

AEROSOL CLIMATE INTERACTION OVER SOUTH ASIA IN A WARMING WORLD

by

SHIWANSHA MISHRA

Centre for Atmospheric Sciences

Submitted

in the fulfilment of the requirement of the degree of Doctor of Philosophy

to the



INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

JANUARY 2025

Abstract

This PhD thesis investigates the equilibrium climate responses of the South Asian Summer Monsoon (SASM) system to various anthropogenic emissions and their projected changes under a warming climate. Using CESM1.2.2-SOM, an atmospheric general circulation model coupled with a slab ocean model, the study evaluates the impacts of greenhouse gases (GHGs), aerosols, black carbon (BC), CO₂, and sulfate emissions, individually and in combination. The analysis also includes mid-21st-century projections under the RCP8.5 scenario and examines the role of dust emissions from West Asia (WA), the Tibetan Plateau (TP), and South Asia (SA) in modulating the onset and withdrawal of the SASM. These investigations provide insights into how anthropogenic and natural forcings shape one of the most climate-sensitive systems globally.

The findings reveal that aerosols consistently delay the SASM onset while advancing its withdrawal, significantly shortening the monsoon's length (LOM) across most of India. GHG emissions also reduce the LOM, primarily by advancing withdrawal. In contrast, BC emissions uniquely advance the SASM onset by 13–20 days and extend its duration by approximately 15 days. Sulfate emissions delay onset and further shorten the monsoon season. Under mid-21st-century RCP8.5 scenarios, SASM onset is projected to be delayed by over five days, with withdrawal advanced by up to 15 days, leading to a reduction of more than 20 days in LOM. Regionally, aerosols delay onset over South and Central India, with combined aerosol and GHG forcings amplifying this effect over Southern and Eastern India. BC generally advances the onset, except for delays in the northern hilly regions and the southern tip of India. Sulfate and CO₂ emissions delay onset across much of South and Western India, with similar regional patterns projected for 2050.

The SASM withdrawal phase exhibits contrasting responses. Aerosol and combined aerosol-GHG forcings advance withdrawal over parts of India, particularly the northwest, while CO₂ and BC emissions delay it. Sulfate emissions, in contrast, advance withdrawal across most regions. By 2050, withdrawal is projected to be delayed over most parts of India except Punjab. Combined forcings of aerosols and GHGs significantly reduce the LOM across Central, Southern, and Western India, while BC emissions extend the LOM in most regions except for the northern hilly areas and Punjab.

Dust emissions further add complexity to SASM dynamics. Suppressed dust emissions over the Tibetan Plateau advance onset, whereas suppression over both TP and WA delays onset over Kerala. Enhanced dust emissions from TP and WA also delay onset, while suppressed WA dust and enhanced SA dust advance withdrawal. These variations result in regionally specific changes to the LOM, underscoring the sensitivity of SASM dynamics to natural dust perturbations.

Anthropogenic forcings significantly impact seasonal mean precipitation (SMP) and temperature across South Asia, with aerosol forcings predominantly suppressing SMP. The most pronounced reductions occur along the Indian western coastline and Nepal, driven by sulfate emissions, which exert the strongest cooling effects. Combined aerosol and GHG forcings yield a similar but slightly less pronounced SMP pattern compared to aerosols alone, highlighting the dominant role of aerosols. BC emissions enhance precipitation in specific regions, while GHG and CO₂ forcings increase SMP over Northern India and the Indo-Gangetic Plain. These increases are expected to intensify by mid-century, with SMP projected to rise over northwestern India but decline over the Western Ghats.

The precipitation responses are closely tied to SASM dynamics. A weakened SASM correlates with reduced sea surface temperature (SST) gradient anomalies and weakened vertical wind shear, suppressing prevailing wind patterns and the local Hadley cell. Enhanced SASM dynamics, on the other hand, strengthen these mechanisms. Seasonal mean precipitation minus evaporation (SPME) reflects these dynamics, with most forcings, including aerosols and sulfate, reducing SPME across South Asia. However, BC and CO₂ forcings increase SPME in many regions, particularly outside Telangana, the eastern Himalayas, and northeastern India.

Temperature extremes exhibit similarly diverse responses. Aerosols and sulfate emissions suppress maximum and minimum daily temperatures and reduce diurnal temperature ranges (DTR), with the strongest cooling effects over the Indo-Gangetic Plain, Northeast, and Eastern India. In contrast, GHG and CO₂ forcings amplify extreme temperatures, significantly increasing the maximum daily maximum temperature (TX_x) and maximum daily minimum temperature (TN_x) across India, particularly in Northeast India and the Indo-Gangetic Plain. By 2050, warming trends under RCP8.5 are projected to intensify, with increases in the frequency of warm days (TX_{90p}) and warm nights (TN_{90p}) alongside reductions in DTR and cold nights (TN_{10p}).

BC emissions have a dual impact, moderating daytime temperatures while warming nighttime temperatures, particularly in Northern India. BC significantly increases the warm spell duration index (WSDI), indicating prolonged heatwaves. In contrast, sulfate and aerosol emissions reduce warm spell durations, while cold spell durations (CSDI) increase in specific regions, such as the Deccan Plateau and parts of Western India.

These findings emphasize the complex and often opposing effects of anthropogenic emissions on the SASM system. Aerosols and sulfate dominate as drivers of cooling and precipitation suppression, while GHGs and CO₂ amplify warming and enhance extreme rainfall events. BC emissions uniquely balance cooling effects on daytime temperatures with warming effects on nighttime temperatures, while also influencing dynamic precipitation responses. These nuanced insights into the interactions between different forcings and regional climate processes highlight the critical need for targeted mitigation strategies and adaptive measures to address the diverse impacts of climate change on the South Asian Summer Monsoon system. This thesis provides a foundation for informed policymaking and robust interventions to mitigate future climate risks in this vulnerable and densely populated region.

सारांश

यह पीएचडी शोध प्रबंध दक्षिण एशियाई ग्रीष्मकालीन मानसून (एसएसएम) प्रणाली की संतुलन जलवायु प्रतिक्रियाओं का अध्ययन करता है, जो विभिन्न मानवजनित उत्सर्जनों और गर्म होती जलवायु के तहत उनके प्रक्षेपित परिवर्तनों को दर्शाता है। सीईएसएम1.2.2-एसओएम का उपयोग करते हुए, जो एक वायुमंडलीय सामान्य परिसंचरण मॉडल है और स्लैब महासागर मॉडल के साथ युग्मित है, यह अध्ययन ग्रीनहाउस गैसों (जीएचजी), एयरोसोल, ब्लैक कार्बन (बीसी), सीओ₂ और सल्फेट उत्सर्जनों के प्रभावों का अलग-अलग और संयुक्त रूप से मूल्यांकन करता है। इसमें मध्य 21वीं सदी के आरसीपी8.5 परिदृश्य के तहत अनुमान और पश्चिम एशिया (डब्ल्यूए), तिब्बती पठार (टीपी), और दक्षिण एशिया (एसए) से धूल उत्सर्जनों की भूमिका को भी शामिल किया गया है, जो एसएसएम की शुरुआत और वापसी को प्रभावित करते हैं। ये अध्ययन यह समझने में मदद करते हैं कि मानवजनित और प्राकृतिक बलाघात वैश्विक रूप से सबसे अधिक जलवायु-संवेदनशील प्रणालियों को कैसे आकार देते हैं।

शोध के निष्कर्ष दर्शाते हैं कि एयरोसोल एसएसएम की शुरुआत को लगातार विलंबित करते हैं जबकि इसकी वापसी को पहले कर देते हैं, जिससे भारत के अधिकांश हिस्सों में मानसून की अवधि (एलओएम) कम हो जाती है। जीएचजी उत्सर्जन भी एलओएम को कम करता है, मुख्यतः वापसी को पहले कर। इसके विपरीत, बीसी उत्सर्जन एसएसएम की शुरुआत को 13-20 दिनों तक पहले कर देता है और इसकी अवधि को लगभग 15 दिनों तक बढ़ा देता है। सल्फेट उत्सर्जन शुरुआत को विलंबित करता है और मानसून की अवधि को और कम करता है। आरसीपी8.5 परिदृश्य के तहत, मध्य 21वीं सदी में एसएसएम की शुरुआत 5 दिनों से अधिक विलंबित और वापसी 15 दिनों तक पहले हो सकती है, जिससे एलओएम 20 दिनों से अधिक घट जाएगी। क्षेत्रीय रूप से, एयरोसोल दक्षिण और मध्य भारत में शुरुआत को विलंबित करते हैं, जबकि संयुक्त एयरोसोल और जीएचजी बलाघात इस प्रभाव को दक्षिण और पूर्वी भारत में बढ़ाते हैं। बीसी सामान्यतः शुरुआत को पहले करता है, लेकिन उत्तर के पहाड़ी क्षेत्रों और भारत के दक्षिणी सिरे में विलंब करता है। सल्फेट और सीओ₂ उत्सर्जन दक्षिण और पश्चिमी भारत के अधिकांश हिस्सों में शुरुआत को विलंबित करते हैं, जिसमें 2050 के लिए भी समान क्षेत्रीय नमूना अनुमानित हैं।

एसएसएम की वापसी में विपरीत प्रतिक्रियाएं दिखाई देती हैं। एयरोसोल और संयुक्त एयरोसोल-जीएचजी बलाघात वापसी को भारत के कुछ हिस्सों, विशेष रूप से उत्तर-पश्चिम, में पहले करते हैं, जबकि सीओ₂ और बीसी उत्सर्जन इसे विलंबित करते हैं। इसके विपरीत, सल्फेट उत्सर्जन अधिकांश क्षेत्रों में वापसी को पहले कर देता है। 2050 तक, वापसी भारत के अधिकांश हिस्सों में विलंबित हो सकती है, पंजाब को छोड़कर। संयुक्त एयरोसोल और जीएचजी बलाघात केंद्रीय, दक्षिणी और पश्चिमी भारत में

एलओएम को काफी हद तक कम करते हैं, जबकि बीसी उत्सर्जन अधिकांश क्षेत्रों में एलओएम को बढ़ाता है, उत्तर के पहाड़ी क्षेत्रों और पंजाब को छोड़कर।

धूल उत्सर्जन एसएसएम गतिकी में और जटिलता जोड़ता है। तिब्बती पठार पर कम किए हुए धूल उत्सर्जन शुरुआत को पहले करते हैं, जबकि टीपी और डब्ल्यूए दोनों पर कम किए हुए उत्सर्जन केरल में शुरुआत को विलंबित करते हैं। टीपी और डब्ल्यूए से बढ़े हुए धूल उत्सर्जन भी शुरुआत को विलंबित करते हैं, जबकि कम किए हुए डब्ल्यूए धूल और बढ़े हुए एसए धूल वापसी को पहले करते हैं। ये विविधताएं एलओएम में क्षेत्रीय विशिष्ट परिवर्तनों को जन्म देती हैं, जिससे एसएसएम गतिकी की प्राकृतिक धूल परिवर्तनों के प्रति संवेदनशीलता उजागर होती है।

मानवजनित बलाघात दक्षिण एशिया में मौसमी औसत वर्षा (एसएमपी) और तापमान को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करते हैं, जिसमें एयरोसोल बलाघात एसएमपी को प्रमुख रूप से कम करते हैं। भारतीय पश्चिमी तटरेखा और नेपाल के साथ सबसे अधिक कमी सल्फेट उत्सर्जनों द्वारा संचालित होती है, जो सबसे मजबूत शीतलन प्रभाव डालते हैं। संयुक्त एयरोसोल और जीएचजी बलाघात एसएमपी के समान लेकिन थोड़ा कम प्रमुख नमूना उत्पन्न करते हैं, जो एयरोसोल की प्रमुख भूमिका को दर्शाते हैं। बीसी उत्सर्जन विशिष्ट क्षेत्रों में वर्षा को बढ़ाते हैं, जबकि जीएचजी और सीओ₂ बलाघात उत्तरी भारत और भारतीय गंगीय के मैदान में एसएमपी को बढ़ाते हैं। यह वृद्धि मध्य सदी तक तीव्र हो सकती है, जिसमें एसएमपी उत्तर-पश्चिमी भारत में बढ़ने और पश्चिमी घाटों में घटने का अनुमान है।

वर्षा प्रतिक्रियाएं एसएसएम गतिकी से निकटता से जुड़ी हैं। कमजोर एसएसएम कमजोर समुद्र सतह तापमान (एसएसटी) ढाल विसंगतियों और कमजोर ऊर्ध्वाधर पवन कतरनी के साथ सहसंबद्ध है, जो प्रचलित पवन नमूना और स्थानीय हैडली सेल को दबा देता है। दूसरी ओर, संवर्धित एसएसएम इन तंत्रों को मजबूत करता है। मौसमी औसत वर्षा घटा वाष्पीकरण (एसपीएमई) इन गतिकी को दर्शाता है, जिसमें अधिकांश बलाघात, जिसमें एयरोसोल और सल्फेट शामिल हैं, दक्षिण एशिया में एसपीएमई को कम करते हैं। हालांकि, बीसी और सीओ₂ बलाघात एसपीएमई को कई क्षेत्रों में बढ़ाते हैं, विशेष रूप से तेलंगाना, पूर्वी हिमालय और पूर्वोत्तर भारत के बाहर।

तापमान चरम सीमाएं समान रूप से विविध प्रतिक्रियाएं प्रदर्शित करती हैं। एयरोसोल और सल्फेट उत्सर्जन अधिकतम और न्यूनतम दैनिक तापमान को कम करते हैं और दैनिक तापमान सीमा (डीटीआर) को कम करते हैं, जिसमें भारतीय गंगीय के मैदान, उत्तर-पूर्व और पूर्वी भारत में सबसे मजबूत शीतलन प्रभाव होता है। इसके विपरीत, जीएचजी और सीओ₂ बलाघात अत्यधिक तापमान को बढ़ाते हैं, भारत भर में अधिकतम दैनिक अधिकतम तापमान (टीएक्सएक्स) और अधिकतम दैनिक न्यूनतम तापमान

(टीएनएक्स) को महत्वपूर्ण रूप से बढ़ाते हैं, विशेष रूप से उत्तर-पूर्व भारत और भारतीय गंगीय के मैदान में। 2050 तक, आरसीपी8.5 के तहत वार्मिंग रुझानों के तीव्र होने का अनुमान है, जिसमें गर्म दिनों (टीएक्स90पी) और गर्म रातों (टीएन90पी) की आवृत्ति में वृद्धि और डीटीआर और ठंडी रातों (टीएन10पी) में कमी होगी।

बीसी उत्सर्जन का दोहरा प्रभाव है, जो दिन के तापमान को मध्यम करता है जबकि रात के तापमान को गर्म करता है, विशेष रूप से उत्तरी भारत में। गर्म दौर अवधि सूचकांक (डब्ल्यूएसडीआई) को महत्वपूर्ण रूप से बढ़ाता है, जो लंबे समय तक चलने वाले लू की लहर को इंगित करता है। इसके विपरीत, सल्फेट और एयरोसोल उत्सर्जन गर्म अवधि की अवधि को कम करते हैं, जबकि ठंडी अवधि की अवधि (सीएसडीआई) विशेष क्षेत्रों जैसे दक्कन के पठार और पश्चिमी भारत के कुछ हिस्सों में बढ़ती है।

ये निष्कर्ष एसएसएम प्रणाली पर मानवजनित उत्सर्जनों के जटिल और अक्सर विरोधाभासी प्रभावों पर जोर देते हैं। एयरोसोल और सल्फेट शीतलन और वर्षा दमन के मुख्य चालक के रूप में कार्य करते हैं, जबकि जीएचजी और सीओ₂ गर्मी को बढ़ाते हैं और अत्यधिक वर्षा घटनाओं को बढ़ाते हैं। बीसी उत्सर्जन दिन के तापमान पर शीतलन प्रभाव को रात के तापमान पर गर्मी के प्रभावों के साथ संतुलित करता है, जबकि गतिशील वर्षा प्रतिक्रियाओं को भी प्रभावित करता है। विभिन्न बलाघातों और क्षेत्रीय जलवायु प्रक्रियाओं के बीच अंतःक्रियाओं पर इन सूक्ष्म अंतर्दृष्टियों से लक्षित शमन रणनीतियों और अनुकूली उपायों की महत्वपूर्ण आवश्यकता पर प्रकाश डाला गया है, ताकि दक्षिण एशियाई ग्रीष्मकालीन मानसून प्रणाली पर जलवायु परिवर्तन के विविध प्रभावों को संबोधित किया जा सके। यह शोध प्रबंध इस संवेदनशील और घनी आबादी वाले क्षेत्र में भविष्य के जलवायु जोखिमों को कम करने के लिए सूचित नीति निर्माण और मजबूत हस्तक्षेपों के लिए एक आधार प्रदान करता है।