ABSTRACT

India's efforts to improve air quality under the National Clean Air Programme (NCAP) and to transition toward long-term decarbonization are often framed through emission-control strategies; however, the role of land use–land cover change (LULCC) in modifying atmospheric chemistry, pollutant dispersion, and climate forcing remains insufficiently quantified. This thesis examines how LULCC and changing anthropogenic emissions interact to influence air quality, public health, and near-term climate over India, with a particular focus on short-lived climate pollutants (SLCPs), including fine particulate matter ($PM_{2.5}$), black carbon (BC), and tropospheric ozone (O_3). The study evaluates their impacts on the ventilation coefficient (VC), aerosol radiative forcing (RF), and near-surface temperature for the years 2019, 2026, and 2030 under NCAP-aligned and interim Net Zero policy pathways. The central objective is to determine whether land-use transitions can amplify or undermine emission-reduction policies and to identify land-management pathways that generate simultaneous air quality, health, and climate co-benefits.

The present thesis research addresses three interrelated objectives. First, the independent influence of LULCC on VC, $PM_{2.5}$ concentrations, and $PM_{2.5}$-attributable mortality is quantified for 2019 and 2026 under NCAP-consistent land-use trajectories. Second, the effect of anthropogenic emission changes alone on $PM_{2.5}$, BC, and O_3 concentrations, together with associated RF and temperature responses, is assessed while holding LULC constant. Third, the combined influence of LULCC and emission changes (on SLCPs, RF and temperature) is evaluated for 2019 relative to 2030 under an interim Net Zero scenario to examine the extent to which integrated policy pathways can support India's concurrent clean-air and climate objectives. Together, these analyses provide a comprehensive assessment of the coupled interactions among meteorology, emissions, and land-surface processes and their implications for national scale policy design.

The modelling framework is built on the Weather Research and Forecasting model with chemistry (WRF Chem v3.9.1), configured over pan Indian domain at 27 km resolution. The domain is divided into six climatologically and geographically distinct zones: North, South, East, West, Central, and Northeast India. The model employs a physics configuration previously demonstrated to perform reliably over the Indian region, including Morrison two-moment microphysics, Grell–Freitas convection, RRTMG short- and long wave radiation,

Unified Noah land surface, and MYNN Level 2.5 PBL and surface layer schemes. Meteorological initial and boundary conditions are taken from NCEP FNL, while gas phase chemistry is represented by MOZART 4 coupled with the MOSAIC 4 bin aerosol module that includes interactions among inorganic and organic aerosols. Biogenic emissions are computed using MEGAN v2.1, and biomass burning is from FINN v1.5, both at high spatial resolution.

A critical component of the study is a systematic evaluation of anthropogenic emission inventories (EIs) for India. Four widely used global/regional EIs (EDGAR, SMoG, REAS, and ECLIPSE) are implemented in WRF-Chem and assessed through simulated aerosol optical depth (AOD) against satellite retrievals at 0.1° spatial resolution. Among these, the SMoG inventory yields the lowest root mean square error (RMSE) in AOD across all zones, with zonal RMSE ranging from 0.32 in Eastern India to 0.45 in the North and Northeast; and is, therefore, selected as the reference EI for India. Emission reductions embedded in the future NCAP and Net Zero scenarios are implemented by scaling this best performing EI forward from its base year, with sector-specific and state-level reduction factors applied to align with the official national policy targets.

Rigorous model evaluation is conducted for both meteorology and chemistry. For 2019, surface $PM_{2.5}$ and O_3 along with wind speed, 2 m temperature (T2), and relative humidity (RH) from 26 cities in 13 states are obtained from the Central Pollution Control Board (CPCB). WRF Chem's performance is assessed using the Boylan–Russell mean fractional bias (MFB) and mean fractional error (MFE) metrics; except for O_3 in Delhi and $PM_{2.5}$ in Andhra Pradesh, all locations satisfy the recommended thresholds of $MFE \leq 0.75$ and $-0.6 \leq MFB \leq 0.6$, providing confidence in the model's ability to reproduce base year pollutant levels. Additional validation with ERA5 reanalysis shows that RMSE for T2, RH, and wind speed largely falls within World Meteorological Organization (WMO) criteria (2 °C, 20%, 2 m s^{-1}), with exceedances in a few states linked to coarse model resolution and observation uncertainties. These evaluations are consistent with earlier Indian WRF based studies that highlight improved performance at finer spatial scales but confirm that the chosen configuration is robust for pan India assessments. The model reproduces observed pollutant concentrations and meteorological fields within the accepted performance benchmarks for most of the regions, confirming its suitability for national-scale policy analysis.

LULC datasets and projections form the second major methodological element. For the base period, 2018 LULC from Bhuvan (1 km) is adopted as representative of 2019 after confirming

negligible differences compared with USGS derived 2019 LULC. Future LULC for 2026 and 2030 is generated using the Land Change Modeler within TerrSet, which blends artificial neural networks, multi-layer perceptrons, and Markov chain matrices to learn transitions from 2010 to 2015 LULC and then project forward. Model performance against 2018 LULC is strong (overall accuracy ~85.7%; kappa statistics 0.81–0.89), though performance is moderate in topographically complex regions such as the Himalaya, Western Ghats, and parts of southern and northeastern India. Crucially, the TerrSet framework allows incorporation of user defined constraints, and NCAP's implied land use recommendations (e.g., increased mixed forest, enhanced water bodies, constrained expansion of certain built-up classes) are encoded to generate 2026 and 2030 maps that are consistent with policy intentions. Zonal summaries of 2018 and projected 2030 LULC classes, including changes in mixed forest, crop, fallow, barren, urban, and water categories, are compiled to support diagnostics of VC, deposition velocity, and radiative properties.

The thesis extends this analysis to 102 non-attainment cities identified by CPCB. Results show that LULCC alone can significantly alter atmospheric ventilation and pollutant exposure. Under LULCC alone, most cities outside southern India experience increased $PM_{2.5}$ due to shifts in fallow, barren/sparsely vegetated, tundra, and built-up classes. In many non-attainment cities, particularly outside southern India, conversion of vegetated land to barren or built-up surfaces reduces dispersion efficiency and increases $PM_{2.5}$ concentrations, thereby offsetting expected gains from emission controls. Cities in Andhra Pradesh and Telangana show reductions in $PM_{2.5}$ in line with regional LULC improvements, whereas several cities in Maharashtra and Himachal Pradesh emerge as hotspots, with $PM_{2.5}$ increases exceeding 10% and large increments in $PM_{2.5}$ attributable premature deaths. The most affected example is Pune, where the projected $PM_{2.5}$ increase driven solely by LULCC leads to an estimated rise of more than 24,000 additional premature deaths in 2026 relative to 2019. Several rapidly urbanizing regions exhibit notable increases in $PM_{2.5}$-related premature mortality under land-use change alone, demonstrating that unmanaged urban expansion can substantially weaken policy effectiveness. Conversely, regions with increased forest and water coverage show improved VC and reduced particulate exposure. These findings clearly demonstrate that, even with emissions nominally fixed, unregulated LULCC can significantly erode NCAP's air quality gains and exacerbate health risks, especially in rapidly urbanizing states.

SLCP concentration changes under the emission only scenarios propagate into RF and temperature. The 2019–2026 emission control experiment shows that the net aerosol RF

becomes more absorption dominated at the surface. The emission-only simulations reveal that while $PM_{2.5}$ concentrations decline under NCAP controls, the relative reduction of scattering aerosols compared with absorbing BC can shift aerosol RF toward less negative values, resulting in localized near-surface warming. The Northeast zone shows a somewhat different behaviour due to its high natural forest cover and associated deposition, which partially counteracts local warming. This finding underscores the importance of balanced SLCP mitigation strategies that avoid unintended short-term climate penalties.

Combining the LULCC and emissions changes for 2030 under an interim Net Zero scenario captures both structural land use transitions and deep emission reductions. In this integrated scenario, LULC evolves in line with NCAP like prescriptions and additional assumptions consistent with net zero planning, including increased mixed forest cover (with a national target of at least 33–36% forest land), expansion of water bodies, and constraints on further urban sprawl in already dense regions. Under the integrated 2030 scenario, simultaneous emission reductions and improved LULC management produce larger declines in $PM_{2.5}$ and BC than either intervention alone, while also moderating RF and temperature responses in several regions. This is because improved VC and deposition in some zones amplify the effect of emission reductions.

Overall, this thesis demonstrates that land-use planning is not merely a background environmental variable but a central determinant of air quality and climate policy outcomes. The findings show that emission-centric strategies alone may be insufficient to achieve sustainable air-quality improvements unless accompanied by deliberate land-surface management. Integrating LULCC into future revisions of NCAP, state implementation plans, and Net Zero roadmaps can strengthen policy effectiveness by linking forest conservation, agricultural management, and urban development to measurable improvements in air quality, health, and climate resilience across India.

सार

राष्ट्रीय स्वच्छ वायु कार्यक्रम (NCAP) के तहत वायु गुणवत्ता में सुधार और दीर्घकालिक डीकार्बोनाइजेशन की ओर संक्रमण के लिए भारत के प्रयासों को अक्सर उत्सर्जन-नियंत्रण रणनीतियों के माध्यम से तैयार किया जाता है; हालाँकि, वायुमंडलीय रसायन विज्ञान, प्रदूषक फैलाव और जलवायु बल को संशोधित करने में भूमि उपयोग-भूमि आवरण परिवर्तन (LULCC) की भूमिका अपर्याप्त रूप से मात्रात्मक बनी हुई है। यह थीसिस इस बात की जांच करता है कि कैसे LULCC और बदलते मानवजनित उत्सर्जन भारत में वायु गुणवत्ता, सार्वजनिक स्वास्थ्य और निकट-अवधि की जलवायु को प्रभावित करने के लिए बातचीत करते हैं, जिसमें सूक्ष्म कण पदार्थ ($PM_{2.5}$) ब्लैक कार्बन (BC) और ट्रोपोस्फेरिक ओजोन (O_3) सहित अल्पकालिक जलवायु प्रदूषकों (SLCPs) पर विशेष ध्यान दिया जाता है। अध्ययन NCAP-संरेखित और अंतरिम नेट जीरो नीति मार्गों के तहत वर्ष 2019, 2026 और 2030 के लिए वेंटिलेशन गुणांक (VC) एरोसोल रेडिएटिव फोर्सिंग (RF) और निकट-सतह के तापमान पर उनके प्रभावों का मूल्यांकन करता है। केंद्रीय उद्देश्य यह निर्धारित करना है कि क्या भूमि-उपयोग परिवर्तन उत्सर्जन-कटौती नीतियों को बढ़ा सकते हैं या कमजोर कर सकते हैं और भूमि-प्रबंधन मार्गों की पहचान करना है जो एक साथ वायु गुणवत्ता, स्वास्थ्य और जलवायु सह-लाभ उत्पन्न करते हैं।

वर्तमान शोध प्रबंध तीन परस्पर संबंधित उद्देश्यों को संबोधित करता है। सबसे पहले, VC, $PM_{2.5}$ सांद्रता, और $PM_{2.5}$-जिम्मेदार मृत्यु दर पर LULCC का स्वतंत्र प्रभाव NCAP-सुसंगत भूमि-उपयोग प्रक्षेपवक्र के तहत 2019 और 2026 के लिए निर्धारित किया गया है। दूसरा, मानवजनित उत्सर्जन का प्रभाव अकेले $PM_{2.5}$, BC और O_3 सांद्रता पर बदलता है, साथ ही संबंधित RF और तापमान प्रतिक्रियाओं का मूल्यांकन LULC स्थिर रखते हुए किया जाता है। तीसरा, LULCC और उत्सर्जन परिवर्तनों (SLCPs, RF और तापमान पर) के संयुक्त प्रभाव का मूल्यांकन अंतरिम नेट जीरो परिदृश्य के तहत 2030 के सापेक्ष 2019 के लिए किया जाता है ताकि यह जांच की जा सके कि एकीकृत नीतिगत मार्ग भारत के समवर्ती स्वच्छ-वायु और जलवायु उद्देश्यों का समर्थन किस हद तक कर सकते हैं। एक साथ, ये विश्लेषण मौसम विज्ञान, उत्सर्जन और भूमि-सतह प्रक्रियाओं के बीच युग्मित अंतःक्रियाओं और राष्ट्रीय स्तर की नीति डिजाइन के लिए उनके प्रभावों का एक व्यापक मूल्यांकन प्रदान करते हैं।

मॉडलिंग फ्रेमवर्क को 27 किमी रिज़ॉल्यूशन पर पैन इंडियन डोमेन पर कॉन्फ़िगर किए गए रसायन विज्ञान (WRF Chem v 3.9.1) के साथ मौसम अनुसंधान और पूर्वानुमान मॉडल पर बनाया गया है। इस क्षेत्र को जलवायु और भौगोलिक रूप से छह अलग-अलग क्षेत्रों में विभाजित किया गया हैः उत्तर, दक्षिण, पूर्व, पश्चिम, मध्य और पूर्वोत्तर भारत। मॉडल एक भौतिकी विन्यास को नियोजित करता है जिसे पहले भारतीय क्षेत्र में विश्वसनीय रूप से प्रदर्शन करने के लिए प्रदर्शित किया गया था, जिसमें मॉरिसन टू-मोमेंट माइक्रोफिजिक्स,

ग्रेल-फ्रीटास कन्वेक्शन, RRTMG शॉर्ट- और लॉन्ग वेव रेडिएशन, यूनिफाइड नूह लैंड सरफेस और MYNN लेवल 2.5 पीबीएल और सरफेस लेयर स्कीम्स शामिल हैं। मौसम संबंधी प्रारंभिक और सीमा स्थितियों को NCEP FNL से लिया जाता है, जबकि गैस चरण रसायन विज्ञान को MOZART4 द्वारा MOSAIC 4 बिन एरोसोल मॉड्यूल के साथ जोड़ा जाता है जिसमें अकार्बनिक और कार्बनिक एरोसोल के बीच बातचीत शामिल होती है। बायोजेनिक उत्सर्जन की गणना MEGAN v2.1 का उपयोग करके की जाती है, और बायोमास बर्निंग FINN v1.5 से होती है, दोनों उच्च स्थानिक रिज़ॉल्यूशन पर।

अध्ययन का एक महत्वपूर्ण घटक भारत के लिए मानवजनित उत्सर्जन सूची (EIs) का एक व्यवस्थित मूल्यांकन है। चार व्यापक रूप से उपयोग किए जाने वाले वैश्विक/क्षेत्रीय EIs (EDGAR, SMoG, REAS, और ECLIPSE) को डब्ल्यूआरएफ-केम में लागू किया जाता है और 0.1 डिग्री स्थानिक रिज़ॉल्यूशन पर उपग्रह पुनर्प्राप्ति के खिलाफ नकली एरोसोल ऑप्टिकल डेप्थ (AOD) के माध्यम से मूल्यांकन किया जाता है। इनमें से, एसएमओजी इन्वेंट्री सभी क्षेत्रों में एओडी में सबसे कम रूट मीन स्क्वायर एरर (RMSE) उत्पन्न करती है, जिसमें क्षेत्रीय आरएमएसई पूर्वी भारत में 0.32 से लेकर उत्तर और पूर्वोत्तर में 0.45 तक होता है; और इसलिए, भारत के लिए संदर्भ ईआई के रूप में चुना जाता है। भविष्य के एनसीएपी और नेट जीरो परिदृश्यों में निहित उत्सर्जन में कमी को इसके आधार वर्ष से आगे इस सर्वश्रेष्ठ प्रदर्शन करने वाले EI को स्केल करके लागू किया जाता है, जिसमें आधिकारिक राष्ट्रीय नीति लक्ष्यों के साथ संरेखित करने के लिए क्षेत्र-विशिष्ट और राज्य-स्तरीय कमी कारक लागू होते हैं।

मौसम विज्ञान और रसायन विज्ञान दोनों के लिए कठोर मॉडल मूल्यांकन किया जाता है। 2019 के लिए, 13 राज्यों के 26 शहरों से हवा की गति, 2 मीटर तापमान (T2) और सापेक्ष आर्द्रता (RH) के साथ सतह $PM_{2.5}$ और O_3 केंद्रीय प्रदूषण नियंत्रण बोर्ड (CPCB) से प्राप्त किए गए हैं WRF Chem के प्रदर्शन का मूल्यांकन बॉयलन-रसेल मीन फ्रैक्शनल बायस (MFB) और मीन फ्रैक्शनल एरर (MFE) मेट्रिक्स का उपयोग करके किया जाता है; दिल्ली में O_3 और आंध्र प्रदेश में $PM_{2.5}$ को छोड़कर, सभी स्थान $MFE \leq 0.75$ और $-0.6 \leq MFB \leq 0.6$ की अनुशंसित सीमा को पूरा करते हैं, जिससे मॉडल की आधार वर्ष प्रदूषक स्तरों को पुनः पेश करने की क्षमता में विश्वास होता है। ERA5 के पुनः विश्लेषण के साथ अतिरिक्त सत्यापन से पता चलता है कि T2, RH, और हवा की गति के लिए RMSE काफी हद तक विश्व मौसम विज्ञान संगठन (WMO) मानदंड ($2\ °C$, 20%, $2\ m\ s{-}1$) के भीतर आता है, जिसमें कुछ राज्यों में अधिकता मोटे मॉडल संकल्प और अवलोकन अनिश्चितताओं से जुड़ी होती है। ये मूल्यांकन पहले के भारतीय WRF आधारित अध्ययनों के अनुरूप हैं जो सूक्ष्म स्थानिक पैमाने पर बेहतर प्रदर्शन को उजागर करते हैं लेकिन इस बात की पुष्टि करते हैं कि चयनित विन्यास अखिल भारतीय मूल्यांकन के लिए मजबूत है। यह मॉडल अधिकांश क्षेत्रों के लिए स्वीकृत प्रदर्शन मानकों के भीतर देखे गए प्रदूषक सांद्रता और मौसम संबंधी क्षेत्रों को पुनः प्रस्तुत करता है, जो राष्ट्रीय स्तर के नीति विश्लेषण के लिए इसकी उपयुक्तता की पुष्टि करता है।

LULC डेटासेट और अनुमान दूसरा प्रमुख पद्धतिगत तत्व बनाते हैं। आधार अवधि के लिए, USGS से प्राप्त 2019 LULC की तुलना में नगण्य अंतर की पुष्टि करने के बाद भुवन (1 किमी) से 2018 LULC को 2019 के प्रतिनिधि के रूप में अपनाया गया है। 2026 और 2030 के लिए भविष्य का LULC टेरसेट के भीतर लैंड चेंज मॉडलर का उपयोग करके उत्पन्न किया जाता है, जो कृत्रिम तंत्रिका नेटवर्क, बहु-परत परसेप्ट्रॉन और मार्कोव चेन मैट्रिक्स को 2010 से 2015 LULC तक संक्रमण सीखने और फिर आगे की परियोजना के लिए मिश्रित करता है। 2018 LULC के मुकाबले मॉडल प्रदर्शन मजबूत है (समग्र सटीकता ~ 85.7%; कप्पा आंकड़े 0.81-0.89) हालांकि प्रदर्शन स्थलाकृतिक रूप से जटिल क्षेत्रों जैसे हिमालय, पश्चिमी घाट और दक्षिणी और पूर्वोत्तर भारत के कुछ हिस्सों में मध्यम है। महत्वपूर्ण रूप से, TerrSet ढांचा उपयोगकर्ता परिभाषित बाधाओं को शामिल करने की अनुमति देता है, और NCAP की निहित भूमि उपयोग सिफारिशें (e.g., मिश्रित वन में वृद्धि, बढ़े हुए जल निकाय, कुछ निर्मित वर्गों के सीमित विस्तार) को उत्पन्न करने के लिए एन्कोड किया गया है 2026 और 2030 मानचित्र जो नीतिगत इरादों के अनुरूप हैं। 2018 के क्षेत्रीय सारांश और अनुमानित 2030 LULC वर्ग, जिसमें मिश्रित वन, फसल, परती, बंजर, शहरी और जल श्रेणियों में परिवर्तन शामिल हैं, को VC, निक्षेपण वेग और विकिरण गुणों के निदान का समर्थन करने के लिए संकलित किया गया है।

थीसिस इस विश्लेषण को CPCB द्वारा पहचाने गए 102 गैर-प्राप्ति शहरों तक विस्तारित करता है। परिणाम बताते हैं कि अकेले LULCC वायुमंडलीय वेंटिलेशन और प्रदूषक जोखिम को महत्वपूर्ण रूप से बदल सकता है। अकेले LULCC के तहत, दक्षिण भारत के बाहर अधिकांश शहरों में परती, बंजर/विरल वनस्पति, टुंड्रा और निर्मित वर्गों में बदलाव के कारण $PM_{2.5}$ में वृद्धि हुई है। कई गैर-प्राप्ति वाले शहरों में, विशेष रूप से दक्षिण भारत के बाहर, वनस्पति भूमि को बंजर या निर्मित सतहों में बदलने से फैलाव दक्षता कम हो जाती है और $PM_{2.5}$ सांद्रता बढ़ जाती है, जिससे उत्सर्जन नियंत्रण से अपेक्षित लाभ की भरपाई होती है। आंध्र प्रदेश और तेलंगाना के शहरों में क्षेत्रीय एलयूएलसी सुधारों के अनुरूप $PM_{2.5}$ में कमी आई है, जबकि महाराष्ट्र और हिमाचल प्रदेश के कई शहर हॉटस्पॉट के रूप में उभरे हैं, जिसमें $PM_{2.5}$ में 10% से अधिक की वृद्धि हुई है और $PM_{2.5}$ में बड़ी वृद्धि हुई है। सबसे अधिक प्रभावित उदाहरण पुणे है, जहां पूरी तरह से LULCC द्वारा संचालित अनुमानित $PM_{2.5}$ वृद्धि 2019 के सापेक्ष 2026 में 24,000 से अधिक अतिरिक्त समयपूर्व मौतों की अनुमानित वृद्धि की ओर ले जाती है। कई तेजी से शहरीकरण वाले क्षेत्र अकेले भूमि-उपयोग परिवर्तन के तहत $PM_{2.5}$ से संबंधित समयपूर्व मृत्यु दर में उल्लेखनीय वृद्धि प्रदर्शित करते हैं, यह दर्शाता है कि अनियंत्रित शहरी विस्तार नीति प्रभावशीलता को काफी कमजोर कर सकता है। इसके विपरीत, वन और जल कवरेज में वृद्धि वाले क्षेत्रों में VC में सुधार और कणों के संपर्क में कमी दिखाई देती है। ये निष्कर्ष स्पष्ट रूप से प्रदर्शित करते हैं कि, नाममात्र के उत्सर्जन के साथ भी, अनियमित LULCC NCAP के वायु गुणवत्ता लाभ को काफी कम कर सकता है और स्वास्थ्य जोखिमों को बढ़ा सकता है, विशेष रूप से तेजी से शहरीकरण वाले राज्यों में।

SLCP सांद्रता उत्सर्जन के तहत बदलती है केवल परिदृश्य RF और तापमान में फैलते हैं। 2019-2026 उत्सर्जन नियंत्रण प्रयोग से पता चलता है कि शुद्ध एरोसोल RF सतह पर अधिक अवशोषण हावी हो जाता है। उत्सर्जन-केवल सिमुलेशन से पता चलता है कि NCAP नियंत्रणों के तहत $PM_{2.5}$ सांद्रता में गिरावट आती है, अवशोषित BC की तुलना में स्कैटरिंग एरोसोल की सापेक्ष कमी एरोसोल RF को कम नकारात्मक मूल्यों की ओर स्थानांतरित कर सकती है, जिसके परिणामस्वरूप स्थानीयकृत निकट-सतह वार्मिंग होती है। पूर्वोत्तर क्षेत्र अपने उच्च प्राकृतिक वन क्षेत्र और संबंधित निक्षेपण के कारण कुछ अलग व्यवहार दिखाता है, जो आंशिक रूप से स्थानीय वार्मिंग का विरोध करता है। यह खोज संतुलित SLCP शमन रणनीतियों के महत्व को रेखांकित करती है जो अनपेक्षित अल्पकालिक जलवायु दंड से बचती हैं।

अंतरिम नेट जीरो परिदृश्य के तहत 2030 के लिए LULCC और उत्सर्जन परिवर्तनों का संयोजन संरचनात्मक भूमि उपयोग संक्रमण और गहरी उत्सर्जन कमी दोनों को दर्शाता है। इस एकीकृत परिदृश्य में, LULC NCAP के अनुरूप विकसित होता है जैसे प्रिस्क्रिप्शन और नेट जीरो प्लानिंग के अनुरूप अतिरिक्त धारणाएं, जिसमें मिश्रित वन क्षेत्र में वृद्धि (कम से कम 33-36% वन भूमि के राष्ट्रीय लक्ष्य के साथ) जल निकायों का विस्तार और पहले से ही घने क्षेत्रों में शहरी फैलाव पर बाधाएं शामिल हैं। एकीकृत 2030 परिदृश्य के तहत, एक साथ उत्सर्जन में कमी और बेहतर LULC प्रबंधन अकेले हस्तक्षेप की तुलना में $PM_{2.5}$ और BC में बड़ी गिरावट पैदा करता है, जबकि कई क्षेत्रों में RF और तापमान प्रतिक्रियाओं को भी नियंत्रित करता है। ऐसा इसलिए है क्योंकि कुछ क्षेत्रों में बेहतर VC और निक्षेपण उत्सर्जन में कमी के प्रभाव को बढ़ाते हैं।

कुल मिलाकर, यह थीसिस दर्शाता है कि भूमि-उपयोग योजना केवल एक पृष्ठभूमि पर्यावरणीय चर नहीं है, बल्कि वायु गुणवत्ता और जलवायु नीति परिणामों का एक केंद्रीय निर्धारक है। निष्कर्षों से पता चलता है कि स्थायी वायु-गुणवत्ता सुधार प्राप्त करने के लिए अकेले उत्सर्जन-केंद्रित रणनीतियाँ अपर्याप्त हो सकती हैं जब तक कि जानबूझकर भूमि-सतह प्रबंधन के साथ न हो। LUCC को NCAP, राज्य कार्यान्वयन योजनाओं और नेट जीरो रोडमैप के भविष्य के संशोधनों में एकीकृत करने से वन संरक्षण, कृषि प्रबंधन और शहरी विकास को पूरे भारत में वायु गुणवत्ता, स्वास्थ्य और जलवायु लचीलापन में मापने योग्य सुधारों से जोड़कर नीतिगत प्रभावशीलता को मजबूत किया जा सकता है।