

**GREEN LOT-SIZING AND SUPPLIER SELECTION UNDER
DYNAMIC RANDOM DEMAND**

ARUN KUMAR PUROHIT



**DEPARTMENT OF MANAGEMENT STUDIES
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
HAUZ KHAS, NEW DELHI-110016 (INDIA)**

AUGUST 2018

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2018

**GREEN LOT-SIZING AND SUPPLIER SELECTION UNDER
DYNAMIC RANDOM DEMAND**

by

ARUN KUMAR PUROHIT

Department of Management Studies

Submitted

In fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the



INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

AUGUST 2018

Dedicated to
My Grandparents
and
My First Teacher Maaji

CERTIFICATE

The thesis entitled ‘Green lot-sizing and supplier selection under dynamic random demand’ being submitted by Mr. Arun Kumar Purohit to the Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the degree of Doctor of Philosophy (Ph. D.) is a record of *bona fide* research work carried out by him. He has worked under my guidance and supervision and has fulfilled the requirements for submission of this thesis, which has attained the standard required for Ph. D. degree of this institute. The results presented in this thesis have not been submitted in part or in full to any other university or institute for award of any degree or diploma.

(Dr. Ravi Shankar)

Professor
Department of Management Studies
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi, India

ACKNOWLEDGEMENTS

I first acknowledge *Dakshinamurthy* for giving me the necessary know-how, energy, health, and inspiration to complete this research. I would like to express my profound gratitude to my Guru Prof. Ravi Shankar for his guidance and unwavering support that have made this research possible. I consider myself very fortunate to have a chance to work with him.

I would like to thank the members of my Student Research Committee (SRC), Prof. S.P. Singh (Chairman), Prof. Seema Sharma (Internal expert), and Prof. A. K. Nema (Department of Civil Engineering) for their valuable comments and suggestions on my research. I also thank all the faculty and staff members of this Institution for their support. I specially thank Dr. Devendra Choudhary, Associate Professor at Government Engineering College Ajmer for extending his support during the research work. My thanks are also due to fellow research scholars in particular, Dhanya Jothimani, Dr. Abhay Bhadani, Dr. Krishnendu Shaw and Monika for their encouragement and infallible support during my research journey.

I sincerely thank the Principal of Govt. Engineering College Bikaner for providing me this opportunity to pursue Ph.D. degree. I also thank my colleagues Dr. Chandan Sharma, Dr. Sanjay Singh, and Dr. Gaurav Bissa for motivating me since the beginning of this voyage. I express my profound respect and gratitude to my parents, Mr. Jugal Kishor and Mrs. Kamala Devi as well as my father-in-law Mr. Brij Ratan and mother-in-law Mrs. Rajkumari, whose unconditional love, sacrifices and blessings helped me to conclude this thesis work. I also thank my sisters Mrs. Aruna, Mrs. Shanti and Mrs. Chandra for their constant encouragement. Finally, my deepest appreciation goes to my wife Shalini, son Ananya and daughter Saumya for their sacrifices, love and motivation throughout my research work. I dedicate this work to my grandparents and my first teacher Maaji.

(Arun Kumar Purohit)

ABSTRACT

In the era of globalization, supply chains are becoming technologically advanced and integrated but geographically more dispersed. As a consequence, there are greater requirements for packaging, transportation, material handling and warehousing related activities. Therefore, supply chain operations such as warehousing, transportation, production, material handling etc. are becoming major sources of carbon emission. Thus, there is a need for an urgent investigation of business activities from an environmental perspective. In addition, increasing pressures of regulatory bodies as well as environmentally conscious customers make supply chain managers re-consider supply chain decisions considering environmental concerns. However, research addressing sustainability in forward supply chains using quantitative models is limited.

In addition, product demand is becoming more and more volatile and random due to various deliberate and random influences which influence the cost effectiveness and customer service level in MRP systems. Nowadays, dynamic random demand is common throughout the launch, ramp, peak, and end-of-life phases of an item because of short product life cycles, seasonality, customer buying patterns, or other factors. Therefore, companies need to achieve a balance between costs, customer service level and carbon emissions while addressing supply chain decisions. Reducing carbon footprints of products also helps managers to leverage their marketing efforts.

The conventional approach of business managers to address the carbon emission problem is directed towards energy savings through options such as use of energy efficient machines/equipment, use of renewable energy sources, product redesign, packaging etc. Although these apparent options are very effective in achieving emission reduction targets, they are very costly to implement. In addition, such options also need long lead time to start showing their effects on emissions generated. On the other hand, managers have little focus

on the impacts of supply chain decisions on energy usage and carbon emissions generation. Decisions related to inventory management, transportation mode selection, plant location, collaboration etc. are largely ignored in assessing their impacts on emissions though contrary to the conventional wisdom, companies can reduce their GHG emissions profitably by optimizing these decisions with emission concerns.

This study aims to investigate that how inventory lot-sizing and supplier selection decisions influence total costs and emissions of a firm under non-stationary stochastic demand considering product-related features and system parameters. Despite the fact that non-stationary stochastic demand makes the problem more complicated and involved, the operational importance of demand uncertainty has motivated us to consider and model it. The study examines the effects of carbon emission parameters of different supply chain activities on these decisions. The impacts of regulatory policies on inventory lot-sizing decision under different demand uncertainties and service levels have also been addressed. Further, we addressed the joint problem of supplier selection and inventory lot-sizing since they not only influence total system-wide cost, customer service levels and carbon emissions significantly, but also affect other decisions such as packaging, waste and location. This study was carried out as there is a lack of model based research in this area especially under stochastic demand situations. Regarding the joint problem of supplier selection and inventory lot-sizing, we conducted two studies with stochastic demand. The first study investigated the combined problem without emission concerns, whereas the second study integrated carbon emissions.

We undertook these studies since it is less clear in literature how the joint decisions impact the carbon footprint of a supply chain especially under dynamic random demand. We carried out numerical studies to examine the effects of product-related features and system parameters on the performance metrics in these two decisions. The product- and system-

related features included service-level measures, demand pattern and demand coefficient of variation. We also analyzed the impacts of emission parameters corresponding to various activities and parameters of different regulatory policies on supplier selection and inventory lot-sizing decisions. The regulatory policy parameters included carbon price, carbon tax and carbon cap, whereas the emission parameters consisted of ordering- and holding-related emissions. The results show that integration of carbon concerns has significant influence on the replenishment schedule, costs, emissions and relative shares of the suppliers.

For these decisions, we developed mixed integer linear programming models with carbon emission and service level constraints. The models explicitly accounts for the emissions generated due to purchasing, ordering and storage activities along with corresponding costs. Coefficient of variation is taken as demand uncertainty measure since it reflects the level of demand uncertainty with respect to average demand level. We used service-level measure to avoid complicacies and inaccuracies associated in evaluation of backordering costs. The supply chain performance was evaluated using criteria such as system-wide cost, service-level, inventory levels and total emissions across the supply chain. Finally, we investigated supply chain coordination problems with carbon emission consideration under time-varying stochastic demand. In particular, we evaluated how coordination between a vendor and a buyer influences costs and emissions under varying levels of demand uncertainty and cycle fill rate under the existence of carbon cap-and-trade regulatory policy. The results show that centralized decision positively impacts the supply chain performance measures such as costs and inventory levels for different values of system and regulatory parameters. However, it increases supply chain-wide emissions in most of the test instances, although under low demand uncertainty and higher carbon price condition, it also decreases supply chain-wide emissions. This thesis provides several important insights and guidelines relevant to academia and supply chain managers while taking decisions under their specific business environment.

सार

वैश्वीकरण के युग में, आपूर्ति श्रृंखला तकनीकी रूप से उन्नत और एकीकृत हो रही है लेकिन भौगोलिक दृष्टि से अधिक फैल गई है। नतीजतन, पैकेजिंग, परिवहन, सामग्री हैंडलिंग और गोदाम से संबंधित गतिविधियों के लिए अधिक आवश्यकताएं हैं। इसलिए, आपूर्ति श्रृंखला संचालन जैसे गोदाम, परिवहन, उत्पादन, सामग्री हैंडलिंग इत्यादि कार्बन उत्सर्जन के प्रमुख स्रोत बन रहे हैं। इस प्रकार, पर्यावरणीय परिप्रेक्ष्य से व्यावसायिक गतिविधियों की तत्काल जांच की आवश्यकता है। इसके अलावा, नियामक निकायों के साथ-साथ पर्यावरणीय रूप से जागरूक ग्राहकों के बढ़ते दबाव ने आपूर्ति श्रृंखला प्रबंधकों को पर्यावरणीय चिंताओं पर विचार करते हुए आपूर्ति श्रृंखला निर्णयों पर दोबारा विचार किया है। हालांकि, मात्रात्मक मॉडल का उपयोग कर आगे आपूर्ति श्रृंखलाओं में स्थिरता को संबोधित करने के शोध सीमित हैं।

इसके अलावा, विभिन्न जानबूझकर और यादृच्छिक प्रभावों के कारण उत्पाद की मांग अधिक से अधिक अस्थिर और यादृच्छिक हो रही है जो एमआरपी सिस्टम में लागत प्रभावशीलता और ग्राहक सेवा स्तर को प्रभावित करती है। आजकल, गतिशील यादृच्छिक मांग छोटे उत्पाद जीवन चक्र, मौसमी, ग्राहक खरीद पैटर्न, या अन्य कारकों के कारण किसी आइटम के लॉन्च, रैंप, पीक और एंड-लाइफ चरणों में आम है। इसलिए, आपूर्ति श्रृंखला निर्णयों को संबोधित करते समय कंपनियों को लागत, ग्राहक सेवा स्तर और कार्बन उत्सर्जन के बीच संतुलन प्राप्त करने की आवश्यकता होती है। उत्पादों के कार्बन पैरों के निशान को कम करने से प्रबंधकों को उनके विपणन प्रयासों का लाभ उठाने में मदद मिलती है।

कार्बन उत्सर्जन समस्या को हल करने के लिए व्यावसायिक प्रबंधकों का पारंपरिक दृष्टिकोण ऊर्जा कुशल मशीनों / उपकरणों, नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों, उत्पाद नवीनीकरण, पैकेजिंग इत्यादि के उपयोग जैसे विकल्पों के माध्यम से ऊर्जा बचत की ओर निर्देशित किया जाता है। हालांकि ये स्पष्ट विकल्प प्राप्त करने में बहुत प्रभावी हैं उत्सर्जन में कमी लक्ष्य, वे लागू करने के लिए बहुत महंगा हैं। इसके अलावा, ऐसे विकल्पों को उत्पन्न उत्सर्जन पर उनके प्रभाव दिखाने के लिए लंबे समय तक समय की आवश्यकता होती है। दूसरी तरफ, प्रबंधकों को ऊर्जा उपयोग और कार्बन उत्सर्जन उत्पादन पर आपूर्ति श्रृंखला के निर्णयों के प्रभाव पर थोड़ा ध्यान नहीं है। इन्वेंट्री प्रबंधन, परिवहन मोड चयन, पौधे स्थान, सहयोग इत्यादि से संबंधित निर्णय

बड़े पैमाने पर उत्सर्जन पर उनके प्रभाव का आकलन करने में अनदेखा किए जाते हैं, हालांकि परंपरागत ज्ञान के विपरीत, कंपनियां उत्सर्जन चिंताओं के साथ इन निर्णयों को अनुकूलित करके अपने जीएचजी उत्सर्जन को लाभप्रद रूप से कम कर सकती हैं।

इस अध्ययन का उद्देश्य यह जांच करना है कि उत्पाद-संबंधित सुविधाओं और सिस्टम पैरामीटर पर विचार करने वाले गैर-स्थिर स्टोकास्टिक मांग के तहत कितनी सूची में आकार-आकार और आपूर्तिकर्ता चयन निर्णय फर्म की कुल लागत और उत्सर्जन को प्रभावित करते हैं। इस तथ्य के बावजूद कि गैर-स्थिर स्टोकास्टिक मांग समस्या को और अधिक जटिल और शामिल करती है, मांग अनिश्चितता के परिचालन महत्व ने हमें विचार करने और इसे मॉडल करने के लिए प्रेरित किया है। अध्ययन इन निर्णयों पर विभिन्न आपूर्ति श्रृंखला गतिविधियों के कार्बन उत्सर्जन मानकों के प्रभाव की जांच करता है। विभिन्न मांग अनिश्चितताओं और सेवा स्तरों के तहत इन्वेंट्री लॉट-साइजिंग फैसले पर नियामक नीतियों के प्रभावों को भी संबोधित किया गया है। इसके अलावा, हमने आपूर्तिकर्ता चयन और सूची के आकार की संयुक्त समस्या को संबोधित किया क्योंकि वे न केवल कुल प्रणाली-व्यापी लागत, ग्राहक सेवा स्तर और कार्बन उत्सर्जन को प्रभावित करते हैं, बल्कि पैकेजिंग, अपशिष्ट और स्थान जैसे अन्य निर्णयों को भी प्रभावित करते हैं। यह अध्ययन किया गया था क्योंकि इस क्षेत्र में विशेष रूप से स्टोकास्टिक मांग स्थितियों के तहत मॉडल आधारित शोध की कमी है। आपूर्तिकर्ता चयन और सूची के आकार की संयुक्त समस्या के संबंध में, हमने स्टोकास्टिक मांग के साथ दो अध्ययन किए। पहले अध्ययन ने उत्सर्जन चिंताओं के बिना संयुक्त समस्या की जांच की, जबकि दूसरा अध्ययन एकीकृत कार्बन उत्सर्जन।

हमने इन अध्ययनों को शुरू किया क्योंकि यह साहित्य में कम स्पष्ट है कि संयुक्त निर्णय आपूर्ति श्रृंखला के कार्बन पदचिह्न को विशेष रूप से गतिशील यादृच्छिक मांग के तहत कैसे प्रभावित करते हैं। हमने इन दो निर्णयों में प्रदर्शन मीट्रिक पर उत्पाद से संबंधित सुविधाओं और सिस्टम पैरामीटर के प्रभावों की जांच करने के लिए संख्यात्मक अध्ययन किए। उत्पाद- और सिस्टम से संबंधित सुविधाओं में सेवा-स्तरीय उपायों, मांग पैटर्न और विविधता की मांग गुणांक शामिल थे। हमने विभिन्न गतिविधियों और आपूर्तिकर्ता चयन और सूची के आकार-निर्धारण निर्णयों पर विभिन्न नियामक नीतियों के मानकों के अनुरूप उत्सर्जन

मानकों के प्रभावों का भी विश्लेषण किया। नियामक नीति मानकों में कार्बन मूल्य, कार्बन कर और कार्बन कैप शामिल था, जबकि उत्सर्जन मानकों में ऑर्डरिंग और होल्डिंग से संबंधित उत्सर्जन शामिल थे। नतीजे बताते हैं कि कार्बन चिंताओं का एकीकरण आपूर्तिकर्ताओं के पुनर्भुगतान अनुसूची, लागत, उत्सर्जन और सापेक्ष शेयरों पर महत्वपूर्ण प्रभाव डालता है।

इन निर्णयों के लिए, हमने कार्बन उत्सर्जन और सेवा स्तर की बाधाओं के साथ मिश्रित पूर्णांक रैखिक प्रोग्रामिंग मॉडल विकसित किए। मॉडल स्पष्ट रूप से संबंधित लागतों के साथ क्रय, ऑर्डरिंग और स्टोरेज गतिविधियों के कारण उत्पन्न उत्सर्जन के लिए खाते हैं। भिन्नता के गुणांक मांग अनिश्चितता उपाय के रूप में लिया जाता है क्योंकि यह औसत मांग स्तर के संबंध में मांग अनिश्चितता के स्तर को दर्शाता है। पिछली लागतों के मूल्यांकन में जुड़ी शिकायतों और त्रुटियों से बचने के लिए हमने सेवा-स्तर उपाय का उपयोग किया। आपूर्ति श्रृंखला प्रदर्शन का मूल्यांकन सिस्टम-व्यापी लागत, सेवा-स्तर, सूची स्तर और आपूर्ति श्रृंखला में कुल उत्सर्जन जैसे मानदंडों का उपयोग करके किया गया था। अंत में, हमने समय-भिन्न स्टोकास्टिक मांग के तहत कार्बन उत्सर्जन विचार के साथ आपूर्ति श्रृंखला समन्वय समस्याओं की जांच की। विशेष रूप से, हमने मूल्यांकन किया कि एक विक्रेता और एक खरीदार के बीच समन्वय कार्बन कैप-एंड-ट्रेड नियामक नीति के अस्तित्व के तहत मांग अनिश्चितता और चक्र भरने की दर के विभिन्न स्तरों के तहत लागत और उत्सर्जन को प्रभावित करता है। नतीजे बताते हैं कि केंद्रीकृत निर्णय सिस्टम श्रृंखला और नियामक मानकों के विभिन्न मूल्यों के लिए लागत श्रृंखला और सूची स्तर जैसे आपूर्ति श्रृंखला प्रदर्शन उपायों पर सकारात्मक प्रभाव डालता है। हालांकि, यह अधिकांश परीक्षण उदाहरणों में आपूर्ति श्रृंखला-व्यापी उत्सर्जन को बढ़ाता है, हालांकि कम मांग अनिश्चितता और उच्च कार्बन मूल्य की स्थिति के तहत, यह आपूर्ति श्रृंखला-व्यापी उत्सर्जन भी कम करता है। यह थीसिस अपने विशिष्ट कारोबारी माहौल के तहत निर्णय लेने के दौरान अकादमिक और आपूर्ति श्रृंखला प्रबंधकों के लिए प्रासंगिक कई महत्वपूर्ण अंतर्दृष्टि और दिशानिर्देश प्रदान करता है।

TABLE OF CONTENTS

Certificate	i
Acknowledgements	ii
Abstract	iii
सार	vi
List of Figures	xiii
List of Tables	xv
List of Abbreviations	xvii
Chapter 1 Introduction	
1.1 Introduction	1
1.2 Carbon emissions and supply chain decisions	3
1.3 Regulatory policies for carbon emission reduction	7
1.3.1 Carbon tax	7
1.3.2 Carbon cap-and-trade	8
1.3.3 Strict carbon cap	8
1.3.4 Carbon cap-and-offset	10
1.4 Demand processes and terminology	10
1.4.1 Deterministic static and dynamic demands	11
1.4.2 Stationary and non-stationary stochastic demands	11
1.4.3 Strategies for stochastic lot-sizing	12
1.4.4 Measures of demand uncertainty	12
1.4.5 Inventory control policies	13
1.5 Research motivation	14

1.6	Research questions and objectives	17
1.7	Research methodology	19
1.8	Thesis structure	20
1.9	Chapter summary	22
Chapter 2	Literature review	
2.1	Introduction	23
2.2	Green Supply Chain Management	23
2.3	Supply chain decisions with carbon management	30
2.3.1	Strategic level decisions	30
2.3.2	Inventory lot-sizing decision	39
2.3.3	Operational level decisions	48
2.4	Research gaps in the literature review	50
2.5	Chapter summary	52
Chapter 3	Development of a static uncertainty model with cycle fill rate	
3.1	Introduction	53
3.2	The stochastic inventory lot-sizing problem formulations	55
3.2.1	Basic formulation	55
3.2.2	“Static uncertainty” strategy formulations	57
3.2.3	“Static-dynamic uncertainty” formulations	60
3.2.4	Proposed model under “Static uncertainty” strategy with cycle fill rate	65
3.3	Numerical examples	67
3.3.1	Solutions for “Static uncertainty” strategy models	68
3.3.2	Solutions for “Static-dynamic uncertainty” models	72
3.4	Chapter summary	78

Chapter 4	Stochastic Inventory Lot-Sizing under Cap-and-Trade System	
4.1	Introduction	79
4.2	Problem statement and background	81
4.3	Model development	84
4.4	Numerical Experiments	86
4.4.1	Experimental design	87
4.4.2	Analyzing the impact of variation in problem parameters	88
4.4.3	Analyzing effects of carbon price	92
4.5	Chapter summary	95
Chapter 5	Impacts of Emission Regulatory Policies on Stochastic Inventory Lot-Sizing	
5.1	Introduction	97
5.2	Problem statement	100
5.3	Model formulations	102
5.4	Numerical Experiments	105
5.4.1	Experimental design	105
5.4.2	Analysis and discussions	105
5.5	Chapter summary	112
Chapter 6	Supplier selection and inventory lot-sizing without emission concerns	
6.1	Introduction	115
6.2	Problem statement	117
6.3	Mathematical model	118
6.4	An illustration	121
6.5	Experimental results and analysis	126
6.6	Chapter summary	130

Chapter 7	Supplier selection and lot-sizing problem with emission concerns	
7.1	Introduction	132
7.2	Problem statement	133
7.3	Model development	134
7.4	Experimental results and analysis	141
7.5	Managerial insights	148
7.6	Chapter summary	149
Chapter 8	Supply chain coordination with emission and fill rate constraints	
8.1	Introduction	151
8.2	Problem statement	154
8.3	Decentralized case	156
8.4	Centralized case	161
8.5	Numerical Experiments and analysis	162
8.6	Chapter summary	169
Chapter 9	Summary of research findings and conclusions	
9.1	Introduction	171
9.2	Summary of research findings	172
9.3	Significant contributions of this research	178
9.4	Limitations and future scope of the research	179
9.5	Closure	179
9.6	Chapter summary	181
	References	182
	List of papers emanating from this research	199
	About the author	200

LIST OF FIGURES

Figure 1.1	Triggers for Green Supply Chain Management	2
Figure 1.2	Flowchart for this research	20
Figure 2.1	Streams of studies in Green Supply Chain Management	29
Figure 2.2	Streams of Literature on Optimization Modeling	31
Figure 3.1	Shortest-path network	65
Figure 4.1	System at a glance with graphical representation of all possible order cycles	83
Figure 4.2	End-customer demand patterns	87
Figure 4.3	Variation in total emission with demand variability and demand pattern	88
Figure 4.4	Variation in total cost with demand variability and demand pattern	88
Figure 4.5	Effect of cycle service level on total cost and total emission	89
Figure 4.6	Effect of coefficient of variation on total cost and total emission	90
Figure 4.7	Effects of cycle service level on total inventory and order frequency	90
Figure 4.8	Effects of demand CV on total inventory and order frequency	90
Figure 4.9	Effects of ordering cost on total cost and emission	91
Figure 4.10	Effects of ordering emission on total cost and emission	91
Figure 5.1	All possible order cycles over the planning horizon	101
Figure 5.2	Effects of permit selling price on performance	106
Figure 5.3	Effects of permit selling price, demand CV and CSL on performance	107
Figure 5.4	Effects of carbon tax on performance	108
Figure 5.5	Effects of carbon tax, demand CV and CSL on performance	109
Figure 5.6	Effects of shifting to green transportation on total cost reduction for different regulatory policies	110

Figure 5.7	Effects of shifting to green transportation on total emission reduction for different regulatory policies	111
Figure 6.1	Costs vs. coefficient of variation	127
Figure 6.2	Inventory level and lot sizes vs. coefficient of variation	127
Figure 6.3	Costs vs. fill rate requirements	128
Figure 6.4	Inventory level vs. fill rate requirements	128
Figure 6.5	Order quantity allocations vs. coefficient of variation	129
Figure 6.6	Order quantity allocations vs. fill rate requirements	130
Figure 7.1	Demand patterns of end-customer's mean demand	141
Figure 7.2	Variations in cost components, total costs and emissions with demand CV and cycle fill rate	145
Figure 7.3	Variations in relative shares of suppliers with demand CV and cycle fill rate	146
Figure 8.1	Effects of firms' carbon cap interaction	166
Figure 8.2	Effects of interaction of demand CV and carbon price	167
Figure 8.3	Effects of interaction of fill rate and carbon price	169

LIST OF TABLES

Table 1.1	Supply chain activities and carbon emissions	6
Table 1.2	Emission regulations in practice	9
Table 2.1	Important definitions of sustainable and green supply chain management	27
Table 2.2	Studies on modeling strategic supply chain decisions with environmental concerns	36
Table 2.3	Main research studies on inventory management with environmental concerns	41
Table 3.1	Demand data for the numerical example	68
Table 3.2	Calculating equivalent deterministic demand	68
Table 3.3	Optimal replenishment policy using Bookbinder and Tan (1988) approach	69
Table 3.4	Finding the optimum cumulated replenishment quantity for cycle (2, 6)	71
Table 3.5	$CQ_{jk}(\beta)$ values for the example problem	71
Table 3.6	Matrix of the on-hand inventory for the example problem	72
Table 3.7	Optimal replenishment policy using Bookbinder and Tan approach	73
Table 3.8	Inverse cumulative distribution function $G_{d_{i-j+1,\dots,i}}^{-1}(\alpha)$	74
Table 3.9	Optimal replenishment policy using Tarim and Kingsman (2004) approach	75
Table 3.10	Maximum allowable shortages	75
Table 3.11	Inverse of first-order loss function $F_{d_{i-j+1,\dots,i}}^{-1}(\beta)$	76
Table 3.12	Finding shortage in the cycle (2, 6)	77
Table 3.13	On-hand inventory (I_{ij}^p)	78
Table 4.1	Summary of experimental results when the carbon price increases from p=1 to p=5	93

Table 6.1	Summary of some of the relevant researches in lot-sizing and supplier selection problem	116
Table 6.2	Discount schedules of suppliers	122
Table 6.3	Data set for the numerical example	122
Table 6.4	Backorders and related quantities when $CQ_{38}(0.95) = 500$	124
Table 6.5	Matrix $CQ_{jk}(\beta_{cycle})$ for the example problem ($\beta_{cycle} = 0.95$)	125
Table 6.6	Sum of on-hand inventory for an order cycle	125
Table 7.1	Suppliers' profiles	140
Table 7.2	Demand data for the example	140
Table 7.3	Effects of variations in fill rate and carbon price	143
Table 7.4	Effects of variations in CV and carbon price	144
Table 7.5	Effects of demand patterns and carbon price	148
Table 8.1	Effects of interaction of vehicle fill rate (ψ) with other parameters on supply chain-wide performance	165

LIST OF ABBREVIATIONS

CSL	Cycle service level
CV	Demand coefficient of variation
DP	Demand pattern
EOQ	Economic order quantity
ETS	Emission trading system
GHG	Green house gases
GSCM	Green supply chain management
LCY	Life-cycle demand pattern
MILP	Mixed-integer linear programming
MRP	Material Requirement Planning
RAND	Random demand pattern
SIN	Sinusoidal demand pattern
STAT	Static demand pattern
VC	Demand variability coefficient
VFR	Vehicle fill rate