THERMO-MECHANICAL MODELLING AND OPTIMIZATION OF POROUS VOLUMETRIC SOLAR RECEIVERS

SONIKA SHARMA

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
SEPTEMBER 2024

THERMO-MECHANICAL MODELLING AND OPTIMIZATION OF POROUS VOLUMETRIC SOLAR RECEIVERS

by

SONIKA SHARMA

Department of Mechanical Engineering

Submitted

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

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
SEPTEMBER 2024

CERTIFICATE

I am satisfied that the thesis entitled “**THERMO-MECHANICAL MODELLING AND OPTIMIZATION OF POROUS VOLUMETRIC SOLAR RECEIVERS**” presented by **Ms. SONIKA SHARMA** is worthy of the consideration for the award of the degree of **DOCTOR OF PHILOSOPHY** and is a record of the original bonafide research work carried out by her under my guidance and supervision, and the results contained in it have not been submitted in part or full to any other university or institute for award of any degree/diploma.
I certify that she has pursued the prescribed course of research.

Dr. Prabal Talukdar

Professor

Department of Mechanical Engineering,

Indian Institute of Technology Delhi,

New Delhi, INDIA

Date: 11/09/2024

Place: New Delhi, INDIA

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to extend my heartfelt gratitude to all those whose unwavering belief in me, support and motivation have been crucial in bringing this thesis to completion. Foremost, I am immensely grateful to my research supervisor, Prof. Prabal talukdar (Department of Mechanical Engineering), for his invaluable guidance and constant encouragement, both academically and personally. His confidence in my abilities, encouragement for independent research and timely feedback have been instrumental in shaping this thesis into its final form. I am profoundly thankful to my research committee members, Prof. B. Premachandran, Prof. Bahni Ray, Prof. Jyoti Phirani and Prof. Snehasish Panigrahy for their constructive feedback and insightful suggestions throughout my research journey. Their guidance was instrumental in maintaining my focus and ensuring the successful outcome of my work.

I would like to express my gratitude to my colleagues, Dr. Bhavna Rajput, Dr. Mahesh Nandyala, Dr. Jayakrishna Pedduri, Ms. Aditi Garg, Dr. Vinayak Sudalai, Mr. Mohammad Tabish Siddiqui and Mr. Vikash Kumar. Their continuous support in addressing research challenges through valuable discussions and idea exchanges has been priceless. I would also like to acknowledge my seniors, Dr. Abhishek Sit, Dr. Ananda Srinivas, Dr. Vipul M Patel, Dr. Punit Singh and Dr. Saurabh Chakraborty for generously sharing their experiences and offering invaluable guidance in navigating research challenges. I also appreciate the assistance of Mr. Tarun Kumar (Technical Staff, RAC Laboratory), whose support ensured timely access to required resources.

I am forever grateful to late Prof. Shardul Singh, whose encouragement and guidance inspired me to pursue my PhD. Special thanks to my friends, especially Ms. Swati Upadhayay, Ms. Ankita Singh, Dr. Ashtha Agarwal, Ms. Priya Chetri and Dr. Sushmita Ghosh, for supporting me throughout my PhD journey. Finally, I extend my profound gratitude to my parents, Mr. Dev Prakash and Mrs. Rajkumari Sharma, for believing in my choices and providing unconditional love throughout this journey. I would also like to thank my siblings, Mohit and Komal, for their presence in times of joy and motivation during difficult times.

This thesis is the result of the support and encouragement from all these wonderful individuals, alongside numerous other remarkable people who have contributed to this journey in countless ways.

SONIKA SHARMA

ABSTRACT

Harnessing solar energy in an efficient and effective way is crucial to fulfilling the ever increasing energy demands in a sustainable manner. Concentrated Solar Power (CSP) technology enables the collection of solar energy using mirror concentrators, which focus it over a small area of receivers, leading to efficient capture and utilization of solar energy. Among the various receiver types, Volumetric Solar Receivers (VSRs) are particularly well-suited for high-temperature applications. The porous structure of the VSRs helps in deeper absorption of solar energy in the receiver volume, thereby reducing the re-radiation losses at elevated temperatures. The heat transfer fluid gets heated while flowing thorough the pores of the receiver, thus converting solar energy into thermal energy. This thermal energy can be subsequently used for applications like electricity production and various industrial applications. However, VSRs face challenges such as lower outputs, thermal hotspots and material failure due to high flux exposures, non-uniform temperatures and thermal gradients and working cycles. Therefore, it is necessary to thoroughly investigate the receiver's performance and explore ways to enhance performance without compromising the mechanical safety of the receiver.

The present research is focussed on investigating the Thermal-Hydraulic-Mechanical (THM) performance of a VSR subjected to steady and transient concentrated solar fluxes. Key performance indicators such as air outlet temperature, pressure drop across the VSR and Failure Index are used to evaluate the thermal, hydraulic and mechanical performance, respectively. A coupled thermo-mechanical model is developed to determine the THM performance of VSR. Additionally, parametric studies have been conducted to understand the effect of various parameters, including porosity and pore size of the porous structure, inlet velocity, absorber length, and the degree of non-uniformity in the incident solar flux on the VSR performance. It is observed that higher porosities and pore sizes show better mechanical safety and promise safer operation. The near-wall region at the inlet is found to be most critical for absorber safety.

The optimization of these design parameters such as porosity, pore size, inlet velocity, and receiver length is also conducted using Genetic Algorithm (GA) to determine the optimum parameter values. To minimize the optimization time and facilitate quick design changes, a surrogate model is first developed using Deep Neural Networks (DNN). The dataset for the model is obtained through actual numerical simulations, and a systematic study is performed to identify the most suitable model architecture and training algorithm suitable for accurately

predicting the THM performance parameters. Based on it, the trained DNN model with 5 hidden layers and 20 neurons per layer is selected to predict the THM performance of the VSR. The actual simulations are replaced by the DNN model predictions during the optimization process, significantly reducing the optimization time and computational resources. A multi-objective optimization problem is formulated with the objective of maximizing air outlet temperature and minimizing pressure drop. The problem is constrained by the constraint of a maximum Failure Index less than the material failure limit to ensure the optimized design parameters maintain receiver safety while enhancing the VSR performance. A comparative study is done to assess the effectiveness of the DNN-GA integrated approach in reducing the optimization time. The DNN-GA integrated approach is found to be 524 times faster than the conventional direct approach. Further studies are conducted to optimize the structural parameters (porosity and pore size) for various inlet velocities and absorber lengths. Simultaneous optimization of design parameters is also conducted to evaluate the performance enhancement in the receiver. The results are presented as Pareto optimal solutions, and the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) is implemented to select design parameters from these Pareto optimal solutions as per the requirements of the designer. The results indicate that the optimum values for porosity, pore size, and absorber length are in the range of 0.9-0.93, 2-4 mm, and 0.01-0.06 m, respectively, when all variables are optimized simultaneously. Furthermore, the optimal input velocity is observed to be close to the lower bound of 0.4 m/s while the corresponding maximum failure index varies from 0.346 to 0.836, indicating mechanically safe configurations.

The effectiveness of functionally graded porous structure in enhancing the THM performance of a VSR is also analyzed in the present work. The numerical model is extended to implement linear spatial variation of porosity and pore size in radial and axial directions, resulting in radial and axial graded structures. Additionally, a combination of radial and axial variation is used to create bidirectional variations. Numerical simulations are performed to determine the THM performance of these graded configurations and compared with best-performing uniform configuration. The top performing configurations from each category (axial, radial and bidirectional) are further compared across a range of inlet velocities and absorber lengths to determine the overall best configuration. It is observed that *a-PI-SC, r-PC-SI* and *r-PD+a-SI* are the best performing configurations of each category, i.e., axial, radial and bidirectional, in the porosity range of 0.9 - 0.95 and pore size range of 2 - 4 mm. Overall, *r-PD+a-SI* configuration outperforms among all the graded structures with the second highest

PEC and highest $FI\ Ratios$. It shows an increase of 8.96 % in T_b and a decrease of 22.7 % and 4 % in FI and ΔP, respectively.

As the VSR experiences transient solar fluxes while operating, a transient thermo-mechanical model is also developed to analyze the dynamic VSR performance. The variation of THM performance indicators over time is investigated during different operational phases of VSR, including start-up, shutdown, daily clear sky operation and cloud passing. The air outlet temperature varied by nearly 370 K during clear-sky operation, potentially leading to disruption for downstream operations. It highlights the necessity of dynamic control. The effect of different startup and shut down durations on the THM performance is also investigated. Smaller start-up and shut-down periods were observed to result in higher temperature and FI variations and vice-versa. Additionally, the effect of cloud transmissivity and solid matrix structure, such as porosity and pore size, on the solid temperature distribution and Failure Index is analyzed. Clouds with zero transmissivity were observed to cause the worst temperature gradients and the highest FI peaks.

The results of this work provide valuable insights for better designing VSRs and selecting appropriate parameters to enhance performance, resulting in higher outputs, lower pumping power and higher mechanical safety. While specific results can vary based on the case, these observations serve as a valuable guide for general design choices. For uniform configurations, porosities higher than 0.85 and pore sizes of 2 mm or larger provide suitable trade-off for efficient and safer configurations. Simultaneous optimization further refines this range to a porosity of 0.9-0.93 and pore sizes of 2-4 mm. In graded configurations with linear gradations within a porosity range of 0.9-0.95 and pore size range of 2-4 mm, the bidirectional (*r-PD+a-SI*) configuration delivers the best results, followed by the axial (*a-PI-SC*) and radial (*r-PC-SI*) configurations.

Keywords: Concentrated solar energy; Volumetric solar receiver; Porous media; Thermo-Mechanical modelling; Deep Neural Networks; Multi-objective optimization; Genetic Algorithm, Graded porous structure

सार

लगातार बढ़ती ऊर्जा मांगों को टिकाऊ तरीके से पूरा करने के लिए सौर ऊर्जा का कुशल और प्रभावी तरीके से उपयोग करना महत्वपूर्ण है। सांद्रित सौर ऊर्जा (CSP) तकनीक दर्पण सांद्रक का उपयोग करके सौर ऊर्जा के संग्रह को सक्षम बनाती है, जो इसे रिसीवर के एक छोटे से क्षेत्र पर केंद्रित करती है, जिससे सौर ऊर्जा का कुशल संग्रहण और उपयोग होता है। विभिन्न रिसीवर प्रकारों में, वॉल्यूमेट्रिक सोलर रिसीवर (VSR) विशेष रूप से उच्च तापमान अनुप्रयोगों के लिए उपयुक्त हैं। VSR की छिद्रपूर्ण संरचना रिसीवर वॉल्यूम में सौर ऊर्जा के गहन अवशोषण में मदद करती है, जिससे ऊंचे तापमान पर पुन: विकिरण हानि कम हो जाती है। ऊष्मा स्थानांतरण द्रव रिसीवर के छिद्रों में बहते समय गर्म हो जाता है, इस प्रकार सौर ऊर्जा को तापीय ऊर्जा में परिवर्तित कर देता है। इस तापीय ऊर्जा का उपयोग बाद में बिजली उत्पादन और विभिन्न औद्योगिक अनुप्रयोगों जैसे अनुप्रयोगों के लिए किया जा सकता है। हालाँकि, VSR को कम आउटपुट, थर्मल हॉटस्पॉट और उच्च फ्लक्स एक्सपोज़र, गैर-समान तापमान और थर्मल ग्रेडिएंट और कार्य चक्र के कारण सामग्री की विफलता जैसी चुनौतियों का सामना करना पड़ता है। इसलिए, रिसीवर के प्रदर्शन की पूरी तरह से जांच करना और रिसीवर की यांत्रिक सुरक्षा से समझौता किए बिना प्रदर्शन को बढ़ाने के तरीकों का पता लगाना आवश्यक है।

वर्तमान शोध स्थिर और क्षणिक संकेंद्रित सौर प्रवाह के अधीन VSR के थर्मल-हाइड्रोलिक-मैकेनिकल (THM) प्रदर्शन की जांच पर केंद्रित है। प्रमुख प्रदर्शन संकेतक जैसे एयर आउटलेट तापमान, VSR में दबाव ड्रॉप और विफलता सूचकांक का उपयोग क्रमशः थर्मल, हाइड्रोलिक और मैकेनिकल प्रदर्शन का मूल्यांकन करने के लिए किया जाता है। VSR के THM प्रदर्शन को निर्धारित करने के लिए एक युग्मित थर्मो-मैकेनिकल मॉडल विकसित किया गया है। इसके अतिरिक्त, VSR प्रदर्शन पर छिद्रपूर्ण संरचना की सरंध्रता और छिद्र आकार, इनलेट वेग, अवशोषक लंबाई और घटना सौर प्रवाह में गैर-एकरूपता की डिग्री सहित विभिन्न मापदंडों के प्रभाव को समझने के लिए पैरामीट्रिक अध्ययन आयोजित किए गए हैं। यह देखा गया है कि उच्च छिद्र और छिद्र आकार बेहतर यांत्रिक सुरक्षा दिखाते हैं और सुरक्षित संचालन का वादा करते हैं। इनलेट पर दीवार के पास का क्षेत्र अवशोषक सुरक्षा के लिए सबसे महत्वपूर्ण पाया गया है।

इन डिज़ाइन मापदंडों जैसे छिद्रता, छिद्र आकार, इनलेट वेग और रिसीवर की लंबाई का अनुकूलन भी इष्टतम पैरामीटर मान निर्धारित करने के लिए जेनेटिक एल्गोरिदम (GA) का उपयोग करके किया जाता है। अनुकूलन समय को कम करने और त्वरित डिज़ाइन परिवर्तनों की सुविधा के लिए, सबसे पहले डीप न्यूरल नेटवर्क्स (DNN) का उपयोग करके एक सरोगेट मॉडल विकसित किया गया है। मॉडल

के लिए डेटासेट वास्तविक संख्यात्मक सिमुलेशन के माध्यम से प्राप्त किया जाता है, और THM प्रदर्शन मापदंडों की सटीक भविष्यवाणी के लिए उपयुक्त सबसे उपयुक्त मॉडल वास्तुकला और प्रशिक्षण एल्गोरिदम की पहचान करने के लिए एक व्यवस्थित अध्ययन किया जाता है। इसके आधार पर VSR के THM प्रदर्शन की भविष्यवाणी करने के लिए 5 छिपी परतों और प्रति परत 20 न्यूरॉन्स के साथ प्रशिक्षित DNN मॉडल का चयन किया जाता है। अनुकूलन प्रक्रिया के दौरान वास्तविक सिमुलेशन को DNN मॉडल पूर्वानुमानों द्वारा प्रतिस्थापित किया जाता है, जिससे अनुकूलन समय और कम्प्यूटेशनल संसाधनों में काफी कमी आती है। वायु आउटलेट तापमान को अधिकतम करने और दबाव में गिरावट को कम करने के उद्देश्य से एक बहुउद्देश्यीय अनुकूलन समस्या तैयार की गई है। VSR प्रदर्शन को बढ़ाने के दौरान अनुकूलित डिज़ाइन पैरामीटर रिसीवर सुरक्षा बनाए रखने को सुनिश्चित करने के लिए सामग्री विफलता सीमा से कम अधिकतम विफलता सूचकांक की बाधा से समस्या बाधित होती है। अनुकूलन समय को कम करने में DNN-GA एकीकृत दृष्टिकोण की प्रभावशीलता का आकलन करने के लिए एक तुलनात्मक अध्ययन किया जाता है। DNN-GA एकीकृत दृष्टिकोण पारंपरिक प्रत्यक्ष दृष्टिकोण की तुलना में 524 गुना तेज पाया गया है। विभिन्न इनलेट वेगों और अवशोषक लंबाई के लिए संरचनात्मक मापदंडों (छिद्रता और छिद्र आकार) को अनुकूलित करने के लिए आगे के अध्ययन आयोजित किए जाते हैं। रिसीवर में प्रदर्शन वृद्धि का मूल्यांकन करने के लिए डिज़ाइन मापदंडों का एक साथ अनुकूलन भी किया जाता है। परिणामों को पेरेटो इष्टतम समाधान के रूप में प्रस्तुत किया जाता है, और डिज़ाइनर की आवश्यकताओं के अनुसार इन पेरेटो इष्टतम समाधानों से डिज़ाइन मापदंडों का चयन करने के लिए आदर्श समाधान (TOPSIS) की समानता द्वारा वरीयता क्रम की तकनीक लागू की जाती है। नतीजे बताते हैं कि छिद्रता, छिद्र आकार और अवशोषक लंबाई के लिए इष्टतम मान क्रमशः 0.9-0.93, 2-4 मिमी और 0.01-0.06 मीटर की सीमा में हैं, जब सभी चर एक साथ अनुकूलित होते हैं। इसके अलावा, इष्टतम इनपुट वेग 0.4 मीटर/सेकेंड की निचली सीमा के करीब देखा जाता है, जबकि संबंधित अधिकतम विफलता सूचकांक 0.346 से 0.836 तक भिन्न होता है, जो यांत्रिक रूप से सुरक्षित कॉन्फ़िगरेशन को दर्शाता है।

वर्तमान कार्य में VSR के THM प्रदर्शन को बढ़ाने में कार्यात्मक रूप से वर्गीकृत छिद्रपूर्ण संरचना की प्रभावशीलता का भी विश्लेषण किया गया है। रेडियल और अक्षीय दिशाओं में छिद्रता और छिद्र आकार के रैखिक स्थानिक भिन्नता को लागू करने के लिए संख्यात्मक मॉडल का विस्तार किया जाता है, जिसके परिणामस्वरूप रेडियल और अक्षीय वर्गीकृत संरचनाएं होती हैं। इसके अतिरिक्त, रेडियल और अक्षीय भिन्नता के संयोजन का उपयोग द्विदिशात्मक विविधताएं बनाने के लिए किया जाता है। इन श्रेणीबद्ध कॉन्फ़िगरेशन के THM प्रदर्शन को निर्धारित करने और सर्वोत्तम प्रदर्शन करने वाले समान कॉन्फ़िगरेशन

के साथ तुलना करने के लिए संख्यात्मक सिमुलेशन किए जाते हैं। समग्र सर्वोत्तम कॉन्फ़िगरेशन निर्धारित करने के लिए प्रत्येक श्रेणी (अक्षीय, रेडियल और द्विदिशात्मक) से शीर्ष प्रदर्शन करने वाले कॉन्फ़िगरेशन की तुलना इनलेट वेग और अवशोषक लंबाई की एक श्रृंखला में की जाती है। यह देखा गया है कि *a-PI-SC*, *r-PC-SI* और *r-PD+a-SI* प्रत्येक श्रेणी का सबसे अच्छा प्रदर्शन करने वाला विन्यास है, यानी, अक्षीय, रेडियल और द्विदिशात्मक, 0.9 - 0.95 और छिद्र की सरंध्रता सीमा में आकार सीमा 2 - 4 मिमी. कुल मिलाकर, *r-PD+a-SI* कॉन्फ़िगरेशन दूसरे उच्चतम पीईसी और उच्चतम एफआई अनुपात के साथ सभी वर्गीकृत संरचनाओं के बीच बेहतर प्रदर्शन करता है। यह T_b में 8.96% की वृद्धि और FI और ΔP में क्रमशः 22.7% और 4% की कमी दर्शाता है।

चूंकि VSR परिचालन के दौरान क्षणिक सौर प्रवाह का अनुभव करता है, गतिशील VSR प्रदर्शन का विश्लेषण करने के लिए एक क्षणिक थर्मो-मैकेनिकल मॉडल भी विकसित किया गया है। समय के साथ THM प्रदर्शन संकेतकों की भिन्नता की जांच वीएसआर के विभिन्न परिचालन चरणों के दौरान की जाती है, जिसमें स्टार्ट-अप, शटडाउन, दैनिक स्पष्ट आकाश संचालन और क्लाउड पासिंग शामिल हैं। साफ़-आसमान संचालन के दौरान वायु आउटलेट तापमान में लगभग 370 K का अंतर होता है, जिससे संभावित रूप से डाउनस्ट्रीम संचालन में व्यवधान उत्पन्न होता है। यह गतिशील नियंत्रण की आवश्यकता पर प्रकाश डालता है। THM प्रदर्शन पर विभिन्न स्टार्टअप और शट डाउन अवधि के प्रभाव की भी जांच की जाती है। छोटे स्टार्ट-अप और शट-डाउन अवधि के परिणामस्वरूप उच्च तापमान और FI भिन्नताएं देखी गईं और इसके विपरीत। इसके अतिरिक्त, ठोस तापमान वितरण और विफलता सूचकांक पर क्लाउड ट्रांसमिसिविटी और ठोस मैट्रिक्स संरचना, जैसे छिद्र और छिद्र आकार, के प्रभाव का विश्लेषण किया जाता है। यह देखा गया कि शून्य संप्रेषणीयता वाले बादल सबसे खराब तापमान प्रवणता और उच्चतम FI चोटियों का कारण बनते हैं।

इस कार्य के परिणाम VSR को बेहतर ढंग से डिजाइन करने और प्रदर्शन को बढ़ाने के लिए उचित मापदंडों का चयन करने के लिए मूल्यवान अंतर्दृष्टि प्रदान करते हैं, जिसके परिणामस्वरूप उच्च आउटपुट, कम पंपिंग शक्ति और उच्च यांत्रिक सुरक्षा होती है। जबकि विशिष्ट परिणाम मामले के आधार पर भिन्न हो सकते हैं, ये अवलोकन सामान्य डिज़ाइन विकल्पों के लिए एक मूल्यवान मार्गदर्शिका के रूप में काम करते हैं। समान विन्यास के लिए, 0.85 से अधिक छिद्र और 2 मिमी या उससे बड़े छिद्र आकार कुशल और सुरक्षित विन्यास के लिए उपयुक्त व्यापार-बंद प्रदान करते हैं। एक साथ अनुकूलन इस सीमा को 0.9-0.93 की सरंध्रता और 2-4 मिमी के छिद्र आकार तक परिष्कृत करता है। 0.9-0.95 की सरंध्रता सीमा के भीतर रैखिक उन्नयन और 2-4 मिमी की छिद्र आकार सीमा के साथ वर्गीकृत

विन्यास में, द्विदिशात्मक (*r-PD+a-SI)* विन्यास सर्वोत्तम परिणाम देता है, इसके बाद अक्षीय (*a-PI-SC)* और रेडियल (*r-PC-SI*) विन्यास होता है ।

मुख्य शब्द: संकेंद्रित सौर ऊर्जा; वॉल्यूमेट्रिक सौर रिसीवर; छिद्रयुक्त मीडिया; थर्मो-मैकेनिकल मॉडलिंग; डीप न्यूरल नेटवर्क; बहुउद्देश्यीय अनुकूलन; जेनेटिक एल्गोरिथम, श्रेणीबद्ध संरचना

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

NOMENCLATURE

C_F	Inertial coefficient
C_p	Specific heat (J/kg K)
d_p	Pore size (m)
E	Youngs Modulus (GN/m^2)
G	Incident irradiation (W/m^2)
h_v	Volumetric Heat Transfer Coefficient (W/m^{3}K)
Nu_v	Volumetric Nusselt Number
k	Thermal conductivity (W/mK)
K	Permeability (m^2)
L	Length (m)
p	pressure (Pa)
q	incident solar radiation (W/m^2)
q_o	Steady-state incident solar radiation (W/m^2)
r	Radial Coordinates (m)
κ_{abs}	Absorption coefficient (1/m)
S_{rad}	Radiative source term (W/m^3)
s_{sca}	Scattering coefficient (1/m)
T	Temperature (K)
$\boldsymbol{U}$	Velocity (m/s)
$\boldsymbol{u}$	Pore Velocity (m/s)
z	Axial Coordinate (m)

GREEK SYMBOLS

α_t	Linear coefficient of thermal expansion (1/K)
β	Extinction coefficient (1/m)
δ	Kronecker delta
ϵ	emissivity
ε	Strain
μ	dynamic viscosity (Pa s)
ϕ	porosity
ρ	density (kg/m^3)

σ	Stefan-Boltzmann constant (W/m^{2}K^4)
τ	Stress (MN/m^2)
ν	Poisson’s Ratio

SUBSCRIPTS

amb	Ambient
b	Mean bulk
c	Collimated
d	Diffuse
D	Decreasing
e	Effective
f	Fluid
I	Increasing
in	Inlet
i, j, k	Tensor indices
out	Outlet
p	Principal
rad	Radiation
s	Solid
sm	Solid matrix

SUPERSCRIPTS

$\sim$	Relative Properties
M	Mechanical
T	Thermal

ABBREVIATIONS

a	Axial graded
ANN	Artificial Neural Network
CFD	Computational Fluid Dynamics
CSP	Concentrated Solar Power
DNN	Deep Neural Network

FEM	Finite Element Method
FI	Failure Index
GA	Genetic Algorithm
HEM	Homogeneous Equivalent Method
HTF	Heat Transfer Fluid
LTE	Local Thermal Equilibrium
LTNE	Local Thermal Non-Equilibrium
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
MCRT	Monte Carlo Ray Tracing
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
MOO	Multi-Objective Optimization
PC	Porosity Constant
PD	Porosity Decreasing
PI	Porosity Increasing
SC	Pore Size Constant
SD	Pore Size Decreasing
SI	Pore Size Increasing
SiC	Silicon Carbide
PEC	Performance Evaluation Criterion
r	Radial graded
VSR	Volumetric Solar receiver
THM	Thermal-Hydraulic-Mechanical
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
U	Uniform
VHTC	Volumetric Heat Transfer Coefficient