



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Επανασχεδιασμός εξαρτήματος συγκράτησης  
καλωδιώσεων δορυφόρου με γνώμονα την  
Προσθετική Κατασκευή του**

Πασόπουλος Σπυρίδων  
Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

*Επιβλέπων: Δρ. – Μηχ. Σ. Πολύδωρας, ΕΔΙΠ Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ*

*Μάθημα: 1109 - Τεχνολογίες και Εφαρμογές Προσθετικής Κατασκευής/3D Εκτύπωσης*

ΑΘΗΝΑ 2023

# Περίληψη

Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει μία σύντομη αναφορά στους διαστημικούς δορυφόρους και στα εξαρτήματα συγκράτησης καλωδιώσεων τους, καθώς και μια εκτενέστερη αναφορά στην Προσθετική Κατασκευή από πλευράς θέσπισης ορολογίας, τεχνολογικών κατηγοριών και διαδικασίας. Επιπροσθέτως, γίνεται μία ειδικότερη αναφορά στην τεχνολογία SLS και τους λόγους για τους οποίους θεωρήθηκε ουσιαστική στην παρούσα εργασία. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με το σκοπό της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του λογισμικού nTop, βασικού εργαλείου υλοποίησης της εργασίας. Περιγράφεται η αναπαράσταση γεωμετριών με Implicit Modeling σε σύγκριση με άλλες συνήθεις μεθόδους και γίνεται σύντομη αναφορά στη θεωρία πεδίων στην οποία βασίζεται. Εν συνεχεία, παρουσιάζεται η δομή των blocks του λογισμικού nTop και οι δυνατότητές του, πολλές εκ των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της εργασίας.

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά το στάδιο υλοποίησης της κύριας εφαρμογής. Αρχικά, γίνεται αναφορά στις απαιτήσεις των θερμοπλαστικών υλικών σε διαστημικές εφαρμογές και παρουσιάζονται οι απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές που τέθηκαν για τον σχεδιασμό του μελετώμενου εξαρτήματος. Εν συνεχεία, εισάγεται η γεωμετρία εκκίνησης – αφετηρία της ροής σχεδιασμού, που μελετάται σύμφωνα με τις προδιαγραφές που τέθηκαν. Ακολούθως, περιγράφεται η εφαρμογή της μεθόδου Data-Driven Design για τον επανασχεδιασμό του μελετώμενου εξαρτήματος. Το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων τελικών προσομοιώσεων επιβεβαίωσης επί της επανασχεδιασμένης γεωμετρίας ως προς την εκπλήρωση των τεχνικών απαιτήσεων μετά τον επανασχεδιασμό, καθώς επίσης την ποσοτική αποτίμησή της σε σύγκριση με την γεωμετρία εκκίνησης και μια κοστολογική εκτίμηση κατασκευής.

Στο τελευταίο μέρος εξάγονται συμπεράσματα και προτείνονται ορισμένες ενδιαφέρουσες μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας.

# Abstract

The first chapter includes a brief reference to space satellites and their cable harness components, as well as a broader reference to Additive Manufacturing in terms of established terminology, technological categories and overall procedure. Additionally, special reference is made to SLS technology and why this was considered essential in the present work. The chapter concludes with the purpose of this work.

In the second chapter nTop software suite is presented. The Implicit Modeling geometry representation method is described, in comparison to other relevant methods, and reference is made to the theory of fields on which the latter is largely based. Furthermore, the nTop block structure and capabilities are presented, many of which were used for the implementation of this work.

The third chapter concerns the implementation of the actual case study. Initially, reference is made to the requirements of thermoplastic materials in space applications, and the required technical specifications set for the design process of the component under study are presented. Moreover, the initial starting geometry for the design workflow is introduced, that is studied according to set specifications. Further, the application of Data-Driven Design method for the redesign of the studied component is described. The chapter concludes by presenting final validation simulation results of the redesigned geometry, verifying fulfillment of technical requirements, as well as with a quantitative assessment in comparison to the initial geometry and a manufacturing cost estimate.

In the last part, conclusions are drawn and some interesting future extensions of this work are proposed.

## Ευχαριστίες – Acknowledgements

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας, καθηγητή μου στο ΔΠΜΣ Δρ. Σταμάτιο Πολύδωρα, μέλος ΕΔΙΠ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου προσέφερε στα πλαίσια της μεταπτυχιακής μου εργασίας να ασχοληθώ σε ένα σύγχρονο αντικείμενο με τεχνολογικά μέσα αιχμής, για την οπτική και τον τρόπο προσέγγισης που μου εμφύσησε στην αντιμετώπιση απαιτητικών τεχνικών θεμάτων, τη συνεχή ενθάρρυνση, την καθοδήγηση, τις συμβουλές του, αλλά και τον πολύτιμο χρόνο που μου διέθεσε καθ' όλη την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την ΟΗΒ Hellas, ελληνική θυγατρική του πολυεθνικού ομίλου διαστημικών εφαρμογών ΟΗΒ SE, τεχνικό υποστηρικτή – συνεργάτη της εργασίας. Ιδιαίτερα τα στελέχη της εταιρείας Δρ. Αικατερίνη Πανοπούλου, Δρ. Ανδρέα Αμπατζόγλου, κ. Mathieu Bernou και κ. Ευστράτιο Ρήγα, για τη συμβολή τους στον καθορισμό του κύριου αντικειμένου εφαρμογής, την παροχή ρεαλιστικών πληροφοριών και τεχνικών δεδομένων και τη διαρκή αξιολόγηση επί της προόδου και των αποτελεσμάτων της.

Θα ήθελα, ακόμη, να ευχαριστήσω την οικογένεια μου η οποία με έχει στηρίξει τόσο πολύ κατά την διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου με κάθε τρόπο και ειδικότερα κατά την περίοδο της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Last but not least, both the author and the supervisor would jointly like to express their sincere gratitude to nTopology Inc., for freely providing the appropriate educational license of their top-notch design software nTop (formerly nTopology) that was essential for the implementation of the present work.

# Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	3
Ευχαριστίες – Acknowledgements	4
Περιεχόμενα	5
Κατάλογος Σχημάτων και Εικόνων	7
Κατάλογος Πινάκων	10
Κατάλογος Συντμήσεων	11
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>13</b>
1.1 Δορυφόροι	13
1.2 Συγκρατητές καλωδίων (cable harness standoff brackets)	13
1.3 Προσθετική Κατασκευή / Τρισδιάστατη (3D) εκτύπωση	14
1.3.1 Γενικά περί Προσθετικής Κατασκευής	14
1.3.2 Διαδικασία Κατασκευής κομματιών με ΠΚ	15
1.3.3 Τεχνολογία Επιλεκτικής Συσσωμάτωσης με Λείζερ (SLS)	16
1.4 Σκοπός της Εργασίας	18
<b>2 Λογισμικό nTop</b>	<b>20</b>
2.1 Εισαγωγή	20
2.2 Implicit modelling	20
2.2.1 3D Γεωμετρίες με B-rep	20
2.2.2 Αναπαράσταση με meshes	21
2.2.3 Εισαγωγή στο Implicit Modeling - Πλεονεκτήματα	21
2.2.4 Πεδία	22
2.2.5 Πράξεις με άλγεβρα Boole	22
2.3 Εργαλεία και δυνατότητες του nTop	25
2.3.1 Ροή εργασίας με blocks	25
2.3.2 Implicit Bodies	27
2.3.3 Meshing	29
2.3.4 Lattices	33
2.3.5 Προσομοιώσεις	37
2.3.6 Data-Driven Design	45
2.3.7 Επιπλέον δυνατότητες στο nTop	45
<b>3 Κύριο μέρος - Υλοποίηση της εφαρμογής</b>	<b>47</b>
3.1 Λειτουργικές απαιτήσεις, στόχοι και προδιαγραφές επανασχεδιασμού	47
3.1.1 Design Space	47
3.1.2 Περιορισμοί (Restrictions)	48
3.1.3 Φορτία κατά την εκτόξευση	50

3.1.4 Συντελεστές ασφαλείας .....	51
3.1.5 Ιδιοσυχνότητα.....	52
3.1.6 Θερμοκρασίες .....	52
3.1.7 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση .....	55
3.1.8 Επιπλέον απαιτήσεις θερμοπλαστικών σε συνθήκες διαστήματος .....	56
3.1.9 Προδιαγραφές για το υλικό του bracket.....	56
3.2 Αρχικό στάδιο σχεδιασμού .....	57
3.2.1 Επιλογή υλικού.....	57
3.2.2 Γεωμετρία εκκίνησης .....	58
3.2.3 Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων .....	59
3.2.4 Σύνορα και συντοριακές συνθήκες.....	61
3.2.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων στατικών αναλύσεων.....	67
3.3 Κύριο στάδιο σχεδιασμού με τη μέθοδο Data-Driven Design .....	69
3.3.1 Εξαγωγή αποτελεσμάτων ανάλυσης γεωμετρίας εκκίνησης .....	69
3.3.2 Δημιουργία επανασχεδιασμένης γεωμετρίας .....	70
3.4 Αξιολόγηση νέου σχεδιασμού .....	78
3.4.1 Προσομοιώσεις στατικής ανάλυσης – έλεγχος εκπλήρωσης απαιτήσεων.....	78
3.4.2 Ποσοτική αποτίμηση .....	80
3.4.3 Κοστολογική προεκτίμηση για ΠΚ παραγομένων του σχεδιασμού.....	81
<b>4 Συμπεράσματα και Επεκτάσεις</b>	<b>83</b>
4.1 Συμπεράσματα .....	83
4.2 Πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις .....	83
<b>Βιβλιογραφία – Πηγές – Αναφορές</b>	<b>85</b>
<b>Παράρτημα</b>	<b>87</b>
Π1 Φυλλάδιο τεχνικών δεδομένων Windform® XT 2.0 .....	87
Π2 Πιστοποιήσεις δοκιμών outgassing του Windform® XT 2.0.....	89

# Κατάλογος Σχημάτων και Εικόνων

## Εικόνες

Εικόνα 1-1.	Παραδείγματα harness standoff brackets .....	14
Εικόνα 1-2.	Στάδια κατασκευής αντικειμένου με ΠΚ [31] .....	16
Εικόνα 1-3.	Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λείζερ (SLS) (προσαρμογή του "Selective laser sintering process" by Materialgeeza - Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons) [29] .....	16
Εικόνα 1-4.	Σύσταση της κοκκώδους πρώτης ύλης [32].....	17
Εικόνα 1-5.	Στάδια συσσωμάτωσης των κόκκων του υλικού στην τεχνολογία SLS [32] ..	17
Εικόνα 2-1.	Τοπολογικά στοιχεία των μοντέλων B-rep [8] .....	20
Εικόνα 2-2.	Αναπαράσταση ελικοειδούς οδοντωτού τροχού με: B-rep (αριστερά) και mesh (δεξιά) [8].....	21
Εικόνα 2-3.	Ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο το οποίο έχει περιγραφεί με την Εξ. (2-1) βάσει του Implicit Modeling .....	22
Εικόνα 2-4.	Ένωση 2 σφαιρών αναπαριστάμενων με meshes και περιοχή με ενδεχόμενες ανακρίβειες [20].....	23
Εικόνα 2-5.	Περιοχές όπου η ένωση κατά Boole μπορεί να αποτύχει στα B-reps.....	24
Εικόνα 2-6.	Παρουσίαση των πράξεων ένωσης και τομής της άλγεβρας Boole στο Implicit Modeling .....	24
Εικόνα 2-7.	Χρωματική διαφοροποίηση μεταξύ blocks Implicit Bodies και αποτελεσμάτων προσομοιώσεων .....	25
Εικόνα 2-8.	Είσοδοι και βοηθητικά σημεία του Ring from Center Point.....	26
Εικόνα 2-9.	Block του Implicit Body του δακτυλίου ως έξοδος της ροής εργασίας .....	26
Εικόνα 2-10.	Εφαρμογή παραδείγματος του Ring from Center Point block εντός ροής εργασίας.....	27
Εικόνα 2-11.	Βασικές γεωμετρίες παραγόμενες από το nTop.....	27
Εικόνα 2-12.	Blocks από την καρτέλα Modeling .....	28
Εικόνα 2-13.	Mesh from Implicit Body .....	29
Εικόνα 2-14.	Σύγκριση Remesh Surface και αρχικού επιφανειακού πλέγματος.....	30
Εικόνα 2-15.	Εφαρμογή του Volume Mesh.....	30
Εικόνα 2-16.	Εσωτερική δομή FE Boundary by Flood Fill block .....	31
Εικόνα 2-17.	Διαφοροποίηση επιλογής τμήματος επιφανείας FE Mesh για διάφορες επιλογές γωνιών .....	32
Εικόνα 2-18.	Στάδια εφαρμογής του FE Boundary by Body block .....	33
Εικόνα 2-19.	Διαθέσιμοι τύποι graph unit cells στο nTop.....	34
Εικόνα 2-20.	Κελιά TPMS διαθέσιμα στο nTop.....	34
Εικόνα 2-21.	Στοχαστικά lattices. Αριστερά: Delaunay. Δεξιά: Voronoi.....	35
Εικόνα 2-22.	Voronoi lattice σε torus με τη χρήση του Random Points in Body block.....	36
Εικόνα 2-23.	Εργαλεία επεξεργασίας των lattices του nTop.....	36
Εικόνα 2-24.	Παράδειγμα FE Model block.....	37

Εικόνα 2-25.	Διαθέσιμες συνοριακές συνθήκες στο nTop.....	38
Εικόνα 2-26.	Μετατοπίσεις.....	39
Εικόνα 2-27.	Παραμορφώσεις.....	39
Εικόνα 2-28.	Τάσεις Von Mises.....	40
Εικόνα 2-29.	Δυνάμεις αντίδρασης.....	40
Εικόνα 2-30.	Αποτελέσματα προσομοίωσης λυγισμού.....	41
Εικόνα 2-31.	Αποτέλεσμα ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων στο nTop.....	43
Εικόνα 2-32.	Συνοριακές συνθήκες θερμικής ανάλυσης διαθέσιμες στο nTop.....	43
Εικόνα 2-33.	Θερμοκρασία.....	44
Εικόνα 2-34.	Ροή θερμότητας.....	44
Εικόνα 2-35.	Εφαρμογή του Data-Driven Design στο lattice structure δοκού [7].....	45
Εικόνα 2-36.	Παράδειγμα σταδίων τοπολογικής βελτιστοποίησης.....	46
Εικόνα 3-1.	Ky-Sat 2 [16].....	57
Εικόνα 3-2.	AlbaPod V2.....	57
Εικόνα 3-3.	Implicit Body της γεωμετρίας εκκίνησης μέσα από το λογισμικό nTop και κατασκευαστικό σχέδιο από το SolidWorks.....	58
Εικόνα 3-4.	Mesh from Implicit Body στη γεωμετρία εκκίνησης.....	59
Εικόνα 3-5.	Remesh Surface στο επιφανειακό πλέγμα της γεωμετρίας εκκίνησης.....	60
Εικόνα 3-6.	Σύγκριση αποτελεσμάτων Mesh from Implicit Body και Remesh Surface.....	60
Εικόνα 3-7.	Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων όγκου της γεωμετρίας εκκίνησης.....	61
Εικόνα 3-8.	Παράκυκλοι ISO 10673-5.5 σε επαφή με το bracket και σύνορα της επαφής τους επί του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.....	62
Εικόνα 3-9.	Δυνάμεις προφόρτισης μέσω των παράκυκλων στη βάση του bracket.....	62
Εικόνα 3-10.	Εφαρμογή του FE Boundary by Flood Fill block στις οπές των κοχλιωτών συνδέσεων (μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων).....	62
Εικόνα 3-11.	Παράδειγμα δέσμευσης B.E. στο Displacement Restrain block και restraints επί των οπών κοχλιωτών συνδέσεων του bracket.....	63
Εικόνα 3-12.	Σύνορο της κάτω επιφάνειας της βάσης του bracket και αντίστοιχο δεσμευμένο B.E. από το Displacement Restraint block.....	63
Εικόνα 3-13.	Restraints επί της κάτω επιφάνειας της βάσης του bracket.....	64
Εικόνα 3-14.	Περιπτώσεις ισοδύναμων δυνάμεων επιταχύνσεων ως quasi-static loads επί του bracket στο περιβάλλον του nTop κατά τις 3 διαφορετικές περιπτώσεις. Αριστερά: X+. Κέντρο: Z+. Δεξιά: XY+45.....	65
Εικόνα 3-15.	Εφαρμογή των σημειακών δυνάμεων επί του συνόλου των κόμβων του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων και για τις 3 περιπτώσεις ζευγών $\theta_a, \theta_k$ με το quasi-static load στο σύστημα κατά τον ημιάξονα X+. Αριστερά: Άνω σημείο εφαρμογής. Δεξιά: Κάτω σημείο εφαρμογής.....	67
Εικόνα 3-16.	Χάρτης σημείων τάσεων Von Mises επί του bracket.....	69
Εικόνα 3-17.	Αριστερά: Παραδείγματα πεδίων τάσεων Von Mises από χάρτες σημείων τους. Δεξιά: Max block για τις μέγιστες τιμές των τάσεων από κάθε περίπτωση σε κάθε σημείο.....	70



Εικόνα 3-18.	Αριστερά: Παραδείγματα μεγίστων τάσεων Von Mises διαφορετικών περιπτώσεων φόρτισης. Δεξιά: Max block για τη μέγιστη εκ των μεγίστων τάσεων όλων των περιπτώσεων .....	70
Εικόνα 3-19.	Συμπληρωματικές γεωμετρίες με τις τελικές τους διαστάσεις.....	72
Εικόνα 3-20.	Παράδειγμα διαφοροποίησης της επιλογής Continuity στο Ramp block [14]	74
Εικόνα 3-21.	Ramp block που χρησιμοποιήθηκε στη ροή εργασίας .....	75
Εικόνα 3-22.	Filter Beams by Length block .....	75
Εικόνα 3-23.	Σύγκριση του Octet lattice structure πριν και μετά την εφαρμογή του Filter Beams by Length block .....	75
Εικόνα 3-24.	Σύγκριση των lattice structures πριν και μετά την εφαρμογή του Smoothen Body block. Πάνω: Diamond lattice πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά). Κάτω: Octet lattice πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά).....	76
Εικόνα 3-25.	Επανασχεδιασμένο bracket. Αριστερά: Diamond lattice. Δεξιά: Octet lattice	77
Εικόνα 3-26.	Επιφανειακές δυνάμεις για τις 3 περιπτώσεις ζευγών γωνιών $\theta_a$ , $\theta_k$ στους δακτύλιους της επανασχεδιασμένης γεωμετρίας. Αριστερά: Άνω δακτύλιος για επιτάχυνση κατά X+. Δεξιά: Κάτω δακτύλιος για επιτάχυνση XY+45° .....	78

## Σχήματα

Σχήμα 2-1.	Συνήθης διαδικασία παραγωγής FE Mesh από Implicit Body .....	31
Σχήμα 3-1.	Design space του παραγομένου του σχεδιασμού.....	47
Σχήμα 3-2.	Κοχλίας ISO 4014. Αριστερά: 3D περιβάλλον SolidWorks. Δεξιά: Διάστασεις από τις βιβλιοθήκες του SolidWorks .....	48
Σχήμα 3-3.	Περικόχλιο ISO 4161 – M5. Αριστερά: 3D περιβάλλον SolidWorks. Δεξιά: Διάστασεις από τις βιβλιοθήκες του SolidWorks .....	49
Σχήμα 3-4.	Παράκυκλος ISO 10673 - 5.5. Αριστερά: 3D περιβάλλον SolidWorks. Δεξιά: Διαστάσεις από τις βιβλιοθήκες του SolidWorks .....	49
Σχήμα 3-5.	Απεικόνιση quasi-static loads στο σύστημα bracket - καλωδίων.....	51
Σχήμα 3-6.	Διάταξη δοκιμής HDT κατά ASTM D 648 [18].....	54
Σχήμα 3-7.	Γράφημα συσχέτισης της HDT με την $T_g$ .....	54
Σχήμα 3-8.	Δείγμα ηλεκτρικού αγωγού ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης $\rho$ [26].....	55
Σχήμα 3-9.	Αριστερά: Μοντελοποίηση της δέσμης καλωδίων ως 2 σημειακές μάζες για το σκοπό των δυνάμεων εξ επαφής της με το bracket. Δεξιά: Δυνάμεις καλωδίων άμεσα εφαρμοσμένες στο bracket όπως μοντελοποιήθηκαν στο nTop.....	66

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1. Ιδιότητες Al 6061-T6.....	48
Πίνακας 3-2. Ιδιότητες ανοξείδωτου χάλυβα AISI 316 .....	49
Πίνακας 3-3. Ιδιότητες Windform® XT 2.0.....	58
Πίνακας 3-4. Σημεία εφαρμογής quasi-static loads καλωδίων .....	67
Πίνακας 3-5. Αποτελέσματα Static και Modal Analysis.....	68
Πίνακας 3-6. Σταθερές γεωμετρικές παράμετροι των lattices .....	73
Πίνακας 3-7. Αποτελέσματα προσομοιώσεων για το επανασχεδιασμένο bracket με Diamond lattice.....	79
Πίνακας 3-8. Αποτελέσματα προσομοιώσεων για το επανασχεδιασμένο bracket με Octet lattice.....	79
Πίνακας 3-9. Αποτελέσματα επαληθευτικών προσομοιώσεων της επανασχεδιασμένης γεωμετρίας με Diamond lattice στο ANSYS.....	80
Πίνακας 3-10. Αποτελέσματα επαληθευτικών προσομοιώσεων της επανασχεδιασμένης γεωμετρίας με Octet lattice στο ANSYS .....	80
Πίνακας 3-11. Μείωση βάρους επανασχεδιασμένου bracket από Windform® XT 2.0 .....	81
Πίνακας 3-12. Προεκτιμημένα κόστη τελικών γεωμετριών .....	82

# Κατάλογος Συντμήσεων

## Συντμήσεις στα Ελληνικά

ΠΚ: Προσθετική Κατασκευή  
Β.Ε.: Βαθμοί Ελευθερίας

## Συντμήσεις στα Αγγλικά

AM: Additive Manufacturing  
ASTM: American Society for Testing and Materials  
ATOX: Atomic Oxygen  
BJT: Binder Jetting  
B-rep: Boundary Representation  
CAD: Computer-Aided Design  
CAM-LEM: Computer-Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials  
CDLP: Continuous Digital Light Processing  
CNC: Computer Numerical Control  
CVCM: Collected Volatile Condensable Material  
DED: Directed Energy Deposition  
DLP: Digital Light Processing  
DMLS: Direct Metal Laser Sintering  
EBM: Electron Beam Melting  
ESA: European Space Agency  
ESD: ElectroStatic Discharge  
FDM: Fused Deposition Modeling  
FE: Finite Element(-s)  
FFF: Fused Filament Fabrication  
GEO: Geostationary Orbit  
GTO: Geostationary Transfer Orbit  
HDT: Heat Deflection Temperature  
ISO: International Organization for Standardization  
LEO: Low Earth Orbit  
LOM: Laminated Object Manufacturing  
MEO: Medium Earth Orbit  
MEX: Material Extrusion  
MJF: Multi Jet Fusion  
MJM: Multi-Jet Modelling  
NASA: National Aeronautics and Space Administration  
NPJ: NanoParticle Jetting  
PBF: Powder Bed Fusion  
PLT: Paper Lamination Technology  
SHL: Sheet Lamination  
SIMP: Solid Isotropic Material with Penalization  
SLA: Stereolithography  
SLM: Selective Laser Melting  
SLS: Selective Laser Sintering

SSO: Sun-Synchronous Orbit  
TML: Total Mass Loss  
TPMS: Triply Periodic Minimal Surface  
UAM: Ultrasonic additive manufacturing  
VPP: Vat PhotoPolymerization

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Δορυφόροι

Οι τεχνητοί δορυφόροι [23] είναι ανθρώπινες κατασκευές οι οποίες τίθενται σε τροχιά (συνήθως γύρω από τη Γη) με τη βοήθεια πυραύλων. Διαθέτουν ευαίσθητες διατάξεις και κάμερες με σκοπό την μελέτη της Γης και άλλων πλανητών, την υποβοήθηση των επικοινωνιών καθώς και την παρατήρηση των απομακρυσμένων σημείων του σύμπαντος. Χάρη στο ευρύ οπτικό τους πεδίο, μπορούν να συλλέγουν πληροφορίες πολύ ταχύτερα από τους επίγειους αισθητήρες. Επιπλέον, σε αντίθεση με τα επίγεια παρατηρητήρια, η όψη από το διάστημα είναι ανεμπόδιστη από κάθε είδους ατμοσφαιρικής απόκρυψης όπως σύννεφα και σκόνη.

Κάθε διαστημικό σκάφος στέλνεται στο διάστημα για να επιτελέσει ένα συγκεκριμένο έργο όπως τηλεπικοινωνίες, επιστημονική έρευνα, πρόβλεψη καιρού ή παρατήρηση πεδίου. Ο σκοπός του δορυφόρου καθορίζει το μέγεθος του, τον τύπο της τροχιάς του και τη γενικότερη δομή του. Παρόλου που υπάρχουν διάφορων τύπων τεχνητοί δορυφόροι και τροχιές αυτών, όλοι υπόκεινται στους ίδιους φυσικούς νόμους και μαθηματικούς υπολογισμούς από τη στιγμή που θα φτάσουν στο διάστημα.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, αφού εκτοξευτεί, ένας δορυφόρος τίθεται σε μία από τις προκαθορισμένες τροχιές γύρω από τη γη. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις, μπορεί να κατευθυνθεί σε μία διαπλανητική πορεία ακολουθώντας ένα δρόμο γύρω από τον Ήλιο μέχρι να φτάσει στον τελικό του προορισμό.

Οι δορυφόροι συνήθως κατηγοριοποιούνται βάσει του υψομέτρου της τροχιάς τους το οποίο επηρεάζει την κάλυψη τους και την ταχύτητα με την οποία κινούνται γύρω από τον πλανήτη [23]. Κατά την επιλογή του τύπου της τροχιάς, οι σχεδιαστές των διαστημικών σκαφών πρέπει να λάβουν υπόψιν τους τον σκοπό, τα δεδομένα που θα λαμβάνουν, τις υπηρεσίες που θα παρέχουν, καθώς και το κόστος, την περιοχή κάλυψης και την επιτευξιμότητα διάφορων τροχιών. Οι πέντε (5) κύριες κατηγορίες δορυφόρων βάσει των τροχιών τους είναι οι εξής:

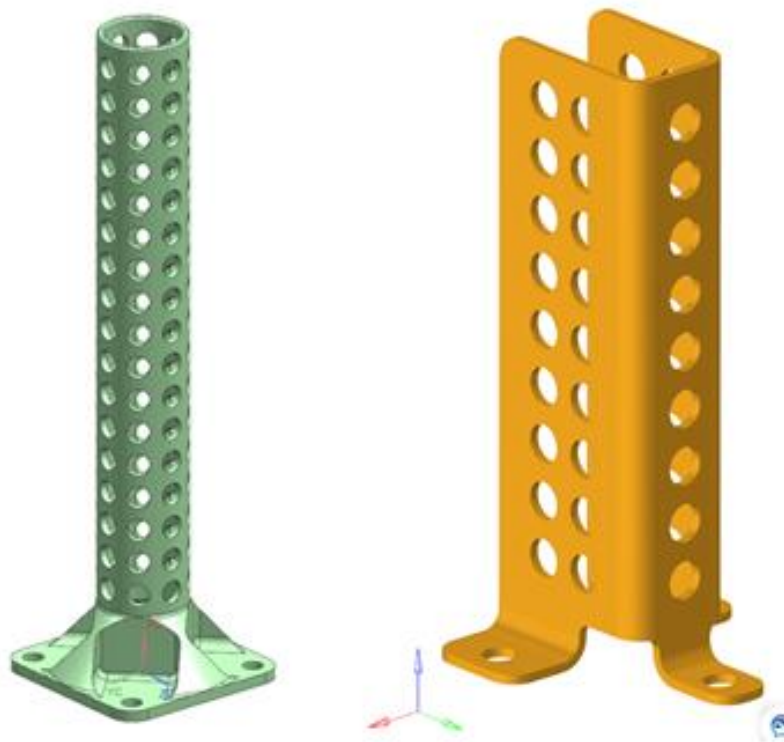
- Δορυφόροι χαμηλής περί της Γης τροχιάς (Low Earth Orbit – LEO)
- Δορυφόροι μεσαίας περί της γης τροχιάς (Medium Earth Orbit – MEO)
- Δορυφόροι γεωστατικής τροχιάς (Geostationary Orbit – GEO)
- Δορυφόροι ηλιοσύγχρονης τροχιάς (Sun-Synchronous Orbit - SSO)
- Δορυφόροι γεωστατικής τροχιάς μεταφοράς (Geostationary Transfer Orbit - GTO)

## 1.2 Συγκρατητές καλωδίων (cable harness standoff brackets)

Οι συγκρατητές καλωδίων (harness standoff brackets ή απλώς brackets) είναι εξαρτήματα τα οποία επιτελούν το σκοπό της συγκράτησης καλωδίων υπό μορφή δεσμίδας και της όδευσης αυτών.

Η Εικόνα 1-1 δείχνει 2 παραδείγματα παραλλαγών των συγκρατητών αυτών μέσα από περιβάλλον CAD. Συγκεκριμένα, η αριστερά εικονιζόμενη παραλλαγή (πράσινη) έχει

προκύψει μετά από κατεργασίες φρεζαρίσματος και διάτρησης ενώ η δεξιά αλλαγή (πορτοκαλί) έχει προκύψει από κατεργασίες στράντζας μεταλλικού φύλλου και διάτρησης.



Εικόνα 1-1. Παραδείγματα harness standoff brackets

## 1.3 Προσθετική Κατασκευή / Τρισδιάστατη (3D) εκτύπωση

### 1.3.1 Γενικά περί Προσθετικής Κατασκευής

Η Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing – AM), αναφερόμενη και ως ΠΚ, αφορά εκείνη την γκάμα τεχνολογιών κατασκευής οι οποίες πραγματοποιούνται με την ελεγχόμενη προσθήκη υλικού.

Η ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών, οι οποίες ξεκίνησαν να εμφανίζονται προς τα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα, οφείλεται κυρίως σε δύο παράγοντες [29] :

- την εξέλιξη της τεχνολογίας CNC (Computer Numerical Control)
- την εξέλιξη της σχεδίασης με τη βοήθεια H-Y, CAD (Computer-Aided Design)

Στο ξεκίνημά τους, οι τεχνολογίες της Προσθετικής Κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή γεωμετρικών και φυσικών πρωτότυπων για την αξιολόγηση και μελέτη υπό ανάπτυξη προϊόντων. Ως εκ τούτου, η αναφορά σε αυτές γινόταν με τον όρο «Ταχεία Πρωτοτυποποίηση» (Rapid Prototyping). Εν συνεχεία, με την εξέλιξη των τεχνολογιών αυτών και τη διεύρυνση των δυνατοτήτων τους, χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή εργαλείων, καλουπιών και μητρών για χρήση σε άλλες μεθόδους παραγωγής. Αυτό είχε αποτέλεσμα να γίνουν γνωστές με τον όρο «Ταχεία Κατασκευή Εργαλείων» (Rapid Tooling). Με την καθιέρωση του προτύπου ISO/ASTM 52900:2021, καθιερώθηκε ο όρος «Προσθετική Κατασκευή» λόγω της προσθήκης υλικού για τη δημιουργία αντικειμένων από δεδομένα τρισδιάστατων μοντέλων, εν αντιθέσει με τις αφαιρετικές (subtractive) και διαμορφωτικές

(formative) μεθοδολογίες [11] . Επειδή η προσθήκη υλικού γίνεται συνήθως σε στρώσεις, συναντάται συχνά και ο όρος «Διαστρωματική Κατασκευή» (Layer Manufacturing) [11] , [31] .

Σήμερα υπάρχουν διαφόρων ειδών τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής, καθεμία με τις δικές της δυνατότητες και περιορισμούς, αποσκοπώντας στην επίτευξη διαφορετικών ιδιοτήτων στα τεμάχια που παράγονται από αυτές. Αναφορικά, μερικές από τις κατηγορίες των τεχνολογιών αυτών είναι οι παρακάτω [11] , [32] :

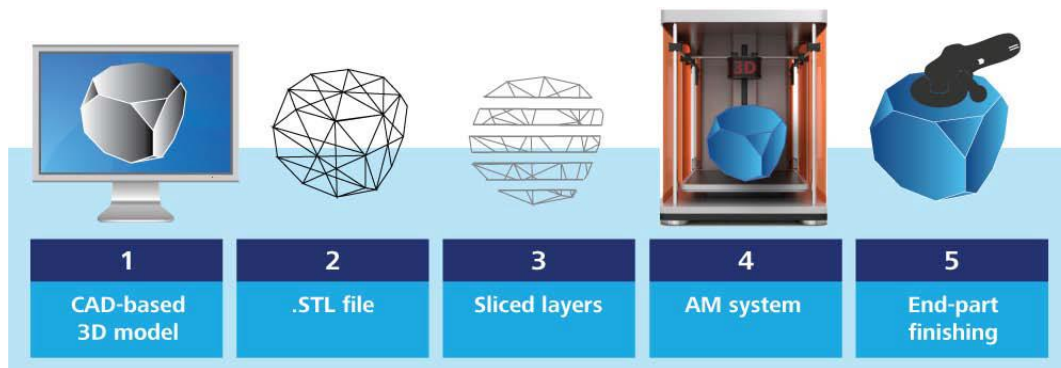
- (Φωτό-)Πολυμερισμός σε Κάδο (Vat PhotoPolymerization – VPP)  
Τεχνολογίες εντός της κατηγορίας: SLA, DLP, CDLP
- Εξώθηση Υλικού (Material Extrusion – MEX)  
Τεχνολογία εντός της κατηγορίας: FDM/FFF
- Σύντηξη Κόνεων σε Κλίνη (Powder Bed Fusion - PBF)  
Τεχνολογίες εντός της κατηγορίας: SLS, DMLS/SLM, EBM, MJF
- Ψεκασμός Υλικού (Material Jetting – MJT)  
Τεχνολογίες εντός της κατηγορίας: MJ, MJM, NPJ
- Ψεκασμός Συγκολλητικής Ύλης (Binder Jetting – BJT)
- Συγκόλληση Επάλληλων Φύλλων (Sheet Lamination - SHL)  
Τεχνολογίες εντός της κατηγορίας: LOM, PLT, CAM-LEM, UAM
- Κατευθυνόμενη Ενεργειακή Εναπόθεση (Directed Energy Deposition – DED)

Όπως θα καταστεί σαφέστερο παρακάτω, η μέθοδος SLS είναι από εκείνες που παράγουν ιδιαίτερος ισοτροπικό αποτέλεσμα. Για αυτό και σε επόμενη παράγραφο γίνεται ειδικότερη αναφορά σε αυτή.

### 1.3.2 Διαδικασία Κατασκευής κομματιών με ΠΚ

Η διαδικασία κατασκευής [29] , [31] ενός αντικειμένου με τεχνολογίες ΠΚ μπορεί να διαχωριστεί στα παρακάτω πέντε (5) βασικά στάδια τα οποία συγκεντρώνει η Εικόνα 1-2:

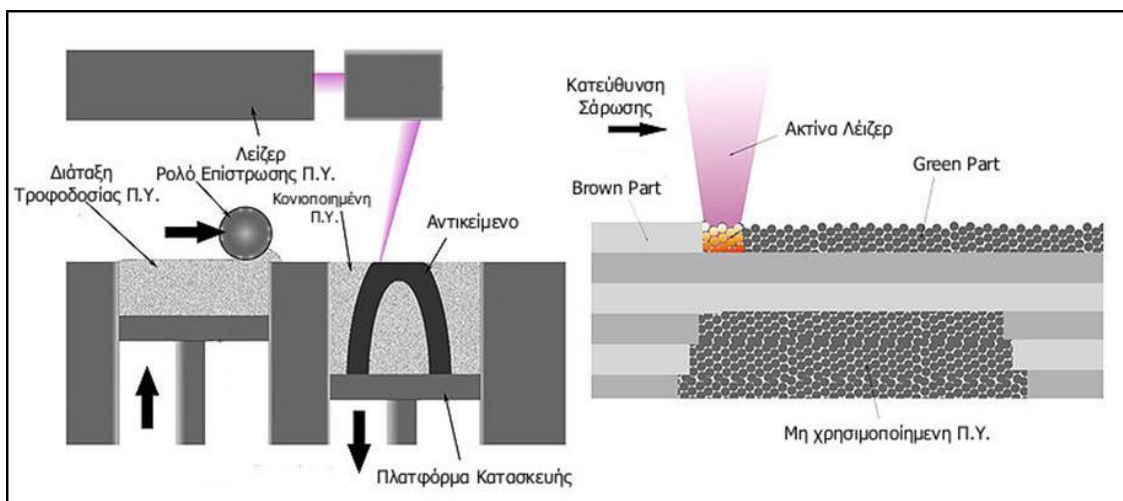
- 1) Σχεδίαση ενός 3D στερεού μοντέλου με τη βοήθεια ενός συστήματος CAD
- 2) Προσέγγιση των επιφανειών του 3D μοντέλου σύμφωνα με κάποιο πολυεδρικό πρότυπο (facet format), όπως το STL (STereoLithography) με προσέγγιση μέσω τριγώνων
- 3) Προπαρασκευαστικές εργασίες της κατασκευής στο λογισμικό οι οποίες περιλαμβάνουν:
  - Προσανατολισμό της κατασκευής
  - Δημιουργία υποστηρικτικών δομών
  - Ρυθμίσεις του τεμαχισμού του αντικειμένου σε στρώσεις κατά την κατεύθυνση της κατασκευής
- 4) Ρύθμιση δευτερευουσών παραμέτρων στη μηχανή και κατασκευή του αντικειμένου
- 5) Απομάκρυνση αντικειμένου από τη μηχανή, καθαρισμός αυτού και ενδεχόμενες μετά-παρασκευαστικές εργασίες (post-processing)



Εικόνα 1-2. Στάδια κατασκευής αντικειμένου με ΠΚ [31]

### 1.3.3 Τεχνολογία Επιλεκτικής Συσσωμάτωσης με Λείζερ (SLS)

Η τεχνολογία SLS ανήκει κατηγορία των Τεχνολογιών Σύντηξης σε Κλίνη (PBF) [11], [32]. Η πρώτη ύλη για τις μηχανές αυτές είναι σε μορφή κόκκων, Αποτελείται είτε από παραφινικά και πολυμερή (με βάση κυρίως το πολυαμίδιο), είτε σύνθετα (π.χ. με ενίσχυση γυαλιού ή άνθρακα), είτε αδρανή και μέταλλα με επικάλυψη κάποιου θερμοπλαστικού υλικού. Η κατασκευή ενός, αντικειμένου με χρήση SLS πραγματοποιείται μέσω της επαναληπτικής απόθεσης στρώσεων κόκκων πρώτης ύλης και της επιλεκτικής θέρμανσης τους με λέιζερ προκειμένου να προκληθεί η κατά τόπους συσσωμάτωση/συγκόλληση των σωματιδίων της. Στην περίπτωση των παραφινικών και πολυμερών η στερεοποίηση γίνεται συνήθως με πλήρη τήξη και συσσωμάτωση.



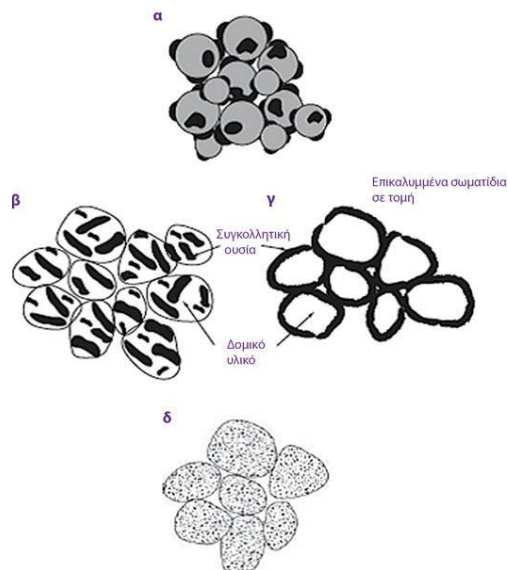
Εικόνα 1-3. Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λείζερ (SLS) (προσαρμογή του "Selective laser sintering process" by Materialize - Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons) [29]

Η διαδικασία της τεχνολογίας SLS [29] για τα μέταλλα, μπορεί να χωριστεί στα ακόλουθα στάδια:



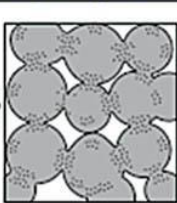
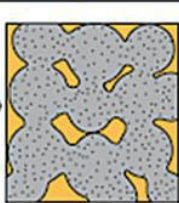
- 1) Τήξη του θερμοπλαστικού υλικού και χαλαρή σύνδεση των κόκκων σε ένα συνεκτικό κομμάτι, ονομαζόμενο και ως «πράσινο κομμάτι» (green part)
- 2) Θερμική επεξεργασία του πράσινου κομματιού σε κλίβανο για τη δημιουργία ισχυρότερου συνεκτικού δεσμού με πλήρη πυροσυσσωμάτωση (full sintering), ονομαζόμενου και ως «καφέ κομμάτι» (brown part)

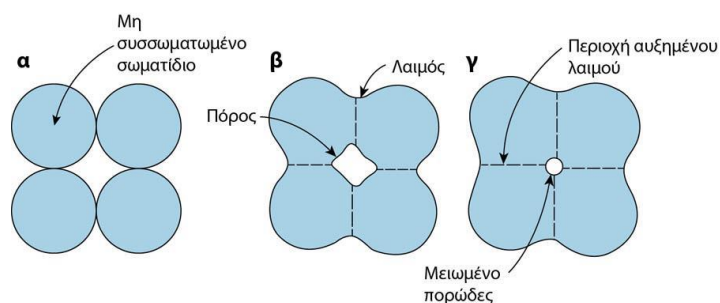


- 3) Εμποτισμό με δευτερεύον υλικό - διηθητή (infiltrator, π.χ. μπρούτζος) για τη μείωση του πορώδους που έχει προκύψει από το προηγούμενο στάδιο.



Εικόνα 1-4. Σύσταση της κοκκώδους πρώτης ύλης [32]

Ασύνδετη πούδρα	Πράσινο κομμάτι	Καφέ κομμάτι	Τελικό κομμάτι
			
	Επεξεργασία σύντηξης της πούδρας σε κλίνη	Επεξεργασία σε Θερμικό Κλίβανο	Επεξεργασία σε Θερμικό Κλίβανο
Μέταλλα ή κεραμικά αναμειγμένα με πολυμερικές συγκολλητικές ουσίες.	Η τήξη και η επαναστερεοποίηση των πολυμερικών συγκολλητικών ουσιών επιτρέπει τον σχηματισμό πολύπλοκων κομματιών χωρίς να επηρεάζονται θερμικά οι μεταλλικές ή κεραμικές πούδρες.	Η εξάτμιση του πολυμερούς και η συσσωμάτωση των σωματιδίων σε αυξημένες θερμοκρασίες έχουν ως αποτέλεσμα ένα πορώδες, συσσωματωμένο εξάρτημα.	Διήθηση με ένα χαμηλότερης θερμοκρασίας τήξης μέταλλο έχει ως αποτέλεσμα ένα πυκνό, συμπαγές, τελικό εξάρτημα.



Εικόνα 1-5. Στάδια συσσωμάτωσης των κόκκων του υλικού στην τεχνολογία SLS [32]

Η μέθοδος SLS παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα [29] , [32] :

- i) Καλή συνοχή και υψηλή μηχανική αντοχή των τελικών αντικειμένων
- ii) Ευρεία γκάμα πρώτων υλών
- iii) Σχετικά υψηλή ισοτροπία στο τελικό αντικείμενο

- iv) Δυνατότητα άμεσης δημιουργίας λειτουργικών συναρμολογημάτων (πλαστικά υλικά)
- v) Έλλειψη απαίτησης για υποστηρικτικές δομές

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνουν [29] , [32] :

- i) Σχετικά μεγάλη τραχύτητα επιφανειών του τελικού αντικειμένου
- ii) Σχετικά πορώδη τελική υφή
- iii) Υψηλό κόστος
- iv) Αργό κύκλο εργασίας
- v) Απαιτητικά στάδια λήψης τελικού αντικειμένου

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η επίτευξη όσον τον δυνατό υψηλότερης ισοτροπίας στο τελικό τεμάχιο αποτέλεσε σημαντικό κριτήριο για την επιλογή του υλικού και της τεχνολογίας ΠΚ που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του. Ο λόγος για αυτό είναι ότι, σε αντίθεση με μία ανισοτροπική μέθοδο, οι πραγματικές μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες ενός τεμαχίου με ισοτροπία υλικού είναι πολύ πιο κοντά στις αναγραφόμενες στο φύλλο τεχνικών δεδομένων του κατασκευαστή (εκτός αν, κατ' εξαίρεση, σε αυτό παρέχονται οι ζητούμενες ιδιότητες κατά άξονα κατεύθυνσης στη μηχανή ΠΚ). Ως εκ τούτου, μπορεί να προβλεφθεί, με πολύ καλύτερη ακρίβεια, η απόδοσή στις απαιτούμενες συνθήκες και προδιαγραφές. Αυτό έχει μεγάλη σημασία στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, όπου το παραγόμενο του σχεδιασμού αφορά των υψηλών απαιτήσεων τομέα της αεροδιαστημικής, για την εξασφάλιση της κατά το δυνατόν υψηλότερης ακριβείας των ιδιοτήτων του τελικού αντικειμένου και των επιδόσεων του που προκύπτουν από την ανάλυση.

Επιπροσθέτως, μια ισοτροπική μέθοδος δεν προσδίδει διαφορετικές ιδιότητες στο τελικό αντικείμενο σε περιπτώσεις διαφορετικών προσανατολισμών κατασκευής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορούν να παραχθούν περισσότερα του ενός αντίγραφα του εν λόγω αντικειμένου ή ακόμα και αντικείμενα διαφορετικής γεωμετρίας μαζί ταυτοχρόνως στον χώρο της μηχανής, για την υλοποίηση του οποίου ενδέχεται να απαιτείται πολύ συγκεκριμένος προσανατολισμός τους εντός αυτού.

Συνεπώς και ένεκα των διαθέσιμων τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής και των υλικών τους, θεωρήθηκε η μέθοδος SLS ως κατάλληλη για την παραγωγή του παραγομένου του σχεδιασμού.

## 1.4 Σκοπός της Εργασίας

Οι συγκρατητές καλωδίων των σύγχρονων δορυφόρων είναι μέχρι τώρα, κατά κύριο λόγο, μεταλλικά εξαρτήματα που απαιτούν σύνθετες και ακριβές κατεργασίες. Το παραπάνω γεγονός έχει ως αποτέλεσμα το αυξημένο κόστος παραγωγής και το βάρος τους το οποίο με τη σειρά του αυξάνει το κόστος αποστολής τους σε τροχιά.

Η παρούσα εργασία, προκειμένου να υλοποιηθεί με βάση ρεαλιστικά, λειτουργικά, τεχνικά και παραγωγικά δεδομένα, υλοποιήθηκε σε συνεργασία με την OHB Hellas, ελληνική θυγατρική του πολυεθνικού ομίλου διαστημικών εφαρμογών OHB SE, και στελέχη της.

Έχει ως αντικείμενο τον επανασχεδιασμό ενός τέτοιου εξαρτήματος ώστε να πληροί το λειτουργικό του ρόλο όντας ελαφρύτερο σε μάζα από ένα συμβατικά κατασκευασμένο και να μπορεί να παραχθεί με κάποια μέθοδο ΠΚ με τη χρήση ενός ή περισσότερων θερμοπλαστικών υλικών. Απώτερος στόχος είναι η επίτευξη μιας γεωμετρίας η οποία, κατασκευασμένη με ΠΚ από το επιλεγμένο θερμοπλαστικό υλικό, θα έχει μικρότερο βάρος

και λογικό κόστος παραγωγής, πληρώντας ταυτόχρονα όλες τις απαραίτητες προδιαγραφές. Επιπλέον, ενδέχεται η διαδικασία του επανασχεδιασμού να μπορεί να συνεισφέρει ως πηγή έμπνευσης και για τον επανασχεδιασμό άλλων εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται σε διαστημικές εφαρμογές με απώτερο σκοπό τη μείωση του κόστους αποστολής στο διάστημα το οποίο αποτελεί από τα σημαντικότερα κόστη των διαστημικών αποστολών.

## 2 Λογισμικό nTop

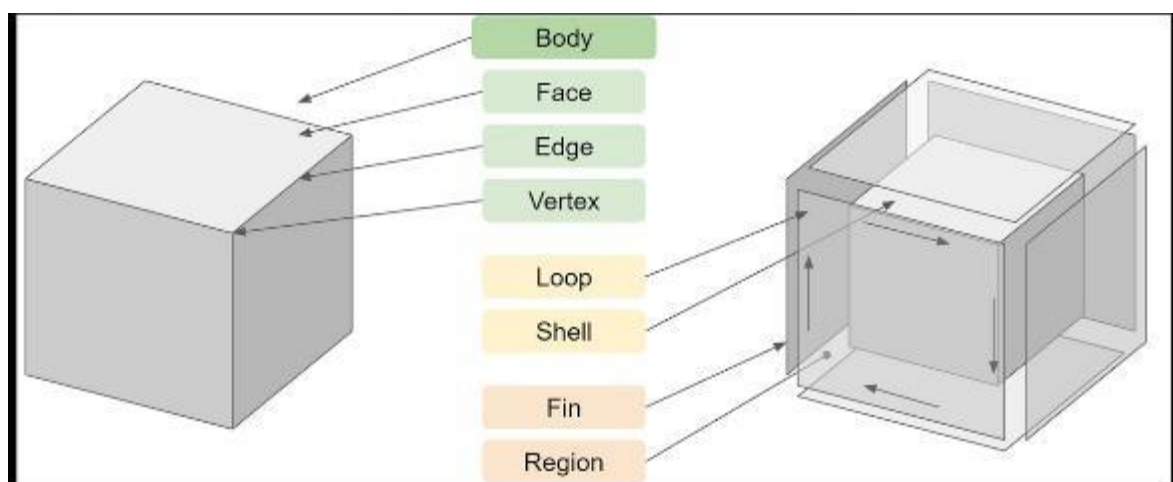
### 2.1 Εισαγωγή

Το nTop (πρώην nTopology) είναι λογισμικό για μηχανικούς, συμπληρωματικό σε άλλα καθιερωμένα υφιστάμενα σχεδιαστικά και υπολογιστικά εργαλεία. Τις περισσότερες φορές, μια εργασία ενός μηχανικού δεν ξεκινά στο nTop από το μηδέν, αλλά με την εισαγωγή μοντέλων CAD, αποτελεσμάτων προσομοιώσεων, ιδιοτήτων υλικών, μετρήσεων δοκιμών και άλλων δεδομένων σε αυτό. Δεδομένα εξόδου από το nTop, με τη σειρά τους, μπορούν να είναι αρχεία CAD, πλέγματα και μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, και κατασκευαστικά δεδομένα. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το nTop αποτέλεσε το κύριο εργαλείο υλοποίησής της.

### 2.2 Implicit modelling

#### 2.2.1 3D Γεωμετρίες με B-rep

Στα περισσότερα λογισμικά CAD, η αναπαράσταση της τρισδιάστατης γεωμετρίας γίνεται με τη χρήση B-reps (boundary representations) ή πλεγμάτων (meshes) [20]. Τα B-reps είναι στερεά τα οποία συντίθενται από έδρες κατάλληλων σχημάτων ενωμένες μεταξύ τους με ακμές. Οι έδρες, οι ακμές, οι αιχμές και άλλα τοπολογικά στοιχεία των B-reps είναι τα κύρια στοιχεία με τα οποία οι σχεδιαστές των λογισμικών CAD μπορούν να εργαστούν. Η χρήση τους είναι καλή σε μοντέλα με χαμηλή έως μεσαία συνθετότητα στη μορφή τους. Ωστόσο, σε περιπτώσεις μοντέλων υψηλής συνθετότητας, η χρήση των B-reps είναι δύσκολη και προβληματική. Αυτό συμβαίνει διότι, με την αύξηση της συνθετότητας της μορφής ενός μοντέλου, αυξάνονται εκθετικά τα μεγέθη των παραγομένων αρχείων και των χρόνων παραγωγής τους [12]. Αυτό με τη σειρά του καθιστά τις υπολογιστικές διαδικασίες πολύ χρονοβόρες στις σύνθετες γεωμετρίες.

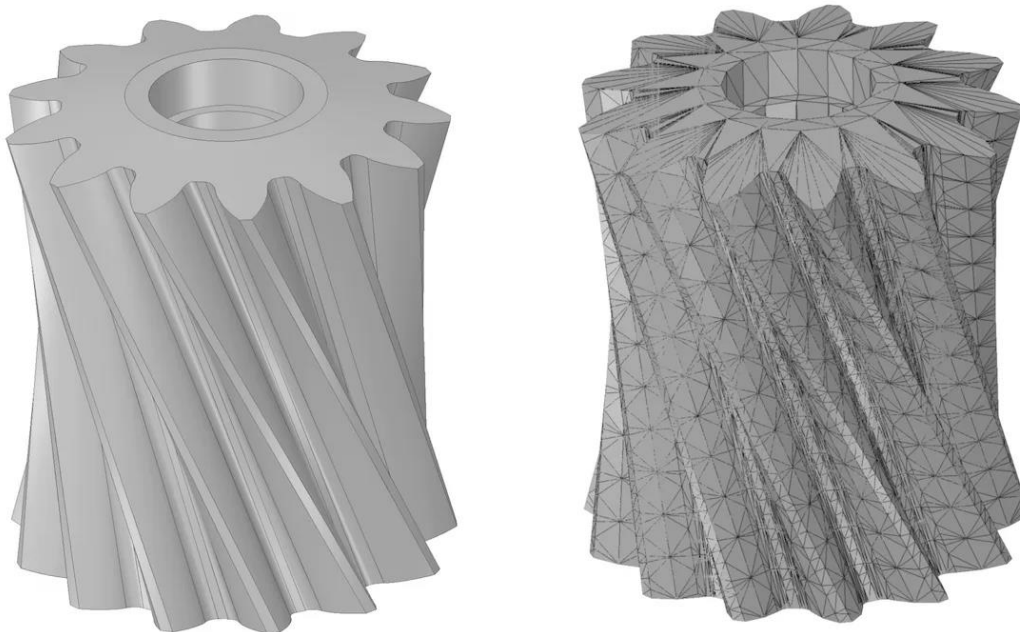


Εικόνα 2-1. Τοπολογικά στοιχεία των μοντέλων B-rep [8]

## 2.2.2 Αναπαράσταση με meshes

Τα meshes είναι απλοποιημένες παραλλαγές των B-reps των οποίων όλες οι έδρες είναι τριγωνικές [8]. Όσο υψηλότερη είναι η καμπυλότητα μιας περιοχής, τόσο μικρότερα και περισσότερα πρέπει να είναι τα τρίγωνα που θα την αναπαραστήσουν. Η αναπαράσταση με mesh ενός μοντέλου είναι επίσης το πρώτο στάδιο για την ανάλυση του με πεπερασμένα στοιχεία.

Στο στάδιο της κατασκευής, δεν είναι διαχειρίσιμα όταν έχουν πλήθος εδρών στις δεκάδες των εκατομμυρίων. Όπως και με τα B-reps, το πλήθος τους αυξάνεται σε μη-πρακτικό βαθμό με την αύξηση της συνθετότητας της γεωμετρίας.



Εικόνα 2-2. Αναπαράσταση ελικοειδούς οδοντωτού τροχού με: B-rep (αριστερά) και mesh (δεξιά) [8]

## 2.2.3 Εισαγωγή στο Implicit Modeling - Πλεονεκτήματα

Σε αντίθεση με τα B-reps και τα meshes, όπου η αναπαράσταση της γεωμετρίας γίνεται με τη χρήση διακριτών στοιχείων ενωμένων μεταξύ τους, στο Implicit Modeling πραγματοποιείται με τη βοήθεια μαθηματικών εξισώσεων. Το γεγονός αυτό την καθιστά υπολογιστικά πολύ ελαφρύτερη, καθώς και δίνει τη δυνατότητα για υψηλότερη ακρίβεια στην αναπαράσταση σύνθετων μορφών με πολύ λεπτά γεωμετρικά στοιχεία. Στις περιπτώσεις όπου τα κατασκευαστικά δεδομένα απαιτούν κάποιας μορφής διακριτοποίηση (discretization) της γεωμετρίας, αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί στο τέλος της διαδικασίας σχεδιασμού, ελαττώνοντας τον υπολογιστικό φόρτο για το τελικό αποτέλεσμα.

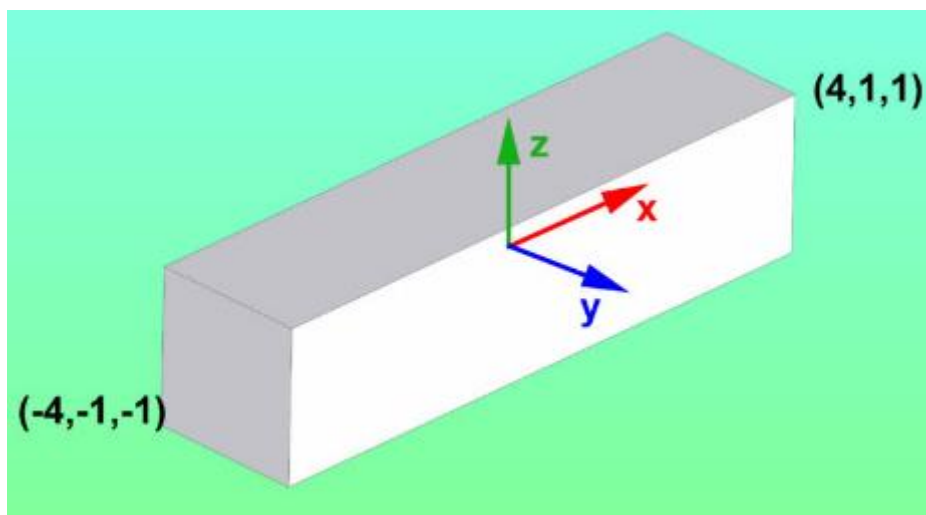
Επιπροσθέτως, όπως θα φανεί σε επόμενη παράγραφο, το Implicit Modeling διευκολύνει εργασίες τροποποίησης μιας γεωμετρίας όταν η αναπαράσταση με B-reps και meshes αποτυγχάνει.

#### 2.2.4 Πεδία

Πολλές λειτουργίες στο ηTop έχουν βασιστεί στη θεωρία των πεδίων (fields). Ένα πεδίο περιγράφει την μεταβολή ενός μεγέθους (βαθμωτού ή διανυσματικού) μέσα στο χώρο. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία σε κάθε σημείο στο χώρο αποτελεί ένα είδος βαθμωτού πεδίου. Αντιστοίχως, η ταχύτητα ενός ρευστού σε κάθε σημείο του χώρου που καταλαμβάνει αποτελεί ένα είδος διανυσματικού πεδίου.

Στην περίπτωση του Implicit Modeling, η περιγραφή μιας γεωμετρίας γίνεται με τη χρήση των πεδίων αποστάσεων (distance fields). Πρόκειται για βαθμωτά πεδία των σημείων του χώρου των οποίων οι τιμές συνάδουν με την απόστασή τους από το σύνορο της γεωμετρίας. Τα σημεία για τα οποία η συνάρτηση του πεδίου είναι μηδενική ή αρνητική αποτελούν αντιστοίχως το σύνορο ή το εσωτερικό της γεωμετρίας και ο γεωμετρικός τόπος τους είναι ουσιαστικά η αναπαράστασή της. Για όσα η τιμή της συνάρτησης είναι θετική, βρίσκονται εκτός αυτής. Για παράδειγμα, το παρακάτω ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο [12] στην Εικόνα 2-3 μπορεί να περιγραφεί με τη συνάρτηση:

$$F_A(x, y, z) = \max(|x| - 4, |y| - 1, |z| - 1) \quad \text{Εξ. (2-1)}$$



**Εικόνα 2-3. Ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο το οποίο έχει περιγραφεί με την Εξ. (2-1) βάσει του Implicit Modeling**

Από την Εξ. (2-1) μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί ότι, αναλόγως του πρόσημου του αποτελέσματος, επαληθεύεται η θέση ενός σημείου όπως αναφέρεται παραπάνω σε σχέση με το σύνορο της γεωμετρίας.

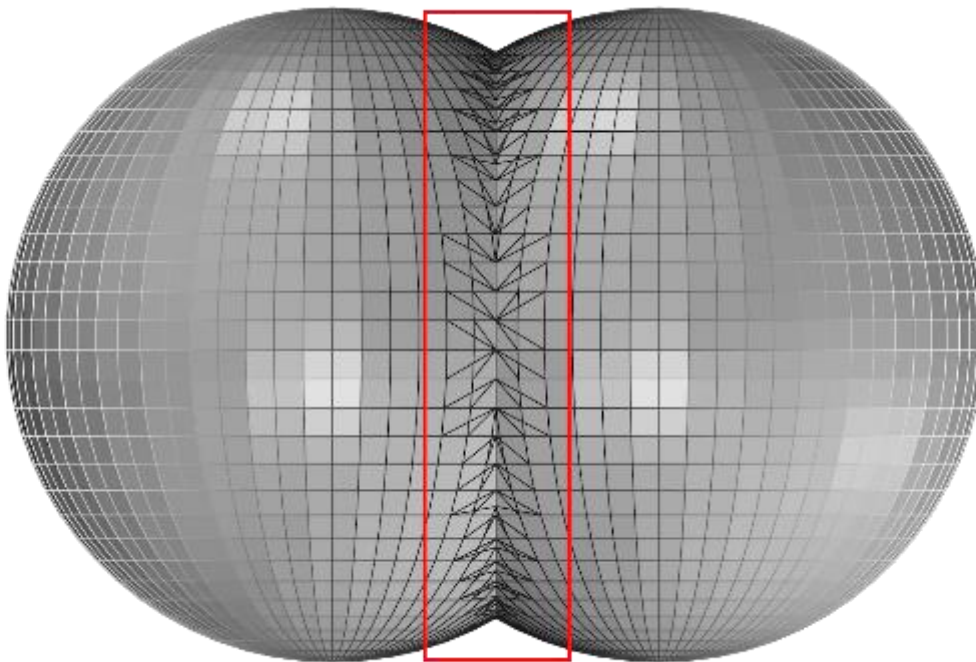
#### 2.2.5 Πράξεις με άλγεβρα Boole

Ένα ακόμα πλεονέκτημα του Implicit Modeling είναι η εγγυημένη ορθότητα σε σχεδιαστικές διεργασίες όπως πράξεις που συναντώνται στη θεωρία συνόλων μέσω της άλγεβρας Boole. Οι πράξεις αυτές είναι συνηθισμένες διεργασίες στο σχεδιασμό τρισδιάστατης γεωμετρίας. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, θεωρώντας δύο γεωμετρίες A και B ως σύνολα σημείων, οι συνήθως χρησιμοποιούμενες πράξεις, οι οποίες είναι διαθέσιμες και στο λογισμικό ηTop, είναι οι παρακάτω:

- Ένωση ( $A \cup B$ ): Είναι το σύνολο των κοινών και μη κοινών σημείων των γεωμετριών A και B
- Τομή ( $A \cap B$ ): Είναι το σύνολο μόνο των κοινών σημείων των γεωμετριών A και B
- Διαφορά ( $A \setminus B$ ): Είναι το σύνολο των σημείων της A τα οποία δεν ανήκουν στη B.

Σημειώνεται ότι οι διεργασίες της ένωσης και της τομής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περισσότερα των δύο συνόλων και, κατ' αντιστοιχία, γεωμετριών.

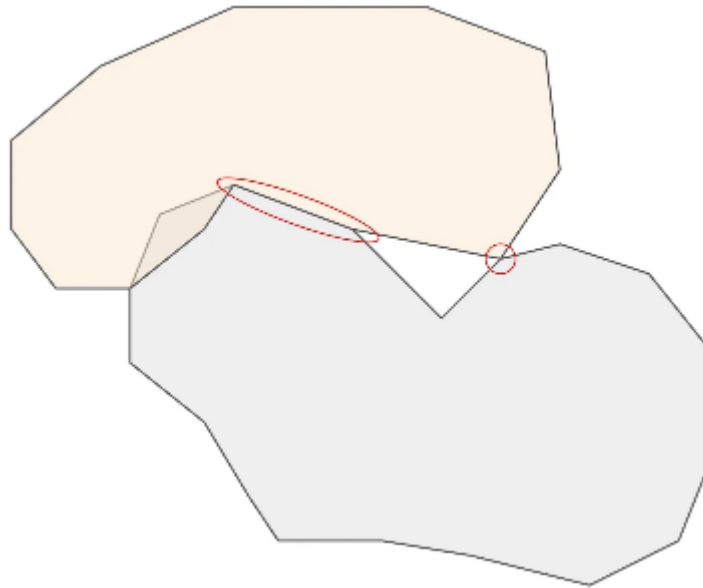
Με την χρήση των B-reps και των meshes, τα αποτελέσματα των παραπάνω πράξεων ενδέχεται να είναι εσφαλμένα καθώς αυξάνεται η συνθετότητα της γεωμετρίας και η λεπτότητα σε στοιχεία της κατά περιπτώσεις [20].



**Potential Problem Areas**

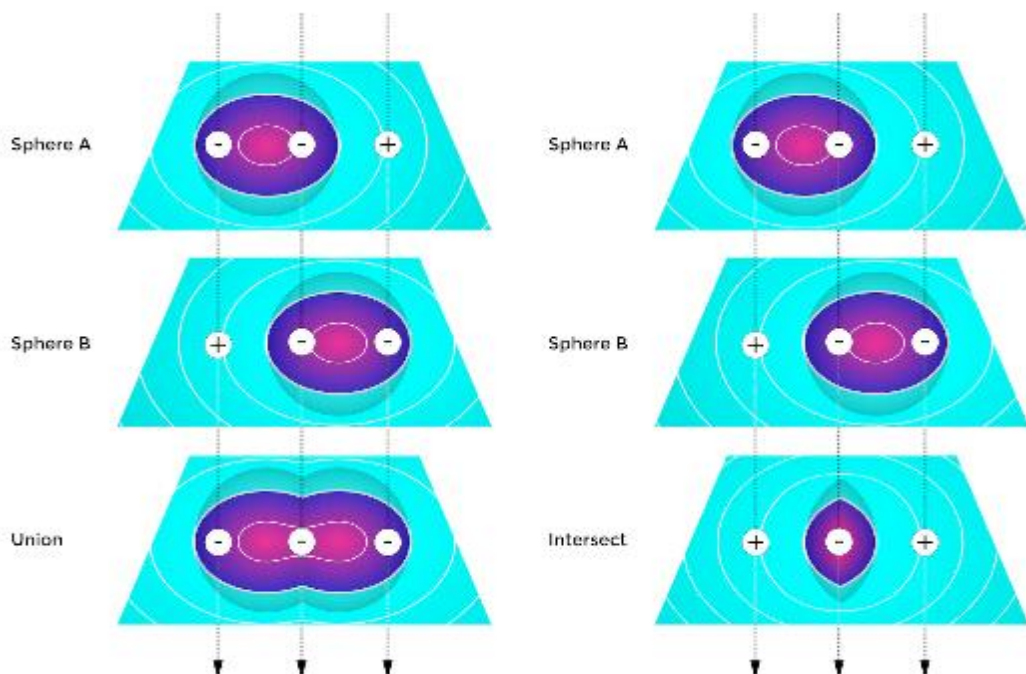
**Εικόνα 2-4. Ένωση 2 σφαιρών αναπαριστάμενων με meshes και περιοχή με ενδεχόμενες ανακρίβειες [20]**

Στα περισσότερα λογισμικά CAD, όπου χρησιμοποιούνται τα B-reps, η αναπαράσταση ενός στέρεου σχήματος απαιτεί να αποτελεί ένα κλειστό σχήμα (manifold). Αυτό με τη σειρά του σημαίνει ότι κάθε ακμή του σχήματος πρέπει να ενώνει ακριβώς δύο έδρες. Αυτό αποτελεί πρόβλημα όταν, πραγματοποιώντας μία ένωση στερεών σχημάτων, το αποτέλεσμα δεν αποτελεί κλειστό σχήμα με αποτέλεσμα τα περισσότερα λογισμικά να μην την επιτρέπουν, όπως μπορεί να φανεί στην Εικόνα 2-5. Στην κυκλωμένη περιοχή, σημειώνεται η ακμή που ενώνει 4 έδρες, οδηγώντας έτσι σε αποτέλεσμα μη-κλειστού σχήματος (non-manifold). Στην περιοχή σημειωμένη με την έλλειψη, φαίνονται έδρες που μπορούν να οδηγήσουν σε γεωμετρικά σφάλματα.



**Εικόνα 2-5.** Περιοχές όπου η ένωση κατά Boole μπορεί να αποτύχει στα B-reps.

Σε αντίθεση με τα B-reps και τα meshes, οι πράξεις της άλγεβρας Boole απλοποιούνται σημαντικά, από υπολογιστικής σκοπιάς, με τη χρήση των πεδίων αποστάσεων των γεωμετριών. Για παράδειγμα, η ένωση των δύο παρακάτω εικονιζόμενων σφαιρών A και B πραγματοποιείται με την εξαγωγή των ελάχιστων τιμών των αλληλεπικαλυπτόμενων πεδίων αποστάσεών τους. Αντιστοίχως, η τομή τους προκύπτει με την εξαγωγή των μέγιστων τιμών των πεδίων τους.



**Εικόνα 2-6.** Παρουσίαση των πράξεων ένωσης και τομής της άλγεβρας Boole στο Implicit Modeling

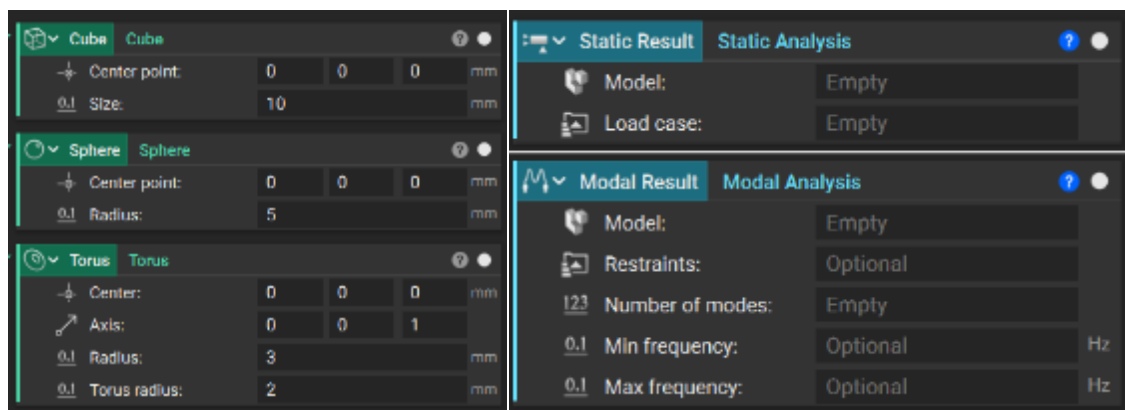


## 2.3 Εργαλεία και δυνατότητες του nTop

### 2.3.1 Ροή εργασίας με blocks

Τα blocks είναι τα βασικά στοιχεία δόμησης μιας ροής εργασίας (workflow) στο nTop. Κάθε block διεκπεραιώνει μία συγκεκριμένη εργασία λαμβάνοντας ένα σύνολο εισόδων και υπολογίζοντας την έξοδο. Οι εισοδοί σε ένα block μπορούν να είναι αριθμητικές τιμές, βαθμωτά ή διανυσματικά πεδία και ακόμα και άλλα blocks κατάλληλου τύπου. Η τελευταία περίπτωση μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ένθετων (**nested**) blocks. Προς αποφυγή εκτεταμένων nested blocks, τα blocks μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπό μορφή μεταβλητών (variables) για τη διευκόλυνση της ροής εργασίας.

Κάθε block έχει ένα συγκεκριμένο είδος εξόδου το οποίο διακρίνεται από τον χρωματισμό του. Για παράδειγμα, όπως παρουσιάζει η Εικόνα 2-7, τα blocks που έχουν ως έξοδο ένα Implicit Body έχουν πράσινο χρώμα στον τίτλο τους ενώ τα blocks που έχουν ως έξοδο τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης έχουν γαλάζιο.



Εικόνα 2-7. Χρωματική διαφοροποίηση μεταξύ blocks Implicit Bodies και αποτελεσμάτων προσομοιώσεων

Επιπλέον, κάθε block μπορεί να υφίσταται είτε ως μοναδιαία οντότητα είτε ως λίστα, όπου στην περίπτωση αυτή περιέχει πολλά block του ίδιου τύπου στο εσωτερικό του.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου μια συγκεκριμένη ροή εργασίας μπορεί να είναι χρήσιμη σε συχνή βάση, ως τμήμα ή με πολλαπλή τοποθέτηση εντός μιας ή πολλών περισσότερων άλλων ροών. Το nTop δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης τέτοιων ροών εργασίας εντός block τα οποία μπορούν να αποθηκευτούν και να επανεισαχθούν αργότερα σε άλλες ροές εργασίας. Αυτή είναι η περίπτωση δημιουργίας των εξατομικευμένων (**custom**) blocks.

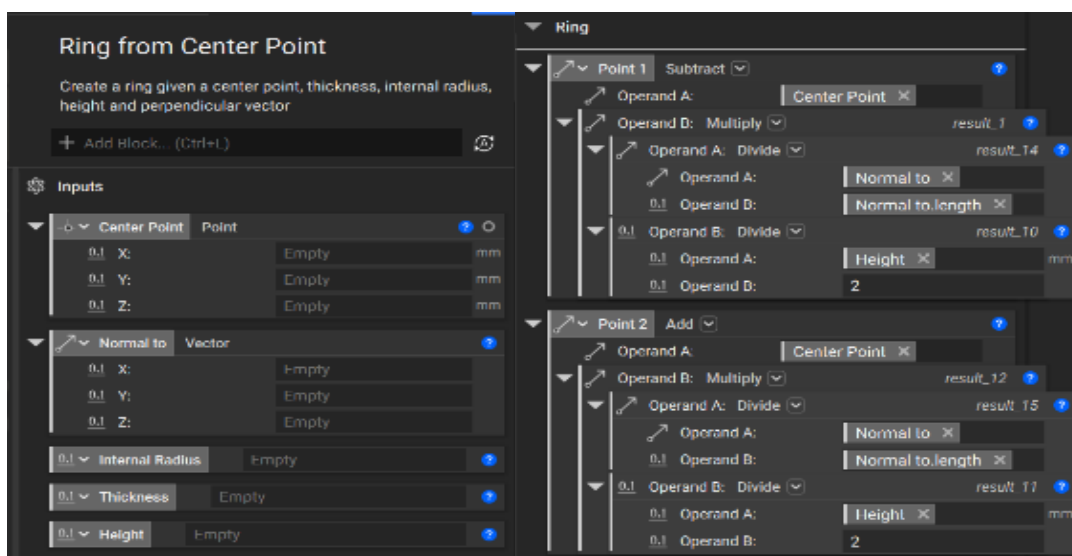
Για τη δημιουργία ενός custom block, απαιτείται το ζητούμενο αποτέλεσμα να έχει μετατραπεί σε μορφή μεταβλητής η οποία πρέπει να τοποθετηθεί στο πεδίο εξόδου (Output) της ροής εργασίας. Ένα custom block μπορεί είτε να διαθέτει είτε να μη διαθέτει εισόδους οι οποίες μπορούν να είναι αριθμητικές τιμές, λίστα επιλογών ή ακόμα και άλλα blocks.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, δημιουργήθηκαν τέτοια custom blocks. Για επεξηγηματικούς και μόνο λόγους, στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται ένα από αυτά, το **Ring from Center Point**. Το block αυτό δημιουργεί το Implicit Body ενός κυκλικού δακτυλίου ορθογωνικής διατομής δεχόμενο τις παρακάτω εισόδους:

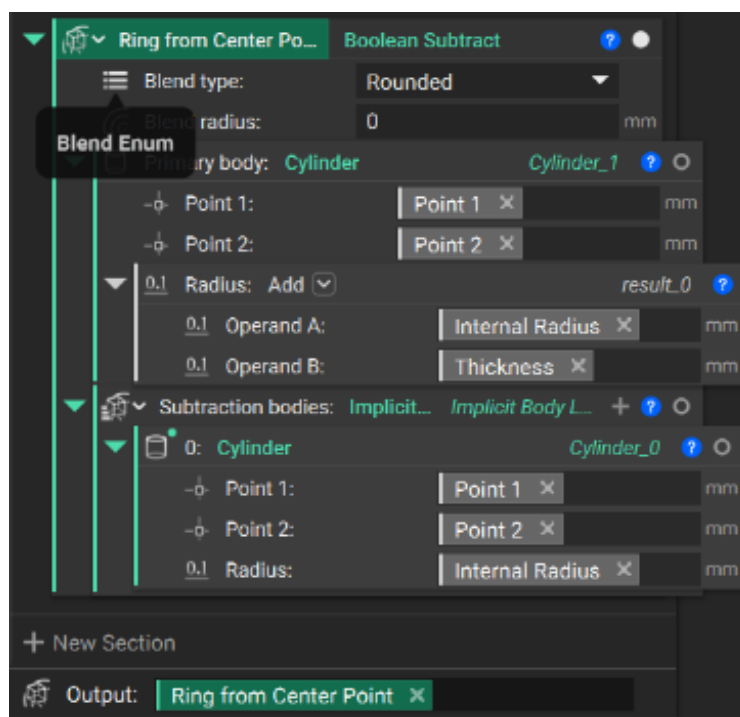
- Center Point: Κέντρο της κυκλικής περιφέρειας και μέσο του ύψους
- Normal to: Διάνυσμα κάθετο στο επίπεδο της κυκλικής περιφέρειας
- Internal Radius: Εσωτερική ακτίνα

- Thickness: Πάχος τοιχώματος ορθογωνικής διατομής
- Height: Ύψος

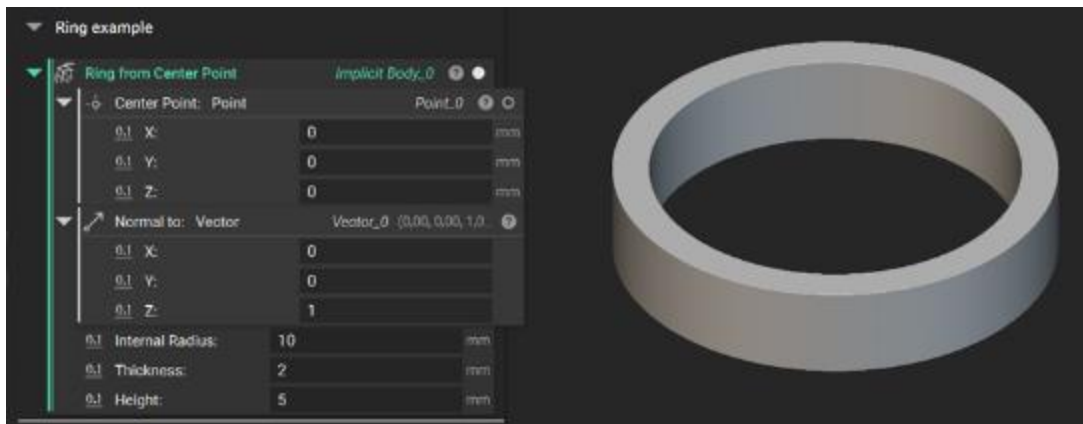
Οι Εικόνες 2-8 και 2-9 συγκεντρώνουν τα τμήματα της ροής εργασίας του custom block Ring from Center Point. Το αριστερό τμήμα της Εικόνας 2-8 περιλαμβάνει τον τίτλο, την περιγραφή και τις εισόδους του block, ενώ το δεξί περιλαμβάνει 2 βοηθητικά σημεία. Η Εικόνα 2-9 παρουσιάζει το block που δημιουργεί το Implicit Body του δακτυλίου και την τοποθέτησή του ως έξοδο της ροής εργασίας. Επίσης, η Εικόνα 2-10 παρουσιάζει τη μορφή και ένα παράδειγμα αποτελέσματος του block αυτού όταν χρησιμοποιείται εντός μιας άλλης ροής εργασίας.



Εικόνα 2-8. Είσοδοι και βοηθητικά σημεία του Ring from Center Point



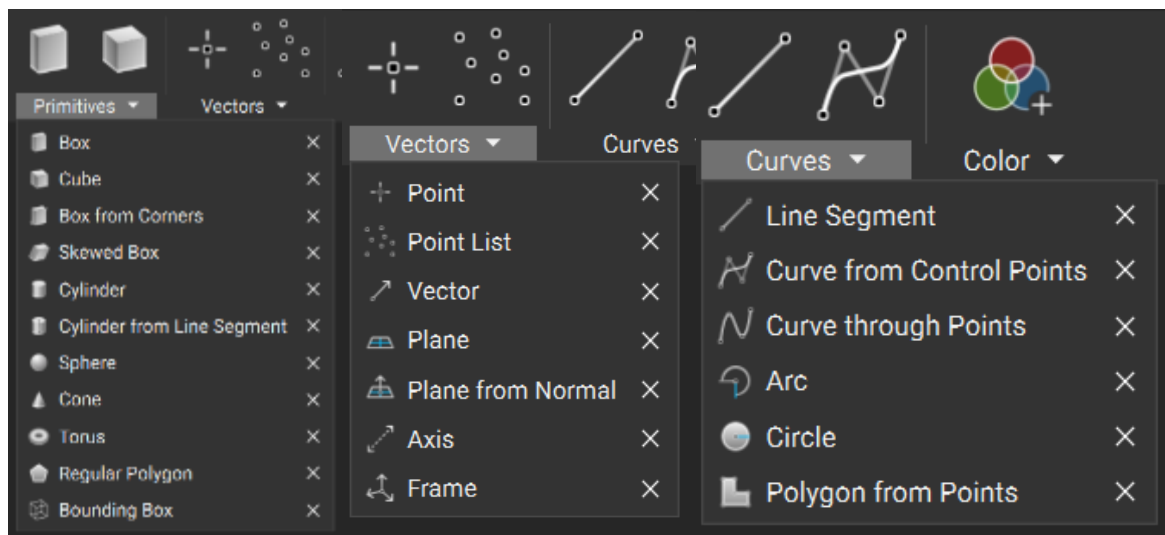
Εικόνα 2-9. Block του Implicit Body του δακτυλίου ως έξοδος της ροής εργασίας



Εικόνα 2-10. Εφαρμογή παραδείγματος του Ring from Center Point block εντός ροής εργασίας

### 2.3.2 Implicit Bodies

Ήδη έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο η έννοια της αναπαράστασης μιας γεωμετρίας με Implicit Body. Συνήθως, στο nTop εισάγονται τέτοιες γεωμετρίες από άλλα συστήματα CAD. Το λογισμικό, όμως, δίνει και τη δυνατότητα της απευθείας έναρξης της σχεδίασης νέας γεωμετρίας, εγγενώς, με τη σύνθεση βασικών και απλοϊκών τρισδιάστατων γεωμετριών ως Implicit Bodies από την κατηγορία **Primitives** της καρτέλας **Create**, όπως σφαίρες, κύλινδροι, ορθογώνια και μη παραλληλεπίπεδα και άλλα. Εκτός από τρισδιάστατες γεωμετρίες, το nTop μπορεί να κάνει αναπαράσταση και άλλων βασικών γεωμετρικών στοιχείων από τις κατηγορίες **Vectors** και **Curves** όπως σημεία, διανύσματα, επίπεδα, ευθείες, καμπύλες και άλλα. Η Εικόνα 2-11 συγκεντρώνει τις επιλογές από τις παραπάνω κατηγορίες μέσα από το περιβάλλον του nTop.



Εικόνα 2-11. Βασικές γεωμετρίες παραγόμενες από το nTop

Στην καρτέλα **Modeling**, υπάρχουν εργαλεία για επεξεργασία και σύνθεση των ανωτέρω γεωμετριών όπως υπάρχουν και στα συνηθή λογισμικά CAD. Τέτοια εργαλεία περιλαμβάνουν τα παρακάτω χωρίς να περιορίζονται μόνο σε αυτά:

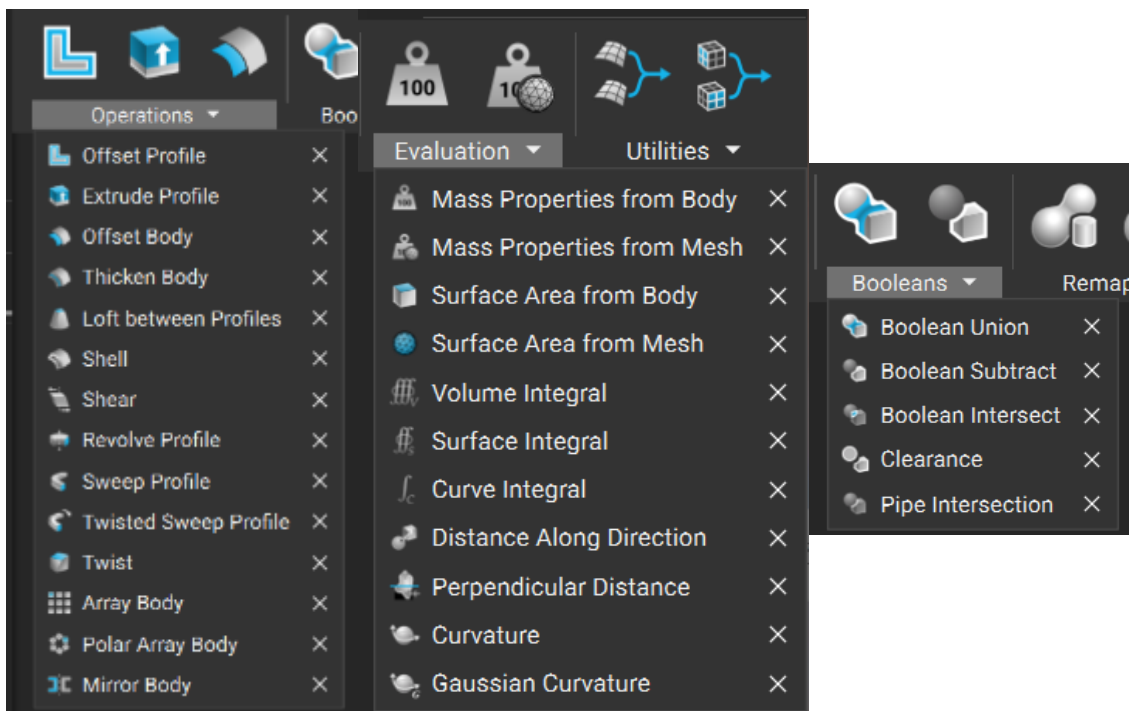
- Offset Profile (ή Body): Επέκταση της περιμέτρου ενός πολυγώνου (ή επιφάνειας ενός Implicit Body) προς τα έξω ή μέσα

- Extruded Profile: Εξώθηση μιας κλειστής 2D γεωμετρίας κατά μήκος μιας κατεύθυνσής και απόστασης
- Loft between Profiles: Δημιουργία ενός Implicit Body ως παρεμβολή μεταξύ 2 παράλληλων κλειστών 2D γεωμετριών
- Shell: Δημιουργία ενός κελύφους από ένα Implicit Body με ανάπτυξη του τοιχώματος προς τα έξω ή μέσα
- Revolve Profile: Δημιουργία Implicit Body με περιστροφή ενός κλειστού σχήματος περί άξονα
- Array Body: Καρτεσιανή αναπαραγωγή αντιγράφων ενός Implicit Body

Ένα πολύ σημαντικό σεντ εργαλείων στο nTop στην καρτέλα Modeling είναι και οι προαναφερθείσες πράξεις συνόλων της άλγεβρας Boole στην κατηγορία **Booleans**. Τα εργαλεία αυτά είναι: Boolean Union, Boolean Subtract και Boolean Intersect τα οποία αντιστοιχούν στην ένωση, διαφορά και τομή των Implicit Bodies που δέχονται ως εισόδους. Οι έξοδοι των πράξεων είναι επίσης Implicit Bodies.

Άλλη μια κατηγορία εργαλείων της καρτέλας Modeling είναι η **Evaluation**, η οποία διαθέτει blocks για τον υπολογισμό διαφόρων γεωμετρικών μεγεθών των εξεταζόμενων Implicit Bodies, όπως όγκο, μάζα, εμβαδόν επιφανείας και άλλα.

Η Εικόνα 2-12 συγκεντρώνει τα διαθέσιμα blocks από τις παραπάνω κατηγορίες μέσα από το περιβάλλον του nTop.



**Εικόνα 2-12. Blocks από την καρτέλα Modeling**

Εκτός από την σχεδίαση μίας γεωμετρίας με Implicit Body εκ του μηδενός, όπως προαναφέρθηκε, υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής αρχείου CAD με το **Import Part** block για τη μετατροπή του σε Implicit Body ή για απευθείας εκτέλεση ορισμένων εργασιών του nTop προορισμένων για μοντέλα CAD.

### 2.3.3 Meshing

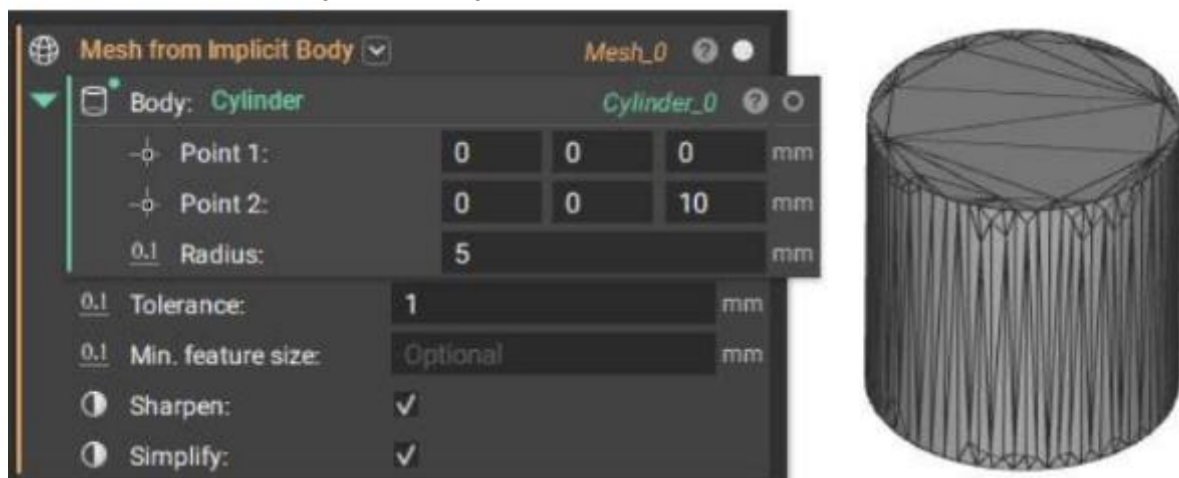
Η πλεγματοποίηση (meshing) είναι η μέθοδος αναπαράστασης/προσέγγισης μιας γεωμετρίας με τη διαίρεση της σε πολλά γεωμετρικά στοιχεία. Όσο μεγαλύτερο το πλήθος των στοιχείων, τόσο ακριβέστερη, αλλά και υπολογιστικά κοστοβόρα, είναι η προσέγγιση της.

Η πλεγματοποίηση της γεωμετρίας μιας κατασκευής είναι απαραίτητο στάδιο για την υπολογιστική προσομοίωση της συμπεριφοράς της σε διάφορα φαινόμενα όπως μηχανική καταπόνηση, ροή θερμότητας, ρευστομηχανική και άλλα. Επιπλέον, το πλέγμα μίας τρισδιάστατης γεωμετρίας είναι ο απαραίτητος τρόπος αναπαράστασης της ως δεδομένο εισόδου σε ένα λογισμικό προετοιμασίας των περισσότερων μηχανών ΠΚ για την παραγωγή της.

Στο nTop υπάρχουν κατά κύριο λόγο 3 είδη πλεγμάτων:

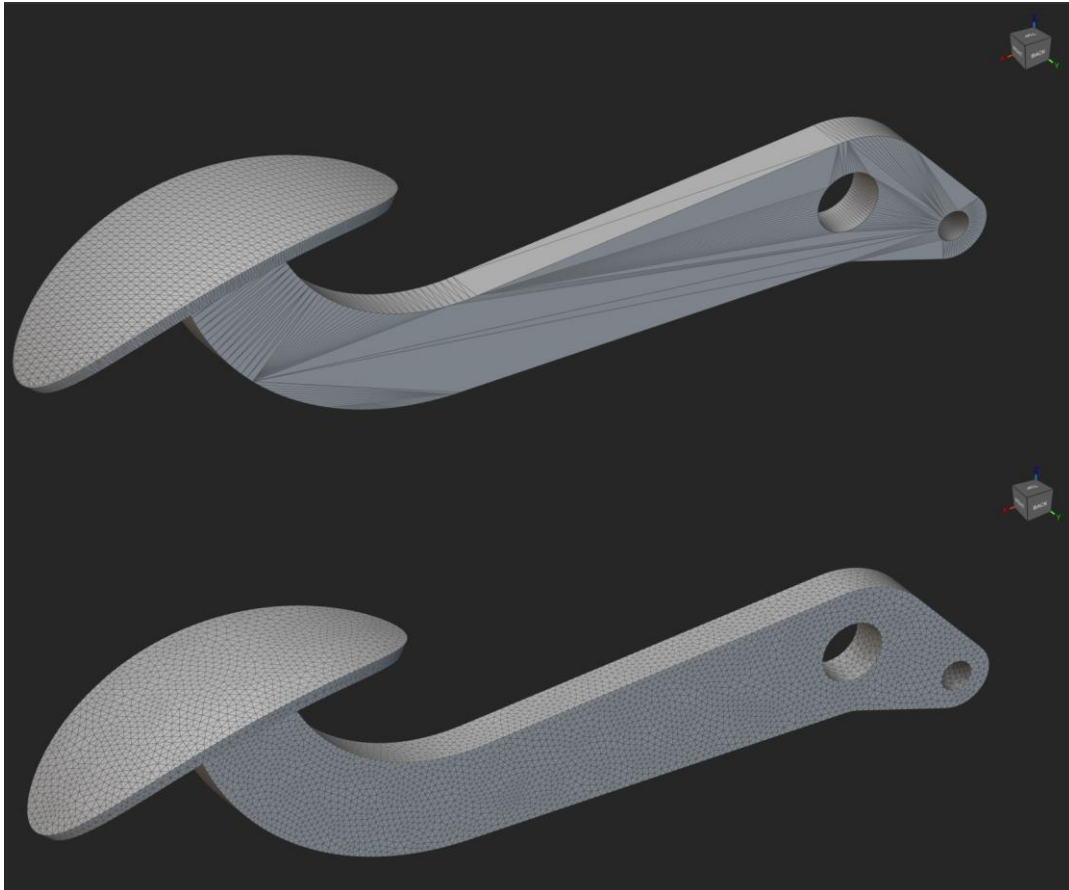
- Επιφανειακά πλέγματα (Surface Mesh)
- Χωρικά πλέγματα (Volume Mesh)
- Πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων (FE Mesh) τα οποία μπορεί να είναι είτε επιφανειακά είτε χωρικά

Η δημιουργία επιφανειακών πλεγμάτων μπορεί να γίνει είτε από ένα αρχείο CAD που έχει εισαχθεί στη ροή εργασίας με το **Mesh from CAD Body** block είτε απευθείας από ένα Implicit Body με το **Mesh from Implicit Body** block. Ως έξοδος του Mesh from Implicit Body block είναι ένα πλέγμα τριγωνικών επιφανειακών στοιχείων διαφορετικών μεγεθών. Η Εικόνα 2-13 δίνει ένα παράδειγμα της εφαρμογής του block σε έναν κύλινδρο.



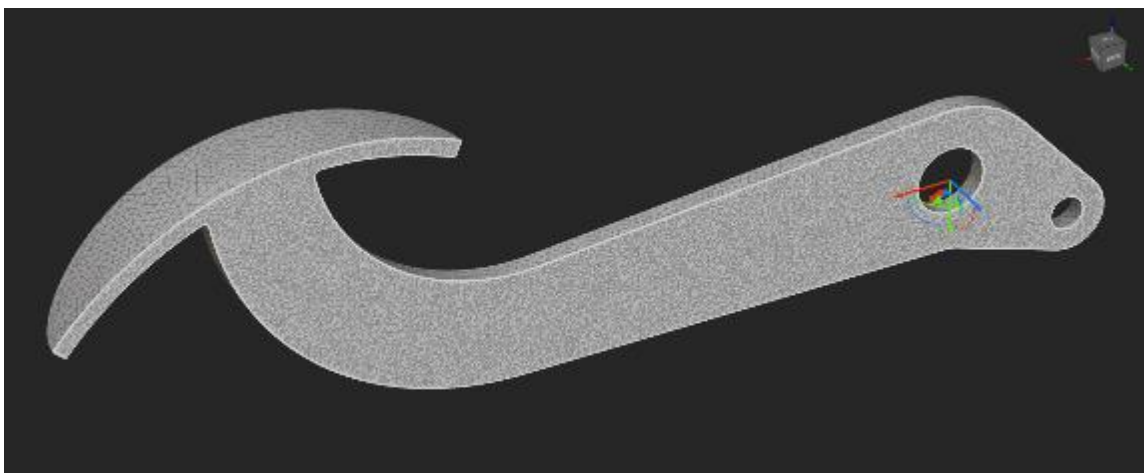
Εικόνα 2-13. Mesh from Implicit Body

Επιπροσθέτως, υπάρχουν και εργαλεία επιδιόρθωσης και απλούστευσης ενός επιφανειακού πλέγματος. Ένα από τα συνηθέστερα είναι το **Remesh Surface** block. Το block αυτό λαμβάνει ως είσοδο ένα επιφανειακό πλέγμα και αναλαμβάνει να μειώσει τον αριθμό των στοιχείων του, να διορθώσει τα ελαττώματα που παρουσιάζονται σε αυτό και να μεταβάλλει χωρικά την πυκνότητά του. Η έξοδος του έχει ως αποτέλεσμα ένα επιφανειακό πλέγμα με καλύτερο έλεγχο στο μέγεθος, το σχήμα και την ομοιογένεια των στοιχείων του. Η Εικόνα 2-14 δίνει ένα παράδειγμα του αποτελέσματος του Remesh Surface block σε ένα πεντάλ (κάτω) σε σύγκριση με το αρχικό επιφανειακό πλέγμα (επάνω).



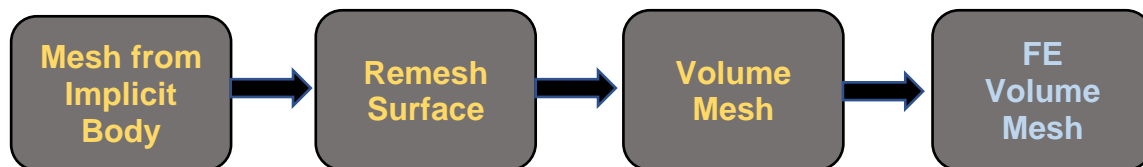
Εικόνα 2-14. Σύγκριση Remesh Surface και αρχικού επιφανειακού πλέγματος

Για την ανάλυση με περασμένα στοιχεία, είναι επιθυμητή η χρήση ενός στέρεου πλέγματος με πεπερασμένα στοιχεία όγκου. Αυτό το σκοπό επιτελεί το **Volume Mesh** block, λαμβάνοντας ως είσοδο ένα επιφανειακό πλέγμα και δίνοντας ως έξοδο ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων όγκου. Η Εικόνα 2-15 παρουσιάζει το αποτέλεσμα της εφαρμογής του block σε μια τομή κατά τον άξονα Y στο πεντάλ του προηγούμενου παραδείγματος, με την οποία είναι ορατά τα τετραεδρικά στοιχεία του πλέγματος.



Εικόνα 2-15. Εφαρμογή του Volume Mesh

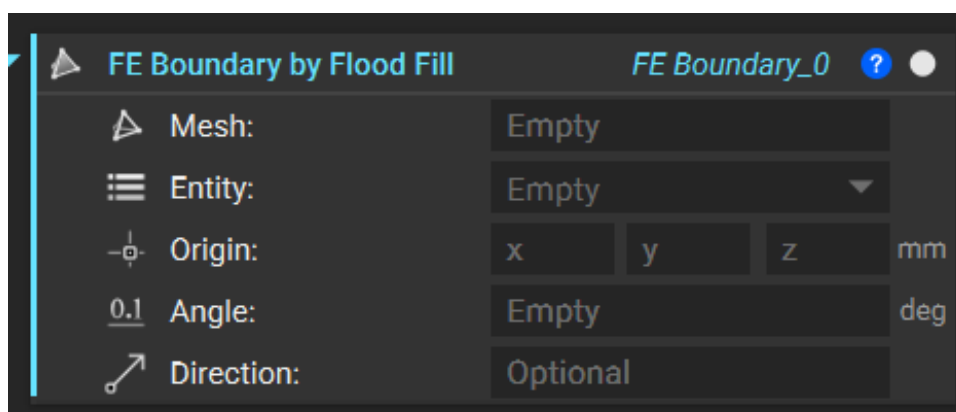
Η δημιουργία των επιφανειακών ή χωρικών πλεγμάτων ακολουθείται πολλές φορές από την δημιουργία αντιστοίχων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων (FE Mesh). Τα FE Meshes χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για τις προσομοιώσεις που είναι δυνατές στο nTop, κυρίως με τη μορφή των χωρικών πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων (FE Volume Meshes). Κατά γενική πρακτική στο nTop, η διαδικασία παραγωγής ενός FE Mesh από ένα Implicit Body γίνεται με την εξής αλληλουχία από blocks όπως δείχνει το Σχήμα 2-1:



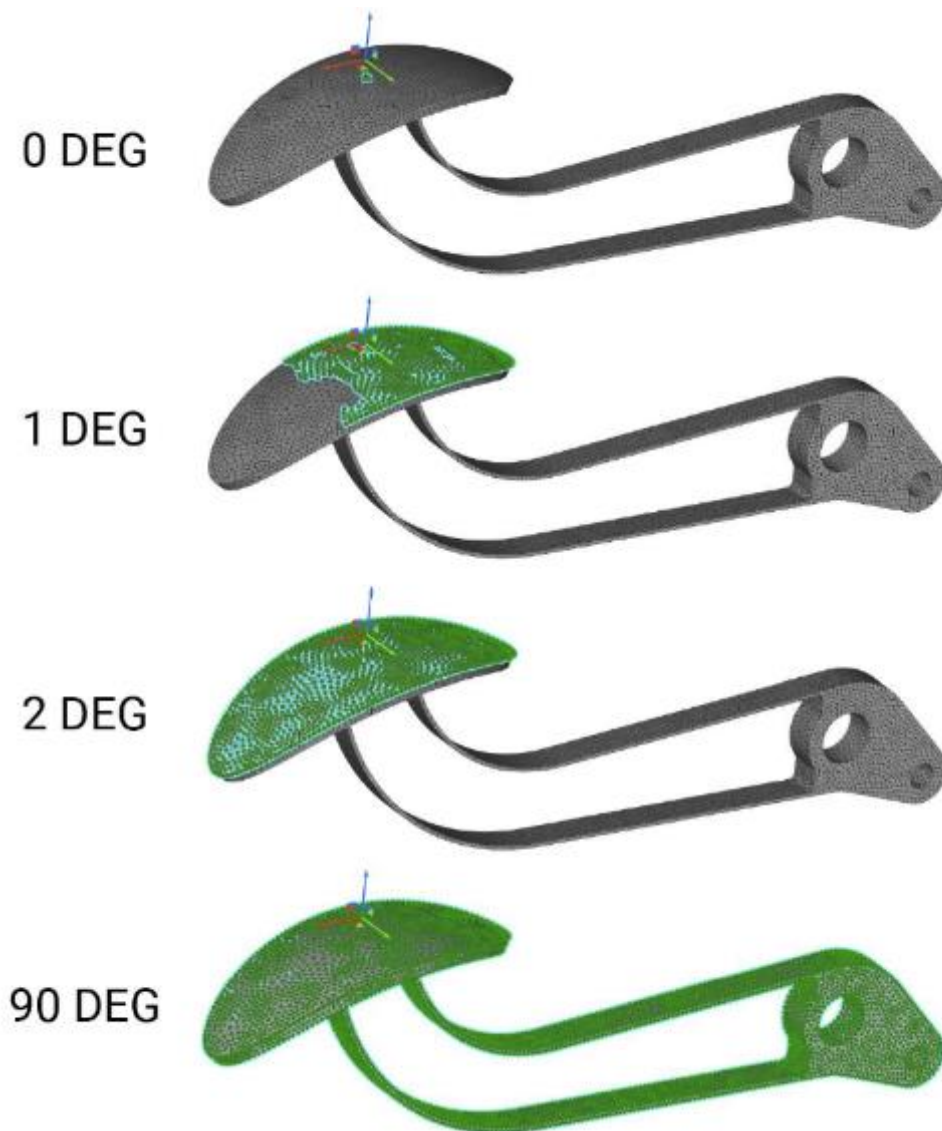
Σχήμα 2-1. Συνήθης διαδικασία παραγωγής FE Mesh από Implicit Body

Το nTop παρέχει και τη δυνατότητα επιλογής τμημάτων ενός FE Mesh στα οποία εφαρμόζονται οι συνοριακές συνθήκες της εκάστοτε προσομοίωσης. Τα τμήματα αυτά ονομάζονται σύνορα (boundaries) και αποτελούνται από επιφανειακές οντότητες του FE Mesh όπως κόμβους, ακμές και έδρες (nodes, edges και faces). Παραδείγματα τέτοιων εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας είναι τα **FE Boundary by Flood Fill** και **FE Boundary by Body** blocks.

Το FE Boundary by Flood Fill block δημιουργεί ένα σύνορο ενός FE Mesh επιλέγοντας τις επιφανειακές του οντότητες με την κατάλληλη τοποθέτηση της αρχής ενός καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Σε περίπτωση ένας εκ των αξόνων τέμνει μία εκ των εδρών του FE Mesh, επιλέγονται και όλες οι υπόλοιπες γειτονικές έδρες σε αλληλουχία. Το κριτήριο για την έκταση της αλληλουχίας αυτής είναι η γωνία που σχηματίζουν οι επιλεγμένες έδρες με τις γειτονικές τους. Όσο η γωνία αυτή είναι μικρότερη από την καθορισμένη τιμή της παραμέτρου **Angle**, επιλέγονται οι γειτονικές έδρες μέχρις ότου το κριτήριο να μην ικανοποιείται. Η Εικόνα 2-16 παρουσιάζει την εσωτερική δομή ενός FE Boundary by Flood Fill block και η Εικόνα 2-17 τη διαφοροποίηση στην έκταση του επιλεγμένου τμήματος της επιφάνειας αναλόγως την επιλεγμένη γωνία.



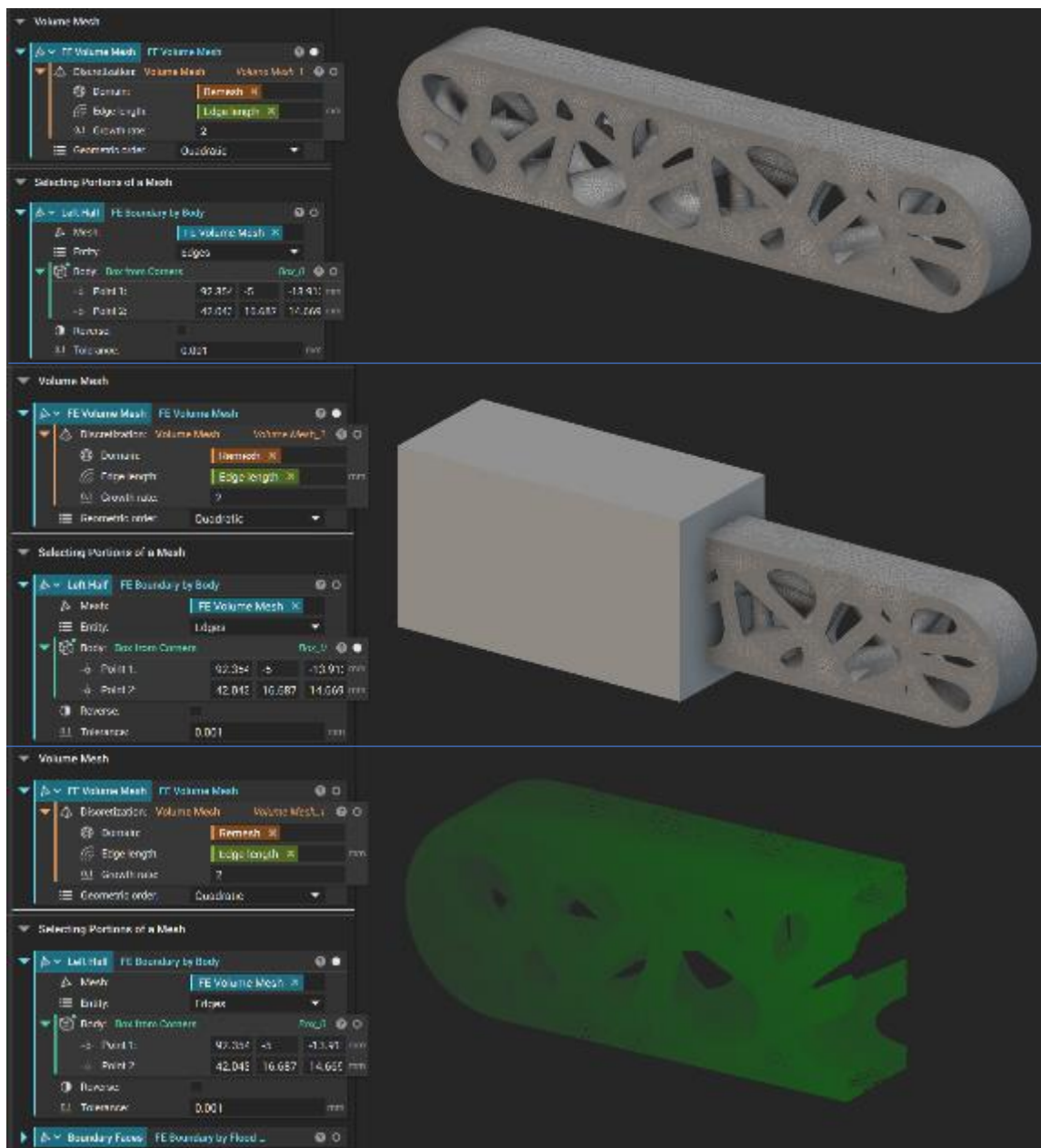
Εικόνα 2-16. Εσωτερική δομή FE Boundary by Flood Fill block



**Εικόνα 2-17. Διαφοροποίηση επιλογής τμήματος επιφανείας FE Mesh για διάφορες επιλογές γωνιών**

Το FE Boundary by Body block δημιουργεί ένα σύνορο ενός FE Mesh επιλέγοντας τις επιφανειακές οντότητες τμήματός του που βρίσκεται εντός ενός Implicit Body. Η Εικόνα 2-18 παρουσιάζει τα στάδια εφαρμογής του block αυτού χρησιμοποιώντας ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο για την επιλογή του αριστερού τμήματος του FE Mesh μιας γεωμετρίας μέχρι τη δημιουργία του συνόρου της αποτελούμενου από ακμές των πεπερασμένων στοιχείων.





Εικόνα 2-18. Στάδια εφαρμογής του FE Boundary by Body block

### 2.3.4 Lattices

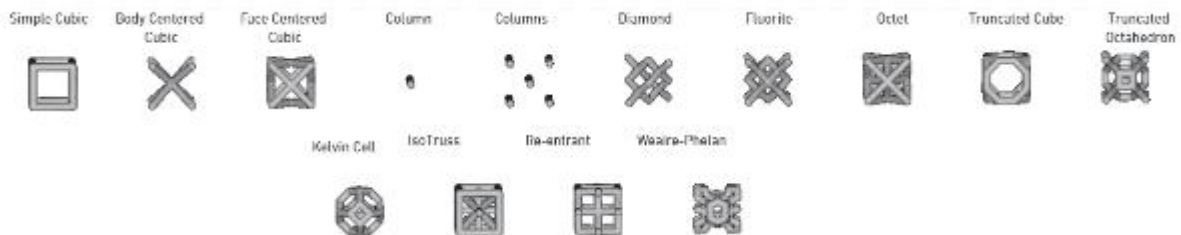
Τα lattices (πλέγματα ή δικτυώματα) είναι μία κανονική γεωμετρική διάταξη σημείων ή αντικειμένων σε μια περιοχή ή στο χώρο [30]. Οι δομές που δημιουργούνται από τα lattices αναφέρονται ως lattice structures (δικτυωτές ή πλεγματικές δομές) [30]. Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες των lattices που παράγονται από το nTop και οι οποίες είναι τα περιοδικά και τα στοχαστικά.

#### Περιοδικά lattices

Τα περιοδικά lattices είναι εκείνα των οποίων η δομή ακολουθεί ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο μέσα στην έκταση του. Η μορφή τους μέσα από το nTop καθορίζεται από τις ακόλουθες 3 παραμέτρους:

- Τον τύπο του μοναδιαίου κελιού (Unit Cell)
- Τις γεωμετρικές παραμέτρους του μοναδιαίου κελιού
- Τους χώρους κατανομής ή χάρτες κελιών (Cell Map)

Στο nTop υπάρχουν δύο κύριοι τύποι μοναδιαίων κελιών. Η πρώτη κατηγορία ονομάζεται **Graph Unit Cell** και αφορά κυρίως τα κελιά που παράγονται από ενώσεις αντηρίδων (struts) - ή δοκίδων (beams), όπως αναφέρονται στο περιβάλλον του nTop - μεταξύ τους με κατάλληλο τρόπο ώστε να δημιουργήσουν την μορφή τους. Η Εικόνα 2-19 συγκεντρώνει ορισμένους από τους τύπους των graph unit cells που είναι διαθέσιμοι στο nTop.



**Εικόνα 2-19. Διαθέσιμοι τύποι graph unit cells στο nTop**

Η γεωμετρική παράμετρος που μπορεί να μεταβληθεί στις graph unit cells είναι το πάχος της διατομής των αντηρίδων.

Η δεύτερη κατηγορία μοναδιαίων κελιών είναι οι **Triply Periodic Minimal Surface - TPMS** (Τριπλά Περιοδικές Ελάχιστες Επιφάνειες) οι οποίες παράγονται από τριγωνομετρικές εξισώσεις. Στο nTop, τα κελιά TPMS μπορούν να μεταβληθούν ως προς το πάχος των τοιχωμάτων τους και ως προς την επέκτασή τους προς τα έξω ή προς τα μέσα. Η Εικόνα 2-20 συγκεντρώνει τις διαθέσιμες μορφές των κελιών αυτών στο λογισμικό.



**Εικόνα 2-20. Κελιά TPMS διαθέσιμα στο nTop**

Επιπλέον, είναι δυνατή η δημιουργία και νέων μοναδιαίων κελιών σύμφωνα με τις ανάγκες του χρήστη ως Implicit Bodies με το **Custom Unit Cell** block.

Οι cell maps των περιοδικών lattices καθορίζουν την κατανομή των μοναδιαίων κελιών εντός μια γεωμετρίας ως προς την κατεύθυνση και το πλήθος. Οι διαθέσιμοι cell maps στο nTop είναι οι παρακάτω:

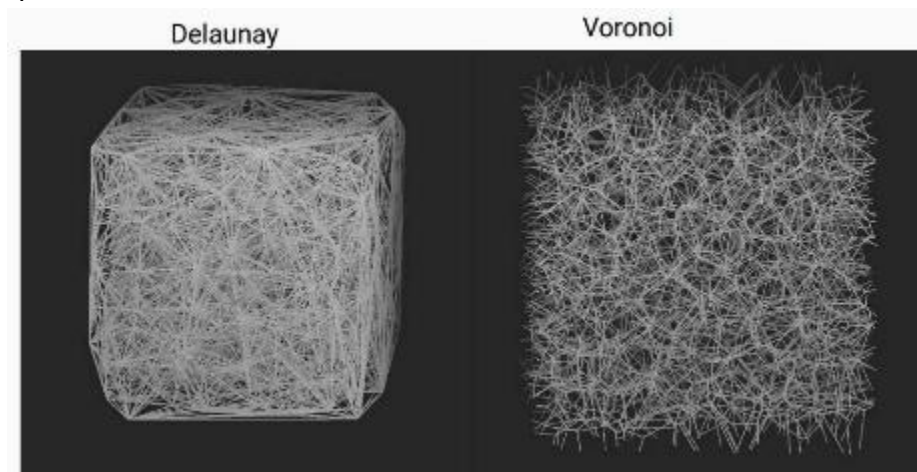
- Ορθογωνικοί (Rectangular): Τα μοναδιαία κελιά στοιβάζονται συνθέτοντας ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο εντός της επιθυμητής γεωμετρίας. Οι παράμετροι προς τροποποίηση είναι οι διαστάσεις κάθε κελιού ως προς κάθε άξονα.

- Κυλινδρικοί (Cylindrical): Τα μοναδιαία κελιά στοιβάζονται συνθέτοντας κύλινδρο εντός της επιθυμητής γεωμετρίας. Οι παράμετροι προς τροποποίηση είναι η ακτίνα κάθε κελιού, το ύψος του, ο αριθμός των κυκλικών τομέων και η επιλογή για καμπυλότητα ή όχι των περιφερειών των κελιών.
- Σφαιρικοί (Spherical): Τα μοναδιαία κελιά στοιβάζονται συνθέτοντας σφαίρα εντός της επιθυμητής γεωμετρίας. Οι παράμετροι προς τροποποίηση είναι η ακτίνα κάθε κελιού, ο αριθμός των κυκλικών τομέων κατά ύψος και πλάτος και η επιλογή για καμπυλότητα ή όχι των περιφερειών των κελιών.

Το nTop προσφέρει και τη δυνατότητα για δημιουργία cell maps από τετραγωνικά πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και από επιφάνειες σωμάτων CAD.

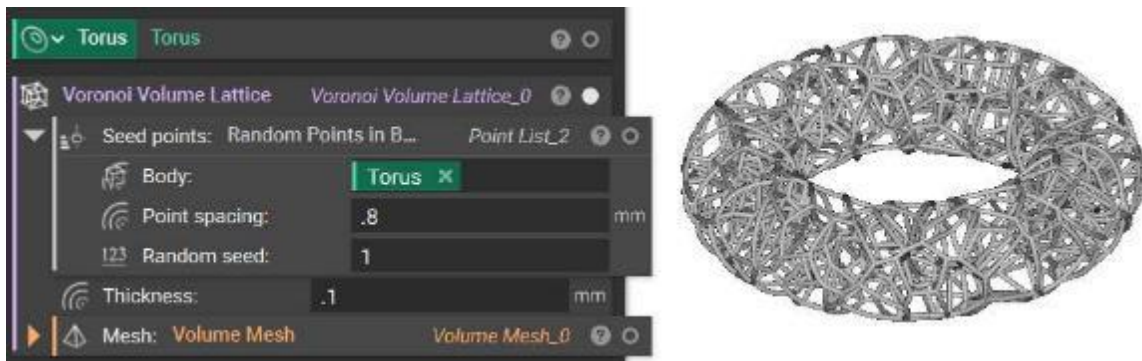
### Στοχαστικά lattices

Σε αντίθεση με τα περιοδικά lattice, τα στοχαστικά δεν εμφανίζουν απαραίτητως περιοδικότητα στη δομή τους. Η παραγωγή τους γίνεται ως επί το πλείστο με την ένωση σημείων μεταξύ τους με αντηρίδες. Τα 2 κυριότερα είδη στοχαστικών lattices που είναι διαθέσιμα στο nTop είναι το Voronoi (επιφανειακό και χωρικό) και το Delaunay, τα οποία παρουσιάζει η Εικόνα 2-21.



Εικόνα 2-21. Στοχαστικά lattices. Αριστερά: Delaunay. Δεξιά: Voronoi

Συνήθης πρακτική είναι η χρήση του **Random Points in Body** block το οποίο παράγει σημεία εντός της επιθυμητής γεωμετρίας με τυχαιότητα στην κατανομή και έλεγχο των μέσων αποστάσεων μεταξύ τους. Η Εικόνα 2-22 παρουσιάζει την εφαρμογή του block αυτού σε ένα Voronoi lattice εντός ενός δακτυλίου torus.



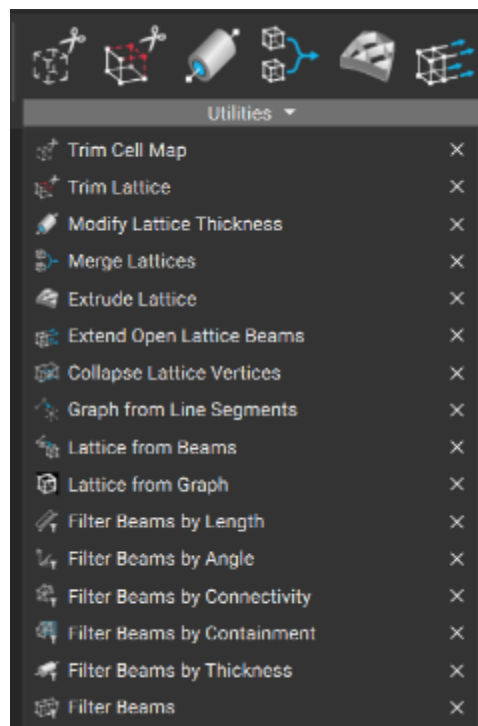
**Εικόνα 2-22. Voronoi lattice σε torus με τη χρήση του Random Points in Body block**

Ωστόσο, είναι δυνατή η χρήση οποιουδήποτε συνόλου σημείων για την παραγωγή ενός στοχαστικού lattice με αποτέλεσμα να μπορεί να ελεγχθεί η κατανομή τους εντός της γεωμετρίας κατά βούληση.

### **Εργαλεία επεξεργασίας των lattices**

Η κατηγορία **Utilities** προσφέρει και εργαλεία για την επεξεργασία των lattice structures όπως περικοπή τους, επέκταση ή σμίκρυνση των αντηρίδων, απομόνωση τους βάσει συγκεκριμένων φίλτρων όπως μήκος, πάχος, γωνία ως προς επίπεδο, και άλλα.

Η Εικόνα 2-23 συγκεντρώνει τα εργαλεία αυτά αναλυτικότερα μέσα από το περιβάλλον του nTop.



**Εικόνα 2-23. Εργαλεία επεξεργασία των lattices του nTop**

### 2.3.5 Προσομοιώσεις

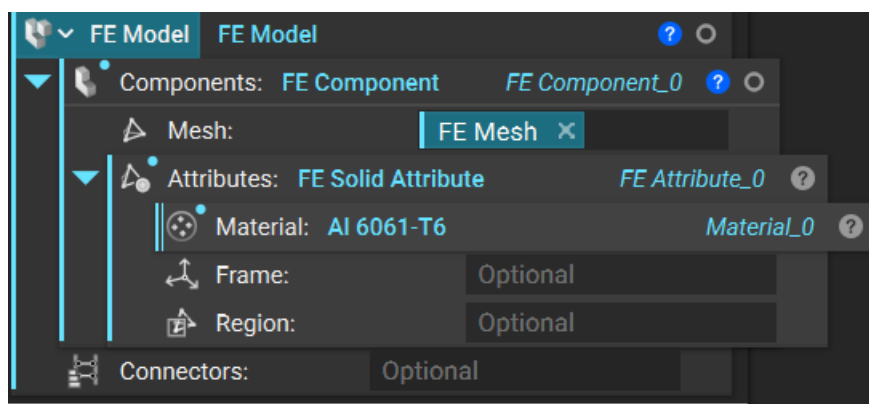
Μία πολύ σημαντική κατηγορία δυνατοτήτων του nTop είναι οι προσομοιώσεις (simulations) φαινομένων με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Μέχρι και την έκδοση 4.0.5, το λογισμικό έχει τη δυνατότητα να εκτελέσει τα εξής είδη προσομοιώσεων:

- Στατική Ανάλυση (Static Analysis)
- Ανάλυση Λυγισμού (Buckling Analysis)
- Ανάλυση Ιδιοσυχνοτήτων (Modal Analysis)
- Θερμική Ανάλυση (Thermal Analysis) με τις εξής συγκεκριμένες υποκατηγορίες:
  - Γραμμική Θερμική Ανάλυση (Linear Thermal Analysis)
  - Μη Γραμμική Θερμική Ανάλυση (Nonlinear Thermal Analysis) σε δοκιμαστικό (BETA) στάδιο
  - Μεταβατική Θερμική Ανάλυση (Transient Thermal Analysis) σε δοκιμαστικό (BETA) στάδιο

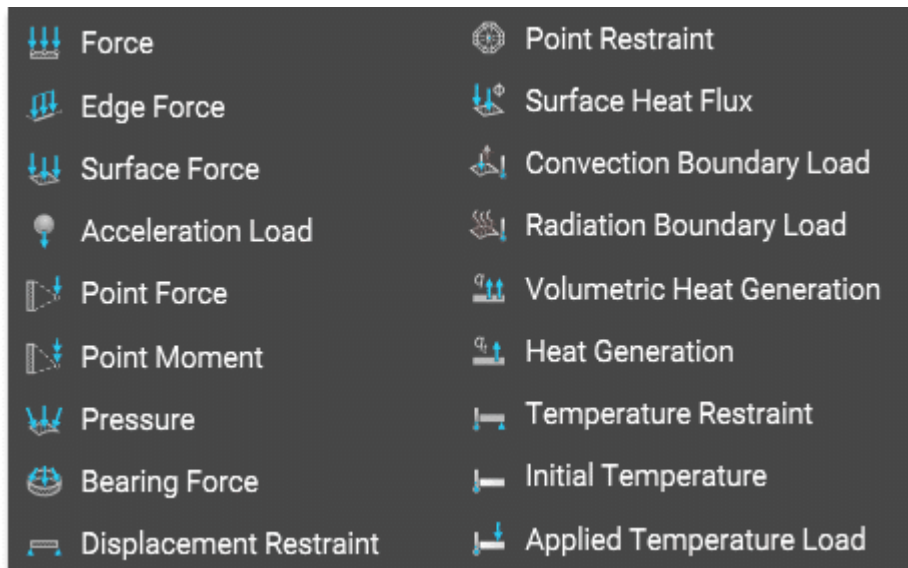
Για την εκτέλεση μιας οποιασδήποτε προσομοίωσης στο nTop απαιτούνται τα εξής 2 blocks ως τα κύρια συστατικά στοιχεία του.

Το πρώτο block είναι το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FE Model). Αυτό συντίθεται εν γένει από το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων της κατασκευής και το χρησιμοποιούμενο υλικό. Σε περιπτώσεις σύνθετων κατασκευών με πολλαπλά υλικά, κάθε κομμάτι τους συμμετέχει με το δικό του πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων και υλικό. Η Εικόνα 2-24 δείχνει ένα παράδειγμα της δομής ενός FE Model block.



Εικόνα 2-24. Παράδειγμα FE Model block

Το δεύτερο block είναι η λίστα των συνοριακών συνθηκών (boundary conditions list). Αυτές περιλαμβάνουν τους περιορισμούς (restraints) της κατασκευής, φορτίσεις όπως δυνάμεις και ροπές, ροές θερμότητας και άλλες. Η Εικόνα 2-25 συγκεντρώνει τις διαθέσιμες συνοριακές συνθήκες μέσα από το περιβάλλον του nTop.



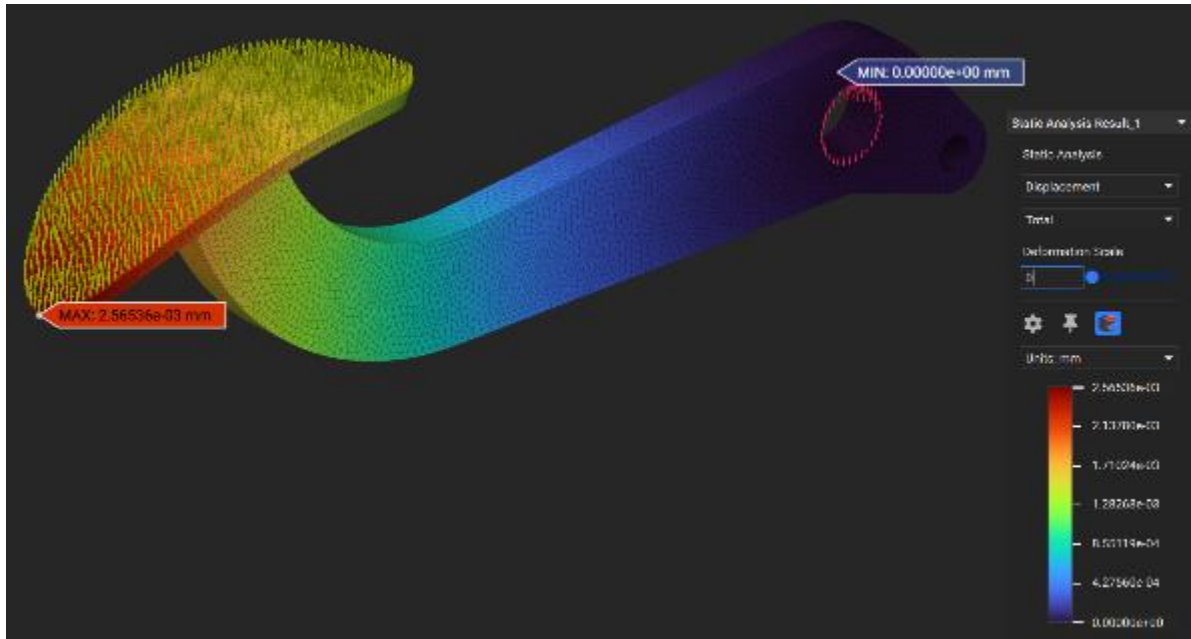
Εικόνα 2-25. Διαθέσιμες συνοριακές συνθήκες στο nTop

Αναλόγως το είδος της ανάλυσης στο nTop, εφαρμόζονται κατάλληλου τύπου συνοριακές συνθήκες οι οποίες περιγράφονται ειδικότερα παρακάτω.

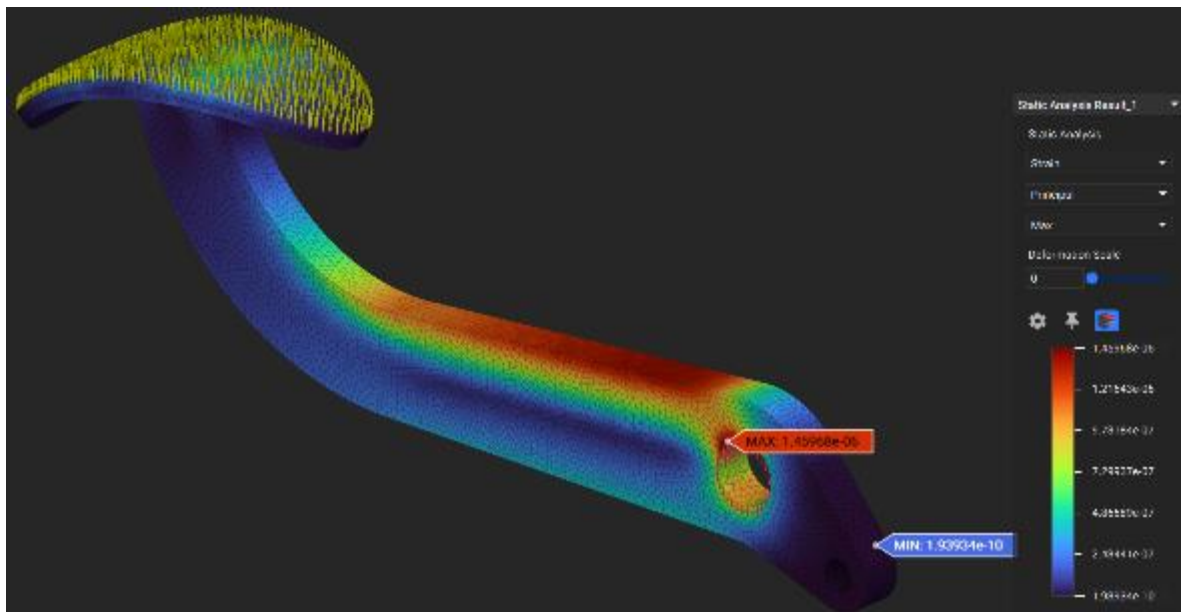
### Στατική Ανάλυση

Η στατική ανάλυση στο nTop εκτελείται με τη χρήση του **Static Analysis** block και αφορά την προσομοίωση της συμπεριφοράς μιας κατασκευής υπό σταθερές φορτίσεις. Η εφαρμογή των φορτίσεων στο Static Analysis block nTop έχει χαρακτήρα ημιστατικό (quasi-static) [24] , [2] Θεωρείται πώς γίνεται με αργό ρυθμό μέχρις ότου η κατασκευή έλθει σε μια μόνιμη κατάσταση με τις σχέσεις των ασκούμενων φορτίσεων και των μετατοπίσεων να θεωρούνται γραμμικές. Η παραμόρφωση θεωρείται χρονικά αμετάβλητη, αγνοώντας δυναμικά φαινόμενα που θα ήταν απόρροια αδρανειακών ή/και αποσβεστικών φορτίσεων. Κατ' εξαίρεση ως προς τα τελευταία, το Static Analysis block έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης αδρανειακών φορτίων επιταχύνσεων ως ισοδύναμα quasi-static loads, πολλαπλασιάζοντας τις μάζες των πεπερασμένων στοιχείων με το διάνυσμα της επιτάχυνσης και κατανέμοντας την δύναμη που προκύπτει επί των κόμβων του πλέγματος.

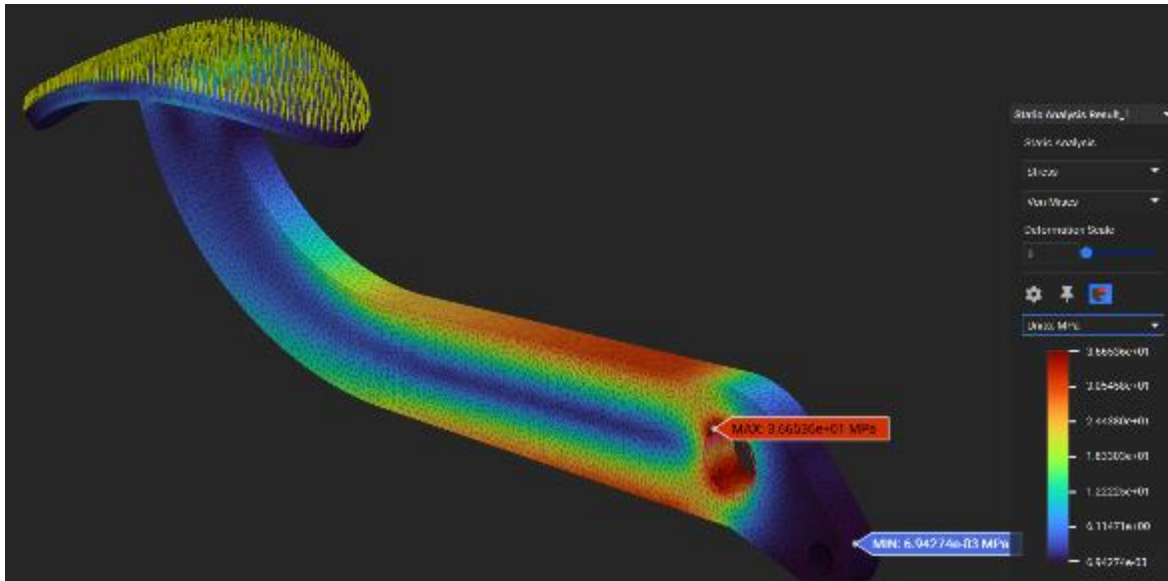
Αποτελέσματα των υπολογισμών της στατικής ανάλυσης είναι οι μετατοπίσεις, παραμορφώσεις, τάσεις και δυνάμεις αντίδρασης στην έκταση της μελετώμενης κατασκευής. Οι Εικόνες 2-26 ως 2-29 παρουσιάζουν συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα ενός παραδείγματος στατικής ανάλυσης ενός πεντάλ στο περιβάλλον του nTop. Η οπή στο πίσω μέρος του πεντάλ είναι πακτωμένη ενώ η έδρα επαφής με το πόδι υφίσταται επιφανειακή δύναμη κατανεμημένη στην επιφάνειά της. Μέσα στο περιβάλλον του nTop, είναι η δυνατή και η άμεση ανάδειξη των σημείων όπου εμφανίζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των εικονιζόμενων μεγεθών με τις επιγραφές MAX και MIN αντιστοίχως.



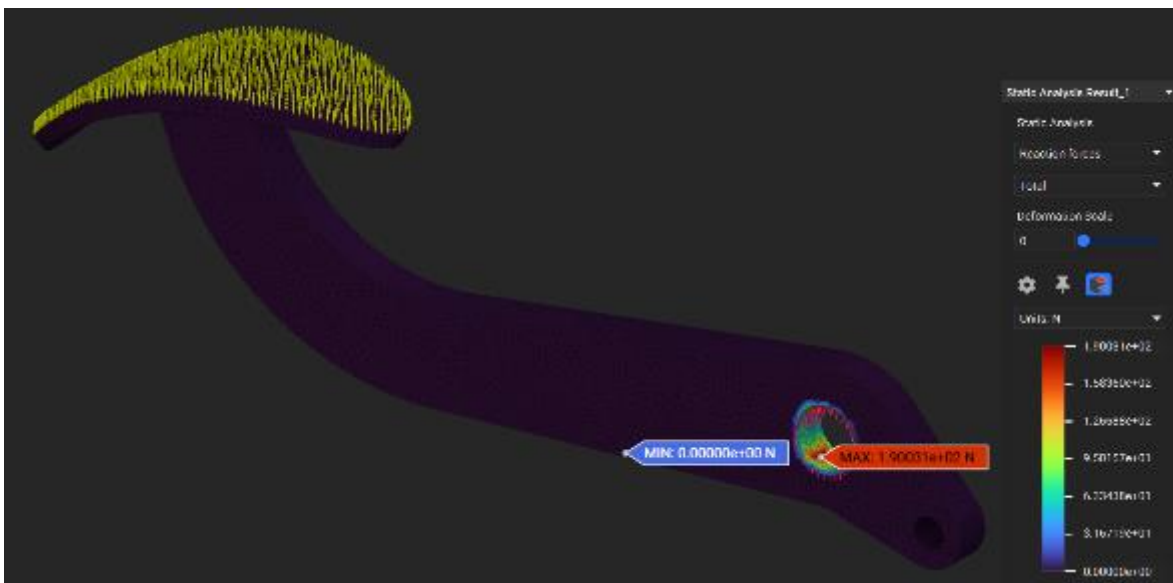
Εικόνα 2-26. Μετατοπίσεις



Εικόνα 2-27. Παραμορφώσεις



Εικόνα 2-28. Τάσεις Von Mises



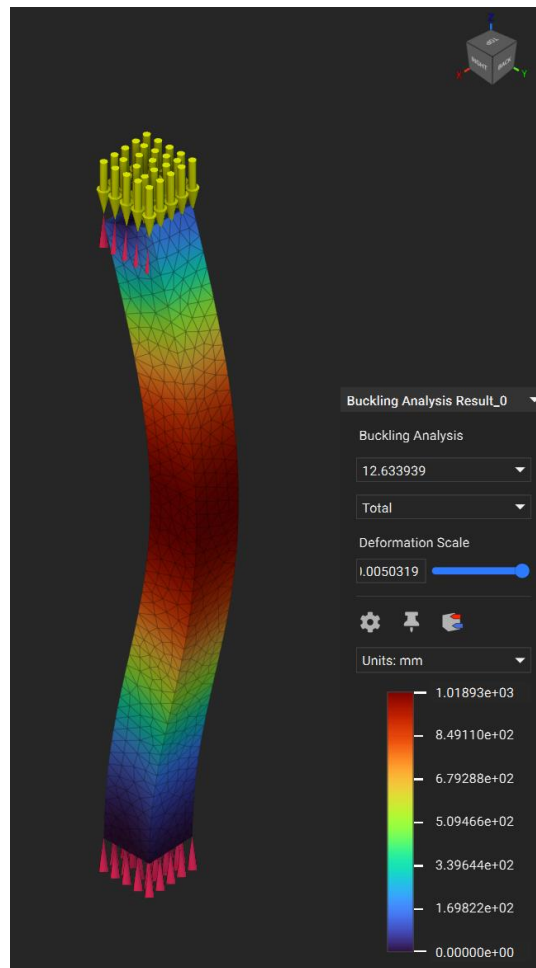
Εικόνα 2-29. Δυνάμεις αντίδρασης

### Ανάλυση Λυγισμού

Η ανάλυση λυγισμού αφορά την ξαφνική μεγάλη αύξηση των παραμορφώσεων ενός φορέα για μικρή αύξηση των επιβαλλόμενων φορτίων. Η μέγιστη τιμή του φορτίου για την οποία ο φορέας παραμένει ευθύγραμμος πριν καμπυλωθεί, ονομάζεται κρίσιμο φορτίο λυγισμού [33]

Το **Buckling Analysis** block λαμβάνει ως εισόδους το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και συνοριακές συνθήκες δυνάμεων και στηρίξεων σε μια κατασκευή. Οι έξοδοί του είναι οι συντελεστές αύξησης των επιβαλλόμενων φορτίων ώστε η κατασκευή να υποστεί λυγισμό, καθώς και οι αντίστοιχες ιδιομορφές της. Η Εικόνα 2-30 δείχνει ένα παράδειγμα αποτελέσματος προσομοίωσης λυγισμού για θλιπτικό φορτίο 1000N.





Εικόνα 2-30. Αποτελέσματα προσομοίωσης λυγισμού

### Ανάλυση Ιδιοσυχνοτήτων

Η ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων αφορά τον υπολογισμό των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών μιας κατασκευής για της διαπίστωση της δυναμικής συμπεριφοράς της χωρίς την επιβολή εξωτερικών φορτίων. Ο υπολογισμός τους έχει ως εναρκτήρια βάση την γενικευμένη εξίσωση κίνησης ενός συστήματος με πολλούς βαθμούς ελευθερίας:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f(t)\} \quad \text{Εξ. (2-2)}$$

όπου:

$\{u\}$ : το διάνυσμα μετατοπίσεων των βαθμών ελευθερίας της κατασκευής

$[M]$ : το μητρώο μάζας

$[C]$ : το μητρώο απόσβεσης

$[K]$ : το μητρώο δυσκαμψίας

$\{f(t)\}$ : το διάνυσμα των εξωτερικών φορτίσεων στην κατασκευή

Για τον προσδιορισμό των ιδιοσυχνοτήτων, θεωρείται ότι η κατασκευή δεν δέχεται εξωτερικές φορτίσεις και υπάρχει μηδενική απόσβεση (το μητρώο  $[C]$  είναι μηδενικό). Συνεπώς:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad \text{Εξ. (2-3)}$$

Θεωρείται, επίσης ότι κάθε σημείο της κατασκευής εκτελεί αρμονική ταλάντωση. Οπότε ισχύει:

$$\{u\} = \{U\} \sin(\omega t + \theta) \quad \text{Εξ. (2-4)}$$

όπου:

$\{U\}$ : το διάνυσμα των πλατών ταλάντωσης κάθε βαθμού ελευθερίας

$\omega$ : η κυκλική συχνότητα της ταλάντωσης

$\theta$ : η γωνία φάσης της ταλάντωσης

Κατά συνέπεια, παραγωγίζοντας ως προς το χρόνο εις διπλούν, προκύπτει για τις επιταχύνσεις των βαθμών ελευθερίας:

$$\{\ddot{u}\} = -\omega^2\{U\} \sin(\omega t + \theta) \quad \text{Εξ. (2-5)}$$

Από τις εξισώσεις (2-3), (2-4) και (2-5) προκύπτει η σχέση:

$$([K] - \omega^2[M])\{U\} \sin(\omega t + \theta) = 0 \Rightarrow ([K] - \omega^2[M])\{U\} = 0$$

η οποία αποτελεί πρόβλημα το ιδιοτιμών:

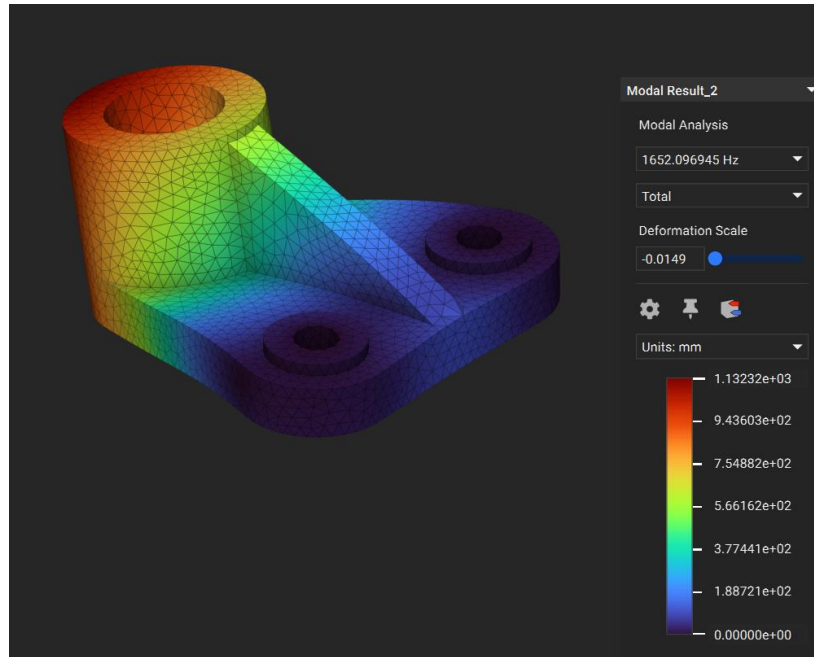
$$\det([K] - \omega^2[M]) = 0 \quad \text{Εξ. (2-6)}$$

Οι λύσεις  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$  για τις οποίες ικανοποιείται η Εξ. (3-) αποτελούν τις κυκλικές ιδιοσυχνότητες της κατασκευής σε rad/s. Με την μετατροπή:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{Εξ. (2-7)}$$

προκύπτουν οι ιδιοσυχνότητες της κατασκευής σε Hz.

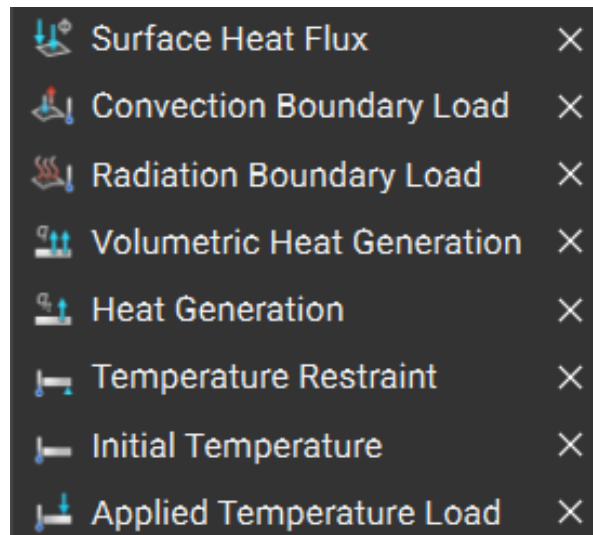
Επειδή ο προσδιορισμός των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών γίνεται χωρίς επιβολή εξωτερικών φορτίων, το **Modal Analysis** block λαμβάνει μόνο τις στηρίξεις στο πεδίο των συνοριακών συνθηκών. Ως έξοδοι του block αυτού είναι ιδιοσυχνότητες της κατασκευής σε πλήθος που έχει καθοριστεί εκ των προτέρων και οι ιδιομορφίες αυτής. Η Εικόνα 2-31 δείχνει ένα παράδειγμα αποτελέσματος ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων ενός εξαρτήματος



**Εικόνα 2-31. Αποτέλεσμα ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων στο nTop**

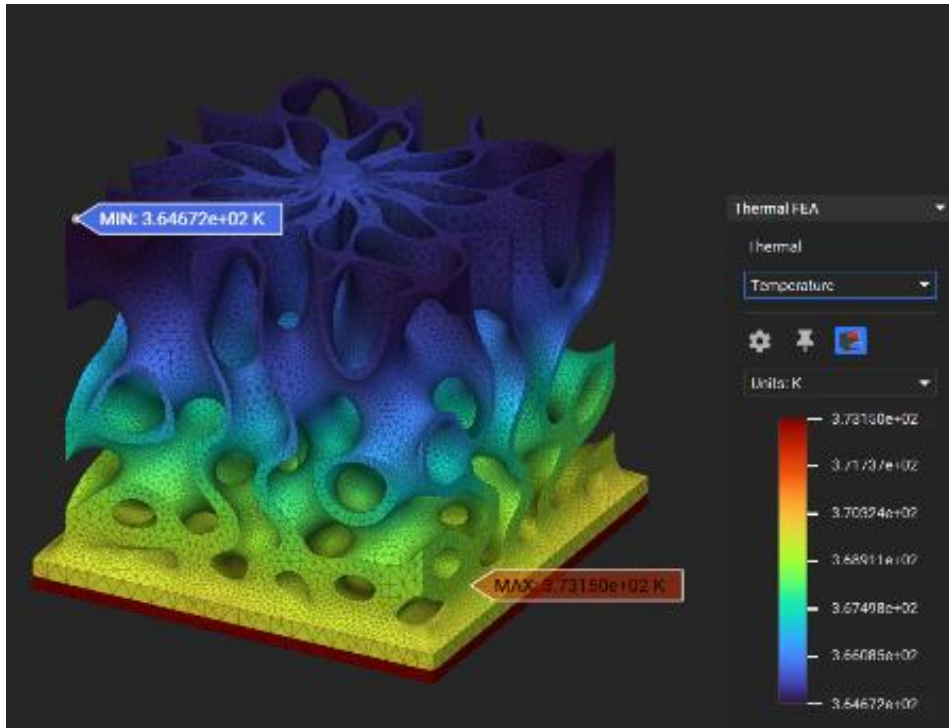
### **Γραμμική Θερμική Ανάλυση**

Η γραμμική θερμική ανάλυση που είναι διαθέσιμη στο nTop εξετάζει τη συμπεριφορά μιας κατασκευής υπό την επιρροή συγκεκριμένων θερμικών συνθηκών, όπως περιβάλλουσα θερμοκρασία, ροή θερμότητας εκ αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας, οι οποίες είναι και οι συνοριακές συνθήκες της ανάλυσης αυτής. Στο πλαίσιο της γραμμικής θερμικής ανάλυσης οι ιδιότητες του υλικού και οι συνοριακές συνθήκες είναι ανεξάρτητες της θερμοκρασίας. Η Εικόνα 2-32 συγκεντρώνει τις συνοριακές συνθήκες που είναι διαθέσιμες στο nTop για την εκτέλεση μιας θερμικής ανάλυσης.

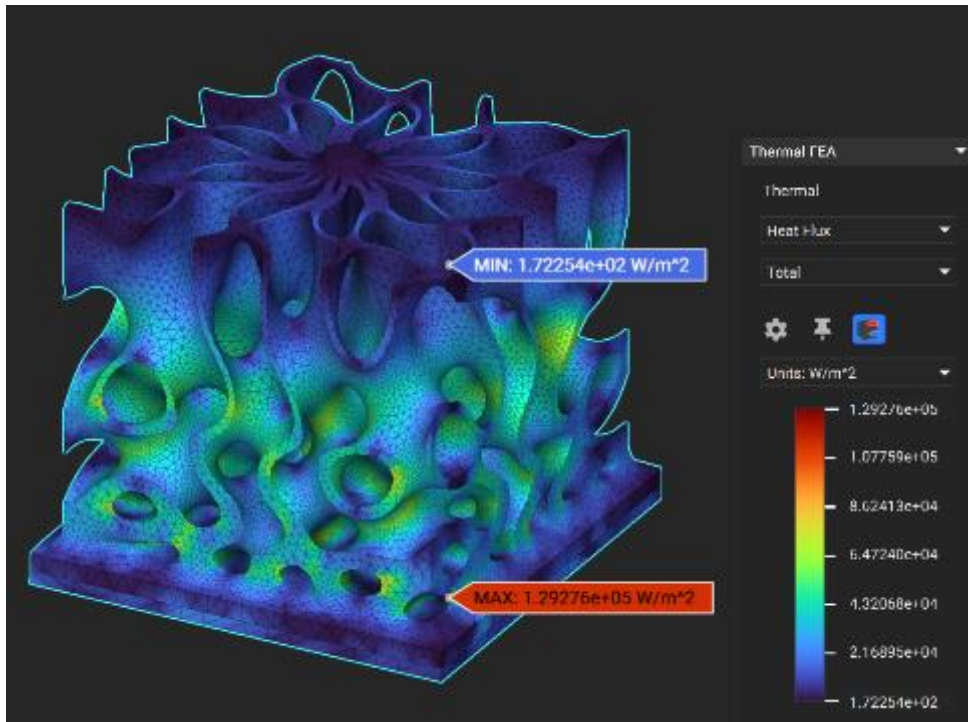


**Εικόνα 2-32. Συνοριακές συνθήκες θερμικής ανάλυσης διαθέσιμες στο nTop**

Επιπλέον, η Εικόνες 2-33 και 2-34 παρουσιάζουν ορισμένα από τα αποτελέσματα μιας γραμμικής θερμικής ανάλυσης.



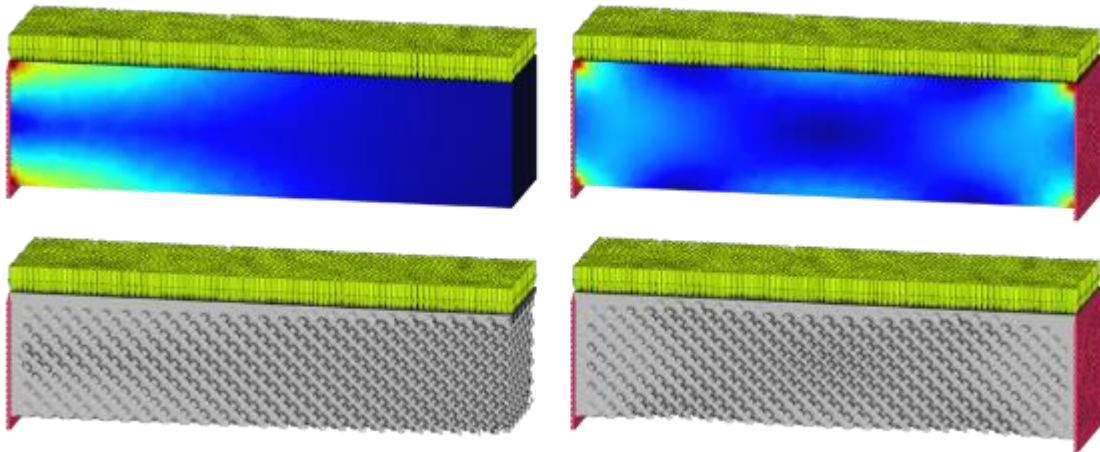
Εικόνα 2-33. Θερμοκρασία



Εικόνα 2-34. Ροή θερμότητας

### 2.3.6 Data-Driven Design

Το Data-Driven Design (Σχεδιασμός Οδηγούμενος από Δεδομένα) αφορά τον παραμετροποιημένο καθορισμό της μορφής μιας γεωμετρίας από τις τιμές βαθμωτών ή διανυσματικών μεγεθών σε διακριτά σημεία του χώρου κατά το σχεδιασμό της. Πολλές φορές τα μεγέθη αυτά αφορούν αποτελέσματα αναλύσεων, όπως θερμοκρασίες, τάσεις, παραμορφώσεις, ταχύτητες ρευστών και άλλων, χωρίς αυτό να αποκλείει και τη χρήση οποιωνδήποτε άλλων μεγεθών αντιστοιχούν στα διακριτά αυτά σημεία. Η Εικόνα 2-35 παρουσιάζει 2 παραδείγματα εφαρμογής Data-Driven Design σε μια δοκό. Συγκεκριμένα, η δοκός υφίσταται καμπυλικά φορτία με 2 διαφορετικές περιπτώσεις στηρίξεων. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις στη δοκό καθορίζουν το πάχος των αντηρίδων ενός lattice structure στην έκτασή της.



Εικόνα 2-35. Εφαρμογή του Data-Driven Design στο lattice structure δοκού [7]

Η διαδικασία του Data-Driven Design στο nTop ξεκινάει με τη δημιουργία χαρτών σημείων (point maps), οι οποίοι είναι αναπαραστάσεις κατάλληλης χρωματικής διάκρισης των τιμών των σημείων αυτών. Εν συνεχεία, δημιουργούνται πεδία από τα δεδομένα των χαρτών σημείων, συναρτήσει των οποίων μεταβάλλονται οι παράμετροι μιας κατασκευής που έχουν τη μορφή πεδίων. Για το λόγο αυτό, ο όρος “Data-Driven Design” χρησιμοποιείται πολλές φορές ως συνώνυμος του όρου “Field-Driven Design” (Σχεδιασμός Οδηγούμενος από Πεδία). Στο πλαίσιο του λογισμικού nTop, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι ο πρώτος όρος αποτελεί μια συγκεκριμένη υποκατηγορία του δεύτερου εφόσον ο τρόπος παραγωγής των πεδίων που καθορίζουν μια γεωμετρία προέρχεται συγκεκριμένα από δεδομένα.

### 2.3.7 Επιπλέον δυνατότητες στο nTop

Εκτός από τις προαναφερθείσες, το nTop παρέχει και επιπλέον δυνατότητες και λειτουργίες ορισμένες εκ των οποίων αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

#### Τοπολογική βελτιστοποίηση

Η καρτέλα **Optimization** παρέχει λειτουργίες για τη επίτευξη του βέλτιστου σχήματος ενός εξαρτήματος σύμφωνα με τους επιθυμητούς στόχους και περιορισμούς για τις καθορισμένες συνοριακές συνθήκες. Το **Topology Optimization** block εκτελεί την επαναληπτική διαδικασία

της βελτιστοποίησης του εξαρτήματος σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία κάνοντας χρήση του αλγορίθμου Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) [1]. Η Εικόνα 2-35 συγκεντρώνει τα στάδια της διαδικασίας της τοπολογικής βελτιστοποίησης σε ένα εξάρτημα. Αριστερά φαίνεται η αρχική γεωμετρία του τεμαχίου. Στο κέντρο φαίνεται το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης με το Topology Optimization block. Δεξιά απεικονίζεται το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας μετά από μετεπεξεργασία της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.



Εικόνα 2-36. Παράδειγμα σταδίων τοπολογικής βελτιστοποίησης

### **Δημιουργία στρώσεων και διάταξη εκτύπωσης**

Μέσω των εργαλείων της καρτέλας **Manufacturing**, το nTop παρέχει τη δυνατότητα προετοιμασίας μιας Implicit γεωμετρίας (ή πολλαπλών) για ΠΚ χωρίς την ανάγκη για πλεγματοποίησή της. Η διαδικασία αυτή αφορά μηχανές ΠΚ που μπορούν να δεχθούν απευθείας δεδομένα στρώσεων.

Η προετοιμασία αφορά την τοποθέτηση των γεωμετριών εντός του χώρου εκτύπωσης της μηχανής ΠΚ τον προσανατολισμό κάθε γεωμετρίας και την τελική δημιουργία στρώσεων. Κύριοι στόχοι των εργαλείων προσανατολισμού της γεωμετρίας είναι η ελαχιστοποίηση της διάστασής κατά τον άξονα Z του παραγόμενου τεμαχίου, καθώς και η ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων υποστηρίξεων.

Στις βιβλιοθήκες των blocks του nTop παρέχονται οι χώροι εκτύπωσης ορισμένων μοντέλων μηχανών ΠΚ της αγοράς, χωρίς αυτό να εμποδίζει τη δημιουργία του χώρου εκτύπωσης ενός οποιουδήποτε άλλου.

### **nTop Automate**

Το nTop Automate παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας αλγορίθμων για την αυτοματοποίηση επαναληπτικών και πιο προηγμένων ροών εργασίας με γραμμές κώδικα σε γλώσσα Python στο περιβάλλον της γραμμής εντολών nTop CL του λογισμικού.

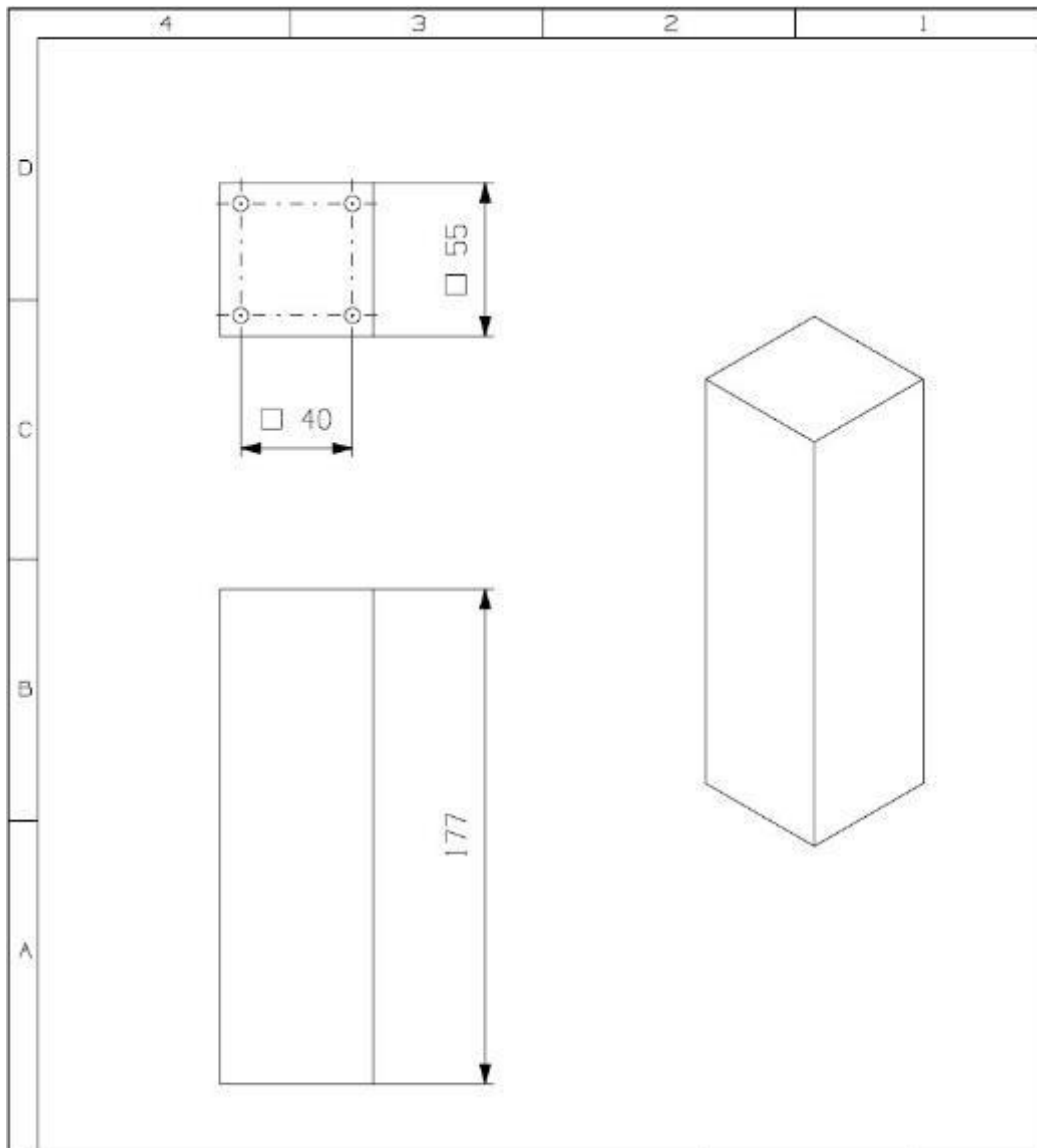
### 3 Κύριο μέρος - Υλοποίηση της εφαρμογής

#### 3.1 Λειτουργικές απαιτήσεις, στόχοι και προδιαγραφές επανασχεδιασμού

##### 3.1.1 Design Space

Το design space είναι ο γεωμετρικά και διαστασιολογικά θεωρούμενος χώρος εντός, και μόνο εντός, του οποίου πρέπει να βρίσκεται το παραγόμενο του σχεδιασμού.

Σε συνεννόηση με τον τεχνικό φορέα της εργασίας, ως design space καθορίστηκε το εικονιζόμενο στο παρακάτω Σχήμα 3-1.



Σχήμα 3-1. Design space του παραγομένου του σχεδιασμού

Ουσιαστικά, το παραγόμενο του σχεδιασμού μελετήθηκε ώστε να μπορεί να βρίσκεται αυστηρά εντός ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου διαστάσεων 55mm x 55mm x 177mm. Για τις αποστάσεις των οπών των κοχλιωτών συνδέσεων, χρησιμοποιήθηκε η απόσταση των 40mm από το ανωτέρω Σχήμα 3-1.

### 3.1.2 Περιορισμοί (Restraints)

#### Επιφάνεια πρόσδεσης

Σε συνεργασία με τον τεχνικό φορέα της εργασίας, η επιφάνεια πρόσδεσης του bracket εντός του δορυφόρου θεωρήθηκε επίπεδη και οι άξονες των κυλινδρικών οπών σύνδεσης σε αυτήν ως κάθετοι στο επίπεδο που αυτή ορίζει. Για το υλικό κατασκευής της, καθορίστηκε το κράμα αλουμινίου Al 6061-T6 το οποίο απαντάται συχνά σε διαστημικές εφαρμογές. Στον Πίνακα 3-1 δίνονται ορισμένες από τις ιδιότητες του υλικού αυτού [3].

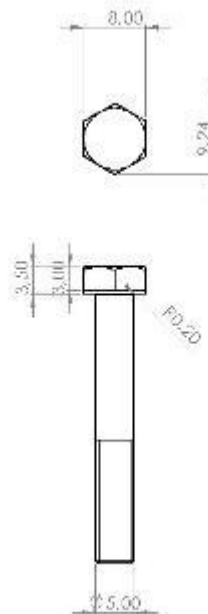
Πίνακας 3-1. Ιδιότητες Al 6061-T6

Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	2.7
Όριο διαρροής σε εφελκυσμό (MPa)	276
Όριο αντοχής σε εφελκυσμό (MPa)	310
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	68.9
Λόγος Poisson	0.33

#### Στοιχεία σύνδεσης

Καθορίστηκε ότι η σύνδεση με την εσωτερική επιφάνεια του δορυφόρου θα γίνει με 4 κοχλιωτές συνδέσεις μετρικού σπειρώματος M5. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία σύνδεσης θα είναι τα εξής:

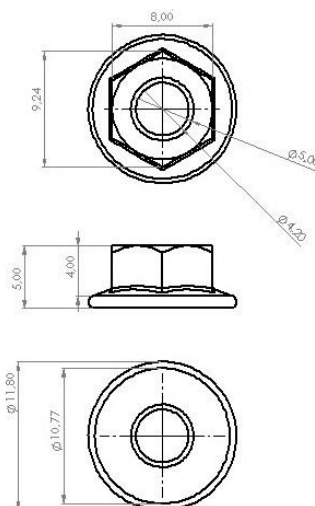
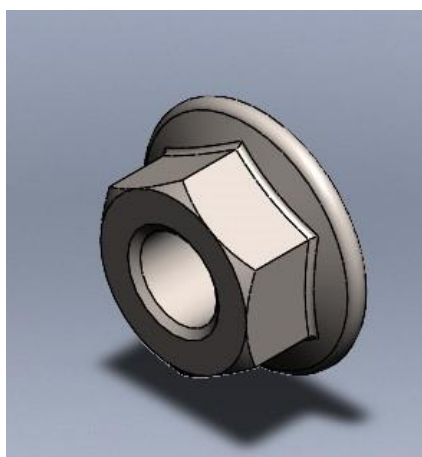
#### Κοχλίας ISO 4014 - M5



Σχήμα 3-2. Κοχλίας ISO 4014. Αριστερά: 3D περιβάλλον SolidWorks. Δεξιά: Διάστασεις από τις βιβλιοθήκες του SolidWorks

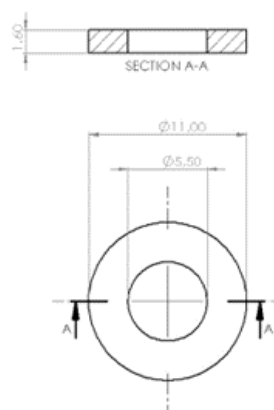
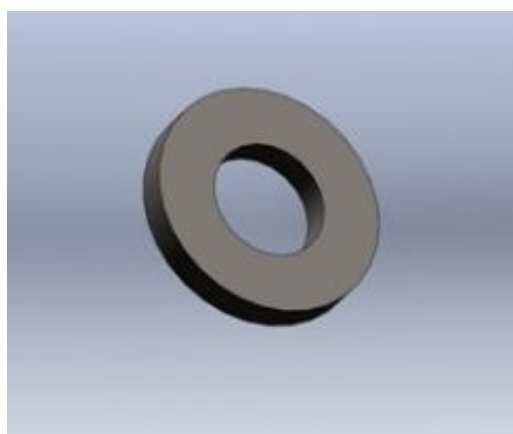


### Περικόχλιο ISO 4161 - M5



Σχήμα 3-3. Περικόχλιο ISO 4161 – M5. Αριστερά: 3D περιβάλλον SolidWorks. Δεξιά: Διάστασεις από τις βιβλιοθήκες του SolidWorks

### Παράκυκλος (ροδέλα) ISO 10673 - 5.5



Σχήμα 3-4. Παράκυκλος ISO 10673 - 5.5. Αριστερά: 3D περιβάλλον SolidWorks. Δεξιά: Διαστάσεις από τις βιβλιοθήκες του SolidWorks

Για το υλικό κατασκευής των στοιχείων σύνδεσης, θεωρήθηκε ανοξείδωτος χάλυβας AISI 316 με τις ιδιότητες του όπως παραθέτει ο Πίνακας 3-2 [4] .

Πίνακας 3-2. Ιδιότητες ανοξείδωτου χάλυβα AISI 316

Πυκνότητα ( $\text{g/cm}^3$ )	8
Όριο διαρροής σε εφελκυσμό (MPa)	240
Όριο αντοχής σε εφελκυσμό (MPa)	550
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	193

### **Φορτίσεις κοχλιωτής σύνδεσης**

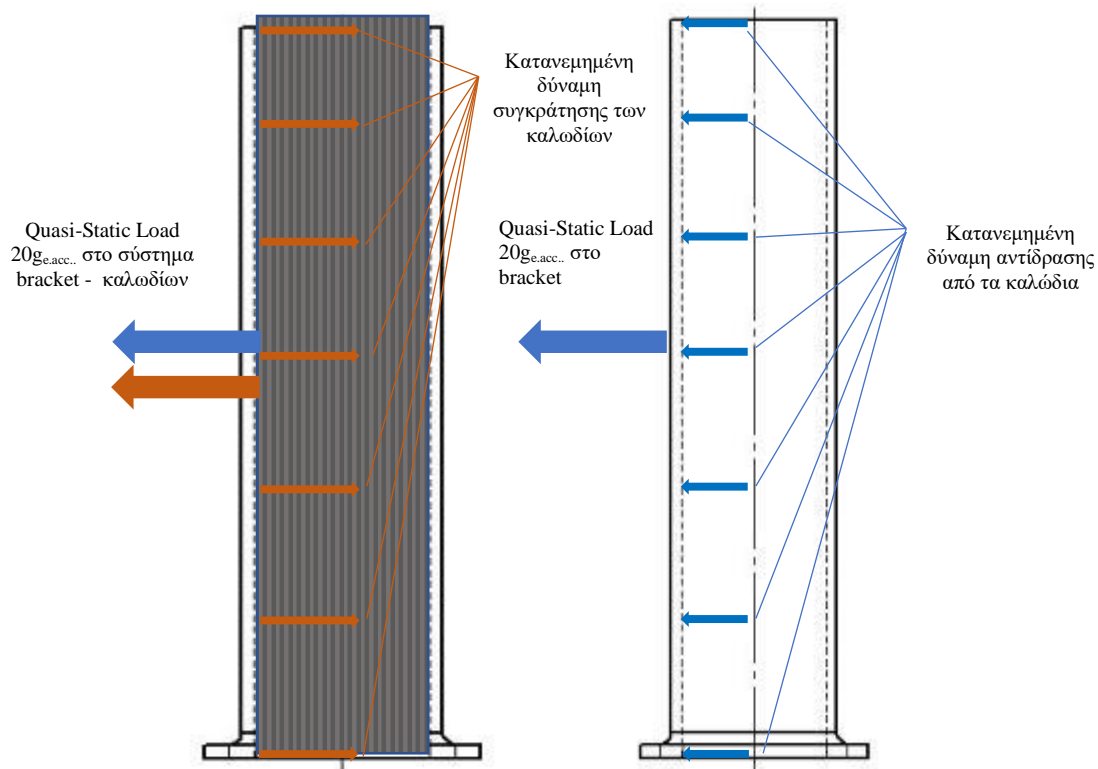
Ως δύναμη προφόρτισης για κάθε κοχλιωτή σύνδεση, προκειμένου να μην υπάρχει κίνδυνος αποσύνδεσής τους, αλλά και περιορισμός των αναπτυσσόμενων τάσεων στην επιφάνεια του θερμοπλαστικού, μετά από κατάλληλους υπολογισμούς, καθορίστηκε η τιμή της στα 200N.

#### **3.1.3 Φορτία κατά την εκτόξευση**

Κατά τον διάρκεια ζωής του, το bracket αναμένεται να δεχτεί πολλών ειδών φορτία, ήδη από τη φάση εκτόξευσης και για όλη τη χρονική διάρκεια που θα παραμείνει σε τροχιά. Σε συνεργασία με τον τεχνικό φορέα της εργασίας και για τους σκοπούς υλοποίησης της μελέτης, θεωρήθηκε, ως δυσμενέστερη περίπτωση φόρτισης του bracket, quasi-static load κατά τη διάρκεια της εκτόξευσης, ισοδύναμο με επιτάχυνση μέγιστης τάξεως  $20g_{e.acc.}$ , όπου  $g_{e.acc.}$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας στη Γη. Η τιμή της τελευταίας λήφθηκε ίση με  $9.807m/s^2$  όπως είναι καταχωρημένη ως σταθερά στο nTop.

Επειδή ο προσανατολισμός τοποθέτησης του bracket εντός ενός δορυφόρου είναι γενικά ακαθόριστος και μη δεσμευτικός, όπως και η θέση του ίδιου του δορυφόρου εντός του ίδιου πυραύλου εκτόξευσης, η αντοχή του πρέπει να ικανοποιείται για κάθε περίπτωση διεύθυνσης του quasi-static load των  $20g_{e.acc.}$  σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες φορτίσεις.

Επιπλέον, ταυτόχρονα με το bracket, τα καλώδια εντός της κοιλότητας συγκράτησης υφίστανται το ίδιο ισοδύναμο quasi-static load στην ίδια κατεύθυνση και δέχονται την αντίδραση της συγκράτησης από την εσωτερική επιφάνεια της κοιλότητας. Συνεπώς, ως ίση και αντίρροπη δύναμη αντίδρασης, οι δυνάμεις εκ των καλωδίων ασκούνται στην εσωτερική επιφάνεια της κοιλότητας συγκράτησης του bracket και λαμβάνονται υπόψιν στον τελικό υπολογισμό. Εξαίρεση από τη θεώρηση των δυνάμεων των καλωδίων αποτελεί η περίπτωση της διεύθυνσης του quasi-static load ως παράλληλη με τον άξονα διέλευσης τους. Σε συνεργασία με τον τεχνικό φορέα της εργασίας, για τη συγκεκριμένη μελέτη ως συνολική συγκρατούμενη μάζα των καλωδίων καθορίστηκαν τα 500g. Το Σχήμα 3-5 απεικονίζει τις φορτίσεις που ασκούνται στο σύστημα bracket – καλωδίων. Με τα μπλε βέλη εικονίζονται οι φορτίσεις στο bracket, ενώ με τα κόκκινα στα καλώδια. Στο αριστερό τμήμα του σχήματος δίνεται έμφαση στις δυνάμεις ασκούμενες στα καλώδια, ενώ στο δεξί τμήμα στις αντίστοιχες επί του bracket.



Σχήμα 3-5. Απεικόνιση quasi-static loads στο σύστημα bracket - καλωδίων.

### Μέγιστη επιτρεπόμενη μετατόπιση

Ένας από τους σκοπούς του επανασχεδιασμού είναι η διατήρηση της κατά το δυνατόν υψηλότερης δυσκαμψίας του bracket για λόγους αποφυγής ανεπιθύμητης επαφής με τα γειτνιάζοντα συστήματα εντός του δορυφόρου. Σε συνεργασία με τον τεχνικό φορέα της εργασίας, η μέγιστη επιτρεπόμενη μετατόπιση από την επιβολή όλων του θεωρούμενων φορτίων καθορίστηκε να είναι μικρότερη από 1mm σε κάθε περίπτωση.

### 3.1.4 Συντελεστές ασφαλείας

Ο συντελεστής ασφαλείας (Factor of Safety – FOS) στις κατασκευές ορίζεται ως εξής [5] :

$$FOS = \frac{\sigma_{lim}}{\sigma_{w,max}}$$

όπου:

$\sigma_{w,max}$ : η μέγιστη αναμενόμενη τάση λειτουργίας

$\sigma_{lim}$ : η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση (συνήθως το όριο αντοχής ή διαρροής)

Η επιλογή των συντελεστών ασφαλείας καθορίζεται από μία πληθώρα παραγόντων, μερικοί από τους οποίους είναι ο τύπος της εφαρμογής, ο τύπος των επιλεγμένων υλικών, η μορφή της γεωμετρίας και το ενδεχόμενο επαλήθευσης της αξιοπιστίας του παραγομένου του σχεδιασμού με δοκιμή πριν την εφαρμογή του.

Για τις αεροδιαστημικές εφαρμογές, στις περιπτώσεις που πραγματοποιείται δοκιμή, οι συνήθειες FOS είναι οι εξής [15] :

Ως προς το όριο αντοχής: **FOS<sub>U</sub> = 1.4 – 1.5**

Ως προς το όριο διαρροής: **FOS<sub>Y</sub> = 1 – 1.25**

Σε περιπτώσεις που η επαλήθευση γίνεται μόνο μέσω της ανάλυσης (άνευ δοκιμής), έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί οι συντελεστές [15] :

**FOS<sub>U</sub> = 2.0**

**FOS<sub>Y</sub> = 1.25**

Η NASA και το Κέντρο Διαστημικών Πτήσεων Goddard (Goddard Space Flight Center) συστήνουν τους εξής συντελεστές [15] :

**FOS<sub>U</sub> = 2.6**

**FOS<sub>Y</sub> = 2.0**

Σύμφωνα με το τεχνικό πρότυπο της NASA: «Structural Design And Test Factors Of Safety For Spaceflight Hardware» [17] για σύνθετες/κολλημένες δομές με περιοχές με ασυνέχειες, συστήνεται: FOS<sub>U</sub> = 2.0

Σύμφωνα με το τεχνικό έγγραφο της ESA: «Tailoring of ECSS-E-32-10A for ExoMars - Structural factors of safety for spacecraft and launch vehicle» [9] , βάσει των οδηγιών υπολογισμού των συντελεστών ασφαλείας, αυτοί προκύπτουν ως εξής:

Για όριο διαρροής: **FOS<sub>Y</sub> = 1.875**

Για όριο θραύσης: **FOS<sub>U</sub> = 3**

Συνοψίζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα και συστάσεις από τους προαναφερθέντες φορείς διαστημικών εφαρμογών, οι συντελεστές ασφαλείας καθορίστηκαν ως εξής:

**FOS<sub>U</sub> = 2.5**

**FOS<sub>Y</sub> = 2.0**

### 3.1.5 Ιδιοσυχνότητα

Για τον περιορισμό των φορτίσεων από τις από τις αρμονικές δονήσεις κατά την εκτόξευση του δορυφόρου, σε συνεργασία με τον τεχνικό φορέα της εργασίας, καθορίστηκε η 1<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα (primary frequency ή first mode) του bracket να είναι μεγαλύτερη από 100Hz. Η επιβεβαίωση αυτού έγινε με τη χρήση Modal Analysis μέσω του nTop.

### 3.1.6 Θερμοκρασίες

Σε συνεργασία με τεχνικό φορέα της εργασίας, εφόσον το bracket θα τοποθετηθεί εντός του δορυφόρου, θεωρήθηκε ότι το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του θα είναι από – 30°C έως + 70°C το οποίο θα μεταβάλλεται περιοδικά στη διάρκεια ενός 24ώρου. Το θερμοκρασιακό

αυτό εύρος αναμένεται κατά τη φάση της τροχιάς, μετά τον διαχωρισμό του δορυφόρου από τον πύραυλο, εντός του οποίου έχει θεωρηθεί θερμοκρασία δωματίου με αμελητέα επιρροή. Το υλικό από το οποίο θα είναι κατασκευασμένο το bracket θα πρέπει να μπορεί να λειτουργεί στο θερμοκρασιακό αυτό εύρος χωρίς αλλοίωση των ιδιοτήτων του σε βαθμό που αυτό θα οδηγούσε σε ανεπιθύμητη συμπεριφορά.

Είναι, προφανώς, απαραίτητο για το σημείο τήξης του θερμοπλαστικού υλικού να είναι υψηλότερο της μέγιστης αναμενόμενης θερμοκρασίας λειτουργίας, δηλαδή των +70°C. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλα δύο θερμοκρασιακά κριτήρια που επεξηγούνται αναλυτικά παρακάτω και βάσει των οποίων επιλέχθηκε το θερμοπλαστικό υλικό για τη παρούσα μελέτη. Αυτά είναι:

- Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης
- Θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης

### **Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης**

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (Glass Transition Temperature), συνήθως αναφερόμενη με τον συμβολισμό  $T_g$ , είναι η θερμοκρασία πάνω από την οποία ένα πολυμερές μετατρέπεται από σκληρό και ψαθυρό ('σαν γυαλί') σε μαλακό και εύπλαστο ('σαν λάστιχο').

Η  $T_g$  εξαρτάται από την χημική δομή ενός πολυμερούς η οποία ορίζεται από την κρυσταλλικότητά του [27]. Μπορεί να είναι άμορφο, κρυσταλλικό ή ημί-κρυσταλλικό.

- Τα άμορφα πολυμερή έχουν μικρότερη  $T_g$  από τα ημί-κρυσταλλικά πολυμερή. Με την αύξηση θερμοκρασίας τείνουν να μαλακώνουν.
- Τα κρυσταλλικά πολυμερή δεν μαλακώνουν με την αύξηση θερμοκρασίας και, ως εκ τούτου, δεν έχουν την ιδιότητα της  $T_g$ . Αντιθέτως, έχουν ένα συγκεκριμένο και απότομο σημείο τήξης το οποίο είναι σε γενικές γραμμές ανώτερο από τα υψηλότερα των άμορφων πλαστικών.
- Τα ημι-κρυσταλλικά πολυμερή παρουσιάζουν ένα συνδυασμό ιδιοτήτων των κρυσταλλικών και των άμορφων και παρουσιάζουν υψηλή  $T_g$ .

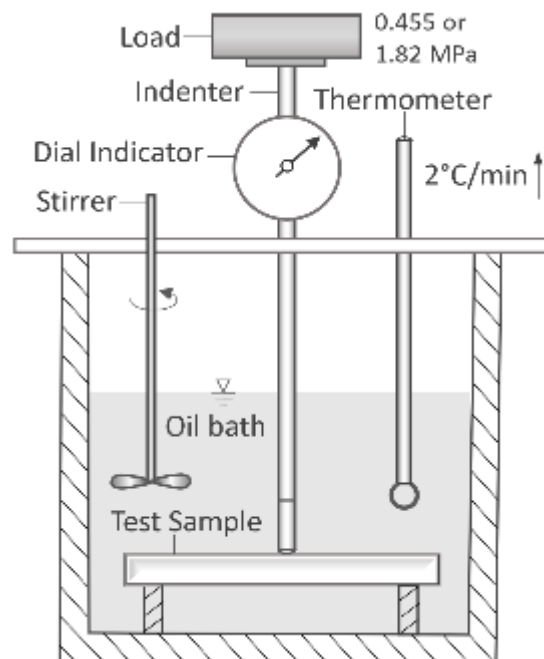
Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, κρίθηκε σκόπιμο για το επιλεγμένο υλικό να διαθέτει θερμοκρασία  $T_g$  υψηλότερη από 70°C, εφόσον αυτή παρέχεται από το φυλλάδιο τεχνικών δεδομένων του παρασκευαστή.

### **Θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης**

Η θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης (Heat Deflection Temperature - HDT) είναι μία ένδειξη του κατά πόσο ένα πολυμερές να μπορεί να παραμείνει δύσκαμπτο υπό σταθερό φορτίο σε υψηλές σχετικά θερμοκρασίες [18]. Η διακρίβωση της HDT γίνεται με τη χρήση της δοκιμής ASTM D 648 (αντίστοιχης με την ISO 75), κατά την οποία ελέγχεται σε ποια θερμοκρασία μία δοκός, κατασκευασμένη από το δοκιμαζόμενο πολυμερές και υπό συγκεκριμένο φορτίο, θα υποστεί κάμψη βέλους 0.25mm. Τα συνήθη φορτία υπό τα οποία δοκιμάζονται οι δοκοί είναι τα εξής:

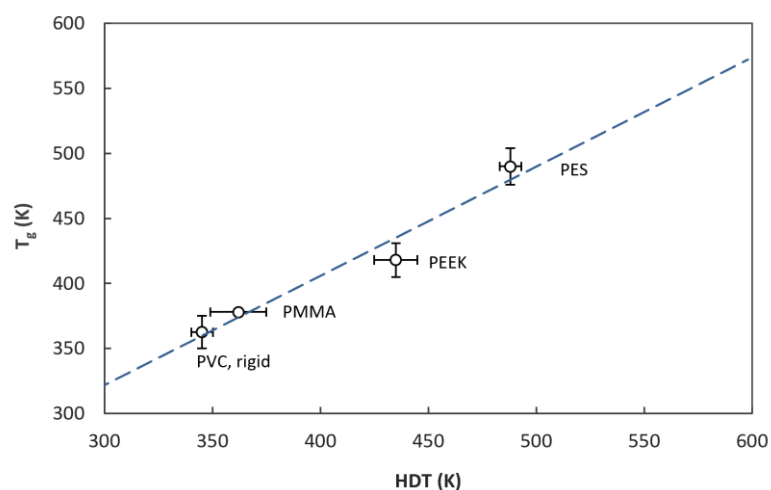
- 0.46MPa (67 psi)
- 1.8MPa (264 psi)

Κατά σπανιότερες περιπτώσεις, πραγματοποιούνται και δοκιμές σε υψηλότερα φορτία όπως 5MPa ή 8MPa [13]. Το Σχήμα 3-6 απεικονίζει τη διάταξη δοκιμής κατά ASTM D 648.



Σχήμα 3-6. Διάταξη δοκιμής HDT κατά ASTM D 648 [18]

Η HDT αποτελεί μία χρήσιμη ένδειξη του θερμοκρασιακού ορίου πάνω από το οποίο το υλικό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κατασκευαστικές εφαρμογές. Παρόλο που σχετίζεται με την  $T_g$  [18], οι δύο αυτές θερμοκρασίες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς διάκριση μεταξύ τους. Οι ενισχύσεις και οι προσθήκες σε ένα πολυμερές μπορούν να αλλάξουν σημαντικά την HDT καθώς καθιστούν το υλικό πιο δύσκαμπτο. Αντιθέτως, η  $T_g$  δεν αλλάζει αισθητά από τα προστιθέμενα αυτά συστατικά καθώς περιγράφει τη μαλάκυνση του πολυμερικού τμήματος του υλικού [18]. Το Σχήμα 3-7 απεικονίζει την συσχέτιση της HDT με την  $T_g$ , η οποία είναι σχεδόν γραμμική.



Σχήμα 3-7. Γράφημα συσχέτισης της HDT με την  $T_g$

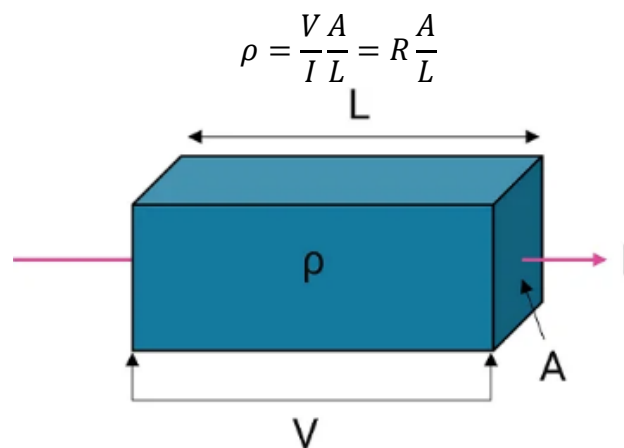
Για κατασκευαστικές εφαρμογές, η HDT θεωρείται πιο αξιόλογο κριτήριο σε θέματα θερμοκρασιακών ορίων εφαρμογών σε σχέση με την  $T_g$  [18].

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, κρίθηκε απαραίτητο η HDT, για την περίπτωση φόρτισης που δίνεται από τον εκάστοτε παρασκευαστή, να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία των  $70^\circ\text{C}$ .

### 3.1.7 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ή αντιστασιμότητα (volume resistivity) ενός υλικού εκφράζει την ικανότητά του να εμποδίζει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος διά μέσω όγκου ενός κυβικού δείγματος αυτού [26]. Οι μονάδες της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά SI είναι  $\Omega\text{m}$  (Ohm επί μέτρο). Συχνά χρησιμοποιείται και η υποδιαίρεση  $\Omega\text{cm}$  ( $10^{-2}\Omega\text{m}$ ), ιδιαίτερος σε φυλλάδια τεχνικών δεδομένων υλικών.

Η σχέση που εκφράζει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση για έναν αγωγό, όπως για τον εικονιζόμενο στο Σχήμα 3-8, είναι η εξής [26]:



Σχήμα 3-8. Δείγμα ηλεκτρικού αγωγού ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης  $\rho$  [26]

όπου:

- $\rho$ : η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υλικού του αγωγού
- $V$ : η ηλεκτρική τάση στα άκρα του αγωγού
- $I$ : το διερχόμενο ρεύμα από τον αγωγό
- $R$ : η (ωμική) αντίσταση του αγωγού
- $A$ : η επιφάνεια της διατομής του αγωγού
- $L$ : το μήκος του αγωγού

Στις αεροδιαστημικές εφαρμογές, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του περιβάλλοντος πλάσματος εν πτήση και των διαστημικών υλικών και ηλεκτρονικών υποσυστημάτων ενδέχεται να προκαλέσουν επιφανειακές ηλεκτροστατικές εκκενώσεις (ElectroStatic Discharges - ESD) [25]. Για το λόγο αυτό, τα διηλεκτρικά υλικά (συνώνυμα των μονωτών [21]) με αντιστασιμότητα πάνω από  $10^{12}\Omega\text{cm}$  πρέπει να αποφεύγονται λόγω της συσσώρευσης ηλεκτρικού φορτίου που μπορεί να προκαλέσει ηλεκτροστατικές εκκενώσεις [25].

### 3.1.8 Επιπλέον απαιτήσεις θερμοπλαστικών σε συνθήκες διαστήματος

#### **Ατομικό οξυγόνο (ΑΤΟΧ)**

Σε υψόμετρα LEO, το οξυγόνο της ατμόσφαιρας υπάρχει κυρίως με τη μορφή του ατομικού οξυγόνου ( $O_1$ ) το οποίο προέρχεται από την φωτοδιάσπαση του μοριακού οξυγόνου [10].

Η επίδραση του ατομικού οξυγόνου στα πολυμερή σε περιβάλλον διαστήματος είναι αρκετά σημαντική, καθώς περιλαμβάνει επιφανειακή διάβρωση, αλλαγή οπτικών, θερμικών και μηχανικών ιδιοτήτων, αλλαγές στη χημική σύσταση και απώλεια μάζας [6], [10].

#### **Υψηλό κενό**

Σε συνθήκες υψηλού κενού (πίεση μικρότερη των  $1.33 \cdot 10^{-9}$  bar), όπως επικρατεί στο εσωτερικό δορυφόρων, τα πολυμερή υλικά εμφανίζουν πτητική συμπεριφορά και έχουν την τάση να υφίστανται εξάχνωση. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται συνήθως ως outgassing. Αποτελέσματα του φαινομένου αυτού είναι η αλλαγή των ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων πολυμερών υλικών, καθώς επίσης και η εναπόθεση των ατμών τους στις γεινιάζουσες επιφάνειες εντός των διαστημικών σκαφών [6], [10].

Με τις δοκιμές του προτύπου ASTM E-595, μπορεί να διαπιστωθεί η outgassing συμπεριφορά ενός πολυμερούς με τη μέτρηση των δύο ακόλουθων παραμέτρων:

- Ολική Απώλεια Μάζας (Total Mass Loss – TML)
- Συλλεγμένο Πτητικό Συμπυκνώσιμο Υλικό (Collected Volatile Condensable Material – CVCM)

Οι αποδεκτές τιμές για τις παραπάνω παραμέτρους ως προδιαγραφές για διαστημικές εφαρμογές είναι [6], [10]:

- TML < 1%
- CVCM < 0.1%

#### **Ακτινοβολίες**

Σε συνθήκες διαστήματος, σημαντικές είναι οι επιδράσεις της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας και της ακτινοβολίας ιονισμού (σωματίδια υψηλών ενεργειών, σωματίδια α και βαρέα ιόντα) που έχουν ως συνέπειες την αλλοίωση των μηχανικών και των θερμό-οπτικών ιδιοτήτων των πολυμερών υλικών [6], [10].

### 3.1.9 Προδιαγραφές για το υλικό του bracket

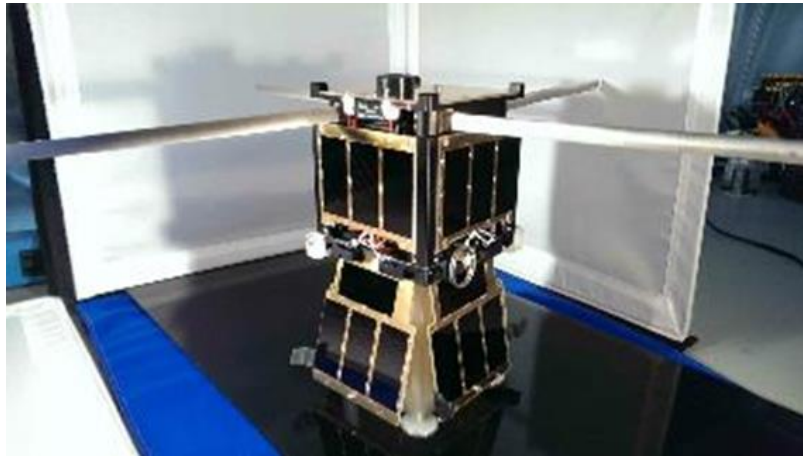
Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, το υλικό του bracket θα πρέπει να είναι της οικογένειας των θερμοπλαστικών υλικών είτε σε αμιγή μορφή είτε ως σύνθετο ενισχυμένο με δευτερεύον (ίνες γυαλιού ή άνθρακα). Θα πρέπει να είναι, ακόμα, συμβατό με προσθετική κατασκευή ισοτροπικών χαρακτηριστικών, όπως η SLS, και να μπορεί να ευρεθεί στο εμπόριο σε κατάλληλη πρωτογενή μορφή (σκόνη). Επιπλέον, θα πρέπει να πληροί τις ειδικές απαιτήσεις για harness standoff brackets της παραγράφου 3.1.7, κυρίως σε ότι αφορά ESD, και τις λοιπές απαιτήσεις διαστημικών εφαρμογών όπως αυτές ετέθησαν στην παράγραφο 3.1.8.



## 3.2 Αρχικό στάδιο σχεδιασμού

### 3.2.1 Επιλογή υλικού

Για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών της επιθυμητής γεωμετρίας, καθοριστικό ρόλο παίζει το επιλεγέν υλικό και τα χαρακτηριστικά του. Κατόπιν των προδιαγραφών που έχουν τεθεί στην Παράγραφο 3.1.9 και κατόπιν σχετικής και εκτενούς έρευνας αγοράς, για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας επελέγη το υψηλών χαρακτηριστικών ενισχυμένο θερμοπλαστικό Windform® XT 2.0 της εταιρείας CRP Technology (τεχνικά χαρακτηριστικά στο παράρτημα Π1) ως υλικό κατάλληλο για τη μελέτη τού bracket στο λογισμικό nTop. Είναι διαθέσιμο ως πρώτη ύλη για ΠΚ σε μηχανές SLS. Η σύστασή του είναι πολυαμίδιο ενισχυμένο με ίνες άνθρακα, γεγονός που το καθιστά σχετικά δύσκαμπτο και με υψηλή μηχανική αντοχή. Έχει εγκριθεί μέσω δοκιμασιών από διαστημικούς φορείς ως κατάλληλο για διαστημικές εφαρμογές [19] καθώς επίσης έχει χρησιμοποιηθεί και σε διαστημικές εφαρμογές, όπως ο Ky-Sat 2 [25] , [16] και ο AlbaPod V2 [22] στις Εικόνες 3-1 και 3-2 αντίστοιχως.



Εικόνα 3-1. Ky-Sat 2 [16]



Εικόνα 3-2. AlbaPod V2

Ο Πίνακας 3-3 συγκεντρώνει ορισμένες από τις ιδιότητες του Windform® XT 2.0 σύμφωνα με το φυλλάδιο τεχνικών δεδομένων της CRP Technology.

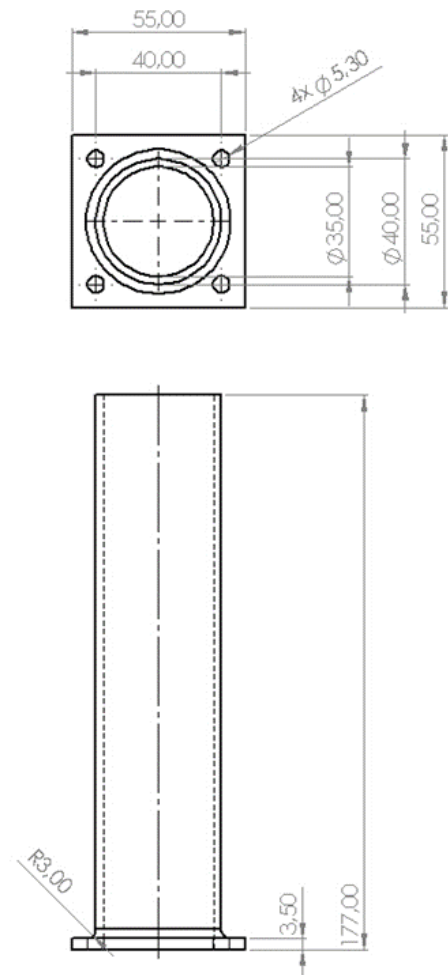
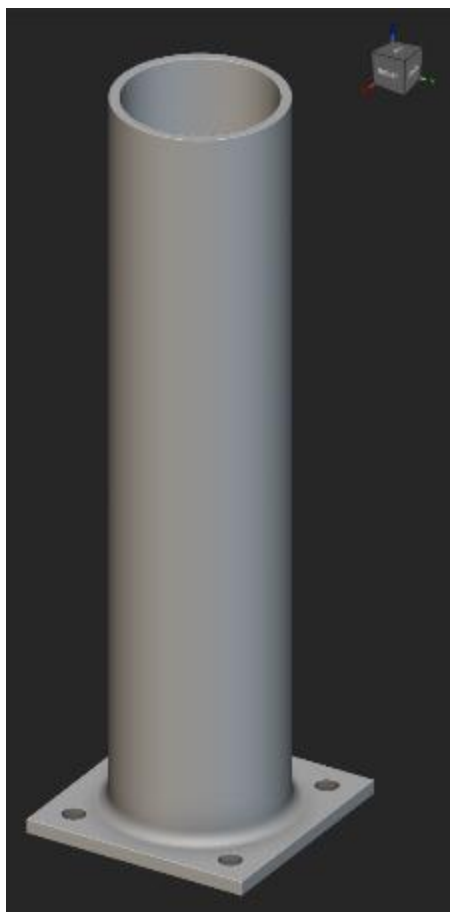
**Πίνακας 3-3. Ιδιότητες Windform® XT 2.0**

Μέτρο ελαστικότητας Young (MPa)	Αντοχή στον εφελκυσμό (MPa)	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Σημείο τήξης (°C)	Θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης (HDT) @ 1.82MPa (°C)	Ειδική ηλεκτρική αντίσταση (Ωcm)
8928.2	83.84	1.097	179.3	173.4	<10 <sup>8</sup>

Επιπλέον, στην παράγραφο Π2, δίνονται οι πιστοποιήσεις των επιτυχών δοκιμών του Windform® XT 2.0 σε outgassing κατά τα πρότυπα δοκιμών της ESA και ASTM E-595-07.

### 3.2.2 Γεωμετρία εκκίνησης

Η Εικόνα 3-3 παρουσιάζει αριστερά την αρχική μορφή (γεωμετρία εκκίνησης) του bracket μέσα από το περιβάλλον του nTop ως Implicit Body και δεξιά το κατασκευαστικό σχέδιο της γεωμετρίας εκκίνησης από αρχείο Drawing του λογισμικού SolidWorks όπου φαίνονται οι διαστάσεις της σε mm.



**Εικόνα 3-3. Implicit Body της γεωμετρίας εκκίνησης μέσα από το λογισμικό nTop και κατασκευαστικό σχέδιο από το SolidWorks**

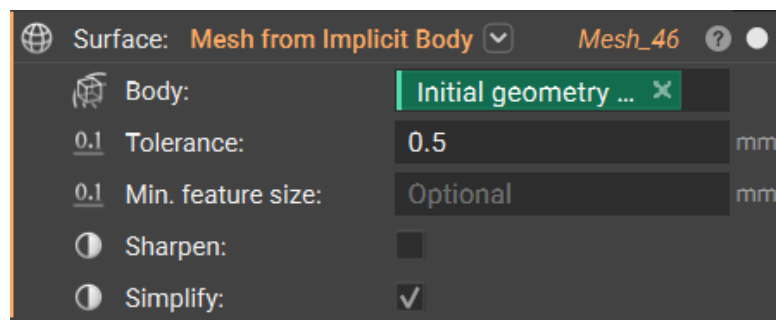
Όπως φαίνεται και στις παραπάνω εικόνες, η επιλεχθείσα γεωμετρία εκκίνησης βρίσκεται εντός του καθορισμένου design space και με μορφή παραπλήσια αυτής των συμβατικά κατασκευαζόμενων brackets με φρεζάρισμα (milling). Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε το μήκος της κοιλότητας συγκράτησης των καλωδίων να είναι ίσο με τη μέγιστη διάσταση του Design Space (177mm). Τα πάχη ελήφθη μέριμνα να είναι στην τάξη που υπαγορεύεται από τις γενικές Αρχές Σχεδιασμού για Κατασκευή/Παραγωγή (DfM) θερμοπλαστικών εξαρτημάτων, με ελάχιστη τιμή τα 2.5mm και για λόγους εξασφάλισης κατασκευασιμότητας με ΠΚ, με το ενδεχόμενο να αυξηθεί εφόσον κρινόταν αναγκαίο από τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Για λόγους απλούστευσης, ο προσανατολισμός του bracket έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε ο άξονας διέλευσης της δέσμης καλωδίων και οι άξονες των οπών κοχλιωτών συνδέσεων να είναι παράλληλοι με τον άξονα Z. Κατά συνέπεια, το επίπεδο της βάσης του bracket είναι κάθετο στον άξονα Z. Ο προσανατολισμός αυτός χρησιμοποιήθηκε και για τη γεωμετρία εκκίνησης και για το τελικό παραγόμενο του σχεδιασμού.

Επιπλέον, οι όροι «πάνω» και «κάτω», που χρησιμοποιούνται παρακάτω για λόγους απλούστευσης, υποδηλώνουν προσανατολισμό προς τα θετικά ή τα αρνητικά του άξονα Z αντιστοίχως. Η κάτω επιφάνεια της βάσης βρίσκεται στα 0mm κατά άξονα Z και ο άξονας συμμετρίας της κυλινδρικής κοιλότητας διέρχεται από το σημείο: [0mm, 0mm, 0mm].

### 3.2.3 Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

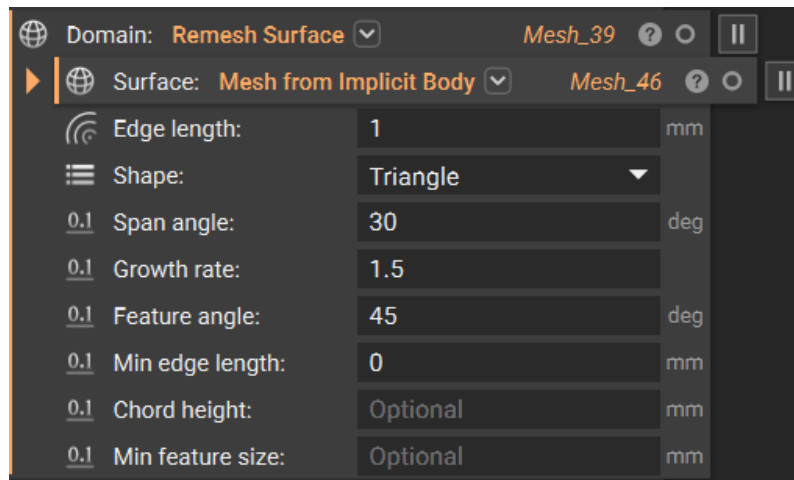
Για τον καθορισμό των συνριακών συνθηκών για τις δοκιμαστικές προσομοιώσεις της γεωμετρίας εκκίνησης, απαραίτητη προϋπόθεση ήταν η ανάλυσή της σε ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Για το σκοπό αυτό, αρχικά χρησιμοποιήθηκε το Mesh from Implicit Body block το οποίο παρουσιάζει η Εικόνα 3-4, για την παραγωγή ενός επιφανειακού πλέγματος.



Εικόνα 3-4. Mesh from Implicit Body στη γεωμετρία εκκίνησης

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, για την γεωμετρία εκκίνησης, καθορίστηκαν μόνο η παράμετρος **Tolerance** (Ανοχή) και η λειτουργία **Simplify**. Το Tolerance καθορίζει την μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση της γεωμετρίας του πλέγματος επιφανειακών στοιχείων από το Implicit Body και ορίστηκε στο 0.5mm για λόγους συμβιβασμού ακρίβειας αποτελεσμάτων και διαχειρισιμότητας υπολογιστικού όγκου. Η λειτουργία Simplify έχει σκοπό την ελαχιστοποίηση του αριθμού των τριγωνικών χωρίς να παραβιάζει την απαίτηση του Tolerance.

Εν συνεχεία, για την βελτίωση του επιφανειακού πλέγματος από πλευράς ομοιογένειας, απλότητας και πιθανών ελαττωμάτων, το παραπάνω πλέγμα εισήχθη ως είσοδος στο ακόλουθο Remesh Surface block, το οποίο παρουσιάζει η Εικόνα 3-5.

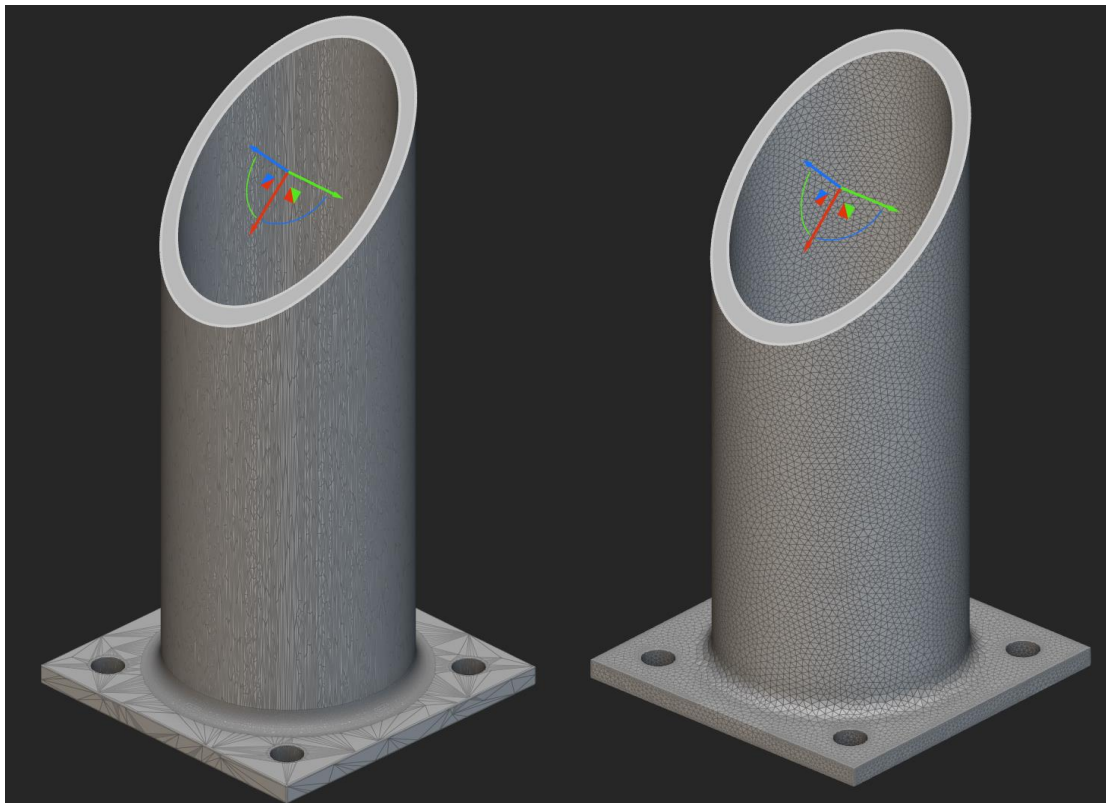


**Εικόνα 3-5. Remesh Surface στο επιφανειακό πλέγμα της γεωμετρίας εκκίνησης**

Από τις παραμέτρους που μπορούν να μεταβληθούν στο συγκεκριμένο block, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, καθορίστηκε το **Edge Length** (Μήκος Ακμής), το σχήμα των επιφανειακών στοιχείων και το **Growth Rate**.

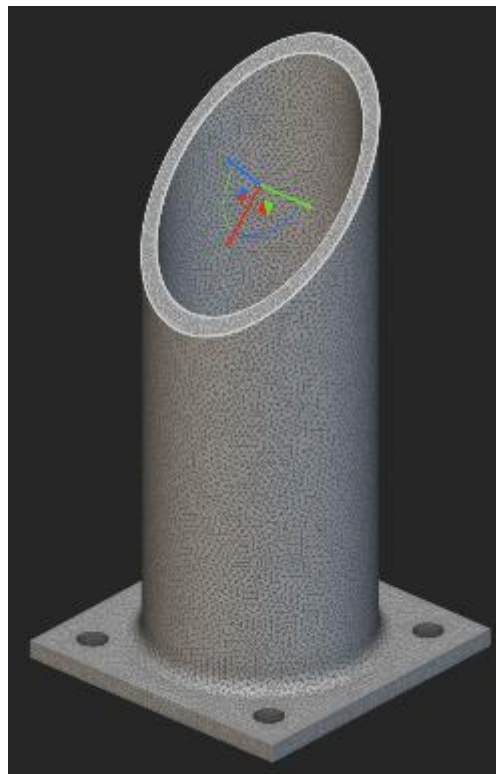
Το Edge Length είναι το μέσο επιθυμητό μήκος ακμής των επιφανειακών στοιχείων το οποίο καθορίστηκε στο 1mm. Το Growth rate είναι ο λόγος κατά τον οποίο τα γειτονικά στοιχεία μπορούν να αυξηθούν κατά μέγεθος ο οποίος τέθηκε στο 1.5.

Η Εικόνα 3-6 παρουσιάζει τη σύγκριση μεταξύ του επιφανειακού πλέγματος της γεωμετρίας εκκίνησης από Mesh from Implicit Body (αριστερά) και της επεξεργασίας αυτού με Remesh Surface (δεξιά) σε λοξή τομή.



**Εικόνα 3-6. Σύγκριση αποτελεσμάτων Mesh from Implicit Body και Remesh Surface**

Ακολούθως, το Remesh Surface block εισήχθη ως είσοδος στο Volume mesh block για τη παραγωγή ενός στερεού, χωρικού πλέγματος. Όπως και με την περίπτωση του Remesh Surface, διατηρήθηκαν το Edge Length σε 1mm και το Growth Rate σε 1.5. Το Volume Mesh της γεωμετρίας εκκίνησης εισέρχεται ως είσοδος στο **FE Volume Mesh** block από το οποίο παράγεται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται στις αναλύσεις. Η Εικόνα 3-7 δείχνει το Volume Mesh της γεωμετρίας εκκίνησης σε τομή, το οποίο ταυτίζεται και με το FE Volume Mesh.

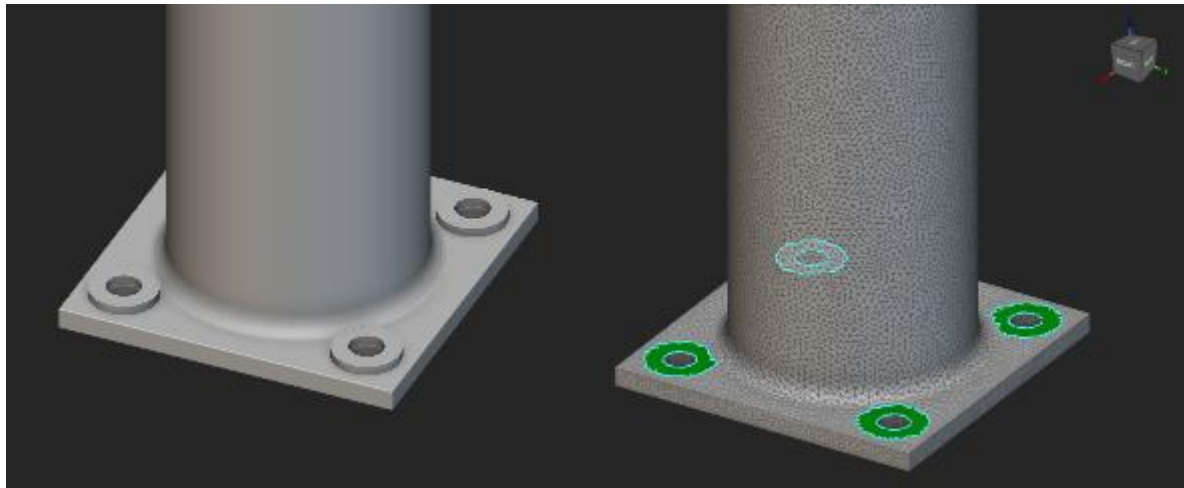


Εικόνα 3-7. Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων όγκου της γεωμετρίας εκκίνησης

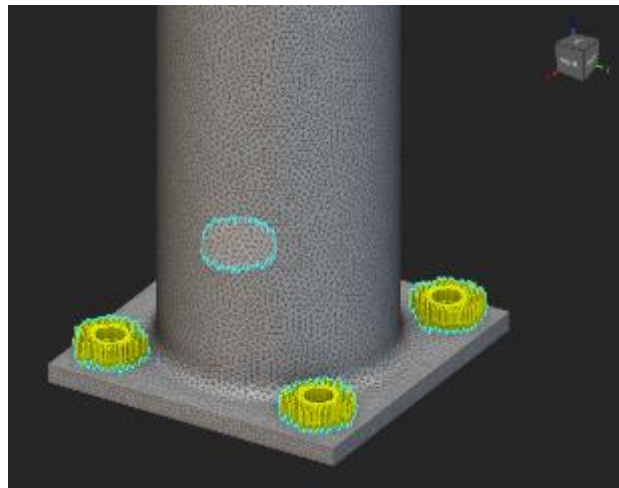
### 3.2.4 Σύνορα και συνοριακές συνθήκες

#### ***Επαφή παράκυκλων και δυνάμεις προφόρτισης στο bracket***

Η ροδέλα ISO 10673-5.5 εισήχθη στη ροή εργασίας ως CAD body, μετατράπηκε σε Implicit Body και τοποθετήθηκε αξονοσυμμετρικά με κάθε οπή κοχλιωτής σύνδεσης με επαφή με την επάνω επιφάνεια της βάσης του bracket. Με τη βοήθεια του FE Boundary by Body block, δημιουργήθηκαν τα σύνορα επαφής κάθε ροδέλας με τη βάση του bracket για την εφαρμογή των δυνάμεων προφόρτισης από τη σύσφιξη των κοχλιωτών συνδέσεων ως το διάνυσμα: [0, 0, -200] N. Η Εικόνα 3-8 παρουσιάζει αριστερά τα Implicit Bodies των παράκυκλων και της γεωμετρίας εκκίνησης στο nTop και δεξιά τα σύνορα που δημιουργήθηκαν επί του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων της από την επαφή τους. Η Εικόνα 3-9 παρουσιάζει την εφαρμογή των δυνάμεων προφόρτισης επί της γεωμετρίας εκκίνησης.



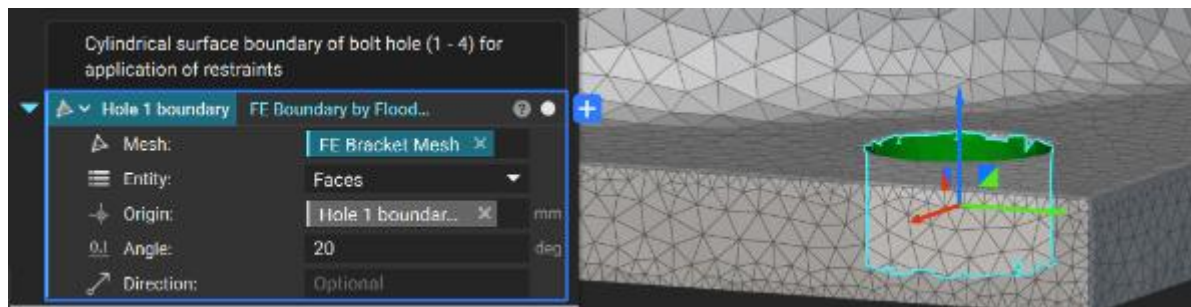
Εικόνα 3-8. Παράκυκλοι ISO 10673-5.5 σε επαφή με το bracket και σύνορα της επαφής τους επί του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 3-9. Δυνάμεις προφόρτισης μέσω των παράκυκλων στη βάση του bracket

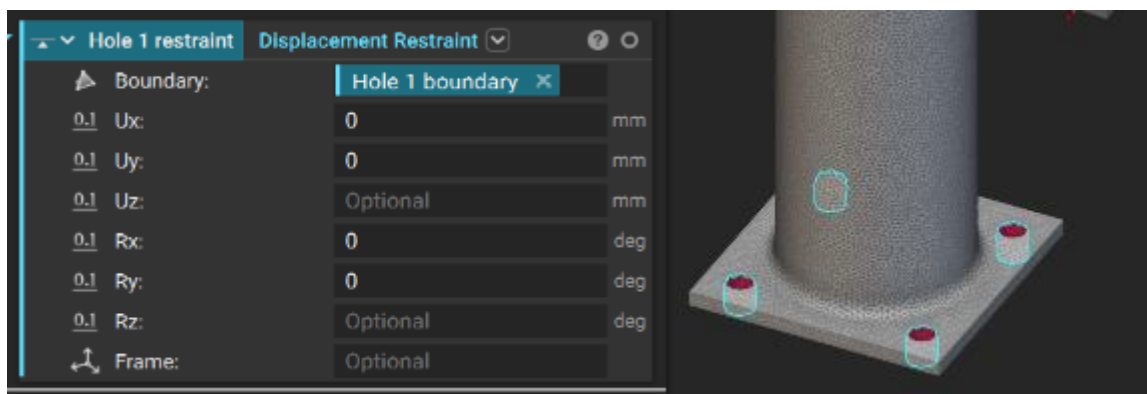
### ***Restraints από τους κοχλίες και την επιφάνεια πρόσδεσης***

Με τη βοήθεια του **FE Boundary by Flood Fill** block, όπως δείχνει η Εικόνα 3-10, δημιουργήθηκαν τα σύνορα των παράπλευρων επιφανειών των οπών κοχλιωτών συνδέσεων του bracket με την τοποθέτηση ενός συστήματος συντεταγμένων εντός αυτών.



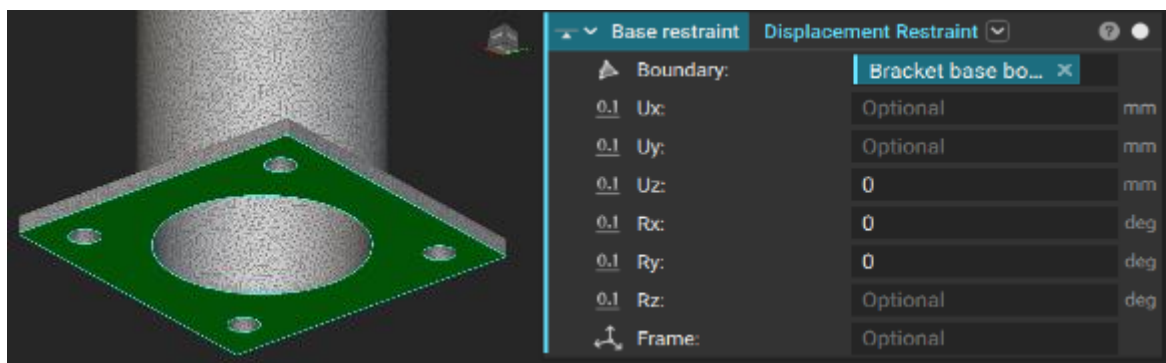
Εικόνα 3-10. Εφαρμογή του **FE Boundary by Flood Fill** block στις οπές των κοχλιωτών συνδέσεων (μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων)

Καθώς οι οπές αυτές δεν διαθέτουν σπείρωμα αλλά προορίζονται για την επαφή με το λείο τμήμα του κορμού των επιλεγμένων κοχλιών, η μοντελοποίηση των restraints επί των παράπλευρων επιφανειών έγινε με τη μορφή αρθρωτών συνδέσεων (pin joints). Συνεπώς, με το **Displacement Restraint** block, οι βαθμοί ελευθερίας (B.E.) που δεσμεύτηκαν επί αυτών των επιφανειών ήταν η μεταφορά κατά τους άξονες X και Y, καθώς και η περιστροφή περί αυτών. Η Εικόνα 3-11 παρουσιάζει αριστερά ένα παράδειγμα των ρυθμισμένων παραμέτρων για τη δέσμευση των εν λόγω B.E. σε μία οπή εντός του Displacement Restraint block και δεξιά την εφαρμογή τους επί των οπών κοχλιωτών συνδέσεων του bracket. Γίνεται αντιληπτό ότι, με την εφαρμογή και των τεσσάρων κοχλιωτών συνδέσεων, δεσμεύεται και η περιστροφή του bracket περί του άξονα Z.

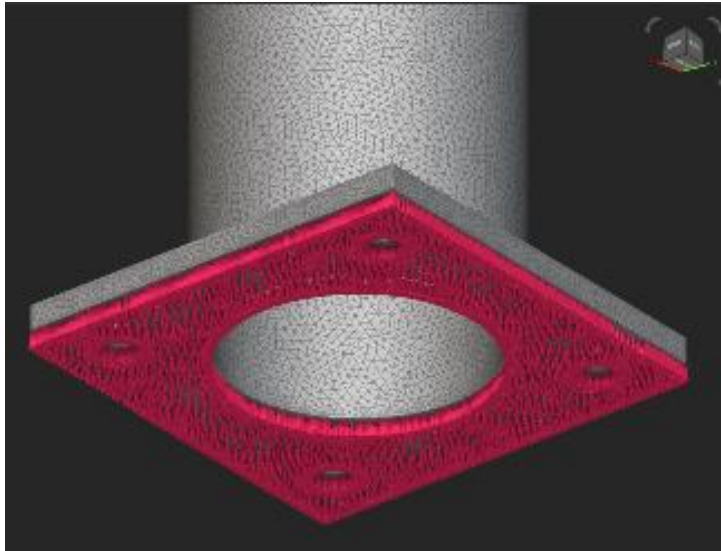


Εικόνα 3-11. Παράδειγμα δέσμευσης B.E. στο Displacement Restraint block και restraints επί των οπών κοχλιωτών συνδέσεων του bracket

Σαφώς, υπάρχει και η δέσμευση της μεταφοράς επί του άξονα Z, η οποία προκύπτει από τη σύσφιξη της βάσης του bracket μεταξύ της επιφάνειας πρόσδεσης και των κεφαλών των κοχλιών μέσω των παράκυκλων. Όπως δείχνει και η Εικόνα 3-12, η δέσμευση αυτή πραγματοποιήθηκε επί του συνόρου της κάτω επιφάνειας της βάσης του bracket (εικονιζόμενο αριστερά) σε συνδυασμό με την περιστροφή περί των αξόνων X και Y, όπως φαίνεται και μέσα από το Displacement Restraint block δεξιά. Το σύνορο δημιουργήθηκε με FE Boundary by Flood Fill block.



Εικόνα 3-12. Σύνορο της κάτω επιφάνειας της βάσης του bracket και αντίστοιχοι δεσμευμένοι B.E. από το Displacement Restraint block



Εικόνα 3-13. Restraints επί της κάτω επιφάνειας της βάσης του bracket

### Φορτίσεις κατά την εκτόξευση

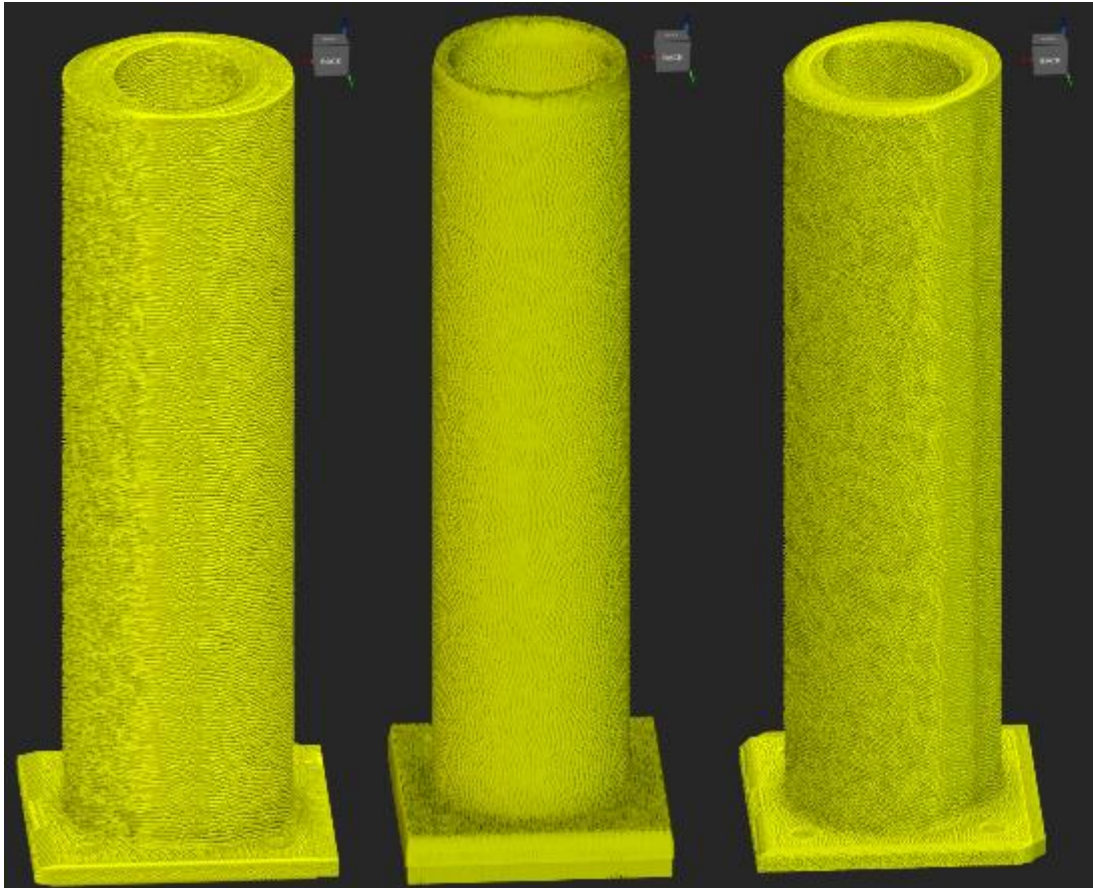
Η μοντελοποίηση των ισοδύναμων quasi-static loads, βάσει των δυνατοτήτων του nTop με τη χρήση του **Acceleration Load** block. Για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.1.3, το μέγεθος της επιτάχυνσης επιλέχθηκε ίσο με  $20g_{e.acc.} = 196.1m/s^2$

Θα ήταν αναμενόμενο, για την ικανοποίηση της προδιαγραφής της αντοχής για κάθε περίπτωση κατεύθυνσης των quasi-static loads, να χρησιμοποιηθούν τρία διαφορετικά σενάρια με κατεύθυνση κατά τους άξονες X, Y και Z. Ωστόσο, λόγω της συμμετρίας της γεωμετρίας εκκίνησης, θεωρήθηκε περιττή η εξέταση της φόρτισης αυτής και προς τις 2 κατευθύνσεις κάθε άξονα και εξετάστηκαν οι περιπτώσεις μόνο κατά τους θετικούς ημιάξονες. Επιπροσθέτως, ένεκα της συμμετρίας αυτής, δεν εξετάστηκε η περίπτωση της κατεύθυνσης των quasi-static loads κατά τον άξονα Y. Αντ' αυτού για λόγους πληρότητας, στις περιπτώσεις της φόρτισης προστέθηκε η κατεύθυνση κατά άξονα παράλληλο με το επίπεδο XY αλλά υπό περιστροφή από τον θετικό ημιάξονα X κατά 45 μοίρες περί του Z ανθρωπολογικά. Επομένως, οι περιπτώσεις κατευθύνσεων των είναι οι εξής τρεις:

- Κατά θετικά του άξονα X (συμβολιζόμενη εφεξής ως X+):  
Διάνυσμα επιτάχυνσης:  $a_{x+} = [196.1m/s^2, 0m/s^2, 0m/s^2]$
- Κατά τα θετικά του άξονα Z (συμβολιζόμενη εφεξής ως Z+)  
Διάνυσμα επιτάχυνσης:  $a_{z+} = [0m/s^2, 0m/s^2, 196.1m/s^2]$
- Κατά άξονα παράλληλο στο επίπεδο XY στραμμένο κατά 45 Μοίρες από τον X+ περί του Z (συμβολιζόμενη εφεξής ως XY+45)  
Διάνυσμα επιτάχυνσης:  $a_{xy+45} = [20g_{e.acc.}\cos45^\circ, 20g_{e.acc.}\sin45^\circ, 0] = [138.7m/s^2, 138.7m/s^2, 0m/s^2]$

Η Εικόνα 3-14 συγκεντρώνει τις εφαρμογές κάθε περίπτωσης ισοδύναμου quasi-static load στο bracket.



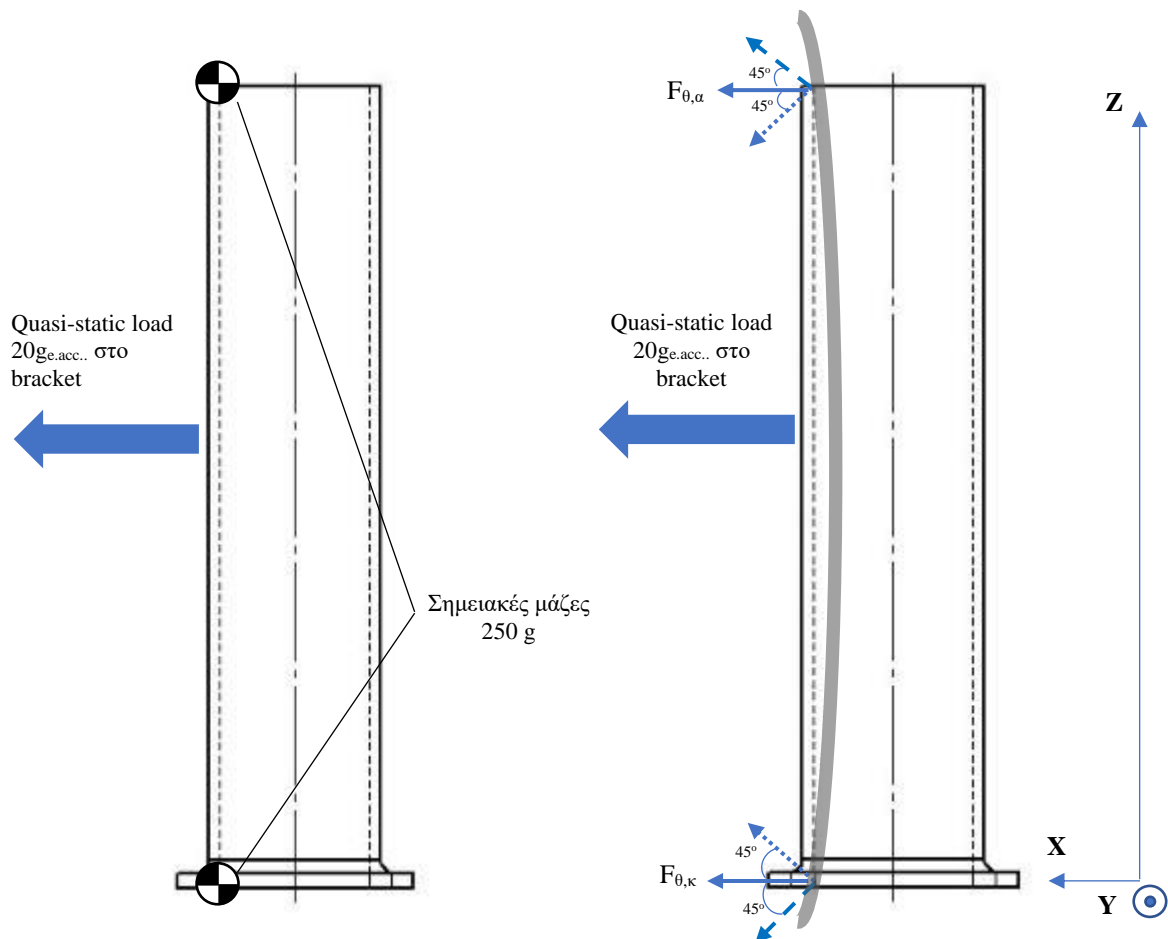


Εικόνα 3-14. Περιπτώσεις ισοδύναμων δυνάμεων επιτάχυνσεων ως quasi-static loads επί του bracket στο περιβάλλον του nTop κατά τις 3 διαφορετικές περιπτώσεις. Αριστερά: X+. Κέντρο: Z+. Δεξιά: XY+45

### **Δυνάμεις αντίδρασης καλωδίων**

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, είναι απαραίτητη η προσομοίωση των δυνάμεων από τα καλώδια ως αντίδραση στη δύναμη συγκράτησης από το bracket. Για λόγους απλούστευσης στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το αρχικό σκεπτικό ήταν η μοντελοποίηση τους ως 2 σημειακές μάζες (point masses). Καθεμία εκ των σημειακών μαζών θα ήταν αγκιστρωμένη στο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του bracket στο ανώτατο και κατώτατο σημείο της εσωτερικής επιφάνειας της κοιλότητας συγκράτησης επί κόμβων προς στην ίδια κατεύθυνση με το quasi-static load του bracket. Η μάζα καθεμίας θα ήταν ίση με το μισό της συνολικής θεωρούμενης μάζας της δέσμης των καλωδίων, δηλαδή 250g.

Ωστόσο, το λογισμικό nTop δεν παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας σημειακών μαζών για τον καθορισμό συνοριακών συνθηκών σε μία ανάλυση. Επομένως, ως εναλλακτική χρησιμοποιήθηκε μία συντηρητικότερη θεώρηση των φορτίσεων αυτών η οποία ήταν η απευθείας εφαρμογή τους ως ισοδύναμες σημειακές δυνάμεις (point forces) υπολογισμένες για την μάζα της δέσμης καλωδίων και την επιτάχυνση των  $20g_{e,acc}$ . Το Σχήμα 3-9. απεικονίζει τις ανωτέρω 2 περιπτώσεις μοντελοποίησης των φορτίσεων αυτών.

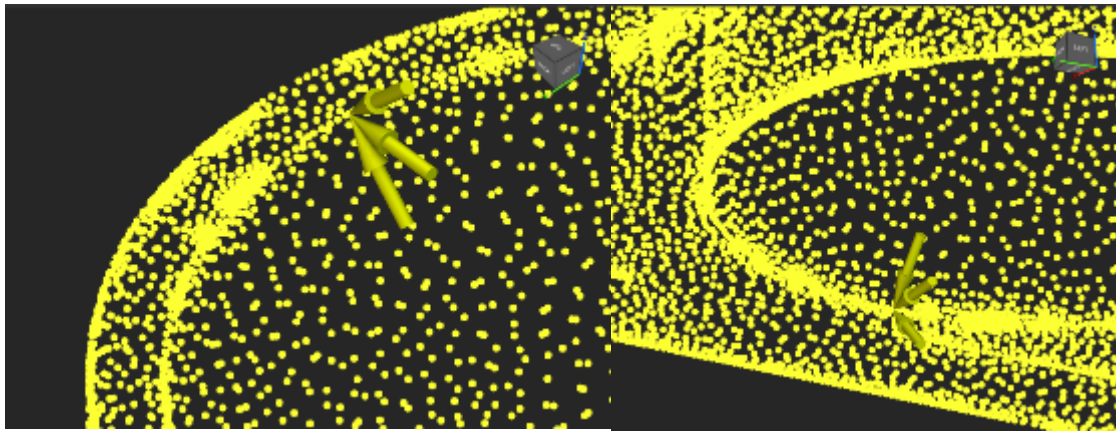


**Σχήμα 3-9.** Αριστερά: Μοντελοποίηση της δέσμης καλωδίων ως 2 σημειακές μάζες για το σκοπό των δυνάμεων εξ επαφής της με το bracket. Δεξιά: Δυνάμεις καλωδίων άμεσα εφαρμοσμένες στο bracket όπως μοντελοποιήθηκαν στο nTop

Εφόσον η προσομοίωση των εν λόγω φορτίσεων δεν ήταν δυνατή να γίνει με μεθόδους μοντελοποίησης των καλωδίων ιδανικές/επιθυμητές για την περίπτωση στο πλαίσιο της εργασίας, θεωρήθηκε επιθυμητή για λόγους πληρότητας και η κάλυψη ορισμένων περιπτώσεων όπου οι δυνάμεις δεν είναι παράλληλες με το επίπεδο XY αλλά υπό γωνίες αντίθετες μεταξύ άνω και κάτω σημείου. Η θεώρηση αυτή έγινε από τη σκοπιά ότι τέτοιες δυνάμεις θα μπορούσαν να είναι αποτέλεσμα ενός πολύ μικρού λυγισμού της δέσμης καλωδίων εντός της κοιλότητας συγκράτησης σε σχέση με το bracket, όπως δείχνει το δεξιό τμήμα του Σχήματος 3-9, κατά την επιβολή τους. Επομένως, για κάθε περίπτωση κατεύθυνσης του ισοδύναμου quasi-static load στο σύστημα bracket – καλωδίων, εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις προσανατολισμού της δύναμης  $F_{\theta,\alpha}$  και  $F_{\theta,\kappa}$  για το άνω και το κάτω σημείο εφαρμογής στο bracket αντιστοίχως. Έστω  $\theta_\alpha$  και  $\theta_\kappa$  οι γωνίες περιστροφής των δυνάμεων σε σχέση με την προβολή τους επίπεδο XY, αντιστοίχως για το άνω και κάτω σημείο εφαρμογής επί του bracket. Τότε, σε κάθε περίπτωση quasi-static load στο σύστημα bracket - καλωδίων, οι γωνίες  $\theta_\alpha$  και  $\theta_\kappa$  καθορίστηκαν ως εξής:

- $[\theta_\alpha, \theta_\kappa] = [0^\circ, 0^\circ]$
- $[\theta_\alpha, \theta_\kappa] = [-45^\circ, 45^\circ]$
- $[\theta_\alpha, \theta_\kappa] = [45^\circ, -45^\circ]$

Οι θετικές και αρνητικές τιμές των γωνιών  $\theta_\alpha$ ,  $\theta_\kappa$  έχουν ληφθεί αντιστοίχως για θετική και αρνητική συνιστώσα κατά τον άξονα Z των δυνάμεων  $F_{\theta,\alpha}$  και  $F_{\theta,\kappa}$ . Η Εικόνα 3-15 παρουσιάζει τις διαφοροποιήσεις μεταξύ αυτών περιπτώσεων των δυνάμεων μέσα από το περιβάλλον του nTop.



**Εικόνα 3-15. Εφαρμογή των σημειακών δυνάμεων επί του συνόλου των κόμβων του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων και για τις 3 περιπτώσεις ζευγών  $\theta_\alpha$ ,  $\theta_\kappa$  με το quasi-static load στο σύστημα κατά τον ημιάξονα X+. Αριστερά: Άνω σημείο εφαρμογής. Δεξιά: Κάτω σημείο εφαρμογής**

Το μέτρο των δυνάμεων από τα καλώδια στο άνω και κάτω σημείο υπολογίστηκε ως εξής:

$$F_{\theta,\alpha} = F_{\theta,\kappa} = 20 * 250g * 9.807m/s^2 = 49.03N$$

Ο Πίνακας 3-4 παρουσιάζει τις συντεταγμένες των άνω και κάτω σημείων εφαρμογής επί του bracket.

**Πίνακας 3-4. Σημεία εφαρμογής quasi-static loads καλωδίων**

Κατεύθυνση quasi-static loads στο σύστημα	Συντεταγμένη κατά άξονα X άνω και κάτω σημείων εφαρμογής (mm)	Συντεταγμένη κατά άξονα Y άνω και κάτω σημείων εφαρμογής (mm)	Συντεταγμένη κατά άξονα Z άνω σημείου εφαρμογής (mm)	Συντεταγμένη κατά άξονα Z κάτω σημείου εφαρμογής (mm)
X+	17.5	0	177	0
XY+45	12.37	12.37	177	0

### 3.2.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων στατικών αναλύσεων

Με τον καθορισμό των παραπάνω συνοριακών συνθηκών στο nTop και την εισαγωγή του Windform® XT 2.0 ως **Custom Block** στο block του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (FE Model), τα παραπάνω στοιχεία συνδυάστηκαν ως είσοδοι σε στατικές αναλύσεις για την διαπίστωση της ικανοποίησης των προδιαγραφών της αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises και της μέγιστης μετατόπισης των κόμβων λόγω παραμόρφωσης. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας μόνο τα restraints που προαναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο, πραγματοποιήθηκε και **Modal Analysis** για την διαπίστωση ικανοποίησης της προδιαγραφής της 1<sup>ης</sup> ιδιοσυχνότητας.

Ο Πίνακας 3-5 συγκεντρώνει τα παραπάνω αποτελέσματα για κάθε περίπτωση κατεύθυνσης ισοδύναμου quasi-static load στο σύστημα bracket – καλωδίων και ζεύγους γωνιών  $\theta_\alpha$ ,  $\theta_\kappa$ .

**Πίνακας 3-5. Αποτελέσματα Static και Modal Analysis**

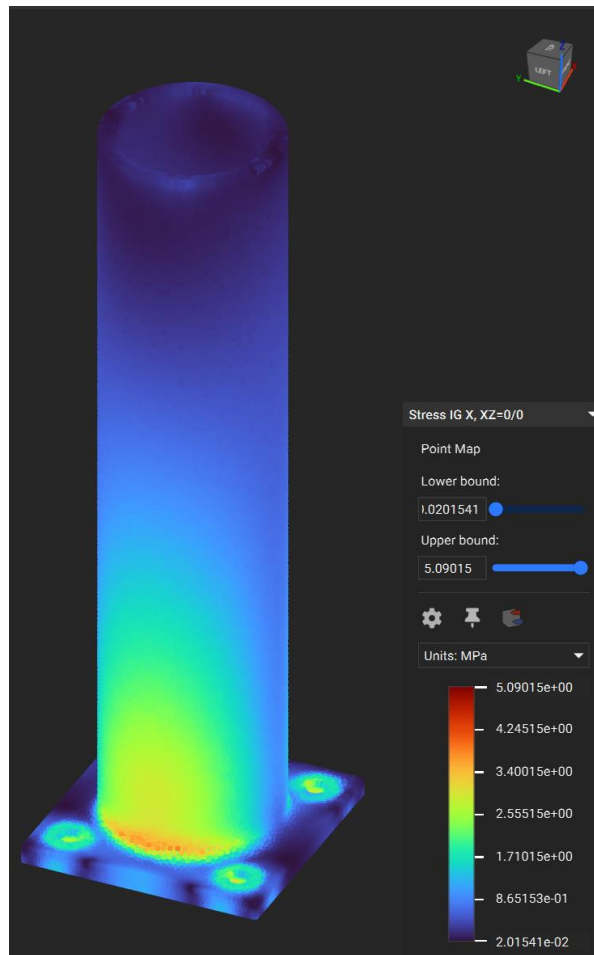
Κατεύθυνση επιτάχυνσης	Ζεύγος γωνιών $\theta_\alpha, \theta_\kappa$	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Μέγιστη τάση Von Mises (MPa)	Συντελεστής ασφαλείας
X+	0°, 0°	0.185	5.04	16.63
	-45°, 45°	0.136	4.66	17.99
	45°, -45°	0.136	4.66	17.99
XY+45	0°, 0°	0.185	5.16	16.25
	-45°, 45°	0.136	4.81	17.43
	45°, -45°	0.136	4.81	17.43
Z+	-	$9.53 \cdot 10^{-4}$	4.53	18.51
1 <sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα (Hz)	648.16			

Από τον Πίνακα 3-5, φαίνεται ότι, σε κάθε περίπτωση συνοριακών συνθηκών, η μέγιστη μετατόπιση είναι μικρότερη από 1mm και, από τις μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις κατά Von Mises, οι προκύπτοντες συντελεστές ασφαλείας είναι πολύ μεγαλύτεροι του 2.5. Ακόμη, η 1<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα του bracket είναι σημαντικά μεγαλύτερη από 100Hz. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι η γεωμετρία εκκίνησης πληροί τις απαιτήσεις των προδιαγραφών που έχουν τεθεί και αποτελεί μια καλή βάση επανασχεδιασμού για την παραγωγή μιας νέας καινούργιας γεωμετρίας με μεθόδους ελάφρυνσης (lightweighting).

### 3.3 Κύριο στάδιο σχεδιασμού με τη μέθοδο Data-Driven Design

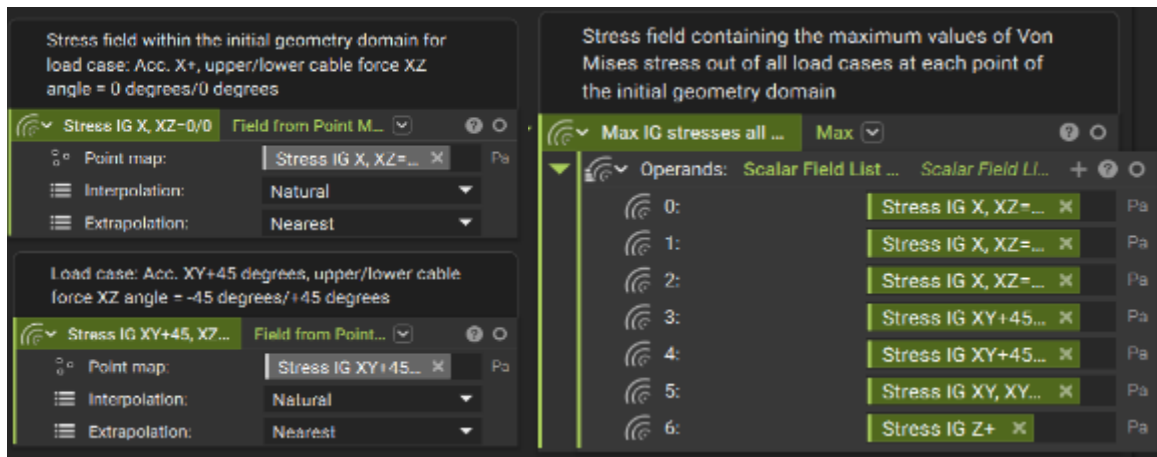
#### 3.3.1 Εξαγωγή αποτελεσμάτων ανάλυσης γεωμετρίας εκκίνησης

Για κάθε περίπτωση στατικής ανάλυσης, δημιουργήθηκαν χάρτες σημείων των τάσεων κατά Von Mises επί του bracket. Η Εικόνα 3-17 παρουσιάζει ως παράδειγμα τον χάρτη σημείων των τάσεων Von Mises για την περίπτωση quasi-static load κατά X+ στο σύστημα για ζεύγος γωνιών  $[\theta_\alpha, \theta_\kappa] = [0^\circ, 0^\circ]$ .



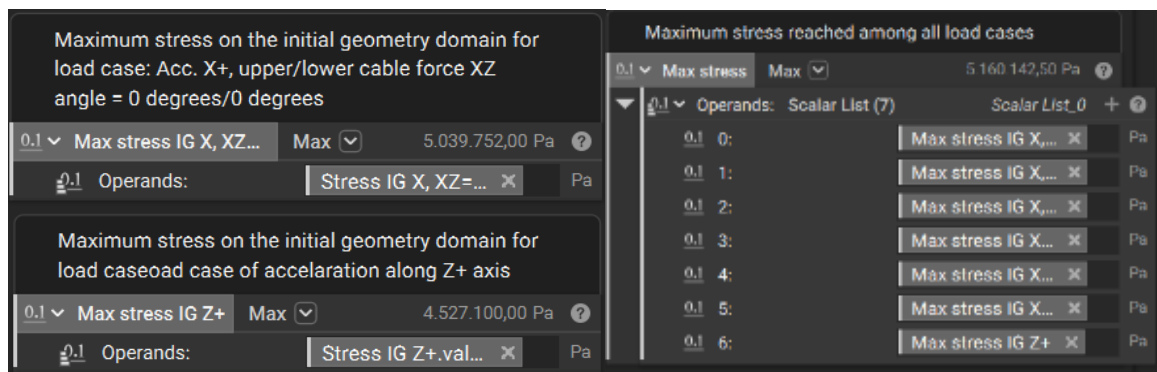
Εικόνα 3-16. Χάρτης σημείων τάσεων Von Mises επί του bracket

Οι χάρτες σημείων χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι σε **Field from Point Map** blocks για τη δημιουργία αντίστοιχων πεδίων τάσεων Von Mises, ένα για κάθε περίπτωση συννοριακών συνθηκών. Τα πεδία των τάσεων εισήχθησαν σε ένα **Max** block (τύπου Scalar Field List) το οποίο συγκρίνει τις τιμές των τάσεων μεταξύ των πεδίων σε κάθε σημείο του bracket και δίνει ως έξοδο ένα πεδίο τάσεων με τη μέγιστη τιμή σε κάθε σημείο από κάθε περίπτωση.



**Εικόνα 3-17. Αριστερά: Παραδείγματα πεδίων τάσεων Von Mises από χάρτες σημείων τους. Δεξιά: Max block για τις μέγιστες τιμές των τάσεων από κάθε περίπτωση σε κάθε σημείο**

Επίσης, εφόσον τα παραπάνω πεδία τάσεων δημιουργήθηκαν από χάρτες σημείων οι οποίοι αποτελούν μία μορφή λίστας συντεταγμένων και τάσεων, εξήχθησαν με αντίστοιχα Max blocks (τύπου Scalar List) οι μέγιστες τιμές των τάσεων κάθε χάρτη σημείων. Με τη σειρά τους, οι μέγιστες αυτές τιμές εισήχθησαν σε ένα τελευταίο Max block το οποίο δίνει ως έξοδο τη μέγιστη εκ των μεγίστων αυτών τιμών των τάσεων.



**Εικόνα 3-18. Αριστερά: Παραδείγματα μεγίστων τάσεων Von Mises διαφορετικών περιπτώσεων φόρτισης. Δεξιά: Max block για τη μέγιστη εκ των μεγίστων τάσεων όλων των περιπτώσεων**

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η παραπάνω διαδικασία έχει σημασία για τον γεωμετρικό έλεγχο των lattice structures που χρησιμοποιούνται παρακάτω στη διαδικασία του επανασχεδιασμού.

### 3.3.2 Δημιουργία επανασχεδιασμένης γεωμετρίας

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η διαδικασία επανασχεδιασμού του bracket πραγματοποιήθηκε ως επαναληπτική διαδικασία (iterative process). Τα βήματα της διαδικασίας είναι τα εξής:

- i) Δημιουργία lattice structure ως συνάρτηση των ανωτέρω πεδίων τάσεων Von Mises από την ανάλυση της γεωμετρίας εκκίνησης και επιπλέον δοσμένων παραμέτρων

- ii) Ένωση του lattice structure με επιπλέον συμπληρωματικές γεωμετρίες και παραμετροποίησή τους κατά το δοκούν για παραγωγή του επανασχεδιασμένου bracket
- iii) Αξιολόγηση του επανασχεδιασμένου bracket στις ίδιες συννοριακές συνθήκες με τη γεωμετρία εκκίνησης
- iv) Αν το επανασχεδιασμένο bracket πληροί τις προδιαγραφές τις μέγιστης μετατόπισης και μέγιστης τάσης Von Mises, επιστροφή στο βήμα (i) και επανάληψη της διαδικασίας με περαιτέρω παραμετροποίηση της γεωμετρίας προς ελάφρυνση · ειδάλλως, επιστροφή στη δομή της προηγούμενης επιτυχούς επανάληψης και νέα επανάληψη της διαδικασίας με ηπιότερη απόπειρα ελάφρυνσης

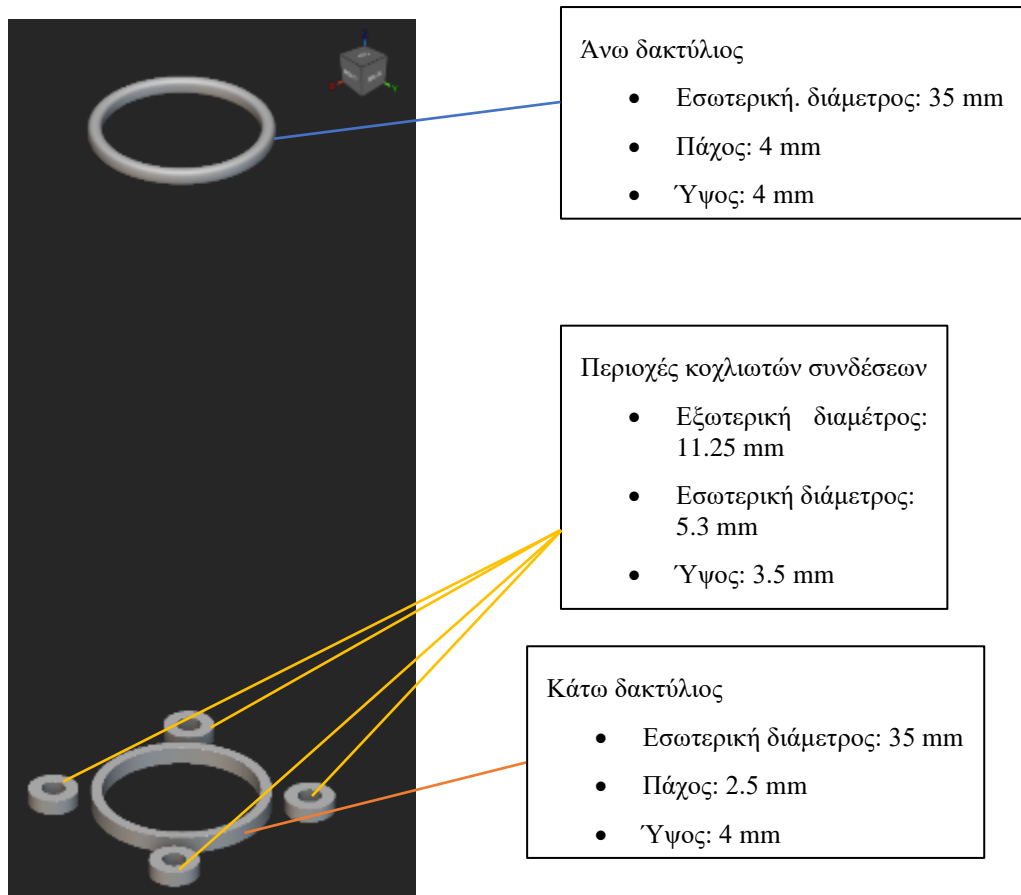
### **Συμπληρωματικές γεωμετρίες**

Οι συμπληρωματικές γεωμετρίες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι εξής:

- 1) Άνω και κάτω δακτύλιοι, τοποθετημένοι κατάλληλα ώστε το ύψος του bracket που ορίζουν να μην ξεπερνάει το ύψος του Design Space των 177mm.
- 2) Τέσσερις περιοχές της βάσης περί των οπών κοχλιωτών συνδέσεων για την συγκράτηση του επανασχεδιασμένου bracket με πλήρη επαφή με τις ροδέλες.

Από τις συμπληρωματικές γεωμετρίες που προαναφέρθηκαν, οι διαστάσεις τους διατηρήθηκαν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του επανασχεδιασμού. Εξαίρεση σε αυτό αποτελεί το πάχος τοιχώματος του άνω δακτυλίου το οποίο αυξήθηκε σε σχέση με το πάχος της υπόλοιπης κοιλότητας συγκράτησης για λόγους περιορισμού των αναπτυσσόμενων τάσεων που παρατηρήθηκαν επί αυτού κατόπιν των προσομοιώσεων.

Η Εικόνα 3-20 δείχνει τις διαστάσεις των συμπληρωματικών γεωμετριών όπως αυτές προέκυψαν στην τελική μορφή του επανασχεδιασμένου bracket. Όπως φαίνεται, οι εσωτερικές διαμέτροι των άνω και κάτω δακτυλίων διατηρήθηκαν ίδιες με της κοιλότητας συγκράτησης της γεωμετρίας εκκίνησης. Η δε εξωτερική διάμετρος των περιοχών κοχλιωτών συνδέσεων υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την εξωτερική διάμετρο των ροδελών και δίνοντας μία επιπλέον μικρή χάρη 0.125 mm.



Εικόνα 3-19. Συμπληρωματικές γεωμετρικές με τις τελικές τους διαστάσεις

### **Lattice structures**

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν lattice structures κυλινδρικού περιοδικού τύπου ως αντικατάσταση του τοιχώματος της κοιλότητας συγκράτησης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το **Cylindrical Volume Lattice** block το οποίο έχει τις παρακάτω εισόδους:

- **Volume:** Implicit Body του κυλινδρικού, εν γένει, χώρου ο οποίος συμπληρώνεται από το περιοδικό lattice. Ο χώρος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ουσιαστικά το τοίχωμα της κοιλότητας συγκράτησης, μειωμένο κατά ύψος όσο το ύψος του άνω δακτυλίου (4 mm)
- **Unit Cell:** Ο τύπος των μοναδιαίων κελιών από τα οποία συντίθεται το lattice. Χρησιμοποιήθηκαν 2 εναλλακτικές μοναδιαίων κελιών: Diamond και Octet.
- **Cell radius:** Η ακτίνα κάθε κελιού
- **Cell height:** Το ύψος κάθε κελιού
- **Arc count:** Ο αριθμός περιφερειακών τομέων των κελιών
- **Trim:** Επιλογή για αποκοπή των τμημάτων του lattice που προκύπτουν εκτός του Volume (ενεργοποιημένη)
- **Thickness:** Το πάχος των αντηρίδων του lattice ως Scalar Field

Ο Πίνακας 3-6 παραθέτει τις τιμές ορισμένων εκ των παραπάνω γεωμετρικών παραμέτρων για το lattice κάθε μοναδιαίου κελιού οι οποίες διατηρήθηκαν σταθερές καθ' όλη τη διαδικασία του επανασχεδιασμού.



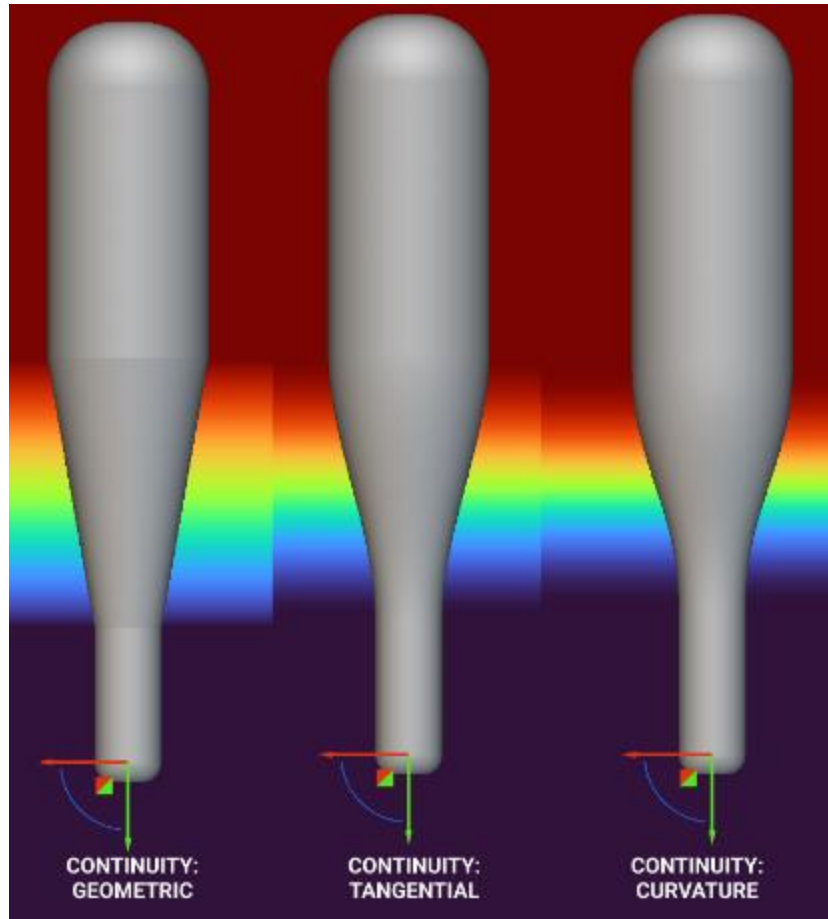
**Πίνακας 3-6. Σταθερές γεωμετρικές παράμετροι των lattices**

Παράμετρος	Τύπος lattice	
	Diamond	Octet
Cell radius (mm)	5	2.5
Cell height (mm)	50	100
Arc count	8	4

Το πάχος των αντηρίδων ήταν η κύρια παράμετρος που διαμορφώθηκε κατά τη διαδικασία του επανασχεδιασμού χρησιμοποιώντας το πεδίο των τάσεων Von Mises που είχε δημιουργηθεί προηγουμένως. Το σκεπτικό είναι η μεγιστοποίηση του πάχους στα σημεία που εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις στην γεωμετρία εκκίνησης και η αρμόζουσα διακύμανσή του μέχρι κάποια ελάχιστη τιμή στα σημεία που η τάση ελαχιστοποιείται. Εφόσον τα φορτία που αναπτύσσονται θα κατανεμηθούν σε ακόμη λεπτότερες διατομές, ο σκοπός τη διακύμανσης αυτής είναι να κατανεμηθούν τα μέγιστα αναπτυσσόμενα φορτία σε μεγαλύτερες επιφάνειες για μια όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων.

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε και με τη χρήση του **Ramp** block. Το Ramp block αναλαμβάνει την παραγωγή ενός Scalar Field (εφεξής «πεδίο εξόδου») σύμφωνα με την κατανομή των τιμών ενός άλλου (εφεξής «πεδίο εισόδου»), καθορισμένες εντός ενός εύρους τιμών από το 1<sup>ο</sup> και ενός άλλου εύρους στο 2<sup>ο</sup>. Διαθέτει ως εισόδους τις εξής παραμέτρους:

- **Scalar field:** το πεδίο βάσει του οποίου θα γίνει η κατανομή των τιμών στο καινούργιο. Στην προκειμένη περίπτωση, είναι το πεδίο μέγιστων τάσεων Von Mises από όλες τις περιπτώσεις
- **In min:** Η ελάχιστη τιμή του πεδίου εισόδου από την οποία ξεκινάει η διακύμανση. Εδώ καθορίστηκε η τιμή 0Pa.
- **Out min:** Η μέγιστη τιμή του πεδίου εισόδου μέχρι την οποία φτάνει η διακύμανση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη τιμή της τάσης
- **Out min:** Η τιμή του πεδίου εξόδου στο σημείο που το πεδίο εισόδου έχει την τιμή In min.
- **Out max:** Η τιμή του πεδίου εξόδου στο σημείο που το πεδίο εισόδου έχει την τιμή In max
- **Continuity:** Ο τύπος της συνάρτησης παρεμβολής μεταξύ των ελαχίστων και μέγιστων τιμών των πεδίων εισόδου και εξόδου. Η Εικόνα 3-21 δείχνει τη διαφοροποίηση ανάμεσα στις 3 διαθέσιμες μεθόδους παρεμβολής, χρησιμοποιώντας ως πεδίο εισόδου την απόσταση κατά μήκος ενός τμήματος ενός κυλίνδρου και ως πεδίο εξόδου την αύξηση της διαμέτρου του με το **Thicken Body** block. Για τις ανάγκες της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε η επιλογή **Geometric (C0)**.



Εικόνα 3-20. Παράδειγμα διαφοροποίησης της επιλογής Continuity στο Ramp block [14]

Όσον αφορά τις τιμές Out min και Out max, εισήχθησαν αντιστοίχως οι μεταβλητές εισόδου της ροής εργασίας **Min lattice thickness** (ελάχιστο πάχος αντηρίδων) και **Max lattice thickness** (μέγιστο πάχος αντηρίδων), με αφητηρία αντιστοίχως 2mm και 100mm. Όσο οι στόχοι του επανασχεδιασμού επιτυγχάνονταν, το μέγιστο πάχος αντηρίδων μειωνόταν. Κατά περιπτώσεις που αυτό κρίθηκε ωφέλιμο, κυρίως για μείωση των μετατοπίσεων από το βέλος κάμψης του bracket, έγινε δοκιμή μικρής αύξησης του ελάχιστης διατομής των αντηρίδων. Με το πέρας της επαναληπτικής διαδικασίας αξιολόγησης – επανασχεδιασμού, διαμορφώθηκαν στις εξής τιμές για τους 2 τύπους μοναδιαίων κελιών:

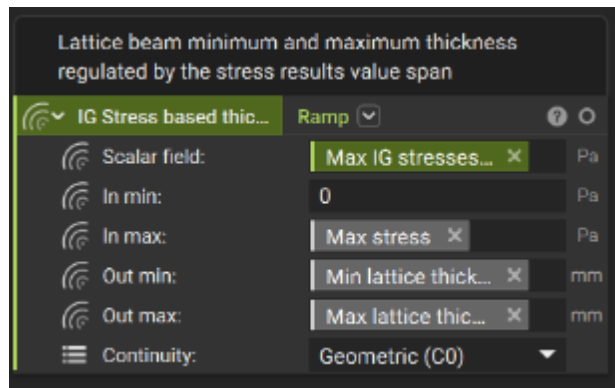
#### Diamond

- Ελάχιστο πάχος αντηρίδων: 2.5mm
- Μέγιστο πάχος αντηρίδων: 15mm

#### Octet

- Ελάχιστο πάχος αντηρίδων: 2mm
- Μέγιστο πάχος αντηρίδων: 6.5mm

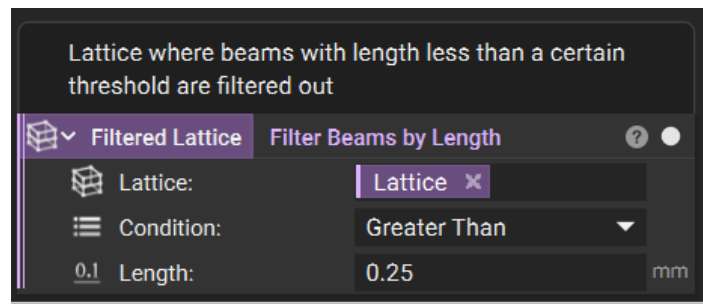
Η Εικόνα 3-22 δείχνει το Ramp block όπως χρησιμοποιήθηκε στο ροή εργασίας του nTop.



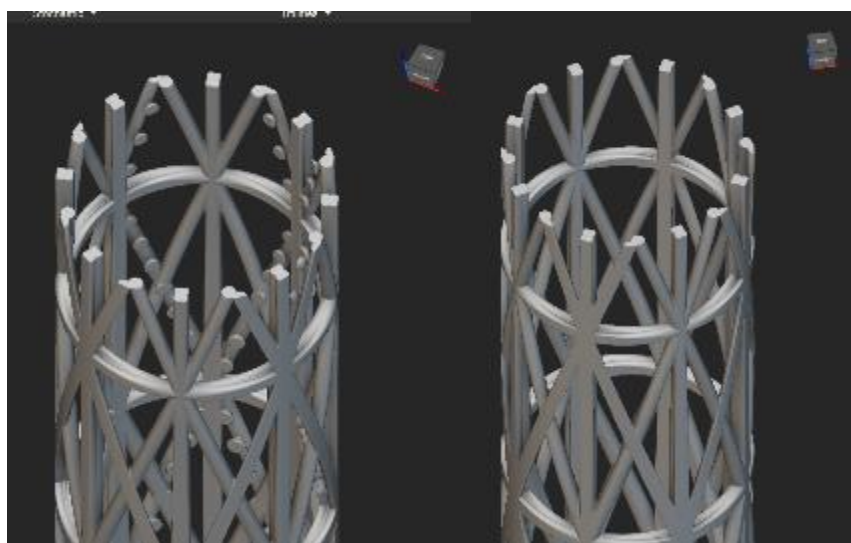
Εικόνα 3-21. Ramp block που χρησιμοποιήθηκε στη ροή εργασίας

Επομένως, με τα lattice structures γεωμετρικώς ορισμένα, ακολούθησε η μετεπεξεργασία τους και η ένωσή τους με τις συμπληρωματικές γεωμετρίες.

Όσον αφορά το lattice structure τύπου Octet, λόγω του τρόπου παραγωγής της, κρίθηκε απαραίτητη η αφαίρεση μικρών αντηρίδων που εμφανίστηκαν ως προεξοχές επί αυτής με τη χρήση του **Filter Beams by Length** block. Συγκεκριμένα, διατηρήθηκαν οι αντηρίδες με μήκος μεγαλύτερο των 0.25 mm. Οι Εικόνες 3-23 και 3-24 δείχνουν το block και το lattice structure τύπου Octet πριν και μετά την εφαρμογή του.

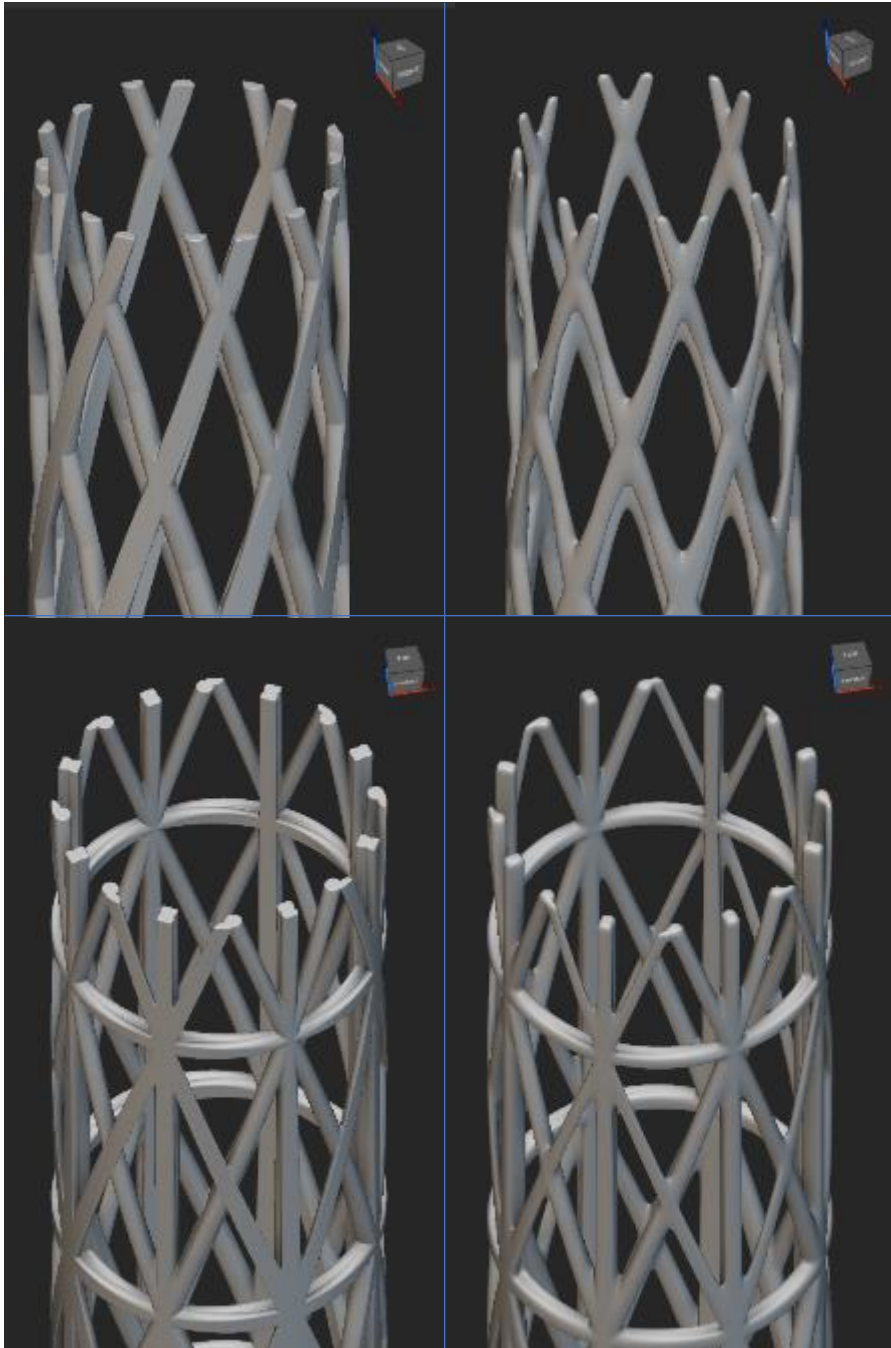


Εικόνα 3-22. Filter Beams by Length block



Εικόνα 3-23. Σύγκριση του Octet lattice structure πριν και μετά την εφαρμογή του Filter Beams by Length block

Εν συνεχεία, και τα 2 lattice structures υπέστησαν την επεξεργασία του **Smoothen Body block** το οποίο αναλαμβάνει τη στρογγυλοποίηση των ακμών μίας γεωμετρίας. Σκοπός αυτού είναι η ελάττωση των ενδεχομένων συγκεντρώσεων τάσεων στα σημεία ένωσης των αντηρίδων. Η Εικόνα 3-25 δείχνει τα 2 lattice structures πριν και μετά την επεξεργασία του Smoothen Body block.



**Εικόνα 3-24.** Σύγκριση των lattice structures πριν και μετά την εφαρμογή του Smoothen Body block. Πάνω: Diamond lattice πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά). Κάτω: Octet lattice πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά)

### **Τελική διαμόρφωση της επανασχεδιασμένης γεωμετρίας**

Η ένωση των lattice structures με τις συμπληρωματικές γεωμετρίες είναι το στάδιο το οποίο δίνει την τελική μορφή στο επανασχεδιασμένο bracket και αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

- I. Ένωση του lattice structure με τον κάτω δακτύλιο
- II. Τομή της προκύπτουσας γεωμετρίας του βήματος I. με το τοίχωμα της κοιλότητας συγκράτησης της αρχικής γεωμετρίας
- III. Ένωση της γεωμετρίας του βήματος II. με τις περιοχές των οπών κοχλιωτών συνδέσεων. Σε αυτό το βήμα, για την ένωση Boole απαιτήθηκε και η δημιουργία fillets ανάμεσα στις ενωμένες αυτές γεωμετρίες. Αυτό επετεύχθη με την επιλογή του τύπου Blend ως Rounded και τη τιμή της Blend Radius στα 8.18mm
- IV. Ένωση της γεωμετρίας του βήματος III. με τον άνω δακτύλιο, στρογγυλεμένο με Smoothen Body block, με τη χρήση fillet, για λόγους μείωσης των αναπτυσθόντων τάσεων κατά τη διαδικασία του επανασχεδιασμού
- V. Τομή της γεωμετρίας του βήματος IV. με μια παραλλαγμένη μορφή της γεωμετρίας εκκίνησης, η οποία ενώνεται με το Implicit Body του άνω δακτυλίου. Με αυτόν το τρόπο, με μόνη εξαίρεση τον τελευταίο, το υπόλοιπο τμήμα του επανασχεδιασμένου bracket θα βρίσκεται εντός του συνόρου της γεωμετρίας εκκίνησης

Η Εικόνα 3-26 παρουσιάζει τις τελικές μορφές των επανασχεδιασμένων bracket για τις 2 εναλλακτικές των μοναδιαίων κελιών.

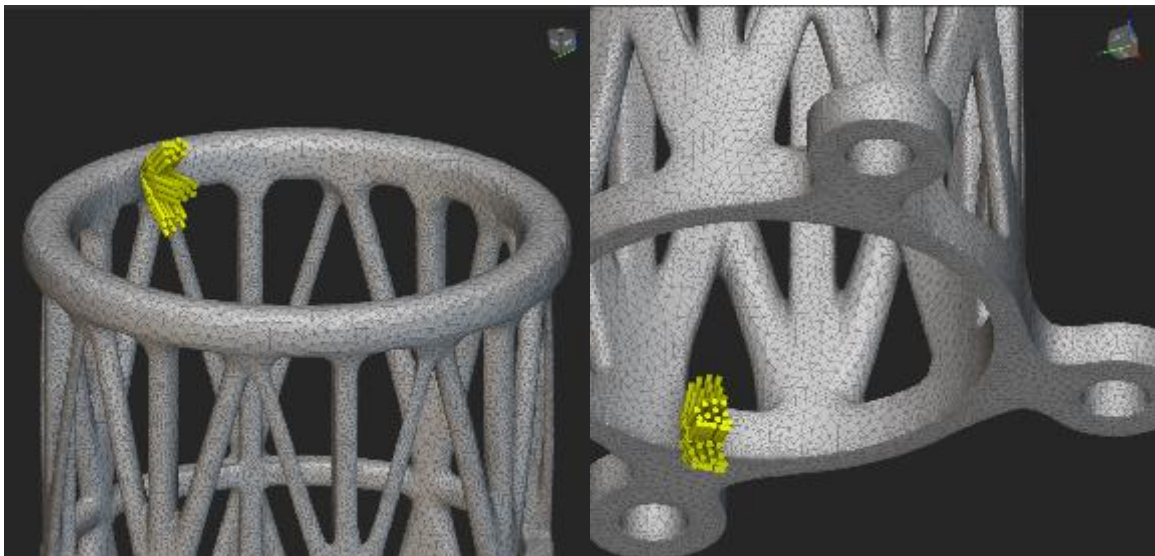


**Εικόνα 3-25. Επανασχεδιασμένο bracket. Αριστερά: Diamond lattice. Δεξιά: Octet lattice**

### 3.4 Αξιολόγηση νέου σχεδιασμού

#### 3.4.1 Προσομοιώσεις στατικής ανάλυσης – έλεγχος εκπλήρωσης απαιτήσεων

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, οι προσομοιώσεις στην επανασχεδιασμένη γεωμετρία έγιναν υπό τις ίδιες συνοριακές συνθήκες με την γεωμετρία εκκίνησης. Η μόνη εξαίρεση σε αυτές ήταν η μοντελοποίηση των δυνάμεων εκ της δέσμης καλωδίων. Για τεχνικούς λόγους που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης, η χρήση των σημειακών δυνάμεων στην επανασχεδιασμένη γεωμετρία οδηγούσε σε προσομοιώσεις οι οποίες έτρεχαν ατέρμονα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν επιφανειακές δυνάμεις επί των δακτυλίων της επανασχεδιασμένη γεωμετρίας, δημιουργημένες από την επαφή των τελευταίων με κύβους ακμής 2 mm. Η Εικόνα 3-27 παρουσιάζει ενδεικτικά ορισμένες εκ των δυνάμεων αυτών επί των δακτυλίων της επανασχεδιασμένης γεωμετρίας.



Εικόνα 3-26. Επιφανειακές δυνάμεις για τις 3 περιπτώσεις ζευγών γωνιών  $\theta_\alpha$ ,  $\theta_\kappa$  στους δακτυλίους της επανασχεδιασμένης γεωμετρίας. Αριστερά: Άνω δακτύλιος για επιτάχυνση κατά X+. Δεξιά: Κάτω δακτύλιος για επιτάχυνση XY+45°

Επιπλέον, για λόγους πληρότητας αλλά και για το ενδεχόμενο μη συμμετρίας της νέας γεωμετρίας μεταξύ των αξόνων X και Y, εξετάστηκε και η επιπλέον περίπτωση του ισοδύναμου quasi-static load στο σύστημα κατά τον ημιάξονα Y+. Για την περίπτωση αυτή, καθορίστηκε μοναδική περίπτωση ζεύγους γωνιών  $[\theta_\alpha, \theta_\kappa] = [0^\circ, 0^\circ]$ .

Οι Πίνακες 3-7 και 3-8 που ακολουθούν παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις 2 εναλλακτικές του επανασχεδιασμού.

**Πίνακας 3-7. Αποτελέσματα προσομοιώσεων για το επανασχεδιασμένο bracket με Diamond lattice**

Κατεύθυνση quasi-static load	Ζεύγος γωνιών $\theta_\alpha, \theta_\kappa$	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Μέγιστη τάση Von Mises (MPa)	Συντελεστής ασφαλείας
X+	0°, 0°	0.803	23.68	3.54
	-45°, 45°	0.650	28.14	2.98
	45°, -45°	0.5	24.44	3.43
XY+45	0°, 0°	0.795	22.75	3.69
	-45°, 45°	0.645	25.39	3.3
	45°, -45°	0.495	25.35	3.31
Y+	0°, 0°	0.838	25.18	3.3
Z+	-	$1.23 \cdot 10^{-3}$	4.71	17.84
<b>1<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα (Hz)</b>	<b>621.96</b>			

**Πίνακας 3-8. Αποτελέσματα προσομοιώσεων για το επανασχεδιασμένο bracket με Octet lattice**

Κατεύθυνση quasi-static load	Ζεύγος γωνιών $\theta_\alpha, \theta_\kappa$	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Μέγιστη τάση Von Mises (MPa)	Συντελεστής ασφαλείας
X+	0°, 0°	0.943	24.35	3.44
	-45°, 45°	0.732	22.35	3.75
	45°, -45°	0.616	24.79	3.38
XY+45	0°, 0°	0.933	24.14	3.47
	-45°, 45°	0.727	24.19	3.47
	45°, -45°	0.608	22.29	3.76
Y+	0°, 0°	0.966	24.85	3.37
Z+	-	$1.26 \cdot 10^{-3}$	4.9	17.11
<b>1<sup>η</sup> Ιδιοσυχνότητα (Hz)</b>	<b>546.02</b>			

Όπως προκύπτει από τους παραπάνω πίνακες, και οι 2 εκδοχές του επανασχεδιασμένου bracket πληρούν τις προδιαγραφές που τέθηκαν για συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο από 2.5, μέγιστη μετατόπιση μικρότερη του 1mm και 1<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα μεγαλύτερη από 100Hz.

### Επαληθευτική αξιολόγηση στο λογισμικό ANSYS

Καθώς το nTop παρέχει δυνατότητες διασυνδεσιμότητας με το λογισμικό ANSYS, επιχειρήθηκε σχετικά επιτυχώς και σε αυτό η επιβεβαίωση της εκπλήρωσης των τεχνικών απαιτήσεων σε ορισμένες επιλεγμένες περιπτώσεις φορτίσεων όπως φαίνεται παρακάτω στους Πίνακες 3-9 και 3-10.

Πίνακας 3-9. Αποτελέσματα επαληθευτικών προσομοιώσεων της επανασχεδιασμένης γεωμετρίας με Diamond lattice στο ANSYS

Κατεύθυνση quasi-static load	Ζεύγος γωνιών $\theta_\alpha, \theta_\kappa$	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Μέγιστη τάση Von Mises (MPa)	Συντελεστής ασφαλείας
X+	0°, 0°	0.773	34.86	<b>2.41</b>
XY+45	0°, 0°	0.765	27.63	3.03
Y+	0°, 0°	0.805	35.54	<b>2.36</b>

Πίνακας 3-10. Αποτελέσματα επαληθευτικών προσομοιώσεων της επανασχεδιασμένης γεωμετρίας με Octet lattice στο ANSYS

Κατεύθυνση quasi-static load	Ζεύγος γωνιών $\theta_\alpha, \theta_\kappa$	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Μέγιστη τάση Von Mises (MPa)	Συντελεστής ασφαλείας
X+	0°, 0°	0.897	26.62	3.15
XY+45	0°, 0°	0.886	26.28	3.19
Y+	0°, 0°	0.916	26.12	3.21

### 3.4.2 Ποσοτική αποτίμηση

Ο Πίνακας 3-11 παραθέτει την ποσοστιαία διαφορά στο βάρος και των 2 εκδοχών του επανασχεδιασμένου bracket σε σχέση με τη γεωμετρία εκκίνησης. Η σύγκριση αυτή γίνεται για κατασκευή της γεωμετρίας εκκίνησης από το ίδιο επιλεγμένο υλικό Windform® XT 2.0, καθώς και για άλλα 2 συνήθη μεταλλικά υλικά αεροδιαστημικών εφαρμογών, κατόπιν σχετικού αιτήματος από πλευράς από του τεχνικού φορέα της εργασίας.



**Πίνακας 3-11.Μείωση βάρους επανασχεδιασμένου bracket από Windform® XT 2.0**

Υλικό	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Μάζα γεωμετρίας εκκίνησης (g)	Μάζα επανασχεδιασμένης γεωμετρίας (g)		Μείωση βάρους (%)	
			Diamond	Octet	Diamond	Octet
Windform® XT 2.0	1.097	63.9	30.2	27.2	52.8	57.4
Al 6061-T6	2.7	157.4			80.8	82.7
Ti-6Al-4V	4.43	258.2			88.3	89.5

Από τον παραπάνω πίνακα, φαίνεται ξεκάθαρα ότι η μείωση βάρους με τον επανασχεδιασμό είναι σημαντική, ξεπερνώντας το 50% ακόμα και για το πολύ ελαφρύτερο θερμοπλαστικό Windform® XT 2.0. Αυτό αποτιμάται ως ιδιαίτερα σημαντικό γεγονός, δεδομένου ότι, όπως έχει αναφερθεί [30] στις αεροδιαστημικές εφαρμογές, το κόστος κάθε kg μπορεί να κυμαίνεται περίπου στα 10.000\$.

### 3.4.3 Κοστολογική προεκτίμηση για ΠΚ παραγομένων του σχεδιασμού

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, επιχειρήθηκε και δίνεται μια εκτίμηση του αναμενόμενου κόστους παραγωγής με τεχνολογία SLS των εξαρτημάτων που μελετήθηκαν. Η εκτίμηση έγινε βάσει της φόρμας υπολογισμών των ιστοτόπων παροχής υπηρεσιών Craftcloud και Sculpteo και γενικότερων πληροφοριών για κοστολόγηση της μεθόδου SLS. Έγινε προσπάθεια ώστε η κοστολόγηση να ανταποκρίνεται σε πρώτες ύλες αντίστοιχου ή κοντινού κόστους με το Windform® XT 2.0. Για λόγους προστασίας των πληροφοριών του σχεδιασμού, αναζητήθηκαν κοστολογήσεις με βάση την γεωμετρία εκκίνησης και όχι τις τελικές. Συνεπώς, η προεκτίμηση κόστους καθεμίας εκ των τελικών γεωμετριών (με περίπου το μισό βάρος από την αρχική) γίνεται με συντελεστή 0.65, με τη διαφορά συνειδητά να ανταποκρίνεται στο επιπλέον προκύπτον κόστος λόγω της αυξημένης συνθετότητας. Η απόπειρα κοστολόγησης γίνεται και για την περίπτωση ενός τεμαχίου αλλά και για σαφώς συμφερότερες παρτίδες περισσότερων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η κοστολόγηση είναι ιδιαιτέρως υποκειμενικό ζήτημα που συναρτάται με το είδος, τη φύση και τη διαθεσιμότητα του εκάστοτε εξοπλισμού, την πολιτική κοστολόγησης και τα ποσοστά κέρδους των διαφόρων παρόχων υπηρεσιών, καθώς και τη χώρα δραστηριοποίησής τους, τυχόν μεταφορικά κ.λπ. Το κόστη που δίνονται, λοιπόν, θεωρούνται καθαρά ενδεικτικά και εναπόκειται στον τεχνικό φορέα της εργασίας ο ακριβής προσδιορισμός τους στην περίπτωση επιθυμίας φυσικής κατασκευής των αποτελεσμάτων του σχεδιασμού για πραγματική δοκιμή. Ο Πίνακας 3-12 συγκεντρώνει τα παραπάνω προεκτιμώμενα κόστη ανά τεμάχιο παρτίδας για τις τελικές γεωμετρίες, τα οποία περιλαμβάνουν κόστη κατασκευής (παραγωγής & υλικού), διαχείρισης παραγγελίας – μεταφορικών και ΦΠΑ 24%.

**Πίνακας 3-12. Προεκτιμημένα κόστη τελικών γεωμετριών**

Ιστότοπος παροχής υπηρεσιών	Υλικό κατασκευής	Τεχνολογία ΠΚ	Κόστος ανά τεμάχιο (μονό τεμάχιο)	Κόστος ανά τεμάχιο (παρτίδα των 30)	Κόστος ανά τεμάχιο (παρτίδα των 60)
Craftcloud	Nylon PA12	SLS	33.94 €	12.25 €	11.44 €
	Glass-Filled Nylon	SLS	37.40 €	18.71 €	16.62 €
	Glass-Filled Nylon	MJF	37.40 €	18.71 €	16.62 €
	Nylon PA12	MJF	39.51 €	21.02 €	19.54 €
	Nylon PA11	MJF	61.92 €	38.26 €	35.48 €
	Nylon PA11	SLS	74.35 €	41.52 €	41.36 €
	Nylon PA11 CF	SLS	255.45 €	169.46 €	169.17 €
Sculpteo	Nylon PA12	SLS	53.36 €	47.80 €	47.80 €
	Nylon PA12	MJF	54.33 €	48.66 €	48.39 €
	Ultrasint® Nylon PA11	SLS	56.03 €	50.16 €	49.90 €
	Nylon PA11	MJF	57.05 €	51.07 €	50.80 €
	Glass-Filled Nylon	SLS	64.16 €	57.36 €	57.09 €
	Ultrasint® Nylon PA11 CF	SLS	134.69 €	119.83 €	119.56 €

Συγκεκριμένα για το Ultrasint® Nylon PA11 CF (Carbon Fiber), όπως παρέχεται από ιστοσελίδες τεχνολογικών ΠΚ, το κόστος του κατά βάρος ως πρώτη ύλη με το οποίο διατίθεται στην αγορά αντιστοιχεί περίπου σε 106€/kg. Λαμβάνοντας υπόψη και το άρθρο του Kerry Stevenson [28] , το Windform® XT 2.0 διατίθεται στην αγορά με κόστος κατά βάρος: 13200€/120kg ή 110€/kg, το οποίο είναι πολύ κοντινό σε εκείνο του Ultrasint® Nylon PA11 CF. Συνεπώς, θεωρήθηκε ότι το συνολικό κόστος καθεμίας εκ των τελικών γεωμετριών για ΠΚ με Windform® XT 2.0 για κάθε περίπτωση μεγέθους παρτίδας θα είναι πολύ κοντινό στο αντίστοιχο αναγραφόμενο για το Ultrasint® Nylon PA11 CF στον Πίνακα 3-12.

## 4 Συμπεράσματα και Επεκτάσεις

### 4.1 Συμπεράσματα

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που εξάγονται από την εργασία συνοψίζονται παρακάτω:

- Οι προδιαγραφές και οι στόχοι που τέθηκαν εκπληρώνονται, καθώς η επανασχεδιασθείσα γεωμετρία του συγκρατητή καλωδίων, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης που υλοποιήθηκε, πληροί όλες τις απαιτήσεις λειτουργίας.
- Το επανασχεδιασθέν αντικείμενο, μάλιστα, επιτυγχάνει αξιοσημείωτη ελάττωση μάζας – βάρους, που ξεπερνά το 50% εκείνου της αρχικής γεωμετρίας.
- Το αποτέλεσμα του σχεδιασμού είναι δυνατόν να αποδοθεί κατασκευαστικά με προσθετική κατασκευή που να πληροί τις προδιαγραφές για χρήση σε αεροδιαστημική εφαρμογή, και μάλιστα μελετήθηκε για συγκεκριμένο υλικό συμβατό με την άκρως ιστροπική μέθοδο SLS.
- Η διαδικασία σχεδιασμού που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία καθιστά σχετικά εύκολο ο επανασχεδιασμός να μπορεί να προσαρμοσθεί και για άλλες μεθόδους ΠΚ ή για άλλα υλικά της ίδιας μεθόδου. Ενδεχομένως, μάλιστα, κατάλληλη τέτοια προσαρμογή να μπορεί να γίνει επιτυχώς και για υλικό σημαντικά φθηνότερο από το Windform® XT 2.0 που είναι ομολογουμένως από τα ακριβότερα, με σχετικά χαμηλή επίπτωση στο επιτυχανόμενο ποσοστό απομείωσης της μάζας.
- Στην επίτευξη του παραπάνω αποτελέσματος, συνεισέφεραν σημαντικά οι προηγμένες σχεδιαστικές και αναλυτικές δυνατότητες και λειτουργίες του λογισμικού nTop. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι, σε σχέση με τις απαιτήσεις της παρούσας εργασίας, το λογισμικό έχει ακόμα ορισμένους περιορισμούς στις διαθέσιμες συνθηκές και τα είδη προσομοιώσεων. Αυτό ενδεχομένως να συνετέλεσε σε κάποια κατά τόπους διαστασιολόγηση ελαφρώς προς τα πάνω στο τελικό εξάρτημα, σε σχέση με την ιδανικά ελάχιστη δυνατή περίπτωση.
- Τέλος, είναι απαραίτητο να γραφεί ότι το προϊόν του σχεδιασμού είναι αποτέλεσμα ψηφιακών προσομοιώσεων με τους συγκεκριμένους περιορισμούς που έχουν προαναφερθεί και με την αναγκαστική παραδοχή ορισμένων συνθηκών, γεγονός που ενδεχομένως λόγω της ιδιαιτερότητας των διαστημικών εφαρμογών να καθιστά απαραίτητες και πραγματικές πειραματικές δοκιμές πριν πιθανή τελική χρήση.

### 4.2 Πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της υλοποίησης της εργασίας, η διαδικασία του επανασχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκε στο nTop, σε έναν βαθμό απαιτούσε μη αυτοματοποιημένες δοκιμαστικές μεταβολές ορισμένων γεωμετρικών παραμέτρων σε κάθε επανάληψη κατά τις προσομοιώσεις αξιολόγησης, προκειμένου να επιτευχθεί το τελικό αποτέλεσμα. Συνεπώς, μία βελτίωση στην διαδικασία επανασχεδιασμού θα μπορούσε να είναι η δημιουργία μίας πλήρως αυτοματοποιημένης ροής εργασίας στο nTop, ενδεχομένως με χρήση ενός ή περισσοτέρων αλγορίθμων φτιαγμένων με το nTop Automate. Ακόμη, η δυνατότητα αυτή του nTop θα επέτρεπε και την ανάπτυξη μιας βελτιστοποιημένης διαδικασίας με δυνατότητες παραγωγής ακόμη ελαφρύτερων μορφών.

Επιπροσθέτως, θα μπορούσε να διερευνηθεί και η χρήση μεθόδων γεννητικού σχεδιασμού (generative design) σε άλλα λογισμικά, με σκοπό την παραγωγή ακόμα ελαφρύτερων ή εντελώς εναλλακτικών μορφών.

Τα παραγόμενα του παρόντος σχεδιασμού δεν αποτελούν έτοιμα τελικά προϊόντα για απευθείας χρήση σε αεροδιαστημικές εφαρμογές, αλλά απόδειξη της εφικτότητας και υλοποιησιμότητας του σκοπού της εργασίας. Συνεπώς, ως αντικείμενο μελλοντικών μελετών και εργασιών, θα μπορούσε να επιδιωχθεί η προετοιμασία και υλοποίηση με ΠΚ, η κατασκευή πειραματικών διατάξεων και οι πραγματικές δοκιμές των παραγομένων του παρόντος σχεδιασμού. Σε περίπτωση, μάλιστα, που τα παραγόμενα του σχεδιασμού ικανοποιούν τις προδιαγραφές και σε φυσικό επίπεδο, θα μπορούσε περαιτέρω να διερευνηθεί η χρήση και ακόμα μικρότερων συντελεστών ασφαλείας σε μία νέα διαδικασία επανασχεδιασμού.

Η διαδικασία και τα βήματα του σχεδιασμού που ακολουθήθηκαν στην παρούσα εργασία μπορούν σχετικά εύκολα να επεκταθούν και σε άλλα εξαρτήματα εντός ενός δορυφόρου με σκοπό την περαιτέρω ελάφρυνση και προσθετική κατασκευή τους.

## Βιβλιογραφία – Πηγές – Αναφορές

- [1] Alekseev, S. και άλλοι (2019) *Analysis and use of SIMP method in optimization of a car hood design*. Αγία Πετρούπολη, Ρωσία: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
- [2] Ambrosio, J.A.C. (2001) 'Quasi-Static Behavior' από το *Crashworthiness: Energy Management and Occupant Protection*. CISM Courses and Lectures no. 423 International Centre for Mechanical Sciences. Springer-Verlag Wien GmbH, σελ.19-31
- [3] ASM Aerospace Specification Metals, Inc. (άνευ χρονολογίας) *ASM Material Data Sheet: Aluminum 6061-T6; 6061-T651* [Online]. Διαθέσιμο σε: <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma6061t6> (Πρόσβαση: 24 Μαΐου 2023)
- [4] ASM Aerospace Specification Metals, Inc. (άνευ χρονολογίας) *ASM Material Data Sheet: AISI Type 316 Stainless Steel, annealed bar* [Online]. Διαθέσιμο σε: <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mq316j> (Πρόσβαση: 24 Μαΐου 2023)
- [5] Beauglieu, R.A. (2013) *Margin of Safety Definition and Examples used in Safety Basis Documents and the USQ Process*. Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής: Nevada Test Site (NTS), Mercury, NV
- [6] Chehab, A.I. and Naser, M.Z. (2020) 'Polymers in space exploration and commercialization' από το: Al Ali AlMaadeed, M., Carignano M.A. & Ponnamma, D. (επιμ.) *Polymer Science and Innovative Applications*. Elsevier, σελ. 457-484
- [7] Courter, B. (2019) *Lightweighting with implicit models* [Blog] nTop. Διαθέσιμο σε: <https://www.ntop.com/resources/blog/lightweighting-with-implicit-models/> (Πρόσβαση: 8/6/2023)
- [8] Courter, B. (2019). B-rep vs. implicit modeling: Understanding the basics [Blog] nTop blog. Διαθέσιμο σε: <https://www.ntop.com/resources/blog/understanding-the-basics-of-b-reps-and-implicit/> (Πρόσβαση: 22 Μαΐου 2023)
- [9] ExoMars Project (2007) *Tailoring of ECSS-E-32-10A for ExoMars - Structural factors of safety for spacecraft and launch vehicle*. ESA
- [10] Gouzman, I. & Grossman, E. (2003) *Space environment effects on polymers in low earth orbit*. Elsevier B.V.
- [11] ISO/ASTM International. (2021) *Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary* EN ISO/ASTM 52900:2021. Switzerland
- [12] Langnau, L. (2020) *Implicit modelling for complex geometry* [Online] 3D CAD World. Διαθέσιμο σε: <https://www.3dcadworld.com/implicit-modelling-for-complex-geometry/> (Πρόσβαση: 22 Μαΐου 2023)
- [13] MatWeb (άνευ ημερομηνίας) *Deflection Temperature Testing of Plastics* [Online]. Διαθέσιμο σε: <https://www.matweb.com/reference/deflection-temperature.aspx> (Πρόσβαση: 25 Μαΐου 2023)
- [14] McCreight, C. (2022) *How do I use the Ramp block* [Online] nTop Support. Διαθέσιμο σε: <https://support.ntop.com/hc/en-us/articles/360041676813-How-do-I-use-the-Ramp-block-> (Πρόσβαση: 4 Ιουνίου 2023)
- [15] Modlin, C. T. & Zipay, J. J. (2014) *The 1.5 & 1.4 Ultimate Factors of Safety for Aircraft & Spacecraft – History, Definition and Applications*. NASA
- [16] Molitch-Hou, M. (2016) 'Carbon Fiber 3D Printing Proves Ideal for Kentucky CubeSat', *Engineering.com* [Online]. Διαθέσιμο σε: <https://www.engineering.com/story/carbon-fiber-3d-printing-proves-ideal-for-kentucky-cubesat> (Πρόσβαση: 29 Μαΐου 2023)
- [17] Office of the NASA Chief Engineer, (2014; 2022). *Structural Design and Test Factors of Safety for Spaceflight Hardware* NASA-STD-5001B w/CHANGE 3: Revalidation w/Administrative/ Editorial Changes 2022-10-24. NASA

- [18] Polymer Database (2019) *Heat Distortion Temperature* [Online]. Διαθέσιμο σε: <https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/HeatDistortion.html> (Πρόσβαση: 25 Μαΐου 2023)
- [19] Rees, C. (2015) 'Windform 3D Printing Material Passes ESA Tests', *Unmanned Systems Technology* [Online]. Διαθέσιμο σε: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2015/09/windform-3d-printing-material-passes-esa-tests/> (Πρόσβαση: 29 Μαΐου 2023)
- [20] Reitz, A. (2019) Implicits and fields for beginners [Blog] *nTop blog*. Διαθέσιμο σε: <https://www.ntop.com/resources/blog/implicits-and-fields-for-beginners/> (Πρόσβαση: 22 Μαΐου 2023)
- [21] Ryschkewitsch, M. G. (2011; 2019) *NASA-HDBK-4002A w/Change 1: Mitigating In-Space Charging Effects — A Guideline*. Washington, DC:NASA
- [22] Satellite Evolution (2022) *CRP-built Alba Orbital 3D-printed deploying system for ultimate nanosatellites tested by Rocket Lab* [Online]. Διαθέσιμο σε: <https://www.satelliteevolution.com/post/3d-printed-deploying-system-for-ultimate-nanosatellites-achieved-new-goal> (Πρόσβαση: 29 Μαΐου 2023).
- [23] Sergieieva, K. (2023) Types Of Satellites: Different Orbits & Real-World Uses [Blog] *EOS Data Analytics blog*. Διαθέσιμο σε: <https://eos.com/blog/types-of-satellites/> (Πρόσβαση: 16 Μαΐου 2023)
- [24] Shafei, B. & Zareian, F. (2008) 'Development of a Quasi-Static Loading Protocol for Displacement-Sensitive Nonstructural Building Components'. The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China
- [25] Small Spacecraft Systems Virtual Institute, Ames Research Center. (2023) 'Structures, Mechanisms and Materials' από το *State-of-the-Art Small Spacecraft Technology*. NASA, σελ. 157-184
- [26] SpecialChem SA (άνευ ημερομηνίας) *Volume Resistivity* [Online]. Omnexus. Διαθέσιμο σε: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/volume-resistivity> (Πρόσβαση: 27 Μαΐου 2023)
- [27] SpecialChem SA (άνευ χρονολογίας) *Glass Transition Temperature* [Online]. Omnexus. Διαθέσιμο σε: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/glass-transition-temperature> (Πρόσβαση: 25 Μαΐου 2023)
- [28] Stevenson, K. (2017) 'Windform Specialized 3D Print Materials', *Fabbaloo* [Online]. Διαθέσιμο σε: <https://www.fabbaloo.com/2017/03/windforms-specialized-3d-print-materials> (Πρόσβαση: 6 Ιουνίου 2023)
- [29] Γιαννατσής, Ι., Δεδούσης, Β. & Κανελλίδης, Β. (2015) 'Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής και Τρισδιάστατης Εκτύπωσης' από το *Σύγχρονες Τεχνολογίες Κατασκευής με τη βοήθεια Η/Υ*. Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, σελ. 84-115
- [30] Πετράκος, Α. (2022) *Κατάταξη, οργάνωση και παραμετροποίηση πλεγματικών δομών για αξιοποίηση σε εξαρτήματα Προσθετικής Κατασκευής*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΔΠΜΣ «Συστήματα Αυτοματισμού», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- [31] Πολύδωρας, Σ. Ν. (2020) *Τεχνολογίες και Εφαρμογές Προσθετικής Κατασκευής/3D Εκτύπωσης – Διάλεξη 2η*. ΔΠΜΣ "Συστήματα Αυτοματισμού", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, παραδεδομένη 13 Οκτωβρίου 2020
- [32] Πολύδωρας, Σ. Ν. (2020) *Τεχνολογίες και Εφαρμογές Προσθετικής Κατασκευής/3D Εκτύπωσης – Διάλεξη 8η*. ΔΠΜΣ "Συστήματα Αυτοματισμού", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, παραδεδομένη 15 Δεκεμβρίου 2020
- [33] Σμυρναίος, Σ.Β. (2015) *Καμπτικός και Στρεπτοκαμπτικός Λυγισμός Ράβδων με Αναλυτικές και Αριθμητικές Μεθόδους*. Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2015/08. Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

# Παράρτημα

## Π1 Φυλλάδιο τεχνικών δεδομένων Windform® XT 2.0



### ABOUT

<b>Class</b>	Polyamide-based carbon fiber reinforced composite
<b>Color</b>	Black
<b>Technology:</b>	SLS (Selective Laser Sintering)
<b>Test:</b>	UL94 HB 1mm and 3mm rating Outgassing Nasa and Esa Coefficient of thermal expansion Skin contact approved

WINDFORM XT 2.0 features excellent mechanical performances, including high stiffness and robustness matched to low density and remarkable lightness

### APPLICATIONS

- Realization of accurate, reliable, **durable prototypes**
- **Small production batch** and **pre-production**
- **Aerodynamic motorsport components** for F1 and IndyCar such as alternator covers
- **Automotive parts** such as cooling ducts, mirrors, headlight lids
- **Aerospace:** small satellites and spacecraft components

### KEY FEATURES



**High tensile modulus**  
Ideal for high-end mechanical applications



**High stiffness and tensile strength**



**Good elongation at break**



**Low density**



**Resistant to high temperatures**  
(HDT 1,82 Mpa 173,4 °C)



**Ideal for applications where weight saving is crucial**



**Spaceproof**  
Compliant to NASA and ESA  
Outgassing tests



**Skin contact approved**

## GOT A PROJECT?

GET IN TOUCH WITH OUR EXPERT TO TALK ABOUT MOST SUITABLE MATERIAL AND TECHNOLOGY

LET'S TALK

Europe  
info@windform.com

North America  
info@corp-usa.net

UAE & GCC  
info@corp-usa.com

Windform® is a brand CRP Technology srl

	Test Method	SI Unit	US Unit
<b>GENERAL PROPERTIES</b>			
Density (20 °C/68 °F)		1,097 g/cc	1.097 g/cc
Colour		BLACK	BLACK
<b>THERMAL PROPERTIES</b>			
Melting point	ISO 11357-2	179,30 °C	355 °F
HDT, 1.82 Mpa	ISO 75-2 TYPE A	173,40 °C	344 °F
Vicat 10N	ISO 306 TYPE A50	176,10 °C	349 °F
<b>FLAMMABILITY PROPERTIES</b>			
Burning Test - HB 1mm	UL 94	HB	HB
Burning Test - HB 3mm	UL 94	HB	HB
<b>MECHANICAL PROPERTIES</b>			
Tensile Strength	UNI EN ISO 527-1	83,84 Mpa	12200 psi
Tensile Modulus	UNI EN ISO 527-1	8928,20 Mpa	1290 ksi
Elongation at break	UNI EN ISO 527-1	3,80 %	3.80 %
Flexural Strength	UNI EN ISO 178	133,00 Mpa	19300 psi
Flexural Modulus	UNI EN ISO 178	7338,20 Mpa	1060 ksi
Impact Strength Unnotched (Charpy 23 °C)	UNI EN ISO 179	22,43 KJ/m <sup>2</sup>	10.7 ft-lb/in <sup>2</sup>
Impact Strength Notched (Charpy 23 °C)	UNI EN ISO 179	4,72 KJ/m <sup>2</sup>	2.25 ft-lb/in <sup>2</sup>
Impact Strength Unnotched (Izod 23 °C)	UNI EN ISO 180	19,26 KJ/m <sup>2</sup>	9.16 ft-lb/in <sup>2</sup>
Impact Strength Notched (Izod 23 °C)	UNI EN ISO 180	5,30 KJ/m <sup>2</sup>	2.52 ft-lb/in <sup>2</sup>
Hardness Shore D	UNI EN ISO 868	79	79
Poisson Ratio	ASTM D638-14	0.41	0.41
Compression Strength	ASTM D695-10	120,2 Mpa	17433.54 psi
Compression Elastic Modulus	ASTM D695-10	6,18 Gpa	896.33 ksi
<b>ELECTRICAL PROPERTIES</b>			
Resistivity, Volume	ASTM D257	<10 <sup>-8</sup> ohm*cm	<10 <sup>-8</sup> ohm*cm
Resistivity, Surface	ASTM D257	<10 <sup>-8</sup> ohm	<10 <sup>-8</sup> ohm
<b>SURFACE FINISH</b>			
After SLS Process		6,00 Ra μm	6.00 Ra μm
After finishing		1,8 Ra μm	1.8 Ra μm
<b>PROPERTIES PER DENSITY UNIT</b>			
UTS per density unit		76,43 Mpa/(g/cc)	11100 psi/(g/cc)
Tensile Modulus per density unit		8138,74 Mpa/(g/cc)	1180 ksi/(g/cc)
Flexural Strength per density unit		121,24 Mpa/(g/cc)	17600 psi/(g/cc)
Flexural Modulus per density unit		6689,33 Mpa/(g/cc)	970 ksi/(g/cc)

**Note:** The material properties provided herein are for reference purposes only. Data was generated from the testing of parts produced with Windform® XT 2.0 material under optimal processing conditions.

Actual values may vary significantly as they are affected by part geometry and process parameters. Material specifications are subject to change without notice.

**Standard Technical Details for Accuracy versus Tolerance:**

For parts up to 1 mm (0.039"), the standard tolerance is ± 0,070 mm (0.003")

For parts up to 3 mm (0.118"), the standard tolerance is ± 0,125 mm (0.005")

For parts up to 6 mm (0.236"), the standard tolerance is ± 0,150 mm (0.006")

For parts over 6 mm (0.236"), refer to UNI EN ISO 286-2 JS14 class (linear tolerances).



## Π2 Πιστοποιήσεις δοκιμών outgassing του Windform® XT 2.0

Δοκιμές σύμφωνες με πρότυπα της ESA



CRP TECHNOLOGY S.r.l.

### Outgassing test reports

Windform XT 2.0 has passed ESA screening outgassing tests in accordance with ESA TEC-QTE 7171 (based on ECSS-Q-ST-70-02C).

Metallized coated and uncoated samples of Windform XT 2.0 have been tested in the  $\mu$ VCM facility of the TEC-QTE laboratory at ESA/ESTEC, Noordwijk, Netherlands.

#### Test Conditions

The sample has been tested, in accordance with AD1 (based on RD1), as per:

- The  $\mu$ VCM vacuum chamber is located in the outgassing lab Ek007a where the environmental condition are controlled by ESTEC site service at  $22 \pm 3$  °C and  $55 \pm 10\%$  RH.
- Pre Test conditioning of the sample, 100-300 mg of material (unless mentioned otherwise), was 24 hours at  $22 \pm 3$  °C and  $55 \pm 10\%$  RH.
- During the Test for 24 hours:
  - The sample was subjected to a temperature of 125 °C.
  - The condensable material was collected by a collector plates kept at 25 °C.
  - The test vacuum pressure was kept below 10<sup>-5</sup> mbar.
- Post Test conditioning of the sample was 24 hours at  $22 \pm 3$  °C and  $55 \pm 10\%$  RH.

#### Outgassing Test Results

Table 1: Sample mass measurements using external balance

	TML (%)	CVCM (%)	RML (%)
Windform XT 2.0	0.571	0.010	0.436
	0.571	0.007	0.438
	0.566	0.000	0.429
Average	0.57	0.01	0.43
SD	0.00	0.01	0.00

---

CRP TECHNOLOGY S.r.l.

Sede Legale e Amministrativa/Headquarters and Administration Office

Via Cesare Della Chiesa 150/C - 41126 Modena

Tel./Phone +39 059 330544/821135/826025

Fax - 39-059-522071/381148

C.F./ P. IVA/Registro Imprese Modena IT03344960368 (VAT number)

Capitale sociale Euro 80.000 i.v.



CRP TECHNOLOGY S.r.l.

**Table 1: Sample mass measurements using external balance**

	TML (%)	CVCM (%)	RML (%)
Windform XT 2.0 - metal coated	0.002	0.000	0.000
	0.002	0.000	0.001
	0.001	0.008	0.000
Average	0.00	0.00	0.00
SD	0.00	0.00	0.00

The ESA outgassing tests can be considered passed for both coated and not-coated samples and they respond to the general outgassing criteria based upon the micro-VCM test (as defined by ECSS-Q-ST-70-02C).

The general requirement for materials screening outgassing is RML<1.0% and CVCM < 0.1 % .

---

CRP TECHNOLOGY S.r.l.

Sede Legale e Amministrativa/Headquarters and Administration Office

Via Cesare Della Chiesa 150/C - 41126 Modena

Tel./Phone +39-059-330544/821135/826025

Fax +39-059-822071/381148

C.F./ P.IVA/Registro Imprese Modena IT03344960368 (VAT number)

Capitale sociale Euro 80.000 i.v.

## Δοκιμές σύμφωνες με το πρότυπο ASTM E-595-07



CRP TECHNOLOGY S.r.l.

### Outgassing test reports

#### Windform XT 2.0

Material was tested in accordance to the ASTM E-595-07 standard and is considered passing.

Bar Position-CVCM Test Number	33739 (16)	33740 (17)	33741 (18)
Initial mass, holder and specimen, gm	0.276450	0.291404	0.295900
Mass of holder, gm	0.033627	0.033020	0.032467
Initial specimen mass @ 50%RH, gm	0.242623	0.258384	0.263433
Final mass, holder & specimen, gm	0.275185	0.290042	0.294496
Total mass loss, specimen, gm	0.001265	0.001362	0.001404
Percent TML, specimen	0.52%	0.53%	0.53%
Average value TML	*****	0.53%	*****
Mass after 50%RH re-soak, 23 C, 24hr, gm	0.275742	0.290584	0.295076
Total mass, water vapor regain, gm	0.000557	0.000542	0.000580
Percent water vapor regain	0.23%	0.21%	0.22%
Average value WVR @ 50%RH	*****	0.22%	*****
Initial mass, collector, gm	1.753789	2.381346	1.757513
Final mass, collector, gm	1.753794	2.381354	1.757516
Collected mass - CVCM, gm	0.000005	0.000008	0.000003
Percent CVCM	0.00%	0.00%	0.00%
Average Value CVCM	*****	0.00%	*****

Remarks: CVCM (unweighable) on separator plate to \_\_\_\_\_ mm diameter. CVCM appearance as follows: \_\_\_\_\_ is not detectable on collector plates.

thin;  heavy; **blue** color;  transparent; \_\_\_\_\_ colored liquid;  
 opaque;  matte;  interference fringes;  foggy;  distorts eye reflection;  smooth;  smoky;  splotchy;  partially opaque;  
 clear liquid;  liquid runs in excess; Deposit covers **30** % of collector disc.

Specimen appearance after test:

**No Visible Change**

Period **24** Hrs. Pressure **2.4X10<sup>-5</sup>** Torr Specimen Temp. **124.5** °C Collector Temp. **24.6** °C

CRP TECHNOLOGY S.r.l.

Sede Legale e Amministrativa/Headquarters and Administration Office  
 Via Cesare Della Chiesa 150/C - 41126 Modena  
 Tel./Phone +39-059-330544/821135/826025  
 Fax +39-059-822071/381148  
 C.F./P.IVA/Registro Imprese Modena IT03344980368 (VAT number)  
 Capitale sociale Euro 80.000 i.v.