

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT

**BÁO CÁO TỔNG KẾT
ĐỀ TÀI NCKH SINH VIÊN**

**NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP VÀ CÔNG CỤ TÍNH TOÁN PHÁT
THẢI CARBON ÁP DỤNG CHO CÁC KHU ĐÔ THỊ DỌC TUYẾN
ĐƯỜNG SẮT 2A CÁT LINH – HÀ ĐÔNG**

Hà Nội, Tháng 5 năm 2026

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT

**BÁO CÁO TỔNG KẾT
ĐỀ TÀI NCKH SINH VIÊN**

**NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP VÀ CÔNG CỤ TÍNH TOÁN PHÁT
THẢI CARBON ÁP DỤNG CHO CÁC KHU ĐÔ THỊ DỌC TUYẾN
ĐƯỜNG SẮT 2A CÁT LINH – HÀ ĐÔNG**

Trưởng nhóm nghiên cứu	: Nguyễn Minh Đức	Lớp: DCTDTD68_06
Thành viên tham gia thực hiện	: Trần Thị Huyền My	Lớp: DCTDQDTBDS69B
	: Đâu Linh Linh	Lớp: DCTDQDTBDS69A
	: Nguyễn Tùng Dương	Lớp: DCTDTD68_06
Người hướng dẫn	: GV.ThS Nguyễn Thị Bích Phương	

Hà Nội, Tháng 5 năm 2026

MỤC LỤC

MỤC LỤC	1
DANH MỤC HÌNH ẢNH	3
DANH MỤC BẢNG BIỂU	4
DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT	5
MỞ ĐẦU	6
CHƯƠNG I: TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU PHÁT THẢI CARBON TRÊN THẾ GIỚI VÀ TẠI VIỆT NAM.	14
1.1. Tình hình nghiên cứu phát thải carbon.	14
1.1.1. Tổng quan nghiên cứu phát thải trên thế giới.	14
1.1.2. Tổng quan nghiên cứu phát thải tại Việt Nam.	18
1.2. Tình hình các khu đô thị mới tại Hà Nội theo hướng carbon thấp.	20
1.2.1. Thực trạng phát thải khí nhà kính tại Hà Nội.	20
1.2.2. Tình hình quy hoạch các khu đô thị mới tại Hà Nội theo hướng carbon thấp.	24
1.2.3. Các khu đô thị gắn liền với mô hình TOD trong quy hoạch hệ thống đường sắt đô thị Hà Nội.	28
1.2.4. Các khu đô thị gắn liền với tuyến 2A (Cát Linh – Hà Đông).	29
1.3. Tổng quan các tài liệu, dự án, phương pháp, công cụ tính toán phát thải.	37
1.3.1. Các công trình nghiên cứu trên thế giới.	37
1.3.2. Các công trình nghiên cứu tại Việt Nam.	40
1.4. Vấn đề nghiên cứu của đề tài	42
1.4.1. Giả thiết nghiên cứu.	43
1.4.2. So sánh và lựa chọn bộ phương pháp – công cụ	43
1.4.3. Tính toán phát thải cụ thể cho 1 đơn vị ở lựa chọn.	46
CHƯƠNG II: CƠ SỞ KHOA HỌC	51
2.1. Cơ sở lý thuyết	51
2.1.1. Hệ thống lý thuyết về phát triển đô thị định hướng giao thông (TOD)	51
2.1.2. Đô thị carbon thấp và phương pháp luận tính toán	53
2.2. Cơ sở pháp lý	54
2.3. Cơ sở thực tiễn	56
2.3.1. Cơ sở thực tiễn trên quốc tế	56
2.3.2. Thực trạng tuyến đường sắt 2A và các khu vực nghiên cứu	57
CHƯƠNG III: PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ CÔNG CỤ NGHIÊN CỨU.	62
3.1. Mô tả tiến trình nghiên cứu	62
3.2. Phương pháp chuyên gia	62
3.3. Phương pháp kế thừa	64

3.4 Nhóm phương pháp GIS và phân tích định lượng.....	71
3.5. Phương pháp khảo sát, đo vẽ thực địa	74
3.5.1. Mục đích và phạm vi thực hiện.....	75
3.5.2. Nội dung và chỉ tiêu đo vẽ	75
3.5.3. Quy trình thực hiện	76
3.5.4. Sản phẩm đầu ra	77
3.6. Phương pháp phân tích, đánh giá, tổng hợp	78
3.6.1. Phân tích so sánh.....	78
3.6.2. Phân tích SWOT	79
3.6.3. Sản phẩm đầu ra của phương pháp	81
3.7. Phương pháp phân tích không gian	82
3.7.1. Mục đích lựa chọn phương pháp.....	82
3.7.2. Các bước thực hiện phân tích.....	83
3.7.3. Công cụ hỗ trợ.....	86
3.8. Phương pháp điều tra xã hội học	90
3.8.1. Xác định cỡ mẫu	91
3.8.2. Các bước điều tra xã hội học.....	91
3.8.3. Các thông số cần điều tra	92
3.8.4. Cấu trúc Phiếu điều tra.....	93
3.8.5. Xử lý mẫu phiếu điều tra.....	101
CHƯƠNG IV: KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU	102
4.1. Quan điểm và nguyên tắc.....	102
4.2. Kiểm kê kết quả tính toán phát thải ở trong khu đô thị	103
4.2.1. Chọn khu đô thị nghiên cứu và tìm kiếm giải pháp đặc thù	103
4.2.2. Nghiên cứu phương pháp và công cụ tính toán phát thải carbon.....	105
4.3. Giải pháp giảm phát thải carbon	107
4.3.1. Nhóm giải pháp quy hoạch và tái cấu trúc không gian đô thị.....	107
4.3.2. Nhóm giải pháp giao thông xanh và kết nối dặm cuối	107
4.3.3. Nhóm giải pháp công trình xanh và năng lượng tái tạo	107
4.3.4. Nhóm giải pháp kinh tế carbon và chuyển đổi số	108
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	110

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1: Tổng phát thải CO ₂ và CO ₂ bình quân đầu người theo các khu vực	21
Hình 1.2: Phát thải khí nhà kính của Việt Nam qua các thời kỳ.	22
Hình 1.3: Biểu đồ thể hiện tỉ lệ phát thải khí nhà kính năm 2015 ở Hà Nội của các lĩnh vực.	23
Hình 1.4: Hình ảnh tổng quan khu đô thị mới Linh Đàm	26
Hình 1.5: Hình ảnh tổng quan khu đô thị mới Gamuda.	27
Hình 2.1. Khu vực nghiên cứu TOD quanh các nhà ga tuyến Metro 2A Hà Nội	51
Hình 2.2. Hiện trạng giao thông dọc tuyến Metro 2A tại Hà Nội.....	56
Hình 2.3: Hiện trạng sử dụng vỉa hè và không gian trước các cơ sở kinh doanh dịch vụ.	58
Hình 2.4: Sơ đồ phân tích bán kính phục vụ của Ga Thượng Đình theo mô hình TOD.	59
Hình 2.5: Sơ đồ vị trí Ga Văn Quán và mối liên hệ không gian với các Khu đô thị Mỗ Lao, Văn Quán.....	60

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1: Tổng phát thải/hấp thụ khí nhà kính của 5 lĩnh vực của TP Hà Nội.	22
Bảng 1.2. Tổng phát thải/hấp thụ khí nhà kính của 5 lĩnh vực năm 2030 của thành phố Hà Nội.....	24
Bảng 1.3: So sánh các phương pháp và công cụ theo khung ASI và GPC.	44
Bảng 1.4: so sánh tổng hợp hai kịch bản.	49
Bảng 3.1. Bảng tổng hợp áp dụng phương pháp kế thừa cơ sở pháp lý vào luận án ...	74

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

STT	Từ viết tắt	Nội dung đầy đủ
1	BAU	Business As Usual (Kịch bản phát triển thông thường)
2	TOD	Transit-Oriented Development (Phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng)
3	GHG	Greenhouse Gas (Khí nhà kính)
4	CO ₂	Carbon Dioxide (Khí cacbonic)
5	tCO ₂	Tấn CO ₂ tương đương
6	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Ủy ban Liên chính phủ về Biến đổi khí hậu)
7	UNEP	United Nations Environment Programme (Chương trình Môi trường Liên Hợp Quốc)
8	IEA	International Energy Agency (Cơ quan Năng lượng Quốc tế)
9	ITDP	Institute for Transportation and Development Policy (Viện Chính sách Giao thông và Phát triển)
10	NDC	Nationally Determined Contribution (Đóng góp do quốc gia tự quyết định)
11	FAR	Floor Area Ratio (Hệ số sử dụng đất)
12	EF	Emission Factor (Hệ số phát thải)
13	EC	Energy Consumption (Mức tiêu thụ năng lượng)
14	Scope 1	Phát thải trực tiếp
15	Scope 2	Phát thải gián tiếp từ điện năng
16	Scope 3	Phát thải gián tiếp khác trong chuỗi giá trị
17	QCVN	Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia
18	UBND	Ủy ban nhân dân
19	GTVT	Giao thông vận tải
20	MRT	Mass Rapid Transit (Hệ thống vận tải khối lượng lớn)
21	GIS	Geographic Information System (Hệ thống thông tin địa lý)
22	BĐKH	Biến đổi khí hậu
23	ĐSĐT	Đường sắt đô thị
24	kWh	Kilowatt-hour (Kilowatt giờ)
25	kgCO ₂ /kWh	Kilogram CO ₂ trên mỗi kWh điện tiêu thụ

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu toàn cầu ngày càng diễn biến phức tạp, phát thải khí nhà kính, đặc biệt là CO₂ từ hoạt động đô thị và giao thông vận tải, đang trở thành một trong những nguyên nhân chính gây gia tăng nhiệt độ toàn cầu. Việt Nam đã cam kết đạt mục tiêu phát thải ròng bằng “0” vào năm 2050 tại Hội nghị United Nations Climate Change Conference (COP26). Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết phải kiểm kê, kiểm soát và giảm phát thải carbon trong các lĩnh vực trọng yếu, trong đó có phát triển đô thị và giao thông.

Tại Việt Nam, quá trình đô thị hóa nhanh cùng với sự gia tăng phương tiện giao thông cá nhân đang làm gia tăng đáng kể lượng phát thải CO₂ tại các đô thị lớn. Hà Nội là một trong những đô thị có mật độ dân cư và phương tiện cao, thường xuyên đối mặt với tình trạng ùn tắc giao thông, ô nhiễm không khí và tiêu thụ năng lượng lớn.

Việc đưa vào vận hành tuyến Đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông đánh dấu bước chuyển quan trọng trong phát triển giao thông công cộng khối lượng lớn. Tuy nhiên, hiệu quả giảm phát thải carbon của tuyến đường sắt đô thị không chỉ phụ thuộc vào bản thân hệ thống vận tải mà còn phụ thuộc vào cấu trúc phát triển không gian đô thị dọc tuyến.

Mô hình phát triển đô thị định hướng giao thông công cộng (TOD – Transit-Oriented Development) được xem là giải pháp quan trọng nhằm tối ưu hóa sử dụng đất, giảm phụ thuộc vào phương tiện cá nhân, gia tăng khả năng tiếp cận giao thông công cộng và từ đó giảm phát thải carbon đô thị. Các khu đô thị dọc tuyến Cát Linh – Hà Đông đang hình thành và phát triển mạnh, tạo điều kiện thuận lợi để nghiên cứu áp dụng mô hình TOD gắn với công cụ tính toán phát thải carbon.

Tuy nhiên, hiện nay tại Việt Nam chưa có bộ phương pháp và công cụ tính toán phát thải carbon chuyên biệt cho các khu đô thị phát triển theo định hướng TOD. Do đó, việc nghiên cứu phương pháp và công cụ tính toán phát thải carbon áp dụng cho các khu đô thị dọc tuyến đường sắt 2A Cát Linh – Hà Đông là cần thiết cả về mặt khoa học và thực tiễn.

2. Tính cấp thiết của đề tài

Biến đổi khí hậu đang trở thành thách thức mang tính toàn cầu và có ảnh hưởng trực tiếp đến định hướng phát triển của mỗi quốc gia. Theo các đánh giá khoa học của Intergovernmental Panel on Climate Change, khu vực đô thị là nguồn phát thải khí nhà kính chủ yếu, đặc biệt từ lĩnh vực giao thông vận tải và công trình xây dựng. Việc kiểm soát phát thải trong đô thị vì vậy được xem là trọng tâm của chiến lược giảm phát thải toàn cầu.

Tại Việt Nam, cam kết đạt phát thải ròng bằng “0” vào năm 2050 được công bố tại COP26 đã tạo ra yêu cầu cấp bách phải tái cấu trúc mô hình phát triển kinh tế – xã hội theo hướng phát thải thấp. Cam kết này được cụ thể hóa thông qua:

- Luật Bảo vệ môi trường 2020 (quy định về kiểm kê khí nhà kính và lộ trình thị trường carbon);
- Chiến lược quốc gia về biến đổi khí hậu đến năm 2050;
- Chiến lược quốc gia về tăng trưởng xanh giai đoạn 2021–2030;
- Đóng góp do quốc gia tự quyết định (NDC) cập nhật.

Các văn bản trên đều nhấn mạnh yêu cầu giảm phát thải trong lĩnh vực giao thông và xây dựng, đồng thời thúc đẩy phát triển giao thông công cộng khối lượng lớn và đô thị nén.

Đối với Hà Nội, định hướng phát triển Thủ đô trong Quy hoạch chung và các chương trình hành động đều xác định hệ thống đường sắt đô thị là trục xương sống của mạng lưới giao thông. Tuyến Đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông – tuyến metro đầu tiên của Việt Nam – không chỉ là dự án hạ tầng giao thông mà còn là tiền đề để tái cấu trúc không gian đô thị theo mô hình TOD (Transit-Oriented Development).

Tuy nhiên, thực tiễn cho thấy:

- Các khu đô thị dọc tuyến đang phát triển nhanh nhưng chưa tích hợp đầy đủ tiêu chí TOD;
- Tỷ lệ sử dụng phương tiện cá nhân vẫn cao;
- Chưa có công cụ định lượng để đánh giá tác động phát thải carbon của phương án quy hoạch.

Trong khi đó, theo Luật Bảo vệ môi trường 2020, các lĩnh vực phát thải lớn phải thực hiện kiểm kê khí nhà kính và từng bước tham gia thị trường carbon. Điều này đặt ra yêu cầu cần có phương pháp và công cụ tính toán phát thải ở cấp khu vực, đặc biệt đối với các khu đô thị mới hình thành dọc tuyến metro.

Hiện nay, khoảng trống chính nằm ở chỗ:

- Thiếu phương pháp tính toán phát thải carbon tích hợp giữa giao thông – công trình – vận hành metro ở cấp khu đô thị;
- Chưa có mô hình định lượng gắn trực tiếp các chỉ tiêu TOD (mật độ, hỗn hợp chức năng, modal share) với mức phát thải carbon;
- Chưa có công cụ hỗ trợ ra quyết định khi điều chỉnh quy hoạch dọc hành lang metro.

Nếu không có cơ sở định lượng cụ thể, việc phát triển dọc tuyến metro có nguy cơ đi theo mô hình gia tăng mật độ nhưng không giảm được phát thải, làm giảm hiệu quả đầu tư hạ tầng và không đóng góp tích cực vào mục tiêu Net Zero.

Do đó, đề tài “Nghiên cứu phương pháp và công cụ tính toán phát thải carbon áp dụng cho các khu đô thị dọc tuyến đường sắt 2A Cát Linh – Hà Đông” có tính cấp thiết cao vì:

1. Đáp ứng yêu cầu thực hiện cam kết Net Zero và NDC của Việt Nam;
2. Phù hợp với quy định kiểm kê khí nhà kính theo Luật Bảo vệ môi trường;
3. Hỗ trợ tích hợp yếu tố carbon vào quy hoạch Thủ đô;
4. Tạo cơ sở khoa học cho phát triển TOD gắn với giảm phát thải;
5. Có khả năng nhân rộng cho các tuyến metro khác trong tương lai.

Như vậy, tính cấp thiết của đề tài không chỉ xuất phát từ nhu cầu nghiên cứu học thuật mà còn gắn trực tiếp với yêu cầu chính sách quốc gia, chiến lược phát triển Thủ đô và lộ trình chuyển đổi sang mô hình đô thị phát thải thấp tại Việt Nam.

3. Mục đích nghiên cứu đề tài

3.1. Mục đích tổng quát

Đề tài hướng tới xây dựng một khung phương pháp và công cụ định lượng phát thải carbon ở cấp khu đô thị theo định hướng TOD, áp dụng cho các khu vực dọc tuyến Đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông, qua đó góp phần chuyển đổi mô hình phát triển đô thị tại Hà Nội từ “đô thị phụ thuộc phương tiện cá nhân” sang “đô thị giao thông công cộng – phát thải thấp”.

Mục đích này không chỉ nhằm tính toán lượng phát thải carbon, mà còn thiết lập cơ sở khoa học để tích hợp chỉ tiêu carbon vào quy hoạch, quản lý phát triển đô thị và ra quyết định đầu tư hạ tầng trong bối cảnh Việt Nam thực hiện cam kết Net Zero.

3.2. Mục đích cụ thể

Đề tài tập trung thực hiện các mục tiêu có tính nền tảng và định hướng dài hạn như sau:

- *Xây dựng nền tảng khoa học cho tích hợp carbon vào quy hoạch đô thị*
 - Làm rõ mối quan hệ định lượng giữa các chỉ tiêu TOD (mật độ, hỗn hợp chức năng, tỷ lệ sử dụng metro...) và mức phát thải carbon.
 - Chuyển hóa các yếu tố quy hoạch không gian thành các biến số có thể đo lường và tính toán phát thải.

Qua đó, tạo tiền đề cho việc coi phát thải carbon là một chỉ tiêu kỹ thuật trong quy hoạch, tương tự như chỉ tiêu dân số, mật độ hay hạ tầng.

- *Phát triển mô hình tính toán tích hợp đa lĩnh vực*

Thiết lập mô hình phát thải tích hợp ba hợp phần trọng yếu của đô thị:

$$E_{Total} = E_{Transport} + E_{Building} + E_{Metro}$$

Mô hình này nhằm phản ánh đúng bản chất liên ngành của phát thải đô thị, thay vì tiếp cận đơn lẻ từng lĩnh vực. Đây là bước tiền quan trọng trong việc xây dựng hệ thống đánh giá carbon cấp khu vực.

- *Xây dựng công cụ hỗ trợ ra quyết định dựa trên bằng chứng*

Phát triển công cụ tính toán có khả năng:

- So sánh kịch bản BAU và kịch bản TOD;
- Lượng hóa mức giảm phát thải khi điều chỉnh mật độ và cơ cấu phương tiện;
- Hỗ trợ lựa chọn phương án quy hoạch tối ưu theo tiêu chí phát thải thấp.

Công cụ này hướng tới phục vụ không chỉ nghiên cứu học thuật mà còn ứng dụng trong thẩm định quy hoạch và quản lý phát triển đô thị.

- *Định vị tuyến Cát Linh – Hà Đông như mô hình thí điểm chuyển đổi carbon thấp*

Thông qua ứng dụng tại tuyến Đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông, đề tài đặt mục tiêu:

- Xây dựng một mô hình thí điểm TOD gắn với kiểm soát phát thải;
- Đánh giá khả năng nhân rộng cho các tuyến metro tương lai;
- Góp phần hình thành hành lang phát triển đô thị carbon thấp đầu tiên tại Hà Nội.

- *Góp phần thực hiện cam kết quốc gia về giảm phát thải*

Đề tài hướng tới đóng góp thiết thực cho:

- Lộ trình kiểm kê khí nhà kính theo Luật Bảo vệ môi trường 2020;
- Thực hiện NDC và mục tiêu phát thải ròng bằng “0” vào năm 2050;
- Hình thành cơ sở dữ liệu phát thải cấp khu đô thị phục vụ thị trường carbon trong tương lai.

4. Đối tượng nghiên cứu của đề tài

Cụ thể, đề tài tập trung vào ba nhóm đối tượng chính:

- *Cấu trúc không gian đô thị theo định hướng TOD*

Bao gồm các thành phần cốt lõi:

- Mật độ dân cư và mật độ xây dựng;
- Hệ số sử dụng đất (FAR);
- Mức độ hỗn hợp chức năng;
- Khả năng tiếp cận giao thông công cộng trong bán kính 400–800m quanh nhà ga.

Những yếu tố này được xem là biến số đầu vào quyết định đến hành vi giao thông và tiêu thụ năng lượng đô thị.

- *Các nguồn phát thải carbon cấp khu đô thị*

Bao gồm:

- Phát thải giao thông đường bộ;
- Phát thải từ tiêu thụ năng lượng công trình;
- Phát thải từ vận hành hệ thống metro (phân bổ theo lượng hành khách).

Nghiên cứu tập trung vào phát thải vận hành (operational emissions), phù hợp với hướng dẫn kiểm kê khí nhà kính của Intergovernmental Panel on Climate Change và yêu cầu kiểm kê theo Luật Bảo vệ môi trường 2020.

- *Mô hình và công cụ tính toán phát thải*

Đề tài nghiên cứu:

- Khung phương pháp tích hợp đa hợp phần;
- Cơ chế xây dựng kịch bản BAU và TOD;
- Công cụ định lượng phục vụ so sánh phương án quy hoạch theo tiêu chí phát thải carbon.

5. Phạm vi nghiên cứu

Đề tài "Nghiên cứu phương pháp và công cụ tính toán phát thải carbon áp dụng cho các khu đô thị dọc tuyến đường sắt 2A Cát Linh – Hà Đông" tập trung vào các nội dung sau:

- *Phạm vi không gian*: Nghiên cứu được thực hiện đối với các khu đô thị nằm trong phạm vi ảnh hưởng trực tiếp của tuyến Đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông tại Hà Nội.

Cụ thể:

- Phạm vi tính toán trong bán kính 400–800m quanh các nhà ga (theo tiêu chí tiếp cận TOD);
- Lựa chọn các khu vực đại diện (trung tâm – chuyển tiếp – ngoại vi) để mô phỏng và đánh giá.

Phạm vi này được xác định nhằm bảo đảm tính thực tiễn và khả năng ứng dụng trực tiếp vào quy hoạch dọc tuyến metro.

- *Phạm vi dữ liệu*

Nghiên cứu tập trung vào:

- Phát thải carbon từ giao thông, công trình và vận hành metro;
- Tác động của điều chỉnh chỉ tiêu quy hoạch đến mức phát thải;
- Xây dựng và thử nghiệm công cụ tính toán phát thải cấp khu đô thị.

Không bao gồm:

- Phát thải vòng đời xây dựng hạ tầng (LCA toàn diện);
- Phát thải công nghiệp và nông nghiệp ngoài phạm vi khu đô thị;
- Phân tích thị trường carbon ở cấp quốc gia.

Việc giới hạn phạm vi này nhằm tập trung vào khía cạnh có thể tác động trực tiếp thông qua quy hoạch đô thị.

- *Phạm vi kỹ thuật*

- Áp dụng phương pháp tính toán phát thải theo hệ số phát thải (Activity Data × Emission Factor);
- So sánh kịch bản BAU và TOD;

- Phân tích độ nhạy nhằm đánh giá mức độ ảnh hưởng của các biến quy hoạch.
- Phạm vi thời gian
 - Dữ liệu sử dụng trong giai đoạn hiện trạng vận hành tuyến metro;
 - Mô phỏng kịch bản phát triển đến trung hạn (10–15 năm);
 - Không đi sâu dự báo dài hạn trên 30 năm do biến động chính sách và dân số.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

6.1. Ý nghĩa khoa học

- *Bổ sung cơ sở lý luận về mối quan hệ giữa TOD và phát thải carbon*

Đề tài góp phần làm rõ mối quan hệ định lượng giữa cấu trúc đô thị theo định hướng giao thông công cộng (TOD) và mức phát thải carbon ở cấp khu đô thị. Thay vì tiếp cận TOD như một mô hình quy hoạch mang tính định tính, nghiên cứu đã:

- Chuyển hóa các chỉ tiêu TOD (mật độ, FAR, hỗn hợp chức năng, modal share...) thành các biến số tính toán phát thải;
- Làm rõ cơ chế phát sinh và kiểm soát phát thải thông qua điều chỉnh cấu trúc không gian đô thị.

Qua đó, đề tài đóng góp vào việc phát triển hướng nghiên cứu liên ngành giữa quy hoạch đô thị – giao thông – môi trường trong bối cảnh chuyển đổi carbon thấp.

- *Xây dựng khung phương pháp tính toán phát thải carbon cấp khu đô thị*

Trên cơ sở hướng dẫn kiểm kê khí nhà kính của Intergovernmental Panel on Climate Change, đề tài đã đề xuất mô hình tính toán tích hợp:

$$E_{Total} = E_{Transport} + E_{Building} + E_{Metro}$$

Khung phương pháp này có ý nghĩa khoa học ở chỗ:

- Tích hợp đa hợp phần thay vì tiếp cận đơn ngành;
- Phù hợp điều kiện dữ liệu và đặc thù đô thị Việt Nam;
- Có khả năng mở rộng sang các tuyến metro và khu đô thị khác.

Đây là bước tiến quan trọng trong việc hình thành phương pháp đánh giá phát thải ở quy mô vi mô (micro-scale urban carbon accounting).

- *Đề xuất công cụ định lượng phục vụ đánh giá kịch bản quy hoạch*

Đề tài không chỉ dừng ở mô hình lý thuyết mà còn phát triển công cụ tính toán có khả năng:

- So sánh kịch bản BAU và TOD;
- Lượng hóa mức giảm phát thải khi điều chỉnh các chỉ tiêu quy hoạch;
- Phân tích độ nhạy và xác định biến số có tác động lớn nhất đến phát thải.

Điều này góp phần chuyển đổi phương pháp nghiên cứu quy hoạch từ định tính sang định lượng, dựa trên bằng chứng khoa học (evidence-based planning).

- *Góp phần xây dựng nền tảng khoa học cho tích hợp carbon vào quy hoạch đô thị*

Trong bối cảnh thực hiện kiểm kê khí nhà kính theo Luật Bảo vệ môi trường 2020, đề tài đặt nền tảng cho việc:

- Lồng ghép chỉ tiêu phát thải carbon vào hệ thống chỉ tiêu quy hoạch;
- Hình thành phương pháp đánh giá carbon ở cấp phân khu và khu TOD;
- Tiến tới xây dựng bộ chỉ số carbon đô thị phục vụ quản lý nhà nước.

6.2. Ý nghĩa thực tiễn

- *Hỗ trợ tích hợp yếu tố carbon vào quy hoạch dọc tuyến metro*

Thông qua ứng dụng tại tuyến Đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông ở Hà Nội, đề tài cung cấp:

- Cơ sở định lượng để điều chỉnh mật độ và cơ cấu sử dụng đất theo hướng phát thải thấp;
- Công cụ đánh giá tác động carbon khi lập và thẩm định quy hoạch;
- Minh chứng thực nghiệm về hiệu quả giảm phát thải của mô hình TOD.

- *Góp phần thực hiện cam kết Net Zero và NDC*

Kết quả nghiên cứu hỗ trợ:

- Lượng hóa phát thải trong lĩnh vực giao thông và công trình;
- Cung cấp dữ liệu tham khảo cho kiểm kê khí nhà kính cấp địa phương;
- Định hướng phát triển hành lang đô thị carbon thấp gắn với hệ thống metro.

Qua đó, đề tài góp phần cụ thể hóa cam kết phát thải ròng bằng “0” vào năm 2050 của Việt Nam.

- *Tạo mô hình thí điểm có khả năng nhân rộng*

Tuyến Cát Linh – Hà Đông được xem là phòng thí nghiệm thực tiễn cho phát triển TOD gắn với kiểm soát phát thải. Mô hình và công cụ do đề tài xây dựng có thể:

- Nhân rộng cho các tuyến metro tương lai tại Hà Nội;
- Áp dụng cho các đô thị lớn khác tại Việt Nam;
- Làm cơ sở cho xây dựng cơ chế đánh giá carbon trong phát triển đô thị.

- *Nâng cao chất lượng ra quyết định quy hoạch*

Việc lượng hóa phát thải giúp:

- So sánh khách quan giữa các phương án quy hoạch;
- Tránh tình trạng tăng mật độ nhưng không kiểm soát được phát thải;
- Hỗ trợ cơ quan quản lý lựa chọn phương án tối ưu theo tiêu chí phát triển bền vững.

7. Cấu trúc báo cáo

Ngoài phần mở đầu, cấu trúc báo cáo gồm 4 chương :

Chương I: Tổng quan tình hình nghiên cứu phát thải carbon trên thế giới và tại Việt Nam.

Chương II: Phương pháp nghiên cứu và xây dựng công cụ tính toán phát thải carbon theo định hướng TOD

Chương III: Ứng dụng tính toán phát thải carbon cho các khu đô thị dọc tuyến đường sắt 2A Cát Linh – Hà Đông theo định hướng TOD

Chương IV: Đề xuất giải pháp và hoàn thiện công cụ tính toán phát thải carbon theo định hướng TOD

CHƯƠNG I: TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU PHÁT THẢI CARBON TRÊN THẾ GIỚI VÀ TẠI VIỆT NAM.

1.1. Tình hình nghiên cứu phát thải carbon.

1.1.1. Tổng quan nghiên cứu phát thải trên thế giới.

Trên thế giới, vấn đề phát thải carbon đã được nghiên cứu rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, đặc biệt trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và nhu cầu phát triển bền vững ngày càng gia tăng. Các nghiên cứu ban đầu chủ yếu tập trung vào việc kiểm kê và đánh giá lượng phát thải, tuy nhiên trong những năm gần đây, xu hướng nghiên cứu đã chuyển dần sang việc đề xuất và triển khai các giải pháp giảm phát thải trong thực tiễn.

Đáng chú ý, nhiều nghiên cứu cho thấy rằng phát thải carbon trong đô thị không chỉ là hệ quả của tiêu thụ năng lượng mà còn phản ánh cách thức tổ chức không gian và vận hành hệ thống đô thị. Trong đó, hệ thống giao thông – đặc biệt là giao thông công cộng – được xem là một trong những “đòn bẩy” quan trọng có khả năng tác động trực tiếp đến mức phát thải thông qua việc thay đổi hành vi di chuyển của người dân. Việc thúc đẩy sử dụng giao thông công cộng không chỉ góp phần giảm phụ thuộc vào phương tiện cá nhân mà còn mở ra hướng tiếp cận mới trong quy hoạch đô thị theo hướng hiệu quả và bền vững hơn.

Theo International Energy Agency, khu vực đô thị tiêu thụ hơn 2/3 năng lượng toàn cầu và phát thải hơn 70% lượng CO₂ liên quan đến năng lượng. Các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng phát thải carbon trong đô thị chủ yếu đến từ ba nguồn chính: giao thông vận tải, tiêu thụ năng lượng trong công trình và hoạt động sinh hoạt của cư dân. Cách phân loại này tương đồng với phương pháp tiếp cận của Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories – một trong những bộ hướng dẫn phổ biến trong kiểm kê phát thải đô thị, trong đó phát thải được chia thành các nhóm chính gồm năng lượng cố định (trong công trình), giao thông vận tải và chất thải. Nhận định này cũng được khẳng định trong các báo cáo của Intergovernmental Panel on Climate Change, cho thấy lĩnh vực năng lượng và giao thông chiếm tỷ trọng lớn trong tổng phát thải.

Trong ba nguồn trên, giao thông vận tải là lĩnh vực có tính biến động cao và chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi cấu trúc không gian đô thị, đặc biệt là mật độ xây dựng, mức độ kết nối và khả năng tiếp cận giao thông công cộng. Do đó, giao thông thường được lựa chọn là đối tượng nghiên cứu trọng tâm trong các nghiên cứu về giảm phát thải carbon đô thị. Điều này đặc biệt rõ trong các mô hình phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng (Transit-Oriented Development – TOD), nơi việc tổ chức không gian đô thị hợp lý có thể làm giảm nhu cầu sử dụng phương tiện cá nhân, tăng khả năng tiếp cận giao thông công cộng và góp phần cắt giảm đáng kể lượng phát thải CO₂.

Trên cơ sở xác định các nguồn phát thải chính, các nghiên cứu tiếp tục sử dụng các phương pháp tính toán và phân tích nhằm lượng hóa và đánh giá mức độ phát thải.

Cụ thể, hướng dẫn kiểm kê của Intergovernmental Panel on Climate Change thường được kết hợp với phương pháp đánh giá vòng đời (LCA) và công cụ hệ thống thông tin địa lý (GIS) để xác định các khu vực phát thải cao và xây dựng các kịch bản giảm phát thải phù hợp. Tuy nhiên, trọng tâm của các nghiên cứu hiện nay không chỉ dừng lại ở đo lường mà còn hướng tới đề xuất và kiểm chứng các giải pháp can thiệp cụ thể.

Trong nhóm các nghiên cứu tập trung vào giải pháp quy hoạch – giao thông, nhiều công trình đã chứng minh mối quan hệ giữa cấu trúc đô thị và phát thải carbon. Điển hình là mô hình Curitiba (Brazil) những năm 1970. Kiến trúc sư Jaime Lerner đã thực hiện một phương pháp nghiên cứu thực nghiệm khi kết hợp chặt chẽ giữa hệ thống xe buýt nhanh (BRT) và quy hoạch trục đô thị (Structural Axes). Theo phân tích của Robert Cervero trong cuốn "The Transit Metropolis" (1998), bằng cách đẩy hệ số sử dụng đất (FAR) lên mức cực hạn từ 5.0 đến 6.0 tại các trục giao thông chính, thành phố này đã tạo ra một cấu trúc đô thị nén điển hình, giúp tối ưu hóa công suất vận tải công cộng.

Kết quả thực nghiệm được ghi nhận trong các báo cáo của Ngân hàng Thế giới (World Bank) cho thấy, giải pháp này giúp Curitiba tiết kiệm tới 27 triệu lít nhiên liệu mỗi năm. Đồng thời, các số liệu từ tổ chức ICLEI (Chính quyền địa phương vì sự bền vững) cũng xác nhận mức phát thải CO₂ của thành phố này thấp hơn 25% so với các đô thị có cùng quy mô tại Brazil, mặc dù Curitiba sở hữu tỷ lệ sở hữu ô tô trên đầu người rất cao. Đây chính là minh chứng thực tiễn đầu tiên, đặt nền móng cho các học thuyết hiện đại về mối quan hệ tỷ lệ nghịch giữa mật độ nén đô thị và cường độ phát thải carbon trên toàn cầu.

Ở cấp độ nâng cao hơn, các nghiên cứu tại châu Á tập trung vào cơ chế tài chính và sự tích hợp giữa sử dụng đất với hệ thống giao thông công cộng, trong đó Tokyo (Nhật Bản) là một điển hình tiêu biểu với mô hình "Rail + Property" (R+P). Các nghiên cứu của Kenichi Shoji và Robert Cervero cho thấy việc kết hợp giữa vận hành đường sắt và phát triển bất động sản xung quanh nhà ga không chỉ giúp đảm bảo nguồn lực tài chính mà còn góp phần hình thành cấu trúc đô thị mật độ cao, định hướng giao thông công cộng.

Cụ thể, theo nghiên cứu của Jin Murakami (2012), các tập đoàn đường sắt tư nhân như Tokyu hay Odakyu đã đạt được mức độ tự chủ tài chính cao thông qua đa dạng hóa nguồn thu, trong đó doanh thu từ các hoạt động phi vận tải thường chiếm khoảng 30%–60% tổng doanh thu. Dữ liệu từ East Japan Railway Company (2024) cũng cho thấy sự khác biệt đáng kể về hiệu quả kinh tế giữa các lĩnh vực, khi tỷ suất lợi nhuận từ bất động sản và cho thuê văn phòng cao hơn so với hoạt động vận tải đường sắt.

Những kết quả này cho thấy vai trò quan trọng của khai thác giá trị đất đai trong việc hỗ trợ phát triển hạ tầng giao thông công cộng, đặc biệt thông qua các công cụ như

điều chỉnh đất đai (Land Readjustment). Đồng thời, mô hình này góp phần thúc đẩy hình thành đô thị nén, giảm nhu cầu di chuyển bằng phương tiện cá nhân, qua đó tạo tiền đề cho việc cắt giảm phát thải carbon trong đô thị.

Sự thành công của mô hình thu hồi giá trị gia tăng từ đất (Land Value Capture) này còn mang lại hiệu quả môi trường vượt trội. Thực tế tại Tokyo chứng minh, khi 95% dân cư sống trong phạm vi đi bộ đến nhà ga, tỷ lệ sử dụng giao thông công cộng đạt mức kỷ lục 48%. Theo các báo cáo của *World Bank* và dữ liệu từ *UITP*, cấu trúc đô thị siêu nén này giúp lượng phát thải carbon giao thông trên đầu người tại Tokyo thấp hơn 4 lần so với các thành phố phát triển dàn trải (urban sprawl) tại Mỹ như Houston. Vòng lặp kinh tế - môi trường này không chỉ kiến tạo những 'thành phố thẳng đứng' mà còn là lời giải thực tiễn cho bài toán Net Zero tại các đô thị đang trong quá trình Metro hóa."

Song song với các giải pháp dựa trên giao thông, các nghiên cứu tại châu Âu tập trung vào giảm phát thải carbon thông qua công trình xây dựng và hệ thống năng lượng, trong đó dự án BedZED (Beddington Zero Energy Development) tại London là một trường hợp điển hình. Dự án do Bill Dunster khởi xướng đã áp dụng phương pháp Đánh giá vòng đời (Life Cycle Assessment – LCA) nhằm lựa chọn vật liệu có hàm lượng carbon thấp ngay từ giai đoạn thiết kế và xây dựng.

Theo báo cáo đánh giá sau sử dụng của BioRegional, việc kết hợp thiết kế thụ động với hệ thống năng lượng sinh khối đã giúp giảm đáng kể nhu cầu tiêu thụ năng lượng trong vận hành, trong đó chi phí sưởi ấm của cư dân giảm tới 81% so với mức trung bình tại Anh. Đặc biệt, các số liệu đo lường thực tế cho thấy mức phát thải carbon bình quân đầu người tại BedZED chỉ còn khoảng 0,51 tấn CO₂/người/năm, tiệm cận các mục tiêu phát thải thấp trong đô thị.

Tương tự, tại Freiburg (Đức), khu đô thị Vauban thể hiện một hướng tiếp cận khác, tập trung vào thay đổi hành vi di chuyển của cư dân kết hợp với giải pháp năng lượng tái tạo. Theo nghiên cứu của Nobis (2003), việc tổ chức bãi đỗ xe tập trung tại rìa khu dân cư thay vì bố trí tại từng hộ gia đình đã góp phần làm giảm đáng kể tỷ lệ sở hữu ô tô, chỉ còn khoảng 172 xe/1000 dân.

Bên cạnh đó, việc áp dụng tiêu chuẩn “PlusEnergy” – nhà thặng dư năng lượng, do Rolf Disch đề xuất, với 100% mái nhà lắp đặt hệ thống năng lượng mặt trời, đã giúp khu đô thị này giảm khoảng 80% lượng phát thải so với các tiêu chuẩn xây dựng thông thường tại Đức.

Những trường hợp này cho thấy, việc kết hợp giữa thiết kế công trình tiết kiệm năng lượng và định hướng hành vi sử dụng giao thông có thể mang lại hiệu quả đáng kể trong giảm phát thải carbon đô thị, qua đó bổ sung một hướng tiếp cận quan trọng bên cạnh các giải pháp quy hoạch giao thông trong chiến lược phát triển đô thị carbon thấp.

Ở quy mô chính sách lớn hơn, các nghiên cứu thực nghiệm tại Trung Quốc thông qua chương trình Thành phố Carbon thấp (Low-Carbon City Pilot - LCCP) đã cung cấp những dữ liệu quý giá về quản trị đô thị. Nghiên cứu của Song và cộng sự (2024) đăng trên tạp chí *Journal of Environmental Management* đã sử dụng Phương pháp sai khác kép (Difference-in-Differences - DID) để đánh giá 284 thành phố cấp địa hạt. Kết quả chỉ ra rằng các chính sách can thiệp đồng bộ giúp giảm cường độ carbon trung bình 4,83% mỗi năm thông qua việc thúc đẩy đổi mới công nghệ và tối ưu hóa cấu trúc công nghiệp. Điều này cũng có quan điểm của Ủy ban Liên chính phủ về Biến đổi khí hậu (IPCC) trong báo cáo đánh giá lần thứ sáu (AR6 - Working Group III, Chương 10). Tại phần tóm tắt cho các nhà hoạch định chính sách (SPM), IPCC khẳng định rằng các chiến lược quy hoạch tích hợp — bao gồm việc nén mật độ đô thị, kết hợp sử dụng đất và ưu tiên giao thông công cộng — có khả năng cắt giảm tới 25% phát thải liên quan đến vận tải toàn cầu vào năm 2050 so với các kịch bản phát triển thông thường. Dữ liệu thực chứng từ Trung Quốc và các khuyến nghị định lượng trong báo cáo AR6 (trang 1050-1065) đã tạo ra một khung tham chiếu toàn cầu, minh chứng rằng sự can thiệp từ cấp độ chính sách vĩ mô là động lực quyết định để hiện thực hóa các mục tiêu Net Zero trong quy hoạch đô thị hiện đại.

Hệ thống chỉ tiêu và công nghệ quy hoạch khu dân cư carbon thấp (Xiaoming Wang, Guochao Zhao n, Chenchen He, Xu Wang, Wenjun Peng - School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China, 2016).

Nghiên cứu đã đề xuất các công nghệ quy hoạch khu phố carbon thấp từ sáu khía cạnh: quy hoạch bố trí, quy hoạch giao thông, quy hoạch và thiết kế kiến trúc, quy hoạch môi trường, quy hoạch kỹ thuật đô thị và quản lý xây dựng. Ngoài ra, nghiên cứu đã xây dựng một hệ thống chỉ tiêu về khu vực carbon thấp dựa trên các công nghệ này từ góc độ “kiểm soát nguồn carbon” và “mở rộng bể chứa carbon” và sử dụng Quy trình mạng phân tích (ANP) để phân tích phản hồi nội bộ và đạt được mức độ ưu tiên. Hệ thống này có thể được sử dụng để chỉ ra mức độ carbon thấp và đưa ra các biện pháp cải thiện. Hơn nữa, nghiên cứu đã thực hiện một nghiên cứu điển hình bằng phương pháp đề xuất cho một khu dân cư ở tỉnh Sơn Đông, Trung Quốc. Thực tiễn nghiên cứu đã chứng minh rằng hệ thống này có thể thúc đẩy sự phát triển bền vững và ít carbon của khu vực đô thị, đồng thời cung cấp cho chính phủ một công cụ hiệu quả.

Từ tổng quan các nghiên cứu trên thế giới, có thể khẳng định rằng phát thải carbon trong đô thị tập trung chủ yếu ở các lĩnh vực giao thông, công trình và sinh hoạt dân cư, trong đó giao thông vận tải giữ vai trò chi phối và có tiềm năng giảm phát thải lớn nhất. Xu hướng nghiên cứu hiện nay cho thấy việc cắt giảm carbon không chỉ phụ thuộc vào công nghệ mà còn gắn chặt với tổ chức không gian đô thị và định hướng phát triển. Đặc biệt, mô hình phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng (TOD)

được xem là giải pháp hiệu quả khi giúp giảm nhu cầu sử dụng phương tiện cá nhân, tối ưu hóa di chuyển và tiết kiệm năng lượng. Bên cạnh đó, việc kết hợp giữa quy hoạch đô thị nén, công trình tiết kiệm năng lượng và sử dụng năng lượng tái tạo đã chứng minh khả năng giảm đáng kể lượng phát thải CO₂ trong thực tiễn. Các công cụ như kiểm kê phát thải, LCA và GIS cũng đóng vai trò quan trọng trong việc lượng hóa và kiểm soát phát thải một cách khoa học. Như vậy, giảm phát thải carbon cần được tiếp cận theo hướng tích hợp, trong đó TOD là một trong những định hướng cốt lõi để đạt được hiệu quả bền vững trong đô thị hiện đại.

1.1.2. Tổng quan nghiên cứu phát thải tại Việt Nam.

Tại Việt Nam, các nghiên cứu và báo cáo chính thức cho thấy phát thải CO₂ trong đô thị tập trung chủ yếu ở ba lĩnh vực: giao thông vận tải, công trình xây dựng và sinh hoạt dân cư. Báo cáo kiểm kê khí nhà kính quốc gia và cập nhật NDC (Nationally Determined Contributions – Đóng góp do quốc gia tự quyết định) của Bộ Tài nguyên và Môi trường chỉ ra rằng lĩnh vực năng lượng (bao gồm giao thông và công trình) chiếm tỷ trọng phát thải lớn nhất, trong đó CO₂ là thành phần chủ đạo. Đồng thời, các nghiên cứu của Ngân hàng Thế giới nhấn mạnh vai trò đáng kể của tiêu thụ năng lượng trong công trình đô thị đối với tổng phát thải, trong khi các báo cáo của Bộ Giao thông Vận tải cho thấy giao thông vận tải là lĩnh vực có tốc độ gia tăng phát thải CO₂ nhanh nhất.

Thực tiễn phát triển tại các đô thị lớn như Hà Nội và TP. Hồ Chí Minh đang ghi nhận những nỗ lực mạnh mẽ trong việc hiện đại hóa hạ tầng, đặc biệt là sự hình thành của các tuyến đường sắt đô thị và mạng lưới xe buýt điện. Tuy nhiên, quá trình chuyển dịch sang mô hình giao thông carbon thấp vẫn đang đối mặt với những rào cản về thói quen sử dụng phương tiện cá nhân và độ phủ của mạng lưới hạ tầng nòng cốt. Sự chuyển đổi này không chỉ đơn thuần là thay đổi công nghệ vận tải, mà còn đòi hỏi sự khớp nối chặt chẽ giữa cấu trúc không gian đô thị và hành vi di chuyển của cư dân.

Trong bối cảnh đô thị hóa diễn ra với tốc độ nhanh, việc tìm kiếm sự đồng bộ giữa quy hoạch xây dựng, hạ tầng giao thông và các giải pháp giảm thiểu carbon đã trở thành mục tiêu ưu tiên trong các chương trình nghị sự về đô thị sinh thái. Thực tế này cho thấy phát thải carbon là một vấn đề đa chiều, đòi hỏi những cách tiếp cận mang tính hệ thống và dữ liệu thực chứng sát với đặc thù của Việt Nam.

Chính từ nhu cầu cấp thiết về việc xác lập cơ sở khoa học cho công tác quản trị, các nghiên cứu về phát thải carbon tại Việt Nam đã được triển khai đa dạng, đi sâu vào việc phân tích định lượng và mô hình hóa các nguồn thải chính. Các công trình khoa học tiêu biểu hiện nay đang tập trung giải quyết bài toán tối ưu hóa mật độ xây dựng để giảm thiểu cường độ carbon như:

Đề tài nghiên cứu khoa học: Nghiên cứu tính toán hàm lượng phát thải các bon sử dụng tư liệu viễn thám phục vụ việc kiểm kê khí nhà kính - Thực nghiệm ảnh

VNREDSat-1 và các nguồn ảnh hiện có tại Việt Nam [Trung tâm Thông tin và Dữ liệu viễn thám, 2021]

Đề tài hướng đến thực hiện các mục tiêu sau: xây dựng được quy trình công nghệ tính toán và quy định kỹ thuật bộ dữ liệu dùng tính toán hàm lượng phát thải các bon theo tiêu chuẩn của Ủy ban Liên chính phủ về biến đổi khí hậu (IPCC) sử dụng tư liệu viễn thám phục vụ kiểm kê khí nhà kính; và đánh giá khả năng ứng dụng tư liệu ảnh VNREDSat-1 cho mục tiêu nêu trên.

Đề tài đã đưa ra tổng quan về phát thải KNK và các văn bản quy định kiểm kê KNK phục vụ định hướng nghiên cứu; Đưa ra được cơ sở khoa học của công nghệ viễn thám trong việc xây dựng dữ liệu tính toán phát thải các bon; Đã phân tích làm sáng tỏ hệ thống phân loại lớp phủ mặt đất bằng dữ liệu ảnh viễn thám, đánh giá khả năng phù hợp cho tính toán phát thải các bon; Đề xuất, xây dựng được các quy định kỹ thuật của bộ dữ liệu phục vụ tính toán phát thải các bon trong tự nhiên sử dụng tư liệu viễn thám.

Trên cơ sở các định hướng, phân tích nêu trên kết hợp nghiên cứu các chức năng và cơ chế tính toán của phần mềm tính toán phát thải khí nhà kính ALU, đã đề xuất và hoàn thiện được “Quy trình ứng dụng công nghệ viễn thám xây dựng dữ liệu phục vụ tính toán phát thải khí các bon” sau quá trình thực nghiệm sử dụng nhiều loại dữ liệu ảnh viễn thám với độ phân giải khác nhau.

Sử dụng công cụ GIS để bản đồ hóa thực trạng tại các thành phố lớn, Nguyễn Thị Thu Hà và cộng sự (2022) trong nghiên cứu về kiểm soát phát thải carbon đã chỉ ra sự phân bố không đồng đều theo không gian. Kết quả cho thấy tại các lõi đô thị lịch sử và trục hành lang hướng tâm, cường độ phát thải carbon cao gấp 3-5 lần vùng ngoại ô. Dữ liệu này chứng minh rằng cấu trúc đô thị nén nếu thiếu sự đồng bộ về hạ tầng giao thông sạch sẽ trực tiếp tạo ra các "điểm nóng" carbon tập trung mật độ cao.

Trong lĩnh vực giao thông vận tải, dự án hợp tác "Hỗ trợ lập kế hoạch lộ trình giao thông carbon thấp" của JICA và Sở Giao thông Vận tải Hà Nội (2020) đã thiết lập hệ thống dữ liệu quan trọng về hệ số phát thải phương tiện. Báo cáo khẳng định xe máy là nguồn phát thải SCO_2 đơn vị khó kiểm soát nhất khi chiếm tới 80% quãng đường di chuyển của cư dân. Để giải quyết nút thắt này, nghiên cứu về tiềm năng TOD của Vũ Anh Tuấn và cộng sự (2021) đã lượng hóa cụ thể: việc tập trung mật độ dân cư trong bán kính 500m quanh nhà ga có thể giúp giảm tới 22% lượng phát thải carbon trên mỗi chuyến đi nhờ việc thay đổi phương thức di chuyển sang vận tải khối lượng lớn.

Ở khía cạnh quản trị năng lượng, Lê Thu Hoa (2023) đã minh chứng hiệu quả của các công cụ điều tiết thông qua nghiên cứu về phí phát thải carbon và đầu tư hạ tầng xanh, chỉ ra khả năng thúc đẩy 12% người dân chuyển đổi sang phương tiện công cộng. Tuy nhiên, các phân tích từ Viện Kiến trúc Quốc gia về tiêu chuẩn thiết kế công trình lại đưa ra cảnh báo về sự gia tăng phát thải carbon gián tiếp (Scope 2). Nếu không kiểm soát hiệu suất năng lượng của các tòa nhà cao tầng, nhu cầu vận hành tại các khu vực

nén mật độ cao sẽ triệt tiêu lợi ích cắt giảm carbon đạt được từ việc phát triển hệ thống giao thông công cộng.

Khép lại bằng góc nhìn về vật liệu xây dựng, Phạm Ngọc Thái (2021) đã ứng dụng phương pháp Đánh giá vòng đời (LCA) để xác định hàm lượng carbon tích lũy ngay từ khâu sản xuất. Tổng hợp từ các công trình của Viện Chiến lược và Phát triển GTVT, có thể thấy xu hướng nghiên cứu hiện nay tại Việt Nam đang hướng tới một mô hình tích hợp toàn diện: kết nối giữa hình thái đô thị nén, hệ thống giao thông phát thải thấp và quản trị hiệu suất năng lượng công trình.

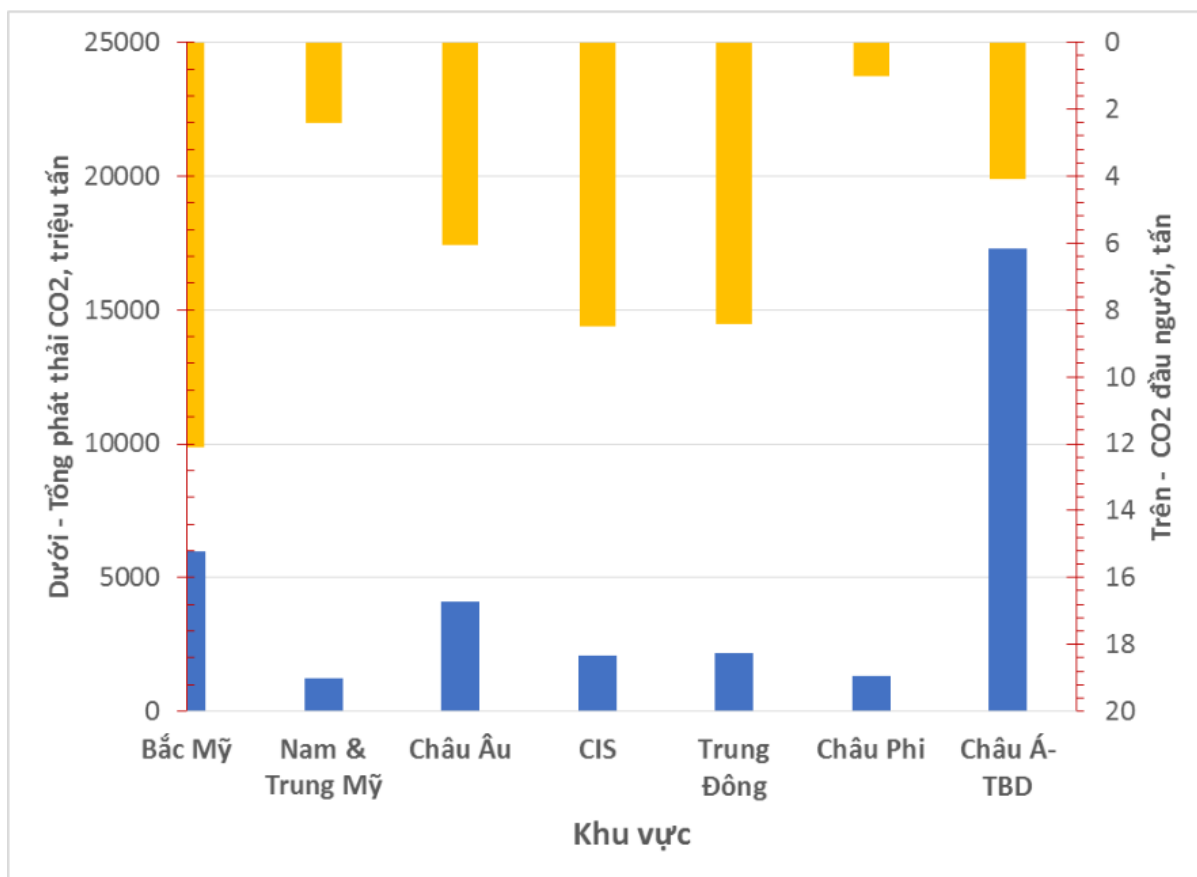
Các nghiên cứu tại Việt Nam đã bước đầu xây dựng được hệ thống dữ liệu định lượng về các nguồn thải chính yếu trong đô thị. Tuy nhiên, thay vì chỉ tập trung vào việc đo đạc tĩnh, xu hướng hiện nay đang chuyển trọng tâm sang việc tìm kiếm các giải pháp tích hợp giữa quy hoạch đô thị nén và mạng lưới giao thông công cộng năng suất cao. Các bằng chứng thực nghiệm đã khẳng định đây là lộ trình hiệu quả nhất để vừa đảm bảo nhu cầu phát triển đô thị, vừa đạt được mục tiêu giảm phát thải bền vững. Những kết luận này chính là nền tảng thực tiễn quan trọng để xây dựng các kịch bản can thiệp cụ thể nhằm tối ưu hóa cường độ carbon trong bối cảnh đô thị hóa hiện nay.

1.2. Tình hình các khu đô thị mới tại Hà Nội theo hướng carbon thấp.

1.2.1. Thực trạng phát thải khí nhà kính tại Hà Nội.

Phát thải khí nhà kính (KNK) đang trở thành một trong những thách thức lớn đối với phát triển bền vững của các đô thị trên thế giới. Theo các nghiên cứu của Intergovernmental Panel on Climate Change, tổng lượng phát thải khí nhà kính toàn cầu đã tăng nhanh trong những thập kỷ gần đây, đặc biệt trong các lĩnh vực năng lượng, giao thông và công nghiệp. Trong giai đoạn từ năm 1970 đến năm 2004, lượng phát thải khí nhà kính toàn cầu đã tăng khoảng 70%, từ 28,7 GtCO₂ tương đương lên 49,0 GtCO₂ tương đương, trong đó riêng giai đoạn 1990–2004 tăng khoảng 24%. Riêng phát thải CO₂ – loại khí nhà kính chiếm tỷ trọng lớn nhất – đã tăng tới 80%, chủ yếu do sự gia tăng tiêu thụ năng lượng và phát triển giao thông vận tải.

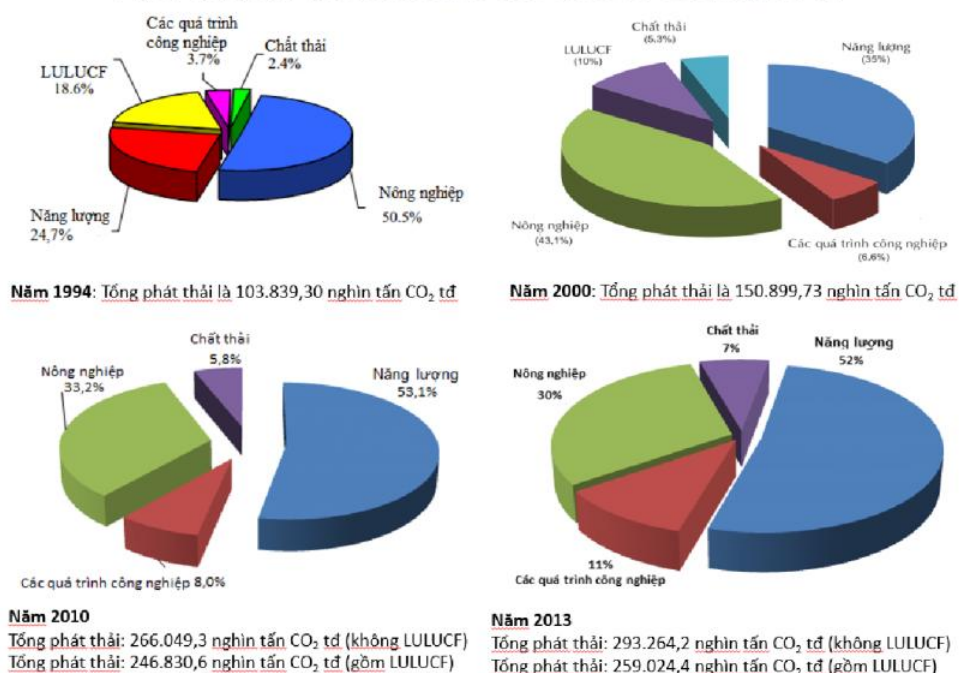
Sự phân bố phát thải khí nhà kính giữa các khu vực trên thế giới cũng có sự khác biệt rõ rệt. Các quốc gia thuộc nhóm nước phát triển chỉ chiếm khoảng 20% dân số toàn cầu, nhưng lại đóng góp tới 46% tổng lượng phát thải khí nhà kính. Trong khi đó, các quốc gia đang phát triển với dân số lớn hơn lại có mức phát thải bình quân đầu người thấp hơn. Ví dụ, khu vực Bắc Mỹ chỉ chiếm khoảng 5% dân số thế giới nhưng đóng góp tới 19,4% lượng phát thải, trong khi khu vực Nam Á chiếm 30,3% dân số nhưng chỉ phát thải khoảng 13,1%. Điều này cho thấy mối quan hệ chặt chẽ giữa mức độ phát triển kinh tế, tiêu thụ năng lượng và phát thải khí nhà kính.



Hình 1.1: Tổng phát thải CO₂ và CO₂ bình quân đầu người theo các khu vực

Tại Việt Nam, lượng phát thải khí nhà kính cũng gia tăng nhanh chóng trong quá trình công nghiệp hóa và đô thị hóa. Theo kết quả kiểm kê khí nhà kính quốc gia, tổng lượng phát thải khí nhà kính của Việt Nam năm 2010 đạt khoảng 246,8 triệu tấn CO₂ tương đương (không bao gồm lĩnh vực sử dụng đất, thay đổi sử dụng đất và lâm nghiệp – LULUCF). Trong đó, lĩnh vực năng lượng chiếm tỷ trọng lớn nhất với khoảng 53,05%, tiếp theo là nông nghiệp chiếm 33,20%, các quá trình công nghiệp chiếm 7,97% và chất thải chiếm 5,78%. Trong giai đoạn 1994–2010, tổng lượng phát thải khí nhà kính của Việt Nam đã tăng nhanh từ 103,8 triệu tấn CO₂ tương đương lên 246,8 triệu tấn CO₂ tương đương, trong đó lĩnh vực năng lượng có tốc độ tăng nhanh nhất.

PHÁT THẢI KHÍ NHÀ KÍNH QUA CÁC THỜI KỲ CỦA VIỆT NAM

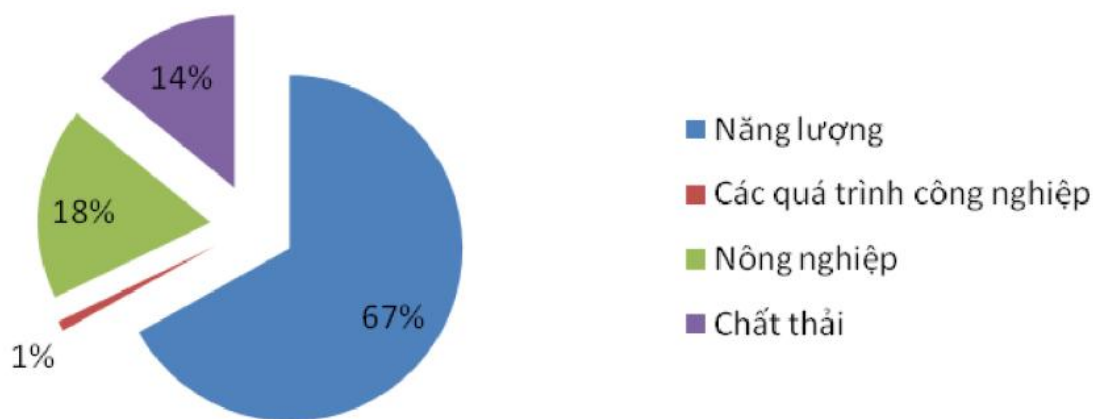


Hình 1.2: Phát thải khí nhà kính của Việt Nam qua các thời kỳ.

Trong bối cảnh đó, các đô thị lớn như Hà Nội đóng vai trò quan trọng trong tổng lượng phát thải khí nhà kính của cả nước. Năm 2018, thành phố Hà Nội đã thực hiện kiểm kê khí nhà kính trên địa bàn thành phố cho năm cơ sở 2015, dựa trên phương pháp hướng dẫn của Intergovernmental Panel on Climate Change. Kết quả kiểm kê cho thấy tổng lượng phát thải khí nhà kính của Hà Nội năm 2015 đạt khoảng 18.181,091 nghìn tấn CO₂ tương đương, chiếm khoảng 7% tổng lượng phát thải khí nhà kính của cả nước.

Bảng 1.1: Tổng phát thải/hấp thụ khí nhà kính của 5 lĩnh vực của TP Hà Nội.

TT	Lĩnh vực	HÀ NỘI NĂM 2015	QUỐC GIA NĂM 2013
		Tổng CO ₂ tđ (nghìn tấn)	Tổng CO ₂ tđ (nghìn tấn)
	Năng lượng	12.167,789	151.402,50
	Các quá trình công nghiệp	171,700	31.767,40
	Nông nghiệp	3.273,900	89.407,80
	LULUCF	-0,987	-34.239,80
	Chất thải	2.568,689	20.686,20
	Tổng	18.181,091	259.024,4



Hình 1.3: Biểu đồ thể hiện tỉ lệ phát thải khí nhà kính năm 2015 ở Hà Nội của các lĩnh vực.

Số liệu cho thấy lĩnh vực Năng lượng là lĩnh vực có tỷ lệ phát thải lớn nhất chiếm 67%, tiếp sau đó là lĩnh vực Nông nghiệp và Chất thải, lĩnh vực Các quá trình công nghiệp chiếm tỷ lệ nhỏ nhất, chỉ 1% trong tổng phát thải khí nhà kính. Đối với lĩnh vực LULUCF năm 2015 tại Hà Nội là hấp thụ 0,987 nghìn tấn CO₂ tương đương. Tổng phát thải khí nhà kính lĩnh vực năng lượng của thành phố Hà Nội trong năm 2015 là 12.167,789 nghìn tấn CO₂ tương đương, trong đó tiêu lĩnh vực dân cư chiếm tỷ trọng cao nhất (khoảng 55,85%), trong đó tiêu thụ điện ở khu vực dân cư là nguồn phát thải lớn nhất, chiếm hơn một nửa tổng phát thải của toàn Thành phố trong lĩnh vực năng lượng (khoảng 52%), tiếp đến tiêu lĩnh vực công nghiệp sản xuất và xây dựng (28,77%).

Kết quả tính toán dự báo phát thải khí nhà kính năm 2030 trên địa bàn thành phố Hà Nội:

Theo dự báo, tổng lượng phát thải KNK của Hà Nội vào năm 2030 là 50.252,945 tăng 2,76 lần so với năm 2015. Trong đó, kết quả tính toán dự báo cho thấy tổng lượng phát thải khí nhà kính của lĩnh vực năng lượng vào năm 2030 tăng lên hơn 3 lần, lên đến 42.743,628 nghìn tấn CO₂ tương đương; Lĩnh vực Các quá trình công nghiệp khoảng 366,610 nghìn tấn CO₂ tương đương, yếu từ sản xuất xi măng và sản xuất sắt thép; Lĩnh vực Nông nghiệp khoảng 2.380,2 nghìn tấn CO₂ tương đương. Nguồn phát thải lớn nhất là CH₄ từ canh tác lúa, nguồn phát thải lớn thứ hai là N₂O từ đất nông nghiệp; Lĩnh vực LULUCF phát thải 39,747 nghìn tấn CO₂ tương đương, nguyên nhân do diện tích rừng năm 2030 ước tính giảm so với năm 2015, diện tích giảm được chuyển đổi sang các loại đất khác nên lượng hấp thụ từ rừng giảm xuống, đồng thời phát thải từ mất rừng do chuyển đổi thành các loại đất khác; Tổng lượng phát thải khí nhà kính trong lĩnh vực chất thải tại thành phố Hà Nội ước tính cho năm 2030 là 4.722,760 nghìn tấn CO₂ tương đương, phát thải khí nhà kính từ các bãi chôn lấp là hạng mục phát thải khí nhà kính nhiều nhất.

Bảng 1.2. Tổng phát thải/hấp thụ khí nhà kính của 5 lĩnh vực năm 2030 của thành phố Hà Nội.

STT	LĨNH VỰC	Tổng CO _{2td} (nghìn tấn)
1	Năng lượng	42.743,628
2	Các quá trình công nghiệp	366,610
3	Nông nghiệp	2.380,200
4	LULUCF	39,747
5	Chất thải	4.722,760
6	Tổng	50.252,945

Những số liệu trên cho thấy phát thải khí nhà kính tại Hà Nội đang có xu hướng gia tăng mạnh mẽ cùng với quá trình đô thị hóa và phát triển kinh tế. Do đó, việc nghiên cứu các mô hình phát triển đô thị theo hướng carbon thấp, đặc biệt là phát triển các khu đô thị mới gắn với hệ thống giao thông công cộng, được xem là một trong những giải pháp quan trọng nhằm giảm phát thải khí nhà kính và hướng tới phát triển đô thị bền vững trong tương lai.

Nhận xét đề xuất: Từ các số liệu trên có thể thấy, phát thải khí nhà kính tại Hà Nội đang gia tăng nhanh chóng, trong đó lĩnh vực năng lượng và giao thông đóng vai trò chủ đạo. Điều này phản ánh mô hình phát triển đô thị hiện nay vẫn phụ thuộc lớn vào tiêu thụ năng lượng hóa thạch và phương tiện cá nhân. Vì vậy, việc chuyển đổi sang mô hình đô thị carbon thấp, đặc biệt thông qua phát triển các khu đô thị mới theo hướng tiết kiệm năng lượng và gắn với giao thông công cộng, là yêu cầu cấp thiết đối với Thủ đô trong giai đoạn tới.

1.2.2 Tình hình quy hoạch các khu đô thị mới tại Hà Nội theo hướng carbon thấp.

Phát triển các KĐT carbon thấp đã được quan tâm chú trọng, một số mô hình quy hoạch đô thị phổ biến như đô thị xanh, đô thị sinh thái... cũng đã đưa tiêu chí phát thải carbon thấp là một tiêu chí quan trọng. Năm 2022, Bộ Xây dựng đã ra Quyết định số 358/QĐ-BXD về việc phê duyệt kế hoạch hành động của ngành. Xây dựng ứng phó với biến đổi khí hậu giai đoạn 2022–2030, tầm nhìn đến năm 2050 nhằm thực hiện cam kết của Việt Nam tại Hội nghị lần thứ 26 các bên tham gia Công ước khung của Liên Hợp Quốc về biến đổi khí hậu (COP26). Trong đó, các mục tiêu chung cũng như các nhiệm vụ cụ thể của ngành xây dựng trong việc ứng phó với biến đổi khí hậu đã được xác định rõ.

Các mục tiêu, nhiệm vụ liên quan đến quy hoạch khu đô thị mới carbon thấp có thể kể đến như: hoàn thiện các công cụ quản lý nhà nước của ngành xây dựng về kiểm kê khí nhà kính (KNK); đo đạc, báo cáo, thẩm định (MRV) giảm nhẹ phát thải KNK áp dụng tới cấp cơ sở; đến năm 2030 có ít nhất 250 khu đô thị mới áp dụng tiêu chí khu đô

thị xanh, phát thải carbon thấp; đến năm 2050 có ít nhất 500 khu đô thị mới, trong đó 100 khu đô thị đạt tiêu chí đô thị xanh, phát thải carbon thấp.

Tuy nhiên, đến nay tại Việt Nam vẫn chưa có hệ thống khái niệm, nguyên tắc và tiêu chí đánh giá dành riêng cho khu đô thị mới carbon thấp. Các khu đô thị mới hiện nay chưa được kiểm kê khí nhà kính, chưa xác định được các nguồn phát thải cũng như các nguồn hấp thụ chính.

KĐTМ Linh Đàm: Khởi công năm 1997 với quy mô trên 200ha, bao gồm 02 khu dân cư: Khu nhà ở Bắc Linh Đàm và khu dịch vụ tổng hợp và nhà ở bán đảo Linh Đàm, KĐTМ Linh Đàm là một trong những KĐTМ đầu tiên ở Hà Nội của thời đô thị hóa tạo động lực cho sự ra đời của “kinh tế bất động sản” với sự xuất hiện của hàng loạt KĐTМ sau đó và phát triển đến tận hôm nay. Nói đến thành công của khu bán đảo Linh Đàm đầu tiên phải đề cập đến giải pháp quy hoạch và kiến trúc với diện tích gần 200ha trong đó gần 50% là mặt nước, khu bán đảo Linh Đàm có lợi thế nổi trội về cảnh quan đã được quy hoạch khá bài bản. Sau khi được công nhận là KĐT kiểu mẫu vào năm 2009.

Trong đó, dự án được chia thành 3 phân khu: khu Bắc Linh Đàm, khu nhà bán đảo Linh Đàm và khu đô thị mới Linh Đàm phía Bắc mở rộng:

- Khu Bắc Linh Đàm với tổng diện tích là 24ha được triển khai trong giai đoạn I của dự án. Tại đây có hơn 500 căn hộ được xây dựng bao gồm các căn biệt thự thấp tầng, căn hộ chung cư từ 9 - 15 tầng cùng các công trình hạ tầng xã hội và dịch vụ thương mại khác;
- Khu Bán đảo Linh Đàm được xây dựng trong giai đoạn II, khởi công năm 2011 với diện tích 35ha. Bao gồm 16 tòa nhà cao 11 tầng cung cấp gần 2000 căn hộ và các dịch vụ công cộng khác như công viên, bể bơi, khu vui chơi, ...;
- Khu đô thị mới Bắc Linh Đàm mở rộng có diện tích là 16,4ha tạo nên quần thể kiến trúc đô thị với đầy đủ tiện nghi và thiết kế theo hiện đại với 4.000 căn nhà xây mới và hơn 3.150 căn hộ, đáp ứng được số lượng nhu cầu nhà ở lớn cho thủ đô. Tiện ích sống tại khu đô thị Linh Đàm:
- Khu đô thị Linh Đàm Hà Nội mang đến cảnh quan xanh mát cho cư dân nơi đây với hơn 31,5ha đất để xây dựng công viên. Bên cạnh đó là hồ điều hòa có diện tích lên tới 74ha chắc chắn sẽ đáp ứng được nhu cầu về cuộc sống xanh, sạch, đẹp cho cư dân ngay giữa lòng thủ đô;
- Khu vui chơi trẻ em nằm ngay trong dự án mang đến không gian giải trí hiện đại;
- Các căn hộ được thiết kế theo phong cách hiện đại, sang trọng với đầy đủ tiện nghi, cơ sở hạ tầng khang trang sẽ đáp ứng nhu cầu sống của mọi cư dân;
- Các tiện ích đáp ứng mọi nhu cầu sống đầy đủ: Trường mầm non, siêu thị, dịch vụ chăm sóc sức khỏe cộng đồng, bể bơi ngoài trời, khu tập gym, spa,...
- Cùng với đó là các tiện ích liên kết ngoại khu như:

- + Hệ thống giao thông thuận tiện: kết nối với các trục đường chính như: Vành đai 3, Nguyễn Xiển, Giải Phóng, quốc 170, ...;
- + Gần với các bệnh viện hàng đầu như: Bệnh viện Bạch Mai, Viện 103, Việt Đức, ...



Hình 1.4: Hình ảnh tổng quan khu đô thị mới Linh Đàm

KDTM Gamuda: Gamuda City là một trong những Khu đô thị quy mô nhất tại Việt Nam trải rộng trên khuôn viên 274ha. Tọa lạc tại vị trí chiến lược phía Nam Hà Nội, cách trung tâm thành phố chỉ vài phút đi xe, Gamuda City được ôm trọn trong vòng tay xanh mát và thanh bình của công viên Yên Sở thoáng rộng.

Gamuda City - một “thành phố thu nhỏ” giữa lòng Hà Nội. Nơi không gian sống xanh mát, trong lành, Đảm bảo an toàn và sự riêng tư, và có các tiện ích đồng bộ hiện đại để hưởng thụ cuộc sống. Sau gần một thập kỷ xây dựng và phát triển Gamuda City đã trở thành khu đô thị xanh kiểu mẫu của Việt Nam và là một trong những nơi đáng sống nhất cho người dân thủ đô.

Tọa lạc tại trung tâm quận Hoàng Mai - vị trí chiến lược cửa ngõ phía Nam thủ đô. Chỉ cách trung tâm thành phố 7km và khu trung tâm phía tây 15 phút lái xe. Gamuda City dễ dàng di chuyển đến các địa điểm trọng yếu của thành phố qua các tuyến đường lớn như Giải Phóng, Tam Trinh, Vành đai 3 trên cao. Đi về các tỉnh phía Nam qua cao tốc Pháp Vân Cầu Giẽ, Các tỉnh phía Đông Bắc bằng cao tốc 5B, Cao tốc Hà Nội - Bắc Giang. Điểm nổi bật là khu đô thị quy mô gần 300 ha nhưng diện tích hồ điều hòa đã lên tới hơn 102ha, đóng vai trò như lá phổi lớn giúp tạo nên môi trường và không khí trong lành hiếm nơi nào có.

Dự án Gamuda City gồm 4 phân khu chính gồm khu đô thị theo tiêu chuẩn quốc tế: Gamuda Gardens, khu công viên Yên Sở, Gamuda Central và Gamuda Lakes. Với mật độ xây dựng chỉ 50%, Diện tích còn lại hơn 35ha được chủ đầu tư hào phóng bao phủ bởi những hàng cây xanh mát, mang đến không gian thoáng đãng, bầu không khí tươi tắn, trong lành cho toàn bộ cộng đồng dân cư.



Hình 1.5: Hình ảnh tổng quan khu đô thị mới Gamuda.

Khu đô thị Gamuda Gardens:

Với quy mô 75 ha, Gamuda Gardens là dự án đô thị xanh đầu tiên của Gamuda Land Việt Nam tại thị trường Hà Nội. Lấy hình mẫu khu đô thị hiện đại của Malaysia là Bandar Botanic, khu đô thị Gamuda Gardens được xây dựng và phát triển theo phong cách khép kín “sống xanh và hướng đến cộng đồng”.

Khu dân cư Gamuda Lakes:

Nằm kế bên khu tổ hợp lePARC by Gamuda và công viên Yên Sở, Gamuda Lakes mang đến cho cư dân không gian sống trong lành được bao quanh bởi cây xanh và hồ Yên Sở.

Lấy ý tưởng từ dự án Gamuda Cove Tại Malaysia. Gamuda Land phát triển Gamuda Lakes trở thành một tổ hợp khép kín với phong cách thiết kế xanh nhưng vẫn đầy đủ tiện ích hiện đại phù hợp với mọi lứa tuổi.

Gamuda Central:

Mảnh ghép cuối cùng trong bộ ba dự án khu đô thị của Gamuda tại Hà Nội, Gamuda Central gồm trung tâm mua sắm sang trọng 8.4ha, Khu Shop bán lẻ, Khu căn hộ chung cư cao cấp, khu khách sạn & dịch vụ và tòa tháp văn phòng bao quanh công viên xanh trung tâm. Gamuda Central sẽ là một đô thị nơi giải trí, mua sắm, thưởng thức, ăn uống và làm việc được kết hợp thành một hoạt động phong phú, vui vẻ và tràn đầy sức sống.

Công viên Yên Sở:

Với diện tích liên hợp 102ha bao gồm những vườn xanh nhân tạo và các hồ nước tự nhiên, công viên Yên Sở được ví như “lá phổi xanh” đô thị lớn nhất Hà Nội, đem lại một không gian sống trong lành với cảnh quan tuyệt đẹp cho các cư dân sẽ sống và làm việc tại Gamuda City.

1.2.3. Các khu đô thị gắn liền với mô hình TOD trong quy hoạch hệ thống đường sắt đô thị Hà Nội.

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và áp lực gia tăng phát thải carbon, mô hình phát triển đô thị định hướng giao thông công cộng (TOD – Transit-Oriented Development) ngày càng được xem là một giải pháp quan trọng trong quy hoạch đô thị hiện đại. Khái niệm này được đề xuất bởi Peter Calthorpe vào đầu những năm 1990, nhấn mạnh việc tổ chức không gian đô thị với mật độ cao, đa chức năng trong phạm vi tiếp cận đi bộ quanh các điểm giao thông công cộng, nhằm giảm sự phụ thuộc vào phương tiện cá nhân. Theo Institute for Transportation and Development Policy, TOD không chỉ là phát triển đô thị gần giao thông công cộng mà còn là sự tích hợp chặt chẽ giữa quy hoạch sử dụng đất và hệ thống vận tải, hướng tới phát triển đô thị nén, nâng cao khả năng tiếp cận và giảm phát thải khí nhà kính.

Tại Hà Nội, mô hình TOD được định hướng triển khai gắn liền với hệ thống đường sắt đô thị, tiêu biểu là Hanoi Metro. Trong đó, hai tuyến có vai trò quan trọng trong việc hình thành các hành lang phát triển đô thị theo định hướng này là tuyến Cát Linh – Hà Đông Metro Line và tuyến Nhổn – Ga Hà Nội Metro Line. Tuyến 2A đóng vai trò kết nối khu vực trung tâm với phía Tây Nam thành phố, đặc biệt là khu vực Hà Đông – nơi tập trung nhiều khu đô thị mới có mật độ dân cư cao. Trong khi đó, tuyến 3 kết nối khu vực phía Tây với lõi trung tâm, đi qua các khu vực phát triển năng động như Cầu Giấy và Mỹ Đình, nơi tập trung nhiều chức năng đô thị quan trọng.

Đọc theo hai tuyến này, nhiều khu đô thị đã và đang hình thành trong phạm vi ảnh hưởng của các nhà ga, tạo điều kiện thuận lợi cho phát triển theo mô hình TOD. Trên hành lang tuyến 2A, có thể kể đến các khu đô thị như Khu đô thị Văn Quán (300–600m), Khu đô thị Văn Khê (200–500m), khu đô thị Mỗ Lao (500–800m), khu tái định cư La Khê (khoảng 900m) và khu đô thị Yên Nghĩa (0–300m). Đây là các khu vực có mật độ dân cư cao, phân bố tương đối gần các nhà ga, tuy nhiên phần lớn vẫn mang tính

chất khu ở đơn thuần, thiếu sự tích hợp đa chức năng và hạ tầng đi bộ, do đó hiệu quả TOD chưa được phát huy rõ rệt.

Trên hành lang tuyến 3, các khu đô thị tiêu biểu bao gồm khu đô thị Cầu Diễn (200–500m), khu đô thị Mỹ Đình I và Mỹ Đình II (500–800m), khu đô thị Thành phố Giao Lư (khoảng 900m–1km) và khu đô thị Resco Cổ Nhuế (800–1000m). So với tuyến 2A, các khu vực này có lợi thế hơn về tính đa chức năng do tập trung nhiều cơ sở giáo dục, văn phòng, thương mại và dịch vụ, tạo điều kiện thuận lợi cho phát triển TOD. Tuy nhiên, không phải tất cả các khu đô thị đều nằm trong bán kính tiếp cận đi bộ lý tưởng (500–800m), do đó vẫn tồn tại sự phụ thuộc nhất định vào các phương tiện trung chuyển.

Nhìn chung, các khu đô thị gắn với mô hình TOD trong quy hoạch hệ thống đường sắt đô thị Hà Nội hiện mới đang ở giai đoạn định hướng và bước đầu hình thành. Mặc dù đã xuất hiện các khu đô thị có vị trí thuận lợi gần nhà ga và mật độ cao, song việc thiếu đồng bộ về hạ tầng đi bộ, kết nối giao thông và sự đa dạng chức năng sử dụng đất vẫn là những hạn chế lớn. Trong thời gian tới, việc hoàn thiện hệ thống metro kết hợp với quy hoạch sử dụng đất hợp lý và phát triển hạ tầng kết nối sẽ đóng vai trò then chốt trong việc hiện thực hóa mô hình TOD, góp phần giảm phát thải khí nhà kính và hướng tới phát triển đô thị bền vững.

1.2.4. Các khu đô thị gắn liền với tuyến 2A (Cát Linh – Hà Đông).

- *Ga Cát Linh.*
- Khu tập thể Hào Nam

Khu tập thể Hào Nam là một khu nhà ở điển hình hình thành trong thời kỳ bao cấp, nằm tại khu vực trung tâm Hà Nội, thuộc quận Đống Đa. Khu vực này có vị trí thuận lợi khi nằm cách ga Cát Linh của tuyến đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông khoảng 450m, tương đương khoảng 5 phút đi bộ, nằm trong bán kính tiếp cận thuận lợi theo mô hình TOD.

Khu tập thể được xây dựng chủ yếu trong giai đoạn 1960–1980, phục vụ nhu cầu nhà ở cho cán bộ, công chức trong thời kỳ kinh tế kế hoạch hóa. Về cấu trúc không gian, các công trình chủ yếu là nhà chung cư thấp tầng (4–5 tầng), được bố trí theo dạng dãy song song, xen kẽ các khoảng sân chung. Các căn hộ có diện tích nhỏ, sử dụng hành lang chung, phản ánh đặc trưng của mô hình nhà ở tập thể thời kỳ bao cấp.

Hiện nay, khu vực này đã có sự biến đổi đáng kể về hình thái đô thị. Nhiều công trình xây chen và chung cư mini cao tầng (5–9 tầng) đã xuất hiện, làm gia tăng mật độ xây dựng và dân số. Không gian đô thị trở nên chật hẹp hơn, đồng thời gây áp lực lên hạ tầng kỹ thuật và giao thông nội bộ.

Về khả năng kết nối, khu vực có lợi thế lớn khi tiếp cận trực tiếp với ga Cát Linh và các tuyến đường chính như Hào Nam, Cát Linh. Tuy nhiên, hệ thống hạ tầng đi bộ chưa được tổ chức hiệu quả, thiếu các tuyến kết nối an toàn và liên tục tới nhà ga.

Xét theo mô hình TOD, khu tập thể Hào Nam có tiềm năng phát triển cao nhờ vị trí gần ga và mật độ dân cư lớn. Tuy nhiên, hạn chế chính là chức năng sử dụng đất còn đơn điệu (chủ yếu là nhà ở) và thiếu không gian công cộng chất lượng. Việc cải tạo, tái thiết theo hướng tăng mật độ hợp lý, phát triển không gian hỗn hợp và nâng cấp hạ tầng đi bộ là cần thiết để khai thác hiệu quả lợi thế TOD.

- Khu tập thể Giảng Võ

Khu tập thể Giảng Võ là một trong những khu nhà ở tập thể tiêu biểu của Hà Nội, nằm trong khu vực trung tâm quận Ba Đình. Khu vực này cách ga Cát Linh khoảng 750m (tương đương 10–11 phút đi bộ), nằm trong bán kính phục vụ của nhà ga theo mô hình TOD.

Được xây dựng trong giai đoạn 1960–1980, khu tập thể Giảng Võ gồm các khối nhà thấp tầng (4–5 tầng), bố trí theo dạng dãy song song, xen kẽ sân chung. Đây là mô hình nhà ở đặc trưng của thời kỳ bao cấp, với diện tích căn hộ nhỏ và sử dụng không gian chung.

Hiện nay, khu vực này đang trong quá trình cải tạo và tái thiết mạnh mẽ, tiêu biểu là việc xây dựng lại các khối nhà A1–A4. Sự chuyển đổi này cho thấy xu hướng thay thế các công trình cũ bằng các tổ hợp nhà ở cao tầng hiện đại, góp phần thay đổi đáng kể hình thái không gian đô thị.

Khu vực có quy mô dân số lớn, mật độ cư trú cao, tạo điều kiện thuận lợi cho phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng. Tuy nhiên, tương tự các khu tập thể cũ khác, khu vực vẫn thiếu các chức năng thương mại – dịch vụ quy mô lớn và các không gian công cộng hấp dẫn.

Nhìn chung, khu tập thể Giảng Võ có tiềm năng lớn để phát triển theo mô hình TOD, đặc biệt trong bối cảnh đang được cải tạo. Việc kết hợp tái thiết đô thị với phát triển không gian hỗn hợp và tăng cường kết nối đi bộ tới nhà ga sẽ là yếu tố then chốt.

- *Ga Văn Quán*

- Khu đô thị Mỗ Lao

Khu đô thị Mỗ Lao được phát triển trong giai đoạn từ khoảng 2005–2015, nằm tại phường Mộ Lao, quận Hà Đông, là một trong những khu đô thị có tốc độ phát triển nhanh trong khu vực phía Tây Nam Hà Nội.

Khu đô thị có quy mô hàng chục hecta, bao gồm nhiều loại hình nhà ở như chung cư cao tầng, nhà liền kề và biệt thự. Quy mô dân số ước tính khoảng 2–4 vạn người, tạo nên mật độ cư trú cao và hoạt động đô thị sôi động.

Về hạ tầng và tiện ích, khu đô thị Mỗ Lao có sự phát triển mạnh về thương mại – dịch vụ, với nhiều cửa hàng, nhà hàng và các hoạt động kinh doanh dọc các tuyến phố. Khu vực có khả năng kết nối tốt với các trục đường lớn như Nguyễn Trãi và Trần Phú.

Xét theo mô hình TOD, khu đô thị có lợi thế về mật độ dân cư và hoạt động đô thị đa dạng. Tuy nhiên, sự phát triển mang tính tự phát, thiếu quy hoạch đồng bộ về không gian đi bộ và kết nối trực tiếp tới nhà ga metro, làm giảm hiệu quả khai thác giao thông công cộng.

Nhìn chung, khu đô thị Mỹ Lạc có tiềm năng TOD ở mức trung bình, cần được tổ chức lại không gian và tăng cường kết nối để phát triển bền vững hơn.

- Khu đô thị Văn Quán

Khu đô thị Văn Quán được triển khai xây dựng từ đầu những năm 2000, là một trong những khu đô thị mới tiêu biểu tại quận Hà Đông trong giai đoạn đầu phát triển đô thị hóa khu vực phía Tây Nam Hà Nội. Với quy mô khoảng 60–70ha, khu đô thị được quy hoạch tương đối đồng bộ, kết hợp giữa nhà ở cao tầng, nhà thấp tầng và không gian cảnh quan, tạo nên một môi trường sống khá hoàn chỉnh.

Dự án bao gồm nhiều loại hình nhà ở như chung cư cao tầng, nhà liền kề và biệt thự, phân bố xung quanh hồ điều hòa trung tâm. Hồ Văn Quán đóng vai trò là yếu tố cảnh quan chính, giúp điều hòa vi khí hậu và nâng cao chất lượng môi trường sống cho cư dân. Tổng dân số ước tính khoảng 2–3 vạn người, tạo nên mật độ dân cư tương đối cao – một yếu tố thuận lợi cho phát triển theo định hướng TOD.

Về hạ tầng và tiện ích, khu đô thị Văn Quán được trang bị khá đầy đủ các dịch vụ thiết yếu như trường học, siêu thị, khu thể thao, dịch vụ ăn uống và các không gian công cộng. Ngoài ra, khu vực này có khả năng kết nối tương đối thuận lợi với các trục giao thông chính như đường Nguyễn Trãi, Trần Phú và tuyến vành đai 3, giúp tăng khả năng tiếp cận đến các khu vực khác trong thành phố.

Tuy nhiên, xét theo mô hình TOD, khu đô thị Văn Quán dù nằm trong bán kính khoảng 300–600m từ các ga của tuyến Cát Linh – Hà Đông Metro Line, nhưng vẫn còn một số hạn chế. Cụ thể, hệ thống hạ tầng dành cho người đi bộ chưa thực sự thuận tiện, thiếu các tuyến kết nối trực tiếp và an toàn đến nhà ga. Bên cạnh đó, mặc dù có một số chức năng dịch vụ, nhưng mức độ tích hợp đa chức năng vẫn chưa cao, chưa hình thành được các trung tâm hoạt động đô thị sôi động gắn với nhà ga.

Nhìn chung, khu đô thị Văn Quán có nhiều điều kiện thuận lợi để phát triển theo mô hình TOD nhờ mật độ dân cư cao, vị trí gần tuyến metro và quy hoạch tương đối đồng bộ. Tuy nhiên, để phát huy hiệu quả, cần có sự cải thiện về hạ tầng đi bộ, tăng cường kết nối giao thông công cộng và bổ sung các chức năng thương mại – dịch vụ, từ đó chuyển đổi từ mô hình đô thị truyền thống sang mô hình TOD thực chất.

- *Ga La Khê.*

- Khu đô thị Văn Phú.

Khu đô thị Văn Phú là một trong những khu đô thị hình thành trong giai đoạn phát triển mạnh của khu vực Hà Đông sau khi mở rộng địa giới hành chính Hà Nội, nằm trong phạm vi ảnh hưởng của tuyến đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông. Khu đô thị

này cách ga La Khê khoảng 750m (tương đương 10–11 phút đi bộ), nằm trong ngưỡng tiếp cận tương đối thuận lợi theo mô hình phát triển đô thị định hướng giao thông công cộng (TOD).

Khu đô thị Văn Phú được triển khai xây dựng trong giai đoạn khoảng 2008–2013, với đặc trưng là các cụm nhà ở cao tầng, trong đó phần lớn là các tòa chung cư phục vụ tái định cư. Quy mô khu đô thị gồm nhiều khối nhà với mật độ xây dựng cao, dân số ước tính từ vài nghìn đến trên một vạn người. Về cấu trúc không gian, khu vực này mang tính chất đơn giản, chủ yếu phục vụ chức năng ở, với mức độ tổ chức không gian và cảnh quan đô thị chưa thực sự nổi bật so với các khu đô thị mới đồng bộ khác trong khu vực.

Về hạ tầng và khả năng kết nối, khu đô thị Văn Phú có lợi thế khi nằm gần tuyến metro và có khả năng tiếp cận các trục giao thông chính của quận Hà Đông. Tuy nhiên, hệ thống hạ tầng kỹ thuật và tiện ích đô thị trong khu vực vẫn còn hạn chế, đặc biệt là sự thiếu hụt các không gian công cộng chất lượng cao và các dịch vụ thương mại – dịch vụ quy mô lớn. Ngoài ra, hệ thống giao thông nội bộ và hạ tầng đi bộ chưa được tổ chức hiệu quả, làm giảm khả năng tiếp cận thuận tiện từ khu đô thị đến nhà ga.

Xét theo mô hình TOD, mặc dù có lợi thế về khoảng cách tới ga và mật độ dân cư cao, khu đô thị Văn Phú vẫn chưa phát huy được hiệu quả của mô hình này. Nguyên nhân chủ yếu là do cấu trúc sử dụng đất còn mang tính đơn chức năng (chủ yếu là nhà ở), thiếu sự tích hợp đa chức năng và chưa hình thành các không gian đô thị sôi động gắn với nhà ga. Đồng thời, chất lượng môi trường sống và hạ tầng ở mức trung bình cũng làm hạn chế khả năng thu hút và phát triển các hoạt động đô thị đa dạng.

Nhìn chung, khu đô thị Văn Phú là một ví dụ điển hình của các khu đô thị mới có vị trí thuận lợi gần tuyến metro nhưng chưa được quy hoạch theo định hướng TOD một cách rõ ràng. Trong tương lai, cần có các giải pháp bổ sung chức năng thương mại – dịch vụ, nâng cấp hạ tầng kỹ thuật và cải thiện hệ thống kết nối đi bộ tới nhà ga, từ đó chuyển đổi khu đô thị theo hướng phát triển hỗn hợp và tận dụng hiệu quả lợi thế của hệ thống giao thông công cộng, góp phần hướng tới phát triển đô thị bền vững.

- *Ga Láng*

• Khu tập thể Vĩnh Hồ

Khu tập thể Vĩnh Hồ nằm gần ga Láng của tuyến đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông, với khoảng cách khoảng 450m, tương đương khả năng tiếp cận đi bộ thuận lợi theo mô hình TOD.

Khu vực được xây dựng trong giai đoạn 1960–1980, gồm các khối nhà chung cư thấp tầng (4–5 tầng), bố trí theo dạng dãy song song, xen kẽ sân chung. Qua thời gian, khu vực đã xuất hiện nhiều công trình xây chen và chung cư mini, làm gia tăng mật độ xây dựng và dân số.

Hiện trạng khu vực đang đối mặt với tình trạng xuống cấp của công trình, hạ tầng kỹ thuật quá tải và không gian công cộng bị thu hẹp. Hệ thống giao thông nội bộ chật hẹp, thiếu các tuyến đi bộ an toàn kết nối trực tiếp với nhà ga.

Mặc dù vậy, khu vực có lợi thế lớn về vị trí và khả năng tiếp cận giao thông công cộng. Đây là điều kiện quan trọng để phát triển theo mô hình TOD nếu được cải tạo và nâng cấp đồng bộ.

- *Ga Thượng Đình*

- Khu đô thị Royal City

Khu đô thị Royal City là một trong những tổ hợp đô thị hiện đại quy mô lớn tại Hà Nội, được xây dựng trong giai đoạn 2010–2014, nằm trên trục đường Nguyễn Trãi, thuộc quận Thanh Xuân. Với quy mô khoảng 12ha, khu đô thị được phát triển theo mô hình tổ hợp đa chức năng, bao gồm nhà ở, thương mại, dịch vụ và giải trí.

Dự án gồm nhiều tòa nhà cao tầng (30–35 tầng) với số lượng căn hộ lớn, dân số ước tính khoảng 15.000–20.000 người. Điểm nổi bật của khu đô thị là hệ thống trung tâm thương mại, không gian ngầm và các tiện ích cao cấp, tạo nên một môi trường sống hiện đại và khép kín.

Về hạ tầng và kết nối, khu đô thị có vị trí thuận lợi khi nằm gần ga Thượng Đình của tuyến metro, đồng thời tiếp cận trực tiếp với trục Nguyễn Trãi – một trong những tuyến giao thông huyết mạch của thành phố. Điều này tạo điều kiện thuận lợi cho việc kết nối với các khu vực khác trong đô thị.

Xét theo mô hình TOD, Royal City có nhiều yếu tố phù hợp như mật độ cao, tích hợp đa chức năng và khả năng thu hút lượng lớn người sử dụng. Tuy nhiên, mô hình phát triển mang tính “khép kín”, thiếu sự liên kết không gian với khu vực xung quanh và nhà ga metro, làm hạn chế khả năng phát huy vai trò của giao thông công cộng.

Nhìn chung, Royal City là một ví dụ điển hình của khu đô thị hiện đại có tiềm năng TOD cao, nhưng cần cải thiện tính mở, tăng cường kết nối đi bộ và liên kết với hệ thống giao thông công cộng để phát triển theo hướng bền vững.

- Khu đô thị Hapulico

Khu đô thị Hapulico được xây dựng trong giai đoạn khoảng 2009–2012, nằm tại số 1 Nguyễn Huy Tưởng, quận Thanh Xuân. Với quy mô khoảng 4,3ha, khu đô thị được quy hoạch theo mô hình khu ở kết hợp thương mại – dịch vụ ở mức độ nhất định.

Dự án gồm 8 tòa nhà cao tầng (17–24 tầng), với quy mô dân số khoảng 8.000–12.000 người. Không gian kiến trúc tương đối đồng bộ, có các tiện ích nội khu như dịch vụ thương mại, văn phòng và không gian sinh hoạt chung.

Về kết nối, khu đô thị nằm trong phạm vi khoảng 800–1000m từ ga Thượng Đình, có khả năng tiếp cận tương đối thuận lợi tới tuyến metro. Đồng thời, khu vực tiếp giáp với các trục giao thông lớn như Nguyễn Trãi và Lê Văn Lương, giúp tăng khả năng liên kết vùng.

Tuy nhiên, xét theo mô hình TOD, khu đô thị Hapulico vẫn còn hạn chế về mức độ tích hợp chức năng và chưa tạo được các không gian công cộng hấp dẫn. Hạ tầng đi bộ và kết nối trực tiếp tới nhà ga chưa được tổ chức hiệu quả, làm giảm khả năng khai thác giao thông công cộng.

Nhìn chung, khu đô thị Hapulico có tiềm năng phát triển theo TOD ở mức trung bình, cần được cải thiện về kết nối không gian và bổ sung các chức năng đô thị để nâng cao hiệu quả sử dụng.

- Khu chung cư Thượng Đình

Khu chung cư Thượng Đình nằm gần ga Thượng Đình, với khoảng cách khoảng 500m, thuộc bán kính tiếp cận thuận lợi theo mô hình TOD.

Được xây dựng trong thời kỳ bao cấp, khu vực gồm các công trình nhà ở thấp tầng (4–5 tầng), bố trí dạng dãy, xen kẽ sân chung. Quy mô dân số tương đối lớn, mật độ cư trú cao.

Về kết nối, khu vực có lợi thế khi nằm gần trục Nguyễn Trãi – một trong những tuyến giao thông quan trọng của Hà Nội. Tuy nhiên, hệ thống hạ tầng kỹ thuật và không gian công cộng còn hạn chế, chưa đáp ứng tốt nhu cầu của cư dân.

Xét theo mô hình TOD, khu vực có tiềm năng phát triển nhưng còn thiếu các chức năng hỗn hợp và chưa hình thành các không gian đô thị sôi động gắn với nhà ga.

- *Ga Vành đai 3.*

- Khu tập thể Thanh Xuân Bắc

Khu tập thể Thanh Xuân Bắc nằm trong phạm vi ảnh hưởng của ga Vành đai 3, với khoảng cách khoảng 400–600m, thuận lợi cho tiếp cận đi bộ.

Khu vực được xây dựng trong giai đoạn 1970–1985, gồm khoảng 9 khối nhà chung cư thấp tầng (4–5 tầng), bố trí theo dạng dãy. Quy mô dân số tương đối lớn, mật độ cư trú cao.

Hiện nay, khu vực đã xuống cấp sau thời gian dài sử dụng, đồng thời xuất hiện tình trạng coi nới, làm gia tăng mật độ xây dựng và gây áp lực lên hạ tầng.

Tuy nhiên, khu vực có lợi thế lớn khi nằm gần các trục giao thông quan trọng như Nguyễn Trãi, Khuất Duy Tiến và vành đai 3, đồng thời kết nối trực tiếp với metro. Đây là điều kiện thuận lợi để phát triển theo định hướng TOD.

- Khu tập thể Thanh Xuân Nam

Khu tập thể Thanh Xuân Nam nằm gần khu vực ga Vành đai 3, với khoảng cách tương tự Thanh Xuân Bắc (400–600m), thuộc phạm vi tiếp cận thuận lợi theo mô hình TOD.

Khu vực gồm khoảng 19 khối nhà tập thể thấp tầng, được xây dựng trong thời kỳ bao cấp. Không gian kiến trúc mang đặc trưng chung của các khu tập thể cũ, với mật độ dân cư cao.

Hiện trạng khu vực đang đối mặt với nhiều vấn đề như xuống cấp công trình, thiếu không gian công cộng, hạ tầng kỹ thuật chưa đồng bộ và hệ thống giao thông nội bộ hạn chế.

Xét theo mô hình TOD, khu vực có tiềm năng phát triển nhờ vị trí gần ga và mật độ dân cư lớn. Tuy nhiên, cần có các giải pháp tái thiết đô thị, phát triển chức năng hỗn hợp và cải thiện hạ tầng đi bộ để khai thác hiệu quả lợi thế này.

- *Ga Phùng Khoang*

• Khu đô thị Trung Văn

Khu đô thị Trung Văn được triển khai xây dựng vào khoảng giai đoạn 2005–2008, nằm trên địa bàn phường Trung Văn, quận Nam Từ Liêm, trong khu vực phát triển đô thị mạnh phía Tây Nam Hà Nội. Với quy mô khoảng 15–16ha, khu đô thị này được quy hoạch theo mô hình khu ở kết hợp giữa nhà cao tầng và thấp tầng, tuy nhiên mức độ hoàn thiện và đồng bộ không cao so với các khu đô thị mới cùng thời kỳ.

Dự án bao gồm các tòa chung cư cao tầng xen kẽ với nhà liền kề và một số công trình dịch vụ cơ bản. Quy mô dân số ước tính khoảng 1–2 vạn người, tạo nên mật độ cư trú ở mức trung bình. Không gian đô thị chưa thực sự nổi bật về cảnh quan, thiếu các yếu tố điểm nhấn như công viên lớn hoặc mặt nước quy mô lớn.

Về hạ tầng và kết nối, khu đô thị có lợi thế khi nằm gần ga Phùng Khoang của tuyến metro Cát Linh – Hà Đông, trong bán kính khoảng 800–1000m. Đồng thời, khu vực tiếp giáp với các trục giao thông quan trọng như đường Tố Hữu, Lương Thế Vinh và khu vực tập trung nhiều trường đại học, làm gia tăng nhu cầu đi lại bằng giao thông công cộng.

Tuy nhiên, xét theo mô hình TOD, khu đô thị Trung Văn vẫn còn nhiều hạn chế. Hệ thống hạ tầng đi bộ chưa hoàn thiện, thiếu các tuyến kết nối trực tiếp, liên tục và an toàn tới nhà ga. Bên cạnh đó, cấu trúc sử dụng đất còn mang tính đơn chức năng, thiếu các hoạt động thương mại – dịch vụ quy mô lớn và chưa hình thành các không gian công cộng sôi động.

Nhìn chung, khu đô thị Trung Văn có tiềm năng phát triển theo mô hình TOD nhờ vị trí gần ga và nhu cầu giao thông lớn từ khu vực lân cận. Tuy nhiên, để phát huy hiệu quả, cần tăng cường kết nối không gian, bổ sung chức năng dịch vụ và nâng cao chất lượng môi trường đô thị.

- *Ga Văn Khê*

• Khu đô thị Văn La

Khu đô thị Văn La được xây dựng trong giai đoạn khoảng 2007–2009, nằm tại phường La Khê, quận Hà Đông. Với quy mô khoảng 12ha, khu đô thị chủ yếu phát triển nhà ở thấp tầng kết hợp một số công trình cao tầng.

Quy mô dân số ước tính khoảng 1,5–2,5 vạn người, mật độ cư trú tương đối cao. Không gian đô thị mang tính chất khu ở truyền thống, chưa có nhiều điểm nhấn về cảnh quan và tiện ích công cộng.

Về kết nối, khu đô thị nằm gần ga La Khê và ga Văn Khê của tuyến metro, trong bán kính khoảng 400–800m, tạo điều kiện thuận lợi cho tiếp cận giao thông công cộng.

Tuy nhiên, xét theo mô hình TOD, khu đô thị Văn La còn hạn chế về chức năng hỗn hợp, thiếu các hoạt động thương mại – dịch vụ quy mô lớn và chưa hình thành các không gian công cộng chất lượng cao.

Nhìn chung, khu đô thị Văn La có tiềm năng phát triển TOD nhờ vị trí gần ga, nhưng cần bổ sung chức năng đô thị và nâng cấp hạ tầng để phát huy hiệu quả.

- *Ga Yên Nghĩa*

• Khu nhà ở Bộ Tư lệnh Thủ đô

Khu nhà ở Bộ Tư lệnh Thủ đô được xây dựng trong giai đoạn khoảng 2010–2015, nằm tại phường Phúc La, quận Hà Đông. Đây là khu nhà ở phục vụ cán bộ, chiến sĩ với quy mô trung bình, bao gồm các khối chung cư và nhà thấp tầng.

Quy mô dân số ở mức vài nghìn người, mật độ cư trú không quá cao so với các khu đô thị khác trong khu vực. Không gian sống tương đối ổn định, ít biến động và có tính tổ chức cao.

Về kết nối, khu vực nằm trong bán kính khoảng 900m từ ga Yên Nghĩa – một đầu mối giao thông quan trọng của tuyến metro, kết hợp với bến xe liên tỉnh.

Tuy nhiên, xét theo mô hình TOD, khu vực này có mức độ phát triển trung bình do tính chất đặc thù (khu ở quân đội), ít tích hợp chức năng thương mại – dịch vụ và hạn chế về tính mở không gian.

Nhìn chung, khu nhà ở Bộ Tư lệnh Thủ đô có khả năng tham gia vào mô hình TOD ở mức trung bình, nhưng không phải là khu vực phát triển động lực chính.

- *Ga Hà Đông*

• Khu đô thị Xa La

Khu đô thị Xa La nằm tại phường Phúc La, quận Hà Đông, là một trong những khu đô thị có quy mô lớn trong khu vực phía Tây Nam Hà Nội. Khu đô thị nằm trong phạm vi ảnh hưởng của ga Hà Đông, với khoảng cách khoảng 800–1000m, thuộc bán kính tiếp cận trung bình theo mô hình TOD.

Khu đô thị được phát triển trong giai đoạn khoảng 2008–2015, bao gồm nhiều tòa chung cư cao tầng (20–30 tầng) với mật độ xây dựng cao. Quy mô dân số lớn, ước tính lên tới hàng vạn người, tạo nên một khu vực có mật độ cư trú rất cao.

Về cấu trúc không gian, khu đô thị chủ yếu phục vụ chức năng ở, với một số tiện ích cơ bản như trường học, chợ và dịch vụ nhỏ lẻ. Tuy nhiên, không gian công cộng và cảnh quan đô thị chưa thực sự nổi bật, thiếu các khu vực sinh hoạt chung quy mô lớn.

Về kết nối, khu vực có khả năng tiếp cận các trục giao thông chính như đường 70, Phùng Hưng và khu vực trung tâm quận Hà Đông. Tuy nhiên, kết nối trực tiếp tới ga metro chưa thực sự thuận tiện do khoảng cách và hệ thống hạ tầng đi bộ chưa hoàn thiện.

Xét theo mô hình TOD, khu đô thị Xa La có lợi thế về mật độ dân cư cao nhưng còn hạn chế về chức năng hỗn hợp và khả năng kết nối giao thông công cộng. Cần cải thiện hạ tầng kết nối, bổ sung dịch vụ và tổ chức lại không gian đô thị để phát huy hiệu quả.

- *Ga Thái Hà*

- Khu dân cư – thương mại Thái Hà – Trung Liệt

Khu vực Thái Hà – Trung Liệt là một khu dân cư hiện hữu kết hợp với hoạt động thương mại sôi động, nằm tại quận Đống Đa, trong phạm vi ảnh hưởng trực tiếp của ga Thái Hà. Với khoảng cách tiếp cận khoảng 200–600m, khu vực này nằm trong bán kính phục vụ thuận lợi theo mô hình TOD.

Khu vực không phải là một khu đô thị mới quy hoạch đồng bộ, mà phát triển theo dạng phố truyền thống kết hợp thương mại dịch vụ. Các công trình chủ yếu là nhà ống cao 3–6 tầng, xen kẽ một số tòa chung cư mini và văn phòng nhỏ.

Điểm nổi bật của khu vực là mật độ hoạt động thương mại cao, với nhiều cửa hàng, văn phòng, dịch vụ ăn uống và bán lẻ dọc theo các tuyến phố Thái Hà, Chùa Bộc, Tây Sơn. Điều này tạo nên một không gian đô thị sôi động, có khả năng thu hút lượng lớn người di chuyển hàng ngày.

Về hạ tầng, khu vực có lợi thế lớn khi nằm trên các trục giao thông chính, đồng thời gần ga metro. Tuy nhiên, hệ thống giao thông nội bộ và vỉa hè còn hạn chế, thường xuyên xảy ra tình trạng lấn chiếm, gây khó khăn cho người đi bộ.

Xét theo mô hình TOD, đây là khu vực có đặc trưng gần với mô hình TOD tự phát, với mật độ cao và chức năng hỗn hợp rõ rệt. Tuy nhiên, để phát triển bền vững, cần cải thiện hạ tầng đi bộ, tổ chức lại không gian vỉa hè và tăng cường kết nối trực tiếp với nhà ga.

1.3. Tổng quan các tài liệu, dự án, phương pháp, công cụ tính toán phát thải.

1.3.1. Các công trình nghiên cứu trên thế giới.

Trên thế giới, nghiên cứu về phát thải carbon trong đô thị ngày càng chuyển từ mô tả xu hướng sang lượng hóa chi tiết theo không gian và hành vi, đặc biệt thông qua việc phân tích các hoạt động di chuyển và cấu trúc không gian đô thị. Các công trình gần đây không chỉ dừng ở việc xác định lượng phát thải mà còn làm rõ cơ chế hình thành phát thải thông qua sự tương tác giữa sử dụng đất, hạ tầng và hành vi của người dân.

Một hướng tiếp cận phổ biến là sử dụng dữ liệu khảo sát quy mô lớn kết hợp với các mô hình thống kê để phân tích mối quan hệ giữa đặc điểm không gian đô thị và phát

thải. Tiêu biểu, nghiên cứu “Investigating the impacts of transit-oriented development on transport-related CO₂ emissions” (2022) đã thu thập dữ liệu của hơn 31.000 cư dân, bao gồm đặc điểm hộ gia đình, tần suất di chuyển, phương tiện và khoảng cách chuyển đi. Trên cơ sở đó, nhóm tác giả xây dựng các biến đại diện cho hành vi di chuyển và áp dụng mô hình hồi quy đa biến bằng phần mềm thống kê (SPSS/R). Kết quả cho thấy những khu vực có khả năng tiếp cận cao với hệ thống vận tải công cộng và cấu trúc không gian nén có mức phát thải thấp hơn rõ rệt, qua đó khẳng định vai trò của tổ chức không gian đô thị trong kiểm soát phát thải.

Bên cạnh đó, cách tiếp cận dựa trên hệ số phát thải kết hợp với phân tích không gian cũng được sử dụng rộng rãi. Nghiên cứu “Assessment of carbon emissions from TOD subway first/last mile trips” (2024) đã khai thác dữ liệu GPS và nhật ký hành trình để xác định quãng đường và phương thức di chuyển trong các chặng đầu – cuối. Dữ liệu này được tích hợp trong môi trường GIS nhằm phân vùng không gian theo mức độ tiếp cận hạ tầng, từ đó tính toán phát thải dựa trên hệ số tương ứng cho từng loại phương tiện. Kết quả cho thấy tại các khu vực có tổ chức không gian hợp lý, lượng phát thải bình quân đầu người trong các chặng ngắn giảm đáng kể.

Ở góc độ phân tích không gian, nghiên cứu tại Thượng Hải (2016) đã xây dựng cơ sở dữ liệu bao gồm mật độ xây dựng, chức năng sử dụng đất và mức độ tiếp cận hạ tầng. Thông qua các công cụ như ArcGIS và GeoDa, nhóm tác giả tiến hành phân tích tự tương quan không gian (ESDA) và mô hình hồi quy không gian để xác định mối quan hệ với phát thải carbon. Kết quả cho thấy các khu vực có mật độ cao và tổ chức đa chức năng thường gắn với mức phát thải thấp hơn.

Ngoài ra, phương pháp tiếp cận “bottom-up” dựa trên dữ liệu hành trình thực tế cũng cho phép lượng hóa phát thải với độ chi tiết cao. Nghiên cứu sử dụng dữ liệu GPS (2018) đã thu thập hành trình cá nhân thông qua thiết bị định vị, sau đó phân loại theo phương tiện và thời gian, trước khi đưa vào mô hình COPERT để tính toán phát thải. Kết quả cho phép xác định chính xác đóng góp của từng loại phương tiện và từng khung giờ vào tổng phát thải đô thị.

Trong khi đó, các mô hình kịch bản được sử dụng để đánh giá xu hướng phát thải trong dài hạn. Nghiên cứu ứng dụng LEAP (2020) đã thiết lập các kịch bản phát triển dựa trên giả định về thay đổi trong cấu trúc không gian và hành vi di chuyển, với dữ liệu đầu vào gồm nhu cầu đi lại, cơ cấu phương tiện và mức tiêu thụ năng lượng. Thông qua phần mềm LEAP, nhóm tác giả mô phỏng lượng phát thải trong tương lai và chỉ ra rằng định hướng phát triển đô thị có thể tạo ra sự khác biệt đáng kể về phát thải.

Ở cấp độ mô phỏng vi mô, mô hình dựa trên hoạt động (MATSim, 2019) cho phép tái hiện hành vi di chuyển của từng cá nhân trong không gian đô thị. Nhóm nghiên cứu đã xây dựng một quần thể giả lập với các lịch trình hoạt động cụ thể, từ đó mô

phòng sự tương tác trong mạng lưới không gian và tính toán phát thải dựa trên cường độ sử dụng phương tiện. Kết quả cho thấy thay đổi trong cấu trúc không gian có thể làm thay đổi hành vi và kéo theo giảm phát thải.

Đáng chú ý, một số nghiên cứu đã mở rộng phạm vi đánh giá thông qua phương pháp vòng đời (LCA). Nghiên cứu (2021) đã phân tách hệ thống thành các giai đoạn xây dựng, vận hành và bảo trì, sử dụng phần mềm SimaPro/GaBi để tính toán phát thải ở từng giai đoạn. Kết quả cho thấy mặc dù giai đoạn vận hành chiếm tỷ trọng lớn, nhưng phát thải từ giai đoạn xây dựng cũng không thể bỏ qua.

Song song với đó, sự phát triển của dữ liệu lớn đã mở ra hướng tiếp cận mới trong phân tích phát thải. Nghiên cứu (2022) sử dụng dữ liệu từ cảm biến, thiết bị di động và hệ thống giám sát đô thị, kết hợp với các thuật toán học máy trong môi trường Python để dự báo phát thải theo không gian và thời gian. Kết quả giúp xác định các khu vực có cường độ phát thải cao và hỗ trợ quá trình ra quyết định.

Ngoài ra, các nghiên cứu đánh giá tác động của hệ thống hạ tầng mới cũng được triển khai theo phương pháp so sánh trước – sau. Nghiên cứu về hệ thống metro (2020) đã thu thập dữ liệu trước và sau khi vận hành, sử dụng GIS để phân tích sự thay đổi không gian và tính toán phát thải dựa trên biến động trong cơ cấu phương tiện và quãng đường di chuyển. Kết quả cho thấy sự cải thiện rõ rệt về hiệu quả phát thải tại các hành lang chính.

Cuối cùng, mô hình tích hợp sử dụng đất – di chuyển (LUTI, 2023) cho phép phân tích đồng thời mối quan hệ giữa phát triển không gian và hành vi di chuyển. Sử dụng UrbanSim kết hợp GIS, nghiên cứu mô phỏng sự thay đổi trong phân bố dân cư và hoạt động, từ đó tính toán nhu cầu di chuyển và chuyển đổi thành lượng phát thải. Kết quả cho thấy các mô hình phát triển đô thị hợp lý có thể góp phần giảm phát thải trong dài hạn.

Nhìn chung, các nghiên cứu trên thế giới cho thấy phát thải carbon trong đô thị đã được tiếp cận thông qua nhiều phương pháp và công cụ khác nhau, bao gồm kiểm kê dựa trên hệ số phát thải, mô hình hóa hành vi, phân tích không gian và đánh giá vòng đời. Mỗi hướng tiếp cận đều phát huy những ưu điểm riêng: các phương pháp dựa trên hệ số cho phép tính toán nhanh và có tính chuẩn hóa; các mô hình hành vi và kịch bản hỗ trợ phân tích động thái và dự báo; trong khi các công cụ phân tích không gian và dữ liệu lớn giúp làm rõ sự phân bố phát thải theo không gian đô thị. Tuy nhiên, các phương pháp này cũng bộc lộ những hạn chế nhất định, đặc biệt liên quan đến yêu cầu dữ liệu, mức độ phức tạp trong triển khai và khả năng phản ánh đồng thời các yếu tố không gian, hành vi và công nghệ.

Bên cạnh đó, phần lớn các nghiên cứu hiện nay vẫn có xu hướng tiếp cận theo từng khía cạnh riêng lẻ, trong khi việc tích hợp các yếu tố cấu trúc không gian đô thị, hành vi di chuyển và khung kiểm kê phát thải tiêu chuẩn chưa thực sự đầy đủ. Mặc dù

các nghiên cứu gắn với định hướng phát triển đô thị theo mô hình TOD đã bước đầu làm rõ tiềm năng giảm phát thải, song vẫn chưa hình thành được một cách tiếp cận mang tính hệ thống, có khả năng kết hợp linh hoạt giữa các phương pháp và công cụ trong các điều kiện dữ liệu khác nhau.

Từ đó có thể thấy, bên cạnh sự đa dạng về phương pháp, vẫn tồn tại nhu cầu về một hướng tiếp cận tích hợp hơn, vừa đảm bảo tính khả thi trong triển khai, vừa phản ánh được mối quan hệ giữa không gian đô thị và phát thải carbon. Đây cũng chính là vấn đề đặt ra cần được tiếp tục xem xét trong các bối cảnh nghiên cứu cụ thể.

1.3.2. Các công trình nghiên cứu tại Việt Nam.

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về phát thải carbon trong đô thị chủ yếu được thực hiện bởi các cơ quan quản lý nhà nước, viện nghiên cứu và các nhóm giảng viên – nghiên cứu sinh tại các trường đại học. Các hướng tiếp cận tập trung vào kiểm kê phát thải, phân tích hành vi di chuyển và bước đầu tích hợp yếu tố không gian đô thị. Tuy nhiên, cách triển khai thường ưu tiên tính khả thi về dữ liệu hơn là xây dựng các mô hình phức tạp.

Trong nhóm nghiên cứu kiểm kê phát thải, báo cáo kiểm kê khí nhà kính tại Hà Nội do Bộ Tài nguyên và Môi trường (2020) – với sự tham gia của các chuyên gia môi trường và quy hoạch đô thị – đã áp dụng phương pháp hệ số phát thải theo hướng dẫn IPCC. Quy trình thực hiện bắt đầu từ việc thu thập số liệu tiêu thụ nhiên liệu và các chỉ số hoạt động đô thị từ niên giám thống kê và báo cáo ngành; sau đó chuẩn hóa dữ liệu và phân loại theo lĩnh vực phát thải; cuối cùng tính toán lượng phát thải thông qua hệ số tương ứng bằng công cụ Excel. Kết quả cho thấy khu vực đô thị trung tâm có cường độ phát thải cao, phản ánh sự tập trung của các hoạt động kinh tế – xã hội.

Ở quy mô đô thị lớn hơn, nghiên cứu tại TP. Hồ Chí Minh do nhóm giảng viên Trường Đại học Bách khoa TP.HCM, đứng đầu là Nguyễn Thị Thanh Huyền (2019) thực hiện đã sử dụng phương pháp kiểm kê “top-down” theo khung GPC. Nhóm nghiên cứu tiến hành tổng hợp dữ liệu tiêu thụ năng lượng cấp thành phố, chuyển đổi về đơn vị phát thải thông qua hệ số chuẩn, sau đó phân bổ theo các khu vực chức năng đô thị. Toàn bộ quá trình được thực hiện trên Excel kết hợp hướng dẫn GPC. Kết quả cho thấy phát thải tập trung tại các khu vực có mật độ hoạt động cao và có xu hướng gia tăng cùng với quá trình đô thị hóa.

Bổ sung cho hướng tiếp cận kiểm kê, nghiên cứu của Trần Quang Phúc (giảng viên) và các nghiên cứu sinh, 2021 đã tập trung vào hành vi di chuyển tại Hà Nội thông qua phương pháp khảo sát kết hợp hệ số phát thải. Quy trình nghiên cứu bao gồm thiết kế bảng hỏi, khảo sát hộ gia đình, xử lý dữ liệu bằng SPSS, sau đó chuyển đổi quãng đường và phương tiện di chuyển thành lượng phát thải tương ứng. Kết quả cho thấy phương tiện cá nhân đóng vai trò chi phối trong cấu trúc phát thải, đồng thời chỉ ra tiềm năng giảm phát thải thông qua thay đổi hành vi.

Ở góc độ không gian, nghiên cứu của Lê Thị Mai Anh (giảng viên, Đại học Xây dựng) và cộng sự (2022) đã áp dụng phương pháp phân tích không gian (GIS) để đánh giá sự phân bố phát thải tại Đà Nẵng. Nhóm nghiên cứu xây dựng cơ sở dữ liệu không gian bao gồm sử dụng đất, mật độ dân cư và mạng lưới hạ tầng; sau đó sử dụng ArcGIS để phân tích, chồng lớp dữ liệu và xác định các khu vực có cường độ phát thải cao. Kết quả cho thấy phát thải có xu hướng tập trung dọc theo các trục phát triển chính.

Trong lĩnh vực mô hình hóa, nghiên cứu của Nguyễn Đức Minh (nghiên cứu sinh ngành môi trường, 2021) đã sử dụng mô hình kịch bản trong phần mềm LEAP để đánh giá các phương án phát triển đô thị. Quy trình thực hiện bao gồm xây dựng kịch bản dân số, nhu cầu di chuyển và tiêu thụ năng lượng; nhập dữ liệu vào LEAP; sau đó mô phỏng và so sánh kết quả phát thải giữa các kịch bản. Kết quả cho thấy định hướng phát triển hợp lý có thể giúp giảm phát thải trong dài hạn.

Ở cấp độ phân tích định lượng, nghiên cứu của Phạm Hoàng Nam (giảng viên) và cộng sự (2020) đã sử dụng mô hình hồi quy nhằm xác định các yếu tố ảnh hưởng đến lựa chọn phương tiện. Dữ liệu khảo sát được xử lý bằng SPSS, sau đó liên hệ với lượng phát thải thông qua hệ số tương ứng. Kết quả chỉ ra rằng khoảng cách di chuyển và khả năng tiếp cận hạ tầng là các yếu tố quan trọng chi phối phát thải.

Một hướng tiếp cận mới hơn là khai thác dữ liệu hành trình. Nghiên cứu của Đỗ Văn Hùng (nhóm nghiên cứu trẻ, 2022) đã sử dụng dữ liệu GPS kết hợp phân tích dữ liệu lớn, trong đó dữ liệu hành trình được thu thập từ thiết bị di động, xử lý bằng Python và GIS, sau đó chuyển đổi thành quãng đường và lượng phát thải tương ứng. Cách tiếp cận này cho phép phân tích phát thải với độ chi tiết cao theo không gian và thời gian.

Ở phạm vi đánh giá tác động hạ tầng, nghiên cứu của Nguyễn Thị Thu Trang (giảng viên quy hoạch đô thị, 2023) đã áp dụng phương pháp so sánh trước – sau, kết hợp với GIS để phân tích sự thay đổi trong hành vi di chuyển. Quy trình bao gồm thu thập dữ liệu trước và sau khi hạ tầng đi vào hoạt động, chuẩn hóa và so sánh lượng phát thải tương ứng. Kết quả bước đầu cho thấy sự chuyển dịch phương thức di chuyển có thể góp phần giảm phát thải.

Ngoài ra, nghiên cứu của Trần Văn Bình (viện nghiên cứu xây dựng, 2022) đã sử dụng phương pháp đánh giá vòng đời (LCA) để phân tích phát thải trong xây dựng hạ tầng đô thị. Dữ liệu về vật liệu và năng lượng được nhập vào phần mềm SimaPro, từ đó tính toán phát thải cho từng giai đoạn. Kết quả cho thấy giai đoạn xây dựng chiếm tỷ trọng đáng kể trong tổng phát thải.

Cuối cùng, nghiên cứu của Nguyễn Hữu Dũng (giảng viên) và cộng sự (2023) đã tiếp cận theo hướng tích hợp, sử dụng GIS kết hợp phân tích thống kê (ArcGIS và SPSS) để đánh giá mối quan hệ giữa cấu trúc không gian và phát thải. Quy trình bao gồm xây dựng cơ sở dữ liệu, phân tích tương quan và lượng hóa phát thải theo khu vực.

Kết quả cho thấy các khu vực có mật độ cao và chức năng hỗn hợp có xu hướng giảm nhu cầu di chuyển và phát thải.

Nhìn chung, các nghiên cứu trong nước đã bước đầu tiếp cận vấn đề phát thải carbon đô thị thông qua nhiều phương pháp và công cụ khác nhau, bao gồm kiểm kê dựa trên hệ số phát thải, phân tích hành vi di chuyển, ứng dụng hệ thống thông tin địa lý và một số mô hình dự báo. Những cách tiếp cận này góp phần cung cấp cơ sở dữ liệu và kinh nghiệm thực tiễn trong việc đánh giá phát thải, đồng thời cho thấy khả năng áp dụng đa dạng các công cụ trong điều kiện đô thị Việt Nam.

Tuy nhiên, khi so sánh với các nghiên cứu trên thế giới, có thể nhận thấy rằng các phương pháp và công cụ được sử dụng trong nước thường được áp dụng riêng lẻ, phụ thuộc vào điều kiện dữ liệu và mục tiêu nghiên cứu cụ thể, thay vì được lựa chọn và kết hợp một cách có hệ thống. Các phương pháp kiểm kê tuy có ưu điểm về tính đơn giản và khả năng triển khai, nhưng hạn chế trong việc phản ánh yếu tố không gian và hành vi; trong khi đó, các công cụ phân tích không gian hoặc mô hình hóa lại đòi hỏi dữ liệu chi tiết và quy trình xử lý phức tạp, nên chưa được áp dụng rộng rãi.

Điều này cho thấy vấn đề đặt ra không phải là thiếu phương pháp hay công cụ, mà là chưa có sự đánh giá, so sánh và lựa chọn một cách có hệ thống để xác định tổ hợp công cụ phù hợp với mục tiêu nghiên cứu và điều kiện dữ liệu cụ thể. Đặc biệt, trong bối cảnh nghiên cứu phát thải gắn với tổ chức không gian đô thị và định hướng phát triển theo giao thông công cộng, yêu cầu đặt ra là cần lựa chọn được các phương pháp và công cụ vừa đảm bảo tính chuẩn hóa, vừa có khả năng phản ánh đặc trưng không gian và hành vi di chuyển.

Từ đó có thể thấy, việc tổng hợp, phân tích và so sánh các phương pháp, công cụ đã được sử dụng, nhằm xác định một bộ công cụ phù hợp và khả thi cho bài toán nghiên cứu cụ thể, là cần thiết. Đây cũng chính là cơ sở để đề tài xác định mục tiêu và định hướng lựa chọn phương pháp trong phần tiếp theo.

1.4. Vấn đề nghiên cứu của đề tài

Trên cơ sở tổng quan các phương pháp và công cụ tính toán phát thải carbon trong đô thị, đề tài hướng tới mục tiêu lựa chọn một bộ phương pháp và công cụ tối ưu phục vụ đánh giá phát thải carbon cho một đơn vị ở điển hình trong bối cảnh phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng (TOD).

Khác với các nghiên cứu theo hướng xây dựng phương pháp mới, đề tài tập trung vào việc:

- Hệ thống hóa các phương pháp (method) và công cụ (tool) đã được sử dụng;
- Thiết lập hệ tiêu chí đánh giá dựa trên khung ASI và GPC;
- So sánh mức độ phù hợp của từng phương pháp – công cụ;
- Từ đó lựa chọn một tổ hợp (bundle) gồm:
- phương pháp tính toán phát thải;

- công cụ hỗ trợ phân tích không gian và hành vi;
- Ứng dụng bộ đã chọn để tính toán phát thải cho một đơn vị ở cụ thể và kiểm chứng qua kịch bản TOD.

1.4.1. Giả thiết nghiên cứu.

Trên cơ sở tổng quan lý thuyết và các nghiên cứu trước, đề tài xây dựng các giả thiết nghiên cứu như sau:

Thứ nhất, phát thải carbon trong đô thị là kết quả tổng hợp của nhiều yếu tố, trong đó nổi bật là hoạt động di chuyển, cấu trúc không gian đô thị và đặc điểm phương tiện. Các yếu tố này không tồn tại độc lập mà có mối quan hệ chặt chẽ, trong đó cấu trúc không gian ảnh hưởng đến nhu cầu và đặc điểm di chuyển, từ đó tác động trực tiếp đến lượng phát thải carbon (Newman & Kenworthy, 1999; Ewing & Cervero, 2010).

Thứ hai, các mô hình phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng (TOD) có khả năng giảm phát thải carbon thông qua việc tác động đồng thời đến ba cơ chế chính: (i) giảm nhu cầu và khoảng cách di chuyển thông qua tổ chức không gian hợp lý; (ii) chuyển đổi phương thức di chuyển theo hướng tăng tỷ trọng giao thông công cộng và phi cơ giới; và (iii) nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống giao thông. Cách tiếp cận này tương đồng với logic của khung ASI (Avoid – Shift – Improve) trong các nghiên cứu về phát thải giao thông đô thị (Dalkmann & Brannigan, 2007; UN-Habitat, 2013).

Thứ ba, do đặc tính phức tạp và đa chiều của phát thải đô thị, không tồn tại một phương pháp hoặc công cụ đơn lẻ nào có thể phản ánh đầy đủ các khía cạnh của vấn đề. Các phương pháp kiểm kê phát thải thường mạnh về lượng hóa nhưng hạn chế trong phản ánh không gian và hành vi, trong khi các công cụ phân tích không gian hoặc mô hình hành vi lại thiếu tính chuẩn hóa trong tính toán. Do đó, việc kết hợp nhiều phương pháp và công cụ trong một hệ thống tích hợp là cần thiết (IPCC, 2006; Kennedy et al., 2010).

Cuối cùng, việc lựa chọn đúng tổ hợp phương pháp và công cụ, phù hợp với mục tiêu nghiên cứu và điều kiện dữ liệu, có vai trò quyết định đến độ tin cậy và khả năng ứng dụng của kết quả. Một tổ hợp hợp lý cần đảm bảo đồng thời ba yêu cầu: (i) tính chính xác trong tính toán phát thải, (ii) khả năng phản ánh đặc trưng không gian và hành vi, và (iii) tính khả thi trong triển khai với dữ liệu thực tế (GPC, 2014; UNFCCC, 2015).

1.4.2. So sánh và lựa chọn bộ phương pháp – công cụ

- *Cơ sở xây dựng tiêu chí đánh giá*

Để lựa chọn được phương pháp và công cụ phù hợp, nghiên cứu sử dụng hai khung lý thuyết làm tiêu chí đánh giá, bao gồm:

- Khung ASI (Avoid – Shift – Improve): được phát triển trong các nghiên cứu về giao thông bền vững bởi UN-Habitat và GIZ, nhằm phân tích các cơ chế giảm

phát thải thông qua tổ chức không gian, chuyển đổi phương thức và nâng cao hiệu quả phương tiện.

- Khung GPC (Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories): được xây dựng bởi World Resources Institute phối hợp với C40 Cities, cung cấp hướng dẫn tiêu chuẩn cho kiểm kê phát thải khí nhà kính ở cấp đô thị, dựa trên hai thành phần cốt lõi là dữ liệu hoạt động (Activity Data) và hệ số phát thải (Emission Factor).

Từ việc xác định vai trò của hai khung phân tích, có thể thấy rằng khung ASI cho phép làm rõ cơ chế hình thành và giảm phát thải thông qua các yếu tố không gian, hành vi và công nghệ, trong khi khung GPC đảm bảo tính chuẩn hóa và độ tin cậy trong quá trình lượng hóa phát thải. Do đó, việc kết hợp hai khung này làm tiêu chí đánh giá không chỉ giúp lựa chọn phương pháp và công cụ một cách toàn diện mà còn tạo cơ sở khoa học vững chắc cho quá trình tính toán và phân tích phát thải carbon trong đô thị.

- *So sánh các phương pháp và công cụ theo ASI + GPC*

Dựa trên tổng quan nghiên cứu, các phương pháp – công cụ được phân loại và đánh giá như sau:

Bảng 1.3: So sánh các phương pháp và công cụ theo khung ASI và GPC.

Nhóm phương pháp	Phương pháp tiếp cận	Công cụ sử dụng	Khả năng phản ánh theo ASI	Mức độ đáp ứng GPC	Nhận xét
Nhóm 1: Lượng hóa phát thải	Phương pháp hệ số phát thải (Emission Factor)	Excel, bảng tính	Mức độ thấp, chủ yếu phản ánh yếu tố <i>Improve</i> (lượng hóa phát thải theo hiệu suất phương tiện), chưa thể hiện được yếu tố không gian và hành vi	Mức độ rất cao, đáp ứng đầy đủ yêu cầu về dữ liệu hoạt động và hệ số phát thải theo chuẩn kiểm kê	Là phương pháp cốt lõi trong tính toán phát thải, có độ tin cậy cao nhưng cần kết hợp với các công cụ khác để phản ánh đầy đủ bản chất phát thải

Nhóm 2: Phân tích không gian	Phân tích cấu trúc đô thị và sử dụng đất	GIS (ArcGIS, QGIS)	Mức độ trung bình, phản ánh tốt yếu tố <i>Avoid</i> thông qua mật độ, khoảng cách và tổ chức không gian đô thị	Mức độ thấp, không trực tiếp phục vụ tính toán phát thải mà chỉ cung cấp dữ liệu đầu vào	Có vai trò quan trọng trong việc làm rõ mối quan hệ giữa không gian đô thị và phát thải, nhưng cần kết hợp với phương pháp tính toán để lượng hóa
Nhóm 3: Phân tích hành vi	Khảo sát, mô hình hồi quy, dữ liệu GPS	SPSS, R, Python	Mức độ trung bình, phản ánh yếu tố <i>Shift</i> thông qua lựa chọn phương tiện và đặc điểm chuyến đi	Mức độ trung bình, có thể cung cấp dữ liệu hoạt động nhưng thiếu tính chuẩn hóa trong tính toán	Giúp làm rõ cơ chế hành vi dẫn đến phát thải, tuy nhiên phụ thuộc lớn vào dữ liệu và khó khái quát hóa
Nhóm 4: Mô hình tích hợp	Mô hình mô phỏng và kịch bản (LEAP, MATSim)	LEAP, MATSim	Mức độ cao, có khả năng phản ánh đồng thời cả ba yếu tố <i>Avoid – Shift – Improve</i>	Mức độ cao, có thể tích hợp tính toán phát thải theo chuẩn kiểm kê	Tiếp cận toàn diện và có khả năng dự báo, tuy nhiên yêu cầu dữ liệu lớn, phức tạp và không phù hợp với phạm

					vi nghiên cứu thực nghiệm quy mô nhỏ
--	--	--	--	--	--

Trên cơ sở phân tích tổng hợp các nhóm phương pháp trong bảng so sánh, có thể nhận thấy mỗi nhóm phương pháp đảm nhiệm một vai trò khác nhau trong quá trình kiểm kê và phân tích phát thải đô thị. Nhóm phương pháp hệ số phát thải (Emission Factor) theo IPCC/GPC giữ vai trò cốt lõi trong định lượng phát thải CO₂, có ưu điểm về tính chuẩn hóa, độ tin cậy cao và khả năng triển khai đơn giản; tuy nhiên chủ yếu phản ánh khía cạnh “Improve” trong khung ASI và chưa tích hợp được các yếu tố không gian – hành vi.

Trong khi đó, nhóm phương pháp phân tích không gian dựa trên GIS đóng vai trò làm rõ cấu trúc đô thị và điều kiện tiếp cận, phản ánh yếu tố “Avoid” nhưng không trực tiếp lượng hóa phát thải. Nhóm phương pháp phân tích hành vi (khảo sát, mô hình hồi quy, dữ liệu GPS) cung cấp cơ sở nhận diện yếu tố “Shift”, song phụ thuộc lớn vào chất lượng dữ liệu và mức độ chuẩn hóa còn hạn chế trong tính toán phát thải.

Đáng chú ý, nhóm mô hình tích hợp như LEAP và MATSim thể hiện ưu thế vượt trội khi có khả năng kết hợp đồng thời ba trụ cột ASI (Avoid – Shift – Improve), đồng thời cho phép xây dựng các kịch bản phát thải trong bối cảnh thay đổi cấu trúc đô thị và hành vi di chuyển. Tuy nhiên, nhóm phương pháp này yêu cầu hệ thống dữ liệu lớn và cấu trúc mô hình phức tạp, chưa phù hợp nếu sử dụng đơn lẻ trong các nghiên cứu quy mô nhỏ hoặc định hướng kiểm kê cơ sở.

Vì vậy, trong phạm vi nghiên cứu này, phương pháp được lựa chọn là phương pháp tiếp cận tích hợp (Integrated Hybrid Approach), bao gồm: (i) khung kiểm kê GPC/IPCC kết hợp hệ số phát thải (EF) làm nền tảng định lượng phát thải; (ii) GIS để phân tích không gian đô thị và hỗ trợ xác định các yếu tố liên quan đến “Avoid”; (iii) phân tích hành vi di chuyển để làm rõ “Shift”; và (iv) mô hình LEAP để tích hợp, mô phỏng và xây dựng kịch bản phát thải theo định hướng phát triển đô thị.

Cách tiếp cận này đảm bảo sự kết hợp giữa tính chuẩn hóa trong kiểm kê phát thải, khả năng phân tích không gian – hành vi và năng lực mô phỏng kịch bản, qua đó phù hợp với mục tiêu nghiên cứu lựa chọn bộ công cụ tối ưu cho phân tích phát thải trong bối cảnh đô thị định hướng phát triển giao thông công cộng (TOD).

1.4.3. Tính toán phát thải cụ thể cho 1 đơn vị ở lựa chọn.

(1) Kịch bản nghiên cứu.

Để đánh giá tác động của cấu trúc di chuyển đô thị đến phát thải carbon, nghiên cứu xây dựng hai kịch bản phân tích so sánh dựa trên phương pháp mô hình hóa kịch bản (scenario analysis) thường được sử dụng trong IPCC Guidelines for Scenario

Development, GPC (Global Protocol for Community-Scale GHG Emissions) và các nghiên cứu về phát triển đô thị bền vững của World Bank và ITDP.

- Kịch bản 1: Hiện trạng (Baseline) được xây dựng nhằm phản ánh điều kiện di chuyển thực tế trong đô thị, trong đó phương tiện cá nhân (xe máy, ô tô) vẫn chiếm tỷ trọng chủ đạo, còn giao thông công cộng đã được triển khai nhưng chưa giữ vai trò chi phối trong cơ cấu di chuyển. Giả định này phù hợp với đặc trưng của các đô thị đang phát triển, nơi mức độ phụ thuộc vào phương tiện cá nhân còn cao.
- Kịch bản 2: Định hướng TOD (Transit-Oriented Development) được xây dựng trên cơ sở lý thuyết TOD của ITDP (TOD Standard) và khung phát triển đô thị của UN-Habitat, trong đó giả định đô thị được tái cấu trúc theo hướng tăng mật độ quanh các đầu mối giao thông công cộng, nâng cao khả năng tiếp cận metro và xe buýt, từ đó thúc đẩy chuyển dịch phương thức di chuyển từ phương tiện cá nhân sang giao thông công cộng (modal shift).

Hai kịch bản được sử dụng nhằm lượng hóa tác động của sự thay đổi cơ cấu phương thức di chuyển đến phát thải carbon trong đô thị.

(2) Phương pháp tính toán phát thải

Phát thải carbon được xác định theo phương pháp hệ số phát thải, dựa trên các hướng dẫn chính thức của IPCC (2006 Guidelines, 2019 Refinement) và GPC (WRI–C40–ICLEI), là các bộ tiêu chuẩn được sử dụng phổ biến trong kiểm kê khí nhà kính cấp đô thị và quốc gia.

Công thức tính được sử dụng như sau: $E=AD \times EF$

Trong đó:

- E: Lượng phát thải CO₂ (kg CO₂/ngày)
- AD (Activity Data): Dữ liệu hoạt động vận tải, xác định thông qua tổng số chuyến đi và quãng đường di chuyển tương ứng
- EF (Emission Factor): Hệ số phát thải của từng loại phương tiện (kg CO₂/km/người), tham chiếu từ IPCC và các nghiên cứu giao thông đô thị quốc tế

Phương pháp này đảm bảo tính chuẩn hóa trong kiểm kê phát thải, đồng thời cho phép so sánh giữa các kịch bản quy hoạch khác nhau.

(3) Giả định đơn vị phân tích

Nghiên cứu sử dụng một đơn vị dân cư giả định đại diện cho nhóm cư dân đô thị điển hình, được xây dựng theo cách tiếp cận trong các mô hình đánh giá phát thải đô thị (GPC scenario design và LEAP framework), với các đặc điểm như sau:

- Quy mô dân số: 1.000 người
- Tần suất di chuyển: trung bình 2 chuyến/người/ngày
- Tổng số chuyến di chuyển: 2.000 chuyến/ngày

Đơn vị này được lựa chọn nhằm đảm bảo khả năng mô phỏng cơ bản nhu cầu di chuyển đô thị, đồng thời phục vụ so sánh định lượng phát thải giữa hai kịch bản nghiên cứu.

(4) Tính toán phát thải – Kịch bản hiện trạng (Baseline)

- Bước 1: Tính hoạt động vận tải (AD)
 - Xe máy: $1000 \times 5 \text{ km} = 5000 \text{ km}$
 - Ô tô: $400 \times 7 \text{ km} = 2800 \text{ km}$
 - Xe buýt: $300 \times 6 \text{ km} = 1800 \text{ km}$
 - Metro: $200 \times 8 \text{ km} = 1600 \text{ km}$
 - Đi bộ: $100 \times 2 \text{ km} = 200 \text{ km}$

Tổng AD = 11.400 km/ngày

- Bước 2: Tính phát thải CO₂
 - Xe máy: $5000 \times 0,09 = 450 \text{ kg CO}_2/\text{ngày}$
 - Ô tô: $2800 \times 0,192 = 537,6 \text{ kg CO}_2/\text{ngày}$
 - Xe buýt: $1800 \times 0,105 = 189 \text{ kg CO}_2/\text{ngày}$
 - Metro: $1600 \times 0,05 = 80 \text{ kg CO}_2/\text{ngày}$
 - Đi bộ: $200 \times 0 = 0$

Tổng phát thải: 1.256,6 kg CO₂/ngày

(5) Tính toán phát thải – Kịch bản TOD

- Bước 1: AD theo cơ cấu TOD
 - Xe máy: $500 \times 5 = 2500 \text{ km}$
 - Ô tô: $200 \times 7 = 1400 \text{ km}$
 - Xe buýt: $500 \times 6 = 3000 \text{ km}$
 - Metro: $700 \times 8 = 5600 \text{ km}$
 - Đi bộ: $100 \times 2 = 200 \text{ km}$

Tổng AD = 12.700 km/ngày

- Bước 2: Tính phát thải
 - Xe máy: $2500 \times 0,09 = 225 \text{ kg CO}_2/\text{ngày}$
 - Ô tô: $1400 \times 0,192 = 268,8 \text{ kg CO}_2/\text{ngày}$
 - Xe buýt: $3000 \times 0,105 = 315 \text{ kg CO}_2/\text{ngày}$
 - Metro: $5600 \times 0,05 = 280 \text{ kg CO}_2/\text{ngày}$
 - Đi bộ: 0

Tổng phát thải: 1.088,8 kg CO₂/ngày.

Bảng 1.4: so sánh tổng hợp hai kịch bản.

(A) Nhóm chỉ tiêu tổng hợp.

Chỉ tiêu	Đơn vị	Kịch bản hiện trạng (Baseline)	Kịch bản TOD	Biến động
Tổng phát thải carbon dioxide	kg CO ₂ /ngày	1.256,6	1.088,8	Giảm 13,4
Tổng quãng đường di chuyển	km/ngày	11.400	12.700	Tăng 11,4
Tỷ lệ phương tiện cá nhân	% chuyển đi	70	35	Giảm mạnh
Tỷ lệ giao thông công cộng	% chuyển đi	25	60	Tăng mạnh

(B) Nhóm chỉ tiêu hiệu quả phát thải.

Chỉ tiêu	Đơn vị	Kịch bản hiện trạng (Baseline)	Kịch bản TOD	Biến động
Phát thải carbon dioxide trên mỗi chuyến đi	Kg CO ₂ /chuyến	0,628	0,544	Giảm 13,4

Trên cơ sở tổng hợp các phương pháp phân tích phát thải carbon trong đô thị, có thể nhận thấy không có một phương pháp đơn lẻ nào có thể đồng thời đáp ứng đầy đủ ba yêu cầu gồm: (i) tính chuẩn hóa trong kiểm kê phát thải, (ii) khả năng phản ánh cấu trúc không gian đô thị và hành vi di chuyển, và (iii) khả năng phân tích kịch bản trong bối cảnh phát triển đô thị theo định hướng TOD.

Cụ thể, phương pháp hệ số phát thải (Emission Factor Method) theo hướng dẫn của IPCC (2006, 2019 Refinement) và khung GPC (WRI-C40-ICLEI) có ưu điểm nổi bật về tính chuẩn hóa, độ tin cậy và khả năng áp dụng rộng rãi trong kiểm kê phát thải đô thị. Tuy nhiên, phương pháp này chủ yếu phản ánh khía cạnh định lượng phát thải trực tiếp, chưa thể hiện đầy đủ các yếu tố không gian và hành vi di chuyển trong đô thị.

Trong khi đó, các công cụ phân tích không gian như GIS, cùng với các mô hình hành vi và mô phỏng như LEAP, MATSim hoặc các mô hình nhu cầu giao thông, có khả năng phản ánh tốt hơn sự thay đổi trong cấu trúc đô thị và hành vi di chuyển. Tuy

nhiên, các công cụ này thường yêu cầu dữ liệu đầu vào lớn, phức tạp và khó đảm bảo tính chuẩn hóa thống nhất trong kiểm kê phát thải.

Từ những phân tích trên, nghiên cứu lựa chọn phương pháp tiếp cận kết hợp (hybrid approach) làm khung phương pháp chính, bao gồm bốn thành phần tích hợp:

- Khung kiểm kê phát thải theo IPCC và GPC nhằm đảm bảo tính chuẩn hóa và khả năng so sánh quốc tế;
- Phương pháp hệ số phát thải (Emission Factor) để lượng hóa phát thải carbon từ hoạt động di chuyển;
- Phân tích không gian đô thị bằng GIS nhằm phản ánh cấu trúc sử dụng đất và điều kiện tiếp cận giao thông trong mô hình TOD;
- Tiếp cận kịch bản (scenario analysis) kết hợp tư duy ASI (Avoid – Shift – Improve) để đánh giá tác động của chuyển dịch phương thức di chuyển đến phát thải carbon.

Cách tiếp cận tích hợp này cho phép nghiên cứu đồng thời giải quyết ba yêu cầu cốt lõi: (i) đảm bảo tính chính xác và chuẩn hóa trong tính toán phát thải, (ii) phản ánh được mối quan hệ giữa không gian đô thị và hành vi di chuyển, và (iii) đánh giá được tác động của các kịch bản phát triển đô thị theo định hướng TOD.

Như vậy, lựa chọn phương pháp nghiên cứu trong đề tài không chỉ mang tính kỹ thuật trong tính toán phát thải, mà còn đảm bảo tính hệ thống trong phân tích đô thị, phù hợp với mục tiêu nghiên cứu về giảm phát thải carbon trong bối cảnh phát triển đô thị bền vững theo mô hình TOD.

CHƯƠNG II: CƠ SỞ KHOA HỌC

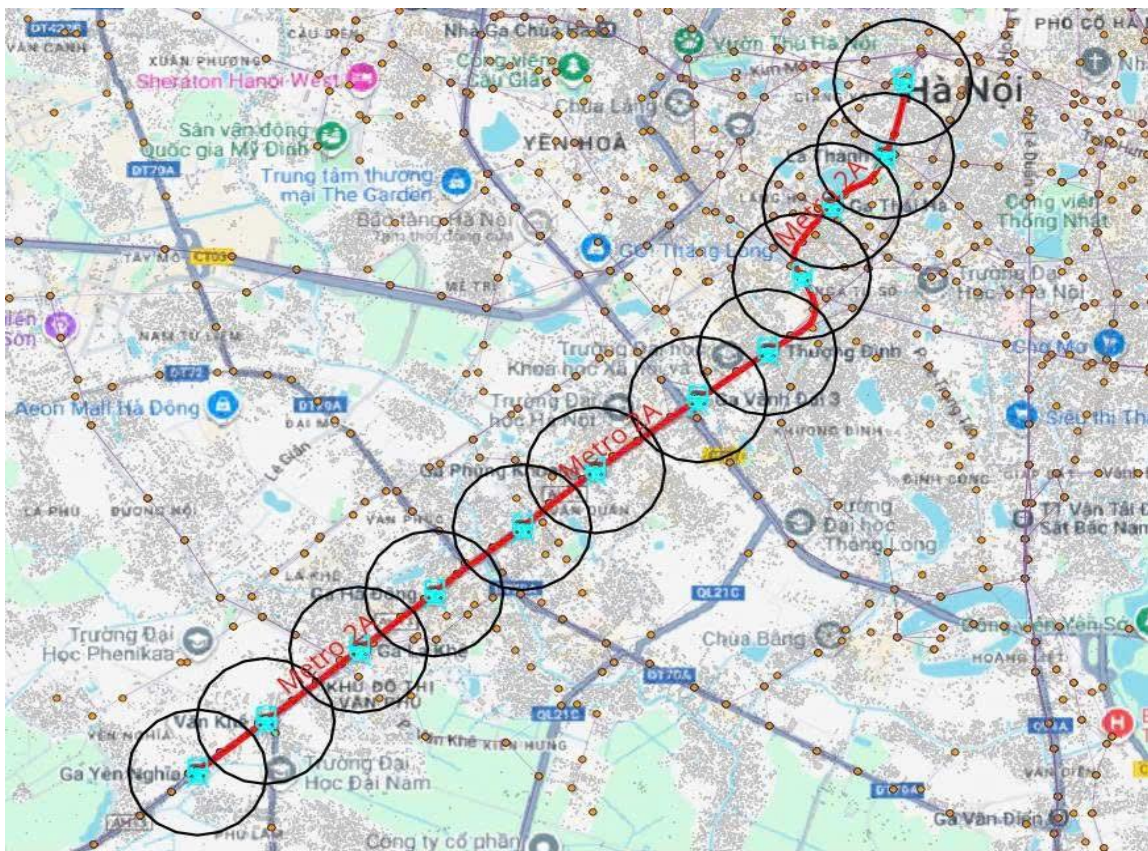
2.1. Cơ sở lý thuyết

2.1.1. Hệ thống lý thuyết về phát triển đô thị định hướng giao thông (TOD)

Nền tảng lý thuyết cốt lõi để xác định phạm vi, quy mô và cấu trúc không gian của nghiên cứu được xây dựng dựa trên các học thuyết kinh điển về Phát triển đô thị định hướng giao thông (Transit-Oriented Development - TOD). Các học thuyết này không chỉ cung cấp định hướng quy hoạch mà còn là cơ sở để đánh giá khả năng chuyển đổi hành vi giao thông của cư dân tại các khu đô thị dọc tuyến đường sắt 2A Cát Linh - Hà Đông.

TOD không đơn thuần là việc xây dựng nhà ga cạnh các khu dân cư, mà là một triết lý thiết kế đô thị toàn diện nhằm tích hợp chặt chẽ giữa sử dụng đất và hệ thống giao thông công cộng sức chứa lớn.

Lý thuyết TOD của Peter Calthorpe (1993): Đây là học thuyết nền tảng xác lập vùng lõi nghiên cứu. Theo Calthorpe, một khu vực TOD tiêu chuẩn phải được thiết kế với bán kính đi bộ tối ưu là khoảng 600m bao quanh một trạm dừng giao thông công cộng trọng điểm. Lý thuyết này dựa trên nguyên lý về hành vi con người và khả năng đi bộ (walkability), trong đó tốc độ đi bộ trung bình của người trưởng thành vào khoảng 1.2 m/s.



Hình 2.1. Khu vực nghiên cứu TOD quanh các nhà ga tuyến Metro 2A Hà Nội

Trong khuôn khổ nghiên cứu này, tiêu chuẩn trên được linh hoạt áp dụng để xác định ranh giới khảo sát cho các Đơn vị ở (ĐVO) dọc tuyến 2A thành vùng bán kính dao động từ 400m đến 800m. Khoảng cách này được chứng minh là tương đương với 5 đến 10 phút đi bộ thực tế. Đây được xem là ngưỡng thời gian tâm lý (psychological threshold) lý tưởng, nơi mà người dân có xu hướng sẵn sàng đi bộ để tiếp cận phương tiện công cộng thay vì sử dụng phương tiện cơ giới cá nhân. Vượt quá khoảng cách này, tỷ lệ sử dụng giao thông công cộng sẽ sụt giảm theo hàm số mũ.

Tiêu chuẩn TOD của ITDP (2017): Viện Chính sách Giao thông và Phát triển (ITDP) đã ban hành bộ tiêu chuẩn đánh giá TOD toàn diện nhằm định lượng hóa chất lượng không gian đô thị xung quanh các đầu mối giao thông. Bộ tiêu chuẩn này được xây dựng dựa trên 8 nguyên tắc cốt lõi, tạo thành một hệ sinh thái đô thị bền vững: Đi bộ (Walk - ưu tiên không gian an toàn cho người đi bộ), Đạp xe (Cycle - thiết lập mạng lưới làn đường ưu tiên), Kết nối (Connect - mạng lưới đường phố dày đặc, nhiều ngã rẽ), Giao thông công cộng (Transit - tiếp cận dễ dàng), Đa dạng (Mix - pha trộn chức năng thương mại, ở, dịch vụ), Tăng mật độ (Densify - tập trung dân cư quanh ga), Nén (Compact - khoảng cách ngắn giữa các điểm đến) và Chuyển đổi (Shift - quản lý nhu cầu giao thông, hạn chế đỗ xe cá nhân). Đối với đặc thù hình thái đô thị của Hà Nội, các nguyên tắc này cung cấp bộ khung giải pháp thiết yếu nhằm phá vỡ các rào cản vật lý (như hệ thống tường rào tại các khu đô thị mới, ngõ ngách chật hẹp), từ đó khuyến khích mạnh mẽ sự phát triển của giao thông phi cơ giới (Non-Motorized Transport - NMT).

Khung lý thuyết 3D/5D (Cervero & Kockelman, 1997; Ewing & Cervero, 2010): Sự phát triển của các mô hình giao thông yêu cầu các công cụ lượng hóa chính xác. Mô hình 3D ban đầu bao gồm 3 biến số, sau đó được mở rộng thành 5D để lượng hóa mối quan hệ phức tạp giữa cấu trúc không gian đô thị và hành vi di chuyển. Năm biến số này bao gồm: (1) Mật độ (Density) - đo lường mật độ dân số và việc làm trên một héc-ta; (2) Đa dạng (Diversity) - chỉ số đo lường sự pha trộn chức năng sử dụng đất, giảm thiểu các chuyến đi xa; (3) Thiết kế (Design) - đặc trưng mạng lưới đường phố, tỷ lệ diện tích vỉa hè, độ che phủ của cây xanh; (4) Khoảng cách đến trạm (Distance to Transit) - khoảng cách theo mạng lưới đường thực tế từ tâm cụm dân cư đến ga; và (5) Tiếp cận điểm đến (Destination Accessibility) - số lượng công việc hoặc dịch vụ có thể tiếp cận trong một thời gian nhất định. Đây là cơ sở khoa học tối quan trọng để xây dựng các hàm hồi quy trong nghiên cứu, nhằm phân tích nguyên nhân sâu xa giải thích tại sao một bộ phận lớn người dân vẫn chưa mặn mà với việc sử dụng tuyến đường sắt 2A dù sống khá gần nhà ga.

Mô hình Node-Place (Bertolini, 1999): Lý thuyết này tiếp cận TOD dưới góc độ cân bằng phát triển vùng. Nó đánh giá sự tương quan giữa hai giá trị cốt lõi của một khu vực TOD: giá trị "Nút" (Node) và giá trị "Địa điểm" (Place). Giá trị "Nút" đại diện cho

khả năng tiếp cận và năng lực cung cấp dịch vụ giao thông của nhà ga (số lượng tuyến kết nối, tần suất tàu, công suất phục vụ). Giá trị "Địa điểm" đại diện cho cường độ hoạt động kinh tế, xã hội, sự đa dạng dịch vụ và mật độ phân bố chức năng quanh nhà ga. Việc ứng dụng mô hình này giúp nghiên cứu dễ dàng nhận diện và phân loại các khu vực đang bị "lệch pha" dọc tuyến 2A. Ví dụ điển hình là khu vực Ga La Thành hay Ga Thái Hà: giá trị "Địa điểm" rất cao do mật độ dân cư và thương mại dày đặc, nhưng giá trị "Nút" kết nối đi bộ lại cực kỳ hạn chế do thiếu vỉa hè và hạ tầng bị lấn chiếm. Sự lệch pha này chính là nguyên nhân trực tiếp làm giảm hiệu quả giảm phát thải của hệ thống.

2.1.2. Đô thị carbon thấp và phương pháp luận tính toán

Mô hình đô thị carbon thấp đặt mục tiêu cốt lõi là tối thiểu hóa "dấu chân carbon" (Carbon Footprint) của quá trình phát triển thông qua việc tối ưu hóa hiệu suất sử dụng tài nguyên, xanh hóa hệ thống năng lượng và cải tổ toàn diện phương thức giao thông. Để lượng hóa được lượng phát thải tại các khu đô thị dọc tuyến 2A một cách minh bạch và chuẩn xác, nghiên cứu dựa trên các phương pháp luận và tiêu chuẩn quốc tế nghiêm ngặt.

Giao thức GPC (Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories): Đây là tiêu chuẩn vàng toàn cầu trong việc đo lường lượng phát thải ở cấp độ cộng đồng và thành phố. Khung kiểm kê khí nhà kính này phân loại các nguồn phát thải đô thị thành 3 phạm vi (Scopes) rành mạch nhằm tránh tính toán trùng lặp (double counting). Scope 1 bao gồm các nguồn phát thải trực tiếp từ các hoạt động diễn ra ngay bên trong ranh giới địa lý của đô thị (ví dụ: lượng xăng dầu bị đốt cháy trực tiếp từ hàng vạn chiếc xe máy, ô tô cá nhân di chuyển trên đường Nguyễn Trãi, Quang Trung hàng ngày; hoặc lượng gas đốt để đun nấu). Scope 2 bao gồm phát thải gián tiếp từ việc tiêu thụ năng lượng điện. Mặc dù nhà máy điện có thể nằm ngoài Hà Nội, nhưng lượng điện tiêu thụ tại các tòa chung cư (như cụm Mỗ Lao, Văn Quán) để phục vụ thang máy, chiếu sáng, điều hòa được quy đổi thành phát thải Scope 2. Scope 3 bao trùm các nguồn phát thải gián tiếp khác phát sinh ngoài ranh giới nhưng là hệ quả từ các hoạt động bên trong đô thị (như phát thải từ quá trình xử lý rác thải sinh hoạt của cư dân tại khu liên hợp Nam Sơn).

Phương pháp luận IPCC (2006/2019): Hướng dẫn của Ủy ban Liên chính phủ về Biến đổi Khí hậu (IPCC) cung cấp hệ thống công thức toán học nền tảng để kiểm kê và tính toán chính xác lượng carbon định lượng. Theo đó, tổng lượng phát thải khí nhà kính (ký hiệu là E_{total}) tại một khu đô thị (ĐVO) cụ thể được xác định bằng phương trình tổng quát phản ánh sự cân bằng carbon:

$$E_{total} = E_{energy} + E_{transport} + E_{waste} - E_{sink}$$

Trong đó, từng cấu phần có ý nghĩa vô cùng quan trọng: E_{energy} là tổng phát thải từ việc tiêu thụ các dạng năng lượng (chủ yếu là điện năng và khí đốt) phục vụ sinh

hoạt của các tòa nhà, chung cư, nhà liền kề; E_transport là tổng lượng phát thải sinh ra từ các hoạt động giao thông đi lại nội khu và ngoại khu của cư dân sinh sống tại ĐVO đó; E_waste là phát thải rò rỉ (chủ yếu là khí Methane - CH₄) từ quá trình chôn lấp và xử lý rác thải sinh hoạt; và E_sink là biến số mang giá trị âm, đại diện cho lượng carbon được hấp thụ ngược lại bởi hệ thống sinh thái, cây xanh, thảm cỏ, không gian mặt nước bên trong khu đô thị.

Việc lượng hóa từng thành phần đơn lẻ (E) trong phương trình trên được thực hiện dựa trên quy tắc nhân cơ bản của IPCC. Lượng phát thải là tích của dữ liệu hoạt động thực tế (Activity Data - AD) nhân với hệ số phát thải đặc trưng (Emission Factor - EF). Hơn nữa, do khí nhà kính có nhiều loại (CO₂, CH₄, N₂O), kết quả phải được nhân với Tiềm năng ấm lên toàn cầu (Global Warming Potential - GWP) để quy đổi mọi khí về một đơn vị đo lường chung là CO₂ tương đương (CO₂e). Công thức thành phần được biểu diễn như sau:

$$E = AD \times EF \times GWP$$

2.2. Cơ sở pháp lý

Hệ thống văn bản quy phạm pháp luật tại Việt Nam trong giai đoạn hiện nay đang từng bước được hoàn thiện một cách mạnh mẽ. Quá trình kiện toàn này tạo lập một hành lang pháp lý vô cùng vững chắc, là bệ phóng cho cả việc triển khai mô hình quy hoạch TOD trên thực tế và hiện thực hóa mục tiêu kiểm soát, cắt giảm phát thải khí nhà kính trong không gian đô thị.

Văn bản pháp lý trọng điểm	Nội dung cốt lõi và Ý nghĩa tác động đối với nghiên cứu
Luật Thủ đô (sửa đổi) năm 2024	Tại Điều 31, văn bản này đánh dấu bước ngoặt lịch sử khi chính thức thể chế hóa khái niệm và mô hình TOD vào hệ thống pháp luật Việt Nam. Luật cho phép thành phố Hà Nội được đặc cách áp dụng các cơ chế đặc thù vượt trội. Cụ thể, thành phố được quyền chủ động điều chỉnh các chỉ tiêu quy hoạch phân khu, quy hoạch chi tiết (cho phép tăng hệ số sử dụng đất, tăng tầng cao). Đặc biệt nhất là cơ chế tài chính cho phép thu hồi giá trị chênh lệch địa tô (Land Value Capture) xung quanh các nhà ga đường sắt đô thị. Đây là tiền đề pháp lý sống còn để đề xuất các dự án tái thiết không gian, dẹp bỏ chướng ngại vật quanh tuyến 2A.
Quy hoạch chung và Quy hoạch GTVT Thủ đô (QĐ 1259 & QĐ 519/QĐ-TTg)	Các bản quy hoạch mang tầm nhìn chiến lược quốc gia này đã xác định cấu trúc mạng lưới đường sắt đô thị của Hà Nội. Trong đó, định vị rõ tuyến đường sắt số 2A là trục vận tải hành khách xương sống, giải quyết bài toán giao thông cho toàn bộ khu vực phía Tây Nam Thủ đô. Văn bản đặt ra mục tiêu vô cùng thách thức là nâng cao thị phần đảm nhận của giao thông công cộng lên mức 50% -

Văn bản pháp lý trọng điểm	Nội dung cốt lõi và Ý nghĩa tác động đối với nghiên cứu
	55% tổng nhu cầu đi lại vào năm 2030. Để đạt được con số khổng lồ này, không có cách nào khác ngoài việc phải thực hiện đồng bộ hóa chặt chẽ giữa quy hoạch sử dụng đất và quy hoạch mạng lưới giao thông theo chuẩn TOD.
Nghị quyết số 06-NQ/TW (năm 2022) của Bộ Chính trị	Nghị quyết là kim chỉ nam về định hướng quy hoạch, xây dựng, quản lý và phát triển đô thị Việt Nam bền vững. Điểm nhấn của Nghị quyết là yêu cầu chuyển dịch sang mô hình "đô thị nén" (Compact City), hạn chế tối đa sự phát triển lan tỏa, phân tán gây lãng phí hạ tầng và làm tăng phát thải giao thông. Điều này cung cấp luận cứ khoa học và chính trị vững chắc để nghiên cứu đề xuất các kịch bản tăng hệ số sử dụng đất, tập trung nguồn lực phát triển dân cư tại các bán kính TOD (400-800m) dọc tuyến Cát Linh - Hà Đông.
Lộ trình Net Zero (Quyết định 876/QĐ-TTg)	Quyết định phê duyệt Chương trình hành động chuyển đổi năng lượng xanh, giảm phát thải khí carbon và khí metan của toàn ngành giao thông vận tải. Văn bản đặt ra lộ trình cụ thể từng giai đoạn nhằm mục tiêu loại bỏ dần phương tiện sử dụng nhiên liệu hóa thạch, ưu tiên phát triển đường sắt đô thị điện khí hóa và thiết lập mục tiêu cao nhất là đạt phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050. Tuyến 2A chạy bằng điện lưới là một trong những viên gạch đầu tiên hiện thực hóa chương trình này.
Thông tư 13/2024/TT-BXD	Văn bản do Bộ Xây dựng ban hành cung cấp các hướng dẫn chi tiết, quy trình kỹ thuật chuẩn mực để tiến hành kiểm kê khí nhà kính. Phạm vi điều chỉnh bao gồm việc đo đạc, báo cáo và thẩm định dữ liệu phát thải (MRV) đối với lĩnh vực quản lý của ngành, tập trung sâu vào các công trình dân dụng và hệ thống tòa nhà thương mại quy mô lớn. Nó chuẩn hóa công tác thu thập số liệu tiêu thụ điện của các tổ hợp chung cư.
Công bố của Cục Biến đổi khí hậu (Hệ số phát thải lưới điện)	Cung cấp số liệu chính thức mang tính pháp lý về Hệ số phát thải của lưới điện quốc gia Việt Nam. Theo bản cập nhật dữ liệu gần nhất cho năm 2023, hệ số này được chốt ở mức 0,6592 tCO ₂ /MWh. Đây không phải là con số tham khảo mà là thông số đầu vào bắt buộc để đưa vào các phương trình toán học nhằm định lượng chính xác lượng phát thải Scope 2 (E _{energy}) của các khu đô thị sử dụng lưới điện dọc tuyến nghiên cứu.

2.3. Cơ sở thực tiễn



Hình 2.2. Hiện trạng giao thông dọc tuyến Metro 2A tại Hà Nội

Việc đánh giá thực trạng kết hợp với công tác đi đo, đi khảo sát thực địa trực tiếp về không gian dọc tuyến 2A Cát Linh – Hà Đông tại các khu đô thị là bước cực kỳ quan trọng. Bước này giúp hiệu chỉnh các mô hình lý thuyết quốc tế cho phù hợp với đặc thù phức tạp của đô thị Việt Nam. Đồng thời, việc đối chiếu với bài học quốc tế giúp mở rộng tầm nhìn về các giải pháp tiềm năng.

2.3.1. Cơ sở thực tiễn trên quốc tế

Trên thế giới, quá trình đô thị hóa gắn liền với sự bùng nổ của mạng lưới phát triển đường sắt đã để lại nhiều bài học quý báu về cách thức tổ chức không gian ("người ta đã làm gì") và những thành tựu rực rỡ đạt được trong việc cắt giảm carbon ("người ta có gì rồi"). Các mô hình tiên tiến chứng minh rằng kỹ thuật giao thông phải đi liền với quản lý đô thị.

Tokyo (Nhật Bản) - Mô hình tái thiết mật độ cao cực hạn: Tokyo là minh chứng thành công vĩ đại của mô hình "Đường sắt kết hợp Bất động sản" (Rail + Property). Với quỹ đất chật hẹp, thay vì tiến hành các dự án giải tỏa trắng diện rộng gây xáo trộn xã hội, chính quyền đã áp dụng linh hoạt cơ chế chuyển nhượng quyền phát triển không gian (Transfer of Development Rights - TDR). Tại các nhà ga trọng điểm như Shinjuku hay Shibuya, không gian ngầm (dưới lòng đất) và không gian trên không (quyền xây

dựng phía trên nhà ga) được tích hợp tối đa thành các tổ hợp thương mại, dịch vụ, bán lẻ khổng lồ. Sự nén chặt không gian đa tầng này giúp Tokyo duy trì mật độ cư dân và việc làm cực cao, biến ga tàu thành một thành phố thu nhỏ. Nhờ vậy, quãng đường đi lại bị triệt tiêu, lượng phát thải bình quân đầu người từ giao thông nội đô của Tokyo luôn nằm trong nhóm thấp nhất của các siêu đô thị trên thế giới.

Singapore - Kỹ thuật vi khí hậu trong thiết kế TOD: Để đối phó với rào cản khí hậu khắc nghiệt là vùng nhiệt đới nắng nóng gay gắt và mưa rào liên tục (điều kiện tự nhiên có sự tương đồng rất lớn với thủ đô Hà Nội), Cơ quan Giao thông Đường bộ Singapore (LTA) không chỉ xây dựng đường ray. Họ đã chi hàng tỷ đô la thiết kế một mạng lưới hạ tầng vi mô là các hành lang đi bộ có mái che (Sheltered walkways). Mạng lưới này bao phủ kín kẽ trong bán kính 400m từ tất cả các ga MRT, vươn trực tiếp đến tận sảnh của các khu dân cư công cộng (HDB) và trường học. Sự đầu tư tỉ mỉ và tốn kém vào hạ tầng vi mô này đã giải quyết triệt để "bài toán chặng cuối" (last-mile problem), tạo ra một vi khí hậu mát mẻ, thúc đẩy người dân đi bộ tiếp cận ga tàu bất chấp thời tiết bất lợi, qua đó giảm triệt để sự phụ thuộc vào ô tô.

Vauban, Freiburg (Đức) - Hình mẫu Đô thị sinh thái không xe hơi: Nằm ở ngoại ô Freiburg, Vauban là một hình mẫu kinh điển về quy hoạch đô thị sinh thái carbon thấp. Khu vực này thực hiện triệt để chiến lược quản lý nhu cầu giao thông mang tên "Đẩy và Kéo" (Push and Pull). Quy hoạch khu vực cắt giảm tối đa bãi đỗ xe ô tô nội khu trên mặt đất. Cư dân buộc phải tuân thủ việc đỗ ô tô tại các gara cao tầng tập trung ở rìa đô thị với chi phí mua chỗ đỗ xe vô cùng đắt đỏ (tạo ra "Lực Đẩy" kinh tế mạnh mẽ). Đổi lại, một tuyến xe điện (Tram) tiện nghi được quy hoạch chạy xuyên tâm khu ở với tần suất cao, kết hợp cùng mạng lưới vỉa hè rộng rãi tuyệt đối an toàn cho xe đạp và trẻ em (tạo ra "Lực Kéo" hấp dẫn). Kết quả thống kê cho thấy, hơn 70% cư dân chuyển đến Vauban đã chủ động từ bỏ việc sở hữu và sử dụng ô tô cá nhân, chuyển sang lối sống xanh.

2.3.2. Thực trạng tuyến đường sắt 2A và các khu vực nghiên cứu

Thực trạng vận hành đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông: Tuyến đường sắt đô thị số 2A Cát Linh – Hà Đông đi vào lịch sử khi là tuyến đường sắt đô thị đầu tiên được vận hành thương mại của thủ đô cũng như cả nước. Tuyến có tổng chiều dài 13,1 km, kết cấu đi hoàn toàn trên cao với hệ thống 12 nhà ga phân bố dọc tuyến. Hướng tuyến đi qua hàng loạt các trục đường huyết mạch bậc nhất, chịu áp lực giao thông lớn nhất của thành phố như Hào Nam, Hoàng Cầu, Thái Hà, Nguyễn Trãi, Quang Trung. Dữ liệu tính toán độc lập đến giữa năm 2024 cho thấy tuyến đã phục vụ an toàn hơn 25 triệu lượt hành khách, duy trì lượng khách ổn định ở mức trung bình 35.000 lượt hành khách mỗi ngày. Tuy nhiên, nếu xét trên góc độ hiệu quả kinh tế đầu tư và các lý thuyết quy hoạch TOD tiêu chuẩn, công suất khai thác hiện tại mới chỉ đạt ngưỡng khoảng 11% - 12% so với công suất thiết kế tối đa của đoàn tàu. Phân tích nguyên nhân cốt lõi thông

qua lăng kính đô thị học cho thấy sự "đứt gãy" nghiêm trọng trong chuỗi hành trình của hành khách. Hạ tầng tiếp cận chặng đầu và chặng cuối (first-mile/last-mile connectivity) xung quanh các nhà ga thiếu sự đồng bộ trầm trọng.



Hình 2.3: Hiện trạng sử dụng vỉa hè và không gian trước các cơ sở kinh doanh dịch vụ.

Vỉa hè bị lấn chiếm làm nơi đỗ xe, buôn bán, thiếu các điểm trông giữ xe máy an toàn tại chân ga, thiếu kết nối an toàn cho người đi bộ sang đường và hệ thống xe buýt gom chưa luôn lách được vào các ngõ sâu. Điều này dẫn đến việc hàng trăm nghìn người dân từ các khu dân cư lân cận gặp rất nhiều rào cản vật lý và tâm lý để tiếp cận nhà ga, khiến lượng khách chưa đạt điểm bùng phát như kỳ vọng quy hoạch ban đầu.

Phân tích sâu vào các khu đô thị mới, Đơn vị ở được lựa chọn để tính toán: Để có cơ sở dữ liệu vi mô phục vụ việc tính toán và ngoại suy lượng phát thải carbon một cách khoa học, nghiên cứu đã tiến hành khoanh vùng, chia tách và phân tích sâu các Đơn vị ở (ĐVO) đại diện cho 3 hình thái cấu trúc không gian đô thị điển hình, trải dài dọc theo trục tuyến 2A:

- Nhóm 1 - Khu tập thể cũ và Phố cũ lịch sử (Khu vực xung quanh Ga Thái Hà, Ga Láng): Đây là khu vực hình thành từ lâu đời, mang đặc trưng quy hoạch của những thập niên trước với mật độ xây dựng và mật độ dân cư tập trung ở mức độ cực kỳ

cao. Cấu trúc không gian tại đây bị nén chặt đến nghẹt thở. Đi kèm với đó là hệ thống hạ tầng kỹ thuật (cấp điện, thoát nước, phòng cháy) và hạ tầng giao thông (mạng lưới đường ngõ nhỏ hẹp) đã bộc lộ sự quá tải trầm trọng. Dù có lợi thế tuyệt đối về khoảng cách vật lý (khoảng cách đường chim bay đến ga rất gần), nhưng chất lượng môi trường đi bộ kém, khói bụi, thiếu không gian chuyển tiếp khiến người dân cảm thấy mệt mỏi, làm giảm đáng kể động lực sử dụng tàu điện.

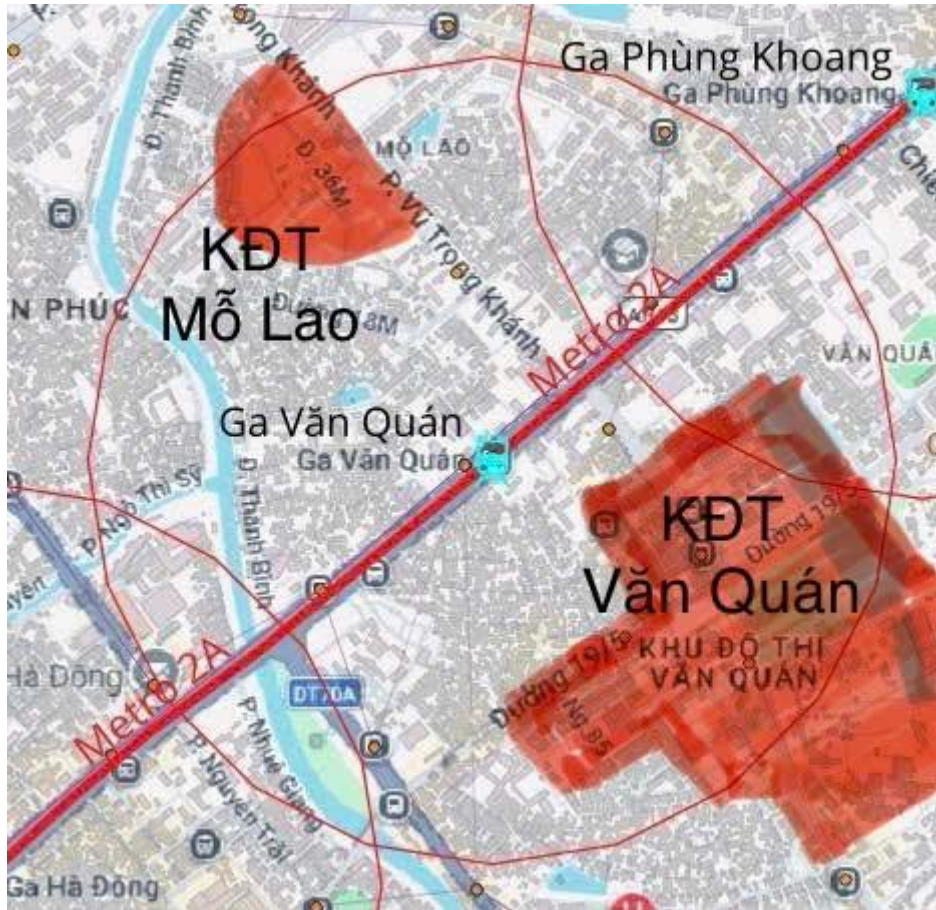
- Nhóm 2 - Hình thái Làng xóm đô thị hóa (Khu vực Ga Phùng Khoang, Ga Thượng Đình):



Hình 2.4: Sơ đồ phân tích bán kính phục vụ của Ga Thượng Đình theo mô hình TOD.

Đặc trưng nổi bật của khu vực này là cấu trúc không gian hình thành mang tính hữu cơ tự phát, không theo quy hoạch chuẩn mực. Mạng lưới ngõ ngách đan xen chằng chịt, dạng xương cá vô cùng nhỏ hẹp và ngoằn ngoèo. Hình thái không gian bất quy tắc này tạo ra sự cản trở lớn đối với sự tiếp cận của hệ thống xe buýt gom (feeder bus). Xe buýt không thể tiếp cận vào sâu, xe cứu hỏa không thể vào được. Sự phụ thuộc vào xe máy cá nhân tại khu vực này là gần như tuyệt đối do tính cơ động luôn lách đặc thù của loại phương tiện này trong các ngõ siêu nhỏ.

- Nhóm 3 - Khu đô thị mới cao tầng khép kín (Khu vực tiếp cận Ga Văn Quán, Ga Mỗ Lao):



Hình 2.5: Sơ đồ vị trí Ga Văn Quán và mối liên hệ không gian với các Khu đô thị Mỗ Lao, Văn Quán.

Đây là các ĐVO hiện đại được phát triển gần đây, sở hữu hệ thống hạ tầng kỹ thuật nội khu đồng bộ, chất lượng sống cao, nhiều tiện ích. Tuy nhiên, một đặc điểm quy hoạch cản trở trực tiếp đến nguyên lý TOD là triết lý thiết kế đóng, tự cô lập (gated community). Các khu đô thị này thường bị bao bọc bởi hệ thống tường rào kiên cố, dài hàng km nhằm mục đích đảm bảo an ninh nội khu, dẫn đến số lượng cổng ra vào kết nối với mạng lưới đường phố bên ngoài bị hạn chế nghiêm trọng. Hậu quả trực tiếp là quãng đường đi bộ thực tế (network distance) của người dân từ sảnh tòa nhà chung cư vòng vèo ra cổng chính rồi tới nhà ga bị kéo dài gấp 1,5 đến 2.5 lần so với khoảng cách đường chim bay, làm triệt tiêu hoàn toàn lợi thế nằm gần ga theo lý thuyết.

Thực hiện đo đạc, tính toán số liệu và thu thập thông tin tại thực địa: Quá trình chạy mô hình không thể thiếu dữ liệu gốc. Căn cứ theo đúng phương pháp luận kiểm kê của IPCC (2006/2019), tổ chức nghiên cứu đã lập kế hoạch và triển khai hàng loạt các đợt khảo sát thực địa chuyên sâu, rải rác ở nhiều khung giờ. Mục đích là để đo đạc và thu thập trực tiếp bộ dữ liệu hoạt động sơ cấp (AD) phục vụ phương trình tổng:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{energy}} + E_{\text{transport}} + E_{\text{waste}} - E_{\text{sink}}.$$

Quá trình đo đạc tập trung vào các biến số vật lý và hình thái của đô thị: Nhóm nghiên cứu tiến hành đo đạc và trích xuất dữ liệu diện tích sàn xây dựng (Gross Floor

Area - GFA) của các tổ hợp chung cư cao tầng không lò (ví dụ điển hình là các block chung cư cao từ 37 đến 41 tầng tại cụm Mỗ Lao, Hà Đông) để làm thông số đầu vào ước tính mức tiêu thụ điện năng điều hòa, chiếu sáng; Khảo sát thực tế tỷ lệ diện tích che phủ bóng mát của cây xanh hai bên đường và không gian mặt nước nhằm xác định khả năng hấp thụ carbon (E_sink); Đặc biệt quan trọng là đo đặc bề rộng hữu dụng thực tế, cao độ vỉa hè, tình trạng chiếm dụng không gian tiếp cận ga để lượng hóa chỉ số "Chất lượng thiết kế" (Design) đưa vào mô hình phân tích hành vi chuyển đổi giao thông (ảnh hưởng trực tiếp đến E_transport).

Để tăng tính minh bạch, thuyết phục và đảm bảo độ chính xác học thuật cao nhất cho công tác định lượng toán học, nghiên cứu đã tiến hành tổng hợp, rà soát và trình bày Bảng danh mục các hệ số phát thải chuẩn dự kiến áp dụng. Các hệ số này không phải là con số giả định, mà được trích xuất nghiêm ngặt từ cơ sở dữ liệu toàn cầu của IPCC và các báo cáo kiểm kê quốc gia chính thức được công bố bởi Bộ Tài nguyên và Môi trường Việt Nam. Sự kết hợp giữa số liệu hoạt động thực địa (AD) và hệ số phát thải chuẩn (EF) này tạo ra độ tin cậy tối đa cho các kịch bản nghiên cứu.

Hạng mục / Phân loại Nguồn phát thải	Thông số Hệ số phát thải (EF)	Đơn vị tính quy chuẩn	Nguồn trích dẫn dữ liệu pháp lý
Lưới điện quốc gia (Tiêu thụ điện năng vận hành tòa nhà, chung cư - E_energy)	0.6592	tCO2/MWh	Cục Biến đổi Khí hậu - Bộ TN&MT (Công bố 2023)
Xăng RON 95 (Phát thải trực tiếp từ động cơ đốt trong của Xe máy, ô tô cá nhân - E_transport)	2.268	kgCO2/lít	IPCC Guidelines (2006/2019) Vol. 2 Energy
Dầu Diesel / DO (Phát thải từ hoạt động của hệ thống Xe buýt gom, xe tải nhẹ - E_transport)	2.661	kgCO2/lít	IPCC Guidelines (2006/2019) Vol. 2 Energy
Khí hóa lỏng LPG (Năng lượng khí đốt tiêu thụ cho hoạt động đun nấu sinh hoạt - E_energy)	2.985	kgCO2/kg	IPCC Guidelines (2006/2019)
Hoạt động chôn lấp chất thải rắn sinh hoạt hỗn hợp (Sinh khí Methane - E_waste)	0.80 - 1.20	tCO2e/tấn rác xử lý	Cơ sở dữ liệu nghiên cứu môi trường nội địa VN

CHƯƠNG III: PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ CÔNG CỤ NGHIÊN CỨU.

3.1. Mô tả tiến trình nghiên cứu

Để đạt được mục tiêu nghiên cứu là lựa chọn và áp dụng bộ phương pháp – công cụ phù hợp trong tính toán phát thải carbon theo định hướng phát triển đô thị gắn với giao thông công cộng (TOD), nghiên cứu được triển khai theo một quy trình logic gồm ba giai đoạn chính, tương ứng với ba nhóm nhiệm vụ nghiên cứu.

Ở giai đoạn thứ nhất, nghiên cứu tập trung vào việc xây dựng cơ sở lựa chọn phương pháp và công cụ. Trên cơ sở tổng hợp các phương pháp đã được sử dụng trong các nghiên cứu trong và ngoài nước, nghiên cứu tiến hành đánh giá mức độ phù hợp của từng phương pháp trong bối cảnh đô thị Việt Nam. Trong bước này, phương pháp chuyên gia và điều tra xã hội học được sử dụng nhằm sàng lọc, hiệu chỉnh và lựa chọn tổ hợp phương pháp phù hợp, đảm bảo vừa đáp ứng yêu cầu chuẩn hóa trong tính toán phát thải, vừa phản ánh được đặc trưng không gian và hành vi di chuyển.

Ở giai đoạn thứ hai, nghiên cứu tiến hành thu thập và xử lý dữ liệu phục vụ phân tích phát thải tại khu vực dọc tuyến đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông. Các phương pháp khảo sát thực địa, điều tra xã hội học và phân tích không gian được sử dụng kết hợp nhằm xây dựng cơ sở dữ liệu bao gồm đặc điểm không gian đô thị, hạ tầng giao thông và hành vi di chuyển của người dân. Trên cơ sở đó, phương pháp định lượng được áp dụng để tính toán phát thải carbon theo kịch bản hiện trạng và kịch bản định hướng TOD.

Ở giai đoạn thứ ba, nghiên cứu thực hiện phân tích, đánh giá và tổng hợp kết quả, bao gồm so sánh giữa các kịch bản, nhận diện các yếu tố ảnh hưởng đến phát thải và đánh giá hiệu quả của mô hình phát triển theo định hướng TOD. Kết quả phân tích là cơ sở để đề xuất các định hướng và giải pháp phù hợp với bối cảnh đô thị Hà Nội.

Quy trình nghiên cứu được xây dựng theo hướng tích hợp, trong đó các phương pháp không được sử dụng riêng lẻ mà có sự liên kết chặt chẽ, bổ trợ lẫn nhau nhằm đảm bảo tính toàn diện và độ tin cậy của kết quả nghiên cứu.

3.2. Phương pháp chuyên gia

Phương pháp chuyên gia là một phương pháp nghiên cứu định tính được sử dụng phổ biến trong các lĩnh vực có mức độ phức tạp cao, đặc biệt khi dữ liệu định lượng còn hạn chế hoặc chưa đầy đủ. Theo Helmer và Dalkey (1963), phương pháp này nhấn mạnh quá trình tham vấn lặp lại nhằm đạt được sự đồng thuận giữa các chuyên gia, trong khi Rowe và Wright (1999) coi đây là một quy trình có cấu trúc nhằm nâng cao chất lượng ra quyết định. Các tổ chức quốc tế như OECD, FAO và IPCC cũng khẳng định vai trò của phương pháp chuyên gia trong việc hỗ trợ phân tích và đánh giá các vấn đề môi trường và phát triển bền vững, nơi các yếu tố không chắc chắn và đa chiều thường chiếm ưu thế.

Trong bối cảnh nghiên cứu phát thải carbon đô thị theo định hướng TOD, việc áp dụng trực tiếp các phương pháp và công cụ từ các nghiên cứu quốc tế thường gặp nhiều hạn chế do sự khác biệt về điều kiện dữ liệu, cấu trúc đô thị và hành vi di chuyển. Kết quả tổng quan ở Chương 1 cho thấy, mặc dù các phương pháp như hệ số phát thải, phân tích không gian hay mô hình hành vi đã được áp dụng rộng rãi, nhưng phần lớn các nghiên cứu vẫn có xu hướng triển khai riêng lẻ, thiếu sự tích hợp và điều chỉnh theo bối cảnh cụ thể. Điều này đặt ra yêu cầu cần có một cơ chế trung gian nhằm đánh giá, lựa chọn và hiệu chỉnh các phương pháp – công cụ trước khi áp dụng vào bài toán nghiên cứu cụ thể. Trong nghiên cứu này, phương pháp chuyên gia được sử dụng nhằm đáp ứng yêu cầu đó.

Cụ thể, phương pháp chuyên gia đóng vai trò định hướng trong việc xây dựng tổ hợp phương pháp nghiên cứu tích hợp (hybrid approach), đảm bảo sự kết hợp hợp lý giữa các thành phần bao gồm phương pháp hệ số phát thải, phân tích không gian và phân tích hành vi. Thông qua quá trình tham vấn, ý kiến chuyên gia được sử dụng để đánh giá mức độ phù hợp của từng phương pháp trong điều kiện đô thị Hà Nội, đồng thời hiệu chỉnh các giả định đầu vào của mô hình tính toán phát thải. Điều này đặc biệt quan trọng trong bối cảnh phát thải carbon không chỉ phụ thuộc vào đặc tính kỹ thuật của phương tiện mà còn chịu ảnh hưởng mạnh mẽ từ cấu trúc không gian đô thị và hành vi lựa chọn phương thức di chuyển.

Kết quả tổng quan nghiên cứu cũng cho thấy, trong nhiều nghiên cứu quốc tế và trong nước, phương pháp chuyên gia thường được sử dụng như một công cụ hỗ trợ trong quá trình xây dựng mô hình hoặc lựa chọn biến số. Chẳng hạn, trong các nghiên cứu về phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng, ý kiến chuyên gia được sử dụng để xác định các yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến hành vi di chuyển, hoặc để hiệu chỉnh các tham số trong mô hình mô phỏng. Tương tự, trong các nghiên cứu kiểm kê phát thải ở cấp đô thị, chuyên gia đóng vai trò quan trọng trong việc lựa chọn hệ số phát thải phù hợp hoặc đánh giá độ tin cậy của dữ liệu đầu vào. Những cách tiếp cận này cho thấy phương pháp chuyên gia không chỉ mang tính hỗ trợ mà còn có vai trò quyết định trong việc đảm bảo tính phù hợp và khả thi của mô hình nghiên cứu.

Trên cơ sở đó, trong nghiên cứu này, phương pháp chuyên gia được sử dụng để giải quyết hai nhóm nhiệm vụ chính. Thứ nhất, phương pháp này được sử dụng nhằm lựa chọn và chuẩn hóa bộ phương pháp – công cụ phục vụ tính toán phát thải carbon theo định hướng TOD. Từ danh sách các phương pháp đã được tổng hợp, chuyên gia tiến hành đánh giá mức độ phù hợp, khả năng áp dụng và yêu cầu dữ liệu của từng phương pháp, từ đó xác định tổ hợp phương pháp tối ưu cho nghiên cứu. Thứ hai, phương pháp chuyên gia được sử dụng để xác định mức độ quan trọng tương đối của các yếu tố trong mô hình phân tích, thông qua việc chuyển hóa nhận định định tính thành các tham số định lượng.

Để đảm bảo tính khoa học và độ tin cậy của kết quả, phương pháp chuyên gia được triển khai theo một quy trình gồm ba bước chính, kết hợp giữa định tính và định lượng:

- **Phỏng vấn sâu (In-depth Interview):**

Giai đoạn này nhằm thu thập các nhận định chuyên sâu về bối cảnh thực tiễn, bao gồm các rào cản trong phát triển TOD, hạn chế của dữ liệu và tính khả thi của các phương pháp nghiên cứu. Thông tin thu được giúp làm rõ những yếu tố mà dữ liệu định lượng khó phản ánh, đặc biệt là các vấn đề liên quan đến hành vi và tổ chức không gian đô thị.

- **Kỹ thuật Delphi:**

Trên cơ sở danh sách các phương pháp, công cụ và biến số dự thảo, các chuyên gia được yêu cầu đánh giá mức độ quan trọng và tính khả thi thông qua thang đo Likert. Các biến số có mức độ đánh giá thấp hoặc có sự phân tán lớn giữa các ý kiến sẽ được loại bỏ hoặc tiếp tục thảo luận ở các vòng tiếp theo. Quá trình này giúp đạt được sự đồng thuận và đảm bảo tính khách quan trong lựa chọn biến số.

- **Phân tích thứ bậc AHP (Analytic Hierarchy Process):**

Ở bước này, các nhận định của chuyên gia được chuyển hóa thành dạng định lượng thông qua ma trận so sánh cặp. Kết quả tính toán cho phép xác định trọng số của từng yếu tố trong mô hình phân tích. Đồng thời, việc kiểm tra tỷ số nhất quán (Consistency Ratio) được thực hiện nhằm đảm bảo tính hợp lý của các đánh giá.

Bên cạnh đó, việc lựa chọn chuyên gia được thực hiện theo nguyên tắc đảm bảo tính đa dạng và chuyên môn, bao gồm các nhóm đại diện cho quản lý nhà nước, nghiên cứu học thuật và thực tiễn vận hành giao thông đô thị. Dữ liệu thu thập được xử lý bằng các công cụ bảng tính nhằm tính toán trọng số và kiểm định độ tin cậy trước khi đưa vào mô hình phân tích.

Nhìn chung, phương pháp chuyên gia trong nghiên cứu này không chỉ đóng vai trò hỗ trợ mà còn là một thành phần cốt lõi trong hệ phương pháp nghiên cứu. Thông qua việc kết nối các phương pháp định lượng và phân tích không gian, phương pháp chuyên gia góp phần đảm bảo rằng mô hình nghiên cứu vừa có cơ sở khoa học, vừa phản ánh đúng đặc trưng thực tiễn của đô thị Hà Nội trong bối cảnh phát triển theo định hướng TOD.

Quy trình này đảm bảo tính logic, khả thi và phù hợp với điều kiện dữ liệu thực tế trong bối cảnh đô thị Hà Nội.

3.3. Phương pháp kế thừa

Trong nghiên cứu này, phương pháp kế thừa được sử dụng nhằm tổng hợp, chọn lọc và hệ thống hóa các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến phát thải carbon trong đô thị, đặc biệt trong mối quan hệ với cấu trúc không gian và hành vi di chuyển. Trên thế giới, các nghiên cứu gần đây đã có sự chuyển dịch rõ rệt từ cách

tiếp cận mô tả xu hướng sang lượng hóa chi tiết theo không gian và hành vi. Theo đó, thay vì chỉ ước tính tổng lượng phát thải, các nghiên cứu tập trung phân rã phát thải theo từng hoạt động di chuyển cụ thể, qua đó làm rõ cơ chế hình thành phát thải thông qua sự tương tác giữa sử dụng đất, đặc điểm hạ tầng giao thông và hành vi lựa chọn phương tiện của người dân. Cách tiếp cận này cho phép đánh giá phát thải ở cấp độ vi mô hơn, đồng thời phản ánh được sự khác biệt giữa các khu vực đô thị với đặc trưng không gian khác nhau.

Trên cơ sở đó, một hướng tiếp cận phổ biến là sử dụng dữ liệu khảo sát quy mô lớn kết hợp với các mô hình thống kê nhằm phân tích mối quan hệ giữa đặc điểm không gian đô thị và phát thải. Các bộ dữ liệu thường bao gồm thông tin về đặc điểm hộ gia đình, tần suất di chuyển, mục đích chuyến đi, loại phương tiện sử dụng và khoảng cách di chuyển. Từ các dữ liệu này, các nghiên cứu tiến hành chuẩn hóa và xây dựng hệ biến đại diện cho hành vi di chuyển, sau đó áp dụng các mô hình hồi quy đa biến để xác định mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố đến phát thải. Cách tiếp cận này cho phép lượng hóa vai trò của các yếu tố không gian như khả năng tiếp cận giao thông công cộng, mật độ xây dựng và mức độ nén của đô thị trong việc tác động đến hành vi di chuyển và phát thải carbon. Tiêu biểu, nghiên cứu *“Investigating the impacts of transit-oriented development on transport-related CO₂ emissions”* (2022) đã sử dụng dữ liệu của hơn 31.000 cư dân, tiến hành mã hóa và chuẩn hóa các biến hành vi di chuyển, sau đó áp dụng mô hình hồi quy đa biến bằng các phần mềm thống kê để phân tích mối quan hệ giữa các yếu tố không gian và phát thải. Kết quả cho thấy các khu vực có khả năng tiếp cận cao với hệ thống vận tải công cộng và cấu trúc không gian nén có mức phát thải thấp hơn rõ rệt, qua đó nhấn mạnh vai trò của tổ chức không gian đô thị trong việc định hướng hành vi di chuyển và kiểm soát phát thải.

Bên cạnh các phương pháp thống kê, cách tiếp cận dựa trên hệ số phát thải kết hợp với phân tích không gian cũng được sử dụng rộng rãi nhằm phản ánh chi tiết sự phân bố phát thải theo lãnh thổ. Theo đó, dữ liệu GPS và nhật ký hành trình được khai thác để xác định chính xác quãng đường, thời gian và phương thức di chuyển trong từng chặng của hành trình, đặc biệt là các chặng đầu – cuối kết nối với hệ thống giao thông công cộng. Các dữ liệu này được tích hợp trong môi trường GIS để phân vùng không gian theo mức độ tiếp cận hạ tầng giao thông, đặc điểm sử dụng đất và tổ chức không gian đô thị. Trên cơ sở đó, lượng phát thải được tính toán thông qua việc áp dụng các hệ số phát thải tương ứng với từng loại phương tiện và điều kiện vận hành, cho phép ước tính phát thải ở mức độ chi tiết theo từng khu vực và từng loại chuyến đi. Điển hình, nghiên cứu *“Assessment of carbon emissions from TOD subway first/last mile trips”* (2024) cho thấy tại các khu vực có tổ chức không gian hợp lý và khả năng tiếp cận tốt với giao thông công cộng, lượng phát thải bình quân đầu người trong các chuyến

đi ngắn giảm đáng kể, phản ánh mối liên hệ chặt chẽ giữa cấu trúc không gian đô thị, hành vi di chuyển và mức phát thải.

Ở góc độ phân tích không gian, nghiên cứu tại Thượng Hải (2016) đã xây dựng cơ sở dữ liệu đô thị bao gồm các biến phản ánh cấu trúc không gian như mật độ xây dựng, chức năng sử dụng đất và mức độ tiếp cận hạ tầng giao thông. Trên cơ sở đó, nhóm tác giả sử dụng các công cụ phân tích không gian như ArcGIS và GeoDa để thực hiện phân tích tự tương quan không gian (ESDA), kết hợp với các mô hình hồi quy không gian nhằm đánh giá mối quan hệ giữa đặc điểm không gian và phát thải carbon. Thông qua các chỉ số như Moran's I và các bản đồ phân cụm, nghiên cứu không chỉ xác định được mức độ tương quan mà còn làm rõ xu hướng phân bố và sự tập trung phát thải theo từng khu vực đô thị. Kết quả cho thấy các khu vực có mật độ cao, tổ chức đa chức năng và khả năng tiếp cận tốt với hạ tầng giao thông thường gắn với mức phát thải thấp hơn, phản ánh mối liên hệ chặt chẽ giữa cấu trúc không gian và hiệu quả môi trường.

Trên cơ sở các kết quả này, hướng tiếp cận phân tích không gian được khẳng định là một công cụ hiệu quả trong việc tích hợp các biến đặc trưng của đô thị vào mô hình phân tích phát thải. Việc sử dụng các chỉ số tự tương quan không gian cho phép nhận diện mức độ phụ thuộc không gian giữa các khu vực, trong khi các mô hình hồi quy không gian giúp lượng hóa ảnh hưởng của từng yếu tố như mật độ, chức năng sử dụng đất và khả năng tiếp cận hạ tầng đến phát thải carbon. Cách tiếp cận này đồng thời khắc phục hạn chế của các mô hình hồi quy truyền thống khi chưa xem xét đầy đủ yếu tố không gian, qua đó nâng cao độ chính xác trong việc giải thích sự khác biệt về phát thải giữa các khu vực đô thị.

Từ đó, các nghiên cứu sau này tiếp tục kế thừa và mở rộng hướng tiếp cận này bằng việc bổ sung các biến không gian chi tiết hơn như mức độ kết nối mạng lưới giao thông, khoảng cách đến các trung tâm chức năng và mức độ tích hợp sử dụng đất. Điều này cho phép phân tích sâu hơn vai trò của cấu trúc không gian đô thị trong việc định hình hành vi di chuyển và phát thải, đồng thời tạo cơ sở cho việc so sánh và đánh giá hiệu quả môi trường giữa các khu vực đô thị khác nhau.

Trên cơ sở tổng hợp và phân tích các nghiên cứu trước, việc áp dụng phương pháp kế thừa trong luận án nhằm giải quyết ba nhiệm vụ trọng tâm, đồng thời tạo tiền đề cho các bước phân tích định lượng tiếp theo.

Chuẩn hóa khái niệm được thực hiện thông qua quá trình tổng hợp, so sánh và đối chiếu có hệ thống các định nghĩa từ các nguồn tài liệu khoa học và thực tiễn. Cụ thể, nghiên cứu tiến hành rà soát các công trình quốc tế liên quan đến phát triển đô thị định hướng giao thông công cộng (TOD), các hướng dẫn và bộ tiêu chí của các tổ chức nghiên cứu, cũng như các nghiên cứu thực nghiệm về cấu trúc không gian đô thị và hành vi di chuyển. Đồng thời, các văn bản pháp lý, quy chuẩn – tiêu chuẩn quy hoạch,

và các nghiên cứu trong nước liên quan đến tổ chức không gian đô thị, đơn vị ở và hạ tầng giao thông tại Việt Nam cũng được thu thập và phân tích.

Trên cơ sở đó, các khái niệm được đưa vào bảng đối chiếu, trong đó làm rõ sự khác biệt về nội hàm, phạm vi áp dụng và cách đo lường giữa các nguồn tài liệu. Quá trình so sánh tập trung vào các nhóm nội dung chính như: (i) cấu trúc không gian đô thị (mật độ, hỗn hợp chức năng), (ii) khả năng tiếp cận giao thông công cộng, (iii) đặc điểm hành vi di chuyển, và (iv) các điều kiện thể chế và hạ tầng hỗ trợ. Từ việc đối chiếu này, nghiên cứu tiến hành lựa chọn các cách hiểu có tính phổ quát, đồng thời điều chỉnh các yếu tố chưa phù hợp với bối cảnh địa phương.

Việc lựa chọn và điều chỉnh khái niệm được thực hiện dựa trên các tiêu chí: mức độ tương thích với hệ thống dữ liệu hiện có tại Hà Nội; khả năng phản ánh đặc trưng cấu trúc không gian đô thị với tính đa dạng cao giữa các khu vực; mức độ phù hợp với điều kiện hạ tầng giao thông và hành vi di chuyển thực tế; và (iv) tính khả thi trong việc chuyển hóa thành các biến số định lượng phục vụ phân tích. Trên cơ sở đó, các khái niệm như “đơn vị ở gắn với TOD”, “chuyển đổi mô hình cấu trúc”, “kết nối dặm cuối (last-mile)” và “mức độ sẵn sàng chuyển đổi (TOD Readiness)” được chuẩn hóa về nội hàm và phạm vi sử dụng, đảm bảo vừa kế thừa được nền tảng lý luận quốc tế, vừa phản ánh đúng điều kiện thực tiễn của đô thị Hà Nội.

Trên cơ sở hệ thống khái niệm đã được chuẩn hóa, nghiên cứu tiếp tục thực hiện quá trình chuyển hóa các khái niệm mang tính trừu tượng thành hệ thống các biến số có thể đo lường được, làm nền tảng cho phân tích định lượng. Cụ thể, các khái niệm như “tính bền vững”, “khả năng tiếp cận” hay “hiệu quả không gian” được phân tích thành các thành phần cấu thành, sau đó được biểu diễn thông qua các chỉ báo định lượng phù hợp như mật độ xây dựng, mức độ hỗn hợp chức năng, khoảng cách đến điểm trung chuyển, khả năng tiếp cận giao thông công cộng và mức độ kết nối mạng lưới. Việc lựa chọn các chỉ báo này được kế thừa từ các nghiên cứu quốc tế đã được kiểm chứng, đồng thời điều chỉnh dựa trên khả năng thu thập dữ liệu và đặc điểm cấu trúc không gian đô thị tại Hà Nội. Kết quả của quá trình này là hình thành một hệ biến số có tính nhất quán, phản ánh được các đặc trưng chính của không gian đô thị và hành vi di chuyển, làm cơ sở cho việc xây dựng bộ tiêu chí và chỉ số đánh giá (TOD Index).

Song song với quá trình chuyển hóa biến số, nghiên cứu tiến hành sàng lọc và lựa chọn các mô hình phân tích từ các nghiên cứu quốc tế nhằm đảm bảo tính phù hợp với bối cảnh nghiên cứu. Việc lựa chọn mô hình không dựa trên mức độ phổ biến mà dựa trên các tiêu chí cụ thể, bao gồm: khả năng tương thích với hệ thống dữ liệu hiện có; mức độ phản ánh được sự đa dạng trong cấu trúc không gian của các đơn vị ở; khả năng tích hợp các yếu tố không gian và hành vi di chuyển; và tính khả thi trong triển khai phân tích định lượng. Trên cơ sở đó, nghiên cứu lựa chọn và điều chỉnh các thành phần phương pháp phù hợp, thay vì áp dụng nguyên mẫu các mô hình quốc tế, nhằm

đảm bảo vừa kế thừa được nền tảng lý luận và phương pháp luận, vừa phản ánh đúng điều kiện thực tiễn của đô thị Hà Nội.

Việc kế thừa nhóm lý thuyết – mô hình TOD trong nghiên cứu này được thực hiện theo hướng tích hợp giữa các mô hình lý thuyết về hành vi di chuyển và các bộ tiêu chuẩn đánh giá thực tiễn. Trên cơ sở tổng quan các nghiên cứu trước, đặc biệt là các công trình của Reid Ewing và Robert Cervero, luận án xác định mô hình 3D/5D và Tiêu chuẩn TOD 3.0 là hai nền tảng chính. Tuy nhiên, thay vì áp dụng trực tiếp, nghiên cứu tiến hành chọn lọc các thành phần có bằng chứng thực nghiệm rõ ràng, sau đó chuyển hóa thành hệ biến và tiêu chí phù hợp với bối cảnh Hà Nội.

Trước hết, đối với mô hình 3D/5D, nhiều nghiên cứu tổng hợp cho thấy các yếu tố cấu trúc đô thị có ảnh hưởng đáng kể đến hành vi di chuyển. Cụ thể, việc gia tăng mật độ và mức độ đa dạng chức năng có thể làm giảm từ 5–20% nhu cầu sử dụng phương tiện cá nhân, đồng thời tăng tỷ lệ sử dụng giao thông công cộng và đi bộ. Trên cơ sở đó, luận án không kế thừa toàn bộ mô hình theo dạng lý thuyết trừu tượng, mà tiến hành chuyển hóa từng thành phần thành biến đo lường cụ thể.

- Đối với yếu tố mật độ (Density), luận án kế thừa quan điểm về đô thị nén như một điều kiện thúc đẩy giảm phát thải và thay đổi hành vi di chuyển. Thay vì sử dụng các chỉ số phức tạp, biến “mật độ dân cư” được lựa chọn do tính khả thi về dữ liệu và khả năng phản ánh trực tiếp cường độ sử dụng không gian. Biến này được đưa vào phân tích GIS thông qua phương pháp chồng lớp bản đồ, nhằm phân loại các khu vực theo mức độ nén và làm cơ sở so sánh không gian.

- Đối với đa dạng chức năng (Diversity), các nghiên cứu quốc tế cho thấy mức độ pha trộn sử dụng đất có vai trò quan trọng trong việc rút ngắn khoảng cách chuyển đi và giảm phụ thuộc vào xe cá nhân. Trên cơ sở kế thừa các phương pháp định lượng, luận án sử dụng chỉ số Entropy (0–1) để đo lường mức độ đa dạng. Việc sử dụng chỉ số này cho phép lượng hóa một cách khách quan cấu trúc chức năng đô thị, thay vì mô tả định tính, đồng thời phù hợp với dữ liệu GIS hiện có.

- Đối với yếu tố thiết kế đô thị (Design), các nghiên cứu thường sử dụng các chỉ số như mật độ giao lộ để phản ánh khả năng kết nối. Tuy nhiên, trong bối cảnh Hà Nội, cấu trúc ngõ nhỏ, phân nhánh phức tạp khiến các chỉ số truyền thống không phản ánh đầy đủ khả năng tiếp cận. Do đó, luận án kế thừa nguyên lý đánh giá kết nối nhưng điều chỉnh cách đo lường, cụ thể hóa thành hai biến: mật độ giao lộ và tỷ lệ đoạn đường có vỉa hè. Việc bổ sung yếu tố vỉa hè dựa trên các nghiên cứu về “last-mile” cho thấy chất lượng hạ tầng đi bộ có ảnh hưởng trực tiếp đến quyết định tiếp cận giao thông công cộng.

- Đối với khoảng cách và khả năng tiếp cận (Distance/Accessibility), nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng khoảng cách đến trạm là yếu tố quyết định trong lựa chọn phương tiện, với ngưỡng phổ biến khoảng 400–800m. Tuy nhiên, khoảng cách tuyến thẳng không

phản ánh đúng thực tế di chuyển trong đô thị có cấu trúc phức tạp. Vì vậy, luận án kế thừa phương pháp phân tích mạng lưới (Network Analysis) trong GIS để đo khoảng cách thực tế theo tuyến đường, từ đó xác định chính xác vùng phục vụ của các điểm giao thông công cộng.

Bên cạnh hệ biến số từ mô hình 5D, luận án tiếp tục kế thừa Tiêu chuẩn TOD 3.0 của Institute for Transportation and Development Policy như một công cụ đánh giá thực tiễn. Khác với mô hình lý thuyết, bộ tiêu chuẩn này cung cấp hệ thống tiêu chí cụ thể để chấm điểm mức độ phát triển TOD. Tuy nhiên, do sự khác biệt về quy mô và dữ liệu, luận án tiến hành sàng lọc các nhóm chỉ số phù hợp với cấp độ đơn vị ở.

Trong đó, nhóm WALK được ưu tiên do các nghiên cứu gần đây cho thấy chất lượng môi trường đi bộ có thể ảnh hưởng đến 30–50% khả năng tiếp cận giao thông công cộng. Các tiêu chí như lối đi bộ liên tục và mặt tiền hoạt động được sử dụng để đánh giá chất lượng kết nối dặm cuối thông qua khảo sát thực địa.

Nhóm CONNECT được kế thừa nhằm phân tích tính thấm của cấu trúc đô thị. Chỉ số kích thước ô phố cho phép làm rõ sự khác biệt giữa các dạng phát triển: khu tập thể cũ với mạng lưới mở, ô nhỏ so với các khu đô thị mới có xu hướng khép kín (ví dụ như Văn Quán, Văn Phú). Sự khác biệt này có ý nghĩa quan trọng trong việc giải thích khả năng di chuyển và tiếp cận.

Nhóm SHIFT tập trung vào các chỉ số liên quan đến tổ chức giao thông và không gian dành cho phương tiện cá nhân. Các tiêu chí như diện tích đường xe chạy và bãi đỗ xe được sử dụng để đánh giá mức độ ưu tiên xe cơ giới, qua đó phản ánh khả năng chuyển đổi sang mô hình TOD. Nhiều nghiên cứu gần đây cũng chỉ ra rằng các khu vực có tỷ lệ không gian dành cho xe cá nhân cao thường gắn với mức phát thải CO₂ lớn hơn.

Bên cạnh các yếu tố không gian, nhiều nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng hành vi di chuyển không chỉ phụ thuộc vào cấu trúc đô thị mà còn chịu ảnh hưởng mạnh bởi yếu tố nhận thức và tâm lý. Do đó, luận án kế thừa hai hướng tiếp cận hành vi chủ đạo, bao gồm lý thuyết lựa chọn phương thức và lý thuyết hành vi có kế hoạch, nhằm giải thích đồng thời cả yếu tố “lý trí” và “tâm lý” trong quyết định đi lại của cư dân.

(1) Kế thừa Lý thuyết Lựa chọn phương thức (Modal Choice Theory)

Trong kinh tế học giao thông, các mô hình lựa chọn phương thức được xây dựng trên nguyên lý tối đa hóa lợi ích ngẫu nhiên (Random Utility Maximization), theo đó cá nhân sẽ lựa chọn phương tiện mang lại “lợi ích cảm nhận” cao nhất. Các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy quyết định này không chỉ phụ thuộc vào chi phí tiền tệ mà còn bị chi phối bởi chi phí tổng quát (Generalized Cost), bao gồm thời gian, công sức và mức độ tiện lợi.

Kế thừa cách tiếp cận này, luận án không chỉ so sánh trực tiếp giữa xe máy và Metro, mà phân tích quyết định lựa chọn dựa trên các thành phần chi phí cụ thể:

- Thời gian tiếp cận (Access Time):

Thời gian đi bộ từ nhà đến ga, được xem là yếu tố then chốt trong các nghiên cứu về “first/last mile”. Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng khi thời gian tiếp cận vượt quá khoảng 10–15 phút, khả năng sử dụng giao thông công cộng giảm đáng kể.

- Sự thuận tiện (Convenience):

Bao gồm khả năng gửi xe, tính liên tục của vỉa hè và mức độ an toàn khi đi bộ. Đây là yếu tố đặc biệt quan trọng trong bối cảnh Hà Nội, nơi hạ tầng đi bộ chưa đồng bộ và ảnh hưởng trực tiếp đến quyết định tiếp cận Metro.

- Chi phí hành trình (Travel Cost):

Được đo thông qua việc so sánh chi phí sử dụng xe máy (xăng, gửi xe) với chi phí vé tháng Metro. Tuy nhiên, nghiên cứu không xem đây là yếu tố quyết định duy nhất, mà đặt trong tương quan với thời gian và sự tiện lợi.

(2) Kế thừa Lý thuyết Hành vi có kế hoạch (Theory of Planned Behavior – TPB)

Trong khi mô hình lựa chọn phương thức giải thích hành vi dưới góc độ hợp lý, nhiều nghiên cứu cho thấy quyết định di chuyển trong thực tế còn chịu ảnh hưởng đáng kể bởi các yếu tố tâm lý và xã hội. Trên cơ sở đó, luận án kế thừa mô hình TPB của Icek Ajzen nhằm làm rõ các rào cản mang tính nhận thức, đặc biệt trong bối cảnh người dân Hà Nội có xu hướng phụ thuộc vào xe máy và hạn chế di chuyển bằng hình thức đi bộ.

Theo mô hình này, hành vi thực tế như việc lựa chọn sử dụng Metro được hình thành trên cơ sở ba nhóm yếu tố chính.

- Xét về phương diện cá nhân, yếu tố thái độ (Attitude) phản ánh mức độ đánh giá tích cực hoặc tiêu cực đối với hành vi. Trong nghiên cứu, nội dung này được cụ thể hóa thông qua cảm nhận của người dân về việc đi bộ ra ga, bao gồm mức độ thoải mái, an toàn hoặc bất tiện. Các khía cạnh này được lượng hóa bằng hệ câu hỏi sử dụng thang đo Likert 5 mức độ nhằm đảm bảo khả năng so sánh giữa các đối tượng khảo sát.

- Ở góc độ tác động xã hội, chuẩn mực xã hội (Subjective Norm) thể hiện ảnh hưởng của môi trường xung quanh đến hành vi cá nhân. Việc lựa chọn sử dụng Metro không chỉ phụ thuộc vào nhận thức riêng mà còn chịu tác động từ thói quen của gia đình, bạn bè hoặc đồng nghiệp. Vì vậy, nghiên cứu đưa vào các câu hỏi nhằm đánh giá nhận thức của người trả lời về mức độ phổ biến của việc sử dụng giao thông công cộng trong cộng đồng xung quanh.

- Liên quan đến khả năng thực hiện hành vi, kiểm soát hành vi nhận thức (Perceived Behavioral Control) phản ánh mức độ cá nhân cảm thấy việc thực hiện hành vi là dễ hay khó. Trong bối cảnh nghiên cứu, yếu tố này gắn với điều kiện tiếp cận thực tế như khoảng cách đến ga, chất lượng hạ tầng đi bộ hoặc các rào cản trong quá trình di chuyển. Các câu hỏi khảo sát được thiết kế nhằm đo lường mức độ chủ động và khả năng thực hiện hành vi sử dụng Metro của người dân.

Từ ba nhóm yếu tố này, luận án xây dựng hệ biến định tính nhằm đánh giá mức độ sẵn sàng chuyển đổi của cư dân. Đây là biến trung gian quan trọng, cho phép liên kết giữa điều kiện không gian đô thị và hành vi di chuyển thực tế, đồng thời bổ sung cho các phân tích định lượng dựa trên chi phí và khả năng tiếp cận.

(3) Logic tích hợp các lý thuyết hành vi trong phân tích lựa chọn phương thức di chuyển

Việc kết hợp lý thuyết lựa chọn phương thức và lý thuyết hành vi có kế hoạch cho phép luận án tiếp cận hành vi di chuyển theo hướng toàn diện hơn. Trong đó, lý thuyết lựa chọn phương thức giải thích quyết định đi lại dựa trên các yếu tố mang tính hợp lý như thời gian, chi phí và mức độ thuận tiện của hành trình, trong khi lý thuyết hành vi có kế hoạch bổ sung góc nhìn về các yếu tố tâm lý và nhận thức như thái độ cá nhân, ảnh hưởng xã hội và cảm nhận về khả năng thực hiện hành vi. Trên thực tế, quyết định lựa chọn phương tiện không chỉ phụ thuộc vào điều kiện khách quan mà còn chịu tác động đáng kể từ thói quen, cảm nhận và mức độ sẵn sàng thay đổi của người sử dụng. Do đó, luận án xây dựng biến “mức độ sẵn sàng chuyển đổi” như một đại diện cho ý định hành vi, đóng vai trò trung gian trong phân tích, nhằm làm rõ mối quan hệ giữa điều kiện không gian, chi phí di chuyển và hành vi lựa chọn phương tiện trong bối cảnh đô thị Hà Nội.

3.4 Nhóm phương pháp GIS và phân tích định lượng

Trên cơ sở tổng quan các nghiên cứu quốc tế về phân tích không gian đô thị, luận án kế thừa nhóm phương pháp GIS và phân tích định lượng như một công cụ trung tâm để lượng hóa mối quan hệ giữa cấu trúc không gian và khả năng tiếp cận trong đô thị. Việc kế thừa được thực hiện theo hướng lựa chọn các mô hình đã được kiểm chứng tại các đô thị châu Á có cấu trúc tương đồng, sau đó điều chỉnh để phù hợp với điều kiện dữ liệu và hình thái đô thị Hà Nội.

a, Kế thừa phương pháp phân tích khả năng tiếp cận dựa trên mạng lưới (Network-based Accessibility)

Trong các nghiên cứu truyền thống, khả năng tiếp cận thường được xác định bằng phương pháp vùng đệm hình học (buffer) theo bán kính đường chim bay. Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu gần đây của S. Taki và Maatouk (2018), cũng như Singh et al. (2014), đã chỉ ra rằng cách tiếp cận này tạo ra sai số đáng kể trong đánh giá khả năng tiếp cận thực tế, đặc biệt tại các đô thị có cấu trúc đường phức tạp và mức độ phân mảnh cao. Sai số này chủ yếu đến từ việc không phản ánh được cấu trúc mạng lưới đường thực tế, dẫn đến hiện tượng đánh giá quá mức khả năng tiếp cận (overestimation).

Trên cơ sở đó, luận án kế thừa phương pháp tiếp cận dựa trên mạng lưới (network-based accessibility) trong môi trường GIS nhằm phản ánh chính xác hơn điều kiện di chuyển thực tế. Cụ thể, thuật toán Service Area được sử dụng để xác định vùng tiếp cận theo thời gian hoặc khoảng cách đi bộ thực tế, thay vì sử dụng khoảng cách tuyến thẳng.

Trong quá trình áp dụng, mô hình không chỉ sử dụng các tuyến đường chính mà còn tích hợp đầy đủ dữ liệu mạng lưới đường ngõ, ngách, vốn là đặc trưng quan trọng của cấu trúc đô thị Hà Nội. Điều này cho phép mô hình phản ánh sát hơn hành vi di chuyển thực tế của người dân trong không gian đô thị.

Trên cơ sở đó, luận án sử dụng chỉ số Pedshed Ratio (tỷ lệ vùng phục vụ) để đánh giá mức độ hiệu quả của mạng lưới tiếp cận, được xác định bằng tỷ lệ giữa diện tích vùng tiếp cận thực tế và diện tích vùng đệm lý thuyết. Giá trị chỉ số càng thấp phản ánh mức độ gián đoạn cao trong cấu trúc mạng lưới, đồng thời cho thấy khả năng tiếp cận không gian kém hiệu quả.

b, Kế thừa khung đánh giá đa tiêu chí không gian (Spatial Multi-Criteria Assessment)

Bên cạnh phân tích tiếp cận, luận án kế thừa khung phân tích đa tiêu chí không gian (SMCA) nhằm tích hợp nhiều lớp dữ liệu khác nhau trong đánh giá tổng hợp cấu trúc đô thị. Cách tiếp cận này cho phép chuyển từ phân tích đơn biến sang phân tích tích hợp, phản ánh đầy đủ hơn tính phức hợp của không gian đô thị.

Trong đó, luận án kế thừa mô hình Node-Place của Bertolini (1999), một trong những khung lý thuyết quan trọng trong đánh giá mối quan hệ giữa chức năng giao thông (node) và chức năng đô thị (place). Tuy nhiên, thay vì sử dụng ở dạng định tính, mô hình này được chuyển hóa thành hệ chỉ số định lượng phục vụ phân tích GIS.

Cụ thể, chỉ số đa dạng chức năng (Diversity) được lượng hóa thông qua Shannon Entropy Index, cho phép đo lường mức độ hỗn hợp sử dụng đất theo thang giá trị từ 0 đến 1, trong đó giá trị càng cao thể hiện mức độ đa chức năng càng lớn.

Đối với chỉ số mật độ (Density), luận án tích hợp đồng thời mật độ dân cư và hệ số sử dụng đất nhằm phản ánh đồng thời cường độ dân số và cường độ xây dựng, qua đó đánh giá mức độ nén không gian đô thị.

Trong khi đó, chỉ số kết nối (Connectivity) được đo lường thông qua mật độ giao lộ (intersection density), tính bằng số lượng nút giao (ngã ba, ngã tư) trên một đơn vị diện tích. Chỉ số này phản ánh mức độ thâm của mạng lưới đường và khả năng lựa chọn tuyến di chuyển trong không gian đô thị.

c, Tích hợp phương pháp trong phân tích không gian tổng hợp

Việc kết hợp phương pháp phân tích mạng lưới với khung đánh giá đa tiêu chí cho phép luận án xây dựng một hệ phân tích không gian toàn diện, trong đó khả năng tiếp cận, cấu trúc không gian và mức độ sử dụng đất được đánh giá đồng thời trên cùng một nền tảng GIS. Cách tiếp cận này không chỉ đảm bảo tính kế thừa từ các mô hình quốc tế đã được kiểm chứng, mà còn cho phép điều chỉnh phù hợp với đặc thù cấu trúc đô thị phân mảnh và không đồng nhất của Hà Nội.

Trong nghiên cứu TOD tại bối cảnh Hà Nội, hệ thống cơ sở pháp lý và quy hoạch không chỉ đóng vai trò định hướng hành chính mà còn được luận án tiếp cận như một nguồn dữ liệu đầu vào có tính ràng buộc, nhằm xác lập giới hạn không gian, điều kiện

triển khai và các kịch bản chuyển đổi cấu trúc đô thị. Vì vậy, quá trình kế thừa được thực hiện theo hướng lựa chọn và trích xuất các thành phần có khả năng chuyển hóa thành biến nghiên cứu, thay vì sử dụng nguyên trạng nội dung văn bản.

(1) Kế thừa khung pháp lý về phát triển TOD theo Luật Thủ đô 2024

Luận án kế thừa các quy định tại Điều 31, Luật Thủ đô số 39/2024/QH15 về phát triển khu vực phụ cận các tuyến đường sắt đô thị và cơ chế đặc thù trong quản lý không gian đô thị. Nội dung quan trọng được trích xuất không nằm ở mô tả pháp lý chung, mà tập trung vào khả năng điều chỉnh mật độ xây dựng, chức năng sử dụng đất và tổ chức không gian tại khu vực quanh nhà ga.

Trên cơ sở đó, luận án xác định vùng bán kính 500m đến 1000m quanh các nhà ga là phạm vi nghiên cứu chính, tương ứng với không gian được phép áp dụng các cơ chế phát triển tăng cường theo định hướng TOD. Đây là bước chuyển từ quy định pháp lý sang xác lập tham số không gian nghiên cứu (spatial scope parameter) phục vụ mô hình phân tích.

(2) Kế thừa Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia QCVN 01:2021/BXD

Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về quy hoạch xây dựng được sử dụng như hệ tiêu chuẩn so sánh (benchmark system) để đánh giá mức độ đáp ứng của các đơn vị ở hiện hữu. Các chỉ tiêu cốt lõi như quy mô dân số, tỷ lệ đất giao thông và chỉ tiêu cây xanh được trích xuất nhằm phục vụ đối chiếu với bộ tiêu chí TOD do luận án xây dựng.

Trong nghiên cứu, các chỉ tiêu này được sử dụng theo hai hướng chính. Một là đánh giá mức độ thiếu hụt hạ tầng và không gian công cộng của các khu đô thị hiện trạng so với tiêu chuẩn quy hoạch. Hai là làm cơ sở đối chiếu trong giai đoạn đề xuất mô hình, nhằm xác định mức độ sai lệch giữa cấu trúc hiện hữu và định hướng phát triển theo TOD.

(3) Kế thừa các đồ án quy hoạch phân khu đô thị

Các đồ án quy hoạch phân khu dọc tuyến đường sắt đô thị số 2A, bao gồm H2-2 và H2-3, được sử dụng như nguồn dữ liệu nền cho phân tích không gian trong hệ thống GIS. Các thông tin về chức năng sử dụng đất, tầng cao xây dựng và mạng lưới đường quy hoạch được số hóa và tích hợp thành lớp dữ liệu “quy hoạch sử dụng đất dự kiến” (planned land use layer).

Dữ liệu này được sử dụng để so sánh với hiện trạng đô thị, từ đó xác định mức độ chênh lệch giữa quy hoạch và thực tế, đặc biệt trong cấu trúc mạng lưới đường và phân bố chức năng không gian.

Bảng 3.1. Bảng tổng hợp áp dụng phương pháp kế thừa cơ sở pháp lý vào luận án

STT	Văn bản kế thừa	Nội dung gốc	Ứng dụng trong luận án	Mục đích
1	Luật Thủ đô 2024 (Điều 31)	Quy định về vùng phụ cận TOD	Bán kính vùng nghiên cứu: 500m - 800m Cơ chế: Cho phép điều chỉnh mật độ	Xác định phạm vi ranh giới và tính khả thi của đề xuất tăng mật độ
2	QCVN 01:2021/BXD	Chỉ tiêu Đơn vị ở	Đất giao thông tối thiểu Bán kính phục vụ trường/chợ	để đánh giá mức độ thiếu hụt hạ tầng của các khu hiện hữu
3	Quyết định 876/QĐ-TTg	Chuyển đổi năng lượng xanh	Mục tiêu: Giảm phát thải Mục tiêu: Chuyển đổi sang giao thông công cộng	Định hướng xây dựng "Kịch bản hành vi": Ưu tiên xe đạp/đi bộ hơn xe máy
4	QH Phân khu H2-2, H2-3	Quy hoạch không gian	Lớp dữ liệu: Mạng đường quy hoạch	So sánh mạng đường thực tế (ngõ ngách) với mạng đường quy hoạch để thấy sự chênh lệch

- **Vai trò tổng hợp trong mô hình nghiên cứu**

Hệ thống biến số và chỉ số được trích xuất từ nhóm cơ sở pháp lý này đóng vai trò là lớp dữ liệu đầu vào nền tảng trong toàn bộ mô hình phân tích. Chúng đảm bảo sự thống nhất giữa khung pháp lý, dữ liệu không gian và các phương pháp định lượng, đồng thời tạo cơ sở để triển khai các bước phân tích tiếp theo trong luận án, bao gồm đánh giá hiện trạng, xây dựng chỉ số TOD và đề xuất kịch bản chuyển đổi không gian đô thị tại Hà Nội.

3.5. Phương pháp khảo sát, đo vẽ thực địa

Phương pháp khảo sát và đo vẽ thực địa trong luận án được xây dựng trên cơ sở kế thừa các phương pháp đánh giá môi trường đi bộ và kiểm tra không gian đô thị đã được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu quốc tế, đặc biệt là bộ công cụ Pedestrian Environmental Data Scan (PEDS) và các khung đánh giá TOD của ITDP. Các phương pháp này cho phép thu thập dữ liệu vi mô về điều kiện không gian mà dữ liệu GIS hoặc bản đồ thứ cấp không phản ánh đầy đủ, từ đó hỗ trợ hiệu chỉnh các phân tích không gian ở cấp độ đô thị.

Trong bối cảnh Hà Nội, nơi tồn tại sự sai lệch đáng kể giữa quy hoạch và hiện trạng, phương pháp này được điều chỉnh để phù hợp với cấu trúc không gian phức tạp,

đặc biệt là hệ thống ngõ ngách dày đặc và mức độ lấn chiếm không gian công cộng cao. Vì vậy, khảo sát thực địa không chỉ mang tính mô tả hiện trạng mà được xem là bước kiểm chứng (ground-truthing) cho dữ liệu GIS.

3.5.1. Mục đích và phạm vi thực hiện

Trước hết, phương pháp được sử dụng nhằm kiểm chứng độ chính xác của dữ liệu không gian thứ cấp trong hệ thống GIS, đặc biệt là mạng lưới giao thông và khả năng tiếp cận thực tế trong phạm vi ảnh hưởng của các nhà ga. Các nghiên cứu quốc tế đã chỉ ra rằng sai số trong đánh giá khả năng tiếp cận thường xuất phát từ việc bỏ qua các không gian vi mô như ngõ nhỏ, lối đi tắt hoặc rào cản vật lý, do đó việc khảo sát thực địa là cần thiết để hiệu chỉnh mô hình phân tích.

Bên cạnh đó, phương pháp này cho phép thu thập các biến vi mô liên quan đến trải nghiệm đi bộ, bao gồm bề rộng không gian dành cho người đi bộ, mức độ che phủ bóng mát, điều kiện an toàn tại các nút giao và mức độ lấn chiếm vỉa hè. Đây là những yếu tố đã được chứng minh trong các nghiên cứu về walkability là có ảnh hưởng trực tiếp đến quyết định di chuyển phi cơ giới.

Phạm vi khảo sát được lựa chọn theo nguyên tắc đại diện cấu trúc đô thị, tập trung trong bán kính 500–800m quanh các nhà ga và chia thành ba nhóm không gian điển hình nhằm đảm bảo khả năng so sánh: khu tập thể cũ với cấu trúc ô bàn cờ mật độ cao; khu làng xóm đô thị hóa với cấu trúc hữu cơ và thiếu hạ tầng đi bộ; và khu đô thị mới với hạ tầng tương đối đồng bộ nhưng bị phân mảnh bởi các rào cản kết nối.

3.5.2. Nội dung và chỉ tiêu đo vẽ

Trong luận án, phiếu quan sát thực địa được xây dựng trên cơ sở kế thừa bộ công cụ Pedestrian Environmental Data Scan (PEDS) và khung đánh giá TOD Standard của ITDP, sau đó được điều chỉnh để phù hợp với điều kiện không gian đô thị Hà Nội. Nội dung phiếu được cấu trúc thành ba nhóm dữ liệu chính, phản ánh ba khía cạnh cốt lõi của môi trường đi bộ trong khu vực nghiên cứu.

- Nhóm thứ nhất: Dữ liệu về hạ tầng kết nối

Nhóm này tập trung vào việc phản ánh mức độ liên tục và khả năng tiếp cận của mạng lưới không gian đi bộ. Các chỉ tiêu được thu thập bao gồm mặt cắt đường và ngõ nhằm xác định bề rộng thực tế của lòng đường và vỉa hè. Đặc biệt, bề rộng vỉa hè khả dụng được tính toán sau khi loại bỏ các yếu tố lấn chiếm như đỗ xe, biển hiệu hoặc cây xanh, qua đó phản ánh chính xác không gian thực sự dành cho người đi bộ.

Bên cạnh đó, các rào cản vật lý trong không gian đô thị được ghi nhận, bao gồm tường rào phân khu đô thị, các đoạn đường cụt và các yếu tố hạ tầng chưa hoàn chỉnh như mương hở chưa được công hóa. Những yếu tố này đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá tính liên tục của mạng lưới tiếp cận đến các nhà ga.

- Nhóm thứ hai: Dữ liệu về sử dụng đất và hoạt động tầng trệt

Nhóm này phản ánh mức độ sống động và tính tương tác của không gian đô thị tại cấp độ tiếp cận người đi bộ. Trọng tâm phân tích là chức năng sử dụng thực tế của tầng một công trình, được phân loại theo các dạng như thương mại, dịch vụ, cơ quan hoặc nhà ở kín cổng.

Song song với đó, mức độ tương tác không gian được lượng hóa thông qua chỉ số mật độ cửa ra vào trên một đơn vị chiều dài mặt phố, thường được tính theo số lượng cửa trên 100m mặt tiền. Chỉ số này phản ánh mức độ “mở” của không gian đô thị và khả năng kích thích hoạt động đi bộ trong khu vực nghiên cứu.

- Nhóm thứ ba: Dữ liệu về giao thông tĩnh và xung đột không gian

Nhóm này tập trung vào các yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn và trải nghiệm di chuyển của người đi bộ. Trong đó, vị trí và quy mô các điểm đỗ xe tự phát trên lòng đường và vỉa hè được ghi nhận nhằm đánh giá mức độ chiếm dụng không gian công cộng của phương tiện cơ giới.

Ngoài ra, các điểm xung đột giao thông cũng được xác định, đặc biệt là các vị trí giao cắt giữa dòng người đi bộ và xe máy. Đây là nhóm dữ liệu quan trọng trong việc đánh giá mức độ an toàn giao thông và khả năng khuyến khích di chuyển phi cơ giới trong khu vực nghiên cứu.

3.5.3. Quy trình thực hiện

Để đảm bảo tính hệ thống và khả năng kiểm chứng của dữ liệu thu thập, quy trình khảo sát thực địa trong luận án được thiết kế theo 4 giai đoạn liên hoàn, trong đó mỗi giai đoạn tương ứng với một nhóm nhiệm vụ từ chuẩn bị dữ liệu, thu thập hiện trường, bổ sung thông tin định tính đến số hóa và chuẩn hóa dữ liệu phục vụ phân tích GIS.

- Bước 1: Chuẩn bị và thiết lập không gian khảo sát

Giai đoạn đầu tiên tập trung vào việc xây dựng nền tảng không gian phục vụ khảo sát thực địa. Bản đồ hiện trạng giao thông và bản đồ quy hoạch được tổng hợp và in phục vụ theo dõi trực tiếp ngoài hiện trường. Trên cơ sở đó, các tuyến đường đóng vai trò trực tiếp cận chính (main routes) dẫn về khu vực nhà ga được xác định và khoanh vùng, nhằm đảm bảo việc khảo sát tập trung vào các không gian có ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng tiếp cận trong mô hình TOD.

- Bước 2: Khảo sát đi bộ và thu thập dữ liệu hiện trường

Giai đoạn này được thực hiện bằng phương pháp đi bộ tuyến tính nhằm ghi nhận trực tiếp điều kiện không gian đô thị. Việc khảo sát được triển khai trong hai khung thời gian khác nhau, bao gồm giờ cao điểm và giờ thấp điểm, nhằm phản ánh đồng thời trạng thái động và tĩnh của không gian giao thông.

Trong quá trình khảo sát, các thông số hình học của không gian như chiều rộng đường, ngõ và vỉa hè được đo trực tiếp bằng thiết bị đo khoảng cách laser. Đồng thời,

dữ liệu hình ảnh được ghi nhận nhằm làm bằng chứng trực quan cho các rào cản không gian, tình trạng lấn chiếm và mức độ gián đoạn của mạng lưới tiếp cận.

- Bước 3: Thu thập thông tin định tính tại hiện trường

Bên cạnh quan sát trực tiếp, phương pháp phỏng vấn nhanh tại hiện trường được thực hiện nhằm bổ sung các thông tin không thể quan sát tức thời trên bản đồ hoặc trong quá trình đi bộ khảo sát. Nội dung tập trung vào việc xác định các lối đi tắt, tuyến di chuyển phi chính thức và thói quen tiếp cận không gian của cư dân địa phương.

Giai đoạn này có vai trò quan trọng trong việc hiệu chỉnh dữ liệu không gian, đặc biệt đối với các khu vực có cấu trúc ngõ ngách phức tạp hoặc không được cập nhật đầy đủ trong hệ thống bản đồ số.

- Bước 4: Số hóa và chuẩn hóa dữ liệu GIS

Giai đoạn cuối cùng tập trung vào việc chuyển đổi toàn bộ dữ liệu thực địa thành định dạng số phục vụ phân tích không gian. Các thông tin đo đạc được cập nhật vào hệ thống GIS thông qua việc chỉnh sửa lớp mạng lưới đường, đồng thời các chỉ số định lượng được nhập vào bảng thuộc tính (attribute table) để phục vụ xử lý thống kê và mô hình hóa.

Việc số hóa được thực hiện trên các nền tảng GIS và CAD nhằm đảm bảo tính chính xác hình học và tính tương thích dữ liệu giữa các lớp thông tin.

Quá trình khảo sát thực địa được hỗ trợ bởi hệ thống công cụ phần cứng và phần mềm nhằm đảm bảo độ chính xác và khả năng tái lập dữ liệu. Về phần cứng, sử dụng thiết bị định vị GPS cầm tay hoặc điện thoại thông minh có tích hợp ứng dụng định vị để ghi nhận tọa độ không gian, kết hợp với thước đo laser hoặc thước dây để xác định kích thước hình học của không gian. Máy ảnh và flycam được sử dụng để ghi nhận toàn cảnh cấu trúc không gian và mật độ xây dựng.

Về phần mềm, AutoCAD được sử dụng để vẽ và hiệu chỉnh mặt cắt không gian, trong khi các nền tảng như ArcGIS Collector hoặc QGIS được sử dụng để số hóa và cập nhật dữ liệu trực tiếp trong quá trình khảo sát, đảm bảo tính liên tục giữa thu thập và xử lý dữ liệu.

3.5.4. Sản phẩm đầu ra

Kết quả của phương pháp khảo sát và đo vẽ thực địa được tổng hợp thành ba nhóm sản phẩm chính, vừa phản ánh hiện trạng không gian đô thị, vừa đóng vai trò dữ liệu đầu vào cho các bước phân tích tiếp theo trong luận án.

Bộ bản đồ hiện trạng

Sản phẩm này thể hiện chính xác mạng lưới đường, ngõ và các rào cản vật lý tại ba khu vực nghiên cứu. Bản đồ không chỉ mô tả hình thái không gian mà còn phản ánh các điểm gián đoạn trong kết nối thực tế, qua đó làm rõ sự khác biệt giữa cấu trúc quy hoạch và cấu trúc sử dụng thực tế.

Hồ sơ mặt cắt điển hình

Các bản vẽ mặt cắt ngang được xây dựng cho các tuyến ngõ và tuyến phố dẫn vào khu vực nhà ga, nhằm minh họa trực quan cấu trúc không gian dành cho người đi bộ. Nội dung thể hiện rõ tỷ lệ phân chia không gian giữa phương tiện cơ giới và người đi bộ, cũng như mức độ lấn chiếm vỉa hè trong điều kiện thực tế.

Cơ sở dữ liệu thuộc tính

Bộ dữ liệu bao gồm các thông số định lượng thu thập từ thực địa như chiều rộng đường, chiều rộng vỉa hè khả dụng và chất lượng không gian tiếp cận. Đây là nguồn dữ liệu trực tiếp phục vụ mô hình phân tích khả năng tiếp cận trong GIS ở các bước tiếp theo.

Vai trò của phương pháp trong nghiên cứu

Phương pháp khảo sát và đo vẽ thực địa cung cấp các bằng chứng thực tế nhằm phục vụ hai chức năng chính trong luận án.

Thứ nhất, dữ liệu thực địa giúp bác bỏ các giả định sai lệch khi chỉ dựa trên bản đồ quy hoạch hoặc dữ liệu thứ cấp, ví dụ trường hợp tuyến đường được thể hiện là thông suốt nhưng thực tế tồn tại ngõ cụt hoặc rào cản vật lý.

Thứ hai, dữ liệu vi mô thu thập được cung cấp cơ sở giải thích hành vi di chuyển thực tế của người dân, đặc biệt trong trường hợp khoảng cách tiếp cận nhà ga ngắn nhưng mức độ sử dụng đi bộ thấp do hạn chế về chất lượng không gian tiếp cận.

Trên cơ sở đó, toàn bộ kết quả của phương pháp này được sử dụng làm đầu vào trực tiếp cho các phương pháp phân tích tiếp theo của luận án, bao gồm phân tích không gian, đánh giá tổng hợp và mô hình hóa định lượng.

3.6. Phương pháp phân tích, đánh giá, tổng hợp

3.6.1. Phân tích so sánh

Phương pháp phân tích so sánh trong luận án được triển khai dựa trên cơ sở các nghiên cứu quốc tế về phân tích không gian đô thị và TOD, trong đó so sánh được xem là một kỹ thuật nền tảng để đánh giá mức độ phù hợp giữa mô hình lý thuyết và thực tiễn đô thị (Ewing & Cervero, 2010; ITDP, TOD Standard 3.0). Các nghiên cứu này cho thấy việc lượng hóa sự khác biệt giữa các chỉ số không gian là cơ sở quan trọng để xác định mức độ “TOD compliance” của đô thị.

Trên cơ sở đó, luận án áp dụng phương pháp so sánh theo ba hướng chính như sau:

- So sánh giữa mô hình lý thuyết và thực tiễn đô thị

Phương pháp này dựa trên cách tiếp cận “gap analysis” thường được sử dụng trong các nghiên cứu TOD và urban planning, nhằm xác định mức độ sai lệch giữa cấu trúc đô thị hiện trạng và bộ tiêu chí lý thuyết. Các chỉ số thực đo từ GIS và khảo sát thực địa (mật độ đường, mức độ kết nối, entropy sử dụng đất, khả năng tiếp cận) được đối chiếu với bộ chỉ số TOD tổng hợp từ ITDP và các nghiên cứu của Ewing & Cervero.

Kết quả so sánh cho phép xác định khoảng chênh lệch định lượng giữa hiện trạng và ngưỡng TOD, từ đó nhận diện các yếu tố không đạt chuẩn trong tổ chức không gian đô thị.

- So sánh giữa các đô thị có cấu trúc tương đồng

Luận án kế thừa phương pháp comparative urban studies, trong đó các đô thị có cấu trúc và điều kiện phát triển tương đồng được sử dụng làm đối tượng tham chiếu. Theo các nghiên cứu về TOD tại châu Á (UN-Habitat, 2020; Suzuki et al., 2013), các đô thị như Tokyo, Seoul hay Bangkok là các trường hợp điển hình của mô hình phát triển mật độ cao gắn với giao thông công cộng.

Trên cơ sở đó, các chỉ số về mật độ xây dựng, mức độ tích hợp giao thông công cộng và cấu trúc sử dụng đất quanh nhà ga được so sánh nhằm xác định mức độ tương đồng và khác biệt trong tổ chức không gian so với Hà Nội.

- So sánh giữa các nhóm không gian trong nội đô Hà Nội

Bên cạnh so sánh liên đô thị, luận án áp dụng phương pháp within-city comparison, thường được sử dụng trong các nghiên cứu GIS đô thị (Batty, 2013), nhằm phân tích sự khác biệt giữa các loại hình không gian trong cùng một thành phố.

Ba nhóm không gian được so sánh gồm khu tập thể cũ, khu làng xóm đô thị hóa và khu đô thị mới. Việc so sánh tập trung vào mối quan hệ giữa cấu trúc không gian tiếp cận và hành vi di chuyển thực tế, đặc biệt là sự khác biệt trong tỷ lệ đi bộ trong cùng điều kiện khoảng cách đến nhà ga. Cách tiếp cận này cho phép làm rõ vai trò của cấu trúc vi mô đô thị trong việc chi phối hành vi di chuyển, thay vì chỉ phụ thuộc vào yếu tố khoảng cách hình học.

3.6.2. Phân tích SWOT

Trong nghiên cứu quy hoạch và phát triển đô thị định hướng giao thông công cộng (TOD), SWOT thường được sử dụng như một công cụ phân tích chiến lược nhằm chuyển hóa kết quả đánh giá hiện trạng thành cơ sở xây dựng kịch bản can thiệp không gian. Các nghiên cứu của UN-Habitat (2014), World Bank (Suzuki et al., 2013) và các khung tái thiết đô thị nén (compact city regeneration) đều nhấn mạnh vai trò của SWOT trong việc xác định “khả năng chuyển đổi” (transformability) của từng loại hình không gian đô thị.

Trên cơ sở đó, luận án không áp dụng SWOT ở cấp độ toàn tuyến, mà kế thừa cách tiếp cận phân rã theo đơn vị không gian (spatial typology-based SWOT analysis), nhằm phản ánh sự khác biệt về hình thái đô thị, cấu trúc hạ tầng và hành vi sử dụng không gian giữa các nhóm đơn vị ở đặc thù tại Hà Nội. Cách tiếp cận này phù hợp với các nghiên cứu TOD gần đây, trong đó nhấn mạnh rằng hiệu quả chuyển đổi phụ thuộc mạnh vào bối cảnh vi mô thay vì chỉ định hướng quy hoạch vĩ mô.

Nhóm khu tập thể cũ

Theo tổng hợp từ các nghiên cứu về tái thiết khu ở cũ tại các đô thị châu Á (Tokyo, Seoul, Singapore), khu tập thể cũ thường mang đặc trưng của cấu trúc đô thị nén theo dạng ô bàn cờ, với mật độ mạng lưới đường tương đối cao và mức độ pha trộn chức năng xã hội tự phát. Đây là nền tảng không gian có lợi cho tiếp cận phi cơ giới và phát triển TOD ở cấp độ vi mô.

Tuy nhiên, các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng các khu vực này thường gặp vấn đề suy giảm chất lượng hạ tầng (infrastructure degradation), thiếu không gian công cộng và xung đột sử dụng vỉa hè, làm giảm đáng kể mức độ hấp dẫn của đi bộ (walkability). Trong bối cảnh Hà Nội, các hiện tượng lấn chiếm không gian đi bộ và thiếu bảo trì hạ tầng càng làm gia tăng độ lệch giữa tiềm năng hình thái và hiệu quả vận hành thực tế.

Do đó, cơ hội phát triển được xác định theo hướng tái thiết đô thị nén (compact city regeneration), tập trung vào cải thiện chất lượng không gian công cộng, khôi phục tính liên tục của mạng lưới đi bộ và nâng cấp tiếp cận tới các điểm ga.

Nhóm làng xóm đô thị hóa (Phùng Khoang, Triều Khúc)

Theo các nghiên cứu về đô thị phi chính thức tại châu Á (Asian Development Bank, 2017; UN-Habitat, 2020), các khu làng xóm đô thị hóa thường có mật độ dân cư rất cao, hình thành mạng lưới hoạt động kinh tế vi mô dày đặc ngay trong không gian ở. Đây là một lợi thế quan trọng về mặt nhu cầu giao thông công cộng và khả năng tạo dòng khách cho hệ thống TOD.

Tuy nhiên, hạn chế mang tính cấu trúc là mạng lưới đường dạng hữu cơ, ngõ hẹp và thiếu tính liên thông, dẫn đến chi phí tiếp cận cao và hạn chế khả năng tích hợp với giao thông công cộng có sức chứa lớn. Ngoài ra, các nghiên cứu về an toàn đô thị cũng chỉ ra đây là nhóm không gian có mức độ rủi ro cao về phòng cháy chữa cháy và xung đột giao thông.

Từ đó, hướng chuyển đổi phù hợp được xác định là cải tạo chỉnh trang quy mô nhỏ (micro-scale regeneration), kết hợp tổ chức lại mạng lưới tiếp cận phi cơ giới và tăng cường kết nối mềm tới hệ thống ga.

Nhóm khu đô thị mới (Văn Quán, Văn Phú)

Các nghiên cứu về khu đô thị mới tại các quốc gia đang phát triển cho thấy xu hướng phổ biến là hình thành các không gian khép kín (gated communities), với cấu trúc đường phân cấp rõ rệt nhưng thiếu tính thấm (permeability) của mạng lưới đô thị (Bertaud, 2004; UN-Habitat, 2015). Điều này dẫn đến hiệu quả tiếp cận giao thông công cộng thấp, mặc dù điều kiện hạ tầng kỹ thuật ban đầu tốt.

Trong trường hợp Hà Nội, các khu đô thị mới như Văn Quán và Văn Phú thể hiện rõ đặc trưng này với không gian rộng, hạ tầng đồng bộ nhưng bị gián đoạn bởi các rào cản vật lý và tổ chức không gian ưu tiên phương tiện cơ giới.

Do đó, cơ hội chuyển đổi được xác định theo hướng mở kết nối không gian (spatial de-sealing), bao gồm giảm rào cản tiếp cận, tái cấu trúc liên kết nội khu với hệ thống ga và tăng cường khả năng đi bộ trong bán kính tiếp cận TOD.

Ý nghĩa phương pháp trong luận án

Việc áp dụng SWOT theo từng loại hình đơn vị ở cho phép luận án chuyển từ phân tích hiện trạng sang định hướng chiến lược, phù hợp với logic nghiên cứu TOD hiện đại: từ “assessment” sang “transformation strategy”. Đồng thời, phương pháp này đóng vai trò cầu nối giữa phân tích định lượng không gian và xây dựng kịch bản quy hoạch trong mục tiêu đề xuất mô hình chuyển đổi (Mục tiêu 3).

3.6.3. Sản phẩm đầu ra của phương pháp

Trong các nghiên cứu về phân tích đô thị định lượng và TOD, phương pháp phân tích – đánh giá – tổng hợp thường được xem là bước chuyển hóa trung gian giữa dữ liệu thực nghiệm và mô hình hóa chính sách, nhằm tích hợp các kết quả phân tích rời rạc thành cấu trúc luận cứ có hệ thống (Ewing & Cervero, 2010; ITDP, TOD Standard 3.0; Batty, 2013). Trên cơ sở đó, luận án chuẩn hóa kết quả của phương pháp này thành ba nhóm sản phẩm đầu ra có tính liên kết logic với nhau.

Bảng so sánh giữa chỉ số thực tế và chỉ số TOD

Sản phẩm này được hình thành từ việc đối chiếu các biến số không gian và hành vi thu thập từ GIS và khảo sát thực địa với hệ thống tiêu chí TOD được kế thừa và điều chỉnh trong luận án. Cách tiếp cận này tương đồng với phương pháp “performance gap analysis” trong các nghiên cứu đánh giá TOD, trong đó mức độ sai lệch giữa hiện trạng và ngưỡng lý thuyết được sử dụng để lượng hóa mức độ không phù hợp của cấu trúc đô thị. Các chỉ số như mật độ mạng lưới đường, mức độ kết nối, entropy sử dụng đất và khả năng tiếp cận được tổng hợp để phản ánh mức độ chênh lệch giữa thực trạng và mô hình TOD mục tiêu.

Ma trận SWOT cho các nhóm đơn vị ở

Trên cơ sở định hướng của phương pháp phân tích chiến lược trong quy hoạch đô thị (strategic spatial analysis), luận án xây dựng ma trận SWOT cho từng nhóm đơn vị ở đặc thù. Khác với cách tiếp cận tổng thể, ma trận này được phân tách theo cấu trúc không gian nhằm phản ánh sự khác biệt về hình thái đô thị và điều kiện hạ tầng. Cách tiếp cận này phù hợp với xu hướng nghiên cứu TOD hiện đại, trong đó khả năng chuyển đổi được đánh giá thông qua sự tương tác giữa yếu tố nội sinh (cấu trúc không gian, mật độ, chức năng sử dụng đất) và yếu tố ngoại sinh (hạ tầng giao thông công cộng, cơ chế chính sách, áp lực phát triển đô thị).

Bộ tiêu chí phân loại khả năng chuyển đổi đơn vị ở

Từ kết quả tổng hợp của phân tích so sánh và SWOT, luận án xây dựng bộ tiêu chí phân loại mức độ sẵn sàng chuyển đổi TOD (TOD readiness classification framework). Bộ tiêu chí này được hình thành trên cơ sở tổng hợp các nhóm chỉ số về

cấu trúc không gian, khả năng tiếp cận giao thông công cộng và chất lượng môi trường đi bộ, đồng thời kế thừa cách tiếp cận phân loại trong các nghiên cứu đánh giá năng lực chuyển đổi đô thị (urban transformability assessment). Mục tiêu của bộ tiêu chí là xác định mức độ ưu tiên can thiệp cho từng loại hình đơn vị ở trong bối cảnh Hà Nội.

Ý nghĩa phương pháp trong chuỗi nghiên cứu

Phương pháp phân tích, đánh giá và tổng hợp đóng vai trò như một cơ chế tích hợp dữ liệu đa nguồn, giúp chuyển đổi các kết quả phân tích định lượng và định tính thành hệ thống luận cứ thống nhất. Việc kết hợp giữa phân tích so sánh theo khoảng cách (gap-based comparison) và phân tích chiến lược theo SWOT cho phép luận án đồng thời xác định mức độ sai lệch so với mô hình TOD và khả năng chuyển đổi của từng loại hình không gian. Cách tiếp cận này phù hợp với logic nghiên cứu TOD hiện đại, đảm bảo tính liên kết giữa phân tích thực trạng, đánh giá tiềm năng và đề xuất mô hình chuyển đổi trong các chương tiếp theo.

3.7. Phương pháp phân tích không gian

Trong nghiên cứu đô thị hiện đại, hệ thống thông tin địa lý (GIS) được sử dụng không chỉ như công cụ trực quan hóa bản đồ mà còn là nền tảng phân tích định lượng không gian, cho phép tích hợp, xử lý và diễn giải dữ liệu đa nguồn trong cùng một môi trường thống nhất (Goodchild, 2007; Longley et al., 2015). Trên cơ sở đó, luận án xác định phương pháp phân tích không gian bằng GIS là công cụ chủ đạo nhằm phục vụ trực tiếp cho Mục tiêu 2 (đánh giá hiện trạng) và Mục tiêu 3 (đề xuất mô hình chuyển đổi).

Khác với các phương pháp quy hoạch truyền thống chủ yếu dựa trên mô tả định tính hoặc các chỉ tiêu tổng hợp, cách tiếp cận bằng GIS cho phép chuyển đổi các dữ liệu rời rạc như bản đồ quy hoạch, dữ liệu khảo sát thực địa, dữ liệu hành vi di chuyển thành các lớp thông tin không gian có thể đo lường và phân tích. Thông qua các kỹ thuật phân tích không gian, các biến số như khả năng tiếp cận, mức độ kết nối, mật độ và phân bố chức năng được lượng hóa dưới dạng các chỉ số thị giác (spatial indicators), giúp nhận diện rõ ràng các quy luật phân bố và bất cân xứng trong cấu trúc đô thị.

Đặc biệt, phương pháp này cho phép phát hiện các “điểm nghẽn” hạ tầng và các khu vực có mức độ tiếp cận thấp mà các phương pháp đánh giá truyền thống khó nhận diện, do hạn chế về khả năng tích hợp dữ liệu và phân tích theo không gian liên tục. Việc sử dụng GIS vì vậy không chỉ nâng cao độ chính xác của phân tích mà còn tạo cơ sở khoa học cho việc liên kết giữa đánh giá hiện trạng và đề xuất giải pháp trong bối cảnh phát triển đô thị theo định hướng TOD.

3.7.1. Mục đích lựa chọn phương pháp

Trong các nghiên cứu về khả năng tiếp cận đô thị và TOD, việc xác định phạm vi phục vụ của nhà ga thường được thực hiện bằng các phương pháp hình học đơn giản, điển hình là bán kính đường chim bay (Euclidean buffer). Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu

đã chỉ ra rằng cách tiếp cận này chỉ phù hợp trong điều kiện mạng lưới giao thông đồng nhất, và có thể gây sai lệch đáng kể trong các đô thị có cấu trúc không gian phức tạp (Handy & Niemeier, 1997; Geurs & van Wee, 2004).

Trong bối cảnh Hà Nội, cấu trúc đô thị mang tính đặc thù với hệ thống ngõ ngách dày đặc, nhiều đoạn cụt, mạng lưới đường dạng phân nhánh và mức độ liên thông không đồng đều. Điều này dẫn đến sự khác biệt rõ rệt giữa khoảng cách hình học và khoảng cách di chuyển thực tế, khiến phương pháp bán kính đường chim bay không phản ánh chính xác khả năng tiếp cận của người dân đối với các điểm ga đường sắt đô thị.

Trên cơ sở đó, luận án lựa chọn phương pháp phân tích mạng lưới (Network Analysis) trong môi trường GIS để đo lường khoảng cách tiếp cận theo tuyến đường thực tế. Phương pháp này cho phép tính toán chi phí di chuyển dựa trên cấu trúc mạng lưới giao thông hiện hữu, thay vì giả định khoảng cách tuyến tính, qua đó phản ánh chính xác hơn điều kiện tiếp cận trong không gian đô thị.

Việc áp dụng phương pháp này nhằm nhận diện các khu vực có sự sai lệch giữa vị trí địa lý và khả năng tiếp cận, tức các khu vực nằm gần nhà ga về mặt hình học nhưng có thời gian hoặc quãng đường tiếp cận lớn do hạn chế của mạng lưới giao thông. Các khu vực này được xác định như các “vùng mù tiếp cận”, đóng vai trò quan trọng trong việc phát hiện các điểm nghẽn hạ tầng và làm cơ sở cho các phân tích không gian và đề xuất giải pháp trong các bước tiếp theo của luận án.

3.7.2. Các bước thực hiện phân tích

Bước 1: Xây dựng và chuẩn hóa cơ sở dữ liệu

Cơ sở dữ liệu không gian của luận án được xây dựng trên nền bản đồ địa hình tỷ lệ lớn (1/2000 và 1/500) do Sở Quy hoạch – Kiến trúc Hà Nội cung cấp, đảm bảo độ chính xác hình học và khả năng tích hợp giữa các lớp dữ liệu. Đây là bước nền tảng, phù hợp với khuyến nghị trong các nghiên cứu GIS đô thị rằng chất lượng dữ liệu đầu vào quyết định trực tiếp đến độ tin cậy của các kết quả phân tích không gian (Longley et al., 2015).

Trên cơ sở dữ liệu nền, luận án tiến hành cập nhật và hiệu chỉnh lớp mạng lưới giao thông (Road Network) thông qua việc số hóa các thông tin thu thập từ khảo sát thực địa. Quá trình này đặc biệt tập trung vào việc bổ sung các tuyến ngõ, ngách nhỏ và các lối đi tắt – những thành phần quan trọng của cấu trúc tiếp cận nhưng thường bị thiếu hoặc không được cập nhật trong các nguồn dữ liệu thứ cấp như Google Maps hay OpenStreetMap. Cách tiếp cận này tương đồng với các nghiên cứu về phân tích khả năng tiếp cận tại các đô thị châu Á, trong đó việc cập nhật mạng lưới thực tế giúp giảm sai số đáng kể so với việc sử dụng dữ liệu chuẩn hóa sẵn có (Taki & Maatouk, 2018; Singh et al., 2014).

Bên cạnh việc hoàn thiện hình học mạng lưới, luận án tiến hành gán thuộc tính (attribute) cho từng đoạn đường nhằm phục vụ phân tích định lượng. Các thông số như

chiều rộng mặt cắt và vận tốc đi bộ trung bình được nhập vào bảng thuộc tính, cho phép mô hình hóa mạng lưới dưới dạng mạng có trọng số (weighted network). Theo lý thuyết phân tích mạng trong GIS, việc tích hợp các biến số này là điều kiện cần để tính toán chi phí di chuyển (distance/time impedance), từ đó phản ánh chính xác hơn khả năng tiếp cận thực tế của người đi bộ (Geurs & van Wee, 2004).

Như vậy, bước xây dựng và chuẩn hóa cơ sở dữ liệu không chỉ dừng lại ở việc thu thập và tích hợp thông tin, mà còn là quá trình chuyển đổi dữ liệu từ dạng mô tả sang dạng có thể phân tích, tạo tiền đề cho các bước tính toán chỉ số không gian và mô hình hóa tiếp theo trong luận án.

Bước 2: Tính toán các chỉ số hình thái không gian

Trên cơ sở dữ liệu đã được chuẩn hóa, luận án sử dụng các công cụ và thuật toán phân tích trong GIS để lượng hóa các đặc trưng hình thái đô thị thông qua ba nhóm chỉ số cốt lõi, tương ứng với các thành phần trong mô hình 3D/5D (Density – Diversity – Design/Accessibility). Cách tiếp cận này phù hợp với các nghiên cứu định lượng về mối quan hệ giữa cấu trúc không gian và hành vi di chuyển đô thị (Ewing & Cervero, 2010).

Chỉ số khả năng tiếp cận được xác định thông qua tỷ lệ giữa diện tích vùng đi bộ thực tế và diện tích vùng đệm lý thuyết xung quanh nhà ga.

$$R = \frac{A_{thực\ tế}}{A_{lý\ thuyết}}$$

Trong đó, diện tích vùng đi bộ thực tế được xác định bằng phương pháp phân tích mạng lưới (service area), còn diện tích vùng đệm lý thuyết được xác định bằng vùng đệm hình học (buffer). Chỉ số R phản ánh mức độ hiệu quả của mạng lưới tiếp cận: trong các cấu trúc ô bàn cờ hoàn chỉnh, giá trị R thường dao động từ 0,6 đến 0,8; ngược lại, tại các khu vực có nhiều ngõ cụt, đường cong hoặc bị chia cắt, giá trị này thường thấp hơn 0,6, cho thấy mức độ kết nối kém và tồn tại các rào cản tiếp cận. Cách đo lường này tương đồng với chỉ số “pedshed ratio” được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu về khả năng đi bộ trong đô thị.

Chỉ số kết nối được lượng hóa thông qua mật độ nút giao trên một đơn vị diện tích (số nút/km²). Đây là một trong những chỉ số cơ bản trong phân tích cấu trúc mạng lưới, phản ánh mức độ “thấm” (permeability) của không gian đô thị. Giá trị mật độ nút giao càng cao cho thấy mạng lưới đường càng liên thông, khả năng lựa chọn lộ trình càng đa dạng và chi phí di chuyển càng thấp. Ngược lại, mật độ thấp thường gắn với các cấu trúc đô thị đóng kín, thiếu kết nối.

Chỉ số đa dạng sử dụng đất được tính toán dựa trên chỉ số Entropy (Shannon Entropy), nhằm đo lường mức độ pha trộn chức năng trong một khu vực.

Công thức:

$$H = \frac{-\sum_{i=1}^k P_i \cdot \ln(P_i)}{\ln(k)} \quad [12].$$

(Trong đó: P_i là tỷ lệ diện tích của chức năng sử dụng đất thứ i ; k là tổng số loại chức năng đất)

Giá trị H từ 0 đến 1

$H = 0$: Khu vực chỉ có 1 chức năng duy nhất (Đơn năng).

$H = 1$: đa dạng chức năng sử dụng đất (Ồ, Thương mại, Văn phòng...).

Chỉ số này được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu TOD để đánh giá khả năng hỗ trợ các hoạt động đi bộ và giảm nhu cầu di chuyển xa.

Thông qua việc tích hợp ba nhóm chỉ số trên, luận án xây dựng được hệ thống biến số định lượng phản ánh toàn diện đặc trưng không gian đô thị, làm cơ sở cho bước chồng lớp và đánh giá đa tiêu chí trong các bước tiếp theo.

Bước 3: Chồng lớp đánh giá tiêu chí

Sau khi các chỉ số hình thái không gian được tính toán, luận án tiến hành tích hợp các lớp thông tin thông qua phương pháp chồng lớp có trọng số (Weighted Overlay) trong môi trường GIS. Đây là kỹ thuật phổ biến trong phân tích đa tiêu chí không gian (Spatial Multi-Criteria Analysis – SMCA), cho phép tổng hợp các biến số khác nhau thành một chỉ số tổng hợp phục vụ đánh giá và ra quyết định (Malczewski, 2004).

Cụ thể, các lớp bản đồ đầu vào bao gồm mật độ dân cư, tỷ lệ vùng phục vụ đi bộ thực tế (chỉ số khả năng tiếp cận) và chỉ số đa dạng sử dụng đất được chuẩn hóa về cùng một thang đo nhằm đảm bảo khả năng so sánh. Trên cơ sở đó, mỗi lớp thông tin được gán một trọng số phản ánh mức độ quan trọng tương đối trong việc đánh giá tiềm năng TOD.

Hệ thống trọng số này không được xác định tùy ý mà được xây dựng dựa trên phương pháp phân tích thứ bậc (AHP – Analytic Hierarchy Process), thông qua ý kiến chuyên gia trong lĩnh vực quy hoạch và giao thông đô thị. Cách tiếp cận này giúp đảm bảo tính khách quan và khoa học trong việc xác định mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố.

Công thức tổng quát:

$$TOD_Score = \sum (W_i \times X_i) \quad [24]$$

Bước 4: Xuất bản đồ và phân vùng kết quả

Kết quả của quá trình chồng lớp đa tiêu chí được thể hiện dưới dạng bản đồ tổng hợp “Phân vùng mức độ sẵn sàng chuyển đổi TOD” (TOD Readiness Map). Đây là bước trực quan hóa kết quả phân tích, đồng thời chuyển hóa các giá trị định lượng thành thông tin không gian có thể phục vụ cho việc đánh giá và ra quyết định trong quy hoạch.

Bản đồ được xây dựng theo nguyên tắc phân loại giá trị chỉ số tổng hợp thành các nhóm mức độ khác nhau, sử dụng thang màu trực quan để phản ánh sự khác biệt về tiềm năng chuyển đổi giữa các khu vực. Trong đó, các khu vực có giá trị chỉ số cao được thể hiện bằng gam màu nóng (đỏ), phản ánh những vị trí có mật độ dân cư cao, khả năng tiếp cận tốt và mức độ đa dạng chức năng cao. Đây là các “điểm nóng” (hotspot), có điều kiện thuận lợi để triển khai mô hình TOD và do đó được ưu tiên trong các kịch bản chuyển đổi.

Ngược lại, các khu vực có giá trị chỉ số thấp được thể hiện bằng gam màu lạnh (xanh), phản ánh những nơi có hạn chế về hạ tầng, mức độ kết nối thấp hoặc khoảng cách tiếp cận lớn đến nhà ga. Đây là các “điểm lạnh” (coldspot), nơi việc áp dụng TOD cần được cân nhắc thận trọng và thường phải đi kèm với các giải pháp cải thiện hạ tầng và tăng cường kết nối trước khi xem xét gia tăng mật độ.

Việc xây dựng bản đồ phân vùng không chỉ giúp nhận diện trực quan các khu vực ưu tiên mà còn là công cụ quan trọng để liên kết kết quả phân tích không gian với các đề xuất quy hoạch trong giai đoạn tiếp theo. Qua đó, luận án đảm bảo tính liên tục giữa phân tích định lượng và định hướng giải pháp, đồng thời nâng cao tính ứng dụng thực tiễn của nghiên cứu trong bối cảnh đô thị Hà Nội.

3.7.3. Công cụ hỗ trợ

Trong luận án, hệ thống GIS được thiết lập như một môi trường phân tích tích hợp, trong đó phần mềm ArcGIS Pro hoặc QGIS (mã nguồn mở) được sử dụng để quản lý dữ liệu không gian, xây dựng mô hình mạng lưới và thực hiện các thuật toán phân tích, đặc biệt là Network Analyst. Việc lựa chọn các công cụ này phù hợp với thông lệ trong các nghiên cứu GIS đô thị, cho phép xử lý dữ liệu đa lớp và thực hiện các bài toán phân tích tiếp cận với độ chính xác cao.

Mục tiêu cốt lõi khi sử dụng công cụ GIS là mô phỏng một cách sát thực tế mạng lưới đi bộ trong đô thị, từ đó tính toán các chỉ số định lượng phản ánh khả năng tiếp cận và cấu trúc không gian. Khác với cách tiếp cận hình học đơn giản, mô hình GIS trong luận án được thiết kế theo hướng phản ánh đầy đủ các điều kiện vật lý và rào cản thực tế, đảm bảo các kết quả phân tích có ý nghĩa ứng dụng.

Để đạt được mục tiêu này, hệ thống dữ liệu GIS được tổ chức thành các nhóm lớp thông tin chính như sau:

- **Lớp giao thông (Road Network):** Bao gồm toàn bộ mạng lưới đường chính, đường nhánh, ngõ xóm và các tuyến vỉa hè. Đây là lớp dữ liệu trung tâm, được sử dụng để xây dựng mô hình mạng lưới phục vụ phân tích khả năng tiếp cận theo tuyến đường thực tế.
- **Lớp điểm dừng đỗ (Transit Nodes):** Bao gồm vị trí các nhà ga đường sắt đô thị, trạm xe buýt và các điểm trung chuyển khác. Lớp này đóng vai trò là các điểm đích trong bài toán phân tích tiếp cận.

- Lớp sử dụng đất (Land Use): Thể hiện ranh giới thửa đất và chức năng sử dụng (đất ở, thương mại, dịch vụ, giáo dục, cây xanh...). Dữ liệu này được sử dụng để tính toán chỉ số đa dạng chức năng và đánh giá mức độ hỗn hợp sử dụng đất.

- Lớp công trình (Building Data): Bao gồm các thông tin về diện tích xây dựng và số tầng cao, phục vụ tính toán mật độ xây dựng và cường độ sử dụng đất – một trong những biến số quan trọng trong mô hình TOD.

- Lớp rào cản (Barriers): Bao gồm các yếu tố cản trở khả năng tiếp cận như tường rào khu đô thị, mương hồ, khu vực ngập úng hoặc các đoạn đường cụt. Việc tích hợp lớp dữ liệu này giúp mô hình phản ánh chính xác hơn điều kiện di chuyển thực tế, tránh đánh giá sai lệch về khả năng tiếp cận.

Việc tổ chức hệ thống dữ liệu theo cấu trúc đa lớp như trên cho phép luận án không chỉ thực hiện các phân tích đơn lẻ mà còn tích hợp các yếu tố không gian khác nhau trong cùng một mô hình. Đây là cơ sở để triển khai các bước phân tích mạng lưới, tính toán chỉ số và chồng lớp đa tiêu chí một cách nhất quán và khoa học trong toàn bộ quá trình nghiên cứu.

Để đảm bảo tính đồng bộ và độ tin cậy của hệ thống phân tích GIS, luận án xây dựng quy trình thu thập và chuẩn hóa dữ liệu theo hướng tích hợp đa nguồn, kết hợp giữa dữ liệu chính thống, dữ liệu mở và dữ liệu khảo sát thực địa. Cách tiếp cận này phù hợp với các nghiên cứu GIS đô thị, trong đó việc kết hợp nhiều nguồn dữ liệu giúp nâng cao độ chính xác và giảm sai lệch trong mô hình phân tích (Goodchild, 2007).

Nguồn dữ liệu đầu vào được xác định gồm ba nhóm chính. Thứ nhất là dữ liệu bản đồ địa hình tỷ lệ 1/500 và 1/2000, được cung cấp dưới định dạng CAD hoặc Microstation từ cơ quan quản lý, đóng vai trò là nền tảng hình học chính xác cho toàn bộ khu vực nghiên cứu. Thứ hai là dữ liệu mở từ OpenStreetMap, được sử dụng để bổ sung và đối chiếu mạng lưới giao thông, đặc biệt hữu ích trong việc cập nhật các tuyến đường mới hoặc các khu vực có biến động nhanh. Thứ ba là dữ liệu khảo sát thực địa do nghiên cứu sinh trực tiếp thu thập, trong đó sử dụng thiết bị GPS cầm tay để ghi nhận các lối đi tắt, ngõ nhỏ trong các khu tập thể và làng xóm – những yếu tố thường không được thể hiện trong bản đồ quy hoạch nhưng có ảnh hưởng lớn đến khả năng tiếp cận thực tế.

Sau khi thu thập, toàn bộ dữ liệu được tiến hành chuẩn hóa về định dạng và hệ quy chiếu không gian. Các dữ liệu CAD và dữ liệu mở được chuyển đổi sang định dạng vector chuẩn của GIS như Shapefile (.shp) hoặc Geodatabase (.gdb), đảm bảo khả năng xử lý và phân tích trong môi trường phần mềm. Đồng thời, toàn bộ các lớp dữ liệu được thống nhất về hệ tọa độ VN-2000 (kinh tuyến trục Hà Nội), nhằm đảm bảo tính nhất quán khi chồng lớp và thực hiện các phép đo không gian.

Quy trình chuẩn hóa này không chỉ giúp đồng bộ hóa dữ liệu từ nhiều nguồn khác nhau mà còn tạo nền tảng cho việc xây dựng cơ sở dữ liệu không gian có cấu trúc

chặt chẽ, phục vụ trực tiếp cho các bước phân tích mạng lưới và tính toán chỉ số trong luận án.

Sau khi hoàn thiện cấu trúc hình học, bước tiếp theo là thiết lập hệ thống thuộc tính cho từng lớp dữ liệu nhằm chuyển đổi dữ liệu không gian từ dạng mô tả sang dạng có thể phân tích định lượng. Trong các nghiên cứu GIS, đây là bước cốt lõi giúp mô hình “hiều” được ý nghĩa của từng đối tượng không gian và cho phép thực hiện các phép tính toán, truy vấn và phân tích chuyên sâu (Longley et al., 2015).

Đối với lớp giao thông (Road Network), dữ liệu được xây dựng dưới dạng đối tượng đường (Polyline), phản ánh cấu trúc mạng lưới di chuyển thực tế. Mỗi đoạn đường được gán các thuộc tính phục vụ trực tiếp cho phân tích khả năng tiếp cận. Thông tin về chiều rộng (Width) được sử dụng để phân biệt các loại hình đường, từ đó xác định khả năng ưu tiên cho người đi bộ. Thuộc tính vận tốc đi bộ (Walk_Speed) được gán theo giá trị trung bình khoảng 4–5 km/h, phù hợp với các nghiên cứu về hành vi đi bộ đô thị, cho phép chuyển đổi khoảng cách thành thời gian di chuyển trong mô hình mạng lưới. Bên cạnh đó, chất lượng hạ tầng (Quality) được phân loại theo các mức tốt, trung bình và kém, dựa trên kết quả khảo sát thực địa về tình trạng vỉa hè và điều kiện đi lại. Việc tích hợp các thuộc tính này giúp mô hình phản ánh không chỉ khoảng cách mà còn chất lượng trải nghiệm di chuyển.

Đối với lớp sử dụng đất (Land Use), dữ liệu được tổ chức dưới dạng vùng (Polygon), thể hiện ranh giới và chức năng của từng thửa đất. Thuộc tính loại đất (Type) được phân loại theo các nhóm chức năng như đất ở, thương mại – dịch vụ, công cộng, cây xanh..., làm cơ sở cho việc tính toán chỉ số đa dạng sử dụng đất. Diện tích (Area) của từng đối tượng được sử dụng để xác định tỷ trọng của các loại hình chức năng trong khu vực nghiên cứu. Đồng thời, mật độ dân cư ước tính (Pop_Density) được bổ sung nhằm phục vụ phân tích mối quan hệ giữa mật độ và khả năng tiếp cận trong mô hình TOD.

Việc gán thuộc tính theo cấu trúc trên cho phép liên kết chặt chẽ giữa dữ liệu không gian và dữ liệu định lượng, tạo nền tảng để triển khai các bài toán phân tích mạng lưới, tính toán chỉ số và chồng lớp đa tiêu chí trong các bước tiếp theo của luận án.

Trên cơ sở hệ thống dữ liệu GIS đã được chuẩn hóa và gán thuộc tính, luận án triển khai các bài toán phân tích không gian theo một chuỗi logic liên hoàn, từ mô phỏng khả năng tiếp cận thực tế, lượng hóa cấu trúc sử dụng đất đến tích hợp đa tiêu chí để đánh giá tiềm năng TOD. Cách tiếp cận này kế thừa các nghiên cứu quốc tế về phân tích TOD, trong đó nhấn mạnh vai trò của GIS như một công cụ lượng hóa mối quan hệ giữa không gian đô thị và hành vi di chuyển (Ewing & Cervero, 2010; Geurs & van Wee, 2004; ITDP, 2017).

Trước hết, bài toán phân tích vùng phục vụ (Service Area Analysis) được thực hiện nhằm mô phỏng chính xác phạm vi tiếp cận của người đi bộ đến các điểm ga. Sử

dụng công cụ Network Analyst, luận án xây dựng các vùng đi bộ 400m và 800m dựa trên mạng lưới đường thực tế đã được hiệu chỉnh, bao gồm cả các tuyến ngõ, ngách và lối đi tắt. Khác với phương pháp vùng đệm hình học, cách tiếp cận này cho phép tính toán vùng phục vụ theo cấu trúc mạng lưới có trọng số (distance/time impedance), phản ánh đúng chi phí di chuyển thực tế. Kết quả phân tích không chỉ cho thấy phạm vi phục vụ thực tế của nhà ga mà còn là cơ sở để tính toán chỉ số Pedshed Ratio, qua đó đánh giá mức độ hiệu quả của hệ thống kết nối đi bộ – một chỉ số đã được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu về walkability và TOD.

Trên nền tảng đánh giá khả năng tiếp cận, luận án tiếp tục triển khai bài toán phân tích đa dạng sử dụng đất (Mixed-use Analysis) nhằm lượng hóa mức độ hỗn hợp chức năng – yếu tố cốt lõi ảnh hưởng đến nhu cầu và hành vi di chuyển. Sử dụng các công cụ như Spatial Statistics hoặc Zonal Statistics, dữ liệu sử dụng đất được tổng hợp theo từng đơn vị không gian để tính toán chỉ số Entropy. Cách tiếp cận này cho phép chuyển đổi cấu trúc sử dụng đất từ dạng phân loại định tính sang dạng chỉ số định lượng liên tục, phản ánh mức độ đa dạng chức năng trong từng khu vực. Các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng các khu vực có chỉ số đa dạng cao thường có xu hướng giảm nhu cầu di chuyển xa và tăng tỷ lệ sử dụng phương thức phi cơ giới.

Từ hai nhóm phân tích trên, luận án tiến hành bước tích hợp thông qua bài toán chồng lớp đánh giá tiềm năng (Weighted Overlay). Đây là bước tổng hợp các biến số không gian thành một chỉ số duy nhất phản ánh mức độ sẵn sàng chuyển đổi TOD. Các lớp dữ liệu đầu vào bao gồm mật độ dân cư, chỉ số khả năng tiếp cận (từ phân tích mạng lưới) và chỉ số đa dạng sử dụng đất được chuẩn hóa và tích hợp theo trọng số xác định từ phương pháp AHP. Phương pháp chồng lớp có trọng số được sử dụng rộng rãi trong phân tích đa tiêu chí không gian (SMCA), cho phép kết hợp các yếu tố có bản chất khác nhau trong một khung đánh giá thống nhất (Malczewski, 2004).

Như vậy, ba bài toán phân tích không gian không tồn tại rời rạc mà được tổ chức theo một chuỗi logic: từ mô phỏng khả năng tiếp cận thực tế, đến lượng hóa cấu trúc không gian và cuối cùng là tích hợp đa tiêu chí để đánh giá tổng hợp. Cách tiếp cận này đảm bảo tính liên kết giữa dữ liệu đầu vào và kết quả đầu ra, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học vững chắc cho việc xây dựng bản đồ phân vùng và đề xuất mô hình TOD trong các bước tiếp theo của luận án.

Kết quả của quá trình phân tích không gian được tổ chức và quản lý trong môi trường GIS dưới dạng cơ sở dữ liệu số, cho phép lưu trữ, truy xuất và cập nhật linh hoạt các lớp thông tin. Việc quản lý dữ liệu theo cấu trúc này đảm bảo tính nhất quán giữa các bước phân tích, đồng thời tạo điều kiện thuận lợi cho việc kiểm chứng và tái sử dụng dữ liệu trong các giai đoạn tiếp theo của nghiên cứu.

Trên cơ sở dữ liệu đã được xử lý, luận án tiến hành biên tập các bản đồ chuyên đề nhằm trực quan hóa kết quả phân tích. Trọng tâm là bản đồ “Mức độ sẵn sàng chuyển

đôi TOD” (TOD Readiness Map), được xây dựng từ kết quả chồng lớp đa tiêu chí. Bản đồ này sử dụng phương pháp phân loại giá trị và thể hiện bằng thang màu liên tục (heatmap), trong đó các giá trị cao được biểu diễn bằng gam màu nóng và các giá trị thấp bằng gam màu lạnh, giúp nhận diện rõ ràng sự phân hóa không gian.

Cách tiếp cận trực quan hóa này phù hợp với các nghiên cứu GIS đô thị, trong đó bản đồ không chỉ đóng vai trò minh họa mà còn là công cụ phân tích, cho phép phát hiện các quy luật phân bố và các khu vực có đặc trưng nổi bật. Thông qua bản đồ nhiệt, các khu vực có mức độ sẵn sàng chuyển đổi cao (hotspot) và thấp (coldspot) được xác định một cách trực quan, tạo cơ sở cho việc liên kết kết quả phân tích định lượng với các định hướng quy hoạch.

Như vậy, bước quản lý và trực quan hóa không chỉ là giai đoạn trình bày kết quả mà còn đóng vai trò quan trọng trong việc chuyển hóa dữ liệu phân tích thành thông tin có ý nghĩa không gian, phục vụ trực tiếp cho việc ra quyết định và đề xuất mô hình TOD trong luận án.

3.8. Phương pháp điều tra xã hội học

Bên cạnh các phương pháp phân tích không gian và định lượng, luận án sử dụng phương pháp điều tra xã hội học nhằm thu thập dữ liệu sơ cấp về hành vi, nhận thức và mức độ sẵn sàng thay đổi của người dân trong bối cảnh chuyển đổi theo định hướng TOD. Cách tiếp cận này phù hợp với các nghiên cứu giao thông đô thị hiện đại, trong đó yếu tố hành vi được xem là thành phần quyết định hiệu quả của các giải pháp tổ chức không gian (Ajzen, 1991; Ewing & Cervero, 2010).

Phương pháp điều tra được triển khai nhằm làm rõ mối quan hệ giữa cấu trúc không gian và lựa chọn di chuyển, đồng thời đánh giá phản ứng của người dân trước các đề xuất can thiệp vào đơn vị ở. Thông tin thu thập không chỉ phản ánh hiện trạng hành vi mà còn cung cấp cơ sở để dự báo xu hướng chuyển đổi phương thức di chuyển trong tương lai.

Kết quả điều tra đóng vai trò là nguồn dữ liệu quan trọng trong toàn bộ luận án. Đối với Mục tiêu 1, dữ liệu khảo sát được sử dụng để hiệu chỉnh và hoàn thiện hệ thống tiêu chí đánh giá TOD theo hướng phù hợp với điều kiện thực tế và nhu cầu của người dân. Đối với Mục tiêu 2, kết quả điều tra giúp nhận diện các “khoảng trống” giữa tiềm năng không gian và hành vi thực tế, đặc biệt là các rào cản tâm lý và điều kiện tiếp cận khiến người dân chưa lựa chọn giao thông công cộng. Đối với Mục tiêu 3, dữ liệu này cung cấp cơ sở thực tiễn để xây dựng các mô hình chuyển đổi phù hợp với từng loại hình đơn vị ở, đảm bảo tính khả thi và khả năng chấp nhận của cộng đồng.

Như vậy, phương pháp điều tra xã hội học không chỉ bổ sung cho các phân tích định lượng mà còn đóng vai trò kết nối giữa cấu trúc không gian và hành vi con người, giúp luận án tiếp cận vấn đề TOD theo hướng toàn diện và thực tiễn hơn.

3.8.1. Xác định cỡ mẫu

Để đảm bảo tính đại diện và độ tin cậy của dữ liệu điều tra, luận án xác định cỡ mẫu dựa trên công thức Slovin – một phương pháp được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu xã hội học và quy hoạch khi tổng thể nghiên cứu đã được ước lượng.

$$n = \frac{N}{1 + Ne^2}$$

Trong đó, N là quy mô tổng thể (tổng dân số trong phạm vi nghiên cứu) và e là sai số cho phép. Với giả định độ tin cậy 95% và sai số biên $e = 0,05$, tổng dân số trong phạm vi bán kính 800m của ba khu vực nghiên cứu điển hình được ước tính khoảng 60.000 người.

Áp dụng công thức trên, cỡ mẫu tối thiểu cần thiết được xác định xấp xỉ $n \approx 397$. Trên cơ sở đó, để đảm bảo độ tin cậy và dự phòng các phiếu không hợp lệ, nghiên cứu sinh lựa chọn quy mô mẫu trong khoảng từ 400 đến 450 phiếu khảo sát.

Về chiến lược chọn mẫu, mẫu điều tra được phân bổ theo hướng đại diện cho các nhóm đơn vị ở đặc trưng trong khu vực nghiên cứu. Cụ thể, số lượng phiếu được chia tương đối đồng đều giữa các nhóm không gian (khu tập thể cũ, khu làng xóm đô thị hóa và khu đô thị mới), nhằm đảm bảo khả năng so sánh và phân tích sự khác biệt về hành vi di chuyển và mức độ sẵn sàng chuyển đổi giữa các loại hình cấu trúc đô thị. Cách tiếp cận này phù hợp với các nghiên cứu thực nghiệm về hành vi giao thông, trong đó việc phân tầng mẫu theo đặc điểm không gian giúp nâng cao tính giải thích của kết quả phân tích.

3.8.2. Các bước điều tra xã hội học

Quy trình điều tra xã hội học trong luận án được xây dựng theo một chuỗi các bước chuẩn hóa, đảm bảo tính khoa học trong thu thập và xử lý dữ liệu, đồng thời bám sát các biến số đã được xác lập từ phương pháp kế thừa và khung lý thuyết hành vi.

Giai đoạn đầu tiên tập trung vào việc thiết kế công cụ khảo sát, trong đó bộ câu hỏi được xây dựng trực tiếp từ hệ thống biến số đã xác định ở phương pháp kế thừa, bao gồm các nhóm yếu tố về khả năng tiếp cận, chi phí di chuyển, mức độ thuận tiện và các yếu tố tâm lý – xã hội. Cách tiếp cận này đảm bảo sự liên kết chặt chẽ giữa khung lý thuyết và dữ liệu thực nghiệm, đồng thời giúp các câu hỏi có khả năng đo lường trực tiếp các khái niệm nghiên cứu như “mức độ sẵn sàng chuyển đổi” hay “chi phí tổng quát”.

Trước khi triển khai chính thức, nghiên cứu sinh tiến hành khảo sát thử nghiệm (pilot survey) với quy mô nhỏ (khoảng 10–15 phiếu) nhằm kiểm tra tính rõ ràng, dễ hiểu của câu hỏi và mức độ phù hợp với bối cảnh địa phương. Kết quả của bước này được sử dụng để điều chỉnh ngôn ngữ, loại bỏ các thuật ngữ chuyên môn khó tiếp cận và hoàn thiện cấu trúc bảng hỏi theo hướng thân thiện với người trả lời.

Sau khi hoàn thiện công cụ khảo sát, điều tra chính thức được triển khai theo phương thức kết hợp nhằm tối ưu hóa độ bao phủ mẫu. Hình thức phỏng vấn trực tiếp

tại hộ gia đình (face-to-face) được ưu tiên để đảm bảo độ tin cậy và khả năng giải thích câu hỏi, đặc biệt với các nhóm đối tượng lớn tuổi. Đồng thời, bảng hỏi cũng được phân phối qua các nền tảng trực tuyến như nhóm cư dân trên Zalo hoặc Facebook nhằm tiếp cận nhóm dân cư trẻ và tăng số lượng mẫu hiệu quả. Cách tiếp cận kết hợp này đang được áp dụng rộng rãi trong các nghiên cứu đô thị nhằm cân bằng giữa chất lượng và quy mô dữ liệu.

Dữ liệu thu thập sau đó được xử lý thông qua bước làm sạch dữ liệu (data cleaning), trong đó các phiếu không hợp lệ được loại bỏ dựa trên các tiêu chí như thiếu thông tin quan trọng hoặc có dấu hiệu trả lời không nghiêm túc (ví dụ: lựa chọn cùng một phương án cho toàn bộ câu hỏi thang đo). Bước này đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo độ tin cậy của dữ liệu đầu vào cho các phân tích tiếp theo.

Cuối cùng, toàn bộ dữ liệu hợp lệ được mã hóa và nhập liệu (coding) vào các phần mềm phân tích như SPSS hoặc Excel. Các biến định tính được chuyển đổi thành dạng số theo thang đo phù hợp (ví dụ: thang Likert 5 mức độ), tạo điều kiện cho việc thực hiện các phân tích thống kê mô tả, kiểm định và mô hình hóa hành vi trong các bước tiếp theo của luận án.

Thông qua quy trình 5 bước này, dữ liệu điều tra xã hội học không chỉ đảm bảo tính đại diện và độ tin cậy mà còn có khả năng tích hợp trực tiếp với các phương pháp phân tích định lượng và không gian, góp phần hình thành một hệ thống luận cứ khoa học xuyên suốt cho nghiên cứu.

3.8.3. Các thông số cần điều tra

Hệ thống thông số điều tra trong luận án không được xây dựng rời rạc mà xuất phát trực tiếp từ khung lý thuyết đã kế thừa ở Mục 3.3 (Modal Choice Theory và TPB), đồng thời được thiết kế để liên kết chặt chẽ với các biến số không gian trong mô hình GIS. Cách tiếp cận này đảm bảo dữ liệu điều tra không chỉ mang tính mô tả mà còn có khả năng giải thích và kiểm chứng các giả thuyết về mối quan hệ giữa cấu trúc đô thị và hành vi di chuyển, phù hợp với hướng nghiên cứu thực nghiệm trong các công trình của Ewing & Cervero (2010) hay Ajzen (1991).

Trên cơ sở đó, các thông số được tổ chức thành ba nhóm có tính kế thừa và logic theo chuỗi: từ đặc điểm nền của đối tượng, đến hành vi thực tế và cuối cùng là khả năng chuyển đổi hành vi.

Trước hết, nhóm đặc điểm kinh tế – xã hội được xác định như lớp biến nền nhằm kiểm soát sự khác biệt giữa các nhóm dân cư. Các biến về tuổi, giới tính và nghề nghiệp không chỉ phục vụ mục đích mô tả mẫu mà còn được sử dụng trong các nghiên cứu giao thông để giải thích sự khác biệt trong lựa chọn phương thức di chuyển. Đáng chú ý, biến số về sở hữu phương tiện cá nhân (số lượng xe máy, ô tô trong hộ) được đưa vào như một chỉ báo trực tiếp của mức độ phụ thuộc vào giao thông cá nhân. Nhiều nghiên cứu tại các đô thị châu Á cho thấy tỷ lệ sở hữu xe máy cao có tương quan nghịch với

việc sử dụng giao thông công cộng, do đó đây là biến quan trọng để đánh giá khả năng chuyển đổi trong bối cảnh Hà Nội.

Tiếp theo, nhóm hành vi đi lại hiện trạng được thiết kế nhằm phản ánh “bức tranh thực tế” về cách người dân di chuyển trong điều kiện hạ tầng hiện hữu. Biến phương thức đi làm chính (modal split) cho phép xác định cấu trúc lựa chọn phương tiện, trong khi khoảng cách hoặc thời gian từ nhà đến ga đóng vai trò liên kết trực tiếp với kết quả phân tích khả năng tiếp cận trong GIS. Đồng thời, việc thu thập thông tin về phương thức kết nối ra ga (đi bộ, xe ôm, xe đạp, người thân đưa đón) giúp làm rõ vai trò của “kết nối dặm cuối” – một yếu tố đã được chứng minh là rào cản lớn đối với hiệu quả của hệ thống TOD. Đặc biệt, các câu hỏi về lý do không sử dụng phương tiện công cộng được xây dựng dựa trên khái niệm “chi phí tổng quát” trong kinh tế học giao thông, bao gồm không chỉ chi phí tiền tệ mà còn thời gian, sự bất tiện và cảm nhận an toàn. Điều này cho phép nhận diện các rào cản không gian và phi không gian một cách toàn diện.

Trên nền tảng hành vi hiện trạng, nhóm thông số thứ ba tập trung vào kịch bản chuyển đổi (willingness to shift) nhằm đánh giá phản ứng của người dân trước các giả định cải thiện hạ tầng theo định hướng TOD. Các biến số như mức độ sẵn sàng đi bộ khi vỉa hè được cải tạo, khả năng sử dụng xe đạp công cộng hay ngưỡng chấp nhận khoảng cách đi bộ được thiết kế theo thang đo Likert để lượng hóa yếu tố tâm lý – hành vi. Cách tiếp cận này kế thừa trực tiếp mô hình TPB, trong đó hành vi không chỉ phụ thuộc vào điều kiện thực tế mà còn chịu ảnh hưởng bởi nhận thức và thái độ của người dùng. Đặc biệt, biến “ngưỡng chấp nhận đi bộ” (300m, 500m, 800m) đóng vai trò cầu nối giữa dữ liệu xã hội học và phân tích không gian, cho phép kiểm chứng mức độ phù hợp của các vùng phục vụ TOD được xác định trong GIS với hành vi thực tế của người dân.

Như vậy, ba nhóm thông số không tồn tại độc lập mà được thiết kế theo một cấu trúc logic: đặc điểm nền quyết định điều kiện lựa chọn, hành vi hiện trạng phản ánh kết quả của cấu trúc không gian hiện hữu, và kịch bản chuyển đổi cho thấy khả năng thay đổi khi các điều kiện được cải thiện. Cấu trúc này đảm bảo dữ liệu điều tra có thể tích hợp trực tiếp với các phương pháp phân tích định lượng và không gian, từ đó cung cấp luận cứ khoa học cho việc đánh giá và đề xuất mô hình TOD phù hợp với bối cảnh Hà Nội.

3.8.4. Cấu trúc Phiếu điều tra

Cấu trúc phiếu điều tra được thiết kế theo logic kế thừa trực tiếp từ hệ thống biến số đã xác định ở các mục trước, đồng thời tuân thủ phương pháp khảo sát hành vi trong nghiên cứu giao thông đô thị, đặc biệt là cách tiếp cận kết hợp giữa Revealed Preference (hành vi thực tế) và Stated Preference (hành vi giả định). Cách tổ chức này giúp đảm bảo phiếu điều tra không chỉ thu thập thông tin mô tả mà còn có khả năng kiểm chứng và dự báo hành vi trong các kịch bản TOD.

Trên cơ sở đó, phiếu điều tra được chia thành ba phần có mối liên hệ chặt chẽ với nhau.

Phần A tập trung vào thông tin chung, đóng vai trò định danh và phân tầng mẫu điều tra. Các câu hỏi trong phần này thu thập các đặc điểm kinh tế – xã hội như độ tuổi, giới tính, nghề nghiệp và mức độ sở hữu phương tiện cá nhân. Dữ liệu này không chỉ giúp mô tả cấu trúc mẫu mà còn là cơ sở để phân tích sự khác biệt về hành vi giữa các nhóm đối tượng, đồng thời phục vụ cho việc kiểm soát biến trong các mô hình phân tích sau này.

Phần B phản ánh hiện trạng và mức độ hài lòng đối với hạ tầng TOD hiện tại, được thiết kế theo thang đo Likert 5 mức độ nhằm lượng hóa cảm nhận của người dân. Nội dung đánh giá tập trung vào các yếu tố có ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng tiếp cận và trải nghiệm di chuyển như chất lượng vỉa hè, mức độ an toàn khi đi bộ, khả năng kết nối đến nhà ga, sự thuận tiện trong việc gửi xe hoặc chuyển tiếp phương tiện. Việc sử dụng thang đo định lượng giúp chuyển đổi các yếu tố cảm nhận thành dữ liệu có thể phân tích thống kê, đồng thời tạo điều kiện so sánh với các chỉ số không gian đã tính toán trong GIS.

Phần C được xây dựng dưới dạng kịch bản lựa chọn (Stated Preference) nhằm kiểm tra phản ứng của người dân trước các giả định cải thiện hạ tầng theo định hướng TOD. Các kịch bản được thiết kế dựa trên các giải pháp đề xuất trong luận án, chẳng hạn như nâng cấp vỉa hè, bổ sung hệ thống xe đạp công cộng hoặc cải thiện kết nối dặm cuối. Người trả lời được yêu cầu lựa chọn hoặc đánh giá mức độ sẵn sàng thay đổi hành vi trong từng tình huống cụ thể. Cách tiếp cận này cho phép dự báo xu hướng chuyển đổi phương thức di chuyển trong tương lai, đồng thời kiểm chứng tính khả thi của các giải pháp quy hoạch từ góc độ người sử dụng.

Như vậy, ba phần của phiếu điều tra được xây dựng theo một trình tự logic từ đặc điểm cá nhân, đánh giá hiện trạng đến phản ứng với kịch bản tương lai. Cấu trúc này đảm bảo khả năng liên kết giữa dữ liệu xã hội học với các phân tích không gian và định lượng, qua đó tạo nền tảng vững chắc cho việc đánh giá và đề xuất mô hình TOD trong luận án.

PHIẾU KHẢO SÁT, LẤY Ý KIẾN CỘNG ĐỒNG VỀ MÔ HÌNH ĐƠN VỊ Ở VÀ GIAO THÔNG CÔNG CỘNG

PHẦN 1: THÔNG TIN CHUNG

I. Xin Anh/ Chị vui lòng cung cấp thông tin cá nhân của anh chị để tiện liên lạc khi cần thiết

Họ và tên	
Địa chỉ	
Điện thoại	
Email	

II. Đối với chuyên gia

a. Thời gian Anh/ Chị công tác trong lĩnh vực quy hoạch?

1	Dưới 3 năm
2	Từ 3-5 năm
3	Từ 5- 10 năm
4	Trên 10 năm

b. Hiện tại Anh/Chị đang công tác cho đơn vị nào?

1	Cơ quan nhà nước về quản lý quy hoạch
2	Cơ quan nghiên cứu, trường đại học, viện nghiên cứu
3	Đơn vị vận hành, quản lý dự án đường sắt đô thị
4	Các đơn vị tư vấn, thiết kế quy hoạch
5	Khác

c. Chức vụ hiện tại của Anh/ Chị trong đơn vị

1	Lãnh đạo
2	Chuyên gia /Nghiên cứu
3	KTS thiết kế quy hoạch, kiến trúc
4	Kỹ sư giám sát/ thi công/ vận hành đô thị
5	Khác

III. Đối với công đồng

a. Thời gian Anh/Chị ở /tiếp cận khu vực nghiên cứu

1	Dưới 3 năm
2	Từ 3-5 năm
3	Từ 5- 10 năm
4	Trên 10 năm

b. Công việc hiện tại của Anh/ Chị

1	Công chức, viên chức
2	Doanh nghiệp
3	Tự do

c. Anh/ Chị đang sinh sống tại khu vực nào?

1	Khu tập thể cũ/ khu phố cũ
2	Khu vực làng xóm đô thị hóa
3	Khu đô thị mới
4	Nhà ở riêng lẻ mặt phố lớn

d. Anh/Chị có đang công tác trong lĩnh vực Quy hoạch/ Kiến trúc/ Xây dựng/ Giao thông hoặc Quản lý đô thị không?

1	Có (mời trả lời thêm các ý kiến chuyên gia sâu ở cuối phiếu)
2	Không

e. Khoảng cách từ nhà Anh/Chị đến Ga đường sắt đô thị (Metro) gần nhất là bao xa?

1	Dưới 300m (Đi bộ < 5 phút)
2	300 - 500m (Đi bộ 5-10 phút)
3	500 - 800m (Đi bộ 10-15 phút)
4	800m - 1.5km
5	Trên 1.5km

f. Số lượng phương tiện hiện tại của hộ gia đình:

Xe máy: chiếc.

Ô tô: chiếc.

Xe đạp: chiếc.

PHẦN II: HIỆN TRẠNG HÀNH VI ĐI LẠI

1. Phương tiện đi lại chính hàng ngày của Anh/Chị là gì?

1	Xe máy cá nhân
2	Ô tô cá nhân
3	Xe buýt / BRT
4	Tàu điện (Cát Linh - Hà Đông)
5	Xe đạp / Đi bộ

2. Nếu Anh/Chị KHÔNG sử dụng Tàu điện/Xe buýt thường xuyên, lý do chính là gì? (Chọn tối đa 3 ý)

1	Ga tàu/Bến xe quá xa nhà
2	Đường đi bộ ra ga vỉa hè xấu, bị lấn chiếm, khó đi
3	Không có mái che nắng/mưa trên đường đi bộ
4	Mạng lưới đường ngõ cụt/tường rào phải đi vòng rất xa
5	Phải chuyển tuyến nhiều lần, bất tiện
6	Giá vé gửi xe máy tại ga đắt hoặc không có chỗ gửi

7	Do thói quen và sự tiện lợi của xe máy cá nhân
---	--

3. Anh/Chị thường kết hợp chuyên đi như thế nào?

1	Đi thẳng từ nhà đến chỗ làm và ngược lại
2	Đi làm - Ghé đón con/đi chợ - Về nhà (Đây là lý do khó bỏ xe máy)
3	Đi làm - Giải trí/Cafe - Về nhà

Phần III: ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG KHÔNG GIAN ĐÔ THỊ

Anh/Chị vui lòng đánh giá mức độ đồng ý với các nhận định sau về khu vực mình đang sống. (Thang điểm: 1-Hoàn toàn không đồng ý ... 5-Hoàn toàn đồng ý)

STT	Tiêu chí đánh giá	1	2	3	4	5
I	Về Mật độ (mục đích: Đánh giá xem mật độ hiện tại có đủ hỗ trợ dịch vụ và Metro không, hay đang gây quá tải)					
1	Khu vực tôi sống có đông đúc dân cư, tạo cảm giác sầm uất và an toàn					
2	Mật độ xây dựng cao giúp tôi dễ dàng tiếp cận nhiều loại hình dịch vụ hơn					
3	Tôi ủng hộ việc xây dựng các tòa nhà cao tầng xung quanh nhà ga để tăng hiệu quả sử dụng đất					
4	Hiện tại, mật độ dân số quá cao đang gây áp lực lên hạ tầng (tắc đường, thiếu chỗ đỗ xe) tại khu tôi ở					
II	Về Đa dạng sử dụng đất. (mục đích: Kiểm tra tính đa dạng của đơn vị ở. Người dân có sống, làm việc và giải trí tại chỗ được không?)					
1	Tôi có thể mua sắm các nhu yếu phẩm hàng ngày (chợ, tạp hóa, thuốc...) trong bán kính đi bộ 5-10 phút					
2	Trong khu vực có đầy đủ các tiện ích công cộng (trường học, trạm y tế, công viên) gần nhà					
3	Tầng 1 của các tòa nhà/nhà phố được sử dụng linh hoạt cho kinh doanh, dịch vụ (cafe, cửa hàng) tạo sự sống động					
4	Khu vực này có sự đa dạng giữa các nhóm dân cư (người già, trẻ em, người đi làm, sinh viên)					

III	Thiết kế (mục đích: Đánh giá khả năng đi bộ (Walkability) - Yếu tố quan trọng nhất của TOD)					
1	Via hè dẫn ra ga tàu/bến xe đủ rộng và bằng phẳng, người già/trẻ em đi lại dễ dàng					
2	Có hệ thống cây xanh/mái che liên tục để che nắng, mưa trên đường đi bộ					
3	Via hè thông thoáng, không bị lấn chiếm bởi xe máy, hàng quán hay biển hiệu					
4	Hệ thống chiếu sáng ban đêm tốt, tôi cảm thấy an toàn khi đi bộ buổi tối					
5	Các vạch kẻ đường/đèn tín hiệu cho người đi bộ sang đường được bố trí hợp lý và an toàn					
6	Cảnh quan đường phố đẹp, sạch sẽ, khuyến khích tôi muốn đi bộ thư giãn					
IV	Khoảng cách – Khả năng tiếp cận hệ thống giao thông công cộng					
1	Khoảng cách từ nhà tôi đến ga tàu điện (hoặc điểm xe buýt) là chấp nhận được để đi bộ					
2	Mạng lưới đường/ngõ liên thông tốt, tôi có thể đi đường tắt để ra ga nhanh chóng					
3	Có quá nhiều tường rào ngăn cách (của các khu đô thị/cơ quan) khiến tôi phải đi đường vòng rất xa mới tới ga					
V	Khả năng tiếp cận điểm đến (Mục đích: Đánh giá xem sống ở đây có thuận tiện để đi làm/đi chơi bằng phương tiện công cộng không)					
1	Từ khu vực nhà tôi, có thể dễ dàng đi đến trung tâm thành phố hoặc nơi làm việc bằng phương tiện công cộng					
2	Khu vực này kết nối tốt với các đầu mối giao thông khác (có trạm xe đạp, xe buýt gom kết nối với ga tàu)					
3	Việc sử dụng phương tiện công cộng ở đây thuận tiện và nhanh hơn so với đi xe máy cá nhân					

Phần IV: KỊCH BẢN CHUYỂN ĐỔI

Đây là phần thu thập thông tin để xây dựng mô hình TOD. Giả sử Thành phố thực hiện các giải pháp sau, Anh/Chị có thay đổi phương tiện tham gia giao thông không?

1. Kịch bản 1: Cải tạo vỉa hè. Nếu vỉa hè từ nhà Anh/Chị đến ga được giải phóng hoàn toàn, lát phẳng, có mái che hoặc cây xanh liên tục: Anh/Chị có sẵn sàng đi bộ 800m (10-15 phút) để đi tàu điện không?

1	Chắc chắn có
2	Có thể (tùy thời tiết)
3	Không (vẫn quá xa)

2. Kịch bản 2: Kết nối xe đạp. Nếu có trạm xe đạp công cộng ngay đầu ngõ/sảnh chung cư và có làn đường ưu tiên cho xe đạp ra ga. Anh/Chị có sử dụng xe đạp thay cho xe máy/xe ôm để ra ga không?

1	Rất sẵn lòng
2	Cân nhắc
3	Không (tôi không biết đi xe đạp/ngại đạp xe)

3. kịch bản 3: Điều chỉnh chỗ đỗ xe. Nếu phí gửi xe máy/ô tô tại trung tâm thành phố tăng cao gấp 3 lần, và phí gửi xe tại ga tàu điện được miễn phí: Anh/Chị có chuyển sang đi Metro đi làm không?

1	Chắc chắn chuyển
2	Có thể chuyển
3	Không (tôi chấp nhận trả phí cao để đi xe cá nhân)

4. Kịch bản 4: Tái cấu trúc đô thị

Nếu khu nhà Anh/Chị được phá bỏ tường rào ngăn cách, mở thêm các lối đi tắt (lối mở) dành riêng cho người đi bộ xuyên qua các lô đất để rút ngắn quãng đường ra ga. Anh/Chị có ủng hộ giải pháp này không?

1	Rất ủng hộ (vì đi lại thuận tiện hơn)
2	Phân vân (lo ngại an ninh)
3	Phản đối (muốn giữ không gian khép kín)

5. Kịch bản 5: Đô thị carbon thấp

Anh/Chị có chấp nhận sống trong các căn hộ diện tích nhỏ hơn một chút, nhưng nằm ngay cạnh ga tàu, nhiều công viên và không cần sở hữu xe máy/ô tô không?

1	Sẵn sàng (đây là lối sống hiện đại)
2	Chỉ chấp nhận nếu chưa lập gia đình
3	Không (tôi vẫn cần nhà rộng và chỗ để xe riêng)

Phần V. Dành cho Chuyên gia

1. Theo góc nhìn chuyên môn của Anh/Chị, đâu là rào cản lớn nhất để áp dụng mô hình TOD tại khu vực này?

1	Cấu trúc đường ngõ ngách quá phức tạp, khó tổ chức giao thông công cộng tiếp cận
2	Thói quen sử dụng xe máy đã ăn sâu vào văn hóa
3	hiếu cơ chế pháp lý về đền bù/giải phóng mặt bằng để mở đường
4	Quy hoạch sử dụng đất còn cứng nhắc, chưa cho phép hỗn hợp chức năng
5	Khác:

2. Anh/Chị đánh giá thế nào về tiềm năng chuyển đổi khu vực này thành mô hình "Khu phố không xe máy" (Motorbike-free zone) trong tương lai (tầm nhìn 2035)?

1	Rất khả thi
2	Khả thi nhưng cần lộ trình dài
3	Không khả thi

3. Ý kiến đóng góp khác của Anh/Chị:

3.8.5. Xử lý mẫu phiếu điều tra

Dữ liệu thu thập từ điều tra xã hội học được xử lý bằng phần mềm SPSS 26.0 theo một quy trình phân tích định lượng có cấu trúc, nhằm chuyển hóa thông tin khảo sát thành các luận cứ khoa học phục vụ trực tiếp cho các mục tiêu nghiên cứu. Cách tiếp cận này kế thừa các phương pháp phân tích thống kê trong nghiên cứu hành vi giao thông, trong đó dữ liệu khảo sát được khai thác theo nhiều cấp độ từ mô tả đến giải thích và dự báo.

Trước hết, phân tích thống kê mô tả (Descriptive Statistics) được sử dụng để khái quát đặc điểm mẫu và hành vi di chuyển hiện trạng. Các chỉ tiêu như tỷ lệ phần trăm lựa chọn phương thức đi lại (modal split), phân bố khoảng cách tiếp cận, hay tỷ lệ sử dụng các hình thức kết nối dặm cuối được tính toán nhằm phản ánh bức tranh tổng thể về hành vi giao thông của cư dân trong khu vực nghiên cứu. Kết quả này đồng thời đóng vai trò đối chiếu với các phân tích không gian trong GIS, giúp kiểm chứng mức độ phù hợp giữa cấu trúc đô thị và hành vi thực tế.

Tiếp theo, để đảm bảo độ tin cậy của các thang đo cảm nhận và thái độ, luận án tiến hành kiểm định độ tin cậy Cronbach's Alpha đối với các nhóm biến sử dụng thang đo Likert. Phương pháp này cho phép đánh giá mức độ nhất quán nội tại của các biến quan sát trong cùng một khái niệm (ví dụ: mức độ hài lòng về hạ tầng đi bộ hoặc nhận thức về sự thuận tiện của giao thông công cộng). Theo thông lệ trong các nghiên cứu xã hội học, hệ số Cronbach's Alpha lớn hơn 0,7 được xem là đạt độ tin cậy chấp nhận được, từ đó đảm bảo các thang đo có thể sử dụng cho các phân tích sâu hơn.

Trên cơ sở dữ liệu đã được kiểm định, luận án triển khai phân tích tương quan và hồi quy nhằm xác định mối quan hệ giữa các biến số và mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố đến quyết định lựa chọn phương thức di chuyển. Cụ thể, các biến độc lập như thời gian tiếp cận, chất lượng vỉa hè, sự thuận tiện, chi phí hành trình và các yếu tố tâm lý được đưa vào mô hình để kiểm định tác động đến biến phụ thuộc là “mức độ sẵn sàng chuyển sang đi bộ hoặc sử dụng Metro”. Cách tiếp cận này kế thừa nguyên lý “tối đa hóa lợi ích ngẫu nhiên” trong lý thuyết lựa chọn phương thức, cho phép lượng hóa mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố và xác định các nhân tố chi phối chính.

Thông qua chuỗi phân tích này, dữ liệu điều tra không chỉ dừng lại ở việc mô tả hiện trạng mà còn được khai thác để làm rõ cơ chế hình thành hành vi và dự báo khả năng chuyển đổi trong các kịch bản TOD. Kết quả phân tích là cơ sở quan trọng để liên kết với các phát hiện từ GIS, đồng thời cung cấp bằng chứng thực nghiệm cho việc đề xuất các giải pháp quy hoạch trong các phân tiếp theo của luận án.

CHƯƠNG IV: KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Trong tiến trình thực hiện các cam kết quốc tế về ứng phó với biến đổi khí hậu, giai đoạn 2025–2026 đánh dấu một bước ngoặt quan trọng của Việt Nam khi các khung pháp lý về thị trường carbon và quản trị đô thị thông minh bắt đầu đi vào vận hành thực tiễn. Thành phố Hà Nội, với vai trò là đô thị đặc biệt, đang đứng trước áp lực phải chuyển đổi mô hình phát triển để đạt mục tiêu Net Zero vào năm 2050. Kết quả nghiên cứu tại Chương IV tập trung vào việc lượng hóa các tác động của hình thái đô thị và hành vi di chuyển dọc hành lang tuyến đường sắt đô thị số 2A Cát Linh – Hà Đông, từ đó đề xuất các lộ trình cắt giảm carbon dựa trên cơ sở khoa học và thực tiễn quản lý bất động sản hiện đại.

4.1. Quan điểm và nguyên tắc

Quan điểm nghiên cứu được xác lập trên nền tảng triết lý phát triển bền vững, trong đó coi việc giảm phát thải carbon không chỉ là nghĩa vụ môi trường mà còn là cơ hội để nâng cao giá trị bất động sản và chất lượng sống đô thị. Tính đến tháng 4 năm 2026, quan điểm này được cụ thể hóa thông qua sự chuyển dịch từ quản lý phát thải bằng công cụ hành chính sang điều tiết bằng tín hiệu thị trường, đặc biệt là sự hình thành của sàn giao dịch tín chỉ carbon theo Nghị định 29/2026/NĐ-CP.³ Việc nghiên cứu phát thải dọc tuyến metro 2A được đặt trong bối cảnh Luật Thủ đô 2024 đã chính thức thể chế hóa mô hình TOD (Phát triển đô thị định hướng giao thông công cộng), cho phép Hà Nội áp dụng các cơ chế đặc thù về mật độ xây dựng và thu hồi giá trị gia tăng từ đất (Land Value Capture) để tái đầu tư cho hạ tầng xanh.

Hệ thống nguyên tắc cốt lõi trong nghiên cứu này bao gồm bốn trụ cột chính nhằm đảm bảo tính khả thi và hiệu quả của các giải pháp can thiệp không gian. Nguyên tắc thứ nhất là tính tích hợp (Integration), yêu cầu sự khớp nối đồng bộ giữa quy hoạch sử dụng đất nén và mạng lưới giao thông công cộng khối lượng lớn. Dữ liệu từ các nghiên cứu quốc tế tại Tokyo và Curitiba chỉ ra rằng khi mật độ cư trú tăng lên đồng hành với khả năng tiếp cận ga metro trong bán kính đi bộ, lượng phát thải carbon giao thông trên đầu người có thể thấp hơn 4 lần so với các đô thị dàn trải. Nguyên tắc thứ hai là ưu tiên giao thông phi cơ giới (NMT Priority), trong đó người đi bộ và xe đạp được đặt ở vị trí trung tâm của mọi thiết kế hạ tầng chặng đầu – chặng cuối. Điều này giúp phá bỏ sự phụ thuộc vào xe máy, vốn chiếm tới 80% quãng đường di chuyển và là nguồn phát thải khó kiểm soát nhất tại Hà Nội.

Nguyên tắc thứ ba nhấn mạnh vào tính minh bạch và chuẩn hóa (Transparency & Standardization) trong phương pháp tính toán. Toàn bộ quy trình kiểm kê phải tuân thủ các hướng dẫn mới nhất của IPCC (2019 Refinement) và khung GPC để đảm bảo kết quả có thể so sánh quốc tế và phục vụ mục tiêu thẩm định hạn ngạch phát thải khí nhà kính cho giai đoạn 2025–2026 theo Quyết định 263/QĐ-TTg. Cuối cùng là nguyên tắc công bằng trong dịch chuyển (Mobility Justice), đảm bảo rằng các giải pháp giảm

phát thải không tạo ra rào cản cho các nhóm yếu thế. Nghiên cứu thực tiễn năm 2026 phản ánh rằng những khó khăn về hạ tầng tiếp cận thường gây ra tổn thất thu nhập và suy giảm chất lượng môi trường đối với các hộ gia đình sống sát hành lang thi công cũ, đòi hỏi các giải pháp tái cấu trúc phải đi kèm với chính sách an sinh xã hội.

Nhóm nguyên tắc	Nội dung chi tiết	Ý nghĩa đối với quản trị đô thị
Quy hoạch nén (Compact)	Tăng hệ số sử dụng đất (FAR) từ 5.0 - 6.0 quanh ga ⁷	Tối ưu hóa hiệu suất hạ tầng, giảm phát thải giao thông ⁷
Đa dạng chức năng (Mix)	Kết hợp Ở - Làm việc - Dịch vụ trong một ô phố	Giảm nhu cầu di chuyển xa, triệt tiêu chuyến đi bằng xe cơ giới ¹¹
Kết nối mềm (Connectivity)	Xóa bỏ tường rào, hình thành mạng lưới đường đi bộ xuyên tâm	Tăng tính "thấm" của đô thị, rút ngắn quãng đường ra ga ⁷
Kinh tế xanh (Green Economy)	Áp dụng phí carbon và trao đổi tín chỉ carbon ²	Tạo nguồn thu tài chính cho các dự án thích ứng biến đổi khí hậu ¹⁴

Sự kết hợp các nguyên tắc này tạo ra một khung tham chiếu giúp các nhà quản lý bất động sản và chính quyền đô thị nhận diện được các giá trị tiềm ẩn của "bất động sản carbon thấp". Trong bối cảnh năm 2026, giá trị các dự án gắn liền với metro tại Hà Nội đã tăng trưởng từ 12% đến 19%, minh chứng cho việc cư dân sẵn sàng trả chi phí cao hơn cho những khu vực có môi trường sống xanh và kết nối thuận tiện. Đây chính là động lực kinh tế quan trọng để thực hiện các chiến lược cắt giảm carbon ở quy mô đơn vị ở.

4.2. Kiểm kê kết quả tính toán phát thải ở trong khu đô thị

4.2.1. Chọn khu đô thị nghiên cứu và tìm kiếm giải pháp đặc thù

Hành lang tuyến metro số 2A Cát Linh – Hà Đông sở hữu một phổ hình thái đô thị cực kỳ phức tạp, phản ánh các giai đoạn phát triển khác nhau của thủ đô. Để lượng hóa phát thải một cách chính xác, nghiên cứu đã lựa chọn ba đơn vị không gian điển hình dọc tuyến làm đối tượng khảo sát chi tiết. Việc lựa chọn này không chỉ dựa trên vị trí địa lý mà còn căn cứ vào cấu trúc hạ tầng và đặc điểm hành vi của cư dân, từ đó tìm kiếm các giải pháp giảm thiểu carbon có tính đặc thù cho từng loại hình.

Nhóm thứ nhất là các Khu đô thị mới cao tầng hiện đại như Văn Quán và Mỗ Lao. Đây là những khu vực có mật độ xây dựng cao với các block chung cư từ 35 đến

45 tầng, thu hút lượng lớn dân cư trẻ và năng động. Tuy nhiên, kết quả kiểm kê cho thấy các khu vực này đang đối mặt với mức phát thải Scope 2 (phát thải gián tiếp từ năng lượng) rất lớn. Dữ liệu thực tế năm 2026 chỉ ra rằng tiêu thụ điện năng cho hệ thống điều hòa, chiếu sáng và thang máy tại các tòa nhà này chiếm tới hơn 60% tổng phát thải vận hành. Một rào cản TOD nghiêm trọng được phát hiện là cấu trúc "khép kín" (gated community) với hệ thống tường rào bao quanh, khiến quãng đường đi bộ thực tế của cư dân ra ga metro bị kéo dài gấp 1,5 đến 2 lần so với khoảng cách đường chim bay. Giải pháp đặc thù được đề xuất là tái cấu trúc không gian theo hướng "phá vỡ sự cô lập", chuyển đổi tầng trệt thành các không gian thương mại mở và hình thành các lối đi bộ xuyên tâm kết nối trực tiếp với sảnh ga metro.

Nhóm thứ hai bao gồm các Khu tập thể cũ và Phố cũ lịch sử như khu vực xung quanh ga Thái Hà và ga Láng. Đây là những nơi có mật độ dân cư và thương mại đậm đặc, tiềm năng tạo dòng khách cho metro rất cao. Tuy nhiên, "dấu chân carbon" giao thông tại đây bị đẩy cao do tình trạng vỉa hè bị lấn chiếm và hạ tầng đi bộ xuống cấp nghiêm trọng, buộc người dân phải lựa chọn xe máy ngay cả cho những quãng đường ngắn dưới 500m. Giải pháp trọng tâm cho khu vực này là chỉnh trang đô thị nén quy mô nhỏ (Micro-scale Urban Regeneration), bao gồm việc khôi phục vỉa hè khả dụng và lắp đặt hệ thống mái che liên tục dọc các hành lang tiếp cận ga để đối phó với điều kiện thời tiết nắng nóng.

Nhóm thứ ba là Hình thái làng xóm đô thị hóa như khu vực ga Phùng Khoang và Thượng Đình. Đặc trưng nổi bật là cấu trúc ngõ ngách dạng xương cá chằng chịt, rất nhỏ hẹp và không có vỉa hè. Tại đây, tỷ lệ sở hữu và sử dụng xe máy gần như là tuyệt đối (100%) do tính cơ động trong ngõ nhỏ, trong khi xe buýt gom hoàn toàn không thể tiếp cận. Nghiên cứu năm 2026 xác định đây là vùng có cường độ phát thải Scope 1 cao nhất trên mỗi đơn vị diện tích. Giải pháp đột phá được tìm kiếm là mô hình "trung tâm trung chuyển vi mô" tại các cửa ngõ ngõ xóm, kết hợp trạm xe đạp chia sẻ và các phương tiện điện nhẹ hỗ trợ di chuyển chặng cuối.

Khu vực khảo sát	Hình thái điển hình	Chỉ số Pedshed Ratio (Hiệu quả đi bộ)	Giải pháp ưu tiên
Cụm Văn Quán - Mỗ Lao	KĐT mới cao tầng	0.55 - 0.62 (Kém do rào cản vật lý)	Xóa bỏ tường rào, công trình xanh PlusEnergy
Cụm Thái Hà - Láng	Phố cũ / Khu tập thể	0.45 - 0.50 (Kém do lấn chiếm)	Chỉnh trang vỉa hè, hành lang có mái che

Cụm Phường Khoang	Làng xóm đô thị hóa	< 0.40 (Rất kém do ngõ nhỏ)	Trạm xe đạp công cộng, xe điện mini trung chuyên
------------------------------	------------------------	--------------------------------	--

Việc nhận diện các rào cản này cho thấy giảm phát thải carbon không đơn thuần là thay đổi công nghệ vận tải mà là một bài toán về tổ chức không gian. Nếu không giải quyết được các điểm đứt gãy trong chuỗi hành trình của hành khách, hiệu suất khai thác của tuyến 2A sẽ vẫn duy trì ở mức thấp (hiện đạt khoảng 12% công suất thiết kế), dẫn đến lãng phí nguồn lực đầu tư và không đạt được mục tiêu môi trường như kỳ vọng.

4.2.2. Nghiên cứu phương pháp và công cụ tính toán phát thải carbon

Để lượng hóa chính xác lượng carbon phát thải và khả năng hấp thụ, nghiên cứu đã xây dựng một quy trình tích hợp giữa phương pháp hệ số phát thải và các công cụ công nghệ hiện đại. Quy trình này đảm bảo tính khách quan và tuân thủ các quy định về kiểm kê khí nhà kính cấp cơ sở bắt đầu thực hiện từ năm 2024-2025 theo Nghị định 06/2022/NĐ-CP.

Phương pháp luận chủ đạo dựa trên nguyên lý của IPCC (2006/2019) và GPC, trong đó phát thải đô thị được phân chia thành 3 phạm vi (Scopes). Phạm vi 1 tập trung vào phát thải trực tiếp từ việc đốt nhiên liệu hóa thạch của các phương tiện cá nhân lưu thông trên các trục đường như Nguyễn Trãi, Quang Trung. Phạm vi 2 bao gồm phát thải gián tiếp từ điện năng tiêu thụ trong các tòa chung cư. Phạm vi 3 bao trùm các nguồn phát thải ngoài biên giới như xử lý rác thải sinh hoạt.

Công thức tính toán cơ bản được thiết lập cho từng loại hình phát thải:

$$E = AD \times EF \times GWP$$

Trong đó:

- E là lượng carbon dioxide tương đương (CO_2e).
- AD (Activity Data) là dữ liệu hoạt động: quãng đường di chuyển (VKT) cho giao thông, hoặc chỉ số tiêu thụ điện (MWh) cho tòa nhà.
- EF (Emission Factor) là hệ số phát thải: Năm 2026, hệ số phát thải của lưới điện Việt Nam được áp dụng là 0,6592 tCO₂/MWh.⁷ Đối với xe máy chạy xăng RON 95, hệ số là 2,268 kgCO₂/lít.
- GWP (Global Warming Potential) là tiềm năng nóng lên toàn cầu dùng để quy đổi các khí CH₄, N₂O về CO_2 .

Hệ thống công cụ hỗ trợ đóng vai trò then chốt trong việc xử lý dữ liệu quy mô lớn và không gian. Nghiên cứu sử dụng Hệ thống thông tin địa lý (GIS) phối hợp với dữ liệu viễn thám (NDVI) để bản đồ hóa các "điểm nóng" carbon. Thuật toán Network Analyst trong ArcGIS Pro được ứng dụng để mô phỏng chính xác khả năng tiếp cận ga metro dựa trên mạng lưới ngõ ngách thực tế, thay vì vùng đệm hình học đường chim

bay.⁷ Ngoài ra, nghiên cứu còn ứng dụng mô hình LEAP (Long-term Energy Alternatives Planning) để xây dựng các kịch bản dự báo phát thải đến năm 2030 cho Hà Nội, nơi tổng lượng phát thải dự kiến sẽ tăng gấp 2,76 lần so với năm 2015 nếu không có các biện pháp can thiệp quyết liệt.

Nhóm nguồn thải	Phương pháp kiểm kê	Công cụ lượng hóa	Dữ liệu đầu vào chính
Giao thông vận tải	Bottom-up (Dựa trên chuyến đi)	GIS + LEAP	Khảo sát OD, tần suất chạy tàu metro ⁷
Tiêu thụ năng lượng	Top-down (Dựa trên hóa đơn)	Phần mềm quản lý carbon	Chỉ số công tơ điện, diện tích sàn xây dựng ¹⁷
Xử lý chất thải	Phương pháp IPCC bậc 1	Mô hình toán học	Khối lượng rác, tỷ lệ hữu cơ phân hủy ⁷
Bể chứa Carbon	Phương pháp NDVI	Viễn thám VNREDSat-1	Độ che phủ cây xanh, diện tích mặt nước hồ ⁷

Kết quả tính toán thực nghiệm cho một đơn vị ở giả định quy mô 1.000 dân dọc tuyến 2A cho thấy sự chênh lệch đáng kể giữa kịch bản hiện trạng và kịch bản TOD. Trong kịch bản hiện trạng (Baseline), nơi xe máy chiếm 70% thị phần di chuyển, tổng phát thải là 1.256,6 kg CO₂/ngày. Tuy nhiên, khi áp dụng mô hình TOD giúp nâng tỷ lệ giao thông công cộng lên 60%, tổng phát thải giảm xuống còn 1.088,8 kg CO₂/ngày (giảm 13,4%). Nếu tính riêng trên mỗi chuyến đi, hiệu quả cắt giảm đạt tới 22% nhờ việc tối ưu hóa quãng đường và sử dụng phương tiện có phát thải thấp như metro (0,05 kg CO₂/km) so với ô tô con (0,192 kg CO₂/km).

Các số liệu từ quận Hà Đông năm 2026 cũng xác nhận rằng "dấu chân carbon" bình quân đạt 6,66 tấn CO₂/người/năm, trong đó Cluster C3 (các khu đô thị cao tầng hiện đại) có mức phát thải cao nhất do tiêu thụ điện và sở hữu ô tô cá nhân nhiều hơn.¹⁸ Điều này nhấn mạnh rằng các khu đô thị mới cần phải là đối tượng ưu tiên hàng đầu trong các chính sách kiểm soát hiệu suất năng lượng và thúc đẩy chuyển đổi xanh.

4.3. Giải pháp giảm phát thải carbon

Trên cơ sở kết quả kiểm kê và phân tích các rào cản vật lý – hành vi, hệ thống giải pháp giảm phát thải carbon cho các khu đô thị dọc tuyến 2A được đề xuất theo hướng tiếp cận đa tầng, kết hợp giữa quy hoạch hạ tầng cứng và điều tiết bằng chính sách mềm. Các giải pháp này bám sát lộ trình Net Zero của Chính phủ và tận dụng tối đa các cơ chế của Luật Thủ đô 2024.

4.3.1. Nhóm giải pháp quy hoạch và tái cấu trúc không gian đô thị

Giải pháp then chốt là hiện thực hóa mô hình đô thị nén (Compact City) tại 12 nhà ga dọc tuyến 2A. Hà Nội cần áp dụng cơ chế điều chỉnh quy hoạch cho phép gia tăng mật độ xây dựng và hệ số sử dụng đất (FAR) lên mức 5.0 – 6.0 trong bán kính 500m quanh ga.⁷ Việc tập trung cư dân và các hoạt động thương mại dịch vụ tại đây giúp giảm thiểu nhu cầu di chuyển bằng phương tiện cá nhân, đồng thời tạo ra một "thành phố thẳng đứng" hiệu quả về năng lượng. Theo báo cáo của IPCC (AR6), các chiến lược quy hoạch tích hợp này có khả năng cắt giảm tới 25% phát thải liên quan đến vận tải toàn cầu vào năm 2050.⁷

Cùng với đó là chiến lược "mở kết nối không gian" (Spatial de-sealing) đối với các khu đô thị khép kín. Việc dỡ bỏ các rào cản vật lý và hình thành các hành lang đi bộ xuyên tâm không chỉ rút ngắn quãng đường ra ga metro mà còn thúc đẩy các hoạt động kinh tế vỉa hè, tạo sự sống động cho đô thị. Tại các khu tập thể cũ, cần triển khai các dự án tái thiết nén, tập trung vào việc tạo ra các ô phố ô bàn cờ liên thông, ưu tiên không gian cho người đi bộ và xe đạp thay vì bãi đỗ xe ô tô.⁷

4.3.2. Nhóm giải pháp giao thông xanh và kết nối dặm cuối

Để thực hiện thành công sự chuyển dịch phương thức di chuyển (Modal Shift), Hà Nội cần triển khai đồng bộ hạ tầng chặng đầu – chặng cuối. Giải pháp "hành lang đi bộ có mái che" (Sheltered walkways) cần được ưu tiên đầu tư trong bán kính 400-800m quanh ga để khắc phục rào cản thời tiết.¹ Đến tháng 4 năm 2026, thành phố đã vận hành mạng lưới 1.100 xe đạp công cộng, nhưng cần mở rộng quy mô và tích hợp các trạm sạc xe điện tại chân ga để thu gom hành khách từ các ngõ sâu nơi xe buýt gom khó tiếp cận.

Đặc biệt, chính sách Vùng phát thải thấp (Low Emission Zone - LEZ) dự kiến áp dụng từ ngày 1/7/2026 tại các quận nội đô sẽ là đòn bẩy mạnh mẽ nhất.²⁸ Trong vùng LEZ, các phương tiện chạy xăng cũ sẽ bị hạn chế lưu thông, thay vào đó là sự ưu tiên tuyệt đối cho xe buýt điện và metro. Điều này buộc cư dân tại các khu đô thị dọc trục Nguyễn Trãi – Quang Trung phải đăng ký lộ trình chuyển đổi phương tiện hoặc chuyển sang sử dụng giao thông công cộng.

4.3.3. Nhóm giải pháp công trình xanh và năng lượng tái tạo

Đối với các dự án bất động sản, việc áp dụng tiêu chuẩn "PlusEnergy" (Nhà thặng dư năng lượng) là hướng đi tất yếu để cắt giảm phát thải Scope 2. Toàn bộ diện

tích mái và mặt đứng đón nắng của các tòa nhà cao tầng nên được lắp đặt hệ thống pin năng lượng mặt trời, giúp cung cấp điện tại chỗ và giảm tới 80% phát thải so với tiêu chuẩn xây dựng thông thường.⁷ Ngoài ra, việc sử dụng vật liệu xây dựng có hàm lượng carbon thấp thông qua phương pháp Đánh giá vòng đời (LCA) cần được đưa vào tiêu chuẩn bắt buộc cho các dự án mới dọc tuyến.

Hệ thống hạ tầng xanh – lam (Green-Blue Infrastructure) cũng cần được mở rộng để gia tăng bể chứa carbon (E_sink). Việc xanh hóa các dải phân cách dọc tuyến metro và cải tạo các hồ điều hòa xung quanh như hồ Văn Quán, hồ Hoàng Cầu không chỉ giúp hấp thụ CO_2 mà còn giảm hiệu ứng đảo nhiệt đô thị, vốn đã làm nhiệt độ quanh các ga metro tăng thêm 3,1°C trong thập kỷ qua.

4.3.4. Nhóm giải pháp kinh tế carbon và chuyển đổi số

Để duy trì tính bền vững tài chính cho các hoạt động giảm phát thải, Hà Nội cần ứng dụng cơ chế Thu hồi giá trị gia tăng từ đất (LVC). Sự hiện diện của metro đã khiến giá trị bất động sản dọc tuyến 2A tăng trung bình 19%, tạo ra một nguồn lực địa tô khổng lồ. Nguồn thu này cần được thu hồi thông qua các công cụ thuế/phí để tái đầu tư vào hạ tầng giao thông sạch.

Hệ thống quản trị thông minh dựa trên dữ liệu lớn (Big Data) và AI cũng đóng vai trò quyết định. Việc áp dụng vé điện tử liên thông, nhận diện sinh trắc học và thanh toán không dùng tiền mặt trên toàn mạng lưới metro và xe buýt giúp nâng cao trải nghiệm khách hàng, thúc đẩy thói quen sử dụng GTCC. Đồng thời, các doanh nghiệp quản lý đô thị cần thực hiện báo cáo phát thải định kỳ thông qua hệ thống giám sát thời gian thực để tham gia vào thị trường tín chỉ carbon nội địa, tạo ra giá trị kinh tế từ việc tiết giảm phát thải thực tế.

Nhóm giải pháp	Biện pháp cụ thể	Hiệu quả giảm phát thải dự kiến	Lộ trình thực hiện
Kỹ thuật	Lắp điện mặt trời mái nhà, công trình xanh LCA	Giảm 80% phát thải vận hành tòa nhà ⁷	Giai đoạn 2026 - 2030
Quy hoạch	Xóa tường rào KĐT, thiết kế hành lang đi bộ	Tăng 22% hiệu quả giảm carbon/chuyến đi ³⁷	Giai đoạn 2025 - 2028

Chính sách	Thí điểm vùng LEZ, phí carbon, sàn tín chỉ	Chuyển dịch 40% người dùng xe máy sang Metro ³⁷	Từ tháng 7/2026 ²⁸
Công nghệ	Vé điện tử, AI điều tiết giao thông, lưới điện thông minh	Tăng 11% doanh thu và lượng khách Metro ³⁴	Đang triển khai (2025-2026)

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] BỘ TÀI NGUYÊN VÀ MÔI TRƯỜNG, 2022. *Báo cáo cập nhật Đóng góp do quốc gia tự quyết định (NDC) của Việt Nam*. Hà Nội: Bộ Tài nguyên và Môi trường.
- [2] BỘ XÂY DỰNG, 2021. *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về Quy hoạch xây dựng (QCVN 01:2021/BXD)*. Hà Nội: Bộ Xây dựng.
- [3] CHÍNH PHỦ NƯỚC CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM, 2022. *Quyết định số 896/QĐ-TTg phê duyệt Chiến lược quốc gia về biến đổi khí hậu đến năm 2050*. Hà Nội: Văn phòng Chính phủ.
- [4] CỤC THỐNG KÊ HÀ NỘI, 2023. *Niên giám thống kê thành phố Hà Nội*. Hà Nội: Cục Thống kê Hà Nội.
- [5] QUỐC HỘI, 2013. *Luật Đất đai số 45/2013/QH13*. Hà Nội: Nhà xuất bản Chính trị Quốc gia.
- [6] QUỐC HỘI, 2020. *Luật Bảo vệ môi trường số 72/2020/QH14*. Hà Nội: Nhà xuất bản Chính trị Quốc gia.
- [7] ỦY BAN NHÂN DÂN THÀNH PHỐ HÀ NỘI, 2011. *Quy hoạch chung xây dựng Thủ đô Hà Nội đến năm 2030 và tầm nhìn đến năm 2050*. Hà Nội: UBND Thành phố Hà Nội.
- [8] ỦY BAN NHÂN DÂN THÀNH PHỐ HÀ NỘI, 2021. *Báo cáo vận hành tuyến Đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông*. Hà Nội: UBND Thành phố Hà Nội.
- [9] BANISTER, D., 2008. The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15(2), tr. 73–80.
- [10] CERVERO, R., 1998. *The Transit Metropolis: A Global Inquiry*. Washington, DC: Island Press.
- [11] EWING, R. và CERVERO, R., 2010. Travel and the built environment. *Journal of the American Planning Association*, 76(3), tr. 265–294.
- [12] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Geneva: IPCC.
- [13] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [14] INSTITUTE FOR TRANSPORTATION AND DEVELOPMENT POLICY (ITDP), 2017. *TOD Standard, Version 3.0*. New York: ITDP.
- [15] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2022. *World Energy Outlook 2022*. Paris: IEA.
- [16] KENNEDY, C. và cộng sự, 2009. Greenhouse gas emissions from global cities. *Environmental Science & Technology*, 43(19), tr. 7297–7302.
- [17] NEWMAN, P. và KENWORTHY, J., 1999. *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*. Washington, DC: Island Press.

[18] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP), 2022. *Emissions Gap Report 2022*. Nairobi: UNEP.

[19] WORLD BANK, 2013. *Planning, Connecting, and Financing Cities – Now*. Washington, DC: World Bank.