EXPERIMENTAL AND NUMERICAL (TWO- AND THREE-DIMENSIONAL) INVESTIGATION OF PARTICLE TRAPPING PERFORMANCE OF SEDIMENT INVERT TRAPS (SIT) FITTED IN RECTANGULAR OPEN CHANNEL

SALMAN BEG

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
MARCH, 2025

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL (TWO- AND THREE-DIMENSIONAL) INVESTIGATION OF PARTICLE TRAPPING PERFORMANCE OF SEDIMENT INVERT TRAPS (SIT) FITTED IN RECTANGULAR OPEN CHANNEL

by

SALMAN BEG

Department of Civil Engineering

Submitted

in fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

MARCH, 2025

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled **"Experimental and Numerical (Two- and Three-Dimensional) Investigation of Particle Trapping Performance of Sediment Invert Traps (SIT) Fitted in Rectangular Open Channel"**, being submitted by **Mr. Salman Beg** to the Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, India for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** in Civil Engineering, is a bonafide research work carried out by him under my supervision and guidance. The thesis, in my opinion, has reached the standard of fulfilling the requirement for the award of Doctor of Philosophy degree. The research report and the results presented in this thesis have not been submitted in parts or in full to any other University or Institute for the award of any degree or diploma.

March, 2025

Dr. Deo Raj Kaushal
(Supervisor)
Professor
Department of Civil Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi-110016

Acknowledgments

I bow in reverence to the Almighty God whose benign benediction gave me the required zeal for completion of this work.

I wish to express my sincere gratitude to my revered and learned supervisor Dr. Deo Raj Kaushal, Professor, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, India for his illuminating, scholarly guidance and creative supervision right from its inception to its culmination in the present work. He has always been inexhaustible source of inspiration and guidance to me. Without his unceasing encouragement and cooperation this work would not have completed. I humbly acknowledge a lifetime's gratitude to him.

I would like to express my gratitude to Prof. Vasant Matsagar, Head, Department of Civil Engineering, former HOD's (Prof. Manoj Dutta, Prof. N. K. Garg, Prof. G. V. Ramana and Prof. A. K. Nema), internal members of SRC (Prof. R. R. Kalaga, Prof. S. Chakma, Department of Civil Engineering) and external member of SRC (Prof. S. S. Sinha, Department of Applied Mechanics) for their co-operative attitude, valuable comments and suggestions throughout the study period.

I owe a deep sense of gratitude to the All-pervading Spirit whose divine light provided me the perseverance, guidance, inspiration, faith and strength to carry on even when the going got tough. My special sincere, heartfelt gratitude and indebtedness are due to my Paternal Aunt, Uncle and Father, for their sincere prayers, constant encouragement and blessings.

I wish to express my deep sense of gratitude to late Prof. M. Jamil, Civil Engineering Department, AMU, Aligarh for his encouraging, caring words, inspiration and guidance which have contributed in a significant way towards

completion of this thesis. I do not have words to express his all kindness and help. I pray for him, for the best returns from Almighty.

I am deeply thankful to Dr. M. Mohsin, Associate Professor, University Polytechnique, AMU, Aligarh for sharing his knowledge in performing PIV experiments.

I am deeply grateful for the moral and uplifting support extended to me by my esteemed colleagues, Dr. Himanshu Pratap Singh, Dr. Sandhya Gupta, Dr. Aravind Kumar Bairwa, Miss Stuti Mishra, Mr. Harshwardhan, Mr. Yatindra Kumar, Mr. Gaurav and all other members of the Simulation Lab who have been instrumental in my journey.

I would also like to extend my thanks to Mr. Nena Ram Gehlot, Mr. Yaad Ram and Mr. Sharan who consistently demonstrated their willingness to provide assistance in the Simulation Laboratory of Water Resource Engineering section. I would like to express my sincere gratitude to the esteemed members of the Civil Engineering Department, particularly Mr. Rajveer Agrawal and Mr. Randheer, for their invaluable assistance with various official matters. Their contributions have been instrumental in the successful completion of this scholarly pursuit. Anyone who assisted me in any way with my research, whether it was directly or indirectly, deserves my deepest gratitude.

March, 2025 **Salman Beg**

Abstract

Sewer systems in cities are an important part of the subterranean infrastructure that will be important for a long time to come. Due to increased urbanization, major construction projects generate enormous volumes of construction debris and dust, having sediment particles which settles on building rooftops, parking lots, highways and streets. Stormwater sewer inlets, open drains, and gully pots carry sediments and heavy metals from impermeable surfaces like roadways, parking lots and building roofs into combined sewers after rainfall and high winds. Smaller sediment particles move as a suspended load in combined sewers, stormwater sewers, or open drains, whereas bigger particles roll, slide, and saltate. In summer, when sewers and open stormwater drainage channels have low water flow, sediment builds up on the channel bed. Excessive sedimentation reduces the cross-section of open stormwater drainages and sewer conduits, reducing their flow capacity and causing sewer water to spill out, causing flooding or waterlogging and environmental nuisance. Stormwater runoff and sewer water which is often silty, reduce the efficiency of sewage treatment plant pumps and hydropower dam turbines. Pollutants sticking on sediment may harm aquatic life and water quality of receiving water bodies.

The sedimentation problem in stormwater sewer channels and drainages has led to the development and use of sedimentation mitigation devices. In-line combined sewage detention tanks (CSDT) and grit chambers place strategically along stormwater channel reaches reduce silt and optimize channel performance. Unfortunately, grit chambers and in-line CSDTs retain organic material with sediment particles, which stinks, and sediment particles escape at high velocity. Slotted sediment invert traps (SITs) reduce particle settling in sewers and stormwater drains without the downsides of grit chambers and detention tanks, according to previous

research. A sediment invert trap (SIT) is a bucket (closed on all sides except top) below the channel bottom that traps sediments that fall in. For assessing the particle trapping performance of SIT, a number of design aspects of SIT such as the shape of SIT, slot sizes, flow depth, sediment size and tilt of SIT have been studied earlier by investigators, experimentally and computationally. In experimental studies, previous investigators have used actual and artificial particles; in two- and three-dimensional computational analysis, spherical particles have been considered in the discrete phase model (DPM) of ANSYS Fluent. However, natural sediments (or sewer sediments) have a non-spherical shape. Earlier investigators have tested SITs of single horizontal and vertical dimensions; however, variation in depth, length and width of SITs can affect its particle trapping efficiency. Moreover, for two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) computational modeling, previous researchers assumed the lid geometry to be a thin line and a plane, respectively. A certain thickness of upstream and downstream lids was proven to exist above the top of the SIT, as shown by the geometry of the actual SIT demonstrated by Schmitt *et al*. (1999). In earlier studies, rectangular and trapezoidal SITs of single depth have been extensively studied through simulation-based modeling using a fixed lid modeling approach in which an open channel flume was considered a conduit closed from all sides and flow in it was under pressure. In fact, the flow in open channels is under gravity and has a distinct free water surface exposed to the atmosphere.

There is a scope for a study on the design aspects of SITs, such as the shape and depth of SIT, lid-thickness of SIT, actual shape of sediment particle and development of empirical particle trap efficiency predictors for predicting the particle trapping performance of rectangular, irregular hexagonal and trapezoidal SITs. An experimental as well as computational investigation is needed to study the effect of

the shape and depth of the SIT, the lid-thickness of SIT, and the actual shape of sediment particles on the particle trap efficiency of the SIT.

This study was started firstly with measurements of velocity distribution in an open channel and SITs using 2D particle image velocimetry (PIV) experimental set-up to visualize the velocity vector field and predict sewer sediment settlement, erosion, and deposition patterns inside slotted rectangular, irregular hexagonal, and trapezoidal sewer SITs. Secondly, a three-dimensional simulation-based case study examined the importance of including lid-thickness (t) and particle shape factor (ϕ) in simulation modeling for prediction of particle trap efficiency of SIT. After that, a separate extensive experimental study examined how the shape and depth of SIT, lid-thickness of SIT, actual shape of sediment particle affects the particle trap efficiency of rectangular, irregular hexagonal and trapezoidal SITs at three depths of flow, with five sewer sediment size ranges, and two slot aperture sizes. For experiments, real sewer sediments collected from the stormwater sewers was used with laboratory-scaled 5 m long and 0.15 m wide open channel flume with bottom-fitted slotted SITs. Under the same conditions and parameters of experimental study, a two- and three-dimensional computational study was carried out to propose an improved simulation modeling to bring an improvement in the prediction of particle trap efficiency of rectangular, irregular hexagonal and trapezoidal SITs by incorporating the thickness of lids in the simulation model geometry and the particle shape factor of real sewer sediment particles into the discrete phase model (DPM). The present 2D and 3D predictions of particle trap efficiency of each SIT was carried out using both spherical and non-spherical drag laws in DPM. The present simulation studies used ANSYS Fluent 2020 R1 CFD software, including the volume of fluid (VOF) model, k-ϵ (realizable type) turbulence model, and DPM. In the end, multiple nonlinear regression analysis was done utilizing Microsoft Excel's generalized reduced gradient

(GRG) solver to develop the empirical trap efficiency predictors for rectangular, irregular hexagonal, and trapezoidal SITs.

The flow velocities at the central vertical plane of open channel flume obtained through PIV measurements were in satisfactory agreement with those predicted by 3D-CFD simulations and equation of Yang *et al*. (2004). Similarly, average flow velocities in open channel flume measured by the EMF were in satisfactory agreement with those predicted by 3D-CFD simulations and equation of Yang *et al*. (2004). At all flow depths in open channel flume, the magnitude of velocities measured by the PIV in the SITs was consistently lower than those predicted by 3D-CFD simulations, in all depth and shape of SITs. The case study showed that lid-thickness and particle shape factor significantly affected the particle trap efficiency of SIT. However, the effect of the particle shape factor was found more dominant than that of the lid-thickness. Experimental and 2D & 3D simulated particle trap efficiency of rectangular, irregular hexagonal, and trapezoidal SITs increased with depth of SIT, but the trend was not uniform for a specific range of sewer sediment sizes, slot aperture sizes, and flow depths. In 2D and 3D simulation modeling, using the experimental data of the present study, the consideration of the lid-thickness (t) in the geometry of the lids and shape factor (ϕ) of real non-spherical sewer sediment particles in the DPM model brought 2D and 3D predicted particle trap efficiency closer to experimental findings as compared to the 2D and 3D predictions with spherical particles, which indicates that the proposed simulation modeling is successfully validated and can be used by hydraulic engineers as a replacement of experiments to design the SITs for sewer solid management. Additionally, regardless of spherical and non-spherical drag laws and lid-thickness, it was found in 2D and 3D simulations that variations in turbulent kinetic energy (TKE) in the slot aperture region with variations in the depth of SIT, depth of flow, and slot aperture size

affected the particle trap efficiency of each SIT. Three-dimensional (3D) simulation modeling outperformed 2D simulation modeling, with predicted particle trap efficiency values closer to experimental values. In general, 3D predicted particle trap efficiencies are lower than 2D predicted particle trap efficiencies which is due to the reason that in case of 3D simulations, the TKE in the slot aperture region was higher than in the case of 2D simulations. The 3D predicted average velocity and velocity vector field in an open channel flume and SITs had been satisfactorily validated with PIV observations. Hence, it is verified that the selected VOF and realizable k-ϵ turbulence models of ANSYS Fluent CFD software are robust for studying the flow through open channel flumes with SITs attached below their bottom bed. The free water surface and water hump formation above the SITs, as tracked by the VOF model, was nearly identical to what was seen experimentally, indicating successful validation of the numerical simulations and robustness of the VOF model. The fixed lid model is not capable to simulate such realistic water surface profiles. Empirical regression models developed for predicting particle trap efficiency of rectangular, irregular hexagonal, and trapezoidal SITs performed well in terms of R, R^2, and *MAPE*.

This study concluded that out of the selected three SIT geometries, the overall best shape of the SIT is rectangular, which yielded maximum particle trap efficiency both experimentally and computationally by trapping the more fraction of sediment particles in a given sewer sediment size range. Out of the two slot aperture sizes of 0.15 m and 0.03 m, use of slot aperture size of 0.15 m in the entire range of depth of SIT (y) covered in the present study provides maximum particle trap efficiency which can be used by hydraulic design engineers for implementing on the existing or new storm water sewers and urban open channel drainages. Based on the careful analysis of the variation of particle trap efficiency with varied depth of rectangular SIT, sewer

sediment size range, flow depth and slot aperture size, it is suggested to use depth of rectangular SIT (y) in the range of 0.38 m $\leq y \leq$ 0.65 m with slot aperture size of 0.15 m and depth of rectangular SIT equal to 0.38 m with slot aperture size of 0.03 m. The best suitable simulation models for modeling the fluid flow in an open channel with bottom-fitted SITs is the VOF and k-ϵ turbulence models.

सार (सारांश)

शहरों में सीवर प्रणालियाँ भूमिगत बुनियादी ढांचे का एक महत्वपूर्ण हिस्सा हैं जो आने वाले लंबे समय तक महत्वपूर्ण रहेंगी। बढ़ते शहरीकरण के कारण, प्रमुख निर्माण परियोजनाएं भारी मात्रा में निर्माण मलबा और धूल उत्पन्न करती हैं, जिसमें तलछट के कण होते हैं जो इमारतों की छतों, पार्किंग स्थलों और राजमार्गों और सड़कों पर जमा हो जाते हैं। बारिश और तेज़ हवाऐं तलछट और भारी धातुओं को अभेद्य सतहों जैसे सड़कों, पार्किंग स्थलों और इमारत की छतों से स्टार्मवाटर सीवर इनलेट, खुली नालियां और गल्ली पोट के रास्ते से संयुक्त सीवर में ले जाते हैं। छोटे तलछट कण संयुक्त सीवरों, स्टार्मवाटर सीवरों या खुली नालियों में सस्पेनडिड लोड के रूप में चलते हैं, जबकि बड़े कण लुढ़कते, फिसलते और उछलते हुऐ चलते हैं। गर्मियों में जब सीवर और खुले स्टार्मवाटर ड्रेनेज चैनलों में पानी का प्रवाह कम होता है, तो चैनल के तल पर तलछट जमा हो जाती है। अत्यधिक तलछट जमाव खुले स्टार्मवाटर ड्रेनेज और सीवर नाली के क्रॉस-सेक्शन को कम कर देता है, जिससे उनकी प्रवाह क्षमता कम हो जाती है और सीवर का पानी बाहर फैल जाता है, जिससे बाढ़ या जलभराव और पर्यावरणीय परेशानी होती है। स्टार्मवाटर अपवाह और सीवर पानी जो अक्सर गादयुक्त होता है, सीवेज उपचार संयंत्र पंपों और जलविद्युत बांध टर्बाइनों की दक्षता को कम कर देता है। तलछट पर चिपके प्रदूषक जलीय जीवन और जल निकायों की जल गुणवत्ता को नुकसान पहुंचा सकते हैं।

स्टार्मवाटर सीवर चैनलों और जल निकासी में अवसादन की समस्या के कारण अवसादन शमन उपकरणों का विकास और उपयोग हुआ है। इन-लाइन संयुक्त सीवेज डिटेंशन टैंक (सीएसडीटी) और ग्रिट चैंबर रणनीतिक रूप से स्टार्मवाटर चैनल के साथ लगाए जाते हैं, जो गाद को कम करते हैं और चैनल के प्रदर्शन को अनुकूलित करते हैं। दुर्भाग्य से, ग्रिट चैंबर और इन-लाइन सीएसडीटी कार्बनिक पदार्थों को तलछट कणों के साथ बनाए रखते हैं, जिससे बदबू आती है और तलछट के कण उच्च वेग से निकल जाते हैं। पिछले शोध के अनुसार, स्लॉटेड सेडिमेंट इनवर्ट ट्रैप्स (एसआईटी) में वो खामियाँ नहीँ होतीँ जो ग्रिट चैंबर और डिटेंशन टैंक मे होती हैं और एसआईटी बहुत कुशलता से सीवर और स्टार्मवाटर नालियों में कणों के जमाव को कम करते हैं। सेडिमेंट इनवर्ट ट्रैप (एसआईटी) चैनल के तल के नीचे एक बाल्टी (ऊपर को छोड़कर सभी तरफ से बंद) होती है जो अंदर गिरने वाले तलछट को फंसाती है। एसआईटी के

कण फंसाने के प्रदर्शन का आकलन करने के लिए, एसआईटी के कई डिजाइन पहलुओं जैसे कि एसआईटी का आकार, स्लॉट का आकार, प्रवाह की गहराई, तलछट का आकार और एसआईटी के झुकाव का अध्ययन जांचकर्ताओं द्वारा पहले प्रयोगात्मक और कम्प्यूटेशनल रूप से किया गया है। प्रायोगिक अध्ययनों में, पिछले जांचकर्ताओं ने वास्तविक और कृत्रिम कणों का उपयोग किया है; दो- और तीन-आयामी कम्प्यूटेशनल विश्लेषण में, ANSYS फ़्लुएंट के डिसकिरीट फेज़ मॉडल (डीपीएम) में कणों को गोलाकार माना गया है। हालाँकि, प्राकृतिक तलछट (या सीवर तलछट) का आकार गैर-गोलाकार होता है। पहले जांचकर्ताओं ने एकल क्षैतिज और ऊर्ध्वाधर आयामों के एसआईटी का परीक्षण किया है; हालाँकि, एसआईटी की गहराई, लंबाई और चौड़ाई में भिन्नता इसकी कण ट्रैप दक्षता को प्रभावित कर सकती है। इसके अलावा, दो-आयामी (२डी) और तीन-आयामी (३डी) कम्प्यूटेशनल मॉडलिंग के लिए, पिछले शोधकर्ताओं ने लिड्स ज्यामिति को क्रमशः एक पतली रेखा और एक पतली शीट माना था। अपस्ट्रीम और डाउनस्ट्रीम लिड्स की एक निश्चित मोटाई एसआईटी के शीर्ष के ऊपर मौजूद साबित हुई थी, जैसा कि श्मिट *एट अल.* (१९९९) द्वारा प्रदर्शित वास्तविक एसआईटी की ज्यामिति द्वारा दिखाया गया था। पहले के अध्ययनों में, एकल गहराई के आयताकार और ट्रैपेज़ॉइडल एसआईटी का फिकस्ड लिड मॉडलिंग दृष्टिकोण का उपयोग करके सिमुलेशन-आधारित मॉडलिंग के माध्यम से बड़े पैमाने पर अध्ययन किया गया है, जिसमें एक खुले चैनल फ़्लूम को सभी तरफ से बंद नाली माना जाता था और इसमें प्रवाह दबाव के अधीन था। वास्तव में, खुले चैनलों में प्रवाह गुरुत्वाकर्षण के अधीन होता है और इसमें वायुमंडल के संपर्क में आने वाली जल सतह होती है।

एसआईटी के डिजाइन पहलुओं पर अध्ययन की गुंजाइश है, जैसे एसआईटी का आकार और गहराई, एसआईटी के लिड्स की मोटाई, तलछट कण का वास्तविक आकार और आयताकार, अनियमित हेक्सागोनल और ट्रैपेज़ॉइडल एसआईटी के कण फंसाने के प्रदर्शन का आकलन करने के लिए अनुभवजन्य कण जाल दक्षता भविष्यवक्ताओं का डेवलपमेंट। एसआईटी के कण जाल दक्षता पर एसआईटी के आकार और गहराई, एसआईटी के लिड्स की मोटाई और तलछट कणों के वास्तविक आकार के प्रभाव का अध्ययन करने के लिए एक प्रयोगात्मक और साथ ही कम्प्यूटेशनल जांच की आवश्यकता है।

इस अध्ययन की शुरुआत सबसे पहले एक खुले चैनल और एसआईटी में वेग वितरण के माप के साथ की गई थी, जिसमें वेग वेक्टर क्षेत्र को देखने और स्लॉटेड आयताकार, अनियमित हेक्सागोनल और ट्रैपेज़ॉइडल सीवर एसआईटी के अंदर सीवर तलछट का गिरना, क्षरण और जमाव पैटर्न का पूर्वानुमान लगाने के लिये २डी पारटिकल इमेज विलासिमीटरी (पीआईवी) प्रयोगात्मक सेट-अप का उपयोग किया गया था। इसके बाद एक तीन-आयामी सिमुलेशन-आधारित केस अध्ययन से एसआईटी की कण जाल दक्षता के पूर्वानुमान के लिए सिमुलेशन मॉडलिंग में लिड्स की मोटाई (t) और कण आकार कारक (ϕ) को शामिल करने के महत्व की जांच की। उसके बाद, एक अलग व्यापक प्रयोगात्मक अध्ययन ने जांच की कि एसआईटी का आकार और गहराई, एसआईटी के लिड्स की मोटाई, तलछट कण का वास्तविक आकार किस तरह आयताकार, अनियमित हेक्सागोनल और ट्रैपेज़ॉयडल एसआईटी की कण जाल दक्षता को प्रवाभित करता है, प्रवाह की तीन गहराई पर, पांच सीवर तलछट के आकार श्रेणियाँ और दो स्लॉट एपर्चर आकार के साथ। प्रयोगों के लिए, स्टार्मवाटर सीवरों से एकत्र किए गए वास्तविक सीवर तलछट का उपयोग प्रयोगशाला-स्केल के ५ मीटर लंबे और ०.१५ मीटर चौड़े खुले चैनल फ़्लूम और बॉटम-फिटेड स्लॉटेड एसआईटी के साथ किया गया था। प्रायोगिक अध्ययन की समान शर्तों और मापदंडों के तहत, आयताकार, अनियमित हेक्सागोनल और ट्रैपेज़ॉइडल एसआईटी की कण जाल दक्षता की अनुमानिता में सुधार लाने के लिए और एक बेहतर सिमुलेशन मॉडलिंग का प्रस्ताव करने के लिए दो- और तीन-आयामी कम्प्यूटेशनल अध्ययन किया गया था जिसमे सिमुलेशन मॉडल ज्यामिति में लिड्स की मोटाई और डिसकिरीट फेज़ मॉडल (डीपीएम) में वास्तविक सीवर तलछट कणों के कण आकार कारक (ϕ) को शामिल किया गया। प्रत्येक एसआईटी की कण जाल दक्षता की वर्तमान २डी और ३डी भविष्यवाणियां डीपीएम में गोलाकार और गैर-गोलाकार ड्रैग कानूनों का उपयोग करके की गईं। वर्तमान सिमुलेशन अध्ययनों में ANSYS फ़्लुएंट २०२० R१ सीएफडी सॉफ़्टवेयर का उपयोग किया गया है, जिसमें वाल्यूम ओफ फ्लूयड (वीओएफ) मॉडल, k-ϵ (रियालाइज़िबिल) टरबुलेंस मॉडल और डीपीएम शामिल हैं। अंत में, आयताकार, अनियमित हेक्सागोनल और ट्रैपेज़ॉइडल एसआईटी के लिए अनुभवजन्य जाल दक्षता भविष्यवक्ताओं को विकसित करने के लिए माइक्रोसॉफ्ट एक्सेल के जेनरालाइज़्ड रिडयूज़्ड ग्रेडिएंट (जीआरजी) सॉल्वर का उपयोग करके मल्टीपल नॉनलाइनियर रिग्रेशन विश्लेषण किया गया था।

खुले चैनल फ्लूम के केंद्रीय ऊर्ध्वाधर तल पर पीआईवी माप के माध्यम से प्राप्त प्रवाह वेग ३डी-सीएफडी सिमुलेशन और यांग *एट अल.* (२००४) के समीकरण द्वारा पूर्वानुमानित वेगों के साथ संतोषजनक रूप से मेल खाते थे। इसी तरह, ओपन चैनल फ्लूम में इलेक्ट्रो मेगनेटिक फ्लो मीटर (ईएमएफ) द्वारा मापे गए औसत प्रवाह वेग ३डी-सीएफडी सिमुलेशन और यांग *एट अल.* (२००४) के समीकरण द्वारा पूर्वानुमानित वेगों के साथ संतोषजनक रूप से मेल खाते थे। खुले चैनल फ्लूम में सभी प्रवाह गहराइयों पर, एसआईटी की सभी गहराई और आकार में पीआईवी द्वारा मापे गए वेगों का परिमाण ३डी-सीएफडी सिमुलेशन द्वारा मापे गए परिमाण से कम था। तीन-आयामी सिमुलेशन-आधारित केस अध्ययन से पता चला कि लिड्स की मोटाई और कण आकार कारक ने एसआईटी की कण जाल दक्षता को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित किया। हालाँकि, कण आकार कारक का प्रभाव लिड्स की मोटाई की तुलना में अधिक प्रभावी पाया गया। आयताकार, अनियमित हेक्सागोनल और ट्रैपेज़ॉइडल एसआईटी की प्रायोगिक और २डी और ३डी सिम्युलेटेड कण जाल दक्षता एसआईटी की गहराई के साथ बढ़ी, लेकिन बढ़ने की प्रवृत्ति सीवर तलछट आकार, स्लॉट एपर्चर आकार और प्रवाह गहराई की एक विशिष्ट श्रृंखला के लिए एक समान नहीं थी। २डी और ३डी सिमुलेशन मॉडलिंग में, वर्तमान अध्ययन के प्रयोगात्मक डेटा का उपयोग करते हुए, डीपीएम मॉडल में वास्तविक गैर-गोलाकार सीवर तलछट कणों के आकार कारक (ϕ) और लिड्स की ज्यामिति में लिड की मोटाई (t) पर विचार करके कण जाल दक्षता की भविष्यवाणी की गई। २डी और ३डी सिमुलेशन मॉडलिंग में गोलाकार कणों के साथ जाल दक्षता की भविष्यवाणियों की तुलना में वास्तविक गैर-गोलाकार कणों के साथ जाल दक्षता प्रायोगिक निष्कर्षों के करीब है जो इंगित करता है कि प्रस्तावित सिमुलेशन मॉडलिंग सफलतापूर्वक मान्य है जिसका उपयोग हाइड्रोलिक इंजीनियरों द्वारा प्रयोगों के प्रतिस्थापन के रूप में और सीवर प्रबंधन के लिए एसआईटी को डिजाइन करने के लिए किया जा सकता है। इसके अतिरिक्त, गोलाकार और गैर-गोलाकार ड्रैग कानूनों और लिड्स की मोटाई की परवाह किए बिना, २डी और ३डी सिमुलेशन में पाया गया कि स्लॉट एपर्चर क्षेत्र में टरबुलेंस काइनेटिक एनरजी (टीकेई) में भिन्नता एसआईटी की गहराई, प्रवाह की गहराई और स्लॉट एपर्चर आकार में भिन्नता के साथ है जिसने प्रत्येक एसआईटी की कण जाल दक्षता को प्रभावित किया। ३डी सिमुलेशन मॉडलिंग ने २डी सिमुलेशन मॉडलिंग से बेहतर प्रदर्शन किया, जिसमें अनुमानित कण जाल दक्षता प्रयोगात्मक कण

जाल दक्षता के करीब थे। सामान्य तौर पर, ३डी पूर्वानुमानित कण जाल दक्षताएं २डी पूर्वानुमानित कण जाल दक्षताओं से कम हैं, जिसका कारण यह है कि ३डी सिमुलेशन के मामले में, स्लॉट एपर्चर क्षेत्र में टीकेई २डी सिमुलेशन के मामले की तुलना में अधिक था। एक खुले चैनल फ्लूम और तलछट इनवर्ट ट्रैप में ३डी सिमुलेशन से अनुमानित किया गया औसत वेग और वेग वेक्टर क्षेत्र पीआईवी अवलोकनों के साथ संतोषजनक ढंग से मान्य किया गया। इसलिए, यह सत्यापित है कि खुले चैनल फ़्लूम्स और उनके निचले बेड के नीचे लगे एसआईटी के माध्यम से प्रवाह का अध्ययन करने के लिए ANSYS फ्लुएंट सीएफडी सॉफ़्टवेयर के चयनित वीओएफ और रियालाइज़िबिल k-ϵ टर्बुलेंस मॉडल सबसे उपयुक्त हैं। एसआईटी के ऊपर पानी की सतह और पानी के उठाव का गठन, जैसा कि वीओएफ मॉडल द्वारा ट्रैक किया गया था, लगभग वैसा ही था जैसा प्रयोगात्मक रूप से देखा गया था, जो संख्यात्मक सिमुलेशन के सफल सत्यापन और वीओएफ मॉडल की मजबूती का संकेत देता है। फिकस्ड लिड मॉडल ऐसी यथार्थवादी जल सतह प्रोफाइल का अनुकरण करने में सक्षम नहीं है। आयताकार, अनियमित हेक्सागोनल और ट्रैपेज़ॉइडल एसआईटी की कण जाल दक्षता का पूर्वानुमान लगाने के लिये प्रस्तावित किये गये अनुभवजन्य प्रतिगमन मॉडल ने R, R^2 और $MAPE$ के संदर्भ में अच्छा प्रदर्शन किया।

इस प्रयोगात्मक और कम्प्यूटेशनल अध्ययन ने निष्कर्ष निकाला कि चयनित तीन एसआईटी ज्यामिति में से, कुल मिलाकर सबसे अच्छा एसआईटी का आकार आयताकार है, जो तलछट कणों के अधिक अंश को फंसा लेता है जिससे अधिकतम कण जाल दक्षता प्राप्त होती। ०.१५ मीटर और ०.०३ मीटर आकार के दो स्लॉट एपर्चर में से ०.१५ मीटर के स्लॉट एपर्चर आकार का उपयोग वर्तमान अध्ययन में शामिल प्रत्येक आयताकार एसआईटी की गहराई (y) की पूरी श्रृंखला में अधिकतम कण जाल दक्षता प्रदान करता है, जिसका उपयोग हाइड्रोलिक डिजाइन इंजीनियरों द्वारा मौजूदा या नए स्टार्मवाटर सीवर और शहरी खुले चैनल ड्रेनेज में अमल में लाया जा सकता है। आयताकार एसआईटी की विभिन्न गहराई, सीवर तलछट आकार श्रेणियों, प्रवाह गहराई और स्लॉट एपर्चर आकार के साथ कण ट्रैप दक्षता की भिन्नता के सावधानीपूर्वक विश्लेषण के आधार पर, ०.१५ मीटर के स्लॉट एपर्चर आकार के साथ $0.3\mathcal{E} \leq y \leq 0.65$ मीटर की सीमा में आयताकार एसआईटी की गहराई (y) और ०.०३ मीटर के स्लॉट एपर्चर आकार के साथ ०.३८ मीटर के बराबर आयताकार एसआईटी की गहराई (y) का उपयोग करने का सुझाव दिया

गया है। बॉटम-फिटेड एसआईटी के साथ एक खुले चैनल में प्रवाह के मॉडलिंग के लिए सबसे उपयुक्त सिमुलेशन मॉडल वीओएफ और रियालाइज़िबिल k-ϵ टरबुलेंस मॉडल हैं।

CONTENTS

LIST OF FIGURES

(c) error range of model development data set (d) comparison with 3D CFD predictions

LIST OF TABLES

LIST OF SYMBOLS

S_p	Sedimentation parameter
C_a	Capillary number
k *or* k_p	Turbulence kinetic energy
k	Von-Karman constant
y_{f}	Vertical distance from channel bed to the free water surface
y_o	Vertical distance where velocity is hypothetically zero
y	Depth of sediment invert trap (SIT)
l	Length of sediment invert trap (SIT)
b	Width of an sediment invert trap (SIT)
x	Slot aperture size
t	Thickness of upstream and downstream lids
L	Characteristic length, Length of the flume
B	Width of the flume or open channel
Y *or* h	Depth of flow in open channel
H	Depth of the flume
S_{α_b}	Source term
S, S_o	Open channel bed slope or gradient
Q	Discharge/Flow rate
A	Wetted area
P	Wetted perimeter of open channel
P	Pressure
P	Porosity
V_p	Volume of pores or voids
V	Total volume of the mixture
R_h	Hydraulic radius
D	Hydraulic diameter
u_*, V_*	Bed shear velocity
F_r	Froude number
r_m	Mean ratio of longest to the shortest diameters
R_h	Hydraulic radius of open channel
R_e	Fluid Reynold number
R_e	Particle relative Reynolds number
R_{*c}	Critical shear Reynold number
D_p	Diameter of sewage solid particles used in present study
G	Specific gravity of sewer sediment particles
w_{s}	Fall velocity of particles
A_p	Average projected area of randomly oriented particles

$\dot{m_{ba}}$ and $\dot{m_{ab}}$	Transition of mass transfer between phases
m_p	Mass of the particle
U_{*c}	Critical bed shear velocity
$\vec{u}_b$	Average velocity of secondary phase: water
$\vec{u}_p$	Average velocity of particle
V	Mean or average velocity of the fluid measured by EMF
V_a	Mean or average flow velocity in the open channel
U_p	Velocity of the particle falling in the moving fluid.
U_{px} *and* U_{py}	Horizontal and vertical components of particle fall velocity in the moving fluid, respectively
$\vec{u}$, $\vec{U}$	Velocity of the fluid phase
u or $u_{x,y,z,t}$	Flow velocity at a point in x-direction
v or $v_{x,y,z,t}$	Flow velocity at a point in y-direction
w or $w_{x,y,z,t}$	Flow velocity at a point in z-direction
$\bar{u}$ *or* $\overline{u_{x,y,z}}$	Average of flow velocity at a point in x-direction
$\bar{v}$ or $\overline{v_{x,y,z}}$	Average of flow velocity at a point in y-direction
$\bar{w}$ or $\overline{w_{x,y,z}}$	Average of flow velocity at a point in z-direction
u' or $u'_{x,y,z,t}$	Fluctuating component of mean flow velocity at a point in x-direction
v' or $v'_{x,y,z,t}$	Fluctuating component of mean flow velocity at a point in y-direction
w' or $w'_{x,y,z,t}$	Fluctuating component of mean flow velocity at a point in z-direction
u_{rms}	Standard deviation of the turbulent velocity fluctuations u'
v_{rms}	Standard deviation of the turbulent velocity fluctuations v'
w_{rms}	Standard deviation of the turbulent velocity fluctuations w'
$d_{84.1}$	Sediment size for which 84.1 percent of the material by weight is finer
d_{50}	Sediment size for which 50 percent of the material by weight is finer
$d_{15.9}$	Sediment size for which 15.9 percent of the material by weight is finer
d_g	Geometric mean diameter
$\vec{F}$	Additional acceleration (force per unit mass of particle), external forces
C_D	Drag coefficient
F_D	Drag force
F_{PG}	Pressure gradient force
F_{VM}	Virtual mass force
F_L	Saffman lift force
g	Acceleration due to gravity
c	Constant
d	Particle diameter, mean sediment diameter
d_n	Nominal or equivalent diameter
d_p	Average equivalent spherical diameter
d_{sieve}	Sieve diameter

a_1, a_2, a_3	Constants based on Reynolds number R_e
$R_{e_{sph}}$	Reynolds number based on equivalent spherical diameter of particle
d_{sph}	Equivalent spherical diameter (m)
SA_{sphere}	Surface area of a sphere with equal volume as that of particle
SA_{particle}	Surface area of real particle
u_t, U_t	Terminal fall velocity of particle in fluid
b_1	$e^{(2.3288-6.4581\phi+2.4486\phi^2)}$
b_2	$0.0964 + 0.5565\phi$
b_3	$e^{(4.905-13.8944\phi+18.4222\phi^2-102599\phi^3)}$
b_4	$e^{(1.4681+12.2584\phi-20.7322\phi^2+15.8855\phi^3)}$
V_x, V_y, V_z	Velocity of fluid in x, y and z-directions
W	Specific weight of sediment at the end of T years
W_e	Webber number
Y	Depth of flow in open channel
y_v	Thickness of physical viscous sublayer
m_p	Particle mass

Greek symbols

α_a	Proportion of volume of primary phase: air
α_b	Proportion of volume of secondary phase: water
ρ_p	Density of sewer sediment particles used in present study
ρ_a	Density of primary phase: air
ρ_b	Density of secondary phase: water
ρ_r	Relative density of the particle in water
ρ_s	Dry density of the sediment
τ_{*c}	Non-dimensional critical shear stress
τ_c	Critical shear stress
τ_o or τ_b	Normal bed shear stress
τ_r	Time of particle relaxation
μ	Molecular or dynamic viscosity of fluid
μ_t	Eddy viscosity
ρ, ρ_f	Density of fluid
ϵ	Rate of dissipation of turbulence energy
ϕ	Particle shape factor
η	Particle trap efficiency of an irregular hexagonal invert trap
γ_s	Specific weight of the sediment particle
γ_s	Specific weight of the fluid
σ	Standard deviation
σ	Surface tension
σ_g	Geometric standard deviation

Ψ	Angle of repose
ν	Kinematic viscosity of the fluid
δ_s	Laminar sub-layer
δt	Duration of each laser pulse
Δt	Camera exposure
$\prod$	Wake strength parameter of Cole

LIST OF ABBREVIATIONS

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ADV	Acoustic Doppler Velocimetry
AGU	American Geophysical Union
ANN	Artificial Neural Network
AS	Absolute Sensitivity
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASM	Algebraic Stress Model
BGM	Bounded Gradient Maximization
BSS	Bed Shear Stress
CIRIA	Construction Industry Research and Information Association
CSS	Combined Sewer System
CFD	Computational Fluid Dynamics
CPHEEO	Central Public Health and Environment Engineering Organization
CSDT	Combined Sewage Detention Tank
CSO	Combined Sewer Overflow
DPM	Discrete Phase Model
EMF	Electro Magnetic Flowmeter
FG	Flush Gate
FLM	Fixed Lid Model
GCI	Grid Convergence Index
GGCB	Green-Gauss Cell-Based
GGNB	Green-Gauss Node-Based
GPT	Gross Pollutant Trap
GRG	Generalized Reduced Gradient
HDVS	Hydrodynamic Vortex Separator
HP	Horse Power
HRIC	High Resolution Interface Capturing
LBM	Lattice Boltzman Method
LDV	Laser Doppler Velocimetry
LSCB	Least Squares Cell-Based
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
MUSCL	Monotone Upstream Centered Schemes for Conservation Laws

NBS	Near Bed Solids
N-S	Navier-Stokes
ODE	Ordinary Differential Equation
PC	Personal Computer
PISO	Pressure-Implicit with Splitting of Operators
PIV	Particle Image Velocimetry
POW	Power Law Scheme
PRESTO	PREssure STaggering Option
PSD	Particle Size Distribution
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RE	Relative Error
RMSE	Root Mean Square Error
RS	Relative Sensitivity
SCPT	System for Catchment, Pre-treatment and Treatment
SEM	Scanning Electron Microscope
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SIMPLEC	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent
SIT	Sediment Invert Trap
SSIIM	Sediment Simulation in Intakes with Multiblock Options
SOU	Second Order Upwind Scheme
SST	Shear Stress Transport
TKE	Turbulent Kinetic Energy
TSS	Total Suspended Solids
NBS	Near bed solids
VOF	Volume of Fluid
WWTP	Waste Water Treatment Plant
2D	Two-Dimensional
3D	Three-Dimensional
u/s	Upstream
d/s	Downstream
vs	Versus