

**PARTICULATE EMISSIONS AT HIGHWAY TOLL
PLAZAS IN INDIA- CONTRIBUTING FACTORS
AND IMPACT OF ADVANCED TOLL
COLLECTION SYSTEMS**

AMIT MUNJAL



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
NEW DELHI – 110016**

JUNE 2024

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2024

**PARTICULATE EMISSIONS AT HIGHWAY TOLL
PLAZAS IN INDIA- CONTRIBUTING FACTORS
AND IMPACT OF ADVANCED TOLL
COLLECTION SYSTEMS**

by

AMIT MUNJAL

Submitted

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

to the



INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

JUNE 2024

Dedicated to

my parents

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled “Particulate emissions at highway toll plazas in India-contributing factors and impact of advanced toll collection systems”, being submitted by Mr. Amit Munjal, to the Indian Institute of Technology Delhi for the award of the degree of ‘Doctor of Philosophy’ in Department of Civil Engineering is a record of the bonafide research work carried out by him under my supervision and guidance. He has fulfilled the requirements for the submission of this thesis, which to the best of my knowledge has reached the requisite standard.

The material contained in the thesis has not been submitted in part or full to any other University or Institute for the award of any other degree or diploma.

Sri Harsha Kota, IIT Delhi

Associate Professor

Department of Civil Engineering,

Indian Institute of Technology Delhi,

New Delhi-110016,

India

Arvind Kumar Nema, IIT Delhi

Professor

Department of Civil Engineering,

Indian Institute of Technology Delhi,

New Delhi-110016,

India

ACKNOWLEDGEMENTS

First and foremost, praises and thanks to the God, the Almighty, for the showers of blessings throughout my research work.

I would like to express my sincere gratitude to many people who have inspired and supported me during my Ph.D. at the Indian Institute of Technology, Delhi. There cannot be right words to convey my gratefulness and respect for my research supervisors, Dr. Sri Harsha Kota and Dr. Arvind Kumar Nema who gave me the opportunity, in the first place, to do this research and kept providing their invaluable guidance throughout this research. They set an example of what a gifted researcher with dedication and perseverance can achieve. I appreciate all the time and care they took to read through the papers and offer constructive criticism.

I want to express my special thanks to Dr. Sri Harsha Kota for all the great support, understanding and freedom he has provided me throughout my Ph.D. He has constantly encouraged me to think deeper and expand my knowledge base. His immense knowledge throughout the domain, enthusiasm and devotion to his work has help me considerably in carrying out this research work.

I would like to express my gratitude to the members of my SRC, Late Professor K.C. Iyer, Professor D.R. Sahoo, Professor Mukesh Khare and Professor Vivek Kumar for reading and considering my work. My sincere appreciation is extended to Mr. Rajiv Sharma (Incharge, Surveying Lab, IIT Delhi) for his constant support, wisdom, and provision of friendly working environment for us. I would also want to thank all the faculty and staff at IIT Delhi's Department of Civil Engineering for their support and encouragement throughout my doctoral studies.

My sincere thanks to all my PhD seniors, especially Shubham Sharma, Shiva Kumar Gummadivalli, Archana Chawla, Arpit Katiyar and to my dear colleagues and lab mates, Gandham Phani Kumar, Pratibha Anand and Pareshbhai Dineshbhai Parmar.

I am extremely grateful to my parents for their love, prayers, caring and sacrifices for educating and preparing me for this life. I am very much thankful to my wife and my son for their love, understanding, prayers and continuing support to complete this research work. Also, I express my thanks to my elder brother for his constant support and vital inputs and suggestions.

(Amit Munjal)

ABSTRACT

The economic growth of a country and its transport infrastructure are positively related. However, emissions from the transport sector have considerable negative impacts. These adverse effects are expected to be more to the population living/ working near the roads. Literature further reveals that vehicular emissions are higher at the locations where short-term episodes of acceleration, idling, deceleration etc. occur frequently. As a result, places like traffic signals or toll plazas have higher chances of poorer air quality. Compared to a traffic signal, the number of stop and go cycles occur far more at a toll plaza. Therefore, further poorer air quality can be expected at a toll plaza.

Though the air pollution risk to the toll plaza staff has been highlighted by the earlier studies, an understanding on the factors affecting pollutant concentration at toll plaza is found to be missing in the literature. This study has been therefore carried out to investigate the relationship between ambient particulate matter (PM) levels near toll plazas with critical factors like traffic flow and meteorological parameters. Ambient concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ near four toll plazas located in north India were monitored using environmental dust monitors (GRIMM EDM 107) during September- December 2020. Meteorological data was collected from the closest Central pollution control board (CPCB) monitoring stations and data on traffic flow was obtained from the National Highways Authority of India (NHAI).

Results showed that ambient PM concentration near toll plazas were higher than Indian NAAQS at almost all sampling sites. Investigation of temporal variation of PM levels during 24 hours period revealed two peaks in PM₁₀ concentration whereas single peak was noticed for PM_{2.5} and PM₁. The relationship between PM levels at toll plaza and meteorological parameters which included relative humidity (RH), barometric pressure (BP), solar radiation (SR), wind speed (WS) and PM concentration at nearest CPCB fixed monitoring station was also assessed by performing multivariate regression analysis. The validity of the developed model was

evaluated by determining Normalised Root Mean Square Error (NRMSE). Multicollinearity test between the independent variables was done by calculating the Variance Inflation Factor (VIF) and tolerance. Results revealed that traffic flow, wind speed and RH are most critical factors influencing near surface PM levels. Traffic flow and RH showed positive relation with PM levels whereas opposite relationship with wind speed was observed. This implies that the desired PM levels near the highway and toll plazas can be achieved by managing the traffic flow on the road. Such information can be helpful in determining a threshold level of traffic volume on roads to keep the pollutant concentrations under permissible limits.

Further, simultaneous PM measurements at toll plaza and a nearby highway location at four sampling sites disclosed that except for staggered toll plaza geometry, PM levels were comparatively lower at toll plaza than nearby highway location. On an average, PM_{10} was around 36% lower whereas $PM_{2.5}$, and PM_1 were 12% and 10%, respectively lower at toll plaza than the corresponding highway location for a normal geometry toll plaza. Similar outcome was also obtained when air dispersion modelling was performed using AERMOD. Although, literature indicates that toll plaza staff is exposed to high PM concentrations, this study revealed that the population living near high-speed road corridors are at higher risk than toll plaza staff.

The effect of toll plaza's geometry, namely, normal, staggered or hybrid on ambient PM levels has also been examined by adopting the vehicle specific power (VSP) based approach. VSP was found to be lower near toll plaza than corresponding highway location for normal and hybrid geometry. However, the same is higher near toll plaza in case of staggered geometry. This might be the reason for higher PM levels near staggered toll plaza vis-à-vis corresponding highway location.

It is evident that due to adoption of stringent exhaust emissions standards and consequent reduction in tailpipe/ exhaust emissions, the proportion of non-exhaust emissions such as

resuspension of road dust, wear and tear of brakes, tires and road has increased considerably. The proportion of exhaust/ non-exhaust vehicular emissions was analysed near toll plaza by examining the PM ratios. Results indicated that the contribution of exhaust emissions vis-à-vis other sources is higher at toll plaza compared to normal highway location demonstrating that frequent stop and go cycles might be increasing the exhaust emissions. Further, compared to the cities in China and Europe, lower value of $PM_{2.5}/PM_{10}$ was obtained in this study. This may be due to poor pavement condition/ dusty roads in India. The concerned authority needs to consider this aspect in future planning.

Another critical factor which directly affects the driving pattern at a toll plaza and thereby the emissions, is the toll collection system. Manual toll collection (MTC) or cash collection is an old and conventional system. However, nowadays more advanced systems like Electronic Toll Collection (ETC) or Open Road Tolling (ORT) are adopted to provide seamless movement of traffic. This direct benefit of adoption of such advanced technologies on human health has also been highlighted in the past. It has been concluded that the incidence of prematurity and low birth weight were reduced by 10.8% and 11.8%, respectively due to adoption of ORT system. Several other studies have also confirmed considerable reduction in emissions due to implementation of ETC and ORT system.

In most of such studies, vehicle emission models like MOBILE 5b, MOBILE 6.2, CMEM, IVE etc. were used. The emission factors (EFs) used in these models are often obtained through dynamometer testing by deploying standard driving cycles. However, it has been reported that the standard driving cycles are not capable of representing the typical variabilities encountered in real-world driving and these variabilities have a strong bearing on the vehicular emissions.

An alternative approach which can record such variabilities in emissions in a better way is real world driving emissions method, where emissions measurement using onboard monitoring

instruments on the test vehicles is performed while actual driving. Few researchers have adopted this approach in their similar studies. However, certain limitations like use of single vehicle, study of only gaseous pollutants, no queue in ETC lanes etc. make their results less useful specially for Indian conditions as in India, many a time there is a queue of vehicles in ETC lanes also. Further in India, vehicles need to almost stop in ETC lane even when there is no queue of waiting vehicle ahead.

Accordingly, in this part of the study, investigation has been carried out to quantify the advantages in terms of reduced emissions and time, that can be realized by transitioning from a cash to ETC/ ORT system in Indian setting. Real world driving emissions approach was adopted and keeping in view the significance of particulate emissions in India, particle number (PN) in exhaust was studied. PN concentrations in vehicular exhaust were measured in real-time using Nanoparticle emission tester (TSI NPET 3795 HC). Vehicular dynamics were measured using a global positioning system (GPS) device and engine speed was monitored using the RPM sensor. Instruments were set to record data at a frequency of 1 Hz and were given power externally using an inverter-battery set kept inside the vehicle. A total of six vehicles belonging to Bharat Stage (BS) III, BS IV and BS VI standards were tested. Experiments were conducted during September- November, 2021 by driving them as per representative driving pattern. In order to avoid impact of any other external factor, the tests were conducted using same driver on western peripheral expressway (WPE) as it was relatively less congested.

Observations demonstrated that, unlike diesel vehicles, emissions generated during the waiting phase in gasoline vehicles were relatively minor when compared to acceleration and deceleration phases. As a result, for queues of equivalent length, the benefits of ETC were not pronounced for gasoline vehicles. Simulations were also carried out using a traffic simulation model VISSIM under three separate regimes - a 100% cash-based system, ETC, and ORT.

Results revealed that the emissions generated by the ETC, and cash-based systems were, respectively, 2 and 4 times greater than those generated by the ORT. Likewise, the cumulative weekly time-delay experienced under the cash system was 2.5 times greater than that experienced under the ETC. Furthermore, the comparison of efficiency of cash and ETC system is carried out by assessing the time-headway between transactions of both toll collection systems. The same was found to be around 21 seconds for cash and 13 seconds for ETC system in India. These results provide ample justification for the Indian government to contemplate a shift to ORT.

Keywords: Toll Plaza pollution; ETC impacts; Real world driving emission; Instantaneous Particle number; VISSIM; AERMOD; Toll Plaza geometry; Vehicular specific power

सार

किसी देश की आर्थिक वृद्धि और उसके परिवहन बुनियादी ढांचे सकारात्मक रूप से संबंधित हैं। हालांकि, परिवहन क्षेत्र से उत्सर्जन का वातावरण और मानव स्वास्थ्य पर काफी नकारात्मक प्रभाव पड़ता है। मानव स्वास्थ्य पर इन वाहनों के उत्सर्जन का प्रतिकूल प्रभाव सड़कों के पास रहने या काम करने वाली आबादी पर अधिक होने की उम्मीद है। इसके अलावा, साहित्य से पता चलता है कि वाहनों का उत्सर्जन उन स्थानों पर अधिक होता है जहां त्वरण, गतिशीलता, मंदी आदि जैसे अल्पकालिक एपिसोड अधिक बार होते हैं। नतीजतन, ट्रैफिक सिग्नल या टोल प्लाजा जैसी जगहों पर खराब वायु गुणवत्ता की संभावना अधिक होती है। हालांकि, ट्रैफिक सिग्नल की तुलना में, टोल प्लाजा पर स्टॉप और गो साइकिल की संख्या कहीं अधिक होती है। इसलिए, टोल प्लाजा पर और खराब वायु गुणवत्ता की उम्मीद की जा सकती है।

हालांकि टोल प्लाजा कर्मचारियों के लिए वायु प्रदूषण के जोखिम को पहले के अध्ययनों द्वारा उजागर किया गया है, टोल प्लाजा पर प्रदूषक स्तर को प्रभावित करने वाले कारणों पर समझ साहित्य में गायब पाई गई है। इसलिए यह अध्ययन यातायात प्रवाह और मौसम संबंधी मापदंडों जैसे महत्वपूर्ण कारणों के साथ राजमार्गों और टोल प्लाजा के पास परिवेशी कण पदार्थ (पीएम) के स्तर के बीच संबंधों की जांच करने के लिए किया गया है। सितंबर-दिसंबर 2020 के दौरान उत्तर भारत में स्थित चार टोल प्लाजा के पास पीएम 10, पीएम 2.5 और पीएम 1 की परिवेशी सांद्रता की निगरानी पर्यावरणीय धूल मॉनिटर (जीआरआईएम ईडीएम 107) का उपयोग करके की गई थी। निकटतम केंद्रीय प्रदूषण नियंत्रण बोर्ड (सीपीसीबी) के निगरानी स्टेशनों से मौसम संबंधी डेटा एकत्र किया गया था और टोल ऑपरेटर यानी भारतीय राष्ट्रीय राजमार्ग प्राधिकरण (एनएचएआई) से यातायात प्रवाह पर डेटा लिया गया था।

परिणामों से पता चला है कि टोल प्लाजा के पास परिवेशी पीएम एकाग्रता लगभग सभी नमूना स्थलों पर भारतीय राष्ट्रीय मानक से अधिक थी जो साहित्य के अनुरूप थी। 24 घंटे की अवधि के दौरान पीएम स्तर

के अस्थायी परिवर्तन की जांच से पीएम 10 में दो शिखर का पता चला, जबकि इसी अवधि के दौरान पीएम 2.5 और पीएम 1 के लिए एकल शिखर देखा गया। टोल प्लाजा पर पीएम के स्तर और मौसम संबंधी मापदंडों के बीच संबंध जिसमें नमी (आरएच), बैरोमेट्रिक दबाव (बीपी), सौर विकिरण (एसआर), हवा की गति (डब्ल्यूएस) और निकटतम सीपीसीबी निर्धारित निगरानी स्टेशन पर पीएम एकाग्रता शामिल थी, उनके बीच सहसंबंध गुणांक की गणना मल्टीवेरिएट रिग्रेशन विश्लेषण करके जांच की गई थी। विकसित मॉडल की वैधता का मूल्यांकन प्रत्येक नमूना स्थान के लिए सामान्यीकृत रूट मीन स्क्वायर एरर (एनआरएमएसई) का निर्धारण करके किया गया था। स्वतंत्र चर के बीच मल्टीकोलिनियरिटी परीक्षण विचरण मुद्रास्फीति कारक (वीआईएफ) और सहिष्णुता की गणना करके किया गया था। परिणामों से पता चला है कि यातायात प्रवाह, हवा की गति और आरएच सतह के पीएम स्तरों के पास प्रभावित करने वाले सबसे महत्वपूर्ण कारक हैं। यातायात प्रवाह और आरएच ने पीएम स्तर के साथ सकारात्मक संबंध दिखाया जबकि हवा की गति के साथ विपरीत संबंध देखा गया। इसका तात्पर्य यह है कि राजमार्ग और टोल प्लाजा के पास वांछित पीएम स्तर सड़क पर यातायात प्रवाह का प्रबंधन करके प्राप्त किया जा सकता है। इस तरह की जानकारी सड़कों पर यातायात की मात्रा के एक सीमा स्तर को निर्धारित करने में सहायक हो सकती है ताकि प्रदूषक सांद्रता को अनुमेय सीमा के तहत रखा जा सके।

इसके अलावा, टोल प्लाजा और चार नमूना स्थलों पर पास के राजमार्ग स्थान पर एक साथ पीएम माप से पता चला कि क्रमबद्ध टोल प्लाजा ज्यामिति को छोड़कर, पीएम का स्तर पास के राजमार्ग स्थान की तुलना में टोल प्लाजा पर तुलनात्मक रूप से कम था। औसतन, पीएम 10 लगभग 36% कम था, जबकि PM2.5 और PM1 क्रमशः 12% और 10% कम था, जो सामान्य ज्यामिति टोल प्लाजा के लिए संबंधित राजमार्ग स्थान की तुलना में टोल प्लाजा पर कम था। यही परिणाम तब भी प्राप्त किया गया था जब आईआरएमओडी का उपयोग करके वायु फैलाव मॉडलिंग किया गया था। हालांकि, साहित्य इंगित करता है कि टोल प्लाजा कर्मचारी उच्च पीएम सांद्रता के संपर्क में हैं, इस अध्ययन से पता चला है कि हार्ड-

स्पीड रोड कॉरिडोर के पास रहने या काम करने वाली आबादी टोल प्लाजा ऑपरेटरों की तुलना में अधिक जोखिम में है।

वाहन विशिष्ट शक्ति (वीएसपी) आधारित दृष्टिकोण को अपनाकर टोल प्लाजा की ज्यामिति, अर्थात्, परिवेशी पीएम स्तरों पर सामान्य, कंपित या हाइब्रिड के प्रभाव की भी जांच की गई है। सामान्य और हाइब्रिड ज्यामिति के लिए संबंधित राजमार्ग स्थान की तुलना में टोल प्लाजा के पास वीएसपी कम पाया गया। हालाँकि, क्रमबद्ध ज्यामिति के मामले में टोल प्लाजा के पास यह अधिक है। यह संबंधित राजमार्ग स्थान की तुलना में अलग-अलग टोल प्लाजा के पास उच्च पीएम स्तर का कारण हो सकता है

यह स्पष्ट है कि कड़े निकास उत्सर्जन मानकों को अपनाने और टेलपाइप/निकास उत्सर्जन में परिणामी कमी के कारण, गैर-निकास उत्सर्जन जैसे सड़क की धूल का पुनः निलंबन, ब्रेक, टायर और सड़क की टूट-फूट का अनुपात काफी बढ़ गया है। पीएम अनुपात की जांच करके टोल प्लाजा के पास निकास/गैर-निकास वाहन उत्सर्जन के अनुपात का विश्लेषण किया गया था। परिणामों से संकेत मिलता है कि अन्य स्रोतों की तुलना में निकास उत्सर्जन का योगदान सामान्य राजमार्ग स्थान की तुलना में टोल प्लाजा पर अधिक है, यह दर्शाता है कि बार-बार रुकने और जाने के चक्र से निकास उत्सर्जन में वृद्धि हो सकती है। इसके अलावा, चीन और यूरोप के शहरों की तुलना में, इस अध्ययन में PM_{2.5}/PM₁₀ का कम मूल्य प्राप्त हुआ। इसका कारण भारत में फुटपाथ की खराब स्थिति/धूल भरी सड़कें हो सकती हैं। संबंधित प्राधिकारी को भविष्य की योजना में इस पहलू पर विचार करने की आवश्यकता है।

एक और महत्वपूर्ण कारक जो टोल प्लाजा पर ड्राइविंग पैटर्न को सीधे प्रभावित करता है और इस प्रकार उत्सर्जन टोल संग्रह प्रणाली का चयन है। मैनुअल टोल संग्रह (एमटीसी) या नकद संग्रह एक पुरानी और पारंपरिक प्रणाली है। तथापि, आजकल यातायात की निर्बाध आवाजाही प्रदान करने के लिए इलेक्ट्रॉनिक पथकर संग्रहण (ईटीसी) अथवा ओपन रोड टोलिंग (ओआरटी) जैसी अधिक उन्नत प्रणालियां अपनाई जाती हैं। मानव स्वास्थ्य पर ऐसी उन्नत प्रणाली को अपनाने के इस प्रत्यक्ष लाभ को जांचकर्ताओं द्वारा भी

उजागर किया गया है, जिन्होंने निष्कर्ष निकाला है कि ओआरटी प्रणाली को अपनाने के कारण समय पूर्व और जन्म के समय कम वजन की घटनाओं में क्रमशः 10.8% और 11.8% की कमी आई है। तदनुसार, अतीत में कई अध्ययनों ने ईटीसी और ओआरटी प्रणाली के कार्यान्वयन के कारण ऐसे उत्सर्जन में कमी का अनुमान लगाया था। उनके परिणाम बताते हैं कि ईटीसी या ओआरटी प्रणाली की तैनाती पर उत्सर्जन में काफी कमी हासिल की गई थी।

इनमें से अधिकांश अध्ययनों में, मोबाइल 5 बी, मोबाइल 6.2, सीएमईएम, आईवी आदि जैसे वाहन उत्सर्जन मॉडल का उपयोग किया गया था जो उत्सर्जन कारकों (ईएफ) पर आधारित हैं। ईएफ अक्सर डायनेमोमीटर परीक्षण के माध्यम से प्राप्त किए जाते हैं जिसमें उत्सर्जन को मानक ड्राइविंग चक्रों का उपयोग करके एक प्रयोगशाला में मापा जाता है। हालांकि, यह बताया गया है कि मानक ड्राइविंग चक्र वास्तविक दुनिया के ड्राइविंग में आने वाली विशिष्ट परिवर्तनशीलता का प्रतिनिधित्व करने में सक्षम नहीं हैं।

एक वैकल्पिक पद्धति जो उत्सर्जन में इस तरह की भिन्नताओं को बेहतर तरीके से रिकॉर्ड कर सकता है, वह वास्तविक दुनिया ड्राइविंग उत्सर्जन विधि (आरडीई) है, जहां वास्तविक ड्राइविंग के दौरान परीक्षण वाहनों पर ऑनबोर्ड निगरानी उपकरणों का उपयोग करके उत्सर्जन माप किया जाता है। अतीत में कुछ शोधकर्ताओं ने अपने अध्ययन में इस दृष्टिकोण को अपनाया है। हालांकि, कुछ सीमाएं जैसे केवल एक वाहन का उपयोग, केवल गैसीय प्रदूषकों का अध्ययन, ईटीसी लेन में कोई कतार नहीं आदि उनके परिणामों को विशेष रूप से भारतीय परिस्थितियों के लिए कम उपयोगी बनाते हैं क्योंकि भारत में, ईटीसी लेन में ज्यादातर वाहनों की कतार होती है और वाहनों को लगभग रुकने की आवश्यकता होती है, भले ही आगे प्रतीक्षा वाहन की कोई कतार न हो।

तदनुसार, अध्ययन के इस भाग में, कम उत्सर्जन और समय के संदर्भ में लाभों को निर्धारित करने के लिए जांच की गई है, जिसे भारतीय सेटिंग में नकदी से ईटीसी / ओआरटी प्रणाली में संक्रमण करके

महसूस किया जा सकता है। आरडीई पद्धति अपनाया गया था और भारत में कण उत्सर्जन के महत्व को ध्यान में रखते हुए, निकास में कण संख्या (पीएन) का अध्ययन किया गया था। वाहन निकास में पीएन सांद्रता को नैनोपार्टिकल उत्सर्जन परीक्षक (टीएसआई एनपीईटी 3795 एचसी) का उपयोग करके वास्तविक समय में मापा गया था। वाहनों की गतिशीलता को ग्लोबल पोजिशनिंग सिस्टम (जीपीएस) डिवाइस का उपयोग करके मापा गया था और आरपीएम सेंसर का उपयोग करके इंजन की गति की निगरानी की गई थी। उपकरणों को 1 हर्ट्ज की आवृत्ति पर डेटा रिकॉर्ड करने के लिए सेट किया गया था और वाहन के अंदर रखे इन्वर्टर-बैटरी सेट का उपयोग करके बाहरी रूप से बिजली दी गई थी। भारत स्टेज (बीएस) तृतीय, बीएस चतुर्थ और बीएस 6 मानकों से संबंधित कुल छह वाहनों का परीक्षण किया गया। सितंबर-नवंबर, 2021 के दौरान प्रतिनिधि ड्राइविंग पैटर्न के अनुसार उन्हें चलाकर प्रयोग किए गए थे। किसी अन्य बाहरी कारक के प्रभाव से बचने के लिए, पश्चिमी परिधीय एक्सप्रेसवे (डब्ल्यूपीई) पर एक ही ड्राइवर का उपयोग करके परीक्षण किए गए क्योंकि यह अन्य राष्ट्रीय राजमार्गों की तुलना में अपेक्षाकृत कम भीड़भाड़ वाला है।

अवलोकनों से पता चला है कि, डीजल वाहनों के विपरीत, त्वरण और मंदी चरणों की तुलना में गैसोलीन वाहनों में प्रतीक्षा चरण के दौरान उत्पन्न उत्सर्जन अपेक्षाकृत मामूली थे। नतीजतन, बराबर लंबाई की कतारों के लिए, गैसोलीन वाहनों के लिए ईटीसी के लाभ स्पष्ट नहीं थे। सिमुलेशन को तीन अलग-अलग व्यवस्थाओं - 100% नकद-आधारित प्रणाली, ईटीसी और ओआरटी के तहत एक ट्रेफिक सिमुलेशन मॉडल वीआईएसआईएम का उपयोग करके भी किया गया था। परिणामों से पता चला कि ईटीसी, और नकदी-आधारित प्रणालियों द्वारा उत्पन्न उत्सर्जन क्रमशः ओआरटी द्वारा उत्पन्न उत्सर्जन की तुलना में 2 और 4 गुना अधिक थे। इसी तरह, नकदी प्रणाली के तहत अनुभव की गई संचयी साप्ताहिक समय-देरी ईटीसी के तहत अनुभव की तुलना में 2.5 गुना अधिक थी। इसके अलावा, नकद और ईटीसी प्रणाली की दक्षता की तुलना दोनों टोल संग्रह प्रणालियों के लेनदेन के बीच समय-हेडवे का आकलन करके की जाती है। भारत में कैश के लिए यह 21 सेकंड और ईटीसी सिस्टम के लिए 13 सेकंड पाया गया। ये

परिणाम भारत सरकार को ओआरटी में बदलाव पर विचार करने के लिए पर्याप्त औचित्य प्रदान करते हैं।

कीवर्ड: टोल प्लाजा प्रदूषण; ईटीसी प्रभाव; वास्तविक दुनिया ड्राइविंग उत्सर्जन (आरडीई); तात्कालिक कण संख्या; VISSIM; एईआरएमओडी; टोल प्लाजा ज्यामिति; वाहन विशिष्ट शक्ति।

GRAPHICAL ABSTRACT PARTICULATE EMISSIONS AT HIGHWAY TOLL PLAZAS IN INDIA- CONTRIBUTING FACTORS AND IMPACT OF ADVANCED TOLL COLLECTION SYSTEMS

Objectives & Highlights



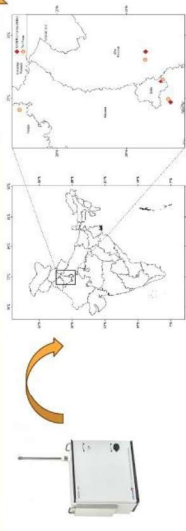
Objective:

- Factors affecting PM levels near toll plaza.
- Estimation of PN reduction in exhaust through ETC and ORT systems in India.

Highlights:

- Real world emission measurement.
- Multiple Vehicles tested.
- Particle number (PN) monitoring.

Data Collection- Ambient PM monitoring



Real world emission measurement



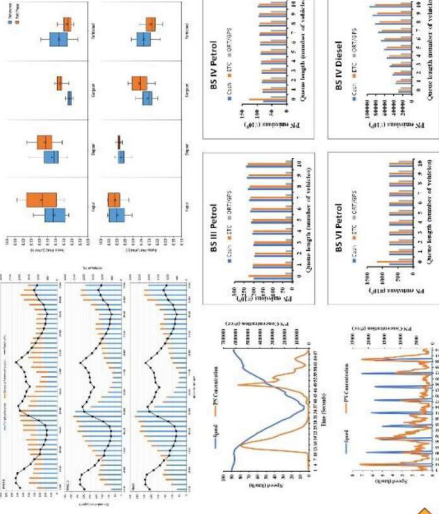
GPS device (PB-03)



Nano particle emission tester (TSI-NPET 3795 HC)

Results

Temporal variation of ambient PM and PM ratios



Service time comparison of Cash and ETC system in India

Transaction time headway (in seconds)	Cash	ETC
0-8	0.73	51.09
9-16	43.80	76.09
17-24	76.64	86.96
25-32	89.05	92.93
33-40	96.35	94.02
41-48	97.08	97.28

Conclusions

- Traffic volume, wind speed and RH are most critical factors influencing near surface PM levels.
- 49% and 75% PN reduction can be expected if cash is replaced by ETC and ORT systems, respectively.
- Total time delay i.e. sum of delay due to all vehicles in one week, was found to be 7246 hours in ETC and 18,560 hours in cash system.

Recommendations

- The current toll plaza design for ETC lanes in India can be improved by installing the tag reader prior to the barrier so that the vehicles may pass the barrier without almost coming to a complete halt.
- Considerable air quality related benefits due to advanced technologies like Open Road Tolling (ORT)/ GPS based tolling have been divulged from the study. The same may be adopted in the regions with poor air quality.

TABLE OF CONTENTS

Certificate.....	i
Acknowledgments.....	ii
Abstract.....	iv
संक्षेप.....	ix
Graphical Abstract.....	xv
Table of contents	xvi
List of figures.....	xviii
List of tables.....	xix
List of abbreviations and acronyms.....	xx
1. INTRODUCTION.....	1
1.1. BACKGROUND	1
1.2. EFFECT OF DRIVING PATTERN ON VEHICULAR EMISSIONS	2
1.3. TOLL PLAZAS AS A POTENTIAL EMISSION HOTSPOT	5
1.3.1. <i>Fundamentals of toll plaza</i>	5
1.3.2. <i>Issues with toll plaza operation</i>	6
1.3.3. <i>Toll plazas: Growth in India</i>	7
1.4. FACTORS AFFECTING AMBIENT PARTICULATE MATTER LEVELS NEAR HIGHWAY TOLL PLAZAS.....	8
1.5. IMPACT OF ADVANCED TOLL COLLECTION SYSTEMS ON VEHICULAR EMISSIONS	10
1.6. MOTIVATION/ NEED FOR THE STUDY	13
1.7. ORGANISATION OF THE THESIS	13
2. LITERATURE REVIEW.....	15
2.1. ROAD TRANSPORT EMISSIONS- BACKGROUND AND THE INFLUENCING FACTORS.....	16
2.2. AMBIENT AIR QUALITY NEAR HIGHWAY TOLL PLAZAS	19
2.3. EMISSION REDUCTION THROUGH ADVANCED TOLL COLLECTION SYSTEM	21
2.3.1. <i>Measurement of exhaust emissions</i>	21
2.3.2. <i>Suitability of emission measurement methods</i>	24
2.3.3. <i>Modelling/ Emission estimation of exhaust emissions in different toll collection systems</i>	29
2.3.3.1. Emission estimation using emission models.....	30
2.3.3.2. Emission estimation using modal emissions model approach	31
2.3.3.3. Emission estimation using other methods.....	32
2.3.3.4. Emission estimation using real world driving emissions approach.....	32
2.4. RESEARCH GAPS.....	35
3. SCOPE AND OBJECTIVES	39
3.1. STUDY RATIONALE	39
3.2. SPECIFIC OBJECTIVES OF THE STUDY.....	40
4. METHODOLOGY- DATA COLLECTION AND ANALYSIS.....	41
4.1. AMBIENT AIR QUALITY NEAR TOLL PLAZA	41
4.1.1. <i>Study area description</i>	41
4.1.2. <i>Selection of pollutant for exposure study</i>	43

4.1.3.	<i>Ambient PM concentration- Instrumentation</i>	<i>44</i>
4.1.4.	<i>Traffic and meteorology.....</i>	<i>45</i>
4.1.5.	<i>Dispersion modelling using AERMOD</i>	<i>45</i>
4.2.	EXHAUST EMISSIONS AT TOLL PLAZA	46
4.2.1.	Data collection.....	47
4.2.1.1.	Instrumentation	47
4.2.1.2.	Selection of vehicles.....	48
4.2.1.3.	Experimental setup	49
4.2.2.	Data analysis methodology.....	53
4.2.2.1.	ETC efficiency in terms of transaction time headway	53
4.2.2.2.	Comparison of PN emissions in Cash/ ETC/ ORT system	53
4.2.2.3.	Quantification of overall PN reduction by ETC and ORT system: A case study at Hapur toll plaza	55
5.	RESULTS AND DISCUSSION	57
5.1.	AMBIENT PM CONCENTRATION AT HIGHWAY TOLL PLAZAS.....	57
5.2.	TEMPORAL VARIATION OF AMBIENT PM AT TOLL PLAZA AND REFERENCE LOCATION	58
5.3.	FACTORS AFFECTING AMBIENT PM CONCENTRATION NEAR TOLL PLAZA	59
5.4.	EFFECT OF TOLL PLAZA GEOMETRY ON PM CONCENTRATION	77
5.5.	EFFECT OF DRIVING PATTERNS ON PARTICULATE EMISSIONS	79
5.6.	COMPARISON OF PM CONCENTRATION AT TOLL PLAZA AND REFERENCE LOCATION	80
5.7.	SPATIAL AND TEMPORAL VARIATION OF THE RATIO OF $PM_{2.5}/PM_{10}$ AND $PM_1/PM_{2.5}$	81
5.8.	EFFICIENCY OF CASH AND ETC SYSTEMS IN INDIA	84
5.9.	CHARACTERISTICS OF VEHICULAR EXHAUST NEAR A TOLL PLAZA	85
5.10.	COMPARISON OF EMISSIONS IN DIFFERENT TOLL COLLECTION SYSTEMS	88
5.11.	QUANTIFICATION OF OVERALL PN REDUCTION BY ETC AND ORT SYSTEM: A CASE STUDY AT HAPUR TOLL PLAZA	89
6.	SUMMARY AND CONCLUSIONS.....	91
6.1.	SUMMARY OF THE PRESENT RESEARCH WORK	91
6.2.	SUMMARY OF KEY FINDINGS:	94
6.3.	KEY CONTRIBUTIONS OF PRESENT RESEARCH WORK:	95
6.4.	SCOPE FOR THE FUTURE RESEARCH WORK.....	96
	REFERENCES	98
	PUBLICATIONS AND CONFERENCES	118
	JOURNAL ARTICLES.....	118
	CONFERENCE PRESENTATIONS	118
	APPENDIX	119
	CURRICULUM VITAE	144

LIST OF FIGURES

Figure 1-1 Growth of toll plazas on National Highways in India.....	8
Figure 4-1: Location of sampled toll plazas	42
Figure 4-2: Sampling locations at toll plazas.....	43
Figure 4-3: Installation on instruments onboard a test vehicle.....	47
Figure 4-4: Composition of vehicles on Indian highways	48
Figure 4-5: Speed profile for no queue scenario in ETC and cash lane	50
Figure 4-6: Speed profile during stop & go cycles in ETC and cash lane.....	50
Figure 5-1: Temporal variation of PM concentration at Hapur toll plaza and corresponding reference location and vehicle count.....	58
Figure 5-2: PM ratios at both sampling locations on four toll plazas.....	82
Figure 5-3: Temporal variation of PM ratios and RH at Hapur toll plaza.....	83
Figure 5-4: Cumulative frequency distribution of time headway in both systems.....	85
Figure 5-5: Speed and PN concentration for a gasoline passenger car (BS VI standard) for no queue scenario in ETC lane	86
Figure 5-6: Speed profile and emissions pattern during stop & go cycles for a gasoline passenger car BS VI standard	86
Figure 5-7: Queue length dependent comparison of emissions in toll collection systems	89

LIST OF TABLES

Table 2-1: Major factors affecting the vehicular exhaust emission.	16
Table 2-2: The application, pros and cons of Emission measurement techniques	25
Table 2-3: Details of previous studies on emission reduction through ETC	33
Table 4-1: Details of the test vehicles	49
Table 4-2: Characteristics of driving pattern in Cash and ETC lane	52
Table 4-3: Abstract of driving parameters during experiments	52
Table 5-1: Mean PM concentration at toll plazas during post-monsoon season	57
Table 5-2: Hourly average PM concentration at Hapur toll plaza, traffic flow and meteorological parameters	59
Table 5-3: Hourly average PM concentration at reference location near Hapur toll plaza, traffic flow and meteorological parameters	63
Table 5-4: Hourly average PM concentration at Gurgaon toll plaza, traffic flow and meteorological parameters	65
Table 5-5: Hourly average PM concentration at reference location near Gurgaon toll plaza, traffic flow and meteorological parameters	67
Table 5-6: Hourly average PM concentration at Faridabad toll plaza, traffic flow and meteorological parameters	69
Table 5-7: Hourly average PM concentration at reference location near Faridabad toll plaza, traffic flow and meteorological parameters	72
Table 5-8: Correlation coefficients between PM levels at toll plaza and meteorology	74
Table 5-9: Coefficient of determination of proposed model for PM levels near toll plaza.	76
Table 5-10: Effect of toll plaza geometry on PM concentration w.r.t the reference location .	78
Table 5-11: Particle number concentration in exhaust during different driving patterns	79
Table 5-12: Comparison of Mean PN concentration during different driving phases.....	87

LIST OF ABBREVIATIONS AND ACRONYMS

ACM	Automatic toll collection
ADMS	Atmospheric Dispersion Modelling System
AEMS	Aerosol Emission Measurement System
ARAI	Automotive Research Association of India
BP	Barometric Pressure
BS	Bharat Stage
CALINE	California Line Source Model
CMEM	Comprehensive Modal Emission Model
CNG	Compressed natural gas
CPCB	Central Pollution Control Board
EDM	Environmental Dust Monitor
EF	Emission Factor
ER	Emission Rate
ETC	Electronic Toll Collection
FEV	Forced Expiratory Volume
FVC	Forced Vital Capacity
GHG	Green House Gases
GPS	Global Positioning System
HBEFA	Handbook Emission Factors for Road Transport
HDV	Heavy duty vehicles
IR	Infra red
IRC	Indian Roads Congress

IVE	International Vehicle Emissions
LMIC	Low- or Middle-Income Country
LOS	Level of Service
MMR	Mumbai Metropolitan Region
MOVES	Motor Vehicle Emission Simulator
MTC	Manual Toll Collection
NAAQS	National Ambient Air Quality Standards
NHAI	National Highways Authority of India
NJTPK	New Jersey Turnpike
NPET	Nano Particle Emission Tester
NRMSE	Normalized Root Mean Square Error
OBD	Onboard Diagnostics
ORT	Open Road Tolling
PARAMICS	PARAllel MICroscopic Traffic Simulator
PCC	Pearson's correlation coefficient
PEFR	Peak Expiratory Flow Rate
PEMS	Portable emissions measurement systems
PHEM	Passenger Car and Heavy-Duty Vehicle Emission Model
PM	Particulate Matter
PN	Particle Number
RH	Relative Humidity
RPM	Revolutions Per Minute
SPD	Speed profile discretization
SR	Solar Radiation
TCIL	Transport Corporation of India Limited

UAV	Unmanned aerial vehicle
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UV	Ultra Violet
VIF	Variance Inflation Factor
VISSIM	Verkehr In Städten - SIMulationsmodell
VOC	Volatile Organic Carbon
VSP	Vehicle Specific Power
WHO	World Health Organisation
WPE	Western peripheral expressway
WS	Wind Speed