DETERMINANTS OF DISPARITY IN AMBIENT AIR POLLUTION EXPOSURE AND ITS ASSOCIATED HEALTH BURDEN IN INDIA

DEBAJIT SARKAR

CENTRE FOR ATMOSPHERIC SCIENCES

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

FEBRUARY 2026

Determinants of disparity in ambient air pollution exposure and its associated health burden in India

by

Debajit Sarkar

Centre for Atmospheric Sciences

Submitted

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

to the

Indian Institute of Technology Delhi

February 2026

Certificate

This is to certify that the thesis entitled "**Determinants of disparity in ambient air pollution exposure and its associated health burden in India**" being submitted by Mr. **Debajit Sarkar** for the award of the degree of **Doctor of Philosophy**, is a record of the original bonafide 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. The results presented in this thesis have not been submitted in part or full to any University or Institution for award of any degree/diploma.

Prof. Sagnik Dey

Head, Centre for Atmospheric Sciences,

Indian Institute of Technology Delhi,

Hauz Khas, New Delhi-110016, India.

Acknowledgements

I express my sincere gratitude towards my supervisor, Prof. Sagnik Dey, for giving me freedom to work independently and competently, along with providing his valuable supervision, constructive criticism, affection, and encouragement throughout my PhD tenure. He taught me to be humble and stay grounded all the time and render the important and significant things in life from the negative and irrelevant ones and fully focus and pursue them. He helped me being into a good researcher and efficient collaborator, and a well communicator over the years.

I would like to thank Dr. Pallav Purohit and Prof. Santu Ghosh for their valuable guidance, help, and support during the different phases of my PhD. I gained a lot of scientific insights and knowledge over the discussions with them. I am extremely grateful to Prof. Somnath Baidya Roy, Prof. Krishna AchutaRao, Prof. Ravi Kumar Kunchala, Prof. Sarvesh Kumar Dubey, and Prof. Sajeev Philip for helpful discussions and advise during the course of my PhD.

I thank my lab-mates, especially Alok Kumar, Fahad Imam, Dr. Arunangshu Das, Akash Mukherjee, Payel Kundu, Rakhi Chaudhary, Kavya Bhatt, Vijay Kumar, Mrs. Sushila, Emili Singha Roy, Debjit Paul, Subhadeep Ghosh, and others for always being there with me, providing moral support, and showing faith. I would also like to thank my other department mates Chaithta ST, Dishana PR, Dr. Sushovan Ghosh, Subhajit Ghoshal Chowdhury, Chiranjit Das, Sankar Prasad Lahiri, Pragnya Makar, and many others for helping and supporting me whenever required.

To my seniors as Alok Kumar and Fahad Imam, and my dearest friends as Sagar Jawla, Surya Kant Bharadwaj, Dushyant Soni, Neha, Raju Sen, and Akash Mukherjee, ‘Thank you’ is a very small word to express what I feel for you and the amount of respect I possess for each and every one among you. You always protected me being my ‘Family’, being the persons in need, and guided me for the betterment and prosperity. I cannot imagine how my life would have been without you here at IIT Delhi. Being with you, I learned that life is above everything and PhD is just a part of it.

During my collaboration at St. John’s Research Institute, Bangalore, I have learned different bio-statistical and analytical techniques, especially from my colleagues John Michael Raj, Rajesh Karmakar, Fransciosalgeo George, and Omkar Deshmukh. I will be so grateful for their support and cooperation.

Finally, I want to thank my grandfather, father, aunts, and cousins for taking all their efforts to nurture me. They were my first teachers, advisors, and philosophers since my childhood. They molded me when I was a boy and gradually gave me the freedom and backed me up to be a confident man. My grandfather and father taught me to dream big, being restless, and keep on chasing the goals of life; to become humble, kind, supportive, and forgiving to others.

My mother, grandmother, and uncles would have been the happiest people now.

Date: Debajit Sarkar

Abstract

Ambient air pollution is the largest environmental risk factor for public health globally, which claimed around one-seventh of the total health causalities. In India, ambient $PM_{2.5}$-attributable health burden is expected to elevate over the upcoming decades and the populace may face calamitous consequences due to its enormous population size and aging factor. To alleviate the growing mortality burden, India aspired to achieve the United Nations' Sustainable Development Goal (SDG-3.4) target, which is to reduce the health burden by one-third by 2030 relative to that of 2015. It is unknown whether the existing emission control pathways are sufficient for this attainment nationally and at subregional level; and if not, then what would be the subsequent exposure-reduction targets? Moreover, the current trajectory of emissions would further degrade air quality and potentially lead to increasing warming in foreseeable future, which may increase the health causalities by manifolds. Therefore, it is necessary to have an ahead-of-time estimate of potential health benefits due to following the air pollution and climate-control pathway as compared to the business-as-usual trends. Consequently, the exiting environmental policies to combat air pollution burden and its attributable health effects have met limited success. This is because the effect of demographic distribution of the sub-populations, leading to differential air pollution exposure levels across the subregions, is unknown in India and has yet to be incorporated into the strategic implementation of such policies and interventions. Evolving studies have reported strong association between ambient $PM_{2.5}$ with the non-communicable diseases (NCDs); however, its distribution across diverse demographic subgroups is unknown in this socially diverse country. More importantly, knowledge-gaps exist if such exposure disparity is associated with differential health effects among the sub-

populations; and hence, lead to disproportionated $PM_{2.5}$-attributable health burden for various NCDs, which is currently missing in the global burden of disease (GBD) framework.

In this thesis, the disparity in ambient $PM_{2.5}$ exposure is examined across various population subgroups in urban and rural India and its changes in recent years are analyzed by integrating satellite-derived $PM_{2.5}$ concentrations (1-km×1-km) with the socio-demographic information from the 4th (2015-16) and 5th (2019-21) rounds of the National Family Health Survey (NFHS). Then, the hierarchical logistic mixed effect model is used to estimate the association between the odds of diabetes, high blood pressure (HBP), and heart disease with satellite-derived $PM_{2.5}$ exposure stratified by participants' gender, wealth, and caste; adjusting for socio-demographic confounders. And then, following the global burden of disease (GBD) framework, the model-derived risk estimates are used to assess ambient $PM_{2.5}$-attributable health burden across the subgroups. Larger absolute disparity (60-90 $\mu g/m^3$) is estimated across the states with high socio-demographic index (SDI) as compared to the middle and lower SDI states. Moreover, it is discovered that ambient $PM_{2.5}$ exposure is higher (indicated by relative disparities in terms of Z_{score}) among the top and bottom quantiles of wealth-index and the other backward caste subgroup (Zscore>±0.02, p<0.1) than among their demographic counterparts in middle and high SDI states. From 2015-16 to 2019-21, the disparity in ambient $PM_{2.5}$ exposure across subgroups increased in urban areas, while it either remained static or decreased in rural areas. Consequently, ambient $PM_{2.5}$-diseases' association varies across sub-populations and is higher among males (mean odds ratio 1.049 vs 1.039) and OBC (1.078 vs 1.044) relative to females and other caste-subgroups, respectively. The $PM_{2.5}$-diabetes association consistently increases from poorest to richest (1.025 to 1.062), while decreases for other two diseases of concern. Additionally, it is estimated that males, OBC, and deprived subgroups suffer from excess morbidities [2.02-11.79 million (1.86-13.92)] than their demographic counterparts, predominantly from diabetes and heart disease. India's urban-centric approach to addressing air pollution may further exacerbate disparities among diverse demographics. Therefore, it is recommended to formulate targeted policies, aimed at reducing ambient $PM_{2.5}$ exposure and alleviating disparities, by prioritizing action plans, policies, and interventions for the vulnerable subgroups. India should implement air pollution mitigation mandates prioritizing the vulnerable subgroups, along with controlling other modifiable risk-factors, simultaneously, to achieve environmental and health equities in the foreseeable future.

To assess the effects of ambient $PM_{2.5}$ exposure and its sectoral contributions in shaping future air quality and its health and economic futures. The health burden attributable to sector-specific primary and secondary emissions is apportioned from local and regional sources at state levels for the base year of 2015 and projected for 2030 under three GAINS-simulated contrasting air pollution emission pathways [Business-as-usual (BAU), Advanced Control Technology (ACT), and Sustainable Development Scenario (SDS)] by integrating into the Global Burden of Disease (GBD) framework**.** It is estimated that $PM_{2.5}$-attributable premature deaths to change from 0.72 million (95% uncertainty intervals, UIs: 0.53-0.89) in 2015 to 0.79 (0.57-1.1), 0.76 (0.6-1.1), and 0.63 (0.48-0.81) million in 2030 under these pathways, respectively. Only 13 states in India will achieve the SDG-3.4 goal if they meet their closest clean-air targets (40 $\mu g/m^3$ or below). For the remaining states, the exposure targets are far-fetched and will require larger efforts than those envisioned under the aspirational SDS pathway. Following the decarbonization scenario (2°C-Warming Scenario), resulting in lower $PM_{2.5}$ concentration and may restrict the warming level below 2°C by the end of the century, may prevent 0.77±0.19 million premature deaths and 18.7±4.3 million morbidities by mid-century. These translate to an aggregated economic benefit of 18.9±4.4 billion Euros annually. Domestic and energy sectors (power plant and industries) would have largest shares in future health causalities; but these sectors would also provide maximal health benefits upon prioritization. However, the projected health impacts are not necessarily lower in climate-control scenario than baseline; because of increasing size of vulnerable population may elevate $PM_{2.5}$-related health effects. For most states, changes in socio-demographic factors (population growth, its aging, and declining baseline mortality/morbidity rates) would play predominant roles than the exposure level in shaping future health impacts. India should adopt the strictest implementation strategy to curb emissions of primary $PM_{2.5}$ and precursor gases, with priority on residential and commercial sectors through a multistate conjugate action plan and an accelerated transition to clean energy. Policies aiming to reduce $PM_{2.5}$ exposure alone are not sufficient, and the policies should plan beyond the current National Clean Air Program and make efforts to control other risk factors (that co-impact baseline mortality rates) simultaneously for considerable health benefits.

सारांश

वातावरणीय वायु प्रदूषण वैश्विक स्तर पर सार्वजनिक स्वास्थ्य के लिए सबसे बड़ा पर्यावरणीय जोखिम कारक है, जो कुल स्वास्थ्य हानियों का लगभग सातवां हिस्सा बनता है। भारत में, $PM_{2.5}$ के कारण होने वाला स्वास्थ्य बोझ आने वाले दशकों में और अधिक बढ़ने की संभावना है, और इसकी विशाल जनसंख्या और वृद्ध होती जनसंख्या के कारण देश को गंभीर परिणामों का सामना करना पड़ सकता है। बढ़ती मृत्यु दर को कम करने के लिए, भारत ने संयुक्त राष्ट्र के सतत विकास लक्ष्य (SDG-3.4) को प्राप्त करने की आकांक्षा जताई है, जिसका उद्देश्य 2015 की तुलना में 2030 तक स्वास्थ्य बोझ को एक-तिहाई तक कम करना है। यह ज्ञात नहीं है कि वर्तमान उत्सर्जन नियंत्रण मार्ग इस लक्ष्य को राष्ट्रीय और उप-क्षेत्रीय स्तर पर प्राप्त करने के लिए पर्याप्त हैं या नहीं; और यदि नहीं, तो फिर आवश्यक प्रदूषण-उत्सर्जन में कटौती के लक्ष्य क्या होने चाहिए? इसके अलावा, वर्तमान उत्सर्जन प्रवृत्ति वायु गुणवत्ता को और बिगाड़ सकती है और संभावित रूप से भविष्य में गर्मी को बढ़ा सकती है, जिससे स्वास्थ्य हानियाँ कई गुना बढ़ सकती हैं। अतः यह आवश्यक है कि वायु प्रदूषण और जलवायु नियंत्रण मार्गों का पालन करने से होने वाले संभावित स्वास्थ्य लाभों का समय से पहले अनुमान लगाया जाए, ताकि व्यवसाय-यथावत प्रवृत्तियों की तुलना में बेहतर रणनीति बनाई जा सके। इसके परिणामस्वरूप, वायु प्रदूषण से होने वाले स्वास्थ्य प्रभावों से निपटने के लिए मौजूदा पर्यावरणीय नीतियों को सीमित सफलता मिली है। इसका कारण यह है कि भारत में उप-जनसंख्या समूहों के जनसांख्यिकीय वितरण और इससे उत्पन्न वायु प्रदूषण की असमानता के प्रभावों को अभी तक रणनीतिक नीतियों और हस्तक्षेपों में शामिल नहीं किया गया है। उभरते हुए अध्ययन दर्शाते हैं कि $PM_{2.5}$ और गैर-संक्रामक रोगों (NCDs) के बीच मजबूत संबंध है; लेकिन इस विविध सामाजिक देश में विभिन्न जनसांख्यिकीय समूहों के बीच $PM_{2.5}$ के वितरण की जानकारी अब भी अधूरी है। सबसे महत्वपूर्ण बात यह है कि यह ज्ञात नहीं है कि क्या इस असमानता का संबंध विभिन्न स्वास्थ्य प्रभावों से है; और इस तरह से यह

विभिन्न उप-जनसंख्याओं के लिए असमान $PM_{2.5}$-जनित स्वास्थ्य बोझ उत्पन्न करता है, जिसे वर्तमान में वैश्विक रोग भार (GBD) ढांचे में शामिल नहीं किया गया है।

इस शोध में, शहरी और ग्रामीण भारत में विभिन्न जनसंख्या उप-समूहों के बीच $PM_{2.5}$ की असमानता का विश्लेषण किया गया है और हाल के वर्षों में इसके परिवर्तनों का अध्ययन किया गया है। इसके लिए उपग्रह-व्युत्पन्न $PM_{2.5}$ सांद्रता (1-किमी × 1-किमी) को राष्ट्रीय पारिवारिक स्वास्थ्य सर्वेक्षण (NFHS) के चौथे (2015-16) और पांचवें (2019-21) दौर की सामाजिक-जनसांख्यिकीय जानकारी से जोड़ा गया है। फिर, लॉजिस्टिक मिक्स्ड इफेक्ट मॉडल का उपयोग करके, मधुमेह, उच्च रक्तचाप (HBP), और हृदय रोग के लिए उपग्रह-आधारित $PM_{2.5}$ के संपर्क के साथ संबंधों का अनुमान प्रतिभागियों के लिंग, संपत्ति, और जाति के अनुसार किया गया है; साथ ही सामाजिक-जनसांख्यिकीय भ्रम कारकों के लिए समायोजन किया गया है। इसके बाद, GBD ढांचे के अनुसार, मॉडल-व्युत्पन्न जोखिम अनुमानों का उपयोग करके उप-समूहों के बीच $PM_{2.5}$ से जुड़ा स्वास्थ्य बोझ आंका गया है। उच्च सामाजिक-जनसांख्यिकीय सूचकांक (SDI) वाले राज्यों में अधिक (60-90 $\mu g/m^3$) असमानता का अनुमान है, जबकि मध्यम और निम्न SDI राज्यों में यह कम है। इसके अलावा, यह पाया गया कि शीर्ष और निम्न संपत्ति-सूचकांक वाले तथा पिछड़ा वर्ग (OBC) के उप-समूहों में $PM_{2.5}$ का संपर्क उच्च (Zscore>±0.02, $p<0.1$) है, विशेषकर मध्यम और उच्च SDI राज्यों में। 2015-16 से 2019-21 के बीच, शहरी क्षेत्रों में उप-समूहों के बीच $PM_{2.5}$ संपर्क में असमानता बढ़ी है, जबकि ग्रामीण क्षेत्रों में यह स्थिर रही या घटी है। इसके परिणामस्वरूप, $PM_{2.5}$ और बीमारियों के बीच संबंध विभिन्न उप-जनसंख्याओं में भिन्न होता है और यह पुरुषों (औसत ऑड्स अनुपात 1.049 बनाम 1.039) और OBC (1.078 बनाम 1.044) में महिलाओं और अन्य जातियों की तुलना में अधिक है। $PM_{2.5}$ और मधुमेह के बीच संबंध सबसे गरीब से सबसे अमीर तक बढ़ता है (1.025 से 1.062 तक), जबकि अन्य दो बीमारियों के लिए यह घटता है। इसके अतिरिक्त, यह अनुमान है कि पुरुष, OBC, और वंचित समूह अधिक बीमारियों से

ग्रस्त हैं [2.02-11.79 मिलियन (1.86-13.92)] – विशेष रूप से मधुमेह और हृदय रोग से। भारत की शहरी-केंद्रित वायु प्रदूषण नीति विविध जनसांख्यिकीय समूहों में असमानता को और बढ़ा सकती है। अतः यह सिफारिश की जाती है कि लक्षित नीतियां बनाई जाएँ, जो $PM_{2.5}$ संपर्क को कम करें और असमानताओं को घटाएँ, विशेषकर कमजोर उप-समूहों के लिए। भारत को ऐसी वायु प्रदूषण न्यूनीकरण रणनीतियाँ अपनानी चाहिए जो कमजोर जनसंख्या समूहों को प्राथमिकता दें और अन्य परिवर्तनीय जोखिम कारकों को भी नियंत्रित करें, जिससे पर्यावरण और स्वास्थ्य में समता प्राप्त की जा सके।

$PM_{2.5}$ संपर्क और इसके क्षेत्रीय योगदानों के स्वास्थ्य, वायु गुणवत्ता, और आर्थिक प्रभावों का भविष्य में आकलन करने के लिए, क्षेत्रीय और राज्य-स्तरीय स्रोतों से प्राथमिक और द्वितीयक उत्सर्जनों से उत्पन्न स्वास्थ्य बोझ का 2015 के आधार वर्ष और 2030 के लिए अनुमान लगाया गया है। इसके लिए तीन GAINS-सिमुलेटेड वायु प्रदूषण उत्सर्जन मार्गों [व्यवसाय-यथावत (BAU), उन्नत नियंत्रण प्रौद्योगिकी (ACT), और सतत विकास परिदृश्य (SDS)] को GBD ढांचे में जोड़ा गया है। अनुमान है कि $PM_{2.5}$-जन्य समय से पूर्व मौतें 2015 में 0.72 मिलियन (95% अनिश्चितता अंतराल: 0.53-0.89) से बढ़कर 2030 में क्रमशः 0.79 (0.57-1.1), 0.76 (0.6-1.1), और 0.63 (0.48-0.81) मिलियन तक पहुँच सकती हैं। केवल 13 भारतीय राज्य SDG-3.4 लक्ष्य को प्राप्त कर पाएंगे यदि वे अपने सबसे नजदीकी स्वच्छ वायु लक्ष्यों (40 $\mu g/m^3$ या उससे कम) को पूरा करें। अन्य राज्यों के लिए लक्ष्य अत्यधिक हैं और SDS मार्ग के मुकाबले अधिक प्रयासों की आवश्यकता होगी। डिकार्बोनाइजेशन परिदृश्य (2°C तापवृद्धि परिदृश्य), जिससे PM2.5 की सांद्रता कम हो सकती है और शताब्दी के अंत तक तापमान वृद्धि को 2°C से नीचे सीमित किया जा सकता है, उससे लगभग 0.77±0.19 मिलियन समय से पूर्व मौतें और 18.7±4.3 मिलियन बीमारियाँ रोकी जा सकती हैं। इसका कुल वार्षिक आर्थिक लाभ लगभग 18.9±4.4 बिलियन यूरो होगा। घरेलू और ऊर्जा क्षेत्र (बिजली संयंत्र और उद्योग) भविष्य में स्वास्थ्य हानियों में सबसे बड़े योगदानकर्ता होंगे; लेकिन इन क्षेत्रों को

प्राथमिकता देने से सबसे अधिक स्वास्थ्य लाभ भी मिल सकते हैं। हालांकि, यह आवश्यक नहीं है कि जलवायु-नियंत्रण परिदृश्य में स्वास्थ्य प्रभाव बेसलाइन की तुलना में कम हों; क्योंकि बढ़ती संवेदनशील जनसंख्या का आकार $PM_{2.5}$ से संबंधित स्वास्थ्य प्रभावों को बढ़ा सकता है। अधिकांश राज्यों में सामाजिक-जनसांख्यिकीय कारकों (जनसंख्या वृद्धि, वृद्धावस्था, और घटती बुनियादी मृत्यु/रुग्णता दरें) का प्रभाव $PM_{2.5}$ संपर्क स्तर से अधिक होगा। भारत को प्राथमिक $PM_{2.5}$ और उसके अग्रदूत गैसों के उत्सर्जन को रोकने के लिए सबसे कठोर रणनीति अपनानी चाहिए, जिसमें बहुराज्यीय संयुक्त कार्य योजना और स्वच्छ ऊर्जा की ओर त्वरित संक्रमण की आवश्यकता है। केवल $PM_{2.5}$ संपर्क को कम करने वाली नीतियाँ पर्याप्त नहीं हैं, बल्कि उन्हें वर्तमान राष्ट्रीय स्वच्छ वायु कार्यक्रम से आगे बढ़ते हुए अन्य जोखिम कारकों को भी नियंत्रित करना चाहिए, जिससे उल्लेखनीय स्वास्थ्य लाभ प्राप्त किया जा सके।

Contents

List of Figures

List of Tables