



Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
ΠΜΣ Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων

---

«Πολυλειτουργικά εξαρτήματα κελύφους οχημάτων επιδόσεων  
προερχόμενα από Κατεργασίες Πρόσθεσης (3Δ εκτύπωση)  
πολλαπλών υλικών».

Ντόλιας Μιχαήλ Άγγελος | 5202020

Νοέμβριος 2023

Επιτροπή

Επιβλέπων: Κριμπένης Αγαθοκλής  
1ο Μέλος: Μαρκολέφας Στυλιανός  
2ο Μέλος: Φατσή Αντώνιος

---

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
ΠΜΣ Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων

---

Δηλώνω υπεύθυνα ότι η διπλωματική εργασία είναι εξ' ολοκλήρου δικό μου έργο και κανένα μέρος της δεν είναι αντιγραμμένο από έντυπες ή ηλεκτρονικές πηγές, μετάφραση από ξενόγλωσσες πηγές και αναπαραγωγή από εργασίες άλλων ερευνητών ή φοιτητών. Όπου έχω βασιστεί σε ιδέες ή κείμενα άλλων, έχω προσπαθήσει, όσο είναι δυνατόν, να το προσδιορίσω σαφώς μέσα από την χρήση αναφορών, ακολουθώντας την ακαδημαϊκή δεοντολογία.

## Περιεχόμενα

---

Περιεχόμενα Εικόνων .....	5
Περιεχόμενα Πινάκων.....	6
Περιεχόμενα Γραφημάτων.....	6
Πρόλογος.....	7
Περίληψη.....	8
Abstract.....	8
1. Εισαγωγή .....	9
1.1 Αντικείμενο διπλωματικής.....	9
1.2 Μέθοδος διπλωματικής.....	9
1.3 Δομή διπλωματικής.....	10
2. Βασικές έννοιες .....	11
2.1 Εισαγωγή στην κατεργασία πρόσθεσης υλικού.....	11
2.2 Πολυλειτουργικότητα & Τεχνολογίες .....	13
2.3 Μεθοδολογία σχεδίασης.....	15
3. Έρευνα.....	19
3.1 Επιλογή εξαρτήματος.....	19
3.2 Καθορισμός προδιαγραφών.....	21
3.3 Μέθοδοι κατεργασιών πρόσθεσης πολλαπλών υλικών.....	24
3.3.1 Εκτόξευση υλικού ( <i>Material Jetting</i> ) .....	25
3.3.2 Εξώθηση υλικού ( <i>Material Extrusion</i> ).....	27
3.3.3 Πολυμερισμός σε δεξαμενή ( <i>Vat Photopolymerization</i> ).....	28
3.3.4 Σύντηξη σε τράπεζα Σκόνης ( <i>Powder Bed Fusion</i> ) .....	29
3.3.5 Εκτόξευση συνδετικού υλικού ( <i>Binder Jetting</i> ).....	30
3.3.6 Εναπόθεση μέσω κατευθυνόμενης ενέργειας ( <i>Directed Energy Deposition</i> )	31
3.3.7 Διαστρωμάτωση φύλλων ( <i>Sheet Lamination</i> ).....	31

3.3.8	Λειτουργικά Διαβαθμισμένο Υλικό ( <i>Functionally Graded Material</i> ).....	32
3.3.8.1	Βήματα διαδικασίας παραγωγής ενός <i>FGM</i> .....	33
4.	Έρευνα υλικών & Χρήση αισθητήρων.....	34
4.1	Επιλογή & Συνδυασμός υλικών .....	34
4.2	Τύποι ινών.....	35
4.3	Τύποι ρητίνης.....	37
4.4	Χρήση αισθητήρων .....	42
5.	Σχεδίαση .....	44
5.1	Μεθοδολογία ανάπτυξης <i>endplate</i> .....	44
5.2	Σχεδιασμός <i>endplate</i> .....	46
5.3	Παρουσίαση & Αξιολόγηση ιδεών <i>endplate</i> .....	47
6.	Αναλύσεις.....	52
6.1	Στατική Μηχανική Ανάλυση.....	52
6.2	Υπολογιστική Δυναμική Ρευστών ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> ).....	66
7.	Μελέτη κατασκευής <i>endplate</i> .....	71
8.	Συμπεράσματα.....	77
9.	Αναφορές & Βιβλιογραφία.....	78

## Περιεχόμενα Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 2.1: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΕΚΤΥΠΩΤΗΣ ΓΙΑ ΥΛΙΚΑ ΥΨΗΛΩΝ ΑΠΟΔΟΣΕΩΝ [2] .....	11
ΕΙΚΟΝΑ 2.2: ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΣΕ ΣΤΡΩΣΕΙΣ [3] .....	12
ΕΙΚΟΝΑ 2.3: ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ [4] .....	13
ΕΙΚΟΝΑ 2.4: ΠΟΛΥΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΑΠΟ <i>KIY</i> [6].....	15
ΕΙΚΟΝΑ 2.5: ΠΕΝΤΑΛ ΦΡΕΝΟΥ <i>F1</i> ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΕΣ ΔΟΜΕΣ [7] .....	16
ΕΙΚΟΝΑ 3.1: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ <i>ENDPLATE</i> ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΜΠΡΟΣΘΙΑΣ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ ΕΝΟΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΤΥΠΟΥ <i>F1</i> .....	19
ΕΙΚΟΝΑ 3.2: ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗΣ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ .....	20
ΕΙΚΟΝΑ 3.3: ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΕΜΠΡΟΣΘΙΑΣ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ ΕΝΟΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΤΥΠΟΥ <i>F1</i> .....	20
ΕΙΚΟΝΑ 3.4: ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΕΔΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΕΔΡΙΚΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ [10] .....	22
ΕΙΚΟΝΑ 3.5: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΕΜΠΡΟΣΘΙΑΣ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ.....	24
ΕΙΚΟΝΑ 3.6: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ - <i>MJ</i> [12].....	26
ΕΙΚΟΝΑ 3.7: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ – <i>FDM</i> [12] .....	27
ΕΙΚΟΝΑ 3.8: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΗ – <i>VAT</i> [12] .....	28
ΕΙΚΟΝΑ 3.9: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΝΤΗΣΗΣ ΣΕ ΤΡΑΠΕΖΑ ΣΚΟΝΗΣ – <i>PBF</i> [12].....	29
ΕΙΚΟΝΑ 3.10: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗΣ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ - <i>BJ</i> [12] .....	30
ΕΙΚΟΝΑ 3.11: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΜΕ ΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – <i>DED</i> [12].....	31
ΕΙΚΟΝΑ 3.12: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ – <i>FGM</i> [13].....	32
ΕΙΚΟΝΑ 4.1: Ο ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΙΝΑΣ ΚΑΙ ΡΗΤΙΝΗΣ ΣΥΝΘΕΤΕΙ ΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΟ ΥΛΙΚΟ [14].....	35
ΕΙΚΟΝΑ 4.2: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΩΝ [14].....	36
ΕΙΚΟΝΑ 4.3: ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΟΤΙΒΑ ΥΦΑΝΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΑΠΟ ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ [14] ..	36
ΕΙΚΟΝΑ 4.4: ΤΝΕΣ ΑΡΑΜΙΔΙΟΥ [14] .....	37
ΕΙΚΟΝΑ 4.5: ΤΥΠΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ ( $\Sigma - E$ ), ΓΙΑ ΔΙΑΣΤΗΜΑ 5 ΩΡΩΝ ΣΕ 80°C [15].....	40
ΕΙΚΟΝΑ 4.6: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΟΥ ΣΕΝΣΟΡΑ ΣΤΗΝ <i>MERCEDES-AMG W11</i> .....	42
ΕΙΚΟΝΑ 4.7: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΚΑΤΑΜΕΤΡΗΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ .....	43
ΕΙΚΟΝΑ 5.1: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΕΜΠΡΟΣΘΙΑΣ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ ΠΡΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗ.....	46
ΕΙΚΟΝΑ 5.2: ΣΧΕΔΙΑ <i>ENDPLATE</i> .....	47
ΕΙΚΟΝΑ 5.3: ΙΣΟΜΕΤΡΙΚΗ ΟΨΗ ΠΡΩΤΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ .....	48
ΕΙΚΟΝΑ 5.4: ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ ΠΡΩΤΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ.....	49
ΕΙΚΟΝΑ 5.5: ΕΜΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΠΡΩΤΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ .....	49
ΕΙΚΟΝΑ 5.6: ΙΣΟΜΕΤΡΙΚΗ ΟΨΗ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ .....	50
ΕΙΚΟΝΑ 5.7: ΕΜΠΡΟΣΘΙΑ ΟΨΗ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ.....	50
ΕΙΚΟΝΑ 5.8: ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ .....	51
ΕΙΚΟΝΑ 6.1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ <i>CFRP</i> .....	54
ΕΙΚΟΝΑ 6.2: ΠΑΚΤΩΣΗ ΚΑΤΩ ΤΜΗΜΑΤΩΝ .....	54
ΕΙΚΟΝΑ 6.3: ΕΦΑΡΜΟΓΗ 1000 N ΣΤΟ ΕΜΠΡΟΣ & ΠΑΝΩ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ <i>ENDPLATE</i> .....	55
ΕΙΚΟΝΑ 6.4: ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΡΙΓΩΝΑ .....	56
ΕΙΚΟΝΑ 6.5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΙΕΣΕΩΝ.....	57
ΕΙΚΟΝΑ 6.6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ .....	57
ΕΙΚΟΝΑ 6.7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ.....	58
ΕΙΚΟΝΑ 6.8: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ .....	59
ΕΙΚΟΝΑ 6.9: ΕΙΣΑΓΩΓΗ <i>PEEK</i> .....	60
ΕΙΚΟΝΑ 6.10: ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΝΕΟΥ ΥΛΙΚΟΥ <i>KEVLAR 149</i> .....	60
ΕΙΚΟΝΑ 6.11: ΠΑΚΤΩΣΗ ΚΑΤΩ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ.....	61
ΕΙΚΟΝΑ 6.12: ΕΦΑΡΜΟΓΗ 1000 N ΣΤΟ ΕΜΠΡΟΣ - ΠΑΝΩ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ <i>ENDPLATE</i> .....	61
ΕΙΚΟΝΑ 6.13: ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΡΙΓΩΝΑ 5 X 5 MM.....	62
ΕΙΚΟΝΑ 6.14: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΙΕΣΕΩΝ .....	62

ΕΙΚΟΝΑ 6.15: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (40 MPA) .....	63
ΕΙΚΟΝΑ 6.16: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ .....	63
ΕΙΚΟΝΑ 6.17: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ .....	64
ΕΙΚΟΝΑ 6.18: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΣΕ ΚΛΙΜΑΚΑ 50:1 .....	64
ΕΙΚΟΝΑ 6.19: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΙΕΣΕΩΝ .....	65
ΕΙΚΟΝΑ 6.20: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ .....	65
ΕΙΚΟΝΑ 6.21: ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΧΩΡΟΣ (CONCEPTUAL DOMAIN) .....	67
ΕΙΚΟΝΑ 6.22: ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΗ ΟΡΙΑΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ (BOUNDARY CONDITION).....	68
ΕΙΚΟΝΑ 6.23: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	68
ΕΙΚΟΝΑ 6.24: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ - ΠΙΕΣΗΣ .....	69
ΕΙΚΟΝΑ 6.25: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΒΗΜΑΤΩΝ CFD ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	70
ΕΙΚΟΝΑ 6.26: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ - ΠΙΕΣΗΣ .....	70
ΕΙΚΟΝΑ 7.1: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΕΚΤΥΠΩΤΗΣ MODIX BIG-60 V4 [21].....	71
ΕΙΚΟΝΑ 7.2: ΚΕΦΑΛΗ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΤΥΠΟΥ CYCLOPS ΜΕ 3 & 2 ΥΠΟΔΟΧΕΣ [22].....	72
ΕΙΚΟΝΑ 7.3: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΝΗΜΑΤΩΝ .....	72
ΕΙΚΟΝΑ 7.4: ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΙΝΩΝ ΥΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΜΟΙΡΕΣ [25] .....	73
ΕΙΚΟΝΑ 7.5: ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΙ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ & ΦΟΡΤΙΑ [26] .....	74
ΕΙΚΟΝΑ 7.6: ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ (XY) & ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ .....	74
ΕΙΚΟΝΑ 7.7: ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΑ ΣΤΡΩΜΑ .....	75
ΕΙΚΟΝΑ 7.8: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ (FLAP) ΣΤΟ ENDPLATE.....	76
ΕΙΚΟΝΑ 8.1: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΜΠΡΟΣΘΙΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗ, ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΑΠΟ ΠΟΛΥΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΜΕΡΙΚΩΣ ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ .....	77

## Περιεχόμενα Πινάκων

---

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ & ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ .....	26
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: ΟΡΘΟΤΡΟΠΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ & ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΤΕΛΙΚΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ [19].....	53

## Περιεχόμενα Γραφημάτων

---

ΓΡΑΦΗΜΑ 4.1: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΡΗΤΙΝΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ [15] .....	39
ΓΡΑΦΗΜΑ 4.3: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΡΗΤΙΝΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΚΑΜΨΙΑ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ [15].....	39

---

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία, με τίτλο «**Πολυλειτουργικά εξαρτήματα κελύφους οχημάτων επιδόσεων προερχόμενα από Κατεργασίες Πρόσθεσης (3Δ εκτύπωση) πολλαπλών υλικών**» εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των μεταπτυχιακών σπουδών στο Γενικό Τμήμα του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Εντάσσεται δε, στον τομέα των αγωνιστικών οχημάτων, η σχεδίαση των οποίων καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την λειτουργία που θα πρέπει να εκτελούν.

Οι σχεδιαστικές ομάδες εστιάζουν κυρίως, στην δημιουργία και κατασκευή συστημάτων για την βελτιστοποίηση της απόδοσης, χωρίς να επικεντρώνονται τόσο στο συνδυασμό υλικών για την δημιουργία ενός εξαρτήματος που θα επιφέρει περισσότερα πλεονεκτήματα για την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης, στοιχείο το οποίο μεταξύ άλλων πραγματεύεται η παρούσα εργασία.

---

## Περίληψη

Στόχος της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η χρήση της μεθόδου Σχεδίαση για Κατεργασίες Πρόσθεσης Υλικού (*Design for Additive Manufacturing – DfAM*), με σκοπό την δημιουργία πολυλειτουργικών εξαρτημάτων μέσω κατεργασιών πρόσθεσης πολλαπλών υλικών, με απώτερο στόχο την βελτίωση της λειτουργίας – απόδοσης ενός οχήματος επιδόσεων.

Επίσης, στην παρούσα διπλωματική εργασία θα επιχειρηθεί να παρουσιαστεί μέσω ενός τρισδιάστατου μοντέλου, ο συνδυασμός δυο ή περισσότερων υλικών που θα απαρτίζουν ένα εξάρτημα ή σετ εξαρτημάτων κελύφους, καθώς και οι μηχανικές μεταβολές που θα επιφέρονται σε αυτό από τις συνθήκες του περιβάλλοντος, στο οποίο θα αλληλοεπιδρούν, (π.χ. λόγω διαφορετικών πιέσεων αέρα που θα δέχονται εξαιτίας της επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης ταχύτητας του οχήματος).

**Λέξεις κλειδιά:** Σχεδίαση για Κατεργασίες Πρόσθεσης Υλικού, κατεργασίες πρόσθεσης πολλαπλών υλικών, πολυλειτουργικό εξάρτημα

## Abstract

The purpose of this thesis was to apply the method of Design for Additive Manufacturing (DfAM), in order to create a multifunctional system of components through an additive process (3D printing), which would combine two or more materials with the ultimate goal of improving the performance of a sport vehicle's systems and consequently the overall performance of the vehicle.

Furthermore, an attempt will be made to present through a 3D model, the combination of the chosen materials that will constitute a part or a system of body parts, as well as the mechanical changes that will be brought to it by environmental conditions in which will interact, (e.g., due to different air pressures it would receive due to acceleration or deceleration of the vehicle's speed).

**Keywords:** Design for Additive Manufacturing, additive processes for multi-material parts, multifunctional system

# 1. Εισαγωγή

---

## 1.1 Αντικείμενο διπλωματικής

Η διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την χρήση της Σχεδίασης για Κατεργασίες Πρόσθεσης Υλικού (*Design for Additive Manufacturing – DfAM*), με σκοπό την δημιουργία πολυλειτουργικών εξαρτημάτων μέσω κατεργασιών πρόσθεσης πολλαπλών υλικών, με στόχο την βελτίωση της λειτουργικότητας και απόδοσης ενός οχήματος επιδόσεων. Παράλληλα, στην παρούσα διπλωματική εργασία θα επιχειρηθεί να παρουσιαστεί, μέσω ενός τρισδιάστατου μοντέλου, ο συνδυασμός 2 ή περισσότερων υλικών που θα απαρτίζουν ένα εξάρτημα ή σετ εξαρτημάτων κελύφους, καθώς και οι μηχανικές μεταβολές που θα επιφέρονται σε αυτό από τις συνθήκες του περιβάλλοντος, στο οποίο θα αλληλοεπιδρούν, (π.χ. λόγω διαφορετικών πιέσεων αέρα που θα δέχονται εξαιτίας της επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης της ταχύτητας του οχήματος).

Η χρήση τέτοιων εξαρτημάτων μπορεί να αποτελέσει μια λύση για την επίτευξη μιας μεγαλύτερης απόδοσης ή της βέλτιστης λειτουργίας των οχημάτων επιδόσεων, ανάλογα με τις διάφορες συνθήκες περιβάλλοντος που μπορεί να αντιμετωπίσουν. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας και της επιστήμης των τελευταίων ετών μπορεί να καταστήσει δυνατή την δημιουργία τέτοιων εξαρτημάτων, όμως μέχρι στιγμής δεν έχει επιχειρηθεί η δημιουργία και η ανάλυση ενός τέτοιου είδους συστήματος.

## 1.2 Μέθοδος διπλωματικής

Θα εξεταστούν πιθανοί συνδυασμοί υλικών με βάση τις επιθυμητές προδιαγραφές του εξαρτήματος. Έπειτα, θα σχεδιαστεί το εξάρτημα μέσω του λογισμικού *SolidWorks (CAD)*, ενώ ταυτόχρονα θα επιχειρηθεί να παρουσιαστεί ο συνδυασμός των επιλεγμένων υλικών στην γεωμετρία αυτού. Παράλληλα, θα εξεταστούν πιθανοί τρόποι – μέθοδοι κατασκευής του εξαρτήματος, με την χρήση ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή, κατάλληλου για την δημιουργία του παρουσιαζόμενου είδους, σύμφωνα με τις συνολικές του διαστάσεις. Στην συνέχεια, το εξάρτημα θα αναλυθεί μέσω του λογισμικού *SolidWorks (Simulation – FEA)*, ώστε να καταγραφεί η αλληλεπίδραση του με τις επιλεγμένες συνθήκες του περιβάλλοντος. Στην φάση αυτή, ίσως χρειαστεί να επαναπροσδιοριστεί η σχεδίαση του εξαρτήματος, αν το εξάρτημα δεν επιτυγχάνει τις λειτουργικές απαιτήσεις, που θα έχουν προσδιοριστεί. Το επόμενο στάδιο θα περιλαμβάνει την φωτορεαλιστική παρουσίαση του εξαρτήματος, την αξιολόγηση του εξαρτήματος, σύμφωνα με τις καθορισμένες προδιαγραφές και τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Έπειτα, θα περιγραφεί ο τρόπος παραγωγής του εξαρτήματος, ενώ παράλληλα θα επιχειρηθεί να παρουσιαστεί το στάδιο της σύνθεσης των επιμέρους φάσεων εκτύπωσης. Τέλος, θα επισημανθούν παρατηρήσεις – συμπεράσματα, και πιθανές μελλοντικές μετατροπές για την αποδοτικότερη επίτευξη του στόχου.

### 1.3 Δομή διπλωματικής

Το κεφάλαιο 1 της εισαγωγής, παρουσιάζει το αντικείμενο της διπλωματικής, τη μεθοδολογία και την δομή της εργασίας. Το κεφάλαιο 2 αναλύει ορισμένες βασικές έννοιες του κλάδου της τεχνολογίας των κατεργασιών πρόσθεσης υλικού, καθώς και της έννοιας της «πολυλειτουργικότητας» σε ένα εξάρτημα. Παράλληλα, στο υποκεφάλαιο 2.3 παρουσιάζεται η μεθοδολογία της Σχεδίασης για Κατεργασίες Πρόσθεσης Υλικού (*Design for Additive Manufacturing – DfAM*). Στο κεφάλαιο 3 της έρευνας, γίνεται η επιλογή του εξαρτήματος και ο καθορισμός των προδιαγραφών του, ενώ παράλληλα συνοψίζονται οι μέθοδοι – διαδικασίες κατασκευής με Κατεργασίες Πρόσθεσης Υλικού (*KΠΥ*).

Στο κεφάλαιο 4 εντοπίζονται και καταγράφονται τα συνηθέστερα υλικά και οι πιθανοί συνδυασμοί αυτών, ενώ γίνεται αναφορά και στην σημαντικότητα χρήσης αισθητήρων για την συλλογή δεδομένων. Στο κεφάλαιο 5 της σχεδίασης, αναλύεται η μεθοδολογία ανάπτυξης του εξαρτήματος, και περιγράφονται συνοπτικά επιπλέον πιθανές λύσεις για την επίτευξη εξωτερικών πολυλειτουργικών εξαρτημάτων, και έπειτα παρουσιάζονται οι φωτορεαλιστικές απεικονίσεις του εξαρτήματος στις πιθανές μορφές του. Το κεφάλαιο 6 των αναλύσεων, παρουσιάζει την επιλεγμένη τοπολογία των επιλεγμένων υλικών, τον λόγο χρήσης μιας τέτοιας τοπολογίας, καθώς και την διαδικασία επίτευξης των αναλύσεων, σύμφωνα με ορισμένες συνθήκες. Επίσης, γίνεται μια αξιολόγηση – αιτιολόγηση όσων αφορά την τελική επιλογή, σύμφωνα με τις κύριες προδιαγραφές και τα παραγόμενα δεδομένα των προσομοιώσεων.

Το κεφάλαιο 7 επιχειρεί να περιγράψει και να παρουσιάσει ως ένα βαθμό την μελέτη κατασκευής του επιλεγμένου εξαρτήματος. Στο κεφάλαιο 8 καταγράφονται τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις, καθώς και μια πιθανή μελλοντική εισήγηση για την χρήση πολυλειτουργικών εξαρτημάτων, σε ένα σύστημα εμπρόσθιας αεροτομής τύπου *Formula 1*. Τέλος, στο κεφάλαιο 9 καταγράφονται όλες οι πηγές και βιβλιογραφικές αναφορές, που χρησιμοποιήθηκαν για την συγγραφή αυτής της διπλωματικής εργασίας.

## 2. Βασικές έννοιες

---

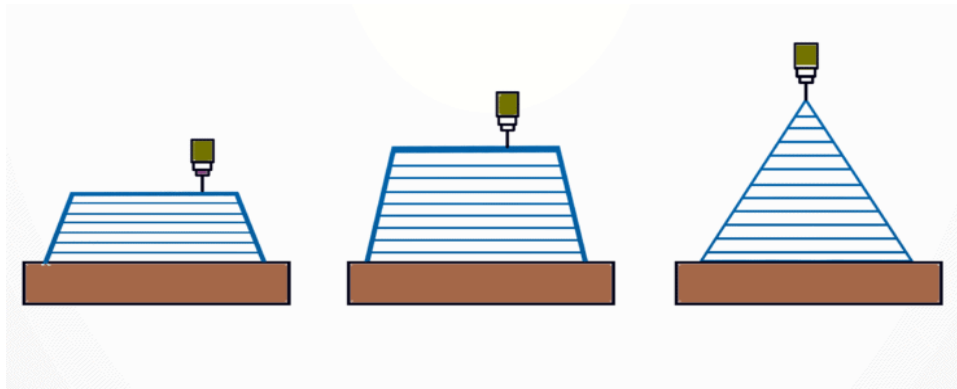
### 2.1 Εισαγωγή στην κατεργασία πρόσθεσης υλικού

Ο όρος Κατεργασία Πρόσθεσης Υλικού (*KΠΥ*) συνδέεται με τον αγγλικό όρο «*Additive Manufacturing*» (*AM*), ο οποίος πλέον έχει καθιερωθεί, αντικαθιστώντας τον όρο ταχεία πρωτοτυποποίηση (*Rapid Prototyping – RP*), που σήμερα είναι γνωστός ως τρισδιάστατη εκτύπωση (*3D Printing*). Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των εργαλειομηχανών *CNC*, αφού ως μηχανές έχουν κοινή δομή – υποσυστήματα και ίδια γλώσσα προγραμματισμού. Η μόνη διαφοροποίηση παρουσιάζεται στην κεφαλή και στον τρόπο λειτουργίας της [1].



Εικόνα 2.1: Τρισδιάστατος εκτυπωτής για υλικά υψηλών αποδόσεων [2]

Η *KΠΥ* παράγει πρωτότυπα προσθέτοντας διαδοχικά στρώσεις (*layer by layer*) του επιλεγμένου υλικού (συνήθως ανήκει στην κατηγορία των πολυμερών), μέσω μιας διαδικασίας τρισδιάστατης εξώθησης (3Δ εκτύπωσης). Γενικά, περιλαμβάνει την δημιουργία ενός τεμαχίου μέσω της αναπαραγωγής λεπτών διατομών, οριοθετημένες (σύμφωνα με την κατεύθυνση κεφαλής εκτύπωσης) στο τρισδιάστατο χώρο εξώθησης. Ο χώρος αυτός, που εκτυπώνεται το τεμάχιο μπορεί να είναι κλειστός ή ανοιχτός. Παράλληλα, κάθε στρώση έχει συγκεκριμένο πάχος (βλ. Εικόνα 2.2).

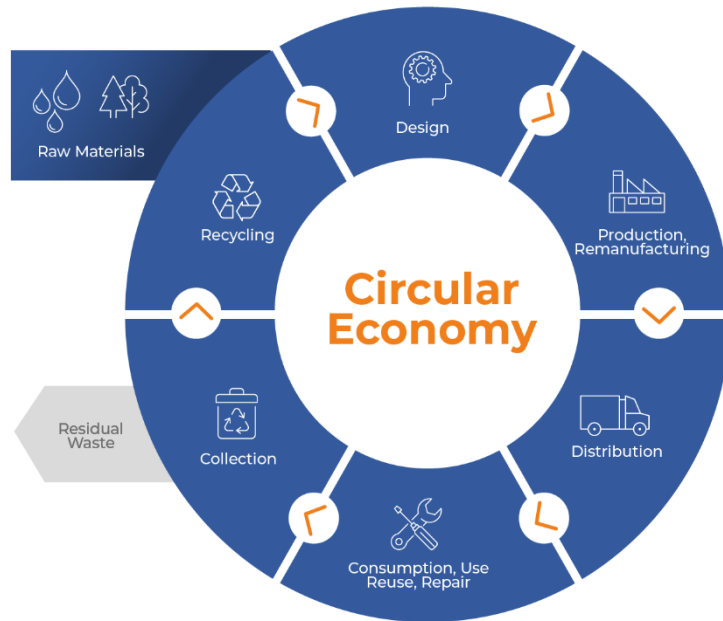


Εικόνα 2.2: Εναπόθεση υλικού σε στρώσεις [3]

Όσο πιο λεπτή είναι η κάθε στρώση, τόσο πλησιέστερα προς το 3D μοντέλο (*CAD*) είναι το παραγόμενο κομμάτι. Η λειτουργία όλων των σύγχρονων διαθέσιμων μηχανών *KΠΥ* στηρίζεται στη στρωματική προσέγγιση, ενώ τα κύρια σημεία διαφοροποίησής τους είναι το υλικό που χρησιμοποιούν, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται και συνενώνονται οι στρώσεις μεταξύ τους. Οι παραπάνω διαφορές καθορίζουν στοιχεία του τελικού κομματιού όπως τη γεωμετρική ακρίβειά του και τις υλικές και μηχανικές ιδιότητές του. Καθορίζουν επίσης, παράγοντες όπως τον χρόνο κατασκευής, την έκταση της απαιτούμενης μετεπεξεργασίας (*post – processing*), και γενικότερα το συνολικό κόστος της παραγωγικής διαδικασίας.

Αξίζει να αναφερθεί, ότι η *KΠΥ* οδηγεί σε μια πιο κλειστού βρόχου παραγωγική οικονομία, η οποία μπορεί να έχει θετικά περιβαλλοντικά οφέλη, περιλαμβάνοντας δυνητικά λιγότερα απόβλητα στη διαδικασία παραγωγής (βλ. Εικόνα 2.3). Η *KΠΥ* μπορεί να υποστηρίξει επίσης, πιο βιώσιμα προϊόντα μέσω μιας βελτιστοποιημένης τρισδιάστατης εκτύπωσης, η οποία με την σειρά της, μπορεί να προσφέρει μια πιο βιώσιμη μέθοδο παραγωγής, κατασκευάζοντας ακριβώς ό,τι χρειάζεται, στις ποσότητες που απαιτείτε και για τον λόγο τον οποίο προορίζεται.

Ήδη οι αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν αρχίσει να εξοικειώνονται με τις μεθόδους *KΠΥ*, δημιουργώντας ελαφρύτερα και πιο αποδοτικά οχήματα, που απαιτούν ελαφρύτερα εξαρτήματα, διατηρώντας όμως την αντοχή και την ποιότητα τους στα επιθυμητά επίπεδα.



Εικόνα 2.3: Παραγωγική οικονομία [4]

## 2.2 Πολυλειτουργικότητα & Τεχνολογίες

Ένα πολυλειτουργικό (*multifunctional*) εξάρτημα συνδυάζει τις ιδιότητες διαφορετικών υλικών για τη βελτιστοποίηση ενός τελικού προϊόντος. Πιο συγκεκριμένα, ένα τέτοιο εξάρτημα πολλαπλών υλικών έχει το πλεονέκτημα να πραγματοποιεί πολλές λειτουργίες και σύμφωνα με έναν κατάλληλο σχεδιασμό ένωσης των υλικών και των τμηματικών γεωμετριών του, να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ενίσχυση της δομής του. Παράλληλα, με τον όρο αυτό, αναπτύσσεται και η δυνατότητα της βέλτιστης επιλογής υλικών, της γεωμετρίας αυτών και των διαδικασιών κατασκευής σε μια ταυτόχρονα κοινή βάση. Ο τελικός στόχος μπορεί να ποικίλλει, από την δημιουργία ενός οικονομικά αποδοτικού και ελαφρού προϊόντος, έως την επίτευξη μιας ειδικής λειτουργίας. Γενικότερα, ο όρος «πολυλειτουργικότητα» αναφέρεται στην ικανότητα ενός μεμονωμένου αντικειμένου ή συστήματος να εκτελεί πολλαπλές λειτουργίες ή εργασίες. Πιο απλά, η έννοια αυτή υποδηλώνει την ικανότητα ενός προϊόντος ή συστήματος να εξυπηρετεί περισσότερους από έναν σκοπούς ή λειτουργίες. Συγχρόνως, η πολυλειτουργικότητα αποτελεί σημαντικό παράγοντα σχεδιασμού, καθώς επιτρέπει την δημιουργία πιο αποτελεσματικών και ευέλικτων προϊόντων που μπορούν να καλύψουν πολλαπλές ανάγκες με λιγότερους πόρους. Μπορεί επίσης, να οδηγήσει σε πιο βιώσιμες πρακτικές σχεδιασμού μειώνοντας την ανάγκη για πολλά προϊόντα που εκτελούν παρόμοιες λειτουργίες.

Στην αυτοκινητοβιομηχανία, τα πολυλειτουργικά προϊόντα αναφέρονται σε εξαρτήματα που έχουν σχεδιαστεί για να εκτελούν πολλαπλές λειτουργίες μέσα σε ένα όχημα. Αντί δηλαδή, να χρησιμοποιούνται πολλαπλά μέρη για την εκτέλεση διαφορετικών λειτουργιών, τα πολυλειτουργικά εξαρτήματα μπορούν να ενσωματώσουν διάφορες λειτουργίες σε ένα μόνο προϊόν, μειώνοντας το βάρος, την περιπλοκότητα του συναρμολογήματος και το κόστος. Για παράδειγμα, μια αντλία καυσίμου σε ένα αυτοκίνητο μπορεί να σχεδιαστεί για να αντλεί όχι μόνο καύσιμο, αλλά και να λειτουργεί ως φίλτρο καυσίμου, μειώνοντας τον αριθμό των εξαρτημάτων που χρειάζονται στο σύστημα αυτό. Ομοίως, ορισμένα εξαρτήματα του κινητήρα μπορούν να σχεδιαστούν για να εκτελούν πρόσθετες λειτουργίες, όπως η ενσωμάτωση του φίλτρου λαδιού στην αντλία λαδιού.

Παράλληλα, τα πολυλειτουργικά εξαρτήματα μπορούν να προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως μειωμένο βάρος και πολυπλοκότητα, βελτιωμένη αξιοπιστία και απλοποιημένη συναρμολόγηση και συντήρηση. Μπορούν επίσης, να συμβάλουν στη βελτίωση της απόδοσης καυσίμου και στη μείωση των εκπομπών ρύπων, μειώνοντας το βάρος του οχήματος. Συνολικά, η χρήση πολυλειτουργικών εξαρτημάτων – ανταλλακτικών αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο σχεδιασμό των σύγχρονων οχημάτων, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε μια πιο αποδοτική και οικονομικά συμφέρουσα παραγωγή, ενώ παράλληλα βελτιώνει την απόδοση και τη βιωσιμότητα αυτών. Ομοίως, και για τους ίδιους λόγους (μείωση βάρους, μεγιστοποίηση απόδοσης, αύξηση αξιοπιστίας, απλοποιημένη συναρμολόγηση και συντήρηση) τα πολυλειτουργικά εξαρτήματα έχουν αρχίσει να εδραιώνονται τα τελευταία χρόνια και στον τομέα του μηχανοκίνητου αθλητισμού. Για παράδειγμα, ένας αγωγός φρένων σε ένα αγωνιστικό αυτοκίνητο μπορεί να σχεδιαστεί ώστε όχι μόνο να ψύχει τα φρένα αλλά και να κατευθύνει τον αέρα στον κινητήρα ή σε άλλα εξαρτήματα για τη βελτίωση της απόδοσής τους. Παρομοίως, ορισμένα εξαρτήματα της ανάρτησης μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να ενσωματώνουν αεροδυναμικά χαρακτηριστικά για τη μεγιστοποίηση της κάθετης δύναμης και της ευστάθειας του οχήματος. Συνολικά, η χρήση πολυλειτουργικών εξαρτημάτων – ανταλλακτικών αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο σχεδιασμό αγωνιστικών οχημάτων, καθώς μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της απόδοσης και της ανταγωνιστικότητας τους, ενώ παράλληλα μειώνει το κόστος και την πολυπλοκότητα<sup>1</sup> τους.

Η κατασκευή εξαρτημάτων που συνδυάζουν δύο ή περισσότερα υλικά, με την *KΠΥ* (αγγλικός όρος: *Multi-Material Additive Manufacturing – MMAM*), επιτρέπει την ταχεία σχεδίαση και την άμεση κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων, που αποτελούνται από πολλαπλά υλικά, χωρίς την ανάγκη χρήσης σύνθετων διαδικασιών κατασκευής και ακριβών εργαλείων<sup>2</sup>. Έτσι, η τρισδιάστατη εκτύπωση πολλαπλών υλικών επιτρέπει την δημιουργία πολυλειτουργικών αντικειμένων, όπου τα άκαμπτα τμήματα τους μπορούν να συνδυαστούν με εύκαμπτα τμήματα υψηλής αντοχής, και όλα αυτά τα διαφορετικά τμήματα να εκτυπώνονται σε μια μόνο διαδικασία, με την

---

<sup>1</sup> Μειώνεται η πολυπλοκότητα του συναρμολογήματος γιατί μπορούν να συνδυαστούν πολλά εξαρτήματα μαζί. Όμως, η πολυπλοκότητα των εξαρτημάτων μπορεί να αυξηθεί. Λόγω όμως, της ελευθερίας κατασκευής που προσφέρουν οι *KΠΥ*, αυτό δεν επιφέρει φόρτο στην αλυσίδα παραγωγής.

<sup>2</sup> Δεν απαιτούνται καλούπια που κρίνονται ακριβά. Αλλά, οι συγκεκριμένες εργαλειομηχανές (υβριδικές) δεν είναι και ιδιαίτερα φθηνές.

χρήση 3Δ εκτύπωσης πολλαπλής εξώθησης<sup>3</sup>. Ένα παράδειγμα, μιας τέτοιας μεθόδου είναι η μοντελοποίηση συγχωνευμένης εναπόθεσης (*Fused Deposition Modeling – FDM*), η οποία αποτελεί μια διαδικασία *KΠΥ*, όπου η εξώθηση του υλικού γίνεται σε μορφή νήματος [5].



Εικόνα 2.4: Πολυλειτουργικά εξαρτήματα οχημάτων κατασκευασμένα από *KΠΥ* [6]

Οι τεχνολογίες για την *KΠΥ*, όπως είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση, περιλαμβάνουν την δημιουργία ενός επιθυμητού προϊόντος, σε στρώσεις (*layer by layer*), αντί να το παράγουν από ένα μόνο κομμάτι υλικού. Αυτό, επιτρέπει την υψηλή ακρίβεια εφαρμογής μιας προσαρμοσμένης κατασκευής, με επακριβώς καθορισμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά. Τα τελευταία χρόνια, η *KΠΥ* άρχισε να επεκτείνεται κάνοντας χρήση και άλλων ομάδων υλικών (πέραν των πολυμερών και των σύνθετων), όπως είναι τα μέταλλα και τα κεραμικά.

## 2.3 Μεθοδολογία σχεδίασης

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση και την επίτευξη του υπό σχεδίαση εξαρτήματος είναι η Σχεδίαση για Κατεργασίες Πρόσθεσης Υλικού (*Design for Additive Manufacturing – DfAM*). Η μέθοδος αυτή, μπορεί να θεωρηθεί μία από τις αποτελεσματικότερες στρατηγικές για το σχεδιασμό πολυλειτουργικών εξαρτημάτων ή συστημάτων, στα οποία γίνεται χρήση δυο ή περισσότερων υλικών για την δημιουργία τους, σύμφωνα με μια σχεδιαστική σύνθεση. Ένα ειδικό χαρακτηριστικό της σχεδίασης για τη βελτίωση της απόδοσης των προϊόντων, κάνοντας χρήση της *KΠΥ* για τη κατασκευή εξαρτημάτων είναι οι κυψελοειδές δομές. Οι δομές αυτές, αποτελούν το συνδυασμό υλικού και κενού χώρου για τη σύνθεση μιας νέας κατασκευής. Οι μηχανικές τους ιδιότητες προσεγγίζουν τις ιδιότητες του συμπαγούς – αρχικού υλικού, αλλά προσφέρουν το σημαντικό πλεονέκτημα του μειωμένου βάρους, κάτι που γενικότερα στο χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας και ειδικότερα στο τομέα του μηχανοκίνητου αθλητισμού, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προδιαγραφές για οποιαδήποτε εξάρτημα του οχήματος, διότι μπορεί να επιφέρει επιπλέον

---

<sup>3</sup> Η χρήση της διαδικασίας αυτής, καθιστά αναγκαίο και τον συνδυασμό του ανάλογου, τεχνολογικού εξοπλισμού.

πλεονεκτήματα όπως είναι η εξοικονόμηση καυσίμου, οι χαμηλότερες εκπομπές ρύπων ( $CO_2$ ) και οι υψηλές αποδόσεις.

Πέραν των κυψελοειδών δομών ειδικά χαρακτηριστικά σχεδίασης *KIY* είναι επίσης οι ενσωματωμένες αρθρώσεις και οι τοπολογικά βελτιστοποιημένες δομές, οι οποίες όμως δεν συμβάλλουν τόσο στην μείωση του βάρους, όσο οι κυψελοειδές δομές (*cellular structures*). Στην προκειμένη περίπτωση, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι μηχανολογικός σχεδιασμός, πλέον, μπορεί να επικεντρωθεί στην διαδικασία της *KIY* εκεί όπου κρίνεται απαραίτητο, και σε αυτό, μπορούν να συμβάλλουν καθοριστικά οι κυψελοειδές δομές. Πέραν επίσης, της ελάττωσης του βάρους της αρχικής συμπαγούς δομής, έχει και θετικές επιπτώσεις στη μείωση του κόστους, λόγω της χρήσης μικρότερης ποσότητας υλικού, που συνεπάγεται σε ελαχιστοποίηση σπατάλης υλικού, χάρη στη τρισδιάστατη εκτύπωση<sup>4</sup>.



Εικόνα 2.5: Πεντάλ φρένου *F1* οχήματος με κυψελοειδές δομές [7]

Η μέθοδος της Σχεδίασης *KIY* παρέχει επίσης στους σχεδιαστές και την ευελιξία όσον αφορά την γεωμετρία, λόγω των εργαλειομηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης που ευνοούν ελεύθερες γεωμετρίες και περίπλοκα σχήματα, καθώς και την λειτουργικότητα του αντικειμένου, λόγω της χρήσης διαφορετικών ομάδων υλικών, με διαφορετικές ιδιότητες, (π.χ. μηχανικές ιδιότητες). Δηλαδή, θα μπορούν να εξυπηρετήσουν δύο ή περισσότερες λειτουργικές απαιτήσεις – προδιαγραφές.

<sup>4</sup> Σε σχέση, πάντα, με τις συμβατικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού.

Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι η μέθοδος της Σχεδίασης *KIY (DfAM)*, απαρτίζεται από ένα σύνολο αρχών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία σχεδίων που είναι βελτιστοποιημένα για τεχνολογίες παραγωγής προσθήκης πολλαπλών υλικών, όπως είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση. Στην φάση αυτή, περιγράφονται συνοπτικά ορισμένες βασικές αρχές του *DfAM*:

- **Σχεδιασμός για δυνατότητα κατασκευής:** Στη φάση της σχεδίασης για την κατασκευή μέσω προσθήκης υλικού, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι δυνατότητες και οι περιορισμοί της συγκεκριμένης διαδικασίας εκτύπωσης που χρησιμοποιείται. Οι σχεδιαστικές ομάδες θα πρέπει δηλαδή, να επιλέγουν τη σωστή τεχνολογία εκτύπωσης, καθώς επίσης το υλικό και τις παραμέτρους που μπορούν να παράγουν για την επιθυμητή ποιότητα προϊόντων.
- **Σχεδιασμός για λειτουργία:** Σε αντίθεση με την παραδοσιακή κατασκευή, η κατασκευή μέσω προσθήκης υλικού επιτρέπει την δημιουργία σύνθετων γεωμετριών που μπορούν να βελτιώσουν τη λειτουργικότητα ενός εξαρτήματος. Οι σχεδιαστές θα πρέπει να εκμεταλλεύονται αυτή την δυνατότητα για να δημιουργούν εξαρτήματα που είναι βελτιστοποιημένα για τις προβλεπόμενες λειτουργίες τους.
- **Σχεδιασμός για βελτιστοποίηση τοπολογίας:** Η βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι μια μαθηματική τεχνική που βοηθά τους σχεδιαστές να δημιουργήσουν δομές που είναι βελτιστοποιημένες για την προβλεπόμενη εφαρμογή τους. Οι αρχές του *DfAM* ενθαρρύνουν τις σχεδιαστικές ομάδες να χρησιμοποιούν λογισμικό βελτιστοποίησης τοπολογίας για την δημιουργία προϊόντων με την ελάχιστη χρήση υλικού, πληρώνοντας παράλληλα τις λειτουργικές απαιτήσεις.
- **Σχεδιασμός για συναρμολόγηση:** Με την κατασκευή μέσω προσθήκης υλικού, είναι δυνατή η εκτύπωση πολλαπλών εξαρτημάτων ως μια ενιαία διάταξη, μειώνοντας την ανάγκη για χειροκίνητα βήματα συναρμολόγησης. Οι αρχές του *DfAM* ενθαρρύνουν τους σχεδιαστές να εξετάζουν την δυνατότητα εκτύπωσης πολλαπλών προϊόντων, ταυτόχρονα, ώστε να δημιουργούν ένα ενιαίο λειτουργικό συγκρότημα.
- **Σχεδιασμός για μετεπεξεργασία:** Ορισμένες διαδικασίες παραγωγής μέσω προσθήκης υλικού απαιτούν βήματα μετά-επεξεργασίας για να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα εξαρτήματος. Οι αρχές *DfAM* ενθαρρύνουν τους σχεδιαστές να λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις μετά την επεξεργασία στο σχεδιασμό τους, όπως δομές στήριξης, φινίρισμα επιφάνειας και θερμική επεξεργασία.

Ακολουθώντας αυτές τις αρχές, οι σχεδιαστικές ομάδες μπορούν να δημιουργούν βελτιστοποιημένα σχέδια που να εκμεταλλεύονται πλήρως τις δυνατότητες των τεχνολογιών κατασκευής μέσω προσθήκης υλικών, με αποτέλεσμα να κατασκευάζονται εξαρτήματα που είναι πιο αποδοτικά, λειτουργικά και οικονομικά προσοδοφόρα στην παραγωγή.

Τέλος, στην φάση αυτή αξίζει να αναφερθεί και η σημαντικότητα της ιεραρχίας των προδιαγραφών και τις επιπτώσεις που θα έχει στις μελλοντικές αποφάσεις για το υπό σχεδίαση εξάρτημα.

Περιορισμοί και κανόνες, όπως είναι επιλογή υλικών και περιορισμοί διαστάσεων, θα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη κατά την διάρκεια του σχεδιασμού για *DfAM*, προκειμένου να διασφαλιστεί η κατασκευαστική δυνατότητα του εξαρτήματος με διαδικασίες *KΠΥ*.

Γενικότερα, η ιεραρχία των προδιαγραφών παίζει πολύ μεγάλο και κρίσιμο ρόλο κατά την σχεδιαστική διαδικασία, διότι επηρεάζει κατά πολύ τις αποφάσεις του σχεδιαστή. Για παράδειγμα, η μείωση του βάρους μπορεί να κριθεί ως μια από τις σημαντικότερες προδιαγραφές ενός εξαρτήματος (ενός οχήματος επιδόσεων), κάτι που μπορεί να επηρεάσει την επιλογή των υλικών, αυτού. Και, μπορεί να έρθει σε «σύγκρουση» με μια άλλη προδιαγραφή, όπως είναι η ανθεκτικότητα ή η αντοχή σε συγκεκριμένες συνθήκες.

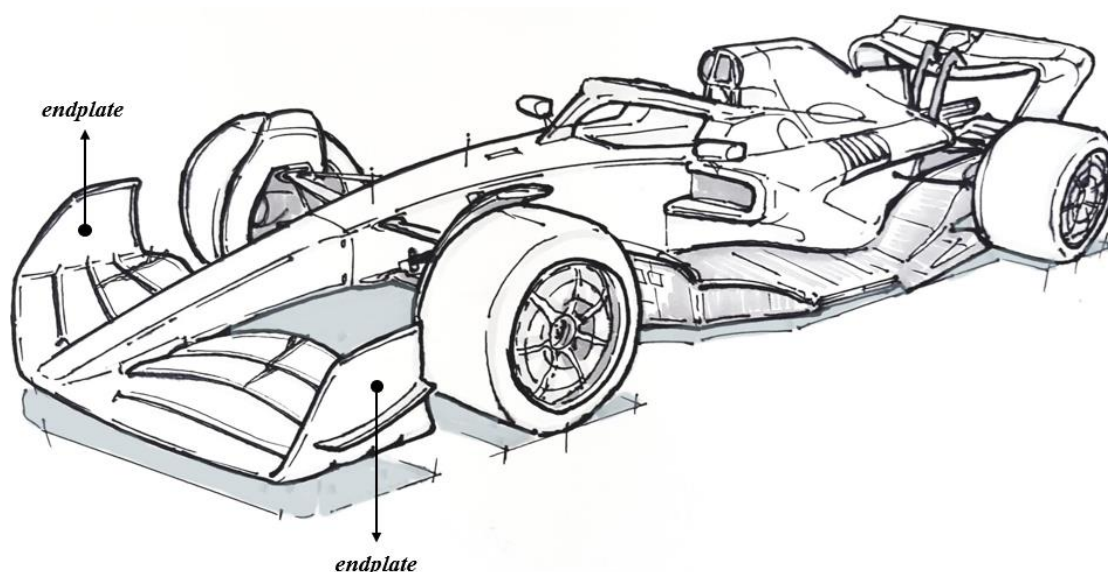
Στη σχεδιαστική φάση αυτή, ο σχεδιαστής θα πρέπει να λάβει υπόψιν του την ιεραρχία των προδιαγραφών, καθώς και το τι θέλει να επιτελεί περισσότερο το εξάρτημα, ώστε να κάνει την βέλτιστη επιλογή υλικών. Αυτό όμως, δεν θα επηρεάσει τόσο στην απόφαση της επιλογής των υλικών, στην παρούσα εργασία, όσο στο πως θα διαμορφωθεί ο συνδυασμός αυτών, στην γεωμετρία – δομή του εξαρτήματος. Μέσα από αυτό επίσης, φανερώνεται έμπρακτα και το βασικό χαρακτηριστικό – πλεονέκτημα των *KΠΥ* διαδικασιών της σύνθεσης των υλικών, ώστε το εξάρτημα να είναι ελαφρύ, αλλά και ανθεκτικό, συγχρόνως.

Το πως τώρα, τα επιλεγμένα υλικά θα συνδέονται στα τμήματα του εξαρτήματος μπορεί να εξαρτηθεί είτε από τις υπόλοιπες προδιαγραφές (π.χ. περιορισμούς), είτε από το περιβάλλον που θα αλληλοεπιδρά, είτε από τη γεωμετρία του εκάστοτε προς σχεδίαση οχήματος.

## 3. Έρευνα

### 3.1 Επιλογή εξαρτήματος

Στην παρούσα εργασία, το εξάρτημα που έχει επιλεχθεί να σχεδιαστεί μπορεί να αποτελέσει ένα υποσύστημα – πτερύγιο της εμπρόσθιας αεροτομής (*subsystem endplate with or without winglets*<sup>5</sup>) ενός οχήματος επιδόσεων, τύπου *Formula 1*. Το εξάρτημα αυτό θα λειτουργεί συμπληρωματικά στο γενικότερο σύστημα της εμπρόσθιας πτέρυγας.



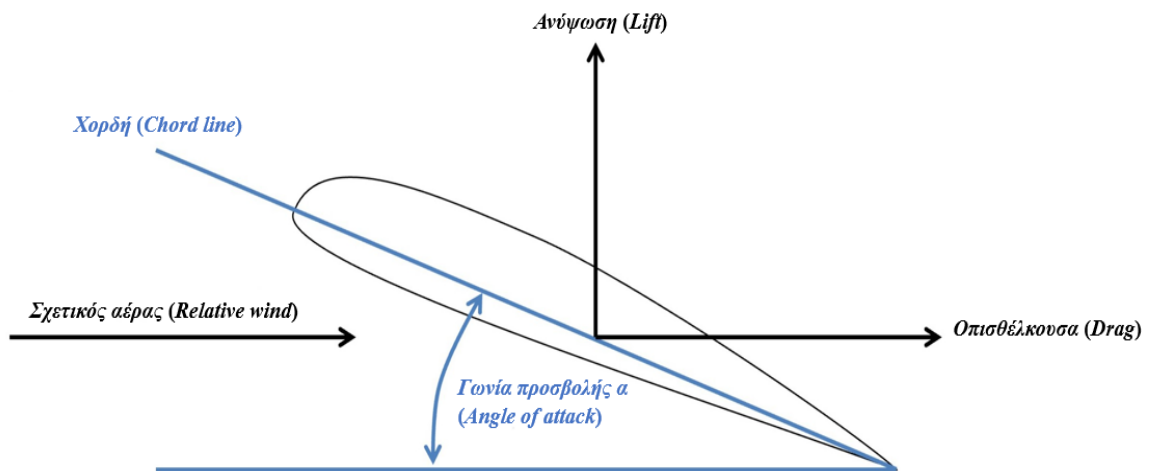
Εικόνα 3.1: Απεικόνιση *endplate* στο σύστημα εμπρόσθιας αεροτομής ενός οχήματος τύπου *F1*

Γενικότερα, η εμπρόσθια αεροτομή (*front airfoil*) ενός οχήματος τύπου *Formula 1* αποτελεί, χωρίς αμφιβολία, το πιο περίπλοκο αεροδυναμικό σύστημα του οχήματος. Και αυτό διότι, αποτελεί το πρώτο τμήμα του μονοθέσιου το οποίο έρχεται σε επαφή με την ροή του αέρα, την οποία και αναλαμβάνει να κατευθύνει προς το κάτω τμήμα και προς το πίσω μέρος του οχήματος, με τρόπο ώστε να αυξάνει την κάθετη δύναμη (*downforce*) και να βελτιστοποιεί την διέλευση του, σε αυτή. Για αυτό και σε μια εμπρόσθια αεροτομή, υπάρχουν τα διάφορα άλλα πτερύγια, ώστε να ανακατευθύνουν ανάλογα και όπως χρειάζεται την ροή του αέρα. Τα *endplate* είναι ένα παράδειγμα τέτοιων πτερυγίων που ανακατευθύνουν τον αέρα γύρω από τους εμπρός τροχούς, ώστε το όχημα να συναντά την μικρότερη αντίσταση, κατά την κίνηση του. Επίσης, αποτελούν και τα ακριανά στηρίγματα της αεροτομής, στα οποία συνδέονται – συγκατούνται τα ενδιάμεσα πτερύγια, αυτής.

Επίσης, το σύστημα της εμπρόσθιας αεροτομής έχει την δυνατότητα να δημιουργεί αρκετή κάθετη δύναμη (*downforce*) ισοδύναμη με το διπλάσιο του βάρους του αυτοκινήτου, ανάλογα με το μέγεθος της (αναλογία γενικών διαστάσεων – *Aspect*

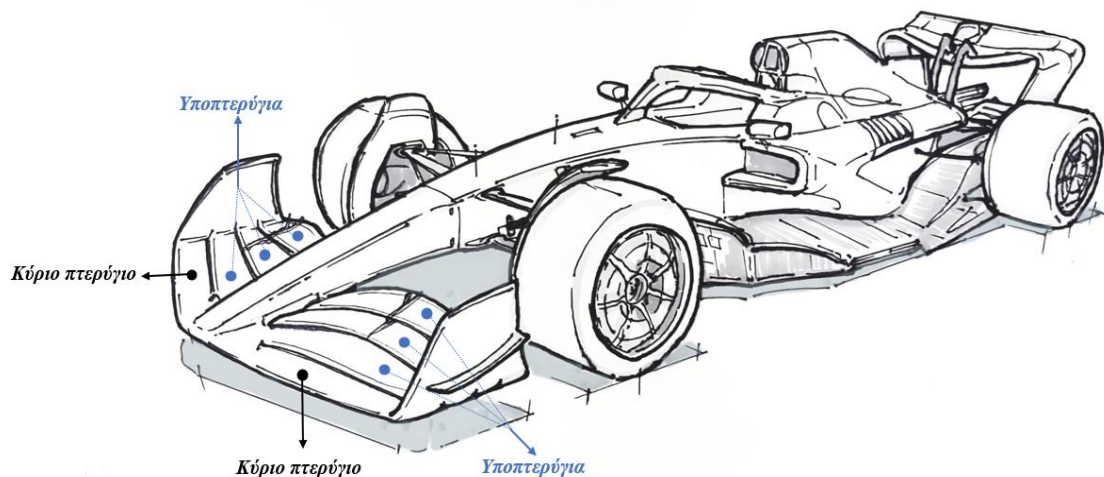
<sup>5</sup> Αποτελούν φτερά – πτερύγια μικρότερων διαστάσεων και διαφορετικής γεωμετρίας, από αυτά που τοποθετούνται στο κύριο σώμα μιας αεροτομής.

*Ratio*<sup>6</sup>) και με την γωνία προσβολής (*Angle of Attack*<sup>7</sup>) που σχηματίζεται μεταξύ της χορδής της αεροτομής και της κατεύθυνσης της αδιατάρακτης ροής του αέρα που την περιβάλλει.



Εικόνα 3.2: Γωνία προσβολής ενδεικτικής αεροτομής

Ως εκ τούτου, το μπροστινό σύστημα της αεροτομής, πέραν της αεροδυναμικής σημαντικότητας που έχει στην λειτουργία του οχήματος, θα πρέπει επίσης να μπορεί να αντέχει και τα απίστευτα μηχανικά φορτία που σχηματίζονται. Σε αυτό το σημείο, διαπιστώνεται εύκολα ότι μέσα από την κατανόηση ενός εξαρτήματος και της σημασίας που κατέχει στην απόδοση ενός οχήματος (*vehicle performance*), αναδύονται ορισμένα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει, δηλαδή προδιαγραφές.



Εικόνα 3.3: Πτερόγιο εμπρόσθιας αεροτομής ενός οχήματος τύπου F1

<sup>6</sup> Η αναλογία μήκους και πλάτους ορίζεται ως ο λόγος διαστάσεων (*aspect ratio*). Όσο υψηλότερος είναι, τόσο πιο αποτελεσματική μπορεί να είναι η αεροτομή.

<sup>7</sup> Ανάλογα με την τοποθέτηση – κλίση της αεροτομής και των υπό-πτερυγίων της, το όχημα μέσω της αεροτομής μπορεί να παράγει μεγαλύτερο φορτίο κατακόρυφης δύναμης (*downforce*). Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία προσβολής, τόσο περισσότερη κάθετη δύναμη δημιουργείται.

### 3.2 Καθορισμός προδιαγραφών

Σε αυτό το σημείο και με βάση τα όσα έχουν μεσολαβήσει, μπορούν να καταγραφούν ορισμένες προδιαγραφές του επιλεγμένου εξαρτήματος (*endplate*). Οι προδιαγραφές ενός οποιουδήποτε προϊόντος ή συστήματος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Χαρακτηριστικά
- Λειτουργικές απαιτήσεις
- Περιορισμοί

Πιο συγκεκριμένα, στα χαρακτηριστικά ανήκουν όλα αυτά, που απαντάνε στην ερώτηση «Τι είναι το σύστημα;». Συνήθως, τα χαρακτηριστικά διατυπώνονται ως επίθετα, στις προδιαγραφές. Για παράδειγμα, ένα σύστημα μπορεί να είναι ανθεκτικό, ελαφρύ, κ.α. Από την άλλη, οι λειτουργικές απαιτήσεις αναφέρονται στο «Τι μπορεί να κάνει το σύστημα;». Και συνήθως, διατυπώνονται με ρήματα. Για παράδειγμα, το εξάρτημα των πτερυγίων της εμπρόσθιας αεροτομής, να μπορεί να ανακατευθύνει αποτελεσματικά την ροή του αέρα. Τέλος, οι περιορισμοί μπορεί να αναφέρονται σε διάφορους παράγοντες. Κύριοι, παράγοντες αυτών, μπορεί να είναι το κόστος και ο χρόνος. Επίσης, ένας άλλος σημαντικός παράγοντας, ειδικά στην περίπτωση τέτοιων εξαρτημάτων, που αναφέρονται και μέθοδοι *KIYY*, είναι η κατεργασιμότητά τους (*feasibility of manufacture*).

Παράλληλα, στο πλαίσιο αυτό του μηχανοκίνητου αθλητισμού ή της αυτοκινητοβιομηχανίας γενικότερα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν και τυχόν κανονισμοί (*regulations*) που αφορούν το όχημα και ορισμένα συστήματα, αυτού. Για παράδειγμα, οι κανονισμοί της Διεθνής Ομοσπονδία Αυτοκινήτου (*FIA – Federation Internationale de l'Automobile*), δεν επιτρέπουν την δημιουργία – τοποθέτηση πλήρως εύκαμπτων πτερυγίων (όχι ακόμα τουλάχιστον), διότι θεωρητικά αυξάνουν κατά πολύ την απόδοση των οχημάτων και έρχονται σε αντίθεση με τους πιο πρόσφατους κανονισμούς, (του έτους 2021 – 2022)<sup>8</sup>, που αφορούν την ασφάλεια των πιλότων.

Έτσι, τα πτερύγια που τοποθετούνται στην εμπρόσθια αεροτομή ή γενικότερα στο κέλυφος των οχημάτων αυτών, χαρακτηρίζονται από μηδενική έως μερική ευκαμπτότητα (*part flexibility*) και συνήθως είναι ρυθμιζόμενα (*adjustable*), αλλά δεν ρυθμίζονται αυτόνομα – αυτόματα.

Ορισμένες προδιαγραφές, που μπορούν να αναδυθούν από την μέχρι τώρα έρευνα είναι οι εξής:

- *Ανθεκτικό*, στις πιέσεις που θα δέχεται.
- *Μερικώς εύκαμπτο* (*part flexible*).
- *Σταθερό*, στο τμήμα τοποθέτησης της αεροτομής.

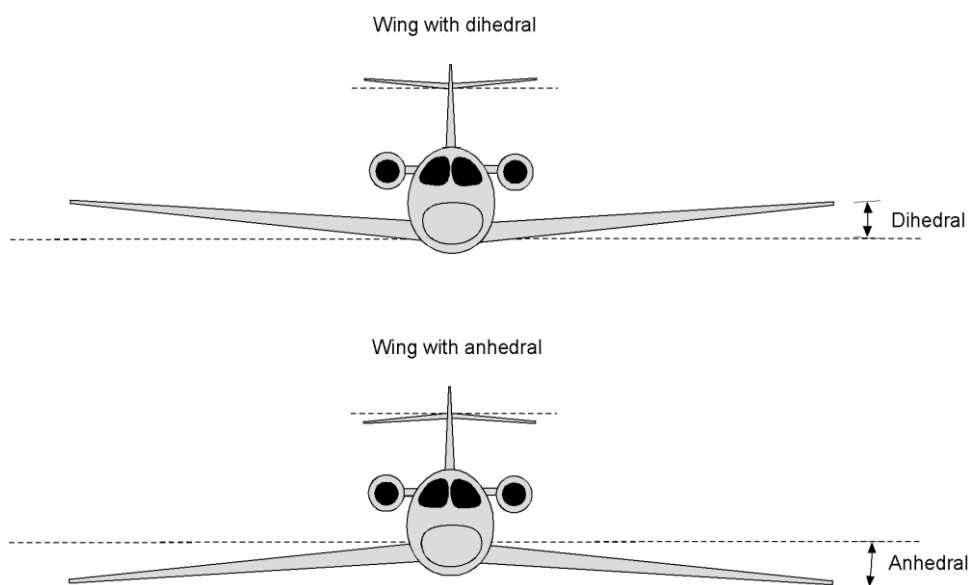
---

<sup>8</sup> Διαμορφώθηκαν αρκετά οι κανονισμοί, όσον αφορά την γεωμετρία των οχημάτων και την αποδοτικότητα τους. Δηλαδή, τα οχήματα τώρα τείνουν να είναι πιο αργά, από ότι ήταν πριν από μια δεκαετία, ώστε να συμμορφώνονται με τους κανονισμούς της ασφάλειας των οδηγών, που πλέον η ομοσπονδία (*FIA*) δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα.

Σύμφωνα, με τους κανονισμούς της *FIA* για οχήματα τύπου *Formula 1*, μπορούν να αντληθούν περαιτέρω προδιαγραφές, που να εστιάζουν σε λειτουργικές και τεχνικές απαιτήσεις, αλλά και σε περιορισμούς. Οι κανονισμοί είναι αρκετά περιοριστικοί – αυστηροί για τέτοιου είδους οχήματα. Στην εργασία αυτή, θα ληφθούν υπόψη ορισμένοι κανονισμοί που αφορούν την εμπρόσθια αεροτομή ενός μονοθέσιου, αλλά όχι με την ίδια αυστηρότητα που αναγράφεται στο έντυπο των κανονισμών της *FIA*, (το έγγραφο των κανονισμών 2022 βρίσκεται στις αναφορές, βλ. κεφάλαιο 9, [8]).

Στο σημείο αυτό, θα γίνει μια ανασκόπηση των τεχνικών προδιαγραφών των υπό πτερυγίων και πτερυγίων που αποτελούν μια εμπρόσθια αεροτομή ενός μονοθέσιου αυτοκινήτου (για τα ακόλουθα βλ. κεφάλαιο 9, [9]). Αυτό γίνεται, διότι ορισμένες προδιαγραφές μπορεί να συνδέονται μεταξύ τους (π.χ. οι προδιαγραφές του ενός πτερυγίου, να συνδέονται με τις αντίστοιχες προδιαγραφές ενός υπό πτερυγίου) ή να είναι κοινές.

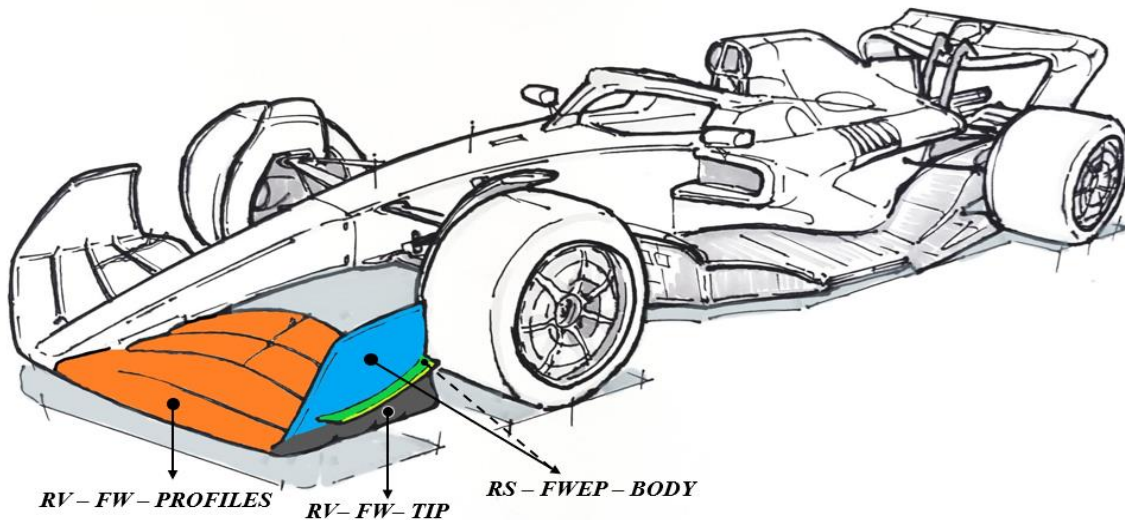
- Η μπροστινή αεροτομή χωρίζεται σε τέσσερα τμήματα.
- Το μπροστινό φτερό διατηρεί το «ανέβασμα» των υπό πτερυγίων προς τα πίσω για να κάνει τα αυτοκίνητα να φαίνονται πιο «δυναμικά», με την γωνία σάρωσης τους να είναι περίπου  $21^\circ$  μοίρες.
- Για να ενωθεί με τη μύτη, το μπροστινό φτερό έχει μια μικρή ανεδρική γωνία (*anhedral angle*) ή κλίση, περίπου  $2,6^\circ$  μοιρών από την κεντρική γραμμή μέχρι την άκρη, όπου το φτερό είναι πιο κοντά στο έδαφος – με το ελάχιστο ύψος να είναι  $100\text{ mm}^9$ . Δηλαδή, τα ανεδρικά φτερά έχουν αρνητική (κάτω) κλίση από τη βάση του φτερού, ενώ τα διεδρικά (*dihedral*) είναι τα φτερά που έχουν μια θετική (ανοδική) κλίση σε σχέση με τη βάση του φτερού.



Εικόνα 3.4: Διαφοροποίηση διεδρικών και ανεδρικών πτερυγίων [10]

<sup>9</sup> Η ελαφριά αύξηση του ύψους (κατά  $25\text{ mm}$ ) μειώνει το φαινόμενο εδάφους (*ground effect*) του πτερυγίου, μειώνοντας την απόλυτη κάθετη δύναμη (*downforce*), αλλά και την ευαισθησία του βήματος (*pitch*).

- Τα πραγματικά στοιχεία της πτέρυγας που παράγουν κάθετη δύναμη (*downforce*) πρέπει να χωρούν μέσα στα πλαίσια του όγκου αναφοράς του μπροστινού φτερού (*Front Wing Reference Volume, RV – FW – PROFILES*, βλ. **πορτοκαλί** στοιχεία, **Εικόνα 3.5**).
- Ο αριθμός των χωριστών στοιχείων – πτερυγίων περιορίζεται σε έως και τέσσερα, τα οποία πρέπει να στοιβάζονται διαδοχικά από το χαμηλότερο προς το υψηλότερο, με ελάχιστο και μέγιστο διαχωρισμό μεταξύ 5 mm και 15 mm αντίστοιχα. Η ελάχιστη κυρτή καμπυλότητα των προφίλ αεροτομής να είναι ίση ή μεγαλύτερη των 50 mm.
- Για δομικούς λόγους, τα δύο κύρια στοιχεία αεροτομής πρέπει να έχουν πάχος τουλάχιστον 25 mm (στο μέγιστο σημείο πάχους τους).
- Τα δύο κύρια στοιχεία αεροτομής πρέπει επίσης να στερεωθούν σε σχέση με τη μύτη, έτσι ώστε μόνο τα δύο επάνω πτερύγια, (εάν χρησιμοποιούνται και τα τέσσερα στοιχεία), να μπορούν να αλλάξουν γωνία για να ρυθμίσουν τα επίπεδα της κάθετης δύναμης (*downforce*) του οχήματος.
- Το ακραίο φτερό του μπροστινού πτερυγίου πρέπει να ταιριάζει στον όγκο αναφοράς του μπροστινού φτερού και πρέπει επίσης να είναι μεγαλύτερο από το σχήμα δέλτα της επιφάνειας αναφοράς του αμαξώματος του τελικού εξωτερικού φτερού της μπροστινής πτέρυγας (*Front Wing Endplate Body Reference Surface, RS – FWEP – BODY*, βλ. **μπλε & πράσινα** στοιχεία, **Εικόνα 3.5**) όταν το όχημα βρίσκεται σε πλευρική απεικόνιση (*side view*).
- Η εξωτερική ακμή πρέπει να έχει το ίδιο μήκος, με την κάτω άκρη της ελάχιστης απαίτησης μήκους του τελικού πτερυγίου (*endplate*).
- Το *endplate* πρέπει να είναι πάχους 10 – 12 mm, με τουλάχιστον 5 mm ράδιο (*fillet radius*) σε όλες τις ακμές του για την αποφυγή τρυπημάτων (*piercings – punctures*). Ενώ, οι γενικότερες μέγιστες διαστάσεις του μήκους και του ύψους του θα πρέπει να είναι έως 540 mm και 375 mm, αντίστοιχα.
- Επιπλέον, ολόκληρο το *endplate* πρέπει να είναι κατασκευασμένο από ένα προδιαγεγραμμένο πολύστρωματικό υλικό για να αποφευχθεί ο θρυμματισμός, έτσι ώστε τα τρυπήματα να μην προκαλούνται από αιχμηρά θραύσματα των ινών άνθρακα.
- Αφού καθοριστεί πλήρως το *endplate* και τα προφίλ πτερυγίων, τα προφίλ αυτών πρέπει να ενωθούν με το *endplate* μέσα στο στον όγκο αναφοράς του μπροστινού φτερού (*Front Wing Reference Volume, RV – FW – TIP*, βλ. **γκρι** στοιχείο, **Εικόνα 3.5**).  
Ο όγκος αυτός μπορεί να περιέχει έως και τέσσερα στοιχεία, αλλά αυτά πρέπει να συγχωνευθούν σε ένα, στο κάτω μέρος του *endplate*. Η ακτίνα (*blend radius*) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από ένα τόξο 20 mm, αποτρέποντας τυχόν αιχμηρές γωνίες – ακμές, που θα μπορούν να δημιουργήσουν ανεπιθύμητες δίνες – στροβίλους προς το πίσω μέρος του οχήματος.
- Το τελευταίο μέρος των μπροστινών πτερυγίων είναι το *diveplane*. Αυτό παράγει λίγη κάθετη δύναμη (*downforce*), αλλά δημιουργεί επίσης μια δίνη που μεταδίδετε εξωτερικά και κατά μήκος των μπροστινών ελαστικών. Επίσης, πρέπει να σχηματίζει μια ενιαία καμπύλη (χωρίς κλίση – *with no inflection*) και δεν μπορεί να έχει ακτίνα καμπυλότητας μικρότερη από 50 mm.



Εικόνα 3.5: Απεικόνιση τμημάτων εμπρόσθιας αεροτομής

### 3.3 Μέθοδοι κατεργασιών πρόσθεσης πολλαπλών υλικών

Οι μέθοδοι και διαδικασίες *KΠΥ* που συνδυάζουν δύο ή περισσότερα υλικά, έχουν εφαρμοστεί τα τελευταία χρόνια για την κατασκευή προϊόντων – συστημάτων, με πολύπλοκες γεωμετρίες και με αποτελεσματικό τρόπο, ώστε να εξοικονομείτε χρόνος παραγωγής και το κόστος των χρησιμοποιούμενων υλικών. Διαθέτουν επίσης, το πλεονέκτημα της κατασκευής ποιοτικών πολυλειτουργικών εξαρτημάτων, από πολλαπλά υλικά, παραγόμενα από μια επιλεγμένη διαδικασία.

Στη φάση αυτή, θα επιλεγθεί η διαδικασία *KΠΥ* που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του υπό σχεδίαση εξαρτήματος. Το «νέο» παραγόμενο υλικό, που συνδυάζει με αποτελεσματικό τρόπο, τα υλικά αυτά που του προσδιορίζουν συνδυαστικές ιδιότητες και από το οποίο θα κατασκευαστεί ένα μελλοντικό προϊόν, αποκαλείται ως Λειτουργικά Διαβαθμισμένο Υλικό (*Functionally Graded Material – FGM*). Το υλικό αυτό, αποτελεί αποτέλεσμα μιας διαδικασίας *KΠΥ* και η ποιότητα του συνδέεται άρρηκτα με τον τρόπο συνδυασμού των υλικών, που χρησιμοποιεί η κάθε μέθοδος *KΠΥ* για την δημιουργία του.

Αρχικά, υπάρχουν αρκετές διαδικασίες *KΠΥ* οι οποίες μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με τις ομάδες των υλικών που χρησιμοποιούν για την κατασκευή ενός προϊόντος. Ο πιο συνήθης συνδυασμός (κατηγοριών) υλικών, ειδικά στο χώρο του μηχανοκίνητου αθλητισμού, είναι αυτός των πολυμερών και των σύνθετων, (βλ. κεφάλαιο 4). Ήδη, μερικές ομάδες της *Formula 1* έχουν ξεκινήσει να εισάγουν στα μονοθέσια τους πολυλειτουργικά εξαρτήματα, παραγόμενα από *KΠΥ*. Όμως οι μέθοδοι αυτοί, χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή εσωτερικών εξαρτημάτων, που αντιμετωπίζουν υψηλές θερμοκρασίες, (π.χ. σύστημα εξάτμισης) και τα χρησιμοποιούμενα υλικά αυτών, προέρχονται από κατηγορίες όπως είναι τα κεραμικά και τα κράματα μετάλλων. Μπορεί η έννοια της *KΠΥ* να παραμένει ίδια, (όπως σε αυτή με συνδυασμό πολυμερών – σύνθετων), αλλά διαφέρει ως προς τα μηχανήματα και τα εργαλεία που απαιτούνται για την παραγωγή τους.

Στο σημείο αυτό θα ακολουθήσουν, συνοπτικά, οι παρουσιάσεις μεθόδων – διαδικασιών για κατεργασίες πρόσθεσης πολλαπλών υλικών, μέσα από τις οποίες θα επιλεγθεί η ιδανικότερη για το επιλεγμένο προς σχεδίαση εξάρτημα. Να σημειωθεί ότι, οι διαδικασίες αυτές θα αναφέρονται στην δημιουργία ενός τεμαχίου σε στρώσεις (*layer by layer*) και η κατάσταση του υλικού θα είναι σε σταθερή ή μερικώς σταθερή μορφή.

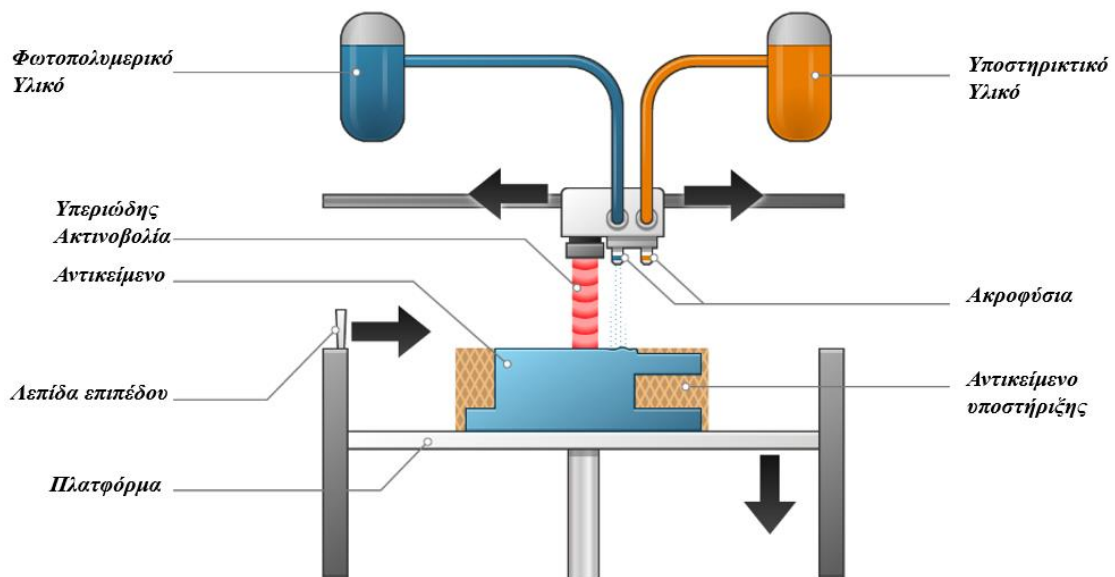
### 3.3.1 Εκτόξευση υλικού (*Material Jetting*)

Η μέθοδος εκτόξευσης υλικού είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές και ακριβείς μεθόδους *KΠΥ*, και εντάσσεται στη γενικότερη κατηγορία των τρισδιάστατων εκτυπωτών, μιας και η βασική λειτουργία τους είναι κοινή, όπως σε αυτή των συμβατικών μηχανών εκτύπωσης. Όπου, μικρό-σταγονίδια εναποτίθενται σε στρώσεις (*layer by layer*) στην πλατφόρμα κατασκευής.

Η προσθήκη του υλικού στην πλατφόρμα γίνεται μέσω κεφαλών εκτόξευσης υλικού, οι οποίες διαθέτουν μικροσκοπικά ακροφύσια (*nozzles*), τα οποία επιτρέπουν την ταυτόχρονη εκτύπωση πολλαπλών υλικών με υψηλή ανάλυση. Αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα της διαδικασίας αυτής, αντίθετα με άλλες διεργασίες *KΠΥ*, αυτό είναι ένας από τους κυριότερους περιορισμούς. Αποτελέσματα σχετικά με αυτή την διαδικασία έχουν δείξει επίσης, ότι μπορούν εύκολα να επιτευχθούν βαθμιδωτές διεπαφές υλικού (*gradient material interface*), οι οποίες εντέλει θα ενισχύουν την αντοχή ένωσης δύο διαφορετικών υλικών [11].

Πίνακας 3.1: Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Εκτόξευσης υλικού

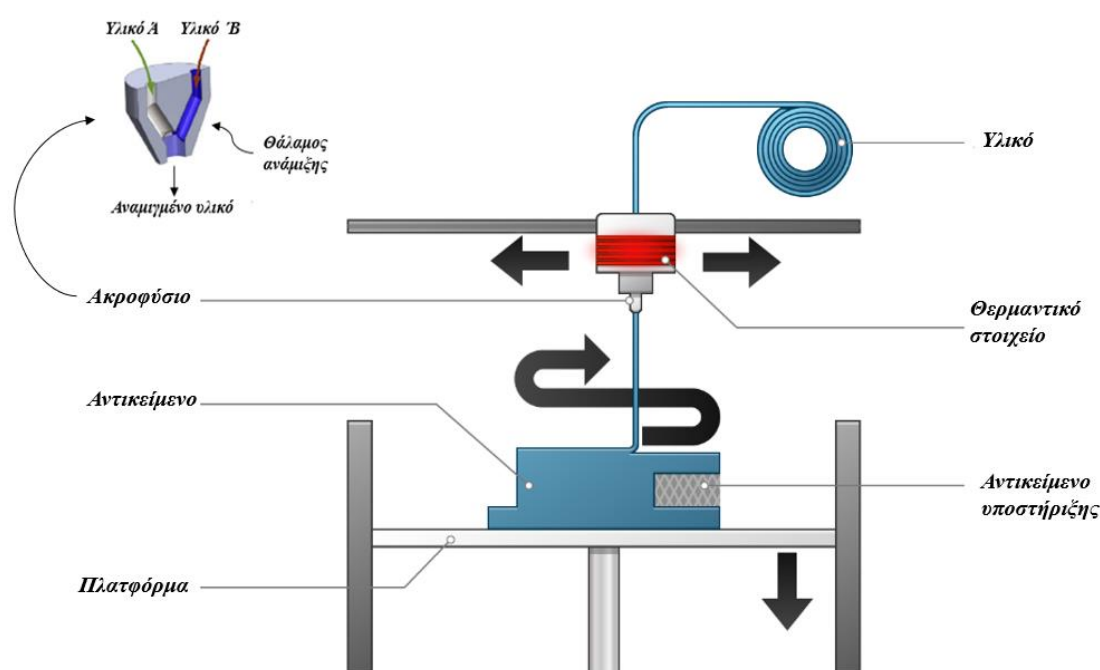
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Εύκολη διαμόρφωση πολύπλοκων γεωμετριών	Περιορισμένη επιλογή υλικών
Ταχύτατη εκτύπωση πολλαπλών υλικών	Ακριβή διαδικασία παραγωγής πρωτότυπων
Υψηλή ακρίβεια διαστάσεων	Υψηλό κόστος υλικών
Παραγωγή τεμαχίων από πολλαπλά υλικά κάνοντας χρήση πολλαπλών ακροφύσιων	Χαμηλές μηχανικές ιδιότητες παραγόμενων
Υψηλή ανάλυση στην παραγωγή τεμαχίων από πολλαπλά υλικά	Υποβάθμιση μηχανικών ιδιοτήτων για πολύωρη έκθεση, λόγω των φωτοευαίσθητων υλικών
Τα παραγόμενα αποκτούν ομοιογενείς μηχανικές & θερμικές ιδιότητες	Αναγκαία η χρήση υποστηρικτικών υλικών για τα περισσότερα πρωτότυπα
Χαμηλή σπατάλη υλικών, λόγω της ακρίβειας των ακροφύσιων	Κυρίως χρησιμοποιείται για την παραγωγή μη λειτουργικών πρωτότυπων



Εικόνα 3.6: Απεικόνιση μεθόδου Εκτόξευσης υλικού - MJ [12]

### 3.3.2 Εξώθηση υλικού (*Material Extrusion*)

Αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες και πιο γνωστές μεθόδους *KΠΥ*, που χρησιμοποιεί μια ποικιλία υλικών, όπως θερμοπλαστικά, σύνθετα και ευέλικτα ελαστομερή, σχηματίζοντας πρωτότυπα μέσω της δημιουργίας στρώσεων. Η διαδικασία αυτή, πολλές φορές αναφέρεται και ως Μοντελοποίηση Συγχωνευμένης Εναπόθεσης (*Fused Deposition Modeling – FDM*). Το υλικό παροχετεύεται επιλεκτικά διαμέσου ενός ακροφυσίου και συνήθως είναι ένα θερμοπλαστικό νήμα [11]. Από εδώ φανερώνεται και η κύρια διαφορά σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο (βλ. υποκεφάλαιο 3.3.1), όπου η μορφή εξώθησης του υλικού είναι σε νήμα και όχι σε μικρό-σταγονίδια (βλ. Εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7: Απεικόνιση μεθόδου Εξώθησης υλικού – *FDM* [12]

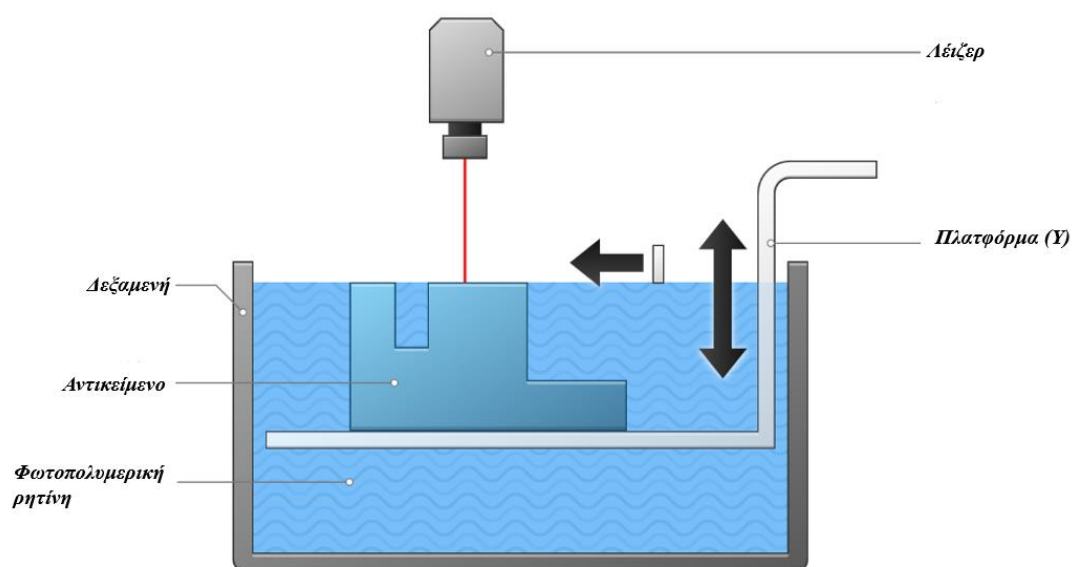
Η διαδικασία αυτή, πολλές φορές αποκαλείται και ως Κατασκευή Εναπόθεσης Νημάτων (*Fused Filament Fabrication – FFF*), λόγω της μορφής διοχέτευσης των υλικών από νήματα. Το υλικό σε μορφή νήματος τήκεται μέσα στην κεφαλή εξώθησης και εναποτίθεται σε μια πλάκα, που βρίσκεται τοποθετημένη πάνω στην πλατφόρμα στήριξης, χρησιμοποιώντας μια τεχνική δημιουργίας στρώσεων (*layer – by – layer*). Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι η διαθεσιμότητα μιας μεγάλης ποικιλίας υλικών και η ευκολία προσαρμογής της διαδικασίας για την παραγωγή ειδικών τεμαχίων που αποτελούνται από πολλά υλικά.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί το γεγονός χρήσης μίας κεφαλής στην διαδικασία αυτή, όπου βοηθά στην ένωση των δυο υλικών (όπου χρειάζεται θα παρέχεται και το κατάλληλο είδος ρητίνης), στην διαμόρφωση μιας καλύτερης επιφάνειας διεπαφής, στην ενίσχυση αντοχής και στον λιγότερο χρόνο παραγωγής.

### 3.3.3 Πολυμερισμός σε δεξαμενή (*Vat Photopolymerization*)

Η διαδικασία αυτή, μέσω στερεολιθογραφίας (*SLA*) χρησιμοποιεί φωτοπολυμερή ρητίνη για την κατασκευή υλικών με υψηλή ανάλυση και καλύτερη ποιότητα επιφάνειας. Ο φωτοπολυμερισμός είναι η διαδικασία σκλήρυνσης που συμβαίνει όταν το εναποτιθέμενο υλικό εκτίθεται σε υπεριώδης ακτινοβολία (*UV*) με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται διασταυρούμενοι δεσμοί, μεταξύ πολυμερικών αλυσίδων, προκαλώντας τη μετάβαση του εναποτιθέμενου υλικού από υγρή ή ημιστερεή κατάσταση σε στερεή [11].

Η μέθοδος αυτή, απαιτεί ειδικό εξοπλισμό και συνήθως απαιτεί και ειδικό περιβάλλον, για αυτό και τις περισσότερες φορές εφαρμόζεται σε εργαστήρια. Παράλληλα μπορεί να δημιουργήσει προκλήσεις, όσον αφορά την διαχείριση πολλών υλικών, διότι υπάρχει υψηλός βαθμός «μόλυνσης» μεταξύ αυτών, λόγω του υγρού πολυμερές που βρίσκεται εντός δεξαμενής, στην οποία και θα εναποτίθενται τα υλικά. Ενώ ταυτόχρονα, κρίνεται και αρκετά χρονοβόρα.

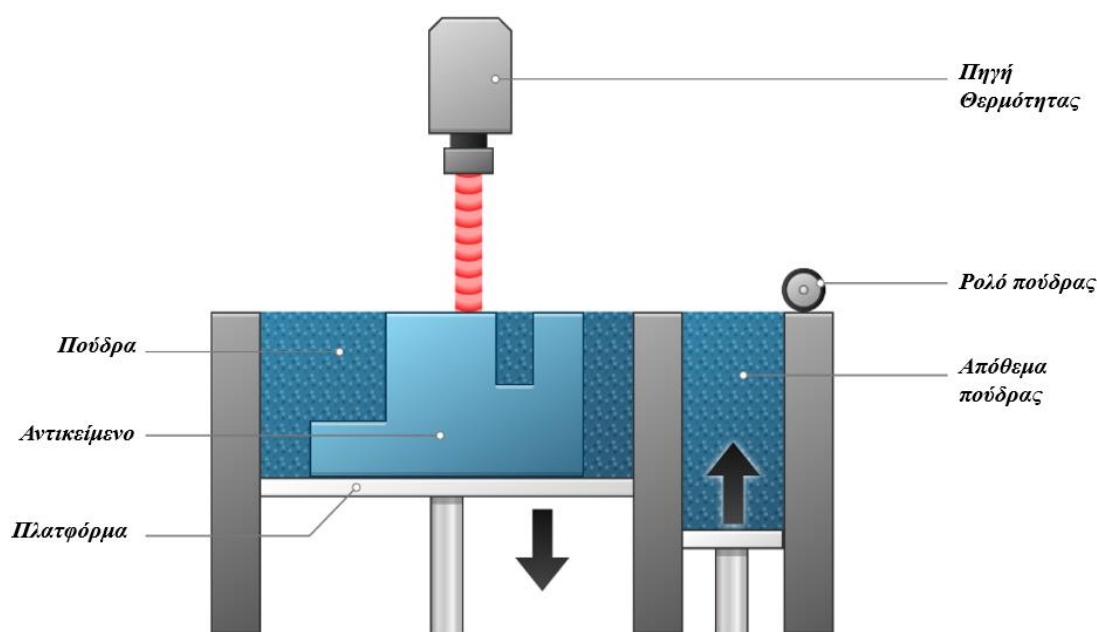


Εικόνα 3.8: Απεικόνιση μεθόδου Πολυμερισμού σε Δεξαμενή – VAT [12]

### 3.3.4 Σύντηξη σε τράπεζα Σκόνης (*Powder Bed Fusion*)

Στη διαδικασία αυτή, μια θερμική ενέργεια τήκει επιλεκτικά περιοχές μιας τράπεζας κονιοποιημένου υλικού. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά μπορεί να ποικίλουν στην μέθοδο αυτή [11]. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταλλικά, πολυμερή και κεραμικά. Ανάλογα με την χρήση του υλικού, μπορεί να διαμορφωθεί και η διαδικασία:

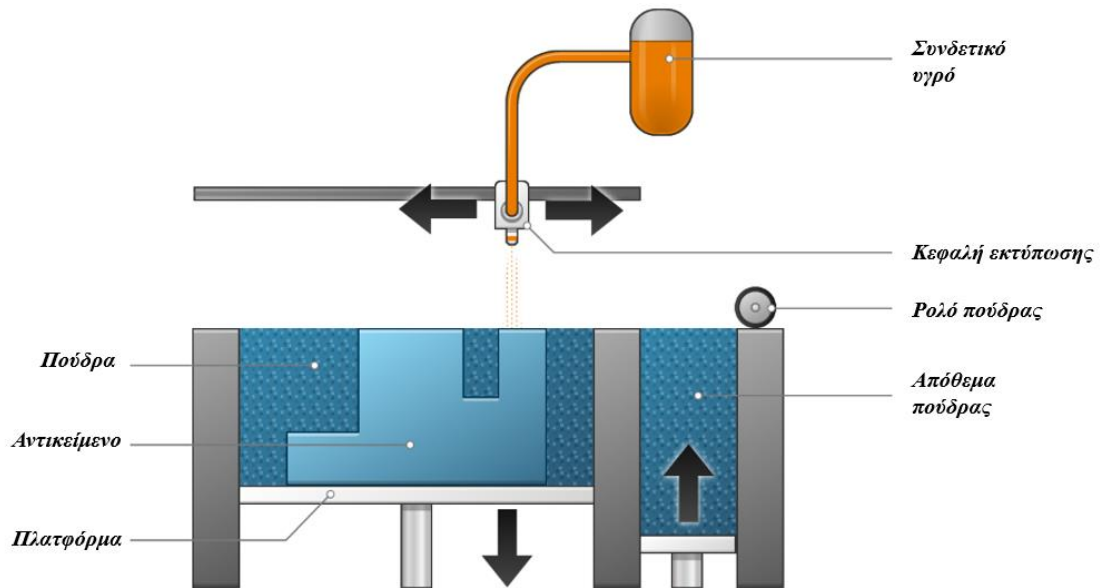
- Για μη μεταλλικά υλικά, γίνεται χρήση Επιλεκτικής Πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ (*Selective Laser Sintering – SLS*).
- Για μεταλλικά υλικά, γίνεται χρήση Επιλεκτικής Τήξης με λέιζερ (*Selective Laser Melting – SLM*)
- Για μεταλλικά υλικά, μπορεί να γίνει χρήση απευθείας Πυροσυσσωμάτωσης Μετάλλων με λέιζερ (*Direct Metal Laser Sintering – DMLS*).
- Για μεταλλικά υλικά επίσης, μπορεί να γίνει χρήση Τήξης με Δέσμη Ηλεκτρονίων (*Electron Beam Melting – EBM*).



Εικόνα 3.9: Απεικόνιση μεθόδου Σύντηξη σε Τράπεζα Σκόνης – PBF [12]

### 3.3.5 Εκτόξευση συνδετικού υλικού (*Binder Jetting*)

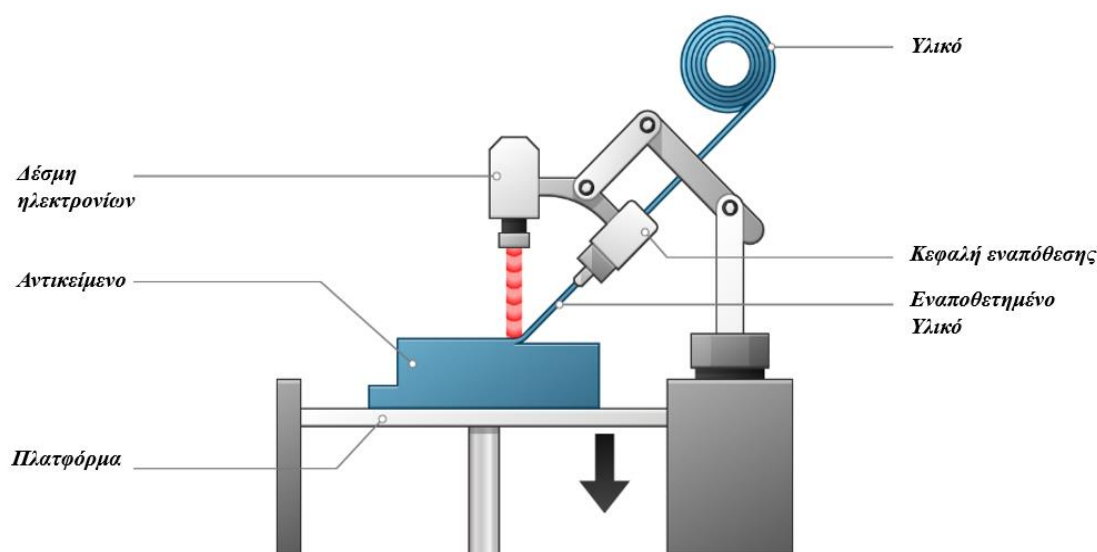
Στη διαδικασία εκτόξευσης συνδετικού υλικού (*BJ*), εναποτίθεται συνδετική ουσία σε υγρή μορφή (χημικά), ώστε να ενώσει επιλεκτικά τη σκόνη υλικού. Η χρήση των υλικών είναι κυρίως μέταλλα και κεραμικά, αλλά αποδεκτή μπορεί να είναι και χρήση πολυμερών, όπως είναι το *ABS*. Έχει κοινά στοιχεία με την Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (*Selective Laser Sintering – SLS*), αλλά η *BJ* χρησιμοποιεί μια βιομηχανική κεφαλή εκτύπωσης, αντί για λέιζερ [11].



Εικόνα 3.10: Απεικόνιση μεθόδου Εκτόξευσης Συνδετικού υλικού - BJ [12]

### 3.3.6 Εναπόθεση μέσω κατευθυνόμενης ενέργειας (*Directed Energy Deposition*)

Η εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενέργεια (*DED*) είναι μία από τις μεθόδους *KΠΥ*, που εμπίπτει σε διαφορετικές κατηγορίες επεξεργασίας, όπως η εναπόθεση μετάλλων με λέιζερ (*LMD*), η διαμόρφωση με λέιζερ (*LENS*) και η απευθείας εναπόθεση μετάλλων (*DMD*). Σε αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιείται υλικό με τη μορφή σύρματος ή σκόνης. Τα υλικά τήκονται χρησιμοποιώντας λέιζερ, δέσμη ηλεκτρονίων ή πηγές ενέργειας τόξου πλάσματος στην ελεγχόμενη περιοχή, καθώς τα υλικά εναποτίθενται [11].



Εικόνα 3.11: Απεικόνιση μεθόδου Εναπόθεσης με Κατευθυνόμενη Ενέργεια – *DED* [12]

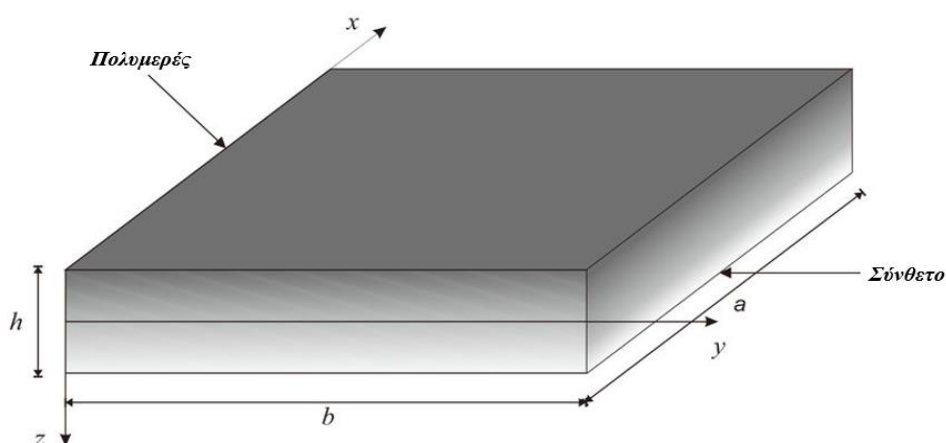
### 3.3.7 Διαστρωμάτωση φύλλων (*Sheet Lamination*)

Στη Διαστρωμάτωση Φύλλων (*SL*) διαδοχικά φύλλα υλικού εναποτίθενται, κόβονται περιφερειακά και κολλιούνται ή συγκολλούνται. Το επιθυμητό σχήμα στρώματος, κόβεται συνήθως με λέιζερ ή με ειδικό μαχαίρι. Γενικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε φύλλο υλικού που μπορεί να τυλιχθεί. Μπορεί να είναι χαρτί, πλαστικό ή και ορισμένα μεταλλικά κράματα. Και, το πιο σύνηθες μέγεθος των φύλλων είναι διαστάσεων A4.

### 3.3.8 Λειτουργικά Διαβαθμισμένο Υλικό (*Functionally Graded Material*)

Αποτελεί το αποτέλεσμα μίας διαδικασίας *KΠΥ*, και έχει ως κύριο μέλημα, την παραγωγή εξαρτημάτων ελεύθερης μορφής, βασισμένα στην απόδοση από την κατευθυνόμενη σταδιακή διαβάθμιση στις ιδιότητες του υλικού. Δηλαδή, το τεμάχιο «χτίζεται» σε στρώσεις (*layer by layer*), τροποποιώντας σκόπιμα τις παραμέτρους επεξεργασίας, αλλάζοντας σταδιακά την κατανομή του χωροταξικού υλικού εντός ενός στοιχείου για να ανταποκριθεί στην προβλεπόμενη λειτουργία του. Η διεπαφή πολλαπλών υλικών μπορεί να κατασκευαστεί μεταβάλλοντας τις συγκεντρώσεις των όγκων τους, με ένα συνεχές βήμα χρησιμοποιώντας ένα μόνο μηχάνημα που να επιτρέπει την κατασκευή σύνθετων εξαρτημάτων, απευθείας από το στάδιο του σχεδιασμού στα λειτουργικά μέρη του.

Παράλληλα, τα υλικά μπορούν να συσχετιστούν σε μια ενιαία διαδικασία, για την παραγωγή πολυμερικών – σύνθετων συνδυασμών στα επιθυμητά τμήματα του εξαρτήματος. Επίσης, η κατασκευή εξαρτημάτων πολλαπλών υλικών με χρήση ξεχωριστών ακροφύσιων για κάθε υλικό, περιορίζει την ικανότητα εκτύπωσης εξαρτημάτων *FGM*, λόγω της άμεσης μετάβασης στη διεπαφή (δηλ. η μετάβαση – διαβάθμιση μπορεί να μην γίνεται ομαλά). Και, δεδομένου ότι μια απότομη μετάβαση στις αρθρώσεις του υλικού (*material joints*) μπορεί να δείξει συγκεντρώσεις υψηλών τάσεων, το εξάρτημα είναι πολύ πιθανό να εμφανίσει αδυναμίες κάτω από διάφορες καταστάσεις καταπόνησης. Κάτι, που δε θα είναι επιθυμητό για την επίτευξη της βέλτιστης λειτουργίας του στο περιβάλλον χρήσης του. Όμως, ο περιορισμός αυτός, μπορεί να ελεγχθεί με τη χρήση ενός ωθητήρα εξώθησης με ένα ακροφύσιο που να επιτρέπει τη συνεχή αλλαγή της σύνθεσης, κατά την εκτύπωση με βάση τη ρυθμιζόμενη αναλογία του κινητήρα εξώθησης. Το κύριο πλεονέκτημα της διαδικασίας *FDM* έναντι μιας άλλης συμβατικής *KΠΥ* είναι η εναλλαγή υλικών, χωρίς αλλαγή της κεφαλής εξώθησης.



Εικόνα 3.12: Παράδειγμα Λειτουργικά Διαβαθμισμένου Υλικού – *FGM* [13]

### 3.3.8.1 Βήματα διαδικασίας παραγωγής ενός *FGM*

Τα βήματα της διαδικασίας *FGM* περιλαμβάνουν πολλά στάδια, όπως είναι τα παρακάτω:

- Σχεδίαση, που περιλαμβάνει τη γεωμετρική μοντελοποίηση, τη μικροδομική μοντελοποίηση και την μοντελοποίηση υλικών.
- Προσομοίωση, που περιλαμβάνει αναλύσεις ως προς τις ιδιότητες του εξαρτήματος, δηλαδή του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο (π.χ. μηχανικές) και ως προς τη γεωμετρία των τμημάτων του, (π.χ. αν έχει αιχμηρά σημεία στα οποία θα συσσωρεύονται υψηλές τάσεις).
- Βελτιστοποίηση της κατανομής των υλικών ή και της γεωμετρίας των τμημάτων του εξαρτήματος, (αν κριθεί απαραίτητο από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων).
- Διαχωρισμό του εξαρτήματος, με βάση την τοποθέτηση των διαφορετικών υλικών (δηλ. σε ποια τμήματα της γεωμετρίας του θα τοποθετείται το κάθε υλικό).
- Δημιουργία διαδρομής των εργαλείων (π.χ. του ωθητήρα εκτόξευσης, ενός τρισδιάστατου εκτύπωση).
- Ανάλυση απόδοσης, βάση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του εξαρτήματος στο περιβάλλον αλληλοεπίδρασης – χρήσης του (*Finite Element Analysis – FEA*)<sup>10</sup>.

#### Σημειώσεις:

- ✚ Δεδομένου ότι τα περισσότερα εξαρτήματα που κατασκευάζονται από *KΠΥ* έχουν ανισότροπες ιδιότητες υλικού, λόγω των ετερογενειών που δημιουργούνται κατά την διαδικασία κατασκευής, είναι απαραίτητη η ομογενοποίηση των ιδιοτήτων του υλικού. Και, πρέπει να εκτελείται σε αρχικό στάδιο της διαδικασίας σχεδίασης του υλικού.
- ✚ Μία ακόμα σημαντική σημείωση είναι η δημιουργία διαδρομής διαχωρισμού του τεμαχίου σε τμήματα. Η οποία περιλαμβάνει τη μετατροπή ενός μοντέλου πλέγματος σε μικρό-δομές για την καλύτερη κατανομή των χαρακτηριστικών του υλικού.
- ✚ Μετά την κατασκευή του εξαρτήματος, εφαρμόζοντας διάφορες μεθόδους δοκιμών – κρίνεται η απόδοση του εξαρτήματος ως προς τις λειτουργίες του.

---

<sup>10</sup> Είναι η διαδικασία προσομοίωσης της συμπεριφοράς ενός εξαρτήματος ή συναρμολογήματος (*assembly*), υπό συγκεκριμένες συνθήκες, έτσι ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων – *FEM*.

## 4. Έρευνα υλικών & Χρήση αισθητήρων

---

### 4.1 Επιλογή & Συνδυασμός υλικών

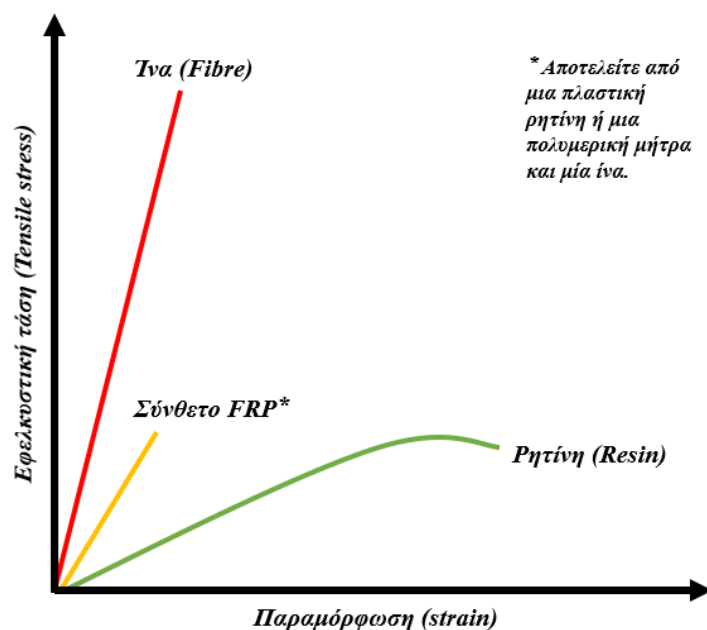
Σε οχήματα επιδόσεων, όπως είναι τα μονοθέσια της *Formula 1*, η πλειοψηφία των υλικών απαρτίζεται από σύνθετα υλικά (*composites*). Γενικά, «σύνθετα» ονομάζονται τα υλικά τα οποία συνδυάζουν δυο ή περισσότερα υλικά, ώστε να δημιουργήσουν ένα σύνθετο με βελτιστοποιημένες ιδιότητες. Ένα τέτοιο παράδειγμα, αποτελεί ο συνδυασμός μιας πολυμερικής μήτρας (*polymer matrix*) και ορισμένων ενισχυτικών παραγόντων, όπως είναι οι ίνες άνθρακα (*carbon fiber*). Αυτός, είναι και ένας από τους πιο συνηθισμένους συνδυασμούς για την παραγωγή σύνθετων υλικών. Το 85% των σημερινών μονοθέσιων της *Formula 1* αποτελούνται από σύνθετα υλικά.

Ένας από τους κυριότερους λόγους, που γίνεται η χρήση τέτοιων υλικών σε οχήματα που αποσκοπούν στην μέγιστη απόδοση, είναι διότι οι ίνες άνθρακα (*carbon fiber*) μπορούν και μεταφέρουν τα (εφελκυστηκά) φορτία σε όλο το μήκος τους (δηλ. κατά μήκος), παρέχοντας μεγαλύτερη αντοχή και ακαμψία προς μία κατεύθυνση, κάτι που καθιστά τα σύνθετα υλικά, τέτοιου τύπου, και τα πιο ισχυρά από όλα τα διαθέσιμα δομικά υλικά.

Ωστόσο, επειδή οι ίνες μπορούν να αποδυναμωθούν αρκετά, όταν αυτά υποβληθούν σε συμπιεστικές και καμπτικές δυνάμεις, οι ίνες συχνά ενσωματώνονται σε μήτρες πολυμερούς (*polymer matrix*), με επεξεργασμένη ρητίνη (*cured resin*). Η ρητίνη μπορεί να δρα σαν κόλλα και να συνδέει τις ίνες μεταξύ τους, αλλά παράλληλα μπορεί και να τις υποστηρίζει, επιτρέποντας τους να απορροφούν μεγάλες συμπιεστικές δυνάμεις.

Η ρητίνη επιτρέπει επίσης, τη μεταφορά διατμητικών τάσεων μεταξύ των ινών, κάτι που ωθεί τις ίνες να «λειτουργούν ως ένα» υλικό, ισοκατανέμοντας τα εξωτερικά φορτία πιο ομοιόμορφα (δηλ. προσφέρει καλύτερη κατανομή), σε σχέση με μια δέσμη χωρίς ρητίνη ή όπως αλλιώς ονομάζεται «ξηρή» δέσμη (*dry bundle*). Η πρακτική σημασία αυτής, είναι ότι αν σπάσει μια ίνα λόγω του φορτίου, τότε αυτό μπορεί να κατανεμηθεί στις υπόλοιπες.

Οπότε, η χρήση ενός σύνθετου υλικού για το υπό σχεδίαση πολυλειτουργικό εξάρτημα της εμπρόσθιας αεροτομής μπορεί να κριθεί ως αναγκαίο – απαραίτητο, για την επίτευξη ορισμένων προδιαγραφών, (βλ. υποκεφάλαιο 3.2).



Εικόνα 4.1: Ο συνδυασμός ίνας και ρητίνης συνθέτει ένα σύνθετο υλικό [14]

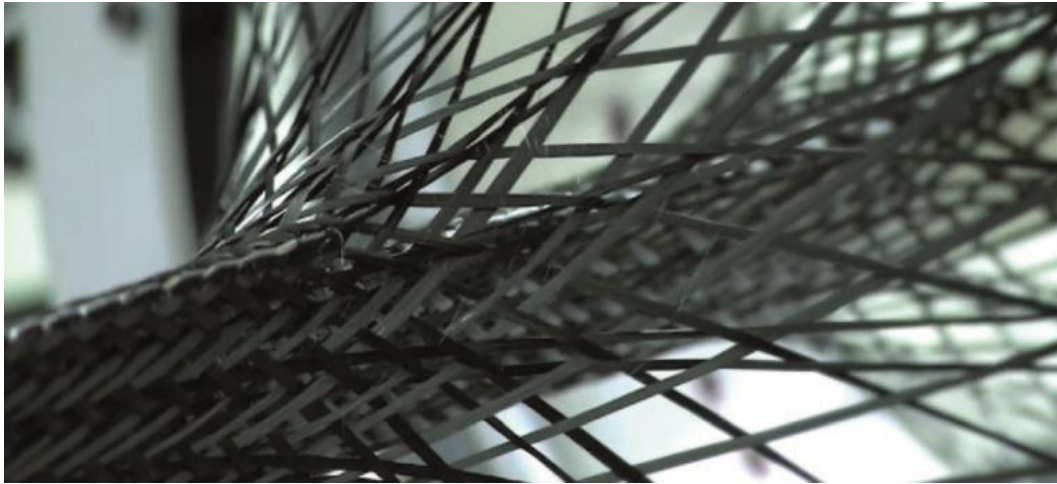
## 4.2 Τύποι ινών

Οι ίνες άνθρακα (*carbon fiber*) χρησιμοποιούνται τακτικά στον μηχανοκίνητο αθλητισμό από τη δεκαετία του '70, κάτι που καθιστά τα σύνθετα με ίνες άνθρακα αν όχι τα σημαντικότερα υλικά των σημερινών αγωνιστικών οχημάτων, τότε ένα από τα σημαντικότερα. Και αυτό διότι έχει αποδειχθεί ότι είναι περίπου πέντε φορές ισχυρότερα από το ατσάλι (*steel*), κατέχοντας παράλληλα και διπλάσια ακαμψία. Στην πραγματικότητα, οι ίνες άνθρακα (*carbon fiber*) έχουν την υψηλότερη ειδική ακαμψία (ακαμψία σε σχέση με την πυκνότητα) από οποιαδήποτε ίνα που διατίθεται στο εμπόριο. Παρουσιάζει επίσης, υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και καλή αντοχή στη διάβρωση και την κόπωση<sup>11</sup>.

Οι ίνες άνθρακα (*carbon fiber*) μπορούν να κατασκευαστούν από μια ποικιλία πρώτων υλών που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε άτομα άνθρακα, στη χημική τους ένωση. Αυτά περιλαμβάνουν πολυακρυονιτρίλιο (*PAN*)<sup>12</sup>, πίσσα ή βισκόζη. Τα νήματα ή νημάτια (*filaments*) που προέρχονται από *PAN* περνούν από τρία στάδια. Ωστόσο, στην προκειμένη φάση δε θα αναλυθούν. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί, είναι ότι τα νήματα (*filaments*) είναι λεπτότερα από μια ανθρώπινη τρίχα και συσσωρεύονται για να σχηματίσουν ένα νήμα (*strand*) ή ένα επιστραμμένο νήμα (*twisted strand*), το οποίο μπορεί στη συνέχεια να συνδυαστεί σε ένα νήμα ή σε ένα ρολό, που με τη σειρά τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία υφασμένων (*woven*), είτε μη υφασμένων (*non-woven*) ή μονοκατευθυντικών (*uni-directional*) υφασμάτων ενίσχυσης (*fabrics*) [14].

<sup>11</sup> Ωστόσο, η αντοχή των ινών άνθρακα σε κρούση είναι χαμηλότερη από τις ίνες γυαλιού ή αραμιδίου (*aramid fibres*), όπως περιγράφεται παρακάτω.

<sup>12</sup> Το πιο δημοφιλές είναι το *PAN*, λόγω της σταθερής ποιότητάς του.



Εικόνα 4.2: Απεικόνιση ανθρακονημάτων [14]

Πέρα από τις ίνες άνθρακα (*carbon fiber*), που γενικότερα είναι και οι πιο διαδεδομένες, υπάρχουν και άλλες τρεις κατηγορίες ινών, από τις οποίες μπορούν να δημιουργηθούν σύνθετα υλικά, και αυτές είναι οι εξής:

- Ίνες γυαλιού (*glass fibres*)
- Ίνες αραμιδίου (*aramid fibres*)
- Φυσικές ίνες (*natural fibres*)

Από αυτές, μόνο οι πρώτες δυο χρησιμοποιούνται στο τομέα του μηχανοκίνητου αθλητισμού και γενικότερα στο τομέα των οχημάτων υψηλών επιδόσεων.

Αρχικά, οι ίνες άνθρακα (*glass fibres*) μπορεί να φαντάζουν αδύνατο να χρησιμοποιούνται στο χώρο των σύνθετων για τέτοιου είδους οχήματα. Γενικά, το γυαλί ως υλικό είναι πολύ εύθραυστο και όταν πιέζεται τα ελαττώματα του διαδίδονται εύκολα σε όλο το υλικό, οδηγώντας σε ρωγμές. Ωστόσο, εάν το γυαλί κατασκευαστεί σε νήματα μικρής διαμέτρου, αν και μπορεί να υπάρχουν ακόμα κάποια ελαττώματα στην επιφάνεια του, σε μια δεδομένη μάζα υλικού η αναλογία ινών που επηρεάζονται είναι αρκετά μικρή και έτσι η πλειοψηφία των ινών μπορεί και παραμένει ισχυρή. Συνεπώς, και μια δέσμη ινών γυαλιού (*bundle of glass fibre*) μπορεί στην πραγματικότητα να είναι σχετικά δυνατή και να αποτελεί εν τέλει μια επιλογή για την σύνθεση ενός σύνθετου εξαρτήματος [14].



Εικόνα 4.3: Διαφορετικά μοτίβα ύφανσης σύνθετου υλικού από ίνες γυαλιού [14]

Τέλος, υπάρχουν οι ίνες αραμιδίου (*aramid fibres*) ή πολυαμίδια (*polyamides*), γνωστά και ως *Kevlar*. Οι ίνες αυτές σχετίζονται με το νάιλον, αλλά η διαφορετική χημική τους σύσταση και το γεγονός ότι οι αλυσίδες ενός πολυμερούς κατευθύνονται έντονα κατά την διαδικασία κατασκευής τους, οδηγεί στην δημιουργία μιας απίστευτα άκαμπτης ίνας. Έχουν επίσης υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, χαμηλή πυκνότητα και εξαιρετική σκληρότητα, για αυτό και στον μηχανοκίνητο αθλητισμό, το *Kevlar* μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο αμάξωμα ή σε εξαρτήματα που τοποθετούνται πάνω σε αυτό. Η χαμηλή πυκνότητα του έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ισχυρότερων και ελαφρύτερων πάνελ αμαξώματος, σε σχέση με τις ίνες γυαλιού. Ωστόσο, οι ίνες αραμιδίου (*aramid fibres*) έχουν χαμηλή αντοχή σε θλίψη κατά μήκος της ίνας, που μπορεί να οδηγήσει στον διαχωρισμό των στρωμάτων μέσα σε ένα πολύστρωματικό υλικό υπό την επίδραση συμπίεσης.



Εικόνα 4.4: Ίνες αραμιδίου [14]

### 4.3 Τύποι ρητίνης

Υπάρχουν δύο γενικοί τύποι ρητίνης που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά και που χρησιμοποιούνται στο μηχανοκίνητο αθλητισμό ή στα οχήματα υψηλών επιδόσεων:

- τα θερμοπλαστικά &
- τα θερμοσκληρυνόμενα

Το πρώτο διαθέτει μακριές μπλεγμένες μοριακές αλυσίδες που γίνονται ελεύθερες να κινούνται μόλις θερμανθούν, κάτι που επιτρέπει στα θερμοπλαστικά να λιώσουν και να γίνουν διαμορφώσιμα.

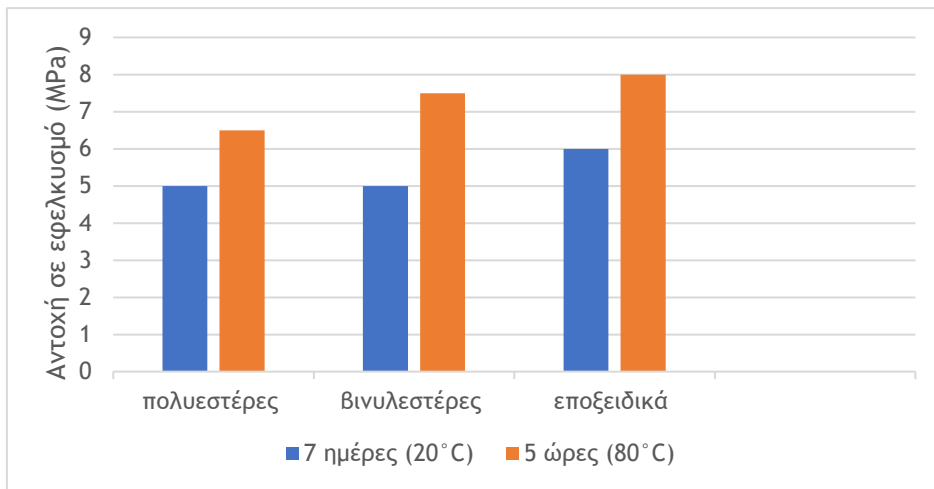
Ενώ, οι λεγόμενοι και θερμοσκληρυντές στα θερμοσκληρυνόμενα υλικά, δεν λιώνουν υπό θερμότητα, αντίθετα αποσυντίθενται. Χωρίς συντήρηση, οι κοντές μοριακές αλυσίδες που αποτελούν αυτή την ομάδα πολυμερών έχουν χαμηλό ιξώδες, το οποίο είναι ιδανικό για τον εμποτισμό των ινών.

Η χημική αντίδραση που προκαλείται από τα σκληρυντικά που αναμιγνύονται στα μείγματα ρητίνης σχηματίζουν δεσμούς μεταξύ αυτών των κοντών αλυσίδων, δημιουργώντας ένα τρισδιάστατο δίκτυο «διασταυρούμενων» συνδέσμων, που είναι απίστευτα ισχυρό. Τα πιο κοινά θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά, ειδικά στο χώρο του μηχανοκίνητου αθλητισμού, είναι οι πολυεστέρες (*polyesters*), οι βινυλεστέρες (*vinylesters*) και τα εποξειδικά (*epoxies*).

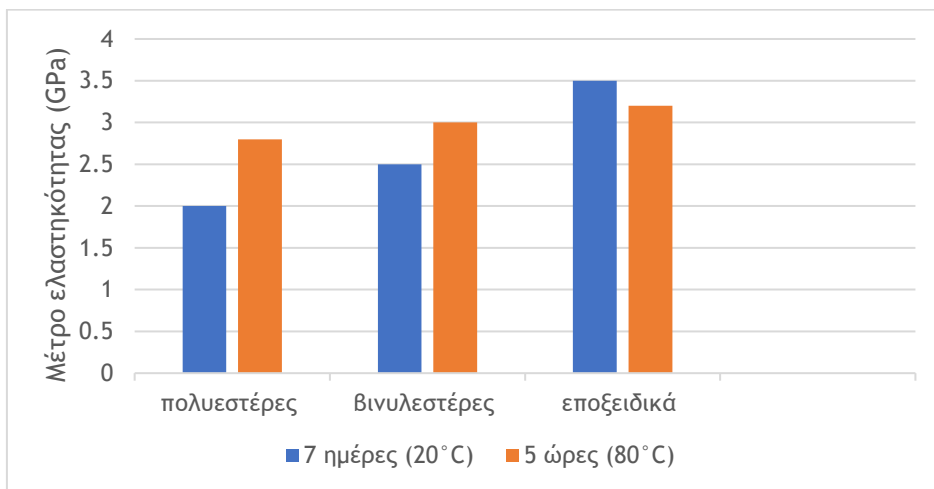
Οι πολυεστέρες είναι οι συνηθέστεροι, διότι είναι οι φθηνότεροι και αυτό συμβαίνει επειδή τα πιο σημαντικά συστατικά έχουν ήδη αναμειχθεί μεταξύ τους, που είναι τα μονομερή ακόρεστου πολυεστέρα και το στυρένιο (*styrene*). Το οποίο αποτελεί έναν ακόρεστο υγρό υδρογονάνθρακα που λαμβάνεται ως υποπροϊόν πετρελαίου, πολυμερίζεται εύκολα και χρησιμοποιείται για την κατασκευή πλαστικών και ρητινών. Ο ακόρεστος πολυεστέρας (*unsaturated polyester*) διαλύεται σε περίπου 35% στυρένιο (*styrene*) και κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης, αυτό το στυρένιο (*styrene*) σχηματίζει σταυρωτούς δεσμούς με τις ακόρεστες ρητίνες στις πολυεστερικές αλυσίδες, προκαλώντας το σχηματισμό μιας τρισδιάστατης δομής. Οι πολυεστερικές ρητίνες μπορούν να σκληρυνθούν σε θερμοκρασία δωματίου, αν μείνουν για αρκετό καιρό. Εναλλακτικά, ένας καταλύτης, όπως το υπεροξείδιο μπορεί να προστεθεί σε αυτές για να επιταχύνει τη χημική αντίδραση της σκλήρυνσης τους.

Οι βινυλεστέρες χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται υψηλότερη χημική αντοχή. Είναι λιγότερο ευαίσθητοι στην υγρασία και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιστρωση πολυεστερικών δομών που εκτίθενται, για παράδειγμα, στο νερό. Αυτή η χαμηλή ευαισθησία στην υγρασία οφείλεται, εν μέρει, στη θέση των εστέρων (*esters*) μέσα στις μοριακές αλυσίδες και επίσης στο ότι υπάρχει μικρότερο τμήμα εστέρων επειδή τα μονομερή είναι ελαφρώς μακρύτερα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός σκληρότερου πολυμερούς.

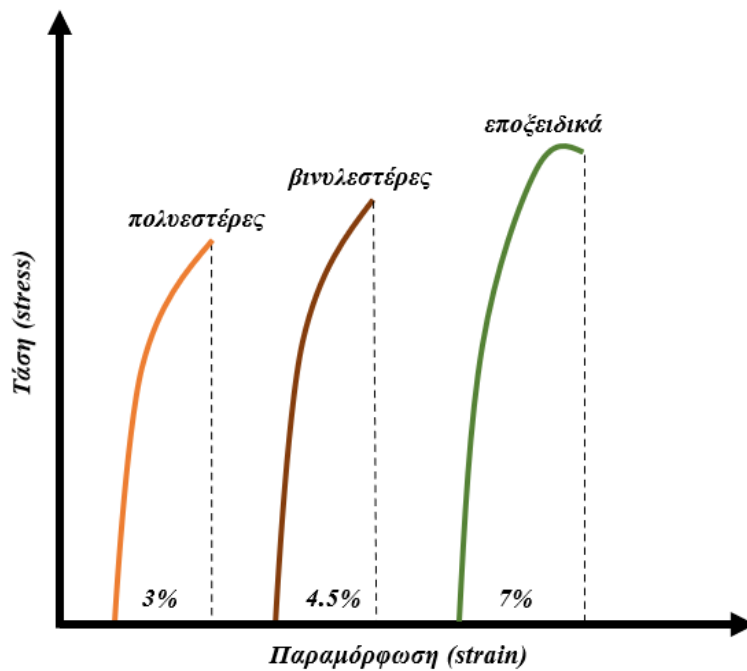
Τα εποξειδικά (*epoxies*) λειτουργούν διαφορετικά από τους πολυεστέρες και τους βινυλεστέρες. Αυτό συμβαίνει επειδή το εποξειδικό σχηματίζεται από τη συγχώνευση δύο συστατικών, πιο συχνό είναι ένα μόριο επόξειδου (*epoxy*) και μιας αμίνης (*amine*). Η ανάμειξη αυτών των δύο συστατικών ξεκινά μια αντίδραση που έχει ως αποτέλεσμα τα εποξειδικά μόρια και οι αμίνες να σχηματίζουν ένα κλειστό δίκτυο με πιο κανονική – πιο τακτική – μόνιμη δομή από τους πολυεστέρες ή τους βινυλεστέρες. Τα εποξειδικά (*epoxies*) χρησιμοποιούνται σε προ εμποτισμένες ίνες άνθρακα (*carbon fiber*) που είναι και το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο σύνθετο υλικό, στον μηχανοκίνητο αθλητισμό [14].



Γράφημα 4.1: Σύγκριση ρητινών σε σχέση με την αντοχή σε εφελκυσμό [15]



Γράφημα 4.2: Σύγκριση ρητινών σε σχέση με την ακαμψία σε εφελκυσμό [15]



Εικόνα 4.5: Τυπικό διάγραμμα καμπυλών ρητινών ( $\sigma - \epsilon$ ), για διάστημα 5 ωρών σε 80°C [15]

Συνοψίζοντας, έχουμε τρεις κύριες κατηγορίες ινών (χωρίς τις φυσικές), που μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους για να σχηματίσουν είτε υφασμένα (*woven*), είτε μη υφασμένα (*non-woven*) ή μονοκατευθυντικά (*uni-directional*) υφάσματα (*fabrics*) ενίσχυσης.

Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες (πολυεστέρας, βινυλεστέρας ή εποξειδικό) εφαρμόζονται στη συνέχεια σε αυτά τα υφάσματα, για τη συγκόλληση των ινών μεταξύ τους. Σχηματίζοντας ένα στρώμα ενίσχυσης ινών, που είναι γνωστό ως φύλλο (*ply* or *lamina*). Μια στοίβα από φύλλα μπορεί στη συνέχεια να τακτοποιηθεί το ένα πάνω στο άλλο, σε ένα καλούπι, με διαφορετικούς προσανατολισμούς, και στη συνέχεια να συνδεθεί με ρητίνη για να σχηματίσει ένα πολύ-στρωματικό υλικό (αποτελεί και την πιο συχνή επιλογή διαμόρφωσης ενός εξαρτήματος – κομματιού).

Αυτό επίσης, μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, αλλά οι δύο μέθοδοι που σχετίζονται περισσότερο με τον μηχανοκίνητο αθλητισμό είναι οι εξής:

- *Wet lay-up* – ένα στρώμα ξηρού υφάσματος ενίσχυσης τοποθετείται πάνω από ένα καλούπι και στη συνέχεια εφαρμόζεται ρητίνη με πινέλο ή ρολό. Ένα άλλο στρώμα υφάσματος τοποθετείται από πάνω, με συγκεκριμένο προσανατολισμό για βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Αυτό μπορεί στη συνέχεια να σκληρυνθεί σε θερμοκρασία δωματίου ή σε ένα αεροστεγές θάλαμο (*autoclave*), ανάλογα με τον τύπο του συστήματος ρητίνης που χρησιμοποιείται.
- *Prepreg* – στρώματα που είναι ήδη εμποτισμένα με σύστημα προ καταλυμένης ρητίνης που σκληραίνει με την εφαρμογή θερμότητας σε αεροστεγές θάλαμο (*autoclave*). Τα προ-εμποτισμένα (*Prepreg*) συνήθως καταλήγουν σε σύνθετα υλικά υψηλότερης ποιότητας, επειδή η ποσότητα και η κατανομή της ρητίνης μέσα στο ύφασμα ελέγχεται καλύτερα μετά την εφαρμογή της, σε σχέση με την πρώτη περίπτωση (*Wet lay-up*).  
Επιπλέον, η διαδικασία σκλήρυνσης λαμβάνει χώρα σε ελεγχόμενο περιβάλλον, με σταθερές θερμοκρασίες και πιέσεις, με αποτέλεσμα να παρέχουν πιο βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Αυτός είναι και ο λόγος που τα προ-εμποτισμένα (*Prepreg*) χρησιμοποιούνται στον μηχανοκίνητο αθλητισμό, και ιδιαίτερα στην *Formula 1* [14].

Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να αναπτύσσεται και μια άλλη κατηγορία σύνθετων υλικών, ειδικά στον μηχανοκίνητο αθλητισμό, η οποία παράγει εξαρτήματα μέσω της προσθήκης υλικού (*Additive Manufacturing – AM*). Κάτι που η εργασία αυτή θα επιχειρήσει να παρουσιάσει στη συνέχεια, μέσα από τα επόμενα κεφάλαια (βλ. κεφάλαιο 5).

Υπάρχει μια ποικιλία διαφορετικών μεθόδων με τις οποίες μπορεί να γίνει αυτό (βλ. υποκεφάλαιο 3.3). Ουσιαστικά η κάθε μία από αυτές δημιουργεί μια περίπλοκη μορφή – γεωμετρία, σε στρώσεις (*layer by layer*) με τη σύντηξη κάποιας μορφής σύνθετης σκόνης ή νήματος (*fiber*), σε συνδυασμό με κάποιο τύπο θερμοπλαστικού.

Αυτό, επιτρέπει την κατασκευή εξαιρετικά πολύπλοκων γεωμετριών – σχημάτων, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για εργαλεία και καλούπια για την κατασκευή εξαρτημάτων με μια βάση ανθρακονημάτων (*carbon fiber*) ή την δημιουργία αεροδυναμικών συσκευών, όπως είναι οι αγωγοί φρένων (*brake ducts*).

#### 4.4 Χρήση αισθητήρων

Σημαντικό κομμάτι επίσης, για την διασφάλιση λειτουργίας και την επίτευξη των απαιτήσεων ενός εξαρτήματος είναι η καταγραφή δεδομένων. Ένα πολυλειτουργικό πτερύγιο ενός αγωνιστικού οχήματος μπορεί να συνδυάζει έναν ηλεκτρονικό αισθητήρα για τη μέτρηση της πίεσης του αέρα. Ένα απλό παράδειγμα αισθητήρα είναι το εξής:

- Ο αισθητήρας μπορεί να εγκατασταθεί σε θέση που είναι βελτιστοποιημένη για ακριβή μέτρηση της πίεσης του αέρα, όπως στο μπροστινό μέρος του πτερυγίου, όπου η ροή του αέρα είναι πιο άμεση και αδιατάρακτη.

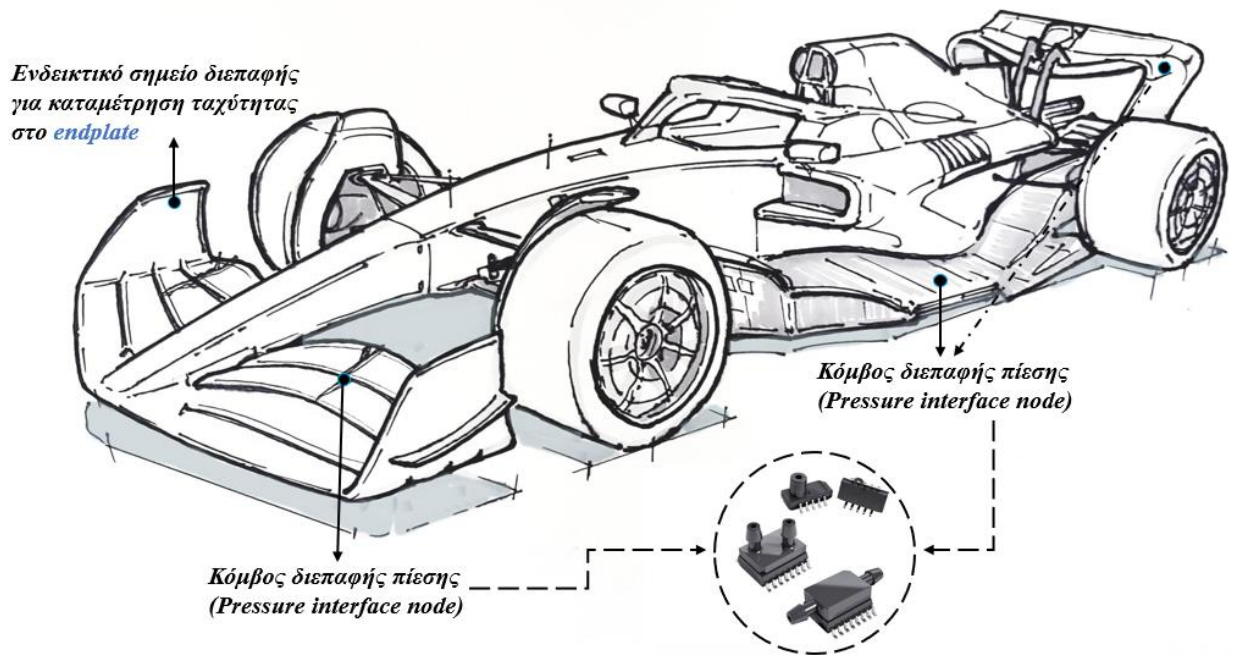
Η διαφορά πίεσης μεταξύ της πίεσης στασιμότητας και της στατικής πίεσης (ποσότητα της πίεσης που ασκείται από ένα ρευστό που δεν κινείται), που μετράτε από τον αισθητήρα μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ταχύτητας της ροής αέρα γύρω από το φτερό.

Επίσης, με την ενσωμάτωση ενός αισθητήρα στη σχεδίαση του πτερυγίου είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένα πολυλειτουργικό φτερό που όχι μόνο παρέχει αεροδυναμικά οφέλη, αλλά παρέχει επίσης, δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για την ταχύτητα της ροής του αέρα. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης του πτερυγίου για μέγιστη απόδοση, όπως προσαρμογή της γωνίας του πτερυγίου ή του σχήματος της αεροτομής για την αύξηση της κάθετης δύναμης ή τη μείωση της οπισθέλκουσας, κ.α.



Εικόνα 4.6: Παράδειγμα τοποθετημένου σένσορα στην Mercedes-AMG W11

Επιπλέον, τα δεδομένα του αισθητήρα πίεσης μπορούν να ενσωματωθούν και με άλλους αισθητήρες στο όχημα, όπως *GPS* και επιταχυνσιόμετρα, παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της απόδοσης του οχήματος, στην πίστα [16]. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση των χρόνων και της ανταγωνιστικότητας των γύρων, παρέχοντας επίσης πολύτιμα δεδομένα για την ανάπτυξη και τη γενικότερη βελτιστοποίηση του οχήματος.



Εικόνα 4.7: Ενδεικτικά σημεία τοποθέτησης αισθητήρων για καταμέτρηση πίεσης και ταχύτητας

## 5. Σχεδίαση

---

### 5.1 Μεθοδολογία ανάπτυξης *endplate*

Σύμφωνα με τα όσα έχουν διατυπωθεί και περιγραφεί έως τώρα είναι λογικό ο σχεδιασμός και η κατασκευή πολυλειτουργικών, εξωτερικών εξαρτημάτων (π.χ. πτερύγια – φτερά) για ένα αγωνιστικό όχημα να απαιτεί προσεκτική εξέταση διαφόρων παραγόντων, όπως η αεροδυναμική, το βάρος και η ανθεκτικότητα. Ακολουθούν ορισμένες λύσεις, μέσα από τις οποίες μπορούν να προκύψουν πολυλειτουργικά φτερά:

- **Μέσω του ενσωματωμένου σχεδιασμού:** Τα πολυλειτουργικά φτερά μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να ενσωματώνουν διάφορες λειτουργίες σε ένα μόνο μέρος τους, όπως ο συνδυασμός αεροδυναμικών χαρακτηριστικών με ψύξη ή δομικά στοιχεία. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να μειώσει το βάρος και την πολυπλοκότητα, βελτιώνοντας παράλληλα την απόδοση και τη λειτουργικότητα του πτερυγίου.
- **Με ελαφριά υλικά:** Η χρήση ελαφρών υλικών, όπως είναι τα σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα, μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του βάρους του πτερυγίου χωρίς να διακυβεύεται η αντοχή του. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της ταχύτητας και του χειρισμού του οχήματος, ενώ παράλληλα μειώνει την κατανάλωση καυσίμου [17].
- **Με προηγμένες τεχνικές κατασκευής:** Οι προηγμένες τεχνικές κατασκευής, όπως η *KIVY* σε συνδυασμό με την τρισδιάστατη εκτύπωση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία σύνθετων γεωμετριών και την ενσωμάτωση πολλαπλών λειτουργιών σε ένα μόνο μέρος του τεμαχίου. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του αριθμού των εξαρτημάτων που χρειάζονται στο φτερό και στην απλοποίηση της συναρμολόγησης και της συντήρησης.
- **Μέσω της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD):** Οι προσομοιώσεις *CFD* μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού πολυλειτουργικών πτερυγίων, και για την επίτευξη της μέγιστης αεροδυναμικής απόδοσης. Αναλύοντας τη ροή του αέρα γύρω από το φτερό, οι σχεδιαστές μπορούν να επαναπροσδιορίσουν τη γεωμετρία για να βελτιώσουν την κάθετη δύναμη, να μειώσουν την οπισθέλκουσα και να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση.
- **Μέσω δοκιμής και επικύρωσης:** Πριν από την ενσωμάτωση πολυλειτουργικών πτερυγίων σε ένα αγωνιστικό όχημα, είναι σημαντικό να δοκιμαστούν, ώστε να επικυρωθεί η σχεδίαση τους και να διασφαλιστεί ότι πληρούν τις απαιτήσεις απόδοσης και ασφάλειας. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα, δοκιμή τροχιάς και άλλες μορφές προσομοίωσης, για να διασφαλιστεί ότι το φτερό λειτουργεί όπως έχει προβλεφθεί.

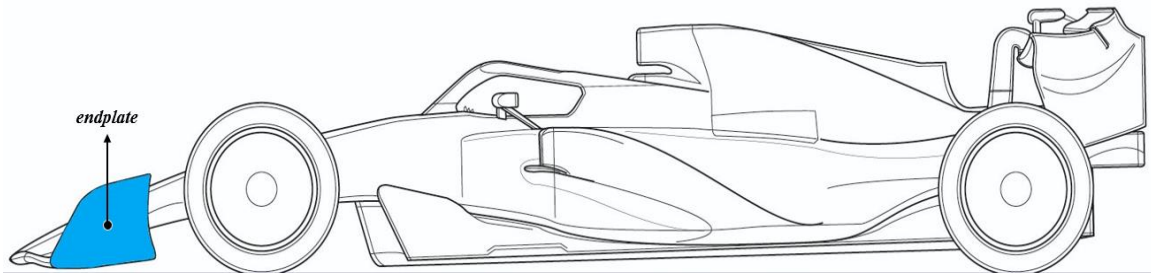
Έτσι, λαμβάνοντας μια ολιστική προσέγγιση στο σχεδιασμό και την κατασκευή, ενσωματώνοντας προηγμένα υλικά και τεχνικές κατασκευής και βελτιστοποιώντας τη σχεδίαση χρησιμοποιώντας προσομοίωση και δοκιμές, είναι δυνατό να δημιουργηθούν εξαιρετικά λειτουργικά και αποτελεσματικά πολυλειτουργικά εξαρτήματα για αγωνιστικά οχήματα.

Όσον αφορά τη σχεδίαση ενός άκαμπτου και μερικώς εύκαμπτου *endplate*, που θα παρέχει στήριξη στα υπό πτερύγια της εμπρόσθιας αεροτομής, και συγχρόνως θα ανακατευθύνει την ροή του αέρα μακριά από τους εμπρός τροχούς, μια επιπλέον λύση είναι η χρήση ενός συνδυασμού σύνθετου υλικού (π.χ. αραμιδίου, βλ. υποκεφάλαιο 4.2), με ένα θερμοπλαστικό πολυμερές [18].

Προτού παρουσιαστεί η λύση αυτή, να σημειωθεί ότι υπάρχουν κράματα μνήμης (*Shape Memory Alloys – SMA*), τα οποία μπορούν να αλλάζουν τη μορφή – δομή τους, ανάλογα με τη θερμοκρασία που τους ασκείται, κάθε φορά. Όμως, η εργασία αυτή δεν πραγματεύεται *KPIY* που αφορούν μεταλλικά κράματα, και για αυτό δεν περιγράφονται περαιτέρω και δεν παρουσιάζονται ως πιθανή λύση. Ένας επιπλέον λόγος που δεν αναλύονται είναι λόγω των κανονισμών που απαγορεύουν τη χρήση υλικών, που προσφέρουν μεγάλη ευελιξία και ευκαμπτότητα, όσον αφορά τη δομή τους.

Επιστρέφοντας στην παραπάνω λύση, γενικά υπάρχουν πολλοί πιθανοί συνδυασμοί θερμοπλαστικών πολυμερών και σύνθετων υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σχεδίαση ενός μερικά εύκαμπτου *endplate*, για ένα αγωνιστικό όχημα. Ακολουθούν μερικά παραδείγματα τέτοιων συνδυασμών:

- **Πολυαιθερεκετόνη (PEEK) ενισχυμένη με ανθρακονήματα (CFR-PEEK):** Το *PEEK* είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές υψηλής απόδοσης που αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες και έχει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Ειδικά, όταν συνδυάζεται – ενισχύεται από ανθρακονήματα, το *CFR-PEEK* μπορεί να προσφέρει ένα ελαφρύ και ισχυρό υλικό με μερική ευελιξία.
- **Πολυανθρακικό (PC) ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (GFR-PC):** Το *PC* είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που είναι ελαφρύ και ανθεκτικό στις κρούσεις. Ειδικά, όταν συνδυάζεται (με ενίσχυση) από ίνες γυαλιού, το *GFR-PC* μπορεί να προσφέρει ένα ισχυρό και μερικώς εύκαμπτο υλικό που να είναι επίσης οικονομικά αποδοτικό.
- **Πολυμερές ενισχυμένο υλικό με ίνες άνθρακα (CFRP) και θερμοπλαστικό ενδιάμεσο στρώμα:** Ενσωματώνοντας ένα θερμοπλαστικό ενδιάμεσο στρώμα μεταξύ στρωμάτων *CFRP*, είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένα σύνθετο υλικό με μερική ευκαμψία. Το ενδιάμεσο στρώμα αυτό, μπορεί να κατασκευαστεί από ένα θερμοπλαστικό πολυμερές όπως το *PEEK* ή το *PC*, το οποίο μπορεί να παρέχει την απαραίτητη ευελιξία διατηρώντας τη δομική ακεραιότητα του σύνθετου.
- **Πολυαμίδιο (PA) ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CFR-PA):** Το *PA*, γνωστό και ως νάιλον, είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που χρησιμοποιείται συνήθως στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Και, όταν συνδυάζεται – ενισχύεται από ανθρακονήματα, το *CFR-PA* μπορεί να προσφέρει ένα ελαφρύ και μερικώς εύκαμπτο υλικό που είναι κατάλληλο για γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων και παραγωγή μικρής κλίμακας.



Εικόνα 5.1: Απεικόνιση τμήματος εμπρόσθιας αεροτομής προς σχεδίαση

## 5.2 Σχεδιασμός *endplate*

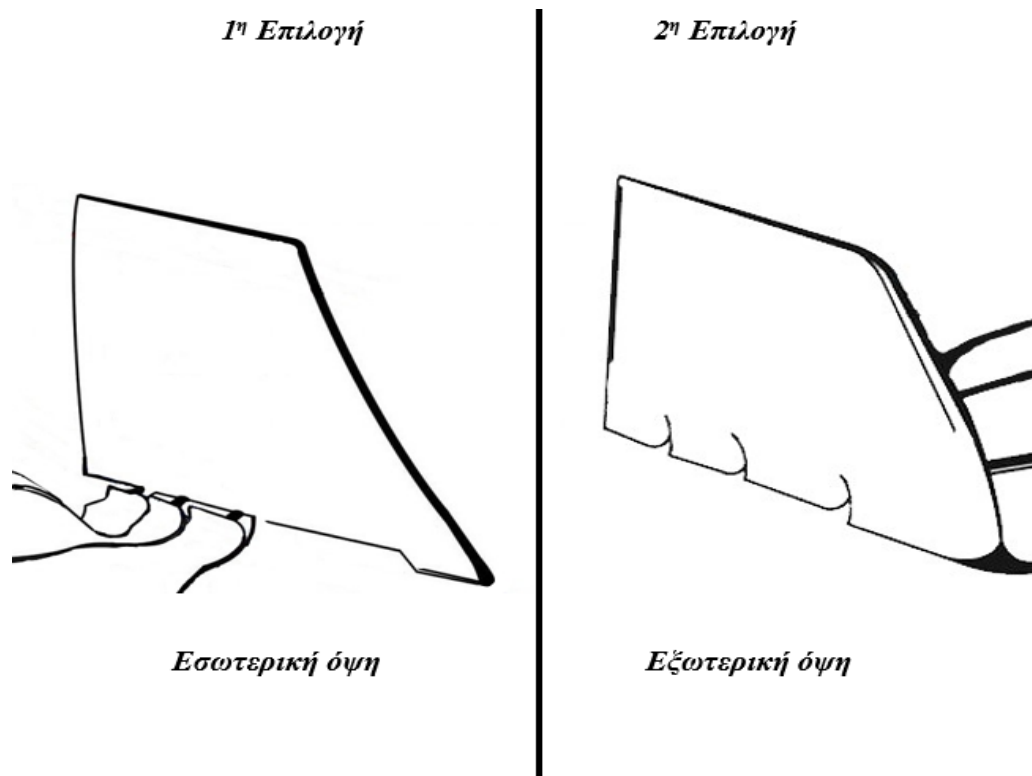
Έχοντας καταλήξει σε ένα σύνολο προδιαγραφών (βλ. υποκεφάλαιο 3.2), η επόμενη φάση της σχεδίασης περιλαμβάνει τον ιδεασμό του επιλεγμένου εξαρτήματος. Κανονικά, στο στάδιο του ιδεασμού, ενός προϊόντος – συστήματος δημιουργούνται σκίτσα με σκοπό την δημιουργία επιμέρους λύσεων, για τις παραπάνω προδιαγραφές. Κάθε προδιαγραφή μπορεί να αποδίδεται από ένα σύνολο σχεδίων, που σκοπό έχουν την αύξηση της ποικιλίας των λύσεων της.

Όμως, σε περιπτώσεις όπως η σχεδίαση ενός πτερυγίου, μιας εμπρόσθιας αεροτομής, η φάση του ιδεασμού δεν καθίσταται τόσο κρίσιμη. Διότι, η φόρμα που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα τέτοιο εξάρτημα είναι ως έναν υψηλό βαθμό προκαθορισμένη, εξαιτίας των πολλών περιοριστικών προδιαγραφών του. Με αποτέλεσμα η ποικιλία σχεδίων που θα μπορούσαν να παραχθούν για τον καθορισμό της γεωμετρίας του πτερυγίου να είναι πολύ περιορισμένη και αρκετά εξαρτημένη από τη βασική λειτουργική απαίτηση που πρέπει να εκτελεί (κρίσιμη προδιαγραφή):

- να ανακατευθύνει αποτελεσματικά την ροή του αέρα από τους εμπρόσθιους τροχούς και προς το πίσω μέρος του οχήματος.

Παράλληλα, ο ιδεασμός αποτελεί την φάση όπου όλες οι κρίσιμες προδιαγραφές του υπό σχεδίαση εξαρτήματος αποφασίζονται, επιφέροντας λύσεις σε καθοριστικά ζητήματα, όπως η επίτευξη βασικών λειτουργικών απαιτήσεων.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η επιλογή των υλικών και η τοπολογία αυτών στη γενικότερη δομή του *endplate*, αποτελούν τα κύρια υπό εξέταση ζητήματα.



Εικόνα 5.2: Σχέδια *endplate*

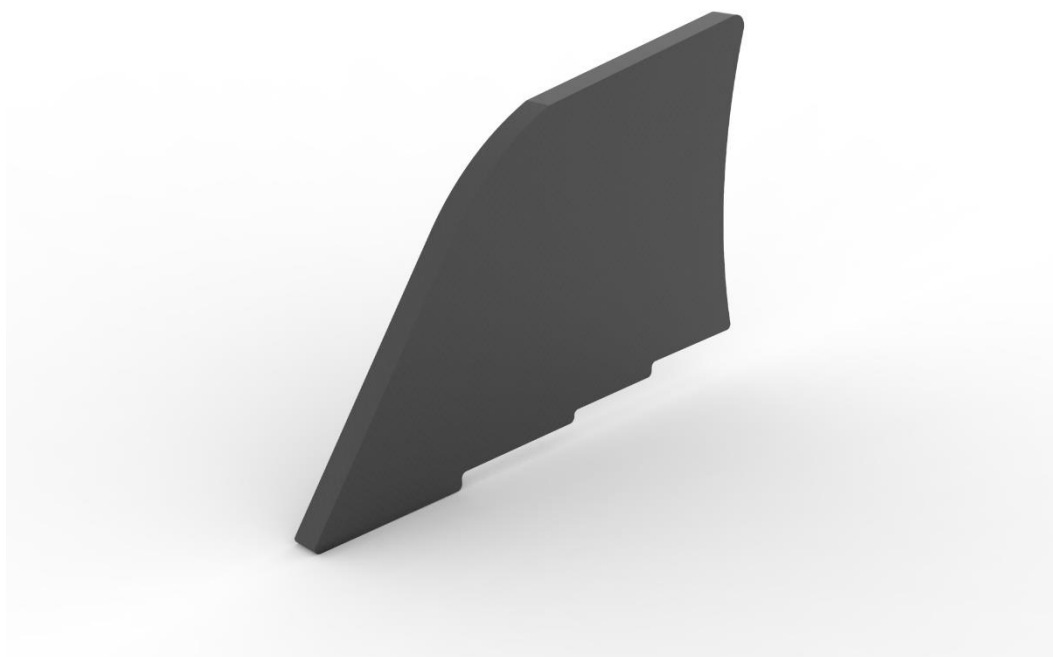
### 5.3 Παρουσίαση & Αξιολόγηση ιδεών *endplate*

Γενικά, η αξιολόγηση γίνεται με βάση τον βαθμό εκπλήρωσης των προδιαγραφών, σε συνδυασμό με την ευρύτερη γνώση του αντικειμένου σχεδίασης. Το στάδιο της αξιολόγησης των ιδεών – σχεδίων, ενός συστήματος συνδέεται άρρηκτα και με τις δομικές – στατικές αναλύσεις που θα ακολουθήσουν σε επόμενο κεφάλαιο (βλ. κεφάλαιο 6).

Στο στάδιο αυτό, μπορεί επίσης να αναθεωρηθεί η τελική σχεδίαση μιας ιδέας, καθορίζοντας την είτε ακατάλληλη, είτε ως αναγκαία προς αλλαγή (τμηματική), όπως η επανασχεδίαση κάποιου τμήματος της.

Ακολουθούν οι φωτορεαλιστικές παρουσιάσεις των δυο παραπάνω επιλογών (βλ. Εικόνα 5.2).

## 1<sup>η</sup> Επιλογή:

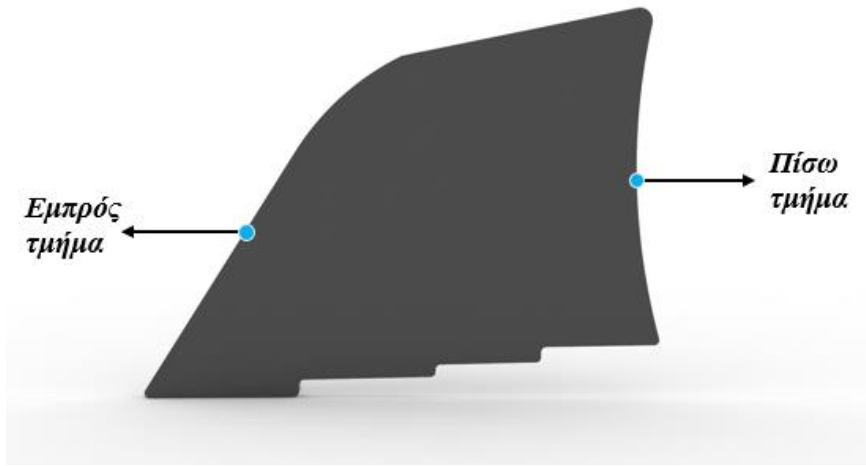


Εικόνα 5.3: Ισομετρική όψη πρώτης επιλογής

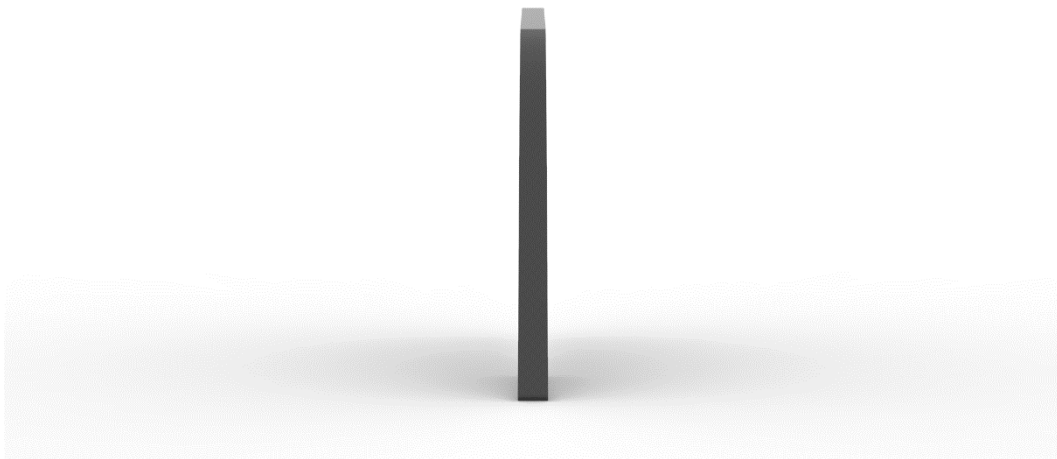
Η πρώτη επιλογή μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα σχέδιο που ακολουθεί με μεγάλη αυστηρότητα τις προδιαγραφές ενός *endplate*. Όπως φαίνεται και από τις όψεις που ακολουθούν (βλ. Εικόνα 5.4 & Εικόνα 5.5), η πρώτη επιλογή μπορεί να χαρακτηριστεί από μια αυστηρά καθορισμένη φόρμα, με το συνδυασμό πολλών ευθύγραμμων τμημάτων.

Η διαφορά του δισδιάστατου σχεδίου σε σχέση με την τρισδιάστατη όψη (βλ. Εικόνα 5.2), είναι ότι κατά το σχεδιασμό τα ράδια (*fillet radius*) που επιλέχθηκαν για τις ακμές είναι μεγαλύτερα των  $5^\circ$  μοιρών. Ενώ παράλληλα, προτιμήθηκε να δοθεί μεγαλύτερη κλίση στην επιφάνεια της πίσω πλευράς του *endplate*, διατηρώντας μια πιο ευθύ κλίση στο εμπρόσθιο τμήμα (βλ. Εικόνα 5.4).

Η αλλαγή αυτή έγινε για αεροδυναμικούς λόγους. Διότι, όπως αναφέρεται και στους κανονισμούς (βλ. υποκεφάλαιο 3.2), η ακτίνα (*blend radius*) κλίσης του δισδιάστατου σχεδίου στο εμπρόσθιο τμήμα θα δημιουργούσε αιχμηρή ακμή, και θα επέφερε ανεπιθύμητες δίνες – στροβίλους προς το πίσω μέρος του οχήματος, κατά την διέλευση της ροής του αέρα.

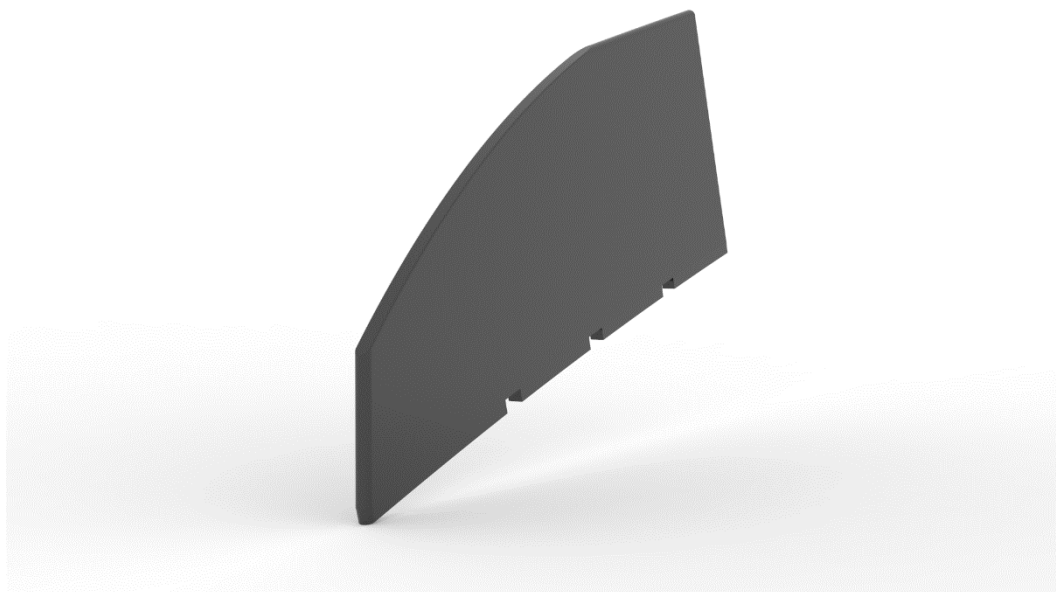


Εικόνα 5.4: Πλάγια όψη πρώτης επιλογής



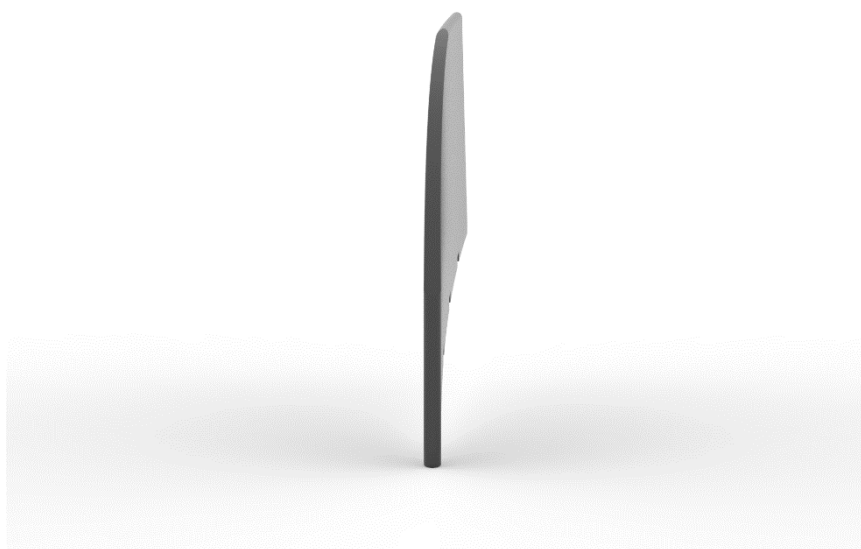
Εικόνα 5.5: Εμπρόσθια όψη πρώτης επιλογής

## 2<sup>η</sup> Επιλογή:

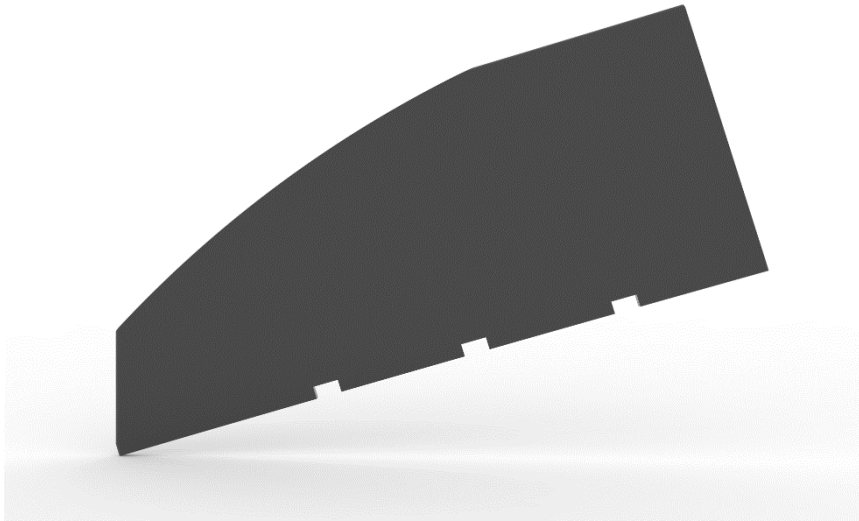


Εικόνα 5.6: Ισομετρική όψη δεύτερης επιλογής

Στη δεύτερη επιλογή έγινε προσπάθεια να δοθεί ένα τελείως διαφορετικό σχήμα ενός πιθανού *endplate*. Παράλληλα, επιχειρήθηκε να δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στην ανακατεύθυνση της ροής του διερχόμενου αέρα από τους εμπρός τροχούς, δίνοντας μια αισθητή κλίση προς τα έξω στην γενικότερη φόρμα του (βλ. Εικόνα 5.7). Σύμφωνα με την παρακάτω απεικόνιση, το *endplate* που φαίνεται είναι το δεξί σε ένα σύστημα εμπρόσθιας αεροτομής έχοντας την κάμερα τοποθετημένη στο εμπρός τμήμα του οχήματος.



Εικόνα 5.7: Εμπρόσθια όψη δεύτερης επιλογής



Εικόνα 5.8: Πλάγια όψη δεύτερης επιλογής

Έχοντας παρουσιαστεί τα δυο πιθανά σχέδια ενός *endplate* στο στάδιο αυτό θα επιλεγεί ένα εκ των δυο, το οποίο θα αποτελέσει και την τελική επιλογή.

Όπως έχει προαναφερθεί η τελική επιλογή συνδέεται άρρηκτα με τις αναλύσεις και τα δεδομένα που θα παραχθούν. Έτσι, μπορεί στην παρούσα φάση ως η ιδανικότερη τελική λύση να φαντάζει η δεύτερη επιλογή, λόγω της μεγαλύτερης βαρύτητας που δίνει για την επίλυση μιας κύριας λειτουργικής απαίτησης:

- ανακατεύθυνση ροής διερχόμενου αέρα από τους εμπρός τροχούς.

Αν όμως δεν δικαιολογηθεί από τα παραγόμενα αποτελέσματα των ακολουθούμενων αναλύσεων, όσον αφορά την ανθεκτικότητα του, τότε η λύση αυτή μπορεί να αλλάξει.

Οπότε, ως τελική λύση στο στάδιο αυτό επιλέγεται το δεύτερο σχέδιο (βλ. Εικόνα 5.8). Στο επόμενο κεφάλαιο των αναλύσεων η γεωμετρία του δεύτερου σχεδίου θα επιλεγεί ως ο γενικευμένος χώρος μέσα στον οποίο θα παρουσιαστεί μια τοπολογία, των επιλεγμένων υλικών, και μέσα από αυτή θα αξιολογηθεί.

Τέλος, στην αρχή του επόμενου κεφαλαίου (βλ. Κεφάλαιο 6), θα παρουσιαστεί μια μηχανική ανάλυση του πρώτου σχεδίου και το υλικό που θα το απαρτίζει θα είναι εξολοκλήρου από ανθρακονήματα. Αυτή η πρώτη ανάλυση και τα στοιχεία της, θα αποτελέσει και μια αιτιολόγηση για την χρήση δύο ή περισσότερων υλικών στο τελικό πολυλειτουργικό εξάρτημα. Στην συνέχεια, και για αν το δεύτερο σχέδιο θα αποτελέσει την τελική επιλογή, θα εμπεριστατωθεί από την σύγκριση των αποτελεσμάτων του σε σχέση με αυτά του πρώτου σχεδίου έχοντας επιλεγεί μια κοινή τοπολογικά λογική υλικών. Δηλαδή, η τοπολογία των δυο επιλεγμένων υλικών θα βασίζεται σε μια κοινή λογική, λόγω της διαφοράς των δυο γεωμετριών τους. Για παράδειγμα, αν το επιλεγμένο σύνθετο υλικό τοποθετηθεί κατά κύριο λόγο στη βάση και στο κύριο σώμα του *endplate* τοποθετηθεί το επιλεγμένο θερμοπλαστικό πολυμερές, τότε η αντίστοιχη τοπολογία των ίδιων υλικών θα πρέπει να τηρηθεί και στο άλλο μοντέλο.

Ωστε εν τέλει, τα δυο *endplate* να κριθούν έχοντας ως κοινό παρονομαστή μια κοινή λογική τοπολογίας των επιλεγμένων υλικών και να συγκριθούν κάτω από κοινές συνθήκες, εστιάζοντας στο ποια γεωμετρία θα εκπληρώνει πιο βέλτιστα την κύρια λειτουργική απαίτηση, αλλά συγχρόνως θα πληρεί και την απαραίτητη ανθεκτικότητα, σύμφωνα με τους κανονισμούς της *FIA*.

## 6. Αναλύσεις

---

### 6.1 Στατική Μηχανική Ανάλυση

Στο στάδιο αυτό, το πολυλειτουργικό εξάρτημα *endplate* θα αναλυθεί ως προς την μηχανική συμπεριφορά του, κάτω από προκαθορισμένες συνθήκες. Για να επιτευχθεί αυτό, θα οριστούν ορισμένα στοιχεία όπως είναι οι μηχανικές ιδιότητες των επιλεγμένων υλικών, καθώς και η τοπολογία αυτών στη γεωμετρία του.

Τα υλικά που επιλέχθηκαν είναι το αραμίδιο (*aramid – Kevlar*) και πιο συγκεκριμένα το *Kevlar K149* που διαθέτει μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $147 \text{ GPa}$  και πυκνότητα ίση με  $1.47 \text{ Kg/cm}^3$ . Υποθέτοντας, ότι οι επιλεγμένες ίνες αραμιδίου έχουν αρκετή απόλυτη δύναμη ώστε να αποφευχθεί το σπάσιμο του σύνθετου υλικού, παράλληλα η μήτρα που επιλέχθηκε σύμφωνα με το συντελεστή *Young* (*Young's modulus*) και τον ειδικό συντελεστή *Young* (*specific Young's modulus*) είναι η πολυαιθερερεκετόνη (*PEEK*), με  $4.6 \text{ GPa}$  και  $3.5 \text{ GPa.cm}^3/\text{g}$ , αντίστοιχα. Οι ορθοτροπικές μηχανικές ιδιότητες και πυκνότητα του συνδυασμού των παραπάνω υλικών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 6.1, όπου ο όγκος των ινών θα καταλαμβάνει περίπου το 80% του συνολικού όγκου του εξαρτήματος [19].

Να σημειωθεί ότι τα ορθοτροπικά υλικά (*orthotropic materials*), στην επιστήμη των υλικών και στη μηχανική των στερεών, ονομάζονται αυτά που έχουν ιδιότητες υλικού σε ένα συγκεκριμένο σημείο και διαφέρουν κατά μήκος των τριών ορθογώνιων αξόνων, όπου κάθε άξονας έχει διπλή περιστροφική συμμετρία. Σε αντίθεση με τα ιστροπικά υλικά, όπου οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες τους είναι ίδιες σε όλες τις κατευθύνσεις και κατ' επέκταση σε όλα τα σημεία ενός μοντέλου.

Στην συνέχεια, δίνονται οι δίνονται ορθοτροπικές μηχανικές ιδιότητες και η πυκνότητα του τελικού σύνθετου υλικού, που προκύπτουν από τον συνδυασμό των δυο επιλεγμένων υλικών, για πιθανή μελλοντική χρήση τους σε κάποια ανάλυση του *endplate*. Στην παρούσα εργασία όμως, οι αναλύσεις θα αναφέρονται σε ιστροπικά υλικά.

Πίνακας 6.1: Ορθοτροπικές μηχανικές ιδιότητες & πυκνότητα τελικού σύνθετου υλικού [19]

Ιδιότητα		K149 – PEEK
Πυκνότητα ( <i>Density</i> )	$\rho$	1.44
Συντελεστής του Young ( <i>Young's modulus or Longitudinal Young's Modulus</i> )	$E_1$	118.5
<i>Transversal Young's Modulus</i> <sup>13</sup>	$E_2$	20.5
Λόγος <i>Poisson</i>	-	0.37

Η πρώτη ανάλυση που θα ακολουθήσει είναι αυτή του πρώτου σχεδίου *endplate* που θα αποτελείται από 100% ανθρακονήματα. Στο πέρας, της παρουσίασης της θα εξηγηθούν και ορισμένοι λόγοι, που θα αιτιολογούν την χρήση δυο υλικών για την παραγωγή του εξαρτήματος.

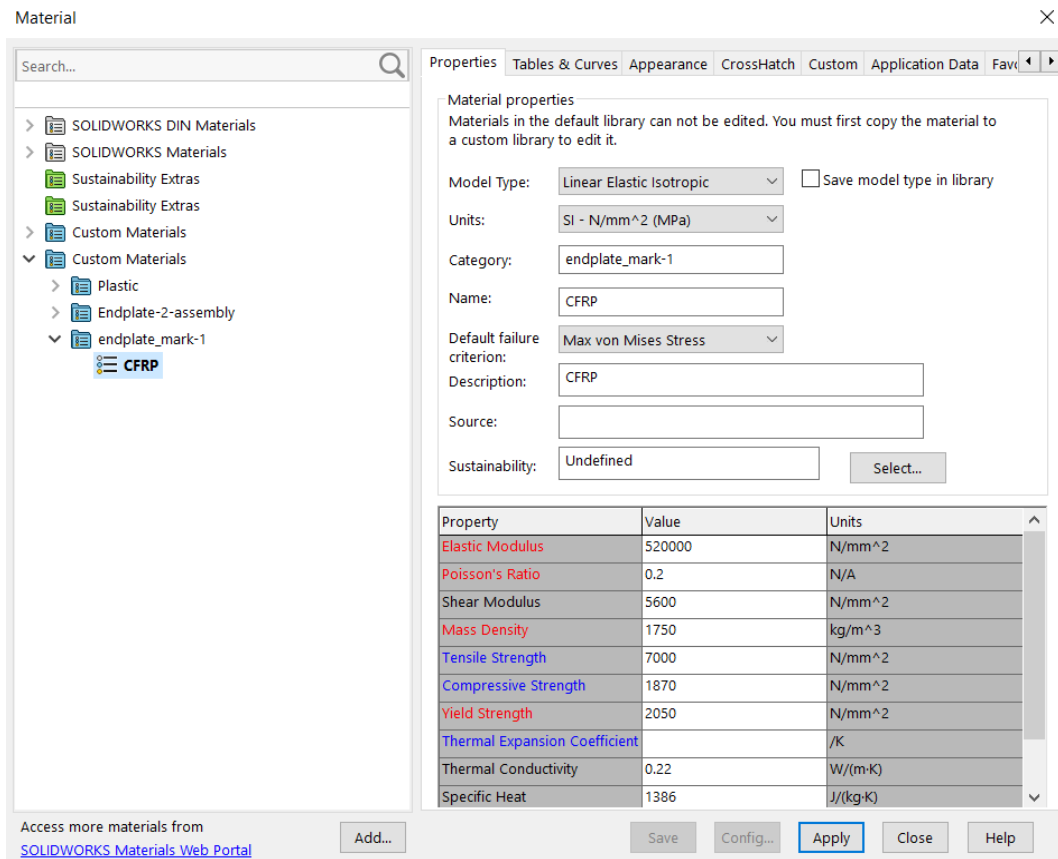
Η στατική μηχανική ανάλυση που θα παρουσιαστεί κάνει χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (*FEM – Finite Element Method*). Η πραγματοποίηση μιας τέτοιας ανάλυσης (*FEA – Finite Element Analysis*) απαιτεί:

- Το σχεδιασμό μιας τρισδιάστατης γεωμετρίας.
- Την εισαγωγή υλικού σε αυτή (μέσα από την καταχώρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του ή όποιων άλλων δεδομένων, που κρίνονται απαραίτητα για την εξαγωγή συμπερασμάτων).
- Τον καθορισμό των βαθμών ελευθερίας του αντικειμένου (συνήθως επιλέγονται επιφάνειες που θα είναι είτε πακτωμένες, είτε ελεύθερες να κινηθούν ως προς μια ή περισσότερες κατευθύνσεις).
- Την εισαγωγή φορτίων.
- Και την δημιουργία ενός πλέγματος (δηλαδή το διαχωρισμό της δομής σε πολλά μικρά γεωμετρικά τμήματα, τα οποία θα δίνουν την δυνατότητα στον αλγόριθμο να επιλύει και να παράγει πιο συγκεκριμένα – λεπτομερή αποτελέσματα).

Ακολουθούν τα βήματα και τα αποτελέσματα της προαναφερόμενης πρώτης ανάλυσης, σύμφωνα με το λογισμικό *SolidWorks*.

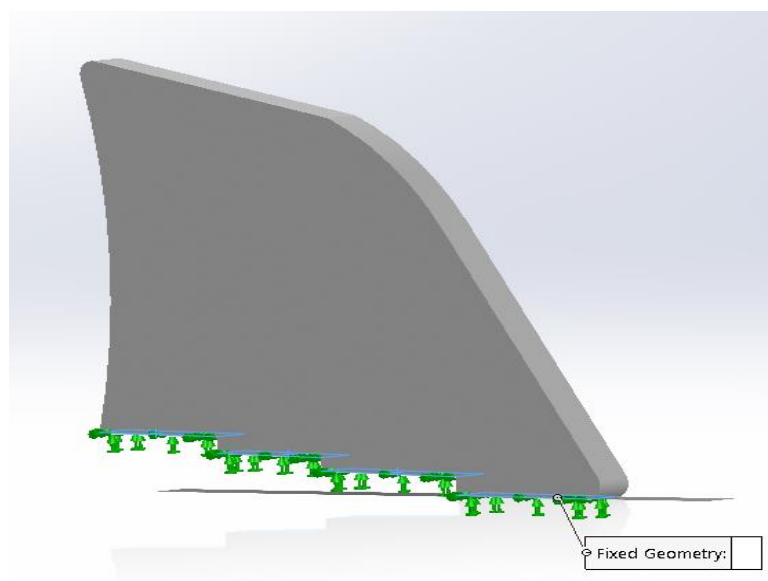
Το πρώτο σχέδιο έχει παρουσιαστεί (βλ. υποκεφάλαιο 5.3 – 1<sup>η</sup> επιλογή), οπότε το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία ενός υλικού, με τις μηχανικές ιδιότητες των ανθρακονημάτων για την εισαγωγή στο τρισδιάστατο μοντέλο.

<sup>13</sup> Δείχνει ότι οι ίνες δεν συμβάλλουν πολύ στην ακαμψία σε εγκάρσιες κατευθύνσεις, εκτός εάν το κλάσμα όγκου τους είναι υψηλό ( $I/Et = (1-\nu_f)/E_m + \nu_f/E_f$ ).



Εικόνα 6.1: Εισαγωγή CFRP

Έπειτα, καθορίστηκαν οι περιορισμοί των βαθμών ελευθερίας στα τμήματα της κάτω επιφάνειας του *endplate* (βλ. Εικόνα 6.2), διότι εκεί θα συνδέονται τα υπόλοιπα πτερύγια της εμπρόσθιας αεροτομής.



Εικόνα 6.2: Πάκτωση κάτω τμημάτων

Στην συνέχεια, εισάγονται τα φορτία στις επιφάνειες της τρισδιάστατης γεωμετρίας.

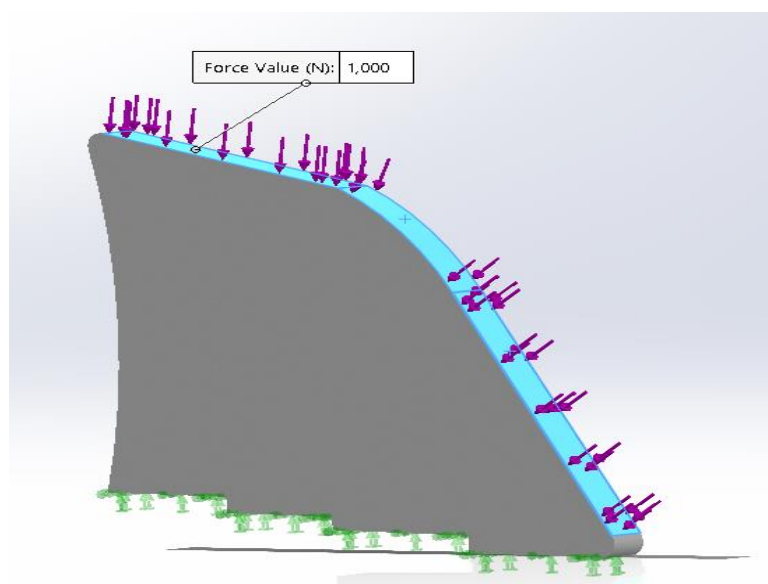
Να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι λόγω των υψηλών φορτίων  $G$  που δέχεται το όχημα σε μέγιστες ταχύτητες έως  $320 \text{ Km/h}$  (περίπου), τα φτερά δεν πρέπει να υπόκεινται σε μετατοπίσεις όπου θα τα καθιστούν πλήρως εύκαμπτα. Έτσι λοιπόν, για τον καθορισμό των φορτίων σε ένα εξάρτημα φτερού η *FIA* έχει αναπτύξει τις παρακάτω δοκιμές (τεχνικές ελέγχου):

- Εάν εφαρμοστεί φορτίο  $60 \text{ N}$ , το φτερό δεν θα πρέπει να εμφανίσει μετατόπιση άνω των  $3 \text{ mm}$ .
- Εάν εφαρμοστεί φορτίο  $1000 \text{ N}$  στο επάνω τμήμα του *endplate*, τότε δεν θα πρέπει να εμφανιστεί μετατόπιση άνω των  $10 \text{ mm}$ .

Γενικά, αυτό το κομμάτι ελέγχου από την *FIA* αποτελεί και το πιο δύσκολο, διότι υπάρχει μεγάλο εύρος φορτίων που μπορεί να δέχονται τα εξαρτήματα των πτερυγίων ενός μονοθέσιου οχήματος, καθώς αυτό διέρχεται στην πίστα. Και, είναι αρκετά δύσκολο και χρονοβόρο να γίνει ο έλεγχος σε όλο το εύρος των φορτίων αυτών, για κάθε πτερύγιο. Για αυτό και στους κανονισμούς αναφέρεται η έννοια της «μερικής ευελιξίας», για τέτοιου είδους εξαρτήματα.

Τα ακόλουθα αποτελέσματα αφορούν την κατανομή ενός φορτίου  $1000 \text{ N}$ , στο εμπρός και επάνω τμήμα του *endplate*. Επιλέχθηκε να εξεταστεί η συμπεριφορά του εξαρτήματος στο μεγαλύτερο δοσμένο φορτίο ( $1000 \text{ N}$ ) από τις δοκιμές.

Τα τμήματα που επιλέχθηκαν (βλ. Εικόνα 6.3), αναφέρονται στο σενάριο όπου η ροή του αέρα θα είναι καταμέτωπη στο εξάρτημα.



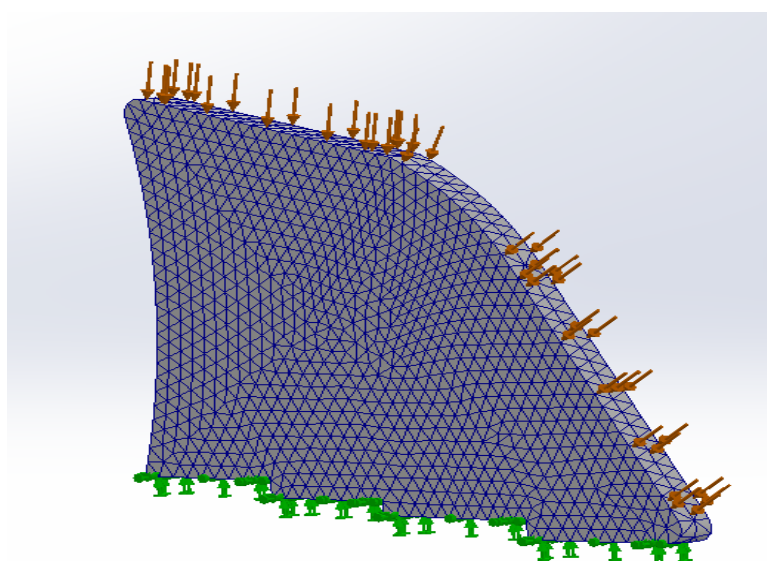
Εικόνα 6.3: Εφαρμογή  $1000 \text{ N}$  στο εμπρός & πάνω τμήμα του *endplate*

Το τελευταίο βήμα για την επίτευξη μιας στατικής ανάλυσης είναι η διαμόρφωση ενός πλέγματος, από τρίγωνα, που διαιρούν τη γεωμετρία του *endplate*.

Στα πόσα τμήματα τριγώνων μπορεί να διαιρεθεί μια τρισδιάστατη γεωμετρία, εξαρτάται και από την δυνατότητα του Η/Υ. Επίσης, το μέγεθος των τριγώνων συνδέεται άρρηκτα με τα πόσα τμήματα θα δημιουργηθούν, για την περιγραφή της γεωμετρίας του αντικειμένου. Το πόσο αναλυτικό – λεπτομερές θα επιλεγεί να είναι το πλέγμα, έχει να κάνει με το πόσο ακριβή απαιτούνται να είναι τα αποτελέσματα.

Σε ένα ιδανικό περιβάλλον το ορθότερο είναι να παράγονται όσο το δυνατόν πιο λεπτομερή και ακριβή αποτελέσματα, για την πιο αποτελεσματική αξιολόγηση ενός προϊόντος – συστήματος. Επίσης, όσο πιο αναλυτικό είναι ένα πλέγμα, τόσο πιο εμφανή θα είναι και τα κρίσιμα αποτελέσματα (π.χ. μέγιστη παραμόρφωση) στην αναπαράσταση της γεωμετρίας του αντικειμένου.

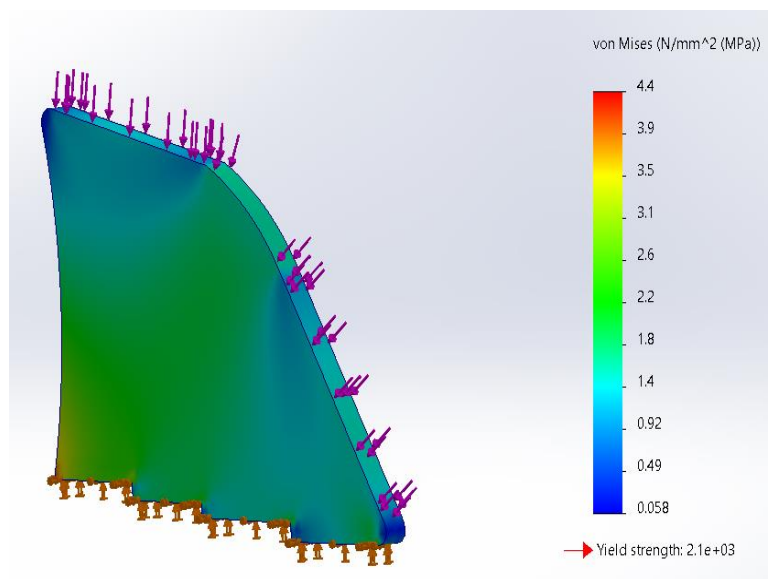
Στην περίπτωση αυτή όμως, το επιλεγμένο πλέγμα αποτελείται από τρίγωνα μεγέθους 10 x 10 mm, για την επίτευξη της παρούσας ανάλυσης. Ο λόγος που δεν επιλέχθηκε ένα πιο αναλυτικό πλέγμα, αποτελούμενο από μικρότερα μεγέθους τρίγωνα, είναι το γεγονός ότι τα συμπεράσματα που προκύπτουν δεν επηρεάζονται σε βαθμό που θα άλλαζε το τελικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 6.4: Καθορισμός πλέγματος από τρίγωνα

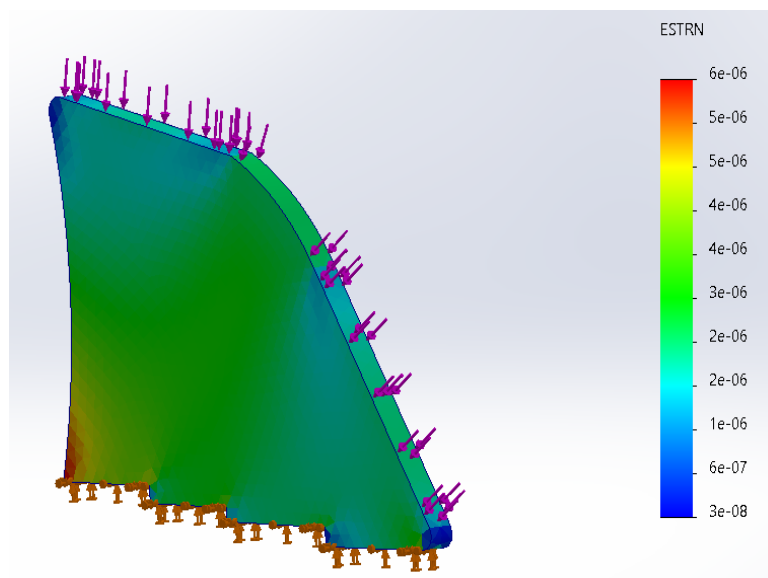
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα παραπάνω εισαγόμενα δεδομένα είναι τα παρακάτω:

## Πίεση (*stress/Von Mises*)



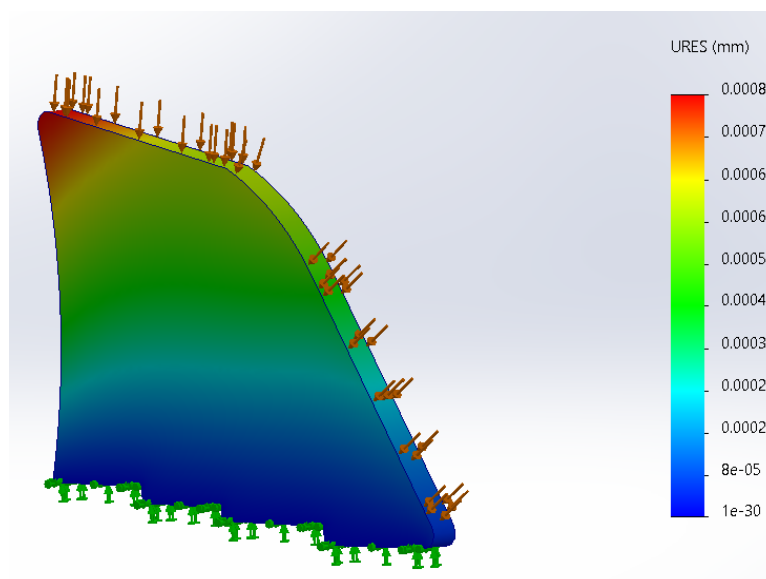
Εικόνα 6.5: Αποτελέσματα πιέσεων

## Παραμόρφωση (*strain*)



Εικόνα 6.6: Αποτελέσματα παραμορφώσεων

## Μετατόπιση (*displacement*)

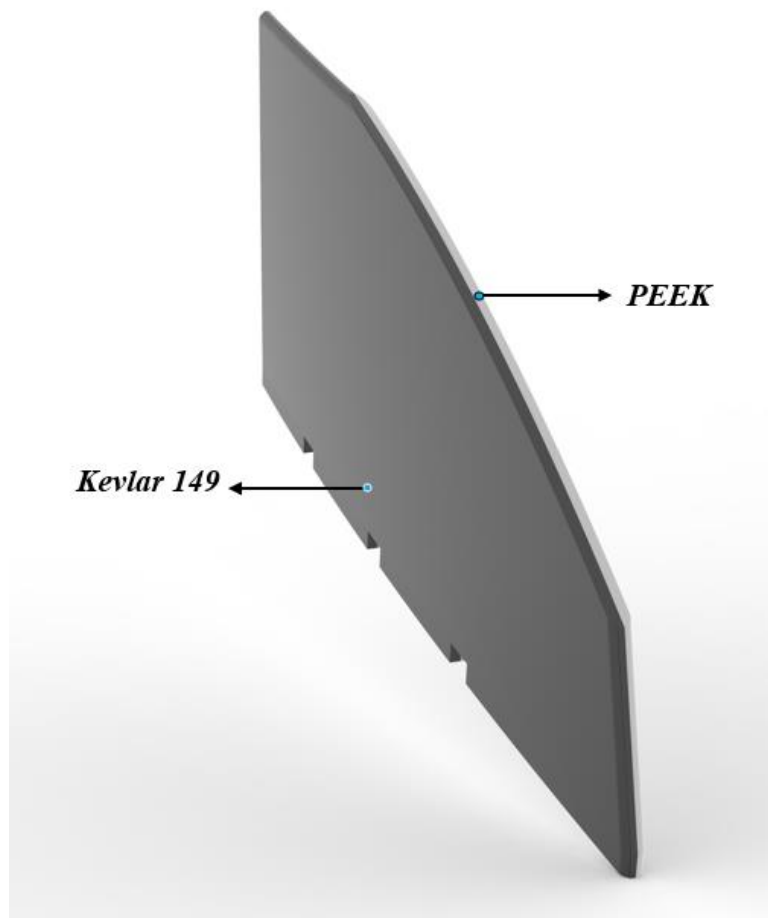


Εικόνα 6.7: Αποτελέσματα μετατοπίσεων

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι τα πτερύγια που κατασκευάζονται από ανθρακονήματα παρουσιάζονται ως πολύ άκαμπτα, λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων τους.

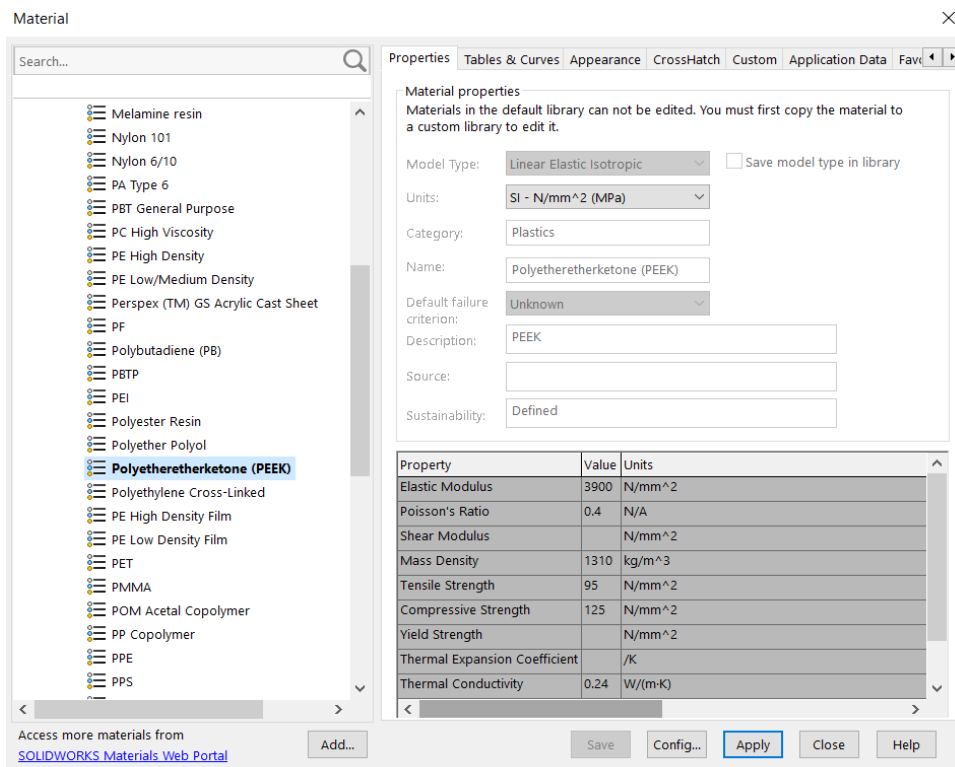
Κάτι που ναι μεν πληρεί τις προδιαγραφές της *FIA* για μη εύκαμπτα πτερύγια χωρίς μεγάλη ευελιξία. Αλλά, από την άλλη τα πτερύγια αυτά δεν παρέχουν ούτε ένα μικρό ποσοστό ευελιξίας.

Για αυτό και με βάση αυτά, προτείνεται ο παρακάτω ενδεικτικός συνδυασμός δύο υλικών (βλ. Εικόνα 6.8) για την κατασκευή του *endplate*. Ο κύριος σκοπός της πρότασης αυτής, είναι η παραγωγή ενός *endplate* που θα πληρεί τις απαραίτητες προϋποθέσεις αντοχής και ευκαμπτότητας, αλλά ταυτόχρονα θα παρέχει μια πιο διαχειρίσιμη – προβλεπόμενη συμπεριφορά κατά την λειτουργία του, παρέχοντας ένα βαθμό ευελιξίας μεγαλύτερο, από αυτόν που παρέχουν τα υπάρχοντα φτερά.

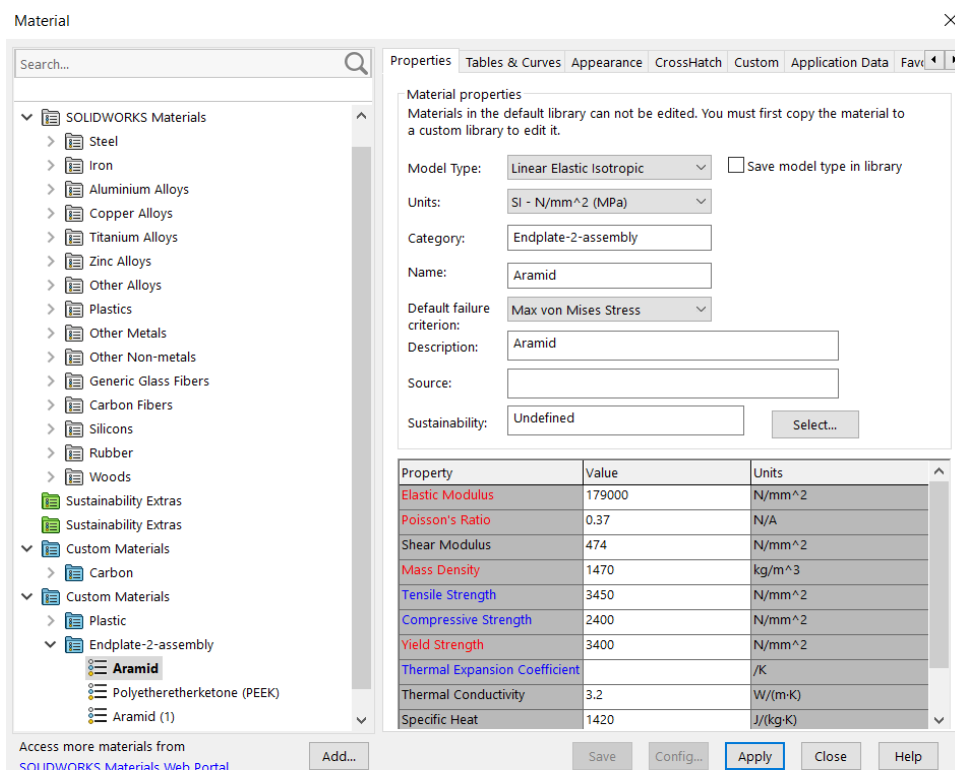


Εικόνα 6.8: Παρουσίαση τοπολογίας υλικών

Σύμφωνα, με την παραπάνω τοπολογία μπορούν να καθοριστούν τα δεδομένα των υλικών στα αντίστοιχα τμήματα του *endplate*. Να σημειωθεί ότι λόγω του προκαθορισμένου ιστροπικού υλικού *PEEK*, ο καθορισμός των ιδιοτήτων του αραμιδίου στο *SolidWorks* θα είναι και αυτές ιστροπικές, (βλ. Εικόνα 6.9 & Εικόνα 6.10). Κατά συνέπεια τα στατιστικά που θα προκύψουν, θα είναι αποτέλεσμα μιας ιστροπικά στατικής ανάλυσης.



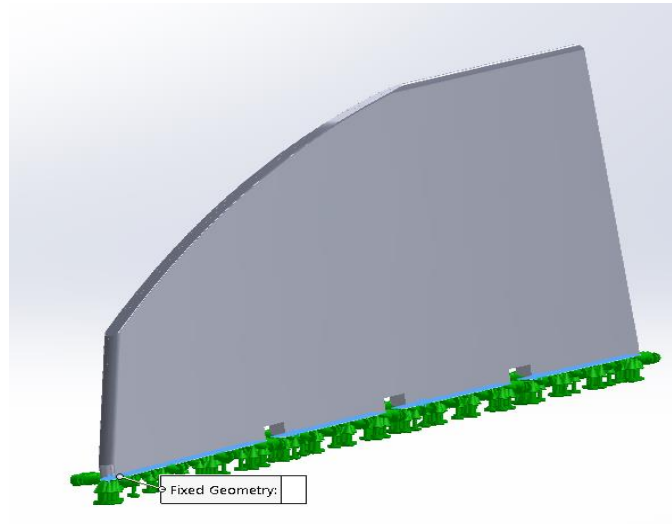
Εικόνα 6.9: Εισαγωγή PEEK



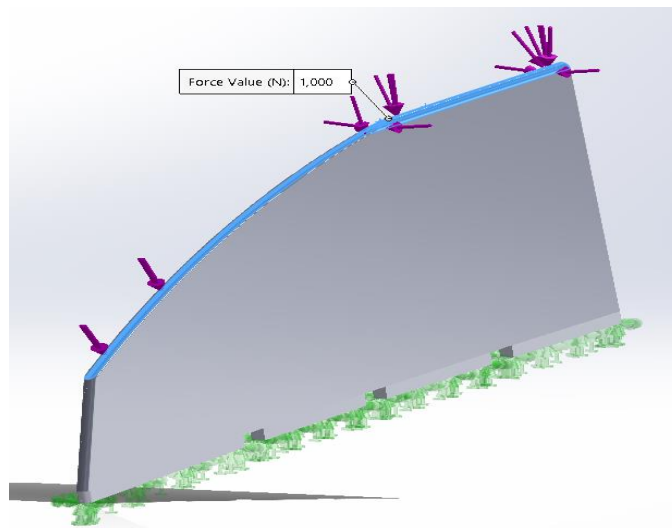
Εικόνα 6.10: Καθορισμός νέου υλικού Kevlar 149

Έτσι, έχοντας καθορίσει τα υλικά, σύμφωνα με την παραπάνω τοπολογία (βλ. Εικόνα 6.8) και επαναλαμβάνοντας τα βήματα που εξηγήθηκαν στην πρώτη στατιστική ανάλυση, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

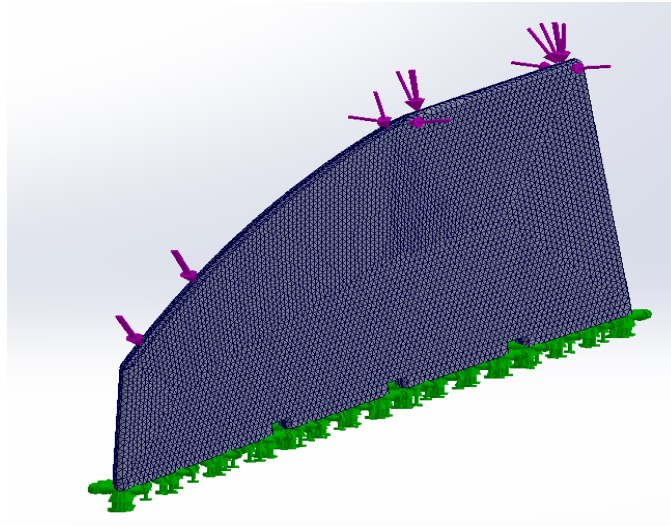
Πρώτα, παρουσιάζονται τα βήματα της στατιστικής ανάλυσης μέσω των ακόλουθων αναπαραστάσεων, (βλ. Εικόνα 6.11 έως Εικόνα 6.13).



Εικόνα 6.11: Πάκτωση κάτω επιφανειών



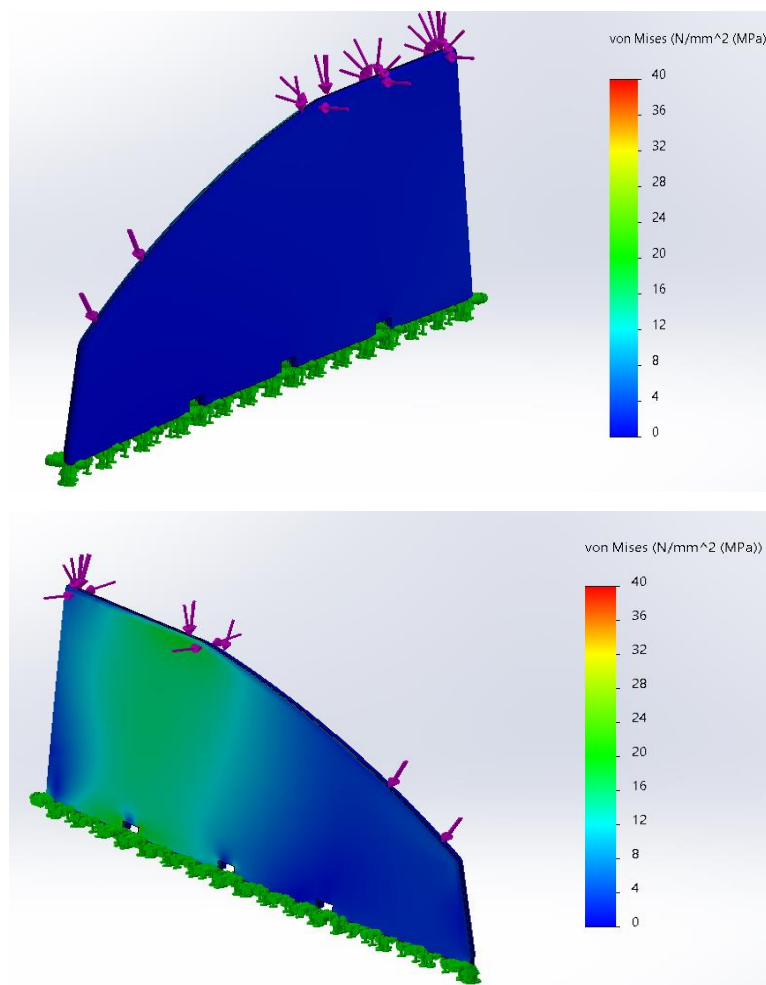
Εικόνα 6.12: Εφαρμογή 1000 N στο εμπρός - πάνω τμήμα του *endplate*



Εικόνα 6.13: Καθορισμός πλέγματος από τρίγωνα 5 x 5 mm

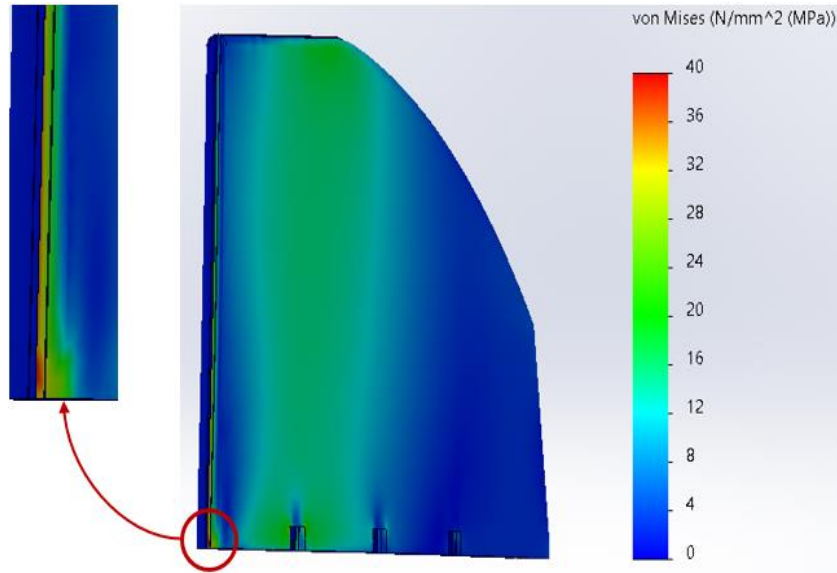
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα παραπάνω εισαγόμενα δεδομένα είναι τα παρακάτω:

Πίεση (*stress/Von Mises*)



Εικόνα 6.14: Αποτελέσματα πιέσεων

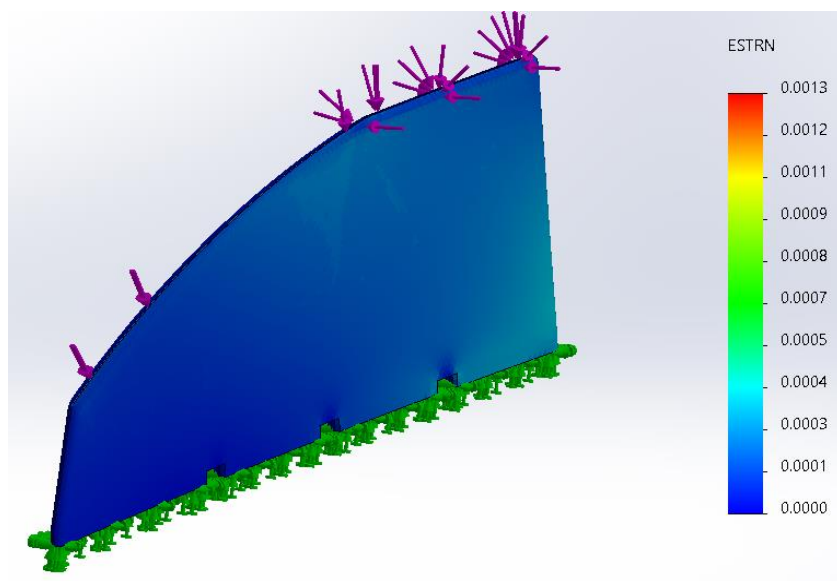
Από τα αποτελέσματα πίεσης προκύπτει ότι η μέγιστη πίεση που αναπτύσσεται είναι της τάξεως των 40 MPa. Το ιδιαίτερο εδώ, δεν είναι το μέγεθος της πίεσης, αλλά η περιοχή στην οποία παρουσιάζεται (βλ. Εικόνα 6.15). Πιο συγκεκριμένα, το φαινόμενο της μέγιστης πίεσης είναι πιο έντονο στην περιοχή εναλλαγής των στρώσεων προς την αρχική στρώση, στο πίσω – κάτω μέρος του *endplate*.



Εικόνα 6.15: Απεικόνιση περιοχής μέγιστης πίεσης (40 MPa)

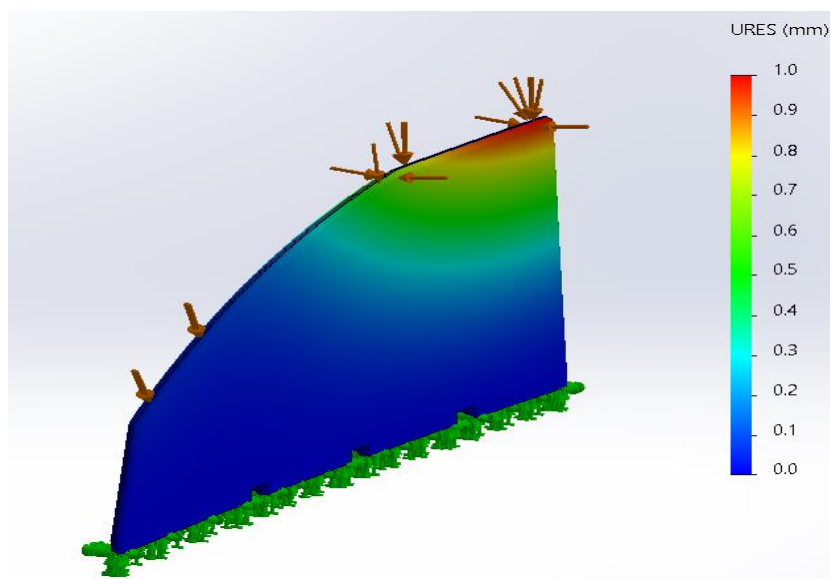
Να σημειωθεί, ότι το παραπάνω φαινόμενο δεν είναι συνεχόμενο, δηλαδή δε θα παρουσιάζετε συνέχεια κατά την λειτουργία του πτερυγίου. Επίσης, δεν θα αποτελεί πρόβλημα λόγω της αντοχής του *Kevlar 149* στην περιοχή αυτή. Αλλά, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά την κατασκευή του (π.χ. πρόληψη με την εισαγωγή στρώματος ρητίνης στην παραπάνω περιοχή όπου γίνεται η μετάβαση των στρώσεων).

Παραμόρφωση (*strain*)



Εικόνα 6.16: Αποτελέσματα παραμορφώσεων

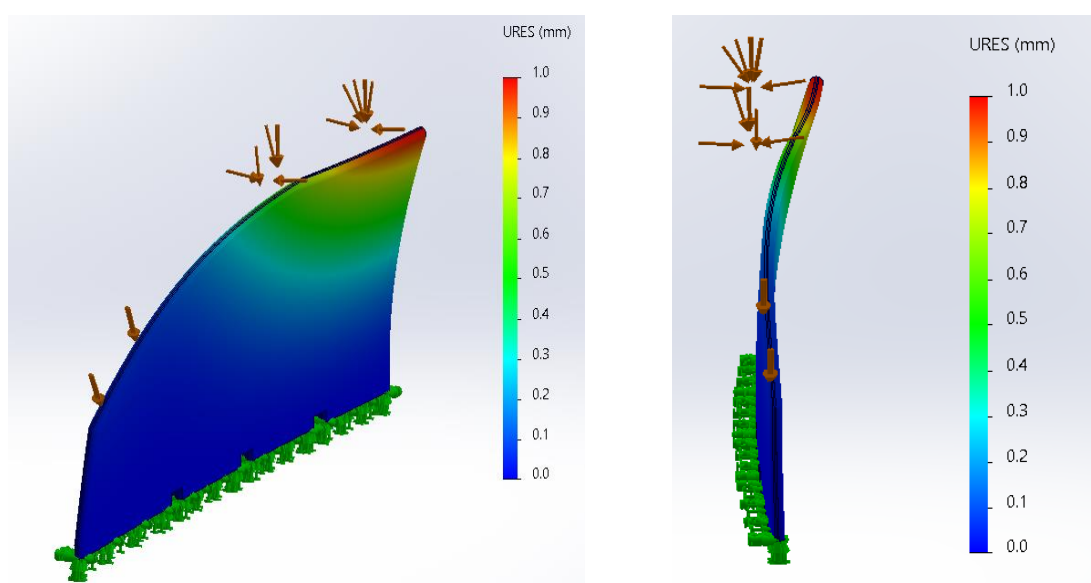
## Μετατόπιση (*displacement*)



Εικόνα 6.17: Αποτελέσματα μετατοπίσεων

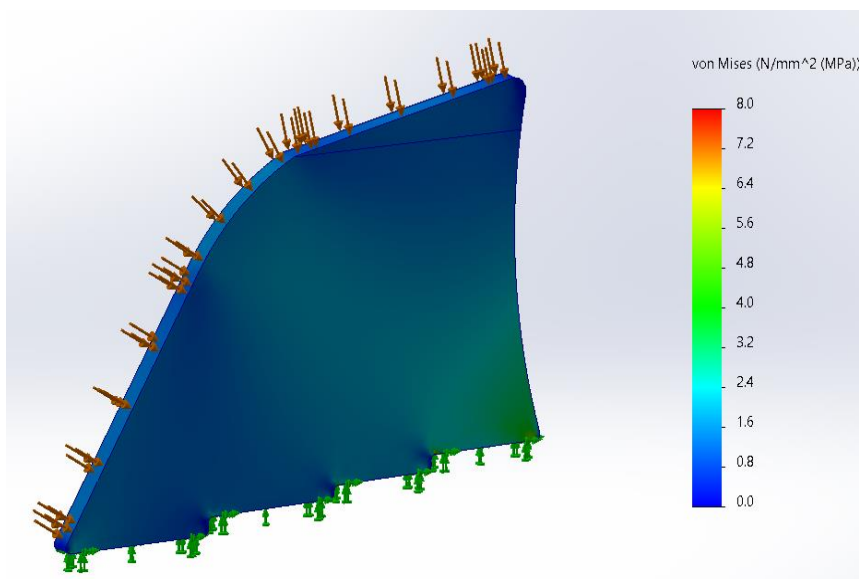
Από τα αποτελέσματα μετατοπίσεων (βλ. Εικόνα 6.17), παρατηρούμε ότι οι μέγιστες μετατοπίσεις δεν ξεπερνούν το ένα χιλιοστό. Κάτι που σημαίνει ότι το συγκεκριμένο μοντέλο *endplate*, κάτω από τις προκαθορισμένες συνθήκες πληρεί τις προϋποθέσεις για να αποτελέσει τμήμα μιας εμπρόσθιας αεροτομής. Επίσης, η μέγιστη μετατόπιση συγκεντρώνεται στη κορυφή του περυγίου και από την μεριά όπου έχει τοποθετηθεί το θερμοπλαστικό πολυμερές (*PEEK*).

Ακολουθούν απεικονίσεις, όπου παρουσιάζουν την παραπάνω μετατόπιση σε κλίμακα (50:1), ώστε να γίνει αντιληπτή η μέγιστη μετατόπιση του ενός χιλιοστού προς την κορυφή του *endplate*.

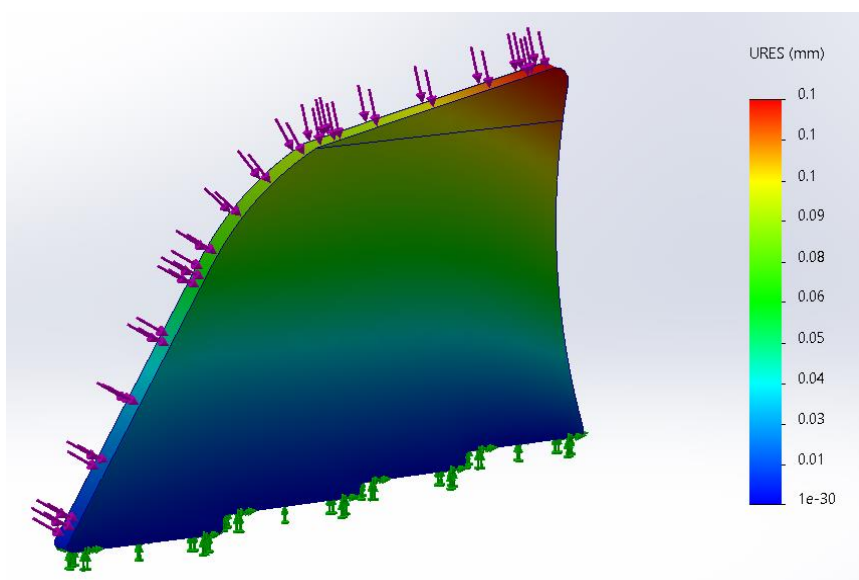


Εικόνα 6.18: Αποτελέσματα μετατοπίσεων σε κλίμακα 50:1

Από την άλλη, με τις ίδιες συνθήκες, τα ίδια εισαγόμενα δεδομένα και με μια κοινή λογική στην τοπολογία των υλικών, το πρώτο μοντέλο παρουσιάζει σχεδόν μηδενικές μετατοπίσεις και παράλληλα φαίνεται ότι υπόκειται σε χαμηλότερες πιέσεις (βλ. Εικόνα 6.19 & Εικόνα 6.20), από ότι το δεύτερο μοντέλο, που αναλύθηκε προηγουμένως. Οι χαμηλότερες πιέσεις οφείλονται στην απλούστερη γεωμετρία του, και στην απουσία μεγάλης καμπυλότητας, που οδηγούν στην πιο ομαλή μετάβαση των στρώσεων των υλικών. Συνεπώς, η δεύτερη επιλογή μπορεί να θεωρηθεί ως πιο ανθεκτική, λόγω της δημιουργίας χαμηλότερων πιέσεων στην επιφάνεια της.



Εικόνα 6.19: Αποτελέσματα πιέσεων



Εικόνα 6.20: Αποτελέσματα μετατοπίσεων

Έτσι, μετά από τα πρώτα δείγματα αναλύσεων η αρχική επιλογή του δεύτερου μοντέλου ως τελική επιλογή *endplate* σε ένα σύστημα εμπρόσθιας αεροτομής, δείχνει ότι θα είναι ιδανική και αποδεκτή.

## 6.2 Υπολογιστική Δυναμική Ρευστών (*Computational Fluid Dynamics*)

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, μια ανάλυση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (*CFD*) είναι απαραίτητη, κρίσιμη και πρέπει να πραγματοποιείται για οποιοδήποτε εξάρτημα που επηρεάζει την αεροδυναμική και τη συνολική απόδοση ενός οχήματος. Πιο συγκεκριμένα η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (*CFD*) είναι η επιστήμη που με τη βοήθεια ψηφιακών υπολογιστών, παράγει ποσοτικές προβλέψεις φαινομένων ροής ρευστού, με βάση τους νόμους διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας, που διέπουν την κίνηση του ρευστού.

Στην εργασία αυτή, αναπτύσσονται δυο Υπολογιστικές Ρευστοδυναμικές αναλύσεις (*CFD*). Η αρχική θα αφορά την τελική επιλογή *endplate*, ενώ η δεύτερη θα αναφέρεται στην πρώτη επιλογή *endplate*. Μέσα από τις δυο αναλύσεις αυτές, θα παρουσιαστεί, ως ένα βαθμό, ο τρόπος επίτευξης της κρίσιμης λειτουργικής απαίτησης που θα αφορά την ανακατεύθυνση της ροής του αέρα από τους εμπρόσθιους τροχούς.

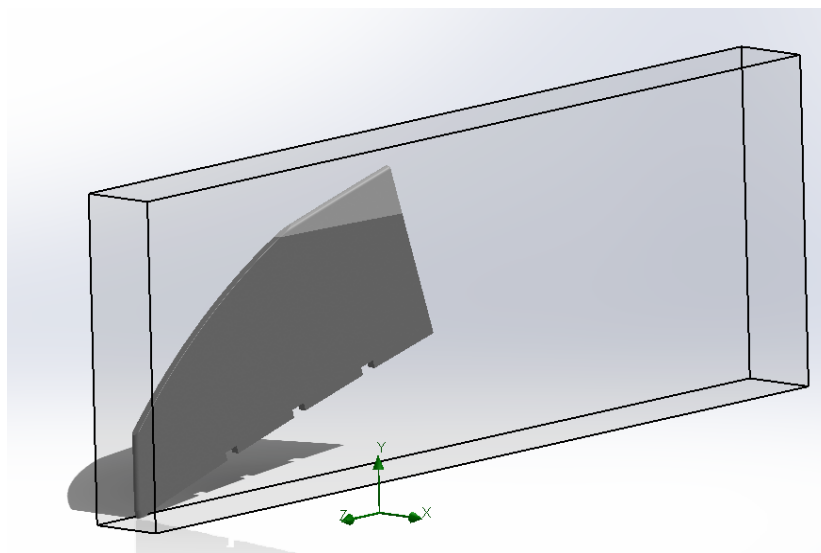
Να σημειωθεί επίσης στο σημείο αυτό ότι, για να κριθεί ως αποτελεσματική η ανακατεύθυνση της ροής του αέρα που επιτυγχάνεται λόγω του σχεδιασμού, του τελικού *endplate*, ιδανικά, θα έπρεπε να πραγματοποιηθεί και μια *CFD* ανάλυση σε ολόκληρο το εμπρός τμήμα του αγωνιστικού οχήματος και κατ' επέκταση μια δεύτερη στο σύνολο του μονοθέσιου, ώστε να μπορεί να αξιολογηθεί εάν όντως είναι αποδοτική η σχεδίαση του εξαρτήματος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων *CFD* που θα παραγόντουσαν. Έτσι, έχοντας διευκρινίσει το λόγο της ανάπτυξης μιας *CFD* ανάλυσης για το επιλεγμένο τελικό *endplate*, μπορεί να περιγραφεί ο τρόπος δημιουργίας της και να ακολουθήσουν τα αποτελέσματα.

Παράλληλα, η παρουσίαση της δεύτερης *CFD* ανάλυσης (ενός συμβατικού *endplate* κατασκευασμένο από *CFRP*, βλ. υποκεφάλαιο 5.3 – 1<sup>η</sup> επιλογή), θα φανερώνει μέσω των απεικονίσεων των αποτελεσμάτων της, και ορισμένους λόγους για τους οποίους θα αιτιολογείται η επιλογή της διαφορετικής γεωμετρίας πτερυγίου (βλ. υποκεφάλαιο 5.3 – 2<sup>η</sup> επιλογή), καθώς και η χρήση πολλαπλών υλικών για την κατασκευή του.

Ακολουθούν τα βήματα επίτευξης μιας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (*CFD*) ανάλυσης. Τα βήματα θα περιγραφούν στην ανάλυση του τελικού *endplate* και στην συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της συμβατικής επιλογής.

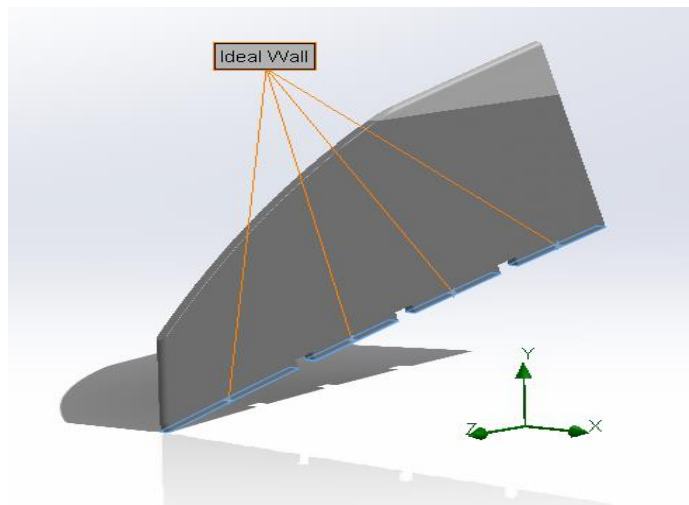
Το λογισμικό που επιλέχθηκε για την επίτευξη της παρακάτω *CFD* ανάλυσης είναι το *SolidWorks*. Όπως στις στατικές μηχανικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν προηγουμένως, για τα διάφορα μοντέλα (βλ. υποκεφάλαιο 6.1), έτσι και εδώ απαιτούνται ορισμένα βήματα:

- Κατά την δημιουργία μιας νέας ανάλυσης (*project – CFD*) γίνεται η εισαγωγή ορισμένων δεδομένων. Κατά την εισαγωγή αυτή, επιλέγονται μονάδες μέτρησης παραμέτρων (π.χ. πίεσης, ταχύτητας, μάζας, θερμοκρασίας, κα.), το είδος του τύπου ανάλυσης (εσωτερικής ή εξωτερικής), τα φυσικά χαρακτηριστικά που θα επιδρούν στο περιβάλλον (π.χ. βαρύτητα, ροή ρευστού, κ.α.), το είδος και ο τύπος του ρευστού, καθώς και οι παράμετροι που θα επιδρούν στο χώρο όπου θα βρίσκεται το 3Δ μοντέλο (π.χ. ταχύτητα ίση με 320 Km/h).
- Θα πρέπει επίσης, να έχει γίνει εισαγωγή υλικού. Στην περίπτωση αυτή, επιλέχθηκε να διατηρηθεί η ίδια τοπολογία υλικών με αυτή των στατικών αναλύσεων (βλ. Εικόνα 6.1).
- Έπειτα, θα πρέπει να διαμορφωθεί ο εννοιολογικός χώρος (*conceptual domain*), στον οποίο θα εμπεριέχεται το μοντέλο (βλ. Εικόνα 6.21).  
Ο χώρος αυτός αποτελεί ένα κουτί, το οποίο διαμορφώνεται, κυρίως, σύμφωνα με το 3Δ μοντέλο που εμπεριέχει. Επίσης, ο χώρος που δίνεται στο πίσω μέρος του *endplate* (δηλαδή το μήκος κουτιού στον άξονα *z*) έχει να κάνει με την γραφική αναπαράσταση και μέχρι που θα απεικονίζονται τα γραφικά χαρακτηριστικά των αποτελεσμάτων. Ο χώρος αυτός μπορεί να διαμορφωθεί ανά πάσα στιγμή κατά την ανάλυση, αν κριθεί αναγκαίο για την αποτελεσματικότερη αναπαράσταση της ροής του ρευστού.



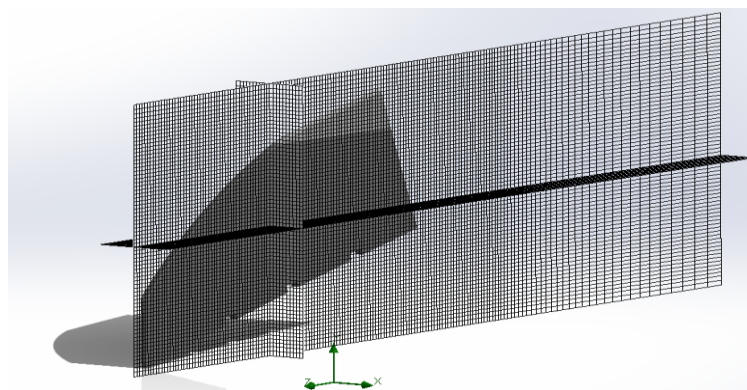
Εικόνα 6.21: Εννοιολογικός χώρος (*Conceptual domain*)

- Στη συνέχεια ορίζονται οι οριακές συνθήκες (*boundary conditions*). Δίνονται αρκετές επιλογές, σύμφωνα με τις οποίες καθορίζονται ορισμένες παράμετροι οι οποίοι λαμβάνονται ή δεν λαμβάνονται υπόψιν, από τον αλγόριθμο, κατά την επίλυση των εξισώσεων *Navier – Stokes*. Η επιλεγμένη οριακή συνθήκη παρουσιάζεται παρακάτω (βλ. Εικόνα 6.22), όπου οι περιοχές σύνδεσης του *endplate* με τα πτερύγια της εμπρόσθιας αεροτομής βρίσκονται σε ιδανική θέση (*ideal wall*). Αυτό σημαίνει ότι οι επιλεγμένες επιφάνειες έχουν λάβει μια συνθήκη μη ολίσθησης (*non – slip*), που υποθέτει ότι η ταχύτητα σε αυτές τις περιοχές είναι μηδέν, ανεξάρτητα από την τιμή ταχύτητας που εφαρμόζεται (έχει προκαθοριστεί στα 320 Km/h).



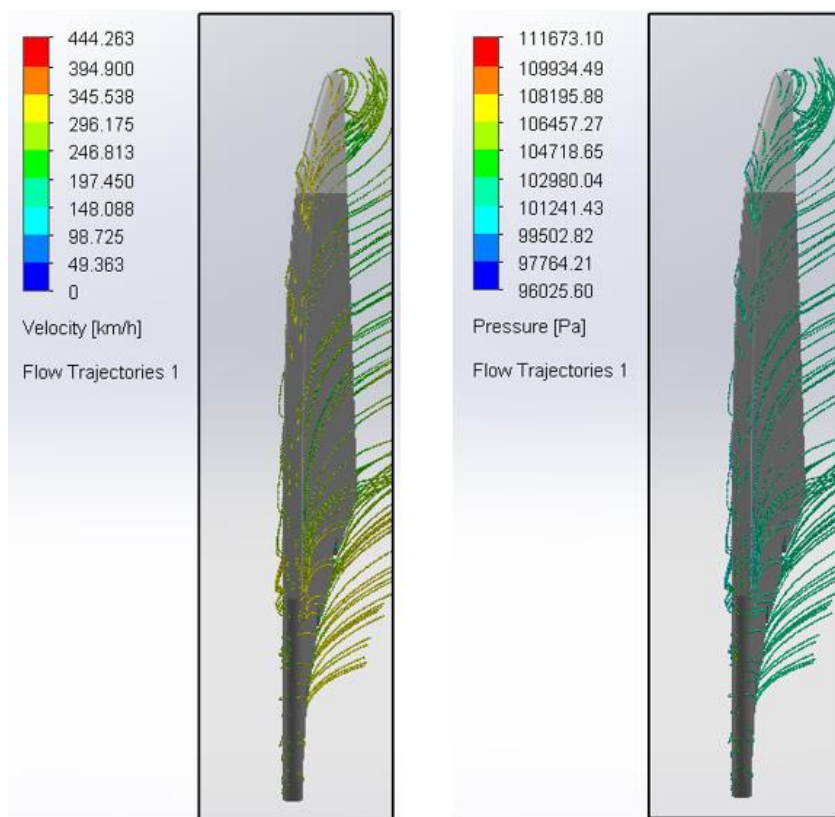
Εικόνα 6.22: Επιλεγμένη οριακή συνθήκη (*boundary condition*)

- Έπειτα, γίνεται η επιλογή των στόχων (*goals*). Στο στάδιο αυτό, επιλέγεται η εμφάνιση των τύπων των αποτελεσμάτων που θα παράγει η ανάλυση. Επιλέχθηκε η ταχύτητα και η πίεση.
- Τέλος, δημιουργείται ένα πλέγμα στον προκαθορισμένο χώρο (*conceptual domain*), το οποίο θα είναι πυκνότερο στην αρχή, όπου θα βρίσκεται το *endplate* και θα αραιώνει προς το πίσω μέρος του (βλ. Εικόνα 6.23).



Εικόνα 6.23: Απεικόνιση πλέγματος

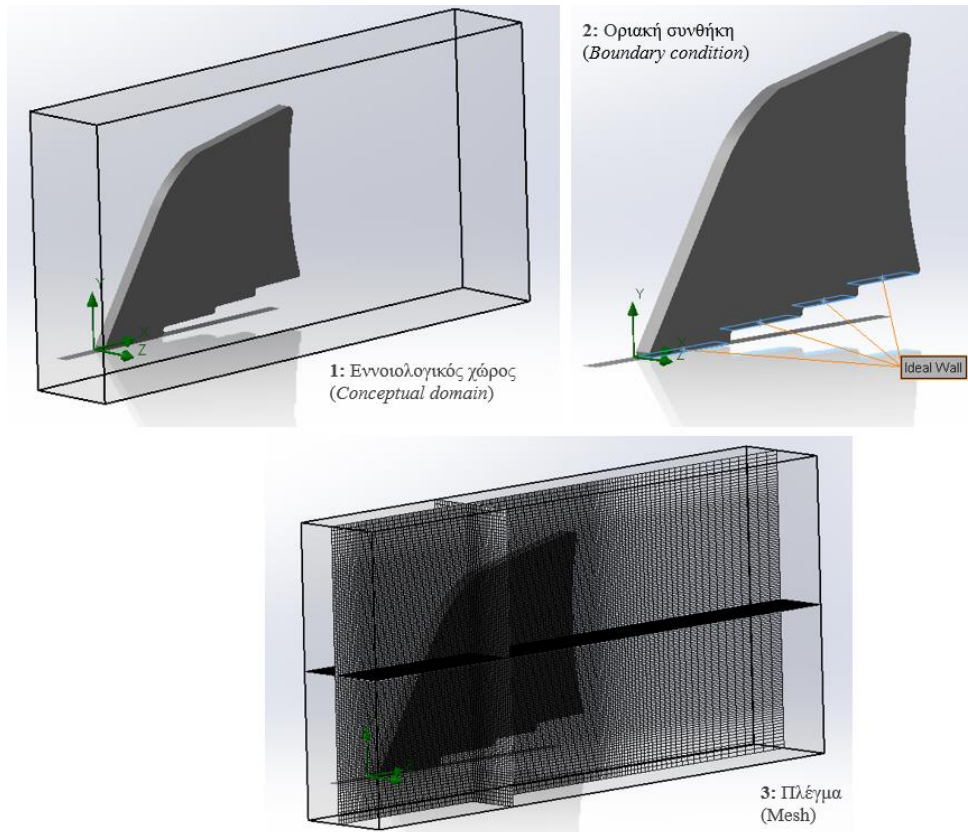
Έτσι, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα της ταχύτητας και της πίεσης, στη γεωμετρία του τελικού *endplate*, καθώς αυτό δέχεται μια ροή αέρα ταχύτητας 320 Km/h. Οι απεικονίσεις των αποτελεσμάτων έγιναν βλέποντας το *endplate* από μπροστά, καθώς διέρχεται, έτσι ώστε να είναι πιο φανερή η ανακατεύθυνση της ροής του αέρα και ταυτόχρονα να παρουσιάζεται ο λόγος που επιλέχθηκε η δεύτερη επιλογή.



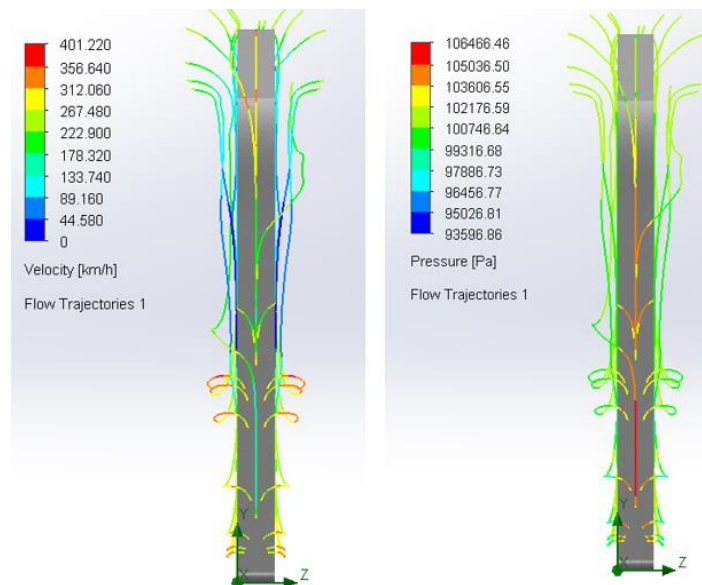
Εικόνα 6.24: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ταχύτητας - πίεσης

Στην φάση αυτή, θα παρουσιαστούν συνοπτικά τα ίδια βήματα για την επίτευξη της *CFD* ανάλυσης της πρώτης επιλογής *endplate*, με την μόνη διαφορά να αφορά την επιλογή υλικού (100% ανθρακονήματα – *CFRP*).

Στα αποτελέσματα που προκύπτουν από την *CFD* ανάλυση αυτή (βλ. Εικόνα 6.26), παρατηρούνται επιδράσεις υψηλότερων καταπονήσεων στην εμπρόσθια επιφάνεια του *endplate*, σε σχέση με τα αποτελέσματα του δεύτερου περυγίου (βλ. Εικόνα 6.24). Μέσα από την παρατήρηση αυτή, μπορεί να αιτιολογηθεί περαιτέρω η επιλογή του δεύτερου *endplate*, καθώς και ο λόγος χρήσης του παραπάνω συνδυασμού υλικών στην γεωμετρία του. Ο συνδυασμός όλων αυτών, συντελεί σύμφωνα και με τα παραγόμενα αποτελέσματα στο γεγονός ότι το επιλεγμένο *endplate* μπορεί να αποτελέσει μια αποδοτικότερη λύση ενός ακριανού περυγίου μιας εμπρόσθιας αεροτομής, σε σχέση με τα υπάρχοντα συμβατικά φτερά (βλ. υποκεφάλαιο 5.3 – 1<sup>η</sup> επιλογή).



Εικόνα 6.25: Απεικόνιση βημάτων CFD ανάλυσης



Εικόνα 6.26: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ταχύτητας - πίεσης

## 7. Μελέτη κατασκευής *endplate*

---

Στο κεφάλαιο αυτό, θα επιχειρηθεί να παρουσιαστεί μια προσέγγιση κατασκευής του *endplate*. Επίσης, θα γίνει αναφορά ενός ενδεικτικού τρισδιάστατου εκτυπωτή, με τον οποίο θα μπορεί να κατασκευαστεί το πτερύγιο στις απαραίτητες διαστάσεις. Παράλληλα, θα αναλυθούν τα στάδια εναπόθεσης των επιλεγμένων υλικών, καθώς και ο τρόπος που θα προσδώσει ένα πιο ενισχυμένο σύνολο μηχανικών ιδιοτήτων, για την καλύτερη μηχανική συμπεριφορά του.

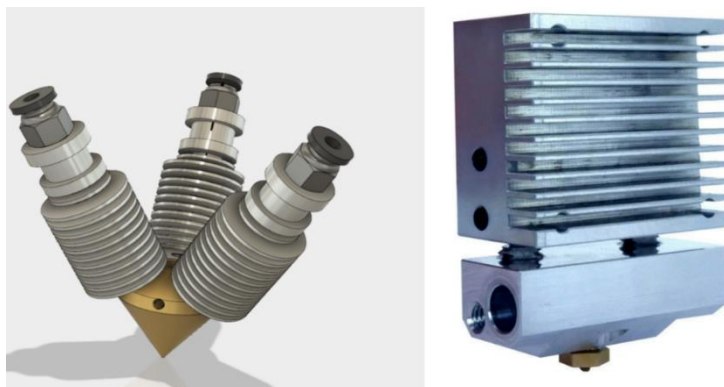
Αρχικά, ως μέθοδος κατασκευής επιλέχθηκε η Μοντελοποίηση Συγχωνευμένης Εναπόθεσης – *FDM* (βλ. υποκεφάλαιο 3.3.2), με σκοπό την παραγωγή ενός Λειτουργικά Διαβαθμισμένου τεμαχίου – *FGM* (βλ. υποκεφάλαιο 3.3.8), σύμφωνα με τον συνδυασμό των επιλεγμένων υλικών (βλ. υποκεφάλαιο 6.1, Εικόνα 6.8). Με βάση τις μεθόδους που περιγράφηκαν (βλ. υποκεφάλαιο 3.3), η *FDM* κρίθηκε ως η καταλληλότερη για την συγκεκριμένη κατασκευή.

Πιο συγκεκριμένα, η χρήση μίας κεφαλής στην διαδικασία αυτή, θα βοηθά στην ένωση των δυο υλικών και θα δίνει την δυνατότητα παροχής ρητίνης (*epoxy*, βλ. υποκεφάλαιο 4.3) όπου απαιτείται, ώστε να διαμορφώνεται καλύτερη επιφάνεια διεπαφής, η οποία θα είναι πιο ενισχυμένη και θα παράγεται σε λιγότερο χρόνο. Στο σημείο αυτό, θα παρουσιαστεί ο επιλεγμένος τρισδιάστατος εκτυπωτής, σύμφωνα με το οποίο θα μπορεί να κατασκευάσει το *endplate* στις πραγματικές διαστάσεις του (κλίμακας 1:1): 540mm x 375mm x 10mm (*length x width x height*) [20].



Εικόνα 7.1: Τρισδιάστατος εκτυπωτής *Modix BIG-60 v4* [21]

Στον παραπάνω εκτυπωτή, μπορεί να προσαρμοστεί μια κεφαλή, η οποία θα διαθέτει τρεις υποδοχές για την εισαγωγή των δυο υλικών, αλλά και για την δυνατότητα παροχής ρητίνης, όπου χρειάζεται. Η ρητίνη πέρα από την ενίσχυση της σύνδεσης των δυο υλικών, μπορεί να βοηθήσει και στην απορρόφηση φορτίων που θα προκαλούνται από υψηλές πιέσεις (βλ. υποκεφάλαιο 6.1, Εικόνα 6.15)<sup>14</sup>.



Εικόνα 7.2: Κεφαλή εξώθησης τύπου Cyclops με 3 & 2 υποδοχές [22]

Πριν, την περιγραφή εναπόθεσης των επιλεγμένων υλικών, θα πρέπει να γίνει αναφορά στην μορφή αυτών, με την οποία θα εισάγονται στον 3Δ εκτυπωτή. Και, τα δυο υλικά θα παρέχονται με την μορφή νήματος. Όσον αφορά, το θερμοπλαστικό υλικό (*PEEK*) μπορεί να βρεθεί εύκολα σε μορφή συνεχούς νήματος (*continues or long fiber*) σε διάφορα μεγέθη (0.08 με 1.10mm), χρώματα, ενώ μπορεί να παραγγελθεί και με ειδικά χαρακτηριστικά (π.χ. ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες) [23]. Όσον αφορά, το επιλεγμένο σύνθετο υλικό (*Kevlar 149*), το νήμα μπορεί να βρεθεί είτε σε μορφή «κοντών» νημάτων (*short or chopped fiber*) τα οποία κρίνονται πιο εύκολα διαχειρίσιμα για εκτύπωση, είτε σε μορφή συνεχούς νήματος (*continues or long fiber*), τα οποία προτιμώνται, τα τελευταία χρόνια, λόγω των καλύτερων ιδιοτήτων που μπορούν να προσφέρουν στο τελικό προϊόν.

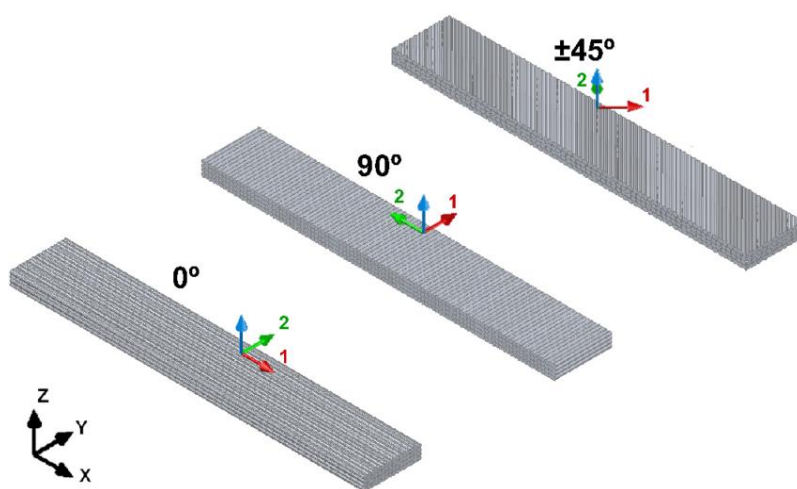


Εικόνα 7.3: Ενδεικτικά δείγματα νημάτων

<sup>14</sup> Γενικά, η αντοχή σε εφελκυσμό μιας εποξειδικής (*epoxy*) ρητίνης κυμαίνεται μεταξύ 34 – 41 MPa.

Η κρίσιμη διαφορά των δυο ειδών νημάτων εντοπίζεται στις μηχανικές ιδιότητες που προσφέρουν στο παραγόμενο τεμάχιο. Η σύγκριση των ιδιοτήτων γίνεται σε σχέση με τις αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητες που προσφέρει το σύνθετο με πλεγμένες ίνες, οι οποίες είναι και οι πιο ισχυρές. Τα συνεχή νήματα προσφέρουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, που πλησιάζουν το 70% των ιδιοτήτων του πλεγμένου, σε αντίθεση με τα «κοντά – τεμαχισμένα» νήματα που πλησιάζουν το 25 – 30% των ιδιοτήτων του πλεγμένου [24]. Έτσι, από μία πρώτη επισκόπηση των δυο ειδών νημάτων, έχει αποφασιστεί να επιλεγθεί η χρήση συνεχούς νήματος και για το σύνθετο υλικό (*Kevlar 149*).

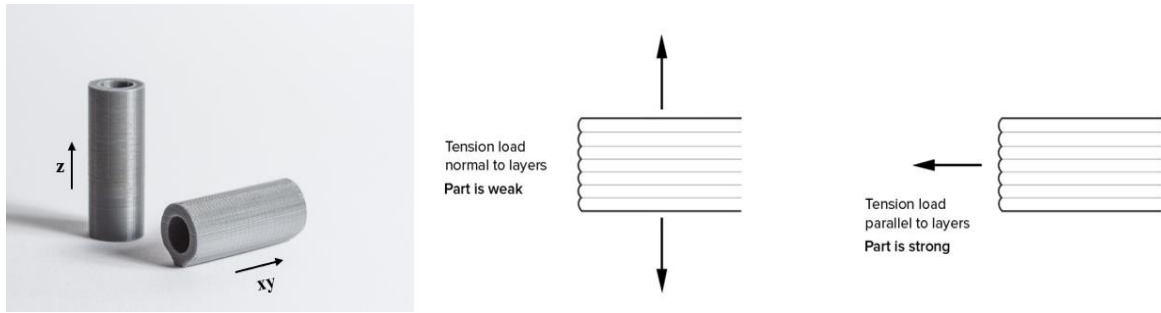
Ένας τρόπος για τον προσδιορισμό πιο ισχυρών μηχανικών ιδιοτήτων, που θα πλησιάζουν ακόμα περισσότερο τα επίπεδα αυτών του πλεγμένου, μπορεί να επιτευχθεί μέσω της συχνής αλλαγής κατεύθυνσης της κεφαλής εναπόθεσης του υλικού, ώστε να διαμορφώνει ίνες πλεγμένες στο χώρο εκτύπωσης. Αυτό δεν θα γίνεται τυχαία. Αντιθέτως, θα μπορεί να προγραμματιστεί μια αλληλουχία εντολών – συνθηκών, ώστε η κεφαλή να εναποθέτει το υλικό, ανά συγκεκριμένες μοίρες κάθε φορά (π.χ.  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$ ).



Εικόνα 7.4: Εναπόθεση ινών υπό διαφορετικές μοίρες [25]

Παράλληλα, σημαντική επίπτωση τόσο στις ιδιότητες, όσο στην οικονομία του υλικού και στο χρόνο κατασκευής του *endplate*, έχει και ο προσανατολισμός εκτύπωσης του. Δηλαδή, με βάση ποιον άξονα ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) θα εκτυπωθεί το τεμάχιο.

Υπάρχουν δυο επιλογές για τον προσανατολισμό εκτύπωσης του *endplate*, είτε με προσανατολισμό  $xy$ , είτε με προσανατολισμό στον  $z$ . Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι ο προσανατολισμός εκτύπωσης στους άξονες  $xy$  μπορεί να παράγει ένα τεμάχιο με λιγότερες στρώσεις υλικού, από ότι στον άξονα  $z$  για την παραγωγή του ίδιου τεμαχίου, ίδιων διαστάσεων. Ενώ ταυτόχρονα, έχει αποδειχθεί ότι το τεμάχιο εκτυπωμένο με προσανατολισμό  $xy$  προσδίδει 4 έως 5 φορές μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό όταν ασκηθεί σε αυτό κάθετο φορτίο, από ότι στο τεμάχιο που έχει εκτυπωθεί με προσανατολισμό  $z$ , (βλ. Εικόνα 7.5 ) [26].



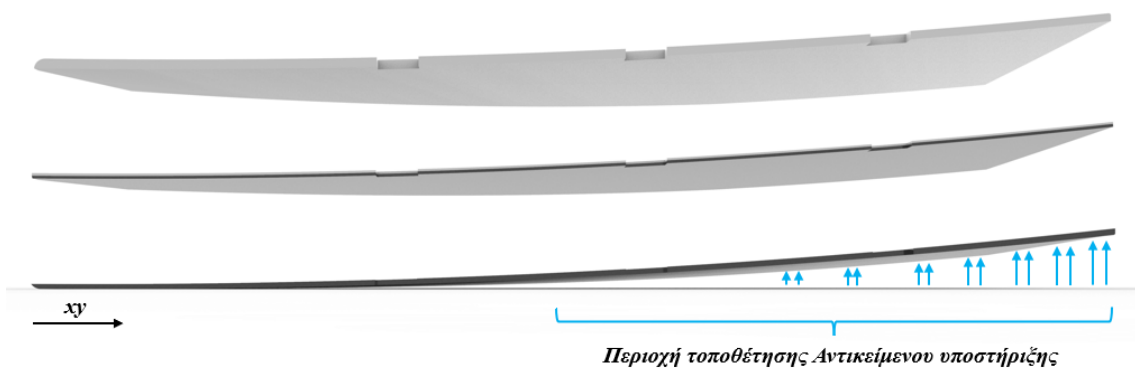
Εικόνα 7.5: Προσανατολισμοί εκτύπωσης & φορτία [26]

Στην φάση αυτή, μπορούν να περιγραφούν κάποια στάδια για την εκτύπωση μιας στρώσης και κατ' επέκταση όλων των στρώσεων του *endplate*:

- Κάθε υλικό τοποθετείται σε μια από τις υποδοχές της κεφαλής εκτύπωσης.
- Σημαντικό είναι πριν την έναρξη της εκτύπωσης να έχει διασφαλιστεί ο τρόπος με τον οποίο θα εναλλάσσεται η κατεύθυνση της κεφαλής και σε ποιες μοίρες, κάθε φορά.

Για την εκτύπωση με προσανατολισμό *xy*:

- Στην πλατφόρμα εκτύπωσης θα πρέπει να έχει τοποθετηθεί ένα βοηθητικό στρώμα – αντικείμενο υποστήριξης το οποίο θα αποτελέσει το στήριγμα, ώστε το περύγιο να αποκτήσει την κλίση – γενικότερη φόρμα του, κατά την εκτύπωση (βλ. Εικόνα 7.6).



Εικόνα 7.6: Προσανατολισμός εκτύπωσης (*xy*) & περιοχή τοποθέτησης υποστήριξης

- Σύμφωνα, με τον παρακάτω διαχωρισμό του *endplate* σε στρώματα, πρώτα θα δημιουργηθεί η πλευρά όπου θα αποτελείται από *Kevlar 149* (100%), έπειτα το επόμενο στρώμα (μεσαίο στρώμα) θα αποτελείται από *Kevlar 149* και μια ποσότητα *PEEK* (π.χ. 80% σύνθετο & 20% θερμοπλαστικό), ώστε να επιτευχθεί μια ομαλότητα στην δομή του *endplate* καθώς θα επιτυγχάνεται η μεταβολή από το ένα υλικό στο άλλο, και στο τελευταίο και λεπτότερο στρώμα του, θα αποτελείται από *PEEK* (100%).



Εικόνα 7.7: Τοπολογία υλικών ανά στρώμα

- Καθώς, θα γίνεται η εξώθηση του *Kevlar 149* θα περνά από ρητίνη (*epoxy*) και καθώς θα εναποτίθεται η ίνα θα υπόκειται σε υπεριώδες φως (*UV light*) για την σταθεροποίηση της.
- Το *PEEK* θα εναποτίθεται με τον ίδιο τρόπο.
- Μετά την εναπόθεση των υλικών, το τεμάχιο – *endplate* θα πρέπει να περάσει από έναν επιφανειακό έλεγχο, ώστε να διασφαλιστεί η επιφανειακή ποιότητα του. Και, όπου απαιτείται διόρθωση θα υπόκειται σε περαιτέρω επεξεργασία.

Το συνολικό αποτέλεσμα θα είναι η κατασκευή ενός *endplate*, που θα επιφέρει κοινά επίπεδα τιμών αντοχής σε εφελκυσμό, με αυτά των υπάρχοντων συμβατικών πτερυγίων. Έτσι, το επιλεγμένο *endplate* θα μπορεί να αποτελέσει μια πραγματικά βιώσιμη λύση για τα ακριανά τμήματα μιας εμπρόσθιας αεροτομής, η οποία όμως θα μπορεί να προσφέρει αποδοτικότερα αεροδυναμικά αποτελέσματα, με απώτερο σκοπό να τείνει να αυξήσει την γενικότερη απόδοση του οχήματος.

Από τα όσα προηγήθηκαν έως τώρα, μπορεί να προσδιοριστεί, πιο συγκεκριμένα, και η έννοια της πολυλειτουργικότητας του εξαρτήματος:

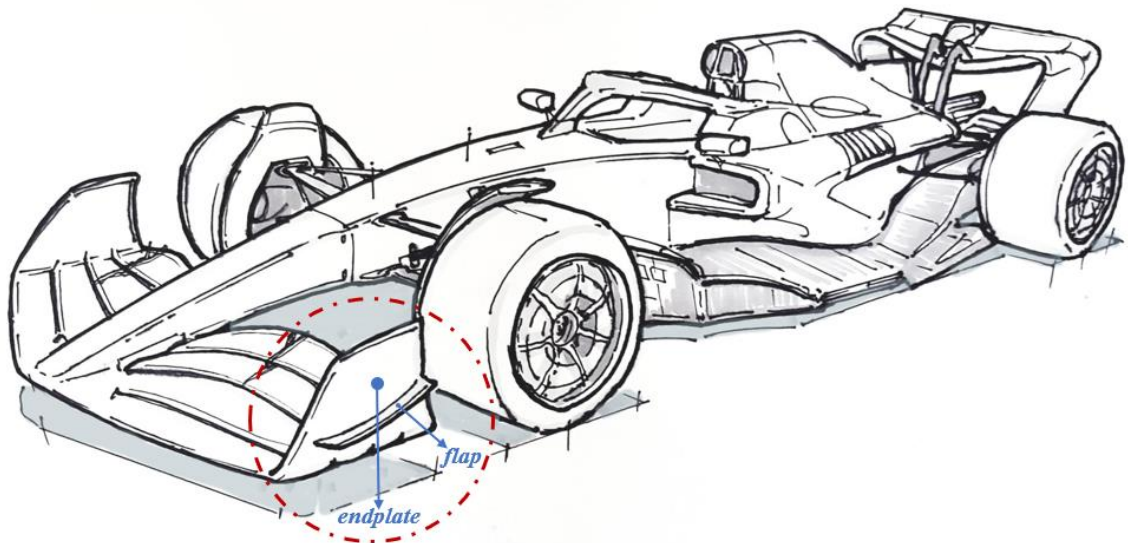
- Τα ακριανά πτερύγια – *endplates* της εμπρόσθιας αεροτομής αποτελούν στηρίγματα των ενδιάμεσων πτερυγίων (*flaps*) αυτής, και για αυτό κρίνεται απαραίτητη η επίτευξη υψηλών αποδόσεων αντοχής στην δομή τους. Ωστε να μπορούν να διατηρούν τα ενδιάμεσα πτερύγια στις προκαθορισμένες θέσεις τους, μειώνοντας την ευελιξία τους, για να συμμορφώνονται στους κανονισμούς της *FIA* περί ευλύγιστων πτερυγίων στις αεροτομές. Και επειδή, λόγω της ακριανής τοποθέτησης τους τείνουν να δέχονται και επιπλέον φορτία από τα ενδιάμεσα πτερύγια της αεροτομής, η έννοια της αντοχής κρίνεται αναγκαία για δυο λόγους:
  - i. στήριξη ενδιάμεσων πτερυγίων (*flaps*), αλλά και
  - ii. για την απορρόφηση φορτίων, χωρίς να διαταράσσεται η γενικότερη διάταξη της αεροτομής σε υψηλά επίπεδα.

- Η δεύτερη λειτουργία τους αφορά την ανακατεύθυνση της ροής του αέρα από τους εμπρόσθιους τροχούς, με τέτοιο τρόπο ώστε το όχημα να συναντά λιγότερη αντίσταση, αλλά και να μεταφέρει την ροή αυτή αποτελεσματικότερα στο πίσω μέρος του οχήματος.

Συνήθως, η μεταφορά της ροής του αέρα πιο ομαλά προς τα πίσω, γίνεται με ένα επιπλέον πτερύγιο που τοποθετείται στην πλαϊνή εξωτερική πλευρά του *endplate* (βλ. Εικόνα 7.8).

Η επιλεγμένη λύση *endplate* με μερικώς εύκαμπτα στοιχεία (στα πλαίσια των κανονισμών – χωρίς μεγάλες μετατοπίσεις), μπορεί να καταστήσει την μέχρι πρότινος ένταξη ενός επιπλέον πτερυγίου (*flap*) για την υποβοήθηση της καλύτερης μεταφοράς της ροής του αέρα προς το πίσω μέρος του οχήματος, ως μη απαραίτητη ή περιττή.

Για τους λόγους αυτούς, το επιλεγμένο *endplate* μπορεί να διακριθεί σε ένα βαθμό ως ένα πολυλειτουργικό εξάρτημα της εμπρόσθιας αεροτομής, επιτελώντας τουλάχιστον δυο λειτουργίες, χωρίς την ανάμειξη επιπλέον εξαρτημάτων – πτερυγίων, για την επίτευξη των λειτουργιών του.



Εικόνα 7.8: Απεικόνιση εξωτερικού πτερυγίου (*flap*) στο *endplate*

## 8. Συμπεράσματα

Με την παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια της χρήσης της Σχεδίασης για Κατεργασίες Πρόσθεσης Υλικού (*Design for Additive Manufacturing – DfAM*) πολλαπλών υλικών, με σκοπό την δημιουργία ενός πολυλειτουργικού εξαρτήματος *endplate*, μιας εμπρόσθιας αεροτομής ενός μονοθέσιου οχήματος τύπου *F1*.

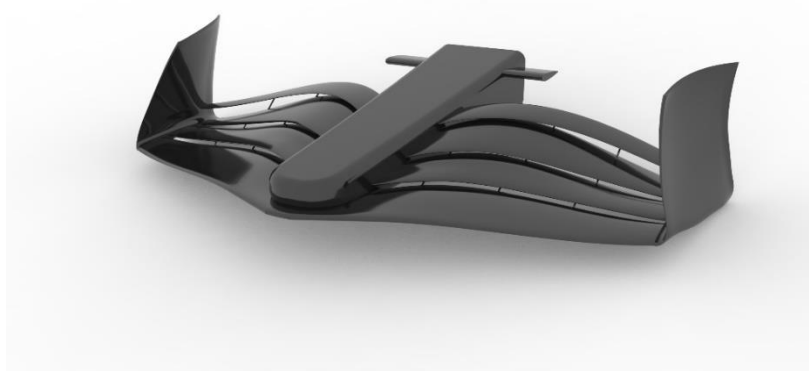
Παράλληλα στο πλαίσιο αυτής, επεξηγήθηκε η χρησιμότητα της διαδικασίας της Μοντελοποίησης Συγχωνευμένης Εναπόθεσης – *FDM* για την δημιουργία ενός Λειτουργικά Διαβαθμισμένου Υλικού – *FGM*. Αφού το επιλεγμένο *endplate* που παρουσιάστηκε παραπάνω, δημιουργήθηκε συνδυάζοντας δυο υλικά (αραμίδιο και πολυαιθερεκετόνη) διαφορετικών κατηγοριών, με σκοπό την παραγωγή ενός «νέου» σύνθετου, που θα εξυπηρετεί πιο αποδοτικά τις κύριες λειτουργίες του εξαρτήματος.

Πιο συγκεκριμένα, το προτεινόμενο πλάνο της εργασίας αυτής ενσωματώνεται στις παρακάτω τέσσερις ενότητες:

- Αναγνώριση λειτουργικών & τεχνικών απαιτήσεων.
- Επιλογή πρωτεύοντος υλικού.
- Επιλογή διεργασίας πολλαπλών υλικών *KPY*, που θα καθιστά την παραγωγή του εξαρτήματος εύκολη, γρήγορη & οικονομική.
- Συνδυασμός υλικών και προσδιορισμός τους στη γεωμετρία του εξαρτήματος (τοπολογία), με τρόπο ώστε να επιτυγχάνονται αποτελεσματικά οι λειτουργικές απαιτήσεις, τηρώντας παράλληλα τις τεχνικές προδιαγραφές (κανονισμούς).

Το πλαίσιο αυτό, μπορεί να λειτουργήσει ως «καθοδηγητής» και να βοηθήσει τις σχεδιαστικές ομάδες να εκμεταλλευτούν τις σχεδιαστικές ελευθερίες που προσφέρει η τεχνολογία των *KPY* πολλαπλών υλικών.

Μελλοντικές ενέργειες μπορούν να επικεντρωθούν σε πιο συγκεκριμένα θέματα, όπως η προσομοίωση των μεθόδων για πολυλειτουργικά εξαρτήματα πολλαπλών υλικών, με δυνατότητα στην βελτιστοποίηση του σχεδιασμού τέτοιων συστημάτων.



Εικόνα 8.1: Μελλοντική εμπρόσθια αεροτομή, παραγόμενη από πολυλειτουργικά μερικώς εύκαμπτα πτερύγια

## 9. Αναφορές & Βιβλιογραφία

---

- [1] - Αγαθοκλής Αν. Κριμπένης, Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός Επίκουρος Καθηγητής ΕΚΠΑ, ΜΣΚ 25 – “3Δ εκτύπωση & υβριδικές εργαλειομηχανές, Μέρος 1 εισαγωγή στην 3Δ εκτύπωση”, 2021
- [2] - <https://3dgence.com/>
- [3] - <https://xometry.eu/en/polymer-cnc-machining-vs-3d-printing-checklist-to-choose-the-right-one/>
- [4] - <https://www.atlasrenewableenergy.com/en/making-circular-economy-happen/>
- [5] - Seymour Hasanov, Suhas Alkunte, Mithila Rajeshirke, Ankit Gupta, Orkhan Huseynov, Ismail Fidan, Frank Alifui-Segbaya and Allan Rennie, “*Review on Additive Manufacturing of Multi-Material Parts: Progress and Challenges*”, 2021
- [6] - <https://www.eos.info/en/3d-printing-materials/plastic/paek-ultem>
- [7] - <https://www.wevolver.com/article/lightweighting-applications-through-smart-engineering-design>
- [8] - [https://www.fia.com/sites/default/files/formula\\_1\\_-\\_technical\\_regulations\\_-\\_2022\\_-\\_iss\\_9\\_-\\_2022-02-18.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/formula_1_-_technical_regulations_-_2022_-_iss_9_-_2022-02-18.pdf)
- [9] - [The 2022 Formula 1 rules explained - F1technical.net](https://www.f1technical.net/news/the-2022-formula-1-rules-explained)
- [10] - <https://eaglepubs.erau.edu/introductiontoaerospaceflightvehicles/chapter/wing-shapes-and-nomenclature/>
- [11] - Αγαθοκλής Αν. Κριμπένης, Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός Επίκουρος Καθηγητής ΕΚΠΑ, ΜΣΚ 25 – “3Δ εκτύπωση & υβριδικές εργαλειομηχανές, Μέρος 2 μέθοδοι κατεργασιών πρόσθεσης υλικού”, 2021
- [12] - <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion>
- [13] - [https://www.researchgate.net/figure/Geometry-of-the-Functionally-Graded-Materials-FGM-rectangular-plate-The-length-width\\_fig1\\_337806533](https://www.researchgate.net/figure/Geometry-of-the-Functionally-Graded-Materials-FGM-rectangular-plate-The-length-width_fig1_337806533)
- [14] - [How are composites used in motorsport? - Racecar Engineering \(telegraph.co.uk\)](https://www.telegraph.co.uk/technology/2016/08/22/how-are-composites-used-in-motorsport/)
- [15] - <https://rachtr.blogspot.com/2016/08/the-advantages-of-epoxy-resin-versus.html>
- [16] - <https://blog.purestorage.com/perspectives/how-formula-1-car-sensors-create-data-at-every-turn/>
- [17] - P.K. Mallick, “*Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles*”, 2010
- [18] - F Ning, W Cong, J Qiu, J Wei and S Wang - Composites Part B: Engineering, “*Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling*”, 2015

- [19] - Xabier Castro and Zeeshan A. Rana, “*Aerodynamic and Structural Design of a 2022 Formula One Front Wing Assembly*”, page 7, 2020
- [20] - <https://topgear-autoguide.com/category/formula-1/dimensions-of-the-2021-f1-cars1607830479>
- [21] - <https://www.modix3d.com/>
- [22] - <https://all3dp.com/2/best-e3d-hot-ends-alternatives/>
- [23] - <https://www.polyfluor.nl/en/products/wire-cables-and-fibre/peek-fibre/>
- [24] - <https://www.addcomposites.com/post/understanding-continuous-fiber-composites-the-science-behind-the-materials>
- [25] - [https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-printing-orientations-0-90-and-45-The-local-material\\_fig14\\_316897831](https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-printing-orientations-0-90-and-45-The-local-material_fig14_316897831)
- [26] - <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-does-part-orientation-affect-3d-print/>