

ΑΝΔΡΕΑΣ ΝΑΚΟΣ

ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Τομέας: Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου

Επιβλέπων: Κουλοχέρης Δημήτριος, Αναπληρωτής Καθηγητής
ΕΜΠ

Αθήνα 2022

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της Διπλωματικής Εργασίας θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Κουλοχέρη, που παρείχε την καθοδήγησή του αλλά και που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Κλειώ Βόσου, η οποία με την αμέριστη συνδρομή της και τη διαρκή βοήθειά της κατέστησε εφικτή την επιτυχή ολοκλήρωση της συγκεκριμένης Διπλωματικής Εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες και την ευγνωμοσύνη μου στην αντιπροσωπεία της Toyota E. Γιαννίτσας ΑΒΕΕ, η οποία μου επέτρεψε να λάβω μετρήσεις σε εξαρτήματα αυτοκινήτων που ήταν απαραίτητα για την υλοποίηση της Διπλωματικής Εργασίας μου.

Τέλος, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω την οικογένεια μου, η οποία με την υπομονή της και την στήριξη που έδειχνε, μου έδινε δύναμη τόσο κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής μου Εργασίας όσο και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ανδρέας Νάκος

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περιεχόμενα.....	5
Περίληψη	7
Abstract	8
Συνομεύσεις – Αρκτικόλεξα	9
1. Εισαγωγή	10
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	11
2.1 Ιστορική αναδρομή.....	11
2.2 Χρησιμότητα αναρτήσεων	12
2.3 Είδη αναρτήσεων.....	13
2.3.1 Μη ανεξάρτητες αναρτήσεις.....	13
2.3.1.1 Φυλλοειδής ανάρτηση (Hotchkiss)	14
2.3.1.2 Τεσσάρων συνδέσμων (Four Link)	14
2.3.1.3 De Dion	15
2.3.2 Ανεξάρτητες αναρτήσεις	15
2.3.2.1 Ταλαντευόμενος άξονας (Swing axle suspension)	16
2.3.2.2 Ανάρτηση διπλών ψαλιδιών (Short-Long arm suspension)	17
2.3.2.3 Ανάρτηση με γόνατα MacPherson (MacPherson Strut)	17
2.3.2.4 Ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων (Multilink Suspension)	18
2.3.2.5 Υστερούντες βραχίονες (Trailing arm)	19
2.4 Σύγκριση μεταξύ αναρτήσεων με ψαλίδια	19
2.5 Πεπερασμένα Στοιχεία	20
2.5.1 Standard Mesh.....	21
2.5.2 Curvature-based Mesh	22
2.5.3 Blended Curvature-based Mesh	22
2.6 Θεωρητικό υπόβαθρο τοπολογικής βελτιστοποίησης	23
2.6.1 Αντικειμενική Συνάρτηση και περιορισμοί	25
2.7 Μελέτη και Βελτιστοποίηση ψαλιδιού MacPherson	26
3. Τοπολογική βελτιστοποίηση συνδέσμου ανάρτησης.....	27
3.1 Γεωμετρικά Μοντέλα.....	27
3.1.1 Πραγματικό μοντέλο (M1).....	27
3.1.2 Μοντέλο Περιγράμματος (M2)	29
3.2 Μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων.....	31
3.2.1 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων πραγματικού μοντέλου (ΠΣ1)	31
3.2.2 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων μοντέλου περιγράμματος (ΠΣ2)...	33
3.3 Ιδιότητες υλικών	35
3.4 Συνθήκες φόρτισης και οριακές συνθήκες	37
3.4.1 Συνθήκες φόρτισης.....	38
3.4.2 Στηρίξεις.....	40

3.5	Ορισμός ανάλυσης τοπολογικής βελτιστοποίησης	41
4.	Αποτελέσματα αναλύσεων	42
4.1	Στατική Ανάλυση ΠΣ1	42
4.1.1	Κράμα Αλουμινίου 7075-T6	42
4.1.2	Χάλυβας AISI 1045.....	46
4.1.3	Χάλυβας ASTM A36	51
4.2	Στατική Ανάλυση και Τοπολογική Βελτιστοποίηση ΠΣ2	59
4.2.1	Κράμα Αλουμινίου 7075-T6	59
4.2.2	Χάλυβας AISI 1045.....	78
4.2.3	Χάλυβας ASTM A36	96
5.	Σχεδιασμός νέων γεωμετρικών μοντέλων βραχιόνων ελέγχου και μηχανική ανάλυση αυτών.....	114
5.1	Κράμα Αλουμινίου 7075-T6	114
5.2	Χάλυβας AISI 1045.....	121
5.3	Χάλυβας ASTM A36	127
6.	Σύγκριση αποτελεσμάτων διαφορετικών μοντέλων	133
7.	Συμπεράσματα και πιθανές επεκτάσεις έρευνας.....	139
8.	Κατάλογος Πινάκων.....	141
9.	Κατάλογος Σχημάτων	142
10.	Κατάλογος Εικόνων	145
11.	Κατάλογος Αναφορών	146

Περίληψη

Ένα από τα πιο σημαντικά συστήματα στα οχήματα είναι το σύστημα ανάρτησης, το οποίο είναι υπεύθυνο για την άνεση του οδηγού και των επιβατών, το κράτημα και τον χειρισμό στον δρόμο. Ένα κρίσιμο εξάρτημα ενός συστήματος παθητικής ανάρτησης επιβατικού αυτοκινήτου είναι ο βραχίονας ελέγχου ή αλλιώς ψαλίδι. Η κύρια λειτουργία του είναι να παρέχει σύνδεση μεταξύ του αμαξώματος του οχήματος και των τροχών. Σε αυτήν τη Διπλωματική Εργασία, ο βραχίονας ελέγχου που μελετήθηκε είναι μέρος μιας ανάρτησης γόνατου MacPherson και οι διαστάσεις του αντιστοιχούν σε μια μπροστινή δεξιά ανάρτηση ενός οχήματος SUV. Δύο γεωμετρικά μοντέλα του βραχίονα ελέγχου αναπτύχθηκαν στο λογισμικό Solidworks® CAD-CAE, ένα γεωμετρικά ακριβές (με τις πραγματικές διαστάσεις) και ένα με τις διαστάσεις περιγράμματος του βραχίονα ελέγχου. Στη συνέχεια, κατασκευάστηκε το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του πρώτου και πραγματοποιήθηκε η μηχανική του ανάλυση σε τυπικές συνθήκες φόρτισης προκειμένου να προσδιοριστεί η κατανομή της παραμόρφωσης και της τάσης σε αυτό. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε ανάλυση τοπολογικής βελτιστοποίησης στο δεύτερο μοντέλο προκειμένου να παραχθούν εναλλακτικοί σχεδιασμοί για τον βραχίονα ελέγχου. Οι παραπάνω αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικά υλικά κατασκευής του βραχίονα ελέγχου. Τελικά, ο πραγματικός και οι εναλλακτικοί σχεδιασμοί του βραχίονα ελέγχου συγκρίθηκαν ως προς το βάρος και την ακεραιότητα της δομής τους σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και υλικά ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη διαδικασία βελτιστοποίησης και τον σχεδιασμό.

Λέξεις κλειδιά: Τοπολογική βελτιστοποίηση, Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, Βραχίονας ελέγχου, Ανάρτηση MacPherson, Παθητικές αναρτήσεις

Abstract

One of the most important systems in ground vehicles is the suspension system, which is responsible for the ride comfort, the road holding and handling. A crucial part of a passenger car passive suspension system is the control arm or wishbone arm or A-arm. Its main function is to provide a link between the body of the vehicle and the wheels. In this thesis, the studied control arm is a part of a MacPherson strut suspension and its dimensions correspond to a front right suspension of a SUV vehicle. Two geometrical models of the control arm were developed in Solidworks® CAD-CAE Software, one with the measured dimensions and one with the outline dimensions of the control arm. A finite element model of the first one was built, using typical loading conditions and different materials, in order to determine the deformation and the stress contours. Then a topology optimization analysis was carried out to the second one in order to obtain new designs for the control arm, respectively for each material of their construction. The FE results of the existing control arms and the optimized ones were compared in terms of weight and structural integrity in different loading conditions and materials leading to conclusions regarding the optimization procedure.

Keywords: Topology optimization, Finite element analysis, Control arm, MacPherson suspension, Passive suspensions

Συνομεύσεις – Αρκτικόλεξα

Μ.Ε.Κ. = Μηχανές Εσωτερικής Καύσης

ΠΣ = Πεπερασμένα Στοιχεία

κ.α. = και άλλοι

ΒΕ = Βαθμοί Ελευθερίας

ΣΦ = Σενάριο Φόρτισης

Μ1 = Μοντέλο πραγματικού ψαλιδιού

Μ2 = Μοντέλο περιγράμματος ψαλιδιού

Μ3 = Βελτιστοποιημένο μοντέλο από κράμα αλουμινίου 7075-T6

Μ4 = Βελτιστοποιημένο μοντέλο από χάλυβα AISI 1045

Μ5 = Βελτιστοποιημένο μοντέλο από χάλυβα ASTM A36

TB = Τοπολογική Βελτιστοποίηση

FE = Finite Elements

CAD = Computer Aided Design

CAE = Computer Aided Engineering

AR = Aspect Ratio

W = Weight

1. Εισαγωγή

Η συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία έχει ως βασικό αντικείμενο τη μελέτη και την τοπολογική βελτιστοποίηση ενός βραχίονα ελέγχου (ψαλιδιού), μορφής L, ανάρτησης τύπου MacPherson. Αρχικά, δημιουργείται το θεωρητικό υπόβαθρο όσων αφορά τις αναρτήσεις και την τοπολογική βελτιστοποίηση. Στη συνέχεια μετρήθηκαν οι βασικές διαστάσεις ψαλιδιού από ανάρτηση που βρίσκεται σε σύγχρονο SUV έτσι ώστε να δημιουργηθεί μοντέλο στο λογισμικό Solidworks® CAD-CAE. Πραγματοποιήθηκαν στατικές αναλύσεις υπό συγκεκριμένες φορτίσεις στο παραπάνω μοντέλο και ταυτόχρονα δημιουργήθηκε ένα νέο μοντέλο χρησιμοποιώντας το περίγραμμα του πραγματικού ψαλιδιού. Το τελευταίο χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την πραγματοποίηση τοπολογικής βελτιστοποίησης με βάση διαφορετικά σενάρια φόρτισης και διαφορετικά υλικά κατασκευής. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων σχεδιάζονται νέα ψαλίδια, τα οποία υποβάλλονται στις ίδιες καταπονήσεις με το πραγματικό μοντέλο. Τέλος γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων έτσι ώστε να γίνουν αντιληπτές οι διαφορές που προκύπτουν από τα διαφορετικά σχέδια και υλικά.

Ροή Διπλωματικής Εργασίας

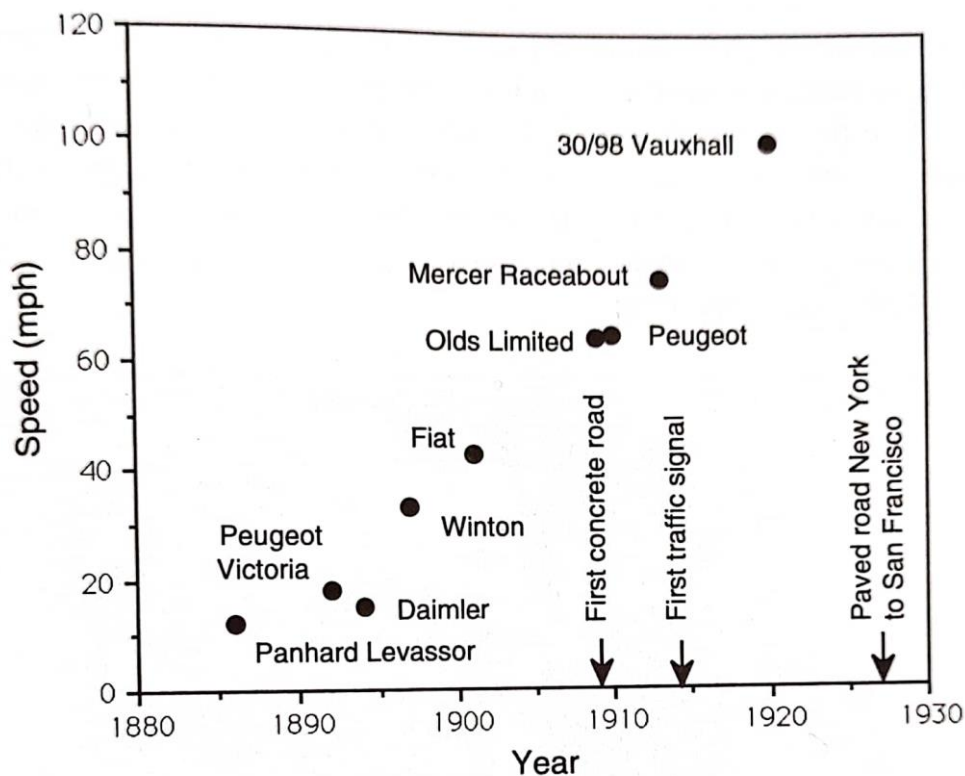
Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βασική δομή και η οργάνωση της συγκεκριμένης Διπλωματικής Εργασίας. Στο επόμενο θα κεφάλαιο παρατίθεται μια ιστορική αναδρομή και ορισμένες βασικές πληροφορίες για τις υπάρχουσες αναρτήσεις των οχημάτων ενώ συγχρόνως γίνεται αναφορά στις ήδη πραγματοποιημένες μελέτες στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της τοπολογικής βελτιστοποίησης αλλά και ο ορισμός της στο λογισμικό. Επίσης ορίζονται τα χαρακτηριστικά των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν. Στο 4^ο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα (α) των στατικών αναλύσεων του γεωμετρικά ακριβούς μοντέλου και (β) των τοπολογικών βελτιστοποιήσεων του δεύτερου μοντέλου, για διαφορετικά υλικά. Στο επόμενο κεφάλαιο χρησιμοποιώντας τα βελτιστοποιημένα μοντέλα, δημιουργούνται νέα μοντέλα, τα οποία δοκιμάζονται σε στατικές αναλύσεις και παρατίθενται τα αποτελέσματά τους. Έπειτα γίνεται σύγκριση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων των μοντέλων, όσον αφορά τις διαφορές που έχουν σε κάθε σενάριο φόρτισης, υλικό, βάρος και κυρίως τον σχεδιασμό τους. Στο 7^ο και τελευταίο κεφαλαίο γίνεται αναφορά σε μελλοντικές μελέτες και στο ενδεχόμενο δημιουργίας μοντέλου με χρήση 3D εκτυπωτή αλλά και στις διαφοροποιήσεις που φέρει η συγκεκριμένη διαδικασία στον σχεδιασμό.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Ιστορική αναδρομή

Οι πρώτες αναρτήσεις παρουσιάστηκαν τον 19^ο αιώνα σε άμαξες, οι οποίες τότε σύρονταν από άλογα. Οι συγκεκριμένες είναι γνωστές ως φυλλοειδή ελατήρια (leaf springs), καθώς αποτελούνταν από πολλαπλές στρώσεις φύλλων σιδήρου ή ακόμα και από ξύλο. Ωστόσο υπάρχουν αναφορές ότι τέτοιου είδους αναρτήσεις χρησιμοποιούνταν από τους αρχαίους Αιγύπτιους μηχανικούς στις πολεμικές μηχανές τους π.χ. καταπέλτες [1].

Όμως στις πρώτες δεκαετίες του 1900 η κινητήρια δύναμη έπαψε να προέρχεται από τα άλογα και στη θέση τους ήρθαν οι μηχανές εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.). Τότε οι ταχύτητες των αυτοκινήτων αυξήθηκαν ραγδαία, ενώ οι ασφαλτοστρωμένοι δρόμοι ήταν λίγοι (Σχήμα 2.1). Έτσι, κατέστη επιτακτική ανάγκη η βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των οχημάτων και επομένως η εξέλιξη των αναρτήσεων, ώστε η οδήγηση, η ασφάλεια και η άνεση των αυτοκινήτων να καλυτερεύσουν [2].



Σχήμα 2.1: Ταχύτητες παραγόμενων αυτοκινήτων [2].

Μια από τις πρώτες αυτοκινητοβιομηχανίες που έφεραν εξελίξεις στον τομέα των αναρτήσεων ήταν η γαλλική Mors, η οποία το 1902 πρόσθεσε στα αυτοκίνητα της πνευματικά αμορτισέρ (shock absorbers).

Στη συνέχεια, το 1920 η Leyland Motors χρησιμοποίησε αντιστρεπτική ράβδο (torsion bar) στις αναρτήσεις της.

Το 1922 η Lancia Lambda καινοτόμησε και εισήγαγε την ανεξάρτητη εμπρόσθια ανάρτηση, η οποία το 1932 έγινε ευρέως διαδεδομένη στα περισσότερα οχήματα.

Το 1932 στο μοντέλο Triumph Mayflower παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το συναρμολόγημα ελατηρίου αποσβεστήρα.

Μία από τις μεγαλύτερες αυτοκινητοβιομηχανίες τότε φέρνει στο προσκήνιο την ανεξάρτητη μπροστινή ανάρτηση τύπου McPherson το 1950 στο μοντέλο της MK 1 Consul.

Το 1959 παρουσιάζεται η ανεξάρτητη λαστιχένια ανάρτηση ενώ το 1962 γίνεται παρουσίαση της υδροελαστικής (hydroelastic) ανάρτησης από τον μηχανικό A. Moulton.

Σήμερα, τα περισσότερα αυτοκίνητα είναι εξοπλισμένα με ανεξάρτητες αναρτήσεις τόσο στους εμπρός όσο και στους πίσω τροχούς [3].

2.2 Χρησιμότητα αναρτήσεων

Η ανάρτηση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα υποσυστήματα του αυτοκινήτου, καθώς διαδραματίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη δυναμική συμπεριφορά του. Ειδικότερα, συνιστά τον σύνδεσμο μεταξύ των τροχών με το υπόλοιπο όχημα και συνεισφέρει στην ομαλή οδήγηση και στην άνεση των επιβατών [4]. Οι κυριότερες λειτουργίες του συστήματος ανάρτησης είναι:

- Να προσφέρει κατακόρυφη προσαρμοστικότητα, έτσι ώστε το σασί του οχήματος να παραμένει απομονωμένο από τις ανωμαλίες του οδοστρώματος
- Σύνδεση τροχών με υπόλοιπο σασί οχήματος και υποστήριξη βάρους του
- Απορρόφηση δυνάμεων και ροπών ελέγχου που προέρχονται από τα ελαστικά, όπως είναι οι διαμήκεις δυνάμεις λόγω επιτάχυνσης και φρεναρίσματος, οι πλευρικές δυνάμεις λόγω στροφής και οι ροπές από έντονα φρεναρίσματα και επιταχύνσεις
- Διατήρηση των τροχών στην κατάλληλη θέση οδήγησης αλλά και γωνία camber
- Διατήρηση ευθυγράμμισης τροχών και επαφής τους με το έδαφος
- Αντίσταση στην τάση για περιστροφή (roll) του σασί [2].

Για να μπορέσει κάθε είδος ανάρτησης να έχει τα παραπάνω λειτουργικά χαρακτηριστικά αποτελείται από διαφορετικά μέλη, που το καθένα διαδραματίζει έναν διαφορετικό ρόλο. Τα συστήματα ανάρτησης συνίστανται από ελατήρια (springs), αποσβεστήρες (shock

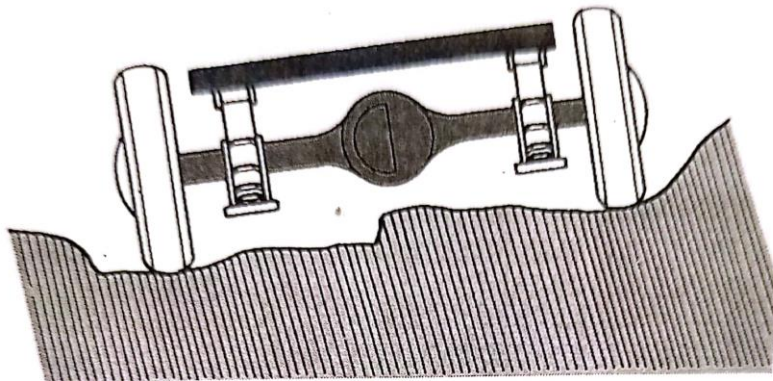
absorbers), αμορτισέρ (τηλεσκοπικό υποσύλωμα) (struts), ψαλίδια (control arms), ακραζόνιο (spindle or axle) και τα ελαστικά παρεμβύσματα (bushings) [5]. Ωστόσο στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας θα δοθεί έμφαση στα ψαλίδια των αναρτήσεων.

2.3 Είδη αναρτήσεων

Σήμερα, έχει αναπτυχθεί πλήθος ειδών αναρτήσεων, ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα να γίνει κατηγοριοποίησή τους. Ένας πρώτος γενικός διαχωρισμός μπορεί να γίνει με βάση την ανεξαρτησία που προσφέρουν στις κινήσεις του ενός τροχού σε σχέση με τον άλλον. Έτσι, γίνεται ο διαχωρισμός στις παρακάτω δύο κατηγορίες.

2.3.1 Μη ανεξάρτητες αναρτήσεις

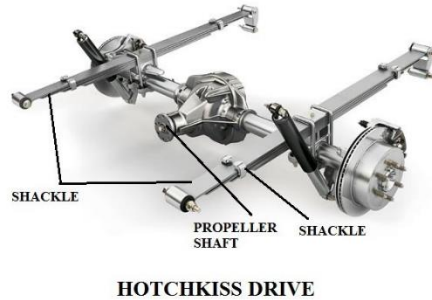
Το συγκεκριμένο είδος αναρτήσεων αποτελείται από έναν ενιαίο άξονα που συνδέει τους δύο μπροστινούς ή πίσω τροχούς. Εξαιτίας του ενιαίου άξονα, όταν ο ένας τροχός συναντήσει κάποια ανωμαλία στο οδόστρωμα τότε και ο αντιδιαμετρικός του θα αναγκαστεί να αλλάξει θέση και πιθανότατα να χάσει πρόσφυση (Σχήμα 2.2). Γι' αυτό το λόγο χαρακτηρίζονται ως μη ανεξάρτητες αναρτήσεις. Επίσης, ο συγκεκριμένος τύπος αναρτήσεων έχει αυξημένο βάρος και εξαιτίας αυτού αυξάνει την αναρτημένη μάζα του οχήματος, που δεν είναι επιθυμητό. Αυτές οι αναρτήσεις με τον ενιαίο άκαμπτο άξονα χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε φορτηγά αλλά και μερικές φορές στον πίσω άξονα των εμπροσθιοκίνητων αυτοκινήτων [5]. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαφορετικά είδη των μη ανεξάρτητων αναρτήσεων.



Σχήμα 2.2: Μη ανεξάρτητη ανάρτηση [5].

2.3.1.1 Φυλλοειδής ανάρτηση (Hotchkiss)

Η συγκεκριμένη ανάρτηση αποτελεί μια από τις συνηθέστερες μη ανεξάρτητες και χρησιμοποιούταν παλαιότερα στον πίσω άξονα αλλά και σήμερα έχει επικρατήσει η χρήση της στα φορτηγά. Αποτελείται από έναν ενιαίο άξονα και τα άκρα του στηρίζονται στις φυλλοειδείς αναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Τέλος, αυτό το είδος αποτελεί μια από τις πιο απλές και φτηνές αναρτήσεις.



Σχήμα 2.3: Φυλλοειδής ανάρτηση [6].

2.3.1.2 Τεσσάρων συνδέσμων (Four Link)

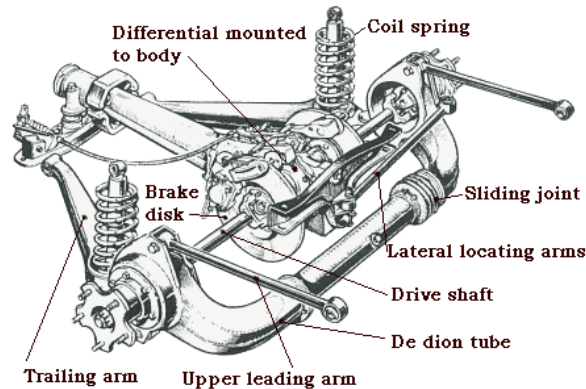
Ο συγκεκριμένος τύπος ανάρτησης αποτελεί εξέλιξη της φυλλοειδούς ανάρτησης και χρησιμοποιείται κυρίως στα μεγαλύτερα επιβατηγά οχήματα με ενιαίο πίσω άξονα κίνησης (rear-drive axle). Αυτός ο τύπος ανάρτησης έχει ελικοειδή ελατήρια που το ένα άκρο του είναι στο μπράτσο που συγκρατεί τον άξονα και το άλλο άκρο συνδέεται με το σασί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Παρόλο που προσφέρει καλύτερη οδήγηση, ο γεωμετρικός σχεδιασμός της είναι πιο πολύπλοκος και πιο ακριβός σε σχέση με την φυλλοειδή ανάρτηση.



Σχήμα 2.4: Ανάρτηση 4 συνδέσμων [7].

2.3.1.3 De Dion

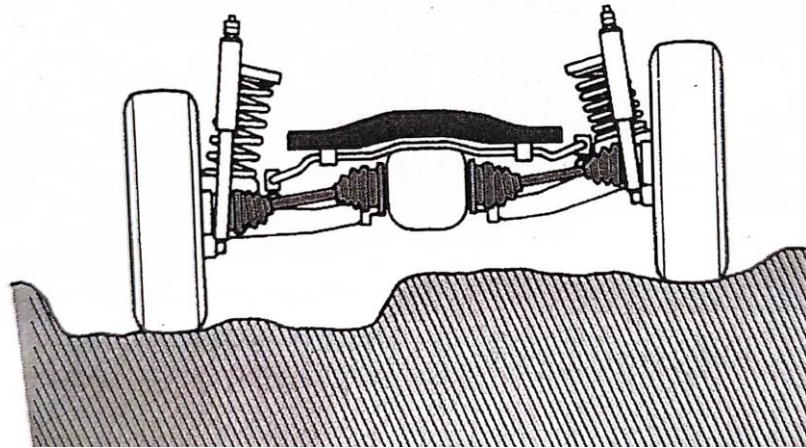
Η χρήση του συγκεκριμένου τύπου ανάρτησης είναι πιο σπάνια και αποτελεί έναν συνδυασμό ανεξάρτητης και μη ανεξάρτητης ανάρτησης. Αυτό συμβαίνει καθώς οι δύο τροχοί συνδέονται μεταξύ τους με ένα άκαμπτο άξονα αλλά το διαφορικό έχει αποσπαστεί αυτόν και στηρίζεται πλέον στο σασί. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται η μη αναρτημένη μάζα αλλά υπάρχει το εξής μειονέκτημα, ο άκαμπτος άξονας έχει ένα σημείο που ολισθαίνει, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα [2].



Σχήμα 2.5: Ανάρτηση De Dion [8].

2.3.2 Ανεξάρτητες αναρτήσεις

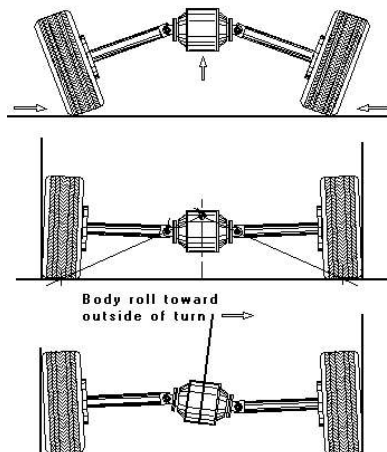
Στην περίπτωση των ανεξάρτητων αναρτήσεων, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σήμερα, ο κάθε τροχός συνδέεται με διαφορετικό ακραξόνιο (spindle) και ψαλίδι σε σχέση με τον απέναντί του (Σχήμα 2.6). Έτσι, ο κάθε τροχός συμπεριφέρεται ανάλογα με τις ανωμαλίες του δρόμου που συναντά χωρίς να επηρεάζεται από τις κινήσεις του αντιδιαμετρικού του. Ωστόσο τα συγκεκριμένα συστήματα είναι πιο πολύπλοκα και αποτελούνται από περισσότερα εξαρτήματα. Οι ανεξάρτητες αναρτήσεις βρίσκονται σχεδόν σε όλα τα επιβατικά αυτοκίνητα στον μπροστινό άξονα, σε μερικά ημιφορτηγά και φορτηγά αλλά και πιο σπάνια στον πίσω άξονα οχημάτων [5].



Σχήμα 2.6: Ανεξάρτητη ανάρτηση [5].

2.3.2.1 Ταλαντευόμενος άξονας (Swing axle suspension)

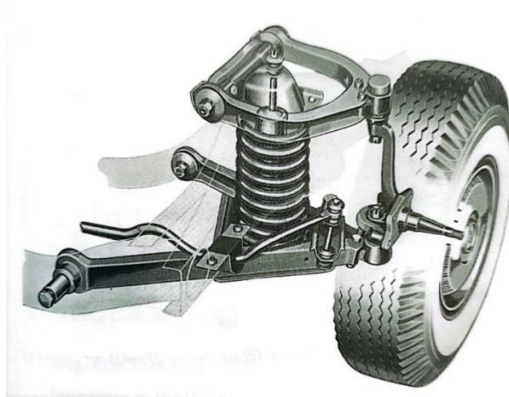
Η συγκεκριμένη αποτελεί μία από τις απλούστερες ανεξάρτητες αναρτήσεις, καθώς συνίσταται από δύο άξονες που περιστρέφονται γύρω από μία κεντρική περιστροφική ένωση. Το άκρο του ημιάξονα είναι σταθερά στερεωμένο στον τροχό κι έτσι όταν αυτός συναντά ανωμαλία διαγράφει μια τροχιά τόξου. Αυτό όμως έχει το μειονέκτημα ότι μπορεί να προκαλέσει τη διαμήκη μετατόπιση του τροχού ως προς τον άξονα σε περίπτωση μεγάλης ανωμαλίας του οδοστρώματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Το συγκεκριμένο είδος ανάρτησης συναντάται μερικές φορές στον πίσω άξονα των οχημάτων, στα τετρακίνητα οχήματα και στα φορτηγά [5].



Σχήμα 2.7: Ανάρτηση swing axle [9].

2.3.2.2 Ανάρτηση διπλών ψαλιδιών (Short-Long arm suspension)

Τα περισσότερα οπισθοκίνητα αυτοκίνητα έχουν στον μπροστινό άξονα τη συγκεκριμένη ανάρτηση. Αυτή αποτελείται από δύο άνισου μήκους ψαλιδία ή A-arms (US) ή wishbones (Britain) και έχουν ανάμεσα τους το συναρμολόγημα ελατηρίου αποσβεστήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Τα ψαλιδία δεν είναι παράλληλα μεταξύ τους, καθώς με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται η αλλαγή της γωνίας Camber κατά την κατακόρυφη μετατόπιση του τροχού. Επίσης, το κάτω ψαλιδί εξυπηρετεί κατά κύριο λόγο τη διατήρηση της απόστασης (track width) μεταξύ των τροχών ενώ ο κύριος σκοπός του επάνω είναι η ρύθμιση της γωνίας camber. Αυτός ο άνισος και μη παράλληλος σχεδιασμός των δύο ψαλιδιών αποτρέπει τον τροχό να μετατοπιστεί πλευρικά, όταν αυτός περάσει πάνω από εξόγκωμα του οδοστρώματος, κι έτσι να τριφτεί στο οδόστρωμα (scrub) [5].



Σχήμα 2.8: Ανάρτηση διπλού ψαλιδιού [2].

2.3.2.3 Ανάρτηση με γόνατα MacPherson (MacPherson Strut)

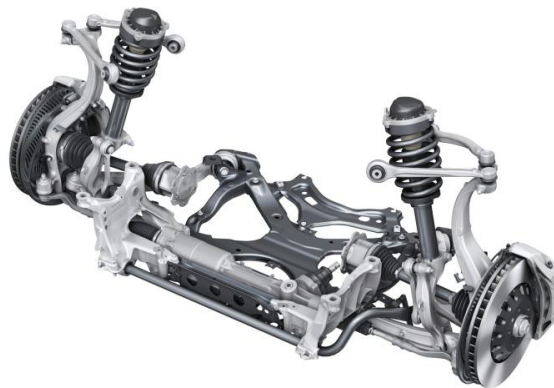
Η ανάρτηση αυτή σχεδιάστηκε από τον ομώνυμο Earle S. MacPherson και έχει παρόμοια γεωμετρία με την ανάρτηση διπλών ψαλιδιών με βασική διαφορά όμως ότι το επάνω ψαλιδί έχει αντικατασταθεί από μία διάταξη με τηλεσκοπικό υποσύλωμα (strut). Πάνω σ' αυτό είναι τοποθετημένο το ελατήριο με τον αποσβεστήρα ενώ μια παραλλαγή του είναι αυτή που το ελατήριο βρίσκεται μεταξύ του κάτω ψαλιδιού και του σασί. Η συγκεκριμένη ανάρτηση προσφέρει περισσότερο ελεύθερο χώρο, όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 2.9 αν τη συγκρίνουμε με το Σχήμα 2.8 και γι' αυτό χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στα προσθιοκίνητα οχήματα που ο κινητήρας τους βρίσκεται μπροστά [5].



Σχήμα 2.9: Ανάρτηση MacPherson [10].

2.3.2.4 Ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων (Multilink Suspension)

Η συγκεκριμένη ανάρτηση Σχήμα 2.10 είναι παρόμοια με αυτή του του διπλού ψαλιδιού με βασική διαφορά ότι το κάθε ψαλίδι έχει αντικατασταθεί από δύο βραχίονες. Έτσι, αποτελείται από 4 βραχίονες (σε κάποιες περιπτώσεις 5) που ενώνονται στην οδηγητική άρθρωση (steering knuckle), η οποία στην περίπτωση αυτή είναι μακρύτερη, καθώς το συναρμολόγημα ελατηρίου-αποσβεστήρα βρίσκεται τοποθετημένο επάνω σε υποστύλωμα (strut). Με αυτό τον τρόπο προσφέρεται περισσότερος χώρος, όπως φαίνεται και στην εικόνα, και γι' αυτό προτιμάται η χρήση της σε προσθιοκίνητα οχήματα [5].



Σχήμα 2.10: Ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων [11].

2.3.2.5 Υστερούντες βραχίονες (Trailing arm)

Αποτελώντας μία από τις απλούστερες και οικονομικότερες ανεξάρτητες αναρτήσεις χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο ως ανάρτηση των πίσω τροχών των σύγχρονων οχημάτων. Αυτή αντί για ψαλίδι έχει βραχίονα (Σχήμα 2.11), ο οποίος ενώνεται με το σασί και με το ακραζόνιο με σφαιροειδής αρθρώσεις [2].



Σχήμα 2.11: Ανάρτηση υστερόντος βραχίονα [12].

2.4 Σύγκριση μεταξύ αναρτήσεων με ψαλίδια

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας μας ενδιαφέρει η μελέτη του ψαλιδιού της ανάρτησης. Γ' αυτόν τον λόγο ακολουθεί μια συγκριτική ανάλυση των αναρτήσεων που έχουν, δηλαδή των αναρτήσεων διπλών ψαλιδιών (S-L A), πολλαπλών συνδέσμων (Multilink) και αυτών με γόνατα MacPherson. Δεδομένου ότι οι πρώτες δύο μοιάζουν μεταξύ τους ειδικά όσον αφορά στα ψαλίδια τους (μορφή, λειτουργία) η σύγκριση θα γίνει μεταξύ της ανάρτησης διπλών ψαλιδιών και αυτών με γόνατα MacPherson.

Οι συγκεκριμένοι τύποι ανάρτησης αποτελούν τις δημοφιλέστερες αναρτήσεις που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα οχήματα και όπως αναφέρει ο S. Khan κ.α. οι διπλών ψαλιδιών χρησιμοποιούνται κυρίως στις πίσω αναρτήσεις ενώ οι MacPherson στις μπροστά [13]. Η βασικότερη διαφορά των δύο τύπων ανάρτησης είναι ότι ο πρώτος αποτελείται από δύο ψαλίδια ενώ ο δεύτερος από ένα. Το βασικότερο πλεονέκτημα της ανάρτησης διπλού ψαλιδιού αποτελεί ο καλύτερος χειρισμός του οχήματος εξαιτίας της μεγαλύτερης αρνητικής γωνίας Camber που δημιουργείται από την κατακόρυφη μετατόπιση των ψαλιδιών. Επίσης, είναι πιο στιβαρές κατασκευές και μπορούν να δεχτούν μεγαλύτερα φορτία, ωστόσο είναι πιο πολύπλοκες στον σχεδιασμό τους και πιο ακριβές [13].

Η ανάρτηση γονάτου MacPherson έχει πιο απλή κατασκευή και είναι φθηνότερή σε σχέση με την ανάρτηση διπλού ψαλιδιού. επίσης, λόγω του μονού ψαλιδιού, η ανάρτηση γονάτου

MacPherson προσφέρει περισσότερο χώρο, πράγμα που αποτελεί πλεονέκτημα για τα προσθιοκίνητα οχήματα. Ωστόσο η μεταβολή που προσφέρουν στη γωνία Camber είναι μικρή και επομένως μειώνεται η επαφή με το οδόστρωμα σε περίπτωση στροφής κι έτσι ο καλός χειρισμός του οχήματος [5].

Τέλος, στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι διαφορές μεταξύ των ειδών αναρτήσεων.

Πίνακας 2.1: Σύγκριση αναρτήσεων MacPherson και Διπλού ψαλιδιού

Ανάρτηση MacPherson	Ανάρτηση διπλού ψαλιδιού
1 ψαλίδι	2 ψαλίδια
Απλή κατασκευή	Σύνθετη κατασκευή
Φθηνό	Ακριβό
Περισσότερος ελεύθερος χώρος	Λιγότερος χώρος
Μικρή μεταβολή γωνίας Camber	Μεγάλη μεταβολή γωνίας Camber
Επιπλέον χαρακτηριστικά	
Ευκολότερη ρύθμιση σε περίπτωση φθορών	Αντοχή σε μεγαλύτερες φορτίσεις
Μεγαλύτερη φθορά σε τροχούς	Καλύτερος χειρισμός οχήματος
Μικρότερο βάρος	Στιβαρή κατασκευή

2.5 Πεπερασμένα Στοιχεία

Προτού οριστεί το υπόβαθρο της τοπολογικής βελτιστοποίησης, θα οριστεί το θεωρητικό υπόβαθρο των πεπερασμένων στοιχείων του λογισμικού, καθώς αποτελούν σημαντικό παράγοντα κάθε ανάλυσης.

Η δημιουργία πλέγματος στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων παίζει καθοριστικό ρόλο τόσο στις μηχανικές αναλύσεις όσο και στις αναλύσεις τοπολογικής βελτιστοποίησης. Το λογισμικό Solidworks παρέχει τη δυνατότητα για τα παρακάτω είδη πεπερασμένων στοιχείων:

- Solid Mesh: δημιουργεί τετραεδρικά τρισδιάστατα στερεά στοιχεία (tetrahedral 3D solid elements), όταν υπάρχει στερεό μοντέλο.

- Shell Mesh: δημιουργεί δισδιάστατα τριγωνικά στοιχεία κελύφους (2D triangular shell elements), όταν υπάρχει μοντέλο κελύφους.
- Beam Mesh: δημιουργεί πεπερασμένα στοιχεία γραμμής που ορίζονται από δύο ακραία σημεία και μια διατομή.
- Mixed mesh: όπου δημιουργεί διαφορετικά ήδη πεπερασμένων στοιχείων (τριδιάστατα, δισδιάστατα και μονοδιάστατα).

Βέβαια υπάρχουν κι άλλοι παράμετροι που καθορίζονται στην δημιουργία πλέγματος. Αρχικά δίνεται η δυνατότητα να ορισθεί η ποιότητα της πλεγματοποίησης στις εξής δύο περιπτώσεις:

- Πλέγμα Προ σχεδιαστικής Ποιότητας (Draft Quality Mesh), το οποίο στην περίπτωση του Solid Mesh δημιουργεί γραμμικά τετραεδρικά στοιχεία, τα οποία ορίζονται με τέσσερις γωνιακούς κόμβους που συνδέονται με έξι ακμές ενώ στην περίπτωση του Shell Mesh δημιουργεί γραμμικά τριγωνικά στοιχεία, τα οποία ορίζονται με τρεις γωνιακούς κόμβους που συνδέονται με τρεις ευθείες ακμές.
- Πλέγμα Υψηλής Ποιότητας (High quality mesh), το οποίο στην περίπτωση του Solid Mesh δημιουργεί παραβολικά τετραεδρικά στερεά στοιχεία, τα οποία ορίζονται από τέσσερις γωνιακούς κόμβους, έξι κόμβους στη μέση και έξι παραβολικές ακμές ενώ στην περίπτωση του Shell Mesh δημιουργεί παραβολικά τριγωνικά στοιχεία, τα οποία ορίζονται από τρεις γωνιακούς κόμβους, τρεις κόμβους στη μέση και τρεις παραβολικές ακμές.

Ωστόσο για να πετύχουμε καλύτερα αποτελέσματα στις αναλύσεις μας και να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια, επιλέγεται η δημιουργία υψηλής ποιότητας πλέγματος.

Το λογισμικό Solidworks δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα να ορίσει τις παραμέτρους των πεπερασμένων στοιχείων.

Επίσης το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε την πυκνότητα του πλέγματος, το μέγεθος των στοιχείων αλλά και το πώς θα γίνεται η μετάβαση από το ένα στο άλλο. Έτσι οι επιλογές που δίνει αρχικά για να ορίσουμε τα πεπερασμένα στοιχεία είναι το Standard Mesh, το Curvature-based Mesh και το Blended Curvature-based Mesh. Ειδικότερα για κάθε επιλογή ισχύουν τα παρακάτω.

2.5.1 Standard Mesh

Χρησιμοποιεί το σχήμα πλέγματος Voronoi-Delaunay για τη δημιουργία πλέγματος και δίνει τη δυνατότητα να ορισθούν τα παρακάτω όσων αφορά το μέγεθος των στοιχείων.

- Global size: Ορίζει το καθολικό μέσο μέγεθος των στοιχείων.
- Tolerance: Εάν η απόσταση μεταξύ δύο κόμβων είναι μικρότερη από αυτήν την τιμή, οι κόμβοι συγχωνεύονται

- Automatic transition: Εάν επιλεγθεί το πρόγραμμα εφαρμόζει αυτόματα έλεγχο πλέγματος σε μικρά χαρακτηριστικά, τρύπες, φιλέτα και άλλες μικρές λεπτομέρειες του μοντέλου, έτσι ώστε να γίνεται μ=ομαλότερη μετάβαση μεταξύ των στοιχείων.

2.5.2 Curvature-based Mesh

Το λογισμικό δημιουργεί αυτόματα περισσότερα στοιχεία σε περιοχές με καμπυλότητα χωρίς να χρειάζεται να γίνει κάποιος αρχικός έλεγχος. Επίσης δίνει την επιλογή να ορισθούν τα παρακάτω όσων αφορά το μέγεθος των στοιχείων.

- Maximum element size: Χρησιμοποιείται για να ορισθεί το μέγεθος των στοιχείων σε περιοχές με μικρή καμπυλότητα.
- Minimum element size: Χρησιμοποιείται για να ορισθεί το μέγεθος των στοιχείων σε περιοχές με υψηλή καμπυλότητα.
- Min number of elements in a circle: Καθορίζει το μέγεθος των στοιχείων με βάση τον ελάχιστο αριθμό στοιχείων που χωράνε σε ένα υποθετικό κύκλο.
- Element size growth ratio: Καθορίζει την καθολική αναλογία αύξησης μεγέθους στοιχείου ξεκινώντας από περιοχές υψηλών καμπυλοτήτων προς όλες τις κατευθύνσεις.

2.5.3 Blended Curvature-based Mesh

Χρησιμοποιείται συνήθως όταν έχουν αποτύχει οι παραπάνω δύο επιλογές να δημιουργήσουν σωστό πλέγμα, καθώς προσαρμόζει το μέγεθος των στοιχείων στην εκάστοτε καμπυλότητα. Επίσης δίνει την επιλογή να ορισθούν τα παρακάτω όσων αφορά το μέγεθος των στοιχείων, τα οποία είναι ίδια με το Curvature-based Mesh με μία μόνο μικρή διαφορά.

- Maximum element size
- Minimum element size: Στη συγκεκριμένη επιλογή δίνεται η δυνατότητα να υπολογισθεί το ελάχιστο μέγεθος του στοιχείου με βάση το εκάστοτε μοντέλο. Αυτό το κάνει το λογισμικό συνυπολογίζοντας την ελάχιστη καμπυλότητα που υπάρχει στο μοντέλο και το ελάχιστο μέγεθος στοιχείου που έχει υπολογίσει ένας έλεγχος πλέγματος (εάν έχει πραγματοποιηθεί)
- Min number of elements in a circle
- Element size growth ratio

Τέλος στις πιο προχωρημένες επιλογές για τον ορισμό πλέγματος είναι ο ορισμός των Ιακωβιανών σημείων (**Jacobian points**), ο οποίος είναι διαθέσιμος μόνος στο Συμπαγές Πλέγμα και στην Υψηλή ποιότητα πλέγματος. Η Ιακωβιανή αναλογία (Jacobian ratio) υπολογίζει την απόκλιση των στοιχείων από ένα τέλειο στοιχείο (AR=1) και αυτά τα σημεία καθορίζουν τη συγκεκριμένη απόκλιση που θα υπάρχει. Το κριτήριο των Ιακωβιανών

στοιχείων μαζί με την αναλογία απεικόνισης (Aspect Ratio (AR)) μειώνουν το ποσοστό των αριθμητικών σφαλμάτων [20].

2.6 Θεωρητικό υπόβαθρο τοπολογικής βελτιστοποίησης

Η τοπολογική βελτιστοποίηση αποτελεί ένα εργαλείο, το οποίο χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στα πρωταρχικά στάδια του σχεδιασμού ενός εξαρτήματος. Έχει ως στόχο να προβλέψει τη βέλτιστη κατανομή του υλικού σε συγκεκριμένο σχεδιαστικό χώρο με τέτοιο τρόπο ώστε να δώσει μια στιβαρή κατασκευή με το ελάχιστο δυνατό βάρος, τηρώντας ταυτόχρονα ορισμένους περιορισμούς και προδιαγραφές [20].

Η τοπολογική βελτιστοποίηση διαχωρίζεται σε δύο θεμελιώδεις κατηγορίες:

- Βελτιστοποίηση διάταξης δικτυώματος (layout optimization)
- Γενικευμένη βελτιστοποίηση σχήματος (generalized (variable topology) shape optimization)

Στη βελτιστοποίηση διάταξης δικτυώματος υπάρχουν πλέγματα των οποίων τα κομμάτια όγκου τείνουν στο μηδέν (από μαθηματική οπτική). Η βέλτιστη μικροδομή των πλεγμάτων συνίσταται από μέλη που διασταυρώνονται μεταξύ τους και η επιρροή των διασταυρώσεων αυτών (κόμβοι) στη δύναμη, την ακαμψία ή το βάρος θεωρείται αμελητέα.

Στη γενικευμένη βελτιστοποίηση σχήματος ή αλλιώς «προηγμένη» βελτιστοποίηση σχήματος (Rozvany 1989), το κομμάτι όγκου (element) είναι μεγαλύτερο του μηδενός και γι' αυτό η διαδικασία συνίσταται από τα παρακάτω βήματα:

- προσδιορισμός των βέλτιστων μικροδομών, οι οποίες συνήθως περιλαμβάνουν κάποιες ελεύθερες μεταβλητές και
- βελτιστοποίηση της διάταξης των μικροδομών (elements), δηλαδή τον βέλτιστο προσανατολισμό και τις βέλτιστες τιμές των ελεύθερων παραμέτρων [21].

Στα σύγχρονα λογισμικά σχεδίασης και μηχανικής ανάλυσης με τη βοήθεια του Η/Υ (CAD - CAE), συχνά, υπάρχει ενσωματωμένη τοπολογική βελτιστοποίηση η οποία ανήκει στη δεύτερη κατηγορία (γενικευμένη βελτιστοποίηση σχήματος).

Η πιο γνωστή μαθηματική μέθοδος εφαρμογής της συγκεκριμένης θεωρίας είναι αυτή του Στερεού Ισοτροπικού Υλικού με μέθοδο Ποινής (Solid Isotropic Material with Penalization method (SIMP)). Η αρχική ιδέα αρχικά προτάθηκε από τον Bendsoe (1989) και η μέθοδος συστάθηκε με τη σύγχρονη μορφή της από τον Rozvany και Zhou (1992).

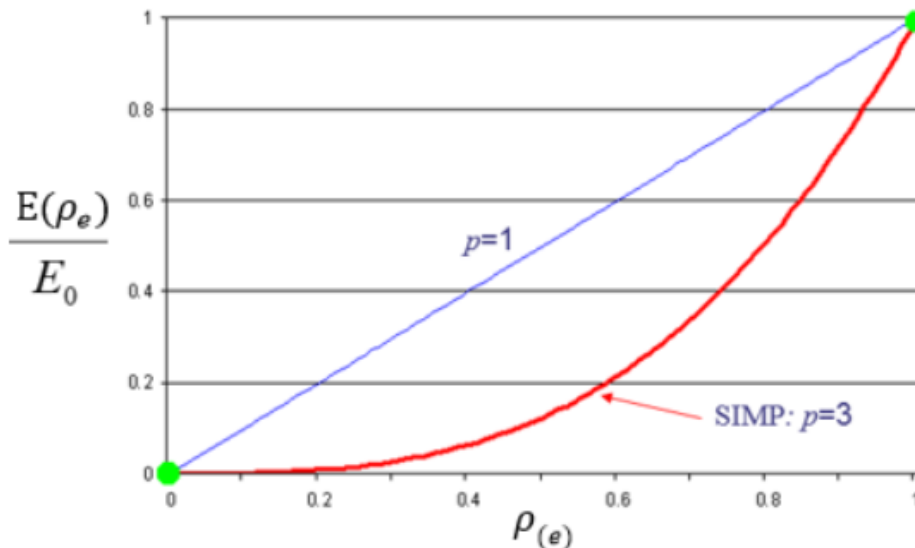
Η παραδοσιακή προσέγγιση της τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι η διακριτοποίηση ενός «τομέα» σε πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, που ονομάζονται ισοτροπικές στερεές μικροδομές (isotropic solid microstructures). Κάθε πεπερασμένο στοιχείο είναι είτε γεμάτο με υλικό είτε άδειο, ανάλογα αν απαιτείται υλικό στην περιοχή ή αν πρέπει να αφαιρεθεί. Εντός μιας σχεδιαστικής περιοχής η πυκνότητα κατανομής του υλικού (ρ) είναι διακριτοποιημένη και κάθε στοιχείο έχει μια δυαδική τιμή πυκνότητας:

$\rho(e) = 1$, όπου απαιτείται υλικό
 $\rho(e) = 0$, όπου αφαιρείται υλικό

Αργότερα, βέβαια, ορίστηκε πυκνότητα ρ , που δεν ήταν δυαδική. Κάθε στοιχείο έχει σχετική πυκνότητα που κυμαίνεται από ρ_{\min} έως 1. Αυτά τα στοιχεία ονομάζονται και πορώδη και το ρ_{\min} είναι η ελάχιστη σχετική πυκνότητα των άδειων στοιχείων, η οποία είναι μεγαλύτερη του μηδενός. Αυτού του είδους η πυκνότητα εξασφαλίζει την αριθμητική σταθερότητα της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων.

Δεδομένου ότι η σχετική πυκνότητα του υλικού μπορεί να ποικίλλει συνεχώς, το μέτρο Ελαστικότητας (συντελεστής Young) του υλικού σε κάθε στοιχείο μπορεί επίσης να ποικίλλει συνεχώς. Για κάθε στοιχείο (e) η σχέση μεταξύ του ρ_e και του συντελεστή Young E_0 υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση.

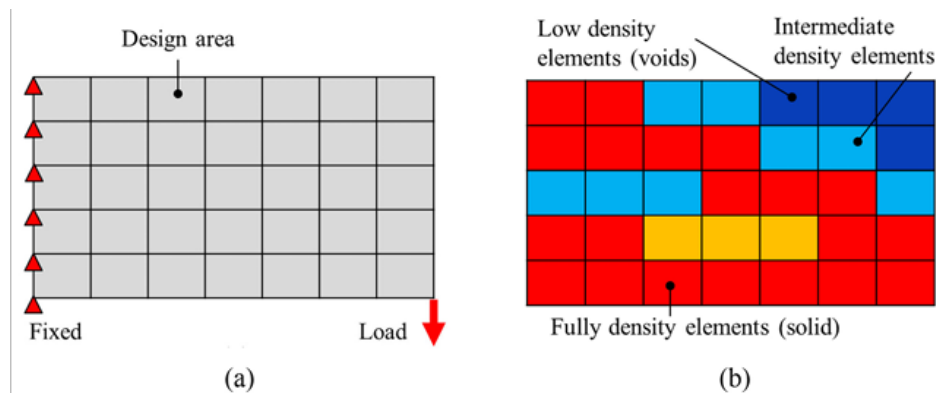
$$E(\rho_e) = \rho_e^p E_0 \quad (2.1)$$



Διάγραμμα 2.1: Γραφική απεικόνιση σχέσης 2.1 [20]

Η συντελεστής ποινής (p) μειώνει τη συνεισφορά των στοιχείων με ενδιάμεσες πυκνότητες στην συνολική ακαμψία. Η συγκεκριμένος συντελεστής οδηγεί τη λύση της βελτιστοποίηση στα στοιχεία που είτε είναι τελείως γεμάτα ($\rho_e = 1$) είτε τελείως άδεια ($\rho_e = \rho_{\min}$). Αριθμητικά πειράματα έχουν δείξει ότι $p=3$ είναι μια κατάλληλη τιμή.

Για να γίνει καλύτερα κατανοητό στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται η διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία και πώς κάποια έχουν υλικό, κάποια έχουν ενδιάμεσες τιμές πυκνότητας και κάποια είναι τελείως κενά.



Σχήμα 2.12: (α) Σχεδιαστική περιοχή και συνθήκες ανάλυσης, (β) Μέθοδος βασισμένη στις πυκνότητες [22]

Η μείωση του συντελεστή ελαστικότητας του υλικού ενός στοιχείου οδηγεί σε μείωση της ακαμψίας του στοιχείου. Σύμφωνα με τη μέθοδο SIMP, η συνολική ακαμψία διαμορφώνεται σύμφωνα με:

$$K_{SIMP(\rho)} = \sum_{e=1}^N [\rho_{min} + (1 - \rho_{min})\rho_e^p]K_e \quad (2.2)$$

όπου K_e είναι ο πίνακας ακαμψίας του στοιχείου, ρ_{min} είναι η ελάχιστη σχετική πυκνότητα, ρ_e είναι η σχετική πυκνότητα του στοιχείου, p είναι ο συντελεστής ποινής και N είναι ο αριθμός των στοιχείων στον τομέα σχεδιασμού.

2.6.1 Αντικειμενική Συνάρτηση και περιορισμοί

Μια αντικειμενική συνάρτηση η οποία απαντάτε συχνά είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής ακαμψίας μιας κατασκευής ή η ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας (compliance) της υπό μια δεδομένη ποσότητα αφαίρεσης μάζας.

Η ενδοτικότητα C (compliance) είναι ένα μέτρο της συνολικής ευκαμψίας ή μαλακότητας μιας κατασκευής και είναι το αντίστροφο της ακαμψίας. Η συνολική ενδοτικότητα ισούται με το άθροισμα των ενεργειών ελαστικότητας ή καταπόνησης του στοιχείου. Η ελαχιστοποίηση της συνολικής ενδοτικότητας C , ισοδυναμεί με τη μεγιστοποίηση της συνολικής ακαμψίας.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, επιδιώκει να επιλύσει τις πυκνότητες στοιχείων (που είναι οι μεταβλητές σχεδιασμού βελτιστοποίησης) που ελαχιστοποιούν τη συνολική συμμόρφωση της κατασκευής.

$$\min C(\{\rho\}) = \sum_{e=1}^N (\rho_e)^p (u_e)^T [K_e] [u_e] \quad (2.3)$$

όπου $[u_e]$ είναι το διάνυσμα κομβικής μετατόπισης του στοιχείου e ,

$[K_e]$ είναι η ακαμψία του στοιχείου e και το διάνυσμα $\{\rho\}$ περιέχει τις σχετικές πυκνότητες των στοιχείων ρ_e .

Κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης βελτιστοποίησης, ο περιορισμός μάζας στόχου, η συνολική ισορροπία δύναμης-ακαμψίας και οι απαιτούμενοι λειτουργικοί περιορισμοί πρέπει να ικανοποιούνται:

$$\sum_{e=1}^N \{v_e\}^T \rho_e \leq M_{target} \quad (2.4)$$

όπου v_e είναι ο όγκος του στοιχείου και M_{target} είναι ο στόχος μάζας της βελτιστοποίησης.

$$[K\{\rho\}]\{u\} = \{F\} \quad (2.5)$$

Όπου $[K\{\rho\}]$ είναι ο συνολικός πίνακας ακαμψίας που διαμορφώνεται από το διάνυσμα των σχετικών πυκνοτήτων, $\{u\}$ είναι το διάνυσμα μετατόπισης και $\{F\}$ είναι το διάνυσμα της εξωτερικής δύναμης.

$$\theta(\{\rho\}, \{u\})_1 \leq \theta_1^*, \theta(\{\rho\}, \{u\})_2 \leq \theta_2^*, \dots \quad (2.6)$$

Ο παραπάνω τύπος περιέχει περιορισμούς απόκρισης σχεδιασμού, όπως όρια τάσεων, μετατοπίσεων, ιδιοσυχνοτήτων κ.α. [23] [21] [20].

2.7 Μελέτη και Βελτιστοποίηση ψαλιδιού MacPherson

Όσotόσο στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται μελέτη ψαλιδιού ανάρτησης MacPherson. Αυτή η επιλογή έγινε λόγω της συχνής χρήσης του στα σύγχρονα οχήματα, των μειονεκτημάτων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο αλλά και των κατασκευαστικών σφαλμάτων που παρουσιάζονται στο συγκεκριμένο ψαλίδι. Όπως αναφέρει ο D. Koulocheris κ.α. είχε παρατηρηθεί μεγάλη επιμήκυνση στη μια πλευρά του ψαλιδιού και υπήρχε ανάγκη για μελέτη του ψαλιδιού σε συγκεκριμένες φορτίσεις [14]. Επίσης σύμφωνα με τον A. Heyes από όλα τα εξαρτήματα των οχημάτων το 13% των σφαλμάτων γίνονται στο σύστημα ανάρτησης και από τις βασικότερες αιτίες αποτελεί ο κακός σχεδιασμός (21%) ενώ και το υλικό κατασκευής διαδραματίζει σημαντικό ρόλο (9%) [15].

Με την εξέλιξη της αυτοκινητοβιομηχανίας γίνεται προσπάθεια τα οχήματα να γίνονται πιο ελαφριά αλλά να αντέχουν τις ίδιες συνθήκες φορτίσεις. Γι' αυτό το λόγο δεν είναι λίγοι αυτοί που έχουν προσπαθήσει να πραγματοποιήσουν τοπολογική βελτιστοποίηση τόσο σε ολόκληρες τις αναρτήσεις όσο και στα ψαλίδια ξεχωριστά. Ειδικότερα ο V. Kulkarni κ.α. έχουν μελετήσει τις καταπονήσεις που δέχεται το ψαλίδι από στατικά φορτία αλλά και έχουν ορίσει τις ιδιοσυχνότητες του και τις παραμορφώσεις που έχει στις συγκεκριμένες [16]. Επίσης ο J. Marzbanrad κ.α. έχουν δημιουργήσει νέο ψαλίδι με διαφορετική κατανομή στο υλικό βασιζόμενοι στις φορτίσεις που λαμβάνει σε ανάλυση κόπωσης [17]. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι η βελτιστοποίηση του ψαλιδιού είναι αναγκαία και αποτελεί αντικείμενο μελέτης πολλών [17, 18, 19].

3. Τοπολογική βελτιστοποίηση συνδέσμου ανάρτησης

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία έχοντας ως βάση ένα πραγματικό ψαλίδι ανάρτησης MacPherson από SUV όχημα, δημιουργείται πρώτα ένα γεωμετρικά ακριβές μοντέλο (shell) που υποβάλλεται σε στατικές αναλύσεις με 4 διαφορετικά σενάρια φόρτισης (ΣΦ). Στη συνέχεια με τις εξωτερικές διαστάσεις του ψαλιδιού δημιουργείται ένα συμπαγές (solid) μοντέλο περιγράμματος, στο οποίο πραγματοποιούνται οι τοπολογικές βελτιστοποιήσεις. Τέλος όλες οι αναλύσεις ορίζονται για 3 διαφορετικά υλικά.

3.1 Γεωμετρικά Μοντέλα

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται, αναλυτικά, τα δυο γεωμετρικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν.

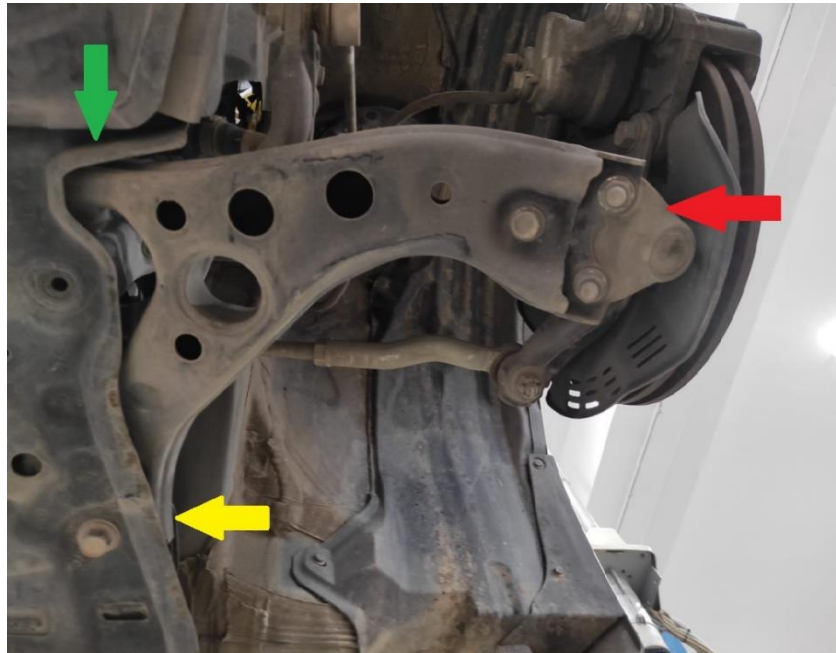
3.1.1 Πραγματικό μοντέλο (M1)

Το γεωμετρικά ακριβές μοντέλο βασίζεται σε βραχίονα ελέγχου (ψαλίδι) της εμπρόσθιας δεξιάς ανάρτησης MacPherson μορφής L ενός Toyota RAV4 2020 (Εικόνα 3.1). Το ψαλίδι αυτό έχει κατασκευαστεί από δύο φύλλα χάλυβα που έχουν συγκολληθεί μεταξύ τους. Εσωτερικά είναι κενό. Επιπλέον, επάνω δεξιά (Εικόνα 3.1) έχει συγκολληθεί ένας κύλινδρος, που χρησιμοποιείται για τη στήριξη και θα αναλυθεί παρακάτω. Τέλος έχοντας ζυγίσει το πραγματικό ψαλίδι προκύπτει ότι το συνολικό βάρος του ανέρχεται στα 3,3 kg.



Εικόνα 3.1: Πραγματικό ψαλίδι

Όσον αφορά τη σύνδεση του ψαλιδιού με το σασί του οχήματος και τον τροχό παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.



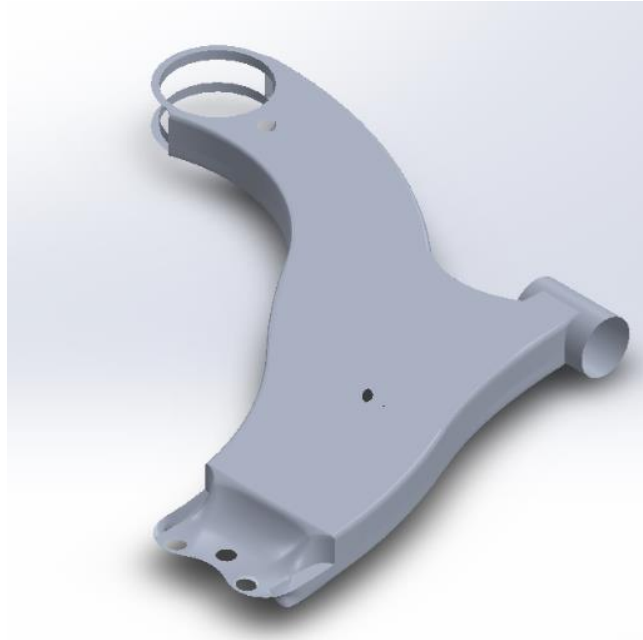
Εικόνα 3.2: Ψαλίδι εγκατεστημένο στο όχημα (εμπρός αριστερή ανάρτηση)

Στην παραπάνω φωτογραφία φαίνεται διαφορετικός βραχίονας ελέγχου από τον αρχικό που σχεδιάστηκε. Το κόκκινο βελάκι δείχνει το σημείο που το ψαλίδι συνδέεται με την άρθρωση οδήγησης (steering knuckle) (Εικόνα 3.3) κι έπειτα αυτό με το συναρμολόγημα του τροχού. Η μεταξύ τους σύνδεση γίνεται με σφαιρική άρθρωση (ball joint) και στο συγκεκριμένο σημείο είναι που εφαρμόζονται οι δυνάμεις των σεναρίων φόρτισης. Το πράσινο βελάκι δείχνει το σημείο σύνδεσης του ψαλιδιού με το σασί του οχήματος στο μπροστινό σημείο ενώ το κίτρινο στο πίσω και αυτά είναι τα σημεία που εφαρμόζονται οι στηρίξεις στις αναλύσεις. Παρόλο που και στις δύο περιπτώσεις η σύνδεση γίνεται με ελαστικά παρεμβύσματα (rubber bushings), στο πίσω σημείο (κίτρινο βέλος) έχουμε πάκτωση ενώ στο μπροστινό σημείο (πράσινο βέλος) έχουμε άρθρωση.



Εικόνα 3.3: Αρθρώσεις οδήγησης (steering knuckles)

Έχοντας μετρήσει τις βασικές διαστάσεις του ψαλιδιού και γνωρίζοντας τον τρόπο σύνδεσης του στο όχημα δημιουργείται στο λογισμικό του Solidworks το γεωμετρικά ακριβές τρισδιάστατο μοντέλο του βραχίονα ελέγχου (M1) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.

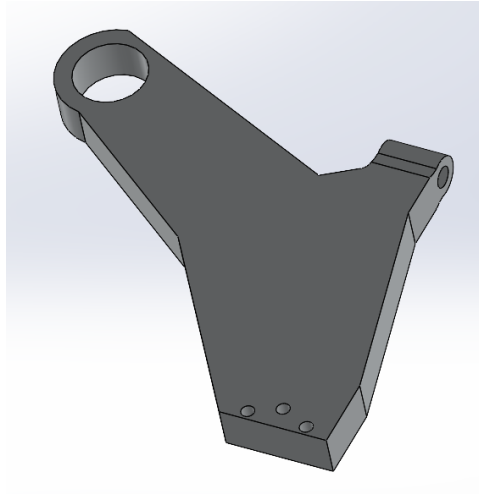


Σχήμα 3.1: Γεωμετρικά ακριβές τρισδιάστατο μοντέλο CAD του βραχίονα ελέγχου (M1) σε ισογεωμετρική όψη (isogeometric)

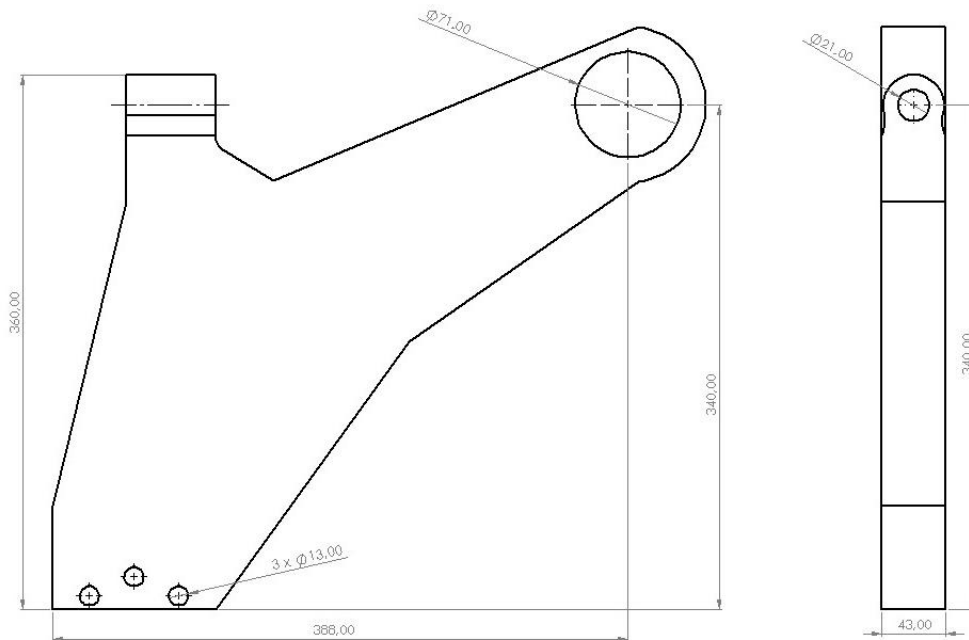
Το παραπάνω μοντέλο αποτελείται από δισδιάστατες επιφάνειες και έχει δημιουργηθεί με τη λειτουργία επιφανειών (Surface) του λογισμικού και δεν έχει πάχος, καθώς αυτό οριστεί στη διαδικασία ορισμού των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία θα αναλυθεί σε επόμενο κεφαλαίο. Επομένως θεωρείται μοντέλο κελύφους (shell model) και θα μελετηθεί η συμπεριφορά του κάτω από 4 διαφορετικά σενάρια φόρτισης σε γραμμική στατική ανάλυση για 3 διαφορετικά υλικά.

3.1.2 Μοντέλο Περιγράμματος (M2)

Χρησιμοποιώντας τις εξωτερικές διαστάσεις του M1 (Σχήμα 3.3), δημιουργήθηκε το M2 το οποίο είναι γεωμετρικό μοντέλο όγκου (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Μοντέλο περιγράμματος CAD του βραχίονα ελέγχου



Σχήμα 3.3: Εξωτερικές διαστάσεις M2

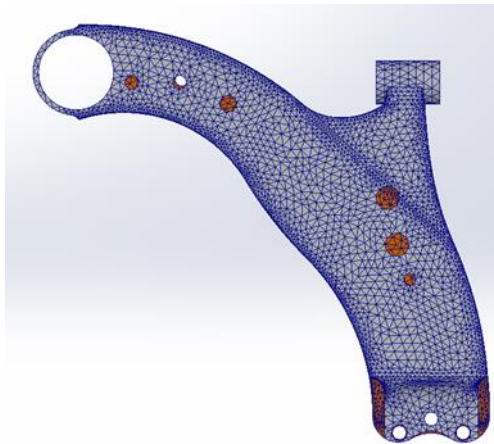
Το συγκεκριμένο εξάρτημα συνιστά συμπαγές τρισδιάστατο μοντέλο και αρχικά θα μελετηθεί η συμπεριφορά του στα 4 ίδια σενάρια φόρτισης και με τα ίδια 3 υλικά με το M1 σε γραμμική στατική ανάλυση. Επίσης θα αποτελέσει τη βάση (σχεδιαστικό χώρο) της ανάλυσης της τοπολογικής βελτιστοποίησης.

3.2 Μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων

3.2.1 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων πραγματικού μοντέλου (ΠΣ1)

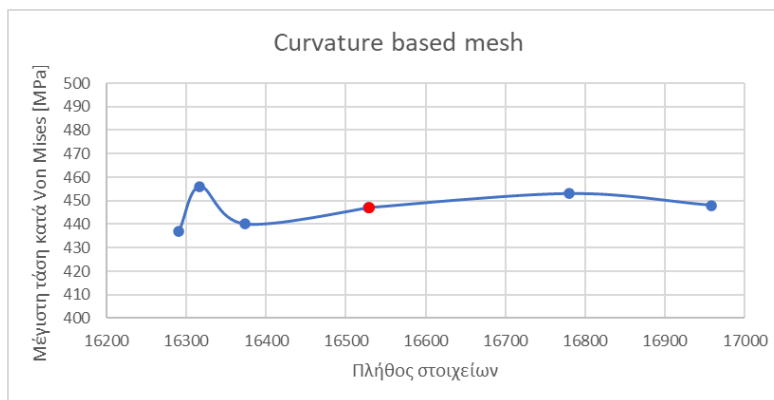
Στην περίπτωση του πραγματικού μοντέλου μας, το μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ) που δημιουργήθηκε αποτελείται από στοιχεία κελύφους. Επομένως κάθε κόμβος των στοιχείων μας έχει 6 ΒΕ κι επειδή έχουμε χρησιμοποιήσει υψηλή ποιότητα πλέγματος έχουμε παραβολικά τριγωνικά στοιχεία κελύφους με 6 κόμβους το καθένα.

Το μοντέλο ΠΣ για το πραγματικό μοντέλο (ΠΣ1) που προέκυψε φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Πλέγμα του M1 (ΠΣ1)

Το παραπάνω πλέγμα προέκυψε έχοντας πραγματοποιήσει πρώτα μελέτη σύγκλισης (Διάγραμμα 3.1) για την επιλογή του τρόπου δημιουργίας του πλέγματος και για το μέγεθος των στοιχείων προκύπτει ότι θα χρησιμοποιηθεί Curvature-based Mesh.



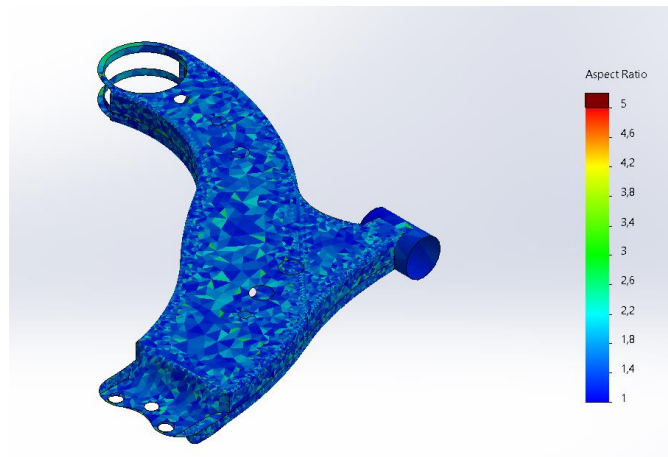
Διάγραμμα 3.1: Καμπύλη μελέτης σύγκλισης, Κόκκινο: σημείο επιλογής

Επίσης, τα χαρακτηριστικά του πλέγματος παρουσιάζονται στον Πίνακας 3.1.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά ΠΣ1

Πλήθος στοιχείων	16530
Πλήθος κόμβων	33763
Μέγιστο μέγεθος στοιχείου [mm]	14,0
Ελάχιστο μέγεθος στοιχείου [mm]	2,62
Ελάχ. πλήθος στοιχείων εντός κύκλου	8
Αναλογία αύξησης μεγέθους στοιχείου	1,4

Στην περίπτωση του Curvature-based Mesh μόνο υπήρχε σύγκλιση των πεπερασμένων στοιχείων και η σύγκλιση σε σχέση με το πλήθος των περασμένων στοιχείων άρχισε να συμβαίνει μετά τα 16500 στοιχεία και γ' αυτό επιλέχθηκε το κόκκινο σημείο και προέκυψε το παραπάνω πλέγμα. Επίσης με τα συγκεκριμένα ΠΣ έχουμε καλή ποιότητα πλέγματος, καθώς περισσότερα από το 90% των στοιχείων έχουν $AR < 5$ και αυτό γίνεται αντιληπτό και από το Σχήμα 3.5.

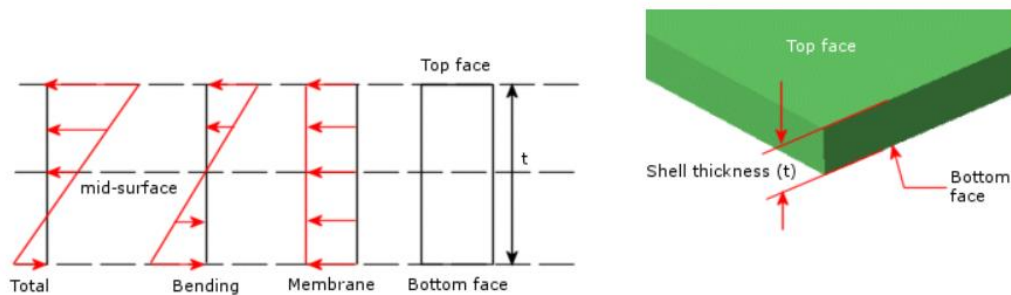


Σχήμα 3.5: Απεικόνιση ΠΣ1 σε σχέση με AR

Μάλιστα παρατηρούμε ότι τα στοιχεία που έχουν τιμές πάνω του 5 είναι ελάχιστα (καφέ χρώμα).

Τέλος πρέπει να γίνει μια αναφορά στην κατανομή της τάσης που θα παρουσιαστεί στα αποτελέσματα των αναλύσεων, καθώς έχουμε στοιχεία κελύφους. Το λογισμικό μπορεί να δημιουργήσει κατανομές τάσεων που αναπτύσσονται πάνω επιφάνεια του μοντέλου, στην κάτω, στην μεμβράνη και κάμψης. Οι κατανομές τάσεις που θα παρουσιαστούν παρακάτω

θα αφορούν τις τάσεις στην πάνω επιφάνεια, οι οποίες συμπεριλαμβάνουν τις τάσεις μεμβράνης και τις καμπτικές. Αυτό γίνεται πιο κατανοητό παρατηρώντας το Σχήμα 3.6.

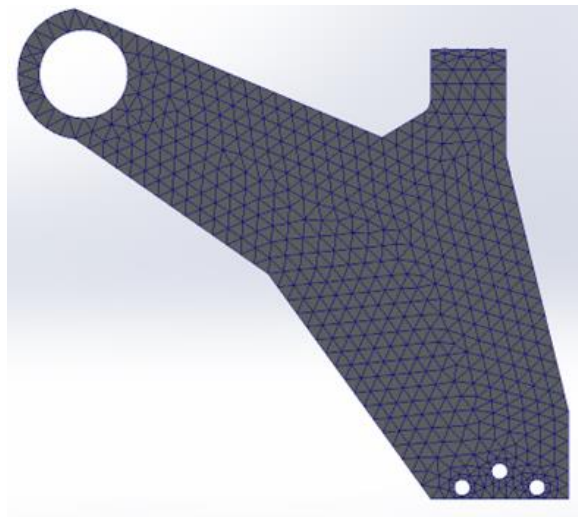


Σχήμα 3.6: Κατανομές τάσεων σε στοιχεία κελύφους

3.2.2 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων μοντέλου περιγράμματος (ΠΣ2)

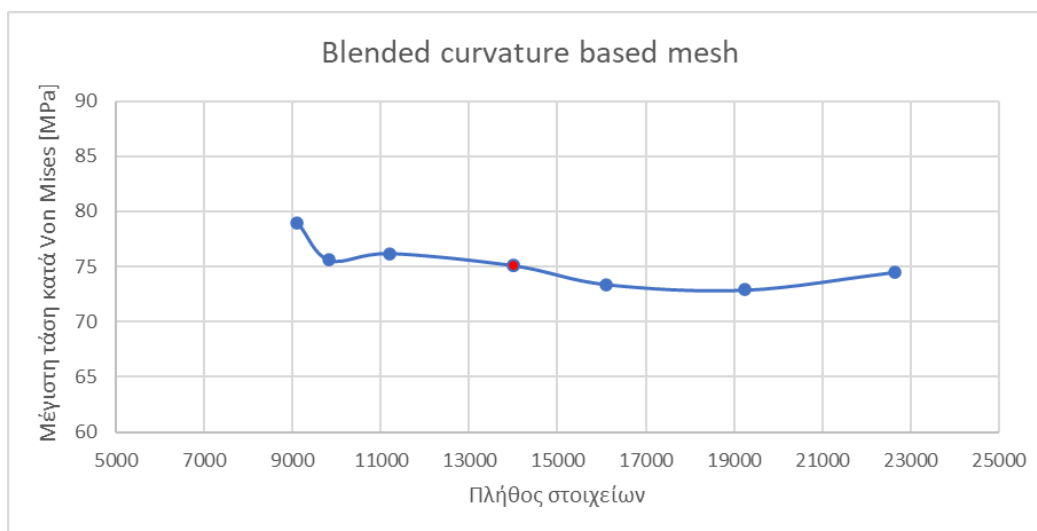
Στην περίπτωση του μοντέλου περιγράμματος, το μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ) που δημιουργήθηκε αποτελείται από συμπαγή στοιχεία. Επομένως κάθε κόμβος των στοιχείων μας έχει 3 ΒΕ κι επειδή έχουμε χρησιμοποιήσει υψηλή ποιότητα πλέγματος έχουμε παραβολικά συμπαγή στοιχεία με 10 κόμβους το καθένα.

Το μοντέλο ΠΣ για το μοντέλο περιγράμματος (ΠΣ2) που προέκυψε φαίνεται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Πλέγμα του M2 (ΠΣ2)

Το παραπάνω πλέγμα προέκυψε έχοντας πραγματοποιήσει πρώτα μελέτη σύγκλισης (Διάγραμμα 3.2) για την επιλογή του τρόπου δημιουργίας του πλέγματος και για το μέγεθος των στοιχείων προκύπτει ότι θα χρησιμοποιηθεί Blended Curvature-based Mesh.



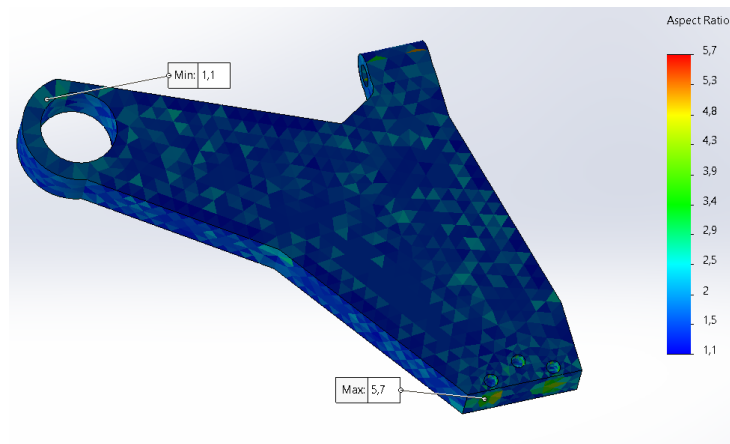
Διάγραμμα 3.2: Καμπύλη μελέτης σύγκλισης, Κόκκινο: σημείο επιλογής

Επίσης τα χαρακτηριστικά του πλέγματος παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά ΠΣ2

Πλήθος στοιχείων	14019
Πλήθος κόμβων	22286
Μέγιστο μέγεθος στοιχείου [mm]	14,0
Ελάχιστο μέγεθος στοιχείου [mm]	4,97
Ιακωβιανά σημεία	16
Μέγιστο AR	5,7
% στοιχείων με AR<3	98,6
Ελάχ. πλήθος στοιχείων εντός κύκλου	8
Αναλογία αύξησης μεγέθους στοιχείου	1,4

Παρατηρούμε ότι από το συγκεκριμένο σημείο και μετά έχει επέλθει σύγκλιση των πεπερασμένων στοιχείων. Μάλιστα με τα συγκεκριμένα πεπερασμένα έχουμε δημιουργήσει μια καλή ποιότητα πλέγματος, καθώς το 98,6% των πεπερασμένων στοιχείων έχει AR<3 αλλά και η μέγιστη τιμή του είναι 5,7 (Σχήμα 3.8). Επίσης στο ΠΣ2 όσον αφορά την Ιακωβιανή αναλογία αυτή έχει μέγιστη τιμή 5,8 κι επομένως όλα τα στοιχεία έχουν αναλογία μεταξύ του και του 10.

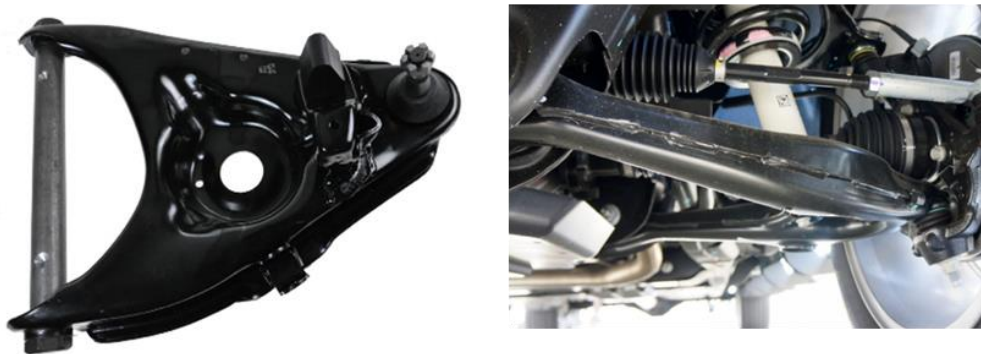


Σχήμα 3.8: Απεικόνιση ΠΣ2 σε σχέση με AR

3.3 Ιδιότητες υλικών

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα ψαλίδια των αναρτήσεων κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο από χυτό αλουμίνιο (cast aluminum) ή χυτοσίδηρο (cast iron) ή πρεσαριστό χάλυβα (stamped steel) [24].

Τα ψαλίδια από πρεσαριστό χάλυβα (Εικόνα 3.4) από φύλλα χάλυβα που με τη πρέσα παίρνουν την εκάστοτε μορφή τους και συγκολλούνται μεταξύ τους. Αποτελεί το πρώτο είδος ψαλιδιών που χρησιμοποιήθηκε στα αυτοκίνητα και σήμερα τοποθετούνται σε φθηνότερα αυτοκίνητα. Ωστόσο παρόλο που είναι επιρρεπή στην σκουριά και παθαίνουν ζημιά εύκολα, είναι φτηνά στην κατασκευή τους και μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα [25].



Εικόνα 3.4: Ψαλίδια από πρεσαριστό χάλυβα [26]

Τα ψαλίδια χυτοσιδήρου κατασκευάζονται κι αυτά με καλούπι είτε ολόκληρα (Εικόνα 3.5α) είτε σε κομμάτια, τα οποία στη συνέχεια ενώνονται με συγκόλληση (Εικόνα 3.5β). Τα συγκεκριμένα είναι τα συνηθέστερα στη σύγχρονα οχήματα και ειδικά σε φορτηγά και

ημιφορτηγά. Είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά και μπορούν να ανταπεξέλθουν σε έντονα σενάριο φόρτισης. Χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στις μπροστινές αναρτήσεις και συνήθως έχουν σχήμα wishbone. Τέλος η στιβαρή φύση των βραχιόνων ελέγχου από χυτοσίδηρο τους καθιστά αποτελεσματικότερους για την οδήγηση και το χειρισμό του οχήματος [25].



(α)

(β)

Εικόνα 3.5: Ψαλίδια χυτοσιδήρου (α) ενιαίο, (β) σε κομμάτια [26]

Τα ψαλίδια από χυτό αλουμίνιο κατασκευάζονται με καλούπι είτε ολόκληρα (Εικόνα 3.6α) είτε σε κομμάτια, τα οποία στη συνέχεια ενώνονται με συγκόλληση (Εικόνα 3.6β). Το συγκεκριμένο είδος ψαλιδιών έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι στιβαρά και ταυτόχρονα ελαφριά. Ωστόσο παρόλο που είναι πιο ανθεκτικά στη διάβρωση σε σχέση με το σίδηρο και το χάλυβα, είναι πιο επιρρεπή σε παραμορφώσεις και ρωγμές, όταν υπόκεινται σε έντονες φορτίσεις, καθώς το αλουμίνιο εκ φύσεως είναι πιο μαλακό υλικό [25].



(α)

(β)

Εικόνα 3.6: Ψαλίδια χυτού αλουμινίου (α) ενιαίο, (β) σε κομμάτια [26]

Παρόλο που διάφορα υλικά χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή των ψαλιδιών, στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας τα παρακάτω που φαίνονται στον πίνακα . Ο λόγος που επιλέχθηκαν τα συγκεκριμένα είναι ότι αποτελούν τα συνηθέστερα που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία για την κατασκευή μερών του του αυτοκινήτου και ειδικότερα των μερών της ανάρτησης [27]. Τα υλικά αυτά είναι ο χάλυβας AISI 1045, ο χάλυβας ASTM A36 και το κράμα αλουμινίου 7075-T6 και οι μηχανικές ιδιότητες τους παρατίθενται στον Πίνακα 3.3. Ενώ παραπάνω αναφέρθηκε ότι τα ψαλίδια

χυτοσιδήρου είναι τα συνηθέστερα που χρησιμοποιούνται σήμερα στις αναρτήσεις δεν εξετάζονται στις αναλύσεις, καθώς οι ιδιότητες τους βρίσκονται είτε ενδιάμεσα των παρακάτω είτε παραπάνω οπότε αν αντέχουν τα υλικά με χαμηλότερο όριο ή παρόμοιο όριο διαρροής αντέχουν κι αυτά [28].

Πίνακας 3.3: Μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας [MPa]	Λόγος Poisson	Όριο Διαρροής [MPa]	Πυκνότητα [kg/m ³]
Χάλυβας AISI 1045	205000	0.29	530	7850
Χάλυβας ASTM A36	200000	0.26	250	7850
Κράμα αλουμινίου 7075-T6	72000	0.33	505	2810

Πηγή: [29]

Επομένως έχοντας τα παραπάνω υλικά το βάρος του M2 για κάθε υλικό παρουσιάζεται στον Πίνακας 3.4.

Πίνακας 3.4: Βάρος M2 για κάθε υλικό

Υλικό	Βάρος [kg]
Κράμα Αλουμινίου	9,2
Χάλυβας AISI 1045	25,7
Χάλυβας ASTM A36	25,7

Επομένως όλες οι γραμμικές στατικές αναλύσεις όλων των μοντέλων και όλες οι τοπολογικές βελτιστοποιήσεις του μοντέλου περιγράμματος, που θα ακολουθήσουν, θα πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας τα 3 παραπάνω υλικά.

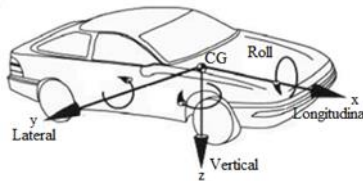
3.4 Συνθήκες φόρτισης και οριακές συνθήκες

Έχοντας ορίσει στο κεφάλαιο 3.1.1 τον τρόπο που συνδέεται ο βραχίονας ελέγχου με το υπόλοιπο όχημα και με τον τροχό καθίσταται εφικτό να οριστούν τα διαφορετικά σενάρια φόρτισης και οι στηρίξεις αλλά και να προσδιοριστεί το σημείο που ασκούνται οι φορτίσεις και σημεία που εφαρμόζονται οι στηρίξεις.

3.4.1 Συνθήκες φόρτισης

Στις στατικές αναλύσεις και των δύο μοντέλων (ΠΣ1 και ΠΣ2) και στην τοπολογική βελτιστοποίηση του ΠΣ2 οι ίδιες συνθήκες φόρτισης χρησιμοποιήθηκαν, οι οποίες δημιουργήθηκαν με βάση τη βιβλιογραφία.

Λαμβάνοντας υπόψη το σύστημα συντεταγμένων στο Σχήμα 3.9, σε ένα όχημα οι δυνάμεις που παράγονται από την επιτάχυνση και το φρενάρισμα αναπτύσσονται στον άξονα x, στον άξονα y αναπτύσσονται τα φορτία από τις στροφές και στον άξονα z αναπτύσσονται οι δυνάμεις που δημιουργούνται από την επαφή των τροχών στο δρόμο. Για τη μηχανική ανάλυση των εξαρτημάτων του οχήματος, όπως ο βραχίονας ελέγχου, είναι συνηθισμένο να αγνοούνται οι δυνάμεις στον άξονα z, καθώς η τιμή τους είναι πολύ χαμηλότερη από εκείνες που παράγονται στον άξονα x και y [18], ωστόσο στις αναλύσεις θα συμπεριληφθεί και μια φόρτιση κατά τον άξονα z, η οποία δημιουργείται από το βάρος του οχήματος [30].



Σχήμα 3.9: Σύστημα συντεταγμένων [31]

Αρχικά θα οριστεί το σενάριο φόρτισης που ασκείται στο ψαλίδι μόνο η δύναμη στον άξονα z, η οποία δημιουργείται λόγω του βάρους του οχήματος με βάση τον από τον S. Rhode [30].

Το συνολικό βάρος του οχήματος είναι $W = 2091 \text{ kg}$ ή $20512,7 \text{ N}$.

Θεωρούμε ότι το 52% του συνολικού βάρους (W) λαμβάνεται από τον μπροστινό άξονα ενώ το 48% από τον πίσω.

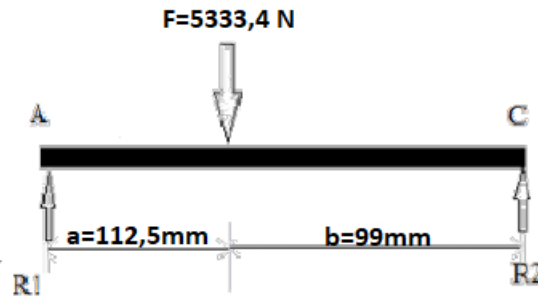
Εμάς μας ενδιαφέρει το μπροστινό ψαλίδι οπότε έχουμε:

$$W(\text{σε μπροστινό άξονα}) = 0,52 * W = 10666,7 \text{ N}$$

$$\text{Αντίδραση σε κάθε μπροστινό τροχό: } R_w = W(\text{σε μπροστινό άξονα})/2 = 5333,4 \text{ N}$$

Από τη συγκεκριμένη δύναμη το 50% το λαμβάνει το ακραζόνιο (stub axle) ενώ το άλλο 50% το λαμβάνει το ελατήριο, ο άξονας και το ψαλίδι.

Έτσι έχουμε το παρακάτω διάγραμμα ελεύθερου σώματος.



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα ελεύθερου σώματος

Η απόστασή AC απεικονίζει την άρθρωση οδήγησης και C είναι το σημείο που συνδέεται το ελατήριο, το A εκεί που συνδέεται το ψαλίδι και το βέλος της δύναμης είναι το σημείο που συνδέεται με τον τροχό. Έτσι R1 η δύναμη αντίδρασης στο ελατήριο και R2 η δύναμη αντίδρασης στο ψαλίδι.

Επομένως από συνθήκες ισορροπίας στο παραπάνω έχουμε $\sum F = 0$ και $\sum M = 0$. Από αυτά προκύπτει η ζητούμενη δύναμη $R2 = 2840$ N και ασκείται κατακόρυφα προς τα κάτω στο άκρο του ψαλιδιού. Επομένως το πρώτο σενάριο φόρτισης ($\Sigma\Phi1$) είναι $Fz = 2840$ N.

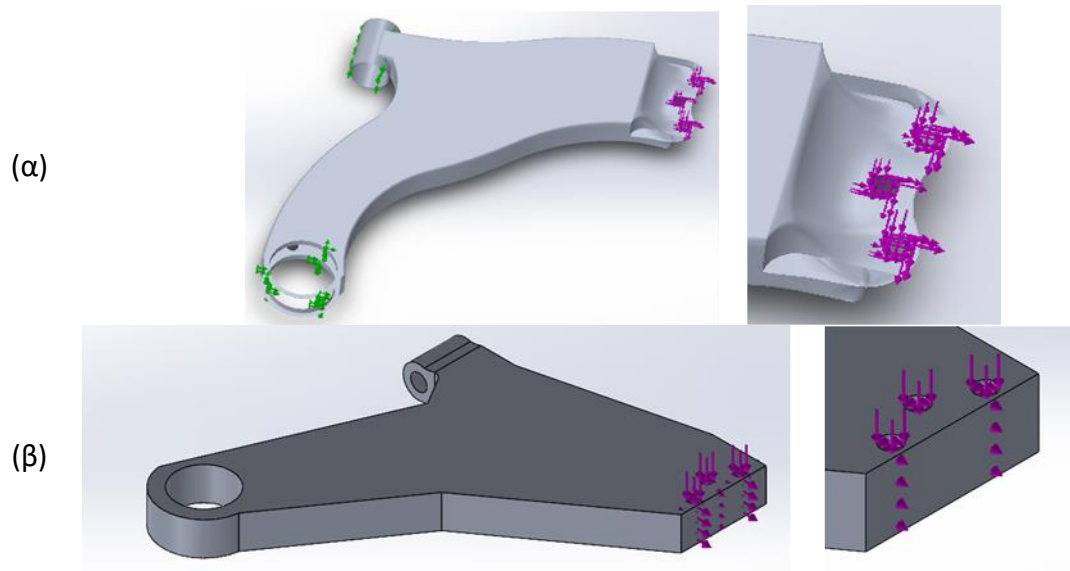
Έτσι τα σενάρια φόρτισης ολοκληρώνονται με αυτά που προτάθηκαν από την C. Vossou και εφαρμόστηκαν σε παρόμοιο βραχίονα ελέγχου. Όλα τα σενάρια φόρτισης φαίνονται στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5: Σενάρια φόρτισης αναλύσεων

Σενάριο Φόρτισης No	$F_x(N)$	$F_y(N)$	$F_z(N)$
$\Sigma\Phi1$	0	0	2840
$\Sigma\Phi2$	-24200	8200	0
$\Sigma\Phi3$	-5900	2020	0
$\Sigma\Phi4$	-31460	15730	0

Το πρώτο σενάριο απεικονίζει το βάρος του οχήματος που ασκείται στο ψαλίδι, το τελευταίο απεικονίζει τις φορτίσεις που δέχεται το ψαλίδι υπό κανονικές συνθήκες κίνησης του οχήματος ενώ τα δύο ενδιάμεσα ($\Sigma\Phi2$ και $\Sigma\Phi3$) απεικονίζουν το απότομο φρενάρισμα μπροστά από μία τρύπα στο οδόστρωμα. Το $\Sigma\Phi2$ είναι το βασικό σενάριο ενώ το $\Sigma\Phi3$ είναι μία μειωμένη περίπτωση του [18].

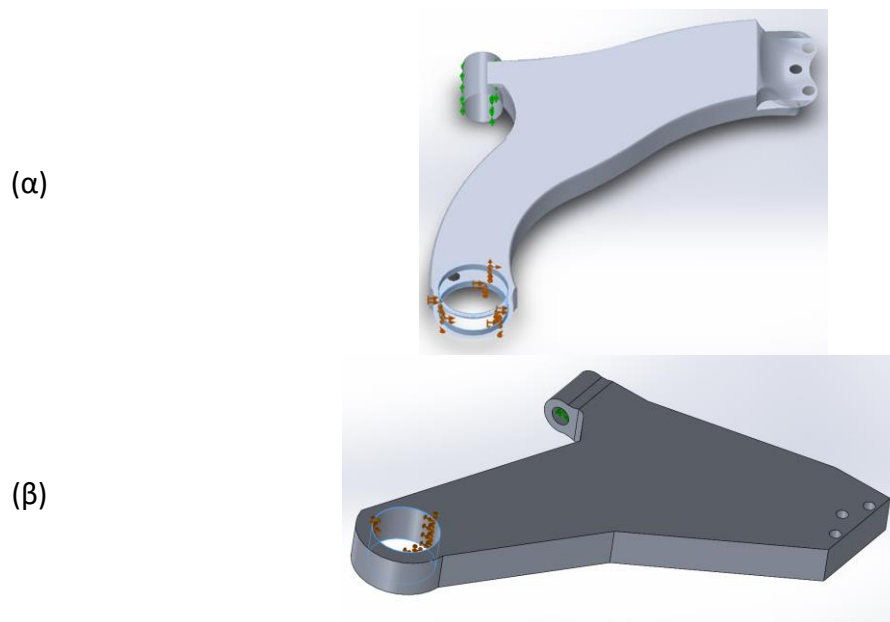
Οι προαναφερθείσες δυνάμεις εφαρμόζονται στα μοντέλα (ΠΣ1 και ΠΣ2) όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11: Θέση φορτίσεων ΠΣ1 (α), ΠΣ2 (β)

3.4.2 Στηρίξεις

Όσον αφορά τη σύνδεση του βραχίονα ελέγχου με το σασί, μοντελοποιήθηκε ως πάκτωση στο πίσω μέρος (fixed support) ενώ στο μπροστινό ως άρθρωση (cylindrical support). Τα πράσινα βελάκια στην εκάστοτε κυλινδρική κοιλότητα υποδηλώνουν την άρθρωση ενώ τα πορτοκαλί στην εκάστοτε κυκλική διαμόρφωση την πάκτωση (Σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.12: Στηρίξεις μοντέλων ΠΣ1 (α), ΠΣ2 (β)

3.5 Ορισμός ανάλυσης τοπολογικής βελτιστοποίησης

Για να πραγματοποιηθεί μια τοπολογική βελτιστοποίηση, (α) πρέπει να ορισθεί ο στόχος (Goal) και (β) οι περιορισμοί (Constraints). Επίσης το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα να ορισθούν έλεγχοι παραγωγής (Manufacturing Controls) αλλά στη πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής δεν έχουν ορισθεί. Οι αναλύσεις που πραγματοποιούνται έχουν όλες τον ίδιο στόχο και τους ίδιους περιορισμούς με βασική διαφορά αρχικά το υλικό του ψαλιδιού κι έπειτα το σενάριο φόρτισης που λαμβάνεται υπόψη για την πραγματοποίηση της βελτιστοποίησης. Επίσης μια ακόμη διαφορά είναι ότι σε κάποιες αναλύσεις τίθεται στο λογισμικό να λάβει υπόψη όλα τα σενάρια φόρτισης (Multiple Load Cases), ώστε να βγάλει τελικό αποτέλεσμα που να αντέχει σε όλες τις φορτίσεις.

Ειδικότερα ως επιλογή στόχου, η καλύτερη αναλογία ακαμψίας προς βάρος (Best Stiffness to Weight Ratio) έχει χρησιμοποιηθεί και για όλες τις αναλύσεις αναγκάζοντας το λογισμικό να δημιουργήσει ένα άκαμπτο μοντέλο με τη μικρότερη δυνατή μάζα. Όσον αφορά τους περιορισμούς που εφαρμόζονται, υπάρχει ένας περιορισμός μάζας που αναφέρεται στη επιθυμητή μείωση της μάζας σε σύγκριση με το αρχικό μοντέλο και ένας περιορισμός τάσης που αναφέρεται στη μέγιστη τιμή τάσης που μπορεί να έχει το βελτιστοποιημένο μοντέλο. Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζονται οι παράμετροι των αναλύσεων για όλα τα υλικά.

Πίνακας 3.6: Παράμετροι τοπολογικών βελτιστοποιήσεων (TB)

	Κράμα Αλουμινίου 7075-T6	Χάλυβας AISI 1045	Χάλυβας ASTM A36
Στόχος	Best Stiffness to Weight Ratio	Best Stiffness to Weight Ratio	Best Stiffness to Weight Ratio
Περιορισμός Μάζας	70%	70%	70%
Περιορισμός Τάσης	202 MPa	212 MPa	100 MPa

Για την ανάλυση τοπολογικής βελτιστοποίησης, χρησιμοποιήθηκε ο επιλύτης direct sparse, όταν κάθε ΣΦ λήφθηκε υπόψη ξεχωριστά από το άλλο ενώ στην περίπτωση που η ανάλυση έτρεξε λαμβάνοντας υπόψη όλα τα ΣΦ ο επιλύτης intel direct sparse χρησιμοποιήθηκε. Επίσης, στην τελευταία περίπτωση η φόρμουλα Min Max (Min Max formulation) ενεργοποιήθηκε προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η μέγιστη συμμόρφωση και να μεγιστοποιηθεί η ακαμψία του εξαρτήματος που υπολογίζεται ανεξάρτητα από κάθε ΣΦ. Το βελτιστοποιημένο σχήμα του εξαρτήματος έχει τη μέγιστη ακαμψία για κάθε ΣΦ [20]. Επιπλέον, στις επιλογές του επιλύτη των προσομοιώσεων ενεργοποιήθηκε να λαμβάνονται υπόψη οι μέσες τάσεις στους ενδιάμεσους κόμβους και ορίστηκε ώστε να διατηρούνται αυτόματα οι περιοχές με φορτίσεις και στηρίξεις.

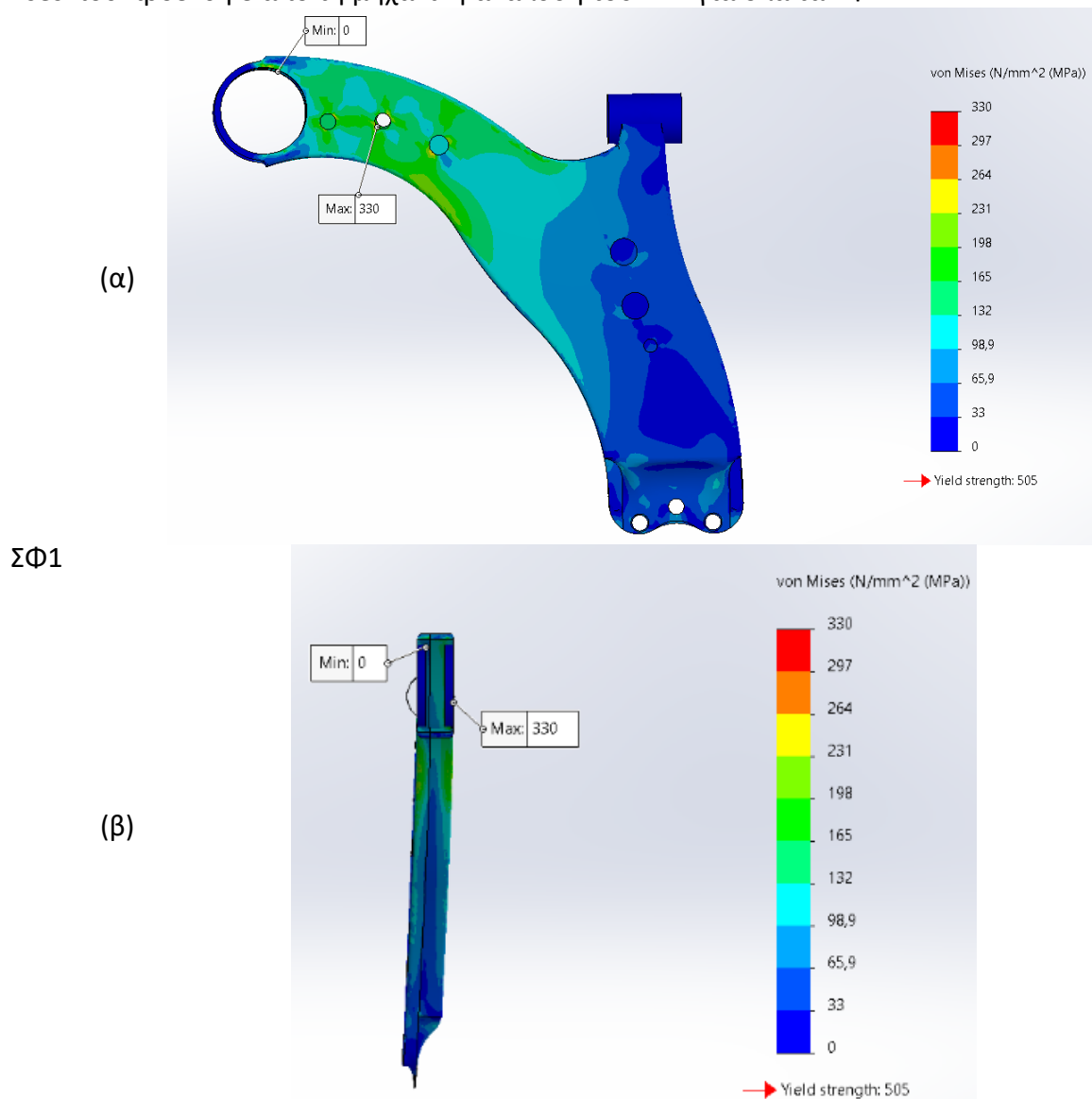
4. Αποτελέσματα αναλύσεων

Αρχικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των στατικών αναλύσεων του ΠΣ1 για τα 3 διαφορετικά υλικά ξεχωριστά, ώστε να δούμε τη συμπεριφορά του στα ΣΦ και στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των τοπολογικών βελτιστοποιήσεων για κάθε υλικό.

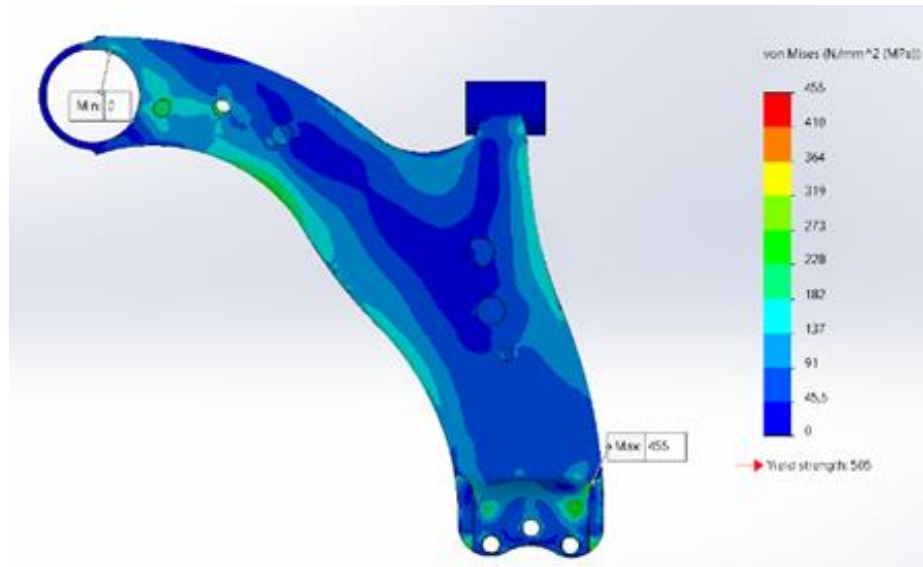
4.1 Στατική Ανάλυση ΠΣ1

4.1.1 Κράμα Αλουμινίου 7075-T6

Στο Σχήμα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή της ισοδύναμης τάσης κατά Von Mises που προέκυψε από τη μηχανική ανάλυση του ΠΣ1 για όλα τα ΣΦ.

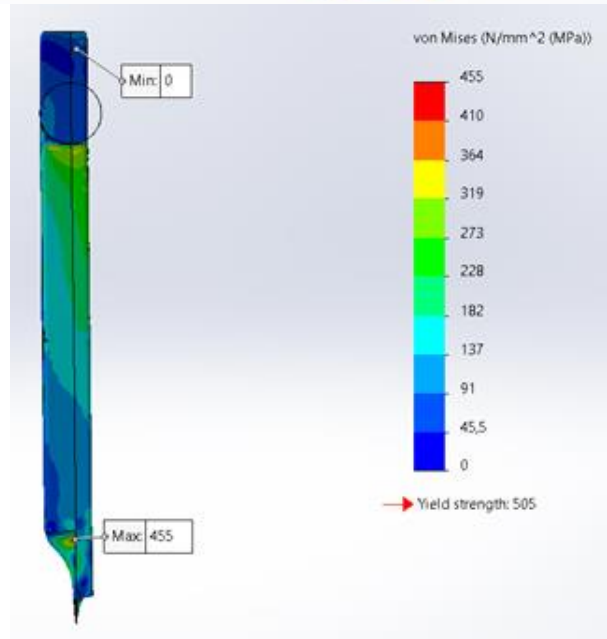


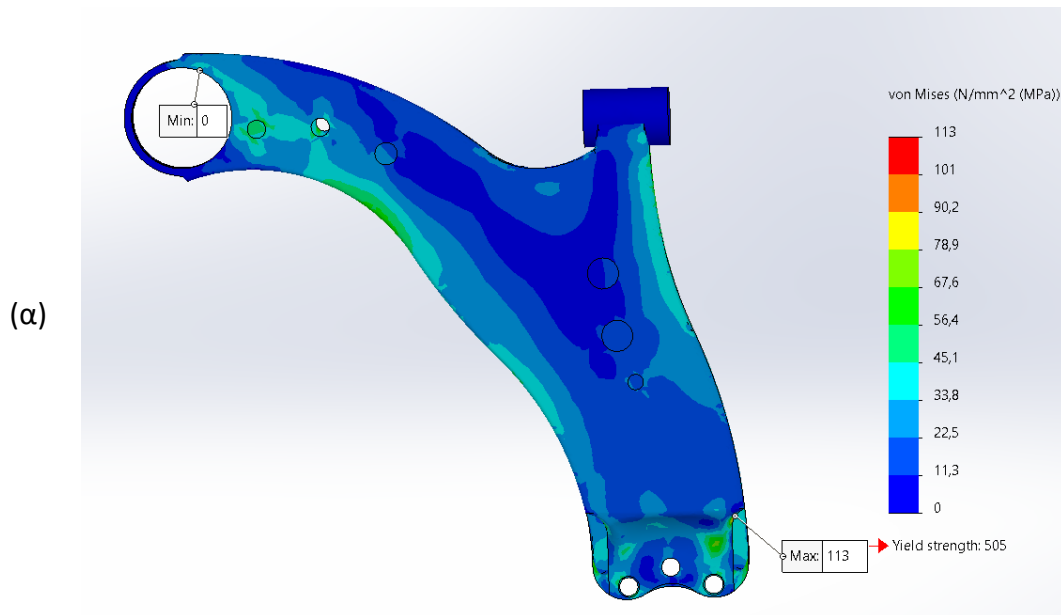
(α)



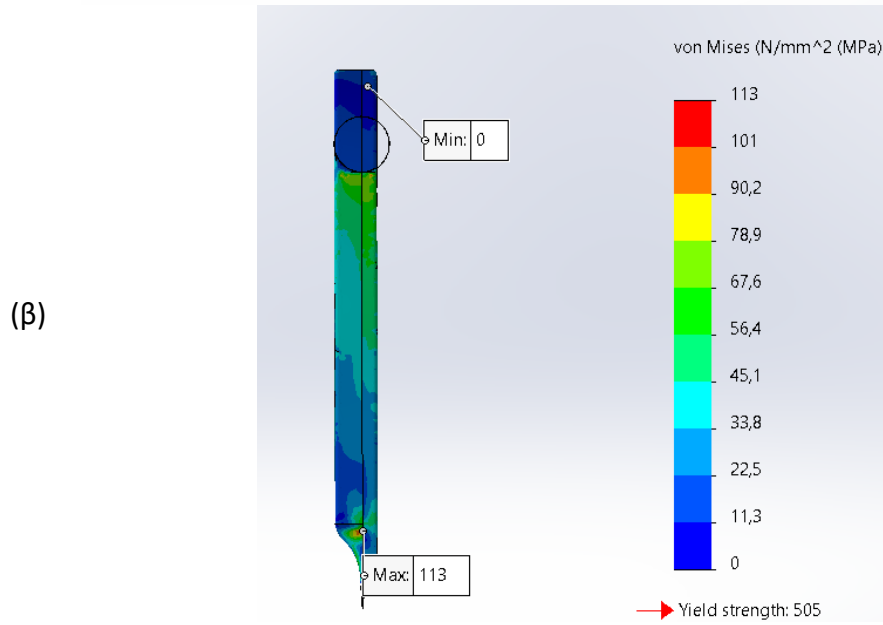
ΣΦ2

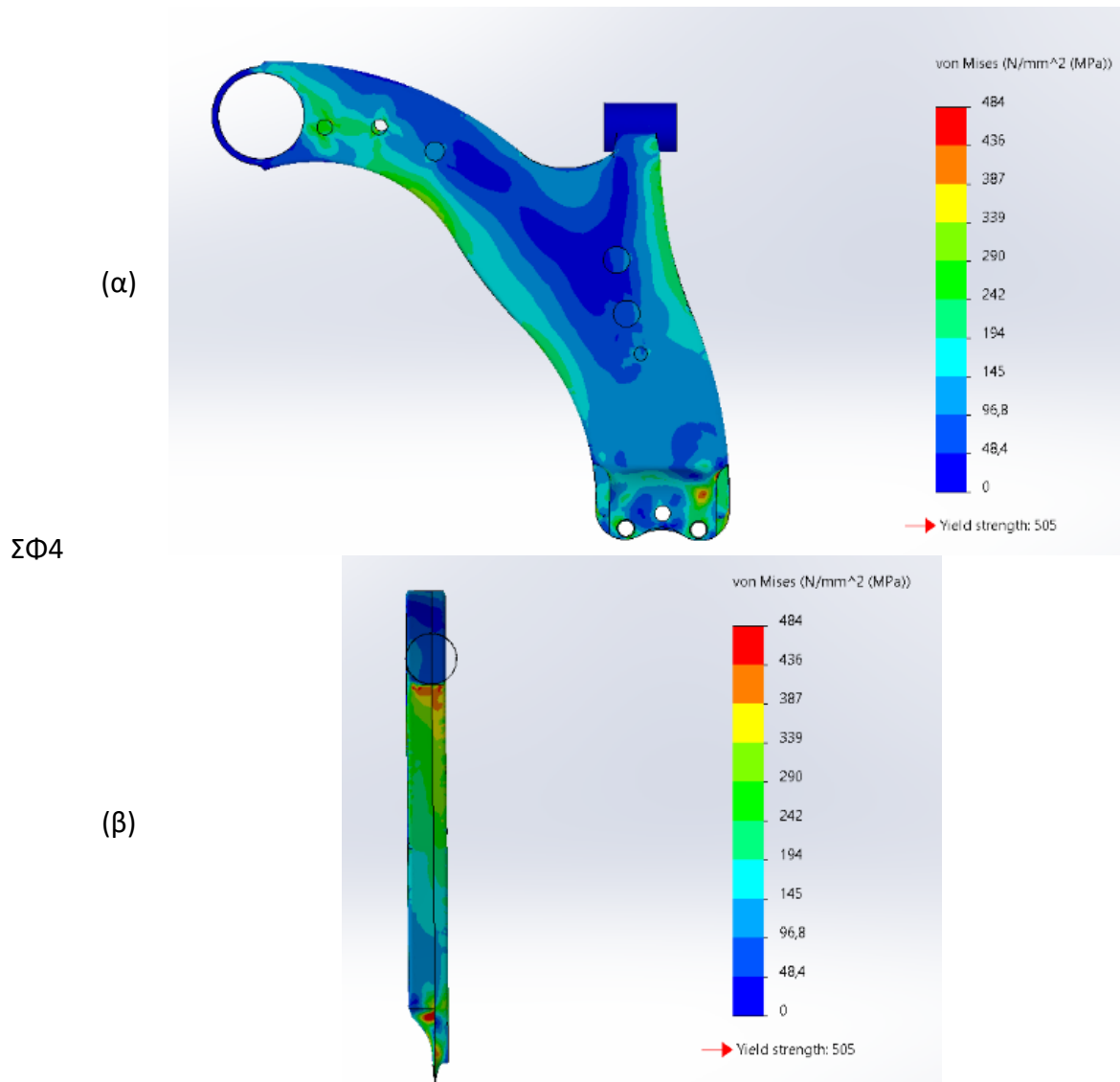
(β)





ΣΦ3





Σχήμα 4.1: Κατανομή τάσης του ΠΣ1 από κράμα αλουμινίου σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη

Δεδομένου ότι το ΠΣ1 αποτελείται από πεπερασμένα στοιχεία κελύφους, η παρουσιαζόμενη κατανομή της τάσης αντιστοιχεί στην επάνω επιφάνεια του κελύφους και αντιπροσωπεύει τη συνολική μεμβρανική και καμπτική τάση σε όλο το πάχος του υλικού βραχίονα ελέγχου, όπως αναφέρθηκε και στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων στο κεφάλαιο 3.2.1.

Ο βραχίονας ελέγχου δημιουργείται από δύο μεταλλικά φύλλα συνδεδεμένα με συγκόλληση MIG. Αυτή η συγκόλληση έχει προσομοιωθεί ως περιμετρική συνδεδεμένη επαφή (bonded contact). Αυτή είναι μια περιοχή συγκέντρωσης τάσης όπως φαίνεται σε όλα τα σενάρια φόρτισης. Επίσης παρατηρούμε έντονη συγκέντρωση τάσης και στο σημείο ένωσης του κυλίνδρου, που έχει την στήριξη άρθρωσης, με το υπόλοιπο ψαλίδι. Στο

συγκεκριμένο σημείο υπάρχει πάλι συγκόλληση που έχει προσομοιωθεί με επαφή σύνδεσης (Bonded Contact). Εκτός από την έντονη συγκέντρωση τάσης που υπάρχει στις συγκολλήσεις παρατηρείται ότι η κατανομή της τάσης είναι παρόμοια στα 3 τελευταία σενάρια και διαφοροποιείται αρκετά στο πρώτο. Αυτό οφείλεται στο ότι στο ΣΦ1 ασκείται δύναμη κατά τον άξονα z ενώ στα άλλα 3 ΣΦ ασκείται δύναμη μόνο κατά τους άξονες x και y. Παρόλο που ο τρόπος που κατανέμεται η τάση είναι κοινός η μέγιστη τιμή της διαφοροποιείται ανάλογα με το ΣΦ, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ1 από κράμα αλουμινίου

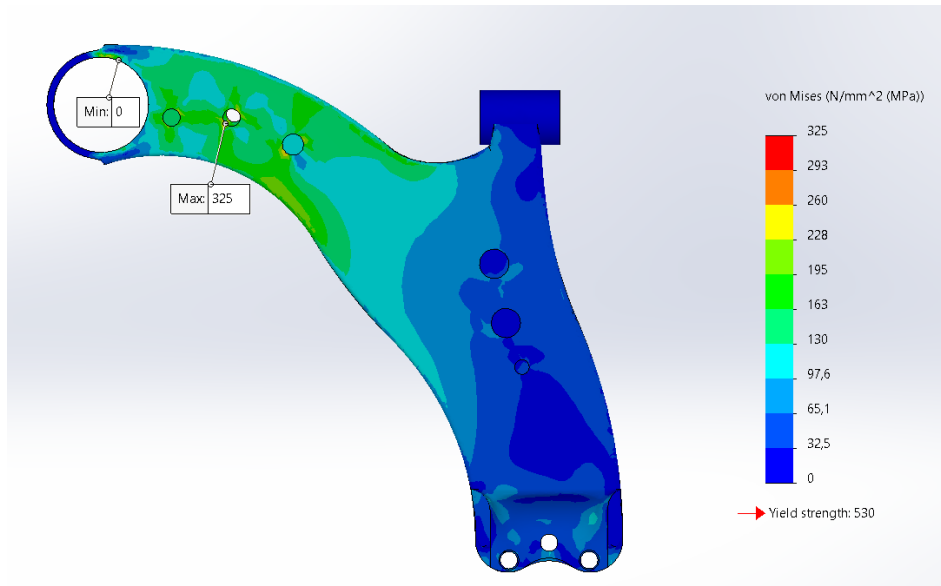
ΣΦ	Τάση [MPa]	Συνολική μετατόπιση [mm]	Μετατόπιση κατά τον άξονα		
			x [mm]	y [mm]	z [mm]
ΣΦ1	330	14,2	0,4	0,9	14,2
ΣΦ2	455	5,2	3,1	1,3	4,0
ΣΦ3	113	1,0	0,7	0,3	0,6
ΣΦ4	484	5,3	3,9	1,7	3,4

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι όταν ασκείται μόνο η δύναμη στον άξονα z η μετατόπιση είναι μεγαλύτερη ενώ στα υπόλοιπα σενάρια η μετατόπιση μοιράζεται και λαμβάνει μικρότερες τιμές. Παρατηρούμε, μάλιστα, ότι η συνολική μετατόπιση είναι τριπλάσια κατά μέτρο στο ΣΦ1 σε σχέση με τα ΣΦ2 και ΣΦ4, ενώ τα μέτρα συνολικών δυνάμεων των ΣΦ2 και ΣΦ4 είναι δεκαπλάσια από το ΣΦ1. Αυτό συμβαίνει καθώς η δύναμη ασκείται κατά τον άξονα z και λόγω της θέσης της φόρτισης και των στηρίξεων είναι σαν να ασκείται δύναμη στο άκρο ενός μακρόστενου σώματος. Έτσι αναπτύσσονται καμπτικές τάσεις και σε συνδυασμό με το δεδομένο ότι το σώμα είναι λεπτό, δημιουργείται αυτή η μεγάλη σχετικά μετατόπιση κατά τον άξονα z. Επίσης όπως ήταν λογικό το ΣΦ2 έχει τις μικρότερες τιμές σε τάση και μετατοπίσεις, καθώς οι τιμές των φορτίσεων είναι οι μικρότερες. Τέλος σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνιέται το όριο διαρροής του υλικού.

4.1.2 Χάλυβας AISI 1045

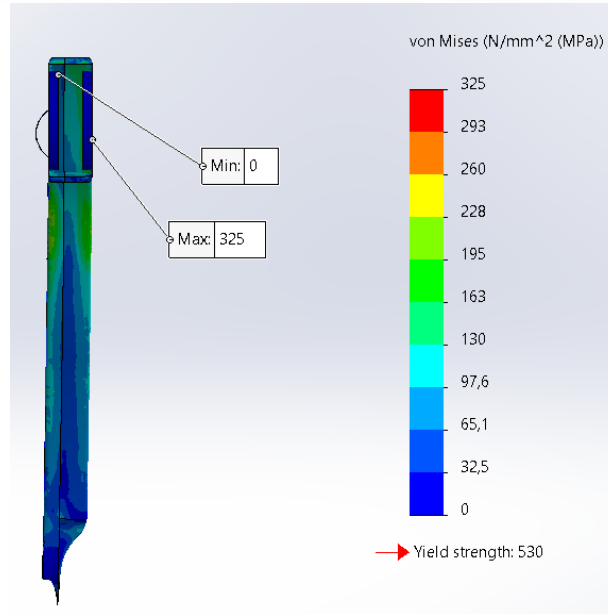
Τα αποτελέσματα του βραχίονα ελέγχου (ΠΣ1) για τον χάλυβα AISI 1045 από όλα τα ΣΦ παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2.

(α)

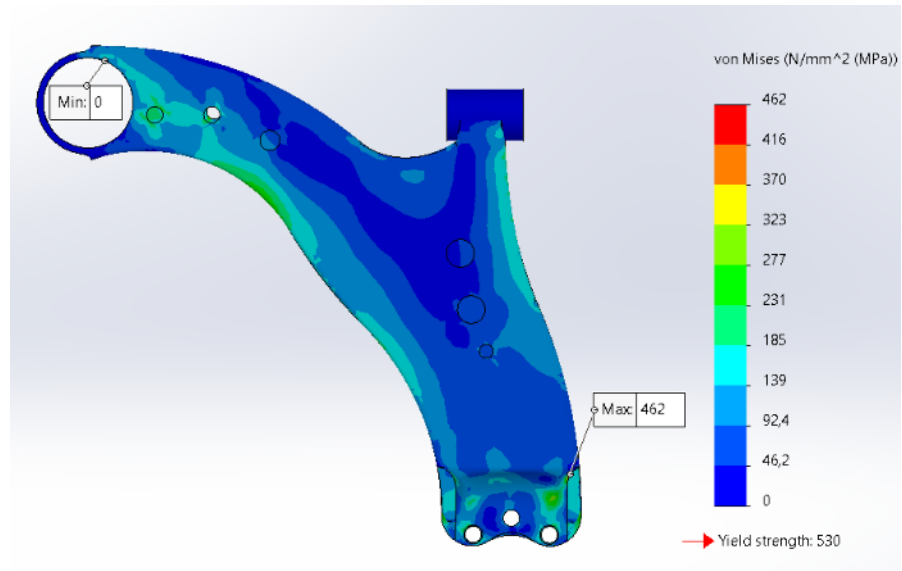


ΣΦ1

(β)

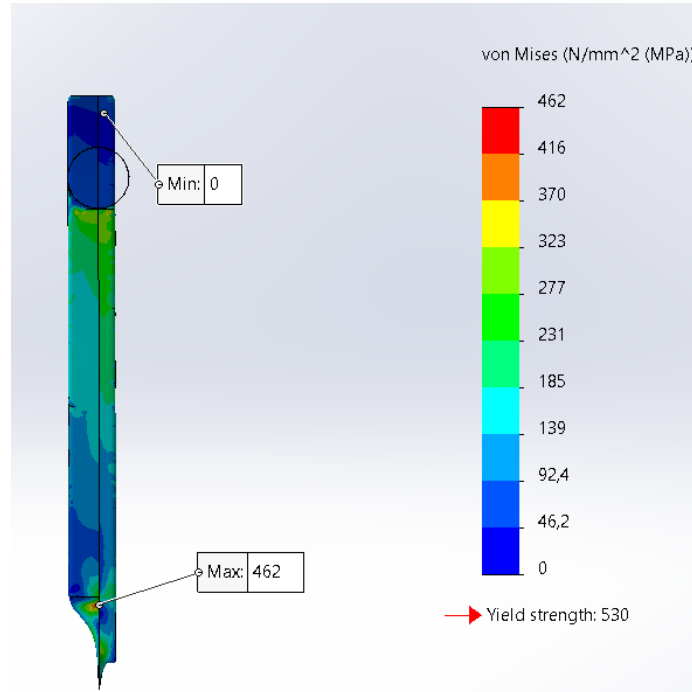


(α)

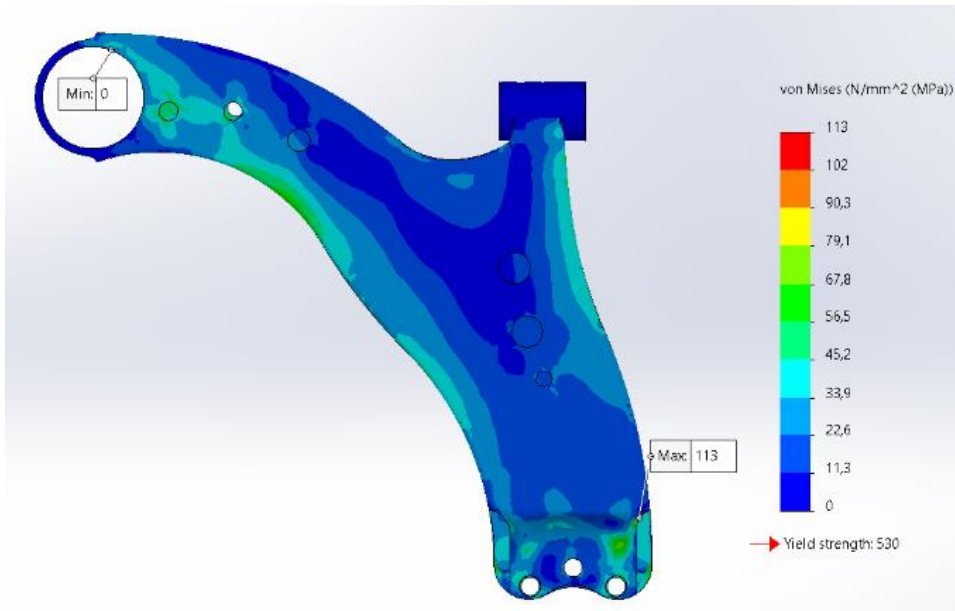


ΣΦ2

(β)

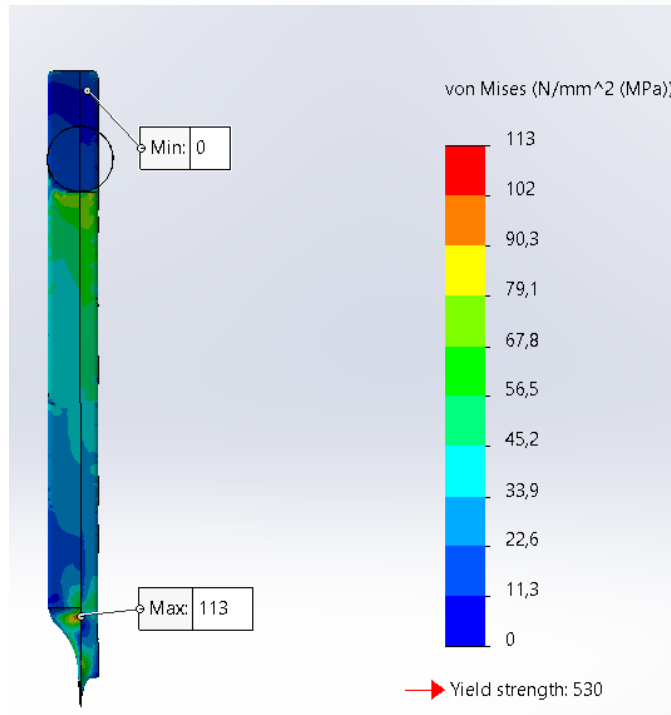


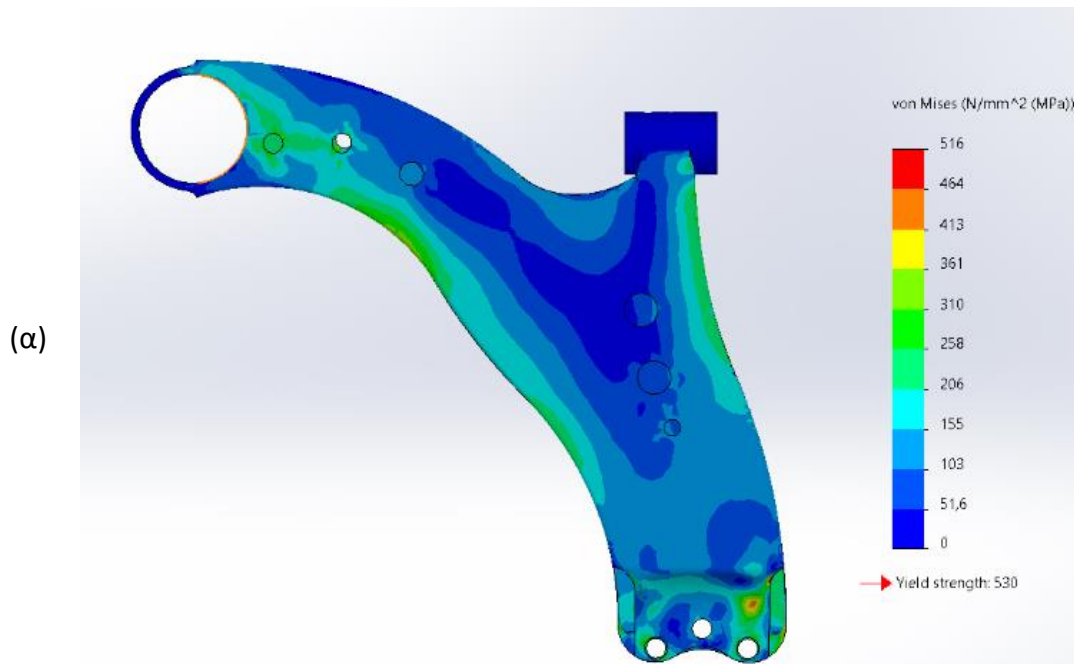
(α)



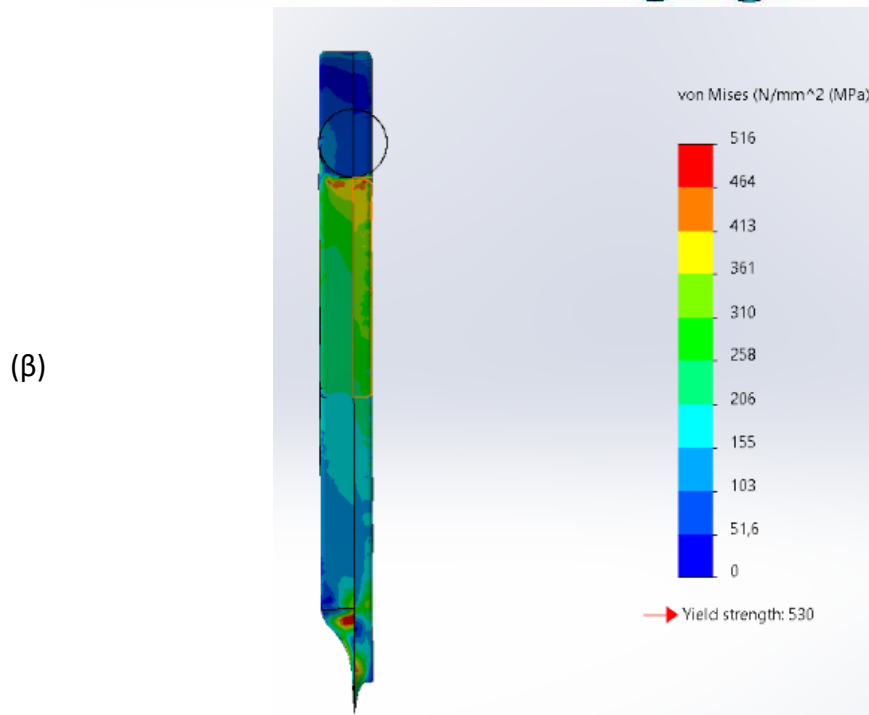
ΣΦ3

(β)





ΣΦ4



Σχήμα 4.2: Κατανομή τάσης του ΠΣ1 από χάλυβα AISI 1045 σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη

Παρατηρούμε ότι οι κατανομές των τάσεων είναι παρόμοιες σε κάθε ΣΦ με το κράμα αλουμινίου και οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στα ίδια σημεία όπως ήταν λογικό αφού έγινε αλλαγή μόνο στο υλικό κι όχι στο σχήμα του ψαλιδιού. Επίσης βλέπουμε

ότι οι μέγιστες τάσεις είναι κοντά στο όριο διαρροής αλλά είναι τοπικές και σε μικρή έκταση οπότε δεν μας επηρεάζουν έντονα. Στο υπόλοιπο ψαλίδι οι τάσεις είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες και με χαμηλές τιμές. Παρόλο που μπορεί να έχουμε παρόμοιες κατανομές, οι μέγιστες τιμές των τάσεων διαφοροποιούνται και γι' αυτό παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 μαζί με τις τιμές των μέγιστων μετατοπίσεων.

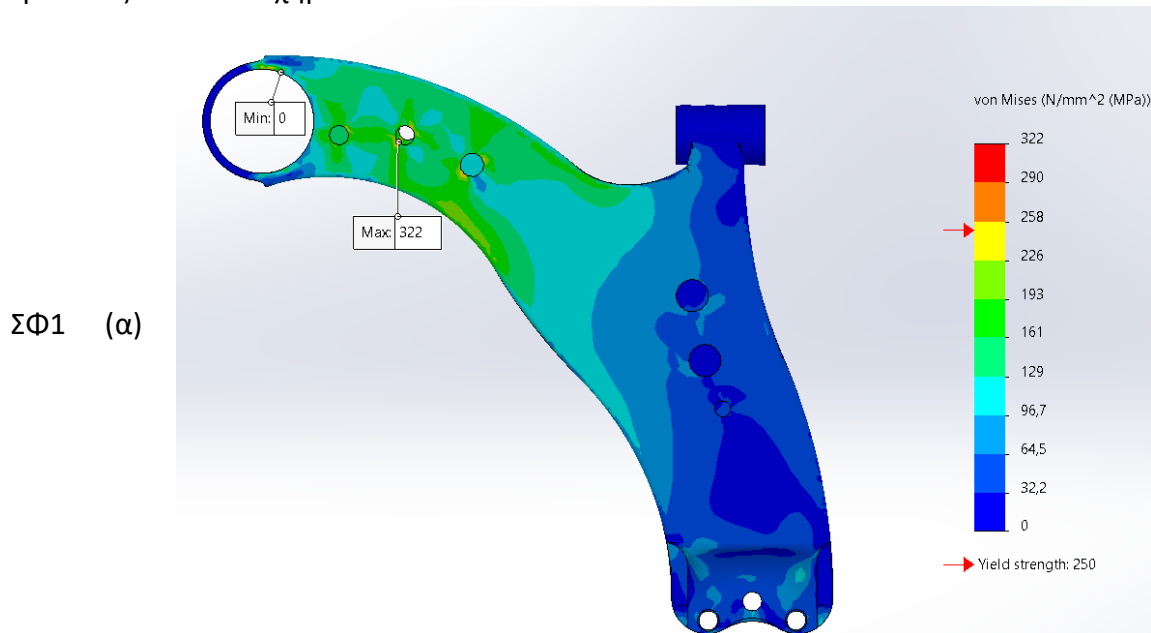
Πίνακας 4.2: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ1 από χάλυβα AISI 1045

ΣΦ	Τάση [MPa]	Συνολική μετατόπιση [mm]	Μετατόπιση κατά τον άξονα		
			x [mm]	y [mm]	z [mm]
ΣΦ1	325	4,9	0,1	0,3	4,9
ΣΦ2	462	1,4	1,0	0,4	0,9
ΣΦ3	113	0,3	0,2	0,1	0,2
ΣΦ4	516	1,9	1,4	0,6	1,2

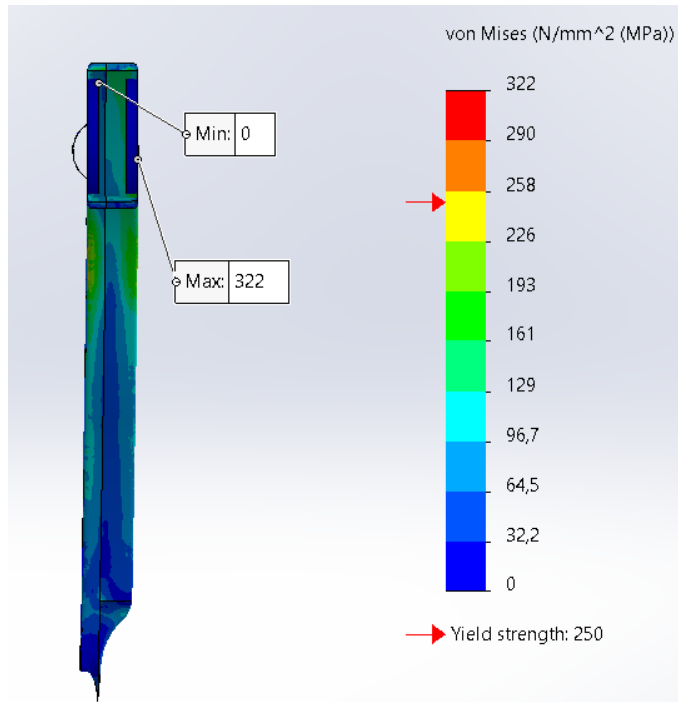
Όσον αφορά τις διαφορές μεταξύ των ΣΦ είναι παρόμοιες με αυτές στο κράμα αλουμινίου. Ωστόσο ενώ βλέπουμε ότι οι τάσεις μεταξύ των δύο υλικών σε όλα τα ΣΦ είναι παρόμοιες, παρατηρούμε οι τιμές των μετατοπίσεων διαφέρουν αρκετά. Στην περίπτωση του χάλυβα είναι αισθητά χαμηλότερες οι τιμές όλων των μετατοπίσεων, που είναι λογικό αφού έχουμε χάλυβα που είναι θεωρητικά «σκληρότερο» υλικό.

4.1.3 Χάλυβας ASTM A36

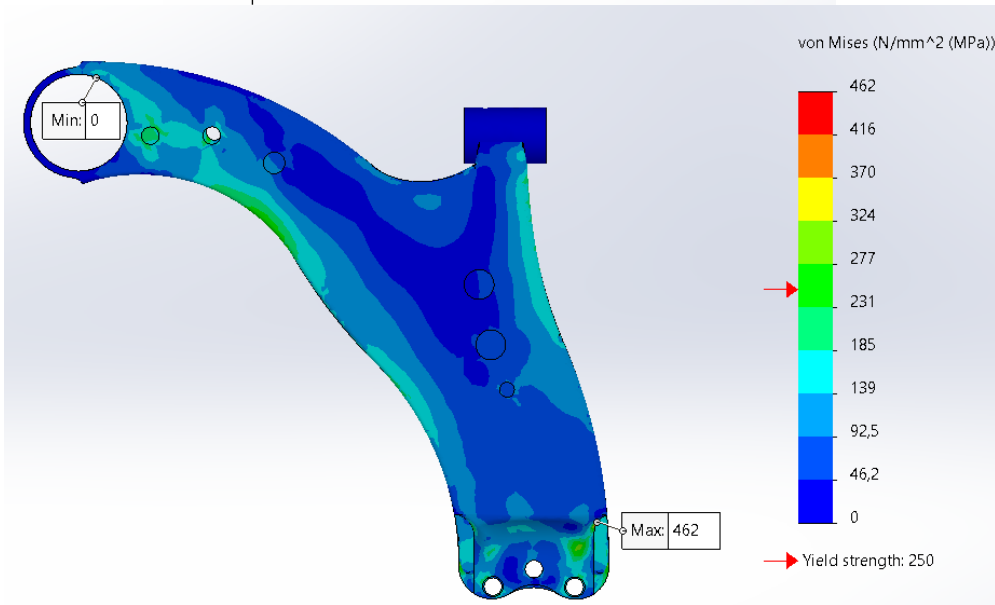
Τα αποτελέσματα του βραχίονα ελέγχου (ΠΣ1) για τον χάλυβα ASTM A36 από όλα τα ΣΦ παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3.



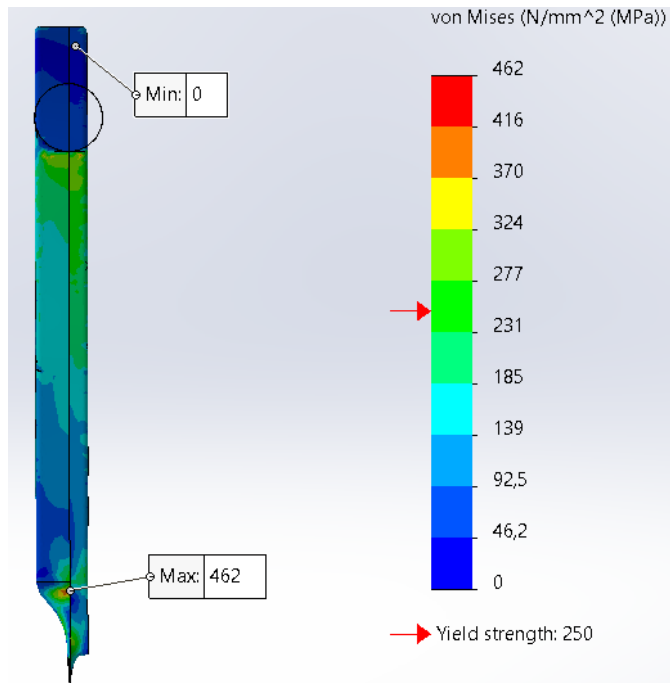
(β)



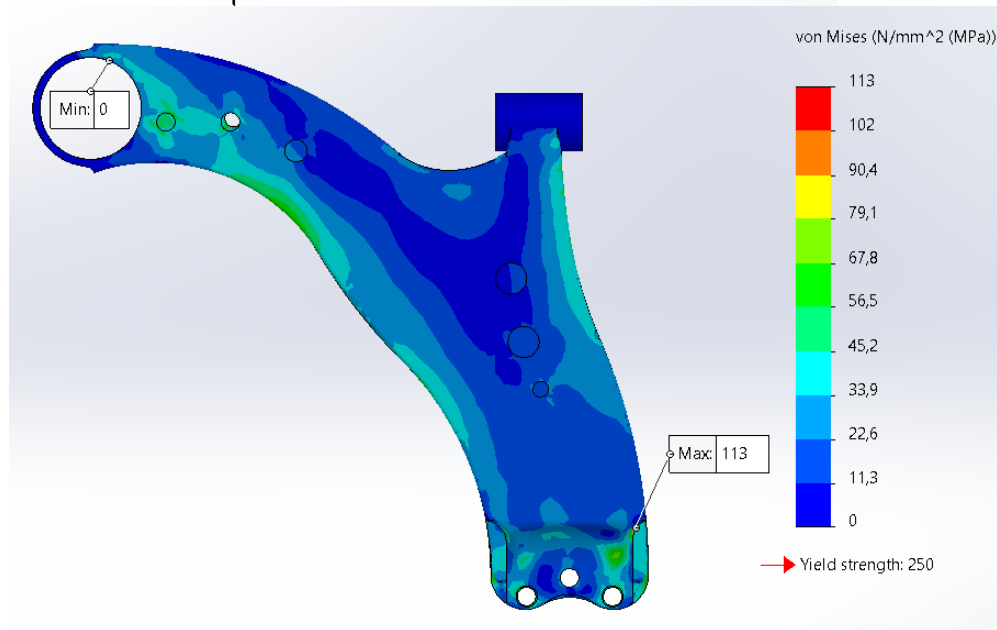
ΣΦ2 (α)



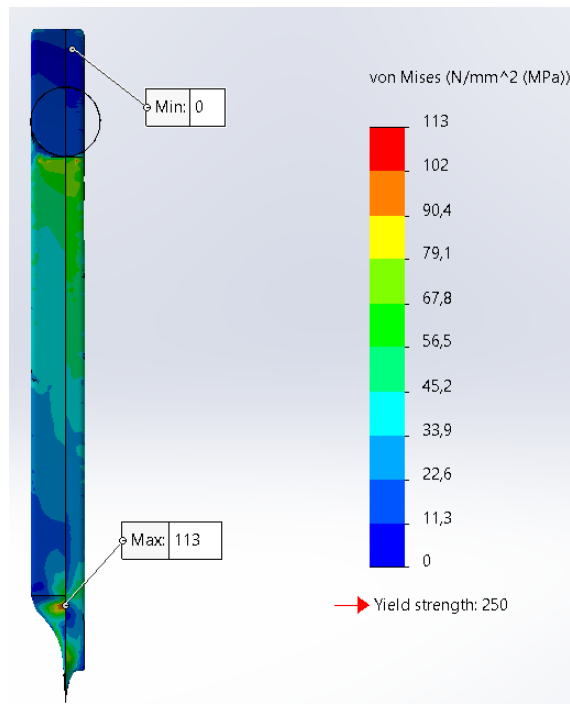
(β)



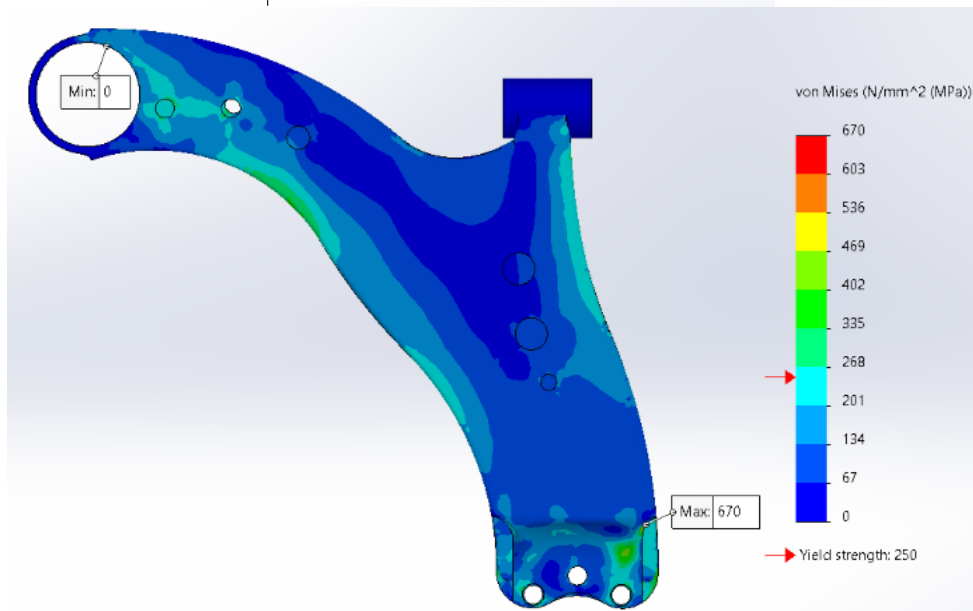
ΣΦ3 (α)



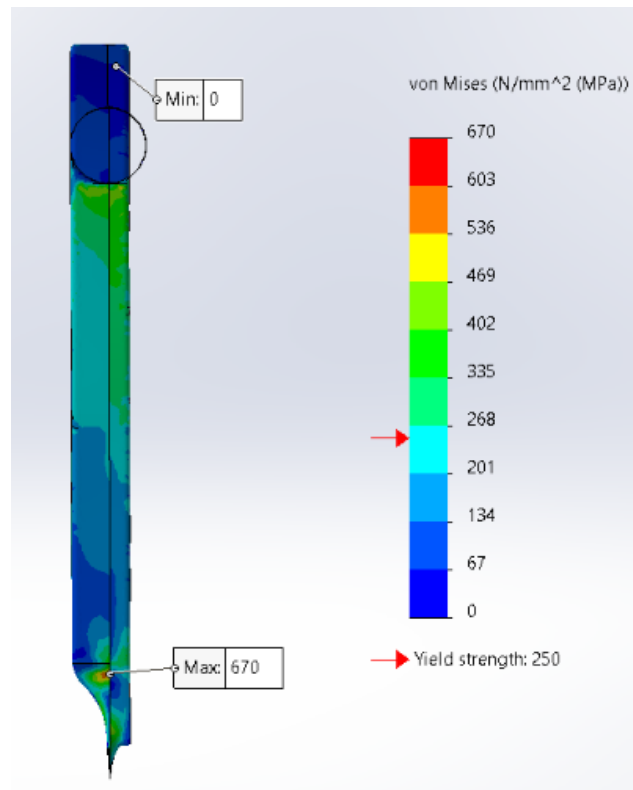
(β)



ΣΦ4 (α)



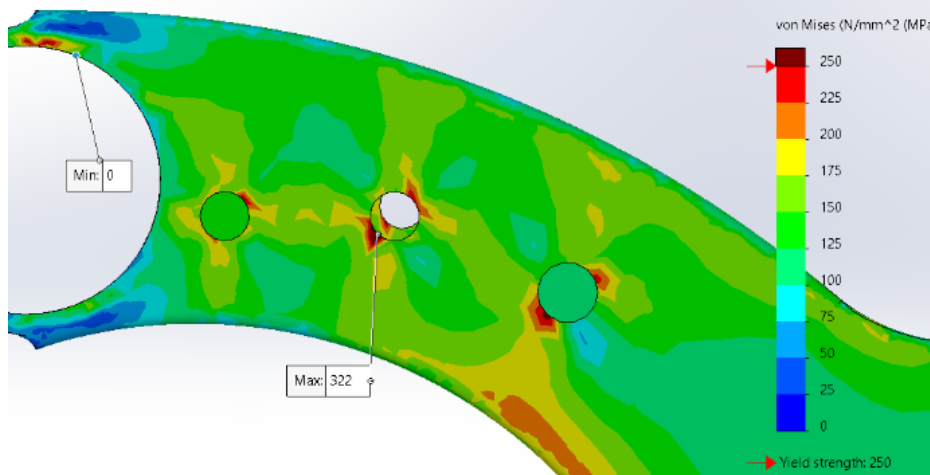
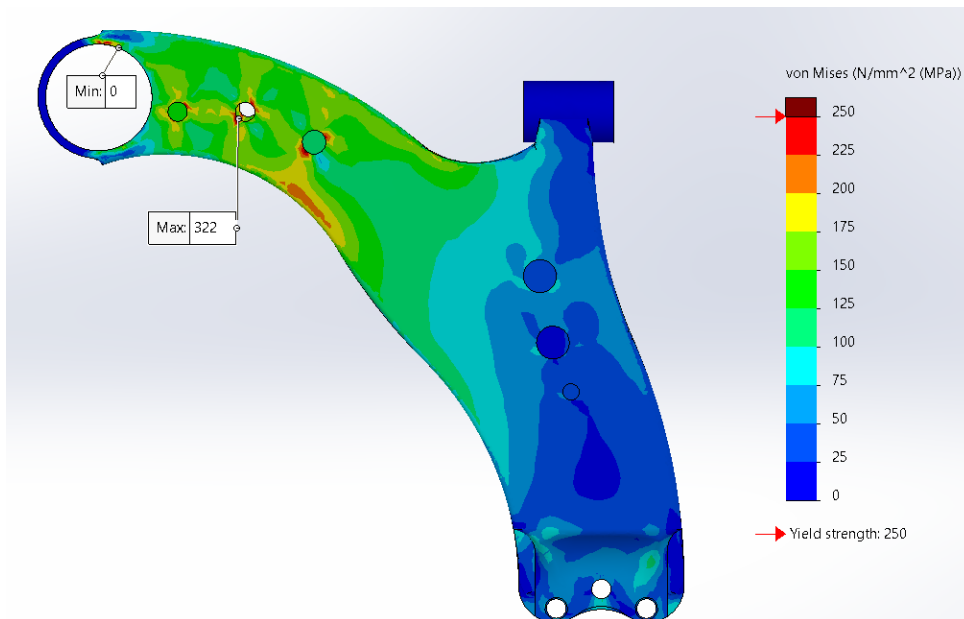
(β)

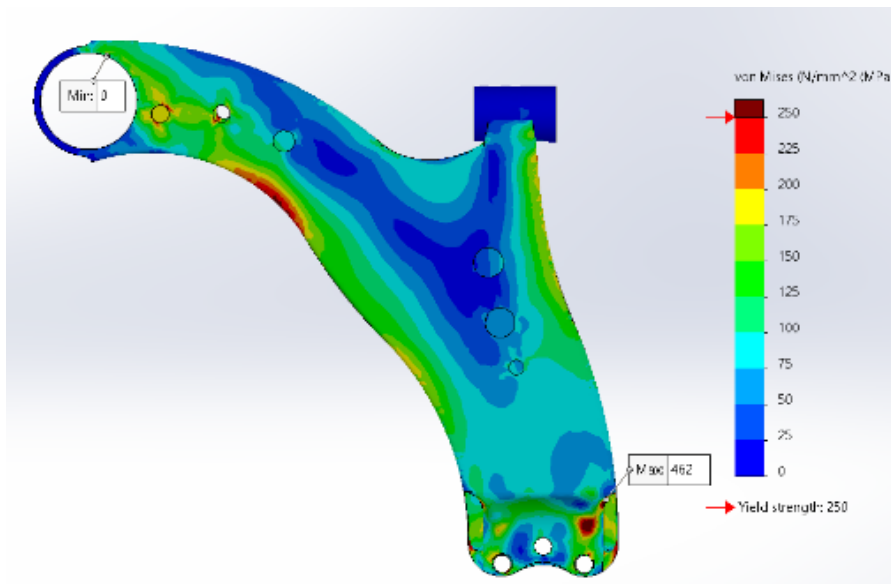


Σχήμα 4.3: Κατανομή τάσης του ΠΣ1 από χάλυβα ASTM A36 σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη

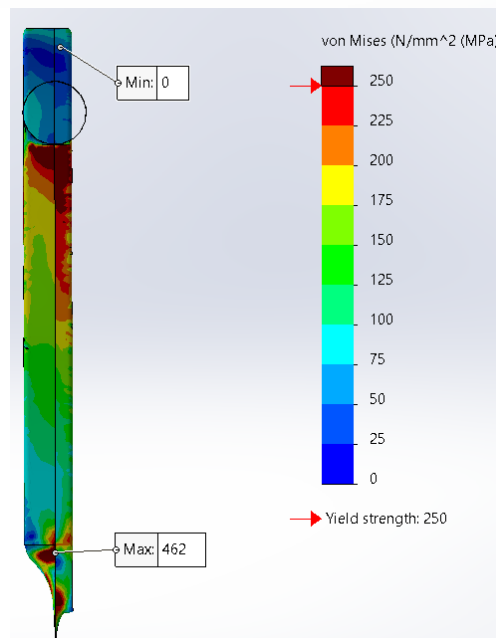
Στο συγκεκριμένο υλικό παρατηρούμε ότι στα ΣΦ1, ΣΦ2 και ΣΦ4 ξεπερνιέται το όριο διαρροής, δεδομένο που αναμέναμε, καθώς το όριο διαρροής είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με τα προηγούμενα δύο υλικά, σχεδόν το μισό. Σε γενικά πλαίσια, όμως, οι κατανομές των τάσεων είναι παρόμοιες με τις παραπάνω και οι μέγιστες τιμές σημειώνονται σε παρόμοια σημεία. Ωστόσο παρόλο που οι τιμές των τάσεων είναι μεγαλύτερες από το όριο διαρροής αυτές είναι τοπικές και συγκεντρώνονται σε πολύ μικρές περιοχές στην περίπτωση του ΣΦ1. Όμως στην περίπτωση του ΣΦ2 και ΣΦ4, έχοντας δημιουργήσει το διάγραμμα των τάσεων να φαίνονται οι τιμές που ξεπερνάνε το όριο διαρροής (καφέ χρώμα), βλέπουμε στο Σχήμα 4.4 ότι αυτές οι περιοχές καλύπτουν μεγάλο μέρος του ψαλιδιού. Επομένως μπορούμε να πούμε ότι το συγκεκριμένο υλικό δεν είναι το ιδανικό για τον συγκεκριμένο σχεδιασμό του βραχίονα ελέγχου.

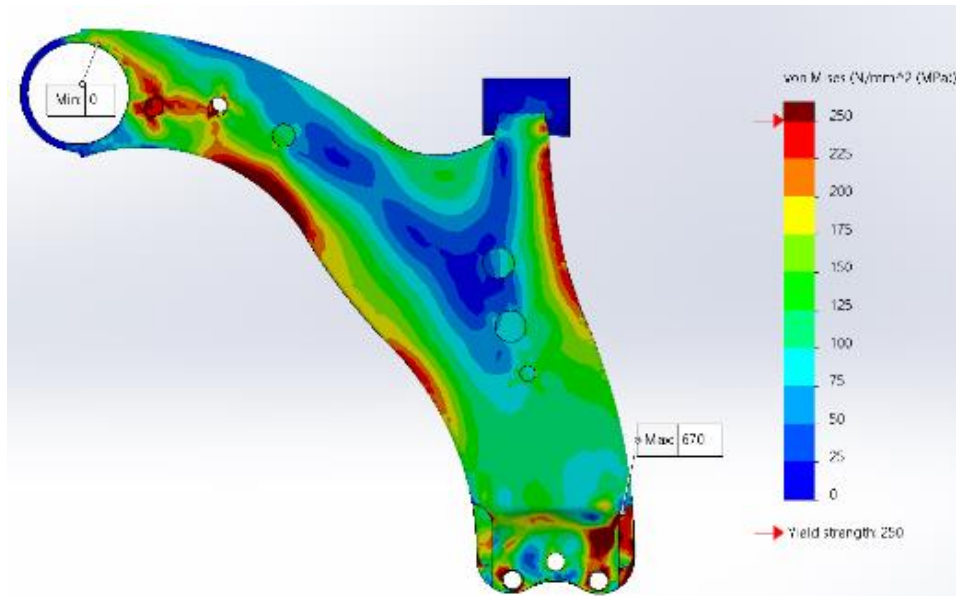
ΣΦ1



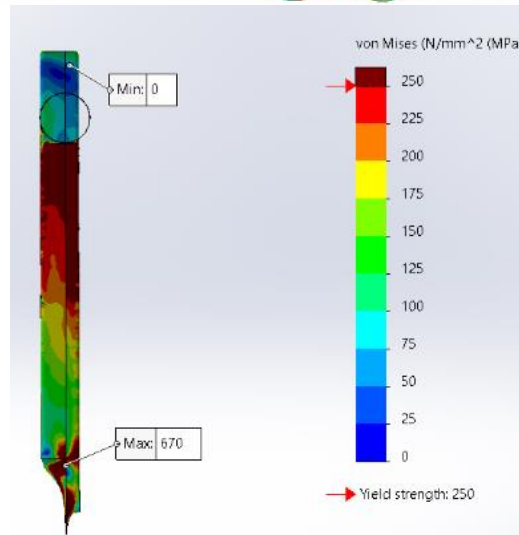


ΣΦ2





ΣΦ4



Σχήμα 4.4: Κατανομή τάσεων ΠΣ1 από χάλυβα ASTM A36 με επισήμανση των περιοχών που ξεπερνάνε το όριο διαρροής

Παρόλα αυτά για λόγους πληρότητας οι τιμές των μέγιστων τάσεων von Mises και μετατοπίσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ1 από χάλυβα ASTM A36

ΣΦ	Τάση [MPa]	Συνολική μετατόπιση [mm]	Μετατόπιση κατά τον άξονα		
			x [mm]	y [mm]	z [mm]
ΣΦ1	322	5,0	0,1	0,3	5,0
ΣΦ2	462	1,4	1,1	0,4	0,9

ΣΦ3	113	0,3	0,3	0,1	0,2
ΣΦ4	670	1,9	1,4	0,6	1,2

Παρατηρούμε ότι οι διαφορές μεταξύ των ΣΦ είναι παρόμοιες με αυτές που έχουν και τα άλλα δύο υλικά. Επίσης οι τιμές των μετατοπίσεων είναι παραπλήσιες με αυτές του άλλου χάλυβα όπως είναι λογικό.

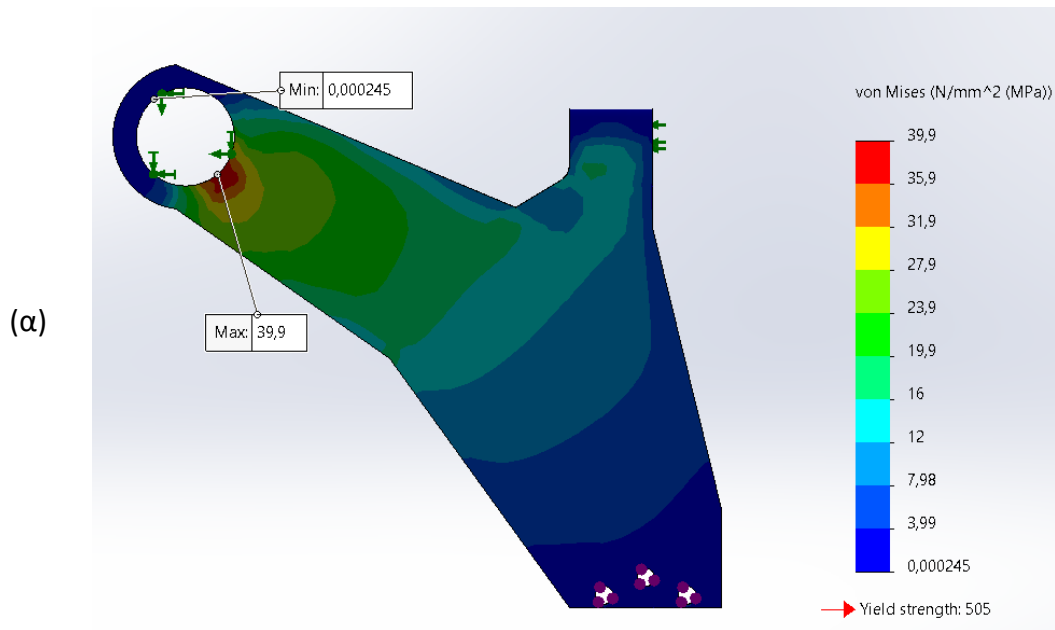
4.2 Στατική Ανάλυση και Τοπολογική Βελτιστοποίηση ΠΣ2

Οι στατικές αναλύσεις στο ΠΣ2 πραγματοποιήθηκαν για να δούμε την κατανομή των τάσεων που έχει στο μοντέλο, έτσι ώστε να έχουμε μια πρώτη εικόνα των περιοχών που έχουν μικρή συγκέντρωση τάσης και πιθανόν να αφαιρεθεί υλικό, όταν γίνει η ανάλυση της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Επίσης το λογισμικό απαιτεί να έχουν γίνει η γραμμική στατική ανάλυση του μοντέλου προτού πραγματοποιηθεί η τοπολογική βελτιστοποίηση, καθώς από αυτή λαμβάνει ορισμένα δεδομένα που χρειάζεται για την επίλυση της ανάλυσης. Επομένως παρακάτω θα παρουσιαστούν, για τα 3 διαφορετικά υλικά, συνοπτικά τα αποτελέσματα των στατικών αναλύσεων σε όλα τα ΣΦ του ΠΣ2, τα αποτελέσματα των τοπολογικών βελτιστοποιήσεων για κάθε ΣΦ ξεχωριστά αλλά το αποτέλεσμα της τοπολογικής βελτιστοποίησης όταν λαμβάνονται υπόψη όλα τα ΣΦ.

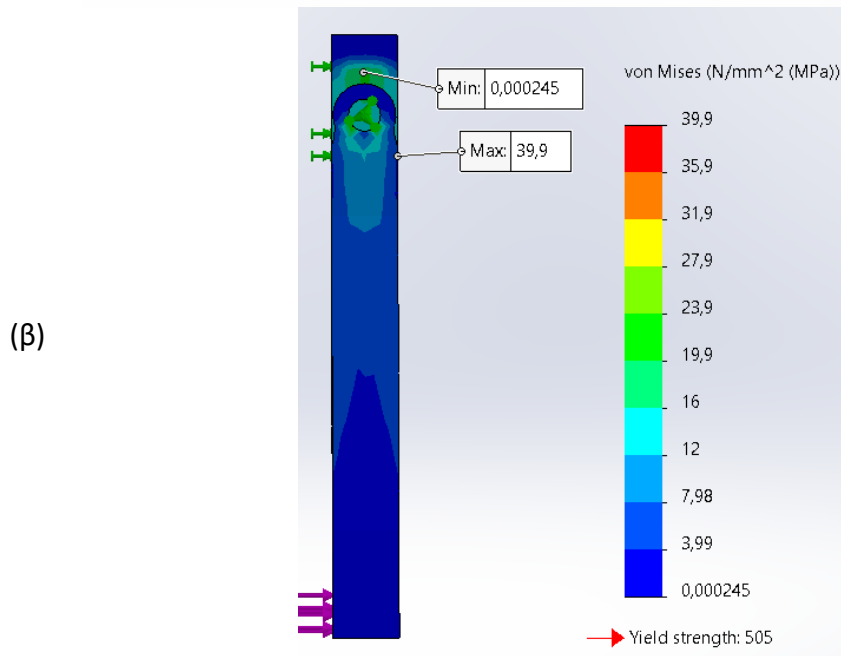
Ειδικότερα για την τελευταία ανάλυση αξίζει να σημειωθεί ότι επιλέγεται η επιλογή Πολλαπλών Σεναρίων Φόρτισης (Multiple Load Cases). Με τη συγκεκριμένη επιλογή το λογισμικό λαμβάνει υπόψη του το κάθε ΣΦ ξεχωριστά και όχι να ασκούνται ταυτόχρονα στο μοντέλο όλα τα ΣΦ. Έτσι δημιουργεί ένα βελτιστοποιημένο μοντέλο που έχει τη μέγιστη ακαμψία για κάθε ΣΦ, το οποίο μπορεί να δράσει ανεξάρτητα.

4.2.1 Κράμα Αλουμινίου 7075-T6

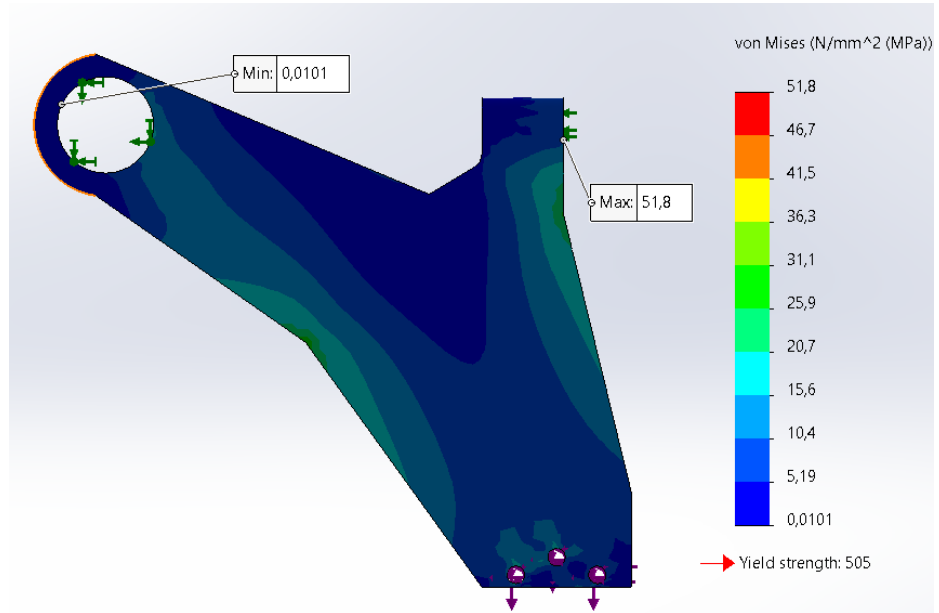
Αρχικά στο Σχήμα 4.5 βλέπουμε τα αποτελέσματα των στατικών αναλύσεων για κάθε σενάριο φόρτισης.



ΣΦ1

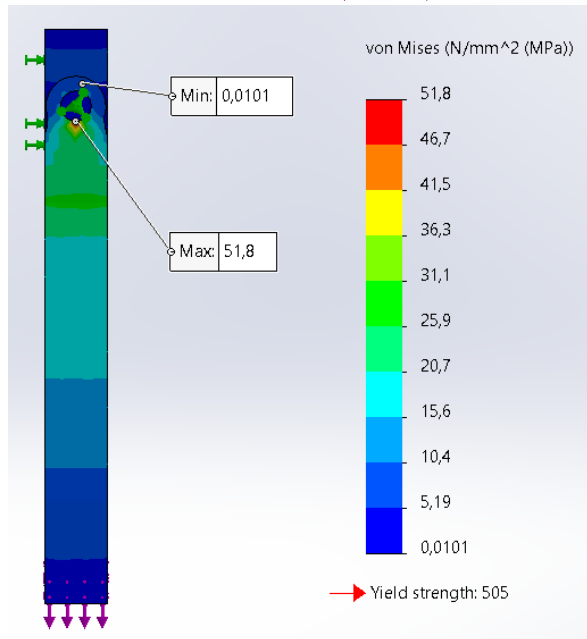


(α)

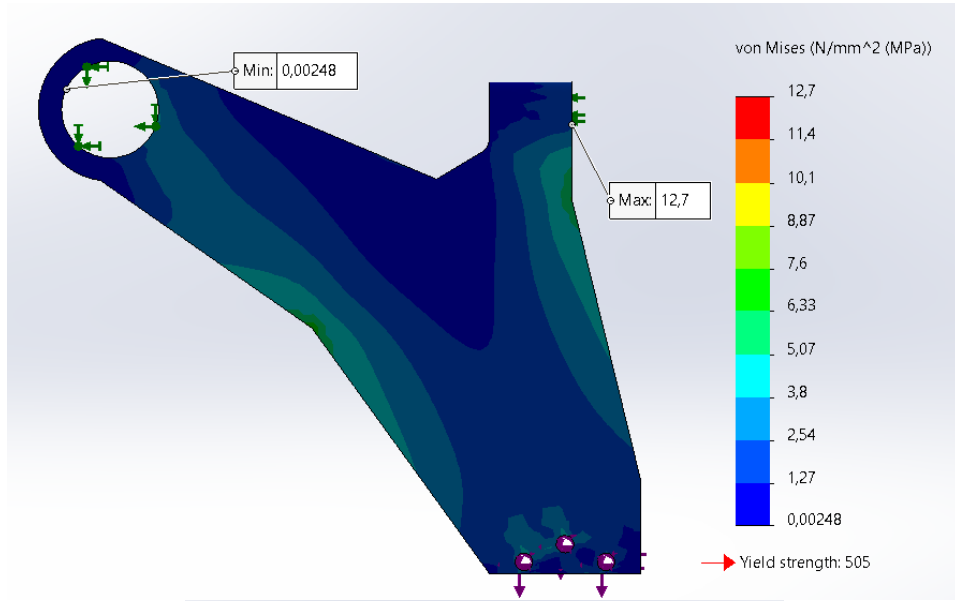


ΣΦ2

(β)

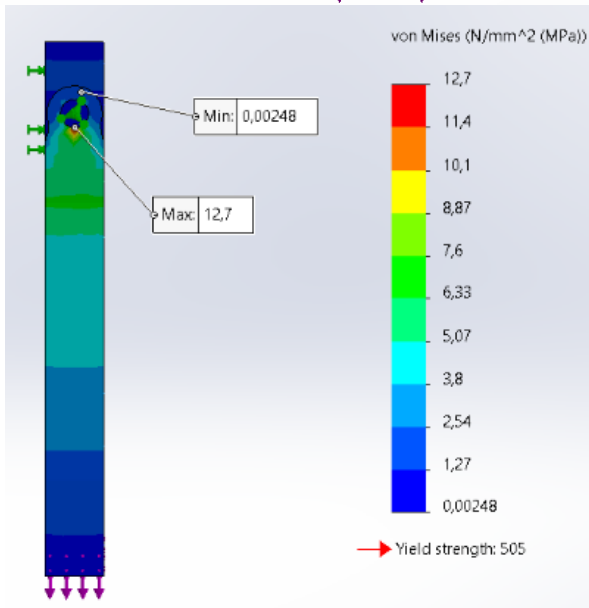


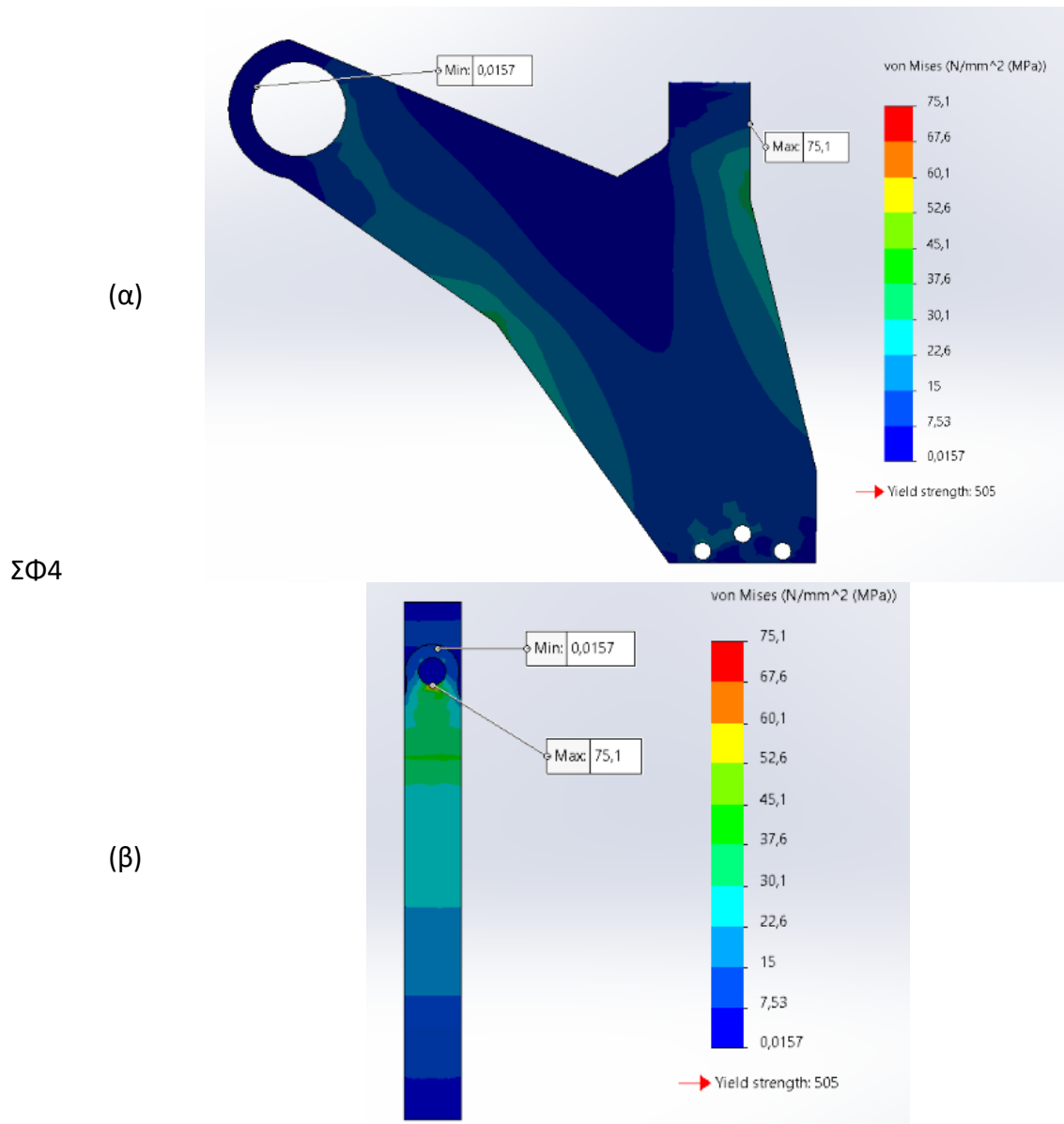
(α)



ΣΦ3

(β)





Σχήμα 4.5: Κατανομή τάσης του ΠΣ2 από κράμα αλουμινίου σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη

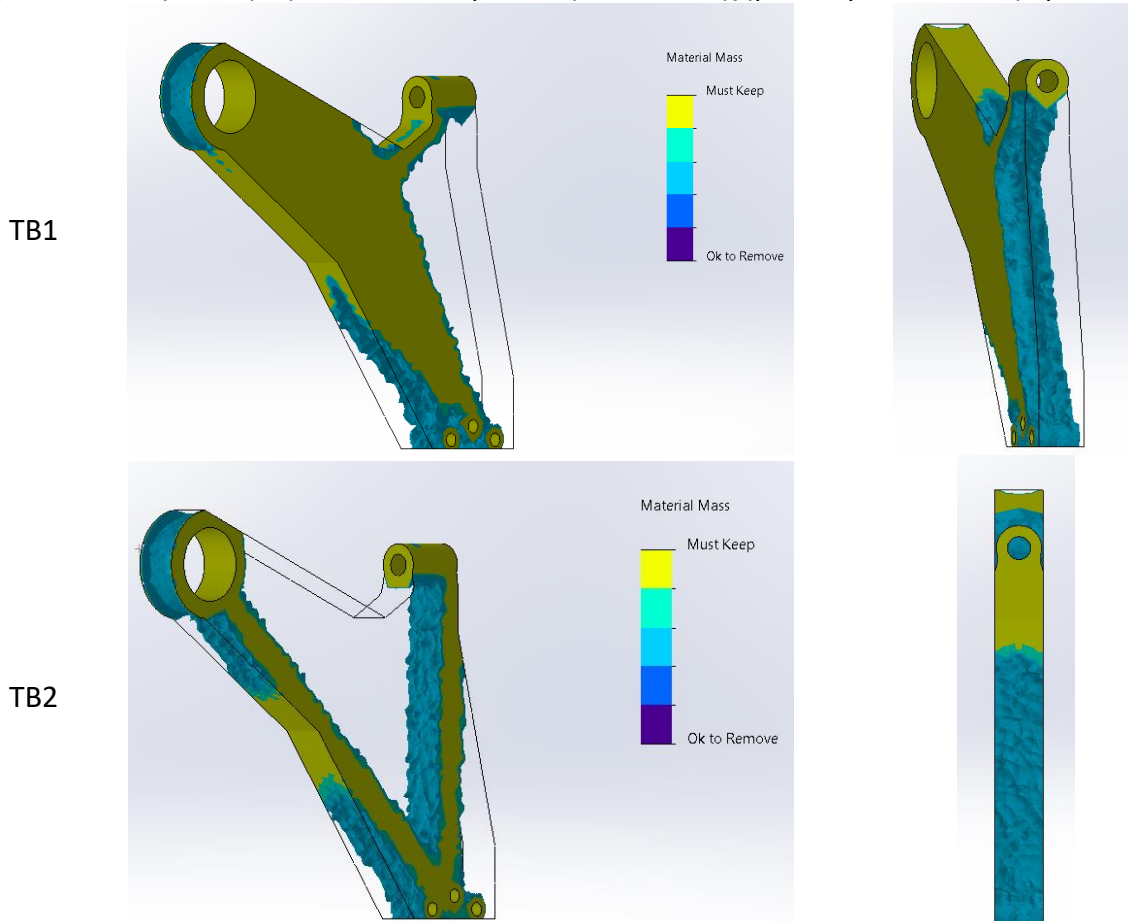
Παρατηρούμε ότι οι κατανομές τάσεων είναι παρόμοιες με μόνη διαφορετική αυτή του ΣΦ που η δύναμη ασκείται κατακόρυφα προς τα κάτω (F_z). Επίσης βλέπουμε ότι δημιουργούνται κυρίως στις ακμές που υπάρχουν στο μοντέλο μας. Ωστόσο οι μέγιστες τιμές των τάσεων και των μετατοπίσεων δεν είναι ίδιες και γι' αυτό παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

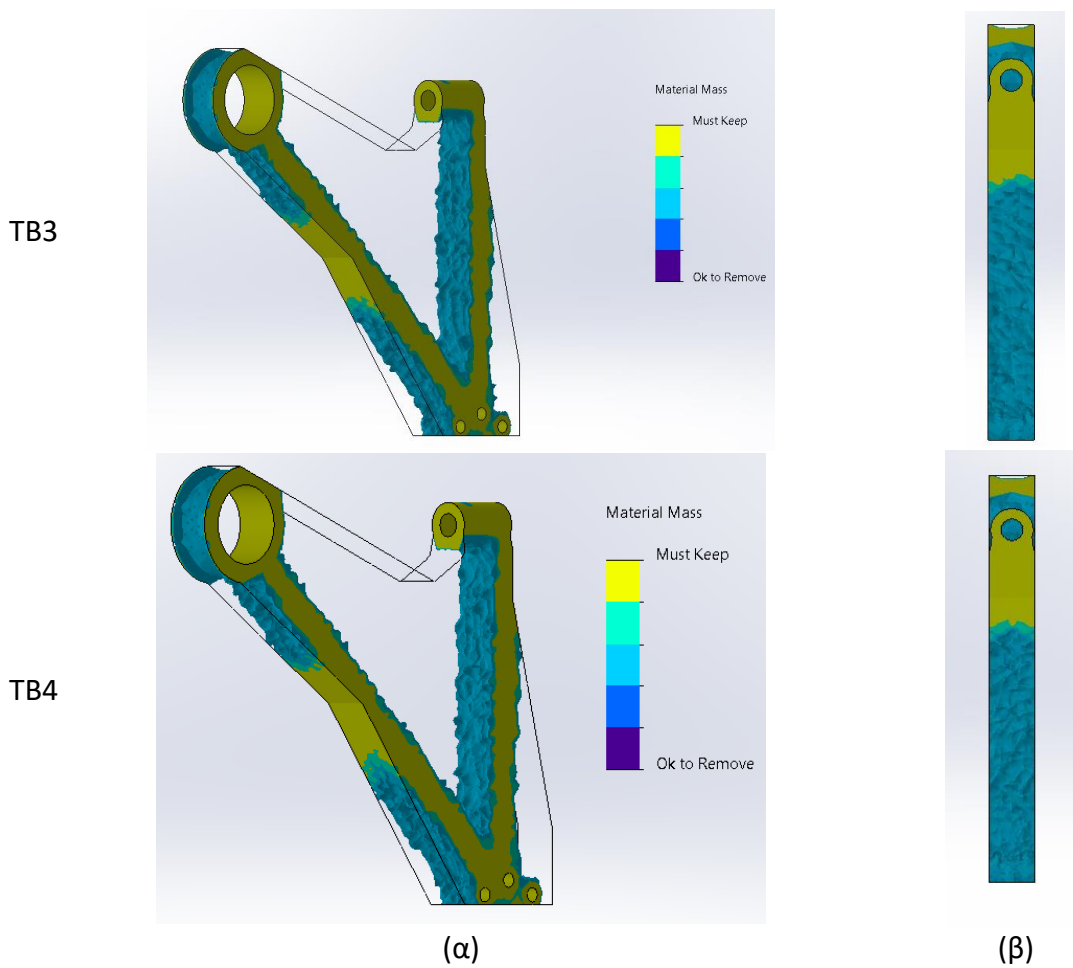
Πίνακας 4.4: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ2 από κράμα αλουμινίου

ΣΦ	Τάση [MPa]	Συνολική μετατόπιση [mm]	Μετατόπιση κατά τον άξονα		
			x [mm]	y [mm]	z [mm]
ΣΦ1	39,9	1,25	0	0	1,25
ΣΦ2	51,8	0,2	0,2	0,1	0
ΣΦ3	12,7	0	0	0	0
ΣΦ4	75,1	0,3	0,2	0,1	0

Είναι φανερό ότι τόσο οι τάσεις όσο και οι μετατοπίσεις είναι αισθητά μικρότερες σε σχέση με το ΠΣ1. Αυτό συμβαίνει, καθώς το ΠΣ2 είναι συμπαγές μοντέλο. Επίσης πάλι βλέπουμε ότι η μεγαλύτερη τάση κατά von Mises σχηματίζεται στο ΣΦ4, όπως και περιμέναμε.

Έχοντας τις κατανομές τάσεων προχωράμε στα αποτελέσματα των τοπολογικών βελτιστοποιήσεων (TB), τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6 για κάθε διαφορετικό ΣΦ.



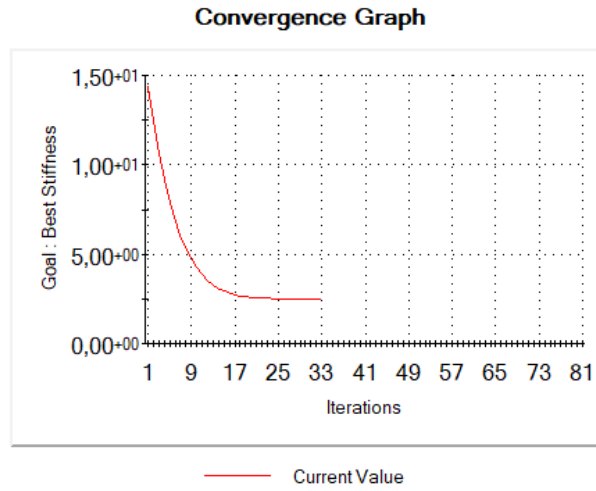


Σχήμα 4.6: Γεωμετρικό μοντέλο TB από κράμα αλουμινίου σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη

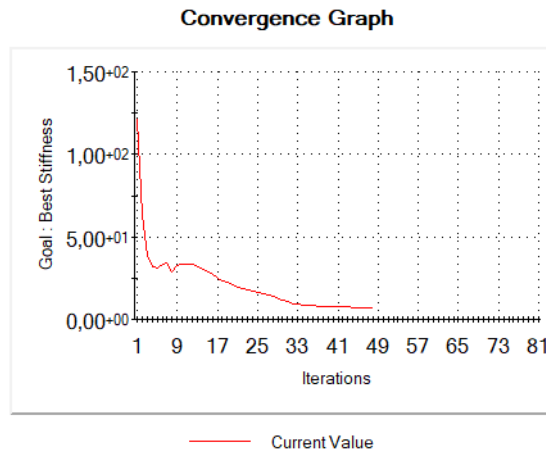
Παρατηρούμε ότι στις τρεις TB τα μοντέλα που δημιουργούνται είναι παρόμοια, κάτι που είναι λογικό καθώς οι φορτίσεις είναι παρόμοιες με μόνη αλλαγή στο μέτρο. Αυτό επιφέρει διαφορά στο πόσο υλικό μπορεί να αφαιρεθεί τελικά σε κάθε TB. Ωστόσο το αποτέλεσμα της TB1 είναι αρκετά διαφορετικό, δεδομένο που περιμέναμε λόγω της διαφορετικής κατανομής της τάσης που είδαμε στο Σχήμα 4.5 για το ΦΣ1.

Επίσης φαίνονται τα διαγράμματα σύγκλισης για τον στόχο (Σχήμα 4.7), τον περιορισμό μάζας (Σχήμα 4.8) και τον περιορισμό τάσης (Σχήμα 4.9) για κάθε TB.

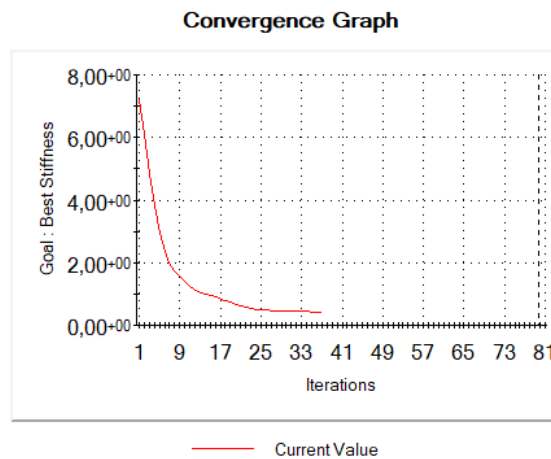
TB1



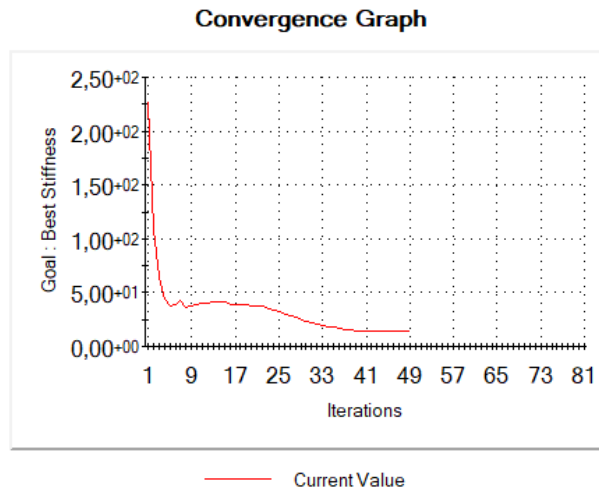
TB2



TB3



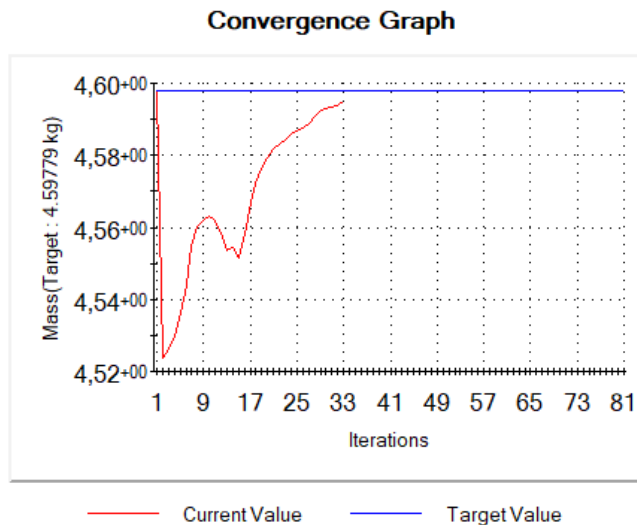
TB4



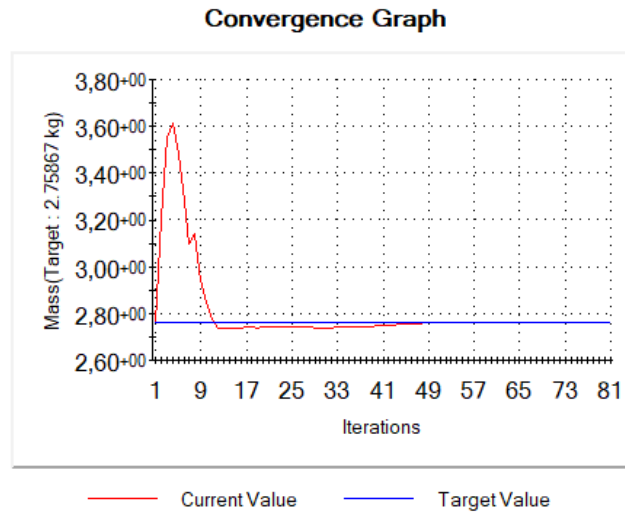
Σχήμα 4.7: Διαγράμματα σύγκλισης για στόχο

Αρχικά παρατηρούμε ότι το πλήθος των επαναλήψεων που ολοκληρώνεται η κάθε TB διαφέρει. Επίσης βλέπουμε στην TB1 όπου λαμβάνεται υπόψη μόνο το ΣΦ1, ότι χρειάζεται τις λιγότερες επαναλήψεις (33) κι αυτό συμβαίνει καθώς είναι το απλούστερο ΣΦ και με τη μικρότερη τιμή. Επίσης βλέπουμε ότι στις TB που έχουμε ΣΦ με μεγαλύτερες τιμές στις δυνάμεις, η σύγκλιση της καμπύλης δεν είναι εκθετική αλλά έχει κάποιες διακυμάνσεις.

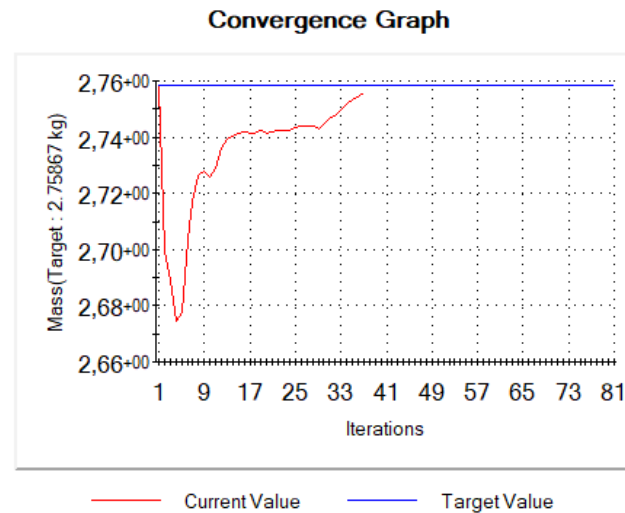
TB1



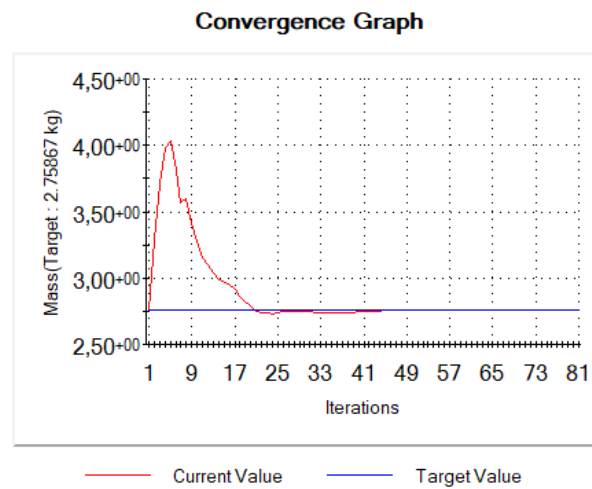
TB2



TB3



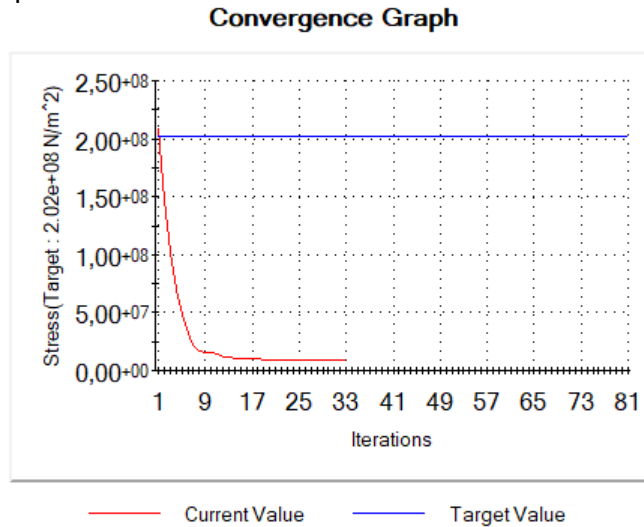
TB4



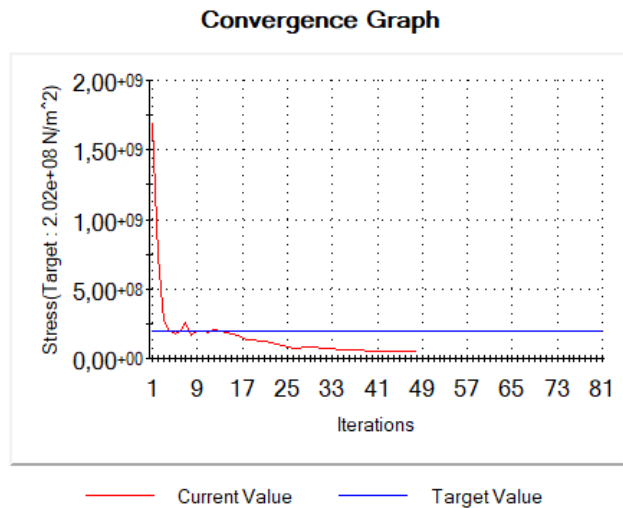
Σχήμα 4.8: Διαγράμματα σύγκλισης για τον περιορισμό μάζας

Στα διαγράμματα σύγκλισης του περιορισμού μάζας βλέπουμε ότι ξεκινάει από την επιθυμητή τιμή και στη συνέχεια βλέπουμε να γίνεται μια υπερακόντιση στο διάγραμμα, είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω, κι έπειτα να προσπαθεί να συγκλίνει στην τιμή που ορίστηκε στον περιορισμό.

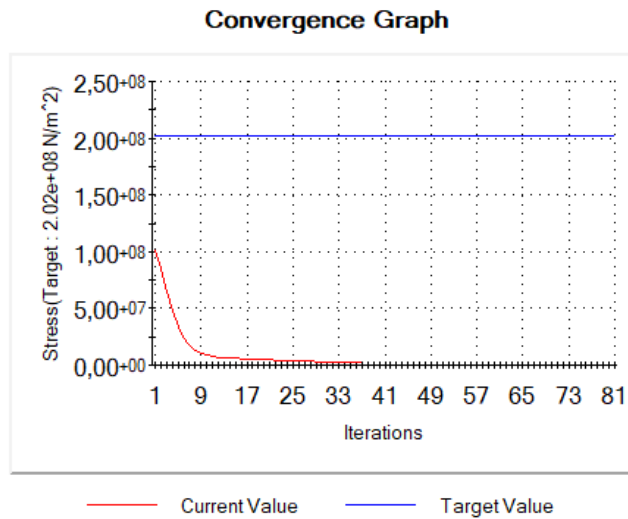
TB1



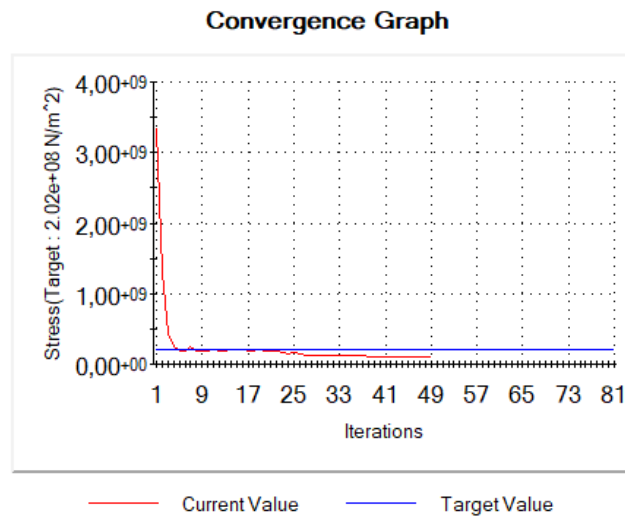
TB2



TB3



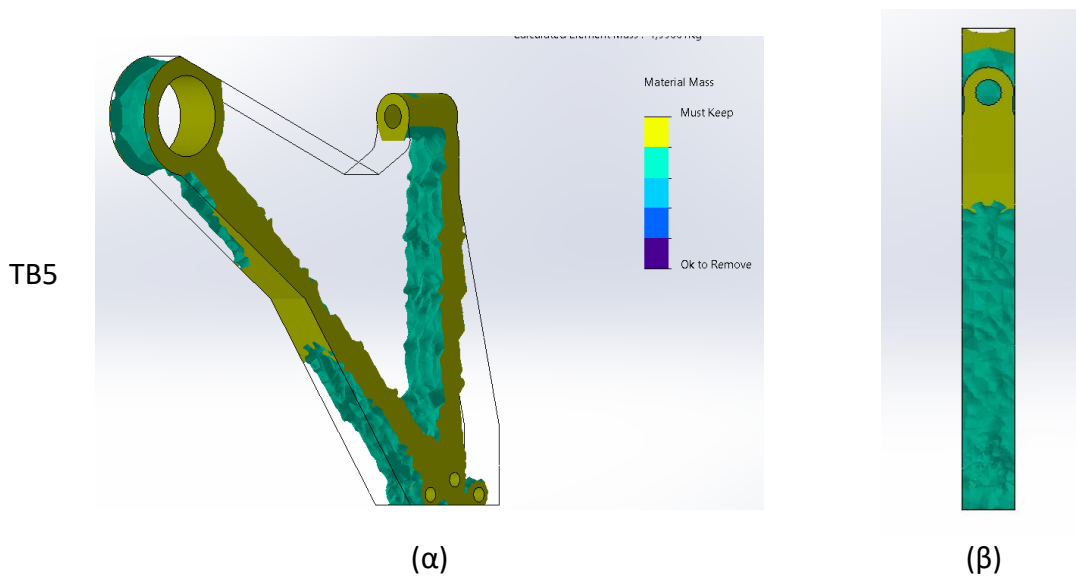
TB4



Σχήμα 4.9: Διαγράμματα σύγκλισης για τον περιορισμό της τάσης

Τέλος στα διαγράμματα σύγκλισης βλέπουμε ότι οι επαναλήψεις ολοκλήρωσης είναι ίδιες με τις αντίστοιχες των προηγούμενων διαγραμμάτων. Επίσης παρατηρούμε ότι στις TB1 και TB3, που οι τιμές των δυνάμεων είναι σχετικά μικρές, το διάγραμμα φτάνει πολύ πιο χαμηλά την τιμή τάσης από την ζητούμενη.

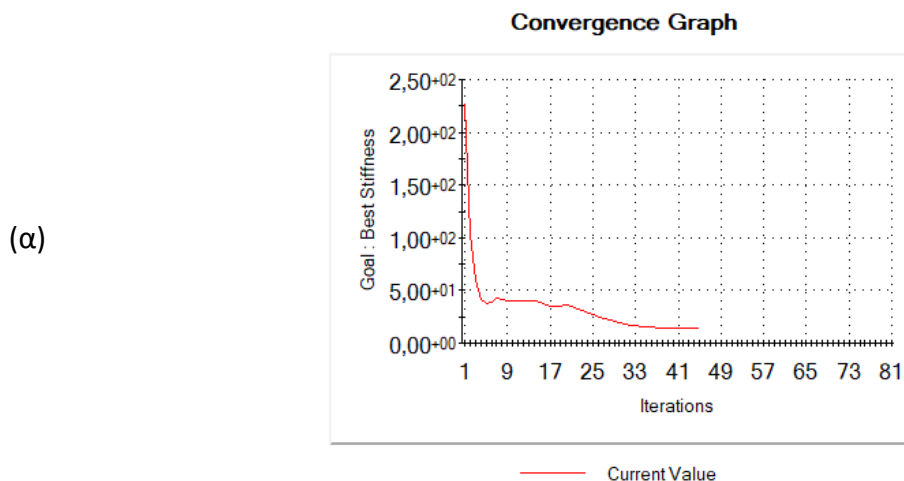
Ωστόσο εμείς επιθυμούμε ένα νέο μοντέλο που θα ικανοποιεί όλα τα ΣΦ και γι' αυτό στο Σχήμα 4.10 φαίνεται το αποτέλεσμα της TB5 που λαμβάνει υπόψη όλα τα ΣΦ.



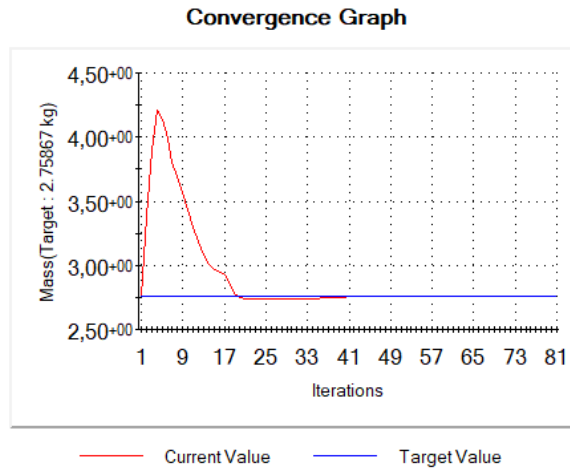
Σχήμα 4.10: Γεωμετρικό αποτέλεσμα TB5 από κράμα αλουμινίου σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη

Παρατηρούμε ότι το υλικό έχει αφαιρεθεί από το κεντρικό κομμάτι και μας δίνεται εν τέλη μια συμπαγής γεωμετρία ενός ψαλιδιού με δύο βραχίονες, που μοιάζει αρκετά με τα αποτελέσματα των TB2, TB3 και TB4 με βασική διαφορά το ποσοστό υλικού που αφαιρέθηκε. Επίσης βλέπουμε ότι υπάρχει δυνατότητα να αφαιρεθεί και περαιτέρω υλικό κάτι το οποίο θα γίνει στον σχεδιασμό του νέου ψαλιδιού με βάση το παραπάνω αποτέλεσμα. Ωστόσο σύμφωνα με το λογισμικό το βάρος του συγκεκριμένου ανέρχεται στα **2,8kg**.

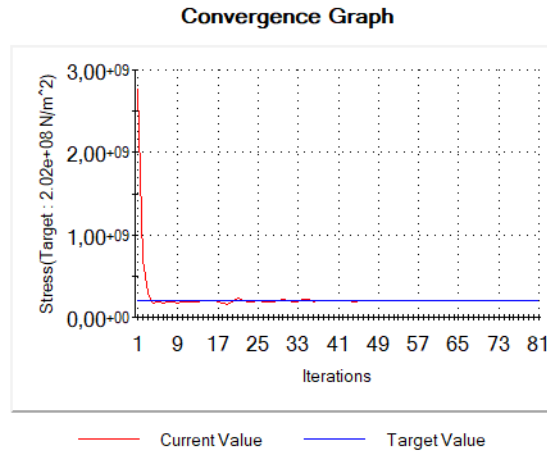
Επίσης στο Σχήμα 4.11 φαίνονται τα διαγράμματα σύγκλισης για τον στόχο και τους περιορισμούς για το TB5. Σημείωση ότι ο περιορισμός τάσης εφαρμόζεται για κάθε ΣΦ κι έτσι υπάρχουν και διαφορετικά διαγράμματα.



(β)

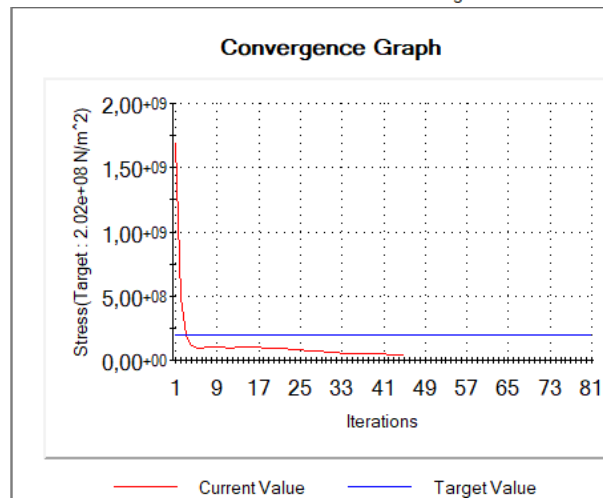


ΣΦ1

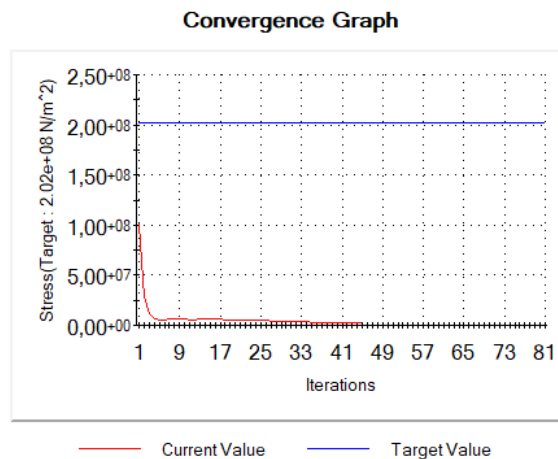


(γ)

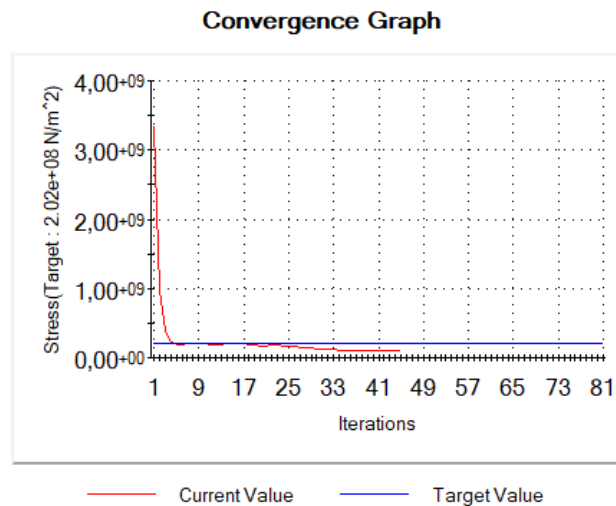
ΣΦ2



ΣΦ3



ΣΦ4

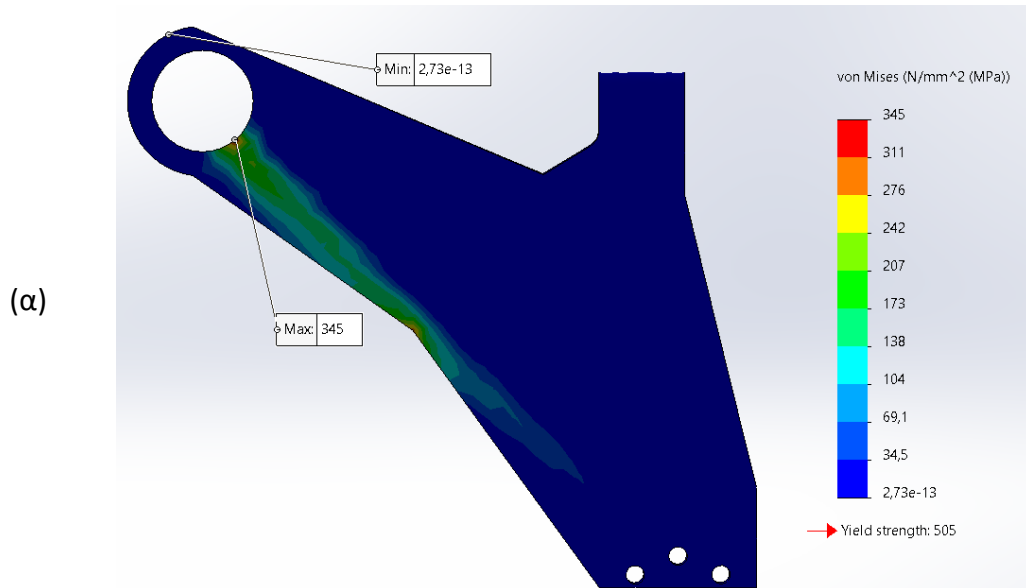


Σχήμα 4.11: Διαγράμματα σύγκλισης για στόχο (α), περιορισμό μάζας (β), περιορισμό τάσης (γ)

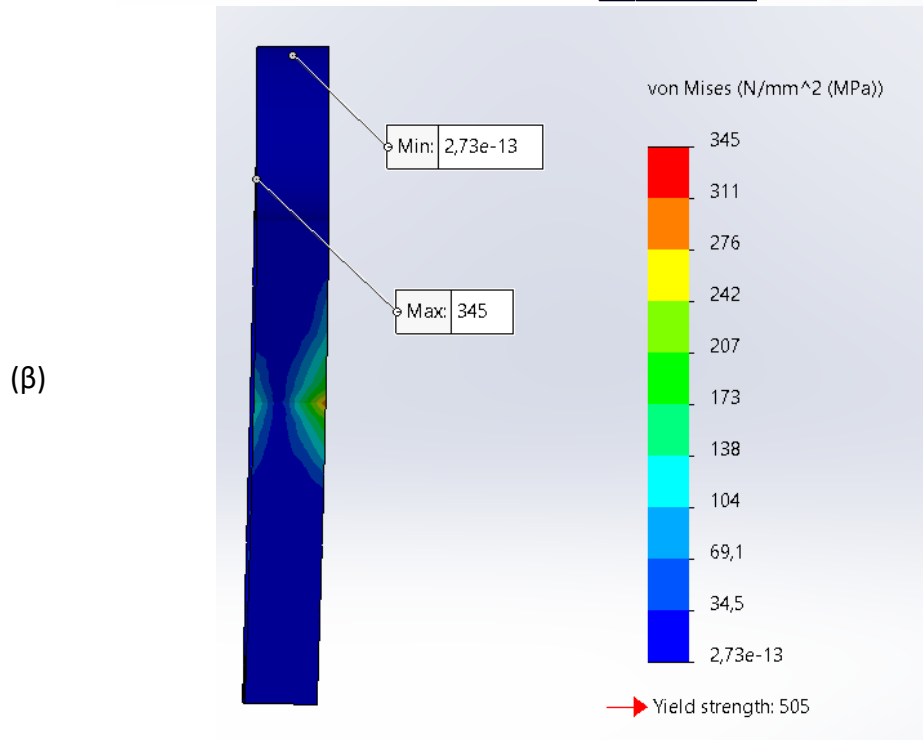
Βλέπουμε ότι στο διάγραμμα σύγκλισης της τάσης του ΣΦ3 οι τιμές τις τάσεις ξεκινάν κάτω από την τιμή στόχο, καθώς έχουμε ούτως ή άλλως μικρές τάσεις λόγω των μικρών τιμών φόρτισης ΣΦ3. Επίσης παρατηρούμε ότι οι επαναλήψεις που ολοκληρώνεται η TB5 βρίσκονται εντός του εύρους των επαναλήψεων των TB1-TB4. Τέλος τα διαγράμματα τάσης είναι 4, καθώς το λογισμικό λαμβάνει υπόψη και τα 4 ΣΦ για να προκύψει το στιβαρότερο μοντέλο.

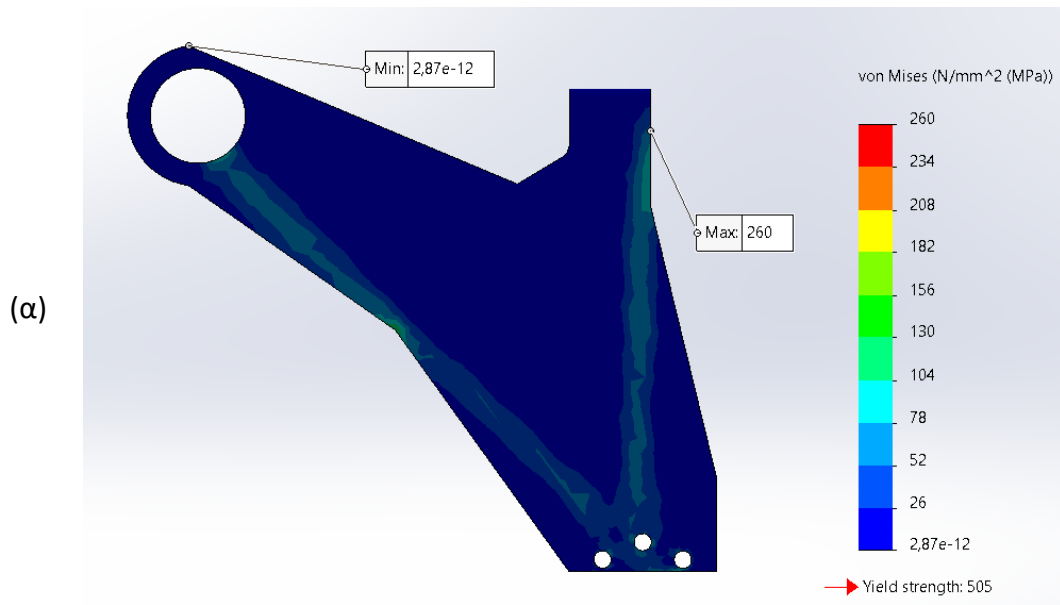
Ακόμη το λογισμικό παρέχει τις κατανομές τάσεις για κάθε ΣΦ σε περίπτωση που εφαρμόζαμε στατικές αναλύσεις στο αποτέλεσμα της TB5. Όμως παρατηρώντας το Σχήμα 4.12 πρέπει να δοθεί προσοχή στο γεγονός ότι το λογισμικό δημιουργεί ένα διάγραμμα κατανομής τάσεων για το βελτιστοποιημένο μοντέλο με τα φορτία από την προσομοίωση της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Ωστόσο, οι τιμές τάσης βασίζονται σε ολόκληρο το μοντέλο, το οποίο μετά τη βελτιστοποίηση μπορεί να περιέχει πορώδη στοιχεία που είναι

λιγότερο άκαμπτα από τα πλήρως πυκνά στοιχεία. Για το λόγο αυτό, αυτές οι τιμές θα πρέπει να θεωρηθούν ως μια πρόχειρη εκτίμηση για το πώς θα μπορούσε να συμπεριφερθεί το τελικό μοντέλο.

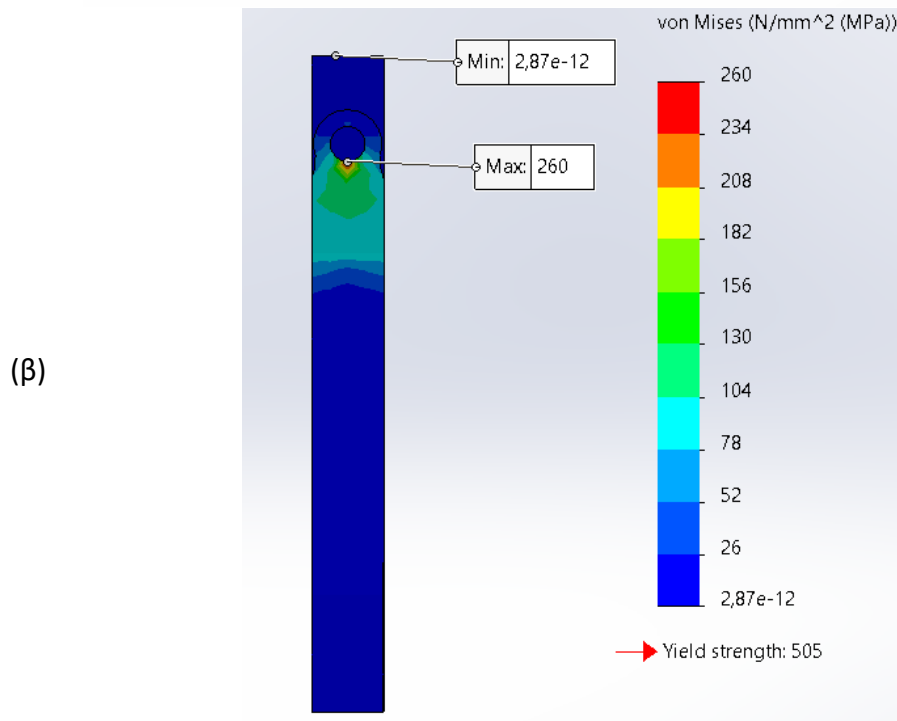


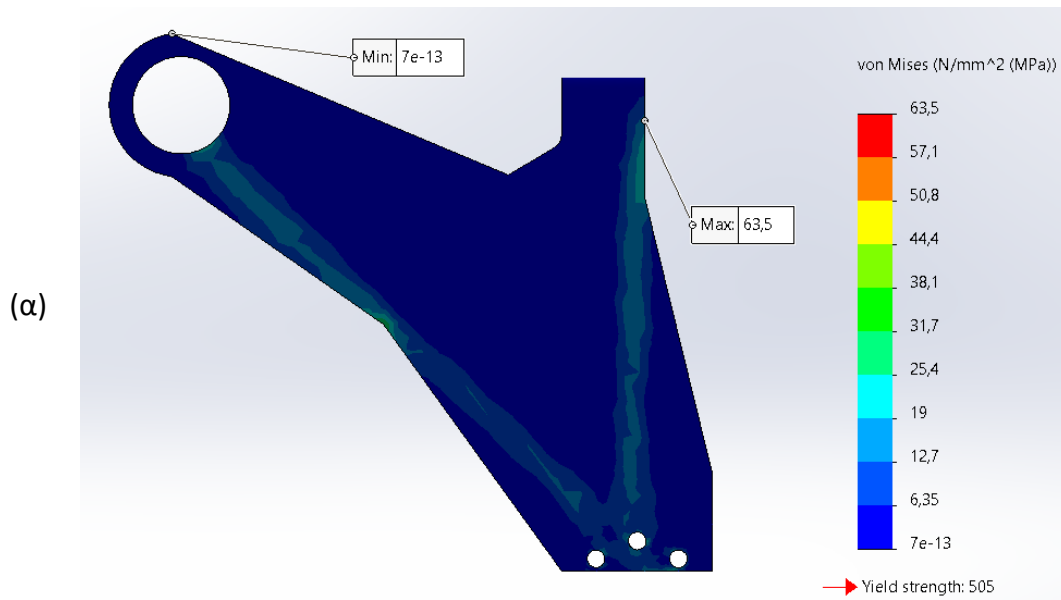
ΣΦ1



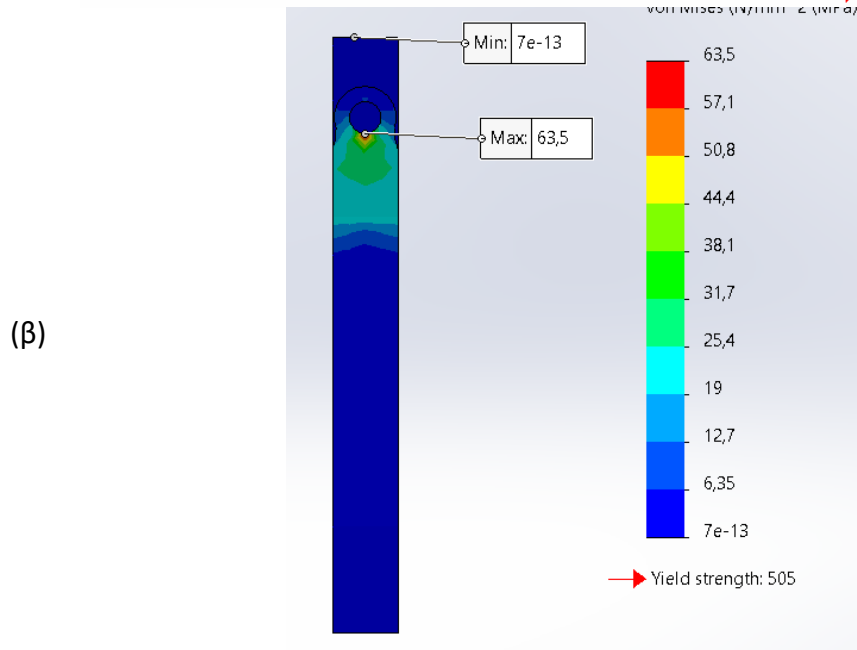


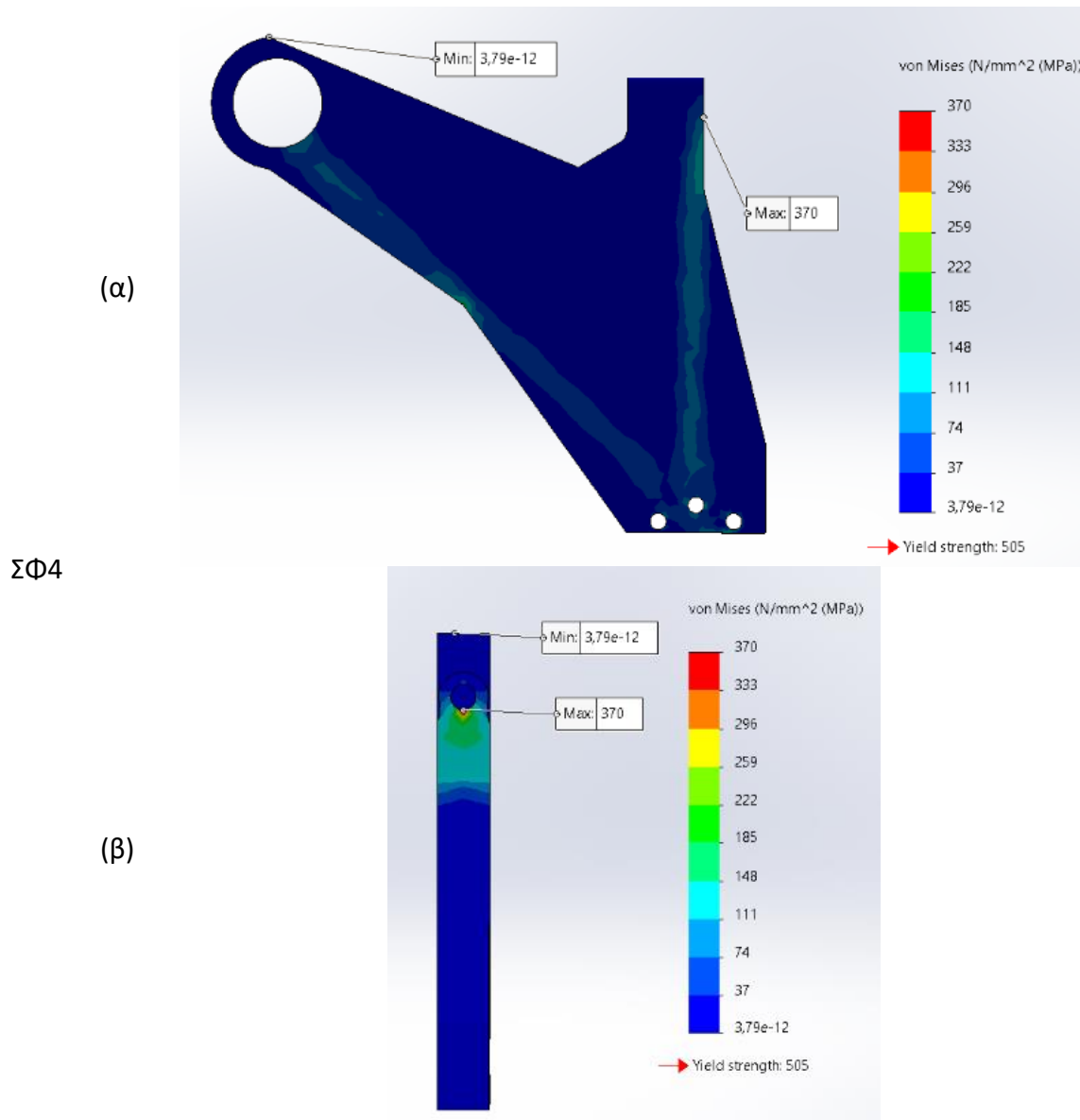
ΣΦ2





ΣΦ3





Σχήμα 4.12: Υποθετική κατανομή τάσης του TB5 από κράμα αλουμινίου σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη

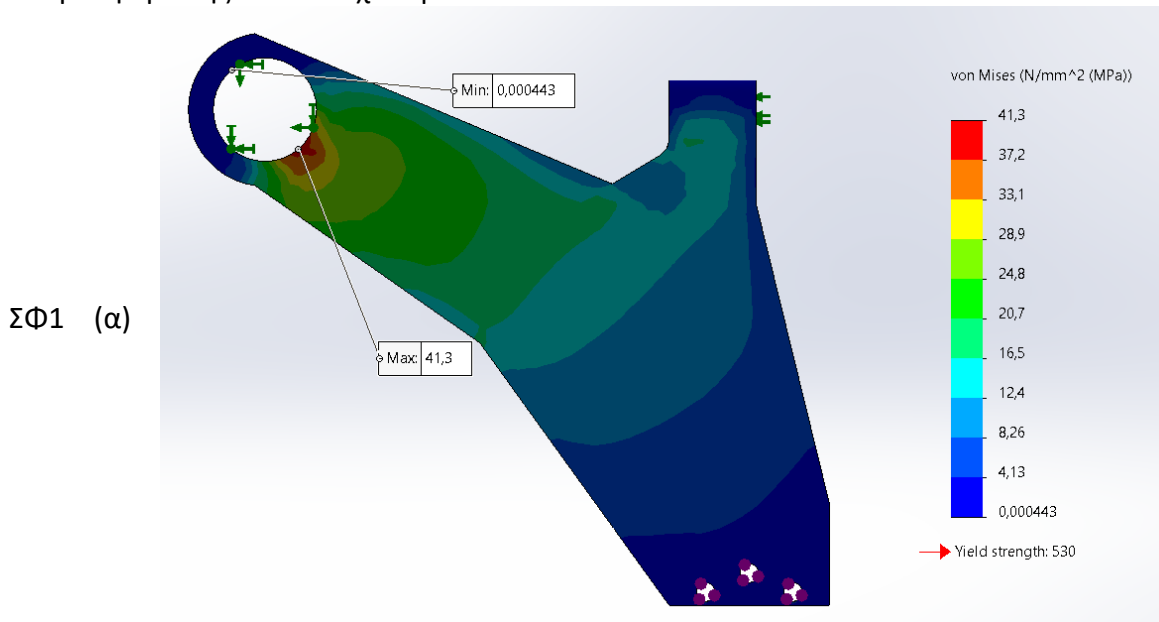
Τέλος στο Σχήμα 4.13 φαίνεται το γεωμετρικό μοντέλο που εξάγει αυτόματα το λογισμικό. Είναι προφανές ότι τα σχέδια που δημιουργούνται αυτόματα από το λογισμικό δεν μπορούν να κατασκευαστούν με συμβατικές τεχνικές κατασκευής, αλλά στο μέλλον θα μπορούσαν να είναι 3D.



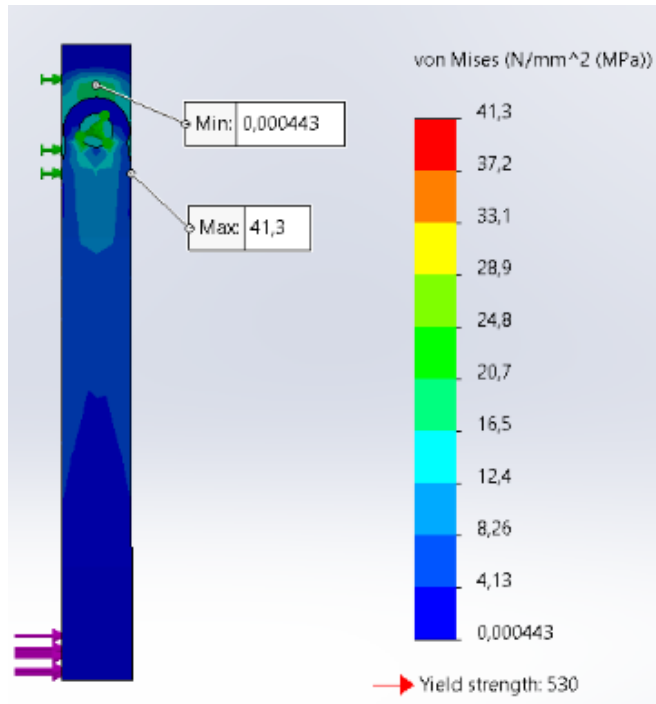
Σχήμα 4.13: Γεωμετρικό μοντέλο TB5 από κράμα αλουμινίου μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη

4.2.2 Χάλυβας AISI 1045

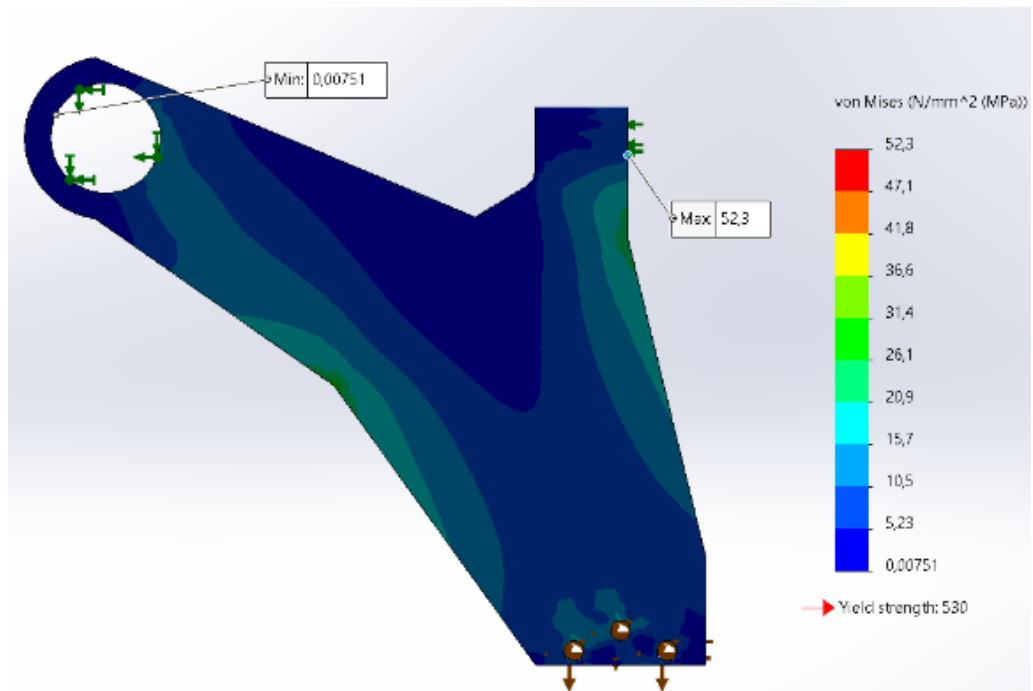
Αρχικά στο Σχήμα 4.14 βλέπουμε τα αποτελέσματα των στατικών αναλύσεων για κάθε σενάριο φόρτισης ΠΣ2 από χάλυβα AISI 1045.



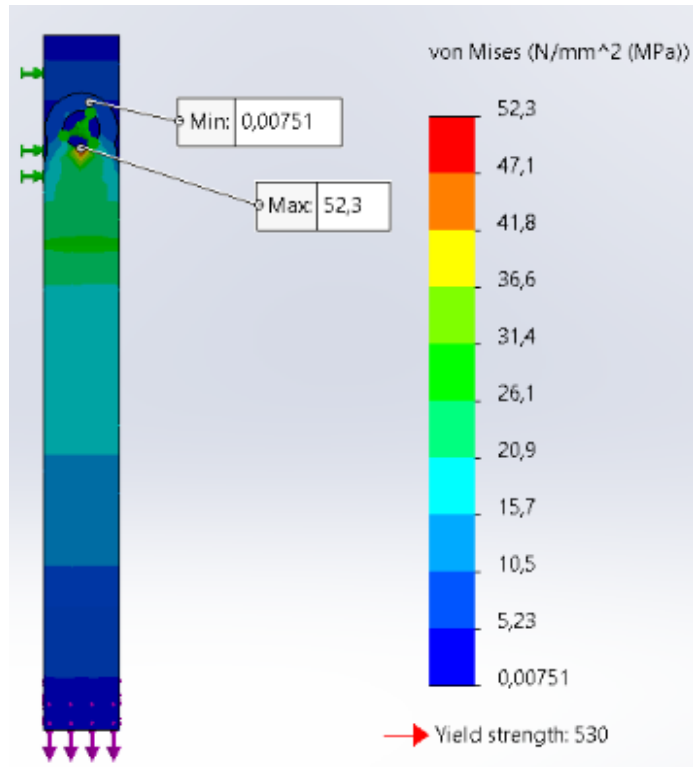
(β)



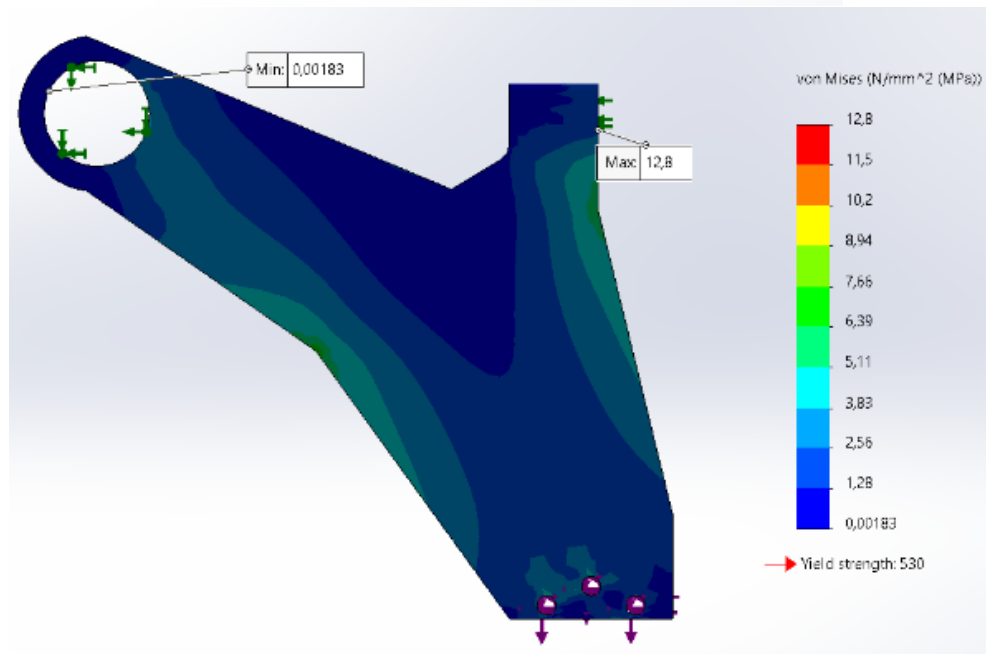
ΣΦ2 (α)



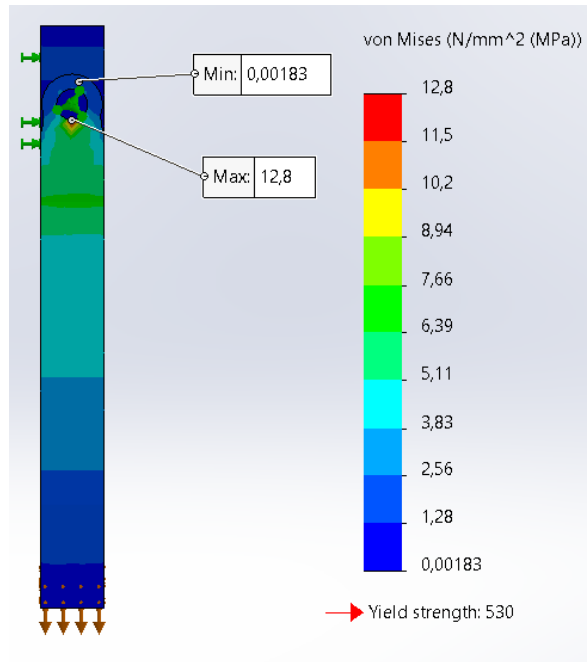
(β)



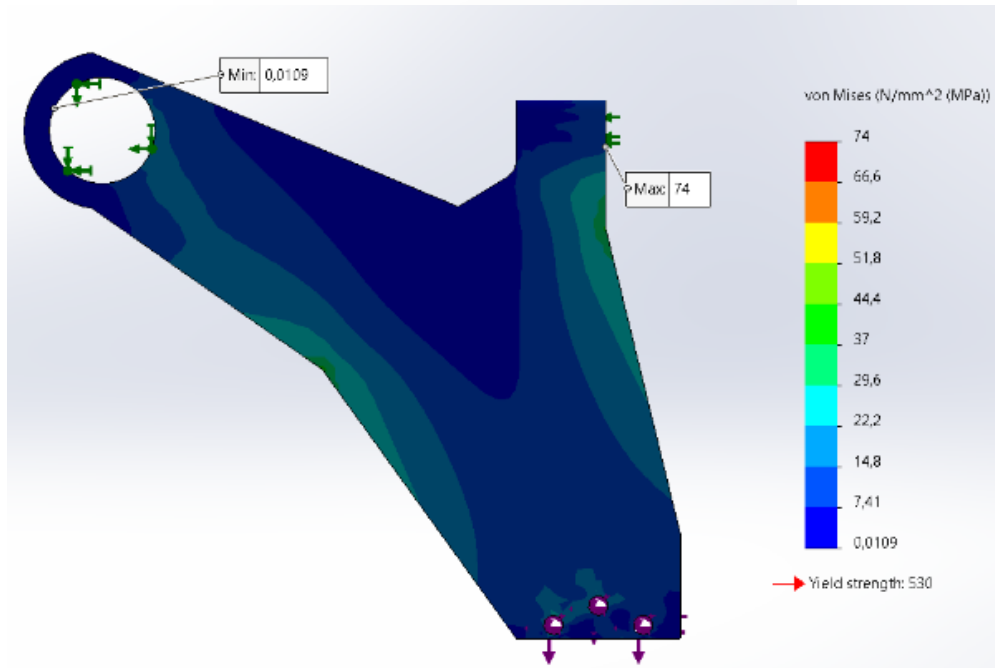
ΣΦ3 (α)

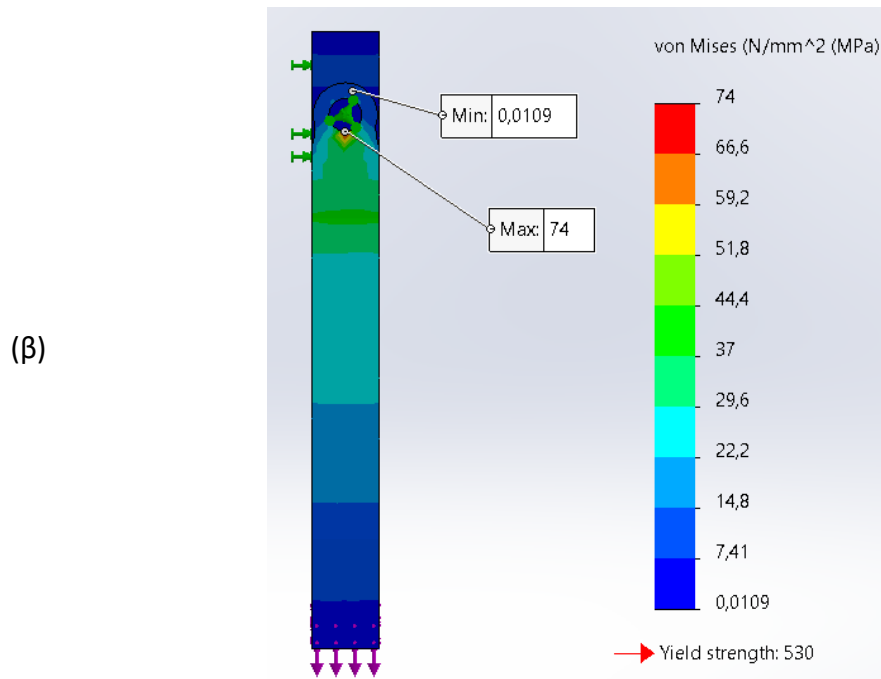


(β)



ΣΦ4 (α)





Σχήμα 4.14: Κατανομή τάσης του ΠΣ2 από χάλυβα AISI 1045 σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη

Παρατηρούμε ότι οι κατανομές τάσεων είναι παρόμοιες με μόνη διαφορετική πάλι αυτή του ΣΦ που η δύναμη ασκείται κατακόρυφα προς τα κάτω (F_z). Ωστόσο οι μέγιστες τιμές των τάσεων και των μετατοπίσεων δεν είναι ίδιες και γι' αυτό παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

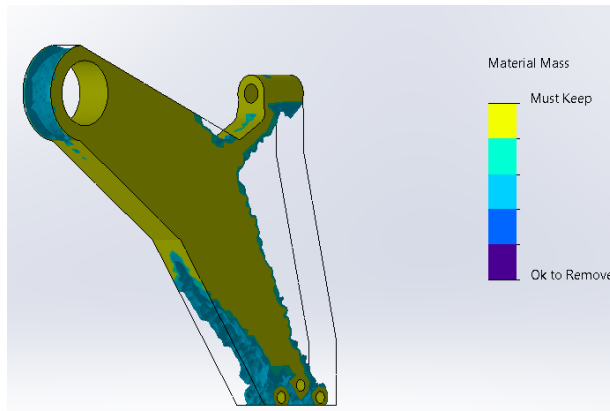
Πίνακας 4.5: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ2 από χάλυβα AISI 1045

ΣΦ	Τάση [MPa]	Συνολική μετατόπιση [mm]	Μετατόπιση κατά τον άξονα		
			x [mm]	y [mm]	z [mm]
ΣΦ1	41,3	0,4	0	0	0,4
ΣΦ2	52,3	0,1	0,1	0	0
ΣΦ3	12,8	0	0	0	0
ΣΦ4	74	0,1	0,1	0	0

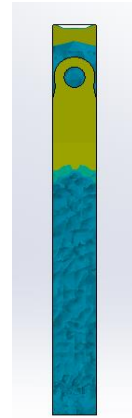
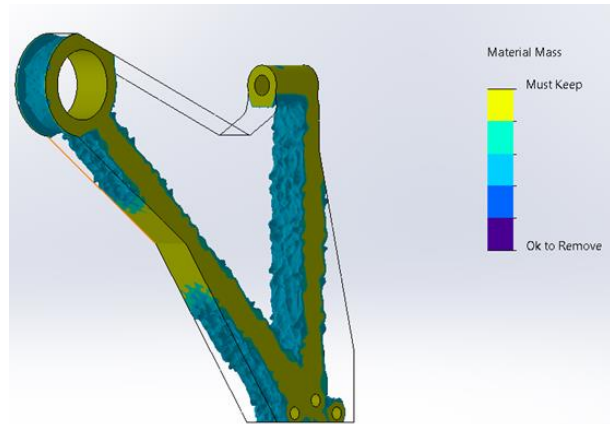
Είναι φανερό ότι τόσο οι τάσεις όσο και οι μετατοπίσεις είναι αισθητά μικρότερες σε σχέση με το ΠΣ1 και σε αυτή την περίπτωση.

Έχοντας τις κατανομές τάσεων προχωράμε στα αποτελέσματα των τοπολογικών βελτιστοποιήσεων (TB), τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.15 για κάθε διαφορετικό ΣΦ.

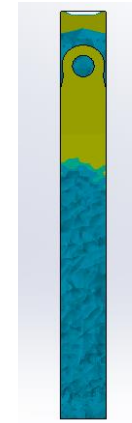
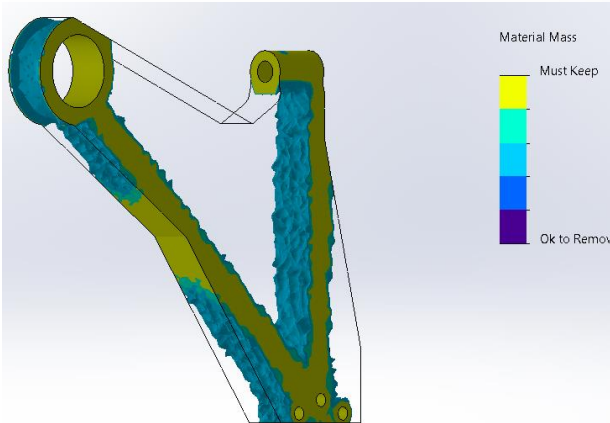
TB1

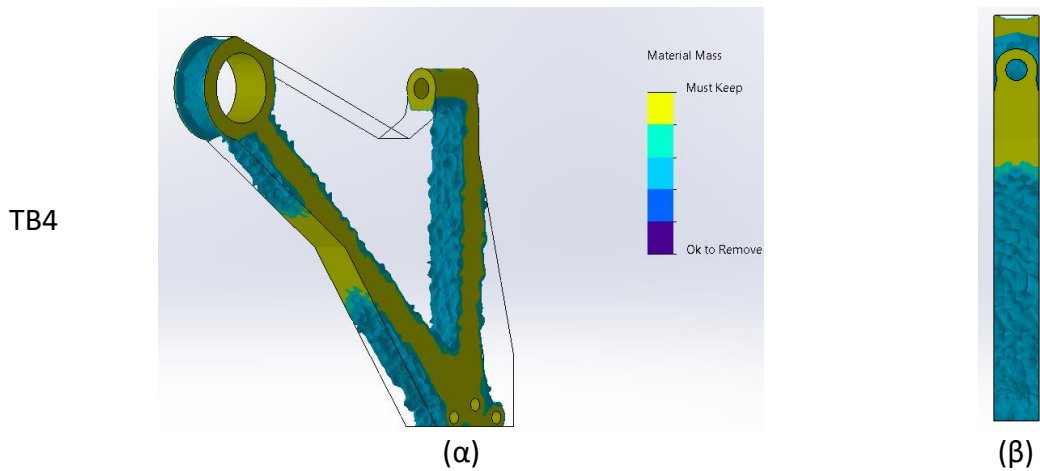


TB2



TB3





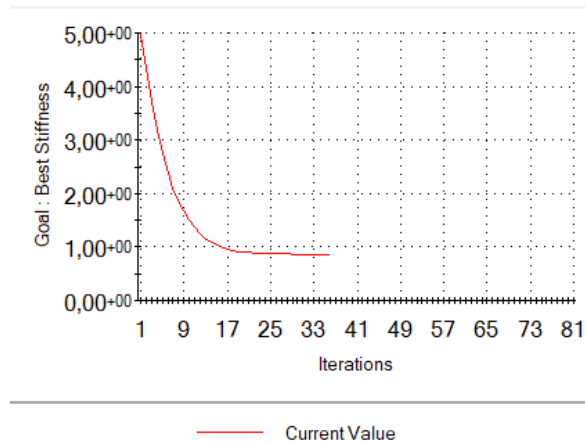
Σχήμα 4.15: Γεωμετρικό μοντέλο TB από χάλυβα AISI 1045 σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη

Παρατηρούμε ότι όλα τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά του αλουμινίου και η μόνη διαφορά που έχουν είναι στο βάρος, όπως και θα δούμε και παρακάτω στο αποτέλεσμα του TB5.

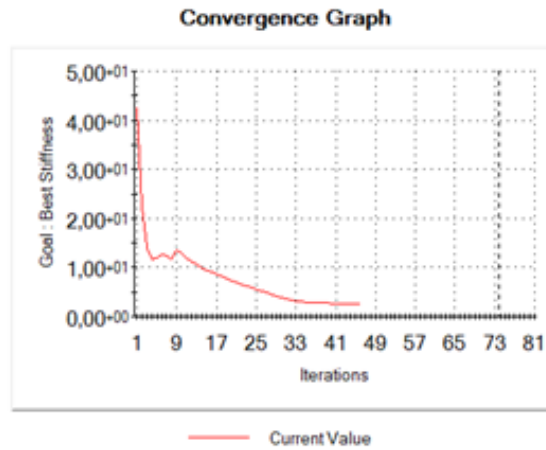
Επίσης φαίνονται τα διαγράμματα σύγκλισης για τον στόχο (Σχήμα 4.16), τον περιορισμό μάζας (Σχήμα 4.17) και τον περιορισμό τάσης (Σχήμα 4.18) για κάθε TB.

Convergence Graph

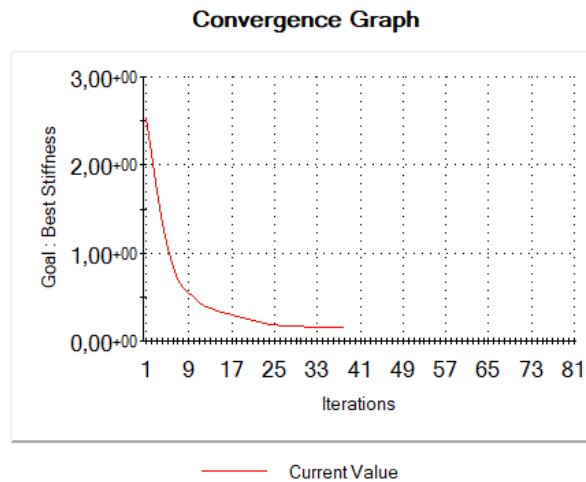
TB1



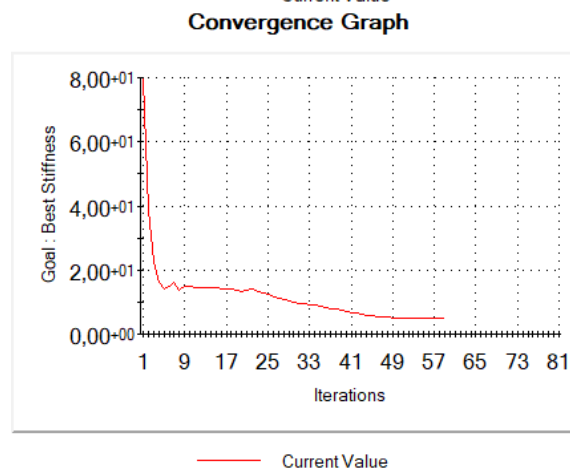
TB2



TB3



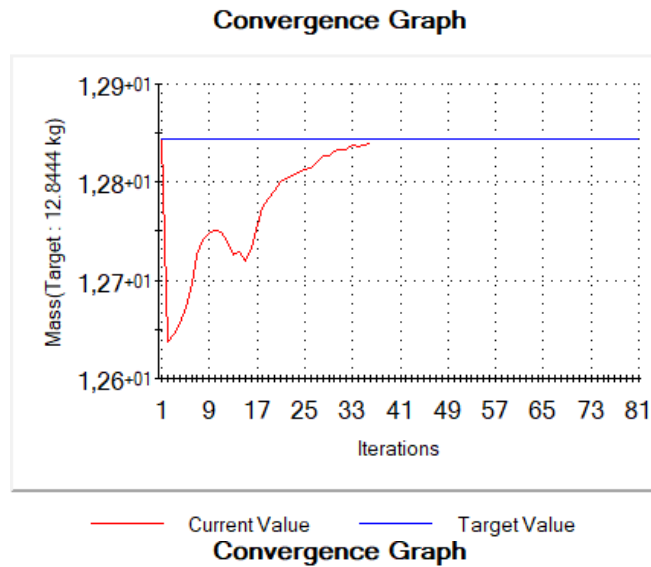
TB4



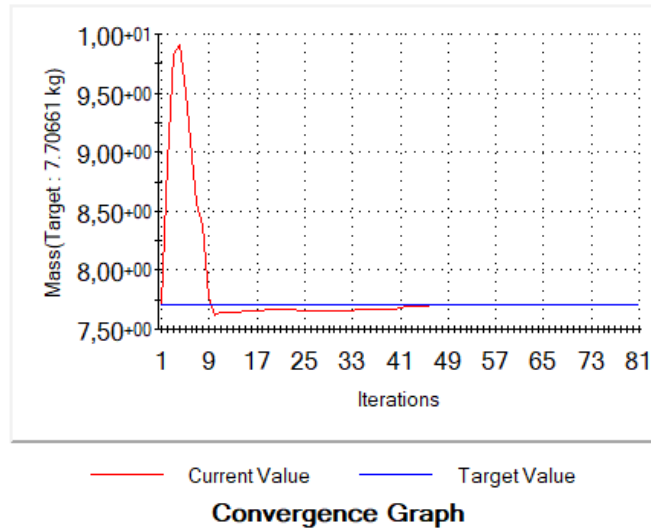
Σχήμα 4.16: Διαγράμματα σύγκλισης για το στόχο

Παρατηρούμε ότι το πλήθος των επαναλήψεων είναι στην ίδια τάξη μεγέθους με αυτό των TB του κράματος αλουμινίου. Η βασική διαφορά είναι ότι το TB4 χρειάζεται περισσότερες επαναλήψεις.

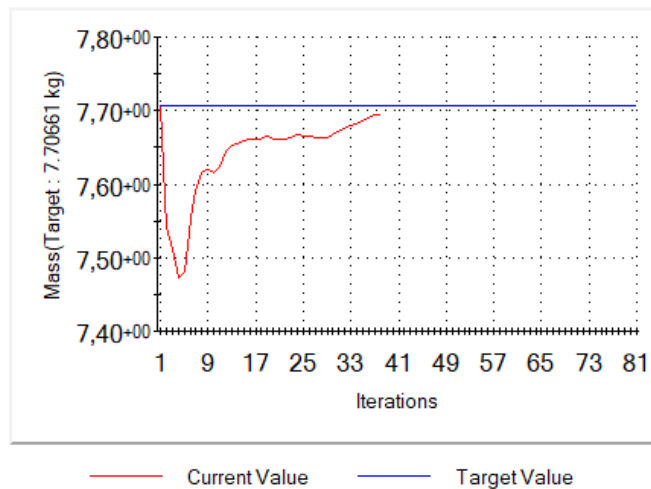
TB1



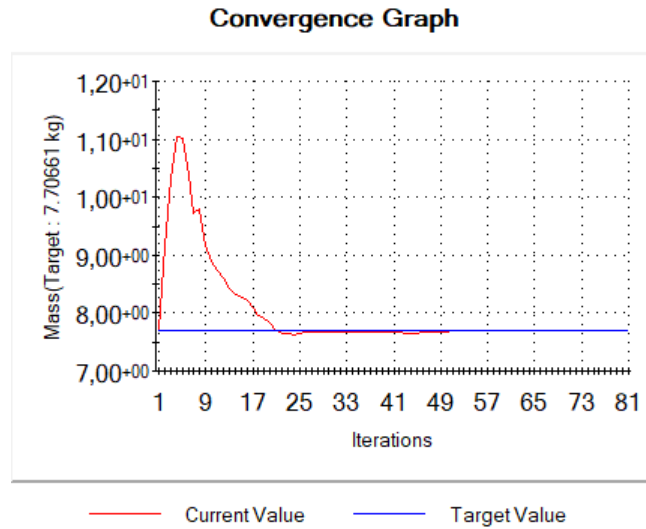
TB2



TB3

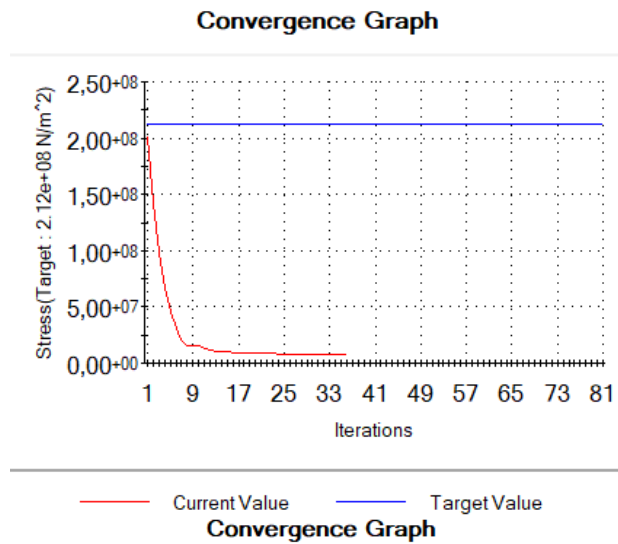


TB4

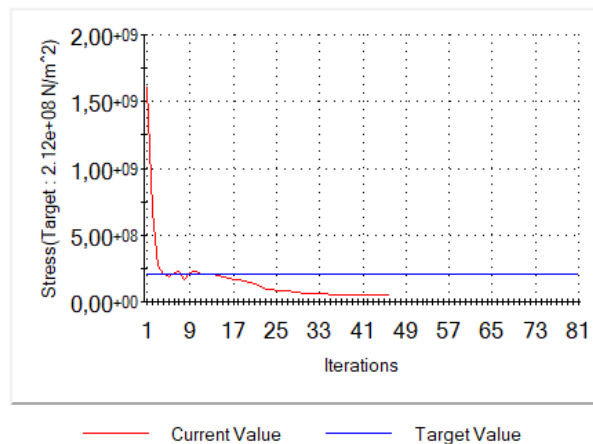


Σχήμα 4.17: Διαγράμματα σύγκλισης για τον περιορισμό μάζας

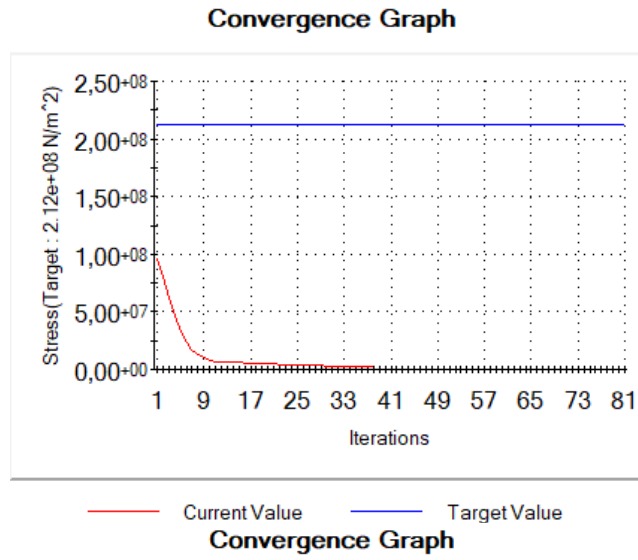
TB1



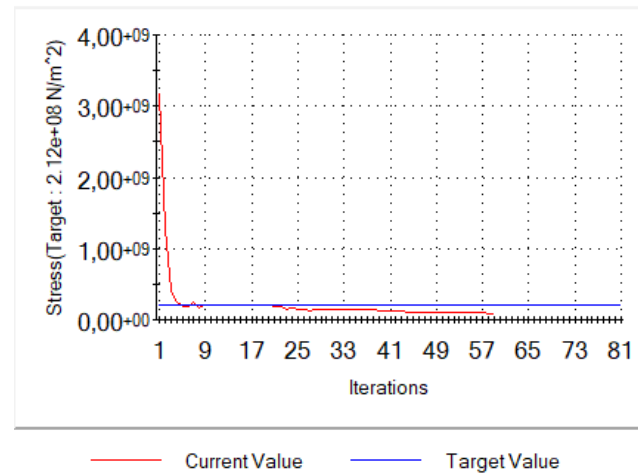
TB2



TB3



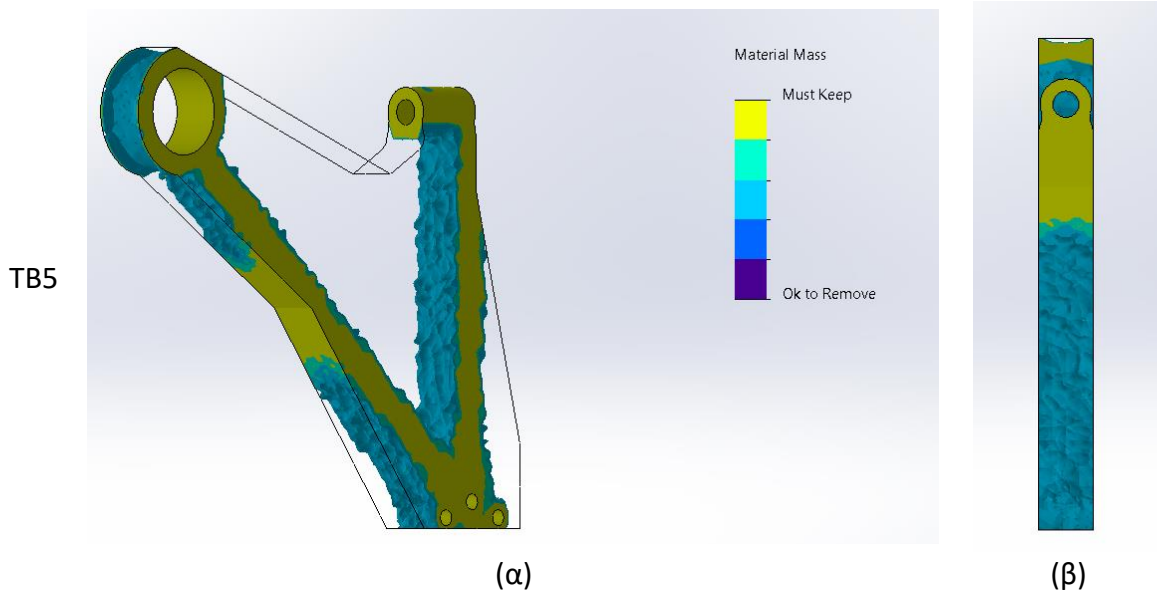
TB4



Σχήμα 4.18: Διαγράμματα σύγκλισης για τον περιορισμό τάσης

Όλα τα διαγράμματα σύγκλισης παρατηρούμε ότι είναι παρόμοια με τα αντίστοιχα του των TB του προηγούμενου υλικού (κράμα αλουμινίου) και οι παρατηρήσεις που γίνονται είναι ίδιες με αυτές των προηγούμενων.

Ωστόσο εμείς επιθυμούμε ένα νέο μοντέλο που θα ικανοποιεί όλα τα ΣΦ και γι' αυτό στο Σχήμα 4.19 φαίνεται το αποτέλεσμα της TB5 που λαμβάνει υπόψη όλα τα ΣΦ.

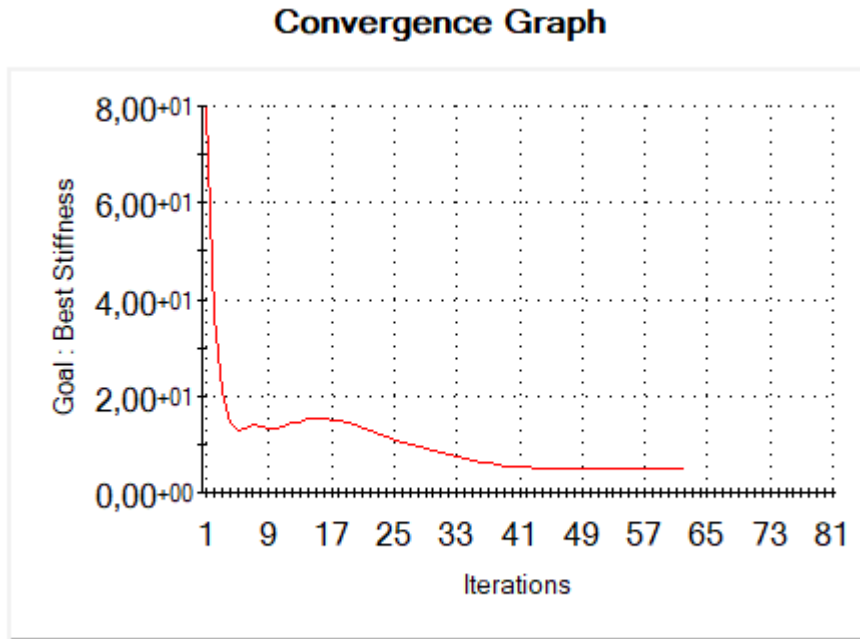


Σχήμα 4.19: Γεωμετρικό αποτέλεσμα TB5 από χάλυβα AISI 1045 σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη

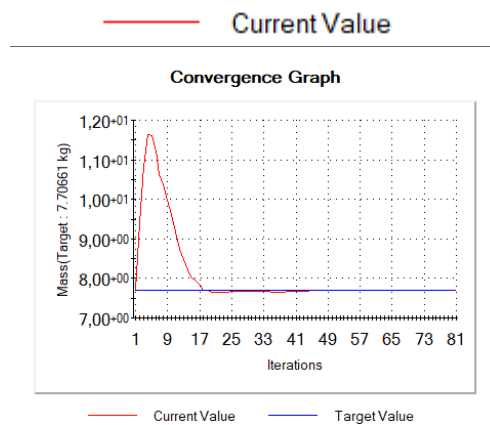
Παρατηρούμε ότι το υλικό έχει αφαιρεθεί από το κεντρικό κομμάτι και μας δίνεται εν τέλη μια συμπαγής γεωμετρία ενός ψαλιδιού με δύο βραχίονες. Το μοντέλο είναι παρόμοιο με αυτό του αλουμινίου κι αυτό είναι λογικό, αφού άλλαξε το υλικό κι όχι οι συνθήκες φόρτισης. Ωστόσο σύμφωνα με το λογισμικό το βάρος του συγκεκριμένου ανέρχεται στα **7,9kg**.

Επίσης στο Σχήμα 4.20 φαίνονται τα διαγράμματα σύγκλισης για τον στόχο και τους περιορισμούς για το TB5. Σημείωση ότι ο περιορισμός τάσης εφαρμόζεται για κάθε ΣΦ κι έτσι υπάρχουν και διαφορετικά διαγράμματα.

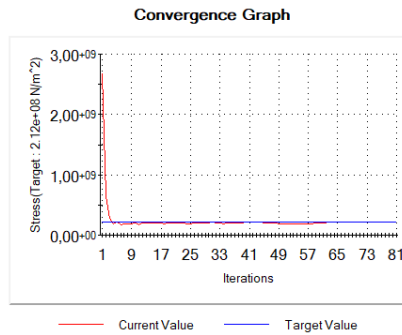
(α)



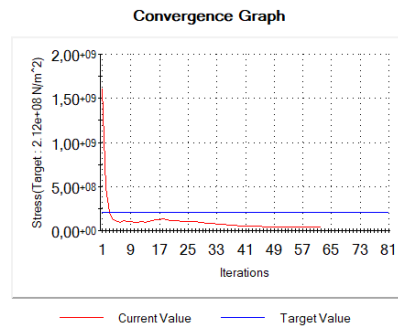
(β)



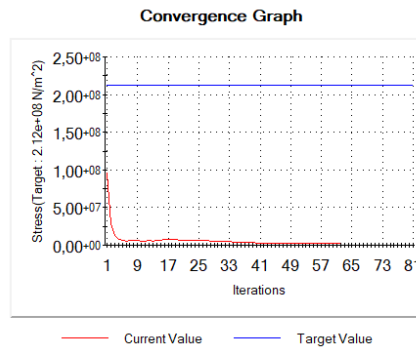
(γ) ΣΦ1



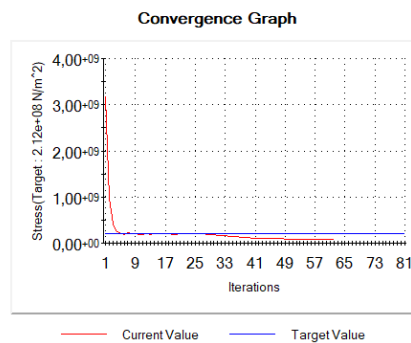
ΣΦ2



ΣΦ3



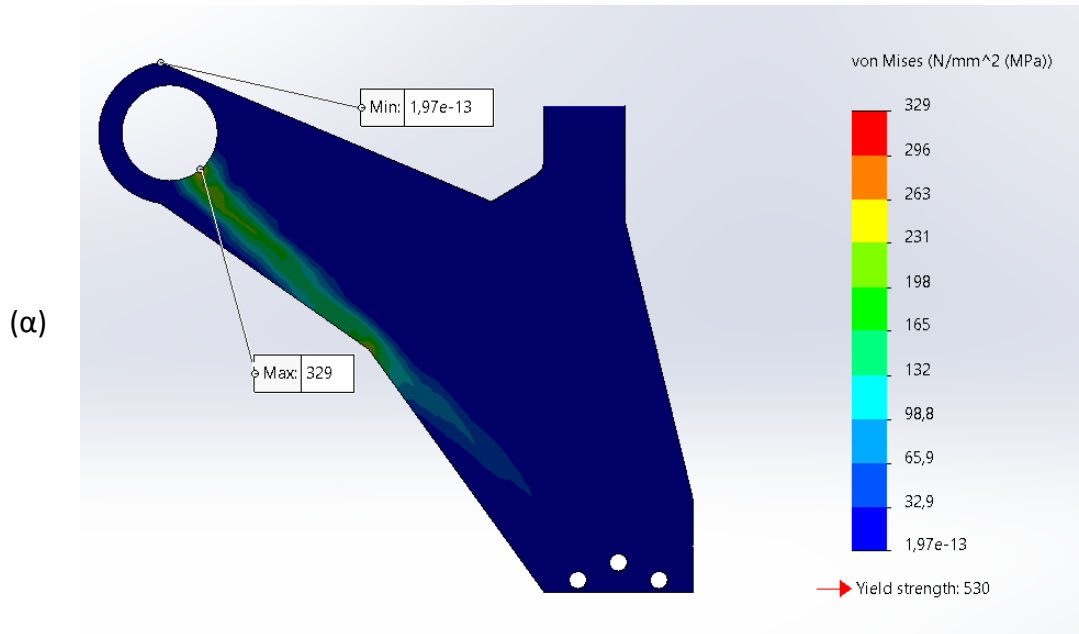
ΣΦ4



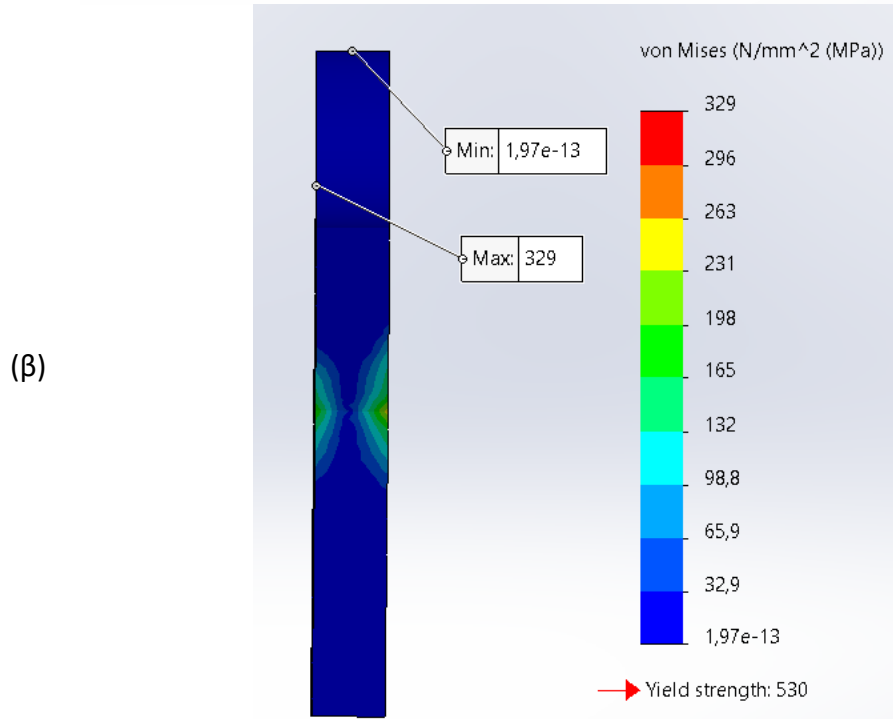
Σχήμα 4.20: Διαγράμματα σύγκλισης για στόχο (α), περιορισμό μάζας (β), περιορισμό τάσης (γ)

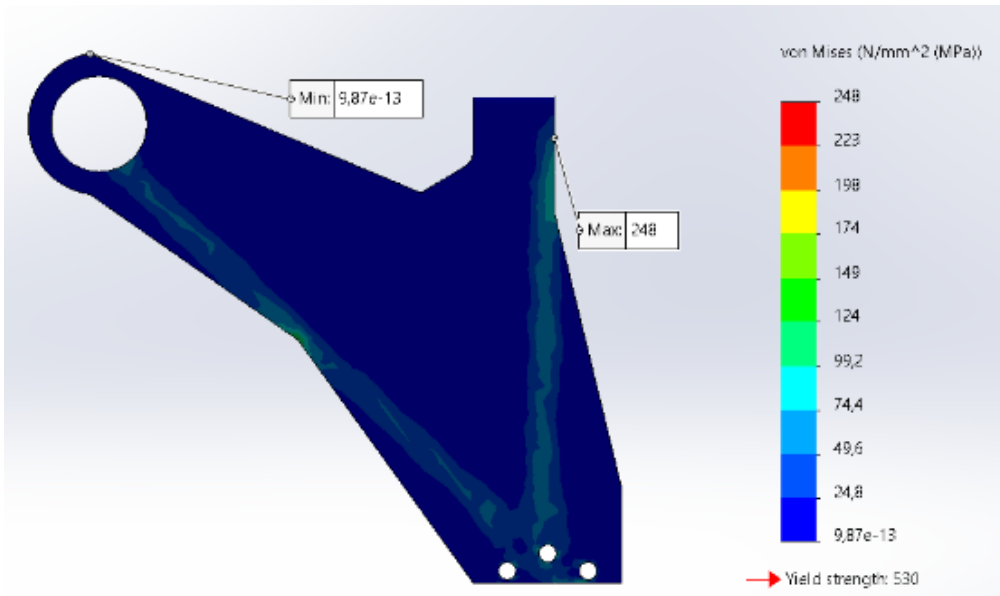
Βλέπουμε ότι πάλι στο διάγραμμα σύγκλισης της τάσης του ΣΦ3 οι τιμές τις τάσεις ξεκινάν κάτω από την τιμή στόχο, καθώς έχουμε ούτως ή άλλως μικρές τάσεις λόγω των μικρών τιμών φόρτισης ΣΦ3. Επίσης, παρατηρούμε ότι χρειάζεται αρκετές παραπάνω επαναλήψεις για να επιτευχθεί ο στόχος, τόσο σε σχέση με το προηγούμενο υλικό, όσο και με τις TB1-TB4.

Ακόμη στο Σχήμα 4.21 φαίνονται οι κατανομές τάσεις για κάθε ΣΦ σε περίπτωση που εφαρμόζαμε στατικές αναλύσεις στο αποτέλεσμα της TB5 και πάλι οι τιμές θα πρέπει να θεωρηθούν ως μια πρόχειρη εκτίμηση.

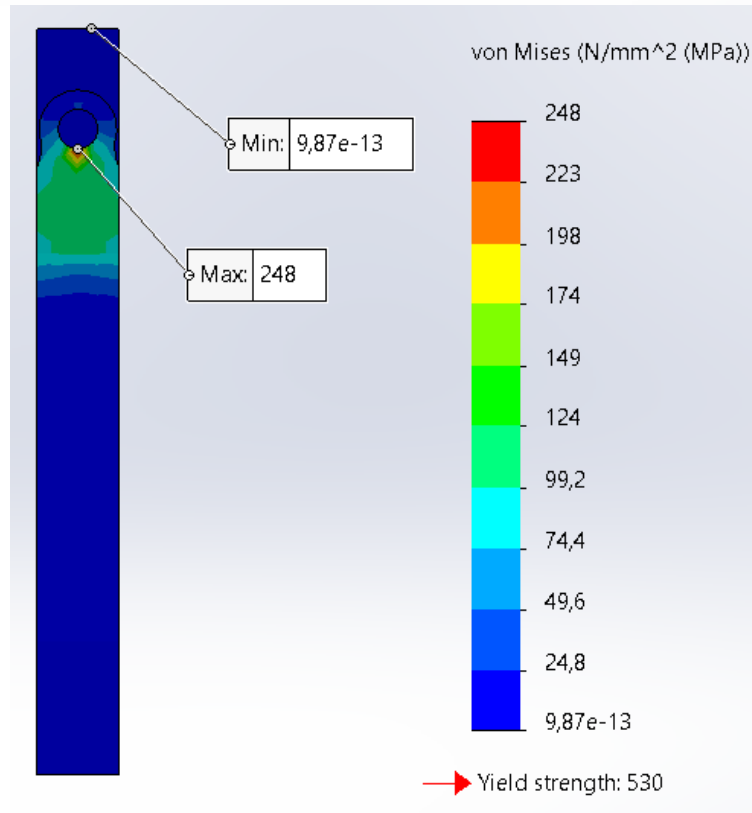


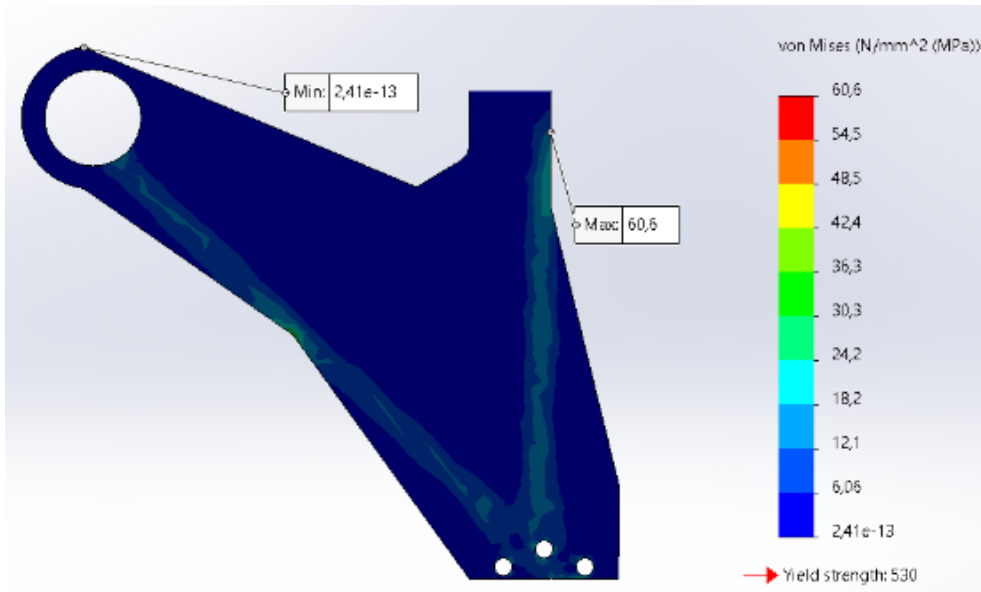
ΣΦ1



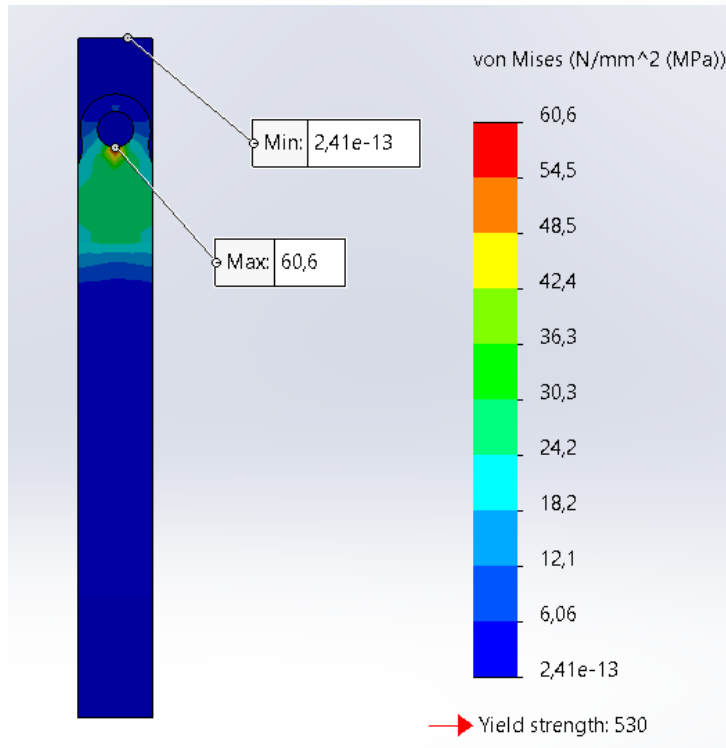


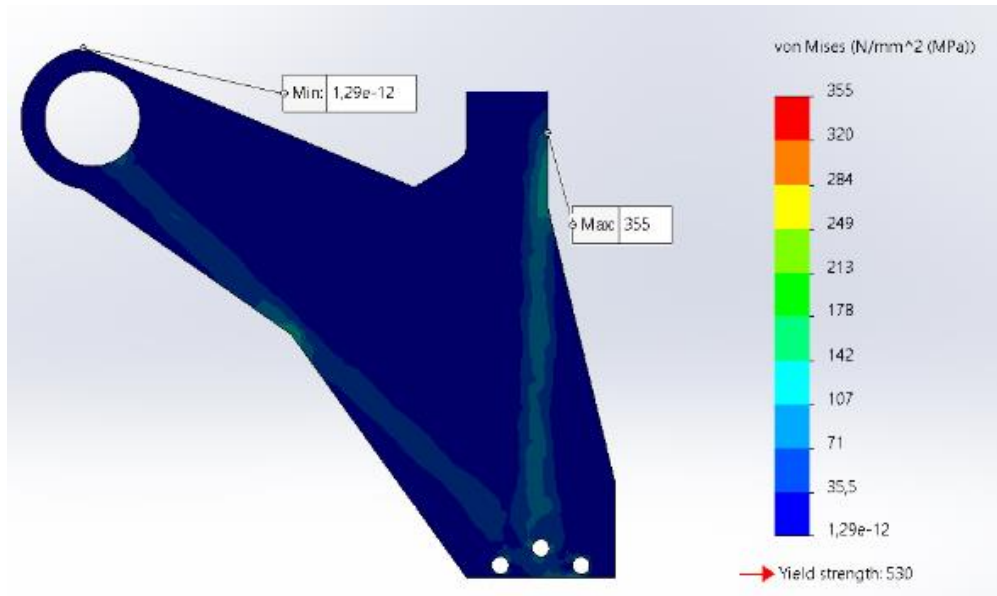
ΣΦ2



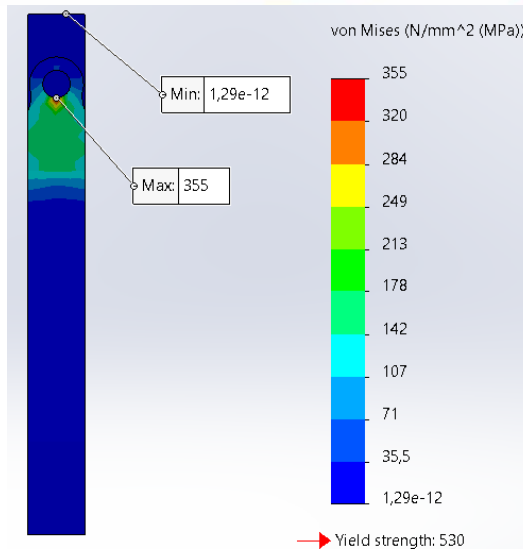


ΣΦ3



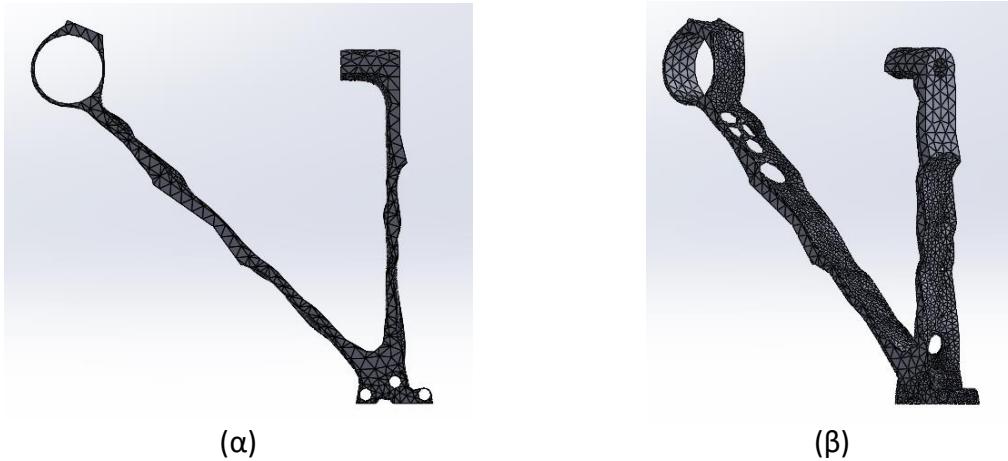


ΣΦ4



Σχήμα 4.21: Υποθετική κατανομή τάσης του TB5 από χάλυβα AISI 1045 σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη

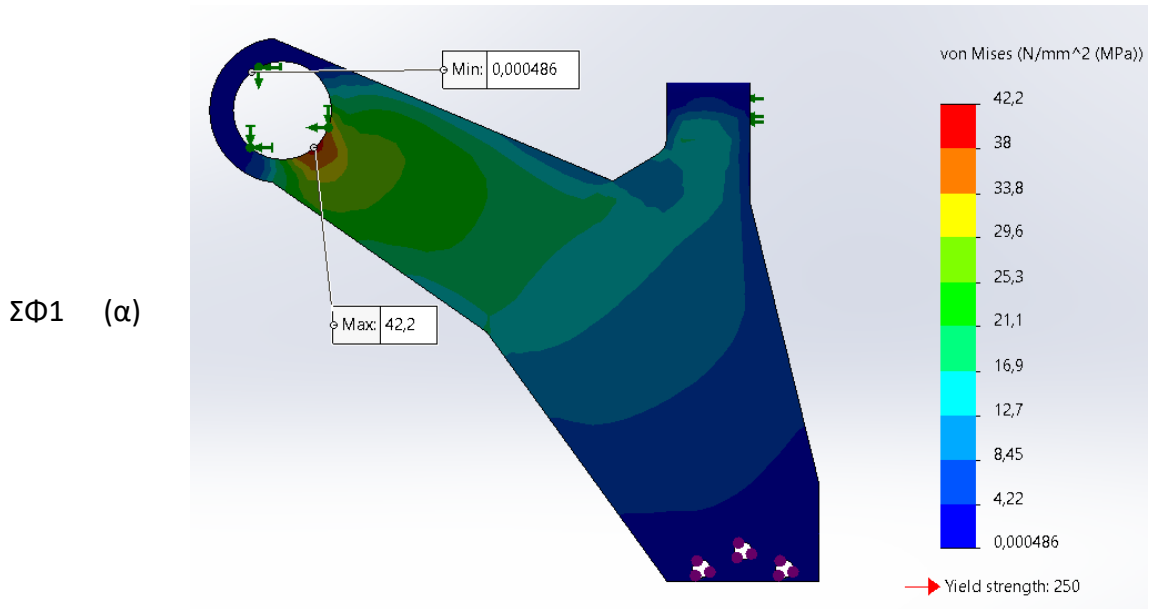
Τέλος στο Σχήμα 4.22 φαίνεται το γεωμετρικό μοντέλο που εξάγει αυτόματα το λογισμικό. Είναι προφανές ότι τα σχέδια που δημιουργούνται αυτόματα από το λογισμικό δεν μπορούν να κατασκευαστούν με συμβατικές τεχνικές κατασκευής, αλλά στο μέλλον θα μπορούσαν να είναι 3D.



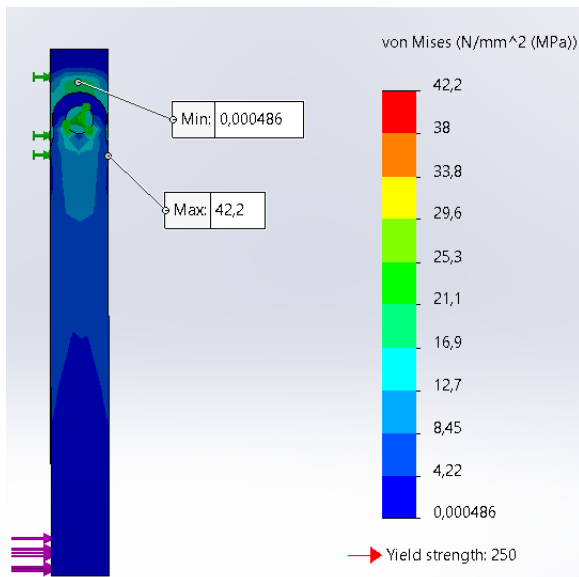
Σχήμα 4.22: Γεωμετρικό μοντέλο TB5 από χάλυβα AISI 1045 μπροσινή (α) και πλάγια (β) όψη

4.2.3 Χάλυβας ASTM A36

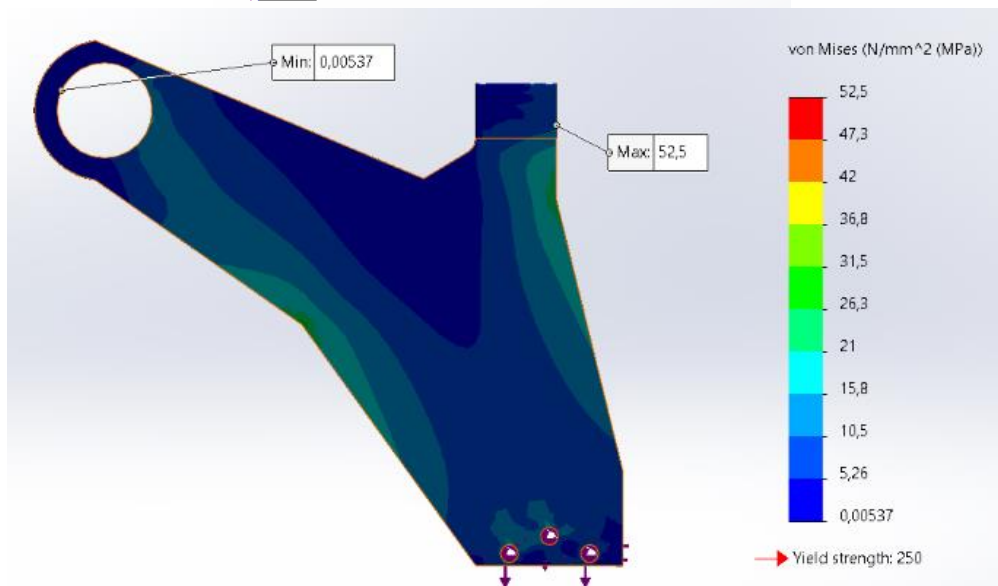
Αρχικά στο Σχήμα 4.23 βλέπουμε τα αποτελέσματα των στατικών αναλύσεων για κάθε σενάριο φόρτισης ΠΣ2 από χάλυβα AISI 1045.



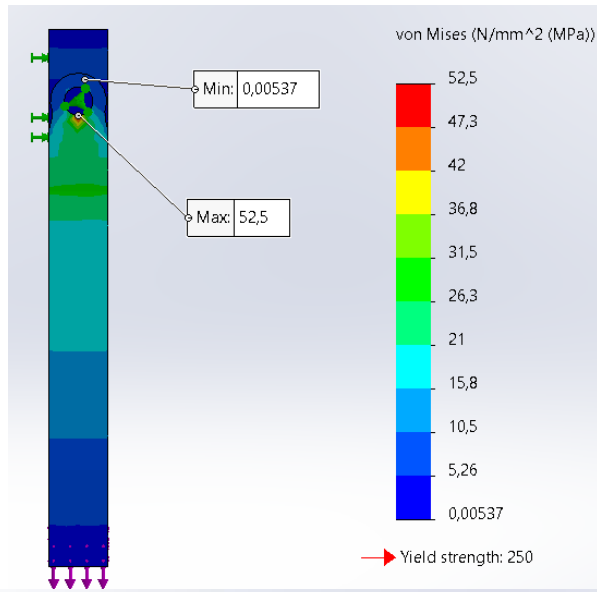
(β)



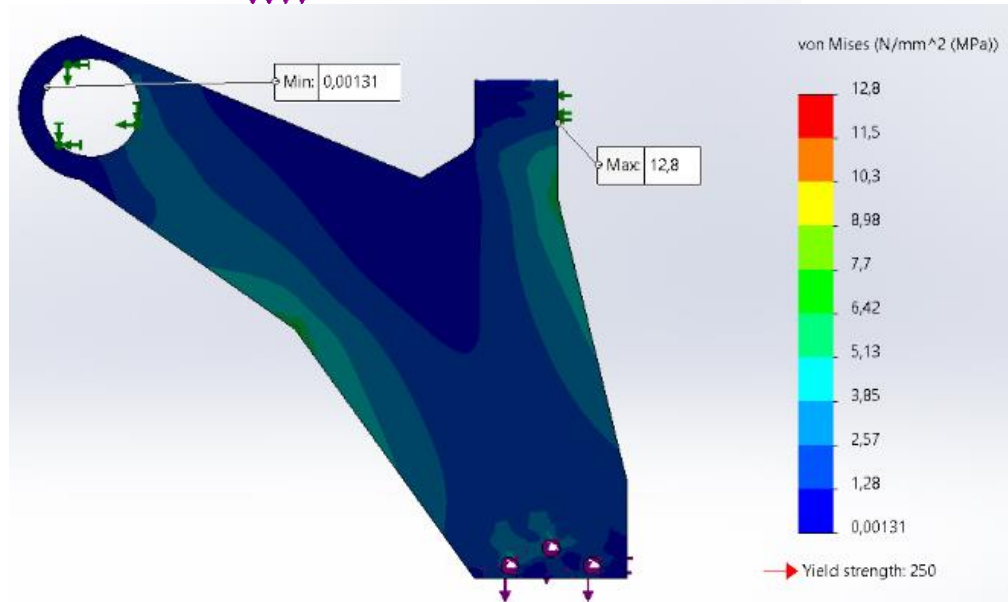
ΣΦ2 (α)



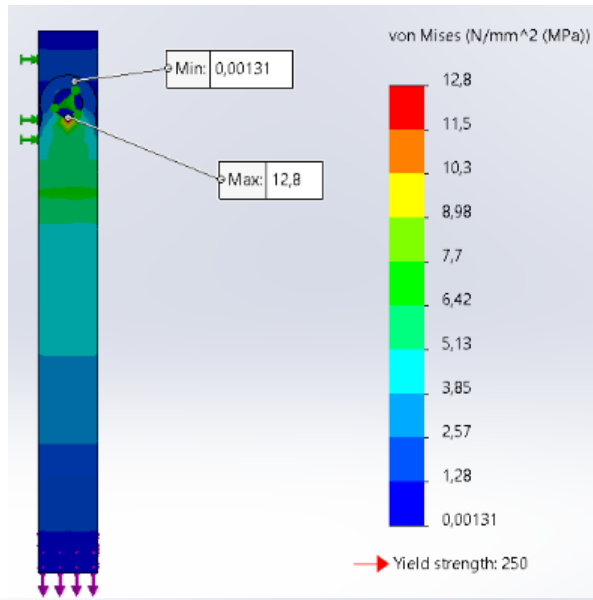
(β)



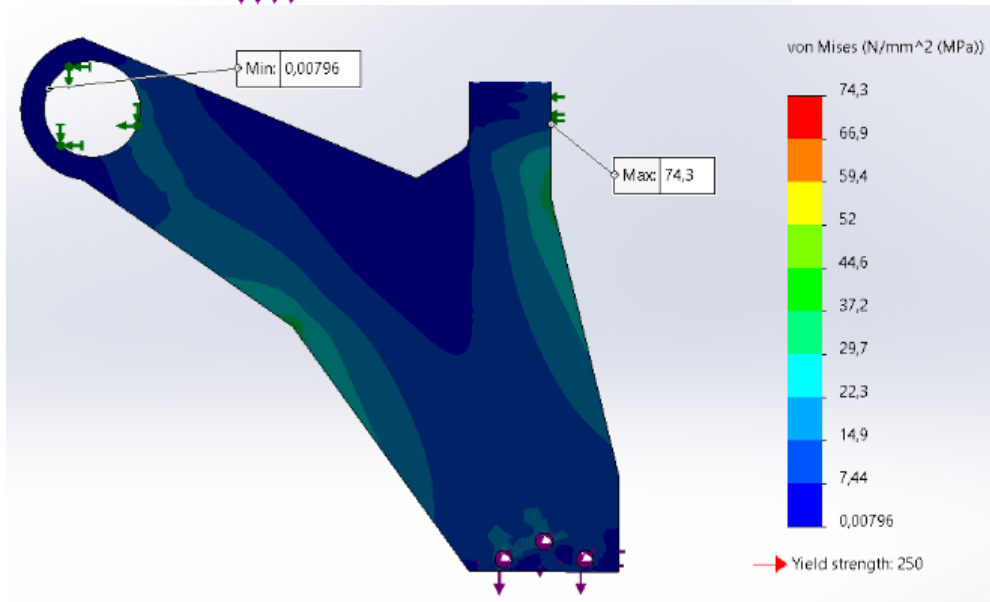
ΣΦ3 (α)



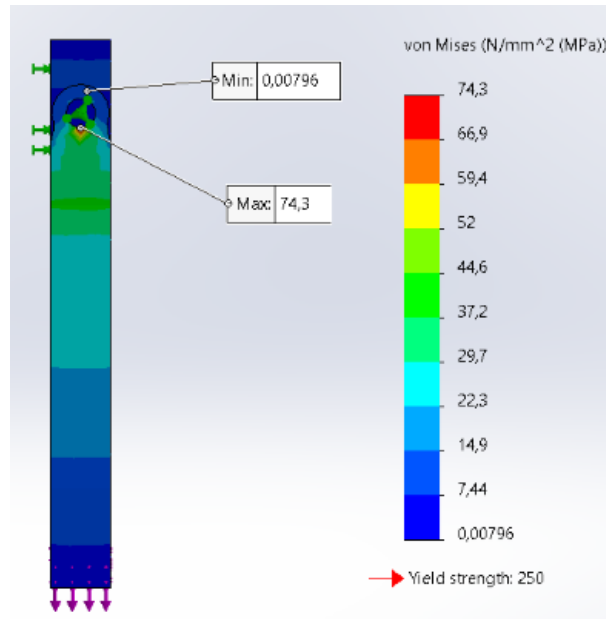
(β)



ΣΦ4 (α)



(β)



Σχήμα 4.23: Κατανομή τάσης του ΠΣ2 από χάλυβα ASTM A36 σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη

Παρατηρούμε ότι οι κατανομές τάσεων είναι παρόμοιες με μόνη διαφορετική πάλι αυτή του ΣΦ που η δύναμη ασκείται κατακόρυφα προς τα κάτω (F_z). Ωστόσο οι μέγιστες τιμές των τάσεων και των μετατοπίσεων δεν είναι ίδιες και γι' αυτό παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

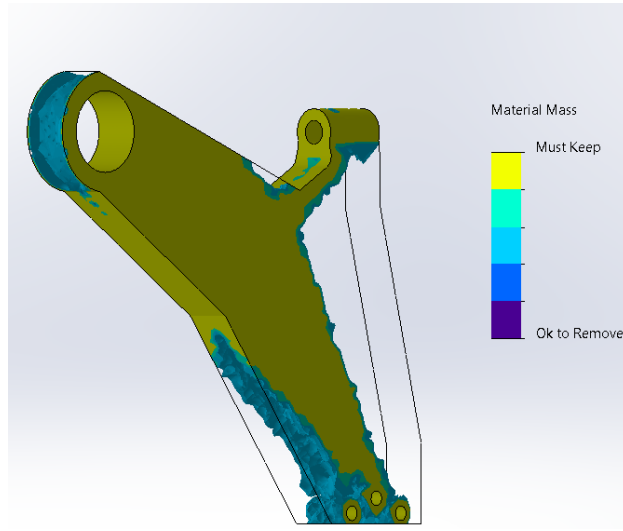
Πίνακας 4.6: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ2 από χάλυβα ASTM A36

ΣΦ	Τάση [MPa]	Συνολική μετατόπιση [mm]	Μετατόπιση κατά τον άξονα		
			x [mm]	y [mm]	z [mm]
ΣΦ1	42,2	0,4	0	0	0,4
ΣΦ2	52,5	0,1	0,1	0	0
ΣΦ3	12,8	0	0	0	0
ΣΦ4	74,3	0,1	0,1	0	0

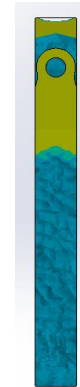
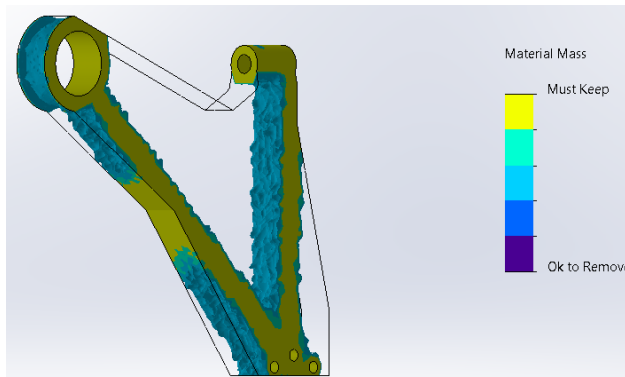
Είναι φανερό ότι τόσο οι τάσεις όσο και οι μετατοπίσεις είναι αισθητά μικρότερες σε σχέση με το ΠΣ1 και σε αυτή την περίπτωση.

Έχοντας τις κατανομές τάσεων προχωράμε στα αποτελέσματα των τοπολογικών βελτιστοποιήσεων (TB), τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.24 για κάθε διαφορετικό ΣΦ.

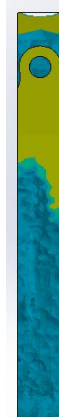
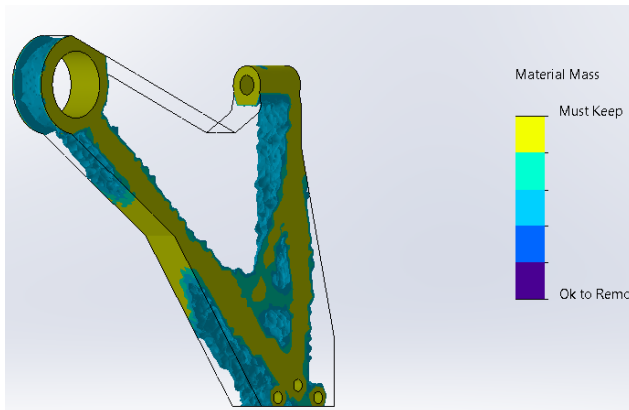
TB1



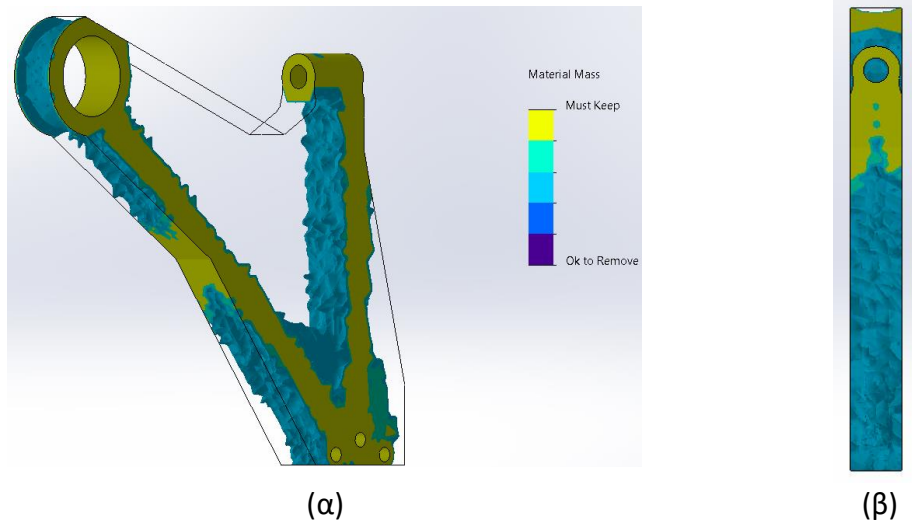
TB2



TB3



TB4

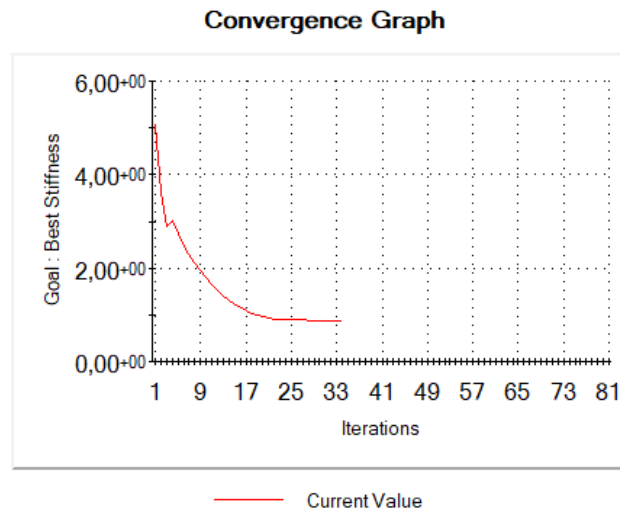


Σχήμα 4.24: Γεωμετρικό μοντέλο TB από χάλυβα ASTM A36 σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη

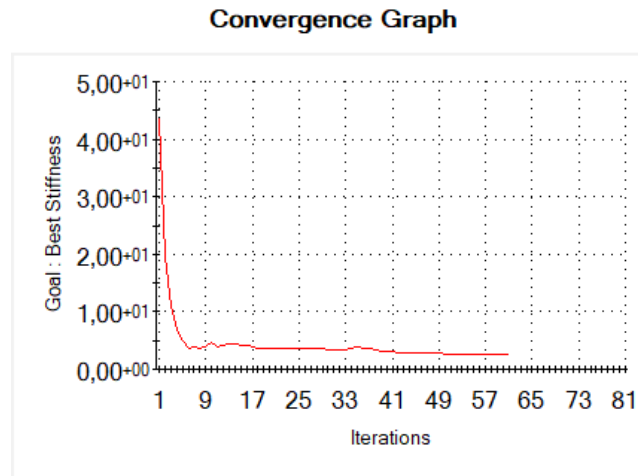
Παρατηρούμε ότι με το συγκεκριμένο υλικό έχουμε διαφορετικό αποτέλεσμα σε κάθε TB. Αυτό συμβαίνει, λόγω το χαμηλότερου ορίου διαρροής κι έτσι το λογισμικό προσπαθεί να ανακατανέμει το υλικό με τέτοιο τρόπο ώστε το τελικό αποτέλεσμα να αντέχει στο εκάστοτε ΣΦ. Ειδικά στο ΣΦ4 βλέπουμε ότι προσπαθεί να δημιουργήσει μία συμπαγή ένωση μεταξύ των δύο βραχιόνων του ψαλιδιού. Επομένως καθίσταται αναγκαία η δημιουργία ενός μοντέλου που θα αντέχει σε όλα τα ΣΦ φόρτισης και γι' αυτό γίνεται η TB5 που φαίνεται παρακάτω.

Επίσης φαίνονται τα διαγράμματα σύγκλισης για τον στόχο (Σχήμα 4.25), τον περιορισμό μάζας (Σχήμα 4.26) και τον περιορισμό τάσης (Σχήμα 4.27) για κάθε TB.

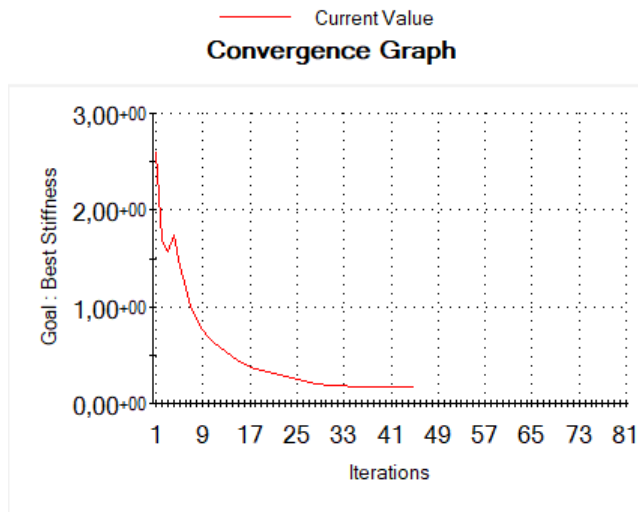
TB1



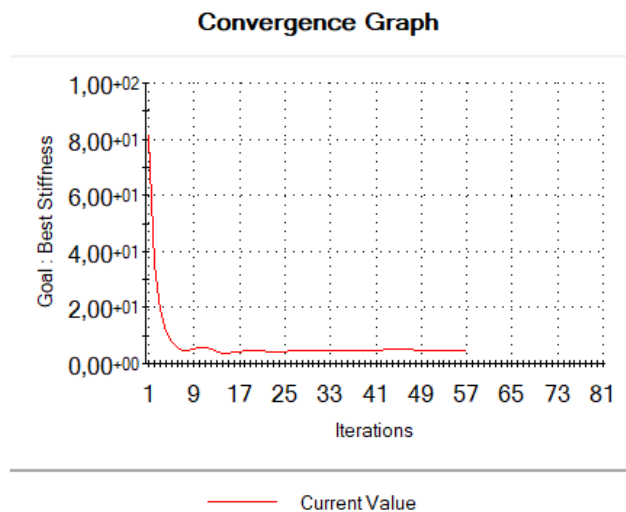
TB2



TB3



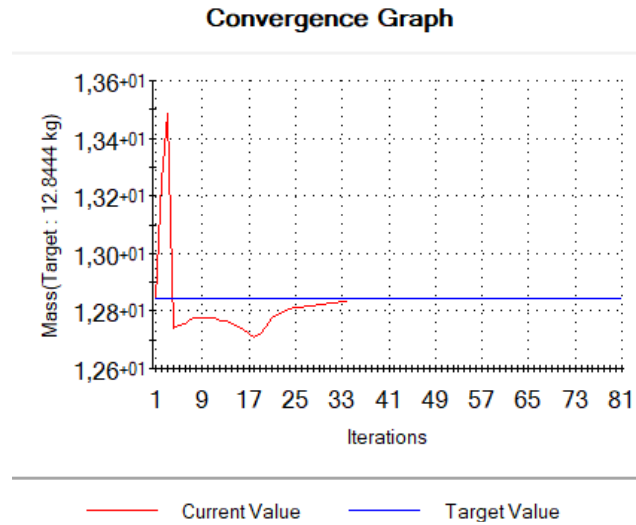
TB4



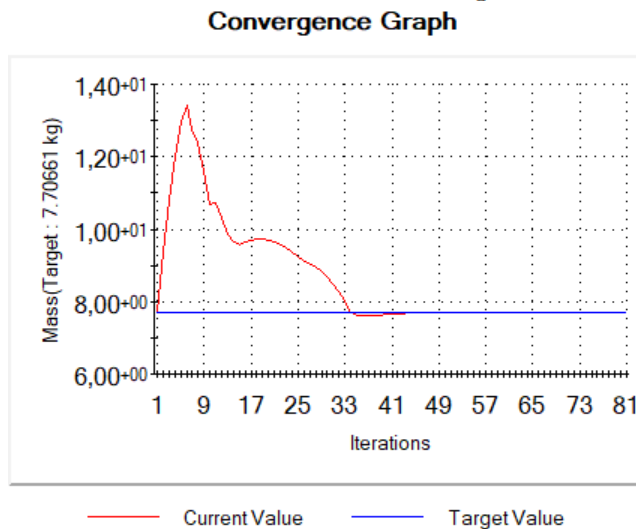
Σχήμα 4.25: Διαγράμματα σύγκλισης για τον στόχο

Παρατηρούμε ότι στα συγκεκριμένα διαγράμματα σύγκλισης δε γίνεται απευθείας και ομαλά όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις αλλά υπάρχουν διακυμάνσεις. Επίσης βλέπουμε ότι χρειάζεται περισσότερες επαναλήψεις για να επιτευχθεί ο στόχος κι αυτό συμβαίνει, καθώς το συγκεκριμένο υλικό έχει χαμηλότερο όριο διαρροής κι έτσι το λογισμικό χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να βρει το στιβαρότερο μοντέλο.

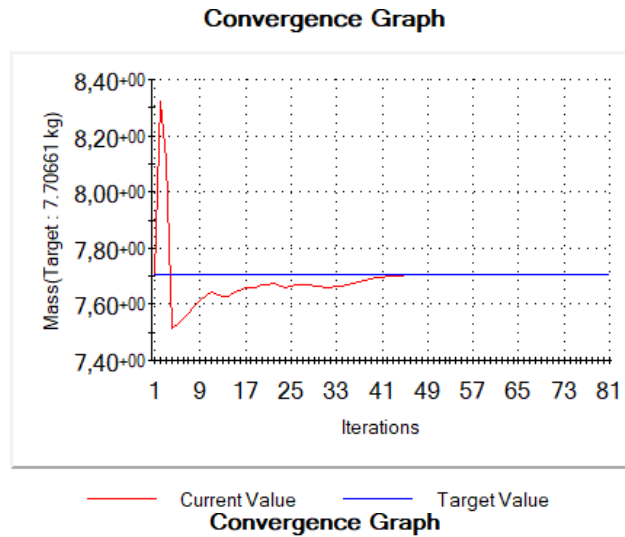
TB1



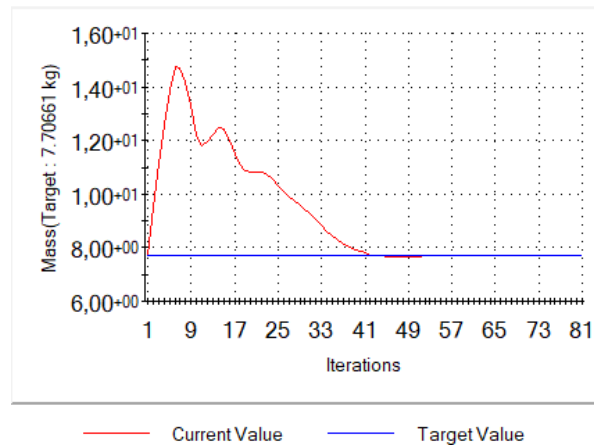
TB2



TB3



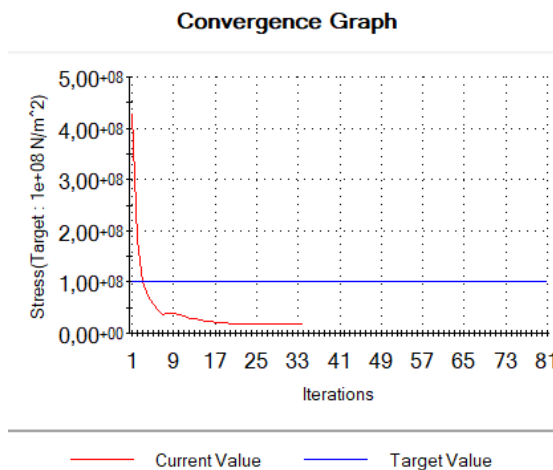
TB4



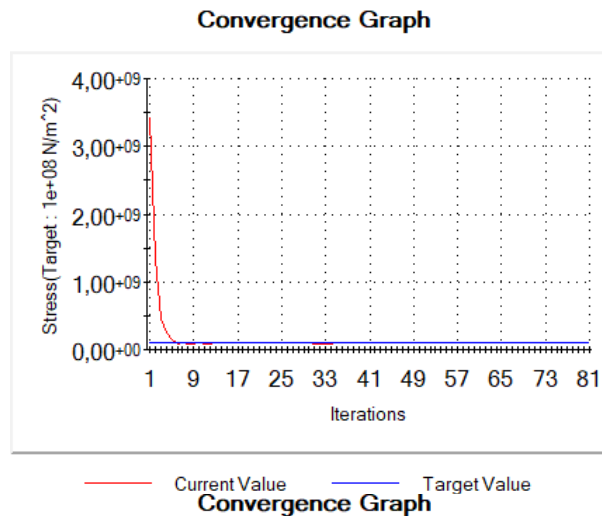
Σχήμα 4.26: Διαγράμματα σύγκλισης για τον περιορισμό μάζας

Στα διαγράμματα τους περιορισμού της μάζας βλέπουμε ότι έχουμε αρκετές διακυμάνσεις και μάλιστα εντονότερες από αυτές των διαγραμμάτων των προηγούμενων υλικών.

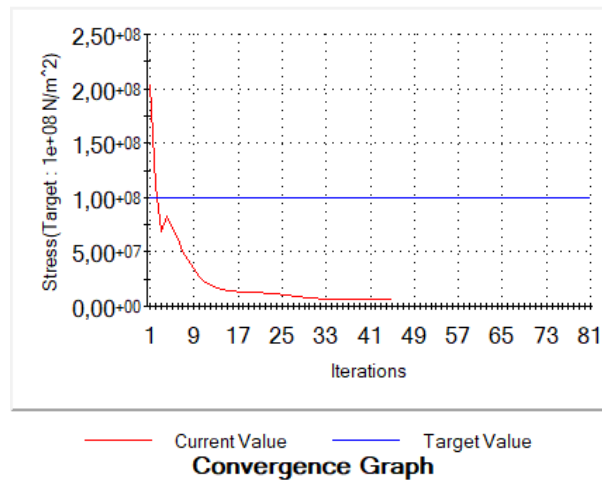
TB1



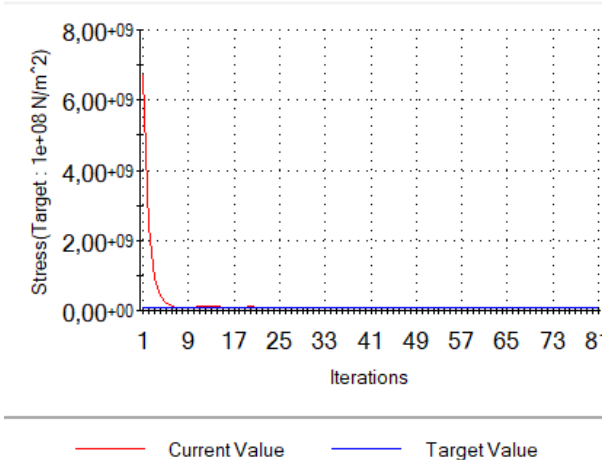
TB2



TB3



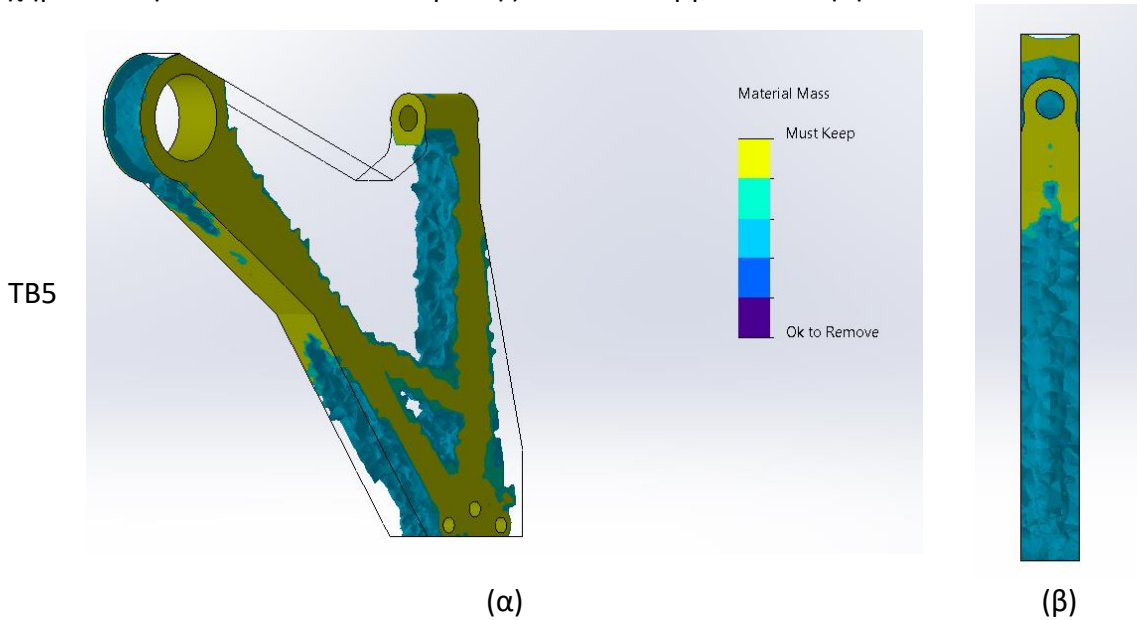
TB4



Σχήμα 4.27: Διαγράμματα σύγκλισης για τον περιορισμό τάσης

Τέλος όσον αφορά τα διαγράμματα τάσης δε βλέπουμε ιδιαίτερες διαφορές από αυτά των προηγούμενων υλικών και έτσι τα σχόλια είναι ίδια.

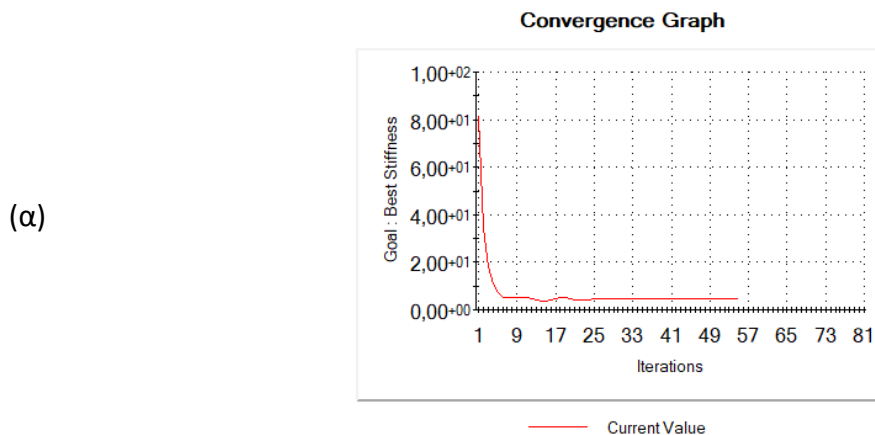
Ωστόσο εμείς επιθυμούμε ένα νέο μοντέλο που θα ικανοποιεί όλα τα ΣΦ και γι' αυτό στο Σχήμα 4.28 φαίνεται το αποτέλεσμα της TB5 που λαμβάνει υπόψη όλα τα ΣΦ.



Σχήμα 4.28: Γεωμετρικό αποτέλεσμα TB5 από χάλυβα ASTM A36 σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη

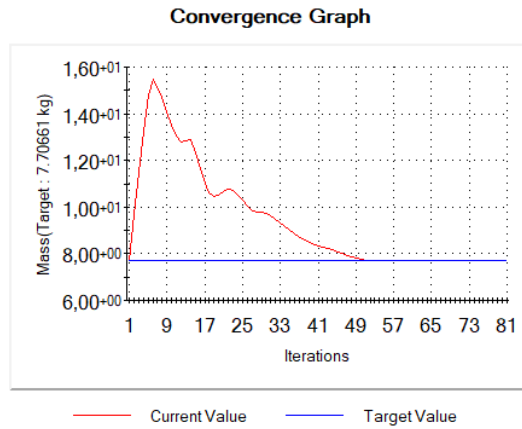
Παρατηρούμε ότι το υλικό έχει αφαιρεθεί από το κεντρικό κομμάτι και μας δίνεται εν τέλη μια συμπαγής γεωμετρία ενός ψαλιδιού με δύο βραχίονες. Το μοντέλο είναι παρόμοιο με αυτό του αλουμινίου κι αυτό είναι λογικό, αφού άλλαξε το υλικό κι όχι οι συνθήκες φόρτισης. Ωστόσο σύμφωνα με το λογισμικό το βάρος του συγκεκριμένου ανέρχεται στα **7,7kg**.

Επίσης στο Σχήμα 4.29 φαίνονται τα διαγράμματα σύγκλισης για τον στόχο και τους περιορισμούς για το TB5. Σημείωση ότι ο περιορισμός τάσης εφαρμόζεται για κάθε ΣΦ κι έτσι υπάρχουν και διαφορετικά διαγράμματα.

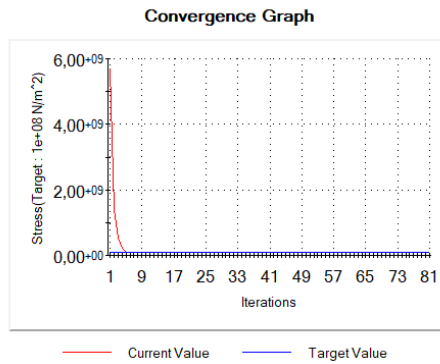


(α)

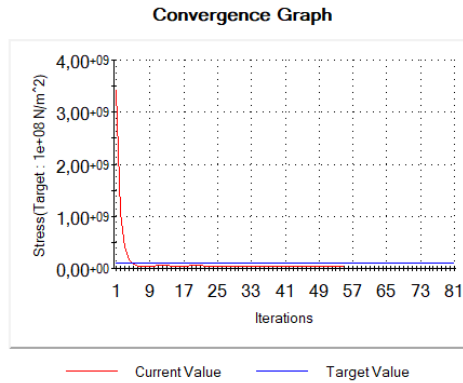
(β)



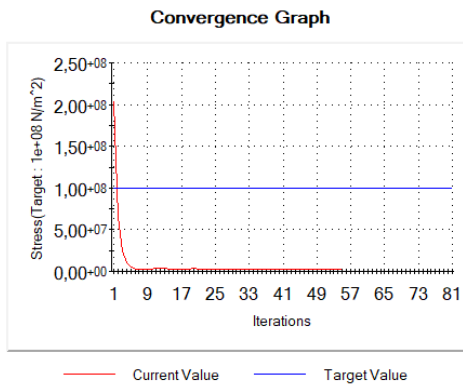
ΣΦ1



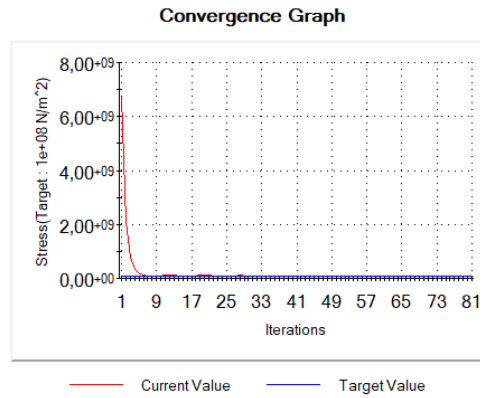
(γ) ΣΦ2



ΣΦ3



ΣΦ4

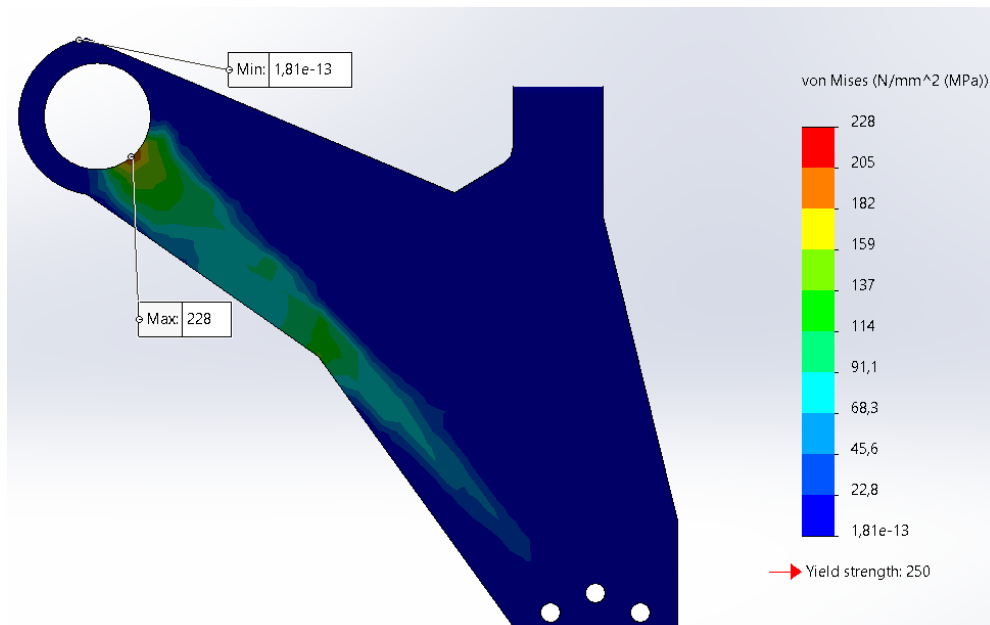


Σχήμα 4.29: Διαγράμματα σύγκλισης για στόχο (α), περιορισμό μάζας (β), περιορισμό τάσης (γ)

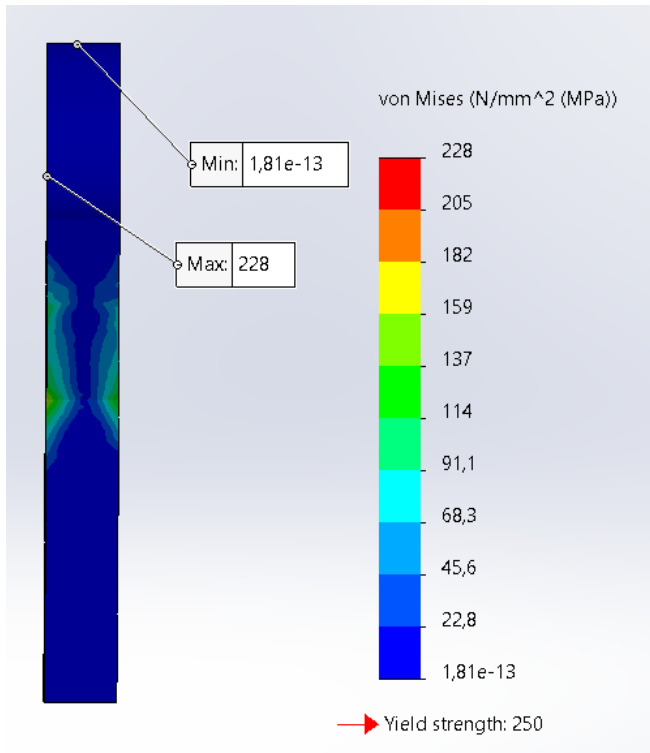
Βλέπουμε ότι πάλι στο διάγραμμα σύγκλισης της τάσης του ΣΦ3 οι τιμές τις τάσεις ξεκινάν πάνω από την τιμή στόχο (σε αντίθεση με τα προηγούμενα υλικά), αλλά συγκλίνει και πέφτει αρκετά χαμηλότερα από την τιμή του στόχου στις πρώτες επαναλήψεις. Επίσης και σε αυτή την TB βλέπουμε ότι χρειάζονται περισσότερες επαναλήψεις για να ολοκληρωθεί η τοπολογική βελτιστοποίηση.

Ακόμη στο Σχήμα 4.30 φαίνονται οι κατανομές τάσεις για κάθε ΣΦ σε περίπτωση που εφαρμόζαμε στατικές αναλύσεις στο αποτέλεσμα της TB5 και πάλι οι τιμές θα πρέπει να θεωρηθούν ως μια πρόχειρη εκτίμηση.

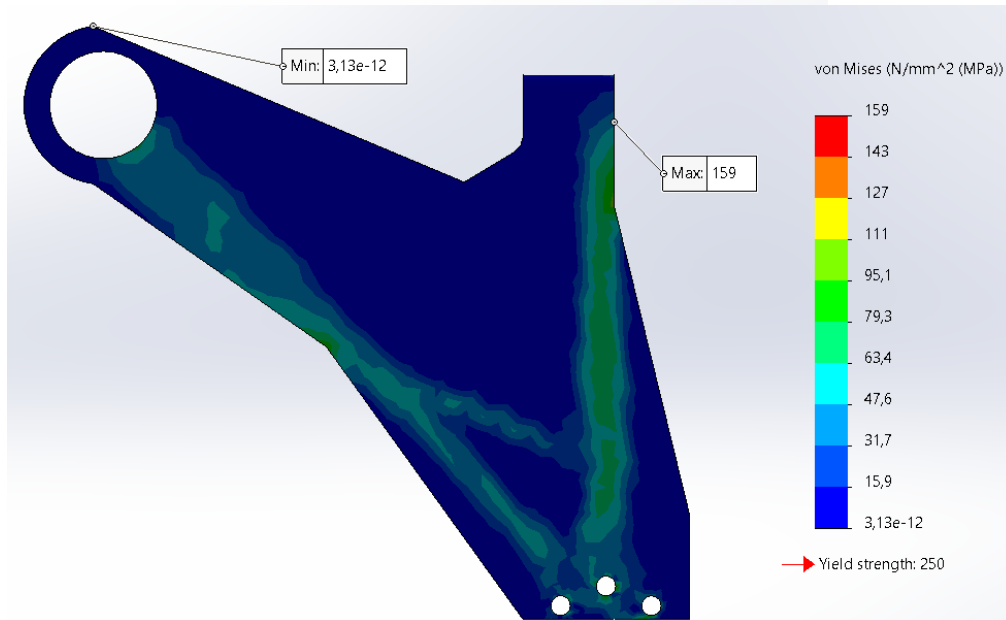
ΣΦ1 (α)



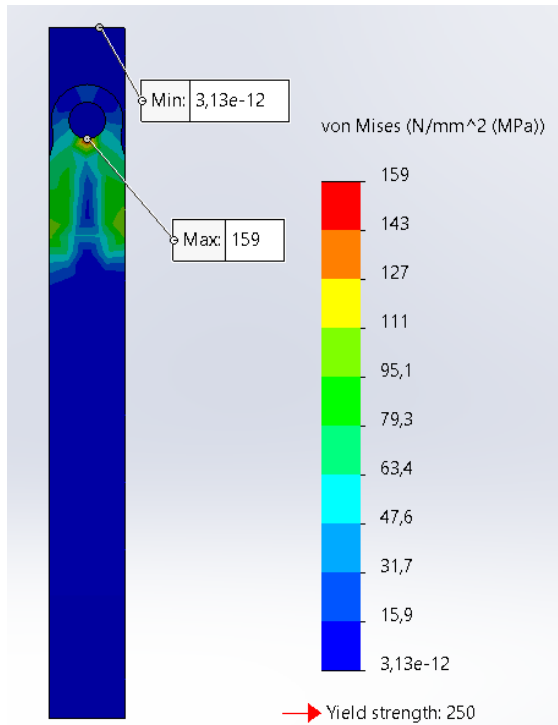
(β)



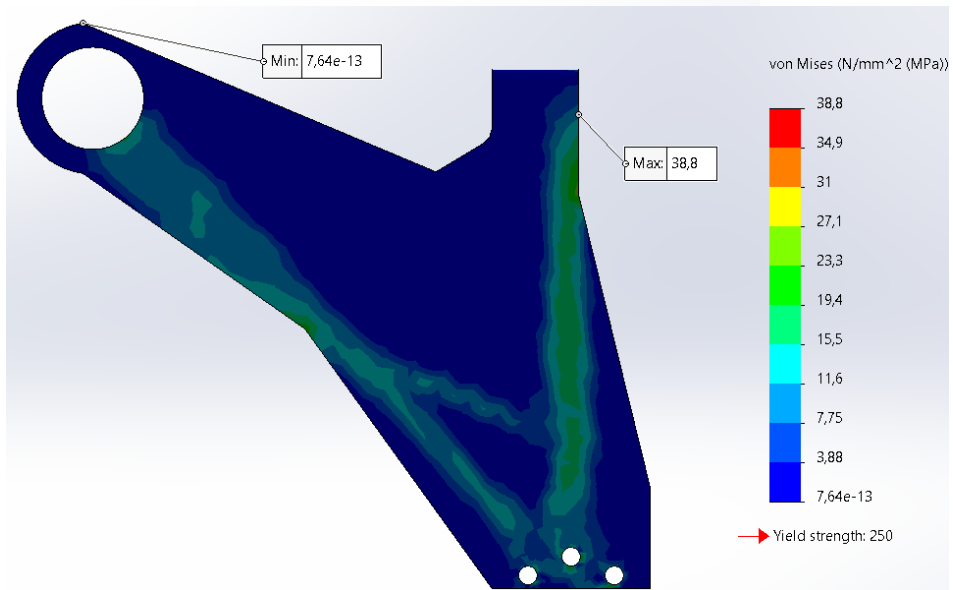
ΣΦ2 (α)



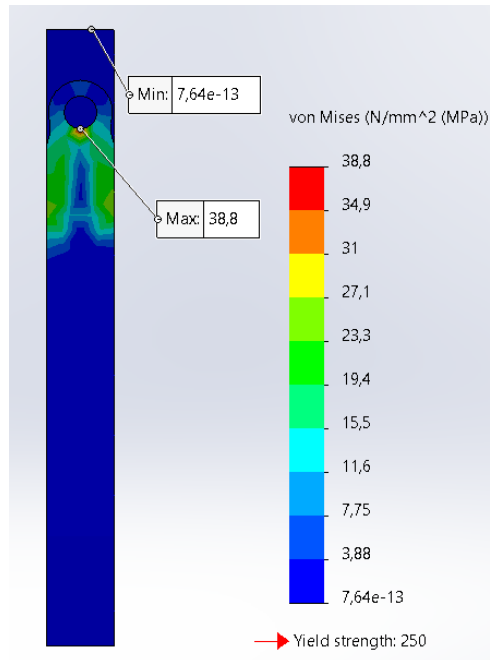
(β)



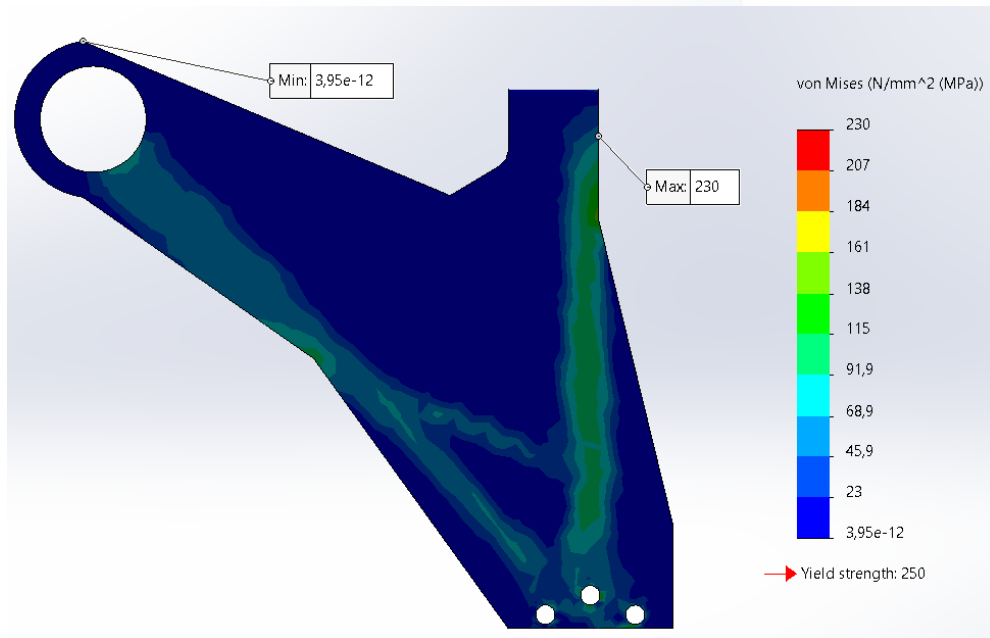
ΣΦ3 (α)



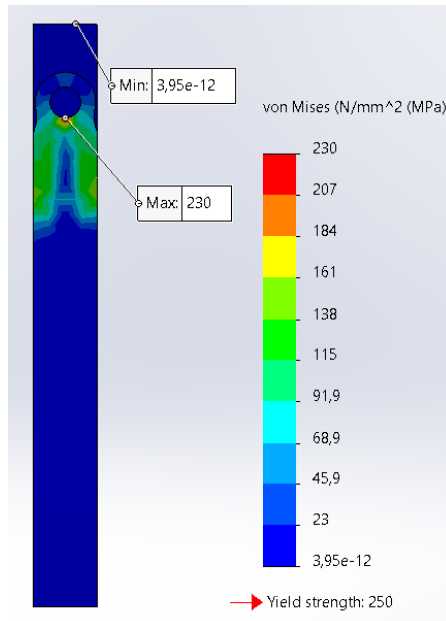
(β)



ΣΦ4 (α)

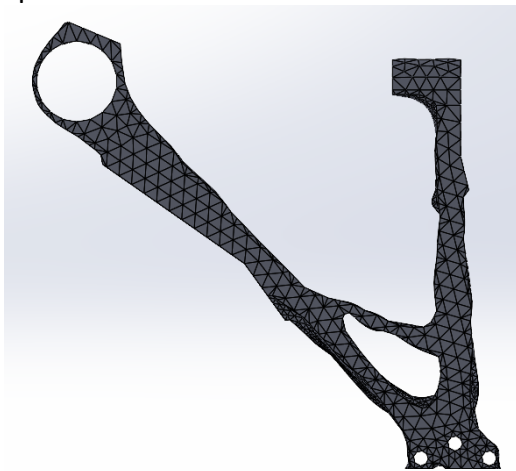


(β)



Σχήμα 4.30: Υποθετική κατανομή τάσης του TB5 από χάλυβα ASTM A36 σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη

Τέλος στο Σχήμα 4.31 φαίνεται το γεωμετρικό μοντέλο που εξάγει αυτόματα το λογισμικό. Είναι προφανές ότι τα σχέδια που δημιουργούνται αυτόματα από το λογισμικό δεν μπορούν να κατασκευαστούν με συμβατικές τεχνικές κατασκευής, αλλά στο μέλλον θα μπορούσαν να είναι 3D.



(α)



(β)

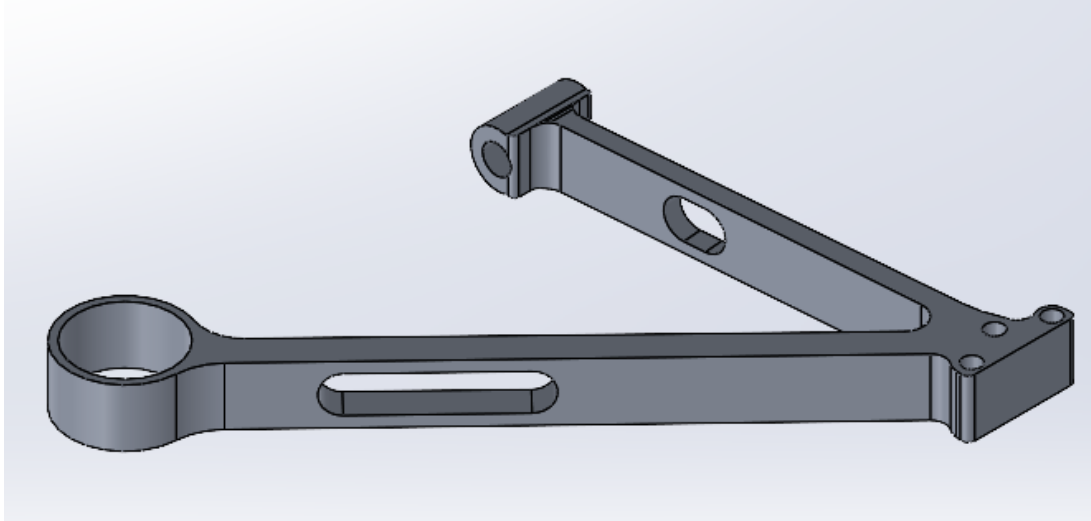
Σχήμα 4.31: Γεωμετρικό μοντέλο TB5 από χάλυβα ASTM A36 μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη

5. Σχεδιασμός νέων γεωμετρικών μοντέλων βραχιόνων ελέγχου και μηχανική ανάλυση αυτών

Έχοντας αποτελέσματα από όλες τις τοπολογικές βελτιστοποιήσεις θα χρησιμοποιηθούν μόνο αυτά από την TB5 κάθε υλικού. Αυτό γίνεται, καθώς θέλουμε τα καινούρια μοντέλα να έχουν την καλύτερη μάζα και να αντέχουν σε όλα τα ΣΦ. Τα νέα σχέδια θα βασιστούν στα γεωμετρικά μοντέλα που παρουσιάστηκαν Σχήμα 4.13, Σχήμα 4.22 και Σχήμα 4.31 αντίστοιχα για κάθε υλικό. Ωστόσο τα συγκεκριμένα σχέδια δεν μπορούν να παρασκευαστούν με τις γνωστές συμβατικές μεθόδους παρά μόνο με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Έτσι βασιζόμενοι σε αυτά, δημιουργείται νέο μοντέλο (M3) για κάθε υλικό χρησιμοποιώντας συνηθισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Επομένως τα τελικά σχέδια για κάθε υλικό, που θα τους εφαρμοστούν οι στατικές αναλύσεις, παρουσιάζονται παρακάτω.

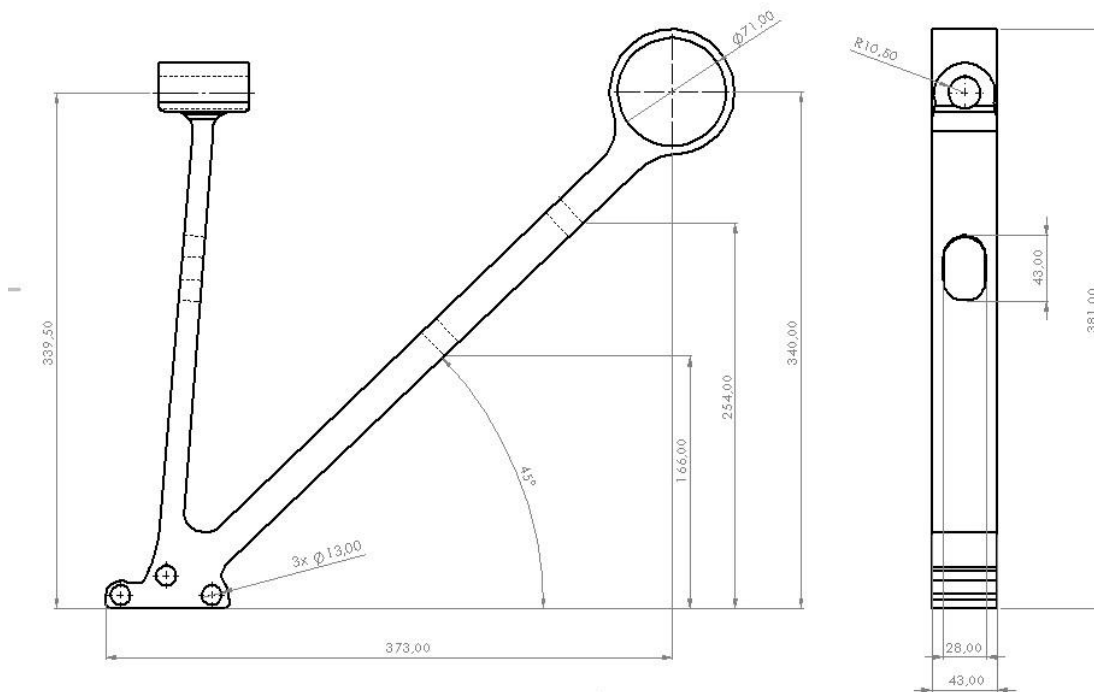
5.1 Κράμα Αλουμινίου 7075-T6

Για το κράμα αλουμινίου το νέο μοντέλο (M3) που σχεδιάστηκε φαίνεται στο Σχήμα 5.1.



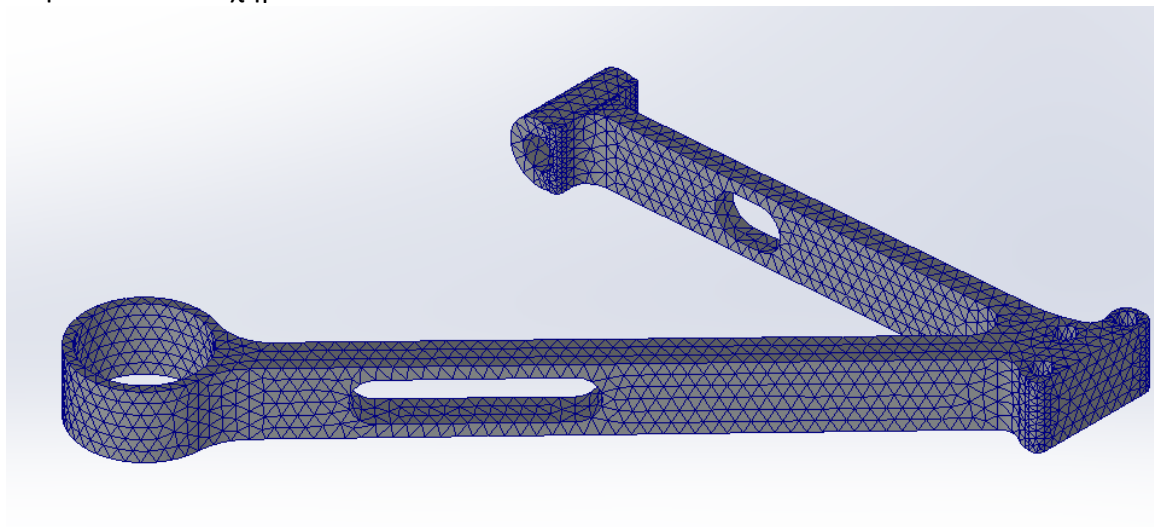
Σχήμα 5.1: Βελτιστοποιημένο μοντέλο (M3) από κράμα αλουμινίου

Οι βασικές διαστάσεις του M3 φαίνονται στο Σχήμα 5.2 ενώ το βάρος του είναι **1,8kg**.



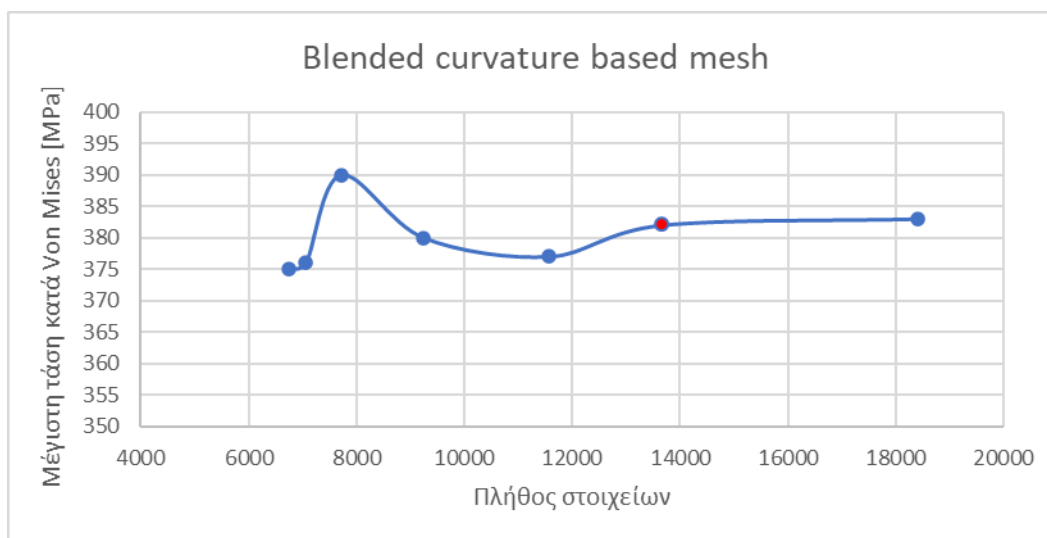
Σχήμα 5.2: Διαστάσεις ΠΣ3

Από το M3 δημιουργήθηκε το ΠΣ3 , στο οποίο πραγματοποιούνται οι στατικές αναλύσεις και φαίνεται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Μοντέλο ΠΣ του M3 (ΠΣ3)

Το παραπάνω πλέγμα προέκυψε έχοντας πραγματοποιήσει πρώτα μελέτη σύγκλισης (Διάγραμμα 5.1) για την επιλογή του τρόπου δημιουργίας του πλέγματος και για το μέγεθος των στοιχείων προκύπτει ότι θα χρησιμοποιηθεί Blended Curvature-based Mesh.



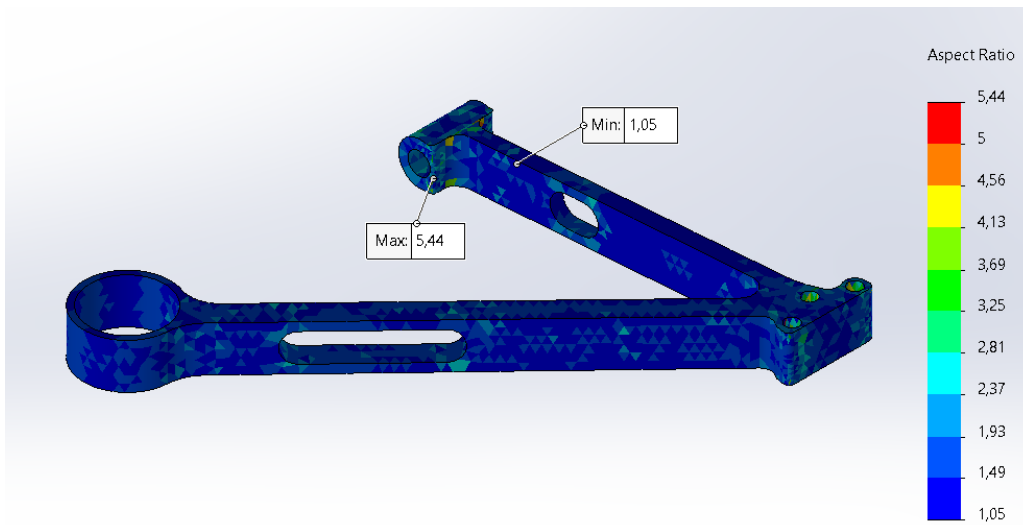
Διάγραμμα 5.1: Καμπύλη μελέτης σύγκλισης, Κόκκινο: σημείο επιλογής

Παρατηρούμε ότι από το συγκεκριμένο σημείο και μετά έχει επέλθει σύγκλιση των πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης τα χαρακτηριστικά του πλέγματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά ΠΣ3

Πλήθος στοιχείων	13665
Πλήθος κόμβων	24063
Μέγιστο μέγεθος στοιχείου [mm]	8
Ελάχιστο μέγεθος στοιχείου [mm]	3,06
Ιακωβιανά σημεία	16
Μέγιστο AR	5,4
% στοιχείων με AR<3	98,6
Ελάχ. πλήθος στοιχείων εντός κύκλου	8
Αναλογία αύξησης μεγέθους στοιχείου	1,4

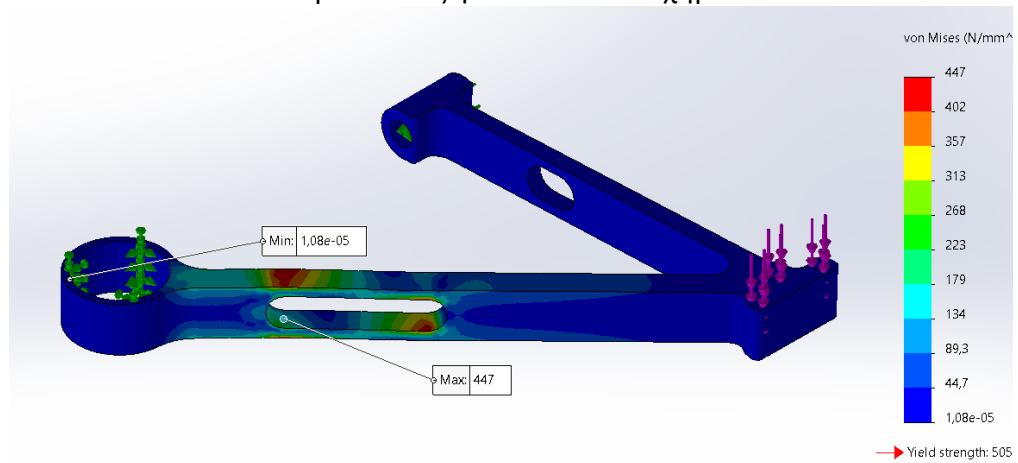
Μάλιστα με τα συγκεκριμένα πεπερασμένα έχουμε δημιουργήσει μια καλή ποιότητα πλέγματος, καθώς το 98,6% των πεπερασμένων στοιχείων έχει AR<3 αλλά και η μέγιστη τιμή του είναι 5,4 (Σχήμα 5.4). Επίσης στο ΠΣ3 όσον αφορά την Ιακωβιανή αναλογία αυτή έχει μέγιστη τιμή 8,3 κι επομένως όλα τα στοιχεία έχουν αναλογία μεταξύ του και του 10.



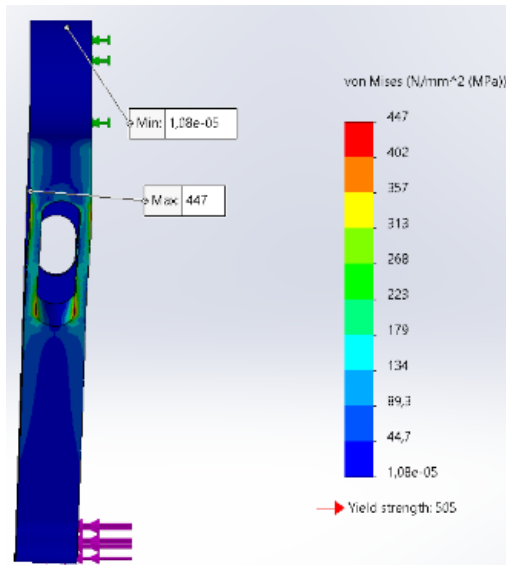
Σχήμα 5.4: Απεικόνιση ΠΣ3 σε σχέση με AR

Έχοντας δημιουργήσει το ΠΣ3, σε αυτό εφαρμόζονται τα ίδια ΣΦ με τις ίδιες στηρίξεις που είχαμε στα ΠΣ1 και ΠΣ2. Τα αποτελέσματά τους φαίνονται στο Σχήμα 5.5.

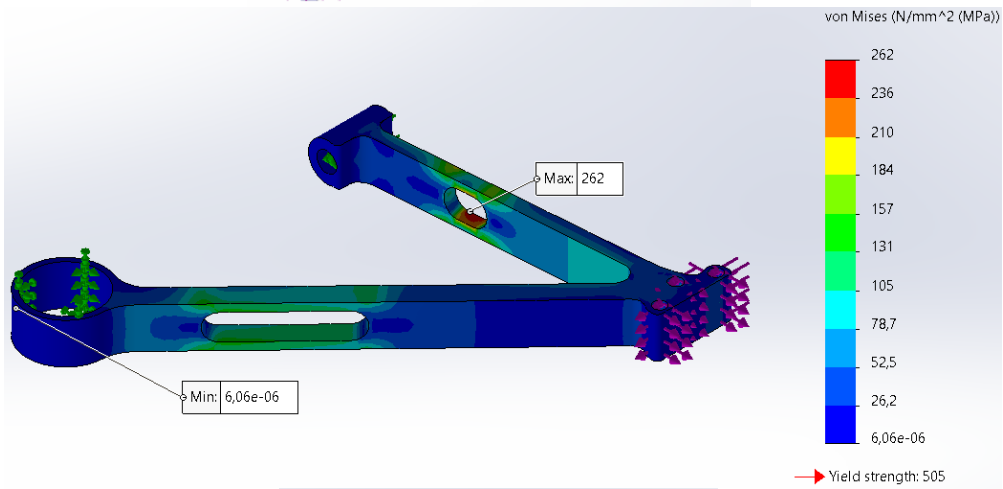
ΣΦ1 (α)



(β)

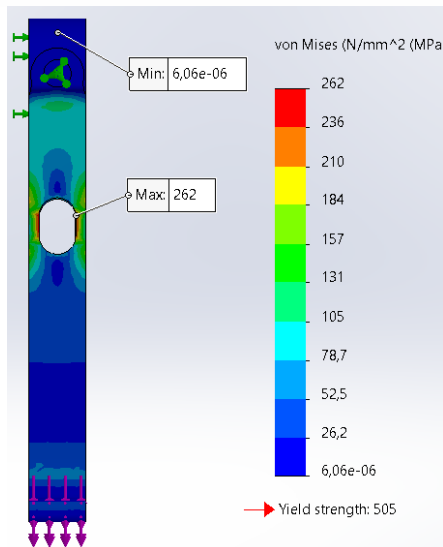


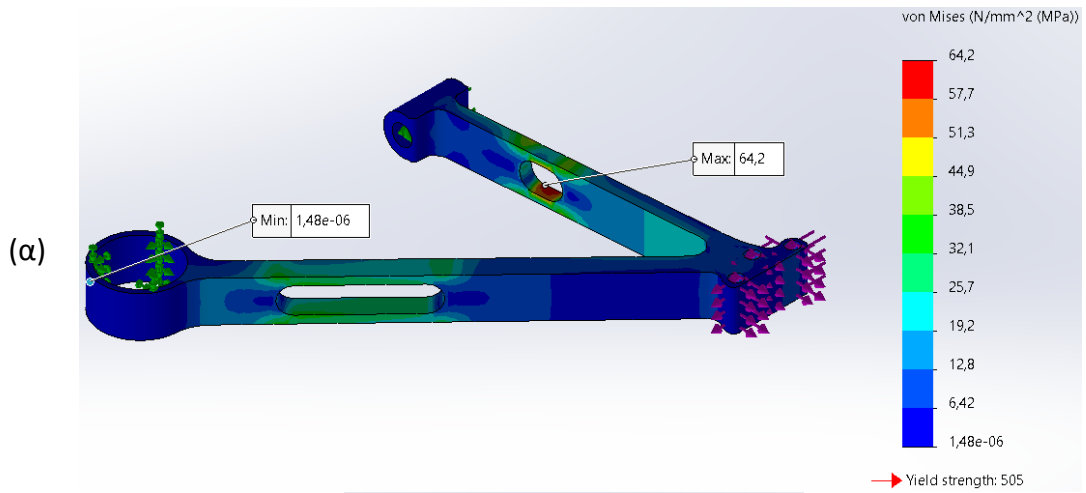
(α)



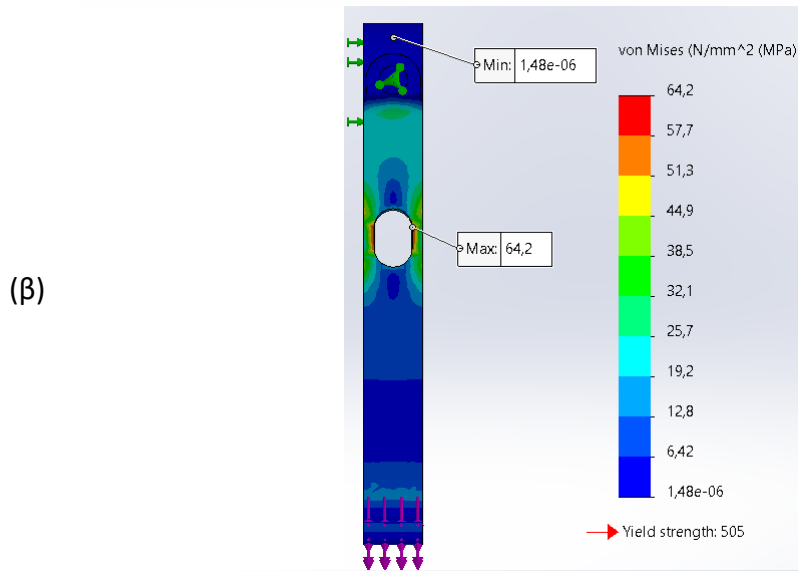
ΣΦ2

(β)

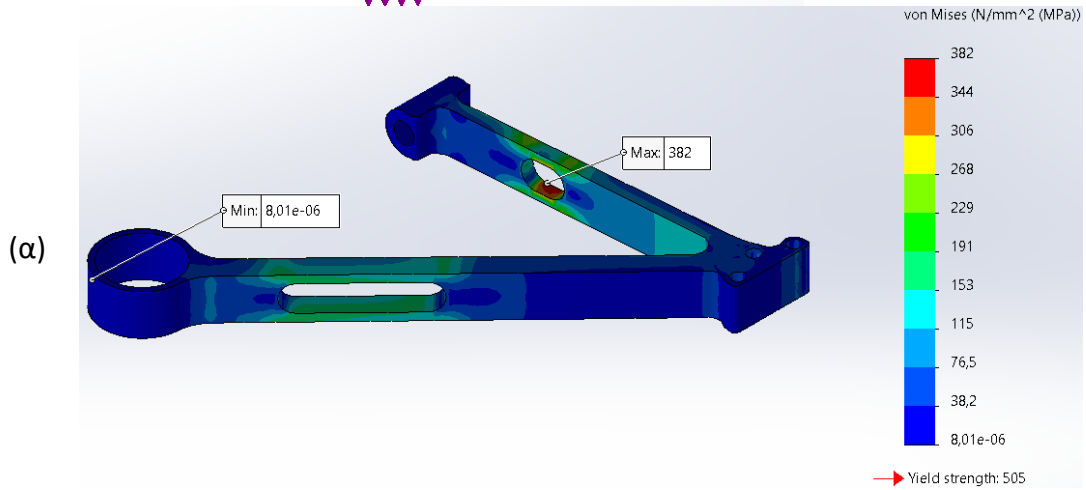




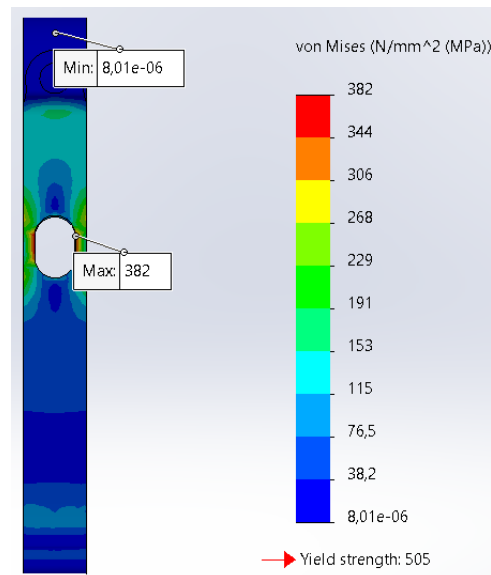
ΣΦ3



ΣΦ4



(β)



Σχήμα 5.5: Κατανομή τάσης von Mises του ΠΣ3 από κράμα αλουμινίου σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη

Παρατηρούμε ότι έχουμε έντονη συγκέντρωση τάσεων γύρω από τις οπές που δημιουργήθηκαν για την μείωση του υλικού. Παρόλα αυτά σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνιέται το όριο διαρροής. Επίσης βλέπουμε ότι οι τάσεις είναι εντονότερες στον πίσω βραχίονα όταν έχουμε το ΣΦ1 ενώ στον μπροστά όταν έχουμε τα υπόλοιπα 3 σενάρια, τα οποία έχουν και παρόμοιες κατανομές. Παρόλο που οι κατανομές είναι παρόμοιες, οι μέγιστες τιμές των τάσεων διαφοροποιούνται και γι' αυτό παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2 μαζί με τις τιμές των μέγιστων μετατοπίσεων.

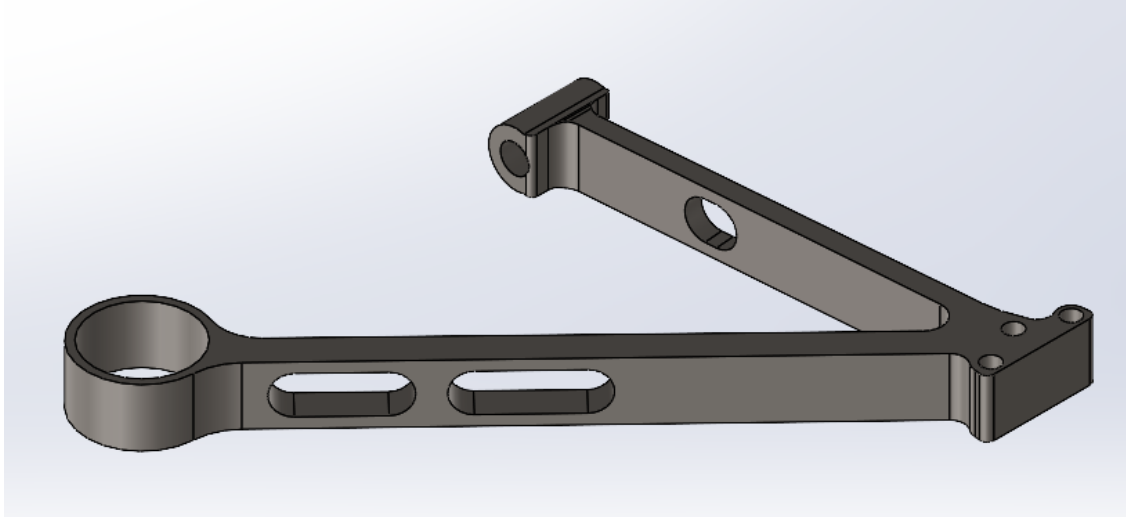
Πίνακας 5.2: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ3

ΣΦ	Τάση [MPa]	Συνολική μετατόπιση [mm]	Μετατόπιση κατά τον άξονα		
			x [mm]	y [mm]	z [mm]
ΣΦ1	447	11,4	0,2	11,4	0,7
ΣΦ2	262	1,0	0,9	0,4	0,1
ΣΦ3	64,2	0,2	0,2	0,1	0
ΣΦ4	382	1,4	1,2	0,6	0,1

Παρατηρούμε ότι στο ΣΦ1 έχουμε τη μεγαλύτερη τάση κατά von Mises αλλά και μετατόπιση. Παρόλο που η τιμή της δύναμης στο συγκεκριμένο σενάριο δε είναι αρκετά μεγάλη, ασκείται κατά τον άξονα z και βλέπουμε ότι προσφέρει τη μεγαλύτερη μετατόπιση στον συγκεκριμένο άξονα. Στα υπόλοιπα ΣΦ βλέπουμε ότι όσο μεγαλώνουν οι δυνάμεις τόσο μεγαλώνουν οι τάσεις και οι μετατοπίσεις.

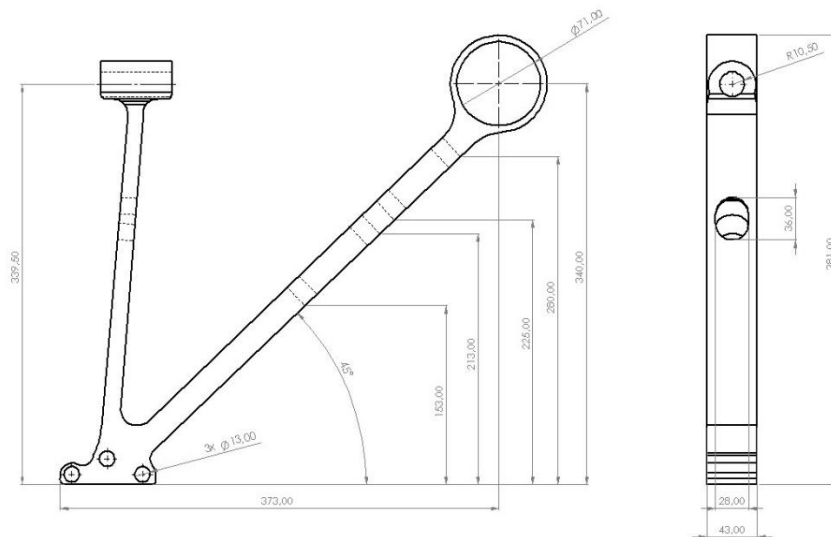
5.2 Χάλυβας AISI 1045

Για τον χάλυβα AISI 1045 το νέο μοντέλο (M4) που σχεδιάστηκε φαίνεται στο Σχήμα 5.6.



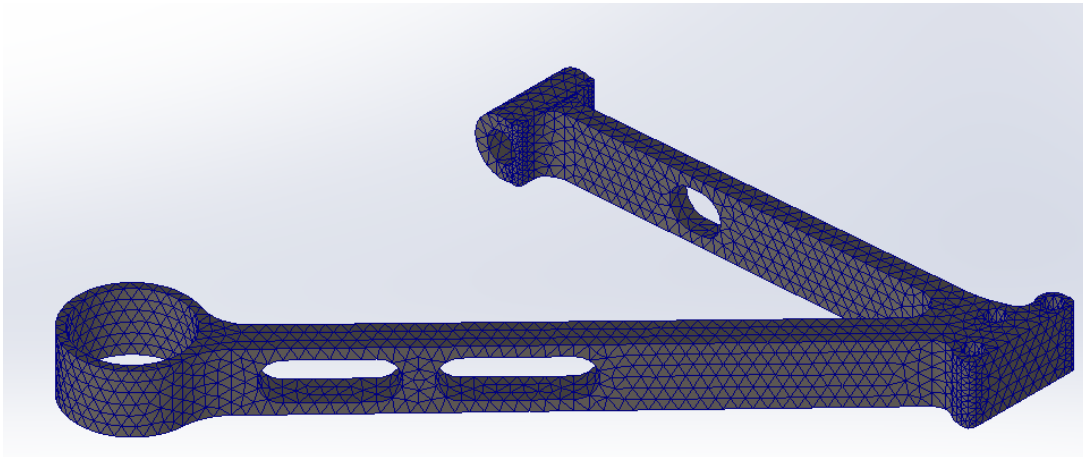
Σχήμα 5.6: Βελτιστοποιημένο μοντέλο (M4) από κράμα αλουμινίου

Οι βασικές διαστάσεις του M4 φαίνονται στο Σχήμα 5.7 ενώ το βάρος του είναι **5,0kg**.



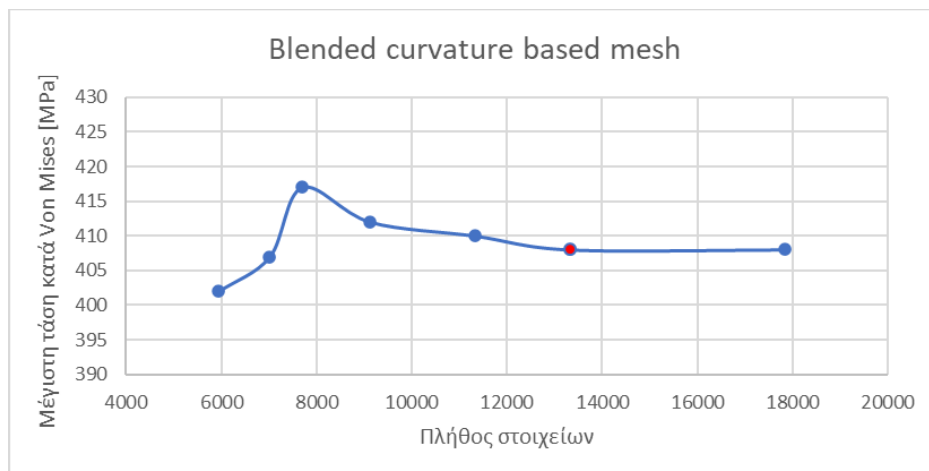
Σχήμα 5.7: Διαστάσεις ΠΣ4

Από το M4 δημιουργήθηκε το ΠΣ4, στο οποίο πραγματοποιούνται οι στατικές αναλύσεις και φαίνεται στο Σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8: Μοντέλο ΠΣ του M3 (ΠΣ3)

Το παραπάνω πλέγμα προέκυψε έχοντας πραγματοποιήσει πρώτα μελέτη σύγκλισης (Διάγραμμα 5.2) για την επιλογή του τρόπου δημιουργίας του πλέγματος και για το μέγεθος των στοιχείων προκύπτει ότι θα χρησιμοποιηθεί Blended Curvature-based Mesh.



Διάγραμμα 5.2: Καμπύλη μελέτης σύγκλισης, Κόκκινο: σημείο επιλογής

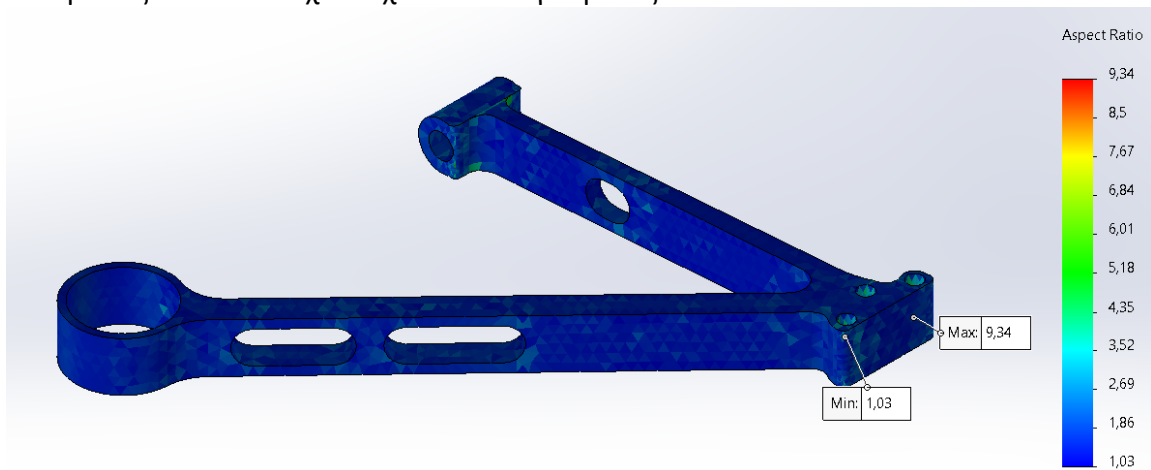
Παρατηρούμε ότι από το συγκεκριμένο σημείο και μετά έχει επέλθει σύγκλιση των πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης τα χαρακτηριστικά του πλέγματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά ΠΣ4

Πλήθος στοιχείων	13337
Πλήθος κόμβων	23632
Μέγιστο μέγεθος στοιχείου [mm]	8
Ελάχιστο μέγεθος στοιχείου [mm]	3,06

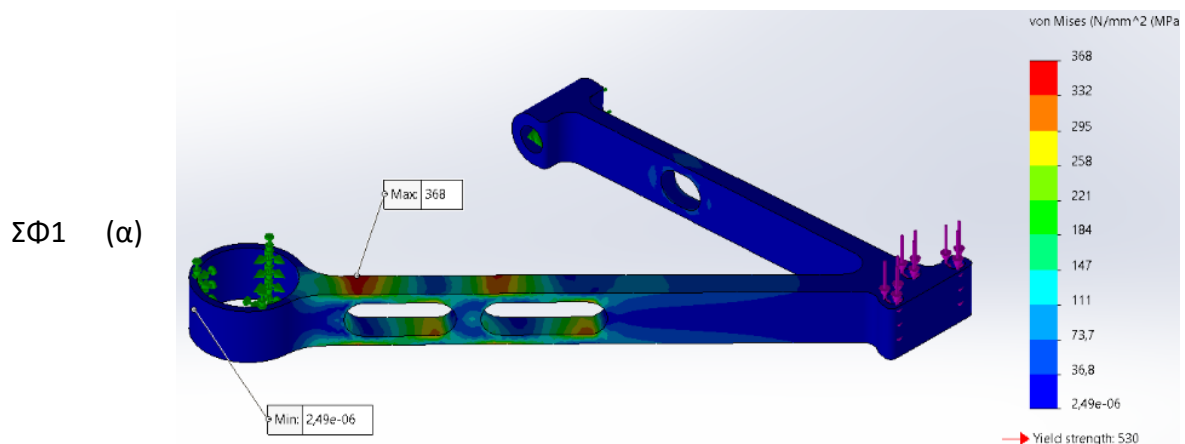
Ιακωβιανά σημεία	16
Μέγιστο AR	9,3
% στοιχείων με AR<3	98,5
Ελάχ. πλήθος στοιχείων εντός κύκλου	8
Αναλογία αύξησης μεγέθους στοιχείου	1,4

Μάλιστα με τα συγκεκριμένα πεπερασμένα έχουμε δημιουργήσει μια καλή ποιότητα πλέγματος, καθώς το 98,5% των πεπερασμένων στοιχείων έχει $AR < 3$ αλλά και η μέγιστη τιμή του είναι 9,3 (Σχήμα 5.9), η οποία παρόλο που είναι μεγάλη σχετικά είναι σε πολύ λίγα στοιχεία. Επίσης στο ΠΣ4 όσον αφορά την Ιακωβιανή αναλογία αυτή έχει μέγιστη τιμή 8,3 κι επομένως όλα τα στοιχεία έχουν αναλογία μεταξύ του και του 10.

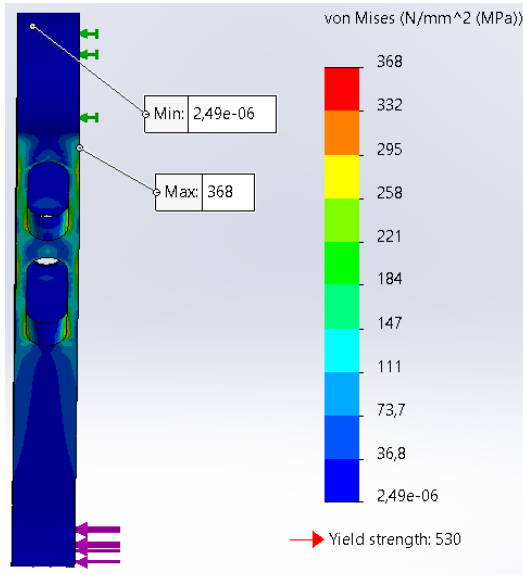


Σχήμα 5.9: Απεικόνιση ΠΣ4 σε σχέση με AR

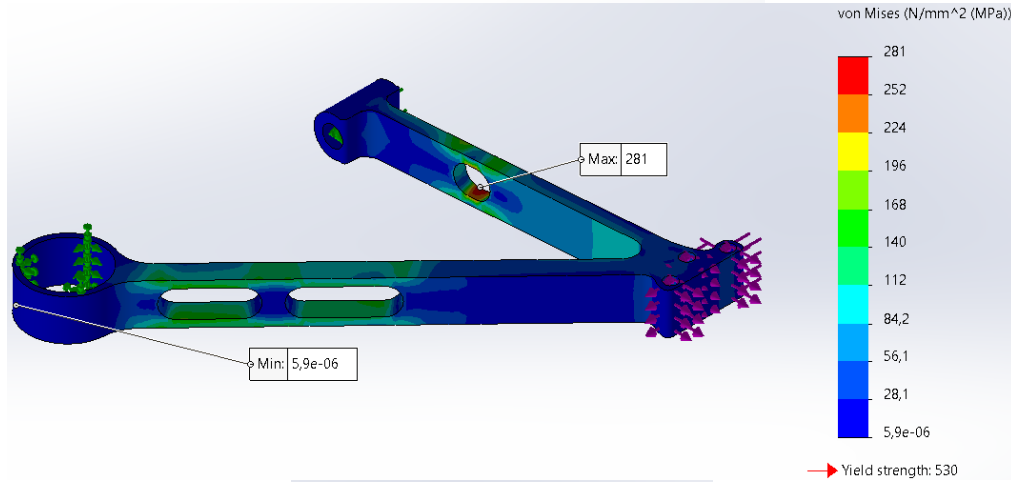
Έχοντας δημιουργήσει το ΠΣ4, σε αυτό εφαρμόζονται τα ίδια ΣΦ με τις ίδιες στηρίξεις που είχαμε στα ΠΣ1 και ΠΣ2. Τα αποτελέσματά τους φαίνονται στο Σχήμα 5.10.



(β)

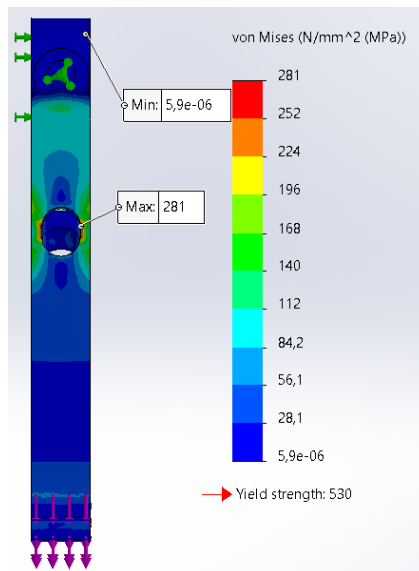


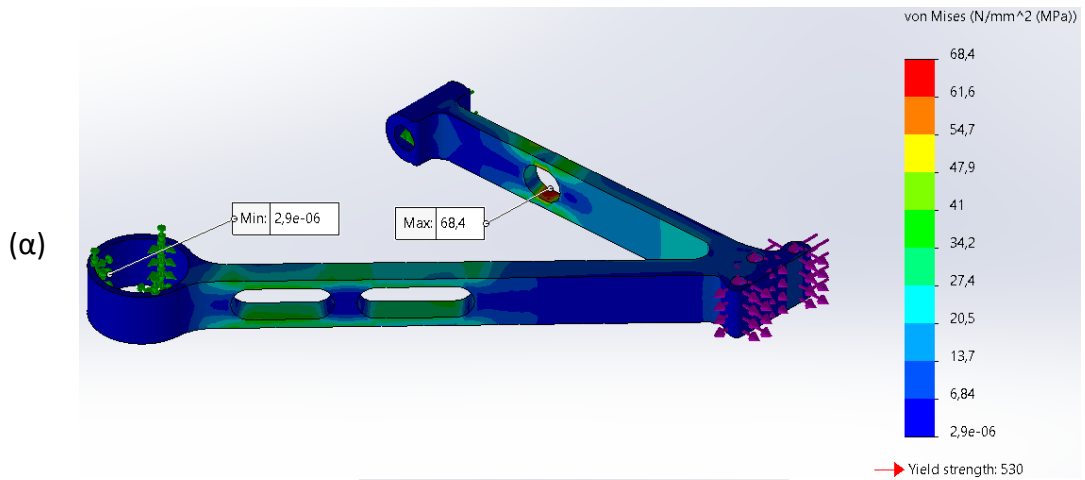
(α)



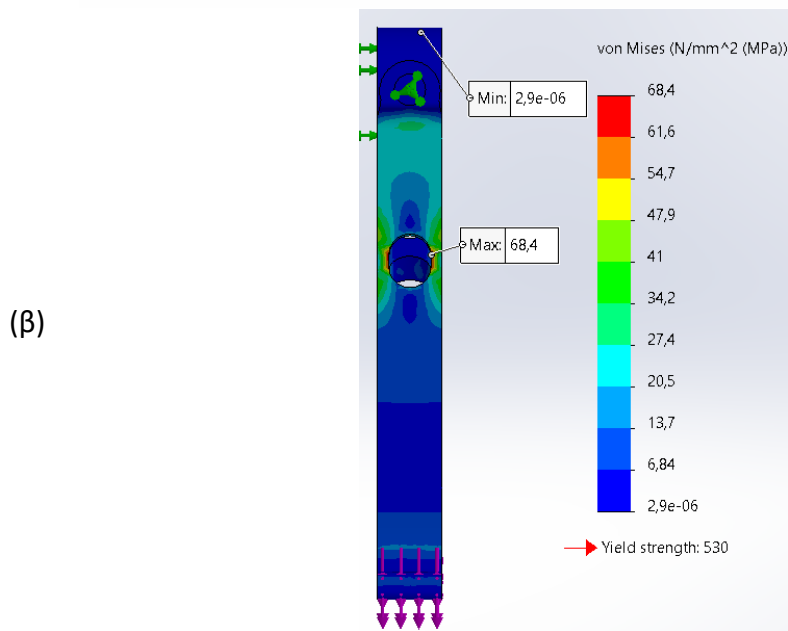
ΣΦ2

(β)

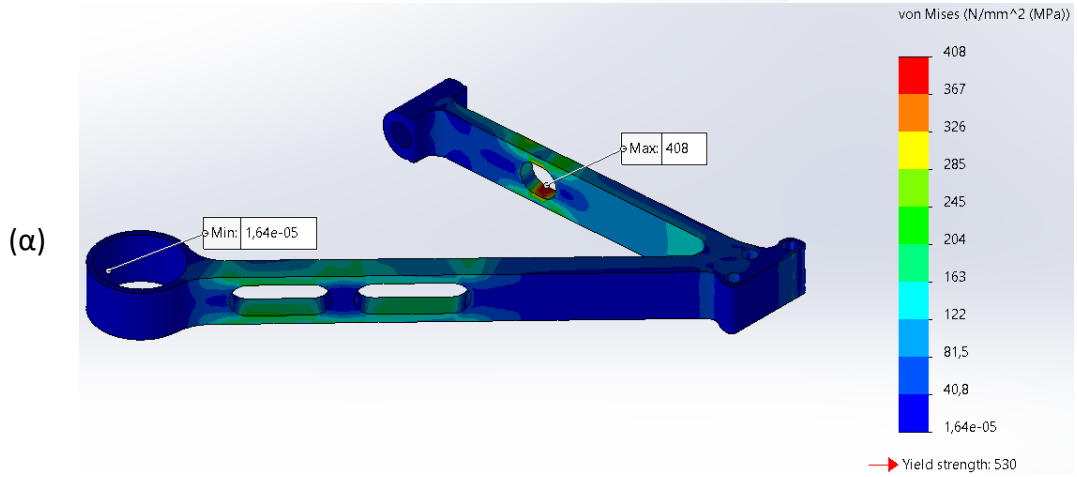




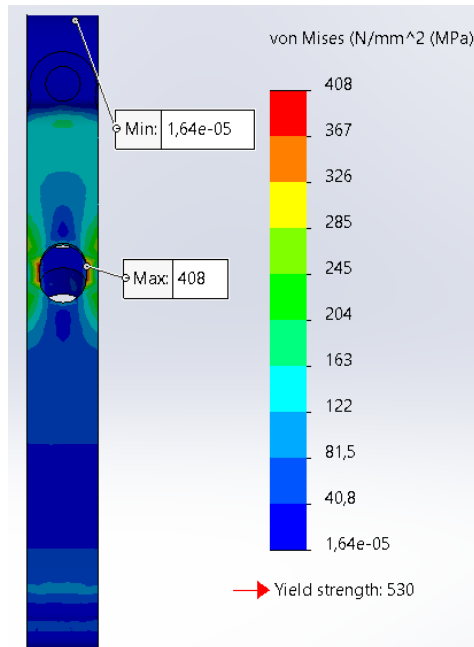
ΣΦ3



ΣΦ4



(β)



Σχήμα 5.10: Κατανομή τάσης von Mises του ΠΣ4 από κράμα αλουμινίου σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη

Παρατηρούμε ότι έχουμε έντονη συγκέντρωση τάσεων γύρω από τις οπές που δημιουργήθηκαν για την μείωση του υλικού και σε αυτή την περίπτωση. Παρόλα αυτά σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνιέται το όριο διαρροής. Επίσης βλέπουμε ότι οι τάσεις είναι εντονότερες στον πίσω βραχίονα όταν έχουμε το ΣΦ1 ενώ στον μπροστά όταν έχουμε τα υπόλοιπα 3 σενάρια, τα οποία έχουν και παρόμοιες κατανομές. Παρόλο που οι κατανομές είναι παρόμοιες, οι μέγιστες τιμές των τάσεων διαφοροποιούνται και γι' αυτό παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4 μαζί με τις τιμές των μέγιστων μετατοπίσεων.

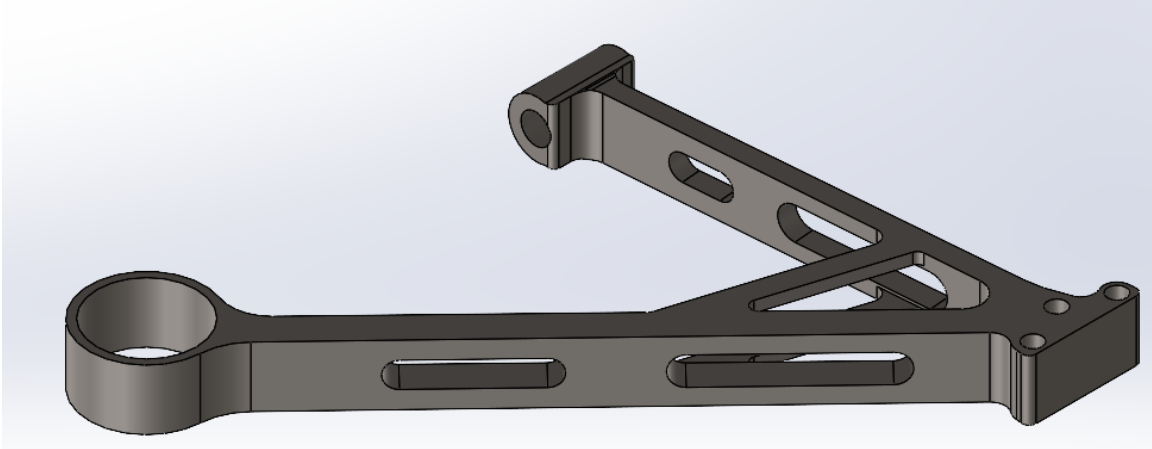
Πίνακας 5.4: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ4

ΣΦ	Τάση [MPa]	Συνολική μετατόπιση [mm]	Μετατόπιση κατά τον άξονα		
			x [mm]	y [mm]	z [mm]
ΣΦ1	368	3,9	0,1	0,2	3,9
ΣΦ2	281	0,4	0,3	0,1	0
ΣΦ3	68,4	0,1	0,1	0	0
ΣΦ4	408	0,5	0,5	0,2	0

Παρατηρούμε ότι στο ΣΦ4 έχουμε τη μεγαλύτερη τάση κατά von Mises σε αυτή την περίπτωση αλλά η μεγαλύτερη μετατόπιση είναι στο ΣΦ1. Παρόλο που η τιμή της δύναμης στο ΣΦ1 δε είναι αρκετά μεγάλη, ασκείται κατά τον άξονα z και βλέπουμε ότι προσφέρει τη μεγαλύτερη μετατόπιση στον συγκεκριμένο άξονα. Στα υπόλοιπα ΣΦ βλέπουμε ότι όσο μεγαλώνουν οι δυνάμεις τόσο μεγαλώνουν οι τάσεις και οι μετατοπίσεις.

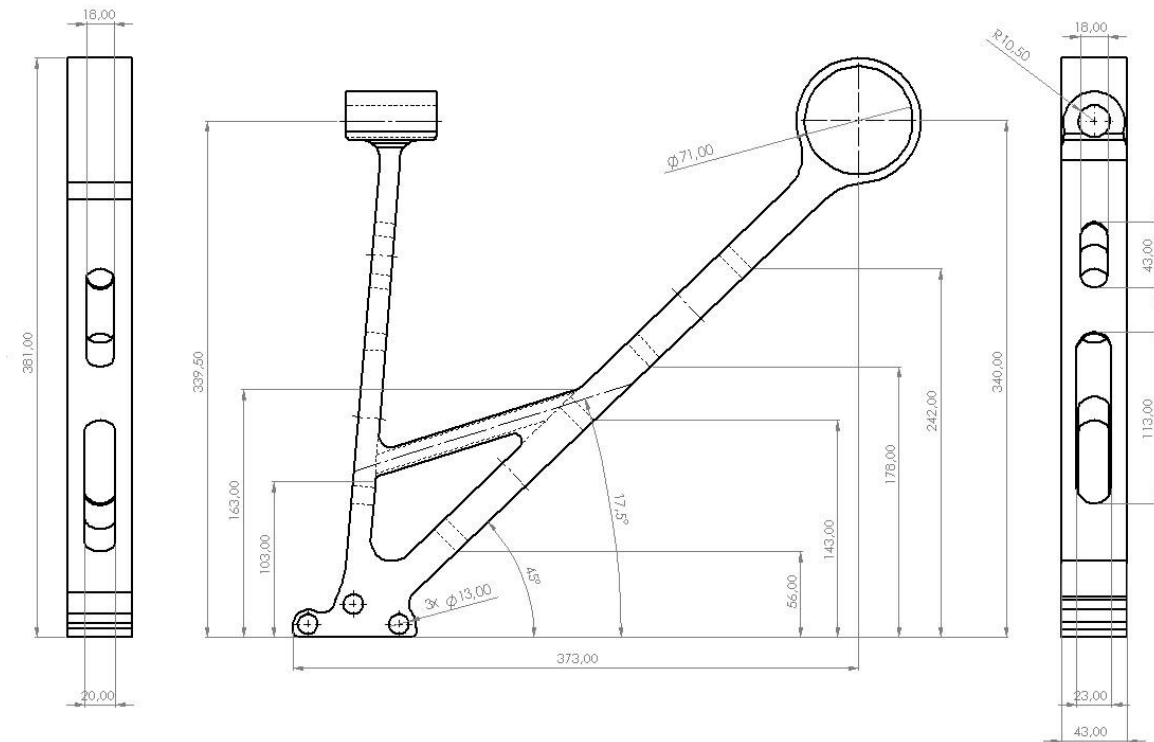
5.3 Χάλυβας ASTM A36

Για τον χάλυβα ASTM A36 το νέο μοντέλο (M5) που σχεδιάστηκε φαίνεται στο Σχήμα 5.11.



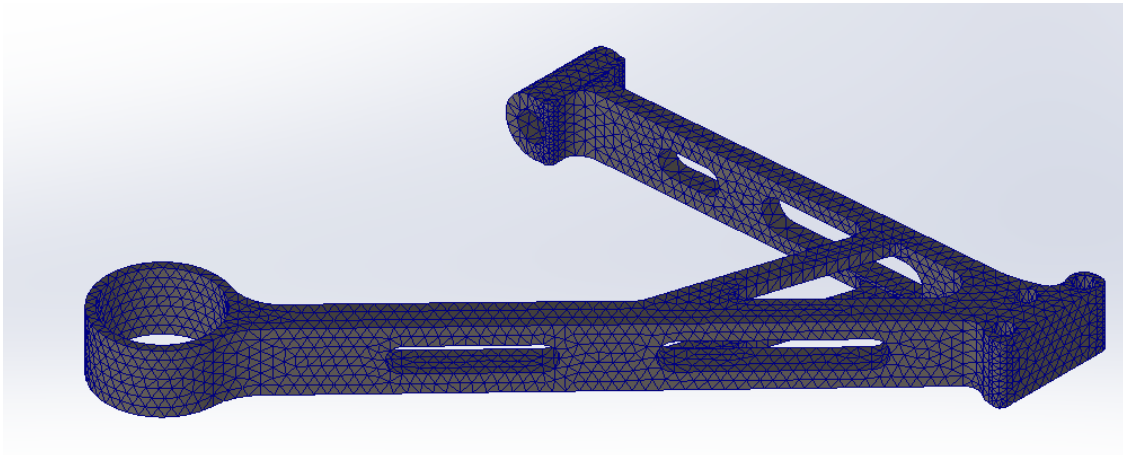
Σχήμα 5.11: Βελτιστοποιημένο μοντέλο (M5) από χάλυβα ASTM A36

Οι βασικές διαστάσεις του M5 φαίνονται στο Σχήμα 5.12 ενώ το βάρος του είναι **4,9kg**.



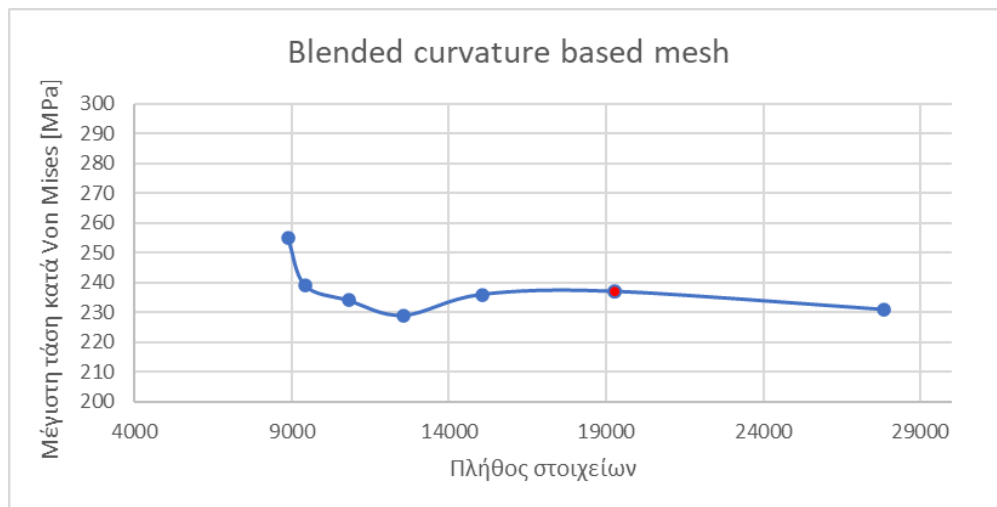
Σχήμα 5.12: Διαστάσεις ΠΣ5

Από το M4 δημιουργήθηκε το ΠΣ4, στο οποίο πραγματοποιούνται οι στατικές αναλύσεις και φαίνεται στο.



Σχήμα 5.13: Μοντέλο ΠΣ του Μ5 (ΠΣ5)

Το παραπάνω πλέγμα προέκυψε έχοντας πραγματοποιήσει πρώτα μελέτη σύγκλισης (Διάγραμμα 5.3) για την επιλογή του τρόπου δημιουργίας του πλέγματος και για το μέγεθος των στοιχείων προκύπτει ότι θα χρησιμοποιηθεί Blended Curvature-based Mesh.



Διάγραμμα 5.3: Καμπύλη μελέτης σύγκλισης, Κόκκινο: σημείο επιλογής

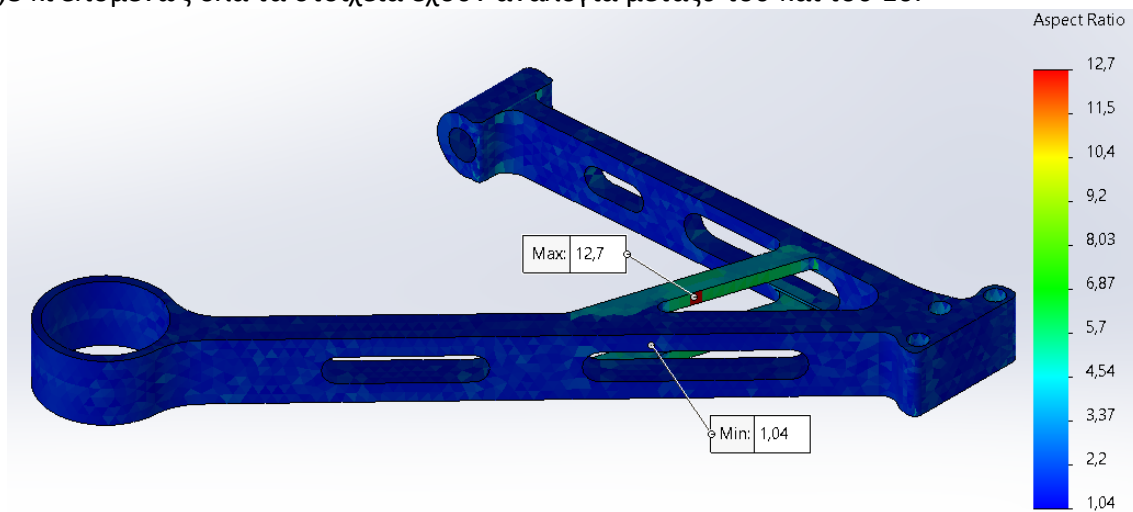
Παρατηρούμε ότι από το συγκεκριμένο σημείο και μετά έχει επέλθει σύγκλιση των πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης τα χαρακτηριστικά του πλέγματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Χαρακτηριστικά ΠΣ5

Πλήθος στοιχείων	19271
Πλήθος κόμβων	34020
Μέγιστο μέγεθος στοιχείου [mm]	7
Ελάχιστο μέγεθος στοιχείου [mm]	3,06

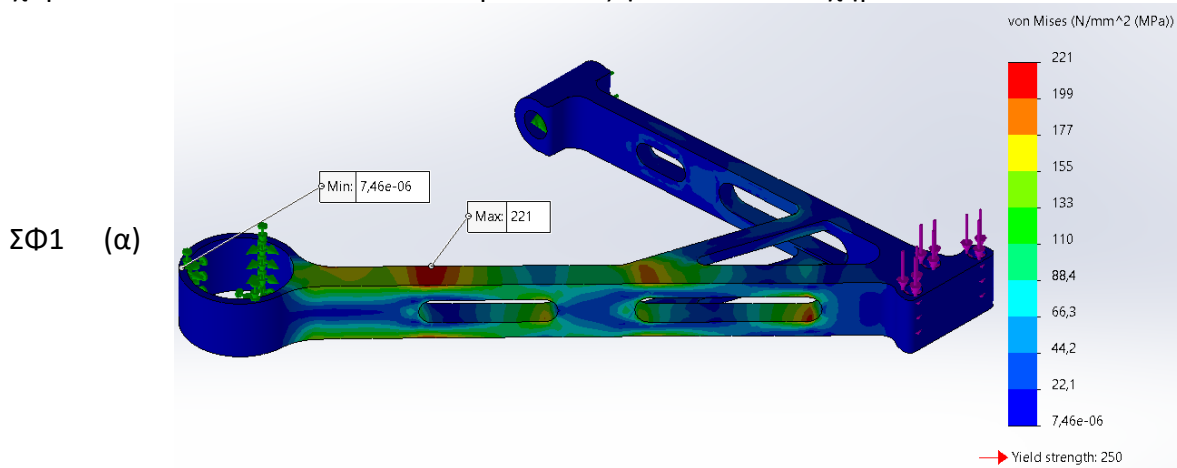
Ιακωβιανά σημεία	16
Μέγιστο AR	12,7
% στοιχείων με AR<3	91,1
Ελάχ. πλήθος στοιχείων εντός κύκλου	8
Αναλογία αύξησης μεγέθους στοιχείου	1,4

Μάλιστα με τα συγκεκριμένα πεπερασμένα έχουμε δημιουργήσει μια καλή ποιότητα πλέγματος, καθώς το 91,1% των πεπερασμένων στοιχείων έχει $AR < 3$ αλλά και η μέγιστη τιμή του είναι 9,3 (Σχήμα 5.14), η οποία παρόλο που είναι μεγάλη σχετικά είναι σε πολύ λίγα στοιχεία. Επίσης στο ΠΣ5 όσον αφορά την Ιακωβιανή αναλογία αυτή έχει μέγιστη τιμή 6,8 κι επομένως όλα τα στοιχεία έχουν αναλογία μεταξύ του και του 10.

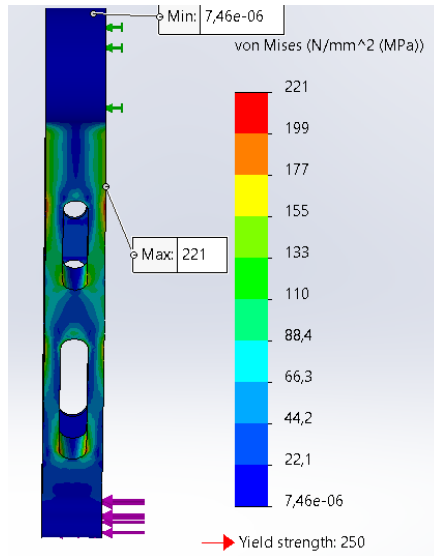


Σχήμα 5.14: Απεικόνιση ΠΣ5 σε σχέση με AR

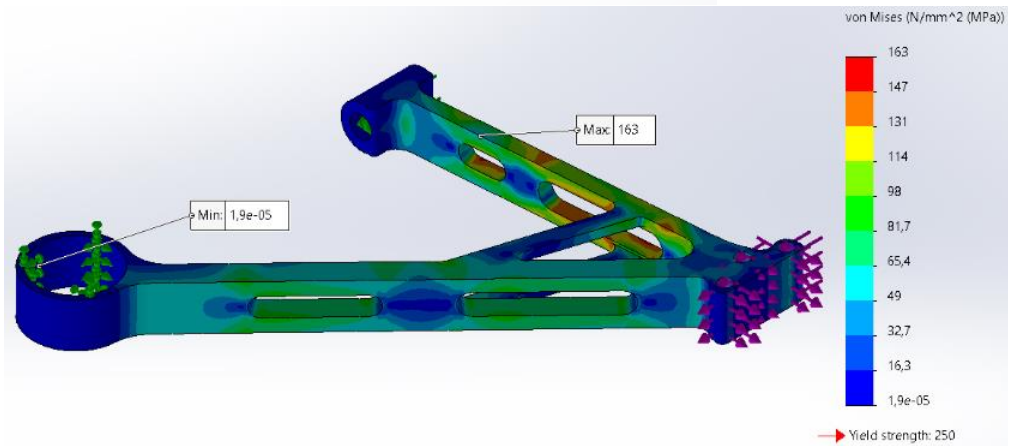
Έχοντας δημιουργήσει το ΠΣ5, σε αυτό εφαρμόζονται τα ίδια ΣΦ με τις ίδιες στηρίξεις που είχαμε στα ΠΣ1 και ΠΣ2. Τα αποτελέσματά τους φαίνονται στο Σχήμα 5.15.



(β)

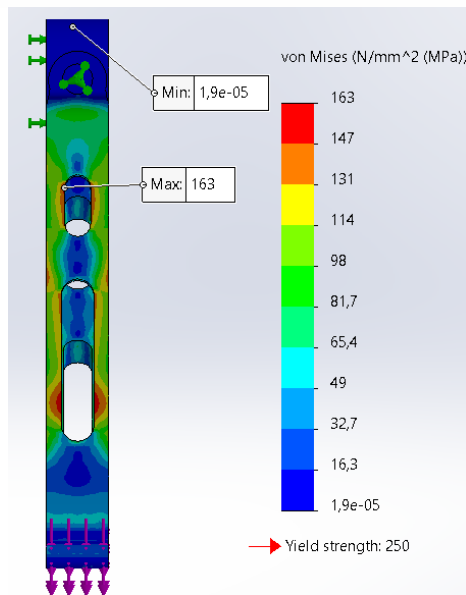


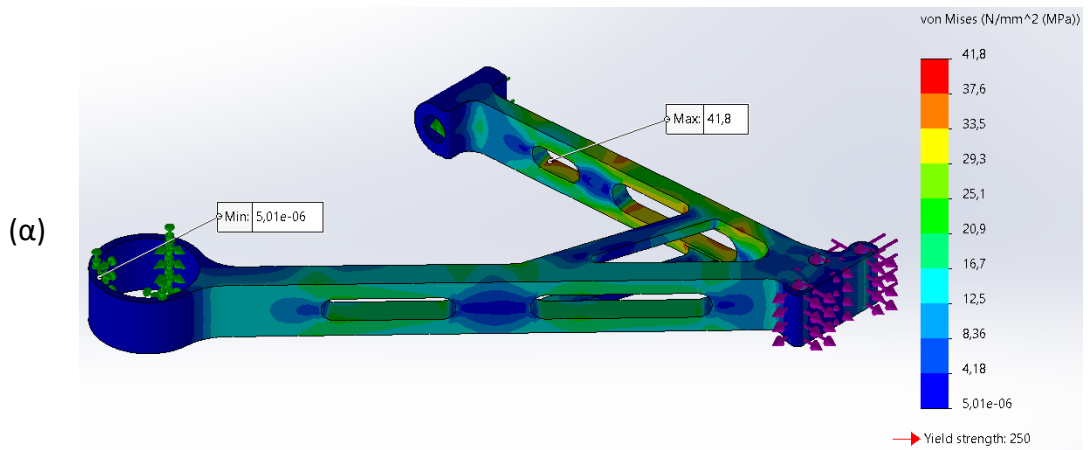
(α)



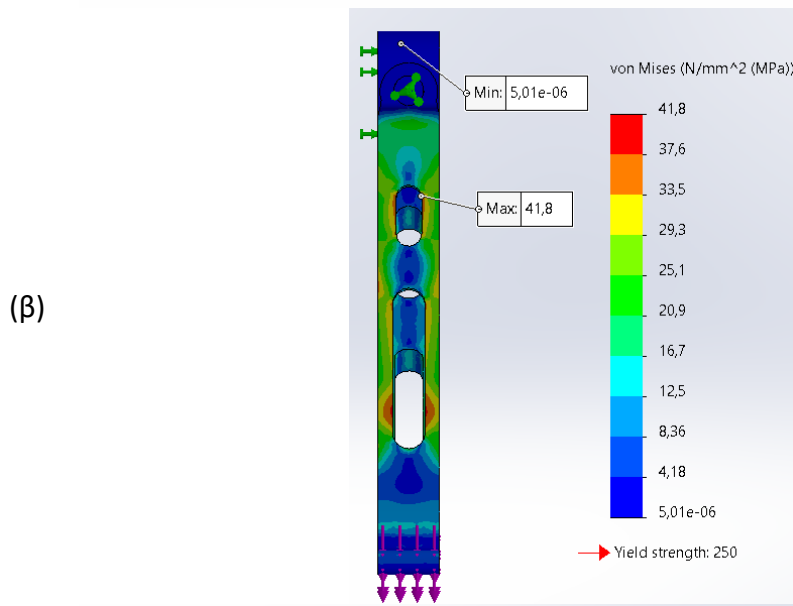
ΣΦ2

(β)

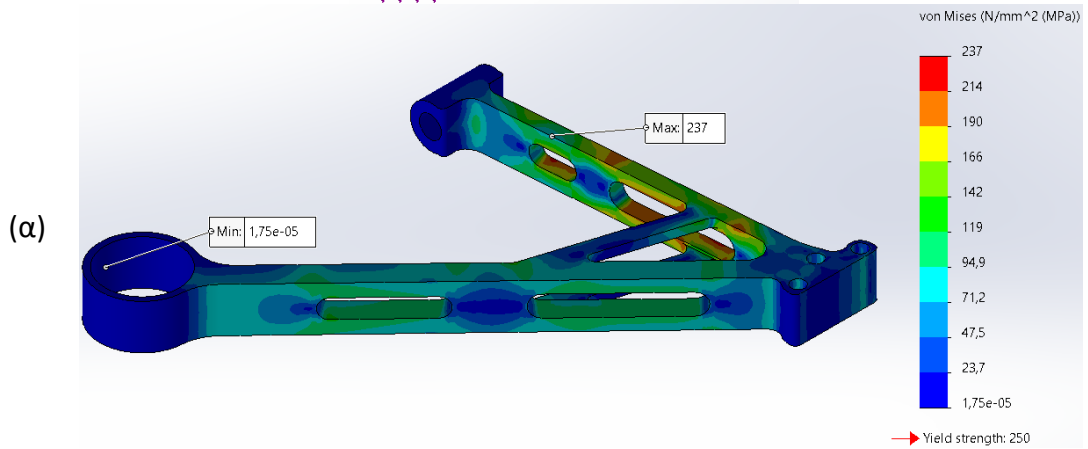




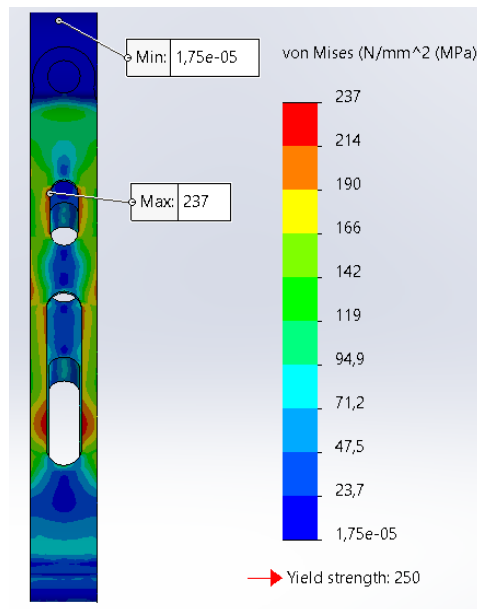
ΣΦ3



ΣΦ4



(β)



Σχήμα 5.15: Κατανομή τάσης von Mises του ΠΣ5 από κράμα αλουμινίου σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη

Παρατηρούμε ότι έχουμε έντονη συγκέντρωση τάσεων γύρω από τις οπές που δημιουργήθηκαν για την μείωση του υλικού και σε αυτή την περίπτωση. Παρόλα αυτά σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνιέται το όριο διαρροής. Επίσης βλέπουμε ότι οι τάσεις είναι εντονότερες στον πίσω βραχίονα όταν έχουμε το ΣΦ1 ενώ στον μπροστά όταν έχουμε τα υπόλοιπα 3 σενάρια, τα οποία έχουν και παρόμοιες κατανομές. Παρόλο που οι κατανομές είναι παρόμοιες, οι μέγιστες τιμές των τάσεων διαφοροποιούνται και γι' αυτό παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6 μαζί με τις τιμές των μέγιστων μετατοπίσεων.

Πίνακας 5.6: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ5

ΣΦ	Τάση [MPa]	Συνολική μετατόπιση [mm]	Μετατόπιση κατά τον άξονα		
			x [mm]	y [mm]	z [mm]
ΣΦ1	221	3,3	0,1	0,2	3,3
ΣΦ2	163	0,4	0,3	0,2	0
ΣΦ3	41,8	0,1	0,1	0,1	0
ΣΦ4	237	0,5	0,5	0,3	0

Παρατηρούμε ότι στο ΣΦ4 έχουμε τη μεγαλύτερη τάση κατά von Mises σε αυτή την περίπτωση αλλά η μεγαλύτερη μετατόπιση είναι στο ΣΦ1. Παρόλο που η τιμή της δύναμης στο ΣΦ1 δε είναι αρκετά μεγάλη, ασκείται κατά τον άξονα z και βλέπουμε ότι προσφέρει τη μεγαλύτερη μετατόπιση στον συγκεκριμένο άξονα. Στα υπόλοιπα ΣΦ βλέπουμε ότι όσο μεγαλώνουν οι δυνάμεις τόσο μεγαλώνουν οι τάσεις και οι μετατοπίσεις.

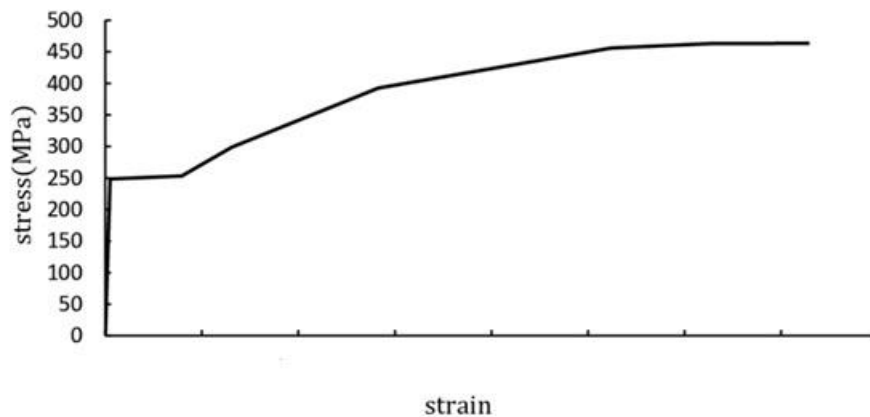
6. Σύγκριση αποτελεσμάτων διαφορετικών μοντέλων

Αρχικά η πρώτη σύγκριση που θα γίνει θα είναι αυτή μεταξύ των διαφορετικών υλικών του M1, ώστε να δούμε τις αλλαγές που επιφέρει το υλικό στο συγκεκριμένο σχέδιο του ψαλιδιού. Έτσι στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται συγκριτικά οι μέγιστες τάσεις κατά von Mises για κάθε υλικό και κάθε ΣΦ στο ΠΣ1.

Πίνακας 6.1: Μέγιστες τάσεις σε μοντέλο ΠΣ1 για κάθε υλικό.

	Κράμα Αλουμινίου	Χάλυβας AISI 1045	Χάλυβας ASTM A36
Όριο διαρροής [MPa]	505	530	250
ΣΦ1	330	325	322
ΣΦ2	455	462	462
ΣΦ3	113	113	113
ΣΦ4	484	516	670

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του χάλυβα ASTM A36 ξεπερνιέται το όριο διαρροής ενώ στα άλλα δύο υλικά δε συμβαίνει αυτό κι ας βλέπουμε να είναι αρκετά κοντά οι τιμές στο ΣΦ4. Επίσης στα ΣΦ1 και ΣΦ2 βλέπουμε ότι ξεπερνάει το όριο διαρροής και η τιμή της τάσης παραμένει σε παρόμοια επίπεδα με αυτή των άλλων δύο υλικών, όπως και ήταν αναμενόμενο. Από την άλλη στο ΣΦ4 αυξάνεται αρκετά και δεν είναι στα ίδια επίπεδα με τα άλλα δύο υλικά. Αυτό κατά πάσα πιθανότητα συμβαίνει λόγω του ότι η τιμή της τάσης είναι αρκετά μεγαλύτερη από το όριο διαρροής και όπως βλέπουμε στο Διάγραμμα 6.1 η τάση μόλις περάσει το όριο διαρροής στην αρχή παραμένει σχετικά σταθερή και στη συνέχεια αυξάνεται με μεγάλο ρυθμό.



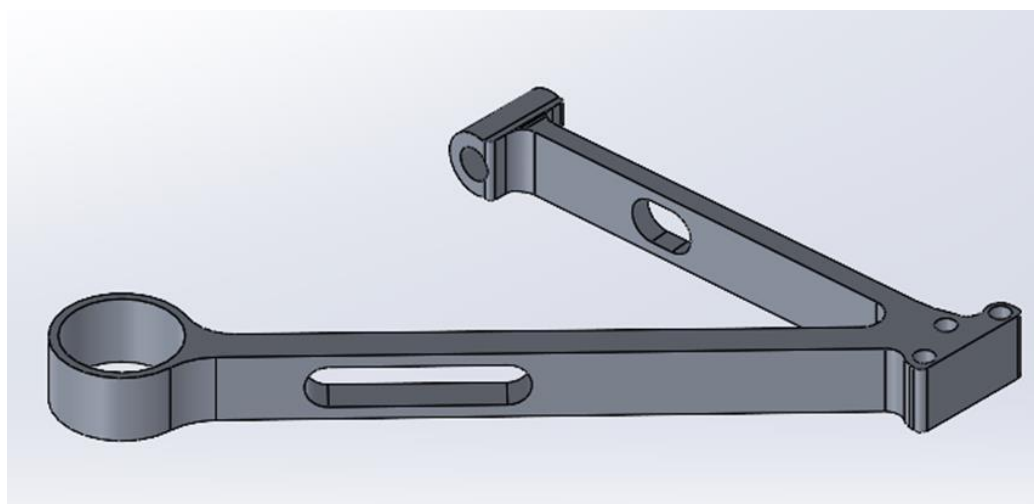
Διάγραμμα 6.1: Διάγραμμα τάσης-επιμήκυνσης χάλυβα ASTM A36 [32]

Η επόμενη σύγκριση που θα γίνει θα είναι αυτή μεταξύ των επανασχεδιασμένων μοντέλων M3, M4 και M5. Έτσι θα δούμε τις διαφορές που έχουν σε τάση μετατοπίσεις σε κάθε ΣΦ, βάρος (Πίνακας 6.2) αλλά και τις διαφορές στη μορφολογία τους (Σχήμα 6.1).

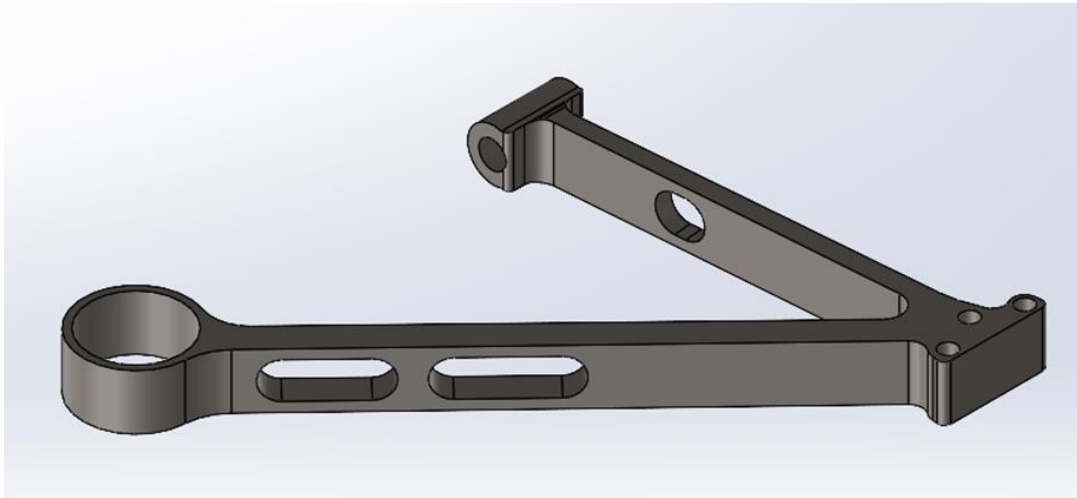
Πίνακας 6.2: Συγκριτικά αποτελέσματα τάσεων μετατοπίσεων και μάζας των βελτιστοποιημένων μοντέλων

	Μοντέλα	ΠΣ3	ΠΣ4	ΠΣ5
Τάση [MPa]	ΣΦ1	447	368	221
	ΣΦ2	262	281	163
	ΣΦ3	64,2	68,4	41,8
	ΣΦ4	382	408	237
Μετατόπιση [mm]	ΣΦ1	11,4	3,9	3,3
	ΣΦ2	1,0	0,4	0,4
	ΣΦ3	0,2	0,1	0,1
	ΣΦ4	1,4	0,5	0,5
Βάρος [kg]		1,8	5,0	4,9

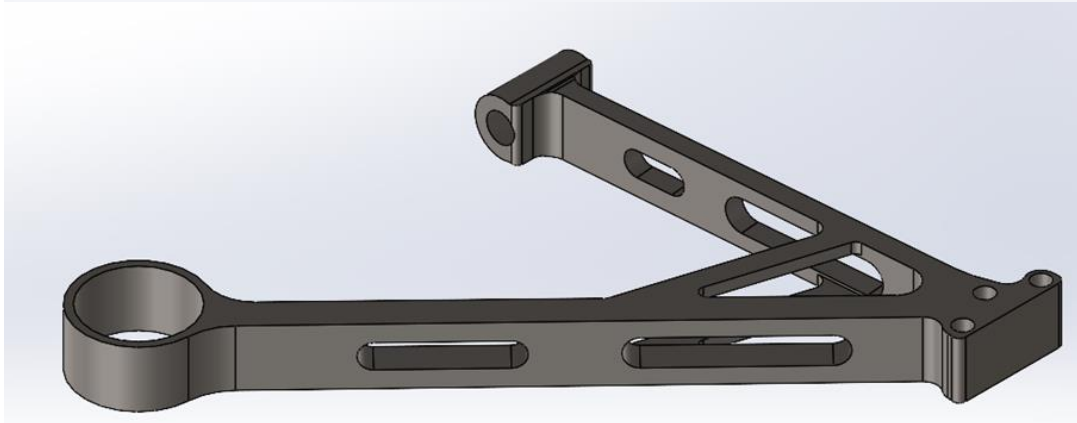
M3



M4



M5



Σχήμα 6.1: Μορφολογία βελτιστοποιημένων μοντέλων

Αρχικά το πρώτο που παρατηρούμε ότι το M3 που είναι φτιαγμένο από το κράμα αλουμινίου είναι το ελαφρύτερο ενώ από την άλλη τα δύο κατασκευασμένα με χάλυβα (M4 & M5) έχουν παρόμοιο βάρος. Παρόλο το μικρό βάρος του M3 βλέπουμε ότι αντέχει τις μεγάλες τάσεις που δημιουργούνται από τις φορτίσεις, ενώ παρατηρούμε επίσης ότι στο συγκεκριμένο έχουμε και τη μεγαλύτερη συνολική μετατόπιση δεδομένο που αναμέναμε εφόσον το αλουμίνιο θεωρείται «μαλακότερο» υλικό από τους χάλυβες. Τέλος όσον αφορά την μορφολογία των μοντέλων βλέπουμε ότι είναι σχεδόν ίδια με μερικές μικρές διαφοροποιήσεις. Αυτό συμβαίνει, καθώς δεν έχουμε αλλάξει τα ΣΦ στις τοπολογικές βελτιστοποιήσεις αλλά μόνο το υλικό (επομένως και το όριο διαρροής) κι έτσι το λογισμικό προσπαθεί να κατανείμει το υλικό με τέτοιο τρόπο ώστε το μοντέλο να αντέχει σε κάθε περίπτωση. Για παράδειγμα, βλέπουμε στο M5 παρατηρούμε ότι έχουν προστεθεί κάποια νεύρα που ενώνουν τους δύο βραχίονες του ψαλιδιού, καθώς το λογισμικό αντιλήφθηκε ότι λόγω του χαμηλότερου όριο διαρροής οι βραχίονες δε θα άντεχαν στις φορτίσεις αν δεν είχαν τη συγκεκριμένη στήριξη.

Η τελευταία σύγκριση που πραγματοποιείται είναι αυτή μεταξύ του πραγματικού ψαλιδιού και του αντίστοιχου μοντέλου του (M1) με τα βελτιστοποιημένα μοντέλα. Έτσι στους

Πίνακας 6.3, Πίνακας 6.4 και Πίνακας 6.5 φαίνονται οι μέγιστες τιμές των τάσεων, των μετατοπίσεων και των βαρών για κάθε υλικό του M1 σε σύγκριση με κάθε βελτιστοποιημένο μοντέλο αντίστοιχα.

Πίνακας 6.3: Συγκριτικά αποτελέσματα τάσεων και μετατοπίσεων για μοντέλα από κράμα αλουμινίου (ΠΣ1 & ΠΣ3)

	Μοντέλα	ΠΣ1 (κράμα αλουμινίου)	ΠΣ3
Τάση [MPa]	ΣΦ1	330	447
	ΣΦ2	455	262
	ΣΦ3	113	64,2
	ΣΦ4	484	382
Μετατόπιση [mm]	ΣΦ1	14,2	11,4
	ΣΦ2	5,2	1,0
	ΣΦ3	1,0	0,2
	ΣΦ4	5,3	1,4

Παρατηρούμε ότι έχει γίνει εναλλαγή του δυσμενέστερου σεναρίου κι αυτό συμβαίνει καθώς στην περίπτωση του ΠΣ1 έχουμε μοντέλο κελύφους ενώ στη δεύτερη (ΠΣ3) έχουμε ένα συμπαγές μοντέλο. Παρόλα αυτά βλέπουμε ότι είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τα παρακάτω υλικά, καθώς όπως προαναφέρθηκε το αλουμίνιο είναι πιο «μαλακό» υλικό. Τέλος βλέπουμε ότι με τη βελτιστοποίηση καταφέραμε να μειώσουμε τις μέγιστες τιμές των τάσεων, ωστόσο πρέπει να επισημάνουμε ότι άλλαξε και η μορφολογία του ψαλιδιού μας.

Πίνακας 6.4: Συγκριτικά αποτελέσματα τάσεων και μετατοπίσεων για μοντέλα από χάλυβα AISI 1045 (ΠΣ1 & ΠΣ4)

	Μοντέλα	ΠΣ1 (χάλυβας AISI 1045)	ΠΣ4
Τάση [MPa]	ΣΦ1	325	368
	ΣΦ2	462	281
	ΣΦ3	113	68,4
	ΣΦ4	516	408
Μετατόπιση [mm]	ΣΦ1	4,9	3,9
	ΣΦ2	1,4	0,4
	ΣΦ3	0,3	0,1
	ΣΦ4	1,9	0,5

Στην περίπτωση του χάλυβα AISI 1045 παρατηρούμε ότι το δυσμενέστερο σενάριο παραμένει το ΣΦ4 αλλά έχουμε πετύχει να μειώσουμε τις τιμές των μέγιστων τάσεων τόσο σε αυτό το ΣΦ όσο και στα άλλα. Επίσης βλέπουμε ότι και οι μετατοπίσεις έχουν μειωθεί

αλλά αυτά οφείλονται τόσο στο βελτιστοποίηση του σχεδίου όσο και στο ότι έγινε συμπαγές το ψαλίδι μας.

Πίνακας 6.5: Συγκριτικά αποτελέσματα τάσεων και μετατοπίσεων για μοντέλα από χάλυβα ASTM A36 (ΠΣ1 & ΠΣ5)

	Μοντέλα	ΠΣ1 (χάλυβας ASTM A36)	ΠΣ5
Τάση [MPa]	ΣΦ1	322	221
	ΣΦ2	462	163
	ΣΦ3	113	41,8
	ΣΦ4	670	237
Μετατόπιση [mm]	ΣΦ1	5,0	3,3
	ΣΦ2	1,4	0,4
	ΣΦ3	0,3	0,1
	ΣΦ4	1,9	0,5

Τέλος στην περίπτωση του χάλυβα ASTM A36 παρατηρούμε ότι έχουμε πετύχει να μειώσουμε σε μεγάλο ποσοστό τις τιμές των μέγιστων τάσεων. Μάλιστα, ενώ στην περίπτωση του ΠΣ1 ξεπερνούσαμε το όριο διαρροής σε κάποια ΣΦ, στο ΠΣ5 αυτό δε γίνεται. Αυτό μας οδηγεί ότι με τη χρήση του βελτιστοποιημένου μοντέλου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το συγκεκριμένο υλικό ενώ στο ψαλίδι τύπου κελύφους δεν ήταν εφικτό.

Όσον αφορά τις μάζες του κάθε ψαλιδιού για το εκάστοτε υλικό βλέπουμε στον Πίνακα 6.6 συγκριτικά τη μάζα του πραγματικού ψαλιδιού, που είναι κατασκευασμένο από χάλυβα, και τις μάζες των βελτιστοποιημένων μοντέλων. Δεν μπορούμε να κάνουμε σύγκριση του ΠΣ1 για κάθε υλικό, καθώς εξαιτίας της κατασκευής του σαν μοντέλο κελύφους, το λογισμικό δε δίνει τη δυνατότητα να έχουμε στοιχεία για τα εγγενή στοιχεία του εξαρτήματος μας. Γι' αυτό η σύγκριση των μαζών γίνεται με γνώμονα το πραγματικό βραχίονα ελέγχου.

Πίνακας 6.6: Μάζες πραγματικού ψαλιδιού και βελτιστοποιημένων μοντέλων

	Πραγματικό ψαλίδι	M3	M4	M5
Βάρος [kg]	3,3	1,8	5,0	4,9

Παρατηρούμε ότι δημιουργήθηκε ένα βελτιστοποιημένο μοντέλο (M3), που έχει λιγότερο βάρος από το πραγματικό. Αυτό, μάλιστα, είναι κατασκευασμένο από κράμα αλουμινίου και όπως είδαμε παραπάνω αντέχει τις ίδιες φορτίσεις με το πραγματικό. Από την άλλη τα βελτιστοποιημένα μοντέλα που είναι κατασκευασμένα από χάλυβα βλέπουμε ότι είναι πιο βαριά από το πραγματικό, το οποίο κι αυτό είναι από χάλυβα. Ωστόσο λόγω της διαφορετικής (συμπαγής) μορφολογίας τους, η οποία είναι και ο λόγος του επιπλέον

βάρους, αντέχουν σε καλύτερο βαθμό τις φορτίσεις σε σχέση με το αρχικό. Αυτό είναι φανερό κιάλας στην περίπτωση του χάλυβα ASTM A36, ο οποίος όταν εφαρμόζεται στο M1 δεν αντέχει τις φορτίσεις, ενώ το βελτιστοποιημένο μοντέλο από το συγκεκριμένο υλικό (M5) αντέχει και είναι μόνο 1,9kg βαρύτερο.

7. Συμπεράσματα και πιθανές επεκτάσεις έρευνας

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης Διπλωματικής Εργασίας ξεκινώντας με έναν βραχίονα ελέγχου (ψαλίδι) ανάρτησης MacPherson από ένα SUV όχημα, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων κελύφους (M1) και δοκιμάστηκε σε στατικές αναλύσεις με διαφορετικές φορτίσεις σε 3 υλικά. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε τοπολογική βελτιστοποίηση σε μοντέλο βασισμένο στο προηγούμενο με χρήση του λογισμικού Solidworks® CAD-CAE, από την οποία προέκυψε νέο βελτιστοποιημένο σχέδιο για κάθε υλικό (M3, M4 & M5).

Αρχικά, αυτό που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι ότι η τοπολογική βελτιστοποίηση του λογισμικού Solidworks, όπως φάνηκε στο Σχήμα 4.13, Σχήμα 4.22 και Σχήμα 4.31, παράγει γεωμετρικά μοντέλα τα οποία δεν μπορεί να δημιουργηθεί με τις συνηθισμένες συμβατικές κατεργασίες. Ωστόσο τα συγκεκριμένα μοντέλα μπορούν κατασκευαστούν με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D printing) υπό ορισμένες συνθήκες. Αυτές τις κατάλληλες συνθήκες το λογισμικό προσφέρει τη δυνατότητα να τις δημιουργήσει με ορισμένες ρυθμίσεις του. Έτσι, μπορεί να παραχθεί ένα πιο «όμορφο» οπτικά αποτέλεσμα που θα μπορούσε να εκτυπωθεί απευθείας χωρίς να σχεδιαστεί νέο μοντέλο. Επομένως σε μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να μελετηθούν σε βάθος οι ρυθμίσεις του λογισμικού για τη δημιουργία και μελέτη ενός τέτοιου μοντέλου, όπως για παράδειγμα η χρήση ορθοτροπικού υλικού που υπάρχει σαν δυνατότητα στις αναλύσεις. Τέλος έχοντας αυτά μοντέλα θα ήταν εφικτό να βρεθεί το κατάλληλο υλικό, ώστε να τυπωθούν σε τρισδιάστατο εκτυπωτή και να δούμε και πειραματικά τη συμπεριφορά τους.

Στη συνέχεια, συγκρίνοντας τη συμπεριφορά του μοντέλου του πραγματικού ψαλιδιού (M1) σε κάθε υλικό, παρατηρούνται διαφορές, όπως περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 6. Επομένως μια απλή παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι στο συγκεκριμένο ψαλίδι με δεδομένες τις φορτίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την μηχανική ανάλυση αυτού στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το κράμα αλουμινίου αντί του χάλυβα, με μόνο ενδιασμό την αντοχή τους στην κόπωση και το χρόνο ζωής τους.

Όσον αφορά το λογισμικό και την τοπολογική βελτιστοποίηση, παρατηρήθηκε ότι δημιουργήθηκαν συμπαγή μοντέλα (M3, M4, M5) ελάχιστα διαφορετικής γεωμετρίας για κάθε υλικό. Παρόλο που όλες οι μηχανικές αναλύσεις έγιναν με τις ίδιες ΣΦ και οι τοπολογικές βελτιστοποιήσεις είχαν τον ίδιο στόχο και περιορισμούς για τα 3 υλικά, το λογισμικό, κάθε φορά, έκανε τέτοια ανακατανομή υλικού, ώστε να παράξει διαφορετικά μοντέλα, τα οποία να αντέχουν σε κάθε περίπτωση. Συγκρίνοντας αυτά τα 3 βελτιστοποιημένα μοντέλα με το M1, για κάθε υλικό αντίστοιχα, παρατηρείται ότι ορισμένα αντέχουν σε μεγαλύτερες φορτίσεις αλλά είναι βαρύτερα και άλλα είναι πιο ελαφριά και αντέχουν ίδιες φορτίσεις. Επίσης σημαντικό είναι ότι το λογισμικό κατάφερε να δημιουργήσει ένα σχέδιο ψαλιδιού, που ενώ στην αρχή με τον χάλυβα ASTM A36 δεν άντεχε, τώρα αντέχει.

Έτσι, παρατηρείται ότι υπάρχουν διαφορετικές γεωμετρίες και υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ενός βραχίονα ελέγχου. Ωστόσο η επιλογή του

σχεδίου και του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός βραχίονα ελέγχου υπόκειται στις απαιτήσεις του σχεδιαστή. Για παράδειγμα, το μοντέλο M4 θα ταίριαζε σε ένα όχημα εκτός δρόμου όπου αναπτύσσονται μεγαλύτερες καταπονήσεις και το ψαλίδι πρέπει να αντέχει σε μεγάλες φορτίσεις και να έχει μικρές μετατοπίσεις ενώ το βάρος του δε αποτελεί σημαντικό κριτήριο. Ένα άλλο κριτήριο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτή την επιλογή, όπως προαναφέρθηκε, είναι η συμπεριφορά του βραχίονα ελέγχου στην κόπωση και ο κύκλος ζωής που έχει, κριτήριο που θα μπορούσε να εξεταστεί σε μελλοντικές έρευνες. Τέλος, ένας σημαντικός παράγοντας που παίζει ρόλο στην τελική μορφή του ψαλιδιού είναι το διαφορετικό κόστος κατασκευής που έχει ένας βραχίονας ελέγχου από συγκολλημένα μεταλλικά φύλλα (M1) σε σχέση με τη δημιουργία συμπαγούς ψαλιδιού (M3, M4, M5) με τις τυπικές κατεργασίες.

8. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Σύγκριση αναρτήσεων MacPherson και Διπλού ψαλιδιού	20
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά ΠΣ1	32
Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά ΠΣ2	34
Πίνακας 3.3: Μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία.....	37
Πίνακας 3.4: Βάρος M2 για κάθε υλικό	37
Πίνακας 3.5: Σενάρια φόρτισης αναλύσεων.....	39
Πίνακας 3.6: Παράμετροι τοπολογικών βελτιστοποιήσεων (TB)	41
Πίνακας 4.1: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ1 από κράμα αλουμινίου.....	46
Πίνακας 4.2: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ1 από χάλυβα AISI 1045	51
Πίνακας 4.3: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ1 από χάλυβα ASTM A36.....	58
Πίνακας 4.4: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ2 από κράμα αλουμινίου.....	64
Πίνακας 4.5: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ2 από χάλυβα AISI 1045	82
Πίνακας 4.6: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ2 από χάλυβα ASTM A36.....	100
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά ΠΣ3	116
Πίνακας 5.2: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ3	120
Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά ΠΣ4	122
Πίνακας 5.4: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ4	126
Πίνακας 5.5: Χαρακτηριστικά ΠΣ5	128
Πίνακας 5.6: Τάσεις και μετατοπίσεις του ΠΣ5	132
Πίνακας 6.1: Μέγιστες τάσεις σε μοντέλο ΠΣ1 για κάθε υλικό.....	133
Πίνακας 6.2: Συγκριτικά αποτελέσματα τάσεων μετατοπίσεων και μάζας των βελτιστοποιημένων μοντέλων	134
Πίνακας 6.3: Συγκριτικά αποτελέσματα τάσεων και μετατοπίσεων για μοντέλα από κράμα αλουμινίου (ΠΣ1 & ΠΣ3).....	136
Πίνακας 6.4: Συγκριτικά αποτελέσματα τάσεων και μετατοπίσεων για μοντέλα από χάλυβα AISI 1045 (ΠΣ1 & ΠΣ4)	136
Πίνακας 6.5: Συγκριτικά αποτελέσματα τάσεων και μετατοπίσεων για μοντέλα από χάλυβα ASTM A36 (ΠΣ1 & ΠΣ5).....	137
Πίνακας 6.6: Μάζες πραγματικού ψαλιδιού και βελτιστοποιημένων μοντέλων	137

9. Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Ταχύτητες παραγόμενων αυτοκινήτων [2].....	11
Σχήμα 2.2: Μη ανεξάρτητη ανάρτηση [5].....	13
Σχήμα 2.3: Φυλλοειδής ανάρτηση [6].	14
Σχήμα 2.4: Ανάρτηση 4 συνδέσμων [7].	14
Σχήμα 2.5: Ανάρτηση De Dion [8].	15
Σχήμα 2.6: Ανεξάρτητη ανάρτηση [5].	16
Σχήμα 2.7: Ανάρτηση swing axle [9].	16
Σχήμα 2.8: Ανάρτηση διπλού ψαλιδιού [2].	17
Σχήμα 2.9: Ανάρτηση MacPherson [10].....	18
Σχήμα 2.10: Ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων [11].	18
Σχήμα 2.11: Ανάρτηση υστερούντος βραχίονα [12].....	19
Σχήμα 2.12: (a) Σχεδιαστική περιοχή και συνθήκες ανάλυσης, (b) Μέθοδος βασισμένη στις πυκνότητες [22].....	25
Σχήμα 3.1: Γεωμετρικά ακριβές τρισδιάστατο μοντέλο CAD του βραχίονα ελέγχου (M1) σε ισογεωμετρική όψη (isogeometric)	29
Σχήμα 3.2: Μοντέλο περιγράμματος CAD του βραχίονα ελέγχου	30
Σχήμα 3.3: Εξωτερικές διαστάσεις M2.....	30
Σχήμα 3.4: Πλέγμα του M1 (ΠΣ1).....	31
Σχήμα 3.5: Απεικόνιση ΠΣ1 σε σχέση με AR	32
Σχήμα 3.6: Κατανομές τάσεων σε στοιχεία κελύφους	33
Σχήμα 3.7: Πλέγμα του M2 (ΠΣ2).....	33
Σχήμα 3.8: Απεικόνιση ΠΣ2 σε σχέση με AR	35
Σχήμα 3.9: Σύστημα συντεταγμένων [31].....	38
Σχήμα 3.10: Διάγραμμα ελεύθερου σώματος	39
Σχήμα 3.11: Θέση φορτίσεων ΠΣ1 (α), ΠΣ2 (β).....	40
Σχήμα 3.12: Στηρίξεις μοντέλων ΠΣ1 (α), ΠΣ2 (β).....	40
Σχήμα 4.1: Κατανομή τάσης του ΠΣ1 από κράμα αλουμινίου σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη	45
Σχήμα 4.2: Κατανομή τάσης του ΠΣ1 από χάλυβα AISI 1045 σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη.....	50
Σχήμα 4.3: Κατανομή τάσης του ΠΣ1 από χάλυβα ASTM A36 σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη.....	55
Σχήμα 4.4: Κατανομή τάσεων ΠΣ1 από χάλυβα ASTM A36 με επισήμανση των περιοχών που ξεπερνάνε το όριο διαρροής.....	58
Σχήμα 4.5: Κατανομή τάσης του ΠΣ2 από κράμα αλουμινίου σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη	63
Σχήμα 4.6: Γεωμετρικό μοντέλο TB από κράμα αλουμινίου σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη	65

Σχήμα 4.7: Διαγράμματα σύγκλισης για στόχο	67
Σχήμα 4.8: Διαγράμματα σύγκλισης για τον περιορισμό μάζας	68
Σχήμα 4.9: Διαγράμματα σύγκλισης για τον περιορισμό της τάσης	70
Σχήμα 4.10: Γεωμετρικό αποτέλεσμα TB5 από κράμα αλουμινίου σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη	71
Σχήμα 4.11: Διαγράμματα σύγκλισης για στόχο (α), περιορισμό μάζας (β), περιορισμό τάσης (γ)	73
Σχήμα 4.12: Υποθετική κατανομή τάσης του TB5 από κράμα αλουμινίου σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη	77
Σχήμα 4.13: Γεωμετρικό μοντέλο TB5 από κράμα αλουμινίου μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη	78
Σχήμα 4.14: Κατανομή τάσης του ΠΣ2 από χάλυβα AISI 1045 σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη	82
Σχήμα 4.15: Γεωμετρικό μοντέλο TB από χάλυβα AISI 1045 σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη	84
Σχήμα 4.16: Διαγράμματα σύγκλισης για το στόχο	85
Σχήμα 4.17: Διαγράμματα σύγκλισης για τον περιορισμό μάζας	87
Σχήμα 4.18: Διαγράμματα σύγκλισης για τον περιορισμό τάσης	88
Σχήμα 4.19: Γεωμετρικό αποτέλεσμα TB5 από χάλυβα AISI 1045 σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη	89
Σχήμα 4.20: Διαγράμματα σύγκλισης για στόχο (α), περιορισμό μάζας (β), περιορισμό τάσης (γ)	91
Σχήμα 4.21: Υποθετική κατανομή τάσης του TB5 από χάλυβα AISI 1045 σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη	95
Σχήμα 4.22: Γεωμετρικό μοντέλο TB5 από χάλυβα AISI 1045 μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη	96
Σχήμα 4.23: Κατανομή τάσης του ΠΣ2 από χάλυβα ASTM A36 σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη	100
Σχήμα 4.24: Γεωμετρικό μοντέλο TB από χάλυβα ASTM A36 σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη	102
Σχήμα 4.25: Διαγράμματα σύγκλισης για τον στόχο	103
Σχήμα 4.26: Διαγράμματα σύγκλισης για τον περιορισμό μάζας	105
Σχήμα 4.27: Διαγράμματα σύγκλισης για τον περιορισμό τάσης	106
Σχήμα 4.28: Γεωμετρικό αποτέλεσμα TB5 από χάλυβα ASTM A36 σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη	107
Σχήμα 4.29: Διαγράμματα σύγκλισης για στόχο (α), περιορισμό μάζας (β), περιορισμό τάσης (γ)	109
Σχήμα 4.30: Υποθετική κατανομή τάσης του TB5 από χάλυβα ASTM A36 σε μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη	113
Σχήμα 4.31: Γεωμετρικό μοντέλο TB5 από χάλυβα ASTM A36 μπροστινή (α) και πλάγια (β) όψη	113

Σχήμα 5.1: Βελτιστοποιημένο μοντέλο (M3) από κράμα αλουμινίου	114
Σχήμα 5.2: Διαστάσεις ΠΣ3	115
Σχήμα 5.3: Μοντέλο ΠΣ του M3 (ΠΣ3)	115
Σχήμα 5.4: Απεικόνιση ΠΣ3 σε σχέση με AR	117
Σχήμα 5.5: Κατανομή τάσης von Mises του ΠΣ3 από κράμα αλουμινίου σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη	120
Σχήμα 5.6: Βελτιστοποιημένο μοντέλο (M4) από κράμα αλουμινίου	121
Σχήμα 5.7: Διαστάσεις ΠΣ4	121
Σχήμα 5.8: Μοντέλο ΠΣ του M3 (ΠΣ3)	122
Σχήμα 5.9: Απεικόνιση ΠΣ4 σε σχέση με AR	123
Σχήμα 5.10: Κατανομή τάσης von Mises του ΠΣ4 από κράμα αλουμινίου σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη	126
Σχήμα 5.11: Βελτιστοποιημένο μοντέλο (M5) από χάλυβα ASTM A36	127
Σχήμα 5.12: Διαστάσεις ΠΣ5	127
Σχήμα 5.13: Μοντέλο ΠΣ του M5 (ΠΣ5)	128
Σχήμα 5.14: Απεικόνιση ΠΣ5 σε σχέση με AR	129
Σχήμα 5.15: Κατανομή τάσης von Mises του ΠΣ5 από κράμα αλουμινίου σε ισογεωμετρική (α) και πλάγια (β) όψη	132
Σχήμα 6.1: Μορφολογία βελτιστοποιημένων μοντέλων.....	135

10. Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 3.1: Πραγματικό ψαλίδι	27
Εικόνα 3.2: Ψαλίδι εγκατεστημένο στο όχημα (εμπρός αριστερή ανάρτηση)	28
Εικόνα 3.3: Αρθρώσεις οδήγησης (steering knuckles)	28
Εικόνα 3.4: Ψαλίδια από πρεσαριστό χάλυβα [26]	35
Εικόνα 3.5: Ψαλίδια χυτοσιδήρου (α) ενιαίο, (β) σε κομμάτια [26]	36
Εικόνα 3.6: Ψαλίδια χυτού αλουμινίου (α) ενιαίο, (β) σε κομμάτια [26]	36

11. Κατάλογος Αναφορών

- [1] UKEssays, «History Of Suspension System Engineering Essay,» UKEssays, 2018.
- [2] T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE, 1992.
- [3] Vikash, «Presentation on suspension,» SAE Tezpur University, Tezpur, 2012.
- [4] H. M. Mohyaldeen, «Analysis of an automobile suspension arm using the robust design method,» UMP, Pahang, 2011.
- [5] T. W. Birch, Automotive Suspension and Steering Systems, Delmar Publishers, 1999.
- [6] «BlogMech,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://blogmech.com/the-hotchkiss-drive-torque-tube-drive/>.
- [7] «ChevyHardcore,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.chevyhardcore.com/news/suspension-art-morrison/>.
- [8] V. vortex. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.vwvortex.com/threads/the-de-dion-tube-suspension-thread-why-because-its-old-timey-and-some-cool-cars-used-it.6969034/>.
- [9] Autozine. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.autozine.org/technical_school/suspension/tech_suspension2.htm.
- [10] TestingAutos. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.testingautos.com/car_care/when-replace-struts-and-shock-absorbers.html.
- [11] «KAIDON,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.kaidon-brake.com/torsion-beam-suspension-equivalent-as-low-cost-level-->.
- [12] «Wuling,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://wuling.id/en>.
- [13] S. Khan, Y. Joshi, A. Kumar και R. B. Vemuluri, «Comparative study between double wish-bone and macpherson suspension system,» 2017.
- [14] «Solidworks help,» Dassault Systemes, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://help.solidworks.com/2021>.
- [15] G. Rozvany, Topology Optimization in Structural Mechanics, 1997.

- [16] L. Kibum, S. Park, Y. Lee, J. Kim και S.-H. Kim, «New concept carrier of front-end module with structural topology optimization for automotive,» 2022.
- [17] M. Bendsoe και N. Kikuchi, Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, 1988.
- [18] D. Koulocheris, C. Vossou, C. Provatidis και T. Costopoulos, «The Influence of the Material Properties on a Typical Control Link of a Vehicle Suspension System under Different Loading Conditions,» Αθήνα, 2014.
- [19] A. M. Heyes, «AUTOMOTIVE COMPONENT FAILURES,» 1998.
- [20] V. Kulkarni, A. Jadhav και P. Basker, «Finite Element Analysis and Topology Optimization of Lower Arm of Double Wishbone Suspension using RADIOSS and Optistruct,» International Journal of Science and Research, 2014.
- [21] J. Marzbanrad και A. Hoseinpour , «Structural optimization of MacPherson control arm under fatigue loading,» ResearchGate, 2017.
- [22] C. G. Vossou, D. V. Koulocheris, C. G. Provatidis και T. N. Costopoulos, «Design and Optimization of a Control Link of a Vehicle Suspension System,» ResearchGate, Athens, 2014.
- [23] A. Pawar, «Static Structural Analysis & Topology Optimization of Automotive Track Control arm for Light Passenger Vehicle,» ResearchGate, 2021.
- [24] L. Konieczny, R. Burdzik και B. Lazarz, «Analysis of properties of automotive vehicle suspension arm depending on different materials used in the MSC.Adams environment,» 2012.
- [25] «GMT,» GMT Rubber-Metal-Technic Ltd, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.gmtrubber.com/comprehensive-guide-vehicle-control-arms/>.
- [26] «SKYJACKER Suspensions,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://skyjacker.com/14-18-gm-1500-factory-control-arm-variations/>.
- [27] «Thomas for Industry,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.thomasnet.com/articles/metals-metal-products/>.
- [28] «RedStone Manufacturing,» [Ηλεκτρονικό]. Available: www.redstonemanufacturing.com/stamped-steel-vs-cast-steel/.
- [29] «Matmatch,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://matmatch.com/learn/material>.

- [30] S. S. Khode και A. B. Gaikwad, «DESIGN ANALYSIS OF LOWER CONTROL ARM OF MAC PHERSON SUSPENSION SYSTEM,» NOVATEUR PUBLICATIONS, 2017.
- [31] «Testing Autos,» [Ηλεκτρονικό]. Available: www.testingautos.com.
- [32] M. Hoseinzadeh, «Investigation of the rigidity of welded shear tab connections,» ResearchGate, 2019.