DEVELOPMENT OF AUXETIC SKIN GRAFTS WITH HIGH EXPANSION POTENTIAL

VIVEK GUPTA

CENTRE FOR BIOMEDICAL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

MARCH 2024

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2024

DEVELOPMENT OF AUXETIC SKIN GRAFTS WITH HIGH EXPANSION POTENTIAL

by

VIVEK GUPTA

CENTRE FOR BIOMEDICAL ENGINEERING

Submitted

In fulfilment of the requirements of the degree of

DOCTOR OF PHILOSOPHY

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

March 2024

Certificate

This is to certify that the dissertation entitled **Development of Auxetic Skin Grafts with High Expansion Potential**, submitted by **Mr. Vivek Gupta**, a Research Scholar, in the *Centre for Biomedical Engineering, Indian Institute of Technology, Delhi 110016, India*, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy**, is a record of an original research work carried out by him under my supervision and guidance. The dissertation fulfils all requirements as per the regulations of this Institute and in my opinion has reached the standard needed for submission. Neither this dissertation nor any part of this has been submitted for any degree or academic award elsewhere.

Prof. Arnab Chanda

(Supervisor)

Centre For Biomedical Engineering

Indian Institute of Technology, Delhi

New Delhi, 110016, India

Acknowledgements

First and foremost, thanks to the Almighty for showering his blessings on me which immensely helped me in accomplishing this dissertation.

I would then like to express my sincere gratitude to my supervisor, Prof. Arnab Chanda, for giving me the opportunity to pursue PhD at IIT Delhi. His passion for academia and research, discipline, timeframe working methodology and determination towards his work has always motivated me to push myself harder. His continuous guidance, valuable advice, confidence and constant encouragement in our pursued research work led to the successful completion of this dissertation. It was a great privilege and honor to work under his supervision.

I would like to present my sincere gratitude to my SRC committee members, namely Prof. Naresh Bhatnagar, SRC Chairperson for his valuable suggestion on the material science aspect of my PhD work. I would also like to thank Dr. Biswarup Mukherjee, SRC internal expert, for his valuable comments on certain experimental methods section of my dissertation. I would also like to thank Dr. Arnab Banerjee, SRC external expert, for his valuable suggestions on the data presentation method of my dissertation. I want to extend my gratitude to all the staff of the biomedical engineering unit in the Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, India.

I want to extend my gratitude to the Disease and Injury Mechanics Lab members namely Mr. Subhodip Chatterjee, Mr. Gurpreet Singh, Mr. Shubham Gupta for their help in assisting me in performing the experiments and consecutive preparation of manuscripts. I am also grateful to the remaining lab members of the Disease and Injury Mechanics lab for their cooperation and support which have made this journey a memorable one.

Most importantly, I would like to thank my mother and father Mrs. Anita Gupta and Mr. Anup Gupta for her constant support. They wholeheartedly believed from

the day I joined the PhD program that I would successfully complete my doctoral research work and successfully prepare my dissertation. Her belief in me served as a source of inspiration to me, which enabled me to reach this position. I would also like to thank my brother, Mr. Chirag Gupta for his constant mental support during the duration of my doctoral journey. Without his advice and support, this day would have not been possible. I am forever indebted to the sacrifices made by my family, which enabled me to complete my doctoral work and complete my dissertation.

Vivek Gupta

(2019BMZ8618)

Abstract

Burn injuries are a prevalent medical concern, and skin grafts represent a standard therapeutic approach for their treatment. These grafts involve the transplantation of healthy skin from a donor site to cover the damaged or burned area, known as the recipient site. However, a significant limitation of conventional skin grafts is their limited expansion capabilities. This constraint poses a challenge, particularly in cases of extensive and severe burn injuries where the availability of donor skin is limited. To overcome this issue and improve the expansion potential of traditional skin grafts, a systematic and scientific investigation is necessary. This investigation incorporated both computational and experimental studies that focus on the analysis of various dimensional parameters related to traditional skin graft patterns. Experimental studies was conducted to validate the findings from the computational models and to assess the practical applicability of the proposed enhancements. Through the integration of computational simulations and experimental data, researchers can gain a deeper understanding of how varying dimensional parameters impact the expansion capabilities of traditional skin grafts. The results of this comprehensive study would not only contribute to advancing our scientific knowledge in the field of burn injury treatment but also potentially lead to the development of improved skin graft techniques. These enhanced grafting approaches could offer a promising solution for treating large and severe burn injuries by maximizing the use of available donor skin and improving overall patient outcomes.

The introductory chapter of this research provides a comprehensive overview of the biomechanics of the skin, emphasizing its structural and functional properties. It delves into the scientific principles of skin grafting as a widely used technique for treating various medical conditions, with a particular focus on its application in burn injury treatment. The chapter highlights the global impact of skin grafting in healthcare, underscoring its significance as a therapeutic approach. Furthermore, the chapter introduces the concept of auxetic structures, which are characterized by their unique property of expanding in response to external forces. These structures have garnered significant attention in recent scientific literature due to their potential for high expansion capabilities. The scientific basis of auxetic structures and their distinctive mechanical behavior is explored, setting the stage for their relevance and potential applications in the context of skin grafting.

The second chapter of this research is dedicated to the development of traditional skin grafts, with a primary focus on investigating their expansion capabilities. Utilizing a scientific

approach, the chapter aims to systematically analyze and validate the results obtained from these skin grafts by comparing them with existing literature. By conducting a comprehensive examination, the study aims to gain a deeper understanding of the factors influencing the expansion analysis of traditional skin grafts. Through experimental and computational methods, the chapter aims to quantify the expansion behavior of traditional skin grafts under various dimensional parameters. This involves investigating how factors such as graft size, thickness, and orientation impact the overall expansion potential of the grafts. Additionally, the chapter seeks to validate the findings by comparing them with established scientific literature on skin grafting.

Chapter three and four of this research involve a thorough and comprehensive investigation of auxetic skin grafts patterns. Assuming a scientific approach, both computational and experimental methodologies were employed to study and analyze these unique graft structures. The primary objective was to identify the auxetic patterns that exhibit the highest expansion capabilities. Additionally, an ultra-low-cost biaxial testing device was developed to test the skin graft simulants biaxially. This device allowed us to test different skin graft patterns in a controlled manner to characterize the auxetic skin graft pattern. In chapter three, a detailed computational study was conducted, utilizing advanced numerical modeling techniques to simulate the behavior of various auxetic skin graft patterns. The computational simulations allowed for a systematic exploration of different auxetic configurations, enabling the identification of patterns with the most promising expansion properties. By employing computational tools, the study aimed to gain insights into the mechanical behavior and expansion characteristics of these specialized grafts. Chapter four focused on the experimental aspect of the research. A series of carefully designed experiments were carried out to validate the findings from the computational simulations and to further explore the effect of dimensional variations in auxetic structures. Through meticulous experimentation and data analysis, the research obtained to elucidate how factors like geometry, thickness, and material properties impact the expansion capabilities of auxetic skin grafts. The combination of computational and experimental investigations enhanced the overall scientific validity and reliability of the study's outcomes.

Chapter five of this research is dedicated to a thorough and systematic investigation of hierarchical auxetic skin graft patterns. Employing a comprehensive scientific approach, this chapter aims to explore and analyze the additional expansion potential offered by these unique hierarchical structures. The study involves a combination of computational simulations and

experimental studies to examine the mechanical behavior and expansion characteristics of the hierarchical auxetic skin grafts.

Chapter six of this research presents a detailed investigation into the implementation of the highest expansion auxetic structure on fresh cadaveric skin. The chapter aims to analyze the results obtained from testing the cadaveric skin samples at different displacement rates. During the experimentation process, the mechanical properties and behavior of the skin samples were closely observed and analyzed and calculated the meshing ratios of the traditional skin graft patterns and compared them with the results obtained from the implementation of auxetic skin graft patterns. The meshing ratios serve as essential indicators of how effectively the graft patterns adhere to and integrate with the recipient site, providing valuable insights into the overall performance of the grafts. The research findings revealed that the auxetic skin graft patterns exhibited less stress on the skin samples and demonstrated higher expansion capabilities compared to traditional skin grafts.

The overall objective of this dissertation was to develop auxetic skin graft patterns to understand their expansion protentional to recover large burn areas. Numerous auxetic patterns were developed and optimized for the highest pattern structures and tested computationally and experimentally. Additionally, hierarchical auxetic patterns were developed, and calculated the additional expansion in auxetic structures. Finally, the highest expansion and lowest void area structure was implemented on the fresh cadaver skin and observed that auxetic skin graft patterns showed superior behavior. This research will build the foundation of future studies on small and large animal models and analyze cell proliferation and tissue regeneration. Also, a clinical trial was also conducted to understand the effectiveness of auxetic skin graft patterns.

अमूर्त

जलने की चोटें एक प्रचलित चिकित्सा चिंता है, और त्वचा ग्राफ्ट उनके उपचार के लिए एक मानक चिकित्सीय दृष्टिकोण का प्रतिनिधित्व करते हैं। इन ग्राफ्टों में क्षतिग्रस्त या जले हुए क्षेत्र को कवर करने के लिए दाता स्थल से स्वस्थ त्वचा का प्रत्यारोपण शामिल होता है, जिसे प्राप्तकर्ता स्थल के रूप में जाना जाता है। हालाँकि, पारंपरिक त्वचा ग्राफ्ट की एक महत्वपूर्ण सीमा उनकी सीमित विस्तार क्षमताएं हैं। यह बाधा एक चुनौती खड़ी करती है, विशेष रूप से व्यापक और गंभीर रूप से जलने की चोटों के मामलों में जहां दाता त्वचा की उपलब्धता सीमित है। इस समस्या को दूर करने और पारंपरिक त्वचा ग्राफ्ट की विस्तार क्षमता में सुधार करने के लिए एक व्यवस्थित और वैज्ञानिक जांच आवश्यक है। इस जांच में कम्प्यूटेशनल और प्रायोगिक दोनों अध्ययन शामिल थे जो पारंपरिक त्वचा ग्राफ्ट पैटर्न से संबंधित विभिन्न आयामी मापदंडों के विश्लेषण पर ध्यान केंद्रित करते हैं। कम्प्यूटेशनल मॉडल से निष्कर्षों को मान्य करने और प्रस्तावित संवर्द्धन की व्यावहारिक प्रयोज्यता का आकलन करने के लिए प्रायोगिक अध्ययन आयोजित किए गए थे । कम्प्यूटेशनल सिमुलेशन और प्रयोगात्मक डेटा के एकीकरण के माध्यम से, शोधकर्ता इस बात की गहरी समझ प्राप्त कर सकते हैं कि विभिन्न आयामी पैरामीटर पारंपरिक त्वचा ग्राफ्ट की विस्तार क्षमताओं को कैसे प्रभावित करते हैं। इस व्यापक अध्ययन के नतीजे न केवल जलने की चोट के उपचार के क्षेत्र में हमारे वैज्ञानिक ज्ञान को आगे बढ़ाने में योगदान देंगे, बल्कि संभावित रूप से बेहतर त्वचा ग्राफ्ट तकनीकों के विकास को भी बढ़ावा देंगे। ये उन्नत ग्राफ्टिंग दृष्टिकोण उपलब्ध दाता त्वचा के उपयोग को अधिकतम करके और समग्र रोगी परिणामों में सुधार करके बड़ी और गंभीर जली हुई चोटों के इलाज के लिए एक आशाजनक समाधान प्रदान कर सकते हैं।

इस शोध का परिचयात्मक अध्याय त्वचा के बायोमैकेनिक्स का एक व्यापक अवलोकन प्रदान करता है, इसके संरचनात्मक और कार्यात्मक गुणों पर जोर देता है। यह विभिन्न चिकित्सीय स्थितियों के इलाज के लिए व्यापक रूप से इस्तेमाल की जाने वाली तकनीक के रूप में स्किन ग्राफ्टिंग के वैज्ञानिक सिद्धांतों पर प्रकाश डालता है, जिसमें जलने की चोट के उपचार में इसके अनुप्रयोग पर विशेष ध्यान दिया जाता है। अध्याय स्वास्थ्य देखभाल में त्वचा ग्राफ्टिंग के वैश्विक प्रभाव पर प्रकाश डालता है, एक चिकित्सीय दृष्टिकोण के रूप में इसके महत्व को रेखांकित करता है। इसके अलावा, अध्याय सहायक संरचनाओं की अवधारणा का परिचय देता है, जो बाहरी ताकतों के जवाब में विस्तार करने की उनकी अनूठी संपत्ति की विशेषता है। इन संरचनाओं ने अपनी उच्च विस्तार क्षमताओं के कारण हाल के वैज्ञानिक साहित्य में महत्वपूर्ण ध्यान आकर्षित किया है। सहायक संरचनाओं और उनके विशिष्ट यांत्रिक व्यवहार के वैज्ञानिक

आधार का पता लगाया गया है, जिससे त्वचा ग्राफ्टिंग के संदर्भ में उनकी प्रासंगिकता और संभावित अनुप्रयोगों के लिए मंच तैयार किया गया है।

इस शोध का दूसरा अध्याय पारंपरिक त्वचा ग्राफ्ट के विकास के लिए समर्पित है, जिसमें उनकी विस्तार क्षमताओं की जांच पर प्राथमिक ध्यान दिया गया है। वैज्ञानिक दृष्टिकोण का उपयोग करते हुए, अध्याय का उद्देश्य मौजूदा साहित्य के साथ तुलना करके इन त्वचा ग्राफ्टों से प्राप्त परिणामों का व्यवस्थित रूप से विश्लेषण और सत्यापन करना है। एक व्यापक परीक्षा आयोजित करके, अध्ययन का उद्देश्य पारंपरिक त्वचा ग्राफ्ट के विस्तार विश्लेषण को प्रभावित करने वाले कारकों की गहरी समझ हासिल करना है। प्रयोगात्मक और कम्प्यूटेशनल तरीकों के माध्यम से, अध्याय का उद्देश्य विभिन्न आयामी मापदंडों के तहत पारंपरिक त्वचा ग्राफ्ट के विस्तार व्यवहार को मापना है। इसमें यह जांच करना शामिल है कि ग्राफ्ट का आकार, मोटाई और अभिविन्यास जैसे कारक ग्राफ्ट की समग्र विस्तार क्षमता को कैसे प्रभावित करते हैं। इसके अतिरिक्त, अध्याय त्वचा ग्राफ्टिंग पर स्थापित वैज्ञानिक साहित्य के साथ तुलना करके निष्कर्षों को मान्य करने का प्रयास करता है।

इस शोध के अध्याय तीन और चार में सहायक त्वचा ग्राफ्ट पैटर्न की गहन और व्यापक जांच शामिल है। वैज्ञानिक दृष्टिकोण मानते हुए, इन अद्वितीय ग्राफ्ट संरचनाओं का अध्ययन और विश्लेषण करने के लिए कम्प्यूटेशनल और प्रायोगिक दोनों पद्धतियों को नियोजित किया गया था। प्राथमिक उद्देश्य उन सहायक पैटर्न की पहचान करना था जो उच्चतम विस्तार क्षमताओं को प्रदर्शित करते हैं। इसके अतिरिक्त, त्वचा ग्राफ्ट सिमुलेंट का द्विअक्षीय परीक्षण करने के लिए एक अति-कम लागत वाला द्विअक्षीय परीक्षण उपकरण विकसित किया गया था। इस उपकरण ने हमें सहायक त्वचा ग्राफ्ट पैटर्न को चिह्नित करने के लिए नियंत्रित तरीके से विभिन्न त्वचा ग्राफ्ट पैटर्न का परीक्षण करने की अनुमति दी। अध्याय तीन में, एक विस्तृत कम्प्यूटेशनल अध्ययन आयोजित किया गया था, जिसमें विभिन्न सहायक त्वचा ग्राफ्ट पैटर्न के व्यवहार को अनुकरण करने के लिए उन्नत संख्यात्मक मॉडलिंग तकनीकों का उपयोग किया गया था। कम्प्यूटेशनल सिमुलेशन ने विभिन्न औक्सेटिक कॉन्फ़िगरेशन की व्यवस्थित खोज की अनुमति दी, जिससे सबसे आशाजनक विस्तार गुणों वाले पैटर्न की पहचान सक्षम हो गई। कम्प्यूटेशनल उपकरणों को नियोजित करके, अध्ययन का उद्देश्य इन विशेष ग्राफ्टों के यांत्रिक व्यवहार और विस्तार विशेषताओं में अंतर्दृष्टि प्राप्त करना था। अध्याय चार अनुसंधान के प्रायोगिक पहलू पर केंद्रित है। कम्प्यूटेशनल सिमुलेशन से निष्कर्षों को मान्य करने और सहायक संरचनाओं में आयामी विविधताओं के प्रभाव का और पता लगाने के लिए सावधानीपूर्वक डिजाइन किए गए प्रयोगों की एक श्रृंखला की गई। सावधानीपूर्वक प्रयोग और डेटा विश्लेषण के माध्यम से, शोध से यह स्पष्ट हुआ कि ज्यामिति, मोटाई और भौतिक गुण

जैसे कारक सहायक त्वचा ग्राफ्ट की विस्तार क्षमताओं को कैसे प्रभावित करते हैं। कम्प्यूटेशनल और प्रयोगात्मक जांच के संयोजन ने अध्ययन के परिणामों की समग्र वैज्ञानिक वैधता और विश्वसनीयता को बढ़ाया।

इस शोध का अध्याय पांच पदानुक्रमित औक्सेटिक त्वचा ग्राफ्ट पैटर्न की गहन और व्यवस्थित जांच के लिए समर्पित है। एक व्यापक वैज्ञानिक दृष्टिकोण को नियोजित करते हुए, इस अध्याय का उद्देश्य इन अद्वितीय पदानुक्रमित संरचनाओं द्वारा प्रस्तावित अतिरिक्त विस्तार क्षमता का पता लगाना और उसका विश्लेषण करना है। अध्ययन में पदानुक्रमित औक्सेटिक त्वचा ग्राफ्ट के यांत्रिक व्यवहार और विस्तार विशेषताओं की जांच करने के लिए कम्प्यूटेशनल सिमुलेशन और प्रयोगात्मक अध्ययन का संयोजन शामिल है ।

इस शोध का अध्याय छह ताजा शव की त्वचा पर उच्चतम विस्तार सहायक संरचना के कार्यान्वयन की विस्तृत जांच प्रस्तुत करता है। अध्याय का उद्देश्य विभिन्न विस्थापन दरों पर शव की त्वचा के नमूनों के परीक्षण से प्राप्त परिणामों का विश्लेषण करना है। प्रयोग प्रक्रिया के दौरान, त्वचा के नमूनों के यांत्रिक गुणों और व्यवहार को बारीकी से देखा और विश्लेषण किया गया और पारंपरिक त्वचा ग्राफ्ट पैटर्न के मेशिंग अनुपात की गणना की गई और उनकी तुलना औक्सेटिक त्वचा ग्राफ्ट पैटर्न के कार्यान्वयन से प्राप्त परिणामों से की गई। मेशिंग अनुपात इस बात के आवश्यक संकेतक के रूप में कार्य करते हैं कि ग्राफ्ट पैटर्न कितने प्रभावी ढंग से प्राप्तकर्ता साइट का पालन करते हैं और उसके साथ एकीकृत होते हैं, जो ग्राफ्ट के समग्र प्रदर्शन में मूल्यवान अंतर्दृष्टि प्रदान करते हैं। शोध के निष्कर्षों से पता चला कि औक्सेटिक त्वचा ग्राफ्ट पैटर्न ने त्वचा के नमूनों पर कम तनाव प्रदर्शित किया और पारंपरिक त्वचा ग्राफ्ट की तुलना में उच्च विस्तार क्षमताओं का प्रदर्शन किया।

इस शोध प्रबंध का समग्र उद्देश्य बड़े जले हुए क्षेत्रों को ठीक करने के लिए उनके विस्तार को समझने के लिए सहायक त्वचा ग्राफ्ट पैटर्न विकसित करना था। उच्चतम पैटर्न संरचनाओं के लिए कई सहायक पैटर्न विकसित और अनुकूलित किए गए और कम्प्यूटेशनल और प्रयोगात्मक रूप से परीक्षण किया गया। इसके अतिरिक्त, पदानुक्रमित सहायक पैटर्न विकसित किए गए, और सहायक संरचनाओं में अतिरिक्त विस्तार की गणना की गई। अंत में, उच्चतम विस्तार और सबसे कम शून्य क्षेत्र संरचना को ताजा शव की त्वचा पर लागू किया गया और देखा गया कि सहायक त्वचा ग्राफ्ट पैटर्न ने बेहतर व्यवहार दिखाया। यह शोध छोटे और बड़े जानवरों के मॉडल पर भविष्य के अध्ययन की नींव तैयार करेगा और कोशिका प्रसार और ऊतक पुनर्जनन का विश्लेषण करेगा। साथ ही, ऑक्सेटिक स्किन ग्राफ्ट पैटर्न की प्रभावशीलता को समझने के लिए एक क्लिनिकल परीक्षण भी किया गया।

Contents

Title Page i
Certificate ii
Acknowledgements iii
Abstract v
Content xi
List of Figures xiv
List of Tables xvii
List of Abbreviations xviii

Chapter 1: Introduction and Literature Review

1.1 Introduction 1
1.2 Biomechanical Properties of Skin 2
1.3 Skin Grafting 3
1.4 Literature Review on Split Thickness Skin Grafting-Expansion 4
1.5 Methods to Obtain High Expansion-Auxetics 6
1.6 Auxetic Structures for Skin Grafting 10
1.7 Literature Gap 10
1.8 Objectives 11
1.9 Workplan 11

Chapter 2: Biomechanical Modelling of Traditional Skin Grafts

2.1 Introduction 12
2.2 Materials and Methods 12
2.2.1 Geometrical Modeling 12
2.2.2 Fabrication of Skin Graft Patterns 13
2.2.3 Materials Modelling 17
2.2.4 Boundary Conditions 19
2.3 Results and Discussion 20
2.3.1 Stress Analysis 20
2.3.1.1 Oval Shaped Variants 20
2.3.1.2 Square Shaped Variants 21
2.3.2 Meshing Ratio Analysis 22
2.3.2.1 Oval Shaped Variants 22
2.3.2.2 Square Shaped Variants 23
2.3.2.3 Hyperelastic Modelling 24
2.4 Conclusion 25

Chapter 3: Computational Modeling of Skin Grafts with Auxetic Incisions

3.1 Introduction 27
3.2 Materials and Methods 27
3.2.1 Geometrical Modelling 27
3.2.1.1 Novel Auxetic Skin Graft Patterns 27
3.2.1.2 Rotating Triangle Shaped Auxetic Skin Graft Variants 31

3.2.1.3 Alternating Slit Shaped Auxetic Skin Graft Variants 33
3.2.1.4 I-Shaped Auxetic Skin Graft Variants 34
3.2.2 Material and Finite Element Modelling 35
3.3 Results and Discussions 37
3.3.1 Deformation Analysis 37
3.3.2 Effective Poisson's ratio analysis 38
3.3.2.1 Rotating Triangle Shaped Variants 38
3.3.2.2 Alternating Slit Shaped Variants 39
3.3.2.3 I-Shaped Variants 40
3.3.3 Stress Analysis 41
3.3.3.1 Rotating Triangle Shaped Variants 41
3.3.3.2 Alternating Slit Shaped Variants 42
3.3.3.3 I-Shaped Variants 43
3.3.4 Meshing ratio analysis 44
3.4 Conclusion 46
Chapter 4: Experimental Study on Auxetic Skin Graft Patterns
4.1 Introduction 48
4.2 Material and Methods 48
4.2.1 Design and Development of Planar Biaxial Tester 48
4.2.2 Geometrical Modeling 51
4.2.2.1 Different Auxetic Structures 51
4.2.2.2 Rotating Triangle, Alternating Skit and I-Shaped Variants 52
4.2.2 Fabrication of Auxetic Structures 54
4.2.3 Materials Modelling 57
4.2.4 Boundary Conditions 59
4.3 Results and Discussion 60
4.3.1 Deformation Analysis 60
4.3.2 Effective Poisson's ratio analysis 62
4.3.2.1 Different structures 62
4.3.2.2 Rotating Triangle Shaped Variants 62
4.3.2.3 Alternating Slit Shaped Variants 63
4.3.2.4 I-Shaped Variants 64
4.3.3 Stress Analysis 65
4.3.3.1 Different structures 65
4.3.3.2 Rotating Triangle Shaped Variants 66
4.3.3.3 Alternating Slit Shaped Variants 67
4.3.3.4 I-Shaped Variants 68
4.3.4 Meshing Ratio Analysis 69
4.3.4.1 Different Structures 69
4.3.4.2 Rotating Triangle (RT) Shaped Variants 70
4.3.4.3 Alternating Slit Shaped Variants 71
4.3.4.4 I-Shaped Variants 72

4.4 Conclusions 73
Chapter 5: Development of Hierarchical Auxetic Structures for Skin Grafting Applications
5.1 Introduction 74
5.2 Material and Methods 74
5.2.1 Geometrical Modelling 74
5.2.2 Fabrication of Hierarchical Patterns 75
5.2.3 Boundary Conditions 76
5.3 Results and Discussions 77
5.3.1 Deformation Analysis 77
5.3.2 Effective Poisson's Ratio Analysis 78
5.3.3 Stress analysis 79
5.3.4 Meshing ratio analysis 80
5.4 Conclusions 81
Chapter 6: Development and Testing of Novel Auxetic Skin Grafts with Human Skin
6.1 Introduction 82
6.2 Material and Methods 84
6.2.1 Preparation of Skin Samples 84
6.2.2 Preparation of Conventional and Auxetic Skin Grafts 85
6.2.3 Experimental Setup and Loading Configurations 86
6.2.4 Data Analysis 88
6.3 Results and Discussions 88
6.3.1 Stress Analysis 88
6.3.2 Meshing Ratio Analysis 90
6.4 Conclusions 91
Chapter 7: Future Work
7.1 Wound Healing Studies 93
7.2 Experimental Testing and Clinical Trials 94
7.3 Incorporating Pore Fraction into the Strain Energy Density Function 95
7.4 Anisotropy of Auxetic Materials 96
References 97
Publications 108
Biodata of Author 109

List of Figures

Figure No.	Caption	Pg
Figure 1.1	Different layers of skin	2
Figure 1.2	Skin grafting procedure	4
Figure 1.3	Properties and applications of auxetic structures	8
Figure 1.4	Behavior of both auxetic and non-auxetic structures under tensile and compressive loads	9
Figure 2.1	Skin graft designs with changing dimensional petameters as shown in Table 1.1	14
Figure 2.2	Square shaped skin graft designs with varying slit angle	15
Figure 2.3	Oval shaped molds and synthetic skin grafts with varying dimensional parameters	16
Figure 2.4	Development of anisotropic skin simulants	16
Figure 2.5	Schematic of square shaped skin graft patterns	17
Figure 2.6	Schematic of uniaxial loading conditions	20
Figure 2.7	Schematic of biaxial loading conditions	20
Figure 2.8	Skin graft patterns with different slit diameters and spacing cauchy stress versus strain responses	21
Figure 2.9	Cauchy stress analysis of anisotropic skin graft simulants	22
Figure 2.10	Skin graft meshing ratios for A) 120mm applied displacements, B) 160mm applied displacements, and C) 240mm applied displacements at various slit lengths and spacings.	23
Figure 2.11	Schematic representation of skin graft expansion	24
Figure 3.1	Skin graft models with auxetic patterns	29
Figure 3.2	Unit cell and Rotating Triangle skin graft models with internal angle varying from 0^o to 135^o.	32
Figure 3.3	(a) Unit cell, (b) Front view of complete AS-shaped skin graft	33
Figure 3.4	Skin graft designs with changing dimensions in mm: "(a) M_1(L_1=8, L_2=4, S=0.5), (b) M_2(L_1=8, L_2=8, S=0.5), (c) M_3(L_1=4, L_2=8, S=0.5), (d) M_4(L_1=8, L_2=4, S=1), (e) M_5(L_1=8, L_2=8, S=1), (f) M_6(L_1=4, L_2=8, S=1), (g) M_7(L_1=8, L_2=4, S=2), (h) M_8(L_1=8, L_2=8, S=2), (i) M_9(L_1=4, L_2=8, S=2)"	34
Figure 3.5	I-shape parameters: "A) D1 (S1=10, S2=5, S3=1, T=0.1), B) D2 (S1=15, S2=7.5, S3=1, T=0.1), C) D3 (S1=20, S2=10, S3=1, T=0.1), D) D4 (S1=10, S2=10, S3=1, T=0.1), E) D5 (S1=5, S2=10, S3=1, T=0.1), F) D6 (S1=7.5, S2=15, S3=1, T=0.1), G) D7 (S1=10, S2=20, S3=1, T=0.1), H) D8 (S1=10, S2=5, S3=2, T=0.1), I) D9 (S1=15, S2=7.5, S3=2, T=0.1), J) D10 (S1=20, S2=10, S3=2, T=0.1), K) D11 (S1=10, S2=10, S3=2, T=0.1), L) D12 (S1=5, S2=10, S3=2, T=0.1), M) D13 (S1=7.5, S2=15, S3=2, T=0.1), N) D14 (S1=10, S2=20, S3=1, T=0.1)"	35
Figure 3.6	Loading conditions (A) uniaxial and (B) biaxial	36

Figure 3.7	Different auxetic skin graft models uniaxial deformation (in mm) at 100% stretch.	39
Figure 3.8	Effective Poisson's ratio analysis of RT-shaped patterns	39
Figure 3.9	Effective Poisson's ratio analysis of AS-shaped patterns	40
Figure 3.10	Effective Poisson's ratio analysis of I-shaped patterns	41
Figure 3.11	Stress analysis of RT shaped patterns (a) Uniaxially, and (b) Biaxially	42
Figure 3.12	Stress analysis of AS shaped patterns	43
Figure 3.13	Stress analysis of I-shaped patterns	44
Figure 4.1	3D schematic of planar biaxial testing device for soft tissues	50
Figure 4.2	Skin graft patterns (A) AS (Alternating Slit), (B) HCS (Honeycomb Shaped), (C) HS (H-Shaped), (D) IS (I-Shaped), (E) RR (Rotating Rhombi) , (F) RT (Rotating Triangle), (G) YS (Y-Shaped)	51
Figure 4.3	AS-shaped, I-shaped, and RT-shaped pattern (a) zoomed model (b) front view of patterns (c) Isometric view of patterns.	53
Figure 4.4	Skin grafts moulds for varying auxetic patterns	55
Figure 4.5	Different auxetic skin grafts simulants	56
Figure 4.6	3D printed moulds with different skin graft phantoms	57
Figure 4.7	Mechanical testing setup on the UTM	59
Figure 4.8	Mechanical testing setup on the biaxial testing device	60
Figure 4.9	Deformation of different skin graft simulants	61
Figure 4.10	Effective Poisson's ratio of different skin graft simulants	62
Figure 4.11	Effective Poisson's ratio of RT skin graft simulants	63
Figure 4.12	Effective Poisson's ratio of AS skin graft simulants	64
Figure 4.13	Effective Poisson's ratio of I-shaped skin graft simulants	65
Figure 4.14	Cauchy stress analysis of different skin graft simulants	66
Figure 4.15	Cauchy stress analysis of RT skin graft simulants	67
Figure 4.16	Cauchy stress analysis of AS skin graft simulants	68
Figure 4.17	Cauchy stress analysis of I-shaped skin graft simulants	69
Figure 4.18	Meshing ratio of different skin graft simulants	70
Figure 4.19	Meshing ratios of RT skin graft simulants	71
Figure 4.20	Meshing ratio of AS skin graft simulants	72
Figure 4.21	Meshing ratio of I-shaped skin graft simulants	73
Figure 5.1	Hierarchical graft patterns, dimensions are in Table 5.1	75
Figure 5.2	3D printing of the graft moulds	76
Figure 5.3	Hierarchical skin grafts simulants	77
Figure 5.4	Testing setup for hierarchical skin grafts	77
Figure 5.5	Expansion analysis of hierarchical skin graft simulants	78
Figure 5.6	Effective Poisson's ratio analysis of different hierarchical skin graft patterns	79
Figure 5.7	Stress–strain of hierarchical skin graft simulants	80
Figure 5.8	Meshing ratio analysis of different hierarchical skin graft patterns	81
Figure 6.1	Schematic of sample site and sample preparation	85
Figure 6.2	Skin graft preparation	87

Figure 6.3	Schematic of skin graft testing under uniaxial and biaxial loading conditions	87
Figure 6.4	Stress analysis at low displacement rate (A) Skin (B) Skin grafts	89
Figure 6.5	Stress analysis at high displacement rate (A) Skin (B) Skin grafts	90
Figure 6.6	Meshing ratio analysis traditional and auxetic skin grafts	91

List of Tables

Table No.	Caption	Pg
Table 2.1	Dimensional parameters of traditional skin grafts	13
Table 2.2	Various trial specimens of two-part polymeric material	14
Table 2.3	Yeoh hyperelastic model estimations	24
Table 3.1	Meshing Ratio of Different Skin Graft Designs	45
Table 4.1	List of components used to develop biaxial tester.	49
Table 4.2	Dimensional parameters of auxetic skin graft patterns	53
Table 5.1	The parameters of hierarchical skin graft models	75
Table 6.1	Statistical analysis of traditional and auxetic skin grafts	91

List of Abbreviations:

2D – Two Dimensional

3D – Three Dimensional

σ – Stress

ε – Strain

Ψ – Strain Energy Function

I – Cauchy-green Tensor Invariants

λ – Principal Stretch

ε –Strain

NPR – Negative Poisson's Ratio

FEA – Finite Element Analysis

Eq. – Equation

SD – Standard Deviation

R – Correlation Coefficient

R^2 – Coefficient of Determination

CAD – Computer Aided Design

PLA – Polylactic Acid

p – Probability Value

F – Force

A – Cross-sectional Area

dL – Change in Length

L – Initial length

AS – Alternating Slit

RT – Rotating Triangle

RR – Rotating Rhombi

RRS – Rotating Rectangle Shaped

HCS – Honeycomb Shaped

DAH – Double Arrow Honeycomb

IS – I-Shaped

HS – H-Shaped

YS – Y-Shaped

STSG – Split-thickness skin grafting

MR – Meshing ratios

UTS – Ultimate Tensile Strength

UTM – Universal Testing Machine