

**FIRE SAFETY PERFORMANCE ASSESSMENT
MODEL FOR RESIDENTIAL BUILDINGS**

RAVINDRA KUMAR



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
NEW DELHI - 110016
JUNE 2018**

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2018

**FIRE SAFETY PERFORMANCE ASSESSMENT
MODEL FOR RESIDENTIAL BUILDINGS**

by

RAVINDRA KUMAR

Department of Civil Engineering

Submitted

In fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy

to the



INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

NEW DELHI - 110016

JUNE 2018

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled “**Fire Safety Performance Assessment Model for Residential Buildings**”, being submitted by **Mr. Ravindra Kumar** to the Indian Institute of Technology Delhi, India, for the award of the degree of “**DOCTOR OF PHILOSOPHY**” in Civil Engineering, is a record of original bona fide research work carried out by him under my guidance and supervision. To the best of my knowledge, the thesis has reached the requisite standard. The material contained in this thesis has not been submitted, in part or full to any other University or Institute for the award of any degree or diploma.

(Prof. B. Bhattacharjee)

Professor
Department of Civil Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi, India -110016

ACKNOWLEDGEMENTS

I am immensely grateful to Prof. B. Bhattacharjee for his invaluable guidance, constant supervision, and persistent encouragement throughout my Ph.D. work. I feel extremely honored and privileged for the opportunity of having numerous interesting discussions with him, that helped me to gain knowledge, inspiring ideas, new perspectives, and insights about work and life in academia. I am also thankful to him for correcting me through my mistakes with patience and for keeping me motivated to improve as an individual and a professional throughout this study.

I am also thankful to research committee members, Prof. Mukesh Khare, Prof. D.K. Banwet, and Dr. K. N. Jha for their invaluable suggestions and critical reviews on the progress of the doctoral work.

I am specially grateful to my friend, Mr. Sanjay Baniwal, Special Commissioner Delhi Police; Mr. Gyan Prakash Sharma, Fire Officer, Greater Noida; Mr. Rajesh, ADO, Delhi Fire Service; Mr. Ashutosh and Mr. Lokesh, Architects for their invaluable help in conducting this study and surveys.

My special thanks to two special friends, Prof. Dr. A. K. Khare, Ex Pro VC, UPTU, Lucknow and Dr. Kamal Jain, Associate Professor at BML Munjal University, Gurgaon for their continuous motivational support, suggestions and editing help for this manuscript.

Thanks to friends and research colleagues, Mr. Shailendra Jain, Ms. Vandana Jha, Mr. Nabil Khan, Dr. Kaustav Sarkar for all their help, countless refreshments, and several interesting discussions. Thanks to Goutam ji, Bikram ji, and Gehlot ji for their unconditional support and help.

I gratefully acknowledge all the contributing experts from industry, academics and all those whom I could not name in this acknowledgement for providing valuable feedbacks and prompt response to the questionnaire.

At last, I am short of words to express my love and thanks to my wife Dr. Suman Chahar, my loving daughter Devyani and son-in-law Mr. Akash for getting me through all the ups and downs, for being patient and supportive to keep me motivated throughout.

Ravindra Kumar

ABSTRACT

Human activities, materials and design are linked to fire hazard in the buildings. Hazard is a condition or physical situation to cause harmful effects on people, property and also on operational continuity. Risk is quantification of hazard in terms of probability of events or losses. Safety is an antithesis of risk. More safety means less risk and vice versa. Existing buildings designed few decades back using old prescriptive criteria may not satisfy the latest compliance levels of the fire codes. Buildings also deteriorate over a period of time in terms fire safety protection due to improper use and poor maintenance. Obviously, fire risk and safety evaluations becomes desirable for existing buildings as a decision tool for the organisations to do some improvement work to achieve desired fire safety objectives with acceptable risks at optimal costs. This assessment can be performed against the latest acceptable design criteria for risk and desirable safety level mentioned in the regulatory literature or fire codes which are of two types viz. (i) *Prescriptive codes*-based on experiential developments and, (ii) *Performance codes*-based on modern engineering design principles using scientific (deterministic) and probabilistic (non-deterministic) design criteria.

The fire risk or safety in building can be evaluated, either using a more precise scientific or probabilistic method called quantitative risk assessment (QRA) or using a less precise but simple heuristic approach. The QRA methods try to estimate the magnitude of the fire hazard conditions due to fire scenario in a building in terms of deterministic heat flux, temperature, spread of smoke, egress time etc against acceptable scientific criteria for untenable

conditions for humans or the risk in terms of non-deterministic, probabilistic criteria of acceptable risk as number of deaths/event or number events/time. A QRA method cover only limited aspect of fire protection evaluation. These methods are time consuming, costly, may not have enough supporting statistical data and require expert knowledge to be applied

On the other hand, in the heuristic fire safety evaluation approaches, fire safety is estimated as combined effects of fire safety parameters or attributes. Importance weights are assigned to fire safety attributes or parameters as effect of all attribute is not same. The weighted values of these parameters are aggregated to get a single score called "Index" defining safety level. Fire indexing is linked to fire safety and can be used for fire safety assessment. The heuristic indexing methods are simple, less time and effort consuming, and does not require expert knowledge. Despite being less precise and giving idea of only the magnitude of the assessment, these are popular as first level decision making tool before application of detailed QRA methods. Heuristic or indexing methods consider all the aspects of fire safety together unlike QRA methods which focus only on some particular or limited aspects. They can be applied to a large number of buildings in a short span of time for macro analysis of their fire safety.

As fire safety depends on a number of attributes, its evaluation can be termed as a Multi Attribute Decision Making (MADM) problem. Since number of the fire safety attributes are large, a hierarchical arrangement of the these is advantageous for the purposes of assigning importance weights.

With this view, a heuristic hierarchical methodology is proposed to develop a fire safety assessment model as MADM problem. It is a four-layered structure

with goal of fire safety at top to be achieved in the form of single Total Fire Safety Index (I_{TFS}). This goal is achieved through aggregated effect of five fire safety strategies viz. means of approach, means of egress, passive fire safety, active fire safety and fire safety management. These are represented as five sub-indices scores for respective strategies. Strategies are weighted aggregated effect of attributes which are again aggregated effect of their respective measurable items. A mathematical model is also characterized to assign weights and to process the information received at the bottom level (measurable items) of this structure to compute strategy sub-indices and the I_{TFS} .

Analytic Hierarchy Process (AHP) has been used to assign weight and aggregate information in some existing fire safety problems but it has some weaknesses of inconsistency and insufficiency of data. Performance of fire safety attributes being vague in nature, the evaluation can be a fuzzy MADM problem. Humans are more comfortable in giving their decisions in qualitative linguistic terms which can be operated upon as fuzzy linguistic membership functions and fuzzy inference system. Fuzzy linguistic and MADM concepts have been combined to assess the fire safety of existing buildings.

In view of the weaknesses of AHP, a new methodology as Fuzzy Simple Additive Weight Method (FSAWM) is proposed to assign weight to the attributes and aggregate the effect of attributes. To assign weight, a questionnaire survey proforma was developed to collect responses of decision makers (DMs). The DMs include all stake holders in fire safety. i.e. architects, engineers, building users and professional fire safety officers. For the purposes of analysis, the DMs have been divided into two groups viz.

group X (all with no fire safety background), and group Y (fire safety professional officers). Responses have been analysed for the group, X, Y and all combined as Z i.e. (X+Y). Weight assignment analysis revealed that there no significant difference in the weight assignment by the two groups, leading to the conclusion that fire safety perception among the two groups is not significantly different.

The present research problem focussed on high rise residential buildings (higher than 15m) of A4 and A5 type as classified by the National Building Code: 2016 of India. Case studies were conducted on four buildings to demonstrate the application of developed methodology.

The attributes have compensatory effects. Analysis of TFSI along with five sub-indices is very useful in identifying the aspect specific weakness in fire safety. The Index scores of the buildings reveal that buildings have high to very high active and passive fire safety levels but have some planning weaknesses in means of approach and means of egress. The fire safety management seems be a neglected or least cared aspect which need attention. Fire safety of buildings can be significantly improved by proper planning at design stage and giving due attention to the fire safety management without much financial burden.

The proposed model can be effectively used for: (i) monitor the fire safety health of the existing buildings for improvement and, (ii) better fire safety planning at design stage of the buildings.

सार

मानव गतिविधियों, सामग्रियों और डिजाइन इमारतों में आग के खतरे से जुड़े हुए हैं। खतरे लोगों, संपत्ति और परिचालन निरंतरता पर भी हानिकारक प्रभाव पैदा करने के लिए एक शर्त या शारीरिक स्थिति है। घटनाओं या घाटे की संभावना के मामले में जोखिम खतरे की मात्रा है। सुरक्षा जोखिम का एक एंथिसिस है। अधिक सुरक्षा का मतलब कम जोखिम और इसके विपरीत है। पुराने अनुसूचित मानदंडों का उपयोग करके कुछ दशक पहले तैयार की गई मौजूदा इमारतों में अग्नि कोड के नवीनतम अनुपालन स्तर को पूरा नहीं किया जा सकता है। अनुचित उपयोग और खराब रखरखाव के कारण अग्नि सुरक्षा संरक्षण के मामले में बिल्डिंग समय की अवधि में भी बिगड़ती है। जाहिर है, मौजूदा इमारतों के लिए अग्नि जोखिम और सुरक्षा मूल्यांकन वांछनीय लागत पर स्वीकार्य जोखिमों के साथ वांछित अग्नि सुरक्षा उद्देश्यों को प्राप्त करने के लिए कुछ सुधार कार्य करने के लिए संगठनों के लिए एक निर्णय उपकरण के रूप में वांछनीय बन जाता है। यह मूल्यांकन विनियामक साहित्य या अग्नि कोड में उल्लिखित जोखिम और वांछनीय सुरक्षा स्तर के लिए नवीनतम स्वीकार्य डिजाइन मानदंडों के खिलाफ किया जा सकता है, जो कि दो प्रकार के हैं। (i) अनुभवात्मक विकास पर आधारित अनुवांशिक कोड और, (ii) प्रदर्शन कोड- वैज्ञानिक (निर्धारिती) और संभाव्य (गैर-निर्धारिती) डिजाइन मानदंडों का उपयोग करके आधुनिक इंजीनियरिंग डिजाइन सिद्धांतों के आधार पर।

इमारत में अग्नि जोखिम या सुरक्षा का आकलन किया जा सकता है, या तो मात्रात्मक जोखिम मूल्यांकन (क्यूआरए) नामक एक अधिक सटीक वैज्ञानिक या संभाव्य विधि का उपयोग करके या कम सटीक लेकिन सरल ह्युरिस्टिक दृष्टिकोण का उपयोग कर। क्यूआरए विधियों में मनुष्यों के लिए अस्थिर स्थितियों या शर्तों में जोखिम के लिए स्वीकार्य वैज्ञानिक मानदंडों के खिलाफ निर्धारिती गर्मी प्रवाह, तापमान, धुआं फैलाने, बहिष्कार समय इत्यादि के मामले में एक इमारत में आग परिदृश्य के कारण अग्नि खतरे की स्थिति की परिमाण का अनुमान लगाने का प्रयास किया जाता है। मौत / घटना या संख्या घटनाओं / समय की

संख्या के रूप में स्वीकार्य जोखिम के गैर-निर्धारिती, संभाव्य मानदंडों का। एक क्यूआरए विधि अग्नि सुरक्षा मूल्यांकन के केवल सीमित पहलू को कवर करती है। ये विधियां समय लेने वाली, महंगी, पर्याप्त सहायक सांख्यिकीय डेटा नहीं हो सकती हैं और विशेषज्ञ ज्ञान को लागू करने की आवश्यकता होती है

दूसरी ओर, उदारवादी अग्नि सुरक्षा मूल्यांकन दृष्टिकोण में, अग्नि सुरक्षा का अनुमान अग्नि सुरक्षा मानकों या विशेषताओं के संयुक्त प्रभाव के रूप में किया जाता है। महत्व भार सभी गुणों के प्रभाव के रूप में अग्नि सुरक्षा गुणों या पैरामीटर को सौंपा गया है। इन मानकों के भारित मूल्यों को सुरक्षा स्तर को परिभाषित करने वाले "इंडेक्स" नामक एक अंक प्राप्त करने के लिए एकत्रित किया जाता है। अग्नि अनुक्रमण अग्नि सुरक्षा से जुड़ा हुआ है और इसका उपयोग अग्नि सुरक्षा मूल्यांकन के लिए किया जा सकता है। हेरिस्टिक इंडेक्सिंग विधियां सरल, कम समय और प्रयास करने वाली हैं, और विशेषज्ञ ज्ञान की आवश्यकता नहीं है। कम सटीक होने और आकलन की परिमाण के विचार देने के बावजूद, विस्तृत क्यूआरए विधियों के आवेदन से पहले ये पहले स्तर के निर्णय लेने के उपकरण के रूप में लोकप्रिय हैं। ह्युरिस्टिक या इंडेक्सिंग विधियां क्यूआरए विधियों के विपरीत अग्नि सुरक्षा के सभी पहलुओं पर विचार करती हैं जो केवल कुछ विशेष या सीमित पहलुओं पर ध्यान केंद्रित करती हैं। उन्हें अपनी अग्नि सुरक्षा के मैक्रो विश्लेषण के लिए थोड़े समय में बड़ी संख्या में इमारतों पर लागू किया जा सकता है।

चूंकि अग्नि सुरक्षा कई विशेषताओं पर निर्भर करती है, इसके मूल्यांकन को मल्टी एट्रिब्यूट निर्णय निर्णय (एमएडीएम) समस्या के रूप में जाना जा सकता है। चूंकि अग्नि सुरक्षा गुणों की संख्या बड़ी है, इसलिए इनकी एक श्रेणीबद्ध व्यवस्था महत्वपूर्ण वजन को निर्दिष्ट करने के प्रयोजनों के लिए फायदेमंद है।

इस विचार के साथ, एक हेरिस्टिक पदानुक्रमित पद्धति का प्रस्ताव अग्नि सुरक्षा मूल्यांकन

मॉडल को एमएडीएम समस्या के रूप में विकसित करने का प्रस्ताव है। यह एकल चार अग्नि सुरक्षा सूचकांक (आईटीएफएस) के रूप में हासिल होने के लिए शीर्ष पर अग्नि सुरक्षा के लक्ष्य के साथ एक चार-स्तर वाली संरचना है। यह लक्ष्य पांच अग्नि सुरक्षा रणनीतियों के कुल प्रभाव के माध्यम से हासिल किया जाता है जैसे कि। दृष्टिकोण का साधन, बहिष्कार, निष्क्रिय अग्नि सुरक्षा, सक्रिय अग्नि सुरक्षा और अग्नि सुरक्षा प्रबंधन का साधन। इन्हें संबंधित रणनीतियों के लिए पांच उप-सूचकांक स्कोर के रूप में दर्शाया जाता है। रणनीतियों को विशेषताओं के भारित प्रभाव को भारित किया जाता है जो कि उनके संबंधित मापनीय वस्तुओं के फिर से समेकित प्रभाव होते हैं। एक गणितीय मॉडल को वजन सौंपने और रणनीति उप-सूचकांक और आईटीएफएस की गणना करने के लिए इस संरचना के निचले स्तर (मापनीय वस्तुओं) पर प्राप्त जानकारी को संसाधित करने के लिए भी चिह्नित किया गया है।

कुछ मौजूदा अग्नि सुरक्षा समस्याओं में वजन और कुल जानकारी असाइन करने के लिए विश्लेषणात्मक पदानुक्रम प्रक्रिया (एएचपी) का उपयोग किया गया है, लेकिन इसमें असंगतता और डेटा की अपर्याप्तता की कुछ कमजोरियां हैं। प्रकृति में अस्पष्ट होने के कारण अग्नि सुरक्षा गुणों का प्रदर्शन, मूल्यांकन एक अस्पष्ट एमएडीएम समस्या हो सकती है। मानव गुणात्मक भाषाई शर्तों में अपने निर्णय देने में अधिक आरामदायक होते हैं जिन्हें अस्पष्ट भाषाई सदस्यता कार्यों और अस्पष्ट अनुमान प्रणाली के रूप में संचालित किया जा सकता है। मौजूदा इमारतों की अग्नि सुरक्षा का आकलन करने के लिए अस्पष्ट भाषाई और एमएडीएम अवधारणाओं को संयुक्त किया गया है।

एएचपी की कमजोरियों को ध्यान में रखते हुए, फ़ज़ी सरल योजक Wight विधि (FSAWM) के रूप में एक नई पद्धति को गुणों को वजन देने और विशेषताओं के प्रभाव को एकत्रित करने का प्रस्ताव है। वजन सौंपने के लिए, निर्णय निर्माताओं (डीएम) के जवाब एकत्र करने के लिए एक प्रश्नावली सर्वेक्षण प्रोफार्मा विकसित किया गया था। डीएम में सभी हिस्सेदारों को अग्नि

सुरक्षा में शामिल किया गया है। यानी आर्किटेक्ट्स, इंजीनियरों, बिल्डिंग यूजर और पेशेवर अग्नि सुरक्षा अधिकारी। विश्लेषण के प्रयोजनों के लिए, डीएम को दो समूहों में बांटा गया है जैसे कि। समूह एक्स (सभी अग्नि सुरक्षा पृष्ठभूमि के साथ), और समूह वाई (अग्नि सुरक्षा पेशेवर अधिकारी)। समूह, एक्स, वाई और सभी जेड i.e. (एक्स + वाई) के रूप में संयुक्त के लिए प्रतिक्रियाओं का विश्लेषण किया गया है। वजन असाइनमेंट विश्लेषण से पता चला कि दोनों समूहों द्वारा वजन असाइनमेंट में कोई महत्वपूर्ण अंतर नहीं है, जिससे निष्कर्ष निकाला जाता है कि दोनों समूहों के बीच अग्नि सुरक्षा धारणा काफी अलग नहीं है।

वर्तमान शोध समस्या ने राष्ट्रीय भवन संहिता: 2016 के भारत द्वारा वर्गीकृत ए 4 और ए 5 प्रकार की उच्च वृद्धि आवासीय भवनों (15 मीटर से अधिक) पर ध्यान केंद्रित किया। विकसित पद्धतियों के आवेदन को प्रदर्शित करने के लिए चार भवनों पर केस अध्ययन आयोजित किए गए।

गुणों में क्षतिपूर्ति प्रभाव पड़ता है। पांच उप-सूचकांक के साथ टीएफएसआई का विश्लेषण आग सुरक्षा में पहलू विशिष्ट कमजोरी की पहचान करने में बहुत उपयोगी है। इमारतों के सूचकांक के निशान से पता चलता है कि भवनों में बहुत अधिक सक्रिय और निष्क्रिय अग्नि सुरक्षा स्तर हैं, लेकिन दृष्टिकोण और साधनों के माध्यम से कुछ नियोजन कमजोरियां हैं। अग्नि सुरक्षा प्रबंधन एक उपेक्षित या कम से कम देखभाल पहलू लगता है जिसे ध्यान देने की आवश्यकता है। भवनों की अग्नि सुरक्षा को डिजाइन चरण में उचित योजना द्वारा काफी सुधार किया जा सकता है और बिना किसी वित्तीय बोझ के अग्नि सुरक्षा प्रबंधन पर ध्यान दिया जा सकता है।

प्रस्तावित मॉडल का प्रभावी ढंग से उपयोग किया जा सकता है: (i) सुधार के लिए मौजूदा भवनों के अग्नि सुरक्षा स्वास्थ्य की निगरानी करें और, (ii) भवनों के डिजाइन चरण में बेहतर अग्नि सुरक्षा योजना।

CONTENTS

	Page No.
CERTIFICATE	(i)
ACKNOWLEDGEMENT	(ii)
ABSTRACT	(iv)
LIST OF FIGURES	(xviii)
LIST OF TABLES	(xx)
ABBREVIATIONS	(xxiii)
CHAPTER -1 INTRODUCTION	
1.1 General	1
1.2 Research Objectives	8
1.3 Scope of Work	9
1.4 Thesis Organization	10
CHAPTER- 2 LITERATURE REVIEW	
2.1 General	12
2.2 Historical Developments of Fire Safety Design and Evaluation	13
2.3 Fire	16
2.3.1 Fire Chemistry	16
2.3.2 Mechanism of Fire Growth	17
2.3.3 Concepts of Fire Hazard, Scenario, and Risk	18
2.3.4 Fire Safety Objectives in Buildings	20
2.4 Fire Safety Design: Prescriptive v/s Performance	20
2.4.1 Prescriptive Design	20
2.4.1.1 National Building of India (NBC 2016)	21
2.4.2 Performance Based Design	22
2.4.2.1 Deterministic Criteria	23

2.4.2.2 Non-deterministic Criteria	24
2.4.2.3 Comparison of Deterministic v/s Probabilistic criteria	25
2.4.2.4 Future Trends	25
2.4.3 Summary of Fire Design Approaches	26
2.5 Fire Risk Assessment	26
2.5.1 Quantitative Risk Assessment (QRA)	28
2.5.1.1 Deterministic Models	28
2.5.1.2 Non-deterministic Models	29
2.5.1.3 Summary of QRA Methods	32
2.5.2 Fire Risk or Safety Indexing: Point Systems as heuristic MADM Approach	33
2.5.2.1 Characteristics of Multi Attribute Evaluation in Fire Safety	34
2.5.2.1.1 Identification of Attributes	35
2.5.2.1.2 Weightage of Attributes	36
2.5.2.1.3 Attribute Values or Grading	37
2.5.2.1.4 Normalization of Data	38
2.5.2.1.5 Grading of Measurable Items	38
2.5.2.1.6 Mathematical Operations to Synthesize Information	40
2.5.2.2 Type of Point Systems or Risk Indexes	41
2.5.2.2.1 Insurance Rating	41
2.5.2.2.2 Multiplicative Models: Gretener's Method	42
2.5.2.2.3 Industry Specific Indices: Dow's Fire and Explosion Index	42
2.5.2.2.4 Additive Models	43
2.5.2.2.5 Hierarchical Approach	44

3.3 Fire Safety Index Framework Construction	88
3.3.1 Goal	88
3.3.2 Fire Safety Strategies	89
3.3.3 Attributes	92
3.3.4 Measurable Items	93
3.4 Fire Safety Strategies, Attribute and Measurable items	95
3.4.1 Means of Access (MOA) to the building for fire services	95
3.4.2 Means of Egress (MOE)	97
3.4.3 Passive Fire Safety (PFS)	100
3.4.4 Active Fire Safety (AFS)	103
3.4.5 Fire Safety Management (FSM)	106
3.5 Assignment of Weights	109
3.5.1 Selection of Linguistic Variables	110
3.5.2 TFN v/s TRFN	112
3.6 Weighting of Strategies, Attributes and Measurable Items	112
3.6.1 FSAWM Approach	112
3.6.2 Weight Assignment using DMs Opinion	113
3.6.3 Collection of DMs Opinion for Importance of Fire Safety Elements	115
3.6.3.1 Selection of DMs	115
3.6.3.2 Survey Questionnaire Proforma	117
3.6.3.3 Guidelines for DMs to fill Survey Proforma	117
3.6.4 Weight Assignment using DMs Response	120
3.6.5 Example to Assign Weight using DMs Responses	122
3.6.6 Computation of Weights	123
3.7 Mathematical Model to Synthesize Information	124

3.7.1 Development of Computation Frame Work for Fire Safety Assessment	124
3.7.1.1 Total Fire Safety Index (I_{TFS})	124
3.7.1.2 Computation of Sub Index Values I_A	125
3.7.1.3 Computation of Grade Values G_{Ai} of an Attribute	125
3.7.1.4 Computation methodology for Sub Index Values I_B, I_C, I_D and I_E	126
3.8 Index Computations	128
3.9 Defuzzification of Fuzzy Index Values into Linguistic Terms	130
3.10 Summary of the Chapter	131
 CHAPTER- 4: RESULTS AND CASE STUDIES	
4.1 General	132
4.2 Weight Assignment Analysis	
4.3 Sensitivity Analysis	133
4.4 Comparison of I_{TFS} with other Fire Safety Indices	148
4.5 Interpretation of I_{TFS} Values	150
4.6 Case studies	151
4.6.1 Methodology of Case studies	151
4.6.1.1 Assumptions	152
4.6.2 Case study Buildings	152
4.3.2.1 Divine Grace Society (DGS), Greater Noida	153
4.3.2.2 Army Welfare Housing Organization (AWHO) Township, Greater Noida	153
4.3.2.3 King's Reserve Resident Welfare Society (KRRWS)	153
4.3.2.4 Radisson Blu Hotel (RBH)	153

4.7 Fire Safety index computations	154
4.8 Parametric Analysis of the Fire Safety Indices	165
4.9 Some important observations in buildings	167
4.10 Summary of the Chapter	169
4.11 Suggestions	170

CHAPTER- 5: CONTRIBUTIONS AND CONCLUSIONS

5.1 General	171
5.2 Salient Contributions	171
5.3 Conclusions	175
5.4 Recommendations	176
5.4.1 For National Building Codes (NBC:2016)	176
5.4.2 For Future Research	177

REFERENCES 179

ANNEXURES 197

A	Fuzzy Set Theory and Applications	197
B	Fire Safety Requirements as per NBC: 2016 part III and IV	205
C	Survey Questionnaire Proforma	214
D	Weight Assignment to Items of fire safety framework	227
E	Building Survey Proforma for Fire Safety Assessment	243
F	Index Computations for Case Studies	258
G	Photographs of the Buildings of Case Studies	273
H	Profile of the Decision Makers (DMs)	277
I	Browser based Tool to Assess Fire Safety Performance	279

RELEVANT PUBLICATIONS

ABOUT THE AUTHOR

LIST OF FIGURES

Figure No.	Title	Page No.
2.1	Fire growth v/s Time (Egan,1978)	17
2.2	COFPRA Model	54
2.3	Hwang and Yoon (1995) classification of MCDM methods	71
2.4	A 5- Point fuzzy linguistic representation (Chang and Chen, 1994)	79
3.1	Conceptual frame work of fire safety assessment model	88
3.2	Total Fire Safety of building and strategies	91
3.3	Means of Access: Attributes and measurable items	96
3.4	Means of Egress: Attributes and measurable items	98
3.5	Passive Fire Safety: Attributes and measurable items	102
3.6	Active Fire Safety of Building: Attributes and measurable items	104
3.7	Fire Safety Management: Attributes and measurable items	106
3.8	Hierarchical fire safety performance assessment model	108
3.9	Sample sheet of the part of Survey Questionnaire Proforma	119
3.10	Options for DMs to give their opinion.	119
3.11	Graphical output of DMs opinion for Q.T of the survey questionnaire proforma	121
3.12	Graphical output of DMs opinion for Q.T of the survey questionnaire proforma for total number of respondants (google form +printed format)	121
3.13	Computational scheme for indexes	129
4.1	Index computation with weights W_x	156

Figure No.	Title	Page No.
4.2	Index computation with weights W_y	157
4.3	Index computation with weights W_z	158
4.4	Fire safety indices for Devine Grace Society, Greater Noida	159
4.5	Fire safety indices for AWHO Society, Greater Noida	160
4.6	Fire safety indices for KRRWS Society, Greater Noida	161
4.7	Fire safety indices for Radisson Blue Hotel, Greater Noida	162
4.8	Comparison of Total Fire Safety Index (TFSI) of all buildings in case studies	163

Annexure Figures

A 1	Schematic representation of Triangular MFs (TFN)	199
A 2	Schematic representation of Trapezoidal MFs (TrFN)	200

LIST OF TABLES

Table No.	Title	Page No.
2.1	Some recent fire disasters (source: newspaper reports, google search)	13
2.2	Framework for performance design for fire safety	23
2.3	Deterministic v/s Probabilistic criteria	25
2.4	Classification of non-deterministic methods	31
2.5	Hierarchy of fire safety decision making levels	46
2.6	Fire safety strategies in fire safety evaluation works	48
2.7	Fire safety attributes in Fire safety evaluation works	51
2.8	Hierarchical fire safety (Shield & Silcock,1986)	53
2.9	Lo Model (1999)	56
2.10	FRIM-MAB (Karlsson 2002) Model	57
2.11	Yang and Peng Model (2005)	58
2.12	Long et al. Model (2009)	60
2.13	Comparison of fire safety evaluation works	62
2.14	TFNs with X_1, X_2, X_3) and TRFN (X_1, X_2, X_3, X_4) on 5 point linguistic scale used by researchers	80
3.1	Conceptual framework of proposed hierarchical structure of fire safety	86
3.2	Total Fire Safety, strategies and their index nomenclature	91
3.3	Fire safety strategy A: Means of Access	96
3.4	Fire safety strategy B : Means of Egress	99
3.5	Fire safety strategy C: Passive Fire Safety	102

Table No.	Title	Page No.
3.6	Fire safety strategy D: Active Fire Safety	105
3.7	Fire safety strategy E: Fire Safety Management (FSM)	107
3.8	Comparison of proposed TFN and TrFN with support ordinates and their defuzzified values	111
3.9	DMs opinion response spectrum in linguistic terms	113
3.10	Responses obtained from DMs through different channels	120
3.11	Assignment of weights using TFN	123
3.12	Assignment of weights using TrFN	123
3.13	Fuzzification of index values (I) in quantitative linguistic terms	130
4.1	Weight assignment by DMs of group X, Y and Z with quantitative and comparison of weight assignments for W_x v/s W_y	135
4.2	Analysis of weight assigned by DMs of group X with respect to DMs	144
4.3	Comparison of fire safety attributes considered in existing models with proposed model	149
4.4	Ranking of buildings for Fire Safety Level (FSL) on the basis of indices for weight W_z	164
4.5	Qualitative fire safety of case studies through indices	165
Annexure Tables		
B.1	Open space and road requirements as per building code (NBC Part 3: 2016)	211
B.2	Exit requirements as per building code (NBC Part 4:2016)	212
B.3	Passive fire safety requirements as per building code (NBC Part 4:2016)	212
B.4	Active fire safety requirements as per building code (NBC Part 4:2016)	213
D.1	Weight assignment for responses of group X DMs	228

Table No.	Title	Page No.
D.2	Weight assignment for responses of group Y DMs	233
D.3	Weight assignment for responses of group Z DMs	238
F.1	Index computations using weight W_x	258
F.2	Index computations using weight W_y	263
F.3	Index computations using weight W_z	268

ABBREVIATIONS

AC	Air Conditioned
AFS	Active Fire Safety
AHP	Analytic Hierarchy Process
ALARM	Alternative Life Safety Analysis for Retrofit Cost Minimization
AWHO	Army Welfare Housing Organization
BCM	Building Characteristics and Management
BOCA	British Official Code Administrators
BS	British Standard
BSI	British Standard Institute
Cd	Detrimental cost
CFD	Computational Fluid Dynamics
CO	Carbon Mono-oxide
COFRA	Central Office Fire Risk Assessment
Cs	Cost of safety
DGS	Divine Grace Society
DMs	Decision Makers
EB	Established Burning
EB-FSRS	Existing Building Fire Safety Ranking System
FDF	Fully Developed Fire
FEI	Fire and Explosion Index
FHA	Fire Hazard Assessment
FIBM	Fire Brigade Intervention Model
FIERAS	Fire Evaluation and Risk Assessment System
FIRECAM	Fire Risk and Cost Assessment Model

FIS	Fuzzy Inference System
FPE	Fire Protection Engineer
FPE	Fire Protection Engineer
FRA	Fire Risk Assessment
FRC	Fire Resisting Construction
FRI	Full Room Involvement
FRIM-MAB	Fire Risk Index Method- Multi-storey Apartment Building
FRSR	Fire Safety Ranking System
FSAWM	Fuzzy Simple Additive Weight Method
FSES	Fire Safety Evaluation System
FSI	Fire Service Installation
FSM	Fire Safety Management
FST	Fuzzy Sets Theory
FTA	Fault Tree Analysis
GSA	Goal Oriented System Approach
HCl	Hydrogen Chloride
HCN	Hydrogen Cyanide
HVAC	Heating Ventilation and Air Conditioning
ISO	International Standards Organisation
KRRWS	King's Reserve Resident Welfare Society
MAD	Multi Attribute Decision
MADM	Multi Attribute Decision Making
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
MEW	Multiplicative Exponential Weighting
MFs	Membership Functions
MOA	Means of Access

MODM	Multi-Objective Decision Making
MOE	Means of Escape
NBC	National Building Code
NCRB	National Crime Record Bureau NCRB
NFPA	National Fire Protection Association
OTP	Objective –to – Policy
PA	Public Address
PFS	Passive Fire Safety
POP	Parameter-to-Policy
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation Method for ENRICHMENT Evaluations
PTS	Parameter-to-Strategy
QRA	Quantitative Risk Assessment
SAW	Simple Additive Weight
SAWM	Simple Additive Weight Method
SFPE	Society for Fire Protection Engineers
STO	Strategy-to-Objective
STP	Strategy to Policy
TFN	Triangular Fuzzy Number
TFSI	Total Fire Safety Index
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
TrFNs	Trapezoidal Fuzzy Number
UD	Universe of Discourse
UK	United Kingdom
WPM	Weighted Product Method