



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ
ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΙΣΤΙΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΙΑΣΟΝΑ**

Επιβλέπων

Νικόλαος Γ. Τσούβαλης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2018

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	1
1.1	Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά	1
1.2	Ανθρακονήματα	3
1.3	Εισαγωγή στην ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.	7
1.4	Σκοπός.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ 1 ^{ΟΥ} HEADBOARD	10
2.1	Επιλογή και σχεδιασμός της γεωμετρίας του Headboard	10
2.2	Προ-επεξεργασία (Pre-Processing).....	11
2.2.1	Επιλογή τύπου στοιχείων και ιδιοτήτων υλικών.....	11
2.2.2	Δημιουργία πλέγματος (Mesh).....	16
2.3	Επίλυση (Solution).....	28
2.3.1	Συνοριακές συνθήκες.....	29
2.3.2	Φορτίσεις	32
2.4	Μετ-επεξεργασία (Post-processing)	35
2.5	Μελέτη του Headboard από Αλουμίνιο	35
2.6	Έλεγχος για λυγισμό στο Headboard από αλουμίνιο	38
2.7	Μελέτη Headboard από ίνες άνθρακα(Carbon Fiber).....	41
2.8	Έλεγχος για λυγισμό βέλτιστου headboard από CFRP.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ 2 ^{ΟΥ} HEADBOARD	64
3.1	Επιλογή και σχεδιασμός της γεωμετρίας του Headboard	64
3.2	Προ-επεξεργασία (Pre-Processing).....	65
3.2.1	Επιλογή τύπου στοιχείων και ιδιοτήτων υλικών.....	65
3.2.2	Δημιουργία πλέγματος (Mesh).....	68
3.3	Επίλυση (Solution).....	75
3.3.1	Συνοριακές συνθήκες.....	76
3.3.2	Φορτίσεις	79
3.4	Μετ-επεξεργασία (Post-processing)	83
3.5	Μελέτη του Headboard από Αλουμίνιο	84
3.6	Έλεγχος για λυγισμό του Headboard από αλουμίνιο	84
3.7	Μελέτη Headboard από ίνες άνθρακα (Carbon Fiber).....	87
3.8	Έλεγχος για λυγισμό βέλτιστου headboard από CFRP.....	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	Σύνοψη και Συμπεράσματα	102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	104

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας αυτής δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την πολύτιμη υποστήριξη του επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Νικόλαου Τσούβαλη. Θέλω να τον ευχαριστήσω για την καθοδήγησή του, τις συμβουλές του, την διάθεση του να βοηθήσει οποιαδήποτε στιγμή και την υποστήριξή του στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον Αστρινό Παπαδάκη και τον Ηλία Μπιλάλη για τις συμβουλές τους και την καθοδήγηση που μου έδωσαν καθώς και για την ψυχολογική υποστήριξη κατά τη διάρκεια της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

1.1 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά

Για ένα σύστημα ο όρος «σύνθετο» σημαίνει ότι αυτό αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Από γενική άποψη, λοιπόν, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνθετο υλικό (composite material). Πιο ειδικά, σήμερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του.

Ορισμός (Agarwal–1990): Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.

Το ένα από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως **συστατικό ενίσχυσης** και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται **μήτρα**, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

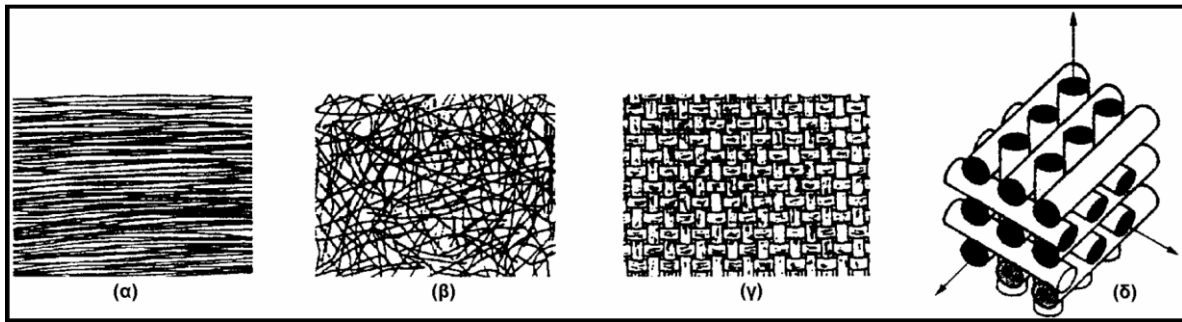
- Ινώδη σύνθετα (fibrous composites): Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας.
- Στρωματικά σύνθετα (laminated composites): Με επάλληλες στρώσεις υλικών.
- Κοκκώδη σύνθετα (particulate composites): Με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε:

- Μονοδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία, οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις.

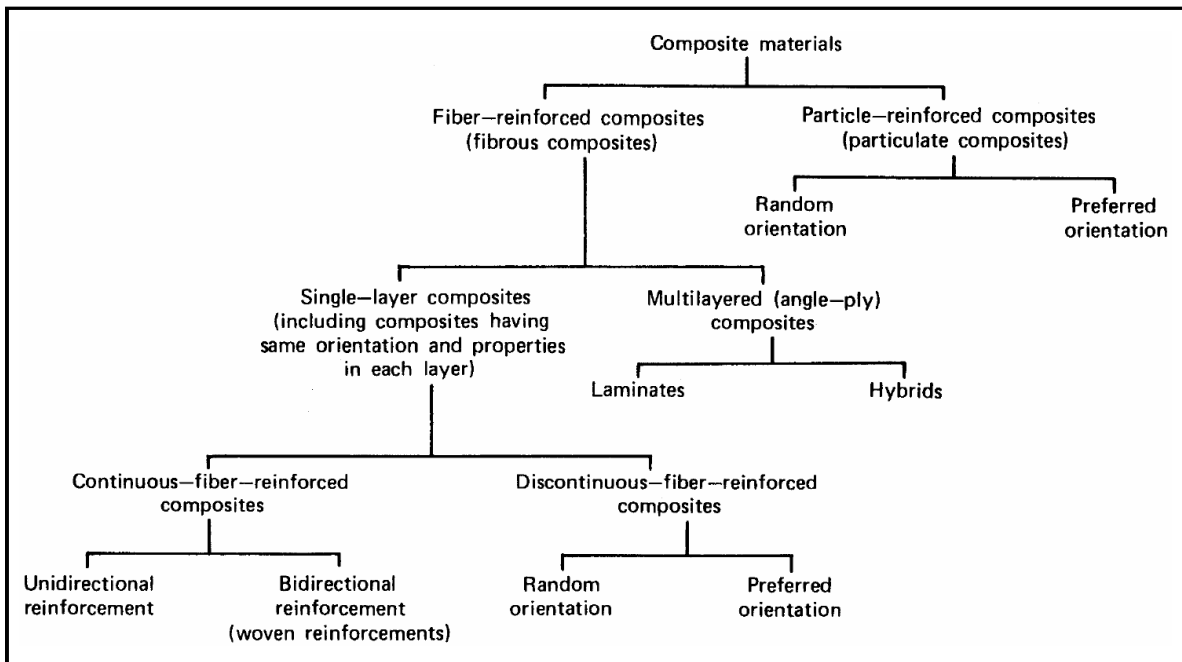
Η ιδιότητα αυτή οδηγεί άμεσα σε ταξινόμηση των πολυδιευθυντικών συνθέτων στις ακόλουθες υπο-ομάδες όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1:

- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.
- Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.
- Σύνθετα με ίνες σε τρισορθογώνια ύφανση.



Σχήμα 1.1: Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη.

Με βάση όσα έχουν ήδη αναφερθεί για τις κατηγορίες των συνθέτων υλικών, έχει καθιερωθεί η ταξινόμηση τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Γενική ταξινόμηση των συνθέτων υλικών

Πλεονεκτήματα σύνθετων υλικών

Το πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών είναι πολλά, αλλά συνήθως το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε δύο κυρίως περιοχές: το μικρό βάρος το οποίο προκύπτει από τις υψηλές ειδικές ιδιότητες (λόγος τιμής ιδιότητας προς ειδικό βάρος) και την αντοχή στην διάβρωση. Τα σύνθετα υλικά προσφέρουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες είναι ισοδύναμες ή ακόμη και καλύτερες από τον χάλυβα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι οι ιδιότητες εμφανίζονται μόνο στις διευθύνσεις των ενισχυτικών ινών (παράλληλα ή κάθετα σε αυτές). Σε άλλες διευθύνσεις οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων μπορεί να είναι σημαντικά χαμηλότερες και αυτό οφείλεται στην ανισοτροπικότητα (συχνά ορθοτροπικότητα) των σύνθετων υλικών. Βασικό πλεονέκτημα όμως είναι η δυνατότητα τοποθέτησης των

ενισχυτικών ινών στις διευθύνσεις των επιβαλλόμενων φορτίων, χρησιμοποιώντας το λιγότερο αναγκαίο υλικό και περιορίζοντας συνεπώς το βάρος της κατασκευής.

Τα σύνθετα υλικά έχουν εξαιρετική αντίσταση στη διάβρωση, ιδίως στο θαλασσινό νερό που ενδιαφέρει περισσότερο για τις ναυπηγικές κατασκευές. Τα ινώδη σύνθετα υλικά δε διαβρώνονται (με την έννοια της μείωσης του πάχους τους, όπως στα μέταλλα), δεν σαπίζουν και γενικά δεν αλλοιώνονται με κανένα τρόπο εαν εκτεθούν για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα στο θαλασσινό νερό ή αέρα.

Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι:

-Ευελιξία στην κατασκευή: Μεγάλες και πολύπλοκες κατασκευές μπορούν να κατασκευαστούν μονοκόμματα, ελαχιστοποιώντας το κόστος της μηχανικής επεξεργασίας και αποφεύγοντας την ύπαρξη ενώσεων και συνδέσμων. Το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της κατασκευής, το ίδιο το υλικό διαμορφώνεται ταυτόχρονα με το τεμάχιο, παρέχει τεράστια περιθώρια πρωτοποριακών κατασκευών, χωρίς τους περιορισμούς των συμβατικών διαδικασιών διαμόρφωσης και μηχανικής επεξεργασίας για τα μέταλλα.

-Θερμικές Ιδιότητες: Είναι δυνατό να δημιουργηθούν υλικά με πολύ χαμηλό, ακόμη και μηδενικό συντελεστή θερμικής διαστολής, έναν παράγοντα κλειδί για τον έλεγχο των ανοχών των διαστάσεων. Ακόμη, η θερμική αγωγιμότητα είναι γενικά χαμηλή, γεγονός που μπορεί να είναι σημαντικό σε μερικές περιπτώσεις.

-Κόπωση: Μερικά σύνθετα υλικά, ιδίως εκείνα με ίνες άνθρακα, παρουσιάζουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά σε κόπωση.

-Ηλεκτρικές ιδιότητες: Το FRP (Fibre Reinforced Plastic) είναι εξαιρετικός μονωτής του ηλεκτρισμού. Τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε μερικές περιπτώσεις.

-Χαρακτηριστικά απόσβεσης (damping): Τα ινώδη σύνθετα υλικά έχουν εκ κατασκευής πολύ καλά χαρακτηριστικά απόσβεσης.

1.2 Ανθρακονήματα

Προκειμένου οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται, έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E), υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό (UTS), μεγάλη ακαμψία (stiffness), υψηλή δυσθραυστότητα (toughness) και επιπλέον να έχει μικρή πυκνότητα (ρ). Όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι, συνήθως, ίνες άνθρακα (CFRP – Carbon Fibre Reinforced Plastic). Οι ίνες άνθρακα και γραφίτη είναι οι επικρατέστερες ενισχύσεις υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας.

Στον ναυπηγικό τομέα οι πρώτες εφαρμογές των σύνθετων υλικών με ανθρακονήματα έγιναν σε κατασκευές εξαρτημάτων (Σχήμα 1.3) καθώς και γαστρών (Σχήμα 1.4) για αγωνιστικά σκάφη, όπου η υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος είναι απολύτως αναγκαία. Επιπλέον το κόστος κατασκευής στις συγκεκριμένες εφαρμογές δεν αποτελεί ζήτημα. Έκτοτε

στον ναυπηγικό τομέα, σε αγωνιστικές καθώς και σε υψηλού επιπέδου κατασκευές, έχει υπάρξει σημαντική ανάπτυξη. Μερικές ακόμη εξειδικευμένες εφαρμογές όπου γίνεται χρήση ανθρακονημάτων είναι η κατασκευή ταχύπλων υδροπτερυγών, στρατιωτικών σκαφών (Σχήμα 1.5) και υψηλών απαιτήσεων υποβρύχιων οχημάτων (Σχήμα 1.6).



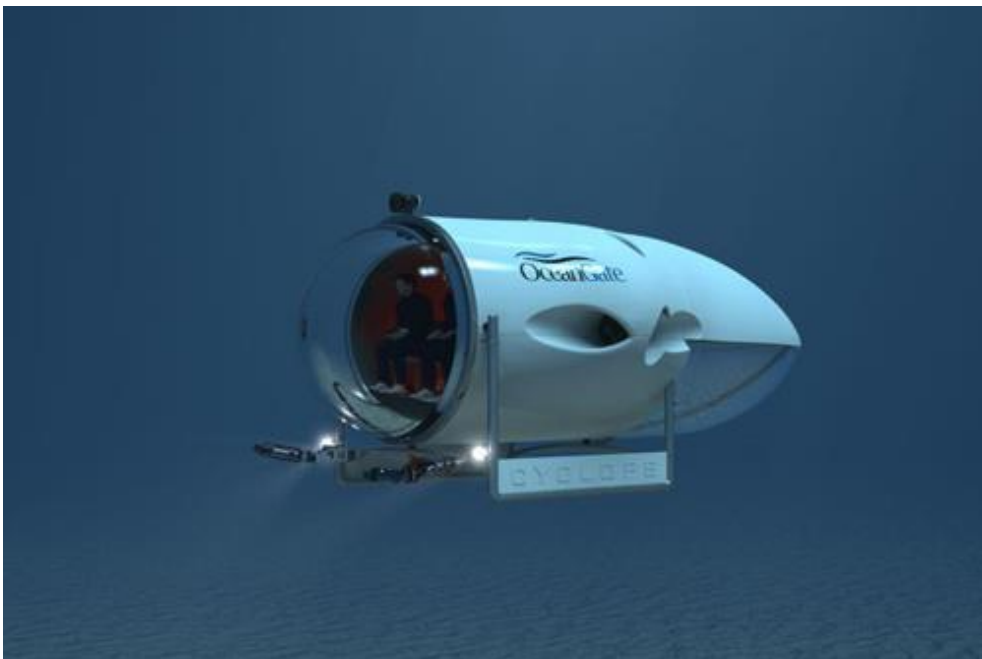
Σχήμα 1.3: Εξάρτημα Clewboard ιστιοπλοϊκού σκάφους της εταιρίας Quick Batten από CFRP



Σχήμα 1.4: Το ιστιοπλοϊκό σκάφος Comanche με κατασκευή γάστρας από προ-εμποτισμένα υφάσματα CFRP (By Billy Black - Photographer for Sail, CC BY-SA 4.0)



Σχήμα 1.5: Σκάφος stealth του Σουηδικού Ναυτικού με γάστρα από CFRP sandwich



Σχήμα 1.6: Υποβρύχιο σκάφος Cyclops της εταιρίας Oceangate με γάστρα από CFRP

Το υψηλό κόστος κατασκευής συνεχίζει να εμποδίζει την ευρεία διάδοση των σύνθετων υλικών με ανθρακονήματα στην κατασκευή γαστρών. Σε εμπορικό επίπεδο με χρήση σύνθετων υλικών με ανθρακονήματα κατασκευάζονται κατάρτια, μάτσες, φρακτές, ελικοφόροι άξονες καθώς και καταστρώματα και διάφορα άλλα μικρά εξαρτήματα. Παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια έχουν υπάρξει επιπλέον εφαρμογές, όπως η κατασκευή της χοάνης της πρύμνης, οι υπερκατασκευές σε ιστιοπλοϊκά ή στρατιωτικά σκάφη ακόμη και η κατασκευή μεγάλων ελίκων (Σχήμα 1.7). Επίσης χρησιμοποιείται σε έπιπλα σε μεγάλα σκάφη αναψυχής,

όχι για τις μηχανικές ιδιότητές τους, αλλά για την ωραία αισθητική που προσφέρει το πλεκτό ύφασμα ινών άνθρακα.



Σχήμα 1.7: Η έλικα QinetiQ Composite Propeller κατασκευασμένη από CFRP με διάμετρο 2,9 μέτρα.

1.2.1 Τρόπος κατασκευής με προεμποτισμένα υλικά (Prepreg materials)

Τα prepreg αποτελούνται από ένα υλικό ενίσχυσης (reinforcement)(ανθρακονήματα, ίνες γυαλιού κλπ) σε μονοδιευθυντική (unidirectional) ή πλεκτή (woven) μορφή προεμποτισμένα σε προκαθορισμένο και ελεγχόμενο επίπεδο μέσα σε μήτρα ρητίνης. Με τα prepreg απλά κόβουμε την επιφάνεια που χρειαζόμαστε από το ρολό υφάσματος και προχωράμε απευθείας στη διαστρωμάτωση, χωρίς να παρεμβάλλεται ανάμειξη ή χειρισμός άλλων δυνητικά επικίνδυνων χημικών. Οι στρώσεις μπορούν να τοποθετηθούν εύκολα και με ακρίβεια στο καλούπι για να δώσουν υψηλό επίπεδο στον έλεγχο του προσανατολισμού των ινών χωρίς τον κίνδυνο μετακίνησης ή την ανάπτυξη περιοχών πλούσιων σε ρητίνη κατά την μετέπειτα επεξεργασία. Όλα αυτά θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απώλεια της απόδοσης.(Καρουσάτου,2014)

Πλεονεκτήματα prepregs:

- Απλουστευμένη αποθήκευση και μειωμένα θέματα υγείας και ασφάλειας
- Επιλογές εργαλείων χαμηλού κόστους
- Μειωμένη εργασία
- Γρήγορη και απόλυτα ελεγχόμενη διαστρωμάτωση, βελτιστοποίηση και μεγιστοποίηση ιδιοτήτων τελικού προϊόντος
- Εξοικονόμηση βάρους
- Μειωμένος κίνδυνος επεξεργασίας σε σύγκριση με της διαδικασίες έγχυσης

Μειονεκτήματα prepregs:

- Υψηλό κόστος πρώτης ύλης
- Επιπλέον κόστος εξοπλισμού
- Αναγκαστική αποθήκευση υλικού σε καταψύκτη

1.3 Εισαγωγή στην ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος (δηλ. μέθοδος υπολογισμού με χρήση H/Y) για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) έρχεται να καλύψει το κενό που έχουν δημιουργήσει οι ανεπάρκειες των αναλυτικών μεθόδων. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων βασίζεται στον τρόπο με τον οποίο ασχολούνται με τη δομή και τη διαδικασία επίλυσης που ακολουθούν. Η κλασική αναλυτική μέθοδος θεωρεί τη δομή συνεχή. Από την άλλη πλευρά, στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η δομή αντιπροσωπεύεται από έναν αριθμό μεμονωμένων στοιχείων που αλληλοσυνδέονται με εξισώσεις συνέχειας. Με τη λύση αυτών των εξισώσεων, σε συνδυασμό με τις εξισώσεις ισορροπίας κάθε στοιχείου, μπορούν να υπολογιστούν τα επιθυμητά μεγέθη σε κάθε σημείο της δομής. Συνεπώς, κατά τη λύση ενός προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, αξιολογείται ολόκληρη η δομή και όχι ένα συγκεκριμένο μέρος, όπως κάνουν οι αναλυτικές μέθοδοι, επιτρέποντας έτσι τη λύση σύνθετων δομών. Η ακρίβεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι ικανοποιητική και συχνά συγκρίσιμη με τις πειραματικές μεθόδους και εξαρτάται από τις διάφορες παραμέτρους που εμπλέκονται κατά την εφαρμογή της. Αυτές οι παράμετροι ορίζονται ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια και ταχύτητα λύσης. Σε γενικές γραμμές, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων συνδυάζει την ταχύτητα και την ακρίβεια και λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των υπολογιστών τα τελευταία χρόνια, έχει αποκτήσει ευρεία εφαρμογή στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διαφόρων κατασκευών.

Υπάρχουν πολλά εμπορικά προγράμματα με δυνατότητες ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για διαφορετικές μηχανικές εφαρμογές. Βοηθούν στην επίλυση διαφόρων προβλημάτων από απλή γραμμική στατική ανάλυση μέχρι μη γραμμική μεταβατική ανάλυση. Μερικά από αυτά τα προγράμματα, όπως τα ANSYS και Abaqus, έχουν ειδικά εργαλεία για την ανάλυση σύνθετων υλικών. Δεδομένου ότι αυτά τα πακέτα λογισμικού όχι μόνο παρέχουν εργαλεία ανάλυσης, γεωμετρική μοντελοποίηση και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, αλλά επίσης μπορούν να ενσωματωθούν στη γενικότερη διαδικασία σχεδιασμού, παραγωγής και κύκλου ζωής προϊόντος, καλούνται συχνά πλήρη περιβάλλοντα ανάλυσης ή συστήματα υπολογιστικής υποστήριξης μηχανικής (CAE – Computer Aided Engineering) (Barbero, 2013).

Τα σύγχρονα λογισμικά ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA) όπως το Ansys είναι συνήθως οργανωμένα σε τρία στάδια: τον προ-επεξεργαστή, την επίλυση και τον μετ-επεξεργαστή. Στον προ-επεξεργαστή, κατασκευάζεται το μοντέλο ορίζοντας τη γεωμετρία, τις ιδιότητες των υλικών και τον τύπο στοιχείων. Τα φορτία και οι συνοριακές συνθήκες εισάγονται στο στάδιο της επίλυσης. Ακολούθως, οι αλγεβρικές εξισώσεις επιλύονται και η λύση λαμβάνεται με την μορφή μετατοπίσεων. Στο τελευταίο στάδιο – την μετ-επεξεργασία, υπολογίζονται τα υπόλοιπα μεγέθη όπως οι τάσεις και οι παραμορφώσεις. Τα αποτελέσματα

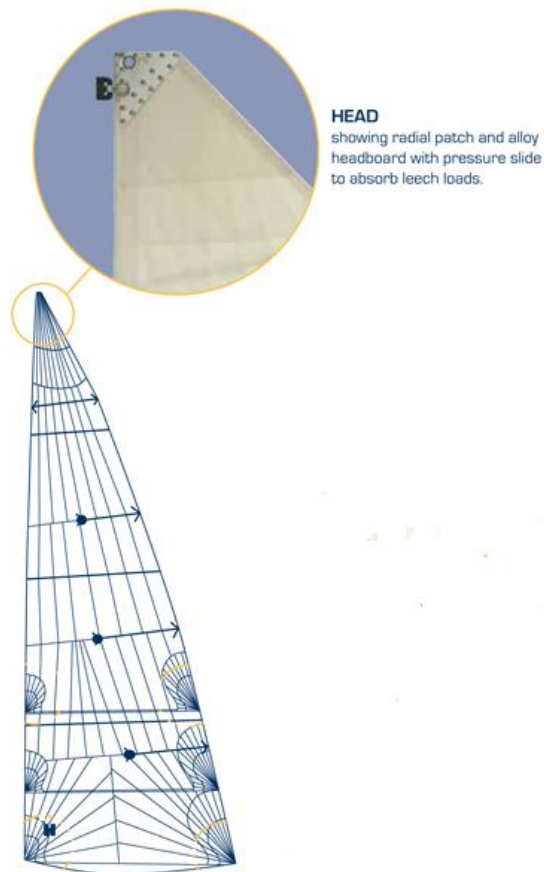
μπορούν να εξεταστούν είτε σε γραπτή μορφή είτε χρησιμοποιώντας γραφικά εργαλεία. Όλα τα παραπάνω βήματα περιγράφονται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.

1.4 Σκοπός

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εξετάζει την σχεδίαση, μοντελοποίηση και ανάλυση εξαρτημάτων από σύνθετα υλικά για χρήση σε ιστία.

Τυπικά τα εξαρτήματα των ιστίων κατασκευάζονται από αλουμίνιο. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η αντικατάσταση του αλουμινίου από σύνθετα υλικά, συγκεκριμένα από ανθρακονήματα, καθώς εμφανίζουν μεγαλύτερες αντοχές, και συνεπώς μεγαλύτερους συντελεστές ασφαλείας, και εξαιρετική αντίσταση στη διάβρωση. Επιπλέον τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν πολύ καλή αναλογία αντοχής προς βάρος που μας επιτρέπει να μειώσουμε το βάρος του εξαρτήματος.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας αναλύονται δύο γεωμετρίες **τζούντας (headboard)**, δηλαδή της πλάκας στην κορυφή του ιστίου ενός ιστιοπλοϊκού σκάφους (Σχήμα 1.8), οι οποίες υπάρχουν ήδη στο εμπόριο.



Σχήμα 1.8: Θέση του headboard στην κορυφή του ιστίου

Αρχικά γίνεται η σχεδίαση της γεωμετρίας με την βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD. Στην συνέχεια εισάγουμε την γεωμετρία στο Ansys Mechanical APDL, το οποίο είναι το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούμε.

Η σχεδίαση ενός εξαρτήματος είναι μία περίπλοκη διαδικασία και εμφανίζει πολλούς κύκλους επαναληψιμότητας. Ως αποτέλεσμα η αναλυτική παρουσίαση της διαδικασίας αποτελεί πρόκληση. Η δομή της συγκεκριμένης εργασίας βασίστηκε στα τρία διακριτά στάδια που χωρίζουν κάθε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο Ansys, τον προ-επεξεργαστή, την επίλυση και τον μετ-επεξεργαστή. Επειδή πραγματοποιήθηκαν πολυάριθμοι κύκλοι επανάληψης της διαδικασίας, μέσα στο κείμενο ορίζονται κάποια μεγέθη και εκτελούνται κάποιες εντολές με βάση συμπεράσματα που προκύπτουν σε μετέπειτα κεφάλαια της εργασίας. Τα τρία στάδια της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

Στο στάδιο του προ-επεξεργαστή, εισάγουμε όλες τις απαραίτητες μεταβλητές όπως τύπος στοιχείων, τιμές μηχανικών ιδιοτήτων, αριθμός και προσανατολισμός των στρώσεων του σύνθετου υλικού. Στην συνέχεια διαιρούμε την γεωμετρία σε πεπερασμένα στοιχεία, δηλαδή δημιουργούμε το πλέγμα του μοντέλου. Στο στάδιο της επίλυσης, αφού έχουμε δημιουργήσει το επιθυμητό πλέγμα, ορίζουμε τις τιμές και τις διευθύνσεις των φορτίσεων που ασκούνται στο μοντέλο μας, αλλά και τις συνοριακές συνθήκες και δίνουμε την εντολή επίλυσης του μοντέλου. Στο τελικό στάδιο της μετ-επεξεργασίας κάνουμε έλεγχο των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του μοντέλου και εξάγουμε τα κατάλληλα συμπεράσματα.

Λόγω της έλλειψης στοιχείων για τις δυνάμεις που ασκούνται στο headboard, αρχικά κάνουμε ανάλυση του μοντέλου κατασκευασμένου από αλουμίνιο για να προσδιορίσουμε την μέγιστη αντοχή του και να προσδιορίσουμε στην συνέχεια τις αντίστοιχες δυνάμεις που θα επιβάλλουμε και στο headboard από σύνθετα υλικά. Στην συνέχεια κάνουμε ανάλυση του μοντέλου από σύνθετα υλικά για να προσδιορίσουμε το βέλτιστο πολύστρωτο για την συγκεκριμένη φόρτιση, καθώς και το ελάχιστο δυνατό πάχος του μοντέλου ώστε να παρουσιάζει ίδια αντοχή με το μοντέλο από αλουμίνιο. Πρόσθετα στον έλεγχο της αντοχής του μοντέλου, πραγματοποιούμε ακόμη μία ανάλυση λυγισμού καθώς παρατηρείται η δημιουργία θλιπτικών τάσεων σε περιοχές του μοντέλου. Αφού ορίζεται το βέλτιστο πολύστρωτο και υπολογίζεται το ελάχιστο πάχος του μοντέλου γίνεται μία αξιολόγηση του ποσοστού μείωσης του βάρους των μοντέλων από σύνθετα υλικά σε σχέση με τα αντίστοιχα μοντέλα από αλουμίνιο.

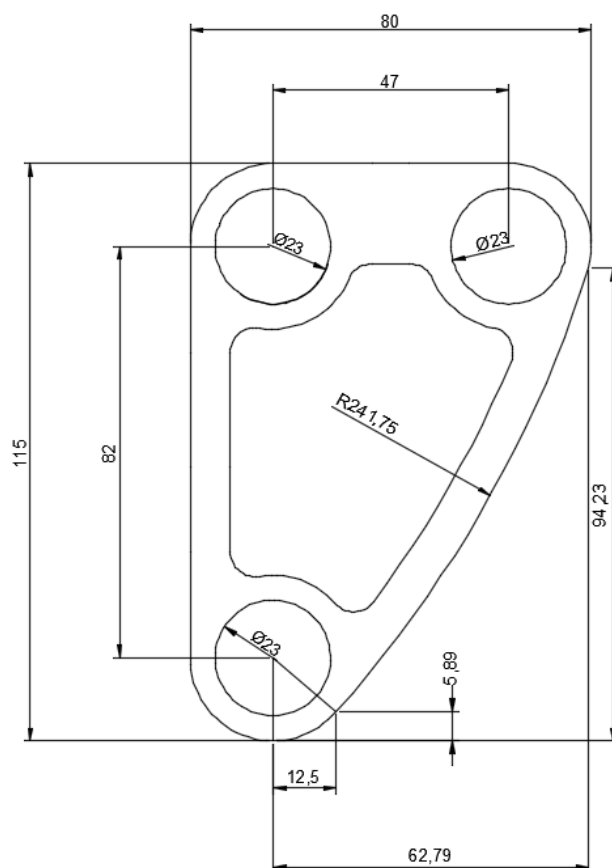
Αξίζει να σημειωθεί ότι η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε πάνω σε ένα αντικείμενο, για το οποίο δεν υπάρχει επαρκής πληροφόρηση. Το headboard ως εξάρτημα ιστιοπλοϊκού σκάφους είναι κάτι πολύ εξειδικευμένο. Το μεγαλύτερο μέρος της γνώσης πάνω στο εξάρτημα είναι καθαρά εμπειρικό και ανήκει στους αντίστοιχους κατασκευαστές εξαρτημάτων. Πειραματικές δοκιμές δεν πραγματοποιούνται στα headboard του εμπορίου παρά μόνο σε πολύ ιδιαίτερες περιπτώσεις αγωνιστικών ιστιοπλοϊκών. Ως εκ τούτου για την περάτωση της εργασίας γίνεται μία σειρά από αναγκαίες παραδοχές οι οποίες παρουσιάζονται και δικαιολογούνται μέσα στο κείμενο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ 1^{ΟΥ} HEADBOARD

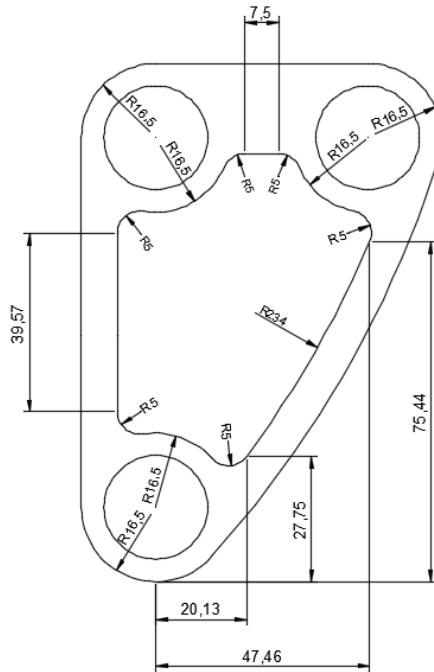
2.1 Επιλογή και σχεδιασμός της γεωμετρίας του Headboard

Για την επιλογή της γεωμετρίας του headboard που σχεδιάσαμε έγινε μία έρευνα στις διαθέσιμες γεωμετρίες που υπάρχουν στο εμπόριο. Ο στόχος ήταν η εύρεση ενός μοντέλου του οποίου θα μπορούμε με μεγάλη ακρίβεια να προσδιορίσουμε τις διαστάσεις και όλες τις σχεδιαστικές λεπτομέρειες (διάμετρος οπών, ακτίνα των fillets, καμπυλότητα της πλευράς κλπ.) καθώς και τις θέσεις και τις διευθύνσεις των συνοριακών συνθηκών και των επιβαλλόμενων φορτίων. Επιπλέον θέλαμε ένα μοντέλο με ενδιαφέρουσα γεωμετρία, με ιδιαίτερο σχεδιασμό ώστε να επιτυγχάνεται μειωμένο βάρος, π.χ. μεγάλα κενά στο εσωτερικό της επιφάνειας, όπου αυτό είναι εφικτό, καθώς και έναν όμορφο οπτικά σχεδιασμό.

Το πρώτο headboard που σχεδιάστηκε, της εταιρίας Rutgeron (Rutgeron Sail Hardware Catalog V.6), φαίνεται μαζί με τις διαστάσεις του παρακάτω, στο Σχήμα 2.1 και Σχήμα 2.2. Η γεωμετρία του headboard παραμένει σταθερή κατά την διεύθυνση του πάχους του. Γίνεται λοιπόν σχεδίαση της γεωμετρίας σε δύο διαστάσεις.



Σχήμα 2.1: Διαστάσεις της γεωμετρίας του headboard



Σχήμα 2.2: Πρόσθετες διαστάσεις της γεωμετρίας του headboard

Το Ansys Mechanical APDL προσφέρει ένα μεγάλο εύρος εργαλείων για την δημιουργία όλων των απαραίτητων γεωμετριών, τα οποία βρίσκονται στο μενού της Προ-επεξεργασίας (Pre-processing). Παρ' όλα αυτά η παρούσα μορφή του προγράμματος καθιστά την σχεδίαση μιας σύνθετης γεωμετρίας αρκετά χρονοβόρα διαδικασία. Επιλέγεται λοιπόν για την αρχική γεωμετρία να γίνει χρήση ενός καταλληλότερου προγράμματος σχεδίασης και στην συνέχεια να μεταφερθεί στο Ansys για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται είναι το AutoCAD 2015 της Autodesk.

Για να μεταφέρουμε την επιφάνεια που σχεδιάσαμε από το AutoCAD στο Ansys πρέπει πρώτα να μετατρέψουμε το αρχείο DWG σε αρχείο IGES. Μέσω του GUI (Graphic User Interface), δηλαδή του γραφικού περιβάλλοντος του προγράμματος για τον χρήστη χρησιμοποιούμε την εντολή Export → Other formats. Στην συνέχεια για να εισάγουμε το αρχείο IGES στο Ansys χρησιμοποιούμε την εντολή Import (File → Import → IGES).

2.2 Προ-επεξεργασία (Pre-Processing)

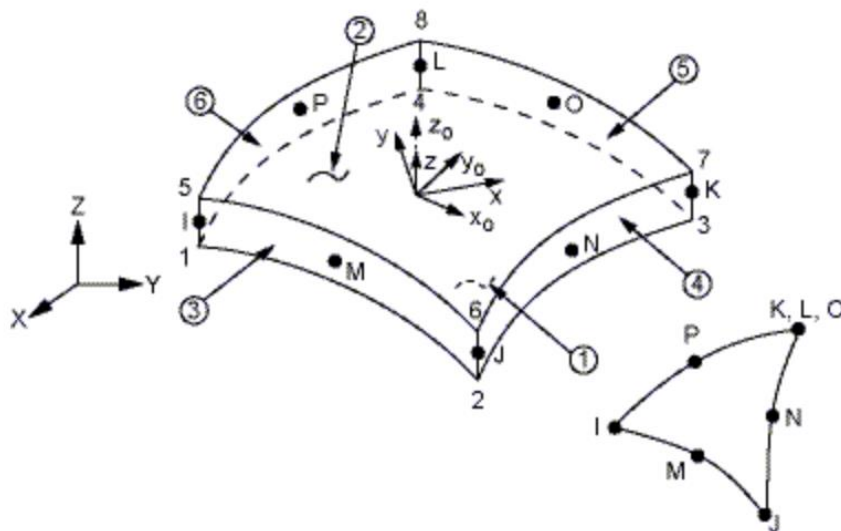
2.2.1 Επιλογή τύπου στοιχείων και ιδιοτήτων υλικών

Επιλογή τύπου στοιχείων

Στόχος είναι να μοντελοποιήσουμε την γεωμετρία που έχουμε σχεδιάσει ήδη στο AutoCAD. Αρχικά επιλέγουμε τον τύπο των στοιχείων που θα απαρτίζουν το μοντέλο μας. Η

γεωμετρία παρουσιάζει μερικά συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να λάβουμε υπόψη μας κατά την επιλογή του κατάλληλου τύπου στοιχείου. Πιο αναλυτικά, το headboard είναι μία λεπτή κατασκευή, δηλαδή το πάχος του είναι κατά πολύ μικρότερο των άλλων δύο διαστάσεών του. Η γεωμετρία επιπλέον παραμένει σταθερή κατά το πάχος της. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά μας επιτρέπουν να μοντελοποιήσουμε το πρόβλημα σε δύο διαστάσεις (2D) χρησιμοποιώντας στοιχεία τύπου κελύφους (Shell). Το headboard που θα μοντελοποιήσουμε θα είναι από σύνθετα υλικά, οπότε τελικά επιλέγεται το στοιχείο SHELL281.

Το SHELL281 είναι κατάλληλο για την ανάλυση δομών κελύφους λεπτού έως μέτριου πάχους. Το στοιχείο έχει οκτώ κόμβους με έξι βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο: Μετατοπίσεις στους άξονες x, y και z και περιστροφές γύρω από τους άξονες x, y και z. Το SHELL281 είναι κατάλληλο για γραμμικές, μεγάλης περιστροφής, και/ή μεγάλης παραμόρφωσης μη γραμμικές εφαρμογές. Το SHELL281 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές με πολλά επίπεδα για την μοντελοποίηση κελυφών από σύνθετα υλικά ή κατασκευών sandwich. Η ακρίβεια στη μοντελοποίηση των κελυφών από σύνθετα υλικά διέπεται από τη θεωρία διατμητικής παραμόρφωσης πρώτης τάξης (συνήθως αναφέρεται ως θεωρία κελύφους Mindlin-Reissner). Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η γεωμετρία, η θέση των οκτώ κόμβων και το σύστημα συντεταγμένων του στοιχείου. Το στοιχείο ορίζεται μέσω των οκτώ κόμβων του (I, J, K, L, M, N, O και P) και της διατομής του κελύφους (shell section), η οποία αναφέρεται παρακάτω. Το στοιχείο μπορεί να αποκτήσει τριγωνική μορφή αν οριστεί ο ίδιος αριθμός κόμβου για τους κόμβους K, L και O (Ansys Element Reference,2014).



x_0 = Element x-axis if element orientation is not provided
 x = Element x-axis if element orientation is provided

Σχήμα 2.3: Γεωμετρία του SHELL281

Για να ορίσουμε το επιθυμητό element type χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών: Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete → Add → (Shell → 3D 8node 281). Στην

συνέχεια ορίζουμε από την επιλογή Options μία παράμετρο του element type. Ορίζουμε την μεταβλητή Storage of Layer Data (K8) ως *All layers + Middle* για να αποθηκεύονται κατά την φάση της επίλυσης δεδομένα για όλες τις στρώσεις καθώς και για την επιφάνεια στο μέσο του πάχους της κάθε στρώσης.

Ορισμός μηχανικών ιδιοτήτων

Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούμε είναι δύο ειδών προεμποτισμένα υφάσματα. Το πρώτο αποτελείται από ύφασμα με μονοαξονικές (Unidirectional) ίνες άνθρακα και εποξική ρητίνη. Το δεύτερο αποτελείται από πλεκτό ύφασμα (Woven fabric) ινών άνθρακα και εποξική ρητίνη. Οι μηχανικές ιδιότητες που πρέπει να οριστούν για κάθε μία από τις δύο στρώσεις είναι τα μέτρα ελαστικότητας στις κύριες διευθύνσεις του υλικού (E_1, E_2, E_3), τα μέτρα διάτμησης στα επίπεδα που ορίζονται από τους παραπάνω άξονες (G_{12}, G_{13}, G_{23}) και οι αντίστοιχοι λόγοι Poisson ($\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$). Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τις τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που αφορούν συνολικά την κάθε στρώση προεμποτισμένου υφάσματος. Οι κυριότερες ιδιότητες ($E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}$) λήφθηκαν από πίνακες μέτρησης μηχανικών ιδιοτήτων στρώσεων (ACP Composites 2014). Οι υπόλοιπες ιδιότητες για τις οποίες δεν υπήρχαν στοιχεία, λήφθηκαν από την σχετική βιβλιογραφία για παρόμοια σύνθετα υλικά.

Πίνακας 2.1: Μηχανικές ιδιότητες προεμποτισμένων υφασμάτων Unidirectional και Woven

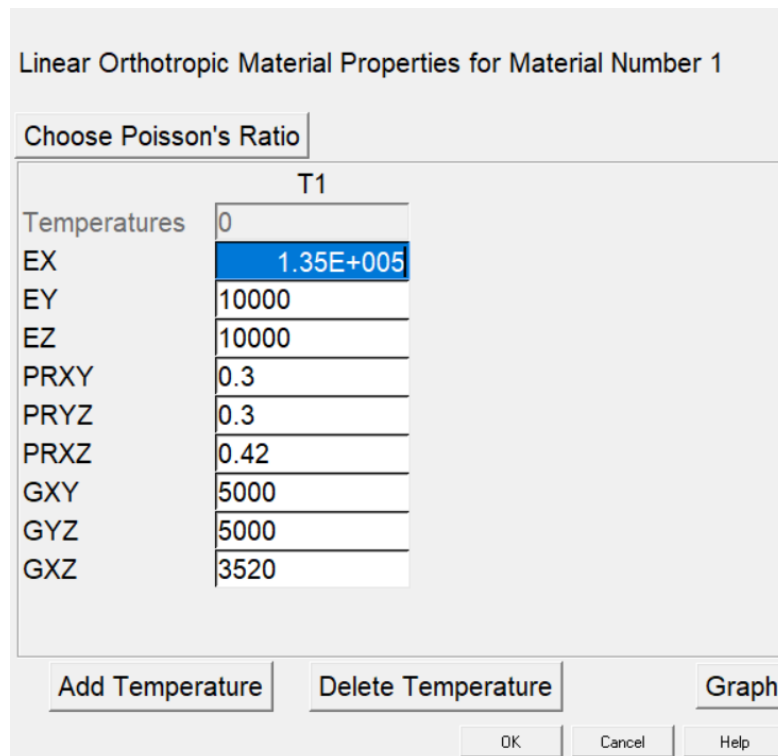
	Unidirectional	Woven
E_1	135 GPa	70 GPa
E_2	10 GPa	70 GPa
E_3	10 GPa	10 GPa
G_{12}	5 GPa	5 GPa
G_{13}	5 GPa	5 GPa
G_{23}	3.52 GPa	3.75 GPa
ν_{12}	0.3	0.1
ν_{13}	0.3	0.1
ν_{23}	0.42	0.1

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως χρειαζόμαστε επιπλέον να ορίσουμε και τις μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου. Επιλέγεται αλουμίνιο 6061-T6, και ο Πίνακας 2.2 παρουσιάζει τις ιδιότητές του.

Πίνακας 2.2: Μηχανικές ιδιότητες Al 6061-T6

E	69 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.33

Για να ορίσουμε τις μηχανικές ιδιότητες μιας στρώσης χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών: Preprocessor → Material Props → Material Models → Material Models Available (Structural → Linear → Elastic → Orthotropic).



Σχήμα 2.4: Ιδιότητες στρώσης με μονοδιευθυντικές ίνες στο Ansys

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, οι ιδιότητες της στρώσης έχουν εισαχθεί σε MPa αντί για Pa. Το Ansys ως πρόγραμμα δεν χρησιμοποιεί μονάδες και δουλεύει με αδιάστατα μεγέθη. Είναι υποχρέωση του χρήστη να διασφαλίζει σωστές μονάδες στα μεγέθη που χρησιμοποιεί. Οι διαστάσεις της γεωμετρίας στο Ansys είναι σε mm και οι δυνάμεις που ασκούνται σε Newtons. Συνεπώς οι ιδιότητες της στρώσης πρέπει να εισαχθούν σε MPa για να διασφαλίσουμε ένα συμβατό σύστημα μονάδων.

Ορισμός κύριων αντοχών των σύνθετων υλικών

Όπως προκύπτει από το στάδιο ορισμού των φορτίσεων παρακάτω, το μοντέλο υπόκειται σε διαξονική εντατική κατάσταση και για την εύρεση της αντοχής του κάνουμε χρήση ενός κριτηρίου αστοχίας. Για την χρήση των κριτηρίων αστοχίας απαιτούνται οι αντοχές του υλικού σε μονοαξονικές εντατικές καταστάσεις. Κάτι τέτοιο είναι απλό όσον αφορά τα ιστροπικά υλικά, στα οποία απαιτούνται μονάχα οι κύριες τάσεις και οι αντοχές σε εφελκυσμό, θλίψη και διάτμηση. Στην περίπτωση των ορθοτροπικών υλικών, όπως τα προεμποτισμένα υφάσματα που χρησιμοποιούμε, όπου οι αντοχές και οι ελαστικές σταθερές μεταβάλλονται στις διάφορες διευθύνσεις, μπορούν να μετρηθούν άπειρες διαφορετικές αντοχές ανάλογα με την διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Για σχεδιαστικούς σκοπούς, σε διαξονική εντατική κατάσταση, ο αριθμός των απαιτούμενων αντοχών αυτών περιορίζεται σε πέντε, στις κύριες διευθύνσεις του υλικού. Οι αντοχές αυτές είναι η αντοχή σε εφελκυσμό στη διεύθυνση 1, X_1 , η αντοχή σε

εφελκυσμό στην διεύθυνση 2, Y_t , η αντοχή σε θλίψη στη διεύθυνση 1, X_c , η αντοχή σε θλίψη στη διεύθυνση 2, Y_c , και η αντοχή σε διάτμηση στο επίπεδο 1-2, S (Τσούβαλης, 1998). Παρ'όλα αυτά στο Ansys απαιτείται η εισαγωγή των αντοχών σε εφελκυσμό και θλίψη του υλικού και στις τρεις διευθύνσεις X, Y, Z καθώς και οι αντοχές σε διάτμηση και στα τρία επίπεδα XY, YZ, XZ. Ο Πίνακας 2.3 παρουσιάζει τις τιμές των αντοχών. Σημειώνεται ότι οι αντοχές σε θλίψη έχουν αρνητικό πρόσημο, καθώς το Ansys ορίζει τις θλιπτικές αντοχές ως αρνητικές.

Πίνακας 2.3 Αντοχές στις κύριες διευθύνσεις του υλικού

Αντοχή σε εφελκυσμό	Unidirectional	Woven
X_t (MPa)	1500	600
Y_t (MPa)	50	600
Z_t (MPa)	50	50
Αντοχή σε θλίψη		
X_c (MPa)	-1200	-570
Y_c (MPa)	-250	-570
Z_c (MPa)	-250	-250
Αντοχή σε διάτμηση		
XY (MPa)	70	90
YZ (MPa)	70	70
XZ (MPa)	70	70

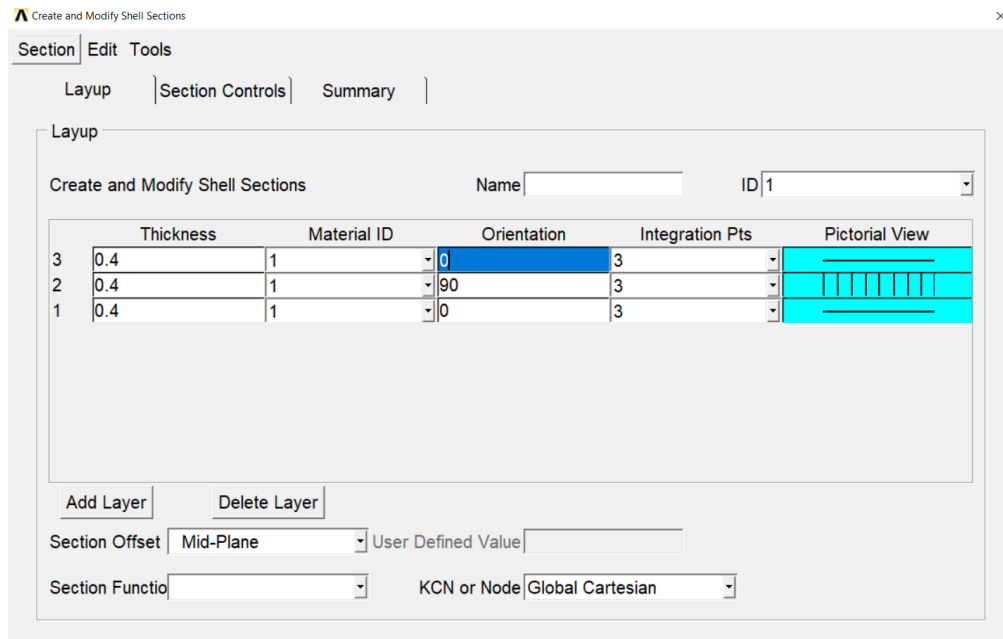
Για να ορίσουμε τις αντοχές στις κύριες διευθύνσεις ενός υλικού χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών: Preprocessor → Material Props → Failure Criteria → Add/Edit → Material Number.

Ορισμός της διατομής των στοιχείων

Για να ορίσουμε τις ιδιότητες της διατομής των στοιχείων χρησιμοποιούμε το μενού Section για στοιχεία κελύφους (Σχήμα 2.5). Στο μενού αυτό μπορούμε να ορίσουμε τον αριθμό των στρώσεων, το πάχος κάθε στρώσης καθώς και τον προσανατολισμό των ινών.

Με την χρήση των εντολών Add Layer/Delete Layer προσθαφαιρούμε στρώσεις στο μοντέλο μας. Η διάσταση του πάχους κάθε στρώσης ορίζεται μέσω της μεταβλητής Thickness. Ο προσανατολισμός των ινών κάθε στρώσης ορίζεται μέσω της μεταβλητής Orientation (Ansys Composite PrePost User's Guide, 2014).

Το πάχος του headboard από αλουμίνιο λαμβάνεται από τον κατάλογο του κατασκευαστή (Rutgerson Sail Hardware Catalog V.6) ίσο με 2 mm. Για τους αρχικούς υπολογισμούς του headboard από σύνθετα υλικά, το πάχος όλων των στρώσεων του λαμβάνεται και αυτό ίσο με 2 mm.

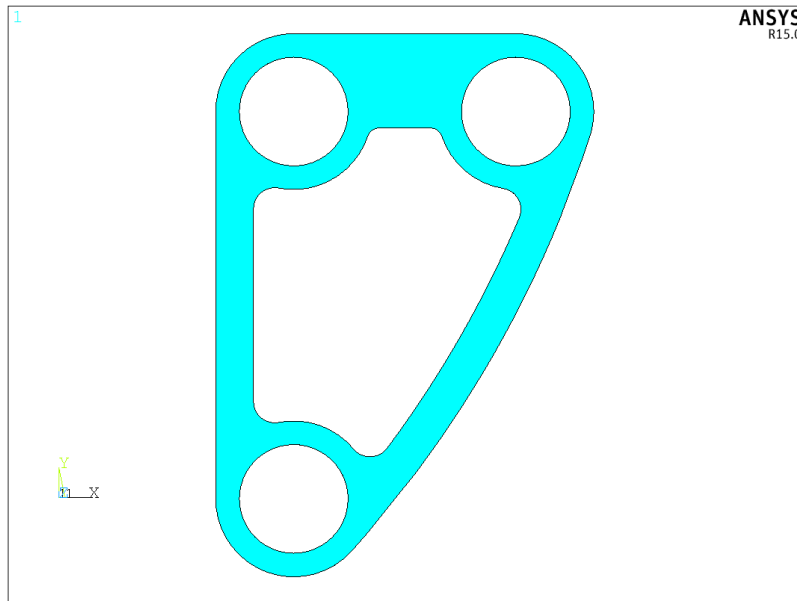


Σχήμα 2.5: Υπομενού του Section για Shell elements

2.2.2 Δημιουργία πλέγματος (Mesh)

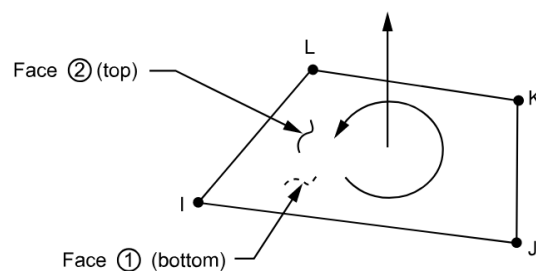
Δημιουργία επιφανειών

Η γεωμετρία που έχουμε εισάγει από το AutoCAD περιλαμβάνει μόνο το περίγραμμα της γεωμετρίας. Για να δημιουργήσουμε το πλέγμα των στοιχείων Shell281 πρέπει αρχικά να δημιουργήσουμε την επιφάνεια του headboard. Η επιφάνεια ορίζεται με βάση τις γραμμές που έχουν εισαχθεί, οι οποίες αποτελούν τα όρια της (Σχήμα 2.6). Χρησιμοποιώ την ακολουθία εντολών: Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Arbitrary → By Lines. Η τελική επιφάνεια φαίνεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Επιφάνεια του μοντέλου

Κατά την δημιουργία μοντέλου με shell elements πρέπει να προσέχουμε την φορά των επιφανειών των στοιχείων όταν εφαρμόζουμε επιφανειακά φορτία. Εξ' ορισμού το φορτίο που ασκείται σε μία επιφάνεια, ασκείται στην πλευρά Ένα (Face 1) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Σε περίπτωση που δύο επιφάνειες οριστούν με αντίθετες φορές τότε θα έχουμε μία λανθασμένη επιβολή φόρτισης με τα δύο φορτία να ασκούνται σε αντίθετες πλευρές. Για την αποφυγή του προβλήματος ελέγχουμε την φορά των επιφανειών μέσω του υπομενού Shell Normals (PlotCtrls → Style → Shell Normals). Αν βρεθούν περιοχές οι οποίες έχουν αντίθετη φορά μπορούμε να αντιστρέψουμε την φορά τους μέσω της εντολής Reverse Normals → of Shell Elems).



Σχήμα 2.7 :Φορά επιφανειών shell element

Καθορισμός ενιαίου συστήματος συντεταγμένων

Κάθε στοιχείο που δημιουργείται σε ένα πλέγμα φέρει το δικό του σύστημα συντεταγμένων όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Έτσι, κατά την δημιουργία ενός πλέγματος, το κάθε στοιχείο έχει μηχανικές ιδιότητες με ίδιο μέτρο αλλά διαφορετικές διευθύνσεις από τα υπόλοιπα, καθώς οι μηχανικές ιδιότητες του ορθοτροπικού υλικού αποδίδονται με βάση το τοπικό σύστημα συντεταγμένων κάθε στοιχείου. Για να εξασφαλίσουμε μηχανικές ιδιότητες

στις ίδιες διευθύνσεις σε όλα τα στοιχεία, πριν την δημιουργία του πλέγματος, δημιουργούμε ένα καινούργιο σύστημα συντεταγμένων με άξονες ίδιους με του καρτεσιανού. Στην συνέχεια ορίζουμε το σύστημα αυτό ως το τοπικό σύστημα συντεταγμένων όλων των στοιχείων που δημιουργούμε. Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται από εδώ και στο εξής στο μοντέλο φαίνεται στο Σχήμα 2.6 παραπάνω.

Για να ορίσουμε το καινούργιο σύστημα συντεταγμένων χρησιμοποιούμε την εντολή «LOCAL,11,0,0,0,0,0,0». Για να ορίσουμε αυτό το σύστημα συντεταγμένων ως το τοπικό σύστημα συντεταγμένων όλων των στοιχείων που δημιουργούνται χρησιμοποιούμε την εντολή «ESYS,11».

Τύποι πλέγματος (Mesh)

Για την δημιουργία του πλέγματος υπάρχουν δύο διαφορετικές τεχνικές που εφαρμόζονται. Η πρώτη είναι η δημιουργία ενός αδόμητου πλέγματος (free mesh) και η δεύτερη είναι η δημιουργία ενός δομημένου πλέγματος (mapped mesh). Στο Σχήμα 2.8 γίνεται σύγκριση των δύο τεχνικών σε δύο διαφορετικές επιφάνειες. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής γίνεται με βάση τις απαιτήσεις και τις ανάγκες της ανάλυσης μας και δεν είναι δεδομένη κάθε φορά. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι δύο τεχνικές με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

Αδόμητο πλέγμα (Free Mesh): Το αδόμητο πλέγμα αποτελεί τον πιο εύκολο και γρήγορο τρόπο δημιουργίας του πλέγματος. Το πρόγραμμα αυτόματα κατασκευάζει το πλέγμα στην επιφάνεια ή στον όγκο που έχουμε υποδείξει. Η μέθοδος αυτή δεν εμφανίζει κάποιο βασικό μοτίβο σχεδίασης. Μπορούν να δημιουργηθούν τετράπλευρα και τρίγωνα στοιχεία καθώς και τετράεδρα. Δεν μπορούν να δημιουργηθούν εξάεδρα στοιχεία.

Πλεονεκτήματα: Εύκολη και γρήγορη δημιουργία πλέγματος,

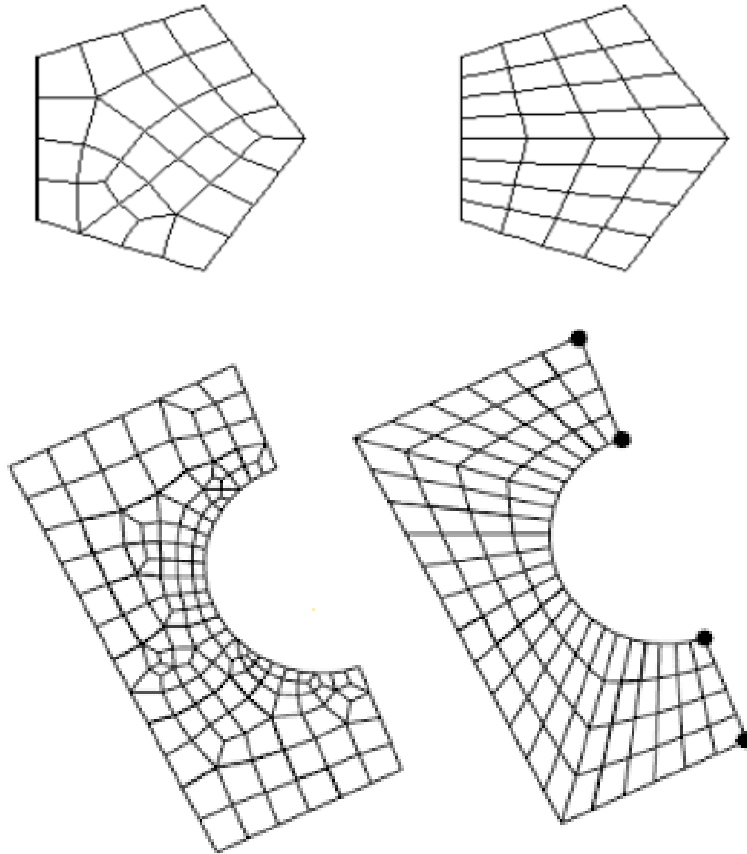
Μειονεκτήματα: Μικρός έλεγχος στην μορφή του πλέγματος και πιθανή δημιουργία πλέγματος κακής ποιότητας.

Δομημένο πλέγμα (Mapped Mesh): Το δομημένο πλέγμα αποτελεί έναν πιο στοχευμένο τρόπο δημιουργίας πλέγματος με περιορισμούς στο σχήμα των στοιχείων και στο μοτίβο της σχεδίασης. Μπορούν να δημιουργηθούν τετράπλευρα και τρίγωνα στοιχεία καθώς και εξάεδρα. Δεν μπορούν να δημιουργηθούν τετράεδρα στοιχεία.

Πλεονεκτήματα: Μεγάλος έλεγχος της δημιουργίας πλέγματος με πολλές διαφορετικές μεταβλητές σχεδίασης. Εξασφάλιση καλής ποιότητας πλέγματος και κατ'επέκταση μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Ευχάριστο οπτικά αποτέλεσμα.

Μειονεκτήματα: Εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία, ειδικά σε σύνθετες γεωμετρίες.

Συνδυασμών τεχνικών: Σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένα συνδυασμός των δύο τεχνικών, με χρήση του αδόμητου πλέγματος μόνο στα σημεία που το μοντέλο εμφανίζει πολύπλοκη γεωμετρία και η τεχνική του δομημένου πλέγματος θα ήταν πολύ δύσκολη και χρονοβόρα (Ansys Modeling and Meshing Guide,2014).



Σχήμα 2.8: Παραδείγματα δισδιάστατων γεωμετριών με αδόμητο πλέγμα αριστερά και με δομημένο πλέγμα δεξιά.

Στην ανάλυσή μας θα δημιουργήσουμε ένα δομημένο πλέγμα. Εκτός από τα πολλά πλεονεκτήματά του όπως αυτά παρουσιάστηκαν παραπάνω, ο κύριος λόγος της επιλογής του δομημένου πλέγματος είναι η δυνατότητα που θα έχουμε να δημιουργήσουμε ένα πλέγμα αποκλειστικά από τετράπλευρα στοιχεία. Τα τετράπλευρα στοιχεία παρουσιάζουν σημαντικά καλύτερη συμπεριφορά σε αναλύσεις με ορθοτροπικά υλικά σε σχέση με τα τριγωνικά στοιχεία και θα επιτύχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματά μας.

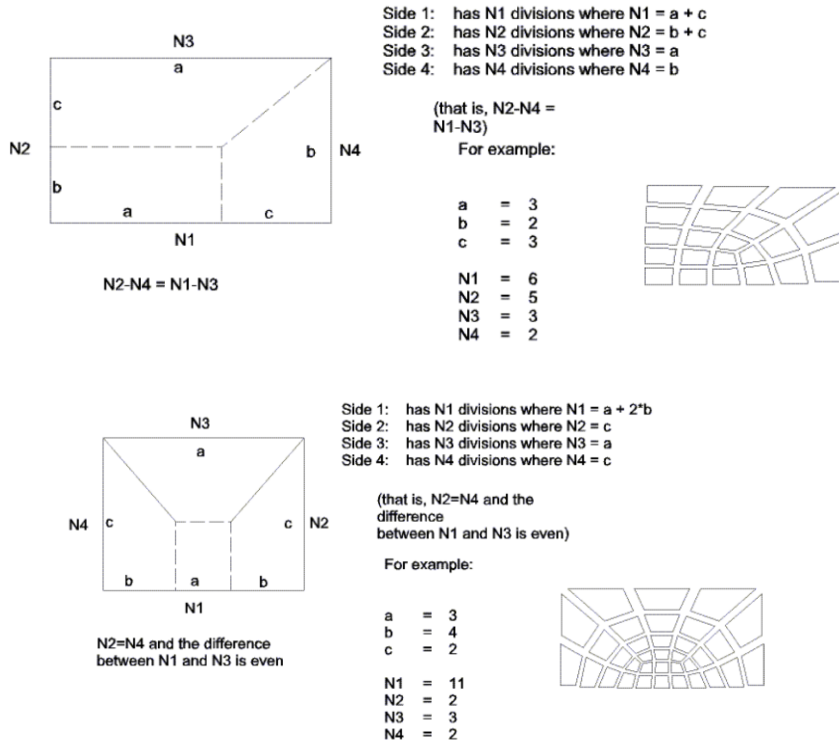
Προϋποθέσεις για δημιουργία δομημένου πλέγματος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, θα δημιουργήσουμε ένα δομημένο πλέγμα στο μοντέλο μας. Για να γίνει αυτό το Ansys θέτει κάποιους περιορισμούς. Για να δημιουργήσουμε σε μία επιφάνεια ένα δομημένο πλέγμα η επιφάνεια πρέπει να είναι «κανονική».

Μια επιφάνεια ορίζεται ως «κανονική» αν έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

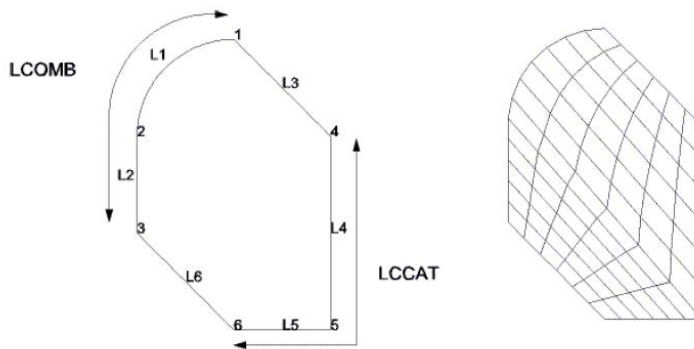
- Η επιφάνεια να ορίζεται από 3 ή 4 πλευρές.
- Η επιφάνεια πρέπει να έχει την ίδια υποδιαίρεση σε στοιχεία σε αντίθετες πλευρές, δηλαδή αν η μία πλευρά χωρίζεται σε 2 στοιχεία τότε και η απέναντι πλευρά πρέπει να χωρίζεται και αυτή σε 2 στοιχεία, ή πρέπει να έχει υποδιαίρεσεις που ακολουθούν ένα από τα καθορισμένα μοτίβα μετάβασης τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 2.9.

- Αν μία περιοχή ορίζεται από 3 πλευρές η υποδιαίρεση πρέπει να είναι ζυγός αριθμός και ίσος σε όλες τις πλευρές
- Πρέπει να οριστεί η μορφή που θα έχουν όλα τα στοιχεία, είτε θα είναι όλα τετράπλευρα ή όλα τρίγωνα.



Σχήμα 2.9: Μοτίβα μετάβασης ανάμεσα σε πλευρές με διαφορετικές υποδιαίρεσεις

Σύζευξη πλευρών: Η σύζευξη πλευρών είναι μία πολύ χρήσιμη εντολή η οποία μας επιτρέπει να ενώσουμε πλευρές μιας επιφάνειας ώστε να πετύχουμε τον απαραίτητο αριθμό των 4 πλευρών για την δημιουργία του δομημένου πλέγματος. Στο Σχήμα 2.10 φαίνεται η λειτουργία της εντολής μέσω της οποίας ενώνονται οι γραμμές L1, L2 και στην συνέχεια είναι δυνατή η δημιουργία ενός δομημένου πλέγματος. Η εντολή της σύζευξης πλευρών είναι ενσωματωμένη στην εντολή για δομημένο πλέγμα By corners (Preprocessor → Meshing → Mesh → Areas → Mapped → By corners) όπου επιλέγοντας τις 4 γωνίες αυτόματα το πρόγραμμα ενώνει τις ενδιάμεσες πλευρές. Πρέπει να σημειωθεί ότι παρ'όλο που με την σύζευξη πλευρών μπορεί να δημιουργηθεί δομημένο πλέγμα σε επιφάνεια με πάρα πολλές πλευρές, στην πράξη η ποιότητα του πλέγματος συνήθως μειώνεται δραστικά σε επιφάνειες με παραπάνω από 5 πλευρές.

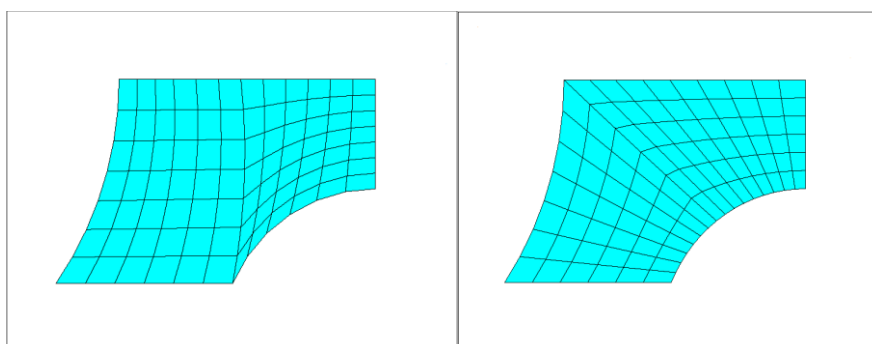


Σχήμα 2.10: Δημιουργία δομημένου πλέγματος σε επιφάνεια με 5 πλευρές μέσω της σύζευξης των πλευρών L1, L2

Διαφορετικά μοτίβα δημιουργίας πλέγματος

Όπως είδαμε παραπάνω με την μέθοδο της σύζευξης πλευρών μπορούμε να εφαρμόσουμε δομημένο πλέγμα σε επιφάνεια με περισσότερες από 4 πλευρές. Η επιλογή όμως των πλευρών που θα ενώσουμε δεν είναι προφανής, καθώς υπάρχουν διαφορετικοί συνδυασμοί πλευρών που μπορούμε να επιλέξουμε. Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται μία επιφάνεια στην οποία έχουμε δημιουργήσει 2 διαφορετικά δομημένα πλέγματα με αλλαγή των πλευρών που ενώσαμε.

Η επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού εξαρτάται από την ποιότητα της μορφής των στοιχείων που δημιουργούνται καθώς και από τις υποδιαίρεσεις που προκύπτουν σε κάθε πλευρά. Η υποδιαίρεση μιας πλευράς, δηλαδή ο αριθμός των στοιχείων που ορίζουν την πλευρά είναι πολύ σημαντικός, καθώς επηρεάζει επιπλέον την δημιουργία πλέγματος σε μία γειτονική επιφάνεια η οποία έχει ως σύνορο την πλευρά αυτή και ως εκ τούτου έχει προκαθορισμένη υποδιαίρεση στην πλευρά αυτή με βάση το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί στην πρώτη επιφάνεια. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11 η πάνω πλευρά στην μία περίπτωση υποδιαιρείται σε 12 στοιχεία ενώ στην δεύτερη σε 9 στοιχεία. Η σωστή σύζευξη πλευρών γίνεται βάση δοκιμών και της εμπειρίας του σχεδιαστή.



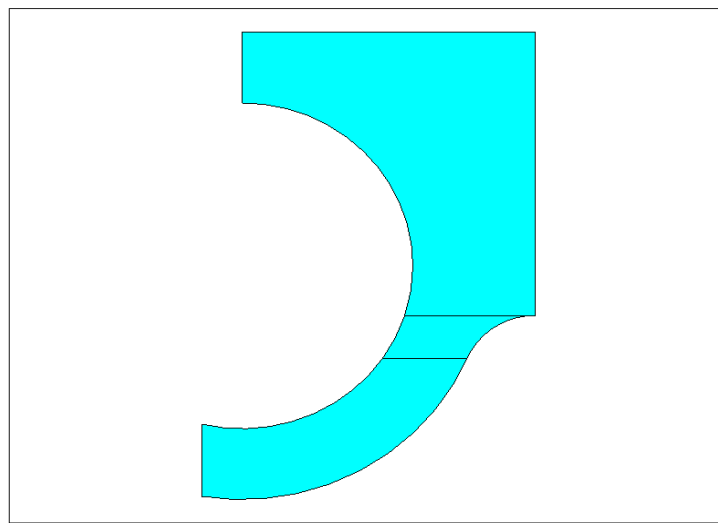
Σχήμα 2.11: Διαφορετικά πλέγματα της ίδιας επιφάνειας

Δημιουργία κατάλληλων επιφανειών

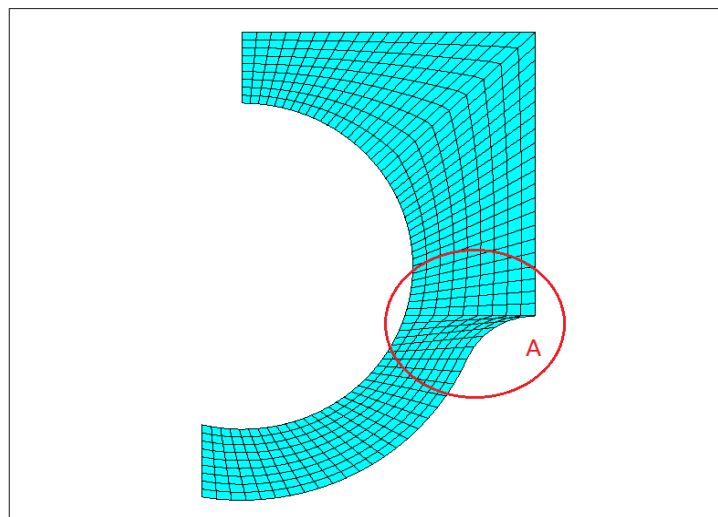
Όπως γίνεται αντιληπτό εξετάζοντας την γεωμετρία του μοντέλου, οι προϋποθέσεις για την δημιουργία δομημένου πλέγματος δεν πληρούνται. Για να ξεπεράσουμε το πρόβλημα αυτό, θα

διαρέσουμε την επιφάνεια του μοντέλου μας σε επιμέρους μικρότερες επιφάνειες, οι οποίες θα πληρούν τις προϋποθέσεις για δομημένο πλέγμα. Ο τρόπος υποδιαίρεσης των επιφανειών είναι ένα πρόβλημα το οποίο απαιτεί σχεδιαστική εμπειρία και πειραματισμό για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος.

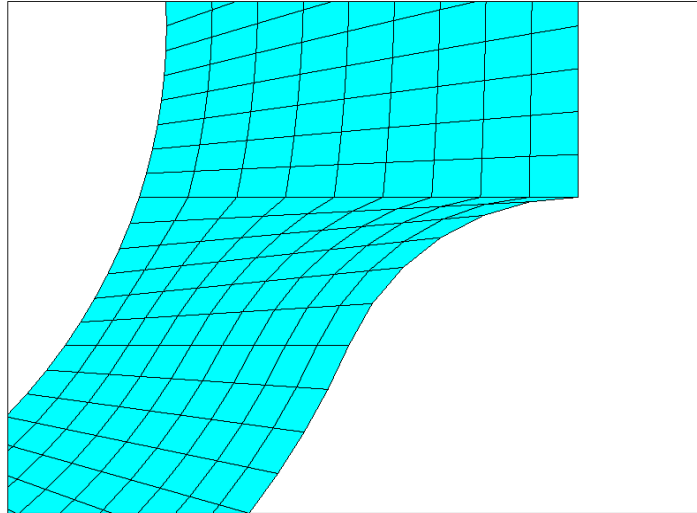
Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται μία από τις αρχικές δοκιμές υποδιαίρεσης των επιφανειών της πάνω αριστερά οπής του μοντέλου μας. Στο Σχήμα 2.13 παρουσιάζεται το πλέγμα των επιφανειών. Όπως φαίνεται σε μεγέθυνση στο Σχήμα 2.14, στο σημείο A του προηγούμενου σχήματος το πλέγμα παρουσιάζει αδυναμία. Τα στοιχεία παρουσιάζουν μεγάλη παραμόρφωση και αποκλίνουν αισθητά από το ιδανική τετράγωνη δομή. Αυτό θα οδηγούσε σε ανακριβείς υπολογισμούς στα συγκεκριμένα στοιχεία. Η τελική, βελτιωμένη υποδιαίρεση της επιφάνειας φαίνεται στο Σχήμα 2.15 και το αντίστοιχο πλέγμα στο Σχήμα 2.16.



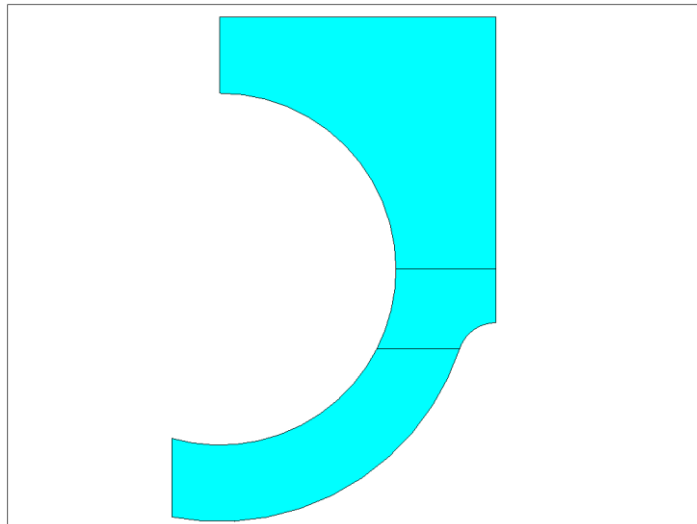
Σχήμα 2.12: Πρώτη δοκιμή υποδιαίρεσης επιφάνειας



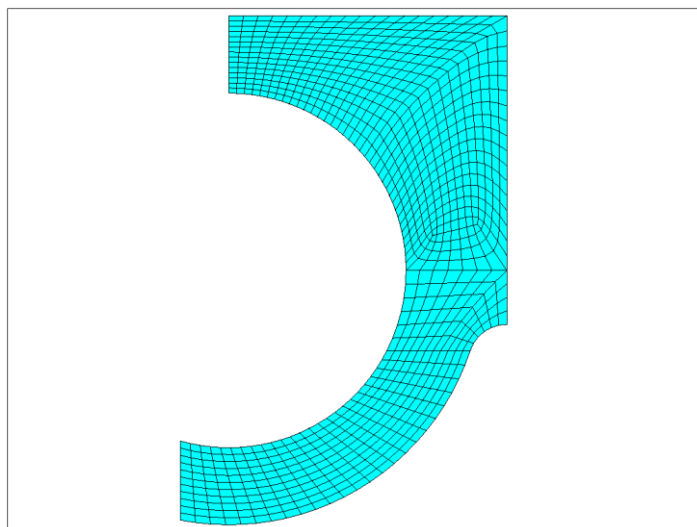
Σχήμα 2.13: Mapped mesh των επιφανειών



Σχήμα 2.14: Μεγέθυνση του σημείου A



Σχήμα 2.15: Τελική υποδιαίρεση επιφάνειας



Σχήμα 2.16: Τελική υποδιαίρεση επιφάνειας με πλέγμα

Μέσω πολλαπλών δοκιμών προέκυψαν μερικές βασικές αρχές, οι οποίες φυσικά δεν είναι απόλυτες, για την αποτελεσματική υποδιαίρεση μιας επιφάνειας και για την δημιουργία ποιοτικού πλέγματος:

- Οι πλευρές μιας επιφάνειας δεν θα πρέπει να παρουσιάζουν αιχμηρές ακμές (Σχήμα 2.12)
- Οι επιφάνειες οριοθετούνται στις άκρες κάθε καμπύλου τμήματος.
- Πρέπει να δοθεί προσοχή στην κατάλληλη σύζευξη πλευρών για την δημιουργία δομημένου πλέγματος, όταν υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί.
- Πρέπει να δοθεί έμφαση στην σειρά με την οποία δημιουργούμε πλέγμα σε κάθε επιφάνεια.
- Κάθε πλέγμα που δημιουργείται σε μία επιφάνεια επηρεάζει ακόμη την μορφή του πλέγματος στις επιφάνειες που συνορεύουν με αυτήν. Προκύπτει λοιπόν ότι πρέπει να δοθεί έμφαση στην σειρά με την οποία δημιουργούμε πλέγμα σε κάθε επιφάνεια. Δύο διαφορετικές σειρές μπορεί να οδηγήσουν σε δύο διαφορετικές τελικές μορφές πλέγματος.
- Όσον αφορά την σειρά δημιουργίας πλέγματος, αυτή είναι προτιμότερο να ξεκινάει από μικρές επιφάνειες.

Επιλογή μεγέθους στοιχείων πλέγματος

Μία ακόμη μεταβλητή σχεδίασης ενός πλέγματος είναι το μέγεθος των στοιχείων που θα δημιουργηθούν. Το μέγεθος των στοιχείων και κατ' επέκταση το πλήθος των στοιχείων ενός πλέγματος επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων μας. Ένα πλέγμα με λίγα στοιχεία θα δώσει αποτελέσματα με μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με ένα πλέγμα με περισσότερα στοιχεία. Αυτό συμβαίνει καθώς στο εσωτερικό ενός στοιχείου οι υπολογισμοί των αποτελεσμάτων γίνονται σε 4 ή 8 κόμβους. Συνεπώς σε περιοχές με απότομες αλλαγές στις τιμές των τάσεων ένα πλέγμα με λίγα στοιχεία δεν θα μπορέσει να αποδόσει με ακρίβεια την αλλαγή στην τάση καθώς θα έχει στην περιοχή μετάβασης λιγότερους κόμβους από ένα πιο πυκνό πλέγμα με περισσότερα στοιχεία.

Προφανώς γίνεται κατανοητό ότι με πιο πυκνό πλέγμα θα έχουμε πιο ακριβή αποτελέσματα. Αυτό είναι λογικό αν σκεφτούμε ότι όσο πιο πολλά στοιχεία έχουμε τόσο πιο καλά μπορούμε να προσεγγίσουμε την πραγματική συνεχή δομή του υλικού. Παρ'όλα αυτά δεν είναι πάντα επιθυμητό να δημιουργήσουμε το πιο πυκνό πλέγμα που είναι δυνατό. Αρχικά η μεγάλη αύξηση του αριθμού των στοιχείων οδηγεί σε πολύ μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους. Επίσης μετά από ένα συγκεκριμένο μέγεθος στοιχείων τα αποτελέσματά που προκύπτουν συγκλίνουν σε συγκεκριμένες τιμές και η περαιτέρω μείωση του μεγέθους τους δεν θα είναι συμφέρουσα με βάση την μεγάλη αύξηση του υπολογιστικού χρόνου που την συνοδεύει.

Για να ελέγξουμε την καταλληλότητα του μεγέθους των στοιχείων κάνουμε μία αξιολόγηση του μεγέθους της ασυνέχειας των τάσεων μεταξύ γειτονικών στοιχείων στην κρίσιμη περιοχή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζει τάσεις απευθείας σε εσωτερικές θέσεις του στοιχείου (σημεία Gauss) και τις εξάγει στους κόμβους στα όρια των στοιχείων. Ενώ συνηθίζεται να βλέπουμε τις τάσεις ως μέσες τιμές, στην πραγματικότητα κάθε στοιχείο υπολογίζει διαφορετικές τάσεις στους κοινόχρηστους κόμβους. Συνεπώς κάνοντας έλεγχο των ποσοστιαίων διαφορών των τάσεων Von Mises των στοιχείων σε έναν κοινόχρηστο κόμβο μπορούμε να αξιολογήσουμε την ποιότητα του πλέγματος στο σημείο αυτό.

Το μέγεθος των στοιχείων καθορίζεται από το element edge length, δηλαδή το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος ακμής των στοιχείων. Το μήκος ακμής πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να επιτρέπει την δημιουργία ποιοτικού πλέγματος σε όλες τις επιφάνειες της γεωμετρίας. Ανάλογα με την γεωμετρία κάποιο μήκος πλευράς μπορεί να οδηγήσει σε αδυναμία του προγράμματος να δημιουργήσει πλέγμα σε κάποιες επιφάνειες, εξαιτίας του μεγέθους του πλέγματος σε γειτονικές επιφάνειες, ή στην δημιουργία κακής ποιότητας στοιχείων μέσα στο πλέγμα. Στην συγκεκριμένη γεωμετρία για την δημιουργία του πλέγματος χρησιμοποιήσαμε μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος ακμής στοιχείων 1 mm. Ο έλεγχος της καταλληλότητας του πλέγματος στους τρεις κόμβους που υπάρχουν στην κρίσιμη περιοχή του μοντέλου, έδειξε ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης εμφανίζουν ικανοποιητική ακρίβεια. Ο

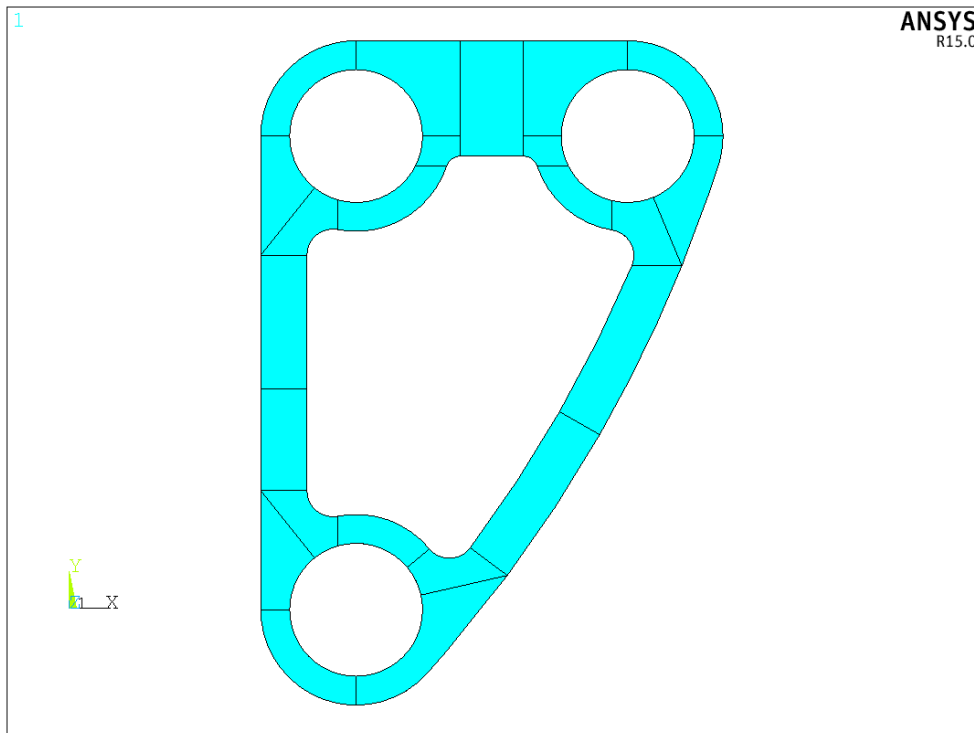
Πίνακας 2.4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του ελέγχου παρακάτω. Προκύπτει ότι στην κρίσιμη περιοχή οι ποσοστιαίες διαφορές δεν ξεπερνούν το 1%, συνεπώς η ποιότητα του πλέγματος είναι αποδεκτή.

Πίνακας 2.4: Ποσοστιαίες διαφορές τάσεων Von Mises στην κρίσιμη περιοχή

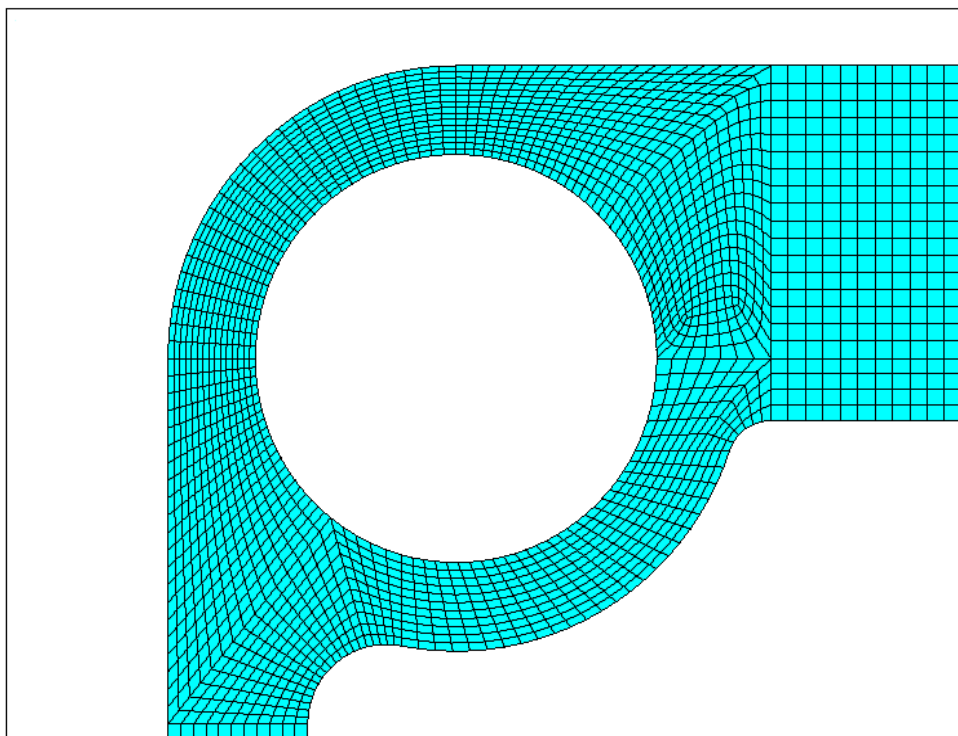
Node	Elements	Elemental Solution (MPa)	Nodal Solution (MPa)	Percentage Difference (%)
1	33	255.16	254.38	0.6
	44	253.62		
Node	Elements	Elemental Solution (MPa)	Nodal Solution (MPa)	Percentage Difference (%)
2	22	270.37	270	0.3
	33	269.65		
Node	Elements	Elemental Solution (MPa)	Nodal Solution (MPa)	Percentage Difference (%)
3	11	255.46	256.69	1
	22	257.99		

Για την επιλογή του μεγέθους των στοιχείων χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών: Preprocessor → Meshing → Size Cntrls → ManualSize → Areas → All Areas , με την οποία ορίζουμε το μήκος της ακμής των στοιχείων.

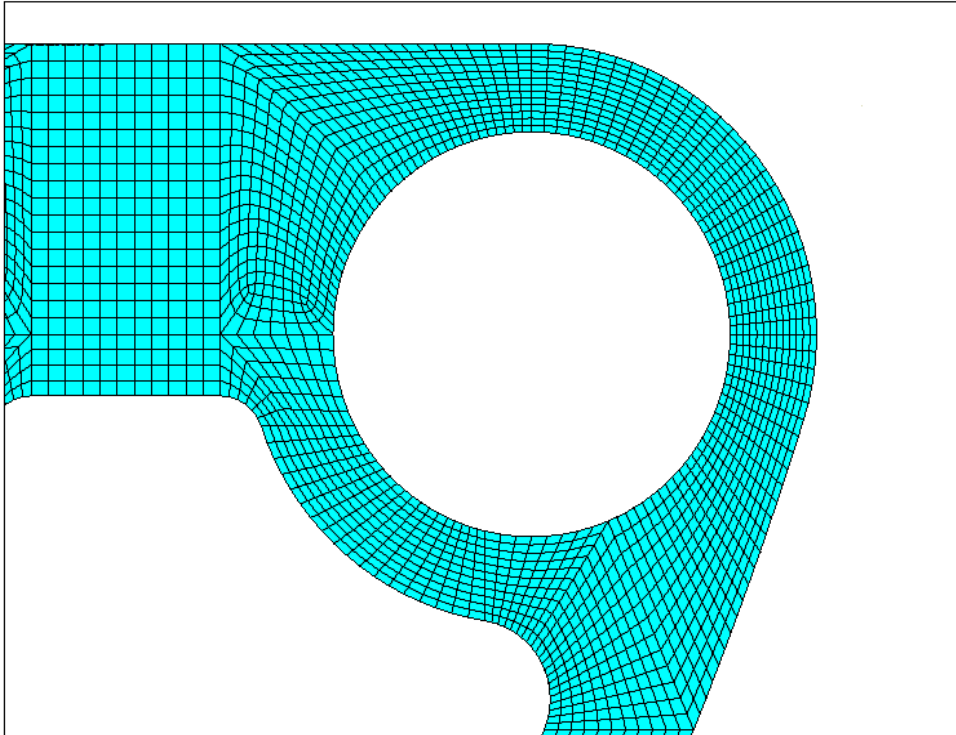
Με βάση όσα αναλύθηκαν παραπάνω η τελική υποδιαίρεση των επιφανειών φαίνεται στο Σχήμα 2.17. Το τελικό πλέγμα του μοντέλου φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 2.18-Σχήμα 2.21) όπου παρουσιάζεται το πλέγμα γύρω από τις τρεις οπές σε μεγέθυνση καθώς και το ολικό πλέγμα.



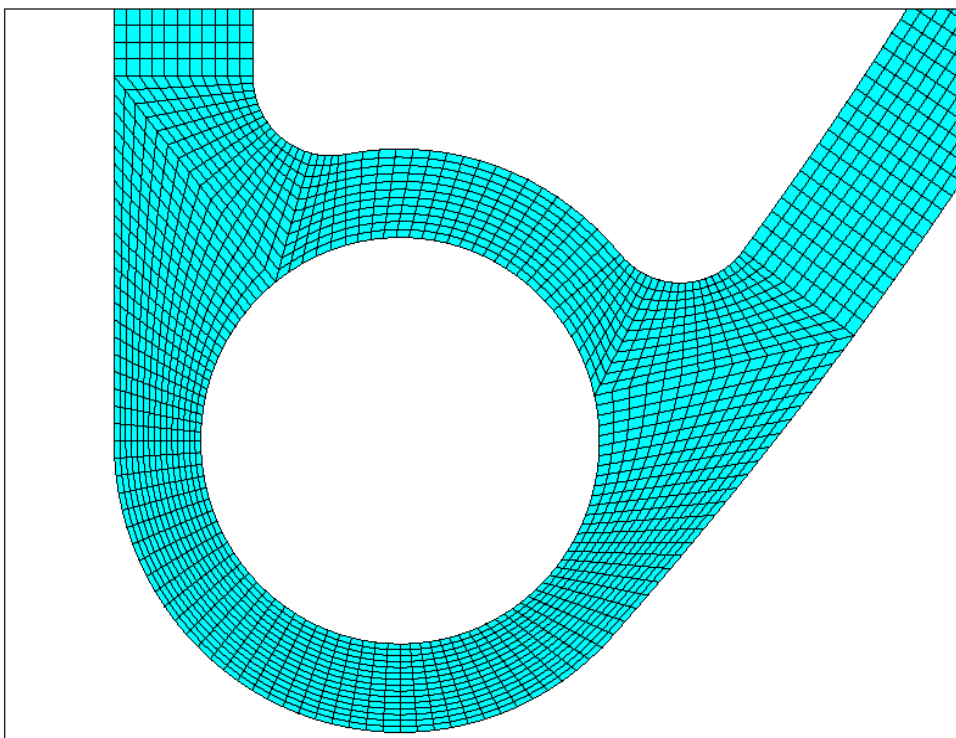
Σχήμα 2.17: Τελική υποδιαίρεση επιφανειών



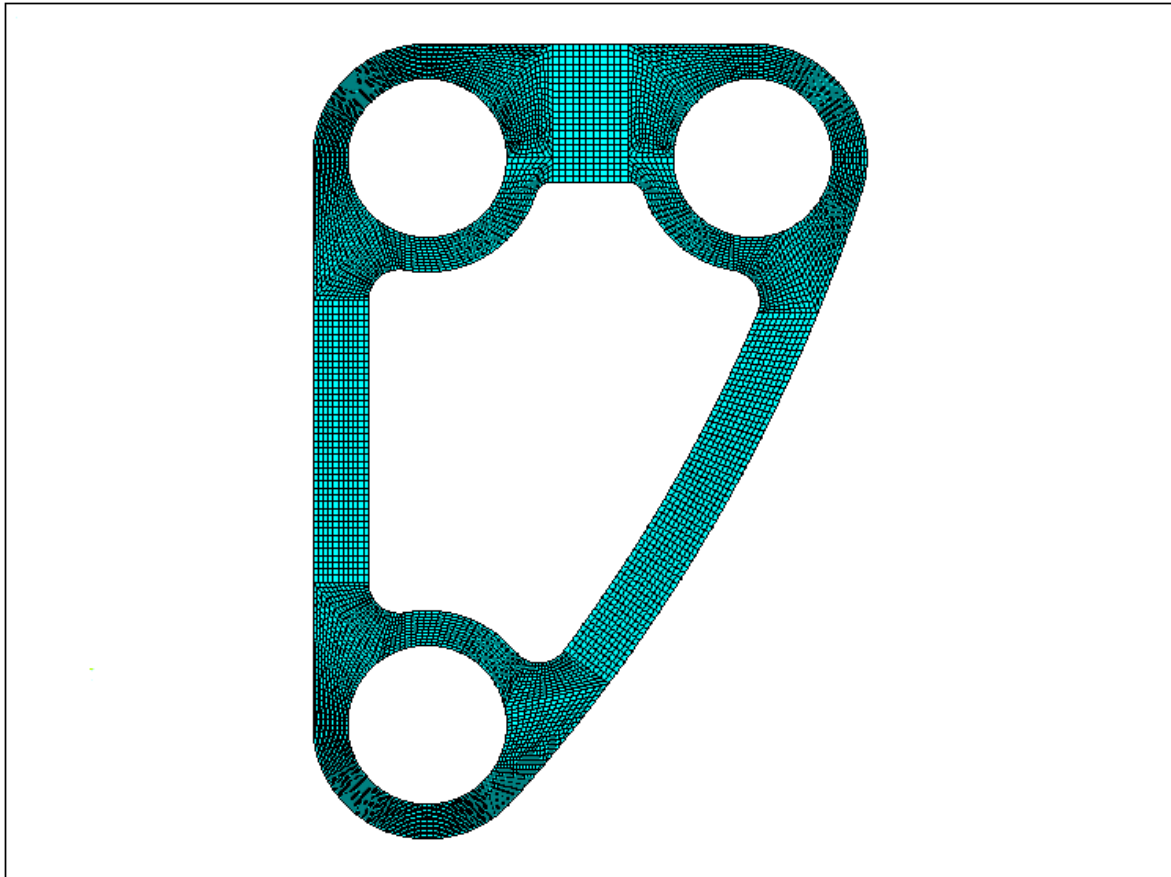
Σχήμα 2.18: Λεπτομέρειες του πλέγματος



Σχήμα 2.19: Λεπτομέρειες του πλέγματος



Σχήμα 2.20: Λεπτομέρειες του πλέγματος

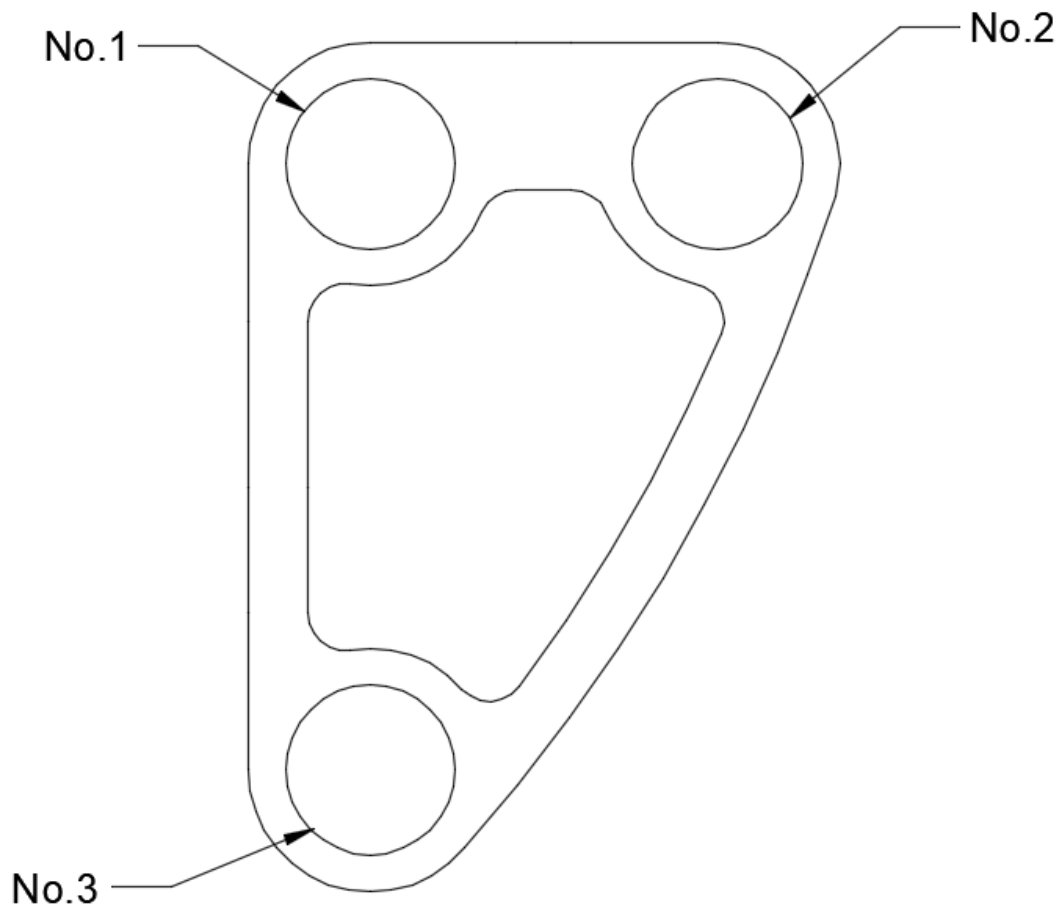


Σχήμα 2.21: Τελική μορφή του δομημένου πλέγματος

2.3 Επίλυση (Solution)

Η επίλυση (solution) αποτελεί το δεύτερο στάδιο της ανάλυσης. Έως τώρα έχουμε ορίσει τη γεωμετρία, τις ιδιότητες του υλικού και έχουμε δημιουργήσει το πλέγμα. Στη φάση αυτή της ανάλυσης καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης, ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος και επιβάλλεται η φόρτιση. Ο τύπος της ανάλυσης ορίζεται με την ακολουθία εντολών: Solution→Analysis Type→New Analysis→Static.

Για καλύτερη και ευκολότερη κατανόηση των ζητημάτων που σχολιάζονται στην συνέχεια ορίζουμε ένα σύστημα αρίθμησης στις οπές το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.22 παρακάτω.



Σχήμα 2.22: Αρίθμηση οπών

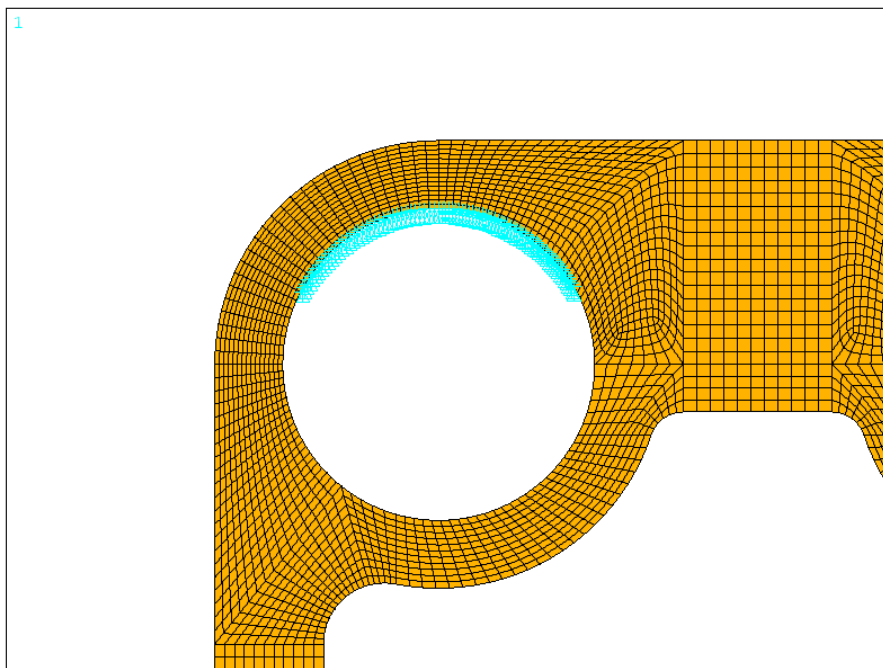
2.3.1 Συνοριακές συνθήκες

Όπως έχουμε αναφέρει το headboard τοποθετείται στην κορυφή του πανιού και ενώνεται με την κορυφή του καταρτιού καθώς και κατά μήκος του καταρτιού σε ένα ή δύο σημεία. Οι συνδέσεις αυτές καθορίζουν τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος. Στο Σχήμα 2.23 φαίνεται μία τυπική γεωμετρία headboard και στο πάνω αριστερό μέρος διακρίνονται οι δύο συνδέσεις με το κατάρτι, μία οριζόντια και μία κατακόρυφη.

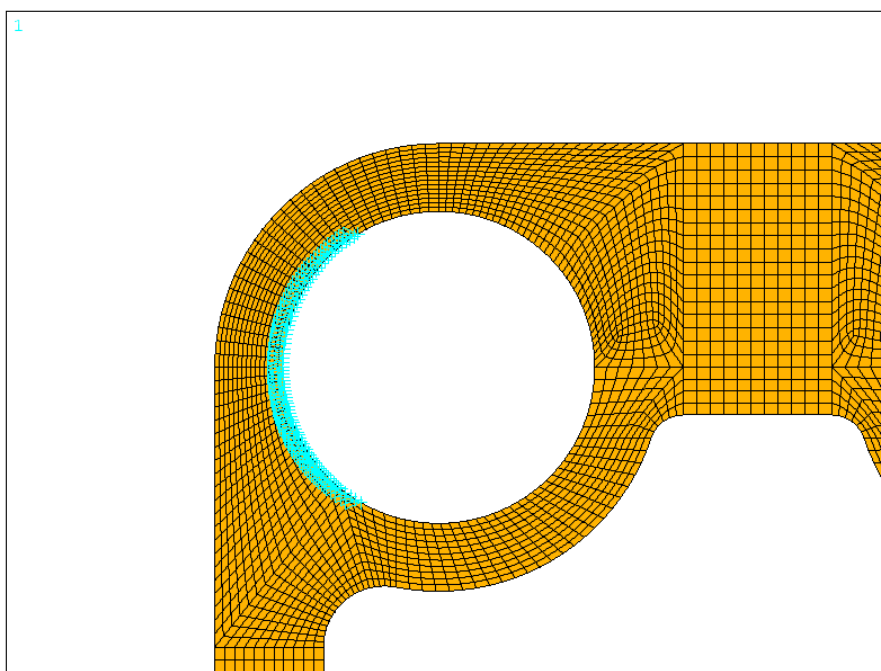


Σχήμα 2.23: Σημεία πρόσδεσης του headboard στο κατάρτι

Με παρόμοιο τρόπο στο μοντέλο που έχουμε κατασκευάσει οι δύο συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται είναι οι $UY=0$ και $UX=0$ και εφαρμόζονται και οι δύο στην ίδια οπή του μοντέλου, στην οπή No.1. Οι συνθήκες θέτονται πάνω στους κόμβους στο όριο της οπής και το μήκος εφαρμογής τους, με βάση την κατακόρυφη σύνδεση του Σχήματος 2.23 και τις συνδέσεις άλλων παρόμοιων headboard που εξετάσαμε, είναι το ένα τρίτο της περιφέρειας της οπής. Οι συνοριακές συνθήκες φαίνονται στο Σχήμα 2.24 και το Σχήμα 2.25. Σημειώνεται ότι οι συνθήκες εφαρμόζονται παράλληλα αλλά παρουσιάζονται ξεχωριστά για λόγους ευκρίνειας.



Σχήμα 2.24: Συνοριακή συνθήκη $UY=0$

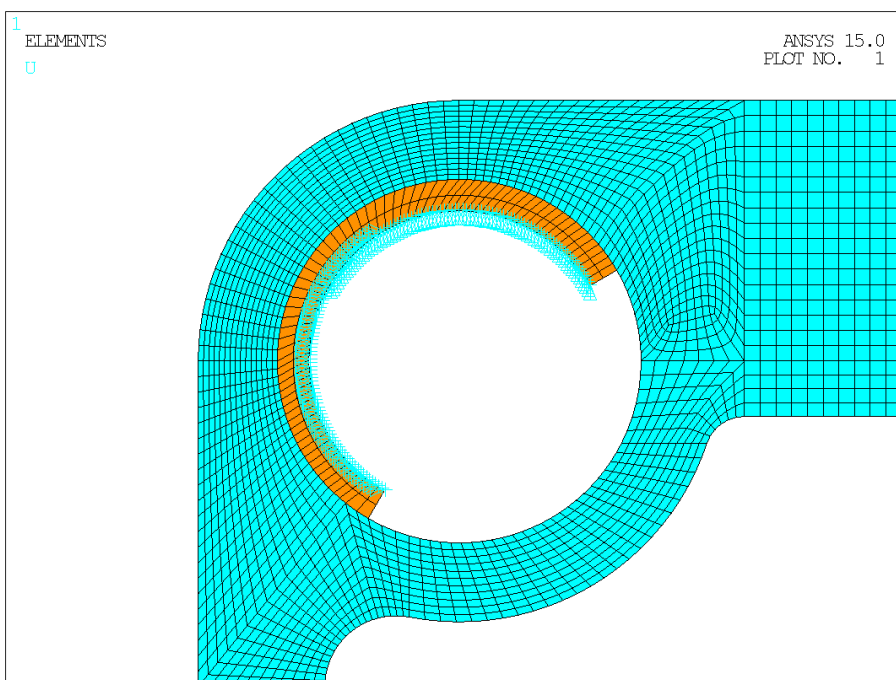


Σχήμα 2.25: Συνοριακή συνθήκη $UX=0$

Εκτός των οριακών συνθηκών $UX=0$ και $UY=0$ πρέπει να ορίσουμε επιπλέον την οριακή συνθήκη $UZ=0$ σε όλους τους κόμβους που έχουμε ορίσει ήδη μία άλλη συνοριακή συνθήκη, παρόλο που το headboard μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του καταρτιού. Αυτό κρίνεται αναγκαίο καθώς χωρίς την επιπλέον συνοριακή συνθήκη $UZ=0$ το Ansys εντοπίζει αοριστία, βγάζει μήνυμα σφάλματος και δεν μπορεί να επιλύσει το μοντέλο. Ο ορισμός της επιπλέον συνοριακής συνθήκης δεν επηρεάζει με κάποιον τρόπο τα αποτελέσματα της ανάλυσης καθώς δεν εφαρμόζουμε φόρτιση στον άξονα Z .

Για να ορίσουμε συνοριακές συνθήκες στους κόμβους χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών: Solution → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → On Nodes.

Κατά την επίλυση του μοντέλου, παρατηρήθηκαν υπερβολικά μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων στα άκρα εφαρμογής των συνοριακών συνθηκών οι οποίες δεν ήταν ρεαλιστικές. Αυτό οφείλεται στη μη ρεαλιστική εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών, καθώς το Ansys θεωρεί ότι υπάρχει απόλυτη ακαμψία στους κόμβους εφαρμογής τους. Παρ'όλα αυτά κάτι τέτοιο δεν ισχύει στην πραγματικότητα καθώς το headboard συνδέεται στο κατάρτι μέσω ιμάντων οι οποίοι έχουν μία συγκεκριμένη ελαστικότητα. Για να αποφύγουμε το πρόβλημα αυτό επιστρέφουμε στην προ-επεξεργασία και δημιουργούμε μία επιπλέον επιφάνεια εσωτερικά της οπής στα σημεία εφαρμογής των συνοριακών συνθηκών. Η επιφάνεια αυτή έχει πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας ($E=7$ GPa) και αναπαριστά την ελαστικότητα του ιμάντα πρόσδεσης. Πάνω στους κόμβους αυτής της επιφάνειας ορίζουμε εκ νέου τις συνοριακές συνθήκες. Η τελική μορφή των συνοριακών συνθηκών φαίνεται στο Σχήμα 2.26.



Σχήμα 2.26: Συνοριακές συνθήκες στα άκρα της πρόσθετης επιφάνειας

2.3.2 Φορτίσεις

Πληροφορίες σχετικά με τις φορτίσεις του headboard δεν υπήρχαν διαθέσιμες κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Ο προσδιορισμός όλων των απαραίτητων παραμέτρων των φορτίσεων γίνεται μέσω μερικών υποθέσεων, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το μέτρο των δυνάμεων που ορίζουμε στο μοντέλο μας θα υπολογιστεί με βάση τις μέγιστες δυνάμεις που μπορεί να παραλάβει η αντίστοιχη γεωμετρία κατασκευασμένη από αλουμίνιο. Παρ'όλα αυτά η θέση και η διεύθυνση επιβολής των δυνάμεων είναι επιπλέον άγνωστες παράμετροι.

Η επιλογή της διεύθυνσης και της φοράς των επιβαλλόμενων δυνάμεων γίνεται με βάση τη μελέτη διαφόρων headboard τοποθετημένων πάνω σε πανιά ιστιοπλοϊκών. Με βάση το headboard στο Σχήμα 2.27 το οποίο είναι παρόμοιο με αυτό που έχουμε σχεδιάσει, παρατηρούμε ότι στις δύο οπές του headboard έχουν εφαρμοστεί ιμάντες ενίσχυσης, οι οποίοι είναι ραμμένοι πάνω στο ιστίο. Θεωρούμε λοιπόν ότι η διεύθυνση εφαρμογής των δυνάμεων ακολουθεί την διεύθυνση των ιμάντων και η φορά τους είναι προς το ιστίο. Στην οπή No.2 η δύναμη σχηματίζει γωνία 55° με τον άξονα X. Στην οπή No.3 αντίστοιχα η δύναμη είναι παράλληλη στον άξονα Y.



Σχήμα 2.27: Headboard τοποθετημένο σε ιστίο

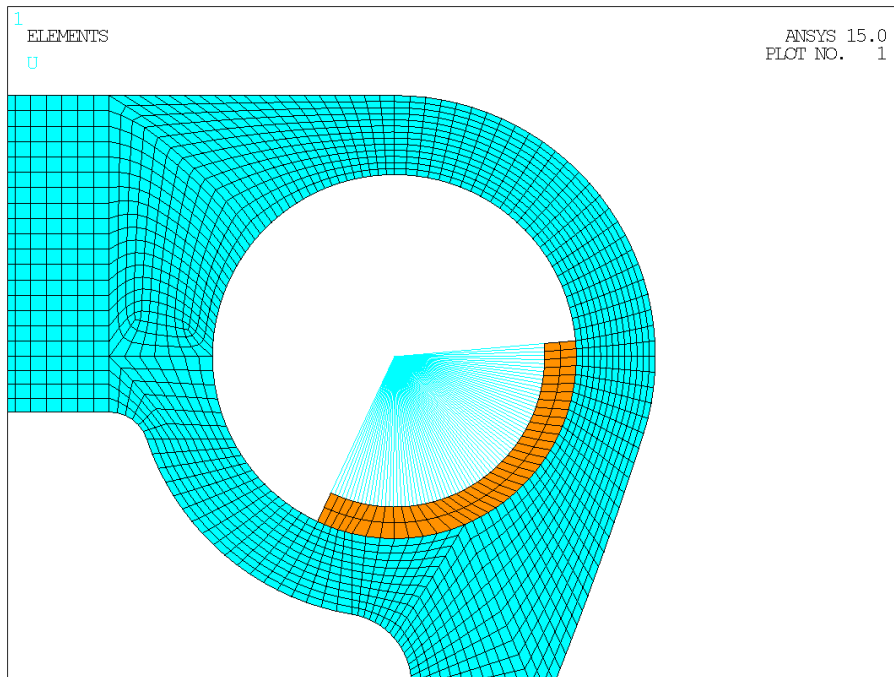
Η επιλογή της θέσης επιβολής των δυνάμεων γίνεται με παρόμοιο τρόπο. Όπως γίνεται άμεσα κατανοητό από το Σχήμα 2.27 η θέση εφαρμογής των δυνάμεων είναι σε ένα τμήμα της περιφέρειας των δύο οπών. Θεωρούμε ότι η δύναμη κατανέμεται στο ένα τρίτο του μήκους της περιφέρειας. Στην οπή No.3 το μήκος αυτό έχει το μέσο του στο σημείο της περιφέρειας με ακτίνα παράλληλη στον άξονα Y και στην οπή No.2 το μέσο βρίσκεται στο σημείο της περιφέρειας με ακτίνα που σχηματίζει γωνία 55° με τον άξονα X. Ακόμη θεωρούμε ότι οι δυνάμεις που ασκούνται στις δύο οπές είναι ίσες κατά μέτρο.

Για να ορίσουμε την κατανεμημένη φόρτιση που δημιουργείται στις οπές λόγω των ιμάντων, χρησιμοποιούμε ένα νέο τύπο στοιχείου, το MPC184. Το MPC184 είναι ένα στοιχείο περιορισμού πολλαπλών στοιχείων, το οποίο χρησιμοποιείται για την δημιουργία ενός άκαμπτου συνδέσμου ανάμεσα σε δύο κόμβους, έναν ανεξάρτητο (master node) και έναν εξαρτημένο (slave node). Πρακτικά ενώνουμε έναν κεντρικό κόμβο (master node) με όλους τους κόμβους (slave nodes) στην περιοχή εφαρμογής της φόρτισης. Στην συνέχεια θέτουμε μία σημειακή δύναμη στον κεντρικό ανεξάρτητο κόμβο η οποία μεταφέρεται και ισομοιράζεται μέσω των στοιχείων MPC184 σε όλους τους υπόλοιπους εξαρτημένους κόμβους.

Για την δημιουργία των στοιχείων MPC184 αρχικά ορίζουμε τις παραμέτρους K1= Rigid Beam και K2=Lagrange Multiplier μέσω του μενού Options (Preprocessor→ Element Type→ Add/Edit/Delete). Για να δημιουργήσουμε τα καινούργια στοιχεία επιλέγουμε τον τύπο στοιχείου MPC184 μέσω της ακολουθίας εντολών: Preprocessor → Modeling → Create → Elements → Element Attributes → Element type number. Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών: Preprocessor → Modeling → Create → Elements → Auto Numbered → Thru Node.

Για να αποφύγουμε τις υπερβολικά μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων που προκύπτουν στα άκρα εφαρμογής της κατανεμημένης φόρτισης εφαρμόζουμε παρόμοια την μέθοδο του επιπλέον υλικού που εφαρμόσαμε παραπάνω στα σημεία εφαρμογής των συνοριακών συνθηκών. Τα στοιχεία MPC184 ενώνονται με τους κόμβους πάνω στο επιπλέον υλικό. Η

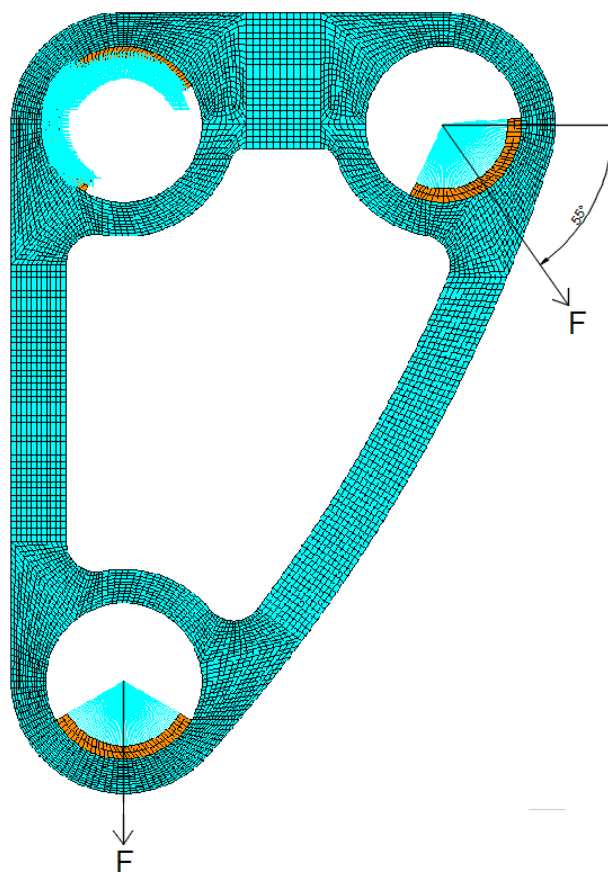
εφαρμογή του επιπλέον υλικού καθώς και των στοιχείων MPC184 φαίνονται στο Σχήμα 2.28 παρακάτω.



Σχήμα 2.28: Εφαρμογή του επιπλέον υλικού και των στοιχείων MPC184 στην περιοχή εφαρμογής της φόρτισης

Τέλος για να ορίσουμε τις δυνάμεις στους δύο κεντρικούς κόμβους χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών: Solution → Define Loads → Apply → Structural → Force/Moment → On Nodes. Η δύναμη F που ασκείται σε γωνία 55° ορίζεται ως δύο συνιστώσες F_x και F_y , όπου $F_x = F \cdot \cos(55^\circ)$ και $F_y = F \cdot \sin(55^\circ)$. Η τιμή της δύναμης F προσδιορίζεται, στο κεφάλαιο 2.5 παρακάτω, έτσι ώστε η φόρτιση να προκαλεί διαρροή στο headboard από αλουμίνιο.

Στο Σχήμα 2.29 φαίνεται η ολοκληρωμένη μορφή του μοντέλου μας, με τις συνοριακές συνθήκες καθώς και τις επιβαλλόμενες δυνάμεις. Για να κάνουμε επίλυση του μοντέλου μας χρησιμοποιούμε την εντολή Solve.



Σχήμα 2.29: Ολοκληρωμένη μορφή του μοντέλου

2.4 Μετ-επεξεργασία (Post-processing)

Η μετ-επεξεργασία (post-processing) είναι το τρίτο και τελευταίο στάδιο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Στο πρώτο στάδιο ορίσαμε τη γεωμετρία, τις ιδιότητες των υλικών και δημιουργήσαμε το πλέγμα και στο δεύτερο στάδιο καθορίσαμε τον τύπο της ανάλυσης (στατική, γραμμική ανάλυση), τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος και επιβάλλαμε την φόρτιση. Στο στάδιο της μετ-επεξεργασίας μπορούμε να πάρουμε και να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα των υπολογισμών του προγράμματος για τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε την συμπεριφορά του μοντέλου μας στις δυνάμεις που του ασκούνται ως προς τις παραμορφώσεις και τις τάσεις που δημιουργούνται καθώς και να προσδιορίσουμε το σημείο αστοχίας κάθε στρώσης μέσω του ελέγχου των αποτελεσμάτων του κριτηρίου αστοχίας Tsai-Wu.

2.5 Μελέτη του Headboard από Αλουμίνιο

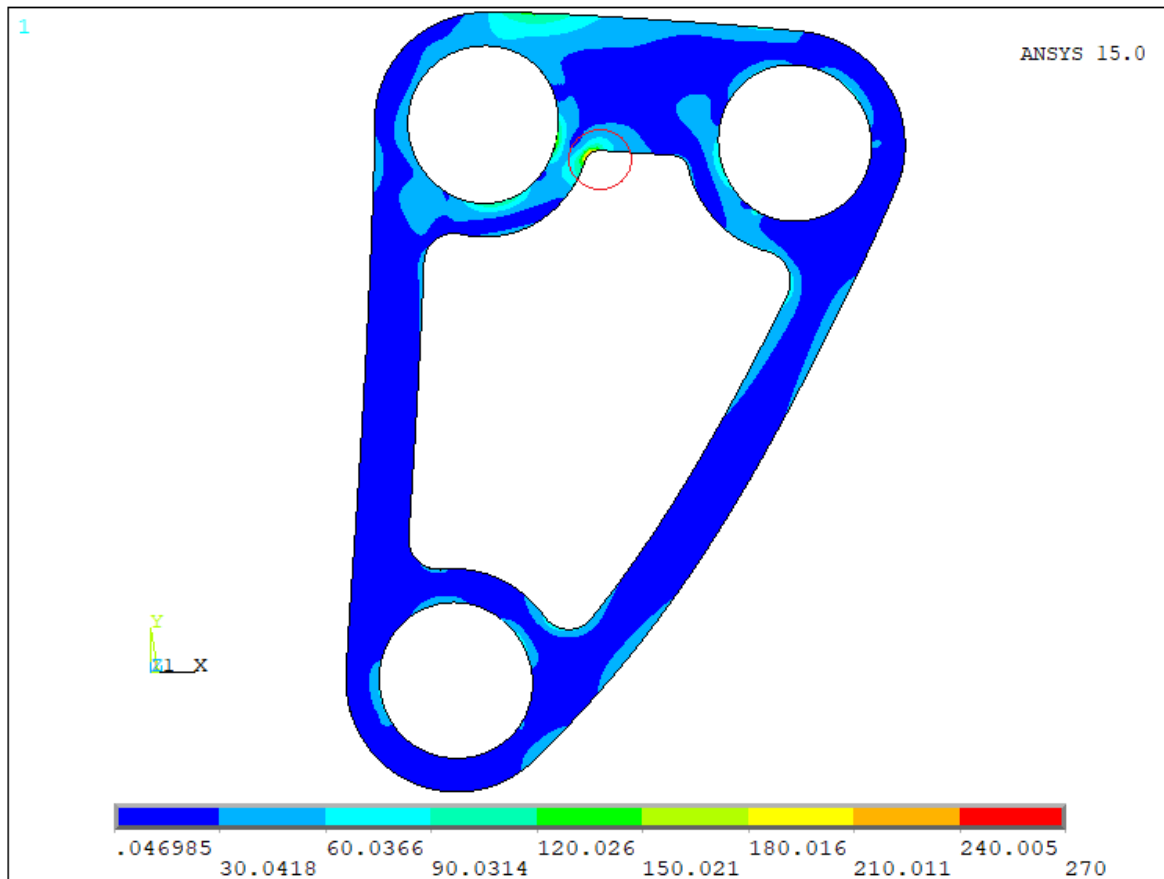
Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως δεν έχουμε πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος των δυνάμεων που ασκούνται στην γεωμετρία του headboard. Για να προσδιορίσουμε τις τιμές των μέγιστων δυνάμεων που θα ασκούνται στο headboard από σύνθετα υλικά κάνουμε την

εξής παραδοχή. Το μέγιστο φορτίο θα ισούται με το φορτίο που προκαλεί τάση διαρροής στο headboard από αλουμίνιο.

Οι δυνάμεις που έχουμε ορίσει στο μοντέλο μας προκαλούν μία διαξονική εντατική κατάσταση και έτσι δεν μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων των τάσεων με τις αντίστοιχες αντοχές σε μονοαξονικές εντατικές καταστάσεις. Για την εύρεση της αντοχής του μοντέλου κάνουμε χρήση του κριτηρίου ισοδύναμης τάσης Von Mises. Η ισοδύναμη τάση αποτελεί ένα υπολογιστικό μέγεθος το οποίο θα προκαλέσει το ίδιο καταστροφικό αποτέλεσμα με την σύνθετη καταπόνηση. Η ισοδύναμη τάση που προκύπτει μέσω του κριτηρίου Von Mises συγκρίνεται με την αντοχή έναντι διαρροής σε εφελκυσμό.

Έπειτα από δοκιμές με δυνάμεις διαφορετικού μεγέθους κάθε φορά και την αντίστοιχη ανάλυση των τάσεων Von Mises που δημιουργούνται, προκύπτει ότι η μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραλάβει το headboard από αλουμίνιο, χωρίς να ξεκινήσει η διαρροή, είναι ίση με 306.183 kN στην κάθε οπή. Παρατηρείται όμως ότι έχουμε πολύ μεγάλη συγκέντρωση τάσεων σε μόνο ένα σημείο του μοντέλου ενώ σε όλη την υπόλοιπη περιοχή οι τάσεις είναι σημαντικά μικρότερες όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.30 παρακάτω.

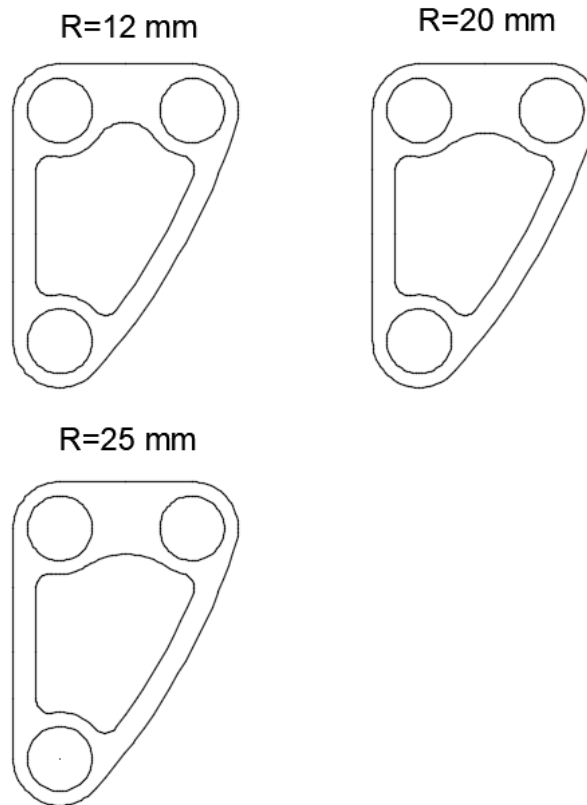
Αρχικά η συγκέντρωση τάσεων θα μπορούσε να μην είναι ρεαλιστική δεδομένου ότι έχουμε κάνει συγκεκριμένες παραδοχές για τις διευθύνσεις που ασκούνται οι δυνάμεις λόγω έλλειψης επαρκούς πληροφόρησης. Ακόμη για να μπορούμε να εξάγουμε σαφή συμπεράσματα για την συμπεριφορά του μοντέλου σε μεγαλύτερες δυνάμεις, χρειάζεται μία μη-γραμμική ανάλυση του μοντέλου, ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά της πλαστικής περιοχής που θα δημιουργηθεί στο σημείο εκείνο. Παρ'όλα αυτά, κάτι τέτοιο δεν είναι στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής.



Σχήμα 2.30: Κατανομή τάσεων Von Mises σε headboard από αλουμίνιο για $F=306.183$ kN.

Η λύση που εφαρμόζεται είναι η τροποποίηση της γεωμετρίας του headboard τοπικά στο συγκεκριμένο σημείο. Η συγκέντρωση τάσεων παρατηρείται στο σημείο της γεωμετρίας με έντονη αλλαγή της καμπυλότητας. Εξετάζουμε λοιπόν την αντικατάσταση των δύο μικρών καμπύλων τμημάτων και του παράλληλου τμήματος ανάμεσα με ένα ενιαίο τόξο. Εξετάστηκαν μερικές γεωμετρίες με διαφορετικές ακτίνες τόξου R που φαίνονται στο Σχήμα 2.31. Όπως είναι λογικό όσο μεγαλύτερη ακτίνα έχει το τόξο, τόσο μικρότερες θα είναι οι συγκεντρώσεις τάσεων. Από την άλλη μεριά όμως θέλουμε να παραμείνουμε όσο το δυνατόν πιο κοντά στην αρχική γεωμετρία καθώς και να αποφύγουμε την αύξηση του βάρους της τελικής κατασκευής με την προσθήκη επιπλέον υλικού. Είναι στην ευχέρεια του σχεδιαστή να αποφασίσει ποια είναι η κατάλληλη ισορροπία ανάμεσα σε αυτές τις απαιτήσεις. Η τελική ακτίνα που επιλέχθηκε είναι $R = 20$ mm. Όπως φάνηκε μέσω των αποτελεσμάτων, μία περαιτέρω αύξηση της ακτίνας δεν προκαλεί σημαντική μείωση των τάσεων.

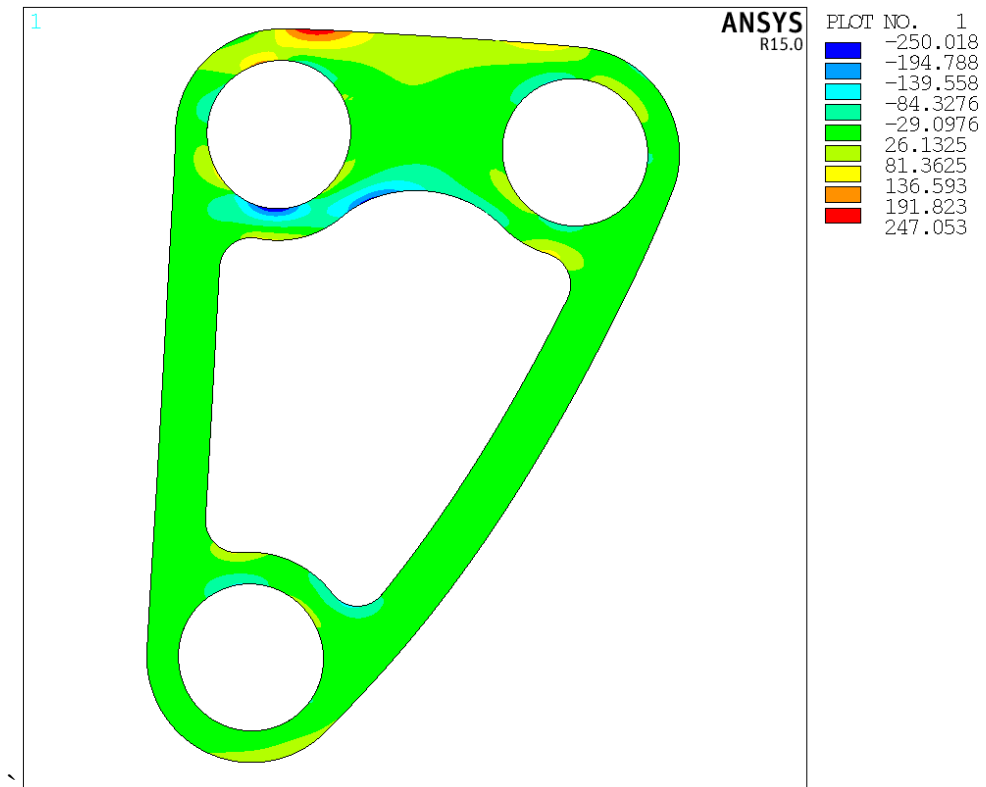
Ακολουθώντας την ίδια ανάλυση για την καινούργια γεωμετρία, προκύπτει ότι η μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραλάβει το headboard από αλουμίνιο είναι ίση με $F=526.994$ kN στην κάθε οπή, αύξηση 70% σε σχέση με την αρχική γεωμετρία.



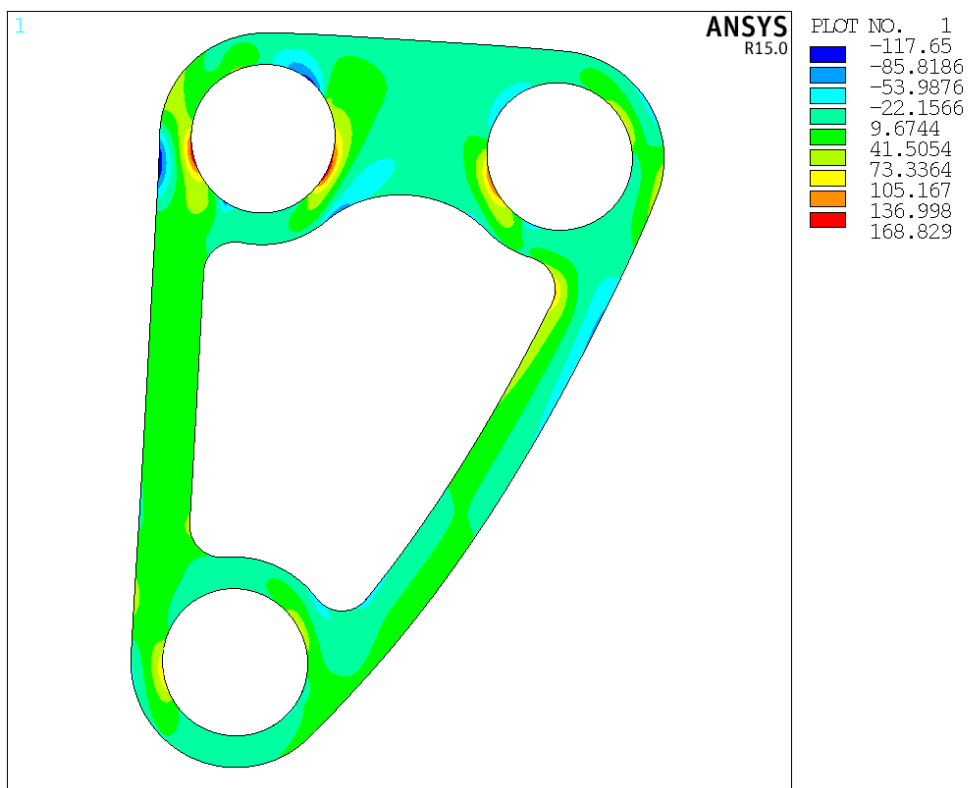
Σχήμα 2.31: Διαφορετικές ακτίνες τόξου R

2.6 Έλεγχος για λυγισμό στο Headboard από αλουμίνιο

Πραγματοποιούμε έναν έλεγχο λυγισμού του μοντέλου μας, επιπρόσθετα του ελέγχου ορίου διαρροής, καθώς παρατηρείται δημιουργία θλιπτικών τάσεων στο μοντέλο, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 2.32 και στο Σχήμα 2.33. Πρέπει να ελέγξουμε ότι δεν επέρχεται αστοχία λόγω λυγισμού σε φορτίο μικρότερο του φορτίου διαρροής.



Σχήμα 2.32: Τάσεις στον άξονα X για F=526.994 kN



Σχήμα 2.33: Τάσεις στον άξονα Y για F=526.994 kN

Το Ansys μας προσφέρει την δυνατότητα μιας γραμμικής ανάλυσης λυγισμού (Eigenvalue Buckling Analysis), η οποία υπολογίζει το θεωρητικό φορτίο λυγισμού μιας ιδανικά ελαστικής κατασκευής. Τα αποτελέσματά της περιλαμβάνουν τα κρίσιμα φορτία λυγισμού και τις αντίστοιχες ιδιομορφές λυγισμού του μοντέλου.

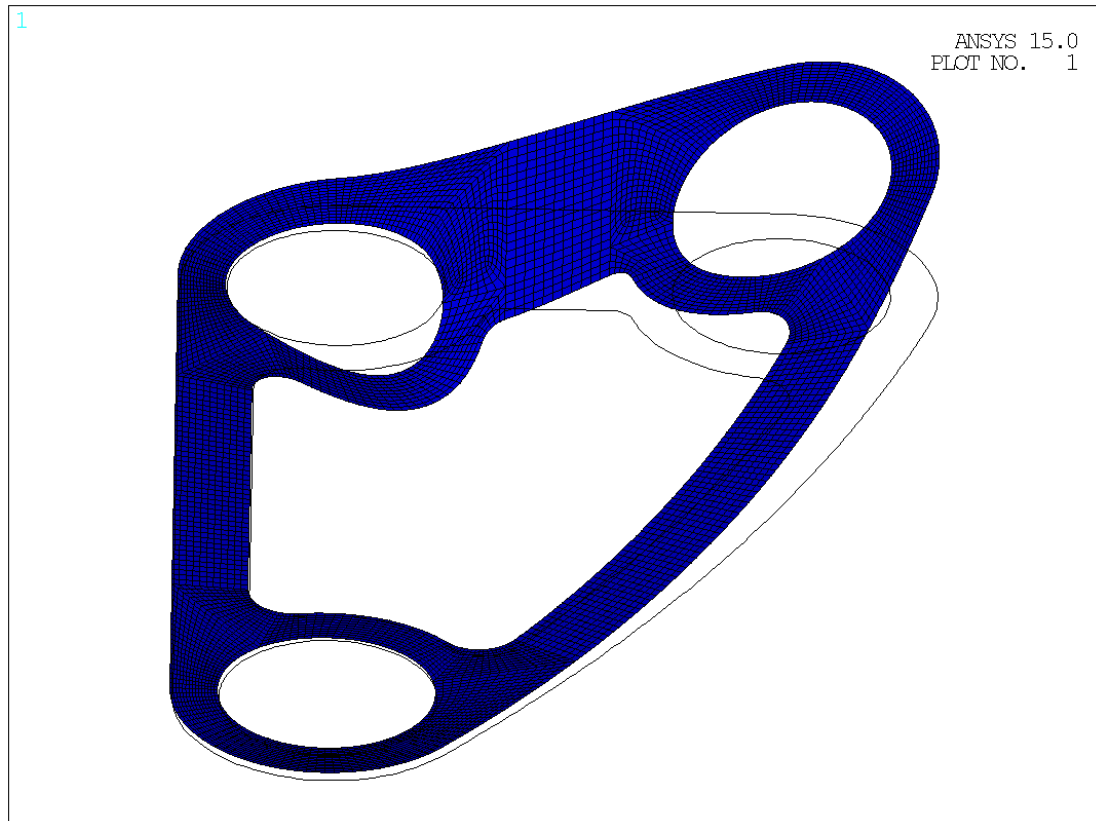
Για να πραγματοποιήσουμε μία ανάλυση λυγισμού πρέπει αρχικά να έχουμε πραγματοποιήσει την στατική ανάλυση του μοντέλου με τις φορτίσεις που έχουμε ορίσει. Στην συνέχεια επιστρέφουμε στο μενού Solution και αλλάζουμε τον τύπο της ανάλυσης σε Eigenvalue Buckling Analysis. Από το μενού Solution επιλέγουμε Unabridged Menu και έτσι εμφανίζεται η επιλογή του μενού Analysis Options (Solution → Analysis Type → Analysis Options). Επιλέγουμε το πρόγραμμα να υπολογίσει τις πρώτες 10 ιδιομορφές λυγισμού ορίζοντας στην μεταβλητή NMODE No. of modes to expand την τιμή 10. Αυτό γίνεται για να εξασφαλίσουμε ότι θα υπολογιστούν ιδιομορφές με θετικούς συντελεστές φορτίου λυγισμού καθώς υπάρχει πιθανότητα οι αρχικές ιδιομορφές λυγισμού που θα προκύψουν να παρουσιάσουν αρνητικούς συντελεστές φορτίου λυγισμού. Η σημασία των αρνητικών συντελεστών είναι ότι θα επέλθει λυγισμός αν αντιστρέψουμε την διεύθυνση των φορτίων που ασκούνται. Ουσιαστική σημασία έχει μόνο η πρώτη ιδιομορφή λυγισμού με θετικό φορτίο. Οι υπόλοιπες ιδιομορφές πραγματοποιούνται σε μεγαλύτερα φορτία από την πρώτη, οπότε θα έχει ήδη επέλθει αστοχία πριν φτάσει το φορτίο στις τιμές αυτές. Επιπλέον στο μενού Expand Modes (Solution → Load Step Opts → Single Expand → Expand Modes) ορίζω στην μεταβλητή NMODE No. of modes to expand αντίστοιχα με προηγουμένως την τιμή 10. Αφού ολοκληρωθεί η ανάλυση λυγισμού πρέπει να ξαναεπιστρέψουμε μία τελευταία φορά στο μενού Solution και να ενεργοποιήσουμε την επιλογή Expansion Pass (Analysis Type → ExpansionPass) και να πατήσουμε Solve.

Μετά το πέρας της ανάλυσης διαβάζουμε τα αποτελέσματα μέσω του μενού της μετεπεξεργασίας. Ο Πίνακας 2.5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα παρακάτω. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης λυγισμού δεν είναι φορτία αλλά συντελεστές φορτίου. Για να προσδιορίσουμε το φορτίο λυγισμού για μία συγκεκριμένη ιδιομορφή πρέπει να πολλαπλασιάσουμε το φορτίο που επιβάλλαμε ($F = 526.994 \text{ kN}$) με τον συντελεστή φορτίου που προέκυψε από το πρόγραμμα.

Πίνακας 2.5: Αποτελέσματα ανάλυσης λυγισμού headboard από αλουμίνιο

Ιδιομορφή λυγισμού	Συντελεστές φορτίου λυγισμού
1	-10.292
2	-8.597
3	-6.7774
4	-5.4429
5	-3.7578
6	-2.5584
7	-1.1758
8	-0.37423
9	4.2523
10	11.006

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της ανάλυσης το φορτίο που θα προκαλέσει λυγισμό αντιστοιχεί στην 9^η ιδιομορφή λυγισμού και είναι περίπου 4.25 φορές μεγαλύτερο από το φορτίο διαρροής, οπότε δεν θα υπάρξει αστοχία λόγω λυγισμού με τα φορτία που έχουμε επιβάλλει. Η παραμόρφωση κατά την αστοχία λόγω λυγισμού φαίνεται στο Σχήμα 2.34 παρακάτω.



Σχήμα 2.34: Παραμόρφωση κατά την αστοχία λόγω λυγισμού

2.7 Μελέτη Headboard από ίνες άνθρακα(Carbon Fiber)

Η ολική αστοχία ενός πολύστρωτου επέρχεται όταν αστοχήσουν όλες οι στρώσεις του. Μετά την αστοχία της πρώτης στρώσης οι υπόλοιπες στρώσεις διατηρούν την ικανότητά τους να φέρουν φορτίο. Επιπλέον λόγω της σύνθεσης των πολύστρωτων και της ύπαρξης της ρητίνης ακόμη και η στρώση που έχει αστοχήσει συνεχίζει να φέρει ένα μέρος του φορτίου. Βέβαια για να υπολογιστεί το πραγματικό φορτίο κατάρρευσης και συνεπώς να οριστεί και ένας συντελεστής ασφαλείας έναντι κατάρρευσης απαιτείται μία αρκετά σύνθετη ανάλυση κάτι το οποίο είναι πέραν των στόχων της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Για την συγκεκριμένη ανάλυση θεωρούμε λοιπόν ότι το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο στο μοντέλο μας ισούται με το φορτίο που προκαλεί αστοχία της πρώτης στρώσης του πολύστρωτου. Η απαίτηση που θα πρέπει να πληροί το μοντέλο μας από σύνθετα υλικά είναι να μπορεί να παραλάβει δύναμη ίση με 526.994 kN στην κάθε οπή, όπως υπολογίστηκε προηγουμένως για το headboard από αλουμίνιο, χωρίς να υπάρξει αστοχία πρώτης στρώσης.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το μοντέλο μας υπόκειται σε διαξονική εντατική κατάσταση και έτσι για την εύρεση της αντοχής του πρέπει να κάνουμε χρήση ενός κριτηρίου αστοχίας. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κριτήρια για τα ινώδη σύνθετα υλικά είναι το κριτήριο μέγιστης τάσης, το κριτήριο μέγιστης παραμόρφωσης, το κριτήριο Tsai-Hill και το κριτήριο Tsai-Wu.

Τα δύο κριτήρια Tsai-Hill και Tsai-Wu βασίστηκαν σε ένα κριτήριο αστοχίας για ανισοτροπικά υλικά που αποτελούσε επέκταση του κριτηρίου Von Mises για τα ισοτροπικά υλικά. Σε αντίθεση με τα κριτήρια μέγιστης τάσης και μέγιστης παραμόρφωσης, τα οποία θεωρούν αστοχία όταν οποιαδήποτε τάση ή παραμόρφωση στις κύριες διευθύνσεις υπερβεί την αντίστοιχη επιτρεπόμενη τιμή, τα κριτήρια Tsai-Hill και Tsai-Wu λαμβάνουν υπόψη τους την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων τάσεων και εμφανίζουν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Στην συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιείται το κριτήριο Tsai-Wu καθώς παρουσιάζει μεγαλύτερη σύμπτωση με τα πειραματικά αποτελέσματα σε σχέση με το Tsai-Hill.

Στην περίπτωση μιας ορθοτροπικής στρώσης σε συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης, για να μην συμβαίνει αστοχία σύμφωνα με το κριτήριο Tsai-Wu πρέπει :

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2 F_{12} \sigma_1 \sigma_2 < 1$$

Όπου:

$$F_1 = \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} \quad , \quad F_2 = \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \quad , \quad F_{11} = -\frac{1}{X_t X_c} \quad , \quad F_{22} = -\frac{1}{Y_t Y_c}$$

$$F_6 = 0 \quad , \quad F_{66} = \frac{1}{S^2}$$

$$F_{12} = \frac{1}{2 \sigma^2} \left[1 - \left(\frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} + \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right) \sigma + \left(\frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} \right) \sigma^2 \right]$$

Τα $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_6 = \tau_{12}$ είναι οι τάσεις στις κύριες διευθύνσεις του υλικού 1 και 2. Το μέγεθος σ είναι η αντοχή του υλικού σε διαξονικό εφελκυσμό. Εξαιτίας του γεγονότος ότι το μέγεθος σ είναι δύσκολο να μετρηθεί πειραματικά, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω προσεγγιστικές σχέσεις :

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{F_{11} F_{22}} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_t X_c Y_t Y_c}} \quad , \quad F_{12} = -\frac{1}{X_t X_c + Y_t Y_c}$$

Στόχος της ανάλυσης είναι να προσδιορίσουμε το καλύτερο πολύστρωτο με βάση την συγκεκριμένη φόρτιση που επιβάλλεται. Για την πλήρη περιγραφή ενός πολύστρωτου πρέπει να δώσουμε πληροφορίες για τον συνολικό αριθμό των στρώσεων και τη συγκεκριμένη τιμή της γωνίας προσανατολισμού των ινών κάθε στρώσης. Ακόμη πρέπει να αναφέρεται και το

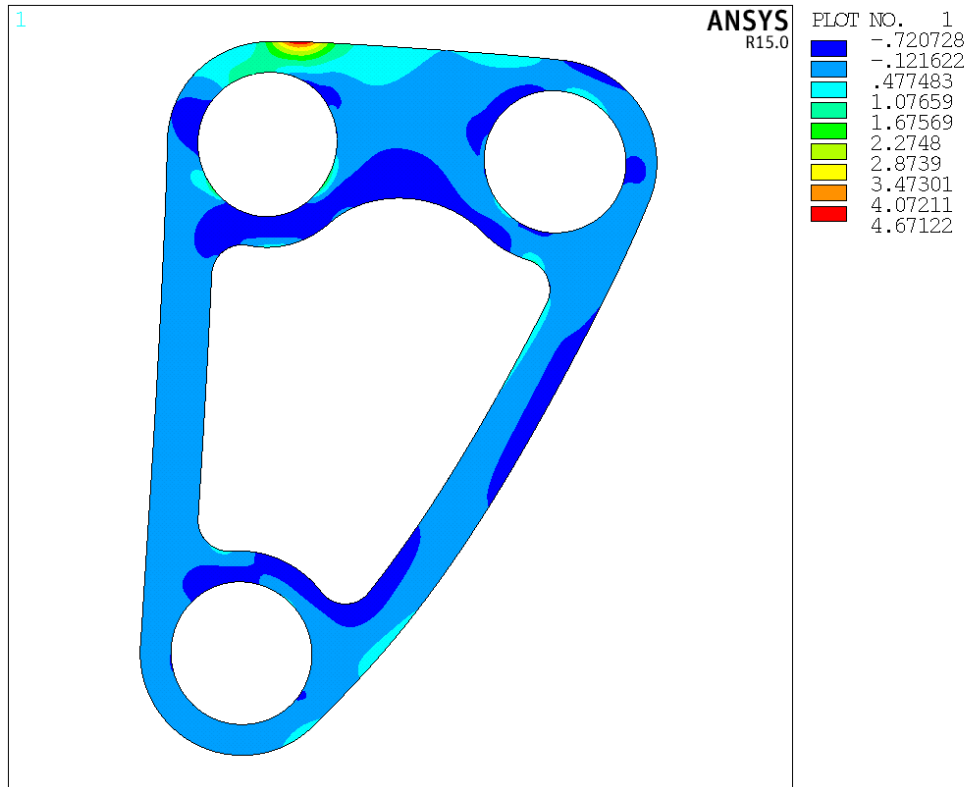
πάχος κάθε στρώσης σε μη κανονικά πολύστρωτα, δηλαδή σε πολύστρωτα με διαφορετικό πάχος ανά στρώση. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν μόνο κανονικά πολύστρωτα, όπου όλες οι στρώσεις είχαν ίσο πάχος.

Τα πολύστρωτα που εξετάζουμε είναι δύο ειδών, πολύστρωτα με διαστρωματώσεις υφάσματος με μονοαξονικές ενισχυτικές ίνες (Unidirectional) και πολύστρωτα με διαστρωματώσεις πλεκτού υφάσματος (Woven fabric).

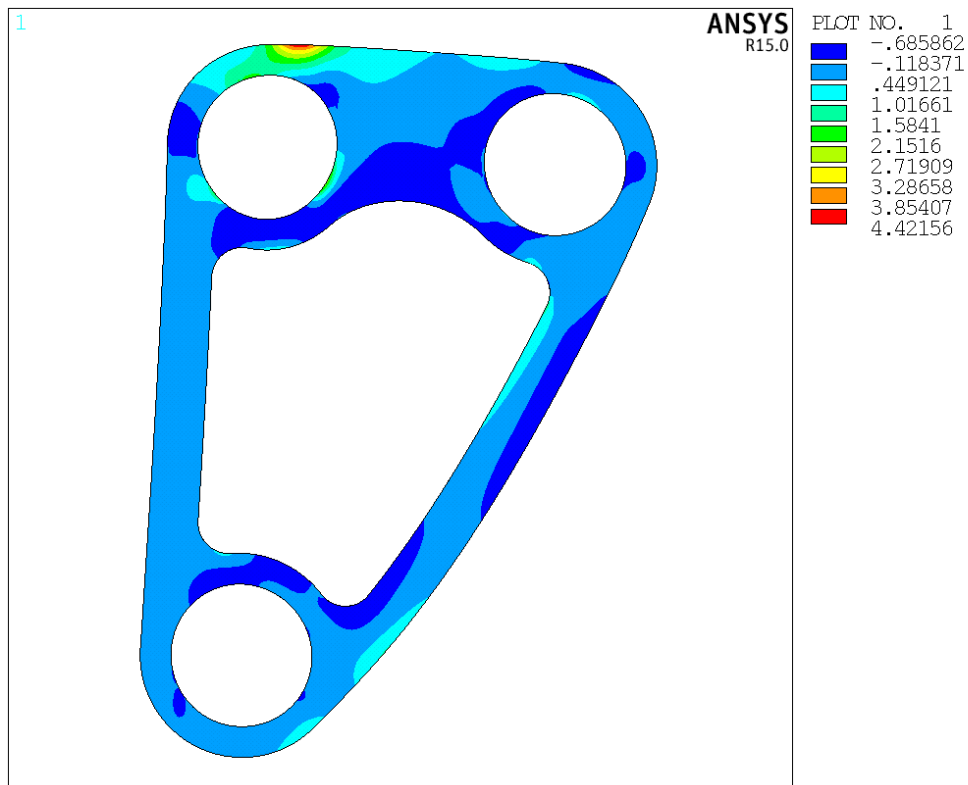
Το αρχικό πάχος των πολύστρωτων που επιλέγεται είναι 2 mm, ίσο με το πάχος του headboard από αλουμίνιο. Περαιτέρω θα επιδιώξουμε την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση του πάχους του headboard, κάτι το οποίο θα πραγματοποιήσουμε σε επόμενο στάδιο, αφού προσδιορίσουμε πρώτα το καλύτερο είδος πολύστρωτου για την συγκεκριμένη φόρτιση.

Η διαστρωμάτωση κάθε πολύστρωτου που μελετήθηκε έγινε με βάση την δεδομένη φόρτιση και τις συνοριακές συνθήκες αλλά και την ανάλυση των αποτελεσμάτων των προηγούμενων πολύστρωτων. Η γωνία τοποθέτησης των στρώσεων μετράται από τον άξονα X όπως αυτός έχει οριστεί στο κεφάλαιο 2.2. Αρχικά μελετήθηκε η διαστρωμάτωση [90,-55]_s, δηλαδή οι στρώσεις τοποθετήθηκαν στις δύο διευθύνσεις επιβολής των δυνάμεων. Στην συνέχεια μελετήθηκε η διαστρωμάτωση [0,90,-55]_s, προστέθηκε δηλαδή μία στρώση στην διεύθυνση επιβολής των αντιδράσεων των συνοριακών συνθηκών. Η διαστρωμάτωση [0,90,55,-55]_s μελετήθηκε για την ενίσχυση της στρώσης -55° στην κάθετη διεύθυνσή της μέσω της στρώσης 55°. Καθώς η τρίτη διαστρωμάτωση παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα, μελετήθηκαν επιπλέον διαστρωματώσεις κρατώντας σταθερές τις στρώσεις 0° και 90° και αλλάζοντας παράλληλα την γωνία των άλλων δύο, κάθετων μεταξύ τους, στρώσεων. Τα διάφορα είδη πολύστρωτων μαζί με τις διαστρωματώσεις τους φαίνονται παρακάτω μαζί με τις αντίστοιχες τιμές του κριτηρίου Tsai-Wu.

Πολύστρωτο No.1 (Μονοδιευθυντικές ίνες) : Διαστρωμάτωση [90/-55]s

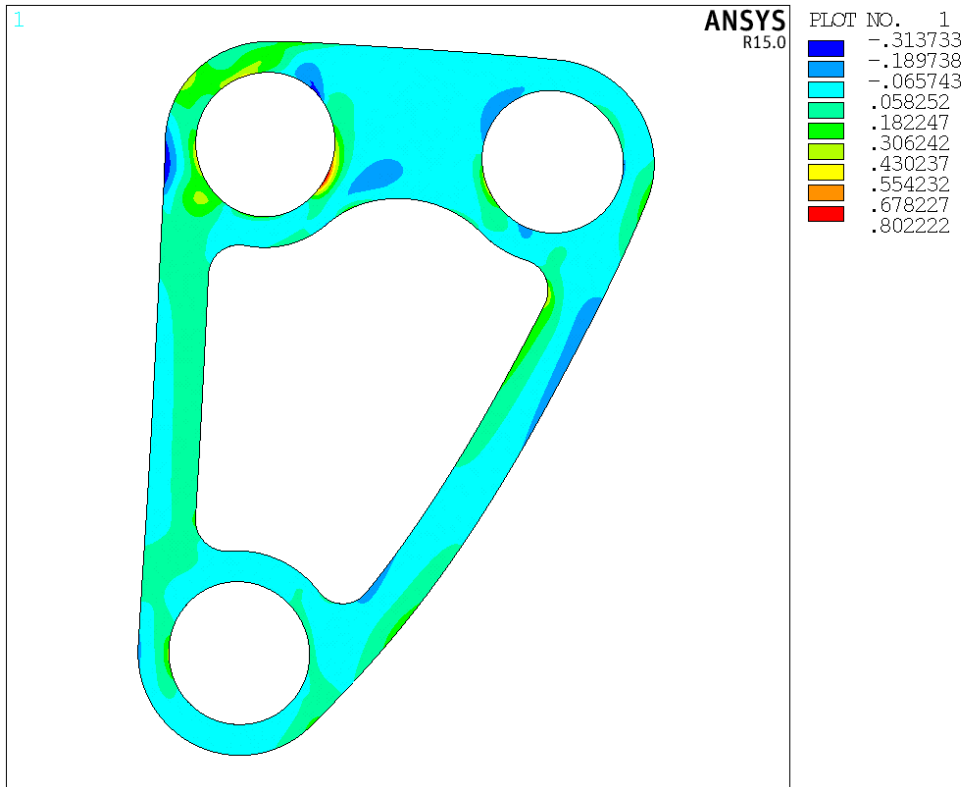


Σχήμα 2.35: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 90° (Πολύστρωτο 1)

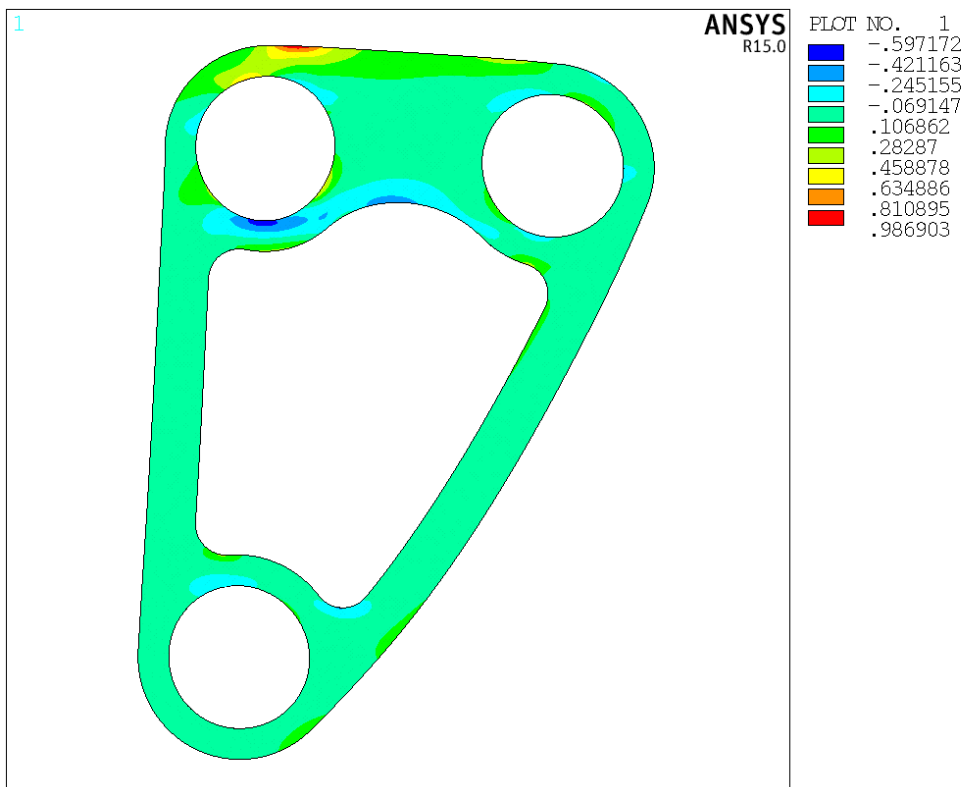


Σχήμα 2.36: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση -55° (Πολύστρωτο 1)

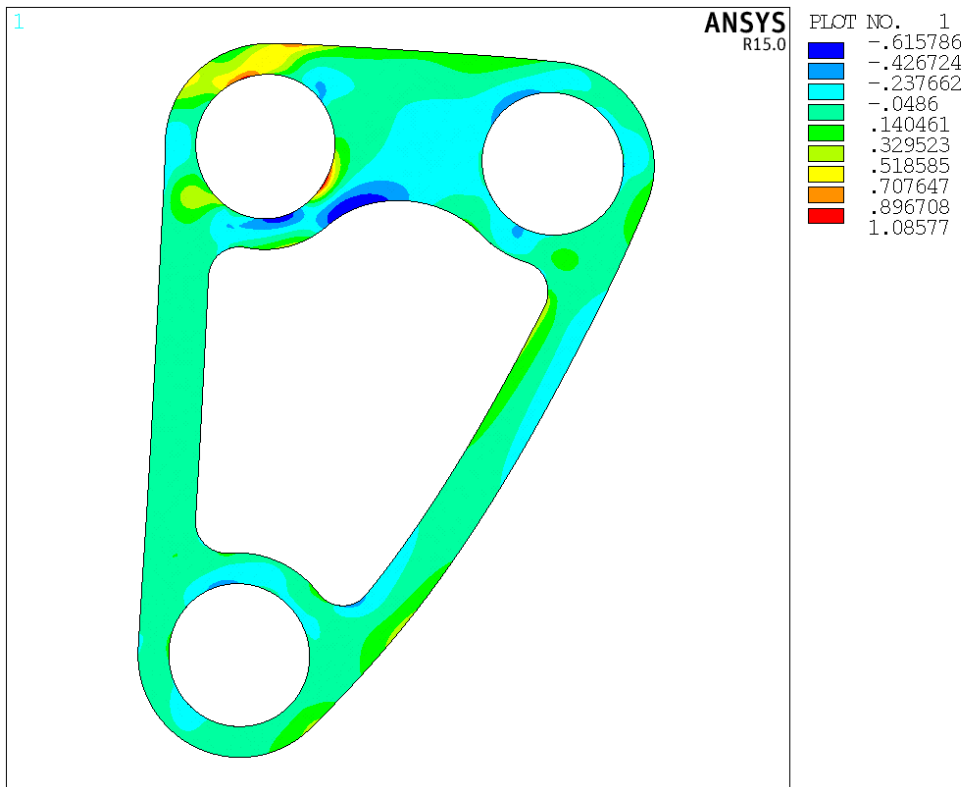
Πολύστρωτο No.2 (Μονοδιευθυντικές ίνες) : Διαστρωμάτωση [0/90/-55]s



Σχήμα 2.37: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 0° (Πολύστρωτο 2)

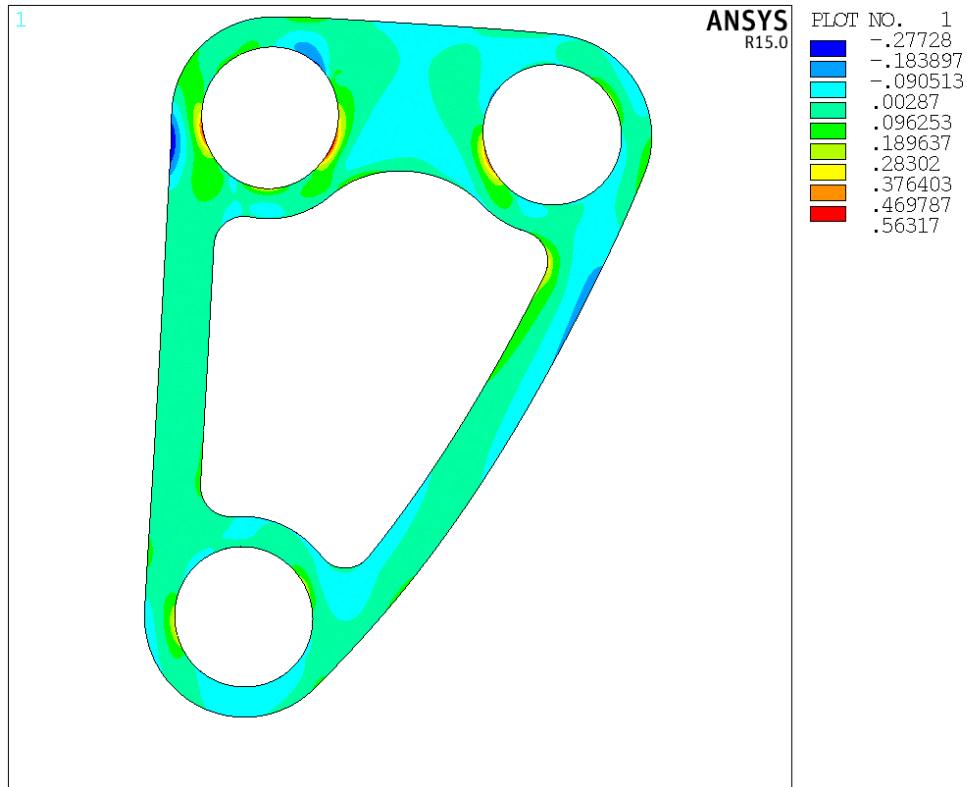


Σχήμα 2.38: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 90° (Πολύστρωτο 2)

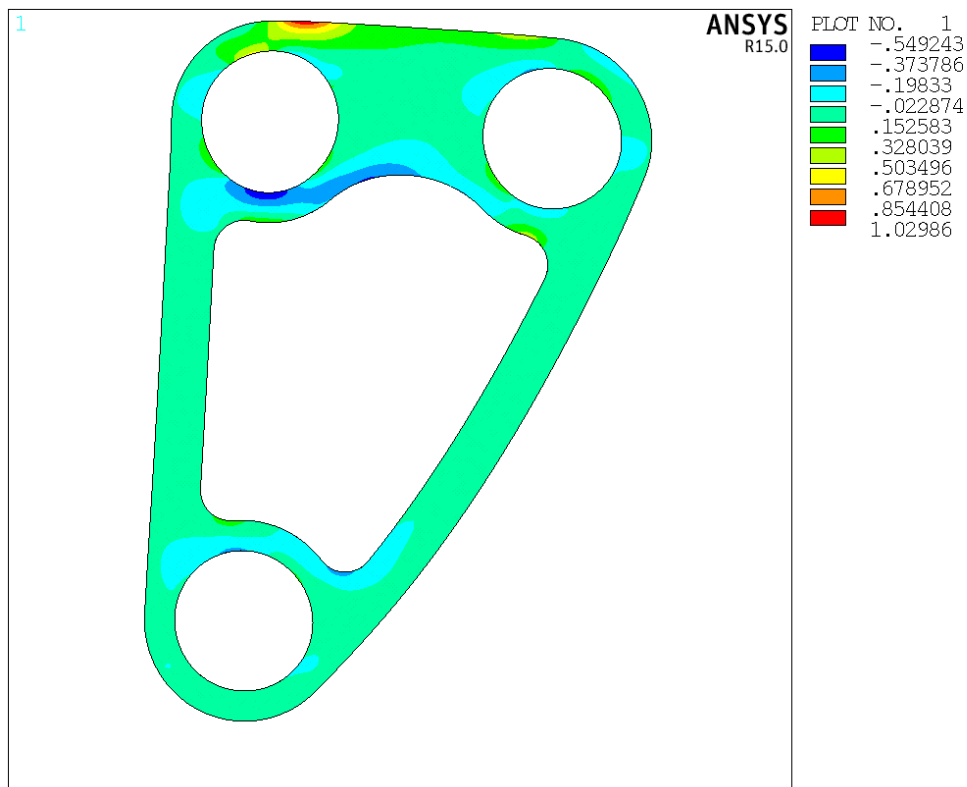


Σχήμα 2.39: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση -55° (Πολύστρωτο 2)

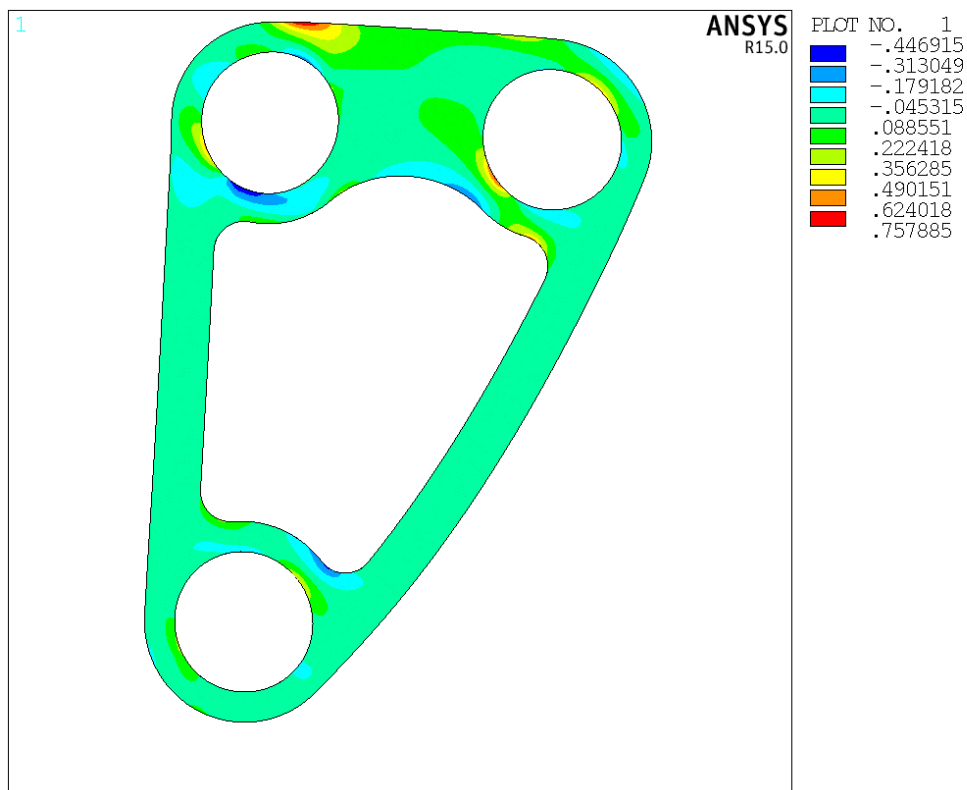
Πολύστρωτο No.3 (Μονοδιευθυντικές ίνες) : Διαστρωμάτωση [0/90/55/-55]s



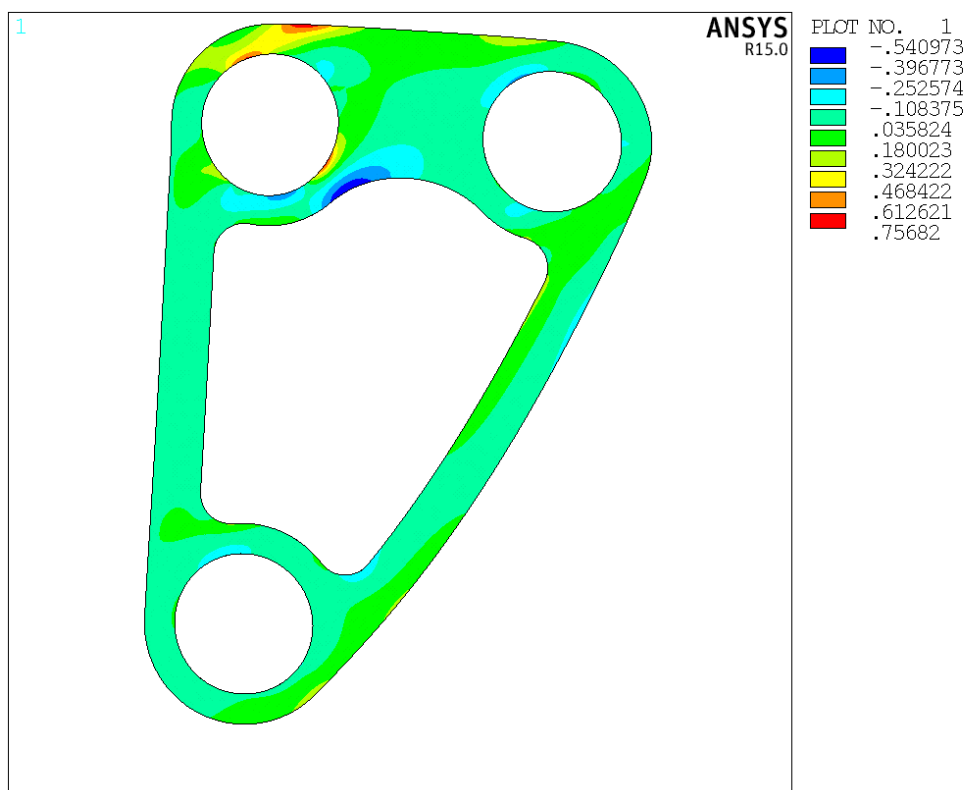
Σχήμα 2.40: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 0° (Πολύστρωτο 3)



Σχήμα 2.41: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 90° (Πολύστρωτο 3)

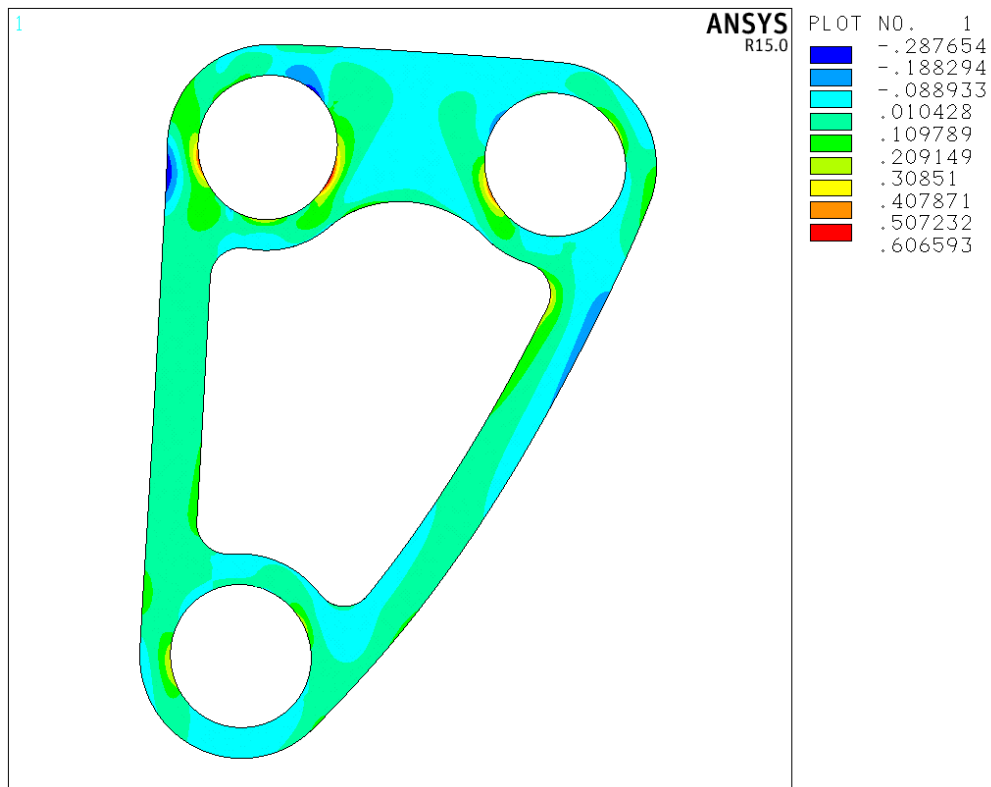


Σχήμα 2.42: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 55° (Πολύστρωτο 3)

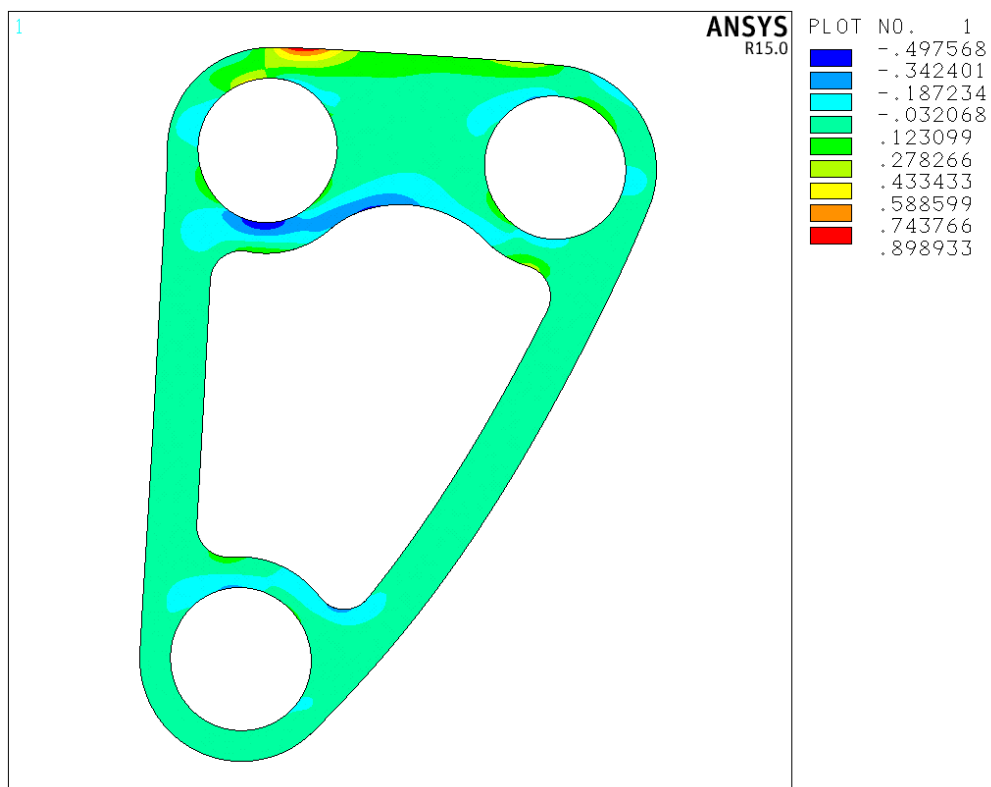


Σχήμα 2.43: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση -55° (Πολύστρωτο 3)

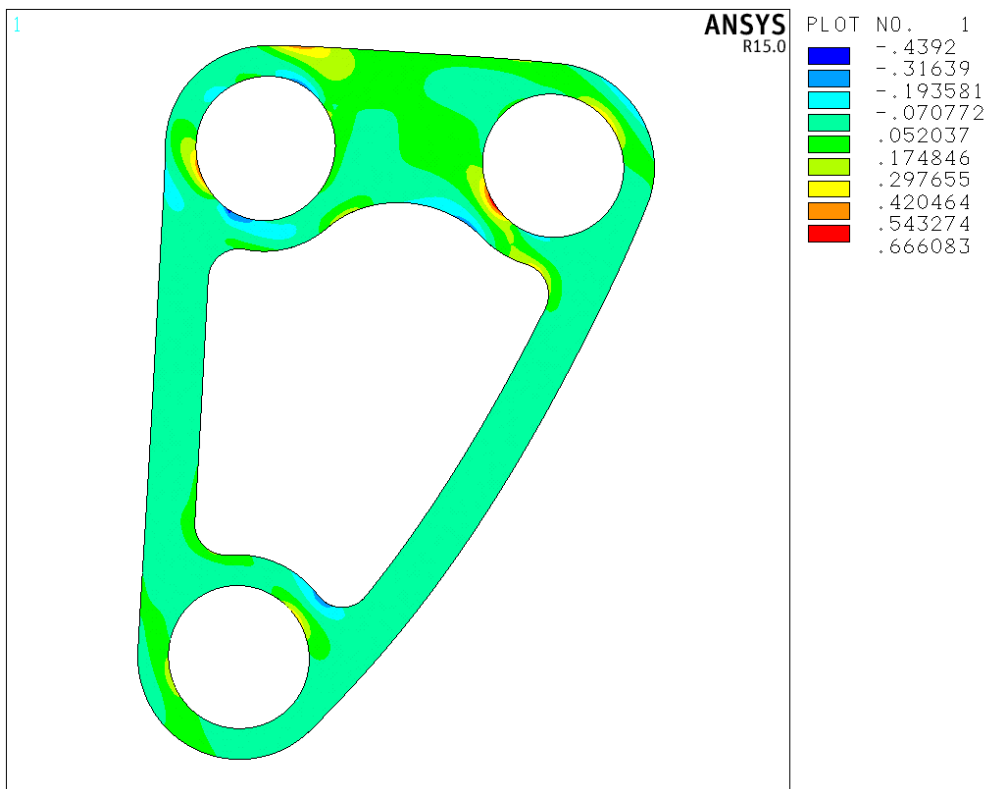
Πολύστρωτο No.4 (Μονοδιευθυντικές ίνες) : Διαστρωμάτωση [0/90/45/-45]s



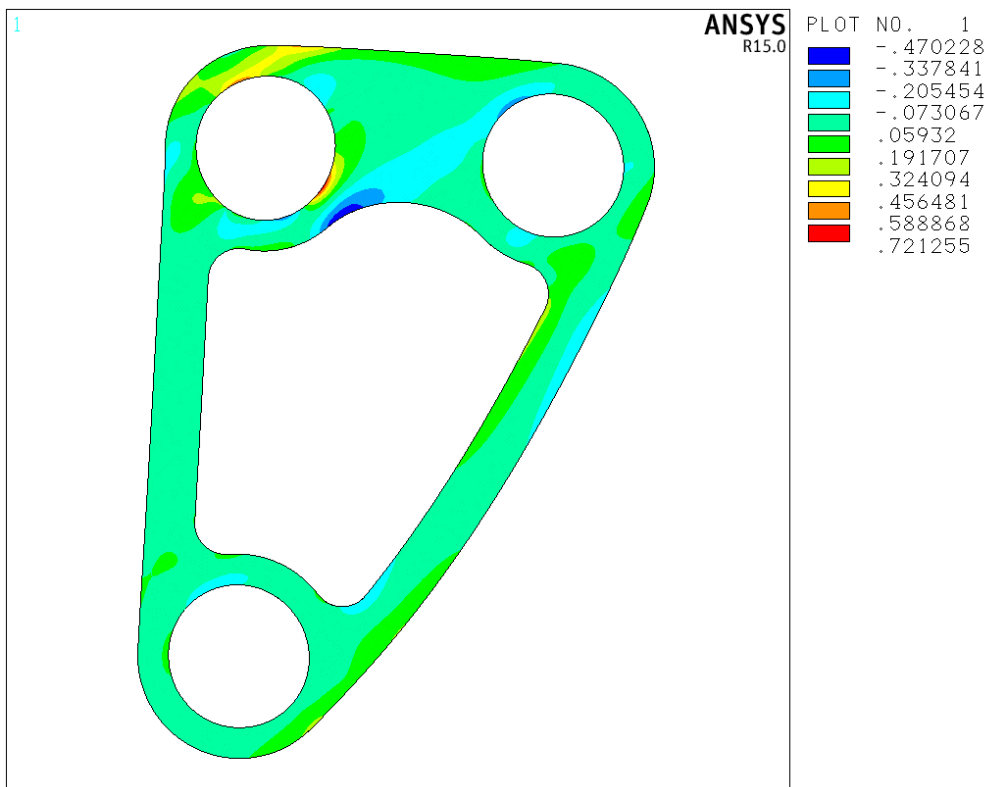
Σχήμα 2.44: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 0° (Πολύστρωτο 4)



Σχήμα 2.45: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 90° (Πολύστρωτο 4)

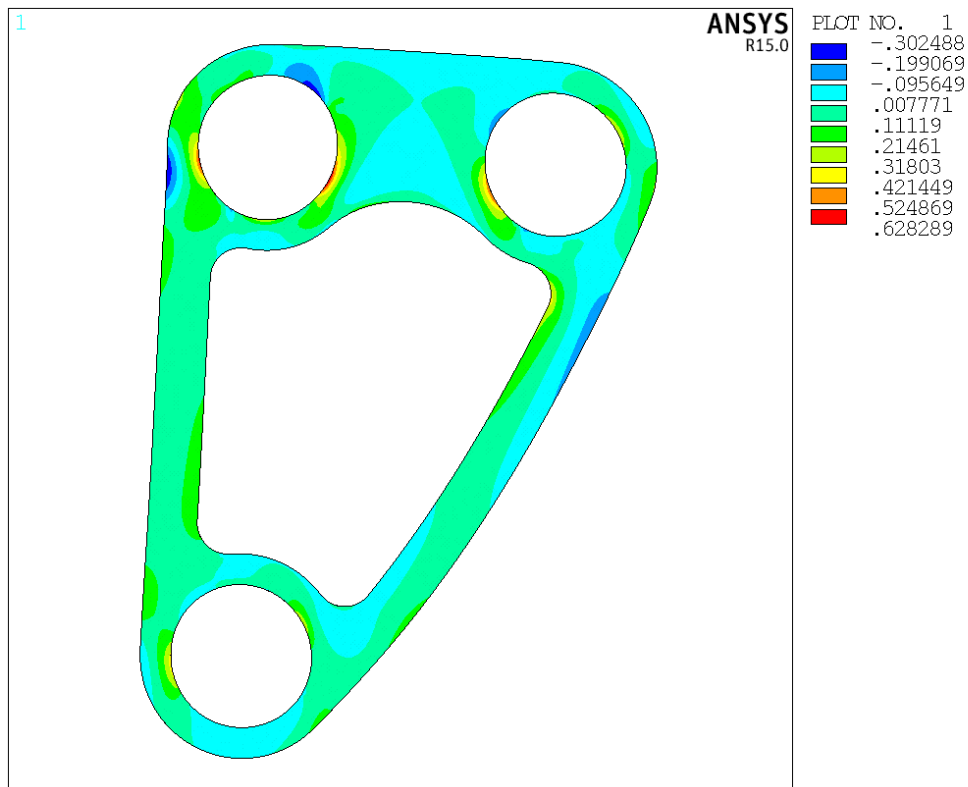


Σχήμα 2.46: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 45° (Πολύστρωτο 4)

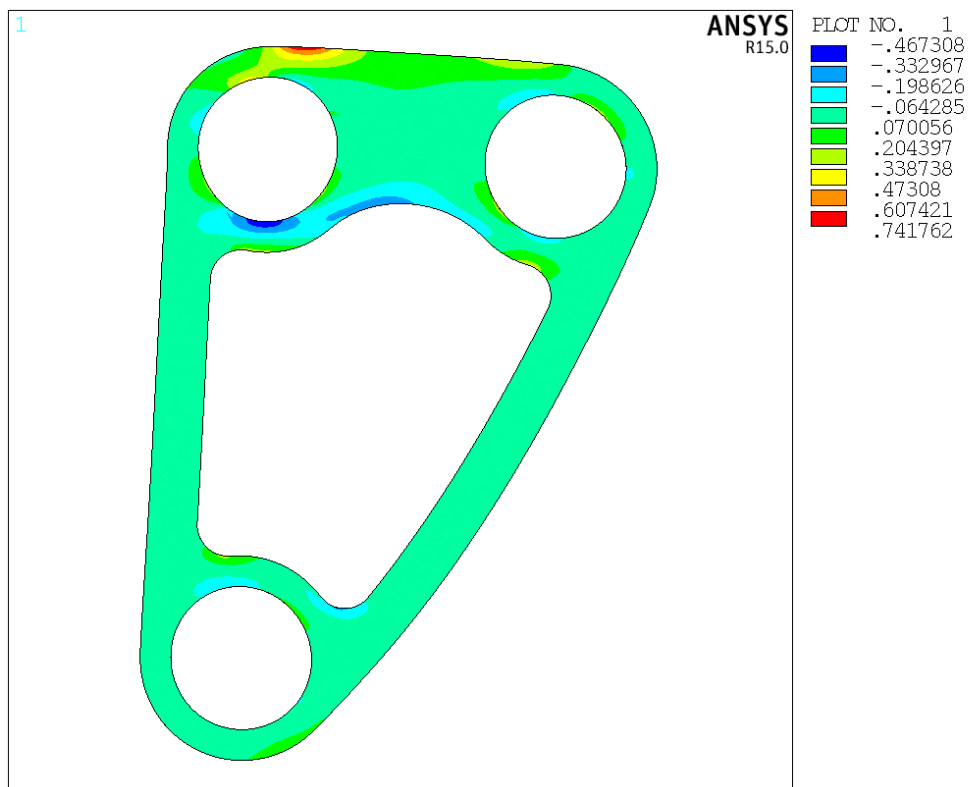


Σχήμα 2.47: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση -45° (Πολύστρωτο 4)

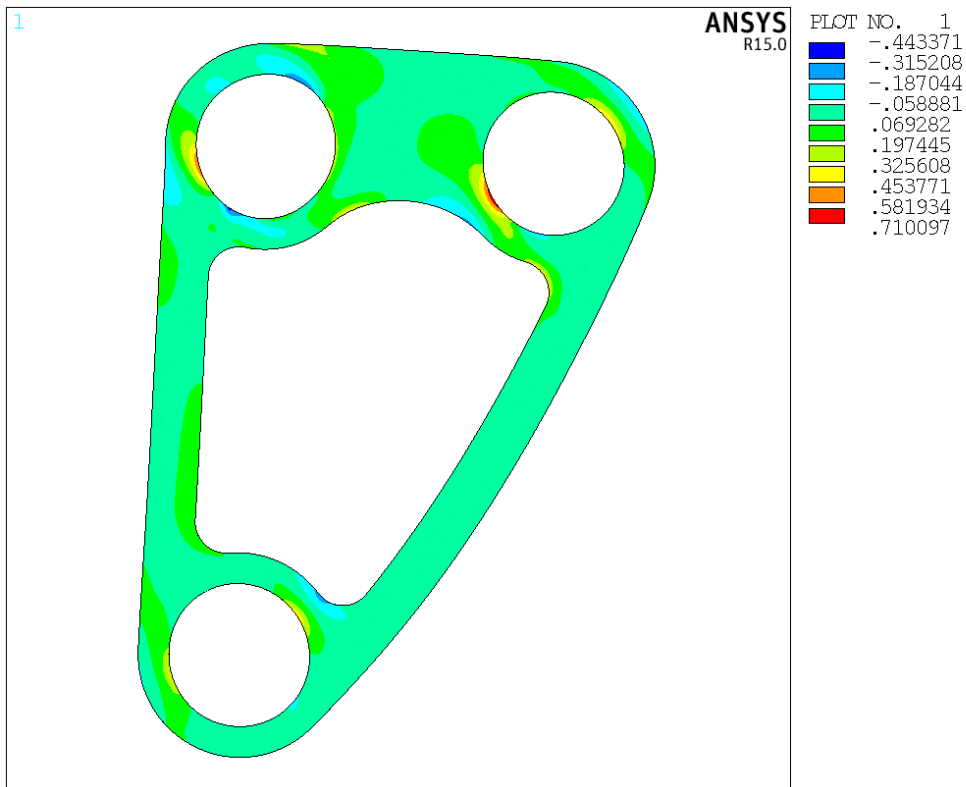
Πολύστρωτο No.5 (Μονοδιευθυντικές ίνες) : Διαστρωμάτωση [0/90/35/-35]s



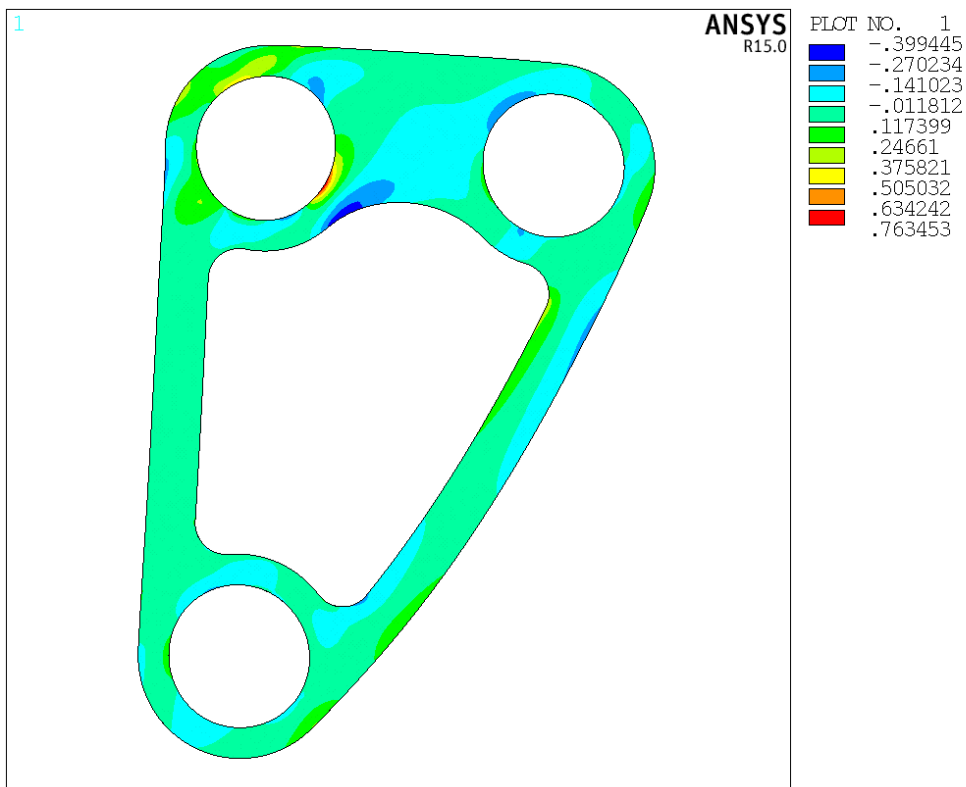
Σχήμα 2.48: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 0° (Πολύστρωτο 5)



Σχήμα 2.49: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 90° (Πολύστρωτο 5)

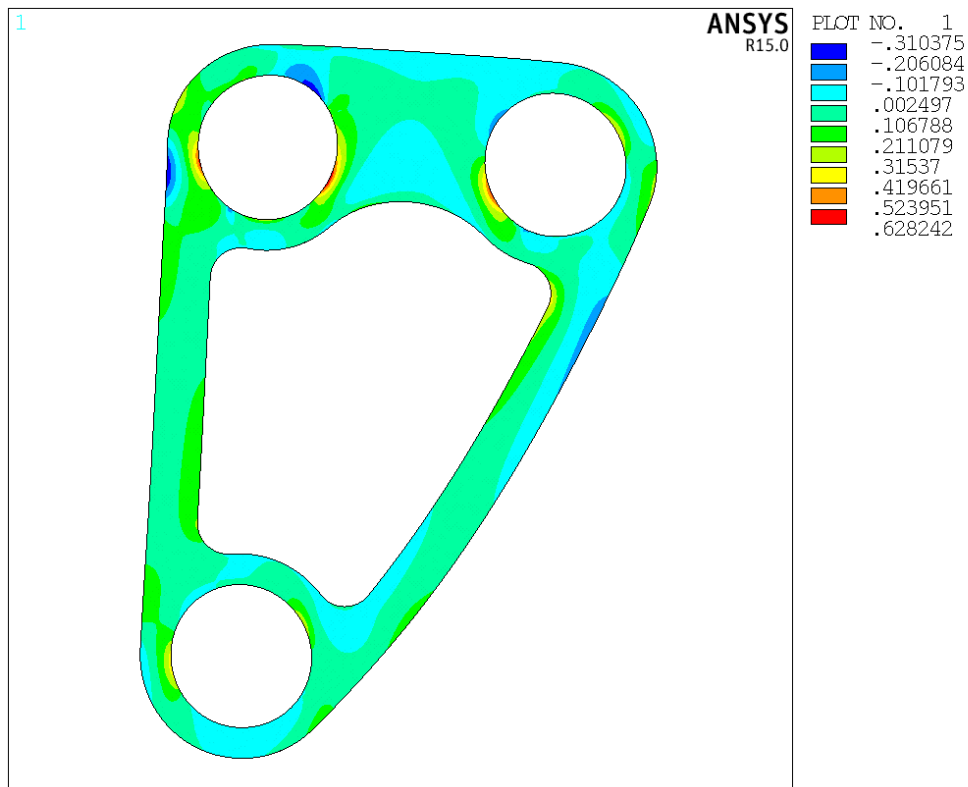


Σχήμα 2.50: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 35° (Πολύστρωτο 5)

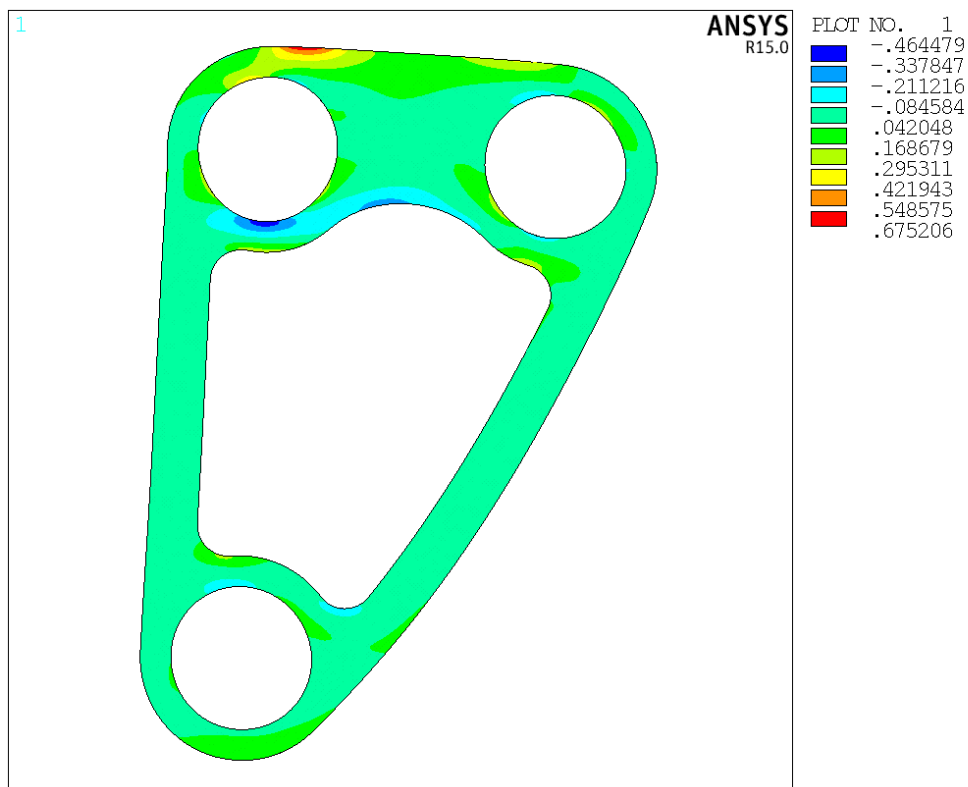


Σχήμα 2.51: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση -35° (Πολύστρωτο 5)

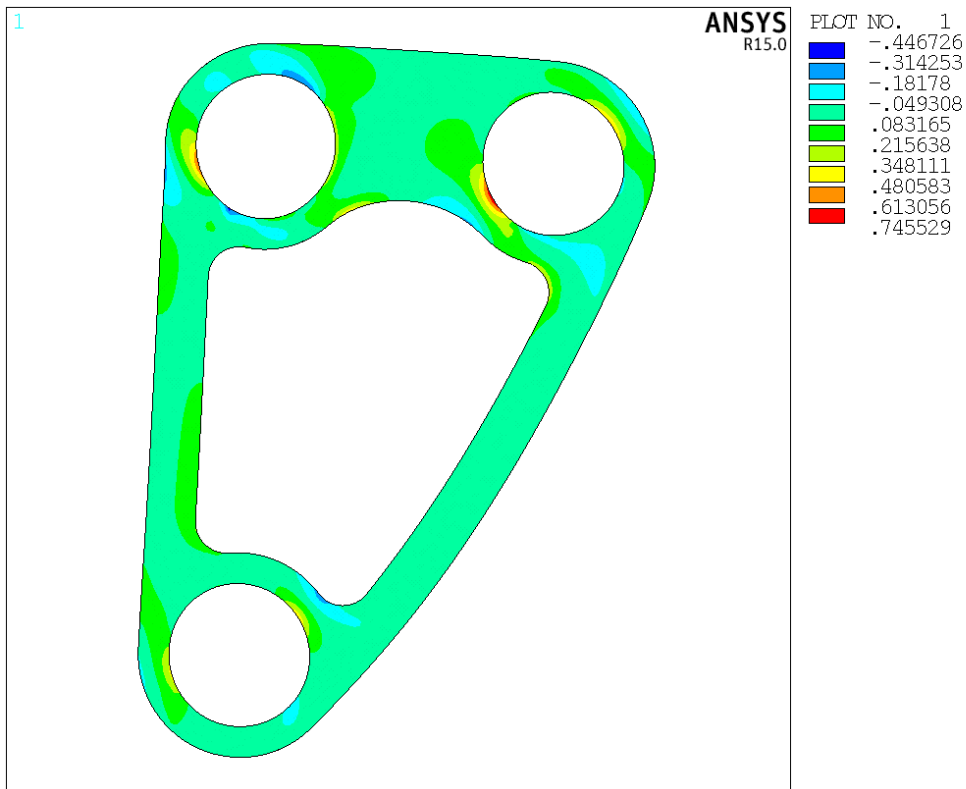
Πολύστρωτο No.6 (Μονοδιευθυντικές ίνες) : Διαστρωμάτωση [0/90/30/-30]s



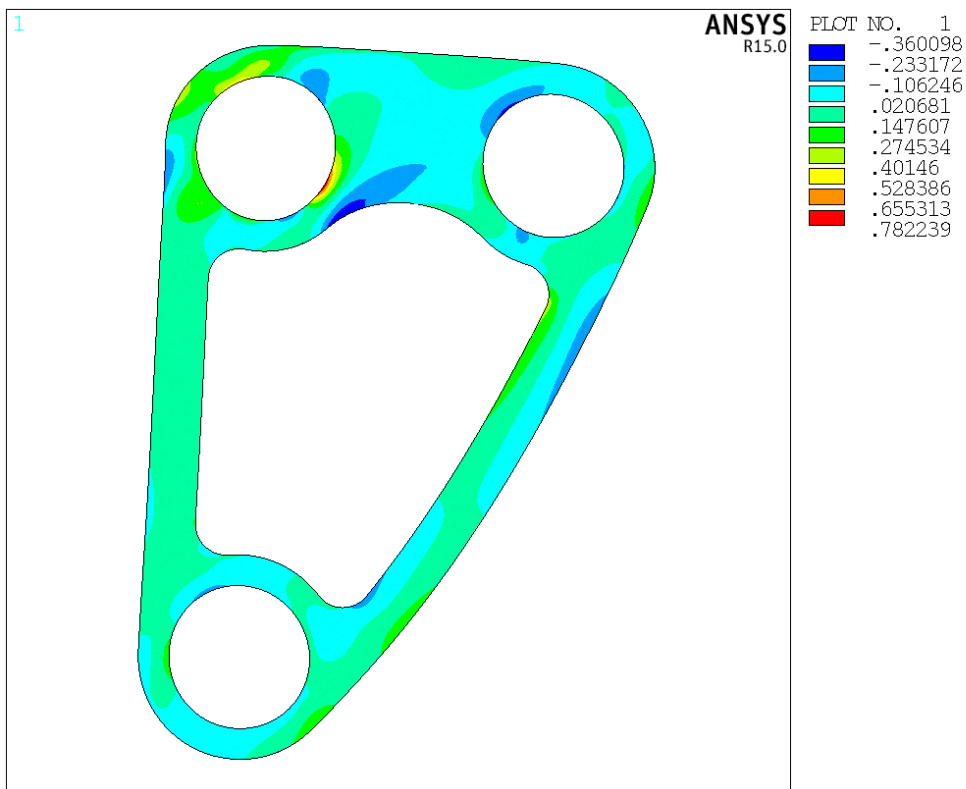
Σχήμα 2.52: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 0° (Πολύστρωτο 6)



Σχήμα 2.53: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 90° (Πολύστρωτο 6)



Σχήμα 2.54: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 30° (Πολύστρωτο 6)



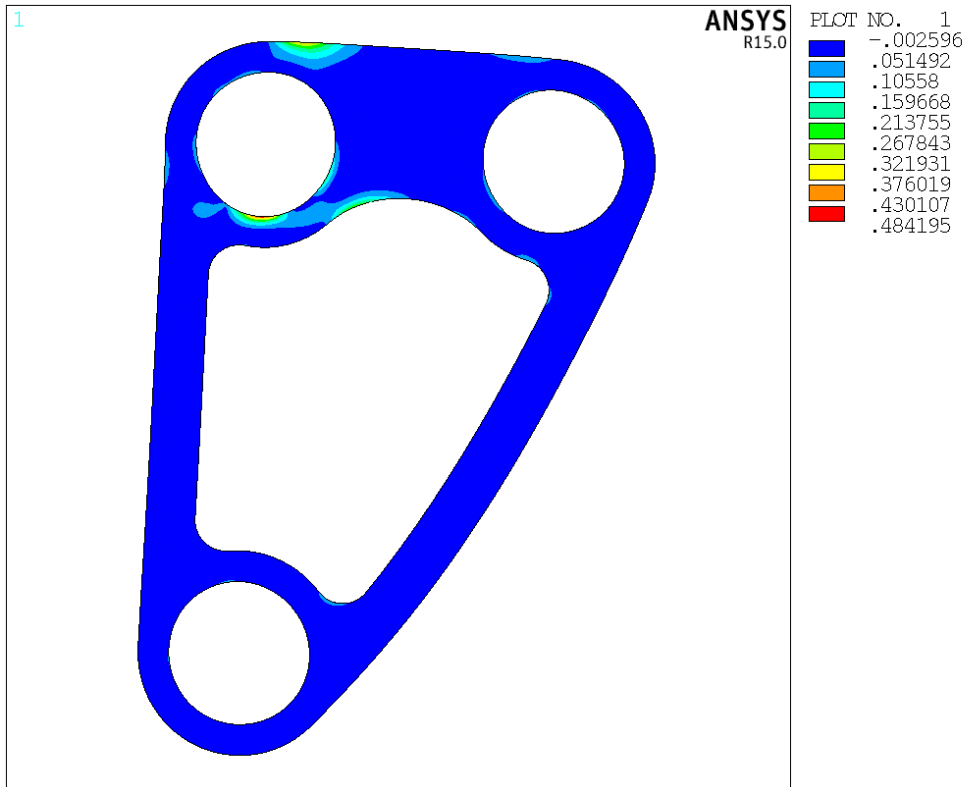
Σχήμα 2.55: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση -30° (Πολύστρωτο 6)

Ο Πίνακας 2.6 παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του κριτηρίου Tsai-Wu ανά στρώση και πολύστρωτο. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα η βέλτιστη διαστρωμάτωση για ύφασμα με μονοδιευθυντικές ίνες ανήκει στο πολύστρωτο 5. Στην συνέχεια εξετάζουμε πολύστρωτα με στρώσεις από πλεκτό ύφασμα. Οι διαστρωματώσεις που εξετάζονται ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν παραπάνω και είναι οι [0/35]_s, [0/45]_s, [0/55]_s.

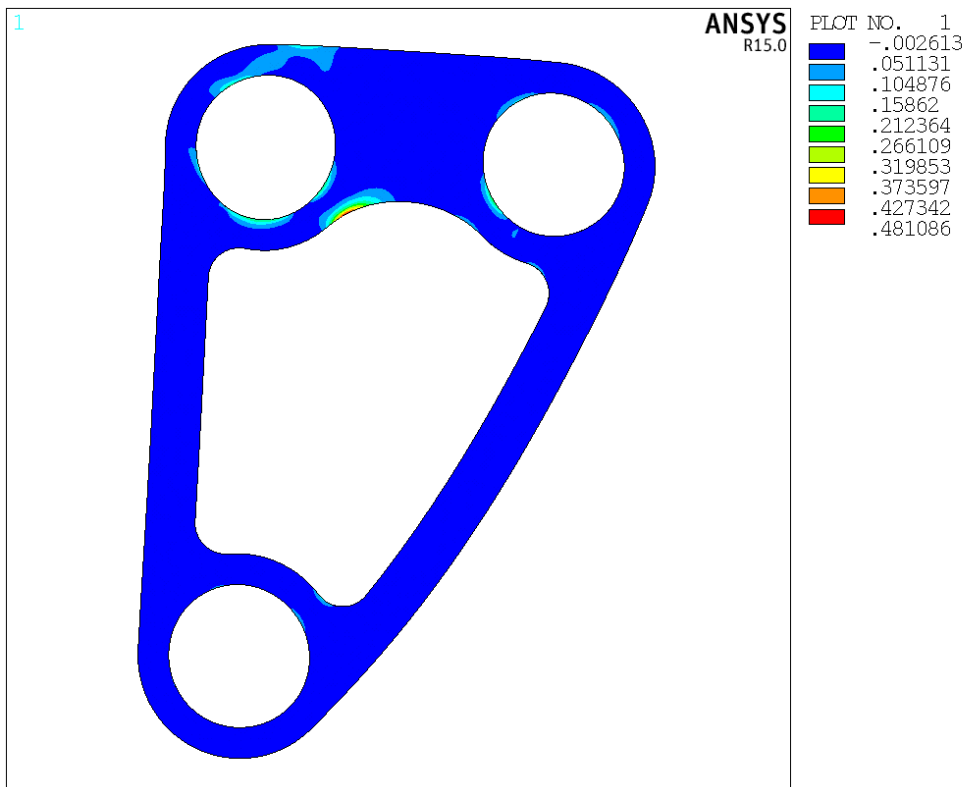
Πίνακας 2.6: Μέγιστες τιμές κριτηρίου Tsai-Wu ανά στρώση και πολύστρωτο για ύφασμα με μονοδιευθυντικές ίνες

Πολύστρωτα	[90/-55] _s	[0/90/-55] _s	[0/90/55/-55] _s	[0/90/45/-45] _s	[0/90/35/-35] _s	[0/90/30/-30] _s
Στρώσεις						
0°	-	0.802	0.563	0.607	0.628	0.628
90°	4.671	0.987	1.030	0.899	0.742	0.675
55°	-	-	0.758	-	-	-
-55°	4.422	1.086	0.757	-	-	-
45°	-	-	-	0.666	-	-
-45°	-	-	-	0.721	-	-
35°	-	-	-	-	0.710	-
-35°	-	-	-	-	0.763	-
30°	-	-	-	-	-	0.746
-30°	-	-	-	-	-	0.782

Πολύστρωτο No.7 (Πλεκτό ύφασμα) : Διαστρωμάτωση [0/35]s

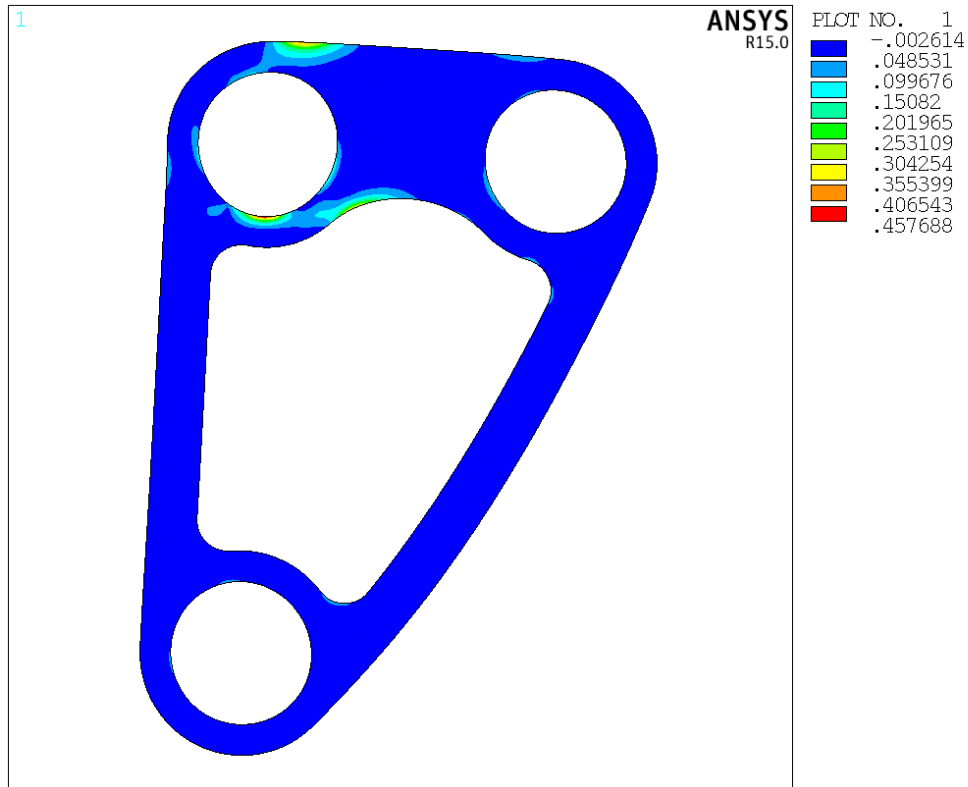


Σχήμα 2.56: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 0° (Πολύστρωτο 7)

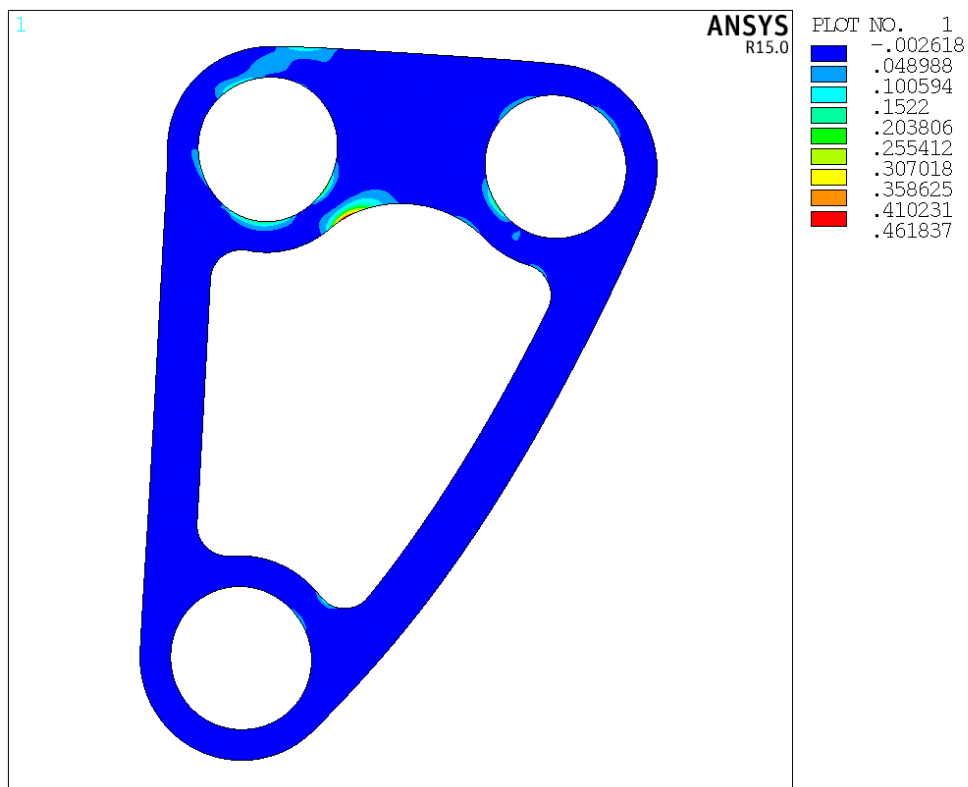


Σχήμα 2.57: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 35° (Πολύστρωτο 7)

Πολύστρωτο No.8 (Πλεκτό ύφασμα) : Διαστρωμάτωση [0/45]s

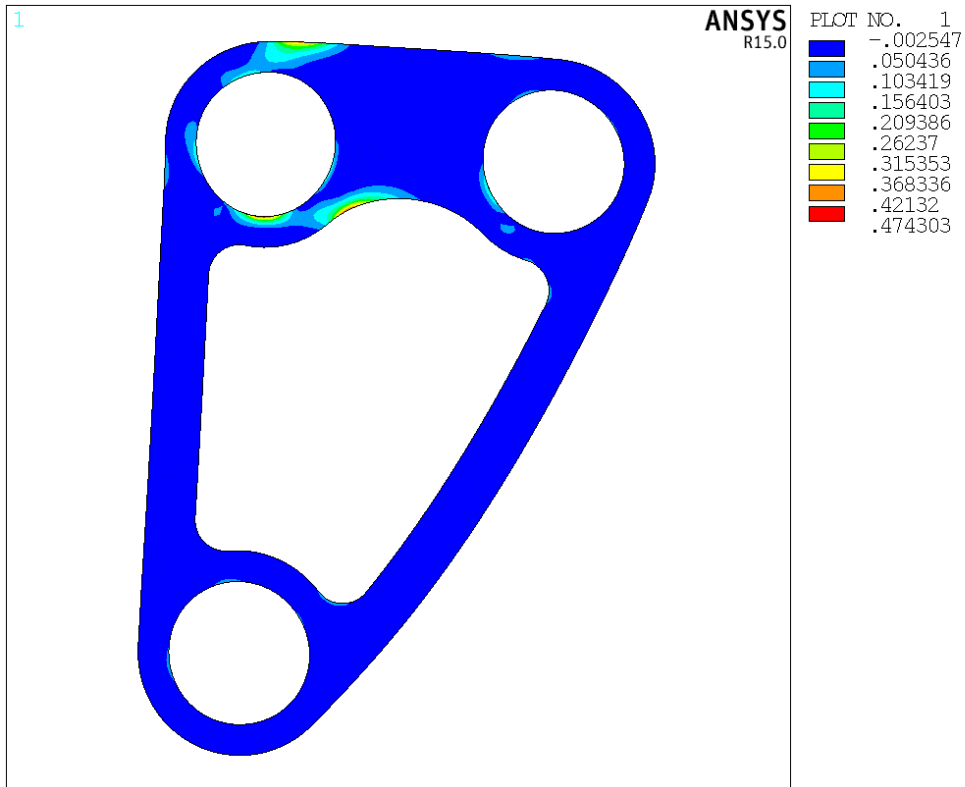


Σχήμα 2.58: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 0° (Πολύστρωτο 8)

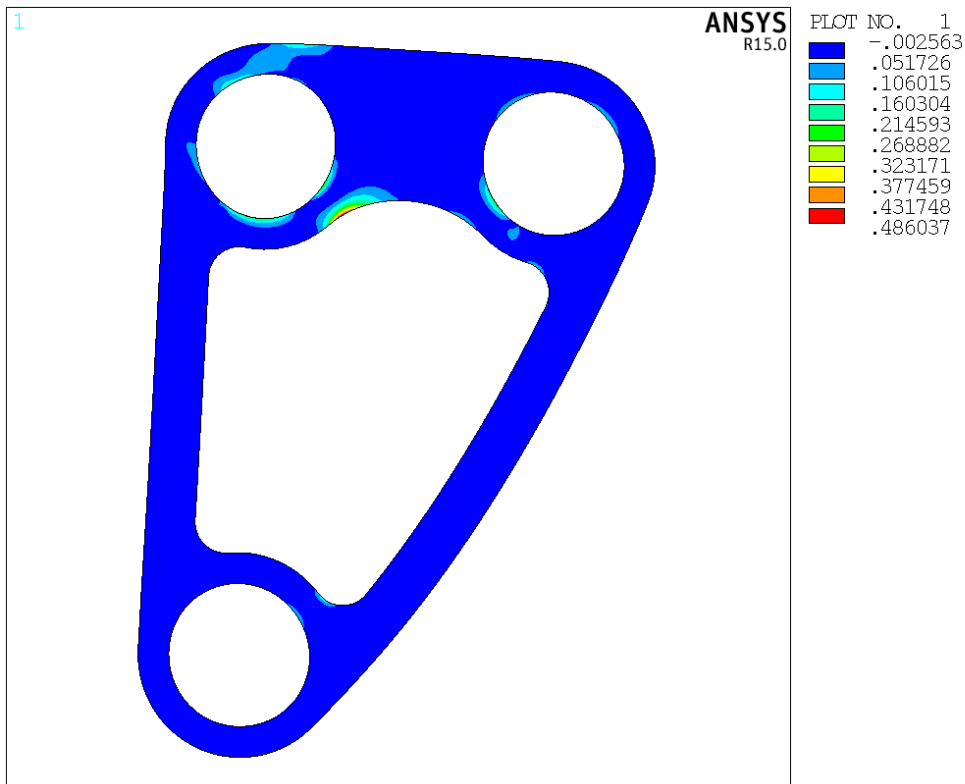


Σχήμα 2.59: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 45° (Πολύστρωτο 8)

Πολύστρωτο No.9 (Πλεκτό ύφασμα) : Διαστρωμάτωση [0/55]s



Σχήμα 2.60: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 0° (Πολύστρωτο 9)



Σχήμα 2.61: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 55° (Πολύστρωτο 9)

Ο Πίνακας 2.7 παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του κριτηρίου Tsai-Wu ανά στρώση και πολύστρωτο. Όπως παρατηρούμε η χρήση στρώσεων πλεκτού υφάσματος αντί για ύφασμα με μονοδιευθυντικές ίνες οδηγεί σε πολύ καλύτερα αποτελέσματα. Η μεγάλη διαφορά στις αντοχές μπορεί να εξηγηθεί μέσω της μελέτης των αντοχών των δύο υφασμάτων. Παρά την μεγάλη αντοχή $X_t = 1500$ MPa, το ύφασμα με μονοδιευθυντικές ίνες παρουσιάζει πολύ μικρή αντοχή $Y_t = 50$ MPa και αυξάνει σημαντικά τις τιμές των αντίστοιχων συντελεστών F_2, F_{22}, F_{12} του κριτηρίου Tsai-Wu. Από την άλλη, το πλεκτό ύφασμα έχει μικρότερη αντοχή $X_t = 600$ MPa, αλλά σημαντικά υψηλότερη αντοχή $Y_t = 600$ MPa και παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά.

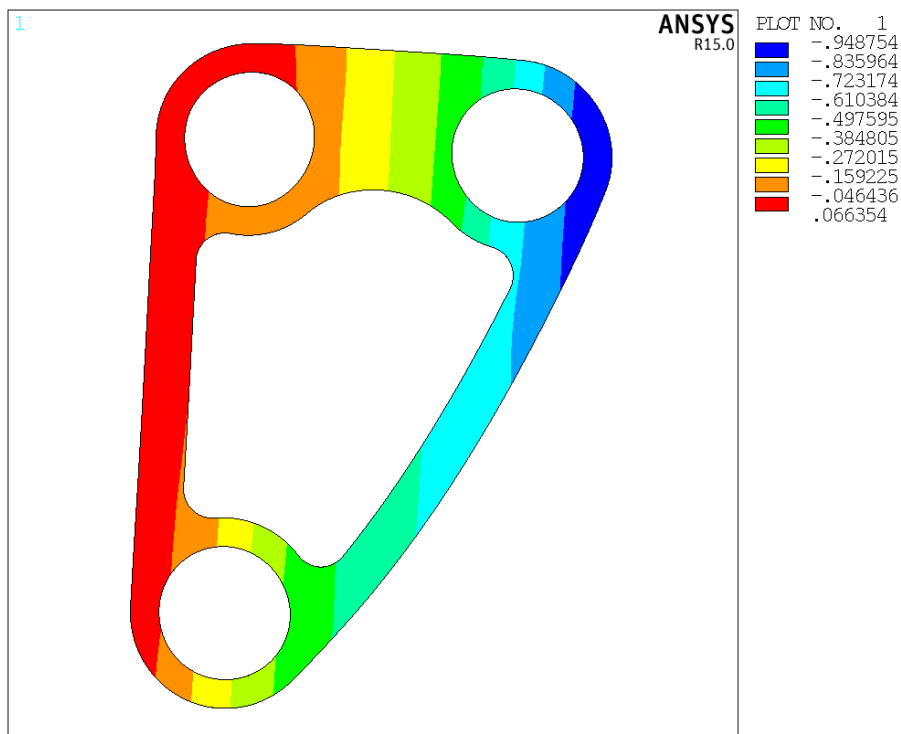
Πίνακας 2.7: Μέγιστες τιμές κριτηρίου Tsai-Wu ανά στρώση και πολύστρωτο για πλεκτό ύφασμα

Πολύστρωτα	$[0/35]_s$	$[0/45]_s$	$[0/55]_s$
Στρώσεις			
0°	0.484	0.458	0.474
35°	0.481	-	-
45°	-	0.462	-
55°	-	-	0.486

Το πολύστρωτο που παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά, και το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε παρακάτω, προκύπτει ότι είναι το πολύστρωτο 8 το οποίο έχει ακολουθία στρώσεων $[0,45]_s$ και χρησιμοποιούνται στρώσεις από πλεκτό ύφασμα. Οι μετατοπίσεις του πολύστρωτου $[0/45]_s$ στον άξονα X παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.62 Σχήμα 3.42 και στον άξονα Y στο Σχήμα 2.63.



Σχήμα 2.62: Μετατοπίσεις στον άξονα X για τον πολύστρωτο [0/45] s



Σχήμα 2.63: Μετατοπίσεις στον άξονα Y για τον πολύστρωτο [0/45] s

Για πάχος 2 mm στο πολύστρωτο 8 προκύπτει μέγιστη τιμή κριτηρίου Tsai-Wu ίση με 0.46, άρα το πάχος είναι πολύ μεγάλο για την συγκεκριμένη φόρτιση. Μειώνουμε το πάχος του πολύστρωτου για να προσδιορίσουμε το ελάχιστο εφικτό πάχος. Σε πάχος μικρότερο από το ελάχιστο θα έχουμε αστοχία της στρώσης 45° η οποία εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή Tsai-Wu

από την στρώση 0°. Τελικά προκύπτει ότι το ελάχιστο εφικτό πάχος του πολύστρωτου είναι $t=1.4$ mm.

2.8 Έλεγχος για λυγισμό βέλτιστου headboard από CFRP

Εκτός από τον έλεγχο του κριτηρίου Tsai-Wu πρέπει να ελέγξουμε επιπλέον ότι δεν επέρχεται αστοχία λόγω λυγισμού πριν την αστοχία της πρώτης στρώσης. Όπως και προηγουμένως εκτελούμε στο Ansys μία γραμμική ανάλυση λυγισμού (Eigenvalue Buckling Analysis), η οποία υπολογίζει το θεωρητικό φορτίο λυγισμού μιας ιδανικά ελαστικής κατασκευής. Τα αποτελέσματά της περιλαμβάνουν τα κρίσιμα φορτία λυγισμού και τις αντίστοιχες ιδιομορφές λυγισμού του μοντέλου. Ο

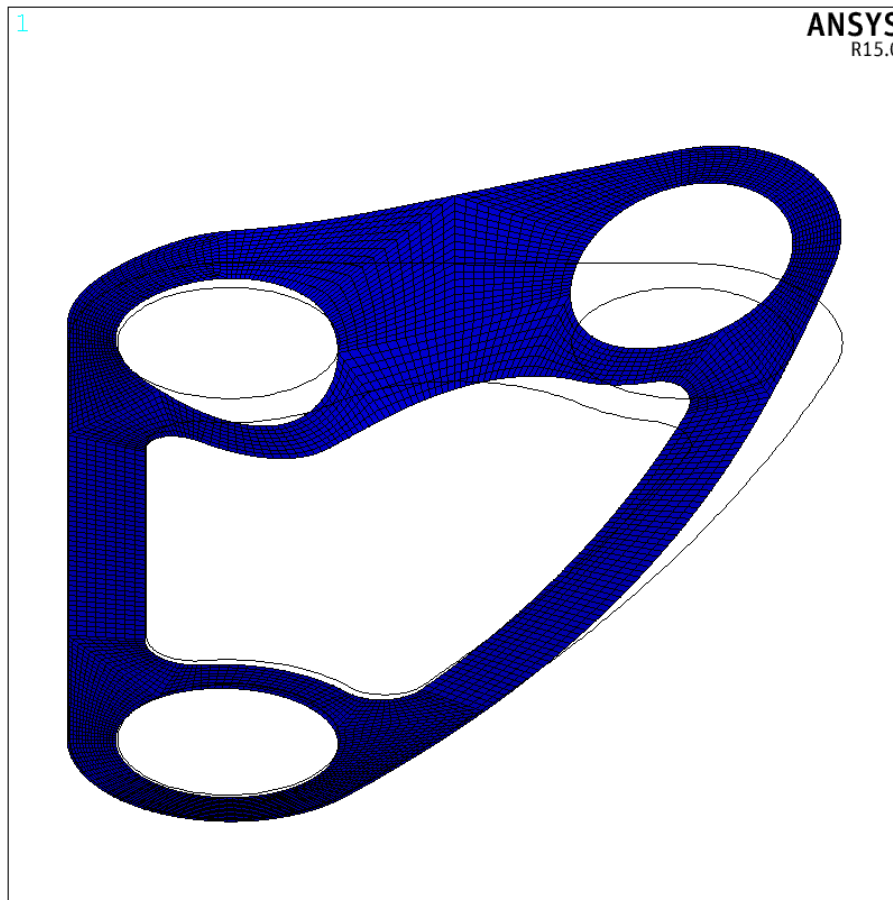
Πίνακας 2.8 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το ελάχιστο εφικτό πάχος $t=1.4$ mm παρακάτω. Η πρώτη θετική ιδιομορφή λυγισμού είναι ίση με 1.01 και όπως φαίνεται επέρχεται λυγισμός αμέσως μετά την αστοχία της πρώτης στρώσης για φορτίο 1% μεγαλύτερο. Ο λυγισμός είναι πολύ επικίνδυνο φαινόμενο καθώς, σε αντίθεση με την αστοχία πρώτης στρώσης, προκαλεί ολική αστοχία του μοντέλου. Συνεπώς πρέπει να αυξήσουμε το συνολικό πάχος του πολύστρωτου. Για την αποφυγή αστοχίας λόγω λυγισμού θεωρούμε έναν συντελεστή ασφαλείας τυπικό για στατικά φορτία ίσο με 1.5. Όπως προκύπτει από δοκιμές το πολύστρωτο με πάχος $t=1.7$ mm πληροί τον συντελεστή ασφαλείας και ο Πίνακας 2.9 παρουσιάζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Η παραμόρφωση κατά την αστοχία λόγω λυγισμού φαίνεται στο Σχήμα 2.64.

Πίνακας 2.8: Αποτελέσματα ανάλυσης λυγισμού headboard πάχους $t=1.4$ mm

Ιδιομορφή λυγισμού	Συντελεστές φορτίου
1	-2.1523
2	-1.7875
3	-1.1707
4	-0.81497
5	-0.56743
6	-0.27076
7	-0.10229
8	1.0131

Πίνακας 2.9: Αποτελέσματα ανάλυσης λυγισμού headboard πάχους $t=1.7$ mm

Ιδιομορφή λυγισμού	Συντελεστές φορτίου
1	-3.0181
2	-1.9639
3	-1.3866
4	-0.94739
5	-0.44997
6	-0.17399
7	1.6134



Σχήμα 2.64: Παραμόρφωση κατά την αστοχία λόγω λυγισμού

Στο σημείο αυτό, αφού έχουμε καταλήξει στην τελική σύνθεση και στο πάχος του μοντέλου μας, μπορούμε να κάνουμε σύγκριση του βάρους του σε σχέση με το αρχικό μοντέλο από αλουμίνιο.

Για τον υπολογισμό του βάρους του μοντέλου χρησιμοποιούμε τις μεταβλητές που παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η πυκνότητα του πλεκτού υφάσματος προκύπτει ότι είναι $\rho = 1.6 \text{ g/cc} = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$
- Η επιφάνεια του headboard είναι ίση με $A = 2986 \text{ mm}^2$
- Το τελικό πάχος του headboard προκύπτει ότι είναι $\tau = 1.7 \text{ mm}$

Άρα το τελικό βάρος ισούται με $W = \tau \cdot A \cdot \rho = 8.12 \text{ g}$

Αντίστοιχα για το headboard από αλουμίνιο έχουμε:

- Το πάχος ισούται είναι $\tau = 2 \text{ mm}$,
- Η επιφάνεια είναι $A = 2986 \text{ mm}^2$
- Η πυκνότητα είναι $\rho = 2.72 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$,

Άρα προκύπτει ότι το βάρος είναι $W = 16.24 \text{ g}$

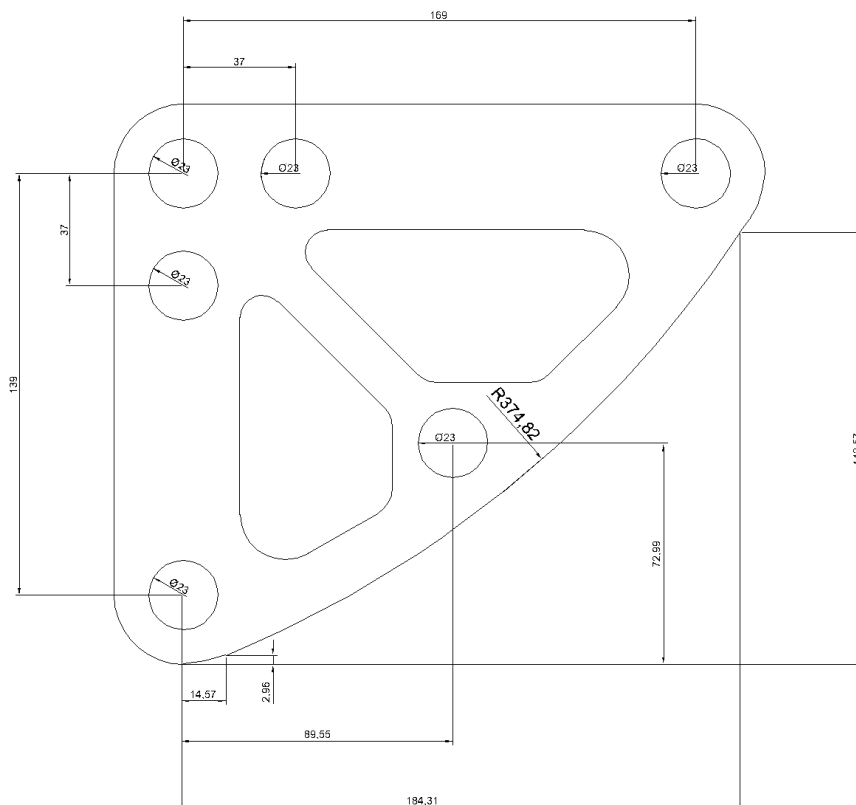
Όπως βλέπουμε το τελικό πάχος του headboard από σύνθετα υλικά είναι μόλις 0.3 mm μικρότερο από το πάχος του αλουμινένιου headboard αλλά η μείωση βάρους που επιτυγχάνεται είναι της τάξης του 50%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ 2^{ΟΥ} HEADBOARD

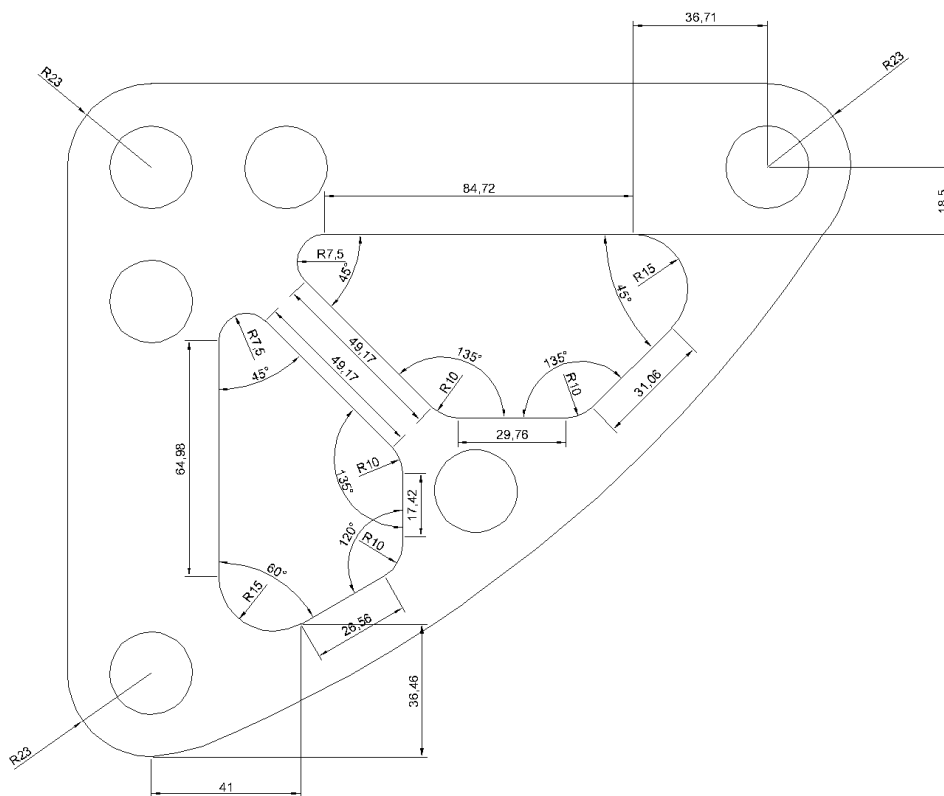
3.1 Επιλογή και σχεδιασμός της γεωμετρίας του Headboard

Όπως αναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο για την επιλογή των γεωμετριών που σχεδιάσαμε έγινε μία έρευνα στις διαθέσιμες γεωμετρίες που υπάρχουν στο εμπόριο. Στόχος ήταν η εύρεση ενός μοντέλου του οποίου θα μπορούμε με μεγάλη ακρίβεια να προσδιορίσουμε τις διαστάσεις και όλες τις σχεδιαστικές του λεπτομέρειες (διάμετρος οπών, ακτίνα των fillets, καμπυλότητα της πλευράς κλπ.) καθώς και τις θέσεις και τις διευθύνσεις των συντοριακών συνθηκών και των επιβαλλόμενων φορτίων. Επιπλέον θέλαμε ένα μοντέλο με ενδιαφέρουσα γεωμετρία, με ιδιαίτερο σχεδιασμό ώστε να επιτυγχάνεται μειωμένο βάρος, π.χ. μεγάλα κενά στο εσωτερικό της επιφάνειας, όπου αυτό είναι εφικτό, καθώς και έναν όμορφο οπτικά σχεδιασμό.

Το δεύτερο headboard που σχεδιάστηκε, ξανά της εταιρίας Rutgeron (Rutgeron Sail Hardware Catalog V.6), φαίνεται μαζί με τις διαστάσεις του παρακάτω, στο Σχήμα 3.1 και το Σχήμα 3.2. Η γεωμετρία του headboard παραμένει σταθερή κατά την διεύθυνση του πάχους του. Γίνεται λοιπόν σχεδίαση της γεωμετρίας σε δύο διαστάσεις.



Σχήμα 3.1: Διαστάσεις της γεωμετρίας του headboard



Σχήμα 3.2: Πρόσθετες διαστάσεις της γεωμετρίας του headboard

Η αρχική επιφάνεια σχεδιάστηκε στο AutoCAD 2015 της Autodesk. Για να μεταφέρουμε την επιφάνεια που σχεδιάσαμε από το AutoCAD στο Ansys πρέπει πρώτα να μετατρέψουμε το αρχείο DWG σε αρχείο IGES. Μέσω του GUI (Graphic User Interface), δηλαδή του γραφικού περιβάλλοντος του προγράμματος για τον χρήστη χρησιμοποιούμε την εντολή Export → Other formats. Στην συνέχεια για να εισάγουμε το αρχείο IGES στο Ansys χρησιμοποιούμε την εντολή Import (File → Import → IGES).

3.2 Προ-επεξεργασία (Pre-Processing)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της προ-επεξεργασίας του μοντέλου. Η θεωρία της προ-επεξεργασίας έχει αναλυθεί εκτενέστερα στο κεφάλαιο 2.

3.2.1 Επιλογή τύπου στοιχείων και ιδιοτήτων υλικών

Επιλογή τύπου στοιχείων

Για την μοντελοποίηση του headboard χρησιμοποιούμε το στοιχείο SHELL281 το οποίο είναι κατάλληλο για την ανάλυση δομών κελύφους λεπτού εως μέτριου πάχους αλλά και για την ανάλυση κατασκευών από σύνθετα υλικά.

Για να ορίσουμε το επιθυμητό element type χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών: Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete → Add → (Shell → 3D 8node 281). Στην συνέχεια ορίζουμε από την επιλογή Options μία παράμετρο του element type. Ορίζουμε την μεταβλητή Storage of Layer Data (K8) ως *All layers + Middle* για να αποθηκεύονται κατά την φάση της επίλυσης δεδομένα για όλες τις στρώσεις καθώς και για την επιφάνεια στο μέσο του πάχους της κάθε στρώσης.

Ορισμός μηχανικών ιδιοτήτων

Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούμε είναι τα δύο προεμποτισμένα υφάσματα που χρησιμοποιήθηκαν και στο κεφάλαιο 2. Το πρώτο αποτελείται από ύφασμα με μονοαξονικές (Unidirectional) ίνες άνθρακα και εποξική ρητίνη. Το δεύτερο αποτελείται από πλεκτό ύφασμα (Woven fabric) ιών άνθρακα και εποξική ρητίνη. Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει τις ιδιότητές τους παρακάτω.

Πίνακας 3.1: Μηχανικές ιδιότητες προεμποτισμένων υφασμάτων Unidirectional και Woven

	Unidirectional	Woven fabric
E_1	135 GPa	70 GPa
E_2	10 GPa	70 GPa
E_3	10 GPa	10 GPa
G_{12}	5 GPa	5 GPa
G_{13}	5 GPa	5 GPa
G_{23}	3.52 GPa	3.75 GPa
ν_{12}	0.3	0.1
ν_{13}	0.3	0.1
ν_{23}	0.42	0.1

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως χρειαζόμαστε επιπλέον να ορίσουμε και τις μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου. Επιλέγεται αλουμίνιο 6061-T6, και ο Πίνακας 3.2 παρουσιάζει τις ιδιότητές του παρακάτω.

Πίνακας 3.2: Μηχανικές ιδιότητες Al 6061-T6

E	69 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.33

Για να ορίσουμε τις μηχανικές ιδιότητες μιας στρώσης χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών: Preprocessor → Material Props → Material Models → Material Models Available (Structural → Linear → Elastic → Orthotropic).

Ορισμός κύριων αντοχών των σύνθετων υλικών

Όπως προκύπτει από το στάδιο ορισμού των φορτίσεων παρακάτω, το μοντέλο υπόκειται σε διαξονική εντατική κατάσταση και για την εύρεση της αντοχής του κάνουμε χρήση ενός κριτηρίου αστοχίας. Για την χρήση των κριτηρίων αστοχίας στο Ansys απαιτείται η εισαγωγή των αντοχών σε εφελκυσμό και θλίψη του υλικού και στις τρεις διευθύνσεις X, Y, Z καθώς και οι αντοχές σε διάτμηση και στα τρία επίπεδα XY, YZ, XZ. Οι τιμές των αντοχών φαίνονται παρακάτω.

Πίνακας 3.3: Αντοχές στις κύριες διευθύνσεις του υλικού

Αντοχή σε εφελκυσμό	Unidirectional	Woven fabric
X _t (MPa)	1500	600
Y _t (MPa)	50	600
Z _t (MPa)	50	50
Αντοχή σε θλίψη		
X _c (MPa)	-1200	-570
Y _c (MPa)	-250	-570
Z _c (MPa)	-250	-250
Αντοχή σε διάτμηση		
XY (MPa)	70	90
YZ (MPa)	70	70
XZ (MPa)	70	70

Για να ορίσουμε τις αντοχές στις κύριες διευθύνσεις ενός υλικού χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών: Preprocessor → Material Props → Failure Criteria → Add/Edit → Material Number.

Ορισμός της διατομής των στοιχείων

Για να ορίσουμε τις ιδιότητες της διατομής των στοιχείων χρησιμοποιούμε το μενού Section για στοιχεία κελύφους. Στο μενού αυτό μπορούμε να ορίσουμε τον αριθμό των στρώσεων, το πάχος κάθε στρώσης καθώς και τον προσανατολισμό των ινών.

Με την χρήση των εντολών Add Layer/Delete Layer προσθαφαιρούμε στρώσεις στο μοντέλο μας. Η διάσταση του πάχους κάθε στρώσης ορίζεται μέσω της μεταβλητής Thickness. Ο προσανατολισμός των ινών κάθε στρώσης ορίζεται μέσω της μεταβλητής Orientation.

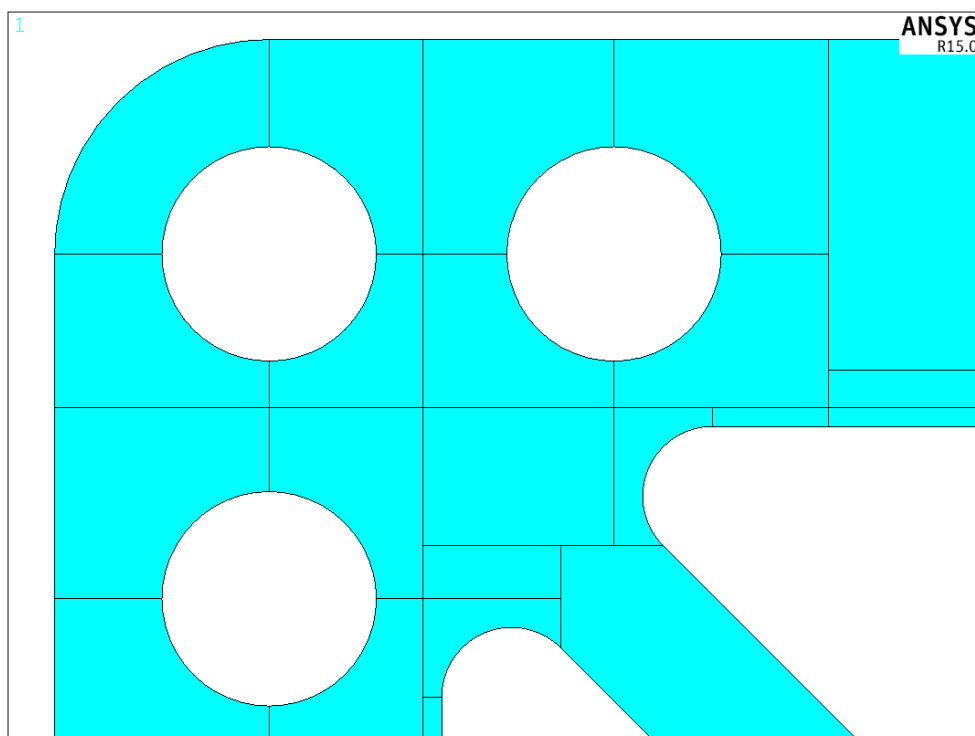
Το πάχος του headboard από αλουμίνιο λαμβάνεται από τον κατάλογο του κατασκευαστή (Rutgerson Sail Hardware Catalog V.6) ίσο με 3 mm. Για τους αρχικούς υπολογισμούς του headboard από σύνθετα υλικά, το πάχος όλων των στρώσεων του λαμβάνεται και αυτό με 3 mm.

3.2.2 Δημιουργία πλέγματος (Mesh)

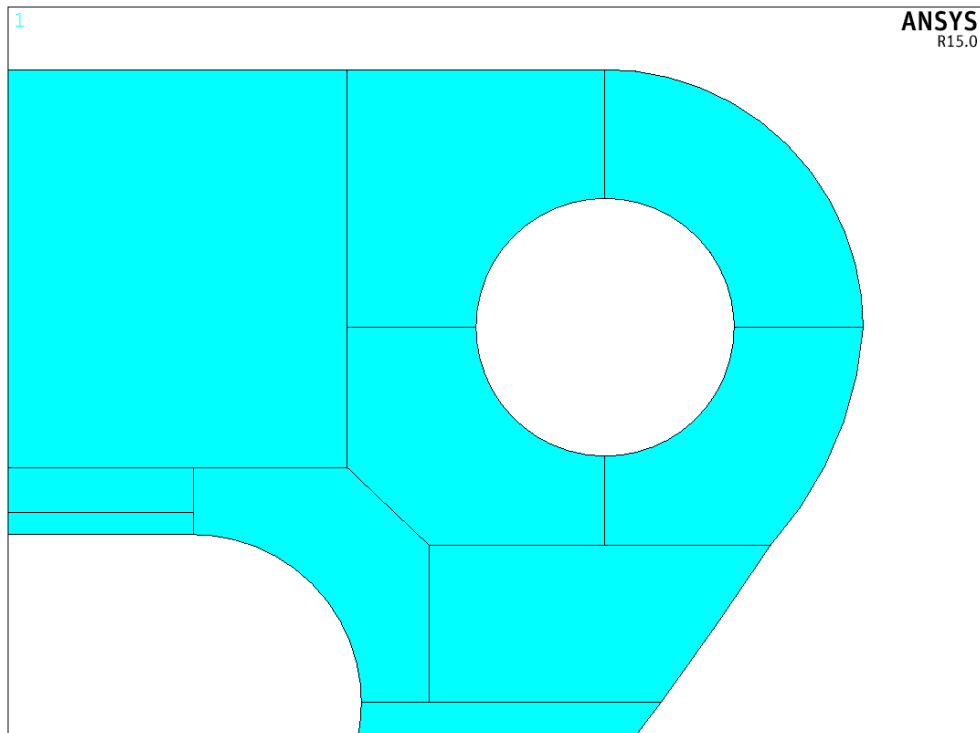
Δημιουργία επιφανειών

Η γεωμετρία που έχουμε εισάγει από το AutoCAD περιλαμβάνει μόνο το περίγραμμα της γεωμετρίας. Για να δημιουργήσουμε το πλέγμα των στοιχείων Shell281 πρέπει αρχικά να δημιουργήσουμε την επιφάνεια του headboard. Η επιφάνεια ορίζεται με βάση τις γραμμές που έχουν εισαχθεί, οι οποίες αποτελούν τα όρια της. Χρησιμοποιώ την ακολουθία εντολών: Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Arbitrary → By Lines. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, στην γεωμετρία δεν δημιουργείται τελικά μία ενιαία επιφάνεια αλλά πολλές υποπεριοχές στις οποίες πληρούνται οι προϋποθέσεις για την δημιουργία δομημένου πλέγματος. Η υποδιαίρεση των επιφανειών φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 3.3-Σχήμα 3.7). Ιδιαίτερη δυσκολία παρουσίασε η περιοχή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3 λόγω της ύπαρξης πολλών καμπύλων τμημάτων σε πολύ κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους.

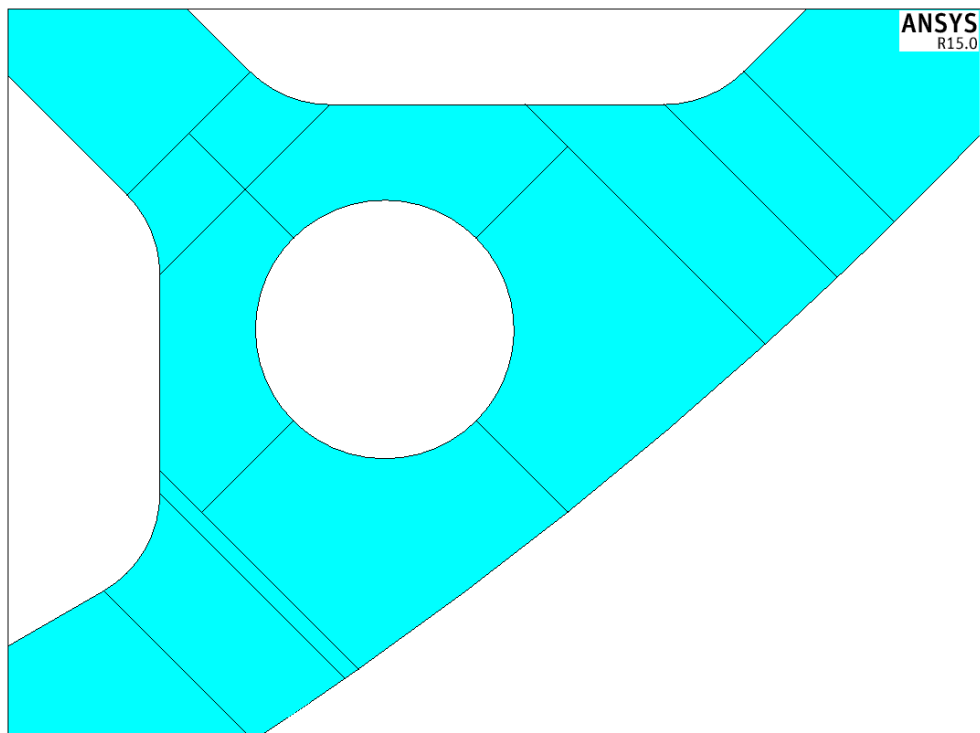
Κατά την δημιουργία μοντέλου με shell elements πρέπει να προσέχουμε επιπλέον την φορά των επιφανειών των στοιχείων όταν εφαρμόζουμε επιφανειακά φορτία. Για την αποφυγή του προβλήματος ελέγχουμε την φορά των επιφανειών μέσω του υπομενού Shell Normals (PlotCtrls → Style → Shell Normals). Αν βρεθούν περιοχές οι οποίες έχουν αντίθετη φορά μπορούμε να αντιστρέψουμε την φορά τους μέσω της εντολής Reverse Normals (Preprocessor → Modeling → Move/Modify → Reverse Normals → of Shell Elems).



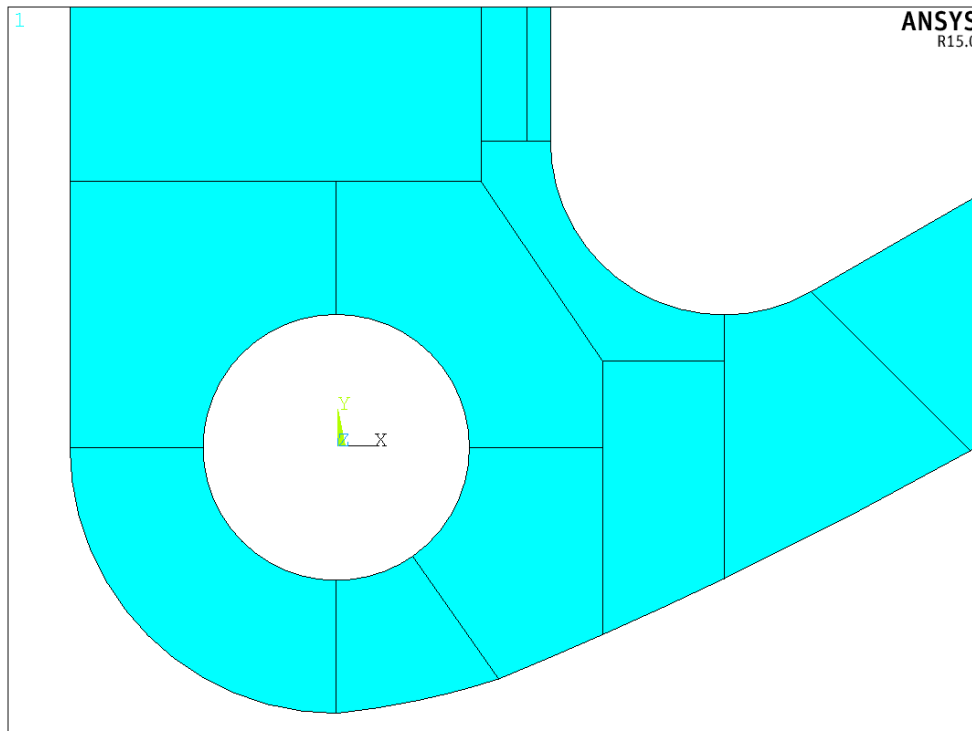
Σχήμα 3.3: Λεπτομέρεια υποδιαίρεσης επιφανειών



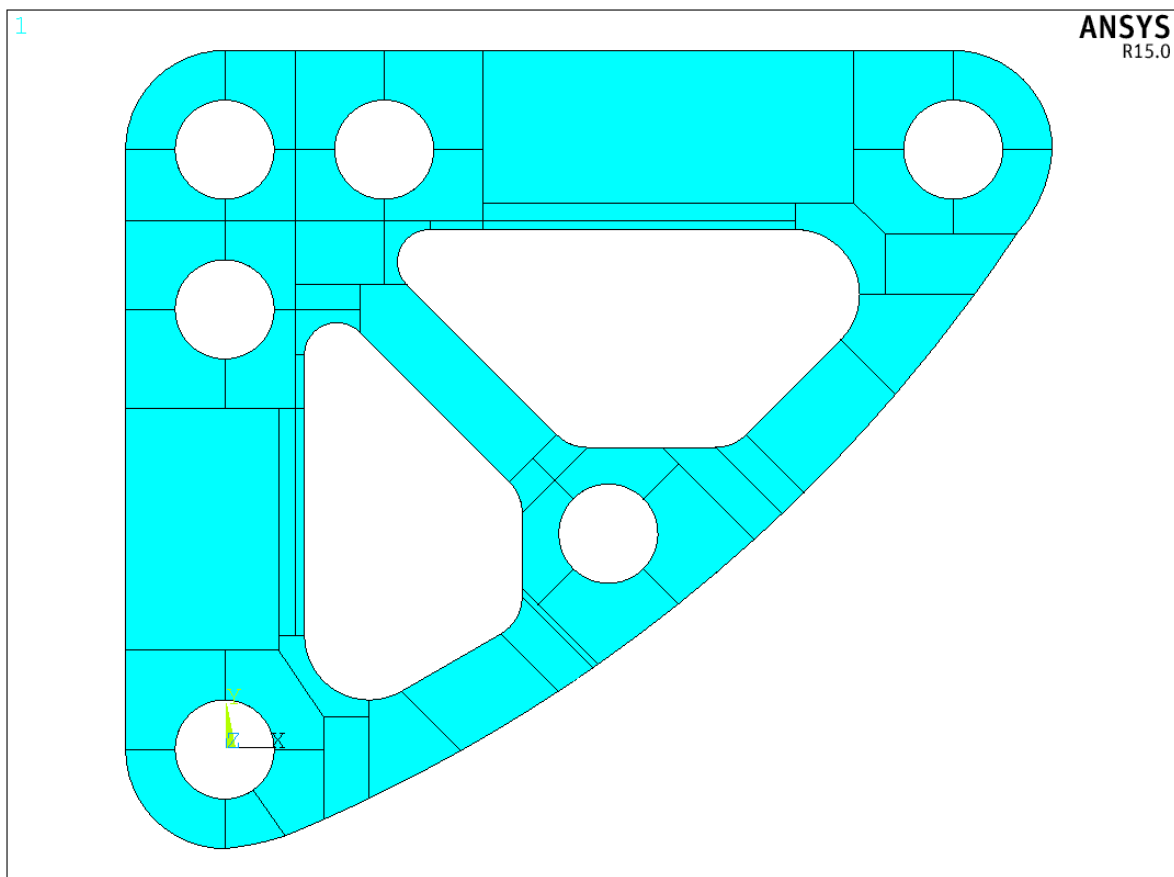
Σχήμα 3.4: Λεπτομέρεια υποδιαίρεσης επιφανειών



Σχήμα 3.5: Λεπτομέρεια υποδιαίρεσης επιφανειών



Σχήμα 3.6: Λεπτομέρεια υποδιαίρεσης επιφανειών



Σχήμα 3.7: Ολικό μοντέλο με υποδιαίρεση επιφανειών

Καθορισμός ενιαίου συστήματος συντεταγμένων

Κάθε στοιχείο που δημιουργείται σε ένα πλέγμα φέρει το δικό του σύστημα συντεταγμένων. Για να εξασφαλίσουμε μηχανικές ιδιότητες με ίδιες διευθύνσεις σε όλα τα στοιχεία, πριν την δημιουργία του πλέγματος, δημιουργούμε ένα καινούργιο σύστημα συντεταγμένων με άξονες ίδιους με το καρτεσιανό. Στην συνέχεια ορίζουμε το σύστημα αυτό ως το τοπικό σύστημα συντεταγμένων όλων των στοιχείων που δημιουργούμε. Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται από εδώ και στο εξής στο μοντέλο φαίνεται στο Σχήμα 3.7.

Για να ορίσουμε το καινούργιο σύστημα συντεταγμένων χρησιμοποιούμε την εντολή «LOCAL,11,0,0,0,0,0,0». Για να ορίσουμε αυτό το σύστημα συντεταγμένων ως το τοπικό σύστημα συντεταγμένων όλων των στοιχείων που δημιουργούνται χρησιμοποιούμε την εντολή «ESYS,11».

Επιλογή τύπου πλέγματος και μεγέθους στοιχείων

Στην ανάλυση μας χρησιμοποιούμε ένα δομημένο πλέγμα. Τα πλεονεκτήματα του που έχουν αναφερθεί και προηγουμένως είναι ο μεγάλος έλεγχος της δημιουργίας πλέγματος με πολλές διαφορετικές μεταβλητές σχεδίασης, η εξασφάλιση καλής ποιότητας πλέγματος και η κατ'επέκταση μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων και το ευχάριστο οπτικά αποτέλεσμα.

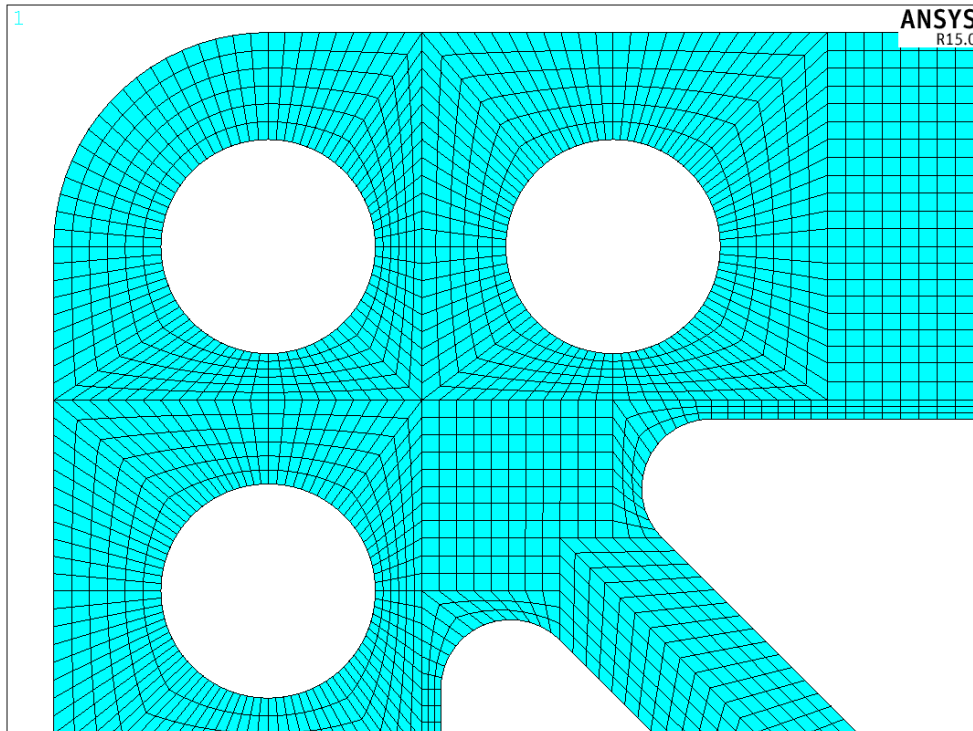
Για να ελέγξουμε την καταλληλότητα του μεγέθους των στοιχείων κάνουμε μία αξιολόγηση του μεγέθους της ασυνέχειας των τάσεων μεταξύ γειτονικών στοιχείων στην κρίσιμη περιοχή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζει τάσεις απευθείας σε εσωτερικές θέσεις του στοιχείου (σημεία Gauss) και τις εξάγει στους κόμβους στα όρια των στοιχείων. Ενώ συνηθίζεται να βλέπουμε τις τάσεις ως μέσες τιμές, στην πραγματικότητα κάθε στοιχείο υπολογίζει διαφορετικές τάσεις στους κοινόχρηστους κόμβους. Συνεπώς κάνοντας έλεγχο των ποσοστιαίων διαφορών των τάσεων των στοιχείων σε έναν κοινόχρηστο κόμβο μπορούμε να αξιολογήσουμε την ποιότητα του πλέγματος στο σημείο αυτό.

Το μέγεθος των στοιχείων καθορίζεται από το element edge length, δηλαδή το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος ακμής των στοιχείων. Το μήκος ακμής πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να επιτρέπει την δημιουργία ποιοτικού πλέγματος σε όλες τις επιφάνειες της γεωμετρίας. Ανάλογα την γεωμετρία κάποιο μήκος πλευράς μπορεί να οδηγήσει σε αδυναμία του προγράμματος να δημιουργήσει πλέγμα σε κάποιες επιφάνειες, εξαιτίας του μεγέθους του πλέγματος σε γειτονικές επιφάνειες, ή στην δημιουργία κακής ποιότητας στοιχείων μέσα στο πλέγμα. Στην συγκεκριμένη γεωμετρία για την δημιουργία του πλέγματος χρησιμοποιήσαμε μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος ακμής στοιχείων 2 mm. Ο έλεγχος της καταλληλότητας του πλέγματος στους τρεις κόμβους που υπάρχουν στην κρίσιμη περιοχή του μοντέλου, έδειξε ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης εμφανίζουν ικανοποιητική ακρίβεια. Ο Πίνακας 3.4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του ελέγχου παρακάτω. Προκύπτει ότι στην κρίσιμη περιοχή οι ποσοστιαίες διαφορές δεν ξεπερνούν το 5%, συνεπώς η ποιότητα του πλέγματος είναι αποδεκτή.

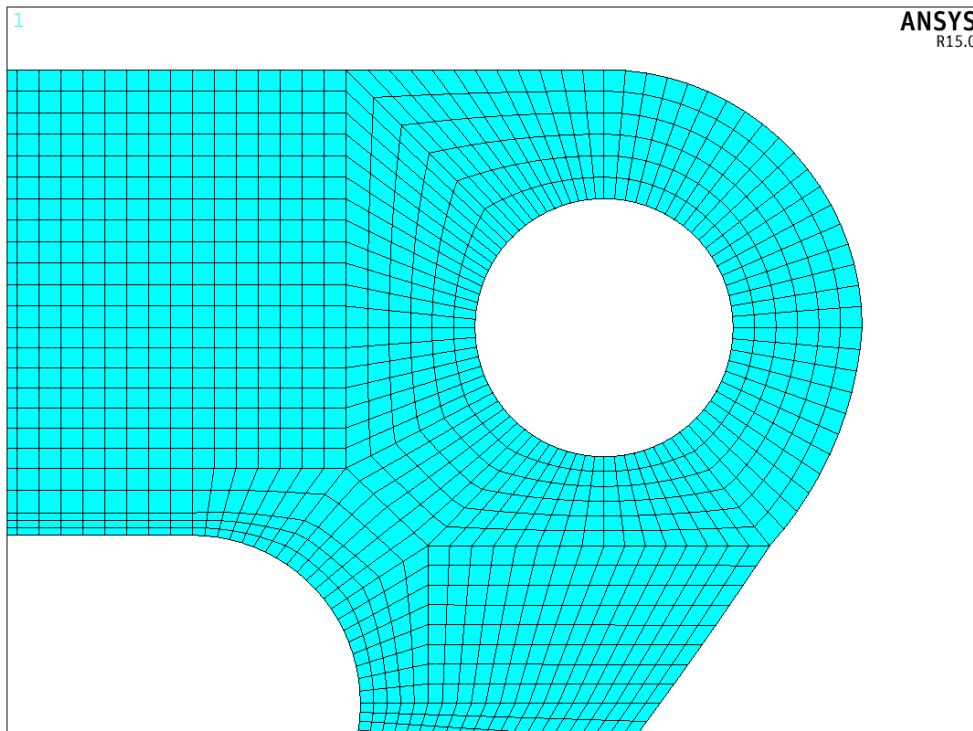
Πίνακας 3.4: Ποσοστιαίες διαφορές τάσεων Von Mises στην κρίσιμη περιοχή

Node	Elements	Elemental Solution (MPa)	Nodal Solution (MPa)	Percentage Difference (%)
1	1202	257.3	250.52	4.3
	1208	246.55		
<hr/>				
Node	Elements	Elemental Solution (MPa)	Nodal Solution (MPa)	Percentage Difference (%)
2	1190	247.68	248.86	1.0
	1196	250.06		
<hr/>				
Node	Elements	Elemental Solution (MPa)	Nodal Solution (MPa)	Percentage Difference (%)
3	1196	265.23	270	3.6
	1202	274.84		

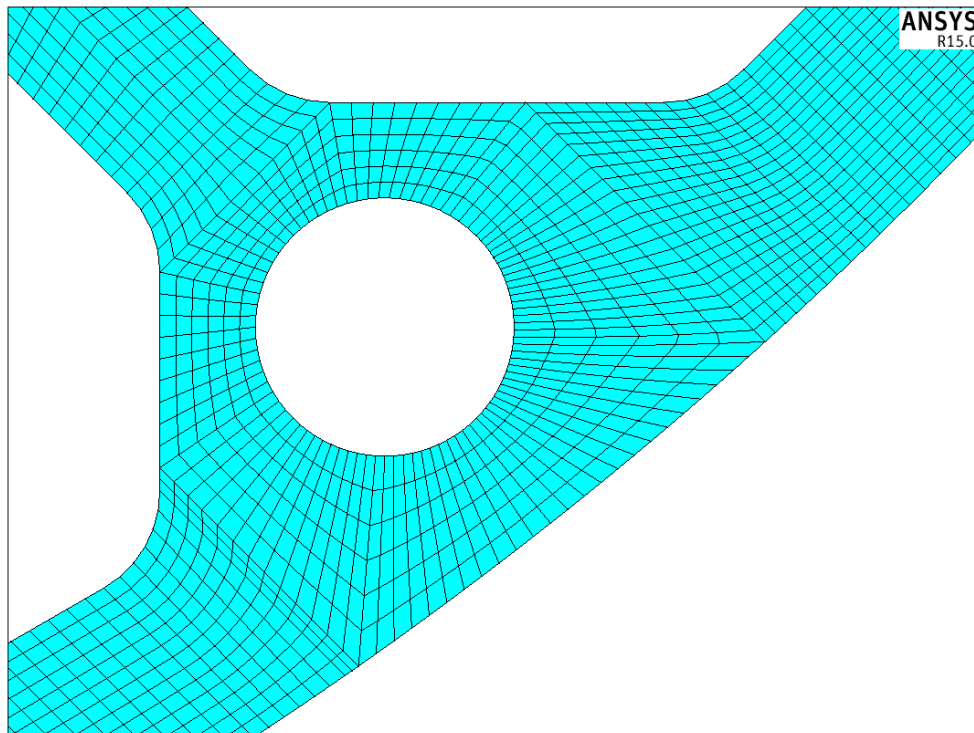
Για την επιλογή του μεγέθους των στοιχείων χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών: Preprocessor → Meshing → Size Cntrls → ManualSize → Areas → All Areas , με την οποία ορίζουμε το μήκος της ακμής των στοιχείων. Η τελική μορφή του πλέγματος φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 3.8-Σχήμα 3.12).



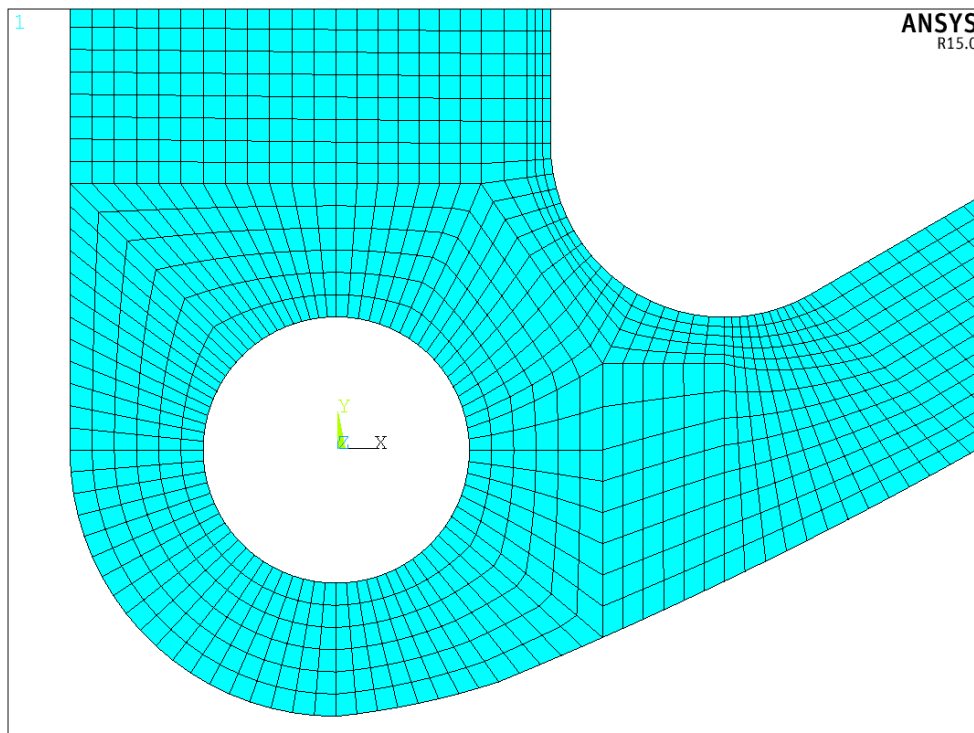
Σχήμα 3.8: Λεπτομέρεια του δομημένου πλέγματος



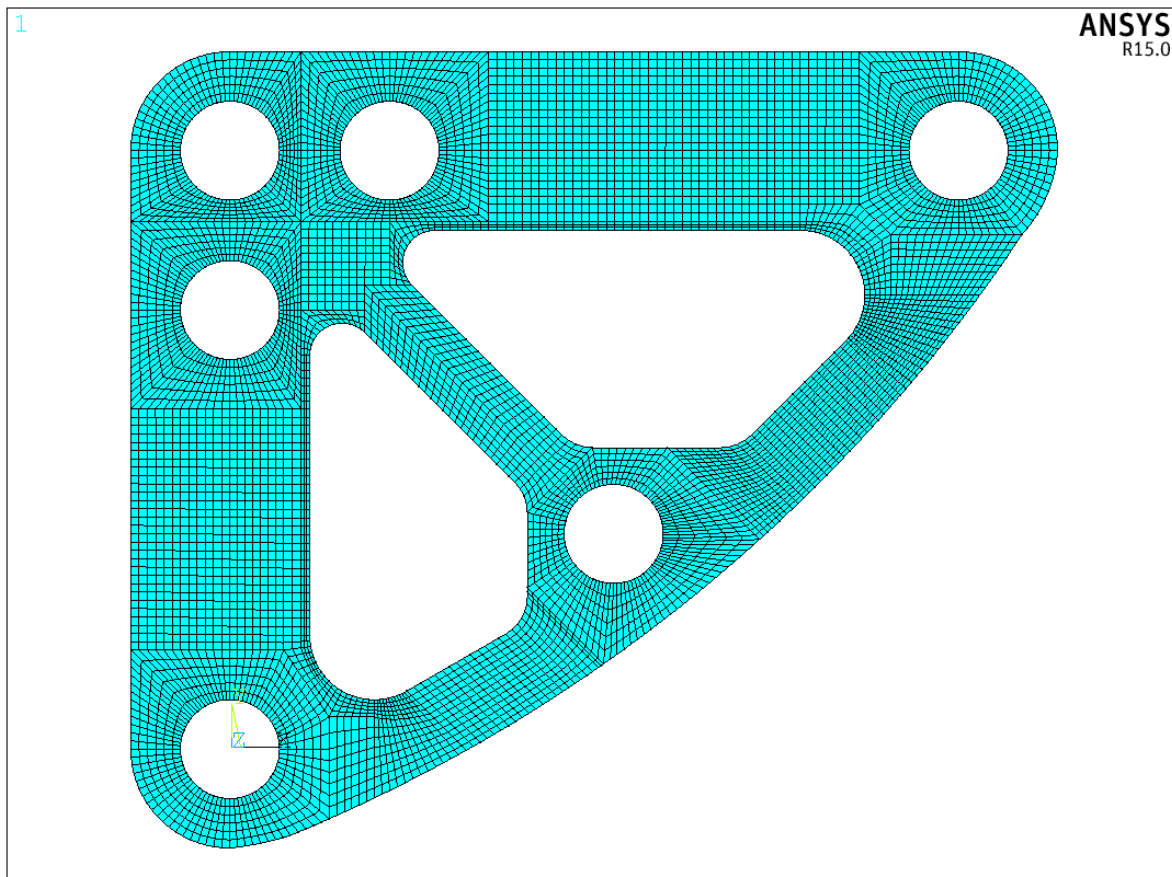
Σχήμα 3.9: Λεπτομέρεια του δομημένου πλέγματος



Σχήμα 3.10: Λεπτομέρεια του δομημένου πλέγματος



Σχήμα 3.11: Λεπτομέρεια του δομημένου πλέγματος

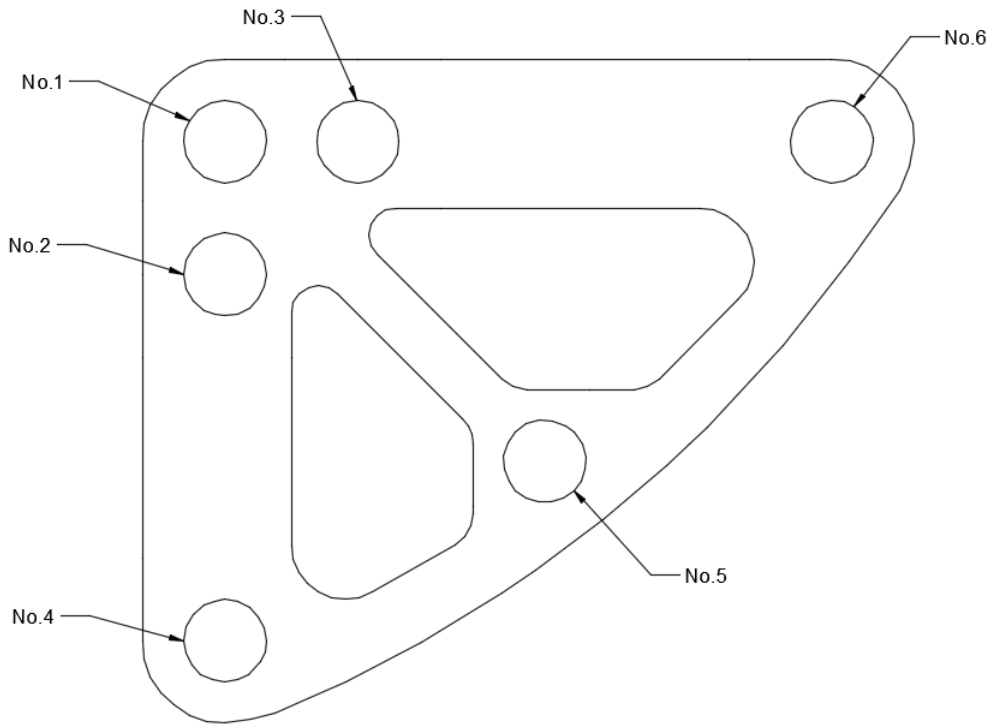


Σχήμα 3.12: Τελική μορφή δομημένου πλέγματος

3.3 Επίλυση (Solution)

Η επίλυση (solution) αποτελεί το δεύτερο στάδιο της ανάλυσης. Έως τώρα έχουμε ορίσει τη γεωμετρία, τις ιδιότητες του υλικού και έχουμε δημιουργήσει το πλέγμα. Στη φάση αυτή της ανάλυσης καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης, ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος και επιβάλλεται η φόρτιση. Ο τύπος της ανάλυσης ορίζεται με την ακολουθία εντολών: Solution→Analysis Type→New Analysis→Static.

Για καλύτερη και ευκολότερη κατανόηση των ζητημάτων που σχολιάζονται στην συνέχεια ορίζουμε ένα σύστημα αρίθμησης στις οπές το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13: Αρίθμηση οπών

3.3.1 Συνοριακές συνθήκες

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν έχουμε στοιχεία για την εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών στο μοντέλο μας, οπότε κάνουμε χρήση του διαθέσιμου φωτογραφικού υλικού για την εκτίμηση της θέσης και της διεύθυνσής τους. Στο Σχήμα 3.14 φαίνεται η γεωμετρία του headboard τοποθετημένη πάνω σε ένα ιστίο. Πάνω στο σχήμα διακρίνονται οι οριζόντιες συνδέσεις με το κατάρτι στις δύο οπές, No.2 και No.4, στο αριστερό μέρος του headboard. Το μήκος εφαρμογής του όπως φαίνεται είναι το ένα τρίτο της περιφέρειας της οπής. Ακόμη υπάρχει μία επιπλέον κατακόρυφη σύνδεση με το κατάρτι στην οπή No.1, η οποία δεν φαίνεται στο σχήμα, καθώς το ιστίο δεν είναι τοποθετημένο πάνω του.



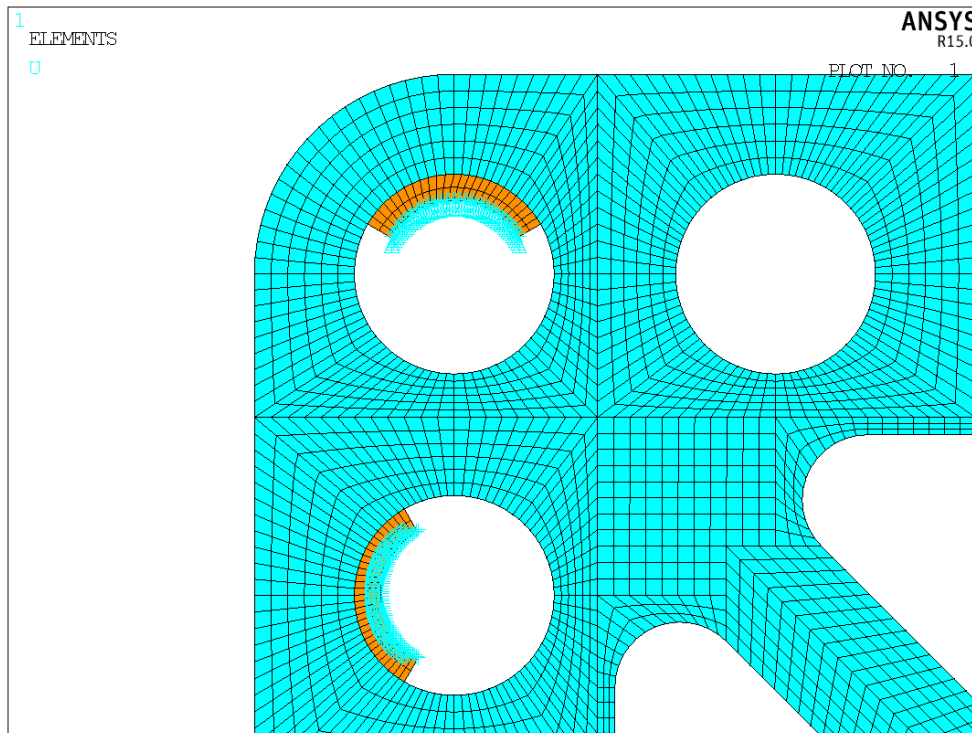
Σχήμα 3.14: Σημεία πρόσδεσης του headboard στο κατάρτι

Θέτουμε λοιπόν στο μοντέλο μας τις συνοριακές συνθήκες $UX=0$ στις οπές No.2 και No.4 (Σχήμα 3.15, Σχήμα 3.16) και την συνοριακή συνθήκη $UY=0$ στην οπή No.1 (Σχήμα 3.15, Σχήμα 3.16).

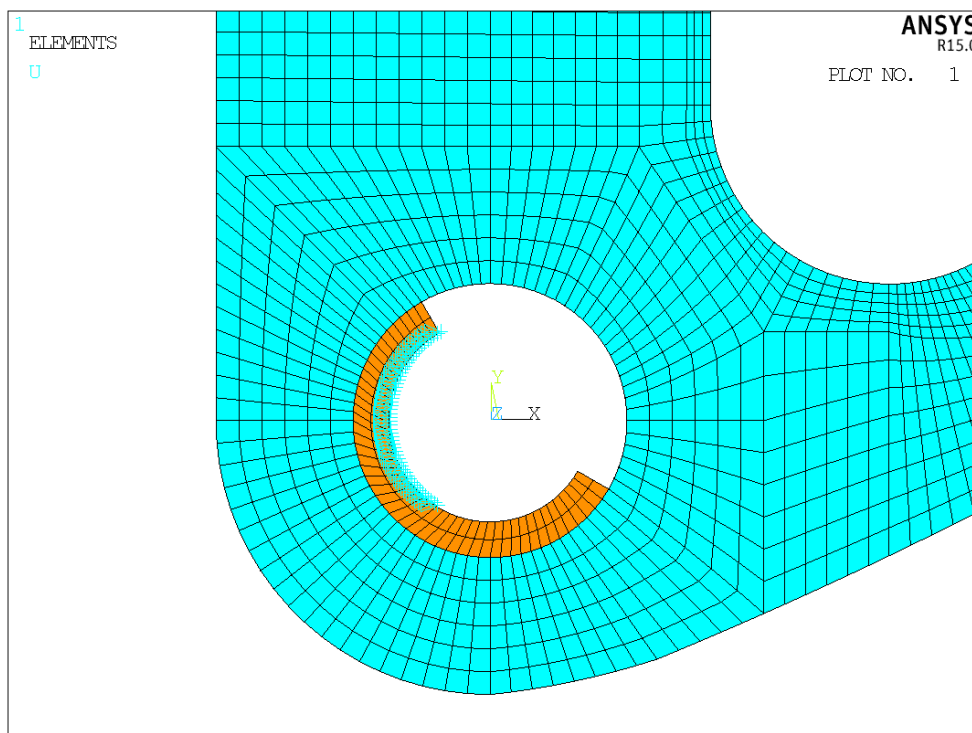
Εκτός των οριακών συνθηκών $UX=0$ και $UY=0$ πρέπει να ορίσουμε επιπλέον την οριακή συνθήκη $UZ=0$ σε όλους τους κόμβους που έχουμε ορίσει ήδη μία άλλη συνοριακή συνθήκη, παρόλο που το headboard μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του καταρτιού. Αυτό κρίνεται αναγκαίο καθώς χωρίς την επιπλέον συνοριακή συνθήκη $UZ=0$ το Ansys εντοπίζει αοριστία, βγάζει μήνυμα σφάλματος και δεν μπορεί να επιλύσει το μοντέλο. Ο ορισμός της επιπλέον συνοριακής συνθήκης δεν επηρεάζει με κάποιον τρόπο τα αποτελέσματα της ανάλυσης καθώς δεν εφαρμόζουμε φόρτιση στον άξονα Z.

Για να ορίσω συνοριακές συνθήκες στους κόμβους χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών: Solution → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → On Nodes.

Όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο κεφάλαιο, στα άκρα των συνοριακών συνθηκών παρατηρήθηκαν πολύ μεγάλες μη ρεαλιστικές συγκεντρώσεις τάσεων. Για να αποφύγουμε το πρόβλημα αυτό επιστρέφουμε στην προ-επεξεργασία και δημιουργούμε μία επιπλέον επιφάνεια εσωτερικά της οπής στα σημεία εφαρμογής των συνοριακών συνθηκών. Η επιφάνεια αυτή έχει πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας ($E=7$ GPa) και αναπαριστά την ελαστικότητα του ιμάντα πρόσδεσης. Πάνω στους κόμβους αυτής της επιφάνειας ορίζουμε εκ νέου τις συνοριακές συνθήκες.



Σχήμα 3.15: Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών στις οπές No.1 και No.2



Σχήμα 3.16: Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών στην οπή No.4

3.3.2 Φορτίσεις

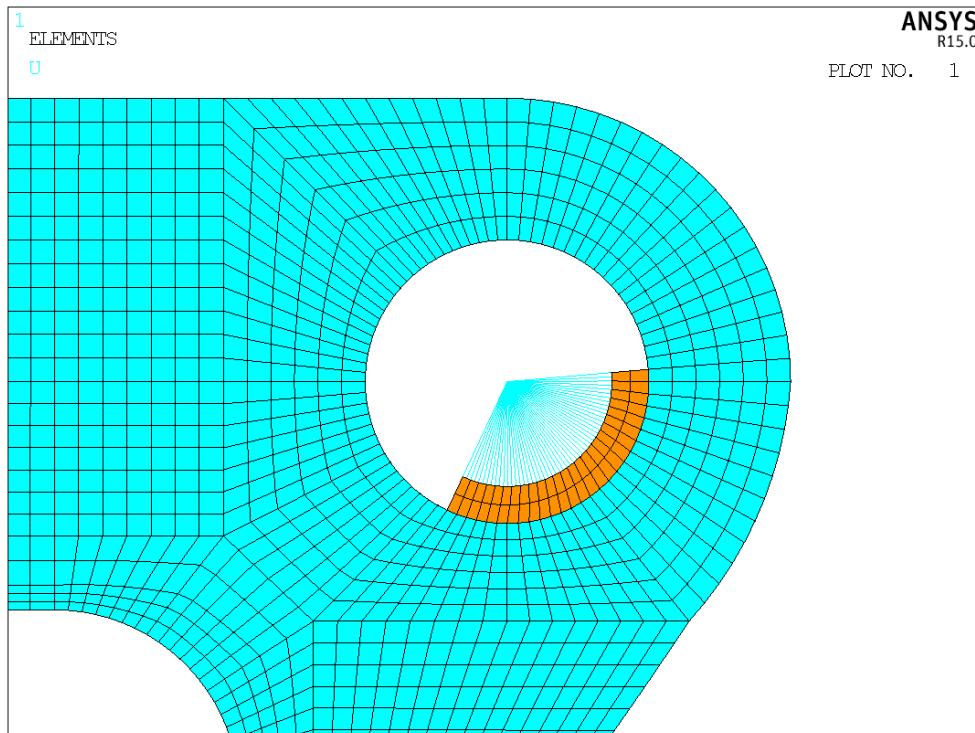
Πληροφορίες σχετικά με τις φορτίσεις του headboard δεν υπήρχαν διαθέσιμες κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Συνεπώς ο προσδιορισμός όλων των απαραίτητων παραμέτρων των φορτίσεων γίνεται μέσω μερικών υποθέσεων, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει το μέτρο των δυνάμεων που ορίζουμε στο μοντέλο μας θα υπολογιστεί με βάση τις μέγιστες δυνάμεις που μπορεί να παραλάβει η αντίστοιχη γεωμετρία κατασκευασμένη από αλουμίνιο. Παρ'όλα αυτά η θέση και η διεύθυνση επιβολής των δυνάμεων είναι επιπλέον άγνωστες παράμετροι.

Η επιλογή της διεύθυνσης και της φοράς των επιβαλλόμενων δυνάμεων γίνεται με βάση τη μελέτη του headboard από αλουμίνιο τοποθετημένου πάνω στο ιστίο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.14 παραπάνω. Παρατηρούμε ότι στις τρεις οπές του headboard έχουν εφαρμοστεί ιμάντες ενίσχυσης, οι οποίοι είναι ραμμένοι πάνω στο ιστίο. Θεωρούμε λοιπόν ότι η διεύθυνση εφαρμογής των δυνάμεων ακολουθεί την διεύθυνση των ιμάντων και η φορά τους είναι προς το ιστίο. Στην οπή No.4 η δύναμη είναι παράλληλη στον άξονα Y. Στην οπή No.6 η δύναμη σχηματίζει γωνία 55° με τον άξονα X. Στην οπή No.5 αντίστοιχα έχουμε δύο δυνάμεις, η μία δύναμη είναι παράλληλη στον άξονα Y και η άλλη σχηματίζει γωνία 55° με τον άξονα X. Η επιλογή της θέσης επιβολής των δυνάμεων γίνεται όπως προηγουμένως. Θεωρούμε ότι η δύναμη κατανέμεται στο ένα τρίτο του μήκους της περιφέρειας, με κέντρο του μήκους το σημείο της περιφέρειας με ακτίνα παράλληλη στο άξονα Y για τη δύναμη που είναι παράλληλη στο άξονα Y και το σημείο της περιφέρειας με ακτίνα που σχηματίζει γωνία 55° με τον άξονα X για τη δύναμη που σχηματίζει γωνία 55° με τον άξονα X.

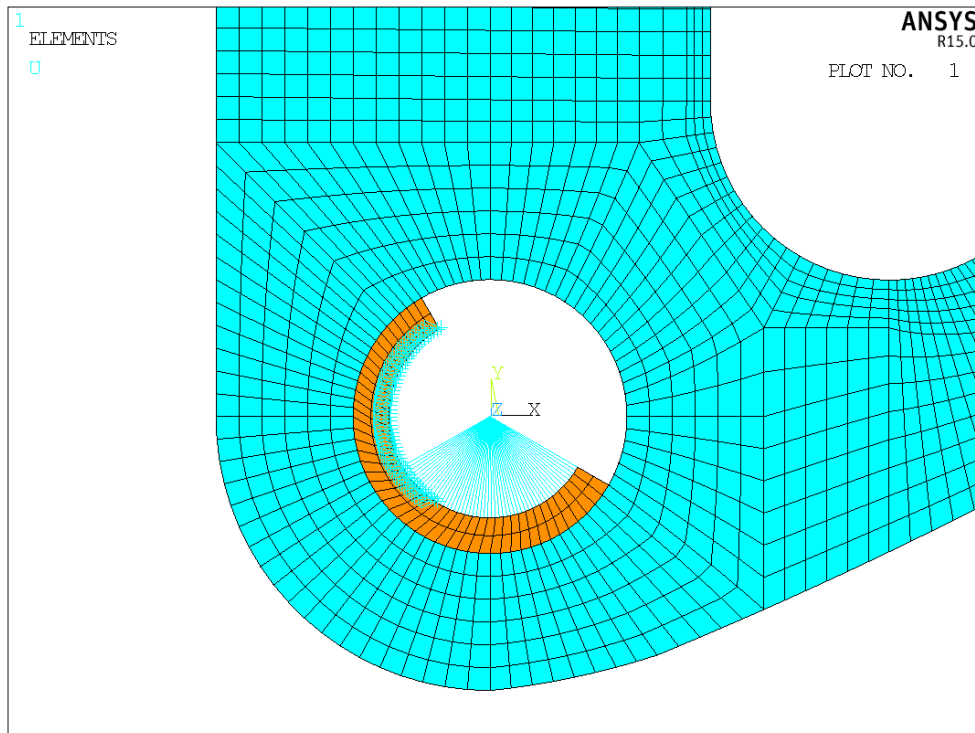
Για να ορίσουμε την κατανεμημένη φόρτιση που δημιουργείται στις οπές λόγω των ιμάντων, χρησιμοποιούμε ένα νέο τύπο στοιχείου, το MPC184. Το στοιχείο MPC184 χρησιμοποιείται για την δημιουργία ενός άκαμπτου συνδέσμου ανάμεσα σε δύο κόμβους, έναν ανεξάρτητο (master node) και έναν εξαρτημένο (slave node). Πρακτικά ενώνουμε έναν κεντρικό κόμβο (master node) με όλους τους κόμβους (slave nodes) στην περιοχή εφαρμογής της φόρτισης. Στην συνέχεια θέτουμε μία σημειακή δύναμη στον κεντρικό ανεξάρτητο κόμβο η οποία μεταφέρεται και ισομοιράζεται μέσω των στοιχείων MPC184 σε όλους τους υπόλοιπους εξαρτημένους κόμβους.

Για να αποφύγουμε τις υπερβολικά μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων που προκύπτουν στα άκρα εφαρμογής της κατανεμημένης φόρτισης εφαρμόζουμε παρόμοια την μέθοδο του επιπλέον υλικού που εφαρμόσαμε παραπάνω στα σημεία εφαρμογής των συνοριακών συνθηκών. Τα στοιχεία MPC184 ενώνονται με τους κόμβους πάνω στο επιπλέον υλικό. Η εφαρμογή του επιπλέον υλικού καθώς και των στοιχείων MPC184 φαίνονται στο Σχήμα 3.17 παρακάτω.



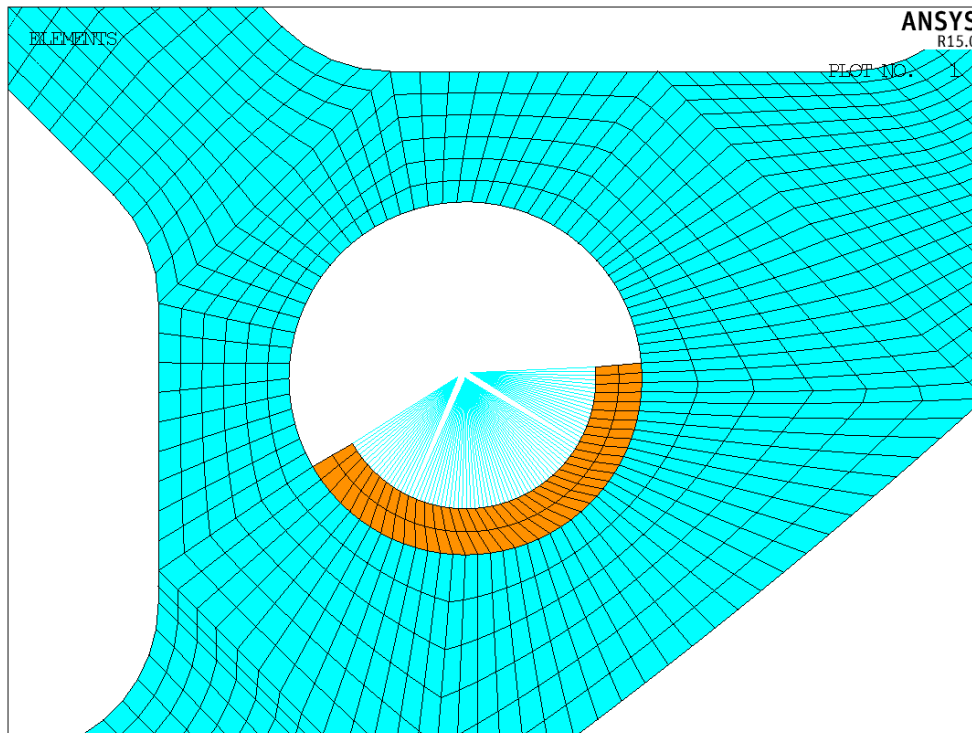
Σχήμα 3.17: Εφαρμογή του επιπλέον υλικού και των στοιχείων MPC184 στην περιοχή εφαρμογής της φόρτισης

Στο συγκεκριμένο μοντέλο εμφανίζονται δύο περιοχές στις οποίες πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή. Η πρώτη περιοχή εμφανίζεται στην οπή No.4 στην οποία έχουμε υπέρθεση της οριακής συνθήκης και του στοιχείου MPC184 σε συγκεκριμένους κόμβους. Οι εξαρτημένοι κόμβοι είναι προκαθορισμένοι να λαμβάνουν τις φορτίσεις και τις συνοριακές συνθήκες του ανεξάρτητου κόμβου. Για να μπορέσουν οι κόμβοι να διατηρήσουν τις δικές τους συνοριακές συνθήκες πρέπει να τροποποιήσουμε τα στοιχεία MPC184 που δημιουργούμε. Για να το επιτύχουμε αυτό θέτουμε στην μεταβλητή Reduction Method την μέθοδο Lagrange Multiplier. Ο τρόπος αλλαγής της μεταβλητής περιγράφεται παρακάτω. Η ταυτόχρονα εφαρμογή συνοριακών συνθηκών και στοιχείων MPC184 φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 3.18.



Σχήμα 3.18: Περιοχή ταυτόχρονης εφαρμογής συνοριακών συνθηκών και στοιχείων MPC184 στην οπή No.4

Η δεύτερη περιοχή στην οποία πρέπει να δώσουμε προσοχή βρίσκεται στην οπή No.5 στην οποία έχουμε την υπέρθεση δύο φορτίων από τους δύο διαφορετικούς ανεξάρτητους κόμβους. Το πρόγραμμα δεν μπορεί να αποδώσει τις φορτίσεις ταυτόχρονα και εμφανίζει σφάλμα. Για να αποφύγουμε την εμφάνιση σφάλματος διαγράφουμε τους δύο ανεξάρτητους κόμβους και στην θέση τους δημιουργούμε τρεις κόμβους. Ο καινούργιος κόμβος που δημιουργείται ενώνεται με όλους τους κόμβους στους οποίους είχαμε προηγουμένως υπέρθεση φορτίου. Οι άλλοι δύο κόμβοι καλύπτουν τους υπόλοιπους κόμβους όπως προηγουμένως. Η εφαρμογή των τριών κόμβων φαίνεται στο Σχήμα 3.19 παρακάτω.



Σχήμα 3.19:Εφαρμογή των τριών κόμβων στην οπή Νο.5

Για την δημιουργία των στοιχείων MPC184 αρχικά ορίζουμε τις παραμέτρους K1= Rigid Beam και K2= Lagrange Multiplier μέσω του μενού Options (Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete). Για να δημιουργήσουμε τα καινούργια στοιχεία επιλέγουμε τον τύπο στοιχείου MPC184 μέσω της ακολουθίας εντολών: Preprocessor → Modeling → Create → Elements → Element Attributes → Element type number. Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών: Preprocessor → Modeling → Create → Elements → Auto Numbered → Thru Node.

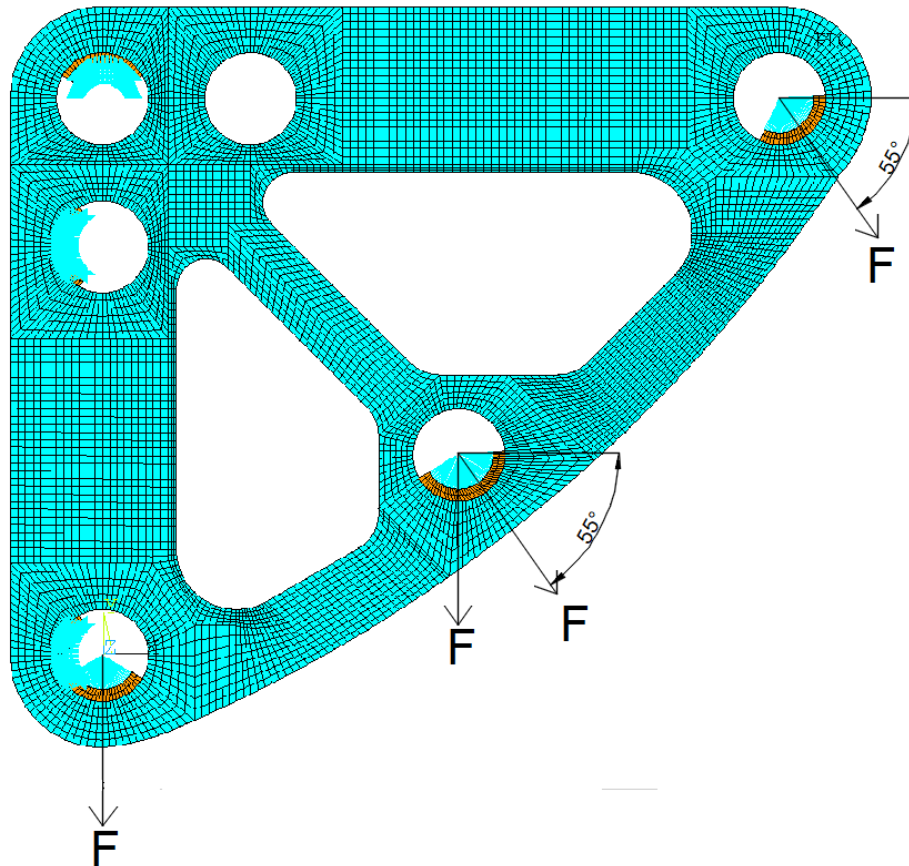
Τέλος για να ορίσουμε τις δυνάμεις στους δύο κεντρικούς κόμβους χρησιμοποιούμε την ακολουθία εντολών: Solution → Define Loads → Apply → Structural → Force/Moment → On Nodes. Η δύναμη F που ασκείται σε γωνία 55° ορίζεται ως δύο συνιστώσες Fx και Fy, όπου $F_x = F \cdot \cos(55^\circ)$ και $F_y = F \cdot \sin(55^\circ)$. Για την ενδιάμεση οπή κατανέμουμε τις δύο δυνάμεις που εφαρμόζονται στους τρεις κόμβους που δημιουργήσαμε με βάση τον αριθμό των κόμβων με τους οποίους συνδέονται:

$$F_{1y} = F \cdot \frac{19}{64}, \quad F_{2y} = F \cdot \frac{45}{64} + F \cdot \frac{45}{64} \cdot \sin(55), \quad F_{2x} = F \cdot \frac{45}{64} \cdot \cos(55),$$

$$F_{3y} = F \cdot \frac{19}{64} \cdot \sin(55), \quad F_{3x} = F \cdot \frac{19}{64} \cdot \cos(55).$$

Η τιμή της δύναμης F προσδιορίζεται, στο κεφάλαιο 3.5 παρακάτω, έτσι ώστε η φόρτιση να προκαλεί τάση διαρροής στο headboard από αλουμίνιο. Στο Σχήμα 3.20 φαίνεται η ολοκληρωμένη μορφή του μοντέλου μας, με τις συνοριακές συνθήκες καθώς και τις

επιβαλλόμενες δυνάμεις. Για να κάνουμε επίλυση του μοντέλου χρησιμοποιούμε την εντολή Solve.



Σχήμα 3.20: Ολοκληρωμένη μορφή του μοντέλου

3.4 Μετ-επεξεργασία (Post-processing)

Η μετ-επεξεργασία (post-processing) είναι το τρίτο και τελευταίο στάδιο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Στο πρώτο στάδιο ορίσαμε τη γεωμετρία, τις ιδιότητες των υλικών και δημιουργήσαμε το πλέγμα και στο δεύτερο στάδιο καθορίσαμε τον τύπο της ανάλυσης (στατική, γραμμική ανάλυση), τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος και επιβάλλαμε την φόρτιση. Στο στάδιο της μετ-επεξεργασίας μπορούμε να πάρουμε και να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα των υπολογισμών του προγράμματος για τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε την συμπεριφορά του μοντέλου μας στις δυνάμεις που του ασκούνται ως προς τις παραμορφώσεις και τις τάσεις που δημιουργούνται καθώς και να προσδιορίσουμε το σημείο αστοχίας κάθε στρώσης μέσω του ελέγχου των αποτελεσμάτων του κριτηρίου αστοχίας Tsai-Wu.

3.5 Μελέτη του Headboard από Αλουμίνιο

Για να προσδιορίσουμε τις τιμές των μέγιστων δυνάμεων στο headboard από σύνθετα υλικά κάνουμε την εξής παραδοχή. Το μέγιστο φορτίο θα ισούται με το φορτίο που προκαλεί τάση διαρροής στο headboard από αλουμίνιο. Οι δυνάμεις που έχουμε ορίσει στο μοντέλο μας προκαλούν μία διαξονική εντατική κατάσταση και έτσι δεν μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων των τάσεων με τις αντίστοιχες αντοχές σε μονοαξονικές εντατικές καταστάσεις. Για την εύρεση της αντοχής του μοντέλου κάνουμε χρήση του κριτηρίου ισοδύναμης τάσης Von Mises. Η ισοδύναμη τάση αποτελεί ένα υπολογιστικό μέγεθος το οποίο θα προκαλέσει το ίδιο καταστροφικό αποτέλεσμα με την σύνθετη καταπόνηση. Η ισοδύναμη τάση που προκύπτει μέσω του κριτηρίου Von Mises συγκρίνεται με την αντοχή έναντι διαρροής σε εφελκυσμό.

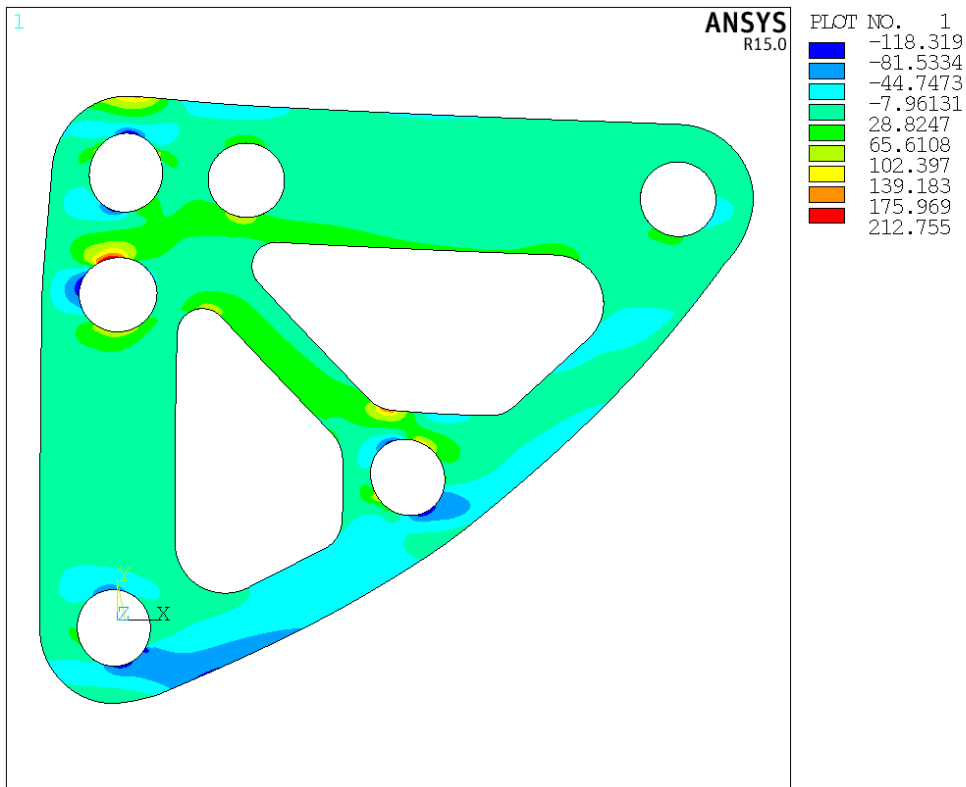
Έπειτα από δοκιμές με δυνάμεις διαφορετικού μεγέθους κάθε φορά και την αντίστοιχη ανάλυση των τάσεων Von Mises που δημιουργούνται, προκύπτει ότι η μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραλάβει το headboard από αλουμίνιο, χωρίς να ξεκινήσει η διαρροή, είναι ίση με 1203.28 kN στις οπές No.4 και No.6 και δύο δυνάμεις 1203.28 kN στην οπή No.5 όπως έχουμε ορίσει παραπάνω.

3.6 Έλεγχος για λυγισμό του Headboard από αλουμίνιο

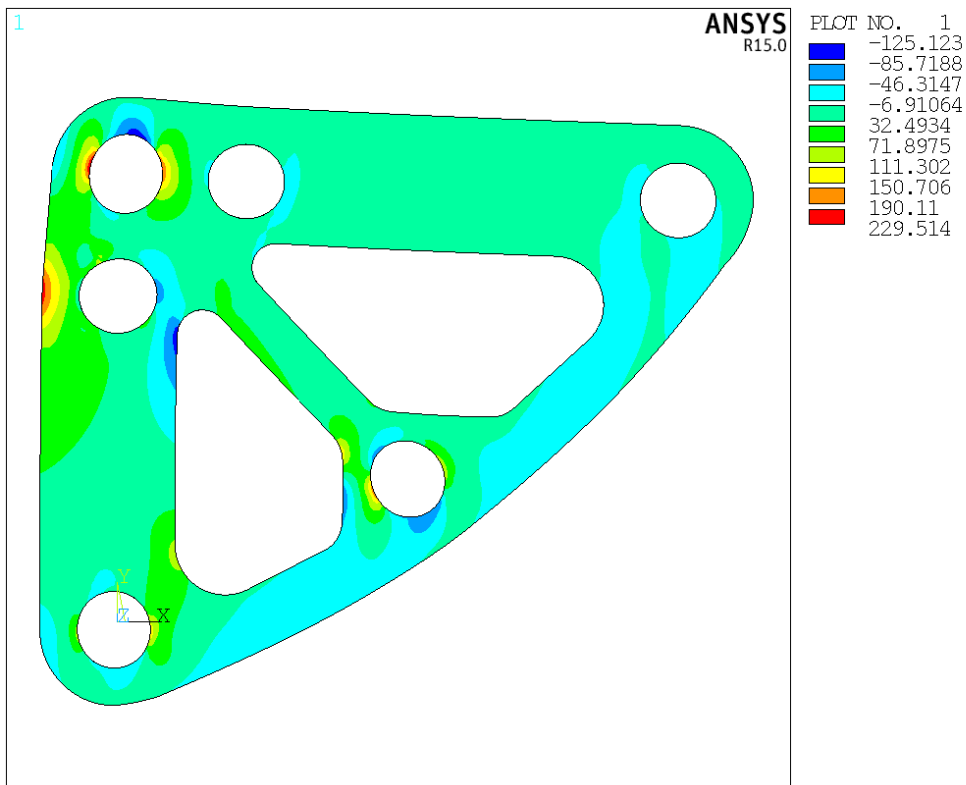
Θα πραγματοποιήσουμε έναν έλεγχο λυγισμού του μοντέλου, επιπρόσθετα του ελέγχου ορίου διαρροής, καθώς παρατηρείται δημιουργία θλιπτικών τάσεων στο μοντέλο, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 3.21 και στο Σχήμα 3.22. Πρέπει να ελέγξουμε ότι δεν επέρχεται αστοχία λόγω λυγισμού σε φορτίο μικρότερο του φορτίου ορίου διαρροής.

Το Ansys μας προσφέρει την δυνατότητα μιας γραμμικής ανάλυσης λυγισμού (Eigenvalue buckling analysis), η οποία υπολογίζει το θεωρητικό φορτίο λυγισμού μιας ιδανικά ελαστικής κατασκευής. Τα αποτελέσματά της περιλαμβάνουν τα κρίσιμα φορτία λυγισμού και τις αντίστοιχες ιδιομορφές λυγισμού του μοντέλου.

Ο Πίνακας 3.5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα παρακάτω. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης λυγισμού δεν είναι φορτία αλλά συντελεστές φορτίου λυγισμού. Για να προσδιορίσουμε το φορτίο λυγισμού για μία συγκεκριμένη ιδιομορφή πρέπει να πολλαπλασιάσουμε το φορτίο που επιβάλλαμε ($F=1203.28$ kN) με τον συντελεστή φορτίου που προέκυψε από το πρόγραμμα.



Σχήμα 3.21: Τάσεις στον άξονα X για $F=1203.28$ kN

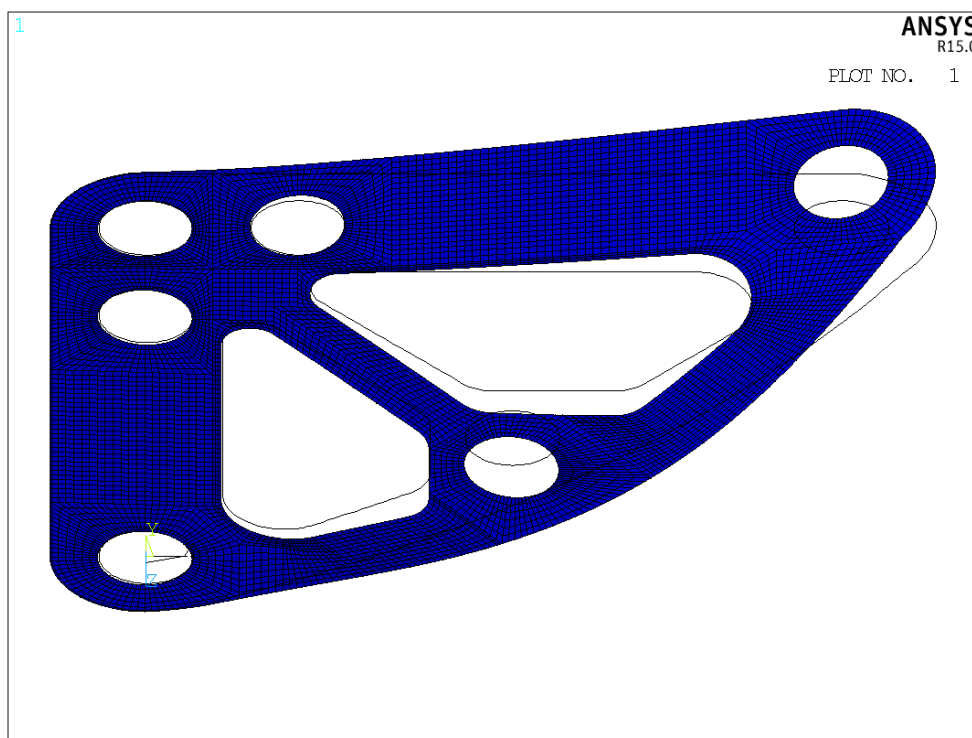


Σχήμα 3.22: Τάσεις στον άξονα Y για $F=1203.28$ kN

Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα ανάλυσης λυγισμού

Ιδιομορφή λυγισμού	Συντελεστές φορτίου λυγισμού
1	-6.1747
2	-5.0012
3	-4.2241
4	-3.7693
5	-2.0787
6	-0.82186
7	1.8156
8	2.3836
9	4.3496
10	6.1157

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της ανάλυσης το φορτίο που θα προκαλέσει λυγισμό αντιστοιχεί στην 7^η ιδιομορφή λυγισμού και είναι περίπου 1.8 φορές μεγαλύτερο από το φορτίο τάσης διαρροής, οπότε δεν θα υπάρξει αστοχία λόγω λυγισμού με τα φορτία που έχουμε επιβάλλει. Η παραμόρφωση κατά την αστοχία λόγω λυγισμού φαίνεται στο Σχήμα 3.23.



Σχήμα 3.23: Παραμόρφωση κατά την αστοχία λόγω λυγισμού

3.7 Μελέτη Headboard από ίνες άνθρακα (Carbon Fiber)

Αντίστοιχα με το κεφάλαιο 2.7, θεωρούμε ότι το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο στο μοντέλο μας ισούται με το φορτίο που προκαλεί αστοχία της πρώτης στρώσης του πολύστρωτου. Η απαίτηση που θα πρέπει να πληροί το μοντέλο μας από σύνθετα υλικά είναι να μπορεί να παραλάβει δύναμη ίση με 1203.28 kN στις οπές No.4 και No.6 και δύο δυνάμεις 1203.28 kN στην οπή No.5, όπως υπολογίστηκε προηγουμένως για το headboard από αλουμίνιο, χωρίς να υπάρξει αστοχία πρώτης στρώσης. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το μοντέλο υπόκειται σε διαξονική εντατική κατάσταση και έτσι για την εύρεση της αντοχής του πρέπει να κάνουμε χρήση ενός κριτηρίου αστοχίας. Στην συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιείται το κριτήριο αστοχίας Tsai-Wu. Η θεωρία του κριτηρίου Tsai-Wu έχει αναλυθεί εκτενέστερα στο κεφάλαιο 2.7.

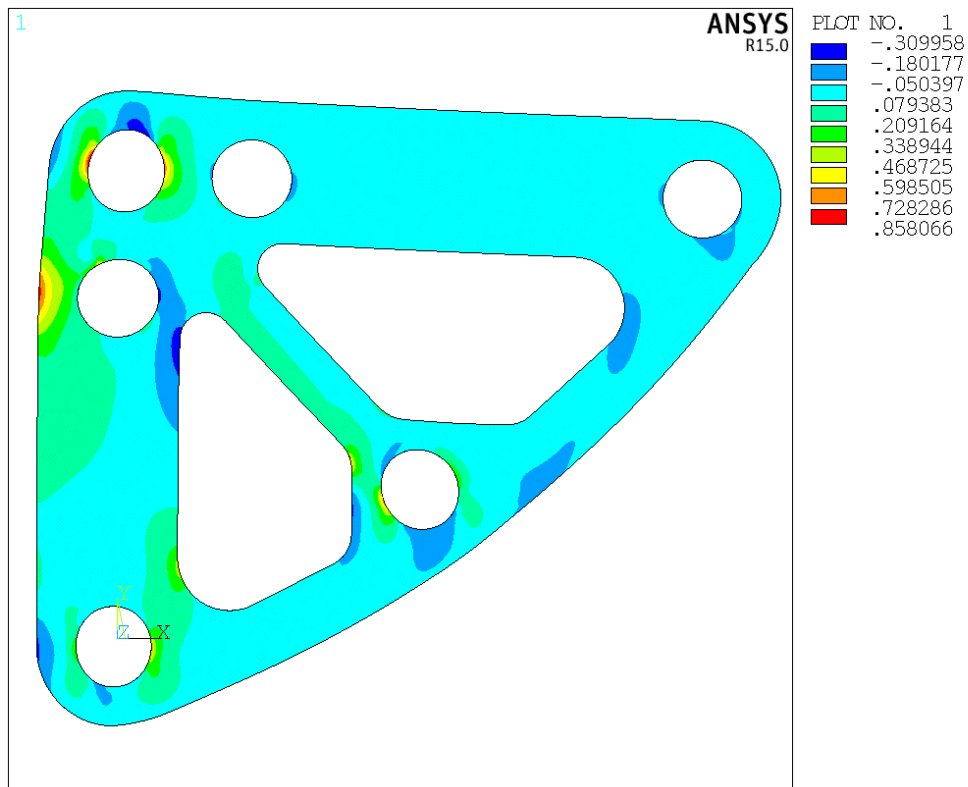
Στόχος της ανάλυσης είναι να προσδιορίσουμε το καλύτερο πολύστρωτο με βάση την συγκεκριμένη φόρτιση που επιβάλλεται. Για την πλήρη περιγραφή ενός πολύστρωτου πρέπει να δώσουμε πληροφορίες για τον συνολικό αριθμό των στρώσεων και τη συγκεκριμένη τιμή της γωνίας προσανατολισμού των ινών κάθε στρώσης. Ακόμη πρέπει να αναφέρεται και το πάχος κάθε στρώσης σε μη κανονικά πολύστρωτα, δηλαδή σε πολύστρωτα με διαφορετικό πάχος ανά στρώση. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν μόνο κανονικά πολύστρωτα, όπου όλες οι στρώσεις είχαν ίσο πάχος.

Τα πολύστρωτα που εξετάζουμε είναι δύο ειδών, πολύστρωτα με διαστρωματώσεις υφάσματος με μονοαξονικές ενισχυτικές ίνες (Unidirectional) και πολύστρωτα με διαστρωματώσεις πλεκτού υφάσματος (Woven fabric).

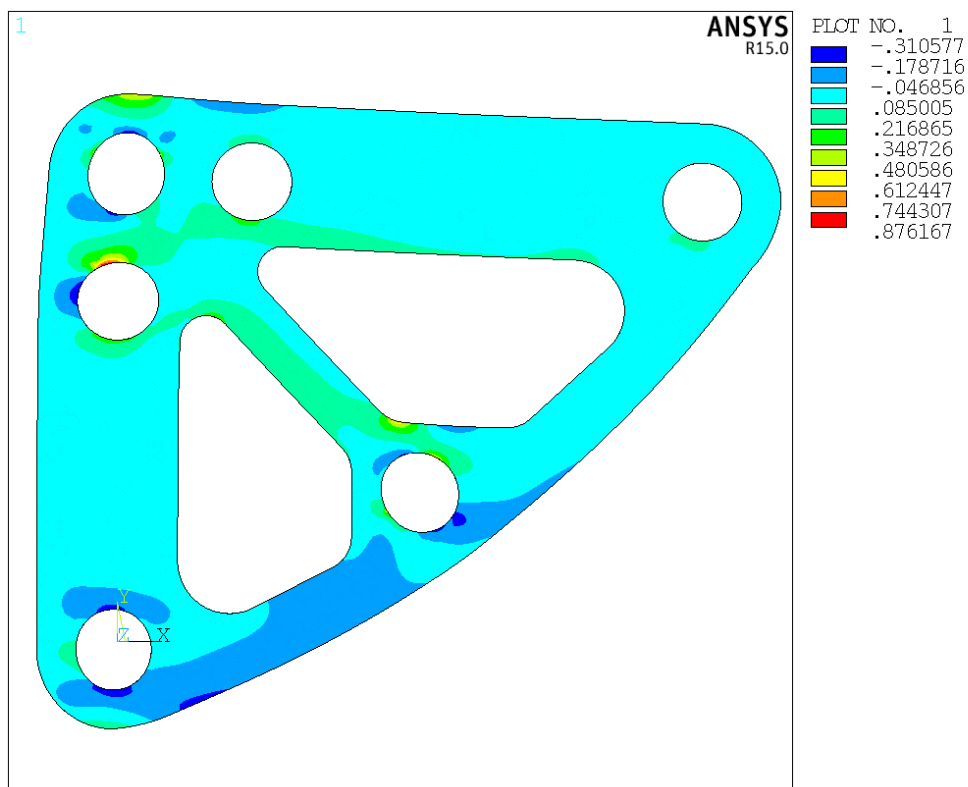
Το αρχικό πάχος των πολύστρωτων που επιλέγεται είναι 3 mm, ίσο με το πάχος του headboard από αλουμίνιο. Περαιτέρω θα επιδιώξουμε την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση του πάχους του headboard, κάτι το οποίο θα πραγματοποιήσουμε σε επόμενο στάδιο, αφού προσδιορίσουμε πρώτα το καλύτερο είδος πολύστρωτου για την συγκεκριμένη φόρτιση.

Η διαστρωμάτωση κάθε πολύστρωτου που μελετήθηκε έγινε με βάση την δεδομένη φόρτιση και τις συνοριακές συνθήκες αλλά και την ανάλυση των αποτελεσμάτων των προηγούμενων πολύστρωτων. Η γωνία τοποθέτησης των στρώσεων μετράται από τον άξονα X όπως αυτός έχει οριστεί στο κεφάλαιο 3.2.2. Στο κεφάλαιο 2 προέκυψαν καλύτερα αποτελέσματα για διαστρωματώσεις της μορφής $[0,90,+φ,-φ]$. Αντίστοιχα λοιπόν και σε αυτό το μοντέλο γίνεται δοκιμή διαστρωματώσεων της παραπάνω μορφής με $φ= 35^{\circ}/45^{\circ}/55^{\circ}$. Τα διάφορα είδη πολύστρωτων μαζί με τις διαστρωματώσεις τους φαίνονται παρακάτω μαζί με τις αντίστοιχες τιμές του κριτηρίου Tsai-Wu.

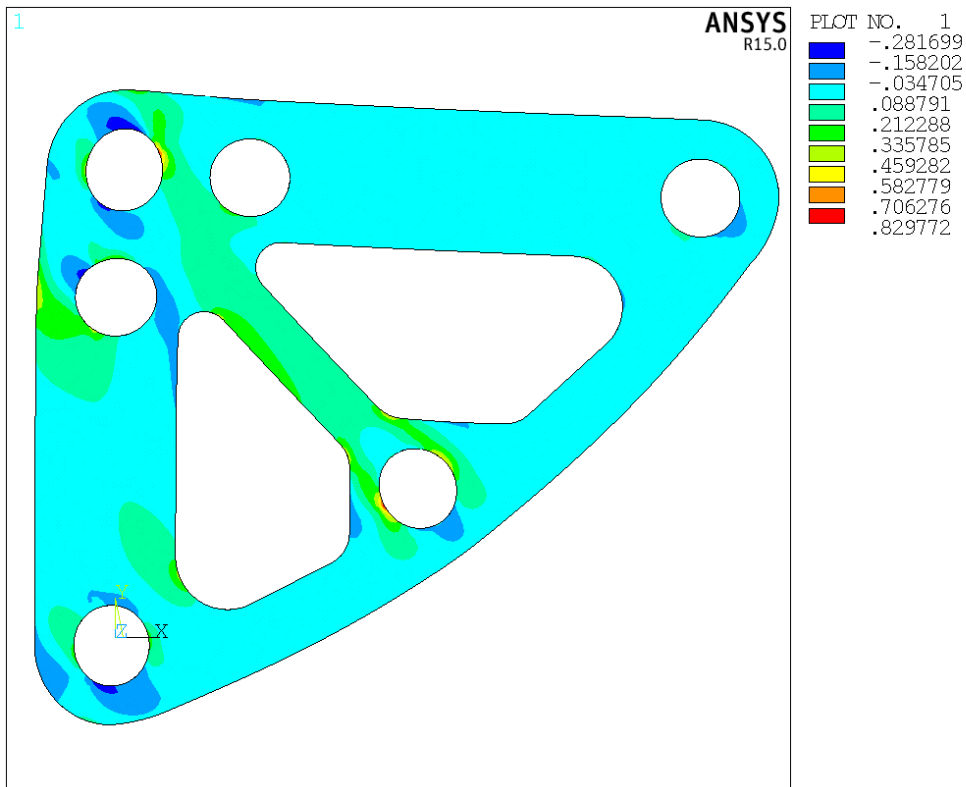
Πολύστρωτο No.1 (Μονοδιευθυντικές ίνες) : Διαστρωμάτωση [0/90/45/-45]s



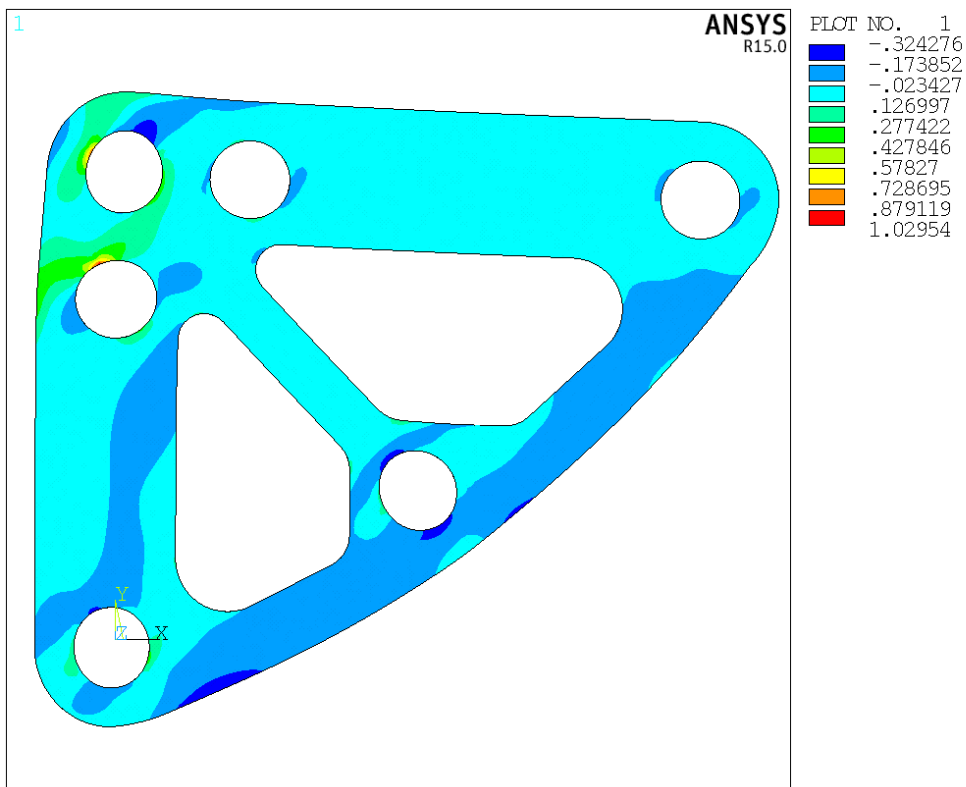
Σχήμα 3.24: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 0° (Πολύστρωτο 1)



Σχήμα 3.25: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 90° (Πολύστρωτο 1)

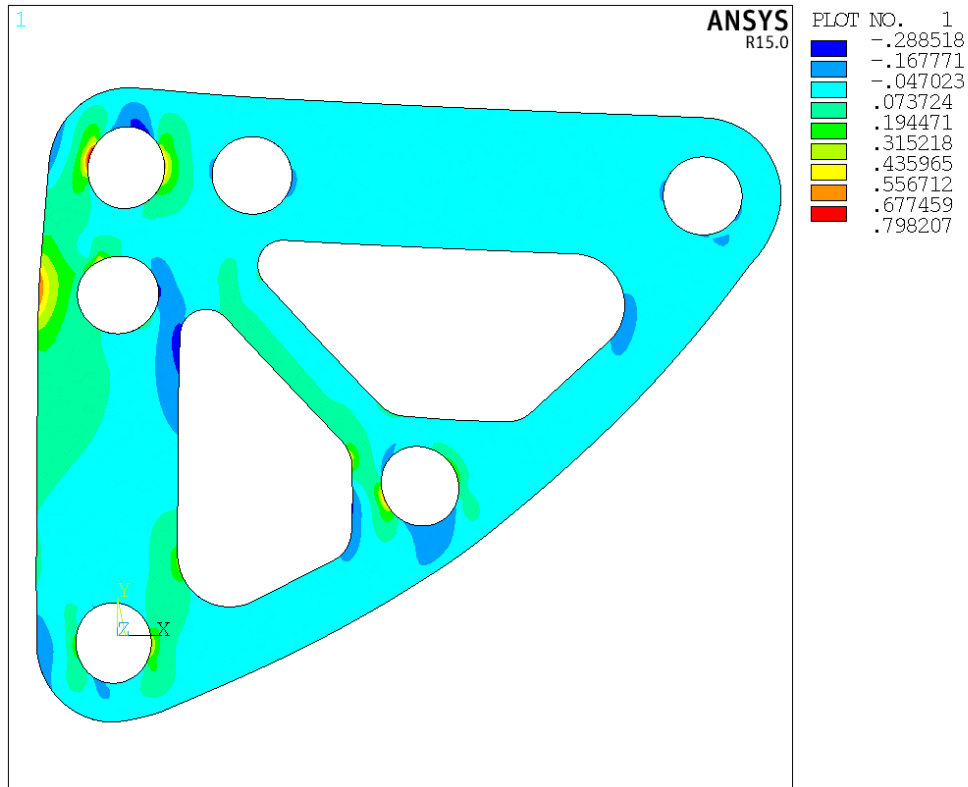


Σχήμα 3.26: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 45° (Πολύστρωτο 1)

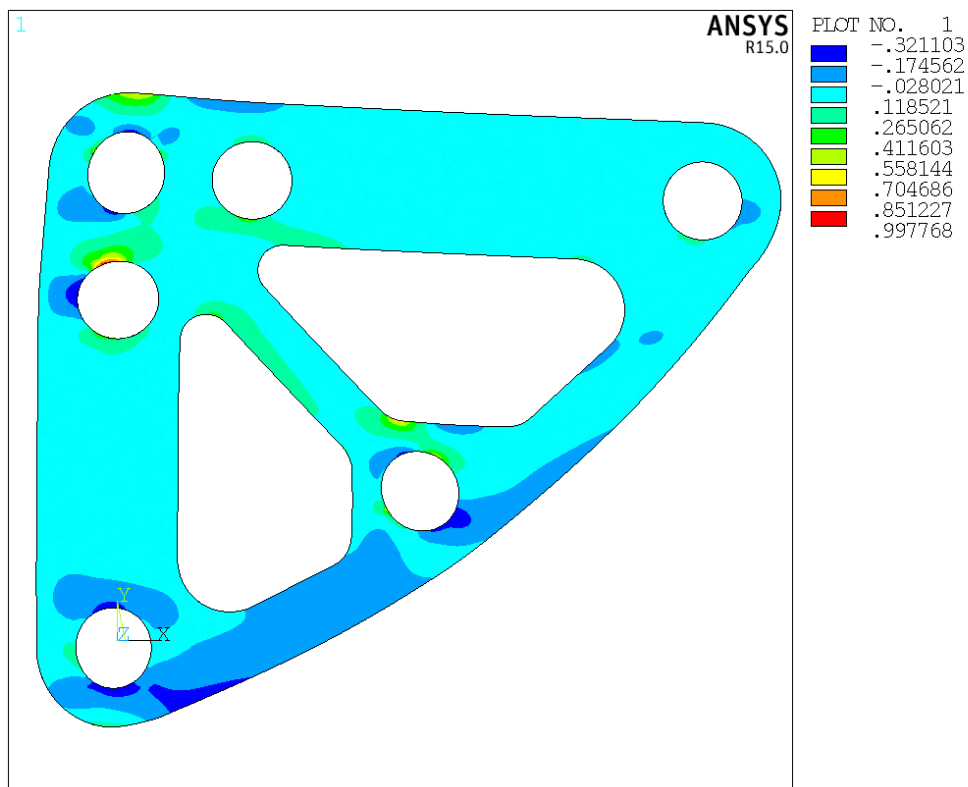


Σχήμα 3.27: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση -45° (Πολύστρωτο 1)

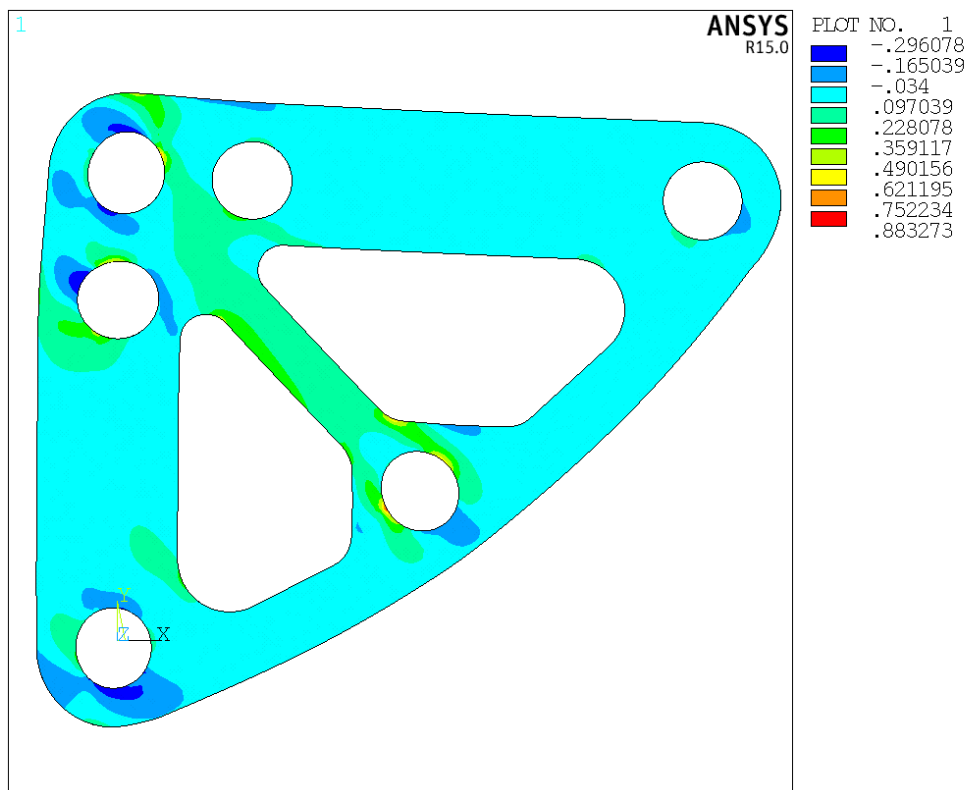
Πολύστρωτο No.2 (Μονοδιευθυντικές ίνες) : Διαστρωμάτωση [0/90/55/-55]s



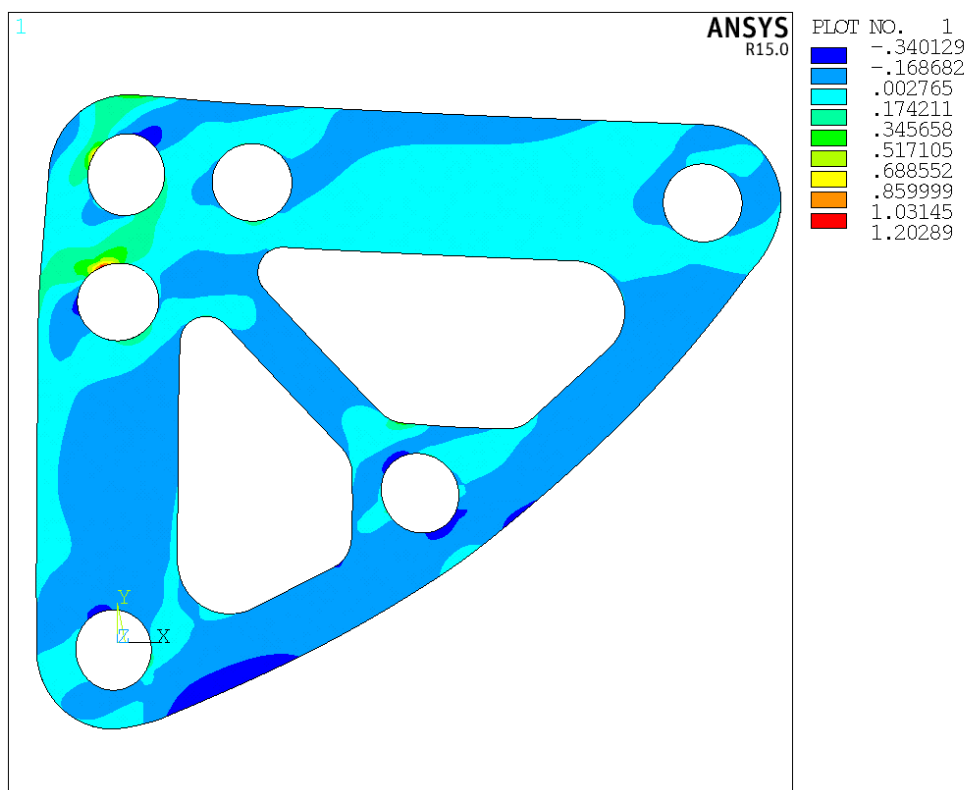
Σχήμα 3.28: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 0° (Πολύστρωτο 2)



Σχήμα 3.29: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 90° (Πολύστρωτο 2)

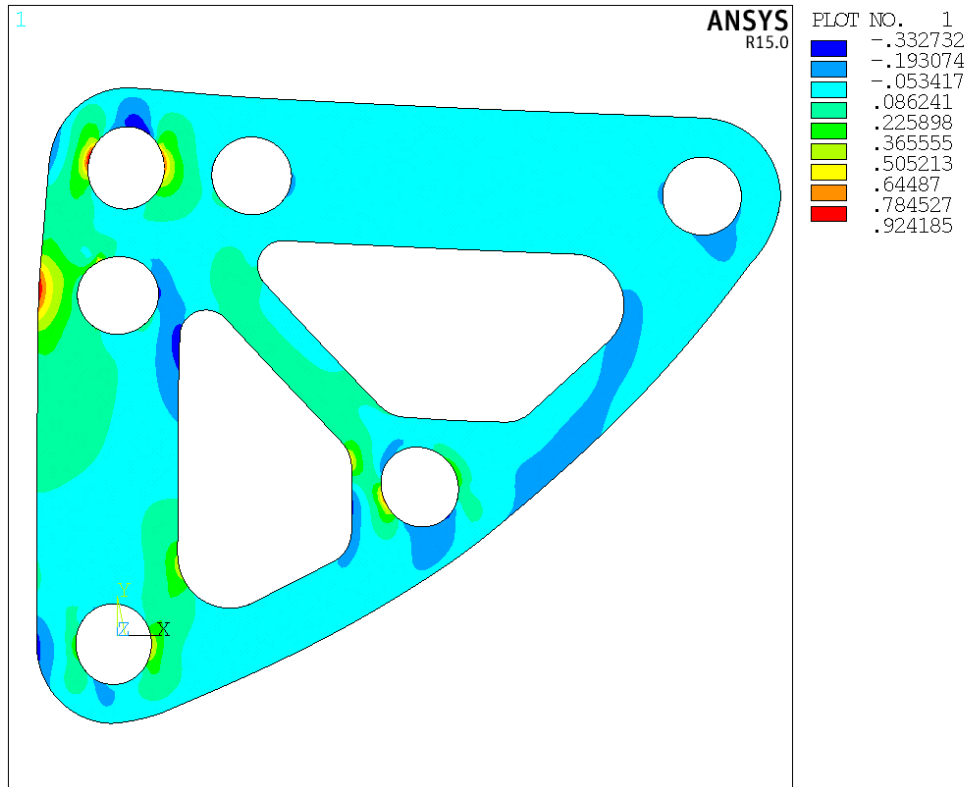


Σχήμα 3.30: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 55° (Πολύστρωτο 2)

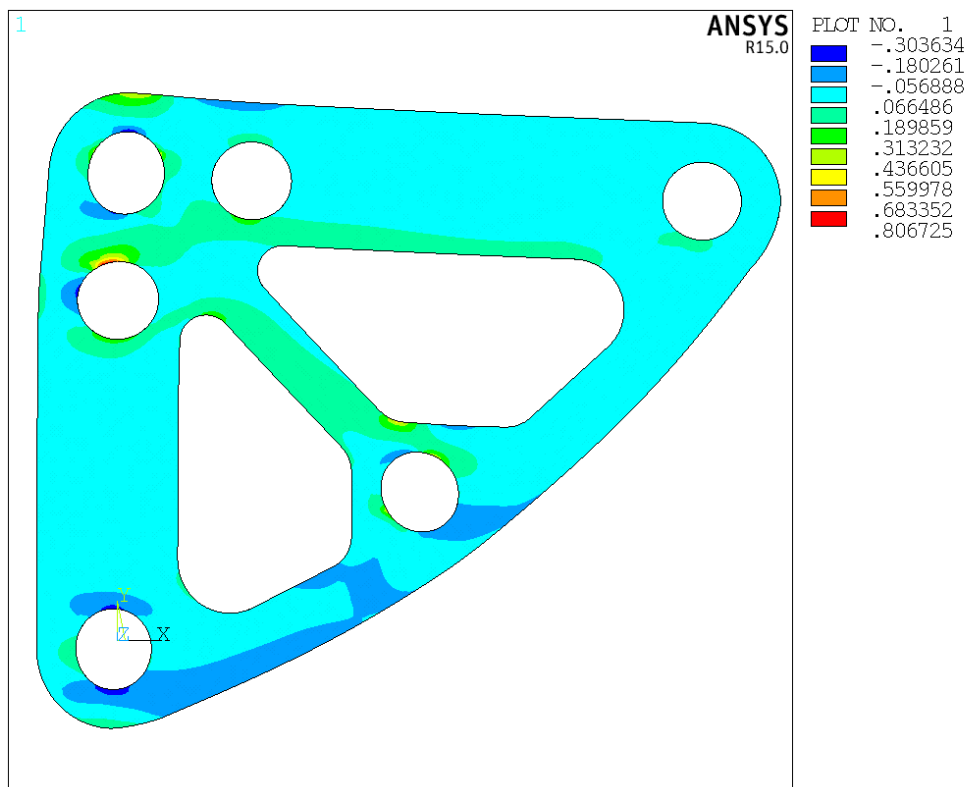


Σχήμα 3.31: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση -55° (Πολύστρωτο 2)

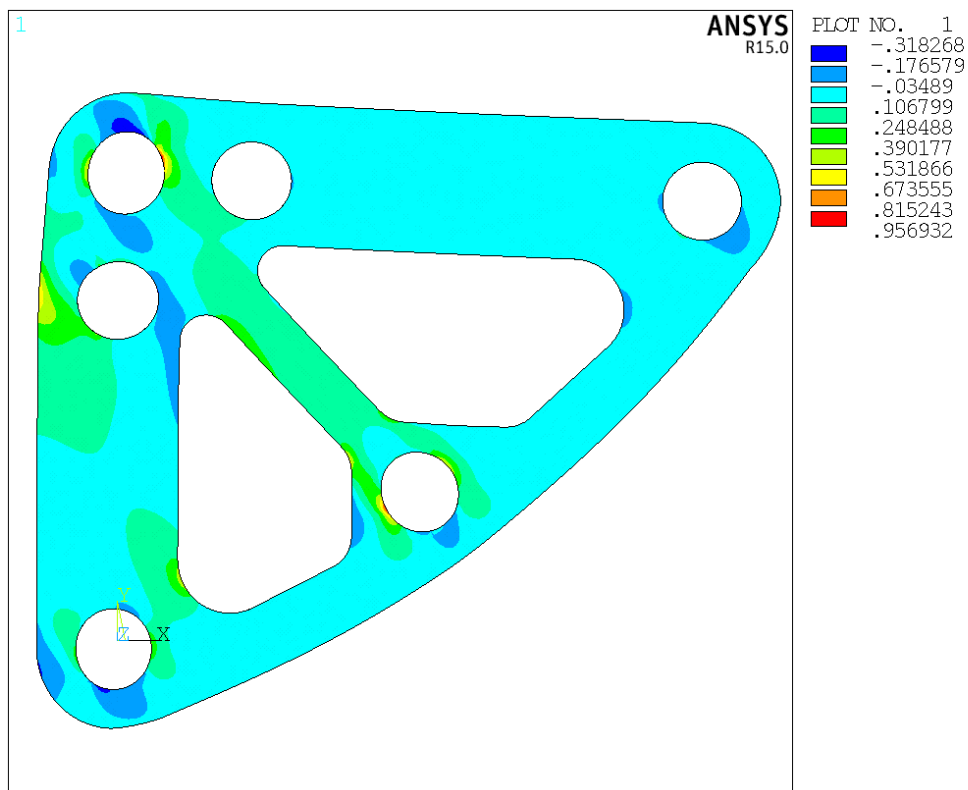
Πολύστρωτο No.3 (Μονοδιευθυντικές ίνες) : Διαστρωμάτωση [0/90/35/-35]s



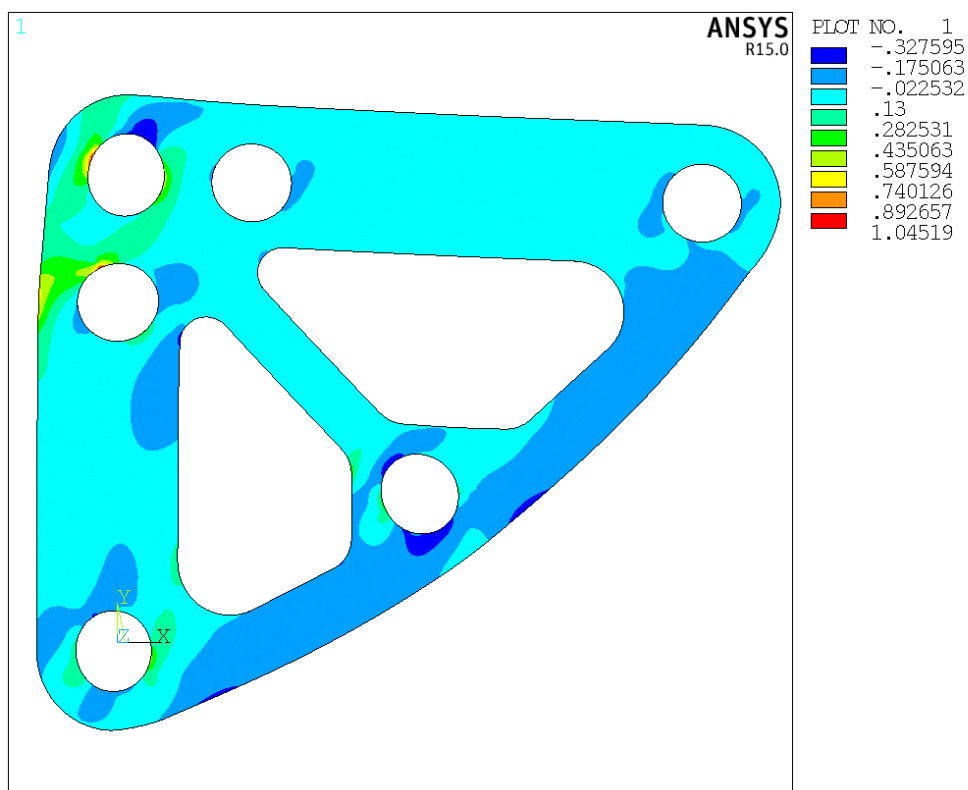
Σχήμα 3.32: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 0° (Πολύστρωτο 3)



Σχήμα 3.33: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 90° (Πολύστρωτο 3)



Σχήμα 3.34: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 35° (Πολύστρωτο 3)



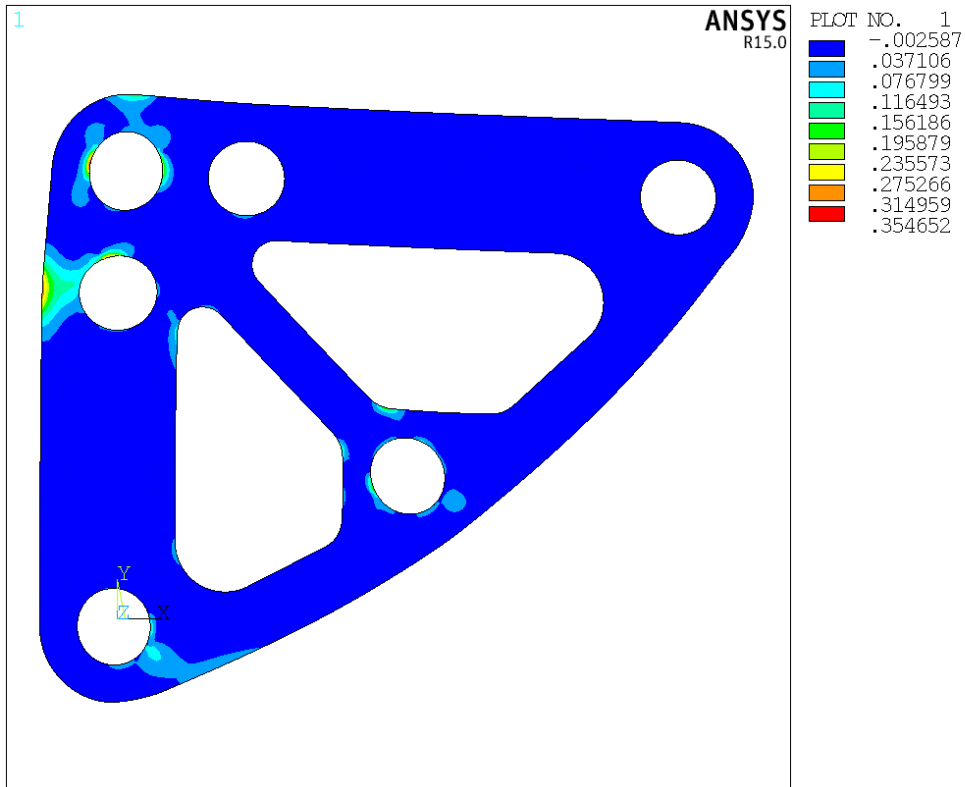
Σχήμα 3.35: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση -35° (Πολύστρωτο 3)

Ο Πίνακας 3.6 παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του κριτηρίου Tsai-Wu ανά στρώση και πολύστρωτο. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα η βέλτιστη διαστρωμάτωση για ύφασμα με μονοδιευθυντικές ίνες ανήκει στο πολύστρωτο 1. Στην συνέχεια εξετάζουμε πολύστρωτα με στρώσεις από πλεκτό ύφασμα. Οι διαστρωματώσεις που εξετάζονται ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν παραπάνω και είναι οι [0/35]_s, [0/45]_s, [0/55]_s.

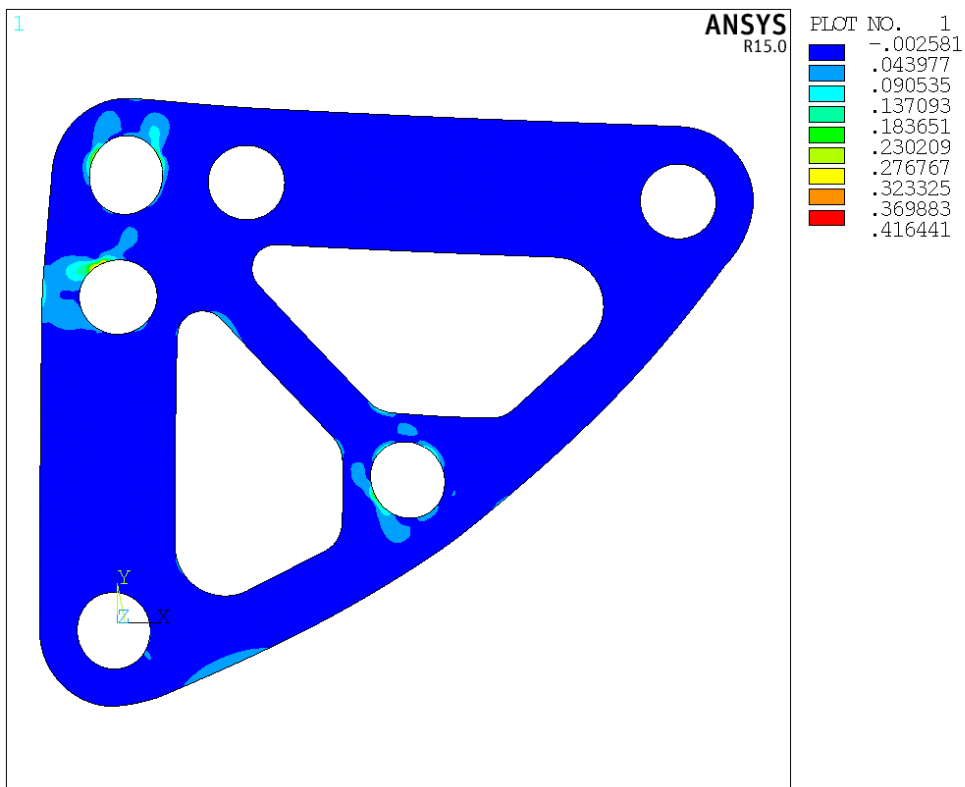
Πίνακας 3.6: Μέγιστες τιμές κριτηρίου Tsai-Wu ανά στρώση και πολύστρωτο για ύφασμα με μονοδιευθυντικές ίνες

Πολύστρωτα	[0/90/45/-45] _s	[0/90/55/-55] _s	[0/90/35/-35] _s
Στρώσεις			
0°	0.858	0.798	0.924
90°	0.876	0.998	0.807
55°	-	0.883	-
-55°	-	1.203	-
45°	0.830	-	-
-45°	1.030	-	-
35°	-	-	0.957
-35°	-	-	1.045

Πολύστρωτο Νο.4 (Πλεκτό ύφασμα) : Διαστρωμάτωση [0/45]_s

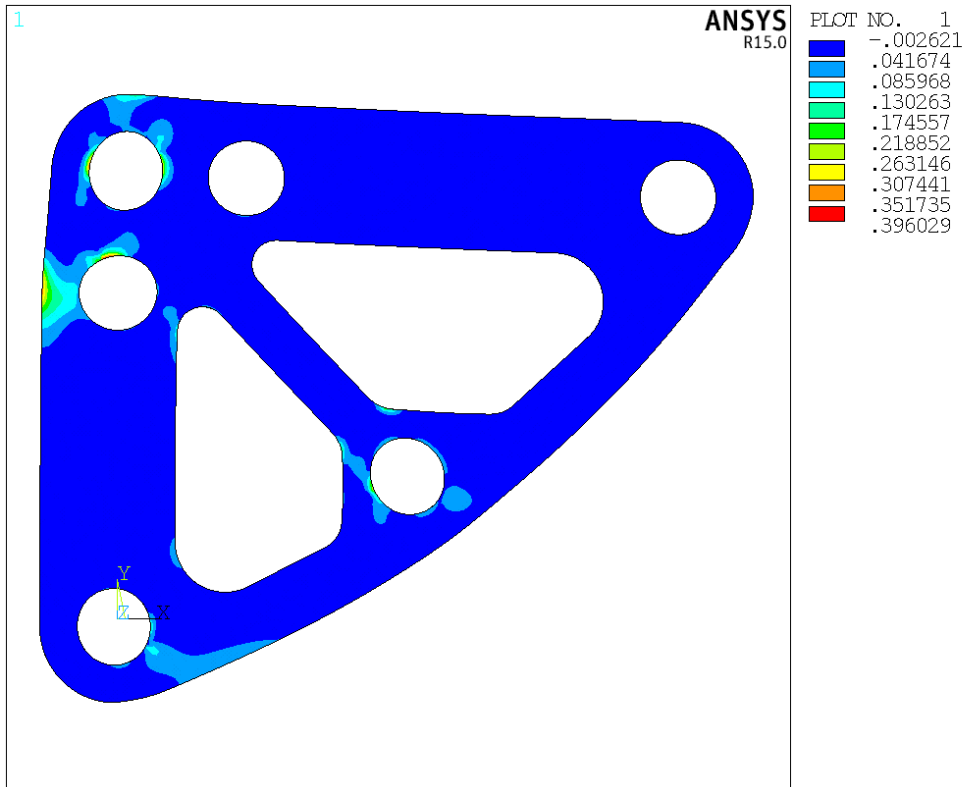


Σχήμα 3.36: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 0° (Πολύστρωτο 4)

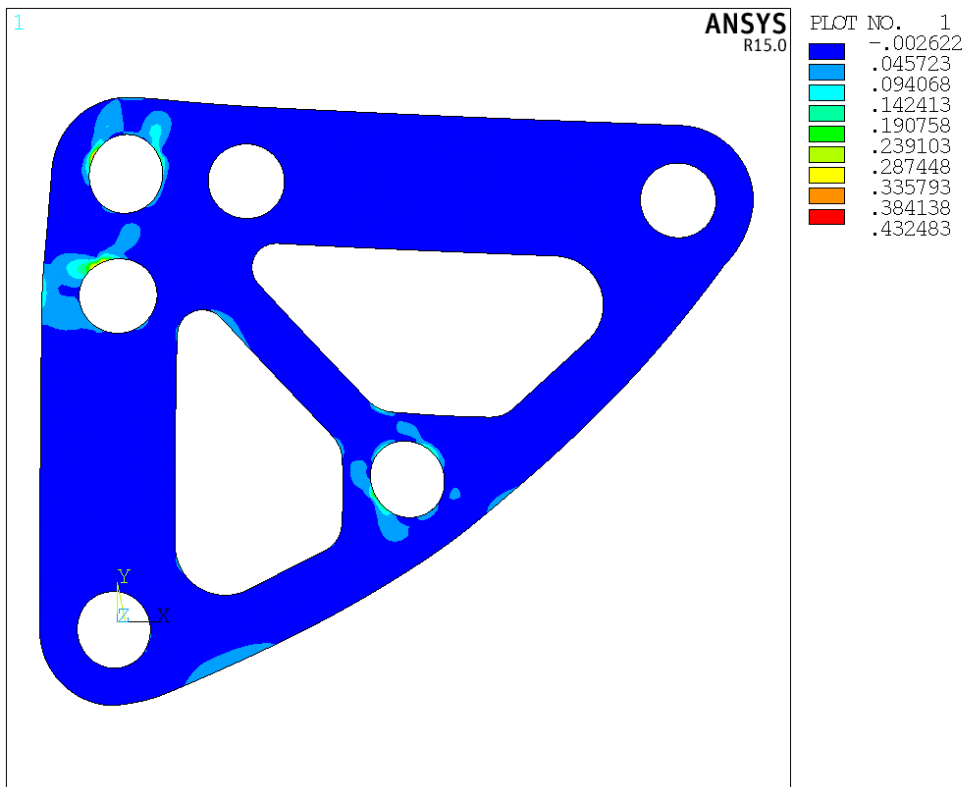


Σχήμα 3.37: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 45° (Πολύστρωτο 4)

Πολύστρωτο No.5 (Πλεκτό ύφασμα) : Διαστρωμάτωση [0/55]s

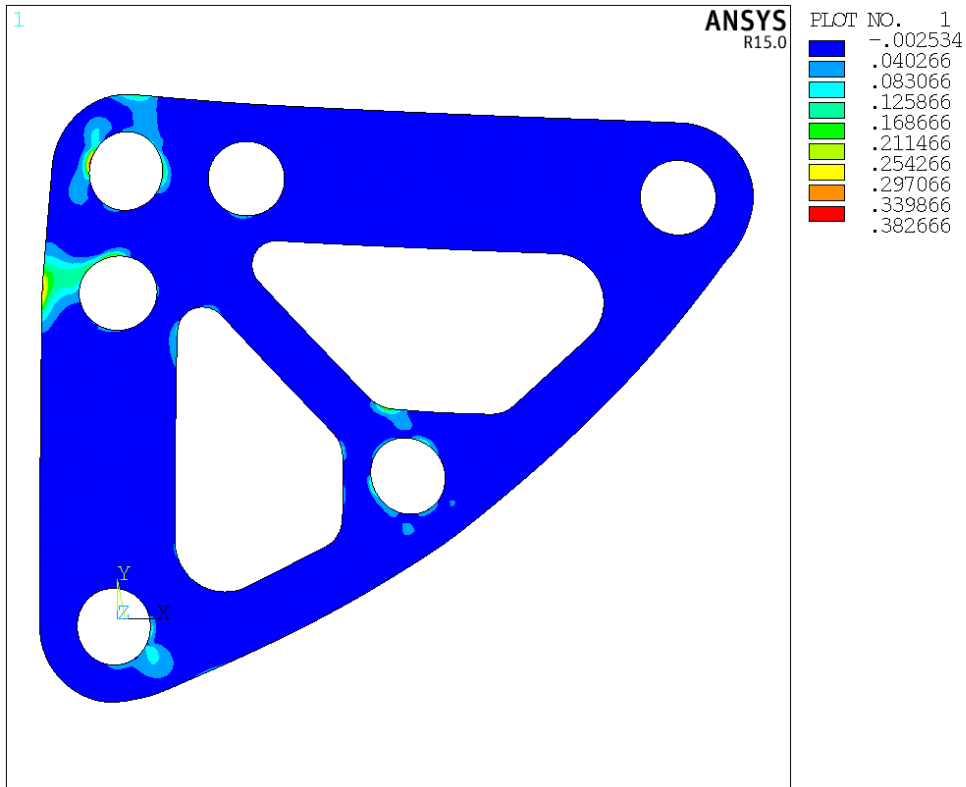


Σχήμα 3.38: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 0° (Πολύστρωτο 5)

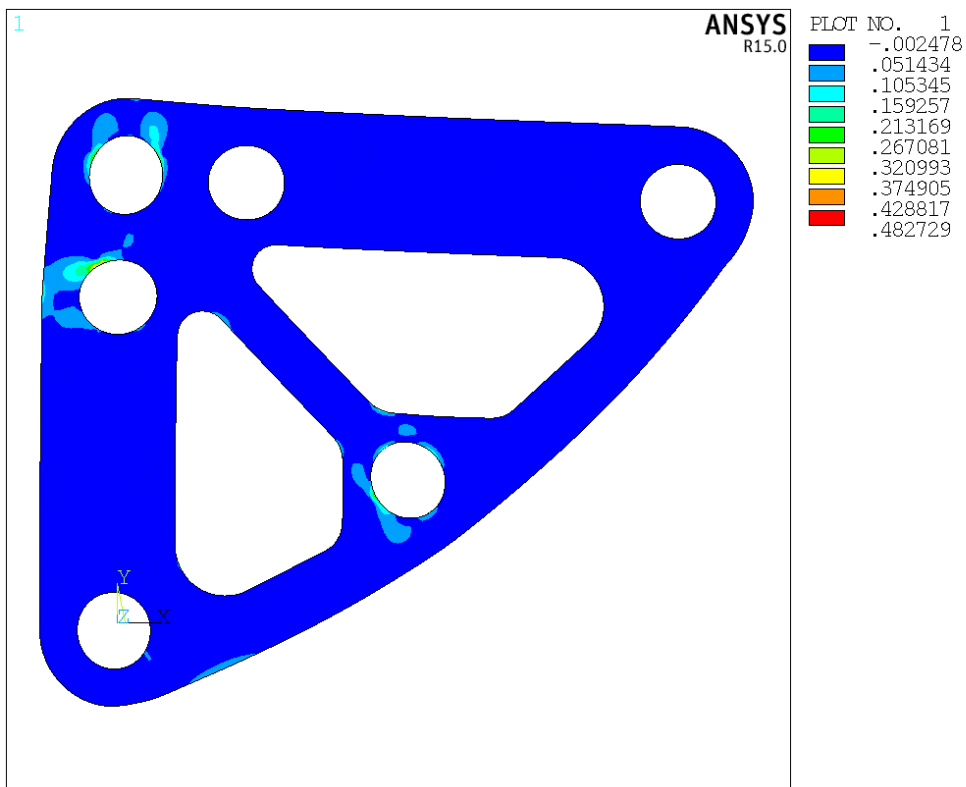


Σχήμα 3.39: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 55° (Πολύστρωτο 5)

Πολύστρωτο Νο.6 (Πλεκτό ύφασμα) : Διαστρωμάτωση [0/35]s



Σχήμα 3.40: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 0° (Πολύστρωτο 6)



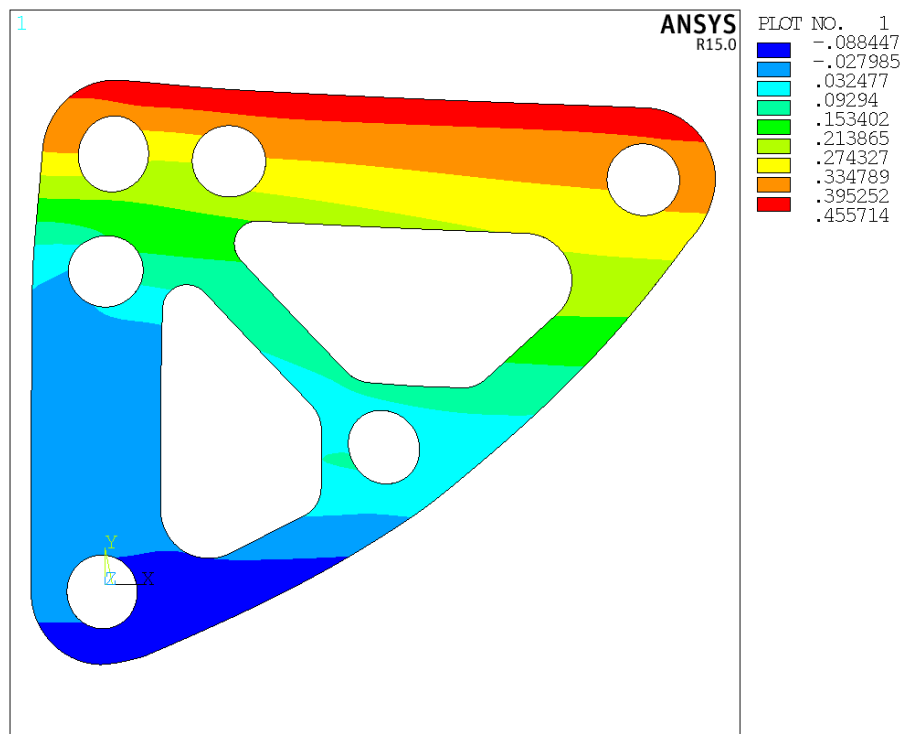
Σχήμα 3.41: Τιμή κριτηρίου Tsai-Wu για την στρώση 35° (Πολύστρωτο 6)

Ο Πίνακας 3.7 παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του κριτηρίου Tsai-Wu ανά στρώση και πολύστρωτο. Όπως παρατηρούμε η χρήση στρώσεων πλεκτού υφάσματος αντί για ύφασμα με μονοδιευθυντικές ίνες οδηγεί σε πολύ καλύτερα αποτελέσματα, το οποίο συμφωνεί με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του 2^{ου} κεφαλαίου.

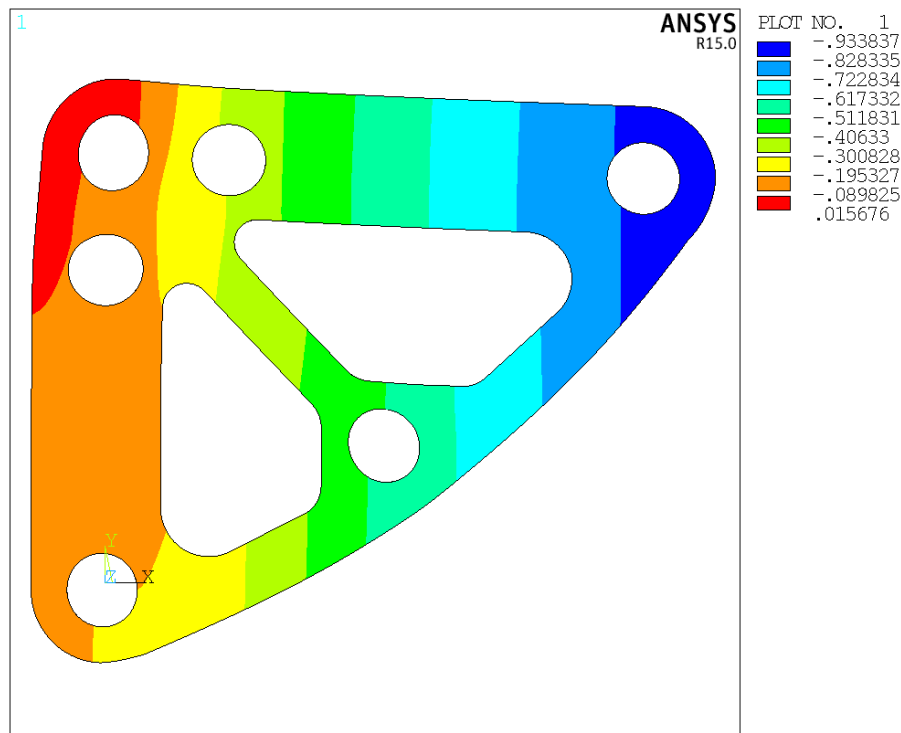
Πίνακας 3.7 Μέγιστες τιμές κριτηρίου Tsai-Wu ανά στρώση και πολύστρωτο για πλεκτό ύφασμα

Πολύστρωτα	[0/45] _s	[0/55] _s	[0/35] _s
Στρώσεις			
0°	0.355	0.396	0.383
35°	-	-	0.483
45°	0.416	-	-
55°	-	0.432	-

Το πολύστρωτο που παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά, και το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε παρακάτω, προκύπτει ότι είναι το πολύστρωτο 4 το οποίο έχει ακολουθία στρώσεων [0/45]_s. Οι μετατοπίσεις του πολύστρωτου [0/45]_s στον άξονα X παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.42 και στον άξονα Y στο Σχήμα 3.43.



Σχήμα 3.42: Μετατοπίσεις στον άξονα X για τον πολύστρωτο [0/45]_s



Σχήμα 3.43: Μετατοπίσεις στον άξονα Y για τον πολύστρωτο $[0/45]_s$

Για το πάχος των 3 mm στο πολύστρωτο 4 προκύπτει μέγιστη τιμή κριτηρίου Tsai-Wu ίση με 0.416, άρα το πάχος είναι πολύ μεγάλο για την συγκεκριμένη φόρτιση. Μειώνουμε το πάχος του πολύστρωτου για να προσδιορίσουμε το ελάχιστο εφικτό πάχος. Σε πάχος μικρότερο από το ελάχιστο θα έχουμε αστοχία της στρώσης 45° η οποία εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή Tsai-Wu από την στρώση 0° . Τελικά μέσω δοκιμών προκύπτει ότι το ελάχιστο εφικτό πάχος του πολύστρωτου είναι 2.1 mm.

3.8 Έλεγχος για λυγισμό βέλτιστου headboard από CFRP

Για να ορίσουμε το τελικό ελάχιστο πάχος του πολύστρωτου πρέπει να ελέγξουμε επιπλέον ότι δεν επέρχεται αστοχία λόγω λυγισμού πριν την αστοχία της πρώτης στρώσης. Όπως και προηγουμένως εκτελούμε στο Ansys μία γραμμική ανάλυση λυγισμού (Eigenvalue buckling analysis), η οποία υπολογίζει το θεωρητικό φορτίο λυγισμού μιας ιδανικά ελαστικής κατασκευής. Τα αποτελέσματά της περιλαμβάνουν τα κρίσιμα φορτία λυγισμού και τις αντίστοιχες ιδιομορφές λυγισμού του μοντέλου.

Ο Πίνακας 3.8 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν για πάχος $t = 2.1$ mm. Η πρώτη θετική ιδιομορφή λυγισμού ίση με 0.3 και όπως είναι προφανές επέρχεται λυγισμός πολύ πριν την αστοχία της πρώτης στρώσης. Συνεπώς πρέπει να αυξήσουμε το συνολικό πάχος του πολύστρωτου. Για την αποφυγή αστοχίας λόγω λυγισμού θεωρούμε έναν συντελεστή ασφαλείας τυπικό για στατικά φορτία ίσο με 1.5. Όπως προκύπτει από δοκιμές το πολύστρωτο με πάχος $t = 3.8$ mm πληροί τον συντελεστή ασφαλείας και ο Πίνακας 3.9 παρουσιάζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Προκύπτει λοιπόν ότι απαιτείται πάχος ακόμη μεγαλύτερο από το

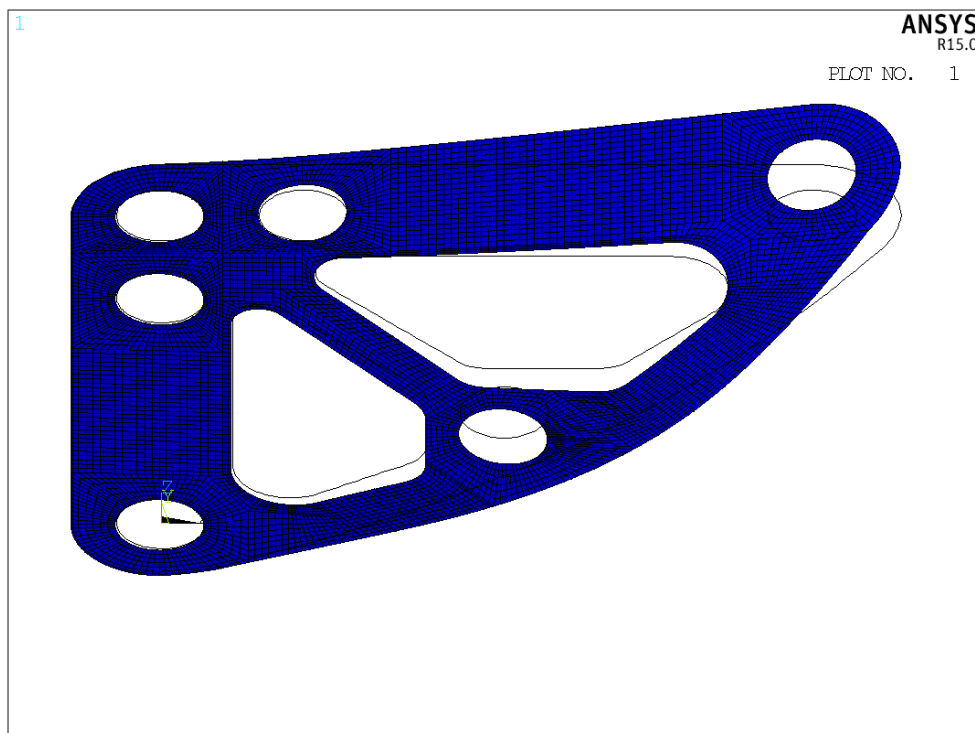
αρχικό πάχος των 3 mm. Η παραμόρφωση κατά την αστοχία λόγω λυγισμού φαίνεται στο Σχήμα 3.44.

Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα ανάλυσης λυγισμού headboard πάχους $t= 2.1$ mm

Ιδιομορφή λυγισμού	Συντελεστές φορτίου
1	-1.0323
2	-0.73856
3	-0.39551
4	-0.22676
5	0.30077
6	0.4962
7	0.86599

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα ανάλυσης λυγισμού headboard πάχους $t= 3.8$ mm

Ιδιομορφή λυγισμού	Συντελεστές φορτίου
1	-3.6719
2	-1.8169
3	-1.0318
4	1.5656
5	2.3551
6	3.9218
7	4.3164



Σχήμα 3.44: Παραμόρφωση κατά την αστοχία λόγω λυγισμού

Στο σημείο αυτό, αφού έχουμε καταλήξει στην τελική σύνθεση και στο πάχος του μοντέλου μας, μπορούμε να κάνουμε σύγκριση του βάρους του σε σχέση με το αρχικό μοντέλο από αλουμίνιο.

Για τον υπολογισμό του βάρους του μοντέλου χρησιμοποιούμε τις μεταβλητές που παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η πυκνότητα του πλεκτού υφάσματος προκύπτει ότι είναι $\rho = 1.6 \text{ g/cc} = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$
- Η επιφάνεια του headboard είναι ίση με $A = 18,385 \text{ mm}^2$
- Το τελικό πάχος του headboard προκύπτει ότι είναι $\tau = 3.8 \text{ mm}$

Άρα το τελικό βάρος ισούται με $W = \tau \cdot A \cdot \rho = 111.78 \text{ g}$

Αντίστοιχα για το headboard από αλουμίνιο έχουμε:

- Το πάχος ισούται είναι $\tau = 3 \text{ mm}$,
- Η επιφάνεια είναι $A = 18,385 \text{ mm}^2$
- Η πυκνότητα είναι $\rho = 2.72 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$,

Άρα προκύπτει ότι το βάρος είναι $W = 190 \text{ g}$

Όπως βλέπουμε παρ'όλο που το πάχος του headboard από ανθρακονήματα είναι 26.6% μεγαλύτερο από το πάχος του αλουμινένιου headboard, επιτυγχάνεται μείωση βάρους της τάξης του 41%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν η σχεδίαση, μοντελοποίηση και ανάλυση ενός εξαρτήματος headboard με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό την μείωση του βάρους του εξαρτήματος. Η γεωμετρία σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα AutoCAD και η ανάλυση έγινε με την βοήθεια του προγράμματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων Ansys Mechanical APDL.

Συμπεράσματα

- Το πολύστρωτο που προέκυψε ως βέλτιστο και στις δύο αναλύσεις των μοντέλων είναι το πολύστρωτο με ακολουθία στρώσεων από πλεκτό ύφασμα $[0,45]_s$. Το αποτέλεσμα αυτό αφορά μόνο την συγκεκριμένη φόρτιση όπως την ορίσαμε στα αντίστοιχα κεφάλαια. Μία αλλαγή στις παραμέτρους της φόρτισης πιθανώς να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα.
- Για τις τιμές του πάχους των μοντέλων από σύνθετα υλικά που εξετάζουμε, ο λυγισμός φαίνεται να είναι η κύρια αιτία αστοχίας. Χαρακτηριστικά σημειώνεται η περίπτωση του δεύτερου μοντέλου που εξετάσαμε, όπου για να επιτύχουμε συντελεστή ασφαλείας έναντι λυγισμού 1.5, θέσαμε τελικό πάχος 3.8 mm, δηλαδή 0.8 mm μεγαλύτερο από το πάχος του μοντέλου από αλουμίνιο.
- Η μείωση του βάρους που μπορεί να επιτευχθεί στα δύο μοντέλα είναι 50% και 41% αντίστοιχα. Βασικό ρόλο σε αυτό το αποτέλεσμα έχει η μεγάλη διαφορά στην πυκνότητα του σύνθετου υλικού και του αλουμινίου, $\rho = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ και $\rho = 2.72 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ αντίστοιχα.
- Το κάθε ένα από τα πολύστρωτα που εξετάσαμε παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά στην φόρτιση. Συνεπώς δεν μπορεί να βρεθεί εκ των προτέρων η στρώση που θα αστοχήσει πρώτη σε κάθε πολύστρωτο χωρίς την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.
- Από την ανάλυση όλων των διαφορετικών πολύστρωτων που εξετάσαμε προέκυψε ότι τα πολύστρωτα με στρώσεις από πλεκτό ύφασμα παρουσιάζουν σημαντικά καλύτερη συμπεριφορά στην συγκεκριμένη φόρτιση από τα πολύστρωτα με στρώσεις από μονοδιευθυντικές ίνες. Η διαφορά αυτή εξηγείται μέσω των αντοχών Y_t των δύο στρώσεων όπου η στρώση με πλεκτό ύφασμα παρουσιάζει 12 φορές μεγαλύτερη αντοχή από την στρώση με μονοδιευθυντικές ίνες, $Y_t = 600 \text{ MPa}$ και $Y_t = 50 \text{ MPa}$ αντίστοιχα.
- Τα κρίσιμα σημεία όσον αφορά την αντοχή του μοντέλου φαίνεται να είναι οι περιοχές γύρω από τα σημεία ορισμού των συνοριακών συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα τα κρίσιμα σημεία βρίσκονται στα άκρα του μοντέλου και στην περιφέρεια των οπών στις περιοχές αυτές.
- Για το πρώτο μοντέλο ειδικότερα παρουσιάστηκε μία περιοχή δημιουργίας μεγάλων τάσεων, στην ουσία των μέγιστων τάσεων που δημιουργούνται στο μοντέλο, σε ένα καμπύλο τμήμα στο εσωτερικό περίγραμμα του μοντέλου. Η συμπεριφορά του

μοντέλου βελτιώθηκε αισθητά έπειτα από μία μικρή αλλαγή στην γεωμετρία του μοντέλου στην περιοχή αυτή. Παρ'όλα αυτά οι μέγιστες τάσεις παραμένουν στην συγκεκριμένη περιοχή. Αυτό θα μπορούσε να ερμηνευθεί ως λανθασμένη αρχική σχεδίαση του μοντέλου από τους σχεδιαστές του είτε ως λανθασμένος ορισμός, από την μεριά μας, των φορτίσεων. Η έλλειψη όμως δεδομένων σχετικά με τις πραγματικές φορτίσεις στο μοντέλο δεν μας επιτρέπει να βγάλουμε σαφή συμπεράσματα.

Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Με βάση τα όσα προέκυψαν από την εργασία αυτή προτείνουμε για περαιτέρω μελέτη να:

- Εξεταστούν επιπλέον πολύστρωτα με διαφορετικούς συνδυασμούς στρώσεων και πολύστρωτα με συνδυασμό στρώσεων από πλεκτό ύφασμα και μονοδιευθυντικές ίνες.
- Να κατασκευαστούν τα μοντέλα και να γίνουν οι αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές ώστε να εξεταστεί η συνάφεια των αποτελεσμάτων της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με τα πειραματικά αποτελέσματα.
- Με βάση την γραμμική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, να γίνει μία πιο εξειδικευμένη μοντελοποίηση σταδιακής θραύσης (Progressive damage modelling) για να μελετηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου έπειτα από την αστοχία της πρώτης στρώσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

-Καρουσάτου Γεωργία (2014)- Σχεδιασμός, μελέτη και κατασκευή αεροδυναμικού τιμονιού από ανθρακονήματα για ποδήλατο δρόμου Μεταπτυχιακή εργασία ΕΜΠ Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «Συστήματα Αυτοματισμού».

-Τσούβαλης Ν. (1998). Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά, Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.

-Agarwal, B.D. and Broutman, L.J. (1990), Analysis and Performance of Fiber Composites 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.

-Ansys Release 15.0 - Ansys Mechanical APDL Element Reference

-Ansys Release 15.0 - Ansys Mechanical APDL Modeling and Meshing Guide

-Ansys Release 15.0 - Ansys Composite PrePost User's Guide

-Barbero, E. J. (2013). *Finite Element Analysis of Composite Materials Using ANSYS*.

-Rutgerson Sail Hardware Catalog V.6 (<https://www.rutgerson.se>)

Διαδικτυακοί σύνδεσμοι

<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8155>

<https://caesai.com/blog/how-do-i-know-if-my-mesh-good-enough>

<https://www.compositesworld.com/articles/carbon-composites-move-beyond-racing-yachts-into-commercial-and-military-marine-applications>

<https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/ANSYS+Learning+Modules>

<https://www.fose1.plymouth.ac.uk/sme/composites/marine.htm>

<http://www.kockums.se/News/photostock/photosurface.html>