



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μοντελοποίηση του
γεμίσματος (infill) σε
τριδιάστατα εκτυπωμένα
αντικείμενα με χρήση τεχνικών
ομογενοποίησης και τοπολογική
βελτιστοποίηση»

ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΑΠΟΥΝΗΣ

Επιβλέπων: Αναπληρωτής
Καθηγητής Βασίλειος Σπιτάς

ΑΘΗΝΑ 2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μοντελοποίηση αντικειμένων όπου:

- το εσωτερικό τους έχει δομή εξάεδρης κυψέλης (honeycomb),
- το εσωτερικό τους έχει δομή πλέγματος (grid) και
- η δομή τους αποτελείται από διαδοχικά στρώματα υλικού (προσομοίωση FDM διεργασίας).

Στόχος της μοντελοποίησης είναι η μείωση του υπολογιστικού κόστους της μέτρησης των μηχανικών ιδιοτήτων αντικειμένων με σύνθετη δομή όπως τα προαναφερθέντα.

Τέλος, εξετάζεται αν οι παραπάνω δομές επηρεάζουν την τελική γεωμετρία που εξάγεται μέσω της μαθηματικής μεθόδου Topology Optimization.

ABSTRACT

In the present thesis, objects are modeled that:

- their interior has a hexagonal cell structure (honeycomb),
- their interior has a grid structure and
- their structure consists of successive layers of material (FDM process simulation).

The goal of the modeling is to reduce the computational power needed for measuring the mechanical properties of objects with a complex structure such as the above.

In the end, it is examined whether the above structures affect the final geometry extracted through the mathematical method Topology Optimization.

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
3D-Printing.....	11
RVE (Representative Volume Element).....	13
Ανισότροπα Υλικά.....	14
Topology Optimization.....	15
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	16
Στόχος	16
Δημιουργία δοκιμών	16
Honeycombs	17
Grids.....	18
Πλακίδια	19
Μεθοδολογία δημιουργίας ισοδύναμων μοντέλων	20
Ισοδύναμα μοντέλα	24
Honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,25mm	25
Honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5mm	26
Honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,5mm	27
Honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,5mm περιστραμμένο 90°	28
Honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,25mm	29
Honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,5mm	30
Honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,25mm	31
Grid πλευράς 1mm και διάκενο 1mm.....	32
Grid πλευράς 1mm και διάκενο 2mm.....	33
Προσομοίωση FDM διεργασίας	34
Topology Optimization.....	39
Αποτελέσματα.....	40
ABS plastic	40
ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,25.....	41
ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5.....	42
ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5 περιστραμμένο 90°	43
ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,5.....	44
ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,25.....	45
ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,5.....	46
ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,25.....	47

ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 1mm	48
ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 2mm	49
ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,0007mm	50
ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,001mm	51
ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,002mm	52
Σχολιασμός αποτελεσμάτων	53
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	54

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1 Εσωτερική όψη τράπεζας εργασίας 3D-printer (Marr, 2018)	11
Εικόνα 2 Σύνθετη γεωμετρία φωτιστικού εκτυπωμένο από 3D-printer (Hosmer, 2013)	13
Εικόνα 3 a: honeycomb infill pattern, b: grid infill pattern.....	14
Εικόνα 4 Bracket πριν (a) και μετά (b) το Topology Optimization.....	15
Εικόνα 5 Κυψέλη με μήκος εσωτερικής πλευράς a και πάχος τοιχώματος b	17
Εικόνα 6 Πλέγμα με πάχος στηλών-γραμμών a και κενό μεταξύ στηλών-γραμμών b	18
Εικόνα 7 9 πλακίδια ίδιων διαστάσεων στοιχισμένα σε 3 γραμμές και 3 στήλες	19
Εικόνα 8 Ορθές και διατμητικές τάσεις κυβικού μοντέλου	21
Εικόνα 9 Ονοματολογία των επιφανειών των εξαέδρων πρισματικών δοκιμίων	22
Εικόνα 10 Δομή honeycomb πλευράς κυψέλης 0,5mm και πάχος κυψέλης 0,25mm	25
Εικόνα 11 Δομή honeycomb πλευράς κυψέλης 0,5mm και πάχος κυψέλης 0,5mm	26
Εικόνα 12 Δομή honeycomb πλευράς κυψέλης 1mm και πάχος κυψέλης 0,5mm	27
Εικόνα 13 Δομή honeycomb πλευράς κυψέλης 1mm και πάχος κυψέλης 0,5mm περιστραμμένο 90°	28
Εικόνα 14 Δομή honeycomb πλευράς κυψέλης 1mm και πάχος κυψέλης 0,25mm	29
Εικόνα 15 Δομή honeycomb πλευράς κυψέλης 2mm και πάχος κυψέλης 0,5mm	30
Εικόνα 16 Δομή honeycomb πλευράς κυψέλης 2mm και πάχος κυψέλης 0,25mm	31
Εικόνα 17 Δομή grid πλευράς 1mm και διάκενου 1mm	32
Εικόνα 18 Δομή grid πλευράς 1mm και διάκενου 2mm	33
Εικόνα 19 Γραφική απεικόνιση FDM διεργασίας. Το υλικό εκχύνεται επίπεδο - επίπεδο. 1) ακροφύσιο έκχυσης υλικού εκτύπωσης, 2) αντικείμενο εκτύπωσης (layer by layer), 3) τράπεζα εκτυπωτή (Smallwood, 2014)	34
Εικόνα 20 Αποκόλληση των στρωμάτων εκτύπωσης ενός βάζου εκτυπωμένο από 3D-printer (abuharsky, 2014)	35
Εικόνα 21 Δοκίμιο για προσομοίωση FDM (Fused Deposition Modeling) διεργασίας.....	36
Εικόνα 22 Δοκίμιο για προσομοίωση FDM (Fused Deposition Modeling) διεργασίας.....	37
Εικόνα 23 Δοκίμιο για προσομοίωση FDM (Fused Deposition Modeling) διεργασίας.....	38
Εικόνα 24 Bracket με στήριξη στα (A) και φόρτιση με δύναμη 300N στο (B).....	39
Εικόνα 25 Topology optimization του bracket για ABS plastic υλικό μπρος ισομετρική προβολή.....	40
Εικόνα 26 Topology optimization του bracket για ABS plastic υλικό πίσω ισομετρική προβολή.....	40
Εικόνα 27 Topology optimization του bracket για ABS plastic υλικό πλάγια προβολή	40
Εικόνα 28 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,25 μπρος ισομετρική προβολή	41
Εικόνα 29 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,25 πίσω ισομετρική προβολή	41
Εικόνα 30 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,25 πλάγια προβολή.....	41
Εικόνα 31 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5 μπρος ισομετρική προβολή	42
Εικόνα 32 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5 πίσω ισομετρική προβολή	42
Εικόνα 33 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5 πλάγια προβολή.....	42
Εικόνα 34 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5 περιστραμμένο 90° μπρος ισομετρική προβολή.....	43

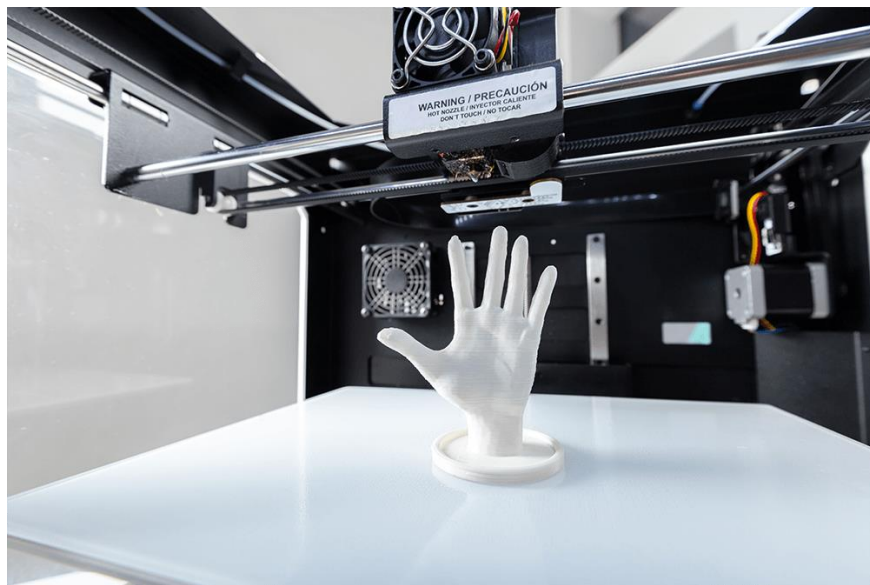
Εικόνα 35 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5 περιστραμμένο 90° πίσω ισομετρική προβολή.....	43
Εικόνα 36 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5 περιστραμμένο 90° πλάγια προβολή	43
Εικόνα 37 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,5 μπρος ισομετρική προβολή	44
Εικόνα 38 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,5 πίσω ισομετρική προβολή	44
Εικόνα 39 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,5 πλάγια προβολή.....	44
Εικόνα 40 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,25 μπρος ισομετρική προβολή	45
Εικόνα 41 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,25 πίσω ισομετρική προβολή	45
Εικόνα 42 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,25 πλάγια προβολή.....	45
Εικόνα 43 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,5 μπρος ισομετρική προβολή	46
Εικόνα 44 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,5 πίσω ισομετρική προβολή	46
Εικόνα 45 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,5 πλάγια προβολή.....	46
Εικόνα 46 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,25 μπρος ισομετρική προβολή	47
Εικόνα 47 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,25 πίσω ισομετρική προβολή	47
Εικόνα 48 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,25 πλάγια προβολή.....	47
Εικόνα 49 Topology optimization του bracket για ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 1mm μπρος ισομετρική προβολή	48
Εικόνα 50 Topology optimization του bracket για ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 1mm πίσω ισομετρική προβολή.....	48
Εικόνα 51 Topology optimization του bracket για ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 1mm πλάγια προβολή.....	48
Εικόνα 52 Topology optimization του bracket για ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 2mm μπρος ισομετρική προβολή	49
Εικόνα 53 Topology optimization του bracket για ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 2mm πίσω ισομετρική προβολή	49
Εικόνα 54 Topology optimization του bracket για ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 2mm πλάγια προβολή.....	49
Εικόνα 55 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,0007mm μπρος ισομετρική προβολή.....	50
Εικόνα 56 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,0007mm πίσω ισομετρική προβολή.....	50
Εικόνα 57 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,0007mm πλάγια προβολή	50
Εικόνα 58 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,002mm μπρος ισομετρική προβολή.....	52

Εικόνα 59 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,002mm πίσω ισομετρική προβολή.....	52
Εικόνα 60 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,002mm πλάγια προβολή	52
Εικόνα 61 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,001mm μπρος ισομετρική προβολή.....	51
Εικόνα 62 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,001mm πίσω ισομετρική προβολή.....	51
Εικόνα 63 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,001mm πλάγια ισομετρική προβολή	51

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

3D-Printing

Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D-printing), που μέχρι πρότινος χρησιμοποιούνταν μόνο πειραματικά από Πανεπιστήμια και μεγάλα ερευνητικά κέντρα, έχει αρχίσει να κερδίζει την αγορά και όπως όλα δείχνουν στο μέλλον θα είναι η κύρια παραγωγική διαδικασία.



Εικόνα 1 Εσωτερική όψη τράπεζας εργασίας 3D-printer (Marr, 2018)

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικοί από τους λόγους που συμβαίνει αυτό:

- **Ταχύτητα:** Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι το Rapid Prototyping. Η ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων είναι η

δυνατότητα σχεδιασμού, κατασκευής και δοκιμής ενός προσαρμοσμένου εξαρτήματος σε όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο. Επίσης, εάν χρειάζεται, ο σχεδιασμός μπορεί να τροποποιηθεί χωρίς να επηρεαστεί αρνητικά η ταχύτητα της διαδικασίας κατασκευής.

Με τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης, μια επιχείρηση μπορεί να σχεδιάσει ένα εξάρτημα, να το κατασκευάσει σε έναν επαγγελματικό τρισδιάστατο εκτυπωτή και να το δοκιμάσει, όλα μέσα σε λίγες ημέρες.

Για τις μικρές επιχειρήσεις, αυτή η διαφορά είναι σημαντική. Η ελευθερία και η δημιουργικότητα που επιτρέπει η τρισδιάστατη εκτύπωση σημαίνει ότι σχεδόν οτιδήποτε μπορεί να δημιουργηθεί χωρίς μακροχρόνιους χρόνους παράδοσης που συνήθως συνδέονται με την ανάγκη εξωτερικής ανάθεσης σύνθετων έργων. Σημαίνει απαλλαγή από τους περιορισμούς των ελάχιστων παραγγελιών, ότι τα μέρη και τα προϊόντα μπορούν να δημιουργηθούν και να προσαρμοστούν με ευκολία.

- Κόστος: Για μικρές παραγωγές και εφαρμογές, το 3D-printing είναι η πιο οικονομικά αποδοτική διαδικασία κατασκευής. Οι παραδοσιακές μέθοδοι πρωτοτύπων, όπως η μηχανική κατεργασία CNC και η χύτευση με έγχυση, απαιτούν μεγάλο αριθμό ακριβών μηχανών και έχουν πολύ υψηλότερο κόστος εργασίας καθώς απαιτούν έμπειρους χειριστές και τεχνικούς μηχανημάτων για τη λειτουργία τους.

Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη διαδικασία 3D-printing, όπου χρειάζονται μόνο 1 ή 2 μηχανές και λιγότεροι χειριστές (ανάλογα με το σύστημα) για την κατασκευή ενός εξαρτήματος. Υπάρχουν πολύ λιγότερα απόβλητα, επειδή το εξάρτημα χιτίζεται από το μηδέν, δεν σκαλίζεται από ένα στερεό μπλοκ όπως στην αφαιρετική κατασκευή και συνήθως δεν απαιτεί πρόσθετα εργαλεία.

- Ελευθερία σχεδιασμού-κατασκευής: Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης δίνει τη δυνατότητα στις επιχειρήσεις να κατασκευάζουν εξάρτηματα χωρίς περιορισμό στη δομή. Πιο σύνθετη δομή μπορεί σημαίνει καλύτερες ιδιότητες σε διάφορες καταπονήσεις.

Επίσης, δίνει τη δυνατότητα μελέτης, σχεδιασμού και κατασκευής προϊόντων ελαχιστοποιώντας το βάρος και τον όγκο τους, διατηρώντας όμως τις επιθυμητές μηχανικές αντοχές. Αυτό πέρα από τη προφανή μείωση στο κόστος κατασκευής, λόγω μείωσης των απαιτούμενων Α' υλών, μειώνει και το κόστος μεταφοράς τους.



Εικόνα 2 Σύνθετη γεωμετρία φωτιστικού εκτυπωμένο από 3D-printer (Hosmer, 2013)

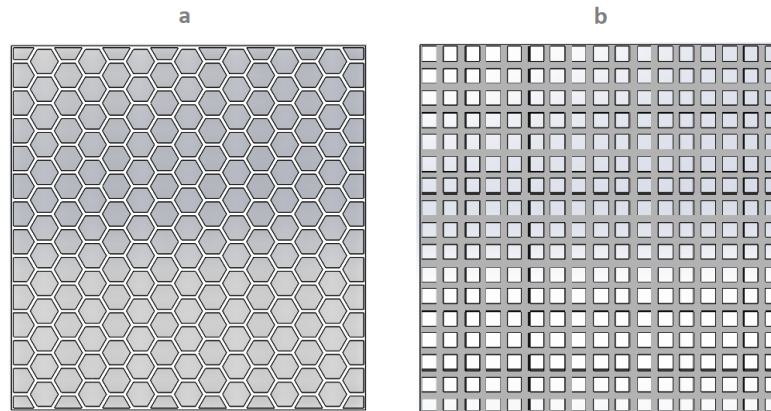
Ειδικότερα οι μικρότερες επιχειρήσεις που δεν διαθέτουν ακριβούς εξοπλισμούς και μηχανήματα επωφελούνται περισσότερο από την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η άνθιση και η εξέλιξη του 3D-printing θα μειώσει κατακόρυφα το κόστος εξερεύνησης και την αποίκησης του διαστήματος, καθώς ο όγκος υλικών που μπορεί να μεταφέρει ένα διαστημόπλοιο είναι αρκετά περιορισμένος και κάθε κιλό (kg) κοστίζει χιλιάδες ευρώ (€).

RVE (Representative Volume Element)

RVE ή αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου στη θεωρία των σύνθετων υλικών ονομάζεται ο μικρότερος δυνατός όγκος από τον οποίο όταν παρθεί μια μέτρηση είναι αντιπροσωπευτική του συνόλου. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου μιας κατασκευής γιατί το υπολογιστικό κόστος για να μετρηθεί το σύνολο της είναι τεράστιο.

Η τεχνολογία του 3D-printing επιτρέπει την κατασκευή εξαρτημάτων των οποίων το εσωτερικό δεν είναι ατόφιο. Υπάρχουν διάφορες δομές που χρησιμοποιούνται για να “γεμίζουν” τα αντικείμενα που έχουν προκύψει από 3D-printers. Δύο από το πιο διαδεδομένα είναι το honeycomb και το grid.



Εικόνα 3 a: honeycomb infill pattern, b: grid infill pattern

Όπως γίνεται κατανοητό το υπολογιστικό κόστος για να γίνουν μετρήσεις σε ένα αντικείμενο ή κατασκευή των οποίων το εσωτερικό τμήμα έχει μία από τις παραπάνω δομές είναι τεράστιο έως αδύνατο. Για αυτό το λόγο γίνονται μετρήσεις στο RVE του αντικειμένου και ανάγονται στο σύνολο.

Ανισότροπα Υλικά

Ανισότροπα υλικά λέγονται τα υλικά που παρουσιάζουν διαφορές στις ιδιότητές τους σε διαφορετικές διευθύνσεις της μάζας τους.

Όταν ένα αντικείμενο εκτυπώνεται από 3D-printer δεν έχει τις ίδιες ιδιότητες σε όλες τις κατευθύνσεις της μάζας του καθώς εκτυπώνεται επίπεδο-επίπεδο (layer by layer). Το επόμενο επίπεδο εκτύπωσης εκχύνεται σε θερμοκρασία τήξης και καθώς πήζει κολλά στο προηγούμενο. Από μετρήσεις που έχουν γίνει (Adrián Rodríguez-Panes, Juan Claver and Ana María Camacho, 2018) έχει παρατηρηθεί ότι δεν είναι δυνατό να εκτυπωθεί αντικείμενο από 3D-printer το οποίο να είναι το ίδιο ομοιογενές με ένα που έχει κατασκευαστεί με άλλους συμβατικούς τρόπους. Οπότε τα αντικείμενα που εκτυπώνονται από 3D-printers θεωρούμε ότι είναι κατασκευασμένα από ανισότροπο υλικό.

Είναι προφανές ότι όταν τα αντικείμενα διαθέτουν εσωτερικά διάφορα patterns (honeycomb, grid, κτλ.) παρουσιάζουν ακόμη μεγαλύτερες ανισοτροπίες.

Topology Optimization

Το Topology Optimization χρησιμοποιείται συνήθως για την ελαχιστοποίηση

1. της ποσότητας του χρησιμοποιούμενου υλικού και
2. της εσωτερικής δυναμικής ενέργειας κατά την παραμόρφωση (strain energy)

διαφόρων κατασκευών διατηρώντας τη μηχανική τους αντοχή. Το Topology Optimization είναι μαθηματική μέθοδος που βελτιστοποιεί χωρικά την κατανομή του υλικού μέσα σε έναν καθορισμένο τομέα, εκπληρώνοντας συγκεκριμένους περιορισμούς που έχουν καθοριστεί προηγουμένως και ελαχιστοποιώντας μια προκαθορισμένη συνάρτηση κόστους. Για μια τέτοια διαδικασία βελτιστοποίησης, τα τρία κύρια στοιχεία είναι οι μεταβλητές σχεδιασμού, η συνάρτηση κόστους και οι περιορισμοί. (Sartorelli, 2020)



Εικόνα 4 Bracket πριν (a) και μετά (b) το Topology Optimization

Η δυνατότητα της ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων και της ελευθερίας στην κατασκευή που προσφέρει το 3D-printing δίνει τη δυνατότητα, μέσω του Topology Optimization, στην κατασκευή προϊόντων μικρότερου βάρους και όγκου διατηρώντας παράλληλα επιθυμητές μηχανικές αντοχές.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Στόχος

Όπως προαναφέρθηκε το υπολογιστικό κόστος της μέτρησης των ιδιοτήτων αντικειμένων ή κατασκευών σύνθετης γεωμετρίας (honeycomb, grid) είναι πολύ μεγάλο. Για το λόγο αυτό θα δημιουργηθούν ομοιογενή ανισότροπα μοντέλα που θα διατηρούν τις ιδιότητες του αρχικών.

Στη συνέχεια, στα μοντέλα αυτά, μέσω της μεθόδου Topology Optimization, θα μειωθεί η μάζα τους έως και 70% της αρχικής.

Τέλος, θα γίνει έλεγχος κατά πόσο και αν διαφοροποιείται το αποτέλεσμα του Topology Optimization αλλάζοντας τη γεωμετρία των αρχικών δοκιμίων, διατηρώντας όμως τις εξωτερικές τους διαστάσεις.

Δημιουργία δοκιμίων

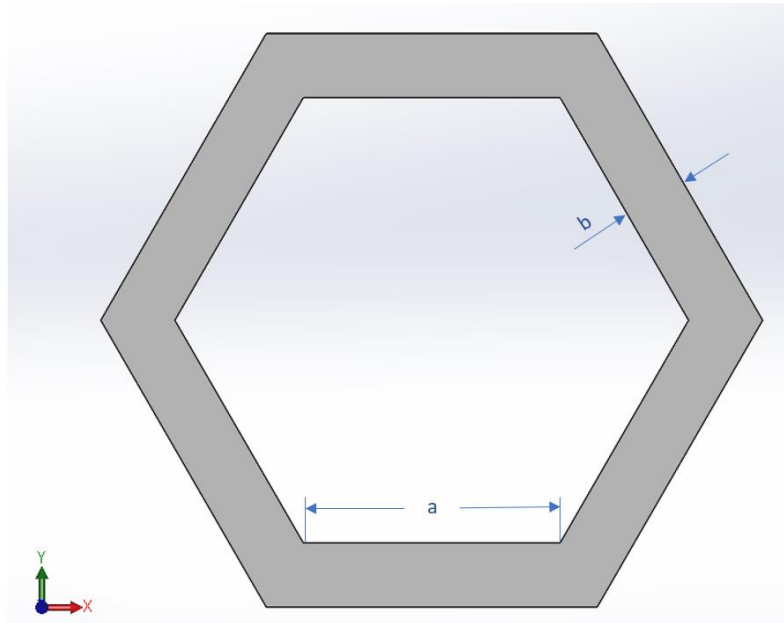
Για την παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκαν δοκίμια ίδιων διαστάσεων αλλά διαφορετικής δομής χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Solidworks 2019. Το υλικό τους είναι ABS plastic με τις παρακάτω ιδιότητες:

- πυκνότητα: 1040 kg/m^3
- Young's Modulus: $2,36\text{E}+10 \text{ Pa}$
- Poisson's Ratio: 0,399
- μέτρο όγκου: $3,9439\text{E}+09 \text{ Pa}$
- μέτρο διάτμησης: $8,5418\text{E}+08 \text{ Pa}$

Σχεδιάστηκαν 7 δοκίμια με δομή κυψέλης (honeycomb) και 2 με δομή πλέγματος (grid). Τέλος, σχεδιάστηκε και ένα δοκίμιο το οποίο αποτελείται από 9 πλακίδια στοιχισμένα σε 3 γραμμές και 3 στήλες.

Παρακάτω περιγράφονται πιο αναλυτικά οι διαστάσεις τους:

Honeycombs

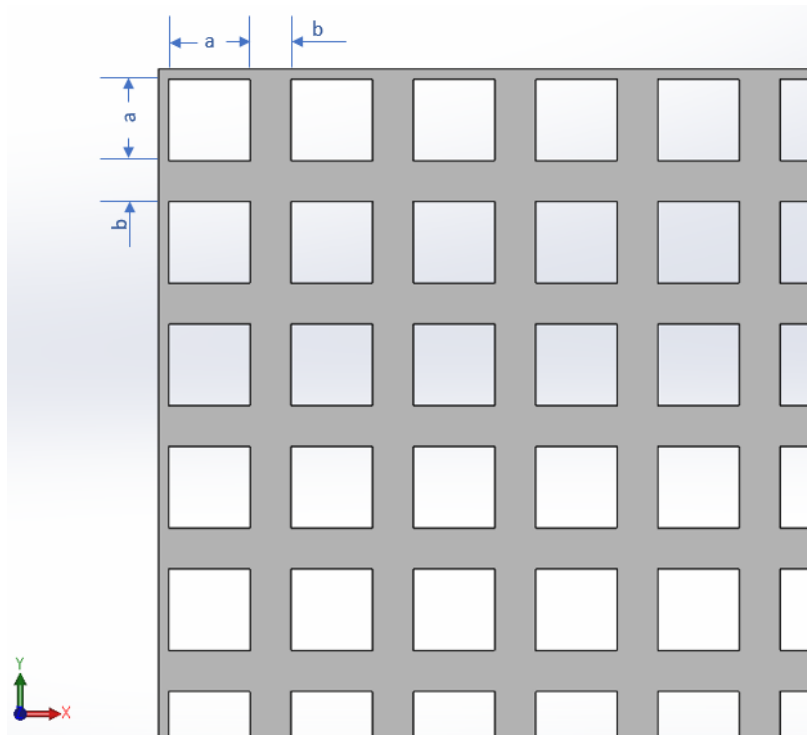


Εικόνα 5 Κυψέλη με μήκος εσωτερικής πλευράς a και πάχος τοιχώματος b

- I. Δοκίμιο 1
 - ✓ Μήκος εσωτερικής πλευράς κυψέλης $a=0.5\text{mm}$
 - ✓ Πάχος τοιχώματος κυψέλης $b=0.5\text{mm}$
- II. Δοκίμιο 2
 - ✓ Μήκος εσωτερικής πλευράς κυψέλης $a=0.5\text{mm}$
 - ✓ Πάχος τοιχώματος κυψέλης $b=0.25$
- III. Δοκίμιο 3
 - ✓ Μήκος εσωτερικής πλευράς κυψέλης $a=1\text{mm}$
 - ✓ Πάχος τοιχώματος κυψέλης $b=0.5\text{mm}$
- IV. Δοκίμιο 4 (σαν το δοκίμιο 3 περιστραμμένο κατά 90°)
 - ✓ Μήκος εσωτερικής πλευράς κυψέλης $a=1\text{mm}$
 - ✓ Πάχος τοιχώματος κυψέλης $b=0.5\text{mm}$
- V. Δοκίμιο 5
 - ✓ Μήκος εσωτερικής πλευράς κυψέλης $a=1\text{mm}$
 - ✓ Πάχος τοιχώματος κυψέλης $b=0.25\text{mm}$

- VI. Δοκίμιο 6
- ✓ Μήκος εσωτερικής πλευράς κυψέλης $a=2\text{mm}$
 - ✓ Πάχος τοιχώματος κυψέλης $b=0.5\text{mm}$
- VII. Δοκίμιο 7
- ✓ Μήκος εσωτερικής πλευράς κυψέλης $a=2\text{mm}$
 - ✓ Πάχος τοιχώματος κυψέλης $b=0.25\text{mm}$

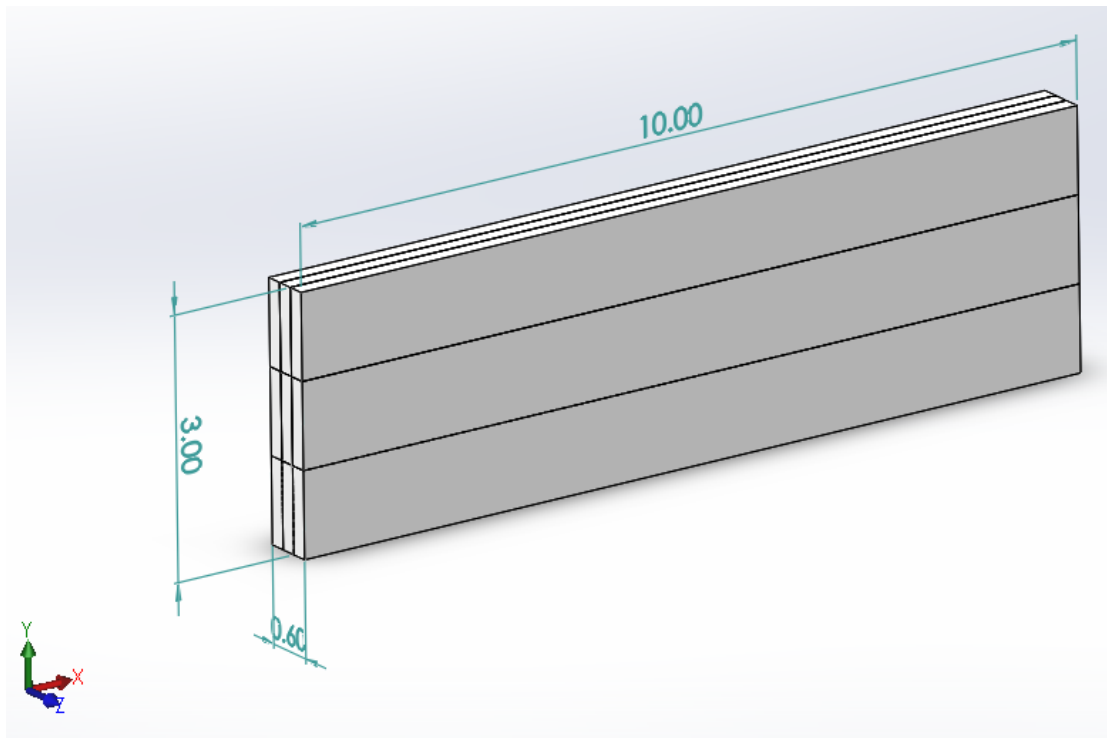
Grids



Εικόνα 6 Πλέγμα με πάχος στηλών-γραμμών a και κενό μεταξύ στηλών-γραμμών b

- VIII. Δοκίμιο 8
- ✓ Πάχος στηλών-γραμμών $a=1\text{mm}$
 - ✓ Κενό μεταξύ στηλών-γραμμών $b=1\text{mm}$
- IX. Δοκίμιο 9
- ✓ Πάχος στηλών-γραμμών $a=1\text{mm}$
 - ✓ Κενό μεταξύ στηλών-γραμμών $b=2\text{mm}$

Πλακίδια



Εικόνα 7 9 πλακίδια ίδιων διαστάσεων στοιχισμένα σε 3 γραμμές και 3 στήλες

- X. Δοκίμιο 10
 - ✓ Διαστάσεις πλακιδίου 10 x 1 x 0.2 mm

Το δοκίμιο 10 σχεδιάστηκε με σκοπό να μοντελοποιηθεί ένα αντικείμενο που έχει εκτυπωθεί από 3D-printer. Έχει αυτή τη μορφή γιατί το αντικείμενο εκτυπώνεται layer by layer.

Μεθοδολογία δημιουργίας ισοδύναμων μοντέλων

Για τη δημιουργία ισοδύναμων ανισότροπων αλλά ομοιογενών μοντέλων πρέπει να υπολογιστεί το μητρώο δυσκαμψίας ή στιβαρότητας κάθε δοκιμίου (Κεσόπουλος, 2020).

Το μητρώο δυσκαμψίας υπολογίζεται ως επέκταση του νόμου του Hooke:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{zy} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}$$

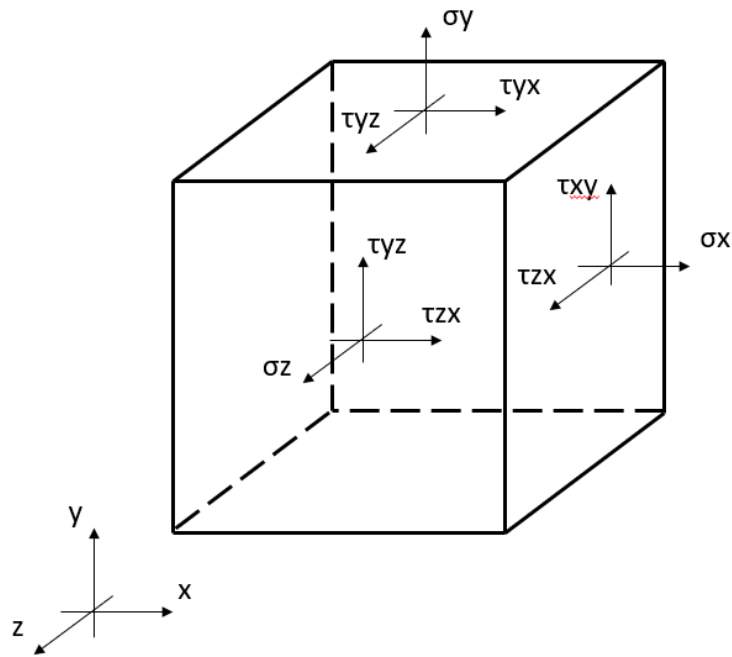
Άρα για να υπολογιστεί το μητρώο C, θα εφαρμοστούν παραμορφώσεις στα δοκίμια, από τις παραμορφώσεις αυτές θα προκύψουν οι αντίστοιχες δυνάμεις με τις οποίες στη συνέχεια θα υπολογιστούν οι τάσεις.

$$C = \sigma \varepsilon^{-1} \quad (1)$$

Τα δοκίμια έχουν όλα πρισματική δομή και ίδιες διαστάσεις με εξαίρεση το Δοκίμιο 10 (πλακίδια). Στην Εικόνα 6 φαίνονται πως ορίζονται οι ορθές και οι διατμητικές τάσεις σε κυβικό μοντέλο.

Οι τάσεις υπολογίζονται διαιρώντας τις δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω των παραμορφώσεων με τις αντίστοιχες επιφάνειες.

$$F = \int_A \sigma dA \quad (2)$$



Εικόνα 8 Ορθές και διατμητικές τάσεις κυβικού μοντέλου

Οι επιφάνειες δεν είναι οι πραγματικές αλλά οι ονομαστικές του πρίσματος. Αυτό για να μπορεί να υπολογιστεί η μέση τάση. Επιπλέον οι ονομαστικές επιφάνειες είναι και οι επιφάνειες των ανισότροπων ομοιογενών μοντέλων που θα δημιουργηθούν.

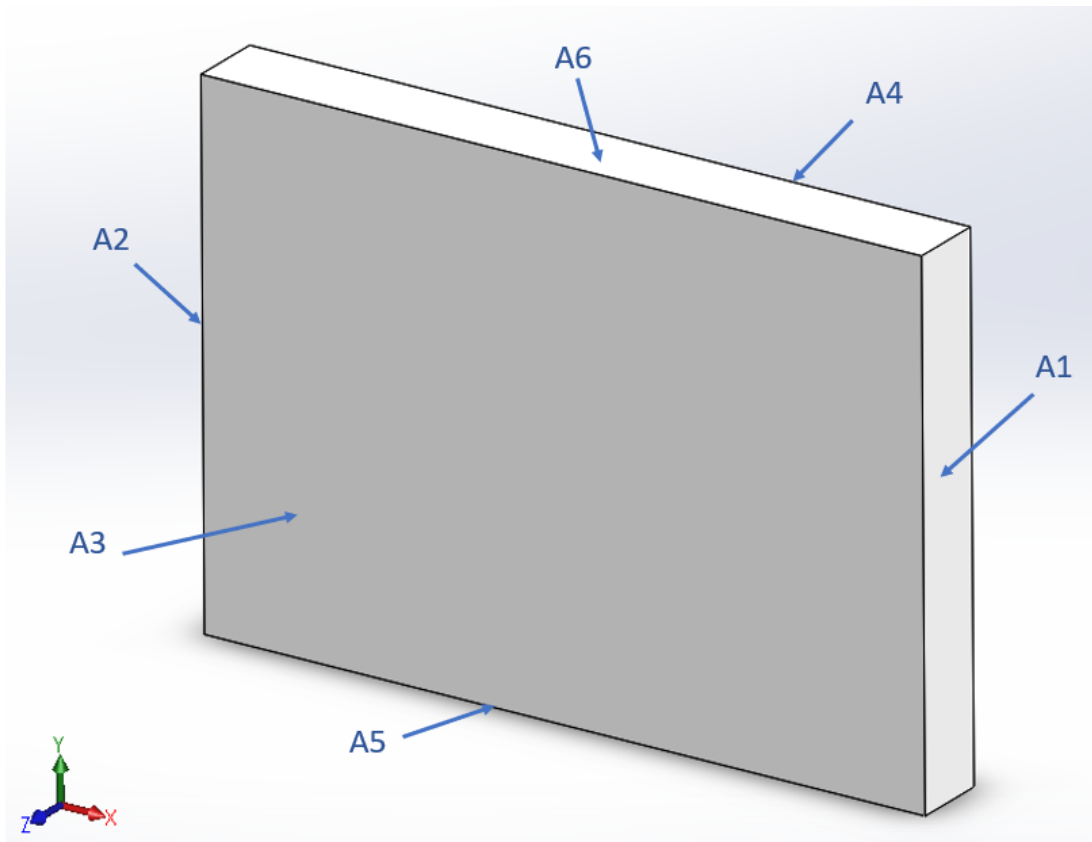
Για να υπολογιστεί το μητρώο ελαστικότητας θα πρέπει να υπολογιστούν 3 ορθές και 3 διατμητικές τάσεις:

1. ορθή τάση σ_x
2. ορθή τάση σ_y
3. ορθή τάση σ_z
4. διατμητική τάση τ_{xy}
5. διατμητική τάση τ_{zy}
6. διατμητική τάση τ_{zx}

Οι παραμορφώσεις και η μέτρηση των αντίστοιχων δυνάμεων θα γίνει με το πρόγραμμα ANSYS 2020 R2. Για ευκολία παρακολούθησης των αποτελεσμάτων οι πλευρές του πρίσματος θα έχουν τις παρακάτω ονομασίες:

- Στον άξονα x+ ορίζεται η επιφάνεια A1
- Στον άξονα x- ορίζεται η επιφάνεια A2
- Στον άξονα z+ ορίζεται η επιφάνεια A3
- Στον άξονα z- ορίζεται η επιφάνεια A4
- Στον άξονα y- ορίζεται η επιφάνεια A5

- Στον άξονα $y+$ ορίζεται η επιφάνεια A6



Εικόνα 9 Ονοματολογία των επιφανειών των εξαέδρων πρισματικών δοκιμίων

Όπως γίνεται αντιληπτό για κάθε δοκίμιο θα πρέπει να γίνουν 6 προσομοιώσεις, μία για κάθε τάση. Παρακάτω φαίνονται οι οριακές συνθήκες που θα δηλωθούν στο ANSYS για κάθε προσομοίωση:

- Εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα x_x
 - ✓ A1: Μετατόπιση στον άξονα x_x
 - ✓ A2: Πακτωμένη
 - ✓ A3: Ελεύθερη κίνηση μόνο στον άξονα x_x
 - ✓ A4: Ελεύθερη κίνηση μόνο στον άξονα x_x
 - ✓ A5: Ελεύθερη κίνηση μόνο στον άξονα x_x
 - ✓ A6: Ελεύθερη κίνηση μόνο στον άξονα x_x

- Εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα γγ
 - ✓ A1: Ελεύθερη κίνηση μόνο στον άξονα γγ
 - ✓ A2: Ελεύθερη κίνηση μόνο στον άξονα γγ
 - ✓ A3: Ελεύθερη κίνηση μόνο στον άξονα γγ
 - ✓ A4: Ελεύθερη κίνηση μόνο στον άξονα γγ
 - ✓ A5: Πακτωμένη
 - ✓ A6: Μετατόπιση στον άξονα γγ

- Εφελκυστική παραμόρφωση στον άξονα ζζ
 - ✓ A1: Ελεύθερη κίνηση μόνο στον άξονα ζζ
 - ✓ A2: Ελεύθερη κίνηση μόνο στον άξονα ζζ
 - ✓ A3: Μετατόπιση στον άξονα ζζ
 - ✓ A4: Πακτωμένη
 - ✓ A5: Ελεύθερη κίνηση μόνο στον άξονα ζζ
 - ✓ A6: Ελεύθερη κίνηση μόνο στον άξονα ζζ

- Διατμητική παραμόρφωση στον άξονα χγ
 - ✓ A1: Ελεύθερη κίνηση μόνο στους άξονες χχ και γγ
 - ✓ A2: Ελεύθερη κίνηση μόνο στους άξονες χχ και γγ
 - ✓ A3: Ελεύθερη κίνηση μόνο στους άξονες χχ και γγ
 - ✓ A4: Ελεύθερη κίνηση μόνο στους άξονες χχ και γγ
 - ✓ A5: Πακτωμένη
 - ✓ A6: Μετατόπιση στον άξονα χχ

- Διατμητική παραμόρφωση στον άξονα ζγ
 - ✓ A1: Ελεύθερη κίνηση μόνο στους άξονες γγ και ζζ
 - ✓ A2: Ελεύθερη κίνηση μόνο στους άξονες γγ και ζζ
 - ✓ A3: Μετατόπιση στον άξονα γγ
 - ✓ A4: Πακτωμένη
 - ✓ A5: Ελεύθερη κίνηση μόνο στους άξονες γγ και ζζ
 - ✓ A6: Ελεύθερη κίνηση μόνο στους άξονες γγ και ζζ

- Διατμητική παραμόρφωση στον άξονα zx
 - ✓ A1: Ελεύθερη κίνηση μόνο στους άξονες xx και zz
 - ✓ A2: Ελεύθερη κίνηση μόνο στους άξονες xx και zz
 - ✓ A3: Ελεύθερη κίνηση μόνο στους άξονες xx και zz
 - ✓ A4: Πακτωμένη
 - ✓ A5: Μετατόπιση στον άξονα xx
 - ✓ A6: Ελεύθερη κίνηση μόνο στους άξονες xx και zz

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι οριακές συνθήκες είναι κοινές για όλα τα δοκίμια.

Έχοντας ορίσει τις οριακές συνθήκες υπολογίζονται μέσω της υπολογιστικής ανάλυσης των αντιδράσεων των κόμβων οι δυνάμεις σε κάθε επιφάνεια για κάθε άξονα. Όπως προαναφέρθηκε διαιρώντας τις δυνάμεις με τις παραπάνω ονομαστικές επιφάνειες υπολογίζεται το μητρώο τανυστή τάσεων. Στη συνέχεια πολλαπλασιάζοντας το μητρώο τανυστή τάσεων με το αντίστροφο μητρώο παραμορφώσεων υπολογίζεται το μητρώο ελαστικότητας.

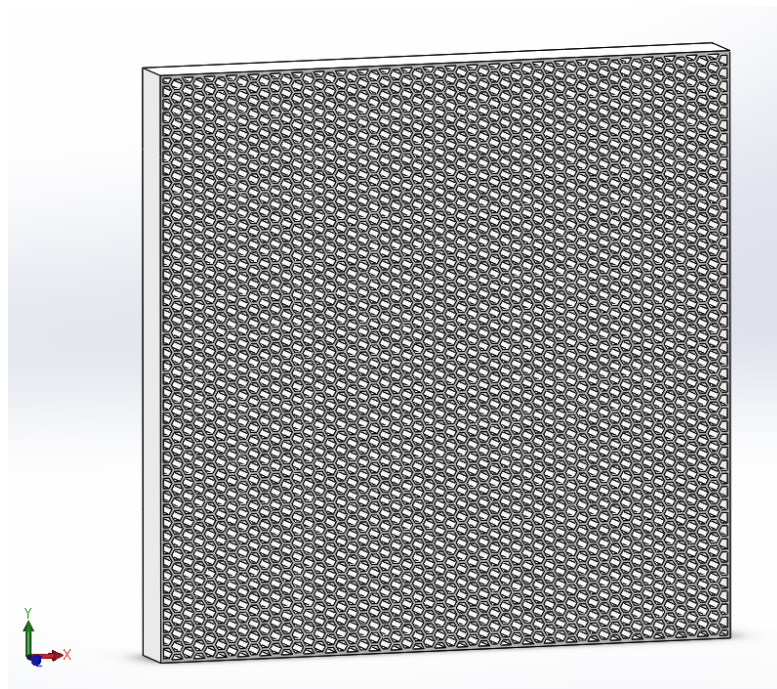
$$\sigma = E \varepsilon \Rightarrow E = \sigma \varepsilon^{-1} \quad (3)$$

Στη συνέχεια εισάγεται το μητρώο δυσκαμψίας στο ANSYS δημιουργώντας ένα ανισότροπο ισοδύναμο υλικό το οποίο αν εισαχθεί σε πρισματικό ομοιογενές δοκίμιο θα έχει την ίδια συμπεριφορά με το αρχικό.

Ισοδύναμα μοντέλα

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα δοκίμια που σχεδιάστηκαν για την δημιουργία ισοδύναμων ανισότροπων ομοιογενών μοντέλων, οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για να γίνουν οι προσομοιώσεις και οι υπολογισμοί και τα τελικά μητρώα ελαστικότητας που προέκυψαν από την υπολογιστική ανάλυση.

Honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,25mm



Εικόνα 10 Δομή honeycomb πλευράς κυψέλης 0,5mm και πάχος κυψέλης 0,25mm

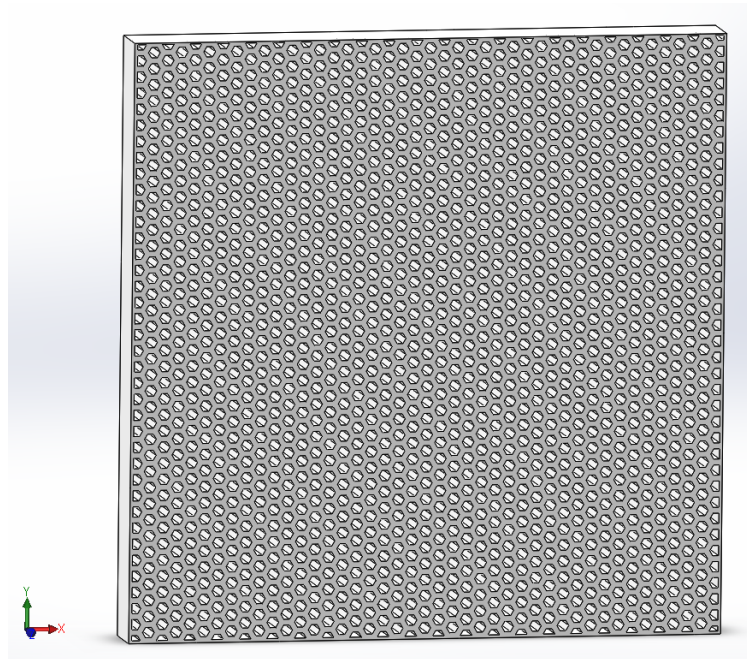
Παραμόρφωση: 1mm

Πυκνότητα: 413,55 kg/m³

Μητρώο ελαστικότητας (MPa):

544,51	400,94	395,15	-7,40	0,13	-47,78
443,70	547,15	405,24	0,00	-47,72	-0,15
349,93	348,74	1246,16	0,17	0,00	0,00
0,56	-1,88	0,34	96,95	0,11	1,20
0,05	0,00	0,00	0,00	414,35	0,02
0,00	-0,08	0,00	0,00	-0,01	416,74

Honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5mm



Εικόνα 11 Δομή honeycomb πλευράς κυψέλης 0,5mm και πάχος κυψέλης 0,5mm

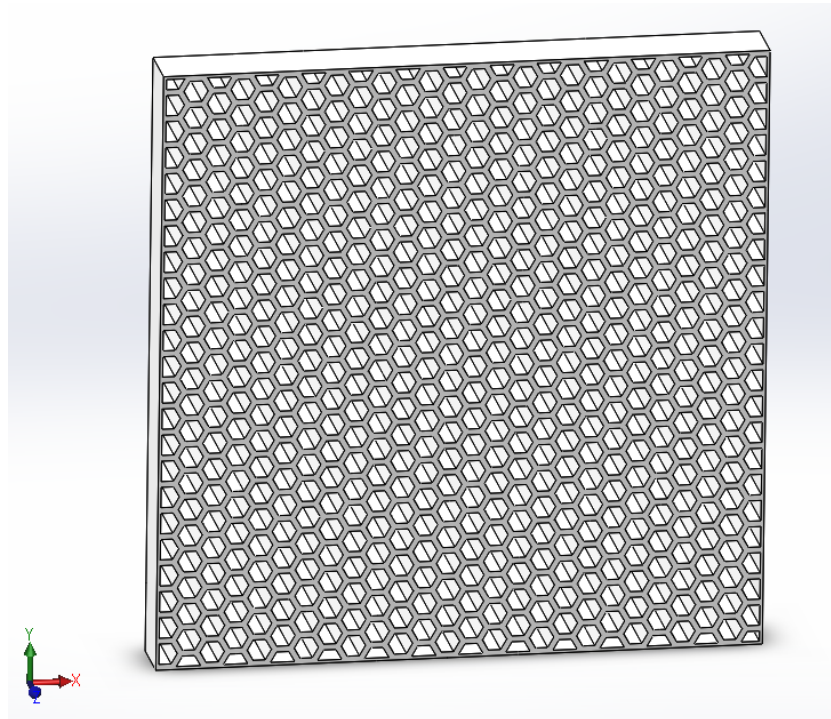
Παραμόρφωση: 1mm

Πυκνότητα: 614,46 kg/m³

Μητρώο ελαστικότητας (MPa):

1156,83	616,28	727,00	-10,43	0,90	-93,47
616,18	1176,09	718,43	0,00	-77,33	-0,08
682,26	688,76	1993,95	0,07	0,00	0,00
0,25	-0,39	0,94	254,85	0,10	1,62
2,54	0,07	-0,01	0,00	709,95	0,12
0,07	0,02	0,00	0,00	0,14	713,48

Honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,5mm



Εικόνα 12 Δομή honeycomb πλευράς κυψέλης 1mm και πάχος κυψέλης 0,5mm

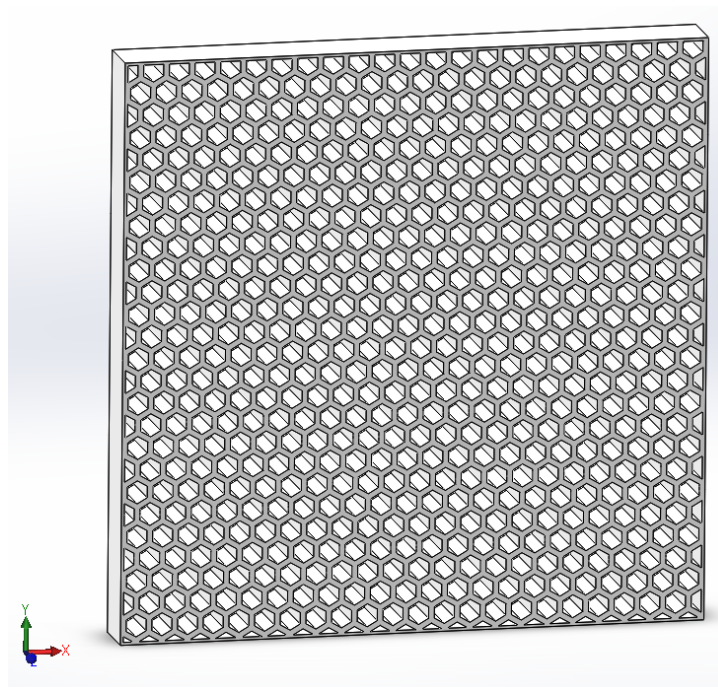
Παραμόρφωση: 1mm

Πυκνότητα: 414,65 kg/m³

Μητρώο ελαστικότητας (MPa):

558,91	374,83	399,48	-7,37	-0,02	-69,16
444,55	552,54	407,73	0,00	-68,27	-0,40
355,52	347,97	1259,70	0,19	0,00	0,00
0,73	-4,33	0,82	96,45	0,14	2,52
0,19	0,02	0,00	0,00	418,33	0,08
0,04	-0,07	0,00	0,00	0,03	427,45

Honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,5mm περιστραμμένο 90°



Εικόνα 13 Δομή honeycomb πλευράς κυψέλης 1mm και πάχος κυψέλης 0,5mm περιστραμμένο 90°

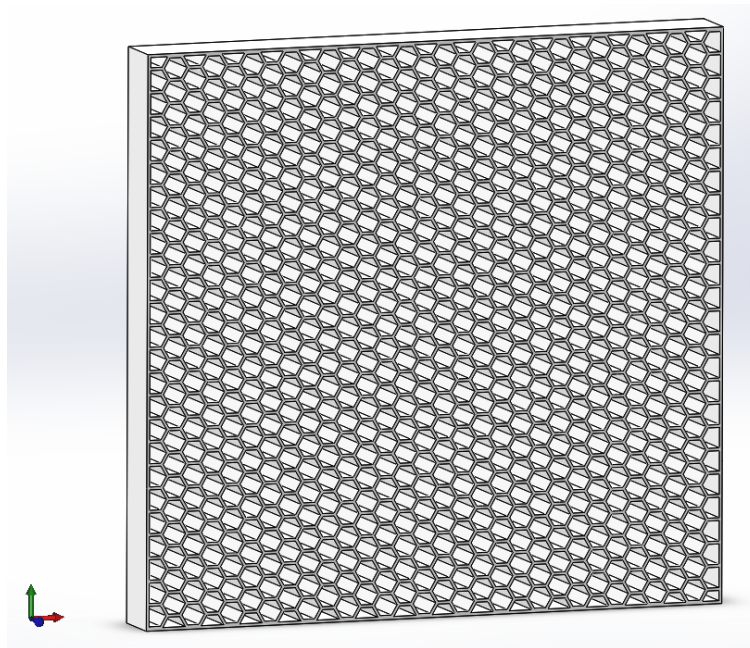
Παραμόρφωση: 1mm

Πυκνότητα: 414,65 kg/m³

Μητρώο ελαστικότητας (MPa):

$$\begin{bmatrix} 564,79 & 448,33 & 418,09 & -5,27 & 0,26 & -68,33 \\ 379,60 & 551,12 & 399,34 & 0,00 & -68,94 & -0,11 \\ 356,10 & 354,57 & 1265,47 & 0,22 & 0,00 & 0,00 \\ -0,14 & -0,16 & -1,47 & 99,39 & -0,13 & 2,92 \\ 5,10 & 0,02 & -0,01 & 0,00 & 422,86 & -0,01 \\ 0,02 & 0,08 & 0,00 & 0,00 & 0,02 & 418,71 \end{bmatrix}$$

Honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,25mm



Εικόνα 14 Δομή honeycomb πλευράς κυψέλης 1mm και πάχος κυψέλης 0,25mm

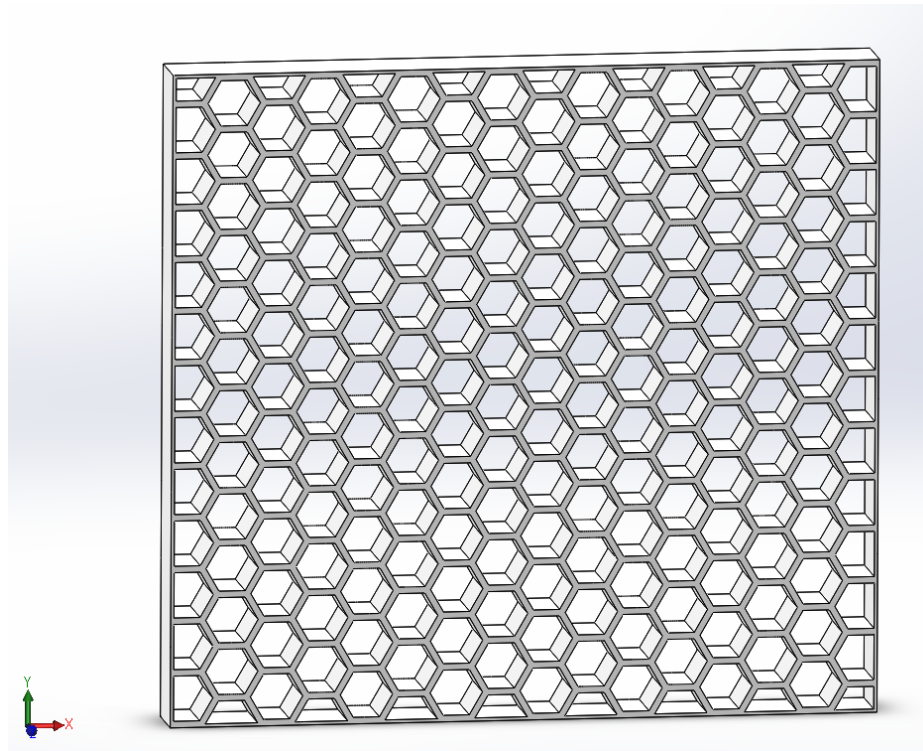
Παραμόρφωση: 1mm

Πυκνότητα: 414,65 kg/m³

Μητρώο ελαστικότητας (MPa):

259,77	257,37	225,84	-4,19	0,12	-34,76
296,05	2577,47	230,74	0,00	-33,60	-0,05
183,53	179,60	735,53	0,04	0,00	0,00
0,59	-2,79	0,26	26,42	0,15	0,99
0,00	0,00	0,00	0,00	224,93	-0,01
0,01	0,04	0,00	0,00	-0,02	233,08

Honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,5mm



Εικόνα 15 Δομή honeycomb πλευράς κυψέλης 2mm και πάχος κυψέλης 0,5mm

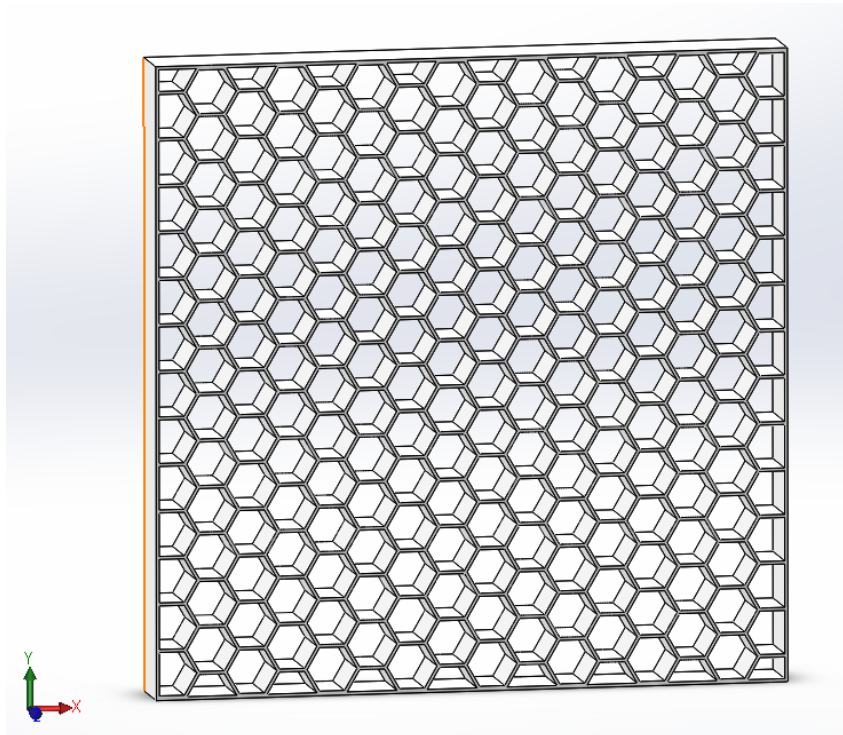
Παραμόρφωση: 1mm

Πυκνότητα: 251,76 kg/m³

Μητρώο ελαστικότητας (MPa):

$$\begin{bmatrix} 265,69 & 224,61 & 224,49 & -3,91 & 0,55 & -45,35 \\ 295,36 & 261,17 & 231,38 & 0,00 & -46,09 & -0,14 \\ 184,08 & 175,84 & 733,92 & 0,13 & 0,00 & 0,00 \\ 0,80 & -4,84 & 1,08 & 26,05 & 0,34 & 2,49 \\ -0,01 & 0,02 & 0,00 & 0,00 & 218,47 & 0,00 \\ 0,02 & 0,10 & 0,00 & 0,00 & -0,08 & 233,25 \end{bmatrix}$$

Honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,25mm



Εικόνα 16 Δομή honeycomb πλευράς κυψέλης 2mm και πάχος κυψέλης 0,25mm

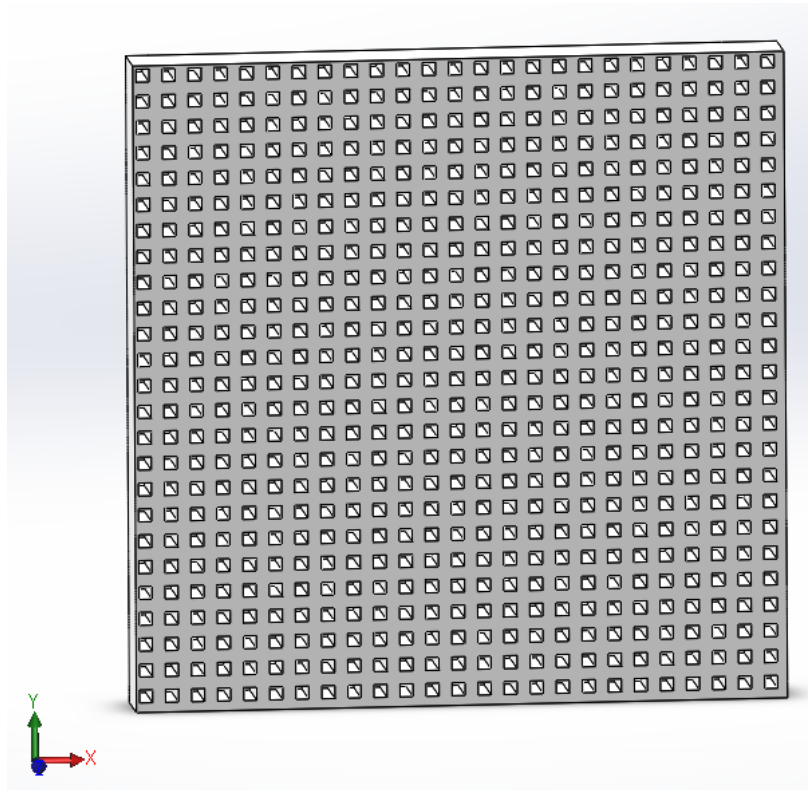
Παραμόρφωση: 1mm

Πυκνότητα: 146,51 kg/m³

Μητρώο ελαστικότητας (MPa):

139,49	166,91	139,48	-1,18	0,26	-23,46
203,50	136,56	144,83	0,00	-21,99	0,07
99,76	96,14	417,84	0,01	0,00	0,00
0,69	-2,72	0,55	5,00	0,23	0,89
0,00	0,00	0,00	0,00	117,15	-0,04
0,00	0,05	0,00	0,00	-0,06	127,03

Grid πλευράς 1mm και διάκενο 1mm



Εικόνα 17 Δομή grid πλευράς 1mm και διάκενου 1mm

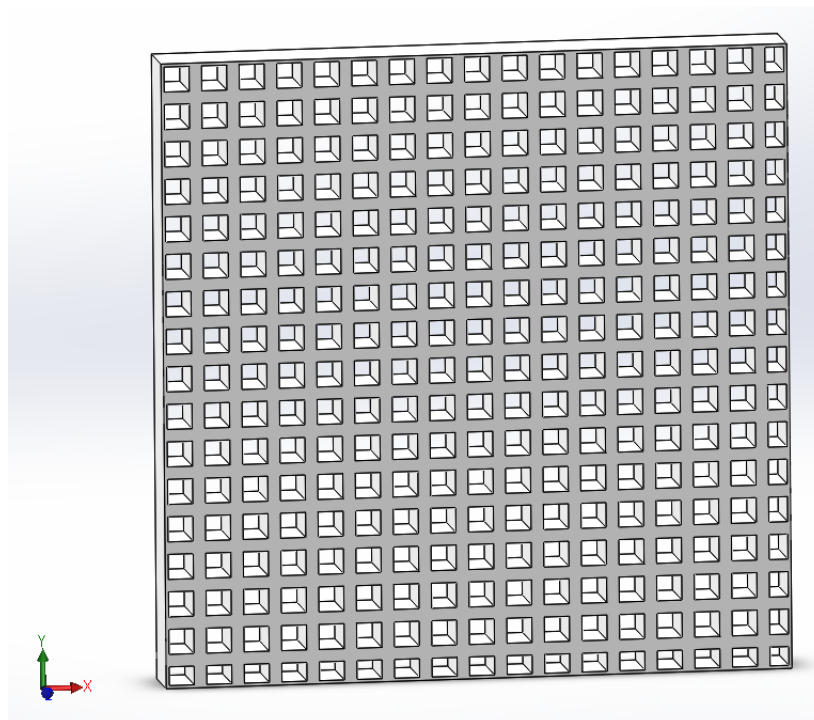
Παραμόρφωση: 1mm

Πυκνότητα: 764,80 kg/m³

Μητρώο ελαστικότητας (MPa):

2704,08	1455,17	1631,24	-20,40	2,16	-165,29
1060,70	2702,40	1471,37	0,00	-145,10	2,15
1498,83	1496,98	3753,85	0,67	0,00	0,00
-0,47	-12,01	-8,66	456,86	-0,15	4,66
17,29	0,29	-0,06	0,00	1401,82	0,00
-0,13	-17,30	0,07	0,00	0,01	1401,77

Grid πλευράς 1mm και διάκενο 2mm



Εικόνα 18 Δομή grid πλευράς 1mm και διάκενου 2mm

Παραμόρφωση: 1mm

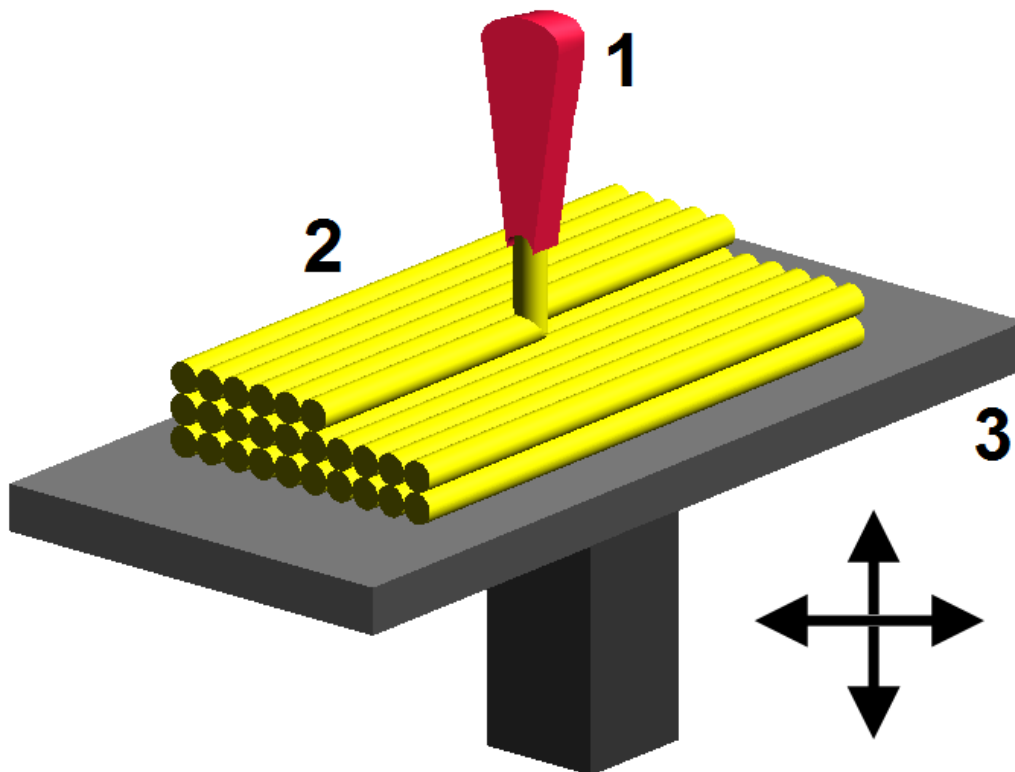
Πυκνότητα: 562,4 kg/m³

Μητρώο ελαστικότητας (MPa):

1100,53	372,74	592,05	-4,05	0,93	-76,38
339,58	1100,40	577,70	0,00	-79,66	0,92
570,10	569,92	1771,82	-0,01	0,00	0,00
0,27	-0,26	-0,29	108,50	0,04	4,06
1,78	0,09	-0,02	0,00	617,38	-0,02
0,10	-1,79	0,02	0,00	-0,01	617,42

Προσομοίωση FDM διεργασίας

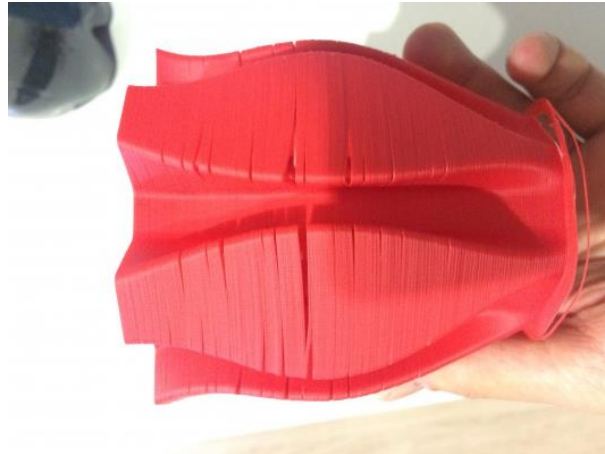
Για την προσομοίωση FDM διεργασίας ενός 3D-printer χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Cohesive Zone Modeling του ANSYS. Το εργαλείο αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει αυτός τις τάσεις, τις ενέργειες ή την απόσταση μεταξύ δύο επιφανειών για να πραγματοποιηθεί αποκόλληση.



Εικόνα 19 Γραφική απεικόνιση FDM διεργασίας. Το υλικό εκχύνεται επίπεδο - επίπεδο. 1) ακροφύσιο έκχυσης υλικού εκτύπωσης, 2) αντικείμενο εκτύπωσης (layer by layer), 3) τράπεζα 3D-printer (Smallwood, 2014)

Η πιο απλή σύνδεση επιφανειών του ANSYS το bonded δεν είναι αποδεκτή γιατί ομογενοποιεί το δοκίμιο κάτι που είναι εντελώς διαφορετικό από ένα αντικείμενο εκτυπωμένο με FDM διεργασία.

Για την παρούσα προσομοίωση επιλέχθηκε αποκόλληση επιφανειών με βάση τις ενέργειες. Οι ζητούμενες τάσεις και ενέργειες ρυθμίστηκαν στο 70% των ονομαστικών του υλικού ABS plastic. Το 70% επιλέχθηκε γιατί από εργαστηριακές δοκιμές (Adrián Rodríguez-Panes, Juan Claver and Ana María Camacho, 2018) έχει παρατηρηθεί ότι από διεργασία FDM με υλικό ABS η μηχανική αντοχή ενός δοκιμίου είναι στην καλύτερη των περιπτώσεων 78% αυτής του ίδιου του υλικού.



Εικόνα 20 Αποκόλληση των στρωμάτων εκτύπωσης ενός βάζου εκτυπωμένο από 3D-printer (abuharsky, 2014)

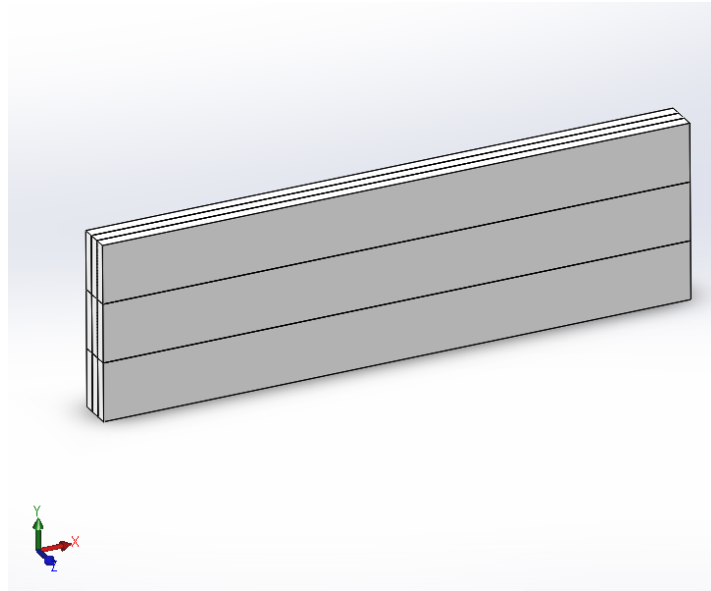
Δημιουργήθηκαν 3 προσομοιώσεις για να παρατηρηθεί αν και κατά πόσο επηρεάζεται το topology optimization από την παραμόρφωση που αναμένεται να έχει το εξεταζόμενο δοκίμιο κάτω από μια συγκεκριμένη φόρτιση.

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Fracture-Energies based Debonding		
3	Debonding Interface Mode	Mixed	
4	Tangential Slip Under Normal Compression	Yes	
5	Maximum Normal Contact Stress	27.3	MPa
6	Critical Fracture Energy for Normal Separation	8800.3	J m ⁻²
7	Maximum Equivalent Tangential Contact Stress	2.93	MPa
8	Critical Fracture Energy for Tangential Slip	945.1	J m ⁻²
9	Artificial Damping Coefficient	1E-09	s

Εικόνα 21 Δήλωση παραμέτρων για χρήση του εργαλείου Cohesive Zone Modeling. 3) Mixed: η αποκόλληση των επιφανειών οφείλεται σε αξονικές και διατμητικές τάσεις. 9) Το Artificial Damping Coefficient χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση των αριθμητικών λύσεων (Raj, 2015). Οι τάσεις και οι ενέργειες εισήχθησαν με βάση τα (Abuzar Es'hagi Oskui, Naghdali Chourani, Elyas Haddadi, 1996) και (MatWeb, n.d.)

Κατά την εισαγωγή των παραμέτρων για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων παρατηρήθηκε ότι για παραμόρφωση άνω των 0,002mm γίνεται η αποκόλληση των στρωμάτων.

FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,001mm



Εικόνα 22 Δοκίμο για προσομείωση FDM (Fused Deposition Modeling) διεργασίας

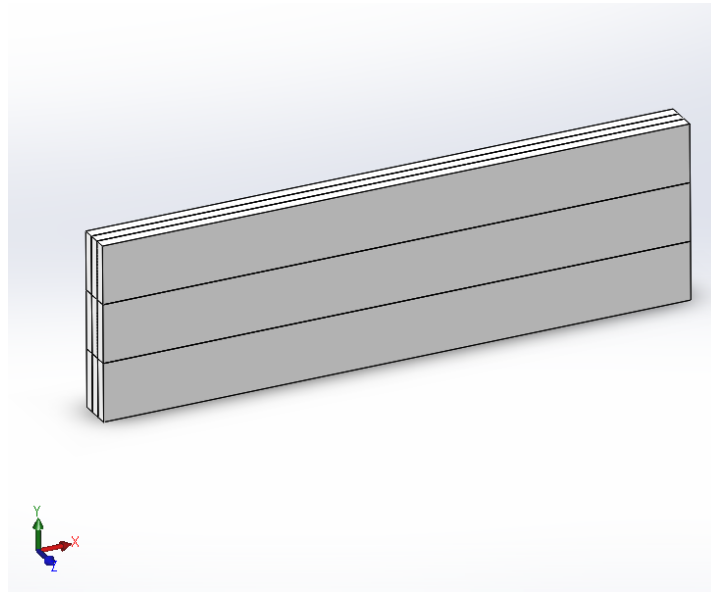
Παραμόρφωση: 0,001mm

Πυκνότητα: 1111,11 kg/m³

Μητρώο ελαστικότητας (MPa):

$$\begin{bmatrix} 14975,29 & 3284,61 & 9735,39 & -79,24 & 0,00 & -6142,57 \\ 3299,88 & 1657,21 & 3243,92 & 0,00 & -227,83 & 0,00 \\ 9744,53 & 3238,55 & 14682,90 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -0,01 & 0,00 & 0,00 & 473,98 & 0,00 & -0,01 \\ 0,00 & 0,05 & 0,00 & 0,00 & 4555,11 & 0,00 \\ 0,04 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 44567,12 \end{bmatrix}$$

FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,002mm



Εικόνα 23 Δοκίμο για προσομοίωση FDM (Fused Deposition Modeling) διεργασίας

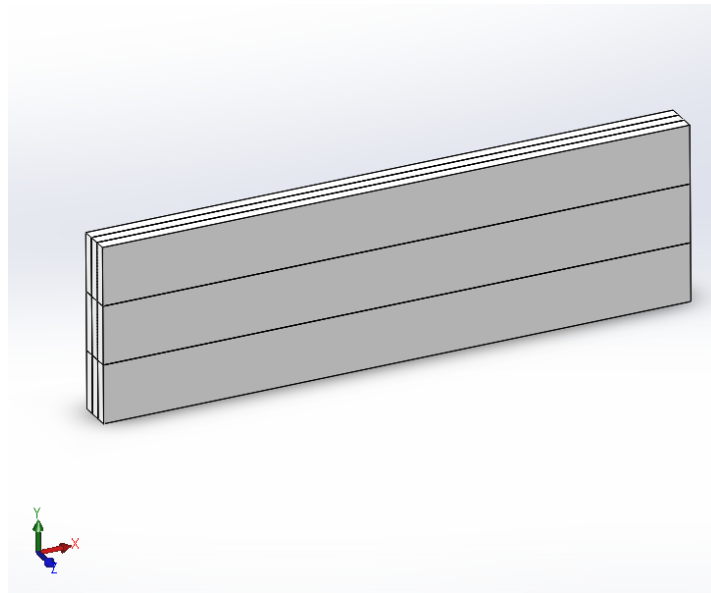
Παραμόρφωση: 0,002mm

Πυκνότητα: 1111,11 kg/m³

Μητρώο ελαστικότητας (MPa):

$$\begin{bmatrix} 7487,65 & 3284,61 & 4867,70 & -79,24 & 0,00 & -341,25 \\ 3299,88 & 3314,43 & 3243,92 & 0,00 & -227,83 & 0,00 \\ 4872,27 & 3238,55 & 7341,45 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -0,01 & 0,00 & 0,00 & 947,96 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,05 & 0,00 & 0,00 & 2277,56 & 0,00 \\ 0,02 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 2475,95 \end{bmatrix}$$

FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,0007mm



Εικόνα 24 Δοκίμιο για προσομοίωση FDM (Fused Deposition Modeling) διεργασίας

Παραμόρφωση: 0,0007mm

Πυκνότητα: 1111,11 kg/m³

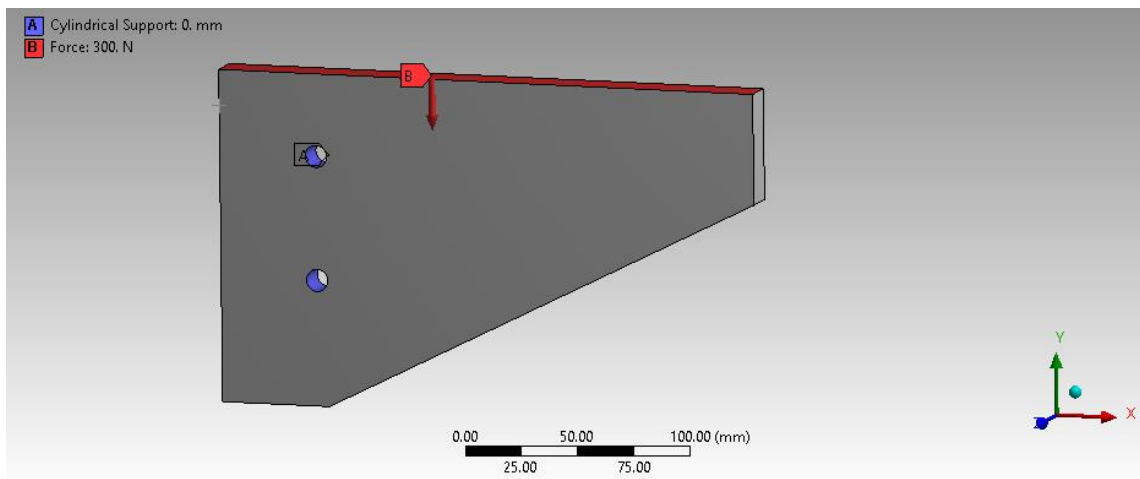
Μητρώο ελαστικότητας (MPa):

$$\begin{bmatrix} 4991,76 & 3284,61 & 3245,13 & -79,24 & 0,00 & -227,50 \\ 3299,88 & 4971,64 & 3243,92 & 0,00 & -227,83 & 0,00 \\ 3248,18 & 3238,55 & 4894,30 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -0,01 & 0,00 & 0,00 & 1421,94 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,05 & 0,00 & 0,00 & 1518,37 & 0,00 \\ 0,01 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1650,63 \end{bmatrix}$$

Topology Optimization

Το ANSYS έχει build-in topology optimization, αλλά για αντικείμενα χωρίς ανισotropίες. Όλα τα παραπάνω μοντέλα έχουν ανισότροπη συμπεριφορά. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε μια επέκταση του ANSYS σε συνεργασία με το GENESIS που ονομάζεται GENESIS Topology Optimization for ANSYS® Mechanical (GTAM).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία υποβλήθηκε σε επεξεργασία topology optimization η στήριξη της Εικόνας 23. Η διάταξη για την οποία έγιναν τα topology optimization φαίνονται επίσης στην Εικόνα 23.

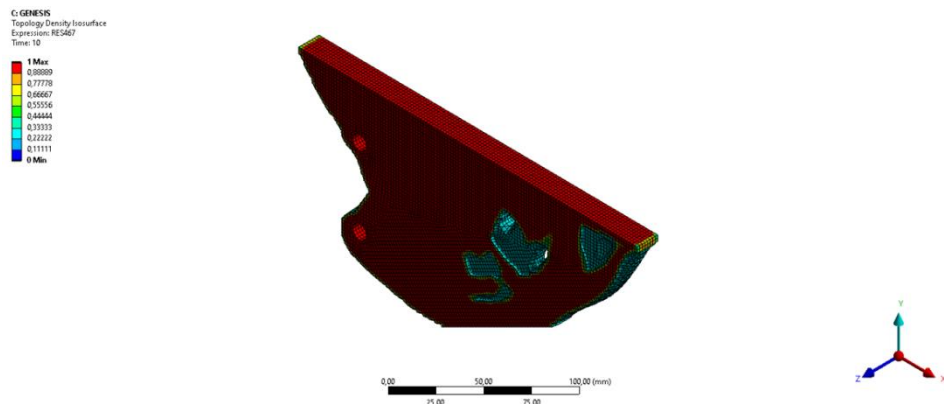


Εικόνα 25 Bracket με στήριξη στα (A) και φόρτιση με δύναμη 300N στο (B)

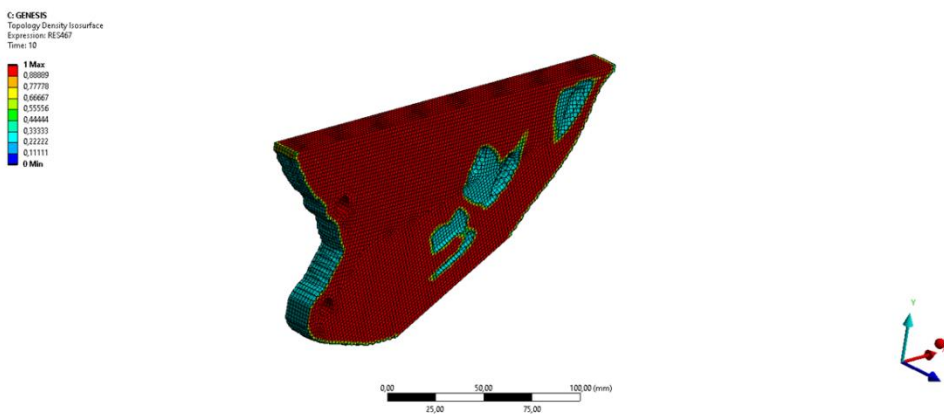
Οι παράμετροι των topology optimization φαίνονται παρακάτω και είναι κοινοί για όλα τα μοντέλα:

1. Στόχος: Ελαχιστοποίηση του stain energy
2. Περιορισμός: Μάζα όχι μικρότερη του 70% του αρχικού

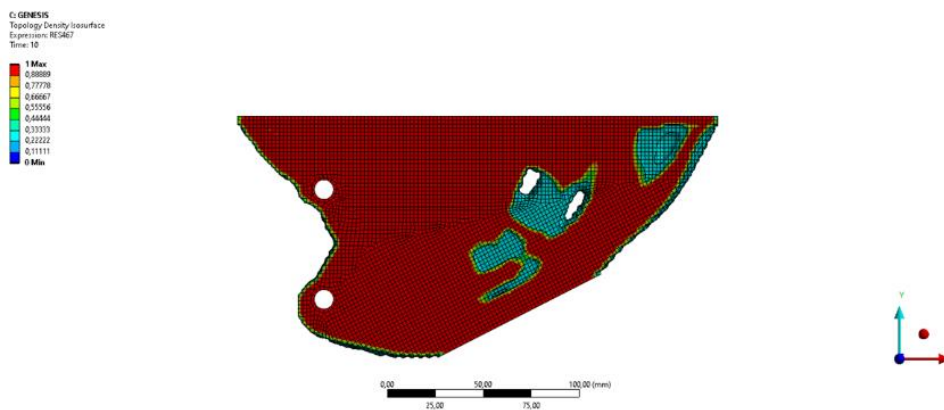
Αποτελέσματα ABS plastic



Εικόνα 26 Topology optimization του bracket για ABS plastic υλικό μπρος ισομετρική προβολή

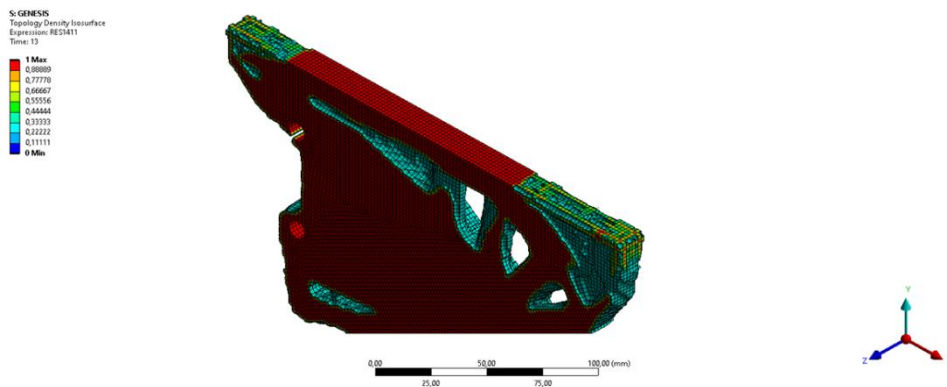


Εικόνα 27 Topology optimization του bracket για ABS plastic υλικό πίσω ισομετρική προβολή

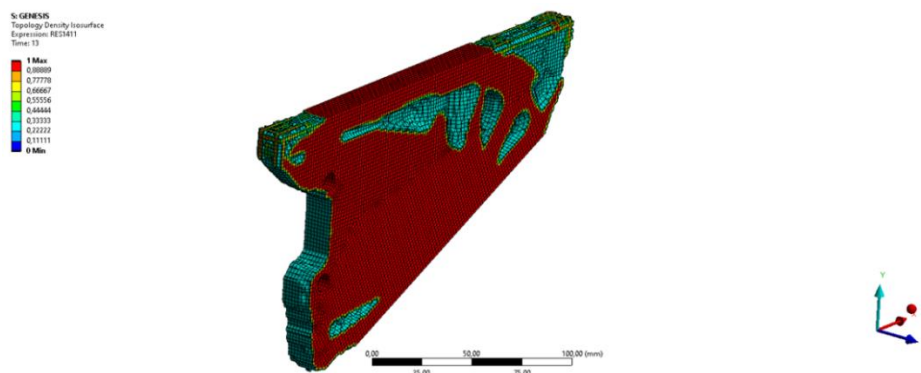


Εικόνα 28 Topology optimization του bracket για ABS plastic υλικό πλάγια προβολή

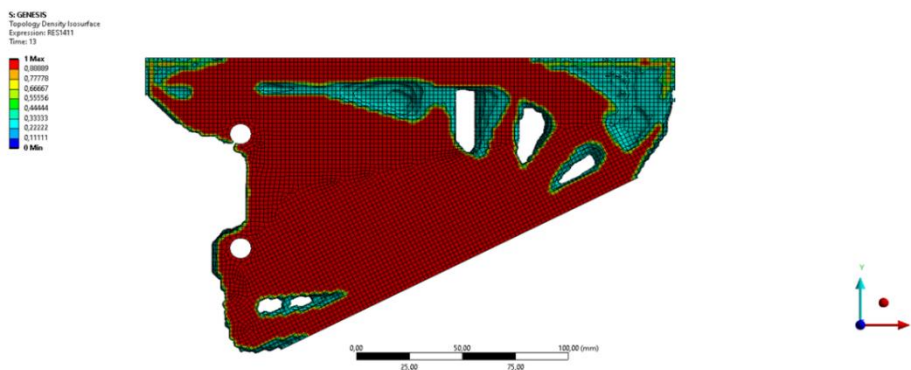
ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,25



Εικόνα 29 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,25 μπρος ισομετρική προβολή

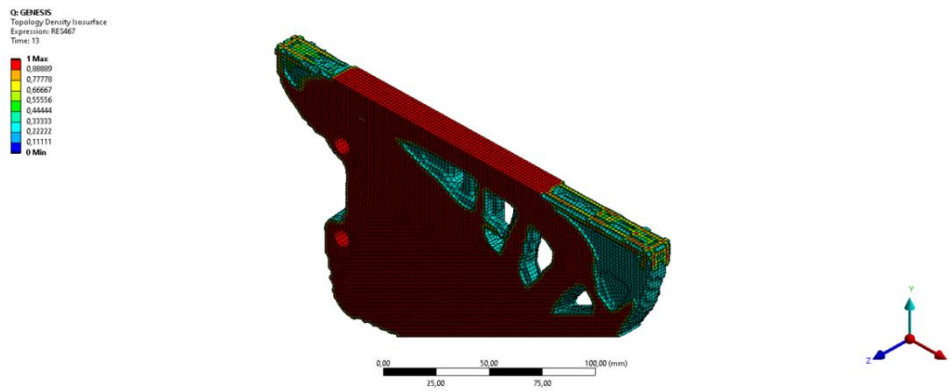


Εικόνα 30 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,25 πίσω ισομετρική προβολή

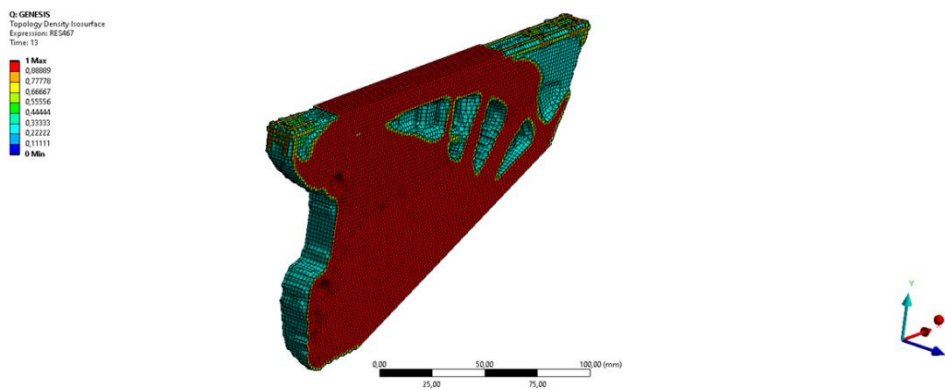


Εικόνα 31 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,25 πλάγια προβολή

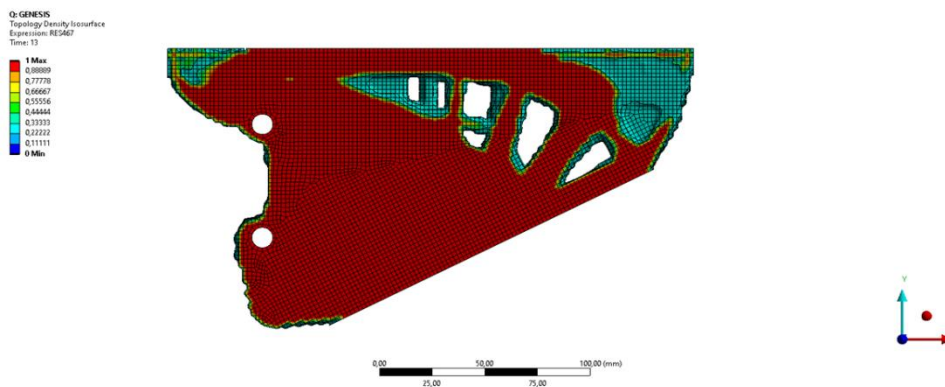
ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5



Εικόνα 32 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5 μπρος ισομετρική προβολή

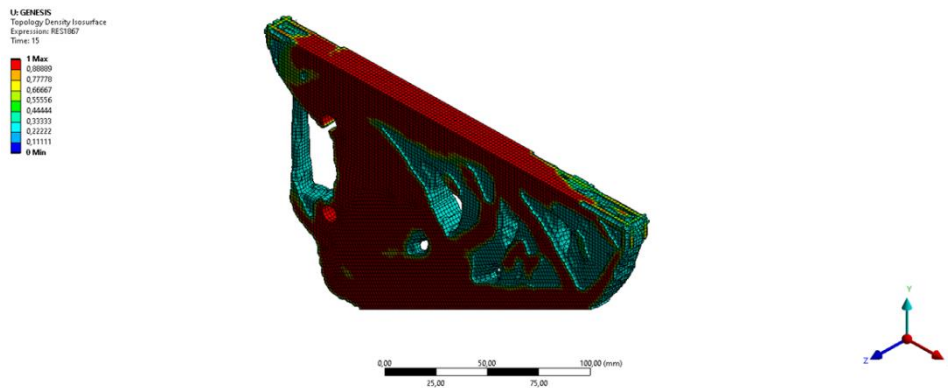


Εικόνα 33 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5 πίσω ισομετρική προβολή

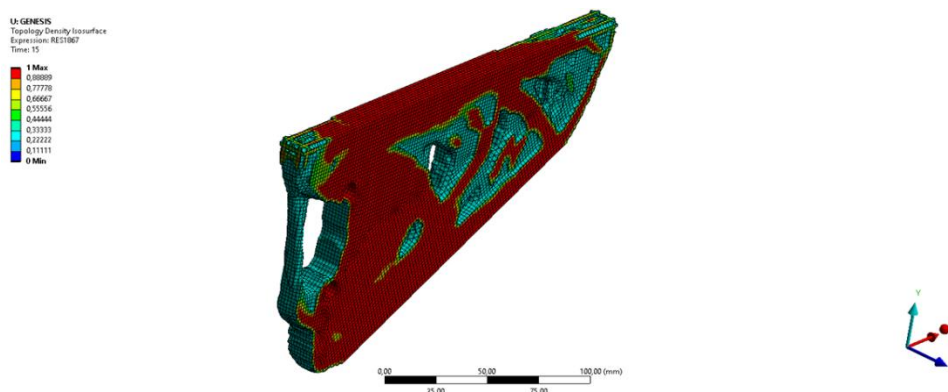


Εικόνα 34 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5 πλάγια προβολή

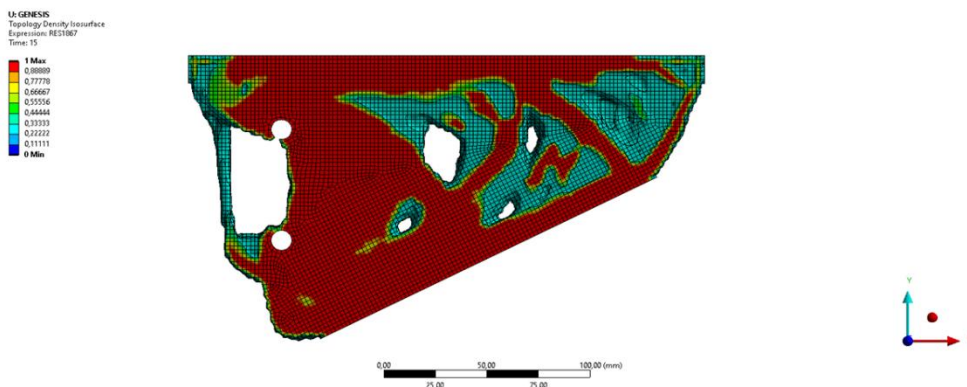
ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5 περιστραμμένο 90°



Εικόνα 35 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5 περιστραμμένο 90° προς ισομετρική προβολή

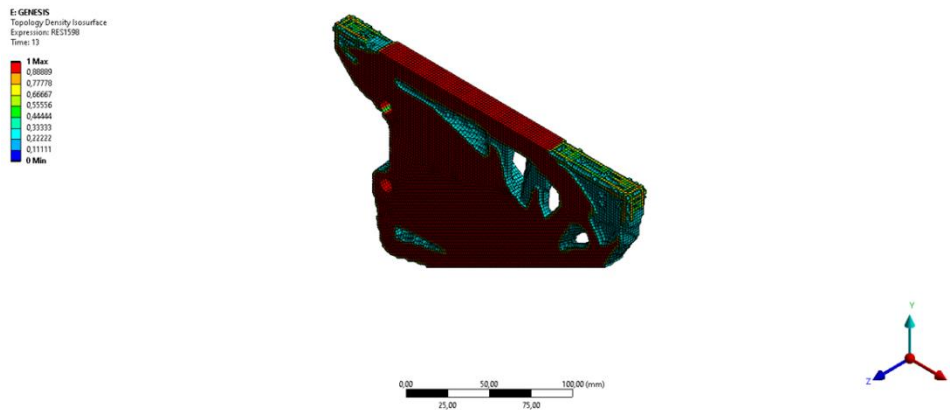


Εικόνα 36 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5 περιστραμμένο 90° πίσω ισομετρική προβολή

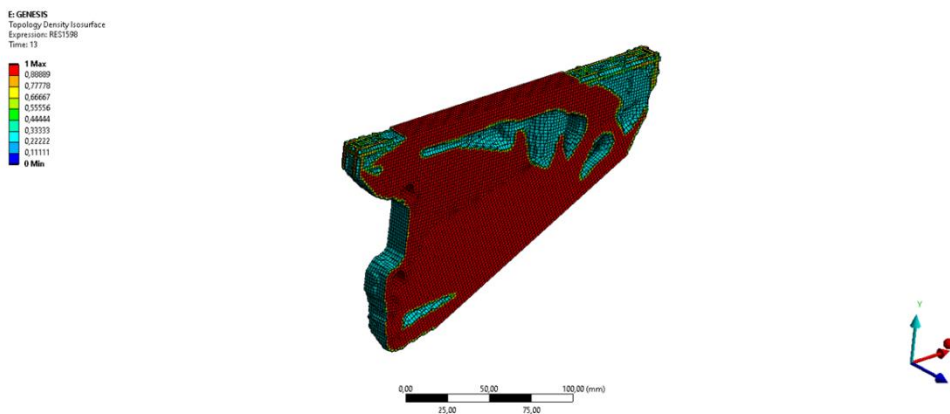


Εικόνα 37 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 0,5mm και πάχος 0,5 περιστραμμένο 90° πλάγια προβολή

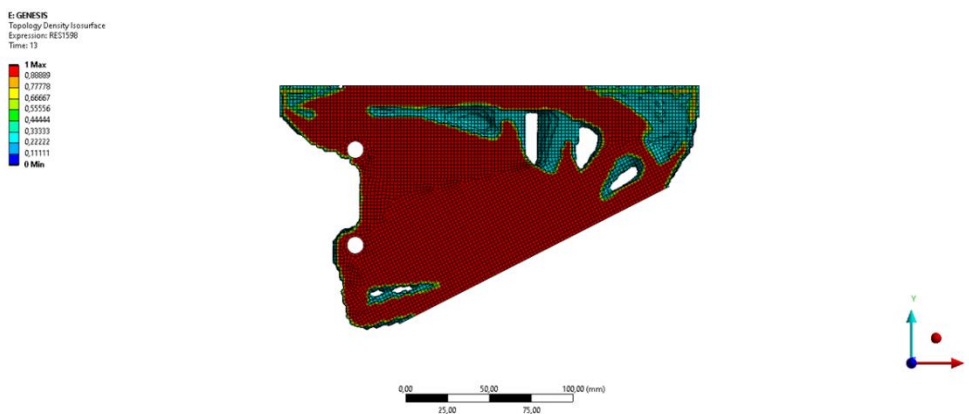
ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,5



Εικόνα 38 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,5 μπρος ισομετρική προβολή

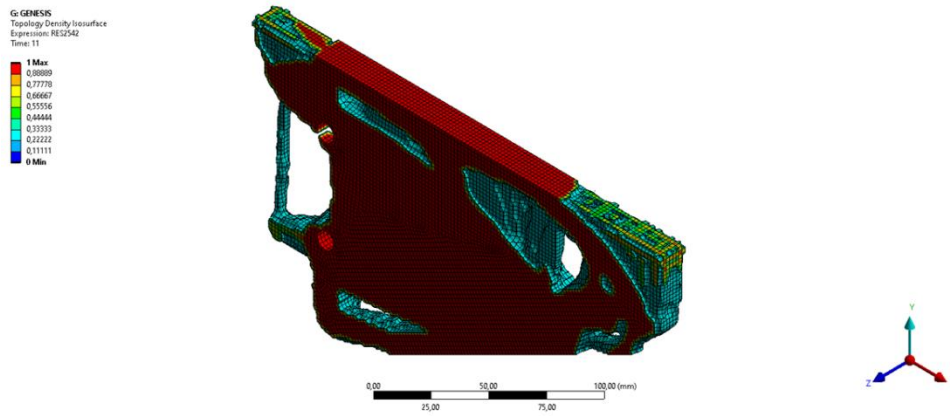


Εικόνα 39 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,5 πίσω ισομετρική προβολή

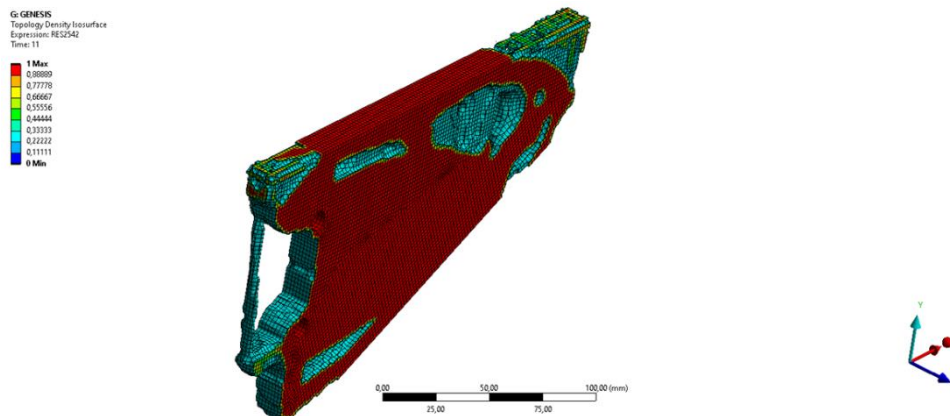


Εικόνα 40 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,5 πλάγια προβολή

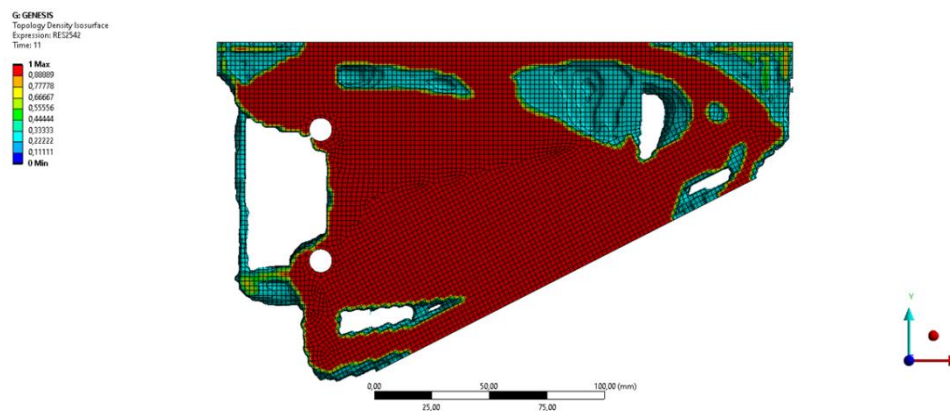
ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,25



Εικόνα 41 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,25 μπρος ισομετρική προβολή

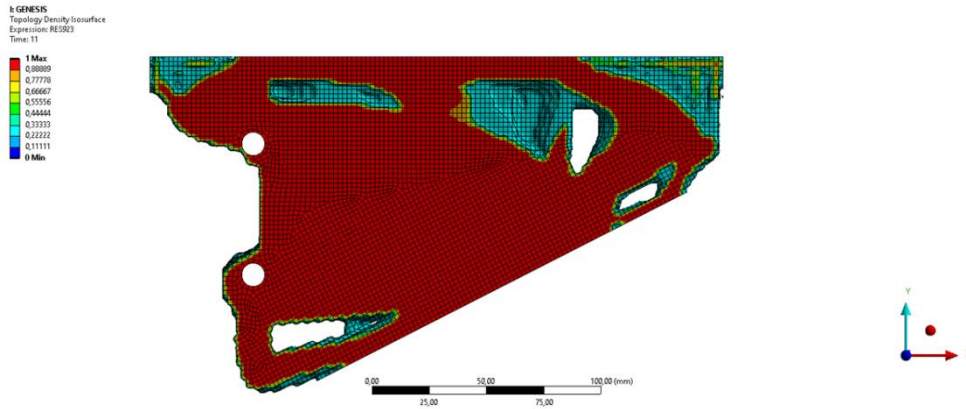


Εικόνα 42 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,25 πίσω ισομετρική προβολή

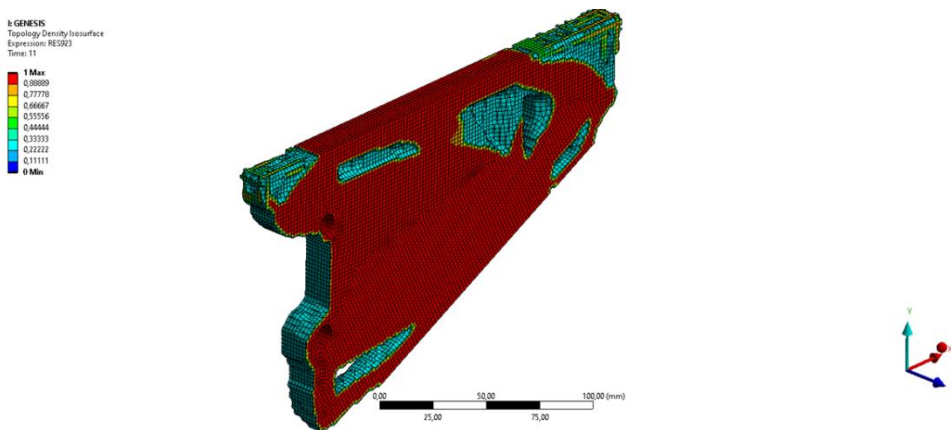


Εικόνα 43 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 1mm και πάχος 0,25 πλάγια προβολή

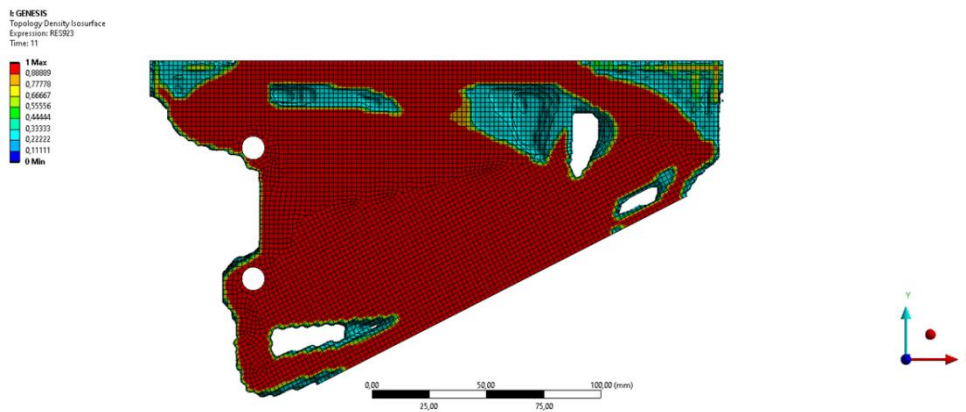
ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,5



Εικόνα 44 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,5 μπρος ισομετρική προβολή

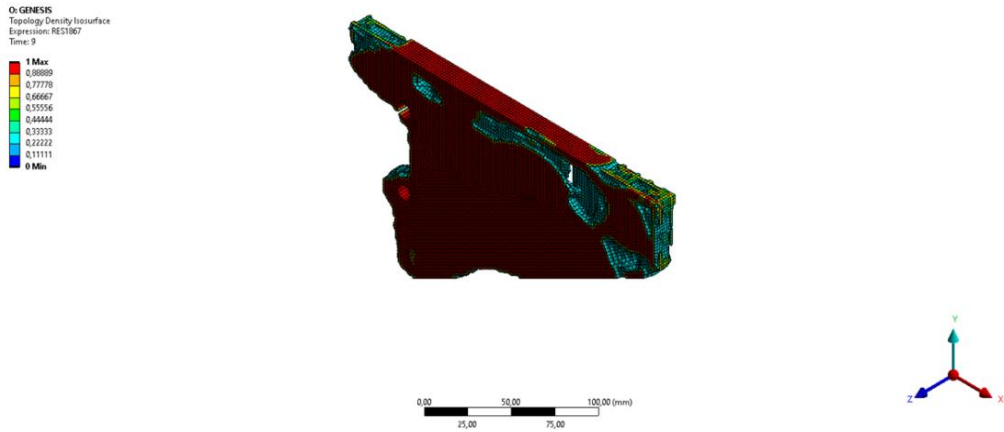


Εικόνα 45 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,5 πίσω ισομετρική προβολή

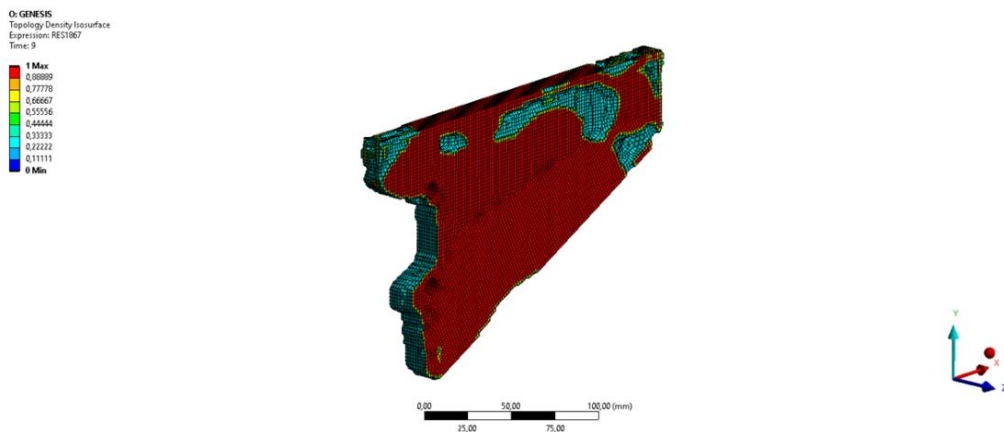


Εικόνα 46 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,5 πλάγια προβολή

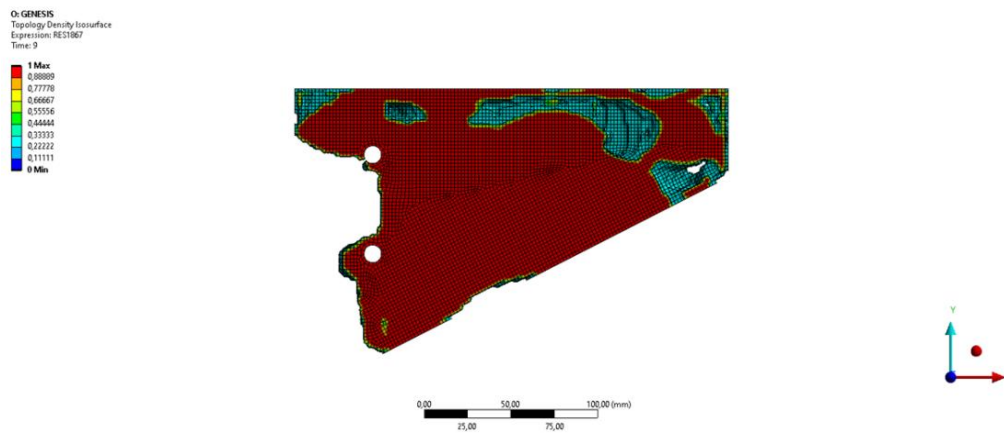
ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,25



Εικόνα 47 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,25 μπρος ισομετρική προβολή

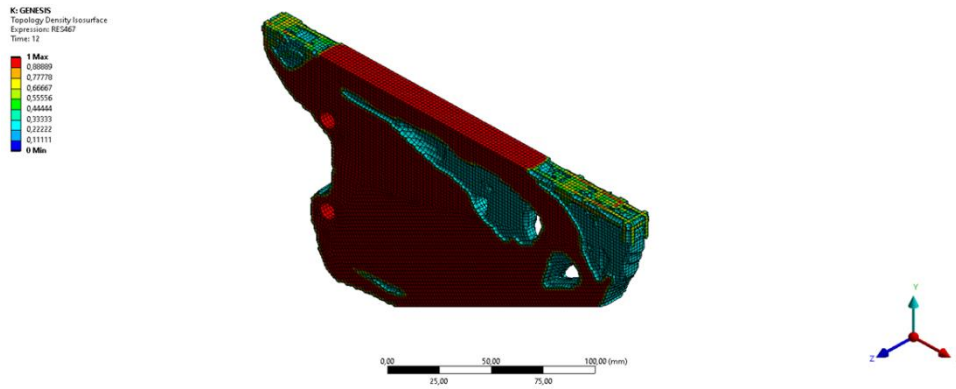


Εικόνα 48 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,25 πίσω ισομετρική προβολή

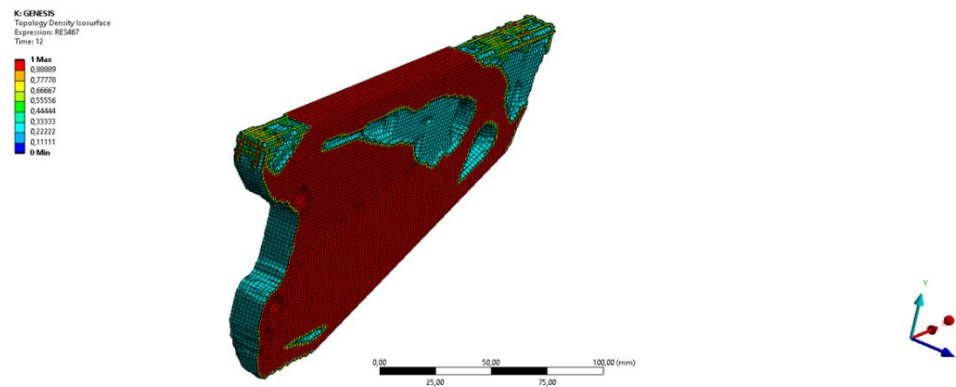


Εικόνα 49 Topology optimization του bracket για ABS plastic honeycomb πλευράς 2mm και πάχος 0,25 πλάγια προβολή

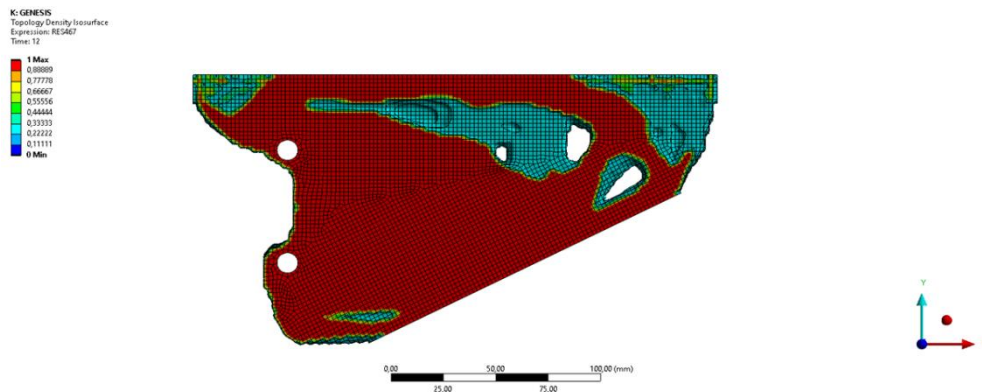
ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 1mm



Εικόνα 50 Topology optimization του bracket για ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 1mm μπρος ισομετρική προβολή

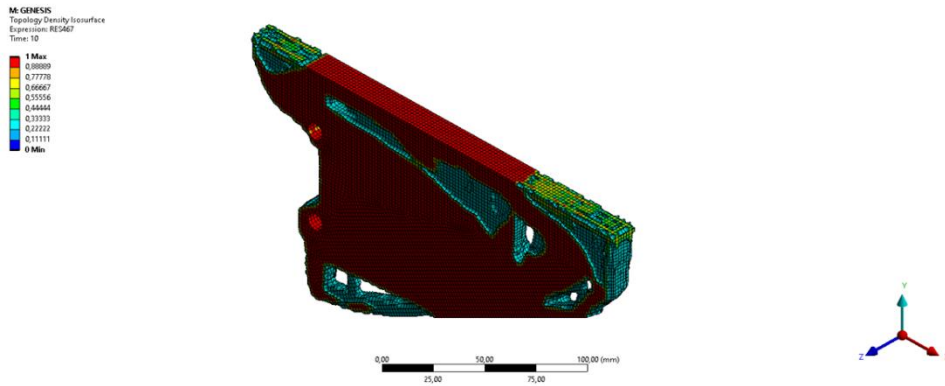


Εικόνα 51 Topology optimization του bracket για ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 1mm πίσω ισομετρική προβολή

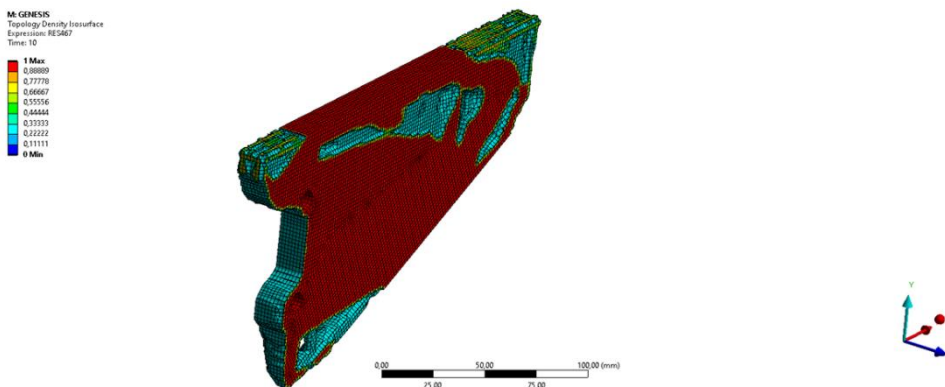


Εικόνα 52 Topology optimization του bracket για ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 1mm πλάγια προβολή

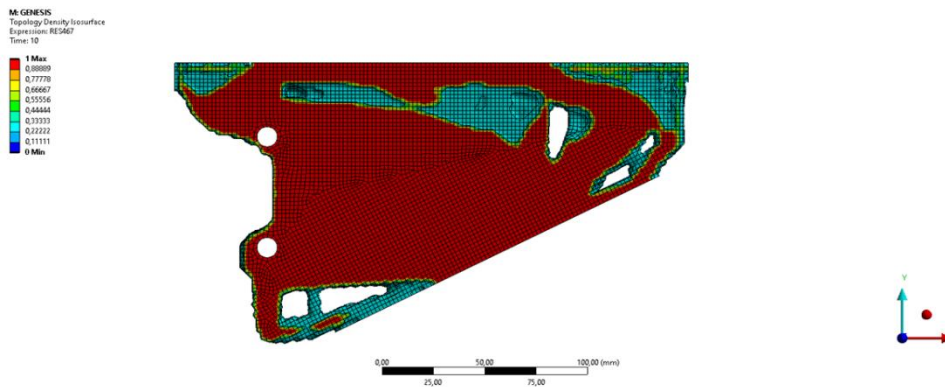
ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 2mm



Εικόνα 53 Topology optimization του bracket για ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 2mm μπρος ισομετρική προβολή

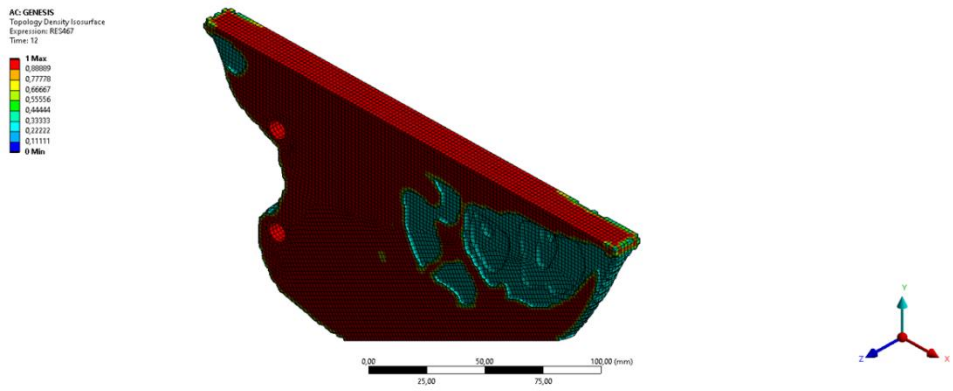


Εικόνα 54 Topology optimization του bracket για ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 2mm πίσω ισομετρική προβολή

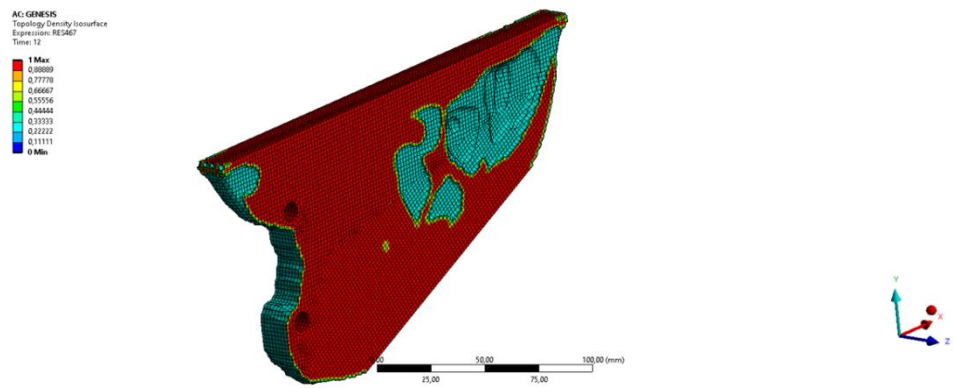


Εικόνα 55 Topology optimization του bracket για ABS plastic grid πλευράς 1mm και διάκενο 2mm πλάγια προβολή

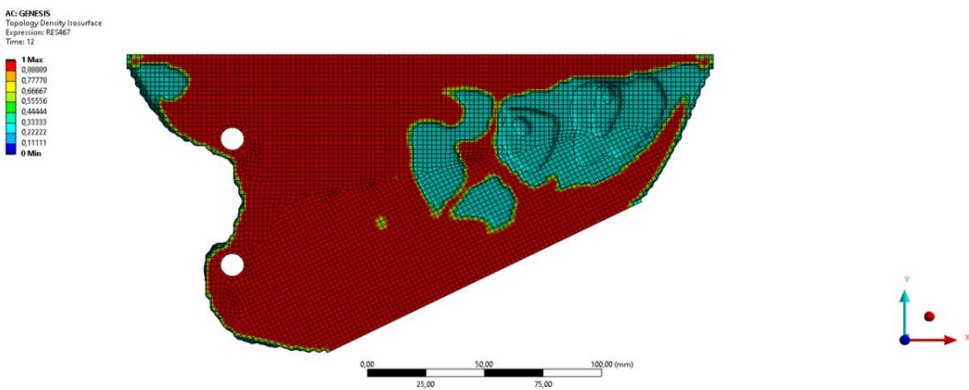
ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,0007mm



Εικόνα 56 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,0007mm μπρος ισομετρική προβολή

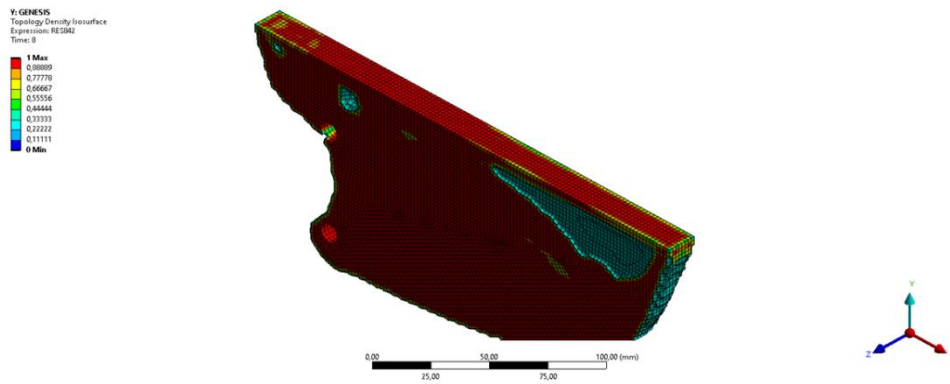


Εικόνα 57 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,0007mm πίσω ισομετρική προβολή

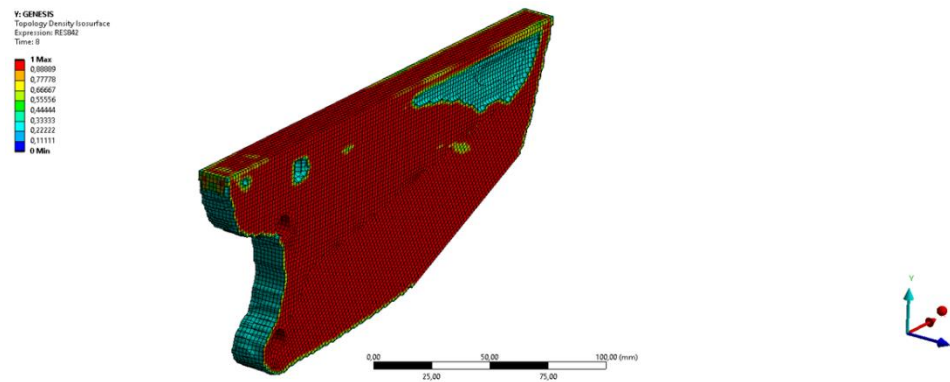


Εικόνα 58 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,0007mm πλάγια προβολή

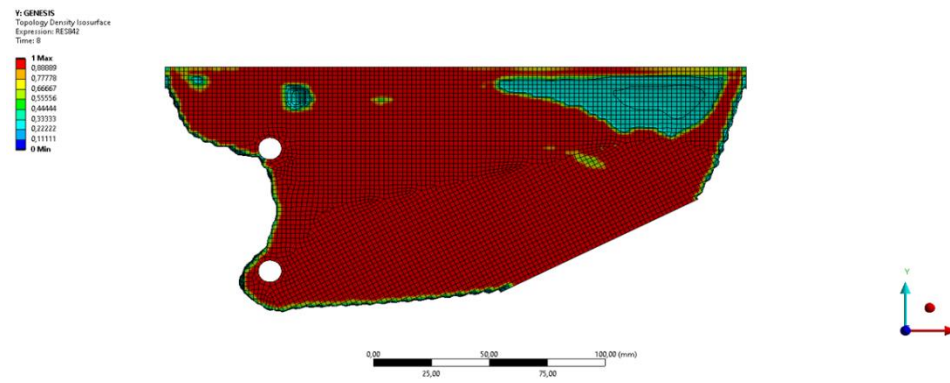
ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,001mm



Εικόνα 59 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,001mm μπρος ισομετρική προβολή

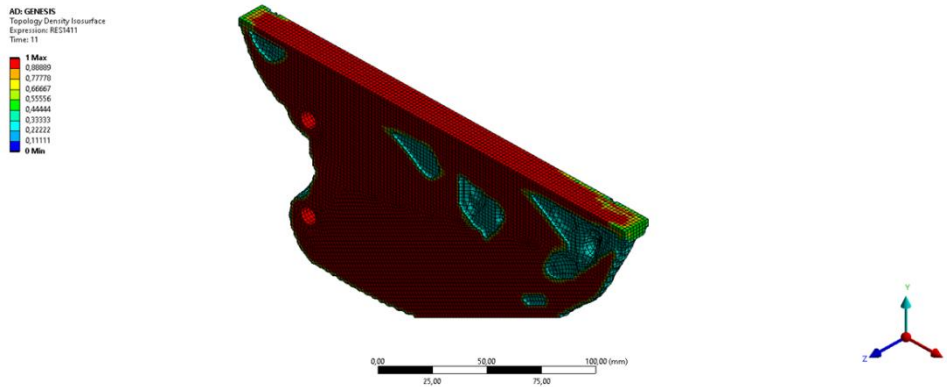


Εικόνα 60 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,001mm πίσω ισομετρική προβολή

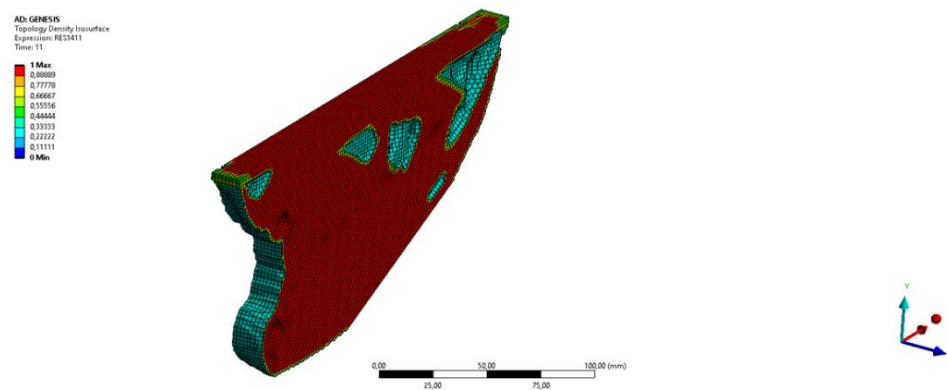


Εικόνα 61 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,001mm πλάγια ισομετρική προβολή

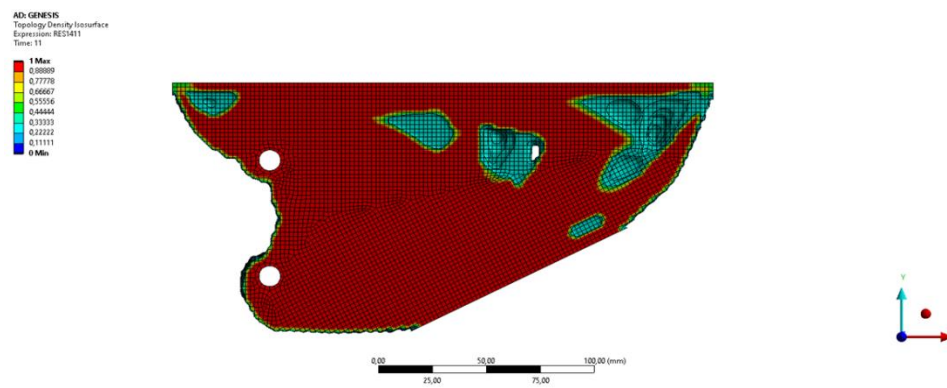
ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,002mm



Εικόνα 62 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,002mm μπρος ισομετρική προβολή



Εικόνα 63 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,002mm πίσω ισομετρική προβολή

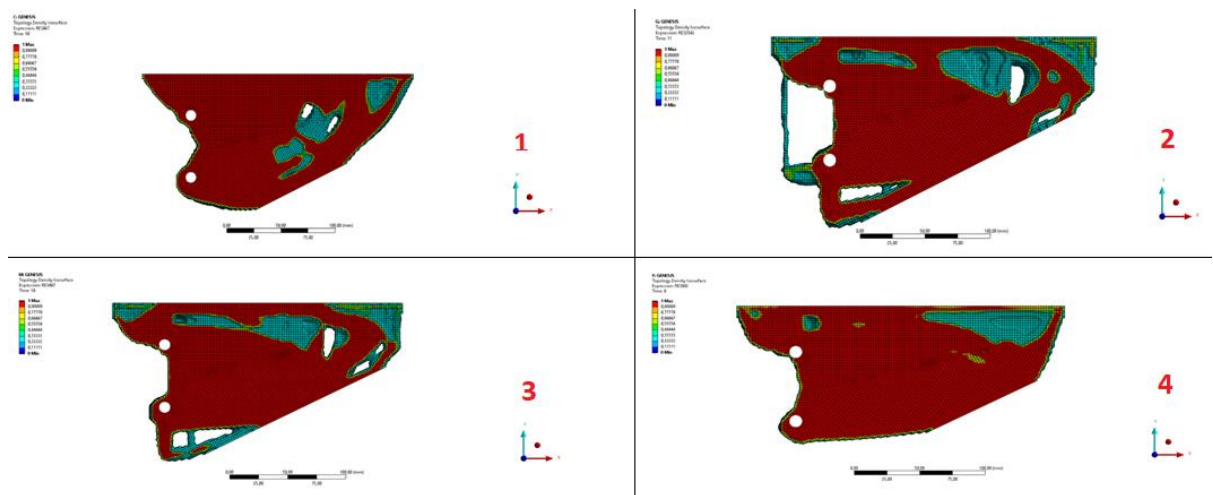


Εικόνα 64 Topology optimization του bracket για ABS plastic FDM με αναμενόμενη παραμόρφωση 0,002mm πλάγια προβολή

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι η τελική γεωμετρία ενός αντικειμένου η οποία έχει προκύψει από το μαθηματική μέθοδο Topology Optimization:

- ✓ εξαρτάται και διαφοροποιείται ανάλογα με το εσωτερικό γέμισμα των κατασκευών (ομοιογενές, honeycomb, grid, κτλ),
- ✓ εξαρτάται και διαφοροποιείται για εσωτερικό γέμισμα ίδιας δομής, διαφορετικών όμως εσωτερικών διαστάσεων,
- ✓ εξαρτάται και διαφοροποιείται για εσωτερικό γέμισμα ίδιας δομής, ίδιων εσωτερικών διαστάσεων αλλά διαφορετικής διεύθυνσης,
- ✓ εξαρτάται και διαφοροποιείται ανάλογα με την αναμενόμενη παραμόρφωση μιας κατασκευής κάτω από μια συγκεκριμένη φόρτιση,
- ✓ δεν είναι η ίδια για αντικείμενα εκτυπωμένα από 3D-printers (FDM διεργασία) και κατασκευασμένα με συμβατικές διεργασίες.



Εικόνα 65 Αποτέλεσμα Topology Optimization για: 1) bracket με solid infill υλικού ABS plastic, 2) bracket με honeycomb infill υλικού ABS plastic, 3) bracket με grid infill υλικού ABS plastic 4) bracket με FDM simulation infill υλικού ABS plastic

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- abuharsky. (2014, November 19). *ABS problems: delamination, cracks, warping*. Ανάκτηση από RepRap: <https://reprap.org/forum/read.php?262,434083>
- Abuzar Es'hagi Oskui, Naghdali Choupani, Elyas Haddadi. (1996). *Experimental and Numerical Investigation of Fracture*. Tabriz, Iran: Department of Mechanical Engineering, Institute of Polymeric Materials/Sahand University of Technology.
- Adrián Rodríguez-Panes, Juan Claver and Ana María Camacho. (2018). The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Manufactured by FDM: A Comparative Analysis. *MDPI*.
- Hosmer, K. (2013, June 13). *Complex Geometric Lamp Designs Produced with 3D Printing*. Ανάκτηση από MY MODERN MET: <https://mymodernmet.com/bathsheba-grossman-3d-printed-lamps/>
- Marr, B. (2018). *7 Amazing Real-World Examples Of 3D Printing*. Ανάκτηση από Bernard Marr & Co.: <https://bernardmarr.com/7-amazing-real-world-examples-of-3d-printing/>
- MatWeb. (χ.χ.). *Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)*. Ανάκτηση από MatWeb MATERIAL PROPERTY DATA: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3a8afcddac864d4b8f58d40570d2e5aa&ckck=1>
- Raj, O. V. (2015). *ANALYSIS OF STRUCTURES WITH POLYMER BASE PROTECTIVE COATINGS*. Kaunas: Kaunas University of Technology Faculty of Mechanical Engineering and Design.
- Sartorelli, A. (2020, March 19). *How to Get the Most out of Topology Optimization*. Ανάκτηση από nTopology: <https://ntopology.com/blog/2020/03/19/how-to-get-the-most-out-of-topology-optimization/>
- Smallwood, B. (2014, Δεκέμβριος 12). *Fun Fact Friday: 3D Printing*. Ανάκτηση από DISCOVERY EDUCATION: <https://blog.discoveryeducation.com/blog/2014/12/12/fun-fact-friday-3d-printing/>
- Κεσόπουλος, Σ. (2020). *Βέλτιστος σχεδιασμός κυψελωτών πλακών με χρήση αυξητικών δομών για μείωση του βάρους και αύξηση της δυσκαμψίας*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.