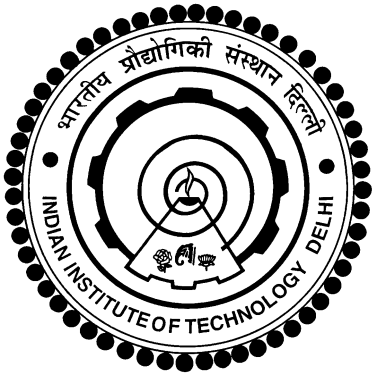
SUSTAINABLE SUPPLY CHAIN MODELS FOR ELECTRIC MOBILITY

TUSHAR GAHLAUT



DEPARTMENT OF MANAGEMENT STUDIES

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, DELHI

January, 2025

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi 2025

SUSTAINABLE SUPPLY CHAIN MODELS FOR ELECTRIC MOBILITY

By

TUSHAR GAHLAUT

(2020SMZ8280)

Department of Management Studies

Submitted
in fulfillment of the requirements of the degree of

DOCTOR OF PHILOSOPHY

to the

Indian Institute of Technology, Delhi

January, 2025

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled **'Sustainable Supply Chain Models for Electric Mobility'** submitted by Tushar Gahlaut to the Indian Institute of Technology, Delhi, India, for the award of degree of Doctor of Philosophy, is a record of bonafide research work carried out by him under my supervision and guidance. The results obtained in thesis have not been submitted to any other University or Institute for the award of any degree or diploma.

Prof. Gourav Dwivedi

Assistant Professor
Department of Management Studies
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi- 110016

ACKNOWLEDGEMENT

This thesis represents a major life milestone. I am grateful to my PhD supervisor, Professor Gourav Dwivedi, for making this trip so educational. His steadfastness enhanced this theory. His feedback was always helpful. My past four years with Professor Gourav Dwivedi have improved my knowledge journey. His dedication and determination to seek fresh research leads have always inspired me to grow. I appreciate his mentoring that helped me advance in this interesting field. My conversations with him throughout this project provided me with valuable information about the development of the electric vehicle (EV) ecosystem in the country, where the decision-making may provide proactive assistance to managers. I acknowledge that in addition to being a vast repository of knowledge and expertise, he has a remarkable disposition of kindness and empathy, demonstrating profound sympathy and affection for his pupils. My intimate relationship with him is something that I will always treasure.

I express my gratitude to the Prof. S.P Singh, Prof. Shourya Shriyam, Prof. Prasanna R and Prof. B.K. Panigrahi for their support, constructive criticism, and helpful suggestions. I'm also, thankful to other professors, particularly Dr. Asheesh Dwivedi and staff of IIT Delhi.

Having conversations with my fellow researchers and friends at the same institution, such as Mrs. Smriti Mishra, Mr. Rituraj Singh, Mr. Ujjwal Kumar, Ms. Akriti Chandra and Mr. Purari Kumar has been of great assistance to my research.

Lastly, I am very grateful to my family members for their unwavering support and patience, which greatly facilitated my endeavour. I express my gratitude to my

parents Mr. Rituraj Gahlaut and Mrs. Anju Bala. I am grateful to my sister Kirti and my wife Kanika Rana, for their substantial encouragement, affection, and assistance.

Tushar Gahlaut

ABSTRACT

In response to the growing number of people living in metropolitan areas, the transportation sector is seeing a significant expansion all over the world. The living standard of the generation is also increasing on daily basis. As a result, carrying personal automobiles on roads has become common in urban areas. This has led to increased road congestion. Though the rise in transportation sector has made mobility of goods and individuals quite easy. But the fact that with the growth of transportation sector there has been enormous rise in greenhouse gas (GHG) emissions cannot be ignored. If the trend of rising GHG emissions continues, the health impacts on individuals will increase and the planet earth will become a pathetic place to live. This has raised concerns amongst the governments of various nations to control the GHG emissions and stop the rising temperature in the environment. As a result, governments across numerous nations are laying emphasis towards the adoption of electric vehicles (EVs).

There are various concerns among the individuals that hinder them to switch from internal combustion engine vehicles (ICEVs) to EVs. Some of the major concerns among the individuals are the high cost of EVs, lack of re-fueling infrastructure, range, safety etc. To overcome these concerns the government along with various private firms is working towards the price reduction of EVs, enhancement of re-fueling infrastructure and range.

This study undertakes the case of India and thereafter find ways to enhance e-mobility in the nation. The total cost of ownership (TCO) of a vehicle is carried using certain assumptions and carrying regression analysis of petrol price. After the calculation of TCO, this data along with other factors is used to carry out the

comparative analysis for available alternatives of EVs, ICEVs and hybrid vehicles across various price segments. We encompassed the use of a hybrid model of multi criteria decision making (MCDM). The model developed, uses best-worst method (BWM) for providing weightage to each of the identified factors and thereafter, technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) is applied to determine the rank of each of the available alternatives. This helps in determining that EVs should be the desirable purchase preference of the consumers, followed by hybrid vehicles and ICEVs should be the least desirable purchase preference among the consumers.

After determining EVs as the desirable purchase preference we identified various blockades to EV adoption in India using literature and expert opinion. A consensus among the experts is build using kappa tool to segregate these EV blockades under social, economic and technological dimensions. Thereafter, BWM is used to rank these blockades thus, enabling the government and organizations to combat the problem of EV adoption in a systematic manner. Sensitivity analysis is carried to identify the impact of variations in the weightage of each factor.

Now it has been found that re-fueling infrastructure is a critical problem in enhancing EV adoption. Thus, we aim to develop a model using Stackelberg game to determine appropriate number of charging stations (CS) and battery-swapping stations (BSS) that should be developed by the government and private firms.

It has also been found that electric vehicle batteries (EVBs) are a typical cost factor for high EV prices. Thus, there is dire need to reduce the price of lithium-ion batteries (LIBs) or EVBs in order to reduce the price of EVs. Considering the case of India, it is not self-sufficient in manufacturing LIBs mainly due to the lack of LIB resources. However, India being a large potential market for EVs provides enormous

potential for LIBs. Thus, to reduce the cost of LIBs it becomes necessary to make India self-sufficient in LIBs. The only way to do so is to enhance circular economy practices for LIBs in the country. Thus, we conducted semi-structured interviews and applied the concept of grounded theory to understand the desired circular supply chain model of LIBs and thereafter, recommend the required policies in the nation for enhancing circular economy practices of LIBs.

सार

बढ़ती शहरी आबादी के साथ, दुनिया भर में परिवहन उद्योग में जबरदस्त वृद्धि हो रही है। पीढ़ी का जीवन स्तर भी दैनिक आधार पर बढ़ रहा है। परिणामस्वरूप, शहरी क्षेत्रों में सड़कों पर निजी ऑटोमोबाइल ले जाना आम हो गया है। इससे सड़क पर जाम बढ़ गया है। यद्यपि परिवहन क्षेत्र में वृद्धि ने वस्तुओं और व्यक्तियों की आवाजाही को काफी आसान बना दिया है। लेकिन इस तथ्य को नजरअंदाज नहीं किया जा सकता कि परिवहन क्षेत्र के विकास के साथ ग्रीनहाउस गैस (जीएचजी) उत्सर्जन में भारी वृद्धि हुई है। यदि जीएचजी उत्सर्जन में वृद्धि की प्रवृत्ति जारी रहती है, तो व्यक्तियों पर स्वास्थ्य प्रभाव बढ़ जाएगा और पृथ्वी ग्रह रहने के लिए एक दयनीय स्थान बन जाएगा। इससे विभिन्न देशों की सरकारों के बीच जीएचजी उत्सर्जन को नियंत्रित करने और पर्यावरण में बढ़ते तापमान को रोकने के लिए चिंता बढ़ गई है। परिणामस्वरूप, कई देशों की सरकारें इलेक्ट्रिक वाहनों (ईवी) को अपनाने पर जोर दे रही हैं।

व्यक्तियों के बीच विभिन्न चिंताएं हैं जो उन्हें आंतरिक दहन इंजन वाहनों (आईसीईवी) से ईवी पर स्विच करने में बाधा डालती हैं। व्यक्तियों के बीच कुछ प्रमुख चिंताएँ ईवी की उच्च लागत, पुन: ईंधन भरने के बुनियादी ढांचे, रेंज, सुरक्षा आदि की कमी है। इन चिंताओं को दूर करने के लिए सरकार विभिन्न निजी कंपनियों के साथ मिलकर ईवी की कीमत में कमी लाने, ईवी की कीमत बढ़ाने की दिशा में काम कर रही है। -ईंधन संबंधी बुनियादी ढांचा और रेंज।

यह अध्ययन भारत के मामले पर विचार करता है और उसके बाद देश में ई-मोबिलिटी बढ़ाने के तरीके खोजता है। किसी वाहन के स्वामित्व की कुल लागत (टीसीओ) कुछ मान्यताओं का उपयोग करके और पेट्रोल की कीमत का प्रतिगमन विश्लेषण करके तय की जाती है। टीसीओ की गणना के बाद, अन्य कारकों के साथ इस डेटा का उपयोग विभिन्न मूल्य खंडों में ईवी, आईसीईवी और हाइब्रिड वाहनों के उपलब्ध विकल्पों के तुलनात्मक विश्लेषण के लिए किया

जाता है। हमने बहु मानदंड निर्णय लेने (एमसीडीएम) के एक हाइब्रिड मॉडल के उपयोग को शामिल किया। विकसित मॉडल, प्रत्येक पहचाने गए कारकों को वेटेज प्रदान करने के लिए सबसे खराब विधि (बीडब्ल्यूएम) का उपयोग करता है और उसके बाद, उपलब्ध विकल्पों में से प्रत्येक की रैंक निर्धारित करने के लिए आदर्श समाधान (टॉप्सिस) की समानता द्वारा वरीयता के क्रम की तकनीक लागू की जाती है। इससे यह निर्धारित करने में मदद मिलती है कि ईवी उपभोक्ताओं की वांछनीय खरीद प्राथमिकता होनी चाहिए, उसके बाद हाइब्रिड वाहन और आईसीईवी उपभोक्ताओं के बीच सबसे कम वांछनीय खरीद प्राथमिकता होनी चाहिए।

ईवी को वांछनीय खरीद प्राथमिकता के रूप में निर्धारित करने के बाद हमने साहित्य और विशेषज्ञ की राय का उपयोग करके भारत में ईवी अपनाने में विभिन्न बाधाओं की पहचान की। इन ईवी अवरोधों को सामाजिक, आर्थिक और तकनीकी आयामों के तहत अलग करने के लिए कप्पा टूल का उपयोग करके विशेषज्ञों के बीच एक आम सहमति बनाई गई है। इसके बाद, BWM का उपयोग इन अवरोधों को रैंक करने के लिए किया जाता है, जिससे सरकार और संगठन व्यवस्थित तरीके से EV अपनाने की समस्या से निपटने में सक्षम हो जाते हैं। प्रत्येक कारक के भार में भिन्नता के प्रभाव की पहचान करने के लिए संवेदनशीलता विश्लेषण किया जाता है।

अब यह पाया गया है कि ईवी अपनाने को बढ़ाने में बुनियादी ढांचे को फिर से ईंधन देना एक गंभीर समस्या है। इस प्रकार, हमारा लक्ष्य चार्जिंग स्टेशनों (सीएस) और बैटरी-स्वैपिंग स्टेशनों (बीएसएस) की उचित संख्या निर्धारित करने के लिए स्टैकेलबर्ग गेम का उपयोग करके एक मॉडल विकसित करना है, जिसे सरकारी और निजी फर्मों द्वारा विकसित किया जाना चाहिए।

यह भी पाया गया है कि इलेक्ट्रिक वाहन बैटरी (ईवीबी) उच्च ईवी कीमतों के लिए एक विशिष्ट लागत कारक है। इस प्रकार, ईवी की कीमत कम करने के लिए लिथियम-आयन बैटरी (एलआईबी) या ईवीबी की कीमत कम करने की सख्त जरूरत है। भारत के मामले पर विचार करते हुए, यह मुख्य रूप से एलआईबी संसाधनों की कमी के कारण एलआईबी के निर्माण में आत्मनिर्भर नहीं है। लेकिन, भारत ईवी के लिए एक बड़ा संभावित बाजार होने के कारण एलआईबी के लिए भारी संभावनाएं प्रदान करता है। इस प्रकार, एलआईबी की लागत को कम करने के लिए भारत को एलआईबी में आत्मनिर्भर बनाना आवश्यक हो जाता है। ऐसा करने का एकमात्र तरीका देश में एलआईबी के लिए सर्कुलर अर्थव्यवस्था प्रथाओं को बढ़ाना है। इस प्रकार, हमने अर्ध-संरचित साक्षात्कार आयोजित किए और एलआईबी के वांछित परिपत्र आपूर्ति श्रृंखला मॉडल को समझने के लिए ग्राउंडेड सिद्धांत की अवधारणा को लागू किया और उसके बाद, एलआईबी की परिपत्र अर्थव्यवस्था प्रथाओं को बढ़ाने के लिए देश में आवश्यक नीतियों की सिफारिश की।

Table of Contents

Certificate **i**

Acknowledgement **ii-iii**

Abstract **iv-ix**

Table of Contents **x-xii**

List of Figures **xiii**

List of Tables **xiv**

List of Abbreviations **xv-xvi**

Chapter 1 ***1***

INTRODUCTION ***1***

1.1 Research Context 1

1.2 Advantages of EVs 5

1.3 Research Objectives 8

1.4 Research Methodology 8

1.5 Research Scope 12

1.6 Organization of Thesis 13

1.7 Chapter Summary 16

Chapter 2 ***18***

LITERATURE REVIEW ***18***

2.1 Overview 18

2.2 Introduction 18

2.2.1 Environmental Impact of EVs 19

2.2.2 TCO 23

2.2.3 Convenience 26

2.2.4 Sustainability 28

2.2.4 Safety 33

2.3 Charging Infrastructure 34

2.4 LIBs 38

Chapter 3 ***48***

A COMPREHENSIVE STUDY FOR MULTI-CRITERIA COMPARISON OF EV, ICEV & HEV *48*

3.1 Overview 48

3.2 Introduction 49
3.3 Factors for Comparison of EV, ICEV & Hybrids 52
3.4 Methodology 54
3.4.1 Best-Worst Method 56
3.4.2 TOPSIS 60
3.5 Results 62
3.6 Conclusion 65
Chapter 4 67
ANALYZING THE BLOCKADES TO ELECTRIC VEHICLE IN AN EMERGING ECONOMY 67
4.1 Overview 67
4.2 Introduction 68
4.3 Blockades for EV Adoption 74
4.4 Methodology 77
4.4.1 Data Collection and Questionnaire Design 78
4.4.2 Data Analysis 79
4.4.3 Kappa Analysis 79
4.4.4 Best Worst Method 81
4.5 Results, Discussion and Implications 83
4.5.1 Sensitivity Analysis 88
4.6 Conclusion 90
Chapter 5 96
OBTAINING A BALANCE BETWEEN CHARGING STATIONS AND BATTERY SWAPPING STATIONS BY PRIVATE FIRMS 96
5.1 Overview 96
5.2 Introduction 96
5.3 Model Preliminaries 100
5.4 Base Model: No Purchase Subsidy 102
5.5 Extension 1: Purchase Subsidy 107
5.6 Extension 2: Consumer Welfare 111
5.7 Conclusion 112
Chapter 6 114
POLICY RECOMMENDATIONS TO ENHANCE CIRCULAR ECONOMY OF LIBs 114
6.1 Overview 114
6.2 Introduction 114
6.3 Need for CE & Recycling of LIBs 119
6.4 Challenges Associated with CLSC of LIBs 122

6.5 Methodology 127
6.6 Results and Discussions 132
6.7 Conclusion 138
C h a p t e r 7 142
SUMMARY AND CONCLUSIONS 142
7.1 Summary of the Study 142
7.2 Major Findings 144
7.3 Research Implications 146
7.4 Limitations and Future Directions 148
REFERENCES 150
LIST OF PUBLICATIONS EMERGED OUT OF THE RESEARCH WORK 168
CURRICULUM VITAE 169

LIST OF FIGURES

Figure 3.1	Methodology for Literature Review	55
Figure 3.2	Methodology for Determining the Rank	55
Figure 3.3	Factor-Wise Comparison of Each Alternative	65
Figure 4.1	Sensitivity Analysis	91
Figure 5.1	Framework to obtain Optimal number of Re-fuelling Stations	100
Figure 5.2	Relation Between Construction Cost and Adoption Target When No Purchase Subsidy is Provided	106
Figure 5.3	Relation Between Construction Cost and Adoption Target When Purchase Subsidy is Provided	110
Figure 6.1	CLSC of LIBs	121

LIST OF TABLES

Table 3.1	Criterion Weights Using BWM	62
Table 3.2	Ranking Using BWM	62
Table 3.3	Weighted Normalized Decision Matrix for TOPSIS	63
Table 3.4	Separation Measure, Performance Score and Rank using TOPSIS	63
Table 4.1	Blockades of EV Mobility and Their Description	77
Table 4.2	Stakeholder Groups, View-Points and Representation in India	79
Table 4.3	Blockades With Their Categories	83
Table 4.4	Blockades With Their Average Weights by Academicians and Industrialists	84
Table 4.5	Blockades With Their Weights & Preference Numbers	85
Table 4.6	Sensitivity Analysis- Blockade Ranking with Different Weights of Academician and Industrialists Group	89
Table 6.1	Challenges associated with CLSC of LIBs	122-126
Table 6.2	Qualification Information of the Interviewees	131
Table 6.3	Policy Recommendations to Enhance CE Practices for LIBs	136-138

LIST OF ABBREVIATIONS

CAGR	:	Continuous Annual Growth Rate
GW	:	Giga Watt
MCDM	:	Multi Criterion Decision Making
BWM	:	Best Worst Method
TOPSIS	:	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
AHP	:	Analytical Hierarchy Process
ICE	:	Internal Combustion Engine
ICEV	:	Internal Combustion Engine Vehicle
EV	:	Electric Vehicle
HEV	:	Hybrid Electric Vehicle
PHEV	:	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
GHG	:	Green House Gas
GOI	:	Government of India
CE	:	Circular Economy
CLSC	:	Closed Loop Supply Chain
LIB	:	Lithium Ion Battery
EVB	:	Electric Vehicle Battery
FAME	:	Faster Adoption and Manufacturing of (Hybrid &) Electric Vehicles
V2G	:	Vehicle-to-Grid
DEMATEL	:	Decision Making Trial And Evaluation Laboratory
OW	:	Others-to-Worst
BO	:	Best-to-Others
IEA	:	International Energy Agency

MPGe	:	Miles Per Gallon Equivalent
KWh	:	Kilo Watt Hour
EOL	:	End-of-Life
SDG	:	Sustainable Development Goal