mối quan hệ giữa khai thác tài nguyên nước, vận hành công nghệ xử lý và các tác động môi trường trong điều kiện BĐKH và xâm nhập mặn.

Nhà máy gồm 03 dây chuyền xử lý nước được xây dựng trong các giai đoạn khác nhau, dây chuyền đầu tiên có công suất 50.000 m³/ngày xây dựng năm 2002; Dây chuyền thứ 2 công suất 120.000 m³/ngày được xây dựng năm 2008 (trong luận án gọi là dây chuyền 120.000 m³/ngày cũ); Dây chuyền thứ 3 công suất 120.000 m³/ngày hoàn thành vào tháng 7/2021 (trong luận án gọi là dây chuyền 120.000 m³/ngày mới). Sự chuyển đổi về trình độ công nghệ qua các giai đoạn ở 03 dây chuyền xử lý dẫn đến tính không đồng nhất về hiệu suất thiết bị và mức tiêu thụ năng lượng, hóa chất. Đặc điểm này tạo ra những thách thức đáng kể cho việc thiết lập chính xác kiểm kê vòng đời.

Các hạng mục công trình chính NMN Cầu Đỏ gồm: Hồ sơ lắng có nhiệm vụ tiếp

nhận nguồn nước thô trực tiếp từ sông Cầu Đỏ và nguồn nước từ trạm bơm An Trạch; Trạm bơm nước thô; 03 cụm xử lý nước; Trạm bơm cấp II; Hệ thống xử lý bùn. Chi tiết sơ đồ công nghệ NMN Cầu Đỏ được thể hiện ở Hình 1.3:



Hình 1.3. Sơ đồ dây chuyền công nghệ NMN Cầu Đò [4]

Trong giai đoạn 2018–2023 có các dự án quan trọng: Nâng công suất NMN Cầu Đỏ thêm 120.000 m³/ngày (đạt 290.000 m³/ngày), nâng công suất trạm bơm An Trạch lên 420.000 m³/ngày, xây dựng NMN Hòa Trung 20.000 m³/ngày, xây dựng và đưa vào vận hành NMN Hòa Liên giai đoạn 1. Những dự án đã và đang triển khai ở Đà Nẵng hướng tới mục tiêu chuyển đổi từ "đáp ứng nhu cầu" sang "quản trị rủi ro mặn".

Hệ thống cấp nước Đà Nẵng thể hiện tính phức tạp cao về nguồn nước và cấu trúc vận hành, do đó đòi hỏi cách tiếp cận phân tích tích hợp trong đánh giá. Mâu thuẫn giữa việc bảo đảm an ninh nguồn nước (tránh mặn) và việc tiết giảm chi phí năng lượng, phát thải (do bơm đẩy xa) chính là luận cứ khoa học thực tiễn để luận án triển khai các bước định lượng tích hợp tại các chương tiếp theo.

1.3.3. Mạng lưới cấp nước

Mạng lưới cấp nước đô thị dài khoảng 3.310 Km, phân vùng thành 6 khu vực chính, tỷ lệ đầu nối hộ dân đạt gần 100% đô thị. Tiêu chuẩn dùng nước bình quân 150 l/người/ngày. Tỷ lệ thất thoát duy trì 14–16%, thấp hơn nhiều địa phương nhưng vẫn cao hơn mục tiêu quốc gia (<12%) [4].

1.3.4. Đánh giá tổng hợp

a) Ưu điểm

Dựa trên các dữ liệu hạ tầng hiện có, nghiên cứu thực hiện đánh giá tổng hợp về hiệu quả vận hành mạng lưới cấp nước TP. Đà Nẵng dưới góc độ quản trị hệ thống và an ninh tài nguyên:

Tính chủ động và khả năng dự phòng chiến lược của nguồn thô: Hệ thống hạ tầng khai thác nước thô liên tục được đầu tư mở rộng và nâng cấp đồng bộ, khẳng định tầm nhìn chiến lược trong việc bảo đảm an ninh nước đô thị. Việc thiết lập các nguồn dự phòng quan trọng tại đập dâng An Trạch, NMN Hòa Liên và hồ Hòa Trung không chỉ gia tăng tổng công suất mà còn tạo ra cơ chế ứng phó linh hoạt trước các biến động thủy văn cực đoan. Khả năng chuyển đổi nguồn thô kịp thời khi cửa thu Cầu Đỏ bị nhiễm mặn là minh chứng cho tính bền vững của cấu trúc hạ tầng hiện hữu.

Tối ưu hóa cấu trúc mạng lưới và năng lực quản lý áp lực: Cấu trúc mạng lưới truyền dẫn và phân phối được phân vùng quản lý một cách khoa học, tạo điều kiện thuận lợi cho việc tối ưu hóa kiểm soát áp lực và quản trị rò rỉ (DMA). Việc phân vùng hợp lý không chỉ giúp duy trì sự ổn định của dòng chảy mà còn nâng cao đáng kể khả năng phản ứng nhanh, khoanh vùng xử lý hiệu quả các sự cố kỹ thuật trên mạng lưới mà không làm gián đoạn dịch vụ trên diện rộng. Đây là yếu tố then chốt để duy trì "độ tin cậy" của toàn hệ thống trong phương pháp LCA.

Hiệu quả phủ mạng và tính ổn định của dịch vụ đô thị: Hệ thống cấp nước Đà Nẵng ghi nhận tỷ lệ đầu nối và bao phủ mạng lưới ở mức cao, bảo đảm quyền tiếp cận nước sạch công bằng cho cư dân đô thị. Chất lượng dịch vụ cấp nước được duy trì ổn định cả về lưu lượng lẫn chất lượng, đáp ứng các tiêu chuẩn khắt khe của một đô thị hiện đại. Sự ổn định này đóng vai trò là biến số cố định quan trọng, cho phép luận án tập trung sâu hơn vào việc đánh giá các tác động môi trường từ quá trình khai thác và xử lý tại nguồn.

b) Hạn chế và rủi ro

Bên cạnh những ưu thế về hạ tầng, hệ thống cấp nước TP. Đà Nẵng vẫn đang đối mặt với các thách thức mang tính hệ thống, đòi hỏi các giải pháp định lượng chuyên sâu:

Tính dễ bị tổn thương trước biến động thủy văn và xâm nhập mặn: Sự phụ thuộc trọng yếu vào nguồn nước mặt khiến hệ thống trở nên nhạy cảm trước tác động kép của BĐKH và các hoạt động khai thác tài nguyên tại thượng lưu. Đặc biệt, cửa thu Cầu Đỏ hiện là "điểm nút" rủi ro nhất khi phải đối mặt với tần suất và cường độ nhiễm mặn ngày càng gia tăng. Việc buộc phải vận hành trạm bơm An Trạch (cách cửa thu Cầu Đỏ 8 Km) ở công suất cao trong thời kỳ mặn không chỉ làm gia tăng chi phí vận hành mà còn gây ra hiện tượng "chuyển dịch gánh nặng môi trường" do gia tăng cường độ năng lượng và phát thải tích lũy.

Mâu thuẫn giữa gia tăng nhu cầu và sự khan hiếm tài nguyên theo mùa: Sự phục hồi mạnh mẽ của ngành du lịch và tốc độ đô thị hóa nhanh (đặc biệt tại các khu vực ven biển như Sơn Trà, Ngũ Hành Sơn) đã đẩy nhu cầu tiêu thụ nước lên mức đỉnh điểm. Đáng chú ý, giai đoạn nhu cầu cao này thường trùng khớp với thời kỳ cạn kiệt và nhiễm mặn nguồn thô (tháng 5 đến tháng 8), làm trầm trọng thêm chỉ số WSI của lưu vực.

Tóm lại, tình hình hiện nay cho thấy hệ thống cấp nước Đà Nẵng đang ở trong tình trạng mâu thuẫn giữa nhu cầu tăng nhanh và nguồn cung biến động mạnh. Mạng lưới tuy có hạ tầng dự phòng mạnh mẽ nhưng quy trình vận hành đang phải đánh đổi đáng kể về mặt năng lượng và môi trường. Thực tế này khẳng định việc áp dụng các công cụ định lượng hiện đại như mô hình tích hợp WSI - LCA là yêu cầu cấp thiết để xác lập cơ sở khoa học cho các quyết định đầu tư và tối ưu hóa quy hoạch hệ thống nước đô thị bền vững.

Để đánh giá khách quan mức độ căng thẳng nguồn nước và hỗ trợ quyết định phân bổ hợp lý, cần sử dụng các công cụ định lượng đã được quốc tế công nhận, như

các chỉ số khan hiếm nước (Falkenmark, WTA, WSI) và phương pháp LCA, nhằm phân tích đồng thời các tác động môi trường liên quan đến hệ thống cấp nước.

1.4. Các công cụ đánh giá tình trạng khan hiếm nước và tác động đến môi trường của hệ thống nước

Trước những thách thức về an ninh nguồn nước, việc chỉ dựa vào các thống kê truyền thống như sản lượng khai thác hay tỷ lệ thất thoát là chưa đủ để đưa ra giải pháp bền vững. Các công cụ định lượng đã được quốc tế công nhận, chẳng hạn như chỉ số khan hiếm nước (Falkenmark, WTA, WSI) và phương pháp LCA, cung cấp một cách tiếp cận toàn diện và có hệ thống để lượng hóa tác động.

1.4.1. Chỉ số căng thẳng nguồn nước

Khái niệm “phát triển bền vững” được hiểu là sự cân bằng giữa ba khía cạnh: bảo vệ môi trường – tăng trưởng kinh tế – phát triển xã hội (UNEP, 1992). Trong lĩnh vực tài nguyên nước, việc lượng hóa mức độ khan hiếm nước đóng vai trò trung tâm để định hướng phân bổ hợp lý và lập kế hoạch cấp nước bền vững. Nhiều chỉ số đã được phát triển nhằm đánh giá căng thẳng nguồn nước từ các góc độ khác nhau.

a) Chỉ số Falkenmark (chỉ số WSI theo đầu người)

Năm 1986, Falkenmark đề xuất cách tiếp cận đơn giản dựa trên lượng nước sẵn có bình quân đầu người ($\text{m}^3/\text{người}/\text{năm}$) [7]. Phân loại tình trạng nguồn nước thể hiện ở Bảng 1.2:

Bảng 1.2. Tình trạng nguồn nước thô do Falkenmark đề xuất (1986)

Chỉ số ($\text{m}^3/\text{người}/\text{năm}$)	Tình trạng
> 1700	Không căng thẳng
1000 -1700	Căng thẳng
500- 1000	Khan hiếm
< 500	Rất khan hiếm

Với cách tiếp cận dựa vào dân số và lượng nước sẵn có thường đơn giản, dễ áp dụng cho quy mô quốc gia. Tuy nhiên, chưa phản ánh biến động theo mùa, chưa xét nhu cầu nước cho môi trường hay mức độ phát triển kinh tế – xã hội.

b) Chỉ số khai thác nước so với khả năng cung cấp (WTA)

WTA được tính bằng tỷ lệ tổng lượng nước khai thác hàng năm (sinh hoạt, nông nghiệp, công nghiệp) so với tổng lượng nước về.

WTA > 40% thì khu vực được xem là khan hiếm nghiêm trọng [8], [9].

Wada cho rằng tỷ lệ ngưỡng của WTA là 0,4 tương ứng với ngưỡng WSI là 1700 m³/người/năm, nguồn nước khan hiếm nghiêm trọng khi tỷ lệ trên 0,8 và tương đương với WSI ngưỡng 500 m³/người/năm [10]. Chỉ số này nhấn mạnh áp lực khai thác, nhưng bỏ qua biến động thủy văn và các nhu cầu ưu tiên (ví dụ dòng chảy môi trường). Ở Việt Nam, các nghiên cứu của Hoàng Thị Nguyệt Minh [11] áp dụng WTA để đánh giá căng thẳng trên các lưu vực như sông Mã. Kết quả thể hiện tình trạng khan hiếm tăng dần trong giai đoạn 2010–2020, 6/10 tiểu lưu vực đã rơi vào tình trạng chịu sức ép cao về tài nguyên nước trong năm 2020.

c) Chỉ số WSI có tính tới năng lực xã hội

Năm 2000, Ohlsson mở rộng chỉ số căng thẳng bằng cách đưa chỉ số phát triển con người (HDI) vào tính toán, nhằm phản ánh năng lực thích ứng của quốc gia [12]. Các nước có HDI cao (Hàn Quốc, Anh, Bỉ) có thể vẫn an toàn dù chỉ số WSI truyền thống có giá trị cao. Ngược lại, các nước nghèo dễ rơi vào tình trạng khan hiếm nghiêm trọng hơn.

d) Chỉ số WSI dựa vào nhu cầu dùng nước

Một số nghiên cứu gần đây của Asheesh [13] và McNulty [14] đề xuất chỉ số khan hiếm dựa trên cân bằng cung–cầu theo thời gian, có xét đến nhu cầu nước sinh hoạt, nông nghiệp, công nghiệp và lượng cần duy trì cho môi trường. Các phương pháp này cung cấp góc nhìn chi tiết nhưng đòi hỏi lượng dữ liệu lớn, khó áp dụng rộng rãi trong điều kiện thiếu số liệu.

e) Chỉ số WSI có tính đến yêu cầu của môi trường

Năm 2005, Smakhtin và cộng sự đã đưa ra phương pháp tính chỉ số WSI hiện đại, coi yêu cầu nước duy trì hệ sinh thái (EWR) là một phần bắt buộc trong cân bằng nước [15]:

$$WSI = \frac{WU}{WR - EWR}$$

Trong đó:

WU: Tổng lượng nước khai thác, sử dụng,

WR: Tổng lượng nước về,

EWR: Dòng chảy môi trường.

Cách đánh giá tình trạng khan hiếm theo Smakhtin đề xuất được thể hiện ở Bảng 1.3:

Bảng 1.3. Chỉ số WSI do Smakhtin đề xuất

Chỉ số WSI	Tình trạng
$WSI > 1$	Khan hiếm về nguồn nước thô, khai thác quá mức.
$0,6 \leq WSI < 1$	Bị khai thác ở mức cao, lưu vực căng thẳng.
$0,3 \leq WSI < 0,6$	Bị khai thác ở mức bình thường.
$WSI < 0,3$	Khai thác ở mức nhẹ.

Với cách tiếp cận này, nhiều lưu vực có mức độ căng thẳng cao hơn khi tính thêm EWR, phản ánh sát thực tế rủi ro suy giảm dòng chảy và suy thoái hệ sinh thái. Chỉ số WSI của Smakhtin thường được sử dụng trong các mô hình toàn cầu (ví dụ WaterGAP2) và là nền tảng để xây dựng hệ số đặc trưng (characterization factor) trong phương pháp LCA.

Nhìn chung, các chỉ số truyền thống như Falkenmark hay WTA phù hợp để mô tả xu thế khan hiếm nước ở quy mô lớn, nhưng thiếu khả năng phản ánh biến động mùa và yêu cầu môi trường. Việc sử dụng chỉ số WSI có xét EWR là bước tiến quan trọng, đặc biệt hữu ích khi tích hợp vào phương pháp LCA để đánh giá tác động môi trường của hệ thống cấp nước đô thị trong điều kiện BĐKH – như trường hợp của Đà Nẵng với thách thức xâm nhập mặn và suy giảm lưu lượng mùa khô.

1.4.2. Một số công cụ hỗ trợ trong việc ra quyết định liên quan đến ngành nước

Các tiêu chuẩn, quy chuẩn, chính sách liên quan đến sử dụng nước cũng là những hệ thống hỗ trợ trong việc ra quyết định ngành nước ở Việt Nam, một trong số đó là: Luật tài nguyên nước năm 2023; Quy hoạch tài nguyên nước thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050... Bên cạnh đó, để tính toán tác động của việc khan hiếm nguồn cung cấp nước ngọt đối với môi trường, các phương pháp đang được phát triển mạnh mẽ. Có rất nhiều công cụ để hỗ trợ trong việc đưa ra các quyết định đánh giá, lựa chọn. Một số công cụ tập trung vào việc cung cấp thông tin từ góc độ môi trường hoặc tính bền vững, cũng như đánh giá tác động môi trường đối với một sản phẩm. Một số các công cụ ví dụ như: Nhãn môi trường, Đánh giá tác động môi trường (EIA), Đánh giá rủi ro (RA), Hệ thống hạch toán kinh tế và môi trường (SEEA), Kiểm toán môi trường, phương pháp LCA, Kiểm toán dòng nguyên vật liệu (MFA)... ([16], [17], [18]). Tất cả các phương pháp đều tập trung vào các tác động môi trường, các phương pháp này cũng có những mối quan hệ qua lại và mỗi công cụ khác nhau có thể phù hợp với từng trường hợp, tình huống, sản phẩm khác nhau.

Trong bối cảnh phát triển nhanh của ngành nước đô thị, việc phát triển và áp dụng công cụ hợp lý sẽ cho phép đánh giá tính bền vững tương đối của các phương án

trong dịch vụ cấp nước và nước thải, từ đó, định vị tốt hơn cho những người ra quyết định trong ngành để có lựa chọn cuối cùng về cách tiếp cận bền vững nhất liên quan đến môi trường và kinh tế. Đối với ngành nước, các công cụ đánh giá tính bền vững thường được áp dụng như phân tích đa tiêu chí (MCA), đánh giá tác động môi trường (EIA), phương pháp LCA hay chi phí vòng đời (LCC).

Phân tích đa tiêu chí (MCA)

Phân tích đa tiêu chí (MCA) là một khung để xếp hạng hoặc cho điểm hiệu suất tổng thể của các phương án dựa trên nhiều tiêu chí. MCA đang được sử dụng nhiều để đánh giá chính sách nước, lập kế hoạch chiến lược và lựa chọn cơ sở hạ tầng [19]. MCA đại diện cho một nhóm các kỹ thuật có khả năng cải thiện tính minh bạch, khả năng kiểm toán và tính chặt chẽ trong phân tích của các quyết định. Phương pháp đa tiêu chí cũng đã được đề cập nhiều trong các nghiên cứu quản lý tài nguyên nước, quản lý thất thoát nước hay phân bổ nguồn nước [20], [21].

Đánh giá tác động môi trường (EIA)

EIA được ra đời từ sớm nhưng từ năm 1969, năm thông qua đạo luật chính sách môi trường của Mỹ được lấy là thời điểm ra đời của EIA. EIA là một công cụ được sử dụng để đánh giá các tác động đáng kể của một dự án hoặc đề xuất phát triển đối với môi trường, có tính đến các tác động liên quan đến kinh tế xã hội, văn hóa và sức khỏe con người, cả có lợi và bất lợi. Nó nhằm mục đích dự đoán sớm tác động môi trường ở các giai đoạn từ quy hoạch và thiết kế dự án, thực hiện dự án. Trên cơ sở đó, tìm kiếm các giải pháp để giảm tác động bất lợi, định hình dự án cho phù hợp với môi trường địa phương.

Sau Mỹ, EIA đã được áp dụng ở nhiều nước. Ở Việt Nam, vào thời điểm hình thành EIA, chúng ta chưa có điều kiện tiếp cận lĩnh vực này. Phải đến đầu những năm 80, các nhà khoa học Việt Nam mới tiếp cận công tác EIA thông qua các hội thảo khoa học và các khóa đào tạo. Trong Luật Bảo vệ môi trường đã quy định rõ các dự án đang hoạt động và dự án muốn hoạt động trên lãnh thổ Việt Nam phải lập báo cáo EIA và trình các cấp có thẩm quyền xét duyệt. Sau khi luật ra đời, nhiều báo cáo EIA đã được thẩm định góp phần giúp những người ra quyết định có thêm tài liệu để xem xét toàn diện các dự án phát triển ở Việt Nam. Cùng với việc ban hành luật, Nhà nước cũng đã ban hành rất nhiều văn bản pháp luật dưới dạng các nghị định của Chính phủ, các quyết định, thông tư của Bộ Tài nguyên và Môi trường, trong đó quy định cụ thể việc thực hiện và hướng dẫn các đơn vị, tổ chức, cá nhân thực hiện đánh giá tác động môi trường trong thực tế. Nhờ đó, EIA cho đến nay đã trở thành một công việc phổ biến, nằm trong khung pháp luật của Nhà nước mà tất cả các dự án đều thực hiện, trong đó có cả các dự án liên quan đến ngành nước. Còn đối với đánh giá môi trường chiến lược

(SEA) thì đây là một công cụ nhằm sử dụng ở giai đoạn sớm hơn trong quá trình ra quyết định, ở cấp độ chiến lược hơn.

Vì EIA và SEA là các công cụ mang tính thủ tục nên các công cụ phân tích khác nhau có thể được sử dụng như một phần của quy trình. Ví dụ, kiểm toán dòng nguyên vật liệu và phương pháp LCA có thể được sử dụng như một phần của SEA.

Đánh giá tác động môi trường (EIA) và đánh giá rủi ro (RA) là một trong những công cụ môi trường ban đầu được sử dụng trong ngành nước với việc triển khai rộng rãi trong các cơ sở và công nghệ xử lý nước thải. Mặc dù có nhiều ưu điểm mà EIA và RA đã bổ sung vào khái niệm về tính bền vững và an toàn cho con người, nhưng một số thiếu sót cũng rõ ràng là cần một công cụ bổ sung để giúp khắc phục những khoảng cách như vậy [22].

Đánh giá vòng đời (LCA)

Trong khi Đánh giá tác động môi trường (EIA) tập trung vào các tác động tại chỗ của dự án cụ thể và Đánh giá môi trường chiến lược (SEA) hướng tới các chính sách vĩ mô, thì Đánh giá vòng đời (LCA) lại cung cấp cái nhìn "xuyên ranh giới". Phương pháp LCA là cách tiếp cận từ đầu đến cuối đối với các sản phẩm, bắt đầu với việc khai thác nguyên liệu thô từ thiên nhiên cho đến khi thải bỏ. Là một công cụ phân tích đánh giá các tác động tiềm ẩn từ các sản phẩm hoặc dịch vụ sử dụng quan điểm vòng đời, bao gồm các tác động từ việc thu mua, sản xuất, sử dụng và quản lý chất thải cũng như vận chuyển nguyên liệu thô. Phương pháp LCA hay chi phí vòng đời (LCC) cho phép đánh giá toàn diện các giải pháp thay thế cơ sở hạ tầng, cho phép những người ra quyết định xem xét cả hậu quả kinh tế và môi trường. Phương pháp LCA là một phương pháp tiếp cận toàn diện được sử dụng để cải thiện việc ra quyết định, nâng cao quản lý và được coi là khuôn khổ tốt nhất để đánh giá các tác động của sản phẩm.

Rõ ràng, các công cụ có sự khác nhau về mục đích, phương pháp luận, sản phẩm cuối cùng, điểm mạnh, điểm yếu và mức độ phù hợp đối với nghiên cứu. Có sự giao thoa giữa các công cụ khác nhau, hai yếu tố quan trọng khi lựa chọn các công cụ đánh giá: các tác động bao gồm và các đối tượng được nghiên cứu. Một số công cụ tập trung vào tài nguyên thiên nhiên như nguồn đầu vào, năng lượng, vật liệu và có thể được sử dụng như là phương pháp đánh giá cho nhiều đối tượng. Một số công cụ vừa chú trọng đến việc sử dụng tài nguyên thiên nhiên, vừa đánh giá tác động đến môi trường. Với mỗi đối tượng sẽ có một công cụ phù hợp nhất, chỉ khi gặp khó khăn trong đánh giá thì mới có thể áp dụng các công cụ khác nhau trên cùng một đối tượng hoặc thay thế lẫn nhau. Việc hiểu bối cảnh xã hội, bối cảnh văn hóa cũng là cần thiết khi lựa chọn các công cụ đánh giá. Một phương pháp đánh giá đáng tin cậy và chính

xác là cần thiết để thiết lập một hệ thống nước bền vững, cơ sở trong quá trình đưa ra các quyết định đúng đắn.

Tóm lại, SEA dành cho các chính sách, kế hoạch và chương trình lớn, trong khi EIA được sử dụng cho các dự án đã được lên kế hoạch. Phương pháp LCA được sử dụng trên các sản phẩm và dịch vụ. Phương pháp LCA có thể được coi là một phương pháp đánh giá có thể được áp dụng cho các loại đối tượng khác nhau. Sự kết hợp của các phương pháp có thể được sử dụng để cung cấp một bức tranh toàn diện hơn. EIA đã cung cấp thông tin về các khía cạnh cụ thể của địa phương, địa điểm mà phương pháp LCA không bao gồm. Hai công cụ sử dụng các ranh giới hệ thống khác nhau và các đối tượng nghiên cứu khác nhau. Và với việc đánh giá toàn bộ vòng đời sản phẩm thì phương pháp LCA vẫn được xem là công cụ mạnh nhất.

1.4.3. Các kết quả nghiên cứu về LCA trên hệ thống nước đô thị.

Phương pháp LCA là một trong những phương pháp toàn diện nhất để đánh giá hoạt động môi trường của hàng hóa và dịch vụ. Phương pháp LCA của hệ thống nước tập trung vào các giai đoạn khác nhau của chuỗi đường đi của nước bao gồm khai thác, sản xuất, phân phối, tiêu thụ và trong một số trường hợp là thu gom, xử lý và thu hồi nước thải. Các nghiên cứu LCA này có tầm quan trọng ngày càng tăng trong việc định lượng các tác động môi trường của các hệ thống khác nhau. Trong nghiên cứu này sẽ tập trung vào giai đoạn khai thác nước thô và sản xuất nước sạch cung cấp cho nhu cầu sinh hoạt và công nghiệp.

Lịch sử ứng dụng LCA trong ngành nước có thể được phân tách thành hai giai đoạn trọng tâm. Các công trình tiên phong vào cuối thế kỷ XX chủ yếu tập trung định lượng các rủi ro môi trường của hệ thống xử lý nước thải (WWT) [23], [24] và sản xuất nước uống (DWP) [25]. Tuy nhiên, kể từ sau năm 2005, ranh giới nghiên cứu đã được mở rộng đáng kể nhằm giải quyết bài toán tối ưu hóa đa kịch bản. Một số kết quả của các nghiên cứu trong và ngoài nước sử dụng phương pháp LCA trên hệ thống nước:

Giai đoạn 1: Xác định mục tiêu và phạm vi

Trên thực tế, phương pháp LCA có thể được sử dụng để đánh giá các kịch bản khác nhau nhằm giảm thiểu tác động đến môi trường và tính bền vững của hệ thống nước đô thị.

Một số kịch bản chính đã được đề xuất trong các nghiên cứu như sau: (i) Thay đổi hoặc cải tiến công nghệ (ví dụ: xây dựng nhà máy xử lý với công nghệ mới, thay đổi hóa chất), (ii) Thay đổi nguồn nước thô hoặc thay đổi nguồn tiếp nhận, (ví dụ, lấy nước từ sông khác, xả nước thải ra biển), (iii) Sự thay đổi từ người sử dụng (ví dụ: sự gia tăng dân số, thay đổi hành vi của người dùng, sử dụng năng lượng tái tạo)... Các kịch bản ở trong các nghiên cứu có thể phân thành một trong 3 nhóm trên. Cụ thể ở Bảng 1.4:

Bảng 1.4. Phân loại các kịch bản đề xuất

STT	Nghiên cứu	Phân loại kịch bản	Các kịch bản được đề xuất trong các nghiên cứu
1	(Homäki và cộng sự, 2003) [26].	(iii)	3 phạm vi được phân tích (thay đổi từ người sử dụng): - Đun sôi nước nóng. - Sử dụng nước đóng chai. - Mạng lưới cấp nước uống công cộng.
2	(Barrios và cộng sự, 2008) [25].	(i)	- Thay đổi hóa chất keo tụ: Phèn nhôm $[Al_2(SO_4)]_3$; Phèn sắt $[FeSO_4]$; Clorua sắt $[FeCl_3]$ được sản xuất bằng năng lượng xanh. - Thay thế NaOH trong việc làm mềm nước (được sản xuất bằng năng lượng xanh). - Tăng thời gian làm việc của than hoạt tính.
3	(Vince và cộng sự, 2008) [27].	(i),(ii)	(ii) Khai thác các nguồn nước thô thay thế (Nước ngầm). (ii) Sử dụng nguồn nước mặt ở xa địa phương (80 Km). (i) Nhà máy khử mặn với công nghệ thẩm thấu ngược. (i) Nhà máy chưng cất đa hiệu ứng nước biển địa phương.
4	(Amir Hamzah Sharaai, 2009) [28].	(i),(iii)	Thực hiện phương pháp LCA trên 3 trường hợp của hệ thống nước hiện tại: - Thay thế Poly Aluminium Chloride (PAC) bằng phèn nhôm $[Al_2(SO_4)]_3$. - Sử dụng tấm pin mặt trời (25%), máy phát thủy điện (25%) và khí đốt tự nhiên (50%).

5	(Godskesen và cộng sự, 2011) [29].	(i), (ii), (iii)	- (i) 07 công nghệ xử lý nước đã được xem xét, bao gồm cả khai thác nước và vận chuyển trên mạng lưới cấp nước. - (ii) Phương pháp LCA xử lý nước thải cho 2 kịch bản: xử lý tập trung và xử lý phân tán. - (iii) 04 kịch bản tái chế nước xả toilet được xem xét.
6,7	(Godskesen, 2012); (Godskesen và cộng sự, 2013) [30];[31].	(ii)	Thu nước mưa; Khai thác nước ngầm; Mở các miệng giếng mới; Khử mặn nước biển.
8	(Del Borghi và cộng sự, 2013) [32].	-	Phương pháp LCA trên hệ thống cấp nước đô thị tại Sicily (Ý). Nghiên cứu xem xét qua 3 quá trình: Thu gom, xử lý và mạng lưới cấp nước.
9	(Mohamed-Zine và cộng sự, 2013) [33].	(i)	Đánh giá LCA trên trạm DWP Boudouaoua.
10	(Barjoveanu và cộng sự, 2014) [34].	(i), (ii)	- Thay đổi tỷ lệ khai thác từ các nguồn nước thô: 80% hệ thống Timisesti, hệ thống Prut 20%; 20% hệ thống Timisesti, 80% hệ thống Prut. - Giảm thất thoát trên mạng lưới cấp nước xuống còn 28,7%. - Cải thiện hệ thống sao cho 100% nước thải được thu gom. - Cải thiện hiệu suất xử lý sao cho 100% nước thải được xử lý.
11	(Li và cộng sự, 2016) [35].	(ii)	Thay đổi tỷ lệ các nguồn nước thô khác nhau cho 4 TP.

12	(Hsien và cộng sự, 2019) [36].	(i),(ii)	- NEWater đóng góp 9,2% vào nước hồ chứa. Tỷ lệ phần trăm hỗn hợp nước khử muối với nước máy dựa trên 50% công suất xử lý tối đa của các nhà máy khử muối. - NEWater đóng góp 0% vào nước hồ chứa. Tỷ lệ phần trăm hỗn hợp nước khử muối với nước máy dựa trên 50% công suất xử lý tối đa của các nhà máy khử muối. - NEWater đóng góp 0% vào nước hồ chứa. Tỷ lệ phần trăm hỗn hợp nước khử muối với nước máy dựa trên 100% công suất xử lý tối đa của các nhà máy khử muối.
13	(Alves và cộng sự, 2021) [37].	(i)	Giảm tỷ lệ thất thoát nước tại NMN và trên mạng lưới cấp nước với các kịch bản giảm khác nhau.
14	(Karnaningroem và Anggraeni, 2021) [38].	(i)	- Xây dựng hệ thống xử lý bùn. - Thay thế hóa chất xử lý.
15	(Leong và cộng sự, 2023) [39].	(i)	Xem xét nguồn năng lượng được sử dụng trong sản xuất nước.
16	(Jade Lui, Susan Lee, William T. Sloan, 2025) [40].	(i)	Thay đổi nguồn năng lượng, xem xét hệ thống xử lý bùn.
17	(Martina Klimtová, 2025) [41].	(i)	Xem xét thay thế hóa chất và loại năng lượng sử dụng.
18	(Trần Văn Hùng và cộng sự, 2025) [42].	(i)	So sánh công nghệ xử lý nước thải.

Tiêu chí lựa chọn các nghiên cứu để xem xét đó là phải bao gồm ít nhất một công nghệ xử lý nước (NMN hoặc/ và trạm xử lý nước thải).

Phần lớn các nghiên cứu điển hình được thực hiện ở châu Âu, khu vực châu Á, đặc biệt là Đông Nam Á vẫn còn rất ít các nghiên cứu liên quan. Các nghiên cứu LCA trên hệ thống nước thường thực hiện trên 2 trong 4 giai đoạn của hệ thống nước. Đối với một ranh giới nghiên cứu thường tập trung vào giai đoạn vận hành, số nhỏ trong đó đề cập đến quá trình xây dựng và ít nghiên cứu coi người sử dụng là một phần của hệ thống.

Phạm vi của nghiên cứu: Về đối tượng, dân số, kịch bản, đơn vị chức năng, ranh giới hệ thống, các bước vòng đời, phương pháp LCIA được thể hiện ở Bảng 1.5:

Bảng 1.5. Các điểm chính về phạm vi, đơn vị chức năng, công cụ của các nghiên cứu LCA trên hệ thống nước

STT	Tài liệu tham khảo	Đối tượng (Số lượng kịch bản)	Đơn vị chức năng	Ranh giới hệ thống	Phạm vi đánh giá	Phương pháp LCIA
1	(Homäki và cộng sự, 2003) [26].	Hà Nội (2)	1m ³ nước sử dụng	Người sử dụng	Xây dựng, vận hành	Eco-Indicator 95
2	(Barrios và cộng sự, 2008) [25].	Hà Lan (3)	1m ³ nước sử dụng	DWP, DWD	Vận hành	Eco-Indicator 99
3	(Vince và cộng sự, 2008) [27].	Pháp (3)	1m ³ nước sử dụng	DWP, DWD	Xây dựng, vận hành	CML-IA
4	(Amir Hamzah Sharaai, 2009) [28].	Malaysia	1m ³ nước sử dụng	DWP	Xây dựng, vận hành	Eco-Indicator 99
5	(Godskesen và cộng sự, 2011) [29].	Copenhagen, Đan Mạch	1m ³ nước sử dụng	DWP, DWD, WWC, WWT, người sử dụng	Xây dựng, vận hành	EDIP 1997
6	(Godskesen, 2012) [30].					
7	(Godskesen và cộng sự, 2013) [31].					

8	(Del Borghi và cộng sự, 2013) [32].	Sicily - Ý	1m ³ nước sử dụng	DWP, DWD	Xây dựng, vận hành	EPD 2008
9	(Mohamed-Zine và cộng sự, 2013) [33].	Algiers, Boudouaoua	1 lít sử dụng	DWP, DWD	Vận hành	Eco-indicator 99
10	(Barjoveanu và cộng sự, 2014) [34].	Romania (4)	1m ³ nước sau xử lý	DWP, WWC, WWT	Xây dựng, vận hành	CML-IA and ecoscarcity 2006
11	(Li và cộng sự, 2016) [35].	Trung Quốc (3)	1m ³ nước sử dụng/năm.	DWP	Xây dựng, vận hành	CML
12	(Hsien và cộng sự, 2019) [36].	Singapore (3)	1m ³ nước sử dụng	DWP, DWD, WWC, WWT	Vận hành	ReCiPe
13	(Alves và cộng sự, 2021) [37].	Brazil (4)	1m ³ nước sử dụng	DWP, DWD	Vận hành	-
14	(Karnaningroem và Anggraeni, 2021) [38].	Indonesia (1)	1m ³ nước sử dụng	DWP		CML-IA
15	(Leong và cộng sự, 2023) [39].	Malaysia (1)	1m ³ nước sử dụng	DWP	Vận hành	Traci
16	(Jade Lui, Susan Lee, William T. Sloan, 2025) [40].	Scotland (2)	1m ³ nước sau xử lý	DWP, WWT	Vận hành	Gabi
17	(Martina Klimtová, 2025) [41].	Czech (2)	1m ³ nước sử dụng	DWP	Vận hành	EF 3.0

18	(Trần Văn Hùng và cộng sự, 2025) [42].	Việt Nam (2)	1m ³ nước sau xử lý	WWT	Vận hành	ReCiPe
----	--	--------------	--------------------------------	-----	----------	--------

Đa số các nghiên cứu đều lựa chọn đơn vị chức năng là 1m³ nước tại nơi sử dụng. Đơn vị chức năng “1m³ nước” được coi như một sản phẩm được xử lý và phân phối bởi một hệ thống công nghệ. Đơn vị chức năng “m³/người/năm” mô tả nước như một dịch vụ được cung cấp cho người sử dụng trong một hệ thống nước đô thị tích hợp. Chức năng là cung cấp đủ nước (cả về số lượng và chất lượng) cho người sử dụng. Trong các nghiên cứu điển hình, lượng nước sử dụng bình quân đầu người dao động từ 50 đến 177 m³ mỗi năm. Nếu các chính sách về quản lý tổng hợp nước đô thị làm giảm lượng nước sử dụng trên đầu người, thì tác động trên mỗi m³ sẽ không thay đổi, nhưng tác động trên đầu người có thể sẽ giảm xuống. Sự cải thiện này không phải do sự thay đổi công nghệ trong hệ thống nước đô thị, mà là sự thay đổi trong toàn bộ hệ thống, bao gồm cả người sử dụng. Lượng nước sử dụng bình quân đầu người phụ thuộc vào cơ sở vật chất, mức sống của người dân, khí hậu, trình độ kinh tế xã hội của đất nước, nhận thức của người sử dụng, ... Nếu đơn vị chức năng “m³/TP/năm” là phù hợp khi so sánh các tác động tổng thể của các kịch bản quản lý tài nguyên nước khác nhau. Đây cũng là một cách tiếp cận khác để giải quyết vấn đề gặp phải với đơn vị chức năng “m³/người/năm” chỉ xác định với một mục đích sử dụng nước là sinh hoạt, trong khi những mục đích dùng khác như các ngành công nghiệp, dịch vụ cũng cần được tính đến.

Tổng kết các nghiên cứu LCA trên hệ thống nước, ba nhóm kịch bản chủ đạo đang chi phối lĩnh vực này:

Cải tiến cấu trúc công nghệ: Các nghiên cứu tập trung so sánh tác động của việc thay đổi hóa chất keo tụ hoặc tích hợp các màng lọc tiên tiến (MF/UF/RO). Kết quả thực nghiệm thể hiện một sự đánh đổi phổ biến: Việc nâng cao chất lượng đầu ra bằng công nghệ cao thường dẫn đến sự gia tăng đột biến về cường độ năng lượng và phát thải KNK.

Đa dạng hóa nguồn thô: Các kịch bản dịch chuyển nguồn (lấy nước xa, khử mặn, tái sử dụng nước thải) được mô phỏng để nhận diện ngưỡng an toàn tài nguyên. Nghiên cứu tại Singapore [36] và Malaysia [39] chỉ ra rằng việc sử dụng nước tái chế hoặc nước máy tại vòi có dấu chân carbon khác biệt từ 1,3 đến 2,2 kg CO₂ tđ, khẳng định vai trò của LCA trong việc thông tin cho các nhà hoạch định chính sách về tính bền vững của các nguồn nước thay thế.

Tích hợp năng lượng tái tạo: Xu hướng mới nhất tập trung vào việc "xanh hóa" kiểm kê vòng đời (LCI) thông qua tích hợp điện mặt trời hoặc điện gió vào dây chuyền sản xuất nước nhằm cắt giảm trực tiếp gánh nặng môi trường tại các "điểm nóng" trạm bơm.

Giai đoạn 2: Kiểm kê vòng đời (LCI)

Giai đoạn kiểm kê vòng đời (LCI) được xem là công đoạn thực thi phức tạp nhất, quyết định tính chính xác của toàn bộ mô hình đánh giá. Kiểm kê vật chất đầu vào (năng lượng, hóa chất sử dụng, lưu lượng và chất lượng nước, ...) được thu thập từ cơ sở dữ liệu của đối tượng cụ thể được nghiên cứu trong các báo cáo hoặc cơ sở dữ liệu nội bộ. Các dữ liệu khác (như cơ sở hạ tầng) được thu thập từ các ước tính và trích dẫn trong các tài liệu tham khảo. Qua lược khảo các công trình khoa học, luận án nhận diện được sự phân hóa rõ rệt trong cách tiếp cận quản lý dữ liệu kiểm kê.

Về công cụ mô hình hóa và hệ thống cơ sở dữ liệu nền, xu thế chủ đạo trong các nghiên cứu quốc tế [26], [29], [33], [34] là sử dụng các phần mềm chuyên dụng như SimaPro hoặc GaBi làm nền tảng ma trận tính toán. Còn cơ sở dữ liệu, phần lớn các nghiên cứu uy tín đều dựa trên cơ sở dữ liệu Ecoinvent hoặc GaBi database [27], [29], [31]. Tuy nhiên, một hạn chế phổ biến được nhận diện là sự phụ thuộc vào các hồ sơ môi trường của các quốc gia phát triển.

Một số công trình gần đây đã bắt đầu tích hợp đa nguồn dữ liệu nhằm nâng cao độ tin cậy, nhưng việc đánh giá chất lượng dữ liệu đầu vào (Data Quality Assessment - DQA) vẫn còn là một khoảng trống lớn trong các nghiên cứu tại khu vực Đông Nam Á, nơi hệ số phát thải của lưới điện và quy trình sản xuất hóa chất có sự khác biệt đáng kể so với châu Âu.

Điện năng được khẳng định là dòng đầu vào quan trọng nhất. Trong hầu hết các nghiên cứu, tỷ lệ tiêu thụ điện cao nhất - chủ yếu là do xử lý nước thải, theo sau là mạng lưới phân phối và NMN. Tiêu thụ điện tại NMN tập trung ở các trạm bơm 1, trạm bơm 2 bơm ra mạng lưới. Điện năng sử dụng trên mạng lưới thoát nước là không đáng kể vì quá trình vận chuyển nước thải này chủ yếu theo nguyên tắc tự chảy. Theo cách tiếp cận "hệ thống công nghệ", hệ thống cấp nước đô thị tiêu thụ 0,58 đến 2,11 kWh trên mỗi m³ được cung cấp cho người dùng [43]. Cách tiếp cận "hệ thống lãnh thổ" mang lại sự phân loại khác nhau đối với các nghiên cứu điển hình, dao động từ 47 đến 256 kWh trên đầu người mỗi năm. So với mức tiêu thụ điện trung bình của Châu Âu, hệ thống cấp nước đô thị đóng góp 1-2% tổng lượng tiêu thụ, tức là khoảng 5700 kWh / đầu người.

Lưu lượng nước: Các dữ liệu về lưu lượng đều thể hiện có sự thất thoát nước giữa đầu vào tại nơi khai thác so với lượng nước tại nơi sử dụng. Tồn thất DWD trung

bình là 25% [44]. Lưu lượng nước thải rất khác nhau vì các hệ thống có thể có hệ thống thoát nước chung, hệ thống thoát nước riêng hoặc cả hai.

Phát thải vào môi trường: Hầu hết phát thải chủ yếu được tính tại NMN và trạm xử lý nước thải. Liên quan đến các chất ô nhiễm phát thải vào nước luôn bao gồm nitơ (nitơ tổng hoặc nitrat, nitrit và amoniac) và photpho (tổng lượng photpho, photphát). Một số nghiên cứu bao gồm COD / BOD, kim loại nặng. Khí thải chủ yếu bao gồm nitơ oxit (N_2O), CO_2 , CH_4 và đôi khi là các chất ô nhiễm khác (bụi, hợp chất hữu cơ dễ bay hơi, CO , SO_2). Phát thải vào đất (chủ yếu từ bùn) bao gồm các kim loại nặng. Các cân bằng vật chất cũng được xem xét trong các nghiên cứu.

Phát thải trực tiếp và gián tiếp: Việc kiểm kê phát thải không chỉ dừng lại ở KNK (CO_2 , CH_4 , N_2O) mà còn mở rộng sang tải lượng dinh dưỡng (Nito, Photpho) và các độc chất sinh thái phát sinh từ bùn thải nhà máy. Các nghiên cứu nhấn mạnh rằng việc sử dụng hóa chất keo tụ (PAC) và khử trùng (Clo) tạo ra gánh nặng môi trường gián tiếp rất lớn trong giai đoạn sản xuất hóa chất tại nhà máy.

Tổng kết chung, các dữ liệu đầu vào được thu thập từ cả dữ liệu sơ cấp của đối tượng nghiên cứu và cả dữ liệu nền thống kê chu trình vòng đời của nhiều đối tượng được kế thừa từ các nghiên cứu trước đây. Việc thu thập dữ liệu sơ cấp ở quy mô nhà máy, hệ thống nước là rất cần thiết vì nó đặc trưng cho từng đối tượng cụ thể. Nhu cầu năng lượng cho các quá trình vận chuyển nước cả ở mạng lưới cấp nước và mạng lưới thoát nước phụ thuộc nhiều vào mật độ dân số và địa hình của TP cũng như các vị trí khai thác nước thô và vị trí xả thải. Nhu cầu năng lượng cho các công nghệ xử lý nước cũng phụ thuộc vào chất lượng nước đầu vào và yêu cầu đầu ra.

Việc kế thừa dữ liệu từ Ecoinvent kết hợp với dữ liệu sơ cấp thực nghiệm tại NMN Cầu Đỏ là hướng đi tối ưu để bảo đảm tính nhất quán quốc tế và độ chính xác địa phương cho luận án. Đây là tiền đề để thiết lập các hệ số đặc trưng hóa trong giai đoạn đánh giá tác động tiếp theo.

Giai đoạn 3: Đánh giá tác động vòng đời (LCIA)

Giai đoạn đánh giá tác động nhằm mục đích chuyển đổi các kết quả kiểm kê (LCI) thành các chỉ số tác động môi trường cụ thể thông qua các mô hình toán học và đặc tính hóa.

Về phạm vi tác động: Các nghiên cứu LCA trong lĩnh vực cấp thoát nước thường được phân loại thành hai nhóm chính: đánh giá đơn tiêu chí và đa tiêu chí. Các nghiên cứu đơn tiêu chí thường tập trung khu trú vào phát thải carbon hoặc tiêu thụ năng lượng sơ cấp. Trong khi đó, các nghiên cứu đa tiêu chí cung cấp cái nhìn toàn diện hơn khi tích hợp các chỉ số về BĐKH, phú dưỡng hóa, axit hóa, độc tính sinh thái

và đặc biệt là tác động từ việc sử dụng tài nguyên nước.

Về phương pháp và công cụ tính toán: Hiện nay, việc lựa chọn phương pháp LCIA đóng vai trò quyết định đến độ tin cậy của kết quả. Một số nghiên cứu sử dụng phương pháp CML-IA, [27], [34], một số áp dụng Eco-indicator 99 [26], [28] và các nghiên cứu của Berit Godskesen áp dụng EDIP [29], [30], [31]. Trong đó khi đó, gần đây ReCiPe được ghi nhận là phương pháp được sử dụng rộng rãi nhất nhờ khả năng cung cấp cả các loại tác động (Midpoint) và điểm kết thúc của tác động (Endpoint) [42], [45]. Về công cụ hỗ trợ, phần mềm SimaPro chiếm ưu thế trong các nghiên cứu học thuật nhờ cơ sở dữ liệu phong phú và khả năng cập nhật các phiên bản LCIA mới nhất [45]. Renzoni và cộng sự đã sử dụng hai phương pháp (Eco-indicator 99 và CML-IA) và cho kết quả rất giống nhau [46].

Giai đoạn 4: Diễn giải vòng đời

Giai đoạn diễn giải là quá trình tổng hợp, phân tích các kết quả từ LCI và LCIA để đưa ra các kết luận, nhận diện các "điểm nóng" môi trường (environmental hotspots) và đề xuất các phương án cải thiện.

Các nghiên cứu phân tích các ảnh hưởng của các giai đoạn (tức là DWP, DWD, WWC và WWT) được sử dụng trong hệ thống nước. Hầu hết các nghiên cứu, thì sự đóng góp cao nhất đến từ WWT. Tiếp theo, DWP và DWD đã có những đóng góp tương đương. WWC có tỷ lệ thấp trong tất cả các tiêu chí. Đối với các nghiên cứu tính đến các loại đóng góp từ các hoạt động (chẳng hạn như sử dụng năng lượng, hóa chất, cơ sở hạ tầng, khí thải trực tiếp, v.v.), sử dụng điện vẫn có đóng góp lớn nhất vào tỷ lệ tác động.

Việc tác động liên quan đến phát thải carbon trên hệ thống nước phụ thuộc nhiều vào mức độ tiêu thụ điện năng và loại điện sử dụng ở các quốc gia. Trong các nghiên cứu trên hệ thống nước ở Sydney và Durban của Lundie [47] và Friedrich [48], đã chỉ ra các tác động tương đối cao liên quan đến phát thải carbon, trong khi mức tiêu thụ điện năng của chúng tương đối thấp so với các nghiên cứu khác. Kết quả trên cho thấy việc sử dụng các loại điện năng khác nhau ở các quốc gia cũng sẽ ảnh hưởng đến lượng phát thải KNK. Ngoài ra, một số nghiên cứu còn thấy sự ảnh hưởng của hệ thống đun nấu nước tại gia đình cũng ảnh hưởng lớn đến phát thải khí [44].

Một nghiên cứu LCA cho quy hoạch sử dụng nước tại Sydney đã được thực hiện để đánh giá một số đề xuất nhằm giảm tác động môi trường của chu trình nước đô thị bao gồm hệ thống cấp nước và xử lý nước thải. Nghiên cứu bao gồm một số kịch bản để thay đổi hệ thống cấp nước và xử lý nước thải, kết quả là nhằm vào các quyết định liên quan đến quy hoạch và dự án trong tương lai của hệ thống nước phức tạp [47]. Renzoni cũng đã thực hiện nghiên cứu LCA của một hệ thống nước từ các cụm giếng khai thác nước ngầm đến các trạm xử lý nước thải [46]. Nghiên cứu kết luận

rằng 3 giai đoạn đóng góp đáng kể vào ô nhiễm: xả nước, vận hành xử lý nước thải và ở mức độ thấp hơn là xây dựng hệ thống nước thải; Mặc dù nước thải có những tác động lớn đến môi trường nhưng khi xem xét chu trình nước uống đô thị bằng phương pháp LCA thì việc cung cấp nước uống vẫn có thể có những cơ hội cải thiện hiệu quả môi trường, vì vậy việc đánh giá nên là giai đoạn bắt buộc của quy hoạch nước uống trong tương lai [27].

Đối với khu vực Đông Nam Á, một nghiên cứu định lượng tác động môi trường từ một hệ thống cấp nước đô thị phức tạp như của Singapore [36]. Trong nghiên cứu này, phương pháp LCA đã được thông qua để nghiên cứu tác động môi trường của nguồn cung cấp nước công cộng của Singapore, bao gồm nước tái chế có độ tinh khiết cao và nước máy. Nghiên cứu đề thông báo cho các ngành công nghiệp và các nhà hoạch định chính sách về tác động môi trường của các nguồn cung cấp này. Các thành phần riêng lẻ trong hệ thống cấp nước đô thị của Singapore đã được nghiên cứu và kết quả của chúng được kết hợp để thực hiện LCA của nước tái chế và nước máy. Kết quả thể hiện 1 m³ nước tái chế từ người tiêu dùng và 1 m³ nước máy tại hộ tiêu dùng đóng góp 2,19 kg CO₂ tương đương và 1,30 kg CO₂ tương đương vào tiềm năng BĐKH, và 0,00344 m³ và 0,882 m³ vào việc cạn kiệt tài nguyên nước tương ứng. Kết quả chỉ ra tầm quan trọng của việc bao gồm phát thải CH₄, N₂O và NO_x trong nước thải và các nghiên cứu LCA liên quan đến hệ thống cấp nước đô thị.

Một nghiên cứu về mối quan hệ giữa thiệt hại môi trường và tỷ lệ lượng mưa nhận được thông qua phương pháp LCA trong sản xuất nước uống ở Malaysia. Mục tiêu của nghiên cứu này là để có được một bức tranh rõ ràng về tiềm năng tác động tạo ra trong quá trình sản xuất nước uống từ hai giai đoạn, đó là giai đoạn sản xuất và giai đoạn xây dựng bằng phương pháp LCA. Nghiên cứu chỉ ra những thiệt hại có thể xảy ra do sử dụng hóa chất và sản xuất điện dựa trên điều kiện khí hậu khắc nghiệt ở Malaysia bao gồm mùa mưa và mùa khô. Việc tiêu thụ lượng lớn hóa chất keo tụ trong mùa mưa để bảo đảm rằng nước sau xử lý phù hợp với tiêu chuẩn đặt ra có nguy cơ gây hủy hoại môi trường. Bằng cách sử dụng phương pháp LCA làm công cụ đánh giá môi trường, có thể thấy trước được thiệt hại về môi trường (thiệt hại cho sức khỏe con người, ảnh hưởng đến chất lượng hệ sinh thái và thiệt hại về tài nguyên), là cơ sở cho việc đề xuất các phương án hợp lý cho hệ thống cấp nước.

Tại Việt Nam, khái niệm về phương pháp LCA vẫn còn khá mới mẻ, đa số được thực hiện đối với các sản phẩm và ngành dịch vụ như tàu chở hàng [49], công trình nhà ở [50], quá trình nhiệt phân lốp xe [51], quản lý chất thải rắn [52], tối ưu hóa trong quản lý chất thải rắn [53]. Các công bố áp dụng phương pháp LCA để đánh giá trên hệ thống cấp nước tại Việt Nam vẫn còn rất hạn chế. Một số công bố trên hệ thống cấp nước đã được thực hiện ở Việt Nam như nghiên cứu trên hệ thống nước tại

Hà Nội [26], NMN ở Long An [54]. Nghiên cứu thực hiện tại nhà máy cấp nước Long Hậu 1- Long An sử dụng nước ngầm làm nguồn nước thô, cũng đã chỉ ra được việc sử dụng điện và hóa chất là nguyên nhân gián tiếp góp phần vào sự nóng lên toàn cầu [54], tuy nhiên, nghiên cứu vẫn chưa đánh giá được tác động từ việc khai thác nước thô đến môi trường. Một nghiên cứu khác được thực hiện tại trạm xử lý nước thải công nghiệp với các công nghệ xử lý nước thải khác nhau [42]. Nghiên cứu đã sử dụng phương pháp ReCiPe v1.13 và phần mềm SimaPro 9.6.0.1 để thực hiện.

Nhìn chung, phương pháp LCA mạnh về đánh giá, định lượng tác động đến môi trường, nhưng thiếu khả năng phản ánh khan hiếm nước mang tính lưu vực, mang tính địa phương trong hệ thống nước. Do đó, xu hướng tích hợp chỉ số WSI vào phương pháp LCA (ISO 14046-2016 [55]) là cần thiết.

1.5. Khoảng trống trong nghiên cứu

Thông qua việc tổng quan các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước, luận án nhận diện được những hạn chế mang tính hệ thống và các khoảng trống chưa được giải quyết, cụ thể như sau:

1.5.1. Về mặt phương pháp luận và công cụ đặc trưng hóa tác động

Mặc dù tiêu chuẩn ISO 14044 cung cấp khung phương pháp LCA mạnh mẽ để lượng hóa phát thải, nhưng phương pháp này chưa có tính đặc trưng về không gian. Các mô hình LCA truyền thống thường coi tài nguyên nước là một dòng đầu vào định mức toàn cầu, chưa đặc trưng hóa được mức độ nghiêm trọng môi trường dựa trên vị trí địa lý và độ khan hiếm của nguồn nước đó tại thời điểm khai thác.

Tiêu chuẩn ISO 14046 [55] đã gợi mở về "Dấu chân khan hiếm nước" (WSF), và các nghiên cứu của Pfister và cộng sự [56] đã xác lập công thức lý thuyết $WSF = WC \times WS$. Tuy nhiên, việc chuyển đổi công thức này thành một thuật toán tích hợp trong các phần mềm như SimaPro để tự động hóa việc hiệu chỉnh hệ số đặc trưng địa phương vẫn là một thách thức về mặt kỹ thuật và chưa được chuẩn hóa trong các nghiên cứu ngành nước tại Việt Nam.

1.5.2. Về đối tượng nghiên cứu và tính đặc thù địa phương

Đà Nẵng là một đối tượng nghiên cứu mang tính điển hình nhưng lại thiếu các công cụ định lượng phù hợp. Các nghiên cứu hiện hữu tại Việt Nam (như tại Long An hay Hà Nội) chủ yếu tập trung vào các hệ thống có nguồn nước thô ổn định. Đối với các đô thị ven biển miền Trung chịu ảnh hưởng của xâm nhập mặn cực đoan, rủi ro tài nguyên không chỉ là số lượng mà còn là "khan hiếm về chất lượng".

Hiện chưa có nghiên cứu nào thực hiện kiểm kê vòng đời (LCI) chi tiết cho các kịch bản chuyển đổi nguồn thô (từ Cầu Đỏ sang An Trạch) để đối phó mặn. Việc thiếu

các hồ sơ môi trường địa phương hóa khiến các kết quả dự báo quy hoạch vẫn mang tính định tính hoặc dựa trên các hệ số mặc định của quốc tế vốn không phản ánh đúng thực trạng sử dụng năng lượng tại Việt Nam.

1.5.3. Cách tiếp cận và hỗ trợ ra quyết định quy hoạch

Hệ thống cấp nước đô thị hiện nay đang vận hành trong một mâu thuẫn nội tại mà các cách tiếp cận đơn lẻ không thể giải quyết. Nếu chỉ dùng phương pháp LCA, nhà quản lý sẽ ưu tiên các giải pháp tốn ít điện nhưng có thể gây cạn kiệt tài nguyên nước ngọt (WSI cao). Ngược lại, nếu chỉ dùng WSI, các giải pháp như khử mặn RO có thể được lựa chọn để giải quyết mặn tại chỗ, nhưng lại gây phát thải carbon cao.

Chưa có một mô hình định lượng tích hợp nào có khả năng đánh giá cả áp lực tài nguyên nước tại địa phương và phát thải môi trường toàn cầu để nhận diện ngưỡng đánh đổi tối ưu. Đây là khoảng trống lớn nhất khiến các bài toán quy hoạch hạ tầng nước hiện nay thường chỉ tập trung vào hiệu quả kinh tế - kỹ thuật ngắn hạn thay vì tính bền vững vòng đời.

Việc kết hợp chỉ số WSI vào phương pháp LCA trong luận án này không phải là sự lắp ghép cơ học giữa hai công cụ, mà nhằm hướng tới các mục tiêu khoa học cốt lõi:

- Về mặt khoa học: Chuyển đổi WSI từ một chỉ số thủy văn đơn thuần thành một Hệ số đặc trưng hóa trong bước đánh giá tác động (LCIA). Cách tiếp cận này cho phép địa phương hóa phương pháp LCA quốc tế vào điều kiện lưu vực Vu Gia - Thu Bồn.

- Về mặt quản trị: Xác lập một thước đo thống nhất để định lượng hóa sự đánh đổi giữa an ninh nước và phát thải. Khung tích hợp này sẽ cung cấp bằng chứng khoa học thực nghiệm để khẳng định kịch bản nào là bền vững nhất cho Đà Nẵng tầm nhìn 2045, hỗ trợ các nhà hoạch định trong việc lựa chọn dự án đầu tư hạ tầng thích ứng với BĐKH.

Việc thực hiện luận án là yêu cầu cấp thiết để lấp đầy những khoảng trống về phương pháp luận và thực tiễn nêu trên, góp phần xây dựng nền tảng khoa học cho quản lý tài nguyên nước thông minh và phát thải thấp tại Việt Nam.

1.6. Tiểu kết chương 1

Tổng quan về thực trạng tài nguyên nước và lược khảo các công cụ đánh giá môi trường hiện hữu cho phép rút ra các nhận định khoa học cốt lõi về sự mâu thuẫn giữa an ninh tài nguyên và gánh nặng công nghệ. An ninh nước đô thị tại các khu vực nhạy cảm như Đà Nẵng không còn là bài toán kỹ thuật đơn lẻ. Việc ứng phó với xâm nhập mặn thông qua các giải pháp hạ tầng và công nghệ đang gây ra hiện tượng "dịch chuyển gánh nặng môi trường", giải quyết được áp lực tài nguyên nước tại nguồn

nhưng lại gia tăng đáng kể dấu chân carbon và cường độ năng lượng toàn cầu. Đây là vấn đề mà các phương thức quy hoạch truyền thống chưa định lượng hóa được.

Đối với các phương pháp đánh giá hiện hữu, các chỉ số khan hiếm nước (WSI, WTA) tuy phản ánh được áp lực tại lưu vực nhưng mới dừng lại ở khía cạnh tài nguyên, chưa soi chiếu được hệ quả môi trường của các dây chuyền xử lý. Phương pháp LCA theo tiêu chuẩn truyền thống chưa tính tới yếu tố địa lý, địa phương.

Đối với cách tiếp cận, tại Việt Nam, hiện chưa có một khung phương pháp luận thống nhất có khả năng tích hợp chỉ số WSI địa phương vào bước đặc trưng hóa tác động của phương pháp LCA. Việc thiếu vắng công cụ này khiến các nhà quản lý khó nhận diện được ngưỡng đánh đổi tối ưu giữa việc bảo vệ nguồn nước và bảo vệ môi trường.

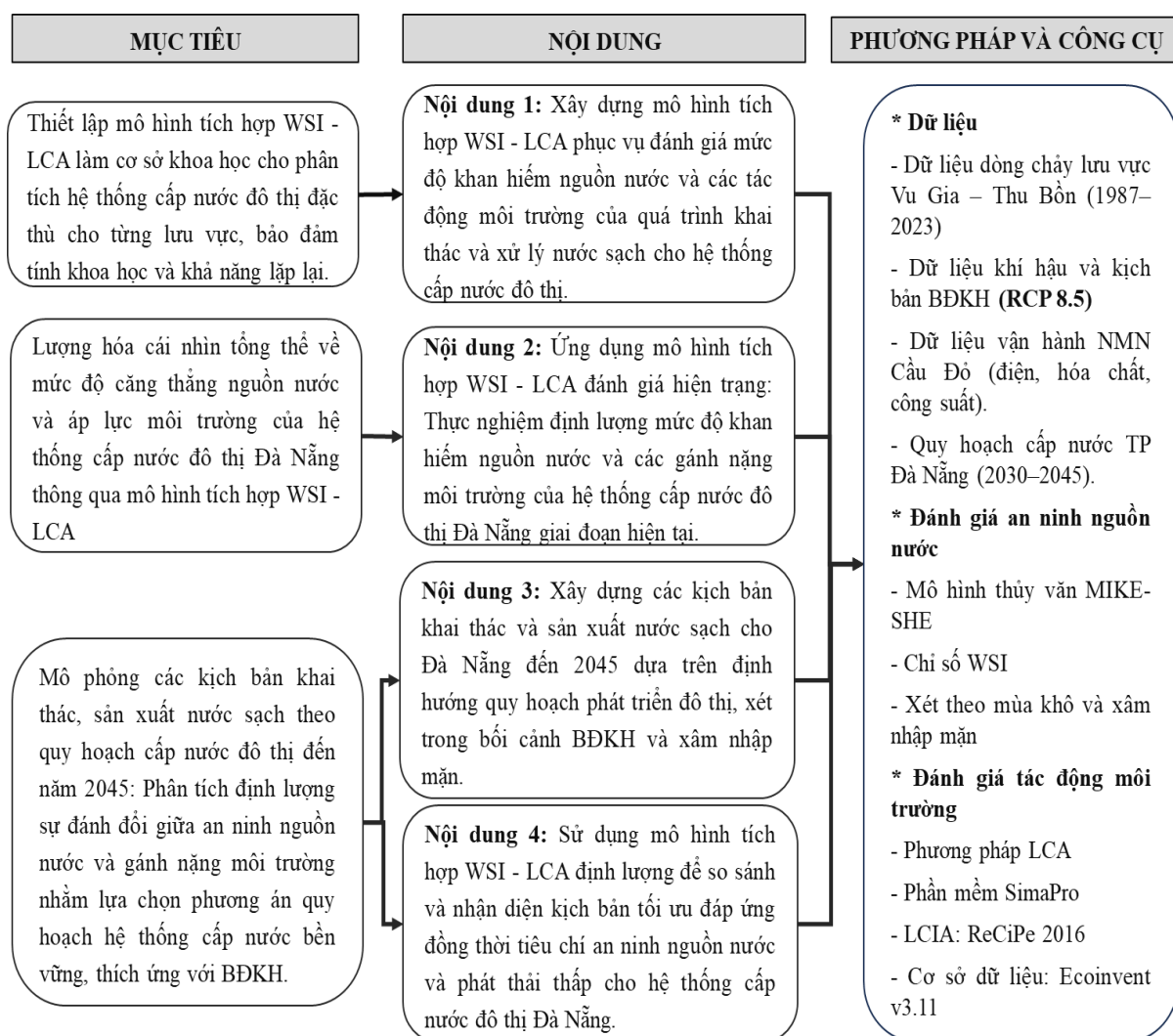
Từ những luận cứ trên, luận án xác lập hướng nghiên cứu then chốt là: Xây dựng mô hình tích hợp chỉ số WSI và phương pháp LCA cho hệ thống cấp nước TP. Đà Nẵng. Điểm mới khoa học của nghiên cứu là chuyển đổi WSI thành Hệ số đặc trưng hóa địa phương nhằm định lượng hóa chính xác "Dấu chân khan hiếm nước" (WSF) trong tổng thể các tác động môi trường. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng sẽ cung cấp luận cứ khoa học định lượng để lựa chọn kịch bản quy hoạch bền vững nhất, thích ứng linh hoạt với bối cảnh BĐKH và xâm nhập mặn cực đoan.

Đây là tiền đề quan trọng để luận án triển khai xây dựng khung mô hình chi tiết và thiết lập các bước phương pháp luận ở các chương sau.

CHƯƠNG 2. ĐỐI TƯỢNG VÀ CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA CÁC PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu này tập trung vào đánh giá tính bền vững của hệ thống cấp nước đô thị TP. Đà Nẵng trong bối cảnh xâm nhập mặn và BĐKH. Đà Nẵng là đô thị lớn ở miền Trung Việt Nam, có hệ thống cấp nước phụ thuộc chủ yếu vào nguồn nước mặt từ lưu vực sông Vu Gia – Thu Bồn, thường xuyên đối mặt với tình trạng nhiễm mặn tại cửa thu Cầu Đỏ vào mùa khô [4]. Thực tế này đặt ra yêu cầu cấp thiết phải phân tích mức độ căng thẳng nguồn nước và tác động môi trường của các kịch bản cấp nước, nhằm tối ưu hóa phân bổ nguồn nước và giảm rủi ro về phát thải trong tương lai.

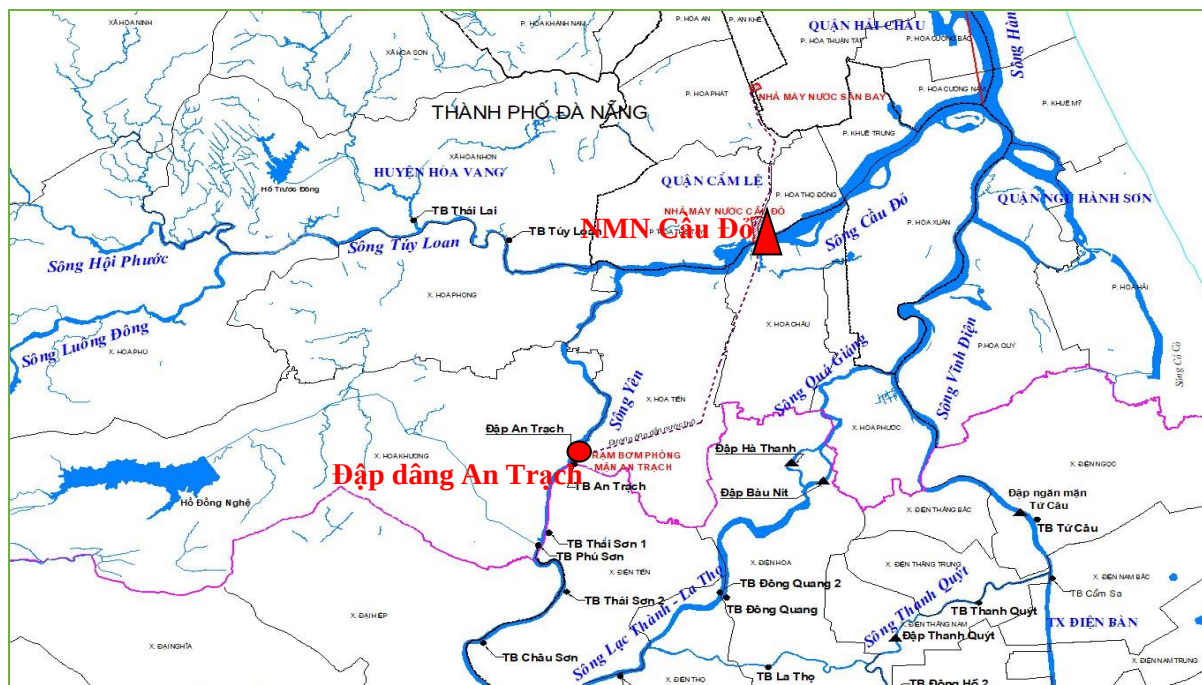
Chương này trình bày đối tượng, phạm vi nghiên cứu, nguồn số liệu và các phương pháp được sử dụng để triển khai phân tích, nhằm bảo đảm tính chặt chẽ và khả năng lặp lại của kết quả nghiên cứu. Khung logic nghiên cứu của luận án được thể hiện ở Hình 2.1:



Hình 2.1. Khung logic nghiên cứu của luận án

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án là phương pháp luận về mô hình tích hợp WSI - LCA, quá trình khai thác, vận chuyển nước thô và sản xuất nước sạch. Nghiên cứu được thực hiện tại điểm khai thác và sản xuất của NMN Cầu Đỏ, nơi chịu ảnh hưởng mạnh của xâm nhập mặn và biến động dòng chảy trong mùa kiệt. Hình 2.2 thể hiện vị trí của NMN Cầu Đỏ và vị trí đập dâng An Trạch.



Hình 2.2. Vị trí NMN Cầu Đỏ và đập dâng An Trạch

Các định nghĩa chi tiết về ranh giới hệ thống và đơn vị chức năng phục vụ trực tiếp cho tính toán, xây dựng kịch bản sẽ được cụ thể hóa trong cấu trúc mô hình tích hợp tại Chương 3 và Chương 4.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp thống kê và kế thừa

Trong quá trình thực hiện luận án, việc sử dụng phương pháp thống kê, kế thừa, hồi cứu các nghiên cứu trước đây đóng vai trò quan trọng trong việc xây dựng định hướng nghiên cứu và bảo đảm tính khách quan, khoa học cho nền tảng lý thuyết của đề tài, phù hợp với điều kiện thực tiễn của hệ thống cấp nước đô thị tại Việt Nam và tại TP. Đà Nẵng. Phương pháp hồi cứu, kế thừa còn giúp cập nhật và bổ sung các phương pháp LCA và căng thẳng nguồn nước trong bối cảnh riêng của Việt Nam, làm cơ sở cho việc lựa chọn giải pháp cấp nước đô thị hiệu quả và bền vững hơn. Cụ thể:

- Thực hiện hồi cứu có hệ thống các nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến đánh giá vòng đời, đặc biệt các nghiên cứu trên hệ thống cấp nước: Tập trung phân tích các công trình khoa học sử dụng phương pháp LCA để đánh giá tác động

môi trường của các hệ thống cấp nước, đặc biệt là các nghiên cứu có cùng đơn vị chức năng (1 m^3 nước sạch) và cùng phạm vi hệ thống, các nghiên cứu được lựa chọn ở các nước khu vực châu Âu, ở châu Á và Đông Nam Á nhằm thuận tiện cho việc so sánh, đánh giá các nghiên cứu.

- Tập hợp và hệ thống hóa các cách tiếp cận, lập luận khác nhau về đánh giá tình trạng khan hiếm nguồn nước. Xem xét các mô hình, công thức xác định chỉ số WSI để lựa chọn công thức tính phù hợp với khu vực, phạm vi nghiên cứu.

- Nghiên cứu, khảo sát các tài liệu hướng dẫn, quy định, các nghiên cứu trước đây về cách xác định dòng chảy môi trường (EWR) và lưu lượng dòng chảy trung bình năm (MAR) tại Việt Nam, đặc biệt là đối với lưu vực sông Vu Gia – Thu Bồn.

- Kế thừa các bộ dữ liệu thứ cấp sử dụng cho phương pháp LCA: Các dữ liệu về tiêu thụ điện, hóa chất, phát thải, lưu lượng khai thác nước, tiêu chuẩn cấp nước được kế thừa từ các báo cáo của Công ty Cổ phần Cấp nước Đà Nẵng, các đề án quy hoạch cấp nước TP. Đà Nẵng, và các công trình nghiên cứu liên quan đến vận hành NMN Cầu Đỏ. Dữ liệu quốc tế về loại tác động (midpoint) và điểm kết thúc của loại tác động (endpoint) được trích xuất từ cơ sở dữ liệu Ecoinvent, bảo đảm tính nhất quán và khả năng đối chiếu với kết quả nghiên cứu quốc tế.

Trên cơ sở đối chiếu, phân tích các nghiên cứu trước đây và xác định khoảng trống nghiên cứu, luận án tiến hành phân tích, so sánh giữa các phương pháp tính tác động nước. Nghiên cứu cũng chỉ ra khoảng trống lý thuyết trong việc đánh giá hệ thống cấp nước có kết hợp cả tác động môi trường toàn cầu (CO_2 , độc tính...) và tác động địa phương – điều mà các nghiên cứu trước đây tại Việt Nam chưa đề cập một cách đầy đủ.

Việc tổng hợp, phân tích, đánh giá các kết quả liên quan đến đối tượng nghiên cứu đã thực hiện trong thời gian qua còn nhằm kế thừa các thông tin và kết quả có trước, tránh rủi ro và nghiên cứu chồng chéo.

2.2.2. Mô hình tính toán dòng chảy về

Lượng nước ngọt được đo lường cả về số lượng và chất lượng từ tài nguyên nước mặt và nước ngầm. Tổng lượng nước mặt được xác định bằng việc phân tích thống kê và sử dụng các mô hình thủy văn. Với điều kiện địa hình lưu vực tương đối phức tạp. Phần lớn diện tích là đồi núi và trung du, phần đồng bằng phân bố theo dải ở phía Đông. Sự thay đổi địa hình tương đối lớn, do đó theo tiêu chí của Tổ chức khí tượng thế giới (WMO), ứng với lưu vực sông Vu Gia Thu Bồn, việc lựa chọn mô hình phân bố là được khuyến nghị. Hiện nay, đã có rất nhiều phần mềm thủy văn được phát triển. Những phần mềm này rất đa dạng được phát triển trên cơ sở nhiều nền tảng lý thuyết khác nhau và cũng đặt những trọng tâm giải quyết khác nhau, một số mô hình thủy văn thông dụng như: MIKE-NAM, Hydrologic Modeling System (HEC-HMS),

Soil and Water Assessment Tool (SWAT), MIKE SHE... Với thế mạnh trong phân tích tác động của khí hậu đến cả dòng chảy và mực nước ngầm, nghiên cứu sử dụng mô hình MIKE SHE để tính tổng lượng nước mặt trên các vùng tính toán phân bổ nguồn nước.

a) Tổng quan về mô hình MIKE SHE

Mô hình MIKE SHE là một mô hình thủy văn phân bố tích hợp, dựa trên cơ sở vật lý, cho phép mô phỏng toàn bộ chu trình thủy văn trong một lưu vực sông. Được phát triển từ khung lý thuyết SHE (Système Hydrologique Européen), MIKE SHE vượt trội ở khả năng mô tả sự tương tác động giữa các thành phần: dòng chảy mặt, dòng chảy trong tầng sát mặt, nước ngầm và quá trình bốc thoát hơi. Việc ứng dụng MIKE SHE trong luận án này đóng vai trò then chốt để lượng hóa các thành phần dòng chảy tại lưu vực Vu Gia – Thu Bồn, cung cấp đầu vào chính xác cho việc xác định chỉ số WSI theo thời gian và không gian.

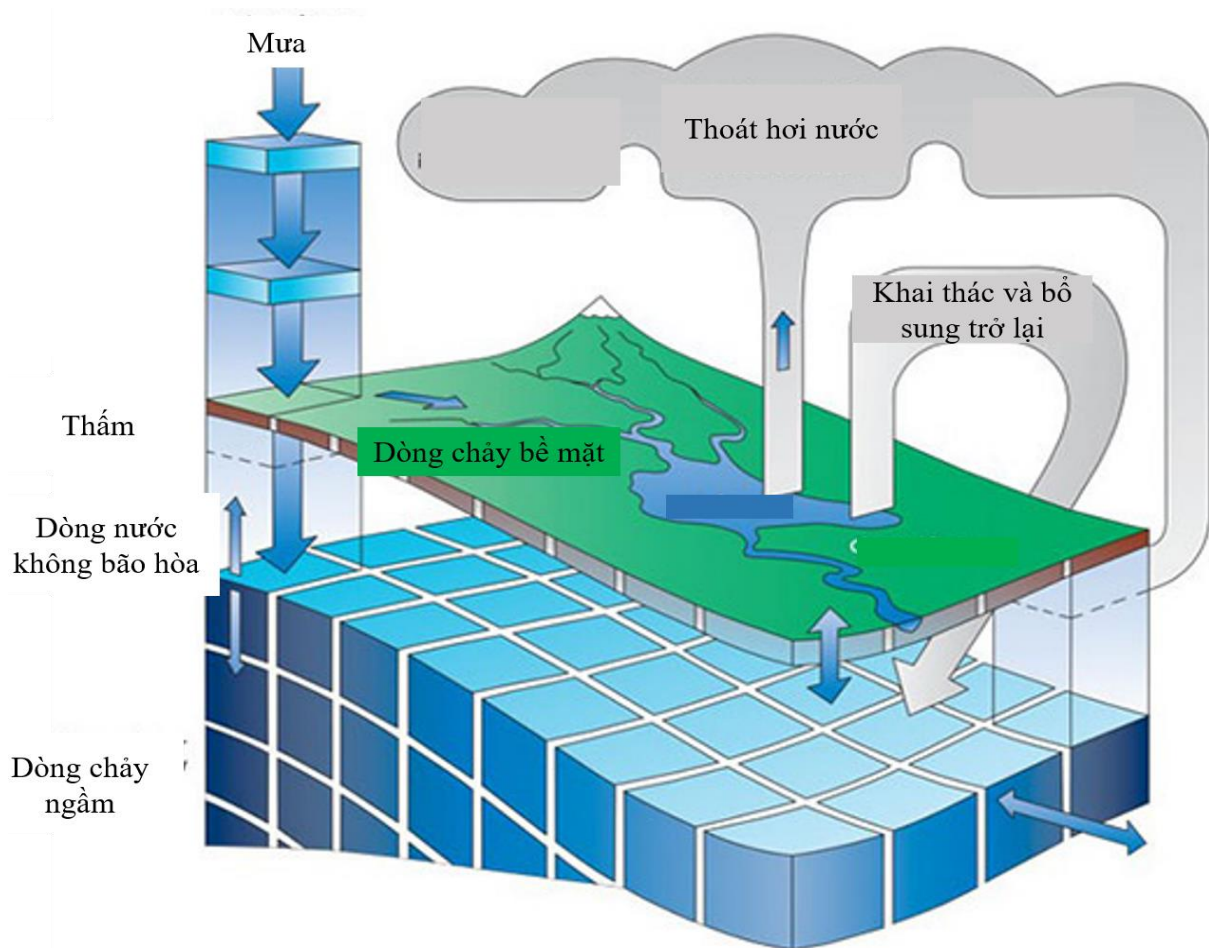
Trên cơ sở yêu cầu có những luận cứ khoa học phục vụ cho công tác quy hoạch tài nguyên nước, đánh giá tác động của đô thị hóa, sự thay đổi thảm phủ, cũng như là sự phát triển cơ sở hạ tầng đối với quá trình thủy văn khu vực châu Âu, mô hình thủy văn đặc trưng cho khu vực này đã được phát triển, mô hình Système Hydrologique Européen còn gọi là SHE. Mô hình là sản phẩm liên kết Viện Thủy văn Anh (British Institute of Hydrology, UK), Viện thủy lực Đan Mạch (The Danish Hydraulic Institute - DHI) và công ty tư vấn SOGREAH, Pháp (the French Consulting Company SOGREAH) dưới sự hỗ trợ tài chính của Ủy ban châu Âu [57].

b) Lịch sử phát triển của mô hình MIKE SHE

Mô hình SHE được xây dựng dựa trên bản phát thảo mà Freeze và Harlan đề xuất vào năm 1969 để mô phỏng quá trình thủy văn lưu vực. Về lý thuyết, quá trình mô phỏng được chia thành nhiều phần khác nhau và được giải bằng phương trình tương ứng. Sau nhiều thử nghiệm để xác nhận chất lượng của mô hình với nhiều nghiên cứu điển hình, phiên bản đầu tiên của SHE đã bắt đầu hoạt động vào năm 1982. Sau đó, mô hình SHE đã được tiếp tục hoàn thiện và mở rộng bởi DHI Water & Environment với tên mới là MIKE SHE. Mô hình này được tiếp tục phát triển để cải thiện chất lượng mô phỏng. Ngày nay, MIKE SHE được xem như là một công cụ hiệu quả trong mô phỏng chế độ thủy văn lưu vực.

c) Lý thuyết cơ bản của mô hình MIKE SHE

Cấu trúc tổng quát của mô hình MIKE SHE được thể hiện như ở Hình 2.3, theo đó, quá trình thủy văn được chia thành 8 phần trong mô hình MIKE SHE [58]. Mô tả các phần này được tóm tắt như sau.



Hình 2.3. Cấu trúc tổng quát của mô hình MIKE SHE. [58]

- Mưa: Lượng mưa là một yếu tố quan trọng trong quá trình thủy văn. Do đó, nó luôn luôn là yêu cầu dữ liệu đầu tiên với bất kỳ mô hình thủy văn nào. Dữ liệu đầu vào này ảnh hưởng nhiều đến chất lượng mô phỏng. Trong MIKE SHE, dữ liệu lượng mưa có thể được đưa vào như một giá trị không đổi hoặc một chuỗi thời gian tùy thuộc và hiện trạng dữ liệu và mục tiêu mô phỏng. MIKE SHE cung cấp ba định dạng phân bố không gian cho dữ liệu mưa: đồng nhất, dựa vào trạm hay phân bố. Ngoài ra, trong MIKE SHE còn có các chức năng khác giúp điều chỉnh lượng mưa nhập vào phù hợp với thực tế hơn, như mưa theo độ cao cũng như là ảnh hưởng của tuyết tan.

- Bốc hơi: Trong cân bằng nước, quá trình bốc hơi là một thành phần quan trọng. Yếu tố này bao gồm quá trình bay hơi và quá trình thoát hơi nước. Trong MIKE SHE lượng bốc hơi được tính toán thông qua dữ liệu thời tiết và thảm thực vật. MIKE SHE cung cấp ba phương pháp để xác định lượng bốc hơi thực tế (ET). Phương pháp SVAT, Phương pháp Kristensen và Jensen, Phương pháp cân bằng hai lớp.

- Dòng không bão hòa: Ứng với dòng không bão hòa, MIKE SHE giả thiết rằng chỉ tồn tại dòng chảy theo chiều đứng, dòng chảy theo chiều ngang rất nhỏ nên có thể bỏ qua. MIKE SHE cung cấp bốn lựa chọn cho việc mô phỏng thành phần này:

Phương pháp của Richards, Phương pháp dòng chảy trọng lực, Phương pháp cân bằng hai lớp, Phương pháp quy vùng bão hòa về dạng tập trung.

- Dòng chảy mặt: Trong MIKE SHE, dòng chảy mặt được tính toán với: Phương pháp phần tử hữu hạn và Phương pháp bán phân bố.

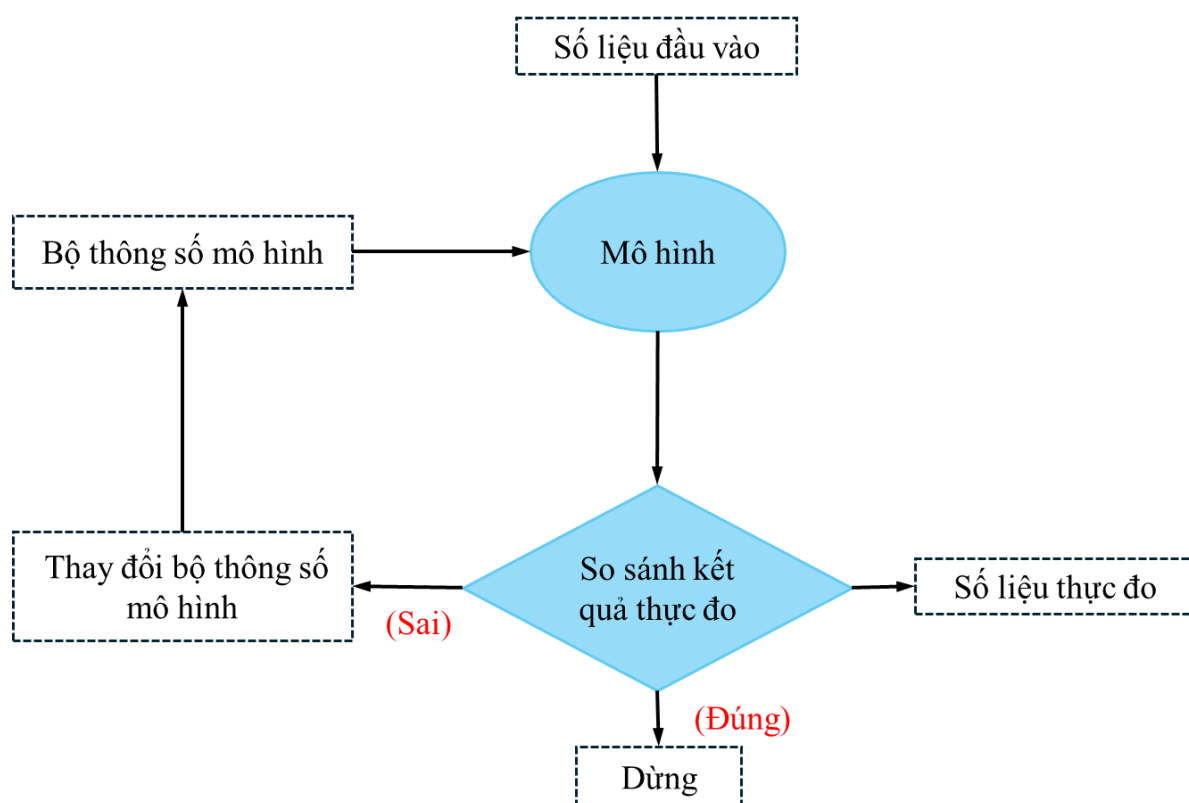
- Dòng chảy trên sông: Quá trình này được MIKE SHE mô phỏng thông qua sự kết hợp với MIKE 11.

- Dòng chảy trong đô thị: Đối với quá trình dòng chảy trong hệ thống cấp thoát nước, MIKE SHE sử dụng kết nối với MIKE URBAN để biểu diễn.

- Dòng chảy ngầm: Thành phần này được MIKE SHE mô phỏng với hai phương pháp: Phương pháp phần tử hữu hạn và phương pháp bể chứa.

- Công trình thủy lợi: MIKE SHE có chức năng tùy chọn công trình thủy lợi tạo ra một số tiểu mục trong cây dữ liệu cho các thông số tưới giống như hồ chứa thủy lợi được sử dụng để mô tả nơi mà nước đến và nước tưới được áp dụng như là mô hình.

Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình: Các bước thực hiện hiệu chỉnh mô hình thể hiện trên Hình 2.4:



Hình 2.4. Sơ đồ hiệu chỉnh và kiểm định mô hình

2.2.3. Mô hình SimaPro – hỗ trợ kiểm kê vòng đời áp dụng cho quản lý hệ thống cấp nước

Để thực hiện phương pháp LCA, một số phần mềm chuyên dụng có khả năng hỗ trợ quản lý dữ liệu kiểm kê (LCI), áp dụng các phương pháp đặc tính hóa tác động (LCIA) và thực hiện phân tích kịch bản một cách chính xác, minh bạch. Hiện nay, ba công cụ phổ biến nhất được sử dụng trong nghiên cứu và thực tiễn là SimaPro, GaBi và OpenLCA:

- SimaPro (PRé Sustainability – Hà Lan): là một trong những phần mềm LCA thương mại lâu đời và được sử dụng rộng rãi nhất, với cơ sở dữ liệu Ecoinvent, Agrifootprint, Industry Data 2.0... tích hợp sẵn. SimaPro hỗ trợ hầu hết các phương pháp LCIA quốc tế (ReCiPe, IMPACT 2002+, CML, USEtox...), có giao diện trực quan, chức năng so sánh kịch bản mạnh, dễ xuất báo cáo và kết quả có thể kiểm chứng.

- GaBi (Sphera): cũng là một phần mềm thương mại, mạnh về dữ liệu ngành công nghiệp (cơ sở dữ liệu GaBi Database rất chi tiết, cập nhật thường xuyên). Phù hợp cho các nghiên cứu LCA trong lĩnh vực công nghiệp chế tạo, sản xuất vật liệu, sản phẩm phức tạp.

- OpenLCA (GreenDelta): phần mềm mã nguồn mở, miễn phí, cho phép tích hợp nhiều cơ sở dữ liệu mở hoặc thương mại. Ưu điểm là linh hoạt, chi phí thấp, nhưng yêu cầu người dùng có kỹ năng thiết lập hệ thống và quản lý dữ liệu cao hơn.

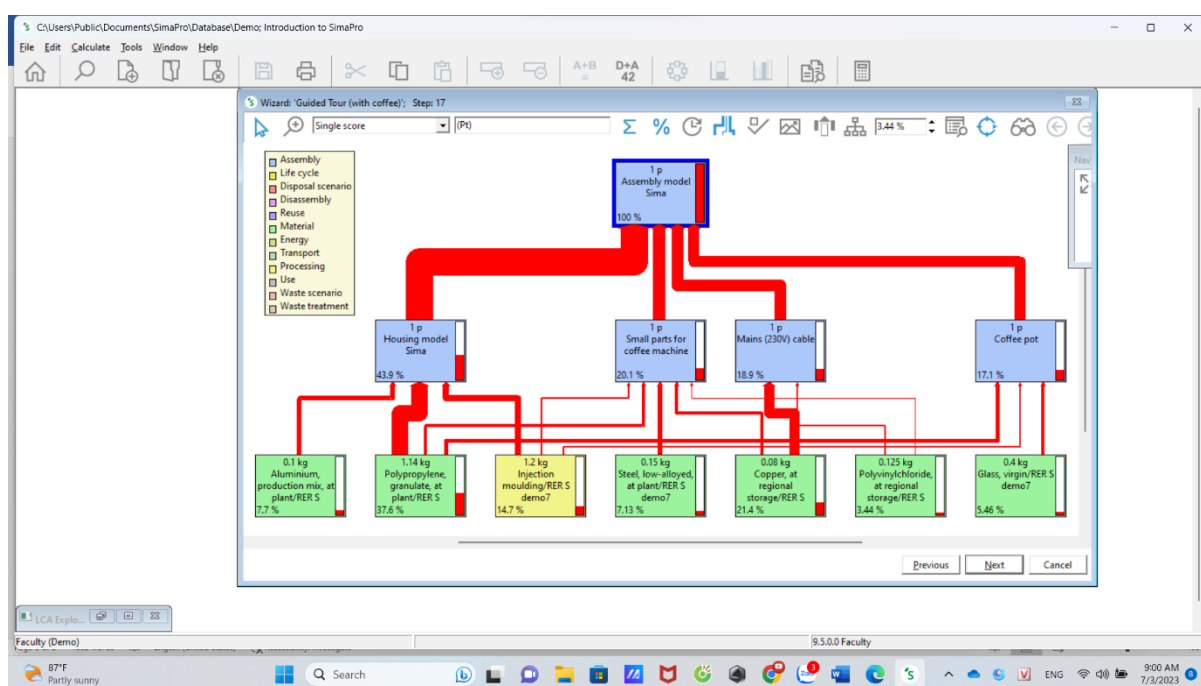
Trong khuôn khổ luận án, phương pháp LCA được triển khai trên nền tảng mô hình hóa chuyên dụng SimaPro (phiên bản 10.2). Việc lựa chọn công cụ này không đơn thuần dựa trên tính phổ biến của phần mềm, mà xuất phát từ khả năng cấu trúc hóa dữ liệu dựa trên lý thuyết ma trận dòng vật chất và tính tuân thủ nghiêm ngặt các tiêu chuẩn quốc tế ISO 14040/14044.

SimaPro là một trong những giải pháp phần mềm LCA hàng đầu trong hơn 30 năm – được sử dụng bởi các công ty, tổ chức tư vấn và trường đại học ở hơn 80 quốc gia. Được phát triển bởi PRé Sustainability, SimaPro được thiết kế để trở thành một nguồn thông tin dựa trên cơ sở khoa học, cung cấp đầy đủ tính minh bạch. SimaPro là một công cụ đánh giá vòng đời được sử dụng rộng rãi trong ngành môi trường. Nó cung cấp một khung làm việc để xác định các tác động môi trường của một sản phẩm, quy trình hoặc dịch vụ trong suốt quá trình sống của nó từ nguồn nguyên liệu, sản xuất, vận chuyển và sử dụng đến chế độ xử lý cuối cùng. SimaPro giúp các nhà nghiên cứu, quản lý môi trường và các doanh nghiệp hiểu rõ hơn về tiềm năng môi trường và tác động xã hội của các hoạt động của họ.

Khác với các công cụ thống kê thông thường, SimaPro cho phép luận án truy xuất nguồn gốc của mọi dòng vật chất và năng lượng đầu vào đến tận khâu khai thác

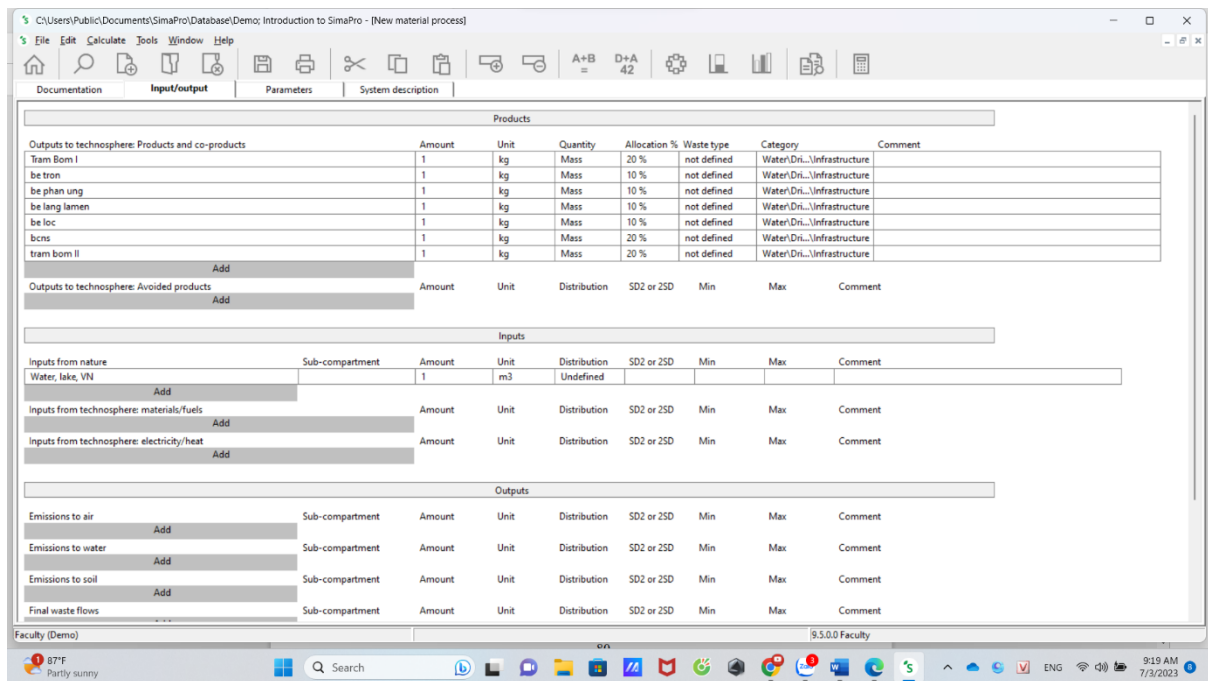
nguyên liệu thô. Điều này bảo đảm tính minh bạch trong việc phân bổ các tác động môi trường gián tiếp phát sinh từ chuỗi cung ứng điện năng và hóa chất xử lý nước tại Đà Nẵng. Phần mềm thực hiện giải các hệ phương trình tuyến tính quy mô lớn để xác định tổng các dòng phát thải tích lũy. Đây là cơ sở khoa học để luận án định lượng được hiện tượng dịch chuyển gánh nặng môi trường - một yếu tố then chốt khi so sánh các kịch bản công nghệ có cường độ năng lượng khác nhau.

Giá trị học thuật của mô hình SimaPro nằm ở khả năng kết nối đồng bộ giữa Kiểm kê vòng đời (LCI) và Đánh giá tác động (LCIA). Thông qua việc tích hợp cơ sở dữ liệu Ecoinvent v3.11, mô hình cung cấp các hồ sơ môi trường được chuẩn hóa quốc tế. Đối với luận án, các quy trình nền được hiệu chỉnh theo đặc điểm điện năng và đặc thù sản xuất tại Việt Nam, bảo đảm tính đại diện về mặt không gian và công nghệ. Hình 2.5 mô tả 1 ví dụ về kết quả chạy trong mô hình Simapro.



Hình 2.5. Ví dụ về kết quả chạy mô hình

SimaPro hỗ trợ phương pháp ReCiPe 2016, cho phép chuyển đổi các thông số kiểm kê vật lý thành 18 loại tác động và 03 nhóm kết thúc của loại tác động. Khả năng tùy chỉnh các hệ số đặc trưng hóa của phần mềm chính là tiền đề kỹ thuật để luận án tích hợp chỉ số WSI địa phương, nhằm hiệu chỉnh tác động của việc tiêu thụ nước dựa trên áp lực tài nguyên thực tế của lưu vực sông Vu Gia – Thu Bồn. Hình 2.6 mô phỏng quá trình khai báo dữ liệu trong mô hình:



Hình 2.6. Ví dụ về việc khai báo dữ liệu cho mô hình

Để đáp ứng các yêu cầu khắt khe về độ tin cậy trong nghiên cứu của luận án, SimaPro cung cấp các công cụ phân tích tới hạn. Mô phỏng Monte Carlo cho phép xử lý tính bất định của dữ liệu đầu vào thông qua các hàm phân phối xác suất. Việc thực hiện hàng ngàn vòng lặp mô phỏng giúp xác định khoảng tin cậy 95% cho các kết quả phát thải, khẳng định ý nghĩa thống kê của các kết quả nghiên cứu. Về phân tích độ nhạy, công cụ này cho phép nhận diện các điểm nóng môi trường trong hệ thống cấp nước. Việc xác định các biến số nhạy cảm nhất (như điện năng tại trạm bơm An Trạch khi xâm nhập mặn) là cơ sở khoa học để đề xuất các giải pháp tối ưu hóa vận hành và quy hoạch chiến lược.

Tóm lại, SimaPro được sử dụng như một khung phân tích hệ thống toàn diện, bảo đảm tính nhất quán từ khâu thiết lập ranh giới đến khâu diễn giải kết quả. Sự kết hợp giữa thuật toán ma trận chuẩn hóa và dữ liệu thực nghiệm địa phương tạo nên một công cụ định lượng đủ độ tin cậy để hỗ trợ ra quyết định trong quản trị hệ thống cấp nước đô thị bền vững.

2.2.4. Phương pháp khảo sát thực tế, thu thập và xử lý số liệu

Để phục vụ cho luận án, nguồn dữ liệu được thu thập bao gồm:

*** Dòng chảy về:** Dữ liệu dòng chảy được mô phỏng thông qua mô hình MIKE SHE. Quá trình mô phỏng được thể hiện ở Mục 3.2.2.

*** Dữ liệu tính toán nhu cầu sử dụng nước:**

Cơ sở tính toán dự báo nhu cầu sử dụng nước và dự báo định hướng dựa vào Quyết định Điều chỉnh quy hoạch chung, dựa vào Điều chỉnh Quy hoạch cấp nước đô thị TP, dựa vào các tiêu chuẩn cấp nước.

Các nhu cầu sử dụng nước tại đối tượng nghiên cứu, đánh giá: Nước sử dụng cho sinh hoạt; Nước sử dụng công nghiệp; Nước sử dụng nông nghiệp; Dịch vụ, công trình công cộng ...

- Nhu cầu dùng nước cho sinh hoạt

Nhu cầu dùng nước sinh hoạt trong tháng:

$$W_{SH} = \frac{N \times q}{1000} \times 30 \text{ (m}^3\text{/tháng)}$$

Với q: Tiêu chuẩn cấp nước sinh hoạt (lít/người/ngày)

N: Số người

- Nhu cầu dùng nước cho công nghiệp: Theo TCVN 13606-2023, tiêu chuẩn dùng nước cho nhu cầu sản xuất công nghiệp phải xác định trên cơ sở những tài liệu thiết kế đã có, hoặc so sánh với các điều kiện sản xuất tương tự.

- Nhu cầu dùng nước cho nông nghiệp: Nước sử dụng cho mục đích trồng trọt, chăn nuôi. Nhu cầu sử dụng nước cho chăn nuôi được ước tính theo mức cấp quy định tại TCVN 4454:1987 Quy hoạch xây dựng điểm dân cư ở xã, hợp tác xã – tiêu chuẩn thiết kế. Nhu cầu sử dụng nước cho mục đích trồng trọt được ước tính theo mức tưới quy định tại TCVN 8641:2011 Công trình thủy lợi, kỹ thuật tưới tiêu nước cho cây lương thực và thực phẩm.

*** Dòng chảy môi trường (EWR)**

Liên quan đến dòng chảy môi trường, mỗi quốc gia có một cách gọi, một thuật ngữ khác nhau: Yêu cầu dòng chảy trên dòng chính (Nam Phi), dòng chảy môi trường (Zimbabwe), mục tiêu dòng chảy sông, dòng chảy môi trường tối thiểu (Úc), dòng chảy tối thiểu chấp nhận được (Mozambique), dòng chảy tối thiểu (Trung Quốc, Ấn Độ, Tây Ban Nha), Yêu cầu nước cho Môi trường (Thái Lan, Đan Mạch) ... Trong đó, hai thuật ngữ được sử dụng nhiều nhất là dòng chảy môi trường và dòng chảy tối thiểu [59].

Theo cẩm nang của Liên minh Bảo tồn Thiên nhiên Quốc tế (IUCN) được xuất bản năm 2013 [60] thì dòng chảy môi trường được định nghĩa là chế độ nước được cung cấp trong một dòng sông, vùng đất ngập nước hoặc vùng ven bờ để duy trì các hệ sinh thái và những lợi ích của chúng ở những nơi dòng chảy bị điều tiết và có sự cạnh tranh trong sử dụng nước. Dòng chảy môi trường góp phần vô cùng quan trọng đối với

sức khỏe của dòng sông, sự phát triển kinh tế và giảm đói nghèo. Chúng bảo đảm tính sẵn có liên tục của nhiều lợi ích mà dòng sông khỏe mạnh và các hệ thống cấp nước dưới đất mang lại cho xã hội.

Với thuật ngữ về dòng chảy môi trường cũng thường phụ thuộc vào quan điểm của người nghiên cứu, mục đích của các nghiên cứu. Một số điểm chung của khái niệm dòng chảy môi trường thường là dòng chảy “đáp ứng nhu cầu cần thiết của môi trường”, “duy trì các hệ sinh thái và lợi ích của chúng” hay “Bảo đảm lợi ích về kinh tế, xã hội và môi trường” ở vùng hạ lưu.

Theo nghiên cứu của Smakhtin và các cộng sự [15], dòng chảy môi trường so với dòng chảy trung bình hằng năm áp dụng cho tất cả các lưu vực tại Việt Nam là 27 %. Tỷ lệ này được đưa ra dựa vào đặc điểm tự nhiên, khí hậu thời tiết của các quốc gia, khu vực trên thế giới, tuy nhiên vẫn chưa mang tính địa phương cho từng lưu vực ở mỗi quốc gia.

Đối với khái niệm dòng chảy tối thiểu, được xem là có nguồn gốc từ Mỹ. Ở Việt Nam, khái niệm về Dòng chảy tối thiểu cũng được giải thích rõ tại điều 2, mục 18 của Luật Tài nguyên nước năm 2023, “*Dòng chảy tối thiểu là dòng chảy ở mức thấp nhất cần thiết để duy trì dòng sông, suối hoặc đoạn sông, suối nhằm bảo đảm sự phát triển bình thường của hệ sinh thái thủy sinh và bảo đảm mức tối thiểu cho hoạt động khai thác, sử dụng nước.*” [61].

Hiện nay, các phương pháp xác định dòng chảy tối thiểu đang được nghiên cứu và ứng dụng ở nước ta là các phương pháp đánh giá nhanh. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu cũng đã sử dụng kết hợp nhiều phương pháp như xét đến các yếu tố thủy văn, thủy lực và sinh thái để xác định dòng chảy tối thiểu nhưng thành phần dòng chảy chưa được nghiên cứu một cách đầy đủ. Ngày 22/12/2017, Bộ Tài nguyên và Môi trường đã ban hành Thông tư số 64/2017/TT-BTNMT Quy định về xác định dòng chảy tối thiểu trên sông, suối và hạ lưu các hồ chứa, đập dâng. Tại Điều 6 và Điều 7 Thông tư hướng dẫn vị trí xác định dòng chảy tối thiểu và phương pháp tính toán các đặc trưng dòng chảy [62].

Ngày 12/7/2021, Bộ Tài nguyên và Môi trường đã ban hành Quyết định số 1354/QĐ-BTNMT về việc công bố giá trị dòng chảy tối thiểu ở hạ lưu các hồ chứa, đập dâng của các công trình thủy lợi, thủy điện [63].

Năm 2018, Luận án Tiến sĩ của Nguyễn Thị Kim Dung đã xây dựng phương pháp xác định dòng chảy tối thiểu – Áp dụng cho hệ thống Vu Gia- Thu Bồn. Tác giả của Luận án đã sử dụng phương pháp tiếp cận tổng thể để xác định dòng chảy tối thiểu cho dòng sông/đoạn sông chịu tác động bởi các công trình khai thác nước phía

thượng nguồn. Phương pháp tiếp cận tổng thể chú trọng vào bảo tồn toàn bộ hệ sinh thái sông và sức khỏe của dòng sông chứ không tập trung vào bảo vệ một loài sinh vật cụ thể. Mục đích của phương pháp là tiếp cận tất cả các vấn đề của dòng sông để đưa ra một chế độ dòng chảy, không phải là chế độ dòng chảy tự nhiên nhưng có khả năng duy trì được hệ sinh thái tiêu biểu và các chức năng tự nhiên của dòng sông. Với nghiên cứu này, dòng chảy tối thiểu được xem là sự kết hợp của 3 thành phần chính: (1) Dòng chảy duy trì sông là dòng chảy cần thiết để dòng sông “được sống” phải được duy trì kể cả trong trường hợp thiếu nước hoặc hạn hán nghiêm trọng. (2) Dòng chảy môi trường là dòng chảy cần thiết để duy trì điều kiện môi trường dòng sông hoặc đoạn sông nhằm bảo đảm sự phát triển bình thường của hệ sinh thái thủy sinh. Đây là “lượng nước cần cho sinh thái” bởi vì nước cho duy trì hệ sinh thái cũng góp phần duy trì điều kiện cảnh quan và sức khỏe của dòng sông. (3) Dòng chảy khai thác sử dụng là dòng chảy cần thiết cho hoạt động khai thác, sử dụng tài nguyên nước của các đối tượng sử dụng nước trên dòng sông hoặc đoạn sông dưới hạ lưu [59].

Thời gian tính toán căng thẳng nguồn nước thường rơi vào mùa kiệt và đây là khoảng thời gian mà hệ sinh thái sông dễ bị tổn thương. EWR thay đổi tùy theo điều kiện môi trường và khoảng thời gian duy trì chức năng sông và dịch vụ hệ sinh thái, EWR thay đổi dựa trên điều kiện của từng địa phương.

*** Dữ liệu sử dụng cho phương pháp LCA**

Có nhiều thách thức trong việc thực hiện LCA đặc biệt là tầm quan trọng của việc thu thập dữ liệu với chất lượng tốt, đáng tin cậy và thiết lập hệ thống phù hợp.

Trong nghiên cứu này, dữ liệu đầu vào gồm hai nhóm chính: (a) Dữ liệu cụ thể từ đối tượng nghiên cứu được thu thập trực tiếp tại NMN Cầu Đỏ, bao gồm lưu lượng nước thô khai thác, lượng nước sạch sản xuất, lượng điện năng tiêu thụ và khối lượng hóa chất sử dụng. Đây là những dữ liệu phản ánh điều kiện vận hành thực tế, đóng vai trò nền tảng trong quá trình kiểm kê vòng đời. (b) Cơ sở dữ liệu nền (background database) được sử dụng để bổ sung dữ liệu cho các quá trình sản xuất và cung ứng điện năng, hóa chất và vật tư nằm ngoài phạm vi kiểm soát tại nhà máy. Hiện nay có nhiều nguồn cơ sở dữ liệu nền được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu LCA, chẳng hạn như Ecoinvent, Industry Data 2.0, Agri-footprint, ELCD (European reference Life Cycle Database), US LCI Database, IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis, Japan), hay Social Hotspot Database (SHDB)...

Trong nghiên cứu này, cơ sở dữ liệu Ecoinvent v3.11 được lựa chọn vì có nhiều ưu điểm nổi bật. Thứ nhất, Ecoinvent là cơ sở dữ liệu LCA lớn nhất hiện nay, với phạm vi bao phủ đa lĩnh vực, từ năng lượng, hóa chất, xây dựng cho đến nông nghiệp

và xử lý chất thải, nhờ đó đáp ứng tốt các yêu cầu của một nghiên cứu có phạm vi hệ thống rộng như cấp nước đô thị. Thứ hai, dữ liệu trong Ecoinvent được xây dựng và cập nhật dựa trên các tiêu chuẩn quốc tế (ISO 14040/44), bảo đảm tính minh bạch, khả năng so sánh và độ tin cậy cao. Thứ ba, Ecoinvent có mức độ chi tiết cao, với các chuỗi cung ứng được mô hình hóa theo nhiều cấp, cho phép cung cấp tác động từ các đầu vào phức tạp trong toàn bộ vòng đời. Ngoài ra, cơ sở dữ liệu này đã được tích hợp trực tiếp trong phần mềm SimaPro, tạo thuận lợi trong quá trình mô phỏng và phân tích, giảm thiểu sai sót khi nhập liệu thủ công. Với những ưu điểm này, Ecoinvent v3.11 được đánh giá là cơ sở dữ liệu nền phù hợp nhất để phục vụ mục tiêu nghiên cứu và xây dựng các kịch bản đánh giá vòng đời cho hệ thống cấp nước đô thị.

2.2.5. Phương pháp đánh giá tác động của việc khai thác nước

Trong phạm vi nghiên cứu này, việc đánh giá tác động của hoạt động khai thác nước thô được thực hiện thông qua việc xây dựng và lượng hóa chỉ số WSI cho khu vực hạ lưu sông Vu Gia, là nơi cung cấp nguồn nước chính cho NMN Cầu Đỏ – NMN chủ lực cho TP. Đà Nẵng.

Chỉ số WSI được lựa chọn làm công cụ đánh giá vì có khả năng phản ánh mức độ khai thác có đề cập đến khả năng chịu tải sinh thái của dòng chảy, có tính đến yếu tố dòng chảy môi trường (EWR). Nghiên cứu sử dụng công thức tính chỉ số WSI do Smakhtin và cộng sự (2005) đề xuất, tích hợp chỉ số WSI trong kết quả của phương pháp LCA, đây cũng là khuyến nghị trong các nghiên cứu của UNEP và ISO 14046 [55].

Để phản ánh rõ hơn sự biến động theo thời vụ, đặc biệt trong mùa khô – thời kỳ nguồn nước chịu áp lực lớn nhất, chỉ số WSI được tính toán dựa trên giá trị trung bình của giai đoạn từ tháng 3 đến tháng 8. Cách tiếp cận này cho phép đánh giá mức độ căng thẳng nguồn nước trong điều kiện bất lợi nhất, từ đó phản ánh chính xác hơn tác động của hoạt động khai thác nước trong phương pháp LCA.

Tích hợp kết quả chỉ số WSI vào phương pháp LCA: Kết quả chỉ số WSI được sử dụng làm hệ số điều chỉnh trong tính toán Dấu chân khan hiếm nguồn nước - Water Scarcity Footprint (WSF) theo công thức:

$$WSF = WC \times WSI \text{ [56]}$$

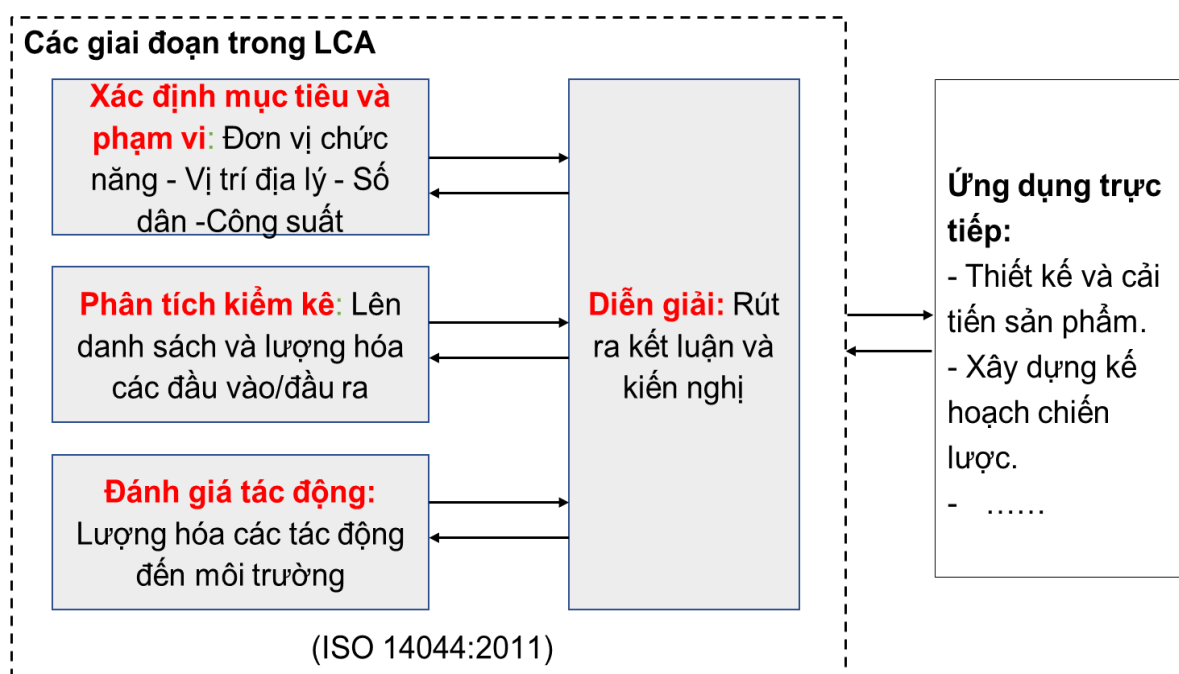
Lượng nước tiêu thụ được quy đổi theo điều kiện khan hiếm địa phương, cho phép lượng hóa rõ ràng hơn tác động của khai thác nước tại sông Vu Gia trong bối cảnh xâm nhập mặn, BĐKH và hạn hán mùa khô.

2.2.6. Phương pháp đánh giá vòng đời (Phương pháp LCA)

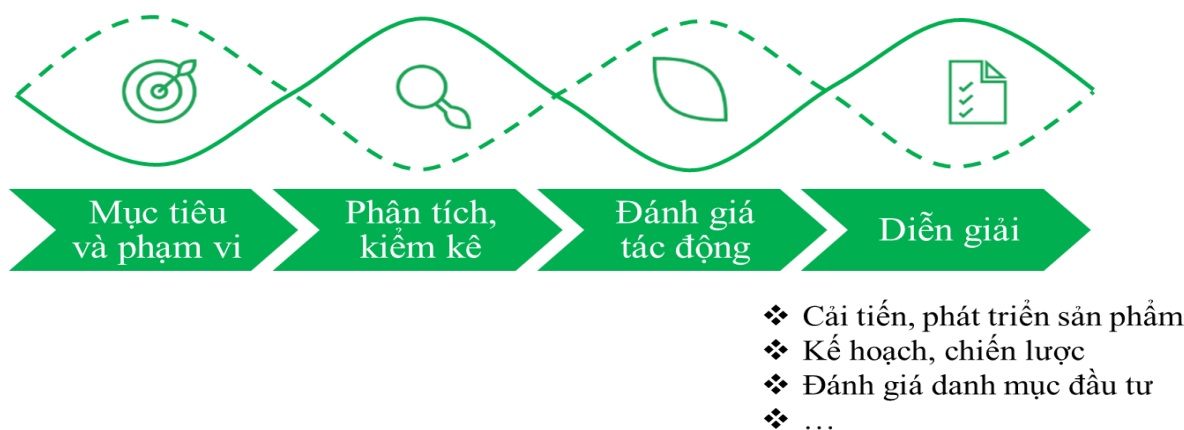
2.2.6.1. Phương pháp LCA: Cơ sở lý thuyết

Theo ISO 14044:2011 [64], phương pháp LCA là thu thập và đánh giá đầu vào, đầu ra và các tác động môi trường tiềm ẩn của một hệ thống sản phẩm trong suốt vòng đời của nó. Đây là một trong những kỹ thuật quản lý môi trường (ví dụ: đánh giá rủi ro môi trường, đánh giá kết quả thực hiện về môi trường, kiểm toán môi trường và đánh giá tác động môi trường).

Một trong những ưu điểm nổi bật của phương pháp LCA là khả năng xem xét toàn bộ dòng vật chất và năng lượng, bao gồm tất cả các phát thải và tiêu thụ tài nguyên trong suốt vòng đời của sản phẩm. Trong quá trình thực hiện phương pháp LCA, tất cả các quy trình từ khai thác nguyên liệu thô đều được đưa vào, quá trình sản xuất trên sản phẩm hoặc một phần của hệ thống cho đến giai đoạn sử dụng. Bước cuối cùng đó là sự kết thúc của vòng đời trong đó các sản phẩm hay hệ thống được xử lý hoặc trở lại một vòng đời mới bằng cách tái chế. Các quá trình vận chuyển nguyên liệu, hóa chất và sản phẩm, nếu phát sinh trong ranh giới nghiên cứu, đều được đưa vào kiểm kê vòng đời. Các giai đoạn của phương pháp LCA được thể hiện ở Hình 2.7 và Hình 2.8:



Hình 2.7. Các giai đoạn của phương pháp LCA



Hình 2.8. Các giai đoạn của phương pháp LCA [64]

Tổ chức Quốc tế về Tiêu chuẩn hóa (ISO) đã tiêu chuẩn hóa phương pháp LCA bao gồm 4 giai đoạn:

* Giai đoạn xác định mục tiêu và phạm vi: xác định được phạm vi của một LCA, kể cả ranh giới của hệ thống và mức độ chi tiết, tùy theo đối tượng và dự định áp dụng của nghiên cứu. Chiều sâu và bề rộng của một LCA có thể khác nhau đáng kể tùy theo mục đích của LCA cụ thể [64].

* Phân tích kiểm kê (LCI): là giai đoạn thứ hai của phương pháp LCA. Đó là kiểm kê dữ liệu đầu vào, đầu ra của hệ thống đang nghiên cứu, liên quan đến quy trình. Giai đoạn này liên quan đến thu thập các dữ liệu cần thiết nhằm thỏa mãn các mục tiêu của nghiên cứu đã định. Đây thường là một bước khá tốn thời gian vì người chuyên môn phương pháp LCA thường gặp phải rằng dữ liệu không phải lúc nào cũng dễ dàng tiếp cận được [65].

Đối với các quy trình có trong phạm vi nghiên cứu, tất cả đầu vào và đầu ra phải được thiết lập và định lượng. Nếu không thể thu được dữ liệu định lượng cho một số quy trình trong hệ thống thì phải sử dụng dữ liệu định tính. Tuy nhiên, đối với các nghiên cứu càng chi tiết, dữ liệu càng cụ thể ứng với đối tượng nghiên cứu càng được tin cậy. Trong một số trường hợp, nếu thiếu dữ liệu thì dữ liệu cụ thể của khu vực hoặc quốc gia cũng được coi là đủ tốt. Trên thực tế, hầu hết các nghiên cứu được công bố cho đến nay đều sử dụng kết hợp dữ liệu chung và dữ liệu cụ thể của đối tượng nơi thực hiện nghiên cứu.

* Đánh giá các tác động môi trường (LCIA): là giai đoạn thứ ba của phương pháp LCA và nhiệm vụ của LCIA là thiết lập mối quan hệ giữa các đầu vào và các sản phẩm đầu ra của giai đoạn kiểm kê vòng đời với các tác động đến môi trường [66]. Đối với giai đoạn này, tiêu chuẩn ISO 14042 [66] quy định ba yếu tố bắt buộc (lựa chọn các loại tác động, phân loại và mô tả đặc tính) và bốn yếu tố tùy chọn (chuẩn hóa, định giá, phân nhóm và phân tích chất lượng dữ liệu) phải được thực hiện:

- Việc lựa chọn các loại tác động phụ thuộc vào: (1) Mục tiêu và phạm vi nghiên cứu. Cụ thể: Các vấn đề cần quan tâm, các câu hỏi của nghiên cứu; Dựa vào ranh giới của nghiên cứu; (2) Đặc điểm của hệ thống, sản phẩm nghiên cứu. Sản phẩm đó liên quan đến loại nguyên nhiên liệu đầu vào như thế nào, các nguồn phát thải chính, các loại chất thải chính. (3) Các dữ liệu và công cụ sẵn có để thực hiện dự án.

- Phân loại là bước trong phương pháp LCA được yêu cầu rõ ràng trong các mục 5.3.2 của ISO 14040 và mục 4.4.2.2 của ISO 14044 – đây là hai tiêu chuẩn cốt lõi cho phương pháp LCA. Ngoài ra, bước phân loại cũng được hướng dẫn chi tiết trong mục 5.5.2 của ISO 14047 cho từng loại tác động [67]. Ở bước này, tất cả đầu vào và đầu ra từ danh sách kiểm kê được gán cho các loại tác động đã chọn (ví dụ CO₂ liên quan đến nóng lên toàn cầu, CFC liên quan đến nóng lên toàn cầu và suy thoái tầng ozon...).

- Bước mô tả đặc tính: Sau khi phân loại từng dòng phát thải vào các loại tác động (ví dụ: CO₂, CH₄ vào tác động liên quan đến BĐKH; SO₂, NO_x liên quan axit hóa), mô tả đặc tính là bước lượng hóa mức độ đóng góp của từng dòng phát thải vào chỉ số tác động đó.

Mô hình định lượng tác động: Hầu hết các nghiên cứu dựa trên nguyên tắc tính toán tải lượng phát thải thông qua hệ số phát thải (EF) và dữ liệu hoạt động:

Tải phát thải = Hệ số phát thải (EF) x Dữ liệu hoạt động (lượng vật liệu tạo ra khí thải).

Hệ số phát thải (EF) của một số nguồn được thể hiện ở Bảng 2.1.

Bảng 2.1. Hệ số phát thải của một số nguồn

Nguồn ảnh hưởng	Hệ số phát thải (EF)	Nguồn
Điện sử dụng	0,725 kgCO ₂ /kWh	Emission Factors of Jamali's Electricity [38].
Nhôm sunfat keo tụ (Al₂(SO₄)₃.14H₂O)	0,395 kg CO ₂ tương đương / kg Nhôm sunfat	Kyung, 2013 [68].
Polyacrylamide (PAM)	1,5 kg CO ₂ tương đương/kg Polyacrylamide	Karnaningroem và Anggraeni, 2021) [38].
Clo lỏng	1,08 kg CO ₂ tương đương /kg Clo lỏng	Karnaningroem và Anggraeni, 2021) [38].
BOD	0,48 kg CH ₄ /kg BOD	IPCC, 2006 [69].
COD	0,25 kg CH ₄ /kg COD	IPCC, 2006 [69].

Đặc biệt đối với tác động BĐKH, mô hình của IPCC được áp dụng phổ biến để định lượng khả năng hấp thụ bức xạ nhiệt của các KNK trong khung thời gian 100 năm (KNK100), đơn vị tính là kg CO₂ tđ. Công thức xác định tiềm năng nóng lên toàn cầu được tính toán cho mỗi KNK [69]:

$$KNK_i = \frac{\int_0^T a_i \cdot C_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot C_{CO_2}(t) dt}$$

a_i : hấp thụ bức xạ nhiệt (cường bức xạ tức thời) sau khi tăng của một đơn vị nồng độ khí i.

$C_i(t)$: Nồng độ khí i còn lại tại thời điểm t sau khi phát thải.

T: số năm thực hiện tích hợp chất khí (ví dụ 20 hoặc 100 năm)

a. Các cách tiếp cận trong bước LCIA:

- Với cách tiếp cận đến các loại tác động (midpoint): Phương pháp tiếp cận loại tác động LCIA còn được gọi là phương pháp hướng vào vấn đề môi trường đơn lẻ [70]; [71] hoặc phương pháp đánh giá tác động cổ điển [72], [73]. Loại tác động mô tả mức độ thay đổi của các yếu tố môi trường do hoạt động sản xuất gây ra, ví dụ: phát thải KNK (kg CO₂-tương đương), phú dưỡng nguồn nước (kg P-tương đương), axit hóa (kg SO₂-tương đương) hoặc tiêu thụ nước (m³). Phân tích ở cấp độ loại tác động giúp nhận diện các điểm nóng cụ thể trong hệ thống và thích hợp cho các nghiên cứu so sánh, tối ưu công nghệ.

- Với cách tiếp cận đến tác động thứ cấp hay điểm kết thúc của loại tác động (endpoint) còn được gọi là phương pháp tiếp cận theo hướng thiệt hại. Điểm kết thúc của loại tác động là phép đo mức độ thiệt hại lên các đối tượng cần bảo vệ: Sức khỏe con người, chất lượng môi trường tự nhiên, tài nguyên thiên nhiên và môi trường nhân tạo [73], [74]. Việc chuyển đổi loại tác động thành điểm kết thúc của loại tác động giúp đơn giản hóa việc giải thích kết quả LCIA. Kết quả điểm kết thúc của loại tác động thể hiện hậu quả tiềm tàng cuối cùng của tác động đó đối với môi trường và xã hội, hỗ trợ các nhà quản lý ra quyết định chiến lược. Tuy nhiên, kết quả điểm kết thúc của loại tác động thường có độ bất định cao hơn do phải sử dụng nhiều mô hình quy đổi.

Một số ví dụ loại tác động (midpoint) và điểm kết thúc của loại tác động (endpoint) được thể hiện ở Bảng 2.2.

Bảng 2.2. Ví dụ về loại tác động và điểm kết thúc của loại tác động [66]

Loại tác động	Lựa chọn cấp độ chỉ báo	
	Thông số chỉ thị tác động	Điểm kết thúc của loại tác động
BĐKH (nóng lên toàn cầu)	Bức xạ hồng ngoại, nhiệt độ, mực nước biển (CO ₂ tương đương - tđ)	Tuổi thọ con người, ảnh hưởng đến hệ sinh thái biển, thảm thực vật tự nhiên, rừng, nông nghiệp, công trình...
Suy thoái tầng ozon	Bức xạ UV-B (kg CFC11 tđ)	Da người, đa dạng sinh học đại dương, cây trồng
Axit hóa	Sự giải phóng proton, pH, (kg SO ₂ tđ)	Đa dạng sinh học rừng, sản xuất gỗ, các quần thể, vật liệu
Phú dưỡng	Nồng độ các chất dinh dưỡng đa lượng (kg N đương lượng/ kg PO ₄ ³⁻ tđ)	Đa dạng sinh học của các hệ sinh thái trên cạn và dưới nước
Độc tính đối với con người	Nồng độ các chất độc hại trong môi trường, sự tiếp xúc của con người	Các khía cạnh của sức khỏe con người (chức năng cơ quan, tuổi thọ con người, số ngày ốm đau)
Độc tính sinh thái	Nồng độ hoặc khả năng sinh học của độc chất trong môi trường	Quần thể loài thực vật và động vật

Ngoài ra, còn một số tác động liên quan đến đầu vào, ví dụ như cạn kiệt tài nguyên, suy giảm chất lượng tài nguyên...

b. Các phương pháp LCIA:

Hiện nay đã có nhiều phương pháp LCIA được phát triển và sử dụng ở các nghiên cứu khác nhau như:

- Phương pháp Chỉ số sinh thái 95- 99 (Eco-indicator 95-99) là một trong những phương pháp đầu tiên đề cập đến điểm kết thúc của loại tác động. Trong đó các tác động được phân loại thành 3 lĩnh vực đánh giá thiệt hại đó là sức khỏe con người,

chất lượng hệ sinh thái, cạn kiệt tài nguyên. Tuy nhiên, phương pháp này đã ít được sử dụng do giới hạn về độ cập nhật dữ liệu.

- Phương pháp CML (2001) là phương pháp truyền thống được sử dụng để ước tính các tác động môi trường do sản phẩm gây ra, để so sánh giữa các nghiên cứu. Phương pháp CML bao gồm 24 loại tác động môi trường khác nhau, như tiềm năng ấm lên toàn cầu, tiềm năng suy giảm tầng ozone, tiềm năng ô nhiễm không khí, tiềm năng sinh học đa dạng và tiềm năng sử dụng tài nguyên... Tuy nhiên, CML chưa bao gồm đầy đủ các tác động mới như khan hiếm nước hoặc sử dụng đất.

- TRACI (2.1): được phát triển bởi Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (US EPA), phù hợp cho các nghiên cứu tại Bắc Mỹ. Các hệ số đặc trưng trong TRACI phản ánh điều kiện môi trường Hoa Kỳ nên có thể không phù hợp khi áp dụng trực tiếp cho khu vực châu Á.

- Phương pháp EDIP một phương pháp LCIA sử dụng cách tiếp cận tác động trung gian. Các tiêu chuẩn EDIP và ISO 1404X đều dựa trên các hướng dẫn của các nhà khoa học Bắc Âu phát triển.

- Phương pháp ReCiPe là phương pháp LCIA thế hệ mới, kết hợp ưu điểm của CML (loại tác động) và Eco-indicator 95-99 (điểm kết thúc của loại tác động). ReCiPe cho phép lựa chọn cách tiếp cận dựa vào loại tác động - midpoint (18 loại tác động: BĐKH, axit hóa, phú dưỡng, độc tính, sử dụng đất, khan hiếm nước...) hoặc điểm kết thúc của loại tác động - endpoint (gộp các tác động thành ba lĩnh vực bảo vệ: sức khỏe con người, hệ sinh thái, tài nguyên). Một số ưu điểm của phương pháp ReCiPe so với các phương pháp khác bao gồm: Tập hợp rộng nhất các loại tác động; Nếu có thể, nó sử dụng các cơ chế tác động có phạm vi toàn cầu. Đây là phương pháp được sử dụng rộng rãi nhất hiện nay nhờ tính toàn diện, cập nhật liên tục và khả năng so sánh kịch bản rõ ràng.

Các tác động môi trường điển hình là: Tiêu thụ năng lượng hóa thạch; Tiêu thụ khoáng sản; Tiêu thụ tài nguyên nước; BĐKH; Tàn phá tầng ozone; Tạo ra axit; Tạo ra chất ô nhiễm hữu cơ bay hơi (VOC); Tạo ra chất rắn; Tạo ra chất phóng xạ.

Các tiêu chí khoa học khi lựa chọn phương pháp LCIA: Tính đầy đủ, đa dạng về phạm vi nghiên cứu; Tính phù hợp với môi trường; Tính khoa học vững chắc và chắc chắn; Đầy đủ tài liệu hướng dẫn, rõ ràng; Khả năng áp dụng.

* Diễn giải kết quả là giai đoạn cuối của phương pháp đánh giá vòng đời (LCA), nhằm phân tích, tổng hợp và đánh giá mức độ tin cậy của các kết quả thu được để phục vụ mục tiêu nghiên cứu và hỗ trợ ra quyết định. Trong giai đoạn này, kết quả đánh giá tác

động được xem xét thông qua các bước như kiểm tra tính đầy đủ và nhất quán của dữ liệu, phân tích độ nhạy, đánh giá độ bất định và so sánh giữa các phương án nghiên cứu.

Phương pháp LCA ban đầu được phát triển để đánh giá tác động môi trường của sản phẩm, sau đó được tìm thấy sử dụng trên các dịch vụ, hệ thống cụ thể. Hiện nay không khó để tìm thấy một nghiên cứu LCA trên một sản phẩm hay dịch vụ từ ngành thực phẩm, sản xuất điện tử, phương tiện,...được nghiên cứu bởi các tác giả từ khắp các quốc gia trên thế giới.

2.2.6.2. Phương pháp LCA trên hệ thống sản xuất nước sạch

Trên thế giới, phương pháp LCA ngày càng được sử dụng rộng rãi để đánh giá các tác động môi trường của công nghệ nước trong hơn 20 năm qua [44]. Sử dụng phương pháp LCA để đánh giá trên hệ thống sản xuất nước sạch theo hướng dẫn của bộ Tiêu chuẩn ISO 14040/14044. Gồm 4 bước cơ bản:

(1) Mục tiêu và phạm vi nghiên cứu cho hệ thống cấp nước

Xác định mục tiêu nghiên cứu được thực hiện trên hệ thống cấp nước. Đơn vị chức năng được lựa chọn bảo đảm khả năng so sánh nhất quán giữa các kịch bản, công nghệ cấp nước, phù hợp với mục tiêu, đối tượng và phạm vi của nghiên cứu. Ranh giới của nghiên cứu được thiết lập theo hướng tiếp cận “từ nguồn đến điểm cuối” phù hợp với mục tiêu nghiên cứu và đối tượng nghiên cứu.

(2) Giai đoạn kiểm kê vòng đời (LCI)

Giai đoạn phân tích kiểm kê bao gồm giai đoạn thu thập, lượng hóa đầu vào, đầu ra nằm trong ranh giới và phù hợp với mục tiêu nghiên cứu. Các đầu vào tính trong hệ thống gồm: điện năng, nước, hóa chất, nhiên liệu (nếu có), và vật liệu tiêu hao. Đầu ra gồm: nước sạch (sản phẩm chính), phát thải không khí (CO_2 , NO_x ...), nước thải, và chất thải rắn (bùn xử lý). Dữ liệu cơ sở nền: Cơ sở dữ liệu Ecoinvent phiên bản v3.11.

(3) Đánh giá tác động vòng đời (LCIA)

LCIA của sản phẩm nhằm định lượng, đánh giá các tác động tiềm ẩn của hệ thống sản phẩm lên môi trường. Việc lựa chọn phương pháp LCIA là một bước quan trọng, ảnh hưởng trực tiếp đến độ tin cậy và khả năng diễn giải của kết quả nghiên cứu. Một số phương pháp LCIA sử dụng phổ biến khi đánh giá hệ thống nước hiện nay bao gồm: ReCiPe (2008/2016); CML (2001); TRACI (2.1); Eco-indicator 99...

Trong nghiên cứu này, ReCiPe 2016 được lựa chọn vì:

- Cân bằng giữa loại tác động và điểm kết thúc của loại tác động: Loại tác động (18 loại tác động như KNK, phú dưỡng, axit hóa, độc tính...) rất phù hợp để phân tích tác động cụ thể của nước (ví dụ: phú dưỡng do N/P, độc tính nước do kim loại). Điểm

kết thúc của loại tác động (tác động đến con người, tác động đến hệ sinh thái, tài nguyên) giúp tổng hợp ảnh hưởng toàn cục để so sánh kịch bản. Các chỉ số tác động được thể hiện ở Bảng 2.3 và Hình 2.9.

- Phổ biến và được công nhận rộng rãi: ReCiPe 2016 là một trong những phương pháp được sử dụng nhiều nhất trong nghiên cứu quốc tế về nước, để so sánh kết quả với các nghiên cứu khác. Các nghiên cứu sử dụng phương pháp LCA liên quan đến xử lý nước thải công nghiệp thường sử dụng ReCiPe (53%) và CML (33,3%) làm phương pháp LCIA được ưu tiên, trong khi các nghiên cứu LCA xử lý nước đô thị áp dụng ReCiPe (35,3%) [45].

- Phương pháp ReCiPe 2016 đặc biệt phù hợp với hệ thống cấp nước vì chứa đựng những tác động liên quan như: Phát thải carbon từ điện, hóa chất; Phú dưỡng (N, P) quan trọng trong nước thải và hệ thống sông hồ; Độc tính của con người/ Hệ sinh thái; Giúp đánh giá tác động của hóa chất xử lý (clo, PAC, polymer); Ảnh hưởng đến nguồn nước;...

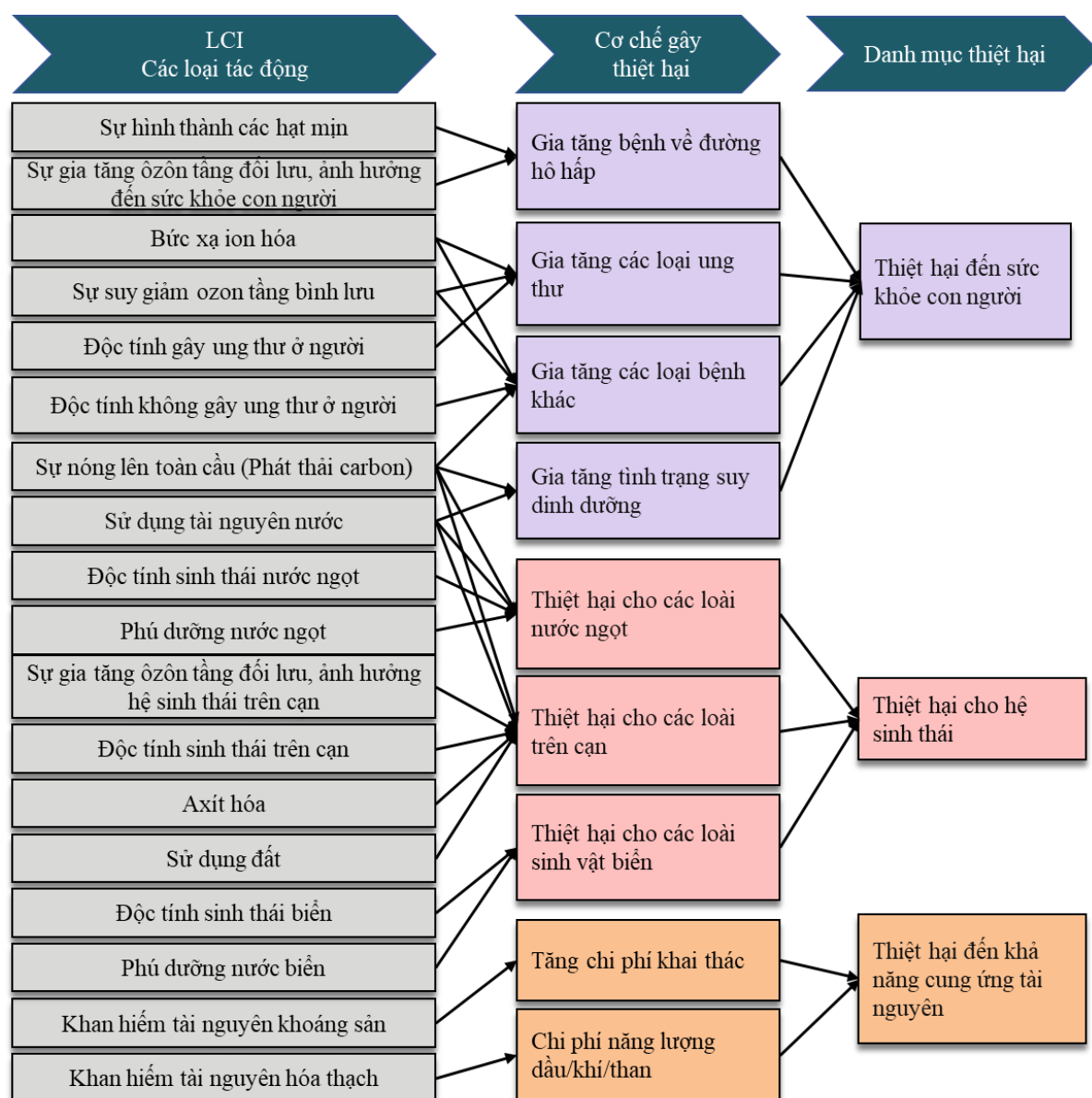
- Khả năng kết hợp với SimaPro: ReCiPe đã được tích hợp sẵn trong SimaPro, dễ triển khai và trực quan hóa.

Việc lựa chọn ReCiPe làm phương pháp LCIA chính sẽ bảo đảm tính toàn diện, minh bạch và khả năng so sánh kết quả trong các kịch bản phân tích, đồng thời hỗ trợ mục tiêu xây dựng hệ thống ra quyết định dựa trên tiêu chí môi trường – kinh tế – xã hội.

Bảng 2.3. Các loại tác động (midpoint) trong ReCiPe 2016

STT	Loại tác động	Đơn vị
1	Sự nóng lên toàn cầu (Phát thải carbon)	kg CO ₂ tđ
2	Sự suy giảm ôzôn tầng bình lưu	kg CFC-11 tđ
3	Bức xạ ion hóa	kBq CO-60 tđ
4	Sự gia tăng ôzôn tầng đối lưu, ảnh hưởng đến sức khỏe con người	kg NO _x tđ
5	Sự hình thành các hạt mịn	kg PM2.5 tđ
6	Sự gia tăng ôzôn tầng đối lưu, ảnh hưởng đến hệ sinh thái trên cạn	kg NO _x tđ

7	Axit hóa	kg SO ₂ tđ
8	Phú dưỡng nước ngọt	kg P tđ
9	Sự phú dưỡng biển	kg N tđ
10	Độc tính sinh thái trên cạn	kg 1,4-DCB
11	Độc tính sinh thái nước ngọt	kg 1,4-DCB
12	Độc tính sinh thái biển	kg 1,4-DCB
13	Độc tính gây ung thư ở người	kg 1,4-DCB
14	Độc tính không gây ung thư ở người	kg 1,4-DCB
15	Sử dụng đất	m ² ·năm đất tđ
16	Khan hiếm tài nguyên khoáng sản	kg Cu tđ
17	Khan hiếm tài nguyên hóa thạch	kg dầu tđ
18	Sử dụng tài nguyên nước	m ³



Hình 2.9. Sơ đồ tổng quan về các loại tác động được đề cập trong phương pháp luận ReCiPe 2016 và mối quan hệ của chúng với các lĩnh vực bảo vệ.

Mặc dù phương pháp ReCiPe 2016 cung cấp 18 loại tác động ở cấp độ điểm giữa (midpoint), tuy nhiên, để bảo đảm tính tập trung và phản ánh sát thực nhất các yếu tố mang tính đặc trưng cũng như thách thức môi trường của hệ thống cấp nước TP. Đà Nẵng, luận án tập trung phân tích 06 loại tác động trọng yếu: Phát thải carbon; Axit hóa; Phú dưỡng nước ngọt; Độc tính sinh thái nước ngọt; Khan hiếm tài nguyên hóa thạch; Sử dụng tài nguyên nước.

Đây là các tác động có độ nhạy cao với quá trình tiêu thụ điện năng và hóa chất trong xử lý nước đô thị. Các lập luận chi tiết về căn cứ lựa chọn, thông số kiểm kê và quy trình định lượng cho 06 loại tác động này sẽ được trình bày cụ thể trong thiết lập mô hình tại Chương 3.

(4) Diễn giải vòng đời

Diễn giải là giai đoạn, trong đó kết quả của một LCA hoặc LCIA, hoặc cả hai được tổng hòa và xem xét như là cơ sở để kết luận, kiến nghị và ra quyết định cho phù hợp với mục tiêu và phạm vi xác định.

Đối với nghiên cứu này, nhằm phục vụ việc so sánh các kịch bản cấp nước, các kết quả đánh giá tác động sau bước đặc trưng hóa được thực hiện thêm bước chuẩn hóa. Chuẩn hóa là quá trình quy đổi các giá trị tác động môi trường về cùng một hệ quy chiếu thông qua việc so sánh với một giá trị tham chiếu, thường là tổng tác động môi trường bình quân đầu người hoặc tổng tác động của một khu vực trong một năm. Nhờ đó, các loại tác động có đơn vị vật lý khác nhau (như kg CO₂ tđ, kg SO₂ tđ, m³ nước tđ, kg dầu tđ...) được chuyển đổi thành các giá trị không thứ nguyên, cho phép đánh giá mức độ đóng góp tương đối của từng hạng mục và so sánh trực tiếp giữa các loại tác động môi trường.

Hiện nay, Việt Nam chưa xây dựng bộ hệ số chuẩn hóa riêng cho đánh giá vòng đời. Vì vậy, nghiên cứu sử dụng bộ hệ số chuẩn hóa khu vực được tích hợp trong phương pháp ReCiPe 2016 của phần mềm SimaPro, phù hợp với thông lệ quốc tế và được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu LCA. Việc áp dụng cùng một bộ hệ số chuẩn hóa cho tất cả các kịch bản bảo đảm tính nhất quán của quá trình đánh giá và cho phép so sánh khách quan mức độ tác động môi trường giữa các phương án cấp nước được xem xét trong luận án.

2.3. Lý thuyết tích hợp WSI và phương pháp LCA

Phương pháp LCA là phương pháp được sử dụng rộng rãi nhằm lượng hóa các tác động môi trường của sản phẩm hoặc hệ thống trong toàn bộ vòng đời. Đối với hệ thống cấp nước, LCA cho phép xác định các tác động phát sinh từ quá trình khai thác nước thô, xử lý, vận chuyển và phân phối nước sạch thông qua các chỉ tiêu như phát thải. Tuy nhiên, trong các mô hình LCA truyền thống, lượng nước khai thác thường được đánh giá chủ yếu theo khối lượng nước tiêu thụ hoặc các hệ số đặc trưng hóa mặc định, chưa phản ánh đầy đủ sự khác biệt về điều kiện tài nguyên nước giữa các lưu vực. Do đó, cùng một lượng nước khai thác nhưng thực hiện tại các khu vực có mức độ khan hiếm khác nhau có thể tạo ra các tác động môi trường khác nhau.

Để khắc phục hạn chế này, nhiều nghiên cứu gần đây đã đề xuất sử dụng chỉ số WSI như một hệ số đặc trưng hóa phản ánh điều kiện khan hiếm nước theo không gian và thời gian. Khác với lượng nước khai thác đơn thuần, WSI biểu thị mức độ căng thẳng của nguồn nước thông qua mối quan hệ giữa nhu cầu khai thác và khả năng cung cấp của lưu vực. Vì vậy, chỉ số này không chỉ phản ánh quy mô khai thác mà còn thể hiện khả năng đáp ứng của nguồn nước đối với các hoạt động sử dụng nước trong điều kiện cụ thể của từng địa phương.

Một điểm cần nhấn mạnh là WSI không chỉ phản ánh sự suy giảm về lượng nước mà còn gián tiếp phản ánh mức độ tổn thương của chất lượng nguồn nước do hoạt động khai thác. Khi tỷ lệ khai thác tăng lên trong điều kiện dòng chảy suy giảm, lượng nước còn lại trong lưu vực giảm đáng kể, làm thay đổi chế độ thủy động lực và các quá trình sinh địa hóa của lưu vực. Hệ quả là khả năng pha loãng các chất ô nhiễm giảm, quá trình tự làm sạch của dòng sông bị suy yếu, đồng thời nguy cơ xâm nhập mặn tại khu vực hạ lưu gia tăng, đặc biệt đối với các cửa thu ven biển. Như vậy, sự gia tăng WSI không chỉ phản ánh áp lực lên tài nguyên nước mà còn hàm ý sự suy giảm chất lượng nguồn nước có thể xảy ra trong quá trình khai thác.

Đối với hệ thống cấp nước đô thị, mối quan hệ giữa lượng nước khai thác và chất lượng nguồn nước còn có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Khi chất lượng nước thô suy giảm do xâm nhập mặn hoặc gia tăng nồng độ các chất ô nhiễm, hệ thống xử lý phải tăng cường sử dụng hóa chất, tăng tiêu thụ điện năng cho bơm chuyển nguồn, vận hành các công trình phòng chống xâm nhập mặn hoặc khai thác từ các nguồn thay thế. Những thay đổi này làm gia tăng các tác động môi trường trong toàn bộ chuỗi khai thác và sản xuất nước sạch. Do đó, tác động của hoạt động khai thác nước không chỉ giới hạn ở việc tiêu hao tài nguyên nước mà còn lan truyền đến các giai đoạn tiếp theo trong vòng đời của hệ thống cấp nước.

Từ góc độ phương pháp luận, việc tích hợp WSI vào LCA không chỉ phản ánh lượng nước tiêu thụ mà còn thể hiện được mức độ nhạy cảm của nguồn nước tại khu vực nghiên cứu, góp phần nâng cao tính đại diện và khả năng ứng dụng của phương pháp trong điều kiện tài nguyên nước biến động.

Việc tích hợp giữa WSI và LCA vì vậy không làm thay đổi nguyên lý của phương pháp LCA mà bổ sung yếu tố đặc trưng hóa theo điều kiện tài nguyên nước địa phương, giúp lượng hóa đồng thời hai khía cạnh của tính bền vững: Các tác động môi trường phát sinh trong toàn bộ vòng đời của hệ thống cấp nước; Mức độ căng thẳng của nguồn nước tại khu vực khai thác. Đây là cơ sở lý thuyết để xây dựng mô hình tích hợp WSI - LCA được trình bày và kiểm chứng trong Chương 3 của luận án.

2.4. Phân tích độ bất định và giới hạn nghiên cứu

Luận án thiết lập các cơ chế kiểm soát sai số nhằm bảo vệ tính tin cậy của kết luận khoa học:

- Độ tin cậy của mô phỏng thủy văn: Mô hình MIKE SHE phụ thuộc vào chất lượng dữ liệu đầu vào. Luận án giảm thiểu rủi ro này bằng cách kiểm định và hiệu chỉnh mô hình với chuỗi số liệu thực tế tại các trạm thủy văn trong lưu vực Vu Gia - Thu Bồn xuyên suốt 37 năm (1987-2023).

- Sự tương thích của dữ liệu môi trường: Việc sử dụng dữ liệu Ecoinvent có thể gây sai lệch khi áp dụng cho Việt Nam. Nghiên cứu thực hiện hiệu chỉnh cấu trúc điện (tỷ trọng nhiệt điện, thủy điện, năng lượng tái tạo) theo dữ liệu thực tế năm 2023 của lưới điện Việt Nam để bảo đảm hệ số phát thải sát với thực tế sản xuất.

- Kiểm soát sai số tích lũy: Để bảo đảm các kết luận về kịch bản tối ưu (như S4) có ý nghĩa thống kê, luận án vận dụng mô phỏng Monte Carlo (10.000 lần lặp) và phân tích độ nhạy đối với các biến đầu vào trọng yếu (điện năng, hóa chất, WSI).

Phân phân tích độ tin cậy dữ liệu, kiểm định của mô hình được thể hiện chi tiết ở mục 3.3.

2.5. *Tiểu kết chương 2*

Hệ thống phương pháp nghiên cứu của luận án được thiết lập trên sự phối hợp chặt chẽ giữa mô phỏng thủy văn phân bố và đánh giá vòng đời. Trên cơ sở tổng hợp và phân tích các công trình trước đây, luận án lựa chọn ba nhóm phương pháp chính: (i) phương pháp thống kê, kế thừa và hồi cứu tài liệu nhằm xây dựng khung lý thuyết và nhận diện khoảng trống nghiên cứu; (ii) mô phỏng thủy văn phân bố để lượng hóa các thành phần dòng chảy, thiết lập dòng chảy môi trường và xác định các tham số phục vụ tính toán chỉ số WSI; và (iii) phương pháp LCA triển khai trên nền tảng SimaPro với cơ sở dữ liệu Ecoinvent v3.11 và phương pháp đặc tính hóa ReCiPe 2016 nhằm lượng hóa toàn diện các tác động môi trường của hệ thống cấp nước.

Việc kết hợp mô hình thủy văn và LCA, cùng với tích hợp chỉ số WSI như một hệ số đặc trưng hóa địa phương, tạo nên một khung phân tích nhất quán. Các phương pháp hỗ trợ như khảo sát thực địa, thu thập – hiệu chỉnh dữ liệu, phân tích độ nhạy và mô phỏng bất định góp phần làm tăng độ tin cậy của kết quả. Như vậy, hệ thống phương pháp được lựa chọn là đầy đủ, phù hợp và có năng lực khoa học cần thiết để giải quyết toàn diện các mục tiêu nghiên cứu, tạo nền tảng vững chắc cho việc thiết lập mô hình tích hợp trình bày tại Chương 3 và thực nghiệm so sánh các kịch bản quy hoạch tại Chương 4.

CHƯƠNG 3. THIẾT LẬP VÀ KIỂM ĐỊNH MÔ HÌNH TÍCH HỢP CHỈ SỐ CĂNG THẲNG NGUỒN NƯỚC VÀ PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ VÒNG ĐỜI

Trên cơ sở các đối tượng, phạm vi nghiên cứu và hệ thống phương pháp đã được trình bày trong Chương 2, việc lượng hóa đầy đủ các yếu tố thủy văn, nhu cầu khai thác, đặc điểm vận hành hệ thống cấp nước cũng như bộ dữ liệu phục vụ phân tích vòng đời (LCA) đã hình thành nền tảng khoa học và thực tiễn cho quá trình xây dựng mô hình tích hợp.

Chương này tập trung quá trình xây dựng và kiểm định mô hình tích hợp WSI - LCA, sản phẩm khoa học cốt lõi của luận án. Thông qua việc hiệu chỉnh các hệ số đặc trưng địa phương và thực nghiệm kiểm định độ nhạy, chương này chứng minh tính đúng đắn của mô hình trong việc định lượng hóa sự đánh đổi giữa an ninh tài nguyên và gánh nặng môi trường.

3.1. Thiết lập mô hình tích hợp chỉ số căng thẳng nguồn nước và phương pháp đánh giá vòng đời

Khung đánh giá hiệu quả của hệ thống cấp nước sử dụng mô hình tích hợp WSI - LCA được xây dựng dựa trên các cơ sở khoa học và thực tiễn như sau:

3.1.1. Cơ sở thực tiễn xây dựng mô hình tích hợp WSI - LCA

Áp lực khan hiếm nước ở đô thị Việt Nam: Nhiều TP lớn như Hà Nội, Hồ Chí Minh, Đà Nẵng... đang đối mặt với thách thức từ đô thị hóa nhanh, BĐKH, ô nhiễm và xâm nhập mặn. Các tác động này không chỉ ảnh hưởng đến nguồn cung cấp nước mà còn làm tăng chi phí và rủi ro trong vận hành hệ thống cấp nước.

Cần có các đánh giá kết hợp để hỗ trợ ra quyết định: Các nhà quản lý cần công cụ định lượng để so sánh cùng lúc nhiều tác động môi trường (khan hiếm nước, phát thải KNK, tiêu thụ điện năng...), làm cơ sở lựa chọn được hệ thống cấp nước tối ưu cho các đô thị. Mô hình tích hợp chỉ số WSI và phương pháp LCA cho phép so sánh và cân nhắc giữa các mục tiêu môi trường – kinh tế – xã hội.

Khả năng áp dụng linh hoạt: Chỉ số WSI có thể điều chỉnh theo dữ liệu địa phương, nên mô hình này có thể áp dụng cho nhiều đô thị và vùng lãnh thổ khác nhau. Điều này giúp mô hình hóa các kịch bản hay các quy hoạch cấp nước phù hợp với điều kiện thực tế.

Hiện chưa có nghiên cứu công bố nào tại Việt Nam áp dụng trực tiếp việc tích hợp chỉ số WSI vào phương pháp LCA để đánh giá hệ thống cấp nước đô thị. Mô hình này cung cấp một cách tiếp cận mới, góp phần nâng cao chất lượng quy hoạch và quản lý tài nguyên nước.

Định hướng mở rộng: Trong tương lai, mô hình có thể tích hợp thêm các yếu tố BĐKH, chất lượng nước, hay rủi ro thiên tai, nhằm xây dựng các chiến lược thích ứng và giảm thiểu tác động môi trường hiệu quả hơn.

3.1.2. Cơ sở khoa học xây dựng mô hình tích hợp WSI - LCA

LCA – công cụ chuẩn để đánh giá toàn diện tác động môi trường: Theo tiêu chuẩn ISO 14040/14044, phương pháp LCA là phương pháp được quốc tế công nhận để phân tích toàn diện tác động môi trường của sản phẩm, dịch vụ hoặc hệ thống – bao gồm hệ thống cấp nước đô thị. Trong các phương pháp LCIA hiện đại (ví dụ ReCiPe 2016), tác động “khan hiếm nước” đã được định nghĩa nhưng chưa phản ánh đủ điều kiện địa phương, đặc biệt trong bối cảnh khan hiếm nước ngày càng gia tăng. Việc tích hợp chỉ số WSI giúp điều chỉnh chỉ số này phù hợp hơn với thực tế từng khu vực. Nghiên cứu đề xuất tích hợp chỉ số WSI vào phương pháp LCA như một loại tác động môi trường độc lập, tương tự như phát thải carbon hay axit hóa...

WSI – chỉ số định lượng mức độ căng thẳng nguồn nước: chỉ số WSI đã được nhiều tổ chức quốc tế (như WRI – Aqueduct) và các nghiên cứu khoa học sử dụng để đo lường mức độ khai thác nước so với khả năng cung cấp. Công thức Smakhtin và cộng sự (2005) cho phép xét đến cả dòng chảy môi trường (EWR), phản ánh chính xác hơn tình trạng khan hiếm.

Tính tương thích phương pháp: Phương pháp LCA đánh giá tác động trên toàn vòng đời của các sản phẩm tham gia, trong khi chỉ số WSI mô tả áp lực nước tại một vị trí, thời điểm cụ thể. Khi tích hợp, chỉ số WSI đóng vai trò như hệ số đặc trưng (characterization factor - CF), tương tự việc quy đổi CH₄ sang CO₂ tđ trong đánh giá BĐKH, nhằm quy đổi mỗi mét khối nước tiêu thụ thành mét khối nước có tính đến mức độ khan hiếm.

Khai thác các công cụ và dữ liệu chuẩn: Mô hình tích hợp sử dụng mô hình thủy văn MIKE SHE để tính toán WR và EWR, kết hợp phần mềm SimaPro (LCA) với cơ sở dữ liệu Ecoinvent v3.11 và phương pháp ReCiPe 2016. Nhờ đó, có thể phản ánh cả các tác động (CO₂ tđ, độc tính, tiêu thụ nước) và có tính đến điểm kết thúc của loại tác động (DALY, species.yr, tài nguyên).

Đóng góp mới về phương pháp: Thay vì dùng chỉ số WSI như chỉ số riêng biệt bên ngoài, mô hình này đưa trực tiếp chỉ số WSI vào tuyến tác động của phương pháp LCA, giúp lượng hóa tác động khan hiếm nước theo điều kiện thực tế từng lưu vực.

3.1.3. Thiết lập mô hình tích hợp WSI - LCA

1. Mục tiêu của mô hình tích hợp

Phát triển một mô hình tích hợp WSI - LCA, trong đó chỉ số WSI được sử dụng như một chỉ số đầu vào để định lượng mức độ khan hiếm nước, bổ sung cho các đánh giá tác động môi trường trong phương pháp LCA, cung cấp một cái nhìn toàn diện hơn

về tính bền vững của hệ thống cấp nước. Như vậy, mô hình tích hợp không chỉ xem xét các tác động môi trường truyền thống mà còn phản ánh sự khan hiếm nguồn nước tại từng khu vực cụ thể.

2. Quy trình đánh giá tích hợp chỉ số WSI và phương pháp LCA trong đánh giá hệ thống cấp nước

Dưới đây là mô hình tích hợp theo các giai đoạn chính của phương pháp LCA, với yếu tố bổ sung là chỉ số WSI:

Giai đoạn 1: Xác định mục tiêu và phạm vi (Goal and Scope Definition)

- Xác định mục tiêu: Làm rõ mục đích của nghiên cứu (ví dụ: đánh giá hiện trạng của hệ thống khai thác và xử lý nước; so sánh hai hệ thống cấp nước; đánh giá hiệu quả môi trường của một công nghệ xử lý mới...).

- Xác định đơn vị chức năng (Functional Unit): Đây là đơn vị đo lường cơ sở cho tất cả các đánh giá. Ví dụ: "cung cấp 1 m³ nước sạch đạt tiêu chuẩn đến một hộ gia đình đô thị trong một năm."

- Xác định ranh giới hệ thống (System Boundaries): Liệt kê tất cả các giai đoạn trong vòng đời của hệ thống cấp nước được đưa vào đánh giá.

- + Giai đoạn đầu vào: Khai thác, thu gom nước thô.

- + Giai đoạn xử lý: Tiêu thụ điện năng, hóa chất, cơ sở hạ tầng.

Giai đoạn 2: Tính toán chỉ số WSI

- * Nguồn dữ liệu:

- Dữ liệu thủy văn: Dữ liệu mưa, bản đồ sử dụng đất, địa chất, mực nước ngầm.

- Nhu cầu nước: Sử dụng nước cho sinh hoạt, công nghiệp, nông nghiệp....

- Nước duy trì hệ sinh thái: Lấy theo quy định dòng chảy môi trường/ Theo nghiên cứu của Smakhtin.

- * Công cụ hỗ trợ: Phần mềm MIKE SHE, WEAP...

- * Tính toán chỉ số WSI: tính toán chỉ số WSI cho lưu vực theo công thức Smakhtin và cộng sự [15]:

$$WSI = \frac{WU}{WR - EWR}$$

Trong đó:

- WU: Tổng lượng nước khai thác, sử dụng (m³/tháng),

- WR: Tổng lượng nước về (m³/tháng),

- EWR: Dòng chảy môi trường (m³/tháng).

Kết quả chỉ số WSI được phân loại theo các ngưỡng đánh giá:

- + $WSI > 1$: Khan hiếm về nguồn nước thô, khai thác quá mức,
- + $0,6 \leq WSI < 1$: Bị khai thác ở mức cao, lưu vực căng thẳng,
- + $0,3 \leq WSI < 0,6$: Bị khai thác ở mức bình thường,
- + $WSI < 0,3$: Khai thác ở mức nhẹ.

Tại đây, việc thu thập thêm dữ liệu vị trí địa lý cho từng nguồn nước là rất quan trọng để áp dụng cho tính toán chỉ số WSI.

Giai đoạn 3: Kiểm kê Vòng đời (Life Cycle Inventory - LCI)

Đây là giai đoạn thu thập dữ liệu chi tiết về tất cả các đầu vào và đầu ra của hệ thống trong ranh giới đã xác định.

Dữ liệu năng lượng: Lượng điện, nhiên liệu tiêu thụ cho việc dẫn nước thô về, bơm nước cho khu xử lý, xử lý và bơm nước ra mạng lưới cấp nước.

Dữ liệu hóa chất: Hóa chất sử dụng cho quá trình khử trùng, keo tụ, điều chỉnh pH của nước.

Dữ liệu nước: Lượng nước thô được khai thác đưa vào dây chuyền xử lý và lượng nước sạch được phân phối đến người dùng.

Dữ liệu phát thải: Lượng khí thải nhà kính (CO_2 , CH_4 , N_2O), bùn thải...

Giai đoạn 4: Đánh giá tác động vòng đời (Life Cycle Impact Assessment - LCIA) có tích hợp chỉ số WSI

Giai đoạn này chuyển đổi dữ liệu LCI thành các tác động môi trường tiềm tàng. Trong nghiên cứu này, phương pháp ReCiPe 2016 được sử dụng để lượng hóa các tác động và điểm kết thúc của tác động, trong đó giai đoạn tác động đóng vai trò trung gian để quy đổi các dòng phát thải và tiêu thụ tài nguyên về các nhóm tác động đặc trưng. Phương pháp LCA tiêu chuẩn:

- Phát thải carbon: Lượng KNK.
- Tiêu thụ năng lượng: Năng lượng sơ cấp cần thiết để vận hành hệ thống.
- Ô nhiễm nước: Gây phú dưỡng nguồn nước, độc tính sinh thái.

Công cụ hỗ trợ: Phần mềm SimaPro; GaBi; OpenLCA ...; phương pháp LCIA ReCiPe; CML; TRACI; Eco-indicator 99 ...; bộ dữ liệu Ecoinvent; Agri-footprint; ELCD; GaBi Database ...

Tích hợp chỉ số WSI vào phương pháp LCA để đánh giá tác động khan hiếm nước:

Trong khi các phương pháp LCIA tiêu chuẩn thường xem “tiêu thụ nước” chỉ là một dòng đầu vào vật chất, chưa phản ánh được bối cảnh khan hiếm nước theo không gian và thời gian cụ thể, nghiên cứu này bổ sung chỉ số WSI để điều chỉnh kết quả đánh giá. Việc tích hợp này được thực hiện bằng cách đưa chỉ số WSI vào công thức tính dấu

chân khan hiếm nguồn nước (Water Scarcity Footprint – WSF), đóng vai trò như một hệ số đặc trưng (characterization factor) trong LCIA. Các bước tính WSF như sau:

- Xác định lượng nước thô cần thiết (m^3) để sản xuất ra 1 m^3 nước sạch (đơn vị chức năng của nghiên cứu) từ mỗi lưu vực.

- Quy đổi ra dấu chân khan hiếm nguồn nước (WSF):

$$WSF = WC \times WSI [56]$$

Trong đó:

- WSF: Water Scarcity Footprint – Dấu chân khan hiếm nguồn nước (chỉ báo tác động môi trường liên quan đến nước, đơn vị: m^3 nước quy đổi – mét khối nước quy đổi theo khan hiếm trên một mét khối nước sản xuất),

- WC: Water Consumption (lượng nước tiêu thụ, đơn vị: m^3),

- WSI: Water Stress Index (chỉ số WSI tại địa phương).

Việc nhân chỉ số WSI với lượng nước tiêu thụ giúp quy đổi mỗi mét khối nước sử dụng thành một “ m^3 nước quy đổi theo khan hiếm”, phản ánh được mức độ áp lực thực tế của việc khai thác nước trong điều kiện cụ thể của từng lưu vực. Hệ số WSF sau đó được tích hợp trực tiếp vào mô hình LCIA để so sánh các kịch bản cấp nước khác nhau.

Cách tiếp cận này không chỉ mở rộng phạm vi đánh giá của phương pháp LCA tiêu chuẩn, mà còn giúp kết nối rõ ràng hơn giữa tiêu thụ tài nguyên và rủi ro khan hiếm nước trong bối cảnh địa phương, đặc biệt hữu ích cho các đô thị ven biển như TP. Đà Nẵng, nơi chịu ảnh hưởng mạnh của xâm nhập mặn và BĐKH.

Giai đoạn 5: Diễn giải kết quả

Đây là giai đoạn phân tích và trình bày kết quả từ việc đánh giá tích hợp.

- So sánh các chỉ số tác động: So sánh tác động tổng thể (bao gồm cả khan hiếm nước và các tác động khác) giữa các kịch bản khác nhau.

- Xác định các điểm nóng: Chỉ ra những khía cạnh nào của công đoạn khai thác và sản xuất gây ra tác động môi trường lớn nhất.

- So sánh và lựa chọn kịch bản.

- Đề xuất giải pháp cải thiện: Dựa trên kết quả, đưa ra các khuyến nghị chiến lược như:

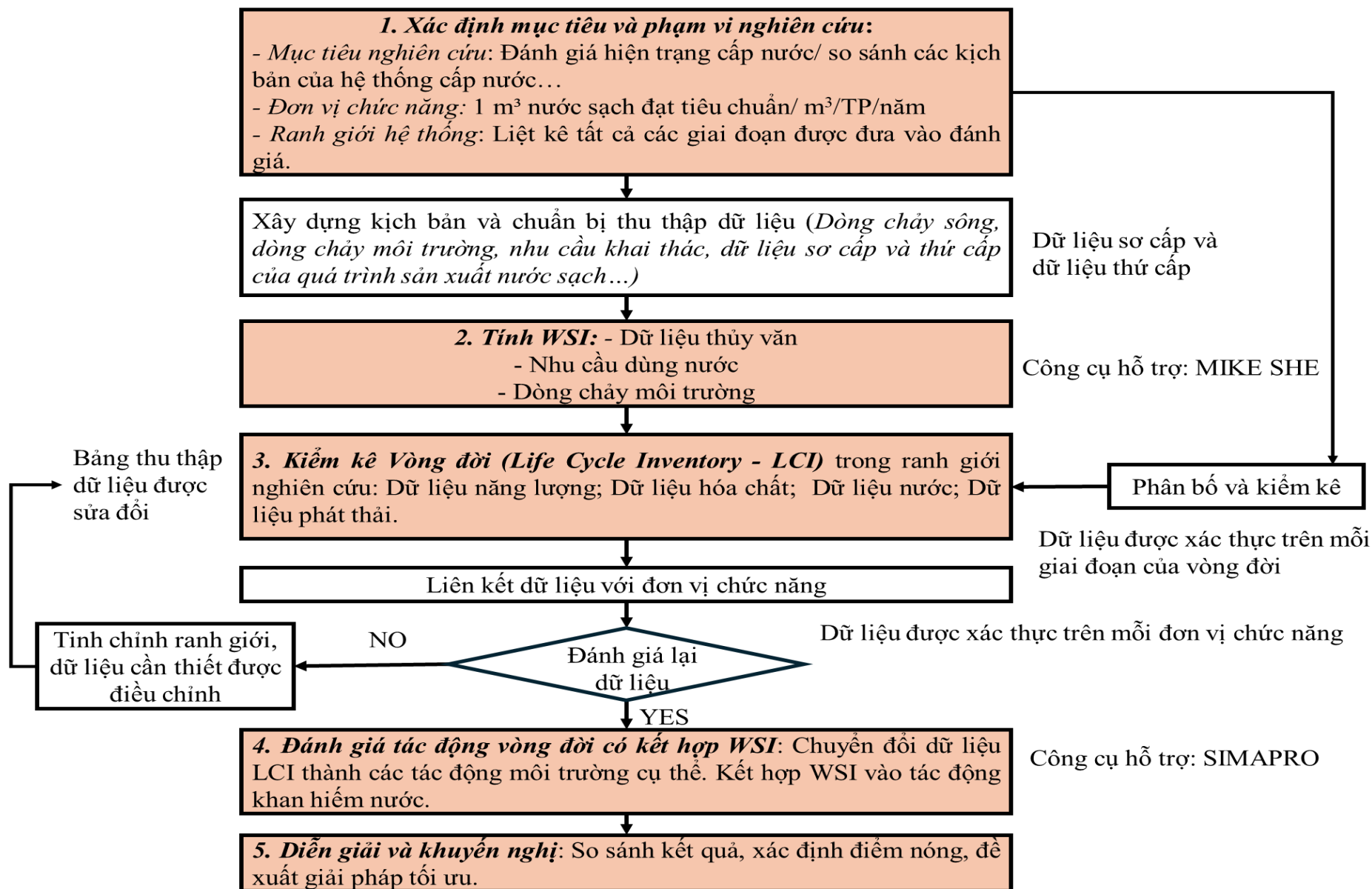
- + Tiết kiệm và sử dụng điện năng hiệu quả, sử dụng năng lượng tái tạo.
- + Giảm rò rỉ, tái chế và tái sử dụng nước ở nhà máy để giảm lãng phí nước.
- + Xử lý nguồn nước bị nhiễm mặn.
- + Sử dụng các nguồn nước thay thế, bổ sung khác.

Nội dung cụ thể các giai đoạn được tóm tắt ở Bảng 3.1.

Bảng 3.1. Tóm tắt các giai đoạn của mô hình tích hợp

Giai đoạn	Nội dung chính	Dữ liệu đầu vào	Kết quả
1. Xác định mục tiêu và phạm vi (Goal & Scope)	Xác định mục tiêu nghiên cứu, đơn vị chức năng, ranh giới hệ thống cấp nước đô thị.	- Mục tiêu nghiên cứu. - Đơn vị chức năng (1 m ³ nước sạch đạt chuẩn QCVN 01-1:2024/BYT. - Ranh giới: (từ khai thác đến điểm đầu mạng lưới).	Các tiêu chí và giới hạn nghiên cứu rõ ràng.
2. Tính toán chỉ số WSI (Water Stress Index)	Xác định mức độ căng thẳng nguồn nước theo lưu vực/kịch bản.	- WR: Nguồn nước tái tạo - WU: Nhu cầu khai thác. - EWR: Dòng chảy môi trường. - Vị trí địa lý nguồn nước. - Kịch bản S1–S5.	Giá trị chỉ số WSI cho từng nguồn nước, từng kịch bản.
3. Kiểm kê vòng đời (Life Cycle Inventory LCI)	Thu thập dữ liệu chi tiết về các dòng vật chất và năng lượng của hệ thống.	- Điện năng (kWh, nhiên liệu). - Vật liệu (ống, hóa chất). - Lượng nước khai thác. - Phát thải (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, chất ô nhiễm).	Bộ dữ liệu LCI đầy đủ, liên kết chỉ số WSI với sản lượng khai thác.
4. Đánh giá tác động vòng đời (LCIA) tích hợp chỉ số WSI.	Chuyển dữ liệu LCI thành tác động môi trường, tích hợp chỉ số WSI vào tác động “khan hiếm nước”.	- LCI từ giai đoạn 3. - Giá trị chỉ số WSI từ giai đoạn 2.	- Tác động khan hiếm nước (m ³ nước quy đổi). - Các tác động khác (CO ₂ tđ, năng lượng, ô nhiễm).
5. Diễn giải và khuyến nghị (Interpretation)	So sánh kết quả, xác định điểm nóng, đề xuất giải pháp tối ưu.	- Kết quả LCIA tích hợp chỉ số WSI. - Các chỉ số môi trường khác.	- So sánh kịch bản/phương án. - Danh sách điểm nóng. - Khuyến nghị cải thiện (tái sử dụng nước, tiết kiệm điện năng, ...).

Hình 3.1 mô tả quy trình thực hiện mô hình tích hợp WSI - LCA trong đánh giá hiệu quả của quá trình khai thác và vận hành hệ thống cấp nước, thể hiện dòng chảy dữ liệu từ tính toán chỉ số WSI đến giai đoạn LCIA và diễn giải kết quả.



Hình 3.1. Mô hình tích hợp WSI - LCA

3.2. Áp dụng mô hình tích hợp WSI - LCA trong đánh giá hiện trạng khai thác và sản xuất nước sạch tại Đà Nẵng

3.2.1. Mục tiêu và phạm vi

(1). Mục tiêu: Đánh giá toàn diện hiện trạng các tác động môi trường và mức độ khan hiếm nguồn nước trong quá trình khai thác và sản xuất nước sạch cho hệ thống cấp nước đô thị tại NMN Cầu Đỏ - TP. Đà Nẵng thông qua việc tích hợp chỉ số WSI và phương pháp LCA.

(2). Đơn vị chức năng: Đơn vị chức năng được sử dụng trong nghiên cứu là 1 m³ nước đã được xử lý đạt chuẩn sinh hoạt và sản xuất QCVN 01-1:2024/BYT và được sẵn sàng cấp đến điểm sử dụng. Đây là đơn vị mà hướng dẫn nghiên cứu về cấp nước (ISO14040/14044) và cũng như nhiều nghiên cứu LCA trên hệ thống cấp nước đô thị sử dụng.

3) Ranh giới của nghiên cứu: Được thiết lập theo hướng tiếp cận “từ nguồn đến điểm cuối của quá trình sản xuất nước sạch”, bao gồm các khâu chính sau:

- **Khai thác và truyền dẫn nước thô:** Hoạt động bơm và dẫn nước từ nguồn cấp nước thô đến NMN.

- **Xử lý nước:** các công đoạn chính như keo tụ, lắng, lọc, khử trùng; sử dụng hóa chất xử lý (PAC, Clo, vôi,...), điện năng cho vận hành máy móc và xử lý bùn thải.

- **Xử lý nội bộ:** bao gồm hoàn nguyên vật liệu lọc, tái sử dụng nước rửa lọc, xử lý bùn lắng và các dòng thải phát sinh trong quá trình xử lý.

Các quá trình xây dựng cơ sở hạ tầng (như chi phí xây nhà máy, xây dựng đường ống truyền tải dài hạn, mạng lưới cấp nước) không được đưa vào ranh giới của nghiên cứu này, do không phải là biến số giữa các kịch bản và ảnh hưởng phân tán theo thời gian dài (trên 30 năm), nhất quán với mục tiêu so sánh các cấu hình nguồn – xử lý và tích hợp chỉ số WSI vào phương pháp LCA. Tác động của giai đoạn phá dỡ là tương đối nhỏ [75].

Mặc dù chu trình vòng đời của nước bao gồm nhiều giai đoạn liên kết chặt chẽ từ khai thác, sản xuất đến phân phối và xử lý nước thải, luận án này chủ động giới hạn phạm vi nghiên cứu tập trung vào hai giai đoạn then chốt: Khai thác và Sản xuất nước sạch. Việc khu trú này không nhằm mục đích đơn giản hóa mô hình, mà tập trung trực diện vào giải quyết mâu thuẫn nội tại cấp bách nhất hiện nay của hệ thống cấp nước TP. Đà Nẵng: Sự đánh đổi giữa rủi ro khan hiếm nước và hiệu quả môi trường của công đoạn xử lý.

Trong bối cảnh đặc thù của Đà Nẵng, nơi an ninh nguồn nước đang chịu áp lực kép từ BĐKH và xâm nhập mặn tại hạ lưu sông Vu Gia - Thu Bồn, giai đoạn khai thác và sản xuất chính là điểm nút quyết định tính bền vững của toàn hệ thống. Việc mở rộng phạm vi sang giai đoạn phân phối hoặc xử lý nước thải có thể làm loãng tiêu điểm nghiên cứu. Bằng cách tập trung vào thượng nguồn của chu trình, luận án cho phép xây dựng một mô hình đánh giá chuyên sâu, cung cấp bằng chứng thực nghiệm về việc tối ưu hóa quy trình khai thác và sản xuất trong điều kiện rủi ro khan hiếm nước cực đoan.

3.2.2. Tính toán chỉ số WSI

Lưu vực Vu Gia – Thu Bồn có mùa cạn từ tháng I đến tháng VIII hàng năm. Dòng chảy nhỏ nhất trên lưu vực phần lớn rơi vào tháng IV, những năm ít hoặc không có mưa tiểu mãn vào tháng V, tháng VI thì dòng chảy nhỏ nhất vào tháng VII và tháng VIII.

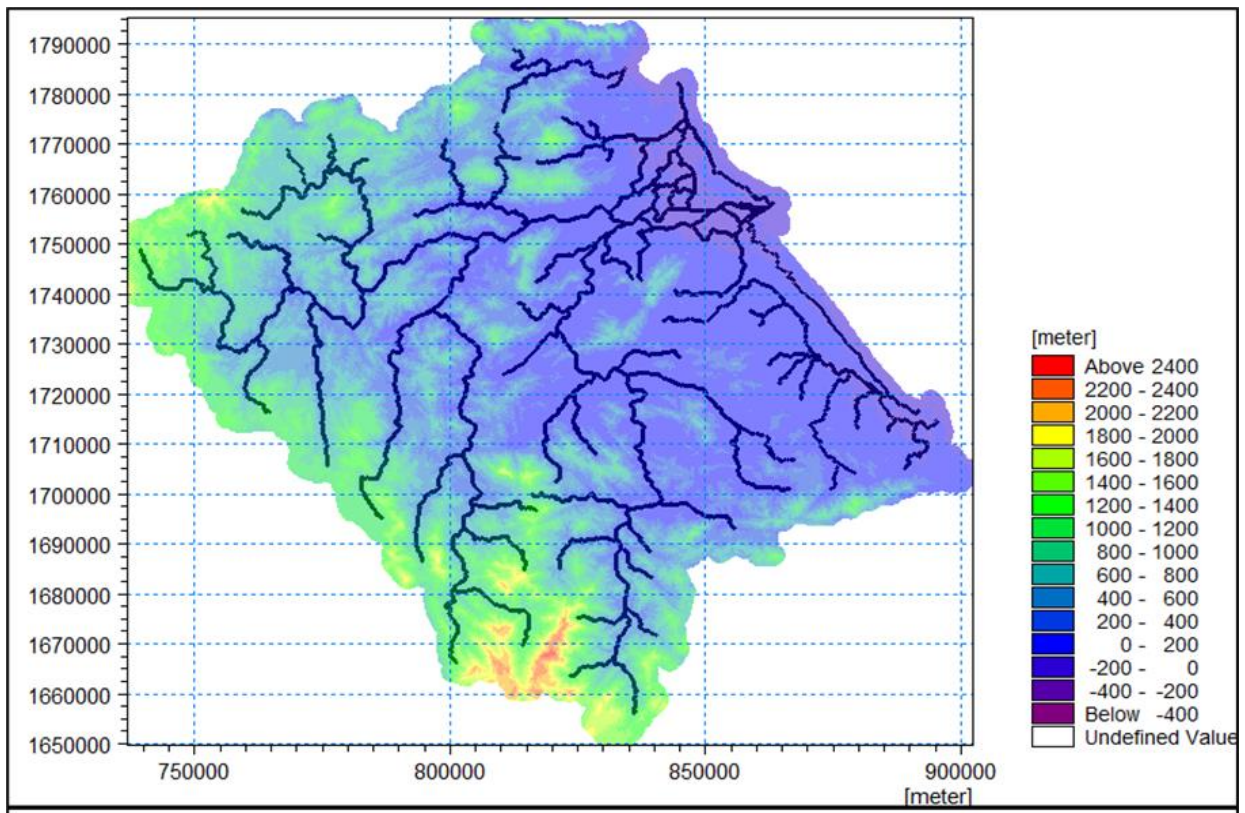
Dòng chảy tháng nhỏ nhất chiếm 1÷3% lượng nước cả năm. Dòng chảy mùa cạn chiếm 20 ÷ 25% lượng nước cả năm. Vùng có dòng chảy mùa cạn lớn nhất là thượng nguồn các sông, mô đun dòng chảy mùa cạn khoảng 25 ÷ 30 l/s.Km², mô đun dòng chảy nhỏ nhất tháng khoảng 10 ÷ 15 l/s.Km². Vùng có dòng chảy mùa cạn nhỏ nhất là vùng thuộc phía Bắc và Tây Bắc tỉnh Quảng Nam, TP. Đà Nẵng thuộc lưu vực các sông Bung, Côn, mô đun dòng chảy mùa kiệt chỉ còn 10 l/s.Km² [76].

a) Dòng chảy về

Mô hình MIKE SHE được xây dựng dựa trên tất cả các thành phần mô hình có sẵn, ví dụ như dòng chảy trên đất liền, sông và hồ, lưu lượng không bão hòa, sự bốc hơi, dòng chảy bão hòa. Kết quả là mô hình đã mô tả khá chính xác các quá trình thủy văn ở lưu vực sông Vu Gia Thu Bồn cũng như làm giảm sự không chắc chắn khi mô phỏng dự đoán khí hậu trong tương lai. Các bộ dữ liệu sau đây đã được sử dụng:

*** Thiết lập mô hình**

- Diện tích mô phỏng: 10.350 Km².



Hình 3.2. Địa hình và sơ đồ mạng lưới sông sử dụng trong mô phỏng

- Địa hình: Dữ liệu độ cao sử dụng trong mô hình được lấy từ SRTM DEM với độ phân giải ngang 90 m từ NASA (<http://www.cgiar-csi.org>). Hình 3.2 thể hiện địa hình và sơ đồ mạng lưới sông trong mô phỏng.

- Lượng mưa: Dữ liệu mưa ngày từ 16 trạm trong khu vực tính toán (Ái Nghĩa, Cẩm Lệ, Câu Lâu, Giao Thủy, Hiên, Hiệp Đức, Hội An, Hội Khách, Khâm Đức, Nông Sơn, Quế Sơn, Thành Mỹ, Tiên Phước, Đà Nẵng, Tam Kỳ, Trà My). Cơ sở dữ liệu tính từ năm 1987 tới năm 2023.

- Sự bốc hơi: Dữ liệu được thừa hưởng từ nghiên cứu của Vũ và các cộng sự [77]. Các tác giả này tính toán sự bốc hơi tiềm năng ở lưu vực Nông Sơn bằng cách sử dụng phương trình Penman-Monteith. Lượng bốc hơi tiềm năng trung bình hàng tháng đối với mỗi loại thảm thực vật và mức trung bình trong lưu vực đã được hình thành.

- Sử dụng đất và Bản đồ đất: Việc sử dụng đất và dữ liệu đất được đơn giản hóa từ dữ liệu sử dụng đất và tương tác về BĐKH của dự án tại miền Trung Việt Nam và các tác động của Dự án đối với BĐKH ở Miền Trung Việt Nam (P1-08 VIE). Dữ liệu đầu vào được xác định bằng 5 loại đất (đất sét, đất á sét, đất thịt, đất cát pha, đất cát) và 9 loại hình

sử dụng đất (đất chưa sử dụng, đất rừng tự nhiên, rừng trồng, đất nông thôn, đất trồng cây ngắn ngày, đất trồng lúa, đất đô thị, đất trồng cây lâu năm, mặt nước).

- Thực vật: Lịch thu hoạch được thiết lập cho các cây trồng chính như rừng, nhà ở, gạo, mía và cỏ. Mỗi loại cây trồng được xác định bởi tài sản thực vật. Tính chất thực vật trong mô phỏng này lấy từ kết quả DHI [58].

- Sông và hồ: Để mô phỏng dòng chảy của sông tốt hơn, mô hình MIKE SHE được kết hợp với mô hình MIKE 11 thủy động lực (mô hình 1D). Mô hình được phát triển trên 44 nhánh chính với chiều dài từ 20 Km đến 202 Km. Hình học của mỗi nhánh sông được xác định qua các mặt cắt ngang. Các mặt cắt ngang được áp dụng trong mô hình này được lấy từ hai nguồn: một vài trong số chúng ở hạ lưu được lấy từ các phép đo, và các phần còn lại được trích ra từ DEM. Hệ số nhám Stickler (M) thay đổi từ $15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ đến $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ đối với các nhánh ngược dòng và giá trị thay đổi từ $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ đến $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ đối với các nhánh xuôi dòng.

- Dòng chảy trên đất liền: Dòng chảy trên đất liền xuất hiện sau khi lượng mưa ròng vượt quá khả năng xâm nhập của đất, sau đó nước từ ao lên mặt đất. Các tham số chính để tính toán dòng chảy này là Stickler hệ số độ gồ ghề (M). Đối với Vu Gia - Thu Bồn, tham số này được xác định dựa trên bản đồ sử dụng đất và từ 2 đến $90 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ [58], [78].

* Vùng không bão hòa: DHI đề xuất ba phương pháp mô tả dòng chảy trong vùng: phương trình Richards, dòng chảy trọng lực và 2 lớp UZ. Tuy nhiên, ứng dụng khẳng định rằng các phương pháp tiếp cận khác nhau không cung cấp những kết quả khác nhau. Đối với ứng dụng hiện tại, phương pháp cân bằng nước hai lớp đơn giản được chọn để giảm thời gian tính toán. Tài sản vật lý của từng loại đất được trình bày thông qua hàm lượng nước bão hòa, hàm lượng nước tại công suất thực địa, hàm lượng nước ở điểm suy yếu và độ dẫn nước bão hòa.

- Khu vực bão hòa: Nước ngầm được cung cấp bởi Phòng Quy hoạch và Điều tra Tài nguyên nước Trung ương. Các đặc tính của tầng nước ngầm chủ yếu được trình bày bằng các tính dẫn thủy lực ngang và thủy lực dọc.

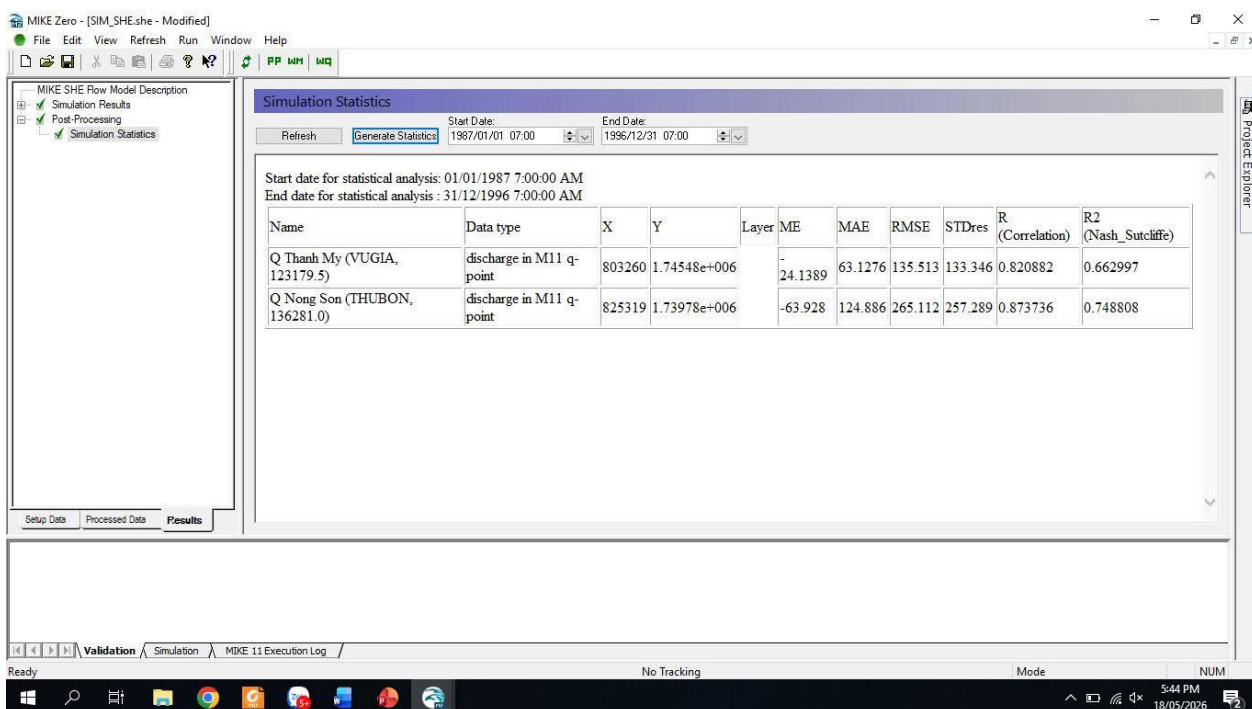
*** Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình**

Mô hình được hiệu chỉnh từ năm 1987 tới năm 1996 và kiểm định từ năm 1997 tới năm 2006. Dữ liệu chạy từ 1987 -2023.

Dữ liệu hiệu chỉnh sử dụng lưu lượng tại 2 trạm Nông Sơn và Thạnh Mỹ. Kết quả hiệu chỉnh được thể hiện ở Bảng 3.2 và Hình 3.3.

Bảng 3.2. Các chỉ số của mô hình MIKE SHE sau khi hiệu chỉnh

Thông số	Trạm	Hiệu chỉnh (1987-1996)	
		R	NASH
Lưu lượng (m ³ /s)	Thành Mỹ	0,820882	0,662997
	Nông Sơn	0,873736	0,748808

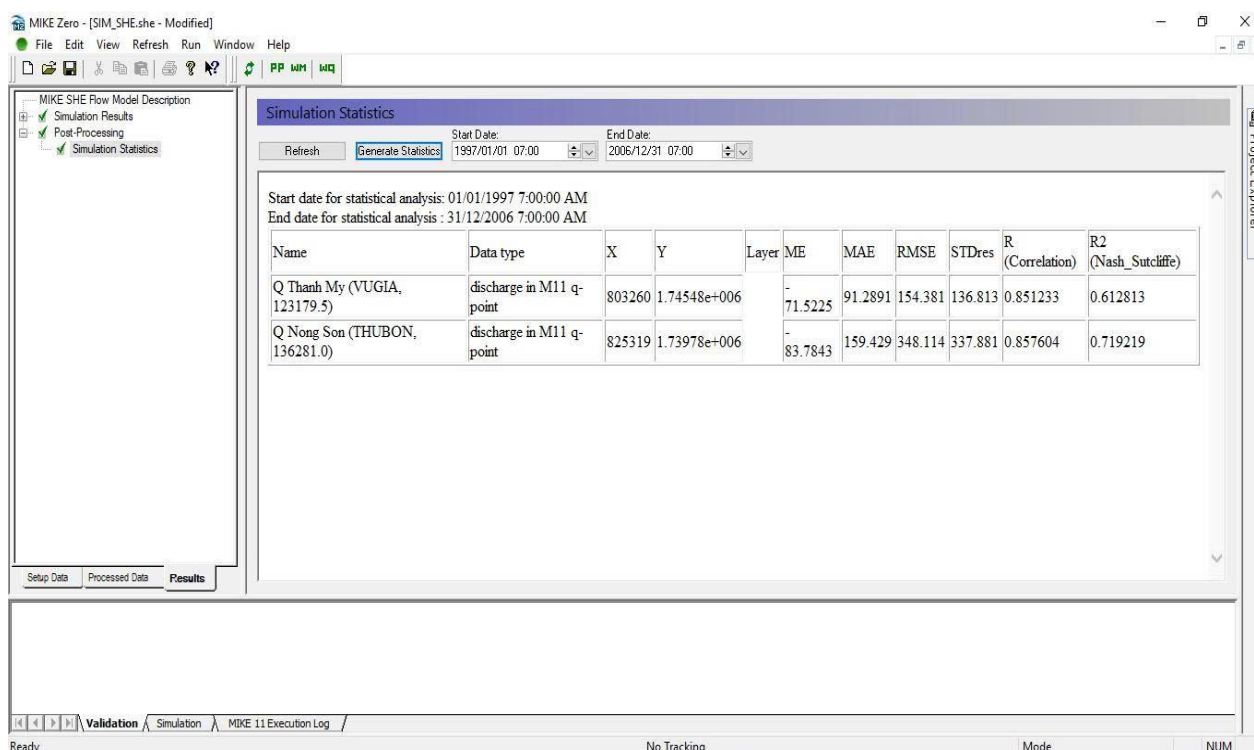


Hình 3.3. Kết quả hiệu chỉnh mô hình.

Quá trình kiểm định mô hình được thiết lập từ năm 1997 đến 2006. Dữ liệu dòng chảy tại trạm Thành Mỹ (sông Vu Gia) và trạm Nông Sơn (sông Thu Bồn) tiếp tục được sử dụng để kiểm định mô hình. Kết quả kiểm định được thể hiện ở Bảng 3.3 và Hình 3.4.

Bảng 3.3. Các chỉ số của mô hình MIKE SHE sau khi kiểm định

Thông số	Trạm	Kiểm định (1997-2006)	
		R	NASH
Lưu lượng (m ³ /s)	Thành Mỹ	0,851233	0,612813
	Nông Sơn	0,857604	0,719219



Hình 3.4. Kết quả kiểm định mô hình.

Trên cơ sở mô hình đã được hiệu chỉnh, kiểm định, so với các tiêu chuẩn liên quan, kết quả mô hình có độ tin cậy, bảo đảm để mô phỏng các kịch bản phục vụ cho tính toán dòng chảy về và làm căn cứ tính toán các chỉ số ở phần tiếp theo.

b) Nhu cầu dùng nước

Cơ sở tính toán nhu cầu dùng nước, dự báo nhu cầu sử dụng nước cho hiện tại và dự báo định hướng cho năm 2045 dựa vào Quyết định Điều chỉnh quy hoạch chung TP. Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045 của thủ tướng chính phủ phê duyệt và dựa vào Điều chỉnh Quy hoạch cấp nước đô thị TP. Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045 đã được thông qua [4]. Các tiêu chuẩn cấp nước cho các nhu cầu được tổng hợp trong Bảng 3.4:

Bảng 3.4. Tiêu chuẩn dùng nước cho TP. Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045

STT	Đối tượng dùng nước và thành phần cấp nước	Tiêu chuẩn/ Tỷ lệ	
		2030	2045
1	Nước Sinh hoạt		
1.1	Tỉ lệ dân số được cấp nước (%)	100	100
1.2	Tiêu chuẩn cấp nước (lít/người.ngày)	170	160
2	Nước phục vụ công trình Công cộng, dịch vụ (Tính theo % của (1))	40	40
3	Nước Tưới cây, rửa đường (Tính theo % của (1))	8	8
4	Nước cho sản xuất nhỏ, tiểu thủ công nghiệp (Tính theo % của (1))	10	8
5	Khu công nghiệp tập trung (m ³ /ha)		
5.1	Tỷ lệ lấp đầy của khu công nghiệp (%)	80	80
5.2	Tiêu chuẩn cấp nước (m ³ /ha/ngày)	33	33
6	Nước thất thoát, rò rỉ (Tính theo % của (1+2+3+4+5))	12	8
7	Nước cho bản thân NMN (Tính theo % của (1+2+3+4+5+6))	4	2

Lượng nước ngọt sẵn có được đo lường cả về số lượng và chất lượng từ tài nguyên nước mặt và nước ngầm. Tổng lượng nước mặt được xác định bằng việc phân tích thống kê và sử dụng các mô hình thủy văn Mike – She.

c) Dòng chảy môi trường

Thời gian tính toán căng thẳng nguồn nước thường rơi vào mùa kiệt và đây là khoảng thời gian mà hệ sinh thái sông dễ bị tổn thương. EWR thay đổi tùy theo điều kiện môi trường, điều kiện địa phương, khoảng thời gian duy trì chức năng sông và dịch vụ hệ sinh thái.

Kết quả tính toán dòng chảy tối thiểu mùa kiệt dựa vào quy định về xác định dòng chảy trên sông [62], quyết định công bố giá trị dòng chảy tối thiểu [63] và nghiên cứu xây dựng phương pháp xác định dòng chảy tối thiểu- Áp dụng cho hệ thống Vu Gia- Thu Bồn

của TS Nguyễn Thị Kim Dung [59]. Luận án thực hiện xác định dòng chảy sinh thái theo phương pháp chu vi ướt kết hợp đánh giá chất lượng nước qua 5 bước chính:

- Bước 1 - Đo đạc địa hình: Thực hiện đo đạc địa hình mặt cắt ngang dòng sông tại các điểm kiểm soát đã chọn.

- Bước 2 - Xây dựng đường quan hệ giữa chu vi ướt và mực nước (H): Thiết lập mối quan hệ giữa chu vi ướt (χ) và mực nước (H) dựa trên phương trình Manning:

$$Q = 1/n \omega R^{2/3} S^{1/2}$$

Trong đó chu vi ướt (χ) được tính bằng diện tích mặt cắt ướt (ω) chia cho bán kính thủy lực (R). Độ dốc mặt nước (S).

- Bước 3 - Xác định điểm uốn: Tìm các điểm uốn của đường cong quan hệ χ và H bằng phương pháp toán học hoặc quan sát đồ thị.

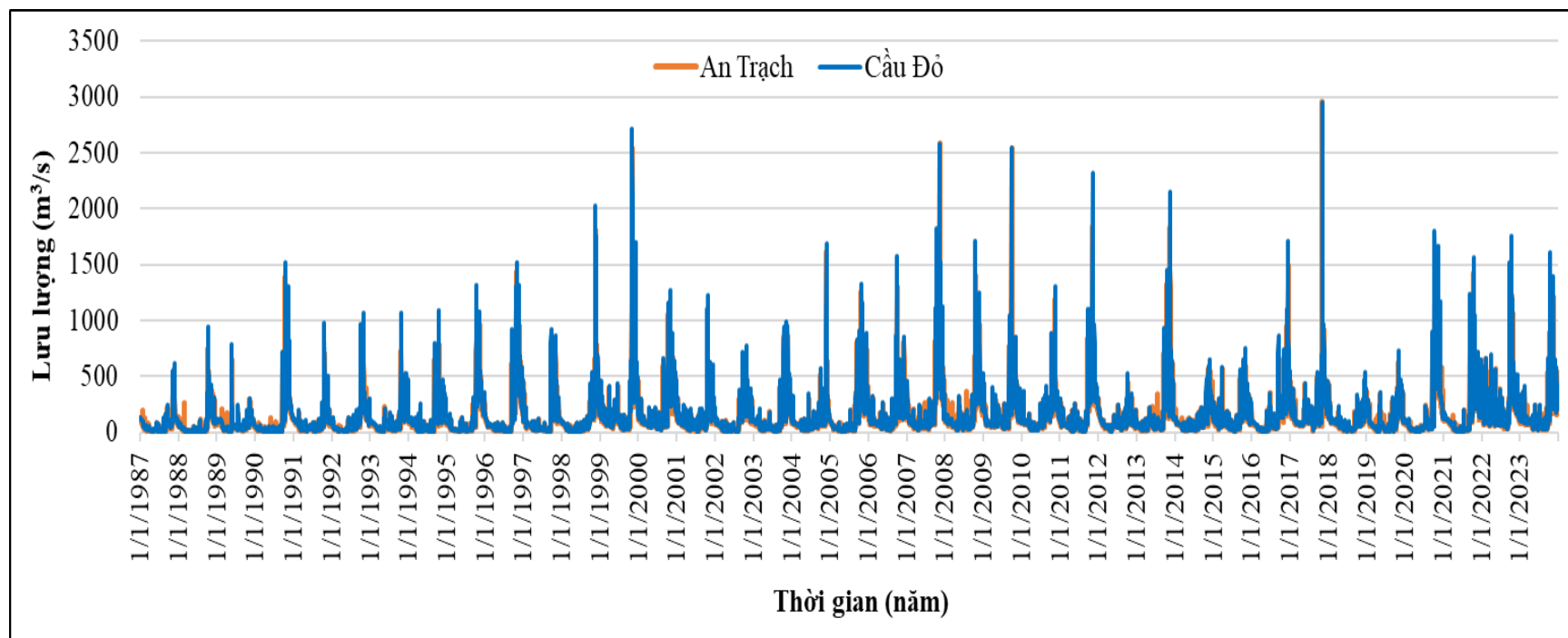
- Bước 4 - Lựa chọn điểm đặc trưng: Kết hợp với kết quả tính toán mực nước lớn nhất, nhỏ nhất để lựa chọn điểm uốn tương ứng với việc làm ngập bãi sông trong mùa kiệt.

- Bước 5 - Kiểm tra chất lượng nước: Sử dụng mô hình toán (như MIKE Ecolab) để kiểm tra xem lưu lượng xác định từ phương pháp chu vi ướt có bảo đảm tiêu chuẩn chất lượng nước (QCVN 08-MT:2015/BTNMT) cho đời sống thủy sinh hay không.

Ưu điểm của phương pháp xác định dòng chảy môi trường đó là đơn giản, dễ ứng dụng và có cách tiếp cận phù hợp với quan điểm sinh thái. Luận án đã áp dụng phương pháp này tại các điểm kiểm soát cụ thể trên hệ thống sông Vu Gia – Thu Bồn gần ngay tại cửa thu nước Cầu Đỏ, phù hợp cho việc tính toán, đánh giá quá trình khai thác tại nhà máy.

Với kết quả của luận án, đề xuất dòng chảy môi trường tại Ái Nghĩa, chiều cao mực nước 2,38 m tương ứng $EWR = 10,9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Với dữ liệu dòng chảy đến trong 37 năm (từ năm 1987 đến năm 2023) ta thấy có những thời đoạn thiếu nước liên tục, không bảo đảm cung cấp nước cho các lưu vực. Các tháng thiếu nước thường bắt đầu rơi vào tháng 5 đến hết mùa khô. Kết quả mô phỏng lượng nước có thể khai thác được tại cửa thu Cầu Đỏ và đập dâng An Trạch được thể hiện ở Hình 3.5:

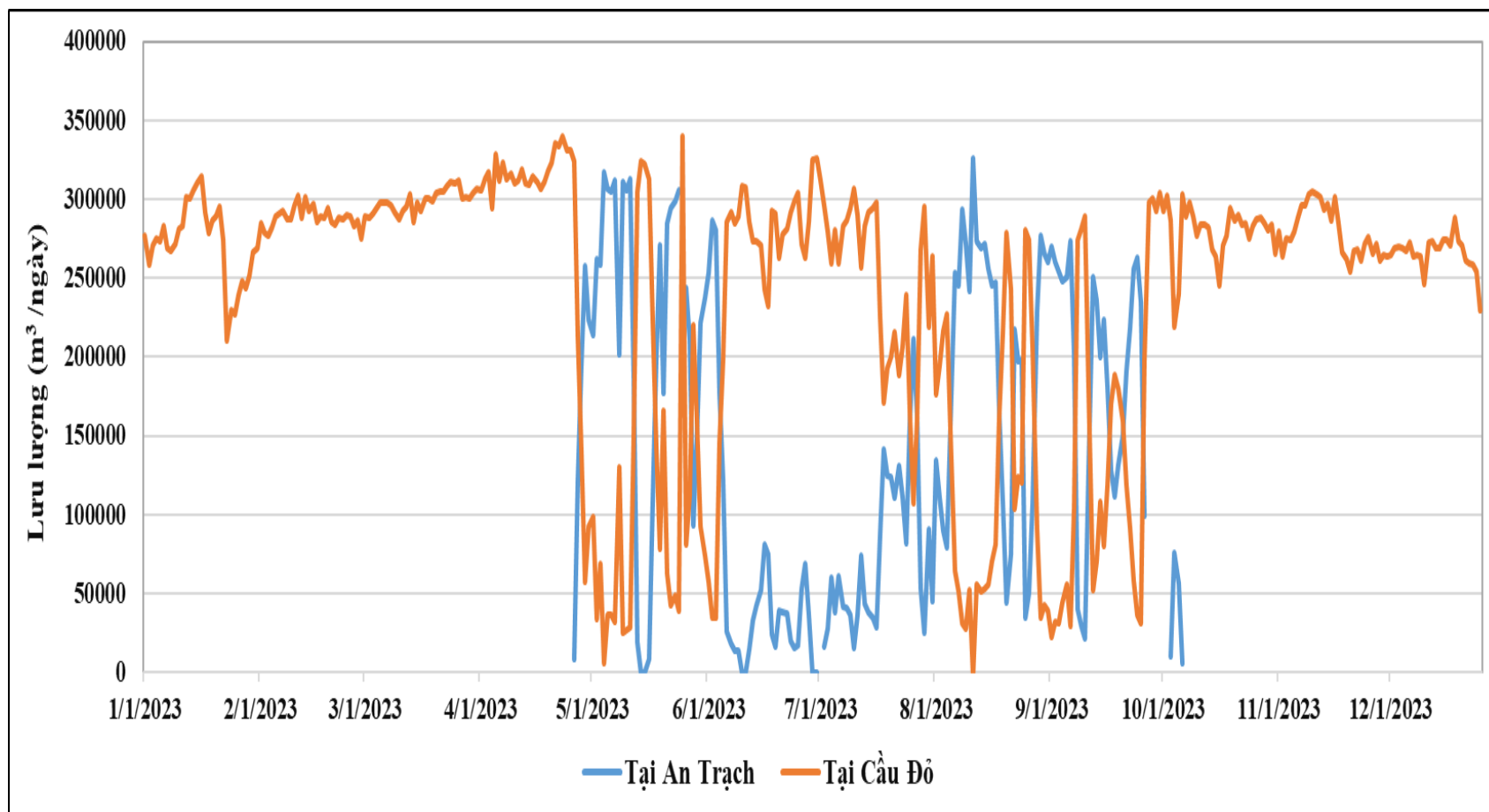


Hình 3.5. Kết quả mô phỏng lượng nước có thể sử dụng (WR) của cửa thu Cầu Đỏ và đập dâng An Trạch (1987-2023)

Với dữ liệu có được từ 1987-2023, lưu lượng nước về theo mùa có sự dao động rõ rệt. Dòng chảy tại cửa thu Cầu Đỏ có biến động mạnh và có tính chu kỳ theo mùa, tại đập dâng An Trạch có dao động ít hơn. Trong năm, khoảng thời gian từ tháng 3 đến tháng 5, lượng nước về để cung cấp cho vùng hạ lưu sông Vu Gia là rất thấp, giá trị thường dao động $<100 \text{ m}^3/\text{s}$, có thời điểm cạn kiệt, đặc biệt trong các năm 1998-1999, 2015-2016, 2020, 2023. Xu hướng dòng chảy mùa khô đang giảm dần, có thể do BĐKH làm thay đổi phân bố mưa theo mùa, suy giảm rừng đầu nguồn làm giảm khả năng giữ nước, hồ chứa thượng nguồn ưu tiên tích nước giảm xả mùa khô. Một số tác động tiềm ẩn có thể xảy ra như xâm nhập mặn sâu, thiếu nước sinh hoạt cho Đà Nẵng, giảm khả năng duy trì hệ sinh thái hạ lưu.

Với lưu vực sát cửa sông, trong khoảng thời gian từ tháng 2 đến tháng 7, mực nước về hạ xuống rất thấp, làm quá trình xâm nhập mặn đi sâu và thời gian mặn kéo dài, có đợt mặn kéo dài nhiều ngày ảnh hưởng đến việc khai thác và sử dụng nước.

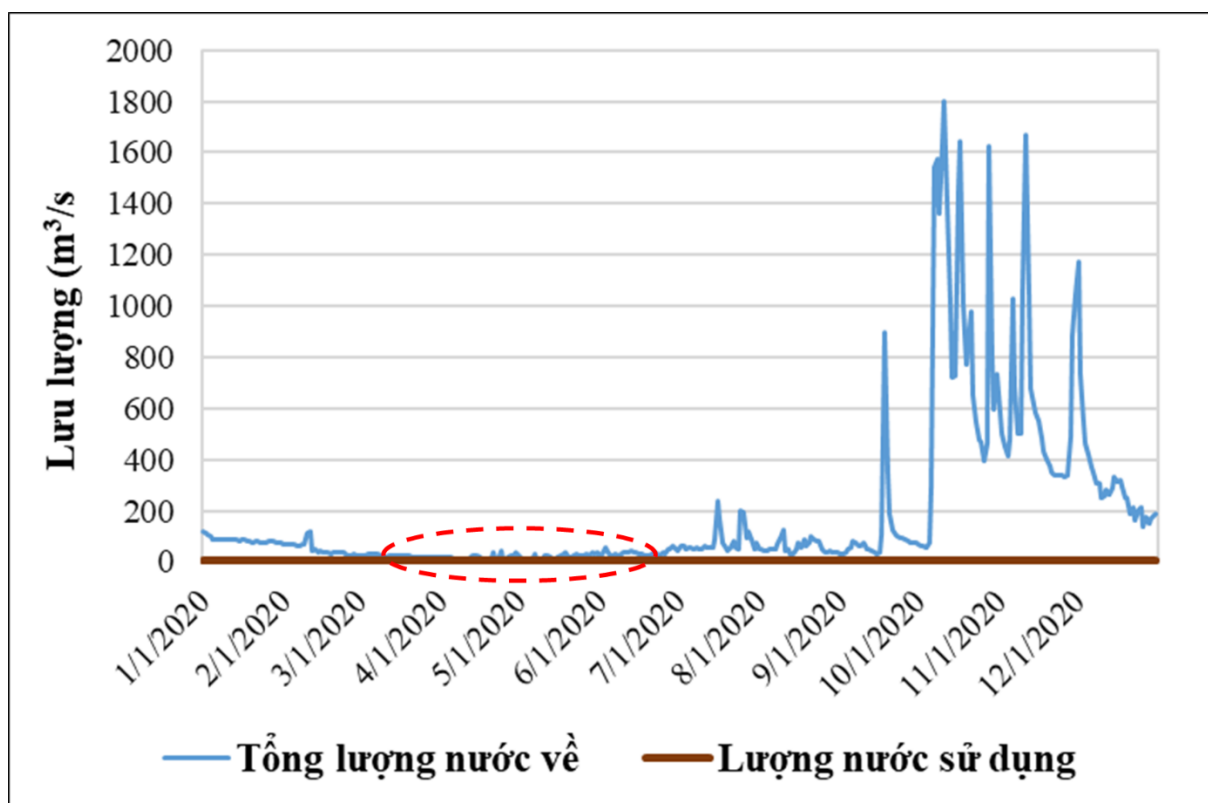
Lượng nước về ít cùng với quá trình nhiễm mặn đã tác động rất lớn đến việc khai thác nước phục vụ cho sản xuất nước sạch tại NMN Cầu Đỏ. Vào thời điểm độ mặn lớn hơn 250 mg/L , cần có thêm lượng nước khai thác bổ sung từ đập dâng An Trạch để cấp cho nhà máy. Lượng nước khai thác tại vị trí cửa thu Cầu Đỏ và đập dâng An Trạch trong năm 2023 được thể hiện ở Hình 3.6.



Hình 3.6. Lượng nước khai thác tại cửa thu NMN Cầu Đỏ và đập dâng An Trạch năm 2023

Trong 4 tháng đầu năm 2023, cửa thu Cầu Đỏ duy trì khai thác ổn định từ 250.000 – 320.000 m³/ngày. Đến khoảng tháng 5 - 9/2023, xuất hiện nhiều thời đoạn ngừng khai thác hoàn toàn tại Cầu Đỏ. Khi đó, tại đập dâng An Trạch tăng khai thác mạnh lên 300.000–350.000 m³/ngày để bảo đảm, điều đó phản ánh nỗ lực cân bằng nguồn nước khi mặn xâm nhập bất thường. Nhiều lần Cầu Đỏ ngừng khai thác hoàn toàn, An Trạch trở thành nguồn chính cấp nước. Hoạt động điều phối giữa 2 trạm cho thấy đã xảy ra nhiều đợt xâm nhập mặn hoặc thiếu nước tại Cầu Đỏ, hệ thống phụ thuộc lớn vào trạm bơm An Trạch trong mùa khô. Điều đó làm tăng phụ thuộc vào đập dâng An Trạch gây áp lực cho tuyến dẫn dài hơn, chi phí điện năng cao hơn. Hệ thống vận hành linh hoạt, nhưng rủi ro về nguồn nước ngày càng tăng, nhất là với bối cảnh mặn kéo dài bất thường. Diễn biến này tương đồng với kết quả mô phỏng của MIKE SHE về lượng nước về (WR), vốn chỉ ra rằng mùa khô là giai đoạn dòng chảy suy giảm nghiêm trọng và khả năng khai thác tại Cầu Đỏ bị hạn chế đáng kể.

Còn đối với năm 2020, năm được xem là có lượng nước về trong các tháng mùa kiệt (tháng 3 đến tháng 8) thấp hơn các năm khác, trung bình tháng 4 là 17,5 m³/s. Hình 3.7 thể hiện mối tương quan giữa lượng nước về và lượng nước sử dụng ở cửa thu Cầu Đỏ năm 2020:



Hình 3.7. Tổng lượng nước về và lượng nước sử dụng tại cửa thu Cầu Đỏ - 2020

Trong năm 2020, so với nhu cầu sử dụng nước ở hạ lưu sông Vu Gia thì việc thiếu nước trở nên nghiêm trọng trong khoảng thời gian từ cuối tháng 4 đến giữa tháng

5. Tình trạng khan hiếm nước xảy ra khi các nhu cầu sử dụng nước vượt quá khả năng nguồn nước cung cấp trong một thời gian nhất định hoặc nguồn nước vẫn có nhưng chất lượng kém không đáp ứng cho các mục đích sử dụng.

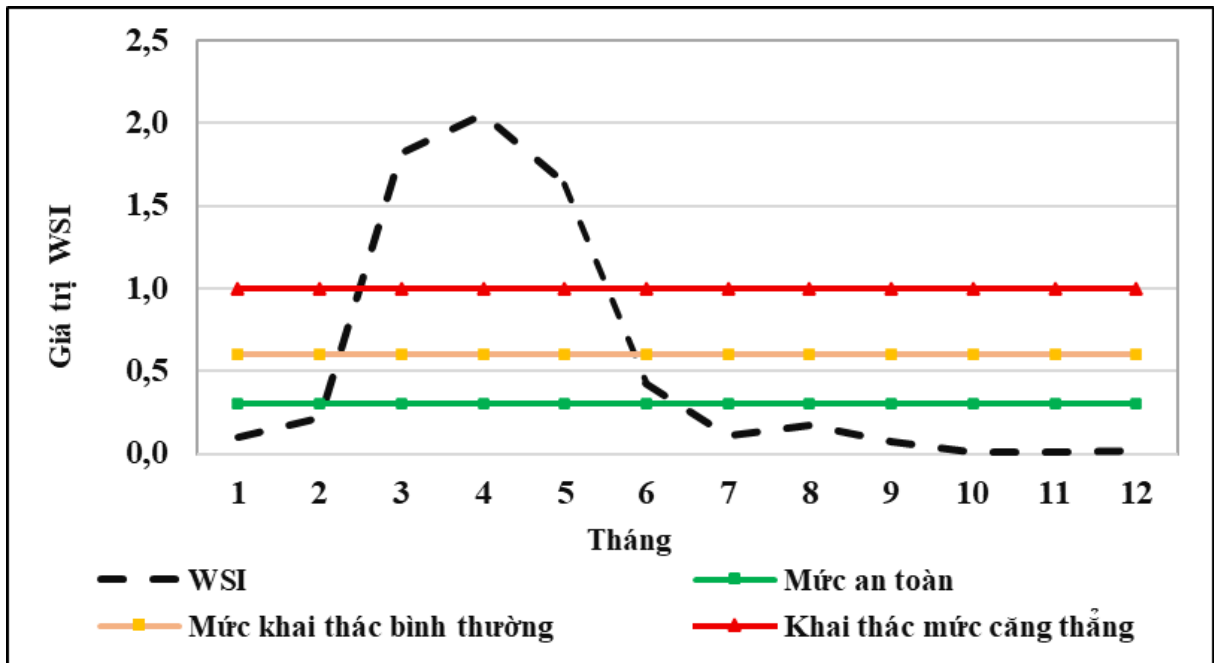
Sự tương đồng giữa kết quả mô phỏng dòng chảy theo mô hình MIKE SHE và số liệu khai thác thực tế tại nhà máy qua hai năm đại diện (2020 và 2023) khẳng định rằng mô hình đã mô phỏng đúng đặc trưng thủy văn lưu vực, đặc biệt là khả năng tái hiện chính xác sự suy giảm dòng chảy trong mùa kiệt và các đợt xâm nhập mặn kéo dài. Dữ liệu này cũng phù hợp với đánh giá nguồn nước trên sông Yên, đập dâng An Trạch và sông Túy Loan trong Điều chỉnh quy hoạch cấp nước Đà Nẵng [4] và Quy hoạch tổng hợp lưu vực sông Vu Gia - Thu Bồn [76]. Do đó, bộ dữ liệu WR được tạo lập từ mô hình là đáng tin cậy và đủ cơ sở để tích hợp vào mô hình đánh giá tác động môi trường theo phương pháp LCA trong các bước phân tích tiếp theo của luận án.

Lưu lượng phân bổ ứng với các tần suất khác nhau tại đập dâng An Trạch và cửa thu Cầu Đỏ được thể hiện ở Bảng 3.5. Theo Quyết định số 359/QĐ-TTg về Điều chỉnh Quy hoạch chung TP. Đà Nẵng, tần suất bảo đảm cấp nước sinh hoạt, dịch vụ và công nghiệp $P = 95\%$ [79]. Tổng lượng nước có thể sử dụng tại đập dâng An Trạch và cửa thu Cầu Đỏ giai đoạn 1987-2023 ứng với tần suất 95% là 58,92 m³/s và 70,08 m³/s.

Bảng 3.5. Lưu lượng phân bổ ứng với các tần suất khác nhau tại đập dâng An Trạch và cửa thu Cầu Đỏ

Vị trí	Lưu lượng có thể phân bổ (m ³ /s)				
	85%	90%	95%	97%	99%
An Trạch	76,98	69,40	58,92	52,58	41,56
Cầu Đỏ	89,78	81,54	70,08	63,11	50,91

Hình 3.8 mô tả sự biến động của chỉ số WSI tại cửa thu Cầu Đỏ theo từng tháng trong năm 2020, phản ánh rõ rệt mức độ áp lực khai thác nước tại điểm cấp chính của hệ thống cấp nước Đà Nẵng ứng với tần suất cấp nước 95%.



Hình 3.8. Giá trị chỉ số WSI tại cửa thu nước Cầu Đỏ

Kết quả thể hiện trên Hình 3.8 thể hiện sự phân hóa rất rõ rệt của chỉ số WSI giữa mùa mưa và mùa khô tại lưu vực Vu Gia – Thu Bồn, phản ánh đặc trưng thủy văn có tính mùa vụ cao của khu vực Đà Nẵng. Trong mùa mưa (tháng 9 đến tháng 1 năm sau), lượng nước về (WR) dồi dào, nhu cầu sử dụng không vượt quá khả năng cung ứng, ghi nhận chỉ số WSI duy trì ở ngưỡng an toàn ($< 0,3$), thể hiện trạng thái khai thác nước không gây áp lực đáng kể lên nguồn nước.

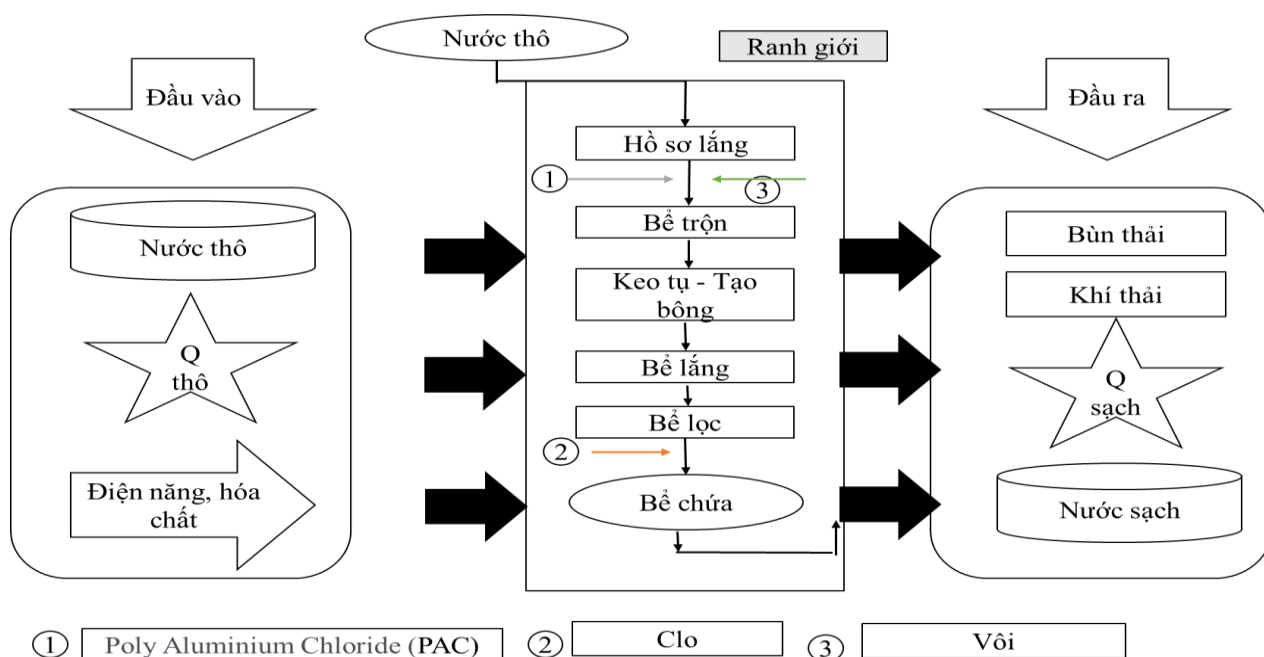
Ngược lại, sang mùa khô (đặc biệt từ tháng 3 đến tháng 8), lượng nước về giảm sâu, trong khi nhu cầu khai thác lại tăng mạnh nhằm đáp ứng yêu cầu cấp nước đô thị và ứng phó với xâm nhập mặn. Hệ quả là chỉ số WSI tăng đột biến, lên ngưỡng khai thác quá mức ($WSI > 1,0$), đỉnh điểm vào tháng 4 đạt giá trị xấp xỉ 2,1. Trong khoảng thời gian từ tháng 3 đến tháng 8 năm 2020, tại cửa thu Cầu Đỏ, chỉ số WSI trung bình là 1,035, khai thác vượt quá khả năng cung cấp, nguy cơ khan hiếm nước cao, gây ra căng thẳng nguồn nước ngay tại điểm cấp nước thô cho nhà máy. Tháng 4 là tháng có giá trị chỉ số WSI cao nhất và bắt buộc phải khai thác phần lớn nước tại đập dâng An Trạch để cấp bổ sung cho NMN Cầu Đỏ, khi nguồn nước ở cửa thu Cầu Đỏ bị nhiễm mặn nghiêm trọng.

Sự tương phản lớn giữa hai mùa không chỉ khẳng định tính nhạy cảm của hệ thống cấp nước Đà Nẵng đối với biến động thủy văn, mà còn lý giải yêu cầu bắt buộc phải tính toán WSI riêng cho từng kịch bản vận hành. Cách tiếp cận theo mùa là đặc biệt quan trọng bởi áp lực lên nguồn nước không đồng nhất theo thời gian: những kịch bản vận hành hợp lý trong mùa mưa có thể không phù hợp trong mùa khô, nơi rủi ro thiếu nước, nhiễm mặn và nhu cầu khai thác bổ sung từ đập dâng An Trạch gia tăng

đột biến. Việc xác định WSI theo kịch bản và theo mùa vì vậy đóng vai trò trọng yếu nhằm phản ánh đúng mức độ rủi ro tài nguyên nước, bảo đảm mô hình tích hợp WSI - LCA có khả năng đánh giá chính xác tác động môi trường và đề xuất giải pháp vận hành hiệu quả theo từng điều kiện thủy văn cụ thể.

3.2.3. Kiểm kê vòng đời

Sơ đồ đầu vào, đầu ra của phạm vi nghiên cứu được thể hiện trong Hình 3.9. Trong nghiên cứu này, hai loại dữ liệu chính được sử dụng: (a) dữ liệu cụ thể từ các đối tượng nghiên cứu, bao gồm sản xuất nước, tiêu thụ điện và sản phẩm hóa chất được kiểm kê theo dữ liệu NMN Cầu Đỏ được thu thập trực tiếp từ các báo cáo nội bộ hoặc trong các quy hoạch chung của TP. Đà Nẵng. Dữ liệu hoạt động tại NMN Cầu Đỏ bao gồm lượng nước thô, nước sản xuất, lượng điện tiêu thụ, sản phẩm hóa chất sử dụng. Hóa chất được sử dụng tại NMN Cầu Đỏ bao gồm PAC, Clo khử trùng. Các dữ liệu được thu thập hằng ngày tại NMN Cầu Đỏ trong vòng 12 tháng năm 2023, bảo đảm độ tin cậy cao trong việc đánh giá hoạt động của hệ thống (Bảng 3.6 và Hình 3.10); (b) dữ liệu nền được cung cấp bởi cơ sở dữ liệu Ecoinvent v3.11, tích hợp trong phần mềm SimaPro 10.2.0.3. Phần mềm SimaPro, phiên bản dành cho giảng viên, bao gồm cơ sở dữ liệu lớn và phương pháp đánh giá tác động, đã được sử dụng để xây dựng LCI [80]. Phần mềm này đã được áp dụng trong một số nghiên cứu ([37]; [38]; [81];..), vì nó cho phép tạo mô hình của hệ thống đang được nghiên cứu, kèm theo bản kiểm kê (thủ công hoặc sử dụng cơ sở dữ liệu) và tính toán tác động bằng các phương pháp đánh giá tác động vòng đời khác nhau.

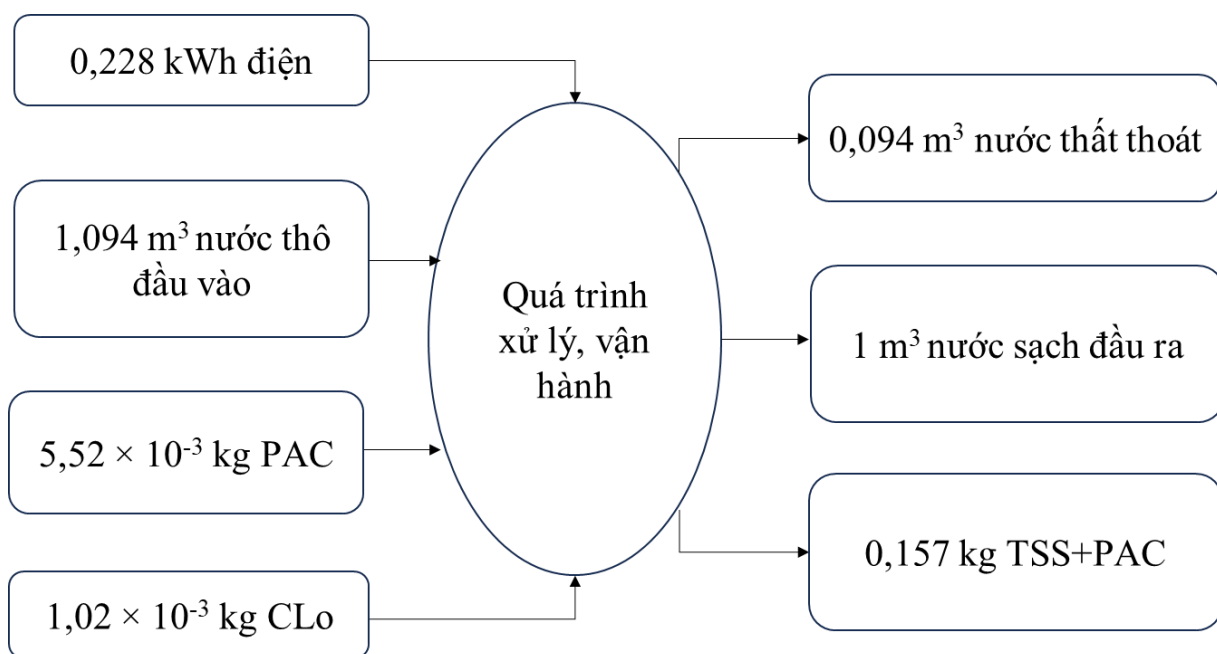


Hình 3.9. Sơ đồ đầu vào và đầu ra của 1 hệ thống cấp nước

Bảng 3.6. Bảng dữ liệu sản xuất của NMN Cầu Đỏ

Tháng	Lượng nước (m ³)						Tiêu thụ điện (kWh)			Sản phẩm hóa chất sử dụng (kg)					
	Dây chuyền cũ (50.000 m ³)		Dây chuyền cũ (120.000 m ³)		Dây chuyền mới (120.000 m ³)		Dây chuyền cũ (50.000 m ³) cũ	Dây chuyền cũ (120.000 m ³) cũ	Dây chuyền mới (120.000 m ³)	Dây chuyền cũ (50.000 m ³)		Dây chuyền cũ (120.000 m ³)		Dây chuyền mới (120.000 m ³)	
	Đầu vào	Đầu ra	Đầu vào	Đầu ra	Đầu vào	Đầu ra				PAC	CLO	PAC	CLO	PAC	CLO
1	464436	422436	3570510	3247620	3448000	3161512	89935	660743	408026	2323,79	343,99	17864,94	2644,56	17391,27	574,44
2	507496	461169	3524305	3202591	3524040	3211488	94030	626303	560543	2582,12	381,40	17931,53	2648,62	17981,35	655,98
3	657844	589203	3305245	2960365	3202920	2983896	125505	654631	531380	2622,41	464,80	13175,93	2335,32	13280,66	353,88
4	1044572	928619	3860865	3432289	3587512	3504448	206239	765143	675123	3338,86	749,47	12340,84	2770,14	12600,29	828,38
5	1407440	1285590	3845760	3512810	3452304	3297437	376363	1268959	1010843	4801,21	1946,05	13119,07	5317,48	12314,73	991,47
6	1092564	1005524	3807645	3504304	3677944	3360296	260206	941302	831888	7501,32	859,86	26142,50	2996,65	25068,18	873,50
7	1220416	1119105	3753030	3441479	3669408	3288856	261902	867337	746087	6243,20	1104,22	19199,12	3395,69	18347,68	245,10
8	1281896	1116449	3786510	3297807	3684736	3629760	307063	1017480	967000	6090,21	1289,38	17989,49	3808,62	19800,29	191,99
9	1150552	1008566	3603580	3158874	3622672	3495312	288894	969589	951388	5383,23	1211,56	16860,51	3794,65	18656,26	198,80
10	961388	836723	3443140	2996660	3140192	2986440	166063	598448	550659	6788,43	974,77	24312,25	3491,07	24229,33	479,16
11	1024328	854601	3545220	2957791	2991296	3017280	169644	588304	553757	5275,51	818,98	18258,63	2834,51	18625,86	891,51
12	500648	440781	3454475	3041389	3009869	2821800	85214	540401	524927	2336,41	533,50	16121,27	3681,14	14957,31	415,36

Nguồn: DAWACO (Năm 2023)



Hình 3.10. Sơ đồ năng lượng, nguyên liệu đầu vào, đầu ra của hệ thống tính trên 1m³ nước sạch tại NMN Cầu Đỏ

Các hệ số phát thải luận án sử dụng trong mô hình tính SimaPro được thể hiện ở Bảng 3.7 tương ứng với các nguồn đầu vào điện năng tiêu thụ, hóa chất.

Bảng 3.7. Hệ số phát thải của các nguồn được sử dụng trong mô hình SimaPro

Nguồn ảnh hưởng	Hệ số phát thải (EF)	Nguồn
Điện sử dụng	0,6592 tCO ₂ /MWh	(Cục biến đổi khí hậu, 2024) [82].
Polyaluminium chloride (PAC)	1,71 kg CO ₂ tđ/kg	Ecoinvent v3.11
Clo khí	0,995 kg CO ₂ tđ/kg Clo khí	Ecoinvent v3.11
BOD	0,48 kg CH ₄ /kg BOD	IPCC, 2006 [69]
COD	0,25 kg CH ₄ /kg COD	IPCC, 2006 [69]

- Thông tin về hỗn hợp mạng lưới điện trung bình được phát triển để tiêu thụ điện dựa trên dữ liệu sản xuất điện năm 2023 ở Việt Nam được cập nhật trong SimaPro phiên

bản 10.2.0.3, trong đó tổng công suất các nguồn điện năng lượng tái tạo chiếm tỷ trọng 27%, nhiệt điện than chiếm tỷ trọng 33,2%; thủy điện chiếm tỷ trọng 28,4%. Công bố về hệ số phát thải của lưới điện Việt Nam cũng đã được Cục biến đổi khí hậu - Bộ tài nguyên và môi trường ban hành [82].

- PAC là hóa chất phổ biến, nhưng Ecoinvent không có dữ liệu riêng cho Việt Nam hay khu vực Đông Nam Á. Dữ liệu chung (GLO) của PAC đại diện cho thị trường toàn cầu, phản ánh trung bình chuỗi cung ứng. Dùng dữ liệu GLO phù hợp khi hóa chất thường nhập khẩu hoặc sản xuất từ nhiều nguồn khác nhau (PAC ở Việt Nam cũng nhập từ Trung Quốc, Nhật Bản, Đài Loan...).

- Clo dạng khí (Cl_2) thường được dùng để khử trùng nước. Clo thường được sản xuất từ phương pháp điện phân dung dịch NaCl có màng ngăn. Dữ liệu cơ sở của Clo được sản xuất bằng công nghệ màng cũng đã được tích hợp trong Ecoinvent v3.11, phù hợp cho điều kiện tại Việt Nam.

Khảo sát thực tế được thực hiện tại nơi khai thác và sản xuất nước sạch lớn nhất TP. Đà Nẵng, nhà máy cấp nước Cầu Đỏ.

3.2.4. Đánh giá tác động vòng đời và diễn giải kết quả

Quá trình xử lý nước uống có thể phát thải KNK, cả từ quá trình xử lý, sử dụng thiết bị hỗ trợ và sử dụng hóa chất (Kyung và cộng sự, 2013).

Nhu cầu nước tăng mạnh ở TP. Đà Nẵng trong những năm gần đây kết hợp với tình trạng khan hiếm nước do nhiễm mặn đã thúc đẩy việc tìm kiếm các nguồn cung cấp khác, khiến nguồn cung cấp tiêu tốn thêm năng lượng. Tác động của tình trạng khan hiếm nước cũng như mối quan hệ nước-năng lượng-carbon đã được đánh giá trong nghiên cứu. Điện năng tiêu thụ tại NMN Cầu Đỏ dao động từ $(0,17 \div 0,33)$ kWh/m³, trung bình $0,2 \div 0,23$ kWh/m³. Mức trung bình thấp hơn với định mức ước tính theo Quyết định số 590/QĐ-BXD ngày 30/5/2014 [83], nhưng khoảng dao động khá tương đồng so với định mức. Lượng điện tiêu thụ nhiều rơi vào các tháng 5 đến tháng 9, là thời điểm nước bị nhiễm mặn, bắt buộc phải khai thác bổ sung từ đập dâng An Trạch. Lượng PAC cho quá trình keo tụ từ $(3,60 \times 10^{-3} \div 8,10 \times 10^{-3})$ kg/m³, tương đương so với định mức. Lượng Clo dao động từ $(0,79 \times 10^{-3} \div 1,51 \times 10^{-3})$ kg/m³ thấp hơn so với định mức. Lượng nước thất thoát trong quá trình sản xuất dao động từ $7,00 \div 9,67\%$, khối lượng bùn khô có độ ẩm 20% phát sinh từ các hoạt động của NMN Cầu Đỏ dao động từ $(11,52 \div 149)$ tấn/ngày. Trong đó, dây chuyền 50.000 m³ và dây chuyền 120.000 m³ cũ có tỷ lệ thất thoát (trung bình 10,9%) cũng như sử dụng điện cao (lần lượt là 0,241 kWh/m³ và 0,245 kWh/m³).

Với mục tiêu là đánh giá toàn diện các tác động môi trường trong quá trình khai thác nước thô và sản xuất nước sạch tại NMN Cầu Đỏ, từ đó đề xuất các kịch bản vận hành và công nghệ phù hợp nhằm bảo đảm tính bền vững của hệ thống trong tương lai. Do đó, việc lựa chọn các loại tác động cần phản ánh đầy đủ những khía cạnh môi trường chịu ảnh hưởng trực tiếp từ hoạt động của nhà máy, đồng thời có ý nghĩa hỗ trợ quá trình ra quyết định quy hoạch.

Dựa trên phương pháp ReCiPe 2016 với 18 loại tác động (midpoint), nghiên cứu lựa chọn 6 loại tác động có liên quan trực tiếp đến hoạt động của hệ thống cấp nước đô thị:

Phát thải carbon: Vì tiêu thụ điện chiếm tỷ trọng lớn nhất trong vận hành hệ thống, phát thải CO₂ từ sản xuất điện là nguồn tác động chủ yếu. KNK giúp định lượng mức đóng góp vào BĐKH, hỗ trợ đánh giá tiềm năng giảm phát thải khi áp dụng các giải pháp tiết kiệm điện năng hoặc sử dụng điện tái tạo.

Axit hóa: Nhằm lượng hóa tác động phát thải SO₂ và NO_x từ sản xuất điện và vận chuyển hóa chất, đánh giá nguy cơ gây mưa axit và suy thoái chất lượng đất – nước khu vực tiếp nhận.

Phú dưỡng nước ngọt và độc tính sinh thái nước ngọt: Phản ánh tác động tiềm tàng đến môi trường nước do xả nước rửa lọc, rò rỉ PAC hoặc Clo dư, và các hợp chất giàu dinh dưỡng ra nguồn tiếp nhận. Đây là các chỉ số quan trọng để kiểm soát chất lượng nguồn nước và bảo vệ hệ sinh thái thủy sinh hạ lưu.

Khan hiếm tài nguyên hóa thạch: Nhằm phản ánh tác động liên quan đến tiêu hao tài nguyên năng lượng hóa thạch trong suốt quá trình vận hành nhà máy. Điện năng từ lưới điện quốc gia hiện nay vẫn tỷ lệ lớn sản xuất từ nhiệt điện than và phần nhỏ từ nhiệt điện khí, do đó suy giảm tài nguyên hóa thạch là tác động quan trọng để lượng hóa tác động đến nguồn tài nguyên không tái tạo. Việc xem xét đến tài nguyên hóa thạch giúp đánh giá tính bền vững của các kịch bản sử dụng điện tái tạo, góp phần lựa chọn giải pháp vừa giảm phát thải KNK vừa giảm áp lực lên trữ lượng tài nguyên hóa thạch quốc gia.

Sử dụng tài nguyên nước: Đặc biệt quan trọng trong bối cảnh nguồn nước thô tại Cầu Đỏ chịu tác động xâm nhập mặn và suy giảm lưu lượng mùa kiệt. Tác động này cho phép đánh giá áp lực khai thác nước, đồng thời hỗ trợ đề xuất giải pháp phân bổ và bảo vệ nguồn nước.

Việc tập trung vào 6 loại tác động này bảo đảm đánh giá được các khía cạnh môi trường có ý nghĩa nhất đối với hệ thống cấp nước Cầu Đỏ, tránh dàn trải trên các tác động

ít liên quan. Cách tiếp cận này cũng phù hợp với thực tiễn nghiên cứu LCA cho hệ thống cấp nước đô thị đã được công bố trong nhiều tài liệu [27]; [81]; [84], giúp kết quả đánh giá dễ so sánh và có giá trị tham chiếu cho các nghiên cứu tiếp theo.

Các tác động được phân tích theo mùa (mưa – khô), theo dây chuyền xử lý (cũ – mới), theo từng dữ liệu đầu vào (điện, hóa chất) và theo từng cụm công trình trong hệ thống. Theo kết quả tính toán bởi phần mềm SimaPro 10.2.0.3 về tác động của các quá trình tại NMN Cầu Đỏ chỉ ra rằng điện và hóa chất được sử dụng để sản xuất nước là những tác nhân chính gây ra nhiều loại tác động môi trường. Các tác động môi trường liên quan đến quá trình vận hành tại 3 dây chuyền của NMN Cầu Đỏ được thể hiện trong Bảng 3.8 và Hình 3.11:

Bảng 3.8. Tác động tổng thể của sản xuất nước tại NMN Cầu Đỏ

Tác động	Đơn vị	Mùa	Dây chuyền cũ (50.000 m ³)	Dây chuyền cũ (120.000 m ³)	Dây chuyền mới (120.000 m ³)
Phát thải carbon	kg CO ₂ tđ	Mùa mưa	0,1454	0,1428	0,1247
		Mùa khô	0,1841	0,1997	0,1767
Axit hóa	kg SO ₂ tđ	Mùa mưa	0,000909	0,000893	0,000778
		Mùa khô	0,001159	0,001259	0,001112
Phú dưỡng nước ngọt	kg P tđ	Mùa mưa	$6,67 \times 10^{-6}$	$6,56 \times 10^{-6}$	$5,72 \times 10^{-6}$
		Mùa khô	$8,48 \times 10^{-6}$	$9,20 \times 10^{-6}$	$8,14 \times 10^{-6}$
Độc tính sinh thái nước ngọt	kg 1,4-DCB	Mùa mưa	$2,20 \times 10^{-5}$	$2,15 \times 10^{-5}$	$1,95 \times 10^{-5}$
		Mùa khô	$2,54 \times 10^{-5}$	$2,71 \times 10^{-5}$	$2,46 \times 10^{-5}$
Khan hiếm tài nguyên hóa thạch	kg dầu tđ	Mùa mưa	0,035	0,034	0,030
		Mùa khô	0,044	0,048	0,043
Sử dụng tài nguyên nước	m ³	Mùa mưa	1,114	1,114	1,055
		Mùa khô	1,142	1,133	1,063

* DCB là 1,4 dichlorobenzen

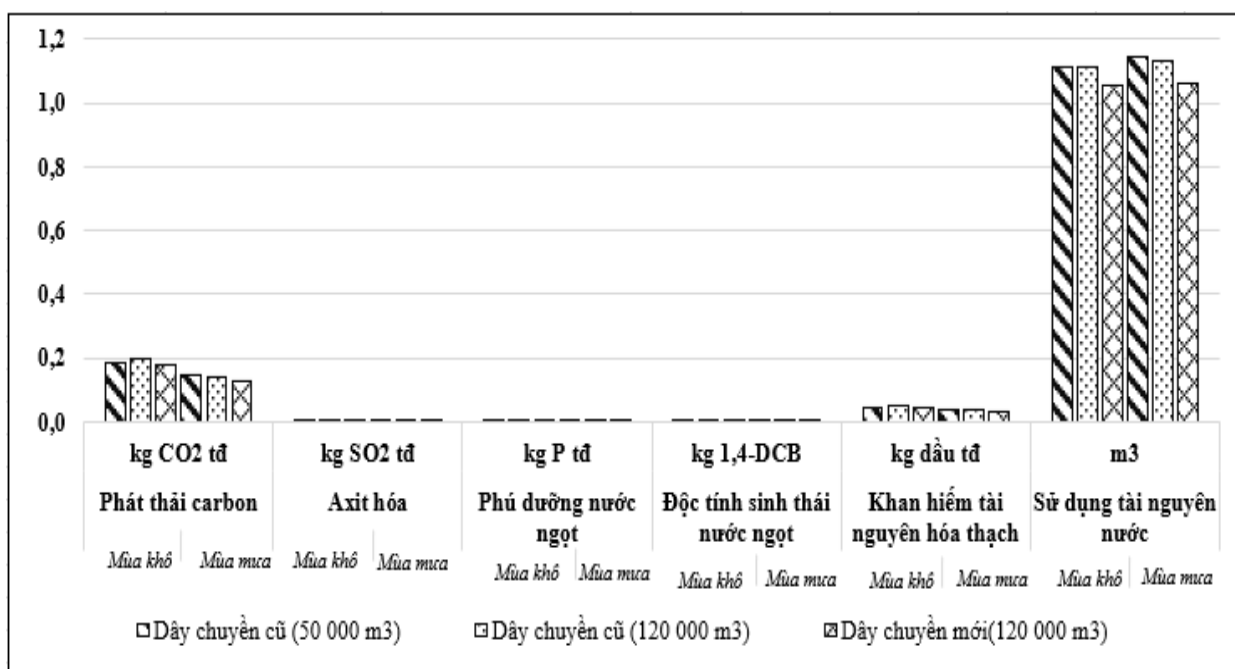
Kết quả khẳng định sự khác biệt rõ rệt về mức độ tác động môi trường giữa các dây chuyền xử lý nước tại NMN Cầu Đỏ, đặc biệt khi xét theo mùa mưa và mùa khô. Trong cả 6 loại tác động được lựa chọn (phát thải carbon, axit hóa, phú dưỡng nước ngọt, độc tính sinh thái nước ngọt, khan hiếm tài nguyên hóa thạch và sử dụng tài nguyên nước), dây chuyền mới 120.000 m³/ngày thể hiện hiệu quả môi trường vượt trội so với hai dây chuyền cũ.

Cụ thể, trong mùa khô, thời điểm hệ thống phải đối mặt với tình trạng nhiễm mặn và thiếu nước, dây chuyền mới chỉ phát thải 0,1767 kg CO₂ tđ/m³, thấp hơn 11,5% so với dây chuyền cũ 120.000 m³/ngày (0,1997 kg CO₂ tđ/m³). Tương tự, các chỉ số về axit hóa và khan hiếm tài nguyên hóa thạch cũng cho thấy dây chuyền mới có mức phát thải thấp hơn khoảng 11–13% so với dây chuyền cũ, phản ánh hiệu quả sử dụng điện năng và hóa chất tốt hơn.

Đáng chú ý, mức sử dụng tài nguyên nước của dây chuyền mới trong mùa khô là 1,063 m³/m³ nước sạch, thấp hơn so với 1,142 m³ ở dây chuyền cũ 50.000 m³ và 1,133 m³ ở dây chuyền cũ 120.000 m³. Kết quả trên nhấn mạnh ưu điểm của dây chuyền mới, giảm thất thoát và tối ưu hóa quy trình xử lý đã góp phần giảm áp lực lên nguồn nước thô, đặc biệt quan trọng trong bối cảnh xâm nhập mặn và suy giảm dòng chảy mùa kiệt.

Ngoài ra, các chỉ số về phú dưỡng và độc tính sinh thái nước ngọt cũng thấp hơn ở dây chuyền mới, khẳng định khả năng kiểm soát tốt hơn các dòng thải giàu dinh dưỡng và hóa chất ra môi trường tiếp nhận. Đây là cơ sở có ý nghĩa quan trọng trong việc bảo vệ hệ sinh thái thủy sinh hạ lưu, vốn đang chịu nhiều áp lực từ BĐKH và đô thị hóa.

Tổng thể, kết quả từ Bảng 3.8 khẳng định rằng dây chuyền mới không chỉ hiệu quả hơn về mặt kỹ thuật mà còn có tính bền vững cao hơn về mặt môi trường. Việc ưu tiên đầu tư, mở rộng hoặc chuyển đổi sang công nghệ xử lý tương tự dây chuyền mới là một hướng đi phù hợp nhằm giảm thiểu tác động môi trường và nâng cao khả năng thích ứng của hệ thống cấp nước đô thị trong tương lai. Tác động đến môi trường của 3 dây chuyền được thể hiện ở Hình 3.11.



Hình 3.11. Tác động của quá trình vận hành NMN Cầu Đỏ đến môi trường

Với hoạt động hiện tại tại NMN Cầu Đỏ, kết quả phát thải KNK được ghi nhận là khá tương đương hoặc thấp hơn so với nhiều nghiên cứu quốc tế sử dụng cùng đơn vị đo lường, phạm vi nghiên cứu. Chẳng hạn, nghiên cứu tại Thổ Nhĩ Kỳ cho thấy mức tiêu thụ điện năng là 0,57 kWh/m³, với phát thải KNK dao động từ 0,2 đến 0,4 kg CO₂ tđ/m³ [85]. Tại Scotland, một nhà máy sử dụng nguồn nước thô tương tự báo cáo mức phát thải KNK là 0,19 kg CO₂ tđ/m³ [40].

Nghiên cứu của Kartikasari tại Indonesia, nơi nhà máy sử dụng nước sông Kabo để cấp nước sinh hoạt, ghi nhận mức tiêu thụ điện năng khoảng 0,25 – 0,27 kWh/m³, sử dụng PAC từ 0,008 – 0,010 kg/m³ và Clo khoảng 0,001 – 0,0012 kg/m³. Phát thải KNK tại đây dao động từ 0,20 – 0,27 kg CO₂ tđ/m³, tương đương với mức phát thải tại NMN Cầu Đỏ trong mùa khô [86].

Tương tự, nghiên cứu của Zhang tại Thiên Tân, Trung Quốc công bố mức phát thải KNK trong giai đoạn vận hành là 0,202 kg CO₂ tđ/m³ [87], tương đương NMN Cầu Đỏ.

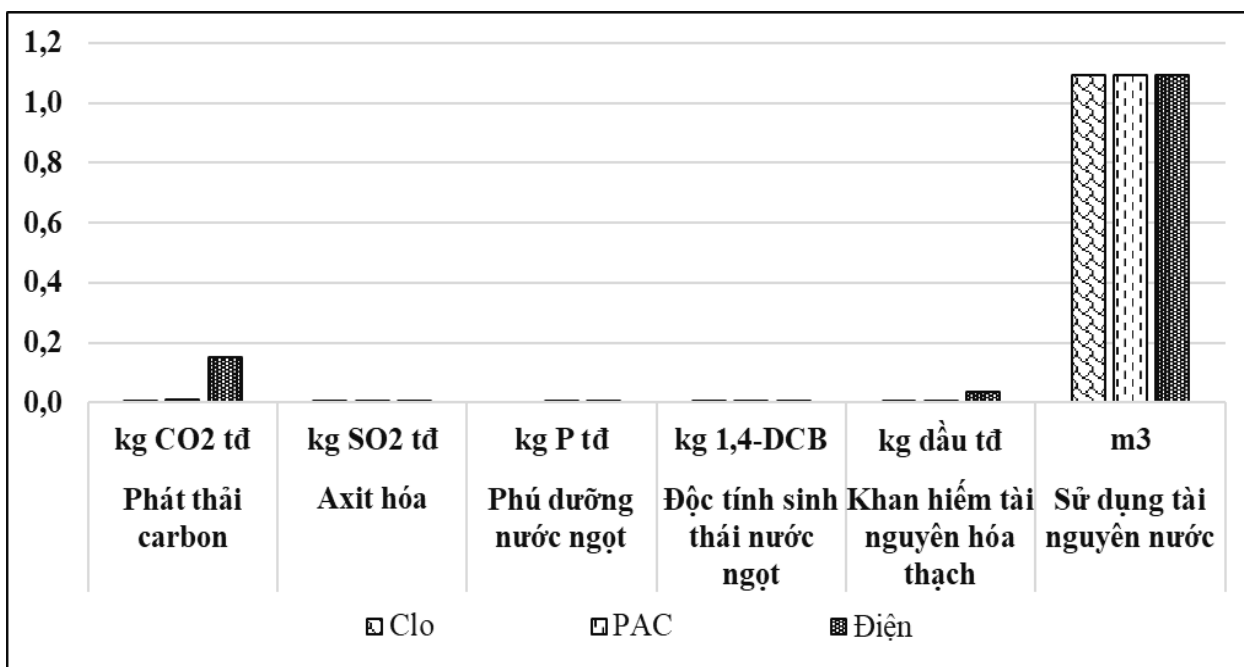
Trong cả các nghiên cứu quốc tế và trong nước, các tác động môi trường đều tập trung chủ yếu vào các nguồn như sử dụng điện năng, hóa chất xử lý và xử lý chất thải, làm nổi bật tính chất phổ biến của các điểm nóng môi trường trong hệ thống cấp nước đô thị.

Dây chuyền 120.000 m³/ngày mới hiệu quả hơn, có tất cả các chỉ số môi trường thấp nhất trong cả 6 loại tác động (thấp hơn 10%). Dây chuyền mới tiết kiệm điện năng và hiệu quả hơn, giảm hơn 11% KNK cũng như phát thải axit hóa so với dây chuyền cũ 120.000 m³. Việc tối ưu hóa sử dụng hóa chất (nhất là PAC) và xử lý bùn sẽ giúp cải thiện đáng kể các chỉ số về phú dưỡng nguồn nước, độc tính sinh thái nước ngọt. Các tác động theo điện năng và hóa chất được thể hiện ở Bảng 3.9 và Hình 3.12:

Bảng 3.9. Tác động liên quan đến việc sử dụng hóa chất và năng lượng tại NMN Cầu Đỏ - Mùa khô

Tác động	Đơn vị	Clo	PAC	Điện
Phát thải carbon	kg CO ₂ tđ	0,0010	0,0093	0,1533
Axit hóa	kg SO ₂ tđ	$3,22 \times 10^{-6}$	$40,26 \times 10^{-6}$	$981,07 \times 10^{-6}$
Phú dưỡng nước ngọt	kg P tđ	$0,607 \times 10^{-7}$	$3,557 \times 10^{-7}$	$7,101 \times 10^{-6}$
Độc tính sinh thái nước ngọt	kg 1,4-DCB	$3,983 \times 10^{-7}$	$69,584 \times 10^{-7}$	$16,806 \times 10^{-6}$
Khan hiếm tài nguyên hóa thạch	kg dầu tđ	0,00025	0,00230	0,03687
Sử dụng tài nguyên nước	m ³	1,094	1,094	1,094

* DCB là 1,4 dichlorobenzen



Hình 3.12. Tác động liên quan đến việc sử dụng hóa chất và năng lượng tại NMN Cầu Đỏ - Mùa khô

Kết quả phân tích từ Bảng 3.9 cho thấy trong quá trình sản xuất nước sạch tại NMN Cầu Đỏ, điện năng tiêu thụ là yếu tố đầu vào gây ra tác động môi trường lớn nhất ở tất cả các tác động được đánh giá. Cụ thể, điện đóng góp tới 0,1533 kg CO₂ đt/m³ (hơn 90% tổng phát thải) trong tác động liên quan đến phát thải carbon, chiếm tỷ trọng vượt trội so với PAC (0,0093 kg CO₂ đt/m³) và Clo (0,0010 kg CO₂ đt/m³). Kết quả phản ánh rõ mối quan hệ giữa tiêu thụ điện năng và phát thải KNK trong hệ thống cấp nước đô thị, đặc biệt trong bối cảnh lưới điện quốc gia vẫn phụ thuộc lớn vào nhiệt điện than. Nghiên cứu ở Thiên Tân – Trung Quốc cũng chỉ ra rằng điện là yếu tố chính gây phát thải, tương tự như tại NMN Cầu Đỏ. Trong đó tỷ lệ đóng góp điện năng tiêu thụ chiếm 67,4% tổng phát thải, hóa chất xử lý chiếm 12,9%, nhiệt năng chiếm 10,4% [84].

Tương tự, trong tác động khan hiếm tài nguyên hóa thạch, điện cũng là nguồn gây tác động lớn nhất với giá trị 0,03687 kg dầu đt/m³, cao hơn gấp 16 lần so với PAC và hơn 147 lần so với Clo. Có thể thấy rằng việc sử dụng điện không chỉ ảnh hưởng đến phát thải KNK mà còn làm gia tăng áp lực lên tài nguyên năng lượng không tái tạo.

Đối với các tác động axit hóa, phú dưỡng nước ngọt và độc tính sinh thái nước ngọt, điện cũng là yếu tố chiếm ưu thế, mặc dù PAC cũng có đóng góp đáng kể, đặc biệt trong độc tính sinh thái nước ngọt ($6,9584 \times 10^{-6}$ kg 1,4-DCB/m³). Điều này phản ánh tác động tiềm tàng từ quá trình sản xuất và sử dụng hóa chất xử lý nước, nhất là PAC – một

hợp chất có nguồn gốc từ quặng nhôm và phụ gia gốc sulfat, thường thải ra các chất vô cơ như oxit nitơ và oxit lưu huỳnh.

Mức sử dụng tài nguyên nước là tương đương giữa các yếu tố đầu vào (1,094 m³/m³ nước sạch), do đây là giá trị tính theo đơn vị chức năng và không thay đổi theo loại vật liệu hay điện năng sử dụng.

Tổng thể, các kết quả từ Bảng 3.9 khẳng định, điện năng tiêu thụ là yếu tố đầu vào có ảnh hưởng lớn nhất đến môi trường trong quá trình xử lý nước tại NMN Cầu Đỏ, đặc biệt trong mùa khô khi nhu cầu khai thác bổ sung từ đập dâng An Trạch tăng cao. Việc tối ưu hóa hiệu suất sử dụng điện năng, chuyển đổi sang nguồn điện tái tạo, và kiểm soát sử dụng hóa chất là những giải pháp tiềm năng nhằm giảm thiểu các tác động môi trường và nâng cao tính bền vững của hệ thống cấp nước đô thị.

Đối với việc sử dụng điện và hóa chất riêng lẻ tại các công trình trong dây chuyền 120.000 m³ thể hiện ở bảng sau:

Bảng 3.10. Các dữ liệu về điện và hóa chất ở dây chuyền 120.000 m³ cũ

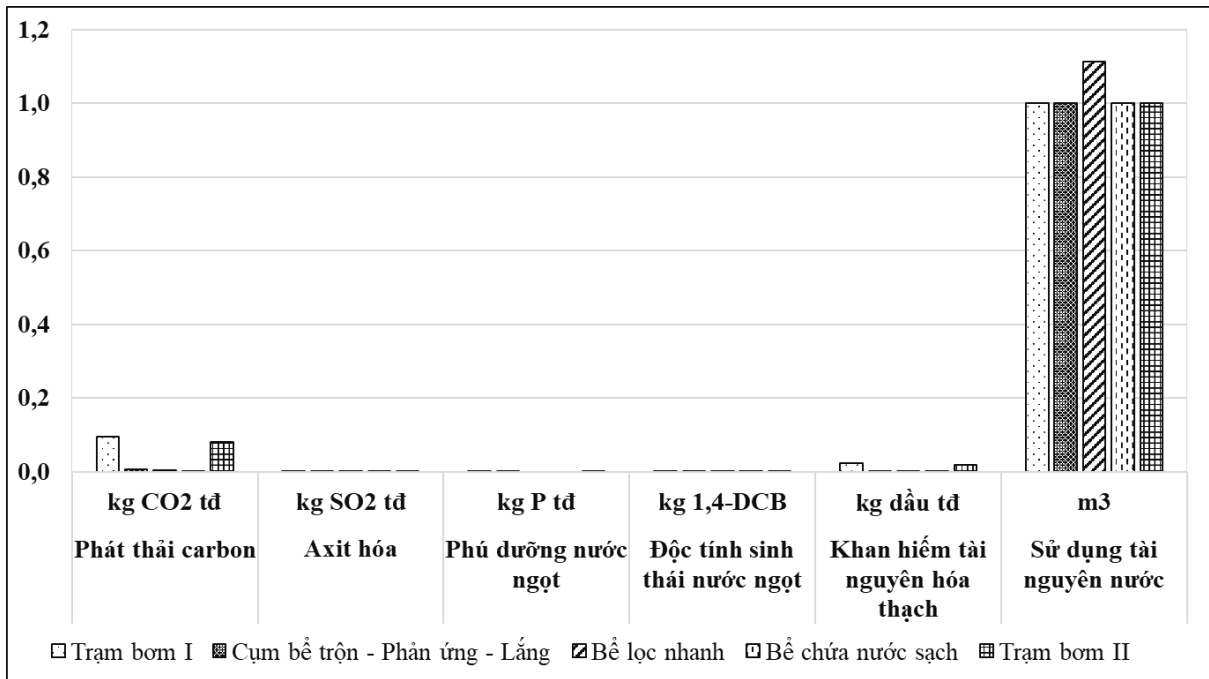
	Trạm bơm 1 (đã có trạm bơm An Trạch)	Cụm bể trộn - Phản ứng - Lắng	Cụm bể lọc	Bể chứa nước sạch	Trạm bơm 2
Điện (kWh/ ngày)	17659,3		559,2		13638,3
PAC (kg/ ngày)		577,3			
Clo (kg/ ngày)				296,6	

Kết quả 06 tác động đến môi trường của từng cụm xử lý trên dây chuyền 120.000 m³ cũ được thể hiện ở Bảng 3.11 và Hình 3.13:

Bảng 3.11. Tác động của từng cụm xử lý trong quá trình vận hành dây chuyền 120.000 m³ cũ đến môi trường

Tác động	Đơn vị	Tổng	Trạm bơm 1	Cụm bể trộn- phản ứng - lắng	Bể lọc nhanh	Bể chứa nước sạch	Trạm bơm 2
Phát thải carbon	kg CO ₂ tđ	0,1883	0,0946	0,0078	0,0033	0,0011	0,0814
Axit hóa	kg SO ₂ tđ	$118,70 \times 10^{-5}$	$60,5 \times 10^{-5}$	$3,61 \times 10^{-5}$	$2,13 \times 10^{-5}$	$0,34 \times 10^{-5}$	$52,07 \times 10^{-5}$
Phú dưỡng nước ngọt	kg P tđ	$87,00 \times 10^{-7}$	$43,80 \times 10^{-7}$	$3,01 \times 10^{-7}$	$1,55 \times 10^{-7}$	$0,64 \times 10^{-7}$	$37,68 \times 10^{-7}$
Độc tính sinh thái nước ngọt	kg 1,4-DCB	$26,0 \times 10^{-6}$	$10,4 \times 10^{-6}$	$5,90 \times 10^{-6}$	$0,37 \times 10^{-6}$	$0,42 \times 10^{-6}$	$8,92 \times 10^{-6}$
Khan hiếm tài nguyên hóa thạch	kg dầu tđ	0,0453	0,0228	0,0195	0,0008	0,0003	0,0195
Sử dụng tài nguyên nước	m ³	1,133	1,000149	1,0000564	1,1135238	1,000014	1,0001284

* DCB là 1,4 dichlorobenzen



Hình 3.13. Tác động của từng cụm xử lý trong quá trình vận hành dây chuyền 120.000 m³ cũ đến môi trường

Với kết quả tính toán theo cụm xử lý ở Bảng 3.11 cho thấy, các tác động môi trường không phân bố đồng đều giữa các cụm công trình trong dây chuyền sản xuất nước tại NMN Cầu Đỏ. Trong đó, trạm bơm 1 và trạm bơm 2 là những điểm gây ra tác động lớn nhất ở hầu hết các tác động được đánh giá, đặc biệt là phát thải carbon và khan hiếm tài nguyên hóa thạch.

Trạm bơm 1 và 2 lần lượt đóng góp 0,0946 kg CO₂ tđ/m³ và 0,0814 kg CO₂ tđ/m³, chiếm tổng cộng hơn 93% lượng phát thải KNK của toàn dây chuyền. Điều đó phản ánh mức tiêu thụ điện năng cao tại các công trình bơm, đặc biệt trong mùa khô khi phải tăng cường khai thác từ đập dâng An Trạch để đối phó với tình trạng nhiễm mặn tại cửa thu Cầu Đỏ.

Tác động axit hóa cũng tập trung chủ yếu tại các trạm bơm, với giá trị lần lượt là $60,5 \times 10^{-5}$ kg SO₂ tđ/m³ tại trạm bơm 1 và $52,07 \times 10^{-5}$ kg SO₂ tđ/m³ tại trạm bơm 2.

Các cụm xử lý như bể trộn – phản ứng – lắng và bể lọc nhanh có mức phát thải thấp hơn về KNK, nhưng lại đóng góp đáng kể vào các tác động phú dưỡng nước ngọt và độc tính sinh thái nước ngọt do liên quan đến việc sử dụng hóa chất như PAC và Clo. Đặc biệt, cụm bể trộn – phản ứng – lắng là nơi sử dụng PAC nhiều nhất, dẫn đến giá trị độc tính sinh thái nước ngọt cao hơn so với các cụm xử lý như bể lọc nhanh và bể chứa nước sạch ($5,90 \times 10^{-6}$ kg 1,4-DCB/m³). Như vậy, việc kiểm soát liều lượng hóa chất và tối ưu hóa quy trình keo tụ là cần thiết để giảm thiểu tác động đến hệ sinh thái thủy sinh.

Trạm bơm 1 và 2 tiếp tục là hai điểm có giá trị khan hiếm tài nguyên hóa thạch cao nhất, lần lượt là 0,0228 kg dầu tđ và 0,0195 kg dầu tđ, phản ánh mức tiêu thụ điện năng lớn từ lưới điện quốc gia vốn phụ thuộc nhiều vào nhiệt điện than.

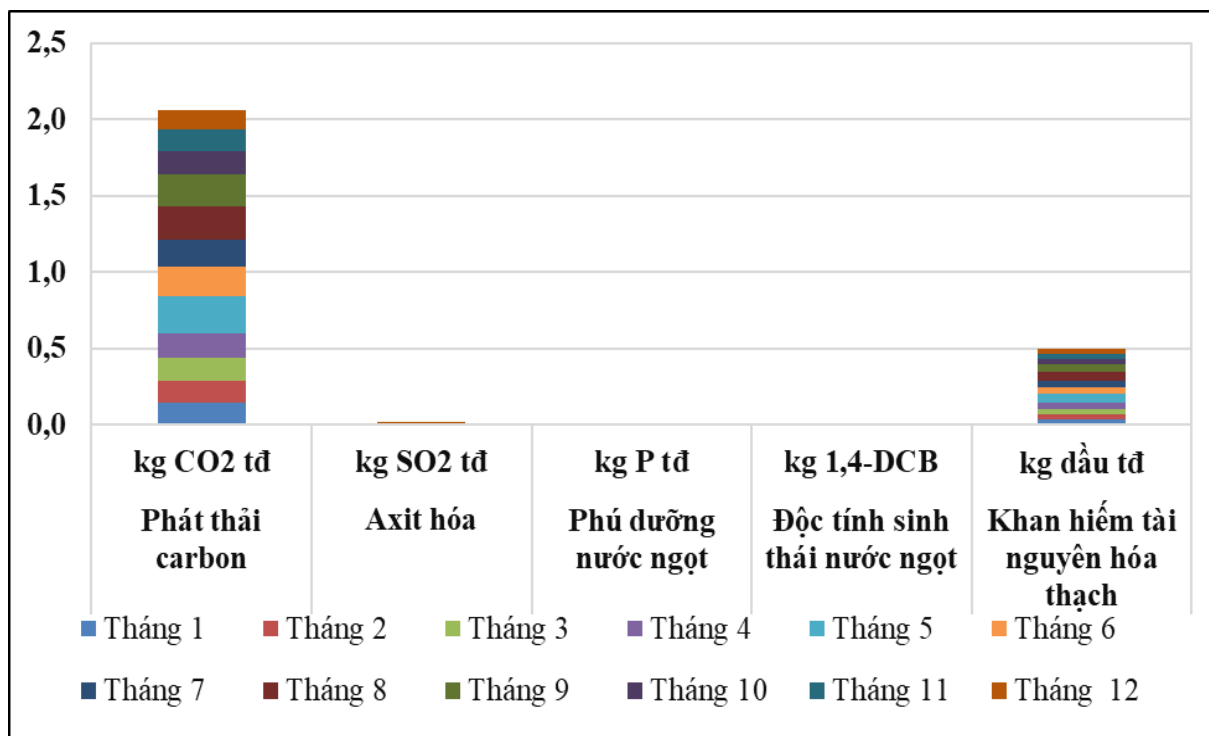
Kết quả trên khẳng định rằng, các công trình tiêu thụ điện năng lớn như trạm bơm là điểm nóng môi trường trong hệ thống xử lý nước, trong khi các cụm xử lý hóa chất cũng cần được giám sát chặt chẽ để giảm thiểu các tác động liên quan đến độc tính và phú dưỡng. Việc phân tích chi tiết theo từng cụm công trình giúp xác định chính xác các điểm cần ưu tiên cải tiến, thông qua đó để hỗ trợ xây dựng các kịch bản vận hành hiệu quả và bền vững hơn cho hệ thống cấp nước đô thị.

Các tác động môi trường trong quá trình vận hành tại NMN Cầu Đỏ không chỉ khác biệt giữa các cụm xử lý mà còn biến động theo từng thời điểm trong năm. Sự thay đổi về chất lượng nguồn nước thô theo mùa, đặc biệt trong mùa khô khi xảy ra hiện tượng nhiễm mặn, dẫn đến sự gia tăng đáng kể trong tiêu thụ điện năng và sử dụng hóa chất xử lý. Xu hướng này dẫn đến sự khác biệt đáng kể về mức độ tác động môi trường, phản ánh rõ tính thời điểm và tính không đồng nhất trong vận hành hệ thống cấp nước. Kết quả theo tháng thể hiện ở Bảng 3.12 và Hình 3.14:

Bảng 3.12. Tác động trung bình từng tháng trong quá trình vận hành dây chuyền 120.000 m³ cũ đến môi trường

Tác động	Đơn vị	Tháng 1	Tháng 2	Tháng 3	Tháng 4	Tháng 5	Tháng 6	Tháng 7	Tháng 8	Tháng 9	Tháng 10	Tháng 11	Tháng 12
Phát thải carbon	kg CO ₂ tđ	0,1450	0,1400	0,1550	0,1547	0,2474	0,1916	0,1776	0,2150	0,2138	0,1473	0,1433	0,1280
Axit hóa	kg SO ₂ tđ	9,09×10 ⁻⁴	8,76×10 ⁻⁴	9,76×10 ⁻⁴	9,77×10 ⁻⁴	15,67×10 ⁻⁴	12,01×10 ⁻⁴	11,16 ×10 ⁻⁴	13,56×10 ⁻⁴	13,48×10 ⁻⁴	9,14×10 ⁻⁴	8,95×10 ⁻⁴	7,99×10 ⁻⁴
Phú dưỡng nước ngọt	kg P tđ	7 ×10 ⁻⁶	6 ×10 ⁻⁶	7 ×10 ⁻⁶	7 ×10 ⁻⁶	11 ×10 ⁻⁶	9 ×10 ⁻⁶	8 ×10 ⁻⁶	10 ×10 ⁻⁶	10 ×10 ⁻⁶	7 ×10 ⁻⁶	7 ×10 ⁻⁶	6 ×10 ⁻⁶
Độc tính sinh thái nước ngọt	kg 1,4-DCB	22 ×10 ⁻⁶	22 ×10 ⁻⁶	22 ×10 ⁻⁶	21 ×10 ⁻⁶	32 ×10 ⁻⁶	29 ×10 ⁻⁶	26 ×10 ⁻⁶	30 ×10 ⁻⁶	30 ×10 ⁻⁶	25 ×10 ⁻⁶	23 ×10 ⁻⁶	20 ×10 ⁻⁶
Khan hiếm tài nguyên hóa thạch	kg dầu tđ	0,0350	0,0337	0,0373	0,0373	0,0596	0,0462	0,0428	0,0518	0,0515	0,0355	0,0345	0,0309
Sử dụng tài nguyên nước	m ³	1,0997	1,1007	1,1168	1,1252	1,0952	1,0869	1,0909	1,1486	1,1412	1,1493	1,1989	1,1361

* DCB là 1,4 dichlorobenzen



Hình 3.14. Tác động theo tháng của dây chuyền 120.000 m³ cũ đến môi trường

Bảng kết quả 3.12 thể hiện đầy đủ các tác động môi trường có sự biến động rõ rệt theo từng tháng, phản ánh sự phụ thuộc của hệ thống xử lý nước vào điều kiện thủy văn và chất lượng nguồn nước thô. Đặc biệt, các tác động như phát thải carbon, khan hiếm tài nguyên hóa thạch, và sử dụng tài nguyên nước đều đạt giá trị cao nhất trong khoảng thời gian từ tháng 5 đến tháng 9, trùng với mùa khô và thời điểm xâm nhập mặn diễn ra mạnh tại cửa thu Cầu Đỏ.

Trong tháng 5, tháng cao điểm của mùa khô, lượng phát thải KNK đạt 0,2474 kg CO₂ đ/m³, cao hơn gần 70% so với tháng 12 (0,1280 kg CO₂ đ/m³). Tương tự, mức độ khan hiếm tài nguyên hóa thạch trong tháng 5 là 0,0596 kg dầu đ/m³, cao hơn gấp đôi so với các tháng mùa mưa như tháng 1 và tháng 2. Kết quả này phản ánh rõ ràng việc tăng cường khai thác từ đập dâng An Trạch để đối phó với tình trạng nhiễm mặn đã làm gia tăng đáng kể lượng điện tiêu thụ, kéo theo các tác động môi trường liên quan.

Đối với tác động liên quan đến sử dụng tài nguyên nước, giá trị cao nhất được ghi nhận vào tháng 11 (1,1989 m³/m³ nước sạch), đồng nghĩa với tỷ lệ thất thoát và tiêu hao nước trong quá trình xử lý tăng mạnh vào cuối mùa mưa. Vấn đề này liên quan đến chất lượng nước thô suy giảm, độ đục tăng vào mùa mưa, đòi hỏi việc xả lắng, vệ sinh diễn ra với tần suất nhiều hơn, tiêu tốn nhiều tài nguyên nước của nhà máy.

Các tác động phú dưỡng nước ngọt và độc tính sinh thái nước ngọt cũng có xu hướng tăng trong mùa khô, đặc biệt vào tháng 5 và tháng 8. Đây là những thời điểm cần tăng cường kiểm soát quy trình xử lý để giảm thiểu tác động đến hệ sinh thái thủy sinh.

Kết quả chung khẳng định rằng mùa khô là giai đoạn hệ thống cấp nước đô thị chịu áp lực môi trường lớn nhất, cả về tiêu thụ điện năng, phát thải KNK và sử dụng tài nguyên nước. Việc tối ưu hóa vận hành theo mùa, tăng cường dự trữ nước ngọt và áp dụng công nghệ xử lý hiệu quả hơn là những giải pháp cần thiết để nâng cao tính bền vững của hệ thống trong bối cảnh BĐKH và xâm nhập mặn ngày càng nghiêm trọng.

Với chỉ số WSI tại NMN Cầu Đỏ vào mùa khô là 1,035, để lượng hóa tác động khan hiếm nước trong khung LCIA, nghiên cứu sử dụng chỉ số WSI như một hệ số đặc trưng (Characterization Factor – CF) theo cách tiếp cận của Pfister và Ridoutt [56]. Chỉ số WSF (Water Scarcity Footprint) được tính theo công thức:

$$WSF = WC \times WSI = 1,133 \times 1,035 = 1,17 \text{ (m}^3 \text{ nước-tương đương)}$$

Trong đó:

- WSF: Water Scarcity Footprint (chỉ báo tác động môi trường liên quan đến nước, đơn vị: m³ nước quy đổi – mét khối nước quy đổi theo khan hiếm trên một mét khối nước sản xuất).

- WC: Lượng nước tiêu thụ: 1,133 m³ thô/1 m³ nước sạch (Kết quả phương pháp LCA mùa khô tại đây chuyển 120.000 m³/ngày cũ).

- WSI: chỉ số khan hiếm nước tại Cầu Đỏ trong mùa khô 1,035.

Mỗi 1 m³ nước sạch được sản xuất tại NMN Cầu Đỏ trong mùa khô sẽ gây ra tác động môi trường tương đương với việc tiêu thụ 1,17 m³ nước trong điều kiện khan hiếm. $WSF > 1$ thể hiện nguồn nước đang bị khai thác vượt quá khả năng tái tạo, tác động khan hiếm nước rất cao.

Với kết quả đánh giá ở trên đòi hỏi phải có giải pháp quản lý tổng hợp tài nguyên nước – năng lượng như: Tối ưu vận hành trạm bơm và giảm tổn thất điện; Tăng dự trữ và đa dạng hóa nguồn nước; Ứng dụng công nghệ xử lý tiết kiệm hóa chất và năng lượng.

Nội dung này là bằng chứng định lượng rõ ràng, khẳng định tính dễ tổn thương của hệ thống cấp nước Đà Nẵng dưới tác động của BĐKH và xâm nhập mặn, mặt khác làm nổi bật ý nghĩa của việc tích hợp chỉ số WSI và phương pháp LCA trong quản lý bền vững tài nguyên nước.

3.3. Đánh giá độ chính xác và kiểm định mô hình tích hợp WSI - LCA theo ba cấp độ

Để khẳng định mức độ chính xác của mô hình tích hợp WSI - LCA ứng dụng cho hệ thống cấp nước Đà Nẵng, nghiên cứu tiến hành quy trình đánh giá mô hình theo 3 cấp độ chuẩn hóa quốc tế bao gồm: Kiểm định mô hình (Validation) qua đối chiếu thực tế; Phân tích độ nhạy (Sensitivity Analysis) đối với các tham số cốt lõi; Phân tích tính không chắc chắn (Uncertainty Analysis) bằng phương pháp Monte Carlo dựa trên ma trận phả hệ dữ liệu Pedigree.

3.3.1. Kiểm định mô hình (Validation)

Để khẳng định tính chính xác của bộ dữ liệu đầu vào trước khi tiến hành tính toán chỉ số WSI và thực hiện phương pháp LCA, nghiên cứu thực hiện quy trình kiểm định mô hình (Validation) thông qua việc đối chiếu kết quả mô phỏng thủy văn với số liệu vận hành khai thác thực tế tại địa bàn TP. Đà Nẵng qua hai năm đại diện (2020 và 2023).

Đối chiếu thực tế vận hành năm 2023: Số liệu quan trắc thực tế trong 4 tháng đầu năm 2023, cửa thu Cầu Đỏ duy trì khai thác ổn định từ 250.000 - 320.000 m³/ngày. Tuy nhiên, từ tháng 5 đến tháng 9/2023, do xâm nhập mặn bất thường và kéo dài, cửa thu Cầu Đỏ nhiều lần phải ngừng khai thác hoàn toàn. Để cân bằng nguồn nước, trạm bơm An Trạch đã phải tăng công suất khai thác mạnh lên mức 300.000 - 350.000 m³/ngày, trở thành nguồn cấp nước chính cho đô thị, kéo theo sự gia tăng áp lực vận hành và chi phí điện năng trên tuyến dẫn nước thô. Diễn biến này trùng khớp với kết quả mô phỏng lượng nước về (WR) từ mô hình MIKE SHE, khi mô hình cho thấy sự suy giảm nghiêm trọng của dòng chảy và sự hạn chế khả năng khai thác tại cửa thu Cầu Đỏ trong mùa khô.

Đối chiếu thực tế vận hành năm 2020: Đây là năm cực đoan có lượng nước về trong các tháng mùa kiệt (tháng 3 đến tháng 8) thấp kỷ lục (trung bình tháng 4 chỉ đạt 17,5 m³/s). Kết quả mô phỏng của mô hình đã tái hiện chính xác tình trạng khan hiếm và suy giảm chất lượng nước nghiêm trọng diễn ra từ cuối tháng 4 đến giữa tháng 5 năm 2020, giai đoạn mà nhu cầu sử dụng nước ở hạ lưu sông Vu Gia vượt quá khả năng cung cấp của nguồn nước.

Đánh giá mức độ tương thích toàn diện: Sự tương đồng chặt chẽ giữa kết quả mô phỏng dòng chảy theo mô hình MIKE SHE và số liệu khai thác thực tế tại nhà máy không chỉ khẳng định mô hình đã phản ánh đúng đặc trưng thủy văn lưu vực, mà còn chứng minh khả năng tái hiện chính xác mức độ nhạy cảm của nguồn nước trong các điều kiện biên cực đoan. Bên cạnh đó, các kết quả đánh giá lượng nước về tại vị trí

khai thác của NMN Cầu Đỏ trong nghiên cứu này đồng nhất với các tài liệu pháp lý mang tính chiến lược, bao gồm Điều chỉnh quy hoạch cấp nước TP. Đà Nẵng [4] và Quy hoạch tổng hợp lưu vực sông Vu Gia - Thu Bồn [76].

Bên cạnh việc trùng khớp với các chuỗi số liệu thực tế năm 2020 và 2023, độ tin cậy và khả năng dự báo định lượng của mô hình thủy văn đầu vào còn được minh chứng rõ ràng thông qua các chỉ tiêu đánh giá sai số toán học đã được thiết lập tại Bảng 3.2. Cụ thể, tại trạm Thành Mỹ, hệ số tương quan R đạt 0,820882 và chỉ số NASH đạt 0,662997; tại trạm Nông Sơn, hệ số R đạt 0,873736 và chỉ số NASH đạt 0,748808. Các giá trị này đều vượt ngưỡng tiêu chuẩn cho phép đối với mô hình thủy văn lưu vực phức tạp ($NASH > 0,65$ và $R > 0,80$), khẳng định mô hình kiểm soát tốt sai số hệ thống, đạt mức độ phù hợp cao và đủ năng lực dự báo các kịch bản suy giảm nguồn nước thô phục vụ cho mô hình tích hợp LCA-WSI.

Sự tương thích cao giữa kết quả mô phỏng, số liệu thực tế và các quy hoạch chiến lược là minh chứng khoa học khẳng định bộ dữ liệu WR được tạo lập có độ tin cậy cao, đáp ứng yêu cầu làm cơ sở dữ liệu đầu vào cho mô hình tích hợp WSI - LCA trong các bước phân tích tiếp theo của luận án.

3.3.2. Phân tích độ nhạy của các tham số đầu vào (Sensitivity Analysis)

Độ tin cậy của mô hình được kiểm tra thông qua phân tích độ nhạy đối với các biến đầu vào quan trọng như chỉ số WSI, lượng điện tiêu thụ, hóa chất xử lý (PAC, Clo). Khi thay đổi các giá trị đầu vào trong phạm vi hợp lý, kết quả đánh giá môi trường có sự biến động tương ứng, đặc biệt trong các tác động như phát thải carbon, khan hiếm tài nguyên hóa thạch và sử dụng tài nguyên nước. Có thể thấy rằng mô hình có khả năng phản ánh đúng mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào đến kết quả đánh giá, giúp xác định các yếu tố cần được ưu tiên kiểm soát trong vận hành hệ thống. Trình tự kiểm tra:

- Lựa chọn tham số đầu vào để kiểm tra độ nhạy: tiêu thụ điện (kWh/m^3).
- Thay đổi tham số ở các mức $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 50\%$ và ghi nhận sự biến động của các chỉ số đầu ra như CO_2 tđ/ m^3 .

Kết quả thể hiện ở Bảng 3.13.

Bảng 3.13. Kết quả phát thải carbon khi thay đổi tham số đầu vào

Mức thay đổi điện năng	Phát thải carbon (kg CO ₂ tđ/m ³)	Tỷ lệ thay đổi so với giá trị gốc (0,1997 kg CO ₂ tđ/m ³)
10%	0,2236	11,97%
20%	0,2430	21,70%
50%	0,3012	50,82%
-10%	0,1849	-7,41%
-20%	0,1655	-17,13%
-50%	0,1073	-46,27%

Phát thải carbon gần như tuyến tính với mức thay đổi điện năng đầu vào và biến số điện năng có độ nhạy rất cao đối với chỉ số liên quan KNK. Với mức thay đổi $\pm 10\%$, phát thải đã biến động gần $\pm 12\%$, hàm ý rằng điện tiêu thụ là một biến đầu vào có ảnh hưởng lớn đến kết quả phương pháp LCA. Đây là một “điểm nóng” cần được kiểm soát trong quy trình vận hành. Điện năng là tham số chính chi phối tác động KNK trong toàn bộ quy trình sản xuất nước sạch. Kết quả khẳng định rằng cải thiện hiệu suất sử dụng năng lượng hoặc thay thế nguồn điện bằng năng lượng tái tạo có thể giảm đáng kể lượng phát thải carbon.

Phân tích độ nhạy này giúp hỗ trợ ra quyết định trong việc lựa chọn công nghệ hoặc kịch bản vận hành hiệu quả hơn.

3.3.3. Phân tích tính không chắc chắn của dữ liệu (Uncertainty Analysis)

Trong nghiên cứu mô hình tích hợp WSI - LCA cho một hệ thống kỹ thuật phức tạp như cấp nước TP. Đà Nẵng, tính không chắc chắn của kết quả đầu ra là điều không thể tránh khỏi, xuất phát từ sai số đo đạc, sự biến động theo mùa của lưu lượng nước thô, hay tính đại diện của dữ liệu kiểm kê (LCI). Để định lượng và kiểm soát rủi ro này, nghiên cứu thực hiện quy trình phân tích tính không chắc chắn bằng cách kết hợp phương pháp ma trận phả hệ dữ liệu (Pedigree Matrix) được đề xuất bởi Weidema [88] và phương pháp mô phỏng Monte Carlo theo tiêu chuẩn ISO 14044.

Phương pháp ma trận phả hệ dữ liệu (Pedigree Matrix) được áp dụng phổ biến trong các nghiên cứu LCA. Đây là công cụ đánh giá chất lượng và độ tin cậy của dữ liệu đầu vào trong phương pháp LCA. Phương pháp này giúp định lượng mức độ tin cậy của dữ liệu dựa trên một số tiêu chí: nguồn gốc, đại diện, độ chính xác, tính đầy đủ, độ mới...

(a) Các dòng dữ liệu được đánh giá

Dựa trên bảng kiểm kê vòng đời (LCI) và tính toán chỉ số WSI tại NMN Cầu Đỏ, các dòng dữ liệu chính được đưa vào đánh giá chất lượng gồm:

- Điện năng tiêu thụ (kWh/m³) theo từng dây chuyền và từng tháng.
- Lượng PAC và Clo sử dụng (kg/m³).
- Lượng nước thô khai thác và nước sạch đầu ra.
- Dữ liệu thủy văn: dòng chảy mùa kiệt, dòng chảy môi trường (EWR), lượng nước về (WR).
- Hệ số phát thải: CO₂ từ điện, PAC, Clo (từ Ecoinvent v3.11).

(b) Các tiêu chí đánh giá chất lượng dữ liệu

Các tiêu chí đánh giá chất lượng dữ liệu sử dụng cho đánh giá hiện trạng khai thác và sản xuất nước tại NMN Cầu Đỏ, theo phương pháp ma trận phả hệ dữ liệu (Pedigree Matrix) được thể hiện ở Bảng 3.14.

Bảng 3.14. Tiêu chí đánh giá chất lượng dữ liệu theo phương pháp ma trận phả hệ Pedigree Matrix

Tiêu chí	Mô tả	Thang điểm (1 = tốt nhất, 5 = kém nhất)
Độ chính xác	Dữ liệu đo trực tiếp hay ước tính	1: Đo trực tiếp tại NMN Cầu Đỏ 3: Tính toán từ mô hình 5: Giả định hoặc lấy từ tài liệu thứ cấp
Đại diện thời gian	Dữ liệu có cập nhật mới nhất không	1: Năm 2023 3: Từ 2018–2020 5: Trước 2010
Đại diện không gian	Dữ liệu có phản ánh đúng địa phương không	1: Đà Nẵng 3: Việt Nam 5: Toàn cầu
Đại diện công nghệ	Dữ liệu có phản ánh đúng công nghệ đang dùng không	1: Đúng dây chuyền NMN Cầu Đỏ 3: Công nghệ tương đương 5: Công nghệ khác
Tính đầy đủ	Có đủ dữ liệu để mô tả dòng vật chất không	1: Đầy đủ theo tháng 3: Trung bình năm 5: Thiếu dữ liệu

Kết quả đánh giá các dòng dữ liệu được thể hiện trong các Bảng 3.15 (a,b,c,d)

Bảng 3.15 (a). Kết quả đánh giá các dòng dữ liệu điện năng tiêu thụ, lượng nước thô khai thác và nước sạch đầu ra.

Tiêu chí	Đánh giá	Điểm
Độ chính xác	Đo trực tiếp từ hoạt động của nhà máy	1
Đại diện thời gian	Dữ liệu năm 2023	1
Đại diện không gian	NMN Cầu Đỏ – Đà Nẵng	1
Đại diện công nghệ	Đúng dây chuyền đang vận hành	1
Tính đầy đủ	Dữ liệu theo ngày hoạt động tại nhà máy, chi tiết từng cụm công trình	1

Tổng điểm: 5/5. Chất lượng dữ liệu rất cao

Bảng 3.15 (b). Kết quả đánh giá các dòng dữ liệu PAC, Clo sử dụng

Tiêu chí	Đánh giá	Điểm
Độ chính xác	Đo trực tiếp từ hệ thống hòa trộn hóa chất và Clo được tổng hợp trong báo cáo vận hành	1
Đại diện thời gian	Dữ liệu năm 2023	1
Đại diện không gian	NMN Cầu Đỏ – Đà Nẵng	1
Đại diện công nghệ	Đúng dây chuyền đang vận hành	1
Tính đầy đủ	Dữ liệu theo ngày hoạt động tại nhà máy	1

Tổng điểm: 5/5. Chất lượng dữ liệu có độ tin cậy rất cao

Bảng 3.15 (c). Kết quả đánh giá các dòng dữ liệu hệ số phát thải từ điện

Tiêu chí	Đánh giá	Điểm
Độ chính xác	Dữ liệu chính thức từ cơ quan nhà nước	1
Đại diện thời gian	Cập nhật năm 2024	1
Đại diện không gian	Việt Nam – đúng địa phương	1
Đại diện công nghệ	Phản ánh lưới điện thực tế	1
Tính đầy đủ	Có đầy đủ thông tin về cơ cấu nguồn điện	1

Tổng điểm: 5/5. Chất lượng dữ liệu có độ tin cậy rất cao

Bảng 3.15 (d). Kết quả đánh giá các dòng dữ liệu hệ số phát thải từ PAC, Clo

Tiêu chí	Đánh giá	Điểm
Độ chính xác	Dữ liệu từ Ecoinvent – thị trường toàn cầu	5
Đại diện thời gian	Phiên bản v3.11 – cập nhật gần đây	5
Đại diện không gian	Dữ liệu phát thải từ thị trường toàn cầu – GLO – không phản ánh riêng Việt Nam	5
Đại diện công nghệ	Công nghệ sản xuất PAC, Clo phổ biến	3
Tính đầy đủ	Có thông tin về chuỗi cung ứng	1

Tổng điểm: **19/5**. Chất lượng dữ liệu thấp

Kết quả đánh giá chất lượng dữ liệu theo ma trận phả hệ Pedigree nhấn mạnh rằng, bộ dữ liệu sử dụng trong mô hình tích hợp WSI - LCA có mức độ tin cậy cao và phù hợp với bối cảnh nghiên cứu.

Nhóm dữ liệu điện năng, nước thô, nước sạch, PAC, Clo và hệ số phát thải điện đạt điểm chất lượng rất cao (tổng điểm 5), nhờ được thu thập trực tiếp tại NMN Cầu Đỏ, và hệ số phát thải cho Việt Nam, có tính đại diện tốt theo thời gian, không gian và công nghệ. Chất lượng dữ liệu đầu vào này bảo đảm mức độ chính xác và nhất quán cho các phép tính LCIA, đặc biệt đối với các loại tác động nhạy với tiêu thụ điện và khai thác nước.

Ngược lại, các dữ liệu liên quan đến phát thải do sử dụng PAC và Clo dù có độ tin cậy và tính đầy đủ tương đối tốt, nhưng điểm đại diện không gian thấp (do dùng hệ số phát thải từ thị trường toàn cầu – GLO của Ecoinvent). Tuy mức độ này vẫn nằm trong giới hạn chấp nhận được của LCA, song cần được lưu ý khi diễn giải các tác động liên quan đến hóa chất xử lý.

Nhìn chung, bộ dữ liệu đáp ứng yêu cầu chất lượng để phục vụ đánh giá vòng đời theo chuẩn ISO 14040/14044, trong đó các dữ liệu trọng yếu nhất (điện và nước) đều có chất lượng rất cao. Nhờ đó khẳng định rằng các kết quả mô phỏng, tính toán theo mô hình tích hợp WSI - LCA và phân tích tác động ở Chương 3 được xây dựng trên nền tảng dữ liệu đáng tin cậy và có thể sử dụng làm cơ sở cho việc so sánh các kịch bản quy hoạch ở Chương 4.

Tiếp theo, các thông số phân phối xác suất trên được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho mô hình mô phỏng ngẫu nhiên Monte Carlo với 10.000 lần lặp. Các dữ liệu

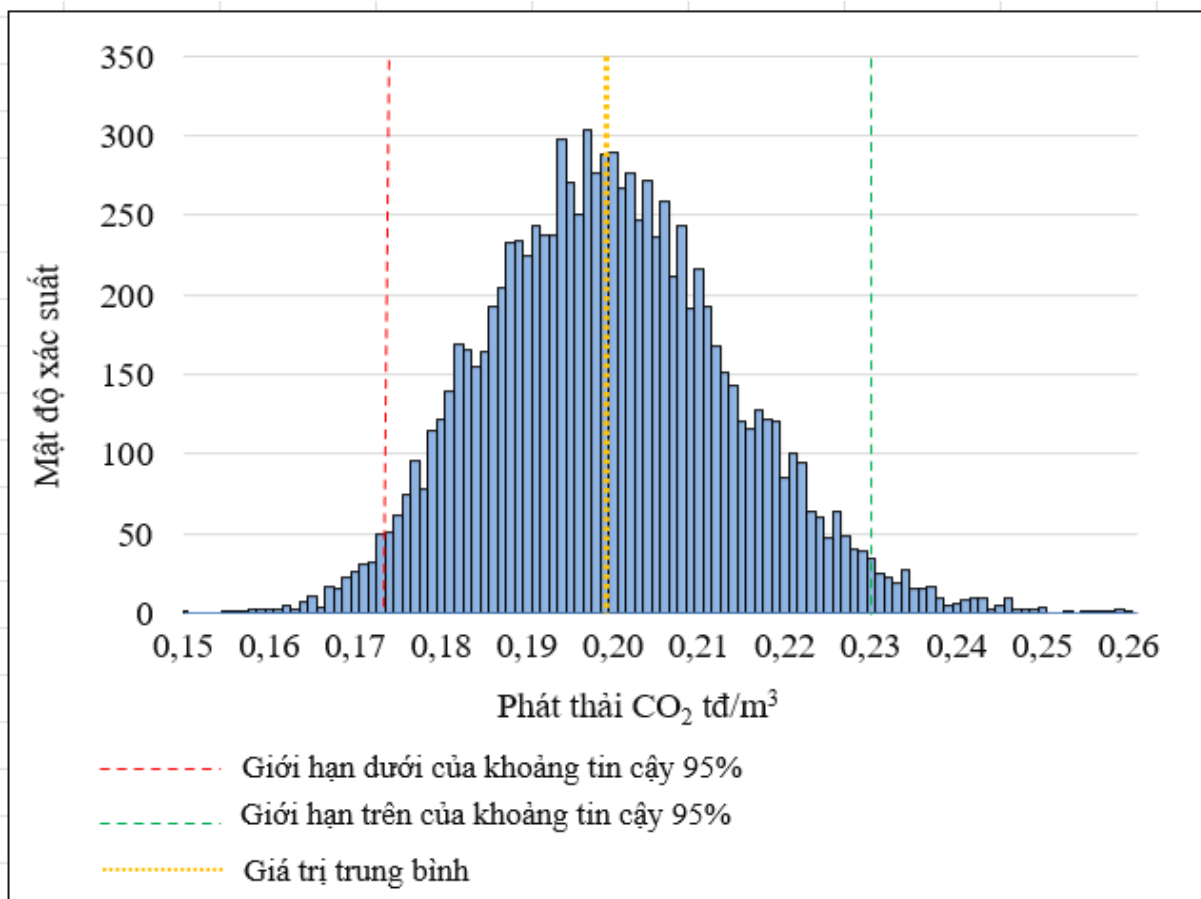
đầu vào (như tiêu thụ điện năng, lượng hóa chất, hệ số phát thải, hay thông tin trong cơ sở dữ liệu nền) trong mô hình tích hợp này thường chứa mức độ bất định nhất định, do được thu thập từ thực tế vận hành của nhà máy, từ các nguồn thống kê của trạm đo. Để phân tích tính không chắc chắn của dữ liệu trong mô hình tích hợp WSI - LCA trong nghiên cứu này, mô phỏng Monte Carlo với 10.000 vòng lặp đã được thực hiện dựa trên bộ dữ liệu đầu vào mùa khô của dây chuyền 120.000 m³/ngày cũ của NMN Cầu Đỏ. Các thông số được lựa chọn (điện năng tiêu thụ, lượng nước vào, lượng nước sạch ra, hóa chất xử lý và hệ số phát thải tương ứng) được gán phân phối xác suất log-normal, với hệ số biến thiên hình học (SDg) xác định từ ma trận phả hệ dữ liệu (Pedigree Matrix) theo phương pháp của Weidema và Wesnæs [88] ở trên. Lựa chọn này dựa trên hai nền tảng khoa học chính:

- Tính chất toán học phù hợp với thực tế kỹ thuật: Phân bố Lognormal giới hạn miền giá trị luôn dương ($x > 0$), phù hợp với thực tế tiêu thụ tài nguyên. Ngoài ra, phân bố này có khả năng mô tả chính xác các hàm mật độ xác suất lệch phải - đặc trưng cho các kịch bản hệ thống phải đột ngột tăng vọt lượng hóa chất và điện năng vận hành trong các giai đoạn mặn xâm nhập bất thường.

- Tính đồng bộ với công cụ kiểm soát chất lượng dữ liệu: Theo phương pháp luận thiết lập dữ liệu của hệ thống Ecoinvent, phân bố Lognormal là cấu trúc toán học duy nhất cho phép liên kết trực tiếp để chuyển đổi các điểm số định tính từ Ma trận phả hệ Pedigree thành các tham số định lượng.

Sự rõ ràng trong việc lựa chọn phân bố xác suất này bảo đảm cho quá trình lặp 10.000 lần của mô hình Monte Carlo phản ánh đúng bản chất vận hành thực tế của hệ thống cấp nước.

Kết quả sự phân bố của phát thải KNK (CO₂ tđ) từ hệ thống sản xuất nước sạch trong mùa khô, với 10.000 vòng lặp mô phỏng được thể hiện ở Hình 3.15 và phát thải KNK tương ứng với từng dữ liệu điện, PAC, Clo được thể hiện ở Hình 3.16:



Hình 3.15. Biểu đồ thể hiện sự phân phối xác suất của phát thải KNK (CO₂ tđ) từ hệ thống sản xuất nước sạch theo mô phỏng Monte Carlo

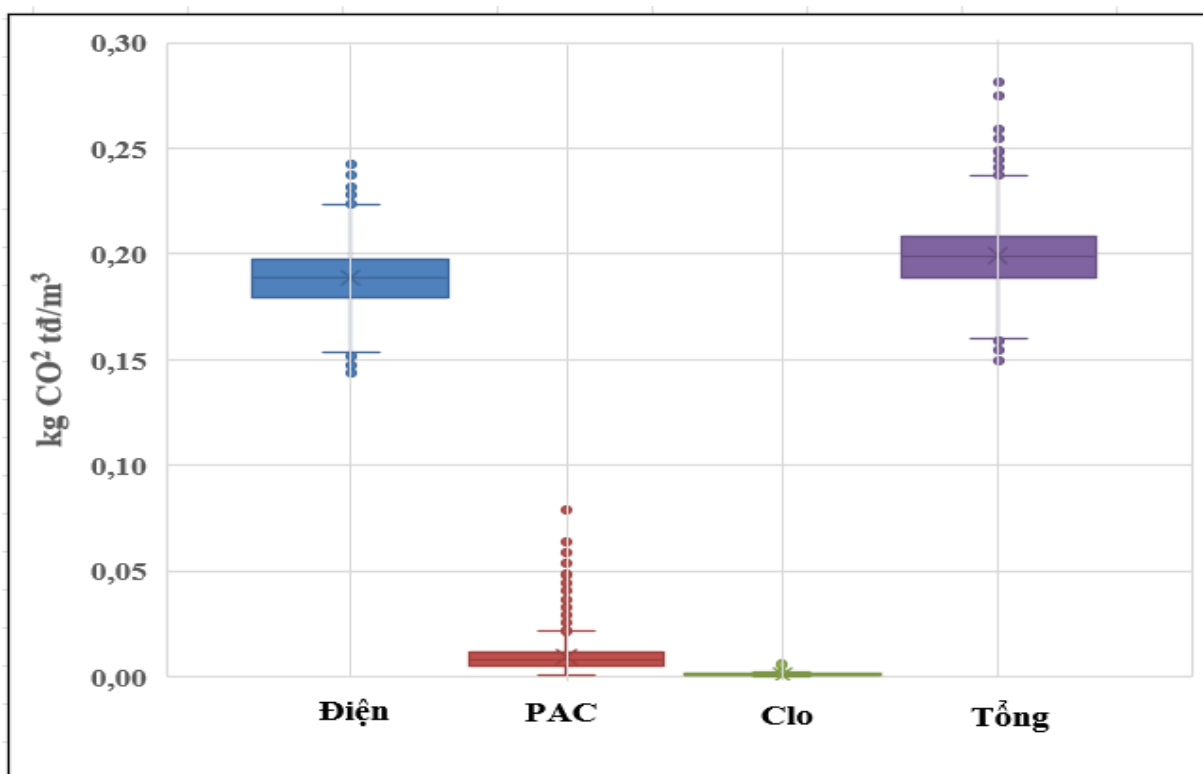
Bảng 3.16. Các thông số cơ bản của mô phỏng Monte Carlo thực hiện trên dữ liệu dây chuyền 120.000 m³/ngày.

Thông số	Trung bình	Độ lệch chuẩn	Khoảng tin cậy 95%
Tổng phát thải KNK	0,1997 kg CO ₂ tđ/m ³	±0,015	0,173 – 0,231
Phát thải điện	0,188 kg CO ₂ tđ/m ³	±0,013	0,16510 – 0,21526
PAC	0,0095 kg CO ₂ tđ/m ³	±0,00245	0,00548 – 0,01493
Clo	0,0010 kg CO ₂ tđ/m ³	±0,00027	0,00059 – 0,00164

Kết quả mô phỏng tổng lượng phát thải KNK vào mùa khô của NMN dao động quanh 0,20 kg CO₂ tđ/m³, với khoảng tin cậy 95% từ 0,173 đến 0,231 kg CO₂ tđ/m³. Biến động chỉ ở mức ± 0,015 kg CO₂ tđ/m³ so với giá trị trung bình, thể hiện mức độ ổn định cao của kết quả đánh giá. Trong đó, điện năng tiêu thụ chiếm tỷ trọng trung bình khoảng 94–95% tổng phát thải, trong khi các hóa chất như PAC và Clo chỉ chiếm

khoảng 5- 6%. Với kết quả này, việc giảm điện năng tiêu thụ và chuyển đổi sang năng lượng tái tạo là hướng ưu tiên để giảm phát thải KNK trong hệ thống cấp nước của TP. Đà Nẵng.

Ngoài ra, cần cải thiện dữ liệu đầu vào (đặc biệt là hóa chất) nhằm giảm độ không chắc chắn và tăng tính chính xác cho các nghiên cứu LCA sau này.



Hình 3.16. Kết quả khí thải từ mô phỏng Monte Carlo

Sự dao động nhỏ của kết quả đầu ra, thể hiện mô hình tích hợp WSI - LCA có tính ổn định và khả năng phản ứng hợp lý trước biến động dữ liệu.

Phân tích Monte Carlo thể hiện mô hình tích hợp WSI - LCA được đề xuất có độ tin cậy cao để ứng dụng trong đánh giá hiệu quả của quá trình khai thác và sản xuất nước sạch. Các kết quả mô phỏng khẳng định rằng, ngay cả khi tồn tại độ không chắc chắn nhất định trong dữ liệu đầu vào, kết quả tổng hợp của chỉ số WSI và phương pháp LCA vẫn ổn định và đáng tin cậy. Cách tiếp cận này phù hợp với hướng dẫn của ISO 14044:2011 về việc sử dụng phân tích độ không chắc chắn nhằm kiểm chứng tính bền vững của phương pháp LCA [23].

Bên cạnh các thông số mang tính chất đặc thù địa phương và có cơ sở tính toán khoa học vững chắc, được đánh giá qua ma trận phả hệ Pedigree và mô phỏng Monte Carlo, kết quả đầu ra của mô hình tích hợp WSI - LCA chịu ảnh hưởng đáng kể bởi các giả định phương pháp luận:

- Ranh giới hệ thống giới hạn từ khâu khai thác đến điểm đầu mạng lưới cấp nước, giúp đánh giá hiệu quả tác động của công nghệ và nguồn nước thô, giả định này bỏ qua giai đoạn phân phối trên mạng lưới cấp nước. Với tỷ lệ thất thoát nước thực tế trên mạng lưới cấp nước Đà Nẵng hiện nay khoảng 14 - 16% [4], lượng nước thô thực tế cần khai thác và xử lý tại nhà máy để sản xuất ra 1 m³ nước sạch cấp cho đối tượng dùng nước sẽ cao hơn tương ứng từ 14 - 16%. Do đó, lượng hóa chất và điện năng tiêu thụ thực tế tính trên đơn vị chức năng cấp đến đối tượng dùng nước sẽ cao hơn kết quả mô hình hóa.

- Giả định về hệ số phát thải nền: Do hạn chế về cơ sở dữ liệu quốc gia tại Việt Nam, các hệ số phát thải vòng đời của nhóm hóa chất sử dụng trong nhà máy (gồm PAC, Clo, Vôi) và cấu trúc phát thải nền của một số công đoạn năng lượng được kế thừa từ bộ dữ liệu quốc tế Ecoinvent v3.11. Giả định này ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác tuyệt đối của các chỉ số tác động môi trường thành phần. Việc áp dụng dữ liệu trung bình quốc tế hoặc khu vực của Ecoinvent có thể tạo ra độ bất định do chưa phản ánh hoàn toàn công nghệ sản xuất hóa chất nội địa hoặc đặc thù của lưới điện Việt Nam tại thời điểm nghiên cứu. Kết quả mô phỏng Monte Carlo ở mục 3.3.3 đã chỉ ra biên độ dao động này. Tuy nhiên, vì toàn bộ 5 kịch bản quy hoạch (S1 - S5) ở Chương 4 đều được áp dụng đồng nhất một hệ thống cơ sở dữ liệu nền, giả định này không làm thay đổi xu hướng so sánh, thứ bậc ưu tiên và cả ý nghĩa khoa học của việc lựa chọn giải pháp cấp nước bền vững cho đô thị.

Những giả định này được đưa ra nhằm đơn giản hóa quá trình xây dựng mô hình tích hợp trong điều kiện dữ liệu đầu vào tại Việt Nam còn hạn chế. Dù tạo ra những biên độ bất định nhất định, chúng không làm đảo lộn xu hướng và độ tin cậy của việc xếp hạng các kịch bản quy hoạch bền vững được phân tích tại Chương 4.

Chuỗi đánh giá 3 cấp độ đồng bộ này là cơ sở khoa học, khẳng định mô hình tích hợp WSI - LCA được xây dựng trong luận án là phù hợp, bảo đảm tính khách quan và có khả năng đại diện tốt cho hệ thống thực tế. Bộ công cụ này đủ độ tin cậy để làm nền tảng đưa ra các đề xuất, khuyến nghị chính sách và giải pháp kỹ thuật bền vững trong quản lý an ninh cấp nước đô thị tại các chương tiếp theo của luận án.

3.4. Tiểu kết chương 3

Chương 3 đã trình bày quá trình thiết lập và kiểm chứng mô hình tích hợp WSI - LCA nhằm định lượng toàn diện các tác động môi trường và mức độ căng thẳng nguồn nước trong hệ thống khai thác và sản xuất nước sạch. Trong mô hình này, chỉ số WSI được tích hợp trực tiếp vào giai đoạn đánh giá tác động (LCIA) như một hệ số đặc trưng, cho phép quy đổi lượng nước tiêu thụ thành “m³ nước theo mức độ khan

hiếm”, phản ánh sát thực bối cảnh khan hiếm nước tại từng lưu vực và theo thời gian. Việc đưa WSI vào LCIA theo cách tiếp cận này là đóng góp mới của luận án, giúp khắc phục hạn chế của các nghiên cứu LCA truyền thống vốn chưa xét đến điều kiện thủy văn địa phương trong tính toán mức độ khan hiếm nước.

Mô hình được xây dựng trên cơ sở mô phỏng thủy văn chuỗi dài 37 năm, tính toán WSI theo công thức Smakhtin, kiểm kê vòng đời chi tiết theo từng dây chuyền, từng cụm xử lý và áp dụng đánh giá tác động theo phương pháp ReCiPe 2016. Các kết quả thu được khẳng định mô hình đáp ứng yêu cầu về độ ổn định, tính nhất quán và khả năng phản ánh các điểm nóng môi trường trong vận hành hệ thống cấp nước, đặc biệt là các tác động liên quan đến tiêu thụ điện năng tại trạm bơm và sử dụng hóa chất tại cụm keo tụ – lắng.

Việc thiết lập và kiểm định ở Chương 3 đã chứng minh rằng mô hình tích hợp WSI - LCA có đủ cơ sở để áp dụng cho việc so sánh, đánh giá các kịch bản quy hoạch nguồn nước và cấu hình xử lý khác nhau. Những kết quả của chương này tạo nền tảng khoa học và thực tiễn quan trọng cho Chương 4, trong đó mô hình tích hợp sẽ được sử dụng để phân tích và lựa chọn kịch bản tối ưu cho hệ thống cấp nước TP. Đà Nẵng trong bối cảnh chịu nhiều áp lực về khan hiếm nguồn nước và BĐKH.

CHƯƠNG 4. ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ CHO CÁC KỊCH BẢN KHAI THÁC, SẢN XUẤT NƯỚC SẠCH TẠI ĐÀ NẴNG THÔNG QUA MÔ HÌNH TÍCH HỢP WSI - LCA

Chương 4 trình bày việc ứng dụng mô hình tích hợp WSI - LCA đã được xây dựng ở Chương 3 để định lượng sự đánh đổi giữa an ninh tài nguyên nước và gánh nặng môi trường của 5 kịch bản quy hoạch. Kết quả nghiên cứu cung cấp bằng chứng khoa học để nhận diện kịch bản tối ưu, bảo đảm hài hòa giữa bảo vệ môi trường toàn cầu và an ninh nước địa phương.

4.1. Xây dựng các kịch bản cấp nước cho TP. Đà Nẵng

4.1.1. Tóm tắt các nội dung quy hoạch hệ thống cấp nước tại TP. Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn 2045

Các giải pháp tổng thể về quy hoạch hệ thống cấp nước Đà Nẵng dựa trên các kết quả đã đề xuất trong Quy hoạch cấp nước TP. Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2050 [89]. Ngoài ra, các nội dung còn kế thừa Điều chỉnh Quy hoạch chung TP. Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045 đã được Thủ tướng Chính phủ phê duyệt tại Quyết định số 359/QĐ-TTg ngày 15/3/2021 [79] và Điều chỉnh Quy hoạch cấp nước đô thị TP. Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045 [4].

Tiêu chuẩn cấp nước sinh hoạt giai đoạn đến năm 2030 là 170 lít/người/ngày với tỷ lệ dân số được cấp nước là 100%. Định hướng đến 2045, tiêu chuẩn cấp nước sinh hoạt là 160 lít/người/ngày với tỷ lệ dân số được cấp nước là 100%. Theo đó, giai đoạn đến năm 2030, tổng nhu cầu dùng nước lớn nhất của toàn TP đạt khoảng 735.000 m³/ngày; và 920.000 m³/ngày cho định hướng năm 2045.

Các nghiên cứu về quy hoạch hệ thống cấp nước cho TP. Đà Nẵng năm 2030 tầm nhìn 2045 tổng quát có một số điểm chung:

Các nghiên cứu trên đều đề xuất đến 2030 nâng công suất NMN Hòa Liên từ 120.000 m³/ngày lên 240.000 m³/ngày; nâng công suất NMN Cầu Đỏ từ 290.000 m³/ngày lên 390.000 m³/ngày và 30.000 m³/ngày cho nhà máy Sân Bay; xây mới NMN An Trạch lấy nguồn nước thô từ đập dâng An Trạch công suất 50.000 m³/ngày. Định hướng năm 2045, vẫn giữ nguyên công suất nhà máy cấp nước hiện có, xây thêm nhà máy trên sông Bắc với công suất 100.000 m³/ngày, xây dựng NMN mới Hòa Châu sử dụng nguồn nước sông Quá Giáng, đập Bàu Nít.

4.1.2. Cơ sở xây dựng các kịch bản khai thác và sản xuất nước sạch đô thị cho TP. Đà Nẵng

4.1.2.1. Cơ sở thực tiễn và định hướng quy hoạch cấp nước đô thị tại TP. Đà Nẵng

Bối cảnh phát triển và áp lực lên nguồn nước: TP. Đà Nẵng hiện đang trong giai đoạn phát triển nhanh về kinh tế – xã hội, với tốc độ đô thị hóa và gia tăng dân số liên tục. Đồng thời, du lịch của TP đang trong giai đoạn phục hồi mạnh sau đại dịch, kéo theo nhu cầu về nước sạch ngày càng cao, đặt ra những thách thức lớn trong việc bảo đảm cấp nước an toàn, ổn định và bền vững cho đô thị. Theo Điều chỉnh Quy hoạch cấp nước đô thị TP. Đà Nẵng, nhu cầu dùng nước lớn nhất dự báo đạt khoảng 735.000 m³/ngày vào năm 2030, và tiếp tục tăng lên 920.000 m³/ngày vào năm 2045. Đây là mức tăng trưởng đáng kể, phản ánh áp lực ngày càng gia tăng đối với hệ thống khai thác và sản xuất nước sạch.

Bên cạnh sự gia tăng về nhu cầu, nguồn nước thô hiện hữu của TP cũng đang đối mặt với nhiều rủi ro. Cụ thể:

- Suy giảm dòng chảy và biến động thủy văn do tác động của BĐKH và sự vận hành của các hồ chứa thượng lưu.
- Xâm nhập mặn ngày càng nghiêm trọng tại khu vực hạ lưu sông Vu Gia – Thu Bồn, đặc biệt là tại cửa thu Cầu Đỏ – nguồn cung chính của hệ thống cấp nước đô thị.
- Ô nhiễm cục bộ nguồn nước mặt do hoạt động công nghiệp, nông nghiệp và sinh hoạt.

Những yếu tố này dẫn đến nhiều hệ quả trực tiếp: (i) Gia tăng nhu cầu năng lượng cho bơm và xử lý nước; (ii) Tăng cường sử dụng hóa chất trong các khâu xử lý; và (iii) Phát thải ngày càng lớn từ toàn bộ hệ thống khai thác và sản xuất nước sạch.

Từ bối cảnh thực tiễn trên, việc xây dựng các kịch bản khai thác và xử lý nước cho hệ thống cấp nước đô thị tại Đà Nẵng là cần thiết nhằm đánh giá, so sánh và lựa chọn phương án tối ưu, bảo đảm cân bằng giữa nhu cầu phát triển và bảo vệ tài nguyên nước trong dài hạn.

Định hướng quy hoạch nguồn nước và nguyên tắc thiết kế:

- Ưu tiên phát triển, sử dụng nguồn nước mặt (hệ thống sông Vu Gia–Thu Bồn, sông Cu Đê) để cấp cho các NMN đô thị, hạn chế và tiến tới ngừng việc khai thác nước dưới đất.
- Nguyên tắc đa dạng hóa nguồn cung cấp nước thô và phương thức khai thác hướng đến bảo đảm nguồn nước an toàn, chủ động cũng là một nội dung được đề cập

đến. Nguyên tắc đa dạng hóa nguồn nước thô được ưu tiên nhằm giảm rủi ro khi phụ thuộc vào một nguồn duy nhất, hạn chế tác động của thiên tai, xâm nhập mặn và ô nhiễm cục bộ.

- Có kế hoạch áp dụng công nghệ xử lý nước linh hoạt, kinh tế và hiệu quả theo mùa: như chế độ bật - tắt khử mặn; chế độ lọc nâng cao khi chất hữu cơ tăng...

- Định hướng giảm phát thải: Kết hợp hiệu quả năng lượng, tăng tỷ lệ năng lượng tái tạo, tối ưu hóa trong vận hành.

Việc xây dựng các kịch bản bảo đảm phù hợp và kế thừa, bám sát các quyết định, các nghiên cứu trước đây:

- Quy hoạch hệ thống cấp nước TP. Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2050 đã được UBND TP. Đà Nẵng phê duyệt tại Quyết định số 9018/QĐ-UBND ngày 28/12/2016 [89].

- Điều chỉnh Quy hoạch chung TP. Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045 đã được Thủ tướng Chính phủ phê duyệt tại Quyết định số 359/QĐ-TTg ngày 15/3/2021 [79].

- Điều chỉnh Quy hoạch cấp nước đô thị TP. Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045 đã được phê duyệt tại Quyết định 372/QĐ-UBND ngày 2/5/2025 [4].

- Việc xây dựng các kịch bản cũng phải bảo đảm phù hợp với định hướng phát triển cấp nước đô thị và khu công nghiệp Việt Nam đến năm 2025, tầm nhìn đến năm 2050 đã được Thủ tướng Chính phủ phê duyệt tại Quyết định số 2502/QĐ-TTg ngày 22/12/2016 [90].

- Dữ liệu quan trắc nguồn nước (dòng chảy, độ mặn theo mùa, nồng độ chất hữu cơ, độ đục), dùng để thiết lập điều kiện vận hành theo mùa.

- Hồ sơ vận hành NMN Cầu Đỏ: Điện tiêu thụ (kWh/m³), hóa chất (kg/m³), nước sử dụng cho bản thân nhà máy (%), lượng nước thô khai thác và sản lượng theo ngày.

- Dữ liệu lưới điện Việt Nam: (kg CO₂/kWh theo năm) để tính phát thải trong phương pháp LCA.

4.1.2.2. Các kịch bản biến đổi khí hậu

Lý do chọn và nguyên tắc khi lựa chọn kịch bản BĐKH:

- Thời kỳ phân tích về kịch bản BĐKH: Lựa chọn giai đoạn 2046–2065 để bám sát các giai đoạn quy hoạch cấp nước của TP.

- Theo kịch bản BĐKH của Bộ Tài nguyên và môi trường năm 2020, biến đổi nhiệt độ trung bình tại Đà Nẵng giai đoạn 2046 - 2065 theo kịch bản RCP 4.5 dao động từ 1,2 đến 1,6 °C; theo kịch bản RCP 8.5 nhiệt độ dao động từ 1,7 đến 2,0 °C [91].

- Tại Đà Nẵng, giai đoạn 2046-2065 so với thời kỳ cơ sở theo kịch bản RCP 4.5, mức biến đổi lượng mưa đều tăng. Tuy nhiên, theo kịch bản RCP 8.5 thì về mùa xuân giảm 5% so với thời kỳ cơ sở.

- Tại tỉnh Quảng Nam cũ, lượng mưa bình quân năm giai đoạn 2046-2065 so với thời kỳ cơ sở theo kịch bản RCP 4.5 và RCP 8.5 đều tăng. Tuy nhiên về mùa xuân thì lượng mưa giảm 3,7% (theo RCP 4.5) và giảm 8,8% (theo RCP 8.5) so với thời kỳ cơ sở.

Trong đó, kịch bản RCP 8.5 được chọn để làm cơ sở xây dựng các kịch bản cấp nước, vì đây là kịch bản phản ánh điều kiện cực đoan, mưa ngắn hơn, ít hơn, nhiệt độ tăng cao, được coi là trường hợp bất lợi nhất cho việc cấp nước an toàn trong tương lai. Và theo khuyến cáo, hướng dẫn của Bộ Tài nguyên môi trường, trước năm 2050 chỉ cần sử dụng một trong hai kịch bản RCP 4.5 hoặc RCP 8.5 để tính toán.

4.1.2.3. Mục tiêu giảm phát thải

Trong các vấn đề môi trường chính liên quan đến quy hoạch, hệ thống cấp nước đô thị tại Đà Nẵng cũng cần bảo đảm phù hợp với các mục tiêu về bảo vệ môi trường và giảm nhẹ BĐKH của quy hoạch chung. Trong đó, giảm phát thải KNK để tránh làm trầm trọng thêm mức độ tác động của BĐKH và nước biển dâng; Kết hợp các giải pháp, kế hoạch, mục tiêu giảm phát thải của từng ngành nghề, lĩnh vực phát triển, có tính đến hệ thống cấp nước đô thị [4].

Tháng 11/2021, tại hội nghị Thượng đỉnh về BĐKH của Liên Hợp Quốc COP26 diễn ra ở Anh, Thủ tướng Phạm Minh Chính tuyên bố Việt Nam cam kết đạt NET ZERO (Phát thải ròng bằng "0") vào năm 2050. Việt Nam sẽ xây dựng và triển khai các biện pháp giảm phát thải KNK, tập trung vào chuyển đổi sang nền kinh tế xanh và năng lượng tái tạo. Trong đó, Việt Nam có lợi thế về năng lượng tái tạo, việc phát triển các nguồn năng lượng tái tạo như điện gió, điện mặt trời và tăng cường hiệu quả sử dụng năng lượng là trọng tâm.

Mục tiêu giảm phát thải liên quan cấp nước:

- Giảm phát thải KNK của hệ thống cấp nước (tấn CO₂ tđ/năm hoặc kg CO₂ tđ/m³), phù hợp cam kết quốc gia NET ZERO 2050 thông qua việc giảm điện năng tiêu thụ (tập trung ở bơm biển tần, vận hành tối ưu) và sử dụng năng lượng tái tạo.

- Giảm căng thẳng tài nguyên nước thông qua tăng tỷ lệ tái sử dụng nước thải sau xử lý phục vụ cho mục đích phi sinh hoạt, tăng tỷ lệ tái sử dụng nước trong NMN Cầu Đỏ.

- Giảm độc tính và phú dưỡng nguồn nước trên cơ sở giảm hóa chất: Tối ưu lượng PAC, chuyển đổi công nghệ khử trùng (UV/ozon thay cho Clo) khi phù hợp để giảm độc tính nguồn nước.

4.1.3. Các kịch bản khai thác và sản xuất nước sạch tại NMN Cầu Đỏ - TP. Đà Nẵng

Dựa trên đặc điểm tự nhiên, kinh tế – xã hội của TP. Đà Nẵng và bám sát các định hướng phát triển đô thị đã được phê duyệt, việc xây dựng các kịch bản cấp nước đến năm 2030 và tầm nhìn 2045 được thiết kế trên một cơ sở khoa học thống nhất. Các kịch bản này vừa phản ánh đúng hiện trạng vận hành hệ thống cấp nước đô thị, vừa kế thừa các nội dung của quy hoạch và điều chỉnh quy hoạch cấp nước. Đồng thời, các kịch bản đưa ra còn đáp ứng các mục tiêu và phạm vi nghiên cứu của luận án. Nhờ đó, hệ thống kịch bản không chỉ phù hợp với điều kiện thực tiễn mà còn bảo đảm khả năng so sánh, đánh giá và lựa chọn phương án tối ưu trong bối cảnh phát triển bền vững, hướng tới NET ZERO vào năm 2050.

Các kịch bản cấp nước cho TP. Đà Nẵng được xây dựng trong điều kiện BĐKH RCP 8.5, trên cơ sở xem xét thực trạng hệ thống cấp nước hiện nay, xu thế phát triển đô thị và du lịch, cũng như các yếu tố tác động đến nguồn nước như xâm nhập mặn và khan hiếm nước tại Đà Nẵng.

Dựa vào các cơ sở ở trên, 5 kịch bản khai thác và sản xuất nước sạch được đề xuất như sau:

a) Kịch bản cơ sở (S1) – Dựa vào quy hoạch cấp nước của TP. Đà Nẵng

Mục tiêu: Làm kịch bản chuẩn để so sánh trong phương pháp LCA, phản ánh tình hình sản xuất nước sạch nếu không có cải tiến kỹ thuật đáng kể.

Với quy hoạch các NMN chính cho TP. Đà Nẵng đến 2045, nâng công suất khai thác tại NMN Cầu Đỏ - Sân Bay lên 420.000 m³/ngày với nguồn nước thô là sông Yên và sông Cầu Đỏ. Mùa mưa, nước thô được lấy từ cửa thu cạnh nhà máy khi độ mặn < 250 mg/L. Mùa kiệt, độ mặn vượt ngưỡng, nước thô sẽ được bổ sung hoặc thay thế hoàn toàn bằng nguồn từ trạm bơm An Trạch trên sông Yên, tùy theo mức độ nhiễm mặn.

Theo Điều chỉnh Quy hoạch cấp nước đô thị, công nghệ xử lý tại nhà máy vẫn duy trì công nghệ đang áp dụng: Sơ lắng - trộn - phản ứng keo tụ - lắng - lọc nhanh - khử trùng bằng Clo. Các dữ liệu hóa chất, điện năng, nước sử dụng cho bản thân nhà

máy duy trì như hoạt động hiện nay tại NMN Cầu Đỏ.

b) Kịch bản 2 (S2): Kết hợp xử lý nước song song: Truyền thống - RO

Mục tiêu: Nhằm tăng khả năng thích ứng với xâm nhập mặn tại cửa thu NMN Cầu Đỏ trong mùa kiệt. Bảo đảm chất lượng nước đầu ra ổn định trong điều kiện độ mặn biến động, bằng cách bổ sung công nghệ RO và lọc MF/UF. Tăng tính linh hoạt vận hành hệ thống sản xuất nước sạch theo mùa và theo độ mặn.

Trong mùa kiệt, nguồn nước thô tại cửa thu NMN Cầu Đỏ có nguy cơ bị nhiễm mặn. Hiện nay, với công suất khai thác 320.000 m³/ngày, khai thác kết hợp từ cửa thu của nhà máy và trạm bơm An Trạch.

Để chủ động ứng phó với tình trạng xâm nhập mặn tại cửa thu NMN Cầu Đỏ có xu hướng gia tăng, đặc biệt vào mùa kiệt, đến giai đoạn năm 2045, đề xuất bổ sung thêm một dây chuyền xử lý mới công suất 100.000 m³/ngày, trang bị hệ thống RO (thẩm thấu ngược) để khử mặn khi độ mặn > 250 mg/L. Cùng với đó, hệ thống bơm tại đập dâng An Trạch vẫn giữ nguyên như hiện trạng, duy trì cấp cho công suất khai thác hiện nay là 320.000 m³/ngày.

Với 100.000 m³/ngày mới bổ sung, khi độ mặn nước thô ≤ 250 mg/L, dòng nước sau khi qua lọc MF/UF sẽ bỏ qua hệ thống RO, được khử trùng bằng Clo, UV hoặc Ozone rồi cấp ra mạng phân phối. Khi độ mặn vượt ngưỡng, toàn bộ hoặc một phần dòng nước sẽ được chuyển qua hệ thống RO để bảo đảm chất lượng trước khi khử trùng và phân phối.

c) Kịch bản 3 (S3): Nguồn nước thay thế

Mục tiêu: Tái sử dụng nước thải sau xử lý cho mục đích phi sinh hoạt. Giải pháp sử dụng nguồn nước thay thế có thể giảm một phần áp lực lên nguồn nước mặt, tăng hiệu quả sử dụng tài nguyên nước thông qua tuần hoàn và tái sử dụng. Mặt khác, tái sử dụng nước thải còn giúp giảm phát thải do việc sử dụng hóa chất và năng lượng trong sản xuất nước sạch, nhằm hỗ trợ mục tiêu phát triển bền vững và giảm căng thẳng tài nguyên nước tại các khu vực đô thị.

Giải pháp tái sử dụng nước thải được xây dựng dựa trên các căn cứ pháp lý cốt lõi của quốc gia và địa phương, bao gồm:

- Quyết định phê duyệt đồ án điều chỉnh quy hoạch thoát nước của TP. Đà Nẵng cũng đề xuất khử trùng bằng tia UV và xây dựng các bể chứa nước thải sau xử lý để sử dụng vào các mục đích tưới cây, rửa đường với tỷ lệ tái sử dụng 25% so với công suất của trạm xử lý nước thải [92].

- Luật Tài nguyên nước số 28/2023/QH15, tại Điều 59 quy định nghiêm ngặt về việc Tuần hoàn, tái sử dụng nước, khuyến khích và bắt buộc các đô thị lớn phải có giải pháp tuần hoàn nước thải cho các mục đích thích hợp nhằm ứng phó với BĐKH [61].

- Xu hướng tái sử dụng nước cho mục đích phi sinh hoạt cũng phù hợp với các hướng dẫn trong tiêu chuẩn Hướng dẫn quản lý các dịch vụ xử lý nước thải sinh hoạt cơ bản tại chỗ [93] và trong ISO 46001:2019 - Hệ thống quản lý sử dụng nước hiệu quả [94].

NMN Cầu Đỏ không chỉ cung cấp nước cho mục đích sinh hoạt và sản xuất mà còn cung cấp cho nhu cầu tưới cây, tưới đường. Để bảo đảm nhiệm vụ cấp nước của nhà máy, trong giai đoạn quy hoạch đến năm 2045, tại NMN Cầu Đỏ đề xuất nâng công suất khai thác lên 390.000 m³/ngày. Phần công suất giảm tải 30.000 m³/ngày sẽ được bù đắp bằng lượng nước tuần hoàn từ trạm xử lý nước thải Hòa Xuân (tương đương chiếm 25% tổng công suất nước thải sau xử lý tại trạm). Đối tượng của nguồn nước thay thế này là cấp nước tưới cây cho Ngũ Hành Sơn, Cẩm Lệ, Sơn Trà, Hải Châu, Thanh Khê, tiểu vùng Hòa Vang (ranh giới cũ).

Do trạm xử lý nước thải Hòa Xuân nằm ở vị trí địa lý kết nối thuận lợi với các trục giao thông lớn của các quận này, việc xây dựng mạng lưới đường ống áp lực riêng (hoặc kết hợp xe bồn chuyên dụng) để cấp nước tưới công cộng được đánh giá là khả thi về mặt kỹ thuật và kinh tế. Để bảo đảm an toàn cho sức khỏe cộng đồng và môi trường đô thị khi tiếp xúc trực tiếp, nguồn nước sau xử lý tại trạm Hòa Xuân bắt buộc bổ sung thêm giai đoạn khử trùng nâng cao bằng công nghệ tia cực tím (UV), bảo đảm đạt quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước mặt hoặc nước tuần hoàn tái sử dụng.

d) Kịch bản 4 (S4): Dịch chuyển cấu trúc nguồn - Nâng công suất cho NMN tại đập dâng An Trạch (Không mở rộng NMN Cầu Đỏ)

Mục tiêu: Tăng cường an ninh nguồn nước bằng cách khai thác trực tiếp từ sông Yên tại vị trí ít bị xâm nhập mặn, cung cấp cho nhà máy đặt cạnh đập dâng An Trạch. Giảm chi phí đầu tư hệ thống dẫn nước cũng như chi phí điện năng để bơm nước thô về. Tăng tính chủ động trong cấp nước cho khu vực Nam Hòa Vang và hỗ trợ thêm cho NMN Cầu Đỏ trong mùa kiệt.

Trong giai đoạn đến năm 2030, quy hoạch đề xuất xây dựng mới NMN An Trạch với công suất thiết kế 50.000 m³/ngày, sử dụng nguồn nước thô từ sông Yên tại khu vực An Trạch. Nguồn nước sông Yên tại vị trí này được đánh giá là bảo đảm cả về chất lượng và lưu lượng, đáp ứng yêu cầu khai thác nước cho cả NMN Cầu Đỏ (công suất 320.000 m³/ngày) và bổ sung thêm 100.000 m³/ngày cho NMN An Trạch. Vị trí

xây dựng NMN An Trạch có lợi thế về mặt địa lý, thuận tiện cho việc cấp nước cho các khu vực lân cận. Đồng thời, phương án này có chi phí đầu tư thấp hơn so với các phương án sử dụng nguồn nước từ các khu vực xa, do không cần hệ thống dẫn nước thô dài từ nơi khai thác về NMN.

Đến giai đoạn năm 2045, nhằm ứng phó với tình trạng nhiễm mặn ngày càng nghiêm trọng tại cửa thu của NMN Cầu Đỏ, quy hoạch đề xuất vẫn giữ nguyên hiện trạng công suất NMN Cầu Đỏ, nâng công suất NMN An Trạch lên 150.000 m³/ngày. Công suất này sẽ phục vụ cấp nước cho khu vực tiểu vùng Nam Hòa Vang, và bơm về 50.000 m³/ngày bổ sung cho NMN Cầu Đỏ góp phần bảo đảm an ninh nguồn nước và tính linh hoạt trong vận hành hệ thống cấp nước đô thị.

e) Kịch bản 5 (S5): Giữ nguyên khai thác nguồn nước thô như S1, áp dụng công nghệ xử lý tiên tiến và tích hợp năng lượng mặt trời áp mái

Mục tiêu: Giảm phát thải KNK, hướng đến mục tiêu NET ZERO 2050, tối ưu chi phí điện năng dài hạn. Ngoài ra, tăng tính bền vững trong vận hành hệ thống cấp nước đô thị.

Trong phương án điều chỉnh quy hoạch, việc khai thác nguồn nước thô được giữ nguyên như trong kịch bản S1, nhằm bảo đảm tính ổn định và hiệu quả của hệ thống hiện hữu. Tuy nhiên, để nâng cao chất lượng nước sạch đầu ra và tối ưu hóa chi phí vận hành, đề xuất áp dụng các công nghệ xử lý tiên tiến tại nhà máy, bao gồm các quy trình xử lý nâng cao và hệ thống giám sát chất lượng nước tự động.

Mặt khác, nhằm hướng đến mục tiêu sử dụng năng lượng sạch và giảm chi phí điện năng, giải pháp lắp đặt hệ thống điện mặt trời áp mái tại các cơ sở sản xuất nước sạch được đưa vào quy hoạch (30% năng lượng mặt trời (NLMT) kết hợp với 70% năng lượng điện lưới). Việc tích hợp nguồn năng lượng tái tạo không chỉ góp phần giảm phát thải KNK mà còn tăng cường tính bền vững trong vận hành hệ thống cấp nước đô thị.

Tóm tắt các kịch bản được thể hiện ở Bảng 4.1:

Bảng 4.1. Tóm tắt các kịch bản đề xuất cho cấp nước đô thị

STT	Kịch bản	Nước thô	Vị trí lấy nước	Công suất sản xuất (m ³ /ngày)	Thời gian khai thác	Công nghệ xử lý chính
1	S1 - Base	Sông Vu Gia	Tại cửa thu NMN Cầu Đỏ (Khi độ mặn <250 mg/L)	420.000	Tháng 1 đến tháng 2 và tháng 9 đến tháng 12	Sơ lắng – trộn – keo tụ – lắng – lọc nhanh – khử trùng bằng Clo
			Đập dâng An Trạch bơm nước thô về NMN Cầu Đỏ (Bổ sung khi độ mặn tại NMN Cầu Đỏ > 250 mg/L và < 1000 mg/L và khai thác 100% khi độ mặn > 1000 mg/L)		Tập trung từ tháng 3 đến tháng 8	
2	S2 – Kết hợp xử lý nước song song: Truyền thống - RO	Sông Vu Gia	Tại cửa thu NMN Cầu Đỏ (Khi độ mặn <250 mg/L)	420.000	Tháng 1 đến tháng 2 và tháng 9 đến tháng 12	Như S1
			Đập dâng An Trạch bơm nước thô về NMN Cầu Đỏ (Bổ sung khi độ mặn tại NMN Cầu Đỏ > 250 mg/L và < 1000 mg/L và khai thác 100% khi độ mặn > 1000 mg/L)	320.000	Tập trung từ tháng 3 đến tháng 8	Như S1
			- Tại cửa thu NMN Cầu Đỏ (Nước lợ) (Khi độ mặn > 250mg/L chuyển qua hệ thống khử mặn)	100.000		Nước lợ - Sơ lắng – trộn – keo tụ – lắng - MF/UF -RO - Ổn định pH và khử trùng → Nước sạch
3	S3 - Nguồn nước thay thế	Sông Vu Gia	-Tại cửa thu NMN Cầu Đỏ (Khi độ mặn < 250 mg/L)	390.000	Tháng 1 đến tháng 2 và tháng 9 đến tháng 12	Như S1
			Đập dâng An Trạch bơm nước thô về NMN Cầu Đỏ (Bổ sung khi độ mặn tại NMN Cầu Đỏ > 250 mg/L, < 1000 mg/L và khai thác 100% khi độ mặn > 1000 mg/L).		Tập trung từ tháng 3 đến tháng 8	
		TXL nước thải Hòa Xuân	Trạm xử lý nước thải Hòa Xuân (cấp tưới cây cho Ngũ Hành Sơn, Cẩm Lệ, Sơn Trà, Hải Châu, Thanh Khê, tiểu vùng Hòa Vang - 8% Qsh) - 25 % nước thải tại trạm xử lý nước thải Hòa Xuân.	30.000	12 tháng trong năm	Bổ sung khử trùng bằng UV

4	S4 - Nâng công suất cho NMN tại đập dâng An Trạch (Không mở rộng NMN Cầu Đỏ)	Sông Vu Gia	-Tại cửa thu NMN Cầu Đỏ (Khi độ mặn < 250 mg/L)	320.000	Tháng 1 đến tháng 2 và tháng 9 đến tháng 12	Nhu S1
			- Đập dâng An Trạch bơm nước thô về NMN Cầu Đỏ (Bổ sung khi độ mặn tại NMN Cầu Đỏ > 250 mg/L, < 1000 mg/L và khai thác 100% khi độ mặn > 1000 mg/L)		Tập trung từ tháng 3 đến tháng 8	
			Khai thác tại đập dâng An Trạch và xây mới NMN tại vị trí cạnh đập dâng An Trạch - Hòa Tiến. Sau xử lý cấp cho khu vực tiểu vùng Nam Hòa Vang và bổ sung cho NMN Cầu Đỏ	100.000	Tháng 1 đến tháng 2 và tháng 9 đến tháng 12	
				100.000	Tập trung từ tháng 3 đến tháng 8	
5	S5 - Giữ nguyên khai thác nguồn nước thô như S1, áp dụng công nghệ xử lý tiên tiến và tích hợp NLMT	Sông Vu Gia	Tại cửa thu NMN Cầu Đỏ (Khi độ mặn < 250 mg/L)	420.000	Tháng 1 đến tháng 2 và tháng 9 đến tháng 12	Sơ lắng - oxy sơ bộ (bằng ozon)– trộn – keo tụ – lắng – lọc nhanh - than hoạt tính– khử trùng bằng Clo + Sử dụng năng lượng mặt NLMT
			Đập dâng An Trạch bơm nước thô về NMN Cầu Đỏ (Bổ sung khi độ mặn tại NMN Cầu Đỏ > 250 mg/L và < 1000 mg/L và khai thác 100% khi độ mặn > 1000 mg/L)		Tập trung từ tháng 3 đến tháng 8	

4.2. Áp dụng mô hình tích hợp để so sánh tác động các kịch bản khai thác và sản xuất nước sạch tại TP. Đà Nẵng

Phần này trình bày kết quả phương pháp LCA và tác động nước (WSF) đối với 5 kịch bản được đề xuất cho hệ thống cấp nước đô thị tại TP. Đà Nẵng. Kết quả được phân tích theo từng nhóm chỉ số tác động (loại tác động và điểm kết thúc của tác động), tác động nước có tích hợp chỉ số WSI và thực hiện so sánh, tổng hợp, lựa chọn giữa các kịch bản.

4.2.1. Mục tiêu và phạm vi

Mục tiêu của phần này là so sánh và đánh giá hiệu quả môi trường của các kịch bản khai thác và sản xuất nước sạch tại TP. Đà Nẵng trong bối cảnh BĐKH và xâm nhập mặn ngày càng nghiêm trọng. Việc đánh giá được thực hiện thông qua mô hình tích hợp chỉ số WSI và phương pháp LCA, nhằm lượng hóa các tác động môi trường từ các phương án cấp nước khác nhau.

Phạm vi nghiên cứu tập trung vào 5 kịch bản cấp nước đã được xây dựng tại mục 4.1.3, với các phương án khai thác và sản xuất nước sạch tại NMN Cầu Đỏ và các nguồn bổ sung như đập dâng An Trạch, nước tái sử dụng từ trạm xử lý nước thải Hòa Xuân, và công nghệ khử mặn RO. Các kịch bản được phân tích trong giai đoạn quy hoạch đến năm 2045, với điều kiện khí hậu giả định theo kịch bản RCP 8.5, là kịch bản phản ánh tình huống cực đoan nhất về nhiệt độ và lượng mưa.

Phân tích được thực hiện theo các bước:

- Tính toán chỉ số WSI cho từng nguồn nước khai thác trong các tháng mùa kiệt, nhằm đánh giá mức độ căng thẳng tài nguyên nước.
- Thực hiện kiểm kê vòng đời (LCI) cho từng kịch bản, bao gồm tiêu thụ điện năng, hóa chất xử lý, nước sử dụng nội bộ và phát thải KNK.
- Đánh giá tác động vòng đời (LCIA) theo phương pháp ReCiPe 2016, với các chỉ số tác động (midpoint) và điểm kết thúc tác động (endpoint) liên quan đến sức khỏe con người, hệ sinh thái và khan hiếm tài nguyên.

Ranh giới hệ thống được xác định từ khai thác nước thô đến khi cấp nước sạch ra mạng lưới phân phối, bao gồm cả các hoạt động xử lý, vận hành, tiêu thụ năng lượng và hóa chất. Đơn vị chức năng được sử dụng là 1 m³ nước sạch cấp ra mạng, bảo đảm tính nhất quán trong so sánh giữa các kịch bản.

4.2.2. Chỉ số WSI với các kịch bản cấp nước cho TP. Đà Nẵng trong điều kiện BĐKH

Trong phần này, chỉ số WSI được tính toán cho từng nguồn nước sử dụng trong 5 kịch bản cấp nước đô thị tại TP. Đà Nẵng đã được xây dựng ở trên, đặc biệt trong

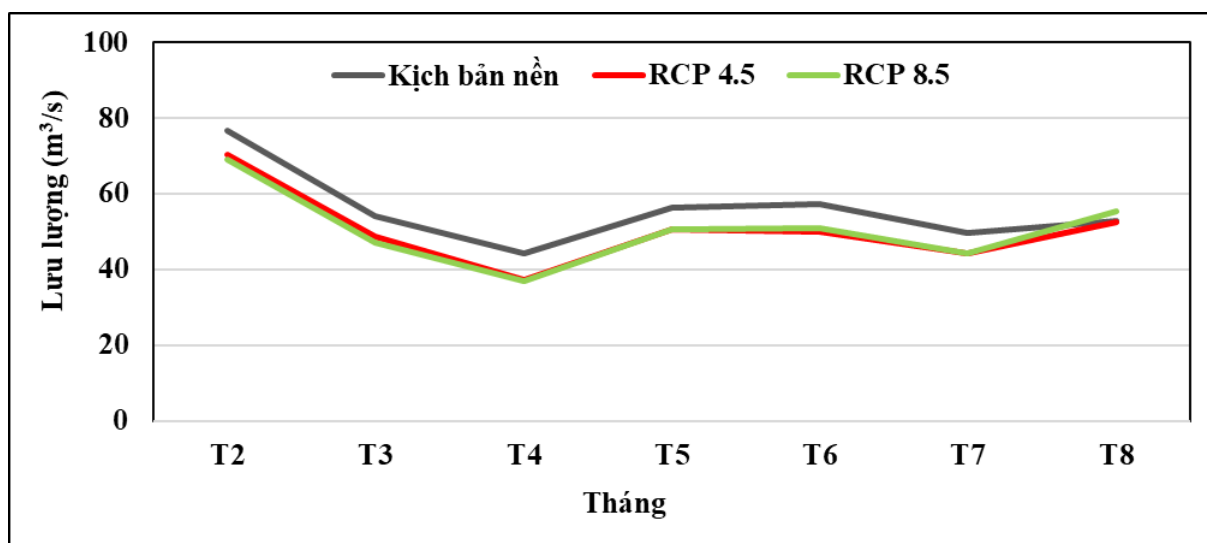
các tháng mùa kiệt (tháng 3 đến tháng 8), khi lưu lượng nước về thấp nhất và nhu cầu sử dụng nước tăng cao.

Việc tính toán chỉ số WSI được thực hiện theo kịch bản BĐKH RCP 8.5 – kịch bản cực đoan nhất về nhiệt độ và lượng mưa, nhằm phản ánh điều kiện bất lợi nhất cho cấp nước an toàn. Dữ liệu đầu vào bao gồm:

- Lưu lượng nước về tại cửa thu Cầu Đỏ và đập dâng An Trạch theo tần suất 95% trong các tháng mùa kiệt.
- Nhu cầu khai thác nước thô theo từng kịch bản (tổng công suất khai thác).
- Dân số dự báo đến năm 2045 là 2,5 triệu người, với tiêu chuẩn cấp nước sinh hoạt 160 lít/người/ngày.

Với kịch bản BĐKH và nước biển dâng cho Việt Nam năm 2020 được cập nhật theo lộ trình đã được xác định trong Chiến lược quốc gia về BĐKH, nhằm cung cấp những thông tin mới nhất về diễn biến, xu thế BĐKH, nước biển dâng trong thời gian qua và kịch bản BĐKH, nước biển dâng trong thế kỷ 21 ở Việt Nam [91].

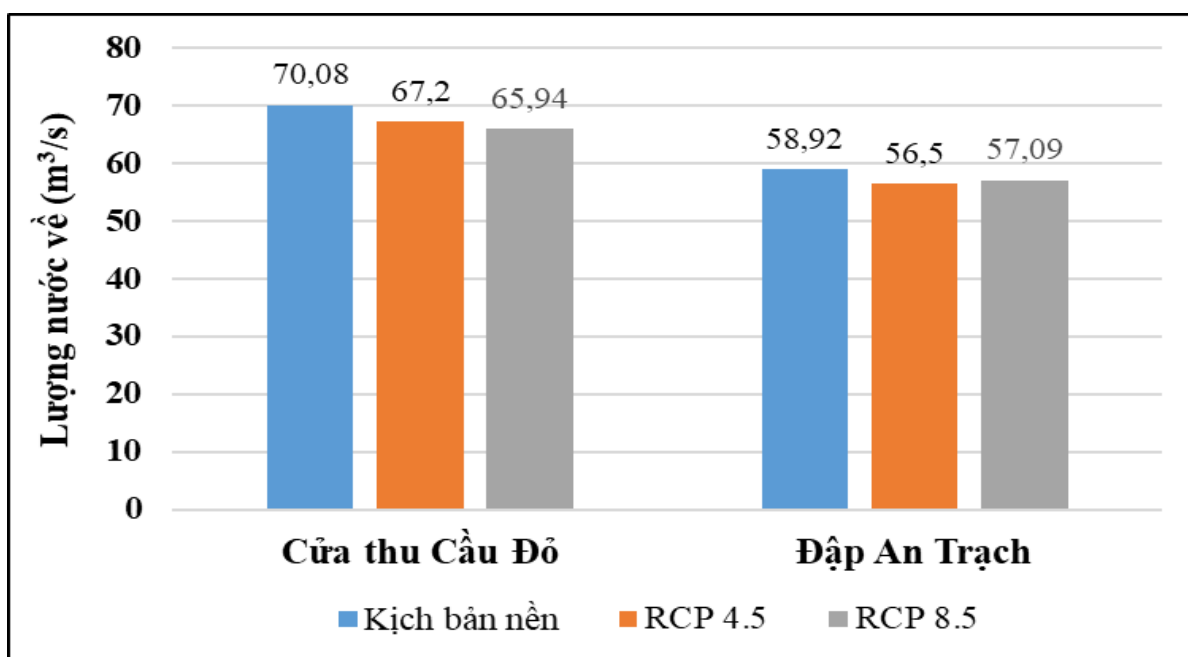
Kịch bản BĐKH xét đến sự biến đổi trong thế kỷ 21 của các yếu tố khí hậu như nhiệt độ, lượng mưa và một số hiện tượng khí hậu cực đoan (bão và áp thấp nhiệt đới, số ngày rét đậm, rét hại, số ngày nắng nóng và hạn hán). Với ảnh hưởng của BĐKH, lượng nước về hạ lưu vào các tháng mùa kiệt có dấu hiệu suy giảm. Lưu lượng nước về tại cửa thu Cầu Đỏ vào các tháng mùa kiệt ứng với kịch bản RCP 4.5 và RCP 8.5 được thể hiện ở Hình 4.1



Hình 4.1. Sự thay đổi của lưu lượng nước về ứng với các kịch bản BĐKH trong các tháng mùa kiệt ở cửa thu Cầu Đỏ

Cả hai kịch bản RCP 4.5 và RCP 8.5 đều thể hiện lưu lượng nước về giảm mạnh từ tháng 2 đến tháng 8, là thời kỳ mùa khô ở Đà Nẵng. Đặc điểm này phản ánh tác động tiêu cực của BĐKH đến nguồn nước mặt, đặc biệt tại cửa thu Cầu Đỏ, nơi

cấp nước chính cho TP. So với RCP 4.5, kịch bản RCP 8.5 (được xem là kịch bản có điều kiện cực đoan nhất), lưu lượng nước về thấp hơn đáng kể, đặc biệt trong các tháng giữa mùa khô (tháng 5–7). Trong khi lưu lượng nước về giảm, nhu cầu sử dụng nước lại tăng vào mùa hè do nhiệt độ cao và trùng với mùa du lịch. Sự kết hợp này càng làm cho tình trạng thiếu nước trở nên nghiêm trọng. Dự báo đến năm 2045, dân số trên toàn TP là 2,5 triệu dân (bao gồm khách vãng lai), với tiêu chuẩn cấp nước cho sinh hoạt 160 lít/người/ngày, nhu cầu sử dụng nước tại Đà Nẵng dự báo tăng đáng kể [79]. Lượng nước về ở cửa thu Cầu Đỏ ứng với tần suất 95% theo 2 kịch bản BĐKH được thể hiện ở Hình 4.2.



Hình 4.2. Lưu lượng nước về ứng với tần suất 95% ứng với các kịch bản BĐKH

Với tần suất 95%, kịch bản RCP 8.5 có dòng chảy cực đoan xuất hiện nhiều hơn, lưu lượng nước về thấp hơn rõ rệt so với RCP 4.5. Đây là kịch bản bất lợi nhất, phản ánh tác động mạnh của BĐKH đến nguồn nước mặt, việc thiếu nước sẽ vô cùng phức tạp vào mùa khô nếu không có phương án chủ động đối phó, cũng như thích nghi. Lựa chọn kịch bản BĐKH với RCP 8.5 (Bức xạ tác động 8,5 W/m²) là kịch bản bất lợi nhất cho khu vực Quảng Nam – Đà Nẵng khi tính toán chỉ số WSI cho giai đoạn 2030-2045.

Theo Điều chỉnh Quy hoạch cấp nước, nhu cầu sử dụng nước tại TP. Đà Nẵng năm 2045 là 920.000 m³/ngày với lượng nước khai thác tại cửa thu Cầu Đỏ và đập dâng An Trạch là 420.000 m³/ngày.

Trên cơ sở kịch bản BĐKH RCP 8.5 và các phương án cấp nước đã được xây dựng, việc tính toán chỉ số WSI được thực hiện cho từng kịch bản cấp nước của TP. Đà Nẵng.

Chỉ số WSI được xác định theo công thức của Smakhtin và cộng sự (2005) [15]:

$$WSI = \frac{WU}{WR - EWR}$$

Trong đó:

- WU: Tổng lượng nước khai thác, sử dụng (m³/tháng),
- WR: Tổng lượng nước về (m³/tháng),
- EWR: Dòng chảy môi trường (m³/tháng).

Mỗi kịch bản được xây dựng tương ứng với các tổ hợp nguồn nước khác nhau (Cầu Đỏ, An Trạch, nguồn thay thế, nước tái sử dụng, nước mặn xử lý bằng RO...), vì vậy giá trị chỉ số WSI của từng kịch bản sẽ phản ánh trực tiếp mức độ căng thẳng nguồn nước của hệ thống cấp nước TP trong các điều kiện thủy văn và khí hậu khác nhau.

Việc tính toán chỉ số WSI cho 5 kịch bản được tiến hành theo hai bước:

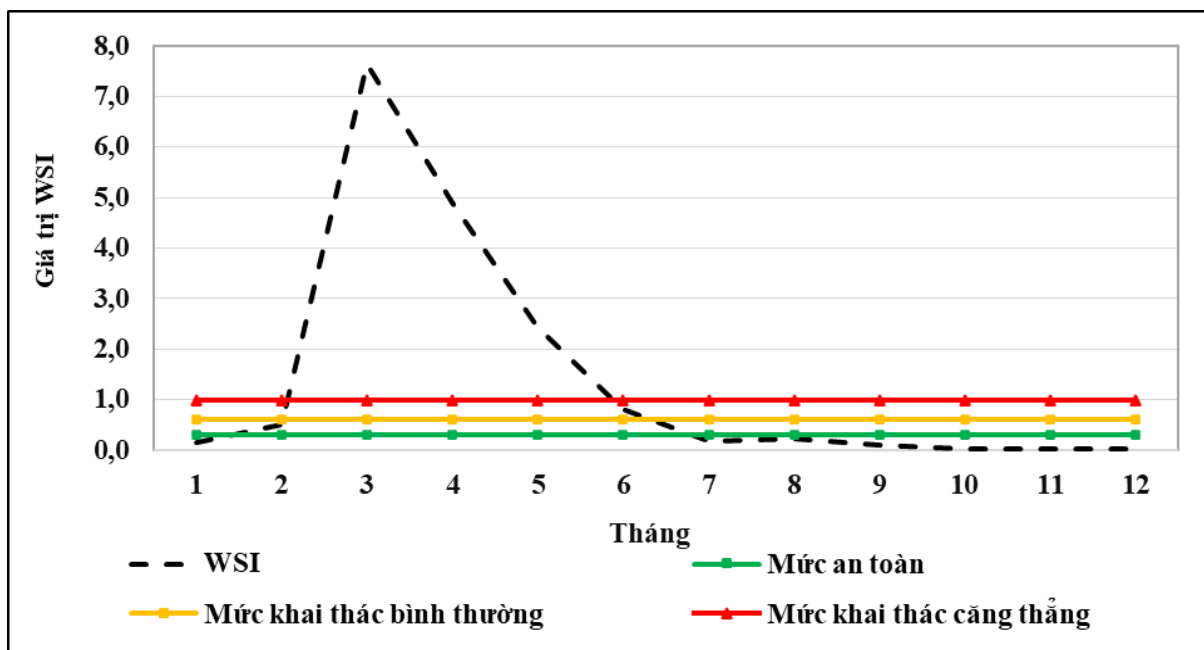
(1). Tính chỉ số WSI riêng cho từng nguồn nước trong các tháng mùa kiệt (tháng 3–8) ứng với kịch bản RCP 8.5.

(2). Tổng hợp và tính chỉ số WSI trung bình có trọng số cho các phương án dựa trên tỷ lệ khai thác nước của từng nguồn trong mỗi kịch bản.

Các kết quả thu được là cơ sở để tích hợp vào phương pháp LCA, thông qua chỉ số WSF (Water Scarcity Footprint), nhằm đánh giá tác động khan hiếm nước trong toàn bộ vòng đời sản xuất và cung cấp nước sạch.

a. Kịch bản S1: Kịch bản cơ sở

Trong kịch bản cơ sở, toàn bộ nguồn nước thô được lấy từ cửa thu Cầu Đỏ và đập dâng An Trạch, với tổng công suất 420.000 m³/ngày. Khi độ mặn tại Cầu Đỏ dưới 250 mg/L, nước được khai thác trực tiếp; khi độ mặn vượt 250 mg/L, nguồn nước được bổ sung từ đập dâng An Trạch. Với kết quả nước về so với nhu cầu khai thác, bắt đầu từ cuối tháng 3 đến đầu tháng 5 là những thời điểm gần như phải đưa toàn bộ nước thô từ đập dâng An Trạch về khi độ mặn tại cửa thu Cầu Đỏ tăng cao. Kết quả WSI của kịch bản 1 được thể hiện ở Hình 4.3:



Hình 4.3. Giá trị chỉ số WSI tại cửa thu nước Cầu Đỏ theo kịch bản S1

Kết quả tính toán chỉ số WSI theo tháng tại cửa thu Cầu Đỏ thể hiện sự biến động rất mạnh về mức độ căng thẳng nguồn nước trong năm, phản ánh rõ tính mùa vụ của lưu lượng nước mặt dưới tác động của BĐKH.

Trong các tháng mùa mưa (từ tháng 9 đến tháng 1 năm sau), giá trị chỉ số WSI < 0,6, thể hiện mức khai thác thấp so với nguồn nước tái tạo – trạng thái an toàn của nguồn nước. Trong giai đoạn này, lưu lượng nước về cao, nhu cầu sử dụng nước thấp nên nguồn nước đáp ứng tốt cho nhu cầu khai thác của hệ thống cấp nước đô thị.

Bắt đầu từ tháng 3 đến tháng 8, đặc biệt đỉnh điểm vào tháng 3 và tháng 5, giá trị chỉ số WSI tăng đột biến, cao gấp nhiều lần ngưỡng khai thác bền vững (chỉ số WSI > 1), có thời điểm vượt chỉ số WSI = 7. Kết quả khẳng định sự khai thác quá tải của lưu vực, phản ánh tình trạng căng thẳng nghiêm trọng về nguồn nước trong các tháng đầu mùa khô.

Sự gia tăng đột ngột này liên quan chặt chẽ đến giảm dòng chảy kiệt tại hạ lưu sông Vu Gia và xâm nhập mặn gia tăng tại cửa thu Cầu Đỏ, dẫn đến việc giảm nguồn nước thô khả dụng (WR – EWR) trong khi nhu cầu khai thác vẫn duy trì ở mức cao.

Giá trị trung bình mùa khô (tháng 3 đến 8) đạt chỉ số WSI = 2,69, cao hơn nhiều so với ngưỡng “khai thác căng thẳng” (0,6–1,0) theo phân loại của Smakhtin (2005), phản ánh rằng lưu vực Vu Gia – Thu Bồn tại cửa thu Cầu Đỏ đang trong tình trạng khai thác quá mức kéo dài trong mùa khô.

Nếu so với các chuẩn quốc tế, chỉ số WSI > 1 được xem là trạng thái khai thác vượt khả năng tái tạo, đồng nghĩa với nguy cơ mất cân bằng nước nghiêm trọng nếu không có giải pháp điều tiết hoặc bổ sung nguồn thay thế.

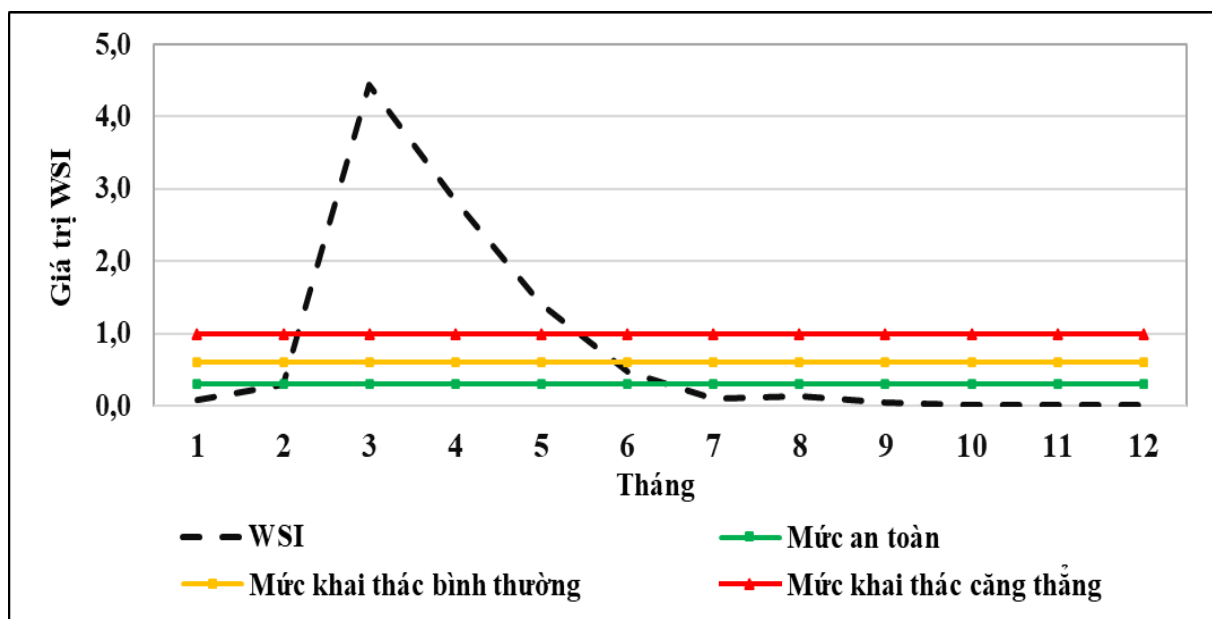
Kết quả này khẳng định sự cần thiết của việc đa dạng hóa nguồn cấp nước, tăng cường sử dụng nước từ đập dâng An Trạch, tái sử dụng nước thải Hòa Xuân, hoặc bổ sung các giải pháp xử lý nước lợ (RO) để bảo đảm cấp nước an toàn, ổn định quanh năm.

b. Kịch bản S2 – Kết hợp xử lý nước mặn (RO)

Kịch bản S2 giả định hệ thống cấp nước được bổ sung thêm dây chuyền khai thác nước lợ công suất 100.000 m³/ngày. Công nghệ xử lý nước mặn (RO) khi độ mặn tại Cầu Đỏ vượt ngưỡng 250 mg/L, giảm lưu lượng khai thác nước ngọt từ sông Vu Gia - đập dâng An Trạch để tránh suy kiệt nguồn.

Trong trường hợp khai thác nước lợ, do đây không phải là nguồn nước ngọt tái tạo nội lưu vực, chỉ số WSI được xem bằng 0 [95]. Như vậy, mặc dù áp lực khan hiếm nước từ khai thác nước lợ được loại trừ, song tác động môi trường của quá trình xử lý nước (đặc biệt là năng lượng và phát thải KNK) lại gia tăng đáng kể.

Giá trị chỉ số WSI tại cửa thu Cầu Đỏ với lượng nước khai thác nước ngọt là 320.000 m³/ngày thể hiện ở Hình 4.4.



Hình 4.4. Giá trị chỉ số WSI tại cửa thu nước Cầu Đỏ theo kịch bản S2

Kết quả tính toán chỉ số WSI cho kịch bản 2 cho thấy mức độ căng thẳng nguồn nước tại khu vực cửa thu Cầu Đỏ đã được cải thiện rõ rệt so với kịch bản 1.

Trong các tháng mùa khô (tháng 3–8), giá trị chỉ số WSI tăng cao, đạt đỉnh khoảng 4,2 vào tháng 3, nhưng thấp hơn đáng kể so với kịch bản 1 (chỉ số WSI đạt 7,5) và trở lại ngưỡng dưới 1 từ tháng 6.

Giá trị trung bình mùa khô của chỉ số WSI khoảng 1,56, thấp hơn hơn 40% so với kịch bản chỉ khai thác nước ngọt (chỉ số WSI = 2,69). Kết quả này nhấn mạnh rằng, việc bổ sung 100.000 m³/ngày nước lợ đã giảm áp lực đáng kể lên lưu vực sông Vu Gia, nhờ đó hạn chế tình trạng khai thác vượt khả năng tái tạo trong mùa khô.

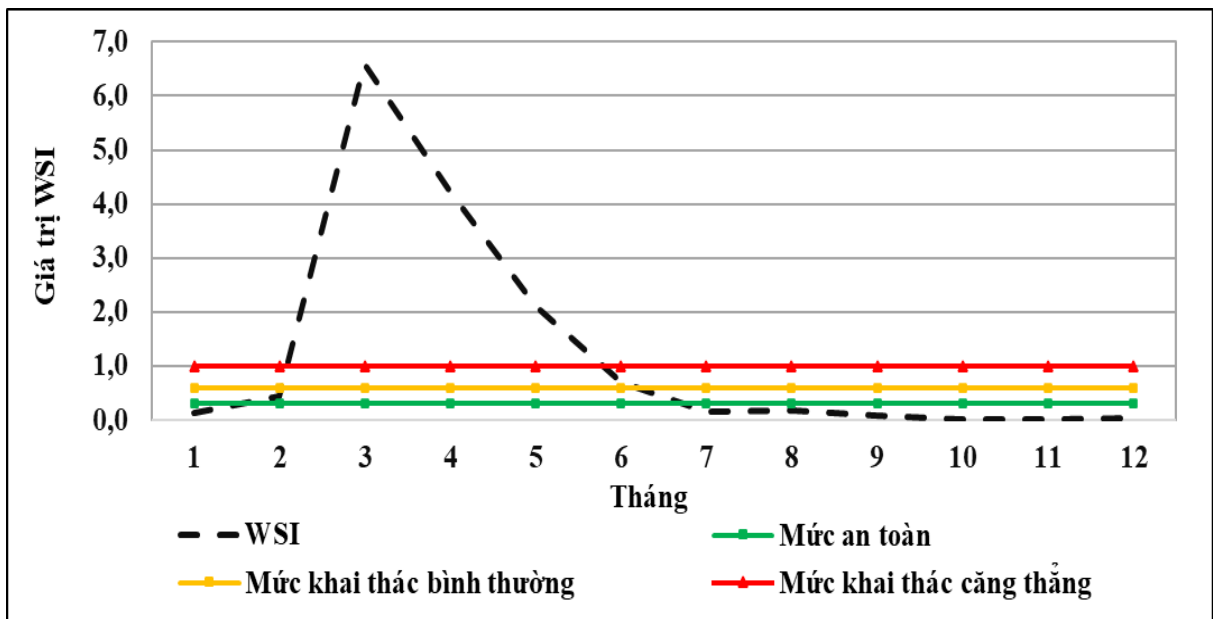
Trong suốt năm, chỉ số WSI chỉ vượt ngưỡng 1 (mức khai thác căng thẳng) trong 3 tháng liên tiếp (tháng 3–5), thay vì 5–6 tháng như kịch bản cơ sở. Đây là tín hiệu tích cực, thể hiện khả năng điều hòa nguồn cung và giảm rủi ro thiếu nước trong điều kiện xâm nhập mặn tăng do BĐKH.

Việc bổ sung nguồn nước lợ xử lý (RO) vào hệ thống cấp nước không chỉ giảm chỉ số WSI trung bình mà còn làm phẳng đường cong dao động theo tháng, tức là giảm biến động căng thẳng giữa các thời kỳ. Điều này có ý nghĩa quan trọng đối với an ninh nước đô thị Đà Nẵng, vì:

- Tăng tính ổn định của hệ thống cấp nước, đặc biệt trong các tháng khô hạn cực đoan theo kịch bản RCP 8.5;
- Tạo điều kiện để triển khai quản lý tài nguyên nước tích hợp (IWRM) và phát triển mô hình cấp nước bền vững trong tương lai.

c. Kịch bản S3 – Nguồn thay thế (tái sử dụng nước thải Hòa Xuân)

Trong kịch bản S3, ngoài hai nguồn nước mặt chính (Cầu Đỏ – An Trạch), nước thải sau xử lý tại trạm xử lý nước thải Hòa Xuân được tái sử dụng cho mục đích tưới cây, rửa đường (chiếm khoảng 25% tổng công suất của trạm xử lý nước thải Hòa Xuân, tương đương 30.000 m³/ngày). Kết quả của kịch bản bổ sung nguồn thay thế được thể hiện ở Hình 4.5:



Hình 4.5. Giá trị chỉ số WSI tại cửa thu nước Cầu Đỏ theo kịch bản S3

Kết quả tính toán khẳng định việc bổ sung 30.000 m³/ngày nước tái sử dụng từ trạm xử lý nước thải Hòa Xuân có tác dụng giảm nhẹ áp lực lên nguồn nước tự nhiên, tuy nhiên mức cải thiện chưa đáng kể so với kịch bản cơ sở.

Trong mùa khô (tháng 3 đến tháng 8), chỉ số WSI tăng cao rõ rệt, đạt đỉnh xấp xỉ 6,5 vào tháng 3, sau đó giảm dần và về dưới ngưỡng căng thẳng (chỉ số WSI < 1) từ tháng 7 trở đi. Mức độ dao động theo tháng tương tự như kịch bản cơ sở, nguồn nước sông Vu Gia vẫn chịu căng thẳng lớn vào đầu mùa kiệt.

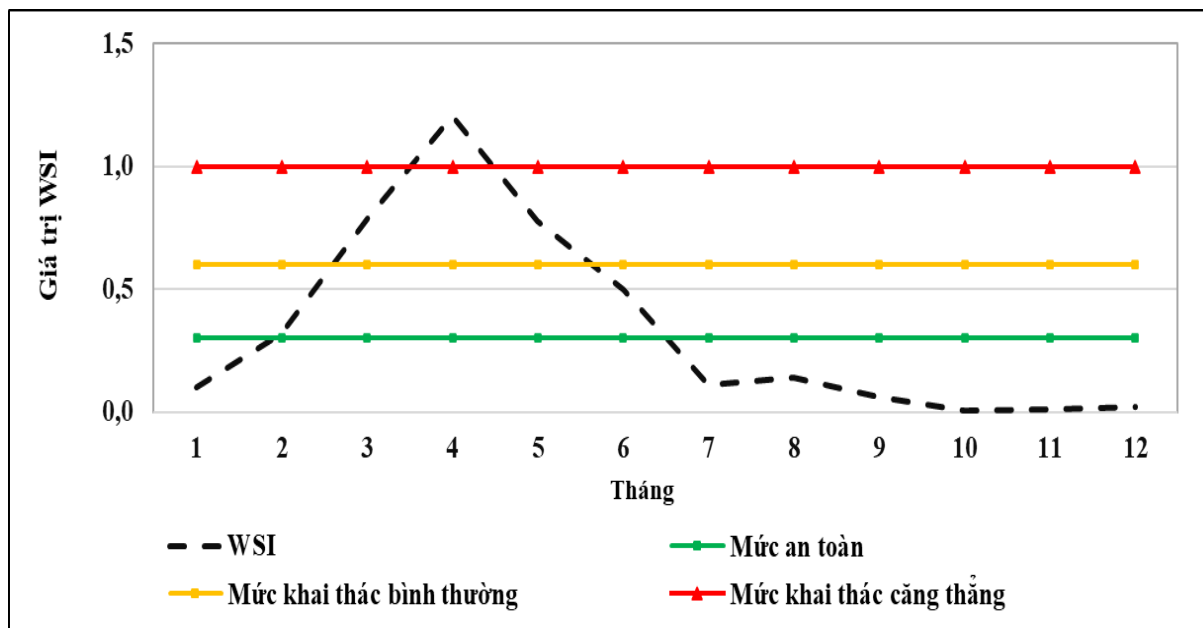
Giá trị trung bình chỉ số WSI mùa khô đạt 2,3, cao hơn so với kịch bản 2, có thể thấy lượng nước tái sử dụng 30.000 m³/ngày (tương đương khoảng 7–8% tổng công suất cấp nước của NMN Cầu Đỏ) chưa đủ để làm giảm đáng kể áp lực khai thác nguồn nước tự nhiên trong điều kiện cực đoan của kịch bản khí hậu RCP 8.5.

Mặc dù giá trị chỉ số WSI giảm không đáng kể, nhưng kịch bản tái sử dụng nước thải mang lại lợi ích rõ rệt về môi trường nhờ giảm tiêu thụ năng lượng, hóa chất và phát thải KNK trong công đoạn xử lý. Nước tái sử dụng chỉ cần qua khử trùng UV không cần các công đoạn keo tụ, lắng, lọc, clo hóa như tại NMN Cầu Đỏ. Đây là phương án khả thi theo hướng kinh tế tuần hoàn trong ngành nước đô thị, góp phần giảm tác động môi trường tổng thể dù chưa làm thay đổi lớn mức độ căng thẳng nguồn nước tự nhiên.

d. Kịch bản S4 – Nâng công suất An Trạch (không mở rộng NMN Cầu Đỏ)

Kịch bản S4 mở rộng công suất thêm 100.000 m³/ngày cho NMN An Trạch, tại khu vực Hòa Tiến, thay vì tăng công suất tại Cầu Đỏ. Nguồn cấp chủ yếu là nước mặt từ sông Vu Gia, được điều tiết bởi đập dâng An Trạch, với tổng công suất 420.000

m³/ngày. Vào các tháng 3,4,5 do ảnh hưởng của xâm nhập mặn, nguồn nước thô cho NMN Cầu Đỏ và nhà máy An Trạch gần như đều được khai thác tại đập dâng An Trạch với công suất cấp cho NMN Cầu Đỏ là 320.000 m³/ngày và 100.000 m³/ngày cho nhà máy An Trạch. Hình 4.6 thể hiện kết quả WSI của kịch bản 4:



Hình 4.6. Giá trị chỉ số WSI tại cửa thu nước Cầu Đỏ theo kịch bản S4

Kết quả tính toán chỉ ra rằng chỉ số WSI trung bình mùa khô đạt 0,58, nằm trong ngưỡng “khai thác bình thường” ($0,3 \leq WSI < 0,6$) theo phân loại của Smakhtin và cộng sự (2005). So với các kịch bản trước, giá trị này thể hiện sự cải thiện rõ rệt về mức độ căng thẳng nguồn nước, qua đó khẳng định vai trò của việc phân bổ lại lưu lượng khai thác giữa hai vị trí cửa thu Cầu Đỏ và đập dâng An Trạch.

Việc chia sẻ lưu lượng khai thác - 320.000 m³/ngày tại Cầu Đỏ và 100.000 m³/ngày tại An Trạch - đã giúp giảm đáng kể áp lực lên lưu vực hạ lưu sông Vu Gia, nơi thường xuyên chịu ảnh hưởng mạnh của xâm nhập mặn vào mùa khô. Trong khi đó, đập dâng An Trạch đóng vai trò nguồn nước dự phòng an toàn, có khả năng cung cấp ổn định hơn nhờ vị trí xa cửa sông và khả năng điều tiết nước mặt.

Giá trị chỉ số WSI chỉ tăng nhẹ trong giai đoạn tháng 3–5, phản ánh giai đoạn dòng chảy kiệt tự nhiên, sau đó nhanh chóng giảm về mức an toàn ($<0,3$) từ tháng 7 trở đi. Kết quả này hàm ý rằng, khả năng cân bằng nước của hệ thống được cải thiện rõ, đặc biệt khi xét trong bối cảnh BĐKH và nhu cầu nước ngày càng tăng đến năm 2045.

Như vậy, kịch bản 4 chứng minh được rằng việc khai thác song song giữa hai nguồn nước mặt lớn là giải pháp hợp lý, giúp phân tán rủi ro nguồn nước, tăng tính linh hoạt vận hành, giảm áp lực môi trường tại từng điểm khai thác. Mức chỉ số WSI

đạt được phản ánh khả năng khai thác bền vững hơn so với các phương án trước, hướng tới bảo đảm an toàn cấp nước cho TP. Đà Nẵng trong điều kiện BĐKH và xâm nhập mặn gia tăng.

e. Kịch bản S5 – Giữ nguyên khai thác nguồn nước thô như S1, áp dụng công nghệ xử lý tiên tiến và tích hợp năng lượng mặt trời áp mái

Kịch bản S5 giữ nguyên công suất khai thác như kịch bản S1 (Cầu Đỏ – An Trạch) nhưng áp dụng các giải pháp quản lý nhu cầu, tiết kiệm năng lượng và tái sử dụng nước trong nhà máy sản xuất nước sạch. Do không mở rộng hay thay đổi quá trình khai thác nên về cơ bản chỉ số WSI tại các nguồn vẫn tương tự S1.

Kết quả tổng hợp giá trị chỉ số WSI của 5 kịch bản vào mùa khô được thể hiện ở Bảng 4.2.

Bảng 4.2. Tổng hợp giá trị chỉ số WSI vào mùa khô của 5 kịch bản cấp nước

Kịch bản	S1	S2	S3	S4	S5
Chỉ số WSI	2,69	1,56	1,60	0,58	2,69

4.2.3. Kiểm kê vòng đời.

Phần kiểm kê vòng đời nhằm thu thập và tổng hợp các dữ liệu đầu vào, đầu ra liên quan đến quá trình khai thác, sản xuất nước sạch trong từng kịch bản cấp nước đô thị tại TP. Đà Nẵng. Đây là bước nền tảng trong phương pháp, giúp định lượng các yếu tố tiêu thụ tài nguyên và phát thải môi trường của từng phương án.

Dữ liệu kiểm kê được xây dựng cho 5 kịch bản cấp nước (S1 đến S5), bao gồm các thông số chính như:

- Nguồn nước thô và vị trí khai thác (cửa thu Cầu Đỏ, đập dâng An Trạch, nước lợ, nước tái sử dụng).
- Công suất khai thác và thời gian vận hành theo mùa.
- Tiêu thụ điện năng (kWh/m³), gồm điện lưới và NLMT (nếu có).
- Lượng hóa chất sử dụng trong xử lý nước: PAC, Clo, các chất phụ trợ trong khử mặn như sắt(III) clorua, axit sunfuric, natri bisulphit, v.v.
- Tỷ lệ nước sử dụng nội bộ trong nhà máy.

Các dữ liệu được thu thập từ:

- Hồ sơ dữ liệu vận hành thực tế của NMN Cầu Đỏ.
- Quy hoạch cấp nước đô thị TP. Đà Nẵng

- Dữ liệu quan trắc nguồn nước và độ mặn theo mùa.
- Thông số kỹ thuật của các công nghệ xử lý nước như RO, MF/UF, UV, than hoạt tính, ozon.
- Hệ số phát thải điện lưới Việt Nam theo từng năm để phục vụ tính toán phát thải KNK.

Kết quả kiểm kê cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các kịch bản như:

- Điện năng tiêu thụ: Kịch bản S2 (khử mặn RO) có mức tiêu thụ điện cao nhất (2,6 kWh/m³), trong khi S1 và S5 có mức thấp hơn đáng kể.
- Lượng hóa chất sử dụng: Các kịch bản sử dụng công nghệ khử mặn, công nghệ tiên tiến (S2, S5) có bổ sung thêm các hóa chất phụ trợ, ảnh hưởng đến độc tính và phú dưỡng nguồn nước.
- Nguồn năng lượng: Kịch bản S5 tích hợp NLMT (30%), giúp giảm phát thải KNK so với các kịch bản sử dụng hoàn toàn điện lưới.

Bảng kiểm kê chi tiết 5 kịch bản được trình bày ở Bảng 4.3. Việc kiểm kê đầy đủ và chính xác giúp bảo đảm tính minh bạch, nhất quán và khả năng so sánh giữa các kịch bản, từ đó hỗ trợ lựa chọn phương án cấp nước tối ưu cho TP. Đà Nẵng trong dài hạn.

Bảng 4.3. Dữ liệu kiểm kê của 5 kịch bản cấp nước

STT	Kịch bản	Vị trí lấy nước	Công suất (m ³ /ngày)	Thời gian khai thác	Điện (kWh/m ³)	PAC (kg/m ³)	Clo (kg/m ³)	Hóa chất khác (kg/m ³)
1	S1 - Base	Tại cửa thu NMN Cầu Đỏ (Khi độ mặn <250 mg/L)	420.000	Tháng 1 đến tháng 2 và tháng 9 đến tháng 12	0,203	0,00553	0,0009	
		Đập dâng An Trạch bơm nước thô về NMN Cầu Đỏ (Bổ sung khi độ mặn tại NMN Cầu Đỏ > 250 mg/L và < 1000 mg/L và khai thác 100% khi độ mặn > 1000 mg/L)		Tập trung từ tháng 3 đến tháng 8	0,299	0,00551	0,0011	
2	S2 – Kết hợp xử lý nước song song: Truyền thống - RO	Tại cửa thu NMN Cầu Đỏ (Khi độ mặn <250 mg/L)	420.000	Tháng 1 đến tháng 2 và tháng 9 đến tháng 12	0,203	0,00553	0,0009	
		Đập dâng An Trạch bơm nước thô về NMN Cầu Đỏ (Bổ sung khi độ mặn tại NMN Cầu Đỏ > 250 mg/L và < 1000 mg/L và khai thác 100% khi độ mặn > 1000 mg/L)	320.000	Tập trung từ tháng 3 đến tháng 8	0,299	0,00551	0,0011	
		- Tại cửa thu NMN Cầu Đỏ (Nước lợ) (Khi độ mặn > 250mg/L chuyển qua hệ thống khử mặn)	100.000		2,6			- Sắt(III) clorua: 0,0005-0,001; - Natri tripolyphosphat (Na ₅ P ₃ O ₁₀): 0,0005 – 0,005; - Axit sunfuric: 0,02; - Natri bisulphit (NaHSO ₃): 0,0011 – 0,0015; - Clo: 0,0075;
3	S3 - Nguồn nước thay thế	-Tại cửa thu NMN Cầu Đỏ (Khi độ mặn < 250 mg/L)	390.000	Tháng 1 đến tháng 2 và tháng 9 đến tháng 12	0,203	0,00553	0,0009	

		Đập dâng An Trạch bơm nước thô về NMN Cầu Đỏ (Bổ sung khi độ mặn tại NMN Cầu Đỏ > 250 mg/L, < 1000 mg/L và khai thác 100% khi độ mặn > 1000 mg/L)		Tập trung từ tháng 3 đến tháng 8	0,299	0,00551	0,0011	
		Trạm xử lý nước thải Hòa Xuân (cấp tưới cây cho Ngũ Hành Sơn, Cẩm Lệ, Sơn Trà, Hải Châu, Thanh Khê, tiểu vùng Hòa Vang - 8% Qsh) - 25 % nước thải tại trạm xử lý nước thải Hòa Xuân	30.000	12 tháng trong năm	UV áp suất trung bình: 0,122 – 0,14 kWh/m ³			
4	S4 - Nâng công suất cho NMN tại đập dâng An Trạch (Không mở rộng NMN Cầu Đỏ)	-Tại cửa thu NMN Cầu Đỏ (Khi độ mặn < 250 mg/L)	320.000	Tháng 1 đến tháng 2 và tháng 9 đến tháng 12	0,203	0,00553	0,0009	
		- Đập dâng An Trạch bơm nước thô về NMN Cầu Đỏ (Bổ sung khi độ mặn tại NMN Cầu Đỏ > 250 mg/L, < 1000 mg/L và khai thác 100% khi độ mặn > 1000 mg/L)		Tập trung từ tháng 3 đến tháng 8	0,2995	0,00551	0,0011	
		Khai thác tại đập dâng An Trạch và xây mới NMN tại vị trí cạnh đập dâng An Trạch - Hòa Tiến. Sau xử lý cấp cho khu vực tiểu vùng Nam Hòa Vang và bổ sung cho NMN Cầu Đỏ	100.000	Tháng 1 đến tháng 2 và tháng 9 đến tháng 12	0,203 +0,0336 (bơm về Cầu Đỏ)	0,00553	0,0009	
			100.000	Tập trung từ tháng 3 đến tháng 8		0,00551	0,0011	
5	S5 - Giữ nguyên khai thác nguồn nước thô như S1, áp dụng công nghệ xử lý tiên tiến và tích hợp NLMT áp mái	Tại cửa thu NMN Cầu Đỏ (Khi độ mặn < 250 mg/L)	420.000	Tháng 1 đến tháng 2 và tháng 9 đến tháng 12	0,212 kWh điện lưới + 0,091 kWh NLMT	0,00553	0,0005	
		Đập dâng An Trạch bơm nước thô về NMN Cầu Đỏ (Bổ sung khi độ mặn tại NMN Cầu Đỏ > 250 mg/L và < 1000 mg/L và khai thác 100% khi độ mặn > 1000 mg/L)		Tập trung từ tháng 3 đến tháng 8	0,2795 kWh điện lưới+ 0,12 kWh NLMT	0,00551	0,0005	

4.2.4. Đánh giá tác động vòng đời và diễn giải kết quả của các kịch bản

Trên cơ sở mô hình tích hợp WSI - LCA, việc đánh giá 5 kịch bản cấp nước đô thị của TP. Đà Nẵng được thực hiện nhằm định lượng toàn diện các tác động môi trường tiềm ẩn trong toàn bộ hệ thống, đồng thời xem xét yếu tố khan hiếm nguồn nước tại từng điểm khai thác. Phương pháp LCA được thực hiện theo hướng dẫn của bộ tiêu chuẩn ISO 14040 và ISO 14044, sử dụng phần mềm SimaPro kết hợp với cơ sở dữ liệu Ecoinvent v3.1 và phương pháp ReCiPe 2016. Các kết quả được tính toán theo cả hai cấp độ: loại tác động (midpoint) và điểm kết thúc của loại tác động (endpoint), trong đó kết quả điểm kết thúc của loại tác động được sử dụng làm cơ sở chính cho việc so sánh, xếp hạng và lựa chọn kịch bản tối ưu.

4.2.4.1. Kết quả tác động đặc trưng của các kịch bản

Ở cấp độ tác động, 6 tác động chính được lựa chọn bao gồm: (i) Phát thải carbon (kg CO₂ tđ), (ii) Axit hóa (kg SO₂ tđ), (iii) Phú dưỡng nước ngọt (kg P tđ), (iv) Độc tính sinh thái nước ngọt (kg 1,4-DCB tđ), (v) Suy giảm tài nguyên hóa thạch (kg dầu tđ), và (vi) Sử dụng tài nguyên nước (m³ nước tiêu thụ). Các chỉ tiêu này phản ánh đặc trưng của hoạt động khai thác và sản xuất nước sạch, giúp nhận diện các “điểm nóng” (hotspots), là cơ sở để so sánh hiệu quả môi trường của các kịch bản khác nhau.

Bên cạnh đó, để phản ánh đặc thù tài nguyên nước của khu vực nghiên cứu, luận án tích hợp chỉ số WSI vào phương pháp LCA thông qua chỉ số dấu chân khan hiếm nguồn nước (WSF = WC × WSI). Việc này cho phép điều chỉnh kết quả sử dụng tài nguyên nước (m³) theo mức độ khan hiếm thực tế của từng nguồn (Cầu Đỏ, An Trạch, nước lợ, hay nước tái sử dụng), qua đó phản ánh chính xác hơn tác động của các kịch bản đến bền vững tài nguyên nước địa phương. Việc tích hợp chỉ số WSI ở cấp độ đặc trưng hóa (characterization) là một đóng góp mới của nghiên cứu này, giúp mở rộng phạm vi của phương pháp LCA tiêu chuẩn từ đánh giá phát thải sang xem xét thêm yếu tố áp lực tài nguyên.

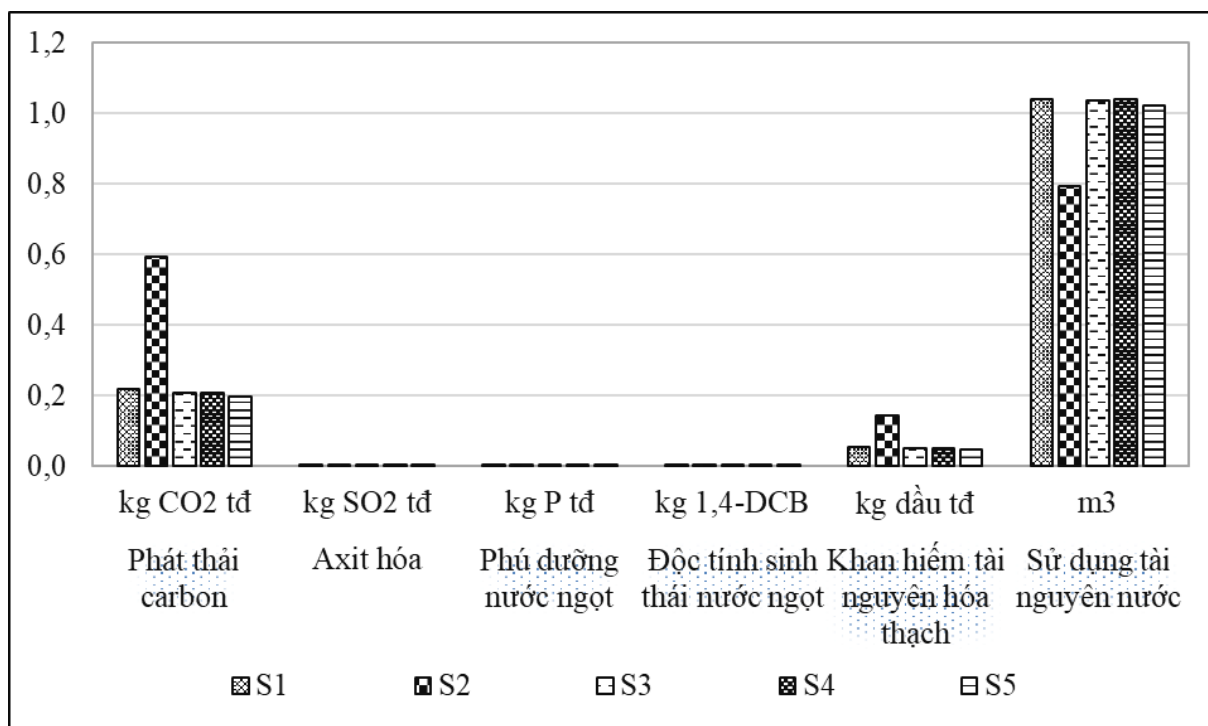
Kết quả dưới đây là lượng phát thải từ phương pháp LCA của các kịch bản đã được đề xuất cho cấp nước Đà Nẵng giai đoạn 2030-2045. Phương pháp đánh giá tác động được sử dụng trong nghiên cứu này là phương pháp ReCiPe 2016 (H) với kết quả của 6 loại tác động đặc trưng được trình bày ở Bảng 4.4. và Hình 4.7.

Bảng 4.4. Kết quả của các loại tác động đặc trưng cho 5 kịch bản cấp nước tại Đà Nẵng

STT	Loại tác động	Đơn vị	Kịch bản				
			S1	S2	S3	S4	S5
1	Phát thải carbon	kg CO ₂ tđ	0,2175	0,5926	0,2078	0,2071	0,1955
2	Axit hóa	kg SO ₂ tđ	0,001370	0,003775	0,001310	0,001304	0,001232
3	Phú dưỡng nước ngọt	kg P tđ	$10,00 \times 10^{-6}$	$27,4 \times 10^{-6}$	$9,57 \times 10^{-6}$	$9,53 \times 10^{-6}$	$8,99 \times 10^{-6}$
4	Độc tính sinh thái nước ngọt	kg 1,4-DCB	$3,04 \times 10^{-5}$	$6,99 \times 10^{-5}$	$2,88 \times 10^{-5}$	$2,92 \times 10^{-5}$	$2,77 \times 10^{-6}$
5	Khan hiếm tài nguyên hóa thạch	kg dầu tđ	0,052	0,143	0,050	0,050	0,047
6	Sử dụng tài nguyên nước	m ³	1,040	0,793	1,038	1,040	1,020

* DCB là 1, 4 dichlorobenzen

m³ nước sạch



Hình 4.7. Kết quả 6 tác động của 5 kịch bản cấp nước được xây dựng

Kết quả các tác động đặc trưng của 5 kịch bản (S1–S5) có sự khác biệt đáng kể, phản ánh mức độ tiêu thụ năng lượng, nguồn nước và công nghệ xử lý khác nhau trong từng phương án cấp nước.

- Phát thải carbon (kg CO₂ tđ): Giá trị cao nhất thuộc kịch bản S2 (0,5926 kg CO₂ tđ), là kịch bản kết hợp xử lý nước ngọt và nước lợ bằng công nghệ RO. Việc sử dụng năng lượng điện lớn cho bơm áp lực và hoàn nguyên màng RO làm gia tăng phát thải KNK. Ngược lại, S5 (0,1955 kg CO₂ tđ) có giá trị thấp nhất, khẳng định ưu thế của phương án duy trì khai thác hiện trạng nhưng tối ưu năng lượng. Các kịch bản S1, S3 và S4 có giá trị tương đương nhau (khoảng 0,207–0,218 kg CO₂ tđ), chứng tỏ phát thải chủ yếu đến từ hoạt động xử lý và vận hành bơm, ít phụ thuộc vào vị trí khai thác. Riêng đối với dây chuyền khử lợ ở kịch bản S2, mức phát thải KNK đạt 1,79 kg CO₂ tđ/m³, nằm trong khoảng trung bình của các hệ thống khử nước lợ trên thế giới (0,4–2,5 kg CO₂ tđ/m³). Còn đối với công đoạn khử trùng cho mục đích tái sử dụng nước thải trong kịch bản S3, phát thải chỉ ở mức 0,08 kg CO₂ tđ/m³, thấp hơn đáng kể so với các hệ thống tái sử dụng nước được ghi nhận trong các nghiên cứu quốc tế (0,1–2,4 kg CO₂ tđ/m³) do chỉ tính ở công đoạn khử trùng sau khi xử lý đạt. Các kết quả này thể hiện các công nghệ áp dụng trong nghiên cứu đạt hiệu suất năng lượng tương đối tốt so với mặt bằng chung toàn cầu [96], [97], [98]. Với nghiên cứu LCA của hệ thống khử mặn ở Singapore, nhờ vào cơ cấu nguồn năng lượng ưu tiên sử dụng khí tự nhiên và áp dụng các công nghệ hiện đại, các hệ thống khử mặn (đặc biệt là khử mặn bằng công nghệ RO cho nước lợ) có mức phát thải carbon thấp khoảng 1,0–1,5 kg CO₂

tđ/m³ [99]. Những kết quả này không những phản ánh hiệu quả của quy trình xử lý, mà còn nêu rõ vai trò quan trọng của một nguồn năng lượng “xanh” trong việc giảm tác động đến BĐKH.

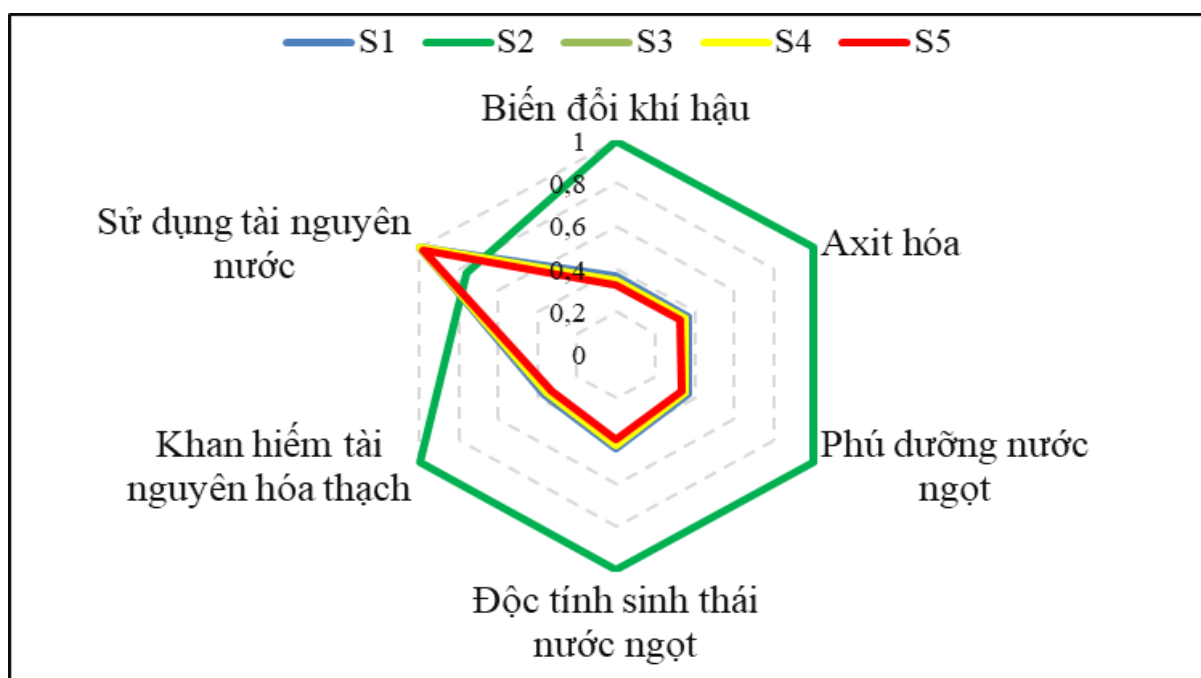
- Axit hóa (kg SO₂ tđ): Xu hướng tương tự phát thải carbon, S2 có mức tác động axit hóa cao nhất (0,003775 kg SO₂ tđ) do tiêu thụ điện năng lớn, trong khi S5 thấp nhất (0,001232 kg SO₂ tđ). Mức độ khác biệt giữa các kịch bản phản ánh mối liên hệ giữa tiêu hao năng lượng hóa thạch và phát thải SO₂ trong hệ thống điện quốc gia.

- Phú dưỡng nước ngọt (kg P tđ) và Độc tính sinh thái nước ngọt (kg 1,4-DCB tđ): Tác động cao nhất vẫn ở S2 do sử dụng hóa chất và năng lượng cao. S5 là kịch bản có mức tác động thấp nhất, cho thấy hiệu quả cải thiện môi trường đáng kể khi giảm tiêu thụ hóa chất và năng lượng. Việc bổ sung xử lý RO ở S2 cũng góp phần làm tăng lượng nước thải cô đặc có chứa chất dinh dưỡng và tăng độc tính.

- Khai thác tài nguyên hóa thạch (kg dầu tđ): Giá trị tác động theo thứ tự giảm dần là S2 đến S1, S3, S4 và S5, kịch bản S2 tiêu thụ nhiều năng lượng nhất (0,143 kg dầu tđ), trong khi S5 ít nhất (0,047 kg dầu tđ). Sự khác biệt này chủ yếu xuất phát từ nhu cầu tiêu thụ điện năng và hóa chất của từng phương án cấp nước. Các kịch bản sử dụng nhiều năng lượng hơn sẽ làm gia tăng lượng nhiên liệu hóa thạch khai thác trong toàn bộ vòng đời.

- Sử dụng tài nguyên nước (m³): Sự khác biệt chủ yếu giữa các kịch bản xuất phát từ tỷ lệ khai thác nước ngọt trong tổng công suất cấp nước. Các kịch bản S1, S3, S4 và S5 có giá trị tương đương (1,020–1,041 m³), trong khi đó, kịch bản S2 có mức tiêu thụ tài nguyên nước thấp hơn đáng kể, nhờ sử dụng 100.000 m³/ngày nước lợ, phần nước này không được tính vào lượng nước ngọt khai thác, do không gây cạnh tranh với nguồn nước sinh thái. Từ các phân tích trên có thể nhận thấy, việc đa dạng hóa nguồn nước, đặc biệt là sử dụng nước lợ hoặc nước biển, có thể làm giảm áp lực lên nguồn nước ngọt trong khu vực.

Kết quả tổng hợp các tác động của các kịch bản được thể hiện ở Hình 4.8:



Hình 4.8. Tổng hợp các tác động của các kịch bản S1-S5

Với các kết quả của bước đánh giá tác động theo phương pháp LCA truyền thống, kịch bản S2 có tác động cao nhất ở hầu hết các nhóm, khẳng định rủi ro môi trường gia tăng do sử dụng công nghệ RO năng lượng cao. S5 thể hiện hiệu quả môi trường tốt nhất trong tất cả các nhóm tác động, là phương án tối ưu nếu xét riêng về hiệu quả năng lượng và phát thải. S1, S3, S4 có mức độ tác động tương đối tương đồng, phản ánh rằng thay đổi vị trí khai thác nước hoặc bổ sung nguồn thay thế (như nước thải tái sử dụng) chỉ cải thiện nhẹ về môi trường nếu không có thay đổi lớn trong công nghệ xử lý.

*** Tích hợp chỉ số WSI vào loại tác động khan hiếm nước:**

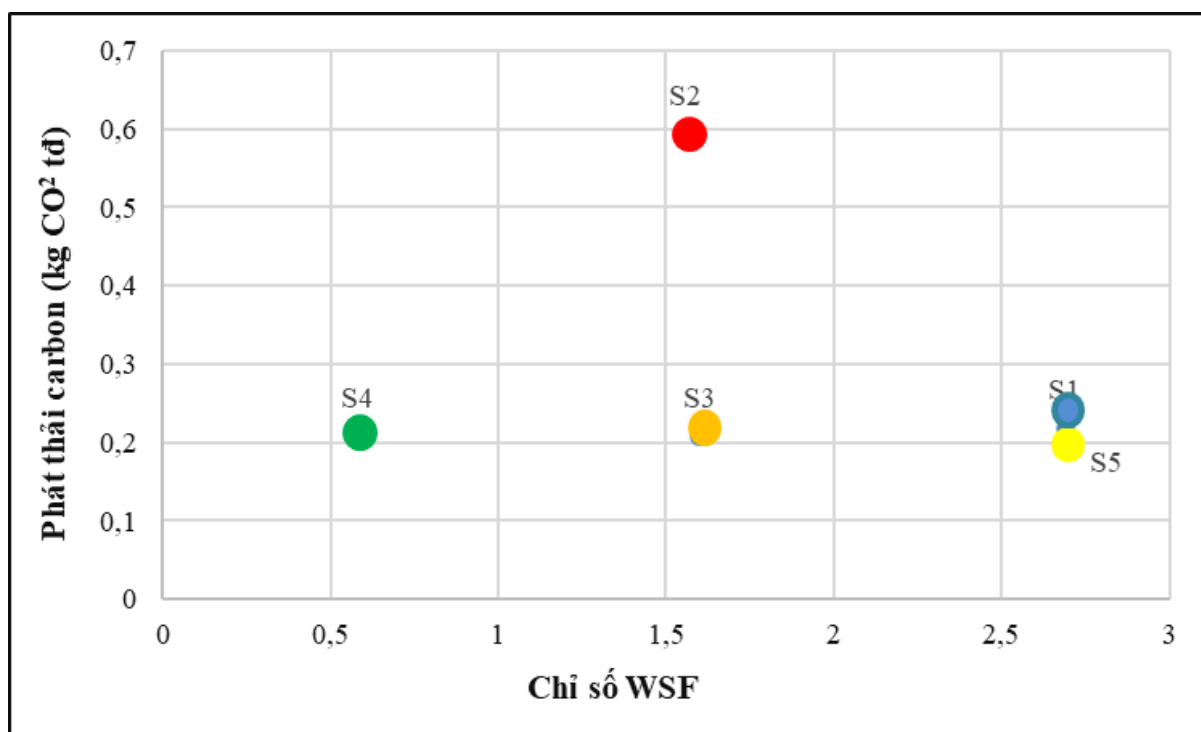
Trong 6 loại tác động của phương pháp ReCiPe 2016, tác động “Sử dụng tài nguyên nước” phản ánh tổng lượng nước ngọt tiêu thụ (WC) trên 1 m³ nước sạch, tuy nhiên chưa xem xét đến bối cảnh khan hiếm nguồn nước tại từng khu vực. Để bổ sung khía cạnh này, nghiên cứu tích hợp chỉ số WSI vào kết quả WC nhằm xác định dấu chân khan hiếm nguồn nước (WSF) cho từng kịch bản. Kết quả thể hiện ở Bảng 4.5.

Bảng 4.5. Kết quả dấu chân khan hiếm nguồn nước (WSF) của 5 kịch bản:

Kịch bản	S1	S2	S3	S4	S5
Chỉ số WSI	2,69	1,56	1,60	0,58	2,69
WC (m ³)	1,040	0,793	1,038	1,040	1,020
WSF (m ³ nước-tương đương)	2,80	1,24	1,66	0,60	2,74

S1 và S5 có giá trị WSF cao nhất (2,8 m³ nước tđ/m³ nước sạch), phản ánh áp lực cao lên nguồn nước Cầu Đỏ, nơi có chỉ số WSI tới 2,69 vào mùa khô. S4 có WSF thấp nhất (0,6) nhờ bổ sung khai thác từ đập dâng An Trạch, khu vực có điều kiện nguồn nước dồi dào và chỉ số WSI thấp (0,58). S2 và S3 có mức trung bình (1,24-1,66), hàm ý rằng, việc sử dụng nước lợi hoặc tái sử dụng nước thải giúp giảm một phần áp lực khai thác nước ngọt.

Kết quả kết hợp WSF và phát thải carbon của 5 kịch bản được thể hiện ở Hình 4.9:



Hình 4.9. Kết quả kết hợp WSF và phát thải carbon của 5 kịch bản

S2 gây tác động môi trường lớn nhất ở hầu hết các chỉ tiêu khí – năng lượng, nhưng lại giảm đáng kể áp lực nguồn nước (WSF) nhờ khai thác nước lợi. S5 thân thiện hơn về phát thải nhưng rất nhạy cảm với khan hiếm nước, do vẫn phụ thuộc hoàn toàn vào nguồn nước ngọt tại Cầu Đỏ. S4 được xem là kịch bản cân bằng nhất, vừa có mức phát thải thấp, vừa giảm đáng kể tác động khan hiếm nước (WSF = 0,6), nhờ khai thác luân phiên và tận dụng tốt nguồn từ An Trạch.

Nghiên cứu trên hệ thống khử mặn tại Trung Quốc cũng chỉ ra rằng, đối với hầu hết các tỉnh được chọn nghiên cứu, các tỉnh có chỉ số WSI cao thường có công suất nhà máy khử mặn cao. Tỉnh Liêu Ninh – Trung Quốc, có chỉ số WSI 0,5 và công suất khử mặn là gần 100.000 m³/ngày, TP. Hà Bắc – Trung Quốc với chỉ số WSI là 0,8 thì công suất khử mặn là hơn 170.000 m³/ngày [98]. Với chỉ số WSI tại Đà Nẵng vào mùa

khô là 2,69 theo kịch bản BĐKH RCP 8.5 được đề xuất, việc đưa ra phương án có nhà máy khử nước lợ cũng cần được xem xét cho hệ thống cấp nước của Đà Nẵng.

4.2.4.2. Kết quả đặc trưng của điểm kết thúc tác động

Trong đánh giá tác động (LCIA), chỉ báo tác động là các số liệu phát thải hoặc gây tác động trung gian. Còn chỉ báo điểm kết thúc của tác động là các chỉ báo cuối cùng ảnh hưởng trực tiếp đến con người, hệ sinh thái hoặc tài nguyên. Ở cấp độ điểm kết thúc của loại tác động, các tác động được quy đổi sang ba nhóm chỉ tiêu tổng hợp: (1) Tác động đến sức khỏe con người (Human Health, đơn vị DALY), (2) Tác động đến hệ sinh thái (Ecosystem Quality, đơn vị species·yr), và (3) Tác động đến tài nguyên (Resources, đơn vị USD2013). Các kết quả này cho phép so sánh toàn diện các tác động môi trường trong cùng một khung giá trị chuẩn hóa và có thể lượng hóa được lợi ích hay rủi ro tương đối giữa các kịch bản cấp nước. Từ chỉ báo các loại tác động chuyển qua chỉ báo điểm kết thúc của tác động được tính theo công thức sau:

$$C_i^{end} = C_i^{mid} \times CF_{i \rightarrow j}$$

Trong đó:

- C_i^{mid} : Kết quả đặc trưng của chất gây tác động i (ví dụ: kg CO₂ tđ, kg SO₂ tđ, kg P tđ, kg 1,4-DCB tđ...).
- $CF_{i \rightarrow j}$: Hệ số chuyển đổi từ giá trị các tác động thành điểm kết thúc của tác động.
- C_i^{end} : Kết quả điểm kết thúc của tác động (theo DALY cho sức khỏe, species·year cho hệ sinh thái, USD cho tài nguyên).

Kết quả đặc trưng điểm kết thúc tác động của 5 kịch bản được thể hiện ở Bảng 4.6 sau:

Bảng 4.6. Giá trị chỉ báo các đặc trưng điểm kết thúc tác động của các kịch bản

STT	Loại tác động	Đơn vị	S1- Tại Cầu Đỏ (Công suất 420.000 m ³ /ngày)	S2		S3		S4		S5- Tại Cầu Đỏ (Công suất 420.000 m ³ /ngày)
				Tại Cầu Đỏ (Công suất 320.000 m ³ /ngày)	Khử lợ (Công suất 100.000 m ³ /ngày)	Tái sử dụng (Công suất 30.000 m ³ /ngày)	Tại Cầu Đỏ (Công suất 390.000 m ³ /ngày)	Tại đập dâng An Trạch (Công suất 100.000 m ³ /ngày)	Tại Cầu Đỏ (Công suất 320.000 m ³ /ngày)	
1	Tổng tác động đến sức khỏe con người	DALY	$7,305 \times 10^{-7}$	$7,298 \times 10^{-7}$	$4,409 \times 10^{-6}$	$4,172 \times 10^{-7}$	$7,298 \times 10^{-7}$	$6,293 \times 10^{-7}$	$7,306 \times 10^{-7}$	$6,751 \times 10^{-7}$
2	Tác động tới hệ sinh thái	species.yr	$3,096 \times 10^{-9}$	$3,095 \times 10^{-9}$	$1,047 \times 10^{-8}$	$2,407 \times 10^{-9}$	$3,095 \times 10^{-9}$	$2,894 \times 10^{-9}$	$3,096 \times 10^{-9}$	$2,954 \times 10^{-9}$
3	Khan hiếm tài nguyên	USD2013	0,008425	0,008413	0,066904	0,003217	0,008413	0,006807	0,008426	0,007592

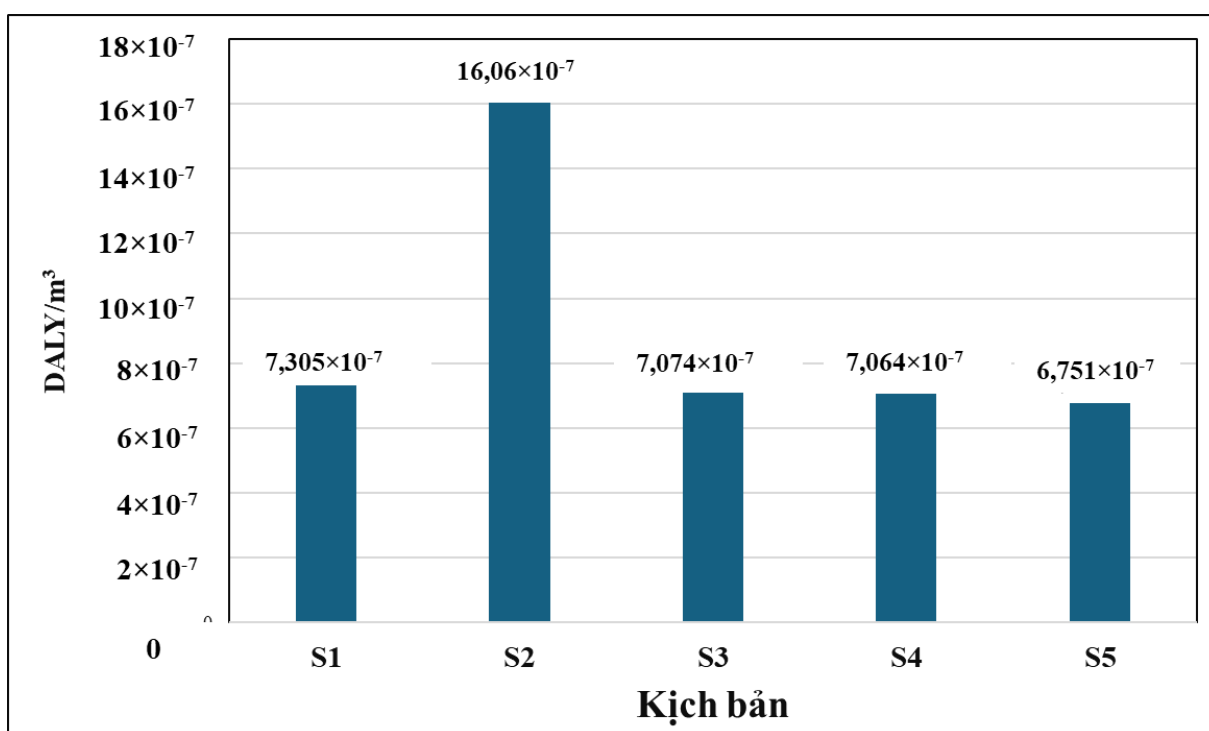
DALY (Disability-Adjusted Life Years): đo lường tác động của một hoạt động đến sức khỏe con người — tính bằng tổng số năm sống bị mất đi do bệnh tật, khuyết tật hoặc tử vong sớm.

Species.yr: Mất mát đa dạng sinh học, được đo bằng số lượng loài biến mất trong 1 năm do tác động từ hệ thống được đánh giá.

Kết quả của các tác động liên quan đến 3 lĩnh vực gồm: (1) tác động đến sức khỏe con người, (2) ảnh hưởng đến đa dạng sinh học và (3) tình trạng khan hiếm tài nguyên được trình bày ở các mục sau:

*** Tác động tới sức khỏe con người**

Các tác động liên quan đến sức khỏe của con người được tính toán từ tổng các điểm kết thúc tác động bao gồm: *Phát thải carbon ảnh hưởng đến sức khỏe con người, suy giảm tầng ôzôn tầng bình lưu, bức xạ ion hóa, hình thành ôzôn, sức khỏe con người, hình thành bụi mịn, độc tính gây ung thư ở người, độc tính không gây ung thư ở người, tiêu thụ nước ảnh hưởng đến sức khỏe con người*. Tác động đến sức khỏe của hệ thống cấp nước đô thị được thể hiện ở Hình 4.10.



Hình 4.10. Các tác động đến sức khỏe của con người từ các kịch bản

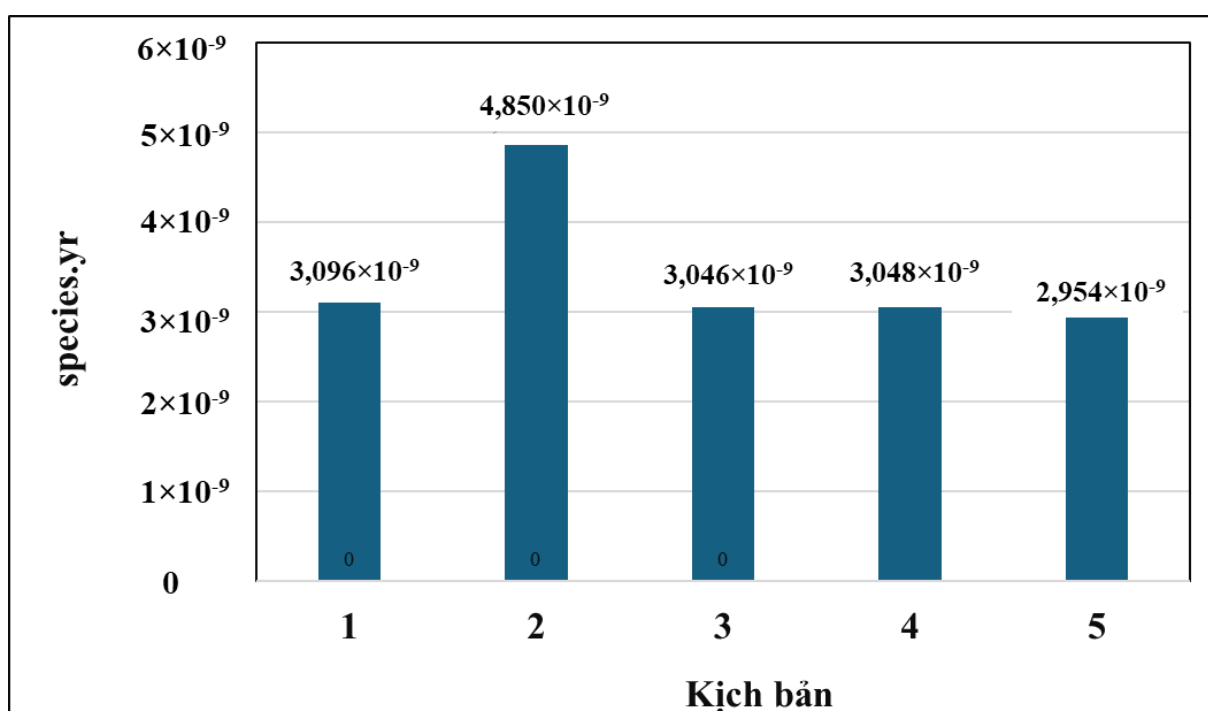
Giá trị tác động đến sức khỏe con người của các kịch bản dao động trong khoảng $6,75 \times 10^{-7} - 16,06 \times 10^{-7}$ DALY/m³. Trong đó, kịch bản S2 có giá trị cao nhất, $16,06 \times 10^{-7}$ DALY/m³, cao gấp hơn 2 lần so với các kịch bản còn lại. Nguyên nhân chính là do công nghệ RO có mức tiêu thụ năng lượng điện lớn, kéo theo phát thải KNK và các chất gây ô nhiễm không khí (SO_2 , NO_x), làm tăng tác động đến sức khỏe con người thông qua các cơ chế ô nhiễm không khí và BDKH.

Ngược lại, các kịch bản S3, S4 và S5 có mức tác động gần tương đương nhau, dao động khoảng $7,0 \times 10^{-7}$ DALY/m³, thấp hơn so với kịch bản cơ sở S1. Trong đó, S5 có giá trị nhỏ nhất ($6,75 \times 10^{-7}$ DALY/m³), thể hiện hiệu quả môi trường tốt hơn nhờ

giảm tiêu thụ năng lượng và duy trì hoạt động khai thác trong ngưỡng an toàn hơn đối với nguồn nước.

* Tác động tới hệ sinh thái

Tác động đến hệ sinh thái từ hệ thống phân tích được tính bằng số lượng loài biến mất trong thời gian 1 năm (species.yr). Các thiệt hại đến hệ sinh thái được tính từ tổng các điểm kết thúc tác động bao gồm: *Phát thải carbon ảnh hưởng đến hệ sinh thái trên cạn, phát thải carbon ảnh hưởng đến hệ sinh thái nước ngọt, hình thành ôzôn ảnh hưởng đến hệ sinh thái trên cạn, axit hóa môi trường đất, phú dưỡng hóa nước ngọt, phú dưỡng hóa biển, độc tính sinh thái trên cạn, độc tính sinh thái nước ngọt, độc tính sinh thái biển, sử dụng đất, tiêu thụ nước ảnh hưởng đến hệ sinh thái trên cạn, tiêu thụ nước ảnh hưởng đến hệ sinh thái thủy sinh*. Tác động đến hệ sinh thái của hệ thống cấp nước đô thị được thể hiện ở Hình 4.11.



Hình 4.11. Các tác động đến hệ sinh thái từ các kịch bản

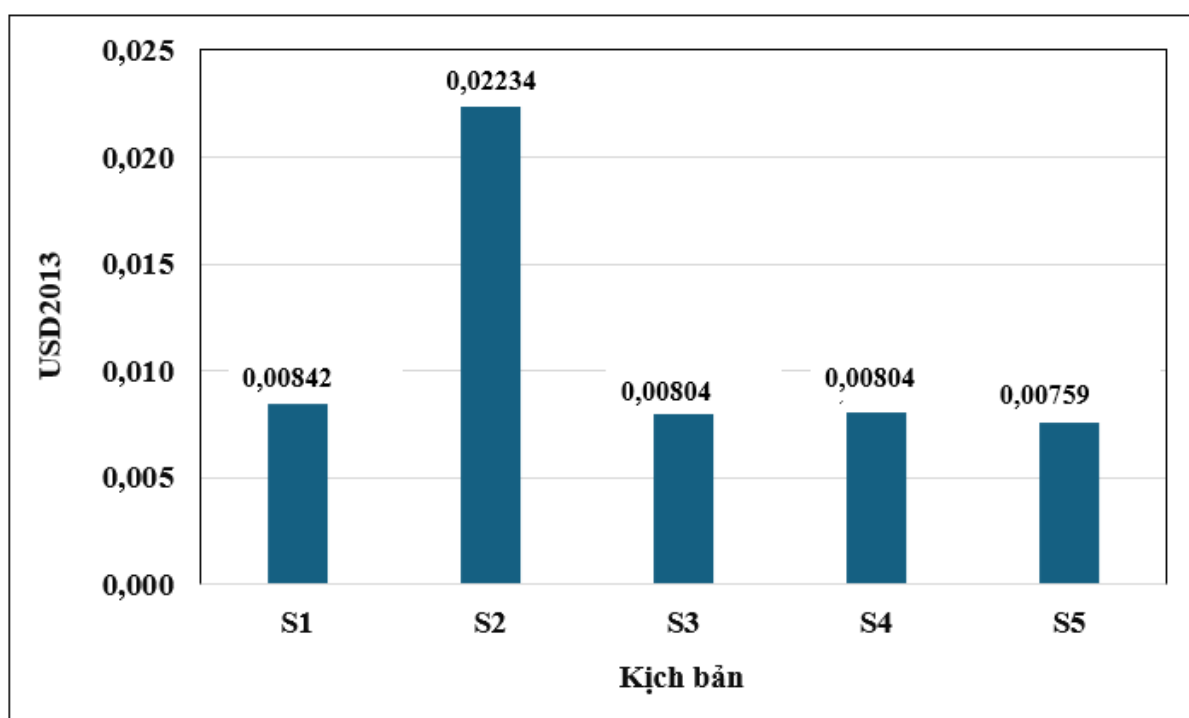
Giá trị tác động đến hệ sinh thái của các kịch bản dao động trong khoảng $2,95 \times 10^{-9} - 4,85 \times 10^{-9}$ species.yr, phản ánh mức độ tổn thất đa dạng sinh học tiềm tàng do các phát thải và sử dụng tài nguyên trong hệ thống cấp nước.

Trong đó, kịch bản S2 có giá trị tác động cao nhất, $4,85 \times 10^{-9}$ species.yr, cao hơn đáng kể so với các kịch bản khác. Nguyên nhân là do quá trình khử mặn RO tiêu thụ năng lượng lớn, kéo theo phát thải CO_2 , SO_2 , NO_x và các chất gây axit hóa, phú dưỡng – là những yếu tố làm suy giảm chất lượng môi trường nước và đất, ảnh hưởng gián tiếp đến hệ sinh thái. Ngoài ra, nước muối thải từ hệ thống RO nếu không được

xử lý tốt cũng có thể làm tăng độ mặn cục bộ, tác động tiêu cực đến các sinh vật thủy sinh.

Ngược lại, các kịch bản S3, S4 và S5 có giá trị tác động thấp hơn, khoảng $3,0 \times 10^{-9}$ species·yr, gần tương đương nhau. Đặc biệt, S5 đạt giá trị thấp nhất ($2,95 \times 10^{-9}$ species·yr), thể hiện mức tác động sinh thái nhỏ nhất, do duy trì được cân bằng giữa khai thác nguồn nước và tiêu thụ năng lượng. Tác động đến tài nguyên của hệ thống cấp nước đô thị được thể hiện ở Hình 4.12.

*** Tác động đến tài nguyên**



Hình 4.12. Các tác động đến tài nguyên từ các kịch bản

Giá trị tác động đến tài nguyên dao động trong khoảng 0,0076 – 0,0223 USD2013/m³, phản ánh chi phí tương đương của việc khai thác tài nguyên hóa thạch và năng lượng sơ cấp cần thiết để sản xuất 1 m³ nước sạch trong từng kịch bản. Trong đó, kịch bản S2 có giá trị tác động cao nhất – 0,0223 USD2013/m³, cao gấp gần 3 lần so với các kịch bản khác. Nguyên nhân chính là quá trình khử mặn RO có mức tiêu thụ điện năng lớn (3–5 kWh/m³), kéo theo nhu cầu cao về nhiên liệu hóa thạch và năng lượng sơ cấp, làm gia tăng chi phí năng lượng quy đổi.

Như vậy, xét về khía cạnh sức khỏe con người, hệ sinh thái và sử dụng tài nguyên, các giải pháp khai thác nước mặn hoặc sử dụng công nghệ RO (S2) tuy giúp bảo đảm cấp nước an toàn vào mùa khô, nhưng lại tăng đáng kể gánh nặng phát thải, chỉ nên được xem là phương án ứng phó trong điều kiện cực đoan. Trong khi các phương án tái sử dụng nước, đa dạng hóa nguồn nước thô, tối ưu năng lượng (S3, S4,

S5) là giải pháp bền vững hơn, giúp giảm gánh nặng tài nguyên, sức khỏe cộng đồng, hệ sinh thái dài hạn cho hệ thống cấp nước đô thị Đà Nẵng.

4.2.4.3. Đánh giá tổng thể và lựa chọn phương án tối ưu

Sau khi thực hiện phân tích tác động ở cấp độ đặc trưng hóa tác động (midpoint) và điểm kết thúc tác động (endpoint), các kết quả thu được đã phản ánh rõ ràng mức độ khác biệt về phát thải, tiêu thụ năng lượng, và ảnh hưởng môi trường của từng kịch bản cấp nước. Tuy nhiên, để đưa ra được phương án lựa chọn tối ưu phục vụ công tác quy hoạch và quản lý hệ thống cấp nước đô thị trong điều kiện BĐKH, cần tiến hành đánh giá tổng hợp trên cơ sở tích hợp các chỉ số môi trường (từ phương pháp LCA) và chỉ số khan hiếm nguồn nước (WSF). Phần dưới đây trình bày kết quả tổng hợp, phân tích so sánh và lựa chọn phương án cấp nước tối ưu, dựa trên các tiêu chí: (i) tác động môi trường tổng hợp ở cấp độ điểm kết thúc tác động; (ii) mức độ khan hiếm nguồn nước qua chỉ số WSF; và (iii) khả năng bảo đảm an toàn cấp nước dài hạn trong bối cảnh BĐKH.

Kết quả khẳng định các kịch bản có sự khác biệt rõ rệt về mức tiêu thụ năng lượng, phát thải KNK, mức độ khan hiếm nước, và tác động đến sức khỏe con người – hệ sinh thái – tài nguyên.

- Ở cấp độ tác động, các chỉ tiêu phát thải carbon (CO_2 tđ) và khai thác tài nguyên hóa thạch (kg dầu tđ) chiếm tỷ trọng lớn nhất trong tổng tác động của hệ thống. Kịch bản S2 (kết hợp xử lý nước ngọt và nước lợ bằng RO) thể hiện giá trị cao nhất ở hầu hết các loại tác động do tiêu thụ năng lượng điện lớn và phát sinh nước thải cô đặc. Trong khi đó, S5 có giá trị thấp nhất, thể hiện hiệu quả vượt trội về mặt môi trường.

- Ở cấp độ điểm kết thúc tác động, kịch bản S2 tiếp tục có tổng tác động cao nhất ($7,10 \times 10^{-5}$), gấp hơn hai lần so với S5 ($3,04 \times 10^{-5}$). Các kịch bản S3 và S4 có giá trị tương đương ($3,18 \times 10^{-5}$), thể hiện mức độ tác động trung bình so với các kịch bản còn lại và cân bằng giữa lợi ích cấp nước – chi phí môi trường.

- Xét theo chỉ số khan hiếm nguồn nước WSF, kết quả cũng thể hiện sự tương quan rõ ràng giữa mức độ căng thẳng tài nguyên và hiệu quả môi trường của từng phương án:

- + S1 (khai thác chủ yếu tại Cầu Đỏ) có $\text{WSF} = 2,80 \text{ m}^3$ nước-tương đương, cao nhất, phản ánh áp lực khai thác lớn tại lưu vực có chỉ số $\text{WSI} = 2,69$.

- + S2 (kết hợp nước lợ – RO) giảm mạnh WSF xuống $1,24 \text{ m}^3$, nhờ bổ sung nguồn nước không cạnh tranh với nguồn sinh thái, dù gia tăng phát thải từ sử dụng năng lượng.

+ S3 (tái sử dụng nước thải Hòa Xuân) và S4 (bổ sung nguồn An Trạch) đạt WSF lần lượt 1,66 và 0,60 m³, thể hiện hiệu quả giảm căng thẳng nguồn nước đáng kể.

+ S5 (duy trì hiện trạng, tối ưu năng lượng) có WSF = 2,74 m³, tương đương S1, cho thấy việc không mở rộng nguồn mới vẫn duy trì áp lực lớn lên nguồn nước ngọt hiện hữu.

Khi tổng hợp cả ba khía cạnh – (i) tác động môi trường (endpoint), (ii) áp lực khan hiếm nước (WSF) và (iii) khả năng bảo đảm cấp nước trong điều kiện BĐKH, có thể thấy:

+ S2 tuy giúp bảo đảm cấp nước trong điều kiện xâm nhập mặn nặng, nhưng tác động môi trường và chi phí năng lượng quá cao, chỉ nên được xem là phương án ứng phó ngắn hạn hoặc dự phòng trong tình huống cực đoan.

+ S1 và S5 đều phụ thuộc nhiều vào nguồn nước Cầu Đỏ, có rủi ro thiếu nước và chỉ số WSI cao, nên không bảo đảm bền vững dài hạn.

+ S3 và S4 là hai phương án cân bằng nhất giữa năng lượng, phát thải và bảo vệ nguồn nước. Trong đó, S4 (kết hợp An Trạch) đạt WSF thấp nhất (0,60 m³) và có tổng điểm tác động môi trường trung bình, thể hiện tính ổn định và bền vững cao hơn khi xét đến yếu tố BĐKH và xâm nhập mặn.

Như vậy, xét theo nguyên tắc phương pháp LCA mở rộng (Chỉ số WSI tích hợp phương pháp LCA), kịch bản S4 được xác định là phương án cấp nước tối ưu cho TP. Đà Nẵng trong giai đoạn 2030-2045. Phương án này không chỉ bảo đảm an toàn cấp nước trong mùa khô, giảm áp lực khai thác tại cửa thu Cầu Đỏ mà còn duy trì mức phát thải, tiêu thụ năng lượng và chi phí tài nguyên ở mức hợp lý. Kết quả này khẳng định giá trị của việc tích hợp chỉ số WSI vào phương pháp LCA như một công cụ hỗ trợ ra quyết định hiệu quả cho quy hoạch tài nguyên nước đô thị bền vững.

4.3. Tiểu kết chương 4

Chương 4 đã trình bày quá trình xây dựng và đánh giá các kịch bản cấp nước đô thị Đà Nẵng giai đoạn 2030-2045, trên cơ sở mô hình tích hợp chỉ số WSI và phương pháp LCA được phát triển ở Chương 3. Kết quả LCA của các kịch bản có sự khác biệt đáng kể về phát thải KNK, tiêu thụ năng lượng, sử dụng tài nguyên nước và tác động môi trường tổng thể. Trong đó, kịch bản sử dụng công nghệ khử lợ RO (S2) tuy góp phần bảo đảm an toàn cấp nước cho mùa khô (chỉ số WSI giảm hơn 40%) nhưng lại có mức tiêu thụ năng lượng và phát thải cao nhất (0,593 kg CO₂ tđ), cao gấp 2,7 lần so với kịch bản cơ sở. Xu hướng này minh chứng cho tính đúng đắn của giả thiết nghiên cứu về sự tồn tại của quy luật dịch chuyển gánh nặng môi trường trong ngành cấp nước.

Ngược lại, các phương án tái sử dụng nước, đa dạng hóa nguồn nước thô, tối ưu năng lượng (S3, S4, S5) thể hiện hiệu quả môi trường vượt trội. So với kịch bản cơ sở (S1), kịch bản mở rộng hạ tầng tại đập dâng An Trạch (S4) đã giải quyết triệt để bài toán khan hiếm nước trong mùa khô khi giảm chỉ số WSF từ 2,8 xuống còn 0,6 m³ tđ tại điểm khai thác nước Cầu Đỏ (giảm 78% gánh nặng tài nguyên). Đáng chú ý, nỗ lực giải tỏa áp lực tại nguồn này không làm gia tăng phát thải carbon, khi chỉ số phát thải carbon của S4 đạt 0,207 kg CO₂ tđ (thấp hơn S1 là 0,217). Kết quả này là minh chứng thực nghiệm rõ ràng, nhấn mạnh sự hoàn hảo của mục tiêu thiết lập điểm cân bằng giữa an ninh nước và bảo vệ môi trường của kịch bản S4.

Kết quả điểm kết thúc tác động và chỉ số WSF cho thấy việc kết hợp nguồn nước thay thế và tái sử dụng nước thải có thể giúp giảm thiểu đáng kể gánh nặng môi trường, tăng khả năng chống chịu với khan hiếm nước trong tương lai. Đây là cơ sở khoa học quan trọng cho việc đề xuất phương án cấp nước bền vững cho TP. Đà Nẵng và là minh chứng cho tính ứng dụng thực tiễn của mô hình tích hợp WSI - LCA trong quy hoạch và quản lý tài nguyên nước đô thị.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm, luận án đã xây dựng thành công mô hình tích hợp giữa chỉ số WSI và phương pháp LCA. Điểm cốt lõi và điểm mới của mô hình là thiết lập cơ chế kết nối dữ liệu thủy văn theo không gian và thời gian với dữ liệu kiểm kê vòng đời (LCI). WSI được đưa vào như một tham số đầu vào trong kết quả của đánh giá vòng đời, cho phép định lượng cả áp lực lên tài nguyên nước tại địa phương lẫn các tác động môi trường toàn cầu. Mô hình đã chứng minh được độ tin cậy cao, bảo đảm tính khoa học, có khả năng lặp lại và đóng vai trò như một công cụ chuẩn hóa để đánh giá các hệ thống cấp nước đô thị có đặc thù lưu vực tương tự.

Ứng dụng mô hình tích hợp cho hệ thống cấp nước Đà Nẵng, luận án đã định lượng rõ mức độ biến động theo mùa của áp lực tài nguyên và môi trường. Kết quả thể hiện các điểm nóng môi trường tập trung chủ yếu ở giai đoạn vận hành, gắn liền với việc tiêu thụ điện năng tại các trạm bơm nước thô (như trạm bơm An Trạch) và sử dụng hóa chất xử lý, phát thải từ việc sử dụng điện đóng góp hơn 90% tổng lượng phát thải carbon từ NMN. Nghiên cứu chỉ ra sự đánh đổi nghiêm trọng vào mùa khô (tháng 3 - tháng 8): chỉ số WSI tại NMN Cầu Đỏ đạt mức rất cao (1,035); mỗi 1 m³ nước sạch được sản xuất tại NMN Cầu Đỏ trong mùa khô sẽ gây ra tác động môi trường tương đương với việc tiêu thụ 1,17 m³ nước trong điều kiện khan hiếm (WSF). Đối với phát thải, vào tháng 5 (cao điểm nhiễm mặn), lượng phát thải KNK tại đập dâng An Trạch tăng cao hơn gần 70% so với tháng 12 (mùa mưa). Việc kết hợp WSI và LCA đã cho phép nhận diện rõ các “điểm nóng” không chỉ về môi trường mà còn về áp lực tài nguyên nước, điều mà các phương pháp riêng lẻ khó thể hiện đầy đủ.

Luận án cũng đã mô phỏng, phân tích định lượng thành công 5 kịch bản cấp nước cho TP. Đà Nẵng theo định hướng đến năm 2045. Luận án cung cấp luận cứ khoa học và thực tiễn để giải bài toán đánh đổi giữa an ninh nguồn nước và gánh nặng môi trường thích ứng với BĐKH. Kịch bản S4, dịch chuyển cấu trúc nguồn về phía thượng lưu (mở rộng NMN tại đập dâng An Trạch) được chứng minh là phương án bền vững nhất khi giải quyết triệt để vấn đề khan hiếm nước tại Cầu Đỏ (giảm đến 78% gánh nặng tài nguyên) và kiểm soát tốt phát thải ở mức thấp (0,207 kg CO₂ tđ). Trong khi đó, kịch bản S2 sử dụng công nghệ khử mặn (RO) dù giải quyết được vấn đề an ninh nguồn nước, giảm hơn 40% chỉ số WSI so với kịch bản cơ sở, nhưng lại đẩy mức phát thải carbon tăng vọt gấp 2,7 lần do tiêu thụ năng lượng quá lớn. Các bằng chứng định lượng này chính là cơ sở quan trọng để hỗ trợ chính quyền TP lựa chọn phương án cấp nước thích ứng với BĐKH và xâm nhập mặn.

2. Hạn chế của luận án

Mặc dù đã đạt được các mục tiêu đề ra, luận án vẫn tồn tại một số hạn chế nhất định cần được xem xét:

Về phạm vi nghiên cứu mới tập trung vào các công đoạn khai thác nước thô, truyền tải nước thô và sản xuất nước sạch, chưa bao quát toàn bộ vòng đời của hệ thống nước đô thị như mạng lưới phân phối, sử dụng nước ở khâu cuối và thu gom, xử lý nước thải.

Nghiên cứu chủ yếu tập trung vào khía cạnh môi trường và tài nguyên nhưng chưa tích hợp sâu sắc phân tích chi phí vòng đời (LCC) để có cái nhìn toàn diện về tính khả thi kinh tế - tài chính của các kịch bản.

Mô hình nghiên cứu mới được áp dụng và kiểm chứng cho trường hợp TP. Đà Nẵng, nên khả năng khái quát hóa cho các đô thị khác cần tiếp tục được kiểm chứng và hiệu chỉnh theo điều kiện cụ thể của từng địa phương.

3. Kiến nghị

Trước hết, đối với công tác quản lý và quy hoạch, cần từng bước đưa cách tiếp cận tích hợp giữa chỉ số WSI và phương pháp LCA vào quá trình xây dựng, rà soát và lựa chọn các phương án cấp nước đô thị, đặc biệt đối với các đô thị ven biển thường xuyên chịu tác động của xâm nhập mặn và biến động dòng chảy mùa kiệt.

Bên cạnh đó, cần tăng cường hệ thống quan trắc, thu thập và chuẩn hóa dữ liệu phục vụ đánh giá, bao gồm dữ liệu dòng chảy, độ mặn, điện năng, hóa chất, bùn thải và các thông số vận hành theo thời gian dài hơn, nhằm nâng cao độ tin cậy của kiểm kê vòng đời và kết quả mô hình đã được xây dựng.

Về mặt nghiên cứu, cần tiếp tục mở rộng phạm vi đánh giá sang các khâu còn lại của hệ thống nước đô thị như phân phối nước, sử dụng nước và xử lý nước thải để có cái nhìn toàn diện hơn về vòng đời hệ thống. Cùng với đó, cần tiếp tục cập nhật, hiệu chỉnh và kết hợp các kịch bản theo các thay đổi mới của quy hoạch phát triển đô thị, nhu cầu sử dụng nước và bối cảnh BĐKH. Ngoài ra, mô hình cần được áp dụng thử nghiệm cho các đô thị khác có điều kiện tương đồng nhằm kiểm chứng tính phù hợp, khả năng thích ứng và khả năng nhân rộng trong thực tiễn quản lý tài nguyên nước ở Việt Nam.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

1. CÁC CÔNG BỐ QUỐC TẾ

[1]. “*Water Stress Index application to assess water scarcity of Lower Vu Gia - Thu Bon River Basin in Vietnam*”. Tác giả: Mai Thị Thùy Dương, Võ Ngọc Dương, Trần Thị Việt Nga. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, **1143**, 2023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1143/1/012004>

[2]. “*Sustainability evaluation of freshwater withdrawal on the Vu Gia Thu Bon basin river in Vietnam*”. Tác giả: Duong Thi Thuy Mai, Duong Ngoc Vo , Nga Thi Viet Tran. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1226(1), 2023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1226/1/012007>.

[3]. “*Life cycle assesment on water treatment: Case study in Cau Do water treatment plant – Da Nang city – VietNam*”. Tác giả: Duong Thi Thuy Mai, Duong Ngoc Vo , Nga Thi Viet Tran. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1391, 2024. doi:10.1088/1755-1315/1391/1/012015.

[4]. “*Comparative Life Cycle Assessment of Urban Water Supply Strategies under Salinity Intrusion in a Coastal City*”. Tác giả: Duong Thi Thuy Mai, Duong Ngoc Vo , Nga Thi Viet Tran, Doan Thuy Kim Phuong, Hua Manh Thinh. River Journal. Đang chờ phản biện.

2. CÔNG BỐ TRONG NƯỚC

[1]. “*Chỉ số đánh giá khan hiếm nguồn nước: Tổng quan và phương pháp tính*”. Tác giả: Mai Thị Thùy Dương, Võ Ngọc Dương, Trần Thị Việt Nga, Lê Thị Hoàng Diệu. Tạp chí khoa học và công nghệ - Đại học Đà Nẵng, Vol. 19, No. 9, 2021.

[2]. “*Thực trạng nhiễm mặn tại điểm khai thác nước thô cấp cho thành phố Đà Nẵng giai đoạn 2005 – 2016. Xu hướng đến năm 2030*”. Tác giả: Mai Thị Thùy Dương, Phan Thị Hà Giang, Huỳnh Văn Tài, Đặng Thị Huyền Ny, Võ Ngọc Dương, Trần Thị Việt Nga. Tạp chí Xây dựng & Đô thị. Số 84. 2022. Trang: 78-82. [Năm 2022](#).

[3]. “*Nghiên cứu tổng quan về phương pháp đánh giá vòng đời sản phẩm trên hệ thống nước đô thị*”. Tác giả: Mai Thị Thùy Dương, Võ Ngọc Dương, Trần Thị Việt Nga, Hồ Diệu Ny. Tạp chí khoa học và công nghệ - Đại học Đà Nẵng. Vol. 22, No. 7, 2024.

3. BÁO CÁO TẠI HỘI NGHỊ KHOA HỌC CƠ HỌC THỦY KHÍ LẦN THỨ 28:

[1]. Ứng dụng phần mềm Simapro trong đánh giá vòng đời sử dụng nước tại Thành phố Đà Nẵng.

[2]. Một cách tiếp cận trong đánh giá mức độ căng thẳng nguồn nước dưới ảnh hưởng của biến đổi khí hậu và sự gia tăng nhu cầu dùng nước. Áp dụng đối với Nhà máy nước Cầu Đỏ, Đà Nẵng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. *The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water*, 2023.
- [2]. *The United Nations World Water Development Report 2024: Water for prosperity and peace*, 2024.
- [3]. Quyết định 1622/QĐ-TTg, *Quy hoạch tài nguyên nước thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050*, Thủ tướng Chính phủ phê duyệt ngày 27/12/2022.
- [4]. Quyết định 372/QĐ-UBND, *Điều chỉnh Quy hoạch cấp nước đô thị thành phố Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045*, UBND TP. Đà Nẵng phê duyệt ngày 05/02/2025.
- [5]. Quyết định 211/QĐ-UBND, *Danh mục, bản đồ phân vùng hạn chế khai thác nước dưới đất trên địa bàn phần đất liền thuộc phạm vi TP Đà Nẵng*, UBND TP. Đà Nẵng phê duyệt ngày 17/01/2025.
- [6]. Quyết định 1865/QĐ-TTg, *Ban hành quy trình vận hành liên hồ chứa trên lưu vực sông Vu Gia - Thu Bồn*, Thủ tướng Chính phủ phê duyệt ngày 23/12/2019.
- [7]. Malin Falkenmark, *Fresh water - time for a modified approach*, Ambio, vol. 15, no. 4, doi: 10.2307/4313251, 1986.
- [8]. Paul D Raskin, Evan Mansen and, Robert M Margolis, *Water and sustainability: Global patterns and long-range problems*, Natural Resources Forum, vol. 20, no. 1, pp. 1–15, doi: 10.1111/j.1477-8947.1996.tb00629.x, 1996.
- [9]. Joseph Alcamo, Thomas Henrichs, Thomas Rösch, *World Water in 2025 - Global modeling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st Century*, Kassel World Water Ser. 2, no. 2, 2000.
- [10]. Wada, *Human and climate change impacts on global water resources*, Ph.D. Thesis, Utrecht, Netherlands Univ. Utrecht, 2013.
- [11]. Hoàng Thị Nguyệt Minh, Nguyễn Ngọc Hà, *Đánh giá mức căng thẳng nguồn nước lưu vực sông mã*, Tạp chí khí tượng thủy văn, pp. 28–35, 2017.
- [12]. Leif Ohlsson, *Water conflicts and social resource scarcity*, Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 2000. doi: 10.1016/S1464-1909(00)00006-X, 2000.
- [13]. Mohamed Asheesh, *Water gaps connecting neighbours from conflict to cooperation by applying scarcity index*, Proceedings of the CIB World Building Congress, vol. V, 2016.

- [14]. Steve McNulty, Erika Cohen Mack, Ge Sun and, Peter Caldwell, *Hydrologic Modeling for Water Resource Assessment in a Developing Country: The Rwanda Case Study*, Forest and the Water Cycle: Quantity, Quality, Management, pp. 181–203, 2016.
- [15]. Vladimir Smakhtin, Carmen Revenga and, Petra Döll, *A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity*, Water Int., vol. 29, no. 3, 2005, doi: 10.1080/02508060408691785, 2005.
- [16]. Myer Kutz, *Handbook of Environmental Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2018.
- [17]. Göran Finnveden and Åsa Moberg, *Environmental systems analysis tools - An overview*, Journal of Cleaner Production, vol. 13, no. 12, pp. 1165–1173, 2005, doi: 10.1016/j.jclepro.2004.06.004, 2005.
- [18]. Åsa Moberg, *Environmental systems analysis tools for decision-making*, Licentiate thesis, Royal Institute of Technology, 2006.
- [19]. Stefan Hajkowicz and Kerry Collins, *Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management*, Water Resour Management, Vol. 21, pages 1553–1566, 2007.
- [20]. Harrison E. Mutikanga, Saroj K. Sharma and, Kalanithy Vairavamoorthy, *Multi-criteria Decision Analysis: A Strategic Planning Tool for Water Loss Management*, Water Resour Management., vol. 25, pages 3947–3969, 2011.
- [21]. Parvin Golfam, Parisa-Sadat Ashofteh, Taher Rajaee and, Xuefeng Chu, *Prioritization of Water Allocation for Adaptation to Climate Change Using Multi-Criteria Decision Making (MCDM)*, Water Resour Management, vol. 33, pages 3401–3416, 2019.
- [22]. Mohamed Tawfic Ahmed, *Life Cycle Analysis in Wastewater: A Sustainability Perspective*, Waste Water Treatment and Reuse in the Mediterranean Region, doi: 10.1007/698_2010_75, pages 125–154, 2010.
- [23]. Richard Emmerson, G. Morse and, J. Lester, *The Life-Cycle Analysis of Small-Scale Sewage-Treatment Processes*, Water and Environment Journal, vol. 9, no. 3, 1995.
- [24]. Z. Zhang and F. Wilson, *Life-cycle assessment of a sewage-treatment plant in south-east Asia*, Water Environment Journal, vol. 14, no. 1, 2000, doi: 10.1111/j.1747-6593.2000.tb00226.x, 2000.
- [25]. Ramiro Barrios, Maarten Siebel, Alex vander Helm, Karin Bosklopper and

- Huub Gijzen, *Environmental and financial life cycle impact assessment of drinking water production at Waternet*, Journal of Cleaner Production, vol. 16, no. 4, pages 471–476, doi: 10.1016/j.jclepro.2006.07.052, 2008.
- [26]. Katihanna Homäki, Per Halkjær Nielsen, Arumugam Sathasivan, and, Erik L. J. Bohe, *Life cycle assessment and environmental improvement of residential and drinking water supply systems in Hanoi, Vietnam*, International Journal of Sustainable Development & World Ecology, vol. 10, no. 1, pages. 27–42, doi: 10.1080/13504500309469783, 2009.
- [27]. François Vince, Emmanuelle Aoustin, Philippe Bréant and, François Marechal, *LCA tool for the environmental evaluation of potable water production*, Desalination, vol. 220, no. 1–3, pages 37–56, doi: 10.1016/j.desal.2007.01.021, 2008.
- [28]. Amir Hamzah Sharaai, Noor Zalina Mahmood and, Abdul Halim Sulaiman, *Life Cycle Assessment (LCA) in Potable Water Production: An Analysis of Green House Gases Emission from Chemicals and Electricity Usage in Water Treatment in Malaysia*, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, vol. 6, no. 3, pages 27–34, 2009.
- [29]. Berit Godskesen et al., *Life cycle assessment of three water systems in Copenhagen-a management tool of the future*, Water Science Technology, vol. 63, no. 3, doi: 10.2166/wst.2011.258, 2011.
- [30]. Berit Godskesen, *Sustainability evaluation of water supply technologies – by using life-cycle and freshwater withdrawal impact assessment & multi-criteria decision analysis*, PhD Thesis, Technical University of Denmark, 2012.
- [31]. Berit Godskesen; Michael Zwicky Hauschild, Martin Rygaard, K. Zambrano, and, Hans-Jørgen Albrechtsen, *Life-cycle and freshwater withdrawal impact assessment of water supply technologies*, Water Resources, vol. 47, no. 7, pages 2363–2374, doi: 10.1016/j.watres.2013.02.005, 2013.
- [32]. Adriana Del Borghi, Carlo Strazza, Michela Gallo, Simona Messineo and, Massimiliano Naso, *Water supply and sustainability: Life cycle assessment of water collection, treatment and distribution service*, The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 18, no. 5, pages 1158–1168, doi: 10.1007/s11367-013-0549-5, 2013.
- [33]. M.-B. Mohamed-Zine, A. Hamouche, and L. Krim, *The study of potable water treatment process in Algeria (boudouaou station) -by the application of life cycle assessment (LCA)*, Journal of Environmental Health Science and Engineering,

vol. 11, no. 1, pages 1–9, doi: 10.1186/2052-336x-11-37, 2013.

- [34]. George Barjoveanu, Iulia Maria Comandaru, Gonzalo Rodriguez-Garcia, Almudena Hospido and, Carmen Teodosiu, *Evaluation of water services system through LCA. A case study for Iasi City, Romania*, The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 19, no. 2, pages 449–462, doi: 10.1007/s11367-013-0635-8, 2014.
- [35]. Yi Li, Wei Xiong, Wenlong Zhang, Chao Wang and Peifang Wang, *Life cycle assessment of water supply alternatives in water-receiving areas of the South-to-North Water Diversion Project in China*, Water Resources, vol. 89, pages 9–19, doi: 10.1016/j.watres.2015.11.030, 2016.
- [36]. Cadence Hsien, Jonathan Sze Choong Low, Shannon Chan Fuchen, and Tan Wee Han, *Life cycle assessment of water supply in Singapore — A water-scarce urban city with multiple water sources*, Resources, Conservation and Recycling, vol. 151, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104476, 2019.
- [37]. Isaura Macedo Alves, Saulo De Tarso Marques Bezerra, Gilson Lima da Silva, Armando Dias Duarte, and Henrique Leonardo Maranduba, *Analysis of the water–energy–greenhouse gas nexus in a water supply system in the Northeast of Brazil*, The Brazilian Journal of Environmental Sciences, vol. 57, no. 1, doi: 10.5327/z217694781036, 2021.
- [38]. Nieke Karnaningroem and Desy Risqi Anggraeni, *Study of Life Cycle Assessment (LCA) on Water Treatment - Indonesia*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 799, no. 1, doi: 10.1088/1755-1315/799/1/012036, 2021.
- [39]. Wai Hong Leong, *Life cycle assessment of water treatment processes in Malaysia: A quest for greener practice*, AIP Conference Proceedings, vol. 2669, no. 1, doi: 10.1063/5.0121697, 2023.
- [40]. Jade Lui, Susan Lee, William T. Sloan, and Siming You, *Life cycle assessment of drinking water and wastewater treatment works in mainland Scotland*, Science Total Environment, vol. 958, no. 177989, 2025.
- [41]. Martina Klimtová, Vladimír Kočí, Eliška Purkarová, and Tatiana Trecáková, *Life cycle assessment of variants of water treatment technological processes in Pilsen (Czech Republic)* Open Access, Water Practice and Technology, vol. 20 (4), pages 954–970, 2025.
- [42]. Hung Van Tran, Hao Anh Phan and Ha Manh Bui, *Life cycle assessment of*

- industry wastewater treatment plant: a case study in Vietnam*, RSC Sustainability, vol. 3, pages 1415–1423, 2025.
- [43]. European Environment Agency, *Electricity Consumption Per Capita in 2008*, [WWW Doc. URL. <http://www.eea.europa.eu/per-capita-in-1#tab-european-data> (accessed 05.04.14.)], Fagan, 2008.
- [44]. Philippe Loubet, Philippe Roux, Eleonore Loiseau and, Veronique Bellon-Maurel, *Life cycle assessments of urban water systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature*, Water Research, vol. 67, pages 187–202, doi: 10.1016/j.watres.2014.08.048, 2014.
- [45]. Charles Amarachi Ogbu, Tatiana Alexiou Ivanova, Temitayo Abayomi Ewemoje, Habeeb Adedotun Alabi, and Hynek Roubík, *Towards environmentally sustainable water management in Africa: a comprehensive review of life cycle assessment studies in water and wastewater treatment*, The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 30, pages 956–979, 2025.
- [46]. Robert Renzoni and Albert Germain, *Life cycle assessment of water from the pumping station to the wastewater treatment plant*, The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 12(2), pages 118–126, 2007.
- [47]. Sven Lundie, Gregory M. Peters, Paul C. Beavis, *Life Cycle Assessment for Sustainable Metropolitan Water Systems Planning*, Environment Science Technology, vol. 38(13), pp. 3465-3473., 2004.
- [48]. Elena Friedrich, Shanthi Pillay, Christopher Andrew Buckley, *Environmental life cycle assessments for water treatment processes — a South African case study of an urban water cycle*, Water SA, vol. 35, pages 73–84, 2009.
- [49]. Đồng Đức Tuấn và Phạm Thị Thanh Hải, *Ước tính các tác động tới môi trường của tàu chở hàng bằng phương pháp đánh giá vòng đời sản phẩm*, Tạp chí khoa học công nghệ Hàng Hải, vol. 63, no. 1859–316x, pages 25–30, 2020.
- [50]. Lê Đình Linh, Tạ Ngọc Bình, *Tích hợp BIM và LCA để đánh giá vòng đời công trình nhà ở tại Việt Nam: Thuận lợi, khó khăn và giải pháp*, Journal of Science and Technology in Civil Engineering - NUCE, vol. 12, no. 1, 2018, doi: 10.31814/stce.nuce.2018-12(1)-10, 2018.
- [51]. Hoàng Nữ Diệu Linh, Phạm Thị Anh, *Đánh giá tác động môi trường của quá trình nhiệt phân lốp xe phế thải bằng phương pháp đánh giá vòng đời sản phẩm LCA, với phần mềm Simapro*, Journal of Transportation Science and Technology, vol. 29, pages 50–55, 2018.

- [52]. Lương Thị Mai Hương, *Ứng dụng đánh giá vòng đời sản phẩm (LCA) để nâng cao hiệu quả quản lý chất thải rắn ở Hà Nội*, Luận văn, Trường đại học xây dựng Hà Nội, 2017.
- [53]. Trần Ngọc Tuấn, *Tối ưu hóa hệ thống quản lý chất thải rắn ở thành phố Huế bằng công cụ đánh giá vòng đời (LCA)*, Luận văn, Đại học Huế, 2023.
- [54]. Vũ Thị Thuý, *Đánh giá vòng đời trong hệ thống xử lý nước cấp tại nhà máy cấp nước long hậu 1 - KCN Long Hậu (Long An)*, Tạp chí khoa học trường đại học sư phạm TP Hồ Chí Minh, vol. 6, pages. 1113–1124, 2020.
- [55]. ISO 14046:2016, *Tiêu chuẩn quốc gia TCVN ISO 14046:2016 về Quản lý môi trường - Dấu vết nước - Các nguyên tắc, yêu cầu và hướng dẫn*.
- [56]. Bradley G Ridoutt, Stephan Pfister, *Water footprinting using a water stress index (WSI) that integrates stress on humans and ecosystems*, in 4th International Conference on Green and Sustainable Innovation (ICGSI), 2014.
- [57]. M.B. Abbott, J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell, J. Rasmussen, *An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system*, Journal of Hydrology, Volume 87, Issues 1–2, DOI: 10.1016/0022-1694(86)90114-9, 1986.
- [58]. Danish Hydraulic Institute, *MIKE SHE - User Guide / Reference Manual*, 2012.
- [59]. Nguyễn Thị Kim Dung, *Nghiên cứu xây dựng phương pháp xác định dòng chảy tối thiểu-áp dụng cho hệ thống sông Vu Gia-Thu Bồn*, Luận án, Viện khoa học Thủy lợi Việt Nam, 2018.
- [60]. IUCN, *Managing Water Allocation and Trade-Offs*, 2013, [Online, Available: www.waterandnature.org].
- [61]. Luật số 28/2023/QH15, *Luật Tài nguyên nước*, Quốc hội khóa XV thông qua ngày 27/11/2023.
- [62]. Thông tư TT 64/2017/TT-BTNMT, *Thông tư Quy định về xác định dòng chảy tối thiểu trên sông, suối và hạ lưu các hồ chứa, đập dâng*, Bộ Tài nguyên và Môi trường ban hành ngày 22/12/2017.
- [63]. Quyết định số 1354 /QĐ-BTNMT, *Quyết định về việc công bố giá trị dòng chảy tối thiểu ở hạ lưu các hồ chứa, đập dâng của các công trình thủy lợi, thủy điện*, Bộ Tài nguyên và Môi trường ban hành ngày 12/7/2021.

- [64]. ISO 14044:2011, *Tiêu chuẩn quốc gia TCVN ISO 14044:2011 về Quản lý môi trường - Đánh giá vòng đời của sản phẩm - Yêu cầu và hướng dẫn.*
- [65]. ISO 14041:2000, *Tiêu chuẩn quốc gia TCVN ISO 14041:2000 về Quản lý môi trường - Đánh giá chu trình sống của sản phẩm - Xác định mục tiêu, phạm vi và phân tích kiểm kê.*
- [66]. ISO 14042:2000, *Tiêu chuẩn quốc gia TCVN ISO 14042:2000 về Quản lý môi trường- Đánh giá tác động.*
- [67]. ISO 14047:2003, *Tiêu chuẩn quốc gia TCVN ISO 14042:2000 về Quản lý môi trường - Các ví dụ áp dụng của ISO 14042.*
- [68]. Kyung Daeseung, Kim Dongwook, Park Nosuk, Lee, and Woojin, *Estimation of CO2 emission from water treatment plant - Model development and application.* Journal of Environmental Management, vol. 301, pages 74-81, 2013.
- [69]. Michiel R. J. Doorn, Sirintornthep Towprayoon, Sonia Maria Manso Vieira, William Irving, Craig Palmer, Riitta Pipattid, and Can Wang, *Chapter 6: Wastewater Treatment and Discharge. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 2006.
- [70]. Louise Camilla Dreyer, Anne Louise Niemann and, Michael Z. Hauschild, *Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99*, The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 8, pages 191–200, 2003.
- [71]. Oscar Ortiz, Francesc Castells and, Guido Sonnemann, *Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA*, Construction and Building Materials, Vol.23, Pages 28-39, 2009.
- [72]. Olivier Jolliet, Manuele Margni, Raphaël Charles, Sébastien Humbert, Jerome Payet, Gerald Rebitzer and, Ralph K Rosenbaum, *IMPACT 2002+: a new life cycle assessment methodology*, International Journal Life Cycle Assess, vol. 8, pages 324-330, 2003.
- [73]. Olivier Jolliet et al., *The LCIA midpoint-damage framework of the UNEP/ life cycle initiative*, International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 9, pages 394–404, 2004.
- [74]. Jane C. Bare, Thomas Gloria, *Environmental impact assessment taxonomy providing comprehensive coverage of midpoints, endpoints, damages, and areas of protection*, Journal of Cleaner Production, Volume 16, Issue 10, Pages 1021-1035, 2008.

- [75]. Elena Friedrich and Christopher Andrew Buckley, *The Use of Life Cycle Assessment in the selection of water treatment processes*, Final Report to the Water Research Commission, no. 1077, 2002.
- [76]. *Báo cáo thuyết minh - Nhiệm vụ quy hoạch tổng hợp lưu vực sông Vu Gia - Thu Bồn thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050*, Cục quản lý tài nguyên nước, 2020.
- [77]. Vu Van Nghi, Do Duc Dung, Dang Thanh Lam, *Potential evapotranspiration estimation and its effect on hydrological model response*, Vietnam Journal of Mechanics, Vol 30(1), 20–32, <https://doi.org/10.15625/0866-7136/30/1/5608>, 2008.
- [78]. Baxter E Vieux, *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*, vol. 38, Kluwer Academic Publishers, DOI:[10.1007/978-94-015-9710-4](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9710-4), 2001
- [79]. Quyết định số 359/QĐ-TTg, *Điều chỉnh Quy hoạch chung thành phố Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045*, Thủ tướng Chính phủ phê duyệt ngày 15/3/2021.
- [80]. PRé Mark Goedkoop, Michiel Oele, Jorrit Leijting, Tommie Ponsioen, and Ellen Meijer, *Introduction to LCA with SimaPro Colophon*, 2016.
- [81]. George Barjoveanu, Carmen Teodosiu, Andreea Florina Gîlcă Derevlean, Roman Ioana, and Silvia Fiore, *Environmental performance evaluation of a drinking water treatment plant: A life cycle assessment perspective*, Environmental Engineering and Management Journal, vol. 18, no. 2, pages 513–522, doi: 10.30638/eemj.2019.048, 2019.
- [82]. Công văn 1726/BĐKH-PTCBT, *Hệ số phát thải lưới điện Việt Nam 2023*, Cục biến đổi khí hậu, 2024.
- [83]. Quyết định 590/QĐ-BXD, *Quyết định công bố định mức dự toán sản xuất nước sạch và quản lý, vận hành mạng cấp nước*, Bộ Xây dựng ban hành ngày 30/5/2014.
- [84]. Alexandre Bonton, Christian Bouchard, Benoit Barbeau, Stéphane Jedrzejak, *Comparative life cycle assessment of water treatment plants*, Desalination, vol. 284, pages 42–54, doi: 10.1016/j.desal.2011.08.035, 2012.
- [85]. Alaa Saad, Nilay Elginöz, Fatos Germirli Babuna, and Gulen Iskender, *Life cycle assessment of a large water treatment plant in Turkey*, Environment Science Pollution Resources, vol. 26, no. 15, doi: 10.1007/s11356-018-3826-9, 2019.
- [86]. Ika Bayu Kartikasari, R. Irwan Bagyo Santoso, *Impact of drinking water*

treatment process using life cycle assessment (LCA) to minimize environmental impact risk, Journal of Social Research, vol. 2, 2023.

- [87]. B. Peng Zhang, Boru Mac, Guolu Zheng, Fukuan Lia, Wei Zhanga, Jingwen Gua, and D. Zehong Liua, Kexun Lia, and Hao Wang, *Unveiling the greenhouse gas emissions of drinking water treatment plant throughout the construction and operation stages based on life cycle assessment*, Ecotoxicology and Environmental Safety, vol. 272, 2024.
- [88]. Bo Pedersen Weidema and Marianne Suhr Wesnæs, *Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators*, Journal Cleaner Production, vol. 4, no. 3–4, pages 167-174, doi: 10.1016/S0959-6526(96)00043-1, 1996.
- [89]. Quyết định số 9018/QĐ-UBND, *Quy hoạch hệ thống cấp nước thành phố Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2050*, UBND TP. Đà Nẵng phê duyệt ngày 28/12/2016.
- [90]. Quyết định số 2502/QĐ-TTg, *Điều chỉnh Định hướng phát triển cấp nước đô thị và khu công nghiệp Việt Nam đến năm 2025, tầm nhìn đến năm 2050*, Thủ tướng Chính phủ phê duyệt ngày 22/12/2016.
- [91]. *Kịch bản biến đổi khí hậu phiên bản cập nhật năm 2020*, Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2020.
- [92]. Quyết định 1495/QĐ-UBND, *Quyết định phê duyệt đồ án điều chỉnh quy hoạch thoát nước thải đô thị TP. Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045*, UBND TP. Đà Nẵng phê duyệt ngày 29/04/2025.
- [93]. Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 12352:2018 về *Các hoạt động liên quan đến dịch vụ nước sạch và nước thải - Hướng dẫn quản lý các dịch vụ xử lý nước thải sinh hoạt cơ bản tại chỗ*.
- [94]. ISO 46001:2019 - *Tiêu chuẩn quốc gia TCVN ISO 46001:2019 về Hệ thống quản lý sử dụng nước hiệu quả - Các yêu cầu và hướng dẫn sử dụng*.
- [95]. Stephan Pfister, *Environmental evaluation of freshwater consumption within the framework of life cycle assessment*, Doctoral Thesis, ETH ZÜRICH, 2011.
- [96]. Eleeja Shrestha, Sajjad Ahmad, Walter Johnson, Pramen Shrestha, Jacimaria R. Batista, *Carbon footprint of water conveyance versus desalination as alternatives to expand water supply*, Desalination, vol. 280, no. 1–3, doi: 10.1016/j.desal.2011.06.062, 2011.
- [97]. Pablo K. Cornejo, Mark V. E. Santana, David R Hokanson, James Mihelcic, and

Qiong Zhang, *Carbon footprint of water reuse and desalination: A review of greenhouse gas emissions and estimation tools*, Journal Water Reuse Desalination, vol. 4, no. 4, doi: 10.2166/wrd.2014.058, 2014.

- [98]. Xuexiu Jia, Jiří Jaromír Klemesš, Petar Sabeв Varbanov, and Sharifah Rafidah Wan Alwi, *Analyzing the energy consumption, GHG emission, and cost of seawater desalination in China*, Energies, vol. 12, no. 3, doi: 10.3390/en12030463, 2019.
- [99]. Jin Zhou, Victor W.-C. Chang, and Anthony G. Fane, *Environmental life cycle assessment of brackish water reverse osmosis desalination for different electricity production models*, Energy Environ. Sci., vol. 4, no. 6, doi: 10.1039/c0ee00828a, 2011.

PHẦN PHỤ LỤC

PHỤ LỤC 3.1. Biểu đồ đường tần suất lưu lượng trung bình nước về theo tháng tại đập An Trạch

PHỤ LỤC 3.2. Biểu đồ đường tần suất lưu lượng trung bình nước về theo tháng tại cửa thu Cầu Đỏ

PHỤ LỤC 3.3. Kết quả Simapro hiện trạng hoạt động của các dây chuyền nhà máy nước cầu đỏ theo mùa (loại tác động – midpoint)

PHỤ LỤC 3.4. Kết quả simapro hiện trạng hoạt động của nhà máy nước Cầu Đỏ theo cụm xử lý – mùa khô (loại tác động – midpoint)

PHỤ LỤC 3.5. Kết quả simapro hiện trạng hoạt động của nhà máy nước Cầu Đỏ theo cụm xử lý – mùa mưa (loại tác động – midpoint)

PHỤ LỤC 3.6. Kết quả simapro hiện trạng hoạt động của nhà máy nước Cầu Đỏ theo tháng (loại tác động – midpoint)

PHỤ LỤC 4.1. Biểu đồ đường tần suất lưu lượng trung bình nước về theo tháng tại đập An Trạch theo kịch bản RCP 8.5

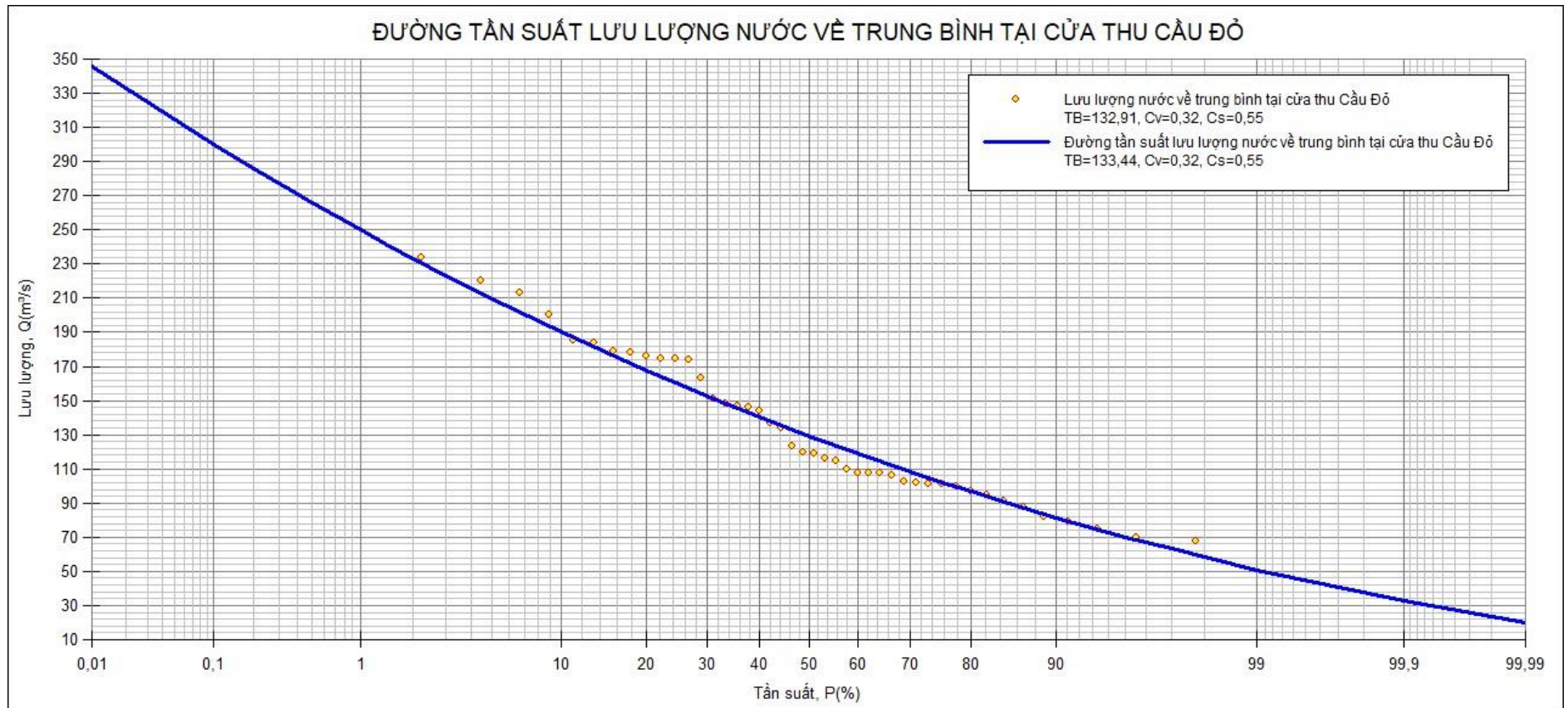
PHỤ LỤC 4.2. Biểu đồ đường tần suất lưu lượng trung bình nước về theo tháng tại cửa thu Cầu Đỏ theo kịch bản RCP 8.5

PHỤ LỤC 4.3. Kết quả Simapro trong mùa mưa của 5 kịch bản cấp nước tại Đà Nẵng (loại tác động – midpoint)

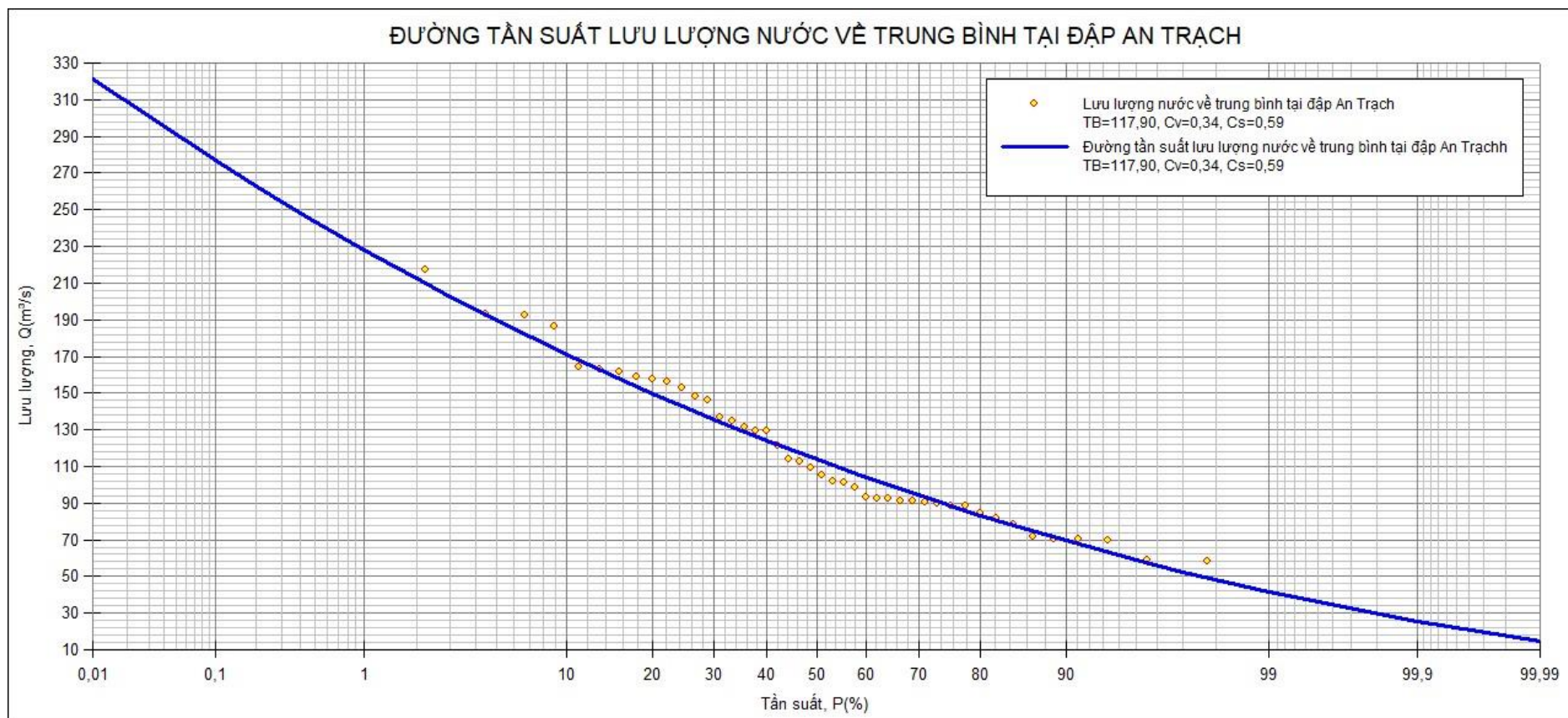
PHỤ LỤC 4.4. Kết quả Simapro trong mùa khô của 5 kịch bản cấp nước tại Đà Nẵng (loại tác động – midpoint)

PHỤ LỤC 4.5. Kết quả Simapro trong mùa khô của 5 kịch bản cấp nước tại Đà Nẵng (điểm kết thúc tác động – endpoint)

PHỤ LỤC 3.1. BIỂU ĐỒ ĐƯỜNG TẦN SUẤT LƯU LƯỢNG TRUNG BÌNH NƯỚC VỀ THEO THÁNG TẠI ĐẬP AN TRẠCH



PHỤ LỤC 3.2. BIỂU ĐỒ ĐƯỜNG TẦN SUẤT LƯU LƯỢNG TRUNG BÌNH NƯỚC VỀ THEO THÁNG TẠI CỬA THU CẦU ĐỎ



PHỤ LỤC 3.3. KẾT QUẢ SIMAPRO HIỆN TRẠNG HOẠT ĐỘNG CỦA CÁC DÂY CHUYỀN NHÀ MÁY NƯỚC CẦU ĐỒ THEO MÙA (LOẠI TÁC ĐỘNG – MIDPOINT)

SimaPro 10.2.0.1

Date:

10/3/2025

Time:

9:03

Project

CURRENT STATUS

Calculation:

Analyze

Results:

Impact assessment

Product:

1 p CURRENT STATUS (of project HTCN)

Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - system

Current library:

[Cut-off, S]

Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - unit [Cut-

Replacing library:

off, U]

Method:

ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.09 / World (2010) H

Indicator:

Characterization

Skip categories:

Never

Exclude infrastructure processes:

Yes

Exclude long-term emissions:

Yes

Sorted on item:

Impact category

Sort order:

Ascending

IMPACT CATEGORY	UNIT	DRY- 50 000 m3/day	DRY- 120 000 m3/day old	DRY- 120 000 m3/day new	RAINY- 50 000 m3/day	RAINY - 120 000 m3/day old	RAINY- 120 000 m3/day new
Global warming	kg CO ₂ eq	0,18411626	0,1996696	0,17668095	0,14535978	0,14278071	0,12472917
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	4,7892× 10 ⁻⁸	5,1812× 10 ⁻⁸	4,6024× 10 ⁻⁸	3,8362× 10 ⁻⁸	3,7648× 10 ⁻⁸	3,3104× 10 ⁻⁸

Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	0,000130825	0,000138901	0,000127012	0,000115191	0,000112445	0,000103137
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	0,000545134	0,000591496	0,000522968	0,000429161	0,000421619	0,000367806
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0,000404735	0,000439156	0,00038827	0,000318557	0,000312964	0,000273004
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	0,000551254	0,000598109	0,000528853	0,000434099	0,000426462	0,000372078
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	0,001159113	0,001258602	0,001111527	0,000908826	0,000893072	0,000777569
Freshwater eutrophication	kg P eq	8,48118× 10 ⁻⁶	9,20077× 10 ⁻⁶	8,13626× 10 ⁻⁶	6,67415× 10 ⁻⁶	6,5572× 10 ⁻⁶	5,72118× 10 ⁻⁶
Marine eutrophication	kg N eq	5,13858× 10 ⁻⁷	5,47984× 10 ⁻⁷	4,97256× 10 ⁻⁷	4,38224× 10 ⁻⁷	4,28618× 10 ⁻⁷	3,88821× 10 ⁻⁷
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,12690148	0,13600623	0,12267558	0,10771885	0,10534265	0,094901581
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	2,5385× 10 ⁻⁵	2,71131× 10 ⁻⁵	2,45909× 10 ⁻⁵	2,19753× 10 ⁻⁵	2,14661× 10 ⁻⁵	1,94923× 10 ⁻⁵

Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,000117539	0,000125683	0,000113788	0,000101144	$9,88336 \times 10^{-5}$	$8,95231 \times 10^{-5}$
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0,000276051	0,000291281	0,000269124	0,000252683	0,000246104	0,000228807
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0,007238365	0,007788004	0,006980281	0,006001048	0,005876921	0,005243667
Land use	m ² a crop eq	0,001341123	0,001452202	0,001288051	0,001067611	0,001048151	0,000919273
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	0,000318689	0,000321091	0,000320144	0,000373105	0,000358863	0,000358602
Fossil resource scarcity	kg oil eq	0,044335294	0,048074896	0,042547852	0,035027367	0,034404395	0,03006443
Water consumption	m ³	1,1138434	1,1138951	1,0546974	1,1421152	1,1326622	1,0626254

PHỤ LỤC 3.4. KẾT QUẢ SIMAPRO HIỆN TRẠNG HOẠT ĐỘNG CỦA NHÀ MÁY NƯỚC CẦU ĐỎ THEO CỤM XỬ LÝ – MÙA KHÔ (LOẠI TÁC ĐỘNG – MIDPOINT)

SimaPro 10.2.0.1 Date: 12/03/2025 Time: 13:01

Project HTCN

Calculation: Analyze

Results: Impact assessment

Product: 1 p 120 000 m3/ngày old (of project HTCN)

 Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - system

Current library: [Cut-off, S]

 Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - unit

Replacing library: [Cut-off, U]

Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.09 / World (2010) H

Indicator: Characterization

Skip categories: Never

Exclude infrastructure

processes: Yes

Exclude long-term

emissions: Yes

Sorted on item: Impact category

Sort order: Ascending

IMPACT CATEGORY	UNIT	DRY- TRẠM BƠM 1	DRY- TRON-PHAN UNG- LANG	DRY- BỂ LỌC	DRY-BỂ CHỨA NƯỚC SẠCH	DRY- TRẠM BƠM 2
Global warming	kg CO ₂ eq	0,094630854	0,007839719	0,003336752	0,001072898	0,081379864

Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	$2,3824 \times 10^{-8}$	$0,323611 \times 10^{-8}$	$0,084 \times 10^{-8}$	$0,04271 \times 10^{-8}$	$2,0488 \times 10^{-8}$
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	$4,8868 \times 10^{-5}$	$3,02728 \times 10^{-5}$	$0,17231 \times 10^{-5}$	$0,715631 \times 10^{-5}$	$4,20251 \times 10^{-5}$
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	$28,2096 \times 10^{-5}$	$2,18503 \times 10^{-5}$	$0,99469 \times 10^{-5}$	$0,245807 \times 10^{-5}$	$24,2594 \times 10^{-5}$
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	$20,9471 \times 10^{-5}$	$1,51295 \times 10^{-5}$	$0,7386 \times 10^{-5}$	$0,199551 \times 10^{-5}$	$18,0139 \times 10^{-5}$
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	$28,5092 \times 10^{-5}$	$2,23732 \times 10^{-5}$	$1,0053 \times 10^{-5}$	$0,251059 \times 10^{-5}$	$24,5171 \times 10^{-5}$
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	$60,5459 \times 10^{-5}$	$3,61293 \times 10^{-5}$	$2,1349 \times 10^{-5}$	$0,339465 \times 10^{-5}$	$52,0678 \times 10^{-5}$
Freshwater eutrophication	kg P eq	$43,8206 \times 10^{-7}$	$3,01416 \times 10^{-7}$	$1,54514 \times 10^{-7}$	$0,64001 \times 10^{-7}$	$37,6844 \times 10^{-7}$
Marine eutrophication	kg N eq	$20,8606 \times 10^{-8}$	$8,7844 \times 10^{-8}$	$0,73556 \times 10^{-8}$	$3,3576 \times 10^{-8}$	$17,9395 \times 10^{-8}$
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,05483392	0,024041508	0,001933483	0,001733369	0,047155624
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	$10,372 \times 10^{-6}$	$5,89724 \times 10^{-6}$	$0,3657 \times 10^{-6}$	$0,4203 \times 10^{-6}$	$8,91963 \times 10^{-6}$
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	$4,89193 \times 10^{-5}$	$2,48617 \times 10^{-5}$	$0,17249 \times 10^{-5}$	$0,172516 \times 10^{-5}$	$4,20692 \times 10^{-5}$
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	$9,10088 \times 10^{-5}$	$8,55361 \times 10^{-5}$	$0,3209 \times 10^{-5}$	$1,34741 \times 10^{-5}$	$7,8265 \times 10^{-5}$

Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	$332,3376 \times 10^{-5}$	$95,7868 \times 10^{-5}$	$11,7185 \times 10^{-5}$	$8,45171 \times 10^{-5}$	$285,801 \times 10^{-5}$
Land use	m ₂ a crop eq	$67,566 \times 10^{-5}$	$7,4566 \times 10^{-5}$	$2,38242 \times 10^{-5}$	$1,27107 \times 10^{-5}$	0,000581048
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	$3,26826 \times 10^{-6}$	$282,239 \times 10^{-6}$	$0,11524 \times 10^{-6}$	$0,269805 \times 10^{-6}$	$2,81061 \times 10^{-6}$
Fossil resource scarcity	kg oil eq	0,02275147	0,001951032	0,000802233	0,000265751	0,019565622
Water consumption	m ₃	1,0001493	1,0000564	1,1135238	1,000014	1,0001284

**PHỤ LỤC 3.5. KẾT QUẢ SIMAPRO HIỆN TRẠNG HOẠT ĐỘNG CỦA NHÀ MÁY NƯỚC CẦU ĐỎ THEO CỤM XỬ LÝ
– MÙA MƯA (LOẠI TÁC ĐỘNG – MIDPOINT)**

SimaPro 10.2.0.1	Date:	13/03/2025	Time:	20:11
Project	HTCN			
Calculation:	Analyze			
Results:	Impact assessment			
Product:	1 p 120 000 m3/ngày old (of project HTCN)			
	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - system			
Current library:	[Cut-off, S]			
	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - unit [Cut-off, U]			
Replacing library:	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.09 / World			
Method:	(2010) H			
Indicator:	Characterization			
Skip categories:	Never			
Exclude infrastructure processes:	Yes			
Exclude long-term emissions:	Yes			
Sorted on item:	Impact category			
Sort order:	Ascending			

IMPACT CATEGORY	UNIT	RAINY-TRẠM BƠM 1	RAINY- TRỘN – PHẢN ỨNG – LẮNG	RAINY – BỂ LỌC	RAINY-BỂ CHỨA NƯỚC SẠCH	RAINY-TRẠM BƠM
Global warming	kg CO ₂ eq	0,050837429	0,00868559	0,003755741	0,000946975	0,070921505

Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	$12,798 \times 10^{-9}$	$3,58527 \times 10^{-9}$	$0,94552 \times 10^{-9}$	$0,376978 \times 10^{-9}$	$17,855 \times 10^{-9}$
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	$2,62528 \times 10^{-5}$	$3,35391 \times 10^{-5}$	$0,19396 \times 10^{-5}$	$0,631639 \times 10^{-5}$	$3,66244 \times 10^{-5}$
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	$15,1547 \times 10^{-5}$	$2,42079 \times 10^{-5}$	$1,1196 \times 10^{-5}$	$0,216957 \times 10^{-5}$	$21,1418 \times 10^{-5}$
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	$11,2532 \times 10^{-5}$	$1,67619 \times 10^{-5}$	$0,83136 \times 10^{-5}$	$0,17613 \times 10^{-5}$	$15,6989 \times 10^{-5}$
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	0,000153157	$2,47872 \times 10^{-5}$	$1,13148 \times 10^{-5}$	$0,221593 \times 10^{-5}$	0,000213664
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	$32,5264 \times 10^{-5}$	$4,00274 \times 10^{-5}$	$2,40297 \times 10^{-5}$	$0,299623 \times 10^{-5}$	$45,3764 \times 10^{-5}$
Freshwater eutrophication	kg P eq	$23,5412 \times 10^{-7}$	$3,33938 \times 10^{-7}$	$1,73916 \times 10^{-7}$	$0,56489 \times 10^{-7}$	$32,8415 \times 10^{-7}$
Marine eutrophication	kg N eq	$11,2067 \times 10^{-8}$	$9,7322 \times 10^{-8}$	$0,82792 \times 10^{-8}$	$2,9635 \times 10^{-8}$	$15,6341 \times 10^{-8}$
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,029457787	0,026635481	0,002176267	0,001529928	0,04109552

Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	$5,57203 \times 10^{-6}$	$6,53352 \times 10^{-6}$	$4,1165 \times 10^{-6}$	$0,37099 \times 10^{-6}$	$7,77335 \times 10^{-6}$
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	$2,62804 \times 10^{-5}$	$2,75441 \times 10^{-5}$	$0,19415 \times 10^{-5}$	$0,152268 \times 10^{-5}$	$3,66628 \times 10^{-5}$
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	$4,88916 \times 10^{-5}$	$9,47651 \times 10^{-5}$	$0,3612 \times 10^{-5}$	$1,18927 \times 10^{-5}$	$6,82069 \times 10^{-5}$
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	$17,85379 \times 10^{-4}$	$10,61218 \times 10^{-4}$	$1,31899 \times 10^{-4}$	$0,745976 \times 10^{-4}$	$24,90719 \times 10^{-4}$
Land use	m ₂ a crop eq	$36,2977 \times 10^{-5}$	$8,26113 \times 10^{-5}$	$2,68158 \times 10^{-5}$	$1,12188 \times 10^{-5}$	$50,6376 \times 10^{-5}$
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	$1,75577 \times 10^{-6}$	$312,692 \times 10^{-6}$	$0,1297 \times 10^{-6}$	$0,238138 \times 10^{-6}$	$2,44941 \times 10^{-6}$
Fossil resource scarcity	kg oil eq	0,012222507	0,00216154	0,000902968	0,00023456	0,017051188
Water consumption	m ₃	1,0000802	1,0000624	1,1323766	1,0000124	1,0001119

**PHỤ LỤC 3.6. KẾT QUẢ SIMAPRO HIỆN TRẠNG HOẠT ĐỘNG CỦA NHÀ MÁY NƯỚC CẦU ĐỎ
THEO THÁNG (LOẠI TÁC ĐỘNG – MIDPOINT)**

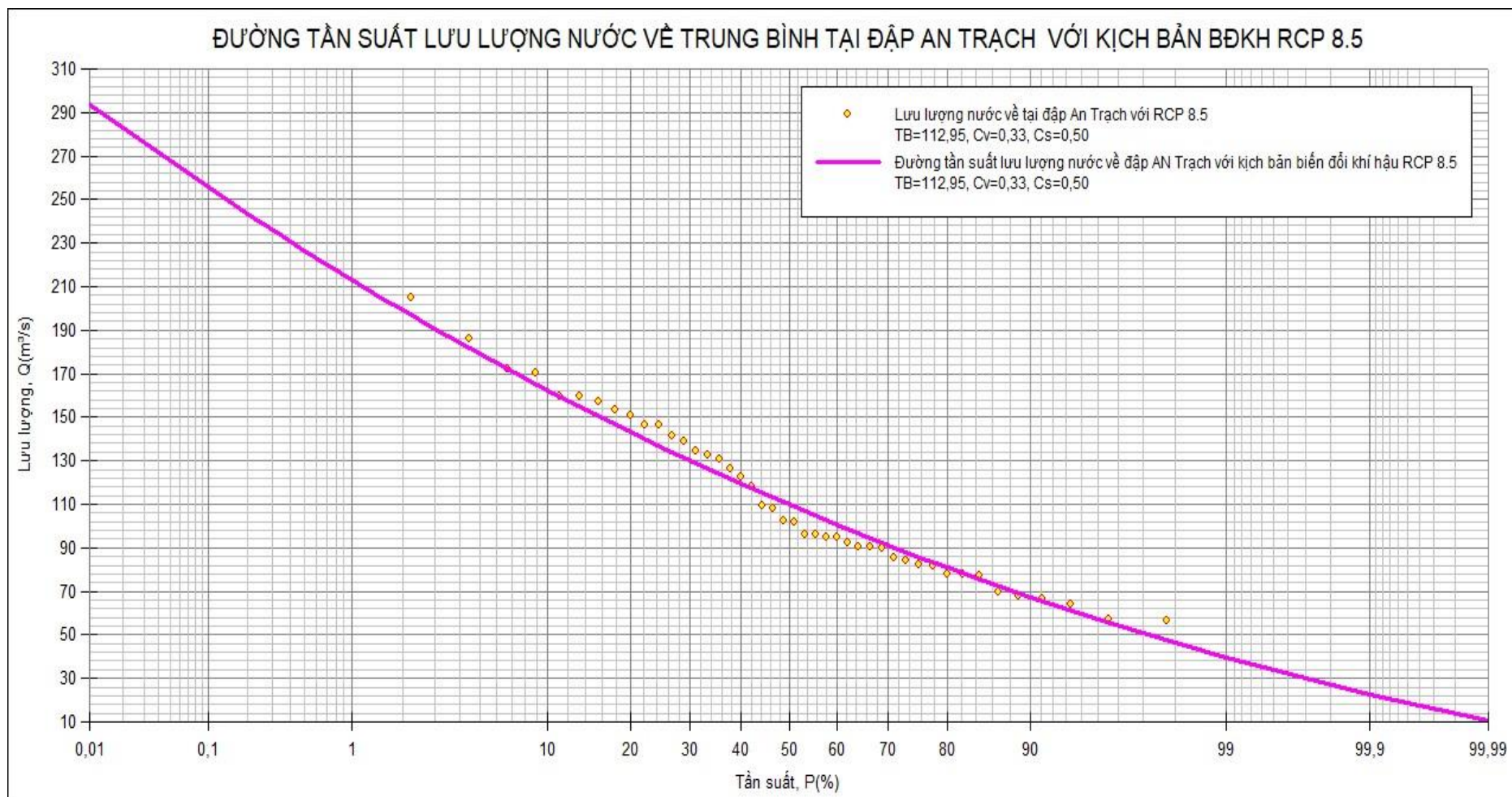
SimaPro 10.2.0.1	Date:	16/03/2025	Time:	13:39
Project	HTCN			
Calculation:	Analyze			
Results:	Impact assessment			
Product:	1 p [12 THÁNG] 120 000 m3/ngày (of project HTCN)			
Current library:	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - system [Cut-off, S] Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - unit [Cut-off, U]			
Replacing library:	U]			
Method:	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.09 / World (2010) H			
Indicator:	Characterization			
Skip categories:	Never			
Exclude infrastructure processes:	Yes			
Exclude long-term emissions:	Yes			
Sorted on item:	Impact category			
Sort order:	Ascending			

IMPACT CATEGORY	UNIT	THÁNG 1	THÁNG 2	THÁNG 3	THÁNG 4	THÁNG 5	THÁNG 6	THÁNG 7	THÁNG 8	THÁNG 9	THÁNG 10	THÁNG 11	THÁNG 12
Global warming	kg CO ₂ eq	1,45 × 10 ⁻¹	1,40 × 10 ⁻¹	1,55 × 10 ⁻¹	1,55× 10 ⁻¹	2,47× 10 ⁻¹	1,92 × 10 ⁻¹	1,78× 10 ⁻¹	2,15 × 10 ⁻¹	2,14× 10 ⁻¹	1,47 × 10 ⁻¹	1,43 × 10 ⁻¹	1,28 × 10 ⁻¹
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	3,81 × 10 ⁻⁸	3,69 × 10 ⁻⁸	4,03 × 10 ⁻⁸	4,00× 10 ⁻⁸	6,35 × 10 ⁻⁸	5,04 × 10 ⁻⁸	4,64 × 10 ⁻⁸	5,58 × 10 ⁻⁸	5,54 × 10 ⁻⁸	3,94× 10 ⁻⁸	3,79 × 10 ⁻⁸	3,38 × 10 ⁻⁸

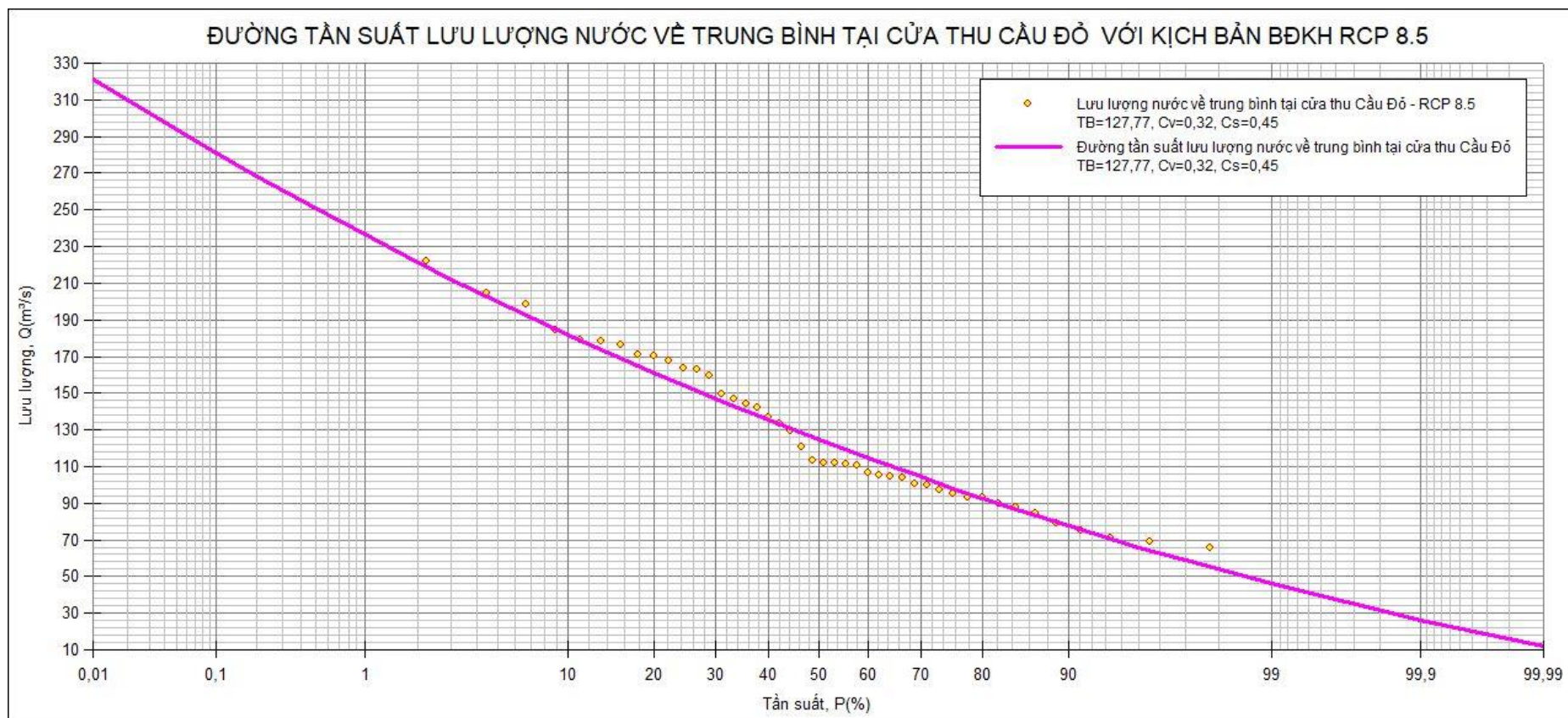
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	$1,11 \times 10^{-4}$	$1,09 \times 10^{-4}$	$1,10 \times 10^{-4}$	$1,05 \times 10^{-4}$	$1,58 \times 10^{-4}$	$1,46 \times 10^{-4}$	$1,29 \times 10^{-4}$	$1,49 \times 10^{-4}$	$1,48 \times 10^{-4}$	$1,29 \times 10^{-4}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-4}$
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	$4,30 \times 10^{-4}$	$4,15 \times 10^{-4}$	$4,60 \times 10^{-4}$	$4,60 \times 10^{-4}$	$7,35 \times 10^{-4}$	$5,68 \times 10^{-4}$	$5,27 \times 10^{-4}$	$6,38 \times 10^{-4}$	$6,35 \times 10^{-4}$	$4,36 \times 10^{-4}$	$4,24 \times 10^{-4}$	$3,79 \times 10^{-4}$
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	$3,18 \times 10^{-4}$	$3,07 \times 10^{-4}$	$3,41 \times 10^{-4}$	$3,41 \times 10^{-4}$	$5,45 \times 10^{-4}$	$4,20 \times 10^{-4}$	$3,90 \times 10^{-4}$	$4,73 \times 10^{-4}$	$4,70 \times 10^{-4}$	$3,22 \times 10^{-4}$	$3,14 \times 10^{-4}$	$2,80 \times 10^{-4}$
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	$4,35 \times 10^{-4}$	$4,20 \times 10^{-4}$	$4,65 \times 10^{-4}$	$4,65 \times 10^{-4}$	$7,43 \times 10^{-4}$	$5,75 \times 10^{-4}$	$5,33 \times 10^{-4}$	$6,46 \times 10^{-4}$	$6,42 \times 10^{-4}$	$4,41 \times 10^{-4}$	$4,29 \times 10^{-4}$	$3,83 \times 10^{-4}$
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	$9,09 \times 10^{-4}$	$8,76 \times 10^{-4}$	$9,76 \times 10^{-4}$	$9,77 \times 10^{-4}$	$1,57 \times 10^{-3}$	$1,20 \times 10^{-3}$	$1,12 \times 10^{-3}$	$1,36 \times 10^{-3}$	$1,35 \times 10^{-3}$	$9,14 \times 10^{-4}$	$8,95 \times 10^{-4}$	$7,99 \times 10^{-4}$
Freshwater eutrophication	kg P eq	$6,65 \times 10^{-6}$	$6,42 \times 10^{-6}$	$7,13 \times 10^{-6}$	$7,13 \times 10^{-6}$	$1,14 \times 10^{-5}$	$8,79 \times 10^{-6}$	$8,16 \times 10^{-6}$	$9,90 \times 10^{-6}$	$9,85 \times 10^{-6}$	$6,73 \times 10^{-6}$	$6,57 \times 10^{-6}$	$5,87 \times 10^{-6}$
Marine eutrophication	kg N eq	$4,26 \times 10^{-7}$	$4,17 \times 10^{-7}$	$4,32 \times 10^{-7}$	$4,19 \times 10^{-7}$	$6,46 \times 10^{-7}$	$5,60 \times 10^{-7}$	$5,04 \times 10^{-7}$	$5,90 \times 10^{-7}$	$5,87 \times 10^{-7}$	$4,81 \times 10^{-7}$	$4,37 \times 10^{-7}$	$3,97 \times 10^{-7}$
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	$1,08 \times 10^{-1}$	$1,05 \times 10^{-1}$	$1,09 \times 10^{-1}$	$1,06 \times 10^{-1}$	$1,61 \times 10^{-1}$	$1,43 \times 10^{-1}$	$1,27 \times 10^{-1}$	$1,49 \times 10^{-1}$	$1,47 \times 10^{-1}$	$1,20 \times 10^{-1}$	$1,10 \times 10^{-1}$	$9,76 \times 10^{-2}$
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	$2,21 \times 10^{-5}$	$2,16 \times 10^{-5}$	$2,20 \times 10^{-5}$	$2,11 \times 10^{-5}$	$3,16 \times 10^{-5}$	$2,93 \times 10^{-5}$	$2,58 \times 10^{-5}$	$2,98 \times 10^{-5}$	$2,95 \times 10^{-5}$	$2,52 \times 10^{-5}$	$2,26 \times 10^{-5}$	$2,01 \times 10^{-5}$

Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	$1,00 \times 10^{-4}$	$9,82 \times 10^{-5}$	$1,01 \times 10^{-4}$	$9,69 \times 10^{-5}$	$1,46 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-4}$	$1,18 \times 10^{-4}$	$1,37 \times 10^{-4}$	$1,36 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-4}$	$9,11 \times 10^{-5}$
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	$2,41 \times 10^{-4}$	$2,38 \times 10^{-4}$	$2,33 \times 10^{-4}$	$2,18 \times 10^{-4}$	$3,18 \times 10^{-4}$	$3,19 \times 10^{-4}$	$2,75 \times 10^{-4}$	$3,11 \times 10^{-4}$	$3,09 \times 10^{-4}$	$2,91 \times 10^{-4}$	$2,52 \times 10^{-4}$	$2,26 \times 10^{-4}$
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	$5,93 \times 10^{-3}$	$5,77 \times 10^{-3}$	$6,13 \times 10^{-3}$	$6,00 \times 10^{-3}$	$9,30 \times 10^{-3}$	$7,86 \times 10^{-3}$	$7,10 \times 10^{-3}$	$8,40 \times 10^{-3}$	$8,34 \times 10^{-3}$	$6,41 \times 10^{-3}$	$5,98 \times 10^{-3}$	$5,32 \times 10^{-3}$
Land use	m ₂ a crop eq	$1,06 \times 10^{-3}$	$1,03 \times 10^{-3}$	$1,13 \times 10^{-3}$	$1,12 \times 10^{-3}$	$1,79 \times 10^{-3}$	$1,40 \times 10^{-3}$	$1,29 \times 10^{-3}$	$1,56 \times 10^{-3}$	$1,55 \times 10^{-3}$	$1,09 \times 10^{-3}$	$1,05 \times 10^{-3}$	$9,41 \times 10^{-4}$
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	$3,38 \times 10^{-4}$	$3,44 \times 10^{-4}$	$2,75 \times 10^{-4}$	$2,23 \times 10^{-4}$	$2,35 \times 10^{-4}$	$4,58 \times 10^{-4}$	$3,44 \times 10^{-4}$	$3,38 \times 10^{-4}$	$3,30 \times 10^{-4}$	$4,96 \times 10^{-4}$	$3,78 \times 10^{-4}$	$3,25 \times 10^{-4}$
Fossil resource scarcity	kg oil eq	$3,50 \times 10^{-2}$	$3,37 \times 10^{-2}$	$3,73 \times 10^{-2}$	$3,73 \times 10^{-2}$	$5,96 \times 10^{-2}$	$4,62 \times 10^{-2}$	$4,28 \times 10^{-2}$	$5,18 \times 10^{-2}$	$5,15 \times 10^{-2}$	$3,55 \times 10^{-2}$	$3,45 \times 10^{-2}$	$3,09 \times 10^{-2}$
Water consumption	m ₃	1,100	1,101	1,117	1,125	1,095	1,087	1,091	1,149	1,141	1,149	1,199	1,136

PHỤ LỤC 4.1. BIỂU ĐỒ ĐƯỜNG TẦN SUẤT LƯU LƯỢNG TRUNG BÌNH NƯỚC VỀ THEO THÁNG TẠI ĐẬP AN TRẠCH THEO KỊCH BẢN RCP 8.5



PHỤ LỤC 4.2. BIỂU ĐỒ ĐƯỜNG TẦN SUẤT LƯU LƯỢNG TRUNG BÌNH NƯỚC VỀ THEO THÁNG TẠI CỬA THU CẦU ĐỒ THEO KỊCH BẢN RCP 8.5



PHỤ LỤC 4.3. KẾT QUẢ SIMAPRO TRONG MÙA MƯA CỦA 5 KỊCH BẢN CẤP NƯỚC TẠI ĐÀ NẴNG

(LOẠI TÁC ĐỘNG – MIDPOINT)

SimaPro 10.2.0.1
Project

Date: 11/10/2025 Time: 18:07
SCENARIO 1-5 RAINY

Calculation: Analyze
Results: Impact assessment
Product: 1 p SCENARIO 1-5
Current library: Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - system [Cut-off, S]
Replacing library: Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - unit [Cut-off, U]
Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.09 / World (2010) H
Indicator: Characterization
Skip categories: Never
Exclude infrastructure processes: Yes
Exclude long-term emissions: Yes
Sorted on item: Impact category
Sort order: Ascending

IMPACT CATEGORY	UNIT	S1	S2	S3		S4		S5
				KB3 REUSE 100 000 m ³	KB3 RAINY SEASON	KB4 RAINY SEASON [ANTRACH]	KB4 RAINY SEASON	
Global warming	kg CO2 eq	0,144914	0,150711	0,086250478	0,15071108	0,17389304	0,15071129	0,15071217

Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	$3,81 \times 10^{-8}$	$3,96 \times 10^{-8}$	$2,1714 \times 10^{-8}$	$3,9641 \times 10^{-8}$	$4,5477 \times 10^{-8}$	$3,9641 \times 10^{-8}$	$3,9544 \times 10^{-8}$
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	0,000112	0,000116	$4,45403 \times 10^{-5}$	0,00011613	0,000128103	0,000116131	0,000112664
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	0,00043	0,000447	0,000257114	0,00044673	0,000515835	0,00044673	0,000447088
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0,000318	0,000331	0,000190921	0,000330522	0,000381837	0,000330522	0,000330741
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	0,000434	0,000452	0,000259845	0,000451858	0,000521698	0,000451859	0,000452201
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	0,000908	0,000944	0,00055184	0,000943831	0,001092151	0,000943832	0,000945666
Freshwater eutrophication	kg P eq	$6,65 \times 10^{-6}$	$6,92 \times 10^{-6}$	$3,99399 \times 10^{-6}$	$6,91578 \times 10^{-6}$	$7,98926 \times 10^{-6}$	$6,91579 \times 10^{-6}$	$6,91117 \times 10^{-6}$
Marine eutrophication	kg N eq	$4,3 \times 10^{-7}$	$4,47 \times 10^{-7}$	$1,90132 \times 10^{-7}$	$4,47381 \times 10^{-7}$	$4,98485 \times 10^{-7}$	$4,47386 \times 10^{-7}$	$4,32295 \times 10^{-7}$
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,108071	0,112394	0,049977905	0,11239404	0,1258283	0,11239456	0,11144946

Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	$2,21 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-5}$	$9,45348 \times 10^{-6}$	$2,30086 \times 10^{-5}$	$2,55498 \times 10^{-5}$	$2,30087 \times 10^{-5}$	$2,27579 \times 10^{-5}$
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,000101	0,000105	$4,45871 \times 10^{-5}$	0,000104644	0,00011663	0,000104645	0,000103643
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0,000243	0,000252	$8,29491 \times 10^{-5}$	0,000252392	0,000274691	0,000252394	0,000245175
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0,00594	0,006177	0,003029063	0,006177367	0,006991552	0,006177389	0,006140917
Land use	m2a crop eq	0,001061	0,001104	0,000615824	0,001103555	0,001269074	0,001103557	0,001100947
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	0,00034	0,000353	$2,97882 \times 10^{-6}$	0,00035341	0,000354234	0,000353415	0,000346552
Fossil resource scarcity	kg oil eq	0,034926	0,036323	0,020736632	0,036323159	0,041896651	0,036323213	0,036318484
Water consumption	m3	1,040292	1,040303	1,0001361	1,0403032	1,0403398	1,0403032	1,0202969

PHỤ LỤC 4.4. KẾT QUẢ SIMAPRO TRONG MÙA KHÔ CỦA 5 KỊCH BẢN CẤP NƯỚC TẠI ĐÀ NẴNG
(LOẠI TÁC ĐỘNG – MIDPOINT)

SimaPro 10.2.0.1
Project

Date: 12/10/2025 Time: 15:27
SCENARIO 1-5 DRY

Calculation: Analyze
 Results: Impact assessment
 Product: 1 p SCENARIO 1-5
 Current library: Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - system [Cut-off, S]
 Replacing library: Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - unit [Cut-off, U]
 Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.09 / World (2010) H
 Indicator: Characterization
 Skip categories: Never
 Exclude infrastructure processes: Yes
 Exclude long-term emissions: Yes
 Sorted on item: Impact category
 Sort order: Ascending

IMPACT	UNIT	S1	S2		S3		S4		S5
			KB2 DRY SEASON	KB2 DRY SEASON (RO)	KB3 REUSE 100 000	KB3 DRY SEASON	KB4 DRY SEASON [ANTRACH]	KB4 DRY SEASON	
Global warming	kg CO ₂ eq	0,21745	0,21712588	1,7940149	0,086250478	0,2171259	0,17406727	0,21747087	0,19549722

Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	$5,65 \times 10^{-8}$	$5,6386 \times 10^{-8}$	$4,51648 \times 10^{-7}$	$2,1714 \times 10^{-8}$	$5,639 \times 10^{-8}$	$4,5546 \times 10^{-8}$	$5,6473 \times 10^{-8}$	$5,0813 \times 10^{-8}$
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	0,000152	0,000151599	0,000926477	$4,45403 \times 10^{-5}$	0,0001516	0,000129364	0,000151777	0,000135685
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	0,000646	0,000644575	0,005347973	0,000257114	0,0006446	0,000516217	0,000645604	0,000580599
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0,000478	0,000477471	0,003971161	0,000190921	0,0004775	0,000382158	0,000478235	0,000429884
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	0,000653	0,000651809	0,005404785	0,000259845	0,0006518	0,000522087	0,000652848	0,000587129
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	0,00137	0,001368146	0,011478294	0,00055184	0,0013681	0,001092651	0,001370353	0,001232263
Freshwater eutrophication	kg P eq	1×10^{-5}	$9,9943 \times 10^{-6}$	$8,30752 \times 10^{-5}$	$3,99399 \times 10^{-6}$	$9,994 \times 10^{-6}$	$8,0004 \times 10^{-6}$	$1,00103 \times 10^{-5}$	$8,98528 \times 10^{-6}$
Marine eutrophication	kg N eq	6×10^{-7}	$5,9956 \times 10^{-7}$	$3,95487 \times 10^{-6}$	$1,90132 \times 10^{-7}$	$5,996 \times 10^{-7}$	$5,04647 \times 10^{-7}$	$6,00326 \times 10^{-7}$	$5,30738 \times 10^{-7}$
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,151196	0,15100994	1,0395454	0,049977905	0,1510082	0,12605854	0,15120786	0,13732054

Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	$3,04 \times 10^{-5}$	$3,0325 \times 10^{-5}$	0,000196634	$9,45348 \times 10^{-6}$	$3,032 \times 10^{-5}$	$2,56053 \times 10^{-5}$	$3,03624 \times 10^{-5}$	$2,7646 \times 10^{-5}$
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,000139	0,000139115	0,000927417	$4,45871 \times 10^{-5}$	0,0001391	0,000116855	0,000139291	0,00012671
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0,000319	0,000318348	0,001725357	$8,29491 \times 10^{-5}$	0,0003183	0,000276937	0,000318677	0,000287927
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0,008527	0,008515969	0,063005025	0,003029063	0,0085159	0,007003744	0,00852802	0,007710954
Land use	m _{2a} crop eq	0,001581	0,001578656	0,012809215	0,000615824	0,0015787	0,001271221	0,00158112	0,001420634
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	$35,5 \times 10^{-5}$	$35,453 \times 10^{-5}$	$6,19618 \times 10^{-5}$	$0,297882 \times 10^{-5}$	$35,45 \times 10^{-5}$	$35,3016 \times 10^{-5}$	$35,45 \times 10^{-5}$	$34,695 \times 10^{-5}$
Fossil resource scarcity	kg oil eq	0,05237	0,052292064	0,43132327	0,020736632	0,0522921	0,041939763	0,052375001	0,047085586
Water consumption	m ₃	1,040411	1,0404102	1,0428312	1,0001361	1,0404102	1,0403423	1,0404108	1,0203674

**PHỤ LỤC 4.5. KẾT QUẢ SIMAPRO TRONG MÙA KHÔ CỦA 5 KỊCH BẢN CẤP NƯỚC TẠI ĐÀ NẴNG
(ĐIỂM KẾT THÚC TÁC ĐỘNG – ENDPOINT)**

SimaPro 10.2.0.1	Date:	12/10/2025	Time:	16:42
Project	HTCN			
Calculation:	Analyze			
Results:	Impact assessment			
Product:	1 p SCENARIO 4 (of project HTCN)			
Current library:	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - system [Cut-off, S]			
Replacing library:	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off by classification - unit [Cut-off, U]			
Method:	ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.09 / World (2010) H/A			
Indicator:	Characterization			
Skip categories:	Never			
Exclude infrastructure processes:	Yes			
Exclude long-term emissions:	Yes			
Sorted on item:	Impact category			
Sort order:	Ascending			

Impact category	Unit	S1	S2		S3		S4		S5
		KB1 DRY SEASON	KB2 DRY SEASON	KB2 DRY SEASON (RO)	KB3 REUSE	KB3 DRY SEASON	KB4 DRY SEASON [ANTRACH	KB 4 DRY SEASON	KB5 DRY SEASON
Global warming, Human health	DALY	$2,0179 \times 10^{-7}$	$2,0149 \times 10^{-7}$	$16,6482 \times 10^{-7}$	$0,80039 \times 10^{-7}$	$2,0149 \times 10^{-7}$	$1,61532 \times 10^{-7}$	$2,0181 \times 10^{-7}$	$1,8142 \times 10^{-7}$

Global warming, Terrestrial ecosystems	species.yr	$6,0896 \times 10^{-10}$	$6,0806 \times 10^{-10}$	$50,241 \times 10^{-10}$	$2,4154 \times 10^{-10}$	$6,0806 \times 10^{-10}$	$4,8747 \times 10^{-10}$	$6,090 \times 10^{-10}$	$5,4748 \times 10^{-10}$
Global warming, Freshwater ecosystems	species.yr	$1,6633 \times 10^{-14}$	$1,6608 \times 10^{-14}$	$13,723 \times 10^{-14}$	$0,6597 \times 10^{-14}$	$1,661 \times 10^{-14}$	$1,3315 \times 10^{-14}$	$1,6635 \times 10^{-14}$	$1,495 \times 10^{-14}$
Stratospheric ozone depletion	DALY	$2,9979 \times 10^{-11}$	$2,99354 \times 10^{-11}$	$23,978 \times 10^{-11}$	$1,1528 \times 10^{-11}$	$2,994 \times 10^{-11}$	$2,4180 \times 10^{-11}$	$2,9982 \times 10^{-11}$	$2,6977 \times 10^{-11}$
Ionizing radiation	DALY	$1,289 \times 10^{-12}$	$1,28753 \times 10^{-12}$	$7,86719 \times 10^{-12}$	$0,37822 \times 10^{-12}$	$1,288 \times 10^{-12}$	$1,0987 \times 10^{-12}$	$1,289 \times 10^{-12}$	$1,1524 \times 10^{-12}$
Ozone formation, Human health	DALY	$5,8746 \times 10^{-10}$	$5,8658 \times 10^{-10}$	$48,668 \times 10^{-10}$	$2,3398 \times 10^{-10}$	$5,8658 \times 10^{-10}$	$4,6977 \times 10^{-10}$	$5,875 \times 10^{-10}$	$5,2836 \times 10^{-10}$
Fine particulate matter formation	DALY	$3,00322 \times 10^{-7}$	$2,99871 \times 10^{-7}$	$24,94 \times 10^{-7}$	$1,19904 \times 10^{-7}$	$2,9987 \times 10^{-7}$	$2,40012 \times 10^{-7}$	$3,0035 \times 10^{-7}$	$2,6998 \times 10^{-7}$
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	species.yr	$8,4209 \times 10^{-11}$	$8,40829 \times 10^{-11}$	$69,7213 \times 10^{-11}$	$3,35198 \times 10^{-11}$	$8,4083 \times 10^{-11}$	$6,7349 \times 10^{-11}$	$8,4217 \times 10^{-11}$	$7,5739 \times 10^{-11}$
Terrestrial acidification	species.yr	$2,9048 \times 10^{-10}$	$2,9004 \times 10^{-10}$	$24,3331 \times 10^{-10}$	$1,1699 \times 10^{-10}$	$2,900 \times 10^{-10}$	$2,316 \times 10^{-10}$	$2,905 \times 10^{-10}$	$2,61 \times 10^{-10}$
Freshwater eutrophication	species.yr	$6,7037 \times 10^{-12}$	$6,69361 \times 10^{-12}$	$55,6384 \times 10^{-12}$	$2,67491 \times 10^{-12}$	$6,6936 \times 10^{-12}$	$5,3582 \times 10^{-12}$	$6,704 \times 10^{-12}$	$6,0178 \times 10^{-12}$

Marine eutrophication	species.yr	$1,0206 \times 10^{-15}$	$1,0194 \times 10^{-15}$	$6,72403 \times 10^{-15}$	$0,3233 \times 10^{-15}$	$1,0194 \times 10^{-15}$	$0,8580 \times 10^{-15}$	$1,021 \times 10^{-15}$	$0,9024 \times 10^{-15}$
Terrestrial ecotoxicity	species.yr	$1,7237 \times 10^{-12}$	$1,72162 \times 10^{-12}$	$11,8517 \times 10^{-12}$	$0,56979 \times 10^{-12}$	$1,7216 \times 10^{-12}$	$1,4372 \times 10^{-12}$	$1,724 \times 10^{-12}$	$1,5655 \times 10^{-12}$
Freshwater ecotoxicity	species.yr	$2,1079 \times 10^{-14}$	$2,10541 \times 10^{-14}$	$13,6502 \times 10^{-14}$	$0,65626 \times 10^{-14}$	$2,1054 \times 10^{-14}$	$1,7778 \times 10^{-14}$	$2,108 \times 10^{-14}$	$1,9194 \times 10^{-14}$
Marine ecotoxicity	species.yr	$1,4631 \times 10^{-14}$	$1,46136 \times 10^{-14}$	$9,74201 \times 10^{-14}$	$0,46836 \times 10^{-14}$	$1,4613 \times 10^{-14}$	$1,228 \times 10^{-14}$	$1,463 \times 10^{-14}$	$1,3311 \times 10^{-14}$
Human carcinogenic toxicity	DALY	$1,0583 \times 10^{-9}$	$1,05729 \times 10^{-9}$	$5,7307 \times 10^{-9}$	$0,275512 \times 10^{-9}$	$1,05728 \times 10^{-9}$	$0,919747 \times 10^{-9}$	$1,05838 \times 10^{-9}$	$0,5624 \times 10^{-9}$
Human non-carcinogenic toxicity	DALY	$1,94252 \times 10^{-9}$	$1,93994 \times 10^{-9}$	$14,353 \times 10^{-9}$	$0,690029 \times 10^{-9}$	$1,93992 \times 10^{-9}$	$1,59545 \times 10^{-9}$	$1,94268 \times 10^{-9}$	$1,7566 \times 10^{-9}$
Land use	species.yr	$1,4031 \times 10^{-11}$	$1,40101 \times 10^{-11}$	$11,368 \times 10^{-11}$	$0,54654 \times 10^{-11}$	$1,40101 \times 10^{-11}$	$1,12817 \times 10^{-11}$	$1,4032 \times 10^{-11}$	$1,2608 \times 10^{-11}$
Mineral resource scarcity	USD2013	$8,20209 \times 10^{-5}$	$8,20262 \times 10^{-5}$	$1,4316 \times 10^{-5}$	$0,06882 \times 10^{-5}$	$8,20189 \times 10^{-5}$	$8,16774 \times 10^{-5}$	$8,20203 \times 10^{-5}$	$8,0273 \times 10^{-5}$
Fossil resource scarcity	USD2013	0,008343288	0,008331214	0,06688927	0,003215817	0,008331198	0,006725781	0,008344061	0,00751139

Water consumption, Human health	DALY	$2,2477 \times 10^{-7}$	$2,2477 \times 10^{-7}$	$2,24544 \times 10^{-7}$	$2,15995 \times 10^{-7}$	$2,2477 \times 10^{-7}$	$2,24772 \times 10^{-7}$	$2,2477 \times 10^{-7}$	$2,2043 \times 10^{-7}$
Water consumption, Terrestrial ecosystem	species.yr	$2,08661 \times 10^{-9}$	$2,0866 \times 10^{-9}$	$2,12966 \times 10^{-9}$	$2,00239 \times 10^{-9}$	$2,0866 \times 10^{-9}$	$2,08541 \times 10^{-9}$	$2,08661 \times 10^{-9}$	$2,0459 \times 10^{-9}$
Water consumption, Aquatic ecosystems	species.yr	$3,52658 \times 10^{-12}$	$3,52658 \times 10^{-12}$	$3,53334 \times 10^{-12}$	$3,39037 \times 10^{-12}$	$3,52658 \times 10^{-12}$	$3,52639 \times 10^{-12}$	$3,5266 \times 10^{-12}$	$3,4587 \times 10^{-12}$