MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION OF ENERGY AND ROUTING PROBLEMS

ANUBHA AGRAWAL

DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

FEBRUARY 2024

MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION OF ENERGY AND ROUTING PROBLEMS

by

ANUBHA AGRAWAL

DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING

Submitted

in fulfillment of the requirement of degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

FEBRUARY 2024

I would like to dedicate this thesis to my parents and husband.

Certificate

This is to certify that the thesis titled “**Multiobjective Optimization of Energy and Routing Problems**” being submitted by Ms. Anubha Agrawal in the Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the degree of Doctor of Philosophy, in Chemical Engineering, is a record of the original, bonafide research work carried out by her under my guidance and supervision. In my opinion, the thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations relating to the degree. The results contained in this thesis have not been submitted for the award of any other degree, associateship or similar title of any university or institute.

Dr. Manojkumar C Ramteke

Department of Chemical Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

Acknowledgements

First of all, I would like to thank God, the almighty, for his unconditional love, blessings and support throughout my research work.

I would like to express deep and sincere gratitude to my research supervisor, Prof. Manojkumar C Ramteke, for giving me the opportunity to do research under his incredible guidance. This work is a result of the pressure free environment provided by him, where he has given me the freedom to explore my ideas and interests, while providing me with helpful feedback and direction. His profound knowledge, unwavering support and encouragement throughout this journey have been a constant source of motivation, empowering me to explore uncharted territories and achieve outcomes beyond what I had imagined. I hold deep respect for him and value his contributions to my growth and learning.

I wish to show my gratitude to the SRC members Prof. Hariprasad Kodamana, Prof. Anurag S Rathore and Prof. Abhijit R Abhyankar for their valuable comments and suggestions. A special thanks to Prof. Hariprasad Kodamana for his consistent help, constructive feedback and support throughout my Ph.D.

I am profoundly grateful to Prof. Bhavik R Bakshi for his remarkable guidance and unwavering support throughout my doctoral journey. His visionary mentorship and direction have sparked a passion within me to explore new horizons and seek innovative solutions for a sustainable future. I owe a debt of gratitude to him for being an indispensable part of my academic and personal growth. It has been an honour to learn from someone as exceptional as him.

I extend my heartfelt gratitude to my lab mates: Dr. Debashish Panda, Dr. Deepak, Amrish, Mili, Atakalty, Aradhana, Deepak, Ahtesham and Rajat, for the excellent discussions and valuable feedbacks.

I also wish to thank my friends, Shalaka and Rucha for always being there for me in all the seasons of my PhD journey. Their support and companionship are immeasurable.

This research would not have been possible without my parents who have always provided unconditional support to me in pursuing my dreams. I would like to give due credit to my better half 'Shubham' for his constant encouragement, support and valuable input at various stages of my research work. Also, I would like to express my gratitude to my parents-in-law for all their support. Besides this, a special thanks to my brothers Amit and Deepesh who offered great advice, love and humour over the years.

Herewith I would like to thank all of those, who have directly or indirectly contributed to the realization of this thesis.

Once again, a note of heartfelt devotion to almighty GOD, who has made me capable of accomplishing this acclivitous task.

Abstract

Energy transition, agricultural development, e-commerce growth, and safe maritime transportation are essential for the unprecedented economic growth of many developing nations like India. The sustainable growth of these sectors is possible by moving towards the sustainable development goals (SDGs) adopted by United Nations member states in 2015, including basic resources to all (SDG 1), sustainable agriculture (SDG 2), good health (SDG 3), water security (SDG 6), clean energy generation (SDG 7), economic growth (SDG 8), responsible consumption (SDG 12), mitigate climate change (SDG 13), marine security (SDG 14), land use (SDG 15), security sector (SDG 16), and inter-regional collaboration (SDG 17). In 2021, about 36 % of global electricity demands are met by coal-fired power plants, which accounts for the consumption of 65% of global coal available. The resulting CO_2 emissions are about 10.5 gigatonnes, attributed to 29% of global energy-related CO_2 emissions. Unfortunately, India is positioned as the world's 3rd largest greenhouse gas emitter due to ~60 % of its electricity demands being met through coal power plants. The pollution from coal power plants causes around 100,000 premature mortalities annually. Further, they consume and require large amounts of water. To overcome these issues, renewable energy resources such as solar and wind are installed, bringing India to rank 3rd in renewable installation. However, they depend on the weather conditions, may require ample space for installation, and are costly. This poses the requirement for a sustainable energy system through economic, social, and ecological dimensions. A grid-connected renewables integrated energy system (RIES) comprised of solar PV modules, wind turbines, Hydrogen fuel cells, and a coal power plant is proposed to meet the power demands of high-income Indian households. It is optimized to obtain the best trade-off between costs to the company, society, and ecosystem for three differentially populated regions of India. A significant reduction in mortalities and ecological degradation is achievable, along with a decrease in electricity cost using optimized RIES, particularly for populated cities. The optimized designs show a more significant reduction in mortalities than the base case and electricity cost of INR 4.72-5.25/kWh. Further, it has been found that the benefits of optimized RIES in terms of reducing greenhouse gas emissions and reducing human mortalities are highest in densely populated regions, which coincidentally suffer from worse air quality.

Furthermore, the escalating demand for clean energy has highlighted the potential of bioenergy, specifically energy generated from crop residue. Instead of leaving a large amount

of crop residue to decompose or be burned in the fields, which can contribute to air pollution and greenhouse gas emissions, it can be collected and used as a valuable energy resource. It offers an opportunity for farmers to diversify their income streams by selling their crop residue as a feedstock for bioenergy production or producing their bioenergy on-site. Since the demands of food, energy, water, and land are increasing with increased population, it is vital to utilize the land efficiently so as to fulfill the food and energy demands simultaneously while minimizing water consumption. Considering the agricultural sector as the central point, the mathematical model of the energy system is proposed and optimized to maximize the food production and bioenergy benefits while minimizing water consumption, through land allocation. This study has been conducted in three regions of India to understand the interplay of various factors. Further, dietary constraints to ensure the production of staple foods (wheat and rice) and nutritional requirements are imposed while focusing on all the objectives. The results demonstrated up to a 1000 % increment in food production benefits, up to 4740 % increase in bioenergy benefits, and up to 97 % reduction in water consumption, compared to the base case in the single objective studies, yielding a win-win-win solution. Notably, our strategy allows the production of a variety of food crops while not putting pressure on any of the regions, in addition to contributing towards cleaner energy pathways and intelligent utilization of resources such as land and water while not compromising the economic benefits to the stakeholders.

The 14th SDG focuses on the sustainable use of marine resources in order to prevent illegal fishing activities and mitigate climate change. Globally, about 1.8 billion metric tons of crude oil get transported by sea every year. Further, India's international trade of about 95 % by volume and 70 % by value is carried through maritime transportation. However, there exist security and safety challenges in these sectors, e.g., smuggling of illicit goods, illegal fishing, human trafficking and robbery in maritime transportation. Therefore, it becomes quite essential to grow these sectors in a sustainable manner which refers to a balance between the economy, society, and environment. In the present work, multiobjective route optimization algorithms are developed and employed to surveillance marine vessels using Helideck Monitoring System (HMS) to prevent such illegal activities. These algorithms also find application in vehicle routing delivery in the fastest-growing e-commerce sector and planning and scheduling in chemical and petrochemical process industries. To optimize maritime surveillance using HMS, the mathematical model is formulated in terms of the traveling salesman problem (TSP) and is optimized to monitor the ships to prevent illegal activities in the blue economy. Though several local-heuristic-based algorithms are quite efficient in solving the single objective TSPs, the efficacy of their extensions for solving the multiobjective and large-sized TSPs is limited. Therefore, a two-stage evolutionary algorithm (TSEA) is developed in the present work to solve the classical multiobjective TSP to minimize the tour length of a salesman in various planes. The algorithm is tested on 25 multiobjective benchmark problems, including two, three, and four objectives to test its efficacy on large-sized problems, i.e., 10000 cities/targets. The performance of TSEA is found to be better than the other compared algorithms. Further, the TSEA is modified by incorporating dynamic components such as position coordinates and the *k*-means clustering approach. This dynamic TSEA is applied in maritime surveillance using HMS. The efficient route for HMS to monitor the vessels is obtained by minimizing its tour length while prioritizing visiting the faulty (anomaly) vessel by applying the dynamic TSEA.

Overall, the multiobjective optimization frameworks proposed in this study address many crucial problems that are essential for the growth of a nation's economy and have a significant contribution to the 1^{st}, 2^{nd},3^{rd}, 6^{th}, 7^{th}, 8^{th}, 12^{th}, 13^{th}, 14^{th}, 15^{th}, 16^{th} and 17^{th} SDGs.

सार

भारत जैसे कई विकासशील देशों की अभूतपूर्व आर्थिक वृद्धि के लिए ऊर्जा परिवर्तन, कृषि विकास, ई-कॉमर्स विकास और सुरक्षित समुद्री परिवहन आवश्यक हैं। 2015 में संयुक्त राष्ट्र के सदस्य देशों द्वारा अपनाए गए सतत विकास लक्ष्यों (एसडीजी) की ओर बढ़ने से इन क्षेत्रों का सतत विकास संभव है, जिसमें सभी के लिए बुनियादी संसाधन (एसडीजी 1), टिकाऊ कृषि (एसडीजी 2), अच्छा स्वास्थ्य (एसडीजी 3), जल सुरक्षा (एसडीजी 6), स्वच्छ ऊर्जा उत्पादन (एसडीजी 7), आर्थिक विकास (एसडीजी 8), जिम्मेदार उपभोग (एसडीजी 12), जलवायु परिवर्तन को कम करना (एसडीजी 13), समुद्री सुरक्षा (एसडीजी 14), भूमि उपयोग (एसडीजी 1) शामिल हैं। 5), सुरक्षा क्षेत्र (एसडीजी 16), और अंतर-क्षेत्रीय सहयोग (एसडीजी 17)। 2021 में, वैश्विक बिजली की लगभग 36% मांग कोयला आधारित बिजली संयंत्रों द्वारा पूरी की जाती है, जो उपलब्ध वैश्विक कोयले की 65% खपत के लिए जिम्मेदार है। परिणामी CO_2 उत्सर्जन लगभग 10.5 गीगाटन है, जो वैश्विक ऊर्जा-संबंधित CO_2 उत्सर्जन का 29% है। दुर्भाग्य से, भारत दुनिया के तीसरे सबसे बड़े ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जक के रूप में स्थित है क्योंकि इसकी लगभग 60% बिजली की मांग कोयला बिजली संयंत्रों के माध्यम से पूरी होती है। कोयला बिजली संयंत्रों से निकलने वाले प्रदूषण के कारण प्रतिवर्ष लगभग 100,000 लोगों की असामयिक मृत्यु हो जाती है। इसके अलावा, वे बड़ी मात्रा में पानी का उपभोग और आवश्यकता करते हैं। इन मुद्दों को दूर करने के लिए, सौर और पवन जैसे नवीकरणीय ऊर्जा संसाधनों को स्थापित किया गया है, जिससे भारत नवीकरणीय स्थापना में तीसरे स्थान पर आ गया है। हालाँकि, वे मौसम की स्थिति पर निर्भर करते हैं, स्थापना के लिए पर्याप्त जगह की आवश्यकता हो सकती है, और महंगे हैं। यह आर्थिक, सामाजिक और पारिस्थितिक आयामों के माध्यम से एक स्थायी ऊर्जा प्रणाली की आवश्यकता को प्रस्तुत करता है। उच्च आय वाले भारतीय घरों की बिजली मांगों को पूरा करने के लिए सौर पीवी मॉड्यूल, पवन टरबाइन, हाइड्रोजन ईंधन सेल और एक कोयला बिजली संयंत्र से युक्त एक ग्रिड-कनेक्टेड नवीकरणीय एकीकृत ऊर्जा प्रणाली (आरआईईएस) प्रस्तावित है। इसे भारत के तीन अलग-अलग आबादी वाले क्षेत्रों के लिए कंपनी, समाज और पारिस्थितिकी तंत्र की लागत के बीच सर्वोत्तम व्यापार-बंद प्राप्त करने के लिए अनुकूलित किया गया है। विशेष रूप से आबादी वाले शहरों के लिए अनुकूलित आरआईईएस का उपयोग करके बिजली की लागत में कमी के साथ-साथ मृत्यु दर और पारिस्थितिक क्षरण में महत्वपूर्ण कमी प्राप्त की जा सकती है। अनुकूलित डिज़ाइन बेस केस और बिजली लागत 4.72-5.25/kWh की तुलना में मृत्यु दर में अधिक महत्वपूर्ण कमी दिखाते हैं। इसके अलावा, यह पाया गया है कि ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन को कम करने और मानव मृत्यु दर को कम करने के मामले में अनुकूलित आरआईईएस का लाभ घनी आबादी वाले क्षेत्रों में सबसे अधिक है, जो संयोग से बदतर वायु गुणवत्ता से पीड़ित हैं।

इसके अलावा, स्वच्छ ऊर्जा की बढ़ती मांग ने जैव ऊर्जा, विशेष रूप से फसल अवशेषों से उत्पन्न ऊर्जा की क्षमता को उजागर किया है। बड़ी मात्रा में फसल अवशेषों को सड़ने या जलाने के लिए खेतों में छोड़ने के बजाय, जो वायु

प्रदूषण और ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन में योगदान कर सकते हैं, इसे एकत्र किया जा सकता है और एक मूल्यवान ऊर्जा संसाधन के रूप में उपयोग किया जा सकता है। यह किसानों को अपने फसल अवशेषों को बायोएनर्जी उत्पादन के लिए फीडस्टॉक के रूप में बेचकर या साइट पर अपनी बायोएनर्जी का उत्पादन करके अपनी आय धाराओं में विविधता लाने का अवसर प्रदान करता है। चूँकि बढ़ती जनसंख्या के साथ भोजन, ऊर्जा, पानी और भूमि की माँगें बढ़ रही हैं, इसलिए भूमि का कुशलतापूर्वक उपयोग करना महत्वपूर्ण है ताकि पानी की खपत को कम करते हुए भोजन और ऊर्जा की माँगों को एक साथ पूरा किया जा सके। कृषि क्षेत्र को केंद्रीय बिंदु मानते हुए, ऊर्जा प्रणाली के गणितीय मॉडल को कृषि-आर्थिक खाद्य-ऊर्जा-जल-भूमि प्रणाली कहा जाता है, जिसे पानी की खपत को कम करते हुए खाद्य उत्पादन और बायोएनर्जी लाभों को अधिकतम करने के लिए प्रस्तावित और अनुकूलित किया जाता है। यह अध्ययन विभिन्न कारकों की परस्पर क्रिया को समझने के लिए भारत के तीन क्षेत्रों में आयोजित किया गया है। इसके अलावा, सभी उद्देश्यों पर ध्यान केंद्रित करते हुए मुख्य खाद्य पदार्थों (गेहूं और चावल) के उत्पादन और पोषण संबंधी आवश्यकताओं को सुनिश्चित करने के लिए आहार संबंधी प्रतिबंध लगाए गए हैं। एकल उद्देश्य अध्ययन में आधार मामले की तुलना में, परिणामों ने खाद्य उत्पादन लाभों में 1000% की वृद्धि, बायोएनर्जी लाभों में 4740% तक की वृद्धि और पानी की खपत में 97% तक की कमी का प्रदर्शन किया, जिससे एक जीत-जीत समाधान प्राप्त हुआ। विशेष रूप से, हमारी रणनीति किसी भी क्षेत्र पर दबाव न डालते हुए विभिन्न प्रकार की खाद्य फसलों के उत्पादन की अनुमति देती है, इसके अलावा हितधारकों को आर्थिक लाभ से समझौता किए बिना स्वच्छ ऊर्जा मार्गों और भूमि और पानी जैसे संसाधनों के बुद्धिमान उपयोग में योगदान देती है।

14वां एसडीजी अवैध मछली पकड़ने की गतिविधियों को रोकने और जलवायु परिवर्तन को कम करने के लिए समुद्री संसाधनों के सतत उपयोग पर केंद्रित है। वैश्विक स्तर पर, हर साल लगभग 1.8 बिलियन मीट्रिक टन कच्चे तेल का परिवहन समुद्र के द्वारा किया जाता है। इसके अलावा, भारत का अंतर्राष्ट्रीय व्यापार मात्रा के हिसाब से लगभग 95% और मूल्य के हिसाब से 70% समुद्री परिवहन के माध्यम से होता है। हालाँकि, इन क्षेत्रों में सुरक्षा और सुरक्षा चुनौतियाँ मौजूद हैं, जैसे, अवैध वस्तुओं की तस्करी, अवैध मछली पकड़ना, मानव तस्करी और समुद्री परिवहन में डकैती, ग्लोबल वार्मिंग, पारिस्थितिक संसाधनों का शोषण और वर्तमान ऊर्जा प्रणालियों में मानव स्वास्थ्य क्षति। इसलिए, इन क्षेत्रों को टिकाऊ तरीके से विकसित करना काफी आवश्यक हो जाता है, जिसका तात्पर्य अर्थव्यवस्था, समाज और पर्यावरण के बीच संतुलन से है। वर्तमान कार्य में, डकैती और अस्थिर मछली पकड़ने जैसी अवैध गतिविधियों को रोकने के लिए हेलिडेक मॉनिटरिंग सिस्टम (एचएमएस) का उपयोग करके समुद्री जहाजों की निगरानी के लिए बहुउद्देश्यीय मार्ग अनुकूलन एल्गोरिदम विकसित और नियोजित किए गए हैं। ये एल्गोरिदम सबसे तेजी से बढ़ते ई-कॉमर्स क्षेत्र में वाहन रूटिंग डिलीवरी और रासायनिक और पेट्रोकेमिकल प्रक्रिया उद्योगों में योजना और शेड्यूलिंग में भी आवेदन पाते हैं। एचएमएस का उपयोग करके समुद्री निगरानी को अनुकूलित करने के लिए, गणितीय मॉडल ट्रैवलिंग सेल्समैन समस्या (टीएसपी) के संदर्भ में तैयार किया गया है और नीली अर्थव्यवस्था में अवैध गतिविधियों को रोकने के लिए जहाजों की निगरानी करने के लिए अनुकूलित किया गया है। यद्यपि कई स्थानीय-अनुमान-आधारित एल्गोरिदम एकल उद्देश्य टीएसपी को हल करने में काफी कुशल

हैं, बहुउद्देश्यीय और बड़े आकार के टीएसपी को हल करने के लिए उनके एक्सटेंशन की प्रभावकारिता सीमित है। इसलिए, विभिन्न स्तरों पर एक सेल्समैन की यात्रा की लंबाई को कम करने के लिए शास्त्रीय बहुउद्देश्यीय टीएसपी को हल करने के लिए वर्तमान कार्य में एक दो-चरण विकासवादी एल्गोरिदम (टीएसईए) विकसित किया गया है। एल्गोरिदम का परीक्षण 25 बहुउद्देश्यीय बेंचमार्क समस्याओं पर किया जाता है, जिसमें बड़े आकार की समस्याओं, यानी 10000 शहरों/लक्ष्यों पर इसकी प्रभावकारिता का परीक्षण करने के लिए दो, तीन और चार उद्देश्य शामिल हैं। टीएसईए का प्रदर्शन अन्य तुलनात्मक एल्गोरिदम से बेहतर पाया गया है। इसके अलावा, TSEA को स्थिति निर्देशांक और k-मीन्स क्लस्टरिंग दृष्टिकोण जैसे गतिशील घटकों को शामिल करके संशोधित किया गया है। इस गतिशील TSEA को HMS का उपयोग करके समुद्री निगरानी में लागू किया जाता है। जहाजों की निगरानी के लिए एचएमएस के लिए कुशल मार्ग गतिशील टीएसईए लागू करके दोषपूर्ण (विसंगति) जहाज का दौरा करने को प्राथमिकता देते हुए इसके दौरे की लंबाई को कम करके प्राप्त किया जाता है।

कुल मिलाकर, इस अध्ययन में प्रस्तावित बहुउद्देश्यीय अनुकूलन ढाँचे कई महत्वपूर्ण समस्याओं का समाधान करते हैं जो देश की अर्थव्यवस्था के विकास के लिए आवश्यक हैं और 1, 2, 3, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16 और 17 एसडीजी में महत्वपूर्ण योगदान देते हैं।

Table of Contents

LIST OF TABLES

LIST OF FIGURES