DESIGN AND DEVELOPMENT OF 2D AND 3D WOVEN AUXETIC FABRICS AND THEIR COMPOSITES

SHIVANGI SHUKLA

DEPARTMENT OF TEXTILE AND FIBRE ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

MARCH 2025

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

Design and Development of 2D and 3D Woven Auxetic Fabrics and their Composites

by

Shivangi Shukla

Department of Textile and Fibre Engineering

Submitted

in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy

to the

Indian Institute of Technology Delhi

March 2025

Dedicated To My Parents

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled "Design and Development of 2D and 3D Woven Auxetic Fabrics and their Composites" being submitted by Ms. Shivangi Shukla, Entry No. 2020TTZ8024 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 her. Ms. Shivangi Shukla has worked under my guidance and supervision. She has fulfilled all the requirements for the submission of this thesis. The results contained in this thesis have not been submitted, in part or full, to any other University or Institute for the award of any degree or diploma.

Date:01/03/2025

Place: New Delhi

Prof. B K Behera

Department of Textile and Fibre engineering

Indian Institute of Technology Delhi

New Delhi-110016

ACKNOWLEDGEMENTS

Words of appreciation and gratitude fall short of acknowledging the inspiring guidance, valuable suggestions, and constant encouragement provided by Prof. B.K. Behera at every stage of this research. I enjoyed and learned a lot working under him throughout my Ph.D. I gratefully acknowledge the help and suggestions of my SRC members, Prof. R. Alagirusamy, Prof. Samrat Mukhopadhyay, Prof. Leena Nebhani (Department of Material Science), and other faculty members of the department.

I acknowledge the help & cooperation of the lab staff, especially Mr. Vikas Khatkar, and I am thankful to all my friends, especially Mr. Mradul Mishra, Dr. Soumya Chowdhury, Dr. Jaya Sharma, Mr. Sameer Kumar Behera, Mr. Dushyant Dubey, Mr. Shubham Agnihotri, Mr Prabhjot Singh and, Mr. Omender, Mr. Rupesh Ganvir for their help, support, and encouragement. Finally, I would like to thank everyone who contributed directly or indirectly during my research work.

I express my sincere gratitude to my mother, father, brother, and friends for their motivation, moral support, and understanding.

Date:01/03/2025 **Shivangi Shukla**

Place: New Delhi

ABSTRACT

Since time immemorial, materials Science and engineering have played a significant role in nearly all developmental endeavors. Historical periods of human activity are designated based on the advancement and utilization of materials, such as the Stone Age, the Iron Age, and the contemporary Silicon Age. Materials have facilitated the development of several technologies, encompassing transportation, agriculture, housing, food science, environmental science, medicine and health, information and communication, as well as structural materials such as textiles. The objective is to enhance the development and application of these materials with requisite qualities while ensuring their affordability to meet human demands. The excitement for materials science and engineering has been enormously enhanced by its tight ties to other fields and its influence on everyday life. Auxetic refers to a class of exceptional materials that increase in thickness when subjected to tensile forces applied perpendicularly. Auxetic materials are substances or structures that exhibit zero or negative Poisson's ratio. Poisson's ratio refers to the phenomenon where, when a material is elongated in the longitudinal direction, it expands in the transverse direction, in contrast to typical materials that compress transversely under comparable conditions. Poisson's ratio is defined as the negative ratio of lateral or transverse strain to longitudinal strain, $\upsilon = (-\varepsilon trans)/\varepsilon load$. Poisson's Ratio is a dimensionless quantity. Auxeticity manifests across various levels and types of materials, including metals, polymers, plastics, ceramics, and fibrous substances. Concentrating on fibrous materials, as they provide a promising category for composite synthesis across many applications. Fibrous materials manifest in multiple forms, including fibers, yarns, textiles, and their corresponding composites. Fibers constitute the primary components of other fibrous formations. These exist in three forms: natural, synthetic, and regenerated.

Research has been conducted on the production of 2D and 3D fabrics. 3D fabrics possess considerable thickness, unlike 2D fabrics. 3D fabrics possess numerous advantages over

traditional 2D fabrics and typically constructed 3D constructions, such as stitched 3D fabrics that consist of multiple stitched 2D fabric layers to attain considerable thickness. In the case of 3D fabrics, integrated structures can be constructed, hence decreasing the delamination failure mode.

Auxeticity can be obtained at various levels; hence, it can be achieved in textiles. Researchers have found multiple methods and technologies for the fabrication of auxetic textiles. Auxetic textiles exist as fiber, yarn, fabric, and composites. Advancements in textile and fiber engineering enable the production of auxetic materials using many textile manufacturing methods, including weaving, knitting, and nonwoven techniques, which can subsequently be converted into composite materials for enhanced fiber reinforcement. Textile materials have significant structural variety, material flexibility, and lightweight properties, rendering them an intriguing possibility to produce various auxetic materials and structures. Investigations have been conducted to develop diverse varieties of auxetic fabrics utilizing multiple ways, i.e., non-woven, knitted, braided, and woven technologies. Non-woven auxetic fabrics are produced by laser cutting or thermo-mechanical techniques. The laser cutting approach employs lasers to cut auxetic geometric patterns, while the thermo-mechanical procedure transforms standard non-woven materials into auxetic non-woven by means of heating and triaxial compression. Auxetic knitted fabrics represent the most extensively studied domain within auxetic textiles, as diverse auxetic geometries have been achieved through the meticulous arrangement of the face and back loops.

Auxetic knitted materials may be used in diverse medical textiles, compression bands, and similar areas. Braided auxetic fabrics are developed on the same principle as auxetic yarn. The braided fabric serves as the main structure, with a rigid yarn encircling it. In comparison to other textile fabrics, woven structures provide a diverse array of structural and mechanical properties, rendering them an appropriate material for composite reinforcement. Auxetic

woven fabrics have been created based on two principles: firstly, auxetic yarn is used as the weft, which confers auxetic properties to the fabric, rendering it auxetic. Secondly, auxetic geometry can be implemented through the amalgamation of standard yarns with varying moduli and weave patterns combined with diverse float lengths. Three-dimensional woven auxetic structures can be fabricated utilizing several matrix systems, such as green epoxy, polyurethane foam, silicone rubber gel, and unsaturated polyester.

Auxetic materials have diverse qualities, including shear resistance, indentation resistance, impact resistance, and blast resistance. These can be used as energy-absorbing materials. These additionally provide acoustic insulation and vibration attenuation. Due to their auxetic structure, they provide variable permeability, meaning the pore size can change according to the applied force level. They also exhibit synclastic behavior. Consequently, due to these features, auxetic materials possess a diverse array of applications. These materials can be utilized in the aviation sector due to their superior shear resistance and synclastic properties. Auxetic materials have also been utilized in the maritime sector to construct ships' hulls because of their superior impact resistance. Auxetics has been utilized in medical textiles for applications such as stents, prostheses, wound treatment, and bone replacements. Auxetics can be utilized in sports protective apparel, such as knee pads, due to their superior impact resistance. They have been utilized for maternity and children's apparel as well.

Despite the benefits of enhanced mechanical qualities previously mentioned, auxetic materials exhibit diminished stiffness and strength owing to their geometric arrangement, namely their porous structure. Certain constraints hinder the design and production of auxetic materials due to their requirement for significant porosity. Consequently, auxetic materials may be unsuitable for load-bearing applications. Typically, auxetic structures are fabricated using additive manufacturing processes, which are expensive. The intricacy of auxetic geometry results in increased production expenses. Auxetic textiles face difficulties in cost and mass

manufacturing for fiber and yarn-based fabrics; knitted auxetic fabrics exhibit stability issues due to their loop structure. Given their structural stability, wearability, and cost-effective continuous manufacturing advantages, woven auxetic textile structures seem poised to meet numerous demanding applications in the near future.

Investigations have been conducted to create auxetic woven textiles utilizing re-entrant hexagonal, foldable, and rotating rectangular geometries. Numerous auxetic geometries remain to be actualized in the fabric. This project aims to build novel hybrid auxetic geometries and incorporate these unattempted designs into woven fabrics. The engineering design of the newly designed hybrid auxetic geometry is also emphasized. To date, 3D woven auxetic structures have not been manufactured on any weaving machine, resulting in a non-continuous manufacturing approach. However, we have successfully generated 3D woven auxetic structures using a typical dobby shedding system. The translation of auxetic geometry into 3D woven constructions has not been pursued through manual or CAD-based design methodologies. This project investigates the design of auxetic 3D woven fabrics using a CAD system.

The exploration of auxetic composites has been limited among researchers. Consequently, an effort has been undertaken to identify a suitable matrix system that is consistent with the auxetic reinforcement to demonstrate auxeticity in its composite form. The mechanical performance of the designed fabric and composite structures is evaluated for their tensile, shear, puncture, and impact properties. This research concentrates on the design engineering, modeling, development, and characterization of 2D and 3D woven auxetic fabrics and their composites. The results underscore the adaptability of weaving as a scalable method for creating auxetic structures with remarkable mechanical properties, hence expanding opportunities in technical fabrics, protective materials, and sophisticated engineering applications.

This research significantly contributes to the creation of auxetic fabrics through various geometries. The work effectively attained auxetic behavior in diverse fabric configurations, such as foldable stripes, re-entrant hexagons, and wave patterns, by integrating differential shrinkage and meticulously constructing loose and tight weave patterns. These structures achieved NPR values as low as -0.5, illustrating the pivotal influence of geometry in customizing auxetic characteristics. The study creates a solid framework for developing auxetic textiles with adjustable mechanical properties, rendering them suitable for use in technical textiles, fashion, and engineering industries.

The study incorporates analytical modeling and hybrid geometries to enhance the theoretical framework of auxetic fabric design. Analytical tools based on Python were utilized to simulate hybrid auxetic structures, which were further validated by experimental techniques. Discrepancies between theoretical predictions and experimental outcomes were noted due to inter-fiber interactions, yet the findings enhance the refinement of computer models for future research.

Among hybrid designs, fabrics featuring elliptical core structures (2DEF05) demonstrated enhanced tensile and impact performance, underscoring the importance of material distribution and geometric inventiveness in optimizing mechanical qualities.

A notable progression in this research is the creation of 3D woven auxetic fabrics, which demonstrate enhanced mechanical capabilities attributable to their three-dimensional architecture and material choice. By integrating high-performance fibers like Kevlar and core-spun polyester with a spandex core, these materials exhibited improved tensile strength, shear resistance, and puncture resistance. Uni-stretch 3D fabrics surpassed their bi-stretch equivalents, mainly owing to Kevlar's superior modulus and the implications of differential shrinkage in areas with a looser weave. Low-velocity impact testing further confirmed the

enhanced energy absorption capability of these textiles, especially those featuring foldable and double-arrow designs. These findings identify 3D woven auxetic fabrics as viable options for high-performance applications, such as protective textiles, aerospace materials, and impact-resistant structures.

The study examines the influence of weave design on auxetic behavior, uncovering essential insights into the correlation between structural characteristics and mechanical performance. In both 2D and 3D textiles, augmenting the float length improved auxeticity by facilitating differential shrinkage. Excessively long floats affect structural integrity, highlighting the necessity for an ideal equilibrium. The research indicates that fabrics with enhanced weave specifications have higher mechanical characteristics, such as increased tensile strength, shear resistance, and impact durability. These findings offer a systematic methodology for the design of auxetic textiles customized to certain application needs.

This work significantly contributes by integrating auxetic reinforcements into several matrix systems to create auxetic composites. The research emphasizes the impact of matrix composition, including epoxy resin, flexible epoxy resin, and silicone rubber gel, on the mechanical characteristics of the composites. Silicone rubber gel enabled optimal auxeticity and energy absorption, while epoxy matrices offered enhanced tensile strength and shear resistance. These findings underscore the adaptability of auxetic composites in fulfilling various performance demands, from impact absorption to structural reinforcement. The research definitively shows that auxetic composites surpass non-auxetic composites in key aspects, including impact energy absorption, tensile strength, and shear resistance.

This research provides a robust basis for forthcoming advancements in auxetic fabrics and composites. This work facilitates the large-scale application of auxetic materials in many industrial sectors by the integration of theoretical modeling, experimental validation, and

materials engineering. The results enhance scientific understanding and provide practical insights for the advancement of auxetic textiles in protective, technical, and consumer applications.

सार

प्राचीन काल से ही, सामग्री विज्ञान और इंजीनियरिंग ने लगभग सभी विकासात्मक प्रयासों में महत्वपूर्ण भूमिका निभाई है। मानव गतिविधि की ऐतिहासिक अवधियों को सामग्री की उन्नति और उपयोग के आधार पर नामित किया गया है, जैसे कि पाषाण युग, लौह युग और समकालीन सिलिकॉन युग। सामग्रियों ने कई तकनीकों के विकास में मदद की है, जिसमें परिवहन, कृषि, आवास, खाद्य विज्ञान, पर्यावरण विज्ञान, चिकित्सा और स्वास्थ्य, सूचना और संचार, साथ ही साथ वस्त्र जैसी संरचनात्मक सामग्री शामिल हैं। इसका उद्देश्य मानव की मांगों को पूरा करने के लिए उनकी सामर्थ्य सुनिश्चित करते हुए आवश्यक गुणों के साथ इन सामग्रियों के विकास और अनुप्रयोग को बढ़ाना है। सामग्री विज्ञान और इंजीनियरिंग के लिए उत्साह अन्य क्षेत्रों के साथ इसके घनिष्ठ संबंधों और रोजमर्रा की जिंदगी पर इसके प्रभाव से काफी बढ़ गया है। ऑक्सेटिक असाधारण सामग्रियों के एक वर्ग को संदर्भित करता है जो लंबवत रूप से लागू तन्यता बलों के अधीन होने पर मोटाई में वृद्धि करते हैं। ऑक्सेटिक पदार्थ ऐसे पदार्थ या संरचनाएं हैं जो शून्य या नकारात्मक पॉइसन अनुपात प्रदर्शित करते हैं। पॉइसन अनुपात उस घटना को संदर्भित करता है, जहां, जब कोई सामग्री अनुदैर्ध्य दिशा में लम्बी होती है, तो यह अनुप्रस्थ दिशा में फैलती है, इसके विपरीत सामान्य सामग्री जो तुलनीय परिस्थितियों में अनुप्रस्थ रूप से संपीड़ित होती है। पॉइसन अनुपात को पार्श्व या अनुप्रस्थ विकृति से अनुदैर्ध्य विकृति के ऋणात्मक अनुपात के रूप में परिभाषित किया जाता है, $\upsilon = (-\varepsilon trans)/\varepsilon load$. पॉइसन अनुपात एक आयामहीन मात्रा है. ऑक्सिटिसिटी धातुओं, पॉलिमर, प्लास्टिक, सिरेमिक और रेशेदार पदार्थों सहित विभिन्न स्तरों और प्रकार की सामग्रियों में प्रकट होती है. रेशेदार सामग्रियों पर ध्यान केंद्रित करना, क्योंकि वे कई अनुप्रयोगों में समग्र संश्लेषण के लिए एक आशाजनक श्रेणी प्रदान करते हैं. रेशेदार सामग्री कई रूपों में प्रकट होती है, जिसमें फाइबर, यार्न, वस्त्र और उनके संबंधित कंपोजिट शामिल हैं.

फाइबर अन्य रेशेदार संरचनाओं के प्राथमिक घटक होते हैं. ये तीन रूपों में मौजूद होते हैं: प्राकृतिक, सिंथेटिक और पुनर्जीवित. 2D और 3D कपड़ों के उत्पादन पर शोध किया गया है. 3D कपड़ों में 2D कपड़ों के विपरीत काफी मोटाई होती है. 3D कपड़ों में पारंपरिक 2D कपड़ों और आम तौर पर निर्मित 3D निर्माणों की तुलना में कई फायदे होते हैं, जैसे कि सिले हुए 3D कपड़े जिनमें काफी मोटाई प्राप्त करने के लिए कई सिले हुए 2D कपड़े की परतें होती हैं. 3D कपड़ों के मामले में, एकीकृत संरचनाओं का निर्माण किया जा सकता है, इसलिए विघटन विफलता मोड को कम किया जा सकता है।

ऑक्सेटिकिटी को विभिन्न स्तरों पर प्राप्त किया जा सकता है; इसलिए, इसे वस्त्रों में प्राप्त किया जा सकता है। शोधकर्ताओं ने ऑक्सेटिक वस्त्रों के निर्माण के लिए कई तरीके और तकनीकें खोजी हैं। ऑक्सेटिक वस्त्र फाइबर, यार्न, फैब्रिक और कंपोजिट के रूप में मौजूद हैं। कपड़ा और फाइबर इंजीनियरिंग में उन्नति बुनाई, बुनाई और गैर-बुना तकनीकों सहित कई कपड़ा निर्माण विधियों का उपयोग करके ऑक्सेटिक सामग्रियों के उत्पादन को सक्षम बनाती है, जिन्हें बाद में बेहतर फाइबर सुदृढीकरण के लिए समग्र सामग्रियों में परिवर्तित किया जा सकता है। कपड़ा सामग्री में महत्वपूर्ण संरचनात्मक विविधता, सामग्री लचीलापन और हल्के गुण होते हैं, जो उन्हें विभिन्न ऑक्सेटिक सामग्रियों और संरचनाओं के उत्पादन के लिए एक आकर्षक संभावना प्रदान करते हैं। कई तरीकों, यानी गैर-बुना, बुना हुआ, लट और बुना प्रौद्योगिकियों का उपयोग करके ऑक्सेटिक कपड़ों की विविध किस्मों को विकसित करने के लिए जांच की गई है। गैर-बुना ऑक्सेटिक कपड़े लेजर कटिंग या थर्मो-मैकेनिकल तकनीकों द्वारा उत्पादित किए जाते हैं। लेजर कटिंग दृष्टिकोण ऑक्सेटिक ज्यामितीय पैटर्न को काटने के लिए लेजर का उपयोग करता है, जबकि थर्मो-मैकेनिकल प्रक्रिया मानक गैर-बुने हुए पदार्थों को हीटिंग और त्रिअक्षीय संपीड़न के माध्यम से ऑक्सेटिक गैर-बुने हुए पदार्थों में बदल देती है।

ऑक्सेटिक बुने हुए कपड़े ऑक्सेटिक वस्त्रों के भीतर सबसे व्यापक रूप से अध्ययन किए गए डोमेन का प्रतिनिधित्व करते हैं, क्योंकि चेहरे और पीछे के लूप की सावधानीपूर्वक व्यवस्था के माध्यम से विविध ऑक्सेटिक ज्यामिति प्राप्त की गई है। ऑक्सेटिक बुने हुए पदार्थों का उपयोग विविध चिकित्सा वस्त्रों, संपीड़न बैंड और इसी तरह के क्षेत्रों में किया जा सकता है। ब्रेडेड ऑक्सेटिक कपड़े ऑक्सेटिक यार्न के समान सिद्धांत पर विकसित किए गए हैं। ब्रेडेड कपड़ा मुख्य संरचना के रूप में कार्य करता है, जिसके चारों ओर एक कठोर धागा होता है। अन्य कपड़ा कपड़ों की तुलना में, बुने हुए ढांचे संरचनात्मक और यांत्रिक गुणों की एक विविध सरणी प्रदान करते हैं, जो उन्हें समग्र सुदृढ़ीकरण के लिए एक उपयुक्त सामग्री प्रदान करते हैं। ऑक्सेटिक बुने हुए कपड़े दो सिद्धांतों के आधार पर बनाए गए हैं: सबसे पहले, ऑक्सेटिक यार्न का उपयोग बाने के रूप में किया जाता है, जो कपड़े को ऑक्सेटिक गुण प्रदान करता है, जिससे यह ऑक्सेटिक बन जाता है। दूसरे, ऑक्सेटिक ज्यामिति को विभिन्न फ्लोट लंबाई के साथ अलग-अलग मॉड्यूल और बुनाई पैटर्न वाले मानक यार्न के समामेलन के माध्यम से लागू किया जा सकता है। तीन आयामी बुने हुए ऑक्सेटिक संरचनाओं को कई मैट्रिक्स सिस्टम, जैसे कि ग्रीन एपॉक्सी, पॉलीयूरेथेन फोम, सिलिकॉन रबर जेल और असंतृप्त पॉलिएस्टर का उपयोग करके तैयार किया जा सकता है।

ऑक्सेटिक सामग्रियों में कतरनी प्रतिरोध, इंडेंटेशन प्रतिरोध, प्रभाव प्रतिरोध और विस्फोट प्रतिरोध सहित विविध गुण होते हैं। इनका उपयोग ऊर्जा-अवशोषित सामग्री के रूप में किया जा सकता है। ये अतिरिक्त रूप से ध्वनिक इन्सुलेशन और कंपन क्षीणन प्रदान करते हैं। उनकी ऑक्सेटिक संरचना के कारण, वे परिवर्तनशील पारगम्यता प्रदान करते हैं, जिसका अर्थ है कि छिद्र का आकार लागू बल स्तर के अनुसार बदल सकता है। वे सिंक्लेस्टिक व्यवहार भी प्रदर्शित करते हैं। नतीजतन, इन विशेषताओं के कारण, ऑक्सेटिक सामग्रियों में अनुप्रयोगों की एक विविध श्रृंखला होती है। इन सामग्रियों का उपयोग उनके बेहतर कतरनी प्रतिरोध और सिंक्लेस्टिक गुणों के कारण विमानन क्षेत्र में किया जा सकता है।

ऑक्सेटिक सामग्रियों का उपयोग उनके बेहतर प्रभाव प्रतिरोध के कारण जहाजों के पतवारों के निर्माण के लिए समुद्री क्षेत्र में भी किया गया है। ऑक्सेटिक्स का उपयोग स्टेंट, कृत्रिम अंग, घाव के उपचार और हड्डी के प्रतिस्थापन जैसे अनुप्रयोगों के लिए चिकित्सा वस्त्रों में किया गया है। ऑक्सेटिक्स का उपयोग उनके बेहतर प्रभाव प्रतिरोध के कारण घुटने के पैड जैसे खेल सुरक्षात्मक परिधानों में किया जा सकता है। उनका उपयोग मातृत्व और बच्चों के परिधानों के लिए भी किया गया है। पहले बताए गए उन्नत यांत्रिक गुणों के लाभों के बावजूद, ऑक्सेटिक सामग्री अपनी ज्यामितीय व्यवस्था, अर्थात् अपनी छिद्रपूर्ण संरचना के कारण कम कठोरता और ताकत प्रदर्शित करती है। महत्वपूर्ण छिद्रता की आवश्यकता के कारण ऑक्सेटिक सामग्रियों के डिजाइन और उत्पादन में कुछ बाधाएँ बाधा डालती हैं। परिणामस्वरूप, ऑक्सेटिक सामग्री लोड-असर अनुप्रयोगों के लिए अनुपयुक्त हो सकती है। आम तौर पर, ऑक्सेटिक संरचनाओं को एडिटिव मैन्युफैक्चरिंग प्रक्रियाओं का उपयोग करके तैयार किया जाता है, जो महंगी होती हैं। ऑक्सेटिक ज्यामिति की जटिलता के परिणामस्वरूप उत्पादन व्यय में वृद्धि होती है। ऑक्सेटिक वस्त्रों को फाइबर और यार्न-आधारित कपड़ों के लिए लागत और बड़े पैमाने पर विनिर्माण में कठिनाइयों का सामना करना पड़ता है; बुने हुए ऑक्सेटिक कपड़े अपनी लूप संरचना के कारण स्थिरता के मुद्दे प्रदर्शित करते हैं। उनकी संरचनात्मक स्थिरता, पहनने योग्यता और लागत प्रभावी निरंतर विनिर्माण लाभों को देखते हुए, बुने हुए ऑक्सेटिक वस्त्र संरचनाएं निकट भविष्य में कई मांग वाले अनुप्रयोगों को पूरा करने के लिए तैयार हैं।

पुनः प्रवेश करने वाले हेक्सागोनल, फोल्डेबल और घूर्णन आयताकार ज्यामिति का उपयोग करके ऑक्सेटिक बुने हुए वस्त्र बनाने के लिए जांच की गई है। कपड़े में कई ऑक्सेटिक ज्यामिति को वास्तविक रूप दिया जाना बाकी है। इस परियोजना का उद्देश्य नवीन हाइब्रिड ऑक्सेटिक ज्यामिति का निर्माण करना और इन अप्रयासित डिज़ाइनों को बुने हुए कपड़ों में शामिल करना है। नए डिज़ाइन किए गए हाइब्रिड ऑक्सेटिक ज्यामिति के इंजीनियरिंग डिज़ाइन पर भी ज़ोर दिया गया है।

आज तक, 3D बुने हुए ऑक्सेटिक संरचनाओं का निर्माण किसी भी बुनाई मशीन पर नहीं किया गया है, जिसके परिणामस्वरूप एक गैर-निरंतर विनिर्माण दृष्टिकोण है। हालाँकि, हमने एक विशिष्ट डॉबी शेडिंग सिस्टम का उपयोग करके 3D बुने हुए ऑक्सेटिक संरचनाओं को सफलतापूर्वक तैयार किया है। ऑक्सेटिक ज्यामिति का 3D बुने हुए निर्माणों में अनुवाद मैन्युअल या CAD-आधारित डिज़ाइन पद्धतियों के माध्यम से नहीं किया गया है। यह परियोजना CAD सिस्टम का उपयोग करके ऑक्सेटिक 3D बुने हुए कपड़ों के डिज़ाइन की जाँच करती है। शोधकर्ताओं के बीच ऑक्सेटिक कंपोजिट की खोज सीमित रही है। परिणामस्वरूप, एक उपयुक्त मैट्रिक्स सिस्टम की पहचान करने का प्रयास किया गया है जो ऑक्सेटिक सुदृढीकरण के साथ संगत है ताकि इसके समग्र रूप में ऑक्सेटिकिटी को प्रदर्शित किया जा सके। डिज़ाइन किए गए कपड़े और मिश्रित संरचनाओं के यांत्रिक प्रदर्शन का मूल्यांकन उनके तन्यता, कतरनी, पंचर और प्रभाव गुणों के लिए किया जाता है। यह शोध 2D और 3D बुने हुए ऑक्सेटिक कपड़ों और उनके कंपोजिट की डिजाइन इंजीनियरिंग, मॉडलिंग, विकास और लक्षण वर्णन पर केंद्रित है। परिणाम उल्लेखनीय यांत्रिक गुणों के साथ ऑक्सेटिक संरचनाओं को बनाने के लिए एक स्केलेबल विधि के रूप में बुनाई की अनुकूलन क्षमता को रेखांकित करते हैं, इसलिए तकनीकी कपड़ों, सुरक्षात्मक सामग्रियों और परिष्कृत इंजीनियरिंग अनुप्रयोगों में अवसरों का विस्तार करते हैं। यह शोध विभिन्न ज्यामिति के माध्यम से ऑक्सेटिक कपड़ों के निर्माण में महत्वपूर्ण रूप से योगदान देता है। इस काम ने अलग-अलग फैब्रिक कॉन्फ़िगरेशन जैसे कि फोल्डेबल स्ट्राइप्स, री-एंट्रेंट हेक्सागोन्स और वेव पैटर्न में ऑक्सेटिक व्यवहार को प्रभावी ढंग से प्राप्त किया, अंतर संकोचन को एकीकृत करके और ढीले और तंग बुनाई पैटर्न का सावधानीपूर्वक निर्माण करके। इन संरचनाओं ने -0.5 के रूप में कम एनपीआर मान प्राप्त किए।

अध्ययन में ऑक्सेटिक फैब्रिक डिजाइन के सैद्धांतिक ढांचे को बढ़ाने के लिए विश्लेषणात्मक मॉडलिंग और हाइब्रिड ज्यामिति को शामिल किया गया है। हाइब्रिड ऑक्सेटिक संरचनाओं को अनुकरण करने के लिए पायथन पर आधारित विश्लेषणात्मक उपकरणों का उपयोग किया गया था, जिन्हें प्रयोगात्मक तकनीकों द्वारा आगे मान्य किया गया था। अंतर-फाइबर इंटरैक्शन के कारण सैद्धांतिक भविष्यवाणियों और प्रयोगात्मक परिणामों के बीच विसंगतियां देखी गईं, फिर भी निष्कर्ष भविष्य के शोध के लिए कंप्यूटर मॉडल के परिशोधन को बढ़ाते हैं। हाइब्रिड डिज़ाइनों में, अण्डाकार कोर संरचनाओं (2DEF05) वाले कपड़ों ने बेहतर तन्यता और प्रभाव प्रदर्शन का प्रदर्शन किया, जो यांत्रिक गुणों को अनुकूलित करने में सामग्री वितरण और ज्यामितीय आविष्कारशीलता के महत्व को रेखांकित करता है। इस शोध में एक उल्लेखनीय प्रगति 3D बुने हुए ऑक्सेटिक कपड़ों का निर्माण है यूनी-स्ट्रेच 3D फ़ैब्रिक अपने बाय-स्ट्रेच समकक्षों से आगे निकल गए, जिसका मुख्य कारण केवलर का बेहतर मापांक और ढीली बुनाई वाले क्षेत्रों में विभेदक सिकुड़न के निहितार्थ हैं। कम-वेग प्रभाव परीक्षण ने इन वस्त्रों की बढ़ी हुई ऊर्जा अवशोषण क्षमता की पुष्टि की, विशेष रूप से वे जो फोल्डेबल और डबल-एरो डिज़ाइन की विशेषता रखते हैं। ये निष्कर्ष 3D बुने हुए ऑक्सेटिक फ़ैब्रिक को उच्च-प्रदर्शन अनुप्रयोगों, जैसे सुरक्षात्मक वस्त्र, एयरोस्पेस सामग्री और प्रभाव-प्रतिरोधी संरचनाओं के लिए व्यवहार्य विकल्प के रूप में पहचानते हैं। अध्ययन ऑक्सेटिक व्यवहार पर बुनाई डिजाइन के प्रभाव की जांच करता है, संरचनात्मक विशेषताओं और यांत्रिक प्रदर्शन के बीच के संबंध में आवश्यक अंतर्दृष्टि को उजागर करता है। 2D और 3D दोनों टेक्सटाइल में, फ्लोट की लंबाई बढ़ाने से विभेदक सिकुड़न की सुविधा के द्वारा ऑक्सेटिकिटी में सुधार हुआ ये निष्कर्ष कुछ अनुप्रयोग आवश्यकताओं के लिए अनुकूलित ऑक्सेटिक वस्त्रों के डिजाइन के लिए एक व्यवस्थित पद्धति प्रदान करते हैं। यह कार्य ऑक्सेटिक कंपोजिट बनाने के लिए कई मैट्रिक्स सिस्टम में ऑक्सेटिक सुदृढीकरण को एकीकृत करके महत्वपूर्ण रूप से योगदान देता है। शोध कंपोजिट की यांत्रिक विशेषताओं पर एपॉक्सी राल, लचीली एपॉक्सी राल और सिलिकॉन रबर जेल सहित मैट्रिक्स

संरचना के प्रभाव पर जोर देता है। सिलिकॉन रबर जेल ने इष्टतम ऑक्सेटिकिटी और ऊर्जा अवशोषण को सक्षम किया, जबकि एपॉक्सी मैट्रिसेस ने बढ़ी हुई तन्य शक्ति और कतरनी प्रतिरोध की पेशकश की। ये निष्कर्ष प्रभाव अवशोषण से लेकर संरचनात्मक सुदृढ़ीकरण तक विभिन्न प्रदर्शन मांगों को पूरा करने में ऑक्सेटिक कंपोजिट की अनुकूलन क्षमता को रेखांकित करते हैं। शोध निश्चित रूप से दिखाता है कि ऑक्सेटिक कंपोजिट प्रभाव ऊर्जा अवशोषण, तन्य शक्ति और कतरनी प्रतिरोध सहित प्रमुख पहलुओं में गैर-ऑक्सेटिक कंपोजिट से आगे निकल जाते हैं। यह शोध ऑक्सेटिक कपड़ों और कंपोजिट में आगामी प्रगति के लिए एक मजबूत आधार प्रदान करता है। यह कार्य सैद्धांतिक मॉडलिंग, प्रायोगिक सत्यापन और सामग्री इंजीनियरिंग के एकीकरण द्वारा कई औद्योगिक क्षेत्रों में ऑक्सेटिक सामग्रियों के बड़े पैमाने पर अनुप्रयोग की सुविधा प्रदान करता है। परिणाम वैज्ञानिक समझ को बढ़ाते हैं और सुरक्षात्मक, तकनीकी और उपभोक्ता अनुप्रयोगों में ऑक्सेटिक वस्त्रों की उन्नति के लिए व्यावहारिक अंतर्दृष्टि प्रदान करते हैं।

TABLE OF CONTENTS

Certificate	i
Acknowledgments	iii
Abstract	v
Table of Contents	xxi
List of Figures	xxv
List of Tables	xxxv
Chapter 1	1
INTRODUCTION	3
Chapter 2	11
RESEARCH OBJECTIVES	13
Chapter 3	17
LITERATURE REVIEW	17
3.1 Introduction	17
3.2 Auxetic material	18
3.3 Mechanics of auxetic material	19
3.4 Classification of auxetic materials	21
3.5 Auxetic structure	22
3.6 Unique properties of auxetic materials	35
3.7 Auxetic textile materials and structures	42
3.8 Mechanical properties of auxetic textiles	65
3.9 Manufacture of auxetic textile	70
3.10 Production of auxetic composites	75
3.11 Testing of auxetic behavior of fabric	75

3.12 Modeling of auxetic materials 76

3.13 Limitation of auxetic materials 79

3.14 Applications of Auxetic Materials 80

Chapter 4 87

MATERIALS AND METHODS 87

4.2 Materials 88

4.3 Development of woven fabrics 93

4.4 Characterization of the 2D and 3D woven fabrics and their composites 97

Chapter 5 103

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF 2D WOVEN AUXETIC FABRICS USING DIFFERENT AUXETIC GEOMETRIES 105

5.1 Introduction 105

5.2 The design concept for the realization of auxetic geometry into the fabric structure 107

5.2.1 Foldable stripes created in a parallel in phase zig-zag way in the vertical and horizontal direction 108

5.3 Results and Discussion: Poisson's ratio of the fabric samples 113

5.4 Conclusion 118

Chapter 6 123

MODELING AND PRODUCTION OF 2D WOVEN AUXETIC FABRIC BASED ON CONVENTIONAL AND HYBRID AUXETIC GEOMETRIES FOR PREDICTION OF NEGATIVE POISSON'S RATIO 123

6.1 Introduction 123

6.2 Design concept and modeling of the auxetic geometry 125

6.3 Determination of Poisson's Ratio for Newly Developed Hybrid Chiral Auxetic Geometry 126
6.3.1 Hybrid Chiral Auxetic Geometry with Elliptical Core 126
6.3.2 Hybrid Chiral Auxetic Geometry with Racetrack Core 127
6.3.3 Hybrid Chiral Auxetic Geometry with Star-shaped Core 129
6.3.4 Hybrid Chiral Auxetic Geometry with Regular Hexagon Core 131
6.4 Realization of the auxetic geometry into the fabric structure 134
6.5 Development of the 2D woven auxetic fabric samples 135
6.6 Results and Discussion 137
6.7 Conclusions 146
Chapter 7 149
DESIGN, DEVELOPMENT, AND CHARACTERIZATION OF 3D WOVEN AUXETIC FABRIC BASED ON DIFFERENT AUXETIC GEOMETRIES 149
7.1 Introduction 149
7.2 Design and development of 3D auxetic fabric 151
7.3 Results and Discussion 153
7.4 Conclusions 163
Chapter 8 169
INVESTIGATION OF THE ROLE OF WEAVE DESIGN ON THE AUXETIC BEHAVIOR OF THE 2D AND 3D WOVEN AUXETIC FABRIC 169
8.1 Introduction 169
8.2 Investigation of the effect of weave design on 2D woven auxetic structure 172
8.3 Investigation of the effect of weave design on 3D woven auxetic structure 182
8.4 Conclusion 194

Chapter 9 199

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF 2D AND 3D WOVEN AUXETIC COMPOSITES WITH DIFFERENT MATRIX SYSTEMS 199

9.1 Introduction 199

9.2 Investigation of the effect of matrix on 2D woven auxetic fabric reinforced composites 201

9.3 Investigation of the effect of matrix on 3D woven auxetic fabric-based composites 208

9.4 Comparison of 2D and 3D auxetic composites 215

9.5 Conclusion 216

Chapter 10 221

CONCLUSION 221

10.1 Key outcomes of the research 221

10.2 Application areas 224

10.3 Challenges and Future Scope 224

References 227

List of Publications 263

Curriculum Vitae 267

LIST OF FIGURES

Figure 3.1 Comparison of conventional and auxetic materials 20

Figure 3.2 Schematic of fundamental deformation in auxetic materials 20

Figure 3.3 Graphical representation of Poisson's ratio for conventional and auxetic structural materials 20

Figure 3.4 General classification of auxetic materials 21

Figure 3.5 The representative cell of an auxetic honeycomb 25

Figure 3.6 Re-entrant structures, (a) star-shaped (b) arrowhead (c) re-entrant hexagon, (d) re-entrant structure from square grids 25

Figure 3.7 Unit cell of star-shaped re-entrant structure 25

Figure 3.8 Re-entrant star-shaped honeycomb 26

figure 3.9 (a) conventional 3d cell (b) 3d auxetic cell by lakes(c) 3d auxetic unit cell (d) 3d auxetic structure 27

Figure 3.10 Rotating unit auxetic structures: (a) square, (b) rectangular, (c) trans-rectangular, (d) bi- square, (e) triangular, (f) isosceles triangular, (g) bi-triangular, and (h) hexa-triangular rotating unit structures 28

Figure 3.11 Rotating rectangle model 29

Figure 3.12 Chiral auxetic structures: (a) tetra chiral structures, (b) anti-tetra chiral structures, (c) Tri chiral structures, (d) anti-Tri chiral structures, and (e) hexachiral structures 30

Figure 3.13 Geometry of meta-chiral system 30

Figure 3.14 A typical shape of fibril-nodule structures: (a) single fibril-type structural model for liquid crystalline polymer (bundle type), (b) multi-fibril structures with rectangular nodules, and (c) circular nodules (network type) 32

Figure 3.15 (a) Interlocking hexagonal model (b) Keyed Brick structures 32

Figure 3.16 Unit cell of Miura-ori folded structure 33

Figure 3.17 (a) buckling induced structure (b) 3D crumpled structure (c) black phosphorus auxetic nanomaterial 35

Figure 3.18 Indentation behavior in (a) non-auxetic and (b) auxetic materials 39

Figure 3.19 Fibre-reinforced composites 39

Figure 3.20 Deformation patterns for non-auxetic and auxetic materials under out-of-plane bending (a) saddle shape (non-auxetic); (b) dome shape (auxetic) 40

Figure 3.21 Variable permeability 40

Figure 3.22 Schematic illustration of auxetic effect – fibrils act as hinges to cause the nodules to translate (a – conventional structure, b – auxetic structure) and (b) microstructure of expanded polytetrafluoroethylene (PTFE) 45

Figure 3.23 Length and width data v/s time of (A) conventional PP fiber (B) auxetic PP fiber 45

Figure 3.24 The geometry of the helical auxetic yarn 47

Figure 3.25 Microfibre auxetic PCL Sheet 49

Figure 3.26 Auxetic braided structure 49

Figure 3.27 Weft knitted fabric based on a foldable structure 51

Figure 3.28 The rhombus-shaped re-entrant structure used for weft-knitted auxetic fabric 51

Figure 3.29 Tubular fabric fit onto different cylinders, and the change in length that occurs 52

Figure 3.30 Warp knitted structure (a) before deformation (b) after deformation (c) fabric diagram 54

Figure 3.31 Auxetic structure formed by a combination of conventional hexagon and inlay yarn 54

Figure 3.32 Warp knitted fabrics produced at the unloaded state 55

Figure 3.33 Samples cut in different directions, Shape fitting ability of spacer fabrics (a) conventional (b) auxetic 55

Figure 3.34 Woven auxetic fabric made from plied auxetic yarns 57

Figure 3.35 Woven auxetic 2D fabric based on the concept of differential shrinkage 57

Figure 3.36 Uni-directional auxetic woven fabric 58

Figure 3.37 Bi-stretch woven auxetic Fabric (a) before relaxation, (b) fabric face after relaxation, and (c) fabric back after relaxation 59

Figure 3.38 Design and Schematic of the basic unit, fabric structure, and weave pattern of the dumbbell, wave pattern, and random structure 59

Figure 3.39 3-D orthogonal solid structure 61

Figure 3.40 Three-dimensional negative Poisson's ratio textile structure: (a) initially and (b) under compression 61

Figure 3.41 Multilayer orthogonal auxetic structure without binder yarn 62

Figure 3.42 Auxetic composite developed by Jiang et al. 64

Figure 3.43 (a)Stress-strain behavior of the auxetic foam in three directions (b)Poisson's ratio vs. strain in longitudinal and transverse directions 66

Figure 3.44 True lateral vs. true axial strain of auxetic and conventional polyester fibers 66

Figure 3.45 Typical Poisson's ratio-strain curve of auxetic yarn sample 66

Figure 3.46 (a) Poisson's ratio as a function of tensile strain (b)three-stage deformation behavior of auxetic braid 67

Figure 3.47 Load-strain curves of a typical auxetic woven fabric and its constituent auxetic yarn 69

Figure 3.48 Poisson's ratio v/s longitudinal strain of auxetic fabric based on foldable geometry 69

Figure 3.49 Poisson's ratio vs. axial strain of fabric samples based on the dumbbell, wave pattern, and random structure. 69

Figure 3.50 Compression curves of pure polyurethane foam, auxetic composite, and non-auxetic composite: (a) stress versus strain; (b) specific stress versus strain 70

Figure 3.51 Liquid crystalline polymer (LCP), arrangement of the main chain 74

Figure 3.52 Manufacturing process of the novel auxetic yarn structure 74

Figure 3.53 The moving paths of two groups of braiding yarns and wrapping the yarn in a modified circular braiding machine 74

Figure 3.54 Testing of Poisson's ratio using a video-extensometer 76

Figure 3.55 Basic unit of the re-entrant structure 79

Figure 4.1 Jacquard shedding loom used for the development of 2D woven fabrics 95

Figure 4.2 Dobby shedding loom used for the development of 3D woven fabrics 96

Figure 4.3 Experimental setup for Poisson's ratio testing (a) schematic of test setup (b) facility for auxeticity testing 98

Figure 4.4 Experimental setup for shear testing (a) facility of shear test (b) sample specifications (c) sample during shear testing 99

Figure 4.5 Experimental setup for puncture test (a) facility of puncture test (b) attachment for puncture test (c) specimen during the puncture test 100

Figure 4.6 Experimental setup of impact test (a) drop weight impact facility (b) close-up of hemispherical-nosed tup (c) specimen fixture (d) placement of sample for impact test 101

Figure 5.1 Comparison of NPR of arrowhead structure and re-entrant hexagon structure 107

Figure 5.2 Design & interlacement pattern of fabric folded stripes in slanting/biased fashion 109

Figure 5.3 Schematic of interlacement pattern of fabric with (i)rotating quadrilateral geometry and (ii) re-entrant hexagonal geometry 110

Figure 5.4 Schematic of the basic unit of weave pattern of fabric with (i) dog-bone shape geometry, (ii) waveform geometry, (iii) random geometry 111

Figure 5.5 Design, graphical representation of Poisson's ratio vs axial strain and image of the fabric sample produced (a),(b),(c)- in phase zig-zag folded stripes in weft direction (d),(e),(f)- in phase zigzag folded stripes in warp direction (g),(h),(i)- folded in the bias direction 114

Figure 5.6 (a) Design of rotating quadrilateral geometry (b), (c)- graphical representation of Poisson's ratio vs axial strain (%) and image of the sample produced for fabric F4 respectively (d),(e)- graphical representation of Poisson's ratio vs axial strain() and image of the sample produced for fabric F5 respectively 115

Figure 5.7 (a) design for re-entrant hexagonal geometry (b) graphical representation of Poisson’s ratio vs axial strain for auxetic fabric based on re-entrant hexagonal geometry (c) image of the sample produced based on Re-entrant hexagonal geometry (d) design for dog-bone geometry (e) graphical representation of Poisson’s ratio vs axial strain for auxetic fabric based on dog-bone geometry (f) image of the sample produced based on dog-bone geometry 116

Figure 5.8 (a) design for wave pattern (b) graphical representation of Poisson’s ratio vs axial strain for auxetic fabric based on wave pattern (c) image of the sample produced based on wave pattern (d) design for zebra pattern (e) graphical 117

representation of Poisson's ratio vs axial strain for auxetic fabric based on zebra pattern (f) image of the sample produced based on zebra pattern

Figure 5.9 Poisson's ratio vs strain plot of the fabric samples 118

Figure 6.1 Modification of the chiral geometry to hybrid geometry with racetrack core 126

Figure 6.2 Hybrid geometry with (a) elliptical core, (b) racetrack core, (c) star-shape core, (d) regular hexagonal core 134

Figure 6. 3 Development of auxetic woven design for hybrid auxetic geometry with racetrack core, using CAD system 135

Figure 6. 4 Weave design of the 2D fabric samples of different hybrid auxetic geometry and plain fabric 136

Figure 6. 5 Images of the fabric samples based on hybrid auxetic geometry and plain fabric 136

Figure 6. 7 Validation of the analytical model 139

Figure 6.8 Auxeticity of the fabric samples based on hybrid auxetic geometry 139

Figure 6. 9 Deformation behavior of the uni-stretch auxetic fabrics 140

Figure 6.10 Tensile properties of the 2D fabrics based on hybrid auxetic geometry 141

Figure 6. 11 Relation between auxeticity and tensile load 141

Figure 6. 12 In-plane shear properties of the 2D woven fabrics based on hybrid auxetic geometry 143

Figure 6. 13 Relation between auxeticity, peak shear load, and energy absorbed during shear deformation 143

Figure 6.14 Puncture resistance of the 2D woven fabrics based on hybrid auxetic geometry 144

Figure 6.15 Drop weight impact resistance of the 2D woven fabrics based on hybrid auxetic geometry 145
Figure 7.1 Geometry and their weave designs 152
Figure 7.2 Yarn arrangement in different deformation zones 152
Figure 7.3 Poisson's ratio vs. axial strain of the 3D fabrics 155
Figure 7.4 Maximum NPR of the 3D auxetic fabrics 156
Figure 7.5 Fabric deformation in the uni-stretch fabrics during tensile loading 156
Figure 7.6 Fabric deformation in the bi-stretch fabrics during tensile loading 157
Figure 7.7 tensile properties of the 3D woven fabrics 158
Figure 7.8 Relation between auxeticity and peak tensile load 158
Figure 7.9 In-plane shear behavior of the 3D woven fabrics 159
Figure 7.10 Relation between auxeticity, shear load, and energy absorbed during shearing of 3D woven fabrics 160
Figure 7.11 Puncture resistance of the 3D woven fabrics 161
Figure 7.12 Relation between auxeticity and energy absorbed during puncture 161
Figure 7.13 Low-velocity impact properties of the 3D fabrics 162
Figure 7.14 Relation between auxeticity and energy absorbed during puncture 163
Figure 8. 1 Weave design of the 2D fabric samples of varying float length 172
Figure 8.2 2D fabric samples were developed of varying float lengths, and a standard sample 173
Figure 8.3 Poisson's ratio v/s axial strain of the 2D fabric samples of varying float length 175
Figure 8. 4 Deformation behavior of 2D woven auxetic fabric under uniaxial loading condition 175
Figure 8. 5 Tensile behavior of the 2D woven fabrics 176

Figure 8. 6 Relation between auxeticity and the tensile load of 2D woven auxetic fabric 177

Figure 8. 7 In-plane shear behaviour of the 2D woven fabric samples 178

Figure 8. 8 Relation between shear load, shear energy absorption, and auxeticity of the 2D woven fabrics 178

Figure 8. 9 Quasi-static puncture behavior of the 2D woven fabrics 179

Figure 8. 10 Relation between Poisson's ratio and energy absorption during puncture test 180

Figure 8. 11 Low-velocity impact behavior of the 2D woven fabrics 181

Figure 8. 12 Relation between Poisson's ratio and energy absorption during impact test 181

Figure 8. 13 Weave design of the 3D woven auxetic fabrics of varying float length 182

Figure 8. 14 Images of the developed 3D woven fabric sample of varying float lengths and standard sample 183

Figure 8. 15 Graphical representation of the Poisson's ratio of the 3D fabric samples 185

Figure 8. 16 Deformation behaviour of the 3D woven auxetic fabrics during uni-axial loading 186

Figure 8. 17 Tensile behavior of the 3D woven auxetic fabrics 187

Figure 8.18 Relation between tensile load and auxeticity of 3D woven auxetic fabrics 187

Figure 8. 19 In-shear behavior of the 3D woven fabrics 189

Figure 8. 20 Relationship between the shear load, energy absorbed during shear deformation, and auxeticity 189

Figure 8. 21 Quasi-static puncture behavior of the 3D woven fabrics 191

Figure 8.22 Relation between puncture load, energy absorbed during puncture test, and auxeticity 191

Figure 8. 23 Low-velocity impact behavior of the 3D woven fabrics 193

Figure 8.24 Relation between energy absorbed during impact load, and auxeticity 193

Figure 9. 1 Images of the developed 2D composites 202

Figure 9. 2 Auxetic behavior of the 2D composites 203

Figure 9. 3 Tensile behavior of the 2D composites 204

Figure 9. 4 Relation between tensile load and auxeticity of 2D composites 204

Figure 9. 5 In-plane shear behavior of the 2D composites 205

Figure 9. 6 Relation between shear force, energy absorbed, and auxeticity of the 2D composites 206

Figure 9. 7 Low-velocity impact behavior of the 2D composites 207

Figure 9. 8 Relation between impact load, energy absorbed during impact deformation, and auxeticity of the 2D auxetic composites 207

Figure 9. 9 Images of the developed fabric sample 209

Figure 9. 10 Auxetic behaviour of the 3D composites 210

Figure 9. 11 Tensile behavior of the 3D composites 211

Figure 9. 12 Relation between tensile load and auxeticity of the 3D auxetic composites 211

Figure 9. 13 In-plane shear behavior of the 3D composites 212

Figure 9. 14 Relation between shear load and auxeticity of the 3D composites 213

Figure 9. 15 Low-velocity impact behavior of the 3D composites 214

Figure 9. 16 Relation between peak force, energy absorption during impact deformation, and auxeticity of 3D auxetic composites 214

Figure 9. 17 Comparison of 2D and 3D woven auxetic composites 215

LIST OF TABLES

Table 4.1	Yarn counts for the cotton yarns	88
Table 4.2	Characteristics of the Epoxy resin	91
Table 4.3	Characteristics of the flexible epoxy resin	92
Table 4.4	Characteristics of silicon rubber gel	93
Table 5.1	Weaving parameters of the auxetic samples	112
Table 6.1	Sample specifications of the 2D woven fabric samples	137
Table 6.2	Fabric parameters of the 2D woven fabric based on hybrid auxetic geometry	138
Table 7.1	Sample specifications of the 3D woven fabric based on different auxetic geometry	153
Table 7.2	Thickness, areal density, thread density, and loose region area % of 3D woven auxetic fabrics	154
Table 8.1	Variation in the loose weave regions of the 2D and 3D woven auxetic fabrics	171
Table 8.2	Fabric parameters of the developed 2D woven fabrics	174
Table 8.3	Thickness, areal density, and thread density of the developed 3D woven fabrics of varying float length	184
Table 9.1	Specification of the composites with 2D reinforcement	201
Table 9.2	Sample Specification of the Composites	208