

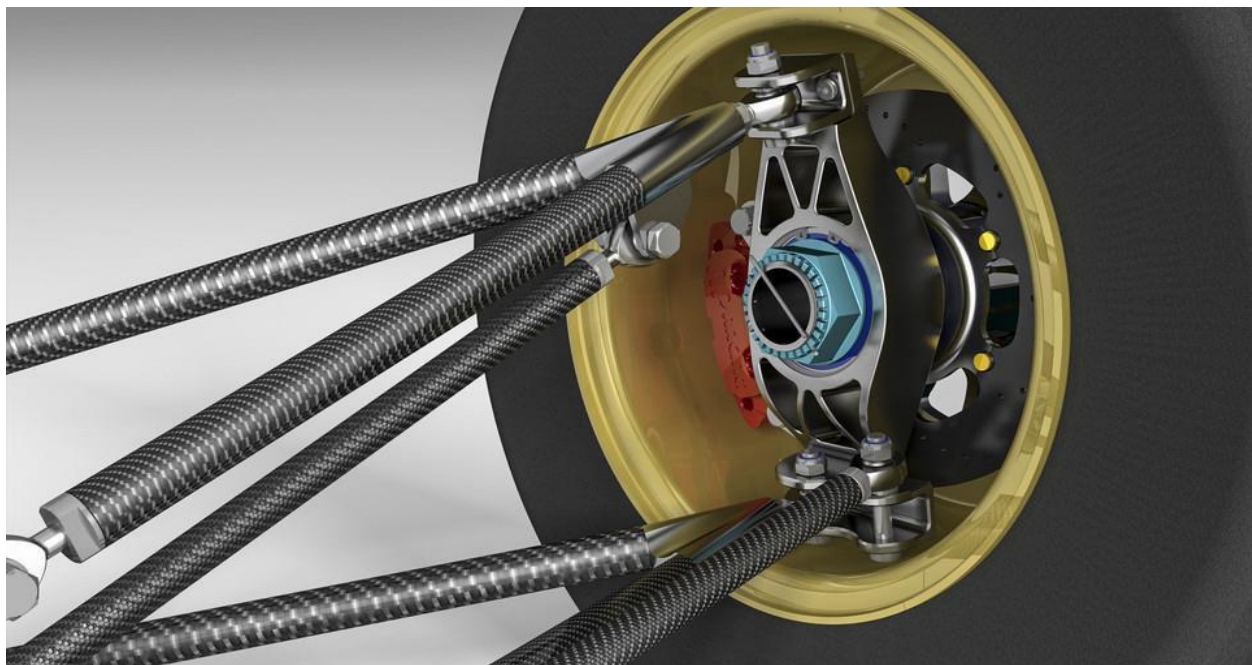


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

*Υπολογιστική Μελέτη Αντοχής και Δυσκαμψίας για βραχίονες  
(ψαλίδια) αγωνιστικού μονοθεσίου από ανθρακόνημα, με χρήση  
πεπερασμένων στοιχείων με το λογισμικό ANSYS™*



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*του Ζαβερδινού Γεώργιου*

*Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Χαριτίδης, Καθηγητής ΕΜΠ*

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2019



## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «**Υπολογιστική Μελέτη Αντοχής και Δυσκαμψίας για βραχίονες (ψαλίδια) αγωνιστικού μονοθεσίου από ανθρακόνημα, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων με το λογισμικό ANSYS™**» εκπονήθηκε κατά το έτος 2018 – 2019, υπό την αιγίδα του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Χαριτίδη Κωνσταντίνο, για την αμέριστη συμπαράσταση και εκπαιδευτική καθοδήγηση κατά την εκπόνηση της εργασίας. Θα ήθελα επίσης να τον ευχαριστήσω για την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα αντικείμενο του άμεσου ενδιαφέροντός μου, με την παράλληλη προσέγγισή του ως αντικείμενο οργανωμένης έρευνας και μελέτης.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον μεταδιδακτορικό ερευνητή κ. Δραγατογιάννη Δημήτρη, για την προσφορά γνώσεων και συμβουλών σε οποιοδήποτε πρόβλημα και δυσκολία συνάντησα κατά την επιτέλεση της εργασίας μου. Ακόμα, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο μεταπτυχιακό ερευνητή Μάριο Γκουλεμάνη, για το χρόνο που διέθεσε και τις υπομονετικές διορθώσεις που μου έκανε σε όλη την πορεία της εργασίας.

Η συμμετοχή μου στην PROM RACING ήταν μεγάλη μου χαρά και πραγματική τιμή. Θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και συνεργάτες μου στην ομάδα, για την πραγματική επίγνωση της αξίας του ομαδικού πνεύματος που κατάλαβα χάρη σε αυτούς, για την εξερεύνηση των ορίων των ανθρώπινων αντοχών στο κυνήγι ενός υψηλού και δύσκολου στόχου, για τις πολύ έντονες στιγμές που ζήσαμε στον κόσμο του Formula Student. Μόνο όποιος το έχει ζήσει μπορεί να το κατανοήσει.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την πίστη που συνέχισαν να δείχνουν σε εμένα όλα αυτά τα πέντε χρόνια σπουδών, ακόμη και τις στιγμές που, λόγω εργασίας, πέραγα μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι να επικοινωνήσω μαζί τους. Υπόσχομαι να επανορθώσω.

## Περίληψη

Η διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής ενός αγωνιστικού μονοθεσίου χαρακτηρίζεται από τη διαρκή επιδίωξη υψηλών επιδόσεων. Για την επίτευξη των επιδόσεων αυτών βασική προϋπόθεση είναι το χαμηλό βάρος. Για αυτό το λόγο στην κατασκευή αγωνιστικών μονοθεσίων χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά, μήτρας εποξικής ρητίνης ενισχυμένα με ίνες άνθρακα. Τα εν λόγω υλικά έχουν υψηλό κόστος, ενώ η μελέτη της μηχανικής τους συμπεριφοράς βασίζεται σε προχωρημένες θεωρίες, όπως η μηχανική πολυστρωματικών υλικών. Η ανάγκη για μείωση του πειραματικού κόστους ιδιαίτερα των εξαρτημάτων που πρόκειται να κατασκευαστούν από σύνθετα υλικά, έχει οδηγήσει στην μελέτη τους με υπολογιστικές μεθόδους οι οποίες προσφέρουν κατευθυντήριες γραμμές κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύεται η μηχανική συμπεριφορά των εμπρός κάτω ψαλιδιών (wishbones) αγωνιστικού μονοθεσίου. Τα ψαλίδια αποτελούνται από εσωτερικά στερεά (αλουμίνιο, αφρό PVC χαμηλής πυκνότητας) και κέλυφος από ανθρακόνημα σε εποξική μήτρα. Μελετήθηκε ο βέλτιστος αριθμός στρώσεων και η διεύθυνση ινών του υφάσματος ανθρακονήματος, ώστε να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ μηχανικής συμπεριφοράς, αξιοπιστίας και βάρους. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς είναι η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method, FEM). Αποτελεί μέθοδο κατάλληλη για προβλήματα μηχανικής με αυξημένη αξιοπιστία, δεδομένης και της ευρείας χρήσης της στην έρευνα αλλά και στη βιομηχανία. Ειδικότερα για μελέτες σύνθετων υλικών όπως η παρούσα, η χρήση της κρίνεται απαραίτητη δεδομένης της πολυπλοκότητας της μηχανικής αλλά και της μελετώμενης γεωμετρίας.

Στα πλαίσια της μελέτης, έπειτα από την ανασκόπηση απαραίτητων θεωρητικών εννοιών, γίνεται παρουσίαση της γεωμετρίας της ανάρτησης του εν λόγω μονοθεσίου, των φορτίων που δέχονται τα μελετώμενα ψαλίδια και στοιχείων μηχανικής σύνθετων υλικών. Για τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων γίνεται αξιοποίηση του υπολογιστικού πακέτου ANSYS™, στο οποίο εισάγεται η γεωμετρία του μελετώμενου εξαρτήματος. Έπειτα από την εισαγωγή των μηχανικών ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών και των ορισμό των διεπαφών μεταξύ των διαφορετικών σωμάτων που συναποτελούν το ψαλίδι, κατασκευάζεται πλέγμα διακριτοποίησης για την επιτέλεση των αριθμητικών υπολογισμών. Στη συνέχεια ορίζεται η διαστρωμάτωση και η κατεύθυνση των ινών και καθορίζονται οι συνοριακές συνθήκες του αριθμητικού μοντέλου, παράλληλα με την εισαγωγή των εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό.

Έπειτα από την επίλυση του αριθμητικού προσομοιώματος, λαμβάνονται τιμές για τη συνολική και την αξονική παραμόρφωση του σώματος, και διακριτά για τα εσωτερικά στερεά και το κέλυφος από ανθρακόνημα. Για το ανθρακόνημα καταγράφονται οι μέγιστες κύριες τάσεις και παραμορφώσεις, ο συντελεστής ασφαλείας με βάση κριτήρια αστοχίας, οι αξονικές παραμορφώσεις για κάθε σκέλος του ψαλιδιού και οι διαστρωματικές διατμητικές τάσεις (interlaminar shear stresses). Για τα εσωτερικά στερεά του σύνθετου σώματος υπολογίζονται κύριες τάσεις και αξονικές παραμορφώσεις. Τα κρίσιμα μεγέθη που αξιολογούνται για τη λήψη αποφάσεων για τη διαστρωμάτωση και τη βελτίωση του σχεδίου είναι ο λόγος δυσκαμψίας (το αντίστροφο μέγεθος της παραμόρφωσης) προς βάρος και ο λόγος συντελεστή ασφαλείας προς βάρος.

Τα μεγέθη αυτά αποτελούν τις βασικές παραμέτρους για την αξιολόγηση της προτεινόμενης από την εργασία, τελικής μορφής του ψαλιδιού. Η διαδικασία βελτιστοποίησης, περιλαμβάνει τη σύγκριση της επίδοσης διαφορετικών προτεινόμενων μορφών, μέχρι την ανάδειξη της βέλτιστης.

## Abstract

The design and manufacturing of a single seated, open-wheel racecar, is characterized by the constant pursuit of high performance. Low weight is a key factor in achieving this performance. For this reason, carbon fiber reinforced epoxy resin (CFRP) composites are used in the manufacturing of racing cars. These materials have a high cost and are characterized by complexity concerning their engineering study. The need of experimental cost reduction, especially for components to be manufactured from composite materials, has led to their engineering approach with computational methods that can provide design and manufacturing guidelines.

In this thesis, we study the mechanical properties of the front lower car wishbones. These specific wishbones, consist of internal solids (aluminum, low density PVC foam) and a CFRP shell that serves the most substantial structural role in the component. The optimum number of layers and the fiber direction of the carbon fiber fabric were studied in order to strike a balance between mechanical behavior, reliability and weight. The method used to study mechanical behavior is the Finite Element Method (FEM). It is a method that is suitable for engineering problems, while having increased reliability, given its widespread use in research and in industry. Particularly for composite material studies such as the present one, its use is considered necessary given the complexity of the engineering aspects and the geometry studied.

In the framework of the study, after reviewing the necessary theoretical concepts, we present the geometry of the suspension of the racecar, the loads taken by the wishbones and the composite engineering equations to be solved. For the finite element method, ANSYS™ computational package is used. In which the geometry of the component to be studied should be imported. Following the assignment of the mechanical properties of the materials and the definition of the interfaces between the different bodies that make up the wishbones, a discretization mesh is constructed to perform the calculations. The lamination and direction of the fibers are then defined and the boundary conditions of the model are determined, along with the introduction of the external force exerted on it.

After the solution of the simulation, values for total and axial deformation of the body are obtained, and for the internal solids and carbon shell separately we obtain values for the following quantities. For carbon fiber, the maximum principal stresses and deformations, the failure factor based on failure criteria, the axial deformations for each arm of the wishbone and the interlaminar shear stresses are obtained. For internal solids, principal stresses and axial deformations are also given as post processing results. The critical quantities that are considered for the final lamination and improvement of the design are the stiffness-to-weight ratio the safety factor-to-weight ratio.

The evaluation of these results leads to the optimized version of the wishbone, suggested by the present study.

# Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη.....	ii
Abstract .....	iii
Κατάλογος Πινάκων .....	vi
Κατάλογος Σχημάτων .....	vi
1. Εισαγωγή – Τεχνολογικό πρόβλημα .....	1
1.1 Σύνθετα υλικά .....	1
1.1.1 Ανθρακόνημα .....	1
1.1.2 Εποξική ρητίνη.....	3
1.1.3 Πολύστρωτα .....	4
1.1.4 Δομή sandwich .....	4
1.2 Formula Student.....	5
1.3 Ανάρτηση με γεωμετρία διπλών ψαλιδιών .....	6
1.4 Στοιχεία Μηχανικής του προβλήματος – Σενάρια Φόρτισης – Δυνάμεις .....	7
1.4.1 Περιγραφή του προβλήματος.....	7
1.4.2 Πλευρική και διαμήκης μεταφορά φορτίου .....	8
1.4.3 Φορτία ελαστικών .....	9
1.4.4 Μηχανική του ψαλιδιού.....	12
1.5 Στοιχεία Μηχανικής Πολύστρωτων.....	13
1.5.1 Τανυστές τάσεων και παραμορφώσεων – Ελαστικές σταθερές.....	13
1.5.2 Κριτήρια αστοχίας σύνθετων, πολύστρωτων υλικών .....	16
1.6 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων – Finite Element Analysis (FEA) .....	17
1.6.1 Πλέγμα διακριτοποίησης .....	18
1.7 Μεθοδολογική προσέγγιση.....	20
2. Προεπεξεργασία (Preprocessing) προσομοίωσης .....	21
2.1 Κελυφοειδής γεωμετρία (Shell geometry- ACP) .....	22
2.1.1 Μηχανικές Ιδιότητες (Engineering Data).....	22
2.1.2 Γεωμετρία στο ANSYS (Geometry) .....	25
2.1.3 Μοντέλο (Model).....	25
2.1.4 Setup.....	28
2.2 Προεπεξεργασία συμπαγούς γεωμετρίας (Solid Mechanical Preprocessing) .....	32
2.2.1 Μηχανικές Ιδιότητες (Engineering Data).....	32
2.2.2 Γεωμετρία στο ANSYS (Geometry) .....	34

2.2.3 Μοντέλο (Model).....	34
2.3 Σύνθεση επιμέρους τμημάτων γεωμετρίας για την τελική επίλυση .....	40
2.3.1 Απομακρυσμένα σημεία (Remote Points) .....	41
2.3.2 Πλέγμα διακριτοποίησης .....	42
2.3.3 Συνοριακές συνθήκες.....	45
3. Επίλυση προσομοίωσης.....	48
3.1 Ρυθμίσεις επιλυτή .....	48
3.2 Ζητούμενα επίλυσης .....	48
3.2.1 Ζητούμενα αναφορικά με το σύνθετο μοντέλο.....	48
3.2.2 Ζητούμενα αναφορικά με το κελυφοειδές μοντέλο του ανθρακονήματος.....	48
3.2.3 Ζητούμενα αναφορικά με το εσωτερικό solid τμήμα του συνδυασμένου μοντέλου .....	49
4. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων .....	50
4.1 Σχήμα διαμόρφωσης.....	50
4.1.1 Εφελκυσμός.....	52
4.1.2 Θλίψη .....	57
4.2 Βαθμός κάλυψης του ψαλιδιού από ανθρακόνημα.....	61
4.3 Διαστρωμάτωση – Lamination του ψαλιδιού .....	67
4.3.1 Εφελκυσμός.....	67
4.3.2 Θλίψη .....	72
4.3.3 Σύνοψη προτεινόμενης βέλτιστης μορφής.....	77
5. Συμπεράσματα .....	78
Βιβλιογραφία.....	79
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	80
Σχήματα Κατανομών εξεταζόμενων μεγεθών έπειτα από Post Processing .....	80
Παραμορφώσεις.....	80
Κατανομές για το κέλυφος από ανθρακόνημα.....	81
Κατανομές για τα εσωτερικά στερεά.....	85
Ανάλυση Ευαισθησίας για το πλέγμα διακριτοποίησης.....	87

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Προεμποτισμένο Μονοδιευθυντικό Ανθρακόνημα .....	23
Πίνακας 2: Προεμποτισμένο woven plain 2x2 ανθρακόνημα .....	24
Πίνακας 3: Στοιχεία ποιότητας πλέγματος .....	27
Πίνακας 4: Σύσταση κράματος 7075T6.....	32
Πίνακας 5: Ιδιότητες AL7075-T6 στο ANSYS.....	33
Πίνακας 6: Ιδιότητες αφρού PVC χαμηλής πυκνότητας στο ANSYS .....	34
Πίνακας 7: Αντιστοίχιση υλικών στο solid μοντέλο .....	35
Πίνακας 8: Ορισμός μεταβλητών διαμόρφωσης πλέγματος .....	36
Πίνακας 9: Στοιχεία ποιότητας πλέγματος .....	38
Πίνακας 10: Ποιότητα στοιχείων.....	42
Πίνακας 11: Aspect Ratio .....	43
Πίνακας 12: Jacobian ratio .....	44
Πίνακας 13: Σύγκριση σχήματος διαμόρφωσης σε εφελκυσμό .....	52
Πίνακας 14: Σύγκριση σχήματος διαμόρφωσης σε θλίψη .....	57
Πίνακας 15: Σύγκριση τιμών εξεταζόμενων μεγεθών για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης του ψαλιδιού από ανθρακόνημα .....	62
Πίνακας 16: Σύγκριση κρίσιμων μηχανικών μεγεθών για διαφορετικές διαστρωματώσεις – εφελκυσμός .....	67
Πίνακας 17: Σύγκριση κρίσιμων μηχανικών μεγεθών για διαφορετικές διαστρωματώσεις – θλίψη .....	72
Πίνακας 18: Διερεύνηση επίδρασης πυκνότητας πλέγματος στις τιμές των αποτελεσμάτων .....	87

## Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1: Οξείδωση πολυακρυλονιτριλίου σε ατμοσφαιρικές συνθήκες με θέρμανση.....	2
Εικόνα 2: Διάγραμμα ροής διαδικασίας παραγωγής ανθρακονήματος, έπειτα από την οξείδωση του PAN .....	2
Εικόνα 3: Είδη πλέξης.....	3
Εικόνα 4: Μηχανισμός αντίδρασης σκλήρυνσης αμινικού και εποξειδικού συστατικού .....	4
Εικόνα 5 : Σχηματισμός πολύστρωτου .....	4
Εικόνα 6: Δομή sandwich .....	4
Εικόνα 7: Το P19, το πιο πρόσφατο αγωνιστικό μονοθέσιο της PROM RACING, στο Hockenheimring της Γερμανίας .....	5
Εικόνα 8: Πανοραμική φωτογραφία διαγωνισμού Formula Student.....	6
Εικόνα 9: (α) Ανάρτηση MacPherson, (β) Ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων, (γ) Ανάρτηση διπλών ψαλιδιών .....	6
Εικόνα 10: Ορισμός συστήματος αξόνων και γωνιών περιστροφικής κίνησης γύρω από αυτούς.....	7
Εικόνα 11: Πλευρική μεταφορά βάρους.....	8
Εικόνα 12: Διαμήκης μεταφορά βάρους κατα την κίνηση του οχήματος .....	9
Εικόνα 13: Διάταξη ανάρτησης διπλών ψαλιδιών μονοθέσιου Formula Student .....	11
Εικόνα 14: Διάταξη ανάρτησης διπλών ψαλιδιών σε μονοθέσιο Formula 1 .....	11
Εικόνα 15: Σημεία σύνδεσης του ψαλιδιού με upright και chassis .....	12
Εικόνα 16: Εσωτερικό ψαλιδιού .....	12
Εικόνα 17: Ορισμός νέου συστήματος αξόνων σε γνωστή γωνία από τη διαμήκη διεύθυνση των ινών.....	16
Εικόνα 18: Κατανομή τάσεων σε διωστήρα (μπιέλα) .....	17
Εικόνα 19: Ενδεικτικές γεωμετρικές οντότητες πλεγμάτων .....	18
Εικόνα 20: Στερεό με πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων.....	19



Εικόνα 21: Aspect ratio για τετράπλευρα και τριγωνικά στοιχεία .....	19
Εικόνα 22: Εξωτερικό carbon περίβλημα ψαλιδιού .....	21
Εικόνα 23: Εσωτερικό ψαλιδιού με αλουμινένια brackets και members από αφρό PVC.....	21
Εικόνα 24:Αποτύπωση συμπλήρωσης δεδομένων για την προεπεξεργασία στο ACP .....	22
Εικόνα 25:Μεταφορά CAD στο ANSYS .....	25
Εικόνα 26: Απεικόνιση προετοιμασίας ACP μοντέλου .....	25
Εικόνα 27 : Όγκος, Μάζα και Επιφάνεια κελυφοειδούς ανθρακονημάτινου περιβλήματος.....	26
Εικόνα 28: Απεικόνιση πλέγματος στο ανθρακόνημα .....	27
Εικόνα 29: Ορισμός πάχους υφάσματος σε ημιστο περιβάλλον εργασίας.....	28
Εικόνα 30: Αριστερό Rosette.....	29
Εικόνα 31: Oriented Selection Sets .....	30
Εικόνα 32: Ορισμός Modelling Plies.....	30
Εικόνα 33: Ίνες παράλληλες στη διαμήκη διεύθυνση του αριστερού μέλους του ψαλιδιού .....	31
Εικόνα 34: Ίνες στην εγκάρσια διεύθυνση στο A arm bracket του ψαλιδιού, στην περιοχή της διαμόρφωσης...	31
Εικόνα 35: Συνολική απεικόνιση του ψαλιδιού με τις διαφοροποιήσεις σε πάχος ανάλογα με την περιοχή .....	32
Εικόνα 36: Μεταφορά συμπαγούς (solid) γεωμετρίας στο ANSYS.....	34
Εικόνα 37 : Όγκος και μάζα συμπαγούς μοντέλου .....	35
Εικόνα 38 : Με κόκκινο και με μπλε απεικονίζονται οι περιοχές του ψαλιδιού στις οποίες εφαρμόζεται η συνθήκη επαφής frictionless.....	35
Εικόνα 39: Πηγή size function - ακμές .....	37
Εικόνα 40: Πηγή size function – εγγύτητα επιφανειών .....	37
Εικόνα 41: Πηγή size function - συνδυασμός.....	38
Εικόνα 42: Συνολική άποψη πλέγματος συμπαγούς γεωμετρίας .....	39
Εικόνα 43: Πλέγμα συμπαγούς γεωμετρίας σε τρισδιάστατη τομή.....	39
Εικόνα 44: Απεικόνιση σύνθεσης συνολικού μοντέλου .....	40
Εικόνα 45 : Απεικόνιση σύνθετης γεωμετρίας.....	41
Εικόνα 46: Ορισμός απομακρυσμένου σημείου – remote point .....	41
Εικόνα 47: Λεπτομέρειες απομακρυσμένου σημείου .....	42
Εικόνα 48: Πλέγμα ψαλιδιού εξωτερικά και σε τομή.....	45
Εικόνα 49: Ορισμός συνοριακής συνθήκης No Separation για την επιφάνεια διεπαφής μεταξύ εσωτερικών στερεών και ανθρακονήματος .....	46
Εικόνα 50: Ορισμός δύναμης που ασκείται στο ψαλίδι .....	46
Εικόνα 51: Ορισμός μετατοπίσεων .....	47
Εικόνα 52: Ορισμός νέου συστήματος συντεταγμένων για το αριστερό σκέλος.....	49
Εικόνα 53: Ψαλίδι χωρίς διαμόρφωση .....	50
Εικόνα 54: Ψαλίδι με διαμόρφωση τύπου Λ .....	51
Εικόνα 55: Διαμόρφωση τύπου Ι.....	51
Εικόνα 56: Εμφάνιση διατμητικών τάσεων μεταξύ στερεών και ανθρακονήματος στις διαμορφώσεις .....	57
Εικόνα 57: Κατανομή συντελεστή ασφαλείας με βάση κριτήρια αστοχίας σύνθετων, σε τομή .....	61
Εικόνα 58: Κατανομή αξονικών παραμορφώσεων στο ψαλίδι .....	64
Εικόνα 59: Κατανομή συνολικής παραμόρφωσης.....	80
Εικόνα 60: Κατανομή αξονικής παραμόρφωσης στον άξονα z .....	80
Εικόνα 61: Κατανομή μέγιστων κύριων τάσεων στο ανθρακόνημα.....	81
Εικόνα 62: Κατανομή μέγιστων κύριων παραμορφώσεων στο ανθρακόνημα .....	81
Εικόνα 63: Κατανομή συντελεστή ασφαλείας στο ανθρακόνημα, βάσει κριτηρίων αστοχίας Tsai-Hill και Tsai-Wu .....	82

Εικόνα 64: Κατανομή αξονικής παραμόρφωσης στο ανθρακόνημα, για το αριστερό σκέλος .....	82
Εικόνα 65: Κατανομή αξονικής παραμόρφωσης στο ανθρακόνημα, για το δεξί σκέλος.....	83
Εικόνα 66: Κατανομή διατμητικών τάσεων μεταξύ ανθρακονήματος και εσωτερικών στερεών.....	83
Εικόνα 67: Κατανομή διαστρωματικών διατμητικών τάσεων, μεταξύ πρώτης και δεύτερης στρώσης ανθρακονήματος.....	84
Εικόνα 68: Κατανομή διαστρωματικών διατμητικών τάσεων, ανάμεσα στην τελευταία στρώση UD και στην πρώτη στρώση woven ενίσχυσης στις διαμορφώσεις .....	84
Εικόνα 69: Κατανομή μέγιστων κύριων τάσεων για τα εσωτερικά στερεά.....	85
Εικόνα 70: Κατανομή μέγιστων κύριων παραμορφώσεων για τα εσωτερικά στερεά.....	85
Εικόνα 71: Κατανομή αξονικής παραμόρφωσης για τα εσωτερικά στερεά του δεξιού σκέλους .....	86
Εικόνα 72: Κατανομή αξονικής παραμόρφωσης για τα εσωτερικά στερεά του αριστερού μέλους .....	86



# 1. Εισαγωγή – Τεχνολογικό πρόβλημα

## 1.1 Σύνθετα υλικά

Η επιλογή υλικών για το σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση και την παραγωγή προϊόντων και εξαρτημάτων, αποτελεί πεδίο εντατικής και αδιάκοπης έρευνας τόσο σε επίπεδο ερευνητικών ιδρυμάτων, όσο και σε επίπεδο βιομηχανίας και επιχειρήσεων.

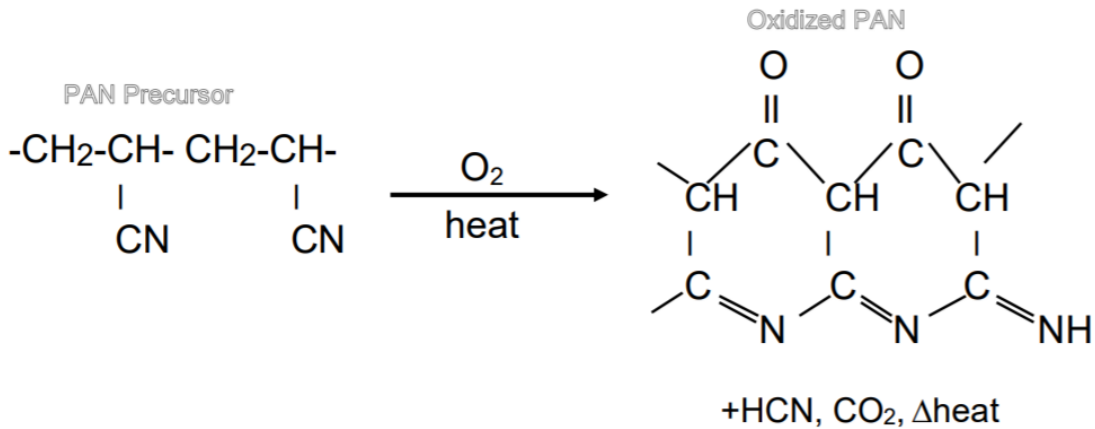
Σύνθετα ονομάζονται τα υλικά τα οποία αποτελούνται από δύο ή και παραπάνω επιμέρους υλικά. Οι ιδιότητές τους προκύπτουν ως συνδυασμός των ιδιοτήτων των επιμέρους υλικών που τα συναποτελούν, γεγονός που αποτελεί και το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα των σύνθετων έναντι των συνεχών υλικών. Τυπική μορφή σύνθετων υλικών είναι η μορφή ενίσχυσης σε μήτρα. Συνήθως, η ενίσχυση είναι σε μορφή ινών, οι οποίες παραλαμβάνουν τα μεγαλύτερα φορτία και έχουν το μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής στην αντοχή και στην ακαμψία. Η μήτρα παίζει το ρόλο της συγκράτησης των ινών και της μεταφοράς φορτίων μεταξύ τους, αλλά και μεταξύ των διαφόρων υποστηρικμάτων του εκάστοτε εξαρτήματος και του σύνθετου υλικού.

### 1.1.1 Ανθρακόνημα

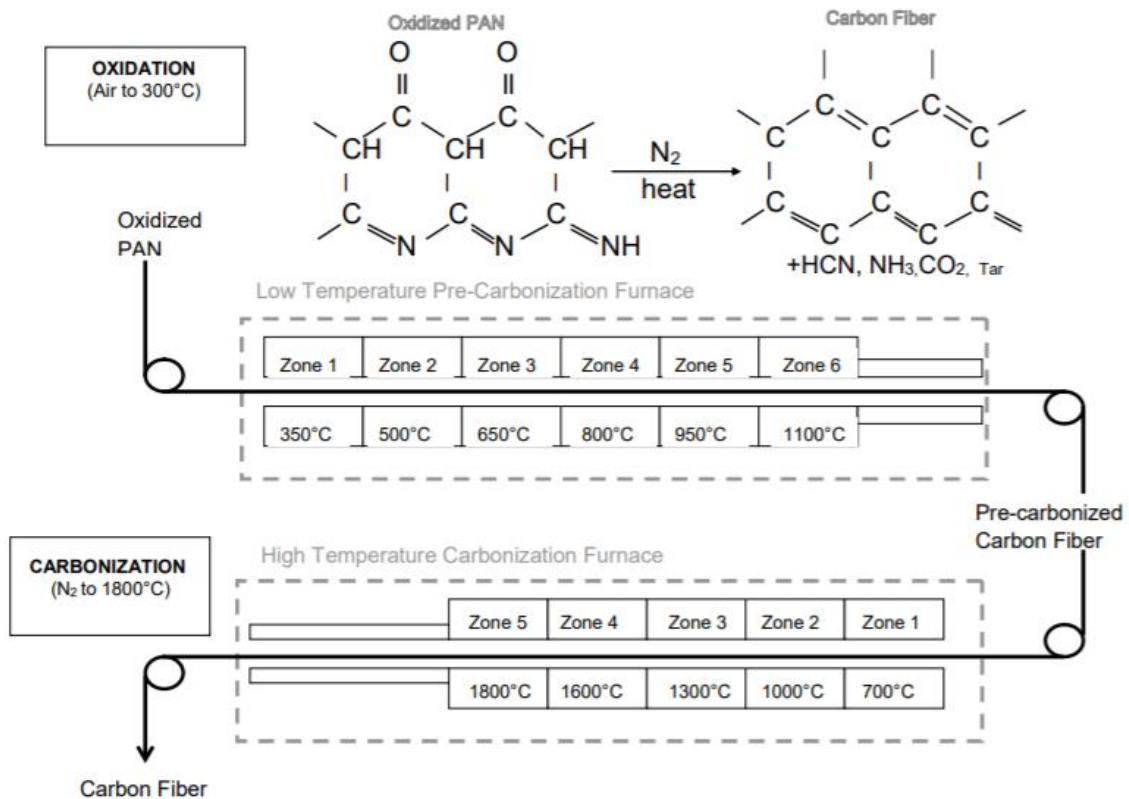
Το ανθρακόνημα είναι χαρακτηριστική μορφή ενίσχυσης σε μήτρα. Από τις μορφές ενίσχυσης σε μήτρα, είναι αυτή που προσφέρει το υψηλότερο ειδικό μέτρο ελαστικότητας και την υψηλότερη τιμή ειδικής αντοχής (μέτρα ελαστικότητας και αντοχή ως προς την πυκνότητα). Καλούνται και ίνες γραφίτη, ενώ οι ιδιότητές τους καθορίζονται από τη σχετική θέση και αλληλεπίδραση μεταξύ των ανθρακικών αλυσίδων που συναποτελούν την κρυσταλλική μορφή του ανθρακονήματος.

Οι **πρόδρομες ουσίες – πρώτες ύλες** που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ανθρακονήματος είναι κατά κύριο λόγο το πολυακρυλονιτρίλιο (PAN) και η πίσσα (pitch). Το PAN από τη δεκαετία του 1970 είναι η βασική πρώτη ύλη για την παραγωγή ανθρακονήματος. Οι ίνες από πίσσα θεωρούνται γενικότερα υποδεέστερες από αυτές από PAN, επειδή απαιτούν αρκετά μεγαλύτερη επεξεργασία για να φτάσουν τις μηχανικές ιδιότητες των ινών PAN. Αν δεν υποστούν την εν λόγω επεξεργασία, διατηρούν την ισοτροπικότητα που τις διακρίνει και μετά την πυρόλυση. Η επεξεργασία αυτή περιλαμβάνει την επιμήκυνση των ινών κατά τη θερμική τους κατεργασία σε θερμοκρασίες 2000 – 3000 °C, για την αποφυγή της οποίας χρησιμοποιείται ενδιάμεσης φάσης πίσσα, ο προσανατολισμός των μορίων της οποίας είναι ευκολότερος. (Chand, 2000)

Η επεξεργασία των πρόδρομων ουσιών μέχρι τη σύνθεση του τελικού ανθρακονήματος περιλαμβάνει την αργή οξειδωσή τους με αέρα στους 300 °C και στη συνέχεια την προ-ανθρακοποίηση (ατμόσφαιρα αζώτου – 1100 °C), ανθρακοποίηση (ατμόσφαιρα αζώτου – 1800 °C) και γραφίτοποίηση (ατμόσφαιρα αργού – 3000 °C). Στη συνέχεια περιφερειακές κατεργασίες και διαδικασίες λαμβάνουν χώρα (επεξεργασία επιφάνειας, πλύσιμο κ.λπ.) μέχρι την περιέλιξη νημάτων (filament winding). Κατ'αυτόν τον τρόπο παράγεται ανθρακόνημα υψηλής αντοχής, υψηλού μέτρου ελαστικότητας ή ενδιάμεσου μέτρου ελαστικότητας, ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται.

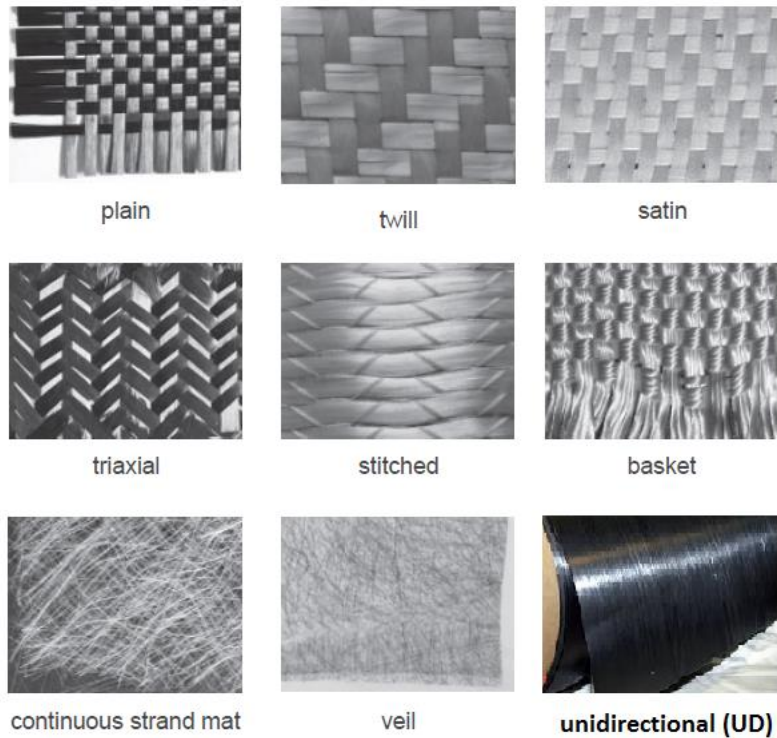


Εικόνα 1: Οξείδωση πολυακρυλονιτριλίου σε ατμοσφαιρικές συνθήκες με θέρμανση



Εικόνα 2: Διάγραμμα ροής διαδικασίας παραγωγής ανθρακονήματος, έπειτα από την οξείδωση του PAN

Για την τελική μορφή του ανθρακούφασματος που χρησιμοποιείται στις διάφορες κατασκευαστικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης και της μελετώμενης στην παρούσα, βασικό στάδιο για το σχεδιασμό αποτελεί και η **πλέξη** των ινών μεταξύ τους. Οι πλέξεις παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.



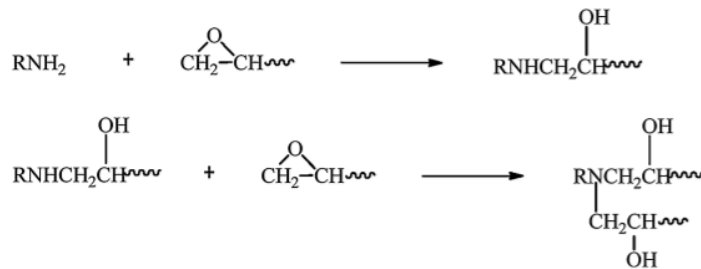
Εικόνα 3: Είδη πλέξης

Για την κατασκευή των ψαλιδιών χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο μονοδιευθυντικό (UD) ύφασμα και plain πλεκτό.

### 1.1.2 Εποξική ρητίνη

Η μήτρα του ανθρακούφασματος διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του. Συγκρατεί τις ίνες μεταξύ τους και επομένως μεταφέρει φορτία μέσω της διεπιφάνειας στις ίνες, αλλά και συνολικά στο σύνθετο από την εκάστοτε εξωτερική πηγή φόρτισης. Συχνά παραλαμβάνει και η ίδια φορτία, συνήθως εγκάρσια, διαστρωματικά διατμητικά και συχνά κατανεμημένα φορτία (bearing loads). Επίσης καθορίζει συνήθως και τις κρίσιμες συνθήκες επιτρεπόμενης χρήσης του συνολικού σύνθετου, όπως η θερμοκρασία, η αντίσταση σε χημικές μεταβολές και ειδικότερα στη διάβρωση, η υγρασία κ.λπ.

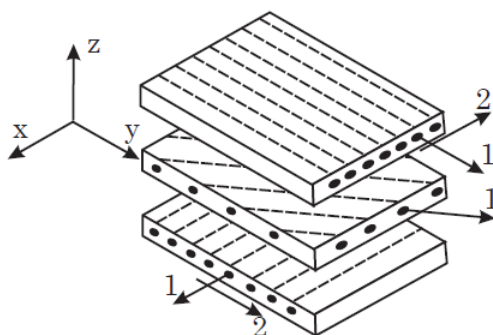
Τα πολυμερή διακρίνονται σε θερμοπλαστικά, θερμοσκληρυνόμενα και ελαστομερή. Κατά κύριο λόγο στα σύνθετα μήτρας – ίνας, χρησιμοποιούνται θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες. Οι χαρακτηριστικότερες αυτών είναι οι πολυεστερικές, οι βινυλεστερικές, οι εποξικές και οι φαινολικές. Εξ'αυτών στις κατασκευές υψηλότερων απαιτήσεων, ευρύτερη χρήση βρίσκουν οι εποξικές, καθώς έχουν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες, ενώ είναι εξαιρετικά θερμοάντοχες και ανθεκτικές στη διάβρωση. Επίσης, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει ο ελεγχόμενος βάσει εξώθερμου και ταχύτητας πολυμερισμός τους σε θερμοκρασίες από 5 – 150 °C (Jin, 2015). Συνήθως το δεύτερο συστατικό για τον πολυμερισμό της ρητίνης περιέχει κάποια διαμίνη. (Εικόνα 4)



Εικόνα 4: Μηχανισμός αντίδρασης σκλήρυνσης αμινικού και εποξειδικού συστατικού

### 1.1.3 Πολύστρωτα

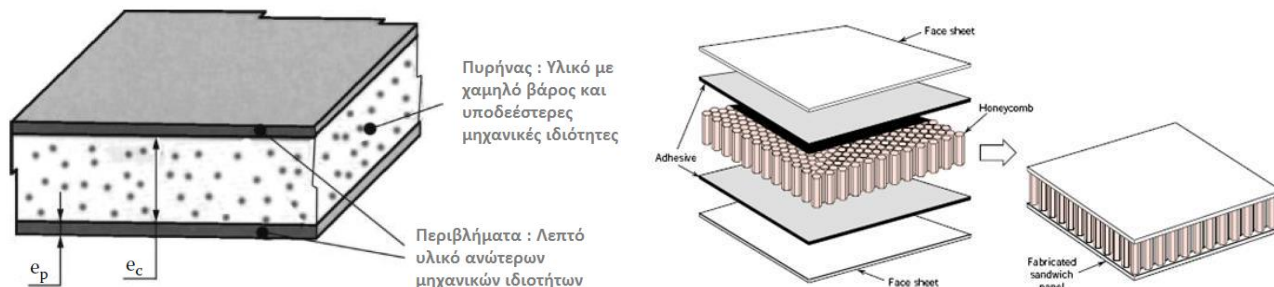
Πολύστρωτο ονομάζεται ένα υλικό το οποίο προκύπτει από τη διαδοχική τοποθέτηση στρώσεων (μήτρας – υφάσματος) η μία πάνω στην άλλη (Εικόνα 5). Οι ίνες του υφάσματος τοποθετούνται σε διάφορες διευθύνσεις για να παραλαμβάνουν πολλαπλά φορτία, επομένως ο σχεδιασμός και η κατασκευή οποιουδήποτε εξαρτήματος από πολύστρωτα απαιτεί την άριστη γνώση του είδους και της κατανομής των φορτίων πάνω σε αυτό.



Εικόνα 5 : Σχηματισμός πολύστρωτου

### 1.1.4 Δομή sandwich

Η δομή sandwich προκύπτει από τη σύνθεση δύο λεπτών υλικών που παίζουν το ρόλο περιβλήματος σε έναν πυρήνα από πιο ελαφρύ υλικό. Ο πυρήνας διατηρεί την απόσταση μεταξύ των περιβλημάτων, αυξάνοντας τη ροπή αδράνειας και κατά συνέπεια την ακαμψία του συνολικού συστήματος, χωρίς παράλληλα να αυξάνεται σημαντικά η συνολική μάζα του συστήματος. Ειδικά στις κατασκευές με σύνθετα, αποτελεί συνήθη πρακτική η χρησιμοποίησή τους, καθώς ο βασικός στόχος στις εφαρμογές αυτές είναι η επίτευξη χαμηλού λόγου μάζας ανά επιφάνεια. Η δομή sandwich απεικονίζεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6: Δομή sandwich

Η αρχή λειτουργίας των κατασκευών αυτών είναι ο εξής. Αν ένα φορτίο, (ειδικότερα καμπτικό) ασκηθεί στο πάνω περίβλημα, τότε μέσω διάτμησης μεταφέρεται στο κάτω περίβλημα. Το υλικό του πυρήνα μπορεί να είναι κυψελοειδές (π.χ honeycomb αλουμινίου, honeycomb αραμιδίου – Nomex) ή κάποιος αφρός (πολυστερίνη – XPS, EPS, Rohacell ή PVC χαμηλής πυκνότητας). Εμφανώς για τον επιδιωκόμενο υψηλό λόγο ακαμψίας προς μάζα, τα περιβλήματα είναι συχνά από ανθρακόνημα, όπως και στο πρόβλημα που εξετάζεται στην εργασία.

## 1.2 Formula Student

Αφορμή για την εκπόνηση του παρουσιαζόμενου εγχειρήματος σχεδιασμού στην εργασία αποτελεί ο διαγωνισμός Formula Student και ειδικότερα η χρήση του ως εξάρτημα του αγωνιστικού μονοθεσίου της φοιτητικής ομάδας PROM RACING του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η ομάδα έχει ιδρυθεί από το 2008 ενώ έχει τέσσερα αγωνιστικά μονοθέσια στο ενεργητικό της, με πληθώρα σημαντικών διακρίσεων στους διεθνείς διαγωνισμούς Formula Student, ειδικότερα κατά την τελευταία τριετία. Ως εκ τούτου, η προσπάθεια σχεδιασμού όσο το δυνατόν ελαφρύτερων και παράλληλα εντός απαιτήσεων εξαρτημάτων, βρίσκεται σε άμεση συσχέτιση με την επίδοση του μονοθεσίου και την επιβράβευση της αδιάκοπης προσπάθειας των μελών της για ολοένα υψηλότερες διακρίσεις.



Εικόνα 7: Το P19, το πιο πρόσφατο αγωνιστικό μονοθέσιο της PROM RACING, στο Hockenheimring της Γερμανίας



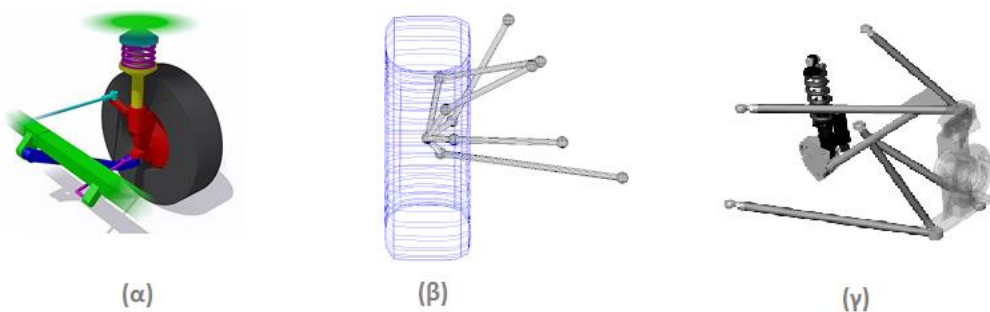


Εικόνα 8: Πανοραμική φωτογραφία διαγωνισμού Formula Student

### 1.3 Ανάρτηση με γεωμετρία διπλών ψαλιδιών

Η ανάρτηση ενός αγωνιστικού μονοθεσίου αλλά και οποιουδήποτε τροχοφόρου οχήματος διέπεται από τις εξής αρχές. Αρχικά γίνεται διάκριση μεταξύ αναρτημένης και μη αναρτημένης μάζας. Στην αναρτημένη μάζα ανήκει το σασί – πλαίσιο και οποιοδήποτε εξάρτημα προσαρτάται άμεσα σε αυτό. Στη μη αναρτημένη μάζα ανήκουν οι τροχοί, τα δισκόφρενα, τα ημιαξόνια και γενικότερα τα εξαρτήματα που βρίσκονται σε απόσταση από αυτό. Οι τροχοί συνδέονται με το πλαίσιο μέσω βραχιόνων, οι οποίοι ονομάζονται ψαλιδιά. Εμφανώς, το σημείο του ψαλιδιού που εδράζεται στο πλαίσιο θεωρείται αναρτημένη μάζα, ενώ όσο προχωράμε κατά μήκος του βραχίονα προς τον τροχό έχουμε μη αναρτημένη μάζα.

Τα είδη ανεξάρτητης ανάρτησης (στην οποία η κάθετη μεταφορική κίνηση του κάθε τροχού ενός άξονα δεν επηρεάζει τον άλλο) τα οποία χρησιμοποιούνται ως επι το πλείστον είναι η γεωμετρία MacPherson ( $\alpha$ ), η γεωμετρία πολλαπλών συνδέσμων ( $\beta$ ) και η γεωμετρία διπλών ψαλιδιών ( $\gamma$ ). (Jazar, 2012)



Εικόνα 9: (α) Ανάρτηση MacPherson, (β) Ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων, (γ) Ανάρτηση διπλών ψαλιδιών

Η περίπτωση που θα μελετηθεί είναι αυτή της γεωμετρίας διπλών ψαλιδιών. Τα ψαλιδιά είναι κρίσιμο τμήμα του μονοθεσίου δεδομένου ότι μεταφέρει όλα τα φορτία μεταξύ των τροχών και του πλαισίου. Αυτό σημαίνει ότι φορτίζονται σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του μονοθεσίου και ειδικότερα λόγω της αγωνιστικής τους χρήσης λαμβάνονται υπόψη ακραίες καταστάσεις φόρτισης. Κατά συνέπεια στο σχεδιασμό τους αλλά και στην επιλογή των υλικών κατασκευής αλλά και της ποσότητας του υλικού αυτού, χρησιμοποιούνται κατά το

δυνατόν υψηλοί συντελεστές ασφαλείας που θα εξασφαλίσουν τη συνολική αξιοπιστία της κατασκευής, χωρίς παράλληλα να τίθενται σε δεύτερη μοίρα οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται με την αντίσταση σε παραμορφώσεις και το χαμηλό βάρος. Περισσότερα για τα σενάρια φόρτισης των ψαλιδιών παρουσιάζονται στην Ενότητα 1.4

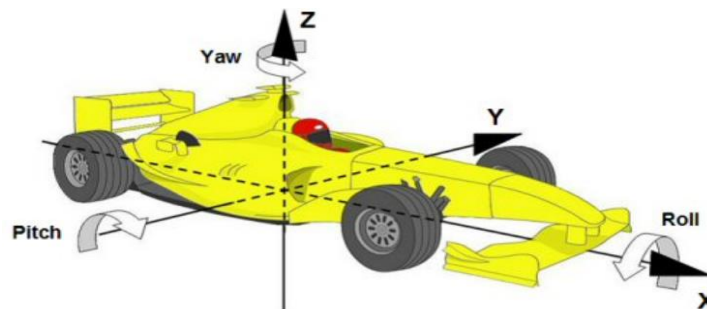
## 1.4 Στοιχεία Μηχανικής του προβλήματος – Σενάρια Φόρτισης – Δυνάμεις

Στην παρούσα παράγραφο, παρουσιάζονται συνοπτικά τα στοιχεία που χρειάζεται κανείς για να κατανοήσει βασικές αρχές του προβλήματος και την ανάγκη για αξιοπιστία και παράλληλη εξασφάλιση υψηλών επιδόσεων μέσω του βέλτιστου σχεδιασμού των εξεταζόμενων εξαρτημάτων.

### 1.4.1 Περιγραφή του προβλήματος

Για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη βελτιστοποίηση του σχεδίου και της διαστρωμάτωσης των ψαλιδιών - βραχιόνων, απαραίτητη είναι η λεπτομερής περιγραφή του προβλήματος με σκοπό την κατανόηση των πτυχών της μελέτης που χρήζουν περαιτέρω προσοχής.

Το όχημα κατά την κίνησή του περιέρχεται σε διαφορετικές καταστάσεις φόρτισης. Προτού όμως γίνει εκτενέστερη αναφορά σε αυτές, πρέπει να οριστούν οι άξονες για τη μεταφορική κίνηση και την αντίστοιχη περιστροφική κίνηση γύρω από αυτούς.



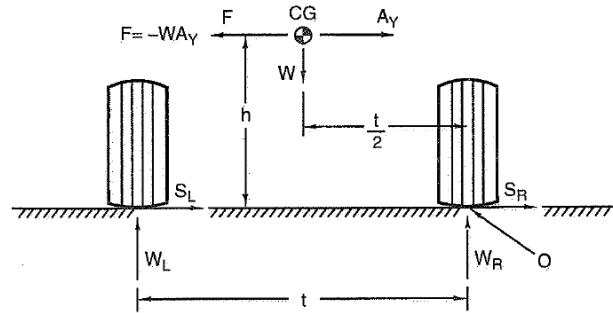
Εικόνα 10: Ορισμός συστήματος αξόνων και γωνιών περιστροφικής κίνησης γύρω από αυτούς

Με τις διάφορες καταστάσεις στις οποίες περιέρχεται το όχημα κατά την κίνησή του, τα ελαστικά του οχήματος δέχονται φόρτιση. Οι καταστάσεις φόρτισης είναι οι παρακάτω .

1. Διαμήκης επιτάχυνση (στον άξονα  $x$ )
2. Πλευρική επιτάχυνση (στον άξονα  $y$ ) – όχημα κινούμενο σε στροφή
3. Διαμήκης επιβράδυνση (στον άξονα  $x$ ) – επιβραδυνόμενο όχημα σε ευθεία
4. Συνδυασμός καταστάσεων 1+2 : Επιτάχυνση σε στροφή
5. Συνδυασμός καταστάσεων 2+3 : Επιβράδυνση σε στροφή.
6. Διέλευση από ανωμαλία του οδοστρώματος.

### 1.4.2 Πλευρική και διαμήκης μεταφορά φορτίου

Η πλευρική μεταφορά φορτίων παρουσιάζεται στην Εικόνα 11 και διέπεται από τις παρακάτω δοσμένες σχέσεις.



Εικόνα 11: Πλευρική μεταφορά βάρους

$$\frac{\Delta W_F}{A_y} = \frac{W}{t_F} \left[ \frac{HK_F}{K_F + K_R} + \frac{b}{l} z_{RF} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\Delta W_R}{A_y} = \frac{W}{t_R} \left[ \frac{HK_R}{K_F + K_R} + \frac{a}{l} z_{RR} \right] \quad (2)$$

$\Delta W$ : Η μεταφορά βάρους στους εξωτερικούς τροχούς

$A_y$ : Η κεντρομόλος επιτάχυνση σε  $g$

$t$ : Το μετατρόχιο – track, η απόσταση μεταξύ των κέντρων των πελμάτων των ελαστικών στον άξονα  $y$ .

$K$ : Ο βαθμός Roll ( $Nm/deg$ ) για τον εμπρός (front –  $K_F$ ) και τον πίσω (rear –  $K_R$ )

$a$ : Ποσοστό κατανομής βάρους στον πίσω άξονα

$b$ : Ποσοστό κατανομής βάρους στον εμπρόσθιο άξονα

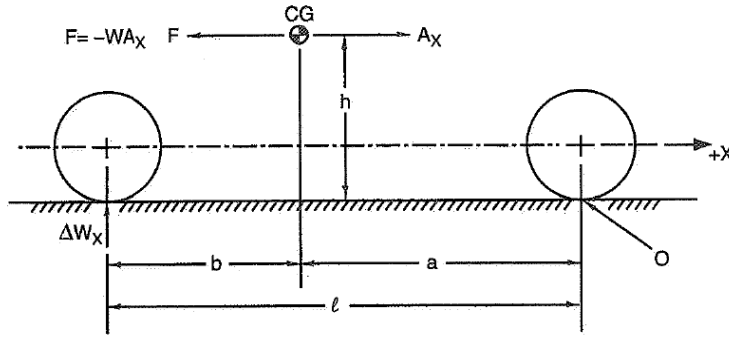
$z_R$ : Ύψος κέντρου περιστροφής, αντίστοιχα με δείκτη  $F$  για μπροστά και δείκτη  $R$  για πίσω.

Η διαμήκης μεταφορά βάρους διέπεται από μία και μοναδική σχέση.

$$\Delta W_x = \frac{h}{l} W A_x \quad (3)$$

$h$ : Το ύψος του κέντρου βάρους

$l$ : Το μεταξόνιο, δηλαδή η απόσταση μεταξύ των κέντρων των πελμάτων των ελαστικών στον άξονα  $y$ .



Εικόνα 12: Διαμήκης μεταφορά βάρους κατά την κίνηση του οχήματος

### 1.4.3 Φορτία ελαστικών

Ενδεικτικά θα παρουσιαστούν οι σχέσεις υπολογισμού των δυνάμεων που παράγονται από τα ελαστικά. Η εξωτερική δύναμη που θα χρησιμοποιηθεί στην πορεία για τα εξεταζόμενα ψαλίδια τροφοδοτείται απλά σαν τιμή εισόδου – input στον διεξάγων τη μελέτη, επομένως ο υπολογισμός των δυνάμεων αυτών δεν είναι στους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Ωστόσο, κρίνεται σκόπιμο για την πληρέστερη εποπτεία του αντικειμένου της μελέτης, να καταγραφούν οι σχέσεις από τις οποίες προκύπτουν οι δυνάμεις αυτές.

Επομένως έχουμε

**Για τον εμπρός εξωτερικό τροχό (Front Outer, FO) :**

$$F_Z = (\Delta W_{F,Lateral} + \frac{\Delta W_{F,Longitudinal}}{2} + W_{tot} b \cdot 0,5 + \frac{Downforce}{2} DD) \cdot 9,81 \quad (4)$$

$$F_X = (W \cdot A_{X,Braking} \cdot 9,81) \cdot \left( \frac{F_{Z,FO}}{F_{Z,Total}} \right) - F_{Y,FO} \cdot \tan(\theta_{SlipAngle})$$

$$F_Y = -(W \cdot A_Y \cdot 9,81) \cdot \left( \frac{F_{Z,FO}}{F_{Z,Total}} \right)$$

**Για τον εμπρός εσωτερικό τροχό (Front Inner, FI)**

$$F_Z = (-\Delta W_{F,Lateral} + \frac{\Delta W_{F,Longitudinal}}{2} + W_{tot} b \cdot 0,5 + \frac{Downforce}{2} DD) \cdot 9,81 \quad (5)$$

$$F_X = (W \cdot A_{X,Braking} \cdot 9,81) \cdot \left( \frac{F_{Z,FI}}{F_{Z,Total}} \right) - F_{Y,FI} \cdot \tan(\theta_{SlipAngle})$$

$$F_Y = -(W \cdot A_Y \cdot 9,81) \cdot \left( \frac{F_{Z,FI}}{F_{Z,Total}} \right)$$

### Για τον πίσω εξωτερικό τροχό (Rear Outer, RO)

$$F_Z = (\Delta W_{R,Lateral} + \frac{\Delta W_{R,Longitudinal}}{2} + W_{tot} \cdot a \cdot 0,5 + \frac{Downforce}{2} \cdot (1 - DD)) \cdot 9,81 \quad (6)$$

$$F_X = (W \cdot A_{X,Accelerating} \cdot 9,81) \cdot \left(\frac{F_{Z,RO}}{F_{Z,Total}}\right)$$

$$F_Y = -(W \cdot A_Y \cdot 9,81) \cdot \left(\frac{F_{Z,RO}}{F_{Z,Total}}\right)$$

### Για τον πίσω εσωτερικό τροχό (Rear Inner, RI)

$$F_Z = (-\Delta W_{R,Lateral} + \frac{\Delta W_{R,Longitudinal}}{2} + W_{tot} \cdot a \cdot 0,5 + \frac{Downforce}{2} \cdot (1 - DD)) \cdot 9,81 \quad (7)$$

$$F_X = (W \cdot A_{X,Accelerating} \cdot 9,81) \cdot \left(\frac{F_{Z,RI}}{F_{Z,Total}}\right)$$

$$F_Y = -(W \cdot A_Y \cdot 9,81) \cdot \left(\frac{F_{Z,RI}}{F_{Z,Total}}\right)$$

*Downforce*: Η κάθετη δύναμη που ασκείται στο μονοθέσιο από τα αεροδυναμικά του βοηθήματα.

*DD*: *Downforce Distribution*, η κατανομή δηλαδή της κάθετης δύναμης σε κάθε τροχό δεξιά και αριστερά. Η τιμή της λαμβάνεται ίση με 0.5

*F<sub>Z,Total</sub>*: Το άθροισμα των *F<sub>Z</sub>* σε κάθε τροχό

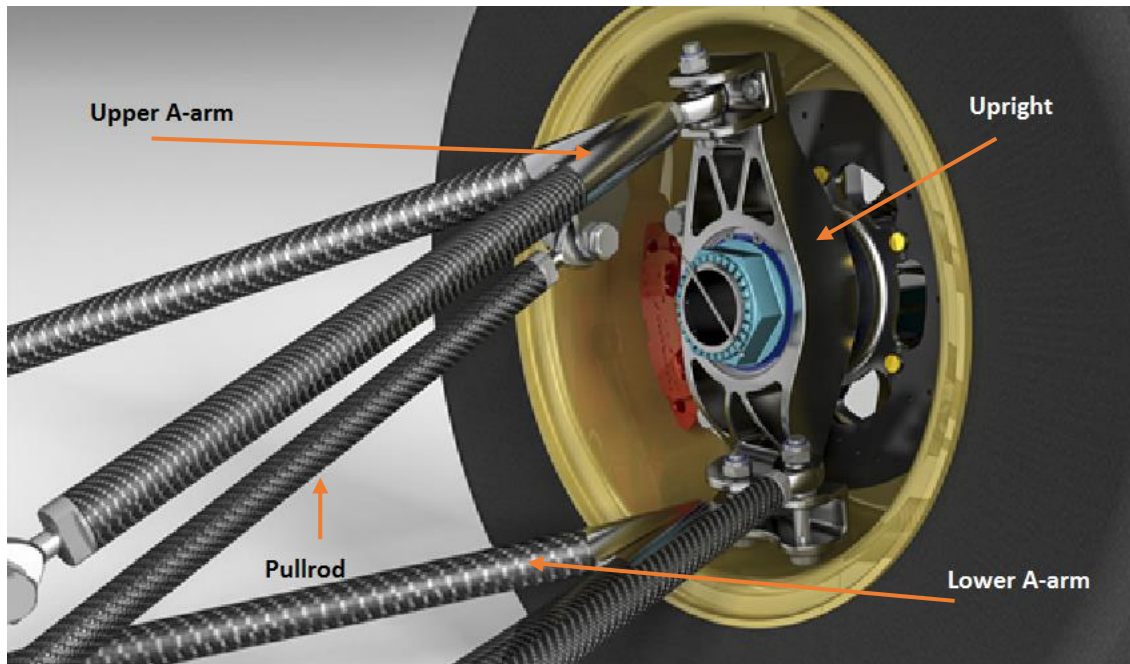
*a*: Η κατανομή βάρους στον εμπρόσθιο άξονα

*b*: Η κατανομή βάρους στον πίσω άξονα

Προφανώς,  $a+b=1$ , ενώ λαμβάνεται κατανομή 47% - 53% εμπρός και πίσω αντίστοιχα.

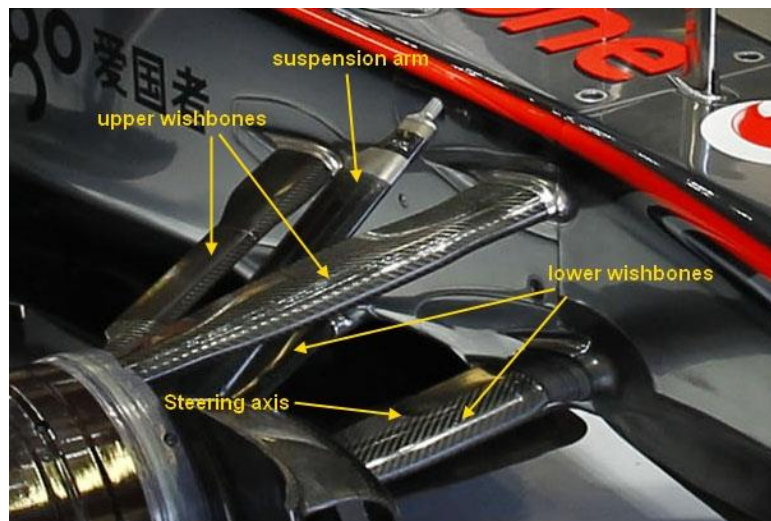
(Τσιαπάρης, 2016), (William F. Miliken, 1995)

Έπειτα από τον υπολογισμό των δυνάμεων στους τροχούς, οι δυνάμεις αυτές μεταφέρονται μέσω της βάσης του τροχού (upright ή μουαγιέ) στα ψαλιδία. Η διάταξη παρουσιάζεται καλύτερα στην Εικόνα 13

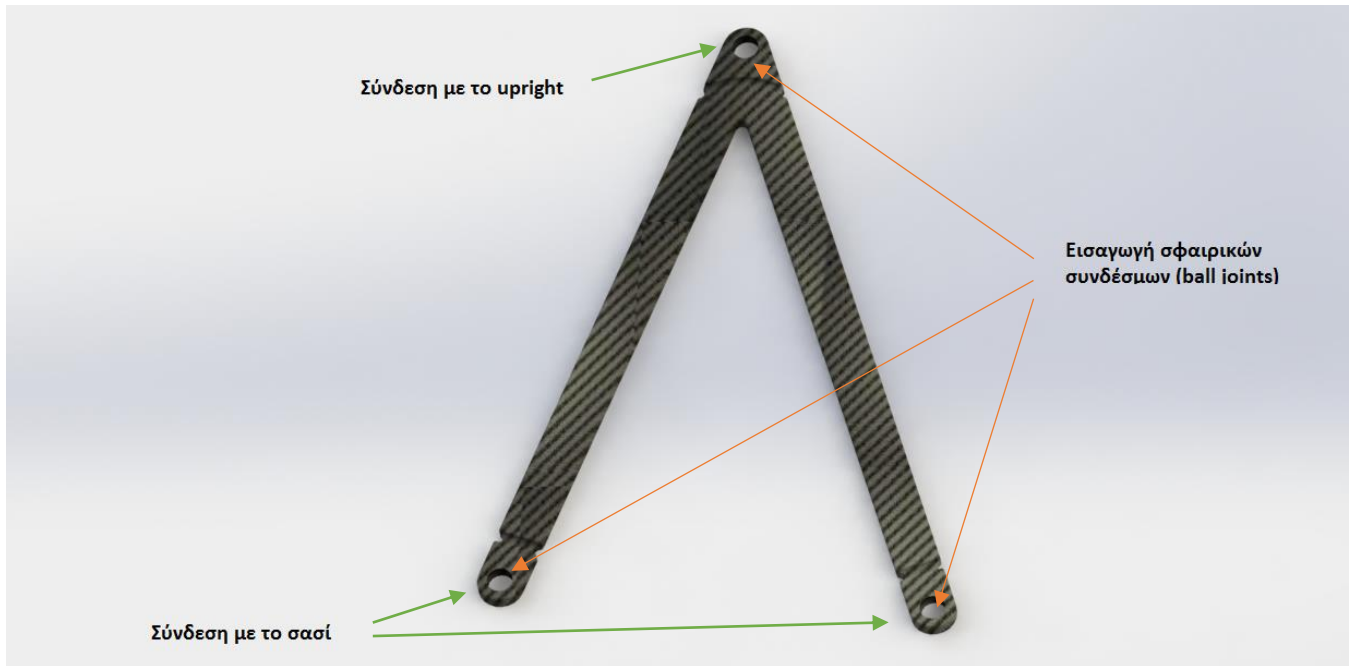


Εικόνα 13: Διάταξη ανάρτησης διπλών ψαλιδιών μονοθεσίου Formula Student

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η μελέτη για την αντοχή και τη δυσκαμψία του εμπρός κάτω βραχίονα (**Lower A-Arm wishbone**). Από τη διάδοση των υπολογιζόμενων δυνάμεων για τις διαφορετικές καταστάσεις φόρτισης στις οποίες περιέρχεται το μονοθέσιο, υπολογίζεται η μέγιστη δύναμη σε **εφελκυσμό και θλίψη** για το κάθε σκέλος του ψαλιδιού. Σαν παράγοντας ασφαλείας στο σχεδιασμό, αλλά και για μεγαλύτερη ευκολία στην κατασκευή, αποφασίζεται πως ο ίδιος αριθμός στρώσεων ανθρακονήματος θα μπει και στα δύο σκέλη, οπότε λαμβάνεται ότι ασκούνται  $10\text{ kN}$  στον σφαιρικό σύνδεσμο που συνδέει την κορυφή του ψαλιδιού (κορυφή του «Λ») με την εισδοχή του upright (βλ. Εικόνα 15). Η δύναμη αυτή επιμερίζεται εξαιτίας της γωνίας που σχηματίζουν τα δύο σκέλη του ψαλιδιού, σε  $5\text{ kN}$  σε κάθε σκέλος.



Εικόνα 14: Διάταξη ανάρτησης διπλών ψαλιδιών σε μονοθέσιο Formula 1

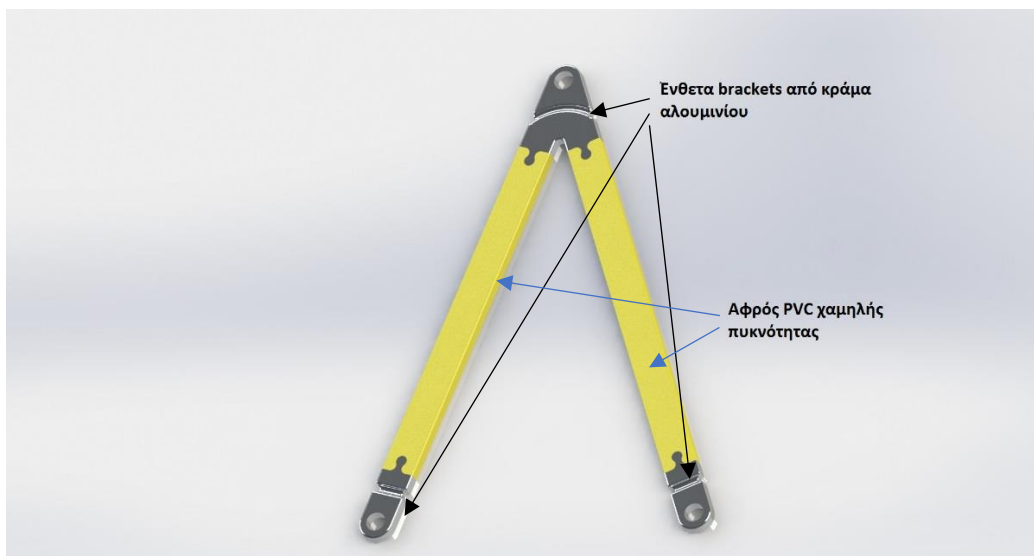


Εικόνα 15: Σημεία σύνδεσης του ψαλιδιού με upright και chassis

#### 1.4.4 Μηχανική του ψαλιδιού

Το ψαλίδι αποτελείται από τα εξής τμήματα.

1. Ένθετες υποδοχές (brackets) από κράμα αλουμινίου αεροπορικού τύπου, στις οποίες εδράζονται οι σφαιρικοί σύνδεσμοι
2. Σκέλη από αφρό PVC χαμηλής πυκνότητας
3. Ανθρακόνημα που περικλείει όλο το ψαλίδι, με κατάλληλα προσανατολισμένες ίνες και συγκεκριμένο αριθμό στρώσεων. Το ανθρακόνημα προσφύεται στον εσωτερικό αφρό και στο αλουμίνιο με εποξική κόλλα.



Εικόνα 16: Εσωτερικό ψαλιδιού

Καθώς ασκείται δύναμη από το upright στην κορυφή του ψαλιδιού, το φορτίο παραλαμβάνεται από το αλουμίνιο και μέσω διάτμησης μέσω της κόλλας, μεταφέρεται στο ανθρακόνημα εξωτερικά. Γίνεται αντιληπτό ότι τον

βασικό δομικό ρόλο του εξαρτήματος τον διαδραματίζουν οι στρώσεις ανθρακονήματος οι οποίες παραλαμβάνουν την πλειονότητα των φορτίων. Αυτό σημαίνει ότι από το υλικό αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η αντοχή και η αντίσταση στην παραμόρφωση, μεγέθη τα οποία αποτελούν αντικείμενα βελτιστοποίησης.

## 1.5 Στοιχεία Μηχανικής Πολύστρωτων

Η ανάγκη επίτευξης υψηλού λόγου αντοχής προς μάζα αλλά και ακαμψίας προς μάζα στρέφει τον μελετητή στη διερεύνηση χρήσης χαμηλής πυκνότητας σύνθετων για να παραλαμβάνουν τα φορτία. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, το ανθρακόνημα είναι η βάση της αντοχής του ψαλιδιού, επομένως και της αξιοπιστίας του. Εγείρεται λοιπόν το ερώτημα της διαχείρισης του υλικού αυτού ως προς τη μηχανική του.

### 1.5.1 Τανυστές τάσεων και παραμορφώσεων – Ελαστικές σταθερές

Η γενική παραδοχή που γίνεται αναφορικά με τα σύνθετα υλικά, είναι ότι θεωρούνται ορθοτροπικά. **Ορθοτροπικά ελαστικό** ονομάζεται ένα ομογενές γραμμικό υλικό το οποίο έχει σε κάθε σημείο του δύο κάθετα μεταξύ τους επίπεδα συμμετρίας αναφορικά με τις μηχανικές του ιδιότητες. Ακριβώς αυτά τα επίπεδα συμμετρίας το κάνουν να διαφέρει από ένα ανισότροπο υλικό. Κατ'αυτόν τον τρόπο, χρειάζεται μόνο εννέα (9) ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές για να οριστεί ο πίνακας – τανυστής παραμορφώσεων του σε σχέση με τις ασκούμενες τάσεις .

(8)

Τανυστής παραμορφώσεων για ορθοτροπικό υλικό

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}$$



Λόγω συμμετρίας εκατέρωθεν της κύριας διαγωνίου, ισχύουν οι εξισώσεις .

$$\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1}, \quad \frac{\nu_{31}}{E_3} = \frac{\nu_{13}}{E_1}, \quad \frac{\nu_{32}}{E_3} = \frac{\nu_{23}}{E_2} \quad (9)$$

Εξαιτίας της συντριπτικής κατανομής φορτίου στη διαμήκη διεύθυνση του ψαλιδιού, η λογική προστάζει τη χρήση μονοδιευθυντικού υφάσματος. **Ο τανυστής των παραμορφώσεων για την περίπτωση μονοδιευθυντικού υλικού είναι ο εξής.**

*Τανυστής παραμορφώσεων για μονοδιευθυντικό υλικό.* (10)

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_l \\ \varepsilon_t \\ \gamma_{lt} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_l} & -\frac{\nu_{tl}}{E_t} & 0 \\ -\frac{\nu_{lt}}{E_l} & \frac{1}{E_t} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{lt}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_l \\ \sigma_t \\ \tau_{lt} \end{Bmatrix}$$

Με δείκτη  $l$  είναι τα μεγέθη στη διαμήκη διεύθυνση (στη διεύθυνση παράλληλα στις ίνες) ενώ με δείκτη  $t$  συμβολίζονται τα μεγέθη στην εγκάρσια διεύθυνση (κάθετα στις ίνες).

Για τον υπολογισμό των σταθερών ελαστικότητας ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις.

$$\sigma_{l_{m+f}} = \sigma_{l_m} V_m + \sigma_{l_f} V_f \quad (11)$$

όπου δηλώνεται ότι η συνολικά ασκούμενη τάση στον διαμήκη άξονα ισούται με το άθροισμα της καταναμημένη ανάλογα με το κατ'όγκο ποσοστό ίνας – μήτρας, τάσης, στην ίνα και στη μήτρα αντίστοιχα.

ενώ ισοδύναμα προκύπτει

$$\begin{aligned} E_l \varepsilon_l &= E_m \varepsilon_l V_m + E_f \varepsilon_l V_f \\ E_l &= E_m V_m + E_f V_f \end{aligned} \quad (12)$$

Για το **λόγο Poisson**, είναι επίσης

$$\nu_{lt} = \nu_m V_m + \nu_f V_f \quad (13)$$

Στην εγκάρσια διεύθυνση, το μέτρο ελαστικότητας δίνεται από τη σχέση

$$\frac{1}{E_t} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \quad (14)$$

ή ισοδύναμα

$$E_t = E_m \left[ \frac{1}{(1 - V_f) + \frac{E_m}{E_f} V_f} \right]$$

Για τη γωνιακή παραμόρφωση, αυτή συνδέεται με τις διατμητικές τάσεις μέσω του μέτρου διάτμησης  $G$ , και συγκεκριμένα

$$\gamma_{lt} = \frac{\tau_{lt}}{G} \quad (15)$$

Κατ'αναλογία με τη σχέση (14), ισχύει για το μέτρο διάτμησης

$$G_{lt} = G_m \left[ \frac{1}{(1 - V_f) + \frac{G_m}{G_f} V_f} \right] \quad (16)$$

Οι ελαστικές σταθερές σε μία στρώση, για οποιαδήποτε διεύθυνση δίνονται από τους παρακάτω πίνακες, για γνωστή γωνία άσκησης φορτίου σε σχέση με τη διεύθυνση των ινών.

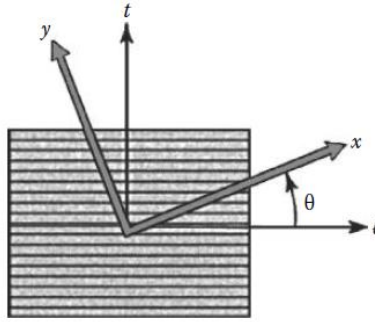
Για τις τάσεις :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_l \\ \sigma_t \\ \tau_{lt} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2cs \\ s^2 & c^2 & 2cs \\ sc & -sc & (c^2 - s^2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

και για τις παραμορφώσεις :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_l \\ \varepsilon_t \\ \gamma_{lt} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2cs \\ s^2 & c^2 & 2cs \\ sc & -sc & (c^2 - s^2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

Τα  $c$  και  $s$  είναι κατ' αντιστοιχία τα ημίτονα και συνημίτονα της γωνίας που σχηματίζουν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις σε σχέση με τη διεύθυνση των ινών. Απεικονίζεται καλύτερα στο παρακάτω σχήμα .



Εικόνα 17: Ορισμός νέου συστήματος αξόνων σε γνωστή γωνία από τη διαμήκη διεύθυνση των ινών

### 1.5.2 Κριτήρια αστοχίας σύνθετων, πολύστρωτων υλικών

#### Κριτήριο αστοχίας Tsai – Hill

$$\frac{\sigma_l^2}{\sigma_{l\text{rupture}}^2} + \frac{\sigma_t^2}{\sigma_{t\text{rupture}}^2} - \frac{\sigma_l \sigma_t}{\sigma_{l\text{rupture}}^2} + \frac{\tau_{lt}^2}{\tau_{lt\text{rupture}}^2} < 1 \quad (19)$$

Το κριτήριο εφαρμόζεται προφανώς ξεχωριστά για εφελκυστικά και ξεχωριστά για θλιπτικά φορτία, καθώς τα όρια αντοχής για τα δύο αυτά είδη φορτίσεων είναι διαφορετικά. Ο συντελεστής ασφαλείας (safety margin) που έχει καθιερωθεί για την εφαρμογή του κριτηρίου, είναι

	$Safety\ margin = \frac{1}{a} - 1$	(20)
--	------------------------------------	------

, όπου  $a^2$  είναι το αριστερό μέρος της ανισότητας Tsai – Hill.

#### Κριτήριο Αστοχίας Tsai – Wu.

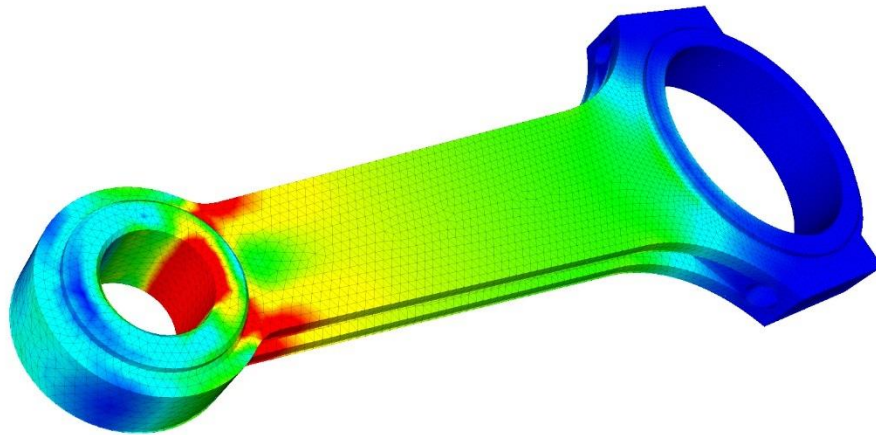
Κυρίως για θλιπτικά φορτία, εφαρμογή βρίσκει και το κριτήριο Tsai – Wu, καθώς το Tsai – Hill δίνει πιο αισιόδοξη εκτίμηση για το περιθώριο ασφαλείας. Σύμφωνα με το κριτήριο Tsai – Wu λοιπόν, είναι

$$\left( \frac{1}{\sigma_{l\text{rupture}}^{\text{tract}}} - \frac{1}{\|\sigma_{l\text{rupture}}^{\text{compr}}\|} \right) \sigma_l + \left( \frac{1}{\sigma_{t\text{rupture}}^{\text{tract}}} - \frac{1}{\|\sigma_{t\text{rupture}}^{\text{compr}}\|} \right) \sigma_t + \frac{\sigma_l^2}{\sigma_{l\text{rupture}}^{\text{tract}} \times \|\sigma_{l\text{rupture}}^{\text{compr}}\|} + \frac{\sigma_t^2}{\sigma_{t\text{rupture}}^{\text{tract}} \times \|\sigma_{t\text{rupture}}^{\text{compr}}\|} - \frac{\sigma_l \sigma_t}{\sigma_{l\text{rupture}}^{\text{tract}} \times \|\sigma_{l\text{rupture}}^{\text{compr}}\|} + \frac{\tau_{lt}^2}{\tau_{lt\text{rupture}}^2} \leq 1 \quad (21)$$

Η πολυπλοκότητα των υπολογισμών που αφορούν τα σύνθετα, ειδικότερα όταν αυτοί βρίσκουν εφαρμογή σε εξεζητημένες γεωμετρίες, καθιστούν αναγκαία την εξεύρεση επαναληπτικών αριθμητικών μεθόδων υπολογισμού των ζητούμενων μεγεθών. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, βρίσκει εφαρμογή στο εν λόγω πρόβλημα. (Gay, 2015) (Gibson, 2015)

## 1.6 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων – Finite Element Analysis (FEA)

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι υπολογιστική τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για την αποτύπωση της συμπεριφοράς του εξεταζόμενου αντικειμένου στην επιβολή συγκεκριμένων συνθηκών όπως η άσκηση φορτίων, θερμοκρασιών ή δονήσεων. Αποτελεί μέθοδο προσομοίωσης καθώς είναι ένας τρόπος διεξαγωγής ενός εικονικού πειράματος για την εξαγωγή δεδομένων και συμπερασμάτων που ανατροφοδοτούν διαρκώς το σχεδιασμό ενός εξαρτήματος. Συνήθως η αναγκαιότητα στη χρήση της μεθόδου προκύπτει από την αδυναμία εκτέλεσης υπολογισμών στο χέρι. Αυτό σημαίνει ότι πιθανότατα στο εξεταζόμενο πρόβλημα υπάρχουν περίπλοκες γεωμετρίες οι οποίες καθιστούν τον αναλυτικό υπολογισμό των ζητούμενων μεγεθών ζημιόγανο χρονικά. Επίσης, η περιγραφή των προβλημάτων από δυσεπίλυτες για αυτές τις γεωμετρίες μερικές διαφορικές εξισώσεις καθιστά μεν τη χρήση FEA αναγκαία, ωστόσο πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη ότι πρόκειται για αριθμητική μέθοδο επίλυσης προβλημάτων. Αυτό σημαίνει ότι θα εμφανίζονται σφάλματα και είναι στην ευθύνη του χρήστη να γνωρίζει σε ποια σημεία της μελέτης του είναι πιθανότερο αυτά να εμφανιστούν και ποιες διαδικασίες χρειάζεται να ακολουθήσει για να τα ελαττώσει.



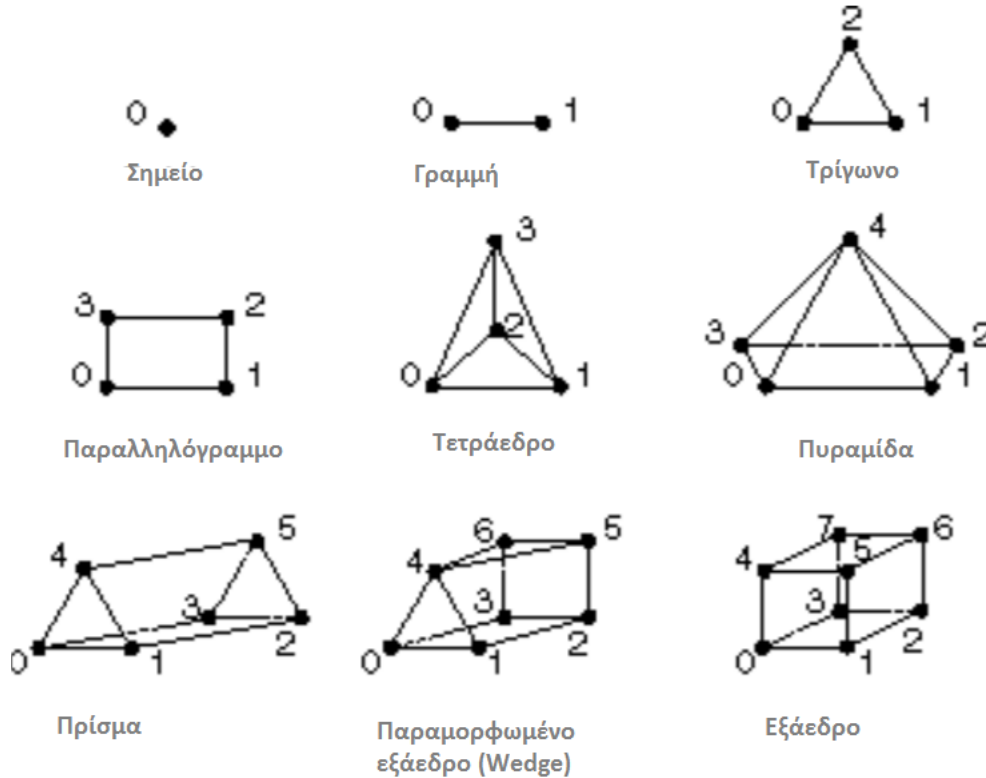
Εικόνα 18: Κατανομή τάσεων σε διωστήρα (μπιέλα)

Ειδικότερα για τα εξαρτήματα από σύνθετα υλικά, υπάρχουν περαιτέρω παράγοντες για την αναγκαιότητα χρήσης της μεθόδου. Ο βασικός παράγοντας είναι ότι τα σύνθετα είναι μη ιστροπικά υλικά. Στις περισσότερες περιπτώσεις αντιμετωπίζονται ως ορθοτροπικά, δηλαδή οι μηχανικές τους ιδιότητες έχουν τρία επίπεδα συμμετρίας (9 σταθερές απαιτούνται για την περιγραφή των ιδιοτήτων του υλικού). Επιπλέον παράγοντες είναι η ανάγκη για έλεγχο πολύπλοκων φορτίσεων όπως οι διαστρωματικές διατμητικές τάσεις αλλά και ο ορισμός πολύπλοκων συνοριακών συνθηκών.

Το πρόβλημα ορίζεται ως εξής. Ορίζονται κάποιες συνοριακές συνθήκες στο εξεταζόμενο αντικείμενο, κάποιοι περιορισμοί δηλαδή στη συμπεριφορά του, ενώ παράλληλα ορίζεται και η εξωτερική κατάσταση στην οποία υποβάλλεται όπως για παράδειγμα η εφαρμογή κάποιας δύναμης ή κάποιας γνωστής παραμόρφωσης. Μετά την επίλυση της προσομοίωσης παραλαμβάνονται αποτελέσματα για την κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων στο αντικείμενο. Πριν γίνει όμως ο ορισμός του προβλήματος, πρέπει να έχει κατασκευαστεί το πλέγμα διακριτοποίησης.

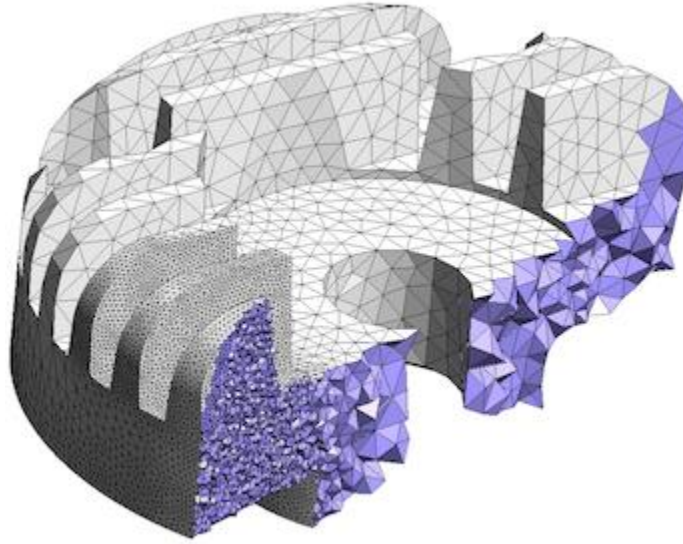
### 1.6.1 Πλέγμα διακριτοποίησης

Η γεωμετρία που εξετάζεται χωρίζεται σε επιμέρους στοιχεία που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Τα πεπερασμένα στοιχεία συνθέτουν το πλέγμα διακριτοποίησης, που αποτελεί το χώρο στον οποίο λύνονται οι διακριτές εξισώσεις. Οι γεωμετρικές οντότητες που απαρτίζουν το πλέγμα παρουσιάζονται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19: Ενδεικτικές γεωμετρικές οντότητες πλεγμάτων

Τα σημεία συνάντησης των ακμών σε κάθε ένα από τα διδιάστατα και τα τρισδιάστατα στοιχεία στην Εικόνα 19 ονομάζονται κόμβοι. Με την επίλυση της προσομοίωσης, η μετακίνηση των κόμβων δίνει τις τιμές παραμόρφωσης αρχικά και στη συνέχεια της τάσης και όλων των τιμών – εξόδου για τα φυσικά μεγέθη που μελετώνται. Επειδή η διάδοση της διαταραχής σε όλο το αντικείμενο γίνεται μέσω των πεπερασμένων στοιχείων, αντιλαμβάνεται κανείς τη σημασία του σχήματος τους και της ποιότητας του πλέγματος συνολικά, στην εξαγωγή αποτελεσμάτων με μικρό σφάλμα.



Εικόνα 20: Στερεό με πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων

Όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 20 μπορούν να υπάρχουν περιοχές στο πλέγμα διακριτοποίησης με πιο πυκνή την τοποθέτηση στοιχείων μεταξύ τους. Συνήθως αυτές είναι περιοχές στις οποίες μας ενδιαφέρει περισσότερο η λήψη αποτελεσμάτων λόγω κάποιας έδρασης σε άλλο αντικείμενο ή λόγω συντοριακών συνθηκών (σημεία εφαρμογής δυνάμεων, στηρίξεων κ.λπ) ή περιοχές στις οποίες το αντικείμενο εμφανίζει κάποια ασυνέχεια ή γεωμετρική πολυπλοκότητα που κατά πάσα πιθανότητα θα αύξανε το σφάλμα με πιο αραιό πλέγμα.

#### 1.6.1.1 Στοιχεία ποιότητας πλέγματος

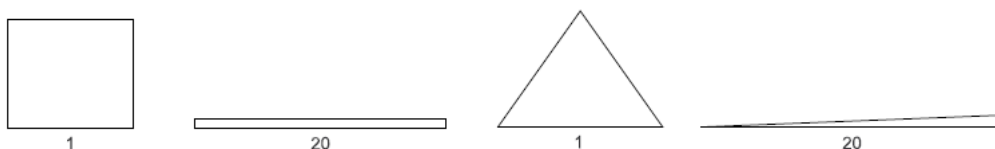
Έχουν θεσπιστεί μεγέθη για την ποσοτικοποίηση της ποιότητας του πλέγματος και συγκεκριμένα για την ποιότητα του κάθε στοιχείου. Ορισμένα από τα μεγέθη αυτά δίνονται συνοπτικά παρακάτω.

##### Jacobian Ratio

Το Jacobian Ratio είναι ένα μέγεθος σύγκρισης του σχήματος ενός στοιχείου με ένα ιδανικό στοιχείο. Παίρνει τιμές από -1.0 μέχρι 1.0 με το 1.0 να είναι η τιμή ενός άριστα σχηματισμένου στοιχείου. Το ιδανικό σχήμα για ένα στοιχείο εξαρτάται από το είδος του στοιχείου. Περιληπτικά, η μέθοδος ορίζει παραμετρικές συντεταγμένες για τους κόμβους του δοσμένου πεπερασμένου στοιχείου, και τις προσαρμόζει στο ιδανικό σχήμα του εκάστοτε στοιχείου. Αν αυτή η «παραμόρφωση» του στοιχείου μέσω της μετακίνησης των κόμβων είναι ίδια για όλους τους κόμβους του στοιχείου, τότε η τιμή του λόγου Jacobian ισούται με 1.0 .

##### Aspect Ratio

Το aspect ratio ενός πεπερασμένου στοιχείου αναπαριστά το πόσο μεγάλη είναι μία πλευρά του σε σχέση με μία άλλη.



Εικόνα 21: Aspect ratio για τετράπλευρα και τριγωνικά στοιχεία

Εμφανώς, η βέλτιστη τιμή του Aspect Ratio είναι η μονάδα. (Gokhale, 2008)

### 1.7 Μεθοδολογική προσέγγιση

Αρχικά, με τις δοσμένες ως input σχετικές θέσεις μεταξύ των σημείων της ανάρτησης στο σασί και στο upright, σχεδιάζεται CAD του ψαλιδιού στο σχεδιαστικό πρόγραμμα SOLIDWORKS™. Οι λεπτομέρειες του σχεδίου δεν είναι στους σκοπούς της μελέτης ωστόσο, το σχέδιο πρέπει να έχει ορισμένα χαρακτηριστικά για τη σωστή μελέτη του σε περιβάλλον εργασίας αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Κατ'αυτόν τον τρόπο, σχεδιάζεται το εσωτερικό τμήμα του ψαλιδιού όπως περιγράφηκε στην ενότητα 1.4, με πέντε σώματα να το αποτελούν, η εξωτερική επιφάνεια των οποίων «αντιγράφεται» σχηματίζοντας ένα κέλυφος γύρω από ολόκληρο το ψαλίδι. Το κέλυφος αυτό αναπαριστά το ανθρακόνημα.

Στη συνέχεια, η γεωμετρία πρέπει να εισαχθεί προς εξέταση σε περιβάλλον εργασίας για τη διεξαγωγή της ανάλυσης FEM. Το περιβάλλον εργασίας που επιλέγεται είναι το ANSYS Workbench, και συγκεκριμένα σύζευξη της πλατφόρμας ACP PrePost του ANSYS, με την πλατφόρμα Mechanical. Στο ACP καθορίζεται ο αριθμός και ο προσανατολισμός των στρώσεων, ενώ στο Mechanical οι συσχετίσεις μεταξύ των σωμάτων που συναποτελούν το ψαλίδι (συνοριακές συνθήκες, τύποι επαφών μεταξύ των σωμάτων).

Στην πορεία κατασκευάζεται πλέγμα διακριτοποίησης για τη γεωμετρία και επιλύεται το μοντέλο. Με μια διαρκή διαδικασία ανατροφοδότησης αποτελεσμάτων σε νέες αλληλουχίες στρώσεων (διαφορετικά laminations), αλλά και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, γίνεται βελτιστοποίηση τόσο της διαστρωμάτωσης όσο και στοιχείων του σχεδιασμού αλλά και του ποσοστού κάλυψης του ψαλιδιού από ανθρακόνημα. (Xiaolin Chen, 2015)

## 2. Προεπεξεργασία (Preprocessing) προσομοίωσης

Η γεωμετρία που θα εισαχθεί προς προσομοίωση αποτελείται από εξωτερικό περίβλημα ανθρακονήματος σε μήτρα ρητίνης, ενώ εσωτερικά υπάρχουν υποστηρίγματα (brackets) από αλουμίνιο τύπου 7075T6 και αφρός PVC. Πριν τον τελικό ορισμό συνοριακών συνθηκών και δυνάμεων στο περιβάλλον Static Structural του ANSYS, πρέπει να οριστούν τα τρία αυτά τμήματα (σύμφωνα με την διάκρισή τους με βάση το υλικό) του υπό εξέταση wishbone.



Εικόνα 22: Εξωτερικό carbon περίβλημα ψαλιδιού



Εικόνα 23: Εσωτερικό ψαλιδιού με αλουμινένια brackets και members από αφρό PVC



## 2.1 Κελυφοειδής γεωμετρία (Shell geometry- ACP)

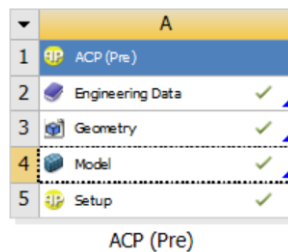
Το εξωτερικό carbon περίβλημα του ψαλιδιού δομείται ανά στρώση υφάσματος στο περιβάλλον εργασίας ACP (Ansys Composite Prepost). Για την πλήρη κάλυψη των απαραίτητων δεδομένων για την προεργασία (preprocessing) που επιτελεί το ACP, απαιτείται να γίνουν τα εξής βήματα:

**Engineering Data:** Συμπλήρωση μηχανικών ιδιοτήτων στις στρώσεις (layers) που θα συνθέσουν το ACP μοντέλο

**Geometry:** Εισαγωγή Shell (Surface) Γεωμετρίας από το CAD που έγινε στο σχεδιαστικό περιβάλλον SOLIDWORKS

**Model:** Διαίρεση της γεωμετρίας σε επιμέρους τμήματα (named selections) διαφορετικού lamination, ορισμός (assignment) υλικού για το lamination, ορισμός αρχικής εκτίμησης πάχους, επαφές (contacts) μεταξύ των προαναφερθέντων τμημάτων (named selections), ορισμός πλέγματος (mesh) για το ανθρακόνημα πάνω στη shell γεωμετρία.

**Setup:** Σύνθεση αλληλουχίας στρώσεων (lamination) με βάση τα παραπάνω δεδομένα.



Εικόνα 24: Αποτύπωση συμπλήρωσης δεδομένων για την προεπεξεργασία στο ACP

### 2.1.1 Μηχανικές Ιδιότητες (Engineering Data)

Η επίλυση του προσομοιώματος γίνεται με βάση περιορισμούς που τίθενται υπό μορφή συνοριακών συνθηκών, αλλά η εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών αυτών προϋποθέτει τον ορισμό μηχανικών ιδιοτήτων για τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν. Κατ'αυτόν τον τρόπο, αν οριστεί μια συνοριακή συνθήκη ή εφαρμοστεί μια δύναμη σε κάποιο σημείο ή επιφάνεια του υπο μελέτη προσομοιώματος, λαμβάνονται διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού ή των υλικών που υπάρχουν στην περιοχή αυτή. Γίνεται επομένως κατανοητό ότι δεν έχει νόημα ο ορισμός δυνάμεων και συνοριακών συνθηκών χωρίς την προγενέστερη καταγραφή μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, αλλά και την αντιστοίχιση αυτών σε γεωμετρίες του μοντέλου.

Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κελυφοειδή γεωμετρία απεικονίζονται στους Πίνακες Πίνακας 1 και Πίνακας 2.

Οι ιδιότητες αυτές προκύπτουν από το φύλλο τεχνικών οδηγιών για τα προεμποτισμένα υφάσματα MTM28 UD και 2x2, το οποίο περιέχει τις μηχανικές ιδιότητες που απαιτούνται για να οριστούν πλήρως τα υλικά αυτά στη βιβλιοθήκη του ANSYS.

Πίνακας 1: Προεμπτισμένο Μονοδιευθυντικό Ανθρακόνημα

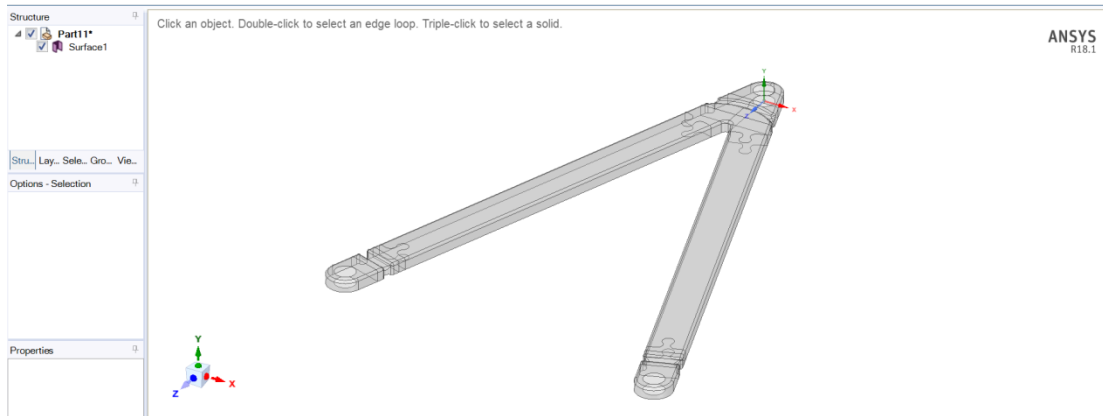
Properties of Outline Row 6: mtm28ud			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1,42	g cm <sup>-3</sup>
4	Orthotropic Elasticity		
5	Young's Modulus X direction	1,27E+05	MPa
6	Young's Modulus Y direction	6900	MPa
7	Young's Modulus Z direction	6900	MPa
8	Poisson's Ratio XY	0,3	
9	Poisson's Ratio YZ	0,4	
10	Poisson's Ratio XZ	0,3	
11	Shear Modulus XY	3690	MPa
12	Shear Modulus YZ	3690	MPa
13	Shear Modulus XZ	3690	MPa
14	Orthotropic Stress Limits		
15	Tensile X direction	2735	MPa
16	Tensile Y direction	55,4	MPa
17	Tensile Z direction	55,4	MPa
18	Compressive X direction	-1309	MPa
19	Compressive Y direction	-100	MPa
20	Compressive Z direction	-100	MPa
21	Shear XY	127	MPa
22	Shear YZ	32	MPa
23	Shear XZ	60	MPa
24	Orthotropic Strain Limits		
25	Tensile X direction	0,021535	
26	Tensile Y direction	0,008029	
27	Tensile Z direction	0,008029	
28	Compressive X direction	-0,011284	
29	Compressive Y direction	-0,011284	
30	Compressive Z direction	-0,009	
31	Shear XY	0,034417	
32	Shear YZ	0,0086721	
33	Shear XZ	0,01626	
34	Tsai-Wu Constants		
35	Coupling Coefficient XY	-1	
36	Coupling Coefficient YZ	-1	
37	Coupling Coefficient XZ	-1	
38	Ply Type		
39	Type	Regular	

Πίνακας 2: Προεμπτισμένο woven plain 2x2 ανθρακόνημα

Properties of Outline Row 7: mtm28woven			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1,42	g cm <sup>-3</sup> ▼
4	Orthotropic Elasticity		
5	Young's Modulus X direction	47676	MPa ▼
6	Young's Modulus Y direction	47676	MPa ▼
7	Young's Modulus Z direction	6900	MPa ▼
8	Poisson's Ratio XY	0,04	
9	Poisson's Ratio YZ	0,3	
10	Poisson's Ratio XZ	0,3	
11	Shear Modulus XY	19500	MPa ▼
12	Shear Modulus YZ	2700	MPa ▼
13	Shear Modulus XZ	2700	MPa ▼
14	Orthotropic Stress Limits		
15	Tensile X direction	551	MPa ▼
16	Tensile Y direction	551	MPa ▼
17	Tensile Z direction	50	MPa ▼
18	Compressive X direction	-509	MPa ▼
19	Compressive Y direction	-509	MPa ▼
20	Compressive Z direction	-170	MPa ▼
21	Shear XY	125	MPa ▼
22	Shear YZ	65	MPa ▼
23	Shear XZ	65	MPa ▼
24	Orthotropic Strain Limits		
25	Tensile X direction	0,011557	
26	Tensile Y direction	0,011557	
27	Tensile Z direction	0,0072464	
28	Compressive X direction	-0,0102	
29	Compressive Y direction	-0,0102	
30	Compressive Z direction	-0,009	
31	Shear XY	0,0064103	
32	Shear YZ	0,019	
33	Shear XZ	0,019	
34	Tsai-Wu Constants		
35	Coupling Coefficient XY	-1	
36	Coupling Coefficient YZ	-1	
37	Coupling Coefficient XZ	-1	
38	Ply Type		
39	Type	Woven	▼

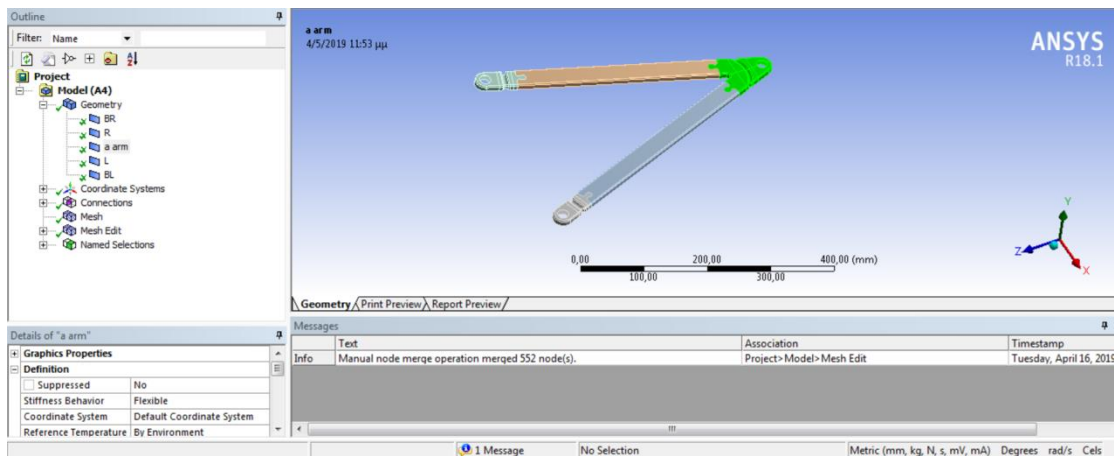
### 2.1.2 Γεωμετρία στο ANSYS (Geometry)

Η εισαγωγή της surface γεωμετρίας (Εικόνα 22) γίνεται από το SOLIDWORKS στο ANSYS. Η τελική του απεικόνιση στο ANSYS δίνεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25:Μεταφορά CAD στο ANSYS

### 2.1.3 Μοντέλο (Model)



Εικόνα 26: Απεικόνιση προετοιμασίας ACP μοντέλου

#### 2.1.3.1 Ορισμός στοιχείων για τη shell γεωμετρία

Η γεωμετρία του ψαλιδιού χωρίζεται όπως φαίνεται (Εικόνα 23) σε πέντε τμήματα ήδη από το CAD. Τα τμήματα αυτά λαμβάνουν τις ονομασίες BR (Bracket right), R (Member Right), Aarm (A arm bracket), L (Member Left), BL (Bracket left). Σε κάθε ένα από τα τμήματα αυτά ορίζεται το αρχικό assignment (αντιστοίχιση) του υλικού, το πάχος του (κατά προσέγγιση) και η συμπεριφορά του αναφορικά με μη γραμμικότητες και τη δυσκαμψία του. (Η δυνατότητα αυτή δίνεται για την απλοποίηση των υπολογισμών σε μοντέλα τμήματα των οποίων δεν είναι αναγκαίο να οριστούν με βάση τα δύο αυτά στοιχεία). Αντιστοιχίζεται λοιπόν το ανθρακόνημα από τα Engineering Data, ορίζεται πάχος 3 mm, ενώ απορρίπτεται η μελέτη μη γραμμικών φαινομένων και φαινομένων

μεγάλης παραμόρφωσης. Το πάχος και το υλικό ορίζονται ώστε να βγουν συνολικές ιδιότητες όγκου και μάζας για το περίβλημα. Οι ιδιότητες που προέκυψαν απεικονίζονται στην Εικόνα 27.

Properties	
<input type="checkbox"/> Volume	2,2499e+005 mm <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Mass	0,33524 kg
<input type="checkbox"/> Surface Are...	74997 mm <sup>2</sup>

Εικόνα 27 : Όγκος, Μάζα και Επιφάνεια κελυφοειδούς ανθρακονημάτινου περιβλήματος

### 2.1.3.2 Ορισμός επαφών μεταξύ διαφορετικών κελυφοειδών σωμάτων στο μοντέλο

Ορίζεται όλα τα κελυφοειδή σώματα στο μοντέλο να είναι ενωμένα μεταξύ τους (συνοριακή συνθήκη bonded).

### 2.1.3.3 Πλέγμα Διακριτοποίησης

Για τη διαμόρφωση του πλέγματος πρέπει να ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως η γεωμετρία του μελετώμενου συστήματος, οι διαθέσιμες επιλογές (size function) του λογισμικού και οι στόχοι ποιότητας του πλέγματος σε σχέση με τους υπολογιστικούς πόρους που θα δαπανηθούν .

**Relevance:** Η επιλογή αυτή παίρνει τιμές από -100 έως +100 με το ένα άκρο να δίνει μεγάλη ταχύτητα στους υπολογισμούς και το δεύτερο άκρο να δίνει μεγάλη ακρίβεια. Επιλέγεται τιμή Relevance ίση με 20, ώστε να υπάρχει αρκετά πυκνό mesh αλλά όχι υπερβολικά, ώστε να μπορεί να είναι ευέλικτο σε διαδοχικές δοκιμές το μοντέλο, λόγω του αντίστοιχα όχι υπερβολικά μεγάλου υπολογιστικού κόστους.

**Size Function:** Η γεωμετρία του ψαλιδιού εμφανίζει μόνο καμπύλες ακμές με ακτίνα το λιγότερο 2 χιλιοστά, οπότε το πλέγμα που θα κατασκευαστεί θα πρέπει να γίνεται πυκνότερο κατά την προσέγγιση σε καμπύλες και ακμές όπου θα εμφανίζεται και η ανάλογη συγκέντρωση τάσεων. Η επιλογή του λογισμικού σε αυτή την περίπτωση είναι η συνάρτηση proximity and curvature. Ορίζεται το ελάχιστο μέγεθος για πεπερασμένο στοιχείο σε 0,1 mm και το μέγιστο σε 1 mm.

**Quality:** Η ποιότητα του κάθε στοιχείου, για τρισδιάστατα στοιχεία δίνεται από τη σχέση (22)

Η τιμή του  $C$  αλλάζει ανάλογα με το είδος του στοιχείου. Στο πλέγμα μας χρησιμοποιείται συνδυασμός τετραεδρικών και εξαγωνικών στοιχείων.

$$Quality = C \left[ \frac{volume}{\sqrt{[\sum(EdgeLength)^2]^3}} \right] \quad (22)$$

$$C_{\text{τετραεδρικού}} = 124.70765802$$

$$C_{\text{εξαγωνικού}} = 41.56921938$$

Η ποιότητα παίρνει τιμές από μηδέν (0) έως ένα (1).

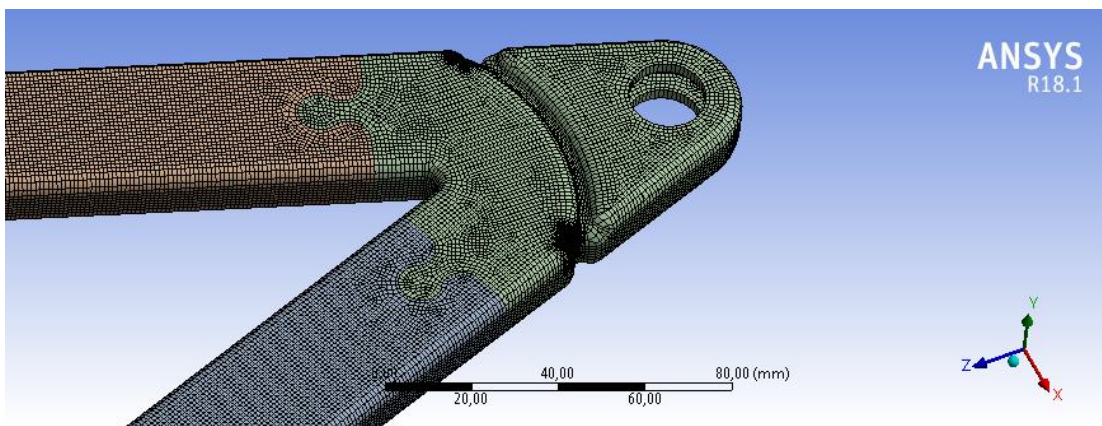
Δίνεται στο λογισμικό η εντολή όταν ελέγχει την ποιότητα του πλέγματος, να θέτει αυστηρά όρια στα σφάλματα στο πλέγμα, με την επιλογή Aggressive Mechanical. Με την επιλογή αυτή δεν γίνονται δεκτά στοιχεία τα οποία έχουν πολύ χαμηλό Jacobian Ratio, οπότε είναι αναμενόμενο να αυξηθεί λίγο ο υπολογιστικός χρόνος, ωστόσο καθιστά το μοντέλο ικανό να ανταπεξέλθει σε περιπτώσεις μεγάλων παραμορφώσεων, αλλά και μη γραμμικών φαινομένων.

Με τις συγκεκριμένες global ρυθμίσεις φτιάχνεται το πλέγμα, ανάλογα με την ποιότητα του οποίου λαμβάνεται απόφαση εάν απαιτείται να παρέμβει ο χρήστης τοπικά σε αυτό. Τα στοιχεία ποιότητας είναι τα εξής :

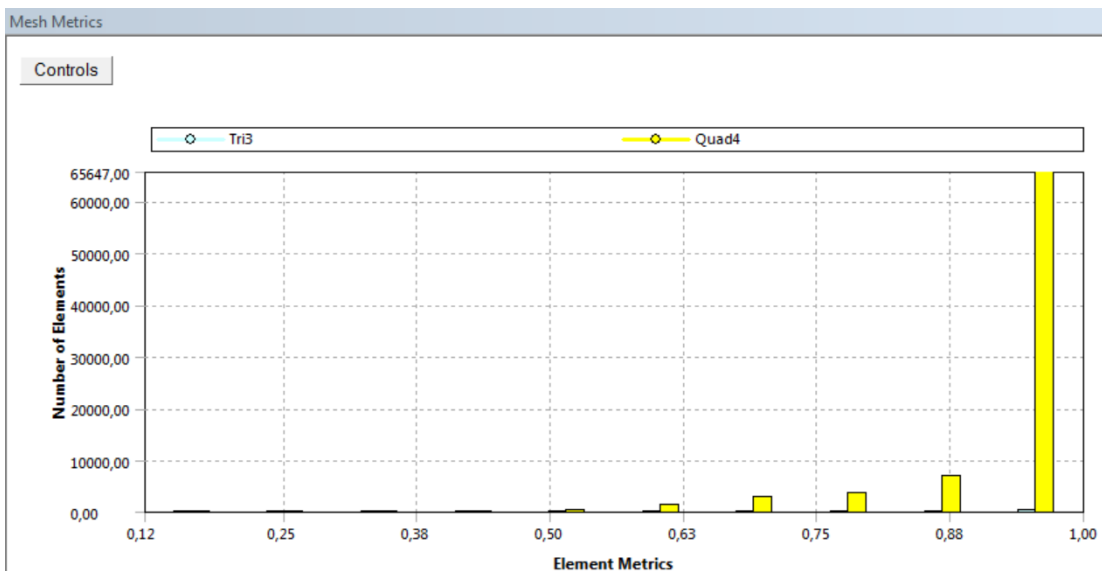
Πίνακας 3: Στοιχεία ποιότητας πλέγματος

Quality	
Check Mesh Qua...	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0,11966
<input type="checkbox"/> Max	0,99947
<input type="checkbox"/> Average	0,95225
<input type="checkbox"/> Standard Devi...	9,3725e-002

Εφόσον το στοιχείο με τη χαμηλότερη ποιότητα έχει 0,12 και ο μέσος όρος είναι 0,95 με τυπική απόκλιση 0,09 το πλέγμα είναι παραπάνω από επαρκές για την υπολογιστική προσέγγιση του προβλήματος. (βλ. και παράρτημα).



Εικόνα 28: Απεικόνιση πλέγματος στο ανθρακόνημα



Διάγραμμα 1: Κατανομή ποιότητας τετράπλευρων κελυφοειδών στοιχείων

**Συγχώνευση κόμβων (Node Merge):** Το σχέδιο εμφανίζει μια ιδιαιτερότητα όπως αναφέρεται και παραπάνω. Αυτή συνίσταται στα πέντε διαφορετικά κελυφοειδή σώματα που το απαρτίζουν. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία επικαλυπτόμενων κόμβων, οι οποίοι αυξάνουν τη συνολική απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ και πολλές φορές καθιστούν την προσομοίωση δυσεπίλυτη. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, αξιοποιείται η δυνατότητα συγχώνευσης κόμβων με το εργαλείο Node Merge, το οποίο δίνει τη δυνατότητα με ορισμένο από το χρήστη βαθμό ευαισθησίας, σε συγκεκριμένη περιοχή να γίνεται η συγχώνευση.

(ANSYS Mechanical User's Guide, 2017)

Ο βαθμός ευαισθησίας που επιλέχθηκε ήταν  $0,05 \text{ mm}$  διότι έχει ορισθεί ελάχιστον μέγεθος στοιχείου  $0,1 \text{ mm}$ . Το Node Merge συγχωνεύει 552 κόμβους από τους 81531 που υπήρχαν αρχικά, δηλαδή  $0,68\%$ . Τελικά δημιουργείται πλέγμα 80979 κόμβων και 81018 στοιχείων.

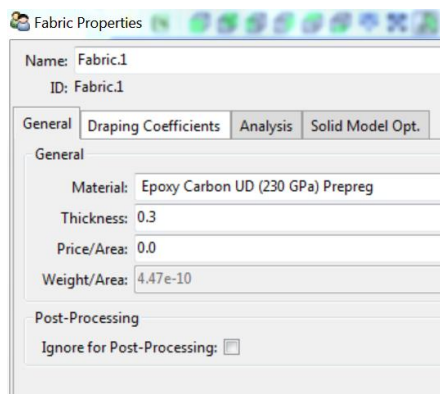
#### 2.1.4 Setup

Στο setup γίνεται μια προσομοίωση της διαστρωμάτωσης (lamination) του ψαλιδιού. Αυτό σημαίνει ότι ορίζονται τα υφάσματα – fabrics που αποτελούν τις στρώσεις του, οι διευθύνσεις των ινών τους και η αλληλουχία τοποθέτησής τους, αλλά και οι περιοχές που πρέπει να υπάρχει αυξημένη παρουσία υλικού. Στη συγκεκριμένη ενότητα θα περιγραφούν οι αρχικές τοποθετήσεις υφασμάτων για την περιγραφή της διαδικασίας, ενώ η βελτιστοποίηση θα περιγραφεί σε επόμενη ενότητα.

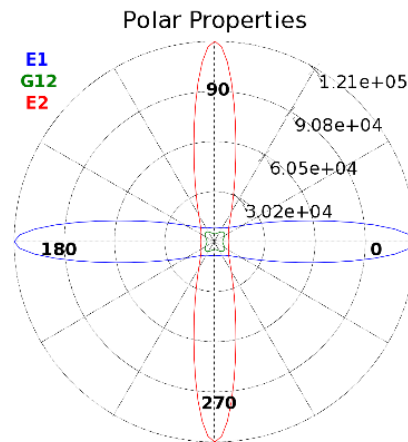
##### 2.1.4.1 Fabrics

Ορίζεται το ύφασμα ανθρακονήματος που θα χρησιμοποιηθεί, το πάχος του και η τιμή του ανά επιφάνεια. Το κόστος δεν είναι στους σκοπούς της παρούσας μελέτης, οπότε δε θα συμπεριληφθεί η εκτίμηση αυτή.

Έπειτα από διεξαγωγή πειράματος και σε συνδυασμό με τις πληροφορίες από το τεχνικό φύλλο οδηγιών της εταιρείας, το πάχος της στρώσης είναι  $0,3 \text{ mm}$ . Οι ιδιότητες του υλικού (αναφορικά με τα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης) στις διάφορες διευθύνσεις των ινών απεικονίζονται παρακάτω.



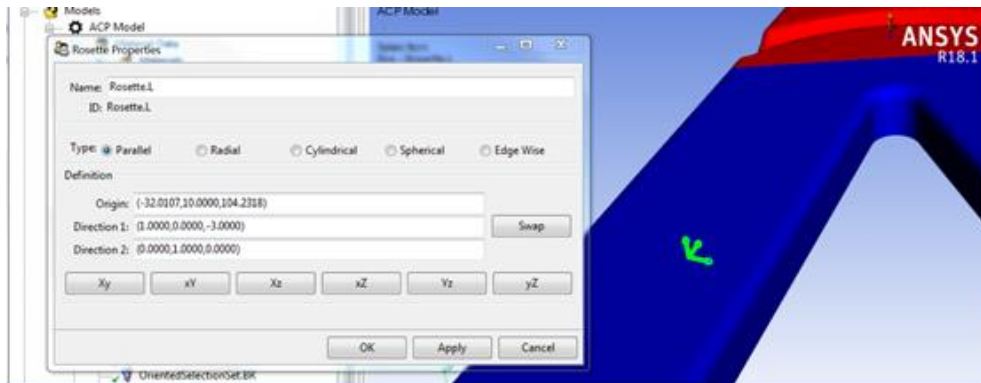
Εικόνα 29: Ορισμός πάχους υφάσματος σε *mm* στο περιβάλλον εργασίας



Διάγραμμα 2: Μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης υφάσματος σε πολικές συντεταγμένες

#### 2.1.4.2 Rosettes

Ορίζονται διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων για το αριστερό και το δεξί μέλος του ψαλιδιού καθώς το καθένα έχει τη διεύθυνση των ινών στο διαμήκη άξονα. Ορίζεται ο άξονας x ως διαμήκης.

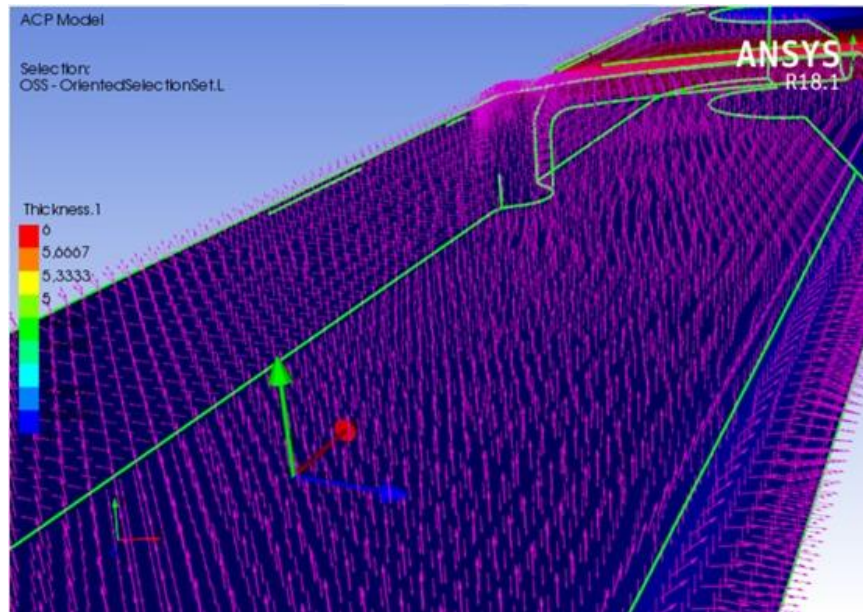


Εικόνα 30: Αριστερό Rosette



### 2.1.4.3 Oriented Selection Sets

Ορίζεται ως πρώτη στρώση να θεωρείται η κάτω και οι στρώσεις να διαδέχονται η μία την άλλη προς τα πάνω

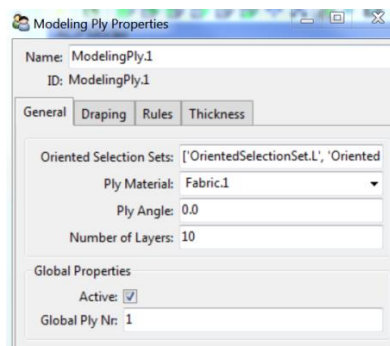


Εικόνα 31: Oriented Selection Sets

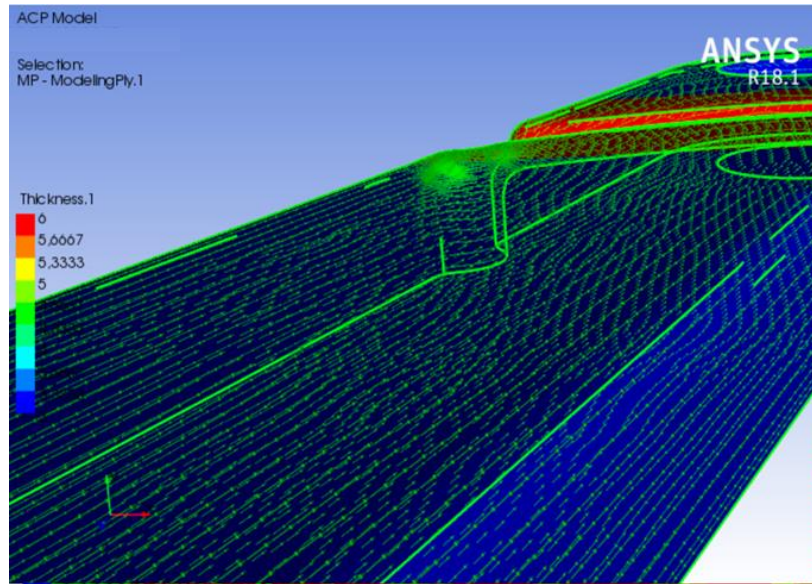
Σημασία στη συγκεκριμένη επιλογή έχει η επαλήθευση ότι το διάνυσμα της φοράς διαδοχής των στρώσεων (με μωβ χρώμα στην παραπάνω εικόνα), είναι κάθετο στο επίπεδο του ψαλιδιού.

### 2.1.4.4 Modelling Plies

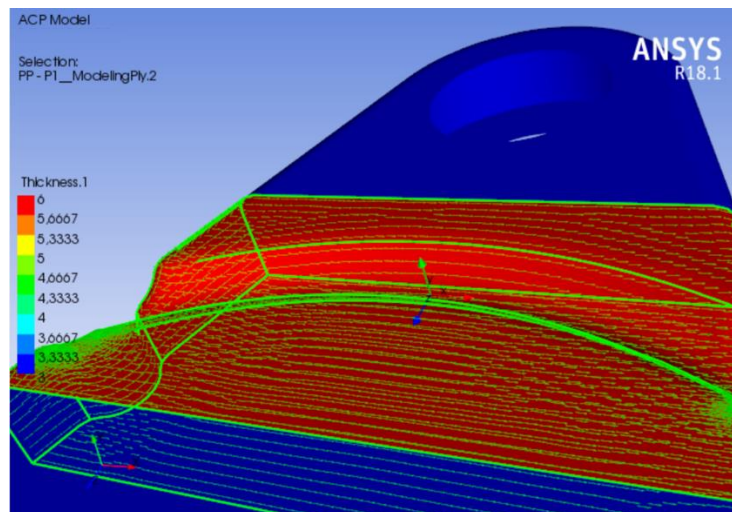
Ορίζεται ο αριθμός, η γωνία διεύθυνσης και η ακριβής αλληλουχία των στρώσεων του ψαλιδιού σε όλα τα σημεία του, με βάση τα oriented selection sets.



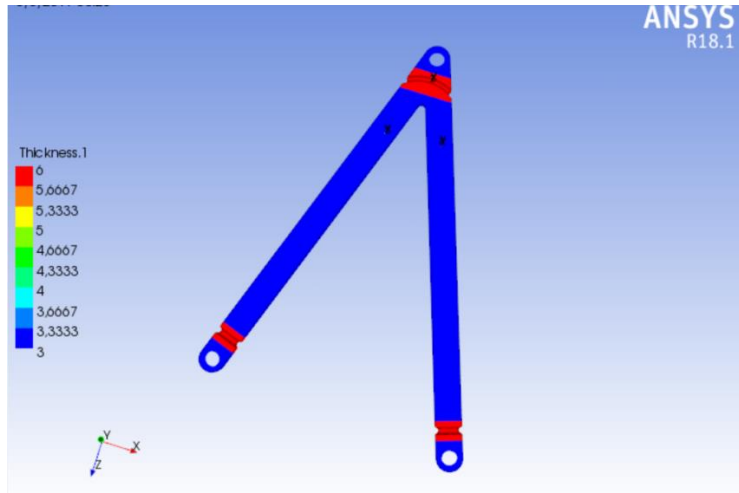
Εικόνα 32: Ορισμός Modelling Plies



Εικόνα 33: Ύνες παράλληλες στη διαμήκη διεύθυνση του αριστερού μέλους του ψαλιδιού



Εικόνα 34: Ύνες στην εγκάρσια διεύθυνση στο A arm bracket του ψαλιδιού, στην περιοχή της διαμόρφωσης



Εικόνα 35: Συνολική απεικόνιση του ψαλιδιού με τις διαφοροποιήσεις σε πάχος ανάλογα με την περιοχή

## 2.2 Προεπεξεργασία συμπαγούς γεωμετρίας (Solid Mechanical Preprocessing)

Για το εσωτερικό τμήμα του ψαλιδιού το οποίο όπως φαίνεται στην Εικόνα 23 αποτελείται από συμπαγή τμήματα αφρού PVC και brackets αλουμινίου, απαιτείται πάλι σύνθεση του μοντέλου με βάση τις ίδιες κατηγορίες συμπλήρωσης δεδομένων : Engineering Data, Geometry, Model.

### 2.2.1 Μηχανικές Ιδιότητες (Engineering Data)

#### 2.2.1.1 AL7075T6

Για τα brackets (ένθετα στηρίγματα), η επιλογή του υλικού γίνεται με βάση τους παρακάτω παράγοντες :

- Κατεργασιμότητα
- Διαθεσιμότητα
- Χαμηλή πυκνότητα
- Ικανές μηχανικές ιδιότητες

Το υλικό που πληροί τις παραπάνω προδιαγραφές και επιλέγεται για την κατασκευή των εν λόγω στηριγμάτων είναι το κράμα αλουμινίου αεροπορικού τύπου, με ονομασία AL-7075T6.

Το AL-7075T6 έχει την εξής σύσταση, σύμφωνα με την ASM (Aerospace Specification Metals Inc.)







Πίνακας 4: Σύσταση κράματος 7075T6

Συστατικό	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Other, each	Other, total	Si	Ti	Zn
Ποσοστό κατά μάζα	87.1 - 91.4	0.18 - 0.28	1.2 - 2	Max 0.5	2.1 - 2.9	Max 0.3	Max 0.05	Max 0.15	Max 0.4	Max 0.2	5.1 - 6.1

(Metals Handbook Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 1990)

Ο βασικός συμπαράγοντας στο κράμα αλουμινίου είναι ο ψευδάργυρος, του οποίου η αυξημένη πυκνότητα ( $\rho_{Zn}=7,14 \text{ g/cm}^3$ ) εξισορροπείται με τη χαμηλή πυκνότητα του μαγνησίου ( $\rho_{Mg}=1,738 \text{ g/cm}^3$ ). Έτσι προκύπτει ένα κράμα χαμηλής πυκνότητας ( $\rho_{7075T6}=2,804 \text{ g/cm}^3$ ) σε συνδυασμό με μηχανικές ιδιότητες συγκρίσιμες με πολλά ατσάλια (UTS=510-540 MPa, Yield Strength=430-480 MPa, και επιμήκυνση 5-11% στην αστοχία) . Η συμπλήρωση των ιδιοτήτων του στο ANSYS, απεικονίζεται στον Πίνακας 5: Ιδιότητες AL7075-T6 στο ANSYS.

Πίνακας 5: Ιδιότητες AL7075-T6 στο ANSYS

Properties of Outline Row 3: 7075t6				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	 
2	 Material Field Variables	Table		
3	 Density	2804	kg m <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
4	 Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
5	Derive from	Shear Mod...		
6	Young's Modulus	7,1554E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
7	Poisson's Ratio	0,33		<input type="checkbox"/>
8	Bulk Modulus	7,0151E+10	Pa	<input type="checkbox"/>
9	Shear Modulus	26900	MPa	<input type="checkbox"/>
10	 Steinberg Guinan Strength			<input type="checkbox"/>
11	Initial Yield Stress Y	4,2E+08	Pa	<input type="checkbox"/>
12	Maximum Yield Stress Ymax	8,1E+08	Pa	<input type="checkbox"/>
13	Hardening Constant B	965		<input type="checkbox"/>
14	Hardening Exponent n	0,1		<input type="checkbox"/>
15	Derivative dG/dP G'P	1,741		<input type="checkbox"/>
16	Derivative dG/dT G'T	-1,645E+07	Pa C <sup>-1</sup>	<input type="checkbox"/>
17	Derivative dY/dP Y'P	0,02738		<input type="checkbox"/>
18	Melting Temperature Tmelt	946.85	C	<input type="checkbox"/>

### 2.2.1.2 PVC Foam (60 kg/m<sup>3</sup>)

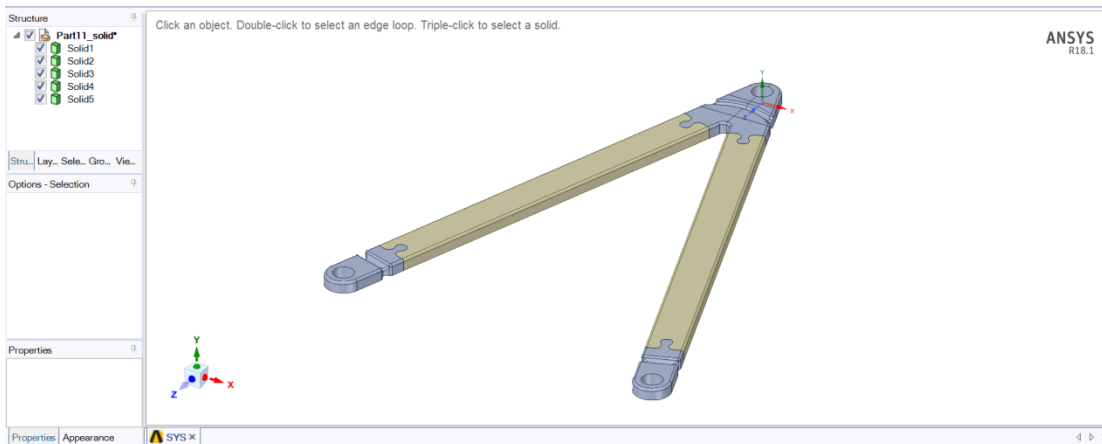
Όπως εξηγήθηκε στην Ενότητα 1.4, το εσωτερικό από τους βραχίονες του ψαλιδιού δεν παραλαμβάνει φορτίο, καθώς αυτό περνά σχεδόν αποκλειστικά στο ανθρακόνημα που το περιβάλλει. Επομένως η επιλογή του υλικού γίνεται με τα ίδια κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω για τα brackets, ωστόσο πλέον δεν υπάρχει αναγκαιότητα για ικανές μηχανικές ιδιότητες. Δεδομένου και του χαμηλού του κόστους, αλλά και της εύκολης διαθεσιμότητάς του, επιλέγεται ο αφρός PVC χαμηλής πυκνότητας, με  $\rho_{PVC}=60 \text{ kg/m}^3$

Πίνακας 6: Ιδιότητες αφρού PVC χαμηλής πυκνότητας στο ANSYS

Properties of Outline Row 5: PVC Foam (60 kg m <sup>-3</sup> )				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	60	kg m <sup>-3</sup>	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Mo...		
5	Young's Modulus	70	MPa	
6	Poisson's Ratio	0,3		
7	Bulk Modulus	5,8333E+07	Pa	
8	Shear Modulus	26,923	MPa	
9	Ply Type			
10	Type	Isotropic H...		

### 2.2.2 Γεωμετρία στο ANSYS (Geometry)

Η εισαγωγή της γεωμετρίας γίνεται από το CAD που δημιουργήθηκε στο SOLIDWORKS. Μετά την εισαγωγή της, η μορφή με την οποία εμφανίζεται στο ANSYS είναι η εξής.



Εικόνα 36: Μεταφορά συμπαγούς (solid) γεωμετρίας στο ANSYS

Όπως φαίνεται, αποτελείται και πάλι από πέντε σώματα, τα οποία ωστόσο αυτή τη φορά είναι στερεά και όχι με μορφή κελύφους.

### 2.2.3 Μοντέλο (Model)

#### 2.2.3.1 Ορισμός στοιχείων για τη solid γεωμετρία

Το συμπαγές εσωτερικό του ψαλιδιού χωρίζεται σε πέντε τμήματα κατ'αντιστοιχία με τη διαίρεση του κελύφους παραπάνω. Τα τμήματα αυτά είναι τα BRS (Bracket right solid), RS (Member Right Solid), AarmS (A arm bracket Solid), LS (Member Left Solid), BLS (Bracket left Solid).

Η αντιστοίχιση των υλικών που γίνεται, απεικονίζεται στον Πίνακα 7: Αντιστοίχιση υλικών στο solid μοντέλο.

Πίνακας 7: Αντιστοίχιση υλικών στο solid μοντέλο

Τμήμα της συμπαγούς εσωτερικής γεωμετρίας	Υλικό
BRS, AarmS, BLS	AL7075T6
RS, LS	PVC Foam

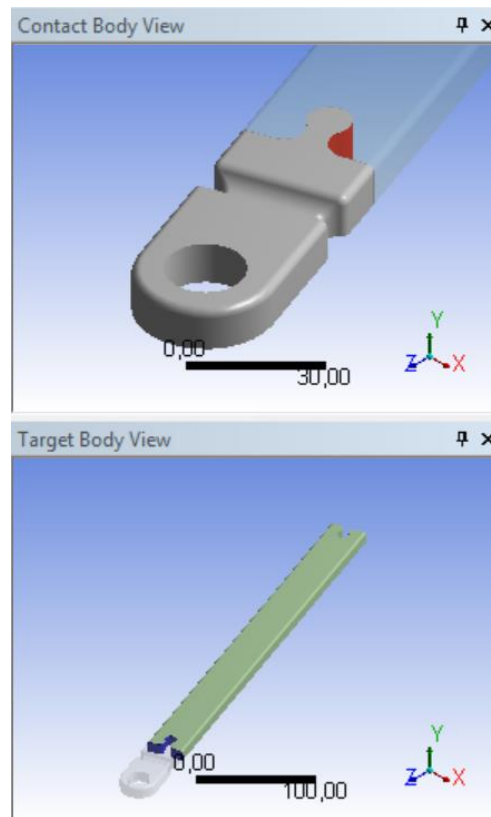
Το πάχος δε χρειάζεται να οριστεί γιατί οι διαστάσεις του στερεού προκύπτουν από το σχέδιο. Τελικά, οι ιδιότητες που προέκυψαν παρουσιάζονται στην Εικόνα 37.

Properties	
<input type="checkbox"/> Volume	2,8437e+005 mm <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Mass	0,22133 kg

Εικόνα 37 : Όγκος και μάζα συμπαγούς μοντέλου

### 2.2.3.2 Ορισμός επαφών (Contacts)

Παρά την ύπαρξη κόλλας μεταξύ των στερεών σωμάτων, γίνεται η παραδοχή μη ύπαρξής της, σαν παράγοντας ασφάλειας για το σχεδιασμό και τη μοντελοποίηση του εν λόγω εξαρτήματος. Επομένως, η συνοριακή συνθήκη επαφής που ορίζεται για τα σώματα είναι η συνθήκη frictionless, σύμφωνα με την οποία επιτρέπεται η ολίσθηση (sliding) του ενός σώματος πάνω στο άλλο, αλλά δεν επιτρέπεται η διείσδυση (penetration) ανάμεσά τους.



Εικόνα 38 : Με κόκκινο και με μπλε απεικονίζονται οι περιοχές του ψαλιδιού στις οποίες εφαρμόζεται η συνθήκη επαφής frictionless

### 2.2.3.2 Διακριτοποίηση Πλέγμα–Mesh

Το πλέγμα των στερεών σωμάτων, αναφορικά με τις global ρυθμίσεις του, θα υπακούει στις ίδιες αρχές με το πλέγμα των κελυφοειδών σωμάτων. Αυτό σημαίνει ότι και πάλι το size function ορίζεται να είναι το proximity and curvature, ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση το ελάχιστο μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου είναι 0,3 mm αντί για 0,1 mm, δεδομένης της μικρότερης απαίτησης για ακρίβεια εφόσον πλέον μελετώνται ισότροπα στερεά σώματα.

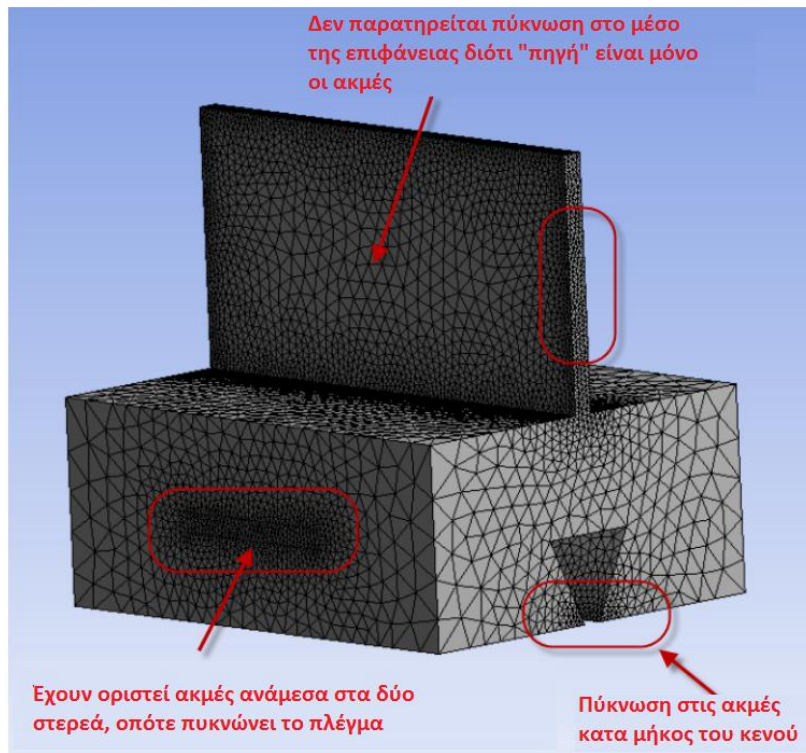
Συγκεντρωτικά :

Πίνακας 8: Ορισμός μεταβλητών διαμόρφωσης πλέγματος

<b>Relevance</b>	<b>20</b>
<b>Size Function</b>	Proximity and Curvature
<b>Proximity size function sources</b>	Faces and edges
<b>Min Size</b>	0.30 mm
<b>Proximity min size</b>	0.10 mm
<b>Max Face Size</b>	10.00 mm
<b>Max Tet Size</b>	10.00 mm
<b>Growth Rate</b>	Default (1.75160)

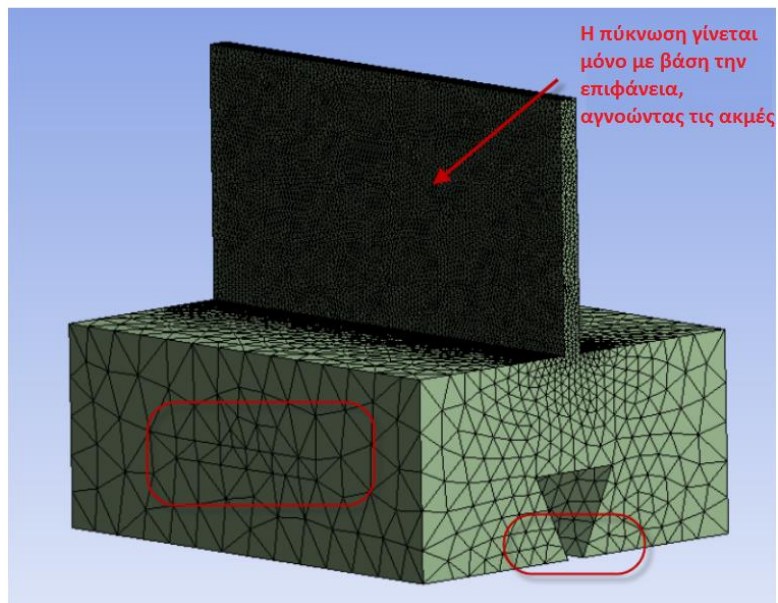
Για την επιλεγμένη συνάρτηση διαστασιολόγησης πλέγματος (size function), ορίζεται όπως φαίνεται και από τον πίνακα (Πίνακας 8), η «πηγή» με βάση την οποία ορίζεται η συνάρτηση να είναι οι επιφάνειες και οι ακμές. Οι διαφορές μεταξύ των επιλογών απεικονίζονται σχηματικά παρακάτω.

**Proximity Size Function Sources = Edges**



Εικόνα 39: Πηγή size function - ακμές

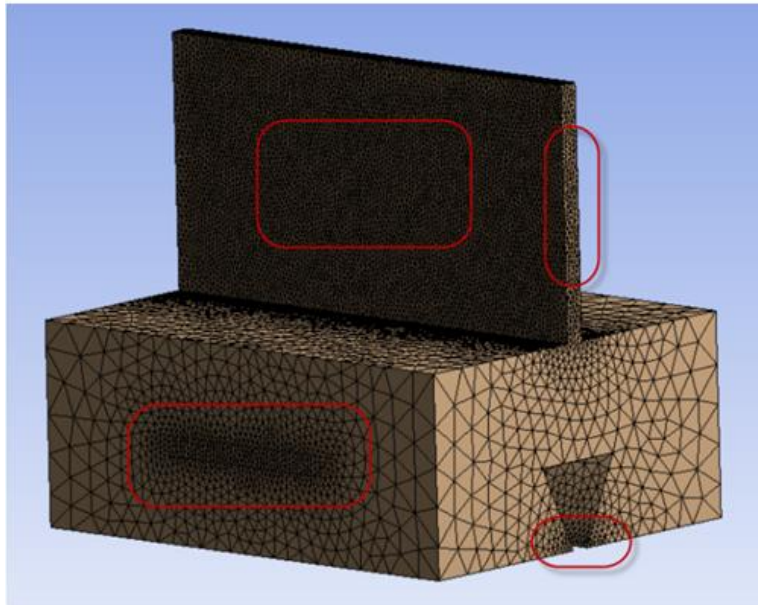
**Proximity Size Function Sources = Faces**



Εικόνα 40: Πηγή size function – εγγύτητα επιφανειών



Proximity Size Function Sources = Faces and Edges



Εικόνα 41: Πηγή size function - συνδυασμός

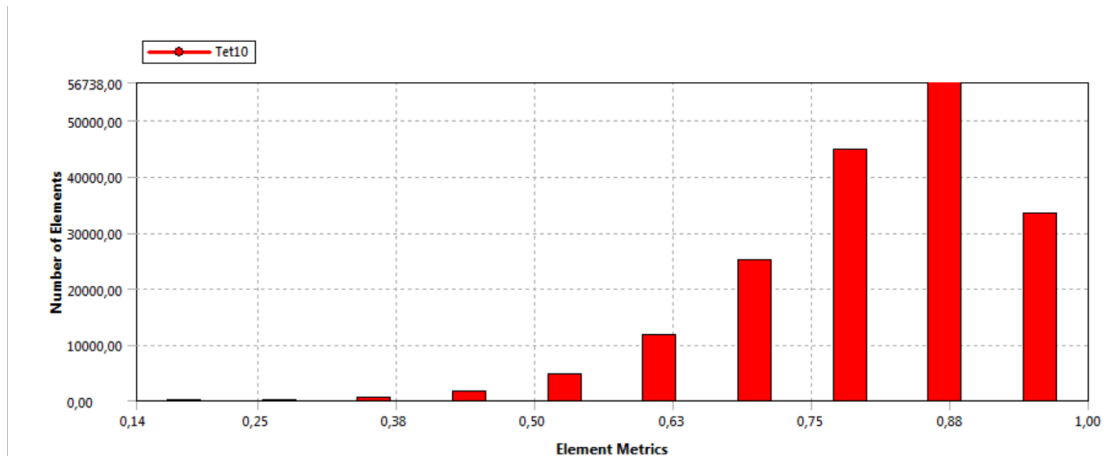
Στο συνδυασμό των δύο μεθόδων επομένως παράγεται πλέγμα ανώτερης ποιότητας για το μοντέλο του ψαλιδιού που εξετάζεται, μιας και συναντάται η περίπτωση στερεών σωμάτων ενωμένων μεταξύ τους (οπότε προκρίνεται η μέθοδος edges) αλλά απαιτείται να υπάρχει πυκνό πλέγμα στις επιφάνειες των στερεών σωμάτων, μιας και μέσω αυτών εφαρμόζονται τα φορτία στο ανθρακόνημα.

Στις εξειδικευμένες ρυθμίσεις πλέγματος (Local Mesh Controls), απλά ορίζεται το πλέγμα να είναι πυκνότερο στις υποδοχές των ball joints του ψαλιδιού, σημεία στα οποία γίνεται η εφαρμογή των δυνάμεων και των στηρίξεων, οπότε η πύκνωση ευνοεί την καλύτερη διάδοση των παραμορφώσεων (και των τάσεων που προκύπτουν), από στοιχείο σε στοιχείο.

Αναφορικά με την ποιότητα του πλέγματος, ισχύει ο τύπος που αναφέρθηκε στην ενότητα ACP (Σχέση (22)). Τα στοιχεία ποιότητας του πλέγματος είναι τα εξής.

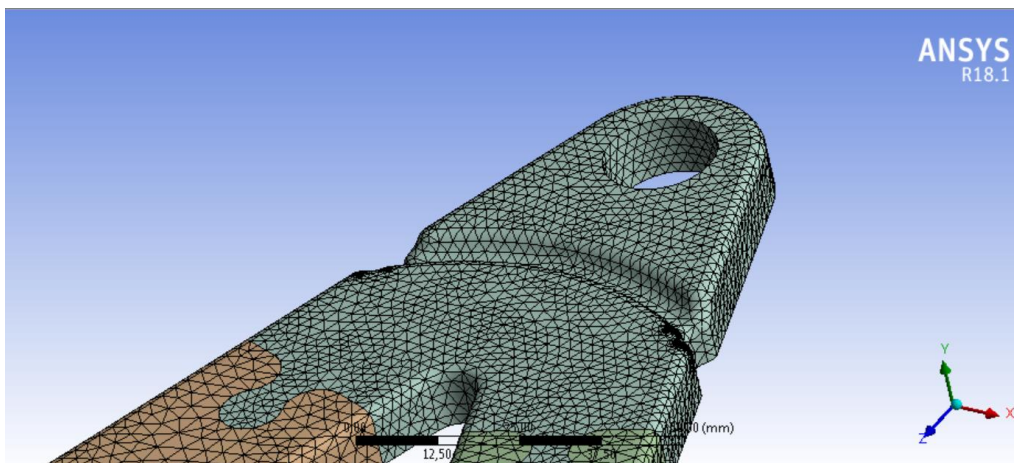
Πίνακας 9: Στοιχεία ποιότητας πλέγματος

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
<input type="checkbox"/> Target Quality	5,e-004
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0,14014
<input type="checkbox"/> Max	0,99994
<input type="checkbox"/> Average	0,81073
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,11359

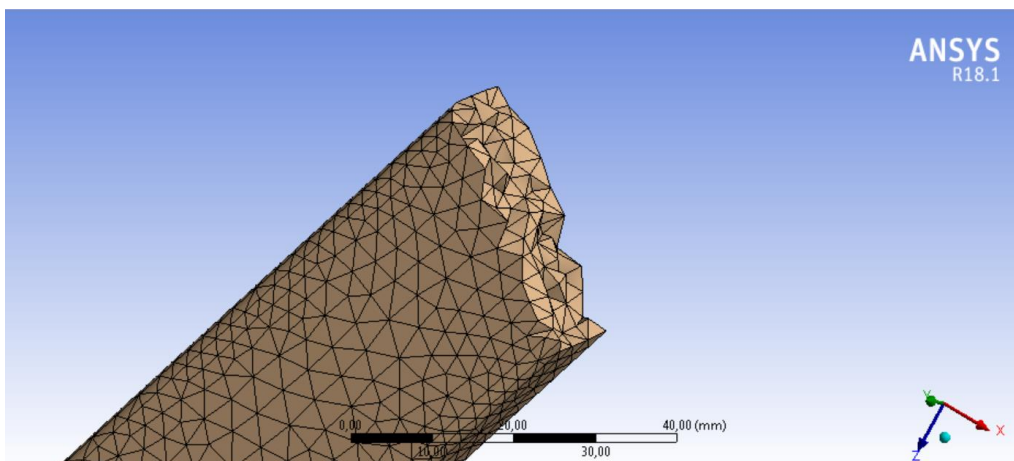


Διάγραμμα 3 : Διαγραμματική απεικόνιση ποιότητας πλέγματος συμπαγούς γεωμετρίας

Παράγεται λοιπόν πλέγμα υψηλής ποιότητας αποτελούμενο εξ' ολοκλήρου από τετραεδρικά στοιχεία (Tet10), με μέση τιμή 0,81. Η τιμή αυτή το καθιστά παραπάνω από αποδεκτό για τους σκοπούς της μελέτης, δεδομένου ότι εξακολουθεί να είναι πλέγμα ισότροπων στερεών σωμάτων, οπότε η ακραία πύκνωσή του θα ήταν άσκοπη δαπάνη υπολογιστικών πόρων.



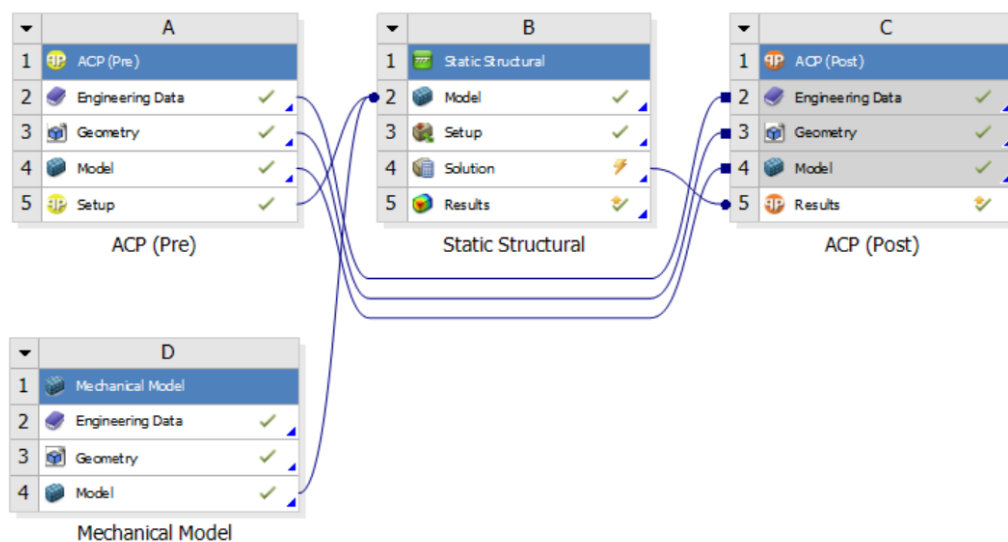
Εικόνα 42: Συνολική άποψη πλέγματος συμπαγούς γεωμετρίας



Εικόνα 43: Πλέγμα συμπαγούς γεωμετρίας σε τρισδιάστατη τομή

### 2.3 Σύνθεση επιμέρους τμημάτων γεωμετρίας για την τελική επίλυση

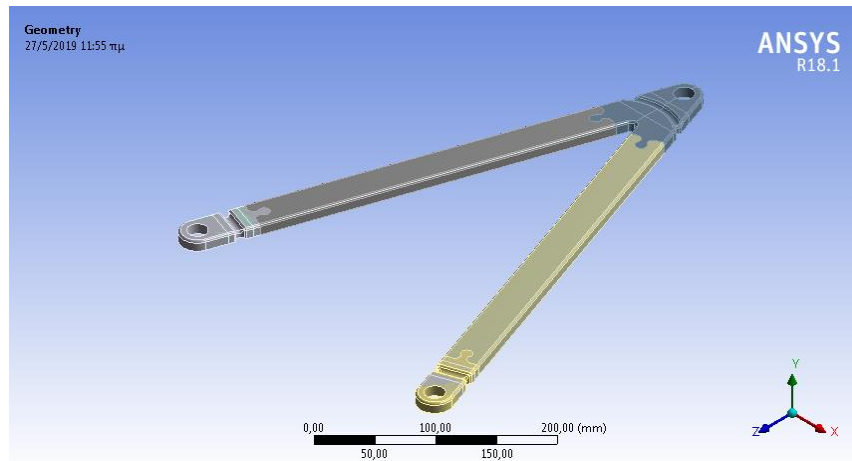
Έπειτα από την προεπεξεργασία τόσο της κελυφοειδούς γεωμετρίας με το ανθρακόνημα (Ενότητα 2.1 Κελυφοειδής γεωμετρία (Shell geometry- ACP), όσο και της συμπαγούς γεωμετρίας με το 7075T6 και τον αφρό PVC (Ενότητα 2.2 Προεπεξεργασία συμπαγούς γεωμετρίας (Solid Mechanical Preprocessing), ακολουθεί η σύνθεση των δύο γεωμετριών (Εικόνα 44: Πεδία A και D), με την κατάλληλη εισαγωγή συνοριακών συνθηκών (Εικόνα 44: Πεδίο B) για την επίλυση του μοντέλου. Η απεικόνιση της σύνθεσης των δυο γεωμετριών και της επιβολής των συνοριακών συνθηκών όπως παρουσιάζεται στο περιβάλλον επισκόπησης του ANSYS, Project Schematic, δίνεται στην Εικόνα 44. Τα τελικά αποτελέσματα προεπεξεργασίας για τα εισάγονται στο Static Structural και δεν απαιτείται εκ νέου ορισμός γεωμετρίας (Geometry) και μηχανικών ιδιοτήτων (Engineering Data).



Εικόνα 44: Απεικόνιση σύνθεσης συνολικού μοντέλου

Στην Εικόνα 45, παρουσιάζεται το σύνολο του σύνθετου μοντέλου. Εξωτερικά, δεν φαίνεται η παραμικρή διαφορά σε σχέση με τις απεικονίσεις για τα επιμέρους τμήματα. Αυτό μοιάζει λίγο παράδοξο, δεδομένης της προσθήκης πάχους στην κελυφοειδή γεωμετρία μέσω των διαδοχικών στρώσεων ανθρακονήματος. Ωστόσο, το πάχος αυτό δε φαίνεται οπτικά γιατί δεν έχει δημιουργηθεί solid model για το κέλυφος.

Η δημιουργία ενός solid model για το κέλυφος θα ήταν απαραίτητη στην περίπτωση εφαρμογής τάσεων στην επιφάνεια που ορίζεται κάθετα στη διεύθυνση τοποθέτησης των στρώσεων, και γενικότερα στην περίπτωση εφαρμογής τάσεων, μετατοπίσεων και γενικότερα συνοριακών συνθηκών, στο ίδιο το ανθρακόνημα. Στο μοντέλο που εξετάζεται ωστόσο, το φορτίο μεταφέρεται από το αλουμίνιο στο ανθρακόνημα. Για λόγους ελάφρυνσης του προσομοιώματος, αλλά και επειδή το extrude του ACP δεν είναι αξιόπιστο (διογκωμένα στοιχεία πέφτουν το ένα πάνω στο άλλο), γίνεται μεταφορά shell δεδομένων, τα οποία έχουν όλες τις μηχανικές ιδιότητες, αλλά δεν κάνουν την οπτική απεικόνιση ακριβή.

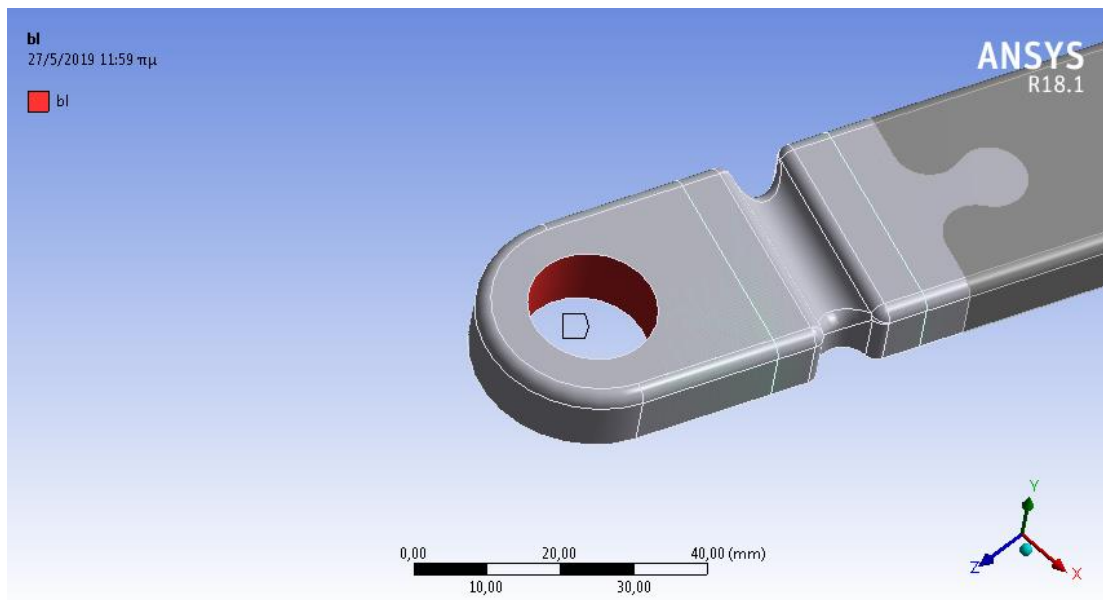


Εικόνα 45 : Απεικόνιση σύνθετης γεωμετρίας

Τα δύο υπομοντέλα λοιπόν, έχουν εισαχθεί το ένα μέσα στο άλλο, με κοινό σύστημα συντεταγμένων, το οποίο προκύπτει από το CAD στο περιβάλλον εργασίας.

### 2.3.1 Απομακρυσμένα σημεία (Remote Points)

Η προσομοίωση ενός ψαλιδιού αναφορικά με τους σφαιρικούς συνδέσμους (spherical-ball joints) που το προσαρτούν στο chassis και στο upright αντίστοιχα , γίνεται με τον ορισμό απομακρυσμένων σημείων στις υποδοχές τους.



Εικόνα 46: Ορισμός απομακρυσμένου σημείου – remote point

Το βέλος εντός της κυλινδρικής υποδοχής (Εικόνα 46), ορίζει ένα απομακρυσμένο σημείο (remote point) που ισαπέχει από την κυλινδρική περιφέρεια της υποδοχής, και υψομετρικά βρίσκεται στο κέντρο της απόστασης μεταξύ της κατώτερης και ανώτερης επιφάνειας του ψαλιδιού κατά τον άξονα  $y$ . Επίσης, εισάγεται η επιλογή

deformable point (Εικόνα 47), ώστε να καθορίζεται ως παραμορφώσιμο σώμα και η περιφέρεια που επισημαίνεται με κόκκινο χρώμα.

Details of "bl"	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Coordinate	-146,07 mm
<input type="checkbox"/> Y Coordinate	5, mm
<input type="checkbox"/> Z Coordinate	420,06 mm
Location	Click to Change
- Definition	
Suppressed	No
Behavior	Deformable
Pinball Region	All

Εικόνα 47: Λεπτομέρειες απομακρυσμένου σημείου

Με βάση τα παραπάνω θα οριστούν οι συνοριακές συνθήκες για σφαιρική σύνδεση (spherical joint), σε επόμενη ενότητα.

### 2.3.2 Πλέγμα διακριτοποίησης

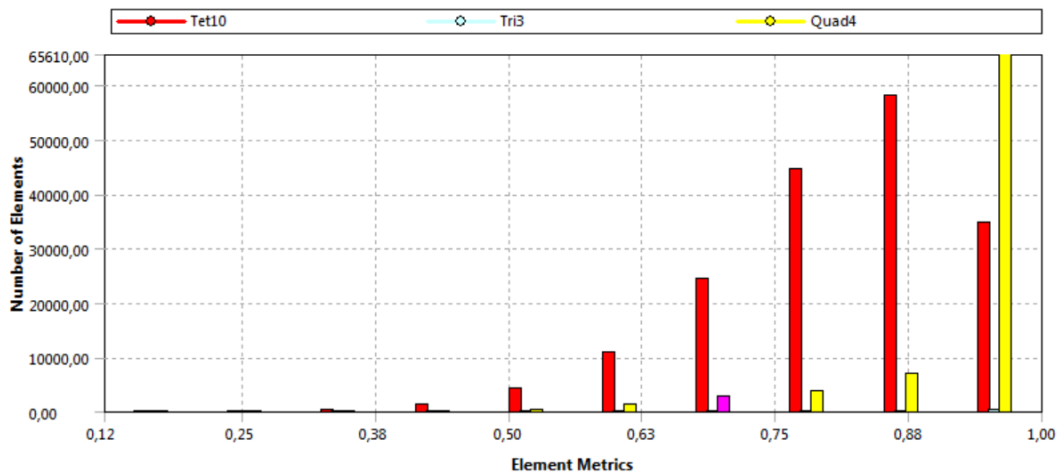
Το πλέγμα διακριτοποίησης είναι σύνθεση των πλεγμάτων των δύο επιμέρους τμημάτων που συναποτελούν το σύνθετο μοντέλο. Αποτελείται από

- 342056 κόμβους
- 474332 πεπερασμένα στοιχεία
- 223288 πεπερασμένα στοιχεία επαφών

Τα στοιχεία ποιότητας για το πλέγμα παρατίθενται στους πίνακες και τα διαγράμματα παρακάτω

Πίνακας 10: Ποιότητα στοιχείων

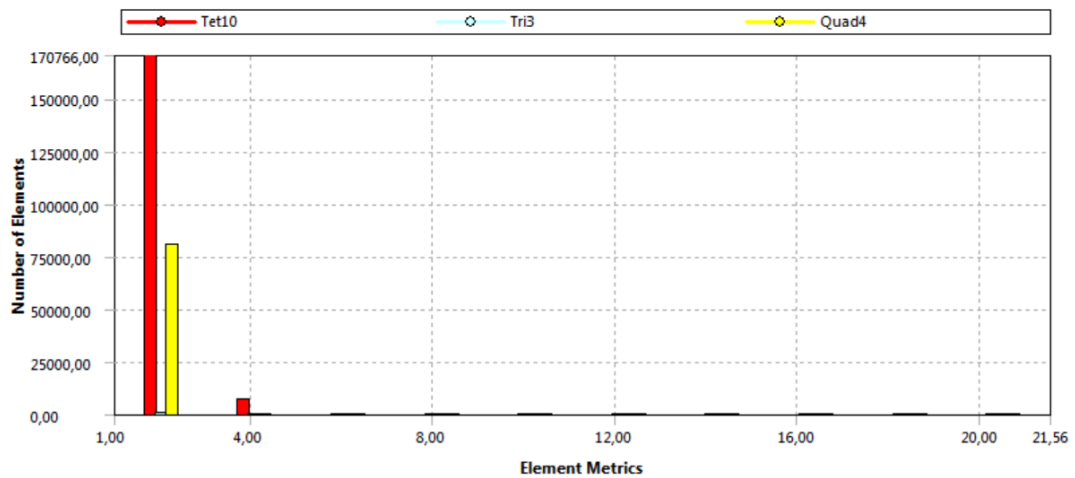
Ποιότητα στοιχείων - Element Quality	
Min	0,14014
Max	0,99994
Μέσος όρος	0,8562
Τυπική απόκλιση	0,12617



Διάγραμμα 4: Ποιότητα στοιχείων

Πίνακας 11: Aspect Ratio

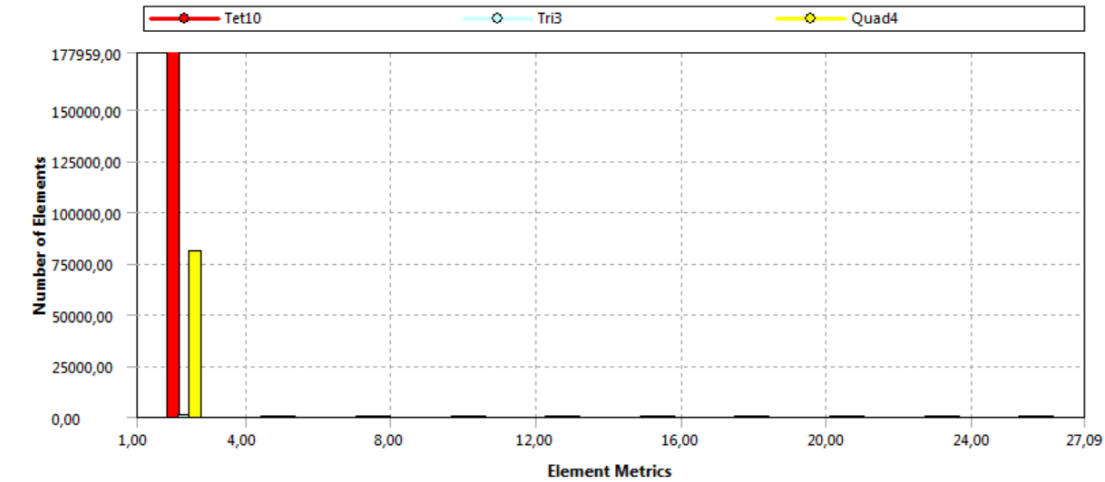
Ποιότητα στοιχείων - Aspect Ratio	
Min	1
Max	21,558
Μέσος όρος	1,662
Τυπική απόκλιση	0,61248



Διάγραμμα 5: Aspect Ratio

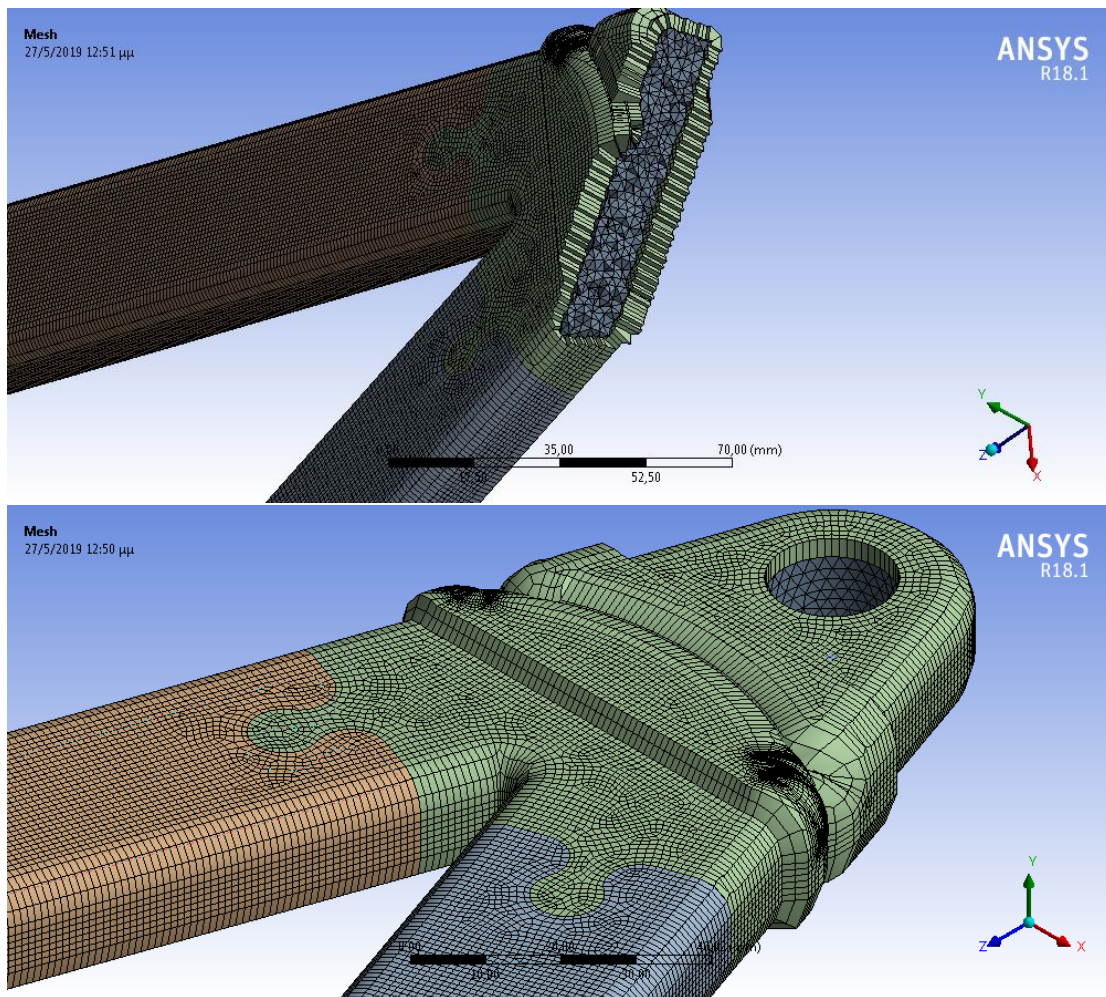
Πίνακας 12: Jacobian ratio

Ποιότητα στοιχείων - Jacobian Ratio	
Min	1
Max	27,087
Μέσος όρος	1,04
Τυπική απόκλιση	0,17472



Διάγραμμα 6: Jacobian ratio

Παρατηρείται και από τα τρία παραπάνω χαρακτηριστικά ποιότητας πλέγματος, ότι το συνολικό πλέγμα της προσομοίωσης είναι κατάλληλο για υπολογισμούς υψηλής ακρίβειας, σε σχέση με τους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους. (βλ. και Παράρτημα)



Εικόνα 48: Πλέγμα ψαλιδιού εξωτερικά και σε τομή.

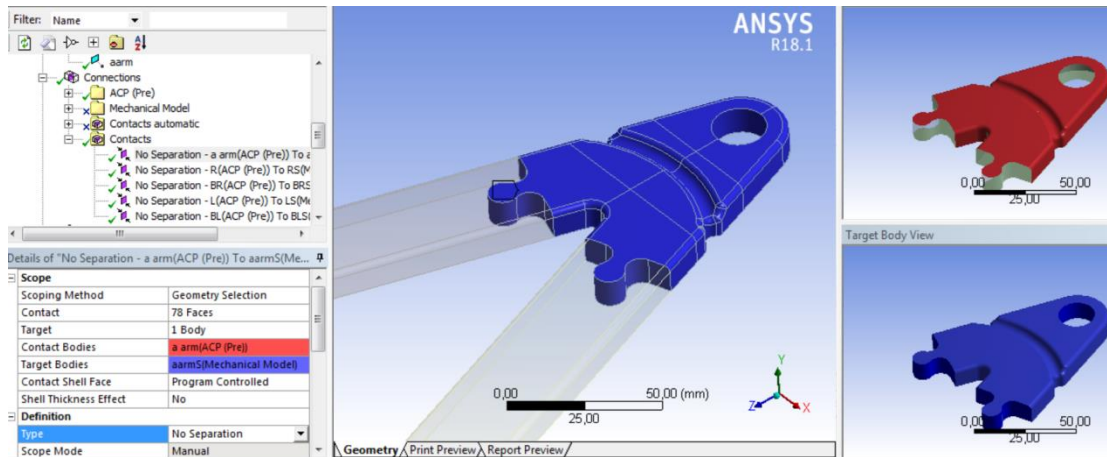
### 2.3.3 Συνοριακές συνθήκες

#### 2.3.3.1 Ορισμός Διεπαφών (Contacts – Connections)

Ο ορισμός των διεπαφών που γίνεται σε αυτή την ενότητα αφορά τις επαφές μεταξύ του κελύφους και των solids. Το ανθρακονημάτινο κέλυφος είναι κολλημένο πάνω στο αλουμίνιο αλλά και στον αφρό στο πραγματικό ψαλίδι, ωστόσο για την προσομοίωση, σαν παράγοντας ασφαλείας, θα επιτραπεί η ολίσθηση του κελύφους πάνω στο εσωτερικό και αντίστροφα.

Κατ'αυτόν τον τρόπο θα τεθεί υπό πρόβλεψη η περίπτωση αστοχίας της κόλλας, και θα εμφανιστούν τάσεις μέσω της διαμόρφωσης η οποία, στόχο έχει τη μηχανική συγκράτηση του ανθρακονημάτος στο αλουμίνιο.





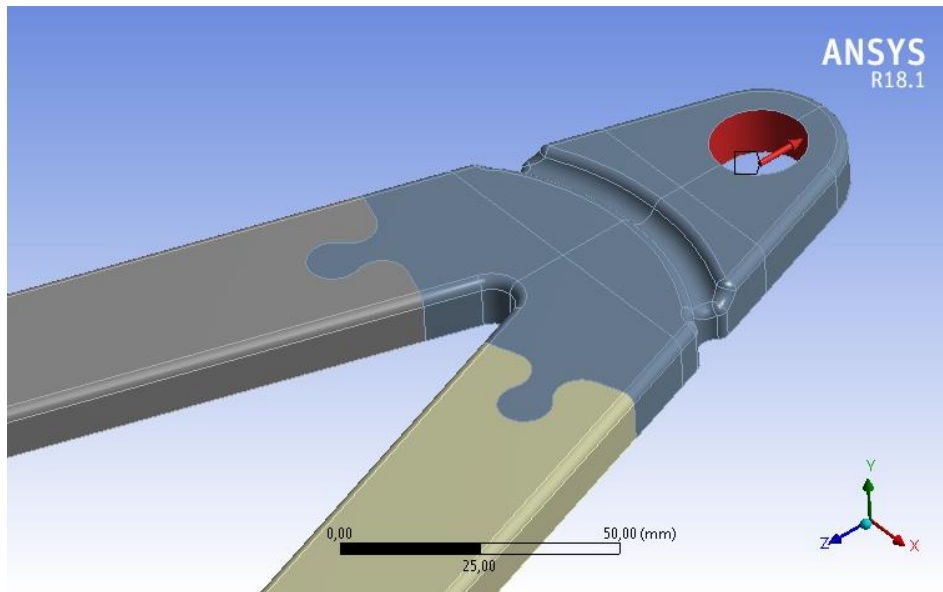
Εικόνα 49: Ορισμός συνοριακής συνθήκης *No Separation* για την επιφάνεια διεπαφής μεταξύ εσωτερικών στερεών και ανθρακονήματος

Η ίδια συνοριακή συνθήκη ορίζεται για καθένα από τα πέντε επιμέρους εσωτερικά στερεά του ψαλιδιού.

### 2.3.3.2 Ορισμός δυνάμεων, στηρίξεων και μετατοπίσεων

#### Ορισμός δυνάμεων :

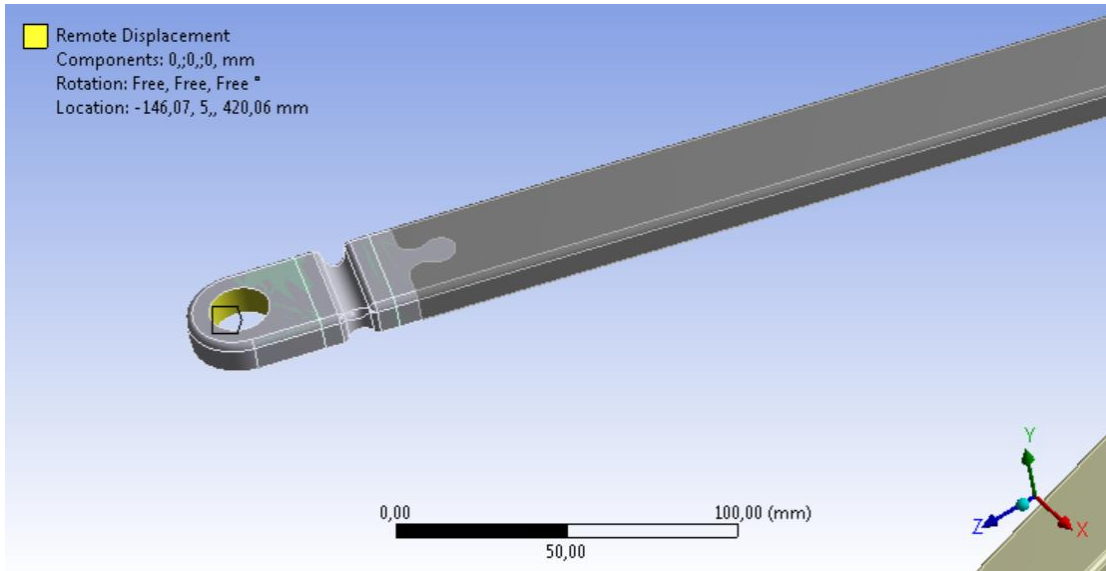
Στο remote point του A arm bracket, εισάγεται δύναμη «remote force» ίση με  $-10000\text{ N}$  στον άξονα  $z$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 50. (βλ. και ενότητα 1.4.4 Μηχανική του ψαλιδιού)



Εικόνα 50: Ορισμός δύναμης που ασκείται στο ψαλίδι

#### Ορισμός μετατοπίσεων

Για την προσομοίωση του σφαιρικού συνδέσμου όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ορίζονται απομακρυσμένα σημεία στο κέντρο του γεωμετρικού τόπου που ορίζεται από το εσωτερικό του κυλίνδρου των υποδοχών των (spherical joints). Στα remote points των δύο κάτω άκρων του ψαλιδιού όλες οι περιστροφικές κινήσεις (rotation  $x$ , rotation  $y$ , rotation  $z$ ) λαμβάνονται ως ελεύθερες, χωρίς καμία δυνατότητα μεταφορικής κίνησης.



Εικόνα 51: Ορισμός μετατοπίσεων

### 3. Επίλυση προσομοίωσης

Από τον επιλυτή – solver του ANSYS, απαιτείται η εξαγωγή δεδομένων σε συγκεκριμένη μορφή. Φυσικά, όπως έχει αναφερθεί, η επίλυση αφορά μόνο τις μετακινήσεις των κόμβων των πεπερασμένων στοιχείων, ανάλογα με τις συνοριακές συνθήκες.

#### 3.1 Ρυθμίσεις επιλυτή

Ο solver ορίζεται να επιτελέσει την προσομοίωση σε ένα μόλις βήμα, καθώς η μελέτη είναι στατική και όχι δυναμική, λαμβάνοντας υπόψη μόνο την ακραία κατάσταση του μέγιστου φορτίου. Εάν ήταν στους σκοπούς της μελέτης και η εξέλιξη των φαινομένων μετά την αρχική αστοχία του υλικού ή αν υπήρχαν δεδομένα εξέλιξης της φόρτισης με το χρόνο, θα γινόταν επιλογή μη γραμμικής ή δυναμικής ανάλυσης σε περισσότερα στάδια.

#### 3.2 Ζητούμενα επίλυσης

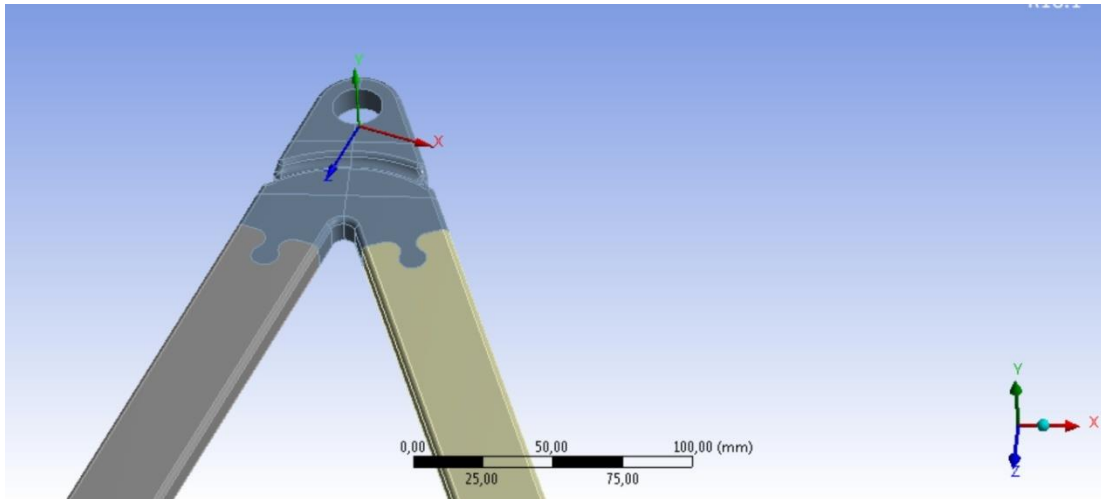
Τα ζητούμενα από την επίλυση είναι τα παρακάτω

##### 3.2.1 Ζητούμενα αναφορικά με το σύνθετο μοντέλο

- **Total deformation** : Η ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των απόλυτων παραμορφώσεων σε  $x$ ,  $y$ ,  $z$  άξονες . Μονάδα μέτρησης [ $mm$ ]
- **Directional deformation**: Η απόλυτη τιμή της παραμόρφωσης στον άξονα  $z$ . Μονάδα μέτρησης:  $mm$
- **Force Reaction**: Η δύναμη που ασκείται από το ball joint στο bracket ώστε να επιτευχθεί η δοθείσα συνοριακή συνθήκη της μηδενικής μεταφορικής μετατόπισης. Μονάδα μετρησης:  $N$

##### 3.2.2 Ζητούμενα αναφορικά με το κελυφοειδές μοντέλο του ανθρακονήματος

- **Maximum Principal Stress**: Η κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης που εμφανίζεται στο ανθρακόνημα. Μονάδα μέτρησης:  $MPa$
- **Maximum Principal Elastic Strain**: Η κατανομή της μέγιστης κύριας ποσοστιαίας παραμόρφωσης στο ανθρακόνημα. Μονάδα μέτρησης:  $mm/mm$
- **Composite Failure Tool**: Δεδομένης της σύστασης του εξωτερικού περιβλήματος από σύνθετα υλικά, εισάγεται προς αξιολόγηση το κριτήριο αστοχίας Tsai–Hill για κάθε πεπερασμένο στοιχείο, όπως και το κριτήριο Tsai–Wu (λόγω της υποβολής του ψαλιδιού σε θλιπτικό φορτίο). Σύμφωνα με τις αρχές που δόθηκαν στην ενότητα 1.5.2 Κριτήρια αστοχίας σύνθετων, πολύστρωτων υλικών, εξάγεται συντελεστής ασφαλείας  $FoS$  για κάθε πεπερασμένο στοιχείο. Μονάδα μέτρησης: Αδιάστατο
- **L-Directional Deformation**: Ορίζεται νέο σύστημα συντεταγμένων για να καταγραφεί με ακρίβεια η παραμόρφωση σε κάθε σκέλος του ψαλιδιού. Ο διαμήκης άξονας είναι πλέον παράλληλος στο αριστερό σκέλος του ψαλιδιού, περιστρέφεται δηλαδή το σύστημα συντεταγμένων κατά το ήμισυ της γωνίας μεταξύ των σκελών, όπως αυτή ορίστηκε από το CAD. Η περιστροφή γίνεται κατά  $19,175^\circ$ . Ζητείται η διαμήκης παραμόρφωση στον περιστραμμένο πλεον,  $z$  άξονα. Μονάδα μέτρησης:  $mm$



Εικόνα 52: Ορισμός νέου συστήματος συντεταγμένων για το αριστερό σκέλος

- **R- Directional Deformation:** Αντίστοιχα με το παραπάνω, για το δεξί σκέλος αυτή τη φορά, με νέο σύστημα συντεταγμένων. Μονάδα μέτρησης: *mm*
- **Shear Stress P1L1:** Δεδομένης της εφαρμογής κόλλας στο σημείο, αξίζει να ελεγχθεί η διατμητική τάση που αναπτύσσεται μεταξύ εσωτερικών στερεών και πρώτης στρώσης. Μονάδα μέτρησης: *MPa*
- **Interlaminar Shear Stress P2L1:** Η διαστρωματική τάση που αναπτύσσεται μεταξύ πρώτης και δεύτερης στρώσης. Το μέγεθος αυτό βοηθάει στη διερεύνηση του ενδεχομένου αστοχίας του σύνθετου αν ξεπεραστεί η τιμή αντοχής σε διάτμηση της εποξικής μήτρας. Μονάδα μέτρησης: *MPa*
- **Interlaminar Shear Stress UD – Woven:** Η διαστρωματική διατμητική τάση που αναπτύσσεται μεταξύ μονοδιευθυντικού υφάσματος και εξωτερικού περιβλήματος πλεκτού υφάσματος. Μονάδα μέτρησης: *MPa*

### 3.2.3 Ζητούμενα αναφορικά με το εσωτερικό solid τμήμα του συνδυασμένου μοντέλου

- **Maximum Principal Stress**
- **Maximum Principal Strain**
- **L-Directional Deformation**
- **R-Directional Deformation**

Τα παραπάνω ζητούμενα έχουν αναλυθεί για το shell μοντέλο, οπότε εδώ γίνεται απλή αναφορά τους.

Εφόσον έχει οριστεί πλέον επαρκώς το μοντέλο, το επόμενο βήμα είναι η παρουσίαση και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, αλλά και της αποδοτικότητας και ορθότητας της διαδικασίας επίλυσης

Ενδεικτικές κατανομές όλων των παραπάνω μεγεθών, τόσο για το κέλυφος, όσο και για τα εσωτερικά στερεά, εμφανίζονται στο παράρτημα.

## 4. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

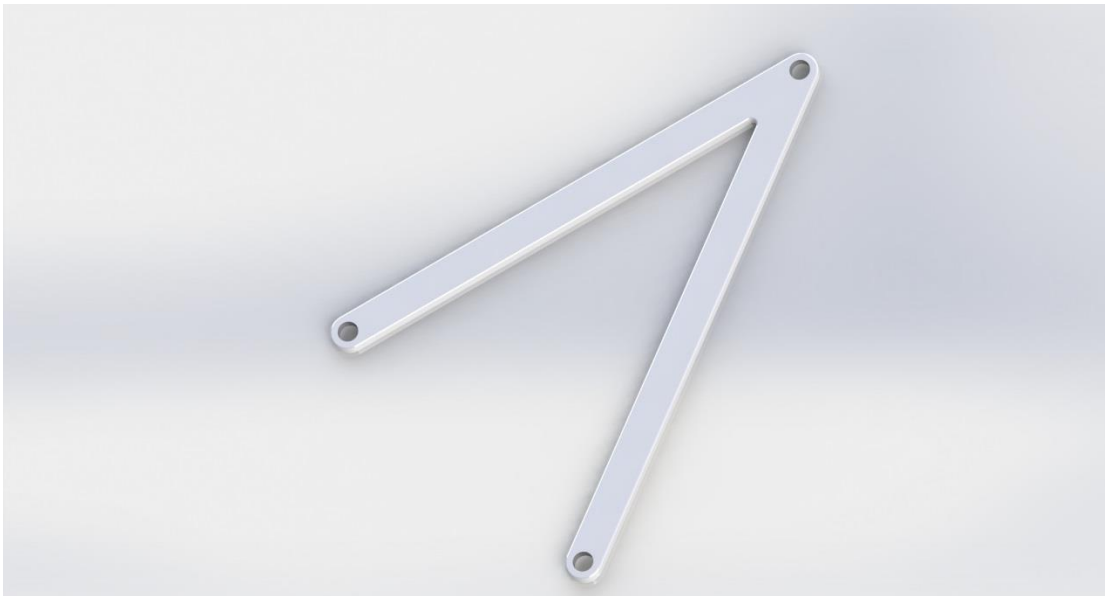
Η βάση της βελτιστοποίησης του ψαλιδιού διακρίνεται στα παρακάτω επιμέρους ζητήματα προς λήψη απόφασης:

- Σχήμα διαμόρφωσης
- Βαθμός κάλυψης του ψαλιδιού από ανθρακόνημα
- Αλληλουχία στρώσεων (Lamination) του ψαλιδιού.

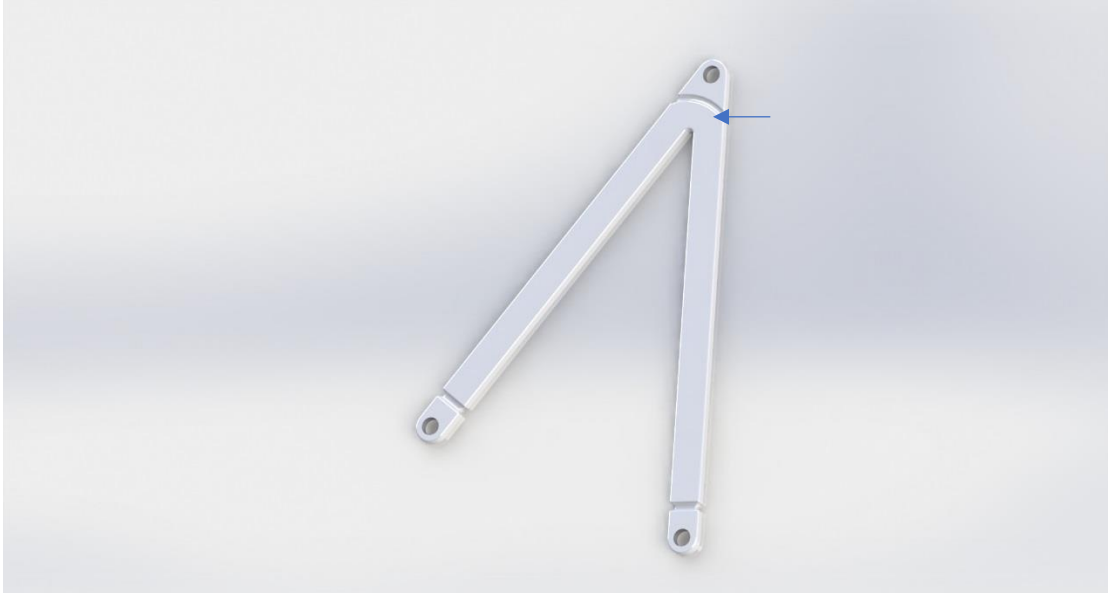
### 4.1 Σχήμα διαμόρφωσης

Οι επιλογές στο σχήμα της διαμόρφωσης είναι η απουσία διαμόρφωσης (Εικόνα 53) , η διαμόρφωση τύπου Λ (Εικόνα 54) και η διαμόρφωση τύπου Ι (Εικόνα 55). Οι επιλογές αυτές στηρίζονται στην εξής υπόθεση. Αν αστοχήσει η κόλλα ανάμεσα στο ανθρακόνημα και στο αλουμίνιο, πρέπει να υπάρχει μια μηχανική στήριξη του ανθρακονήματος στο αλουμίνιο, με τη μορφή διαμόρφωσης – εσοχής πάνω σε αυτό. Η διαμόρφωση αυτή ασκεί ορθά και διατμητικά φορτία στο ανθρακόνημα που θέλει να διαφύγει από την περιοχή της, με αποτέλεσμα η μετακίνηση αυτού να περιορίζεται και αντίστοιχα να περιορίζεται και η αξονική παραμόρφωση ολόκληρου του ψαλιδιού.

Για να γίνει σωστά η σύγκριση απαιτείται όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες του μοντέλου να παραμείνουν σταθεροί. Έτσι, επιλέγεται μία ασφαλής αλληλουχία στρώσεων που διατηρείται για τα δύο μοντέλα με τη διαμόρφωση, και μία παρόμοια για το μοντέλο χωρίς τη διαμόρφωση.



Εικόνα 53: Ψαλίδι χωρίς διαμόρφωση



Εικόνα 54: Ψαλίδι με διαμόρφωση τύπου Λ



Εικόνα 55: Διαμόρφωση τύπου I

Η διαστρωμάτωση που επιλέγεται είναι η εξής.

Για την περίπτωση χωρίς διαμόρφωση **(10+2)**, χρησιμοποιούνται 10 στρώσεις μονοδιευθυντικό ανθρακόνημα στο διαμήκη άξονα του κάθε σκέλους του ψαλιδιού, και 2 στρώσεις πλεκτό (woven) εξωτερικά.

Για την περίπτωση με τη διαμόρφωση τύπου Λ **(8-4Λ)**, χρησιμοποιούνται 8 στρώσεις μονοδιευθυντικού UD ανθρακονήματος και 4 στρώσεις πλεκτού woven ανθρακονήματος 2x2, σε κάθε διαμόρφωση.

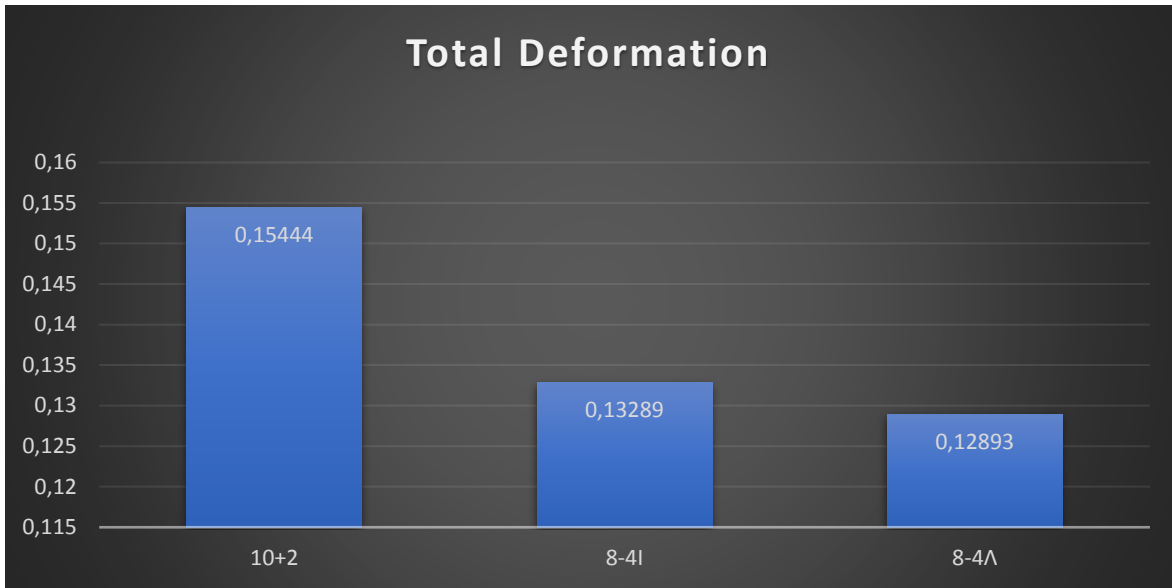
Η ίδια διαστρωμάτωση γίνεται και για τη διαμόρφωση τύπου I **(8-4I)**.

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι τα εξής, για εφελκυσμό και θλίψη. Οι βέλτιστες τιμές των μεγεθών επισημαίνονται με πράσινο χρώμα.

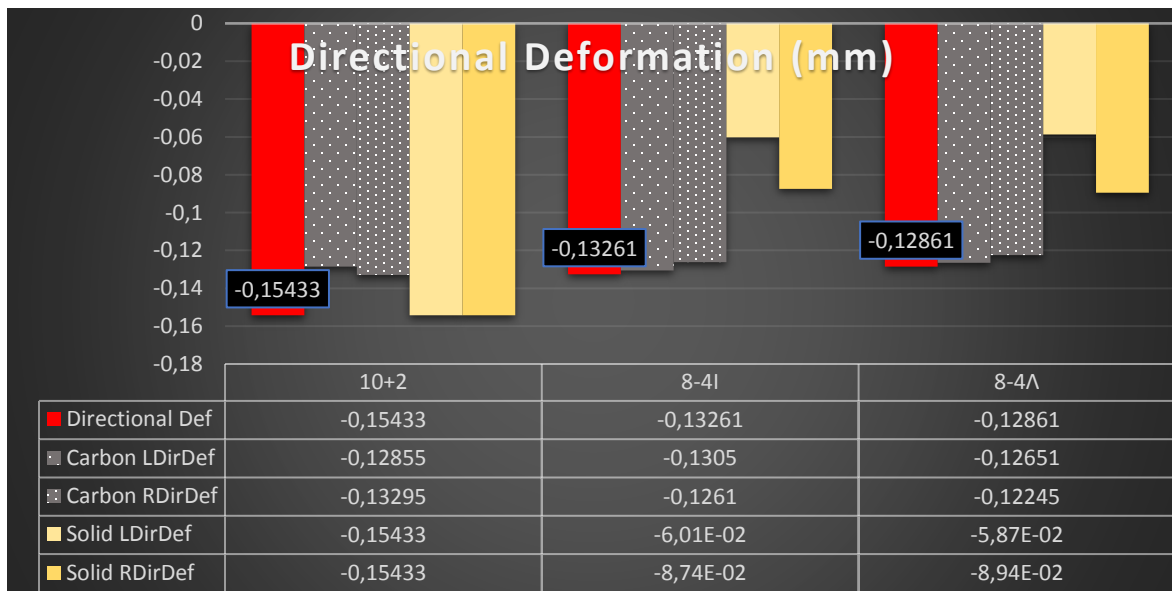
#### 4.1.1 Εφελκυσμός

Πίνακας 13: Σύγκριση σχήματος διαμόρφωσης σε εφελκυσμό

	<b>ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ</b>	Χωρίς Διαμόρφωση <b>(10+2)</b>	Διαμόρφωση τύπου <b>Λ(8-4Λ)</b>	Διαμόρφωση τύπου I <b>(8-4I)</b>
Συνολικά μεγέθη	<b>Total deformation (mm)</b>	0,15444	0,12893	0,13289
	<b>Directional Deformation (mm)</b>	-0,15433	-0,12861	-0,13261
	<b>Weight (g)</b>	571,83	491,37	489,79
	<b>Stiffness/Weight Ratio (N/mm/g)</b>	34210,46	41146,88	39892,92
	<b>SF/Weight Ratio (1/g)</b>	0,001667	0,005495	0,002842
Μεγέθη για το ανθρακόνημα	<b>Maximum Principal Stress (MPa)</b>	228,31	135,97	143,66
	<b>Max Principal Strain</b>	4,24E-03	1,96E-03	3,17E-03
	<b>Safety Factor (Min)</b>	0,95333	2,7	1,3921
	<b>L-Directional Def (mm)</b>	-0,12855	-0,12651	-0,1305
	<b>R-Directional Def. (mm)</b>	-0,13295	-0,12245	-0,1261
	<b>Shear Stress P1L1 (MPa)</b>	26,55	15,383	14,843
	<b>ILSS P2L1 (MPa)</b>	23,056	13,847	12,47
	<b>ILSS UD-Woven (MPa)</b>	9,7766	12,142	14,432
Μεγέθη για τα εσωτερικά στερεά	<b>Max. Principal Stress (MPa)</b>	93,724	115,63	191,77
	<b>Ls-Directional Def (mm)</b>	-0,15433	-0,0587	-0,0601
	<b>Rs-Directional Def (mm)</b>	-0,15433	-0,0894	-0,0874

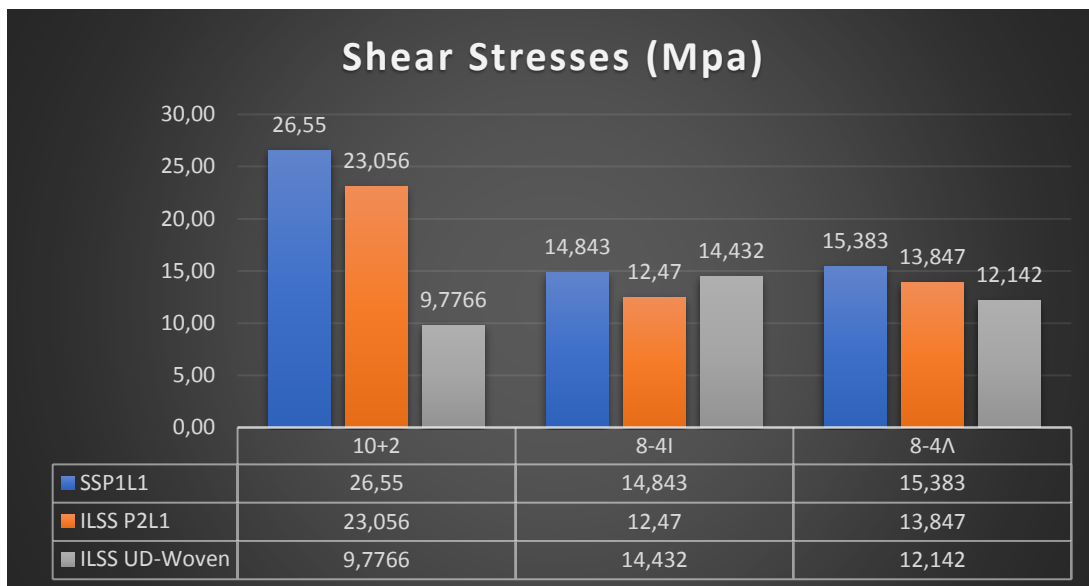


Διάγραμμα 7: Αθροιστική παραμόρφωση του ψαλιδιού στους τρεις άξονες



Διάγραμμα 8: Παραμόρφωση στον άξονα Z



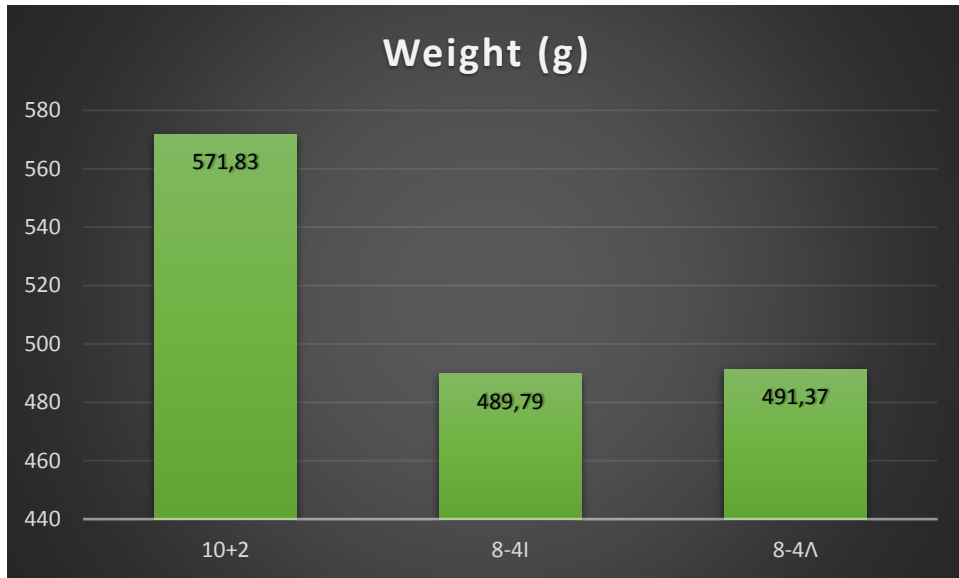


Διάγραμμα 9: Μέγιστες διατμητικές τάσεις για κάθε περίπτωση διαμόρφωσης

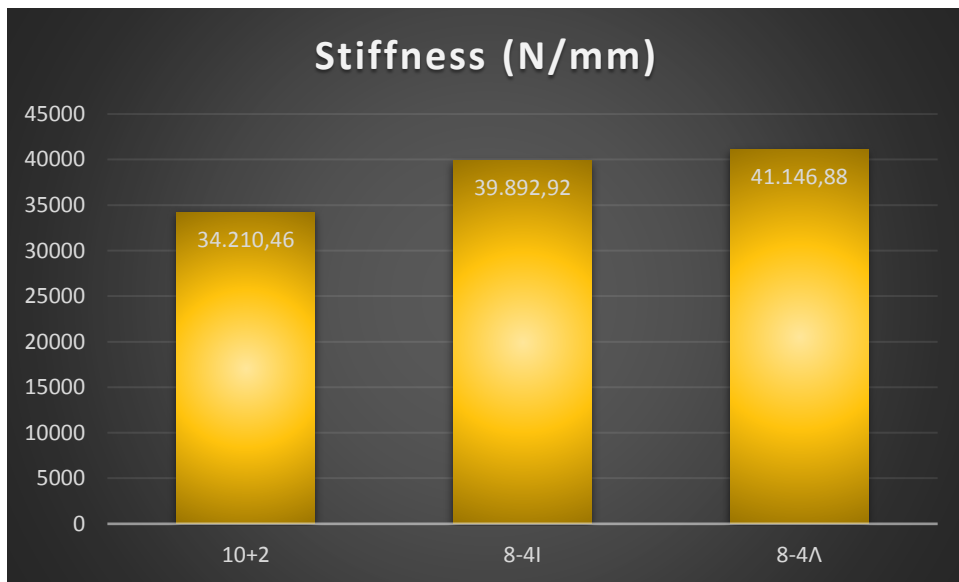
**Σχολιασμός (Διάγραμμα 7:** Αθροιστική παραμόρφωση του ψαλιδιού στους τρεις άξονες **Διάγραμμα 8** **Διάγραμμα 9):** Αρχικά παρατηρείται ότι η ολική παραμόρφωση αποτελείται σχεδόν εξ'ολοκλήρου από παραμόρφωση στον άξονα z. Περνώντας στο Διάγραμμα 8, παρατηρείται ότι το ευκολότερα παραμορφώσιμο ψαλίδι είναι το 10+2. Αυτό είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι το ανθρακοϋφασμα (στο οποίο επιτρέπεται η ολίσθηση πάνω στα εσωτερικά στερεά ως συνοριακή συνθήκη), βρίσκει αντίσταση μόνο στις άκρες του ψαλιδιού. Στα 8-4I και 8-4Λ, το ύφασμα βρίσκει αντίσταση στις διαμορφώσεις. Με βάση τη λογική που περιγράφεται στην αρχή της ενότητας, το αναμενόμενο αποτέλεσμα θα είναι με τον μετασχηματισμό της διαμόρφωσης από ευθεία σε καμπύλη, να ασκούνται περισσότερες τάσεις από τη διαμόρφωση στο ανθρακόνημα που να αντιστέκονται στην απομάκρυνση του τελευταίου από το αλουμινένιο ένθετο. Αυτό έχει ευνοϊκή επίδραση στην ολική αντίσταση του ψαλιδιού στην αξονική παραμόρφωση.

Πράγματι, παρατηρείται ότι ο βασικός παράγοντας παραμόρφωσης στις περιπτώσεις των διαμορφώσεων είναι το ανθρακόνημα, το οποίο παραμορφώνεται λιγότερο αξονικά στη διαμόρφωση τύπου Λ (8-4Λ). Ακόμη, για να επιβεβαιωθεί η αρχική λογική για τις διαμορφώσεις, συγκρίνοντας τις διατμητικές τάσεις για τα 8-4Λ και 8-4I από το αλουμίνιο στο ανθρακόνημα, πράγματι όπως αναμενόταν στην περίπτωση Λ είναι μεγαλύτερη η τάση που ασκείται, άρα και ο βαθμός συγκράτησης του ανθρακονήματος στη διαμόρφωση.

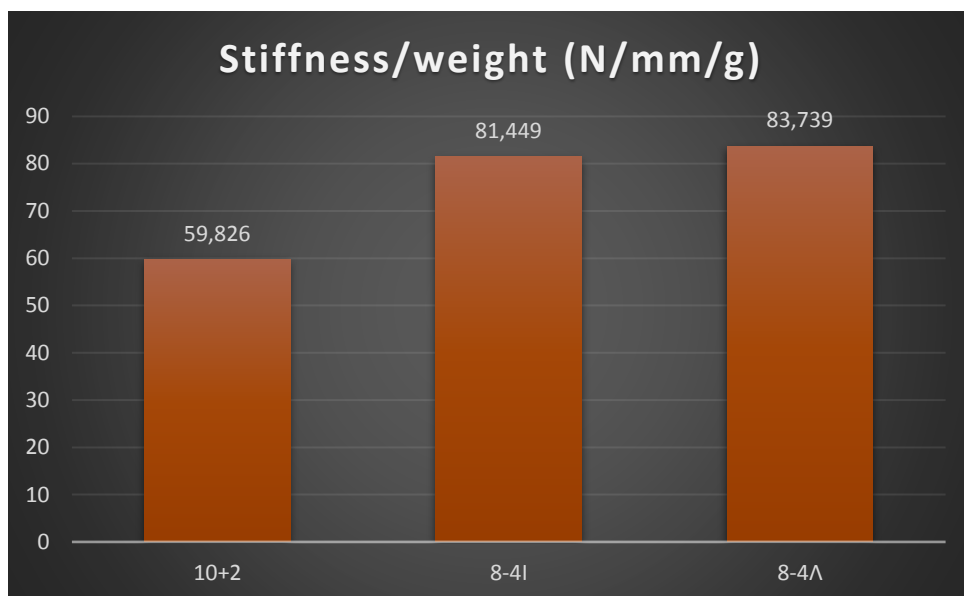
Ο μεγαλύτερος βαθμός συγκράτησης φαίνεται στην περίπτωση χωρίς διαμόρφωση, αφού όλη η συγκράτηση με διάτμηση γίνεται από το κορυφαίο σημείο του ψαλιδιού στο A arm bracket.



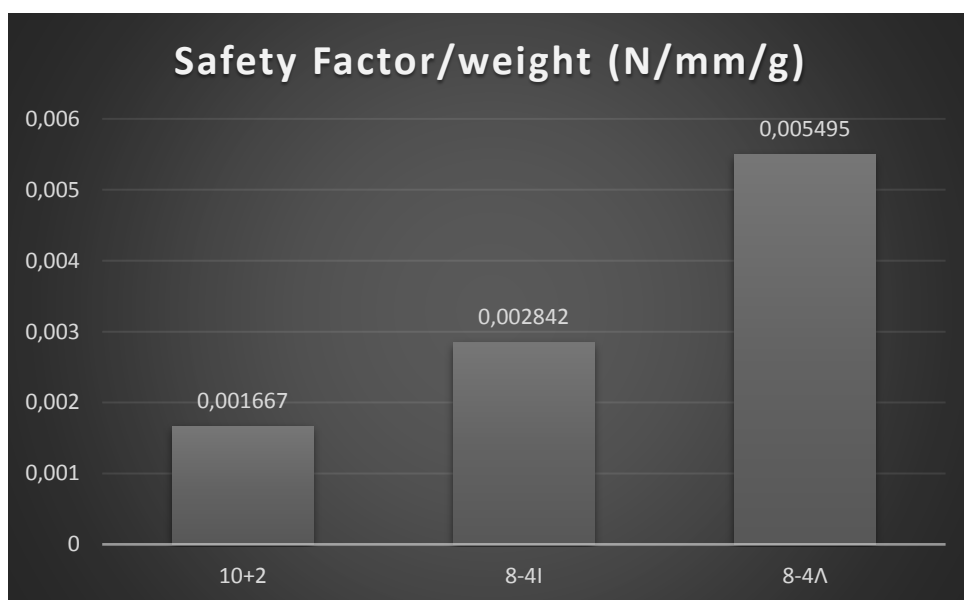
Διάγραμμα 10: Βάρη ψαλιδιών με διαφορετική διαμόρφωση



Διάγραμμα 11: Δυσκαμψία ψαλιδιών με διαφορετική διαμόρφωση



Διάγραμμα 12: Λόγος δυσκαμψίας - βάρους για ψαλίδια με διαφορετική διαμόρφωση



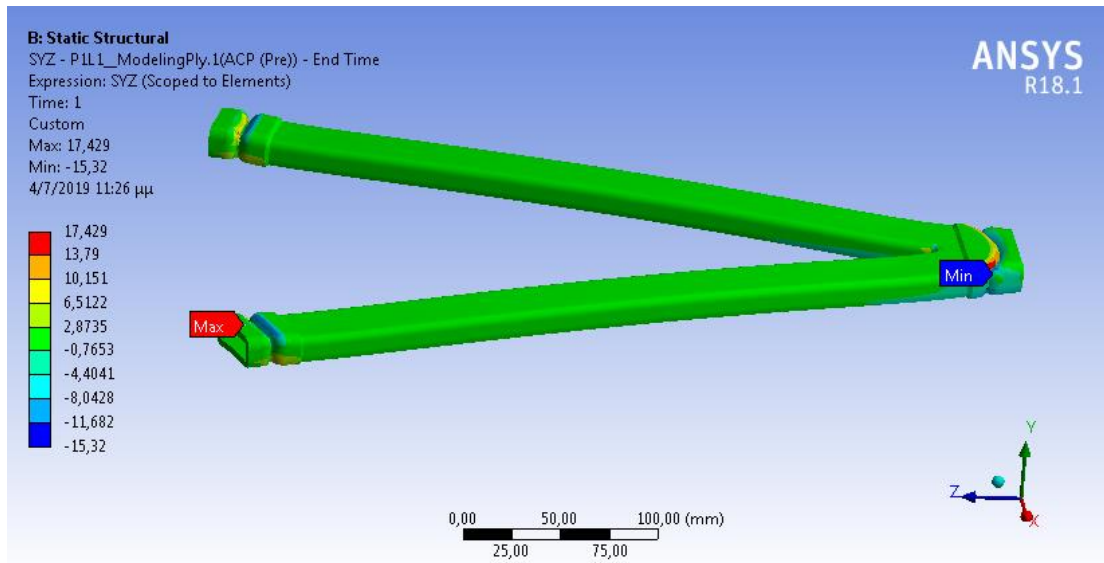
Διάγραμμα 13: Παράγοντας ασφαλείας κριτηρίων αστοχίας Tsai-Hill και Tsai-Wu σε σχέση με το βάρος

**Σχολιασμός (Διαγράμματα Διάγραμμα 10, Διάγραμμα 11, Διάγραμμα 12 Διάγραμμα 13).** Οι περιπτώσεις με τη διαμόρφωση είναι αναμενόμενα αρκετά ελαφρύτερες από την 10+2, εφόσον οι τέσσερις εξωτερικές στρώσεις είναι μόνο στις διαμορφώσεις. Παρόλα αυτά, οι 8-4Λ και 8-4I έχουν μεγαλύτερες αντιστάσεις σε αξονική παραμόρφωση και μεγαλύτερους παράγοντες ασφαλείας των κριτηρίων αστοχίας. Μεταξύ των δύο έχουμε παρόμοια συμπεριφορά του stiffness-to-weight-ratio, ωστόσο για τον παράγοντα ασφαλείας επικρατεί το 8-4Λ.

Με βάση τα παραπάνω προκρίνεται η χρήση της διαμόρφωσης Λ, (χωρίς απαραίτητα τη διαστρωμάτωση 8-4), ωστόσο μένει να μελετηθεί και η συμπεριφορά σε θλίψη.

Σημειώνεται ότι, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 56: Εμφάνιση διατμητικών τάσεων μεταξύ στερεών και ανθρακονήματος στις διαμορφώσεις, πράγματι η εμφάνιση διατμητικών τάσεων στα σημεία των

διαμορφώσεις, επιβεβαιώνει τη λειτουργικότητά τους ως ασφαλιστική δικλείδα συγκράτησης σε περίπτωση αστοχίας της κόλλας.



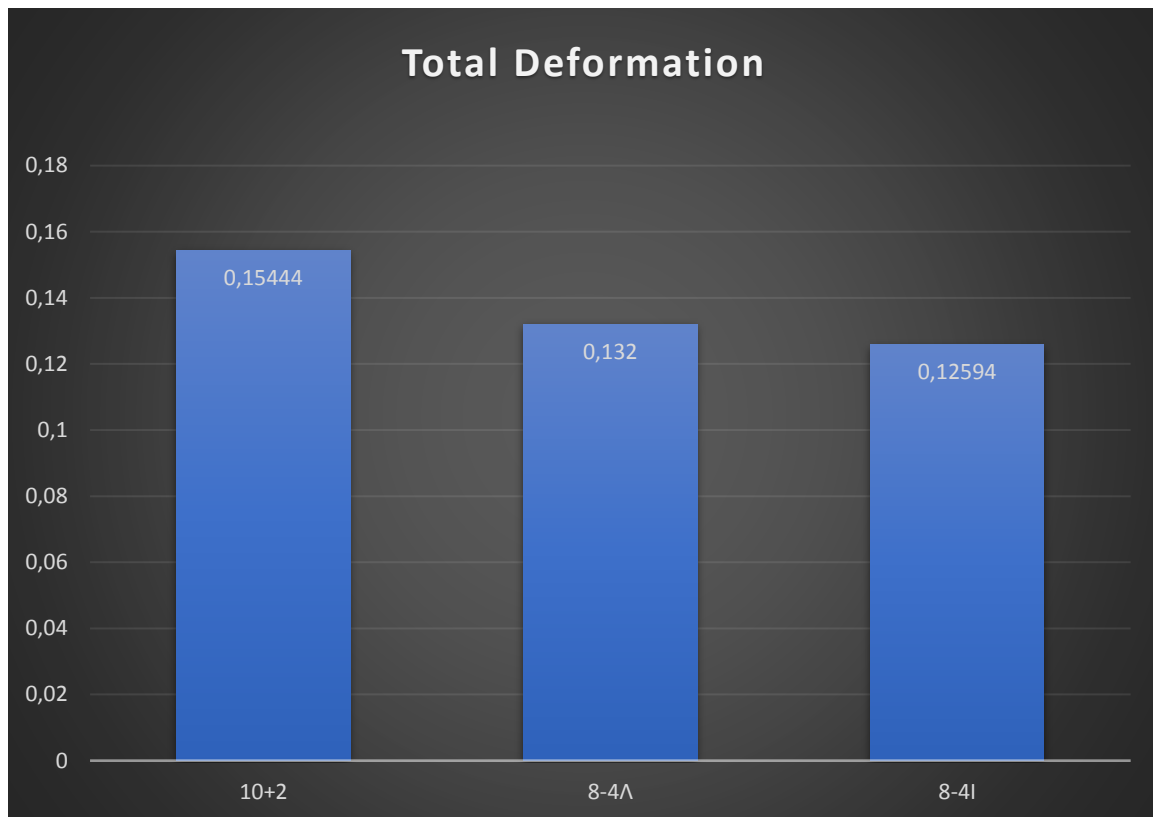
Εικόνα 56: Εμφάνιση διατμητικών τάσεων μεταξύ στερεών και ανθρακονήματος στις διαμορφώσεις

#### 4.1.2 Θλίψη

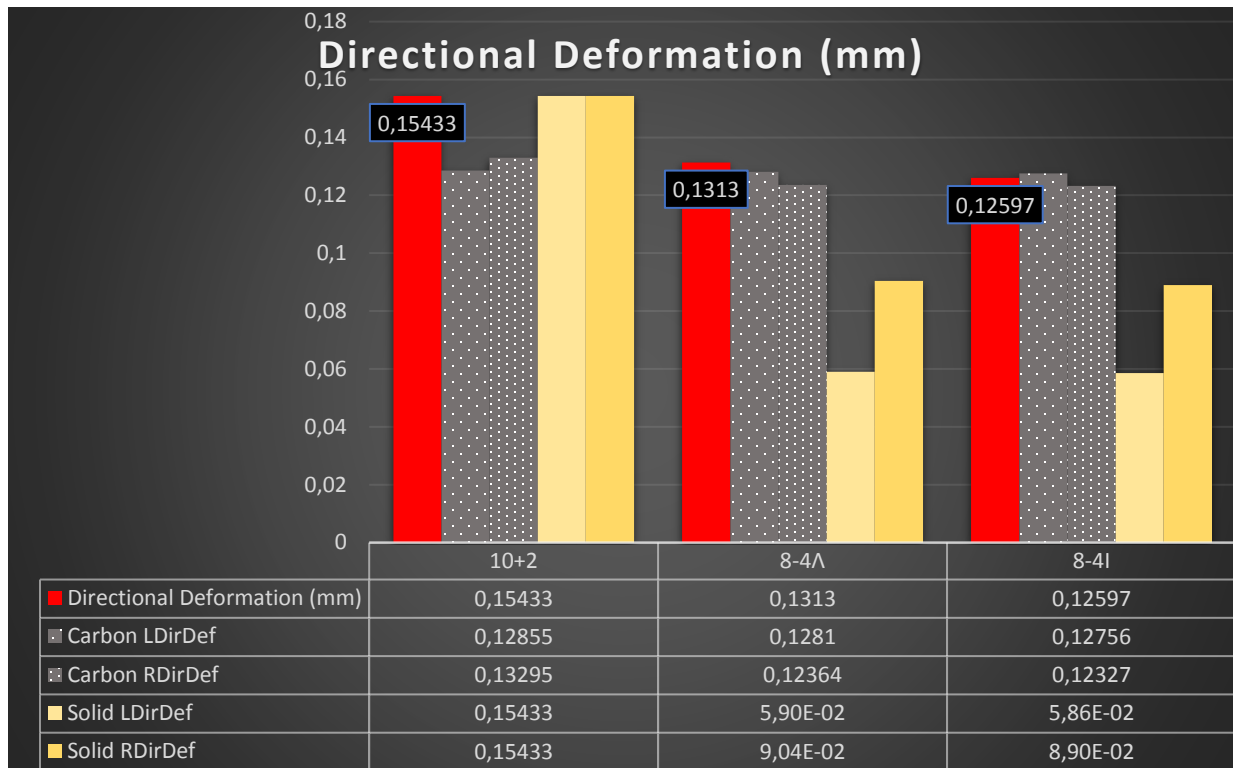
Πίνακας 14: Σύγκριση σχήματος διαμόρφωσης σε θλίψη

	<b>ΘΛΙΨΗ</b>	Χωρίς Διαμόρφωση <b>(10+2)</b>	Διαμόρφωση τύπου <b>Λ(8-4Λ)</b>	Διαμόρφωση τύπου <b>I (8-4I)</b>
Συνολικά μεγέθη	<b>Total deformation (mm)</b>	0,15444	0,132	0,12594
	<b>Directional Deformation (mm)</b>	0,15433	0,1313	0,12597
	<b>Weight (g)</b>	571,83	491,37	489,79
	<b>Stiffness/Weight Ratio (N/mm/g)</b>	59,826	82,02504	83,33006
	<b>SF/Weight Ratio (1/g)</b>	0,002899988	0,008329	0,003744
Μεγέθη για το ανθρακόνημα	<b>Maximum Principal Stress(MPa)</b>	71,014	56,556	90,504
	<b>Max Principal Strain</b>	1,72E-03	1,82e-03	3,02e-03
	<b>Safety Factor</b>	1,6583	4,0928	1,8336
	<b>L-Directional Def (mm)</b>	0,12855	0,1281	0,12756

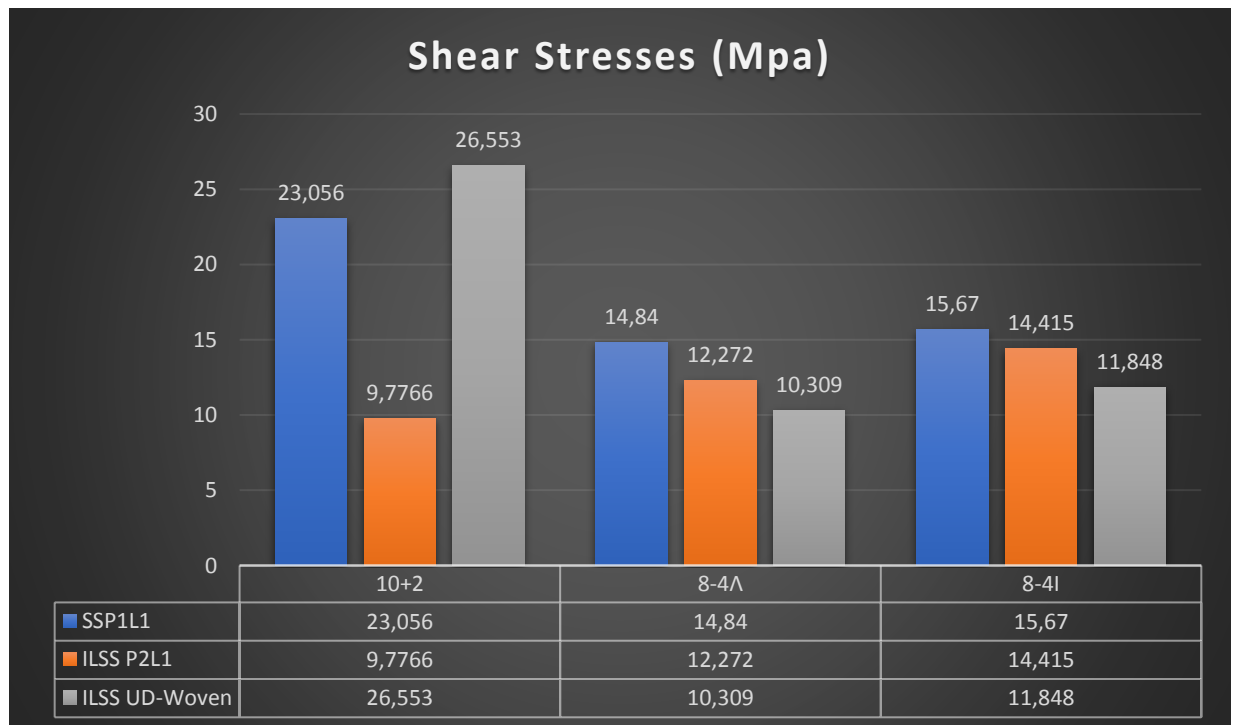
	<b>R-Directional Def. (mm)</b>	0,13295	0,12364	0,12327
	<b>Shear Stress P1L1 (MPa)</b>	-23,056	14,84	15,67
	<b>ILSS P2L1 (MPa)</b>	-9,7766	12,272	14,415
	<b>ILSS UD-Woven (MPa)</b>	-26,553	10,309	11,848
Μεγέθη για τα εσωτερικά στερεά	<b>Max. Principal Stress (MPa)</b>	164,97	147,34	146,78
	<b>Ls-Directional Def (mm)</b>	0,15433	5,90E-02	5,86E-02
	<b>Rs-Directional Def (mm)</b>	0,15433	9,04E-02	8,90E-02



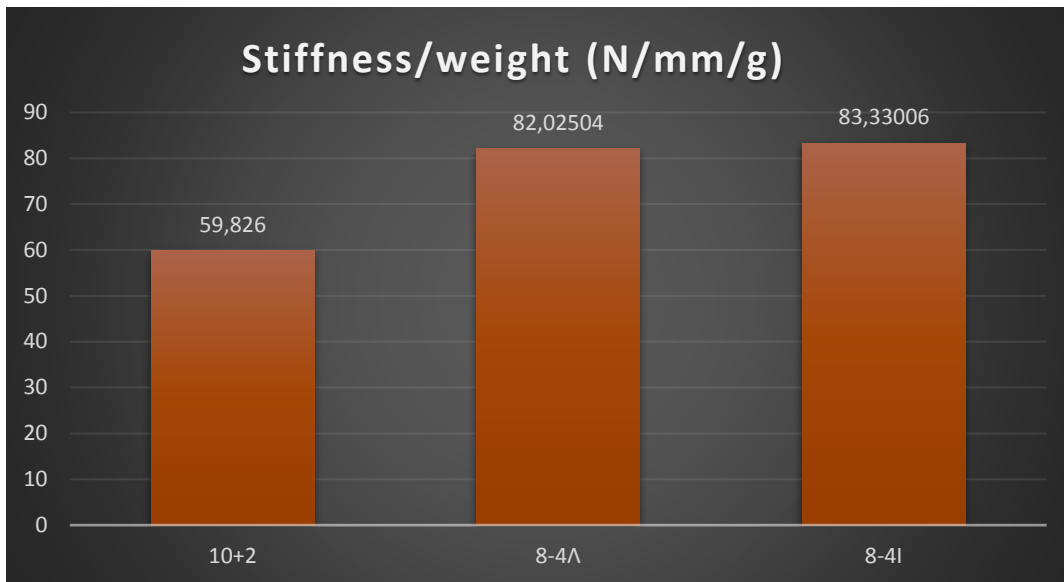
Διάγραμμα 14: Αθροιστική παραμόρφωση του ψαλιδιού σε θλίψη



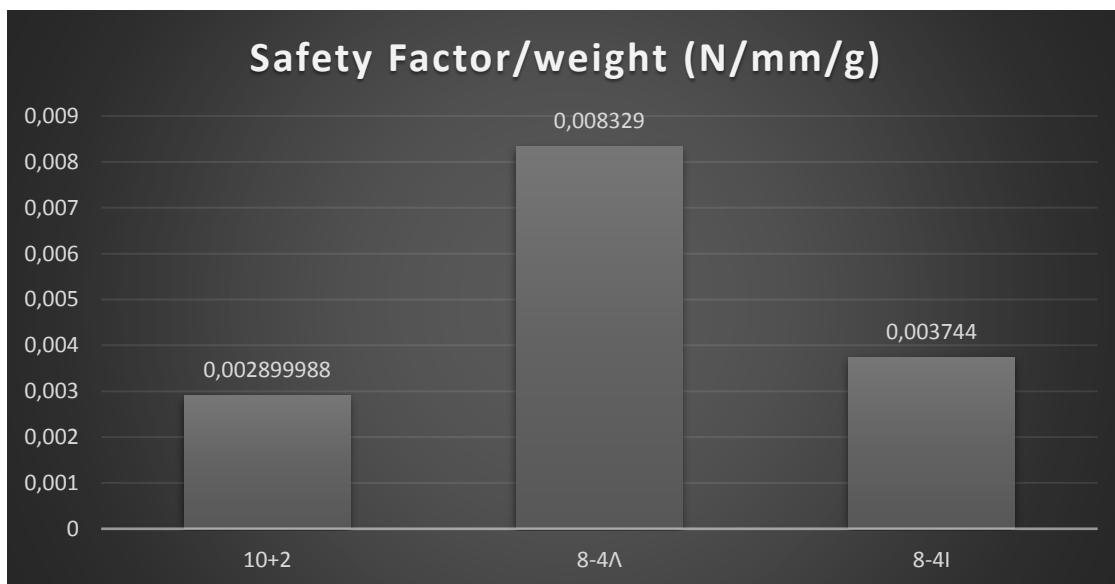
Διάγραμμα 15: Αξονική παραμόρφωση στον άξονα Z (θλίψη)



Διάγραμμα 16: Διατμητικές τάσεις για διαφορετικές διαμορφώσεις (θλίψη)



Διάγραμμα 17: Λόγος αντίστασης στην παραμόρφωση/βάρος για διαφορετικές διαμορφώσεις (θλίψη)

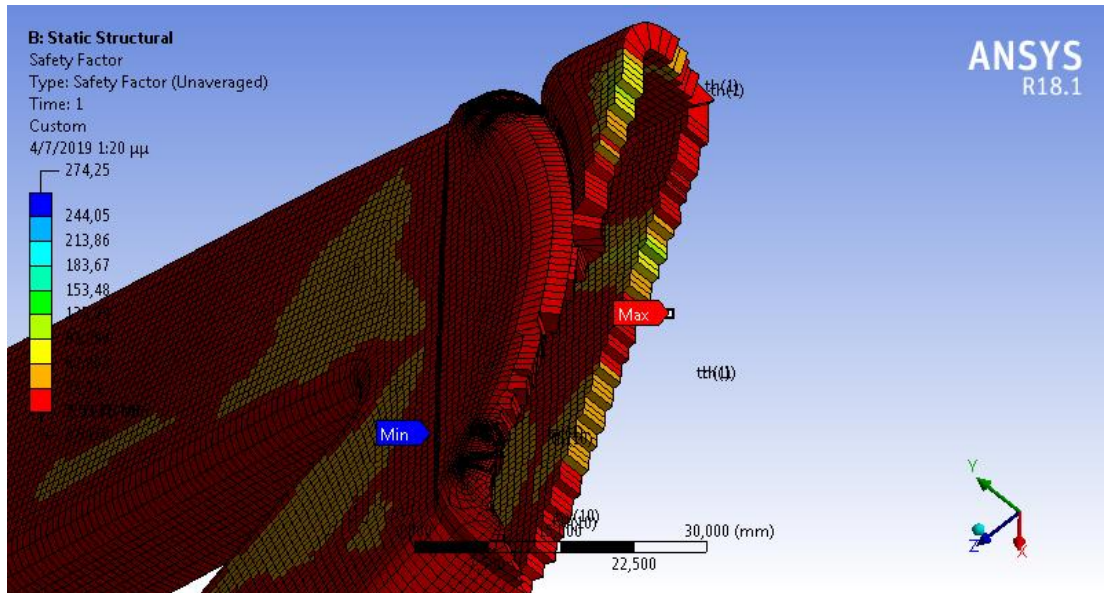


Διάγραμμα 18: Λόγος συντελεστή ασφαλείας/βάρος για διαφορετικές διαμορφώσεις (θλίψη)

**Σχολιασμός (Διάγραμμα 14 Διάγραμμα 17):** Παρατηρείται τόσο από τον πίνακα όσο και από τα διαγράμματα, ότι η χειρότερη επίδοση σε αυτή τη μορφή της συνοριακής συνθήκης δίνεται από το ψαλίδι 10-2. Εξάλλου, η επιλογή στον παράγοντα της διαμόρφωσης, είναι μία, τόσο για την περίπτωση της θλίψης όσο και για την περίπτωση του εφελκυσμού. Επομένως, θα κινηθούμε και πάλι ανάμεσα στις διαμορφώσεις τύπου I και τύπου Λ.

Μεταξύ αυτών, παρατηρείται ότι στον παράγοντα της αντίστασης στην αξονική παραμόρφωση, η διαμόρφωση τύπου I είναι οριακά ανώτερη σε επίδοση από την τύπου Λ. Αναφορικά με τις διατμητικές τάσεις στη διαμόρφωση, αυτές είναι και (πάλι οριακά) μεγαλύτερες για τη διαμόρφωση I, άρα συγκρατεί το ανθρακόνημα πιο ισχυρά στη θέση του.

Για τη θλίψη φαίνεται οριακά καλύτερη η διαμόρφωση τύπου I , ενώ για τον εφελκυσμό με σημαντικότερη διαφορά η διαμόρφωση τύπου Λ. Σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνει υπενθύμιση ότι τα θλιπτικά φορτία λαμβάνονται με μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας από ότι τα εφελκυστικά (και τα δύο είναι κάτω από 10000N, δύναμη με την οποία γίνονται οι υπολογισμοί, ωστόσο τα θλιπτικά είναι πιο κάτω από τα εφελκυστικά, βλ. Ενότητα 1.4) Αυτό σημαίνει ότι μια καλύτερη επίδοση στον εφελκυσμό έχει μεγαλύτερη βαρύτητα από μια οριακά καλύτερη επίδοση στη θλίψη. Επομένως γίνεται η επιλογή της διαμόρφωσης τύπου Λ για το οριστικό σχέδιο.



Εικόνα 57: Κατανομή συντελεστή ασφαλείας με βάση κριτήρια αστοχίας σύνθετων, σε τομή

#### 4.2 Βαθμός κάλυψης του ψαλιδιού από ανθρακόνημα

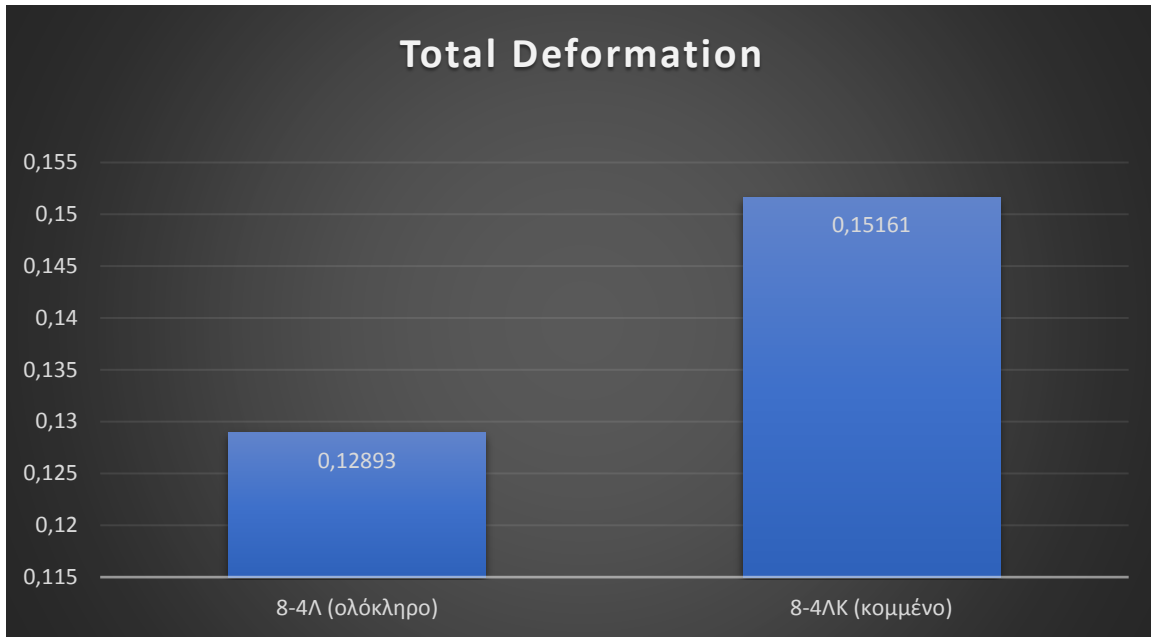
Εφόσον ολοκληρώθηκε η ανάλυση ευαισθησίας και επιλογής διαμόρφωσης πρέπει να εξεταστεί ο βαθμός κάλυψης του ψαλιδιού από το ανθρακόνημα. Είναι αναμενόμενο ότι όταν καλύπτεται ολόκληρο το ψαλίδι εξωτερικά, η μηχανική του συμπεριφορά θα είναι ανώτερη από όταν μείνουν κομμάτια του ψαλιδιού ακάλυπτα. Ωστόσο, πρέπει να συγκριθεί εάν το παραπάνω βάρος της περίπτωσης του εντελώς καλυμμένου ψαλιδιού, αξίζει σε σχέση με το μηχανικό όφελος. Για το λόγο αυτό, θα συγκριθεί η συμπεριφορά του ψαλιδιού 8-4Λ με μία νέα έκδοσή του, την 8-4ΛΚ, η οποία έχει την ίδια διαστρωμάτωση μεν, αλλά σημεία του ψαλιδιού μένουν ακάλυπτα από το ανθρακόνημα, προς εξοικονόμηση βάρους.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί, ότι η δυνατότητα για τη διερεύνηση της επιλογής αυτής, δίνεται από τη διαμόρφωση. Αν δεν υπήρχε η διαμόρφωση, η μόνη ασφαλιστική δικλείδα συγκράτησης του ανθρακονήματος στη θέση του στην περίπτωση αστοχίας της κόλλας είναι οι ακμές των άκρων των αλουμιένιων ένθετων στο ανώτερο και στα δύο κατώτερα σημεία του ψαλιδιού. Οι τρεις διαμορφώσεις ωστόσο, επιτελούν τη ζητούμενη μηχανική συγκράτηση ώστε να μας δοθεί η δυνατότητα να εξετάσουμε την περίπτωση να μην καλύψουμε με ανθρακόνημα αυτές τις ακμές των άκρων των ένθετων.

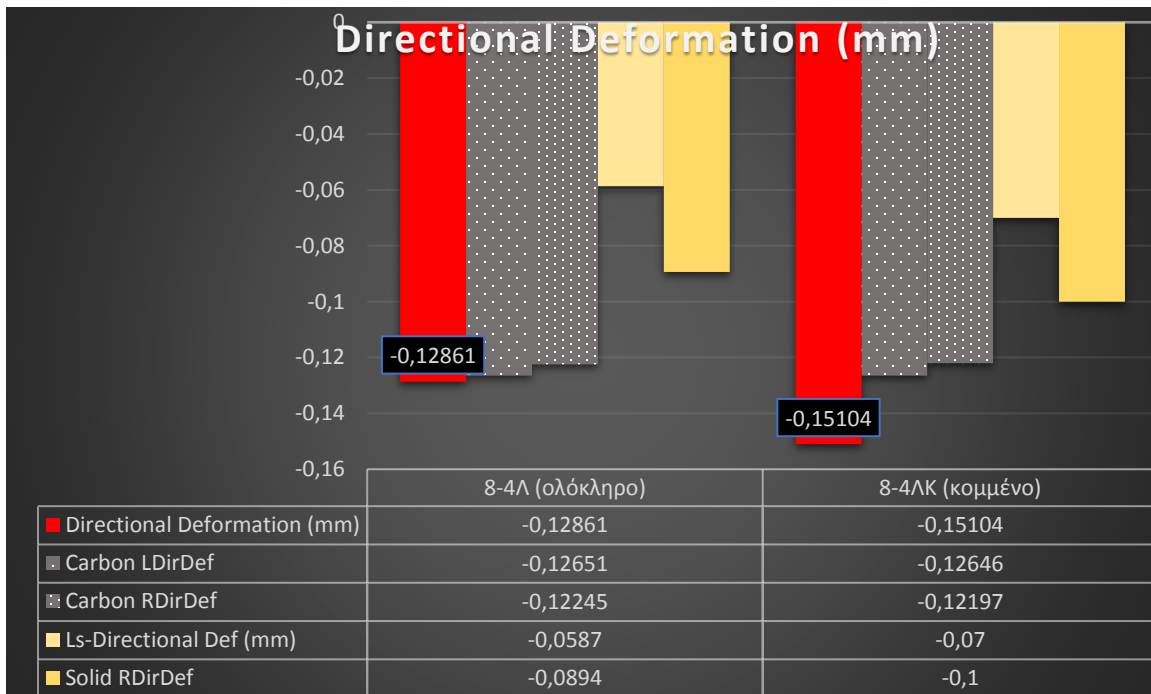


Πίνακας 15: Σύγκριση τιμών εξεταζόμενων μεγεθών για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης του ψαλιδιού από ανθρακόνημα

		8-4Λ (ολόκληρο)	8-4ΛΚ (κομμένο)
Συνολικά μεγέθη	Total deformation (mm)	0,12893	0,15161
	Directional Deformation (mm)	-0,12861	-0,15104
	Weight (g)	491,37	467,8
	Stiffness/Weight Ratio (N/mm/g)	83,73909	74,89804
	SF/Weight Ratio (1/g)	0,005495	0,006721
Μεγέθη για το ανθρακόνημα	Maximum Principal Stress (MPa)	135,97	76,405
	Max Principal Strain	1,96E-03	2,45E-03
	Safety Factor (Min)	2,7	3,1446
	L-Directional Def (mm)	-0,12651	0,12646
	R-Directional Def. (mm)	-0,12245	0,12197
	Shear Stress P1L1	15,383	-15,327
	ILSS P2L1	13,847	-14,215
	ILSS UD-Woven	12,142	-15,875
Μεγέθη για τα εσωτερικά στερεά	Max. Principal Stress (MPa)	115,63	198,66
	Ls-Directional Def (mm)	-0,0587	0,07
	Rs-Directional Def (mm)	-0,0894	0,10

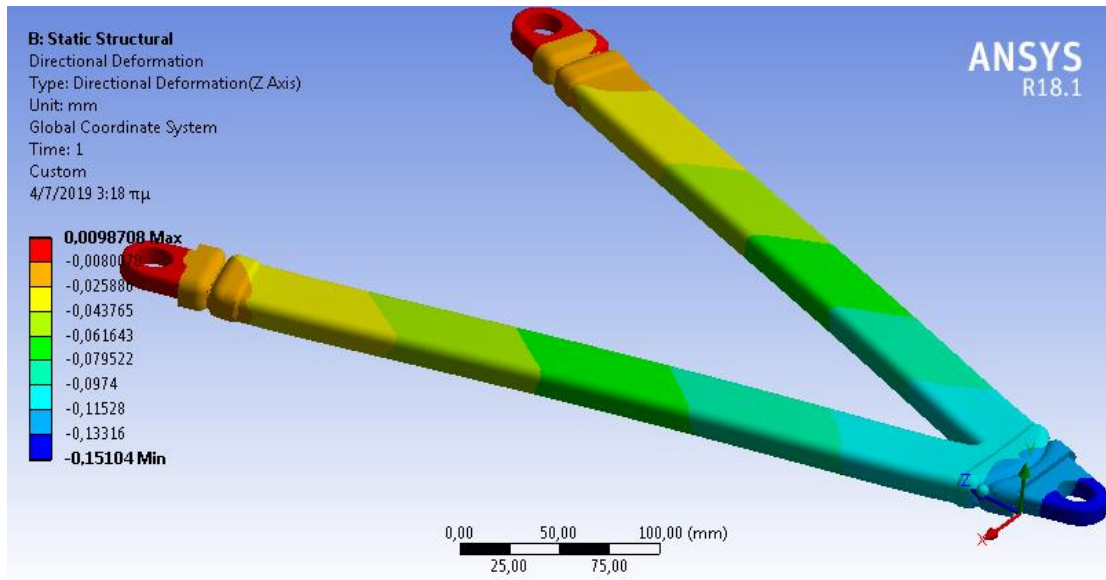


Διάγραμμα 19: Συνολική παραμόρφωση για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης

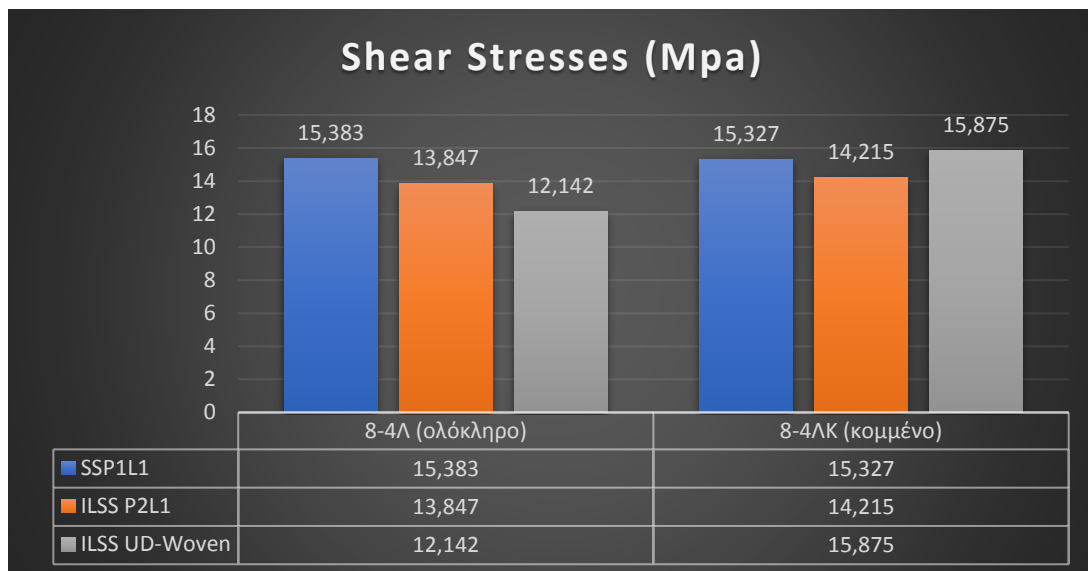


Διάγραμμα 20: Αξονική παραμόρφωση (στον άξονα z) για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης

**Σχολιασμός διαγραμμάτων 19,20 :** Είναι εμφανές ότι η αξονική παραμόρφωση, όπως ήταν αναμενόμενο, είναι αρκετά μεγαλύτερη στην περίπτωση του κομμένου ψαλιδιού. Με προσεκτική παρατήρηση των τιμών των διαγραμμάτων της αξονικής παραμόρφωσης, διαπιστώνει κανείς ότι το συνολικό compliance προκύπτει αποκλειστικά από τα εσωτερικά στερεά, τα ένθετα δηλαδή στα σημεία που δεν έχουν ανθρακόνημα. Αυτό μπορεί να το παρατηρήσει κανείς και από την Εικόνα 58: Κατανομή αξονικών παραμορφώσεων στο ψαλίδι, με την κατανομή των αξονικών παραμορφώσεων.

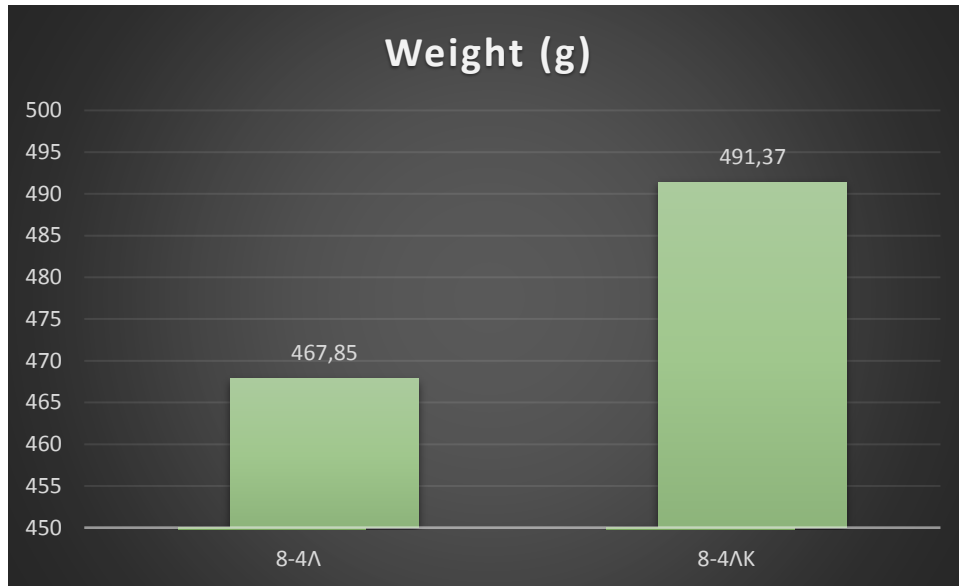


Εικόνα 58: Κατανομή αξονικών παραμορφώσεων στο ψαλίδι

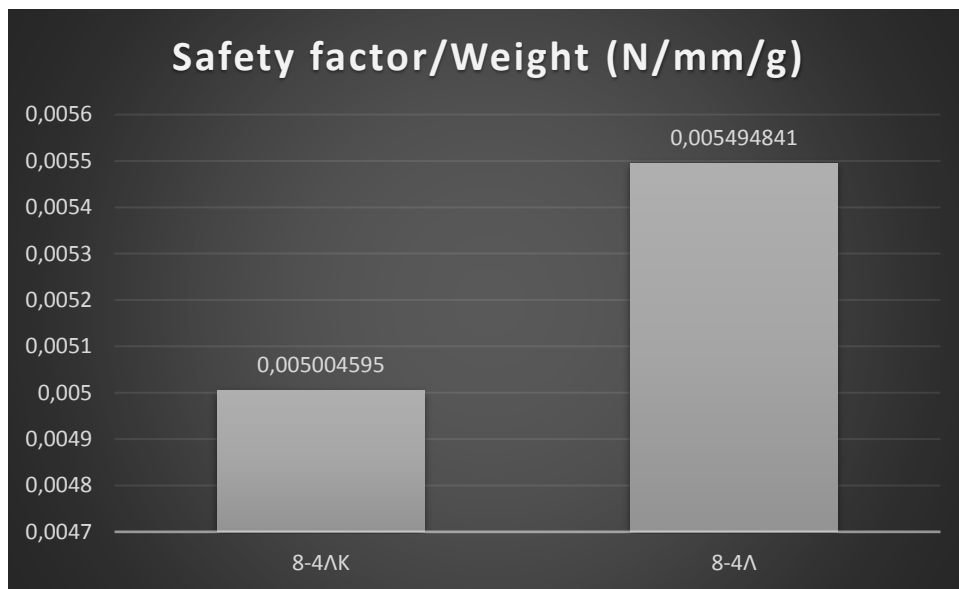


Διάγραμμα 21: Σύγκριση διατμητικών τάσεων για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης

**Σχολιασμός διαγράμματος Διάγραμμα 21:** Βλέπουμε τις διατμητικές τάσεις μόνο στις διαμορφώσεις. Είναι αναμενόμενο στην περίπτωση 8-4ΛΚ να παρατηρούνται αυξημένες διατμητικές τάσεις, ιδίως διαστρωματικές, δεδομένου ότι η διαμόρφωση έχει αναλάβει το ρόλο της μηχανικής συγκράτησης εξ'ολοκλήρου, ενώ στην 8-4Λ όπως αναφέρθηκε αυτές μοιράζονται μεταξύ διαμορφώσεων και ακμών στο άκρο του ψαλιδιού.

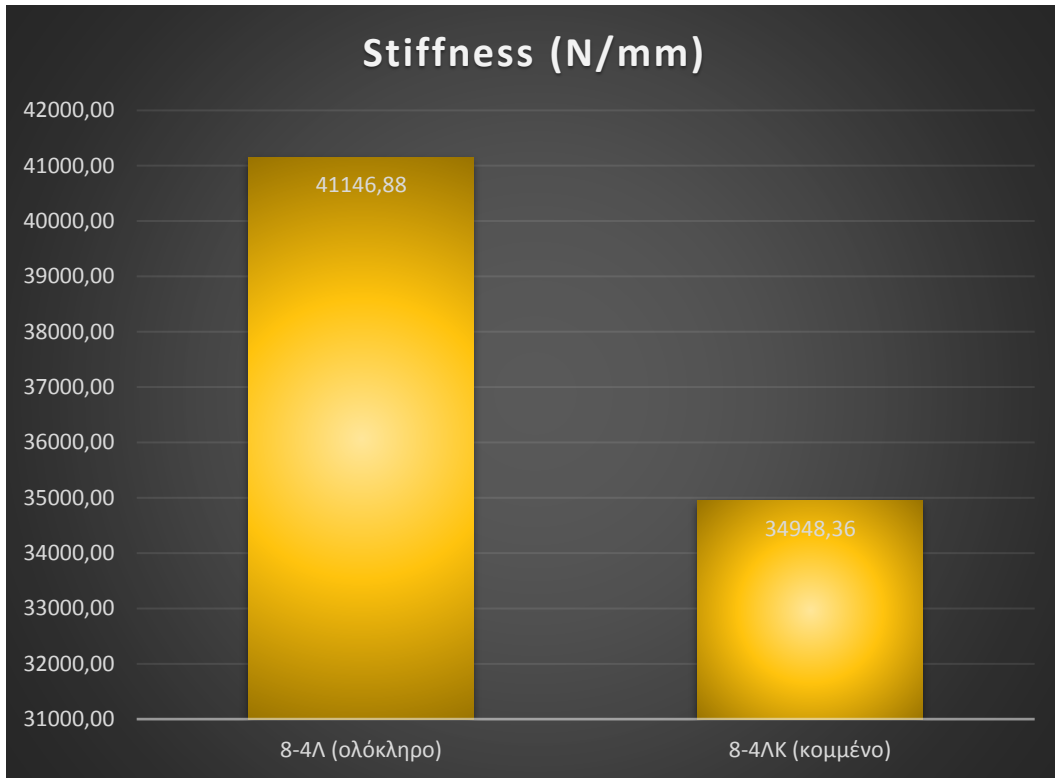


Διάγραμμα 22: Σύγκριση βάρους για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης

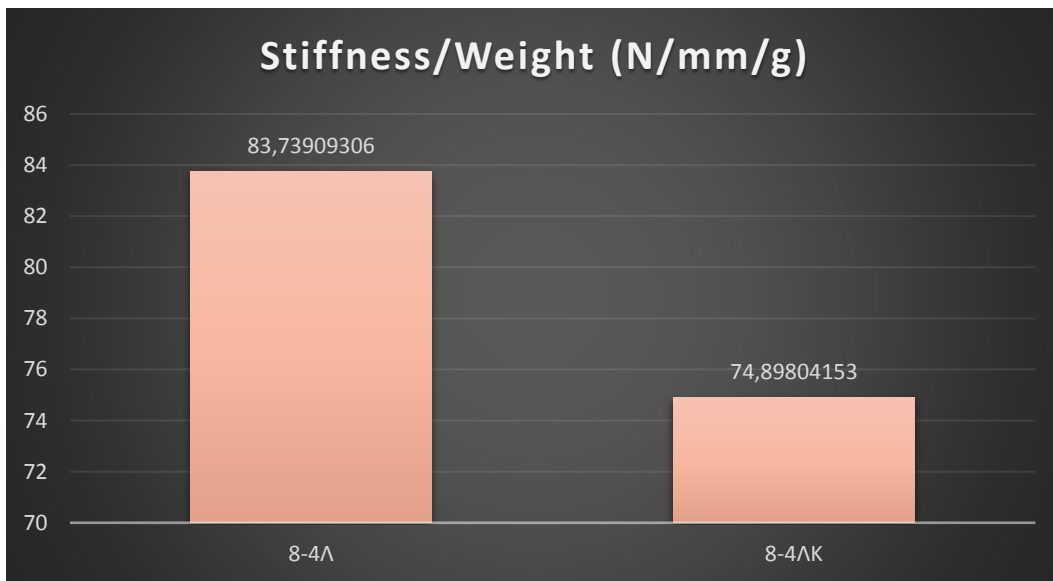


Διάγραμμα 23: Συντελεστής ασφαλείας κριτηρίων αστοχίας/βάρους για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης

**Σχολιασμός διαγραμμάτων 22,23:** Στο σημείο της εξέτασης του παράγοντα του βάρους, αλλά και του συντελεστή ασφαλείας για την αστοχία του ανθρακονήματος σε σχέση με το βάρος, η κομμένη μορφή υπερτερεί σημαντικά. Στο formula student, εξαιτίας της περιορισμένης υποδύναμης των μονοθεσιών, και ειδικότερα για το concept του μονοθεσίου για το οποίο σχεδιάζονται τα ψαλίδια, το βάρος διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Επομένως, είναι παράγοντας που λαμβάνεται κατά προτεραιότητα υπόψη και στην περίπτωση της απόφασής μας, θα την επηρεάσει σημαντικά προς την 8-4ΛΚ περίπτωση.



Διάγραμμα 24: Δυσκαμψία για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης



Διάγραμμα 25: Δυσκαμψία/βάρος για διαφορετικά ποσοστά κάλυψης

**Σχολιασμός διαγραμμάτων 24,25:** Αναφορικά με τον παράγοντα της δυσκαμψίας (stiffness) του ψαλιδιού, εμφανίζεται η ολόκληρη μορφή να υπερτερεί της κομμένης. Ποσοστιαία όμως η διαφορά είναι μόλις 15% στη μείωση του stiffness αν δεν τοποθετηθεί ανθρακόνημα στα άκρα, γεγονός που έχει μικρή επίδραση. Αξιολογώντας και πάλι με μεγαλύτερη βαρύτητα τον παράγοντα του βάρους, αποφασίζουμε υπέρ του κομμένου σχεδίου. Εξ'άλλου, το stiffness ελέγχεται και από τη διαστρωμάτωση η οποία εξετάζεται στην αμέσως επόμενη παράγραφο.

### 4.3 Διαστρωμάτωση – Lamination του ψαλιδιού

Εφόσον πλέον έχουν ληφθεί αποφάσεις για τη διαμόρφωση και το βαθμό κάλυψης, πρέπει να ληφθεί η απόφαση που είναι το πιο βασικό στοιχείο μελέτης αναφορικά με τις κατασκευές σύνθετων υλικών, η διαστρωμάτωση. Η τελική διαστρωμάτωση θα αποφασιστεί με την επίλυση των προσομοιώσεων των πεπερασμένων στοιχείων. Τα κρίσιμα μεγέθη έχουν αναφερθεί στην ενότητα 3.2 Ζητούμενα επίλυσης, και είναι τα ίδια με τις ενότητες 4.1 και 4.2.

Η κωδικοποίηση της διαστρωμάτωσης ακολουθεί επίσης τη λογική των ενότητων 4.1 και 4.2. Κατ'αυτόν τον τρόπο, το ψαλίδι με κωδικό 6-5ΛΚ έχει 6 στρώσεις στα σκέλη του με μονοδιευθυντικό ανθρακόνημα με διεύθυνση των ινών στο διαμήκη άξονα, 5 στρώσεις woven ανθρακοϋφασμα στις διαμορφώσεις τύπου Λ, ενώ το carbon δεν καλύπτει όλο το ψαλίδι (δείκτης Κ).

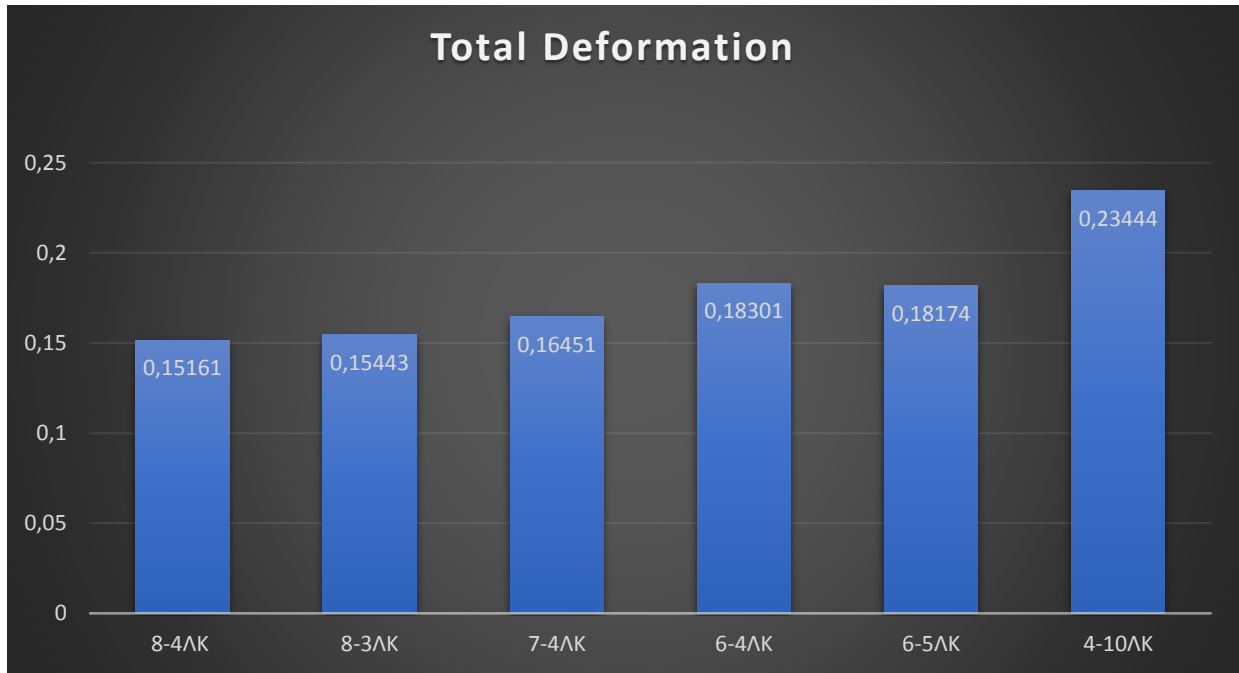
#### 4.3.1 Εφελκυσμός

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δίνονται σε Πίνακα και στα ακόλουθα διαγράμματα.

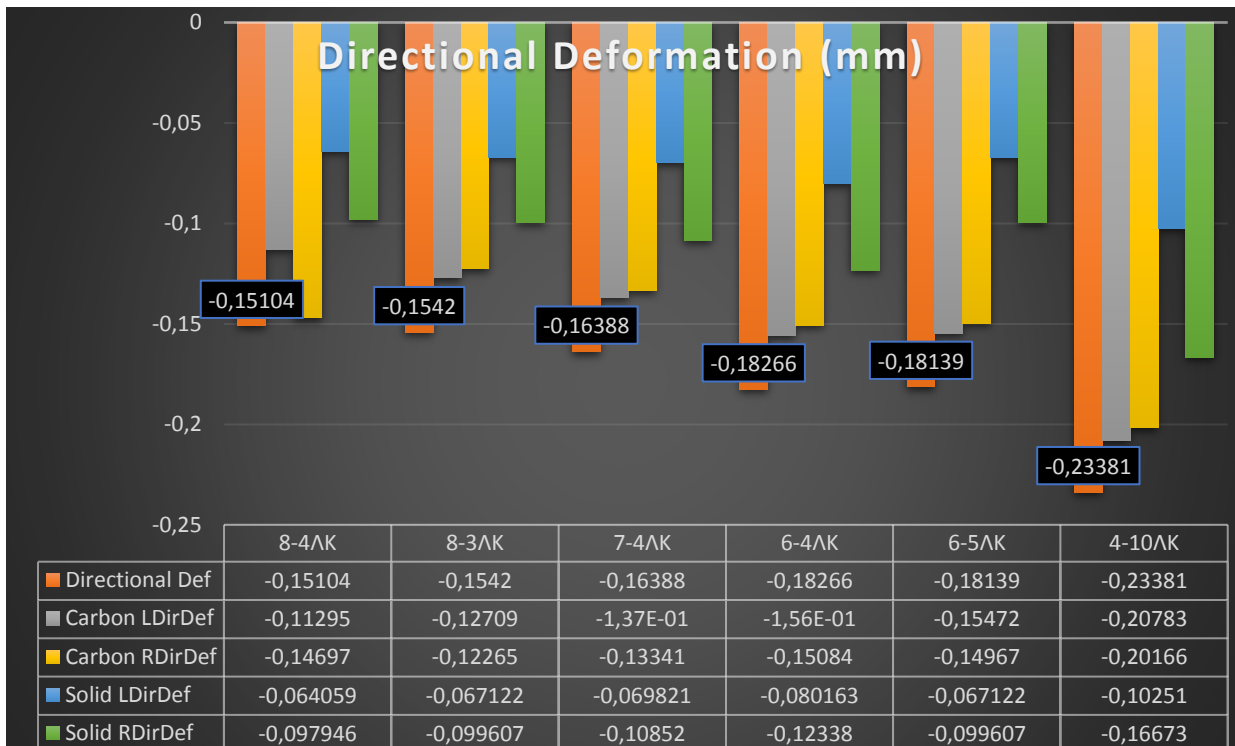
Πίνακας 16: Σύγκριση κρίσιμων μηχανικών μεγεθών για διαφορετικές διαστρωματώσεις – εφελκυσμός

ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ		8-4ΛΚ	8-3ΛΚ	7-4ΛΚ	6-4ΛΚ	6-5ΛΚ	4-10ΛΚ
Συνολικά μεγέθη	Total deformation (mm)	0,15161	0,15443	0,16451	0,18301	0,18174	0,23444
	Directional Deformation (mm)	0,009871	0,009694	0,010144	0,010465	0,010597	0,012097
	Weight (g)	467,8	464,23	438,85	409,84	413,47	373,58
	Stiffness (N/mm)	35041,05	34324,25	32295,58	28974,05	29179,12	22633,33
	Stiffness/Weight Ratio (N/mm/g)	74,89804	73,93804	73,59139144	70,696	70,5713	60,58497
	SF/Weight Ratio (1/g)	0,005005	0,004604	0,004848	0,004632	0,005102	0,007189
Μεγέθη για το ανθρακόνημα	Maximum Principal Stress(MPa)	138,63	141,94	155,04	175,49	172,01	172,01
	Max Principal Strain	0,002332	0,002424	0,002551	0,00281	0,0027487	0,003089
	Safety Factor (Min)	2,3414	2,1371	2,1274	1,8984	2,1094	2,6856
	L-Directional Def (mm)	-0,11295	-0,12709	-1,37E-01	-1,56E-01	-0,15472	-0,20783
	R-Directional Def. (mm)	-0,14697	-0,12265	-0,13341	-0,15084	-0,14967	-0,20166
	Shear Stress P1L1	15,22	16,69	17,134	19,401	17,429	18,589
	ILSS P2L1	14,329	14,825	15,143	16,837	15,373	17,232
	ILSS UD-Woven	16,165	14,572	18,916	22,737	24,112	28,28
	Max. Principal Stress (MPa)	175,19	173,59	182,7	190,63	191,88	202,66

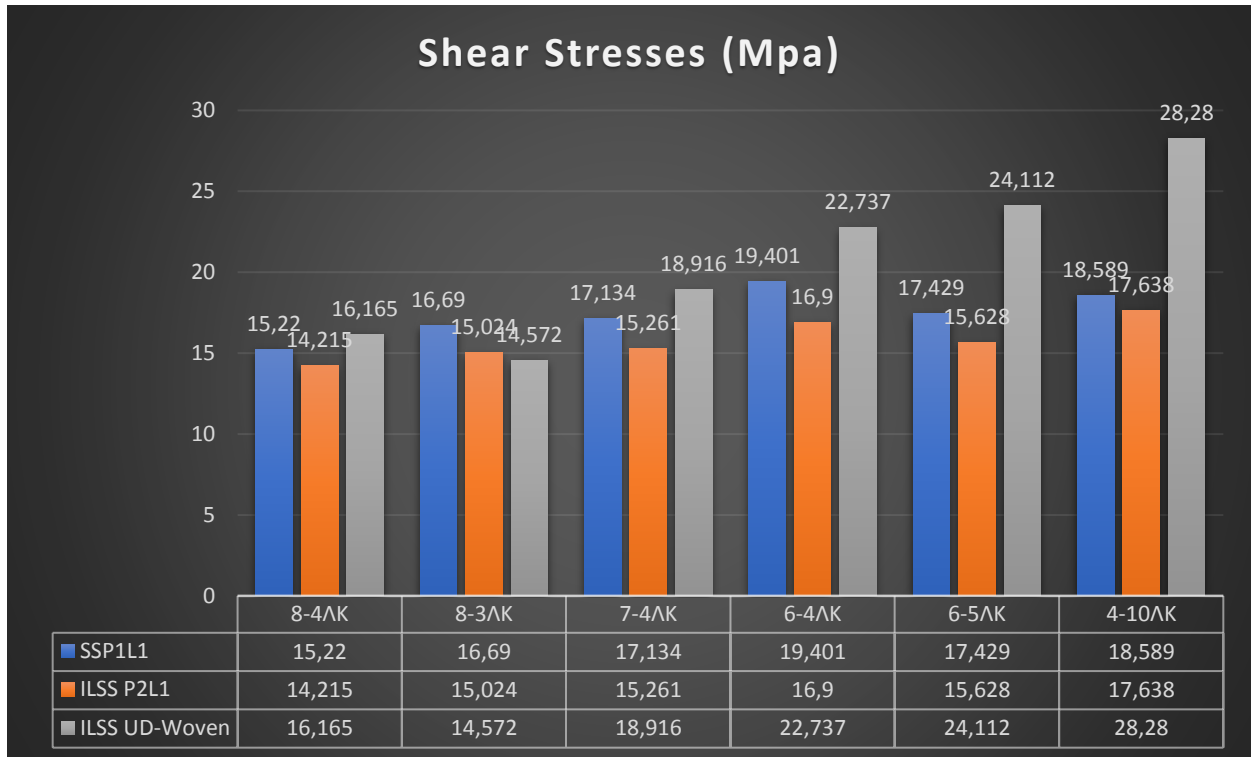
Μεγέθη για τα εσωτερικά στερεά	<b>Ls-Directional Def (mm)</b>	-0,06406	-0,06712	-0,06982	-0,08016	-0,06712	-0,10251
	<b>Rs-Directional Def (mm)</b>	-0,09795	-0,09961	-0,10852	-0,12338	-0,09961	-0,16673



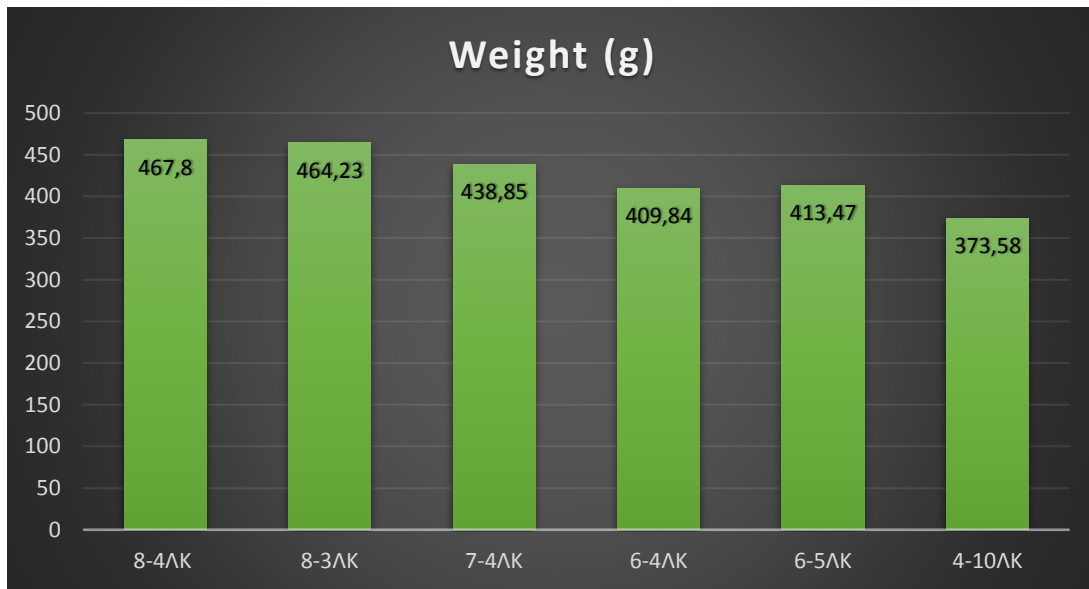
Διάγραμμα 26: Συνολική παραμόρφωση για διαφορετικές μορφές διαστρωμάτωσης



Διάγραμμα 27: Αξονική παραμόρφωση για διαφορετικές μορφές διαστρωμάτωσης

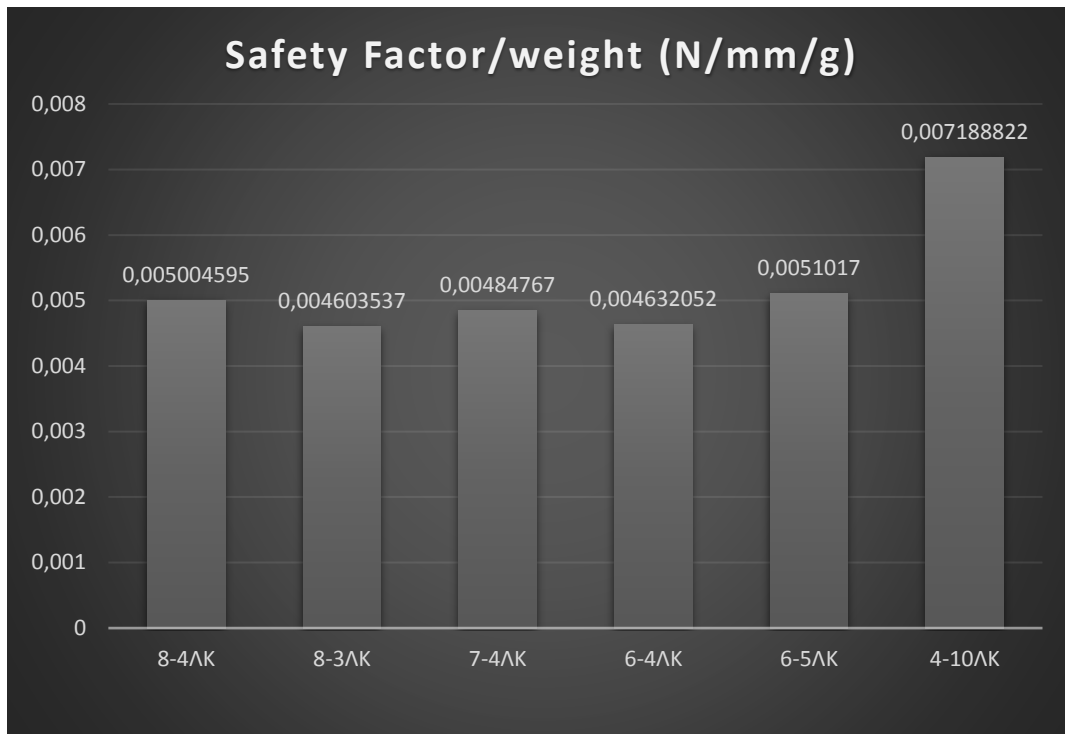


Διάγραμμα 28: Διατμητικές τάσεις για διαφορετικές μορφές διαστρωμάτωσης

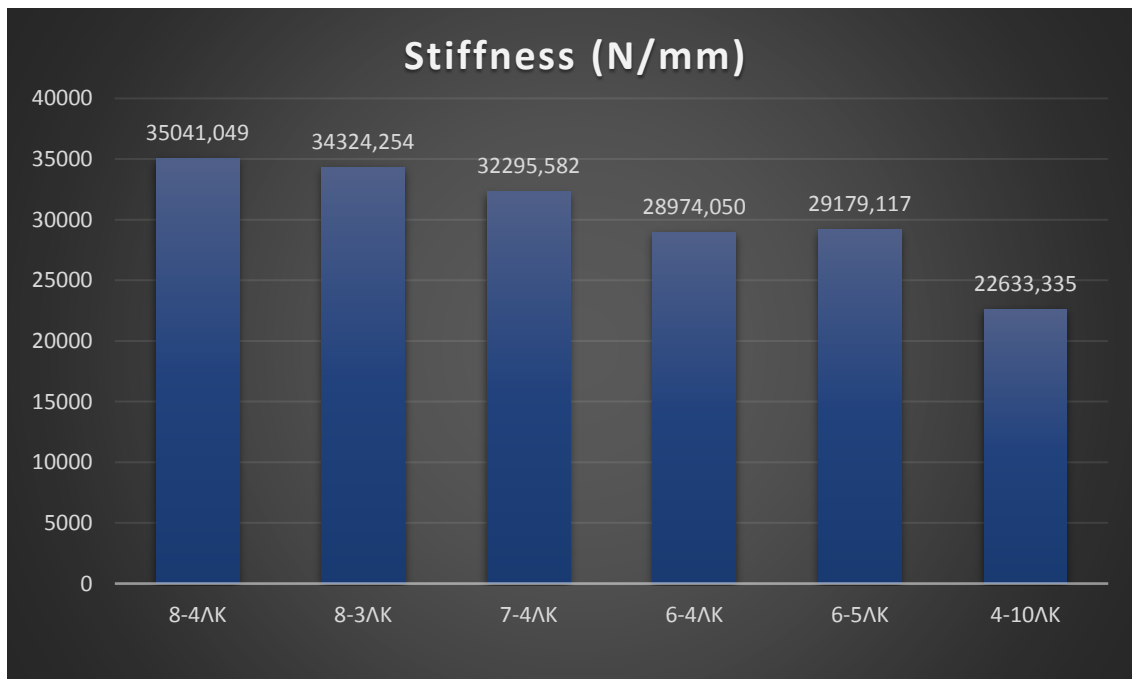


Διάγραμμα 29: Βάρη για διαφορετικές μορφές διαστρωμάτωσης

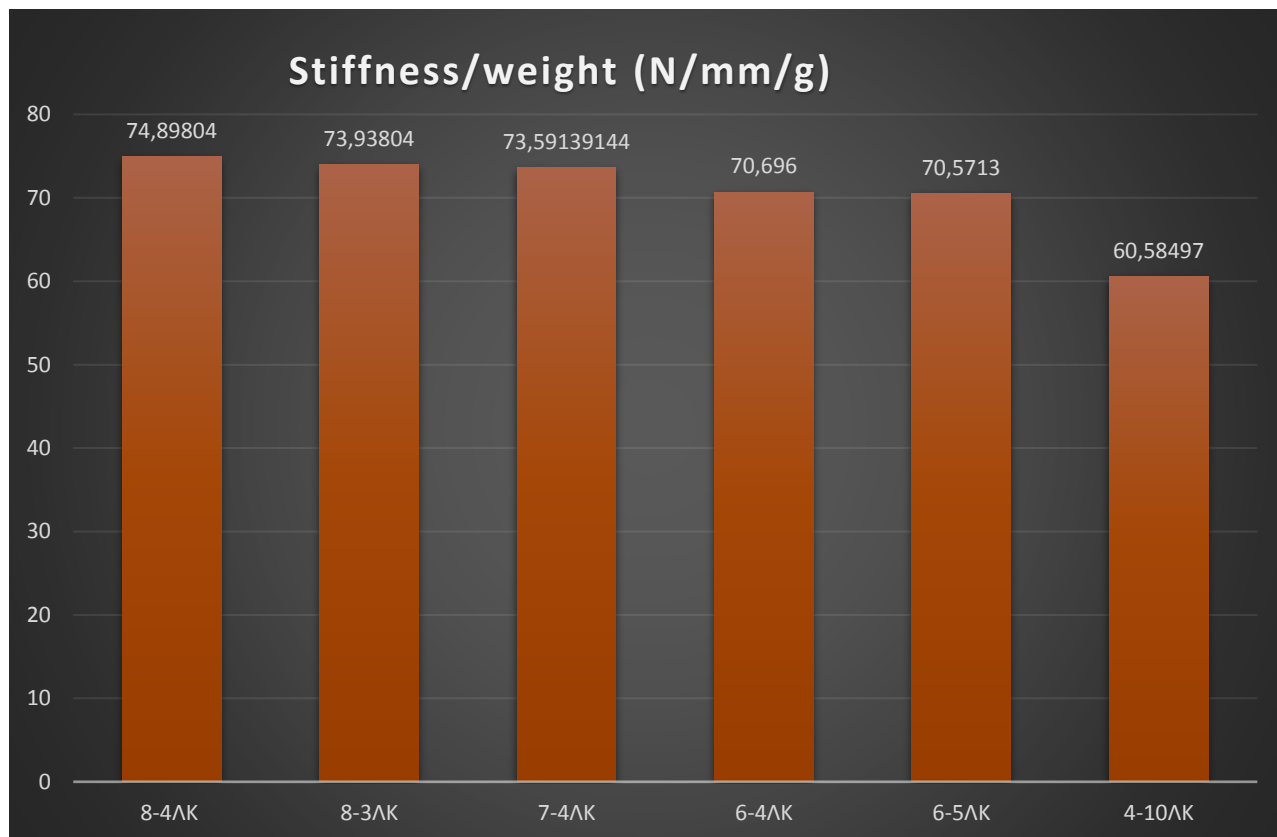




Διάγραμμα 30: Λόγος παράγοντα ασφαλείας σε σχέση με τη μάζα για διαφορετικές μορφές διαστρωμάτωσης



Διάγραμμα 31: Αντίσταση στην παραμόρφωση για διαφορετικές μορφές διαστρωμάτωσης



Διάγραμμα 32: Λόγος ακαμψίας/βάρος για διαφορετικές μορφές διαστρωμάτωσης

**Σχολιασμός διαγραμμάτων:** Από τον πίνακα ήδη έχει γίνει αντιληπτή η υπεροχή της μορφής 8-4ΛΚ. Ωστόσο, από τα παραπάνω διαγράμματα, στόχος δεν είναι μόνο η ανάδειξη της βέλτιστης μορφής, αλλά και η ταυτοποίηση της επίδρασης των διαφορετικών αλληλουχιών στρώσεων στα διάφορα εξεταζόμενα μεγέθη. Με τη σύγκριση των μοντέλων 8-4 και 8-3, αλλά και 6-4 και 6-5, που έχουν ως μόνη διαφορά τις αυξημένες στρώσεις στη διαμόρφωση, παρατηρείται μικρή απόκλιση στα μεγέθη των παραμορφώσεων, αλλά πιο σημαντική, όπως αναμενόταν, στα μεγέθη των διατμητικών τάσεων και ιδιαίτερα των διαστρωματικών. Σε αυτό προστίθεται ότι η αύξηση των στρώσεων στις διαμορφώσεις παίζει μεγαλύτερο ρόλο στην αύξηση του παράγοντα ασφαλείας για όλο το ψαλίδι, όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 30, της τάξης του 10%.

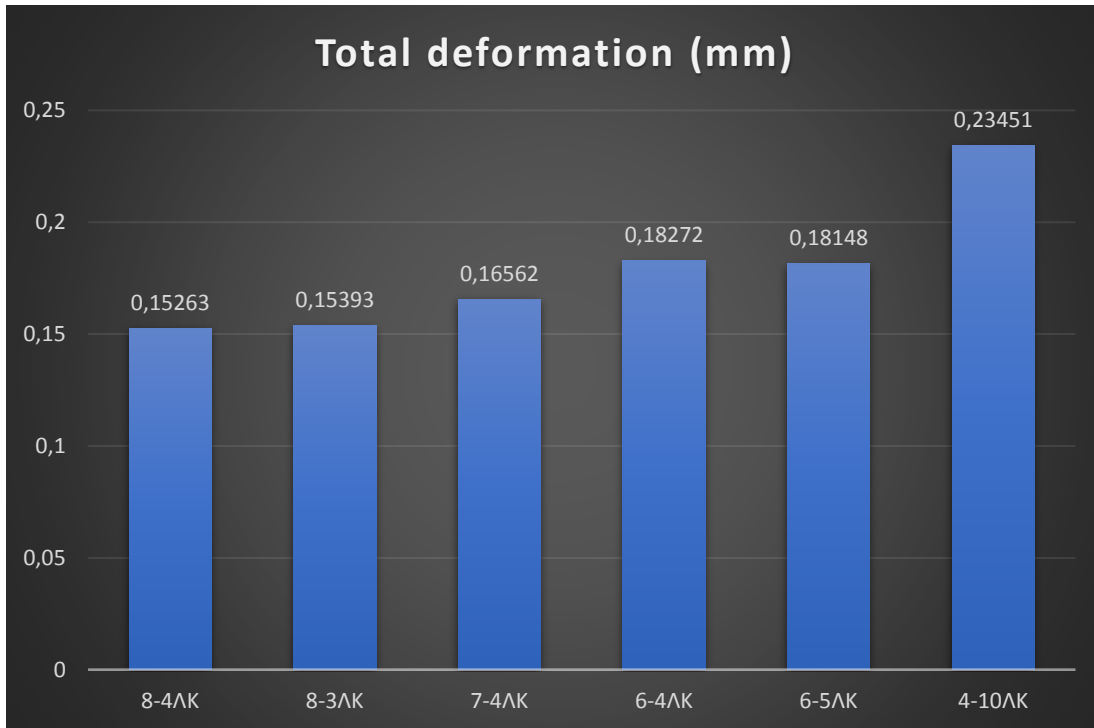
Στην ακαμψία της κατασκευής πρωτεύοντα ρόλο παίζουν οι στρώσεις του μονοδιευθυντικού στα κύρια σκέλη της κατασκευής, γεγονός που παρατηρείται και από τη ραγδαία πτώση της ακαμψίας/βάρος στην περίπτωση των τεσσάρων στρώσεων (Διάγραμμα 32)

#### 4.3.2 Θλίψη

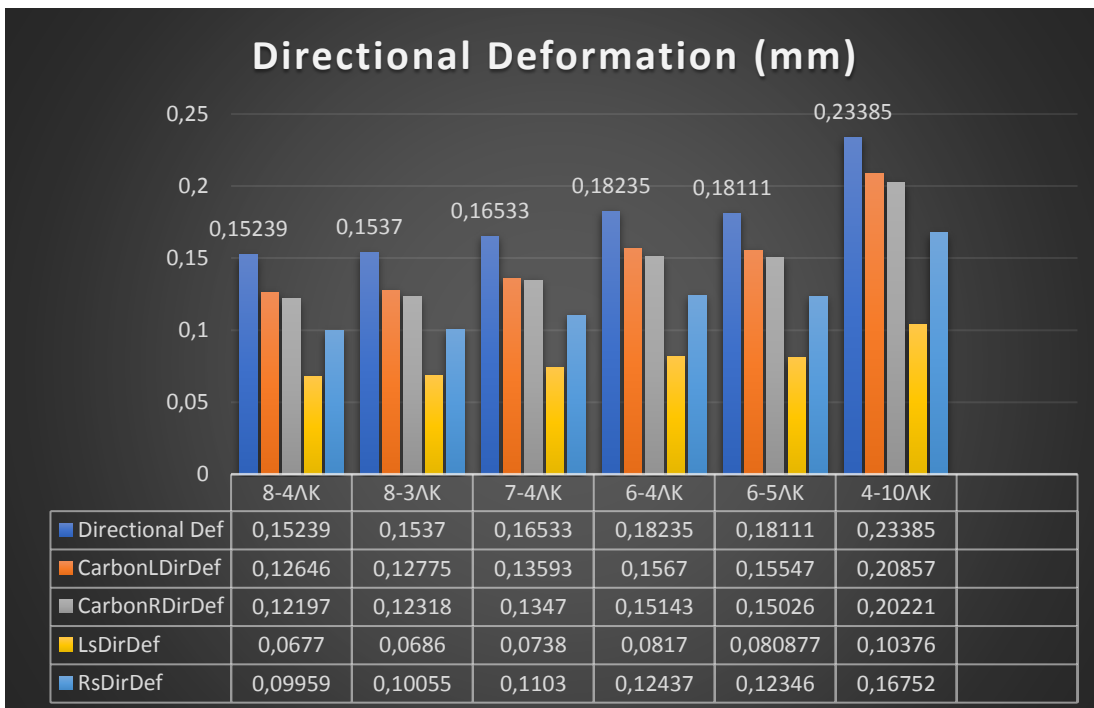
Οι αντίστοιχες τιμές για θλίψη παρουσιάζονται στον πίνακα και στα σχετικά διαγράμματα. Προηγουμένως, πρέπει να τονιστεί ότι η τιμή που λαμβάνεται στο μοντέλο για θλιπτική δύναμη είναι ίση σε μέτρο με την εφελκυστική. Στην πραγματικότητα είναι αρκετά μικρότερη. Ωστόσο, ο σχεδιασμός γίνεται με βάση τη μεγαλύτερη σε μέτρο δύναμη, οπότε η μελέτη της αντοχής σε θλίψη, στην προκειμένη περίπτωση που έχουμε φόρτιση στον ίδιο άξονα με τον εφελκυσμό, λειτουργεί ως επαλήθευση. Για να είναι εξασφαλισμένη δηλαδή η τελική πρόταση της μελέτης πριν την κατασκευή, πρέπει να καλυφθεί και αυτό το ζήτημα.

Πίνακας 17: Σύγκριση κρίσιμων μηχανικών μεγεθών για διαφορετικές διαστρωματώσεις – θλίψη

ΘΛΙΨΗ		8-4ΛΚ	8-3ΛΚ	7-4ΛΚ	6-4ΛΚ	6-5ΛΚ	4-10ΛΚ
Συνολικά μεγέθη	Total deformation(mm)	0,15263	0,15393	0,16562	0,18272	0,18148	0,23451
	Directional Deformation (mm)	0,15239	0,1537	0,16533	0,18235	0,18111	0,23385
	Weight (g)	467,8	464,23	438,85	409,84	413,47	373,58
	Stiffness (N/mm)	34726,69	34430,71	32008,71	29021,11	29219,81	22629,89
	Stiffness/Weight Ratio (N/mm/g)	74,22612	74,16735	72,9377	70,81084	70,66972	60,57576
	SF/Weight Ratio (1/g)	0,006721	0,006634	0,006566	0,006143	0,006222	0,005679
Μεγέθη για το ανθρακόνημα	Maximum Principal Stress (MPa)	76,405	78,001	86,725	99,475	97,254	117,32
	Max Principal Strain	0,002447	0,025	0,0027	0,00309	0,002733	0,003599
	Safety Factor (Min)	3,1446	3,0795	2,8816	2,5176	2,5727	2,1216
	L-Directional Def (mm)	0,12646	0,12775	0,13593	0,1567	0,15547	0,20857
	R-Directional Def. (mm)	0,12197	0,12318	0,1347	0,15143	0,15026	0,20221
	Shear Stress P1L1	15,327	16,755	17,258	17,459	17,258	18,589
	ILSS P2L1	14,215	15,024	15,261	15,751	15,628	17,638
	ILSS UD-Woven	15,875	14,84	18,867	18,895	18,867	32,033
Μεγέθη για τα εσωτερικά στερεά	Max. Principal Stress (MPa)	198,66	200,55	210,08	222,36	220,32	225,83
	LS-Directional Def (mm)	0,0677	0,0686	7,38E-02	8,17E-02	8,09E-02	0,10376
	RS-Directional Def (mm)	0,10	0,10055	0,1103	0,12437	0,12346	0,16752

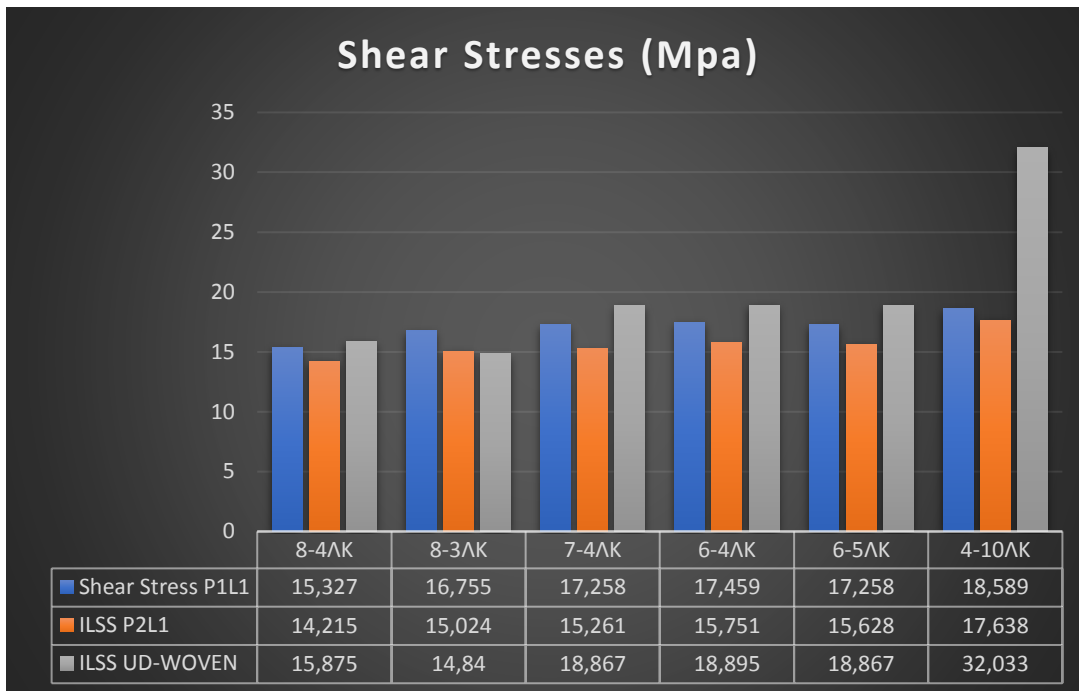


Διάγραμμα 33: Συνολική παραμόρφωση για διαφορετικές μορφές διαστρωμάτωσης



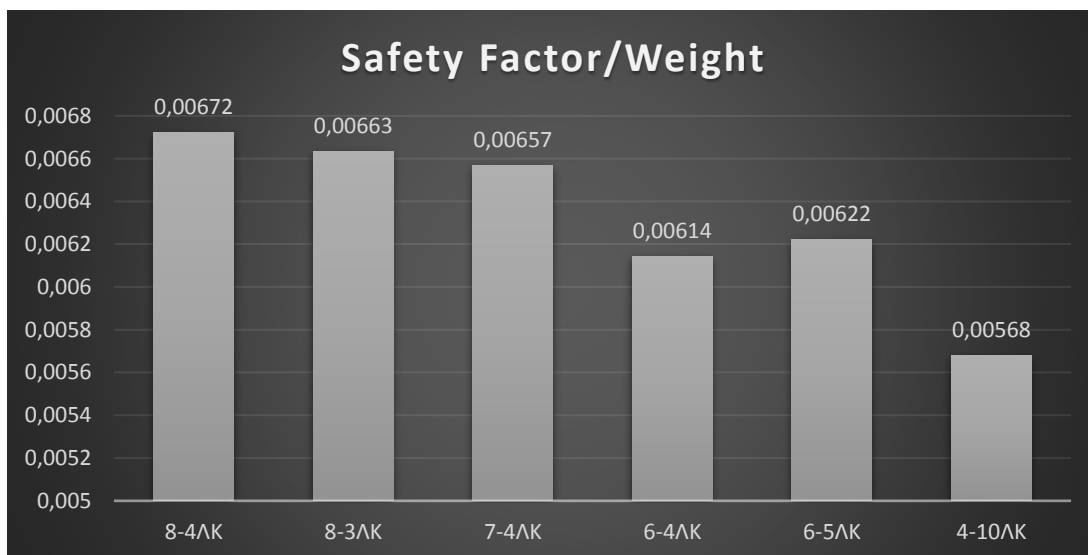
Διάγραμμα 34: Αξονική παραμόρφωση για διαφορετικές μορφές διαστρωμάτωσης

**Σχολιασμός διαγραμμάτων:** Για τη θλίψη παρατηρούνται πολύ κοντινές τιμές παραμορφώσεων σε σχέση με τις τιμές του εφελκυσμού. Και πάλι γίνεται αντιληπτό, όπως και στον εφελκυσμό, ότι στην περίπτωση της παραμόρφωσης, πρωτεύοντα ρόλο παίζουν οι στρώσεις στο διαμήκη άξονα του ψαλιδιού, και όχι αυτές στις διαμορφώσεις.



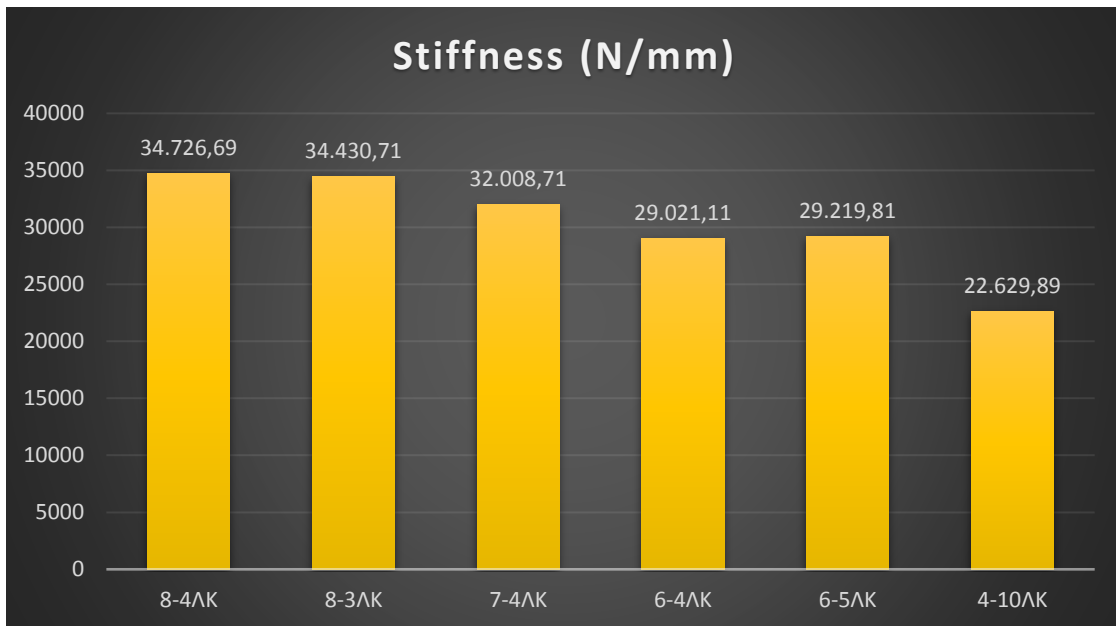
Διάγραμμα 35: Διατμητικές τάσεις για διαφορετικές μορφές διαστρωμάτωσης

**Σχολιασμός:** Η παρατήρηση με το περισσότερο ενδιαφέρον στο διάγραμμα, είναι η πολύ υψηλή (σε σχέση με τις υπόλοιπες) τιμή της διαστρωματικής διατμητικής τάσης ανάμεσα στις μονοδιευθυντικές και τις woven στρώσεις στο 4-10ΛΚ. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται αν αναλογιστεί κανείς ότι οποιοδήποτε φορτίο μεταφέρεται από τη διαμόρφωση στις UD στρώσεις, όταν πάει να περάσει στις woven και συναντάει 10 από αυτές, η δυσκολία μετακίνησής τους μεταφράζεται σε ανάπτυξη ILSS στη διεπιφάνεια μεταξύ των διαφορετικών αυτών πλέξεων ανθρακονήματος.

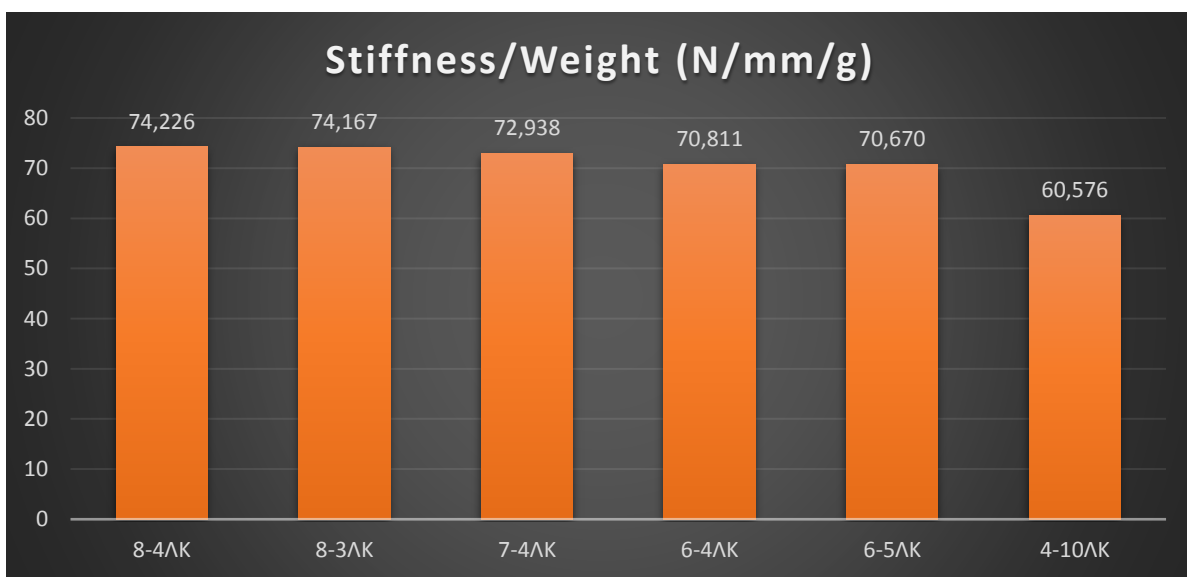


Διάγραμμα 36: Συντελεστής ασφαλείας κριτηρίων αστοχίας/βάρος για διαφορετικές μορφές διαστρωμάτωσης

**Σχολιασμός:** Στο χαρακτηριστικό αυτό διάγραμμα επιβεβαιώνεται η αξία τοποθέτησης ορισμένων παραπάνω γραμμαρίων στην κατασκευή, με το όφελος στον συντελεστή ασφαλείας να είναι μεγαλύτερο απ'ότι να λαμβανόταν ένα ρίσκο για ασήμαντα χαμηλότερο βάρος.



Διάγραμμα 37: Δυσκαμψία για διαφορετικές μορφές διαστρωμάτωσης



Διάγραμμα 38: Λόγος δυσκαμψίας/βάρους για διαφορετικές μορφές διαστρωμάτωσης

#### 4.3.2.1 Λυγισμός

Για να γίνει ολοκληρωμένη μελέτη του φαινομένου του λυγισμού, πρέπει κανείς να κινηθεί σε πολύ πιο διαφορετικό και εξεζητημένο είδος προσομοίωσης. Χρειάζεται μη γραμμικό μοντέλο για την παρακολούθηση της προόδου του φαινομένου, και την εξαγωγή συντελεστή ασφαλείας. Ωστόσο, μπορεί να γίνει μια προσέγγιση – υπολογισμός με βάση το πάχος, που αν δίνει παράγοντα ασφαλείας αρκετά μεγάλο, γίνεται αποδεκτός.

Για ένα σκέλος του ψαλιδιού έχουμε δύναμη περίπου 5kN. Η ροπή αδράνειας είναι :

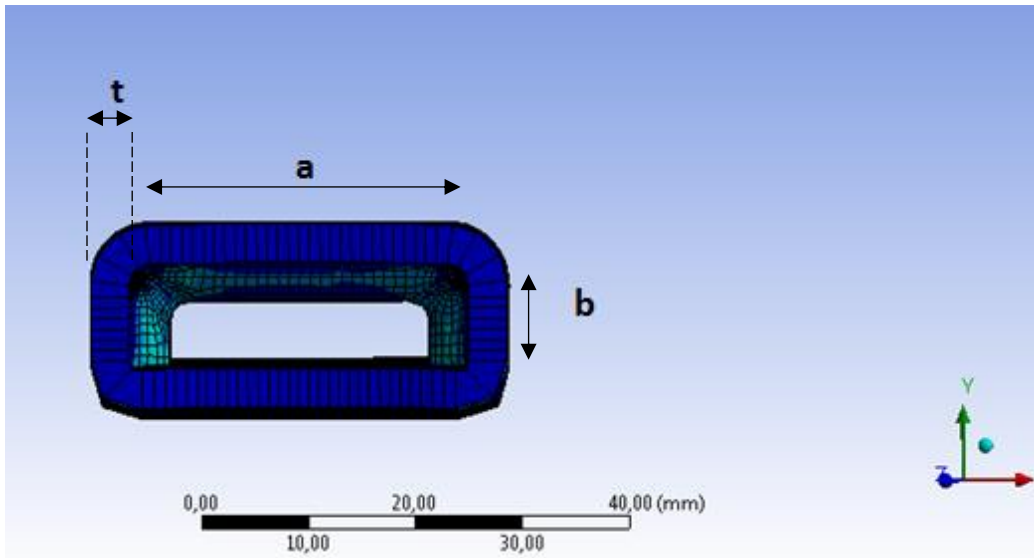
$$I_{yy} = \frac{(a + 2t) \cdot [(b + 2t)]^3}{12} - \frac{a \cdot b^3}{12} = 7275 \text{ mm}^4 \quad (23)$$

όπου :

$$a = 32 \text{ mm}$$

$$b = 10 \text{ mm}$$

$$t = 8 \text{ στρώσεις} \cdot \frac{0,3 \text{ mm}}{\text{στρώση}} = 2,4 \text{ mm}$$



Διάγραμμα 39: Διατομή του κελύφους του ψαλιδιού

Ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει επομένως είναι ο εξής

$$\text{Buckling Safety Factor} = \frac{E \cdot \pi^2 \cdot I_{yy}}{\frac{K \cdot l}{F}} = 13,744 \quad (24)$$

όπου:

$$E = 127000 \text{ MPa (βλ. Πίνακας 1)}$$

$$K = 1$$

$$l = 350 \text{ mm (το μήκος του σκέλους)}$$

$$F = 5 \text{ kN, η θλιπτική δύναμη}$$

Επομένως, με τόσο μεγάλη τιμή του συντελεστή ασφαλείας, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι έχει καλυφθεί ο παράγοντας του λυγισμού.

#### 4.3.3 Σύνοψη προτεινόμενης βέλτιστης μορφής

Η προτεινόμενη βέλτιστη μορφή για το εμπρός κάτω ψαλίδι του αγωνιστικού μονοθεσίου είναι η 8-4ΛΚ. Η απόφαση αυτή λαμβάνεται δεδομένου ότι δίνεται μεγάλη βαρύτητα στον υψηλό συντελεστή ασφαλείας για την αστοχία του σύνθετου, αλλά και στο επιδιωκόμενο stiffness. Ειδικότερα, η επικράτηση της εν λόγω μορφής διαστρωμάτωσης στα μεγέθη *Συντελεστής Ασφαλείας/Βάρος* σε θλίψη και *Ακαμψία/Βάρος* σε εφελκυσμό και θλίψη, δείχνει ότι για να επιτευχθούν τα χαρακτηριστικά αυτά για το ψαλίδι, «αξίζει» η δαπάνη σε βάρος.

Σε ό,τι αφορά όμως τη διαστρωμάτωση, εγείρεται το λογικό ερώτημα, γιατί να μην τοποθετηθεί για παράδειγμα και άλλη μια στρώση UD στη διαμήκη διεύθυνση, αφού επιτυγχάνονται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Για την ακαμψία των ψαλιδιών όπως είναι λογικό, δεν ισχύει ότι όσο μεγαλύτερη θα είναι, τόσο το καλύτερο. Εξαρτάται βέβαια αρκετά από τον οδηγό, αλλά στο σχεδιασμό των ψαλιδιών γενικά ισχύει ο εμπειρικός κανόνας ότι «η ακαμψία των ψαλιδιών θα πρέπει να είναι περίπου 5 φορές η στρεπτική ακαμψία του πλαισίου».

Επειδή για το ψαλίδι έχουμε σύστημα της κατασκευής που μελετήσαμε με τους σφαιρικούς συνδέσμους, η ολική ακαμψία θα είναι :

$$K_{total} = \frac{K_{wishbone} \cdot K_{balljoint}}{K_{wishbone} + K_{balljoint}} = \frac{35041 \cdot 78000}{35041 + 78000} = 24159,29 \text{ N/mm} \quad (25)$$

Η υπολογιζόμενη στρεπτική δυσκαμψία του σασί του μονοθεσίου είναι  $4800 \text{ Nm/deg}$ . Βάσει του εμπειρικού κανόνα λοιπόν,  $5 \cdot 4800 = 24000 \text{ N/mm}$  που είναι πολύ κοντά στο νούμερο που υπολογίστηκε.



## 5. Συμπεράσματα

### Στόχος εργασίας – μελέτης

Οι στόχοι της μελέτης ήταν οι εξής

- η κατανόηση των φαινομένων μηχανικής φόρτισης του ψαλιδιού ενός αγωνιστικού μονοθεσίου,
- η σύνθεση ενός αξιόπιστου μοντέλου προσομοίωσης των μηχανικών φορτίσεων που δέχεται ένα ψαλίδι και
- η λήψη απόφασης για σχεδιαστικές παραμέτρους και τη διαστρωμάτωση του ψαλιδιού, μέσα από τη σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς διαφορετικών προτεινόμενων μορφών.

### Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Η επικρατούσα προτεινόμενη μορφή ψαλιδιού είναι η 8-4ΛΚ. Όπως δηλώνει το όνομά της έχει 8 στρώσεις μονοδιευθυντικού υφάσματος στη διαμήκη διεύθυνση του κάθε σκέλους του ψαλιδιού και 4 στρώσεις woven plain 2x2 υφάσματος στις διαμορφώσεις. Ο δείκτης Λ δηλώνει ότι η διαμόρφωση στην κορυφή του ψαλιδιού έχει τη μορφή Λ, όπως αυτή εξηγήθηκε στην ενότητα κα. Επίσης ο δείκτης Κ δηλώνει ότι το ψαλίδι δεν καλύπτεται εξ'ολοκλήρου από ανθρακόνημα [βλ. ενότητα 4.2 Βαθμός κάλυψης του ψαλιδιού από ανθρακόνημα]. Το συνολικό βάρος του ψαλιδιού, όπως αυτό προέκυψε από την προσομοίωση, είναι 467,8 g. Το βάρος αυτό είναι σχεδόν 60% χαμηλότερο από το βάρος ενός ασάλινου ψαλιδιού, ωστόσο εξακολουθεί να είναι σχετικά υψηλό συγκριτικά με τα μοντέλα που εξετάζονται. Η απόφαση αυτή υπαγορεύεται από τον υψηλό συντελεστή ασφαλείας, μιας και ο δομικός ρόλος του μελετώμενου εξαρτήματος είναι κρίσιμος τόσο για την επίδοση του μονοθεσίου όσο και για την ασφάλεια του οδηγού.

Σημειώνεται ότι η μορφή 8-4ΛΚ, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 16, έχει την καλύτερη επίδοση στη συντριπτική πλειοψηφία των εξεταζόμενων κριτηρίων μηχανικής αξιολόγησης. Συγκεκριμένα, στα πιο σημαντικά μεγέθη, εμφανίζει μέγιστες τιμές αξονικής παραμόρφωσης 0,151 mm, ελάχιστη τιμή λόγου ακαμψίας προς βάρος 74,9 N/mm/g και ελάχιστη τιμή συντελεστή ασφαλείας για το ανθρακόνημα ίση με 3,145.

Οι τιμές αυτές συνιστούν ικανοποιητικές σχεδιαστικές προδιαγραφές του συγκεκριμένου εξαρτήματος, ενώ παράλληλα ικανοποιείται και ο στόχος μείωσης βάρους στο μονοθέσιο του οποίου θα είναι τμήματα. Αυτό σημαίνει ότι το μελετώμενο εξάρτημα μπορεί να περάσει από το σχεδιασμό στην κατασκευή.

### Μελλοντική έρευνα

Στην εργασία η κόλλα προσομοιώνεται με τη συνθήκη No Separation μεταξύ του κελύφους και των εσωτερικών στερεών [2.3.3.1 Ορισμός Διεπαφών (Contacts – Connections)]. Ωστόσο, η ακριβέστερη προσομοίωση της συμπεριφοράς της θα προϋπέθετε την εισαγωγή κριτηρίων αστοχίας της και τη μελέτη διάδοσης μιας πιθανής ρωγμής στην έκτασή της. Μια άλλη ενδιαφέρουσα παράμετρος είναι η διερεύνηση της επίδρασης του πάχους της κόλλας τόσο στην αντοχή της, όσο και στην ελαστικότητα του ψαλιδιού.

Για λόγους ασφαλείας το φαινόμενο της αστοχίας εμφανίζει ενδιαφέρον διερεύνησης ώστε μέσω της αποτύπωσης της συμπεριφοράς από την αστοχία μέχρι την πλήρη κατάρρευση του εξαρτήματος, να γίνει γνωστός ο χρόνος που θα είναι διαθέσιμος στον οδηγό, μέχρι το σημείο τερματισμού ή κάποιο σημείο ασφαλούς στάθμευσης.

## Βιβλιογραφία

ANSYS *Mechanical User's Guide*. (2017). Ansys, Inc.

Barbero, E. J. (2018). *Introduction to Composite Materials Design, Third Edition*. CRC Press.

Beer, J. D. (2015). *Mechanics of Materials, 7th Edition*. McGraw Hill.

Chand, S. (2000). Review: Carbon Fiber for composites. *Journal of Material Science*, 35, 1300 - 1313.

Gay, D. (2015). *Composite Materials, Design and Applications, 3rd Edition*. CRC Press.

Gibson, R. F. (2015). *Principles of Composite Materials Mechanics*. CRC Press.

Gokhale, N. (2008). *Practical Finite Element Analysis*. Finite to infinite, 1st Edition.

Jazar, R. N. (2012). *Vehicle Dynamics: Theory and Applications*. Spring.

Jin, F.-L. L.-J. (2015). Synthesis and application of epoxy resins: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 29, 1–11.

*Metals Handbook Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. (1990). ASM International.

Singh, J. (2015). STATIC STRUCTURAL ANALYSIS OF SUSPENSION ARM USING FINITE ELEMENT METHOD. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*.

William F. Miliken, D. L. (1995). *Race Car Vehicle Dynamics*.

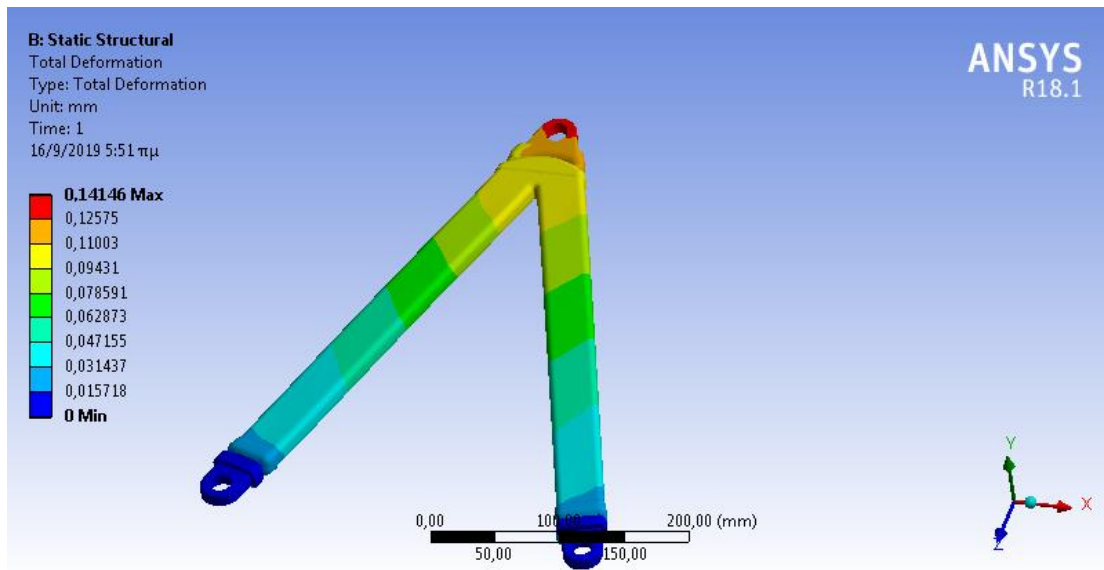
Xiaolin Chen, Y. L. (2015). *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. CRC Press.

Τσιαπάρας, Ά. (2016). Διπλωματική Εργασία: "Ανάλυση προσέγγισης σχεδιασμού συστήματος ανάρτησης πρωτότυπου αγωνιστικού οχήματος". Αθήνα: ΕΜΠ.

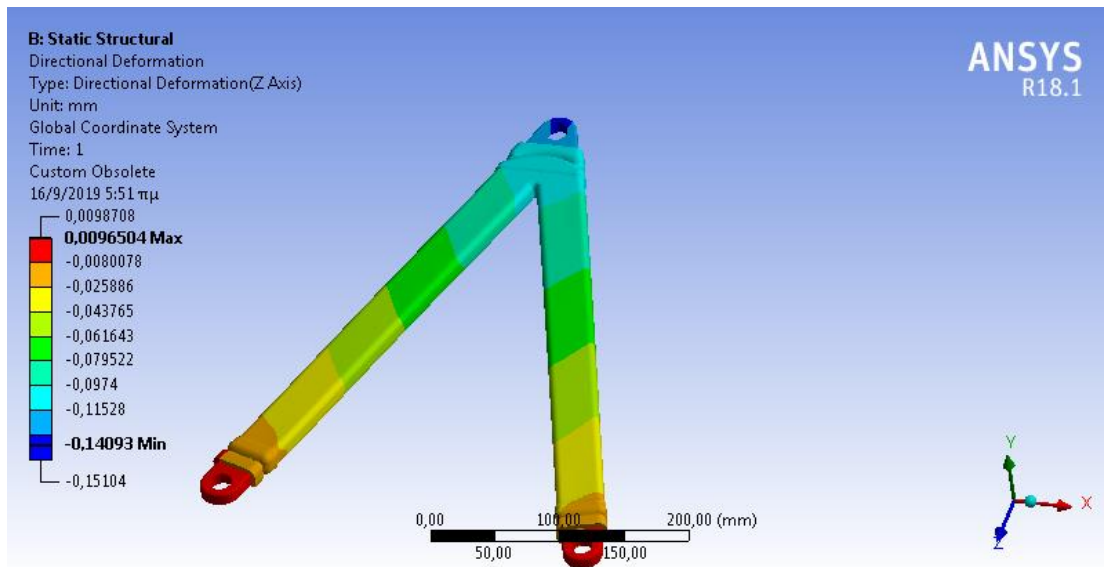
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## Σχήματα Κατανομών εξεταζόμενων μεγεθών έπειτα από Post Processing

### Παραμορφώσεις

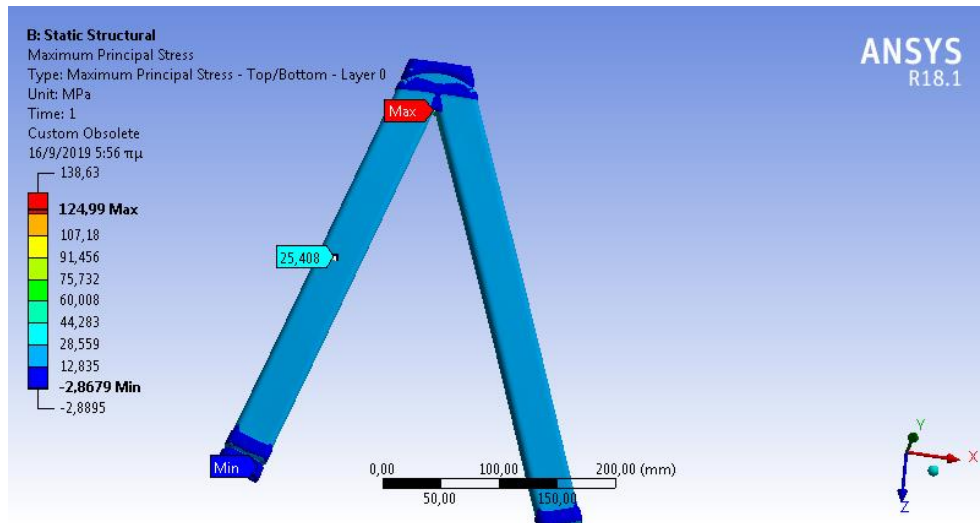


Εικόνα 59: Κατανομή συνολικής παραμόρφωσης

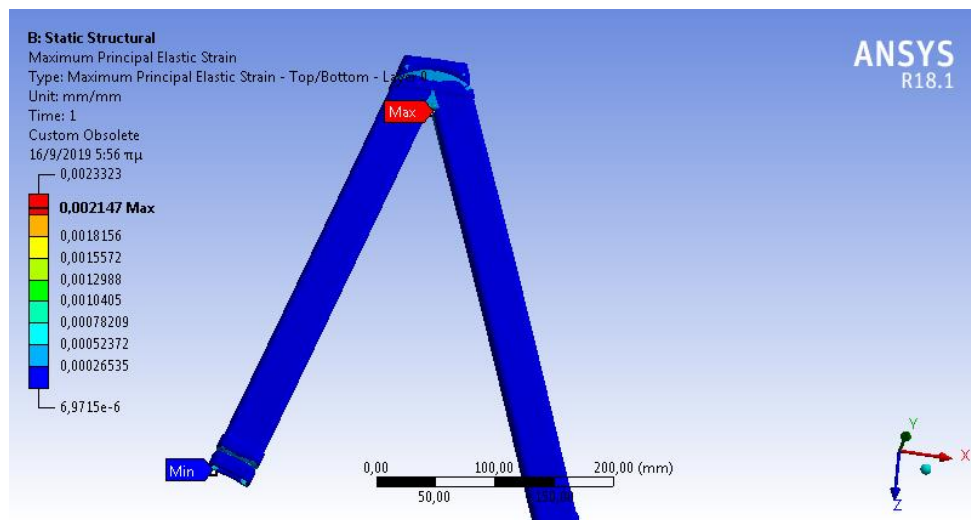


Εικόνα 60: Κατανομή αξονικής παραμόρφωσης στον άξονα z

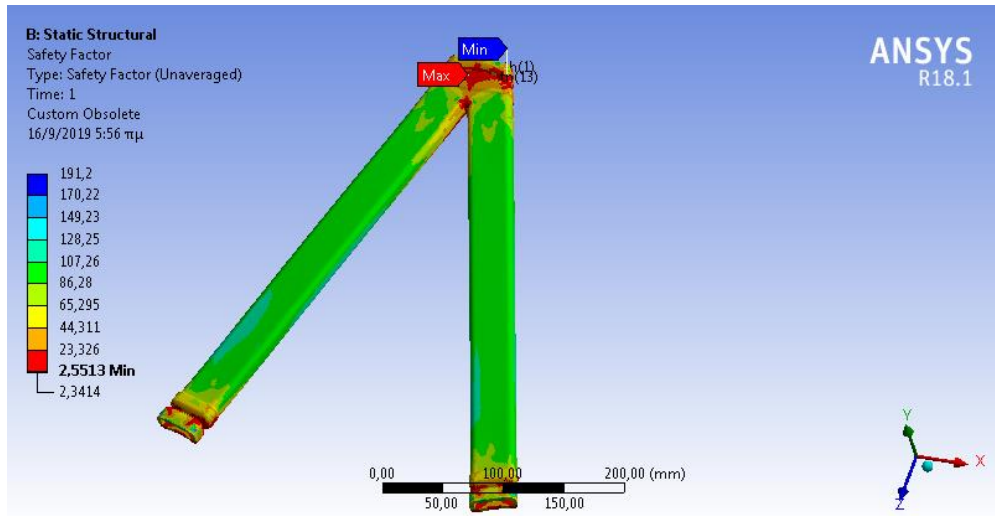
## Κατανομές για το κέλυφος από ανθρακόνημα



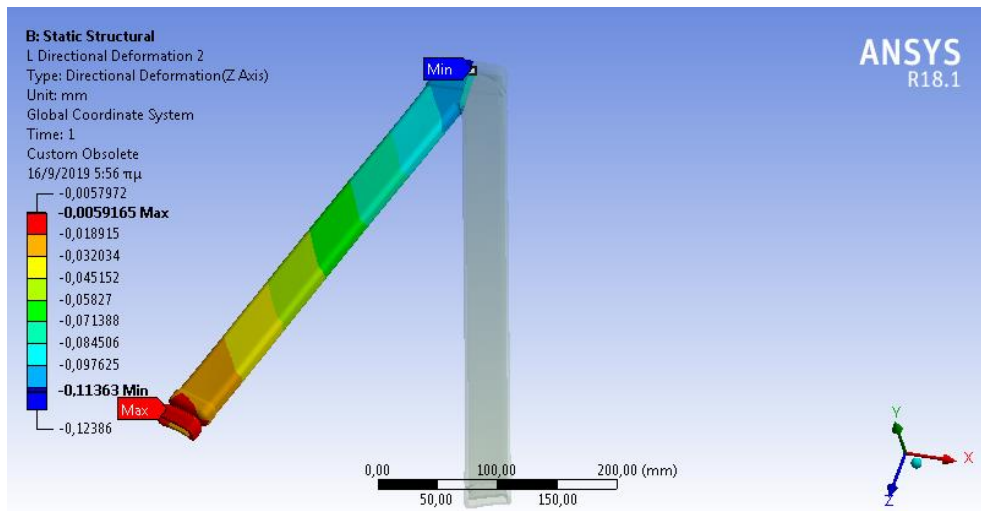
Εικόνα 61: Κατανομή μέγιστων κύριων τάσεων στο ανθρακόνημα



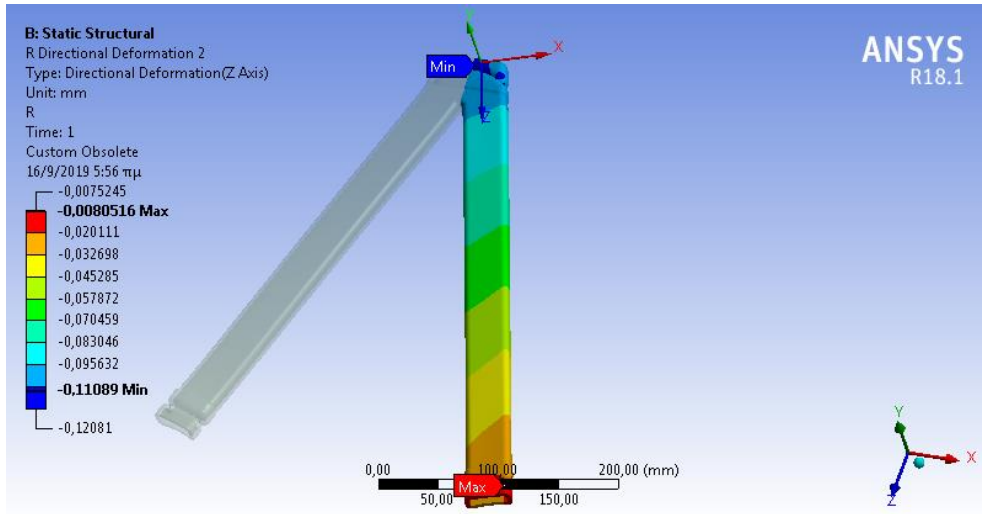
Εικόνα 62: Κατανομή μέγιστων κύριων παραμορφώσεων στο ανθρακόνημα



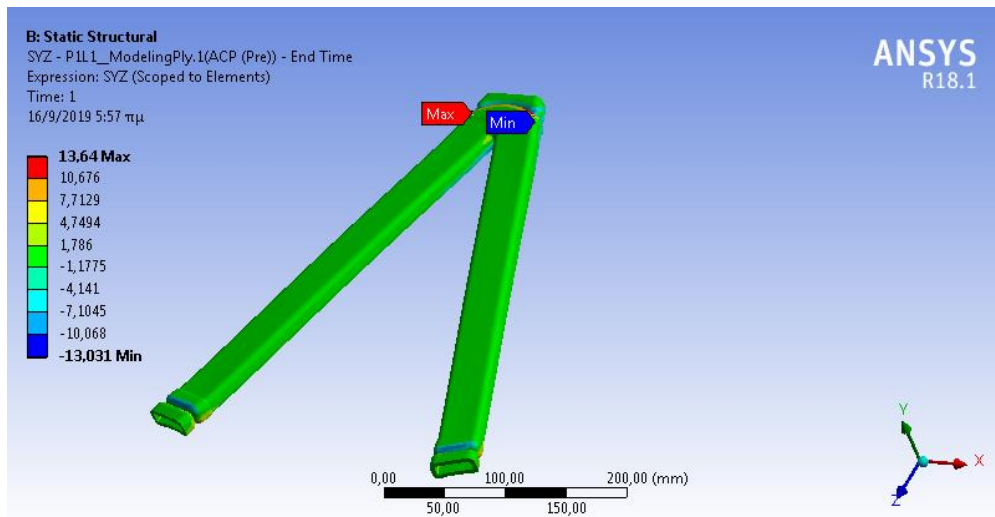
Εικόνα 63: Κατανομή συντελεστή ασφαλείας στο ανθρακόνημα, βάσει κριτηρίων αστοχίας Tsai-Hill και Tsai-Wu



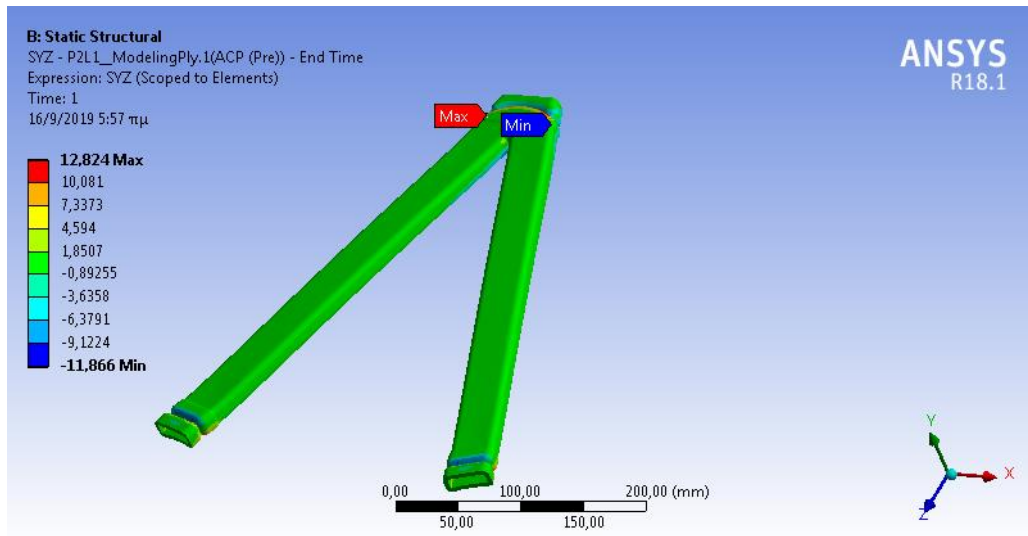
Εικόνα 64: Κατανομή αξονικής παραμόρφωσης στο ανθρακόνημα, για το αριστερό σκέλος



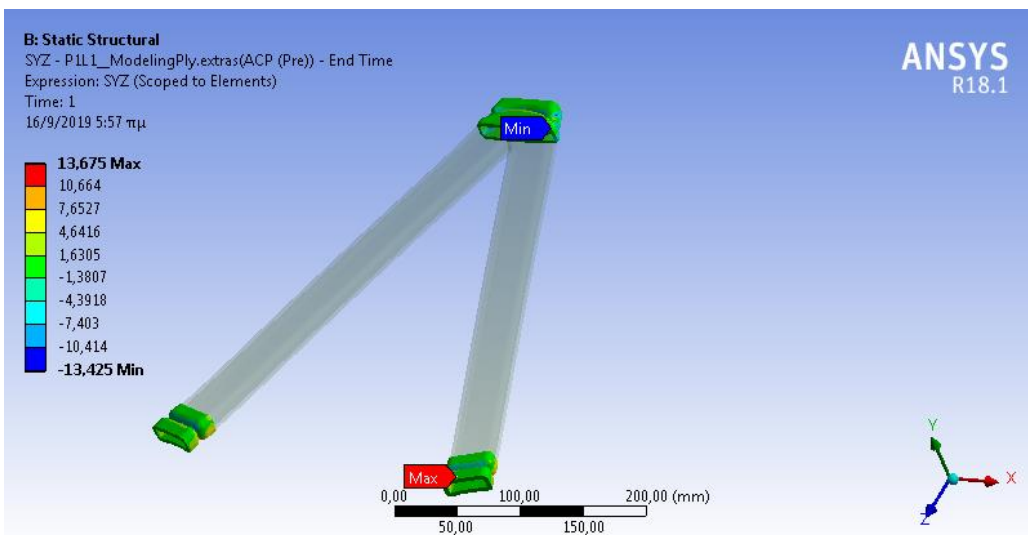
Εικόνα 65: Κατανομή αξονικής παραμόρφωσης στο ανθρακόνημα, για το δεξιό σκέλος



Εικόνα 66: Κατανομή διατμητικών τάσεων μεταξύ ανθρακονήματος και εσωτερικών στερεών

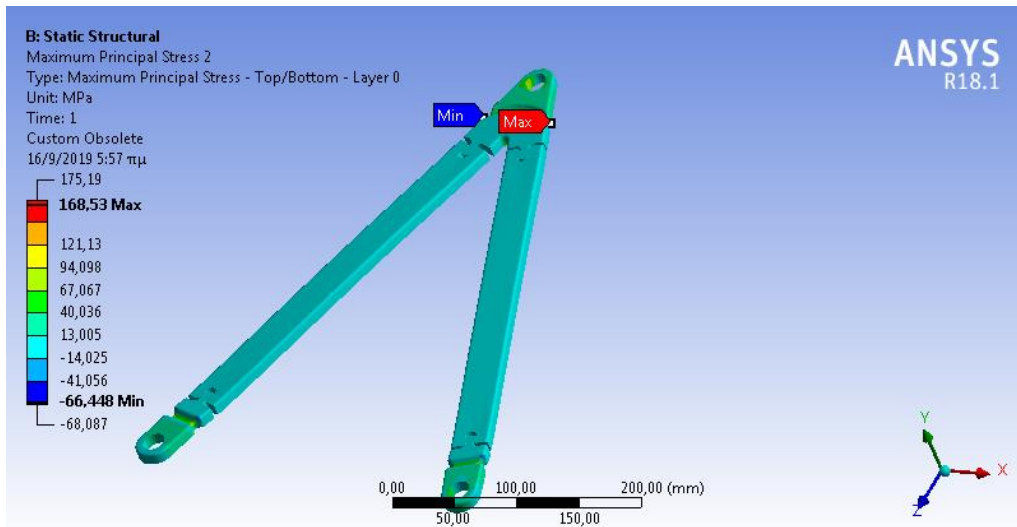


Εικόνα 67: Κατανομή διαστρωματικών διατμητικών τάσεων, μεταξύ πρώτης και δεύτερης στρώσης ανθρακονήματος

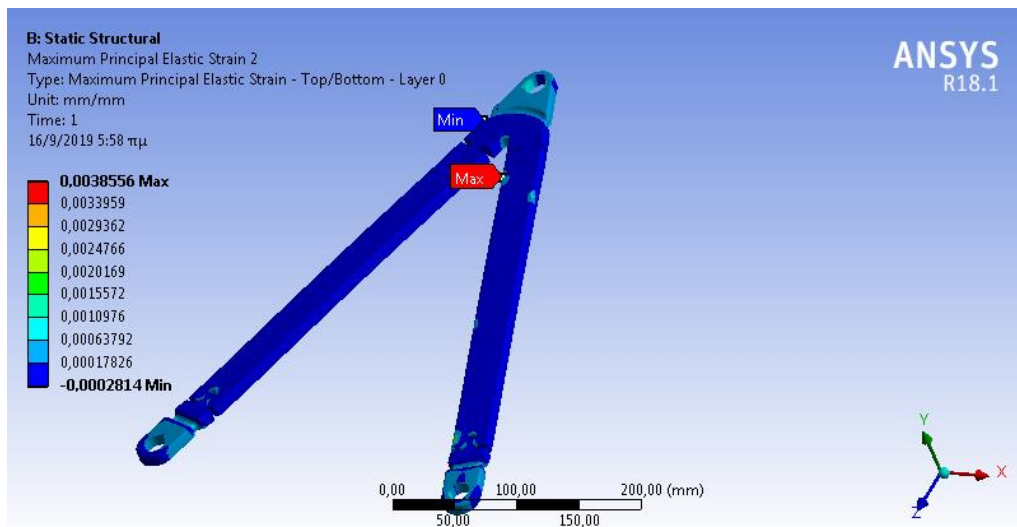


Εικόνα 68: Κατανομή διαστρωματικών διατμητικών τάσεων, ανάμεσα στην τελευταία στρώση UD και στην πρώτη στρώση wovnen ενίσχυσης στις διαμορφώσεις

## Κατανομές για τα εσωτερικά στερεά

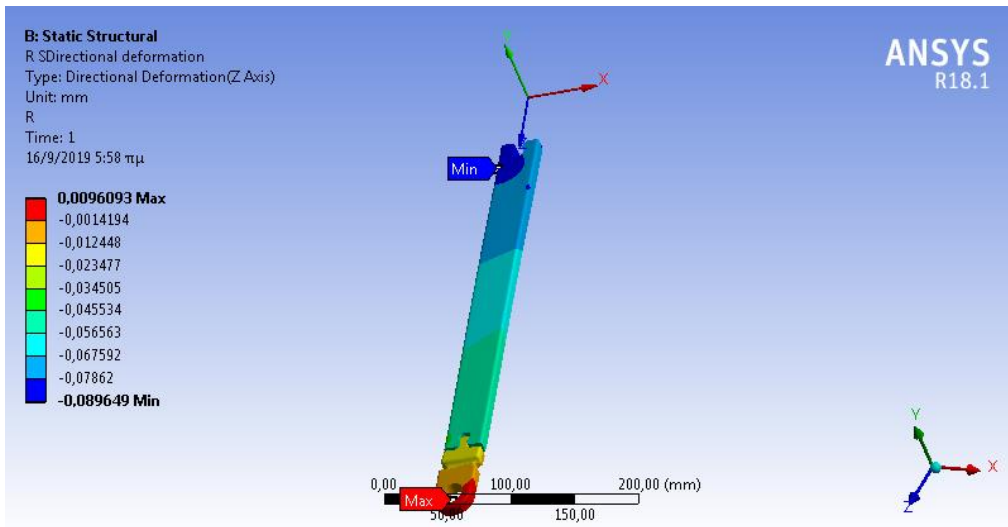


Εικόνα 69: Κατανομή μέγιστων κύριων τάσεων για τα εσωτερικά στερεά

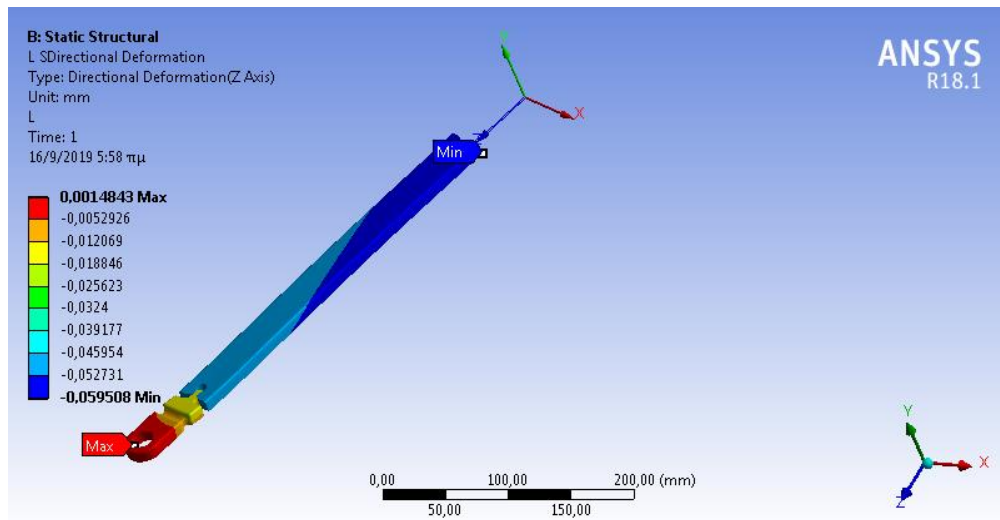


Εικόνα 70: Κατανομή μέγιστων κύριων παραμορφώσεων για τα εσωτερικά στερεά





Εικόνα 71: Κατανομή αξονικής παραμόρφωσης για τα εσωτερικά στερεά του δεξιού σκέλους



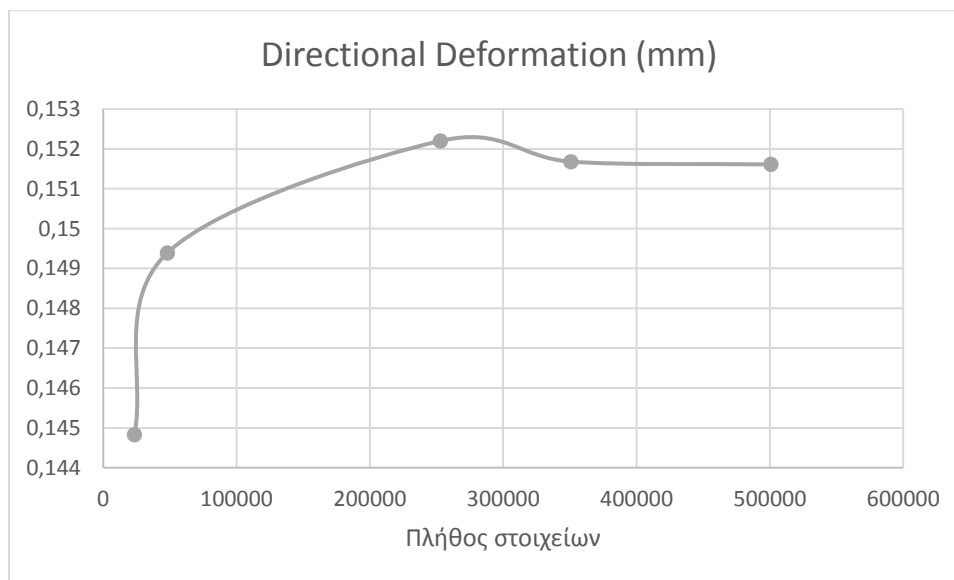
Εικόνα 72: Κατανομή αξονικής παραμόρφωσης για τα εσωτερικά στερεά του αριστερού μέλους

## Ανάλυση Ευαισθησίας για το πλέγμα διακριτοποίησης

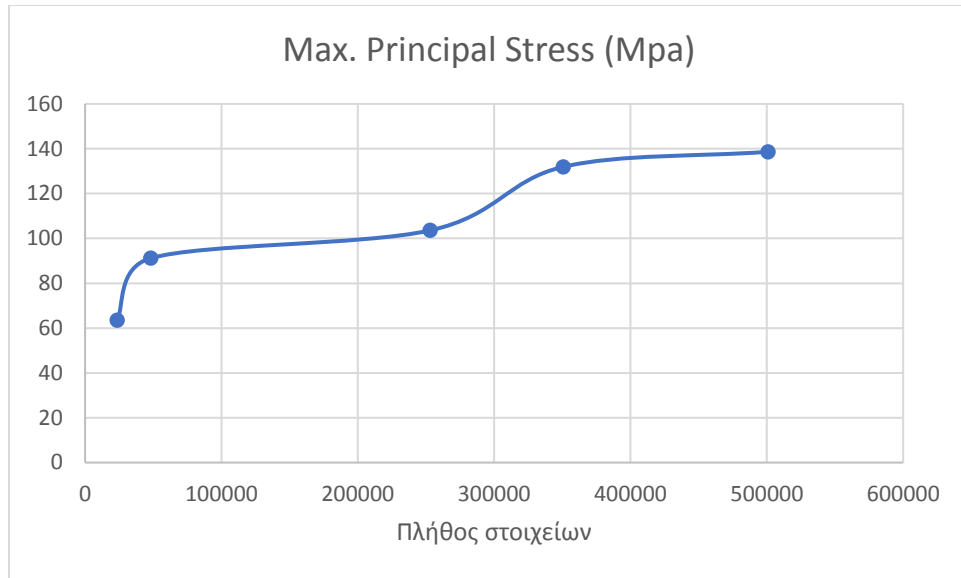
Στους στόχους που πρέπει να εκπληρωθούν κατά τον ορισμό των παραμέτρων του πλέγματος διακριτοποίησης, εκτός από την ικανοποιητική ακρίβεια, πρέπει να υπάρχει και η ευελιξία του μοντέλου. Με τον όρο ευελιξία εννοείται η δυνατότητα να επιλύονται γρήγορα και με ακρίβεια οι προσομοιώσεις, ώστε να μπορούν σύντομα να γίνουν οι δοκιμές που θα οδηγήσουν στη βελτιστοποίηση. Στα πλαίσια αυτού, πέρα από τα στοιχεία ποιότητας για το πλέγμα (βλ. , έγιναν και ορισμένες δοκιμές καταγραφής της επίδρασης της πυκνότητας του πλέγματος στις τιμές των αποτελεσμάτων. Ο πίνακας που προέκυψε είναι ο παρακάτω

Πίνακας 18: Διερεύνηση επίδρασης πυκνότητας πλέγματος στις τιμές των αποτελεσμάτων

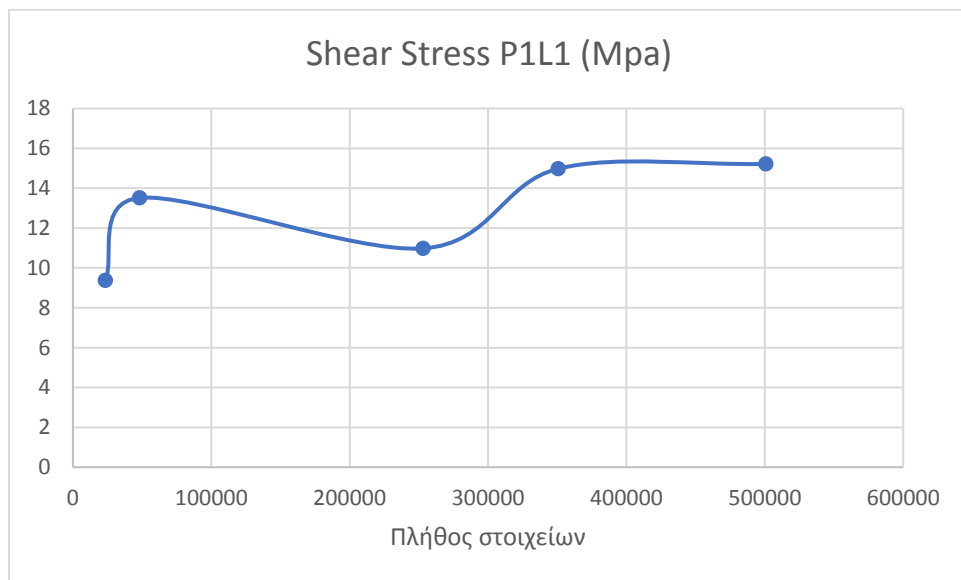
<b>Μέγεθος στοιχείου ACP (mm)</b>	1	2,25	3	5	6
<b>Μέγεθος στοιχείου εσωτ. Στερεών (mm)</b>	2,5	2,7	3	5	6
<b>Ελάχιστη ποιότητα στοιχείου</b>	0,1574	0,1088	0,044	0,0717	0,0598
<b>Μέγιστη ποιότητα στοιχείου</b>	0,99994	0,99995	0,99997	0,99998	0,99959
<b>Μέση ποιότητα στοιχείου</b>	0,82825	0,82692	0,82539	0,78697	0,83501
<b>Πλήθος κόμβων</b>	500767	350743	252962	48086	23504
<b>Πλήθος στοιχείων</b>	344616	212695	169176	29749	13780
<b>Directional Deformation (mm)</b>	0,15161	0,15168	0,1522	0,14939	0,14483
<b>Max. Principal Stress (MPa)</b>	138,63	131,94	103,56	91,163	63,559
<b>Shear Stress P1L1 (MPa)</b>	15,22	14,98	10,979	13,516	9,3833



Διάγραμμα 40: Συσχέτιση πλήθους στοιχείων με τα αποτελέσματα της αξονικής παραμόρφωσης



Διάγραμμα 41: Συσχέτιση πλήθους στοιχείων με τα αποτελέσματα των μέγιστων κύριων τάσεων



Διάγραμμα 42: Συσχέτιση πλήθους στοιχείων με τα αποτελέσματα των διατμητικών τάσεων

**Σχολιασμός:** Το γεγονός ότι και στα τρία μεγέθη παρατηρείται σταθεροποίηση της τιμής μετά τα 350000 πεπερασμένα στοιχεία, οδηγεί στην επιβεβαίωση της επιλογής των περίπου 500000 στοιχείων ως παραπάνω από επαρκή για τους σκοπούς της μελέτης.