# SEAWATER INTRUSION IN COASTAL AQUIFERS

**VIKAS SHARMA**

**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

**MARCH 2025**

# SEAWATER INTRUSION IN COASTAL AQUIFERS

**By**

**VIKAS SHARMA**

Department of Civil Engineering

**Submitted**

in fulfilment of requirements of degree of

**DOCTOR OF PHILOSOPHY**

to the

**INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

**MARCH 2025**

*I dedicate this dissertation to my father*

***Ashok Sharma***

# CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled **"Seawater intrusion in coastal aquifers"** being submitted by **Mr. Vikas Sharma** to the **Indian Institute of Technology Delhi**, for the award of the **degree of Doctor of Philosophy** is a record of the original bonafide research work carried by him under my guidance and supervision. The thesis work, in my opinion, has reached the requisite standards fulfilling the requirement for the **Degree of Doctor of Philosophy.**

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

**Prof. Sumedha Chakma**

Professor

Department of Civil Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

Hauz Khas, New Delhi-110016, India

# ACKNOWLEDGEMENTS

One of my life's most difficult and profound learning experiences was conducting research for my Doctor of Philosophy degree. At this point, you are putting most of the work on your own to finish the journey, but it would not be feasible to do so without the help of many others.

First and foremost, I would like to express my most profound appreciation to IIT Delhi for providing me with an atmosphere full of enthusiasm for cutting-edge research and unconditional support for free thinking. I want to express my sincere gratitude to my supervisor, Prof. Sumedha Chakma, for giving me an opportunity to explore a new dimension of research with all-around support during this long research journey of my Ph.D. Without his constant encouragement, inspiration, understanding, knowledge sharing, and constructive criticism, this would not have been completed with a great research experience.

I would certainly like to extend my most profound appreciation to the members of the research committee SRC, Prof. Suresh Bhalla (SRC chairperson), Prof. Sawan Suman (Outside department expert), and Prof. B.R. Chahar (Departmental expert) for their constructive comments and critical insights, which substantially helped me to improve the study starting from the early inception stage. I would also like to sincerely thank Mr. N. R. Gehlot (Head, Simulation Lab, Civil Engineering Department) and Sharan Kumar for providing the computational facility. It gives me enormous pleasure to extend special thanks to all my colleagues, especially Mr. Kamalakanta Sahu and other friends in the water resource simulation lab at IIT Delhi, who have helped, encouraged, and shared valuable time with me throughout the duration of the study.

I want to express my greatest gratitude to my beloved mother, Satyawati Sharma, for her endless and unconditional support, my sister, Dr. Gunjan Sharma, my better half, Ankita, and my daughter, Prisha Sharma, for their constant love and encouragement. Without all four of you, this journey could never have been accomplished. I am very thankful to all of you for believing in me and being the supporting pillars of my life.

Lastly, I would like to express my sincere thanks to those people, friends, and relatives who are not listed here but directly and indirectly encouraged and supported me throughout this journey.

**Vikas Sharma**

# ABSTRACT

Seawater intrusion (SWI) is an ongoing issue exacerbated internationally by the growing need for freshwater along coastlines, which is affected by rising sea levels and changing climates, challenging sustainable management. Rising sea levels exacerbate SWI, diminishing freshwater availability, disrupting groundwater recharge, amplifying tidal influence, inducing land subsidence, degrading agriculture, damaging coastal ecosystems, and complicating remediation methods such as managed aquifer recharge and physical barrier installation. This research focuses on finding intrusion behavior under the different layering and packing of formation material. The more realistic and conventional remediation techniques are tested for their efficiency under the influence of inclined ocean-aquifer boundary. A laboratory-scale glass box apparatus of dimension 100×50×10 $cm^3$ was used to experiment with a *70°* inclined interface. Individual material with different permeability was used to form the stratified formations. High-resolution images were taken at defined intervals and enhanced for clear intrusion visuals. The thesis documents the importance of an inclined ocean aquifer boundary in stratified layers aquifer formation with static sea level and sea level rise and accessed the efficiency of subsurface barrier and mixed barrier. Additionally, a novel physical barrier has been tested for efficiency and proven to be more effective than existing physical barriers.

The first phase started with determining the intrusion behavior within a sloping boundary in a heterogeneous aquifer and assessing the efficiency of subsurface barriers. Comparing the results of the heterogeneous base case and barrier installed condition, a huge quantity of about 38.93% of groundwater was conserved from contamination. Homogeneous media shows a faster rate of intrusion with a progressive rate of contamination, while heterogeneous media, without barriers, shows slower rates of intrusion due to reduced permeability. Analysis of the toe length using sensitivity analysis in the heterogeneous case shows a range of 24.82 cm to 75 cm before barrier installation and a range of 13.05 cm to 65.24 cm after installation of a barrier.

For the second phase, stratified media was prepared, and the performance of a new kind of novel under-surface barrier system for stratified layers with different permeability under the influence of an inclined ocean-aquifer interface was tested. Results show that the under-surface barrier is much more successful in stopping intrusion when materials with monotonically increasing permeability are considered, as the toe length increases with increasing permeability. For perpendicular stratification, using a conventional barrier is much less efficient than an under-surface barrier as the ratio of toe length to height decreases. The height of intrusion after using an under-surface barrier in different layers decreases subsequently as compared to without the barrier. Results also exhibit that using an under-surface barrier starting from the point where the equilibrium of water has reached and extending towards the impermeable strata is the most efficient approach to follow.

For the third phase, the behavior of intrusion under layering of material in monotonic increasing permeability of the material from bottom to top in parallel stratification and from fresh groundwater side to ocean side. The intrusion was recorded in 2-layer, 3-layer, and 4-layer formations. The height of the intrusion ranged from 28.3 to 32.2 cm. The intrusion was fast and accurate due to the higher permeability of the material. It was concluded that the toe length-to-height ratio varies from 0.43 to 7.0. This ratio is small for materials with lower permeability because the intrusion is slow but steady in both directions; however, for materials with higher permeability, this ratio corresponds to a higher value. The intrusion is restricted to the individual layer until it encounters an impervious layer and follows a proportional pattern with an increasing intrusion area as the opening area increases.

For the fourth phase, the efficiency of the mixed barrier was tested, and the extent of intrusion was analyzed in stratified layers under the influence of an inclined ocean-aquifer boundary with a mixed barrier as a remediation technique. The $T_L\backslash H$ ratio in the base case perpendicular stratification without barrier installation ranged from 0.2 to 0.9 for all four layers, while this ratio ranged from 0.67 to 1.164 in barrier installed condition for mixed barrier installed condition. Both the lower and upper limits of the range increase and approach unity, indicating a proportional intrusion in the vertical and horizontal directions. There was a 40-48% decrease in the extent of toe length after installation. With a mixed barrier installed, the height of the intrusion was reduced, resulting in an increase in the $T_L \backslash H$ and a decrease in the potential for toe length. The intrusion was delayed by 86.67% in parallel stratification and 28.22% in perpendicular stratification after comparing the time period for the base case and the mixed barrier installed condition. A parabolic profile of intrusion was observed in the low-permeability layer, while a convex-outward profile was observed in the higher-permeability layer. The results of this investigation shed light on the mixed barrier's suitability for use in realistically diverse coastal aquifers.

For the fifth phase, the focus of the research shifted to the understanding of studying the influence of sea level rise on the layered formation with inclined ocean-aquifer boundary. The toe length to height ratio corresponds to a value of 0.8 to 3.5 and 1.02 to 1.83, assuming a top horizontal surface, which changes to 0.42 to 4.7 and 0.84 to 1.62 after implementing inclined top ground for parallel and perpendicular stratification, respectively. The results imply that the migration of toe length in parallel stratification is much faster than that in perpendicular stratification. A comparison of increasing intrusion area ranged from 8.3% to 206% for all layering cases, with less time needed to reach the vertical boundary. It was concluded that for the smaller openings, the interaction opening governs the intrusion and not the available head of saltwater above the point. The induced intrusion from the top surface dominates the process for a larger interaction opening.

The results derived from the research may be applied to real-life scenarios for estimating the effectiveness of coastal protection structures such as cutoff walls, under-surface barriers, and subsurface barriers. Applicability of results is subjected to upscaling (Froude's similitude), temporal dynamics, heterogeneity, and the understanding of boundary conditions under case-specific scenarios having heterogeneous formations, such as the eastern coastline and western coastline of India. Finally, the outcomes attained could be helpful for better understanding the behavior of seawater wedges and in providing remediation techniques to save coastal aquifers.

# सार

समुद्री जल की घुसपैठ एक निरंतर मुद्दा है जो तटरेखाओं के साथ ताजे पानी की बढ़ती आवश्यकता के कारण अंतरराष्ट्रीय स्तर पर बढ़ रहा है, जो समुद्र के स्तर में बदलाव और जलवायु में बदलाव से प्रभावित है, जो स्थायी प्रबंधन को चुनौती दे रहा है। एक ओर, समुद्र के स्तर में प्रत्याशित वृद्धि, और दूसरी ओर, प्राकृतिक भूजल पुनर्भरण में कमी, पानी की मांग में वृद्धि, और जलवायु परिवर्तन, समुद्री जल की घुसपैठ को खराब कर सकते हैं। जलभृत एकरूपता पर अधिकांश अध्ययन जिनका उपयोग प्रबंधन दिशानिर्देश बनाने के लिए किया जाता है, लवणता संवेदनशीलता पर ध्यान केंद्रित करते हैं। हालांकि, कुछ निष्कर्षण स्थितियों के तहत, कम पारगम्यता बाधाओं और पसंदीदा प्रवाह मार्गों के साथ भौगोलिक संरचना काफी विविध हो सकती है जो परिसंचरण और खारे परिवहन तंत्र को प्रभावित करते हैं। यह शोध विभिन्न परतों और संरचना सामग्री की पैकिंग के परिदृश्यों के तहत घुसपैठ के व्यवहार को खोजने पर केंद्रित है। अधिक यथार्थवादी और पारंपरिक उपचार तकनीकों का झुकाव वाले महासागर-जलीय सीमा के प्रभाव में उनकी दक्षता के लिए परीक्षण किया जाता है। यहाँ, *70°* झुके हुए इंटरफेस के साथ प्रयोग करने के लिए $100 \times 50 \times 10$ सेमी$^3$ आयाम के एक प्रयोगशाला-पैमाने के ग्लास बॉक्स उपकरण का उपयोग किया गया था। स्तरीकृत संरचनाओं को बनाने के लिए अलग-अलग पारगम्यता वाली व्यक्तिगत सामग्री का उपयोग किया गया था। उच्च-रिज़ॉल्यूशन वाली छवियों को परिभाषित अंतराल पर लिया गया था और स्पष्ट घुसपैठ दृश्यों के लिए बढ़ाया गया था।

पहला चरण एक विषम जलभृत में एक ढलान सीमा के भीतर घुसपैठ व्यवहार को निर्धारित करने और उपसतह बाधाओं की दक्षता का आकलन करने के साथ शुरू हुआ। विषम आधार मामले और बाधा स्थापित स्थिति के परिणामों की तुलना करते हुए, लगभग 38.93% भूजल की एक बड़ी मात्रा को दूषित होने से बचाया गया था। सजातीय मीडिया संदूषण की प्रगतिशील दर के साथ घुसपैठ की तेज दर दिखाता है, जबकि विषम मीडिया, बिना किसी बाधा के, कम पारगम्यता के कारण घुसपैठ की धीमी दर दिखाता है।

विषम मामले में संवेदनशीलता विश्लेषण का उपयोग करके $T_L$ की लंबाई का विश्लेषण बाधा स्थापना से पहले 24.82 सेमी से 75 सेमी की सीमा और बाधा की स्थापना के बाद 13.05 सेमी से 65.24 सेमी की सीमा दिखाता है।

दूसरे चरण के लिए स्तरीकृत मीडिया तैयार किया गया था और सतह के नीचे नए अवरोध की दक्षता का परीक्षण किया गया था। परिणाम बताते हैं कि सतह के नीचे की बाधा घुसपैठ को रोकने में बहुत अधिक सफल होती है जब मोनोटोनिक रूप से बढ़ती पारगम्यता वाली सामग्री पर विचार किया जाता है, क्योंकि बढ़ती पारगम्यता के साथ $T_L$ की लंबाई बढ़ जाती है। लंबवत स्तरीकरण के लिए, पारंपरिक अवरोध का उपयोग सतह के नीचे के अवरोध की तुलना में बहुत कम कुशल है क्योंकि पैर की $T_L$ और ऊंचाई का अनुपात कम हो जाता है। विभिन्न परतों में सतह के नीचे की बाधा का उपयोग करने के बाद घुसपैठ की ऊंचाई बाधा के बिना की तुलना में बाद में कम हो जाती है। परिणाम यह भी दर्शाते हैं कि सतह के नीचे की बाधा का उपयोग उस बिंदु से शुरू होता है जहां पानी का संतुलन पहुंच गया है और अभेद्य स्तर की ओर बढ़ना अनुसरण करने के लिए सबसे कुशल दृष्टिकोण है।

तीसरे चरण के लिए मोनोटोनिक में सामग्री की परत के तहत घुसपैठ का व्यवहार समानांतर स्तरीकरण में नीचे से ऊपर तक और ताजा भूजल की ओर से समुद्र की ओर सामग्री की पारगम्यता बढ़ रही है। घुसपैठ को 2-परत, 3-परत और 4-परत के गठन के साथ दर्ज किया गया था। घुसपैठ की ऊंचाई 28.3 से 32.2 सेमी तक थी। सामग्री की उच्च पारगम्यता के कारण घुसपैठ तेज और सटीक थी। यह निष्कर्ष निकाला गया कि $T_L$ की लंबाई और ऊंचाई का अनुपात 0.43 से 7.0 तक भिन्न होता है। कम पारगम्यता वाली सामग्री के लिए, यह अनुपात छोटा है क्योंकि घुसपैठ धीमी है लेकिन दोनों दिशाओं में स्थिर है; हालाँकि, उच्च पारगम्यता वाली सामग्री के लिए, यह अनुपात उच्च मूल्य से मेल खाता है। घुसपैठ को अलग-अलग परत तक सीमित किया जाता है जब तक कि यह एक अभेद्य परत का सामना नहीं करता है और जैसे-जैसे उद्घाटन क्षेत्र बढ़ता है घुसपैठ के बढ़ते क्षेत्र के साथ आनुपातिक पैटर्न का पालन करता है।

चौथे चरण के लिए मिश्रित बाधा की दक्षता का परीक्षण किया गया और एक उपचार तकनीक के रूप में एक मिश्रित बाधा के साथ एक झुकी हुई महासागर-जलीय सीमा के प्रभाव में स्तरीकृत परतों में घुसपैठ की सीमा का विश्लेषण किया गया। $T_L \backslash H$ अनुपात सभी स्तरीकरण स्थितियों और स्थापित उपचार के लिए 0.2 से 12.84 तक था। स्थापना के बाद $T_L$ की लंबाई में 40-48% की कमी आई। एक मिश्रित अवरोध स्थापित होने के साथ, घुसपैठ की ऊंचाई कम हो गई थी, जिसके परिणामस्वरूप $T_L \backslash H$ में वृद्धि हुई और $T_L$ की लंबाई की क्षमता में कमी आई। बेस केस और मिश्रित बाधा स्थापित स्थिति के लिए समय सीमा की तुलना करने के बाद समानांतर स्तरीकरण में घुसपैठ में 86.67% और लंबवत स्तरीकरण में 28.22% की देरी हुई थी। कम पारगम्यता परत में घुसपैठ की एक परवलयिक रूपरेखा देखी गई, जबकि उच्च पारगम्यता परतों में एक उत्तल-बाहरी रूपरेखा देखी गई। इस जांच के परिणाम वास्तविक रूप से विविध तटीय जलभृतों में उपयोग के लिए मिश्रित बाधा की उपयुक्तता पर प्रकाश डालते हैं।

पांचवें चरण के लिए अनुसंधान का ध्यान झुका हुआ महासागर-एक्विफर सीमा के साथ स्तरित गठन पर समुद्र के स्तर में वृद्धि के प्रभाव का अध्ययन करने की समझ पर स्थानांतरित हो गया। ऊंचाई के लिए $T_L$ की लंबाई का अनुपात 0.8 से 3.5 और 1.02 से 1.83 के मान से मेल खाता है, एक शीर्ष क्षैतिज सतह को मानते हुए, जो क्रमशः समानांतर और लंबवत स्तरीकरण के लिए झुका हुआ शीर्ष जमीन को लागू करने के बाद 0.42 से 4.7 और 0.8 4 से 1.62 में बदल जाता है। परिणाम इंगित करते हैं कि समानांतर स्तरीकरण में पैर की उंगलियों की लंबाई का प्रवास लंबवत स्तरीकरण की तुलना में बहुत तेज है। ऊर्ध्वाधर सीमा तक पहुंचने के लिए कम समय की आवश्यकता वाले सभी लेयरिंग मामलों के लिए बढ़ते घुसपैठ क्षेत्र की तुलना 8.3% से 206% तक थी। यह निष्कर्ष निकाला गया कि छोटे उद्घाटन के लिए, अंतःक्रिया उद्घाटन घुसपैठ को नियंत्रित करता है न कि बिंदु के ऊपर खारे पानी के उपलब्ध शीर्ष को। एक बड़े अंतःक्रिया उद्घाटन के लिए, शीर्ष सतह से प्रेरित घुसपैठ प्रक्रिया पर हावी होती है।

शोध से प्राप्त परिणामों को तटीय सुरक्षा संरचनाओं की प्रभावशीलता का अनुमान लगाने के लिए वास्तविक जीवन के परिदृश्यों पर लागू किया जा सकता है जैसे कि कटऑफ दीवारें, सतह के नीचे की बाधाएं, और उपसतही बाधाएं जैसे कि अपस्केलिंग (फ्राउड की समानता) लौकिक गतिशीलता, विषमता, और विषमता पर विचार करने के बाद भारत की पूर्वी तटरेखा और पश्चिमी तटरेखा जैसे विषम संरचनाओं वाले मामले-विशिष्ट परिदृश्यों के तहत सीमा स्थितियों की प्रयोज्यता। अंत में, प्राप्त परिणाम समुद्री जल पट्टियों के व्यवहार को बेहतर ढंग से समझने और तटीय जलभृतों को बचाने के लिए उपचार तकनीक प्रदान करने में सहायक हैं।

# TABLE OF CONTENTS

# LIST OF FIGURES

# LIST OF TABLES

# LIST OF ABBREVIATIONS

| | |
|---|---|
| ALERT | Automated Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography |
| ANN | Artificial Neural Network |
| API | Application Programming Interface |
| ASR | Aquifer Storage and Recovery |
| CGWB | Central Ground Water Board |
| COCI | Open Citations Index of Crossref |
| CSV | Comma Separated Values |
| DCOM | Detrital Colored Organic Matter |
| EC | Electrical Conductivity |
| EPMC | Europe PubMed Central |
| FEFLOW | Finite Element subsurface Flow system |
| FWCI | Field Weighted Citation Impact |
| FWL | Fresh Water Lens |
| GIS | Geographic Information System |
| GPS | Global Positioning System |
| HBC | Homogeneous Base Case |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| IWRM | Integrated Water Resource Management |
| MAR | Managed Aquifer Recharge |
| MODFLOW | Modular Finite-Difference Groundwater Flow Model |
| OCC | Open Citations Corpus |
| PCA | Principal Components Analysis |
| PHREEQC | PH (pH), RE (redox), EQ (equilibrium), C (program written in Q) |

| | |
|---|---|
| RCM | Regional Climate Models |
| RIS | Research Information Systems |
| SCIE | Science Citation Index Expanded |
| SEAWAT | Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow and Transport |
| SIDS | Small Island Developing States |
| SMD | Subsurface Monitoring Device |
| SUTRA | Saturated-Unsaturated Transport |
| SWI | Seawater Intrusion |
| TDS | Total Dissolved Solids |
| TEM | Transient Electromagnetic |
| VES | Vertical electrical sounding |
| WoS | Web of Science |

# LIST OF SYMBOLS

| | |
|---|---|
| $A_T$ | Saltwater intrusion area at time *T*, $cm^2$ |
| $P_{e_m}$ | *Péclet* number |
| $f_x$ | Function representing the saltwater intrusion |
| $\alpha_L$ | Longitudinal dispersivity, cm |
| $\alpha_T$ | Transverse dispersivity, cm |
| $\rho_S$ | Saltwater density, $kg/m^3$ |
| $\rho_f$ | Freshwater density, $kg/m^3$ |
| $\Delta x$ *and* $\Delta y$ | Quadratic element sizes in the horizontal and vertical directions |
| *a* | Initial value of toe length in *x*-direction, m |
| *b* | Final value of toe length in *x*-direction, m |
| *c* | Solute concentration (mass of solute per unit volume of fluid, $kg/m^3$) |
| $C_F$, $C_S$ | Freshwater and saltwater concentration gm/l |
| $C_T$ | Tracer dye concentration, gm/l |
| *D* | Dispersion tensor, $m^2/s$ |
| *H* | Height of intrusion |
| $H_1$ | Height of intrusion in layer 1 |
| $H_2$ | Height of intrusion in layer 2 |
| $H_3$ | Height of intrusion in layer 3 |
| $H_4$ | Height of intrusion in layer 4 |
| $K_1$ | Permeability of material retained on a 4.75 mm sieve |
| $K_2$ | Permeability of glass beads of size 3 mm |
| $K_3$ | Permeability of aggregate passing through a 4.75 mm sieve and retained on a 1.18 mm sieve |

| | |
|---|---|
| $K_4$ | Permeability of material passing 1.18 mm and retained on a 600-micron sieve |
| $L_1$ | Layer 1 with permeability $K_1$ |
| $L_2$ | Layer 2 with permeability $K_2$ |
| $L_3$ | Layer 3 with permeability $K_3$ |
| $L_4$ | Layer 4 with permeability $K_4$ |
| *ppt* | Parts per thousand |
| $Q$ | Sources or sinks, $kg/m^3 \cdot s$ |
| $Q_f$ | Sources or sinks of fluid mass |
| $Q_s$ | Sources or sinks of solute transport |
| $t$ | Time |
| $T_L$ | Intrusion toe length |
| $T_{L1}$ | Toe length in layer 1 |
| $T_{L2}$ | Toe length in layer 2 |
| $T_{L3}$ | Toe length in layer 3 |
| $T_{L4}$ | Toe length in layer 4 |
| $v$ | Darcy velocity or volumetric flux vector, m/s |
| *x-, y-* | Direction horizontal and vertical to ground |
| $z$ | Drop of saltwater and freshwater interface below MSL [m] |
| $\alpha$ | Density ratio |
| $\rho$ | Fluid density, $kg/m^3$ |
| $\rho_S$ | Saltwater density |
| $dH$ | Head variation in sea level rise |
| $\rho_f$ | Freshwater density |
| $\phi$ | Porosity of the porous medium (dimensionless) |