



## मध्य भारत-गंगा मैदान के शहरी क्षेत्र वाराणसी में ब्लैक कार्बन की परिवर्तनशीलता और स्रोत का विभाजन

प्रशांत कुमार चौहान, रमाकांत तिवारी, अभय कुमार सिंह\*

भौतिक विज्ञान विभाग, बनारस हिन्दू विश्वविद्यालय, वाराणसी, उत्तर प्रदेश, भारत-२२१००५  
लेखक से संवाद के लिए ईमेल\*- singhak@bhu.ac.in

आलेख प्राप्त: १९ मार्च २०२६; संशोधित: ०४ अप्रैल २०२६; स्वीकृत: ०४ अप्रैल २०२६  
प्रथम ऑनलाइन प्रकाशित: २५ अप्रैल २०२६

### सारांश

ब्लैक कार्बन (बीसी) एक खास प्रकाश अवशोषित करने वाला एरोसोल है जो क्षेत्र की हवा की गुणवत्ता, मानव स्वास्थ्य और जलवायु पर काफी असर डालता है। इस अध्ययन में, वाराणसी में बीसी के समय के बदलाव और स्रोत में योगदान की जांच की गई, जो भारत के बीच के भारत-गंगा के मैदान (आईजीपी) में एक घनी आबादी वाला शहरी केंद्र है। दिसंबर 2020 से नवंबर 2021 तक सात-तरंगदैर्घ्य वाले एथैलोमीटर (ईई-33) का इस्तेमाल करके लगातार माप किए गए, जिसका समय निर्धारण एक मिनट था। जीवाश्म ईंधन के जलने (बीसी<sub>ff</sub>) और जैव ईंधन के जलने (बीसी<sub>bb</sub>) से होने वाले योगदान को मापने के लिए एथैलोमीटर मॉडल का इस्तेमाल किया गया। नतीजों से बीसी सांद्रता में साफ मौसमी और रोजाना बदलाव का पता चलता है। सबसे ज्यादा सांद्रता सर्दियों में (जनवरी में ~11 माइक्रोग्राम/मीटर<sup>3</sup>), ज्यादा उत्सर्जन और खराब मौसम की वजह से देखा गया, जबकि सबसे कम स्तर मानसून के दौरान (~1-1.5 माइक्रोग्राम/मीटर<sup>3</sup>) बारिश और अच्छे वायुमंडलीय मिश्रण की वजह से देखा गया। मानसून के बाद के समय में बीसी सांद्रता फिर से बढ़ गया (~6-7 माइक्रोग्राम/मीटर<sup>3</sup>), जिसका ज्यादातर असर इलाके में कृषि अवशेष जलाने से हुआ। सुबह (07:00-09:00) और शाम (19:00-22:00) के समय शिखर के साथ एक साफ स्पष्ट द्विमोडल दैनिक स्वरूप देखा गया, जो यातायात उत्सर्जन और घरेलू ईंधन जलने से जुड़ा था। सीमा परत की ऊंचाई कम होने के कारण रात के समय सांद्रता दिन के दौरान के मान की तुलना में लगातार अधिक थी। स्रोत के बंटवारे से पता चलता है कि जीवाश्म ईंधन के जलने से बीसी उत्सर्जन सबसे ज्यादा होता है, जो कुल बीसी का 60-85% हिस्सा है, जबकि जैव ईंधन के जलने से 15-40% हिस्सा होता है, जिसका असर सर्दियों और मानसून के बाद के मौसम में ज्यादा होता है। ये नतीजे बताते हैं कि मध्य आईजीपी में बीसी स्तर को नियंत्रण करने में शहरी जीवाश्म ईंधन उत्सर्जन का अहम रोल है, और हवा की गुणवत्ता सुधारने और क्षेत्र में मौसम के असर को कम करने के लिए लक्षित शमन रणनीति की ज़रूरत पर जोर देते हैं।

**सूचक शब्द** - ब्लैक कार्बन, जीवाश्म ईंधन, जैव ईंधन, भारत-गंगा का मैदान



# Variability and Source segregation of Black Carbon in Varanasi, an Urban Area in the Central Indo-Gangetic Plain

Prashant Kumar Chauhan, Ramakant Tiwari, Abhay Kumar Singh  
Department of Physics, Banaras Hindu University, Varanasi, Uttar Pradesh, India – 221005  
Corresponding Author Email\*: [singhak@bhu.ac.in](mailto:singhak@bhu.ac.in)

Received On: 19 March 2026; Final Revision: 04 April 2026; Accepted On: 04 April 2026  
Published Online First: 25 April 2026

## ABSTRACT

Black carbon (BC) is a specific light-absorbing aerosol that has a significant impact on the region's air quality, human health, and climate. In this study, the contribution to the time shift and source of BC in Varanasi, a densely populated urban centre in the Indo-Gangetic Plain (IGP) of central India, was examined. Continuous measurements were made from December 2020 to November 2021 using a seven-wavelength aethalometer (AE-33), timed to one minute. The ethylometer model was used to measure the contribution from fossil fuel burning (BCFF) and biofuel burning (BCBB). The results reveal clear seasonal and diurnal variations in BC concentrations. The highest concentrations were observed in winter ( $\sim 11 \mu\text{g} / \text{m}^3$  in January) due to higher emissions and poor weather, while the lowest levels were observed during monsoon ( $\sim 1-1.5 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ) due to rainfall and good atmospheric mixing. In the post-monsoon period, the BC concentration again increased ( $\sim 6-7 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ), largely due to agricultural residue burning in the area. A clear bimodal diurnal pattern was observed, with peaks in the morning (07:00-09:00) and evening (19:00-22:00), associated with traffic emissions and household fuel burning. Because of the low boundary layer height, night-time concentrations were consistently higher than daytime values. Source sharing shows that BC emissions from burning of fossil fuels are the highest, accounting for 60-85% of the total BC, while biofuel burning accounts for 15-40%, with a higher impact in winter and post-monsoon season. These results suggest that urban fossil fuel emissions play an important role in controlling BC levels in the central IGP, and emphasise the need for targeted mitigation strategies to improve air quality and reduce weather impacts in the region.

**Keywords:** Black carbon, fossil fuels, biofuels, Indo-Gangetic Plain

## लेखक परिचय

### प्रशांत कुमार चौहान

भारत की बनारस हिंदू यूनिवर्सिटी (बीएचयू) में एक उभरते हुए वायुमंडलीय वैज्ञानिक और भौतिकी में शोधकर्ता हैं। उनकी शोध वायुमंडलीय एरोसोल और इसके जलवायु पर पड़ने वाले प्रभाव पर है, जिसमें एरोसोल-जलवायु अंतःक्रिया, ब्लैक कार्बन की परिवर्तनशीलता, रेडिएटिव फोर्सिंग और सिंधु-गंगा मैदान की हवा की गुणवत्ता शामिल है जो दुनिया भर में सबसे प्रदूषित और जलवायु के प्रति संवेदनशील क्षेत्रों में से एक है। पीएचडी कार्यक्रम में शामिल होने से पहले, उन्होंने जी.बी. पंत नेशनल इंस्टीट्यूट ऑफ हिमालयन एनवायरनमेंट में प्रोजेक्ट फेलो के तौर पर काम किया, जहाँ उन्होंने उत्तर-पश्चिमी हिमालयी क्षेत्रों में एरोसोल जलवायु विज्ञान पर इसरो द्वारा वित्त पोषित शोध में योगदान दिया। उन्होंने एटमोस्फेरिक पॉल्यूशन रिसर्च, फिजिक्स एंड केमिस्ट्री ऑफ द अर्थ, और फ्रंटियर्स इन सस्टेनेबल सिटीज सहित जाने-माने अंतर्राष्ट्रीय पत्रिकाओं में कई विशेषज्ञ-समीक्षित प्रकाशन लिखे हैं। वह राष्ट्रीय और अंतर्राष्ट्रीय सम्मेलन, खासकर यूरोपियन एरोसोल कॉन्फ्रेंस (फिनलैंड) में प्रस्तुतीकरण के ज़रिए वैज्ञानिक समुदायों के साथ भी सक्रिय रूप से जुड़े रहे हैं, साथ ही एरोसोल माप और जलवायु पर पड़ने वाले प्रभाव पर खास प्रशिक्षण कार्यक्रम भी किए हैं। मशहूर सीएसआईआर-यूजीसी जूनियर रिसर्च फेलोशिप (AIR-118) पाने वाले प्रशांत, वायु प्रदूषण और जलवायु परिवर्तन की वैज्ञानिक समझ को आगे बढ़ाने के लिए प्रतिबद्ध हैं। उनकी दीर्घकालिक दृष्टि, प्रभावी शोध और वैश्विक सहयोग के ज़रिए सतत पर्यावरण नीति और बेहतर वायु गुणवत्ता में योगदान देना है।



प्रशांत कुमार चौहान

### प्रो. अभय कुमार सिंह

अपने शानदार पेशेवर करियर के दौरान प्रो. अभय कुमार सिंह ने शिक्षण और अनुसंधान के क्षेत्र में बेहतरीन योगदान दिया है। वे कम अक्षांशों पर ऊपरी वायुमंडल के श्लेस वेदरश; अंतरिक्ष मौसमद्वय अध्ययन और सिंधु-गंगा बेसिन के ऊपर एरोसोल की विशेषताओं के क्षेत्र में अपने कई महत्वपूर्ण और उत्कृष्ट योगदानों के लिए जाने जाते हैं। वे फसल अवशेष जलाने से उत्पन्न एरोसोल और पूरे सिंधु-गंगा बेसिन क्षेत्र में उनके लंबी दूरी के परिवहन से जुड़े मुद्दों को सुलझाने में सफल रहे हैं। जिसने वैज्ञानिक समुदाय की सोच पर गहरा प्रभाव डाला है। **BATAL** अभियानों की एक श्रृंखला के माध्यम से एशियाई ट्रोपोस्फीयर एरोसोल; अटलद्वय परत में प्रदूषित एरोसोल की प्रकृति निर्माण और परिवहन पर किए गए उनके अध्ययन ने अटल की कई अनसुलझी विशेषताओं को उजागर किया है। सूर्य ग्रहण पर किए गए उनके अध्ययन जिसका विश्लेषण पहली बार आठ अलग-अलग शहरों में किया गया। ने सौर विकिरण और सतह पर मौजूद ओजोन में महत्वपूर्ण कमी। मौसम संबंधी मापदंडों में गतिशील परिवर्तन और साथ ही वायुमंडलीय गुरुत्वाकर्षण तरंगों द्वारा आयनमंडल में उत्पन्न टीआईडी दोलनों को दर्शाया। उनके कार्यों का उल्लेख पुस्तकों। समीक्षाओं और शोध पत्रों में व्यापक रूप से किया गया है। उनका एच.सूचकांक 39 और i10-सूचकांक 109 है, तथा उनके शोध पत्रों को कुल ४६११ बार उद्धृत किया गया है। प्रो. सिंह ने ३०० से अधिक शोध पत्र प्रकाशित किए हैं, १६ पीएचडी छात्रों का मार्गदर्शन किया है, और ४ करोड़ रुपये की लागत वाली १६ अनुसंधान परियोजनाओं को सफलतापूर्वक पूरा किया है। उन्होंने अकेले ही 'एटमोस्फेरिक रिसर्च लैब' (वायुमंडलीय अनुसंधान प्रयोगशाला) की स्थापना की। जिसे इसरो द्वारा मान्यता प्राप्त है। उन्होंने स्वीडन के उमेआ विश्वविद्यालय में एक वर्ष तक 'बॉयज़कास्ट फेलो' के रूप में कार्य किया। प्रो. सिंह ने कई देशों का दौरा किया। जिनमें नीदरलैंड। इटली। स्वीडन। हंगरी। जापान। दक्षिण कोरिया। तथा अमेरिका के न्यू ऑरलियन्स, पासाडेना और बोस्टन शामिल हैं। उनमें एक प्रभावशाली वैज्ञानिक दृष्टिकोण। प्रयोगात्मक कौशल। उच्च गुणवत्ता वाला शोध कार्य और विशिष्ट शैक्षणिक क्षमताएँ हैं।



प्रो. अभय कुमार सिंह

## 1. प्रस्तावना

**ब्लैक कार्बन** (बीसी) वायुमंडलीय एरोसोल के सबसे ज़रूरी प्रकाश अवशोषित करने वाले घटकों में से एक है और यह मुख्य रूप से कार्बोनिक ईंधन के अधूरे जलने से बनता है। मुख्य उत्सर्जन स्रोत में गाड़ियों और औद्योगिक गतिविधि से जीवाश्म ईंधन का जलना, घरों में जैव ईंधन का इस्तेमाल, कोयला जलाना, और जंगल की आग और खेती के बचे हुए जैव ईंधन को खुले में जलाना शामिल है [1, 2]। एक बड़ी वर्णक्रमीय श्रेणी में सौर विकिरण को अवशोषित करने की अपनी मजबूत क्षमता के कारण, बीसी पृथ्वी के विकिरण संतुलन पर काफी असर डालता है और इसे कार्बन डाइऑक्साइड के बाद सबसे ज़रूरी अल्पकालिक जलवायु बलों में से एक माना जाता है [3]। अपने जलवायु पर असर के अतिरिक्त, बीसी वायुमंडलीय प्रदूषण में भी काफी योगदान देता है और इसके स्वास्थ्य पर गंभीर प्रभाव पड़ते हैं, जिसमें सांस और हृदय की रक्तवाहिकाओं संबंधी बीमारियां शामिल हैं [4]। बीसी कण ज्यादातर महीन पार्टिकुलेट मैटर (पीएम<sub>2.5</sub>) से जुड़े होते हैं और आम तौर पर वायुमंडलीय जीवनकाल कई दिनों से लेकर लगभग कुछ हफ्ते तक होता है, जिससे वे क्षेत्रीय और महादेशीय स्तर पर लंबी दूरी तक परिवहित हो सकते हैं [1]। उत्सर्जन के बाद, बीसी कण संघनन और जमाव जैसी प्रक्रिया के ज़रिए सल्फेट्स, नाइट्रेट्स और जैविक एरोसोल जैसे अन्य वायुमंडलीय घटकों के साथ प्रतिक्रिया कर सकते हैं। ये एजिंग प्रक्रियाएं अंदरूनी मिश्रित कणों का कारण बनती हैं जो एरोसोल के सूक्ष्म-भौतिक और प्रकाशीय गुणों को प्रभावित करती हैं, जिससे विकिरण को अवशोषित करने और बिखरने की उनकी क्षमता के साथ-साथ उनके बादल संघनन नाभिकीय गतिविधि पर भी असर पड़ता है [5, 6]। बीसी द्वारा सौर विकिरण के अवशोषण से वायुमंडलीय तापन हो सकता है, जबकि साथ ही पृथ्वी की सतह तक पहुंचने वाले सौर विकिरण में कमी आ सकती है, जिससे वायुमंडलीय स्थिरता, बादल निर्माण और क्षेत्रीय जल विज्ञान चक्र पर असर पड़ता है [2]।

आईजीपी को बीसी उत्सर्जन के वैश्विक हॉटस्पॉट में से एक माना जाता है, क्योंकि यहाँ आबादी का घनत्व ज्यादा है, शहरीकरण तेजी से हो रहा है, जीवाश्म ईंधन की खपत बहुत ज्यादा है, और जैव ईंधन जलाने की गतिविधियाँ बहुत ज्यादा होती हैं [7]। मध्य आईजीपी में मौजूद शहरी केंद्र, जैसे वाराणसी, में अक्सर गाड़ियों से होने वाले तेज उत्सर्जन, घरों में आग लगने, औद्योगिक गतिविधियों और मौसमी कृषि अवशेष जलाने की वजह से बीसी का स्तर बढ़ जाता है। इसके अलावा, मौसम की स्थिति जैसे कि सीमा परत की कम ऊँचाई, मंद हवाएँ, और सर्दियों में तापमान में बदलाव, सतह के पास बीसी और दूसरे बारीक कणों के जमा होने को बढ़ावा देते हैं, जिससे हवा में गंभीर प्रदूषण होता है [8,9]। अतः, इस क्षेत्र में बीसी की सामयिक परिवर्तनशीलता और स्रोतों को समझना, वायु गुणवत्ता प्रबंधन में सुधार और इसके जलवायु प्रभावों का आकलन करने हेतु आवश्यक है।

बीसी का स्रोत आबंटन, मुख्य उत्सर्जन स्रोतों की पहचान करने और देखी गई सांद्रता में उनके सापेक्षिक योगदान को मापने में अहम भूमिका निभाता है। ऐसी जानकारी असरदार उत्सर्जन नियंत्रण रणनीति बनाने और वायुमंडलीय मॉडल में एरोसोल स्रोत के निरूपण को बेहतर बनाने के लिए ज़रूरी है। बीसी स्रोत आबंटन के लिए कई तरीके विकसित किए गए हैं, जिनमें प्रापक मॉडल, उत्सर्जन इन्वेंट्री विश्लेषण, रेडियोकार्बन (<sup>14</sup>C) माप, और एरोसोल अवशोषण की तरंगदैर्घ्य निर्भरता पर आधारित प्रकाशीय विधियाँ शामिल हैं [10, 11]।

इन विधियों में, एथैलोमीटर मॉडल का व्यापक रूप से उपयोग किया गया है क्योंकि इसमें विभिन्न दहन स्रोतों के बीच अंतर करने के लिए एरोसोल प्रकाश अवशोषण की वर्णक्रमीय निर्भरता का उपयोग करने की क्षमता है। यह मॉडल एल्ज़ॉर्ज़ान एंगस्ट्रॉम एक्सपोनेंट (एएई) का इस्तेमाल करता है, जो एरोसोल अवशोषण की तरंगदैर्घ्य निर्भरता को बताता है। जीवाश्म ईंधन के जलने से निकलने वाला बीसी आम तौर पर एक के करीब एएई दिखाता है, जबकि जैव ईंधन जलने से निकलने वाला उत्सर्जन आम तौर पर ज्यादा एएई वैल्यू दिखाता है, क्योंकि इसमें प्रकाश अवशोषित करने वाले जैविक यौगिक होते हैं, जिन्हें आम तौर पर ब्राउन कार्बन [10, 12] कहा जाता है। इस सिद्धांत को लागू करके, एथैलोमीटर मॉडल कुल बीसी को दो मुख्य हिस्सों में

अलग करता है: जीवाश्म ईंधन के जलने से निकलने वाला बीसी (बीसी<sub>g</sub>) और जैव ईंधन जलने से निकलने वाला बीसी (बीसी<sub>b</sub>)। इस तकनीक का इस्तेमाल शहरी और क्षेत्रीय माहौल में बीसी स्रोत के समय और मौसम के हिसाब से होने वाले बदलाव की जांच करने के लिए बड़े पैमाने पर किया गया है।

अतः, एरोसोल-जलवायु अंतःक्रियाओं की हमारी समझ को सुदृढ़ करने और वायु प्रदूषण व जलवायु प्रभावों को घटाने हेतु प्रभावी योजनाएं विकसित करने के लिए बीसी विशेषताओं और स्रोत योगदान की विस्तृत जाँच-पड़ताल महत्वपूर्ण है, विशेषकर आईजीपी जैसे अत्यंत प्रदूषित क्षेत्रों में।

## 2. स्थल विवरण और मौसम संबंधी स्थितियाँ

यह अध्ययन बनारस हिंदू यूनिवर्सिटी (बीएचयू), वाराणसी (25.27° N, 82.98° E; समुद्र तल से लगभग 80 मीटर ऊपर) के भौतिकी विभाग में की गई थी। वाराणसी, मध्य आईजीपी में गंगा नदी के किनारे बसा है और लगभग 112 वर्ग किलोमीटर के क्षेत्रफल में फैला है। यह धार्मिक रूप से एक महत्वपूर्ण और घनी आबादी वाला शहरी केंद्र है, जिसकी आबादी का घनत्व भारत की जनगणना (2011) के अनुसार लगभग 2399 व्यक्ति प्रति वर्ग किलोमीटर है। शहर कई छोटे और मध्यम स्तर के उद्योगों से घिरा हुआ है, जो पूरे साल तुलनात्मक रूप से ज्यादा एरोसोल की मात्रा में योगदान करते हैं [13]।

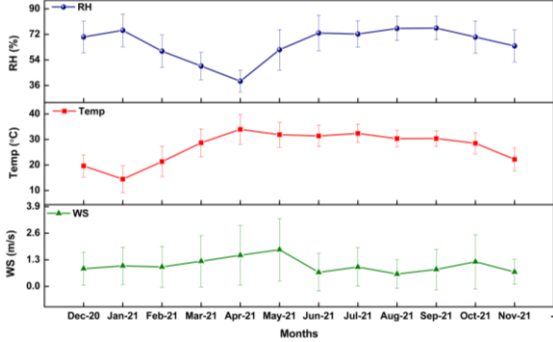
इस क्षेत्र में वायु प्रदूषण में मुख्य योगदान देने वालों में सड़क की धूल से पैदा होने वाले पार्टिकुलेट मैटर, घर में खाना पकाने, प्रकाश और तापन गतिविधि से निकलने वाले उत्सर्जन और खुले में कचरा जलाना शामिल हैं। गाड़ियों से होने वाला उत्सर्जन भी एक अहम भूमिका निभाता है, क्योंकि वाराणसी में पंजीकृत गाड़ियों की कुल संख्या 7,77,000 से ज्यादा है, जिससे जीवाश्म ईंधन का जलना वायुमंडलीय प्रदूषण का एक बड़ा स्रोत बन जाता है [14]।

मध्य आईजीपी में होने की वजह से, वाराणसी में चार अलग-अलग मौसम होते हैं: शीत (दिसंबर- जनवरी- फरवरी), ग्रीष्म (मार्च-अप्रैल-मई), वर्षा-ऋतु (जून-जुलाई-अगस्त-सितंबर), और वर्षा-ऋतु के बाद (अक्टूबर-नवंबर)। यह वर्गीकरण भारतीय मौसम विज्ञान विभाग और आईजीपी के पूर्व अध्ययनों के अनुरूप है [13, 17]। इन मौसमी बदलावों की वजह से उत्सर्जन स्रोत और मौजूदा मौसम की स्थितियों में अंतर के कारण एरोसोल की मात्रा में काफी अंतर आ जाता है [9]। उदाहरण के लिए, ग्रीष्म ऋतु में, एरोसोल की मात्रा में अक्सर आस-पास के सूखे और अर्ध-शुष्क क्षेत्र से लंबी दूरी तक लाए गए बड़े कण ज्यादा होते हैं [13]। इसके उलट, सर्दियों में आमतौर पर स्थिर वायुमंडलीय स्थितियाँ होती हैं जो घना कोहरा बनने में मदद करती हैं, जिससे वायुमंडलीय दृश्यता कम हो जाती है। वर्षा-ऋतु के समय, वाराणसी में सालाना बारिश का लगभग 71% हिस्सा होता है, जो आर्द्र मार्जन प्रक्रिया के ज़रिए एरोसोल की सांद्रता पर काफी असर डालता है। इसके अलावा, इस मौसम में इस क्षेत्र में समुद्री एरोसोल का असर भी हो सकता है [15,16]।

हवा का तापमान (Temp), सापेक्षिक आर्द्रता (RH), और हवा की गति (WS) जैसे मौसम के मापक, केंद्रीय प्रदूषण नियंत्रण बोर्ड (सीपीसीबी) के चलाए जा रहे अनुश्रवण केंद्र से लिए गए थे। अध्ययन क्षेत्र (बीएचयू) और सीपीसीबी स्टेशन (अर्दली बाज़ार) के बीच की दूरी लगभग 5 किमी है, जो एक ही शहरी सूक्ष्म वातावरण में आता है। वाराणसी जैसे मध्यम आकार के शहरों में, तापमान, सापेक्ष आर्द्रता और हवा की गति जैसे बड़े (सिनोप्टिक-स्केल) मौसम संबंधी पैरामीटर इस दूरी पर महत्वपूर्ण रूप से भिन्न नहीं होते हैं। इसके अतिरिक्त, सीपीसीबी स्टेशन एक मानकीकृत और गुणवत्ता-नियंत्रित निगरानी नेटवर्क का हिस्सा है, जहाँ डेटा को नियमित रूप से कैलिब्रेट और सत्यापित किया जाता है। इसी कारण से, कई पिछले अध्ययनों ने भी इस क्षेत्र के लिए सीपीसीबी डेटा का उपयोग किया है [9, 13]।

चित्र 1 अध्ययन के समय के दौरान सापेक्षिक आर्द्रता (RH), तापमान, और हवा की गति (WS) जैसे मौसम के मुख्य मापक में हर महीने होने वाले बदलाव को दिखाता है। सालाना औसत तापमान लगभग 27.09 ± 6.14 °सेल्सियस था। जनवरी में सबसे कम औसत तापमान लगभग 15 °सेल्सियस रिकॉर्ड किया गया, जिससे यह साल का सबसे ठंडा महीना बन गया। इसके उलट,

ग्रीष्म ऋतु शुरू होने की वजह से अप्रैल (~34 °सेल्सियस) में सबसे ज्यादा तापमान देखा गया। कुल मिलाकर, जनवरी से अप्रैल तक तापमान में धीरे-धीरे बढ़ोतरी हुई, जिसके बाद अप्रैल से नवंबर तक इसमें कमी आई। सालाना औसत सापेक्षिक आर्द्रता (RH) लगभग  $66 \pm 12\%$  थी, जो अप्रैल में कम से कम 39% से सितंबर में ज्यादा से ज्यादा 76% तक थी। पूरे साल हवा की गति में भी काफी बदलाव दिखा। सबसे ज्यादा हवा की गति (~1.8 मीटर/सेकंड) मई में दर्ज की गई, जबकि सबसे कम हवा की गति (~0.6 मीटर/सेकंड) नवंबर में हुई, जिससे सालाना औसत हवा की गति  $1.03 \pm 0.35$  मीटर/सेकंड रही।



चित्र 1: अध्ययन अवधि के दौरान वाराणसी में (ए) सापेक्ष आर्द्रता (%), (बी) तापमान (°सेल्सियस), और (सी) हवा की गति (मीटर/सेकंड) का मासिक औसत परिवर्तन।

### 3. ब्लैक कार्बन मापन और स्रोत आवंटन

ब्लैक कार्बन (बीसी) द्रव्यमान सांद्रता को 2 लीटर प्रति मिनट की प्रवाह दर पर संचालित सात-तरंगदैर्घ्य एथैलोमीटर (ईई-33, मैगी साइंटिफिक) का उपयोग करके 1 मिनट के समय अंतराल के साथ लगातार मापा गया। यह उपकरण बीयर-लेम्बर्ट सिद्धांत के आधार पर काम करता है और इसमें दोहरी स्थान तकनीक शामिल है ताकि माप के दौरान फिल्टर लोडिंग के असर को अपने आप ठीक किया जा सके। यह उपकरण भौतिकी विभाग के सबसे ऊपरी मंजिल पर मौजूद एक कमरे में लगाया गया था। नमूना प्रवेशिका को भवन की छत से लगभग 3 मीटर ऊपर रखा गया था, जो खुद ज़मीन से लगभग 10 मीटर ऊपर है, जिससे उपकरण आस-पास की हवा का सैंपल ले सके।

ईई-33 एथैलोमीटर सात तरंग दैर्घ्य (370, 470, 520, 590, 660, 880, और 950 नैनोमीटर) पर फिल्टर टेप पर जमा कणों के माध्यम से प्रकाश के क्षीणन को मापता है, जो पराबैंगनी से लेकर निकट-अवरक्त वर्णक्रमीय क्षेत्र तक फैला होता है। बहु तरंगदैर्घ्य माप से एरोसोल अवशोषण की वर्णक्रमीय निर्भरता का पता चलता है और जीवाश्म ईंधन के जलने और जैव ईंधन जलने से निकलने वाले बीसी के स्रोत का बंटवारा करने में मदद मिलती है [18]। जैव ईंधन जलने से निकलने वाले एरोसोल आमतौर पर पराबैंगनी क्षेत्र में ज्यादा अवशोषण दिखाते हैं, जबकि जीवाश्म ईंधन के जलने से निकलने वाले बीसी निकट-अवरक्त क्षेत्र में, खासकर 880 नैनोमीटर पर, ज्यादा अवशोषण दिखाते हैं [19]। हालांकि प्रकाश क्षीणन को सभी सात तरंग दैर्घ्य पर मापा जाता है, बीसी द्रव्यमान सांद्रता आमतौर पर 880 नैनोमीटर पर अवशोषण से प्राप्त होती है, जहां अन्य एरोसोल घटकों से हस्तक्षेप न्यूनतम होता है। खनिज धूल और जैविक एरोसोल छोटी तरंग दैर्घ्य (स्पेक्ट्रम के नीले और हरे भाग) पर अधिक तीव्रता से अवशोषित होते हैं, लेकिन निकट-अवरक्त क्षेत्र में उनका अवशोषण काफी क्षीण हो जाता है। इस प्रकार, 880 नैनोमीटर पर अवशोषण मुख्य रूप से बीसी को समर्पित है, जो इसे इसकी सांद्रता मापने के लिए एक उपयुक्त तरंगदैर्घ्य बनाता है।

मापे गए अवशोषण गुणांक को द्रव्यमान सांद्रता में बदलने के लिए, एक उपयुक्त द्रव्यमान अवशोषण क्रॉस-सेक्शन (एमएसी) का उपयोग किया जाता है [20]। इस अध्ययन में उपयोग किए गए निर्माता-अनुशंसित एमएसी मान क्रमशः 370, 470, 520, 590, 660, 880, और 950 नैनोमीटर तरंग दैर्घ्य पर 18.47, 14.54, 13.14, 11.58, 10.35, 7.77, और 7.19 मीटर<sup>2</sup> प्रति ग्राम हैं [21,

22]। एरोसोल अवशोषण गुणांक ( $b_{abs}$ ) और बीसी द्रव्यमान सांद्रता के बीच संबंध इस प्रकार है:

$$b_{abs}(\lambda) = BC(\lambda) \times MAC(\lambda)$$

बीसी के प्रमुख उत्सर्जन स्रोतों की पहचान करने के लिए, जीवाश्म ईंधन दहन (बीसी<sub>ff</sub>) और जैव ईंधन दहन (बीसी<sub>bb</sub>) से योगदान का अनुमान लगाने के लिए एथैलोमीटर मॉडल का उपयोग किया गया। इस मॉडल के अनुसार, एक निश्चित तरंगदैर्घ्य पर कुल एरोसोल अवशोषण इन दो स्रोतों के अवशोषण योगदान का योग होता है [23]:

$$b_{abs}(\lambda) = b_{abs}(\lambda, ff) + b_{abs}(\lambda, bb)$$

जहां  $b_{abs}(\lambda, ff)$  और  $b_{abs}(\lambda, bb)$  क्रमशः जीवाश्म ईंधन दहन और जैव ईंधन जलने से जुड़े अवशोषण गुणांक का प्रतिनिधित्व करते हैं।

एंस्ट्रॉम के शक्ति नियम के अनुसार, जीवाश्म ईंधन और जैव ईंधन जलाने वाले स्रोतों के लिए एरोसोल अवशोषण की वर्णक्रमीय निर्भरता को इस प्रकार व्यक्त किया जा सकता है:

$$\frac{b_{abs}(\lambda_1, ff)}{b_{abs}(\lambda_2, ff)} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-\alpha_{ff}}$$

$$\frac{b_{abs}(\lambda_1, bb)}{b_{abs}(\lambda_2, bb)} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-\alpha_{bb}}$$

जहां  $\alpha_{ff}$  और  $\alpha_{bb}$  अवशोषण एंस्ट्रॉम घातांक हैं जो क्रमशः जीवाश्म ईंधन और जैव ईंधन जलने वाले स्रोतों का प्रतिनिधित्व करते हैं।

इन संबंधों का उपयोग करके, कुल बीसी सांद्रता में जीवाश्म ईंधन दहन (बीसी<sub>ff</sub>) और जैव ईंधन दहन (बीसी<sub>bb</sub>) के सापेक्ष योगदान का अनुमान लगाया गया।

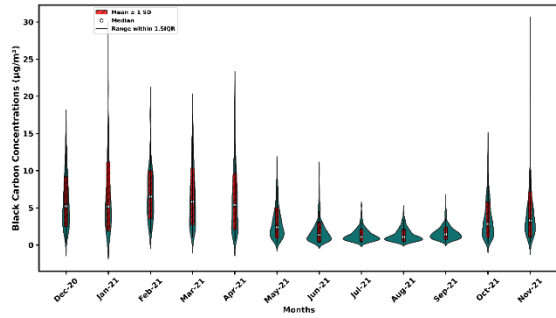
$$BC = BC_{ff} + BC_{bb}$$

इस अध्ययन में, विभाजन के लिए प्रयुक्त  $\alpha_{ff}$  और  $\alpha_{bb}$  मान क्रमशः 1 और 2 हैं। जैव ईंधन दहन अनुपात की गणना के लिए उपयोग किया जाने वाला 'एथैलोमीटर मॉडल'  $\alpha_{bb}$  मान के प्रति संवेदनशील है और इसलिए इसका मान विशिष्ट स्थान और स्रोत पर निर्भर करता है। वर्तमान परिदृश्य में, एरोसोल स्रोत क्षेत्र एक बड़े भौगोलिक क्षेत्र में फैला हुआ है, और अनुश्रवण केंद्र तक पहुंचने से पहले एरोसोल बहुत अधिक मिश्रण और एजिंग से गुजरते हैं, इसलिए,  $\alpha_{bb}$  का औसत मान 2 निर्धारित किया गया है। आईजीपी क्षेत्र पर पूर्व अध्ययनों में एंस्ट्रॉम घातांक के समान मानों का उपयोग किया गया है [24, 25]।

### 4. परिणाम और विवेचना

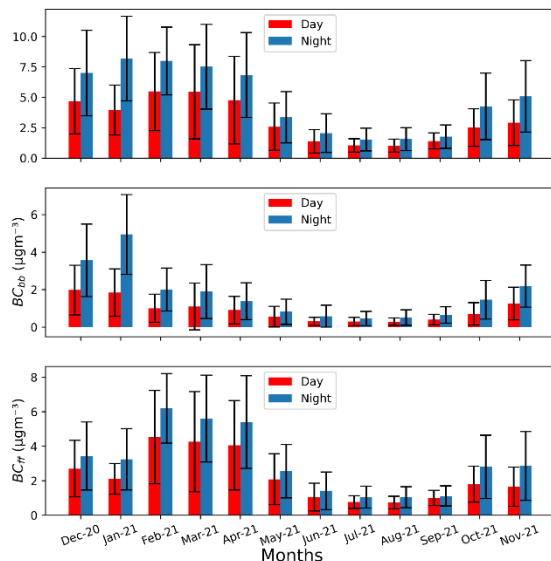
चित्र 2 में दिसंबर 2020 से नवंबर 2021 तक वाराणसी में ब्लैक कार्बन (बीसी) की सांद्रता में मासिक परिवर्तन का वायलिन प्लॉट दिखाया गया है। बीच का लाल भाग मासिक औसत के चारों ओर की पूरी सीमा को उजागर करता है, जिससे पता चलता है कि अधिकांश डेटा बिंदु माध्य के एक मानक विचलन के भीतर कहीं एकत्रित होते हैं। सफेद वृत्त माध्यिका को दर्शाता है, जो महीने की केंद्रीय प्रवृत्ति को प्रदर्शित करता है। ऊपर और नीचे फैली पतली काली रेखाएं डेटा का संपूर्ण फैलाव दर्शाती हैं, जो निचली से ऊपरी सीमा तक की रेंज को कवर करती हैं, जिससे यह स्पष्ट करने में मदद मिलती है कि पूरे महीने सांद्रता में कितना उतार-चढ़ाव होता है। वायलिन प्लॉट प्रत्येक माह के लिए 1.5 IQR के भीतर वितरण, माध्यिका, माध्य  $\pm 1$  मानक विचलन, और परिवर्तनशीलता को दर्शाता है, जो बीसी सांद्रता में स्पष्ट मौसमी भिन्नता को उजागर करता है। शीत ऋतु के दौरान सबसे अधिक बीसी स्तर देखे गए, जनवरी में चरम पर (~11 माइक्रोग्राम/मीटर<sup>3</sup>)

और उसके बाद फरवरी और मार्च में (~10 माइक्रोग्राम/मीटर<sup>3</sup>)। ये उच्च सांद्रता मुख्य रूप से बढ़े हुए वाहन उत्सर्जन, जीवाश्म ईंधन दहन, जैव ईंधन जलाने और प्रतिकूल मौसम संबंधी स्थितियों जैसे उथली सीमा परत की ऊंचाई और मंद हवाओं के कारण होती है जो प्रदूषक फैलाव को सीमित करती हैं। मार्च-अप्रैल के दौरान, ब्लैक कार्बन (बीसी) की सांद्रता अपेक्षाकृत अधिक रहती है, लेकिन तेज हवाओं और बेहतर वायुमंडलीय मिश्रण के कारण थोड़ी कम होने लगती है। वर्षा-ऋतु के मौसम (जून-सितंबर) के दौरान बीसी में उल्लेखनीय कमी देखी जाती है, जुलाई और अगस्त में सबसे कम मान (~1-1.5 माइक्रोग्राम/मीटर<sup>3</sup>) होते हैं, मुख्य रूप से वर्षा और आर्द्र निष्कासन प्रक्रियाओं के कारण। वर्षा-ऋतु के बाद के मौसम में, कृषि अवशेषों के जलने और स्थिर मौसम के कारण अक्टूबर-नवंबर में बीसी का स्तर फिर से बढ़ जाता है (~6-7 माइक्रोग्राम/मीटर<sup>3</sup>)। बीसी के स्तर में सर्दियों में सबसे अधिक और मानसून में सबसे कम स्तर के ऐसे ही मौसमी पैटर्न आईजीपी क्षेत्र में पिछले अध्ययनों में भी दर्ज किए गए हैं [8, 26]।



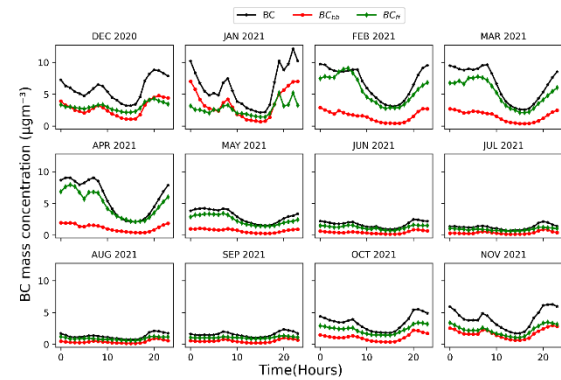
चित्र 2: बीसी सांद्रता (माइक्रोग्राम/मीटर<sup>3</sup>) के मासिक औसत परिवर्तन का वायलिन आरेख।

चित्र 3 वाराणसी में बीसी, बीसी<sub>bb</sub> (जैव ईंधन दहन), और बीसी<sub>ff</sub> (जीवाश्म ईंधन दहन) के मासिक दिन और रात के बदलावों को दर्शाता है। यह स्पष्ट रूप से देखा जाता है कि पूरे वर्ष रात में बीसी की सांद्रता दिन की तुलना में अधिक होती है। उदाहरण के लिए, सर्दियों के दौरान, रात में बीसी का स्तर लगभग 7-8 माइक्रोग्राम/मीटर<sup>3</sup> तक पहुंच जाता है, जबकि दिन में लगभग 4-5 माइक्रोग्राम/मीटर<sup>3</sup> के आसपास रहता है। यह अंतर मुख्य रूप से सीमा परत गतिकी के कारण है। रात में, सीमा परत उथली और स्थिर हो जाती है, जो प्रदूषक फैलाव को प्रतिबंधित करती है और सतह के पास बीसी के संचय की ओर ले जाती है। इसके विपरीत, दिन के दौरान, सौर तापन वायुमंडलीय मिश्रण को बढ़ाता है, जो प्रदूषकों को फैलाने में मदद करता है। दिल्ली, कानपुर और लखनऊ जैसे शहरों में भी रात में बीसी की ज्यादा सांद्रता के ऐसे ही पैटर्न देखे गए हैं [8, 27]।



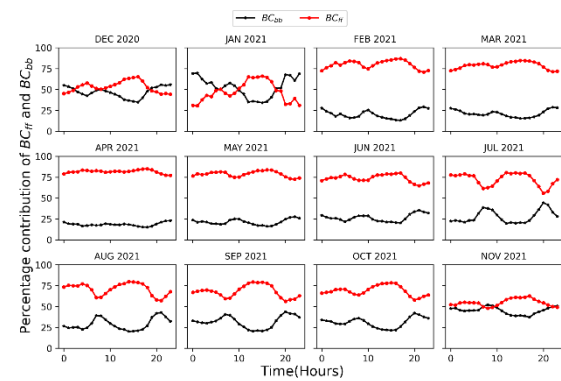
चित्र 3: दिन और रात के योगदान के साथ बीसी, बीसी<sub>ff</sub>, और बीसी<sub>bb</sub> में मासिक परिवर्तन।

चित्र 4 वाराणसी में प्रत्येक माह बीसी, बीसी<sub>bb</sub>, और बीसी<sub>ff</sub> का दैनिक परिवर्तन दर्शाती है। अधिकांश महीनों के दौरान एक स्पष्ट ट्रिमोडल पैटर्न देखा जाता है, जिसमें सुबह (07:00-09:00) और शाम (19:00-22:00) में दो प्रमुख शिखर होते हैं। ये शिखर मुख्य रूप से व्यस्त समय के वाहनों के उत्सर्जन, घरेलू ईंधन जलाने और एक उथली सीमा परत से जुड़े होते हैं जो प्रदूषक फैलाव को सीमित करती है। सबसे कम ब्लैक कार्बन सांद्रता दोपहर (12:00-15:00) के दौरान होती है, जब सीमा परत की ऊंचाई बढ़ती है, जिससे प्रदूषकों का बेहतर फैलाव होता है। अधिकांश महीनों में, बीसी<sub>ff</sub> कुल बीसी पर हावी रहता है, यह दर्शाता है कि जीवाश्म ईंधन का दहन प्रमुख स्रोत है, जबकि बीसी<sub>bb</sub> सुबह जल्दी और रात के घंटों के दौरान अधिक योगदान देता है। इसी तरह के द्वि-मोडल दैनिक पैटर्न आईजीपी क्षेत्र में भी बताए गए हैं [26]।



चित्र 4: बीसी, बीसी<sub>ff</sub>, और बीसी<sub>bb</sub> की द्रव्यमान सांद्रता में महीनेवार दैनिक भिन्नता।

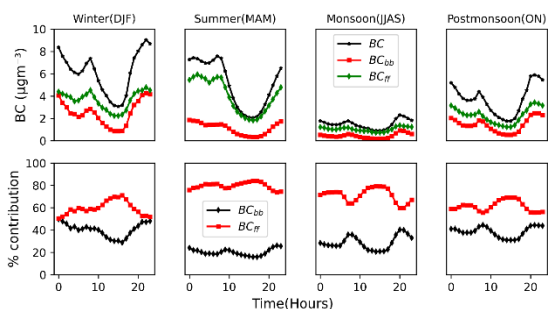
चित्र 5 वाराणसी में कुल ब्लैक कार्बन में जैव ईंधन दहन (बीसी<sub>bb</sub>) और जीवाश्म ईंधन दहन (बीसी<sub>ff</sub>) के प्रति घंटा प्रतिशत योगदान को दर्शाती है। परिणाम संकेत देते हैं कि जीवाश्म ईंधन दहन प्रमुख स्रोत है, जो कुल बीसी का लगभग 60-85% योगदान देता है, जबकि जैव ईंधन दहन लगभग 15-40% योगदान देता है। सर्दियों (दिसंबर-जनवरी) के दौरान, बीसी<sub>bb</sub> का योगदान बढ़ जाता है, विशेषकर रात में, लगभग 50% तक पहुंच जाता है, संभवतः घरेलू ईंधन के उपयोग और क्षेत्रीय जैव ईंधन जलाने के कारण। इसके विपरीत, ग्रीष्म और वर्षा-ऋतु में, जीवाश्म ईंधन का दहन प्रमुख स्रोत बना रहता है, जो बीसी उत्सर्जन का 70-85% होता है। इसी तरह के परिणाम आईजीपी क्षेत्र के अन्य शहरों, जैसे कानपुर, दिल्ली और पटना के लिए भी बताए गए हैं [8, 10, 11]।



चित्र 5: बीसी<sub>ff</sub>, और बीसी<sub>bb</sub> की द्रव्यमान सांद्रता में महीनेवार प्रतिशत योगदान।

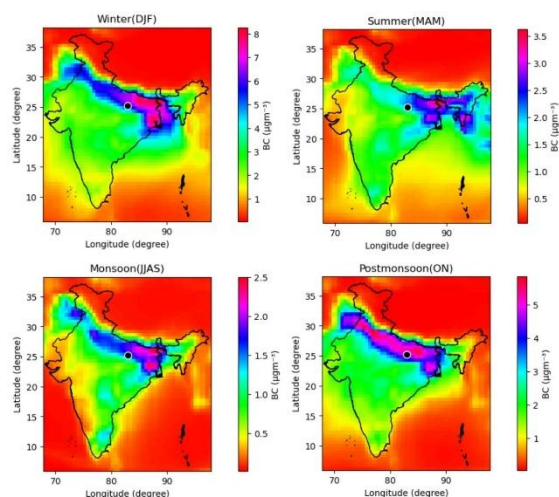
चित्र 6 वाराणसी में बीसी, बीसी<sub>bb</sub>, और बीसी<sub>ff</sub> के मौसमी दैनिक परिवर्तन को दर्शाती है। सर्दियों में बीसी की उच्चतम सांद्रता (~8-9 माइक्रोग्राम/मीटर<sup>3</sup>) दर्ज

की जाती है, विशेष रूप से शाम के घंटों के दौरान, जिसमें घरेलू ईंधन के उपयोग के कारण जैव ईंधन जलने का उल्लेखनीय योगदान होता है। गर्मियों में, तेज हवाओं और वायुमंडलीय मिश्रण बढ़ने के कारण बीसी का स्तर थोड़ा घट जाता है, जबकि जीवाश्म ईंधन का दहन प्रमुख स्रोत बना रहता है। वर्षा-ऋतु के मौसम में बारिश और आर्द्र निष्कासन प्रक्रियाओं के कारण बीसी की सांद्रता सबसे कम (~1-2 माइक्रोग्राम/मीटर<sup>3</sup>) दिखती है, हालांकि जीवाश्म ईंधन का उत्सर्जन अभी भी प्रमुख है। वर्षा-ऋतु के बाद के मौसम में, उत्तरी भारत में पराली जलाने के कारण बीसी की सांद्रता फिर से बढ़ जाती है, जिससे जैव ईंधन दहन का योगदान बढ़ जाता है। ये मौसमी पैटर्न आईजीपी पर हुए पिछले अध्ययनों के अनुरूप हैं [7, 28]।



**चित्र 6:** बीसी, बीसी<sub>ff</sub>, और बीसी<sub>bb</sub> की द्रव्यमान सांद्रता में मौसमी दैनिक भिन्नता और प्रतिशत योगदान।

चित्र 7 भारत में बीसी का मौसमी स्थानिक वितरण दर्शाती है, जो शीत, ग्रीष्म, वर्षा-ऋतु, और वर्षा-ऋतु के बाद के लिए MERRA-2 रीएनालिसिस डेटासेट से प्राप्त किया गया है। काला बिंदु मध्य आईजीपी में वाराणसी के स्थान को दर्शाता है। परिणाम दर्शाते हैं कि सर्दियों के दौरान आईजीपी में बीसी की उच्चतम सांद्रता होती है, जिसका मान लगभग 6-8 माइक्रोग्राम/मीटर<sup>3</sup> तक पहुंच जाता है, मुख्य रूप से उच्च उत्सर्जन और स्थिर वायुमंडलीय स्थितियों के कारण। गर्मियों के मौसम के दौरान, तेज हवाओं और बेहतर वायुमंडलीय मिश्रण के कारण बीसी का स्तर थोड़ा कम हो जाता है। सबसे कम सांद्रता वर्षा-ऋतु के दौरान वर्षा और आर्द्र निष्कासन प्रक्रियाओं के कारण होती है। वर्षा-ऋतु के बाद, मुख्य रूप से फसल अवशेष जलाने और मानवजनित उत्सर्जन में वृद्धि के कारण बीसी का स्तर फिर से बढ़ जाता है।



**चित्र 7:** भारत में ब्लैक कार्बन का मौसमी स्थानिक वितरण।

## 5. निष्कर्ष

इस अध्ययन ने दिसंबर 2020 से नवंबर 2021 तक बहु तरंगदैर्घ्य एथैलोमीटर (एई-33) के साथ निरंतर माप का उपयोग करके, मध्य आईजीपी क्षेत्र में स्थित वाराणसी में ब्लैक कार्बन (बीसी) की लौकिक विशेषताओं और स्रोत योगदान की जांच की। परिणामों ने स्थानीय उत्सर्जन स्रोतों और मौसम संबंधी स्थितियों से प्रभावित होकर, बीसी सांद्रता में एक मजबूत मौसमी और दैनिक परिवर्तनशीलता का प्रदर्शन किया। सर्दियों के मौसम में बीसी की सांद्रता सबसे अधिक थी, जो मुख्य रूप से जीवाश्म ईंधन दहन, जैव ईंधन जलाने, और कम सीमा परत ऊँचाई व कमजोर हवाओं जैसी स्थिर वायुमंडलीय स्थितियों के कारण था। फसल अवशेषों को जलाने और स्थिर मौसम संबंधी स्थितियों की शुरुआत के कारण मानसून के बाद के मौसम में बीसी का स्तर फिर से बढ़ गया।

बीसी की दैनिक भिन्नता ने एक द्विमोडल पैटर्न प्रदर्शित किया, जिसमें सुबह और शाम के घंटों के दौरान शिखर थे, जो यातायात उत्सर्जन और घरेलू ईंधन जलाने की गतिविधियों के अनुरूप थे। एक स्थिर रात की सीमा परत के निर्माण के कारण रात की सांद्रता दिन के स्तर से लगातार अधिक थी, जो प्रदूषक फैलाव को सीमित करती है।

स्रोत विभाजन विश्लेषण ने संकेत दिया कि जीवाश्म ईंधन का दहन प्रमुख योगदानकर्ता है, जो कुल बीसी का 60-85% है, जबकि जैव ईंधन जलाने से लगभग 15-40% योगदान होता है, जिसका प्रभाव सर्दियों और मानसून के बाद के मौसम में बढ़ जाता है। ये परिणाम बताते हैं कि वाराणसी में बीसी प्रदूषण के प्रमुख स्रोत वाहनों का उत्सर्जन और शहरी जीवाश्म ईंधन का दहन हैं, जबकि जैव ईंधन जलाना एक द्वितीयक लेकिन मौसमी रूप से महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। समग्र रूप से, निष्कर्ष आईजीपी क्षेत्र में बीसी स्तरों पर मानवजनित उत्सर्जन के महत्वपूर्ण प्रभाव को उजागर करते हैं और क्षेत्रीय वायु गुणवत्ता में सुधार करने और जलवायु प्रभावों को कम करने के लिए वाहन स्रोतों और जैव ईंधन जलाने को लक्षित करने वाली प्रभावी उत्सर्जन नियंत्रण रणनीतियों की आवश्यकता पर बल देते हैं।

## संदर्भ ग्रंथ सूची (Bibliography/References)

1. Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., ... & Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of geophysical research: Atmospheres*, 118(11), 5380-5552.
2. Ramanathan, V., & Carmichael, G. (2008). Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature geoscience*, 1(4), 221-227.
3. IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
4. Janssen, N. A., Hoek, G., Simic-Lawson, M., Fischer, P., Van Bree, L., Ten Brink, H., ... & Cassee, F. R. (2011). Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with PM10 and PM2.5. *Environmental health perspectives*, 119(12), 1691.
5. Lack, D. A., & Cappa, C. D. (2010). Impact of brown and clear carbon on light absorption enhancement, single scatter albedo and absorption wavelength dependence of black carbon. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(9), 4207-4220.
6. Andreae, M. O., & Gelencsér, A. (2006). Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(10), 3131-3148.
7. Gustafsson, O., Krusa, M., Zencak, Z., Sheesley, R. J., Granat, L., Engstrom, E., ... & Rodhe, H. (2009). Brown clouds over South Asia: biomass or fossil fuel combustion?. *Science*, 323(5913), 495-498.
8. Tiwari, S., Pipal, A. S., Srivastava, A. K., Bisht, D. S., & Pandithurai, G. (2015). Determination of wood burning and fossil fuel contribution of black carbon at Delhi, India using aerosol light absorption technique. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(4), 2846-2855.
9. Srivastava, S., Kumar, M., Singh, R. S., Rai, B. N., Mall, R. K., & Banerjee, T. (2019). Long-term observation of black carbon aerosols at an urban location over the central Indo-Gangetic Plain, South Asia. *Atmosfera*, 32(2), 95-113.
10. Sandradewi, J., Prévôt, A. S., Szidat, S., Perron, N., Alfarra, M. R., Lanz, V. A., ... & Baltensperger, U. R. S. (2008). Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter. *Environmental science & technology*, 42(9), 3316-3323.
11. Zotter, P., Herich, H., Gysel, M., El-Haddad, I., Zhang, Y., Močnik, G., ... & Prévôt, A. S. (2017). Evaluation of the absorption Ångström exponents for traffic and wood burning in the Aethalometer-based source apportionment using radiocarbon measurements of ambient aerosol. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(6), 4229-4249.
12. Kirchstetter, T. W., Novakov, T., & Hobbs, P. V. (2004). Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D21).
13. Tiwari, S., Kaskaoutis, D., Soni, V. K., Dev Attri, S., & Singh, A. K. (2018). Aerosol columnar characteristics and their heterogeneous nature over Varanasi, in the central Ganges valley. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(25), 24726-24745.
14. Dasgupta, P., & Srikanth, K. (2020). Reduced air pollution during COVID-19: Learnings for sustainability from Indian Cities. *Global Transitions*, 2, 271-282.
15. Murari, V., Kumar, M., Mhawish, A., Barman, S. C., & Banerjee, T. (2017). Airborne particulate in Varanasi over middle Indo-Gangetic Plain: variation in particulate types and meteorological influences. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(4), 157.
16. Tiwari, S., & Singh, A. K. (2013). Variability of aerosol parameters derived from ground and satellite measurements over Varanasi located in the Indo-Gangetic Basin. *Aerosol and Air Quality Research*, 13(2), 627-638.
17. Chauhan, P. K., Tiwari, S., Gupta, D. K., Kumar, A., Pratap, V., & Singh, A. K. (2024). Assessment of equivalent black carbon variations and its source apportionment over Varanasi, Indo-Gangetic Basin. *Atmospheric Pollution Research*, 15(4), 102061.
18. Zioła, N., Błaszczak, B., & Klejnowski, K. (2021). Temporal variability of equivalent black carbon components in atmospheric air in Southern Poland. *Atmosphere*, 12(1), 119.

19. Goel, V., Hazarika, N., Kumar, M., Singh, V., Thamban, N. M., & Tripathi, S. N. (2021). Variations in Black Carbon concentration and sources during COVID-19 lockdown in Delhi. *Chemosphere*, 270, 129435.
20. Petzold, A., Ogren, J. A., Fiebig, M., Laj, P., Li, S. M., Baltensperger, U., ... & Zhang, X. Y. (2013). Recommendations for reporting "black carbon" measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(16), 8365-8379.
21. Weingartner, E., Saathoff, H., Schnaiter, M., Streit, N., Bitnar, B., & Baltensperger, U. (2003). Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers. *Journal of Aerosol Science*, 34(10), 1445-1463.
22. Rathod, T. D., & Sahu, S. K. (2022). Measurements of optical properties of black and brown carbon using multi-wavelength absorption technique at Mumbai, India. *Journal of Earth System Science*, 131(1), 32.
23. Herich, H., Hueglin, C., & Buchmann, B. (2011). A 2.5 year's source apportionment study of black carbon from wood burning and fossil fuel combustion at urban and rural sites in Switzerland. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(7), 1409-1420.
24. Kumar, R. R., Soni, V. K., & Jain, M. K. (2020). Evaluation of spatial and temporal heterogeneity of black carbon aerosol mass concentration over India using three year measurements from IMD BC observation network. *Science of the Total Environment*, 723, 138060.
25. Vaishya, A., Singh, P., Rastogi, S., & Babu, S. S. (2017). Aerosol black carbon quantification in the central Indo-Gangetic Plain: Seasonal heterogeneity and source apportionment. *Atmospheric Research*, 185, 13-21.
26. Srivastava, A. K., Singh, S., Pant, P., & Dumka, U. C. (2012). Characteristics of black carbon over Delhi and Manora Peak—a comparative study. *Atmospheric Science Letters*, 13(3), 223-230.
27. Tripathi, S. N., Dey, S., Tare, V., & Satheesh, S. K. (2005). Aerosol black carbon radiative forcing at an industrial city in northern India. *Geophysical research letters*, 32(8).
28. Tiwari, S., Srivastava, A. K., Bisht, D. S., Bano, T., Singh, S., Behura, S., ... & Padmanabhamurty, B. (2009). Black carbon and chemical characteristics of PM10 and PM2.5 at an urban site of North India. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 62(3), 193-209.