

‘REVERSE LOGISTICS MODELS FOR ELECTRIC VEHICLE BATTERIES

Deepak Gautam



Department of Mechanical Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

JANUARY 2025

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

REVERSE LOGISTICS MODELS FOR ELECTRIC VEHICLE BATTERIES

by

DEEPAK GAUTAM

Department of Mechanical Engineering

Submitted

in fulfilment 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 “**Reverse Logistics Models for Electric Vehicle Batteries**” being submitted by **Mr. Deepak Gautam** to Indian Institute of Technology Delhi for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is a record of original research work carried out by him. He has worked under my guidance and supervision and has fulfilled the requirements for the submission of this thesis, which to my knowledge has reached the requisite standard.

The results contained in this thesis have not been submitted, in part or full, to any other university or institute for the award of any degree or diploma.

(Prof. Nomesh B. Bolia)

Professor
Department of Mechanical Engineering,
Indian Institute of Technology Delhi,
New Delhi -110016, India

ACKNOWLEDGEMENTS

Thank you, God, for everything you have given me.

First and foremost, I express my deepest sense of respect and gratitude to my supervisor Prof. Nomesh B. Bolia. His valuable guidance, continuous encouragement and motivation helped me throughout my research work. He has always inspired me to live a balanced life both personally and professionally. I will carry forward these principles in my life.

I am grateful to the members of Student Research Committee (SRC): Prof. P.M.V. Subbarao, Prof. M.P. Gupta, and Prof. Varun Rammohan for their valuable suggestions during my research work.

I would like to thank all my lab mates and friends for their continuous support during the Ph.D. It was enriching to interact with different set of people trying to create societal impact through diverse research problems. My special thanks to my seniors Dr. Amit Ranjan Verma and Dr. Abhishek Bhatnagar for helping whenever required. I would like to thank Ms. Maansi, Mr. Mohit, and Mr. Pratik for their continuous support in my thesis. My special thanks to my friends Mr. Rituraj and Dr. Amit Yadav for being there all the time.

I would also like to acknowledge the contributions of Mr. Harsh, Mr. Prem, Mr. Gaurav, Mr. Vishram and Mr. Rama Shankar to carrying out supporting tasks throughout the duration of the research work. Further, I would also like to acknowledge the support received from the Public Systems Lab set up at IIT Delhi in partnership with the United Nations World Food Programme. Last but not least, I would like to thank my parents and family members for their endless love and support. This dissertation is dedicated to them. This research work was partially supported by the Mitsui & Co. Engineering and Trust (MEET).

(Deepak Gautam)

ABSTRACT

The urgent global adoption of Electric Vehicles (EVs) is a response to environmental concerns, reducing reliance on fossil fuels, and combating global warming. To effectively implement the Sustainable Development Goals (SDGs) and mitigate the environmental impact of increased mining and high demand due to widespread EV adoption, the management of used Electric Vehicle batteries (EVBs) is crucial. As a critical component of EVs, batteries present various challenges in their development and adoption. This thesis conducts a comprehensive review of recent research on the reverse logistics network and closed-loop supply chain of used EVBs, aligning with the SDGs and emphasizing the significance of environmental, resource, and waste management.

The primary objective is to develop a comprehensive framework for addressing the management of used EVBs, encompassing efficient collection, potential reuse, and material recovery. Through this, we seek to raise awareness about the crucial role of sustainable waste management and circular economy principles in tackling these issues. By establishing a foundational framework, we lay the groundwork for future research and identify prospects for further innovation. Emphasizing proper battery management within the context of sustainable development and resource conservation, we aim to inspire ongoing research and foster innovative solutions. Ultimately, the objective is to advance the understanding and implementation of effective strategies for EVB management, supporting the SDGs, and effectively addressing the environmental challenges associated with widespread EV adoption. This endeavor will contribute to a circular economy approach to waste management and resource utilization, facilitating a sustainable and greener future.

The thesis starts with a literature review to develop an understanding of factors that influence consumer attitudes and behaviors toward EVs and batteries, underscoring their critical role in the shift toward sustainable transportation. It also assesses the role of socioeconomic determinants, technical specifications, policy impacts, and battery end-of-life perceptions. The research identifies key socio-economic factors driving consumer choices and perceptions through a comprehensive survey and logistic regression analysis. The findings will guide policymakers and businesses in developing effective strategies to promote EV use, supporting SDGs related to sustainable cities, communities, and economic growth. The

insights gained from this study can inspire private sector growth and innovation, leading to new business opportunities that benefit companies and consumers.

One of the biggest challenges for the future is managing the used-up batteries from EVs. These batteries must be collected for potential after-use and element recovery to minimize the effects of intensive mining, high anticipated demand, and expense. A structured reverse logistics network is needed to retrieve these spent batteries from customers. The next objective outlines a design strategy for such a collection network and includes a case study for Delhi (India), where potential collection centers should be established. The problem is formulated using the traditional facility location problem variations: set covering and p-median. The methodology used in this study determines the number and location of collection centers required in an urban area. The goal is to locate collection centers where 2 Wheelers used batteries can be collected so customers can get to them within a reasonable threshold while considering real-life constraints. To achieve this, a mathematical programming model is created and solved using the CPLEX 12.10 solver and the Artificial Bee Colony approach where relevant. The results provide effective infrastructure designs for new policies that governments and other stakeholders may choose to implement and support sustainable practices for collecting and properly managing used EVBs.

The thesis then presents an innovative model aligning with SDGs 11, 12, and 9. Focused on enhancing operational profits, the model integrates a robust reverse logistics network and policy framework to ensure safe disposal and environmental preservation. Employing the CPLEX solver software, we evaluated various scenarios to maximize profitability and efficiency in battery return systems. Our findings underscored the limitations of conventional proximity-based methods, emphasizing the necessity of advanced optimization. Additionally, the sensitivity analysis highlighted the collection rate parameter's pivotal role in influencing customer behavior and overall system profitability. The study also emphasizes the significance of accessible collection centers, revealing disparities in accessibility across customer zones. These findings call for nuanced analyses to ensure equitable access.

Next the thesis presents a study that employs a rigorous multi-criteria approach to systematically evaluate and prioritize barriers hindering the widespread adoption of second-use EVBs. The study's overarching objectives are to overcome these barriers, aligning with broader sustainability goals, and to offer insights shaping policies addressing environmental,

social, and economic impacts, in coherence with SDGs 8, 11, 12, and 13. The research unfolds through a three-phase approach involving literature reviews, field visits, and expert interviews for barrier identification, theoretical framework development through literature and Delphi studies, and prioritization using the Fuzzy Best-Worst Method (FBWM). Results indicate that addressing Cost and Technological Challenges is pivotal for successful second-use EVB adoption, with proposed solutions involving regulations, recycling, and awareness. The study underscores the circular economy perspective, connecting identified barriers to specific SDGs.

The thesis also evaluates strategies to increase the recycling infrastructure for used EVBs, filling a significant knowledge gap regarding sustainable management methods. The Fuzzy Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (Fuzzy DEMATEL) and FBWM techniques are employed to assess the factors that impact the expansion of the recycling network. The primary goal is to elucidate the influence of the environment on the management of used batteries, assess its economic viability, evaluate its social implications, ensure compliance with regulations, and optimize logistical efficiency. The Fuzzy DEMATEL research uncovers causal connections between identified factors, resulting in a Total Influence Matrix and Final Outcomes. The FBWM technique assigns weights to factors and prioritizes them. This assists decision-makers in identifying the most crucial criteria. This study establishes the groundwork for well-informed policy suggestions, facilitates the EV industry's shift towards a more environmentally sustainable future, furnishes stakeholders with data-driven strategies, and ensures that technological progress aligns with social and environmental obligations.

Overall, this thesis presents a multi-faceted approach to the sustainable management of used EVBs, addressing critical environmental, economic, and social challenges. Through comprehensive reviews, empirical studies, and advanced optimization techniques, the research offers valuable insights and practical solutions for policymakers, industry stakeholders, and the broader academic community.

Keywords: Electric Vehicles (EVs); Sustainable Development Goals (SDGs); Battery Management; Circular Economy; Reverse Logistics; Environmental Sustainability; Resource Optimization; Second-use EV Batteries; Sustainable Transportation

सारांश

इलेक्ट्रिक वाहनों (ईवी) को तत्काल वैश्विक रूप से अपनाना पर्यावरणीय चिंताओं, जीवाश्म ईंधन पर निर्भरता को कम करने और ग्लोबल वार्मिंग से निपटने के लिए एक प्रतिक्रिया है। सतत विकास लक्ष्यों (एसडीजी) को प्रभावी ढंग से लागू करने और व्यापक ईवी अपनाने के कारण बढ़ते खनन और उच्च मांग के पर्यावरणीय प्रभाव को कम करने के लिए, प्रयुक्त ईवी बैटरियों का प्रबंधन महत्वपूर्ण है। ईवी के एक महत्वपूर्ण घटक के रूप में, बैटरियां उनके विकास और अपनाने में विभिन्न चुनौतियाँ पेश करती हैं। यह थीसिस एसडीजी के साथ संरेखित करते हुए और पर्यावरण, संसाधन और अपशिष्ट प्रबंधन के महत्व पर जोर देते हुए, रिवर्स लॉजिस्टिक्स नेटवर्क और प्रयुक्त ईवी बैटरियों की बंद-लूप आपूर्ति श्रृंखला पर हाल के शोध की व्यापक समीक्षा करती है।

प्राथमिक उद्देश्य प्रयुक्त ईवी बैटरियों के प्रबंधन को संबोधित करने के लिए एक व्यापक रूपरेखा विकसित करना है, जिसमें कुशल संग्रह, संभावित पुनः उपयोग और सामग्री पुनर्प्राप्ति शामिल है। इसके माध्यम से, हम इन मुद्दों से निपटने में स्थायी अपशिष्ट प्रबंधन और परिपत्र अर्थव्यवस्था सिद्धांतों की महत्वपूर्ण भूमिका के बारे में जागरूकता बढ़ाना चाहते हैं। एक मूलभूत ढांचा स्थापित करके, हम भविष्य के अनुसंधान के लिए आधार तैयार करते हैं और आगे के नवाचार के लिए संभावनाओं की पहचान करते हैं। सतत विकास और संसाधन संरक्षण के संदर्भ में उचित बैटरी प्रबंधन पर जोर देते हुए, हमारा लक्ष्य चल रहे अनुसंधान को प्रेरित करना और नवीन समाधानों को बढ़ावा देना है। अंततः, उद्देश्य ईवी बैटरी प्रबंधन के लिए प्रभावी रणनीतियों की समझ और कार्यान्वयन को आगे बढ़ाना, एसडीजी का समर्थन करना और व्यापक ईवी अपनाने से जुड़ी पर्यावरणीय चुनौतियों को प्रभावी ढंग से संबोधित करना है। यह प्रयास अपशिष्ट प्रबंधन और संसाधन उपयोग के लिए एक चक्रीय अर्थव्यवस्था दृष्टिकोण में योगदान देगा, जिससे एक टिकाऊ और हरित भविष्य की सुविधा मिलेगी।

अध्ययन की शुरुआत उन कारकों की समझ विकसित करने के लिए एक साहित्य समीक्षा से होती है जो ईवी और बैटरी के प्रति उपभोक्ता के रवैये और व्यवहार को प्रभावित करते हैं, जो टिकाऊ परिवहन की ओर बदलाव में उनकी महत्वपूर्ण भूमिका को रेखांकित करते हैं। यह सामाजिक आर्थिक निर्धारकों, तकनीकी विशिष्टताओं, नीति प्रभावों और बैटरी के जीवन के अंत की धारणाओं की भूमिका का भी आकलन करता है। शोध एक व्यापक सर्वेक्षण और लॉजिस्टिक रीग्रेशन विश्लेषण के माध्यम से उपभोक्ता की पसंद और धारणाओं को चलाने वाले प्रमुख सामाजिक-आर्थिक कारकों की पहचान करता है। निष्कर्ष नीति निर्माताओं और व्यवसायों को ईवी उपयोग को बढ़ावा देने, टिकाऊ शहरों,

समुदायों और आर्थिक विकास से संबंधित एसडीजी का समर्थन करने के लिए प्रभावी रणनीति विकसित करने में मार्गदर्शन करेंगे। इस अध्ययन से प्राप्त अंतर्दृष्टि निजी क्षेत्र के विकास और नवाचार को प्रेरित कर सकती है, जिससे नए व्यावसायिक अवसर पैदा होंगे जिससे कंपनियों और उपभोक्ताओं को लाभ होगा।

गहन खनन, उच्च प्रत्याशित मांग और व्यय के प्रभावों को कम करने के लिए इन बैटरियों को संभावित उपयोग के बाद और तत्व पुनर्प्राप्ति के लिए एकत्र किया जाना चाहिए। ग्राहकों से इन खर्च की गई बैटरियों को पुनः प्राप्त करने के लिए एक संरचित रिवर्स लॉजिस्टिक्स नेटवर्क की आवश्यकता होती है। अगला अध्ययन ऐसे संग्रह नेटवर्क के लिए एक डिजाइन रणनीति की रूपरेखा तैयार करता है और इसमें दिल्ली (भारत) के लिए एक केस अध्ययन शामिल है, जहां संभावित संग्रह केंद्र स्थापित किए जाने चाहिए। समस्या को पारंपरिक सुविधा स्थान समस्या विविधताओं का उपयोग करके तैयार किया गया है: सेट कवरिंग और पी-मीडियन। इस अध्ययन में प्रयुक्त पद्धति शहरी क्षेत्र में आवश्यक संग्रह केंद्रों की संख्या और स्थान निर्धारित करती है। लक्ष्य संग्रह केंद्रों का पता लगाना है जहां दोपहिया वाहनों में इस्तेमाल की गई बैटरियों को एकत्र किया जा सके ताकि ग्राहक वास्तविक जीवन की बाधाओं को ध्यान में रखते हुए उचित सीमा के भीतर उन तक पहुंच सकें। इसे प्राप्त करने के लिए, जहां प्रासंगिक हो, CPLEX 12.10 सॉल्वर और आर्टिफिशियल बी कॉलोनी दृष्टिकोण का उपयोग करके एक गणितीय प्रोग्रामिंग मॉडल बनाया और हल किया जाता है। परिणाम नई नीतियों के लिए प्रभावी बुनियादी ढाँचा डिज़ाइन प्रदान करते हैं जिन्हें सरकारें और अन्य हितधारक उपयोग की गई ईवी बैटरियों को इकट्ठा करने और ठीक से प्रबंधित करने के लिए स्थायी प्रथाओं को लागू करने और समर्थन देने के लिए चुन सकते हैं।

अगला अध्ययन एसडीजी 11, 12 और 9 के साथ संरेखित एक आविष्कारशील मॉडल प्रस्तुत करता है। परिचालन लाभ बढ़ाने पर ध्यान केंद्रित करते हुए, मॉडल सुरक्षित निपटान और पर्यावरण संरक्षण सुनिश्चित करने के लिए एक मजबूत रिवर्स लॉजिस्टिक्स नेटवर्क और नीति ढांचे को एकीकृत करता है। CPLEX सॉल्वर सॉफ्टवेयर का उपयोग करते हुए, हमने बैटरी रिटर्न सिस्टम में लाभप्रदता और दक्षता को अधिकतम करने के लिए विभिन्न परिदृश्यों का मूल्यांकन किया। हमारे निष्कर्षों ने उन्नत अनुकूलन की आवश्यकता पर बल देते हुए पारंपरिक निकटता-आधारित तरीकों की सीमाओं को रेखांकित किया। इसके अतिरिक्त, संवेदनशीलता विश्लेषण ने ग्राहक व्यवहार और समग्र सिस्टम लाभप्रदता को प्रभावित करने में संग्रह दर पैरामीटर की महत्वपूर्ण भूमिका पर प्रकाश डाला। अध्ययन सुलभ संग्रह

केंद्रों के महत्व पर भी जोर देता है, जिससे ग्राहक क्षेत्रों में पहुंच में असमानताओं का पता चलता है। ये निष्कर्ष न्यायसंगत पहुंच सुनिश्चित करने के लिए सूक्ष्म विश्लेषण की मांग करते हैं।

इसके बाद थीसिस एक अध्ययन प्रस्तुत करती है जो दूसरे उपयोग वाले ईवीबी को व्यापक रूप से अपनाने में बाधा डालने वाली बाधाओं का व्यवस्थित रूप से मूल्यांकन और प्राथमिकता देने के लिए एक कठोर बहु-मानदंड दृष्टिकोण को नियोजित करता है। अध्ययन का व्यापक उद्देश्य इन बाधाओं को दूर करना, व्यापक स्थिरता लक्ष्यों के साथ संरेखित करना और एसडीजी 8, 11, 12 और 13 के अनुरूप पर्यावरणीय, सामाजिक और आर्थिक प्रभावों को संबोधित करने वाली नीतियों को आकार देने वाली अंतर्दृष्टि प्रदान करना है। अनुसंधान तीन के माध्यम से सामने आता है - चरणबद्ध दृष्टिकोण जिसमें साहित्य समीक्षा, क्षेत्र का दौरा, और बाधा पहचान के लिए विशेषज्ञ साक्षात्कार, साहित्य और डेल्फ़ी अध्ययन के माध्यम से सैद्धांतिक रूपरेखा विकास, और फ़ज़ी बेस्ट-वर्स्ट विधि (एफबीडब्ल्यूएम) का उपयोग करके प्राथमिकता शामिल है। नतीजे बताते हैं कि लागत और तकनीकी चुनौतियों को संबोधित करना सफल दूसरे-उपयोग ईवीबी अपनाने के लिए महत्वपूर्ण है, जिसमें प्रस्तावित समाधानों में नियम, रीसाइक्लिंग और जागरूकता शामिल है। अध्ययन चक्रीय अर्थव्यवस्था के परिप्रेक्ष्य को रेखांकित करता है, जो पहचानी गई बाधाओं को विशिष्ट एसडीजी से जोड़ता है।

अगला अध्ययन टिकाऊ प्रबंधन विधियों के संबंध में एक महत्वपूर्ण ज्ञान अंतर को भरने, प्रयुक्त ईवी बैटरियों के लिए रीसाइक्लिंग बुनियादी ढांचे को बढ़ाने के लिए रणनीतियों का गहन मूल्यांकन करता है। रीसाइक्लिंग नेटवर्क के विस्तार को प्रभावित करने वाले कारकों का आकलन करने के लिए फ़ज़ी डिप्सीज़न-मेकिंग ट्रायल एंड इवैल्यूएशन लेबोरेटरी (फ़ज़ी डीमैटेल) और फ़ज़ी बीडब्ल्यूएम तकनीकों का उपयोग किया जाता है। प्राथमिक लक्ष्य प्रयुक्त बैटरियों के प्रबंधन पर पर्यावरण के प्रभाव को स्पष्ट करना, इसकी आर्थिक व्यवहार्यता का आकलन करना, इसके सामाजिक निहितार्थों का मूल्यांकन करना, नियमों का अनुपालन सुनिश्चित करना और लॉजिस्टिक दक्षता का अनुकूलन करना है। फ़ज़ी डीमैटेल अनुसंधान पहचाने गए कारकों के बीच कारणात्मक संबंधों को उजागर करता है, जिसके परिणामस्वरूप कुल प्रभाव मैट्रिक्स और अंतिम परिणाम प्राप्त होते हैं। फ़ज़ी बीडब्ल्यूएम तकनीक कारकों को महत्व देती है और उन्हें प्राथमिकता देती है। यह निर्णय निर्माताओं को सबसे महत्वपूर्ण मानदंडों की पहचान करने में सहायता करता है। यह अध्ययन अच्छी तरह से सूचित नीतिगत सुझावों के लिए आधार तैयार करता है, ईवी उद्योग को अधिक पर्यावरणीय रूप से टिकाऊ भविष्य की ओर स्थानांतरित करने की सुविधा प्रदान करता है, हितधारकों को डेटा-संचालित रणनीतियों से सुसज्जित

करता है, और यह सुनिश्चित करता है कि तकनीकी प्रगति सामाजिक और पर्यावरणीय दायित्वों के साथ संरेखित हो।

कुल मिलाकर, यह थीसिस महत्वपूर्ण पर्यावरणीय, आर्थिक और सामाजिक चुनौतियों का समाधान करते हुए प्रयुक्त ईवी बैटरियों के टिकाऊ प्रबंधन के लिए एक बहुआयामी दृष्टिकोण प्रस्तुत करती है। व्यापक समीक्षाओं, अनुभवजन्य अध्ययनों और उन्नत अनुकूलन तकनीकों के माध्यम से, अनुसंधान नीति निर्माताओं, उद्योग हितधारकों और व्यापक शैक्षणिक समुदाय के लिए मूल्यवान अंतर्दृष्टि और व्यावहारिक समाधान प्रदान करता है।

TABLE OF CONTENTS

Contents

CERTIFICATE	i
ACKNOWLEDGEMENTS	ii
ABSTRACT	iii
TABLE OF CONTENTS	x
LIST OF FIGURES	xv
LIST OF TABLES	xvii
1. INTRODUCTION	1
1.1. Preamble	1
1.1.1. Significance and Scope of RL	1
1.1.2. Scope of RL for Used EVBs	2
1.1.3. Current Landscape and Challenges in RL for Used EVBs	3
1.1.4. Research Gaps and Motivation for Present Work	5
1.2. Research Problem and Objectives	8
1.2.1. Research Problem	9
1.2.2. Research Objectives	9
1.3. Thesis Outline	10
1.4. Summary	13
2. LITERATURE REVIEW	14
2.1. Introduction	14
2.2. Global and Indian EV Market	14
2.3. EVBs Value chain	17
2.4. Collection and Recycling of used EVBs	18
2.5. Incentives and Policies for EVB Management	21
2.6. Applications and Barriers to second use EVBs	25

2.7.	Recycling Policies and Practices for EVBs	27
2.8.	Observations from Literature Review	28
2.9.	Research Gaps.....	29
2.10.	Summary	30
3.	MEASURING INFLUENCES ON EV ADOPTION IN INDIA: SOCIOECONOMIC FACTORS, POLICIES, AND BATTERY PERCEPTIONS	31
3.1.	Introduction.....	31
3.2.	Literature Review.....	33
3.3.	Methodology	35
3.3.1.	EV Adoption	35
3.3.2.	Conceptual Framework	37
3.3.3.	Data Collection Method	39
3.4.	Synergizing Insights from Surveys and Results	41
3.4.1.	Study Area and Rationale for Location Selection.....	41
3.4.2.	Descriptive Study	42
3.4.3.	Factors Affecting EV Adoption: Encouragements and Discouragements.....	43
3.4.4.	Importance of different policies	43
3.4.5.	Customer's attitude towards end-of-life products.....	44
3.4.6.	Detailed Econometrics Insights	44
3.4.7.	Customer attitude toward the return channel	54
3.4.8.	Customer's willingness to travel to return	55
3.5.	Discussion and policy implications	55
3.5.1.	Market Insights	55
3.5.2.	Barriers to adoption.....	56
3.5.3.	Policy insights.....	57
3.5.4.	Stakeholder insights	57
3.5.5.	Future outlook	58

3.5.6.	Business insights.....	58
3.5.7.	Policy Implications	59
3.6.	Summary	60
4.	DESIGNING A RL NETWORK FOR USED EVBs.....	62
4.1.	Introduction.....	62
4.2.	Literature Review.....	64
4.3.	Mathematical Models.....	67
4.3.1.	Set covering location problem	69
4.3.2.	p -median location model.....	71
4.4.	Case Study and Results.....	74
4.4.1.	Case study	75
4.4.2.	Results from CPLEX	77
4.4.3.	Artificial Bee Colony (ABC).....	78
4.4.4.	Computational Results of the ABC Method	80
4.5.	Summary.....	83
5.	INCENTIVE MODEL FOR PRODUCT RECOVERY AND REVERSE LOGISTICS 85	
5.1.	Introduction.....	85
5.2.	Literature Review.....	91
5.3.	Model Formulation	93
5.4.	Case study and Data Collection	98
5.5.	Results and Discussion	100
5.5.1.	The effects of changes in the collection rate.....	105
5.5.2.	Accessibility of Collection Centers	106
5.5.3.	Theoretical Implications	107
5.5.4.	Policy Implications	107
5.6.	Summary.....	108

6. EVALUATING AND OVERCOMING BARRIERS TO SECOND-USE APPLICATIONS OF EVBs	110
6.1. Introduction.....	110
6.2. Literature Review.....	112
6.3. Methodology	114
6.3.1. Prioritization Framework	115
6.3.2. Identification of Barriers.....	116
6.3.3. Grouping of Barriers into Categories.....	116
6.3.4. Arrangement of Barriers and Categories in Order of Priority	117
6.4. Unlocking Insights: Expert Insights, Categorization, Prioritization, and Sensitivity Analysis.....	120
6.4.1. Expert Insights and Identified Barriers	120
6.4.2. Categorization and Ranking of Barriers	123
6.4.3. Sensitivity Analysis	126
6.5. Potential Solutions and Policy Implications	127
6.5.1. Potential Solutions	127
6.5.2. Policy and Managerial Implications	129
6.5.3. Real-World Case Studies	130
6.6. Summary	130
7. POLICY IMPACTS ON THE EVOLUTION OF BATTERY RECYCLING NETWORKS THROUGH FUZZY-DRIVEN ANALYSIS.....	132
7.1. Introduction.....	132
7.2. Literature Review.....	135
7.3. Research Methodology	136
7.3.1. FUZZY DEMATEL Method	137
7.3.2. Fuzzy Best Worst Method	140
7.4. Application of Methodological Framework using Fuzzy DEMATEL and FBWM	141

7.4.1.	Barriers identification and Data collection	141
7.4.2.	Fuzzy DEMATEL Analysis.....	144
7.4.3.	FBWM Analysis	147
7.5.	Theoretical and Policy Implications	151
7.5.1.	Theoretical Contributions	151
7.5.2.	Practical and Policy Implications.....	152
7.6.	Summary	156
8.	CONCLUSION AND DIRECTIONS FOR FUTURE RESEARCH	157
8.1.	Conclusion	157
8.2.	Utility of the Research Work	163
8.3.	Research Contributions	165
8.4.	Limitations of the Study.....	166
8.5.	Suggested Directions for Future Research.....	167
8.6.	Summary	168
	REFERENCES	169
	LIST OF PUBLICATIONS BASED ON PRESENT RESEARCH WORK.....	198
	BIOGRAPHY OF RESEARCHER	199

LIST OF FIGURES

Figure 1. 1 Research Methodology	10
Figure 2. 1 The EV ecosystem.....	15
Figure 3. 1 Socioeconomic profile of respondents	42
Figure 3. 2 Intention to buy a vehicle	43
Figure 3. 3 Attitude toward end-of-life products	44
Figure 3. 4 Return channel choice	54
Figure 3. 5 Willingness to travel to return	55
Figure 3. 6 Key components of the market analysis	56
Figure 3. 7 Barriers to adoption	57
Figure 3. 8 Key components of the Future Outlook	58
Figure 4. 1 General Methodology of our Study	64
Figure 4. 2 Framework for the models.....	69
Figure 4. 3 Map of Delhi (Arc Gis)	75
Figure 4. 4 Glimpse of Data Preparation	76
Figure 5. 1 General Methodology of our study.....	89
Figure 5. 2 Charting the Path to Sustainable Battery Management	90
Figure 5. 3 Number of customer zones having a collection center within a certain distance	106
Figure 6. 1 Mapping second-life batteries against SDGs in EV context	111
Figure 6. 2 Methodology Framework	114
Figure 6. 3 Clustering of barriers based on weights	125
Figure 6. 4 (a)–(e) Sensitivity analysis	127
Figure 7. 1 Visual Summary of Literature Review on EV Battery Recycling Networks and Sustainable Management Practices.....	134
Figure 7. 2 Methodology Framework	137
Figure 7. 3 The casual diagram.....	146

Figure 7. 4 Grouping of elements according to their respective weights	149
Figure 7. 5 Sensitivity analysis	150
Figure 7. 6 Integrated Strategies for Sustainable Recycling.....	155

LIST OF TABLES

Table 1. 1 Thesis Outline	11
Table 2. 1 Comprehensive reviews that consider facility location problems in their domains	19
Table 2. 2 Ready references for key studies and models	23
Table 2. 3 Summary of barriers to second-use EVB adoption	26
Table 3. 1 Independent variables used in the model	45
Table 3. 2 Parameter estimates of significant independent variables	45
Table 3. 3 Parameter estimates	47
Table 3. 4 Parameter estimates	49
Table 3. 5 Parameter estimates	51
Table 3. 6 Parameter estimates	52
Table 3. 7 Parameter estimates	53
Table 4. 1 Results of small instances of SCP solved using CPLEX.....	77
Table 4. 2 Summary of elements of the ABC technique	80
Table 4. 3 Results of SCP obtained using CPLEX and ABC method	81
Table 4. 4 Comparison of SCP solution with the scenario when customers are assigned to the nearest center	81
Table 4. 5 Results of the p-median problem obtained using the ABC method	82
Table 5. 1 Chosen parameter values for problem instances.....	100
Table 5. 2 Solutions for Scenario 1	101
Table 5. 3 Solutions for Scenario 2.....	102
Table 5. 4 Solutions for Scenario 3.....	103
Table 5. 5 Solutions for Scenario 4.....	103
Table 5. 6 Consolidated Results of all scenarios	104
Table 5. 7 Impact of collection rate on total profit	105
Table 6. 1 Summary of barriers to second-use EVB adoption Error! Bookmark not defined.	

Table 6. 2 Scale of kappa statistics for measuring consensus level	116
Table 6. 3 Expert profiling: unveiling knowledgeable professionals' profiles	120
Table 6. 4 Comprehensive list of barriers	122
Table 6. 5 Barriers classification and kappa statistics	123
Table 6. 6 Prioritizing with FBWM Analysis	124
Table 6. 7 Potential solutions to barriers and their SDG alignments.....	129
Table 7. 1 Language Concepts and Associated Fuzzy Values Representing Impact Ratings	139
Table 7. 2 Utilization of BWM by different researchers across different sectors	140
Table 7. 3 Comprehensive list of barriers	142
Table 7. 4 Total Influence Matrix	144
Table 7. 5 Outcomes of the analysis	145
Table 7. 6 Using FBWM for prioritization and assigning weights.....	147
Table 8. 1 Chapter-wise SDGs Addressed.....	158
Table 8. 2 Practical Applications and Intended Users of Proposed Models	164