



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ.
Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Διπλωματική Εργασία

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ 3D PRINTING ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΔΗΜΑΤΩΝ

Σουλαντίκα Ερμιόνη

Επιβλέπων Καθηγητής: Α. Μαρκόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο τομέας των μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον για την παραγωγή προϊόντων καθημερινής χρήσης, καθώς προσφέρει νέες δυνατότητες σε σχέση με πιο παραδοσιακές μεθόδους κατεργασιών. Η εργασία αυτή είχε ως στόχο την πραγματοποίηση μια πρώτης προσέγγισης σχεδιασμού μιας σόλας παπουτσιού προκειμένου να εκτυπωθεί με την μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης Fused Deposition Modeling (FDM). Εκτυπώθηκαν πέντε δοκίμια, χρησιμοποιώντας ως υλικό το Ultimaker TPU 95A. Οι παράμετροι πλήρωσης που μελετήθηκαν είναι το μοτίβο και το ποσοστό πλήρωσης και οι συνδυασμοί που εκτυπώθηκαν είναι Gyroid 40%, Gyroid 50%, Hexagonal 18.5%, Hexagonal 27.5% και Hexagonal 35.5%. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε out-of-plane δοκιμή θλίψης, από τις οποίες προέκυψαν οι καμπύλες σ-ε για τον κάθε συνδυασμό. Στην συνέχεια, αυτές οι καμπύλες χρησιμοποιήθηκαν στο Solidworks ώστε να ορισθούν πέντε νέα υλικά που θα αντιπροσωπεύουν αυτούς τους συνδυασμούς. Τέλος, σχεδιάσθηκε στο Solidworks η επιθυμητή σόλα και έγιναν δοκιμές θλίψης και κάμψης με τα νέα υλικά σε αυτό το λογισμικό. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι ότι και τα πέντε δοκίμια επανήλθαν στην αρχική τους κατάσταση χωρίς να φαίνονται σημαντικές μόνιμες παραμορφώσεις, παρόλο που οι τάσεις υπερέβησαν το όριο διαρροής και των πέντε συνδυασμών. Από τις δοκιμές στο Solidworks φάνηκε ότι τα υλικά με τα μοτίβο Gyroid είναι πιο κατάλληλα για την συγκεκριμένη εφαρμογή, καθώς παραμορφώνονται πιο εύκολα από τα Hexagonal.

ABSTRACT

The field of 3D printing methods is of great interest for the production of everyday products, as it offers new possibilities in relation to traditional processing methods. The aim of this work was to carry out a first design approach to a shoe sole in order to be printed with the 3D printing method of Fused Deposition Modeling (FDM). Five specimens were printed using the material Ultimaker TPU 95A. The printing parameters that have been studied were the infill pattern and infill percentage and the printed combinations were Gyroid 40%, Gyroid 50%, Hexagonal 18.5%, Hexagonal 27.5% and Hexagonal 35.5%. The specimens were subjected to an out-of-plane compression test, from which the σ - ϵ curves for each combination were obtained. These curves were then used in Solidworks to define five new materials that would represent these combinations. Finally, the desired sole was designed at Solidworks and compression and bending tests were performed using the new materials in this software. The results showed that all five specimens returned to their original state without any significant permanent deformations, although stresses exceeded the yield strength of all five combinations. Tests at Solidworks have shown that the materials made with the Gyroid pattern had better performance for this application, as they are more easily deformed than the Hexagonal.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	9
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
2 ΘΕΩΡΙΑ	14
2.1 ΚΥΚΛΟΣ ΒΑΔΙΣΗΣ	14
2.1.1 ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΒΑΔΙΣΗΣ	14
2.1.2 ΜΟΤΙΒΟ ΥΠΙΣΤΙΡΙΕΗΣ ΤΟΥ ΠΟΔΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΑΦΗ ΜΕ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	17
2.1.3 ΑΡΘΡΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΟΔΙΟΥ	18
2.1.4 ΠΙΘΑΝΟ ΣΗΜΕΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΟΛΑΣ.....	19
2.2 ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ	19
2.3 ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ	21
3 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	23
3.1 ΥΛΙΚΟ ΝΗΜΑΤΟΣ.....	23
3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	25
3.2.1 ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΛΗΡΩΣΗΣ	25
3.2.2 ΜΟΤΙΒΟ ΠΛΗΡΩΣΗΣ	26
4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ SOLIDWORKS.....	32
5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ SOLIDWORKS	35
5.1 ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	35
5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΘΛΙΨΗΣ	39
5.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΟ SOLIDWORKS.....	48
5.3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟ SOLIDWORKS	48
5.3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ	50
5.3.3 ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ	52
5.3.4 ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ	59
5.4 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	63
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	68
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	70

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση των φάσεων του κύκλου βάρδισης. Η εικόνα προέρχεται από το [9].	14
Εικόνα 2: Διαγράμματα των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε κάθε μία από τις οκτώ περιοχές του ποδιού σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η εικόνα προέρχεται από το [3].	15
Εικόνα 3: Αλληλουχία των περιοχών υποστήριξης του ποδιού κατά τη στάση. Μόνο η φτέρνα στην απόκριση φόρτισης (LRQ Loading Response). Επίπεδο πόδι στο μέσο της στάσης (M St: Mid Stance). Μπροστινό τμήμα του ποδιού και δάχτυλα στην τελική στάση (T St: Terminal Stance). Μεσαίο τμήμα του μπροστινού τμήματος του ποδιού πριν την αιώρηση (P Sw: Pre-Swing). Η εικόνα προέρχεται από το άρθρο [10].	17
Εικόνα 4: Οι τρεις αρθρώσεις του ποδιού με μεγάλη λειτουργική σημασία κατά το περπάτημα. Η εικόνα προέρχεται από το [10].	18
Εικόνα 5: Η κίνηση των MP κατά τη στάση. Το σκιασμένο δάχτυλο δείχνει την περιοχή κίνησης. Η εικόνα προέρχεται από το [10].	19
Εικόνα 6: Σχηματική παράσταση πειράματος μονοαξονικής θλίψης. Η εικόνα προέρχεται από το [11].	20
Εικόνα 7: Σχηματική παράσταση τύπων παραμόρφωσης υπό θλιπτικές τάσεις καθώς και συγκριτικού διαγράμματος σ - ϵ για διάφορους τύπους l/d. (a) Buckling, when $L/D > 5$. (B) Shearing, when $L/D > 2.5$. (c) Double barreling, when $L/D > 2.0$ and friction is present at the contact surface. (d) Barreling, when $L/D < 2.0$ and friction is present at the contact surfaces. (e) Homogenous compression, when $L/D < 2.0$ and no friction is present at the contact surfaces. (f) Compressive instability due to work-softening material. Η εικόνα προέρχεται από το [11].	20
Εικόνα 8: Σχηματική παράσταση πειράματος καθαρής κάμψης ευθύγραμμης συμμετρικής δοκού.	21
Εικόνα 9: Αναπτυσσόμενες ροπές κατά την καθαρή κάμψη ευθύγραμμης συμμετρικής δοκού. Η εικόνα προέρχεται από το [12].	21
Εικόνα 10: Καταπόνηση σόλας με ABS σε θλίψη.	23
Εικόνα 11: Καταπόνηση σόλας με ABS σε κάμψη.	23
Εικόνα 12: Εκτυπωτής Ultimaker 3.	24
Εικόνα 13: Κάτοψη δοκιμίων.	28
Εικόνα 14: Πλάγια όψη δοκιμίων.	28
Εικόνα 15: Συμμετρική όψη και κάτοψη των προς εκτύπωση τεμαχίων από το λογισμικό Cura	30
Εικόνα 16: Σχηματική απεικόνιση των μοτίβο Hexagonal στο Solidworks.	31
Εικόνα 17: Μεγέθη γυναικείων υποδημάτων.	32
Εικόνα 18: Σχηματική αναπαράσταση των ανατομικών περιοχών. Η εικόνα προέρχεται από το [19].	33
Εικόνα 19: Εννέα ανατομικές περιοχές στις οποίες χωρίζεται η σόλα.	33
Εικόνα 20: Περιοχές στο κάτω μέρος της σόλας.	34
Εικόνα 21: Δοκίμια με εξωτερικό τοίχωμα.	35
Εικόνα 22: Δοκίμια με και χωρίς εξωτερικό τοίχωμα.	35
Εικόνα 23: Ανεπιτυχής εκτύπωση δοκιμίου με μοτίβο Gyroid.	36

Εικόνα 24: Διακοπή εκτύπωσης με αποτέλεσμα το ένα δοκίμιο να έχει μικρότερο ύψος, ...	36
Εικόνα 25: Διακοπή εκτύπωσης προτού φτάσει στο συνολικό ύψος και αποτυχία εκτύπωσης του μοτίβο.	37
Εικόνα 26: Εκτυπωμένα δοκίμια.	38
Εικόνα 27: Μηχάνημα δοκιμών INSTRON 4482.	39
Εικόνα 28: Στιγμιότυπα από τη δοκιμή σε θλίψη ενός δοκιμίου hexagonal και ενός gyroid.	40
Εικόνα 29: Δοκίμιο Gyroid 40% πριν και μετά τη θλίψη.	40
Εικόνα 30 Δοκίμιο Gyroid 50% πριν και μετά τη θλίψη.	41
Εικόνα 31: Δοκίμιο Hexagonal 18.5% πριν και μετά τη θλίψη.	41
Εικόνα 32: Δοκίμιο Hexagonal 27.5% πριν και μετά τη θλίψη.	42
Εικόνα 33: Δοκίμιο Hexagonal 35.5% πριν και μετά τη θλίψη.	42
Εικόνα 34: Διάγραμμα Φορτίου θλίψης - Βράχυνσης για το Hexagonal-18.5%.	43
Εικόνα 35: Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για το Hexagonal-27.5%.	43
Εικόνα 36: Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για το Hexagonal-35.5%.	44
Εικόνα 37: Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για το Gyroid-40%.	44
Εικόνα 38: Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για το Gyroid-50%.	45
Εικόνα 39: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης για το Hexagonal-18.5%.	46
Εικόνα 40: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης για το Hexagonal-27.5%.	46
Εικόνα 41: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης για το Hexagonal-35.5%.	47
Εικόνα 42: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης για το Gyroid-40%.	47
Εικόνα 43: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης για το Gyroid-50%.	48
Εικόνα 44: Βιβλιοθήκη υλικών στο Solidworks (Properties).	48
Εικόνα 45: Βιβλιοθήκη υλικών στο Solidworks (Tables & Curves).	49
Εικόνα 46: Διάγραμμα νόμων κλιμάκωσης του λόγου Poisson για δομές G, D, P και W. Η εικόνα προέρχεται από το [22].	49
Εικόνα 47: Δείκτης BMI για διάφορες τιμές Σωματικού Βάρους και Ύψους. Η εικόνα προέρχεται από το [24].	51
Εικόνα 48: Καταπόνηση σε θλίψη της σόλας με υλικό Hexagonal 18.5%.	52
Εικόνα 49: Παραμόρφωση λόγω θλίψης της σόλας με υλικό Hexagonal 18.5%.	53
Εικόνα 50: Καταπόνηση σε θλίψη της σόλας με υλικό Hexagonal 27.5%.	53
Εικόνα 51: Παραμόρφωση λόγω θλίψης της σόλας με υλικό Hexagonal 27.5%.	54
Εικόνα 52: Καταπόνηση σε θλίψη της σόλας με υλικό Hexagonal 35.5%.	54
Εικόνα 53: Παραμόρφωση λόγω θλίψης της σόλας με υλικό Hexagonal 35.5%.	55
Εικόνα 54: Καταπόνηση σε θλίψη της σόλας με υλικό Gyroid 40%.	55
Εικόνα 55: Παραμόρφωση λόγω θλίψης της σόλας με υλικό Gyroid 40%.	56
Εικόνα 56: Καταπόνηση σε θλίψη της σόλας με υλικό Gyroid 50%.	56
Εικόνα 57: Παραμόρφωση λόγω θλίψης της σόλας με υλικό Gyroid 50%.	57
Εικόνα 58: Αναπτυσσόμενες τάσεις λόγω θλιπτικών φορτίων στην κάτω πλευρά της σόλας.	57
Εικόνα 59: Απόσταση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του μέγιστου ύψους που πρέπει να φτάσει το πίσω τμήμα της σόλας.	59
Εικόνα 60: Καταπόνηση σε κάμψη της σόλας με υλικό Hexagonal 18.5%.	60
Εικόνα 61: Καταπόνηση σε κάμψη της σόλας με υλικό Hexagonal 27.5%.	60
Εικόνα 62: Καταπόνηση σε κάμψη της σόλας με υλικό Hexagonal 35.5%.	61
Εικόνα 63: Καταπόνηση σε κάμψη της σόλας με υλικό Gyroid 40%.	61

Εικόνα 64: Καταπόνηση σε κάμψη της σόλας με υλικό Gyroid 50%.....	62
Εικόνα 65: Αναπτυσσόμενες τάσεις λόγω κάμψης στην κάτω πλευρά της σόλας.....	62
Εικόνα 66: Περιοχές της σόλας στις οποίες εφαρμόζονται τα διαφορετικά υλικά.....	64
Εικόνα 67: Καταπόνηση λόγω θλίψης της σόλας με τον συνδυασμό υλικών στο Solidworks.	64
Εικόνα 68: Παραμόρφωση λόγω θλίψης της σόλας με τον συνδυασμό υλικών στο Solidworks.	65
Εικόνα 69: Καταπόνηση λόγω κάμψης της σόλας με τον συνδυασμό υλικών στο Solidworks.	66
Εικόνα 70: Καταπόνηση λόγω κάμψης της σόλας με τον συνδυασμό υλικών στο Solidworks. Σημείο ανάπτυξης μέγιστων τάσεων.	66

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Περιοχές στις οποίες χωρίζεται το πόδι.	15
Πίνακας 2: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή Η.	16
Πίνακας 3: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή MF.....	16
Πίνακας 4: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή MT ₁	16
Πίνακας 5: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή MT ₂	16
Πίνακας 6: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή MT ₃₄	16
Πίνακας 7: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή T ₁	16
Πίνακας 8: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή T ₂	16
Πίνακας 9: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή T ₃₅	16
Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά νήματος Ultimaker TPU 95A.	25
Πίνακας 11: Παράμετροι διεργασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης που παραμένουν σταθεροί.	25
Πίνακας 12: Παράμετροι διεργασίας που μελετήθηκαν.	28
Πίνακας 13: Ο χρόνος εκτύπωσης και το υλικό που καταναλώθηκε για κάθε τεμάχιο σύμφωνα με το λογισμικό Cura.	29
Πίνακας 14: Ανατομικές περιοχές του ποδιού. Ο πίνακας προέρχεται από το [19].	32
Πίνακας 15: Μεγέθη για τον υπολογισμό των σ, ε.	45
Πίνακας 16: Ιδιότητες των νέων υλικών για τη βιβλιοθήκη υλικών του Solidworks.....	50
Πίνακας 17: Κανονικοποιημένη μέγιστη πίεση νεαρών και ηλικιωμένων ατόμων για τις εννιά ανατομικές περιοχές 50	50
Πίνακας 18: Διατροφική κατάταξη με βάση το BMI [23].	51
Πίνακας 19: Μέγιστε τιμές πίεσης για κάθε ανατομική περιοχή της σόλας.	52
Πίνακας 20: Σύγκριση αναπτυσσόμενων τάσεων με τα όρια διαρροής των υλικών.	58
Πίνακας 21: Μετατοπίσεις ανά ανατομική περιοχή της σόλας για κάθε υλικό.	58
Πίνακας 22: Μέγιστη και ελάχιστη τάση που αναπτύσσεται λόγω κάμψης.	63
Πίνακας 23: Φορτία που απαιτούνται για την μέγιστη κάμψη της σόλας για κάθε υλικό	63

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα παλαιότερα χρόνια η κατασκευή των υποδημάτων γινόταν από ειδικούς τεχνίτες, ένα ζευγάρι τη φορά, το οποίο φτιαχνόταν με βάση τις μετρήσεις των ποδιών κάθε πελάτη. Τα υποδήματα έπαψαν να είναι χειροποίητα κατά το τέλος του 19^{ου} αιώνα, οπότε και δημιουργούνταν μαζικά από μηχανήματα σε γραμμές παραγωγής. Μέχρι και σήμερα ακολουθείται η ίδια μέθοδος παραγωγής τους. Πλέον, παράγονται υποδήματα για όλες τις δραστηριότητες των ατόμων, με ποικίλα υλικά, σχέδια και το κόστος τους έχει μειωθεί σημαντικά. Παρόλο που με αυτόν τον τρόπο καλύπτονται οι ανάγκες του όλο και αυξανόμενου πληθυσμού σε παγκόσμιο επίπεδο, έχει παρατηρηθεί ότι η μαζική παραγωγή έχει ορισμένα μειονεκτήματα.

Αρχικά, τα μεγέθη και τα σχέδια των υποδημάτων είναι τυποποιημένα, με στόχο να μπορούν να καλύπτουν ένα εύρος του αγοραστικού κοινού. Επειδή, όμως, αυτές οι τυποποιήσεις βασίζονται σε συγκεκριμένα μοντέλα δεν μπορούν να καλύπτουν βέλτιστα τις ανάγκες κάθε περίπτωσης, με αποτέλεσμα πολλές φορές τα τελικά προϊόντα να μην εφαρμόζουν σωστά στο πόδι. Έτσι, αντί τα υποδήματα να προστατεύουν το πόδι από ανεπιθύμητα ερεθίσματα πίεσης και να διευκολύνουν την εκτέλεση καθημερινών λειτουργιών, μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία προβλημάτων, όπως αστάθεια, μικροτραυματισμούς, ακόμα και παραμορφώσεις του ποδιού. Με τον τρόπο αυτόν μειώνεται σημαντικά η άνεση των υποδημάτων, που αποτελεί ένα βασικό κριτήριο για την αγορά τους, αλλά και τον σχεδιασμό τους [1].

Τα προβλήματα αυτά προκύπτουν γιατί δεν λαμβάνονται υπόψη οι παράγοντες που προκαλούν τις διαφορές στα πόδια των ανθρώπων. Υπάρχει το ενδεχόμενο ο συνδυασμός του μήκους και του μέγιστου πλάτους του πέλματος να μην αντιστοιχεί στα υπάρχοντα μοντέλα, με αποτέλεσμα να χρειάζεται να επιλεγεί ένα νούμερο το οποίο να μην προσφέρει σωστή εφαρμογή. Επίσης, υπάρχουν παράγοντες όπως το φύλο, η ηλικία, το σωματικό βάρος και προηγούμενοι τραυματισμοί, τα οποία επηρεάζουν την κατανομή των δυνάμεων και την παραμόρφωση του πέλματος.

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Xiaoguang Zhao et al. [2] είχε ως στόχο να εξετάσει την επιρροή του φύλου, της ηλικίας και του δείκτη μάζας σώματος (ΔΜΣ) στο ύψος και στη δυσκαμψία της καμάρας. Συμμετείχαν 173 άτομα (ηλικιών 57.60 ± 11.19 χρονών, μέσου ΔΜΣ $25.12 \pm 3.93 \text{ kg/m}^2$) και χρησιμοποιήθηκε σαρωτής λέιζερ τριών διαστάσεων για τη μέτρηση των πληροφοριών της δομής του ποδιού κάθε υποκειμένου, από τις οποίες υπολογίστηκαν το ύψος και η δυσκαμψία της καμάρας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι γυναίκες είχαν πόδια με χαμηλή καμάρα σε σύγκριση με τους άντρες και δεν διαπιστώθηκε διαφορά στη δυσκαμψία. Τα άτομα μεγαλύτερης ηλικίας έτειναν να έχουν πιο σκληρή καμάρα από τα μεσήλικα και νεότερα άτομα, και δεν βρέθηκε διαφορά του ύψους καμάρας. Ο ΔΜΣ είχε αντίκτυπο στο ύψος της καμάρας, αλλά όχι στη δυσκαμψία της.

Η μελέτη των W. C. Hutton and M. Dhanendran [3] είχε ως στόχο την μελέτη της φόρτισης του πέλματος κατά τη διάρκεια της βάδισης, καθώς και των συσχετισμών και των παραλλαγών σχετικά με το φορτίο, τον χρόνο επαφής, το φύλο, την ηλικία και την γωνία του έξω δακτύλου. Στην μελέτη συμμετείχαν 31 γυναίκες και 43 άντρες, με ηλικίες που κυμαίνονταν από 6 έως 65 ετών, και μέσο σωματικό βάρος από 27.4 έως 71.8 kg. Από τα πειράματα προέκυψε ότι στα νεότερα άτομα δέχονται τις μεγαλύτερες δυνάμεις το μεγάλο δάχτυλο και η φτέρνα, καθώς και οι μεταταρσικές περιοχές, με μικρό φορτίο στο μέσο του πέλματος, εμφανή διαμήκη καμάρα και σημαντική συμμετοχή του μεγάλου δακτύλου στην ανύψωση του ποδιού από το έδαφος. Παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της ηλικίας το πόδι λειτουργεί λιγότερο αποτελεσματικά, όπως φαίνεται από την αυξανόμενη γωνία του έξω δακτύλου, την βύθιση της διαμήκους καμάρας, καθώς και την αύξηση του φορτίου που μεταφέρει το μέσο του πέλματος, με μεγαλύτερη φόρτιση των πλευρικών μεταταρσικών κεφαλών και λιγότερο στο μεγάλο δάχτυλο. Οι αυξημένες γωνίες του έξω δακτύλου αντικατοπτρίζουν την ανάγκη για διεύρυνση της βάσης υποστήριξης. Επιπρόσθετα, με την αύξηση του σωματικού βάρους παρατηρήθηκε αύξηση του φορτίου στο μέσο του πέλματος.

Από τα αποτελέσματα και των δύο μελετών φαίνεται πως η μορφή του ποδιού και η κατανομή των δυνάμεων εξαρτώνται σε κάποιο βαθμό από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, όπως το φύλο και η ηλικία. Με την εξατομίκευση των υποδημάτων είναι δυνατό να λαμβάνονται υπόψη οι διαφορές που εμφανίζονται στα πόδια κάθε ατόμου και έτσι να γίνονται οι απαραίτητες προσαρμογές ώστε τα υποδήματα να μπορούν να προσφέρουν την κατάλληλη εφαρμογή και υποστήριξη. Οι αλλαγές αυτές μπορεί να είναι στις διαστάσεις του υποδήματος, στην εσωτερική

σόλα, στην δημιουργία μιας αποσπώμενης σόλας, στην προσθήκη απορροφητικών επιφανειών κ.α. Εκτός από την αντιμετώπιση των αναγκών που προκύπτουν από τα διαφορετικά χαρακτηριστικά, με την εξατομίκευση των υποδημάτων μπορούν να καλυφθούν και οι ανάγκες που προκύπτουν λόγω ασθενειών, όπως είναι ο διαβήτης. Τα άτομα με διαβήτη τείνουν να χάνουν σταδιακά την προστατευτική αίσθηση του πόνου στα πόδια τους, με αποτέλεσμα να υπάρχει πιθανότητα να τα υπερφορτώσουν και να τα τραυματίσουν χωρίς να το παρατηρήσουν. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε έλκη στα πόδια που δεν επούλωνονται, ακόμα και σε ακρωτηριασμό των κάτω άκρων. Ο σχηματισμός έλκους για πρώτη φορά είναι ένα ιδιαίτερα αρνητικό ορόσημο, επειδή αυξάνει σημαντικά τον κίνδυνο επανασχηματισμού του. Στόχος είναι η πρόληψη των πρωτογενών ελκών με την προσπάθεια μείωσης της πιθανότητας τραυματισμού των μαλακών ιστών στο πόδι με τη βοήθεια εξειδικευμένων υποδημάτων ή ορθώσεων. Η χρήση απορροφητικών υλικών στα υποδήματα και τις ορθώσεις των διαβητικών παίζουν σημαντικό ρόλο προς αυτήν την κατεύθυνση με την ανακατανομή του πελματικού φορτίου. Η μέθοδος της προσθετικής κατασκευής, επιτρέπει την παραγωγή κατά παραγγελία εσωτερικών σολών, πελματίων (footbeds) ή ορθωτικών που έχουν εξατομικευμένη γεωμετρία, καθώς και εξατομικευμένη σκληρότητα για να καλύπτει τις ανάγκες των ασθενών [4].

Ένα ακόμα πρόβλημα που έχει προκύψει με την μαζική παραγωγή υποδημάτων χαμηλού κόστους είναι ότι πολλές φορές χρησιμοποιούνται υλικά κατώτερης ποιότητας, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κακής ποιότητας παπουτσιών, με μειωμένη αντοχή. Κάτι τέτοιο οδηγεί στην ανάγκη για συχνή αντικατάστασή τους, δημιουργώντας έτσι αύξηση των απορριμμάτων. Με την εξατομίκευση των υποδημάτων δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιούνται υλικά καλύτερης ποιότητας, που ανταποκρίνονται στις ανάγκες του κάθε ατόμου ξεχωριστά, με στόχο να μπορεί να αξιοποιήσει κάθε ζεύγος υποδημάτων για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Επιπρόσθετα, με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και υλικών παράγονται και αξιοποιούνται υλικά τα οποία μπορούν να διασπαστούν φυσικά, χωρίς να προκαλούν επιβλαβή απορρίμματα.

Μία νέα τεχνολογία που συγκεντρώνει αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η κατασκευή προσθήκης υλικού (Additive Manufacturing) ή τριδιάστατη εκτύπωση (3D Printing), όπως είναι ευρύτερα γνωστή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, όπως είναι η δημιουργία υποδημάτων. Το προς εκτύπωση προϊόν σχεδιάζεται αρχικά σε ψηφιακή μορφή με τη χρήση υπολογιστή (CAD/CAM – Computer-Aided Design/Manufacturing). Το αρχείο μεταφέρεται σε κατάλληλη μορφή στη συσκευή εκτύπωσης και παράγεται το επιθυμητό προϊόν με την προσθήκη υλικού σε διαδοχικές στρώσεις. Το γεγονός ότι δεν απαιτούνται επιπρόσθετα μέσα για τον σχεδιασμό και την παραγωγή του προϊόντος απλοποιεί την διαδικασία κατασκευής και είναι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης [5]. Η τεχνολογία αυτή περιλαμβάνει ένα εύρος μεθόδων, όπως είναι οι Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA), Selective Laser Sintering (SLS), Digital Light Process (DPL), Material Jetting (MJ), Selective Laser Melting (SLM) κ.α., από τις οποίες επιλέγεται κάθε φορά η κατάλληλη για την εκάστοτε εκτύπωση.

Γενικά, τα στοιχεία που κάνουν την τεχνολογία αυτή ιδιαίτερα ελκυστική είναι η ενσωμάτωση των διαδικασιών σχεδιασμού και κατασκευής, η αποτελεσματική χρήση των υλικών με ελάχιστα απόβλητα και η δυνατότητα δημιουργίας εξατομικευμένων γεωμετριών με υψηλή διαστασιακή ακρίβεια και αποδεκτή επιφανειακή τραχύτητα. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ότι εξακολουθούν αρκετές φορές να προσφέρουν κατώτερες μηχανικές ιδιότητες λόγω του επιπρόσθετου πορώδους και της ανισοτροπίας που προκαλείται από τη διαδικασία κατασκευής σε στρώσεις. Δύο, ακόμα, παράγοντες που εμποδίζουν την επικράτηση των τεχνολογιών αυτών στην κατασκευή μεγάλου όγκου πλήρως λειτουργικών μηχανικών τεμαχίων είναι το κόστος των πρώτων υλών και των εκτυποτών, καθώς και ο αυξημένος χρόνος κατασκευής όταν πρόκειται για μεγάλο όγκο τεμαχίων [6], [7].

Μεταξύ των τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης, η μέθοδος Fused Deposition Modeling (FDM) χρησιμοποιείται αρκετά συχνά και σε ποικίλες εφαρμογές. Πρόκειται για μια διαδικασία εξώθησης υλικού, το οποίο βρίσκεται υπό την μορφή νήματος θερμοπλαστικών πολυμερών και είναι αποθηκευμένο σε μια δεξαμενή ή δοχείο. Το νήμα εξωθείται από το ακροφύσιο εκτύπωσης με εφαρμογή πίεσης σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, κατάλληλη για το εκάστοτε υλικό. Το υλικό προς εκτύπωση εξωθείται συνεχώς μέσω του ακροφυσίου εξώθησης του εκτυπωτή μέσω δύο κυλίνδρων που κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Το νήμα εξωθείται στην πλατφόρμα κατασκευής σε συνεχόμενες στρώσεις μέχρι να σχηματισθεί το τελικό αντικείμενο. Οι διαδρομές που ακολουθεί σε κάθε εκτύπωση το ακροφύσιο καθορίζονται από G-κώδικες που προκύπτουν από την επεξεργασία του αρχικού μοντέλου CAD με το κατάλληλο λογισμικό slicer.

Η μέθοδος FDM προσφέρει μεγάλη ευελιξία στην κατασκευή θερμοπλαστικών τεμαχίων με σύνθετες τρισδιάστατες γεωμετρίες σε λογικούς χρόνους κατασκευής, καθιστώντας την έτσι ως μια καλή εναλλακτική για εφαρμογές σε διαφορετικούς τομείς όπως ο αεροναυτικός, η αυτοκινητοβιομηχανία και οι βιοϊατρικές βιομηχανίες. Ωστόσο, παρά τις προόδους σε αυτόν τον τομέα, υπάρχει ακόμα περιορισμένη γνώση σχετικά με τις σχέσεις μεταξύ των συνθηκών της διαδικασίας παραγωγής και της τελικής μηχανικής απόδοσης αυτών των τεμαχίων, εμποδίζοντας περαιτέρω πρόοδο και αξιοποίηση αυτής της τεχνολογίας [6].

Μετά την εκτύπωση το τελικό τεμάχιο αποκτά διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες από αυτές που είχε το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του, και για τον προσδιορισμό τους απαιτούνται κατάλληλες μηχανικές δοκιμές. Οι ιδιότητες του τεμαχίου εξαρτώνται τόσο από τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του αρχικού υλικού, όσο και από τις παραμέτρους που θα επιλεγθούν για την εκτύπωση. Από τις πιο σημαντικές παραμέτρους είναι η ανάλυση στρώσης ή πάχος στρώσης (layer resolution), ο προσανατολισμός κατασκευής (build orientation), η θερμοκρασία, η ταχύτητα εκτύπωσης (printing speed), το μοτίβο πλήρωσης (infill pattern), το ποσοστό πλήρωσης (infill percentage), η γωνία του raster (raster angle) και το διάκενο αέρα (air gap) [8].

Τα νήματα που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη στους εκτυπωτές FDM είναι κατασκευασμένα από θερμοπλαστικά πολυμερή, το οποίο σημαίνει ότι μπορούν να μαλακώσουν και να λιώσουν όταν θερμανθούν, και στη συνέχεια να ανακτήσουν τις ιδιότητες τους αφού ψυχθούν. Η επιλογή του υλικού εξαρτάται από την χρήση για την οποία προορίζεται το τελικό προϊόν, το οποίο μπορεί να είναι από μηχανικό πρωτότυπο μέχρι ένα εξάρτημα υψηλής απόδοσης. Τα πιο συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται είναι Poly-lactic Acid (PLA), Acrylonitrile butadiene styrene (ABS), Polyethylene terephthalate (PET), Nylon/Polyamide (P.A.), Polycarbonate (P.C.), Polyetherimide (PEI), Polyether-ether-ketone (PEEK) και Thermoplastic polyurethane (TPU) [8].

Η εργασία αυτή έχει ως στόχο την κατασκευή μίας επίπεδης γυναικείας σόλας παπουτσιού με την μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης FDM. Το υλικό που επιλέχθηκε είναι το TPU και οι παράμετροι διαδικασίας που επιλέχθηκαν να μελετηθούν είναι το ποσοστό πλήρωσης και το μοτίβο πλήρωσης. Για την μελέτη των υλικών εκτυπώθηκαν πέντε δοκίμια, τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμή συμπίεσης. Η μοντελοποίηση της σόλας έγινε στο Solidworks, όπου χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης που προέκυψαν από τις δοκιμές για τον κάθε συνδυασμό παραμέτρων. Τα μοντέλα δοκιμάστηκαν σε συμπίεση και κάμψη στο Solidworks και με βάση τα αποτελέσματα επιλέχθηκε ο συνδυασμός παραμέτρων διεργασίας που προτείνεται για την κατασκευή της σόλας.

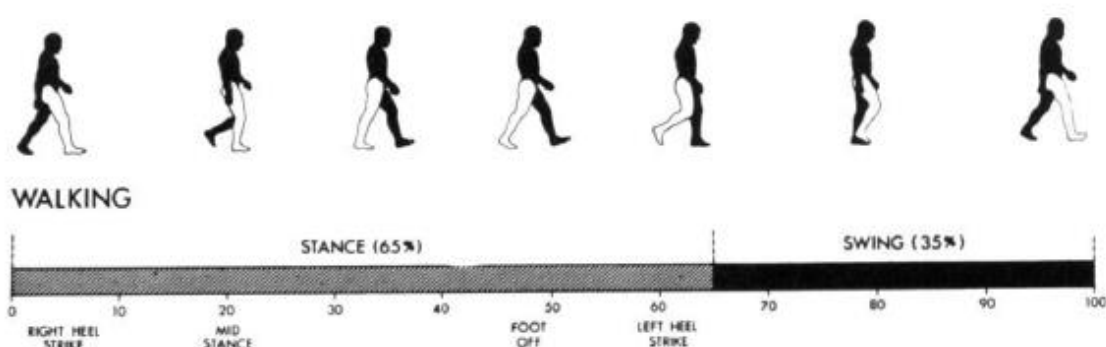
2 ΘΕΩΡΙΑ

2.1 ΚΥΚΛΟΣ ΒΑΔΙΣΗΣ

2.1.1 ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΒΑΔΙΣΗΣ

Οι C. W. Chan και A. Rudins [9] στο άρθρο τους περιγράφουν τις φάσεις ενός κύκλου βάδισης, καθώς και κάποια χαρακτηριστικά του φυσιολογικού βαδίσματος. Σύμφωνα με το άρθρο η ταχύτητα του κανονικού περπατήματος κυμαίνεται μεταξύ 3.6 με 4.5 km/h. Σε αυτήν την ταχύτητα, ένα άτομο κάνει κατά μέσο όρο περίπου 60 κύκλους/μίν και αφιερώνει το 60% κάθε κύκλου στη φάση στάσης και το 40% στη φάση αιώρησης. Ο κύκλος από το χτύπημα της φτέρνας στο ένα πόδι στο επόμενο χτύπημα της φτέρνας στο ίδιο πόδι ισούται με το 100% του συνολικού κύκλου βάδισης. Η περίοδος από 0 έως 15% είναι η φάση πρόσκρουσης της φτέρνας (heel strike), από 15 έως 30% είναι η φάση μέσης στάσης (midstance), από 30 έως 45% είναι η φάση ώθησης (push-off), και από 40 έως 60% είναι η επιτάχυνση του αιωρούμενου ποδιού. Στο τέλος της φάσης στάσης του ενός ποδιού και της αρχής της φάσης στάσης του άλλου, μία περίοδος υποστήριξης και από τα δύο άκρα συνεχίζεται για περίπου 11% του κύκλου βάδισης.

Στην Εικόνα 1 φαίνεται μία σχηματική αναπαράσταση των φάσεων του κύκλου βάδισης.

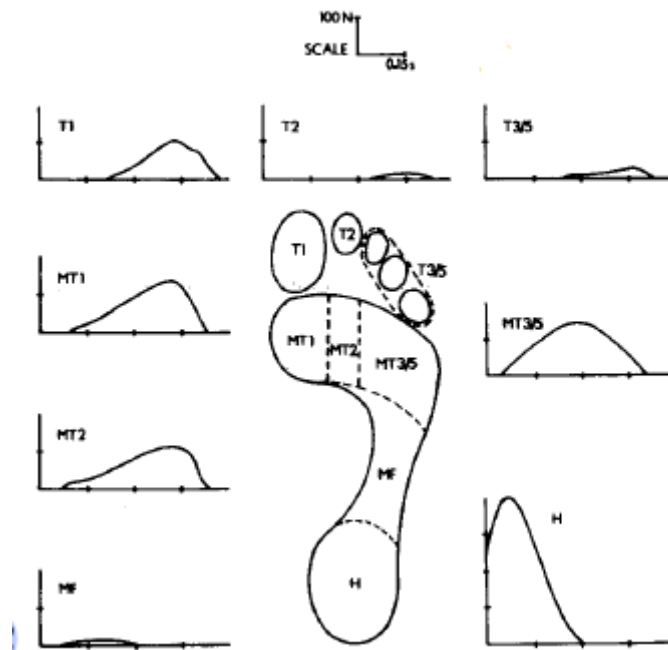


Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση των φάσεων του κύκλου βάδισης. Η εικόνα προέρχεται από το [9].

Η παραπάνω ανάλυση επιβεναιώνεται και πειραματικά από τους W.C. Hutton και M. Dhanendran [3], οι οποίοι μελέτησαν πώς αναπτύσσονται οι δυνάμεις στις περιοχές του ποδιού από την στιγμή που η φτέρνα ακουμά στο έδαφος (heel strike) μέχρι την στιγμή που τα δάχτυλα του ποδιού χάνουν την επαφή (από 0 sec έως 0.6 sec). Στον Πίνακα 1 αναγράφονται οι περιοχές στις οποίες χωρίζεται στο πόδι σε αυτή τη μελέτη και στην Εικόνα 2 φαίνονται σχηματικά οι οκτώ περιοχές στις οποίες είναι χωρισμένο το πόδι, καθώς και το διάγραμμα της δύναμης που ασκείται σε κάθε μία από τις οκτώ περιοχές συναρτήσει του χρόνου.

Πίνακας 1: Περιοχές στις οποίες χωρίζεται το πόδι.

Σύμβολο	Τμήμα ποδιού
T ₁	Πρώτο Δάχτυλο (First Toe)
T ₂	Δεύτερο Δάχτυλο (Second Toe)
T ₃₅	Τρίτο, Τέταρτο και Πέμπτο Δάχτυλο (Third, Fourth & Fifth Toe)
MT ₁	Πρώτο Μετατάρσιο (First Metatarsal)
MT ₂	Δεύτερο Μετατάρσιο (Second Metatarsal)
MT ₃₅	Τρίτο, Τέταρτο και Πέμπτο Μετατάρσιο (Third, Fourth & Fifth Metatarsal)
MF	Μέσο του ποδιού (Midfoot)
H	Φτεรνα (Heel)



Εικόνα 2: Διαγράμματα των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε κάθε μία από τις οκτώ περιοχές του ποδιού σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η εικόνα προέρχεται από το [3].

Η κλίμακα των διαγραμμάτων δύναμης-χρόνου είναι για την δύναμη 100 N και για τον χρόνο 0.15 sec. Από τα διαγράμματα προκύπτουν οι ακόλουθοι πίνακες για κάθε μία από τις περιοχές του ποδιού. Στους πίνακες η πρώτη τιμή αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή που φαίνεται ότι αρχίζει να ασκείται δύναμη στην εκάστοτε περιοχή και η τελική τιμή αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή που η δύναμη μηδενίζεται. Επίσης, αναγράφονται οι τιμές που αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές 0.15, 0.3, 0.45 sec (όταν η δύναμη είναι μεγαλύτερη του μηδενός), καθώς και η χρονική στιγμή με την μέγιστη τιμή δύναμης (με bold αριθμούς).

Πίνακας 2: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή Η.

H	Χρονική στιγμή (sec)			
	0	0.075	0.15	0.3
Δύναμη (N)	250	400	300	0

Πίνακας 3: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή MF.

MF	Χρονική στιγμή (sec)			
	0.075	0.15	0.2	0.3
Δύναμη (N)	0	10	20	0

Πίνακας 4: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή MT₁.

MT ₁	Χρονική στιγμή (sec)					
	0.1	0.15	0.3	0.42	0.45	0.525
Δύναμη (N)	0	30	100	140	120	0

Πίνακας 5: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή MT₂.

MT ₂	Χρονική στιγμή (sec)				
	0.075	0.15	0.3	0.45	0.525
Δύναμη (N)	0	30	70	120	0

Πίνακας 6: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή MT₃₄.

MT ₃₅	Χρονική στιγμή (sec)				
	0.05	0.15	0.3	0.45	0.5
Δύναμη (N)	0	80	150	50	0

Πίνακας 7: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή T₁.

T ₁	Χρονική στιγμή (sec)				
	0.225	0.3	0.42	0.45	0.57
Δύναμη (N)	0	40	100	90	0

Πίνακας 8: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή T₂.

T ₂	Χρονική στιγμή (sec)		
	0.35	0.45	0.525
Δύναμη (N)	0	20	0

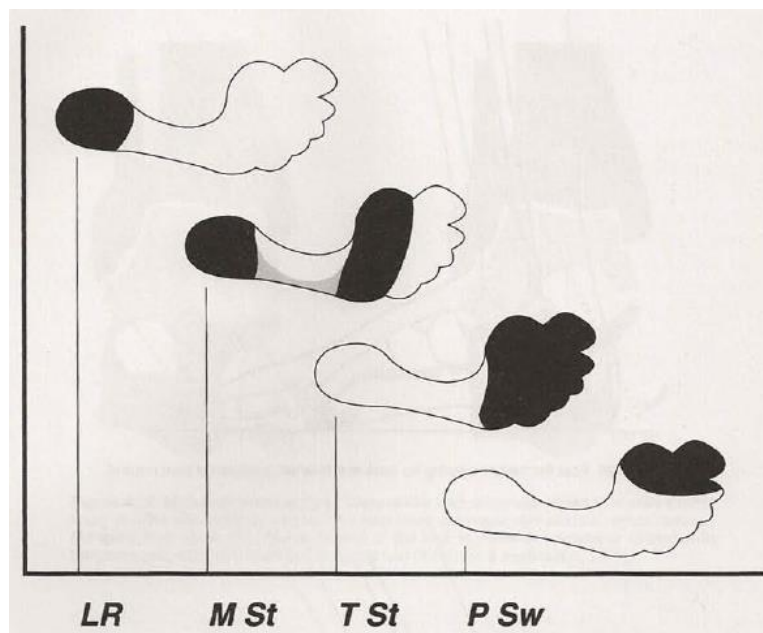
Πίνακας 9: Διάγραμμα δύναμης-χρόνου για την περιοχή T₃₅.

T ₃₅	Χρονική στιγμή (sec)			
	0.25	0.3	0.45	0.57
Δύναμη (N)	0	10	30	0

Με βάση όσα προηγήθηκαν φαίνεται πως οι μεγαλύτερες δυνάμεις αναπτύσσονται στην φτέρνα (H), στις μεταταρσικές περιοχές (MT_{1,3,4}) και το μεγάλο δάχτυλο (T₁).

2.1.2 ΜΟΤΙΒΟ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΟΥ ΠΟΔΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΑΦΗ ΜΕ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Σύμφωνα με τον J. Perry στο κεφάλαιο 4 του βιβλίου του αναπτύσσονται τα μοτίβο υποστήριξης του ποδιού κατά την επαφή του με το πάτωμα/έδαφος. Σύμφωνα με το βιβλίο οι χρονικές διαφορές της επαφής της φτέρνας και του μπροστινού τμήματος του ποδιού με το πάτωμα δημιουργούν τρία μοτίβο στήριξης των ποδιών. Αυτά συμβαίνουν συνήθως με την ακόλουθη αλληλουχία: φτέρνα, επίπεδο πόδι (φτέρνα και μπροστινό τμήμα του ποδιού) και μπροστινό τμήμα του ποδιού. Η τελευταία περιοχή του μπροστινού τμήματος του ποδιού που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος είναι το πρώτο μετατάρσιο καθώς το σωματικό βάρος μεταφέρεται στο άλλο πόδι. Η αλληλουχία αυτή φαίνεται στην Εικόνα 3. Ο χρόνος επαφής των δαχτύλων ποικίλλει. Υπάρχουν, επίσης, διαφορές στον τρόπο φόρτισης του μπροστινού τμήματος του ποδιού κατά την διάρκεια της περιόδου του επίπεδου ποδιού. Η ισοδύναμη λατινική ορολογία είναι calcaneograde (μόνο φτέρνα), plantigrade (επίπεδο), digigrade (μπροστινό τμήμα του ποδιού) και unguligrade (άκρες των δακτύλων του ποδιού).



Εικόνα 3: Αλληλουχία των περιοχών υποστήριξης του ποδιού κατά τη στάση. Μόνο η φτέρνα στην απόκριση φόρτισης (LRQ Loading Response). Επίπεδο πόδι στο μέσο της στάσης (M St: Mid Stance). Μπροστινό τμήμα του ποδιού και δάχτυλα στην τελική στάση (T St: Terminal Stance). Μεσαίο τμήμα του μπροστινού τμήματος του ποδιού πριν την αιώρηση (P Sw: Pre-Swing). Η εικόνα προέρχεται από το άρθρο [10].

Υποστήριξη Φτέρνας (Calcaneograde)

Η περίοδος στάσης αρχίζει συνήθως με την επαφή της φτέρνας με το πάτωμα. Η ταχύτητα αυτής της δράσης οδήγησε στον όρο χτύπημα φτέρνας. Μετά την επαφή με το πάτωμα, η φτέρνα συνεχίζει να είναι η μοναδική πηγή υποστήριξης για το πρώτο 6% με 10% του κύκλου βάρδισης.

Υποστήριξη Επίπεδου Ποδιού (Plantigrade)

Η επαφή του μπροστινού τμήματος του ποδιού τερματίζει την περίοδο υποστήριξης μόνο με τη φτέρνα και εισάγει τη στάση επίπεδου ποδιού (plantigrade). Αυτό συνεχίζει για το 20%, περίπου, του κύκλου βάρδισης. Ο τρόπος επαφής του μπροστινού τμήματος του ποδιού ποικίλλει ανάλογα με το άτομο.

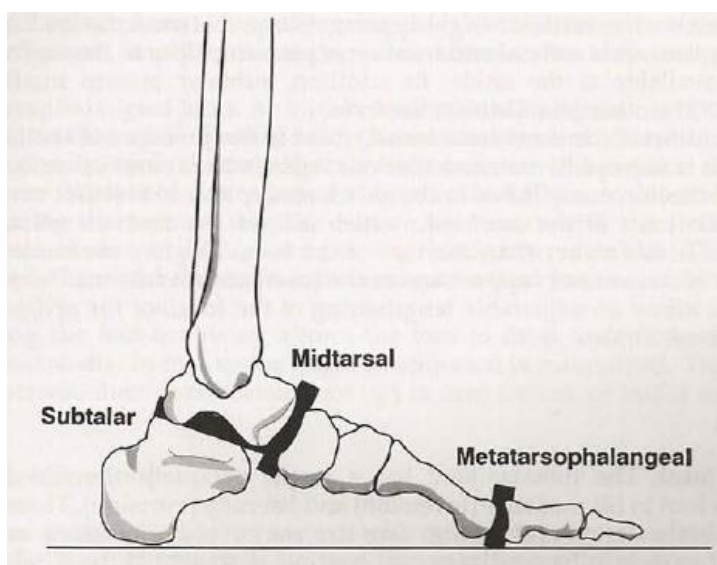
Υποστήριξη Μπροστινού Τμήματος του Ποδιού (Digigrade)

Η έγερση της φτέρνας αλλάζει τον τρόπο στήριξης του ποδιού από την επίπεδη στο μπροστινό μέρος, με την εμπλοκή και των πέντε μεταταρσικών κεφαλών. Αυτό συμβαίνει στο σημείο 30% του κύκλου βάρδισης και παραμένει μέχρι το τέλος της στάσης.

Η επαφή των δακτύλων με το δάπεδο μεταβάλλεται αρκετά. Ο Scranton εντόπισε αρκετά νωρίς την έναρξη, ενώ ο Barnett βρήκε την έναρξη της εμπλοκής των δακτύλων μετά από απομονωμένη υποστήριξη του μπροστινού τμήματος του ποδιού κατά 10% της περιόδου στάσης. Είναι σύνηθες το δάχτυλο να είναι το τελευταίο τμήμα του ποδιού που σηκώνεται από το δάπεδο στο τέλος της στάσης. Ο Bojsen το αποκαλεί αυτό ως η unguigrade φάση της βάρδισης. Η ταυτόχρονη αποχώρηση του πρώτου μεταταρσίου και του δακτύλου είναι, επίσης, ένα φυσιολογικό εύρημα [10].

2.1.3 ΑΡΘΡΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΟΔΙΟΥ

Σύμφωνα με τον J. Perry στο Κεφάλαιο 4 του βιβλίου του το πόδι περιλαμβάνει τρεις βασικές αρθρώσεις. Αυτές είναι η άρθρωση κάτω από τον αστράγαλο (subtalar), η μεσοτάρσια άρθρωση (midtarsal) και η μεταταρσοφαλάγγια άρθρωση (metatarsophalangeal). Η άρθρωση που είναι σημαντική για αυτή την εργασία και θα αναλυθεί εδώ είναι η τελευταία. Στην Εικόνα 4 φαίνονται οι τρεις αρθρώσεις στο πόδι (μαύρες περιοχές) που έχουν μεγάλη λειτουργική σημασία κατά το περπάτημα.

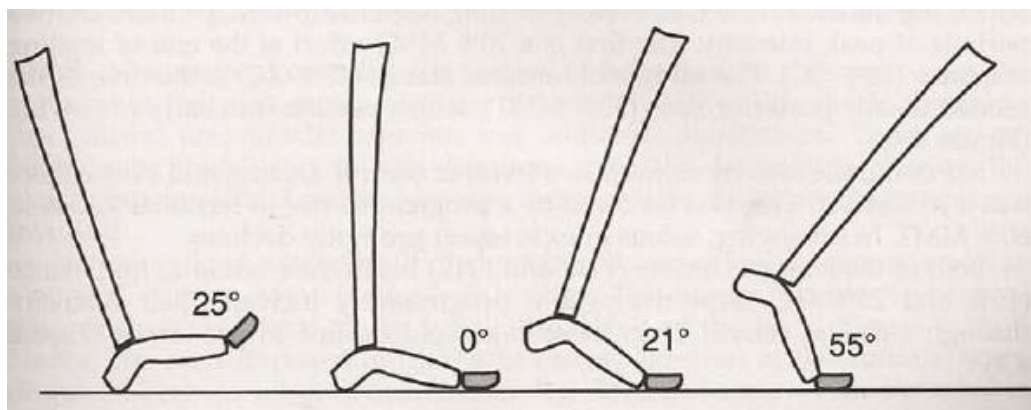


Εικόνα 4: Οι τρεις αρθρώσεις του ποδιού με μεγάλη λειτουργική σημασία κατά το περπάτημα. Η εικόνα προέρχεται από το [10].

Μεταταρσοφαλάγγια άρθρωση (Metatarsophalangeal joint)

Κατά την αρχική επαφή οι MP αρθρώσεις βρίσκονται σε 25° κάμψη προς τα πίσω (dorsiflexion) με τα δάχτυλα του ποδιού προς τα πάνω. Μετά την επαφή του μπροστινού τμήματος του ποδιού στο τέλος της απόκρισης φόρτισης, τα δάχτυλα του ποδιού πέφτουν προς την ουδέτερη ευθυγράμμιση και διατηρούν αυτήν την θέση καθ' όλη τη διάρκεια της μέσης στάσης (mid stance). Με την άνοδο της φτέρνας στην τελική στάση (terminal stance), οι MP αρθρώσεις κάμπτονται προς τα πίσω (dorsiflex) κατά 21°. Κατά τη διάρκεια αυτής της κίνησης τα δάχτυλα παραμένουν σε επαφή με το έδαφος, και οι μεταταρσικοί άξονες σχηματίζουν γωνία προς τα πάνω καθώς το οπίσθιο πόδι

ανυψώνεται. Αυτή η κίνηση συνεχώς αυξάνεται καθ' όλη την περίοδο πριν από την αιώρηση (pre-swing) σε μία τελική θέση επέκτασης 55°, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Η κίνηση των MP κατά τη στάση. Το σκιασμένο δάχτυλο δείχνει την περιοχή κίνησης. Η εικόνα προέρχεται από το [10].

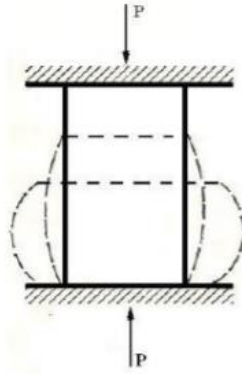
Η ανύψωση του ποδιού για αιώρηση επιτρέπει στα δάχτυλα του ποδιού να πέσουν προς τη γραμμή των μεταταρσικών αξόνων. Στην μέση της αιώρησης διατηρείται ελαφριά κάμψη προς τα πίσω (dorsiflexion). Στην συνέχεια, οι MP αρθρώσεις αυξάνουν την κάμψη προς τα πίσω (dorsiflexion) (δάχτυλα ποδιού προς τα πάνω) σε προετοιμασία για την αρχική επαφή [10].

2.1.4 ΠΙΘΑΝΟ ΣΗΜΕΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΟΛΑΣ

Όσον αφορά την καταπόνηση που δέχεται μία σόλα κατά τη διάρκεια ενός κύκλου βάρδισης συμπεραίνεται πως το πιο πιθανό σημείο αστοχίας είναι στις μεταταρσικές περιοχές κοντά στην μεταταρσοφαλάγγια άρθρωση. Αυτό προκύπτει από το ότι κατά την περίοδο πριν την αιώρηση το μπροστινό τμήμα του ποδιού φέρει όλο το βάρος του σώματος για περίπου το 30% της φάσης στάσης, με αυξανόμενη γωνία των MP που φτάνει την μέγιστη τιμή των 55°, καταπονώντας τη σόλα σε κάμψη.

2.2 ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ

Στο πείραμα της μονοαξονικής θλίψης (compression test) το δοκίμιο φορτίζεται υπό την επίδραση δύο δυνάμεων ίσου μέτρου, ίδιας διεύθυνσης και αντίθετης φοράς, με στόχο την συμπίεση του υλικού. Όταν η επιβαλλόμενη τάση είναι μικρότερη από την τάση ελαστικότητας (young stress) που αντιστοιχεί στο όριο ελαστικότητας του υλικού, το υλικό παραμορφώνεται ελαστικά, υπό θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η δοκιμή θλίψης φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 6.



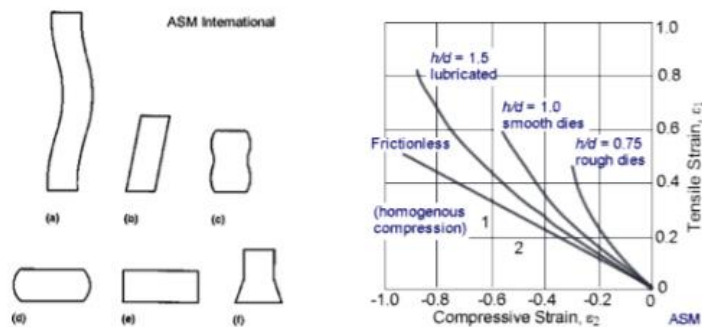
Εικόνα 6: Σχηματική παράσταση πειράματος μονοαξονικής θλίψης. Η εικόνα προέρχεται από το [11].

Στην περίπτωση ελαστικής παραμόρφωσης (βράχυνσης) και μέχρι το όριο αναλογίας του διαγράμματος σ - ϵ , ισχύει ο νόμος του Hooke για τις ορθές μηχανικές τάσεις.

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

Οι παραδοχές ισχύος του νόμου του Hooke για τις ορθές μηχανικές τάσεις μπορούν να συμπυκνωθούν στις ακόλουθες:

- Η επιβαλλόμενη δύναμη δρα στη διεύθυνση του κύριου άξονα της ράβδου και το σημείο εφαρμογής της είναι το κέντρο βάρους της διατομής.
- Ο κύριος άξονας της ράβδου είναι απολύτως ευθύγραμμος.
- Οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στη διατομή.
- Στα θλιβόμενα μέρη δεν υπάρχει κίνδυνος λυγισμού.
- Όλες οι κατά μήκος ίνες της ράβδου επιμηκύνονται ή συμπιέζονται ακριβώς το ίδιο.
- Οι διατομές που αρχικά είναι επίπεδες και κάθετες στον άξονα της ράβδου, παραμένουν έτσι και μετά την παραμόρφωση.
- Οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις είναι πάντα μικρότερες από την τάση αναλογίας σ_A του υλικού [11]



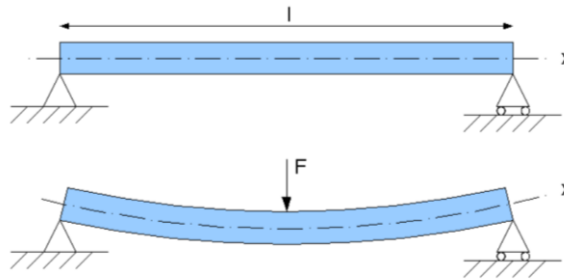
Εικόνα 7: Σχηματική παράσταση τύπων παραμόρφωσης υπό θλιπτικές τάσεις καθώς και συγκριτικού διαγράμματος σ - ϵ για διάφορους τύπους l/d . (a) Buckling, when $L/D > 5$. (B) Shearing, when $L/D > 2.5$. (c) Double barreling, when $L/D > 2.0$ and friction is present at the contact surface. (d) Barreling, when $L/D < 2.0$ and friction is present at the contact surfaces. (e) Homogenous compression, when $L/D < 2.0$ and no friction is present at the contact surfaces. (f) Compressive instability due to work-softening material. Η εικόνα προέρχεται από το [11]

2.3 ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ

Η μηχανική δοκιμή της καθαρής κάμψης ευθύγραμμης συμμετρικής δοκού αναφέρεται στην καταπόνηση της δοκού μόνο από καμπτικές ροπές, με τελικό αποτέλεσμα την κάμψη της και την ανάπτυξη ορθών μηχανικών τάσεων, οι οποίες δεν οφείλονται σε αξονικά φορτία, αλλά σε καμπτικές ροπές, γι' αυτό και καλούνται καμπτικές τάσεις ή ορθές τάσεις λόγω κάμψης.

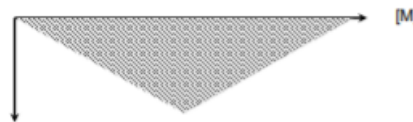
Συνοπτικά, οι συνθήκες που πρέπει να πληρούνται ώστε να αναπτυχθούν συνθήκες καθαρής κάμψης σε μία δοκό είναι οι ακόλουθες:

$$\Sigma F_x = 0, \Sigma F_y = 0, \Sigma M_k \neq 0, \Sigma M_t = 0$$



Εικόνα 8: Σχηματική παράσταση πειράματος καθαρής κάμψης ευθύγραμμης συμμετρικής δοκού.

Στην Εικόνα 8 απεικονίζεται η δοκιμή της κάμψης τριών σημείων (3 point bending test), κατά την οποία η δοκός στηρίζεται αμφιέριστα ή ως αμφιπροέχουσα και φέρει στο μέσον της σημειακό φορτίο P. Κατά την ανωτέρω φόρτιση και από την επίλυση των στερεοστατικών εξισώσεων ισορροπίας καθώς και από τον προσδιορισμό και τον σχεδιασμό του διαγράμματος καμπτικών ροπών, προκύπτουν τα ακόλουθα:



Εικόνα 9: Αναπτυσσόμενες ροπές κατά την καθαρή κάμψη ευθύγραμμης συμμετρικής δοκού. Η εικόνα προέρχεται από το [12].

$$M_{max} = \frac{P \cdot L}{4}$$

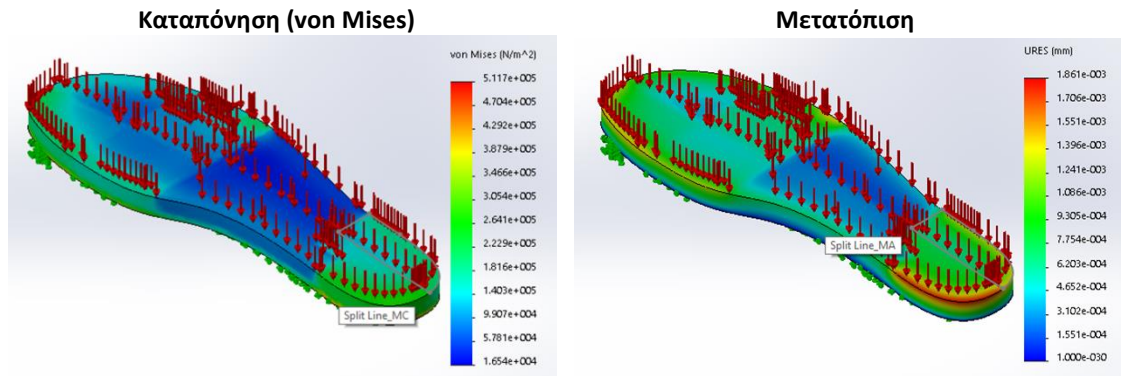
Οι βασικές παραδοχές της καθαρής κάμψης είναι οι ακόλουθες:

- Το ύψος h της διατομής της δοκού είναι μικρότερο από το μισό του ανοίγματος A ($h < A/2$).
- Υπάρχει τουλάχιστον ένας άξονας συμμετρίας.
- Ο ουδέτερος άξονας της δοκού (διαμήκης), ο οποίος διέρχεται από τα κέντρα βάρους των διατομών, είναι ευθύγραμμος, όταν η δοκός είναι αφόρτιστη.
- Τα εξωτερικά φορτία είναι κάθετα στον άξονα της δοκού και βρίσκονται στο επίπεδο φόρτισης ή καμπτόμενο επίπεδο, που συμπίπτει με το επίπεδο συμμετρίας της δοκού (διαφορετικά θα έχουμε σύνθετη κατάσταση).
- Η δοκός είναι από υλικό με ίδιο μέτρο ελαστικότητας (E) σε εφελκυσμό και θλίψη και οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μικρότερες του ορίου αναλογίας του υλικού, άρα ισχύει ο Νόμος του Hooke.
- Οι διατομές (κάθετες τομές στον άξονα είναι επίπεδες, όταν η δοκός είναι απαραμόρφωτη και παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον άξονα, ακόμα κι όταν αυτός καμπυλώνεται μετά τη φόρτιση (υπόθεση των Bernoulli-Navier) [12]

3 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

3.1 ΥΛΙΚΟ ΝΗΜΑΤΟΣ

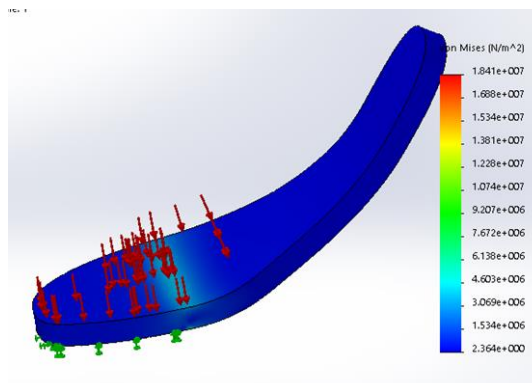
Αρχικά ως υλικό επιλέχθηκε το ABS (Acrylonitrine butadiene styrene). Πρόκειται για ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά για τρισδιάστατη εκτύπωση με την μέθοδο FDM, είναι οικονομικό, έχει καλή αντοχή σε κρούση, καλή συγκολλησιμότητα μεταξύ των στρώσεων κατά την εκτύπωση, καλή αντοχή στην καταπόνηση και την τριβή και τα τελικά προϊόντα έχουν καλή διαστασιακή ακρίβεια. Αυτό που δεν έγινε αντιληπτό από την αρχή είναι το γεγονός ότι είναι ένα εξαιρετικά δύσκαμπτο υλικό. Μία σόλα κατασκευασμένη με ABS μπορεί να αντέξει τα θλιπτικά φορτία που δέχεται μία σόλα παπουτσιού χωρίς να παραμορφωθεί, όμως δεν μπορεί να καμφθεί έτσι ώστε να ακολουθήσει την κίνηση του ποδιού κατά το βάδισμα. Αυτό επιβεβαιώθηκε από μια αρχική δοκιμή που έγινε στο Solidworks, όπου μελετήθηκε σε θλίψη και κάμψη μία σόλα μήκους 225mm και ύψους 10mm, για φορτία που προκύπτουν από άτομο βάρους 60kg.



Εικόνα 10: Καταπόνηση σόλας με ABS σε θλίψη.

Η μέγιστη τιμή τάσης που αναπτύσσεται είναι $\sigma = 0.51 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, η οποία είναι αρκετά μικρότερη από την αντοχή σε εφελκυσμό $\sigma = 30 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ του υλικού. Επίσης, φαίνεται πως η μέγιστη τιμή της μετατόπισης είναι αμελητέα.

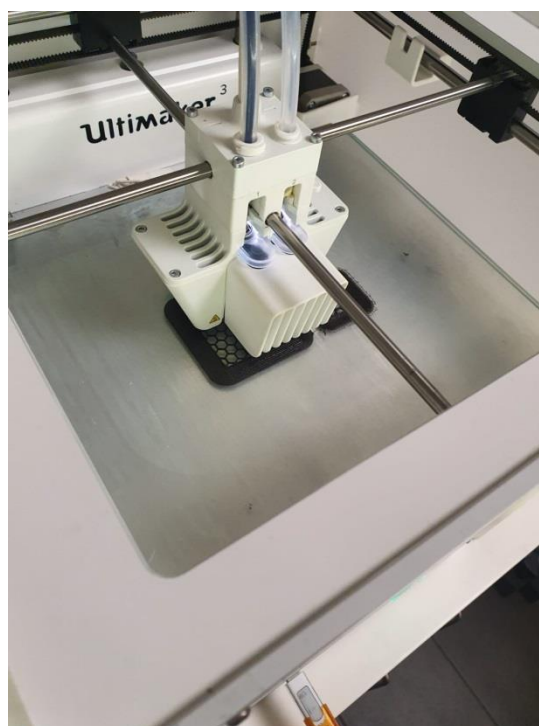
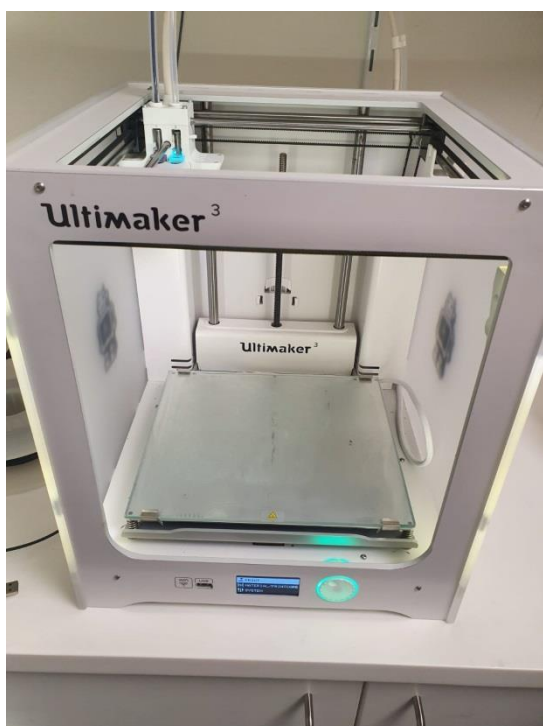
Στην συνέχεια έγινε δοκιμή σε κάμψη περίπου 55° . Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνεται ότι η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται είναι $18.41 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ στο σημείο που σταματάει η στήριξη, στην κάτω επιφάνεια της σόλας. Η τάση αυτή είναι αρκετά μεγάλη, καθώς το όριο θραύσης είναι $30 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$.



Εικόνα 11: Καταπόνηση σόλας με ABS σε κάμψη.

Με βάση αυτά τα αποτελέσματα αποφασίσθηκε να γίνει χρήση αρκετά πιο εύκαμπτου υλικού. Για τον λόγο αυτό αναζητήθηκαν νήματα που ανήκουν στην κατηγορία των TPU. Το υλικό του νήματος που χρησιμοποιήθηκε είναι το Ultimaker TPU 95A της εταιρίας Ultimaker και η μηχανή για FDM εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι η Ultimaker 3. Το υλικό TPU (thermoplastic polyurethane) είναι μια κατηγορία υλικών που ανήκει στην τάξη των TPE (thermoplastic elastomers), το οποίο είναι αρκετά δημοφιλές για την τρισδιάστατη εκτύπωση καθώς η σκληρότητα του μπορεί να προσαρμοστεί σε μεγάλο βαθμό. Η σκληρότητα και το πόσο εύκαμπτο είναι το υλικό φαίνεται από την τιμή 95A. Η τιμή 95A είναι η τιμή της σκληρότητας του υλικού στην Shore Hardness Scale, όπου η τιμή Shore A αντιστοιχεί στα πιο εύκαμπτα νήματα και η τιμή 95 αντιστοιχεί στα σκληρά νήματα. Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό των εύκαμπτων νημάτων είναι ότι η επιμήκυνση σε θραύση είναι σημαντικά μεγαλύτερη από ότι άλλων υλικών, καθιστώντας τα πιο ανθεκτικά στην παραμόρφωση κατά την έκτασή τους.

Σύμφωνα με την εταιρία κατασκευής του πρόκειται για ένα ελαστικό υλικό, κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν ανθεκτικότητα, ευελιξία και ικανότητες αντίστοιχες του καουτσούκ και του πλαστικού. Παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στην φθορά, ευελιξία όπως του καουτσούκ και αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή για βιομηχανικές επιστρώσεις ή πρωτότυπα καταναλωτικών προϊόντων. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό του είναι ότι εκτυπώνεται πιο εύκολα και γρήγορα χωρίς να επηρεάζεται αρνητικά η σύνδεση μεταξύ των στρώσεων, σε αντίθεση με άλλα εύκαμπτα νήματα που είναι πιο δύσκολο να εκτυπωθούν. Δεν είναι επιρρεπές σε στρέβλωση ή αποκόλληση και εκτυπώνεται αξιόπιστα χωρίς πρόσθετα εξαρτήματα. Τέλος, προτείνεται η σχετική πυκνότητα να είναι μικρότερη του 50% για την αποφυγή πρόσληψης υγρασίας και για να αποφευχθεί η διαρροή του υλικού κατά την εκτύπωση. Στον Πίνακα 10 παρατίθενται μερικά από τα χαρακτηριστικά του νήματος που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 12: Εκτυπωτής Ultimaker 3.

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά νήματος Ultimaker TPU 95A.

Όνομα υλικού	TPU95A Black
Κατασκευαστής	Ultimaker
Διάμετρος νήματος (mm)	2.85
Βάρος νήματος ανά τεμάχιο (gram)	750
Θερμοκρασία εκτύπωσης (°C)	225-240
Σχετική υγρασία (%)	<50

3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το λογισμικό slicer που χρησιμοποιήθηκε είναι το Ultimaker Cura 4.11. Τα δοκίμια σχεδιάσθηκαν στο Solidworks και εισήχθησαν στο Cura ως αρχεία STL. Οι παράμετροι κατεργασίας που διατηρήθηκαν σταθεροί για όλα τα δοκίμια φαίνονται στον Πίνακα 11.

Πίνακας 11: Παράμετροι διεργασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης που παραμένουν σταθεροί.

Παράμετροι διεργασίας	Τιμές
Layer height (mm)	0.2
Wall Thickness (mm)	0.0
Top/Bottom Thickness (mm)	0.0
Printing Temperature (°C)	235.0
Build Plate Temperature (°C)	60
Print Speed (mm/s)	15.0
Fan Speed (%)	20.0

Με τις μεθόδους προσθετικής κατασκευής δίνεται η δυνατότητα στους κατασκευαστές να προσαρμόζουν τις ιδιότητες των υλικών μέσω του σχεδιασμού της μικροδομής του υλικού. Οι ιδιότητες του υλικού του τελικού τυπωμένου τεμαχίου διαφέρουν από τις αρχικές ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιείται για την εκτύπωση, λόγω αλλαγών στην μικροδομή του που λαμβάνουν χώρα κατά την εναπόθεση του υλικού σε στρώσεις [13]. Η μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης FDM δίνει την δυνατότητα μεταβολής των ιδιοτήτων των τελικών τεμαχίων μέσω της αλλαγής των παραμέτρων κατεργασίας, όπως είναι το πάχος στρώσης (layer resolution), η ταχύτητα εκτύπωσης (printing speed), το μοτίβο πλήρωσης (infill pattern), το ποσοστό πλήρωσης (infill percentage/density) κ.α. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε να μελετηθούν το μοτίβο πλήρωσης και το ποσοστό πλήρωσης, διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους κατεργασίας σταθερές. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι ο χειριστής μπορεί να ελέγξει το πάχος των εξωτερικών τοιχωμάτων και το εσωτερικό του τεμαχίου.

3.2.1 ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΛΗΡΩΣΗΣ

Τα τεμάχια που εκτυπώνονται με την μέθοδο FDM δεν είναι πάντα στέρεα, αλλά μπορούν να παραχθούν με διάφορα ποσοστά κοίλου έτσι ώστε να βελτιωθούν παράγοντες όπως ο χρόνος εκτύπωσης, το βάρος, το κόστος και οι μηχανικές ιδιότητες των τεμαχίων. Αυτό επιτυγχάνεται με την πυκνότητα πλήρωσης. Η πυκνότητα πλήρωσης είναι το ποσοστό του χώρου του τεμαχίου που καταλαμβάνει το μοτίβο με το οποίο κατασκευάζεται το εσωτερικό του. Στο λογισμικό CURA το ποσοστό πλήρωσης 0% αντιστοιχεί σε κενό τεμάχιο και το 100% σε τελείως στερεό. Με την αύξηση της πυκνότητας πλήρωσης παρατηρείται αύξηση του βάρους του τεμαχίου, καταναλώνεται περισσότερο υλικό με αποτέλεσμα να αυξάνεται το τελικό κόστος, αυξάνεται ο χρόνος εκτύπωσης, ενώ βελτιώνεται η αντοχή του μέχρι ενός σημείου. Συνήθως, χρησιμοποιείται πυκνότητα πλήρωσης

από 0-20% για μη λειτουργικά τεμάχια ή τεμάχια στα οποία δεν επιβάλλεται φορτίο, από 20-40% για τεμάχια στα οποία ασκείται μερικό φορτίο και προορίζονται για ελαφριά χρήση, και από 40-100% για τεμάχια τα οποία δέχονται σημαντικά φορτία και η αντοχή τους είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά τους. Όσον αφορά τα εύκαμπτα υλικά, όπως είναι στην συγκεκριμένη περίπτωση το TPU, θεωρητικά μπορεί να εφαρμοστεί οποιοδήποτε ποσοστό πλήρωσης, αλλά θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό αυξάνεται η δυσκαμψία του τεμαχίου. Τα ποσοστά πλήρωσης που επιλέχθηκαν για αυτήν την εργασία είναι ανάμεσα στο 10 και 50%.

Η μελέτη των Kui Yang et al. είχε ως στόχο την συστηματική διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων πλήρωσης (ποσοστό και μοτίβο) και του ρυθμού καταπόνησης σε εφελκυσμό στις συμπεριφορές ελαστοπλαστικής παραμόρφωσης και αστοχίας των σύνθετων δομών με βάση το πολυαμίδιο, που δημιουργήθηκαν με την μέθοδο FDM. Τα μοτίβο πλήρωσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το hexagonal (εξαγωνικό) και το triangular (τριγωνικό). Οι πυκνότητες πλήρωσης που επιλέχθηκαν ήταν 29%, 39%, και 49%, καθώς βρίσκονται εντός του εύρους των τιμών 20-50% που χρησιμοποιείται για ελαφριές κατασκευές σαν και αυτές της μελέτης. Τα τεμάχια με εξαγωνικές μονάδες παρουσίασαν υψηλότερο συντελεστή εφελκυσμού και αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά μικρότερη επιμήκυνση σε θραύση από εκείνα με τις τριγωνικές μονάδες, σε δεδομένη πυκνότητα πλήρωσης. Το μοτίβο πλήρωσης ήταν ένας από τους καθοριστικούς παράγοντες για τους τρόπους παραμόρφωσης και αστοχίας κυρίως λόγω των ελαττωμάτων που προκαλεί η διαδρομή εκτύπωσης. Στις σύνθετες κατασκευές με τριγωνικές μονάδες, η αστοχία ξεκίνησε από έναν εσωτερικό κόμβο και τότε διαδόθηκε σε άλλους εσωτερικούς κόμβους. Η έναρξη της αστοχίας του εσωτερικού κόμβου μπορεί να αποδοθεί στις κατασκευαστικές ατέλειες που προκαλούνται από τις επικαλυπτόμενες διαδρομές εκτύπωσης. Αντιθέτως, για τις σύνθετες κατασκευές με εξαγωνικές μονάδες, η αστοχία ξεκίνησε από το περιφερειακό τοίχωμα. Αυτή η αστοχία θα μπορούσε να εξηγηθεί από την πιο σημαντική καταπόνηση του περιφερειακού τοιχώματος σε σύγκριση με τις ακμές των μονάδων, καθώς και των λιγότερων ατελειών των κυτταρικών αρθρώσεων στις εξαγωνικές μονάδες με επικαλυπτόμενες διαδρομές εκτύπωσης. Τα πειραματικά αποτελέσματα για τις διαφορετικές πυκνότητες πλήρωσης έδειξαν ότι το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε εφελκυσμό αυξήθηκαν με την αύξηση της πυκνότητας πλήρωσης. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να αποδοθεί στις βελτιωμένες δυνατότητες των σύνθετων κατασκευών αντίστασης σε παραμόρφωση. Το μοτίβο και η πυκνότητα πλήρωσης είχαν περιορισμένη επίδραση στις ικανότητες απορρόφησης σχετική ενέργειας, ενώ παρατηρήθηκε πως αυτή αυξήθηκε με την αύξηση του ρυθμού καταπόνησης για όλα τα υλικά. [14]

3.2.2 ΜΟΤΙΒΟ ΠΛΗΡΩΣΗΣ

Το μοτίβο πλήρωσης είναι η δομή και το σχήμα του υλικού στο εσωτερικό ενός τεμαχίου. Από απλές γραμμές έως πιο σύνθετα γεωμετρικά σχήματα, τα μοτίβο πλήρωσης μπορούν να επηρεάσουν την αντοχή, το βάρος, τον χρόνο εκτύπωσης και ακόμη και την ευελιξία ενός εξαρτήματος. Ανάλογα με το μοτίβο πλήρωσης αλλάζουν και τα τελικά χαρακτηριστικά του τεμαχίου, όπως η πολυπλοκότητα του σχεδίου, η απόδοση υλικού, η κατανάλωση του αρχικού υλικού, ο χρόνος εκτύπωσης και ο αριθμός των επιπέδων συνδετικής αντοχής (2D ή 3D). Υπάρχουν ποικίλα μοτίβο όπως είναι οι γραμμές (lines), το πλέγμα (grid), τα τρίγωνα (triangles), το κυβικό (cubic), το γυροειδές (gyroid) κ.α. Τα μοτίβο που επιλέχθηκαν να μελετηθούν είναι το gyroid και το hexagon.

Οι δομές honeycomb, στις οποίες ανήκει το μοτίβο hexagon, κατασκευασμένες με μία μέθοδο προσθετικής κατασκευής έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε εφαρμογές προστασίας από κρούση και απορρόφησης ενέργειας. [15] Επίσης, οι δομές αυτές έχουν μικρούς λόγους βάρους προς αντοχή και βάρους προς κόστος, απορρόφηση ψηλής ενέργειας και καλή απόδοση σε κρούση.

Οι C. Zeng et al. κατασκεύασαν συνεχείς σύνθετες δομές honeycomb ενισχυμένες με ίνες (continuous fiber reinforced composite honeycomb structures, CFRCHSs) με εξαιρετικές ιδιότητες

μνήμης με την μέθοδο FFF (fused filament fabrication) και μελέτησαν πειραματικά τις συμπεριφορές συμπίεσης out-of-plane/in-plane και τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι οι τρόποι αστοχίας των τρισδιάστατων εκτυπωμένων CFRCHSs σε out-of-plane φόρτιση είναι κυρίως πλευρική διάτμηση και προοδευτική αστοχία αναδίπλωσης. Παρατηρείται εξαιρετική out-of-plane ειδική απορρόφηση ενέργειας των CFRCHSs σε σχέση με αρκετές ανταγωνιστικές κυτταρικές δομές. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι η διαδικασία αστοχίας των τρισδιάστατων εκτυπωμένων CFRCHSs σε in-plane φόρτιση είναι ότι τα κύτταρα honeycomb καταρρέουν στρώμα-στρώμα κατά μήκος της κατεύθυνσης φόρτωσης, που συνοδεύεται από το σχηματισμό ενός τοπικού δακτυλίου. Η ανάλυση ικανότητας απορρόφησης της σύγκρουσης δείχνει ότι τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα CFRCHSs ξεπερνούν την απόδοση πολλών ανταγωνιστικών κυτταρικών τοπολογιών στην αντοχή σε συμπίεση και στην ειδική απορρόφηση ενέργειας. Επιπλέον, οι δοκιμές ανάκτησης σχήματος δείχνουν ότι τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα CFRCHSs διαθέτουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν ως βασικά στοιχεία ελαφρών ευφυών συστημάτων και συσκευών απορροφητικών ρυθμιζόμενης ενέργειας [16].

Στην εργασία τους, οι L. Sang et al. ανέπτυξαν και πρότειναν θερμοπλαστικά σύνθετα νήματα ενισχυμένα με ίνες που αποτελούνται από πολυγαλακτικό οξύ (polylactic acid), πολυκαπρολακτόνη (polycaprolactone) και ίνες βασάλτη για τρισδιάστατη. Πραγματοποίησαν μηχανικές δοκιμές, δυναμική μηχανική ανάλυση και ρεολογικές δοκιμές για να καταγραφούν οι μηχανικές, θερμικές και ιξωδοελαστικές ιδιότητες των τρισδιάστατων εκτυπωμένων δειγμάτων PLA-PCL/KBF με την μέθοδο FDM (fused deposition modeling). Στη συνέχεια, κατασκευάστηκαν circular honeycombs χρησιμοποιώντας τέσσερις αναλογίες νημάτων και μελετήθηκαν οι in-plane μηχανικές ιδιότητες συμπίεσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα δείγματα circular honeycomb που κατασκευάζονται με νήμα PLA-PCL30/KBF διαθέτουν ανώτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, η οποία αποδίδεται στην ολκιμότητα της μήτρας και στην καλή πρόσφυση διεπαφής μήτρας/ίνας. Επιπλέον, κατασκευάζονται δύο άλλες δομές honeycomb, hexagonal και re-entrant, και αξιολογούνται οι μηχανικές ιδιότητες συμπίεσης τους. Προκύπτει ότι οι hexagonal honeycombs παρουσιάζουν συγκρίσιμη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας με τις re-entrant honeycombs. Επομένως, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα σύνθετα υλικά PLA-PCL/KBF είναι μία πολλά υποσχόμενη πρώτη ύλη για την κατασκευή δομών honeycomb με FDM ως δομές απορρόφησης ενέργειας [17].

Τα υλικά πλέγματος (lattice materials) που βασίζονται σε τριπλά περιοδικές ελάχιστες επιφάνειες (TPMS- Triply Periodic Minimal Surfaces) έχουν λεία επιφάνεια, δεν είναι επιρρεπή στην συγκέντρωση τάσεων και μπορεί να ελεγχθεί εύκολα η παραγωγή της μεταβλητής πυκνότητας των κυτταρικών υλικών, η οποία προκύπτει από κατάλληλη συνάρτηση. Σε αυτήν την οικογένεια υλικών ανήκει και η γυροειδής κυτταρική δομή.

Η γυροειδής επιφάνεια ανακαλύφθηκε από τον επιστήμονα της NASA Alan Schoen τη δεκαετία του 1970 ως ένα από τα νέα ελαφρά υλικά μεγάλης αντοχής και είναι ένας από τους πιο συνηθισμένους τύπους τριπλά περιοδικών ελάχιστων επιφανειών. Ανήκει στον τρισδιάστατο χώρο R^3 , δεν περιλαμβάνει επίπεδες καμπύλες συμμετρίας, ούτε ευθείες γραμμές. Η εξίσωση που περιγράφει την κυτταρική δομή είναι η

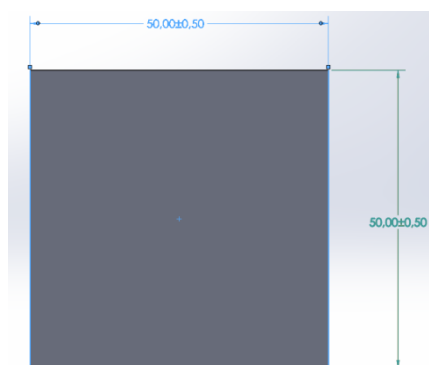
$$f_{gy} = \sin(x) \cos(y) + \sin(y) \cos(z) + \sin(z) \cos(x) = 0$$

Η γυροειδής δομή έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει και στη φύση, όπως για παράδειγμα στην μικροδομή των φτερών της πεταλούδας. Τρία πλεονεκτήματα της γυροειδούς κυτταρικής δομής είναι:

1. Η δομή είναι συνεχής και μπορεί εύκολα να αποβάλει ρητίνη σε υγρή μορφή ή μορφή σκόνης όταν κατασκευάζεται με μέθοδο προσθετικής κατασκευής

2. Η σπειροειδής δομή της έχει την ικανότητα να αυτό-υποστηρίζεται κατά τη διαδικασία κατασκευής της με προσθετική κατασκευή.
3. Η δομή της έχει υψηλή ειδική αντοχή σε χαμηλή πυκνότητα [15], [18]

Τα δοκίμια που εκτυπώθηκαν για αυτήν την εργασία είναι πέντε, τρία με infill pattern Hexagonal και infill density 18.5, 27.5 και 35.5% και δύο με infill pattern Gyroid και infill density 40 και 50%. Οι διαστάσεις των δοκιμών είναι 50mm × 50mm × 20mm (μήκος × πλάτος × ύψος) και φαίνονται στην Εικόνα 13 και Εικόνα 14.



Εικόνα 13: Κάτοψη δοκιμών.



Εικόνα 14: Πλάγια όψη δοκιμών.

Τα πρώτα δοκίμια Hexagonal που σχεδιάστηκαν αρχικά δεν μπορούσαν να μετατραπούν από το Cura σε κατάλληλη μορφή για να μπορέσουν να εκτυπωθούν. Διαπιστώθηκε ότι το πρόβλημα αυτό οφειλόταν στο ότι το πάχος των εξαγώνων ήταν μικρότερο από την διάμετρο $d=0.4\text{mm}$ του ακροφυσίου και προφανώς δεν ήταν εφικτό να εκτυπωθεί. Στη συνέχεια έγιναν δοκιμές με διάφορα πάχη εξαγώνων και διαπιστώθηκε ότι το βέλτιστο πάχος ήταν το διπλάσιο της διαμέτρου για αυτό το μοτίβο.

Για την εκτύπωση των δοκιμών, οι παράμετροι κατεργασίας που μελετήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 12. Το μοτίβο Gyroid υπήρχε ως επιλογή στο λογισμικό Cura, αλλά το μοτίβο Hexagonal δεν υπήρχε. Για αυτόν το λόγο σχεδιάστηκε το μοτίβο με δοκιμές στο Solidworks, διατηρώντας σταθερό το πάχος και μεταβάλλοντας το πλάτος των εξαγώνων (τελικά ποσοστά 18.5, 27.5 και 35.5%) και εισήχθη στο Cura με το τελικό μοτίβο που θα έχει μετά την εκτύπωση. Προκειμένου να εκτυπωθεί πρέπει να γίνει επιλογή των παραμέτρων Infill Density και Infill Pattern στο λογισμικό Cura. Ως ποσοστό πλήρωσης επιλέχθηκε 100% και ως μοτίβο πλήρωσης προέκυψε μετά από δοκιμή κάθε διαθέσιμου μοτίβο, ότι το καταλληλότερο είναι το Concentric.

Πίνακας 12: Παράμετροι διεργασίας που μελετήθηκαν.

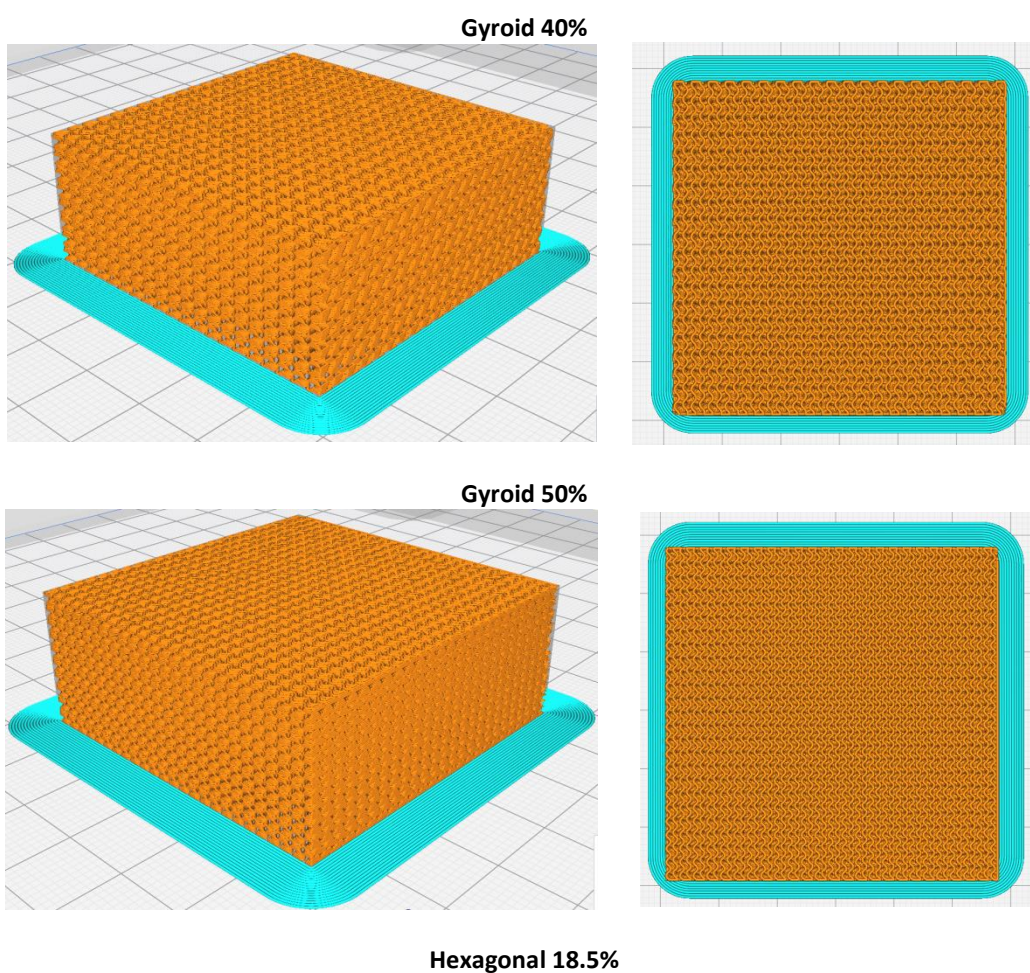
Παράμετροι διεργασίας	Gyroid	Hexagonal
Infill Pattern	Gyroid	Concentric
Infill Density (%)	40, 50	100 (και για τα τρία τελικά ποσοστά πλήρωσης)

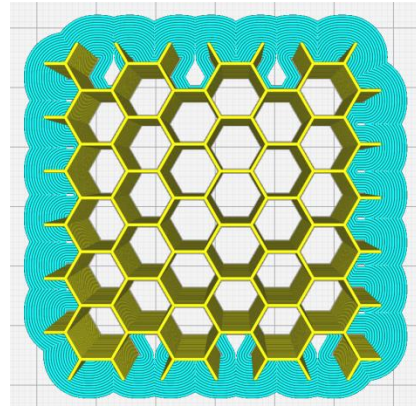
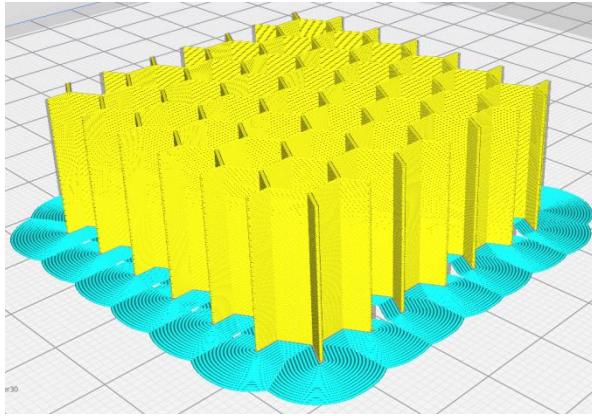
Ο χρόνος εκτύπωσης και το υλικό που καταναλώθηκε για κάθε τεμάχιο σύμφωνα με το λογισμικό Cura φαίνονται στον Πίνακα 13.

Πίνακας 13: Ο χρόνος εκτύπωσης και το υλικό που καταναλώθηκε για κάθε τεμάχιο σύμφωνα με το λογισμικό Cura.

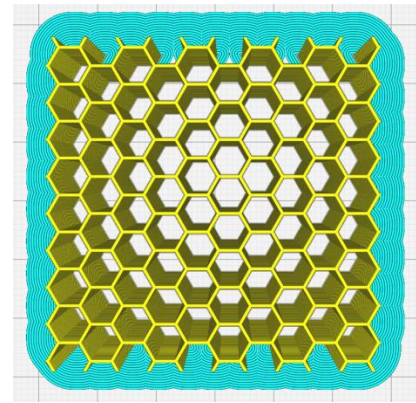
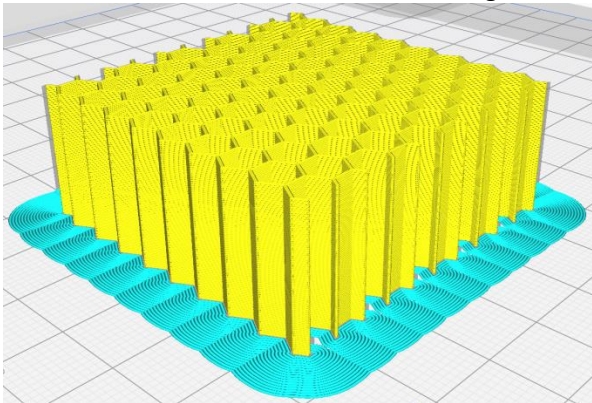
Δοκίμιο	Χρόνος εκτύπωσης	Υλικό που καταναλώθηκε	
Gyroid 40%	4 ώρες 54 λεπτά	26g	3.32mm
Gyroid 50%	6 ώρες 1 λεπτό	32g	4.10mm
Hexagonal 18.5%	4 ώρες 6 λεπτά	11g	1.30mm
Hexagonal 27.5%	6 ώρες 7 λεπτά	16g	2.04mm
Hexagonal 35.5%	7 ώρες 54 λεπτά	21g	2.60mm

Στην Εικόνα 15 παρατίθενται η συμμετρική όψη και η κάτοψη των τελικών δοκιμών όπως παρουσιάζονται στο λογισμικό Cura.

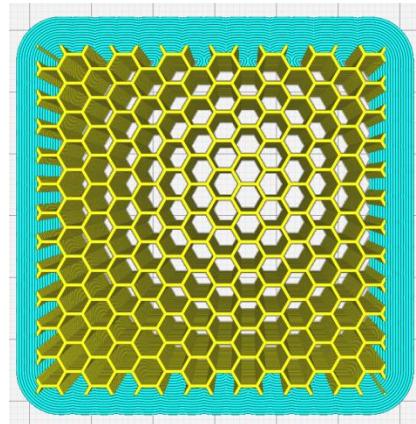
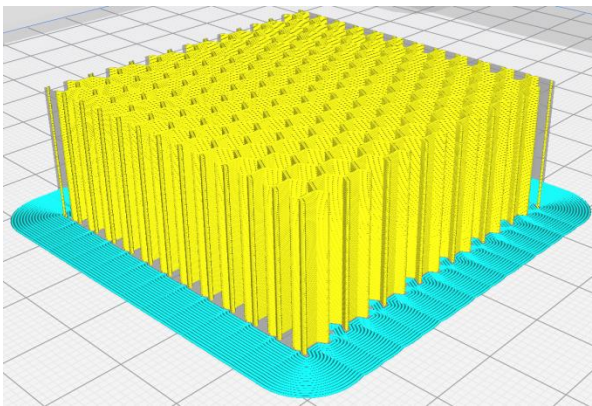




Hexagonal 27.5%



Hexagonal 35.5%



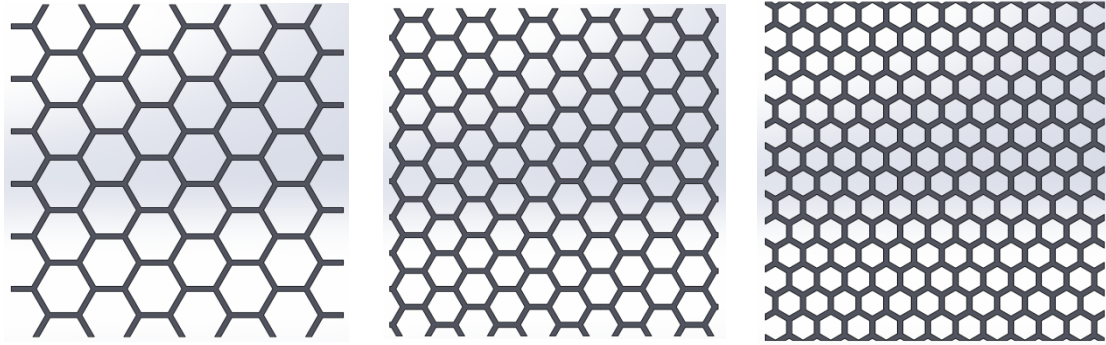
Εικόνα 15: Συμμετρική όψη και κάτοψη των προς εκτύπωση τεμαχίων από το λογισμικό Cura

Τα μοτίβο που σχεδιάζονται στο Solidworks φαίνονται στην Εικόνα 16.

Hexagonal 18.5%

Hexagonal 27.5%

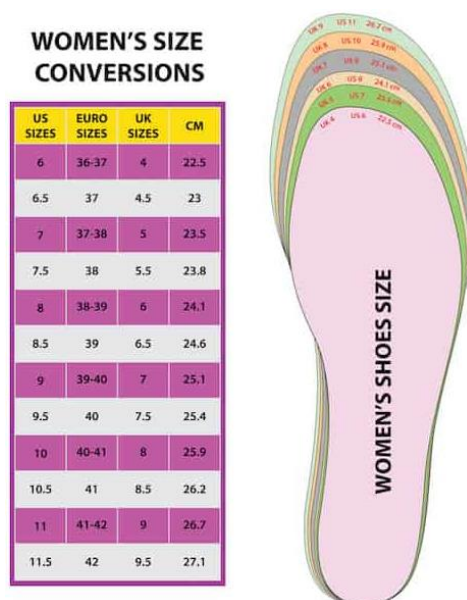
Hexagonal 35.5%



Εικόνα 16: Σχηματική απεικόνιση των μοτίβο Hexagonal στο Solidworks.

4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ SOLIDWORKS

Για τον σχεδιασμό της σόλας χρησιμοποιήθηκε ως οδηγός μία εικόνα στην οποία φαίνονται σχηματικά οι σόλες που αντιστοιχούν στα γυναικεία μεγέθη υποδημάτων από 36-37 (22.5cm) έως 42 (27.1mm), και συγκεκριμένα το μέγεθος 36-37 (22.5cm). Το περίγραμμα έγινε με την χρήση Splines, έχοντας ως οδηγό το περίγραμμα από την Εικόνα 17.



Εικόνα 17: Μεγέθη γυναικείων υποδημάτων.

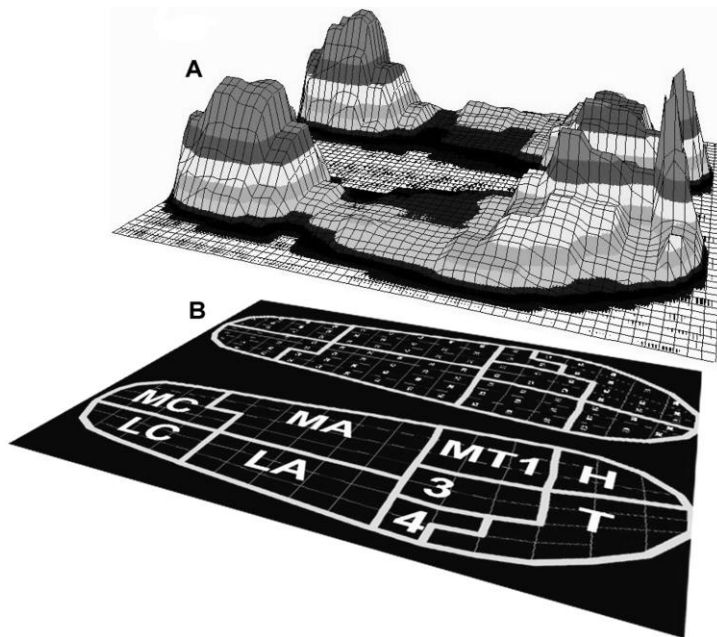
Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στη θεωρία, κατά το βάδισμα ασκούνται διαφορετικές δυνάμεις σε κάθε περιοχή του ποδιού. Προκειμένου να μελετηθεί η καταπόνηση της σόλας σε θλίψη και κάμψη στο Solidworks χρειάζεται να χωρισθεί η επιφάνεια επαφής με το πέλμα σε κατάλληλες περιοχές, όπου θα εφαρμοσθούν τα αντίστοιχα φορτία.

Σύμφωνα με τους Hessert et al. [19] για την κατανομή της πίεσης στο πόδι προκύπτουν οι εννιά ανατομικές περιοχές στις οποίες χωρίζεται το πόδι, για να εφαρμοσθούν στη συνέχεια οι αντίστοιχες μέγιστες πιέσεις κάθε περιοχής. Οι περιοχές αυτές φαίνονται στον Πίνακα 14.

Πίνακας 14: Ανατομικές περιοχές του ποδιού. Ο πίνακας προέρχεται από το [19].

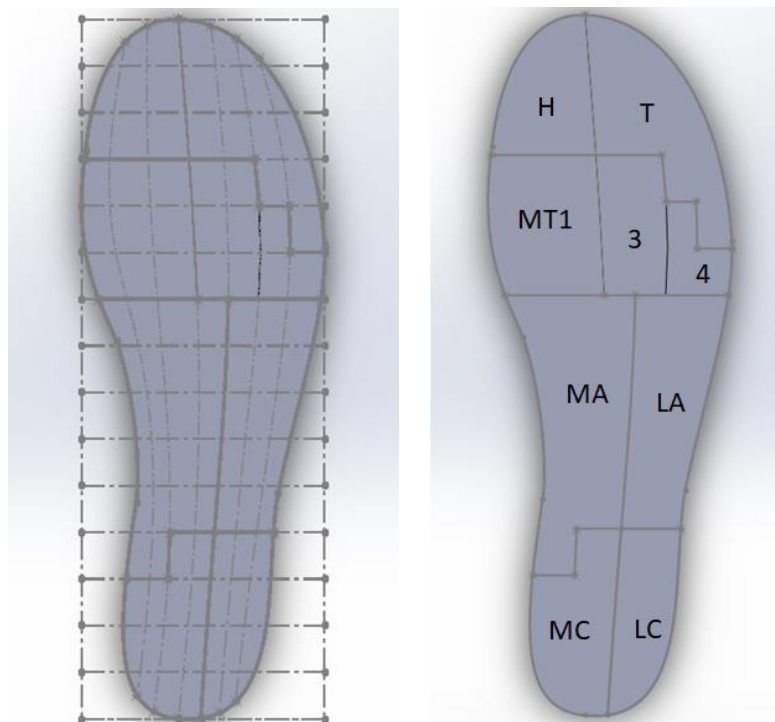
Ανατομικές περιοχές ποδιού	Συμβολισμός
Μεγάλο δάχτυλο (Halux)	H
Δάχτυλα (Toes)	T
Πρώτο μετατάρσιο (First metatars)	MT1
Δεύτερο και τρίτο μετατάρσιο (Second & third metatars)	3
Τέταρτο και πέμπτο μετατάρσιο (Fourth & fifth metatars)	4
Μεσαία καμάρα (Medial arch)	MA
Πλευρική καμάρα (Lateral arch)	LA
Μεσαία πτέρνα (Medial calcaneus)	MC
Πλευρική πτέρνα (Lateral calcaneus)	LC

Οι ανατομικές περιοχές φαίνονται σχηματικά στην Εικόνα 18.



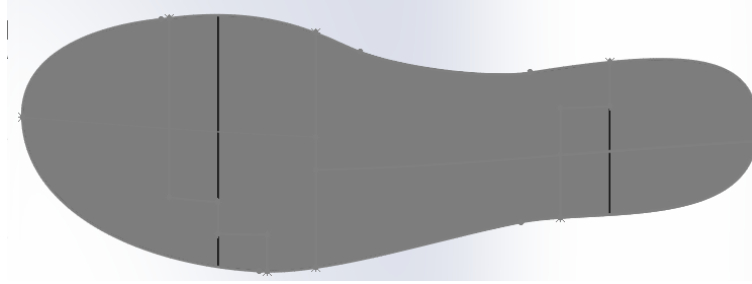
Εικόνα 18: Σχηματική αναπαράσταση των ανατομικών περιοχών. Η εικόνα προέρχεται από το [19] .

Από αυτό φαίνεται πως το πόδι χωρίστηκε σε 14 οριζόντιες γραμμές και 6 κατακόρυφες καμπύλες με βάση τις οποίες οριοθετούνται οι εννιά περιοχές. Η διάταξη αυτή ακολουθήθηκε για τη σόλα στο Solidworks, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19, με σκοπό να εφαρμοσθούν τα φορτία για τις δοκιμές θλίψης.



Εικόνα 19: Εννέα ανατομικές περιοχές στις οποίες χωρίζεται η σόλα.

Στο κάτω μέρος της σόλας σχεδιάσθηκαν δύο περιοχές, μία στο μπροστινό όπου θα εφαρμοσθεί η στήριξη και μία στο πίσω τμήμα όπου θα εφαρμοσθεί το φορτίο. Οι περιοχές φαίνονται στην Εικόνα 20.

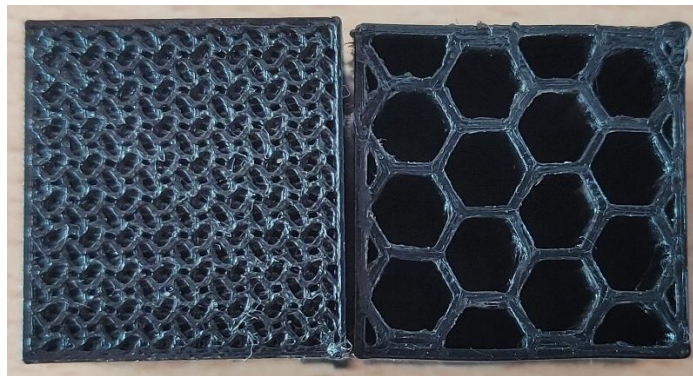


Εικόνα 20: Περιοχές στο κάτω μέρος της σόλας.

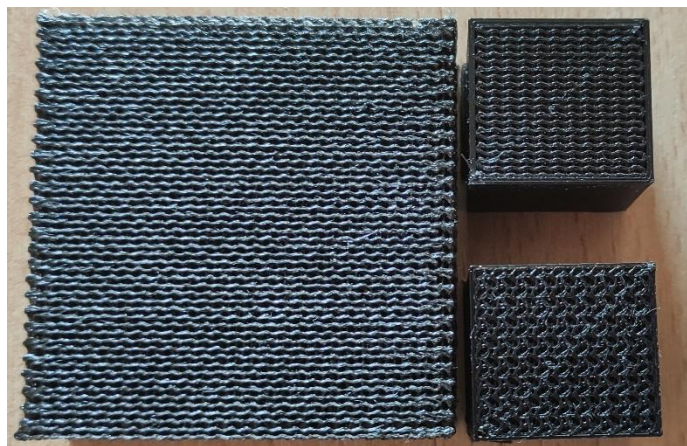
5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ SOLIDWORKS

5.1 ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Αρχικά, εκτυπώθηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 20mm με την προσθήκη εξωτερικού τοιχώματος στις πλευρές των κύβων, με τη θεώρηση ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης θα είναι συγκρίσιμα εφόσον όλα τα δοκίμια έχουν το ίδιο πάχος τοιχώματος. Παρόλο που δεν υπήρχε πρόβλημα κατά την εκτύπωση των τεμαχίων, αποφασίσθηκε να εκτυπωθούν δοκίμια χωρίς εξωτερικά τοιχώματα. Ο λόγος αυτής της απόφασης είναι ότι τα τοιχώματα αύξαναν την ανθεκτικότητα σε καταπόνηση σε θλίψη των εσωτερικών μοτίβο, με αποτέλεσμα να μην αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές ιδιότητες των δομικών μονάδων της σόλας. Στην Εικόνα 21 φαίνονται δύο από τα δοκίμια με εξωτερικό τοίχωμα και στην Εικόνα 22 φαίνονται δοκίμια με και χωρίς εξωτερικό τοίχωμα και διαφορετικά ποσοστά πλήρωσης.



Εικόνα 21: Δοκίμια με εξωτερικό τοίχωμα.

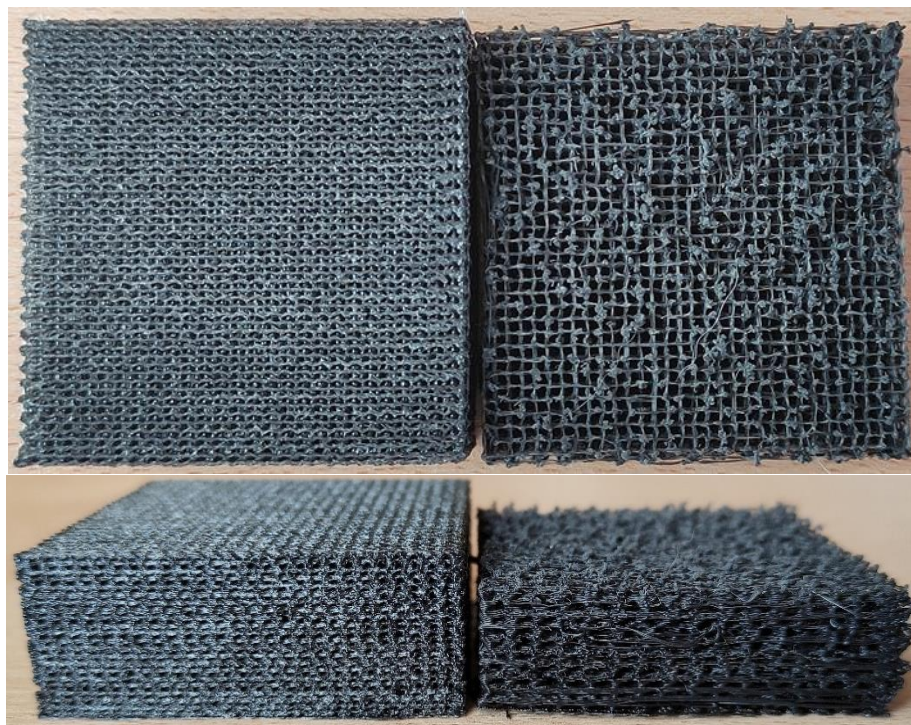


Εικόνα 22: Δοκίμια με και χωρίς εξωτερικό τοίχωμα.

Όσον αφορά τις διαστάσεις των δοκιμών αποφασίσθηκε να έχουν μεγαλύτερο εμβαδό επαφής με τις επιφάνειες του μηχανήματος (50mm×50mm). Το ύψος επιλέχθηκε να είναι ίσο με το ύψος της σόλας (20mm), καθώς η εκτύπωση κυβικών δοκιμών με ακμή 50mm ήταν χρονοβόρα και αύξανε σημαντικά την κατανάλωση υλικού.

Για το μοτίβο Gyroid επιλέχθηκαν αρχικά τα ποσοστά 30, 40, 50%. Παρατηρήθηκε ότι για το μοτίβο Gyroid με την μείωση του ποσοστού ήταν ιδιαίτερα μαλακό, ενώ υπήρχαν και προβλήματα

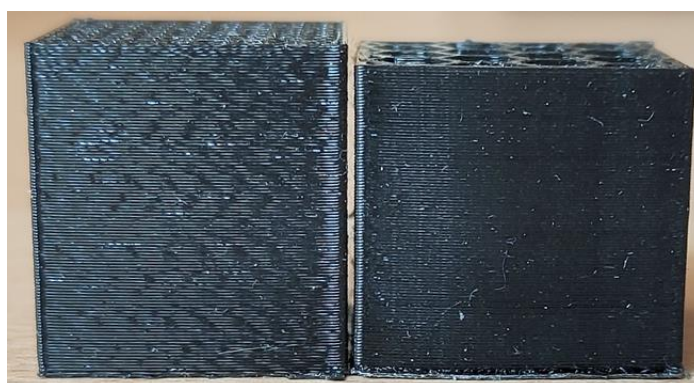
κατά την εκτύπωση (διακοπή εκτύπωσης και ακανόνιστη εκτύπωση). Το δοκίμιο Gyroid 30% απέτυχε, καθώς δεν εκτυπώθηκε ολόκληρο και το μοτίβο ήταν ακανόνιστο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 23.



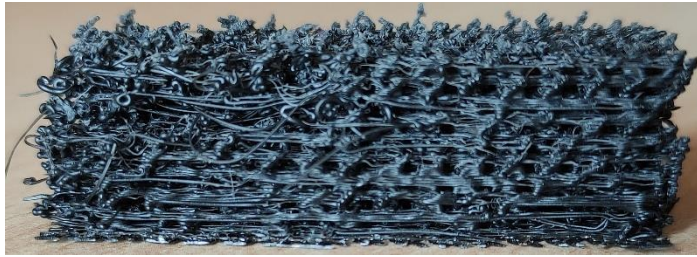
Εικόνα 23: Ανεπιτυχής εκτύπωση δοκιμίου με μοτίβο Gyroid.

Όσον αφορά το μοτίβο Hexagonal, εκτυπώθηκε αρχικά το δοκίμιο με ποσοστό 35.5% και παρατηρήθηκε ότι ενώ ήταν μεταξύ των ποσοστών 30 και 40% ήταν ιδιαίτερα άκαμπτο. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκαν δύο ποσοστά μικρότερα από αυτό.

Κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης των τεμαχίων παρατηρήθηκε ότι, στο σημείο όπου τα δύο ράουλα παραλάμβαναν το νήμα και περιστρέφονταν για να το προωθήσουν στο ακροφύσιο, συσσωρευόταν υλικό. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η προώθηση του νήματος και να διακόπτεται η εκτύπωση. Στην συνέχεια έπρεπε να καθαριστεί η περιοχή αυτή χειροκίνητα και να ξεκινήσει η εκτύπωση του εκάστοτε τεμαχίου από την αρχή. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι πρόκειται για ελαστικό υλικό και έτσι όταν συμπιέζεται μεταξύ των δύο ραούλων αντί να προωθείται προς τα πάνω παραμορφώνεται και δημιουργεί μια συσσωρευμένη μάζα προς την αντίθετη φορά κίνησης του νήματος. Μερικά ακόμα παραδείγματα αστοχιών φαίνονται στις Εικόνες 24 και 25.



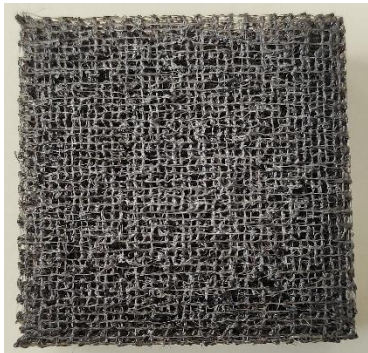
Εικόνα 24: Διακοπή εκτύπωσης με αποτέλεσμα το ένα δοκίμιο να έχει μικρότερο ύψος.



Εικόνα 25: Διακοπή εκτύπωσης προτού φτάσει στο συνολικό ύψος και αποτυχία εκτύπωσης του μοτίβο.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν τελικά για τις δοκιμές με φαίνονται στην Εικόνα 26.

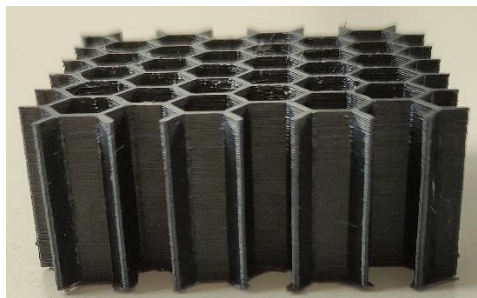
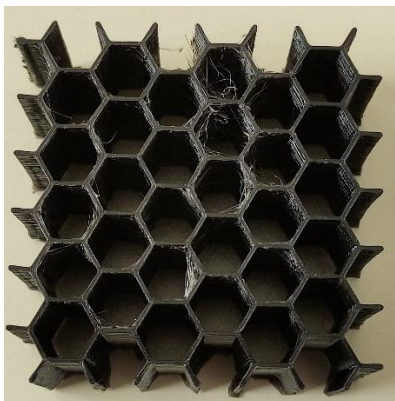
Gyroid 40%



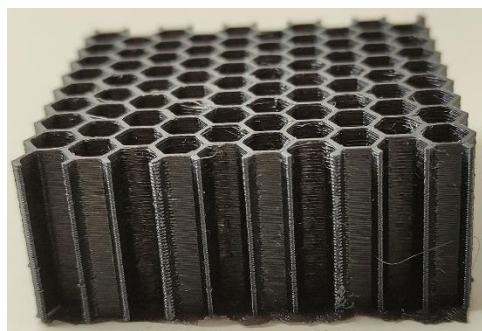
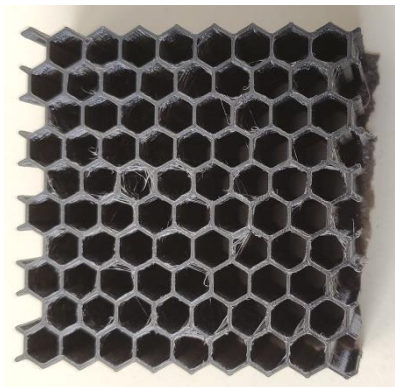
Gyroid 50%



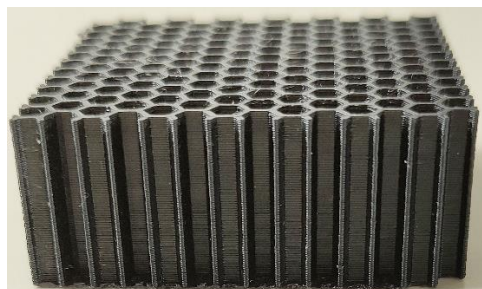
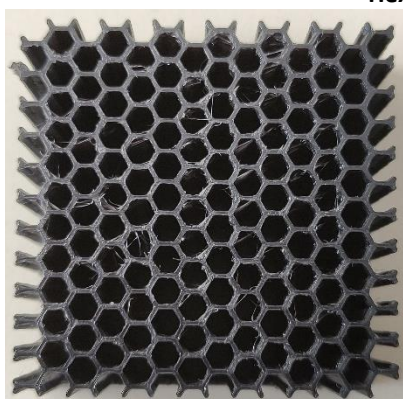
Hexagonal 18.5%



Hexagonal 27.5%



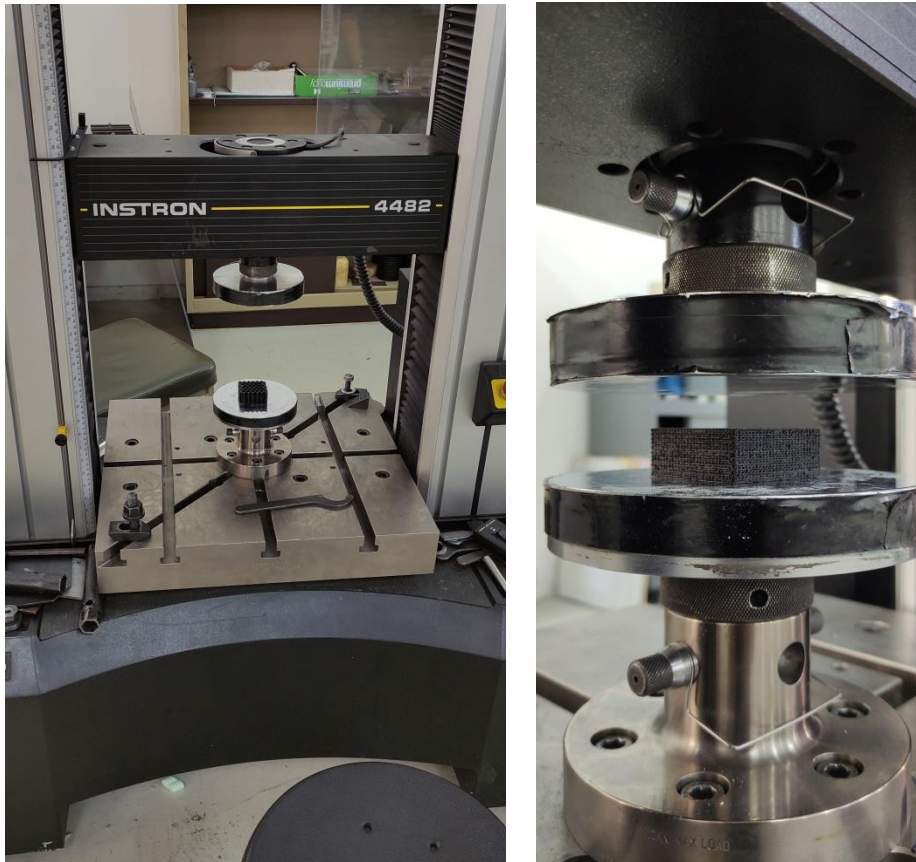
Hexagonal 35.5%



Εικόνα 26: Εκτυπωμένα δοκίμια.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 26 , υπάρχουν δύο είδη επιφανειακών ατελειών στα δοκίμια. Η πρώτη επιφανειακή ατέλεια είναι ότι οι στρώσεις από τις οποίες αποτελούνται τα Hexagonal δοκίμια είναι εμφανείς και δεν μπορούν να υποστούν κάποια πρόσθετη επεξεργασία επιφανειακής λείανσης, καθώς πρόκειται για εύκαμπτο υλικό. Η δεύτερη είναι ότι υπάρχουν ίνες σε διάφορα σημεία εκτός του μοτίβο, που λογικά προκλήθηκαν από διαρροές υλικού κατά την μετακίνηση του ακροφυσίου. Τέλος, παρατηρείται ότι δεν είναι αρκετά εμφανές το μοτίβο Gyroid, όπως είναι στο λογισμικό Cura. Αυτό είναι πιθανό να προκλήθηκε εξαιτίας του προβλήματος που αντιμετώπιζε η μηχανή με τη συσσώρευση υλικού.

5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΘΛΙΨΗΣ

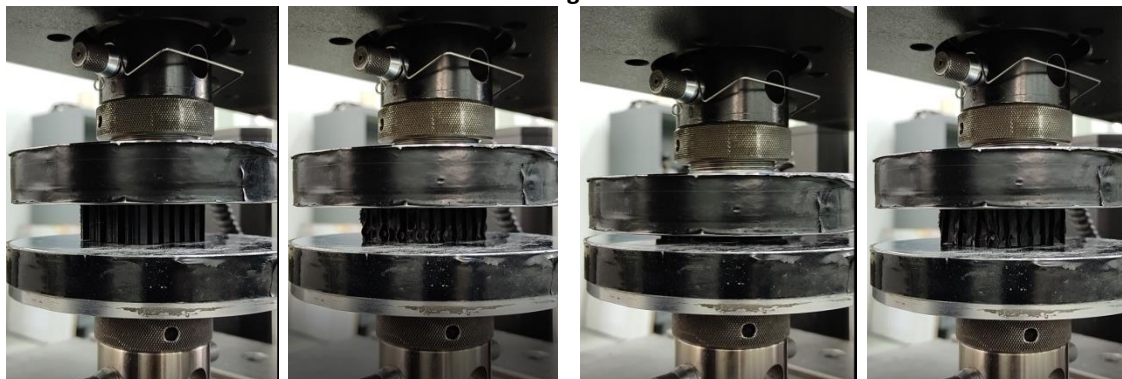


Εικόνα 27: Μηχάνημα δοκιμών INSTRON 4482.

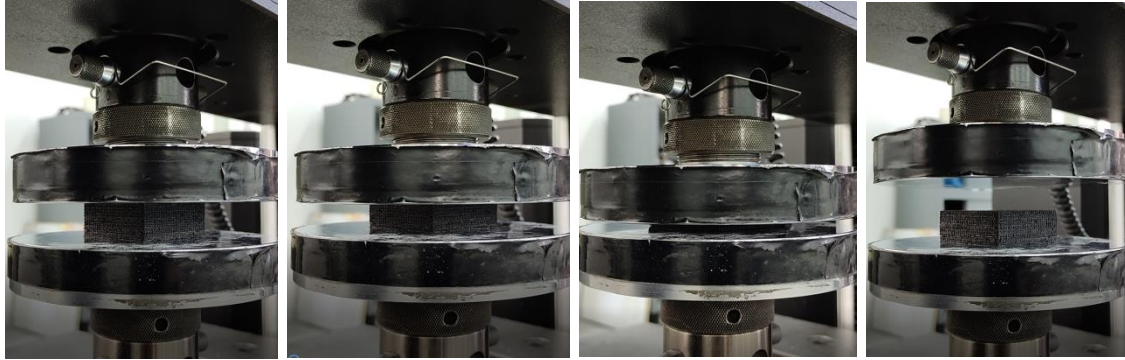
Οι δοκιμές θλίψης πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ. Το μηχάνημα δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε είναι το INSTRON 4482 testing machine. Η ταχύτητα θλίψης ορίσθηκε ως 5.0mm/min και το μέγιστο μήκος θλίψης στα 14.0mm. Από τις δοκιμές προέκυψαν τα διαγράμματα Φορτίο (Compressive load, kN) – Μετατόπιση (Compressive extension, mm) και Τάση (Compressive stress, MPa) - Παραμόρφωση (Compressive strain, mm/mm) για κάθε τεμάχιο.

Στην Εικόνα 28 φαίνονται τέσσερα στιγμιότυπα από τη θλίψη ενός δοκιμίου Hexagonal και ενός Gyroid.

Hexagon



Gyroid



Εικόνα 28: Στιγμιότυπα από τη δοκιμή σε θλίψη ενός δοκιμίου hexagonal και ενός gyroid.

Στις Εικόνες 29-33 φαίνονται τα δοκίμια πριν και μετά τη θλίψη.

Gyroid 40%

Πριν τη θλίψη

Μετά τη θλίψη



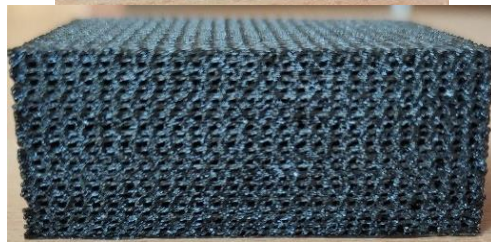
Εικόνα 29: Δοκίμιο Gyroid 40% πριν και μετά τη θλίψη.

Gyroid 50%

Πριν τη θλίψη



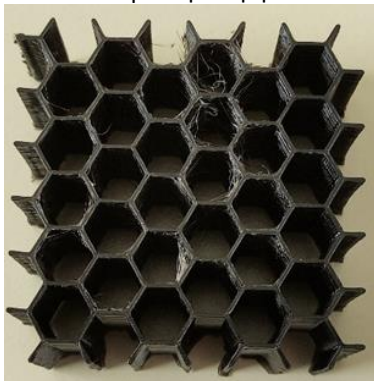
Μετά τη θλίψης



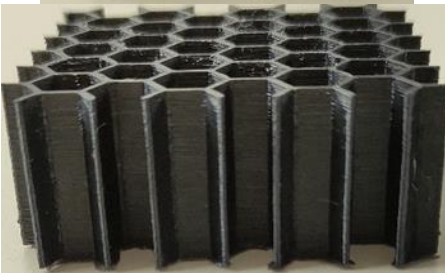
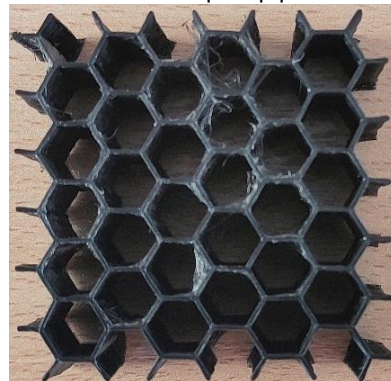
Εικόνα 30 Δοκίμιο Gyroid 50% πριν και μετά τη θλίψη.

Hexagonal 18.5%

Πριν τη θλίψη



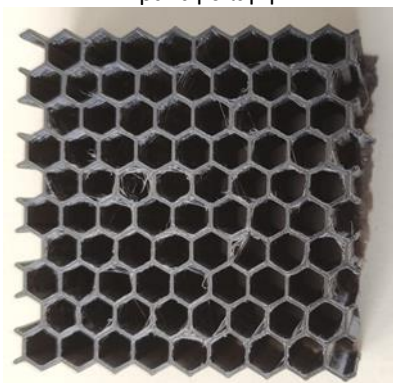
Μετά τη θλίψη



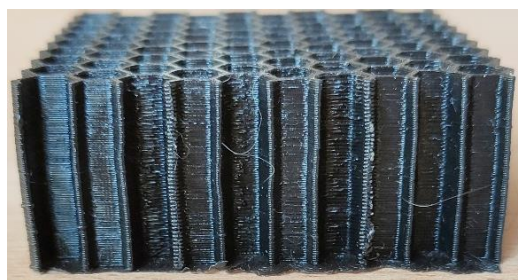
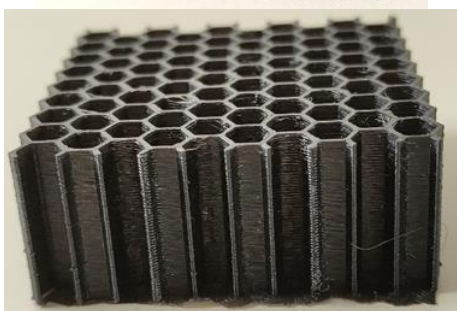
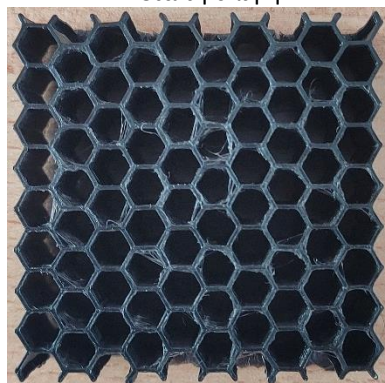
Εικόνα 31: Δοκίμιο Hexagonal 18.5% πριν και μετά τη θλίψη.

Hexagonal 27.5%

Πριν τη θλίψη



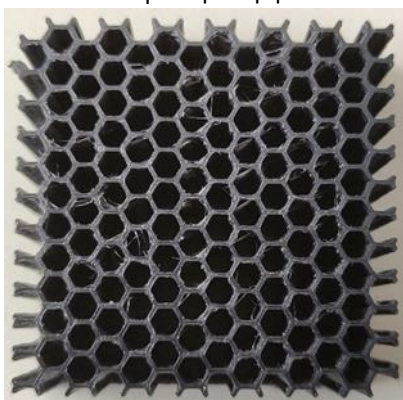
Μετά τη θλίψη



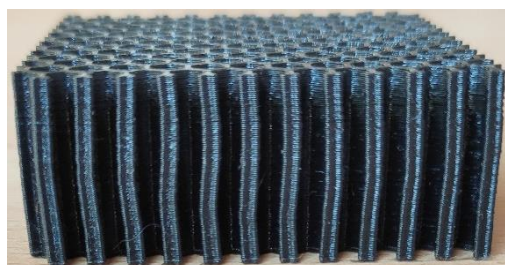
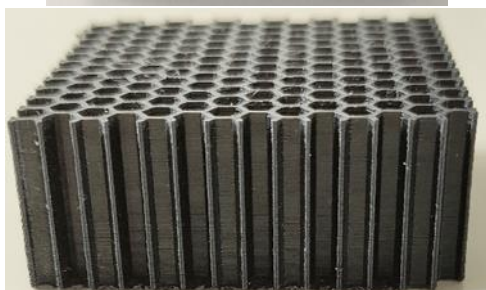
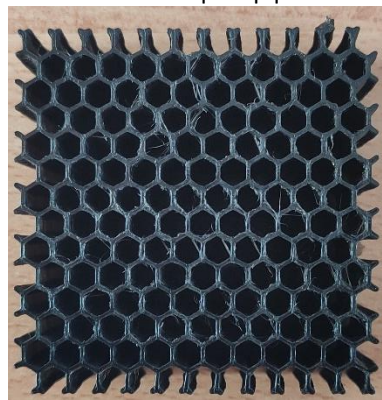
Εικόνα 32: Δοκίμιο Hexagonal 27.5% πριν και μετά τη θλίψη.

Hexagonal 35.5%

Πριν τη θλίψη



Μετά τη θλίψη

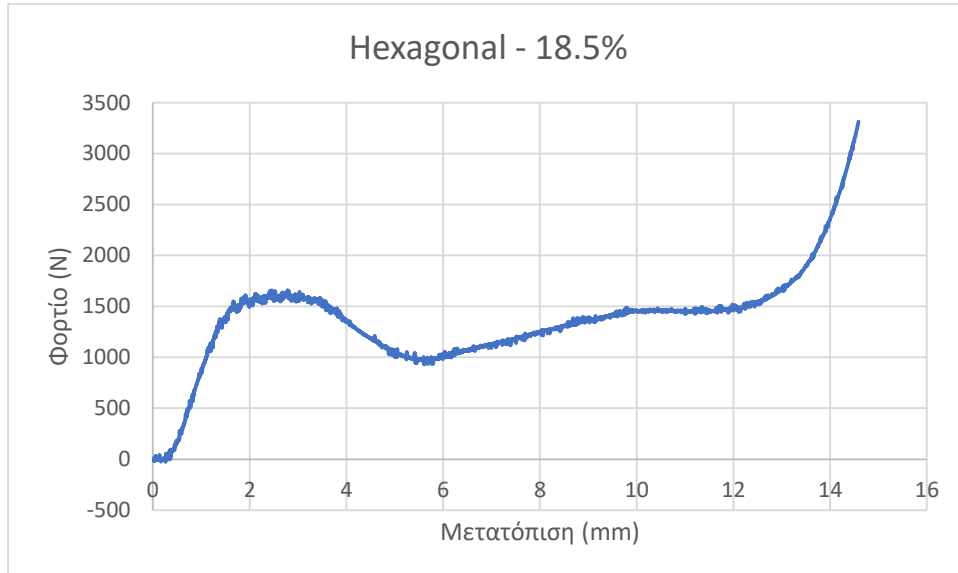


Εικόνα 33: Δοκίμιο Hexagonal 35.5% πριν και μετά τη θλίψη.

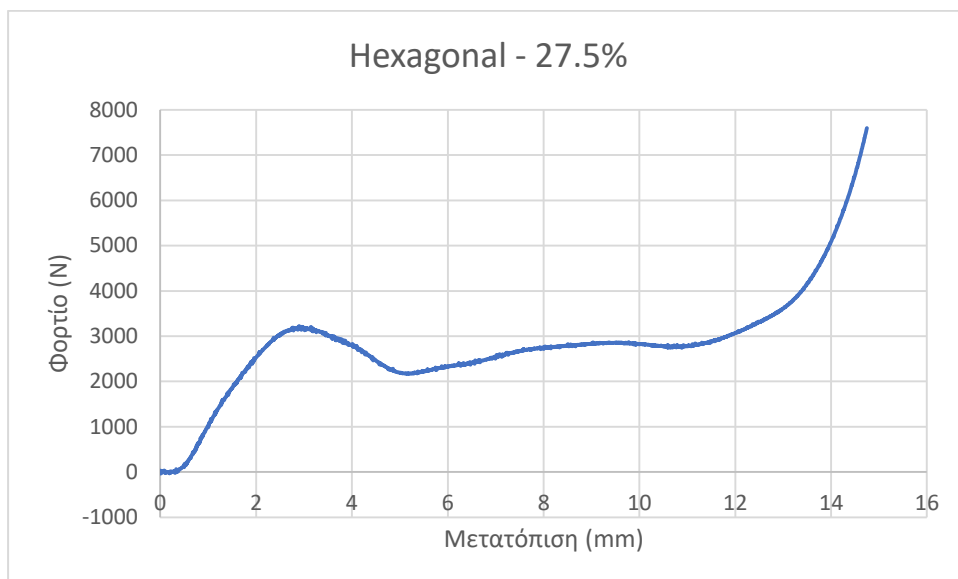
Από τα στιγμιότυπα της Εικόνας 28 φαίνεται ότι μετά τη θλίψη τα δοκίμια επανέρχονται στην αρχική τους θέση χωρίς να έχουν αστοχήσει. Στις Εικόνες 29-33 φαίνεται ότι τα δοκίμια με μοτίβο Gyroid δεν έχουν παραμορφωθεί ακόμα και στις άκρες των πλευρών και έχουν επανέλθει στην αρχική τους κατάσταση. Τα δοκίμια με το μοτίβο Hexagonal έχουν επανέλθει και αυτά στην

αρχική τους θέση, με αστοχίες στα εξωτερικά τμήματα όπου δεν υπάρχουν ολοκληρωμένα εξάγωνα. Θεωρητικά αυτό θα μπορούσε να διορθωθεί προσθέτοντας εξωτερικό τοίχωμα, προκειμένου να προστεθεί στήριξη στα ημιτελή σχήματα.

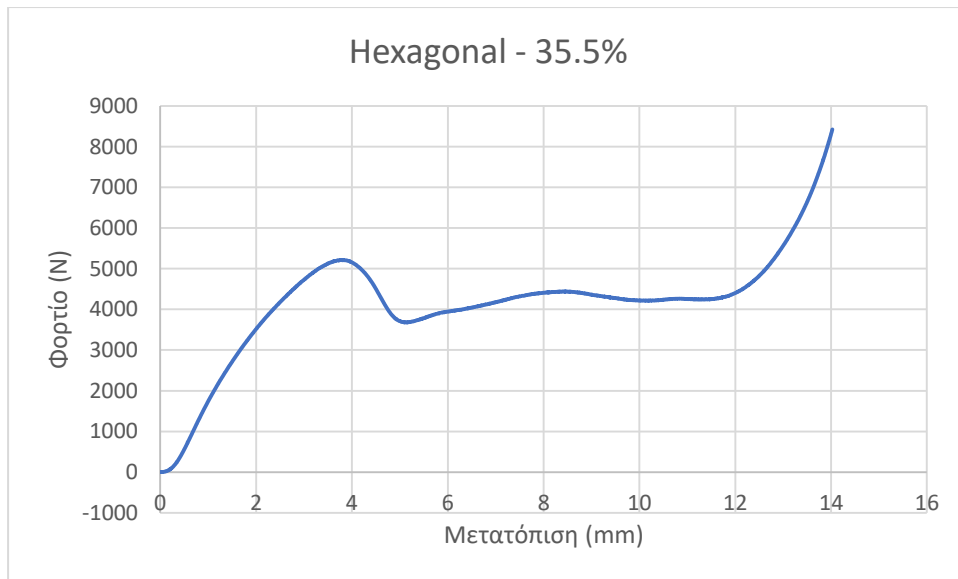
Τα διαγράμματα Φορτίου (N) - Μετατόπισης (mm) που προκύπτουν από τις μετρήσεις των δοκιμών 8δίνονται στις Εικόνες 35-39.



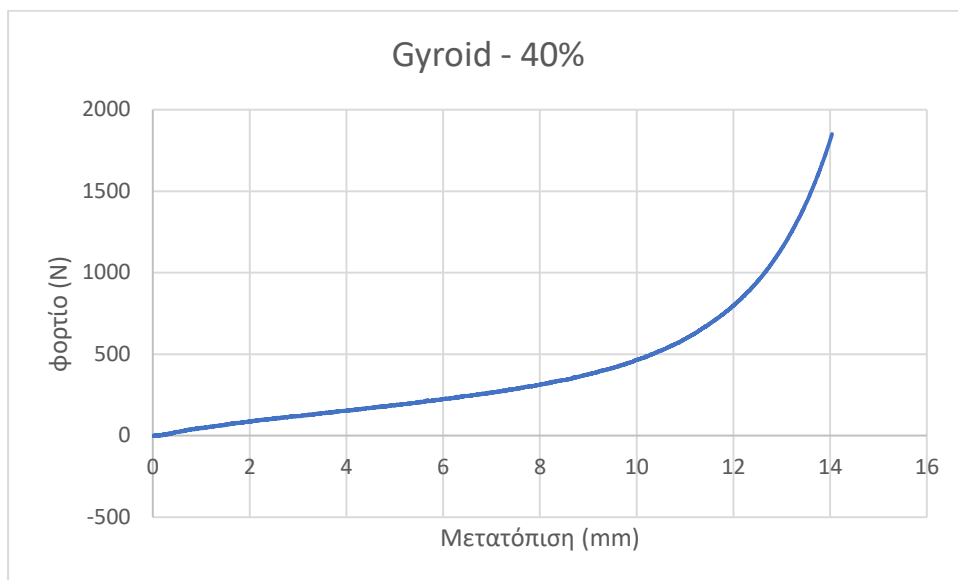
Εικόνα 34: Διάγραμμα Φορτίου θλίψης - Βράχυνσης για το Hexagonal-18.5%.



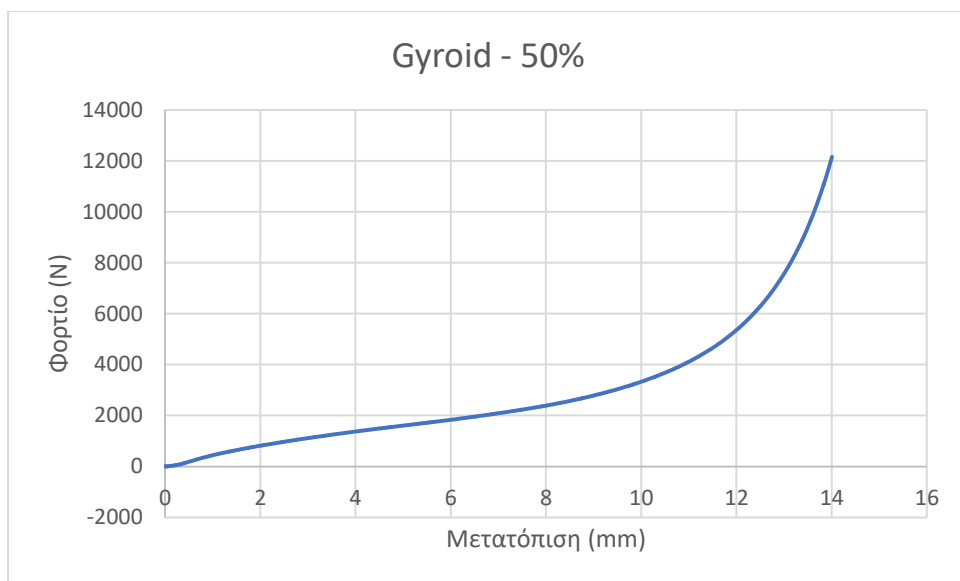
Εικόνα 35: Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για το Hexagonal-27.5%.



Εικόνα 36: Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για το Hexagonal-35.5%.



Εικόνα 37: Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για το Gyroid-40%.



Εικόνα 38: Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για το Gyroid-50%.

Οι τιμές που προκύπτουν από αυτά τα διαγράμματα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης σε θλίψη και την τάσης που ασκείται, με στόχο την δημιουργία των αντίστοιχων διαγραμμάτων για κάθε περίπτωση. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται δίνονται στην συνέχεια.

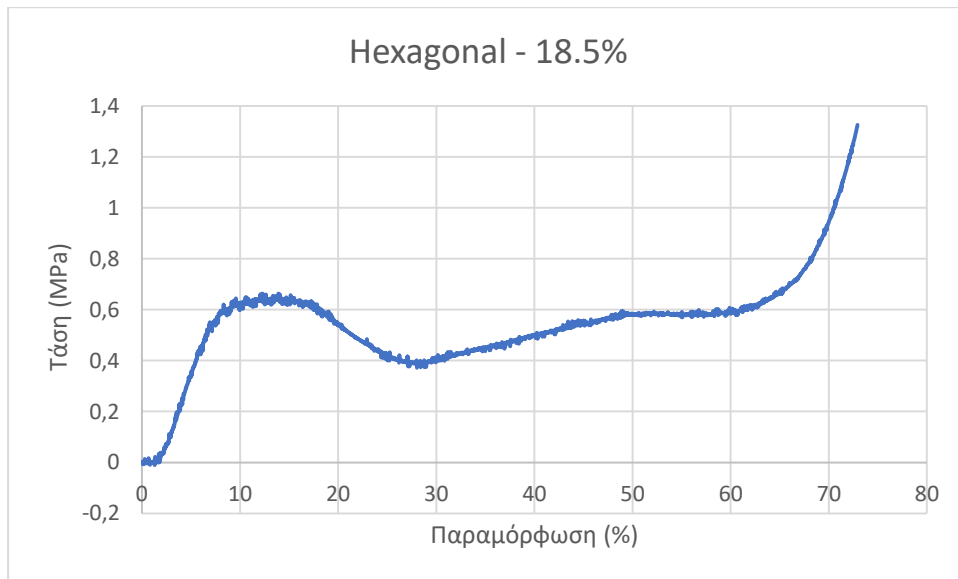
Πίνακας 15: Μεγέθη για τον υπολογισμό των σ , ϵ .

Μέγεθος	Σύμβολο
Φορτίο θλίψης (N)	F
Εμβαδόν επιφάνειας άσκησης φορτίου (mm ²)	A
Βράχυνση (mm)	Δl
Αρχικό ύψος δοκιμίου (mm)	l
Τάση (MPa)	σ
Παραμόρφωση (mm/mm)	ϵ

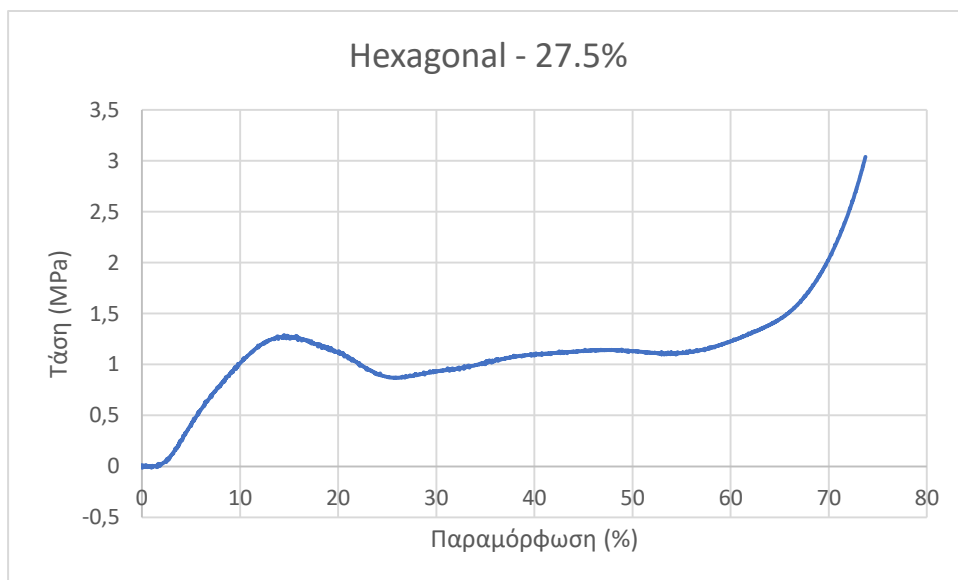
$$\sigma = \frac{F}{A} \Rightarrow \sigma = \frac{F}{2500}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \Rightarrow \epsilon = \frac{\Delta l}{20}$$

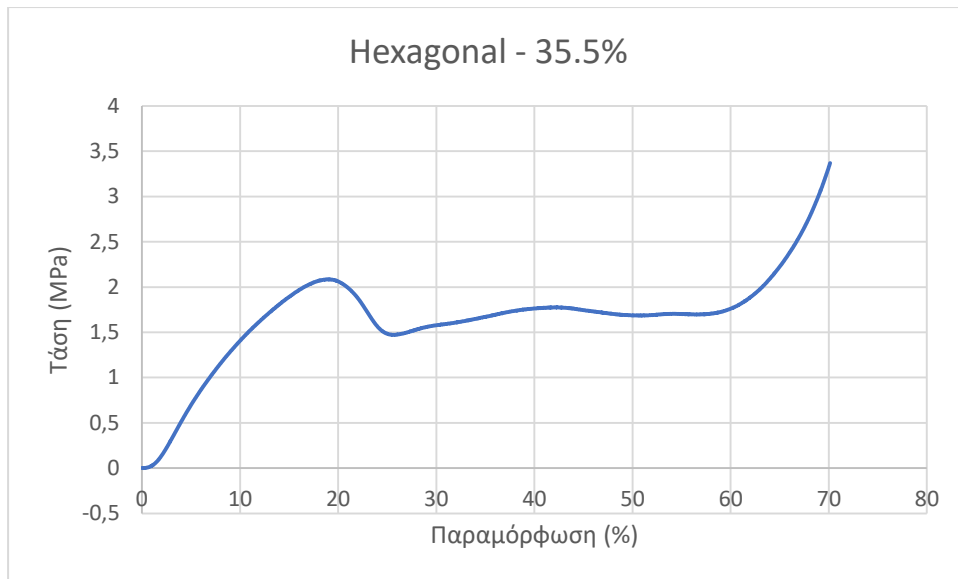
Τα διαγράμματα που προκύπτουν δίνονται στις Εικόνες 40-44.



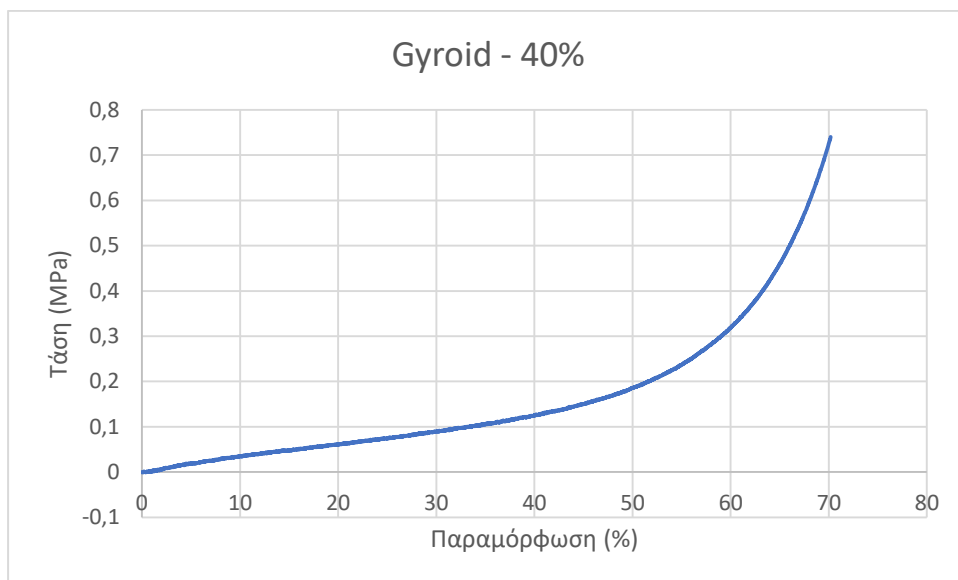
Εικόνα 39: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης για το Hexagonal-18.5%.



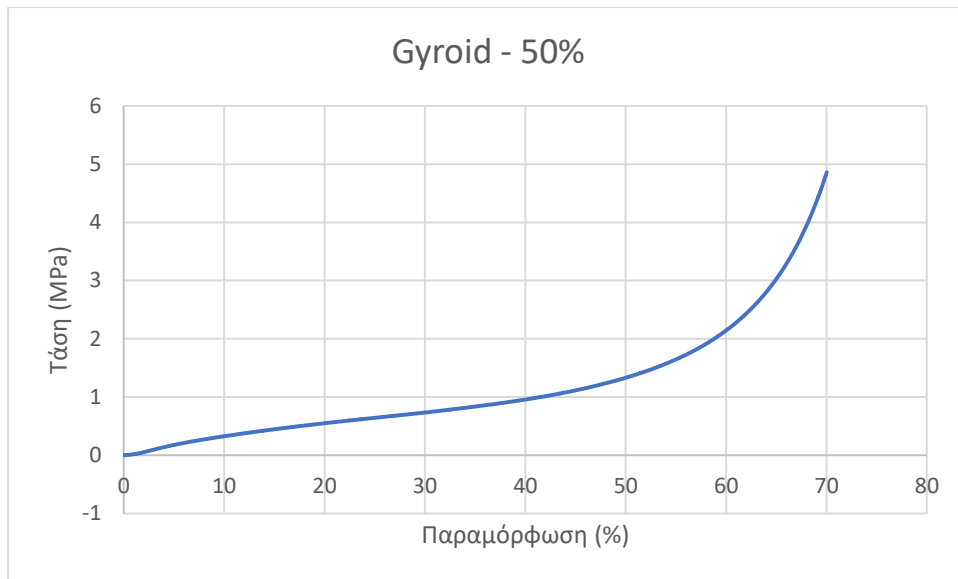
Εικόνα 40: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης για το Hexagonal-27.5%.



Εικόνα 41: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης για το Hexagonal-35.5%.



Εικόνα 42: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης για το Gyroid-40%.



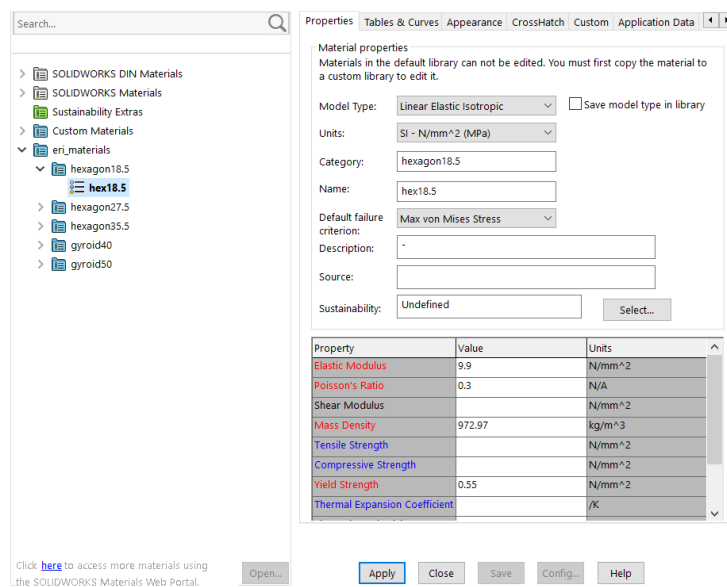
Εικόνα 43: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης για το Gyroid-50%.

5.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΟ SOLIDWORKS

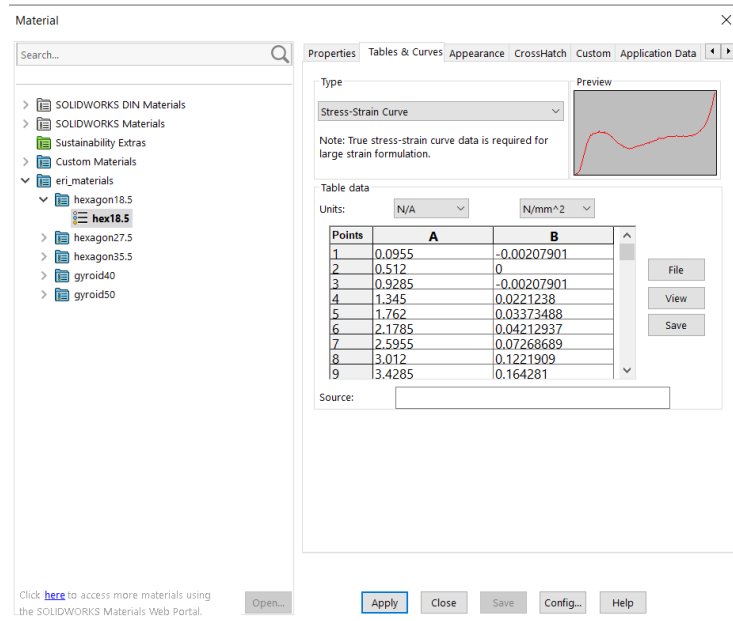
5.3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟ SOLIDWORKS

Τα διαγράμματα σ-ε που υπολογίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα θα χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα προκειμένου να ορισθούν πέντε νέα υλικά στη βιβλιοθήκη υλικών του Solidworks, έτσι ώστε να αντιστοιχούν στον κάθε συνδυασμό ποσοστού και μοτίβο πλήρωσης.

Αρχικά, προστίθεται νέα βιβλιοθήκη υλικών, στην οποία θα ορισθούν τα νέα υλικά. Προκειμένου να εισαχθούν οι καμπύλες σ-ε, επιλέγεται ως τύπος υλικού (model type) το “Plasticity – von Mises”. Στη συνέχεια, με την εντολή “Create stress-strain curve” εμφανίζεται η δεύτερη καρτέλα όπου εισάγονται οι τιμές της παραμόρφωσης στην πρώτη στήλη και της τάσης στη δεύτερη. Επειδή το πλήθος των σημείων που δέχεται το Solidworks είναι 200 και από τα δεδομένα υπήρχαν πάνω από 3000 σημεία, επιλέχθηκαν 200 σημεία με κριτήριο να διατηρείται το σχήμα της καμπύλης.



Εικόνα 44: Βιβλιοθήκη υλικών στο Solidworks (Properties).

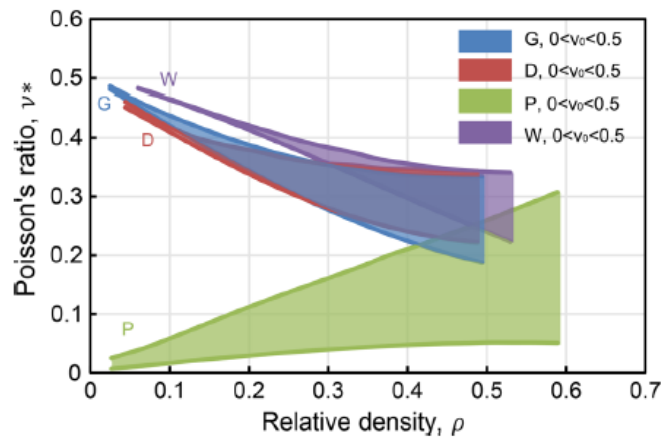


Εικόνα 45: Βιβλιοθήκη υλικών στο Solidworks (Tables & Curves).

Για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα υλικά έπρεπε αν ορισθούν το μέτρο ελαστικότητας (elastic modulus), ο λόγος Poisson (Poisson's ratio), το όριο διαρροής (yield strength) και η πυκνότητα (mass density).

Ο λόγος Poisson για το μοτίβο Hexagonal φαίνεται να παραμένει ίδιος με του αρχικού υλικού για out-of-plane φόρτιση [20] και μπορεί να θεωρηθεί ότι ισούται κατά προσέγγιση με 0.3 [21].

Ο λόγος Poisson για το μοτίβο Gyroid φαίνεται να κυμαίνεται περίπου μεταξύ των τιμών 0.3 και 0.5, σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικόνας 46. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση 0.3.



Εικόνα 46: Διάγραμμα νόμων κλιμάκωσης του λόγου Poisson για δομές G, D, P και W. Η εικόνα προέρχεται από το [22].

Το μέτρο ελαστικότητας E (MPa) υπολογίστηκε προσεγγιστικά από τα διαγράμματα σ-ε, λαμβάνοντας δύο ζεύγη τιμών από την ελαστική περιοχή και τάση μικρότερη του ορίου θραύσης.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \cdot 100\% \left(\frac{MPa}{\%} \right) \Rightarrow E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \cdot 100 (MPa)$$

Το όριο διαρροής σ_y (MPa) υπολογίστηκε προσεγγιστικά από τα διαγράμματα σ-ε ως η μέγιστη τιμή πριν το τέλος της γραμμικής περιοχής.

Η πυκνότητα ρ (kg/m^3) υπολογίσθηκε με βάση την πυκνότητα του κάθε δοκιμίου, λαμβάνοντας ως μάζα την μάζα των εκτυπωμένων δοκιμίων αφού ζυγίσθηκαν και ως όγκο το ποσοστό του όγκου του του δοκιμίου μετά την εφαρμογή του μοτίβο.

$$\rho = \frac{m}{x \cdot (0.05 \cdot 0.05 \cdot 0.02)} \Rightarrow \rho = \frac{m}{x \cdot 0.00005} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Οι τιμές που προκύπτουν δίνονται στον Πίνακα 16.

Πίνακας 16: Ιδιότητες των νέων υλικών για τη βιβλιοθήκη υλικών του Solidworks.

Μέγεθος	Hex18.5	Hex27.5	Hex35.5	gyr40	gyr50
Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	9.9	12.8876	12.7091	0.3125	2.39
Όριο διαρροής (MPa)	0.55	1.1	2	0.13	1.06
Πυκνότητα (kg/m^3)	972.97	945.45	957.75	750.00	960.00

5.3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ

Για τον υπολογισμό των φορτίων που θα ασκηθούν στη σόλα χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των Hessert et al. [19]. Στο άρθρο δίνονται οι κατανομές μέγιστης πίεσης κανονικοποιημένες ως προς το σωματικό βάρος (BW), για κάθε ανατομική περιοχή για νεαρά και τα ηλικιωμένα άτομα. Οι τιμές των πιέσεων δίνονται στον Πίνακα 17.

Πίνακας 17: Κανονικοποιημένη μέγιστη πίεση νεαρών και ηλικιωμένων ατόμων για τις εννιά ανατομικές περιοχές

	Κανονικοποιημένη Μέγιστη Πίεση (% BW/cm ²)	
	Νέοι (γ)	Ηλικιωμένοι (ο)
P _H	3.7	2.5
P _T	2.5	2.3
P _{MT1}	3.2	3
P ₃	3.8	3.5
P ₄	2	2
P _{MA}	1.8	1.6
P _{LA}	1	1.3
P _{MC}	4.6	3.2
P _{LC}	3.4	2.8

Προκειμένου να γίνει η εφαρμογή των φορτίσεων για την μελέτη σε στατική καταπόνηση στο Solidworks, γίνεται ο υπολογισμός των τιμών μέγιστης πίεσης σε N/m^2 για τα νεαρά άτομα, για κάθε περιοχή, με βάση τη σχέση:

$$P'_i = P_i \cdot \frac{BW[\text{kg}] \cdot 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]}{100[\%]} [\%] \cdot \frac{1}{[\text{cm}^2] \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{cm}^2} \right]} = P_i \cdot BW \cdot 981 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$$

Ενδεικτικές τιμές του βάρους λαμβάνονται από το διάγραμμα τιμών του δείκτη μάζας σώματος, BMI (Body Mass Index). Ο δείκτης μάζας σώματος υπολογίζεται από τον λόγο του βάρους του ατόμου (BW) σε kg, προς το τετράγωνο του ύψους του (Height) σε m:

$$BMI = \frac{BW[\text{kg}]}{Height^2[\text{m}^2]}$$

Η κατηγοριοποίηση της διατροφικής κατάστασης με βάση τον BMI δίνεται στον Πίνακα 18.

Πίνακας 18: Διατροφική κατάταξη με βάση το BMI [23].

BMI	<18.5	18.5-24.9	25.0-29.9	30.0-34.9	35.0-39.9	40>
Διατροφική κατάσταση	Λιποβαρής	Φυσιολογικό βάρος	Προ-παχυσαρκία	Κατηγορία παχυσαρκίας I	Κατηγορία παχυσαρκίας II	Κατηγορία παχυσαρκίας III

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας της Εικόνας 47 που δείχνει αναλυτικά τις τιμές του δείκτη BMI για διάφορους συνδιασμούς σωματικού βάρους και ύψους για άτομα άνω των 20 ετών

		WEIGHT																																											
		lbs	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	kgs	41	45	50	54	59	64	68	73	77	82	86	91	95	100	104	109	113	118	122	127	132
HEIGHT	ft/in	cm																																											
	4'8"	142.2	20	22	25	27	29	31	34	36	38	40	43	45	47	49	52	54	56	58	61	63	65	142.2	20	22	25	27	29	31	34	36	38	40	43	45	47	49	52	54	56	58	61	63	65
	4'9"	144.7	19	22	24	26	28	30	32	35	37	39	41	43	45	48	50	52	54	56	58	61	63	144.7	19	22	24	26	28	30	32	35	37	39	41	43	45	48	50	52	54	56	58	61	63
	4'10"	147.3	19	21	23	25	27	29	31	33	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	59	61	147.3	19	21	23	25	27	29	31	33	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	59	61
	4'11"	149.8	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	51	53	55	57	59	149.8	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	51	53	55	57	59
	5'0"	152.4	18	20	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	53	55	57	152.4	18	20	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	53	55	57
	5'1"	154.9	17	19	21	23	25	26	28	30	32	34	36	38	40	42	43	45	47	49	51	53	55	154.9	17	19	21	23	25	26	28	30	32	34	36	38	40	42	43	45	47	49	51	53	55
	5'2"	157.4	16	18	20	22	24	26	27	29	31	33	35	37	38	40	42	44	46	48	49	51	53	157.4	16	18	20	22	24	26	27	29	31	33	35	37	38	40	42	44	46	48	49	51	53
	5'3"	160.0	16	18	19	21	23	25	27	28	30	32	34	35	37	39	41	43	44	46	48	50	51	160.0	16	18	19	21	23	25	27	28	30	32	34	35	37	39	41	43	44	46	48	50	51
	5'4"	162.5	15	17	19	21	22	24	26	27	29	31	33	34	36	38	39	41	43	45	46	48	50	162.5	15	17	19	21	22	24	26	27	29	31	33	34	36	38	39	41	43	45	46	48	50
	5'5"	165.1	15	17	18	20	22	23	25	27	28	30	32	33	35	37	38	40	42	43	45	47	48	165.1	15	17	18	20	22	23	25	27	28	30	32	33	35	37	38	40	42	43	45	47	48
	5'6"	167.6	15	16	18	19	21	23	24	26	27	29	31	32	34	36	37	39	40	42	44	45	47	167.6	15	16	18	19	21	23	24	26	27	29	31	32	34	36	37	39	40	42	44	45	47
	5'7"	170.1	14	16	17	19	20	22	24	25	27	28	30	31	33	34	36	38	39	41	42	44	45	170.1	14	16	17	19	20	22	24	25	27	28	30	31	33	34	36	38	39	41	42	44	45
	5'8"	172.7	14	15	17	18	20	21	23	24	26	27	29	30	32	33	35	37	38	40	41	43	44	172.7	14	15	17	18	20	21	23	24	26	27	29	30	32	33	35	37	38	40	41	43	44
	5'9"	175.2	13	15	16	18	19	21	22	24	25	27	28	30	31	33	34	35	37	38	40	41	43	175.2	13	15	16	18	19	21	22	24	25	27	28	30	31	33	34	35	37	38	40	41	43
	5'10"	177.8	13	14	16	17	19	20	22	23	24	26	27	29	30	32	33	34	36	37	39	40	42	177.8	13	14	16	17	19	20	22	23	24	26	27	29	30	32	33	34	36	37	39	40	42
5'11"	180.3	13	14	15	17	18	20	21	22	24	25	27	28	29	31	32	33	35	36	38	39	40	180.3	13	14	15	17	18	20	21	22	24	25	27	28	29	31	32	33	35	36	38	39	40	
6'0"	182.8	12	14	15	16	18	19	20	22	23	24	26	27	28	30	31	33	34	35	37	38	39	182.8	12	14	15	16	18	19	20	22	23	24	26	27	28	30	31	33	34	35	37	38	39	
6'1"	185.4	12	13	15	16	17	18	20	21	22	24	25	26	28	29	30	32	33	34	36	37	38	185.4	12	13	15	16	17	18	20	21	22	24	25	26	28	29	30	32	33	34	36	37	38	
6'2"	187.9	12	13	14	15	17	18	19	21	22	23	24	26	27	28	30	31	32	33	35	36	37	187.9	12	13	14	15	17	18	19	21	22	23	24	26	27	28	30	31	32	33	35	36	37	
6'3"	190.5	11	13	14	15	16	18	19	20	21	23	24	25	26	28	29	30	31	33	34	35	36	190.5	11	13	14	15	16	18	19	20	21	23	24	25	26	28	29	30	31	33	34	35	36	
6'4"	193.0	11	12	13	15	16	17	18	19	21	22	23	24	26	27	28	29	30	32	33	34	35	193.0	11	12	13	15	16	17	18	19	21	22	23	24	26	27	28	29	30	32	33	34	35	
6'5"	195.5	11	12	13	14	15	17	18	19	20	21	23	24	25	26	27	28	30	31	32	33	34	195.5	11	12	13	14	15	17	18	19	20	21	23	24	25	26	27	28	30	31	32	33	34	
6'6"	198.1	10	12	13	14	15	16	17	18	20	21	22	23	24	25	27	28	29	30	31	32	34	198.1	10	12	13	14	15	16	17	18	20	21	22	23	24	25	27	28	29	30	31	32	34	
6'7"	200.6	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	21	23	24	25	26	27	28	29	30	32	33	200.6	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	21	23	24	25	26	27	28	29	30	32	33	
6'8"	203.2	10	11	12	13	14	15	16	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31	32	203.2	10	11	12	13	14	15	16	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31	32	
6'9"	205.7	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	24	24	25	26	27	28	29	30	31	205.7	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	24	24	25	26	27	28	29	30	31	
6'10"	208.2	9	10	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	208.2	9	10	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
6'11"	210.8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	28	29	30	210.8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	28	29	30	

Εικόνα 47: Δείκτης BMI για διάφορες τιμές Σωματικού Βάρους και Ύψους. Η εικόνα προέρχεται από το [24].

Μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι η σόλα θα πρέπει να αντέχει άτομα με δείκτη BMI που να ανήκει στις κατηγορίες "Φυσιολογικό βάρος" (Healthy) και "Προ-παχυσαρκία" (Overweight). Επομένως, για το μέγεθος παπουτσιού 36-37 μπορεί να θεωρηθεί ως μέγιστο ύψος H=175.2 cm και με βάση την Εικόνα μπορεί να επιλεγεί ως μέγιστη τιμή του σωματικού βάρους BW= 86 kg που αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή BMI = 28 στην κατηγορία "Overweight".

Οι μέγιστες πιέσεις για κάθε περιοχή με βάρος BW= 86 kg δίνονται στον Πίνακα 19.

Πίνακας 19: Μέγιστε τιμές πίεσης για κάθε ανατομική περιοχή της σόλας.

Σύμβολο μέγιστης πίεσης (N/m ²)	Τιμή
P'_H	312154.2
P'_T	210915
P'_{MT1}	269971.2
P'_3	320590.8
P'_4	168732
P'_{MA}	151858.8
P'_{LA}	84366
P'_{MC}	388083.6
P'_{LC}	286844.4

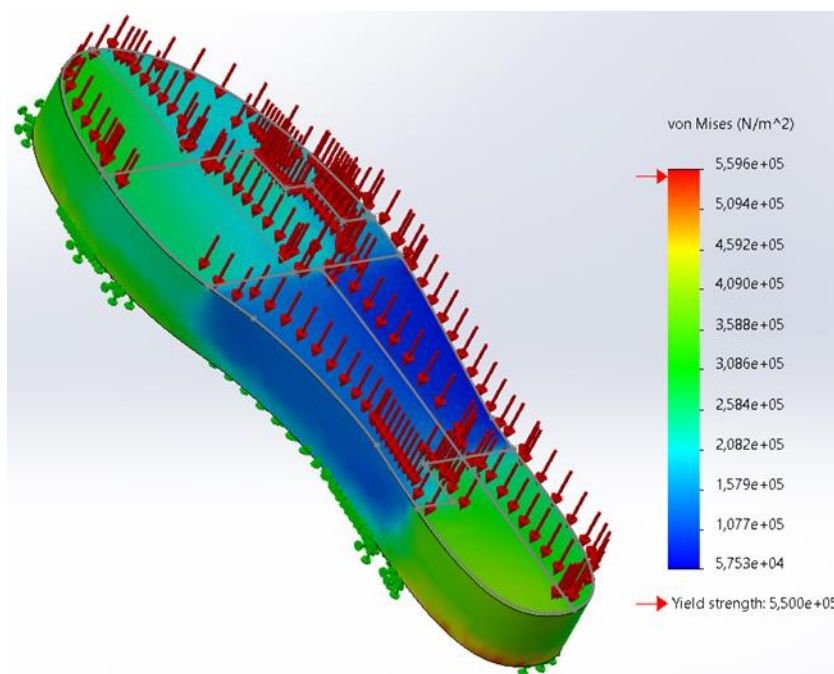
5.3.3 ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ

Και στις δύο δοκιμές οι σόλες θεωρήθηκαν συμπαγείς και εφαρμόστηκαν τα υλικά που ορίστηκαν με βάση τις δοκιμές θλίψης.

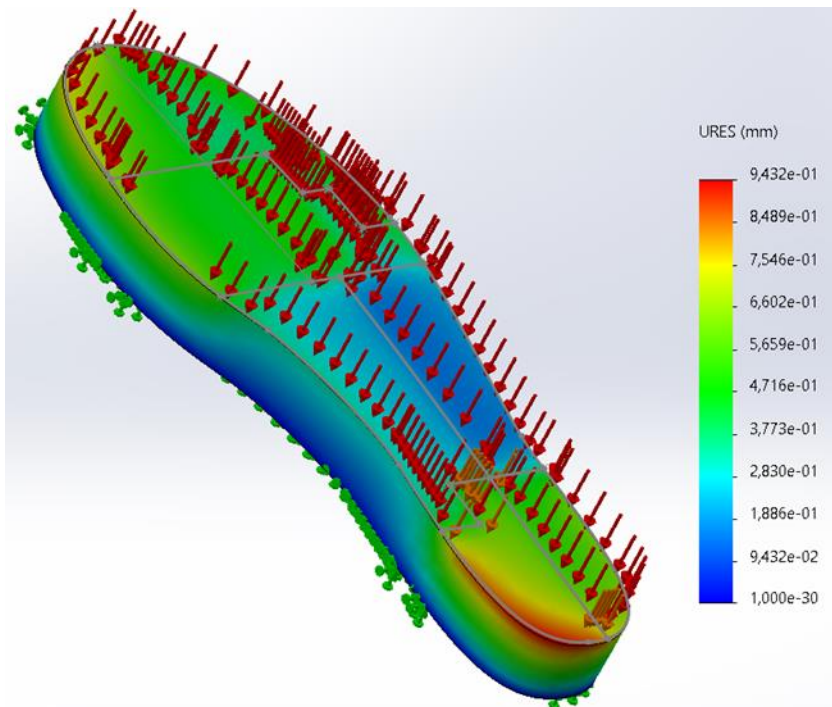
Για τις δοκιμές θλίψης εφαρμόστηκαν τα φορτία του Πίνακα 21 στις αντίστοιχες περιοχές και το κάτω μέρος της σόλας θεωρήθηκε πακτωμένο, για όλες τις περιπτώσεις.

Στις Εικόνες 48-57 φαίνονται η καταπόνηση της σόλας και η μετατόπιση που προκλήθηκε σε πραγματική κλίμακα.

Hexagonal 18.5%

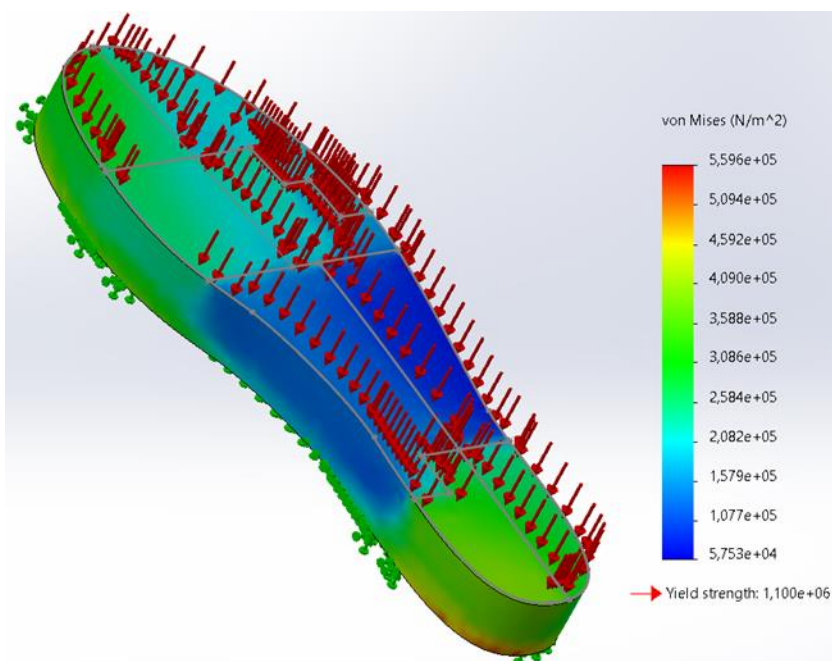


Εικόνα 48: Καταπόνηση σε θλίψη της σόλας με υλικό Hexagonal 18.5%.

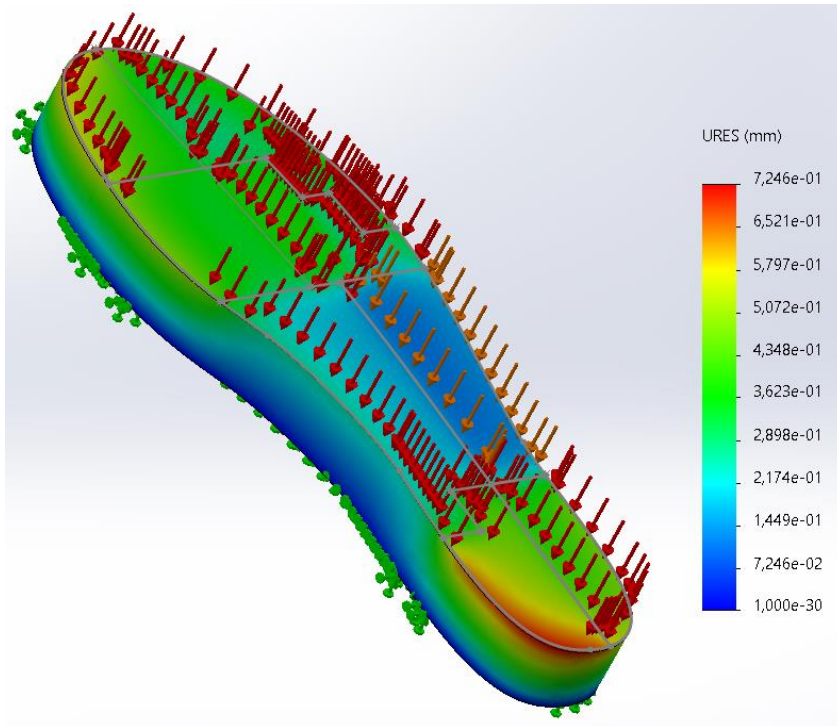


Εικόνα 49: Παραμόρφωση λόγω θλίψης της σόλας με υλικό Hexagonal 18.5%.

Hexagonal 27.5%

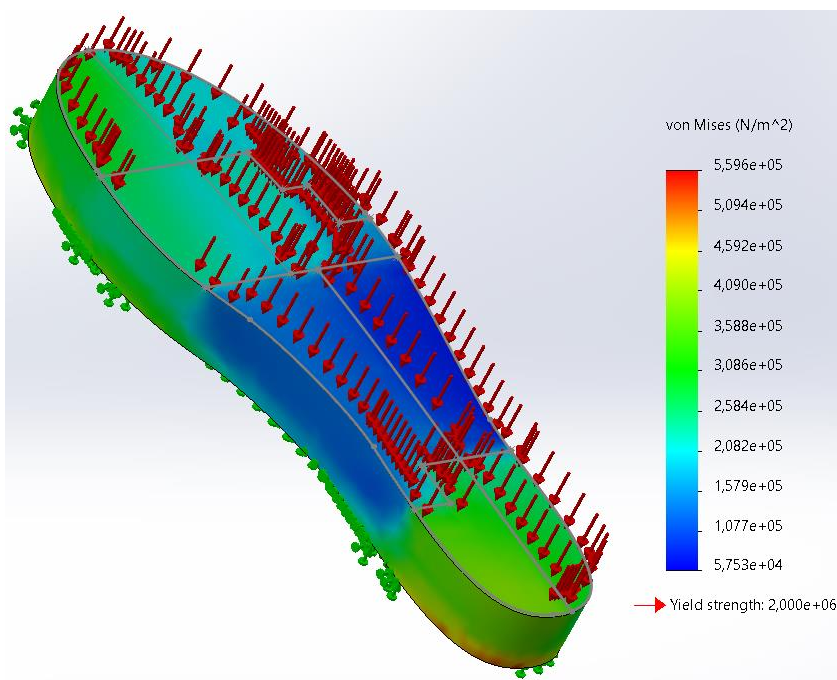


Εικόνα 50: Καταπόνηση σε θλίψη της σόλας με υλικό Hexagonal 27.5%.

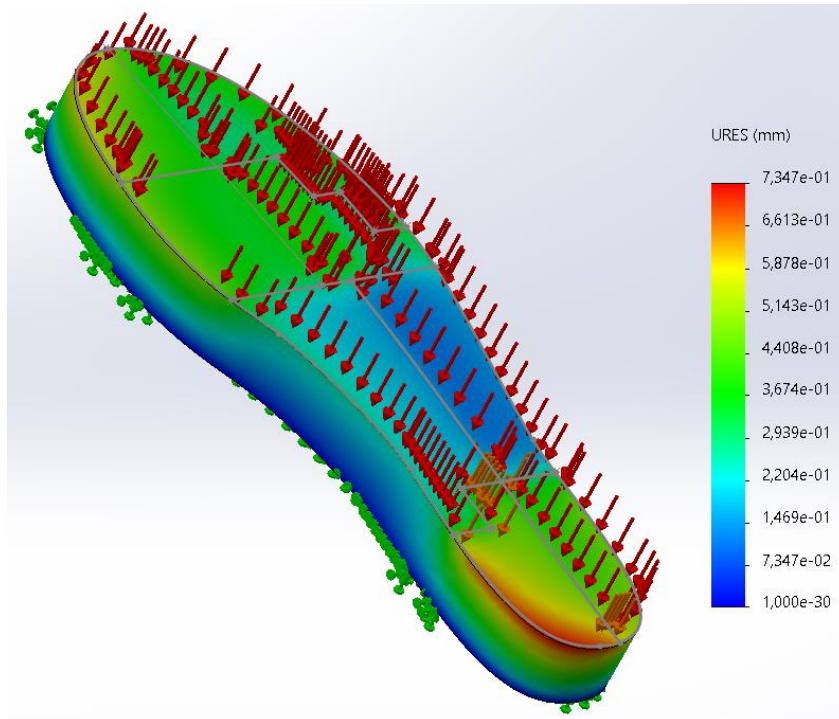


Εικόνα 51: Παραμόρφωση λόγω θλίψης της σόλας με υλικό Hexagonal 27.5%.

Hexagonal 35.5%

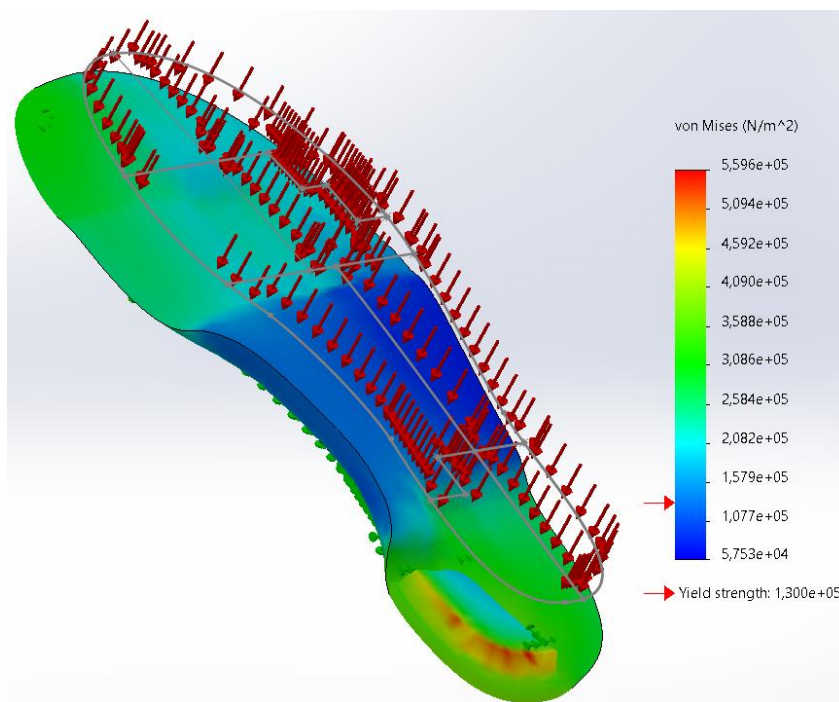


Εικόνα 52: Καταπόνηση σε θλίψη της σόλας με υλικό Hexagonal 35.5%.

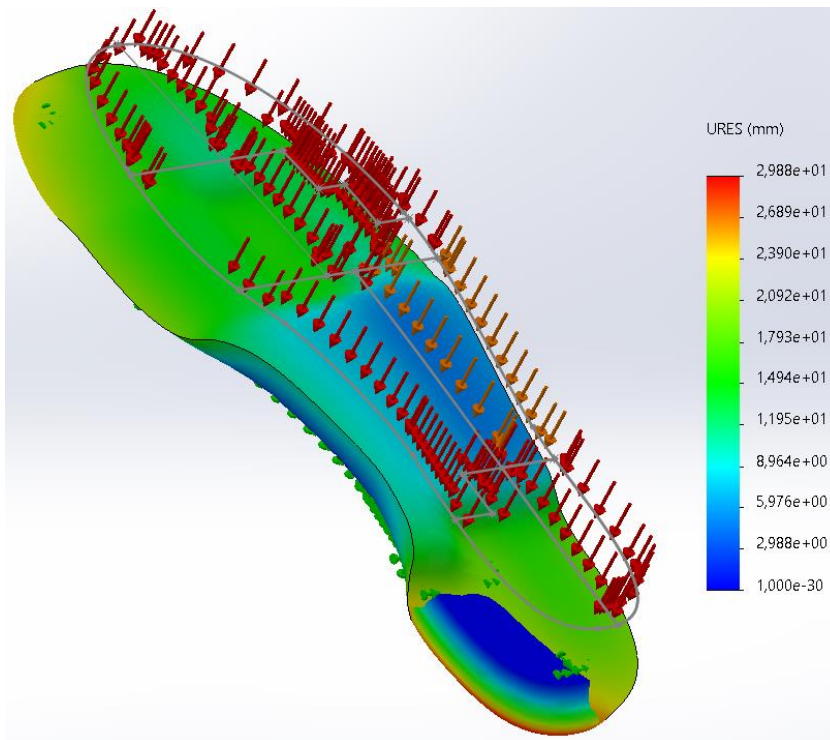


Εικόνα 53: Παραμόρφωση λόγω θλίψης της σόλας με υλικό Hexagonal 35.5%.

Gyroid 40%

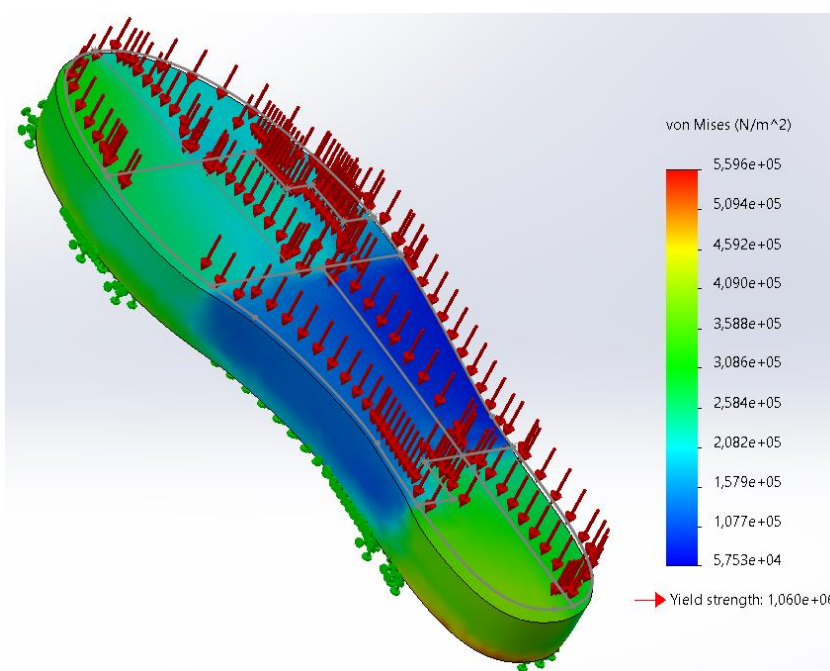


Εικόνα 54: Καταπόνηση σε θλίψη της σόλας με υλικό Gyroid 40%.

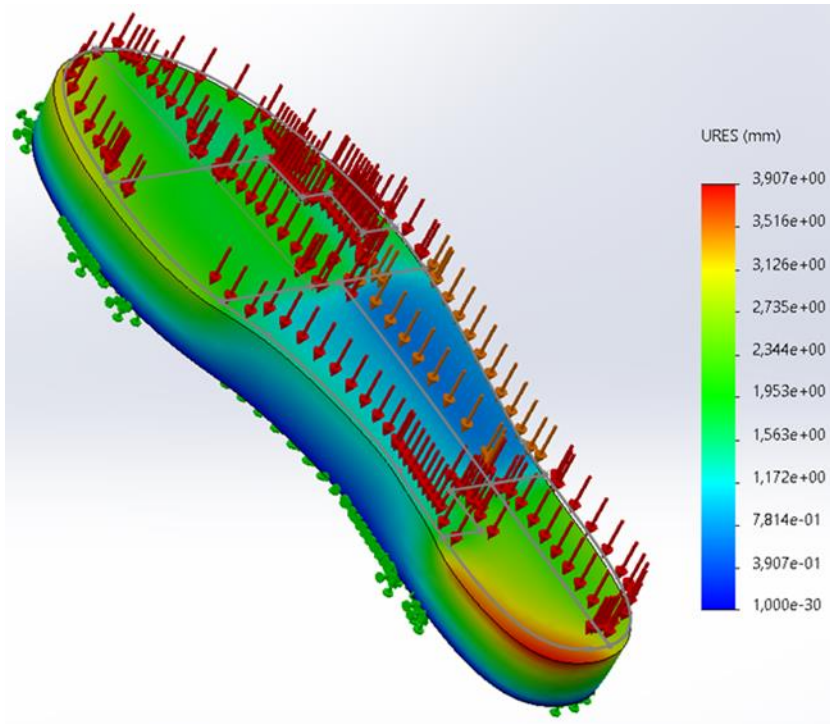


Εικόνα 55: Παραμόρφωση λόγω θλίψης της σόλας με υλικό Gyroid 40%.

Gyroid 50%

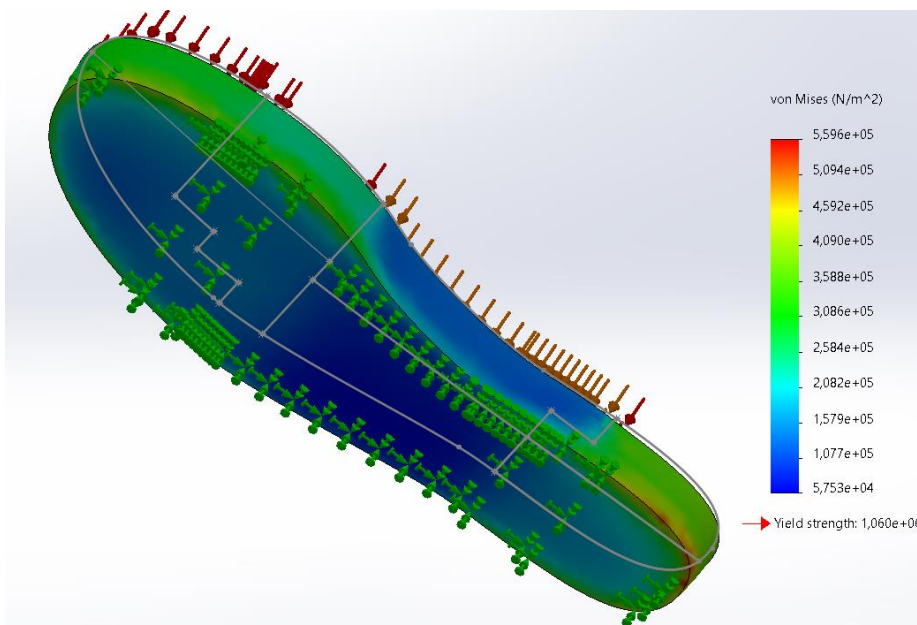


Εικόνα 56: Καταπόνηση σε θλίψη της σόλας με υλικό Gyroid 50%.



Εικόνα 57: Παραμόρφωση λόγω θλίψης της σόλας με υλικό Gyroid 50%.

Οι τάσεις που αναπτύσσονται λόγω των θλιπτικών φορτίων είναι ίδιες για όλες τις δοκιμές ανεξάρτητα από το υλικό, καθώς τα φορτία που ασκούνται και οι περιοχές στις οποίες ασκούνται παραμένουν σταθερά. Στις εικόνες που αναφέρονται στα αποτελέσματα των αναπτυσσόμενων τάσεων παρατηρείται σε ποιές περιοχές οι τάσεις ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού. Στην Εικόνα 58 φαίνεται η περιοχή που εμφανίζεται η μέγιστη τάση, η οποία μοιάζει να είναι ίδια για όλα τα υλικά.



Εικόνα 58: Αναπτυσσόμενες τάσεις λόγω θλιπτικών φορτίων στην κάτω πλευρά της σόλας.

Στον Πίνακα 20 αναφέρονται προσεγγιστικά οι τάσεις που αναπτύσσονται και με βάση τα όρια διαρροής του κάθε υλικού σημειώνονται με ✓ οι περιοχές που αντιστοιχούν σε τάσεις

μικρότερες του ορίου διαρροής και με × οι περιοχές που αντιστοιχούν σε τάσεις που υπερβαίνουν το όριο διαρροής.

Πίνακας 20: Σύγκριση αναπτυσσόμενων τάσεων με τα όρια διαρροής των υλικών.

Ανατομικές Περιοχές	Ασκούμενη Τάση (von Mises) (MPa)	Hex18.5%	Hex27.5%	Hex35.5%	Gyr40%	Gyr50%
		Όριο διαρροής (MPa)				
		0.55	1.1	2	0.13	1.06
H	0.34	✓	✓	✓	×	✓
T	0.22	✓	✓	✓	×	✓
MT1	0.25	✓	✓	✓	×	✓
3	0.24	✓	✓	✓	×	✓
4	0.19	✓	✓	✓	×	✓
MA	0.15	✓	✓	✓	×	✓
LA	0.11	✓	✓	✓	✓	✓
MC	0.39	✓	✓	✓	×	✓
LC	0.29	✓	✓	✓	×	✓
MC στο κάτω μέρος της σόλας (max)	0.559	×	✓	✓	×	✓

Όσον αφορά τις εικόνες με τις μετατοπίσεις, φαίνεται πως στο πρόγραμμα αναπτύσσονται με τον ίδιο τρόπο σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά αλλάζουν οι τιμές ανάλογα με το υλικό. Στον Πίνακα 21 αναγράφονται οι προσεγγιστικές μετατοπίσεις που εμφανίζονται σε κάθε ανατομική περιοχή για κάθε υλικό. Από τις εικόνες φαίνεται πως η μέγιστη μετατόπιση εμφανίζεται στην περιοχή MC της φτέρνας, ενώ αρκετά μεγάλες μετατοπίσεις εμφανίζονται και στο μπροστινό τμήμα της σόλας.

Πίνακας 21: Μετατοπίσεις ανά ανατομική περιοχή της σόλας για κάθε υλικό.

Ανατομικές περιοχές	Μετατόπιση (mm)				
	Hex18.5%	Hex27.5%	Hex35.5%	Gyr40%	Gyr50%
H	0.68	0.51	0.53	22	2.9
T	0.40	0.29	0.31	12	1.6
MT1	0.57	0.45	0.37	19	2.5
3	0.56	0.44	0.36	18	2.4
4	0.31	0.26	0.27	9.5	1.3
MA	0.29	0.22	0.23	9	1.1
LA	0.19	0.12	0.13	6.1	0.79
MC (max)	0.943	0.724	0.734	29.88	3.9
LC	0.66	0.49	0.51	20	2.7

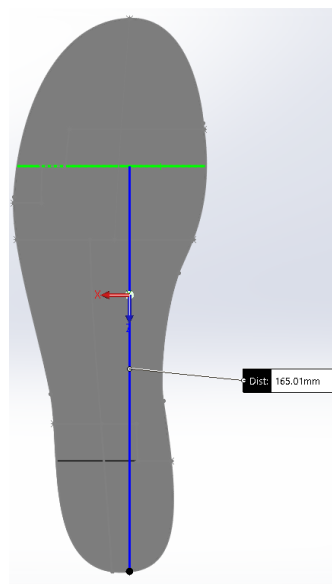
Με βάση τα αποτελέσματα από τη δοκιμή σε θλίψη της σόλας για τα πέντε νέα υλικά που πραγματοποιήθηκε στο Solidworks προκύπτουν μερικά συμπεράσματα. Αρχικά, φαίνεται πως στα υλικά με τα μοτίβο Hexagonal 27.5% και 35.5% οι τάσεις δεν ξεπερνάν το όριο διαρροής και οι μετατοπίσεις που προκύπτουν είναι σχεδόν αμελητέες (μικρότερες του 1mm). Οι τάσεις που αναπτύσσονται στο υλικό με το μοτίβο Hexagonal 18.5% προσεγγίζουν περισσότερο το όριο διαρροής του υλικού, ενώ φαίνεται πως η μέγιστη τάση ($\sigma=0.559$ MPa) ξεπερνά σε μια μικρή περιοχή στο πίσω τμήμα του κάτω μέρους της σόλας το όριο διαρροής ($\sigma_y=0.55$ MPa). Οι μετατοπίσεις, αν και λίγο μεγαλύτερες από τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις, είναι και αυτές σχεδόν αμελητέες (μικρότερες του 1mm).

Όσον αφορά το υλικό με το μοτίβο Gyroid 50%, οι τάσεις δεν ξεπερνάν το όριο διαρροής, αλλά εμφανίζονται μετατοπίσεις μέχρι 3.9mm στην περιοχή MA (στο εσωτερικό τμήμα της φτέρνας).

Οι τάσεις που αναπτύσσονται στο υλικό με το μοτίβο Gyroid 40% φαίνεται να ξεπερνούν το όριο διαρροής ($\sigma_y=0.13$ MPa) σχεδόν σε όλες τις περιοχές. Οι μετατοπίσεις στο μπροστινό και πίσω τμήμα της σόλας φαίνεται να ξεπερνάν το ύψος της (20mm), δηλαδή το υλικό φτάνει στο επίπεδο του εδάφους, ενώ προς το κεντρικό τμήμα είναι μικρότερες. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν αναμενόμενα, καθώς το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή θλίψης μπορούσε να συμπιεστεί ακόμα και με τα χέρια.

5.3.4 ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ

Η μέγιστη γωνία κάμψης που θα πρέπει να ασκηθεί στη σόλα με βάση τη θεωρία είναι $\phi=55^\circ$. Επειδή δεν βρέθηκαν δεδομένα για τη δύναμη με την οποία πρέπει να σηκωθεί το πίσω μέρος της σόλας, υπολογίστηκε το μέγιστο ύψος στο οποίο πρέπει να φτάσει.



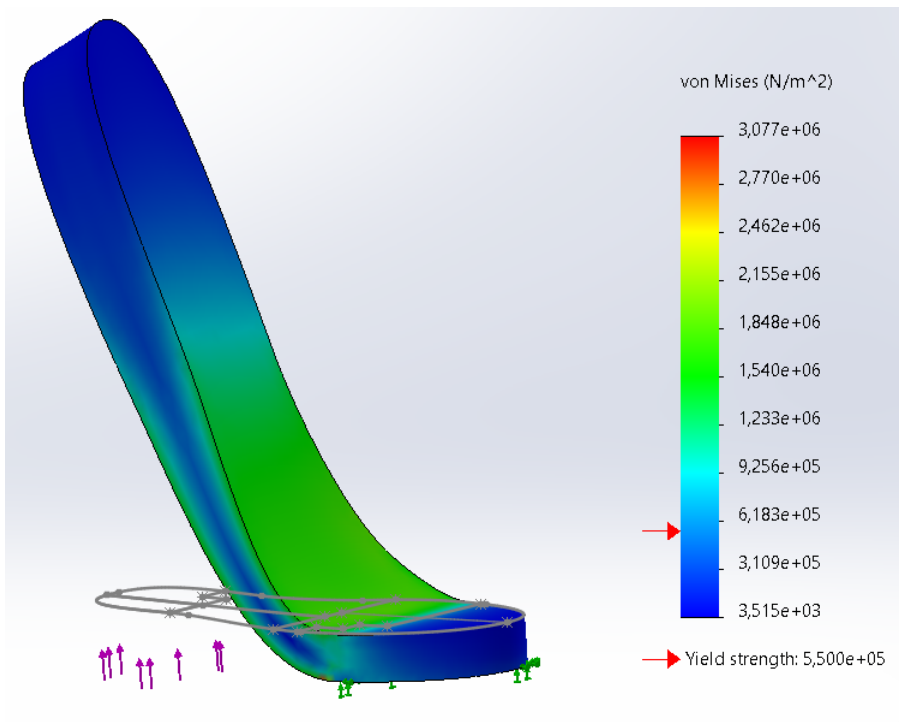
Εικόνα 59: Απόσταση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του μέγιστου ύψους που πρέπει να φτάσει το πίσω τμήμα της σόλας.

Το μέγιστο ύψος ισούται με

$$h_{max} = 165 \cdot \tan 55 = 239.93mm$$

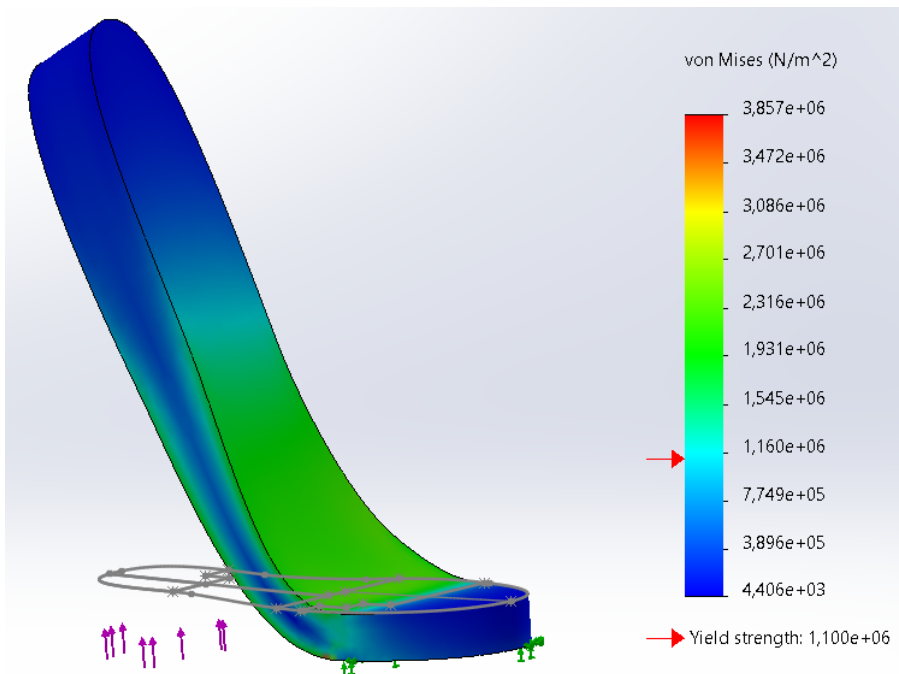
Στο Solidworks ασκήθηκαν δοκιμαστικά φορτία F στο πίσω τμήμα της σόλας μέχρι να προσεγγισθεί το μέγιστο ύψος h_{max} , έχοντας το μπροστινό τμήμα πακτωμένο. Στις Εικόνες 60-64 φαίνεται η καταπόνηση των δοκιμών και έχει σημειωθεί και η δύναμη που ασκήθηκε.

Hexagonal 18.5% (F=75N)



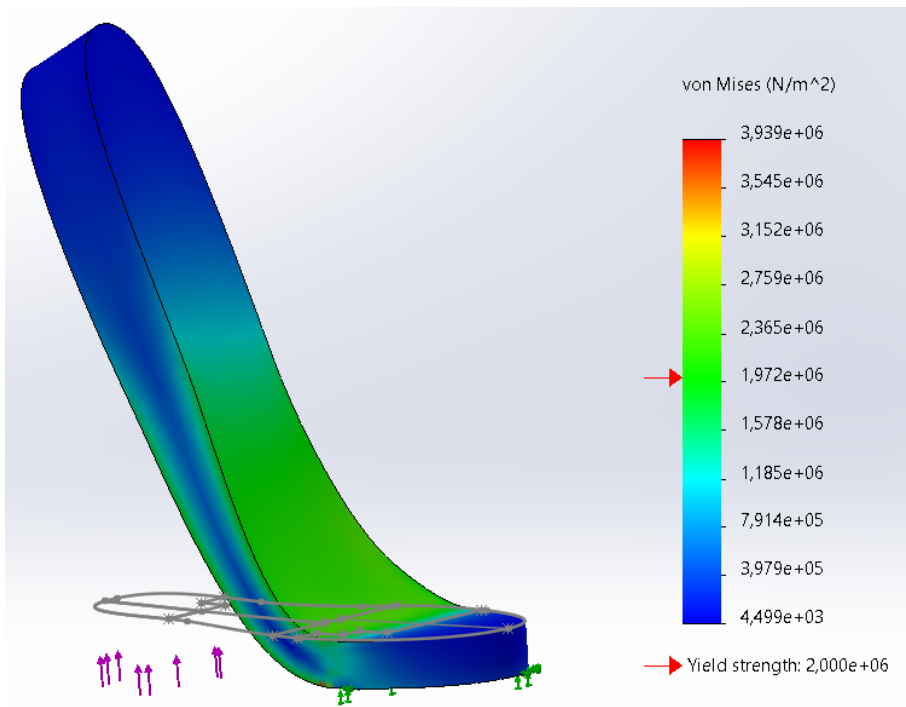
Εικόνα 60: Καταπόνηση σε κάμψη της σόλας με υλικό Hexagonal 18.5%.

Hexagonal 27.5% (F=94N)



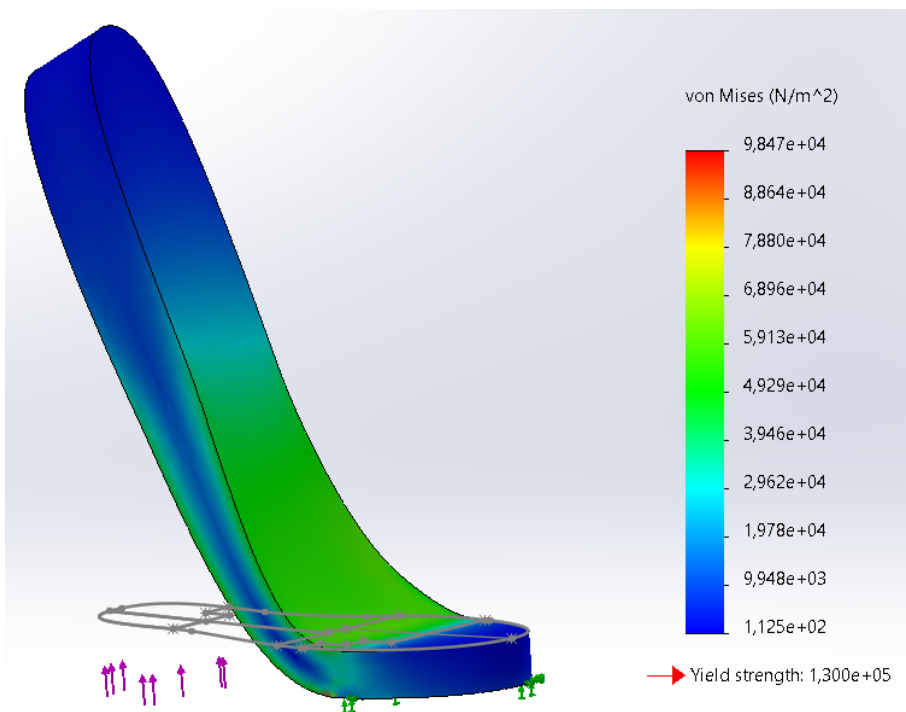
Εικόνα 61: Καταπόνηση σε κάμψη της σόλας με υλικό Hexagonal 27.5%.

Hexagonal 35.5% (F=96N)



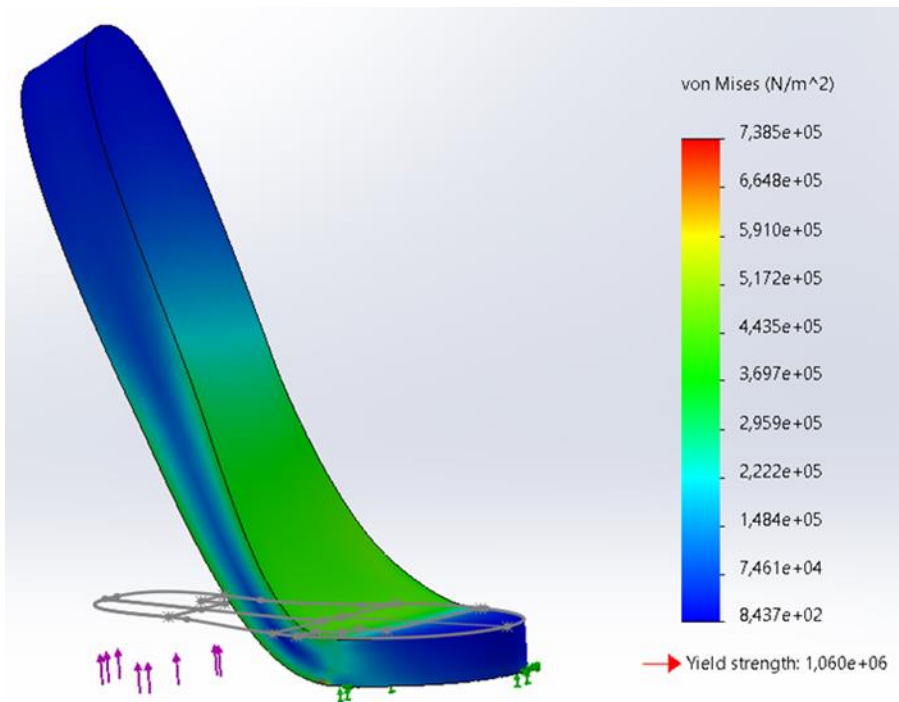
Εικόνα 62: Καταπόνηση σε κάμψη της σόλας με υλικό Hexagonal 35.5%.

Gyroid 40% (F=2.4N)



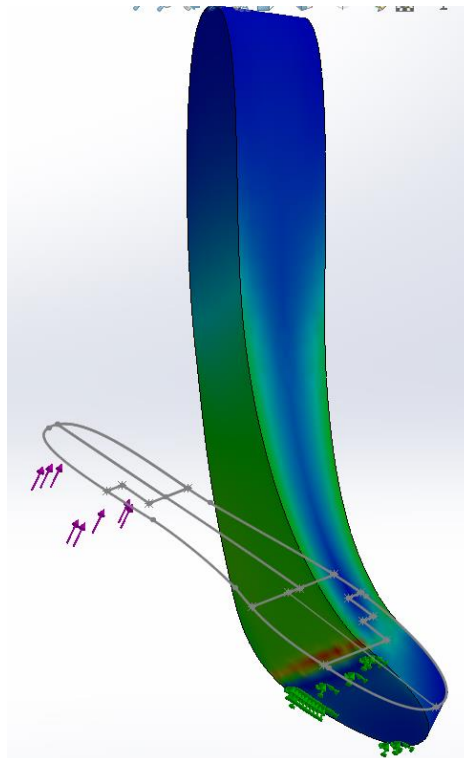
Εικόνα 63: Καταπόνηση σε κάμψη της σόλας με υλικό Gyroid 40%.

Gyroid 50% (F=18N)



Εικόνα 64: Καταπόνηση σε κάμψη της σόλας με υλικό Gyroid 50%.

Με βάση τα αποτελέσματα του Solidworks για την καταπόνηση της σόλας σε κάμψη φαίνεται πως οι τάσεις αυξάνονται γύρω από την περιοχή που κάμπτεται η σόλα. Συγκεκριμένα οι μέγιστες τάσεις φαίνεται να αναπτύσσονται στην περιοχή μετά την στήριξη, στην κάτω πλευρά της σόλας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 65. Στον Πίνακα 22 φαίνονται οι μέγιστες και ελάχιστες τάσεις που αναπτύσσονται σε κάθε περίπτωση.



Εικόνα 65: Αναπτυσσόμενες τάσεις λόγω κάμψης στην κάτω πλευρά της σόλας.

Πίνακας 22: Μέγιστη και ελάχιστη τάση που αναπτύσσεται λόγω κάμψης.

		Hex18.5%	Hex27.5%	Hex35.5%	Gyr40%	Gyr50%
		Όριο διαρροής (MPa)				
		0.55	1.1	2	0.13	1.06
Τάσεις (MPa)	Min	0.0035	0.0044	0.0045	0.00011	0.00084
	Max	3.077	3.857	3.939	0.09847	0.7385

Οι δυνάμεις που απαιτούνται για να καμφθεί η σόλα μέχρι τις 55° δίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 23.

Πίνακας 23: Φορτία που απαιτούνται για την μέγιστη κάμψη της σόλας για κάθε υλικό

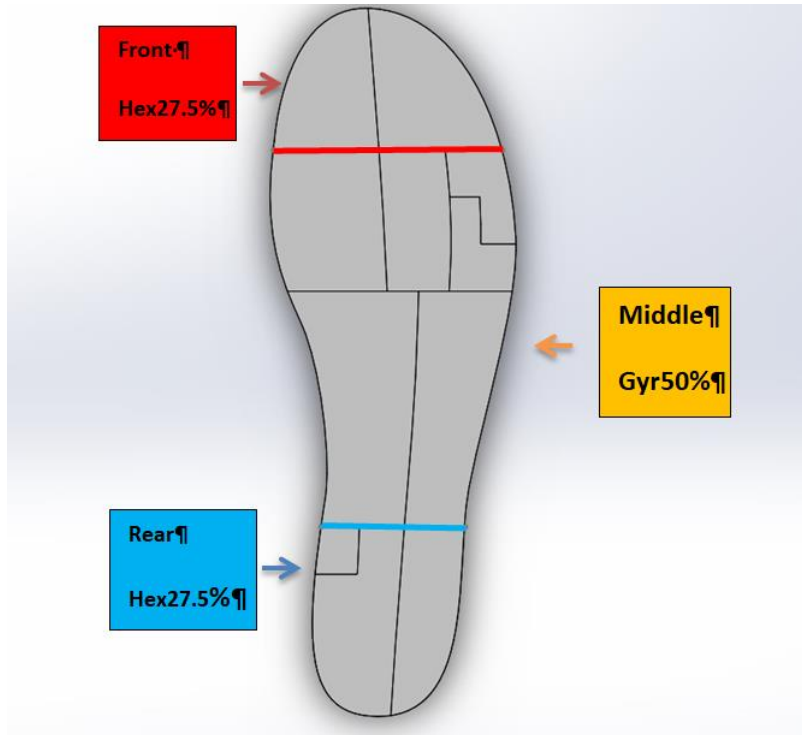
	Hex18.5%	Hex27.5%	Hex35.5%	Gyr40%	Gyr50%
Φορτίο (N)	75	94	96	2.4	18

Παρατηρείται ότι στα υλικά με τα μοτίβο Hexagonal ξεπερνάται το όριο διαρροής. Καθώς, όμως, το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ως πρώτη ύλη είναι ιδιαίτερα ελαστικό και μετά τις δοκιμές θλίψης όλα τα δοκίμια επανήλθαν στην αρχική τους κατάσταση με ελάχιστες αστοχίες, δεν είναι σίγουρο αν το υλικό θα αστοχήσει ή θα επανέλθει στην αρχική του κατάσταση. Στα υλικά με μοτίβο Gyroid δεν παρατηρείται αντίστοιχο πρόβλημα. Όσον αφορά τα φορτία που απαιτούνται η διαφορά μεταξύ των δύο μοτίβο είναι σημαντική, με τα Hexagonal να φτάνουν κοντά στα 100N, ενώ τα Gyroid σχεδόν στα 20N.

5.4 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

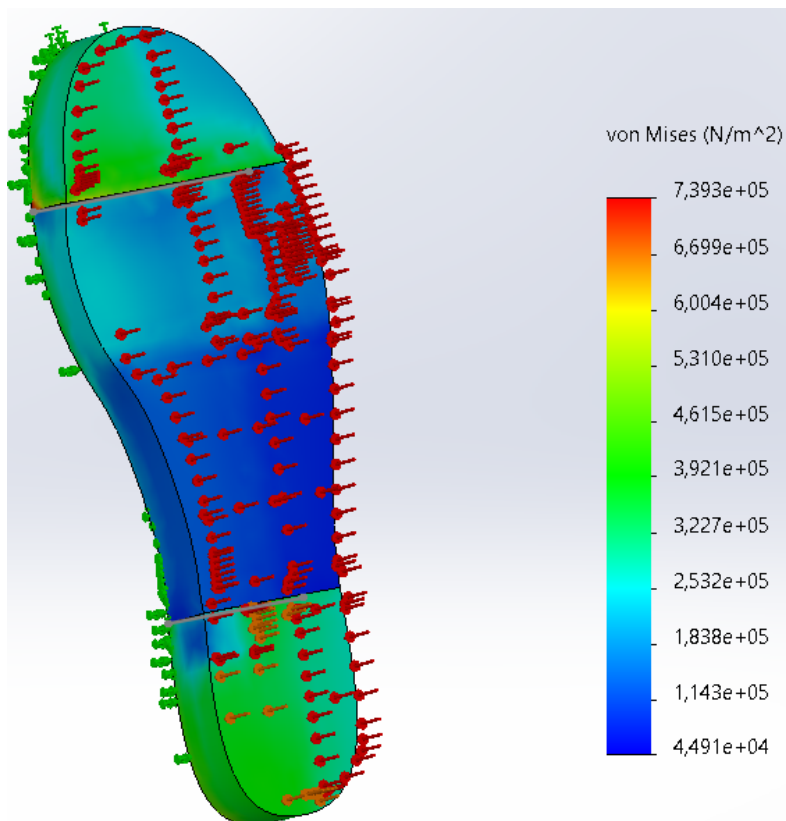
Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, προτείνεται να χρησιμοποιηθεί στην ίδια σόλα ένας συνδιασμός των δύο μοτίβο, με στόχο να αξιοποιηθούν η αντοχή του μοτίβου Hexagonal και η ευκαμψία του μοτίβου Gyroid. Ο στόχος αυτής της δοκιμής είναι να γίνει μια προσπάθεια βελτίωσης της αντοχής της σόλας.

Παρατηρήθηκε ότι οι μέγιστες καταπονήσεις λόγω των θλιπτικών φορτίων εμφανίζονται στο μπροστινό και πίσω τμήμα της σόλας, στις περιοχές H, MT1, MC και LC. Οι μέγιστες καταπονήσεις λόγω της κάμψης εμφανίζονται στο κεντρικό τμήμα, που αντιστοιχεί στις περιοχές MT1, 3 και 4. Για τον λόγο αυτό η σόλα χωρίζεται σε τρία τμήματα, Front, Middle και Rear, όπως φαίνεται στην Εικόνα 66. Στα τμήματα Front και Rear χρησιμοποιήθηκε το υλικό με μοτίβο Hexagonal 27.5%, καθώς δεν ξεπερνάται το όριο διαρροής του και έχει παρόμοιες ιδιότητες με το Hexagonal 35.5%. Στο τμήμα Middle χρησιμοποιήθηκε το υλικό με μοτίβο Gyroid 50%, καθώς είχε καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από το Gyroid 40%.

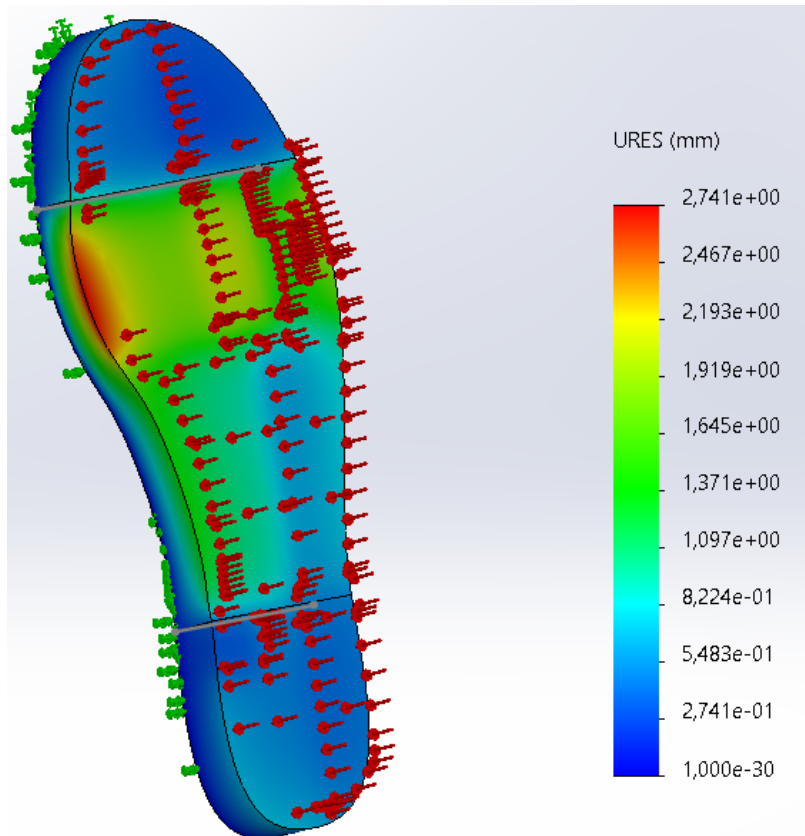


Εικόνα 66: Περιοχές της σόλας στις οποίες εφαρμόζονται τα διαφορετικά υλικά

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε δοκιμή θλίψης με τις ίδιες συνθήκες όπως και στις υπόλοιπες περιπτώσεις. Στις Εικόνες 67 και 68 φαίνονται τα αποτελέσματα των αναπτυσσόμενων τάσεων και μετατοπίσεων, αντίστοιχα.



Εικόνα 67: Καταπόνηση λόγω θλίψης της σόλας με τον συνδυασμό υλικών στο Solidworks.

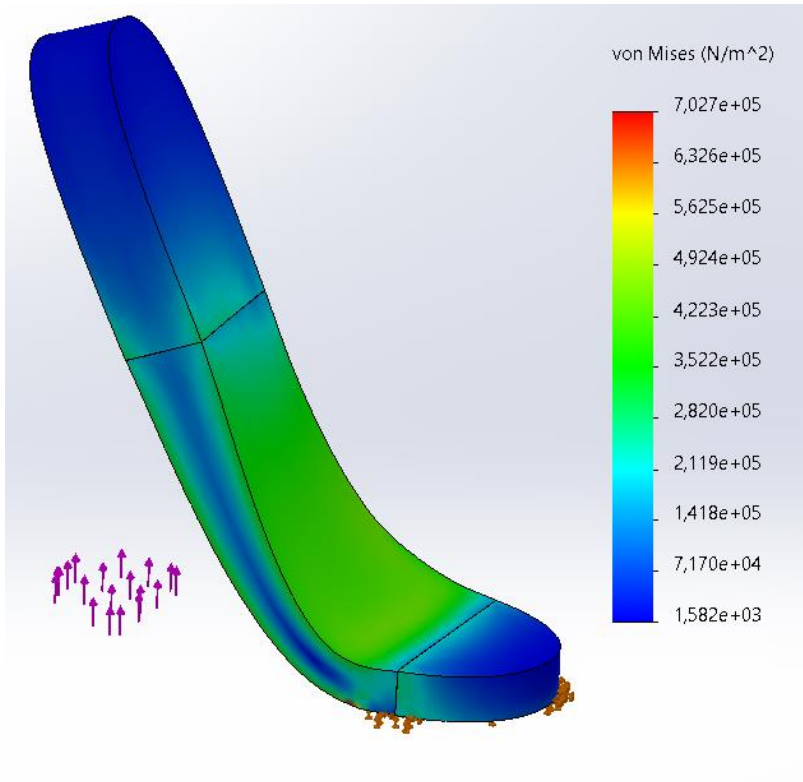


Εικόνα 68: Παραμόρφωση λόγω θλίψης της σόλας με τον συνδυασμό υλικών στο Solidworks.

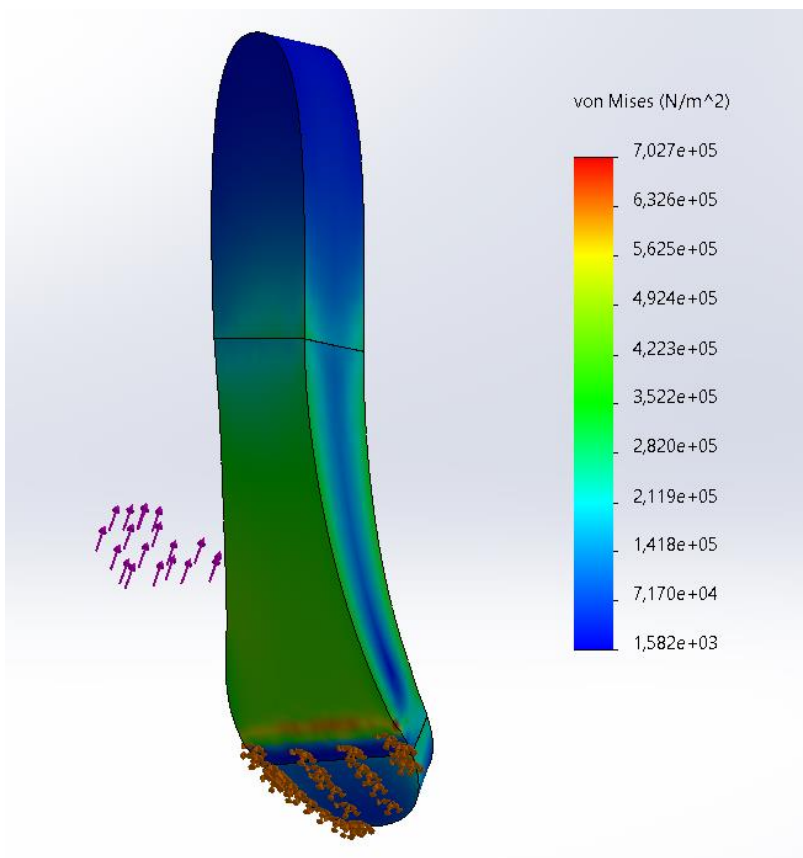
Το όριο διαρροής του υλικού με μοτίβο Hexagonal 27.5% είναι $\sigma_y=1.1$ Mpa και του Gyroid 50% είναι $\sigma_y=1.06$ Mpa. Εφόσον η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται είναι $\sigma=0.739$ MPa, δεν υπερβαίνεται σε κανένα σημείο το όριο διαροής των υλικών.

Όσον αφορά την μετατόπιση, στα τμήματα που αποτελούνται από το υλικό με το μοτίβο Hexagonal 27.5% είναι αμελητέα. Η μέγιστη μετατόπιση είναι 2.72 mm στην περιοχή MT1, με μετατοπίσεις της τάξης του 1.8mm και στις περιοχές 3 και 4, όπου έχει εφαρμοσθεί το υλικό με το μοτίβο Gyroid 50%. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό μιας και στην περιοχή των μεταταρσίων ασκούνται σχετικά μεγάλα φορτία, αλλά επειδή αποτελούν την περιοχή που κάμπτεται δεν θα μπορούσε να ενισχυθεί με τη χρήση του μοτίβο Hexagonal. Πρόκειται για μια περιοχή που απαιτεί την μέγιστη προσοχή κατά τον σχεδιασμό, και που πιθανόν θα χρειαζόταν να χρησιμοποιηθεί κάποιο εναλλακτικό μοτίβο.

Για τη δοκιμή κάμψης εφαρμόστηκε η δύναμη που αντιστοιχεί στο υλικό με μοτίβο Gyroid 50%, δηλαδή $F=18$ N. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις Εικόνες 69 και 70. Η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται είναι $\sigma=0.702$ MPa, που είναι μικρότερη του ορίου διαρροής του υλικού με μοτίβο Gyroid 50%, όπως ήταν αναμενόμενο από τα προηγούμενα αποτελέσματα.



Εικόνα 69: Καταπόνηση λόγω κάμψης της σόλας με τον συνδυασμό υλικών στο Solidworks.



Εικόνα 70: Καταπόνηση λόγω κάμψης της σόλας με τον συνδυασμό υλικών στο Solidworks. Σημείο ανάπτυξης μέγιστων τάσεων.

Φυσικά, το μοντέλο αυτό αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση και χρειάζεται να εξετασθούν πολλές παράμετροι μέχρι να φτάσει στο σημείο της εκτύπωσης. Είναι σημαντικό να ερευνηθεί αν υπάρχει τρόπος σύνδεσης των διαφορετικών μοτίβο, έτσι ώστε να μπορούν να εκτυπωθούν. Σε διαφορετική περίπτωση, αποτελεί ένα ενδιαφέρον θέμα για μελλοντική μελέτη.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την πρόοδο στην επιστήμη και την τεχνολογία αναπτύσσονται νέα υλικά και τεχνολογίες κατεργασίας προσφέροντας καινούριες δυνατότητες σε πολλούς τομείς, όπως αυτός της κατασκευής υποδημάτων. Μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα τεχνολογία που έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται σε αυτόν τον τομέα είναι η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Κάποιοι από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της είναι ότι μπορούν να παραχθούν αντικείμενα με περίπλοκες εσωτερικές γεωμετρίες, με μικρή παραγωγή απορριμμάτων και ότι δεν απαιτείται βοηθητικός εξοπλισμός, όπως για παράδειγμα καλούπια. Παρόλα τα πλεονεκτήματα της μεθόδου συναντώνται προβλήματα τα οποία εμποδίζουν την επικράτησή της στον τομέα της μαζικής παραγωγής. Ακόμα, το κόστος των υλικών είναι υψηλό, με την μαζική παραγωγή αυξάνεται σημαντικά ο χρόνος εκτύπωσης και, τέλος, δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα για το πώς μεταβάλλονται οι ιδιότητες των υλικών μετά την εκτύπωση τους.

Σε αυτήν την εργασία έγινε μια προσπάθεια να κατανοηθούν οι μεταβολές που προκύπτουν μετά την τρισδιάστατη εκτύπωση και να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μίας λειτουργικής σόλας παπουτσιού. Η μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης που επιλέχθηκε είναι η Fused Deposition Modeling (FDM). Εκτυπώθηκαν πέντε δοκίμια, χρησιμοποιώντας ως υλικό το Ultimaker TPU 95A. Οι παράμετροι πλήρωσης που μελετήθηκαν είναι το μοτίβο και το ποσοστό πλήρωσης και οι συνδυασμοί που εκτυπώθηκαν είναι Gyroid 40%, Gyroid 50%, Hexagonal 18.5%, Hexagonal 27.5% και Hexagonal 35.5%. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλίψης από τις οποίες προέκυψαν οι καμπύλες σ-ε για τον κάθε συνδυασμό. Στην συνέχεια, αυτές οι καμπύλες χρησιμοποιήθηκαν στο Solidworks ώστε να ορισθούν πέντε νέα υλικά που θα αντιπροσωπεύουν αυτούς τους συνδυασμούς. Τέλος, σχεδιάστηκε στο Solidworks η επιθυμητή σόλα και έγιναν δοκιμές θλίψης και κάμψης με τα νέα υλικά σε αυτό το λογισμικό.

Από την μελέτη αυτή μπορούν να προκύψουν ορισμένα συμπεράσματα. Αρχικά, από τις δοκιμές στο Solidworks φαίνεται ότι τα υλικά με μοτίβο hexagonal μπορεί να είναι πιο ανθεκτικά σε θλίψη και να μην παραμορφώνονται σχεδόν καθόλου, απαιτούν όμως πολύ μεγαλύτερα φορτία για να καμφθούν από τα υλικά με Gyroid μοτίβο. Αντιθέτως, τα υλικά με μοτίβο Gyroid παραμορφώνονται περισσότερο και κάμπτονται πολύ πιο εύκολα. Αυτή η διαφορά είναι ιδιαίτερα σημαντική, γιατί συνήθως αναζητούνται υποδήματα που να μπορούν να παραμορφώνονται εύκολα χωρίς να χάνουν το αρχικό τους σχήμα. Το μοτίβο Hexagonal θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή σε θλίψη στην out-of-plane κατεύθυνση, καθώς παρατηρείται ότι για μικρότερα ποσοστά πλήρωσης (μικρότερη κατανάλωση υλικού άρα και κόστους) είναι πιο ανθεκτικά σε τέτοιου είδους καταπόνηση. Ένα, ακόμα, πιθανό μειονέκτημα του μοτίβο hexagonal είναι ότι μπορεί να μην είναι αρκετά αναπνευστικό στην επιφάνεια επαφής με το πέλμα λόγω της επίπεδης επιφάνειας και των κενών από τα οποία αποτελείται. Στον αντίποδα, το μοτίβο Gyroid είναι αρκετά πιο ευχάριστο στην επιφάνειά του, εξαιτίας ίσως της έλλειψης γωνιών και τη δημιουργία μικρότερων κενών. Όσον αφορά τον χρόνο κατασκευής, φαίνεται πως το μοτίβο Gyroid εκτυπώνεται γρηγορότερα. Μια εξήγηση μπορεί να είναι το γεγονός ότι η κίνηση του ακροφυσίου είναι συνεχής δημιουργώντας καμπύλες, ενώ στο Hexagonal υπήρχαν πολλές ακμές και αλλαγές στη διεύθυνση κίνησης. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για την κατασκευή μιας σόλας το μοτίβο Gyroid θα ανταποκρινόταν καλύτερα στις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής.

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση που επιδέχεται εξέλιξη. Αρχικά, θα είχε ενδιαφέρον σε μελλοντική εργασία να μελετηθεί ο σχεδιασμός υβριδικών μοτίβο όπως αυτό που αναφέρθηκε προηγουμένως, καθώς θα ήταν δυνατό να κατασκευάζονται ενιαία τεμάχια με τη βέλτιστη γεωμετρία ανάλογα με τις καταπονήσεις που δέχεται κάθε περιοχή τους. Θα μπορούσε, επίσης, να μελετηθεί για την συγκεκριμένη εφαρμογή η δημιουργία υλικού με διαβαθμισμένη πυκνότητα χρησιμοποιώντας ως μοτίβο πλήρωσης το Gyroid [25]. Μία ακόμα πρόταση θα ήταν με το ίδιο υλικό να μελετηθούν και άλλα μοτίβο πλήρωσης, όπως

το grid, και να συγκριθούν με το Gyroid. Σχετικά με το μοτίβο Hexagonal, θα μπορούσε να μελετηθεί η συμπεριφορά του σε καταπόνηση στην in-plane κατεύθυνσή του χρησιμοποιώντας το ίδιο υλικό, γιατί από τα δοκίμια παρατηρήθηκε ότι μπορούσε να παραμορφωθεί πιο εύκολα σε αυτήν την κατεύθυνση. Τέλος, θα μπορούσαν να προστεθούν χαρακτηριστικά, όπως εξωτερικό τοίχωμα, και να γίνει βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της σόλας προκειμένου να ακολουθεί την γεωμετρία του πέλματος.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] F. Pasquale, G. Salvatore, L. Antonio και S. Luca, «Improving comfort of shoe sole through experiments based on CAD-FEM modeling,» *Medical Engineering & Physics*, τόμ. 35, αρ. 1, pp. 36-46, 2013.
- [2] Z. Xiaoguang, G. Yaodong, Y. Jiabin, M. Ye και Z. Zhexiao, «The Influence of Gender, Age, and Body Mass Index on Arch Height and Arch Stiffness,» *The Journal of Foot & Ankle Surgery*, τόμ. 59, αρ. 2, pp. 298-302, 2020.
- [3] W. C. Hutton και M. Dhanendran, «A study of the distribution of load under the normal foot during walking,» *International orthopaedics*, τόμ. 3, αρ. 2, pp. 153-157, 1979.
- [4] E. C. Panagiotis, G. Alfred, F. Cynthia, F. Kurt και C. Nachiappan, «Optimised cushioning in diabetic footwear can significantly enhance their capacity to reduce plantar pressure,» *Gait & Posture*, τόμ. 79, pp. 244-250, 2020.
- [5] K. Tim, W. Jun και C. L. W. Charlie, «CrossFill: Foam Structures with Graded Density for Continuous Material Extrusion,» *Computer-Aided Design*, τόμ. 114, pp. 37-50, 2019.
- [6] G.-H. S., A. A. και G.-G. D., «A continuum constitutive model for FDM 3D printed thermoplastics,» *Composites Part B*, τόμ. 201, p. 108373, 2020.
- [7] J. S. I., S. P. και G. J., «A review on the various processing parameters in FDM,» *Materials Today: Proceedings*, τόμ. 37, αρ. 2, pp. 509-514, 2021.
- [8] K. Saifuddin, J. Ketan και D. Samadhan, «A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts,» *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [9] W. C. Carl και R. Andrew, «Foot Biomechanics During Walking and Running,» *Mayo Clin Proceedings*, τόμ. 69, αρ. 5, pp. 448-461, 1994.
- [10] P. Jacquelin, «Ankle and Foot Complex,» σε *Gait Analysis: Normal and pathological function*, Thorofare, NJ, SLACK Incorporated, 1992, pp. 82-119.
- [11] Ι. Γ. Κωνσταντίνος, «Μονοαξονική Θλίψη,» σε *Πειραματική Αντοχή Υλικών*.
- [12] Ι. Γ. Κωνσταντίνος, «Καθαρή Κάμψη,» σε *Πειραματική Αντοχή Υλικών*.
- [13] S. Madhukar, C. Aleksander και V. S. Chandra, «Development of constitutive material model of 3D printed structure via FDM,» *Materials Today Communications*, τόμ. 15, pp. 143-152, 2018.
- [14] W. Kui, X. Xun, W. Jin, Z. Andong, P. Yong και R. Yanni, «Effects of infill characteristics and strain rate on the deformation and failure properties of additively manufactured

- polyamide-based composite structures,» *Results in Physics*, τόμ. 18, p. 103346, 2020.
- [15] L. Dawei, L. Wenhe, D. Ning και M. X. Yi, «Comparison of Mechanical Properties and Energy Absorption of Sheet-Based and Strut-Based Gyroid Cellular Structures with Graded Densities,» *Materials*, τόμ. 12, αρ. 13, p. 2183, 2019.
- [16] Z. Chengjun, L. Liwu, B. Wenfeng, L. Jinsong και L. Yanju, «Compression behavior and energy absorption of 3D printed continuous fiber reinforced composite honeycomb structures with shape memory effects,» *Additive Manufacturing*, τόμ. 38, p. 101842, 2021.
- [17] S. Lin, H. Shuangfeng, P. Xingshuang, J. Xigao και W. Jinyan, «Development of 3D-printed basalt fiber reinforced thermoplastic honeycombs with enhanced compressive mechanical properties,» *Composites Part A*, τόμ. 125, p. 105518, 2019.
- [18] M. Nasiha και E. P. Albert, «Simple 3-D Visualization of Some Common Mathematical Minimal Surfaces using MATLAB».
- [19] J. H. M., V. M., L. J., H. K., A. L. L. και N. V., «Foot pressure distribution during walking in young and old adults,» *BMC Geriatrics*, τόμ. 5, αρ. 1, 2005.
- [20] Z. J. και F. A. M., «The out-of-plane properties of honeycombs,» *International Journal of Mechanical Sciences*, τόμ. 34, αρ. 6, pp. 475-489, 1992.
- [21] W. Jian και C. Ying, «Influence of the Geometric Parameters on the Densification Onset Strain of Double-Walled Honeycomb Aluminum under Out-of-Plane Compression,» *Advances in Materials Science and Engineering*, τόμ. 2020, p. 7, 2020.
- [22] Z. Xiaoyang, F. Zhibing, D. Kai, W. Chaoyang και Y. Yong, «Minimal surface designs for porous materials: from microstructures to mechanical properties,» *Journal of Materials Science*, τόμ. 51, αρ. 11, pp. 10194-10208, 2018.
- [23] «World Health Organization,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.euro.who.int/en/health-topics/disease-prevention/nutrition/a-healthy-lifestyle/body-mass-index-bmi>.
- [24] «BMI Calculator Ireland,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://bmiccalculatorireland.com/>.
- [25] K. Tim, W. Jun και C. L. W. Charlie, «CrossFill: Foam Structures with Graded Density for Continuous Material Extrusion,» *Computer-Aided Design*, τόμ. 114, pp. 37-50, 2019.