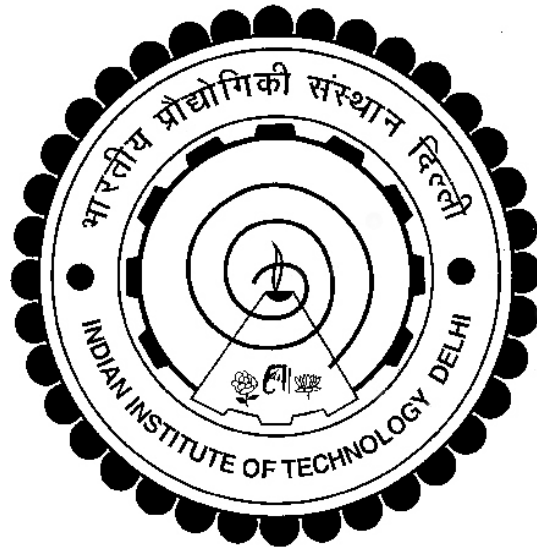


**DESIGN AND DEVELOPMENT OF HIGH ENERGY  
ABSORBENT AIRCREW HELMET USING 3D WOVEN  
STRUCTURAL COMPOSITES**

**OMENDER**



**DEPARTMENT OF TEXTILE AND FIBRE ENGINEERING  
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

**MAY 2025**

**© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2025**

**DESIGN AND DEVELOPMENT OF HIGH ENERGY  
ABSORBENT AIRCREW HELMET USING 3D WOVEN  
STRUCTURAL COMPOSITES**

by

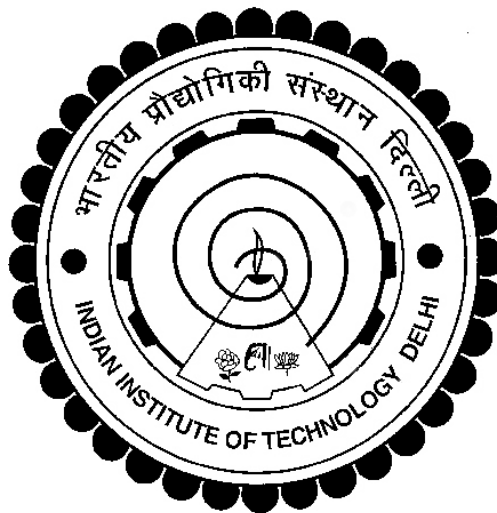
**OMENDER**

Department of Textile and Fibre Engineering

**Submitted**

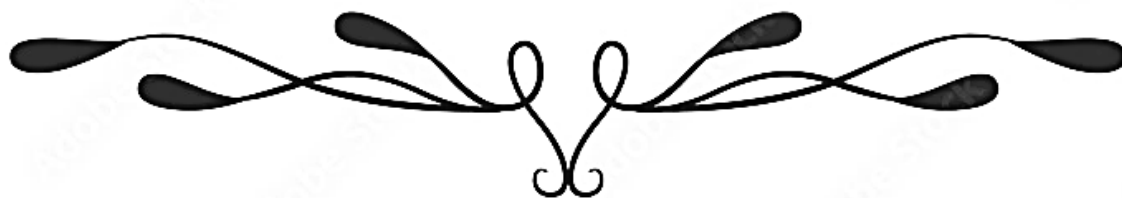
*in fulfilment of the requirement of the degree of Doctor of Philosophy*

to the

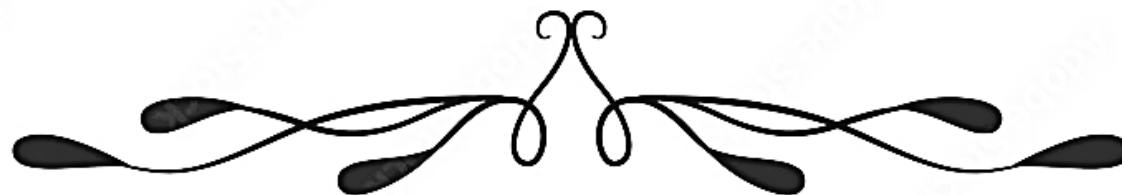


**DEPARTMENT OF TEXTILE AND FIBRE ENGINEERING  
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

**MAY 2025**



**Dedicated to Nation**



## **CERTIFICATE**

This is to certify that the thesis entitled “**DESIGN AND DEVELOPMENT OF HIGH ENERGY ABSORBENT AIRCREW HELMET USING 3D WOVEN STRUCTURAL COMPOSITES**”, being submitted by **Mr. Omender**, Entry No. 2020TTZ8774 to the Indian Institute of Technology Delhi for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is a record of Bonafide research work carried out by him. Mr. Omender has worked under my guidance and supervision and fulfilled the requirements for the thesis submission. The results contained in the thesis have not been submitted, in part or full, to any other university for the award of any degree or diploma.

Date:

**Place:** New Delhi

**Prof. B K Behera**

Department of Textile and Fibre Engineering

Indian Institute of Technology Delhi New

Delhi-110016

## ACKNOWLEDGEMENT

With deep gratitude to the Almighty God, I humbly recognise that without the guidance and influence of a higher power, I would not have discovered the right direction in life. His boundless mercy has accompanied me throughout my academic journey, particularly during my pursuit of a Ph.D. degree. I am thankful to Him for enlightening my soul and allowing me to embark on this educational journey. He grants me the power, knowledge, Patience, spirit, and persistence required to diligently work on and complete this project.

I want to express my sincere gratitude and respect to my excellent research mentor, **Dr B.K Behera**, Professor at the Department of Textile and Fibre Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, for his inspiring guidance and steadfast support, whose expertise was essential in shaping the study's methodology and research topic. His mentorship has taught me essential skills in time management, dedication, and developing disciplined research habits. I gratefully acknowledge the help of caretaker- supervisor Dr. Javed Sheikh and my SRC members, Prof. R. Alagirusamy, Prof. Samrat Mukhopadhyay, Prof. S.P Singh, and other faculty members of the department.

I am also thankful to the help and cooperation of the lab staff, especially Dr. Vikas Khatkar, Mr. B. Biswal, Mr. Rupesh Ganvir and Mr. Rajesh Chauhan. I am thankful to all my friends especially, Dr. Zunjarrao Kamble, Mr. Prabhjot Singh, Ms. Jaya Sharma, Mr. Soumya Choudhary, Mr. Shubham Agnihotri, Ms. Lekhani Tripathi, Mr. Dushyant Dubey, Ms. Shivangi Shukla, Mr. Sameer Behera, for their constant help, support, valuable assistance and encouragement.

During this period, however, I have gotten a lot of support and help from my backbone, “**My Family**,” who has provided me with expertise from the beginning. I am deeply grateful to my parents, grandparents, and especially the late **Sh. Devender Singh**, my father, holds a special

place next to God for me. I acknowledge their blessings as a constant source of strength and goodwill throughout my life.

Words fall short of expressing the depth of my love for my younger brother, **Mr. Abhishek Chandel**. Our bond is woven with threads of unconditional support, shared laughter, and endless understanding.

**Smt. Jamuna Devi**, my mother, is the cornerstone of my strength. Her blessings have consistently steered me towards my goals, and I am forever indebted to her unwavering patience and unwavering support. She embodies the role of both my mother and my best friend, offering solace during moments of disappointment and acting as an energising force when my spirits are down. Her love, support, optimism, and inspiration are truly unconditional.

I am deeply grateful to my wife, **Mrs. Pooja Kaushal**, for her invaluable support, which has significantly contributed to the enhancement of my cognitive processes. Her influence has not only facilitated a more positive outlook on life but has also equipped me with effective coping mechanisms to maintain happiness amidst stressful situations.

With profound gratitude, I extend my heartfelt thanks to **Mr. Thakur Dass Sharma**, the esteemed Principal of Alpha Public Sr. Sec. School. Gratitude also flows to the dedicated educators at J.N.G.E.C Sundernagar and N.I.T Jalandhar, whose guidance has been invaluable in navigating challenging circumstances. To my roots in education, I owe a debt of appreciation for providing stability and nourishment. In addition, I am deeply grateful to the prestigious institution of IIT Delhi for offering an exquisite environment conducive to my pursuit of a PhD.

I extend my deepest gratitude to the Defence Research & Development Organisation (DRDO) DEBEL for their generous sponsorship of Project RP04187 at the esteemed Focus Incubation Centre for 3D Weaving and Structural Composites, Indian Institute of Technology Delhi.

Last but not least, I appreciate myself for my steadfast belief in my capabilities and relentless dedication without rest. I acknowledge myself for my tireless quest for perfection, for never surrendering, and for embodying the spirit of generosity by always striving to give more than I receive.

Place: **New Delhi**

**OMENDER**

## ABSTRACT

The aircrew helmet serves as protective headgear for aircrew members, shielding them from various threats such as canopy hits, flying debris, and ballistic hazards during incidents like bird strikes, emergency ejections, hailstorms, and crash landings. The necessity for the aircrew helmet to be lightweight and provide high-impact protection is paramount for ensuring the safety of aircrew personnel, particularly during manoeuvres that subject pilots to high G-forces. This objective is met by striking a balance between the advanced materials and the adoption of a novel 3D weaving technique, which shows promising results in terms of damage tolerance. In the aircrew helmet, two primary components play crucial roles in head protection: the shell and the liner. The shell spreads the impact load across a wider area while the liner absorbs and dissipates the impact throughout its surface. This thesis explores innovative techniques to improve the performance of both components, aiming to enhance overall protection.

This research domain has emerged as a focal point for experts in protective textiles. Over the past fifty years, laminates and 2D reinforcements have been predominant in aircrew helmet design. However, traditional liner materials have exhibited subpar damage tolerance and susceptibility to blunt trauma effects. Innovative approaches incorporating 3D woven structural composites have revolutionised the field, offering superior ballistic protection and lightweight attributes.

The research employs a multidisciplinary approach to advance the understanding and application of 3D woven structural composites in aircrew helmet design. Geometric modelling techniques are utilised to precisely define the intricate structures of both the helmet shell and liner, ensuring optimal design parameters. Optimisation techniques are then employed to fine-tune these designs, maximising performance metrics such as impact resistance and energy absorption.

This study investigates the utilisation of 3D woven structural composites featuring both solid and hollow structures, each offering distinct advantages in impact resistance and energy absorption properties. The solid structural composite is employed for the helmet shell, utilising various configurations to bolster impact resistance. Conversely, the helmet liner incorporates hollow structural composites, specifically 3D woven honeycomb structures, to optimise energy absorption and dissipation. By combining these elements, the performance of aircrew helmets is evaluated, focusing on their synergistic effects. The assessment involves flatwise compression and dynamic impact analyses to gauge the overall efficacy of the helmet shell and liner in mitigating impact forces.

Shifting the focus to the helmet liner, a critical determinant of overall performance, this research explores the vast potential of 3D-woven honeycomb composites. This novel material offers a wealth of yet-to-be-explored possibilities for optimising energy absorption and, consequently, mitigating head injuries and improving damage tolerance. To further enhance this liner's efficacy, the study investigates innovative techniques for strengthening the interface of the structural composite. It also explores the benefits of intralayer hybridisation, a technique that combines various fibre types within the 3D woven structure. Additionally, a comparative analysis with traditional honeycomb materials allows for a clear understanding of the superior performance offered by 3D woven composites in aircrew helmet liners.

In essence, this thesis presents a comprehensive exploration of 3D woven structural composite materials for aircrew helmet, aiming to achieve lightweight design with simultaneous improvement in mechanical properties and impact energy absorption. The research addresses the critical need for lightweight yet robust helmet capable of effectively absorbing impact energy to enhance aircrew safety. Ultimately, this research strives to create a new generation

of lightweight yet high-impact energy absorption-based helmets that effectively protect aircrew personnel.

The initial focus lies on the development and validation of geometric model to predict the areal density of 3D woven preforms, crucial for lightweight yet robust helmets. Through experimental validation, the models demonstrate accurate predictions, providing valuable insights for informed design decisions and reducing production costs. This research includes an initial phase focused on preserving consistent areal density in both the aircrew helmet shell and liner. Initially, the focus is on maintaining the areal density of the preform, followed by calculating the fibre volume fraction and surface area requirements. By integrating these considerations into the design process, this research aims to achieve a balanced distribution of material properties while ensuring optimal weight characteristics and structural integrity in both the helmet shell and liner. A geometric model was derived to predict the areal density based on the structural parameters of the preform, including the weave design and geometric parameters. The predicted areal density, based on varying yarn linear density and the number of picks in the free and bonded wall, was compared to experimental results, and the results showed good agreement. The model was validated using experimental data from a variety of 3D woven honeycomb preforms, showing that it accurately predicts the areal density and can be used as a tool to design 3D woven honeycomb preforms for advanced composites. The results highlight that this modelling approach efficiently calculates fabric geometry parameters using minimal manufacturer and weaver data.

In the second part of this research, an attempt was made to investigate the impact of honeycomb geometry and helmet shell variations on the energy absorption capabilities of aircrew helmets. Two sections are explored: first, the structural optimisation of 3D woven honeycomb composite liners using Box Behnken Design, and second, the design engineering of high-

energy absorbent aircrew helmets utilising 3D woven structural composites in liner and shell. In the first section, subsequent investigations delve into the optimisation of honeycomb designs using statistical tools, such as the Box Behnken Design of Experiment, to assess the influence of geometric parameters on impact energy absorption. The research identifies optimal configurations, emphasising the importance of cell size, cell height, and cell wall thickness in maximising cushioning properties while maintaining structural integrity. In the second section, the focus shifts to the design engineering of aircrew helmets utilising 3D woven structural composites. This involves thoroughly investigating the effectiveness of 3D woven structural composites in aircrew helmet components, with a specific focus on optimising performance through compressive and impact energy analysis. Key findings include the superior energy absorption and cushioning properties of the L2T2H3 configuration for honeycomb liners, particularly when paired with the OR8L3M shell configuration. Impact energy analysis reveals the intricate interplay of factors like weave architecture, impactor geometry, and velocity in shaping force-displacement behaviour and energy absorption capacity. The combination of helmet shell and liner demonstrates enhanced energy absorption capabilities, with the liner exhibiting higher and more sustained absorption.

In the third part of this research, the study investigates the development and performance evaluation of intralayer hybrid 3D woven honeycomb composite cores for Aircrew Helmet Liners. Various specimen types, incorporating intralayer hybridisation with materials such as Kevlar, Glass, Dyneema, Sisal, Hemp, and Jute, were tested to enhance mechanical properties. Experimental exploration reveals significant improvements in mechanical performance across diverse honeycomb core configurations, with GK3DHC showing remarkable specific energy absorption and toughness characteristics. The study emphasises the potential of hybrid composites for structural materials, highlighting enhanced damage tolerance and dispersed damage distribution, particularly along the weft direction. Results demonstrate that sisal, hemp,

and glass show improvement in specific energy absorption, while Dyneema shows excellent crush force efficiency compared to Kevlar. Given the paramount importance of safety, Kevlar emerges as the preferable choice for the helmet liner due to its superior results in both specific energy absorption and crush force efficiency.

Additionally, honeycomb cores with a height of 15 mm exhibit superior specific energy absorption and crush force efficiency, attributed to intralayer hybridisation's synergistic effects. Results indicate significant improvements in mechanical performance, particularly with hybridisation techniques, highlighting the potential of natural alternatives such as sisal and hemp. Ongoing efforts aim to combine the properties of natural and synthetic fibres to reduce manufacturing costs while maintaining superior structural performance.

In the fourth part of this research, the augmentation of interfibre interfaces through surface treatment with ZnO nanorods and matrix modification with graphene nanoplatelets enhances the mechanical properties of aircrew helmets. The research focused on synergising these interventions to enhance the mesomechanical and macro mechanical properties, which are specifically targeted at improving the performance of aircrew helmets. Initially, the influence of GNP concentration on structural morphology was investigated. Subsequently, compressive, flexural and impact analyses were conducted to assess the effects of the treated specimens on the mechanical enhancement. The study demonstrates a synergistic approach, resulting in 29% increase in impact energy absorption compared to traditional Kevlar composites. Various analytical techniques, including TGA, Raman spectroscopy, FTIR, DMA, and SEM imaging, were employed to characterise the composite materials. The findings reveal that incorporating 1% graphene nanofillers during the ZnO treatment process significantly improves mechanical performance. It was observed that the energy absorption rate increased with the addition of graphene nanofiller. SEM imaging confirms the presence of ZnO nanorods on fabric substrates

and evaluates morphological damage post-impact. The research contributes to understanding composite behaviour under impact loads, resulting in notable enhancements in mechanical performance. The synergistic effects of these interventions demonstrate promising advancements in aircrew helmet durability and impact resistance.

In the fifth part of this research, the energy dissipation efficiency of an aircrew helmet liner developed using 3D woven honeycomb structural composites is compared to different commercially available honeycomb liner materials such as Nomex and Aluminium. In contrast to liners with discrete density differences, the use of a honeycomb-based liner reduces concerns about delamination, back face deformation, and fracture propagation. Aluminium shows localised deformation, and Nomex shows adhesive debonding, which denotes the poor energy dissipation efficiency of the liner material. The research involves comparing several parameters related to crashworthiness, such as specific energy absorption (SEA), crush force efficiency (CFE), and energy dissipation efficiency, which are crucial for head protection and ensuring helmet injury tolerance. These parameters play a vital role in assessing the ability of different configurations of the honeycomb liner during impacts. Flatwise compression and dynamic impact tests were conducted to evaluate the helmet liner's performance while maintaining consistency in the helmet shell component. The results revealed that the 3D woven honeycomb liner configuration performs optimally in terms of energy absorption by demonstrating sufficient and balanced competency across these three critical factors. Aluminium and Nomex exhibit distinct modes of failure under mechanical stress: localised deformation for aluminium and adhesive debonding for Nomex. These behaviours signify a deficiency in energy dissipation efficiency within the liner material. This disparity highlights the need for materials with enhanced capacity for absorbing and dispersing energy, particularly in applications. This research offers valuable insights for improving the performance of aircrew

helmet liners, with a particular focus on utilising 3D woven honeycomb liners featuring a 3D woven solid structure to maintain exceptional structural integrity.

In the last part of this research, Finite element analysis (FEA) and 3D X-ray Tomography techniques were utilised to analyse the back face deformation (BFD) at high-velocity impact and the internal damage resulting from impacts on the helmet liners, respectively. Finite element analysis is employed to evaluate the mechanical performance and failure modes of 3D woven honeycomb composite-based liners and shells. In FEA, the development of the model involved leveraging the SolidWorks platform for design, encompassing components such as the helmet, head dummy, and striker. HyperMesh was utilised to refine meshing, while LS-DYNA served as the platform for simulating the prototype model. FEA-simulated responses is conducted, specifically focusing on the bulge zone and dent depth. The results revealed that the 3D woven honeycomb liner configuration performs optimally in terms of energy absorption throughout the liner. Also, the simulation result revealed that the 3D woven honeycomb liner exhibits wave propagation. This phenomenon enhances its energy absorption capacity and reduces back-face deformation, which is attributed to its crushing behaviour. Numerical simulations closely align with experimental data, affirming the efficacy of the developed composite materials in providing robust head protection against various impact scenarios. A comparative analysis assessed resultant acceleration over time, showing alignment between numerical simulations and experimental data, enhancing helmet validation.

In summary, this thesis significantly enhances the field of aircrew helmet design, with a specific emphasis on refining the liner through a thorough examination of structural composite materials. The results yield invaluable perspectives for crafting high-efficiency helmets, particularly in aerospace contexts, thus bolstering safety measures and fortifying protection for aircrew members.

## सार

एयरक्रू हेलमेट एयरक्रू पायलट के लिए सुरक्षात्मक शिरोवस्त्र के रूप में कार्य करता है, जो आपातकालीन इजेक्शन, ओलावृष्टि और क्रैश लैंडिंग जैसी घटनाओं के दौरान कैनोपी से टकराना, और प्राक्षेपिक प्रहार जैसे विभिन्न खतरों से बचाता है। एयरक्रू कर्मियों की सुरक्षा सुनिश्चित करने के लिए एयरक्रू हेलमेट का हल्का होना और उच्च-प्रभाव की सुरक्षा प्रदान करना सर्वोपरि है, विशेष रूप से युद्धाभ्यास के दौरान जो पायलटों को उच्च गुरुत्वीय बल के अधीन करता है।

इस उद्देश्य को उन्नत सामग्रियों और एक नवीन 3D बुनाई तकनीक को अपनाने के बीच संतुलन बनाकर पूरा किया गया है, जो क्षति सहनशीलता के संदर्भ में आशाजनक परिणाम दिखाता है। एयरक्रू हेलमेट में, दो प्राथमिक घटक सिर की सुरक्षा में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं: शेल और लाइनर। शेल प्रभाव भार को व्यापक क्षेत्र में फैलाता है, जबकि लाइनर प्रभाव को अपनी पूरी सतह पर अवशोषित और नष्ट कर देता है। यह शोध प्रबन्ध दोनों घटकों के प्रदर्शन को बेहतर बनाने के लिए नवीन तकनीकों की खोज करता है, जिसका लक्ष्य समग्र सुरक्षा को बढ़ाना है। सुरक्षा क्षेत्र में, सिर पर किसी भी चोट या आघात के परिणामस्वरूप गंभीर मृत्यु और चोटें हो सकती हैं, जिसके कारण सुरक्षा का ध्यान मुख्य रूप से सिर पर केंद्रित होता है।

यह अनुसंधान कार्यक्षेत्र सुरक्षात्मक वस्त्रों के विशेषज्ञों के लिए एक केंद्र बिंदु के रूप में उभरा है। पिछले पचास वर्षों में, एयरक्रू हेलमेट अभिकल्पना में लैमिनेट्स और 2D सुदृढीकरण प्रमुख रहे हैं। हालाँकि, पारंपरिक लाइनर सामग्रियों ने कम क्षति सहनशीलता और कुंद आघात प्रभावों के प्रति संवेदनशीलता प्रदर्शित की है। 3D बुने हुए संरचनात्मक कंपोजिट को शामिल करने वाले नवोन्वेषी दृष्टिकोण ने बेहतर प्राक्षेपिक सुरक्षा और हल्के गुण प्रदान करते हुए इस क्षेत्र में क्रांति ला दी है।

अनुसंधान एयरक्रू हेलमेट डिजाइन में 3D बुने हुए संरचनात्मक कंपोजिट की समझ और अनुप्रयोग को आगे बढ़ाने के लिए एक बहु-विषयक दृष्टिकोण को नियोजित करता है। इष्टतम डिजाइन मापदंडों को सुनिश्चित करते हुए, हेलमेट शेल और लाइनर दोनों की जटिल संरचनाओं को सटीक रूप से परिभाषित करने के लिए ज्यामितीय मॉडलिंग तकनीकों का उपयोग किया गया है। फिर इन डिजाइनों को बेहतर बनाने के लिए अनुकूलन तकनीकों को नियोजित किया गया है, जिससे प्रभाव प्रतिरोध और ऊर्जा अवशोषण जैसे प्रदर्शन मेट्रिक्स को अधिकतम किया जा सके।

यह अध्ययन 3D बुनाई से बुने हुए संरचनात्मक कंपोजिट के उपयोग का परीक्षण करता है, जो ठोस और खोखली दोनों संरचनाओं को शामिल करता है। प्रत्येक संरचना प्रभाव प्रतिरोध और ऊर्जा अवशोषण गुणों में विशेष लाभ प्रदान करती है। हेलमेट शेल के लिए, ठोस संरचनात्मक समग्र को स्थिर करने के लिए विभिन्न ऑर्थोगोनल के विभिन्न प्रकार जैसी संरचनाओं का उपयोग किया गया है। विपरीत रूप से, हेलमेट लाइनर के लिए खोखले संरचनात्मक कंपोजिट, विशेष रूप से 3D बुनाई से बुने हुए छत्ते की संरचनाओं का उपयोग किया गया है, ताकि ऊर्जा अवशोषण और अपव्यय को अनुकूलित किया जा सके। इन तत्वों के संयोजन में, उनके सहकारी प्रभावों पर ध्यान केंद्रित करके, एयरक्रू हेलमेट के प्रदर्शन का मूल्यांकन किया है। मूल्यांकन में, हेलमेट शेल और लाइनर की समग्र प्रभावकारिता को मापने के लिए फ्लैटवाइज संपीड़न और गतिशील प्रभाव विश्लेषण शामिल है।

हेलमेट लाइनर पर ध्यान केंद्रित करते हुए, जो समग्र प्रदर्शन का एक महत्वपूर्ण निर्धारक है, यह शोध 3D बुनाई से बुने हुए हनीकॉम्ब कंपोजिट की विशाल क्षमता का पता लगाता है। यह नवीन सामग्री ऊर्जा अवशोषण को अनुकूलित करने और परिणामस्वरूप, सिर की चोटों को कम करने और क्षति सहनशीलता में सुधार करने के लिए अभी तक खोजी जाने वाली संभावनाओं का खजाना प्रदान करती है। इस लाइनर की प्रभावकारिता को और बढ़ाने के लिए, अध्ययन संरचनात्मक समग्र के अंतराफलक को मजबूत करने के लिए नवीन तकनीकों की जांच करता है। यह इंटरलेयर हाइब्रिडाइजेशन के लाभों का भी पता लगाता

है, एक ऐसी तकनीक जो 3D बुनाई संरचना के भीतर विभिन्न फाइबर प्रकारों को जोड़ती है। इसके अतिरिक्त, पारंपरिक हनीकॉम्ब सामग्रियों के साथ तुलनात्मक विश्लेषण करके एयरकू हेलमेट लाइनर्स में 3D बुनाई से बुने हुए कंपोजिट द्वारा पेश किए गए बेहतर प्रदर्शन की स्पष्ट समझ की अनुमति देता है।

संक्षेप में, यह थीसिस एयरकू हेलमेट के लिए 3D बुनाई से बुने हुए संरचनात्मक समग्र सामग्रियों की व्यापक खोज प्रस्तुत करती है, जिसका लक्ष्य हल्के डिजाइन, यांत्रिक गुणों और प्रभाव ऊर्जा अवशोषण को बढ़ाना है। यह शोध एयरकू सुरक्षा को बढ़ाने के लिए प्रभाव ऊर्जा को प्रभावी ढंग से अवशोषित करने में सक्षम हल्के लेकिन मजबूत हेलमेट की महत्वपूर्ण आवश्यकता को संबोधित करता है। अंततः, यह शोध हल्के लेकिन उच्च प्रभाव वाले ऊर्जा अवशोषण आधारित हेलमेट की एक नई पीढ़ी बनाने का प्रयास करता है जो प्रभावी ढंग से एयरकू कर्मियों की रक्षा करता है।

प्रारंभिक फोकस 3D बुनाई से बुने हुए प्रीफॉर्म के क्षेत्रीय घनत्व की भविष्यवाणी करने के लिए ज्यामितीय मॉडल के विकास और सत्यापन पर है, जो हल्के लेकिन मजबूत हेलमेट के लिए महत्वपूर्ण है। प्रयोगात्मक सत्यापन के माध्यम से, मॉडल सटीक भविष्यवाणियां प्रदर्शित करते हैं, सूचित डिजाइन निर्णयों के लिए मूल्यवान अंतर्दृष्टि प्रदान करते हैं और उत्पादन लागत को कम करते हैं। इस शोध में एक प्रारंभिक चरण शामिल है जो एयरकू हेलमेट शेल और लाइनर दोनों में लगातार क्षेत्रीय घनत्व को संरक्षित करने पर केंद्रित है। प्रारंभ में, केंद्र प्रीफॉर्म के क्षेत्रीय घनत्व को बनाए रखने पर है, इसके बाद फाइबर वॉल्यूम अंश और सतह क्षेत्र आवश्यकताओं की गणना की जाती है। डिजाइन प्रक्रिया में इन विचारों को एकीकृत करके, इस शोध का उद्देश्य हेलमेट शेल और लाइनर दोनों में इष्टतम वजन विशेषताओं और संरचनात्मक अखंडता को सुनिश्चित करते हुए सामग्री गुणों का संतुलित वितरण प्राप्त करना है। बुनाई डिजाइन और ज्यामितीय मापदंडों सहित प्रीफॉर्म के संरचनात्मक मापदंडों के आधार पर क्षेत्रीय घनत्व की भविष्यवाणी करने के लिए एक ज्यामितीय मॉडल तैयार किया गया था। अलग-अलग धागे के रैखिक घनत्व और पिक्स की संख्या के आधार पर अनुमानित क्षेत्रीय घनत्व की प्रयोगात्मक परिणामों से तुलना की गई और अच्छी

सहमति दिखाई गई। मॉडल को विभिन्न प्रकार के 3D बुने हुए हनीकॉम्ब प्रीफॉर्म से प्रायोगिक डेटा का उपयोग करके मान्य किया गया था, जिससे पता चलता है कि यह क्षेत्र घनत्व की सटीक भविष्यवाणी करता है और इसे उन्नत कंपोजिट के लिए 3D बुनाई से बुने हुए हनीकॉम्ब प्रीफॉर्म को डिजाइन करने के लिए एक उपकरण के रूप में इस्तेमाल किया जा सकता है। परिणाम इस बात पर प्रकाश डालते हैं कि यह मॉडलिंग दृष्टिकोण न्यूनतम निर्माता और बुनकर डेटा का उपयोग करके कपड़े की ज्यामिति मापदंडों की कुशलता से गणना करता है।

इस शोध के दूसरे भाग में, एयरकू हेलमेट की ऊर्जा अवशोषण क्षमताओं पर हनीकॉम्ब ज्यामिति और हेलमेट शेल विविधताओं के प्रभाव की जांच करने का प्रयास किया गया। दो खंडों का पता लगाया गया है: पहला, बॉक्स बेनकेन डिज़ाइन का उपयोग करके 3D बुनाई से बुने हुए हनीकॉम्ब कंपोजिट लाइनर्स की संरचनात्मक वृद्धि, और दूसरा, 3D बुनाई से बुने हुए संरचनात्मक कंपोजिट का उपयोग करके उच्च-ऊर्जा अवशोषक एयरकू हेलमेट की इंजीनियरिंग। पहले अनुभाग में, हनीकॉम्ब डिज़ाइन के अनुकूलन को गहराई से समझने के लिए, बॉक्स-बेनकेन डिज़ाइन के तर्कत्मक तरीकों का उपयोग किया जाता है, जैसे कि सांख्यिकीय तरिका। इसके माध्यम से ऊर्जा अवशोषण पर ज्यामितीय मापदंडों के प्रभाव का आकलन किया जाता है। अनुसंधान इष्टतम विन्यास की पहचान करता है, संरचनात्मक अखंडता को बनाए रखते हुए कुशनिंग गुणों को अधिकतम करने में सेल आकार, सेल ऊंचाई और सेल की मोटाई के महत्व पर जोर देता है। दूसरे अनुभाग में, 3D बुनाई से बुने हुए संरचनात्मक कंपोजिट का उपयोग करके एयरकू हेलमेट की डिजाइन इंजीनियरिंग पर ध्यान केंद्रित किया गया है। इसमें संपीड़ित और प्रभाव ऊर्जा विश्लेषण के माध्यम से प्रदर्शन को अनुकूलित करने पर विशेष ध्यान देने के साथ, एयरकू हेलमेट घटकों में 3D बुनाई से बुने हुए संरचनात्मक कंपोजिट की प्रभावशीलता की पूरी तरह से जांच की गई है। मुख्य निष्कर्षों में हनीकॉम्ब लाइनर्स के लिए L2T2H3 समाकृति के बेहतर ऊर्जा अवशोषण और कुशनिंग गुण शामिल हैं, खासकर जब OR8L3M शेल समाकृति के साथ जोड़ा जाता है। प्रभाव ऊर्जा विश्लेषण से

बल-विस्थापन व्यवहार और ऊर्जा अवशोषण क्षमता को आकार देने में बुनाई वास्तुकला, प्रभावक ज्यामिति और वेग जैसे कारकों की जटिल परस्पर क्रिया का पता चला है। हेलमेट शेल और लाइनर का संयोजन बढ़ी हुई ऊर्जा अवशोषण क्षमताओं को प्रदर्शित करता है, साथ ही लाइनर उच्च और अधिक निरंतर अवशोषण प्रदर्शित करता है।

इस शोध के तीसरे भाग में, अध्ययन एयरक्रू हेलमेट लाइनर्स के लिए इंटरलेयर हाइब्रिड 3D बुनाई से बुने हुए हनीकॉम्ब कंपोजिट कोर के विकास और प्रदर्शन मूल्यांकन की जांच की गई है। यांत्रिक गुणों को बढ़ाने के लिए केवलार, ग्लास, डायनेमा, सिसल, हेम्प और जूट जैसे धागों की सामग्रियों के साथ इंटरलेयर संकरण को शामिल करते हुए विभिन्न नमूना प्रकारों का परीक्षण किया गया। प्रायोगिक अन्वेषण से विभिन्न हनीकॉम्ब कोर समाकृति में यांत्रिक प्रदर्शन में महत्वपूर्ण सुधार का पता चलता है, जिसमें GK3DHC उल्लेखनीय विशिष्ट ऊर्जा अवशोषण और क्रूरता विशेषताओं को दर्शाता है। अध्ययन संरचनात्मक सामग्रियों के लिए हाइब्रिड कंपोजिट की क्षमता पर जोर देता है, विशेष रूप से बाने की दिशा में बढ़ी हुई क्षति सहनशीलता और बिखरे हुए क्षति वितरण पर प्रकाश डालता है। परिणाम दर्शाते हैं कि सिसल, हेम्प और ग्लास विशिष्ट ऊर्जा अवशोषण में सुधार दिखाते हैं जबकि डायनेमा, केवलार की तुलना में उत्कृष्ट क्रश बल दक्षता दिखाता है। सुरक्षा के सर्वोपरि महत्व को देखते हुए, केवलार विशिष्ट ऊर्जा अवशोषण और क्रश बल दक्षता दोनों में अपने बेहतर परिणामों के कारण हेलमेट लाइनर के लिए बेहतर विकल्प के रूप में उभरा है। इसके अतिरिक्त, 15 मिमी की ऊंचाई वाले हनीकॉम्ब कोर बेहतर विशिष्ट ऊर्जा अवशोषण और क्रश बल दक्षता प्रदर्शित करते हैं, जो इंटरलेयर संकरण के सहक्रियात्मक प्रभावों के कारण होता है। परिणाम यांत्रिक प्रदर्शन में महत्वपूर्ण सुधार का संकेत देते हैं, विशेष रूप से संकरण तकनीकों के साथ, सिसल और हेम्प जैसे प्राकृतिक विकल्पों की क्षमता को उजागर करते हैं। चल रहे प्रयासों का उद्देश्य बेहतर संरचनात्मक प्रदर्शन को बनाए रखते हुए विनिर्माण लागत को कम करने के लिए प्राकृतिक और सिंथेटिक फाइबर के गुणों को संयोजित करना है।

इस शोध के चौथे भाग में, एयरक्रू हेलमेट की यांत्रिक शक्तियों को बढ़ाने के लिए, सतह पर ZnO नैनोरोड्स का उपयोग और मैट्रिक्स में ग्राफीन नैनोप्लेटलेट्स के साथ संशोधन करके इंटरफाइबर इंटरफेस में मजबूती की गयी है। अनुसंधान ने मेसोमैकेनिकल और मैक्रोमैकेनिकल गुणों को बढ़ाने के लिए इन हस्तक्षेपों को समन्वित करने पर ध्यान केंद्रित किया, जो विशेष रूप से एयरक्रू हेलमेट के प्रदर्शन में सुधार लाने के लिए लक्षित हैं। प्रारंभ में, संरचनात्मक आकृति विज्ञान पर जीएनपी एकाग्रता के प्रभाव की जांच की गई थी। इसके बाद, यांत्रिक वृद्धि पर उपचारित नमूनों के प्रभावों का आकलन करने के लिए संपीड़ित, लचीले और प्रभाव विश्लेषण किए गए। अध्ययन एक सहक्रियात्मक दृष्टिकोण प्रदर्शित करता है, जिसके परिणामस्वरूप मानक केवलार कंपोजिट की तुलना में प्रभाव ऊर्जा अवशोषण में 29% की वृद्धि होती है। समग्र सामग्रियों को चिह्नित करने के लिए टीजीए, रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी, एफटीआईआर, डीएमए और एसईएम इमेजिंग सहित विभिन्न विश्लेषणात्मक तकनीकों को नियोजित किया गया था। निष्कर्षों से पता चलता है कि ZnO उपचार प्रक्रिया के दौरान 1% ग्राफीन नैनोफिलर्स को शामिल करने से यांत्रिक प्रदर्शन में काफी सुधार होता है। यह देखा गया कि ग्राफीन नैनोफिलर को शामिल करने से ऊर्जा अवशोषण की दर में वृद्धि हुई। SEM इमेजिंग फैब्रिक सबस्ट्रेट्स पर ZnO नैनोरोड्स की उपस्थिति की पुष्टि करती है और प्रभाव के बाद रूपात्मक क्षति का मूल्यांकन करती है। अनुसंधान प्रभाव भार के तहत समग्र व्यवहार को समझने में योगदान देता है, जिसके परिणामस्वरूप यांत्रिक प्रदर्शन में उल्लेखनीय वृद्धि होती है। इन हस्तक्षेपों के सहक्रियात्मक प्रभाव एयरक्रू हेलमेट स्थायित्व और प्रभाव प्रतिरोध में आशाजनक प्रगति प्रदर्शित करते हैं।

इस शोध के पांचवें भाग में, 3D बुनाई से बुने हुए हनीकॉम्ब संरचनात्मक कंपोजिट का उपयोग करके विकसित एयरक्रू हेलमेट लाइनर की ऊर्जा अपव्यय दक्षता की तुलना नोमेक्स और एल्यूमीनियम जैसे विभिन्न व्यावसायिक रूप से उपलब्ध हनीकॉम्ब लाइनर सामग्रियों से की गई है। अलग-अलग घनत्व अंतर वाले लाइनर के विपरीत, हनीकॉम्ब-आधारित लाइनर का उपयोग विलयन, पिछला चरण विरूपण और

फ्रैक्चर प्रसार के बारे में चिंताओं को कम करता है। एल्युमीनियम स्थानीयकृत विरूपण दिखाता है, और नोमेक्स डिबॉन्डिंग असफलता दिखाता है, जो लाइनर की खराब ऊर्जा अपव्यय दक्षता को दर्शाता है। शोध में क्रेशयोग्यता से संबंधित कई मापदंडों की तुलना करना शामिल है, जैसे विशिष्ट ऊर्जा अवशोषण (एसईए), क्रश बल दक्षता (सीएफई), और सुरक्षा का मार्जिन, जो सिर की सुरक्षा और हेलमेट की चोट सहनशीलता सुनिश्चित करने के लिए महत्वपूर्ण हैं। ये पैरामीटर प्रभावों के दौरान हनीकॉम्ब लाइनर के विभिन्न विन्यासों की क्षमता का आकलन करने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। हेलमेट शेल घटक में स्थिरता बनाए रखते हुए हेलमेट लाइनर के प्रदर्शन का मूल्यांकन करने के लिए फ्लैटवाइज संपीडन और गतिशील प्रभाव परीक्षण आयोजित किए गए थे। परिणामों से पता चला कि 3D से बुना हनीकॉम्ब लाइनर समाकृति इन तीन महत्वपूर्ण कारकों में पर्याप्त और संतुलित क्षमता प्रदर्शित करके ऊर्जा अवशोषण के मामले में इष्टतम प्रदर्शन करता है। एल्युमीनियम और नोमेक्स यांत्रिक तनाव के तहत विफलता के अलग-अलग तरीके प्रदर्शित करते हैं: एल्युमीनियम के लिए स्थानीयकृत विरूपण और नोमेक्स के लिए चिपकने वाली विफलता। ये व्यवहार लाइनर सामग्री के भीतर ऊर्जा अपव्यय दक्षता में कमी का संकेत देते हैं। यह असमानता विशेष रूप से अनुप्रयोगों में ऊर्जा को अवशोषित और फैलाने की बढ़ी हुई क्षमता वाली सामग्रियों की आवश्यकता पर प्रकाश डालती है। यह शोध एयरक्रू हेलमेट लाइनर्स के प्रदर्शन में सुधार के लिए मूल्यवान अंतर्दृष्टि प्रदान करता है, जिसमें असाधारण संरचनात्मक अखंडता बनाए रखने के लिए 3D बुनाई से बुने हुए ठोस संरचना वाले हनीकॉम्ब लाइनर्स के उपयोग पर विशेष ध्यान दिया गया है।

इस शोध के अंतिम भाग में, परिमित तत्व विश्लेषण (एफईए) और 3D एक्स-रे टोमोग्राफी तकनीकों का उपयोग क्रमशः उच्च-वेग प्रभाव पर बैक फेस विरूपण (बीएफडी) और हेलमेट लाइनर पर प्रभाव के परिणामस्वरूप आंतरिक क्षति का विश्लेषण करने के लिए किया गया था। 3D बुनाई से बुने हुए हनीकॉम्ब कंपोजिट-आधारित लाइनर्स और शेल्स के यांत्रिक प्रदर्शन और विफलता मोड का मूल्यांकन करने के लिए परिमित तत्व विश्लेषण का उपयोग किया जाता है। एफईए में, मॉडल के विकास में डिजाइन के लिए

सॉलिडवर्क्स प्लेटफॉर्म का लाभ उठाना शामिल है, जिसमें हेलमेट, हेड डमी, और स्ट्राइकर जैसे घटक शामिल हैं। हाइपरमेश का उपयोग मेशिंग को परिष्कृत करने के लिए किया गया था, जबकि एलएस-डायना ने प्रोटोटाइप मॉडल के अनुकरण के लिए मंच के रूप में कार्य किया था। एफईए सिमुलेटेड प्रतिक्रियाएं आयोजित की जाती हैं, विशेष रूप से उभार क्षेत्र और सेंध की गहराई पर ध्यान केंद्रित किया गया है। परिणामों से पता चला कि 3D बुनाई से बुना हनीकॉम्ब लाइनर संरचना पूरे लाइनर में ऊर्जा अवशोषण के मामले में इष्टतम प्रदर्शन करता है। साथ ही, सिमुलेशन परिणाम से पता चला कि 3D बुनाई से बुना हनीकॉम्ब लाइनर तरंग प्रसार प्रदर्शित करता है। यह घटना इसकी ऊर्जा अवशोषण क्षमता को बढ़ाती है और इसके कुचलने वाले व्यवहार के कारण होने वाली उभार क्षेत्र विकृति को कम करती है। संख्यात्मक सिमुलेशन प्रयोगात्मक डेटा के साथ निकटता से संरेखित होते हैं, जो विभिन्न प्रभाव परिदृश्यों के खिलाफ मजबूत सिर सुरक्षा प्रदान करने में विकसित मिश्रित सामग्रियों की प्रभावकारिता की पुष्टि करते हैं। एक तुलनात्मक विश्लेषण ने समय के साथ परिणामी त्वरण का आकलन किया, संख्यात्मक सिमुलेशन और प्रयोगात्मक डेटा के बीच संरेखण दिखाया, जिससे हेलमेट सत्यापन में वृद्धि हुई।

संक्षेप में, यह थीसिस एयरक्रू हेलमेट डिजाइन के क्षेत्र को महत्वपूर्ण रूप से बढ़ाती है, जिसमें संरचनात्मक मिश्रित सामग्रियों की गहन जांच के माध्यम से लाइनर को परिष्कृत करने पर विशेष जोर दिया गया है। परिणाम विशेष रूप से एयरोस्पेस संदर्भों में उच्च दक्षता वाले हेलमेट तैयार करने के लिए अमूल्य दृष्टिकोण प्रदान करते हैं और एयरक्रू सदस्यों के लिए सुरक्षा को मजबूत करते हैं।

## Contents

	<b>Page no.</b>
Certificate	i
Acknowledgements	ii
Abstract	v
Saar	xii
Table of Contents	xx
List of Figures	xxxii
List of Tables	xlii
List of Abbreviations	xlv
List of Symbols	xlvi
<b>Chapter 1: Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Background	2
1.2 Statement of the problem	6
1.3 Motivation	7
1.4 Overview of the investigation	8
<b>Chapter 2: Research Objectives</b>	<b>10</b>
2.1 Principal objective	10
2.2 Sub-objectives	10
<b>Chapter 3: Literature Review</b>	<b>11</b>
3.1 Introduction	12
3.1.1 Historical Background of protective headgear	13
3.1.2 Theory of load transfer from helmet shell to head	15
3.1.3 Biomechanics of head injuries and their assessment	19
3.1.3.1 Tolerance to indentation	19

3.1.3.2 Tolerance to Peak Acceleration	21
3.1.3.3 Assessment criteria and thresholds of protective headgear	22
3.2 Components of helmet	27
3.2.1 Shell	27
3.2.2 Energy-absorbing Liner	30
3.2.2.1 Expanded polystyrene (EPS) foam liner	30
3.2.2.2 Polypropylene (PP), polyethylene (PE) foam liner	31
3.2.2.3 Polyurethane foam liner	31
3.2.3 Comfort Padding	31
3.2.4 Miscellaneous Accessories	32
3.2.4.1 Retention system	32
3.2.4.2 Visor	32
3.2.4.3 Ventilation System	32
3.3 Types of helmets based on application	33
3.3.1 Bicycle Helmet	33
3.3.2 Motorcycle helmet	33
3.3.3 Industrial Helmet	34
3.3.4 Combat Helmet	35
3.3.5 Cricket Helmet	36
3.3.6 Football Helmet	37
3.3.7 Aircrew Helmet	38
3.3.8 Smart Helmet	39
3.4 Materials for Helmet shell manufacturing	40
3.4.1 Matrix materials	40
3.4.2 Reinforcing material	40

3.5 Advancements in the Design and Development of Helmet Components	45
3.5.1 Development of Advanced Outer Shell Structures	45
3.5.2 Advancements in Helmet Liner	51
3.6 Helmet characterization	63
3.6.1 Helmet Impact Absorption Test	63
3.6.2 Resistance-to-penetration Test	65
3.6.3 Helmet Rigidity Test	66
3.6.4 Dynamic Test of Retention System	66
3.6.5 Helmet Ballistic Test	66
3.7 Finite element modelling of Helmet based on impact and its transmission	67
3.8 Summary and Outlook	71
<b>Chapter 4: Materials and Methods</b>	<b>74</b>
4.1 Introduction	75
4.2 Materials	76
4.2.1 Yarns	76
4.2.2 Matrix material and curing agent	77
4.2.3 Graphene nanoplatelets (GNPs)	78
4.2.4 Zinc oxide (ZnO) nanorods	78
4.2.5 Aluminium and Nomex Honeycomb	79
4.3 Methods	80
4.3.1 Determination of Areal density of 3D woven structural preform	80
4.3.2 Manufacturing of 3D woven Solid and Honeycomb Composites	82
4.3.3 Production of 3D woven structural preform	91

4.3.4 Consolidation of Composite Structures	93
4.4 Characterization of the developed composite materials	95
4.4.1 Flatwise Compression	95
4.4.2 Dynamic Impact Test	98
4.4.3 Relative Density	99
4.4.4 Three-point bending	101
4.4.5 Evaluation of the thermogravimetric analysis of composites	102
4.4.6 Structural and Morphological Characterization	103
4.4.6.1 Fourier transform infrared spectroscopy	103
4.4.6.2 Raman spectroscopy	103
4.4.6.3 Scanning Electron Microscopy	104
4.4.6.4 X-ray diffraction	104
4.4.6.5 Tomography Analysis	104
<b>Chapter 5: To develop a geometrical model to estimate the areal density of 3D woven honeycomb fabrics to facilitate honeycomb weaving</b>	107
5.1 Introduction	108
5.2 Materials and Methods	110
5.2.1 Materials	111
5.2.2 Methods	112
5.3 Results and Discussion	126
5.3.1 Comparative analysis of the predicted and experimental areal density of the 3D woven honeycomb	126
5.3.2 Assessment of the accuracy of the model	127
5.3.3 Regression Analysis	130
5.3.4 Predicted Outcomes Using Geometric Modelling	132

5.3.4.1 Effect of different layers on the areal density of 3D woven honeycomb preform	132
5.3.4.2 Effect of yarn count and ends per meter on the areal density of 7-layer 3D woven honeycomb	135
5.3.4.3 Effect of ends and picks per meter and yarn count on the areal density of the 7-layer 3D woven honeycomb	136
5.3.4.4 Effect of Pick Insertion on Areal Density of 7 Layer 3D Woven Honeycomb with Varying Yarn Count"	137
5.3.4.5 Effect Pick Insertion in free/bonded wall on Fibre Volume Fraction (FVF)	138
5.3.4.6 Calculation of helmet surface area	139
5.4 Conclusion	140
<b>Chapter 6: Investigation of the influence of honeycomb geometry and helmet shell variants on impact energy absorption of aircrew helmet</b>	142
6.1 Investigation of the influence of honeycomb geometry (cell size, cell height, and cell thickness) for enhanced energy absorption of honeycomb composite liner by Box Behnken Design (BBD) of Experiment	143
6.1.1 Introduction	142
6.1.2 Materials and Methods	145
6.1.2.1 Optimization approach	145
6.1.2.2 Manufacturing of 3D woven Honeycomb Composites	148
6.1.3 Results and Discussion	149
6.1.3.1 Relative density	149
6.1.3.2 Compressive response	151

6.1.3.3 Drop weight impact test	152
6.1.3.4 Regression Analysis	153
6.1.3.5 Analysis of Variance (ANOVA)	154
6.1.3.6 Optimization of the variable using Box Behnken Design	156
6.1.3.7 Solution	168
6.1.3.8 Assessment of the accuracy of the model	169
6.1.4 Conclusions	170
6.2 Design Engineering of High Energy Absorbent Aircrew helmet using 3D woven honeycomb liner with different 3D woven solid structure-based composites as shell material	173
6.2.1 Introduction	172
6.2.2 Material and Methods	175
6.2.2.1 Manufacturing of 3D woven Solid and Honeycomb Composites	175
6.2.2.2 Optimization approach	178
6.2.2.3 Characterisation of 3D woven structural composite based aircrew helmet	180
6.2.3 Results and Discussion	182
6.2.3.1 Compressive strength	182
6.2.3.2 Impact Energy	186
6.2.3.3 Synergic Effect of structural configuration on variables	194
6.2.3.4 Failure analysis	195
6.2.4 Conclusion	196

<b>Chapter 7: Mechanical analysis of intralayer hybrid 3D woven honeycomb composite core using different textile fibres in the aircrew helmet liner</b>	<b>201</b>
7.1 Introduction	202
7.2 Materials and Methods	204
7.2.1 Materials	204
7.2.2 Methods	206
7.2.2.1 Development of 3D woven honeycomb preforms	206
7.2.2.2 Production of intralayer hybrid 3D woven honeycomb preforms	207
7.2.2.3 Production of the hybrid honeycomb composite	209
7.2.3 Characterization of the Hybrid Honeycomb Core	210
7.2.3.1 Flatwise Compression	210
7.2.3.2 Three-point bending	211
7.2.3.3 Density measurement of the 3D woven honeycomb liner	212
7.2.3.4 Evaluation of the thermogravimetric analysis of composites	213
7.2.3.5 Fractography analysis/ Microstructural examination	213
7.3 Results and Discussion	214
7.3.1 Compressive Behaviour of the Hybrid Honeycomb Core Structure	212
7.3.1.1 Effect of Core Height on the Compression Strength	215
7.3.1.2 Effect of Core Height on Crush Force Efficiency	217
7.3.1.3 Effect of Core Height on the Specific Energy Absorption (SEA)	218
7.3.2 Three-point bending test of various honeycomb cores	219

7.3.2.1 Effect of Core Height on Three-Point Bending Behaviour	219
7.3.2.2 Effects of Various Honeycomb Cores on the Three-Point Bending Behaviour	221
7.3.3 Characterization of the density of different hybrid honeycomb profiles	222
7.3.4 Thermogravimetric evaluation	224
7.3.5 Failure modes of hybrid composite laminates	225
7.4 Conclusion	228
<b>Chapter 8: Investigation of the effect of various treatments of textile structural composite-based shell and liner on the impact performance of aircrew helmet</b>	231
8.1 Introduction	232
8.2 Materials and Methods	234
8.2.1 Materials	234
8.2.2 Methods	235
8.2.2.1 Development of the 3D woven structural preform	235
8.2.2.2 Surface Functionalisation of Helmet Liner with ZnO Nanorods	237
8.2.2.3 Graphene-induced Matrix Modification of Helmet Shell	239
8.2.2.4 Consolidation of Treated Structural Composites	240
8.2.3 Characterization of helmet performance	241
8.2.3.1 Structural and Morphological Characterization	241
8.2.3.2 Evaluation of the mechanical performance of different composite structures	243
8.3 Results and Discussion	246

8.3.1 Surface Morphology of ZnO Treated Preform-Helmet Liner Modification	246
8.3.2 Graphene-induced structural composites	252
8.3.3 Flatwise Compression Test Results	260
8.3.4 Flexural Test Results	261
8.3.5 Impact Tests Results	262
8.3.6 Conclusion	264
<b>Chapter 9: Comparison of mechanical performance of 3D woven honeycomb composite liner with equivalent aluminium and Nomex honeycomb-based liner materials</b>	266
9.1 Introduction	267
9.2 Material and Methods	269
9.2.1 Materials	269
9.2.2 Methods	270
9.2.2.1 Manufacturing of 3D woven Solid structure for shell and Honeycomb Composites for liner	270
9.2.2.2 Consolidation of Composite Structures	271
9.2.3 Characterization of the performance of helmet	273
9.2.3.1 Flatwise Compression	274
9.2.3.2 Dynamic Impact Test	274
9.3 Results and Discussion	275
9.3.1 Density Measurement of various honeycomb core	275
9.3.2 Compressive Response	276
9.3.2.1 SEA (Specific Energy absorption)	277
9.3.2.2 CFE (Crush Force Efficiency)	278

9.3.3 Impact Energy	279
9.3.4 Energy Dissipation Efficiency	281
9.4 Conclusion	282
<b>Chapter 10: Finite element analysis of 3D woven honeycomb composite-based liner and shell to investigate their mechanical performance and failure</b>	283
10.1 Introduction	284
10.2 Materials and Methods	287
10.2.1 Manufacturing of 3D woven structural composite	287
10.2.2 Finite Element Analyses (FEA)	287
10.2.3 Tomography Analysis	296
10.2.4 Head Injury Criterion (HIC)	299
10.3 Results and Discussion	300
10.3.1 Dent Depth Analysis in 3D Woven Honeycomb Composite through Tomography	300
10.3.2 Effect of Bulge Zone or Dent Depth: Experimental vs. Simulated	301
10.3.3 Simulation results	301
10.3.4 Head Injury Criterion	303
10.3.5 Residual Velocity vs Time	304
10.3.6 Conclusion	305
<b>Chapter 11: Summary and Conclusions</b>	308
<b>Scope for future work</b>	310
<b>Limitations</b>	311
<b>References</b>	313

<b>Publication Details</b>	357
<b>Curriculum vitae</b>	361

## List of Figures

---

Figure 3.1	Evolution of helmets from World War II to present US Army a); Polish Army b)	14
Figure 3.2	Load transmission from helmet to brain	16
Figure 3.3	Comparison of Head Injury Criterion-HIC15 and HIC36 for theoretical head acceleration pulse, which is a half-sine wave	24
Figure 3.4	High-fidelity finite element model of the human head	25
Figure 3.5	Human head numerical model with various aspects of its components	26
Figure 3.6	Component of full-face protective headgear	27
Figure 3.7	Compression moulding tool and the concept of the moulded insert	30
Figure 3.8	Digital models of bicycle helmets. From left: Netti Lightning, MET Crossover, and MET Kaos	33
Figure 3.9	Certified motorcycle helmet and the developed finite element (FE) model	34
Figure 3.10	3D CAD model of Industrial Helmet- Helmet shell a); Cradle b)	35
Figure 3.11	New ballistic helmets serving in the world- U.S. Army IHPS mid-cut helmet a); U.K. VIRTUS helmet b); Russia 6B47 aramid helmet; c) Norway Hjelm light helmet d)	36
Figure 3.12	Main components of -standard cricket helmet a); Helmet layers b)	36
Figure 3.13	VZ1 Football helmet- Surface view a); internal view b)	38
Figure 3.14	Aircrew Integrated Helmet System donned on headform front view a); isometric view b)	39
Figure 3.15	Matrix material for helmet shell development	40

Figure 3.16	Filament Deposition preforming by compression moulding a); by filament winding b)	42
Figure 3.17	Dome shape formation - Pinwheel dart pattern a); Pinwheel origami base edge b); Pinwheel segment pattern c); Hexagonal dart pattern d); Pinwheel cut and assembly e); Thermoforming layout f); helmet prototype g)	45
Figure 3.18	Various techniques used for Helmet shell manufacturing	46
Figure 3.19	Helmet shell manufacturing through a thermoforming process	46
Figure 3.20	Preform placement into the mould a); Bagging setup of the infusion process for the helmet shells b); manufactured composite helmet shell c)	47
Figure 3.21	The behaviour of STF during impact	49
Figure 3.22	Zinc oxide nanowires- with a high aspect ratio a); with a low aspect ratio (scale bar 3 $\mu\text{m}$ ) b)	50
Figure 3.23	Additive manufactured helmet lattice liner arrangement	54
Figure 3.24	FE model of the helmet with Hierarchical lattice liner	54
Figure 3.25	3D-printed composites with a re-entrant honeycomb reinforced, chiral truss reinforced, regular honeycomb reinforced, and truss reinforced designs a); Nominal stress and strain curves for various designs b); Young's modulus and energy absorption of auxetic and non-auxetic composites c)	55
Figure 3.26	Mechanism of a self-reinforced triple shape memory silicone rubber composite with accurate designable second temporary shape	57

Figure 3.27	Bio-inspired designs: pumpkin a); stacked diatom skeletal b); internal Fibonacci spiral c); haystack d); wheel spoke e); external Fibonacci spiral f); spiral wave g); double helix h); hexagonal spring i)	58
Figure 3.28	Energy absorbing bioinspired design- turtle shell a); beetle forewings b); peacock mantis shrimp c); lady beetle d)	59
Figure 3.29	Schematic section of the prototype liner	60
Figure 3.30	Illustration of the helmet with honeycomb filler	60
Figure 3.31	A schematic diagram illustrating a woven fabric with a multilayer structure featuring a hexagonal shape and its geometrical parameters	61
Figure 3.32	The production process of 3D woven honeycomb Structure	63
Figure 3.33	Operation of a drop weight impact test machine	64
Figure 3.34	The Total Human Model for Safety (THUMS) head Finite Element (FE) model	69
Figure 3.35	Finite Element Analysis (FEA) of Helmeted Head-form in Impact	70
Figure 3.36	Helmet configuration- Shell forming a); Helmet with the support structure b); Defining composite layers c); Fixed support at the bottom d); Application of force e); Meshing f); Displacement distribution g)	71
Figure 4.1	Geometry of a cross-section of the repeat unit of the honeycomb fabric	82
Figure 4.2	Geometric parameters of a honeycomb unit cell; cross-sectional view along weft a); Repeat unit of 9P7L honeycomb structure b); Plan of 9P7L honeycomb Structure c)	86
Figure 4.3	Cross-sectional representation of 3 pick honeycomb structure a); 5 pick honeycomb structure b); 7 pick honeycomb structure c); 9 pick honeycomb structure d)	88

Figure 4.4	The peg plan of 3; 5; 7; 9 pick 7-layer honeycomb preform	89-92
Figure 4.5	Customised 3D weaving Dynamic Loom	93
Figure 4.6	Representation of 3d woven solid/hollow preform; 5P7L a); 7P7L b); 9P7L c); OR8L1P d); OR8L2M e); OR8L3M f)	94
Figure 4.7	Consolidation of 3D structural composite using VARTM technique	94
Figure 4.8	Developed aircrew helmet shell and liner	95
Figure 4.9	Compressive Behaviour of 3D woven honeycomb liner	97
Figure 4.10	Instrumented Drop-weight Test Assembly	99
Figure 4.11	CEAST 9350 impact strength tester a); Types of impactors for dynamic impact testing b)	100
Figure 4.12	Instrument for density measurement based on Archimedes principle	101
Figure 4.13	Image Reconstruction and structural analysis by Tomography	105
Figure 5.1	Lenticular yarn cross-section a); Thread spacing factor b)	113
Figure 5.2	Python Platform to determine the areal density and RMS value	118
Figure 5.3	Geometric parameters of a honeycomb unit cell; cross-sectional view along weft a); Repeat unit of 9P7L honeycomb structure b)	119
Figure 5.4	Representation of 3D woven honeycomb preform woven using yarn linear density having 22 tex a); 66.6 tex b); 110 tex c)	122
Figure 5.5	Representation of the 3D woven honeycomb preform having a different cell size	122
Figure 5.6	Consolidated 7 layer- 3D woven Honeycomb Preforms	123
Figure 5.7	Comparison of theoretical and experimental areal density of 3D woven honeycomb preform with 66.6 tex	126

Figure 5.8	Correlation coefficients between the experimental and predicted areal densities for (a) 22 tex, (b) 66.6 tex, and (c) 110 tex yarn-based 3D woven honeycomb preforms, and (d) a comparison among the three fabric variants for a 7-layer 3D woven honeycomb preform	129
Figure 5.9	Residual plots for areal density of 7-layer 3D woven honeycomb with percentage and fitted value	134
Figure 5.10	Effect of yarn count and ends per meter on the areal density of the 7-layer 3D woven honeycomb	135
Figure 5.11	Influence of Yarn Count and Ends per Meter on 7-Layer 3D Woven Honeycomb preform with Constant Areal Density	136
Figure 5.12	Effect of Pick Insertion in free/bonded wall on Areal Density of 7-Layer 3D Woven Honeycomb with Varying Yarn Count	137
Figure 5.13	Effect of Pick Insertion in free/bonded wall on Fibre Volume Fraction of 7-Layer 3D Woven Honeycomb with Varying Yarn Count	138
Figure 6.1	Effect of cell wall thickness and cell size on the relative density of honeycomb structure	149
Figure 6.2	Compression performance of various textile-based 3D honeycomb liner	151
Figure 6.3	Force-energy vs Time curves of various 3D woven composites at 50J impact energy	152
Figure 6.4	Interaction of cell wall thickness and cell size on responses	160
Figure 6.5	3D response surface plots for combined effects on Relative density, Cushion Factor and Impact Energy	162
Figure 6.6	Contour plots for combined effects on Relative density, Cushion Factor and Impact Energy	165

Figure 6.7	3D surface plot of Interaction of A and B, A and C, and BC with Desirability a); Optimal Honeycomb Structural Parameters for Maximum Efficiency b)	168
Figure 6.8	Comparison of predicted and observed results	169
Figure 6.9	Sandwich Composite having 3D woven honeycomb core and 3D woven solid facesheet for aircrew helmet	177
Figure 6.10	Flatwise, conical, and hemispherical Impactor geometries	181
Figure 6.11	Compression performance of various textile-based 3D honeycomb liner	183
Figure 6.12	Effect of cell size and wall thickness on cushion factor a); effect of peak stress on cushion factor b)	184
Figure 6.13	Effect of Cell size and wall thickness on Crush Force Efficiency a); Effect of Core height and wall thickness on Crush Force Efficiency b)	185
Figure 6.14	Effect of Cell wall thickness and Cell size on Specific Energy Absorption a), Effect of Core height and wall thickness on Specific Energy Absorption b)	186
Figure 6.15	Force-energy vs Time curves of various 3D woven composites at 50J impact energy	187
Figure 6.16	Effect of weave architecture of 3D woven solid composite on Perforation	189
Figure 6.17	Effect of Impactor Geometry on Force vs. Displacement	190
Figure 6.18	Relationship Between Impact Energy, Energy Absorbed, and Velocity Variation	192
Figure 6.19	Effect of Facesheet thickness variation	193

Figure 6.20	Investigation of Force-Displacement Relationship as Influenced by Facesheet Material Properties	194
Figure 6.21	Influence of shell design variables ( $\beta$ ) on Compressive energy ( $\alpha$ )	195
Figure 6.22	Energy converting history for Impact energy 50 J by helmet components	196
Figure 6.23	The Multifaceted Phases in the Transfer of Load from the Impactor to the Facesheet and Core Upon Impact	197
Figure 6.24	Microscopic image analysis - the intricate 3D woven honeycomb composite structure a); woven threads arrangement in cell wall of honeycomb structure b)	198
Figure 6.25	SEM Analysis of Post-Impact Sample Showing Matrix Cracking, Fibre Pull-Out, Fibre Debonding, and Matrix Deformation	199
Figure 7.1	Representation of 3D woven honeycomb cell cross-section a); 9P7L repeat- The peg plan of 9 pick-7 layer of honeycomb preforms b); Customised 3D weaving machine c); Representation of 3d woven honeycomb preform d)	206
Figure 7.2	Depiction of intralayer woven arrangements in 3D woven honeycomb composites featuring various combinations, including Kevlar a); Dyneema-Kevlar b); Glass-Kevlar c); Sisal-Kevlar d); Jute-Kevlar e); and Hemp-Kevlar f)	207
Figure 7.3	Representation of intralayer 3D woven honeycomb preform Kevlar a); Glass b); Dyneema c); Sisal d); Jute e); hemp f)	209
Figure 7.4	Representation of various honeycomb composite core developed using VARTM process	210

Figure 7.5	Load vs displacement curve of the K3DHC with core heights of 10mm, 15mm and 20 mm	214
Figure 7.6	Compression performance of various textile-based 3D honeycomb liners	215
Figure 7.7	Diverse configurations of crushed 3D woven hybrid honeycomb composites under quasi-static loading conditions	216
Figure 7.8	Stress–strain curves of K3DHC specimens with distinct honeycomb cores a); compressive strength variation in hybrid honeycombs with different core configurations b)	217
Figure 7.9	Crush Force Efficiency of various 3D woven Hybrid Honeycomb Core	218
Figure 7.10	Comparison of Specific Energy Absorption of various Hybrid Honeycomb structures.	219
Figure 7.11	Stress-strain curves for K3DHC honeycomb core specimens with varying core heights	220
Figure 7.12	Load variation in Kevlar honeycomb structures with different core heights, normalised by mass a); volume b)	221
Figure 7.13	Stress-Strain responses of various hybrid honeycomb cores under three-point bending load	222
Figure 7. 14	Load Variation of various Honeycomb Structures Normalised by Mass a); Volume b)	222
Figure 7.15	Relative density of various hybrid honeycomb cores	224
Figure 7.16	Thermal decomposition characteristics of various honeycomb cores	225
Figure 7.17	Tomographic reconstruction and selective region of virgin 3D woven Kevlar honeycomb a); Tomographic reconstruction and selective region of crushed 3D woven Kevlar honeycomb b); Top and side views	227

	of the crushed Kevlar honeycomb composite c); Fine-scale imaging for analysing progressive folding and collapse behaviour d)	
Figure 7.18	Micro scale imaging of hybrid honeycomb composites	228
Figure 8.1	Grafting of ZnO nanorods by surface functionalisation and seeding	238
Figure 8.2	Development of the graphene-infused composite	239
Figure 8.3	Formation of the Helmet Shell and Liner Prototype through the Consolidation Process	240
Figure 8.4	Yarn Pullout of treated and untreated fabric with ZnO nanorods: Test setup a); before pullout b); after pullout c)	244
Figure 8.5	Macro to Nano transformation with ZnO Nanorods in Honeycomb Composites	247
Figure 8.6	Force vs Displacement curve of treated and untreated Kevlar fabric	247
Figure 8.7	SEM Analysis of ZnO Nanorod Deposition on the Fabric Surface a); Cylindrical Rod-shaped structures b); Magnification at 50x Revealing Cylindrical Rods c); Measurements of ZnO nanorods Length and Diameter d)	248
Figure 8.8	TGA of the grafted ZnO nanorods on the Kevlar surface	249
Figure 8.9	FTIR spectrum of the ZnO-treated Kevlar sample	250
Figure 8.10	XRD pattern of the treated ZnO preform	251
Figure 8.11	Thermal decomposition characteristics of doped graphene-induced helmet shell	252
Figure 8.12	Comparison of the storage modulus and loss modulus of treated Kevlar composite shells	255
Figure 8.13	Raman spectroscopy of the 1% GNP-infused fabric	256
Figure 8.14	Scanning electron microscopy images of GNP-loaded composites	257

Figure 8.15	FTIR of doped graphene into ZnO-treated Kevlar composites	258
Figure 8.16	XRD pattern of doped graphene	259
Figure 8.17	Specific energy absorption of treated Kevlar composites with varying core heights	260
Figure 8.18	Load variation of various honeycomb structures normalised by mass	261
Figure 8.19	Absorbed impact energy	263
Figure 9.1	Representation of 3D woven Honeycomb Composite a); Aluminium Honeycomb b); Nomex Honeycomb c)	272
Figure 9.2	Comparative Relative Density Analysis of 3D Woven Aramid, Nomex, and Aluminium Honeycomb Cores	275
Figure 9.3	Comparative Compressive response of 10 mm cell sizes of 3D woven aramid, Nomex, and aluminium honeycomb cores	276
Figure 9.4	Specific Energy Absorption (SEA) of various Honeycomb Cores	277
Figure 9.5	Crush Force Efficiency of various Honeycomb Cores	278
Figure 9.6	Force vs Displacement of various honeycomb Cores a); Impact energy absorbed b)	279
Figure 9.7	Energy vs Times of various honeycomb Cores	280
Figure 9.8	Energy dissipation Efficiency of various Honeycomb Cores at Cell size 10mm	281
Figure 10.1	Cross sectional shape of Kevlar yarn	288
Figure 10.2	SolidWorks model of unit cell of 3D woven honeycomb fabric	288
Figure 10.3	SolidWorks model of honeycomb composite liner.	289
Figure 10.4	Representation of the assembly involving a head model, head dummy, shell, and liner in the modelling process	289

Figure 10.5	Tomography of 3D woven honeycomb composite	296
Figure 10.6	Depiction of the response, expressed as dent depth, to impact energies of 50 joules and 100 joules in a 3D woven honeycomb composite	297
Figure 10.7	Micro Computed Tomography Examination of Stress Transfer Mechanisms in Honeycomb Sandwich Panels	298
Figure 10.8	Low velocity Impact Testing of Helmet prototype at different energy levels	300
Figure 10.9	Comparative analysis of experimental and simulation results based on dent depth	301
Figure 10.10	von Mises stress distribution within the 3D woven honeycomb liner and helmet shell at different impact stages: (a) projectile's initial contact with the outer shell, (b) transverse spread of impact-induced stress, and (c) full stress wave generation across the structure	303
Figure 10.11	Comparison of HIC of simulated and Experimental results	303
Figure 10.12	Residual velocity vs time	304

---

## List of the Tables

---

Table 3.1	Types of Head injuries	20
Table 3.2	Types of Shell Material based on helmet application	28
Table 3.3	Dome shape formation using textile preforms	44
Table 3.4	Latest technology adopted for helmet	52
Table 4.1	Properties of Kevlar 29 multifilament yarn	76
Table 4.2	Mechanical properties of various yarns/multifilament reinforcements	77
Table 4.3	Physical properties of Lapox L-552 epoxy resin and K-552 curing agent	78
Table 4.4	Mechanical properties of Nomex and Aluminium honeycomb	79
Table 4.5	Details of various 3D woven solid performs and their composites, Peg plan a); Top view of woven structure b); Side view of 3D woven fabric c)	84
Table 4.6	Details of weaving parameters of 3D woven fabrics woven using different 3D weave design	85
Table 4.7	3D woven honeycomb weaving parameters	87
Table 5.1	Mechanical properties of Kevlar-29	112
Table 5.2	Input and output parameters of modelled 3d honeycomb structure	115
Table 5.3	Details of 3D woven honeycomb structures	121
Table 5.4	Comparison of Predicted and Measured Areal Density (g/m <sup>2</sup> ) in 3D Woven Fabrics with Varying Yarn Counts: An RMSE-Based Accuracy Analysis	128

Table 5.5	Regression Model Evaluation Metrics	131
Table 5.6	Analysis of Variance (ANOVA) Results for Regression Model's	132
Table 5.7	Regression Equation with varying layers of 3D woven honeycomb preform	133
Table 6.1	Factors and actual design levels	146
Table 6.2	ANOVA Table of Multiple Response	155
Table 6.3	Box Behnken Design Output Showing the Response of Relative Density, Cushion Factor ( $\alpha$ ), and Impact Energy ( $\beta$ ) for Varying Levels of Experimental Parameters	158
Table 6.4	Design Expert Optimization Constraints	159
Table 6.5	Details of variable parameters of Specimen	178
Table 6.6	Factors and actual design levels	180
Table 6.7	Total kinetic impact energy obtained by varying impact velocity and Falling height with a dropping mass of 11.1 kg	182
Table 7.1	Mechanical properties of various yarns/multifilament reinforcements	205
Table 7.2	Physical properties of epoxy resin	205
Table 7.3	Details of the preform development for a 3D woven hybrid honeycomb	208
Table 7.4	T10% ( $^{\circ}$ C) and char yield percentage of developed Hybrid honeycomb	226
Table 8.1	Mechanical properties of Kevlar-29	235
Table 8.2	Physical Properties of Epoxy Resin	235
Table 8.3	Weaving details to make solid and hollow structures	236
Table 8.4	Manufacturing 3D woven fabrics by using different weave designs	237

Table 8.5	T10% (°C) and char yield percentage of developed nanocomposites	253
Table 9.1	Mechanical Performance Characteristics of Kevlar-29	270
Table 9.2	Mechanical properties of Nomex and Aluminium honeycomb	270
Table 9.3	Details of OR8L3M 3D woven solid performs and their composites, Peg plan a); Top view of woven structure b); Side view of 3D woven fabric c)	271
Table 10.1	The material specifications of the different parts of the model	292
Table 10.2	Material model (Mat 55/54) properties for outer shell and inner liner made of Kevlar/epoxy composites	293
Table 10.3	Material properties of Mat 54 for Kevlar honeycomb	294
Table 10.4	Material properties of ballistic clay for Mat_10	294
Table 10.5	Material properties of Lead for Mat_Johnson_Cook	295

---

## List of abbreviations

Abbreviation	Description
FVF	Fibre volume fraction
GSM	Areal density
EPM	Ends per meter
PPM	Picks per meter
3D	Three Dimensional
DoE	Design of Experiments
ANOVA	Analysis of Variance
ASTM	American Society for Testing and Materials
RD	Relative density
SEA	Specific Energy Absorption
CFE	Crush Force Efficiency
CF	Cushion Factor
K3DHC	Kevlar 3D woven honeycomb fabric
DK3DHC	Dyneema-Kevlar Hybrid 3D woven Honeycomb composites
SK3DHC	Sisal-Kevlar Hybrid 3D woven Honeycomb composites
HK3DHC	Hemp-Kevlar Hybrid 3D woven Honeycomb composites
GK3DHC	Glass-Kevlar Hybrid 3D woven Honeycomb composites
JK3DHC	Jute-Kevlar Hybrid 3D woven Honeycomb composites
OR8L3M	Orthogonal Eight layers- Matt Three pick
9P8LHC	9 Pick-8 layer Honeycomb Composites

VKC	Virgin Kevlar Composites
GNPs	Graphene nanoplatelets
ZnOKC	ZnO nanorods treated Kevlar Composite
GO	Graphene Oxide
GOZNOKC	Graphene-Zinc oxide Nanorods Treated Kevlar Composites
FEM	Finite element modelling

---

## List of Symbols

Symbol	Description	Unit
$\lambda$	Yarn linear density	Tex, kg/m
E	Young's modulus	GPa
GSM	Areal density	g/m <sup>2</sup>
$\beta$ (beta)	Empirical constant or coefficient associated with impact energy	J
$\sigma$	Stress	MPa
$\epsilon$	Strain	- (dimensionless)
$\rho$	Density	g/cc
F	Force	N
G	Shear modulus	GPa
T <sub>c</sub>	Cell wall thickness	mm
H <sub>c</sub>	Core height	mm
L <sub>c</sub>	Cell side length	mm
H <sub>c</sub>	Height of honeycomb core	mm
$\sigma$	stress	MPa
P <sub>m</sub>	Ultimate load per unit mass	N/kg
A	Cross-sectional area of cell wall	mm <sup>2</sup>
Sp <sub>w</sub>	Specific weight	kg/m <sup>3</sup>
E'	Storage modulus	MPa
E''	Loss modulus	MPa
$\eta$	Viscosity	mPa.s