

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

Ngành: Kỹ thuật môi trường

Mã số: 9520320

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SỸ KỸ THUẬT

Đà Nẵng - Năm 2026

Công trình này được hoàn thành tại
Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án ở đơn vị chuyên môn Khoa Môi trường, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng vào ngày 17/01/2026.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Trung tâm Công nghệ thông tin và Học liệu số, Đại học Đà Nẵng
- Trung tâm Học liệu và Truyền thông, Trường Đại học Bách khoa

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Hoạt động sản xuất và cung cấp nước luôn tiêu tốn năng lượng, hóa chất và tài nguyên, đồng thời phát sinh nhiều tác động môi trường. Trong bối cảnh toàn cầu áp dụng các công cụ đánh giá môi trường, phương pháp LCA giúp lượng hóa tác động xuyên suốt vòng đời hệ thống cấp nước, trong khi chỉ số WSI phản ánh mức độ căng thẳng nguồn nước theo từng lưu vực. Tuy nhiên, tại Việt Nam, việc tích hợp LCA và WSI trong quy hoạch cấp nước còn hạn chế.

Các đô thị ven biển như Đà Nẵng đang chịu áp lực lớn từ đô thị hóa, biến đổi khí hậu, ô nhiễm và xâm nhập mặn, làm suy giảm nguồn nước thô và gia tăng rủi ro vận hành. Nhu cầu nước tăng nhanh cũng khiến cân bằng cung-cầu ngày càng khó khăn.

Trên cơ sở đó, luận án **“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”** phát triển mô hình tích hợp WSI-LCA cho hệ thống cấp nước đô thị Đà Nẵng, cung cấp cách tiếp cận toàn diện để đánh giá tác động môi trường và hỗ trợ lựa chọn kịch bản cấp nước tối ưu.

2. Mục tiêu của luận án

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.

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 tập trung ở khâu khai thác, truyền tải nước thô và xử lý nước tại NMN Cầu Đỏ.

Phạm vi nghiên cứu theo thời gian: Đối với dòng chảy, dữ liệu được lấy theo chuỗi dữ liệu lịch sử tại các trạm từ 1987-2023. Dữ liệu hoạt động của NMN được thu thập từ nhật ký hoạt động năm 2023. Các kịch bản cấp nước dựa trên quy hoạch.

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 quy trình tích hợp WSI vào LCA; Bổ sung cơ sở khoa học cho đánh giá tài nguyên nước ở Việt Nam; Góp phần phát triển khoa học liên ngành, mở ra hướng nghiên cứu mới cho các hệ thống hạ tầng đô thị chịu tác động của BĐKH.

b. Ý nghĩa thực tiễn

Ra quyết định dựa trên bằng chứng khoa học. Khả năng nhân rộng và áp dụng thực tiễn cho các đô thị ven biển và vùng hạ lưu sông ở Việt Nam, 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. Cách tiếp cận này có tính khái quát và có thể mở rộng áp dụng cho các đô thị khác ở Việt Nam.

- Luận án áp dụng mô hình tích hợp WSI-LCA để định 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, đảm bảo 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; 4 chương; Kết luận, kiến nghị.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Tổng quan về tài nguyên nước

Tài nguyên nước phân bố không đồng đều theo không gian và thời gian, dẫn đến sự chênh lệch lớn về khả năng tiếp cận nước giữa các vùng và quốc gia. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nhu cầu nước ngày càng tăng, tình trạng mất cân bằng cung–cầu trở thành thách thức cấp bách. Điều này đặt ra yêu cầu phải sử dụng các công cụ đánh giá định lượng nhằm hỗ trợ phân bổ nước công bằng và hiệu quả, đồng thời bảo vệ hệ sinh thái và đảm bảo quyền tiếp cận nước sạch cho cộng đồng.

Nhu cầu nước tăng nhanh do đô thị hóa, công nghiệp hóa và gia tăng dân số khiến nhiều lưu vực rơi vào tình trạng mất cân bằng cung–cầu, nhất là mùa khô. Tại Việt Nam, an ninh tài nguyên nước phụ thuộc lớn vào việc giải quyết tình trạng căng thẳng nước, suy giảm chất lượng nguồn nước và các rủi ro thiên tai liên quan. Trên lưu vực Vu Gia – Thu Bồn, mùa khô thường xảy ra hạn hán và xâm nhập mặn, gây thiếu nước cho hệ thống cấp nước Đà Nẵng. Để đảm bảo cấp nước bền vững, cần quản lý khai thác nước mặt và nước ngầm hợp lý, giảm thất thoát, nâng cao hiệu quả sử dụng, đồng thời áp dụng các công cụ đánh giá định lượng để dự báo khan hiếm nước, phân tích tác động môi trường.

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

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

- Công trình khai thác: Làm nhiệm vụ thu nước từ nguồn. Đối với NMN Cầu Đỏ: cửa thu nước thô tại NMN Cầu Đỏ và trạm bơm An Trạch.

- Trạm bơm nước thô: Vận chuyển nước thô từ công trình thu lên

trạm xử lý.

- Khu xử lý nước: Tập hợp các công trình nhằm làm sạch nước thô đạt tiêu chuẩn quy định.

- Trạm bơm nước sạch: 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 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 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.

1.3. Hiện trạng hệ thống cấp nước TP Đà Nẵng

1.3.1. Nguồn nước thô

Hệ thống cấp nước Đà Nẵng hiện dựa chủ yếu vào nguồn nước mặt từ hệ thống sông Vu Gia, sông Cu Đê và hồ Hòa Trung.

Nguồn nước mặt chính:

Sông Vu Gia (nguồn chính cho NMN Cầu Đỏ và NMN Sân Bay): Nguồn cung cấp nước chính của TP hiện nay là từ sông Cầu Đỏ đang có dấu hiệu suy giảm về trữ lượng và gia tăng mức độ xâm nhập mặn cả về cường độ lẫn thời gian trong năm.

Mùa khô, xâm nhập mặn tăng, lưu lượng thượng nguồn giảm gây rủi ro cho nguồn thô tại cửa thu Cầu Đỏ và Cu Đê. Cấp nước TP phụ thuộc vào hoạt động của các hồ chứa, trạm bơm phòng mặn và quản trị liên hồ để duy trì cung cấp.

1.3.2. Các nhà máy nước sạch

Hệ thống cấp nước đô thị Đà Nẵng với tổng công suất thiết kế của hệ thống là 463.500 m³/ngày.

NMN Cầu Đỏ: Công suất thiết kế là 290.000 m³/ngày. Nước thô

được lấy từ sông Vu Gia cạnh NMN; NMN Sân Bay: Nguồn nước thô từ cửa thu Cầu Đỏ, công suất thiết kế là 30.000 m³/ngày; NMN Hòa Liên: Nguồn nước từ sông Cu Đê, công suất thiết kế giai đoạn I: 120.000 m³/ngày; NMN Sơn Trà 1 & 2: Nguồn nước thô từ suối Đá. Tổng công suất thiết kế: 7.000 m³/ngày (Sơn Trà 3 ngừng hoạt động từ 30/7/2020); NMN Hải Vân: Nguồn nước thô từ suối Lương, công suất 5.000 m³/ngày (vận hành không ổn định); NMN Hồ Hòa Trung: Nguồn nước thô từ hồ Hòa Trung, công suất giai đoạn 1: 10.000 m³/ngày.

1.3.3. Mạng lưới cấp nước

Mạng lưới dài khoảng 3.310 km, tỷ lệ đầu nối gần 100% đô thị. Tiêu chuẩn dùng nước bình quân 150 l/người/ngày. Tỷ lệ thất thoát 14–16%.

Đánh giá tổng hợp:

Ưu điểm:

- Hạ tầng và nguồn thô được mở rộng và đầu tư liên tục, có dự phòng
- Mạng lưới phân vùng hợp lý, thuận lợi quản lý áp lực, xử lý sự cố.
- Tỷ lệ đầu nối cao, dịch vụ cấp nước đô thị ổn định.

Hạn chế và rủi ro:

Hệ thống cấp nước đô thị tại Đà Nẵng phụ thuộc lớn vào nguồn nước mặt và rủi ro xâm nhập mặn. Tần suất, thời gian, biên độ nhiễm mặn ngày càng tăng ở tại điểm khai thác nước của NMN Cầu Đỏ. Thời kỳ nhiễm mặn buộc vận hành trạm bơm An Trạch cách nhà máy 8km ở công suất cao hơn, tăng chi phí vận hành (bơm) và phụ thuộc năng lượng, đồng thời kéo theo những tác động đến môi trường lớn hơn.

Đô thị hóa và du lịch phục hồi sau đại dịch đã làm nhu cầu sử dụng nước tăng đột biến. Nhu cầu dùng nước tăng đúng vào các tháng cao điểm về nhiễm mặn.

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

1.4.1. Chỉ số căng thẳng nguồn nước

Nhiều chỉ số căng thẳng nguồn nước đã được phát triển, phản ánh khía cạnh khác nhau của quan hệ cung–cầu nước: Chỉ số Falkenmark

(1986) dựa trên lượng nước sẵn có bình quân người, đánh giá nhanh mức độ căng thẳng nguồn nước ở quy mô quốc gia; Chỉ số WTA đo lường tỷ lệ khai thác nước so với tổng tài nguyên tái tạo; Chỉ số WSI có tính đến năng lực xã hội của Ohlsson (2000) đưa thêm chỉ số HDI nhằm phản ánh khả năng thích ứng của từng quốc gia; Các mô hình gần đây (Asheesh, 2015; McNulty, 2016) tính WSI theo nhu cầu dùng nước tổng hợp; Cách tiếp cận của Smakhtin và cộng sự (2005) là bước tiến quan trọng, khi đưa dòng chảy môi trường (EWR) vào công thức:

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

Trong đó:

WU: Tổng lượng nước khai thác, sử dụng; WR: Tổng lượng nước tái tạo; EWR: Dòng chảy môi trường.

Các chỉ số như Falkenmark hay WTA phù hợp ở quy mô quốc gia nhưng thiếu độ chi tiết cho quy mô lưu vực hoặc đô thị. Ngược lại, WSI có tính đến yêu cầu môi trường phù hợp để kết hợp với LCA trong đánh giá hệ thống cấp nước đô thị, đặc biệt trong bối cảnh *BĐKH* và xâm nhập mặn.

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

Nhiều công cụ được áp dụng trong ngành nước, bao gồm: EIA– đánh giá tác động môi trường ở quy mô dự án; SEA– đánh giá ở quy mô chiến lược; MCA (Multi-Criteria Analysis) – so sánh các phương án theo tiêu chí kinh tế, xã hội, môi trường; LCA công cụ xem xét các tác động môi trường trong suốt vòng đời, từ khai thác tài nguyên đến xử lý thải bỏ.

Trong đó, LCA được xem là công cụ mạnh nhất để lượng hóa tác động môi trường của hệ thống cấp nước.

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

Cấu trúc LCA trong hệ thống nước gồm 4 giai đoạn chính:

(1) Xác định mục tiêu và phạm vi – xác định ranh giới hệ thống, đơn vị chức năng và các kịch bản đề xuất.

(2) Kiểm kê vòng đời (LCI): thu thập và lượng hóa dữ liệu đầu vào

điện năng, hóa chất, lưu lượng và phát thải.

(3) (4) Đánh giá tác động và diễn giải (LCIA) – tính toán các chỉ số tác động và các tác động đến hệ sinh thái, sức khỏe con người và tài nguyên thiên nhiên.

Các phương pháp LCIA được áp dụng phổ biến gồm ReCiPe, CML-IA, Eco-Indicator 99, EDIP, tùy thuộc phạm vi và mục tiêu nghiên cứu.

*** Tổng quan nghiên cứu quốc tế cho thấy:**

- Giai đoạn đầu (1995–2005) tập trung vào xử lý nước thải và sản xuất nước uống. Từ năm 2005 trở lại, LCA mở rộng cho toàn bộ hệ thống nước đô thị.

- Các kịch bản phân thành 3 nhóm: (i) thay đổi công nghệ hoặc hóa chất; (ii) thay đổi nguồn nước thô hoặc nguồn tiếp nhận; (iii) thay đổi hành vi người sử dụng hoặc cơ cấu năng lượng.

- Phần lớn các nghiên cứu đều cho thấy giai đoạn xử lý nước thải (WWT) và sản xuất nước sạch (DWP) là những điểm nóng môi trường.

*** Một số các điểm chính của các nghiên cứu:**

Các nghiên cứu LCA về hệ thống cấp nước cho thấy: (1) BDKH và phú dưỡng là 2 tác động được đánh giá phổ biến nhất; (2) Tiêu thụ năng lượng dao động 0,58–2,11 kWh/m³; (3) Phát thải chủ yếu gồm CO₂, CH₄, NO_x và các chất gây phú dưỡng; (4) SimaPro là công cụ phân tích được sử dụng rộng rãi. Tuy nhiên, phần lớn nghiên cứu tập trung ở châu Âu, thiếu dữ liệu cho Đông Nam Á và Việt Nam. LCA có đánh giá định lượng nhưng chưa thể phản ánh đặc thù khan hiếm nước theo từng địa phương.

1.5. Khoảng trống trong nghiên cứu

Tại Việt Nam, LCA còn hạn chế, đặc biệt là trên hệ thống cấp nước. Còn chỉ số WSI cho phép đánh giá mức độ khai thác nước so với khả năng cung cấp tái tạo của lưu vực. WSI và LCA thường được áp dụng độc lập, chưa có nghiên cứu kết hợp cho hệ thống cấp nước trong bối cảnh xâm nhập mặn và BDKH, dẫn đến: Thiếu liên kết giữa áp lực nguồn nước và tác động vòng đời; Hạn chế trong việc hỗ trợ ra quyết định; Khoảng trống về tính địa phương hóa: WSI cung cấp thông tin theo vùng nhưng chưa được kết hợp vào phân tích vòng đời để phản ánh đặc thù địa lý trong đánh giá.

Pfister và cộng sự (Ridoutt & Pfister, 2014) đã đề xuất cách tiếp cận

mới trong đánh giá vòng đời. Chỉ số này được gọi là Dấu chân khan hiếm nguồn nước (WSF) và được tính theo công thức:

$$WSF = WC \times WSI \text{ (Ridoutt \& Pfister, 2014)}$$

Trong đó:

- WSF: Dấu chân khan hiếm nguồn nước.
- WC: Water Consumption (lượng nước tiêu thụ, đơn vị: m³)
- WSI (chỉ số căng thẳng nguồn nước tại địa phương tính toán)

Công thức tính WSF là kết quả trong phương pháp LCA hiện đại, giá trị WSF càng cao, tác động đến an ninh nguồn nước càng lớn.

1.6. Tiểu kết chương 1

Các chỉ số như WSI hay tỷ lệ khai thác nước hiện nay chủ yếu dựa trên dòng chảy trung bình năm nên chưa phản ánh biến động mùa và thường bỏ qua dòng chảy môi trường. Do đó, đánh giá khan hiếm nước cần được thực hiện chi tiết hơn theo không gian – thời gian, có xét đến đặc trưng mùa và nhu cầu sinh thái để phản ánh đúng hiện trạng và khả năng khai thác bền vững. Xu hướng tích hợp WSI vào LCA, phù hợp khuyến nghị ISO 14046, là cách tiếp cận hiện đại giúp liên kết phát thải, sử dụng tài nguyên và áp lực khan hiếm trong một hệ thống đánh giá thống nhất.

Từ tổng quan các nghiên cứu, luận án này đề xuất xây dựng mô hình tích hợp WSI–LCA để lượng hóa toàn diện tác động môi trường của hệ thống cấp nước đô thị, đặc biệt trong điều kiện BĐKH và xâm nhập mặn. Khung nghiên cứu gồm ba cấu phần chính:

- Đánh giá căng thẳng nguồn nước (WSI) có xét đến dòng chảy môi trường (Smakhtin, 2005);

- Đánh giá tác động môi trường bằng LCA, trong đó lượng nước tiêu thụ được điều chỉnh theo mức độ khan hiếm (WSI) tại từng vị trí khai thác;

Cách tiếp cận này cho phép phản ánh đồng thời khía cạnh tài nguyên và môi trường, tạo nền tảng cho hệ thống hỗ trợ ra quyết định trong quy hoạch và quản lý cấp nước đô thị theo hướng bền vững, thích ứng với biến đổi khí hậu.

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

2.1. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu

Đối tượng: 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 thực hiện tại NMN Cầu Đỏ với 03 dây chuyền xử lý: dây chuyền công suất 50.000 m³/ngày (2002); Dây chuyền công suất 120.000 m³/ngày (2008); Dây chuyền thứ 3 công suất 120.000 m³/ngày (7/2021).

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp thống kê và kế thừa

Phương pháp thống kê, kế thừa và hồi cứu được sử dụng xuyên suốt trong luận án nhằm tổng hợp các kết quả nghiên cứu đã công bố và xác định khoảng trống trong nghiên cứu. Luận án thực hiện:

- Hồi cứu hệ thống các nghiên cứu trong và ngoài nước về LCA cho hệ thống cấp nước với cùng đơn vị chức năng và phạm vi tương đồng.
- Tổng hợp, đối chiếu các mô hình và cách tính WSI.
- Kế thừa dữ liệu thứ cấp về tiêu thụ điện, hóa chất, phát thải và lưu lượng khai thác từ các báo cáo của ngành nước Đà Nẵng và cơ sở dữ liệu Ecoinvent.

2.2.2. Mô hình tính toán dòng chảy về

Mô hình dòng chảy MIKE-SHE: Luận án sử dụng mô hình thủy văn phân bố MIKE-SHE để xác định dòng chảy tự nhiên trên lưu vực Vu Gia – Thu Bồn. Kết quả mô phỏng cung cấp dữ liệu đầu vào cho tính toán chỉ số căng thẳng nguồn nước (WSI) và xây dựng các kịch bản cấp nước.

2.2.3. Mô hình SimaPro

Mô hình vòng đời SimaPro: Đánh giá tác động môi trường được thực hiện bằng phần mềm SimaPro với cơ sở dữ liệu Ecoinvent 3 và phương pháp ReCiPe 2016. Đơn vị chức năng là 1 m³ nước sạch.

2.2.4. Khảo sát thực tế, thu thập và xử lý số liệu

Các dữ liệu: Bản đồ địa hình, mưa, lưu lượng, mặt cắt sông, phân bố đất và đặc điểm địa chất, mực nước ngầm; Nhu cầu sử dụng nước: Dự báo

dựa trên Quy hoạch chung TP. Đà Nẵng; Dòng chảy môi trường (EWR)

Dữ liệu phục vụ LCA:

Sơ cấp: Lưu lượng nước thô, điện năng tiêu thụ, hóa chất và phát thải tại NMN Cầu Đỏ; Nền (background): Cơ sở dữ liệu Ecoinvent 3.11 tích hợp trong SimaPro, bao phủ chuỗi cung ứng điện năng, hóa chất và vật liệu.

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

Chỉ số WSI được chọn vì phản ánh mức độ khai thác nước gắn với sức chịu tải sinh thái và tích hợp dòng chảy môi trường (EWR). Nghiên cứu áp dụng công thức của Smakhtin (2005), phù hợp khuyến nghị UNEP (2016) và ISO 14046. Kết quả WSI được dùng làm hệ số điều chỉnh trong Dấu chân khan hiếm nước (WSF), quy đổi lượng nước tiêu thụ theo mức khan hiếm địa phương, phản ánh chính xác tác động khai thác trong bối cảnh BĐKH, xâm nhập mặn và mùa khô tại Đà Nẵng.

2.2.6. Phương pháp đánh giá vòng đời

LCA gồm 4 bước: (1) xác định mục tiêu – phạm vi, (2) kiểm kê vòng đời, (3) đánh giá tác động, (4) diễn giải kết quả. Đơn vị chức năng là 1 m³ nước sạch, ranh giới từ khai thác nước thô đến xử lý.

Trong LCIA, ReCiPe 2016 được lựa chọn vì bao quát 18 hạng mục tác động, kết hợp phân tích chi tiết và điểm kết thúc tác động, cho phép mô phỏng, so sánh và chuẩn hóa kết quả, phù hợp với nghiên cứu hệ thống cấp nước đô thị.

2.3. Tiểu kết chương 2

Chương 2 trình bày đối tượng, phạm vi nghiên cứu cùng với nguồn dữ liệu và phương pháp nghiên cứu được sử dụng. Các phương pháp bao gồm mô hình thủy văn MIKE-SHE để tính toán dòng chảy sẵn có, phương pháp kiểm kê và đánh giá vòng đời bằng phần mềm SimaPro với phương pháp đánh giá ReCiPe 2016, kết hợp với chỉ số WSI nhằm phản ánh mức độ căng thẳng nguồn nước trong bối cảnh xâm nhập mặn và BĐKH. Đồng thời, chương này cũng nêu cách xác định nhu cầu nước, dòng chảy môi trường và cách tích hợp WSI vào kết quả LCA để lượng hóa tác động môi trường tại quy mô địa phương.

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

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

Về thực tiễn, mô hình này giúp đồng thời đánh giá phát thải – năng lượng ở cấp độ toàn cầu và mức độ khan hiếm nước tại từng địa phương, hỗ trợ so sánh và lựa chọn các kịch bản cấp nước bền vững.

Về khoa học, LCA theo ISO 14040/14044 cung cấp nền tảng đánh giá vòng đời, trong khi WSI dựa trên tương quan giữa nhu cầu khai thác và lượng nước tái tạo sau khi trừ dòng chảy môi trường. Khi tích hợp vào LCA, WSI được dùng như hệ số đặc trưng để quy đổi lượng nước tiêu thụ theo mức độ khan hiếm. Mô hình đánh giá gồm 5 bước chính.

Mô hình đánh giá sử dụng WSI được phân hạng từ mức khai thác nhẹ đến khan hiếm nghiêm trọng để phản ánh mức độ chịu tải của lưu vực. Trong bước kiểm kê vòng đời (LCI), dữ liệu về điện năng, hóa chất, phát thải và lưu lượng khai thác được thu thập từ đối tượng nghiên cứu và cơ sở dữ liệu Ecoinvent 3.11. Bước đánh giá tác động được thực hiện bằng ReCiPe 2016 trong phần mềm SimaPro, nơi WSI được tích hợp để tính Dấu chân khan hiếm nước WSF, điều chỉnh lượng nước tiêu thụ theo mức độ khan hiếm của từng địa phương. Giai đoạn diễn giải, kết quả được phân tích để so sánh các kịch bản, nhận diện điểm nóng môi trường và đề xuất giải pháp.

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

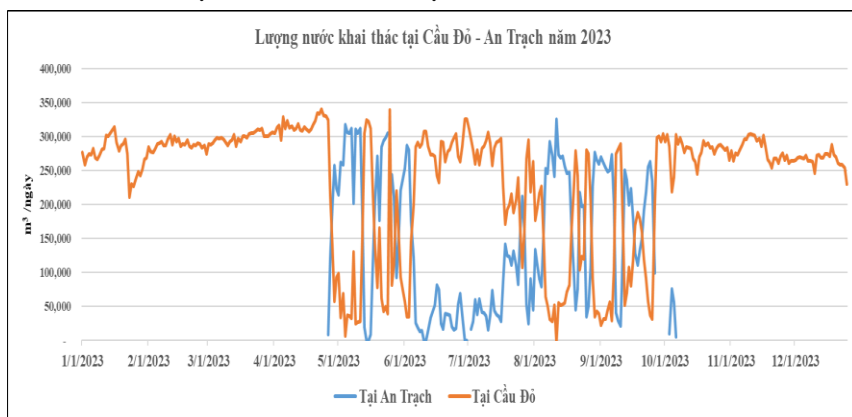
Nghiên cứu áp dụng mô hình tích hợp WSI và LCA nhằm đánh giá toàn diện các tác động môi trường và mức độ khan hiếm nguồn nước trong hoạt động khai thác – xử lý nước cấp tại Nhà máy nước (NMN) Cầu Đỏ.

Đơn vị chức năng: 1 m³ nước sạch đạt chuẩn QCVN 01-1:2024/BYT. Ranh giới: (1) khai thác và dẫn nước thô; (2) xử lý nước; (3) xử lý nội bộ.

3.2.2. Tính toán WSI

Dựa vào chuỗi dữ liệu 37 năm (1987–2023), cho thấy nhiều giai đoạn thiếu nước kéo dài từ tháng 5 đến hết mùa khô.

Dòng chảy mùa khô có xu hướng giảm do BĐKH, suy giảm rừng đầu nguồn và điều tiết hồ chứa, dẫn đến nguy cơ xâm nhập mặn sâu, thiếu nước sinh hoạt và suy giảm hệ sinh thái. Tại vùng cửa sông, từ tháng 2–7 mực nước xuống thấp làm mặn xâm nhập kéo dài, ảnh hưởng trực tiếp đến khai thác nước của nhà máy Cầu Đỏ, thể hiện qua lượng nước khai thác tại Cầu Đỏ và An Trạch năm 2023.

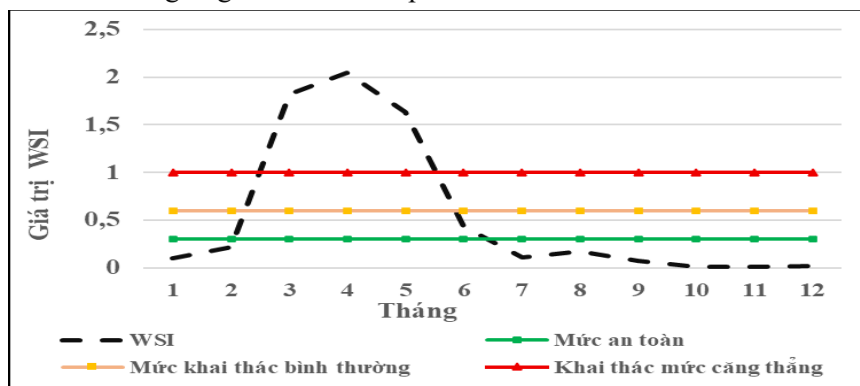


Hình 3.1. Lượng nước khai thác tại cửa thu nhà máy Cầu Đỏ và đập An Trạch năm 2023

Trong 4 tháng đầu năm 2023, cửa thu Cầu Đỏ khai thác ổn định 250.000–320.000 m³/ngày. Từ tháng 5–9, do xâm nhập mặn tăng, trạm nhiều lần phải dừng khai thác, khiến An Trạch phải tăng công suất lên 300.000–350.000 m³/ngày, làm chi phí điện tăng và rủi ro an ninh nguồn nước lớn hơn. So với năm 2020 – năm kiệt nhất giai đoạn 1987–2023 – lượng nước về tháng 4 chỉ đạt 17,5 m³/s, thấp hơn nhiều so với nhu cầu cấp nước hạ lưu.

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%. Tổng lượng nước có thể sử dụng tại đập 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.

Hình 3.2 mô tả sự biến động của chỉ số căng thẳng nguồn nước (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%.

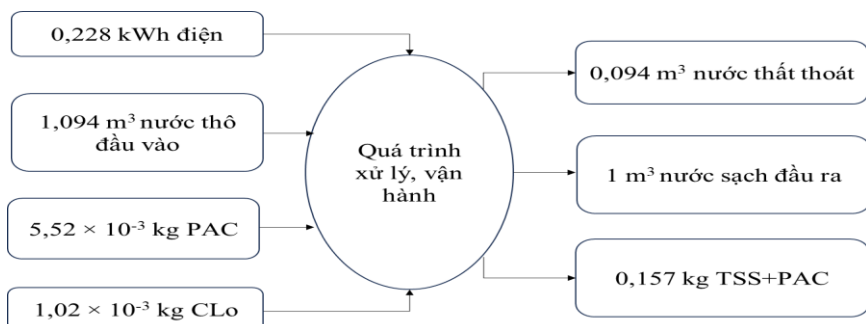


Hình 3.2. Giá trị WSI tại cửa thu nước Cầu Đỏ

Biểu đồ cho thấy nguồn nước tại Cầu Đỏ luôn căng thẳng trong mùa khô, đặc biệt từ tháng 3–8 khi WSI trung bình đạt 1,035. Tháng 4 là thời điểm nghiêm trọng nhất, buộc phải lấy phần lớn nước từ An Trạch do Cầu Đỏ nhiễm mặn. Lưu vực này vốn cung cấp chủ yếu cho nhu cầu sinh hoạt và công nghiệp của Đà Nẵng, trong khi lượng nước về thấp và chịu tác động mạnh của xâm nhập mặn, khiến rủi ro khan hiếm càng gia tăng.

3.2.3. Kiểm kê vòng đời

Nghiên cứu sử dụng hai nhóm dữ liệu: (a) **Dữ liệu cụ thể** từ NMN Cầu Đỏ, gồm lưu lượng nước thô – nước sạch, điện năng và hóa chất trong năm 2023, đảm bảo độ tin cậy cho mô phỏng hệ thống; (b) **Dữ liệu nền** từ Ecoinvent v3.11 trong SimaPro 10, dùng để kiểm kê và tính toán tác động môi trường theo các phương pháp LCIA quốc tế.



Hình 3.3. Sơ đồ dữ liệu tại nhà máy Cầu Đỏ

Hệ số phát thải sử dụng trong mô hình tính SimaPro:

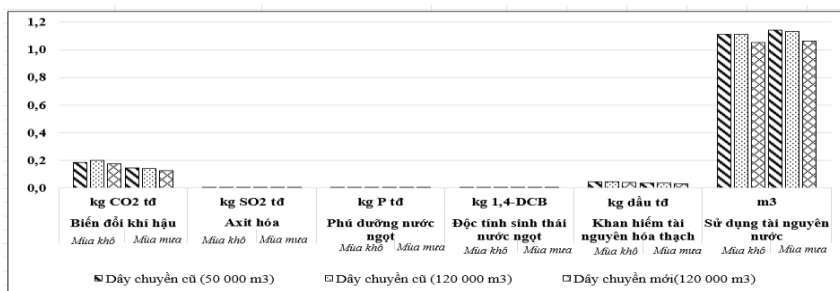
Bảng 3.1. Hệ số phát thải của các nguồn

Nguồn	Hệ số phát thải (EF)	Nguồn
Điện sử dụng	0,6592 tCO ₂ /MWh	(Cục biến đổi khí hậu, 2024)
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
COD	0,25 kg CH ₄ /kg COD	IPCC, 2006

Hệ số phát thải được cập nhật theo công bố của Cục Biến đổi khí hậu (2024). Dữ liệu PAC được sử dụng ở mức GLO do Ecoinvent không có dữ liệu riêng cho Việt Nam và hóa chất này chủ yếu có nguồn cung quốc tế. Clo khử trùng được mô phỏng bằng dữ liệu sản xuất theo công nghệ màng trong Ecoinvent v3.11, phù hợp với điều kiện Việt Nam.

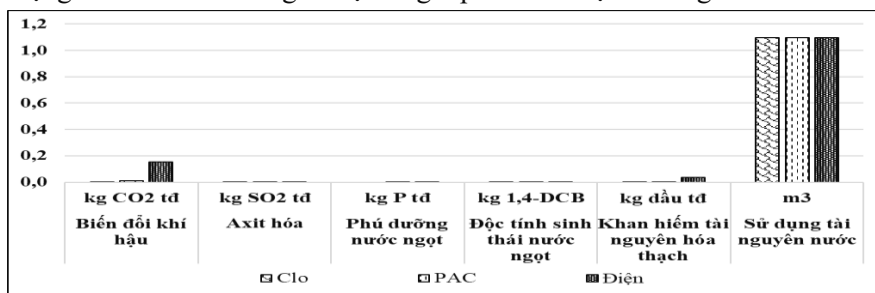
3.2.4. Đánh giá tác động vòng đời và diễn giải kết quả

Kết quả LCI cho thấy điện tiêu thụ tăng vào mùa khô do phải bơm nước từ An Trạch; Hai dây chuyền cũ tiêu thụ điện cao hơn (0,241–0,245 kWh/m³). 6 nhóm tác động môi trường chính: BĐKH, axit hóa, phú dưỡng và độc tính sinh thái nước ngọt, khan hiếm hóa thạch, tiêu thụ tài nguyên nước. Kết quả cho thấy dây chuyền mới 120.000 m³/ngày có mức tác động môi trường thấp hơn rõ rệt so với hai dây chuyền cũ. Phát thải KNK giảm khoảng 11,5%, các tác động axit hóa và khan hiếm tài nguyên hóa thạch giảm 11–13%.



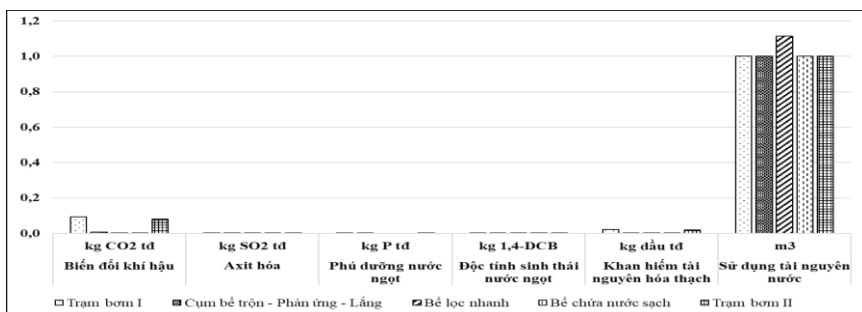
Hình 3.4. Tác động của quá trình vận hành NMN Cầu Đổ đến môi trường

Điện năng 0,17–0,33 kWh/m³ và phát thải 0,1767–0,1997 kg CO₂ td/m³, thấp hơn tại Thổ Nhĩ Kỳ, tương đồng với Scotland, Indonesia và Trung Quốc. Kết quả này khẳng định hiệu quả vận hành và tính bền vững của nhà máy. Mở rộng và chuẩn hóa theo dây chuyền mới sẽ giảm phát thải CO₂, tiết kiệm năng lượng – hóa chất và hướng tới hệ thống cấp nước đô thị thích ứng BĐKH.



Hình 3.5. Tác động liên quan đến việc sử dụng hóa chất và năng lượng

Điện năng đóng góp chính vào các tác động môi trường tại NMN, chi phối phát thải KNK, khan hiếm tài nguyên hóa thạch và các tác động khác. Sử dụng nước tương đối đồng đều giữa các đầu vào. Giải pháp giảm tác động tập trung vào tối ưu hóa hiệu suất bơm, xử lý, truyền dẫn, tăng tỷ lệ điện tái tạo và kiểm soát hóa chất, đặc biệt mùa khô, nhằm giảm KNK, tiết kiệm chi phí và nâng cao tính bền vững cho hệ thống cấp nước Đà Nẵng. Kết quả 06 tác động của từng cụm xử lý trên dây chuyền 120.000 m³ cũ được thể hiện ở hình sau:



Hình 3.6. Tác động của từng cụm xử lý

Tác động môi trường tại NMN Cầu Đỏ phân bố không đồng đều: trạm bơm 1 và 2 chiếm 93% phát thải KNK và khan hiếm năng lượng hóa thạch, đồng thời là nguồn chính gây axit hóa. Mùa khô làm tăng điện năng và hóa chất sử dụng, dẫn đến phát thải KNK đạt đỉnh 0,2474 kg CO₂ td/m³, khan hiếm năng lượng hóa thạch cao gấp đôi mùa mưa, và áp lực nước thô, WSI > 1.

Đề lượng hóa tác động khan hiếm nước trong khung LCA, nghiên cứu sử dụng chỉ số WSI = 1,035 làm hệ số đặc trưng (Characterization Factor – CF), theo Ridoutt & Pfister (2010, 2014). Áp dụng công thức:

$$\begin{aligned} \text{WSF} &= \text{WC} \times \text{WSI} = 1,133 \times 1,035 \\ &= 1,17 \text{ m}^3 \text{ nước-tđ/m}^3 \text{ nước sạch} \end{aligned}$$

Trong đó: - WC: lượng nước thô tiêu thụ để sản xuất 1 m³ nước sạch (1,133 m³/m³); WSI: chỉ số khan hiếm nước tại Cầu Đỏ trong mùa khô (1,035).

Mỗi 1 m³ nước sạch sản xuất tại NMN Cầu Đỏ mùa khô tương đương 1,17 m³ nước theo mức độ khan hiếm (WSF > 1), cho thấy nguồn nước hạ lưu sông Vu Gia đang khai thác vượt khả năng tái tạo, rủi ro cao.

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

3.3.1. Kiểm định mô hình (Validation)

Mô hình thủy văn MIKE-SHE được kiểm định bằng cách đối chiếu kết quả mô phỏng lượng nước về với số liệu vận hành khai thác thực tế tại TP. Đà Nẵng qua 2 năm đại diện: Năm 2023 và 2020; Mô hình tái hiện chính xác diễn biến suy giảm dòng chảy mùa khô tại cửa thu Cầu Đỏ.

Tại trạm Thành Mỹ và Nông Sơn các chỉ số đều đạt ngưỡng tiêu

chuẩn, khẳng định mô hình kiểm soát tốt sai số và hoàn toàn thống nhất với các Quy hoạch cấp nước TP. Đà Nẵng và Quy hoạch lưu vực sông Vu Gia - Thu Bồn.

3.3.2. Phân tích độ nhạy của các tham số đầu vào

Mục tiêu phân tích nhạy cảm cho thấy điện năng là biến quan trọng nhất ảnh hưởng đến LCA; biến $\pm 10\%$ điện năng làm phát thải CO_2 thay đổi gần $\pm 12\%$, xác định điện là “điểm nóng môi trường” cần ưu tiên tiết kiệm và dùng năng lượng tái tạo.

3.3.3. Phân tích tính không chắc chắn của dữ liệu

Được thực hiện kết hợp giữa Ma trận phá hệ Pedigree (Weidema) và mô phỏng Monte Carlo (10.000 vòng lặp) theo ISO 14044:

- **Đánh giá chất lượng dữ liệu (Pedigree Matrix):** Dữ liệu điện năng, lượng nước, hóa chất (PAC, Clo) thu thập trực tiếp tại NMN Cầu Đỏ (2023) và hệ số phát thải điện Việt Nam (2024) có độ tin cậy cao.

- **Mô phỏng ngẫu nhiên Monte Carlo:** Thực hiện mô phỏng Monte Carlo 10.000 vòng lặp trên dữ liệu mùa khô của dây chuyền 120.000 $\text{m}^3/\text{ngày}$ cũ tại NMN Cầu Đỏ. Mô hình tích hợp WSI-LCA ổn định và phản ánh hợp lý mối quan hệ giữa phát thải – tiêu thụ năng lượng – khan hiếm nước.

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 lượng hóa 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 “ m^3 nước theo mức độ khan hiếm, phản ánh chính xác 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.

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

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

Các kịch bản được xây dựng dựa trên phân bổ nguồn nước, công nghệ xử lý, tái sử dụng nước và nguồn năng lượng sử dụng:

- Kịch bản S1 (Base): Khai thác chủ yếu tại cửa thu Cầu Đỏ, bổ sung từ An Trạch trong mùa khô; sử dụng điện lưới thông thường.

- Kịch bản S2: Bổ sung khử mặn RO (nước lợ), đảm bảo nguồn nước thô nhưng tiêu thụ năng lượng rất cao.

- Kịch bản S3: Kết hợp tái sử dụng nước thải (Hòa Xuân), giảm phần nào áp lực nguồn nước ngọt.

- Kịch bản S4: Bổ sung nhà máy tại đập dâng An Trạch.

- Kịch bản S5: Giữ nguyên nguồn như S1 nhưng cải tiến công nghệ và sử dụng năng lượng mặt trời áp mái.

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 LCA và tác động nước (WSF) đối với 05 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 kết hợp WSI và thực hiện so sánh, tổng hợp, lựa chọn giữa các kịch bản.

4.2.1. Mục tiêu và phạm vi

Mục tiêu là so sánh hiệu quả môi trường của 5 kịch bản cấp nước đô thị Đà Nẵng đến 2045, trong bối cảnh BĐKH và xâm nhập mặn.

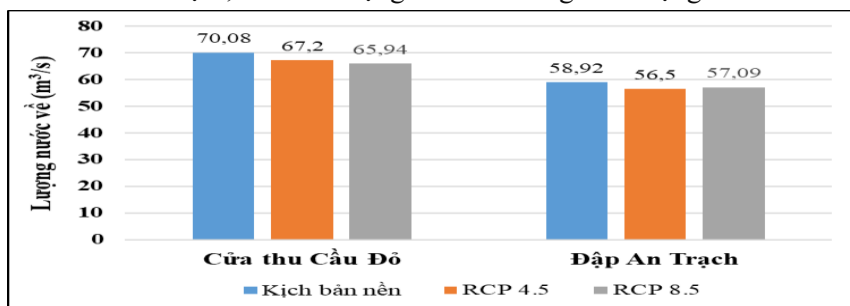
Phân tích gồm: Tính WSI cho từng nguồn mùa kiệt để đánh giá căng thẳng nước; Kiểm kê vòng đời (LCI) gồm điện năng, hóa chất, nước nội bộ và phát thải KNK; Đánh giá tác động (LCIA) theo ReCiPe 2016.

Ranh giới hệ thống: từ khai thác nước thô đến cấp nước sạch ra mạng, bao gồm xử lý, vận hành, năng lượng và hóa chất. Đơn vị chức năng: 1 m³ nước sạch, đảm bảo so sánh nhất quán giữa các kịch bản.

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

WSI được tính cho từng nguồn nước trong 5 kịch bản cấp nước Đà Nẵng, tập trung vào mùa kiệt (tháng 3–8) khi lưu lượng thấp và nhu cầu cao. Phân tích dựa trên kịch bản BĐKH cực đoan RCP 8.5, với dữ liệu đầu vào gồm: lưu lượng nước về tại Cầu Đỏ và An Trạch (tần suất 95%), nhu cầu khai thác nước thô theo kịch bản, và dân số dự báo 2,5 triệu người với mức cấp nước 160 l/người/ngày đến năm 2045. Kịch bản BĐKH xét các biến đổi nhiệt độ, lượng mưa và hiện tượng khí hậu cực đoan trong thế kỷ 21.

Cả hai kịch bản RCP 4.5 và RCP 8.5 đều dự báo lưu lượng nước về tại cửa thu Cầu Đỏ giảm mạnh từ tháng 2–8, với RCP 8.5 giảm sâu hơn, đặc biệt tháng 5–7. Trong khi đó, nhu cầu nước mùa hè tăng do nhiệt độ cao và mùa du lịch, làm tình trạng thiếu nước nghiêm trọng hơn.



Hình 4.1. Lưu lượng nước về ứng với tần suất 95% ứng với các kịch bản BĐKH

Với tần suất 95%, kịch bản RCP 8.5 cho thấy dòng chảy cực đoan và lưu lượng nước về thấp hơn RCP 4.5, phản ánh tác động mạnh của BĐKH và nguy cơ thiếu nước nghiêm trọng mùa khô. Theo quy hoạch, nhu cầu nước Đà Nẵng năm 2045 là 920.000 m³/ngày, trong khi khai thác tại Cầu Đỏ và An Trạch là 420.000 m³/ngày. Trên cơ sở này, WSI được tính cho từng kịch bản cấp nước của thành phố.

Chỉ số WSI được xác định theo công thức của Smakhtin. Mỗi kịch bản được xây dựng tương ứng với các tổ hợp nguồn nước khác nhau, vì vậy giá trị WSI của từng kịch bản sẽ phản ánh trực tiếp mức độ căng thẳng nguồn nước của hệ thống cấp nước thành phố trong các điều kiện khác nhau. Kết quả WSI của 5 kịch bản vào được thể hiện ở bảng 4.1.

Bảng 4.1. Tổng hợp giá trị WSI vào mùa khô của 5 kịch bản cấp nước

Kịch bản	S1	S2	S3	S4	S5
WSI	2,69	1,56	1,60	0,58	2,69

4.2.3. Kiểm kê vòng đời.

Kiểm kê vòng đời (LCI) được thực hiện cho 5 kịch bản cấp nước (S1–S5) tại Đà Nẵng, thu thập dữ liệu về nguồn nước thô, công suất khai thác, điện năng, hóa chất xử lý, nước nội bộ và hệ số phát thải điện lưới. Kết quả cho thấy:

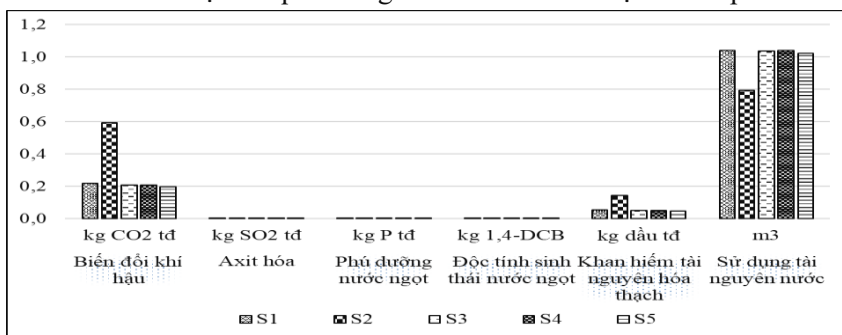
Điện năng: S2 tiêu thụ cao nhất (2,6 kWh/m³), S1 và S5 thấp hơn.

Hóa chất: Sử dụng công nghệ khử mặn và tiên tiến (S2, S5) cần thêm hóa chất phụ trợ, ảnh hưởng tới độc tính và phú dưỡng.

Nguồn năng lượng: S5 tích hợp 30% NLMT, giảm phát thải KNK so với dùng hoàn toàn điện lưới.

4.2.4. Đánh giá tác động vòng đời và diễn giải kết quả của các kịch bản

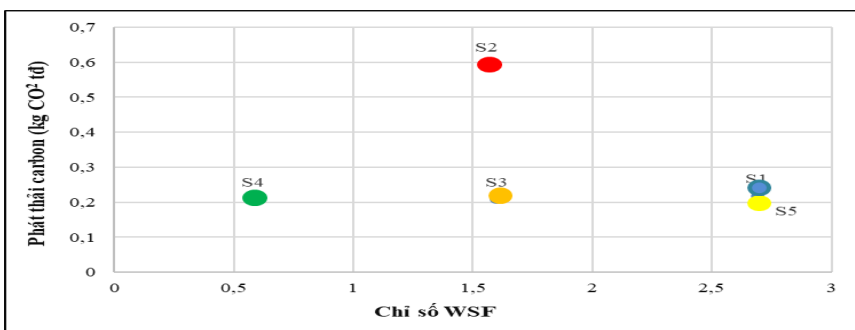
Hình 4.2 thể hiện kết quả đánh giá WSI–LCA cho 5 kịch bản cấp nước:



Hình 4.2. Kết quả 6 tác động của 5 kịch bản cấp nước được xây dựng

Tác động trung gian: BĐKH và khai thác tài nguyên hóa thạch chiếm tỷ trọng lớn. S2 có tác động cao nhất do tiêu thụ năng lượng lớn, S5 thấp nhất.

Kết quả kết hợp WSI và phát thải carbon của 5 kịch bản thể hiện ở hình 4.3:



Hình 4.3. Kết quả kết hợp WSF và phát thải carbon của 5 kịch bản

Chỉ số WSF (căng thẳng nước): S1: 2,80 m³ – áp lực cao tại Cầu Đỏ; S2: 1,24 m³ – giảm căng thẳng nhờ nguồn nước lợi, nhưng chi phí năng lượng cao; S3: 1,66 m³; S4: 0,60 m³ – giảm đáng kể áp lực nguồn nước; S5: 2,74 m³ – duy trì áp lực cao.

S2 chỉ phù hợp làm phương án dự phòng trong tình huống cực đoan. S1 và S5 không bền vững dài hạn do phụ thuộc nguồn nước Cầu Đỏ. S3 và S4 cân bằng giữa năng lượng, phát thải và bảo vệ nguồn nước; S4 (kết hợp An Trạch) là phương án tối ưu 2030–2045, đảm bảo an toàn cấp nước mùa khô, giảm áp lực khai thác và duy trì mức phát thải hợp lý.

4.3. Tiểu kết chương 4

Chương 4 tập trung vào việc mô phỏng, so sánh và định lượng 05 kịch bản cấp nước cho TP. Đà Nẵng giai đoạn 2030–2045 thông qua mô hình tích hợp WSI–LCA. Các kết quả chính bao gồm: Kịch bản khử mặn (S2 dù giúp giảm hơn 40% áp lực nguồn nước (chỉ số WSI), nhưng lại gây gánh nặng môi trường lớn nhất với mức phát thải carbon cao gấp 2,7 lần kịch bản cơ sở. Giải pháp mở rộng hạ tầng tại đập dâng An Trạch có hiệu quả vượt trội. Giảm tới 78% gánh nặng tài nguyên nước mùa khô tại Cầu Đỏ (chỉ số WSI giảm xuống 0,6 m³ nước tđ). Đặc biệt, kịch bản này không làm gia tăng phát thải carbon (thấp hơn cả kịch bản cơ sở S1).

Nghiên cứu là minh chứng thực nghiệm cho tính ứng dụng của mô hình tích hợp WSI–LCA trong việc cung cấp luận cứ khoa học để ra quyết định quy hoạch hệ thống cấp nước bền vững cho các đô thị đặc thù như Đà Nẵng.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Kết quả nghiên cứu đã thiết lập thành công mô hình tích hợp WSI – LCA. Lần đầu tiên lượng hóa đồng thời "áp lực tài nguyên nước địa phương" và "tác động môi trường toàn cầu". Mô hình có độ tin cậy cao và có khả năng áp dụng cho các lưu vực tương tự.

Kết quả đánh giá hiện trạng hệ thống cấp nước Đà Nẵng: Điểm nóng môi trường nằm ở giai đoạn vận hành, trong đó phát thải từ tiêu thụ điện chiếm tới hơn 90% tổng lượng phát thải carbon; Dây chuyền sản xuất mới giúp giảm 11–13% phát thải so với dây chuyền cũ; Mùa khô (tháng 3 – tháng 8) có chỉ số căng thẳng nguồn nước (WSI) rất cao (1,035). Do tác động của xâm nhập mặn và nhu cầu bơm nước từ An Trạch, phát thải khí nhà kính (KNK) vào tháng 5 cao hơn 70% so với tháng 12.

Kết quả mô phỏng các kịch bản đến năm 2045: Kịch bản tối ưu (S4), dịch chuyển cấu trúc nguồn về phía thượng lưu (đập dâng An Trạch) là phương án bền vững nhất vì: Giảm 78% gánh nặng tài nguyên nước; Không làm tăng phát thải carbon (thấp hơn kịch bản cơ sở); Công nghệ khử mặn dù giải quyết được an ninh nguồn nước nhưng lại gây gánh nặng môi trường cực lớn khi phát thải carbon cao gấp 2,7 lần.

2. Kiến nghị

Tích hợp công cụ mới vào quy trình thẩm định, lựa chọn các phương án cấp nước đô thị. Đặc biệt áp dụng cho các đô thị ven biển đang đối mặt với thách thức kép là xâm nhập mặn và biến động dòng chảy mùa kiệt (tương tự Đà Nẵng).

Tăng cường hệ thống quan trắc để thu thập dữ liệu dài hạn và đồng bộ về: thủy văn (dòng chảy, độ mặn) và vận hành (điện năng, hóa chất, phát thải bùn). Nâng cao độ chính xác cho công tác kiểm kê vòng đời (LCI) và độ tin cậy của các mô hình dự báo.

Mở rộng phạm vi: Không chỉ dừng lại ở sản xuất nước mà cần đánh giá toàn diện chu trình nước đô thị, bao gồm cả khâu phân phối, tiêu thụ và xử

lý nước thải.

Điều chỉnh mô hình theo các biến số mới về quy hoạch đô thị, nhu cầu nước và các kịch bản biến đổi khí hậu cập nhật.

Áp dụng mô hình cho các đô thị khác (như Huế, Quy Nhơn, Hải Phòng...) để kiểm chứng tính linh hoạt và khả năng thích ứng của hệ phương pháp luận đã xây dựng.

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 Dịu 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.