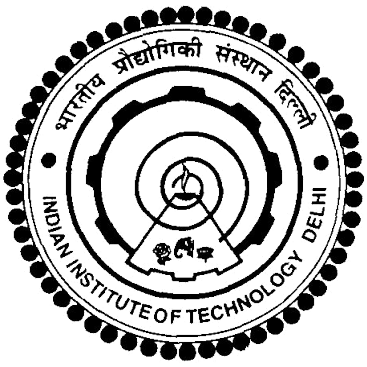
OPTIMAL DESIGN OF AIR QUALITY MONITORING NETWORK EXPANSION IN AN URBAN CLUSTER

SHEELU VERGHESE



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
DECEMBER 2023

©Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2023

OPTIMAL DESIGN OF AIR QUALITY MONITORING NETWORK EXPANSION IN AN URBAN CLUSTER

by

SHEELU VERGHESE

Department of Civil Engineering (2016CEZ8432)

Submitted

In fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

DECEMBER 2023

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled '**OPTIMAL DESIGN OF AIR QUALITY MONITORING NETWORK EXPANSION IN AN URBAN CLUSTER',** being submitted by **Ms. Sheelu Verghese**, **to the Indian Institute of Technology Delhi**, for the award of '**Doctor of Philosophy**' in **Department of Civil Engineering** is a record of the bonafide research work carried out by her under my guidance. She has fulfilled the requirements for submission of this thesis, which to the best of my knowledge has reached the requisite standard.

The work presented in this thesis has not been submitted elsewhere to any other University or Institute for the award of any other degree or diploma.

Dr. Arvind Kumar Nema
Professor
Department of Civil Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi-110016, India

Place: New Delhi
Date:

ACKNOWLEDGEMENTS

Words cannot express my gratitude to all the people with whom I collaborated during my PhD journey, who kept me motivated till the end. Foremost I wish to express my gratitude to the Department of Civil Engineering for providing me with a chance to pursue a PhD. My sincere thanks to my supervisor Prof. Arvind Kumar Nema for invaluable guidance, feedback and encouragement at all stages of my work. I wish to also thank my SRC chairperson Prof. Kalaga R. Rao and thesis committee members Prof. Mukesh Khare and Prof. S.P Singh for their insightful comments that helped me refine my work.

The sudden lockdowns on the onset of COVID-19 had to some extent impacted the work in terms of data availability. However, with online resources and the constant support of friends, I was able to track my work in the intended direction. My special thanks to co-research scholar, Shiva Kumar for his extensive support, and discussions at various stages and to Shubham for all the assistance provided in data compilation. I wish to also thank Kavita, Aparna, Swati, Durga Prasad, Rekha Singh and Anu for their constant support. I am thankful to my Institute, Department and Library staff for all the resources and prompt action in the execution of all processes related to my thesis. My sincere thanks to the organisation SAFAR- Indian Institute of Tropical Meteorology for the emission data provided for this study.

I would be ever indebted to my husband for being my support throughout. I will be always humbled by my family for their faith in me especially, my parents, in-laws, sisters and my daughter for their support during my PhD journey. Finally, I thank the almighty God for blessing me with the passion, perseverance and resources to complete this study.

New Delhi Sheelu Verghese

ABSTRACT

Deteriorating ambient air quality is a concern on account of its direct impact on day-to-day activities, human health and biodiversity. Air pollution issues are rising worldwide, especially in urban clusters of developing metro cities. Rapid fortuitous development of industrial and commercial activities coupled with exponential population surge, growth of transportation and infrastructure demand, biomass burning, and transboundary pollution transport are some major factors attributed to the deteriorating air quality. Periodic assessment of existing monitoring networks thus assumes significance for addressing the evolving and transient patterns of air pollution in developing urban clusters. The high installation and maintenance costs of a monitoring station demand the optimal design of an air quality monitoring network (AQMN).

Pollution issues in Delhi, India, making headlines in the recent past were majorly due to dominant pollutant $PM_{2.5}$ (particulate matter less than or equal to 2.5μm diameter) and shifting hotspots. $PM_{2.5}$ concentration in Delhi during most duration in the recent past had been about five to nine times greater than the twenty-four-hour guideline value specified by the World Health Organisation (WHO). The existing network of monitoring stations here, keeping track of air quality changes, may be redundant or may have become insufficient over time. The airshed boundary demarcation and its assessment for Delhi are at a very nascent stage. Airshed delineation (i.e. identifying larger surrounding regions that influence a region's air quality), and ambient air monitoring of airsheds, both play crucial roles in understanding and implementing strategic air quality management policies. Airshed can vary in size and pollution loads, and to a large extent is dependent on the meteorology, topography and the pollutant type. The provision of additional monitors under such a scenario is a challenge alongside budgetary constraints, thus requiring the

exploration of optimal solutions. The design of an air quality monitoring network must adhere to siting regulations and satisfy monitoring objectives together with optimality. The gravity of the problem is concerning though, but very limited studies in literature have engaged exclusively towards an integrated assessment approach or application of new techniques to find optimal locations of monitoring stations. With modern computational techniques available, this thesis proposes a GIS model in combination with an optimization model as a tool for effective air pollution management. The methodology is applied as a case study to explore the optimal expansion of the $PM_{2.5}$ monitoring network of 2018 for Delhi, India.

This research work executed is broadly directed to find solutions to the following objectives (a) adequacy assessment of monitoring stations of the existing network and (b) recommending an optimal configuration for expansion of the current monitoring network. To find the solution to these objectives foremost it was deemed necessary to define the intended purposes of monitoring. To fulfil this requirement, an extensive literature review was carried out to define significant monitoring objectives, prescribed air quality standards and siting criteria regulations. It was concluded that monitoring ambient emissions, safeguarding sensitive land use and mitigating health risks were the most important objectives that must be considered for the design of monitoring networks for urban clusters. The adequacy of existing $PM_{2.5}$ monitoring stations in Delhi, India was assessed for these attributes which defined the region's urban-specific characteristics. A framework was created in ArcGIS to assimilate the various data by generating map layers for:- existing $PM_{2.5}$ air quality monitoring stations, Thiessen polygon-based representative area delineation map (drawing its similarity to airshed boundary), gridded $PM_{2.5}$ emission inventory, gridded land use land cover (LULC) category, industrial locations, and gridded population density. Earlier works used conventional methods such as statistical and

geospatial analysis for adequacy assessment of monitoring networks but this thesis applies a novel approach for assessing the **heterogeneity** in the distribution of monitoring stations. The network adequacy for representation of the urban-specific characteristics (population,landuse, and emissions) and the coverage effectiveness is estimated and conveyed by two indices namely representative index and coverage index. The monitoring gaps in terms of attribute representation and coverage is estimating by the value of the indices. Additional monitoring stations could be added to cover these gaps for effective monitoring. Another contribution of this thesis is to explore the various approaches in the field of optimisation, in particular, for the design of AQMN and to recommend suitable alternative modern techniques for our study region. The optimisation involves allocating a limited number of monitoring stations to satisfy multiple and often conflicting or competing objectives. Most real-time combinatorial optimisation problems are NP-hard in nature, involving multiple combinations of the many objectives and constraints in a huge search space. Therefore, for such problems, metaheuristic approaches can be a suitable alternative to classical methods employed in literature so far. In literature, evolutionary computational (EC) methods:-evolutionary algorithms (EA) and swarm intelligence (SI) algorithms have been applied for solving various types of optimisation problems but found limited application for AQMN design. This thesis thus explores the application of these computational techniques for AQMN design for the area of study. Particle Swarm Optimisation (PSO) and non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) are the two EC techniques used to solve the multi-objective optimisation problem. The model takes inputs from a geospatial model comprising gridded attributes of the objectives considered for the AQMN design. The optimisation function examines the two objective functions: firstly maximizing the grid attribute demand for safeguarding population and sensitive land use, and secondly, maximising grid attribute demand for detection of emission

concentration and violations above the prescribed $PM_{2.5}$ limits. Further, to gain maximum information with limited monitoring stations, a few constraints are also set for the objectives such as threshold population density and land use category. The distances between two monitors are also evaluated as a constraint. The PSO algorithm analyses the maximisation of grid attribute demand for varying weights of the two objective functions. Several trials were run to investigate convergence to the global optimum by the PSO for varying sizes of initial swarm and number of iterations. The NSGA-II model used by this study offers the possibility of exploring several solutions based on the simultaneous maximisation of the competing objectives.

Thus, the present study illustrates the possibilities of an AQMN optimisation considering evolutionary computational methods as a suitable alternative. The adequacy assessment methodology adopted for representing urban attributes defining the monitoring purpose can be used in real-time to redesign airshed boundaries. It suggests the approaches to possible modifications of existing networks by assessment of representation and coverage gaps. The tabulated comprehensive summary of various design approaches applied so far, covered by this work will help all in having a glance and understanding the applicability of various methods. Finally, the thesis brings forth the challenges involved in the execution of the methodology which are briefly discussed in summary and conclusions. This thesis proposes a methodology that acts as a guide to overcome the shortfalls in terms of data adequacy by stakeholders and research aspirants. It recommends modifications and of other metro cities as well.

Keywords: Air quality, monitoring stations, urban cluster, design methods, monitoring network, standards, adequacy assessment, evolutionary algorithms

सारांश

दिन-प्रतिदिन की गतिविधियों, मानव स्वास्थ्य और जैव विविधता पर इसके प्रत्यक्ष प्रभाव के कारण बिगड़ती परिवेशी वायु गुणवत्ता एक प्रमुख चिंता का विषय बनी हुई है। विश्व भर में वायु प्रदूषण के मुद्दे विशेष रूप से विकासशील महानगरों के शहरी समूहों में बढ़ रहे हैं। औद्योगिक और वाणिज्यिक गतिविधियों का तेजी से विकास, जनसंख्या वृद्धि, परिवहन और बुनियादी ढांचे की मांग, बायोमास जलाना, सीमा पार प्रदूषण,परिवहन ये कुछ प्रमुख कारक हैं जो अधिकांश विकासशील शहरों की बिगड़ती वायु गुणवत्ता के लिए जिम्मेदार हैं। मौजूदा निगरानी तंत्र का समय-समय पर मूल्यांकन विकासशील शहरी समूहों के वायु प्रदूषण के विकसित और अस्थायी स्वरुप को संबोधित करने के लिए महत्वपूर्ण है। निगरानी स्टेशनों की भारी संख्या में स्थापना और रखरखाव लागत के कारण वायु गुणवत्ता निगरानी तंत्र (एक्यूएमएन) का इष्टतम डिजाइन समान रूप से महत्वपूर्ण है।

भारत की राजधानी दिल्ली की खराब वायु गुणवत्ता हाल के दिनों में सुर्खियां बटोर रही है, ज्यादातर इसके प्रमुख प्रदूषक $PM_{2.5}$ (2.5μm व्यास से कम के कण पदार्थ) और बदलते अति क्षेत्र के लिए। वर्ष के अधिकांश समय दिल्ली में $PM_{2.5}$ की सघनता होती है जोकि विश्व स्वास्थ्य संगठन (डब्ल्यूएचओ) द्वारा निर्दिष्ट चौबीस घंटे के दिशानिर्देश मूल्य से लगभग पांच से नौ गुना अधिक है। यहां मौजूदा निगरानी अवस्थानों का तंत्र,जो हवा की गुणवत्ता में बदलाव का पता रखता है जो समय के साथ निरर्थक या अपर्याप्त हो गया है। बेहतर नियंत्रण के लिए अतिरिक्त मॉनिटर का

प्रावधान बजटीय बाधाओं के साथ एक चुनौती है, इसलिए इष्टतम समाधानों की खोज की आवश्यकता है। हालाँकि, समस्या की गंभीरता बहुत बड़ी चिंता का विषय है, लेकिन साहित्य में बहुत सीमित अध्ययन विशेष रूप से निगरानी अवस्थानों के इष्टतम स्थानों को खोजने के लिए नई तकनीकों के मूल्यांकन और अनुप्रयोग के लिए हुए हैं।जाहिर तौर पर भारत सहित अधिकांश विकासशील देशों के लिए एयरशेड सीमा सीमांकन और इसका आकलन बहुत ही प्रारंभिक अवस्था में है। एयरशेड रेखांकन (अर्थात,आसपास के बड़े क्षेत्रों की पहचान करना जो किसी भौगोलिक क्षेत्र की वायु गुणवत्ता को प्रभावित करते हैं), और एयरशेड क्षेत्रों की परिवेशी वायु गुणवत्ता की निगरानी, दोनों, रणनीतिक वायु गुणवत्ता प्रबंधन नीतियों को समझने और लागू करने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं।एयरशेड आकार और प्रदूषण भार में भिन्न हो सकता है, और काफी हद तक मौसम विज्ञान, स्थलाकृति और प्रदूषक प्रकार पर निर्भर करता है। इस प्रकार हमारा कार्य इन मुद्दों को इस अध्ययन के उद्देश्यों के रूप में लेता है और दिल्ली,भारत के लिए 2018 के $PM_{2.5}$ निगरानी नेटवर्क के मामले के अध्ययन के रूप में लागू किए जाने वाले निगरानी तंत्र के इष्टतम डिजाइन के लिए एक पद्धति तैयार करता है। स्थानिक डेटा और उन्नत कम्प्यूटेशनल तकनीकों की उपलब्धता के साथ, हमने वायु गुणवत्ता प्रबंधन के लिए भविष्य के उपकरण के रूप में अनुकूलन मॉडल के संयोजन में जीआईएस मॉडल का प्रस्ताव दिया।

हमारे द्वारा परिकल्पित और क्रियान्वित किए गए अनुसंधान कार्य को व्यापक रूप से निम्नलिखित उद्देश्यों के समाधान खोजने के लिए निर्देशित किया गया है (अ) मौजूदा तंत्र के

निगरानी अवस्थानों की पर्याप्तता का आकलन और (ब) वर्तमान निगरानी तंत्र के विस्तार के लिए इष्टतम विन्यास की सिफारिश करना। इन उद्देश्यों का समाधान खोजने के लिए सबसे पहले निगरानी के उद्धिष्ट उद्देश्यों को परिभाषित करना महत्वपूर्ण था, जिससे वायु गुणवत्ता निगरानी नेटवर्क (एक्यूएमएन) के डिजाइन के लिए विचार करने की आवश्यकता है। इस आवश्यकता की पूर्ति के लिए, हमने इसे अपने अध्ययन के उद्देश्य के रूप में लिया और साहित्य से सबसे महत्वपूर्ण निगरानी उद्देश्यों, निर्धारित वायु गुणवत्ता मानकों और विभिन्न देशों द्वारा निर्धारित साइटिंग मानदंड नियमों को संकलित किया। हम इस निष्कर्ष पर पहुँचे है कि व्यापक उत्सर्जन की निगरानी, संवेदनशील भूमि उपयोग की सुरक्षा और स्वास्थ्य जोखिम को कम करना, नगर पुंज के लिए निगरानी तंत्र डिजाइन के महत्वपूर्ण पहलू हैं।इस प्रकार, निगरानी अवस्थानों के मौजूदा तंत्र की पर्याप्तता का आकलन इन विशेषताओं की पृष्ठभूमि में किया गया था, जो नगर पुंज की शहरी विशिष्ट विशेषताओं को परिभाषित करता है।ArcGIS में एक भू-स्थानिक रुपरेखा निम्न के लिए मानचित्र परतों को उत्पन्न करके विभिन्न स्थानिक डेटा को एकीकृत करने के लिए बनाया गया था:

- $PM_{2.5}$ वायु गुणवत्ता निगरानी अवस्थान, थिएसेन बहुभुज-आधारित प्रतिनिधि क्षेत्र चित्रण मानचित्र (एयरशेड सीमा से इसकी समानता खींचना), ग्रिड $PM_{2.5}$ उत्सर्जन भण्डार,ग्रामीण भूमि उपयोग भूमि आच्छादन(एलयूएलसी) श्रेणी, औद्योगिक स्थान और ग्रामीण जनसंख्या घनत्व।इन शहरी विशिष्ट विशेषताओं और कवरेज प्रभावशीलता के प्रतिनिधित्व के लिए नेटवर्क पर्याप्तता का अनुमान लगाया गया था और दो सूचकांकों नामतः प्रतिनिधि सूचकांक और कवरेज सूचकांक द्वारा

व्यक्त किया गया था। मूल्यांकन का यह नया दृष्टिकोण हितधारकों और शोधकर्ताओं को निगरानी अवस्थानों के वितरण में एकरूपता का आकलन करने में मदद करेगा।यह विशेषता प्रतिनिधित्व और कवरेज के मामले में निगरानी के अंतराल को निर्धारित करने में भी मदद करेगा।

इस थीसिस का एक अन्य योगदान वायु गुणवत्ता निगरानी तंत्र के इष्टतम डिजाइन के क्षेत्र में विभिन्न दृष्टिकोणों का पता लगाना और उपयुक्त वैकल्पिक आधुनिक कम्प्यूटेशनल तकनीकों की सिफारिश करना है।अनुकूलन में कई और अक्सर परस्पर विरोधी या प्रतिस्पर्धी उद्देश्यों को पूरा करने के लिए सीमित संख्या में निगरानी अवस्थान आवंटित करना शामिल है।अधिकांशतः वास्तविक-समय संयोजन अनुकूलन समस्याएं प्रकृति में एनपी-कठिन हैं, जिसमें एक विशाल खोज स्थान में कई उद्देश्यों और बाधाओं के कई संयोजनों के कारण जटिलता शामिल है।इसलिए, ऐसी समस्याओं के लिए, साहित्य में अब तक नियोजित पारंपरिक तरीकों पर मेटाहयूरिस्टिक दृष्टिकोण एक उपयुक्त विकल्प हो सकता है।विकासवादी कम्प्यूटेशनल (ईसी) तकनीक जैसे कि विकासवादी एल्गोरिदम (ईए) स्वार्म इंटेलिजेंस (एसआई) वायु गुणवत्ता निगरानी नेटवर्क के डिजाइन के लिए साहित्य में बहुत कम उल्लेख करते हैं।अध्ययन क्षेत्र के लिए एक्यूएमएन डिजाइन का पता लगाना हमारा प्रयास था। यहाँ बहुउद्देश्यीय अनुकूलन समस्या को दो ईसी तकनीकों द्वारा हल किया गया है जैसे कि पार्टिकल स्वार्म ऑप्टिमाइजेशन (PSO) और नॉन-डोमिनेटेड सॉर्टिंग जेनेटिक एल्गोरिथम-II (NSGA-II)।बहुउद्देश्यीय अनुकूलन मॉडल यहां भू-स्थानिक मॉडल से इनपुट लेता है और उद्देश्यों की जांच करता है: जनसंख्या घनत्व, पीएम$_{2.5}$ उत्सर्जन एकाग्रता, संवेदनशील भूमि

उपयोग प्रकार और निर्धारित मानकों का उल्लंघन करने वाले ग्रिड की पहचान को अधिकतम करना।इसके अतिरिक्त सीमित निगरानी अवस्थानों के साथ अधिकतम जानकारी प्राप्त करने के लिए, कुछ बाधाओं को भी निर्धारित किया जाता है जैसे कि सीमा जनसंख्या घनत्व और भूमि उपयोग के साथ-साथ दो मॉनिटरों के बीच न्यूनतम पृथक्करण दूरी।पीएसओ एल्गोरिथ्म दो उद्देश्य कार्यों के अलग-अलग वजन के लिए ग्रिड विशेषता मांग के अधिकतमकरण का विश्लेषण करता है।इस अध्ययन द्वारा उपयोग किया गया NSGA-II मॉडल प्रतिस्पर्धी उद्देश्यों के बीच कुशल सांमजस्य बैठाने के लिए कई समाधानों की खोज की संभावना प्रदान करता है।

इस प्रकार, वर्तमान अध्ययन एक उपयुक्त विकल्प के रूप में विकासवादी कम्प्यूटेशनल विधियों पर विचार करते हुए एक AQMN अनुकूलन की संभावनाओं को दर्शाता है।निगरानी उद्देश्य को परिभाषित करने वाली शहरी विशेषताओं के प्रतिनिधित्व के लिए अपनाई गई पर्याप्तता मूल्यांकन पद्धति का वास्तविक समय में एयरशेड सीमाओं को पुनर्रचना करने के लिए उपयोग किया जा सकता है।यह प्रतिनिधित्व और कवरेज अंतराल के आकलन द्वारा मौजूदा नेटवर्क के संभावित संशोधनों के दृष्टिकोण का सुझाव देता है।हमारे शोध कार्य के अंतर्गत किए गए वायु गुणवत्ता निगरानी नेटवर्क के डिजाइन के लिए अब तक लागू किए गए विभिन्न डिजाइन दृष्टिकोणों का सारणीबद्ध व्यापक सारांश सभी को त्वरित नज़र रखने और विभिन्न तरीकों की प्रयोज्यता को समझने में मदद करेगा।अंत में, थीसिस कार्यप्रणाली के निष्पादन में शामिल चुनौतियों को सामने लाती है, जिन पर सारांश और निष्कर्ष में संक्षेप में चर्चा की गई है।

कुल मिलाकर, यह थीसिस ऐसी पद्धति का प्रस्ताव करता है जो वायु प्रदूषण से संबंधित मुद्दों के नियंत्रण और शमन में प्रभावी डेटा आत्मसात और उपयोग के लिए हितधारकों और अनुसंधान उम्मीदवारों द्वारा डेटा पर्याप्तता के संदर्भ में कमी को दूर करने के लिए एक मार्गदर्शक के रूप में कार्य करता है।

TABLE OF CONTENTS

CERTIFICATE i

ACKNOWLEDGEMENTS ii

ABSTRACT iii

TABLE OF CONTENTS xiii

LIST OF FIGURES xvi

LIST OF TABLES xviii

ABBREVATIONS AND NOTATIONS xx

1. INTRODUCTION 1

1.1 Background 1

1.1.1 Particulate matter pollution: source and effects 2

1.1.2 Air Pollution scenario of Delhi, India 3

1.1.3 Ambient air quality monitoring in India 4

1.2 Motivation 5

1.3 Problem Definition 6

1.4 Research Identification 6

1.4.1 Research Questions 6

1.4.2 Research Objectives 7

1.5 Organisation of Thesis 7

2. RELATED WORKS IN MONITORING NETWORK DESIGN 9

2.1 Monitoring Objectives 10

2.2 Ambient Air Quality Standards 12

2.3 Siting criteria of air quality monitoring stations 15

2.4 Optimal Design of Air Quality Monitoring Network 19

2.4.1 Conventional design approaches 23

2.4.1.1 Limitations of conventional approaches 24

2.4.2 Contemporary algorithms for multi-objective optimisation 25

2.4.2.1 Review of contemporary approaches in AQMN design 30

2.4.2.2 Advantages and limitations of evolutionary algorithms 31

2.5 Summary and Research Gaps 43

3 CASE STUDY AREA & SCOPE OF WORK 45

3.1 Description of study area 45

3.2 Climate and land use 45

3.3 Particulate matter pollution in Delhi 46

3.4 Scope of work 48

4 MATERIALS AND DATA 49

4.1 $PM_{2.5}$ Air Quality Monitoring Network of Delhi 49

4.2 Population data 49

4.3 Gridded emission inventory data 50

4.4 Land use land cover classification map 51

4.5 Modelled $PM_{2.5}$ concentration data 53

5 ADEQUACY ASSESSMENT FOR REPRESENTATION AND COVERAGE 57

5.1 Framework for Assessment 57

5.2 Methodology 58

5.2.1 Synthesis of gridded attribute values 58

5.3 Mathematical Formulation 62

5.4 Estimation of Indices 64

5.4.1 Estimation of index of representation (I_R) 65

5.4.2 Estimation of coverage index(I_{cov}) 65

5.5 Results and Conclusions 67

5.6 Summary 75

6 OPTIMISATION FRAMEWORK 76

6.1 Methodology 77

6.2 Geospatial Model 77

6.3 Optimisation Model 82

6.3.1 Basic concepts and parameters of Particle Swarm Optimisation 84

6.3.2 Basic concepts of Non-dominated sorting Genetic Algorithm-II 89

6.4 Objective functions and Constraints 92

6.5 Implementation of Algorithm and Results 97

6.5.1 PSO Implementation 97

6.5.2 Results and Discussions of PSO 99

6.5.3 NSGA-II implementation 103

6.5.4 Results and Discussions of NSGA-II 104

6.6 Summary and Conclusions 114

7 CONCLUSIONS 116

7.1 Conclusions 116

8 LIMITATIONS AND FUTURE SCOPE 119

8.1 Limitations 119

8.2 Future Scope 120

REFERENCES 123

LIST OF PUBLICATIONS 139

AUTHOR'S BIO DATA 140

LIST OF FIGURES

Figure No.	Title	Page No.
2.1	Country wise distribution of study areas of previous researches	22
3.1	Location map of case study area	47
4.1	Map of Delhi showing existing $PM_{2.5}$ monitoring stations	52
4.2	Land use classification map of Delhi	53
5.1	$PM_{2.5}$ monitoring stations and TP's	59
5.2	Merged attributes shape file in ArcGIS	66
5.3	Regions with inadequate representation of attributes	71
5.4	Regions with adequate representation of attributes	72
5.5	Regions with inadequate coverage effectiveness	73
5.6	Regions with adequate coverage effectiveness	74
6.1	Framework for geospatial model	81
6.2	Generalised framework for evolutionary algorithm	83
6.3	Generalised framework for swarm intelligence algorithm	84
6.4	Pseudo code for conventional PSO	87
6.5	Working principle of NSGA-II	91

LIST OF FIGURES

Figure No.	Title	Page No.
6.6	Attribute representative zone of a monitor for a defined range	95
6.7	Proposed siting scheme for expansion from PSO	102
6.8	Illustration of chromosome representation	104
6.9	Illustration of mutation operation	104
6.10	Illustration of crossover operation	104
6.11	Pareto fronts of non dominated solutions for combinations of N and T	106
6.12	New potential locations from global pareto solutions by NSGA-II	111
6.13	Proposed siting scheme I for expansion from NSGA-II	112
6.14	Proposed siting scheme II for expansion from NSGA-II	113

LIST OF TABLES

Table No.	Title	Page No.
2.1	Monitoring objectives specified by literature & policies	11
2.2	Comparisons of air quality standards for major pollutants	14
2.3	AQI classification and ranges in India for PM_{10} and $PM_{2.5}$	15
2.4	Scales of representativeness as given by USEPA	17
2.5	Interrelation of site types and scales of representativeness	17
2.6	Minimum monitoring station recommendation for $PM_{2.5}$ by USEPA	18
2.7	Recommended Minimum Number of Stations: CPCB Guidelines	18
2.8	Recommended minimum monitoring stations for Particulate Matter for European Union	19
2.9	Timeline categorization countries and contemporary method applied for AQMN design	30
2.10	Summary of design approaches of selected works for AQMN design	32
4.1	$PM_{2.5}$ monitoring station names and abbreviations	50
4.2	Sample data of $PM_{2.5}$ emission inventory from various sectors	54
4.3	Description of land use categories and reassigned raster values	56
4.4	Sample data of gridded simulated $PM_{2.5}$ concentrations	56
5.1	Scale factor applied for different classification of attribute land use land cover	61

Table No.	Title	Page No.
5.2	Scale factor applied for different ranges of attribute population density	62
5.3	Scale factor applied for different ranges of attribute emission concentrations	62
5.4	Sample data of merged attribute table in ArcGIS	67
5.5	Representative index value and ranking for monitoring stations for I_R	68
5.6	Coverage index value and ranking of monitoring stations for I_{cov}	69
6.1	Violation scores for different threshold $PM_{2.5}$ concentrations	80
6.2	Scale factor applied for different land use categories for optimisation	80
6.3	Optimisation results from PSO	101
6.4	Global pareto solutions after sorting for elitism and crowding distances	107
6.5	Final proposed potential locations for expansion from NSGA-II	108
6.6	Proposed siting scheme I for expansion from NSGA-II results	109
6.7	Proposed siting scheme II for expansion from NSGA-II results	110

ABBREVATIONS AND NOTATIONS

AAQS	Ambient air Quality Standards
ABC	Artificial Bee Colony
ACO	Ant Colony Optimisation
AHP	Analytical Hierarchy Process
AQG	Air Quality Guideline
AQMN	Air Quality Monitoring Network
AQI	Air Quality Index
CA	Cluster Analysis
CAAQMS	Continuous Ambient Air Quality Monitoring Stations
CO	Carbon Monoxide
CPCB	Central Pollution Control Board
EA	Evolutionary Algorithm
ELECTRE III	Elimination and Choice Translating Reality
EU	European Union
GA	Genetic Algorithm
GRAP	Graded Response Action Plan
HGA	Hybrid Genetic Algorithm
LAT	Lower Assessment Threshold
MCDM	Multi Criteria Decision Making
MOEA	Multi Objective Evolutionary Algorithm
MoEFCC	Ministry of Environment, Forest and Climate Change
MOO	Multi-Objective Optimisation
MPA	Monitoring Planning Area
MS	Monitoring Station

MSA	Metropolitan Statistical Areas
NAAQS	National Ambient Air Quality Standards
NAD	Net Attribute Demand
NAMP	National Air Monitoring Programme
NCAP	National Clean Air Programme
NCT	National Capital Territory
NCR	National Capital Region
NO_2	Nitrogen Dioxide
NSGA-II	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II
O_3	Ozone
Obj	Objective
Pb	Lead
PM	Particulate Matter
$PM_{2.5}$	Particulate Matter with aerodynamic diameter less than or equal to 2.5μm
PM_{10}	Particulate Matter with aerodynamic diameter less than or equal to 10μm
PSO	Particle Swarm Optimization
PCA	Principal Component Analysis
RSPM	Respirable Suspended Particulate Matter
SLCP	Short Lived Climate Pollutants
SA	Simulated Annealing
SCA	Spatial Correlation Analysis
SO_2	Sulphur Dioxide
SPCB	State Pollution Control Boards
SGA	Stepwise Genetic Algorithm

SI	Swarm Intelligence
TP	Thiessen Polygon
UAT	Upper Assessment Threshold
USEPA	US Environmental Protection Agency
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS 84	World Geodetic System
WHO	World Health Organisation
col	Column
η	Net attribute detection rate
hr	Hour
km	Kilometers
μm	Micron metre
$\mu g/m^3$	Microgram per cubic metre
mg/m^3	milligrams per cubic metre
t/grid/year	Tonnes per grid per year
E_{si}	scaled cumulative emission concentration of a grid
P_{si}	scaled population density of a grid
L_{si}	scaled land use category of a grid