

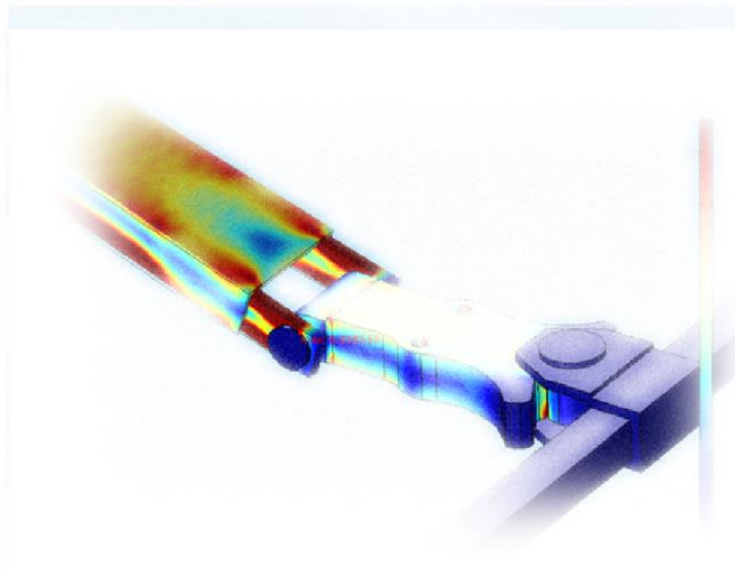


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ
ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΣΕ ΜΠΑΡΑ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ
ΩΣ ΦΟΡΕΑ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΠΙΣΘΕΛΚΗΣΗ
ΒΑΡΕΟΥ ΤΥΠΟΥ ΣΥΣΚΕΥΩΝ**



ΤΣΕΣΜΕΤΖΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

Στην Χρυσάνθη

Στην Χρυσάνθη Σταματίου, μια γυναίκα γεμάτη δύναμη και ζωντάνια, που έφυγε νωρίς

Η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, αποτελεί ένα σημαντικό επίτευγμα στη ζωή μου και για τη πραγματοποίησή της, έχω την ανάγκη να προσφέρω τις πιο θερμές ευχαριστίες μου σε τρία σημαντικά πρόσωπα, που βοήθησαν στην πραγματοποίησή της.

Το πρώτο ευχαριστώ ανήκει στον καθηγητή μου, *Δρ. Αριστομένη Αντωνιάδη* του εργαστηρίου Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης, για την εμπιστοσύνη και την στήριξη που μου έδειξε να αναδείξω αυτό το θέμα εργασίας.

Το δεύτερο ευχαριστώ ανήκει, στην ερευνήτρια και επιστημονική συνεργάτιδα του εργαστηρίου και φίλη, *Δρ. Παππά Μαρία* για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου παρείχε κάθε φορά που τη χρειάστηκα.

Τέλος, το τρίτο ευχαριστώ ανήκει στην σύντροφο μου, *Χριστίνα Μανταλώζη*, για την υπομονή και την στήριξη που μου πρόσφερε όλον αυτό τον καιρό για την επίτευξη των στόχων μου.

Αλέξανδρος Τσεσμετζής
Χανιά, Ιούνιος 2017

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
1.1 Αντικείμενο εργασίας	6
1.2 Δομή εργασίας.....	7
2. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΩΝ.....	9
2.1 Αντικείμενο της Μηχανικής Συμπεριφοράς Υλικών	9
2.2 Στάθμη των Γνώσεων.....	9
2.2.1 Στατική Ισορροπία – Εσωτερικές Δυνάμεις	9
2.2.2 Ελαστική και Πλαστική Συμπεριφορά	11
2.2.3 Τάση.....	11
2.2.4 Παραμόρφωση.....	13
3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ ΜΗ ΜΗΧΑΝΟΚΙΝΗΤΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ.....	15
3.1 Ορισμοί.....	15
3.2 Σύστημα Διεύθυνσης με μπάρα ρυμούλκησης	15
3.3 Ανάλυση Επιμέρους τμημάτων συστήματος διεύθυνσης	19
3.3.1 Μπάρα ρυμούλκησης (drawbar).....	19
3.3.2 Πείρος περιστροφής μπάρας ρυμούλκησης (pin hinge)	19
3.3.3 Κεντρικό συγκρότημα βραχίονα τιμονιού (center steering arm assembly) ...	19
3.3.4 Πείρος περιστροφής συγκροτήματος βραχίονα (pin center)	20
3.3.5 Εμπρόσθιο συγκρότημα άξονα (beam assembly front)	20
3.4 Μελέτη συστήματος διεύθυνσης με μπάρα ρυμούλκησης	20
3.5 Υπολογισμός βασικών παραμέτρων μελέτης	22
3.5.1 Οπισθέλκουσα δύναμη επίγειου εξοπλισμού	22
3.5.2 Μέθοδος εύρεσης υλικού κατασκευής τμημάτων συστήματος διεύθυνσης ..	24
4. ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	28
4.1 Γενικά	28
4.2 Ορισμός CAD	28
4.3 Ορισμός CAE.....	28
4.4 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	29
4.5 Στάδια Ανάπτυξης ενός μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων	30
5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	33
5.1 Εισαγωγή.....	33
5.2 Επισκόπηση και περιβάλλον εργασίας πακέτου σχεδιασμού.....	33
5.3 Σχεδιασμός συστήματος διεύθυνσης ρυμουλκούμενης συσκευής με μπάρα ρυμούλκησης.....	36
5.3.1 Η μπάρα ρυμούλκησης	37
5.3.2 Ο πείρος περιστροφής μπάρας ρυμούλκησης	40
5.3.3 Το κεντρικό συγκρότημα βραχίονα τιμονιού	41

5.3.4	Ο πείρος περιστροφής συγκροτήματος βραχίονα	43
5.3.5	Το εμπρόσθιο συγκρότημα άξονα	44
5.3.6	Το σύστημα διεύθυνσης (Assembly)	44
5.4	Προσομοίωση συστήματος διεύθυνσης με χρήση του λογισμικού σχεδίασης	47
5.4.1	Ρύθμιση παραμέτρων μοντέλου σε περιβάλλον λογισμικού σχεδίασης	47
5.4.2	Πλεγματοποίηση μοντέλου (Meshing).....	50
5.4.3	Επίλυση προβλήματος	51
6.	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	54
6.1	Εισαγωγή στο λογισμικό προσομοίωσης	54
6.2	Επισκόπηση του Comsol Multiphysics και το περιβάλλον εργασίας χρήστη	55
6.3	Χρήση λογισμικού COMSOL με LiLin για πακέτο σχεδιασμού.....	59
6.4	Αναλυτικά βήματα χρήσης του COMSOL για τη μοντελοποίηση του συστήματος διεύθυνσης.....	61
6.4.1	Εισαγωγή γεωμετρίας συστήματος διεύθυνσης στο Comsol Multiphysics....	61
6.4.2	Ρύθμιση Παραμέτρων	63
6.4.3	Πλεγματοποίηση (Meshing)	66
6.4.4	Προβλήματα κατά εφαρμογή πλεγματοποίησης	68
6.4.5	Σχεδιαστικές αλλαγές συστήματος διεύθυνσης	70
6.4.6	Αλλαγές συνδεσμολογίας συστήματος διεύθυνσης	74
6.4.7	Διορθωτικές ενέργειες στη παραμετροποίηση	78
6.4.8	Επίλυση του προβλήματος (Solving)	80
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	93
7.1	Σύνοψη.....	93
7.2	Συμπεράσματα	96
7.3	Προοπτικές	98
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	100

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο Εργασίας

Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι η αναλυτική παρουσίαση της μοντελοποίησης μιας σύνθετης διάταξης, του συστήματος κίνησης και διεύθυνσης που διαθέτει στο σύνολο του όλος ο μη μηχανοκίνητος εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε ένα αεροδρόμιο για την εξυπηρέτηση και συντήρηση των αεροσκαφών. Το σύστημα αποτελείται από πέντε βασικά συναρμολογούμενα μέρη ώστε να δίνουν την δυνατότητα ελεύθερης κίνησης τόσο στον κατακόρυφο άξονα για την ελεύθερη επιλογή γωνίας ρυμούλκησης και οπισθέλκισης, όσο και στον οριζόντιο άξονα για την πραγματοποίηση απαραίτητων ελιγμών του εξοπλισμού, με σκοπό την τοποθέτησή τους σε καθορισμένες θέσεις κοντά σε αεροσκάφη. Στην εικόνα του σχήματος 1.1 φαίνεται το σύστημα διεύθυνσης ρυμουλκούμενης συσκευής, οι στρεβλώσεις και οι παραμορφώσεις που προκαλούνται κατά την διάρκεια των ελιγμών οπισθέλκισης του εν λόγω εξοπλισμού.



Σχήμα 1.1: Σύστημα ρυμούλκησης, στρεβλώσεις παραμορφώσεις και καταστροφή εξαρτημάτων

Η μοντελοποίηση γίνεται ώστε να αναλυθούν οι καταπονήσεις που εμφανίζονται στο σύστημα, με την εφαρμογή εξωτερικής δύναμης που απαιτείται για να κινηθούν οι συσκευές. Η μοντελοποίηση χωρίζεται σε δυο κομμάτια. Η σχεδίαση της διάταξης πραγματοποιήθηκε σε πακέτο σχεδιασμού, και οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics. Η διάταξη της παρούσας θα μελετηθεί, με την βοήθεια των παραπάνω προγραμμάτων, στις ακραίες θέσεις που μπορεί να λαμβάνει για μελετηθούν τα όρια αντοχής και η αποφυγή τους για λόγους ασφάλειας.

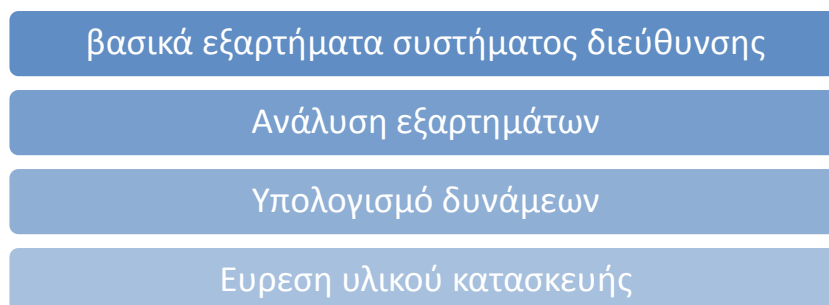
Μέσα από τη μελέτη αυτή πέραν των αναλύσεων που θα πραγματοποιηθούν στο μοντέλο, θα γίνει και προσπάθεια επιβεβαίωσης των αναφορών σε ζημιές που έχουν συμβεί σε κομμάτια της διάταξης μας εξαιτίας της διαδικασίας οπισθέλκισης. Έχουν πράγματι αναφερθεί στρεβλώσεις στους πείρους περιστροφής της διάταξης αλλά και σπάσιμο του κεντρικού βραχίονα του συστήματος διεύθυνσης. Είναι λοιπόν βασικός στόχος της μελέτης να αποδείξει ότι η διαδικασία της οπισθέλκισης είναι μια πολύ επίπονη διαδικασία για το σύστημα διεύθυνσης του επίγειου εξοπλισμού που μπορεί να οδηγήσει, αν λειτουργεί σε οριακή θέση, σε σοβαρή βλάβη του μηχανήματος έως και τραυματισμό προσωπικού.

1.2. Δομή Εργασίας

Η Εργασία χωρίζεται σε 7 επιμέρους κεφάλαια αναλύοντας αρχικά τις ήδη υπάρχουσες γνώσεις στο αντικείμενο, σχεδιάζοντας τη μπάρα ρυμούλκησης, υπολογίζοντας με πεπερασμένα στοιχεία την μηχανική συμπεριφορά της και τέλος εξάγοντας συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης.

Αναλυτικότερα, στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται μια εισαγωγή στην εργασία μέσω της παρουσίασης του βασικού αντικειμένου και της δομής της. Το **δεύτερο κεφάλαιο** διαπραγματεύεται κάποιες βασικές έννοιες για την μηχανική συμπεριφορά των υλικών που υποβάλλονται σε τάσεις και εντάσεις για την διερεύνηση μιας κατάστασης όπως αυτή που μελετάται σε αυτή την εργασία.

Το **τρίτο κεφάλαιο**, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 1.1, αναφέρεται λεπτομερέστερα στο σύστημα διεύθυνσης και τα βασικά του μέρη. Γίνεται ανάλυση των επιμέρους εξαρτημάτων από τα οποία αποτελείται ένα τέτοιο σύστημα διεύθυνσης. Τέλος υπολογίζεται προσεγγιστικά με την βοήθεια των νόμων του Newton η δύναμη που ασκείται σε ένα τέτοιο σύστημα για την έναρξη της διαδικασίας οπισθέλκισης καθώς και τα υλικά κατασκευής των παραπάνω εξαρτημάτων. Η δύναμη και το υλικό κατασκευής είναι τα απαραίτητα στοιχεία για να ολοκληρωθεί η προσομοίωση του μοντέλου.



Σχήμα 1.1: Θεματικές ενότητες τρίτου κεφαλαίου

Το **τέταρτο κεφάλαιο** διαπραγματεύεται τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων παραθέτοντας τα βασικότερα στοιχεία, τους ορισμούς της μεθόδου αλλά και τα στάδια της ανάπτυξης ενός μοντέλου, γνώσεις απαραίτητες για την χρήση προγραμμάτων που βασίζουν τη λειτουργία τους σε αυτή τη μέθοδο. Ενώ το **πέμπτο κεφάλαιο** αποτελεί μια επισκόπηση του προγράμματος πακέτου σχεδιασμού των εξαρτημάτων όπου και δίνονται λεπτομερή στοιχεία για τα στάδια σχεδίασης των επιμέρους υλικών από τα οποία αποτελείται το σύστημα διεύθυνσης καθώς και η δημιουργία της ολοκληρωμένης διάταξης.

Στο **έκτο κεφάλαιο** με τη χρήση του προγράμματος Comsol Multiphysics πραγματοποιείται η προσομοίωση της μελέτης και εξαγωγή συμπερασμάτων. Γίνεται λεπτομερή αναφορά των

προβλημάτων που εμφανιστήκαν καθώς και οι τρόποι με τους οποίους αντιμετωπίστηκαν. Καταγράφονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν και γίνεται σύγκριση με τα προβλήματα που ήδη έχουν αναφερθεί.

Τέλος, στο **έβδομο κεφάλαιο** αναφέρονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη μελέτη όπως επίσης και οι μελλοντικές προοπτικές για περαιτέρω εξέλιξή της με ταυτόχρονη αξιοποίηση των αποτελεσμάτων.

2. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΩΝ

2.1 Αντικείμενο της Μηχανικής Συμπεριφοράς Υλικών

Η Μηχανική συμπεριφορά υλικών είναι ο τομέας εκείνος της μεταλλουργίας που ασχολείται, κατά κύριο λόγο, με την απόκριση των μεταλλικών υλικών σε εξωτερικές δυνάμεις και γενικότερα, σε μηχανικά φορτία. Τα φορτία αυτά μπορεί να καταπονούν ένα μέταλλο κατά τη χρήση του σαν δομικό στοιχείο μίας κατασκευής ή κατά τη λειτουργία του σαν εξάρτημα μιας μηχανής, κ.τ.λ. Στις περιπτώσεις αυτές είναι απολύτως απαραίτητο για τον μηχανικό να γνωρίζει τις μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου, οι οποίες όσο βρίσκονται εντός ορίων κατά τη λειτουργία της μηχανής, εξασφαλίζουν ότι το δομικό στοιχείο ή εξάρτημα δεν θα υποστεί αστοχία. Με τον όρο «αστοχία» (failure) περιγράφεται η αδυναμία ενός δομικού στοιχείου ή στοιχείου μηχανών να συνεχίσει να επιτελεί ομαλά, αποτελεσματικά και με ασφάλεια την λειτουργία του.

Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών δεν είναι ένα αντικείμενο που μπορεί να μελετηθεί και να αναλυθεί μεμονωμένα. Πρόκειται για έναν συνδυασμό γνώσεων και μεθόδων από διαφορετικούς κλάδους της επιστήμης του μηχανικού, όπως για παράδειγμα η αντοχή υλικών, η τεχνολογία υλικών και η φυσική μεταλλουργία, καθώς και για ένα συνδυασμό διαφορετικών προσεγγίσεων στο θέμα της συμπεριφοράς των μεταλλικών υλικών κάτω από την επίδραση δυνάμεων. Η προσέγγιση της κλασσικής αντοχής των υλικών, βρίσκει εφαρμογή στις θεωρίες ελαστικότητας και πλαστικότητας, όπου το μέταλλο θεωρείται σαν ένα ομογενές, συνεχές μέσο, του οποίου η μηχανική συμπεριφορά μπορεί να περιγραφεί με αρκετά μεγάλη ακρίβεια με τη χρήση μερικών μόνο σταθερών του υλικού. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί την επιστημονική βάση για τον υπολογισμό, την ανάλυση και τη διαστασιολόγηση δομικών στοιχείων κατασκευών και στοιχείων μηχανών.

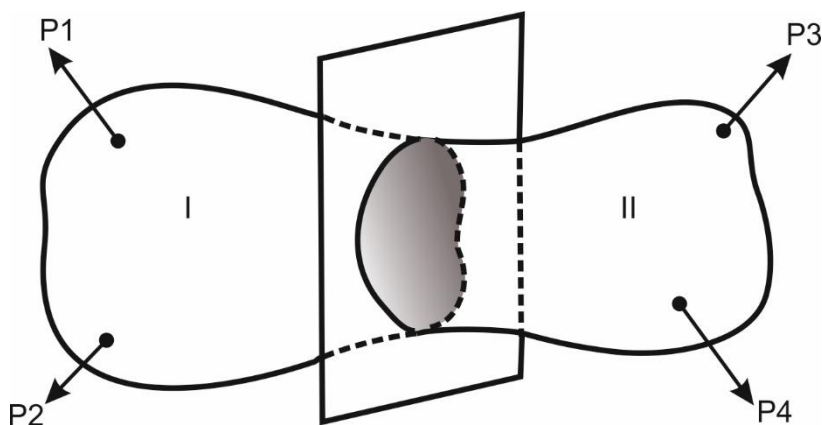
2.2 Στάθμη των Γνώσεων

Για την καλύτερη κατανόηση των θεμάτων που εξετάζει η μηχανική συμπεριφορά υλικών, θεωρείται σκόπιμο στο σημείο αυτό να γίνει μία ανασκόπηση ορισμένων βασικών γνώσεων, οι οποίες αποτελούν αντικείμενο της αντοχής υλικών, της τεχνολογίας υλικών και της φυσικής μεταλλουργίας.

2.2.1 Στατική Ισορροπία – Εσωτερικές Δυνάμεις

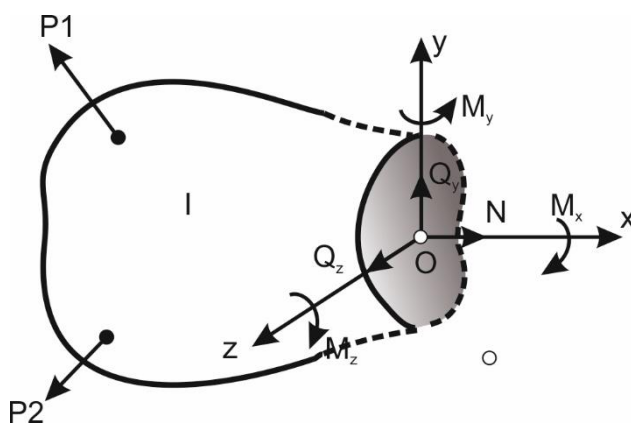
Όπως είναι γνωστό, ο κλάδος της μηχανικής που ονομάζεται στατική ασχολείται με τις σχέσεις μεταξύ των δυνάμεων που δρουν σε ένα στερεό σώμα και διερευνά τις συνθήκες ισορροπίας του. Εάν πληρούνται οι συνθήκες ισορροπίας, τότε το σώμα βρίσκεται σε κατάσταση στατικής ισορροπίας (δηλαδή σε ηρεμία ή ομαλή κίνηση), μια κατάσταση που συναντάται συνήθως στις περισσότερες κατασκευές. Αν δεν πληρούνται συνθήκες στατικής ισορροπίας, δηλαδή εάν το σώμα βρίσκεται σε μη ομαλή κίνηση (π.χ. επιταχυνόμενη κίνηση), τότε στις δυνάμεις που το καταπονούν πρέπει να προστεθούν και οι δυνάμεις αδράνειας. Στις περιπτώσεις αυτές το σώμα λέγεται ότι βρίσκεται σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας, αντικείμενο με το οποίο ασχολείται ο κλάδος της μηχανικής που ονομάζεται δυναμική.

Σε οποιοδήποτε στερεό σώμα που καταπονείται από εξωτερικές δυνάμεις, είτε βρίσκεται σε κατάσταση στατικής ισορροπίας είτε όχι, αναπτύσσονται εσωτερικές δυνάμεις. Ο υπολογισμός των εσωτερικών δυνάμεων αποτελεί το πρώτο βήμα για τον καθορισμό και τον έλεγχο της απόκρισής τους στα εξωτερικά φορτία. Στη μηχανική ο προσδιορισμός των εσωτερικών δυνάμεων πραγματοποιείται με τη μέθοδο των τομών. Το σώμα του σχήματος 2.1, που καταπονείται από τις εξωτερικές δυνάμεις P_1 , P_2 , κ.τ.λ., βρίσκεται σε κατάσταση στατικής ισορροπίας.



Σχήμα 2.1: Καταπόνηση σώματος υπό την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων

Σύμφωνα με την αρχή των τομών, όταν ένα σώμα ισορροπεί τότε ισορροπεί και κάθε νοητό του τμήμα. Εάν το σώμα χωρίζεται σε δύο τμήματα, I και II, μέσω μίας τυχαίας νοητής τομής, που γίνεται σε αυτό με το επίπεδο T, τότε τα τμήματα I και II του σώματος βρίσκονται επίσης σε κατάσταση στατικής ισορροπίας. Για να εξασφαλιστεί η ισορροπία του κάθε τμήματος, θα πρέπει στις δύο επιφάνειες τομής να ενεργούν δυνάμεις, οι οποίες ονομάζονται εσωτερικές δυνάμεις και οι οποίες αντισταθμίζουν την επίδραση των εξωτερικών δυνάμεων. Εάν δεν υπήρχαν οι εσωτερικές δυνάμεις και επενεργούσαν μόνο οι εξωτερικές (π.χ. P_1 και P_2 στο τμήμα I), τότε τα τμήματα I και II δεν θα βρίσκονταν σε κατάσταση ηρεμίας ή ομαλής κίνησης (δηλαδή σε στατική ισορροπία), αλλά σε κατάσταση μη ομαλής κίνησης (π.χ. το τμήμα I θα επιταχυνόταν συνεχώς κάτω από την επίδραση των P_1 και P_2). Οι εσωτερικές δυνάμεις είναι κατανομημένες σε όλη την επιφάνεια της τομής και, σύμφωνα με την αρχή της δράσης-αντίδρασης, θα πρέπει σε κάθε σημείο της τομής να είναι ίσες σε μέγεθος και αντίθετες σε φορά μεταξύ τους στα τμήματα I και II. Στο σχήμα 2.2 παριστάνεται η συνισταμένη εσωτερική δύναμη στο κέντρο βάρους της επιφάνειας διατομής, που αντιστοιχεί στο σημείο O του σχήματος.



Σχήμα 2.2: Συνισταμένη εσωτερική δύναμη στο κέντρο βάρους της επιφάνειας διατομής

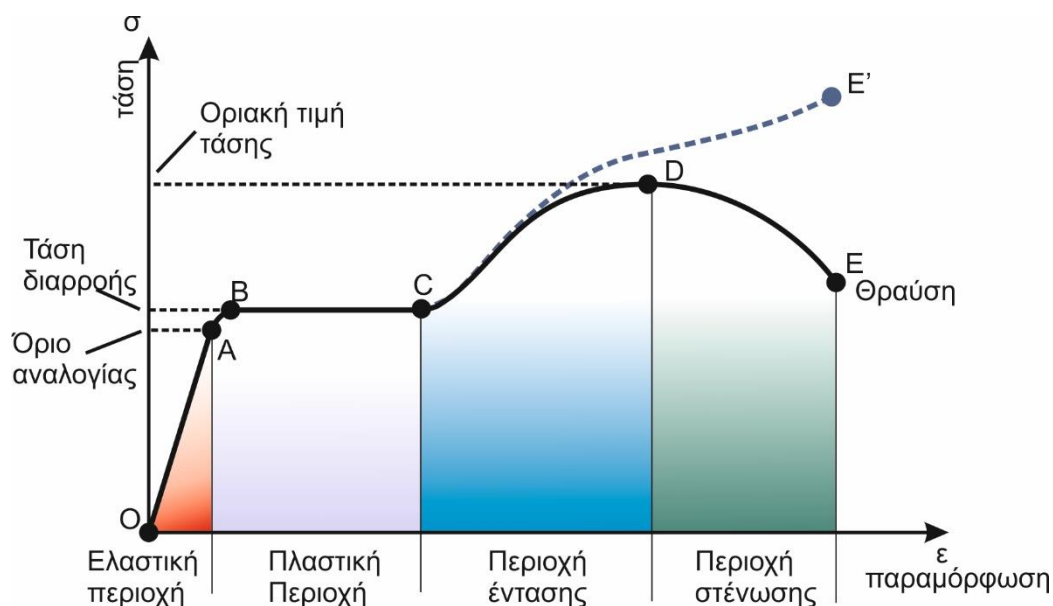
Στη γενική περίπτωση, η συνισταμένη των εσωτερικών δυνάμεων μπορεί να αναλυθεί σε τρεις συνιστώσες δυνάμεις (αξονική N_x και εγκάρσιες Q_y και Q_z), καθώς και σε τρεις ροπές (M_x , M_y και M_z). Σε κατάσταση στατικής ισορροπίας οι εσωτερικές και εξωτερικές δυνάμεις αλληλοεξουδετερώνονται. Το μέγεθος και η φορά των εσωτερικών δυνάμεων εξαρτώνται από τα εξωτερικά φορτία και από την διεύθυνση της τομής, δηλαδή από τον προσανατολισμό του επιπέδου τομής T στον χώρο.

2.2.2 Ελαστική και Πλαστική Συμπεριφορά

Η εμπειρία από την παρατήρηση της μηχανικής συμπεριφοράς των στερεών υλικών, και κατά συνέπεια και των μετάλλων, έχει δείξει ότι όλα τα υλικά παραμορφώνονται, δηλαδή υφίστανται μεταβολές των διαστάσεων ή/και του σχήματός τους, κάτω από την επίδραση εξωτερικών φορτίων. Επιπρόσθετα, έχει βρεθεί ότι για κάθε υλικό υπάρχει μία οριακή τιμή φορτίου (όριο ελαστικότητας), η οποία εάν δεν ξεπεραστεί τότε το υλικό επανέρχεται στις αρχικές του διαστάσεις μόλις απομακρυνθεί το φορτίο. Όσον αφορά ειδικότερα τα μέταλλα, το οριακό αυτό φορτίο συνήθως αναφέρεται σαν όριο διαρροής (yield stress). Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το όριο ελαστικότητας και το όριο διαρροής δεν είναι πάντοτε ταυτόσημες έννοιες.

Στα περισσότερα στερεά υλικά, όσο τα εξωτερικά φορτία είναι μικρότερα από το όριο ελαστικότητας, η παραμόρφωση (δηλαδή η ελαστική παραμόρφωση) είναι ευθέως και γραμμικά ανάλογη προς το φορτίο. Η γραμμική αυτή συσχέτιση μεταξύ φορτίου και παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή είναι γνωστή ως νόμος του Hooke. Ο νόμος του Hooke, δηλαδή η γραμμική σχέση ανάμεσα στην τάση (stress) και την ελαστική παραμόρφωση, ισχύει σε όλα τα μεταλλικά υλικά για μικρές τιμές παραμόρφωσης.

Όταν τα εξωτερικά φορτία υπερβούν το όριο ελαστικότητας (ή το όριο ροής) του υλικού, τότε το στερεό σώμα υφίσταται μία μόνιμη μεταβολή των διαστάσεων ή/και του σχήματός του, η οποία παραμένει ακόμη και μετά την απομάκρυνση του φορτίου. Ένα σώμα που παραμορφώνεται μόνιμα κατ' αυτό τον τρόπο λέγεται ότι έχει υποστεί πλαστική παραμόρφωση.

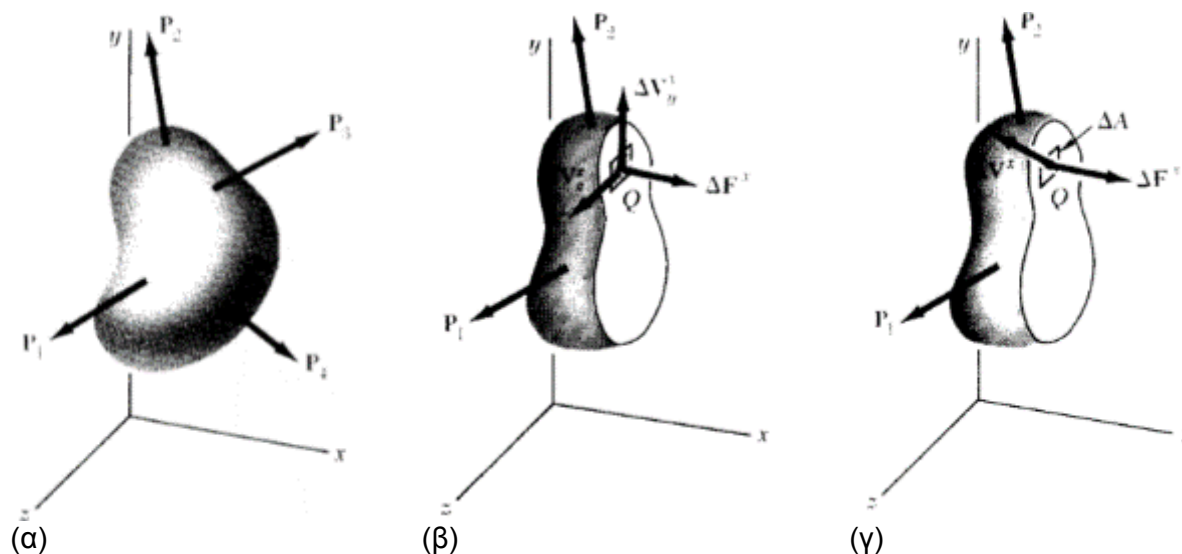


Σχήμα 2.3: Τυπικό διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης

2.2.3 Τάση

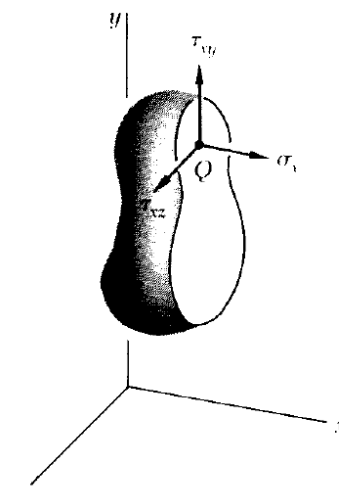
Στο σχήμα 2.4(α) παρουσιάζεται ένα σώμα σε στατική ισορροπία, το οποίο καταπονείται από διάφορα εξωτερικά φορτία P_1 , P_2 , κ.τ.λ.. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα εξωτερικά φορτία προκαλούν την ανάπτυξη εσωτερικών δυνάμεων στο σώμα, οι οποίες καταπονούν όλα τα σημεία του σώματος, όχι απαραίτητα ομοιόμορφα. Σε ένα τυχαίο σημείο Q του σώματος, στο οποίο μας ενδιαφέρει η μηχανική καταπόνηση που δέχεται, δημιουργείται νοητή τομή. Το αριστερό μέρος του σώματος καταπονείται πλέον από ορισμένα μόνο από τα εξωτερικά φορτία (π.χ. P_1 και P_2), καθώς και από εσωτερικές δυνάμεις, τόσο ορθές (αξονικές) όσο και διατμητικές (εγκάρσιες), κατανεμημένες επάνω στην επιφάνεια της τομής. Εστιασμένα στο σημείο Q, απομονώνεται μία πολύ μικρή επιφάνεια εμβαδού ΔA η οποία το περικλείει και συμβολίζεται με

την ορθή εσωτερική δύναμη και με την διατμητική εσωτερική δύναμη, που επενεργούν επάνω στην επιφάνεια ΔA .



Σχήμα 2.4: (α) Καταπόνηση στερεού σώματος σε στατική ισορροπία, (β) Ανάλυση δυνάμεων σε τυχαίο σημείο Q στέρεου σώματος, (γ) Ανάλυση της εγκάρσιας δύναμης ΔV_x .

Στις δυνάμεις ΔF_x και ΔV_x χρησιμοποιείται ο δείκτης x , για να δείξει ότι οι δυνάμεις αυτές επενεργούν επάνω σε ένα επίπεδο που είναι κάθετο προς τον άξονα x . Ενώ η ορθή δύναμη ΔF_x έχει έναν καθορισμένο προσανατολισμό ως προς την επιφάνεια ΔA (είναι κάθετη προς την ΔA), η εγκάρσια δύναμη ΔV_x μπορεί να έχει οποιαδήποτε διεύθυνση επάνω στην επιφάνεια. Κατά συνέπεια, είναι πιο εύχρηστο να αναλυθεί η δύναμη ΔV_x σε δύο συνιστώσες, την ΔV_{xy} και την ΔV_{xz} , οι οποίες έχουν διεύθυνση παράλληλη προς τους άξονες y και z , αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4(γ). Διαιρώντας κάθε μία από τις εσωτερικές δυνάμεις ΔF_x , ΔV_{xy} και ΔV_{xz} με την επιφάνεια ΔA και λαμβάνοντας το όριο $\Delta A \rightarrow 0$, ορίζονται τρεις συνιστώσες της τάσης που καταπονούν το σημείο Q του σώματος, που φαίνονται στην εικόνα του σχήματος 2.5 και είναι:



Σχήμα 2.5: Οι συνιστώσες της τάσης

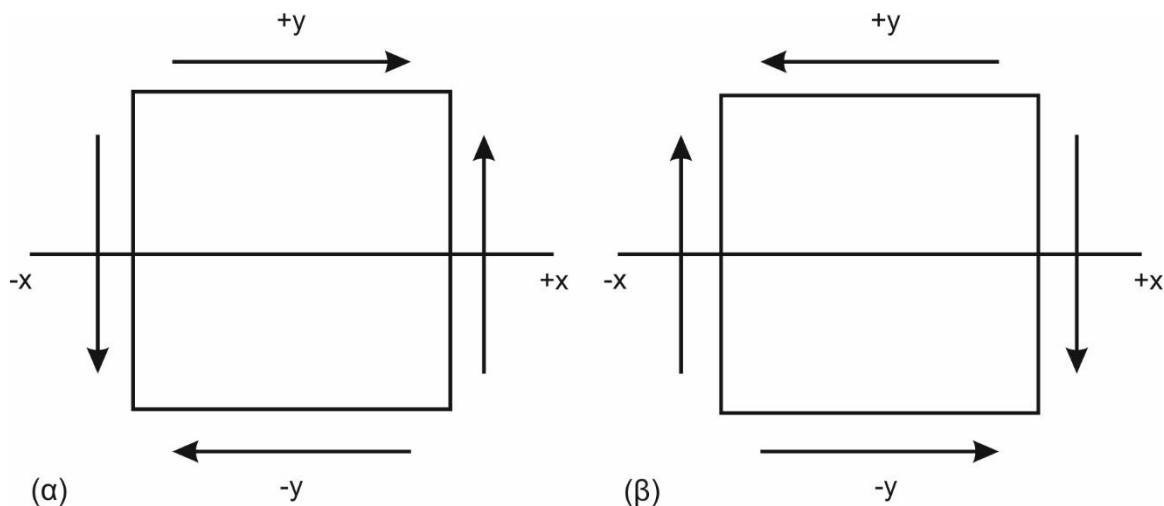
$$\sigma_x = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} \quad \tau_{xy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V_{xy}}{\Delta A} \quad \tau_{xz} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V_{xz}}{\Delta A}$$

Εξίσωση 2.1

Η τάση σ_x ονομάζεται ορθή τάση (normal stress), ενώ οι τάσεις τ_{xy} και τ_{xz} ονομάζονται διατμητικές τάσεις (shear stresses). Ας σημειωθεί ότι ο δείκτης x στον παραπάνω συμβολισμό των τάσεων δηλώνει ότι οι τάσεις ενεργούν επάνω σε ένα επίπεδο που είναι κάθετο προς τον άξονα x . Ο δεύτερος δείκτης στις διατμητικές τάσεις υποδηλώνει την διεύθυνση προς την οποία επενεργούν οι τάσεις αυτές. Έτσι, για παράδειγμα, το σύμβολο τ_{xy} σημαίνει ότι πρόκειται για διατμητική τάση που επενεργεί επάνω σε ένα επίπεδο κάθετο προς τον άξονα x και η διεύθυνσή της είναι παράλληλη προς τον άξονα y . Αντίστοιχα, το σύμβολο τ_{xz} σημαίνει ότι πρόκειται για

διατμητική τάση που επενεργεί επάνω σε ένα επίπεδο κάθετο προς τον άξονα x και η διεύθυνσή της είναι παράλληλη προς τον άξονα z.

Όσον αφορά το πρόσημο των συνιστωσών της τάσης, έχει επικρατήσει οι ορθές τάσεις να θεωρούνται θετικές όταν προκαλούν εφελκυσμό (tension) σε ένα σώμα και αρνητικές όταν προκαλούν θλίψη (compression). Μία διατμητική τάση θεωρείται θετική όταν επενεργεί στη «θετική» έδρα ενός στοιχειώδους κύβου και έχει φορά προς την θετική διεύθυνση του άξονα συντεταγμένων. Επίσης, θετική είναι μία διατμητική τάση όταν επενεργεί στην «αρνητική» έδρα ενός στοιχειώδους κύβου και έχει φορά προς την αρνητική διεύθυνση του άξονα συντεταγμένων. Για παράδειγμα, όλες οι διατμητικές τάσεις του σχήματος 2.6(α) είναι θετικές.



Σχήμα 2.6: (α) Θετική διατμητική δύναμη (β) Αρνητική διατμητική δύναμη

Αρνητική θεωρείται μία διατμητική τάση όταν επενεργεί στη “θετική” έδρα ενός στοιχειώδους κύβου και έχει φορά προς την αρνητική διεύθυνση του άξονα συντεταγμένων, ή όταν επενεργεί στην «αρνητική» έδρα ενός στοιχειώδους κύβου και έχει φορά προς την θετική διεύθυνση του άξονα συντεταγμένων, όπως φαίνεται στο στο σχήμα 2.6(β).

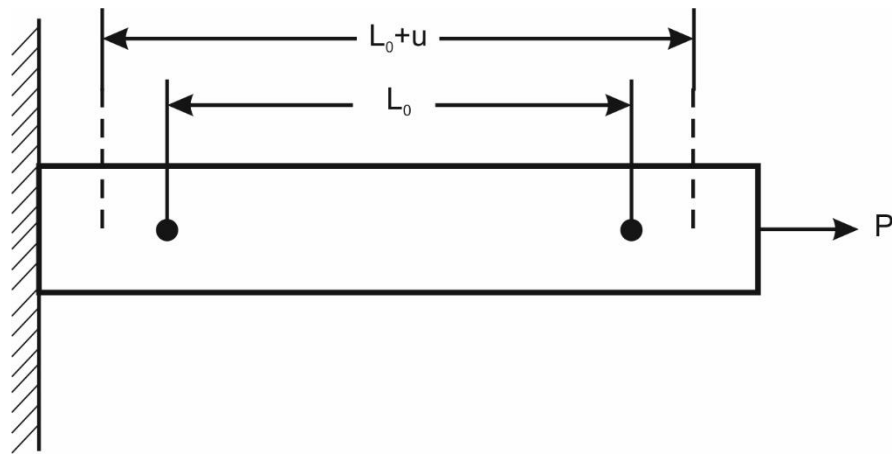
Οι τάσεις, τόσο οι ορθές όσο και οι διατμητικές, σαν φυσικά μεγέθη εκφράζουν τον λόγο δύναμης ως προς το εμβαδόν επιφάνειας. Η συνήθης μονάδα μέτρησης της τάσης είναι το N/m^2 , το οποίο για συντομία ονομάζεται Pascal (Pa). Στα μεταλλικά υλικά συνήθως χρησιμοποιείται ένα πολλαπλάσιο του Pa, το MPa ($1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 10^6 \text{ N/m}^2$).

2.2.4 Παραμόρφωση

Η παραμόρφωση (strain) είναι το αποτέλεσμα της επίδρασης των τάσεων στα στερεά σώματα. Οι ορθές τάσεις προκαλούν ορθές παραμορφώσεις (normal strains). Σε μια κυλινδρική ράβδο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7 ορίζονται δύο σημάδια που απέχουν μεταξύ τους απόσταση L_0 . Εφαρμόζοντας ένα εφελκυστικό φορτίο P στη ράβδο, διαπιστώνεται ότι η απόσταση μεταξύ των δύο σημάδιων θα έχει αυξηθεί κατά μία ποσότητα u και θα είναι τώρα $L_f = L_0 + u$. Η ποσότητα u ονομάζεται επιμήκυνση (elongation) και προκύπτει ότι:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{L_0 + u - L_0}{L_0} = \frac{u}{L_0} \quad \text{Εξίσωση 2.2}$$

Όπου ε καλείται ονομαστική ορθή παραμόρφωση ή απλώς ονομαστική παραμόρφωση (nominal ή engineering strain).



Σχημα 2.7: Παραμόρφωση κυλινδρικής ράβδου

Ωστόσο, εκτός από τον ορισμό της εξίσωσης 2.2, υπάρχει και άλλος τρόπος με τον οποίο μπορεί να εκφραστεί η ορθή παραμόρφωση. Όταν η παραμόρφωση ορίζεται όχι μέσω της εξίσωσης 2.2, αλλά μέσω της παρακάτω εξίσωσης 2.3:

$$\varepsilon = \int_{L_0}^{L_f} \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L_f}{L_0}\right) \quad \text{Εξίσωση 2.3}$$

όπου L_0 και L_f το αρχικό και το τελικό μήκος, αντίστοιχα, τότε καλείται πραγματική ορθή παραμόρφωση ή απλώς πραγματική παραμόρφωση (true strain). Η έννοια της πραγματικής παραμόρφωσης αποκτά ιδιαίτερη χρησιμότητα σε περιπτώσεις που εμφανίζονται μεγάλες τιμές παραμόρφωσης, όπως είναι για παράδειγμα στις κατεργασίες διαμόρφωσης των μετάλλων (έλαση, βαθεία κοίλανση, κ.λ.π.). Θα πρέπει να επισημανθεί ότι για μικρές τιμές παραμόρφωσης, (π.χ. ελαστικές παραμορφώσεις) οι τιμές της ονομαστικής της εξίσωσης 2.2 και της πραγματικής παραμόρφωσης της εξίσωσης 2.3 συμπίπτουν. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να αποφεύγεται η δημιουργία σύγχυσης με τις παραπάνω μορφές έκφρασης της παραμόρφωσης. Οι ορθές παραμορφώσεις είναι το αποτέλεσμα της επίδρασης ορθών τάσεων σε ένα σώμα. Η ονομαστική και η πραγματική παραμόρφωση είναι απλώς δύο διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να εκφραστεί η τιμή των ορθών παραμορφώσεων.

Οι ορθές παραμορφώσεις, και κατά συνέπεια οι ορθές τάσεις που τις προκαλούν, είναι υπεύθυνες για την μεταβολή των γραμμικών διαστάσεων ενός σώματος (π.χ. του μήκους μίας ράβδου, του μήκους και του πλάτους ενός λεπτού ελάσματος, κ.τ.λ.)

3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ ΜΗ ΜΗΧΑΝΟΚΙΝΗΤΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

3.1 Ορισμοί

Επίγειος Εξοπλισμός αεροδρομίου είναι το σύνολο των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται για να υποστηρίξουν ένα αεροσκάφος στο έδαφος από την προσγείωση έως την απογείωση του, καθώς και στις διαδικασίες συντήρησης του.

Μη μηχανοκίνητος επίγειος εξοπλισμός είναι οι συσκευές που δεν είναι αυτοκινούμενες αλλά απαιτούν μηχανοκίνητο μέσο με σύστημα πρόσδεσης για να κινούνται στο χώρο του αεροδρομίου.

Ρυμούλκηση μη μηχανοκίνητου επίγειου εξοπλισμού είναι διαδικασία έλξης του απαραίτητου εξοπλισμού από μηχανοκίνητο μέσο, αυτοκίνητο ή τράκτορα, με σκοπό την μεταφορά του σε οποιοδήποτε χώρο του αεροδρομίου. Είναι η πιο συνηθισμένη διαδικασία μεταφοράς αεροσκαφών και μέσων

Οπισθέλκηση μη μηχανοκίνητου επίγειου εξοπλισμού είναι η αντίθετη διαδικασία της ρυμούλκησης. Είναι το σπρώξιμο του μηχανήματος από μηχανοκίνητο μέσο, με σκοπό την τοποθέτηση του σε συγκεκριμένο σημείο στο χώρο του αεροδρομίου. Είναι λιγότερο συνηθισμένη διαδικασία μεταφοράς γιατί παρουσιάζει μεγαλύτερους κινδύνους στην ασφάλεια του εργατικού προσωπικού και των μηχανημάτων.

3.2 Σύστημα Διεύθυνσης με μπάρα ρυμούλκησης

Η ρυμούλκηση και η οπισθέλκηση επίγειου εξοπλισμού και αεροσκαφών είναι καθημερινές διαδικασίες στους χώρους κάθε αεροδρομίου για την εξυπηρέτηση και συντήρηση αεροσκαφών. Αποτελεί διαδικασία που απαιτεί γνώση και εμπειρία στην ορθή εκτέλεση της και ανήκει στις διαδικασίες ασφαλείας πτήσεων και εδάφους για την εύρυθμη λειτουργία ενός αερολιμένα.

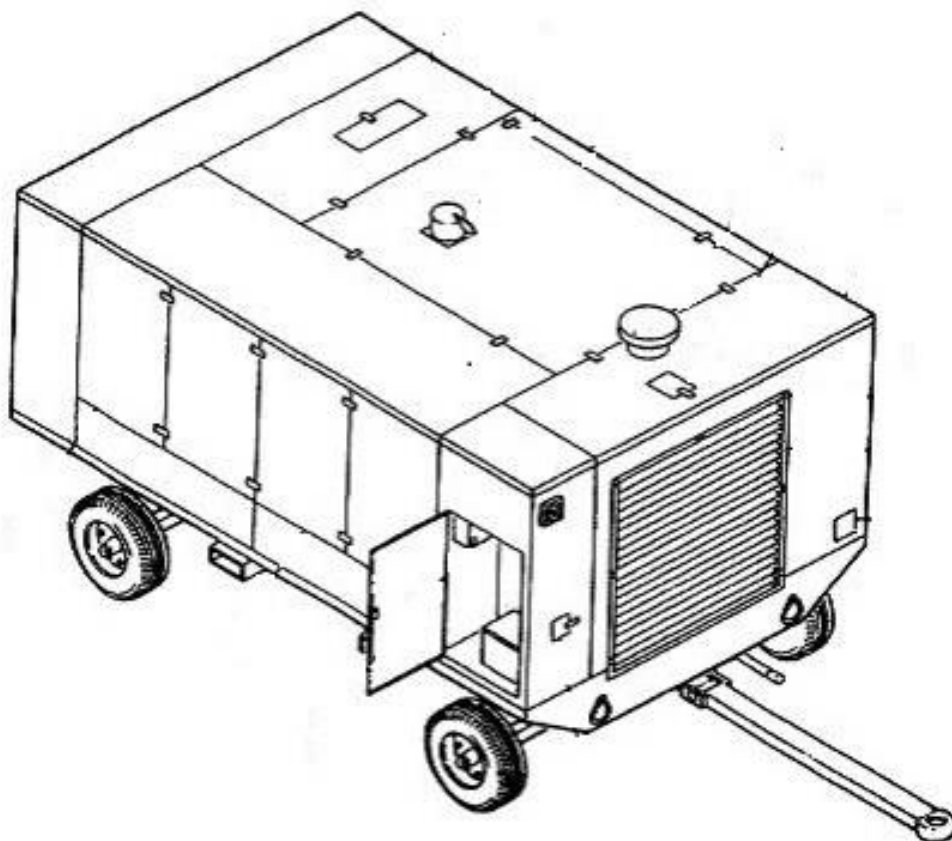
Ο μεγαλύτερος όγκος του εξοπλισμού δεν είναι αυτοκινούμενος αλλά απαιτεί μηχανοκίνητο μέσο για την πραγματοποίηση των διαδικασιών οπισθέλκησης. Για το λόγο αυτό οι συσκευές αυτές διαθέτουν σύστημα διεύθυνσης με μπάρα ρυμούλκησης με σκοπό την σύνδεση τους με όχημα που θα τα μεταφέρει όπου απαιτείται. Κατά την πραγματοποίηση της μεταφοράς και τοποθέτησης του εξοπλισμού αυτού στις συγκεκριμένες θέσεις λειτουργίας τους, το σύστημα διεύθυνσης τους είναι ο αποδέκτης όλου του συνόλου των φορτίων που αναπτύσσονται σε αυτό, που σε συνδυασμό με το μεγάλο βάρος των μηχανημάτων, το οδηγούν στα όρια αντοχής του.

Η διαδικασία οπισθέλκησης, σχήμα 3.1, σύμφωνα με διεθνείς και εθνικούς κανονισμούς που διέπουν την εύρυθμη λειτουργία ενός αεροδρομίου στην περιοχή κίνησης αεροσκαφών, πρέπει να γίνεται με ταχύτητες που δεν ξεπερνούν τα 5Km/h. Η μέγιστη γωνία οπισθέλκησης καθώς και η γωνία στρέψης της μπάρας του συστήματος διεύθυνσης καθορίζονται με τις τεχνικές οδηγίες του κατασκευαστή του επίγειου εξοπλισμού.

Η πλειοψηφία του επίγειου εξοπλισμού είναι μεγάλου μεγέθους και βάρους. Είναι τροχήλατα με ελαστικά επίσωτρα πίεσης αέρα για καλύτερη πρόσφυση με το έδαφος και μεγαλύτερη ευκολία ρυμούλκησης και οπισθέλκησης. Η συσκευή παροχής υδραυλικής ισχύος, στην εικόνα του σχήματος 3.2, έχει βάρος 5100lbs ή 2.314kg. Ένα μηχάνημα σαν και αυτό θα πρέπει, με δύσκολους ελιγμούς οπισθέλκησης, να τοποθετηθεί κοντά σε αεροσκάφος σε συγκεκριμένη θέση και σε περιορισμένο μερικές φορές χώρο, για την πραγματοποίηση λειτουργικών ελέγχων και αποκατάσταση βλαβών των υδραυλικών συστημάτων του αεροσκάφους.



Σχήμα 3.1: Διαδικασία οπισθέλκησης συσκευής με μηχανοκίνητο όχημα.



Σχήμα 3.2: Συσκευή παροχής υδραυλικής ισχύος σε αεροσκάφη.

Το πλήρως ρυμουλκούμενο σύστημα πάνω στο οποίο τοποθετείται μια τέτοια συσκευή είναι από τα συνήθη συστήματα ρυμούλκησης που συναντάμε σε επίγειο εξοπλισμό αυτού του τύπου και φαίνεται στο σχήμα 3.3.

Στο παραπάνω σύστημα, ο πείρος περιστροφής της μπάρας ρυμούλκησης (δείκτης 14) συνδέει την μπάρα ρυμούλκησης (δείκτης 16) με το υπόλοιπο σύστημα διεύθυνσης επιτρέποντας την να κινείται πάνω – κάτω από 0° έως περίπου 90° (γωνία οπισθέλκησης). Ο πείρος περιστροφής συγκροτήματος βραχίονα (δείκτης 36), που συνδέει τον κεντρικό συγκρότημα βραχίονα τιμονιού (δείκτης 28) με τον εμπρόσθιο συγκρότημα άξονα (δείκτης 55) του επιτρέπει να κινείται δεξιά - αριστερά σε μια γωνία στρέψης συνολικά περίπου στις 140° (70° δεξιά και 70° αριστερά για την πραγματοποίηση των ελιγμών).

Τα φορτία που αναπτύσσονται σε όλο το παραπάνω σύστημα προκαλούν μεγάλες ανοχές στους πείρους σύνδεσης του συγκροτήματος που ξεπερνάνε, πολλές φορές, τα όρια που έχει καθορίσει ο κατασκευαστής στην τεχνική βιβλιογραφία του. Η συνεχής όμως καταπόνηση των συγκεκριμένων κομματιών, λόγω χρήσης, έχει προκαλέσει στρεβλώσεις στη μπάρα ρυμούλκησης και στους πείρους περιστροφής καθώς και θραύση του κεντρικού βραχίονα τιμονιού του συγκροτήματος, όπως φαίνεται και στην εικόνα του σχήματος 3.5.



Σχήμα 3.5: Καταπονήσεις, στρεβλώσεις και σπάσιμο εξαρτημάτων συστήματος διεύθυνσης

Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι μεν η καθήλωση μηχανημάτων, που είναι απαραίτητα για την εύρυθμη λειτουργία των διαδικασιών συντήρησης των αεροσκαφών καθώς δε και το σχετικά μεγάλο κόστος επισκευής των συστημάτων. Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται στο σύστημα αυτό και στα επιμέρους μέρη του για να μελετήσει τους λογούς που προκαλούνται οι προαναφερθείσες φθορές.

3.3 Ανάλυση Επιμέρους τμημάτων συστήματος διεύθυνσης



3.3.1 Μπάρα ρυμούλκησης (drawbar)

Η μπάρα ρυμούλκησης είναι το τμήμα του συστήματος διεύθυνσης που χρησιμοποιείται για την πρόσδεση των μηχανημάτων πάνω σε αυτοκινούμενα μέσα για την μεταφορά τους. Είναι συνήθως κατασκευασμένα από χυτοσίδηρο. Στην εικόνα του σχήματος 3.6 παρουσιάζεται η μπάρα ρυμούλκησης ως καινούριο ανταλλακτικό.

Σχήμα 3.6: Μπάρα ρυμούλκησης

3.3.2 Πείρος περιστροφής μπάρας ρυμούλκησης (pin hinge)

Είναι ο πείρος άρθρωσης μεταξύ μπάρας ρυμούλκησης και κεντρικού βραχίονα τιμονιού για ελεύθερη κίνηση πάνω – κάτω της πρώτης. Συνήθως κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο ώστε σε περίπτωση μεγάλων καταπονήσεων να σπάει ώστε να προστατέψει το υπόλοιπο σύστημα από ανεπιθύμητες στρεβλώσεις, κάμψεις και θραύσεις. Στην εικόνα του σχήματος 3.7 φαίνεται ο πείρος ως νέο ανταλλακτικό.



Σχήμα 3.7: Πείρος περιστροφής μπάρας ρυμούλκησης



3.3.3 Κεντρικό συγκρότημα βραχίονα τιμονιού (center steering arm assembly)

Είναι το τμήμα που στηρίζει το σύστημα διεύθυνσης και καθορίζει την γωνία των ελιγμών που μπορεί να εκτελέσει η συσκευή κατά την διάρκεια της οπισθέλκισης του. Κατασκευασμένο συνήθως και αυτό από χυτοσίδηρο. Στην εικόνα του σχήματος 3.8 φαίνεται το κεντρικό συγκρότημα βραχίονα τιμονιού ως νέο ανταλλακτικό.

Σχήμα 3.8: Κεντρικό συγκρότημα βραχίονα τιμονιού

3.3.4 Πείρος περιστροφής συγκροτήματος βραχίονα (pin center)

Είναι ο πείρος άρθρωσης μεταξύ συγκροτήματος βραχίονα τιμονιού και συγκροτήματος εμπρόσθιου άξονα που επιτρέπει την κίνηση δεξιά – αριστερά του πρώτου και την μετάδοση της γωνίας περιστροφής μέσω των ημιαξονίων μετάδοσης στους τροχούς της συσκευής. Στην εικόνα του σχήματος 3.9 φαίνεται ο πείρος ως μεταχειρισμένο ανταλλακτικό.



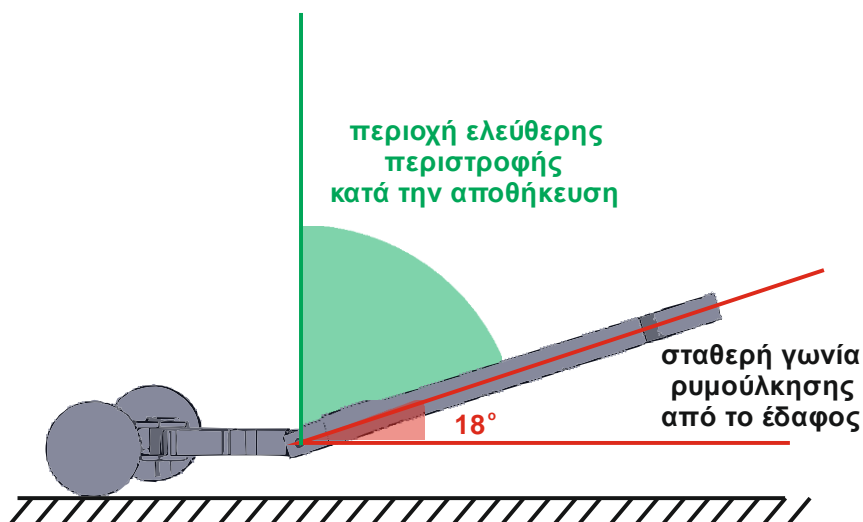
Σχήμα 3.9: Πείρος περιστροφής συγκροτήματος βραχίονα

3.3.5 Εμπρόσθιο συγκρότημα άξονα (beam assembly front)

Είναι ο εμπρόσθιος άξονας του ρυμουλκούμενου συστήματος, που διαθέτουν όλες οι συσκευές αυτού του τύπου. Αποτελεί έναν από τους δυο κυρίως άξονες, πάνω στους οποίους στηρίζεται όλη η κατασκευή του επίγειου εξοπλισμού. Καθορίζει την δυνατότητες ρυμούλκησης του μηχανήματος, αφού εξαρτάται από τα κατασκευαστικά πρότυπα με τα οποία κατασκευάστηκε χωρίς βέβαια να παρουσιάζει κάποιο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό γνώρισμα. Είναι κατασκευασμένος από χυτοσίδηρο.

3.4 Μελέτη κίνησης συστήματος διεύθυνσης με μπάρα ρυμούλκησης

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία που δίνει ο κατασκευαστής στη βιβλιογραφία του, το εν λόγω σύστημα διεύθυνσης έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να δίνει ελευθερία κινήσεων τόσο κατά την διάρκεια της ρυμούλκησης όσο και κατά την διάρκεια της οπισθέλκισης των συσκευών που το διαθέτουν. Αναφέρει λοιπόν ότι ο πείρος περιστροφής της μπάρας ρυμούλκησης (δείκτης 14 σχήματος 3.4), συνδέει την μπάρα ρυμούλκησης (δείκτης 16) με το υπόλοιπο σύστημα διεύθυνσης επιτρέποντας την να κινείται πάνω – κάτω από 0° έως περίπου 90° . Η γωνία αυτή που δημιουργείται ονομάζεται γωνία οπισθέλκισης. Στην εικόνα του σχήματος 3.10 φαίνεται, σε σχεδιαστικό περιβάλλον, η επιτρεπτή γωνία περιστροφής της μπάρας ρυμούλκησης.



Σχήμα 3.10: Σταθερή γωνία στρέψης συνδεσμολογίας στο άξονα z

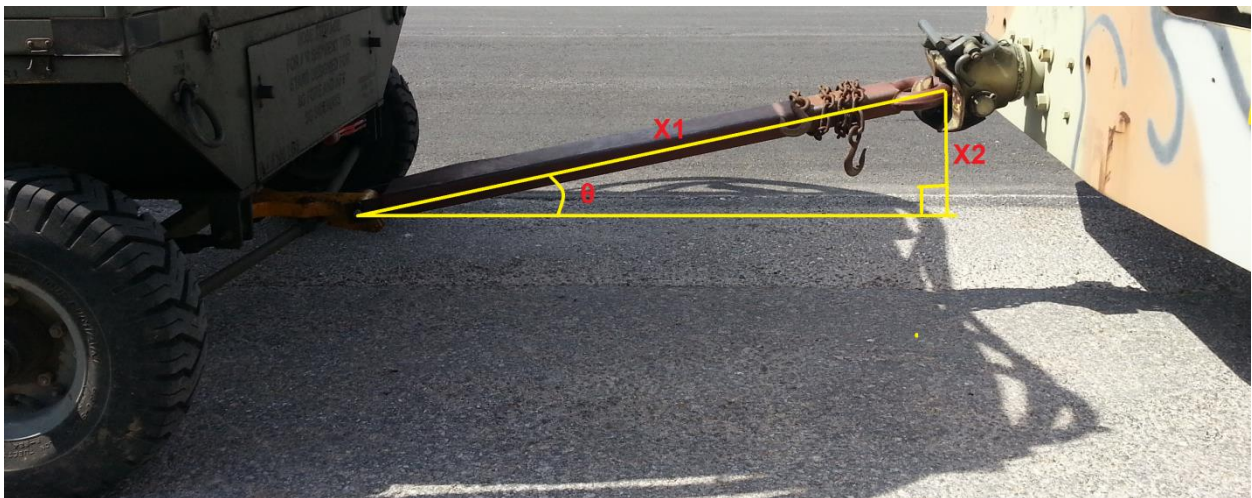
Το γεγονός αυτό επιτρέπει τον χρήστη του μηχανήματος να συνδέει τη συσκευή με το όχημα ρυμούλκησης σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος γωνίας χωρίς βέβαια αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν αυστηρά όρια ασφαλείας. Η επιθυμητή τιμή γωνίας που αναφέρεται από τους κατασκευαστές αλλά και από τις τυποποιημένες διαδικασίες ασφαλείας αεροδρομίων (κίνηση αεροσκαφών, μέσων και προσωπικού) στην περίπτωση ρυμούλκησης κυμαίνεται από 0° έως και 25°. Στην περίπτωση οπισθέλκεσης η τιμή της γωνίας θα πρέπει να είναι σχεδόν μηδενική. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ακόμη ότι η μπάρα ρυμούλκησης λαμβάνει ορθή γωνία για λόγους εξοικονόμησης χώρου, αποθήκευσης και μεταφοράς του επίγειου εξοπλισμού.

Στη συγκεκριμένη μελέτη το σημείο σύνδεσης του οχήματος βρίσκεται σε γωνία ως προς το σύστημα διεύθυνσης του υπό εξέταση μηχανήματος. Η γωνία που δημιουργεί η μπάρα ρυμούλκησης κατά την σύνδεση των δυο παραπάνω, ως προς το οριζόντιο οδόστρωμα, είναι ίση με $\theta = 18^\circ$. Σε αυτή την τιμή πραγματοποιούνται οι διαδικασίες ρυμούλκησης αλλά και οπισθέλκεσης των μηχανημάτων. Η μέτρηση έγινε σύμφωνα με την εικόνα του σχήματος 3.11, όπου το μήκος της μπάρας είναι γνωστό και ίσο με 840mm και το ύψος του σημείου σύνδεσης της μπάρας από το έδαφος είναι ίσο με 260mm. Σύμφωνα με κοινούς κανόνες γεωμετρίας και την εξίσωση 3.1, υπολογίστηκε η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της μπάρας ρυμούλκησης και του εδάφους.

$$\sin \theta = \frac{X_2}{X_1} \Rightarrow \sin \theta = 0,3095 \Rightarrow \theta \cong 18$$

Εξίσωση 3.1

Είναι κατανοητό λοιπόν ότι κατά την διάρκεια της προσομοίωσης του μοντέλου μας η γωνία αυτή είναι μια παράμετρος που έχει καθορισμένη τιμή και αμετάβλητη.



Σχήμα 3.11: Υπολογισμός γωνίας μπάρας και οριζόντιου δαπέδου

Επίσης ο πείρος περιστροφής συγκροτήματος βραχίονα (δείκτης 36), στη ίδια εικόνα του σχήματος 3.4, που συνδέει τον κεντρικό συγκρότημα βραχίονα τιμονιού (δείκτης 28) με τον εμπρόσθιο συγκρότημα άξονα (δείκτης 55) μπορεί και κινείται δεξιά - αριστερά σε μια γωνία στρέψης συνολικά περίπου στις 140° (70° δεξιά και 70° αριστερά για την πραγματοποίηση των ελιγμών. Γίνεται κατανοητό ότι σύστημα μας έχει οριακή γωνία με τον εμπρόσθιο άξονα ίση με 20° και προς τις δυο κατευθύνσεις. Πολλές φορές όμως, κατά την διάρκεια της οπισθέλκεσης, το σύστημα λειτουργεί σε αυτές τις οριακές τιμές με αποτελέσματα να δέχεται μεγάλες καταπονήσεις. Στην εικόνα του σχήματος 3.12 φαίνονται οι δυο οριακές θέσεις της συνδεσμολογίας, οι οριακές τιμές των γωνιών καθώς και η αρχική θέση του συστήματος.



Σχήμα 3.12: Όρια γωνιών στρέψης συστήματος διεύθυνσης στο άξονα x

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε ανάλυση και μελέτη σε δυο ακραίες θέσεις και μια τυχαία θέση. Η πρώτη θέση, βρίσκει τη μπάρα ρυμούλκησης και τον κεντρικό βραχίονα, ως ένα τμήμα, σε γωνία 90° με το εμπρόσθιο συγκρότημα άξονα. Πρόκειται για την αρχική θέση (θέση ηρεμίας) του συστήματος διεύθυνσης κατά την έναρξη της διαδικασίας οπισθέλκεσης. Είναι η πιο επιθυμητή θέση του συστήματος που πρέπει να διατηρείται κατά την εξέλιξη της εν λόγω διαδικασίας. Δυστυχώς όμως δεν βρίσκεται πάντα στη θέση αυτή, εξαιτίας πολλών αιτιών που δεν εξετάζονται στην εργασία αυτή. Γι αυτό και η δεύτερη θέση που θα μελετηθεί θα είναι οριακή και έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στη θέση αυτή η μπάρα ρυμούλκησης και το κεντρικό τμήμα του βραχίονα, ως ένα τμήμα, βρίσκεται σε γωνία 20° με τον εμπρόσθιο συγκρότημα άξονα και σε επαφή με τον τελευταίο. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα διεύθυνσης είναι σε οριακή θέση και υπάρχει κίνδυνος στρεβλώσεων και θραύσης εξαρτημάτων. Είναι μη αποδεκτή θέση που μπορεί να βρεθεί το σύστημα διεύθυνσης και πρέπει να αποφεύγεται σε όλη την διάρκεια της διαδικασίας οπισθέλκεσης. Τα αποτελέσματα παραθέτονται στο επόμενο κεφάλαιο και γίνεται σύγκριση με τα προβλήματα που έχουν ήδη προκύψει, κατά καιρούς, στην διάρκεια της διαδικασίας αυτής. Γίνεται σαφές πως και για τις δυο, υπό μελέτη, θέσεις είναι η γωνία στρέψης του συστήματος ως προς τον άξονα x, αυτή που μεταβάλλεται. Η αρχική προσέγγιση της μελέτης έγινε σε μια τρίτη τυχαία θέση όπου η τιμή της παραπάνω γωνίας βρίσκεται μεταξύ των δυο πιο πάνω οριακών θέσεων.

3.5 Υπολογισμός βασικών παραμέτρων μελέτης

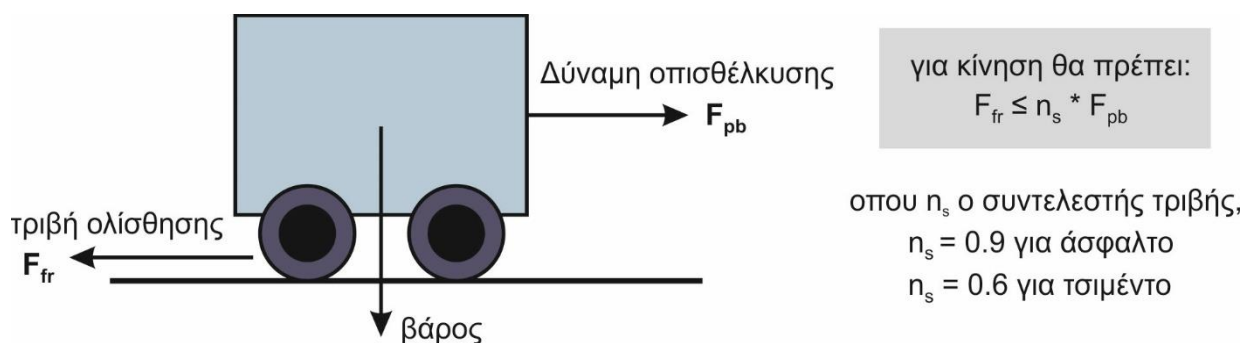
3.5.1 Οπισθέλκουσα δύναμη επίγειου εξοπλισμού

Η «Οπισθέλκουσα Δύναμη» F_{pb} ενός επίγειου μέσου εξυπηρέτησης αεροσκαφών (ground support equipment's drag power), είναι η τιμή της δύναμης που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα τέτοιο μηχάνημα ώστε να αρχίσει να κινείται, σε δεδομένο οδόστρωμα και καιρικές συνθήκες.

Ο ακριβής υπολογισμός της οπισθέλκουσας δύναμης είναι αδύνατος για κάθε περίπτωση και για διαφορετικές συνθήκες (οδόστρωματος, καιρικές συνθήκες). Όμως η εκτίμηση αυτής της δύναμης για δεδομένο τύπο και βάρος συσκευής είναι απαραίτητη στον οδηγό που θα εκτελέσει την ρυμούλκηση για την σωστή και ασφαλή εκτέλεση της διαδικασίας. Για την παρούσα μελέτη, η δύναμη αυτή εκτιμάται με βάση τα οδόστρώματα στα οποία κινούνται τα μηχανήματα αυτά καθώς και τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν σε ένα αεροδρόμιο. Τέλος η μελέτη της δύναμης που εφαρμόζεται εκτιμάται ότι συγκεντρώνεται στη μπάρα ρυμούλκησης, στο σημείο σύνδεσής του με το όχημα που θα το κινήσει. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ακόμη το γεγονός ότι η ελάχιστη δύναμη που απαιτείται για να κινηθεί ένα τέτοιο μηχάνημα είναι διαφορετική από την μέγιστη οπισθέλκουσα δύναμη που αναπτύσσει το όχημα ρυμούλκησης.

Ο υπολογισμός της οπισθέλκουσας δύναμης F_{pb} θα πραγματοποιηθεί με την βοήθεια των νόμων του Νεύτωνα. Μοντελοποιείται το προς οπισθέλκεση μηχάνημα ως ένα σώμα στο οποίο

ασκείται μια δύναμη και εμφανίζει τριβή ολίσθησης F_{fr} αντίθετη της δύναμης F_{pb} , σύμφωνα με το σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13: Ανάλυση δυνάμεων κατά την οπισθέλκηση μηχανήματος.

Η παράμετρος που πρέπει να υπολογιστεί, στο παραπάνω μοντελοποιημένο σχέδιο είναι η τριβή που αναπτύσσεται κατά την διάρκεια της διαδικασίας εκκίνησης της οπισθέλκησης. Η τριβή είναι δύναμη αντίστασης που εκδηλώνεται ενάντια στην σχετική κίνηση δύο σωμάτων που οι επιφάνειές τους εφάπτονται. Στη περίπτωση αυτή είναι η δύναμη τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ του υλικού κατασκευής των δρόμων και της πίστας απογείωσης ενός αεροδρομίου με τα ελαστικά επίσωτρα της συσκευής. Η φορά της εκδηλωμένης τριβής είναι πάντα αντίθετη προς την φορά της κίνησης. Η δύναμη τριβής διακρίνεται σε στατική τριβή όταν τα σώματα ισορροπούν και σε τριβή ολίσθησης όταν τα σώματα κινούνται μεταξύ τους και σε οριακή τριβή όταν το σώμα τείνει να κινηθεί. Η δύναμη τριβής είναι ανάλογη της κάθετης δύναμης αντίδρασης N που αναπτύσσεται κατακόρυφα (κάθετα στην επιφάνεια επαφής):

$$F_{fr} \leq n_s * N \text{ και } F_{fr} = n_k * N$$

Εξίσωση 3.2

Ο συντελεστής τριβής είναι καθαρός αριθμός και εξαρτάται από το τύπο του υλικού σύστασης και τη φύση των εφαπτόμενων επιφανειών. Διακρίνεται ο συντελεστής στατικής τριβής n_s (με εφαπτόμενα σώματα σε στάση) και ο συντελεστής κινητικής τριβής n_k (με σώματα σε κίνηση). Για τη στατική τριβή, η ισότητα ισχύει λίγο πριν οι επιφάνειες αρχίσουν να ολισθαίνουν, δηλαδή όταν η κίνηση είναι επικείμενη. Επομένως πρέπει υπολογιστεί η οριακή τιμή του συντελεστή τριβής λίγο πριν κινηθεί η συσκευή.

Όπως έχει προαναφερθεί το μηχάνημα κινείται σε ελαστικά επίσωτρα. Έχουν υπολογιστεί κατά προσέγγιση οι συντελεστές τριβής σε περιπτώσεις που η κίνηση πραγματοποιείται σε διαφορετικούς τύπους οδοστρώματος. Στη παρούσα εργασία οι τύποι οδοστρώματος που επιλέγονται είναι αυτοί που διαθέτει ένα αεροδρόμιο (άσφαλτος και τσιμέντο). Μελέτες έχουν αναδείξει πως ελαστικά πάνω σε στεγνή άσφαλτο αναπτύσσουν συντελεστή στατικής τριβής ίσο με:

$$n_{s_asphalt} = 0,9$$

και σε στεγνό τσιμέντο ίσο με:

$$n_{s_concrete} = 0,6$$

Οι παραπάνω τιμές είναι αυτές που θα καθορίσουν και την τιμή της δύναμης F_{pb} .

Σύμφωνα με την μοντελοποίηση της εργασίας θα γίνει ανάλυση των δυνάμεων που αναπτύσσονται πάνω στο προς οπισθέλκηση μηχάνημα σύμφωνα με το σύστημα αξόνων που ορίζουμε. Το σύστημα αυτό έχει κέντρο του το κέντρο μάζας του μηχανήματος και άξονα των x την διεύθυνση κίνησης του σώματος αυτού, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9.

Στον άξονα διεύθυνσης x:

$$\sum F_x = m_{eq} * a_x = 0 \Rightarrow F_{pb} - F_{fr} = 0 \quad (1)$$

$$F_{pb} = F_{fr} \quad (2) \text{ και } F_{fr} = n_s * N \quad (3)$$

Από τις εξισώσεις (1), (2) & (3) προκύπτει η σχέση:

$$F_{pb} = F_{fr} = n_s * N \quad (4)$$

Στον άξονα διεύθυνσης y:

$$\sum F_y = m_{eq} * a_y = 0 \Rightarrow N - B = 0 \Rightarrow$$

$$N = B \Rightarrow \frac{F_{fr}}{n_k} = B \Rightarrow$$

$$F_{fr} = n_s * B \quad (5) \text{ και } B = m_{eq} * g \quad (6)$$

Από τις εξισώσεις (4),(5) και (6) προκύπτει:

$$F_{pb} = n_s * (m_{eq} * g) \Rightarrow (7)$$

όπου n_s η τιμή του συντελεστή στατικής τριβής n_s του οδοστρώματος την οριακή χρονική στιγμή πριν η ζητούμενη δύναμη F_{pb} κινήσει το μηχανήμα βάρους m_{eq} . Για τις γνωστές τιμές του συντελεστή τριβής οδοστρώματος προκύπτει:

Σε οδόστρωμα στεγνής ασφάλτου με συντελεστή στατικής τριβής $n_{s_asphalt} = 0,9$, η τιμή της οπισθέλκουσας δύναμης ίση με :

$$F_{pb_asphalt} = 20.430 \text{ Nt} .$$

Σε οδόστρωμα στεγνού τσιμέντου με συντελεστή στατικής τριβής $n_{s_concrete} = 0,6$, η τιμή της οπισθέλκουσας δύναμης ίση με:

$$F_{pb_concrete} = 13.620 \text{ Nt} .$$

Στην παραπάνω μοντελοποίηση θεωρήθηκε η αντίσταση του αέρα αμελητέα.

3.5.2 Μέθοδος εύρεσης υλικού κατασκευής τμημάτων συστήματος διεύθυνσης

Ένα άλλο βασικό σημείο της σωστής διεξαγωγής της μελέτης είναι η εύρεση του υλικού κατασκευής των εξαρτημάτων του συστήματος διεύθυνσης. Ο κατασκευαστής δεν δίνει το υλικό κατασκευής των εξαρτημάτων αυτών στα τεχνικά του εγχειρίδια. Η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε για την εύρεση τους είναι ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος (Non Destructive Inspection) υλικών.

Μη καταστροφική επιθεώρηση (NDI) είναι η επιθεώρηση της δομής ή του συστατικού ενός υλικού ή μιας κατασκευής με τέτοιο τρόπο που δεν θα επηρεάσει στο μέλλον την χρησιμότητα του. Ο σκοπός του ελέγχου μπορεί να είναι για την ανίχνευση ελαττωμάτων, τη μέτρηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών, να καθορίζει το υλικό της διάρθρωσης ή της σύνθεσης, να ελέγχει τις φυσικές, ηλεκτρικές ή θερμικές ιδιότητες χωρίς να προκαλεί οποιοσδήποτε αλλαγές στο εξάρτημα. Οι βασικότεροι μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου που έχουν αναπτυχθεί είναι:

1. Η οπτική μέθοδος
2. Η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών
3. Η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων
4. Η μέθοδος των δινορευμάτων
5. **Η μέθοδος των υπερήχων**
6. Η ακτινογραφική μέθοδος.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε εδώ, στη μελέτη, ήταν η μέθοδος των υπερήχων. Ο όρος υπέρηχος αφορά τα ηχητικά κύματα που έχουν συχνότητα μεγαλύτερη από 20KHz. Για τους περισσότερους μη καταστροφικούς, με υπέρηχους, ελέγχους, ο υπέρηχος παράγεται από μια συσκευή που ονομάζεται μεταβιβαστής (transducer).

Στα μέσα της δεκαετίας του 1920 , με την ανάπτυξη και κατασκευή υποβρυχίων, δημιουργήθηκε η ανάγκη της υποβρυχίας επικοινωνίας. Η έρευνα για μια κατάλληλη μέθοδο επικοινωνίας οδήγησε στην εφεύρεση του σόναρ. Στα τέλη της δεκαετίας του 1930, σημαντικό έργο έγινε στην εφαρμογή υπερηχητικών κυμάτων για την μη καταστροφική επιθεώρηση υλικών. Οι πρώτες συσκευές χρήσης υπερήχων ήταν ως επί το πλείστον για την μεταλλουργική έρευνα. Από τότε, η μέθοδος των υπερήχων έχει αναπτυχθεί με την πρόοδο των αεροσκαφών, υλικών, και τεχνολογιών. Ο υπέρηχος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σχεδόν οποιοδήποτε υλικό για τον εντοπισμό ασυνέχειας από μεγάλες αποκολλήσεις, μέχρι τα μικρότερα ελαττώματα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του συνολικού πάχους ενός υλικού, και το συγκεκριμένο βάθος ενός ελαττώματος. Το υλικό απαιτεί ελάχιστη ή καμία προετοιμασία. Ωστόσο, η γνώση της εσωτερικής γεωμετρίας του είναι κρίσιμη για την ερμηνεία οποιουδήποτε σήματος ελαττώματος.

Η μετάδοση και του ακουστικού ήχου και του υπέρηχου χαρακτηρίζεται από περιοδικές δονήσεις των μορίων ή άλλων μικρών στοιχείων της ύλης. Η δόνηση μεταδίδεται μέσω ενός υλικού με ταχύτητα που αποτελεί και χαρακτηριστικό σε αυτό το υλικό. Καθώς ένα σωματίδιο μετατοπίζεται από τη θέση ηρεμίας από οποιαδήποτε εφαρμοζόμενη τάση, κινείται σε μια μέγιστη απόσταση από τη θέση ηρεμίας, αυτό ονομάζεται μέγιστη μετατόπιση. Το σωματίδιο στη συνέχεια αντιστρέφει την κατεύθυνση του και κινείται προς στη θέση ηρεμίας σε μια δεύτερη μέγιστη θέση με αρνητική κατεύθυνση, αυτή είναι μια δεύτερη μέγιστη μετατόπιση. Το σωματίδιο στη συνέχεια κινείται πίσω στην θέση ηρεμίας, όπου ολοκληρώνει έναν κύκλο. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να απομακρυνθεί η πηγή της δόνησης και η ενέργεια μεταβιβάζεται σε ένα παρακείμενο σωματίδιο. Τα πλάτη των δονήσεων σε υλικά και κατασκευές που ελέγχονται με υπέρηχους είναι αρκετά χαμηλά, έτσι ώστε, να μην υπάρξει μόνιμη επίδραση στο τμήμα. Το μήκος κύματος ορίζεται από τον τύπο:

$$\lambda (\lambda\acute{\alpha}\mu\delta\alpha) = V/f$$

Εξίσωση 3.3

όπου:

λ = μήκος κύματος (συνήθως ίντσες ή εκατοστά)

v = ταχύτητα (ίντσες ή εκατοστά ανά δευτερόλεπτο)

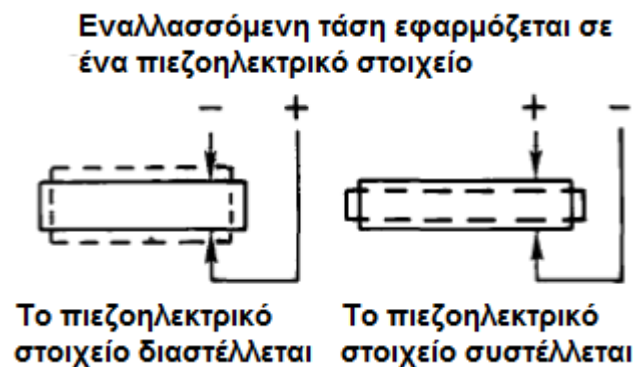
f = συχνότητα (hertz)

Ο όρος «ταχύτητα» νοείται η απόσταση που διανύεται ανά μονάδα χρόνου. Ο όρος «συχνότητα» νοείται ο αριθμός των πλήρων κύκλων που συμβαίνουν σε ένα δευτερόλεπτο. Ο

όρος "Hertz" νοούνται οι κύκλοι ανά δευτερόλεπτο. Ο όρος "μήκος κύματος" είναι η απόσταση ενός κύματος που ταξιδεύει κάνοντας έναν κύκλο.

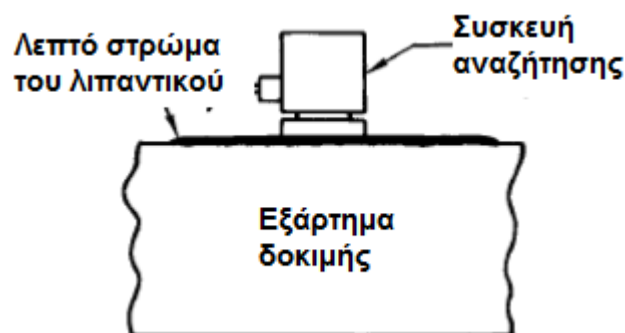
Οι υπερηχητικές δονήσεις δημιουργούνται από την εφαρμογή ηλεκτρικής ενέργειας στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μέσω της συσκευής του. Η παρεχόμενη ενέργεια θα είναι είτε μια ξαφνική υψηλής τάσης ακίδα (παλμός ακίδας) από έναν πυκνωτή εκκενώσεως, ή ένα σύντομος παλμός σταθερής τάσης που ονομάζεται τετραγωνικό κύμα.

Το στοιχείο του μετατροπέα μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια (δόνηση) σε μια συχνότητα που καθορίζεται από το υλικό και το πάχος του στοιχείου. Για υλικά αεροσκαφών, αυτή η συχνότητα είναι υπερηχητική. Η συσκευή είναι επίσης σε θέση να λαμβάνει υπερήχους, μηχανική ενέργεια και να την μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια (αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12: Δημιουργία υπερηχητικών δονήσεων

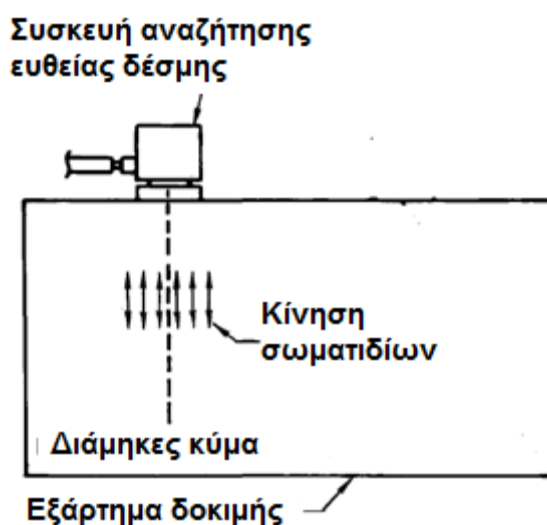
Η υπερηχητική ενέργεια μεταδίδεται μεταξύ του αισθητηρίου και του υλικού δοκιμής μέσω ενός μέσου (π.χ. λάδια, λίπη, ή νερό), σχήμα 3.13. Ο σκοπός του μέσου σύζευξης είναι να εξαλείψει τον αέρα στη διεπιφάνεια μεταξύ του μετατροπέα και του υπό επιθεώρηση υλικού, διότι ο αέρας έχει υψηλή ακουστική αντίσταση, και αποτελεί ένα φτωχό πομπό υπερήχων. Όπως τα ηχητικά κύματα, τα υπερηχητικά κύματα είναι ικανά να διαδίδονται μέσω οποιασδήποτε ελαστικού μέσου (στερεό, υγρό, αέριο), αλλά όχι στο κενό. Η διάδοση σε οποιοδήποτε αέριο είναι πολύ κακή.



Σχήμα 3.13: Μέσο σύζευξης συσκευής και υλικού δοκιμής μεταφοράς υπερήχων

Οι διαστάσεις του κάθε υλικού είναι γνωστές και η συσκευή του μεταβιβαστή παράγει παλμούς με γνωστές τιμές. Σύμφωνα με το σχήμα 3.14, η συσκευή παράγει και στέλνει διαμήκη κύματα στα εν λόγω υλικά, επηρεάζοντας την υπερηχητική ταχύτητα που διαπερνά τα υλικά αυτά. Μεταβάλλοντας την ταχύτητα των κυμάτων επιτυγχάνεται η επιθυμητή διάσταση. Χάρη αυτή τη συσκευή, βρέθηκαν οι ταχύτητες που αντιστοιχούν στη διάσταση του κάθε υλικού. Η ταχύτητα

που μετρήθηκε διαπερνά το σώμα και ανακλάται από το κάθε εξάρτημα και επιστρέφει στη συσκευή. Η διαδρομή που διένυσε ο υπέρηχος στο κάθε υλικό έχει μετρηθεί και είναι γνωστή η διάσταση της. Για κάθε διάσταση λοιπόν, που μετρήθηκε, για κάθε υλικό, αντιστοιχεί και μια υπερηχητική ταχύτητα. Η ταχύτητα αυτή αποτελεί και χαρακτηριστική ιδιότητα κάθε υλικού.



Σχήμα 3.14: Μέθοδος διάδοσης διαμήκη κύματος σε υλικό ελέγχου. .

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας στο εργαστήριο NDI οι τιμές των υπερηχητικών ταχυτήτων, όπως επίσης και το υλικό κατασκευής για κάθε ένα εξάρτημα του συστήματος ρυμούλκησης, έτσι όπως προέκυψαν από την υπερηχητική μέθοδο παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα 3.1:

α/α	Ονοματολογία εξαρτήματος	Υπερηχητική ταχύτητα (10 ⁵ inches/sec)	Υλικό κατασκευής
1	Μπάρα ρυμούλκησης	2.32	steel
2	Πείρος περιστροφής μπάρας ρυμούλκησης	2.31	steel
3	Κεντρικό συγκρότημα βραχίονα τιμονιού	2.31	steel
4	Πείρος περιστροφής συγκροτήματος βραχίονα	2.31	steel
5	Εμπρόσθιο συγκρότημα άξονα	2.32	steel

Πίνακας 3.1: Πίνακας υπερηχητικών ταχυτήτων και υλικού κατασκευής.

4. ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

4.1 Γενικά

Η ραγδαία εξέλιξη των τελευταίων ετών στη Μηχανολογία οφείλεται, χωρίς αμφιβολία, στην εισαγωγή των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε όλους τους επιμέρους τομείς της. Σε σχέση με τις κατασκευαστικές επιστήμες, η δυνατότητα “απεικόνισης” της γεωμετρίας μιας μηχανολογικής κατασκευής στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, καθώς και η δυνατότητα “προσομοίωσης” της στατικής, δυναμικής, θερμικής, ρευστοδυναμικής, κλπ. συμπεριφοράς της, αποτελούν επιτεύγματα των τελευταίων ετών και αλλάζουν σημαντικά τόσο την εκπαίδευση όσο και την επαγγελματική πράξη του μηχανολόγου μηχανικού.

Η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Design: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού.

Η ανάλυση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Engineering: CAE) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με την χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάλυση γεωμετρίας CAD, που επιτρέπει στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. Η κυρίαρχη μέθοδος CAE είναι αυτή των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method: FEM).

4.2 Ορισμός CAD

Η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Design: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού. Με τον όρο CAD εννοούμε τη δημιουργία γεωμετρικών απεικονίσεων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και μάλιστα τρισδιάστατης (3D) απεικόνισης κατασκευών ή δομών, όπου χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένες διαδικασίες προσέγγισης επιφανειών (μέσω των παρεμβολών Coons, Bezier και Nurbs) ή και όγκων. Έτσι, είναι πολύ ευκολότερη και ελέγξιμη η αλλαγή της γεωμετρίας ενός μηχανολογικού εξαρτήματος μέχρι ο μελετητής καταλήξει σε μία αποδεκτή κατασκευαστική λύση. Επιπλέον, όλα τα συστήματα CAD διαθέτουν κατάλληλα φίλτρα – interfaces (DXF, IGES, STEP) που δίνουν τη δυνατότητα μεταφοράς της γεωμετρικής πληροφορίας από το ένα σύστημα στο άλλο (εναλλαξιμότητα).

Τα εργαλεία CAD μπορούν να ποικίλουν μεταξύ γεωμετρικών εργαλείων διαχείρισης σχημάτων, μέχρι εξειδικευμένα προγράμματα εφαρμογών όπως ανάλυση και βελτιστοποίηση. Μεταξύ αυτών των δύο άκρων, τυπικά εργαλεία που είναι διαθέσιμα επί του παρόντος, περιλαμβάνουν ανάλυση ανοχών, υπολογισμούς ιδιοτήτων μάζας (κέντρα βάρους, ροπές αδρανείας, κλπ.), μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (FEM) και οπτικής απεικόνισης (visualization) των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, μεταξύ άλλων. Ο σημαντικότερος ρόλος του CAD είναι ο καθορισμός της γεωμετρίας του υπό σχεδιασμό προϊόντος που είναι ουσιώδης σε όλες τις επόμενες φάσεις του κύκλου. Στη συνέχεια, η εν λόγω γεωμετρία αξιοποιείται από το CAE.

4.3 Ορισμός CAE

Η ανάλυση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Engineering: CAE) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με την χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάλυση γεωμετρίας CAD, που επιτρέπει στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και να μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. Τα εργαλεία CAE διατίθενται σε ευρεία κλίμακα αναλύσεων. Κινηματικά

προγράμματα, για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση λειτουργίας μηχανών. Προγράμματα δυναμικής ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση σύνθετων συναρμολογημένων δομών όπως π.χ. οχήματα ή συσκευασίες σε πτώση επί του εδάφους.

Μεταξύ των πλέον διαδεδομένων μεθόδων ανάλυσης είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method: FEM) που επιτρέπει τη στατική και δυναμική ανάλυση τάσεων και μετατοπίσεων, θερμική ανάλυση, ρευστομηχανική και αεροδυναμική ανάλυση, ακουστική ανάλυση, κατανομή μαγνητικού πεδίου ή και άλλων πεδίων. Η εφαρμογή της FEM απαιτεί τη χρήση ενός απλουστευμένου αφαιρετικού μοντέλου που πρέπει να γεννηθεί είτε με αλληλεπίδραση του χρήστη ή και αυτόματα. Το λογισμικό που καθιστά δυνατή την κατασκευή του αφαιρετικού μοντέλου και τη γένεση των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί τους προ-επεξεργαστές (pre-processors). Μετά την εκτέλεση της ανάλυσης σε κάθε στοιχείο, ο H/Y συγκεντρώνει τα αποτελέσματα και τα εμφανίζει με ευανάγνωστο οπτικό τρόπο. Περιοχές υψηλών τάσεων μπορεί να παριστάνονται με κόκκινο χρώμα για παράδειγμα. Το λογισμικό τέτοιων απεικονίσεων αποτελεί τους λεγόμενους μετα-επεξεργαστές (post-processors).

Επίσης, είναι διαθέσιμα πολλά εργαλεία βελτιστοποίησης σχεδιασμού. Παρόλο που τα εργαλεία βελτιστοποίησης μπορούν να θεωρηθούν σαν εργαλεία CAE, συνήθως ταξινομούνται με ξεχωριστό τρόπο. Διάφορες ερευνητικές προσπάθειες εξελίσσονται προς την κατεύθυνση αυτόματου σχεδιασμού με ολοκλήρωση των διαδικασιών βελτιστοποίησης και ανάλυσης. Σε αυτές τις προσεγγίσεις, γίνεται η παραδοχή ενός απλού αρχικού σχήματος σχεδιασμού, όπως ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο για δισδιάστατο εξάρτημα που αποτελείται από μικρά στοιχεία διαφορετικών πυκνοτήτων. Κατόπιν, εκτελείται η διαδικασία βελτιστοποίησης προς υπολογισμό των βέλτιστων τιμών αυτών των πυκνοτήτων που αποβλέπει στην επίτευξη ενός στόχου με παράλληλη ικανοποίηση των συνθηκών τάσεων ή/και μετατοπίσεων. Συνήθως ο στόχος είναι η επίτευξη του ελάχιστου βάρους. Με βάση τις βέλτιστες τιμές πυκνοτήτων, το βέλτιστο σχήμα του σχεδιασμού λαμβάνεται με απαλοιφή των στοιχείων χαμηλής πυκνότητας.

Η γοητεία των μεθόδων ανάλυσης και βελτιστοποίησης είναι ότι επιτρέπουν στον μηχανικό να δει τον τρόπο με τον οποίο το προϊόν θα συμπεριφερθεί και του επιτρέπει να επισημάνει τα όποια λάθη έχουν γίνει μέχρι τη στιγμή εκείνη, προτού προχωρήσει σε χρονοβόρες και δαπανηρές διαδικασίες κατασκευής και ελέγχου φυσικών πρωτοτύπων. Επειδή το κόστος μελέτης μεταβάλλεται εκθετικά στα τελευταία στάδια ανάπτυξης και παραγωγής του προϊόντος, η πρώιμη βελτιστοποίηση και εξευγενισμός που επιτυγχάνεται από την ανάλυση CAE τελικά αποπληρώνεται με μείωση χρόνου και κόστους.

4.4 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική τεχνική ανάλυσης που χρησιμοποιείται από τους μηχανικούς, επιστήμονες και μαθηματικούς για να αποκτήσουν λύσεις στις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν, ή κατά προσέγγιση περιγράφουν, μια ευρεία ποικιλία φυσικών (και μη φυσικών) προβλημάτων. Έτσι δίνουν τη δυνατότητα εκτίμησης ή και υπολογισμού μεγεθών χωρίς την ενδεχόμενη ανάγκη δαπανηρού πειράματος ή καταστροφικού ελέγχου. Τα φυσικά προβλήματα ποικίλουν και εκτείνονται σε τομείς όπως η μηχανική στερεών, υγρών, τον ηλεκτρομαγνητισμό ή την δυναμική. Η Μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την τεχνική προσομοίωσης σε υπολογιστή για την ανάλυση της μηχανικής του υπό εξέταση προβλήματος.

Η υπόθεση της μεθόδου προβλέπει ότι ένας πολύπλοκος τομέας μπορεί να διαιρείται σε μια σειρά μικρότερων περιοχών στις οποίες οι διαφορικές εξισώσεις, από τις οποίες περιγράφονται οι παραπάνω περιοχές, μπορούν να δώσουν μια προσεγγιστική λύση. Με τη συναρμολόγηση του συνόλου των εξισώσεων για κάθε περιοχή, μπορεί να οριστεί η συμπεριφορά σε όλη την

έκταση του υπό μελέτη τομέα. Καθεμιά από τις παραπάνω περιοχές ορίζεται ως ένα στοιχείο και η διαδικασία υποδιαίρεσης ενός τομέα σε έναν πεπερασμένο αριθμό στοιχείων χαρακτηρίζεται ως διακριτοποίηση . Τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα σε συγκεκριμένα σημεία , που ονομάζονται κόμβοι , και η διαδικασία συναρμολόγησης απαιτεί η λύση να είναι συνεχής κατά μήκος των κοινών ορίων των γειτονικών στοιχείων.

Η πλειοψηφία των προγραμμάτων που στηρίζουν την λειτουργία τους στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων συνδυάζει όλα τα επιμέρους πεπερασμένα στοιχεία σε ένα πλέγμα και στη συνέχεια μετατρέπει, το υπό μελέτη πρόβλημα, σε μια σειρά συνεχών διαφορικών εξισώσεων, σε ένα μεγάλο σύνολο ταυτόχρονων γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων . Το σύστημα αυτό θα έχει αρκετές χιλιάδες εξισώσεις, και η λύση των αλγεβρικών γραμμικών εξισώσεων είναι μια προσέγγιση του συνόλου των διαφορικών εξισώσεων, που αντιπροσωπεύει το πλέγμα. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να θέσει υπό αμφισβήτηση την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Θεωρητικά όμως, ένα πλέγμα με άπειρο αριθμό στοιχείων, μπορεί να δημιουργήσει την καλύτερη προσέγγιση ενός πολύπλοκου προβλήματος. Αυτό και μόνο το γεγονός, αποτελεί και το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου.

Η χρήση προγραμμάτων αριθμητικής προσομοίωσης, με ιδιαίτερη αναφορά στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που αφορά την αναπαράσταση μιας περιοχής ως ένα σύνολο διακριτών υποπεριοχών, είναι πλέον ευρύτατα διαδεδομένη, λόγω και της συνεχούς εξέλιξης των δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών τις τελευταίες δεκαετίες και αποτελεί τη συνήθη πρακτική για την ανάλυση κατασκευών υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης.

4.5 Στάδια Ανάπτυξης ενός μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων

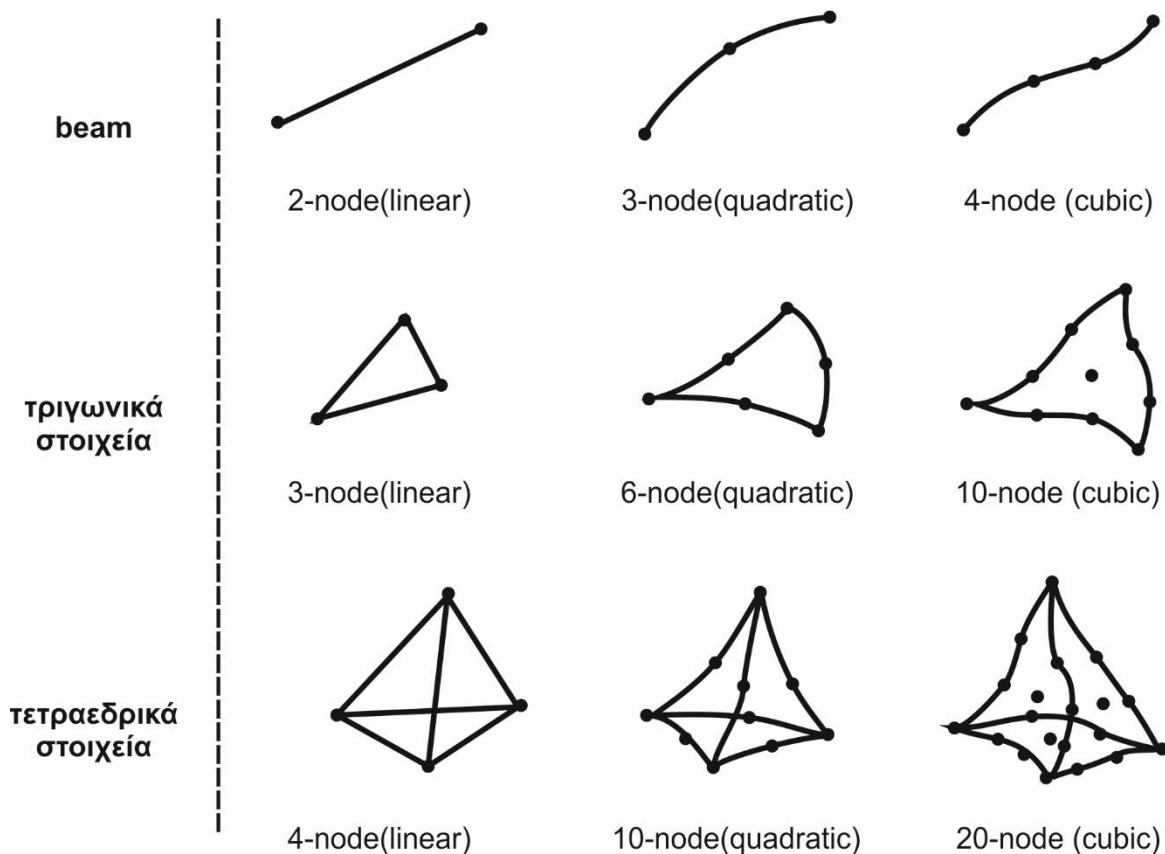
Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος η οποία με την βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή, μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και το βασικό της πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να βρεί εφαρμογή σε όλα τα προβλήματα κατεργασιών.

Το 1944 ο Merchant πρότεινε το πρώτο αναλυτικό μοντέλο που έθεσε τα πλαίσια για τη μοντελοποίηση της ορθογωνικής κοπής. Με την εφεύρεση των ηλεκτρονικών υπολογιστών και τη ραγδαία ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος, οι τεχνικές με πεπερασμένα στοιχεία (**FEM-Fine Element Modeling**) άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως από τους ερευνητές για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας κατεργασιών.

Η μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ξεκινά με τη διακριτοποίηση των συνεχών μέσων της κατεργασίας. Ο χώρος που αυτά καταλαμβάνουν χωρίζεται σε τετράγωνα, τρίγωνα ή πολύγωνα και ενώνονται αυτά τα πεπερασμένα στοιχεία με κόμβους. Το πλέγμα που δημιουργείται δεν είναι πάντα ομοιόμορφο. Ειδικά σήμερα μπορούν να κατασκευαστούν πλέγματα πυκνότερα σε περιοχές του χώρου μοντελοποίησης που μας ενδιαφέρουν περισσότερο και αραιότερα σε περιοχές μικρότερου ενδιαφέροντος, με χρήση ειδικών αλγορίθμων. Ακολουθεί το σχήμα 4.1 με τους βασικούς τύπους τυπικών πεπερασμένων στοιχείων.

Ο προ-επεξεργαστής ξεκινάει από τη γεωμετρία του αντικειμένου ή του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Παραδοσιακά συστήματα FINITE ELEMENT ANALYSIS (FEA) είχαν μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες μοντελοποίησης, αλλά σήμερα τα περισσότερα είτε προσφέρουν προηγμένες δυνατότητες, ή έχουν στενούς δεσμούς με συστήματα CAD (μερικές φορές και τα δύο). Συστήματα που στηρίζονται σε γεωμετρική μοντελοποίηση CAD, είτε εργάζονται απευθείας με το μοντέλο CAD, είτε μεταφράζουν και εισάγουν τη γεωμετρία. Η απευθείας

σύνδεση με CAD κερδίζει όλο και μεγαλύτερο έδαφος, διότι εξαλείφει τα βήματα μετάφρασης, την απώλεια δεδομένων και μικραίνει τον κύκλο σχεδιασμού-ανάλυσης-αλλαγής. Περαιτέρω, η χρήση συστήματος CAD διευκολύνει τη μοντελοποίηση και παρέχει πιο ισχυρές λειτουργίες δημιουργίας και αλλαγής σύνθετης γεωμετρίας. Πράγματι, σήμερα τα περισσότερα υβριδικά συστήματα μοντελοποίησης μπορούν να κτίσουν οποιαδήποτε γεωμετρία απαιτείται για την ανάλυση.



Σχήμα 4.1: Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (α) μονοδιάστατα, (β) δισδιάστατα και (γ) τρισδιάστατα προβλήματα

Το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία του κατάλληλου πλέγματος και η κατανομή κόμβων. Όταν σε κάθε πλέγμα αποδίδονται κόμβοι, τότε αυτό μετατρέπεται σε πεπερασμένο στοιχείο. Η γένεση πλέγματος είναι το πλέον σημαντικό και δύσκολο στάδιο της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διευκόλυνση αυτού του σταδίου, σήμερα όλα τα συστήματα προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η τυπική προσέγγιση είναι να προσφέρουν αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία για επιφάνεια του τρισδιάστατου χώρου (κελύφη, επίπεδη εντατική ή επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση).

Πολλά συστήματα επιτρέπουν στους χρήστες να επέμβουν στις παραμέτρους αυτόματης γένεσης πλέγματος όπως την πυκνότητα πλέγματος. Τα διάφορα στοιχεία που υποστηρίζονται από ένα σύστημα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν τη λεγόμενη βιβλιοθήκη στοιχείων (element library). Όσο πιο μεγάλο το είδος των στοιχείων τόσο περισσότερα είδη προβλημάτων μπορούν να επιλυθούν.

Αφού επιλεγεί η διάταξη των στοιχείων, καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης. Επίσης, οι άγνωστοι, ή αλλιώς οι βαθμοί ελευθερίας, συσχετίζονται με τους κόμβους. Οι άγνωστοι περιέχουν μετατοπίσεις, περιστροφές, θερμοκρασία, ροή θερμότητας, κ.ο.κ. Κατόπιν,

καθορίζονται οι οριακές συνθήκες οι οποίες πρέπει να εκφρασθούν σαν ένα σύνολο τιμών μετατοπίσεων, δυνάμεων, ή θερμοκρασιών σε συγκεκριμένους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, μερικές φορές τα πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να δημιουργηθούν χωρίς να έχουν οριακές συνθήκες. Εάν πρόκειται να εισαχθούν σημειακά φορτία, πρέπει να δημιουργηθούν κόμβοι στα αντίστοιχα σημεία εφαρμογής τους. Τα περισσότερα συστήματα που είναι συνδεδεμένα με CAD επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει τις οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, και σε αυτή την περίπτωση οι οριακές συνθήκες μετατρέπονται σε ισοδύναμες οριακές συνθήκες στους κόμβους του πλέγματος από το ίδιο το σύστημα. Οι περισσότεροι μοντελοποιητές πεπερασμένων στοιχείων επίσης παρέχουν έναν αριθμό τρόπων εύκολου καθορισμού των φορτίσεων και των οριακών συνθηκών για το χειρισμό ευρείας κλίμακας προβλημάτων και ρεαλιστικών συνθηκών.

Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει επίσης να αποδοθούν ιδιότητες υλικού. Αυτές οι ιδιότητες περιλαμβάνουν για ελαστικές κατασκευές το μέτρο ελαστικότητας Young (E) και το λόγο Poisson (ν). Το πάχος στοιχείων κελύφους και πλακών διαχειρίζεται περισσότερο σαν ιδιότητα του υλικού παρά σαν γεωμετρική ιδιότητα για την αποφυγή επίλυσης του προβλήματος στις τρεις διαστάσεις. Από τη στιγμή που ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα στάδιο που παραδοσιακά ονομάζεται μετα-επεξεργαστής (Post-Processor). Τα περισσότερα πακέτα προσφέρουν ποικίλους τρόπους κατηγοριοποίησης, εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, τα οποία τυπικά περιλαμβάνουν τάσεις, παραμορφώσεις, και παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής. Ο παραδοσιακός τρόπος είναι υπό μορφή ζωνών ισοτασικών επιφανειών, κυρίως με χρήση χρωματικής κλίμακας.

5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

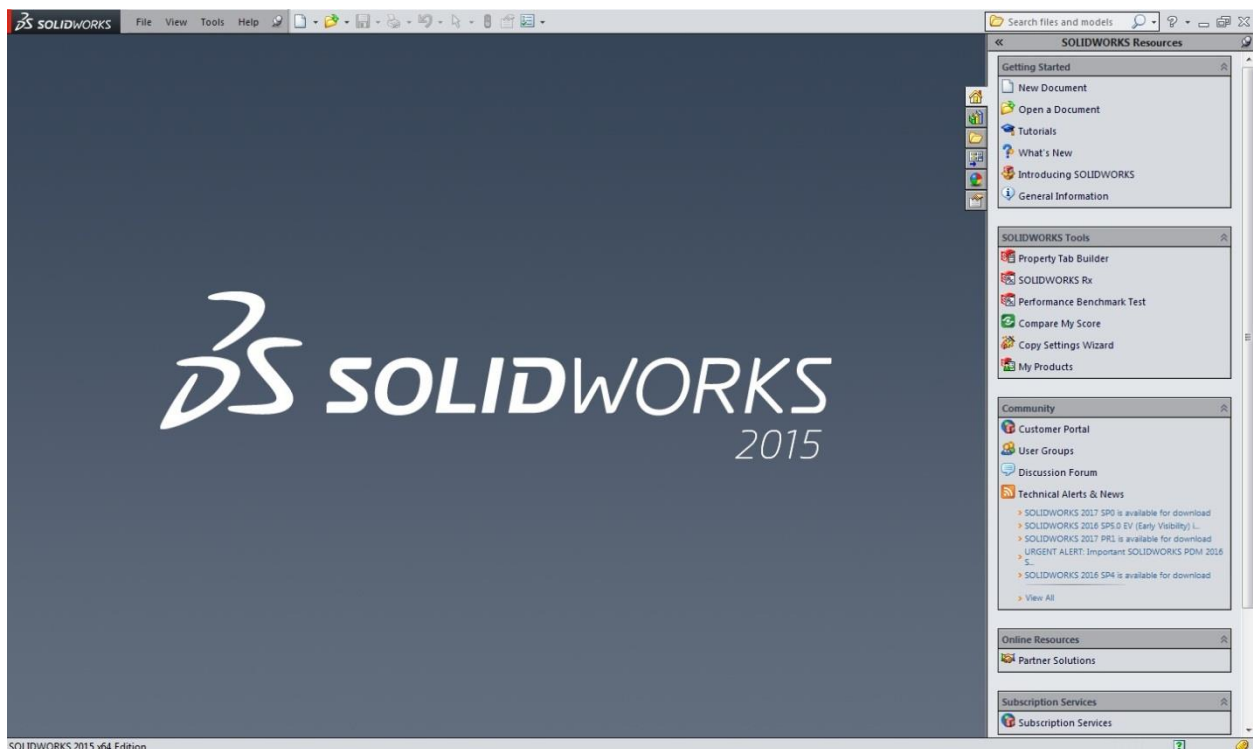
5.1 Εισαγωγή

Το πακέτο σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή εδώ την εργασία αποτελεί ένα από τα πολλά 3D μηχανολογικά CAD (Computer Aided Design) προγράμματα, που κυκλοφορούν στην αγορά και βοηθούν οποιοδήποτε χρήστη στην δημιουργία τρισδιάστατης παραμετρικής μοντελοποίησης χρησιμοποιώντας Features (χαρακτηριστικά) καθώς και στην συναρμολόγηση των προϊόντων που έχουν ήδη σχεδιαστεί (Assembly).


5.2 Επισκόπηση και περιβάλλον εργασίας πακέτου σχεδιασμού

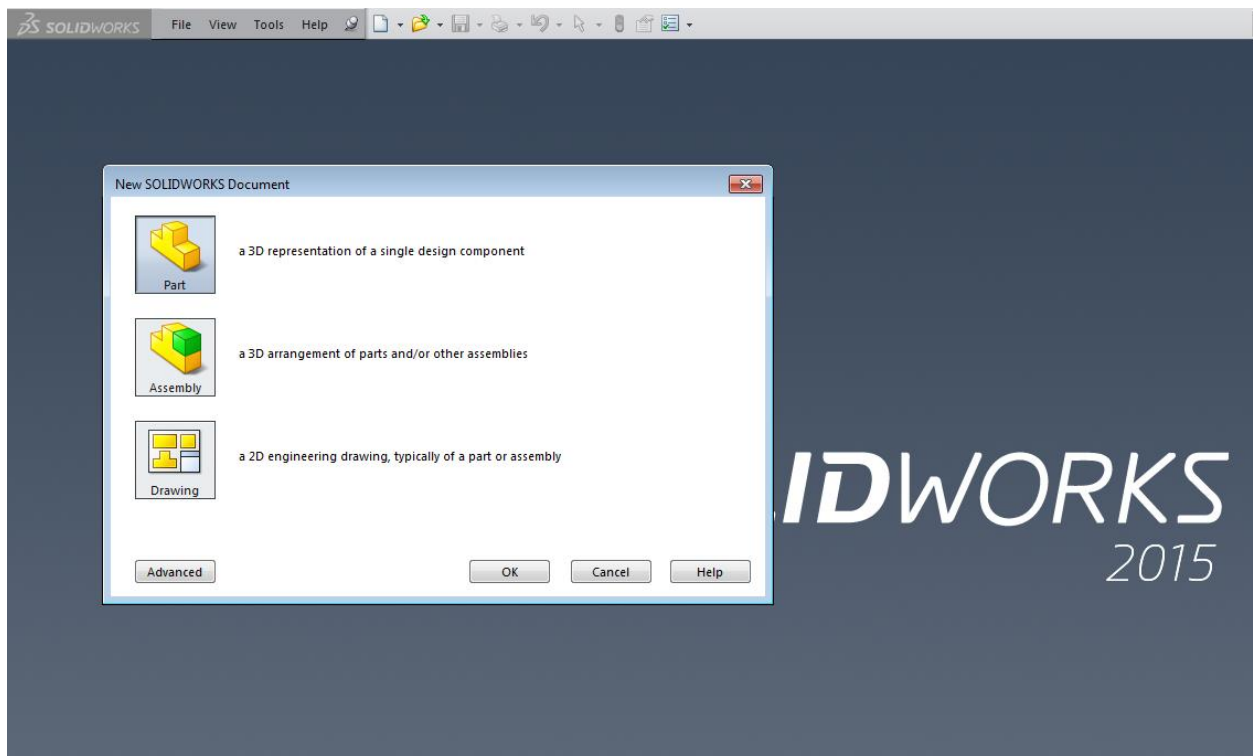
Στο τμήμα αυτό του κεφαλαίου επισημαίνονται κάποιες βασικές αρχές του προγράμματος ώστε ο χρήστης να είναι σε θέση να σχεδιάζει τρισδιάστατα αντικείμενα. Όπως προαναφέρθηκε, το πρόγραμμα αυτό αποτελεί το μηχανικό πακέτο λογισμικού αυτοματοποίησης σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα μελέτη για την κατασκευή των εξαρτημάτων αλλά και την δημιουργία της συνδεσμολογίας τους σε περιβάλλον Microsoft® Windows. Μερικές από τις βασικές αρχές σχεδίασης αναλύονται παρακάτω.

Όταν ο χρήστης ανοίγει το πρόγραμμα αντικρίζει την εικόνα που φαίνεται στο σχήμα 5.1. Στο πάνω μέρος της εικόνας είναι το βασικό μενού εργασιών που μπορούν να πραγματοποιηθούν στο πρόγραμμα και τα βασικότερα κουμπιά που χρησιμοποιεί ο χρήστης.



Σχήμα 5.1: Βασική οθόνη προγράμματος πακέτου σχεδιασμού

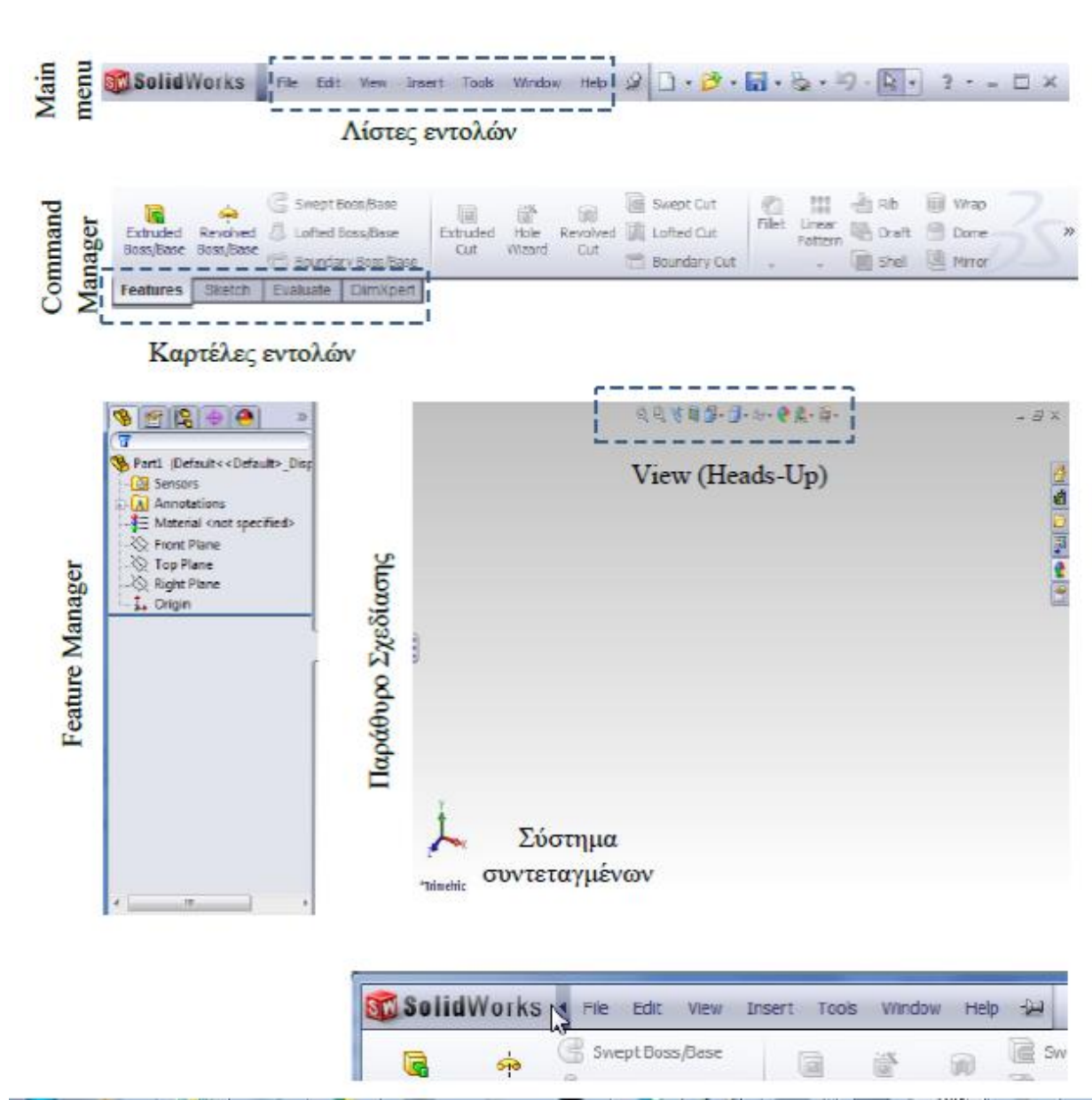
Το άνοιγμα ενός νέου αρχείου γίνεται με το κουμπί New  και στην οθόνη του χρήστη εμφανίζεται το παράθυρο New Document δίνοντας μας τρεις επιλογές όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Παράθυρο επιλογής αρχείου

Το πακέτου σχεδιασμού μπορεί να δημιουργήσει τρία διαφορετικά αρχεία και επομένως τρεις διαφορετικές μορφές σχεδίων: Τρισδιάστατα αντικείμενα (3D Part), τρισδιάστατα συναρμολογήματα από εξαρτήματα που ήδη έχουμε σχεδιάσει (Assembly) και μηχανολογικά σχέδια αντικειμένων ή συνδεσμολογιών. Στη συγκεκριμένη φάση επιλεγούμε το άνοιγμα ενός νέου σχεδίου για την δημιουργία ενός μεμονωμένου εξαρτήματος. Στην οθόνη ανοίγει ένα νέο αρχείο σχεδίου.

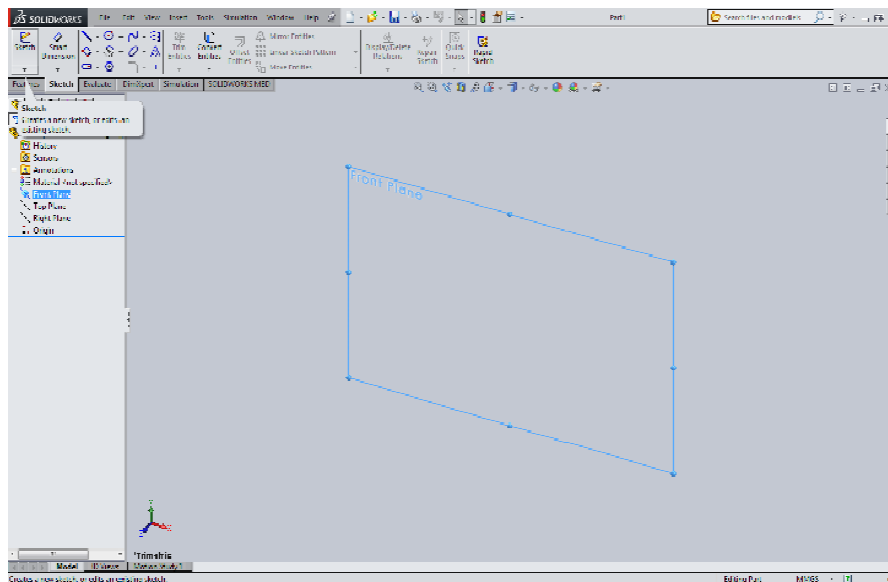
Στο σχήμα 5.3 που ακολουθεί επεξηγούνται όλες οι βασικές περιοχές που εμφανίζονται στην οθόνη. Στο πάνω μέρος της οθόνης βρίσκεται το κυρίως μενού (Main menu) και περιλαμβάνει τις λίστες εντολών File, Edit, View, Insert, Tools, Windows και Help. Κάτω από την περιοχή του Main Menu υπάρχει η περιοχή του Command Manager που αποτελείται από τις καρτέλες εντολών Features, Sketch, Evaluate και Dim Expert. Καθεμιά από τις καρτέλες αυτές περιέχει διαφορετικές εντολές για διαφορετικές εργασίες που επιθυμεί ο χρήστης να χρησιμοποιήσει. Στο ίδιο σχήμα φαίνονται οι εντολές της καρτέλας Features. Η περιοχή Feature Manager βρίσκεται στο αριστερό μέρος της οθόνης και εκεί καταγράφεται όλη η ιστορική εξέλιξη του αντικειμένου κατά την σχεδίαση. Η περιοχή σχεδίασης των αντικειμένων βρίσκεται στο μέσο της οθόνης, κάτω αριστερά εμφανίζεται το μενού View (Heads –Up) που βοηθούν στη σχεδίαση ενώ κάτω αριστερά βρίσκεται το σύστημα συντεταγμένων.



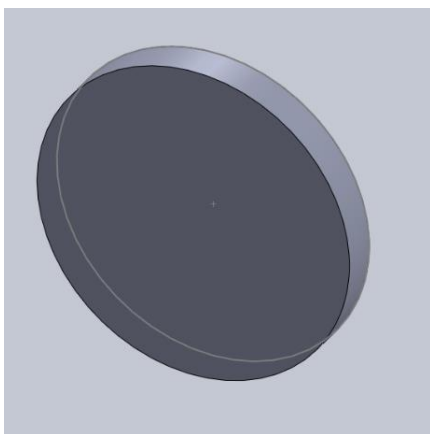
Σχήμα 5.3: Βασικές περιοχές αρχείου σχεδίασης

Για να ξεκινήσει ο χρήστης την σχεδίαση, αρχικά ενός δισδιάστατου αντικειμένου θα πρέπει να επιλέξει από το Command Manager, την καρτέλα Sketch στο σχήμα 5.4.

Στο Feature Manager μπορεί να επιλέξει ένα από τα τρία βασικά επίπεδα στο οποίο θα ξεκινήσει να σχεδιάζει (Front, Top και Right Plane). Όλες οι δυνατότητες σχεδίασης της καρτέλας Sketch δυσδιάστατων αντικειμένων έχουν εμφανιστεί στο Command Manager. Υπάρχει πλήθος σχεδιαστικών εργαλείων που δίνουν μεγάλη ελευθερία επιλογών στο χρήστη να χρησιμοποιήσει για την σχεδίαση του.



Σχήμα 5.4: Επιλογή επίπεδου σχεδίασης



Η δημιουργία στερεών, τρισδιάστατων αντικειμένων γίνεται με την επιλογή της καρτέλας Features στο Command Manager. Οι εντολές της καρτέλας χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή δισδιάστατων σχεδίων (Sketches) σε τρισδιάστατα αντικείμενα. Πολλές από τις εντολές της καρτέλας Sketch και της καρτέλας Features χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή. Στο [σχήμα 5.5](#) φαίνεται η σχεδίαση ενός παραδείγματος τρισδιάστατου κυλίνδρου με την βοήθεια των παραπάνω καρτελών. Στη συγκεκριμένη εικόνα διακρίνονται στο Command Manager όλα τα εργαλεία σχεδίασης που περιλαμβάνονται στη καρτέλα Features.

Σχήμα 5.5: Σχεδίαση παραδείγματος τρισδιάστατου κυλίνδρου

5.3. Σχεδιασμός συστήματος διεύθυνσης ρυμουλκούμενης συσκευής με μπάρα ρυμούλκησης

Στη παρούσα εργασία θα σχεδιαστούν πέντε διαφορετικά αρχεία τρισδιάστατων αντικειμένων (Parts) και ενός αρχείου όπου θα δημιουργηθεί η συναρμολογούμενη διάταξη (Assembly) του συστήματος διεύθυνσης. Η σχεδίαση των αντικειμένων έγινε με βάση τις πραγματικές διαστάσεις τους. Για το λόγο αυτό το σύστημα διεύθυνσης αποσυναρμολογήθηκε για να μετρηθούν τα επιμέρους κομμάτια που το απαρτίζουν. Οι μετρήσεις έγιναν με την χρήση μετροταινίας και μικρομέτρου. Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξης +0.02mm και -0.02 mm διότι δεν υπάρχουν ακριβείς διαστάσεις καταγεγραμμένες, αλλά ούτε μηχανολογικό σχέδιο για τα αντικείμενα αυτά. Για τον σχεδιασμό της συναρμολογημένης διάταξης (Assembly) δημιουργήθηκαν τα εξής αρχεία (Parts):

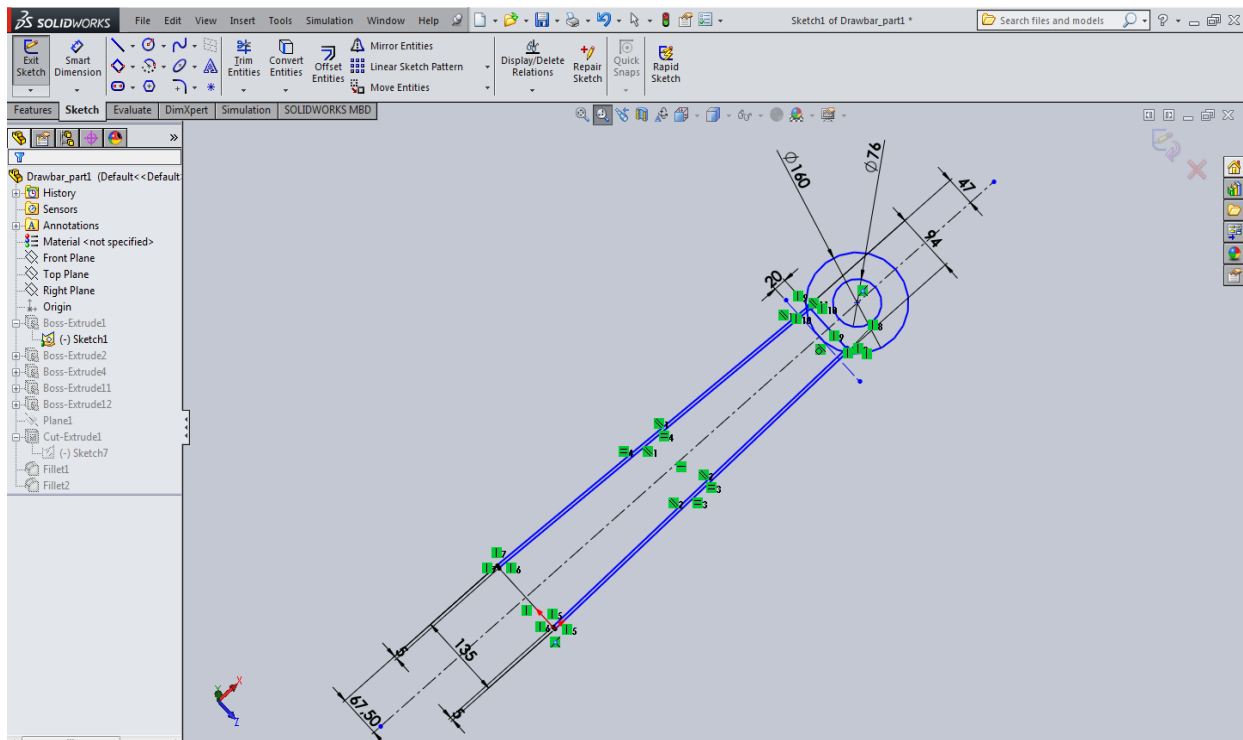
1. Η μπάρα ρυμούλκησης (drawbar_part1.sldprt)
2. Ο πείρος περιστροφής μπάρας ρυμούλκησης (pin Hinge_part2. sldprt)
3. Το κεντρικό συγκρότημα βραχίονα τιμονιού (arm center steering_part3.sldprt)

4. Ο πείρος περιστροφής συγκροτήματος βραχίονα (pin Cotter_part4.sldprt)
5. Το εμπρόσθιο συγκρότημα άξονα (beam assembly front_part5. sldprt)

Η δημιουργία καθενός από τα παραπάνω αρχεία αναλύεται παρακάτω στις κύριες φάσεις σχεδίασης τους και επισημαίνονται τυχόν προβλήματα που προέκυψαν.

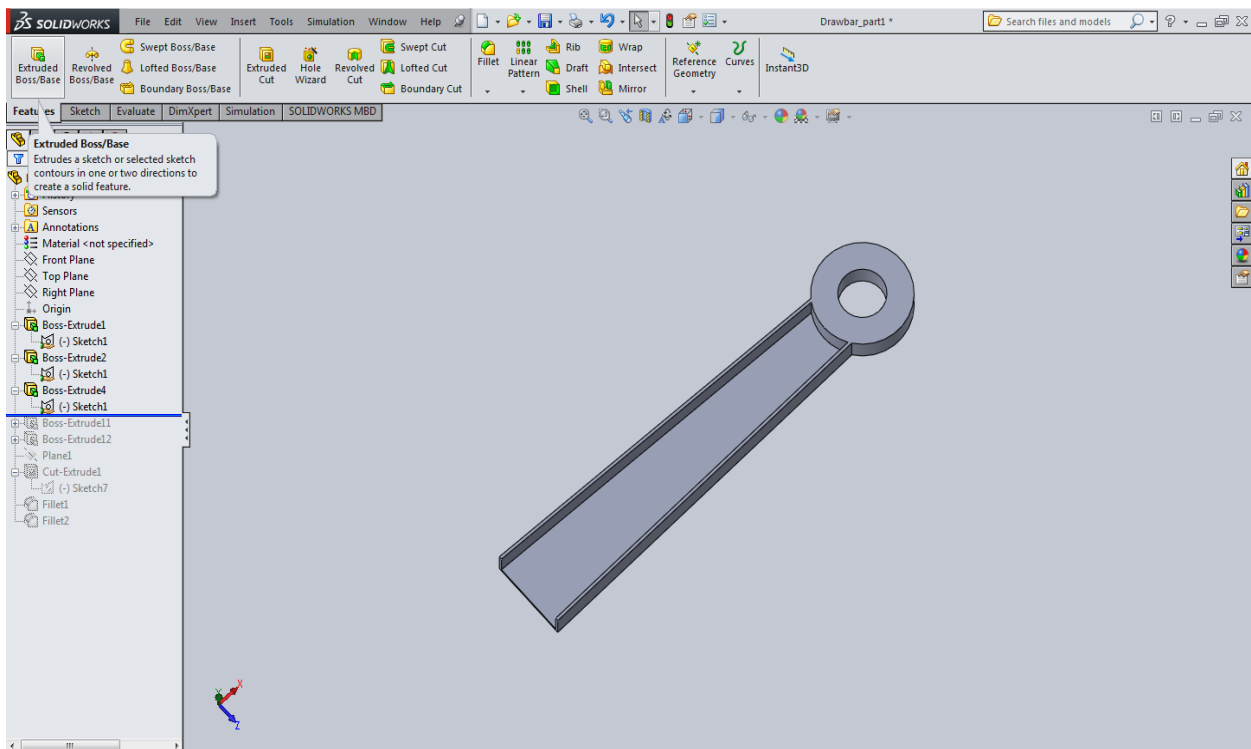
5.3.1 Η μπάρα ρυμούλκησης

Διαθέτοντας τις διαστάσεις της αντικειμένου, κατασκευάστηκε, ως πρώτο βήμα στη σχεδίαση, ένα αρχικό μονοδιάστατο σχέδιο με τη βοήθεια των εργαλείων της καρτέλας Sketch του Command Manager όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.6.



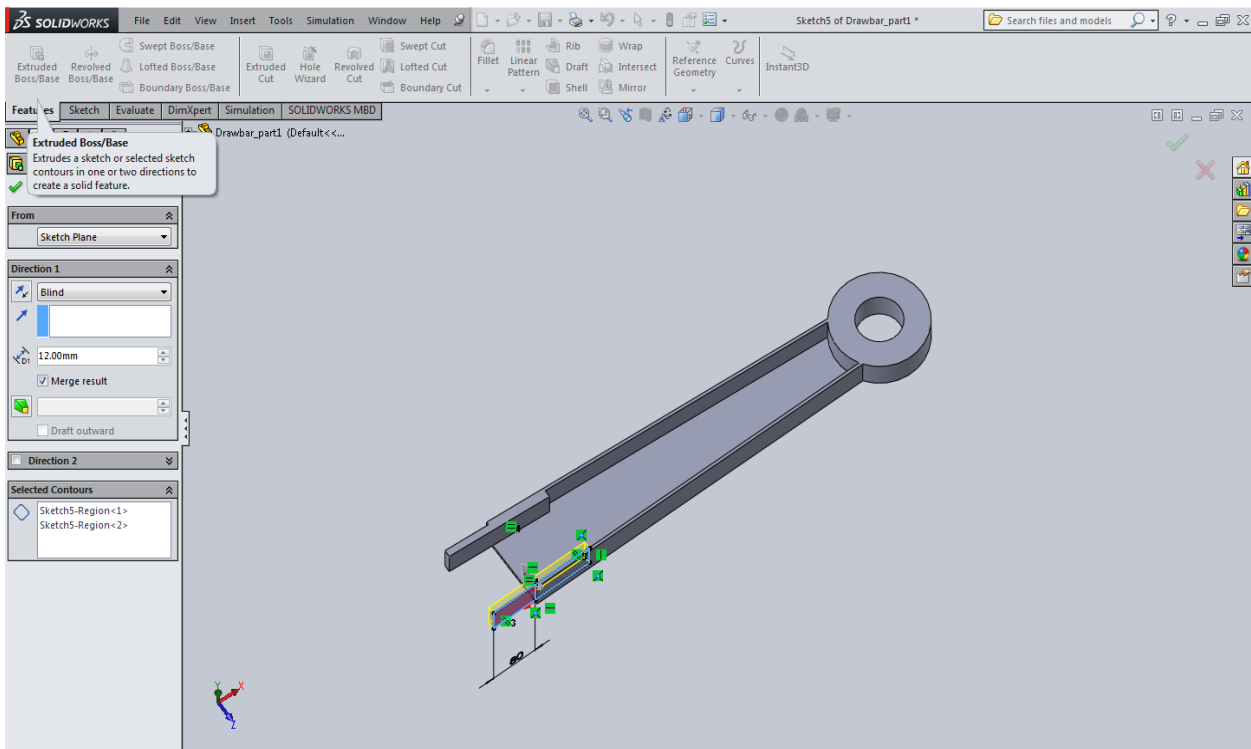
Σχήμα 5.6: Αρχικό μονοδιάστατο σχέδιο μπάρας ρυμούλκησης

Στη συνέχεια με τη χρήση των εντολών «Extruded Boss Base» της καρτέλας Features προκύπτει η ενδιάμεση μορφή του αντικειμένου και παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7.

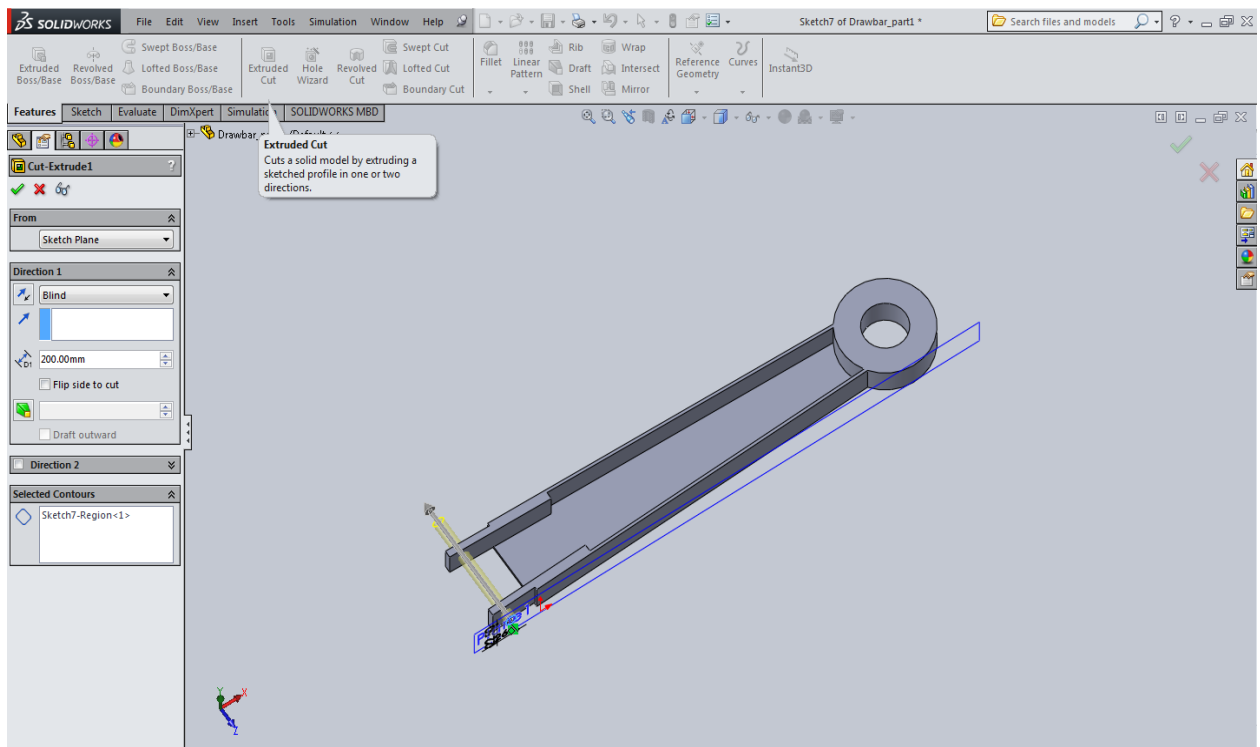


Σχήμα 5.7: Ενδιάμεσο στάδιο σχεδίασης

Στο τρίτο βήμα της σχεδίασης έγιναν οι απαραίτητες προσθήκες, τα συγκολλημένα πλακακια στο σχεδίο 5.8 και οι οπές των πλακακιών στο σχεδίο 5.9 με την χρήση της εντολής «Extruded Cut» της καρτέλας Features.

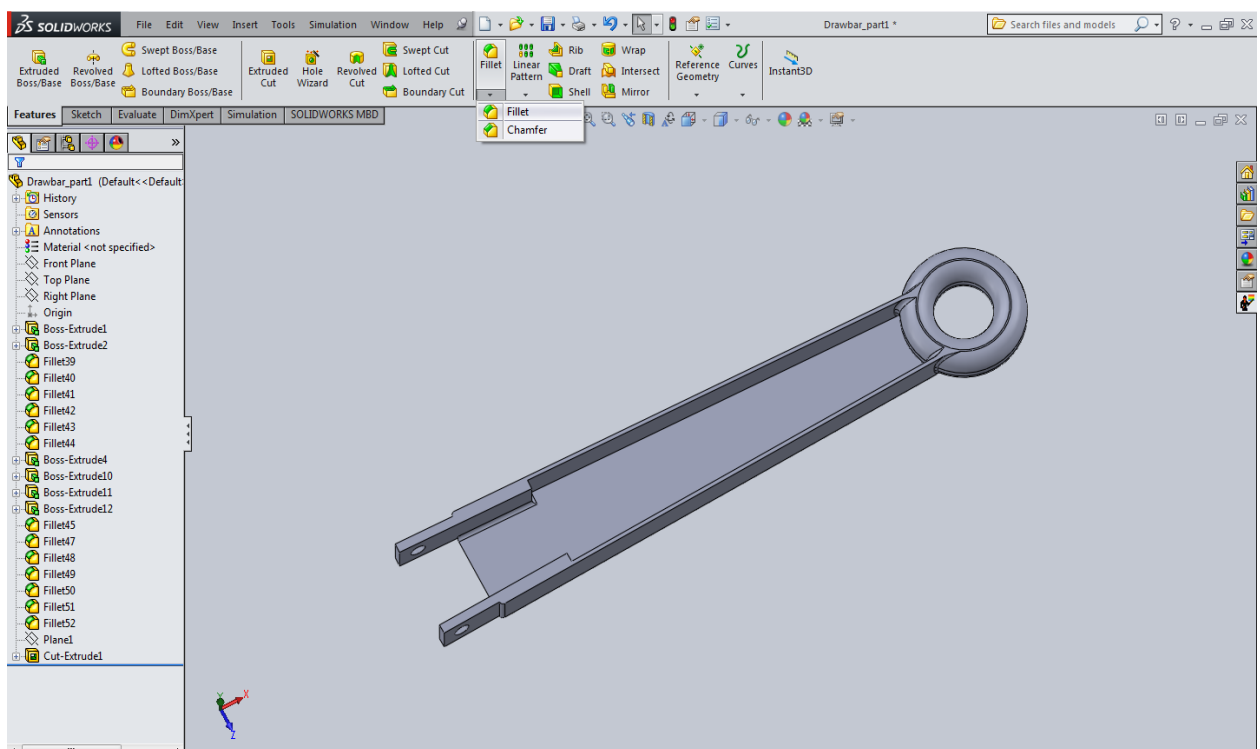


Σχεδίο 5.8: Σχεδίαση συγκολλημενων πλακακιων



Σχεδίο 5.9: Σχεδίαση οπών επι των πλακακιών

Στο τελευταίο στάδιο της σχεδίασης του αντικειμένου χρησιμοποιήθηκε πολλαπλές φορές, η εντολή «Fillet» από την καρτέλα του Features, προσδιορίζοντας την πραγματική μορφή της μπάρας ρυμούλκησης. Η ολοκλήρωση της τελικής τρισδιάστατης μορφής του αντικειμένου φαίνεται στο σχήμα 5.10.

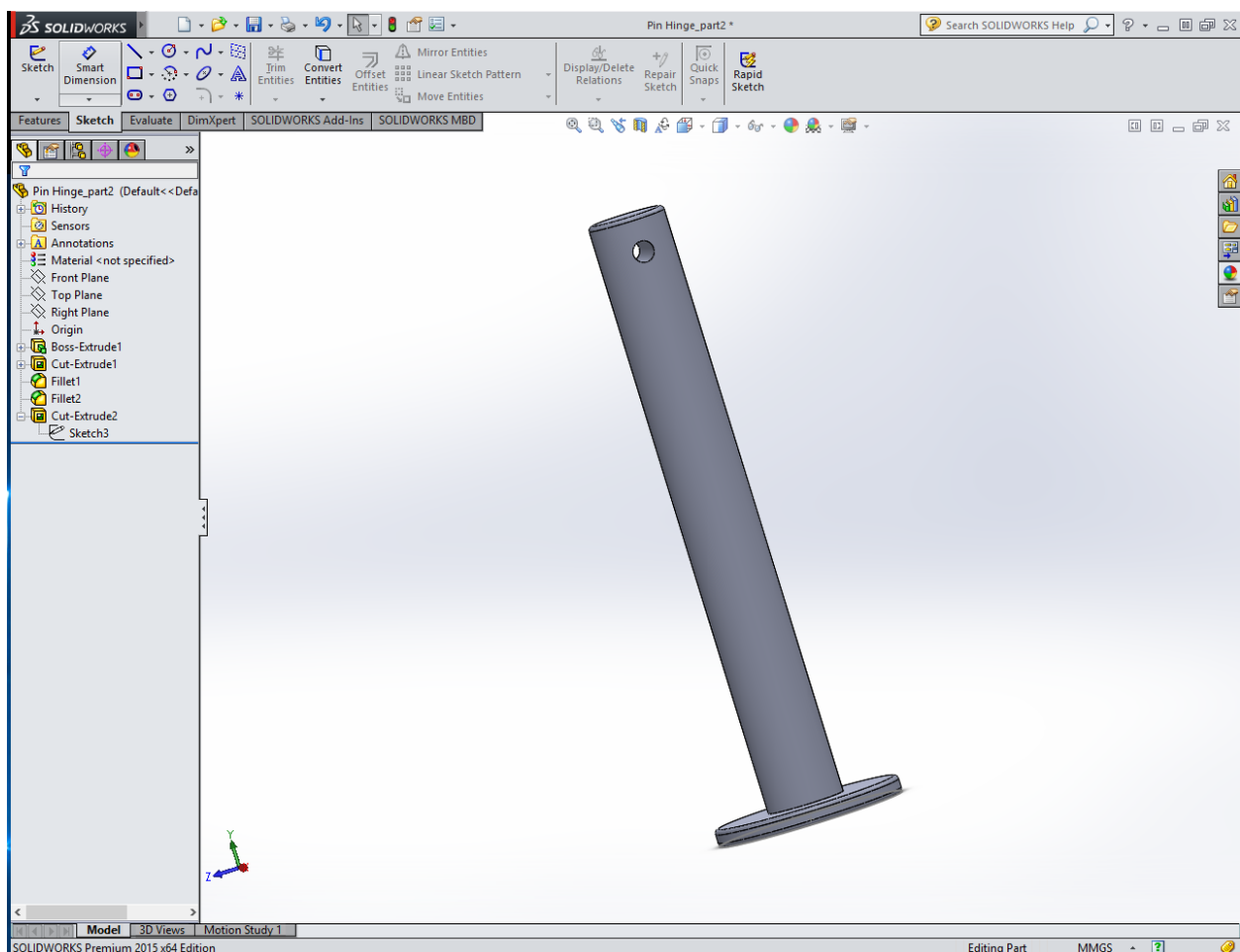


Σχήμα 5.10: Φωτορεαλιστική απεικόνιση μπάρα ρυμούλκησης

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.10 η εντολή «Fillet» δίνει καμπυλοτητες στο αντικειμενο φερνοντας ετσι στην τελική φωτορεαλιστική του μορφή. Παράλληλα η χρήση αυτής της εντολής δημιουργεί προβλήματα στη δημιουργία του πλέγματος για τη περαιτέρω ανάλυση σε επίπεδο προσομοίωσης των μοντέλων. Παρόλο αυτά όμως η ακριβής σχεδίαση των οπών, που επιτυγχάνεται με την χρήση της παραπάνω εντολής, είναι πολύ σημαντική για την επίτευξη ακρίβειας σχεδιασμού. Στην προκειμένη περίπτωση η σχεδίαση τους είναι απαραίτητη για την σωστή εφαρμογή των πείρων. Ο κατασκευαστής, σε μια τέτοια συνδεσμολογία με οπές και πείρους είναι ακριβής στις διατομές, στην καμπυλότητα και στις ανοχές σύμφωνα με την βιβλιογραφία του. Η αρχική λοιπόν προσέγγιση σχεδιασμού των εξαρτημάτων τους πραγματοποιήθηκε με ακρίβεια. Η τελευταία, όπως θα προκύψει κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, θα δημιουργήσει προβλήματα. Τέτοιας φύσεως δυσκολίες θα προκύψουν και θα μελετηθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

5.3.2 Ο πείρος περιστροφής μπάρας ρυμούλκησης

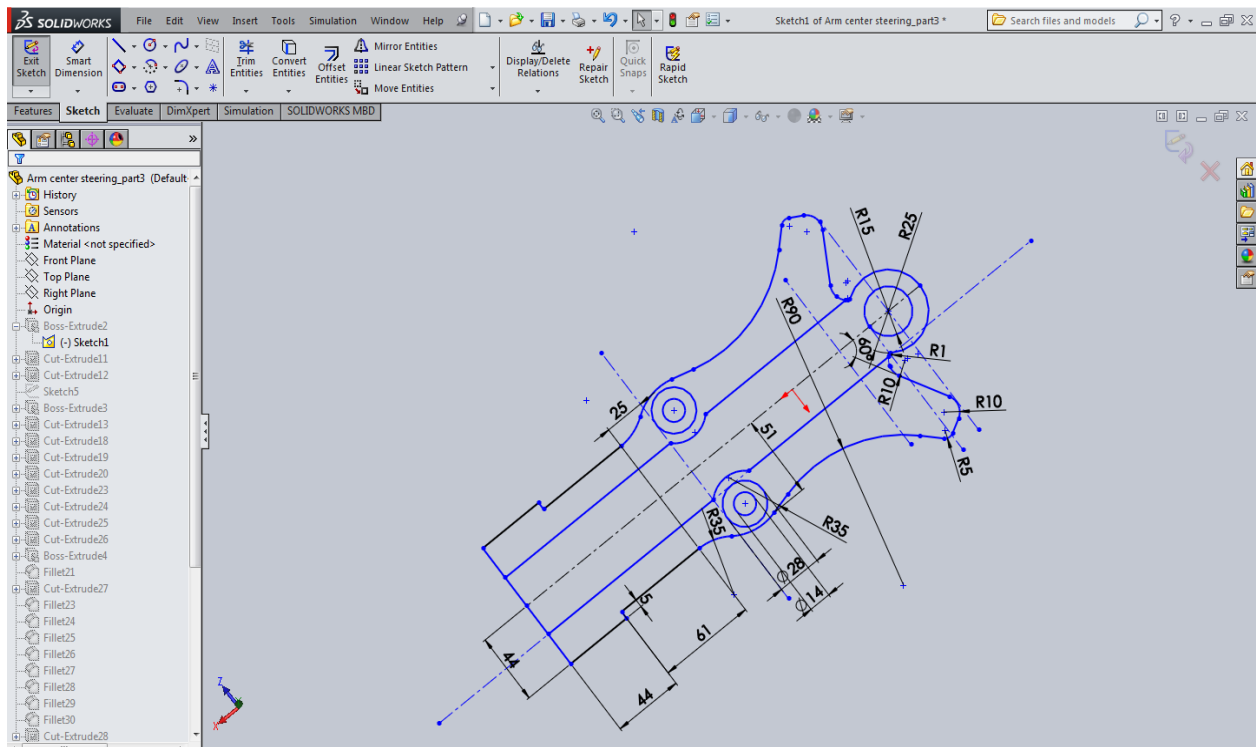
Με την βοήθεια των εργαλείων σχεδίασης της καρτέλας Sketch και των εντολών «Extruded Boss Base» για την δημιουργία της αρχικής μορφής του αντικειμένου και «Extruded Cut», για την δημιουργία της οπής, της καρτέλας Features, ο πείρος λαμβάνει την τελική του φωτορεαλιστική απεικόνισή, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.11: Φωτορεαλιστική απεικόνιση πείρου περιστροφής μπάρας

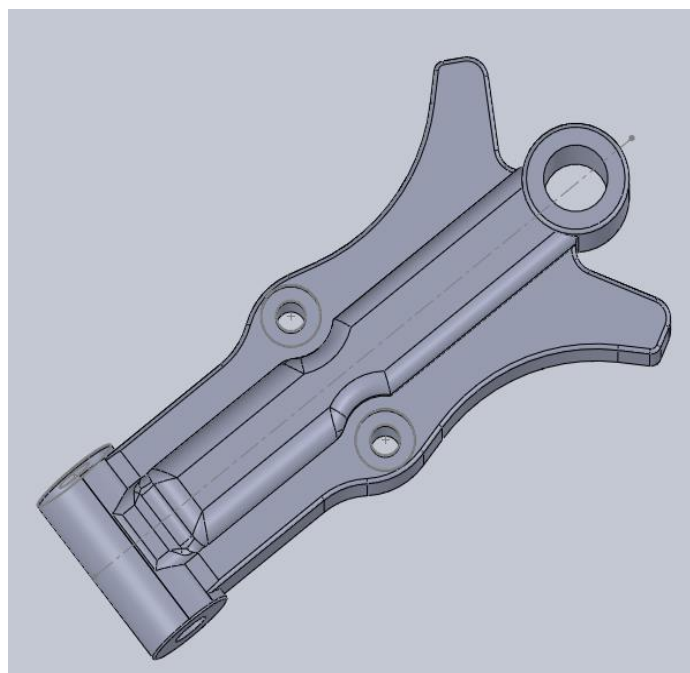
5.3.3 Το κεντρικό συγκρότημα βραχίονα τιμονιού

Η δυσμορφία του αντικειμένου αποτυπώνεται και στο σχέδιο του σχήματος 5.12 που και αποτελεί το αρχικό στάδιο της σχεδίασης του.



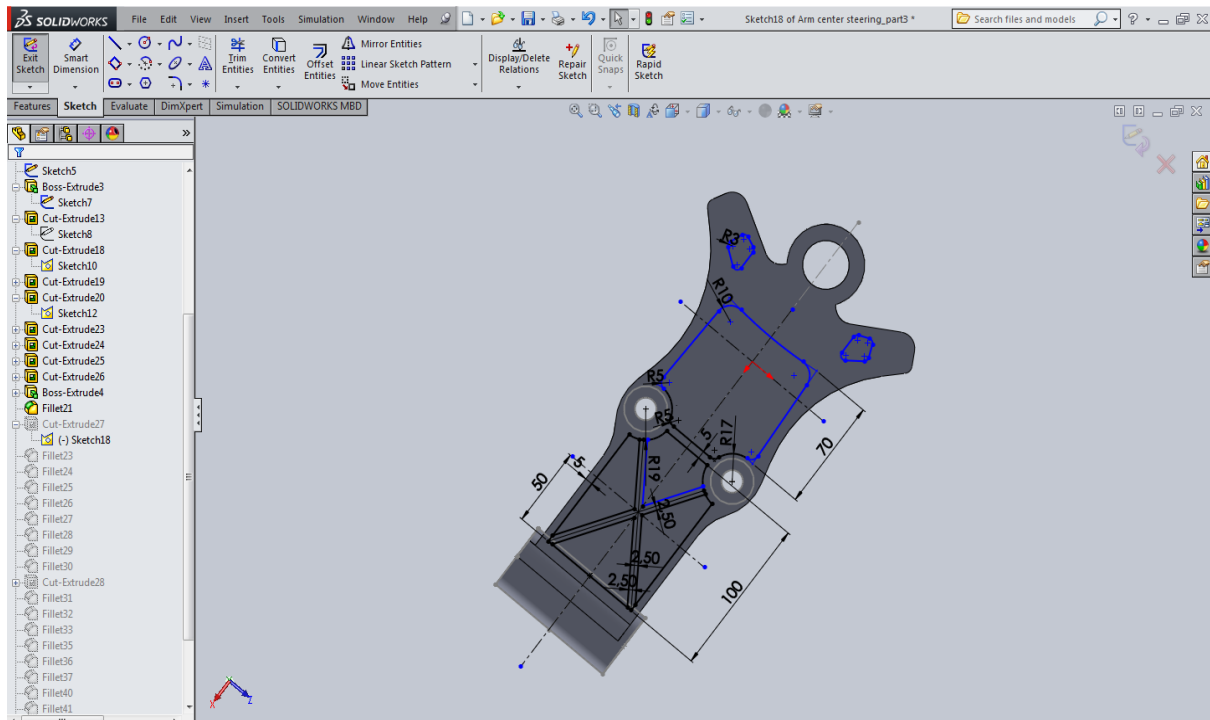
Σχήμα 5.12: Αρχικό δυσδιάστατο σχέδιο βραχίονα

Ομοίως με τα προηγούμενα αντικείμενα χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές, περισσότερες φορές βέβαια από οποιαδήποτε άλλο αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Με την εντολή «Extruded Boss Base» και την πολλαπλή χρήση των εντολών «Extruded Cut» και «Fillet» προέκυψε το πάνω μέρος του βραχίονα του τιμονιού όπως φαίνεται στο σχήμα 5.13.



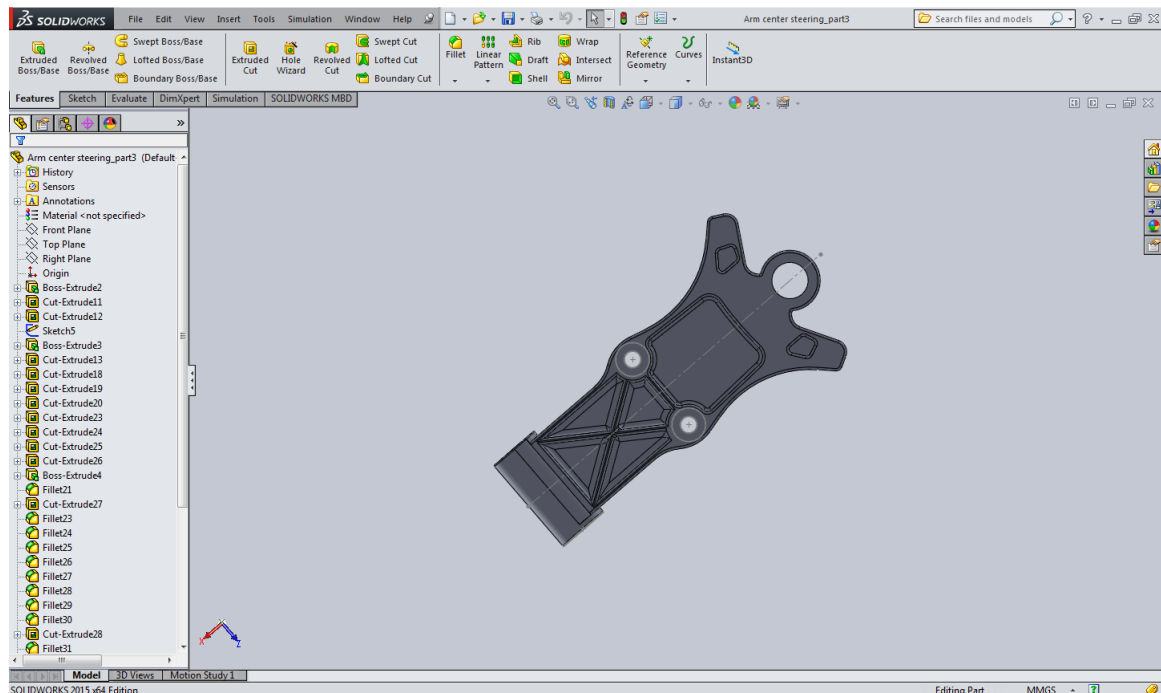
Σχήμα 5.13: Η τελική σχεδίαση της μορφής της πάνω πλευράς του βραχίονα

Για την κάτω πλευρά του βραχίονα με την ίδια μεθοδολογία έγινε η αρχική σχεδίαση όπως φαίνεται στο σχέδιο 5.14.



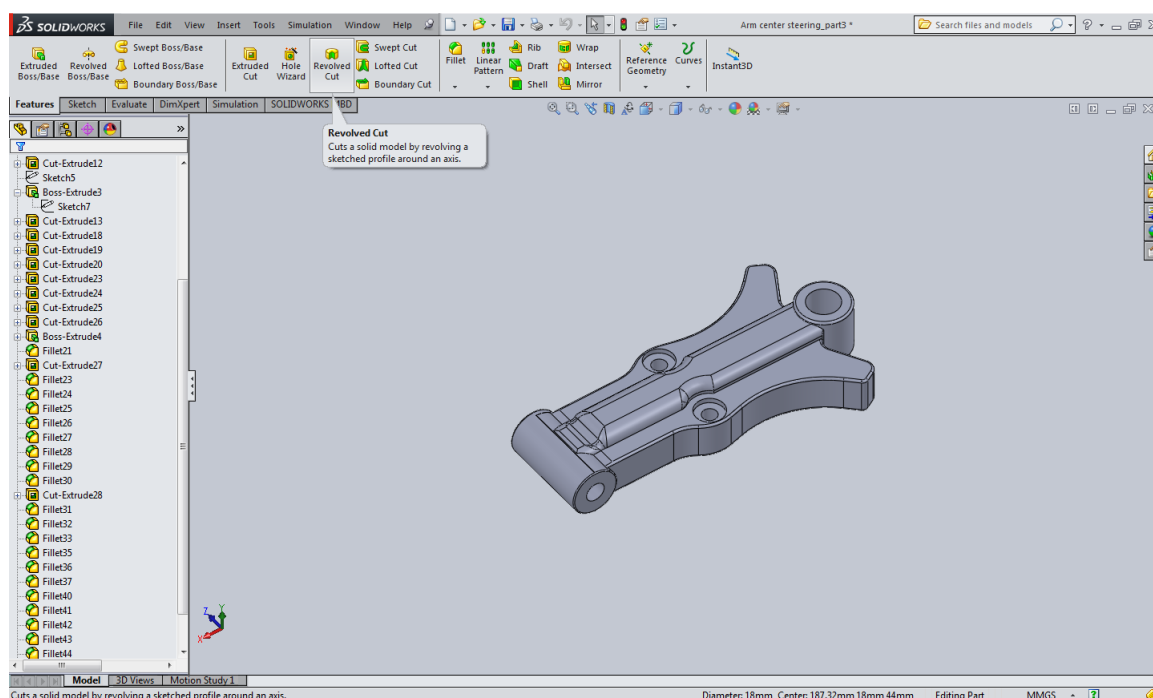
Σχέδιο 5.14: Το αρχικό δισδιάστατο σχέδιο της κάτω πλευράς του βραχίονα

Στη συνέχεια με χρήση των εντολών «Extruded Cut» και «Fillet» ολοκληρώνεται η κάτω πλευρά του βραχίονα λαμβάνοντας την τελική της μορφή όπως φαίνεται στο σχέδιο 5.15.



Σχέδιο 5.15: Η τελική σχεδίαση της μορφής της κάτω πλευράς του βραχίονα

Η ολοκληρωμένη μορφή του βραχίονα, αφού πραγματοποιήθηκε η πολλαπλή χρήση της εντολής «Fillet», φαίνεται στο σχέδιο 5.16.

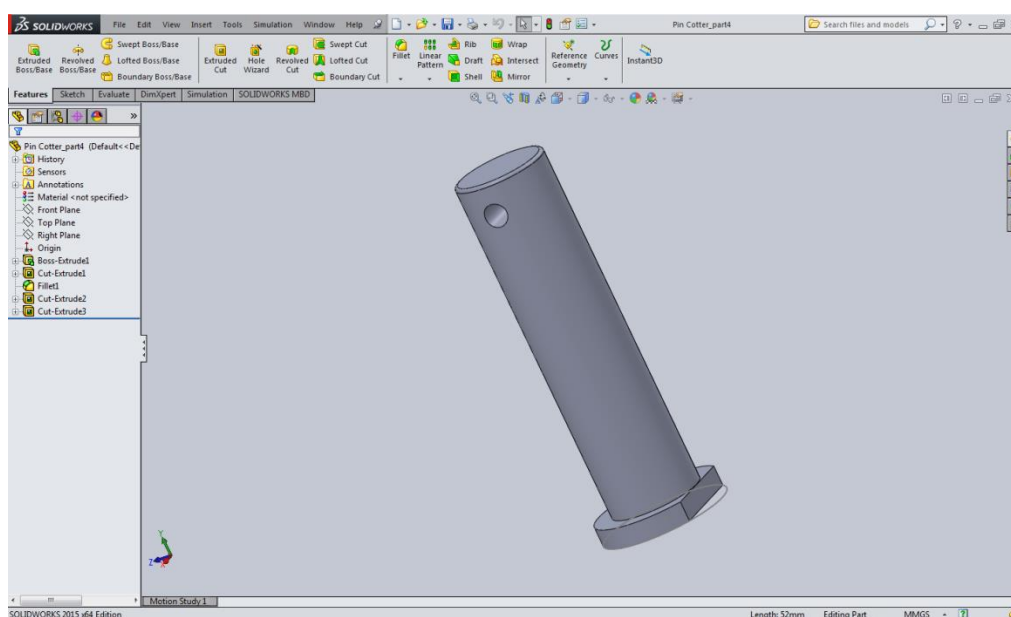


Σχέδιο 5.16: Φωτορεαλιστική απεικόνιση του βραχίονα

Η σχεδίαση του εξαρτήματος αυτού, λόγω της δυσμορφίας του, είχε αρκετές δυσκολίες. Η φωτορεαλιστική εικόνα του σχήματος 5.16 έχει κάποιες μικροδιαφορές σε σχέση με το πραγματικό εξάρτημα.

5.3.4 Ο πείρος περιστροφής συγκροτήματος βραχίονα

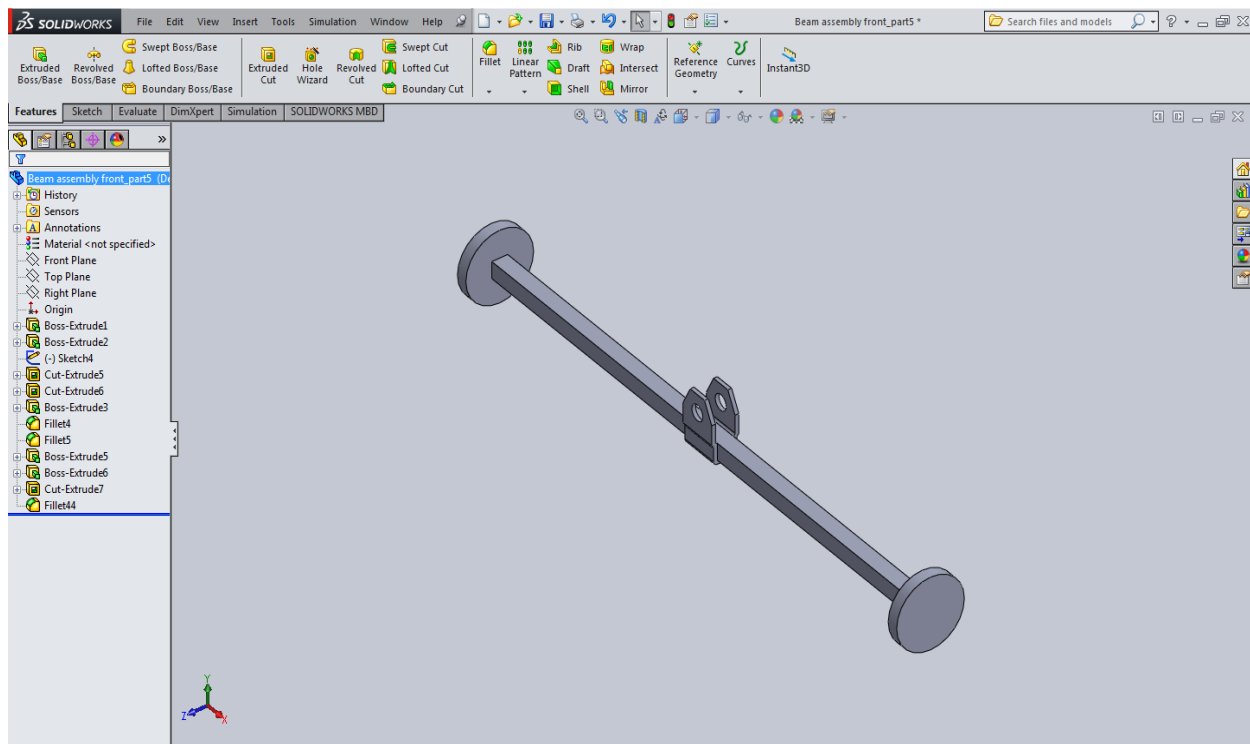
Η σχεδίαση του πείρου περιστροφής του συγκροτήματος του βραχίονα σχεδιάστηκε με την ίδια μεθοδολογία όπως και στο πείρο περιστροφής της μπάρας ρυμούλκησης. Η τελική μορφή του πείρου φαίνεται στο σχήμα 5.17.



Σχήμα 5.17: Φωτορεαλιστική απεικόνιση πείρου περιστροφής βραχίονα

5.3.5 Το εμπρόσθιο συγκρότημα άξονα

Ακολουθώντας την ίδια τεχνική με τα παραπάνω σχεδιάστηκε και το πέμπτο κομμάτι του συστήματος διεύθυνσης. Το εμπρόσθιο συγκρότημα άξονα φαίνεται ολοκληρωμένο στο [σχήμα 5.18](#).



Σχήμα 5.18: Φωτορεαλιστική απεικόνιση του εμπρόσθιου συγκροτήματος άξονα

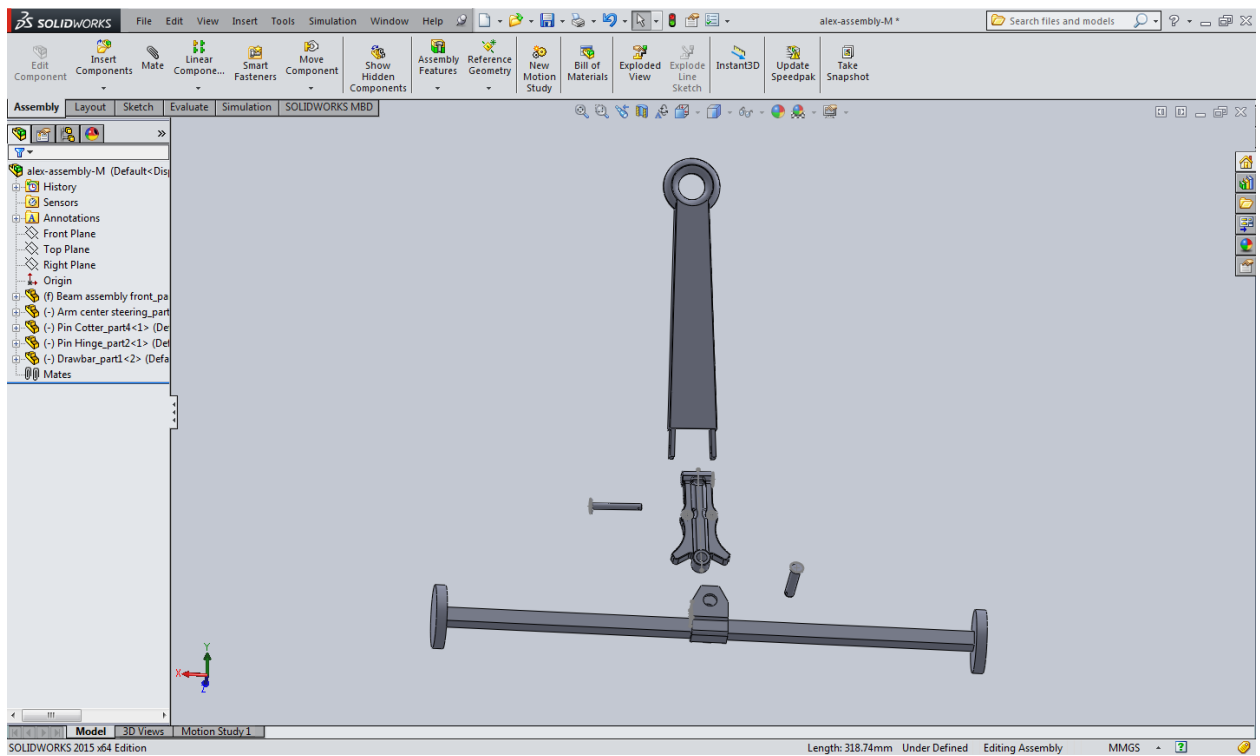
Σημειώνεται ότι στο σχέδιο του εμπρόσθιου συγκροτήματος άξονα οι «στρογγυλές» επιφάνειες αποτελούν τα ελαστικά επίσωτρα του εμπρόσθιου άξονα του συστήματος της συσκευής.

5.3.6 Το σύστημα διεύθυνσης (Assembly)

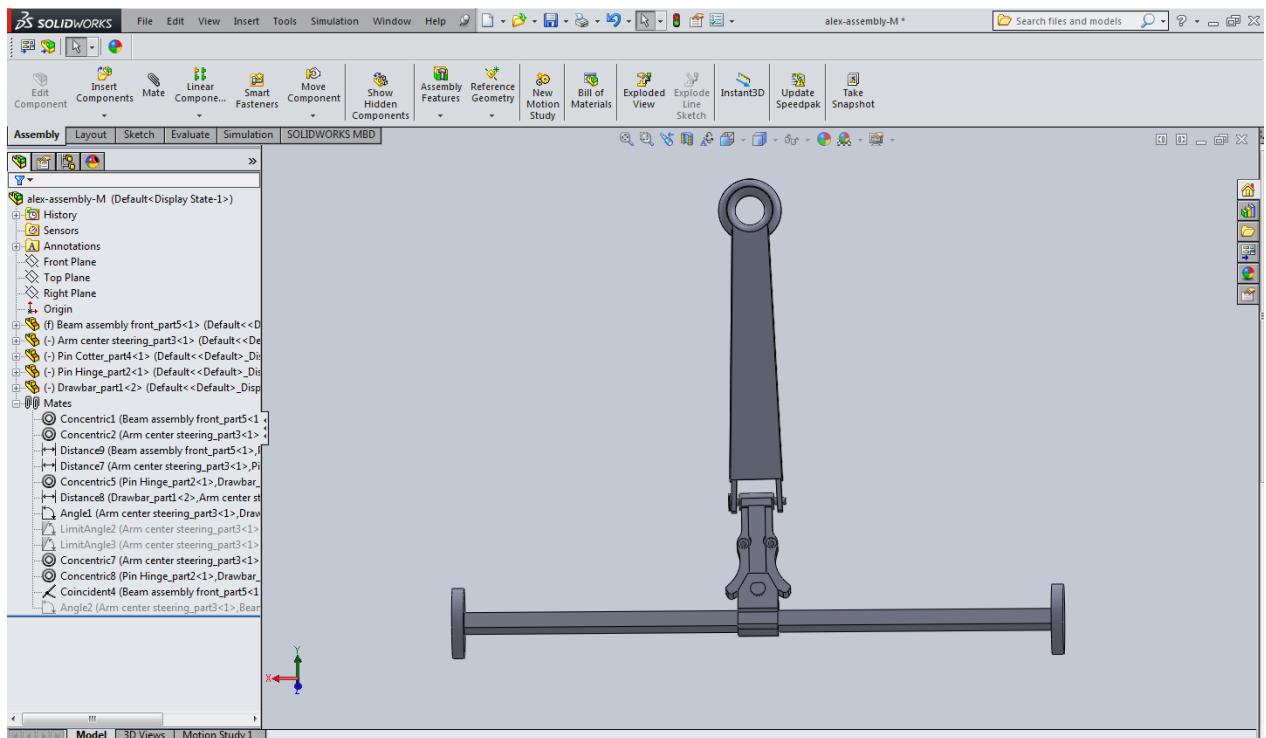
Έως τώρα στην εργασία δημιουργήθηκαν πέντε διαφορετικά αρχεία τρισδιάστατων αντικειμένων που αποτελούν και τα εξαρτήματα του συστήματος διεύθυνσης που έχουν κατασκευαστεί. Για το τελευταίο αρχείο, τη δημιουργία του αρχείου συνδεσμολογίας των εξαρτημάτων, δημιουργούμε ένα νέο αρχείο assembly.

Στο νέο αρχείο που έχει δημιουργηθεί μπορεί να πραγματοποιηθεί η διαδικασία εισαγωγής των επιμέρους αρχείων εξαρτημάτων για την δημιουργία του αρχείου συνδεσμολογίας. Με την βοήθεια του κουμπιού **Browse** εισάγουμε ένα-ένα τα αντικείμενα που απαρτίζουν την σύνθεση μας. Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται στο [σχήμα 5.19](#).

Η διαδικασία συναρμολόγησης του συστήματος διεύθυνσης πραγματοποιείται με την εντολή Mates. Με την εντολή αυτή γίνεται ουσιαστικά η συναρμολόγηση των εξαρτημάτων μεταξύ τους. Είναι μια διαδικασία που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, αφού θα πρέπει να οριστούν, με ακρίβεια, οι σχέσεις των εξαρτημάτων μεταξύ τους με στόχο τη ορθή σύνδεση της συνδεσμολογίας. Στη εικόνα του [σχήματος 5.20](#) φαίνεται ολοκληρωμένο και ορισμένο το σύστημα διεύθυνσης.



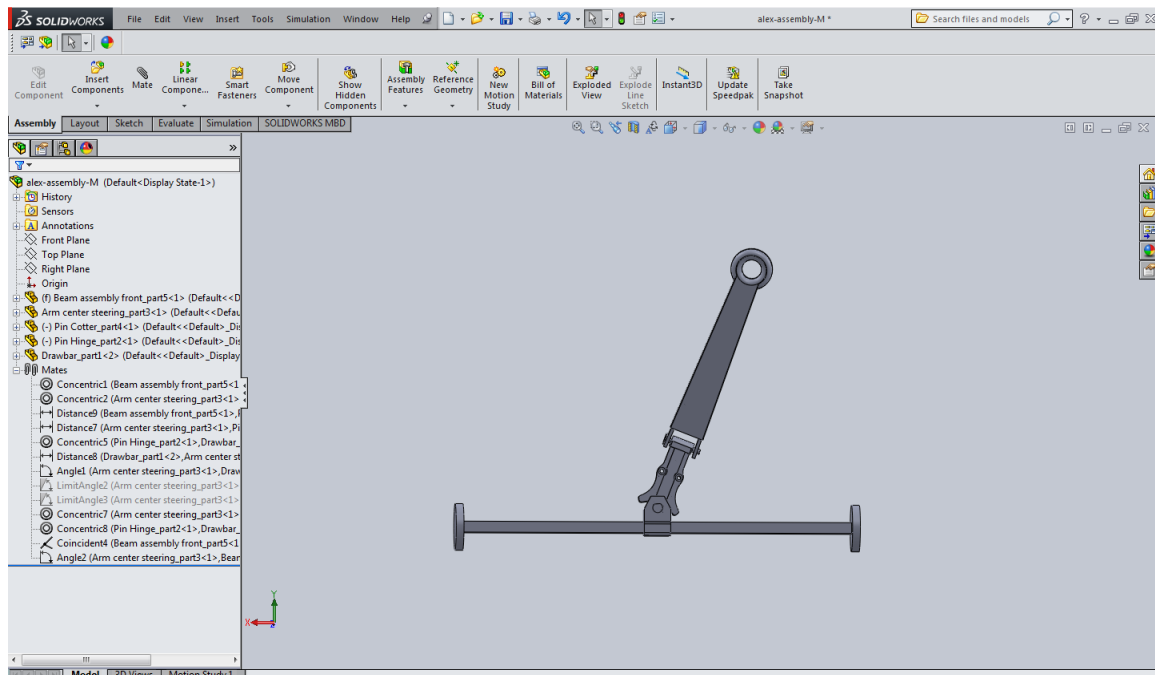
Σχήμα 5.19: Διαδικασία εισαγωγής των κομματιών (Parts) σε αρχείο συνδεσμολογίας (Assembly)



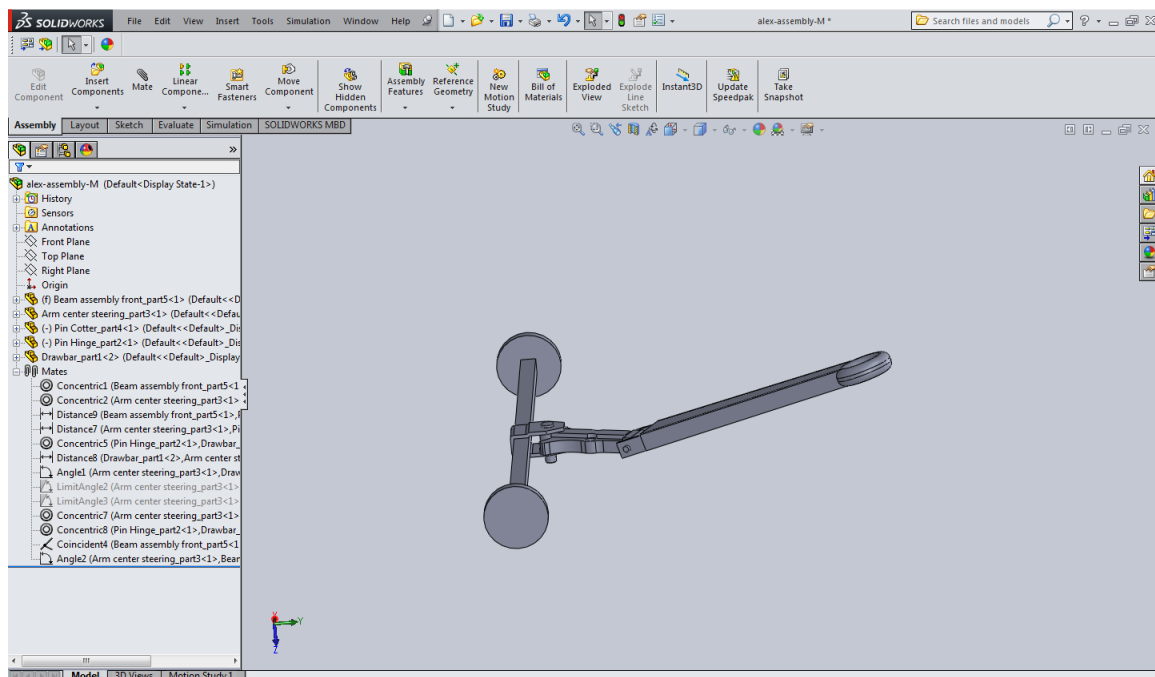
Σχήμα 5.20: Ολοκλήρωση συνδεσμολογίας με την εντολή Mates

Το σχεδιαστικό κομμάτι της εργασίας ολοκληρώνεται με την δημιουργία των αρχείων της συνδεσμολογίας που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση. Τα αρχεία που θα δημιουργηθούν για περαιτέρω επεξεργασία θα είναι η αρχική θέση (ηρεμίας) του συστήματος και η οριακή του θέση. Η αρχική θέση θα μελετηθεί ως η ιδανικότερη θέση κατά την οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί η διαδικασία ρυμούλκησης με μικρά αρνητικά αποτελέσματα ενώ η

οριακή θέση θα μελετηθεί για τις αρνητικές επιπτώσεις που θα προκαλέσει. Αρχικά να σημειωθεί ότι στη φάση της προσομοίωσης θα χρησιμοποιηθεί ένα τρίτο αρχείο, με τυχαία γωνία κατά την διάρκεια της διαδικασίας οπισθέλκισης. Στην εικόνα του σχήματος 5.21 έχει οριστεί η γωνία στρέψης σε τυχαία τιμή ίση με 20° από την θέση ηρεμίας ή διαφορετικά σε τιμή ίση με 110° από το αριστερό τμήμα του εμπρόσθιου άξονα του συστήματος. Ενώ η γωνία περιστροφής της μπάρας ρυμούλκησης στην εικόνα του σχήματος 5.22 έχει οριστεί με σταθερή τιμή και ίση με 18° . Οι παρακάτω τιμές, με όμοιο τρόπο όπως τα παραπάνω, ορίστηκαν με την εντολή Mates.



Σχήμα 5.21: Ορισμός γωνίας στρέψης συνδεσμολογίας



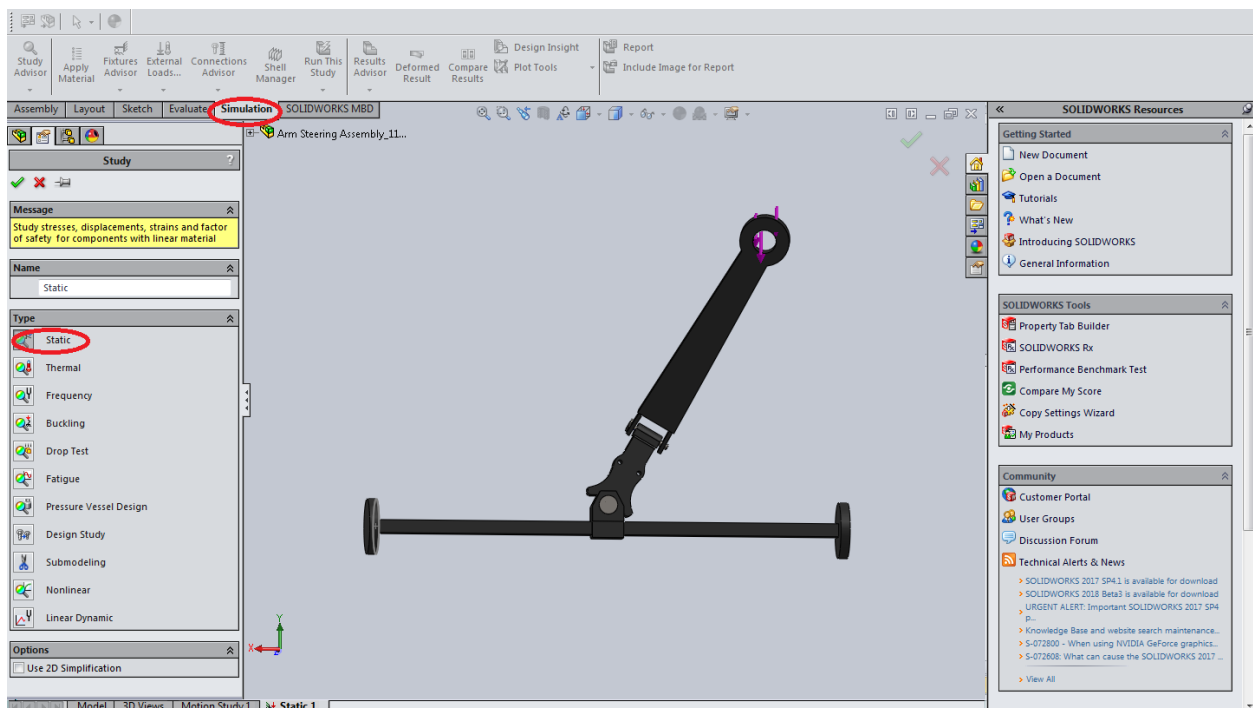
Σχήμα 5.22: Ορισμός γωνίας περιστροφής συνδεσμολογίας

5.4 Προσομοίωση συστήματος διεύθυνσης με χρήση του λογισμικού σχεδίασης

Το 3D μηχανολογικό CAD λογισμικό σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου, αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση σχεδίασης και μελέτης. Παρέχει και την δυνατότητα προσομοίωσης σχεδιαστικών μοντέλων σε περιβάλλον που μπορεί να παραμετροποιηθεί από το χρήστη. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικότερα βήματα για την ρύθμιση παραμέτρων που διέπουν το μοντέλο καθώς και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε.

5.4.1 Ρύθμιση παραμέτρων μοντέλου σε περιβάλλον λογισμικού σχεδίασης

Στην εικόνα του σχήματος 5.22 φαίνεται το ολοκληρωμένο, σχεδιαστικά, μοντέλο. Η σχεδίαση του εν λόγω μοντέλου πραγματοποιήθηκε στην καρτέλα *Assembly* της καρτέλας εντολών. Η παραμετροποίηση του θα γίνει με την επιλογή της καρτέλας *Simulation*.

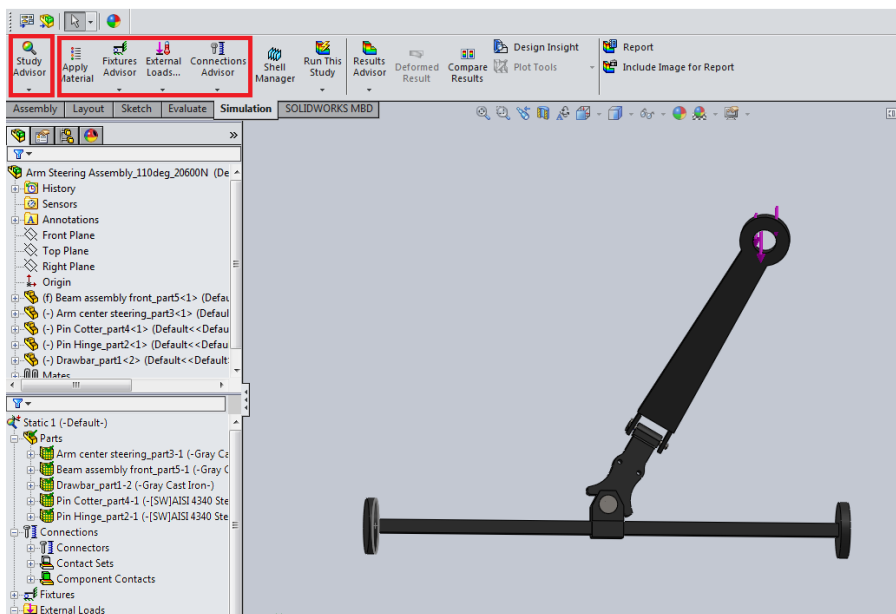


Σχήμα 5.23: Επιλογή καρτέλας εντολής προσομοίωσης

Στην εικόνα του σχήματος 5.23 φαίνεται η καρτέλα της προσομοίωσης καθώς και η επιλογή στατικής ανάλυσης για την μελέτη του μοντέλου.

Στην εικόνα του σχήματος 5.24 φαίνονται οι δυνατότητες της καρτέλας Simulation στις καρτέλες που εμφανίζονται πάνω από αυτήν στο Command Manager. Τα τέσσερα βασικά βήματα που πρέπει να οριστούν για την επιτυχή διενέργεια της στατικής ανάλυσης του μοντέλου είναι:

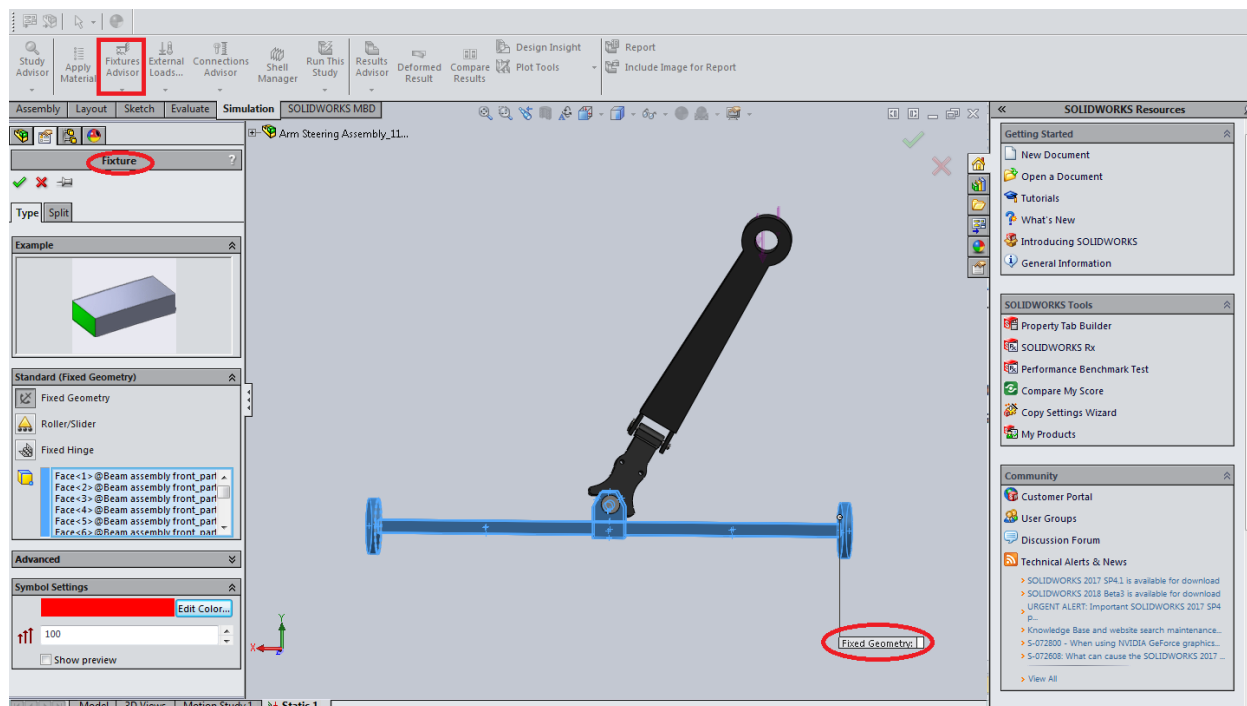
- α. Ορισμός υλικού εξαρτημάτων μοντέλου (Apply Material).
- β. Ορισμός σταθερών επιφανειών, άκρων ή σημείων του μοντέλου (Fixtures).
- γ. Ορισμός εξωτερικών φορτίων στο μοντέλο σε επιφάνειες, άκρα ή σημεία (External loads).
- δ. Ορισμός συνδέσεων της συνδεσμολογίας του μοντέλου (Connections).



Σχήμα 5.24: Τα τέσσερα βήματα της παραμετροποίησης

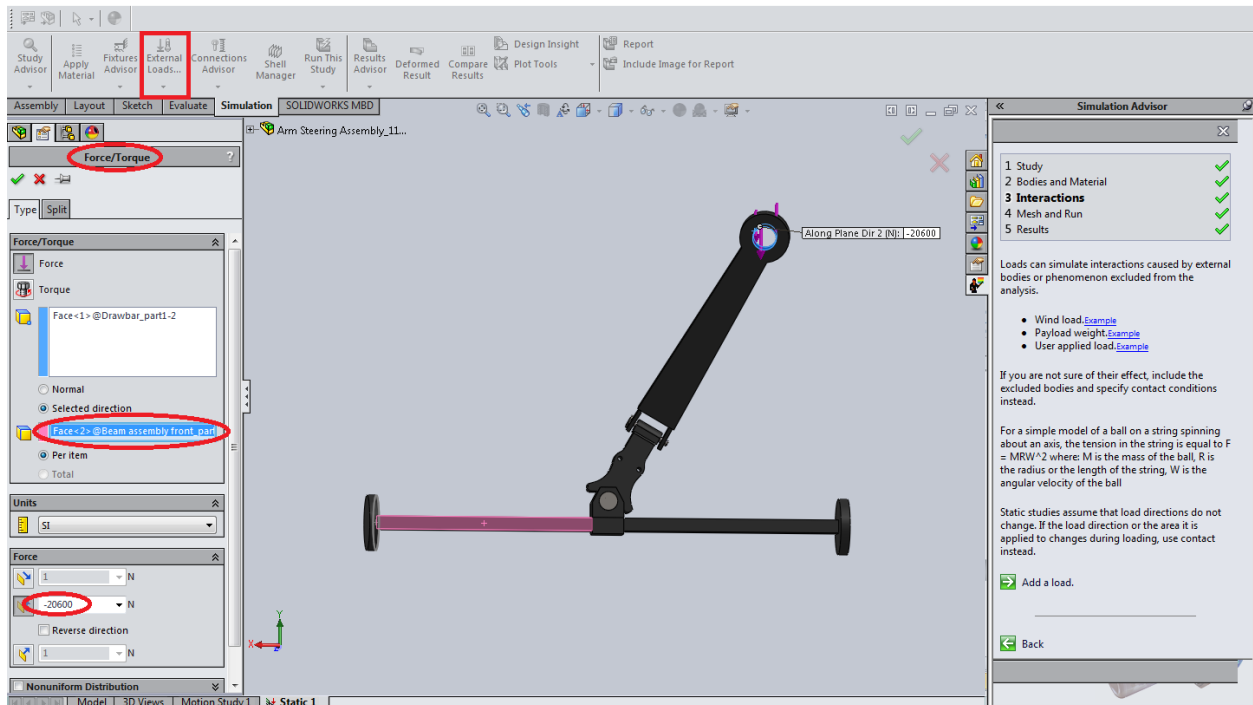
Όπως έχει αναφερθεί το υλικό κατασκευής των εξαρτημάτων της συνδεσμολογίας είναι το ατσάλι (structural steel). Επομένως το πρώτο βήμα της επιλογής του υλικού ολοκληρώνεται με την επιλογή του υλικού, με την εντολή *Apply Material* από μια μεγάλη λίστα υλικών που διαθέτει το λογισμικό.

Το δεύτερο βήμα της παραμετροποίησης του μοντέλου αναφέρεται στον ορισμό των σταθερών επιφανειών της συνδεσμολογίας. Αυτό γίνεται με την εντολή *Fixtures*. Στην εικόνα του [σχήματος 5.25](#) φαίνονται ότι ορίστηκαν οι επιφάνειες του εξαρτήματος του εμπρόσθιου άξονα της συνδεσμολογίας ως σταθερές.



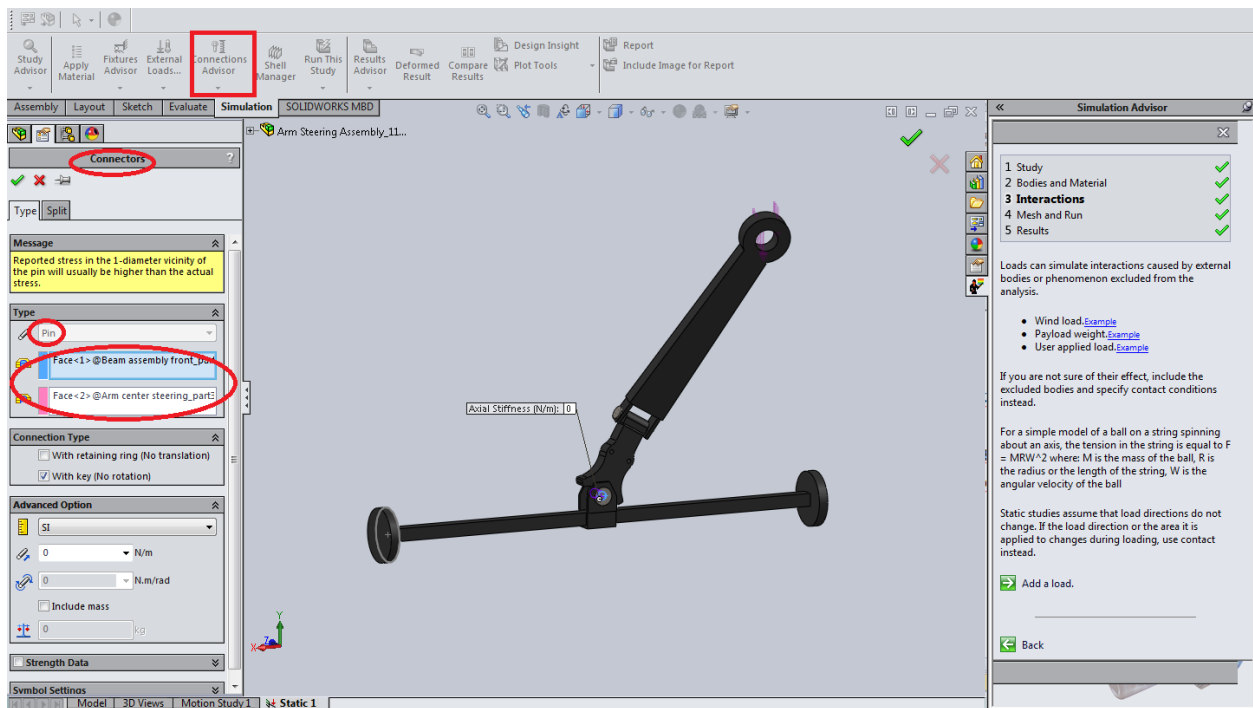
Σχήμα 5.25: Ορισμός σταθερών επιφανειών συνδεσμολογίας.

Στο τρίτο βήμα ορίζεται η δύναμη που ασκείται στο μοντέλο στις εσωτερικές επιφάνειες του δακτυλίου της μπάρας ρυμούλκησης. Η τιμή θα είναι ίση με 20.430Nt, είναι η δύναμη που αναπτύσσεται από όχημα οπισθέλκησης στη μπάρα ρυμούλκησης σε ασφαλοστρωμένο οδόστρωμα και με κατεύθυνση αντίθετη ως προς τον άξονα y (αρνητικό πρόσημο). Η όλη διαδικασία ορισμού δύναμης αποτυπώνεται στην εικόνα του σχήματος 5.26



Σχήμα 5.26: Ορισμός της δύναμης που αναπτύσσεται στη συνδεσμολογία

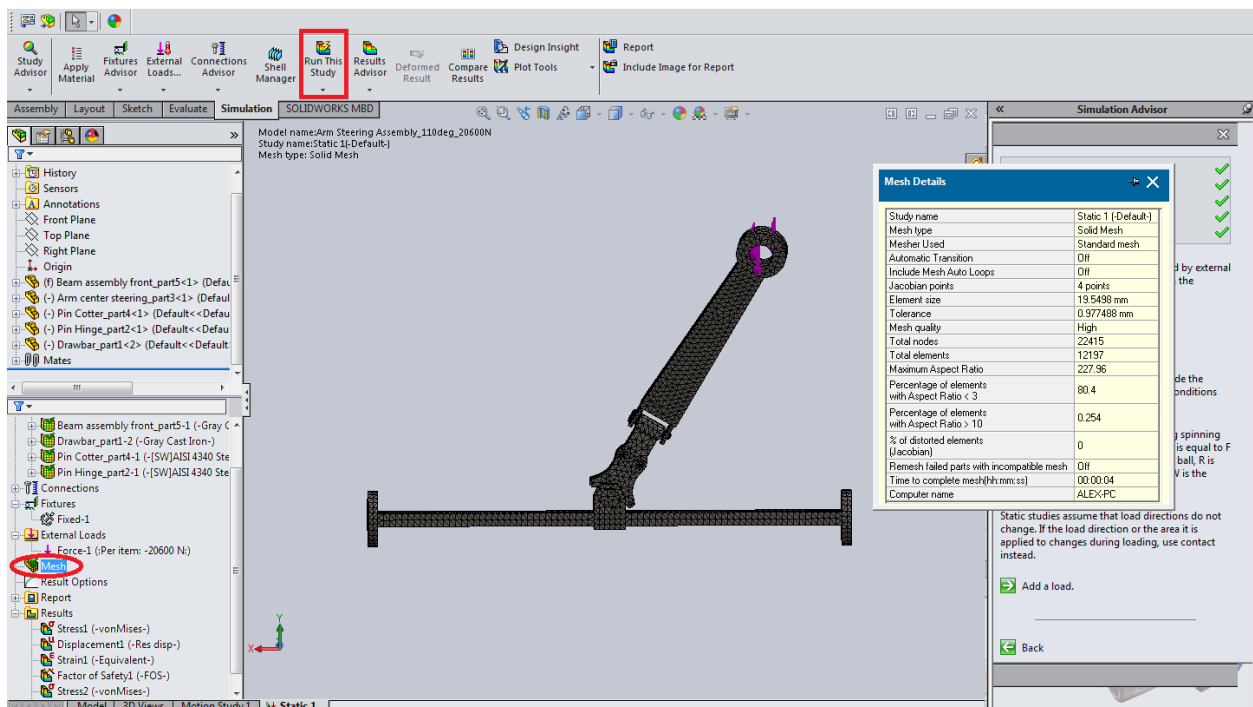
Τέλος, στο τέταρτο βήμα, δημιουργούνται οι απαραίτητες συνδέσεις μεταξύ των εξαρτημάτων της συνδεσμολογίας. Οι δυο πείροι που συνδέουν δυο εξαρτήματα της συνδεσμολογίας, δημιουργούν ουσιαστικά τέσσερα ζεύγη συνδέσεων, ώστε να επιτευχθεί η ορθή σύνδεση. Η εντολή *Connections* επιτρέπει το σχηματισμό αυτών των συνδέσεων (pin connectors). Στην εικόνα του σχήματος 5.27 αποτυπώνεται η δημιουργία μια τέτοιας σύνδεσης, η οποία ορίζεται επιλέγοντας τις σωστές επιφάνειες και τον σωστό τύπο σύνδεσης. Στην περίπτωση εδώ ο τύπος είναι ο πείρος (pin). Επίσης να σημειωθεί ότι δημιουργήθηκαν τέσσερις, τέτοιου τύπου, συνδέσεις (pin connectors) με σκοπό τον ορθό ορισμό των δυο πείρων που περιλαμβάνει η συνδεσμολογία μας.



Σχήμα 5.27: Ορισμός pin connectors στην συνδεσμολογία

5.4.2 Πλεγματοποίηση μοντέλου (Meshing)

Η πλεγματοποίηση αποτελεί το επόμενο καθοριστικότατο στάδιο της μελέτης, για την ολοκλήρωση της και την επιτυχή επίλυση του προβλήματος. Για την πραγματοποίηση του meshing της πλέον ορισμένης γεωμετρίας του μοντέλου, επιλέγουμε την εντολή *Run This Study* και επιλογή *Mesh*.



Σχήμα 5.28: Ολοκλήρωση διαδικασίας Meshing

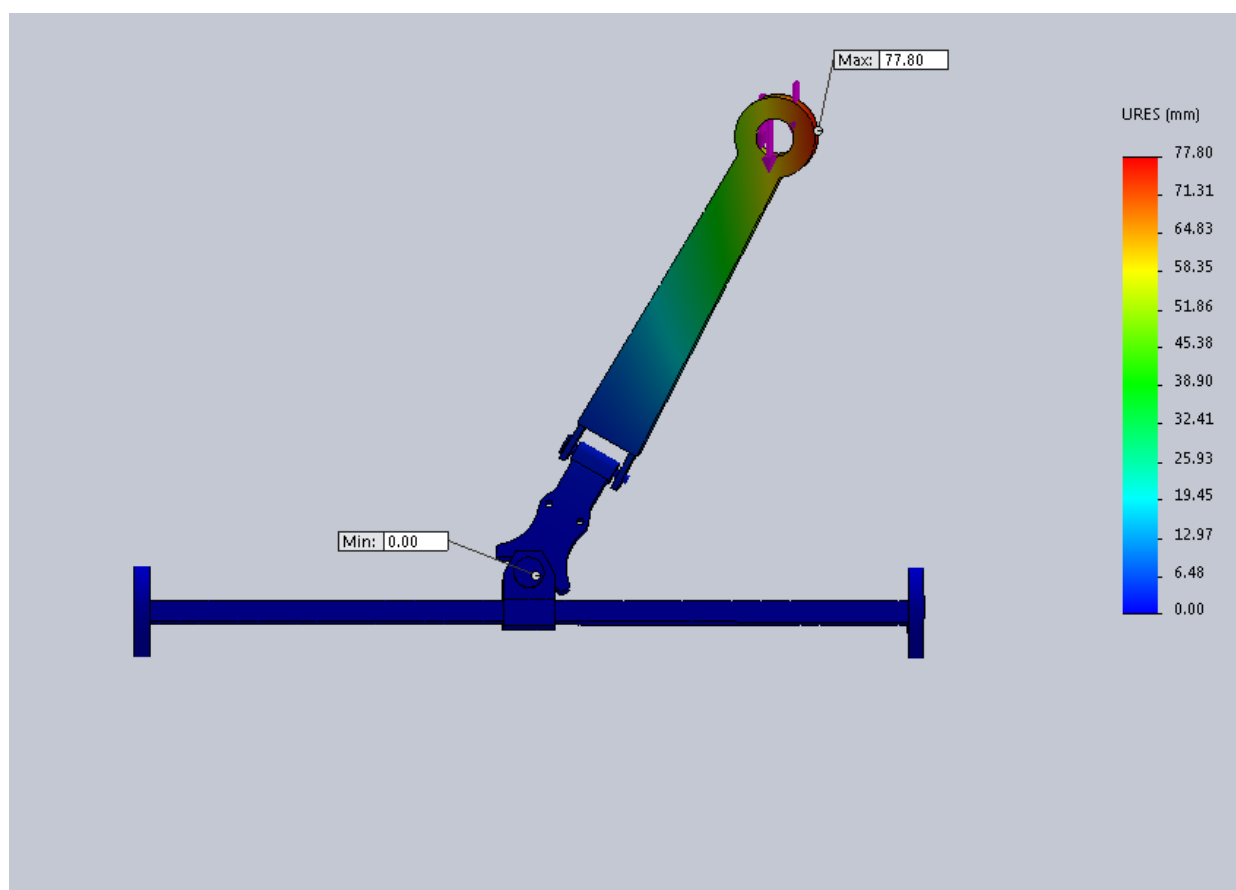
Στην εικόνα του σχήματος 5.28 φαίνεται η πλεγματοποίηση της συνδεσμολογίας καθώς και χαρακτηριστικές της λεπτομέρειες. Η διαδικασία ολοκληρώθηκε με επιτυχία χωρίς κάποιο σφάλμα ή προειδοποίηση. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο είναι έτοιμο για το τελευταίο στάδιο της επίλυσης και την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

5.4.3 Επίλυση προβλήματος

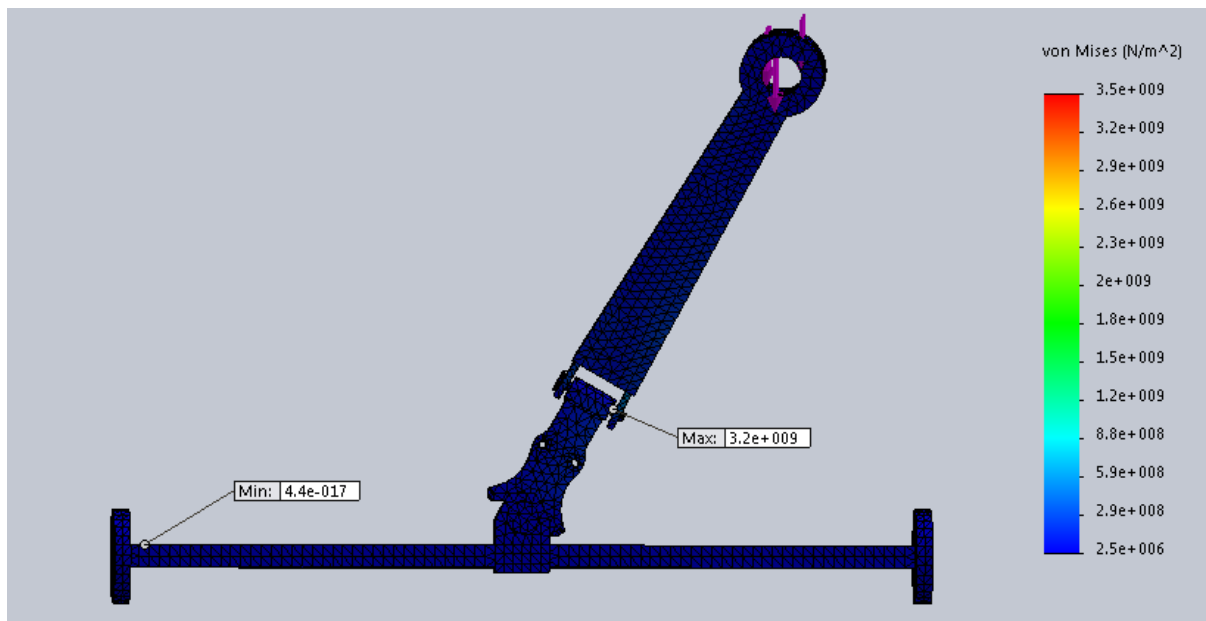
Περίπτωση: Οπισθέλκηση σε τυχαία γωνία στρέψης

A1. Τύπος οδοστρώματος: Τσιμέντο

Στην εικόνα του σχήματος 5.29 φαίνεται η συνολική μετατόπιση των τμημάτων της συνδεσμολογίας με βάση τη χρωματική κατανομή χρωμάτων. Όπως παρατηρείται υπάρχει μετατόπιση της μπάρας, με τη μέγιστη τιμή να φτάνει στα 77.80mm. Στο σχήμα 5.30 φαίνεται η κατανομή της τάσης πάνω στην συνδεσμολογία μας. Η μέγιστη τιμή της τάσης εμφανίζεται στο πείρο στρέψης που συνδέει τον εμπρόσθιο άξονα με το κεντρικό βραχίονα τιμονιού. Η μέγιστη τιμή φτάνει τα 3,2GPa.



Σχήμα 5.29: Διάγραμμα συνολικής μετατόπισης συνδεσμολογίας.

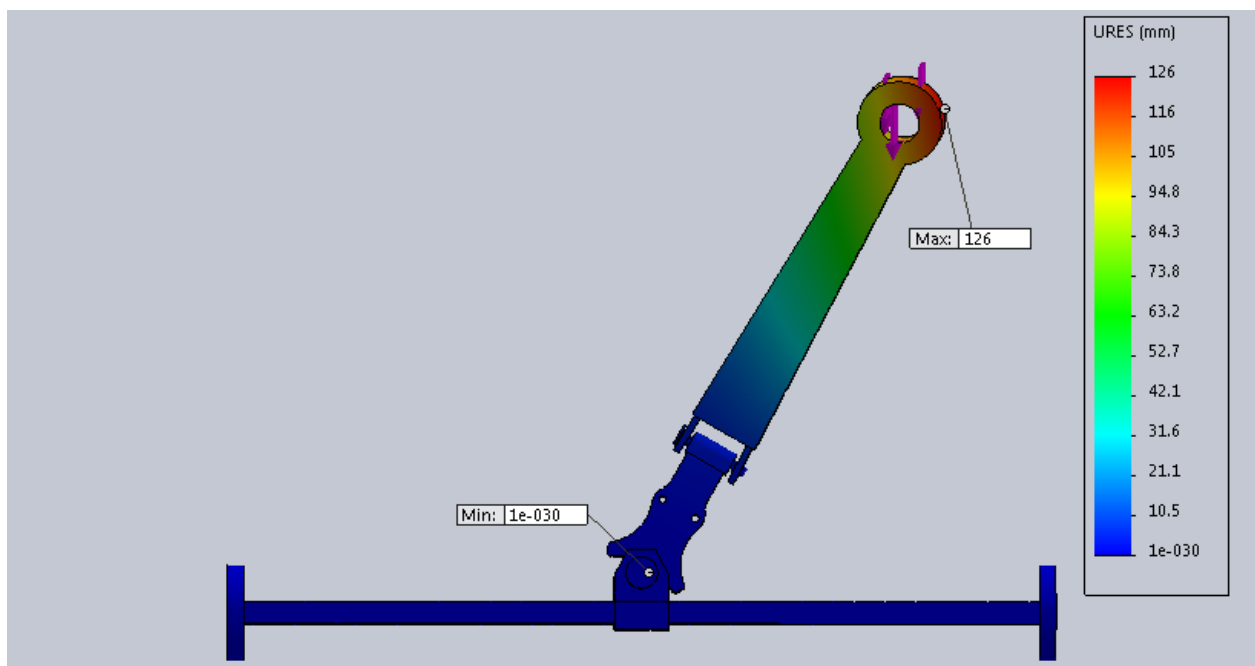


Σχημα 5.30: Διάγραμμα τάσης (Von Mises Stress) συνδεσμολογίας.

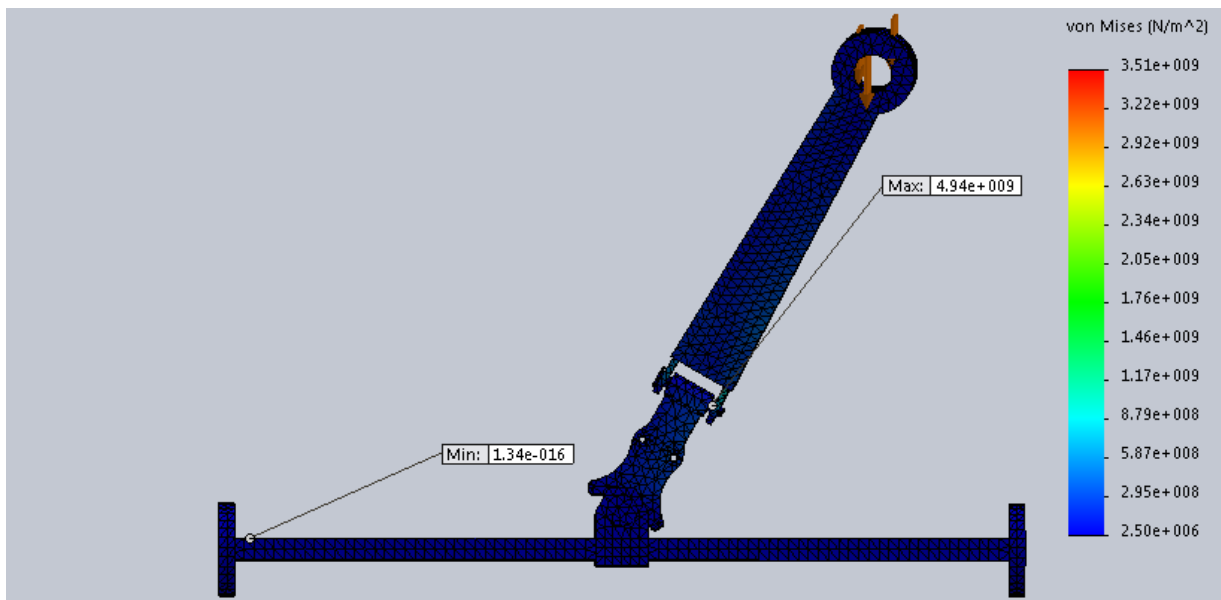
Περίπτωση: Οπισθέλκηση σε τυχαία γωνία στρέψης

A1. Τύπος οδοστρώματος: Άσφαλτος

Στην εικόνα του σχήματος 5.31 φαίνεται η συνολική μετατόπιση των τμημάτων της συνδεσμολογίας με βάση τη χρωματική κατανομή χρωμάτων. Όπως παρατηρείται υπάρχει μετατόπιση της μπάρας, με τη μέγιστη τιμή να φτάνει στα 126mm. Στο σχήμα 5.32 φαίνεται η κατανομή της τάσης πάνω στην συνδεσμολογία μας. Η μέγιστη τιμή της τάσης εμφανίζεται στο πείρο στρέψης που συνδέει τον εμπρόσθιο άξονα με το κεντρικό βραχίονα τιμονιού. Η μέγιστη τιμή φτάνει τα 4,94GPa.



Σχημα 5.31: Διάγραμμα συνολικής μετατόπισης συνδεσμολογίας.



Σχημα 5.32: Διάγραμμα τάσης (Von Mises Stress) συνδεσμολογίας.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το λογισμικό σχεδίασης δεν είναι ικανοποιητικά. Η μετατόπιση των 126 mm στην περίπτωση της ασφάλτου είναι μια τιμή που δεν ταιριάζει με τα πραγματικά δεδομένα. Μια μετατόπιση με τέτοια τιμή δεν μπορεί να δικαιολογηθεί. Αυτό γιατί η μπάρα ρυμούλκησης έχει ρυθμιστεί στις 18°, χωρίς καμιά μετακίνηση ως προς τον άξονα z. **Κρίθηκε αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί μια πιο αξιόπιστη μέθοδος προσομοίωσης δυνάμεων** για την περίπτωση της οπισθέλκησης που μελετάται.

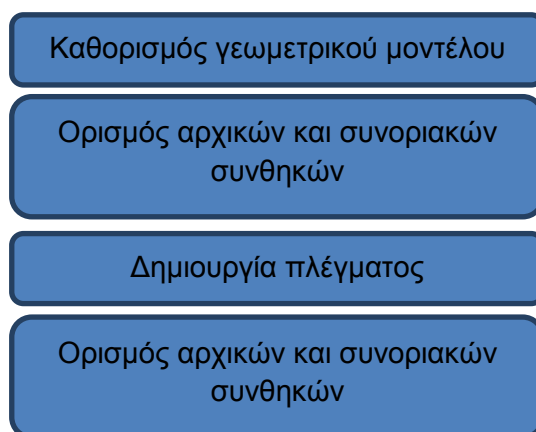
6. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

6.1 Εισαγωγή στο λογισμικό προσομοίωσης

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα γνωστό στην επιστημονική κοινότητα λογισμικό όπως το COMSOL Multiphysics, το οποίο είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης και πεπερασμένων στοιχείων για διάφορες φυσικές και μηχανικές εφαρμογές, ειδικά για συνδυασμό φαινομένων, ή πολυφυσικής. Μία πρώιμη έκδοση (πριν από το 2005) του COMSOL Multiphysics ονομαζόταν FEMLAB. Το 1986, το COMSOL ξεκίνησε από μεταπτυχιακούς φοιτητές (Svante Littmarck και Farhad Saeidi), βασισμένο σε κώδικα που αναπτύχθηκε για ένα μεταπτυχιακό μάθημα στο Βασιλικό Ινστιτούτο Τεχνολογίας (KTH) στη Στοκχόλμη, Σουηδία. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε έκδοση του Comsol Multiphysics η οποία πρωτοκυκλοφόρησε τον Δεκέμβριο 2013.



Το διαδραστικό περιβάλλον του COMSOL χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση κι επίλυση προβλημάτων επιστημονικής και μηχανικής φύσης. Δίνει στον χρήστη την δυνατότητα δημιουργίας μοντέλων με βασική προϋπόθεση τον καθορισμό των απαραίτητων φυσικών ποσοτήτων οι οποίες χαρακτηρίζουν την μελετώμενη εφαρμογή, όπως: οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών, τα φορτία, οι ροές κλπ., χωρίς να απαιτείται όμως ο καθορισμός των εξισώσεων επίλυσης απ' τον ίδιο. Το λογισμικό COMSOL Multiphysics βασίζει τις υπολογιστικές τεχνικές του στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) και δύναται να προσομοιώνει τα συστήματα γραμμικών και μη γραμμικών μη μόνιμων μερικών διαφορικών εξισώσεων (Partial Differential Equations), οι οποίες αποτυπώνουν την φύση του εκάστοτε προβλήματος.



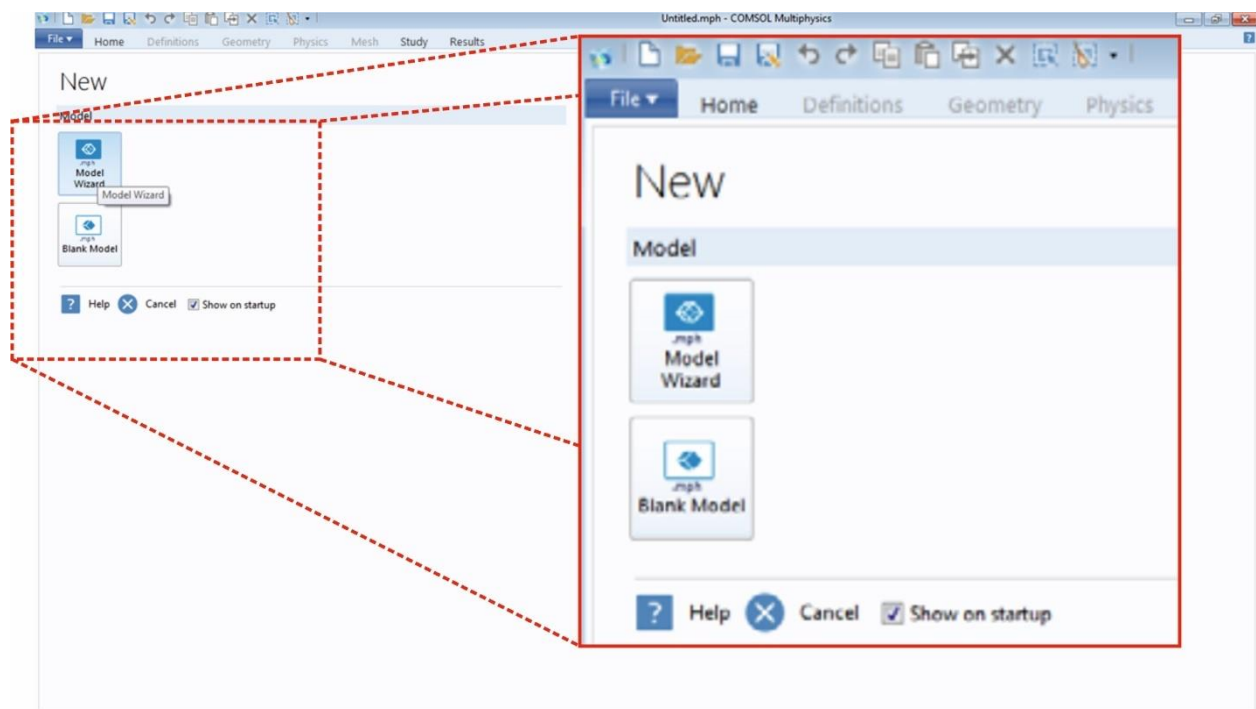
Σχήμα 6.1: Τα βασικά βήματα για την επίτευξη της προσομοίωσης του μοντέλου

Η προσομοίωση της ανάλυσης των παραμορφώσεων, τάσεων και εντάσεων σε μια συμπαγή μηχανική κατασκευή, όπως αυτής της μελέτης, με το κατάλληλα επιλεγμένο χρονικό βήμα προσομοίωσης από το COMSOL, όπως φαίνεται στη εικόνα του σχήματος 6.1, εξελίσσεται σε μια σειρά διαδοχικών βημάτων ως εξής: Τον καθορισμό του γεωμετρικού μοντέλου της μελετώμενης εφαρμογής ακολουθεί η κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος. Η διαμόρφωση του πλέγματος, η οποία εξαρτάται απ' τις αρχικές και συνοριακές συνθήκες, διευκολύνει την αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος απ' το υπολογιστικό εργαλείο. Οι εξισώσεις των τάσεων και των εντάσεων συγκροτούνται στο COMSOL Multiphysics κι εν τέλει το λογισμικό

επιλύει αυτά τα συστήματα των PDEs εφαρμόζοντας τις κατάλληλες αρχικές κι οριακές συνθήκες.

6.2 Επισκόπηση του Comsol Multiphysics και το περιβάλλον εργασίας χρήστη

Είναι σημαντικό, πριν ανοίξει το πρόγραμμα, ο χρήστης να γνωρίζει τη φύση του προβλήματος, τις παραμέτρους που το διέπουν και το τι αποτελέσματα περιμένει να δει. Στη συγκεκριμένη μελέτη μελετάμε μια συμπαγή συνδεσμολογία τμημάτων ενός συστήματος διεύθυνσης και θέλουμε να αναλύσουμε, όταν μια δύναμη ασκείται σε συγκεκριμένο σημείο της, τις τάσεις, τις δυνάμεις και τις παραμορφώσεις που θα προκύψουν. Με βάση αυτά τα κύρια στοιχεία θα δοθεί μια πρώτη επισκόπηση του προγράμματος. Κατά την εκκίνηση, η πρώτη εικόνα που συναντάει ο χρήστης είναι αυτή του σχήματος 6.2.

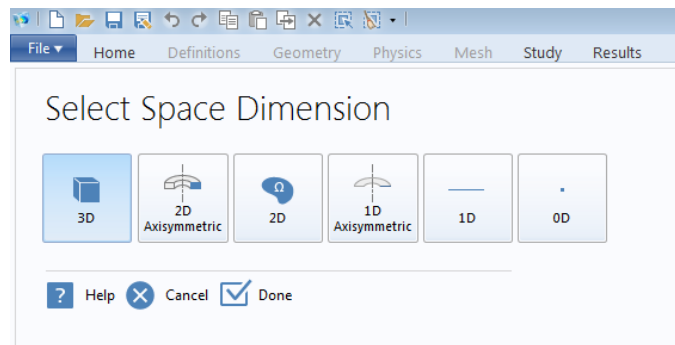


Σχημα 6.2: Βασική οθόνη προγράμματος Comsol Multiphysics και σε μεγέθυνση η δημιουργία του νέου αρχείου.

Το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα στο χρήστη για το άνοιγμα ενός νέου αρχείου. Οι επιλογές ανοίγματος νέου αρχείου είναι δυο: η δυνατότητα δημιουργίας νέου **model Wizard** ή τη δημιουργία νέου **Blank Model**. Η δεύτερη επιλογή δημιουργίας αρχείου καθοδηγεί στην ρύθμιση της χωρικής διάστασης του υπό μελέτη μοντέλου, τη φυσική του και το είδος της μελέτης που θα υλοποιηθεί.

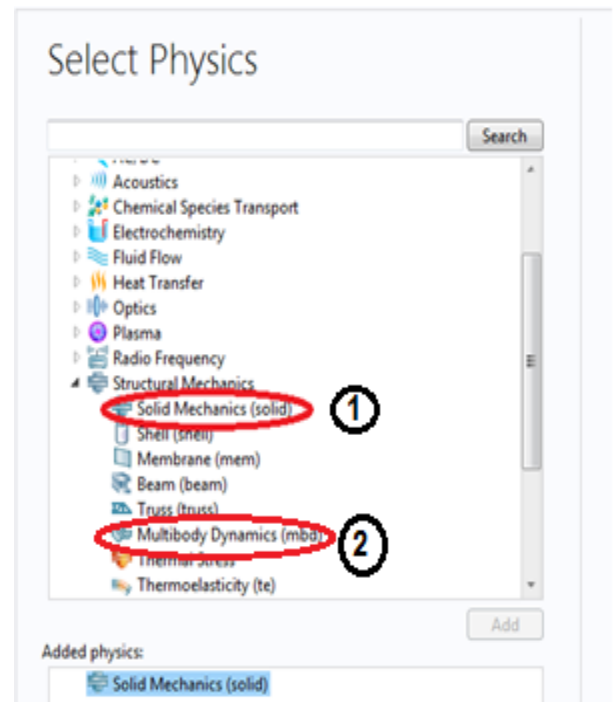
Τα βήματα που θα ακολουθηθούν, με βάση το αντικείμενο της μελέτης, είναι:

- A. Ξεκινώντας γίνεται η επιλογή της χωρικής διάστασης στην οποία θα γίνει η μελέτη. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3 δίνονται αρκετες επιλογες χωρικής διάστασης όπως: τρισδιάστατη (3D), δυσδιάστατη αξονοσυμμετρική (2D), δυσδιάστατη (2D), μονοδιάστατη αξονοσυμμετρική (1D), μονοδιάστατη (1D) και μηδενική (0D) χωρική διάσταση. Εδώ επιλέγουμε το κουμπί 3D γιατί μελετάμε το μοντέλο μας και στις τρεις διαστάσεις του χώρου.



Σχήμα 6.3: Επιλογή χωρικής διάστασης μελέτης μοντέλου

Β. Το δεύτερο βήμα είναι να επιλεγεί η φυσική διεπαφή ή οι φυσικές διεπαφές που θα διεπουν την μελέτη. Καθορίζεται επακριβώς το φυσικό περιβάλλον στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η μελέτη. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4, υπάρχουν πολλών ειδών τομείς της φυσικής που μπορεί ένας χρήστης να χρησιμοποιήσει για την μελέτη του, ανάλογα τη φύση της εργασίας του. Εδώ επιλέγεται ο τομέας της Δομικής Μηχανικής (Structural Mechanics) για την μελέτη τάσεων και παραμορφώσεων. Στον τομέα αυτό θα χρησιμοποιηθούν δύο υποτομείς του, συγκεκριμένα ο υποτομέας της Μηχανικής συμπαγών υλικών (Solid Mechanics) και ο υποτομέας της Δυναμικής των πολλαπλών σωμάτων (Multibody Dynamics). Η μελέτη των τάσεων και των παραμορφώσεων σε συμπαγή υλικά όπως αυτά της συνδεσμολογίας μας είναι οι κυριοί λόγοι για τους οποίους έγινε χρήση των δυο αυτών βασικών υποτομέων της Μηχανικής του προγράμματος καθώς και για την εξαγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων.



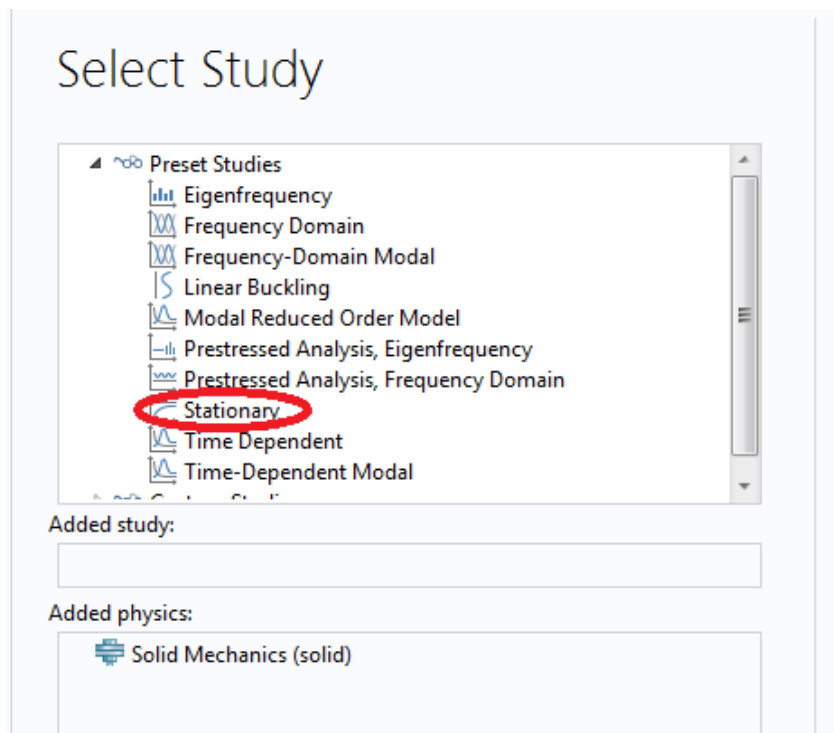
Σχήμα 6.4: Επιλογή φυσικής διεπαφής.

Ο τομέας της Δομικής Μηχανικής είναι αφιερωμένος, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, στην ανάλυση των μηχανικών δομών που υπόκεινται στατικά ή δυναμικά φορτία. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτό το λογισμικό για ένα ευρύ φάσμα τύπων ανάλυσης, συμπεριλαμβανομένων των στατικών, παροδικών, ιδιόμορφων / μεταφορικών, παραμετρικών, αναλύσεων συχνότητας όπως αναλύεται παρακάτω.

Ο πρώτος υποτομέας, της Μηχανικής συμπαγών υλικών καθορίζει τις ποσότητες και τα χαρακτηριστικά για την ανάλυση τάσεων και τη γενική γραμμική και μη γραμμική στερεή μηχανική, που επιλύει τις μετατοπίσεις. Είναι από τους πρώτους βασικούς υποτομείς που παρουσίασε το λογισμικό προσομοίωσης για αυτού του τύπου μελέτες.

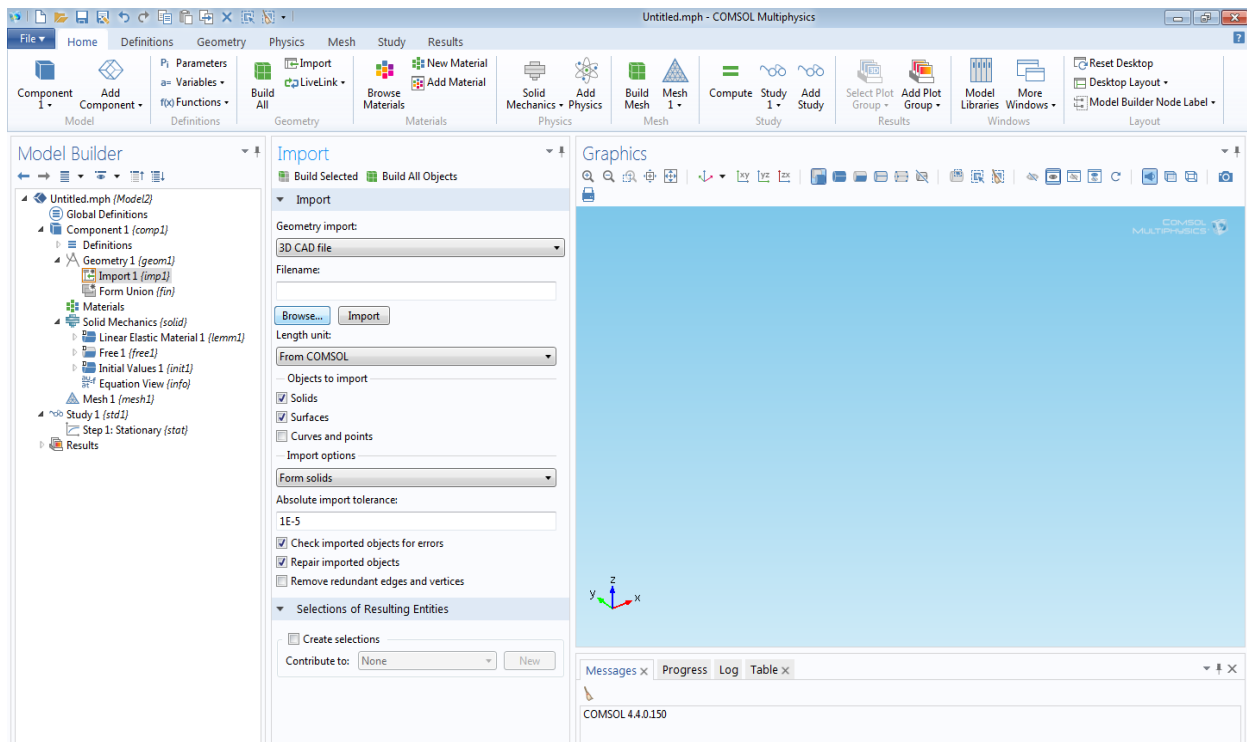
Ο δεύτερος υποτομέας, της Δυναμικής των πολλαπλών σωμάτων αποτελεί ένα νέο πρόσθετο εργαλείο, για την Δομική Μηχανική που παρέχει ένα προηγμένο σύνολο εργαλείων και για το σχεδιασμό αλλά κυρίως για τη βελτιστοποίηση των πολυσωματικών συστημάτων δομικής μηχανικής χρησιμοποιώντας ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA), όπως και ο πρώτος υποτομέας. Η ενότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση πλέον μικτών συστημάτων εύκαμπτων και άκαμπτων σωμάτων, όπου κάθε σώμα μπορεί να υποβληθεί σε μεγάλες περιστροφικές ή μεταφορικές μετατοπίσεις.

- C. Το τρίτο βήμα για την ολοκλήρωση του οδηγού δημιουργίας αρχείου του μοντέλου είναι η επιλογή μελέτης. Σε μια μεγάλη λίστα από τύπους μελετών που μας δίνει το λογισμικό, όπως φαίνεται και σχήμα 6.5 επιλέγεται η στατική μελέτη για το πρόβλημα μας.



Σχήμα 6.5: Επιλογή στατικής μελέτης για το υπό διερεύνηση μοντέλο.

Μετα την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων προκύπτει στην οθόνη η επιφάνεια εργασίας του προγραμματός, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6.



Σχήμα 6.6: Κυρίως επιφάνεια εργασίας του προγράμματος Comsol Multiphysics.

Στις ακόλουθα σχήματα (σχήμα 6.7 και σχήμα 6.8) επεξηγούνται επιγραμματικά τα διάφορα τμήματα της επιφάνειας εργασίας του λογισμικού Comsol Multiphysics.

Quick access toolbar: Περιέχει βασικές λειτουργίες του προγράμματος όπως άνοιγμα-κλείσιμο αρχείου, αποθήκευση, ανάρτηση εντολής, αντιγραφή και επικόλλησης

Περιέχει κουμπιά και λίστες εργαλείων για τον έλεγχο της διαδικασίας μοντελοποίησης

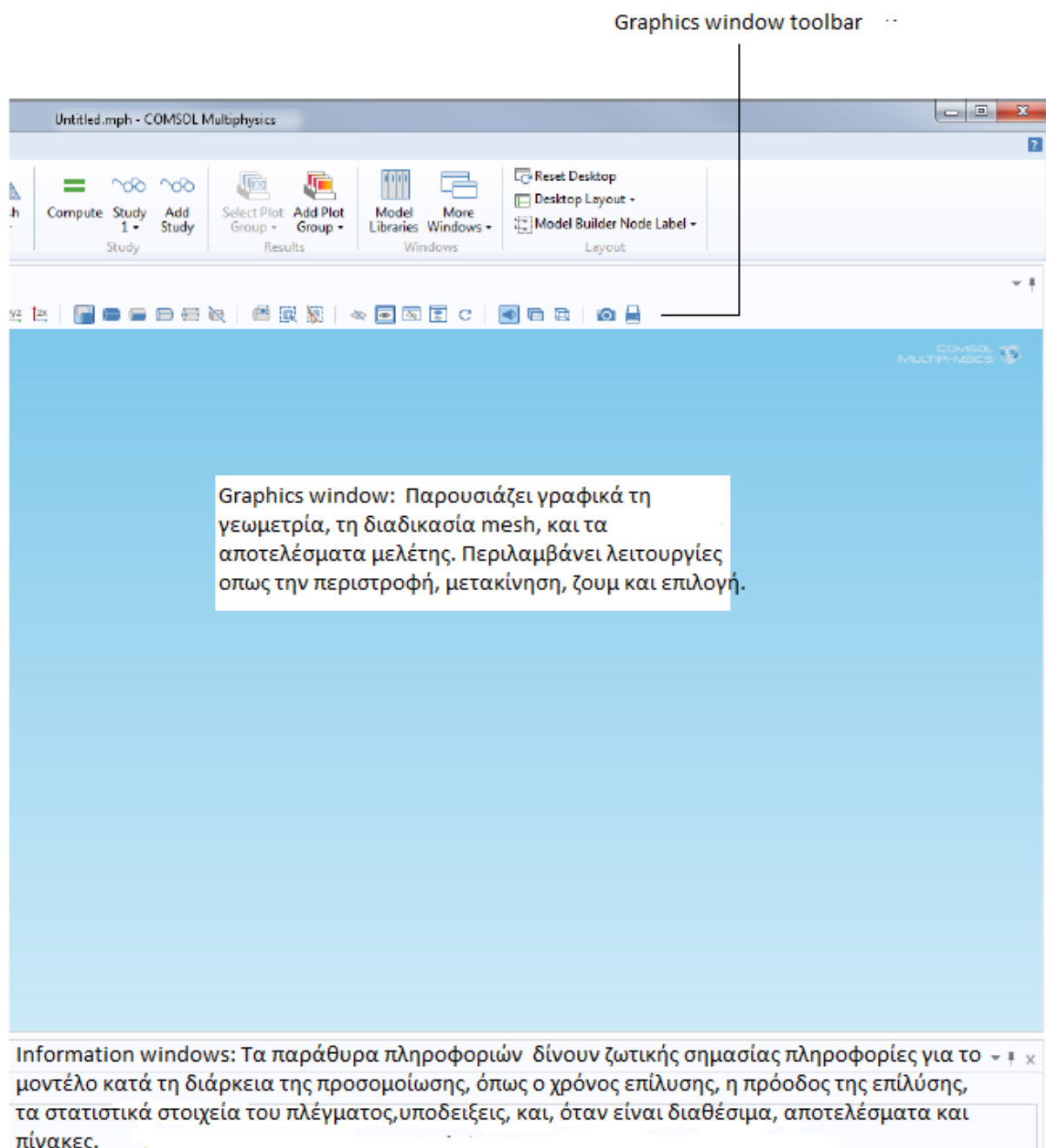
Model builder model

Model Tree: Περιέχει την σύνοψη του υπο μελέτη μοντέλου και όλες τις λειτουργίες και τις διεργασίες που απαιτούνται για την δημιουργία, την λύση του μοντέλου και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Model builder window: Αποτελεί μαζί με το Model tree και τις σχετικές εργαλειοθήκες την σύνοψη ολόκληρης της μελέτης του μοντέλου. Ελέγχεται ολόκληρη η διαδικασία της μοντελοποίησης.

Window Settings: Περιέχει τις συσχετιζόμενες ρυθμίσεις για οποιοδήποτε κόμβο του πεδίου του Model builder και αν επιλεγεί για την εξέλιξη της μοντελοποίησης.

Σχήμα 6.7: Κυρίως τμήματα επιφάνειας εργασίας προγράμματος Comsol Multiphysics.



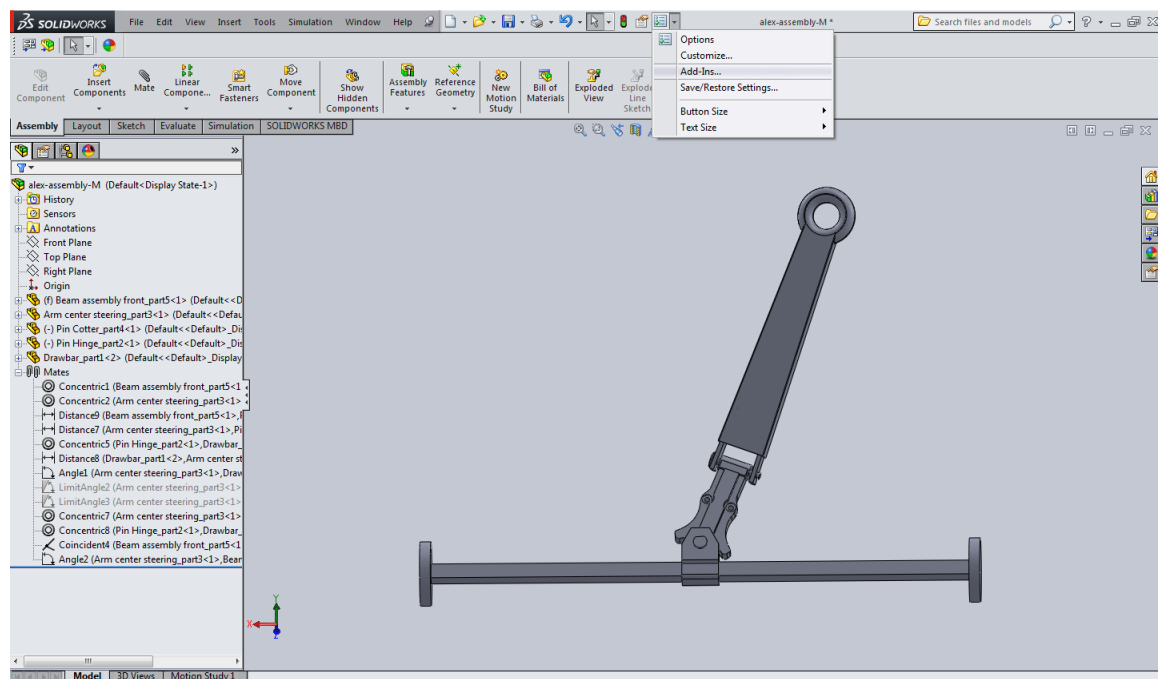
Σχήμα 6.8: Κυρίως τμήματα επιφάνειας εργασίας προγράμματος Comsol Multiphysics.

6.3 Χρήση λογισμικού COMSOL με LiLin για πακέτο σχεδιασμού

Με το LiLin για το πακέτο σχεδιασμού, ως πρόσθετο εργαλείο, ο χρήστης μπορεί να συνδέσει τις γεωμετρίες του πακέτου σχεδιασμού με προσομοιώσεις στο Comsol Multiphysics, κερδίζοντας πολλαπλά οφέλη. Στην ουσία, με αυτό το εργαλείο γίνεται ο συγχρονισμός των δυο προγραμμάτων. Μπορούν να εισαχθούν γεωμετρίες και παράμετροι που δημιουργήθηκαν σε επίπεδο σχεδιασμού με το solidworks για παράδειγμα και να συγχρονιστούν άμεσα σε επίπεδο προσομοίωσης στο Comsol Multiphysics.

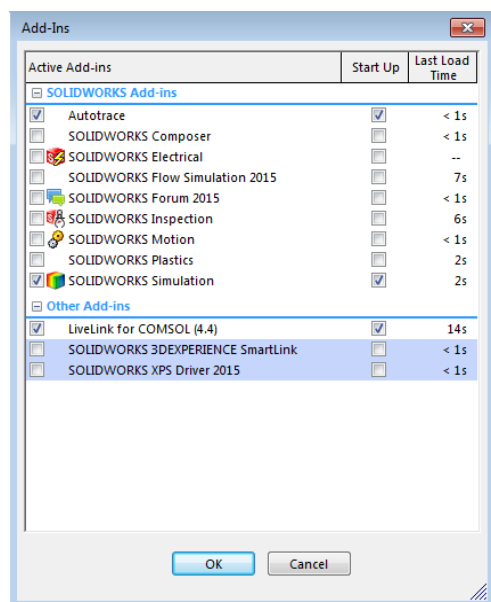
Το πρώτο βήμα για τον συγχρονισμό των προγραμμάτων με το LiveLink είναι η εμφάνιση του υπό μελέτη μοντέλου με το πακέτο σχεδιασμού. Στο σχήμα 6.9 φαίνεται το ολοκληρωμένο

σύστημα διεύθυνσης σχεδιασμένο στο πακέτο σχεδιασμού. Όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα, πάνω δεξιά, επιλέγεται το κουμπί του αναδυόμενου παράθυρου **Add ins...**



Σχήμα 6.9: Ολοκληρωμένο σχέδιο διάταξης μπάρας ρυμούλκησης.

Με την επιλογή αυτή προκύπτει η καρτέλα του σχήματος 6.10. Σε αυτήν με απλό κλικ, ενεργοποιείται, το κουτάκι του εργαλείου που ονομάζεται LiLin for Comsol.



Σχήμα 6.10: Επιλογή LiLin for Comsol ως add-in.

Το επόμενο βήμα είναι το άνοιγμα του προγράμματος Comsol Multiphysics ώστε να συγχρονιστούν τα δυο λογισμικά δίνοντας στο χρήστη τη δυνατότητα της εισαγωγής του μοντέλου αλλά και την άμεση ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των δυο λογισμικών που έχει να κάνει τόσο με την γεωμετρία όσο και με τις παραμέτρους του υπό μελέτη μοντέλου.

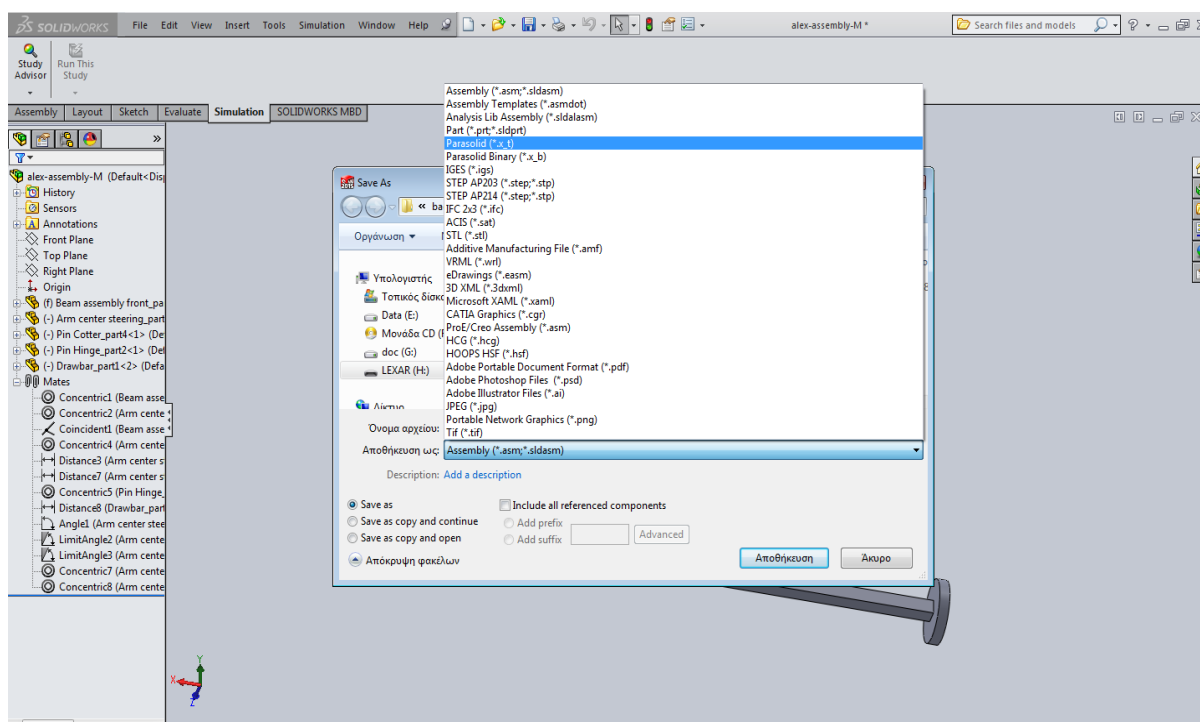
6.4 Αναλυτικά βήματα χρήσης του COMSOL για τη μοντελοποίηση του συστήματος διεύθυνσης

6.4.1 Εισαγωγή γεωμετρίας συστήματος διεύθυνσης στο Comsol Multiphysics

Η εισαγωγή της γεωμετρίας του συστήματος διεύθυνσης που σχεδιάστηκε στο πακέτο σχεδιασμού στο σχήμα 5.23 μπορεί να γίνει με δυο τρόπους:

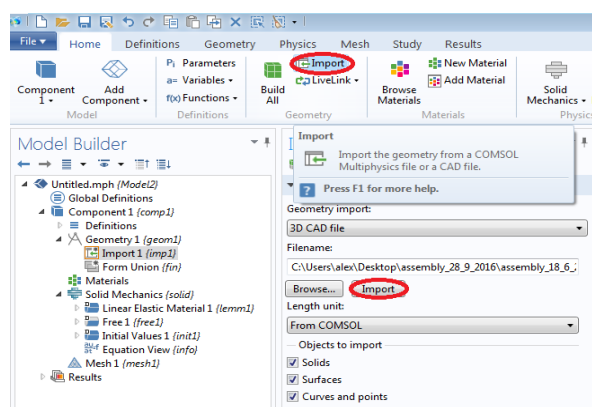
- την αποθήκευση του ως αρχείο συμβατό και
- με την χρήση του πρόσθετου εργαλείου LiLin για το πακέτο σχεδιασμού.

Με τον πρώτο τρόπο, αφού έχουν ολοκληρωθεί όλες οι εργασίες στο σχέδιο, μπορεί να αποθηκευτεί ως αρχείο Parasolid με κατάληξη *.x_t είτε ως αρχείο Parasolid Binary με κατάληξη *.x_b σύμφωνα με την εικόνα του σχήματος 6.11.



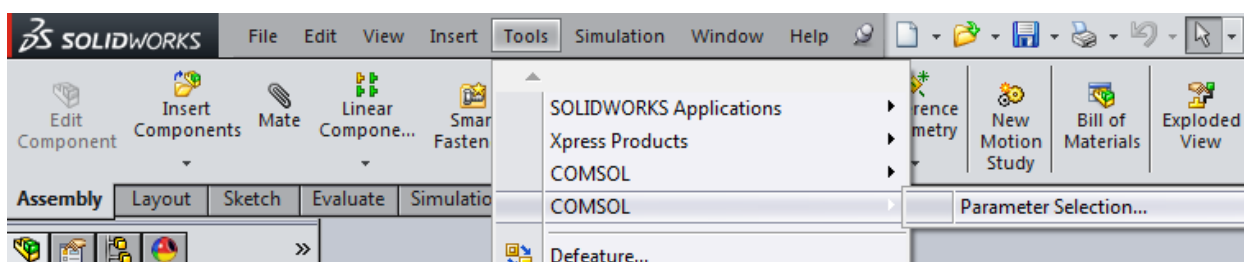
Σχήμα 6.11: Αποθήκευση σχεδίου ως αρχείο Parasolid (*.x_t) ή Parasolid Binary (*.x_b).

Οι δυο μορφές αυτές είναι συμβατές με το Comsol Multiphysics. Αφού ολοκληρώθηκαν τα πρώτα τρία βήματα, το λογισμικό είναι έτοιμο να δεχτεί το μοντέλο προς επίλυση. Αυτό γίνεται, με την επιλογή του κουμπιού *import* από το κυρίως μενού όπως φαίνεται στο σχήμα 6.12. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι είναι γνωστό στο χρήστη ο χώρος που αποθηκεύτηκε το σχέδιο και το είδος της γεωμετρίας που θα γίνει εισαγωγή να είναι 3D CAD File.



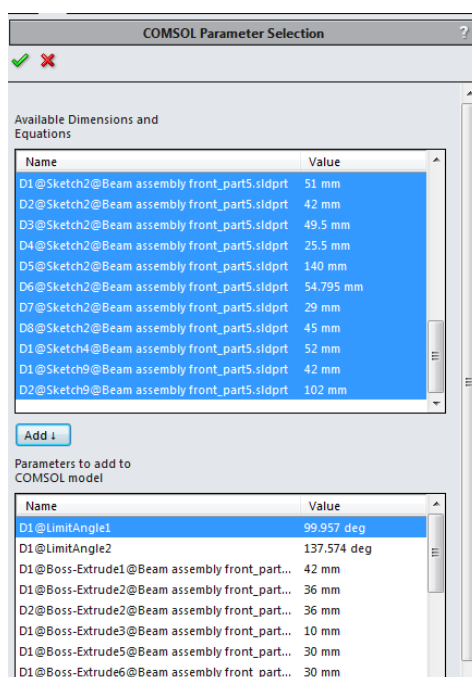
Σχήμα 6.12: Εισαγωγή του 3D σχεδίου

Ο δεύτερος τρόπος εισαγωγής της γεωμετρίας του μοντέλου στο Comsol Multiphysics είναι η χρήση του εργαλείου LiLin. Αρχικά θα πρέπει για να επιτευχθεί συγχρονισμός, να είναι σε λειτουργία και τα δυο προγράμματα, με το αρχείο του μοντέλου ανοιχτό στο πρόγραμμα του πακέτου σχεδιασμού. Με τον τρόπο αυτό, η εισαγωγή θα γίνει με τη χρήση, στο κυρίως μενού, του κουμπιού *LiLin*. Πριν ολοκληρωθεί η εισαγωγή, πρέπει να επιβεβαιωθεί πως οι παράμετροι που έχουν οριστεί στο πακέτο σχεδιασμού για το μοντέλο θα εισαχθούν και στο πρόγραμμα του Comsol Multiphysics. Για το λόγο αυτό, στο ήδη ανοιχτό τρισδιάστατο σχέδιο, στο πακέτο σχεδιασμού και επιλέγονται οι παραμέτροι που θα συμπεριληφθούν μαζί με τη γεωμετρία κατά την διαδικασία εισαγωγής. Στο σχήμα 6.13 φαίνεται η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί.



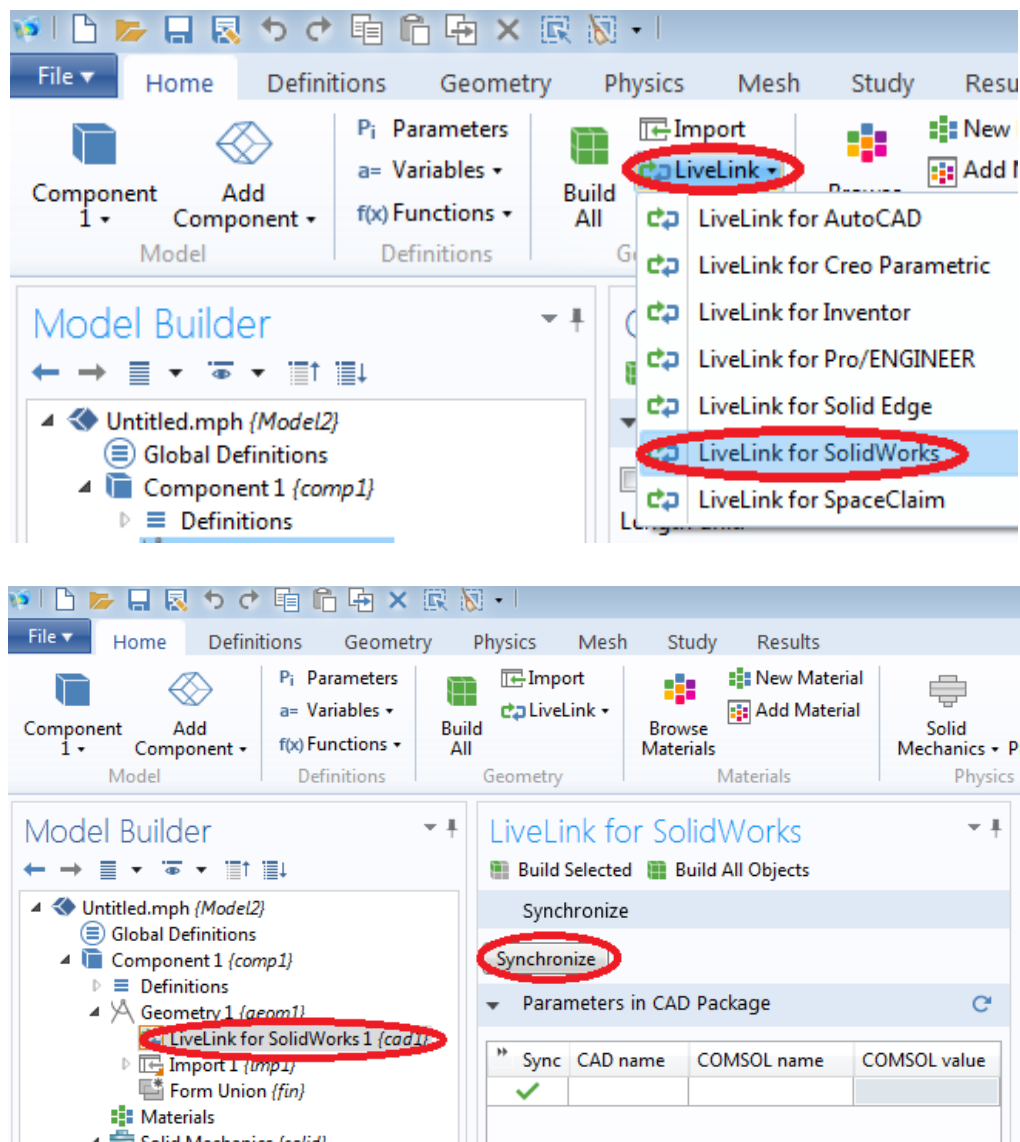
Σχήμα 6.13: Εισαγωγή των παραμέτρων του σχεδίου στο Comsol Multiphysics.

Στο επόμενο σχήμα 6.14 πλέον να γίνει επιλογή των παραμέτρων εισαγωγής του σχεδίου στο πρόγραμμα προσομοίωσης.



Σχήμα 6.14: Επιλογή παραμέτρων για εισαγωγή.

Αφού ολοκληρωθεί η παραπάνω εργασία στο πακέτο σχεδιασμού, επιστρέφουμε στο Comsol Multiphysics για να ολοκληρώσουμε τη διαδικασία εισαγωγής. Με κλικ στο κουμπί *Synchronize* έχει πλέον ολοκληρωθεί η διαδικασία της εισαγωγής της γεωμετρίας. Τα τελικά βήματα της διαδικασίας φαίνονται στην εικόνα του σχήματος 6.15.



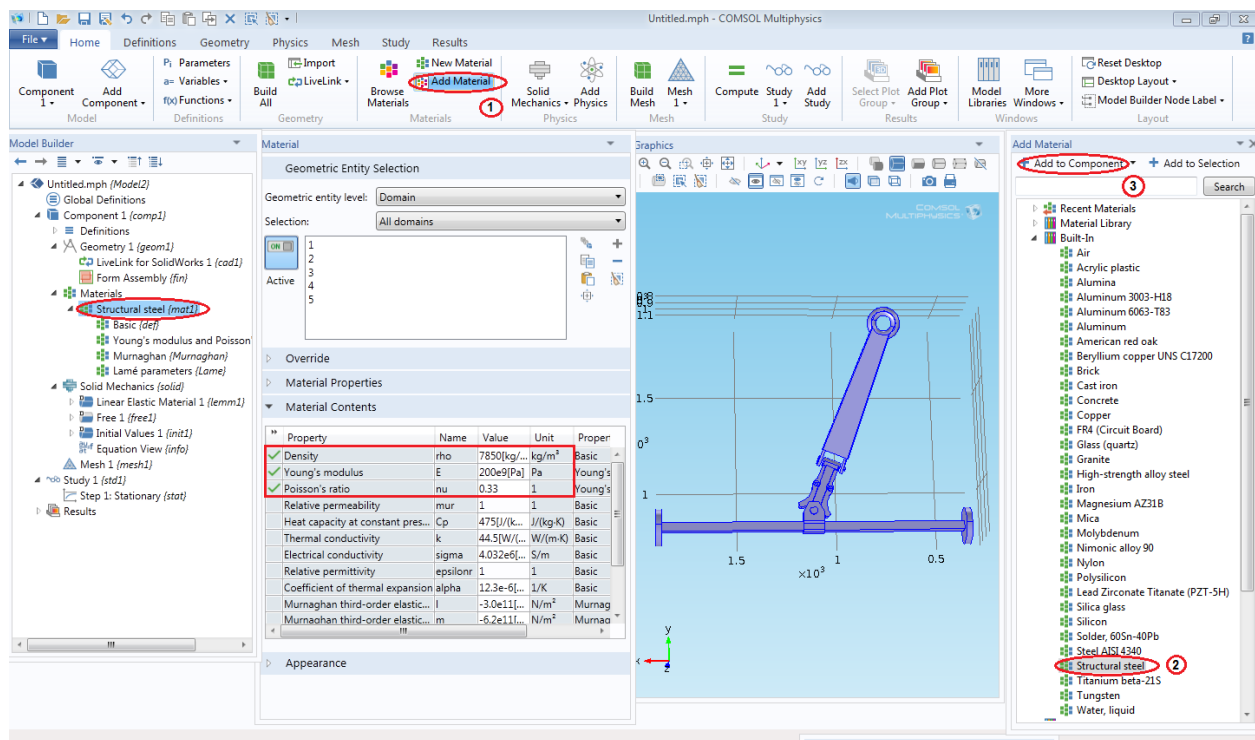
Σχήμα 6.15: Συγχρονισμός προγράμματος Comsol Multiphysics.

6.4.2 Ρύθμιση Παραμέτρων

Το επόμενο βήμα για την μοντελοποίηση του συστήματος διεύθυνσης, είναι η ρύθμιση των παραμέτρων. Είναι οι συνθήκες εκείνες που θα βοηθήσουν στη ορθή παραμετροποίηση της φυσικής κατάστασης του συστήματος δημιουργώντας το κατάλληλο περιβάλλον για την διαδικασία της μοντελοποίησης. Οι παραπάνω ρυθμίσεις πραγματοποιούνται σε περιβάλλον που καθορίζεται από την διεπαφή Solid Mechanics του τομέα Structural Mechanics.

Επομένως, ακολουθώντας το διάγραμμα κατασκευής της μελέτης του Comsol, η πρώτη παράμετρος που πρέπει να οριστεί είναι το υλικό κατασκευής των τμημάτων που απαρτίζουν την συνδεσμολογία. Για το υλικό κατασκευής τους είναι ο χάλυβας όπως αναλύθηκε στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας. Ο χάλυβας, σύμφωνα με διεθνείς καταλόγους υλικών, έχει μέτρο Ελαστικότητας 200 GPa, όρια διαρροής 280 MPa και όριο θραύσης 430 MPa.

Για την επιλογή του υλικού χρησιμοποιήθηκε το κουμπί *Add Material* και επιλέχθηκε το χάλυβας (structural steel), σύμφωνα με την εικόνα του σχήματος 6.16. Το υλικό κατασκευής, ως παράμετρος ισχύει για όλες τις θέσεις που μελετούνται η παρούσα εργασία.



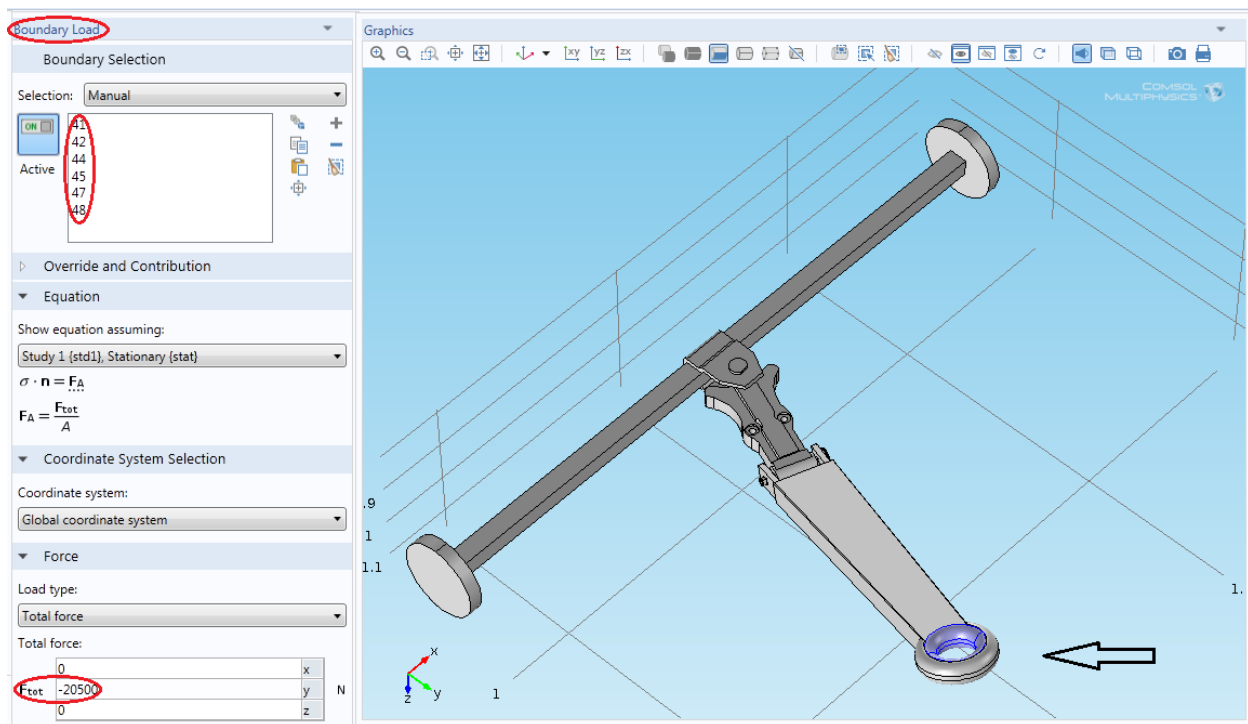
Σχήμα 6.16: Επιλογή υλικού κατασκευής εξαρτημάτων συνδεσμολογίας.

Μετά τον ορισμό του υλικού κατασκευής των τμημάτων, είναι ο καθορισμός των οριακών συνθηκών της φυσικής που διέπουν την κατασκευή.

Η πρώτη παράμετρος, οριακής φύσεως, που ορίζεται είναι η **δύναμη** που ασκείται στο σύστημα διεύθυνσης. Όπως περιγράφηκε ήδη στην παράγραφο 3.4 η δύναμη οπισθέλκισης υπολογίστηκε και είναι ίση με:

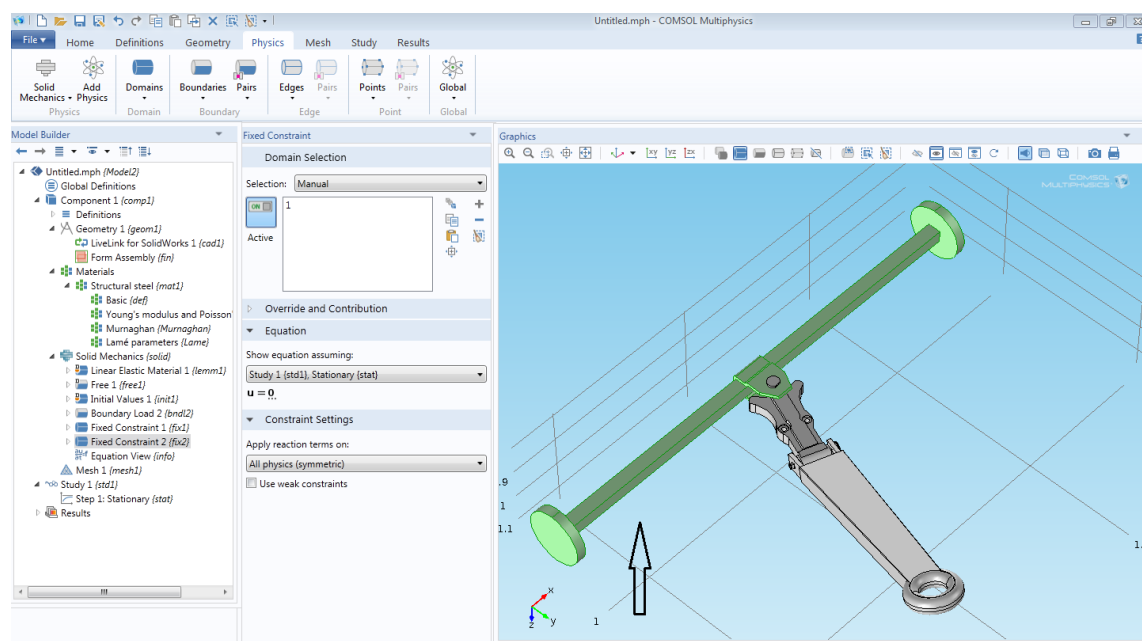
$$\left. \begin{aligned} F_{pb_asphalt} &= 20.430 \text{ Nt} \text{ ή} \\ F_{pb_concrete} &= 13.620 \text{ Nt} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\bullet F_{pb} = n_s * (m_{eq} * g), \\ &\bullet \theta = 18^\circ \\ &\bullet n_{s_asphalt} = 0,9 \text{ ή } n_{s_concrete} = 0,6 \\ &\bullet m_{eq} = 2.314 \text{ Kg} \\ &\bullet \text{αμελητέα αντίσταση αέρα} \end{aligned}$$

Η συνδεσμολογία, δέχεται λοιπόν μια δύναμη ίση με 20.430Nt όταν το μηχάνημα κινείται σε δρόμο κατασκευασμένο από ασφαλτό ή μια δύναμη ίση με 13.620Nt σε δρόμο κατασκευασμένο από τσιμέντο. Η τιμή της διαφοροποιείται, όπως φαίνεται, ανάλογα με το τύπο του οδοστρώματος. Αναπτύσσεται στον εσωτερικό δακτύλιο της μπάρας ρυμούλκησης από το τράκτορα ρυμούλκησης κατά τη διεύθυνση y όπως σχεδιάστηκε το σύστημα. Για να οριστεί η δύναμη αυτή σύμφωνα με την εικόνα του σχήματος 6.17 ορίζεται στο παράθυρο της ολικής δύναμης ως συντεταγμένη y με αρνητικό πρόσημο μιας και εφαρμόζεται αντίθετα από το άξονα της κατεύθυνσης y που εφαρμόζεται στις επιφάνειες 41, 42, 44, 45, 47 και 48 της μπάρας ρυμούλκησης της συνδεσμολογίας. Αυτό ισχύει και για τις δυο θέσεις που θα μελετηθεί η συνδεσμολογία, μιας και η δύναμη που δέχεται το σημείο αυτό παραμένει σταθερή σε οποιαδήποτε ελιγμό πραγματοποιηθεί κατά την διάρκεια της οπισθέλκισης και έχει την τιμή που υπολογίστηκε σύμφωνα με τον τύπο οδοστρώματος στον οποίο πραγματοποιείται. Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η δύναμη που εφαρμόζεται στο σύστημα σε μια τυχαία θέση κατά την διάρκεια της διαδικασίας σε δρόμο από ασφαλτό.



Σχήμα 6.17: Ορισμός δύναμης οπισθέλκεσης στη συνδεσμολογία.

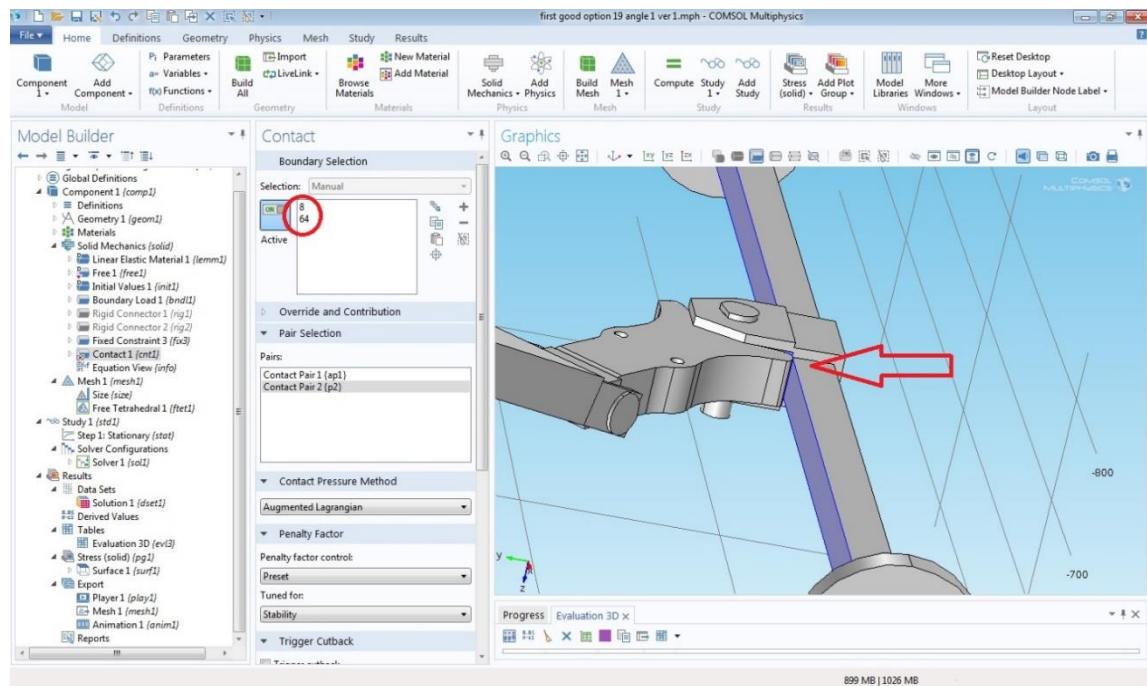
Οι επόμενοι παράμετροι που θα πρέπει να οριστούν είναι τα πακτωμένα τμήματα της συνδεσμολογίας (**Fixed constraints domains**). Τα παραπάνω αποτελούν τα τμήματα εκείνα, επιφάνειες, ακμές ή ακόμα και ολόκληρα εξαρτήματα της συνδεσμολογίας που ορίζονται ως πακτωμένα. Σύμφωνα με το σχήμα 6.18, στη θέση ηρεμίας, ολόκληρο το τμήμα του εμπρόσθιου συγκροτήματος άξονα ορίστηκε ως πακτωμένο (fixed) τμήμα της συνδεσμολογίας.



Σχήμα 6.18: Ορισμός πάκτωσης της περιοχής του εμπροσθίου συγκροτήματος άξονα.

Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι αυτό γίνεται διότι το σύστημα εξετάζεται σε οριακή θέση, όπου η συσκευή την οποία φέρει, βρίσκεται στην χρονική εκείνη στιγμή, που ξεκολλά από το έδαφος, λίγο πριν εκκίνηση της ρυμούλκησης. Η παράμετρος αυτή ισχύει και για την θέση υπό γωνία που μελετάται το μοντέλο μας.

Μια άλλη βασική σταθερά είναι εκείνη που θα οριστεί μόνο στη θέση **υπό γωνία**. Η οριζόμενη παράμετρος αυτή ανήκει στη κατηγορία των Fixed Constrains και στην υποκατηγορία *Contacts*. Στη θέση που η μπάρα ρυμούλκησης και το κεντρικό τμήμα του βραχίονα βρίσκεται σε γωνία 20° με τον εμπρόσθιο συγκρότημα άξονα είναι σε επαφή με τον τελευταίο. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να οριστεί μια σταθερά επαφής μεταξύ των δυο παραπάνω εξαρτημάτων ώστε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης να αναπτυχθούν οι επιθυμητές τάσεις στο σύστημα διεύθυνσης και να προκύψουν ικανοποιητικά, προς μελέτη, αποτελέσματα. Στην εικόνα του σχήματος 6.19 φαίνεται το σημείο επαφής μεταξύ των δυο τμημάτων το οποίο ορίζεται ως επαφή (contact) μεταξύ των επιφανειών 8 και 64 του συστήματος.

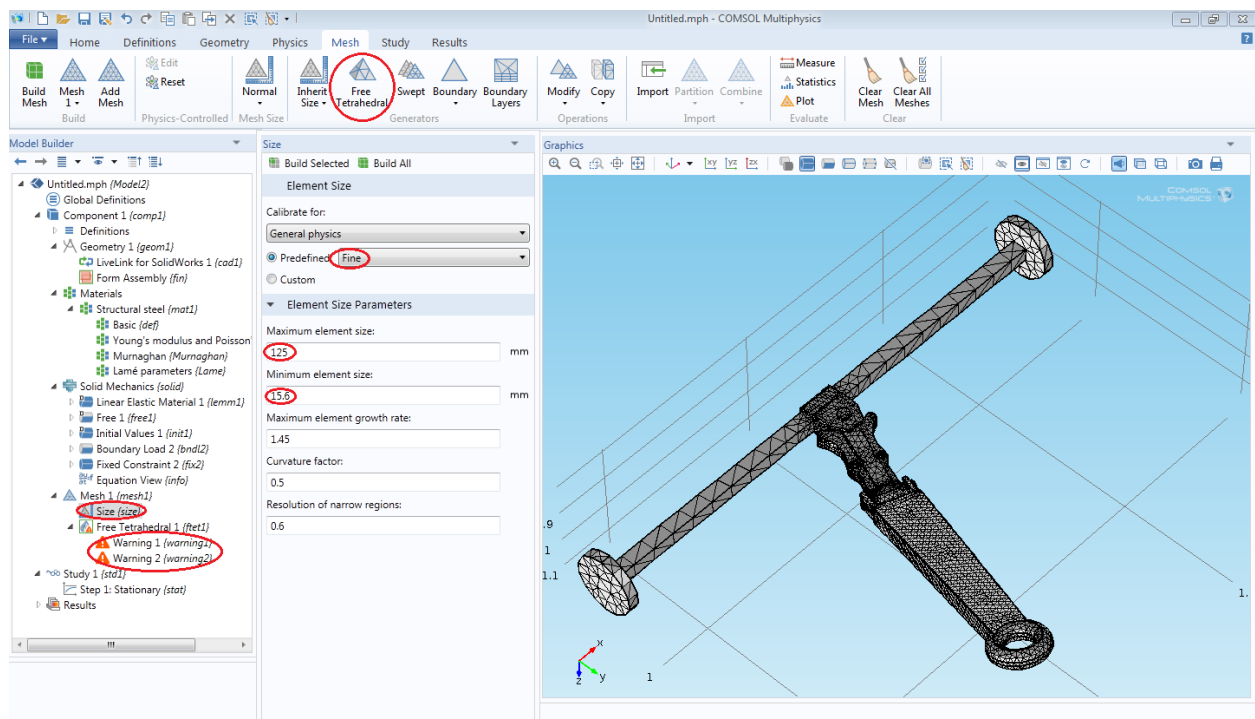


Σχήμα 6.19: Σημείο ορισμού παραμέτρου επαφής της συνδεσμολογίας σε θέση υπό γωνία

6.4.3 Πλεγματοποίηση (Meshing)

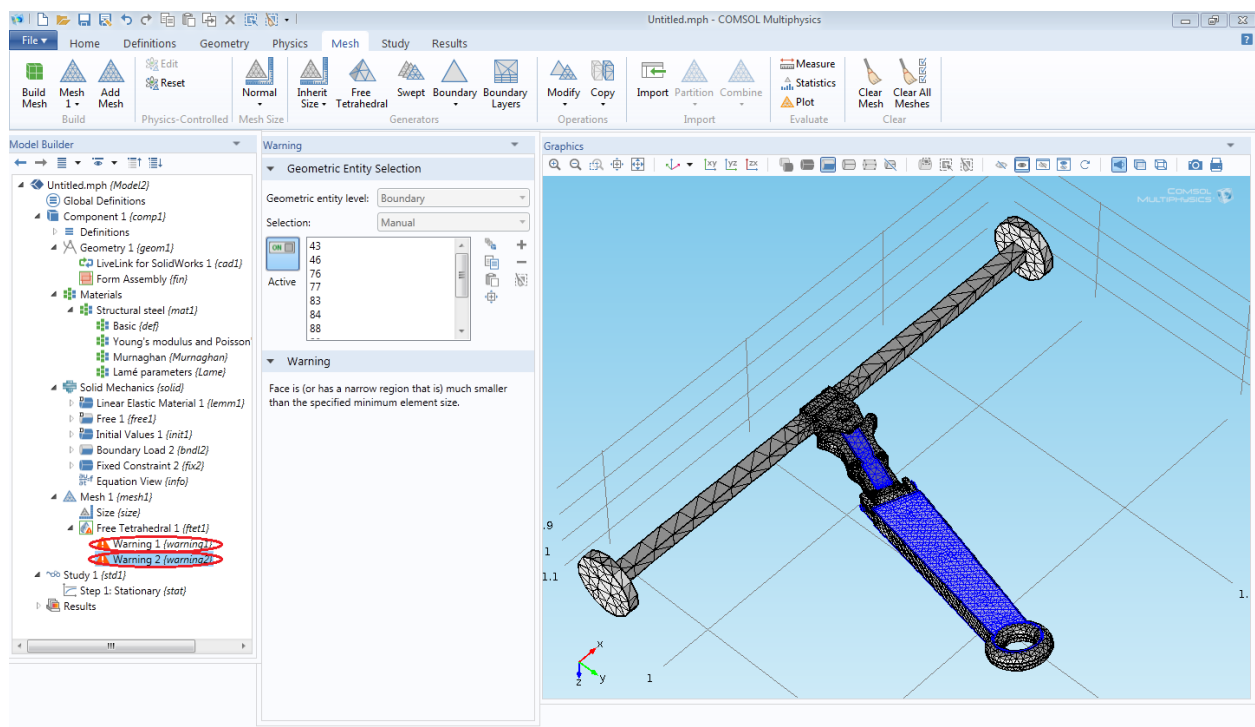
Η πλεγματοποίηση είναι ένα πολύ καθοριστικό βήμα για την ολοκλήρωση της μελέτης και την εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων. Για την πραγματοποίηση του meshing της πλέον ορισμένης γεωμετρίας του μοντέλου, επιλέγουμε από το κυρίως μενού το μενού mesh. Υπάρχουν πολλά είδη πλεγματοποίησης, στη συγκεκριμένη μελέτη επιλέγεται Free Tetrahedral, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.20.

Όπως φαίνεται η διαδικασία του mesh πραγματοποιήθηκε για το υπό μελέτη αντικείμενο (με μέγιστη διάσταση 1500 mm) με μέγεθος στοιχείων μεταξύ 15,6mm και 125mm. Η διαμέτρηση (calibration) έγινε σε επιλογή *Fine*. Τα αποτελέσματα που προέκυψε κρίθηκε μη ικανοποιητικό. Στο σχήμα 6.21 φαίνεται ότι η πλεγματοποίηση δεν ολοκληρώθηκε επιτυχώς. Το λογισμικό ενημερώνει με δυο προειδοποιήσεις (warnings) ότι υπάρχουν πολλά σημεία του πλέγματος που δεν μπόρεσαν να διακριτοποιηθούν. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι θα πρέπει να μεταβληθεί το ελάχιστο μέγεθος στοιχείου.

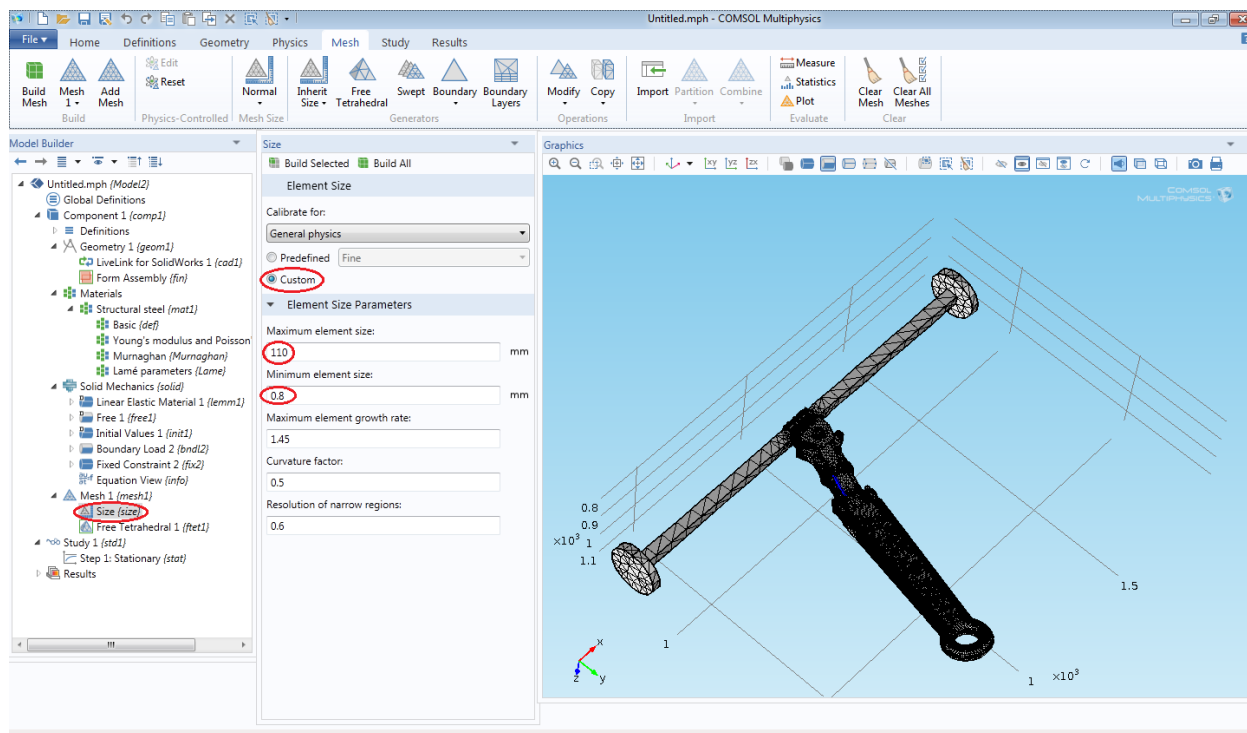


Σχήμα 6.20: Εφαρμογή παραμέτρων Meshing του μοντέλου.

Οι πολλαπλές επαναλήψεις της διαδικασίας “try and error” και με μέγιστο μέγεθος στοιχείου ίσο με 110mm και ελάχιστο μέγεθος στοιχείου ίσο με 0,8mm η πλεγματοποίηση ολοκληρώθηκε με επιτυχία, σύμφωνα με την εικόνα του σχήματος 6.21. Το μοντέλο προς επίλυση όμως ήδη έχει επιβαρυνθεί, διότι το ελάχιστο μέγεθος στοιχείου είναι πλέον 0,8mm απαιτώντας υπολογισμούς για την επίλυσή του με μεγάλες απαιτήσεις υπολογιστικής δύναμης.



Σχήμα 6.21: Εμφάνιση warnings κατά την διαδικασία meshing.

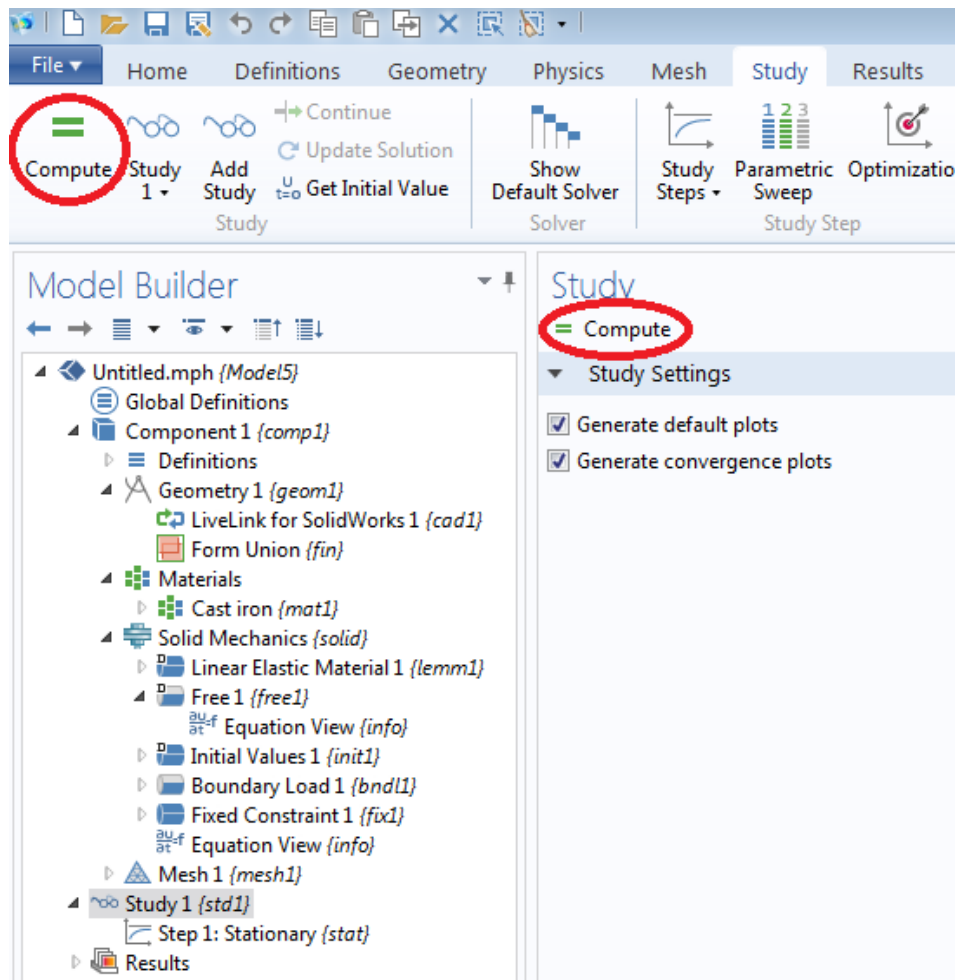


Σχήμα 6.22: Ολοκλήρωση επιτυχημένης αλλά μη ικανοποιητικής διαδικασίας Meshing.

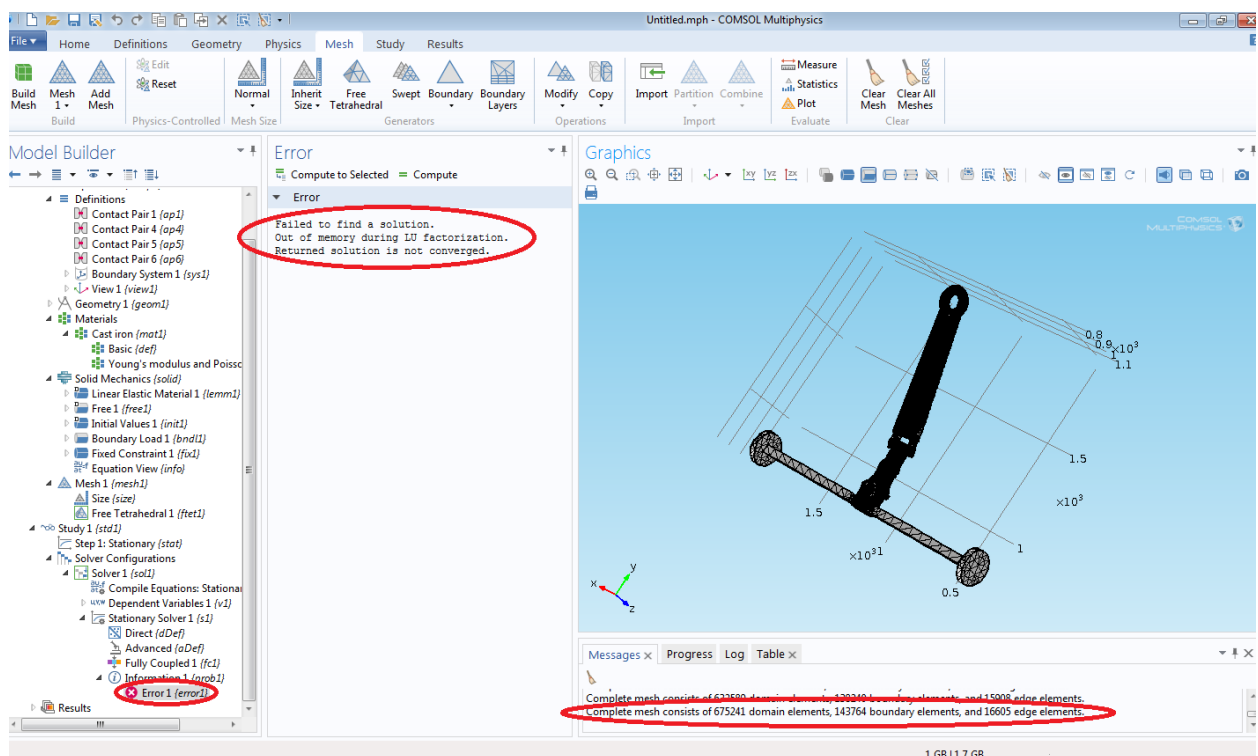
6.4.4 Προβλήματα κατά εφαρμογή πλεγματοποίησης

Όπως προαναφέρθηκε η πλεγματοποίηση του μοντέλου, κατά την διάρκεια της μοντελοποίησης, είναι μια διαδικασία που στηρίζεται στη θεωρία των τετραερασμένων στοιχείων, επομένως απαιτεί μεγάλη υπολογιστική δύναμη για να ολοκληρωθεί. Επιπλέον οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν μετά την Οι σχεδιαστικές ατέλειες (λάθη σχεδιασμού, μεγάλος αριθμός καμπυλόγραμμων επιφανειών) καθώς και η λανθασμένη παραμετροποίηση του μοντέλου αποτελούν τα βασικά είναι εκείνα σημεία που προκαλούν τα μεγαλύτερα προβλήματα που αυξάνουν ακόμη περισσότερο την διαδικασία του meshing. Το αποτέλεσμα του συνδυασμού των παραπάνω είναι να μην μπορεί το λογισμικό να ολοκληρώσει το στάδιο αυτό της μοντελοποίησης. Στην εργασία αυτή, αντιμετωπίστηκαν αυτά τα προβλήματα. Στην εικόνα του σχήματος 6.22 φαίνεται πως για να ολοκληρωθεί το στάδιο του mesh έπρεπε η ελάχιστη τιμή του μεγέθους στοιχείου του πλέγματος να περιοριστεί στην τιμή των 0,8 mm, αριθμός πολύ μικρός για πραγματοποίηση μοντελοποίησης και επίλυσης του προβλήματος σε ένα κοινό οικιακό ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Πράγματι στην προσπάθεια επίλυσης του προβλήματος του σχήματος 6.23, το αποτέλεσμα που προκύπτει, μετά από πολύ χρόνο, ένα μήνυμα όπως φαίνεται στο σχήμα 6.24. Παρατηρείται ότι το πρόγραμμα δίνει μήνυμα λάθους μη έυρεσης λύσης. Στην ίδια εικόνα του σχήματος 6.23, παρατηρείται ότι η διαδικασία της δημιουργίας πλέγματος που ολοκληρώθηκε αποτελείται από 675.241 στοιχεία, αριθμός τεράστιος σε σύγκριση με τη πολυπλοκότητα της παρούσας μελέτης αλλά και της υπολογιστικής δύναμης που απαιτείται από έναν υπολογιστή.



Σχημα 6.23: Ολοκλήρωση επίλυσης με την επιλογή *Compute*.



Σχήμα 6.24: Αποτυχία εύρεσης λύσης με εμφάνιση error.

Σε όλα αυτά πρέπει να αναφερθεί και η λανθασμένη παραμετροποίηση του μοντέλου. Πράγματι πέρα από τα μηνύματα σφαλμάτων που προεκυψάν, σε αρκετές προσπάθειες που έγιναν, η επίλυση του προβλήματος δεν ολοκληρώθηκε. Αυτό σημαίνει, σύμφωνα με το Troubleshooting του λογισμικού στα εγχειρίδια του, ότι δεν έχει γίνει ολοκληρωμένος και σωστός ορισμός των παραμέτρων που διέπουν το μοντέλο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το λογισμικό να μην μπορεί να πραγματοποιήσει επίλυση μελέτης και να δώσει αποτελέσματα.

Από τα παραπάνω είναι κατανοητό ότι, αρχικά πρέπει η διακριτοποίηση της γεωμετρίας να πραγματοποιηθεί με μεγαλύτερη τιμή ελαχίστου μεγέθους στοιχείο ώστε ο αριθμός τους να μειωθεί σημαντικά. Δεύτερον θα πρέπει να γίνει ορθολογικότερη παραμετροποίηση της μελέτης. Έτσι το λογισμικό θα μπορέσει να ολοκληρώσει τα στάδια της διακριτοποίησης και παραμετροποίησης και να ολοκληρώσει το τελευταίο στάδιο της επίλυσης. Η λύση που προτείνεται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η απλούστευση του σχεδιασμού του μοντέλου καθώς και η αποφυγή ορισμού πολύπλοκων παραμέτρων στη φυσική διεπαφή του υπό μελέτη μοντέλου.

6.4.5 Σχεδιαστικές αλλαγές συστήματος διεύθυνσης

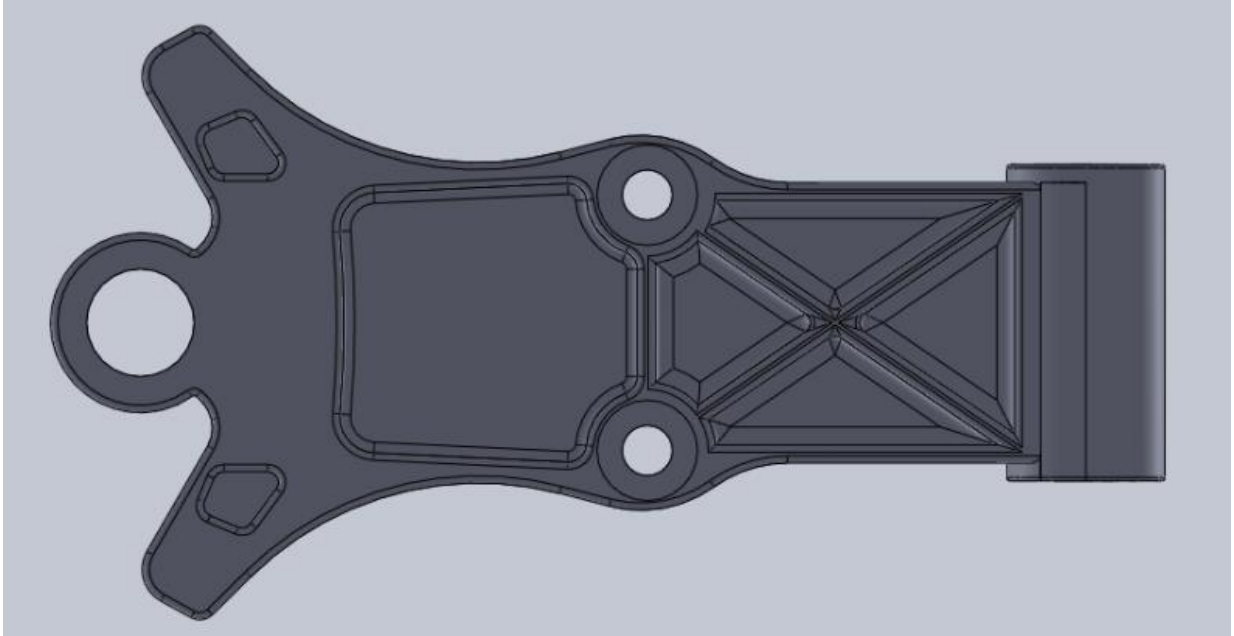
Με τον όρο απλοποίηση του μοντέλου εννοούμε την διαδικασία κατά την οποία θα περιορίσουμε την πολυπλοκότητα του σχεδίου του μοντέλου μας, χωρίς αυτό να επηρεάσει την φυσική του δομή και λειτουργία. Στη διαδικασία αυτή θα χρησιμοποιηθεί το πρόσθετο εργαλείο LiLin for πακέτο σχεδιασμού.

Οι απλοποιήσεις θα πραγματοποιηθούν στα επιμέρους εξαρτήματα του συστήματος διεύθυνσης, σε επίπεδο σχεδιασμού στο πακέτο σχεδιασμού και κατόπιν τα επιμέρους τμήματα καθώς και ολόκληρη η συνδεσμολογία θα υποβάλλεται σε διαδικασία meshing στο λογισμικό Comsol Multiphysics. Κατά την διάρκεια της επανασχεδίασης τμημάτων από τα εξαρτήματα που παρουσιάζουν δυσκολίες στη δημιουργία πλέγματος, οι αλλαγές θα μεταβιβάζονται αυτόματα, μέσω LiLin, σε διαδικασία πλεγματοποίησης. Αποτελεί μια επαναλαμβανόμενη προσπάθεια που σκοπό έχει την επίτευξη μιας επιτυχημένης πλεγματοποίησης του μοντέλου με ικανοποιητικές τιμές διακριτοποίησης που θα μας επιτρέψει μια ικανοποιητική επίλυση του προβλήματος μας. Είναι μια καθαρά στοχαστική προσπάθεια, από την οποία θα προκύψουν ικανοποιητικές τιμές διακριτοποίησης με τις λιγότερες διαφοροποιήσεις στο σχεδιασμό των τμημάτων του μοντέλου.

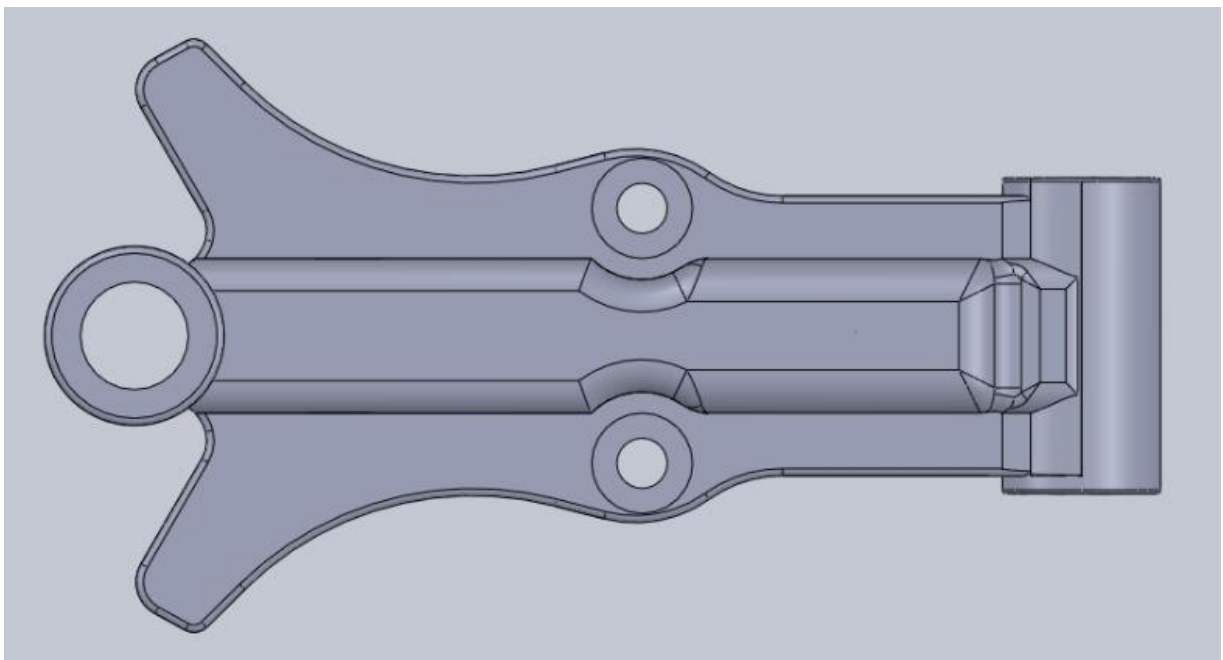
Στις εικόνες του 4^{ου} κεφαλαίου που αποτελεί και την φάση σχεδίασης των τμημάτων της συνδεσμολογίας φαίνεται ότι για την σχεδίαση τους χρησιμοποιήθηκε η εντολή *Fillet*. Η εντολή αυτή δημιουργεί την δημιουργία καμπυλοτήτων των επιφανειών δίνοντας στα εξαρτήματα την τελική τους μορφή. Διαγράφει τις ακμές των επιφανειών και τις μετατρέπει σε τόξα, δίνοντας τους την φωτορεαλιστική εικόνα που έχει το κάθε εξάρτημα. Ακόμη, παρατηρήθηκαν, ότι υπάρχουν σε πολλά εξαρτήματα, οπές και βαθουλώματα, ως καμπυλότητες που φτιάχτηκαν από τον κατασκευαστή.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις, σε επαναλαμβανόμενες προσπάθειες διακριτοποίησης, απέδειξαν πως δημιουργούν τα μεγαλύτερα προβλήματα στη δημιουργία πλέγματος. Πράγματι, η δημιουργία καμπυλοτήτων στα εξαρτήματα καθώς και οι οπές και τα βαθουλώματα, δημιουργούν πολύ μικρές επιφάνειες, με αποτέλεσμα να απαιτείται πολύ μικρό μέγεθος στοιχείου για να πραγματοποιηθεί η διακριτοποίηση τους. Αυτό έχει σαν συνέπεια η διαδικασία να γίνεται χρονοβόρα απαιτώντας λογισμικό μεγάλης υπολογιστικής δύναμης, χωρίς σίγουρη επιτυχή ολοκλήρωση.

Στα σχήματα 6.25 και 6.26 φαίνεται η σχεδίαση του κεντρικού συγκροτήματος βραχίονα τιμονιού της συνδεσμολογίας στο πακέτο σχεδιασμού. Η δυσμορφία του κομματιού είναι εμφανής. Αποτελείται από πολλαπλές καμπυλότητες και η πολλαπλή χρήση της εντολής Fillet ήταν απαραίτητη ώστε το σχεδιασμένο αντικείμενο να λάβει την ρεαλιστική του μορφή. Έτσι έχουν δημιουργηθεί πάρα πολλές μικρές επιφάνειες οι οποίες θα δημιουργήσουν προβλήματα στη μετέπειτα δημιουργία πλέγματος.



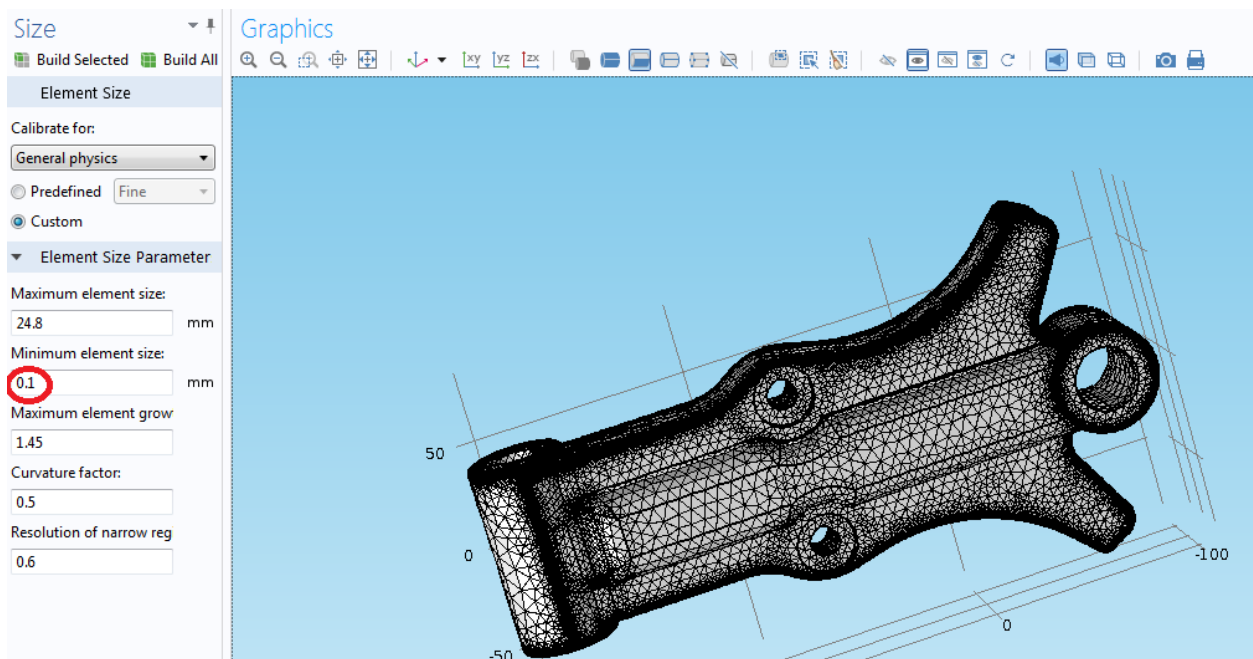
Σχήμα 6.25: Κάτω μέρος κεντρικού βραχίονα τιμονιού



Σχήμα 6.26: Πάνω μέρος κεντρικού βραχίονα τιμονιού

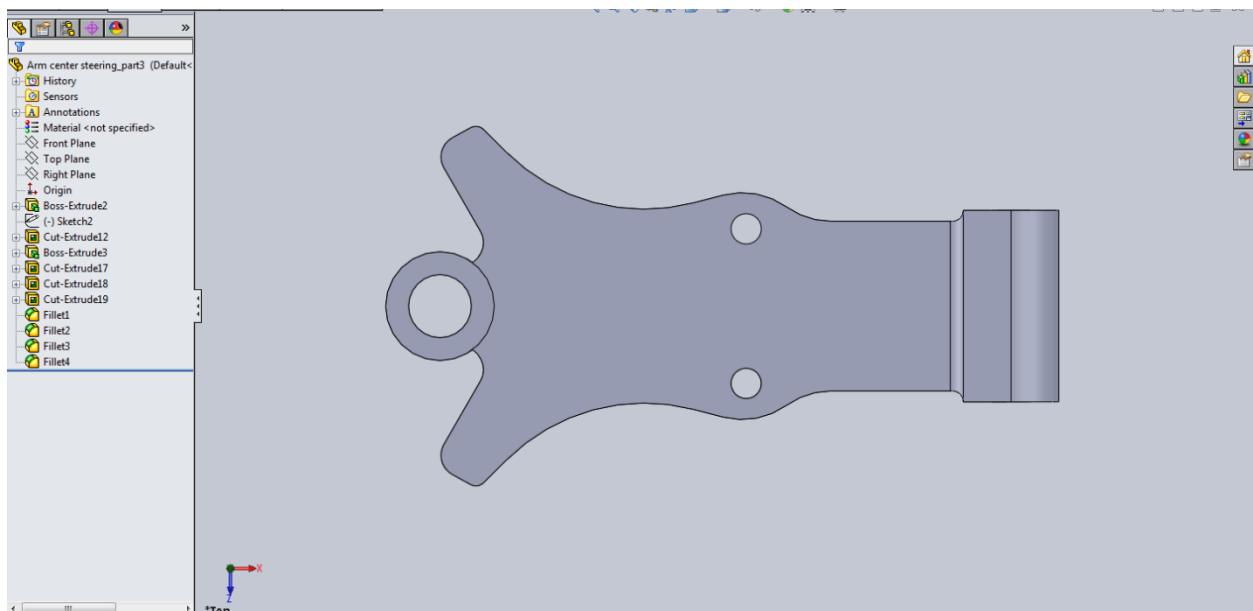
Η διακριτοποίηση αυτού μόνο του εξαρτήματος στο Comsol Multiphysics, όπως φαίνεται στην εικόνα του σχήματος 6.27, ολοκληρώθηκε με τιμή ελάχιστου μεγέθους στοιχείου ίσο με 0,1mm.

Γίνεται κατανοητό πως και το εξάρτημα αυτό θα δημιουργήσει στην διαδικασία του meshing της συνδεσμολογίας, πολλά προβλήματα.



Σχήμα 6.27: Εφαρμογή διαδικασίας meshing στο κεντρικό βραχίονα τιμονιού.

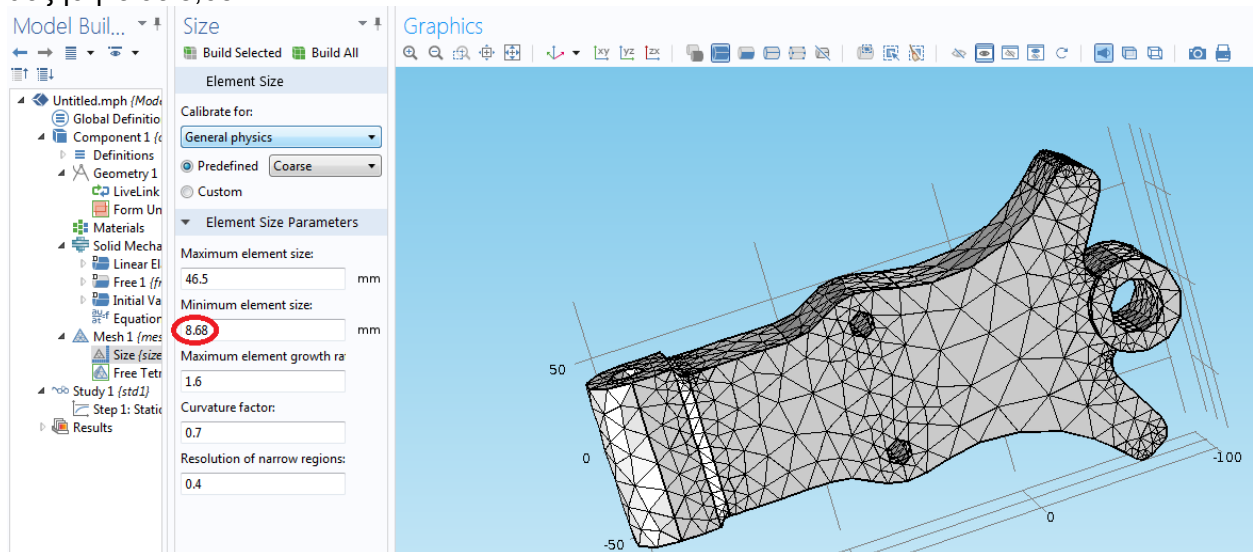
Κατά την διάρκεια των απλοποιήσεων των εξαρτημάτων του συνολικού συστήματος, με τη αφαίρεση των εντολών του *Fillet* από την σχεδίαση του βραχίονα καθώς και πολλές από τις καμπυλότητες του, το εξάρτημα τροποποιείται στην μορφή του σχήματος 6.28.



Σχήμα 6.28: Απλοποιήσεις στη σχεδίαση του κεντρικού βραχίονα τιμονιού.

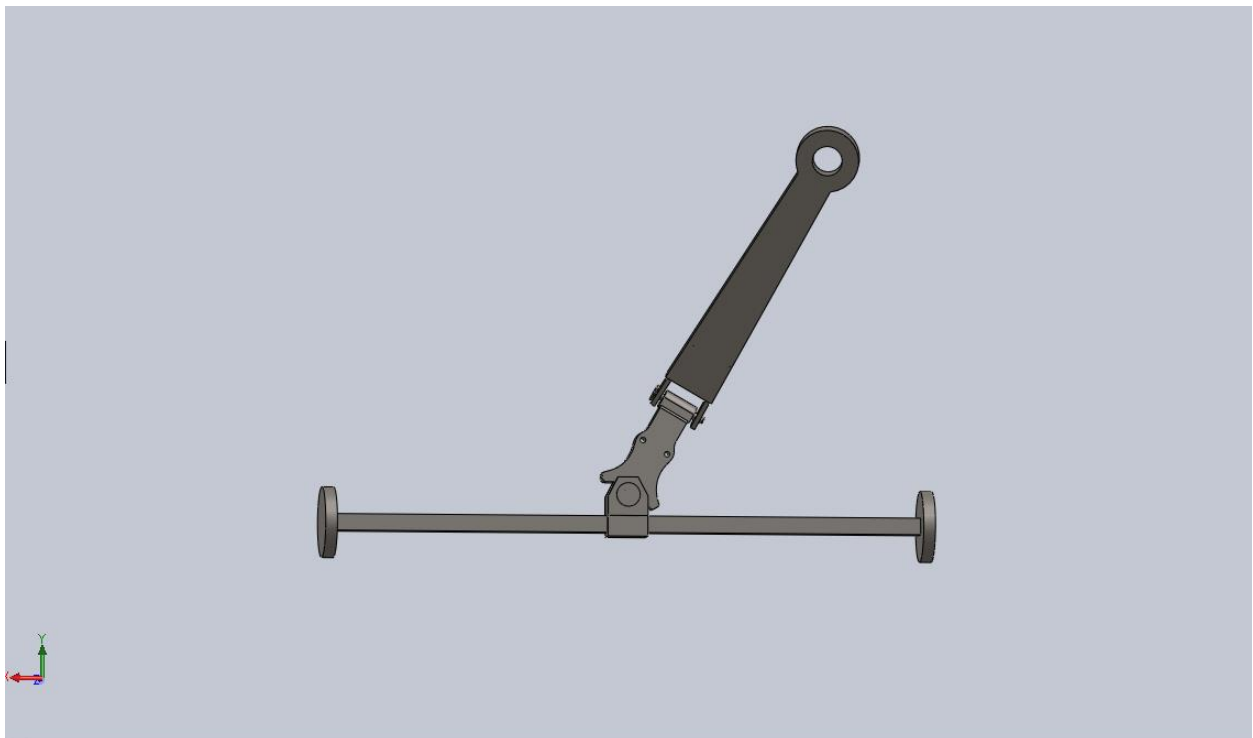
Όπως φαίνεται στη παραπάνω εικόνα οι εντολές του *Fillet* καθώς και οι περισσότερες καμπυλότητες του εξαρτήματος απομακρύνθηκαν. Η αρχική φυσική του μορφή παραμένει σχεδόν ίδια χωρίς βέβαια να επηρεάζεται σημαντικά η φυσική του λειτουργία ως εξάρτημα της

συνδεσμολογίας. Στην εικόνα του σχήματος 6.29 φαίνεται καθαρά ότι η διακριτοποίηση του εν λόγω εξαρτήματος βελτιώθηκε πάρα πολύ, μιας και η τιμή του μεγέθους ελάχιστου στοιχείου αυξήθηκε σε 8,68mm.



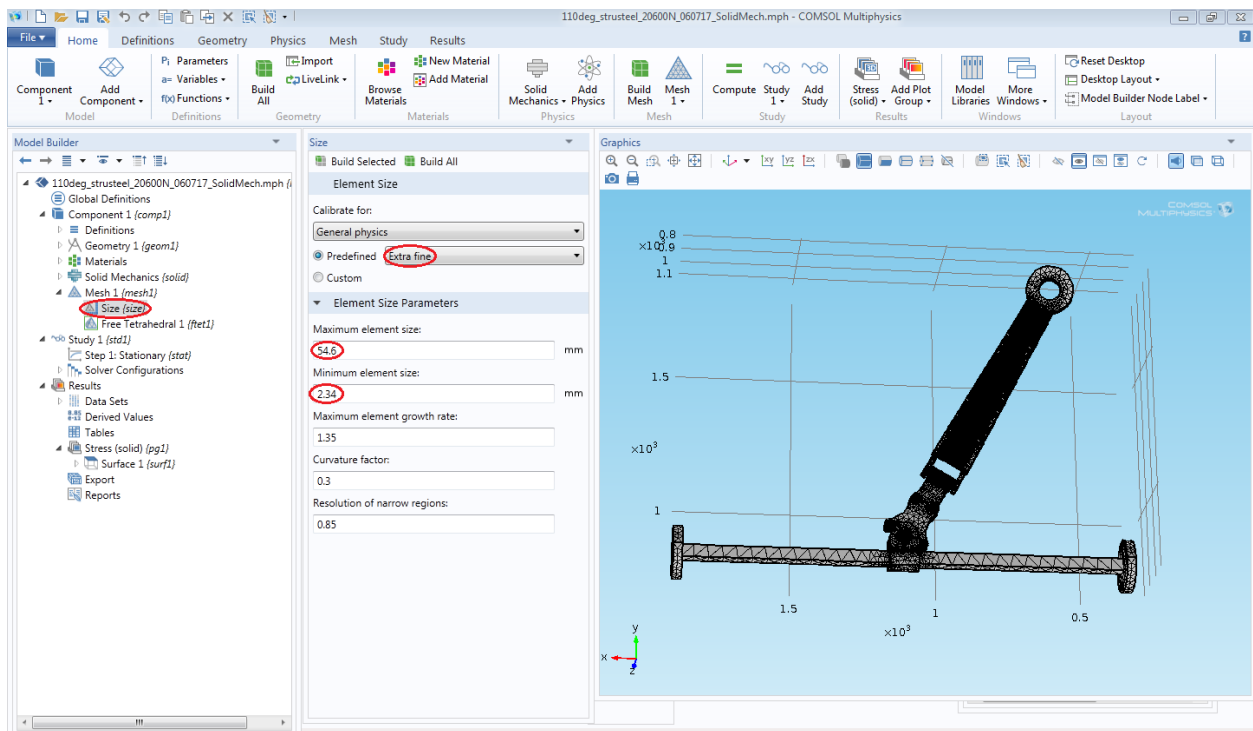
Σχήμα 6.29: Νέα εφαρμογή διαδικασίας meshing στο κεντρικό βραχίονα τιμονιού.

Οι απλοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε αρκετές επιφάνειες πολλών εκ των εξαρτημάτων της συνδεσμολογίας, φαίνονται στην εικόνα του σχήματος 6.30. Πραγματοποιήθηκαν αναλογες απλοποιήσεις, όπως πιο πάνω στον κεντρικό βραχίονα τιμονιού, και σε επιφάνειες των πείρων αλλά και στη μπάρα ρυμούλκησης. Διαπιστώθηκαν αρκετά σχεδιαστικά «λαθη» τα οποία διορθώθηκαν. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας αυτής γίνεται σαφές ότι σχεδιαστικά απλοποιήθηκαν πολλές καμπύλες σε επιφάνειες της συνδεσμολογίας



Σχήμα 6.30: Η νέα σχεδιαστικά απλοποιημένη συνδεσμολογία

Στην παραπάνω εικόνα του σχήματος 6.31 φαίνεται ότι η διαδικασία της διακριτοποίησης ολοκληρώνεται επιτυχώς. Όπως φαίνεται η διαδικασία του mesh πραγματοποιήθηκε για το υπό μελέτη αντικείμενο (με μέγιστη διάσταση 1500 mm) με μέγεθος στοιχείων μεταξύ 2,34mm και 54,6mm. Η διαμέτρηση (calibration) έγινε σε επιλογή Extra Fine. Όπως γίνεται κατανοητό το εύρος της τιμής του μεγέθους του στοιχείων, μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής, περιορίστηκε σημαντικά. Τα παραπάνω δεδομένα σε συνδυασμό με την αύξηση της ελάχιστης τιμής μεγέθους στοιχείου στα 2,34mm οδηγεί σε ικανοποιητική εξοικονόμηση υπολογιστικής δύναμης, όσο αφορά τις δυνατότητες ενός οικιακού υπολογιστή, και σε μια γρηγορότερη και ικανοποιητική επίλυση της μελέτης.

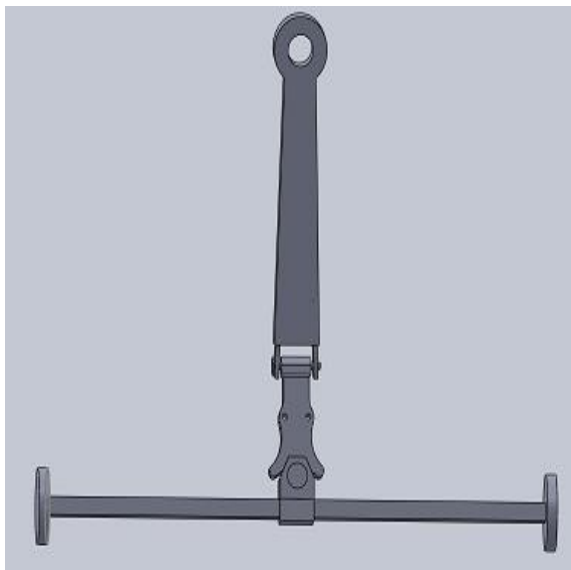


Σχήμα 6.31: Ολοκλήρωση επιτυχημένης και ικανοποιητικής διαδικασίας Meshing.

6.4.6 Αλλαγές συνδεσμολογίας συστήματος διεύθυνσης

Με την πρώτη διαδικασία των σχεδιαστικών αλλαγών επιτεύχθηκε η επίλυση των προβλημάτων που έχουν να κάνουν με το στάδιο της δημιουργίας πλέγματος. Η συνδεσμολογία όμως διατηρεί την πολυπλοκοτήτά της σε λειτουργικό επίπεδο. Αποτελείται από τρία διαφορετικά εξαρτήματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με δυο πείρους. Ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων της φυσικής περιγραφής της λειτουργίας της, η στοχαστική αντιμετώπιση του προβλήματος και η μεγάλη υπολογιστική δύναμη που απαιτείται για την επίλυση του, ήταν οι βασικότεροι λόγοι για τους οποίους η συνδεσμολογία απλοποιήθηκε τόσο σχεδιαστικά όσο και κατασκευαστικά. Παρακάτω λοιπόν θα αναλυθεί μια δεύτερη διαδικασία που θα πραγματοποιηθεί στο πακέτο σχεδιασμού κατά την οποία κάποια από τα εξαρτήματα θα συνδυαστούν και θα ενωθούν χωρίς αυτό να μεταβάλλει την λειτουργική κατάσταση για την οποία έχουν κατασκευαστεί, αλλά παράλληλα θα μειώσει τον αριθμό των παραμέτρων και θα δώσει μια γρηγορότερη και πιο ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα της μελέτης.

Η ρύθμιση παραμέτρων που έχει ήδη πραγματοποιηθεί, καθώς και με την νέα διακριτοποίηση που εφαρμόστηκε στη συνδεσμολογία δεν έφερε ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Είναι σαφές πως η συνδεσμολογία δεν είναι πλήρως ορισμένη όσο αφορά την λειτουργική φυσική της.

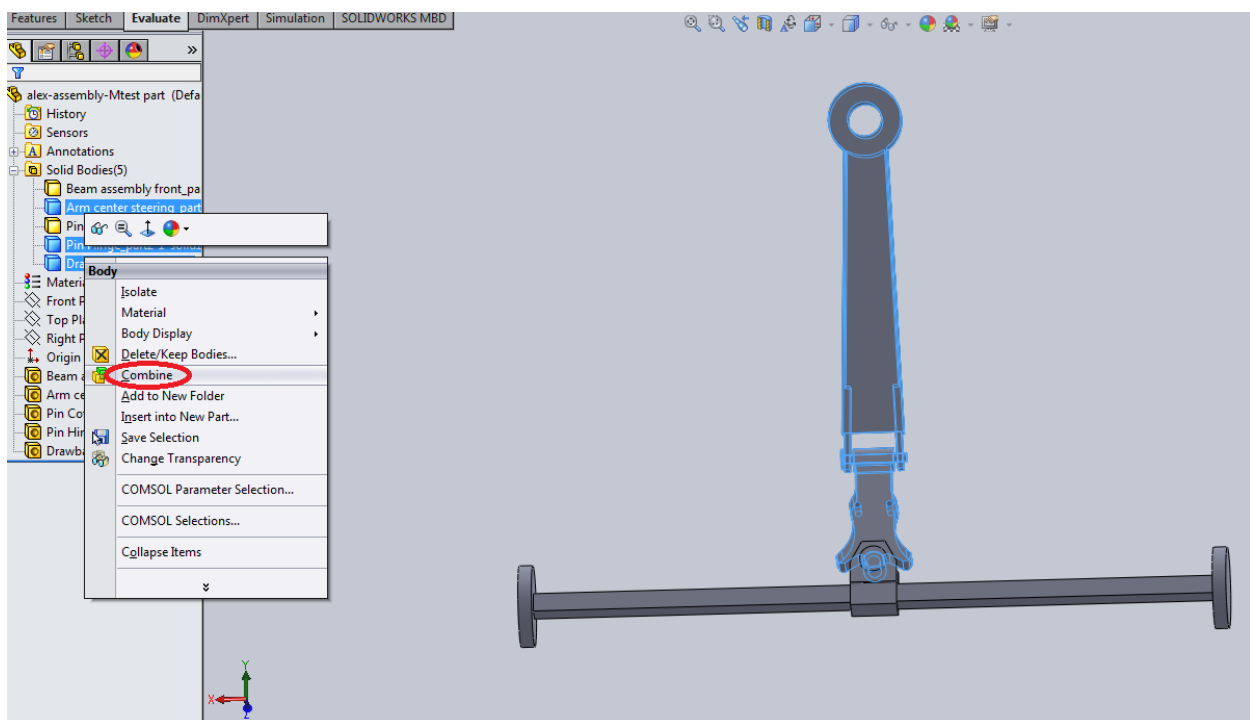


Στο σχήμα 6.32 φαίνεται πλέον ολοκληρη η συνδεσμολογία, στο πακέτο σχεδιασμού, με τις σχεδιαστικές αλλαγές.

Σκοπός είναι η απλοποίηση του συστήματος μέσω του συνδυασμού και της ένωσης εξαρτημάτων. Η μπάρα ρυμούλκησης είναι τοποθετημένη συνεχώς σε γωνία 18° από το έδαφος. Ο πείρος που ενώνει την μπάρα και ο κεντρικός βραχίονας του τιμονιού του συστήματος αποτελούν ένα ενιαίο τμήμα του συστήματος που κινείται ως προς τον άξονα z σε ένα εύρος γωνίας 140° ως προς το έδαφος, τον άξονα y. Έτσι λοιπόν θα μπορούσαμε να δημιουργήσουμε ένα νέο εξάρτημα που θα αποτελείται από τα παραπάνω εξαρτήματα.

Σχημα 6.32: Τροποποιημένο σχέδιο συνδεσμολογίας σε περιβάλλον πακέτο σχεδιασμού.

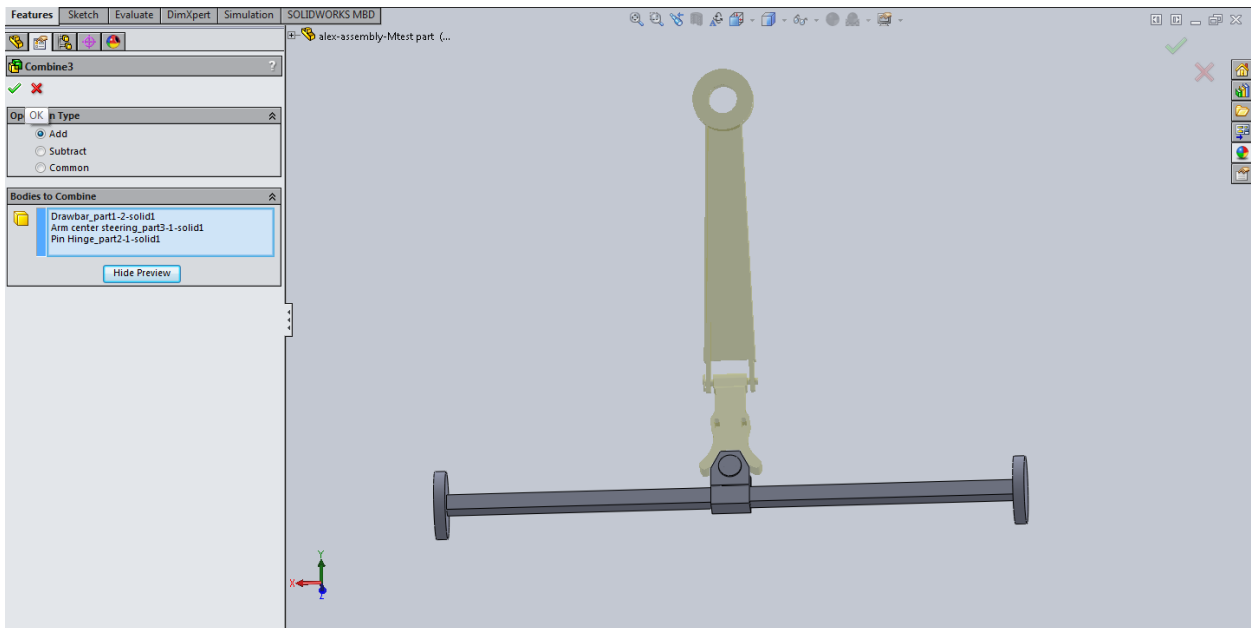
Στην επιφάνεια εργασίας του σχεδιαστικού προγράμματος διατηρώντας τις σχέσεις των εξαρτημάτων που θέλουμε να διατηρήσουμε, θα αποθηκεύσουμε το παρόν αρχείο assembly (.SLDASM) ως αρχείο Part Document (.SLDPRT). Ανοίγοντας το νέο αρχείο Part παρατηρούμε πως η συνδεσμολογία παραμένει η ίδια. Στο σχήμα 6.33 αυτό που αλλάζει είναι ότι τα εξαρτήματα στο μενού Feature Manager είναι πλέον πέντε συμπαγή αντικείμενα, στα οποία πλέον δεν υπάρχει το ιστορικό της σχεδιασής τους.



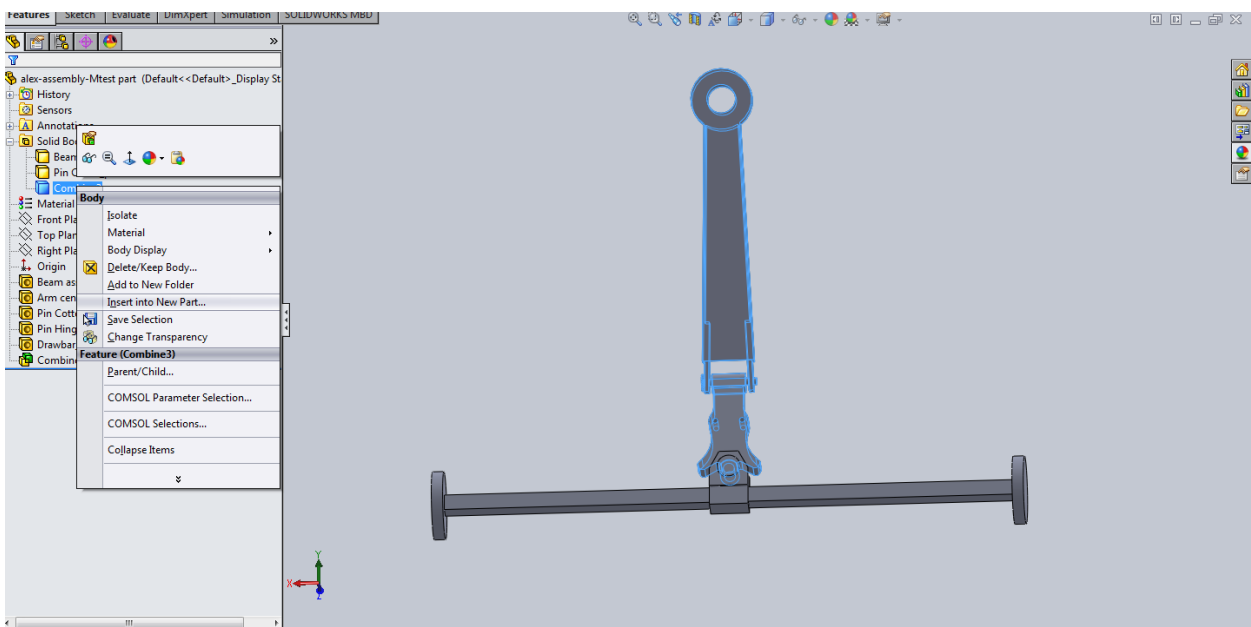
Σχημα 6.33: Επιλογή των εξαρτημάτων προς συνένωση με την εντολή *Combine*.

Επιλέγοντας τα παραπάνω εξαρτήματα με δεξί κλικ στο αναδυόμενο παράθυρο γίνεται ο συνδυασμός των παραπάνω με την εντολή *combine*. Ανοίγει το παράθυρο διαλόγου της

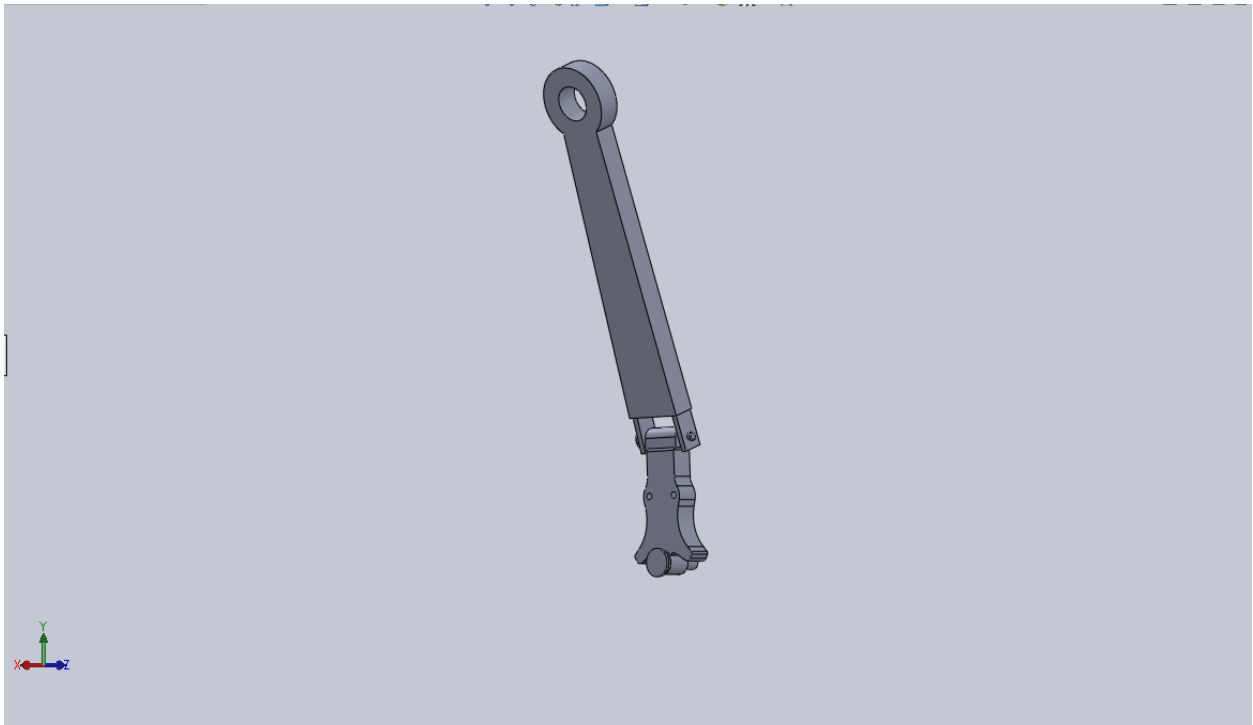
εντολής, σχήμα 6.34, και με τσεκαρισμένη την επιλογή *Add* δημιουργείται στο Feature Manager ένα νέο εξάρτημα με την ονομασία *Combine1*. Το εξάρτημα αυτό αποθηκεύεται ως νέο εξάρτημα με δεξί κλικ και επιλογή από το αναδυόμενο παράθυρο της επιλογής *Insert into New Part*, σχήμα 6.35. Δημιουργήθηκε ένα νέο τμήμα από τα τρία που αρχικά σχεδιάστηκαν, σχήμα 6.36.



Σχήμα 6.34: Δημιουργία νέου εξαρτηματος με την επιλογή *Add*.

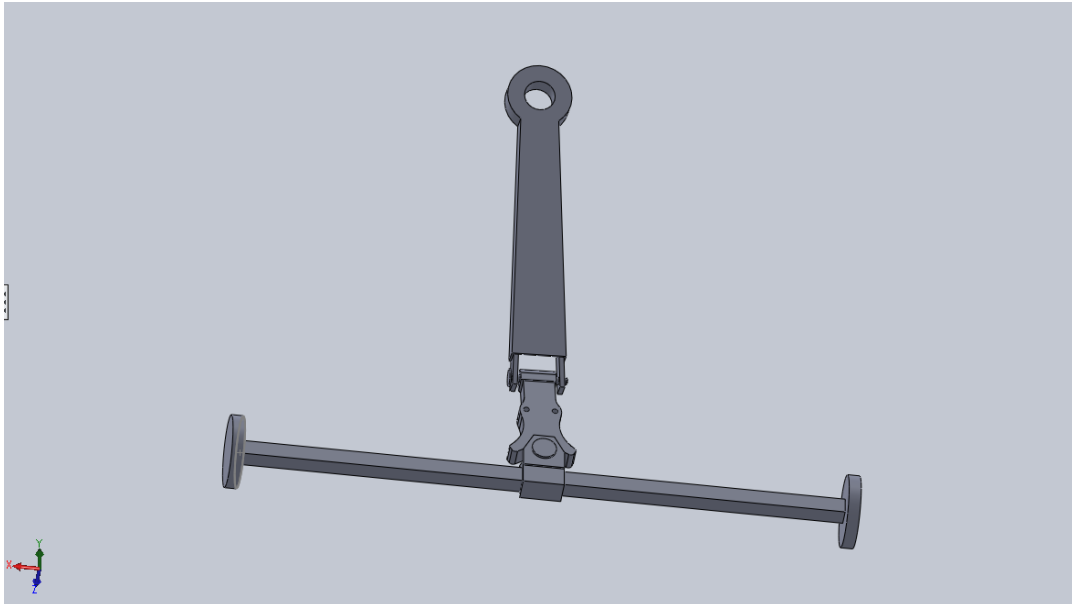


Σχήμα 6.35: Αποθήκευση του νέου τμήματος ως νέου.



Σχημα 6.36: Το νέο εξάρτημα αποτελούμενο από τα τρία παλαιότερα.

Με το νέο εξάρτημα επανασχεδιάστηκε η συνδεσμολογία σε καινούριο αρχείο assembly. Στην εικόνα του σχήματος 6.37 φαίνεται το νέο αρχείο αποτελούμενο πλέον από δύο εξαρτήματα, το νέο, και το εμπρόσθιο συγκρότημα άξονα.



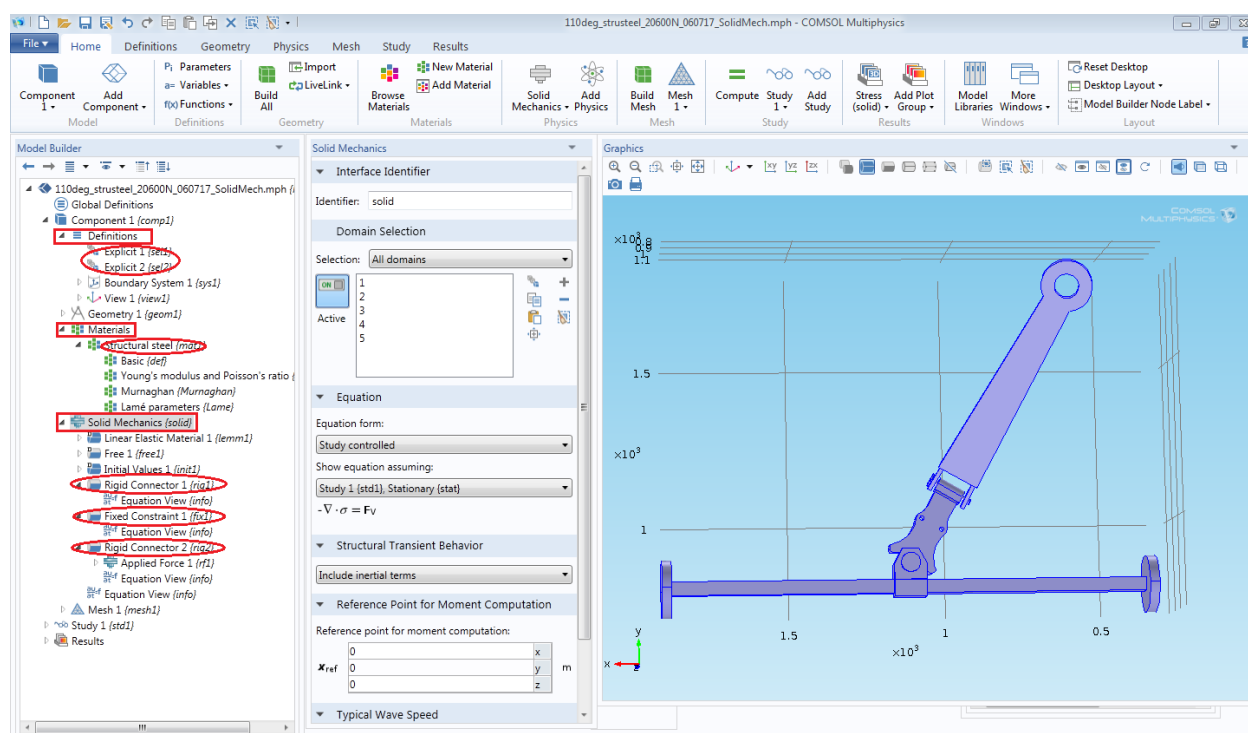
Σχημα 6.37: Ολοκλήρωση τροποποιημένης συνδεσμολογίας.

Η νέα συνδεσμολογία, η οποία αποτελείται από δύο εξαρτήματα πλέον, είναι απλούστερη μεν αλλά δημιουργεί προβλήματα στην προσέγγιση ορθής επίλυσης του προβλήματος. Ο συνδυασμός των πείρων της συνδεσμολογίας ως ένα εξάρτημα απαλείφει πολλές κινήσεις του συστήματος διευθύνσης. Έτσι μείωνονται δραματικά οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος, κάνοντας την επίλυση του προβλήματος ευκολότερη. Όμως η λύση που προκύπτει είναι σαφέστατα πολύ μακριά από τα προσδωκούμενα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα σε

προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό σχεδίασης το αποτέλεσμα ήταν μη επιθυμητό. Επομένως οι παραπάνω αλλαγές δε θα χρησιμοποιηθούν στο νέο μοντέλο.

6.4.7 Διορθωτικές ενέργειες στη παραμετροποίηση

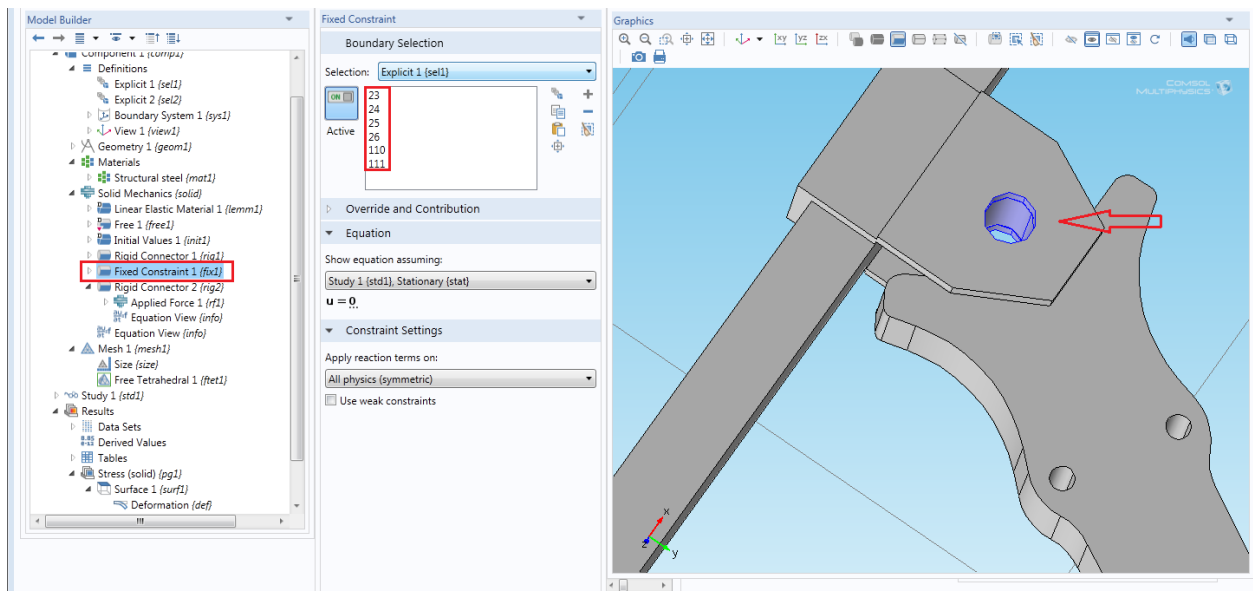
Οι διορθωτικές ενέργειες στη παραμετροποίηση, στην νέα, απλοποιημένη σχεδιαστικά συνδεσμολογία, συγκεντρώνονται στη καρτέλα του κυρίως μενού του λογισμικού με τη ονομασία Physics. Με τη βοήθεια του εργαλείου LiLin εισήχθη στο πρόγραμμα προσομοίωσης το μοντέλο. Στην καρτέλα αυτή βρίσκονται όλα εκείνα τα εργαλεία που απαιτούνται για την ρύθμιση των περισσότερων παραμέτρων μιας μελέτης. Στην εικόνα του σχήματος 6.38 φαίνονται οι ρυθμίσεις αυτές.



Σχήμα 6.38: Ρύθμιση των παραμέτρων στη νέα τροποποιημένη συνδεσμολογία.

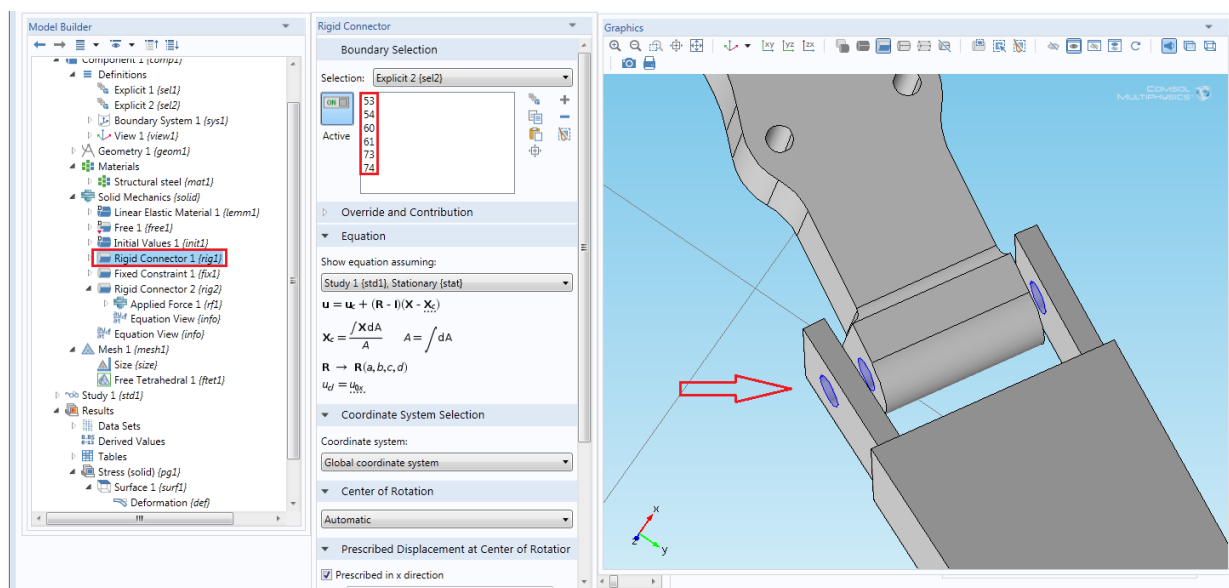
Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα έχουν οριστεί στη καρτέλα του Model Builder όλοι οι αναγκαίοι παράμετροι για να την ολοκλήρωση της μελέτης στη Δομική μηχανική (Solid Mechanics). Το υλικό κατασκευής των εξαρτημάτων είναι το structural steel. Η βασικότερες αλλαγές σε επίπεδο διεπαφής, στο επίπεδο Solid Mechanics της προσομοίωσης του Model Builder, είναι ο ορισμός των φυσικών διασυνδέσεων μεταξύ επιφανειών και εξαρτημάτων (boundaries) στη καρτέλα Physics.

Η πρώτη παράμετρος σε επίπεδο φυσικής είναι ο ορισμός των επιφανειών του εμπρόσθιου άξονα και οι επιφάνειες του κεντρικού βραχίονα, με τις οποίες έρχεται σε επαφή ο πείρος περιστροφής συγκροτήματος βραχίονα ως σταθερές (Fixed Constraint 1). Επιλέγονται λοιπόν οι επιφάνειες 23, 24, 25, 26, 110 και 111 όπως φαίνεται στην εικόνα του σχήματος 6.39.



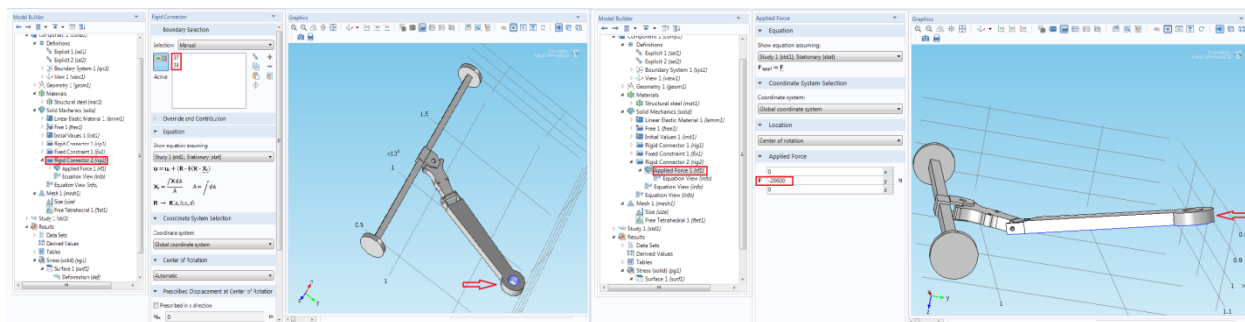
Σχήμα 6.39: Επιλογή Fixed constraint 1 επιφανειών του νέου μοντέλου.

Η δεύτερη παράμετρος αποτελείται από τις επιφάνειες του κεντρικού βραχίονα και της μπάρας ρυμούλκησης, με τις οποίες έρχεται σε επαφή ο πείρος περιστροφής της τελευταίας, ως μια σταθερή σύνδεση (Rigid Connector 1). Επιλέγονται οι επιφάνειες 53, 54, 60, 61, 73 και 74 όπως φαίνεται στη εικόνα του σχήματος 6.40.



Σχήμα 6.40: Επιλογή Rigid Connector 1 επιφανειών του νέου μοντέλου.

Μια τρίτη παράμετρος που δημιουργήθηκε για τον ακριβή ορισμό της δύναμης που δέχεται το μοντέλο, αποτελείται από τις επιφάνειες του εσωτερικού δακτυλίου της μπάρας ρυμούλκησης, ως μια σταθερή σύνδεση (Rigid Connector 2). Επιλέγονται οι επιφάνειες 37 και 38 όπως φαίνεται στη εικόνα του σχήματος 6.41.



Σχήμα 6.41: Επιλογή Rigid Connector 2 επιφανειών του νέου μοντέλου.

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται και η δύναμη που ασκείται στις εν λόγω επιφάνειες της τρίτης παραμέτρου με πρόσημο αρνητικό, γιατί εφαρμόζεται αντίθετα ως προς τον άξονα y . Η τιμή της εξαρτάται από το είδος του οδοστρώματος που μελετάται. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η διαδικασία της οπισθέλκισης πραγματοποιείται σε ασφαλτο.

Όπως φαίνεται οι παράμετροι της φυσικής του μοντέλου τροποποιήθηκαν. Οι αρχικοί παράμετροι της παραγράφου 6.4.2 διαγράφηκαν. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την γρηγορότερη αλλά κυρίως την σωστότερη επίλυση του προβλήματος. Ο ορισμός μόνο επιφανειών, του μοντέλου προς παραμετροποίηση και όχι ολόκληρων τμημάτων της συνδεσμολογίας εξοικονόμησε υπολογιστικό χρόνο για την προσομοίωση. Επίσης η αποφυγή της παραμετροποίησης επιφανειών με επαφή (Contact), λειτούργησε ευεργετικά στην σωστή επίλυση της μελέτης χωρίς να επηρεάσει το αποτέλεσμα της. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι η παραπάνω παραμετροποίηση της μελέτης ισχύει και στους δυο υποτομείς της Δομικής Μηχανικής (Solid Mechanics & Multibody Dynamics).

6.4.8 Επίλυση του προβλήματος (Solving)

Αρχικά η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται σε τυχαία γωνία της διαδικασίας. Στην εικόνα του σχήματος 5.21 έχει οριστεί η γωνία στρέψης σε τυχαία τιμή ίση με 20° από την θέση ηρεμίας ή διαφορετικά σε τιμή ίση με 110° από το αριστερό τμήμα του εμπρόσθιου άξονα του συστήματος. Ενώ η γωνία περιστροφής της μπάρας ρυμούλκησης στην εικόνα του σχήματος 5.22 έχει οριστεί με σταθερή τιμή και ίση με 18° . Η μελέτη του μοντέλου έγινε και με τους δυο υποτομείς της Δομικής Μηχανικής (Solid Mechanics & Multibody Dynamics) και στους δυο τύπους οδοστρώματος (ανάλογη τιμή δύναμης). Αρχικά επιλέχθηκε η περίπτωση του Solid mechanics δεδομένου ότι είναι μια απλούστερη υπολογιστικά διαδικασία η οποία θα έδινε μια πρώτη εκτίμηση της συμπεριφοράς.

Η περίπτωση φυσικής κίνησης Multibody Dynamics είναι μια επέκταση του Solid mechanics που παρέχει ένα προηγμένο σύνολο εργαλείων για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση συστημάτων μηχανισμών πολλαπλών σωμάτων χρησιμοποιώντας την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Αυτό το εργαλείο επίλυσης δίνει τη δυνατότητα να προσομοιωθούν μικτά συστήματα με κινούμενα και σταθερά σημεία, όπου κάθε εξάρτημα μπορεί να υποβάλλεται σε μεγάλες περιστροφές ή μετατοπίσεις. Τέτοιες αναλύσεις συμβάλλουν στην αναγνώριση κρίσιμων σημείων στα πολυσωματικά σας συστήματα, επιτρέποντάς σας έτσι να εκτελέσετε λεπτομερέστερες δομικές αναλύσεις σε επίπεδο structural ανάλυσης. Η μονάδα Multibody Dynamics δίνει επίσης την ελευθερία να αναλύετε τις δυνάμεις που βιώνουν τα τμήματα της δομής και τις τάσεις που παράγονται σε εύκαμπτα εξαρτήματα που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία λόγω μεγάλων παραμορφώσεων ή κόπωσης. Εξαιτίας της ιδιαιτερότητας και υπεροχής της multibody dynamic ανάλυσης η συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε και

παρουσιάζεται παρακάτω για στην ανάλυση των βασικών πεδίων και των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την οπισθέλκηση.

A. Μελέτη οπισθέλκυσης όταν η γωνία στρέψης είναι σε ενδιάμεση θέση (110°)

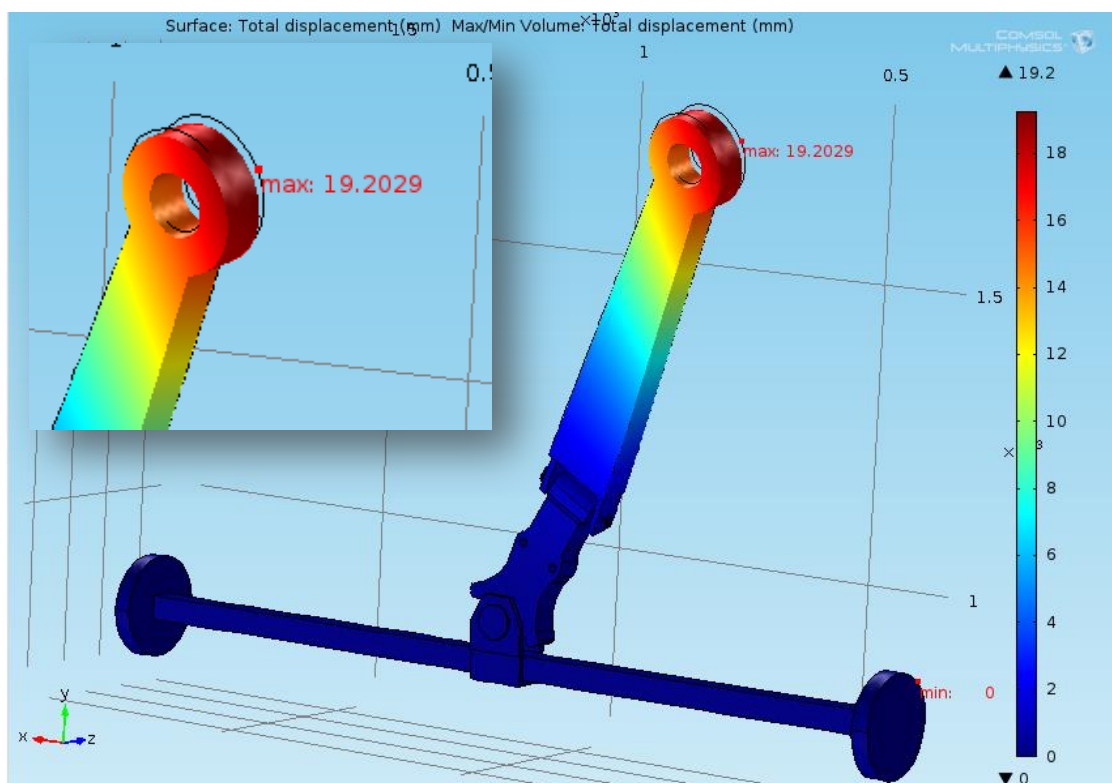
A1.1 Τύπος οδοστρώματος: Τσιμέντο

Η συνολική παραμετροποίηση της συγκεκριμένης περίπτωσης φαίνεται παρακάτω:

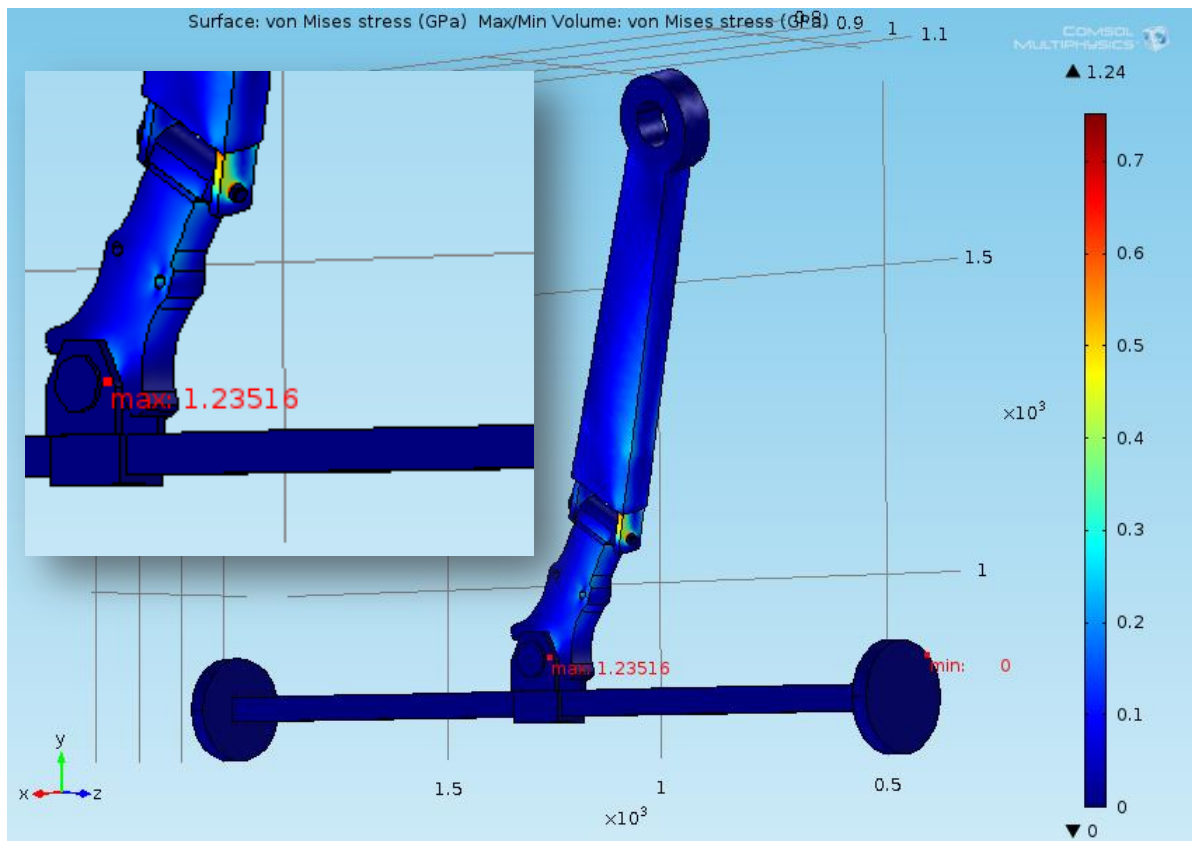
$$F_{pb_concrete} = 13.620 Nt .$$

- $F_{pb} = n_s * (m_{eq} * g)$
- *Physics selection: Structural Mechanics/Multibody Dynamics*
- *Study Selection: Stationary*
- **$\theta = 18^\circ$ (γωνία περιστροφής)**
- **$\omega = 110^\circ$ (γωνία στρέψης)**
- $n_{s_concrete} = 0,6$
- $m_{eq} = 2.314 Kg$
- αμελητέα αντίσταση αέρα

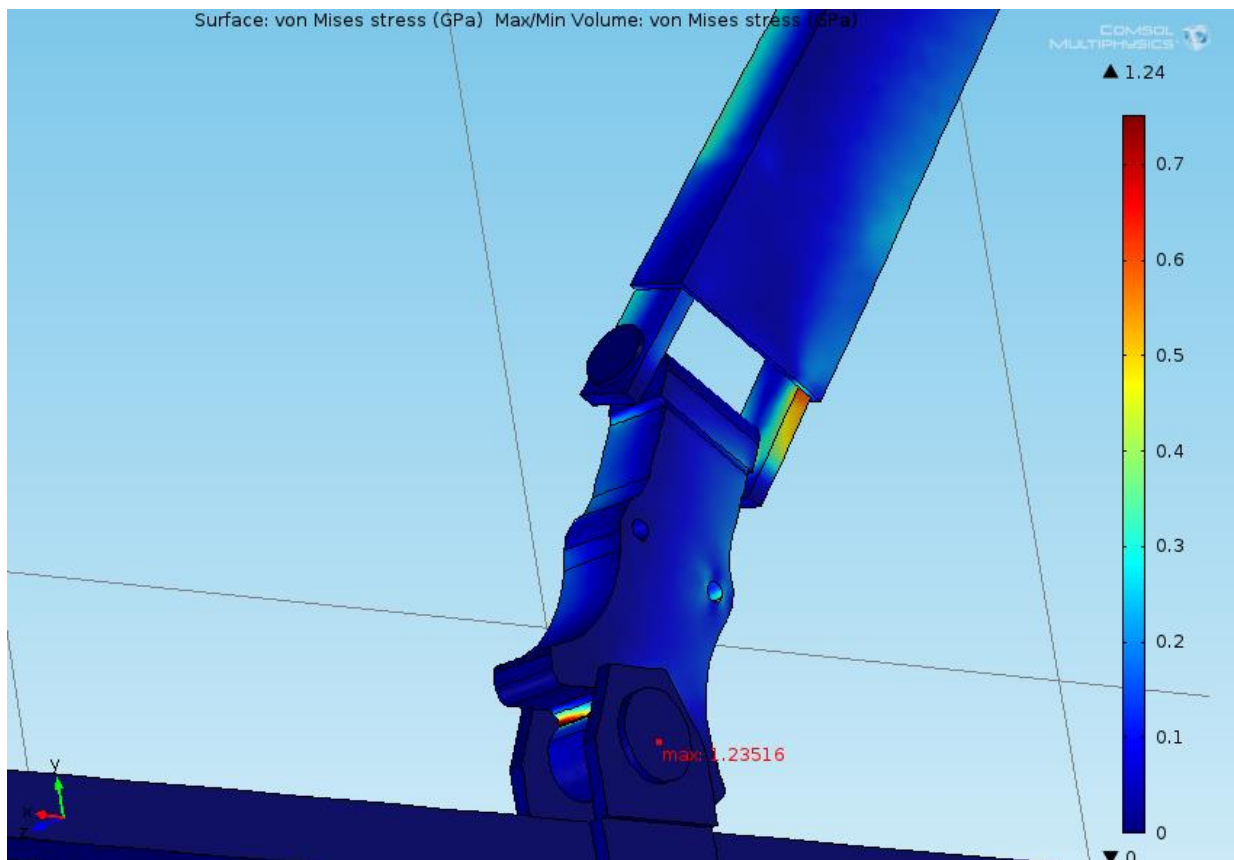
Στην εικόνα του σχήματος 6.42 φαίνεται η συνολική μετατόπιση των τμημάτων της συνδεσμολογίας με βάση τη χρωματική κατανομή χρωμάτων. Όπως παρατηρείται υπάρχει μετατόπιση της μπάρας, με τη μέγιστη τιμή να φτάνει στα **19.2mm**. Η μέγιστη μετατόπιση στην πραγματική ζωή εντοπίζεται ακριβώς στο ίδιο σημείο με περίπου ίδιες τιμές. Στο σχήματα 6.43 φαίνεται η κατανομή της τάσης πάνω στην συνδεσμολογία. Η μέγιστη τιμή της τάσης εμφανίζεται στον πείρο στρέψης που συνδέει τον εμπρόσθιο άξονα με το κεντρικό βραχίονα τιμονιού. Η μέγιστη τιμή φτάνει τα **1.24 GPa**. Ακόμη συγκέντρωση τάσης (κόκκινο χρώμα) παρατηρείται, από τις ίδιες εικόνες, στις επιφάνειες της μπάρας ρυμούλκησης κοντά και γύρω από τον πείρο περιστροφής, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο. Σε μεγέθυνση, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.44 φαίνονται οι αυξημένες τιμές των τάσεων.



Σχήμα 6.42: Διάγραμμα συνολικής μετατόπισης συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα τσιμέντου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 110° .



Σχημα 6.43: Διάγραμμα τάσης (Von Mises Stress) συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα τσιμέντου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 110° .



Σχημα 6.44: Μεγέθυνση διαγράμματος τάσεων (Von Mises Stress) συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα τσιμέντου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 110° .

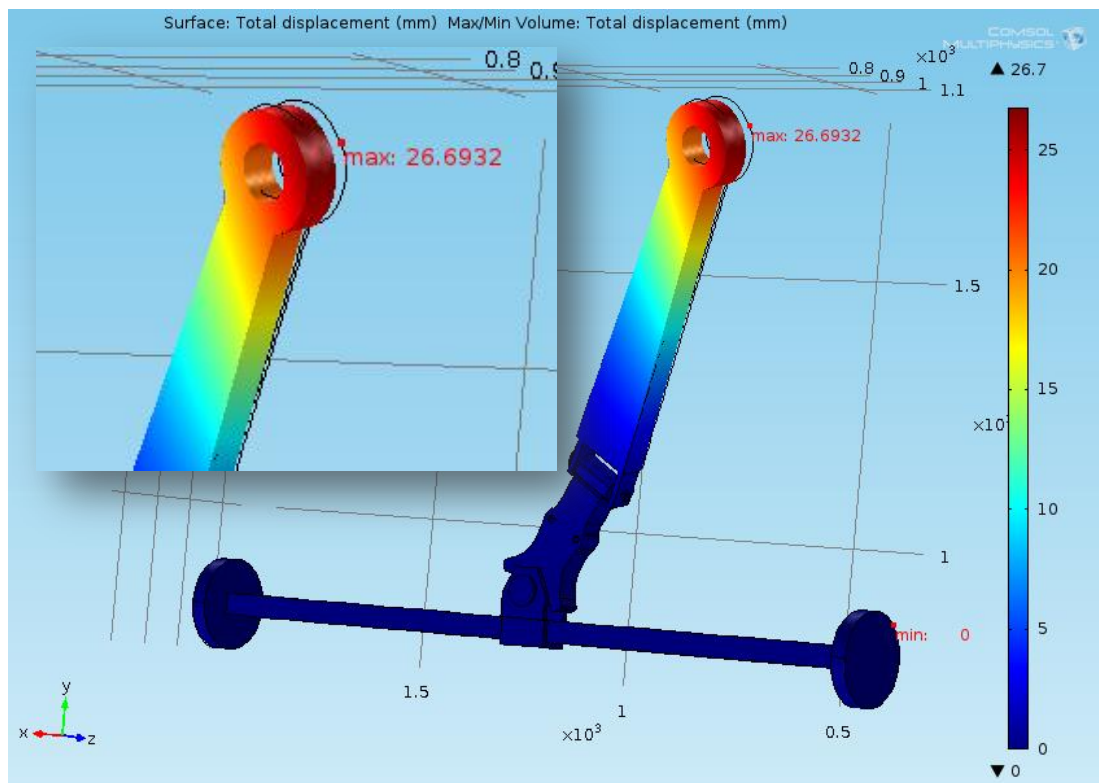
A1.2 Τύπος οδοστρώματος: Ασφάλτος

Η συνολική παραμετροποίηση της συγκεκριμένης περίπτωσης φαίνεται παρακάτω:

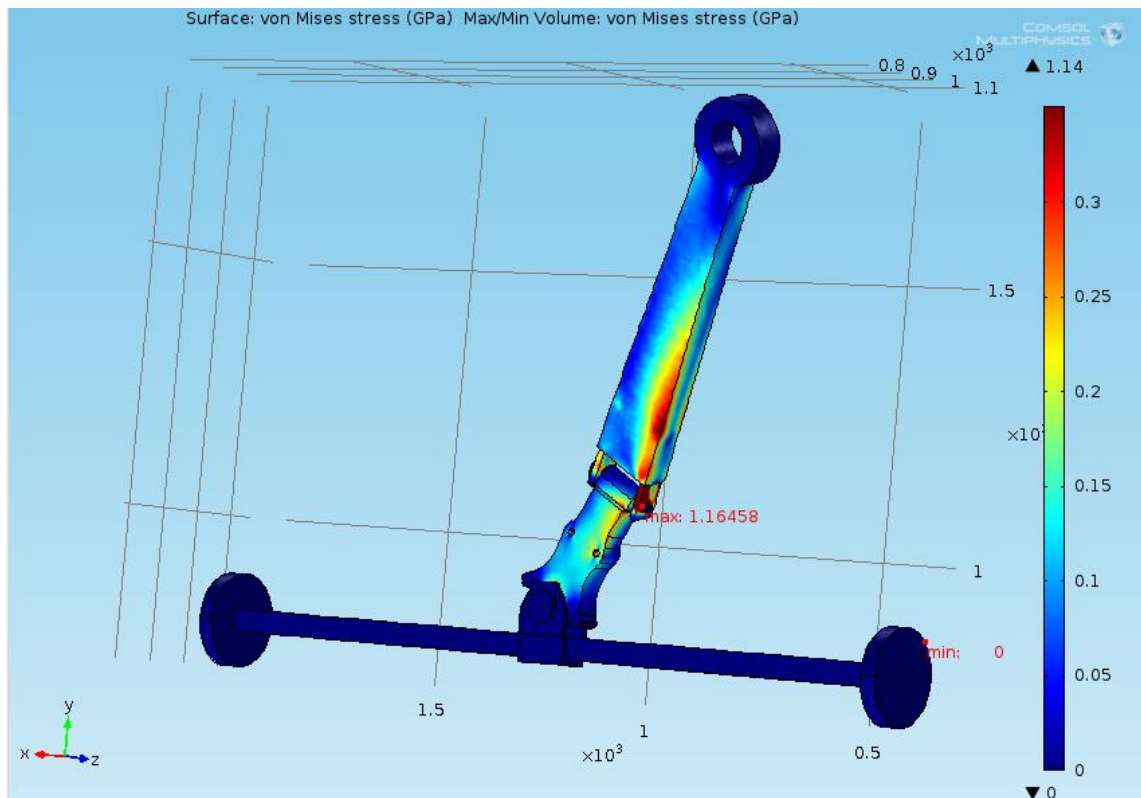
$$F_{pb_asphalt} = 20.430Nt.$$

- $F_{pb} = n_s * (m_{eq} * g)$
- *Physics selection: Structural Mechanics/Multibody Dynamics*
- *Study Selection: Stationary*
- $\theta=18^\circ$ (γωνία περιστροφής)
- $\omega=110^\circ$ (γωνία στρέψης)
- $n_{s_asphalt}=0,9$
- $m_{eq}=2.314Kg$
- αμελητέα αντίσταση αέρα

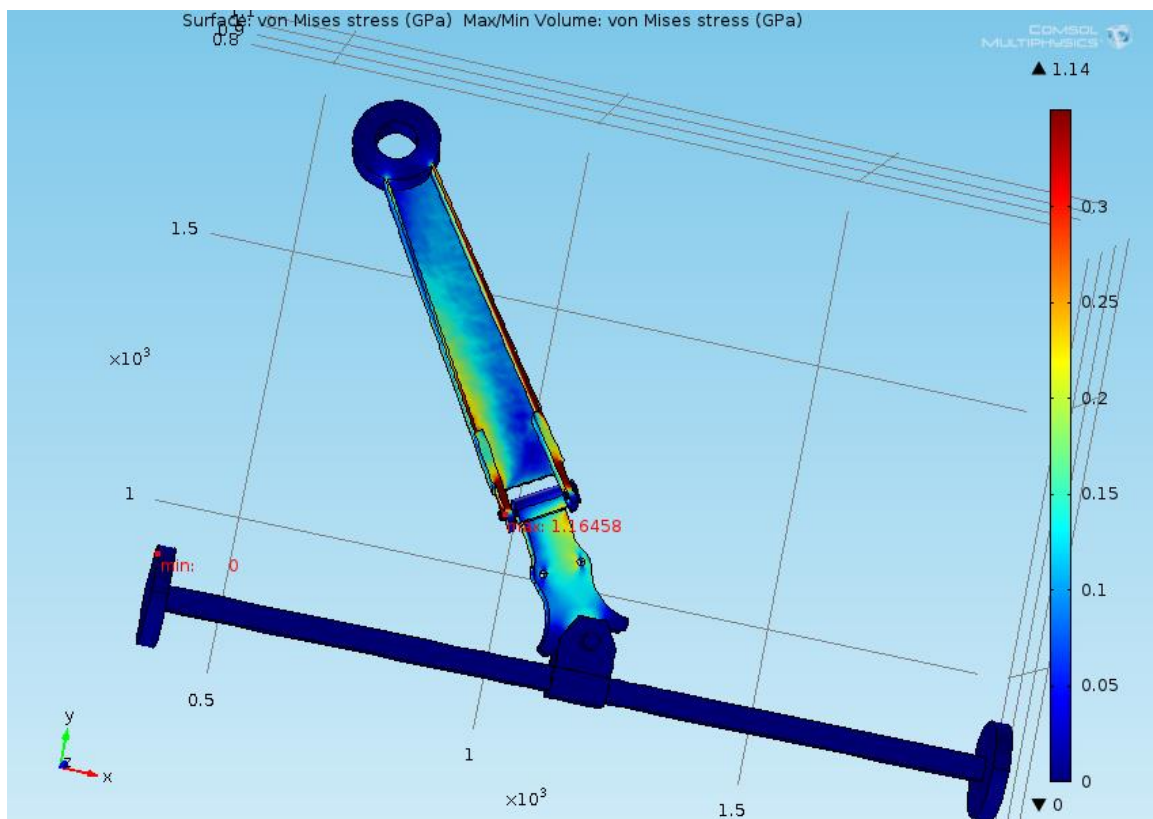
Στην εικόνα του σχήματος 6.45 φαίνεται η συνολική μετατόπιση των τμημάτων της συνδεσμολογίας με βάση τη χρωματική κατανομή χρωμάτων. Όπως παρατηρείται υπάρχει μετατόπιση της μπάρας, με τη μέγιστη τιμή να φτάνει στα **26.7mm**. Όπως αναμενόταν, η μέγιστη μετατόπιση είναι ακριβώς στο ίδιο σημείο με την περίπτωση του οδοστρώματος τσιμέντου. Η τιμή είναι ελαφρώς μεγαλύτερη της περίπτωσης τσιμέντου, γεγονός που δικαιολογείται στην μεγαλύτερη δύναμη οπισθέλκυσης που απαιτείται για την κίνηση του ρυμουλκού. Στα σχήματα 6.46 και 6.47 φαίνεται η κατανομή της τάσης πάνω στην συνδεσμολογία. Στην περίπτωση αυτή, η μέγιστη τιμή της τάσης εμφανίζεται στη περιοχή του πείρου περιστροφής που συνδέει το κεντρικό βραχίονα τιμονιού με τη μπάρα ρυμούλκησης. Η μέγιστη τιμή φτάνει τα **1.16GPa**. Σε μεγέθυνση, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.48 φαίνονται οι αυξημένες τιμές των τάσεων που κυμαίνονται έως και 0.35GPa.



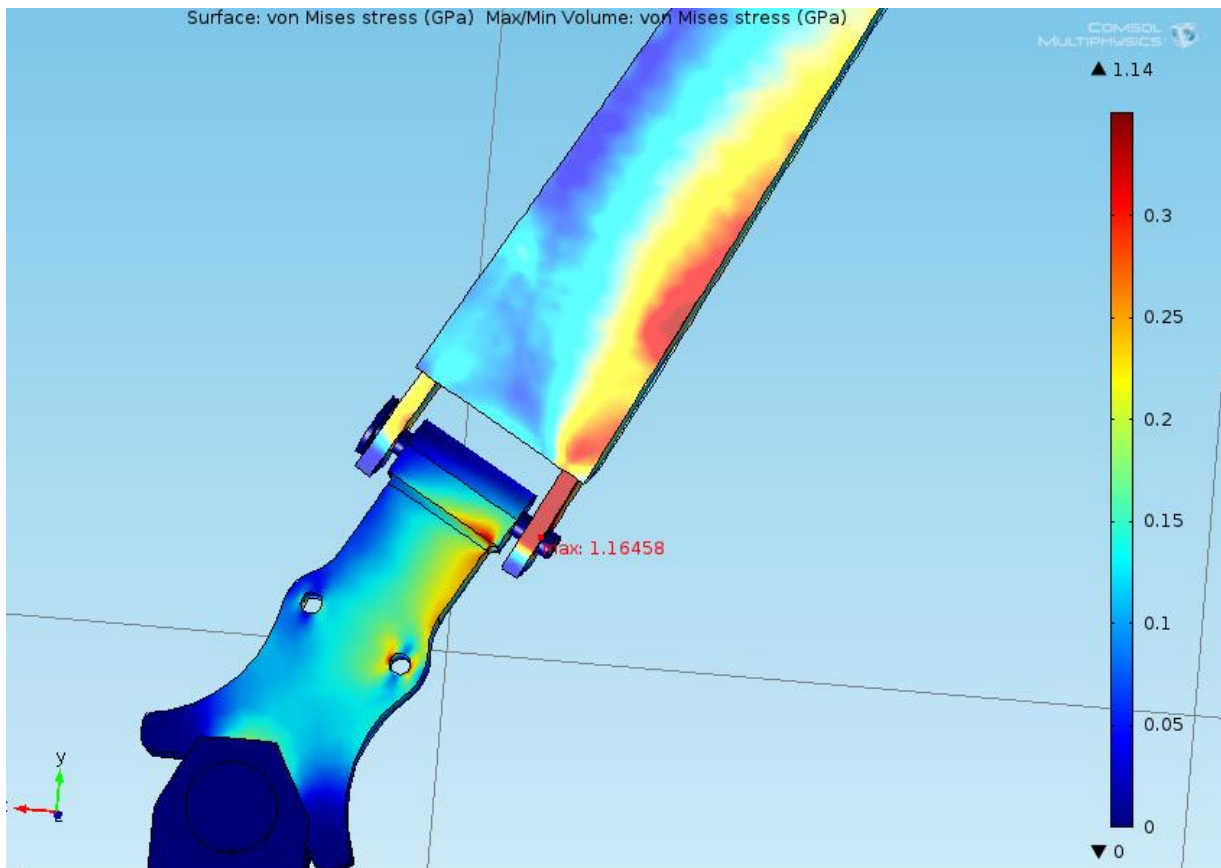
Σχημα 6.46: Διάγραμμα συνολικής μετατόπισης συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα ασφάλτου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 110° .



Σχημα 6.47: Διάγραμμα τάσης (Von Mises Stress) συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα ασφάλτου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 110° .



Σχημα 6.48: Διάγραμμα τάσεων (Von Mises Stress) συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα ασφάλτου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 110° .



Σχημα 6.49: Μεγέθυνση διαγράμματος τάσεων (Von Mises Stress) συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα ασφάλτου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 110° .

Μετά από την ολοκληρωμένη αποτύπωση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν σε μια τυχαία θέση του συστήματος διεύθυνσης είναι πολύ σημαντικό να γίνει και η διερεύνηση του συστήματος και στις ακραίες θέσεις του, οι οποίες παρουσιάζουν και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον όπως έχει ήδη αναφερθεί. Εδώ η μελέτη περιορίζεται σε τύπο οδοστρώματος μόνο την ασφαλτο που εμφανίστηκαν οι μέγιστες τιμές τάσεων και μετατόπισης, όπου είναι πιο έντονα και ορατά τα φαινόμενα της ρυμούλκησης και μπορούν να βγουν εμφανέστερα συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται στις παρακάτω παραγράφους αναλυτικά.

Β. Μελέτη οπισθέλκησης σε ασφαλτοστρωμένο δρόμο, όταν η γωνία στρέψης είναι σε κάθετη διεύθυνση (90°)

Η πρώτη θέση, βρίσκει τη μπάρα ρυμούλκησης και τον κεντρικό βραχίονα, ως ένα τμήμα, σε γωνία 90° με το εμπρόσθιο συγκρότημα άξονα, σύμφωνα με την εικόνα του σχήματος 6.50. Πρόκειται για την αρχική θέση (θέση ηρεμίας) του συστήματος διεύθυνσης κατά την έναρξη της διαδικασίας οπισθέλκησης. Είναι η πιο επιθυμητή θέση του συστήματος που πρέπει να διατηρείται κατά την εξέλιξη της εν λόγω διαδικασίας. Δυστυχώς όμως δεν βρίσκεται πάντα στη θέση αυτή, εξαιτίας πολλών αιτιών που δεν εξετάζονται στην εργασία αυτή.



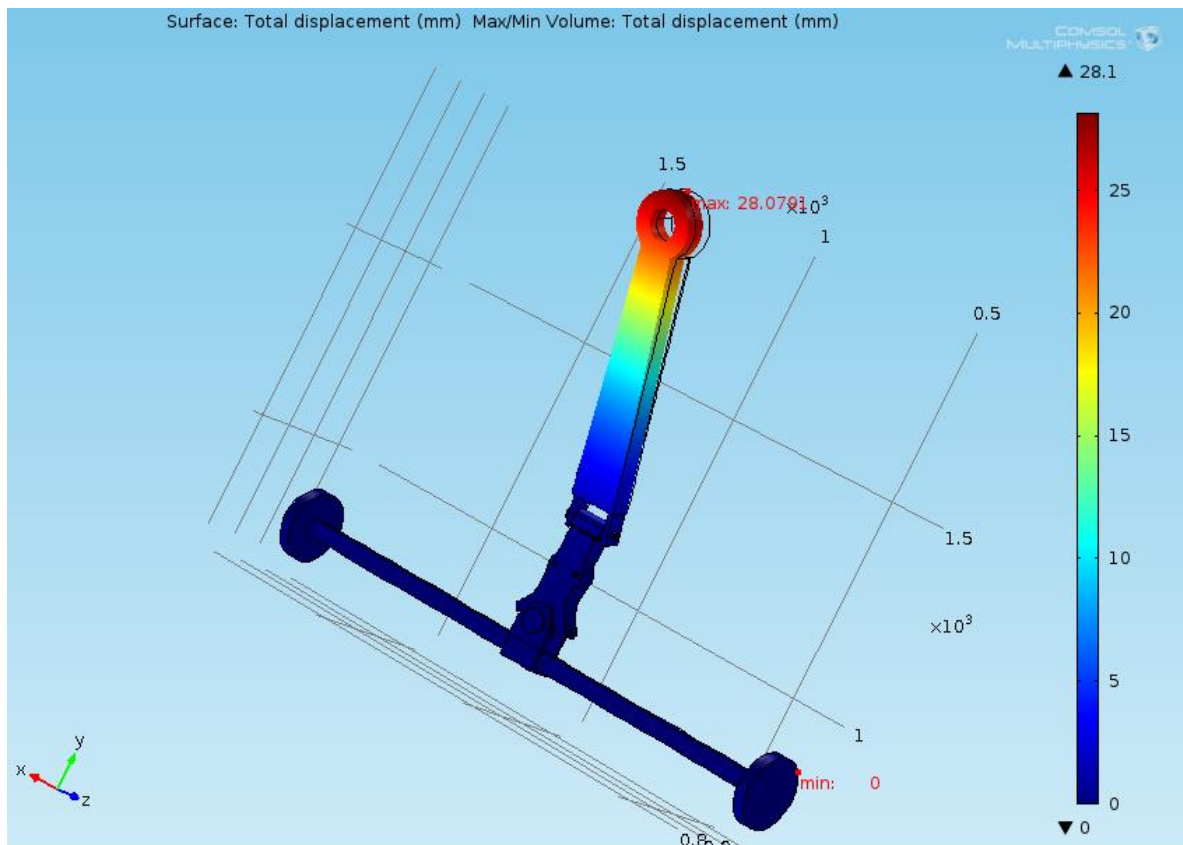
Σχήμα 6.50: Αρχική θέση συστήματος διεύθυνσης

Η συνολική παραμετροποίηση της συγκεκριμένης περίπτωσης φαίνεται παρακάτω:

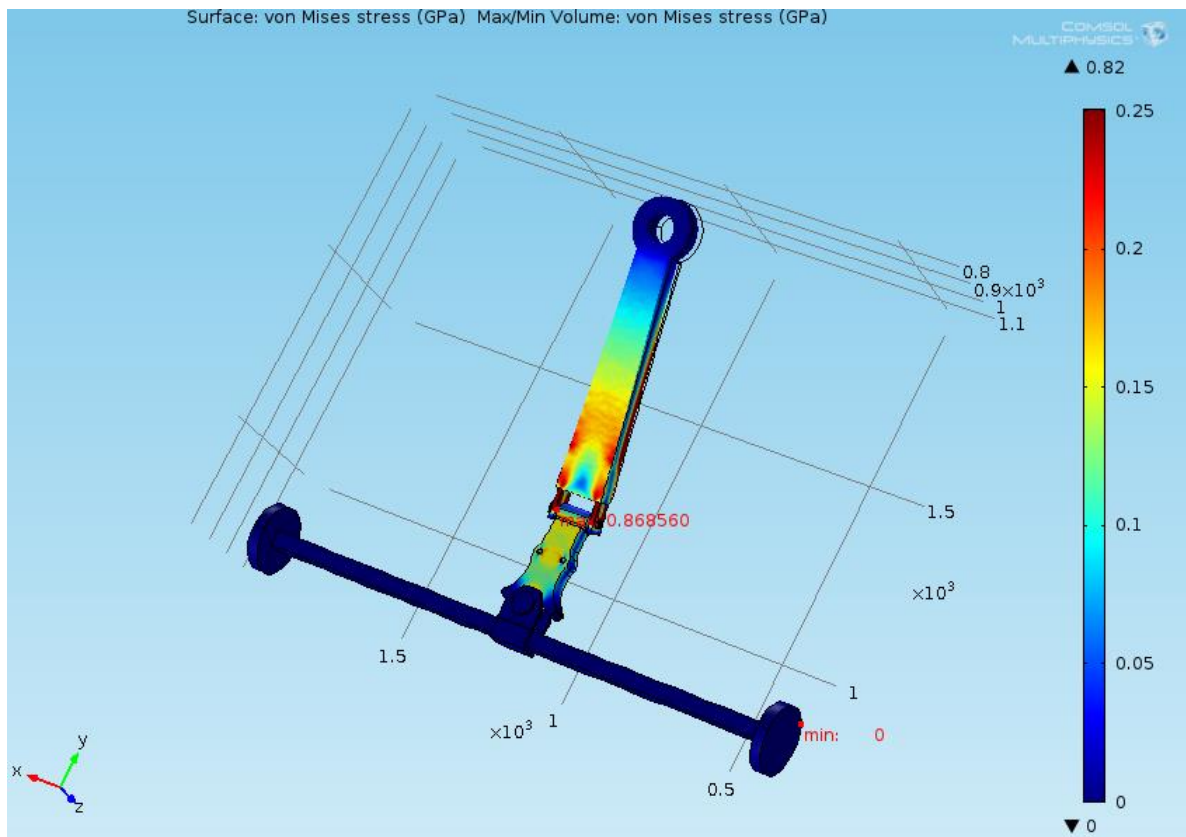
$$F_{pb, asphalt} = 20.430 Nt .$$

- $F_{pb} = n_s * (m_{eq} * g)$
- *Physics selection: Structural Mechanics/Multibody Dynamics*
- *Study Selection: Stationary*
- $\theta = 18^\circ$ (γωνία περιστροφής)
- $\omega = 90^\circ$ (γωνία στρέψης)
- $n_{s, asphalt} = 0,9$
- $m_{eq} = 2.314 Kg$
- αμελητέα αντίσταση αέρα

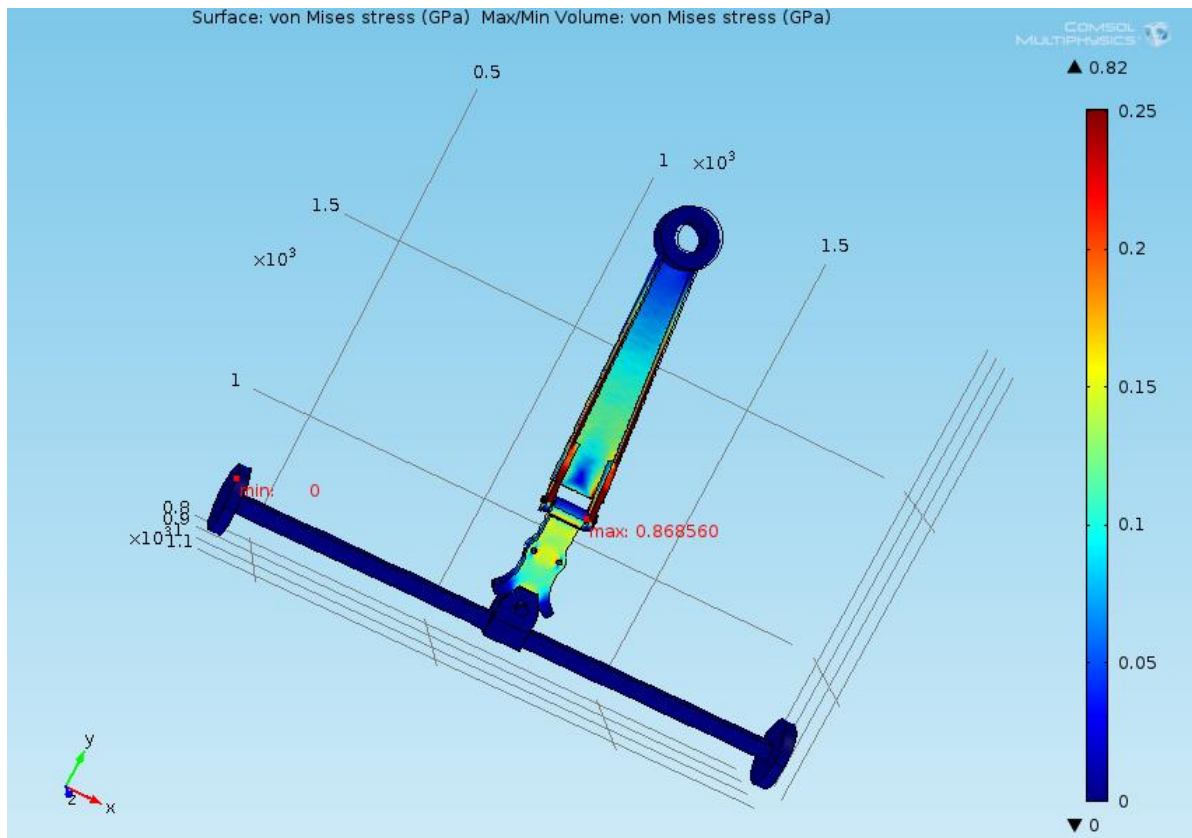
Στην εικόνα του σχήματος 6.51 φαίνεται η συνολική μετατόπιση των τμημάτων της συνδεσμολογίας με βάση τη χρωματική κατανομή χρωμάτων. Όπως παρατηρείται υπάρχει μετατόπιση της μπάρας, με τη μέγιστη τιμή να φτάνει στα **28.1mm**. Η μέγιστη αυτή μετατόπιση είναι στο ίδιο σημείο με την περίπτωση της γωνίας στρέψης των 110° . Η μέγιστη τιμή επίσης είναι παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση αλλά όπως ήταν αναμενόμενο ελαφρώς μεγαλύτερη. Στα σχήματα 6.52 και 6.53 φαίνεται η κατανομή της τάσης πάνω στην συνδεσμολογία μας. Παρατηρείται συγκέντρωση τάσης (κόκκινο χρώμα), κοντά στο σημείο σύνδεσης της μπάρας ρυμούλκησης και κεντρικού βραχίονα τιμονιού. Σημαντική τάση αναπτύσσεται και στις δυο πλευρές του κεντρικού βραχίονα με την μέγιστη τιμή να την λαμβάνει η περιοχή του πείρου στρέψης, με μέγιστη τιμή που φτάνει στα **0.87GPa**. Όπως είναι λογικό στην περίπτωση της φόρτισης στην διεύθυνση κίνησης η τάσεις κατανέμονται σε ολη την μπάρα και δεν εστιάζονται σε συγκεκριμένη πλευρά του αντικειμένου, όπως επίσης δεν εμφανίζουν τόσο μεγάλες τιμές όπως στις περιπτώσεις στραμμένου άξονα. Σε μεγέθυνση, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.54 η περιοχή του πείρου στρέψης συγκεντρώνει την υψηλότερη τιμή της τάσης που εμφανίζεται στη συνδεσμολογία ενώ το πεδίο της τάσης είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο σύμφωνα με τον άξονα συμμετρίας του.



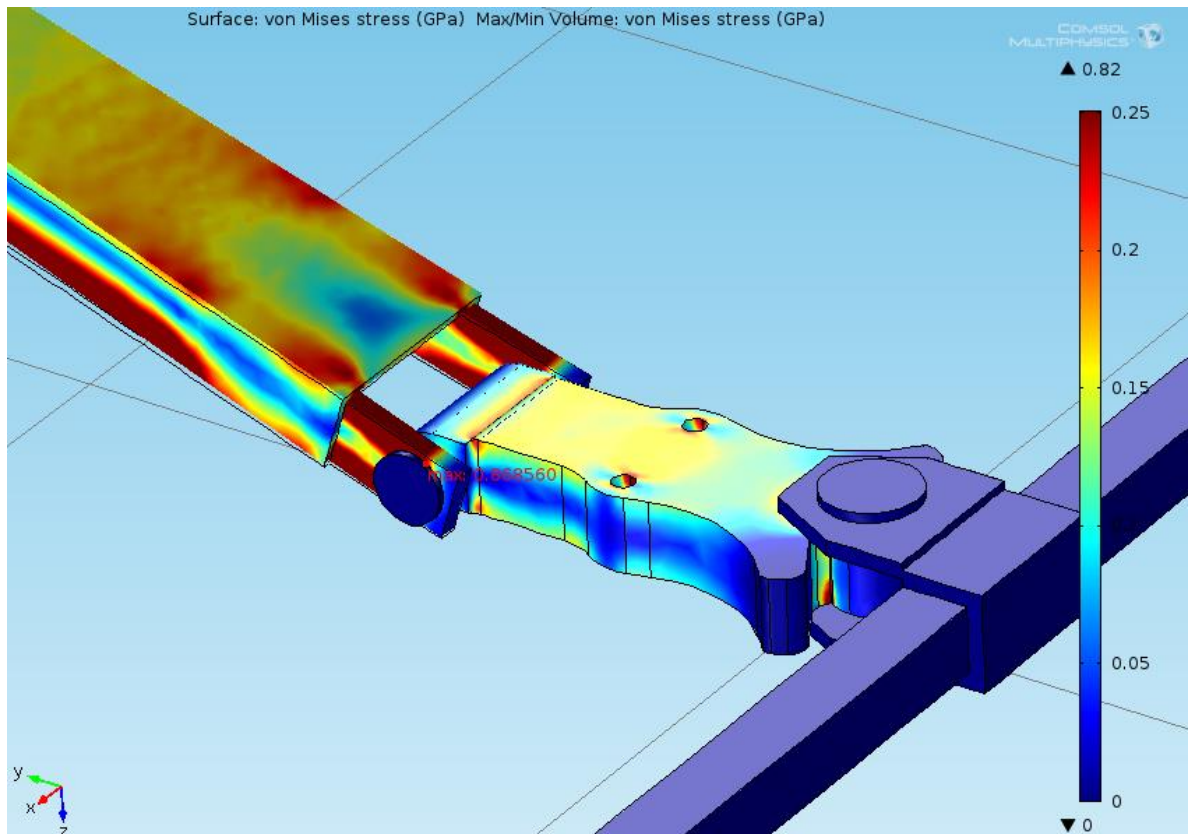
Σχημα 6.51: Διάγραμμα συνολικής μετατόπισης συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα ασφάλτου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 90° .



Σχημα 6.52: Διάγραμμα τάσης (Von Mises Stress) συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα ασφάλτου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 90° .



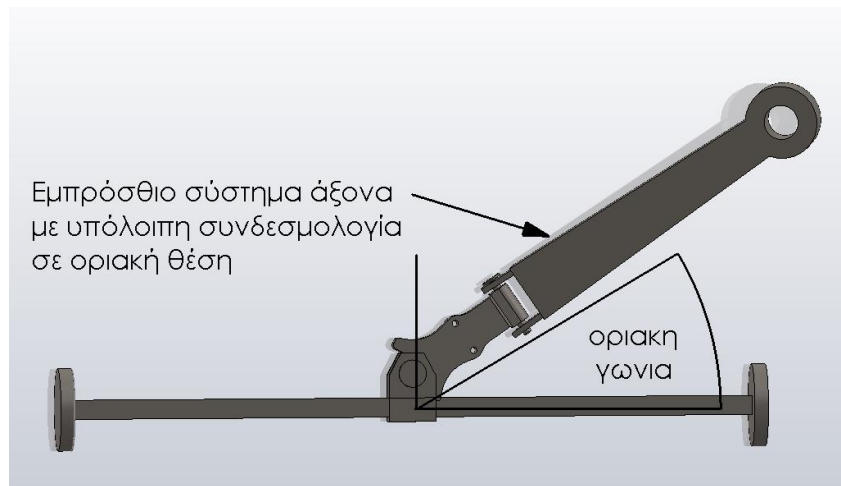
Σχημα 6.53: Διάγραμμα τάσεων (Von Mises Stress) συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα ασφάλτου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 90° .



Σχημα 6.54: Μεγέθυνση διαγράμματος τάσεων (Von Mises Stress) συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα ασφάλτου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 90° .

Γ. Μελέτη Οπισθέλκτης σε ασφαλτοστρωμένο δρόμο όταν η γωνία στρέψης βρίσκεται σε ακραία θέση (20°)

Η τελευταία θέση που θα μελετηθεί θα είναι οριακή και έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στη θέση αυτή η μπάρα ρυμούλκησης και το κεντρικό τμήμα του βραχίονα, ως ένα τμήμα, βρίσκεται σε γωνία 20° με τον εμπρόσθιο συγκρότημα άξονα και σε επαφή με τον τελευταίο, όπως φαίνεται και στην εικόνα του σχήματος 6.55. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα διεύθυνσης είναι σε οριακή θέση και υπάρχει κίνδυνος στρεβλώσεων και θραύσης εξαρτημάτων. Είναι μη αποδεκτή θέση που μπορεί να βρεθεί το σύστημα διεύθυνσης και πρέπει να αποφεύγεται σε όλη την διάρκεια της διαδικασίας οπισθέλκτης.

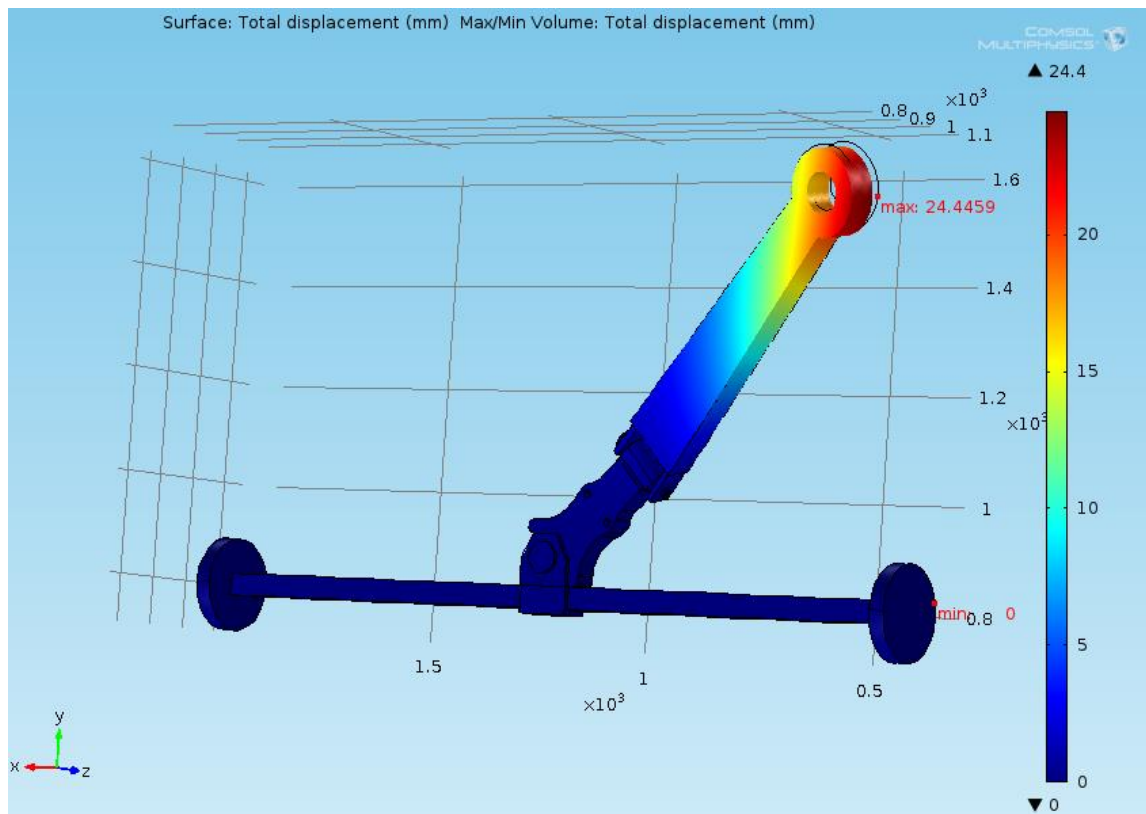


Σχήμα 6.55: Οριακή θέση συστήματος διεύθυνσης

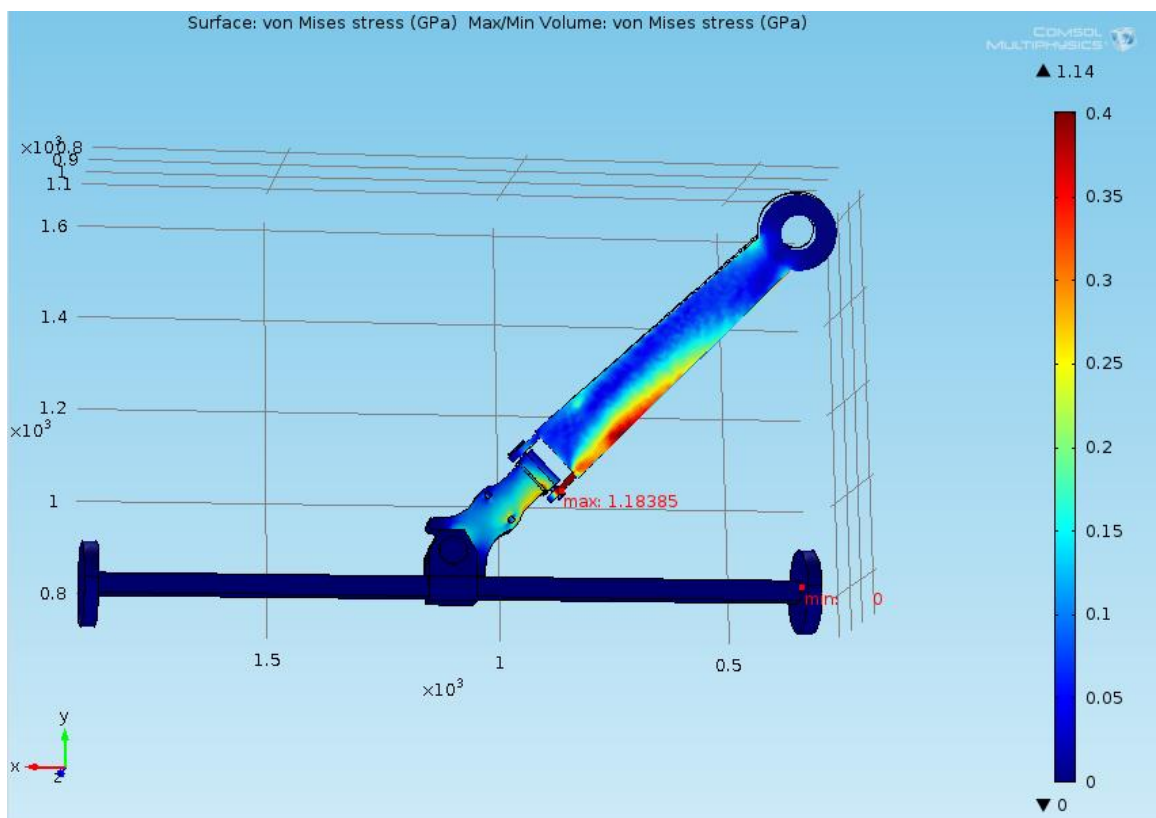
Η συνολική παραμετροποίηση της συγκεκριμένης περίπτωσης φαίνεται παρακάτω:

$$F_{pb_asphalt} = 20.430Nt . \left\{ \begin{array}{l} \bullet F_{pb} = n_s * (m_{eq} * g) \\ \bullet \textit{Physics selection: Structural Mechanics/Multibody Dynamics} \\ \bullet \textit{Study Selection: Stationary} \\ \bullet \theta = 18^\circ \text{ (γωνία περιστροφής)} \\ \bullet \omega = 20^\circ \text{ (γωνία στρέψης)} \\ \bullet n_{s_asphalt} = 0,9 \\ \bullet m_{eq} = 2.314Kg \\ \bullet \textit{αμελητέα αντίσταση αέρα} \end{array} \right.$$

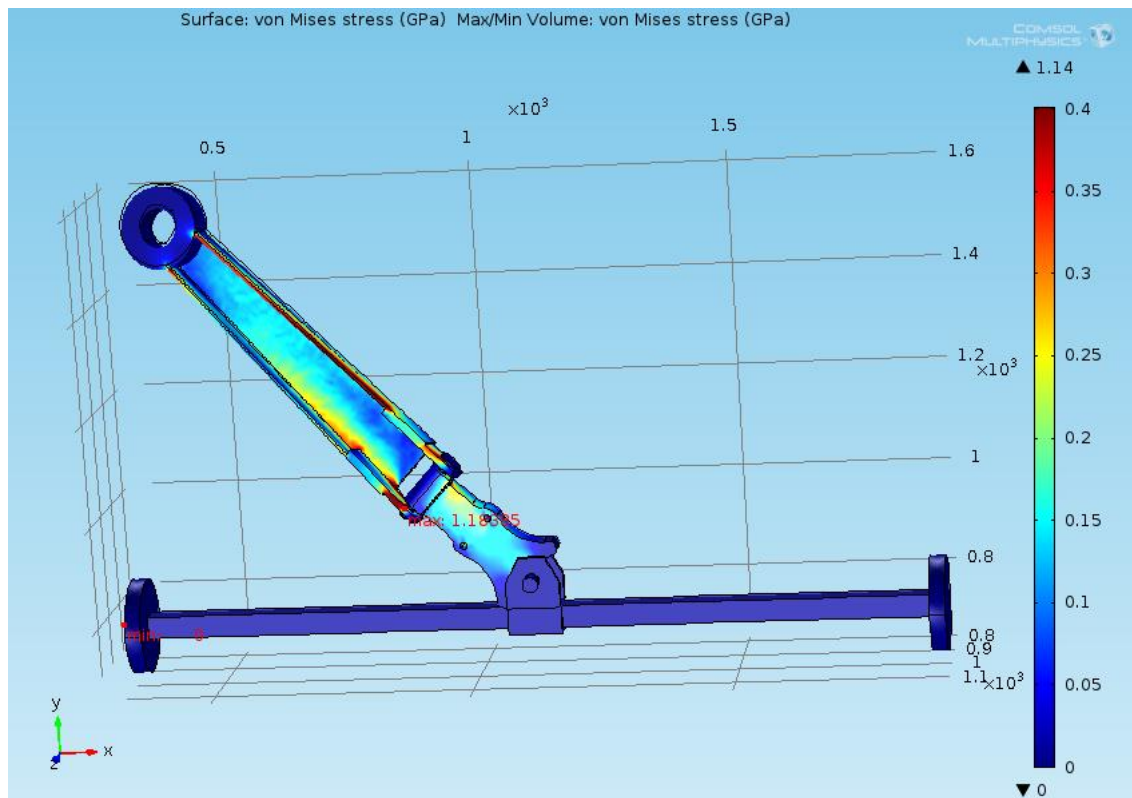
Στην εικόνα του σχήματος 6.56 φαίνεται η συνολική μετατόπιση των τμημάτων της συνδεσμολογίας με βάση τη χρωματική κατανομή χρωμάτων. Όπως παρατηρείται υπάρχει μετατόπιση της μπάρας, με τη μέγιστη τιμή να φτάνει στα **24.4mm**. Στα σχήματα 6.57 και 6.58 φαίνεται η κατανομή της τάσης πάνω στην συνδεσμολογία. Παρατηρείται συγκέντρωση τάσης (κόκκινο χρώμα), κοντά στο σημείο σύνδεσης της μπάρας ρυμούλκησης και κεντρικού βραχίονα τιμονιού. Σημαντική τάση αναπτύσσεται και στις δυο πλευρές του κεντρικού βραχίονα που κυμαίνεται στα 0.4GPa με την μέγιστη τιμή να την λαμβάνει η περιοχή του πείρου στρέψης, με μέγιστη τιμή που φτάνει στα **1.18GPa**. Σε μεγέθυνση, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.59 η περιοχή του πείρου στρέψης συγκεντρώνει την υψηλότερη τιμή της τάσης που εμφανίζεται στη συνδεσμολογία.



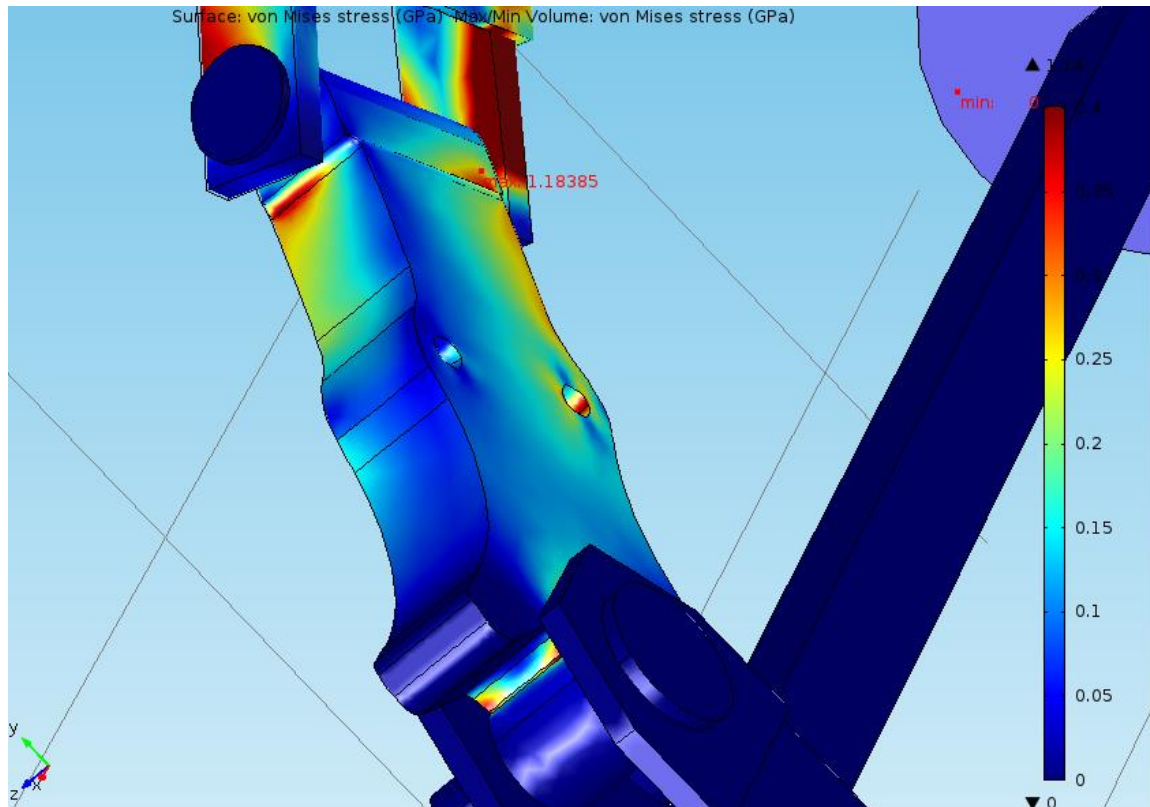
Σχημα 6.56: Διάγραμμα συνολικής μετατόπισης συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα ασφάλτου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 20° .



Σχημα 6.57: Διάγραμμα τάσης (Von Mises Stress) συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα ασφάλτου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 20° .

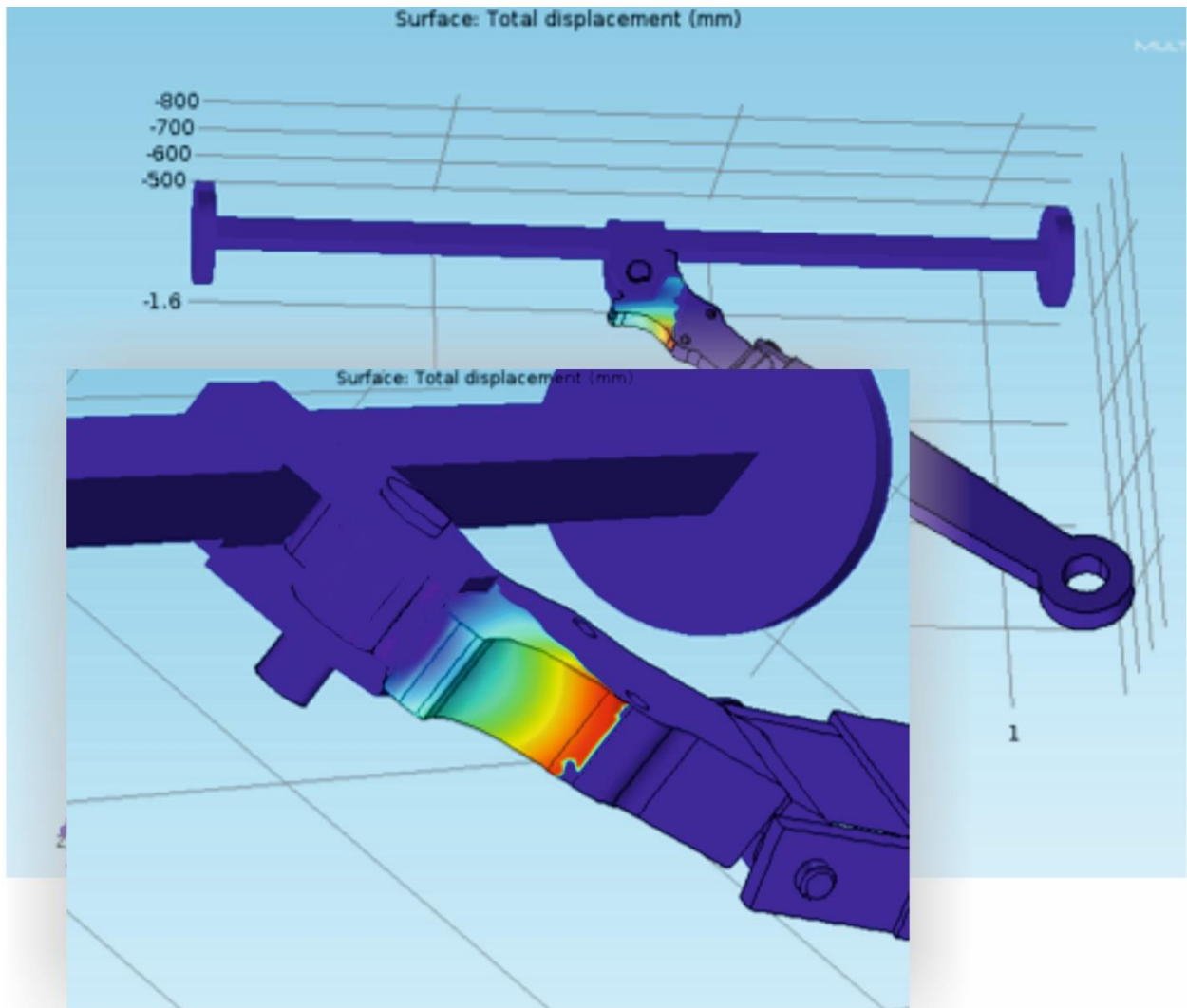


Σχημα 6.58: Διάγραμμα τάσεων (Von Mises Stress) συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα ασφάλτου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 20° .



Σχημα 6.59: Μεγέθυνση διαγράμματος τάσεων (Von Mises Stress) συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα ασφάλτου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 20° .

Τέλος εφαρμόστηκε δοκιμαστικά υπερβολικά μεγάλη δύναμη της τάξης των 35.000 N στην ακραία περίπτωση γωνίας στρέψης των 20° σε ασφαλτόδρομο προκειμένου να ελεγχθεί η μορφή της στρέψης και θραύσης του συνδέσμου της μπαράς τυμούλκησης. Φυσικά οι τιμές των τάσεων που προέκυψαν δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες εξαιτίας της καταστροφής του πλέγματος παρόλα αυτά είναι αξιοσημείωτη η συμπεριφορά των τασικών πεδίων και το σημείο καταστροφής του συνδέσμου, καθώς ταυτίζεται απόλυτα με την πραγματικότητα. Στο σχήμα 6.60 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοιωτικής ανάλυσης στις υψηλές αυτές συνθήκες.



Σχήμα 6.60: Μεγέθυνση διαγράμματος τάσεων (Von Mises Stress) συνδεσμολογίας σε οδόστρωμα ασφάλτου για γωνία περιστροφής 18° και γωνία στρέψης 20° όταν η δύναμη οπισθέλκυσης είναι υπερβολικά μεγάλη και ίση με 35.000 N.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

7.1 Σύνοψη

Όλος ο μηχανοκίνητος εξοπλισμός εξυπηρέτησης αεροσκαφών σε ένα αεροδρόμιο, διαθέτει ένα συγκεκριμένο σύστημα διεύθυνσης όπως φαίνεται στο σχήμα 7.1. Το σύστημα διεύθυνσης αυτό, χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση ελιγμών (ρυμούλκησης-οπισθέλκισης), με σκοπό την τοποθέτηση του εξοπλισμού σε προβλεπόμενες θέσεις λειτουργίας, πλησίον των αεροσκαφών, από βαρέου τύπου οχήματα.



Σχήμα 7.1: Γωνία μπάρας ρυμούλκησης με σύστημα αξόνων (έδαφος).

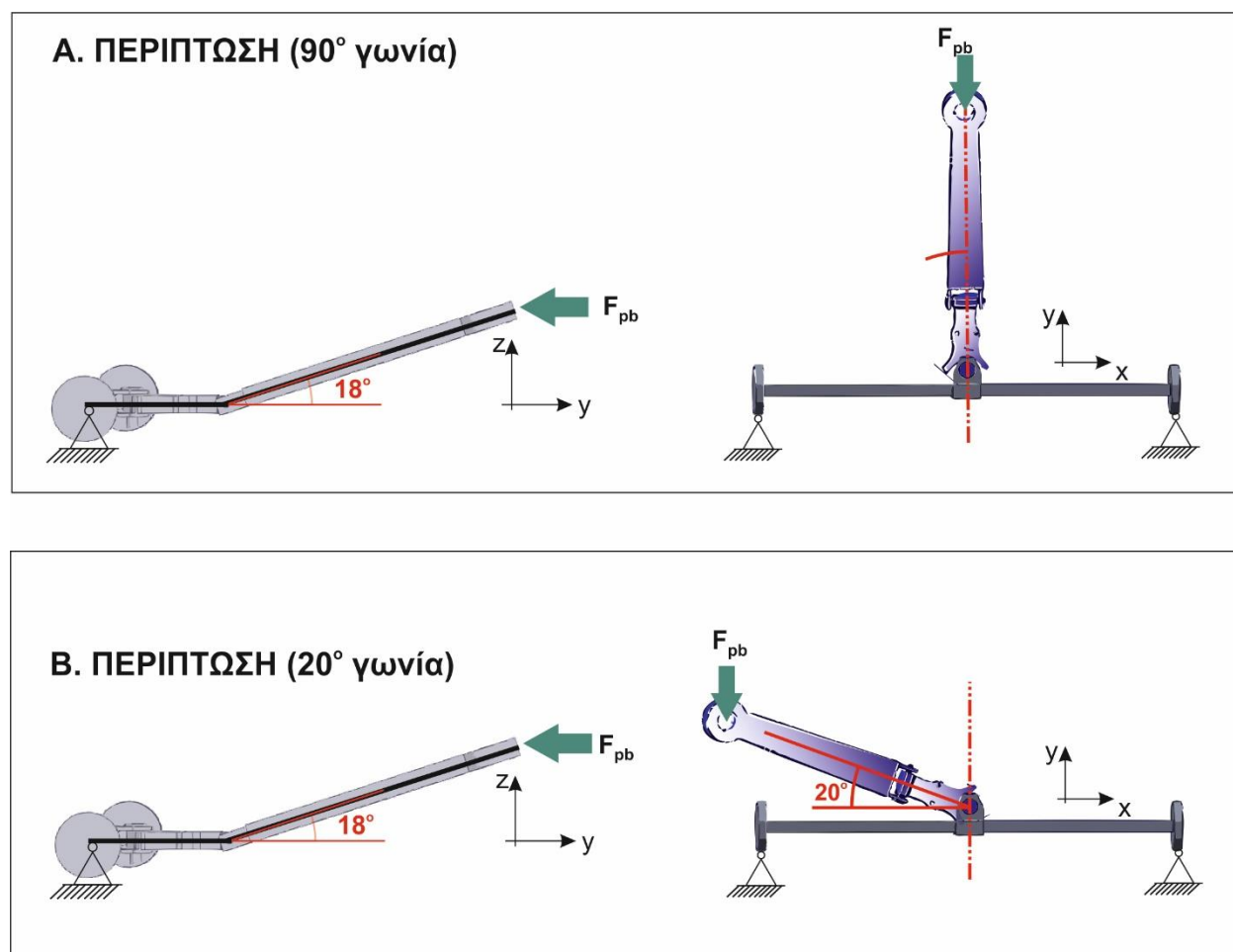
Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά του συγκεκριμένου συστήματος διεύθυνσης μέσω προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία. Η μελέτη επικεντρώθηκε στην ανάλυση της θραύσης του εξαρτήματος συνδεσμολογίας και της στρέβλωσης του πείρου σύνδεσης όπως φαίνεται στο σχήμα 7.2 όταν το εξάρτημα χρησιμοποιείται σε οπισθέλκιση. Για την ανάλυση αυτή επιλέχθηκε να γίνει προσομοίωση της κίνησης σε τρεις διαφορετικές θέσεις όπου και εντοπίστηκαν τα προβλήματα θραύσης και στρέβλωσης της συνδεσμολογίας.



Σχήμα 7.2: Στρέβλωση και σπάσιμο εξαρτημάτων συνδεσμολογίας.

Για την προσομοίωση αυτή απαιτήθηκε αρχικά ο σχεδιασμός των επιμέρους τεμαχίων όλης της συνδεσμολογίας σε σχεδιαστικό πακέτο και έπειτα, μετά την σχεδιαστική συναρμολόγηση

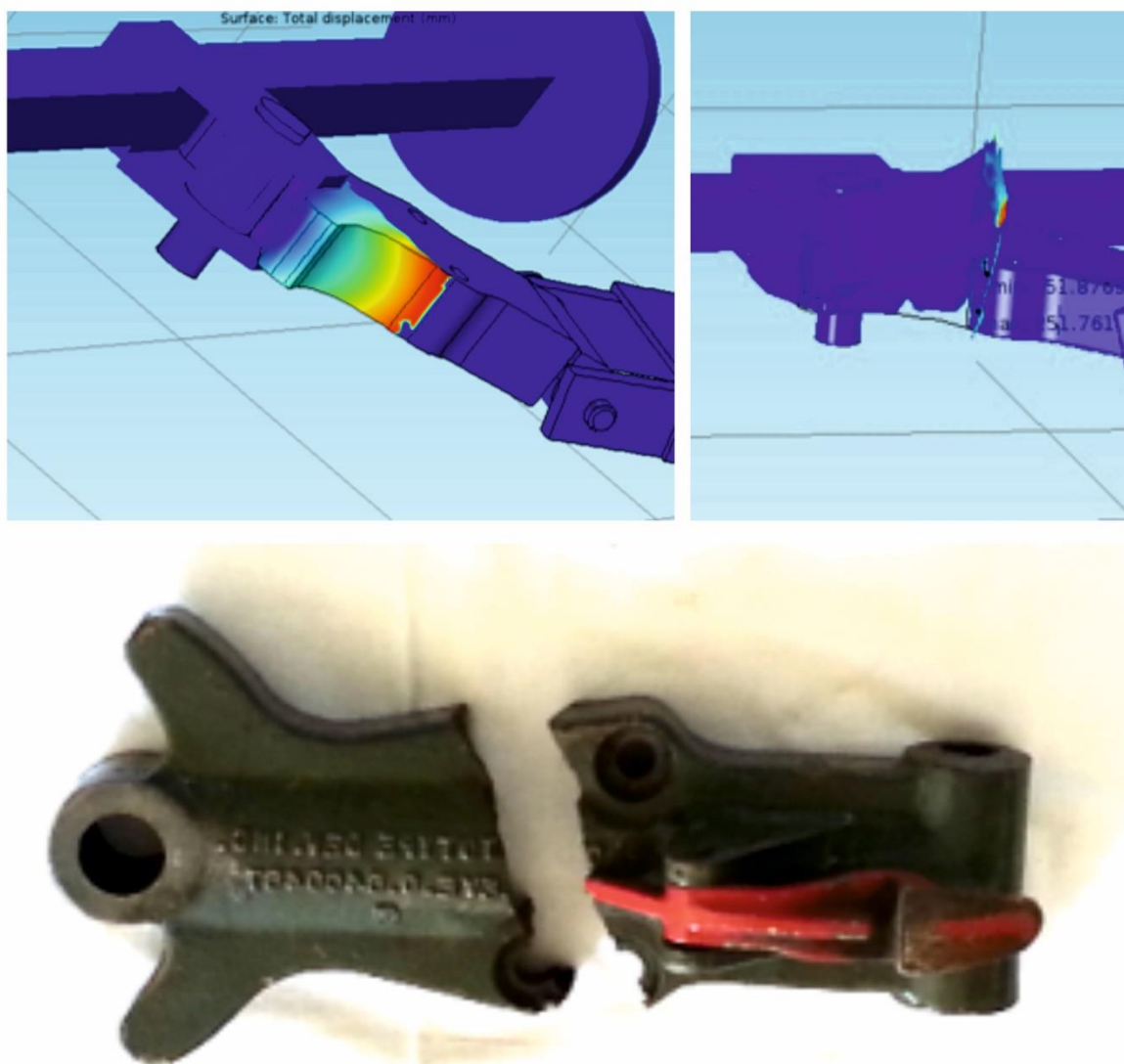
επιλύθηκε το πρόβλημα σε πακέτο πετρερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας οριακές συνθήκες που προσδιορίστηκαν μετά από κατάλληλη μελέτη. Έτσι για την προκειμένη περίπτωση μελετήθηκαν δύο ακραίες περιπτώσεις τοποθέτησης του συστήματος (γωνία 20° και γωνία 90°) όπως φαίνεται στο σχήμα 7.3 και μια ενδιάμεση (γωνία 110°).



Σχήμα 7.3: Ανάλυση των περιπτώσεων που μελετήθηκαν στην εργασία

Και στις 3 περιπτώσεις ασκείται δύναμη F_{pb} της τάξης των $13.6 \cdot 10^3 \text{ N}$, σε τσιμεντένιο δρόμο και $20.4 \cdot 10^3 \text{ N}$, σε ασφαλτοστρωμένο δρόμο κατά τη διεύθυνση του y όπως φαίνεται στο σχήμα 7.3. Για την επίλυση θεωρήθηκε ότι υπάρχει πάκτωση στις ρόδες της συνδεσμολογίας και ότι το υλικό για όλη την διάταξη είναι ο ίδιος χάλυβας με μέτρο Ελαστικότητας 200GPa και όριο θραύσης 0,43 GPa.

Από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα 7.1. Όπως παρατηρείται στον πίνακα αυτό και όπως είναι λογικό για μια απλή εφαρμογή δύναμης, παρατηρούνται μεν τάσεις και μετατοπίσεις στα διάφορα εξαρτήματα της μπάρας ρυμούλκησης. Θα πρέπει φυσικά να τονιστεί όμως ότι όλες οι μέγιστες τιμές εμφανίστηκαν ανά περίπτωση στον σύνδεσμο και στους πείρους όπως ακριβώς εμφανίστηκαν και στα πραγματικά αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν. Προκειμένου να δοθεί μια εκτίμηση της καταστροφής των αντικειμένων αυτών και να περαστεί το σημείο θραύσης του υλικού, εφαρμόστηκε στην ακραία περίπτωση στρέψης του ρυμουλκού μεγάλη δύναμη η οποία οδήγησε σε διαχωρισμό του συνδέσμου. Στο σχήμα 7.4 φαίνεται ακριβώς αυτή η θραύση όπως συνέβη στην προσομοίωση αλλά και στην πράξη.



Σχήμα 7.4: Θραύση συνδέσμου μετά από έντονη καταπόνηση.

α/α	Περίπτωση	οδόστρωμα	Μετατόπιση [mm]	Max VonMises Stress [GPa]
1	Οπισθέλκυση σε τυχαία γωνία στρέψης (110°)	Τσιμέντο	19.2	1.24
		Άσφαλτος	26.7	1.16
2	Οπισθέλκυση σε ορθή γωνία στρέψης (90°)	Τσιμέντο	28.1	0.87
3	Οπισθέλκυση σε οριακή γωνία στρέψης (20°)	Άσφαλτος	24.4	1.18

Πίνακας 7.1: Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοιώσεων.

7.2. Συμπεράσματα

Στην μεταπτυχιακή εξετάστηκε, η οριακή θέση του συστήματος που δημιουργεί και τα προβλήματα στρέβλωσης και καταστροφής της συνδεσμολογίας. Κατά την διάρκεια της ολοκλήρωσης της μελέτης προέκυψαν προβλήματα σε επίπεδο πλεγματοποίησης της συνδεσμολογίας. Αυτά οφειλόταν στις δύσμορφες επιφάνειες του συστήματος σε επίπεδο σχεδιασμού. Υπήρχαν δηλαδή πολλές καμπυλότητες και σπασίματα (fillets and chamfers) τα οποία καθιστούσαν πολύπλοκο το meshing της διάταξης. Η επιλεκτική και προσεκτική απαλοιφή τους από τη γεωμετρία των εξαρτημάτων, χωρίς την διαφοροποίηση της πραγματικής μορφής και διαστάσεων, συνετέλεσε ουσιαστικά στην πραγματοποίηση της μελέτης αφού η πλεγματοποίηση ολοκληρώθηκε με επιτυχία. Έτσι επετεύχθη γρηγορότερη επίλυση της μελέτης εξοικονομώντας χρόνο και υπολογιστική δύναμη.

Είναι προφανές πως η μελέτη αυτή δίνει αρκετά σημαντικά συμπεράσματα για την όλη διαδικασία στρέβλωσης στο σύστημα διεύθυνσης με μπάρα ρυμούλκησης, μιας και επιτυγχάνεται μερικώς ταύτιση των αποτελεσμάτων της εργασίας με τα πραγματικά ευρήματα που έχουν προκύψει.

Έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα σημεία της εργασίας ότι η διαδικασία της οπισθέλκησης μιας συσκευής, για την κάλυψη οποιασδήποτε τεχνικής φύσεως υπηρεσία προς το αεροσκάφος, αποτελεί μια επίπονη κατάσταση για το ίδιο το μηχάνημα αλλά και επικίνδυνη για το προσωπικό που εμπλέκεται. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να ακολουθείται πιστά η διαδικασία και με μεγάλη προσοχή.

Το βασικότερο συμπέρασμα που προέκυψε από αυτή τη μελέτη, είναι ότι το σύστημα διεύθυνσης και συγκεκριμένα τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται ένα τέτοιο σύστημα ρυμούλκησης, καταπονούνται κατά την διαδικασία της οπισθέλκησης σε σημείο να φτάνουν στα όρια στρέβλωσης και θραύσης τους. Στις εικόνες του σχήματος 7.5 και του σχήματος 7.6 παρατηρούμε τις στρεβλώσεις που αναπτύσσονται στον πραγματικό κόσμο, στο πείρο περιστροφής της μπάρας ρυμούλκησης, στην ίδια την μπάρα ρυμούλκησης καθώς και το σπάσιμο του κεντρικού βραχίονα τιμονιού.



Σχημα 7.5: Σπάσιμο εξαρτημάτος κεντρικού βραχίονα συνδεσμολογίας.



Σχήμα 7.6: Στρεβλώσεις της μπάρας ρυμούλκησης.

Όπως γίνεται λοιπόν κατανοητό τόσο από τις εικόνες, όσο και από την πειραματική μελέτη μέσω του προγράμματος Comsol Multiphysics 4.4, σε όλες τις θέσεις του συστήματος διεύθυνσης όπου το σύστημα μπάρα-πείρος-βραχίονας τιμονιού είναι σε συνεχή καταπόνηση δεχόμενη διαφόρων ειδών τάσεις κατά την εξέλιξη της διαδικασίας. Άρα λοιπόν αποδεικνύεται πως θα πρέπει οι οριακές θέσεις κατά την διαδικασία της οπισθέλκισης να αποφεύγονται ή ακόμη και να αποφεύγεται, στο σύνολο της, η διαδικασία αυτή. Η χρήση της διαδικασίας θα πρέπει να επιτρέπεται μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις ενώ επιβάλλεται να πραγματοποιηθούν αλλαγές στο σύστημα αυτό, όπως αλλαγή υλικού, αλλαγή διαστάσεων ή και περιορισμό κινήσεων

Έχει αναφερθεί πως το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του συστήματος διεύθυνσης είναι ο χάλυβας. Οι μετρήσεις που έγιναν για την εύρεση του υλικού, με την μέθοδο των υπέρηχων, είναι αρκετά ικανοποιητικές αλλά δεν μπορούν να μας δώσουν την ακριβή σύνθεση του υλικού κατασκευής. Επομένως ορίστηκε το προαναφερθέν υλικό του οποίου τα βασικά χαρακτηριστικά φαίνονται στην εικόνα του σχήματος 7.7, όπως δίδονται από την βιβλιοθήκη υλικών του προγράμματος. Δύο ακόμα βασικά χαρακτηριστικά του υλικού είναι η τάση διαρροής, αποτελεί το σημείο στο οποίο το υλικό περνά στην πλαστική περιοχή, που ισούται με 0,25 GPa και η τάση θραύσης όπου το υλικό παραμορφώνεται και ισούται με 0,4 GPa. Στο πίνακα 7.1 η μέγιστη τιμή της Von misses stress που αναπτυχθήκε σε σημείο του συγκροτήματος βραχίονα είναι 1.24GPa. Η τιμή αυτή συγκρινόμενη με τις τιμές του ορίου διαρροής και της θραύσης είναι μεγάλη. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα οι τάσεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή κατά την διάρκεια της οπισθέλκισης είναι πολύ μεγάλες και καταστούν αδύνατη την αποφυγή θραύσης των υπό μελέτη εξαρτημάτων. Επομένως η

αποφυγή των οριακών θέσεων καθώς και όλης της διαδικασίας κρίνεται απαραίτητη. Αν συνυπολογιστεί ότι κατά την διαδικασία οπισθέλκυσης το φορτίο που ασκείται είναι σταθερό αλλά ασκείται ακανόνιστα χρονικά, αυξάνει τις πιθανότητες καταστροφής του συστήματος.

»	Property	Name	Value	Unit	Property group
✓	Density	rho	7850[kg/m...	kg/m ³	Basic
✓	Young's modulus	E	200e9[Pa]	Pa	Young's modulus and Poisson'...
✓	Poisson's ratio	nu	0.33	1	Young's modulus and Poisson'...
	Relative permeability	mur	1	1	Basic
	Heat capacity at constant pressure	Cp	475[J/(kg*K)]	J/(kg·K)	Basic
	Thermal conductivity	k	44.5[W/(m...	W/(m·K)	Basic
	Electrical conductivity	sigma	4.032e6[S/m]	S/m	Basic
	Relative permittivity	epsilon _r	1	1	Basic
	Coefficient of thermal expansion	alpha	12.3e-6[1/K]	1/K	Basic
	Murnaghan third-order elastic moduli	l	-3.0e11[Pa]	N/m ²	Murnaghan
	Murnaghan third-order elastic moduli	m	-6.2e11[Pa]	N/m ²	Murnaghan
	Murnaghan third-order elastic moduli	n	-7.2e11[Pa]	N/m ²	Murnaghan
	Lamé parameter λ	lambLame	1.5e11[Pa]	N/m ²	Lamé parameters
	Lamé parameter μ	muLame	7.5e10[Pa]	N/m ²	Lamé parameters

Σχήμα 7.7: Βασικά χαρακτηριστικά υλικού κατασκευής συστήματος διεύθυνσης

Ένα δεύτερο συμπέρασμα είναι πως η διαδικασία της οπισθέλκυσης θα πρέπει να γίνεται με μηδενική οριζόντια γωνία και όχι με την υπάρχουσα των 18°, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.1, η οποία επιβαρύνει ακόμη περισσότερο τα εξαρτήματα της συνδεσμολογίας μας, επιταχύνοντας την αστοχία τους. Πράγματι η δύναμη οπισθέλκυσης που θα δέχεται η μπάρα ρυμούλκησης και κατ' επέκταση η όλη συνδεσμολογία μειώνεται, σύμφωνα με το κεφάλαιο 3 και τα σχήματα 3.10 και 3.11, έχοντας σαν αποτέλεσμα η διαδικασία να πραγματοποιείται με μικρότερες καταπονήσεις στα μηχανικά του μέρη.

Τέλος μπορεί να αναφερθεί, πέραν των παραπάνω, ότι το υλικό κατασκευής των εξαρτημάτων της συνδεσμολογίας αποτελεί καθοριστικό ρόλο στην αντοχή τους σε καταπονήσεις αυτού του τύπου που μελετήθηκαν στη παρούσα εργασία.

7.3 Προοπτικές

Οι προοπτικές εξέλιξης της παρούσας εργασίας επεκτείνονται σε όλες τις φάσεις της, πιο συγκεκριμένα:

- Στο στάδιο σχεδιασμού
- Στο σταδιο προσομοίωσης

Οσο αφορά το στάδιο σχεδιασμού οι προοπτικές για ένα πιο λεπτομερή σχεδιασμό των εξαρτημάτων με την χρήση υπολογιστή καλύτερων αποδόσεων αλλά και την χρήση καλύτερων μετρητικών οργάνων θα έδινε πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια στα σχεδιαζόμενα τμήματα και καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής τους μορφής.

Στο στάδιο της προσομοίωσης οι προοπτικές που δίδονται για την εξέλιξη της εργασίας είναι πολλές. Καταρχην η χρήση υπολογιστή πολύ καλων αποδοσεων σε μνήμη και ταχύτητα, δίνει πιο γρήγορη και πιο αξιόπιστη λύση. Τα τυχόν προβλήματα αντιμετωπίζονται γρηγορότερα εξοικονομώντας πολύτιμο χρόνο. Η μελέτη χρήσης διαφορετικού υλικού κατασκευής των εξαρτημάτων ή συνδυασμός υλικών μπορεί να επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα. Η παρούσα

μελέτη αποτελεί μια στατική λύση του προγράμματος. Δίνεται η δυνατότητα το πρόβλημα να αντιμετωπιστεί και ως δυναμικό, όχι μόνο ως στατικό καθώς και να χρησιμοποιηθεί διαφορετική φυσική προσέγγιση, πολλαπλές δυνατότητες που τις παρέχει το πρόγραμμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Βελαώρα Ι, 2009, Αθήνα, Στοιχεία Μηχανών, Εκδόσεις ΙΩΝ Στοιχεία Μηχανών Σχέδιο ΟΕΔΒ
- [2] Βαρύτης Ε. και Σταυροπούλου Σ. (), Θεσσαλονίκη, Βασικές αρχές σχεδίασης CAD με το Solidworks, έκδοση των συγγραφέων
- [3] Γκρος Γ, 2002, Αθήνα, Αντοχή Υλικών, Εκδόσεις Ίδρυμα Ευγενιδου
- [4] Γκοτσης Π, 2004, Σερρες, Πεπερασμενα Στοιχεία, Εκδόσεις ΖΗΤΗ
- [5] Αριστομένης Θ. Αντωνιάδης, 2013, Μηχανολογικό σχέδιο, Εκδόσεις Τζιόλα
- [6] Μαυρομματακος Κ. Αργυρης, 1979, Αθήνα, Φυσική (Μηχανική των στερεών), Εκδόσεις Ίδρυμα Ευγενιδου
- [7] Καλλικούρδης Μαρ, 1998, Αθήνα, Μηχανολογικό σχέδιο, Εκδόσεις Ίδρυμα Ευγενιδου
- [8] Σατόγλου Αρετή, 2012, Χανιά, Μελέτη εύρεσης και σύγκρισης ιδιοσυχνοτήτων για δυο κυκλικά κυλινδρικά κελύφη
- [9] Μπότος Αθανάσιος, 2011, Χάνια, Μελέτη φιάλης νερού με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων
- [10] ΑλκΗΣΙΣ Παπαντωνίου, 2012, Χανιά, Μελέτη συστήματος αγκυροβόλησης μικρών σκαφών Σχεδιασμός και ανάλυση αγκύρας τύπου delta
- [11] Μαργαρίτα Παναγοπούλου, Προσομοίωση εκβολής πλαστικού σωλήνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων
- [12] Αγαθοκλέους Θεόφιλος, 2013, Χανιά, Προσομοίωση σύνθετης διάταξης πιεζοηλεκτρικών στοιχείων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων
- [13] Beginner's Guide to SolidWorks 2013 - Level I Alejandro Reyes SDC SDCpublications
- [14] Beginner's Guide to SolidWorks 2013 - Level I Alejandro Reyes SDC SDCpublications
- [15] James D. Bethune *Boston University* 2009 Engineering Design and Graphics with SolidWorks®
- [16] Roger W. Pryor, 2011, Multiphysics Modeling using Comsol, a first principles approach jones and bartlett publishers
- [17] SolidWorks® 2010 Bible Matt Lombard 2010 by Wiley Publishing, Inc., Indianapolis, Indiana
- [18] SolidWorks· 2013 Part II – Advanced Techniques Paul Tran SDCPublications
- [19] T.O. 33A2-2-30-31, 1969, Operation and Maintenance, Test Stand, Hydraulic System components
- [20] T.O. 33A2-2-30-33, 1969, Overhaul, Test Stand, Hydraulic System components
- [21] T.O. 33A2-2-30-34, 1969 Illustrated Parts Breakdown, Test Stand, Hydraulic System components
- [22] T.O. 33B-1-1, 2013, Nondestructive Inspection Methods, Basic Theory
- [23] J. Ed Akin, 2009, Finite Element Analysis Concepts via SolidWorks, World Scientific
- [24] COMSOL Multiphysics Reference Manual, Version: November 2013 COMSOL 4.4
- [25] http://www.mie.uth.gr/n_ekp_ylik

