



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ /
TECHNICAL
UNIVERSITY
OF CRETE**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη αντοχής και επανασχεδιασμός εμπρόσθιου συστήματος ανάρτησης μοτοσυκλέτας τύπου Telelever

Structural Analysis and Redesign of a Telelever Motorcycle Front
Suspension System

ΙΩΑΝΝΟΥ ΜΑΡΙΟΣ

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Χανιά 2024

Copyright © Ιωάννου Μάριος, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Αφιερώνεται στους γονείς μου

Δημήτρη και Βέρα

Περίληψη

Η συγκεκριμένη εργασία αφορά τη μελέτη του εμπρόσθιου συστήματος ανάρτησης δίτροχης μοτοσυκλέτας, τύπου Telelever. Στόχος είναι η μείωση βάρους του συστήματος και ταυτόχρονα η διατήρηση της αντοχής του, μέσα από τον επανασχεδιασμό συγκεκριμένων τμημάτων του. Αρχικά πραγματοποιείται ο σχεδιασμός κάθε εξαρτήματος ξεχωριστά, καθώς και η συναρμολόγηση τους σε λογισμικό τρισδιάστατου σχεδιασμού (CAD). Στη συνέχεια, με την χρήση εξειδικευμένου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (CAE) εφαρμόζονται τα στατικά φορτία που ασκούνται στο σύστημα κατά τη λειτουργία του και αξιολογούνται μέσω προσομοίωσης τα αποτελέσματα των τάσεων και παραμορφώσεων, τόσο για την περίπτωση της στατικής φόρτισης όσο και για την περίπτωση της ακραίας πέδησης. Η περίπτωση της ακραίας πέδησης αποτελεί τη μέγιστη φόρτιση που μπορεί να δεχθεί το σύστημα σε ευθεία κίνηση. Βάση των αποτελεσμάτων, πραγματοποιείται επανασχεδιασμός συγκεκριμένων τμημάτων με στόχο την μείωση του βάρους του και παράλληλα τη διατήρηση της δομικής του ασφάλειας. Σε αυτή τη φάση ανάπτυξης εξετάζονται εναλλακτικά σχέδια των τμημάτων του συστήματος με στόχο τη βελτίωση του τελικού σχεδιασμού του, βάση των προδιαγραφών που έχουν τεθεί. Τέλος πραγματοποιείται εκ νέου μελέτη αντοχής και αξιολόγηση του νέου σχεδιασμού του συστήματος στα ίδια φορτία και επιλέγεται η καταλληλότερη σχεδίαση βάση των δυνατοτήτων παραγωγής.

Abstract

This study is focused on a Telelever type front suspension system for a two-wheeled motorcycle. The main target is to reduce the system's weight and maintain its structural rigidity through the redesign of specific components. As a first step the components are designed and assembled using a three-dimensional design software (CAD). Using a dedicated Computer Aided Engineering (CAE) software, loads are applied on the system and the results of stresses and deformations are evaluated by finite element analysis simulation, for a static analysis and a braking scenario. The maximum load applied during system operation on a straight path, is the full front brake scenario. Based on the simulation results, certain parts are redesigned focusing on weight reduction without compromising structural rigidity. In this development phase, alternative designs of the components are evaluated towards an optimal final design that meets the technical requirements set. Finally, a structural analysis of the new system designs is conducted and evaluated through simulation, based on the same load scenarios and the optimal design is chosen according to production capabilities.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους με στήριξαν και συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ελευθέριο Δοϊτσίδα και τον Διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης κ. Σπανουδάκη Πολυχρόνη για την συνεχή καθοδήγηση, τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις και την υποστήριξη σε κάθε στάδιο της έρευνας μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και την σύντροφο μου Κατερίνα για την αμέριστη στήριξή τους και την υπομονή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Θερμές ευχαριστίες οφείλω και στον συμφοιτητή μου Ευάγγελο Σμαραγδή, για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Η συμβολή τους ήταν καθοριστική για την επιτυχία αυτής της εργασίας και τους είμαι πραγματικά ευγνώμων.

"Ο μηχανικός βλέπει λύσεις εκεί που άλλοι βλέπουν προβλήματα."

Περιεχόμενα

Λίστα εικόνων.....	10
Λίστα πινάκων.....	13
<u>Κεφάλαιο 1 :</u> Εισαγωγή.....	14
1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	14
1.2 Προηγμένα Συστήματα Αναρτήσεων.....	20
1.2.1 Αγωνιστικά Συστήματα.....	23
1.3 Εμπρόσθιο Σύστημα Ανάρτησης Telelever.....	24
1.4 Σχετικές Ερευνητικές Εργασίες.....	27
1.5 Στόχος Εργασίας.....	29
 <u>Κεφάλαιο 2 :</u> Ανάλυση και Μοντελοποίηση.....	30
2.1 Εισαγωγή και Περιγραφή της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων.....	30
2.1.1 Θεωρίες Αστοχίας.....	33
2.2 Μελέτη Αντοχής του Συστήματος.....	34
2.2.1 Περίπτωση Στατικής Φόρτισης.....	34
2.2.2 Περίπτωση Πέδησης.....	36
2.3 Μοντελοποίηση Συστήματος.....	40
2.3.1 Δημιουργία Πλέγματος.....	42
2.3.2 Μοντελοποίηση Συνδέσεων.....	43
2.3.3 Μοντελοποίηση Υλικών.....	44
2.3.4 Μοντελοποίηση Περιορισμών.....	47
2.3.5 Μοντελοποίηση Δυνάμεων.....	48
2.3.6 Αρχείο Επιλυτή.....	49
 <u>Κεφάλαιο 3 :</u> Αποτελέσματα Ανάλυσης.....	50
3.1 Αποτελέσματα Αρχικού Μοντέλου.....	50
3.1.1 Αποτελέσματα Καταπόνησης Κατά την Στατική Φόρτιση.....	50
3.1.2 Αποτελέσματα Καταπόνησης Κατά την Ακραία Πέδηση.....	51

3.1.3 Αριθμητικές Τιμές Αποτελεσμάτων.....	52
<u>Κεφάλαιο 4</u> : Επανασχεδιασμός Ψαλιδιού.....	53
4.1. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	53
4.1.1 Μοντέλα Επανασχεδιασμού.....	53
4.2 Αποτελέσματα Επανασχεδιασμού.....	55
4.2.1 Αποτελέσματα 1 ^{ου} Επανασχεδιασμού.....	56
4.2.2 Αποτελέσματα 2 ^{ου} Επανασχεδιασμού.....	58
4.2.3 Αποτελέσματα Συνολικού Συστήματος.....	60
4.3 Αριθμητικές Τιμές Επανασχεδιασμού.....	61
4.4 Σύνοψη Αποτελεσμάτων.....	61
<u>Κεφάλαιο 5</u> : Συμπεράσματα.....	64
5.1 Ανακεφαλαίωση και Τελικά Αποτελέσματα.....	64
5.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	65
Βιβλιογραφία.....	66

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1 : Πρώτη δίκυκλη μοτοσυκλέτα.....	14
 (https://www.mixanitouxronou.gr/1885)	
Εικόνα 2: Εμπρόσθιο σύστημα ανάρτησης σε ποδήλατο το 1901.....	14
 (https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4471-5149-4)	
Εικόνα 3: (Αριστερή εικόνα) Το σύστημα του Alfred Angas Scott και (Δεξιά εικόνα) το Druid Fork.....	15
 (https://cybermotorcycle.com/components/druid-forks.htm)	
Εικόνα 4: Κατάλογος μοτοσυκλετών Webb το 1929.....	16
 (https://www.webbikeworld.com/motorcycle-brands/european-motorcycle-brands/)	
Εικόνα 5: Το υδραυλικό αμορτισέρ του Rudolf Schleicher.....	17
 (https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4471-5149-4)	
Εικόνα 6: Μοτοσυκλέτα Indian με Springer Fork.....	17
 (https://www.autoevolution.com/)	
Εικόνα 7: BMW R12, η πρώτη μοτοσυκλέτα με τηλεσκοπικό πιρούνι.....	18
 (https://bringatrailer.com/listing/1936-bmw-r12-2)	
Εικόνα 8 : Η διαφήμιση του Triumph Tigress το 1958 (Δεξιά) και οι δύο τμηματικές όψεις του βραχίονα (Αριστερά).....	19
 (https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4471-5149-4)	
Εικόνα 9 : USD πιρούνια της Honda CRF250R τύπου Motocross.....	21
 (https://www.cyclenews.com/)	
Εικόνα 10: Η Yamaha GTS1000 η οποία φέρει το σύστημα HCS.....	22
 (https://en.wikipedia.org/wiki/Yamaha_GTS1000)	
Εικόνα 11 : Το σύστημα Duolever στο BMW K 1200 S.....	22
 (https://www.bmwgroup.com/en.html)	
Εικόνα 12 : USD πιρούνια της Öhlins σε μοτοσυκλέτα MotoGP Ducati.....	23
 (https://www.asphaltandrubber.com/)	
Εικόνα 13 : Αριστερά ο Andrea Dovizioso και δεξιά ο Jorge Lorenzo το 2017.....	24
 (https://www.asphaltandrubber.com/)	
Εικόνα 14: Εμπρόσθιο σύστημα ανάρτησης Telelever.....	25
 (https://www.bing.com/search?EID=MBSC&form=BGCDF&pc=U750&q=bmw+group)	

Εικόνα 15 : Τα διάφορα μέρη που απαρτίζουν το σύστημα Telelever.....	26
 (https://www.bmw-motorrad.gr/el/home.html#/filter-ola)	
Εικόνα 16 : Βαθμοί ελευθερίας του συστήματος.....	27
 (https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4471-5149-4)	
Εικόνα 17 : Γραφικές παραστάσεις σύγκρισης τηλεσκοπικών πιρουνιών και συστήματος Telelever.....	28
 (https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4471-5149-4)	
Εικόνα 18 : Συνήθεις τύποι πεπερασμένων στοιχείων.....	31
 (https://necronomiconmagic.weebly.com/lovecraft-and-weird-mathematics.html)	
Εικόνα 19 : Ανάλυση τάσεων σε μπιέλα με την χρήση FEM και Von Mises.....	34
 (https://www.researchgate.net/publication/318307768 Behavior of Composite Concrete)	
Εικόνα 20: Οι δυνάμεις στον κάθετο άξονα κατά την στατική φόρτιση.....	36
 (https://www.unm.edu/~starr/moto/cm.pdf)	
Εικόνα 21 : Αναπαράσταση δυνάμεων που ασκούνται κατά το φρενάρισμα της μοτοσυκλέτας.....	37
 (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1571066108003824)	
Εικόνα 22 : Το σύστημα Telelever στο FUSION 360 σε ολοκληρωμένη μορφή.....	40
Εικόνα 23 : Το ολοκληρωμένο σύστημα Telelever κάτω δεξιά, πάνω δεξιά και αριστερά το Ball Joint και κάτω αριστερά το διπλό ψαλίδι A-ARM.....	41
Εικόνα 24: Το Ball Joint στο σύστημα Telelever σε τομή.....	42
Εικόνα 25: Τελική μορφή συστήματος με Shell και Solid Mesh.....	43
Εικόνα 26: Οι εννέα συνδέσεις (CONTACTS) στο σύστημα.....	44
Εικόνα 27 : Τα εξαρτήματα του συστήματος αριθμημένα.....	45
Εικόνα 28 : Η καρτέλα ορισμού υλικού για το ψαλίδι.....	47
Εικόνα 29 : Οι πάκτωση που εφαρμόστηκε στο μοντέλο(αριστερά) και η εντολή της άρθρωσης(δεξιά).....	47
Εικόνα 30 : Αριστερά απεικονίζεται η δύναμη στατικής φόρτισης και δεξιά οι δυνάμεις στην περίπτωση πέδησης.....	48
Εικόνα 31 : Το αρχείο επιλυτή για την γραμμική στατική ανάλυση.....	49
Εικόνα 32 : Κατανομή τάσεων(αριστερά) και μετατοπίσεων(δεξιά) στο συνολικό σύστημα σε στατική φόρτιση.....	50
Εικόνα 33 : Κατανομή τάσεων(αριστερά) και μετατοπίσεων(δεξιά) στο διπλό ψαλίδι σε στατική φόρτιση.....	51

<u>Εικόνα 34 :</u> Κατανομή τάσεων(αριστερά) και μετατοπίσεων(δεξιά) στο συνολικό σύστημα σε ακραία πέδηση.....	51
<u>Εικόνα 35 :</u> Κατανομή τάσεων(αριστερά) και μετατοπίσεων(δεξιά) στο διπλό ψαλίδι σε ακραία πέδηση.....	52
<u>Εικόνα 36 :</u> Ο πρώτος επανασχεδιασμός στο Fusion 360.....	54
<u>Εικόνα 37 :</u> Ο δεύτερος επανασχεδιασμός στο Fusion 360.....	55
<u>Εικόνα 38 :</u> Αποτελέσματα Τάσεων Στατικής Φόρτισης (Επανασχεδιασμός 1 ^{ος}).....	56
<u>Εικόνα 39 :</u> Αποτελέσματα Μετατοπίσεων Στατικής Φόρτισης (Επανασχεδιασμός 1 ^{ος}).....	56
<u>Εικόνα 40 :</u> Αποτελέσματα Τάσεων Ακραίας Πέδησης (Επανασχεδιασμός 1 ^{ος}).....	57
<u>Εικόνα 41 :</u> Αποτελέσματα Μετατοπίσεων Ακραίας Πέδησης (Επανασχεδιασμός 1 ^{ος}).....	57
<u>Εικόνα 42 :</u> Αποτελέσματα Τάσεων Στατικής Φόρτισης (Επανασχεδιασμός 2 ^{ος}).....	58
<u>Εικόνα 43 :</u> Αποτελέσματα Μετατοπίσεων Στατικής Φόρτισης (Επανασχεδιασμός 2 ^{ος}).....	58
<u>Εικόνα 44 :</u> Αποτελέσματα Τάσεων Ακραίας Πέδησης (Επανασχεδιασμός 2 ^{ος}).....	59
<u>Εικόνα 45 :</u> Αποτελέσματα Μετατοπίσεων Ακραίας Πέδησης (Επανασχεδιασμός 2 ^{ος}).....	59
<u>Εικόνα 46:</u> Αποτελέσματα συνολικού συστήματος σε στατική φόρτιση (αριστερά) και ακραία πέδηση (δεξιά) στον 1 ^ο Επανασχεδιασμό.....	60
<u>Εικόνα 47:</u> Αποτελέσματα συνολικού συστήματος σε στατική φόρτιση (αριστερά) και ακραία πέδηση (δεξιά) στον 2 ^ο Επανασχεδιασμό.....	60

Λίστα Πινάκων

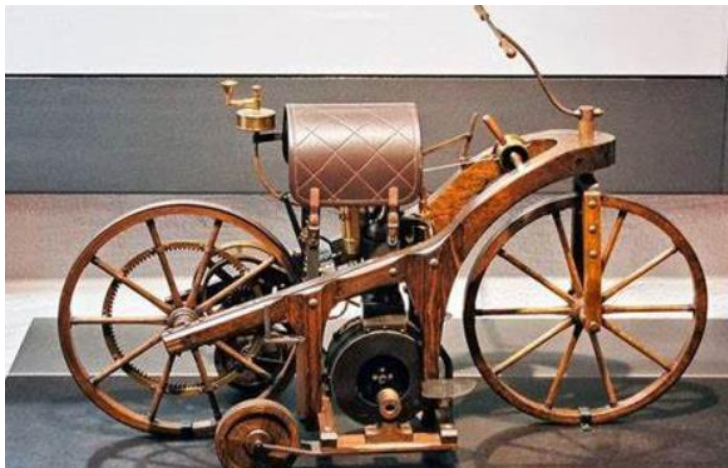
<u>Πίνακας 1 :</u> Τα υλικά των εξαρτημάτων που απαρτίζουν το σύστημα Telelever.....	45
<u>Πίνακας 2 :</u> Μέγιστες τιμές τάσεων και μετατοπίσεων.....	52
<u>Πίνακας 3 :</u> Μέγιστες τιμές τάσεων και μετατοπίσεων του Ψαλιδιού για τους δύο επανασχεδιασμούς.....	61
<u>Πίνακας 4:</u> Μέγιστες τιμές τάσεων του Συνολικού Συστήματος για τους δύο επανασχεδιασμούς.....	61
<u>Πίνακας 5 :</u> Μέγιστες τιμές τάσεων και μετατοπίσεων του Ψαλιδιού για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζουμε.....	62
<u>Πίνακας 6 :</u> Η μάζα ψαλιδιού σε κάθε μία από τις περιπτώσεις.....	62

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

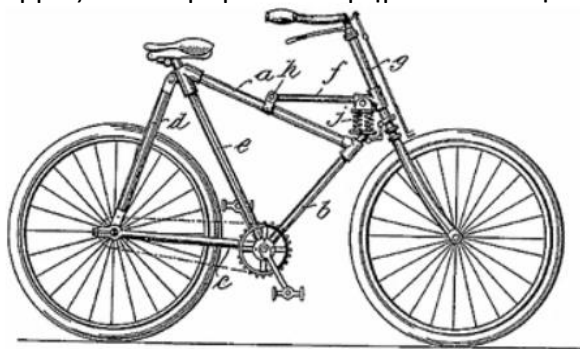
1.1 Ιστορική Αναδρομή

Οι μοτοσυκλέτες έχουν κάνει την πρώτη εμφάνιση τους τον 19^ο αιώνα, συγκεκριμένα το 1885 οι Γερμανοί εφευρέτες Γκότλιμπ Ντέμλερ και Βίλχελμ Μάιμπαχ ονόμασαν το κατασκεύασμα της «Daimler Reitwagen» στα γερμανικά το οποίο σημαίνει «όχημα υπασίας». Ως το πρώτο μηχανοκίνητο δίκυκλο με κινητήρα εσωτερικής καύσης και ξύλινο ως επί των πλείστων σκελετό, αποτέλεσε την βάση των δίκυκλων μοτοσυκλετών [5].



Εικόνα 1: Πρώτη δίκυκλη μοτοσυκλέτα. (Πηγή: mixanitouchronou.gr)

Από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα και αρχές του 20^{ου}, οι τότε μηχανικοί ξεκίνησαν να αναζητούν μηχανισμούς βελτίωσης της οδικής άνεσης των μοτοσυκλετών. Μια πρόκληση που είχαν να αντιμετωπίσουν ήταν οι κραδασμοί και εκεί πρωτοεμφανίστηκαν τα πρώτα ελατήρια τοποθετημένα σε διάφορα σημεία του πλαισίου της μοτοσυκλέτας [1]. Μια από τις πρώτες ιδέες εμπρόσθιου συστήματος ανάρτησης θεωρείται το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας των ΗΠΑ από τον Emil Koch το 1901, όπου το ελατήριο εφαρμόζεται στο μπροστινό τμήμα του ποδηλάτου [1, 3].

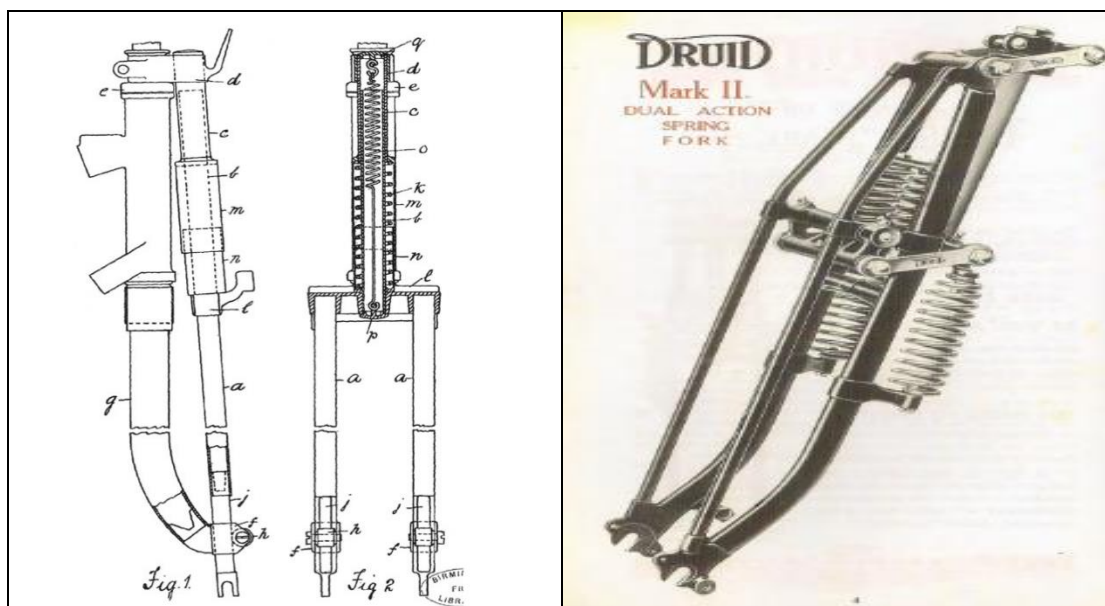


Εικόνα 2: Εμπρόσθιο σύστημα ανάρτησης σε ποδήλατο το 1901. (Πηγή : [2])

Στα επόμενα χρόνια είχε κυριαρχήσει το σύστημα Girder, ένα είδος εμπρόσθιας ανάρτησης που χρησιμοποιήθηκε στις πρώτες μοτοσικλέτες πριν την εισαγωγή των τηλεσκοπικών πιρουνιών το 1907 [4]. Ήταν το πρώτο σύστημα εμπρόσθιας ανάρτησης σε μοτοσικλέτα καθώς πριν από την εφαρμογή του δεν είχε εφαρμοστεί κάτι ανάλογο με επιτυχία και επικρατούσαν τα ποδηλατικού τύπου πλαίσια της μοτοσικλέτες. Το σύστημα Girder αποτελείται από ένα πλαίσιο που μοιάζει με βραχίονα, το οποίο φέρει συνδέσμους και ελατήρια που διαχειρίζονται τις δυνάμεις της ανάρτησης και του τιμονιού. Συνήθως έχει έναν κεντρικό βραχίονα που συνδέεται με το πλαίσιο της μοτοσικλέτας μέσω αρθρώσεων. Ο μπροστινός τροχός είναι τοποθετημένος στον βραχίονα όπου κινείται πάνω-κάτω, απορροφώντας τους κραδασμούς. Επιπλέον, χρησιμοποιεί ένα ελατήριο ή αποσβεστήρα κραδασμών για να διαχειρίζεται της ανωμαλίες του δρόμου [4].

Ακολουθώντας από τον Alfred Angas Scott, στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1909 θα παρουσιαστεί ένα σύστημα ελατηρίου προσαρμοσμένου πάνω από τις άκαμπτες δοκούς του πιρουνιού. Το συγκεκριμένο σύστημα είχε τοποθετημένο τον μπροστινό τροχό της μοτοσικλέτας στα κάτω άκρα των δοκών σε σχήμα U [3]. Στην πορεία το παρόν σύστημα παρουσίασε ελαττωματικό σχεδιασμό, λόγω της αδυναμίας αντιμετώπισης των κοινών κραδασμών κατά την κίνηση από το ελατήριο.

Το 1917 θα εμφανιστούν επίσημα τα Druid forks τα οποία είχαν μια σχεδίαση που βασιζόταν σε διάφορους αρθρωτούς βραχίονες και συνδέσμους και ήταν δημοφιλή στις βρετανικές μοτοσικλέτες, όπως οι Norton και BSA. Από το 1913 ο Arthur Drew, ο άνθρωπος που σκέφτηκε την μορφή των Druid forks σαν μια πατέντα συστήματος Girder, θα δώσει τα θεμέλια στην ουσία σε πολλούς μετέπειτα μηχανικούς στον σχεδιασμό διαφόρων παραλλαγών της συγκεκριμένης πατέντας [2, 3].



Εικόνα 3: (Αριστερή εικόνα) Το σύστημα του Alfred Angas Scott και (Δεξιά εικόνα) το Druid Fork. (Πηγή: Wikipedia)

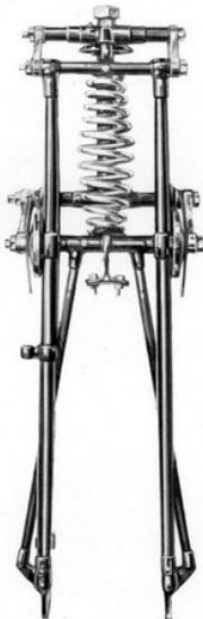
Διάφορες παραλλαγές των Girders χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα μοτοσυκλετών της Triumph στα μέσα της δεκαετίας του 1920, αλλά μία σημαντική ανακάλυψη άλλαξε την γεωμετρία του τιμονιού της εποχής στις μοτοσυκλέτες [1]. Η ανακάλυψη αυτή ήταν ο ολισθητής στο πάνω μέρος και ο αρθρωτός σύνδεσμος στο κάτω μέρος που επέτρεψαν την ελευθερία σε κίνηση προς τα εμπρός και προς τα πίσω, η οποία ήταν μια νέα ιδέα εκείνη την εποχή.

Το 1934 από τους Fisker και Nielsen στο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 416,594 θα παρουσιαστούν τα τηλεσκοπικά πιρούνια με εσωτερικά ελατήρια στην μοτοσυκλέτα Nimbus Type C. Το κάθε σκέλος του τελειώνει με μία εσοχή τύπου U όμοια με το σύστημα του Alfred Angas Scott [4], με τον άξονα του τροχού να στερεώνετε στα κοχλιωτά άκρα του, παρέχοντας την εύκολη αφαίρεση του τροχού.

Έπειτα, κατά την διάρκεια του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου, χρησιμοποιήθηκε από την British Motorcycles το Webb Fork. Βασισμένο στα ήδη υπάρχοντα Girders, βελτίωσε το πρόβλημα πλευρικής ακαμψίας που αντιμετώπιζαν, λόγω της απόσβεσης περιστροφικών τριβών και της προοδευτικής συμπίεσης που πρόσφερε το κωνικό σπειροειδές ελατήριο που διέθετε. Τα πιρούνια Webb, εφαρμόστηκαν σε κάποιες Velocettes KTT και είχαν τα πλευρική σύνδεση των καλαμιών από δοκούς που ένωναν το μέσο του κάτω μέρους του περιβλήματος του άξονα με «νύχια» στα άκρα των καλαμιών.

Webb's SUPER SHOCK ABSORBER
SPRING FORKS.

DUAL PURPOSE FORK.



Prov. Patent No. 21969. Reg'd Design 739493.

Webb's SUPER SHOCK ABSORBER
SPRING FORKS.

"ALWAYS IN FRONT"

Our Latest for 1929.

Webb's

Dual Purpose Fork.

IDEAL FOR SOLO, SIDECAR
AND DIRT TRACK RACING.

The **FIRST TIME OUT** this Fork secured the
following World's records :


HICKS, ON A VELOCETTE, BROOKLANDS
CHAMPIONSHIPS.

350 c.c. Solo	96.90 m.p.h.
500 c.c. Solo	100.41 m.p.h.
350 c.c. Sidecar	78.31 m.p.h.
All Comers' Sidecar	81.37 m.p.h.

The same Fork was used in each race, proving that the
"WEBB" is a real dual purpose Fork.

Second time out 56 World's records secured by
a machine fitted with this new type fork.

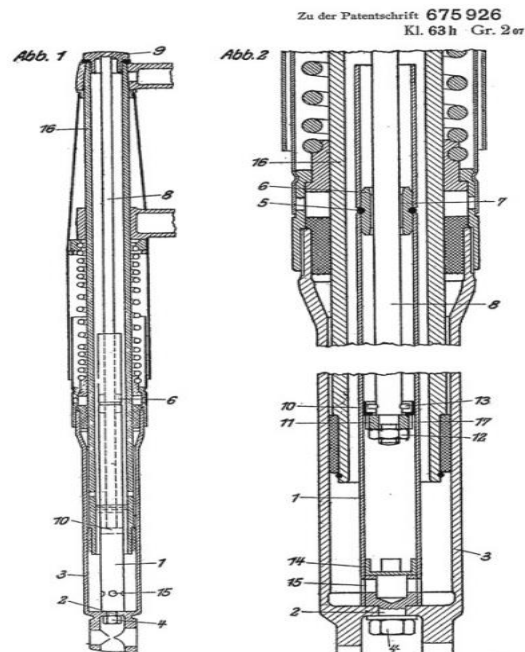
**DON'T LET THE OTHER MAN
HAVE THE ADVANTAGE—
COME AND GET IT!**

Sheldon's Emu 

Εικόνα 4: Κατάλογος μοτοσυκλετών Webb το 1929. (Πηγή: European Motorcycles)

Τα επόμενα χρόνια, προτάθηκε από τον Rudolf Schleicher της Bayerische Motoren Werke (BMW) ένα ορόσημο σχεδιασμού ανάρτησης τον Μάιο του 1939 [1]. Η ιδέα

του Schleicher ήταν το τηλεσκοπικό πιρούνι με ενσωματωμένο αμορτισέρ. Μέσα στο τηλεσκοπικό πιρούνι είχαν τοποθετηθεί δύο σωλήνες και ένα στέλεχος μεταφοράς, μια βαλβίδα αντεπιστροφής στο κάτω άκρο της με υδραυλικό υγρό εντός των σωλήνων για συμπίεση.



Εικόνα 5: Το υδραυλικό αμορτισέρ του Rudolf Schleicher. (Πηγή: [1])

Αξιοσημείωτο κομμάτι της δεκαετίας του 1930 και έπειτα ήταν το Springer Fork, ένα μηχανικό σύστημα πιρουνιού με σπείρωμα ελατηρίων, το οποίο χρησιμοποιούνταν σε μοτοσυκλέτες τύπου Harley-Davidson και οι Indian. Αυτό το σύστημα επέτρεπε κάποια απορρόφηση κραδασμών αλλά δεν ήταν ιδιαίτερα αποδοτικό σε υψηλές ταχύτητες ή δύσβατα εδάφη [4].



Εικόνα 6: Μοτοσυκλέτα Indian με Springer Fork. (Πηγή: Auto evolution)

Η περίοδος 1939-1950 θεωρείται σταθμός στην εξέλιξη των εμπρόσθιων συστημάτων ανάρτησης, όπως επίσης και αρκετών άλλων τεχνολογιών. Όπως προαναφέρθηκε κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, πέραν των Webb Forks, η ανάρτηση τύπου Girder χρησιμοποιήθηκε ευρέως κατά τη διάρκεια του πολέμου σε μοντέλα της BMW R75 και Zündapp KS 750. Αυτή ήταν μια εξέλιξη του άκαμπτου πιρουνιού, με δύο βραχίονες και έναν κάθετο σύνδεσμο που απορροφούσε τις κινήσεις της ρόδας μέσω του ελατηρίου. Αυτή η ανάρτηση ήταν ανθεκτική και λειτουργική σε πολεμικές συνθήκες. Στην μεταπολεμική περίοδο κάνει την ραγδαία του εμφάνιση το τηλεσκοπικό υδραυλικό αμορτισέρ, το οποίο είχε ήδη εφευρεθεί το 1935 από τον Rudolf Schleicher και πλέον αποτελούσε κοινό αμορτισέρ στις πλείστες μοτοσυκλέτες της δεκαετίας του 1940 και του 1950 (το πρώτο τηλεσκοπικό πιρούνι χρησιμοποιήθηκε στην BMW R12). Μετά τον πόλεμο, η Triumph παρουσίασε μοντέλα όπως για παράδειγμα το 3T με τηλεσκοπικά πιρούνια και η χρήση της υδραυλικής απόσβεσης (Hydraulic Dampening) στις αναρτήσεις έγινε αρκετά πιο διαδεδομένη μετά τον πόλεμο, βελτιώνοντας την σταθερότητα και τον έλεγχο των μοτοσυκλετών [1].



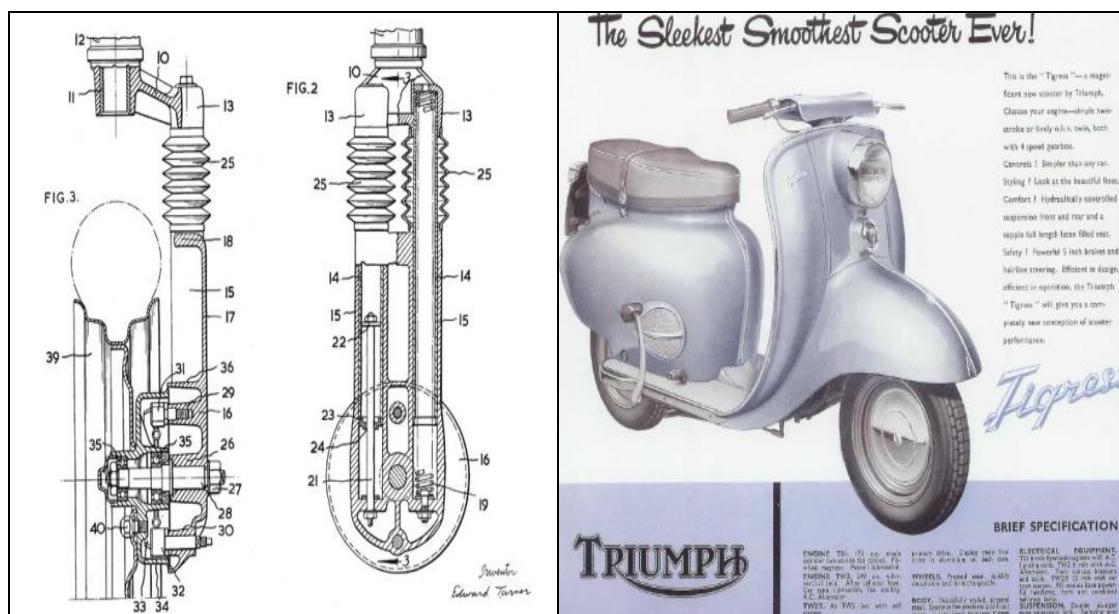
Εικόνα 7: BMW R12, η πρώτη μοτοσυκλέτα με τηλεσκοπικό πιρούνι. (Πηγή: Wikipedia)

Έπειτα, με την πάροδο του χρόνου οι κατασκευαστές άρχισαν να μεταβαίνουν από τις πιο παραδοσιακές τεχνολογίες ανάρτησης όπως ήταν τα Girder forks, στα τηλεσκοπικά πιρούνια, τα οποία τελικά κυριάρχησαν και καθόρισαν το μέλλον των μοτοσυκλετών. Την δεκαετία του 1950 ο Edward Turner της Triumph παρουσίασε μια ενδιαφέρουσα εφεύρεση. Το εμπρόσθιο σύστημα ανάρτησης στις μοτοσυκλέτες Triumph του 1958, το δημοφιλές μοντέλο Bonneville ή τα Tiger και Trophy, χρησιμοποιούσαν τηλεσκοπικά πιρούνια με υδραυλική απόσβεση [1].

- **Δομή:** Αποτελούνταν από δύο σωλήνες, ο ένας μέσα στον άλλο, με εσωτερικά ελατήρια και υδραυλικά αμορτισέρ για την απόσβεση των κραδασμών.

- **Απόσβεση:** Το υδραυλικό σύστημα πρόσφερε καλύτερη απόσβεση των κραδασμών σε σχέση με τα προγενέστερα συστήματα, παρέχοντας μια ομαλή και σταθερή αίσθηση οδήγησης. Η απόσβεση ήταν ελεγχόμενη από τη ροή λαδιού μέσα στο σύστημα, το οποίο μείωνε την ταχύτητα συμπίεσης και επαναφοράς των πιρουνιών [1].
- **Πλεονεκτήματα:** Η χρήση τηλεσκοπικών πιρουνιών στη Triumph παρείχε καλύτερη ευστάθεια και καλύτερο έλεγχο κατά την οδήγηση σε ανώμαλες επιφάνειες ή κατά τη διάρκεια του φρεναρίσματος. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα αυξημένη άνεση για τον αναβάτη και βελτιωμένο χειρισμό της μοτοσυκλέτας.

Η απόφαση της Triumph να χρησιμοποιήσει τηλεσκοπικά πιρούνια συντέλεσε στην επιτυχία της εταιρείας, ειδικά σε αγωνιστικά περιβάλλοντα και παράλληλα σε μοτοσυκλέτες παραγωγής, καθώς προσέφεραν υψηλή απόδοση και αντοχή.



Εικόνα 8 : Η διαφήμιση του Triumph Tigris το 1958 (Δεξιά) και οι δύο τμηματικές όψεις του βραχίονα (Αριστερά). (Πηγή: [1])

Από το 1960 και έπειτα τα τηλεσκοπικά πιρούνια βελτιώθηκαν σε ακόμη μεγαλύτερο βαθμό. Οι κατασκευαστές άρχισαν να ενσωματώνουν καλύτερα υλικά και σχεδιασμούς για αυξημένη σταθερότητα και άνεση. Παράλληλα, ορισμένες καινοτόμες εταιρείες άρχισαν να πειραματίζονται με διαφορετικά συστήματα. Οι κατασκευαστές άρχισαν επίσης να πειραματίζονται με διαφορετικά βάρη λαδιού και σχεδιασμούς ελατηρίων για καλύτερη απόδοση.

Η ιταλική εταιρεία Ceriani έγινε πολύ δημοφιλής την δεκαετία του 1960, προσφέροντας πιρούνια υψηλής απόδοσης που χρησιμοποιούνταν τόσο σε δρόμους όσο και σε αγωνιστικές μοτοσυκλέτες. Αυτά τα πιρούνια συνδύαζαν ελαφρά υλικά, όπως είναι για παράδειγμα το αλουμίνιο, με βελτιωμένη απόδοση της ανάρτησης.

Στη δεκαετία του 1970, τα υδραυλικά τηλεσκοπικά πιρούνια κυριάρχησαν στον χώρο των μοτοσυκλετών. Αυτά περιλάμβαναν όχι μόνο καλύτερα αμορτισέρ, αλλά

και τη χρήση ρυθμιζόμενης φόρτισης και απόσβεσης, κάτι που βελτίωσε σημαντικά την απόδοση τόσο στην καθημερινή χρήση όσο και σε αγωνιστικό επίπεδο. Επιπλέον, η εμφάνιση των δισκοφρένων στις μοτοσυκλέτες είχε ως αποτέλεσμα την απαραίτητη προσαρμογή των αναρτήσεων στις νέες απαιτήσεις πέδησης. Τα δισκόφρενα απαιτούσαν πιο στιβαρή κατασκευή των πιρουνιών για να απορροφούν καλύτερα της πιέσεις. Ορισμένες εταιρείες πειραματίζονταν με πιο πρωτοποριακά συστήματα, της το leading link fork και τα Ελβετικά πιρούνια Earles, που παρείχαν αυξημένη σταθερότητα και έλεγχο, ειδικά κατά το φρενάρισμα.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980, η εξέλιξη των εμπρόσθιων συστημάτων ανάρτησης κορυφώθηκε με την εισαγωγή προηγμένων τεχνολογιών, όπως οι ρυθμιζόμενες αναρτήσεις, οι αντι-βυθιστικές αντλίες (anti-dive systems), καθώς και μερικές νέες εξελίξεις στην τεχνολογία αμορτισέρ.

- **Anti-Dive Systems:** Αυτά τα συστήματα είχαν σκοπό την αποτροπή της υπερβολικής «βύθισης» του εμπρόσθιου μέρους της μοτοσυκλέτας κατά τα έντονα φρεναρίσματα. Χρησιμοποιήθηκαν σε αρκετά μοντέλα κατά τις αρχές της δεκαετίας του 1980, αν και ορισμένα αποδείχθηκαν περίπλοκα και λιγότερο αποτελεσματικά από την αρχική ιδέα.
- **Αέρο-πιρούνια (Air Forks):** Άρχισαν να εμφανίζονται πιρούνια που χρησιμοποιούσαν πεπιεσμένο αέρα για να ρυθμίσουν την ανάρτηση, δίνοντας στους αναβάτες την δυνατότητα να αλλάζουν την ακαμψία της ανάρτησης ανάλογα με τις συνθήκες.

1.2 Προηγμένα Συστήματα Αναρτήσεων

Βασιζόμενοι στις ήδη υπάρχουσες εφευρέσεις στον τομέα των εμπρόσθιων αναρτήσεων, οι μηχανικοί της σύγχρονης εποχής εξέλιξαν σε μεγάλο βαθμό τα συστήματα αναρτήσεων ώστε να ανταποκρίνονται με επιτυχία ακόμη και στις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε αγωνιστικούς τομείς.

➤ Upside-Down (USD) Forks

Στα USD πιρούνια, το πιο μέρος της ανάρτησης με την μεγαλύτερη διάμετρο (ο σωλήνας) βρίσκεται στην κορυφή, ενώ το λεπτότερο μέρος (το καλάμι) βρίσκεται στο κάτω μέρος. Αυτό σημαίνει ότι το τμήμα της ανάρτησης που συνδέεται με το πλαίσιο της μοτοσυκλέτας είναι πιο στιβαρό και ανθεκτικό, ενώ το πιο λεπτό και ελαφρύ μέρος συνδέεται με τον τροχό. Έχουν βελτιωμένη απόδοση στις στρόφες, καλύτερο έλεγχο του τιμονιού και υψηλότερη αντοχή στις καταπονήσεις [3]. Η ανεστραμμένη διάταξη επιτρέπει την καλύτερη κατανομή των δυνάμεων, παρέχοντας αυξημένη ακαμψία και μειώνοντας τις ταλαντώσεις. Αυτό μεταφράζεται σε καλύτερη αίσθηση και σταθερότητα για τον αναβάτη, ειδικά στις στρόφες και κατά το σκληρό φρενάρισμα. Το γεγονός ότι το τμήμα που συνδέεται με τον τροχό είναι ελαφρύτερο, μειώνει την αδράνεια και βελτιώνει την απόκριση της ανάρτησης σε ανωμαλίες του

δρόμου. Επομένως για τους παραπάνω λόγους τα USD πιρούνια έχουν κυριαρχήσει σε μοτοσυκλέτες Motocross και μοτοσυκλέτες MotoGP.



Εικόνα 9 : USD πιρούνια της Honda CRF250R τύπου Motocross. (Πηγή : cyclenews.com)

➤ Hub-Center Steering Systems

Το Hub-Center Steering System είναι ένα καινοτόμο σύστημα διεύθυνσης για μοτοσυκλέτες που διαφοροποιείται σημαντικά από τα παραδοσιακά συστήματα διεύθυνσης με πιρούνια. Αντί να χρησιμοποιεί ένα ζευγάρι πιρουνιών για την ανάρτηση και τον έλεγχο της κατεύθυνσης του εμπρόσθιου τροχού, χρησιμοποιεί ένα σύστημα με κεντρικό άξονα (hub) για την διεύθυνση. Ο μπροστινός τροχός της μοτοσυκλέτας συνδέεται με το πλαίσιο μέσω του κεντρικού άξονα και μοχλικών μηχανισμών, αντί για τα παραδοσιακά πιρούνια. Η περιστροφή του τροχού γίνεται μέσω αυτού του κεντρικού άξονα, ο οποίος είναι τοποθετημένος στο κέντρο του τροχού. Ένα σύστημα από βραχίονες και συνδέσμους επιτρέπει την κίνηση του τροχού προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά, ενώ ταυτόχρονα διαχειρίζεται την ανάρτηση του τροχού.

Μερικά πλεονεκτήματα του Hub-Center Steering είναι η σημαντική μείωση του φαινομένου «dive» (βύθιση) κατά το φρενάρισμα και επιπλέον, λειτουργεί με μικρότερο «trail» (η απόσταση μεταξύ του σημείου που ο άξονας του πιρουνιού τέμνει το έδαφος και του σημείου επαφής του τροχού με το έδαφος) [4]. Το συγκεκριμένο σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως σε πειραματικές και εξειδικευμένες μοτοσυκλέτες, καθώς και σε κάποιες μικρές σειρές παραγωγής, της η Bimota Tesi, η Vyrus 986, η Yamaha GTS1000 και βασίζεται στο RADD του James Parker [2, 3, 4, 6].



Εικόνα 10: Η Yamaha GTS1000 η οποία φέρει το σύστημα HCS. (Πηγή : Wikipedia)

➤ Duolever System

Το 2004 η BMW θα παρουσιάσει για πρώτη φορά το σύστημα Duolever το οποίο αποτελεί εφεύρεση του Norman Hugh Hossack. Η πρώτη εφαρμογή υλοποιήθηκε στο K1200R της BMW και μέχρι σήμερα φέρουν το σύστημα αυτό τα μοντέλα της K-series [4]. Το σύστημα αποτελείται από δύο κύριους μοχλούς που συνδέονται με τον εμπρόσθιο τροχό και το πλαίσιο της μοτοσυκλέτας μέσω της κεντρικού άξονα. Μερικά πλεονεκτήματα του είναι η εξαιρετική ικανότητα στη μείωση του φαινομένου βύθισης κατά το φρενάρισμα, παρέχοντας καλύτερη σταθερότητα και πιο ακριβή έλεγχο της μοτοσυκλέτας καθώς και η σταθερότητα και άνεση κατά τους κραδασμούς από ανωμαλίες εδάφους. Επιπρόσθετα, οι δυνάμεις από το δρόμο μεταφέρονται πιο ομαλά στον αναβάτη. Παρόλα αυτά, το Duolever παραμένει ένα μη διαδεδομένο και εύχρηστο σύστημα εμπρόσθιας ανάρτησης, αφού έχει αρκετά μεγάλο βάρος και αρκετή πολυπλοκότητα συγκριτικά με τα παραδοσιακά πιρούνια [4, 6].



Εικόνα 11: Το σύστημα Duolever στο BMW K 1200 S. (Πηγή : bmwgroup.com)

1.2.1 Αγωνιστικά Συστήματα Αναρτήσεων

Δύο από της κορυφαίες σειρές αναρτήσεων που υπάρχουν σε αγωνιστικό επίπεδο για μοτοσυκλέτες είναι οι NIX και TTX της Σουηδικής εταιρίας Öhlins, γνωστή για της υψηλής ποιότητας αναρτήσεις της, κυρίως για μοτοσυκλέτες και αγωνιστικά οχήματα.

Οι αναρτήσεις Öhlins NIX διαθέτουν το σύστημα NIX (NIX Cartridge System), το οποίο διαχωρίζει της λειτουργίες της απόσβεσης συμπίεσης και της επαναφοράς σε διαφορετικά καλάμια της ανάρτησης.

Το σύστημα TTX (Twin Tube Technology) της Öhlins είναι από τα πιο εξελιγμένα συστήματα ανάρτησης που προσφέρει η εταιρεία. Βασίζεται σε έναν σχεδιασμό με διπλό σωλήνα, όπου η πίεση του λαδιού διατηρείται σταθερή, παρέχοντας πιο σταθερή και προβλέψιμη απόσβεση [6].



Εικόνα 12: USD πιρούνια της Öhlins σε μοτοσυκλέτα MotoGP Ducati. (Πηγή : asphaltandrubber.com)

Τα USD πιρούνια της Öhlins, είναι τα πιο συνηθισμένα πιρούνια που χρησιμοποιούνται από της της κατασκευαστικές εταιρίες στο MotoGP. Το 2017 και με το πρώτο Grand Prix στο Qatar, η εταιρία της Ducati πρωτοτύπησε με σωλήνες του πιρουνιού από ανθρακονήματα. Οι δύο οδηγοί της εργοστασιακής Ducati οι οποίοι ήταν ο Ιταλός Andrea Dovizioso και ο 5 φορές Παγκόσμιος Πρωταθλητής από την Ισπανία, Jorge Lorenzo ήταν οι πρώτοι αναβάτες που είχαν το σύστημα ανάρτησης με το νέο υλικό της εύκολα διακρίνεται και στην εικόνα 14 το σκούρο χρώμα της μπότες, όπου το πιο σύνηθες υλικό είναι το αλουμίνιο.

Η αρκετά αισθητή διαφορά βάρους, καθώς το ανθρακόνημα έχει σαφώς μειωμένο βάρος, είχε βελτιώσει την απόδοση της μοτοσυκλέτας. Πέραν της αισθητής μείωσης του βάρους, σκοπός της χρήσης σωλήνων πιρουνιού από ανθρακονήματα είναι η

προσαρμογή της κάμψης της μπροστινής ανάρτησης, αφού η Ducati στο MotoGP αντιμετώπιζε προβλήματα στις στροφές. Ουσιαστικά, σκοπός της δεν ήταν η μείωση του συνολικού βάρους της μοτοσυκλέτας, αλλά η χρήση κάποιου υλικού που θα επέτρεπε ελαστικότητα και καλύτερη συμπεριφορά της μοτοσυκλέτας της στροφές, πράγμα το οποίο εάν εφαρμοζόταν με επιτυχία θα έλυne ένα πρόβλημα που επικρατούσε και στην εργοστασιακή αλλά και στην δορυφορική Ducati του MotoGP για αρκετά χρόνια.



Εικόνα 13 : Αριστερά ο Andrea Dovizioso και δεξιά ο Jorge Lorenzo το 2017. (Πηγή : asphaltandrubber.com)

1.3 Εμπρόσθιο Σύστημα Ανάρτησης Telelever

Στην συγκεκριμένη εργασία το προς μελέτη εμπρόσθιο σύστημα ανάρτησης μοτοσυκλέτας είναι το Telelever. Χρησιμοποιεί έναν διπλό βραχίονα (ψαλίδι) που είναι τοποθετημένος στο πάνω μέρος του πιρουνιού και συνδέεται με το πλαίσιο της μοτοσυκλέτας. Στη βάση αυτού του συστήματος υπάρχει ένα αμορτισέρ τύπου monoshock, που απορροφά της ανωμαλίες του δρόμου. Το σύστημα αυτό αποτελεί μια καινοτόμο σχεδίαση η οποία αναπτύχθηκε από την BMW, για ορισμένα από τα μοντέλα μοτοσυκλετών της και αποσκοπεί στο να βελτιωθεί η συμπεριφορά της μοτοσυκλέτας κατά την οδήγηση, ιδιαίτερα κατά το φρενάρισμα και σε απαιτητικές συνθήκες δρόμου, καθώς επιπλέον αυξάνει την αναρτώμενη μάζα σε σύγκριση με το συμβατικό τηλεσκοπικό μοντέλο. Το 1993, η BMW παρουσίασε για πρώτη φορά το σύστημα Telelever στο μοντέλο R1100RS. Ήταν ένα σημαντικό βήμα για την εταιρεία, καθώς αυτή η νέα τεχνολογία αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει τα προβλήματα που σχετίζονται με την παραδοσιακή ανάρτηση [3, 6].



Εικόνα 14: Εμπρόσθιο σύστημα ανάρτησης Telelever. (Πηγή : Wikipedia)

Κύρια πλεονεκτήματα του συστήματος Telelever :

- **Σταθερότητα στο φρενάρισμα:** Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του συστήματος Telelever είναι η σημαντική μείωση της βύθισης του μπροστινού μέρους της μοτοσικλέτας κατά το φρενάρισμα. Αυτό βοηθά στη διατήρηση της σταθερότητας και του ελέγχου της μοτοσικλέτας [6].
- **Απορρόφηση κραδασμών:** Χάρη στην ειδική γεωμετρία του συστήματος, η ανάρτηση που φέρει το σύστημα απορροφά περισσότερους κραδασμούς από το έδαφος, προσφέροντας άνεση στον αναβάτη [6].
- **Διαχωρισμός των λειτουργιών:** Σε αντίθεση με της παραδοσιακές αναρτήσεις, όπου το τηλεσκοπικό πιρούνι είναι υπεύθυνο τόσο για την απορρόφηση των κραδασμών όσο και για την καθοδήγηση του μπροστινού τροχού, στο σύστημα Telelever αυτές οι λειτουργίες διαχωρίζονται. Αυτό βελτιώνει την απόκριση της ανάρτησης και τη συμπεριφορά της μοτοσικλέτας.
- **Ανθεκτικότητα και συντήρηση:** Το σύστημα Telelever είναι σε γενικές γραμμές πιο ανθεκτικό και απαιτεί λιγότερη συντήρηση σε σύγκριση με τα παραδοσιακά τηλεσκοπικά πιρούνια.
- **Βελτιωμένη σταθερότητα και ακρίβεια διεύθυνσης της στροφής :** Σε μια παραδοσιακή τηλεσκοπική ανάρτηση, όταν ο αναβάτης φρενάρει δυνατά πριν από μια στροφή, η ανάρτηση συμπιέζεται (δηλαδή βυθίζεται), γεγονός που μπορεί να αλλάξει τη γεωμετρία του τιμονιού και την αίσθηση της οδήγησης. Το Telelever μειώνει σημαντικά αυτή τη βύθιση, διατηρώντας τη γωνία του τιμονιού πιο σταθερή, κάτι που προσφέρει βελτιωμένη ακρίβεια και έλεγχο κατά την είσοδο και τη διαδρομή μιας στροφής. Επιπλέον, η μειωμένη βύθιση της ανάρτησης σημαίνει ότι το κέντρο βάρους της μοτοσικλέτας παραμένει πιο σταθερό. Αυτό βοηθά στην καλύτερη κατανομή των φορτίων μεταξύ των τροχών και συμβάλλει στη σταθερότητα της

μοτοσικλέτας κατά τη στροφή, επιτρέποντας στον αναβάτη να διατηρήσει υψηλότερη ταχύτητα με μεγαλύτερη ασφάλεια [6].



Εικόνα 15 : Τα διάφορα μέρη που απαρτίζουν το σύστημα Telelever. (Πηγή : bmwMotorradHellas.com)

i. Τηλεσκοπικό πιρούνι (Telescopic Fork Legs):

Αποτελεί το εξωτερικό σύστημα σωλήνων (πιρούνι) που περιλαμβάνει της δύο κύριους σωλήνες που συγκρατούν τον μπροστινό τροχό. Σε αντίθεση με της παραδοσιακές τηλεσκοπικές αναρτήσεις, στο Telelever, το πιρούνι αυτό δεν είναι υπεύθυνο για την απορρόφηση των κραδασμών, αλλά μόνο για την καθοδήγηση του μπροστινού τροχού.

ii. Ψαλίδι (A-arm ή Telelever arm):

Το Telelever ψαλίδι είναι μια κυρίως οριζόντια δομή που συνδέεται στο πλαίσιο της μοτοσικλέτας και στο κάτω μέρος του τηλεσκοπικού πιρουνιού. Αυτό το εξάρτημα είναι υπεύθυνο για τη σταθερότητα του μπροστινού τμήματος και την απορρόφηση των κατακόρυφων φορτίων που προκύπτουν κατά την οδήγηση και το φρενάρισμα.

iii. Κεντρικό αμορτισέρ (Central Shock Absorber/ Damper):

Το Telelever σύστημα χρησιμοποιεί ένα κεντρικά τοποθετημένο αμορτισέρ, το οποίο είναι υπεύθυνο για την απορρόφηση των κραδασμών από της ανωμαλίες του δρόμου. Το αμορτισέρ συνδέεται μεταξύ του ψαλιδιού και του πλαισίου της μοτοσικλέτας.

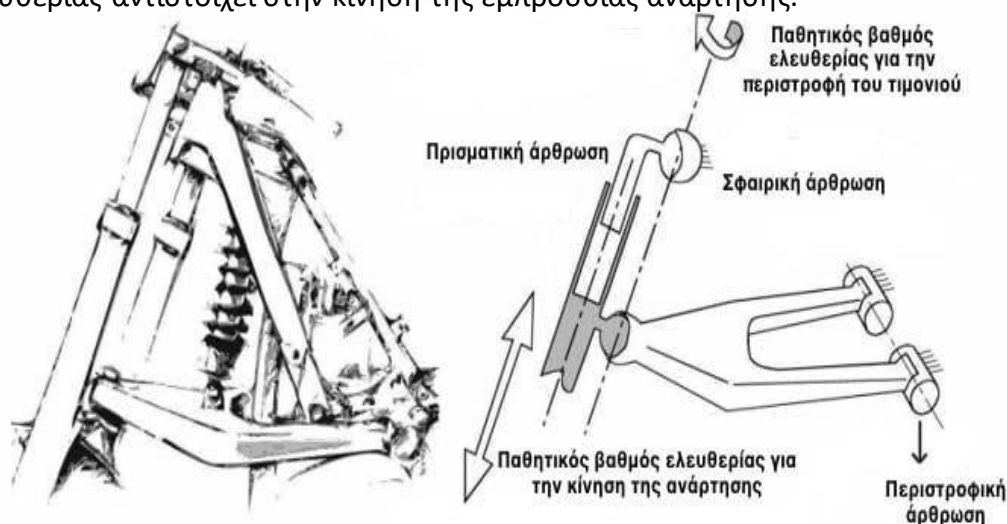
1.4 Σχετικές Ερευνητικές Εργασίες

Ένα αρκετά συνηθισμένο ερώτημα γύρω από το εμπρόσθιο σύστημα ανάρτησης του Telelever, είναι γιατί η εφαρμογή του στις μοτοσυκλέτες δεν έχει ευρεία κλίμακα. Σαφώς όπως και τα υπόλοιπα εμπρόσθια συστήματα ανάρτησης, έχει ορισμένα θετικά αλλά και ορισμένα αρνητικά χαρακτηριστικά, υπό την έννοια της εφαρμογής του συστήματος. Η προσαρμογή του με λίγα λόγια δεν μπορεί παρά μόνο να είναι σε συγκεκριμένου είδους μοτοσυκλέτες με συγκεκριμένες απαιτήσεις.

Καθώς κυρίαρχο σύστημα εμπρόσθιας ανάρτησης της μοτοσυκλέτες θεωρούνται τα τηλεσκοπικά πιρούνια, είναι τα πρώτα που συγκρίνονται με το σύστημα Telelever σε έρευνες που έχουν γίνει ούτως ώστε να παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα του Telelever συγκριτικά με το πιο κοινό σύστημα εμπρόσθιας ανάρτησης που χρησιμοποιείται.

Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές τηλεσκοπικές αναρτήσεις, όπου το εμπρόσθιο μέρος της μοτοσυκλέτας βυθίζεται έντονα όταν φρενάρει, το σύστημα Telelever, παρέχει περιορισμένο βύθισμα προσφέροντας με αυτό τον τρόπο πιο προβλέψιμη συμπεριφορά σε απότομο φρενάρισμα. Επιπλέον, το περιορισμένο βύθισμα παρέχει βελτιωμένη απορρόφηση κραδασμών.

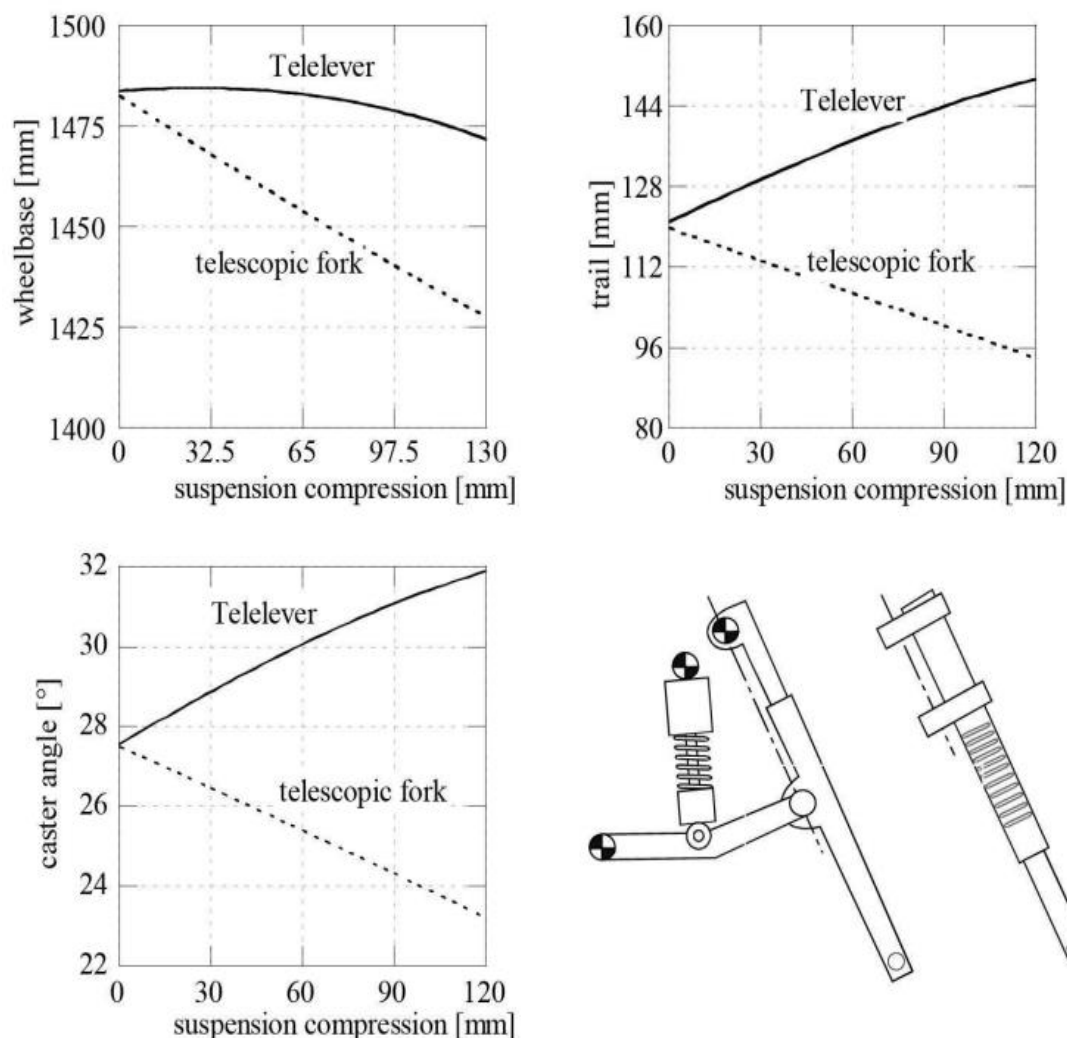
Ένα διαφορετικό στοιχείο μεταξύ των δύο παραπάνω συστημάτων, είναι η κινηματική διάταξη της. Συγκεκριμένα, στο σύστημα Telelever υπάρχουν δύο βαθμοί ελευθερίας [7]. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 17, ο πρώτος βαθμός ελευθερίας διέρχεται από τον περιστροφικό άξονα όπου τα δύο μέρη συνδέονται με το πρισματικό ζεύγος γύρω από τον άξονα περιστροφής και ο δεύτερος βαθμός ελευθερίας αντιστοιχεί στην κίνηση της εμπρόσθιας ανάρτησης.



Εικόνα 16: Βαθμοί ελευθερίας του συστήματος. (Πηγή:[7])

Επιπλέον αξίζει να αναφερθεί ότι έρευνα έγινε και με αριθμητική σύγκριση στο μεταξόνιο, γωνία caster και trail μεταξύ των δύο συστημάτων. Στα παρακάτω διαγράμματα της εικόνας 18, ο άξονας Χ απαρτίζεται από την συμπίεση ανάρτησης

και στις τρεις γραφικές παραστάσεις και στους αντίστοιχους Y άξονες, έχουμε μεταξόνιο (Wheelbase), Trail (όλα σε mm) και γωνία caster (σε μοίρες).



Εικόνα 17: Γραφικές παραστάσεις σύγκρισης τηλεσκοπικών πιρουνιών και Telelever. (Πηγή: [7])

Προφανώς στις τρεις γραφικές παραστάσεις αποτυπώνονται τρία προτερήματα που φέρει το σύστημα Telelever έναντι των τηλεσκοπικών πιρουνιών. Το μεγαλύτερο μεταξόνιο (Wheelbase) έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ανύψωση του εμπρόσθιου τροχού κατά την επιτάχυνση και μπορεί να βελτιώσει την κατανομή του βάρους μεταξύ μπροστινού και πίσω τροχού, βοηθώντας τη μοτοσυκλέτα να χειρίζεται καλύτερα το φορτίο ή τον αναβάτη. Από την άλλη, μεγαλύτερο Trail και μεγαλύτερη Caster γωνία καθιστούν το οδήγημα λιγότερο ευαίσθητο σε ανεπιθύμητες αλλαγές κατεύθυνσης.

1.5 Στόχος Εργασίας

Η συγκεκριμένη εργασία αποσκοπεί στην μείωση του συνολικού βάρους κυρίως του ψαλιδιού A-Arm που απαρτίζει το σύστημα Telelever, ικανοποιώντας παράλληλα τις όποιες απαιτήσεις αντοχής και διατηρώντας την δομική του ασφάλεια. Η μελέτη έγινε με κριτήριο δύο διαφορετικές περιπτώσεις εφαρμογής τάσεων στο σύστημα, την περίπτωση στατικής φόρτισης και την περίπτωση ακραίας πέδησης. Έπειτα από την εξαγωγή αποτελεσμάτων, με την χρήση εξειδικευμένου λογισμικού CAE (Computer Aided Engineering), επανασχεδιάζεται με κάποιες διαφοροποιήσεις το ψαλίδι A-Arm του συστήματος, καθώς είναι το βασικό προς μελέτη τεμάχιο από το όλο σύστημα και γίνεται μια αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Με την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έχουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα σύγκρισης του αρχικού μοντέλου και του μοντέλου που επανασχεδιάστηκε.

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση και Μοντελοποίηση

2.1 Εισαγωγή και Περιγραφή της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

Η ανάπτυξη υπολογιστικών μεθόδων ελέγχου της αντοχής, όπως και τα λογισμικά προσομοίωσης, έχουν καταστεί αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης μηχανικής και βιομηχανικής πρακτικής. Αυτές οι μέθοδοι επιτρέπουν στους μηχανικούς να διεξάγουν πολύπλοκες αναλύσεις της δομής και της απόδοσης υλικών και κατασκευών με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Χρησιμοποιώντας λογισμικά προσομοίωσης, οι μηχανικοί μπορούν να δημιουργήσουν λεπτομερή μοντέλα των κατασκευών και να προσομοιώσουν τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης, τις θερμικές μεταβολές, και τις δυναμικές επιδράσεις που πρόκειται να υποστούν τα υλικά σε πραγματικές συνθήκες. Αυτό επιτρέπει τον έγκαιρο εντοπισμό πιθανών αδυναμιών ή αστοχιών, παρέχοντας τη δυνατότητα βελτιστοποίησης του σχεδιασμού πριν από την κατασκευή, μειώνοντας έτσι τον χρόνο που θα απαιτούσε ο παραδοσιακός φυσικός έλεγχος μέσω πρωτοτύπων, αλλά κυρίως το κόστος, καθώς για παράδειγμα σε ένα Crash Test μοτοσυκλέτας η αυτοκινήτου το κόστος είναι σαφώς πολύ μεγαλύτερο. Επιπλέον, τα λογισμικά αυτά προσφέρουν τη δυνατότητα να διερευνηθούν διαφορετικά σενάρια φόρτισης και συνθηκών λειτουργίας, βοηθώντας στην ανάπτυξη πιο ανθεκτικών και ασφαλών προϊόντων.

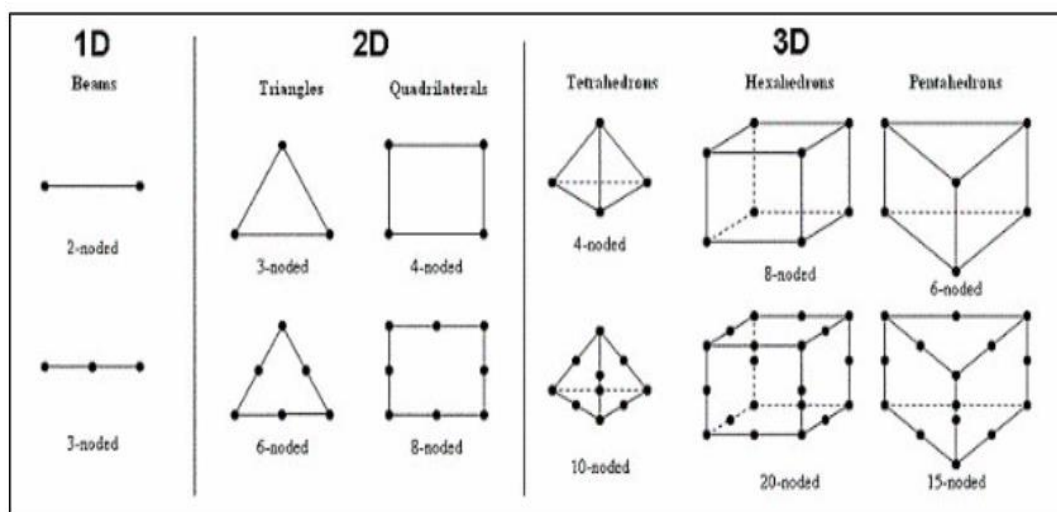
Μία από αυτές τις υπολογιστικές μεθόδους και αυτή που θα εφαρμοστεί στην παρούσα εργασία, είναι η Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία (Finite Elements Analysis-FEA). Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) λειτουργεί με το να διασπά ένα πολύπλοκο πρόβλημα σε μικρότερα, απλούστερα στοιχεία, τα οποία συνδέονται μέσω κόμβων για να σχηματίσουν ένα πλέγμα. Κάθε στοιχείο αναλύεται ξεχωριστά για να δημιουργηθούν διαφορικές εξισώσεις (partial differential equations) που περιγράφουν τη φυσική του συμπεριφορά. Το λογισμικό το οποίο πραγματοποιεί την μέθοδο αυτή και εξάγει το αποτέλεσμα ονομάζεται προ-επεξεργαστής (pre-processor) και έπειτα χρησιμοποιείται για την ολοκληρωμένη εξαγωγή αποτελεσμάτων ο μέτα – επεξεργαστής (postprocessor) όπου θα της παρουσιάσει σε μορφή διαγραμμάτων αλλά ακόμη και σχηματικά τις περιοχές υψηλών και χαμηλών τάσεων.

Στην προκειμένη εργασία, χρησιμοποιήθηκε το εξειδικευμένο λογισμικό της BETA CAE Systems S.A, το οποίο παρέχει το λογισμικό ANSA v24.0.1 σαν προ επεξεργαστή (pre – processor), επιλυτή εντός η εκτός του ANSA v24.0.1 το λογισμικό EPILYSIS και το META v24.0.1 ως μέτα – επεξεργαστής (post – processor).

Κατά την διαδικασία της ανάλυσης με την χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων διεκπεραιώνονται κάποια βήματα μέχρι την τελική εξαγωγή αποτελέσματος στον μελετητή. Αρχικά, αφού σχεδιαστεί σε ένα πρόγραμμα CAD το επιθυμητό μοντέλο σε τρεις διαστάσεις, εισάγουμε το αρχείο με το τρισδιάστατο μοντέλο στον προ επεξεργαστή. Το μοντέλο χωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία και έπειτα πραγματοποιούνται τα απαραίτητα βήματα στο προ επεξεργαστή, όπως για παράδειγμα η δημιουργία πλέγματος, ο ορισμός υλικών και πακτώσεων καθώς και ο ορισμός ασκούμενων δυνάμεων. Αφού διενεργηθούν τα βήματα που απαιτούνται, εισάγονται στο πρόγραμμα του επιλυτή, το οποίο με αριθμητικές μεθόδους μας δίνει μια επίλυση η οποία εισάγεται στον μέτα-επεξεργαστή, ο οποίος είναι το πρόγραμμα το οποίο εξάγει ολοκληρωμένα αποτελέσματα, με χρωματική αναπαράσταση των τάσεων που ασκούνται στο μοντέλο της.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόζεται ώστε να επιλύσει μερικά από τα εξής προβλήματα :

- Προβλήματα ιδιοτιμής (Ελεύθερος κραδασμός)
- Πρόβλημα σταθερής κατάστασης (Στατικό πρόβλημα)
- Πρόβλημα ροής υγρού
- Βελτιστοποίηση δομής
- Προέκταση ράβδου, κάμψη δοκού, στρέψη λεπτών μελών κάτω στατικό και δυναμικό φορτίο



Εικόνα 18: Συνήθεις τύποι πεπερασμένων στοιχείων.

1.Γραμμικά (1D) Στοιχεία

Χρησιμοποιούνται για τη μελέτη μονοδιάστατων προβλημάτων, όπως είναι για παράδειγμα δοκοί, ράβδοι, αγωγοί κλπ.

2. Τριγωνικά Στοιχεία (2D)

Χρησιμοποιούνται για επιφάνειες και επίπεδα προβλήματα (2D) σε επίπεδες πλάκες, μεμβράνες ή επιφάνειες.

- Τρίγωνο με τρεις κόμβους (Linear Triangle): Κάθε γωνία του τριγώνου είναι ένας κόμβος.
- Τρίγωνο με έξι κόμβους (Quadratic Triangle): Έχει τρεις κόμβους στις κορυφές και τρεις στα μέσα των πλευρών.

3. Τετραγωνικά Στοιχεία (2D)

Αυτά τα στοιχεία χρησιμοποιούνται για επιφανειακά προβλήματα, όπως είναι τα τριγωνικά, αλλά έχουν την μορφή τετραγώνου ή ορθογωνίου.

- Τετράγωνο με τέσσερις κόμβους (Linear Quadrilateral): Ένας κόμβος σε κάθε γωνία.
- Τετράγωνο με οκτώ κόμβους (Quadratic Quadrilateral): Κόμβοι στις γωνίες και στις μέσες των πλευρών.

4. Τετραεδρικά Στοιχεία (3D)

Χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατα στερεά αντικείμενα. Αυτά τα στοιχεία έχουν τέσσερις τριγωνικές πλευρές και είναι αντίστοιχα με το τριγωνικό στοιχείο στις δύο διαστάσεις.

- Τετράεδρο με τέσσερις κόμβους (Linear Tetrahedron): Κόμβοι στις κορυφές του τετραέδρου.
- Τετράεδρο με δέκα κόμβους (Quadratic Tetrahedron): Κόμβοι στις κορυφές και στις μέσες των ακμών.

5. Εξαεδρικά Στοιχεία (3D)

Αυτά είναι πιο αποτελεσματικά σε ορθογωνικά γεωμετρικά αντικείμενα και είναι αντίστοιχα με τα τετραγωνικά στοιχεία σε δύο διαστάσεις.

- Εξάεδρο με οκτώ κόμβους (Linear Hexahedron): Κόμβοι σε κάθε γωνία του κύβου.
- Εξάεδρο με είκοσι κόμβους (Quadratic Hexahedron): Κόμβοι σε κάθε γωνία και στην μέση κάθε ακμής.

6. Πρισματικά Στοιχεία (3D)

Αυτά τα στοιχεία χρησιμοποιούνται σε γεωμετρίες που συνδυάζουν τριγωνικές και τετραγωνικές διατομές. Είναι χρήσιμα για προβλήματα όπου η γεωμετρία παραμένει σταθερή κατά μήκος της διάστασης.

- Πρίσμα με έξι κόμβους (Linear Wedge): τρεις κόμβοι σε κάθε άκρο.
- Πρίσμα με δεκαπέντε κόμβους (Quadratic Wedge): Κόμβοι στις γωνίες και στις μέσες των ακμών.

2.1.1 Θεωρίες Αστοχίας

Ο ρόλος των θεωριών αστοχιών είναι η πρόβλεψη της αστοχίας υλικών υπό σύνθετες καταστάσεις φόρτισης. Αυτές οι θεωρίες βοηθούν στο να εκτιμηθεί πότε ένα υλικό θα σπάσει ή θα υποστεί μη αναστρέψιμη παραμόρφωση, με βάση τις τάσεις και τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε αυτό. Γύρω από την ανάγκη προσδιορισμού της ασφάλειας του της μελέτη κομματιού, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι υπολογισμού και επίλυσης όπου είναι [2, 10]:

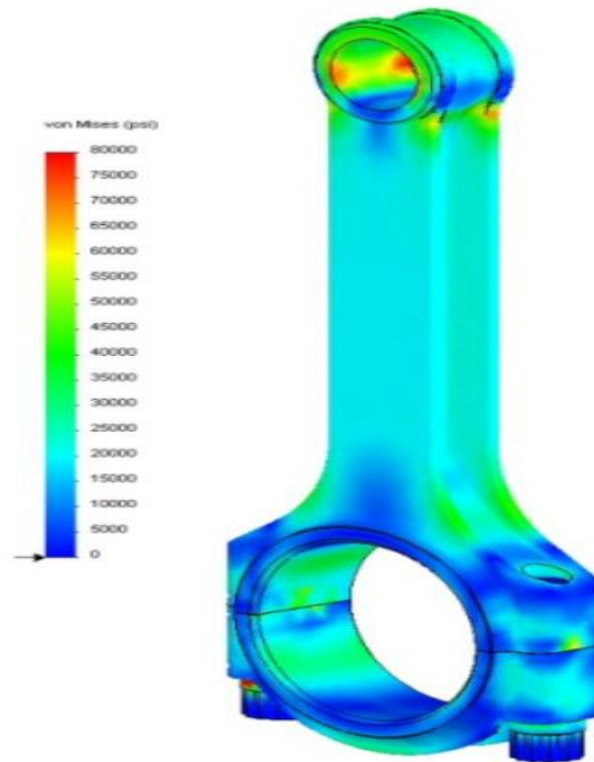
1. Θεωρία Μέγιστης Καθαρής Τάσης (Rankine ή Maximum Normal Stress Theory)
2. Θεωρία Μέγιστης Καθαρής Παραμόρφωσης (Saint Venant ή Maximum Normal Strain Theory)
3. Θεωρία Μέγιστης Διατμητικής Τάσης (Tresca ή Maximum Shear Stress Theory)
4. Θεωρία Μέγιστης Ενεργειακής Παραμόρφωσης (Von Mises)
5. Θεωρία Μέγιστης Ενέργειας Διατμητικής Παραμόρφωσης (Guest ή Maximum Distortion Energy Theory)
6. Θεωρία Mohr-Coulomb
7. Θεωρία Drucker-Prager

Στην προκειμένη περίπτωση, η μέθοδος που θα επιλεγεί είναι η Θεωρία Μέγιστης Ενεργειακής Παραμόρφωσης (Κριτήριο Von Mises). Σύμφωνα με την θεωρία αυτή, ένα υλικό θα αστοχήσει όταν η ενεργός τάση παραμόρφωσης (Von Mises stress) που προκύπτει από την εφαρμογή φορτίων έχει φτάσει ή ξεπεράσει την τάση διαρροής του υλικού σε μονοαξονική τάση [8]. Η τάση Von Mises υπολογίζεται από τις κύριες τάσεις σ_1 , σ_2 και σ_3 ως εξής [9]:

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

Με την εφαρμογή του παραπάνω τύπου, εντοπίζονται οι συνιστώσες στο υπό μελέτη μοντέλο που φέρουν μικρότερο και μεγαλύτερο κίνδυνο αστοχίας και αυτό παρουσιάζεται στον χρήστη του λογισμικού με τον ανάλογο χρωματισμό στα σημεία για παράδειγμα υψηλής τάσης με χρώμα κόκκινο, ενώ στα σημεία χαμηλότερης τάσης και συνεπώς μικρότερου κινδύνου αστοχίας με μπλε ή κίτρινο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα των ασκούμενων τάσεων σε ένα μοντέλο, από μετά-επεξεργαστή υπό μορφή χρωματικής αναπαράστασης των τάσεων στο μοντέλο, παρουσιάζεται στην εικόνα 18. Το λογισμικό κατά τον τύπο της τάσης Von Mises, παρουσιάζει με μονάδα μέτρησης psi (λίβρες ανά τετραγωνική ίντσα) στην παρακάτω μπιέλα, τα σημεία με

χρωματική αναπαράσταση και υπόμνημα το οποίο φέρει αντίστοιχα με το χρώμα της κάθε περιοχής του μοντέλου και την τιμή των psi που ασκούνται σε αυτό.



Εικόνα 19: Ανάλυση τάσεων σε μπιέλα με την χρήση FEM και Von Mises. (Πηγή: Wikipedia)

2.2 Μελέτη Αντοχής του Συστήματος

Το εμπρόσθιο σύστημα ανάρτησης που θα αναλυθεί είναι της BMW GS R1200 μοντέλο του 2013 και σχεδιάστηκε σε τρισδιάστατη μορφή σε CAD περιβάλλον σε ξεχωριστά κομμάτια. Τα κομμάτια αυτά συναρμολογήθηκαν επίσης στο CAD πρόγραμμα, με αρκετές απλοποιήσεις για διευκόλυνση της ανάλυσης.

2.2.1 Σενάριο Στατικής Φόρτισης

Η στατική φόρτιση (ή στατικό φορτίο) αναφέρεται στη δύναμη ή το βάρος που ασκείται σε ένα αντικείμενο ή μια δομή όταν αυτό παραμένει ακίνητο ή σε αμετάβλητη κατάσταση. Το αναρτώμενο βάρος είναι η μόνη δύναμη που επιδρά στο σύστημα εξαιτίας της βαρύτητας, το μέγεθος της δύναμης ή του βάρους δεν αλλάζει με το χρόνο και επίσης το αντικείμενο ή η δομή βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας ή ισορροπίας, χωρίς να επιταχύνεται ή να μετακινείται [11].

Παρακάτω θα υπολογίσουμε την ασκούμενη δύναμη στην στατική φόρτιση (Περίπτωση 1^η). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι απαραίτητες παράμετροι για

τον υπολογισμό, καθώς η αριθμητική τους εφαρμογή στους παρακάτω τύπους που θα δούμε, θα μας δώσουν την ασκούμενη δύναμη του αναρτώμενου βάρους στον άξονα του εμπρόσθιου τροχού, που θα εφαρμοστεί μετέπειτα στο πρόγραμμα ανάλυσης.

➤ **Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συστήματος :**

- **p**: Απόσταση μεταξύ αξόνων (μεταξόνιο) εμπρός και πίσω τροχού = 1520 mm
- **M_{moto}**: Βάρος μοτοσυκλέτας = 225kg
- **M_{wheel}**: Βάρος τροχών = 29 kg (προσέγγιση)

Υπολογισμός οριζόντιας απόστασης μεταξύ του κέντρου βάρους και του πίσω τροχού :

Η απόσταση μεταξύ αξόνων (μεταξόνιο) εμπρός και πίσω τροχού είναι 1520mm, η κατανομή βάρους μεταξύ μπροστινού και πίσω τροχού είναι περίπου 49.5% μπροστά και 50.5% πίσω, όταν η μοτοσυκλέτα είναι σε στατική κατάσταση και χωρίς φορτίο. Επομένως η απόσταση μεταξύ του πίσω τροχού και του κέντρου βάρους μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής [7]:

$$b = 0.505 \times 1.520\text{m} = 767.6\text{mm}$$

Άρα η απόσταση μεταξύ του εμπρός τροχού και του κέντρου βάρους θα είναι [7]:

$$a = 1520\text{mm} - 767.6\text{mm} = 752.4\text{mm}$$

- **b**: Απόσταση μεταξύ πίσω τροχού και κέντρου βάρους = 767.6 mm
- **a**: Απόσταση μεταξύ εμπρός τροχού και κέντρου βάρους = 752.4mm
- Ποσοστό κατανομής μάζας της μοτοσυκλέτας: 49.5% εμπρός και 50.5%

Το αναρτώμενο βάρος χωρίζεται σε δυο κατηγορίες :

- i. Βάρος αναβάτη (Driver's weight)
- ii. Βάρος μοτοσυκλέτας (Sprung weight)

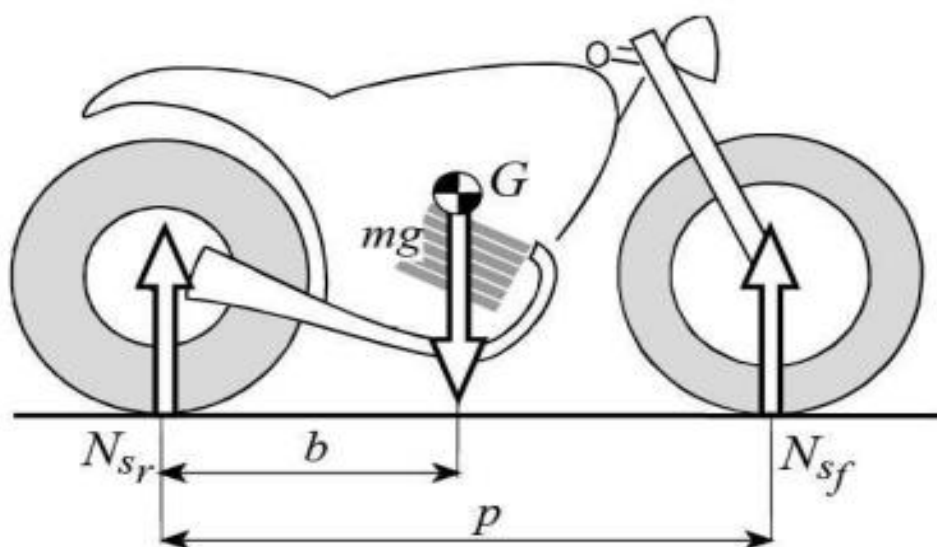
Η αναρτώμενη μάζα συμβολίζεται με **M** και απαρτίζεται από την μάζα του αναβάτη **M_{rider}** (θεωρήθηκε 90 kg) μαζί με τη μάζα **M_{moto}** του οχήματος που ασκείται πάνω στην ανάρτηση, αλλά όχι την μάζα **M_{wheel}** των τροχών, καθώς δεν παίζουν κάποιο ρόλο στην στατική καταπόνηση. Άρα θα έχουμε :

$$m = M_{moto} + M_{rider} - M_{wheel} = 225 \text{ kg} + 90 \text{ kg} - 29 \text{ kg} = 286 \text{ kg}$$

Υπολογισμός της δύναμης στον εμπρόσθιο τροχό:

Στην εικόνα 20, βλέπουμε σε ένα απλό μοντέλο μοτοσυκλέτας, την απόσταση του μεταξονίου (wheelbase) (**p**), την προσεγγιστική θέση του κέντρου βάρους για τις πλείστες περιπτώσεις σε μια μοτοσυκλέτα και τις δυνάμεις που ασκούνται στο σημείο αυτό (CoG), απόσταση μεταξύ πίσω τροχού και κέντρου βάρους (**b**), την δύναμη που

ασκείται στον πίσω τροχό (N_{sr}) και την δύναμη που ασκείται στον εμπρόσθιο τροχό (N_{sf}) που είναι και το ζητούμενο μας για την στατική φόρτιση.



Εικόνα 20: Οι δυνάμεις στον κάθετο άξονα κατά την στατική φόρτιση. (Πηγή [12])

Για τις δυνάμεις στον κάθετο άξονα ισχύει η σχέση:

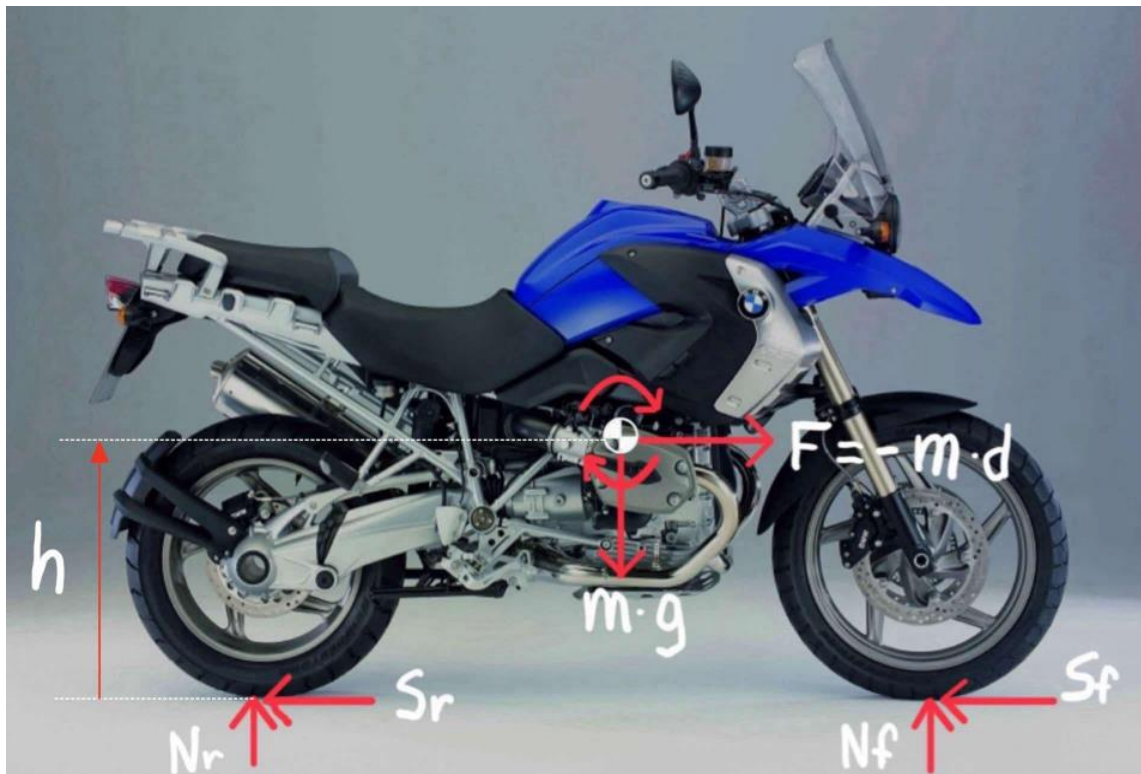
$$b = \frac{N_{sf} \times p}{m \times g} \quad \text{Άρα} \quad N_{sf} = \frac{b \times m \times g}{p} = \frac{767.6 \text{ mm} \times 286 \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1520 \text{ mm}} \quad (1)$$

Επομένως η δύναμη N_{sf} που ασκείται στον κάθετο άξονα κατά την στατική φόρτιση είναι :

$$\underline{N_{sf_{\text{τελικό}}} = 1416.86 \text{ N}}$$

2.2.2 Περίπτωση Πέδησης

Σε αυτή την υπό-ενότητα θα εξετάσουμε την περίπτωση ακραίας πέδησης σε στεγνό οδόστρωμα, μηδενικής κλίσης. Η πέδηση είναι μια κατάσταση όπου ο αναβάτης χρησιμοποιεί τα φρένα (εμπρόσθια φρένα στην περίπτωση αυτή), για να επιβραδύνει ή να σταματήσει την μοτοσυκλέτα και η περίπτωση ακραίας πέδησης που θα εξεταστεί είναι όταν κατά την επιβράδυνση ο πίσω τροχός φτάνει ακριβώς στο σημείο πριν ξεκινήσει να ανυψώνεται. Ορίζοντας τη μοτοσυκλέτα μαζί με τον αναβάτη ως άκαμπτο σώμα (rigid body), η δύναμη που ασκείται από το οδόστρωμα προς τον πίσω τροχό στον κάθετο άξονα πρέπει να είναι αυστηρά μεγαλύτερη από μηδέν, ώστε να ισχύει η επιθυμητή περίπτωση πέδησης που εξετάζουμε στο παρόν στάδιο. Η φόρτιση αυτή αποτελεί την μέγιστη φόρτιση που ασκείται σε ένα εμπρόσθιο σύστημα μοτοσυκλέτας.



Εικόνα 21 : Αναπαράσταση δυνάμεων που ασκούνται κατά το φρενάρισμα της μοτοσυκλέτας. (Πηγή [12])

Κατά τον κατακόρυφο και κατά τον οριζόντιο άξονα υπάρχει ισορροπία δυνάμεων και γύρω από το κέντρο βάρους της μοτοσυκλέτας υπάρχει ισορροπία ροπών, επομένως προκύπτουν οι εξής εξισώσεις :

- $S_f + S_r = m \times d$ [ως προς τον οριζόντιο άξονα] **(2)**
- $N_f + N_r = m \times g$ [ως προς τον κατακόρυφο άξονα] **(3)**
- $N_r \times b - N_f \times a + (S_f + S_r) \times h = 0$ [Ροπές γύρω από το κέντρο βάρους] **(4)**

Όπου οι όροι αυτοί είναι :

Nf: Η αντίδραση από το έδαφος στον εμπρόσθιο τροχό

Nr: Η αντίδραση από το έδαφος στον πίσω τροχό

Sf: Η δύναμη πέδησης εμπρός

Sr: Η δύναμη πέδησης πίσω

d: Η επιβράδυνση

m×d: Η αδρανειακή δύναμη από την επιβράδυνση

h: Ύψος του κέντρου βάρους

Με βάση την εξίσωση ισορροπίας (4), λύνοντας την ως προς N_r και αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (2) και (3) προκύπτει ότι:

$$N_r = \frac{(m \times g \times a)}{(a+b)} - \frac{(m \times d \times h)}{(a+b)} \quad (5)$$

και ακολουθώντας την ίδια μέθοδο με πριν αλλά λύνοντας ως προς N_f προκύπτει :

$$N_f = \frac{(m \times g \times b)}{(a+b)} + \frac{(m \times d \times h)}{(a+b)} \quad (6)$$

Επίσης, ούτως ώστε να μην ανυψωθεί ο πίσω τροχός ισχύει η εξής ανίσωση :

$$N_r > 0 \rightarrow \frac{(m \times g \times a)}{(a+b)} > \frac{(m \times d \times h)}{(a+b)}$$

Συνεπώς,

$$d < \frac{g \times a}{h} \quad (7)$$

Από την ανίσωση (7) έχουμε την μεταβλητή h η οποία είναι το ύψος του κέντρου βάρους. Με βάση την πηγή [12], στην οποία πραγματοποιήθηκε πειραματικός υπολογισμός του ύψους του κέντρου βάρους στην BMW GS R1200, έχουμε από την θέση του κέντρου βάρους έως το ύψος του εμπρόσθιου άξονα του τροχού 292mm (στον κατακόρυφο άξονα). Επομένως, συνυπολογίζοντάς και την ακτίνα του τροχού με το ελαστικό (320mm) έχουμε το ύψος του κέντρου βάρους, **$h = 612\text{mm}$** . Άρα αντικαθιστώντας στην συνθήκη (7) τις τιμές της επιτάχυνσης της βαρύτητας, την απόσταση μεταξύ εμπρός τροχού και κέντρου βάρους και το ύψος του κέντρου βάρους έχουμε :

$$d < \frac{9.81 \frac{m}{s^2} \times 752.4\text{mm}}{612\text{mm}} \rightarrow \quad \mathbf{d < 12.06 \frac{m}{s^2}}$$

Στην περίπτωση της πέδησης οι ασκούμενες τάσεις είναι στον άξονα του εμπρόσθιου τροχού όπως και στην στατική φόρτιση (με κάθετη διεύθυνση), αλλά και στις δαγκάνες των μπροστινών δίσκων φρεναρίσματος. Η ανύψωση του πίσω τροχού συνεπάγεται με $S_r=0$ και αυτή η ανύψωση οφείλεται στην ροπή που εμφανίζεται κατά την πέδηση η οποία είναι και η δύναμη της επιβράδυνσης στο σύστημα.

Σύμφωνα με το Δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα, η δύναμη επιβράδυνσης είναι το αποτέλεσμα της επιτάχυνσης που προκαλείται από τα φρένα και η σχέση της με τη μάζα της μοτοσυκλέτας και του αναβάτη είναι:

$$F = m \times d$$

όπου:

- **F:** είναι η δύναμη επιβράδυνσης
- **m:** είναι η συνολική μάζα της μοτοσυκλέτας και του αναβάτη = 286kg

- **d:** είναι η επιβράδυνση (αρνητική επιτάχυνση) = 12.06

Επομένως, με βάση την εξίσωση (2) και το $Sr=0$, προκύπτει η εξίσωση $Sf = m \times d$ η οποία προκύπτει από τον Δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα.

Κάνοντας λοιπόν αντικατάσταση των τιμών και λύνοντας τις πράξεις θα έχουμε :

$$F = 286\text{kg} \times 12.06 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \rightarrow F = 3449.16\text{N}$$

Ακολουθώντας, για να βρούμε την ροπή, εφαρμόζουμε τον τύπο:

$$\tau = F \times r$$

όπου:

- **τ :** είναι η ροπή (σε Nm)
- **F :** είναι η δύναμη που ασκείται = 3449.16N
- **r :** είναι η απόσταση από το σημείο εφαρμογής της δύναμης μέχρι τον άξονα περιστροφής ($r_{\text{τροχού}} = 320\text{mm}$ και $r_{\text{δίσκου φρεναρίσματος}} \approx 181\text{mm}$)

Ροπή στον εμπρόσθιο τροχό :

$$\tau = F \times r = 3449.16\text{N} \times 0.32\text{m} \rightarrow \tau = 1103.73\text{Nm}$$

Δύναμη αντίδρασης στις εμπρόσθιες δαγκάνες των φρένων :

$$F = \frac{\tau}{r} = \frac{1103.73\text{Nm}}{0.181\text{m}} \rightarrow F = 6097.96\text{N}$$

Όμως η δύναμη αυτή θα διαιρεθεί δια δύο, καθώς το σύστημα φέρει δύο δαγκάνες δίσκου φρεναρίσματος.

$$F = \frac{6097.96\text{N}}{2} \rightarrow \underline{\underline{F = 3048.98\text{N}}} \text{ (Για κάθε δαγκάνα)}$$

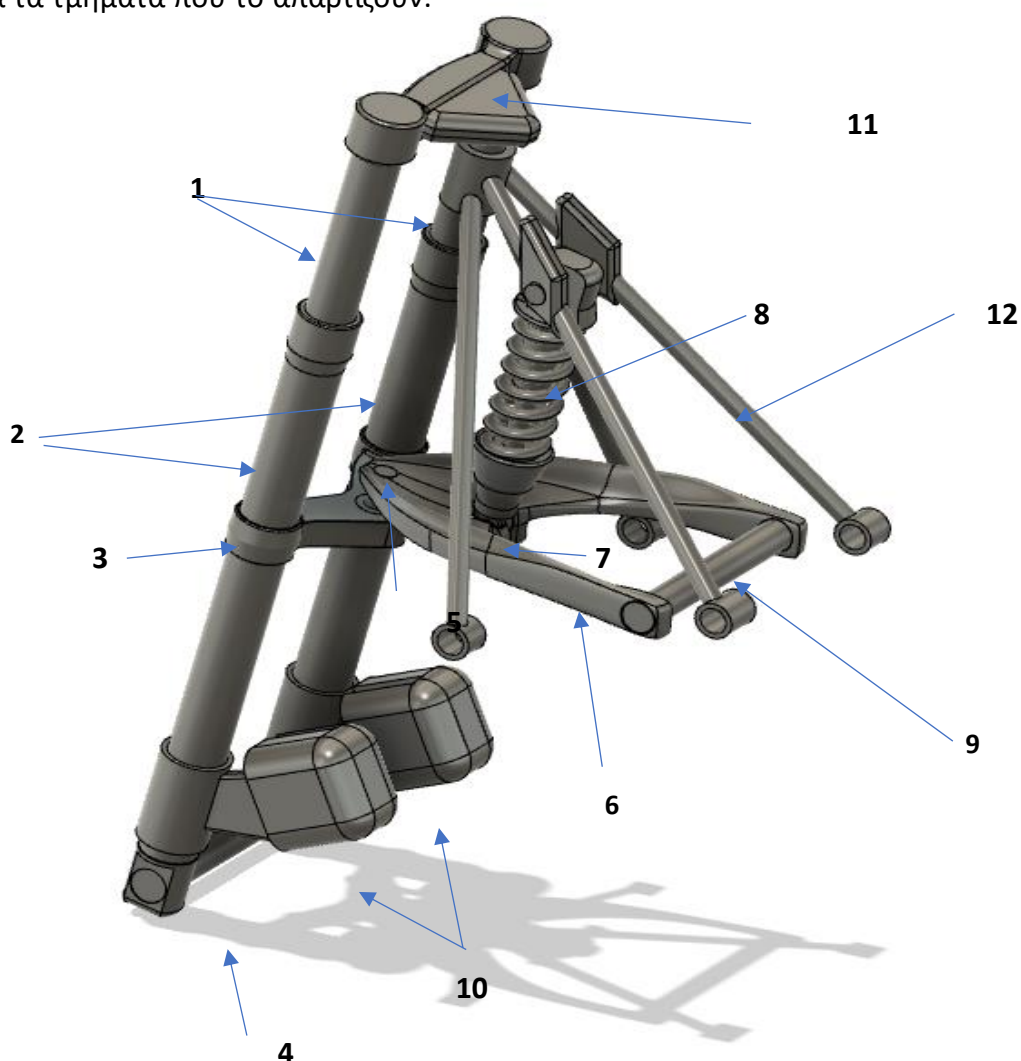
Αντικαθιστώντας στην σχέση (6) τα παραπάνω, προκύπτει:

$$Nf = \frac{(286\text{kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0.7676\text{m})}{(0.7524\text{m} + 0.7676\text{m})} + \frac{(286\text{kg} \times 12.06 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0.612\text{m})}{(0.7524\text{m} + 0.7676\text{m})} = \underline{\underline{2805.60\text{N}}}$$

2.3 Μοντελοποίηση Συστήματος

Για την ανάλυση του συστήματος και την μελέτη αντοχής του χρησιμοποιήθηκε εξειδικευμένο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων της BETA CAE Systems S.A, ενώ το μοντέλο σχεδιάστηκε σε πραγματικές διαστάσεις στο πρόγραμμα Fusion 360 σε τρισδιάστατη μορφή.

Το συνολικό σύστημα απαρτίζεται αναλυτικά από 1) τις δύο μπουκάλες, 2) τις δύο μπότες, 3) την σύνδεση τους, 4) τον άξονα στήριξης του εμπρόσθιου τροχού, 5) τον άξονα (πανομοιότυπο με ball joint σε απλοποιημένη μορφή) που ενώνει την σύνδεση με το A-Arm, 6) το διπλό ψαλίδι A-Arm, 7) τον άξονα στήριξης του αμορτισέρ στο διπλό ψαλίδι, 8) το αμορτισέρ, 9) τον άξονα σύνδεσης του ψαλιδιού με τον υπόλοιπο σκελετό, 10) τις δαγκάνες φρεναρίσματος, 11) την τιμονόπλακα, 12) την βάση στηρίγματος αμορτισέρ και τιμονόπλακας, 13) τον άξονα σύνδεσης του αμορτισέρ με την βάση στηρίγματος. Στην εικόνα 22, φαίνεται το σύστημα σε ολοκληρωμένη μορφή με όλα τα τμήματα που το απαρτίζουν.

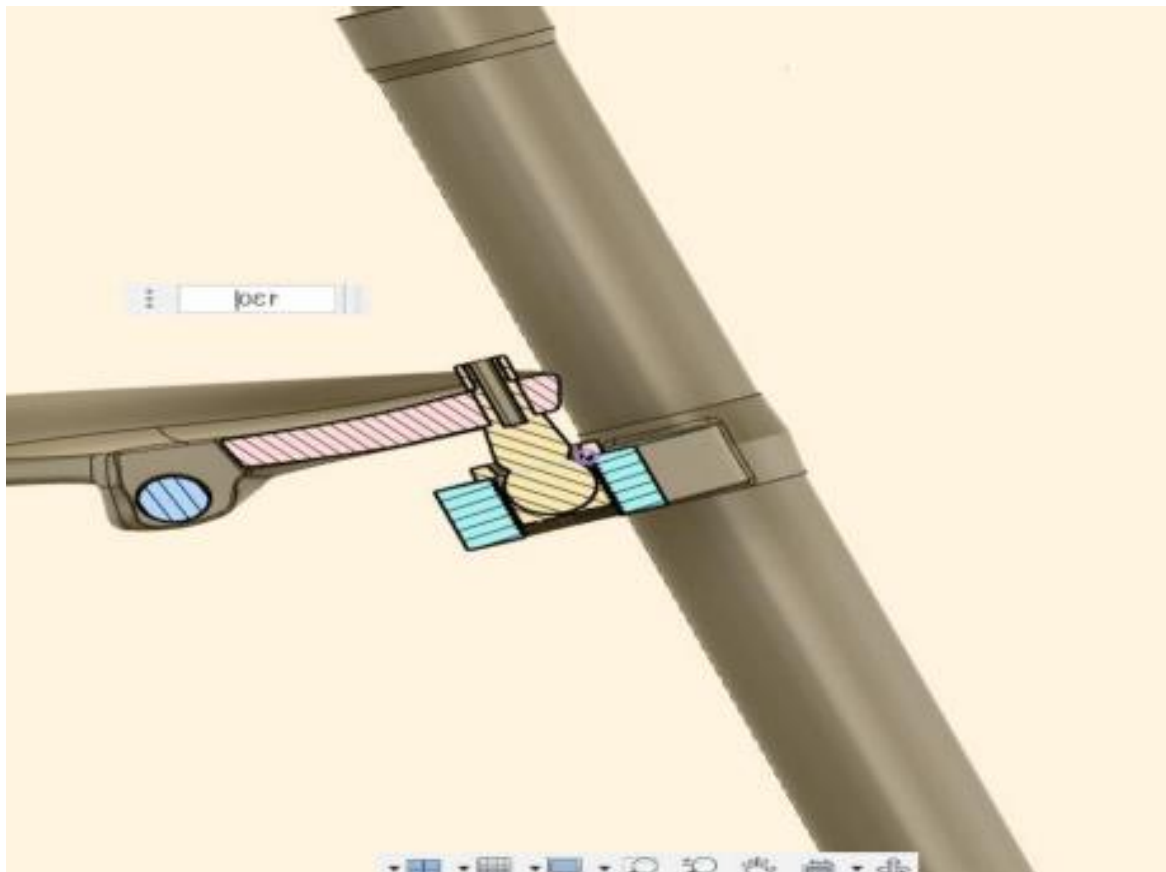


Εικόνα 22 : Το σύστημα Telelever στο FUSION 360 σε ολοκληρωμένη μορφή.



Εικόνα 23 : Το ολοκληρωμένο σύστημα Telelever κάτω δεξιά, πάνω δεξιά και αριστερά το Ball Joint και κάτω αριστερά το διπλό ψαλίδι A-ARM.

Στο παρόν στάδιο, αξίζει να αναφερθεί το κομμάτι του ball joint και η χρησιμότητα του. Το Ball Joint ή στα ελληνικά Σφαιρικός Σύνδεσμος, είναι ένα εξάρτημα που χρησιμοποιείται γενικότερα σε συστήματα διεύθυνσης κινήσεων, δίνοντας ελευθερία σε διάφορες κατευθύνσεις χάρη στην σφαιρική του μορφή. Η χρήση του κυρίως στις αυτοκινητοβιομηχανίες είναι καθοριστική, αφού βρίσκει επιτυχώς εφαρμογή σε διάφορα κομβικά σημεία, δίνοντας σημαντικές λύσεις σε διαχρονικά προβλήματα που αντιμετώπιζαν οι μηχανικοί. Στην εικόνα 24, μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε την μορφή που έχει το Ball Joint και να δούμε πως δίνει την δυνατότητα στο ψαλίδι να παίρνει την κατάλληλη κλίση κατά την πέδηση και παράλληλα να αποτελεί έναν σύνδεσμο μεταξύ του ψαλιδιού και των μπουκαλών. Για την διεκπεραίωση μιας πιο εύκολης ανάλυσης, το Ball Joint αντικαταστάθηκε σχεδιαστικά με έναν σύνδεσμο απλής μορφής.

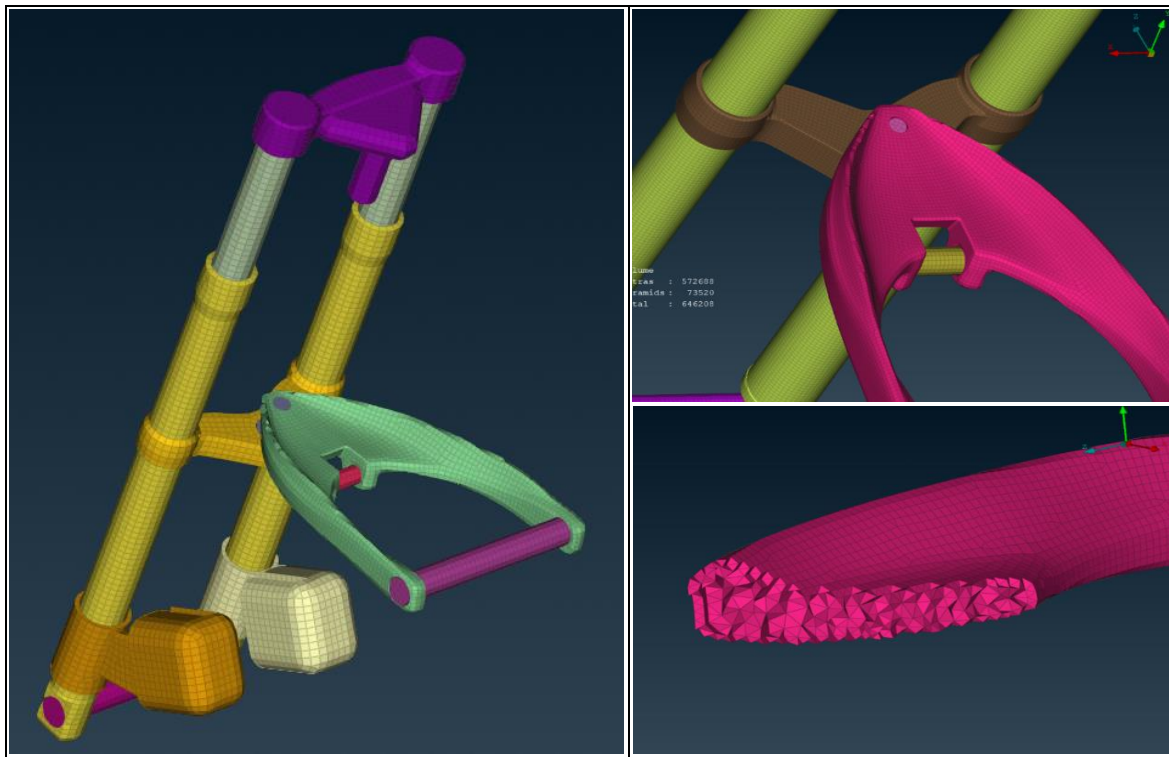


Εικόνα 24: Το Ball Joint στο σύστημα Telelever σε τομή.

2.3.1 Δημιουργία Πλέγματος

Στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSA v24.0.1 (προ-επεξεργαστής) της BETA CAE Systems S.A, δημιουργούμε πλέγμα (mesh) στο μοντέλο για να το αναλύσουμε, διότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method - FEM) βασίζεται στη διαίρεση του συνεχούς μοντέλου σε μικρότερα διακριτά κομμάτια, τα πεπερασμένα στοιχεία όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη υποενότητα. Επιπλέον η ανάλυση γίνεται σε πλέγμα επιφάνειας (shell mesh) και σε στερεό πλέγμα (solid mesh) ανάλογα με το προς μελέτη αντικείμενο. Παραδείγματος χάριν, ένα αντικείμενο με μόνο την εξωτερική του επιφάνεια να είναι προς μελέτη, δηλαδή απλώς μια επιφάνεια τριβής στο σύστημα, θα εφαρμοστεί σε αυτό πλέγμα επιφάνειας (shell mesh), καθώς σε αντικείμενο όπως το ψαλίδι που μας ενδιαφέρει η συμπαγής και ογκομετρική μελέτη του και όχι μόνο η μελέτη της εξωτερικής του επιφάνειας, εφαρμόζεται σε αυτό στερεό πλέγμα (solid mesh). Το ANSA δίνει την δυνατότητα διόρθωσης τυχόν ασυνέχειας στο πλέγμα που προκύπτει, πράγμα που μπορεί να οφείλεται στο αρχικό σχέδιο που προέρχεται από το πρόγραμμα σχεδίασης (CAD).

Για την μοντελοποίηση του συστήματος απλοποιήσαμε την αρχική του μορφή, αφαιρώντας κάποια εξαρτήματα στην ανάλυση. Στην εικόνα 25 αριστερά, είναι η απλοποιημένη μορφή του προς ανάλυση.



Εικόνα 25: Τελική μορφή συστήματος με Shell και Solid Mesh.

Τα στοιχεία πλέγματος που επιλέχθηκαν για την ανάλυση δύο μορφές γεωμετρίας, τετράπλευρα (quads) και τριγωνικά (trias). Η δημιουργία των στοιχείων του όγκου πραγματοποιήθηκε με τον αλγόριθμο Tetra Rapid. Το shell mesh αποτελείται από CQUAD4 = 25 815 στοιχεία και CTRIA3 = 1 032 στοιχεία και το solid mesh αποτελείται από CTETRA = 120 668 στοιχεία και PYRAMID = 25 815 στοιχεία.

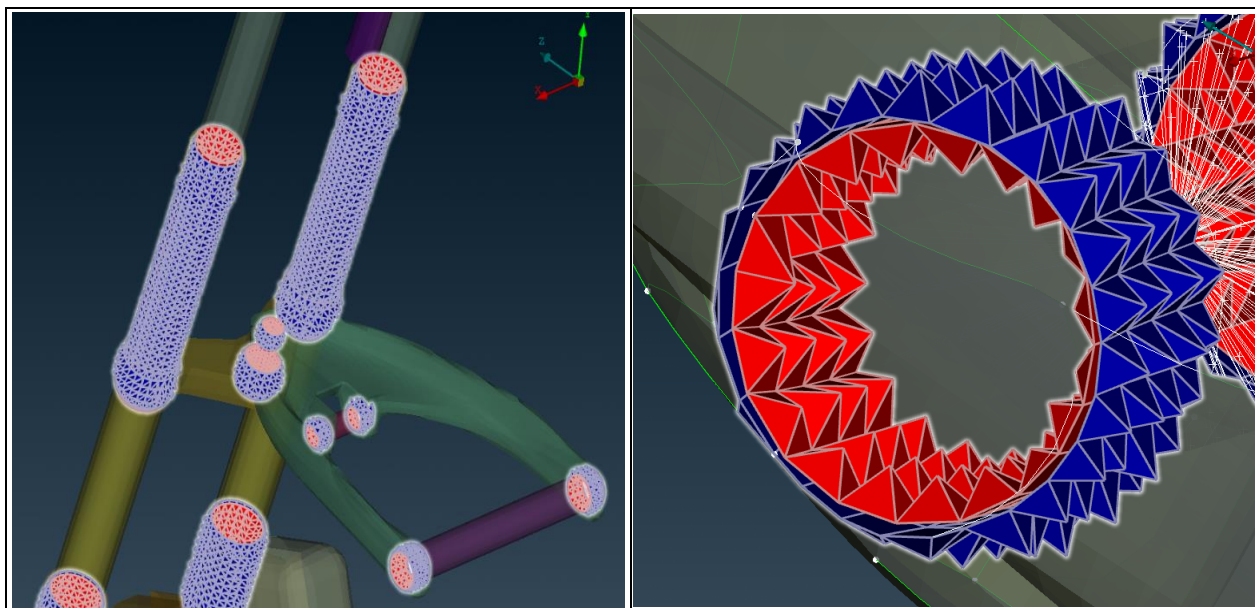
2.3.2 Μοντελοποίηση Συνδέσεων

Το όλο σύστημα δεν αποτελεί ενιαίο σύνολο, καθώς προκύπτει από μια συναρμολόγηση που έγινε στο FUSION 360, μεταξύ διαφόρων εξαρτημάτων (όπως προαναφέρθηκαν στην εισαγωγή της ενότητας 2.3).

Για την λειτουργικότητα του συστήματος στο ANSA v24.0.1 χρειάζεται να δημιουργηθούν συνδέσεις μεταξύ των εξαρτημάτων, χρησιμοποιώντας από το deck του NASTRAN την συνάρτηση CONTACT. Για να είναι λειτουργική η συνάρτηση, πρέπει αρχικά να οριστούν ένα Master Set και ένα Slave Set και έπειτα το BCBODY το οποίο παίρνει σαν όρισμα τα δύο Set που έχουν ορισθεί, ούτως ώστε να δημιουργηθεί το CONTACT. Για να αναγνωριστεί μια επαφή ως άκαμπτη, αναγκαία συνθήκη είναι να είναι ορισμένη σε Solid Mesh. Στο μοντέλο μας υπάρχουν συνολικά εννέα CONTACTS από τα οποία φαίνονται μερικά στην εικόνα 26, όπου με μπλε χρώμα είναι τα Master Sets και με κόκκινο χρώμα είναι τα Slave Set.

Επιπλέον, οι συνδέσεις δημιουργήθηκαν με την προϋπόθεση της ακαμψίας και αυτό επιτεύχθηκε με την εισαγωγή της εντολής IGLUE από το BCONPRG με τιμή 1.

Άλλη μια εντολή που χρειάστηκε να εισαχθεί στην ανάλυση ήταν το ERROR από το BCONPRG. Εν ολίγης, η εντολή ERROR είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται σε πολύπλοκες αναλύσεις στον προ-επεξεργαστή.



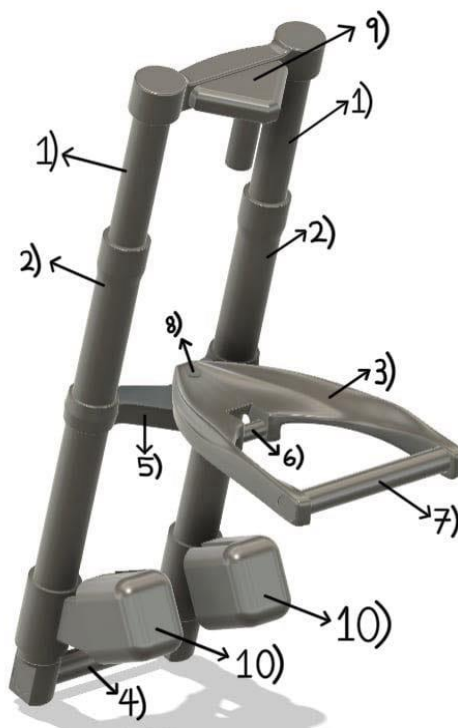
Εικόνα 26: Οι 9 συνδέσεις (CONTACTS) στο σύστημα.

2.3.3 Μοντελοποίηση Υλικών

Έπειτα από τον καθορισμό συνδέσεων, σειρά έχει εισαγωγή των υλικών κατασκευής και των δομικών χαρακτηριστικών των εξαρτημάτων που απαρτίζουν το σύστημα. Η επιλογή των υλικών κατασκευής είναι κρίσιμη για κάθε κομμάτι του συστήματος, καθώς επηρεάζει άμεσα τη λειτουργικότητα και την απόδοση του.

Τα υλικά πρέπει να επιλέγονται με βάση τις μηχανικές τους ιδιότητες, όπως η αντοχή, η ακαμψία, η ανθεκτικότητα στη φθορά και η αντίσταση στη διάβρωση, αλλά και το βάρος τους. Επιπλέον, η θερμική και χημική σταθερότητα των υλικών καθορίζει τη συμπεριφορά τους σε διαφορετικά περιβάλλοντα και συνθήκες λειτουργίας. Επιπρόσθετα η σωστή επιλογή υλικού γίνεται στις πλείστες φορές με κάποια κριτήρια κατεργασιμότητας και κόστους, δηλαδή αν σε μια μαζική παραγωγή είναι εφικτή και κερδοφόρα η κατασκευή του τεμαχίου.

Παρακάτω θα δούμε το υλικό κατασκευής και τα δομικά χαρακτηριστικά του κάθε τεμαχίου στο μοντέλο που μελετήσαμε σε απλοποιημένη μορφή στον προ-επεξεργαστή.



Εικόνα 27 : Τα εξαρτήματα του συστήματος αριθμημένα.

Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί, υπάρχουν αναλυτικά τα υλικά που αντιστοιχούν στα αριθμημένα εξαρτήματα, όπως φαίνονται στην εικόνα 27. Μερικά σημαντικά χαρακτηριστικά των υλικών που απαιτούνται στο λογισμικό είναι: α) E: Συντελεστής Young (Young's Modulus), με μονάδα μέτρησης το GPa (Giga Pascal), β) ν: Συντελεστής Poisson (Poisson's Ratio), γ) G: Διατμητικός Συντελεστής (Shear Modulus) ή Συντελεστής Ακαμψίας ενός υλικού, με μονάδα μέτρησης το GPa (Giga Pascal), δ) ρ: η πυκνότητα με μονάδα μέτρησης το g/cm^3 και το Σγ το οποίο είναι το όριο Διαρροής (Yield Strength), όπου εκφράζει την μέγιστη τάση με μονάδα μέτρησης τα MPa.

	Ονομασία Εξαρτημάτων	Υλικό	E(GPa)	ν	G(GPa)	ρ(g/cm^3)	Σγ(MPa)
1	Δύο Καλάμια	AISI 304	190	0.27	74	7.85	510
2	Δύο Μπότες	A356.0-T6	70	0.33	26	2.6	200
3	Διπλό Ψαλίδι A-Arm	7075-T6	71.7	0.33	26.9	2.81	503
4	Άξονας Τροχού	AISI 4130	210	0.3	80	7.85	560
5	Σύνδεση Ψαλιδιού-Μπότες	6061-T6	68	0.33	26	2.7	290
6	Άξονας Αμορτισέρ	AISI 4130	210	0.3	80	7.85	560
7	Άξονας Ψαλίδι-Σκελετός	AISI 4130	210	0.3	80	7.85	560
8	Άξονας Σύνδεσης-Ψαλίδι	AISI 4130	210	0.3	80	7.85	560
9	Τιμονόπλακα	6061-T6	68	0.33	26	2.7	290
10	Δαγκάνες	AISI 4130	210	0.3	80	7.85	560

Πίνακας 1 : Τα υλικά των εξαρτημάτων που απαρτίζουν το σύστημα Telelever.

Για τις δύο μπότες χρησιμοποιήθηκε το χυτό κράμα αλουμινίου **A356.0-T6** είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο κράμα λόγω της αντοχής του, της ανθεκτικότητάς του στην διάβρωση και επιπλέον χαρακτηρίζεται από αρκετά καλή ικανότητα για χύτευση σε καλούπια με υψηλή ακρίβεια. Ειδικά η κατάσταση σκλήρυνσης T6 υποδηλώνει ότι το υλικό έχει υποβληθεί σε θερμική επεξεργασία για βελτιστοποίηση των μηχανικών του ιδιοτήτων. Αποτελείται από αλουμίνιο αλλά εμπεριέχει και ένα ποσοστό Πυριτίου και άλλων μετάλλων.

Για τα δύο καλάμια χρησιμοποιήθηκε ο Ανοξείδωτος Χάλυβας (Stainless Steel) **AISI 304**, αφού είναι ένας από τους πιο κοινά χρησιμοποιούμενους τύπους ανοξείδωτου χάλυβα λόγω της εξαιρετικής αντοχής του στην διάβρωση, της εύκολης κατεργασιμότητας και της καλής αισθητικής του. Αποτελείται κυρίως από χρώμιο και νικέλιο και έχει πολύ λίγη περιεκτικότητα άνθρακα [13].

Στο βασικό μας προς μελέτη εξάρτημα, το Διπλό Ψαλίδι A-Arm, το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το Κράμα Αλουμινίου-Ψευδαργύρου **7075-T6**. Είναι ένα από τα πιο ανθεκτικά κράματα αλουμινίου, γνωστό για την υψηλή αντοχή του και την χρήση του σε εφαρμογές που απαιτούν ανώτερη μηχανική απόδοση, όπως εξαρτήματα υψηλής αντοχής. Παράλληλα με την μεγάλη του ανθεκτικότητα χαρακτηρίζεται από σχετική ευκολία κατεργασιμότητας και επιπλέον κατά την διάρκεια μιας πρόσκρουσης το αλουμίνιο έχει την ιδιότητα να κατανέμει το φορτίο του σε ολόκληρο το τεμάχιο μειώνοντας έτσι την παραμόρφωση του σε αντίθεση με τον χάλυβα. Τα στοιχεία που το συνθέτουν είναι Ψευδάργυρος (Zn), Μαγνήσιο (Mg), Χαλκός (Cu), Χρώμιο (Cr) και Αλουμίνιο (Al) [2, 16, 17].

Σε όλους τους άξονες και στις δαγκάνες ορίστηκε ο ενισχυμένος χάλυβας **AISI 4130** ο οποίος είναι γνωστός και ως χάλυβας "χρωμομολυβδαίνιο" (chromoly steel) και προσφέρει υψηλή αντοχή εφελκυσμού (από 560 έως 770 MPa), γεγονός που το καθιστά ιδανικό για εξαρτήματα που χρειάζονται αντοχή και ανθεκτικότητα σε υψηλά φορτία [13].

Τέλος, στην τιμονόπλακα και στην σύνδεση ψαλιδιού-μπότες, χρησιμοποιήθηκε το κράμα αλουμινίου **6061-T6**, λόγω του ότι προσφέρει υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό (περίπου 290 MPa) και αντοχή διαρροής (240 MPa), κάνοντάς το κατάλληλο για φορτία υψηλής καταπόνησης και επιδέχεται εύκολα κατεργασία με κοπτικά εργαλεία (τόρνος, φρεζάρισμα) [14].

Ο προ-επεξεργαστής στον οποίο θα εισαχθούν τα παραπάνω υλικά, παίρνει τις τιμές των υλικών με συγκεκριμένη μονάδα μέτρησης (Από το σύστημα S.I.) και οι μονάδες αυτές είναι:

Μήκος: mm (Millimetres)

Χρόνος: s (Second)

Πίεση: Mpa (Mega Pascal = 10^6 Pascal)

Δύναμη: N (Newton)

Βάρος: t (tons)

MAT1 MATT1 MAT4 MATT4 MAT5 MATT5 MATS1 MATFTG MATF1 MATEP MATVP MATF MATVE MAT1F [MAT1]

Name: 7075-T6 (A-ARM)

Main Misc

MAT1

	MID	E	G	NU	RHO	A	TREF
MAT1	12	71700.	26900.	0.33	2810.		
	ST	SC	SS	MCSID			
	503.						

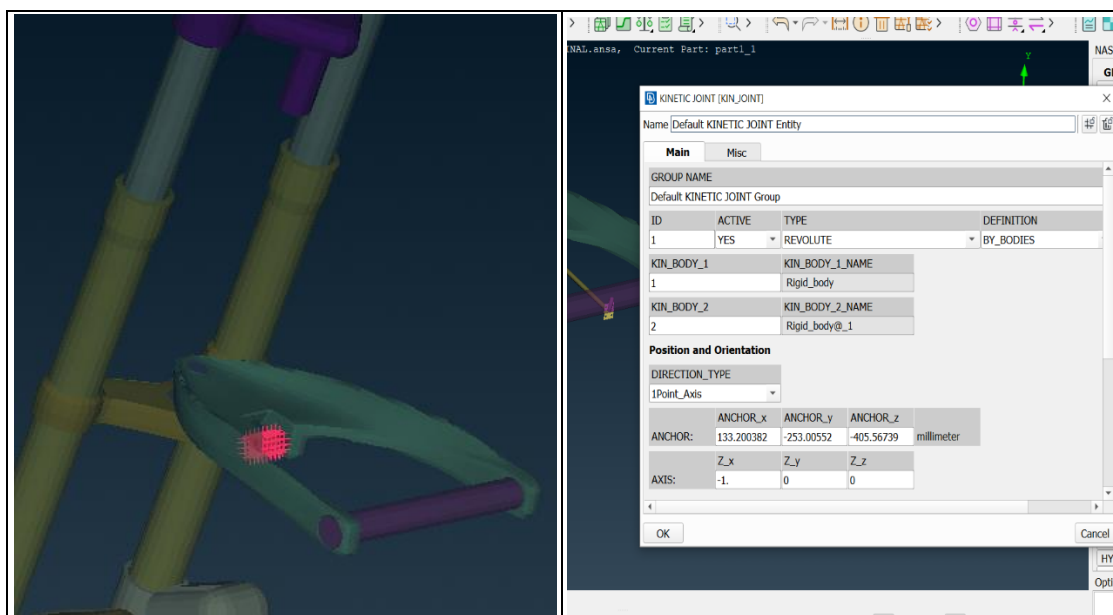
MATT1
 MAT4,5
 MATS1
 MATFTG
 MATF1
 MATEP
 MATVP
 MATF

OK Cancel

Εικόνα 28 : Η καρτέλα ορισμού υλικού για το ψαλίδι.

2.3.4 Μοντελοποίηση Περιορισμών

Στο μοντέλο μας, υπάρχει ο περιορισμός της πάκτωσης. Πακτωμένο σημείο θεωρήθηκε ο άξονας σύνδεσης του αμορτισέρ με το ψαλίδι. Επιπλέον, στον άξονα σύνδεσης του ψαλιδιού με τον σκελετό, εφαρμόστηκε περιστροφική άρθρωση (Revolute Joint), καθώς στο συγκεκριμένο σημείο επαφής του ψαλιδιού με τον άξονα σύνδεσης του σκελετού, υπάρχει περιστροφική κίνηση του ψαλιδιού με την βοήθεια ρουλεμάν, κατά την συμπίεση την ανάρτησης.



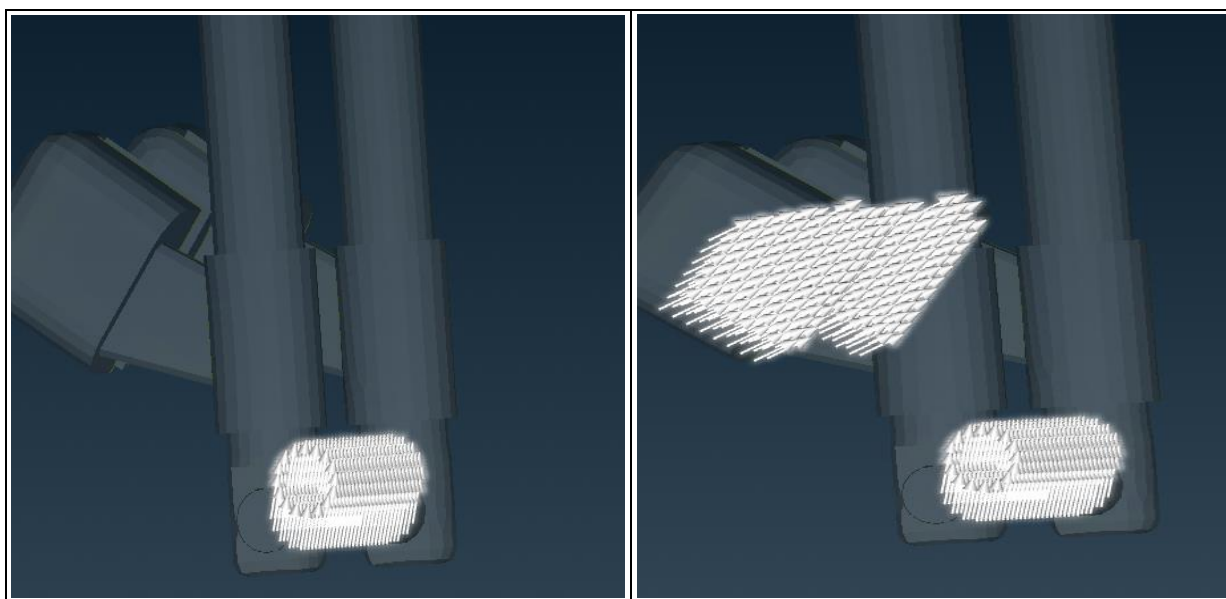
Εικόνα 29 : Οι πάκτωση που εφαρμόστηκε στο μοντέλο(αριστερά) και η εντολή της άρθρωσης(δεξιά).

Για τον ορισμό των πακτώσεων, αρχικά ορίστηκαν τα ανάλογα Sets στις περιοχές εφαρμογής του περιορισμού. Έπειτα από το Deck του NASTRAN, από την κατηγορία των BCs επιλέχθηκε το SPC1 που πήρε σαν όρισμα του το κάθε Set σε κάθε πάκτωση που επρόκειτο να δημιουργήσουμε. Στο Component Numbers μετατρέπουμε το C από 123456 σε 123 μεταβάλλοντας τους βαθμούς ελευθερίας του με αυτό τον τρόπο

σε τρεις. Ακολουθώντας από την καρτέλα ELEMENTS από το ίδιο Deck, επιλέξαμε το RBE3 για την ολοκλήρωση του περιορισμού, το οποίο πήρε σαν όρισμα το Set στο οποίο εφαρμόστηκε προηγουμένως το SPC. Για τον ορισμό της άρθρωσης χρησιμοποιήθηκε η εντολή Kinetic Joint Assistant: Revolute Joint επίσης από το Deck του Nastran, κατά την οποία επιλέχθηκαν αρχικά τα δύο άκαμπτα εξαρτήματα που την απαρτίζουν, το σημείο περιστροφής και ο άξονας από τον οποίο πραγματοποιείται περιστροφή.

2.3.5 Μοντελοποίηση Δυνάμεων

Για την μοντελοποίηση των δυνάμεων, αφού ορίσουμε τα set των επιφανειών που ασκείται η κάθε δύναμη (με Grids), από το Deck του NASTRAN και με την εντολή Force θα οριστούν οι δυνάμεις. Στην καρτέλα που εμφανίζεται θέτουμε σε μονάδες μέτρησης Newton την αντίστοιχη δύναμη που βρήκαμε στην υποενότητα 2.2.2 καθώς και την φορά που θα έχει η κάθε μια.



Εικόνα 30 : Αριστερά απεικονίζεται η δύναμη στατικής φόρτισης και δεξιά οι δυνάμεις στην περίπτωση πέδησης.

Επιπλέον, η δύναμη στον άξονα του τροχού έχει κατακόρυφη διεύθυνση. Αφού ολοκληρωθεί ο καθορισμός των χαρακτηριστικών τους, η κάθε δύναμη αντιστοιχεί σε ένα Load Set το οποίο θα εισαχθεί στο αρχείο επιλυτή.

Από τα δύο Load Sets που έχουμε δημιουργήσει, στο πρώτο υπάρχει η περίπτωση της στατικής φόρτισης και στο δεύτερο η περίπτωση πέδησης. Στην στατική φόρτιση η δύναμη εφαρμόστηκε στον άξονα του εμπρόσθιου τροχού με τιμή $N_{\text{static}} = 1416.86\text{N}$. Στο δεύτερο Load Set όπου έχουμε την περίπτωση της πέδησης εφαρμόστηκε στην κάθε δαγκάνα η δύναμη $F = 3048.98\text{N}$ και επιπλέον συμπεριλήφθηκε η δύναμη που έχουμε στην στατική φόρτιση, όπως φαίνεται και στην εικόνα 29, αφού προφανώς η δύναμη της βαρύτητας εξακολουθεί να ασκείται στο σύστημα.

2.3.6 Αρχείο Επιλυτή

Με το πέρας των παραπάνω βημάτων, ακολουθεί η σύνταξη του αρχείου επιλυτή (header file). Το αρχείο αυτό περιέχει βασικές πληροφορίες, ορισμούς και παραμέτρους όπως για παράδειγμα τα ορίσματα δυνάμεων και πακτώσεων που απαιτούνται από το πρόγραμμα επιλυτή (solver) κατά την προετοιμασία μιας ανάλυσης. Ο επιλυτής EPILYSIS είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία δεδομένων του μοντέλου και για τον υπολογισμό των προς μελέτη μεγεθών. Επίσης χρησιμοποιήθηκε το SOL 101, το οποίο είναι ένας συγκεκριμένος τύπος στατικής δομικής ανάλυσης (Linear Static Analysis) όπου εφαρμόζεται για την επίλυση γραμμικών στατικών προβλημάτων.

Include	Command
<input checked="" type="checkbox"/>	SOL 101
	CEND
<input checked="" type="checkbox"/>	DISPLACEMENT(PLOT) = ALL
<input checked="" type="checkbox"/>	STRESS(PLOT) = ALL
<input checked="" type="checkbox"/>	STRAIN(PLOT) = ALL
<input checked="" type="checkbox"/>	SPC = 1
<input checked="" type="checkbox"/>	LOAD = 1
<input checked="" type="checkbox"/>	BCONTACT = 10
<input checked="" type="checkbox"/>	PARAM, POST, -1

Fill from: Selected Apply

OK Cancel

Εικόνα 31: Το αρχείο επιλυτή για την γραμμική στατική ανάλυση.

Σε αυτή την ανάλυση αυτό που εξετάζεται είναι οι ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises και οι παραμορφώσεις. Στο αρχείο υπάρχουν δύο Load Sets τα οποία δημιουργήσαμε και εισάγονται το κάθε ένα ξεχωριστά για κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις που εξετάζουμε. Για την στατική φόρτιση που περιλαμβάνει μόνο τη φόρτιση βάρους έχουμε ID = 1 και για την πέδηση που περιλαμβάνει τόσο το βάρος όσο και τη δύναμη στις δαγκάνες ID = 2. Στην εικόνα 30 συμπεριλήφθηκε με LOAD = 1 η περίπτωση της στατικής φόρτισης. Ουσιαστικά, με την ολοκλήρωση του αρχείου επιλυτή σηματοδοτείται και η ολοκλήρωση της ανάλυσης στον προ-επεξεργαστή.

Κεφάλαιο 3

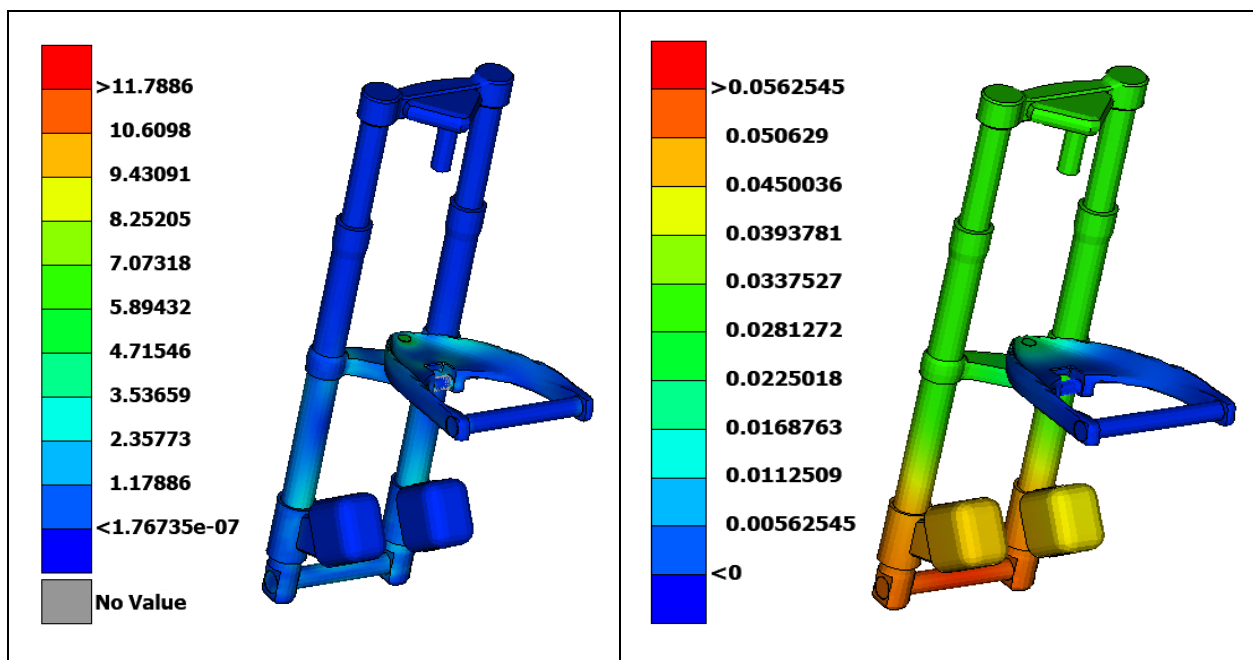
Αποτελέσματα Ανάλυσης

3.1 Αποτελέσματα Αρχικού Μοντέλου

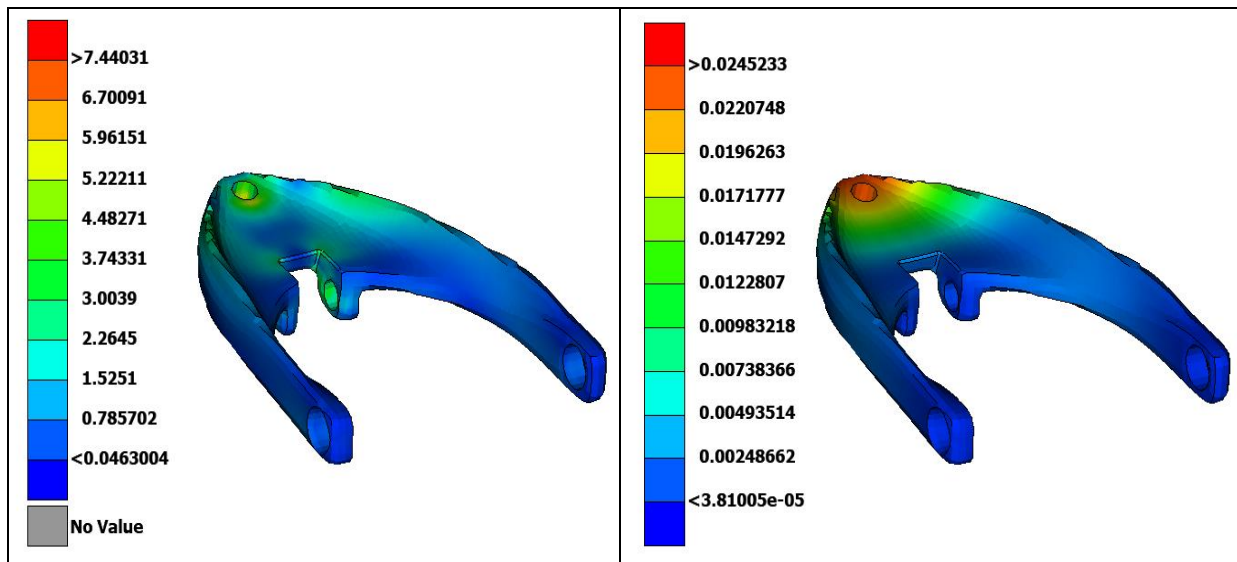
Αφού ολοκληρωθεί η μοντελοποίηση του συστήματος Telelever στον προεπεξεργαστή, το επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή του αρχείου επιλυτή στον μεταεπεξεργαστή META v24.0.1 για την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα που θα εξεταστούν αφορούν τις ορθές τάσεις κατά Von Mises (Von Mises stresses) που μετρούνται σε MPa και τις μετατοπίσεις (displacements) που μετρούνται σε mm. Από την ανάλυση του συνολικού συστήματος, η μελέτη θα επικεντρωθεί στο διπλό ψαλίδι A-Arm το οποίο είναι και το βασικό εξάρτημα που θα υποστεί μελέτη βελτιστοποίησης.

3.1.1 Αποτελέσματα Καταπόνησης Κατά την Στατική Φόρτιση

Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 31, 32), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με χρωματική αναπαράσταση και στο Διπλό Ψαλίδι A-Arm (Εικόνα 32) αλλά και στο συνολικό σύστημα Telelever (Εικόνα 31) σε στατική φόρτιση.



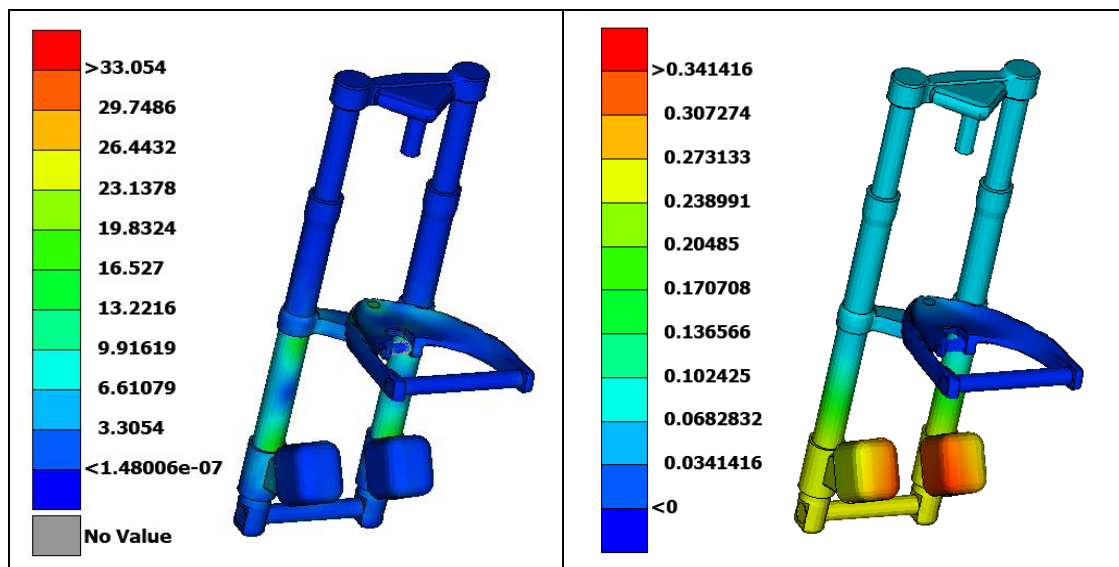
Εικόνα 32 : Κατανομή τάσεων(αριστερά) και μετατοπίσεων(δεξιά) στο συνολικό σύστημα σε στατική φόρτιση.



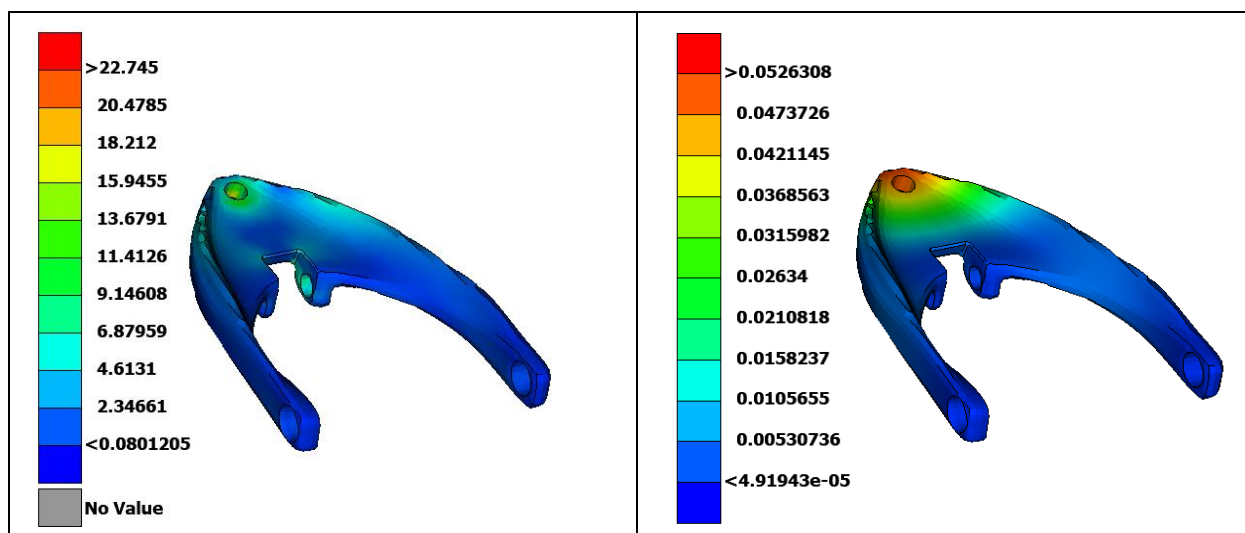
Εικόνα 33 : Κατανομή τάσεων(αριστερά) και μετατοπίσεων(δεξιά) στο διπλό ψαλίδι σε στατική φόρτιση.

3.1.2 Αποτελέσματα Καταπόνησης Κατά την Ακραία Πέδηση

Σε αυτή την υποενότητα, παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα με χρωματική αναπαράσταση στο διπλό ψαλίδι A-Arm (Εικόνα 34) αλλά και στο συνολικό σύστημα Telelever (Εικόνα 33) για την περίπτωση της ακραίας πέδησης.



Εικόνα 34 : Κατανομή τάσεων(αριστερά) και μετατοπίσεων(δεξιά) στο συνολικό σύστημα σε ακραία πέδηση.



Εικόνα 35 : Κατανομή τάσεων(αριστερά) και μετατοπίσεων(δεξιά) στο διπλό ψαλίδι σε ακραία πέδηση.

3.1.3 Αριθμητικές Τιμές Αποτελεσμάτων

Από την εξαγωγή αποτελεσμάτων του μετά-επεξεργαστή, πέραν των χρωματικών αναπαραστάσεων προκύπτουν και οι αριθμητικές τιμές που εκφράζουν τα φορτία που ασκούνται και τις μετατοπίσεις που επιφέρουν στο υλικό μέσω της καταπόνησης. Η κλίμακα που αναλογεί σε κάθε ένα από τα αποτελέσματα κυμαίνεται αναλογικά, ξεκινώντας από κάτω με τις μικρότερες τιμές και καταλήγοντας στο πάνω μέρος με την μεγαλύτερη τιμή η οποία εκφράζει ένα όριο τιμής, το οποίο ξεπερνάνε τα σημεία με την συγκεκριμένη αντιστοιχία.

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των αποτελεσμάτων για το συνολικό σύστημα και για το ψαλίδι:

	ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ		ΑΚΡΑΙΑ ΠΕΔΗΣΗ	
	Ψαλίδι A-ARM	Συνολικό Σύστημα	Ψαλίδι A-ARM	Συνολικό Σύστημα
Μέγιστη Τάση (MPa)	7.44	11.79	22.75	33.05
Μέγιστη Μετατόπιση (mm)	0.025	0.056	0.05	0.34

Πίνακας 2 : Μέγιστες τιμές τάσεων και μετατοπίσεων του Αρχικού Μοντέλου.

Κεφάλαιο 4

Επανασχεδιασμός Ψαλιδιού

4.1 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Όπως μπορούμε να διακρίνουμε και από τις χρωματικές αναπαραστάσεις των αποτελεσμάτων για την στατική φόρτιση, οι ως επί των πλείστων επιφάνειες δέχονται φορτία της τάξεων του 1MPa έως 8.25MPa και το ψαλίδι στο εμπρόσθιο τμήμα του στο κάτω μέρος δέχεται δυνάμεις από 7.44MPa και πάνω. Στην περίπτωση πέδησης από 3.31MPa έως 29.75MPa στα περισσότερα σημεία και στο σημείο που το ψαλίδι φέρει την βάση του άξονα σύνδεσης του με το αμορτισέρ έχουμε δυνάμεις 22.7MPa και πάνω.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, στο ψαλίδι έχουμε κατά την στατική φόρτιση με 7.44MPa, ποσοστιαία τιμή της τάξεως του 32.70% της ακραίας πέδησης με τιμή 22.75MPa. Επίσης η μέγιστη μετατόπιση από 0.025mm (στατική φόρτιση) αυξάνεται 0.025mm και φτάνει στην ακραία πέδηση τα 0.05mm.

Με υλικό κατασκευής το κράμα αλουμινίου-ψευδαργύρου 7075-T6, το ψαλίδι A-ARM με βάση τα φορτία που δέχεται κατά τις δύο παραπάνω περιπτώσεις, απέχει αρκετά από το όριο διαρροής του υλικού το οποίο είναι ίσο με 503MPa, δηλαδή μπορεί να αντέξει εφελκιστική τάση μέχρι τα 503MPa χωρίς να παραμορφωθεί η γεωμετρία του τεμαχίου. Μετά από αυτό το όριο το τεμάχιο αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά μέχρι να έρθει σε θραύση το όριο της οποίας είναι 572MPa [16, 17].

Επομένως συμπεραίνουμε ότι, αφού η μέγιστη καταπόνηση του ψαλιδιού είναι πολύ μικρή σε σχέση με το όριο διαρροής του προς μελέτη υλικού δεν δημιουργούνται προβλήματα δομικής ασφάλειας και ικανοποιούνται οι απαιτήσεις αντοχής υλικού.

4.1.1 Μοντέλα Επανασχεδιασμού

Με το πέρας της εξαγωγής αποτελεσμάτων και με βάση την κατανομή τάσεων επανασχεδιάστηκε το ψαλίδι του συστήματος Telelever. Από τις χρωματικές αναπαραστάσεις των τάσεων παρατηρούμε ότι αρκετά φορτία συγκεντρώνονται στην περιφερειακή επιφάνεια του ψαλιδιού αλλά και στα σημεία σύνδεσης με την ανάρτηση και το Ball Joint. Με βάση την διαπίστωση αυτή, δεν αφαιρούμε υλικό κατά τον επανασχεδιασμό στις περιφερειακές επιφάνειες του ψαλιδιού για την διατήρηση την δομικής του ακεραιότητας και εστιάζουμε στην αφαίρεση υλικού σε επιφάνειες που καταπονούνται λιγότερο από κοινού και στις δύο περιπτώσεις.

Ακολουθούν με βάση τα προηγούμενα αποτελέσματα, δύο επανασχεδιασμοί του ψαλιδιού, ώστε να επιτευχθεί ένα νέο ψαλίδι με μειωμένο βάρος που παράλληλα θα είναι εφικτή η κατασκευή του με κλασικές μεθόδους παραγωγής.

➤ **1^{ος} Επανασχεδιασμός Ψαλιδιού A-ARM :**

Στην πρώτη περίπτωση επανασχεδιασμού, αφαιρέθηκαν δύο ισόμερη κομμάτια υλικού από το κεντρικό σημείο του ψαλιδιού, μεταξύ της σύνδεσης του με το αμορτισέρ και της σύνδεσης του με το Ball Joint. Τα κενά που δημιουργούνται από την αφαίρεση υλικού, κατασκευάστηκαν με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να μας δίνουν την δυνατότητα επιλογής παραγωγής του ψαλιδιού.

Ο κατασκευαστής σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να επιλέξει μεταξύ των μεθόδων: 1) Χύτευσης μετάλλου σε καλούπι, 2) Χύτευσης μετάλλου σε καλούπι (στην μορφή πριν την αφαίρεση υλικού) και ακολούθως φρεζάρισμα των οπών από εργαλειομηχανή τύπου CNC και 3) 3D (τριδιάστατη) εκτύπωση μετάλλου. Η επιλογή μεθόδου ή συνδυασμού μεθόδων, προκύπτει από την γραμμή παραγωγής αφού ταξινομήσει την σημαντικότητα παραγόντων όπως είναι για παράδειγμα το κόστος παραγωγής και ο χρόνος κατεργασίας.



Εικόνα 36 : Ο πρώτος επανασχεδιασμός στο Fusion 360.

➤ **2^{ος} Επανασχεδιασμός Ψαλιδιού A-ARM :**

Ο δεύτερος επανασχεδιασμός του ψαλιδιού φέρει μια μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, αφού στόχος ήταν η μείωση ακόμη περισσότερου υλικού από τον πρώτο επανασχεδιασμό, διατηρώντας παράλληλα την δομική ακεραιότητα του ψαλιδιού. Για αυτό τον λόγο, αφαιρέθηκε υλικό από τρεις μεγάλες οπές στο διάστημα μεταξύ της στήριξης με το αμορτισέρ και της στήριξης με το Ball Joint, δύο μικρότερες δεξιά και αριστερά από το σημείο τοποθέτησης του άξονα σύνδεσης με το αμορτισέρ και δύο στο περιφερειακό διάστημα μεταξύ του άξονα στήριξης του αμορτισέρ και του άξονα σύνδεσης με τον σκελετό.

Οι ιδανικοί τρόποι παραγωγής για αυτό τον σχεδιασμό ψαλιδιού είναι: 1) η χύτευση μετάλλου σε καλούπι και 2) η 3D (τρισεδιάστατη) εκτύπωση μετάλλου.



Εικόνα 37 : Ο δεύτερος επανασχεδιασμός στο Fusion 360.

4.2 Αποτελέσματα Επανασχεδιασμού

Με το πέρας του επανασχεδιασμού, το κάθε ένα από τα δύο ψαλίδια χρησιμοποιήθηκε ξεχωριστά για να γίνει εξ ολοκλήρου συναρμολόγηση στο Fusion360. Έπειτα, αφού πραγματοποιήθηκε η συναρμολόγηση όλων των εξαρτημάτων που απαρτίζει το σύστημα Telelever, ακολουθεί η ίδια διαδικασία βημάτων όπως και στο κεφάλαιο 2 για την μοντελοποίηση και ανάλυση του συστήματος στο προ-επεξεργαστή. Στην συνέχεια εισάγεται το αρχείο επιλυτή για κάθε ένα από τα επανασχεδιασμένα μοντέλα στον μέτα-επεξεργαστή και εξάγονται εκ νέου αποτελέσματα.

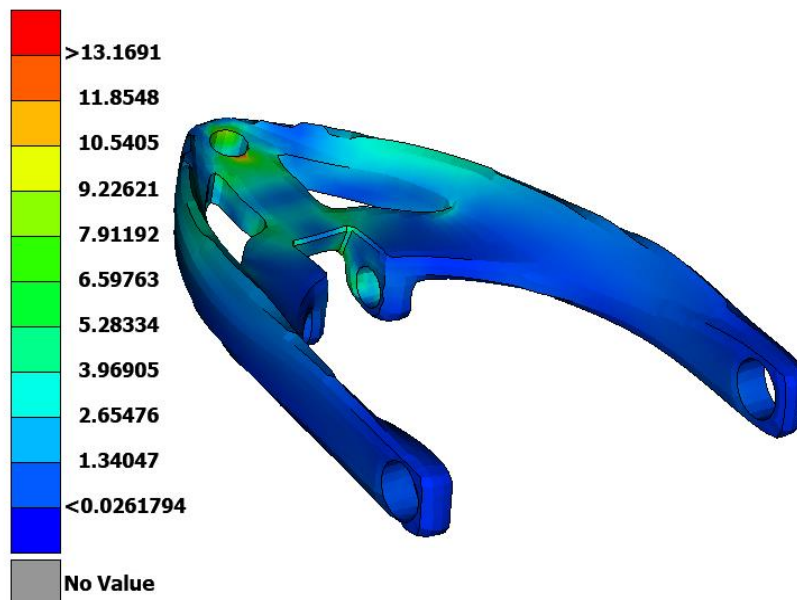
Από τα αποτελέσματα αυτά, βασικές μας προϋποθέσεις ώστε ο επανασχεδιασμός να κριθεί ικανοποιητικός είναι το βάρος του ψαλιδιού να μειωθεί και οι τάσεις να μην υπερβαίνουν τα όρια διαρροής του υλικού.

Σε επόμενη υποενότητα θα αναλυθούν όλες οι τάσεις και οι μάζες που έχει το ψαλίδι πριν και μετά τον κάθε επανασχεδιασμό ούτως ώστε να συγκριθούν μεταξύ τους. Με αυτό τον τρόπο θα συμπεράνουμε την βαρύτητα του ρόλου του επανασχεδιασμού σε παραγωγικό επίπεδο και γενικότερα σε επίπεδο βιομηχανίας.

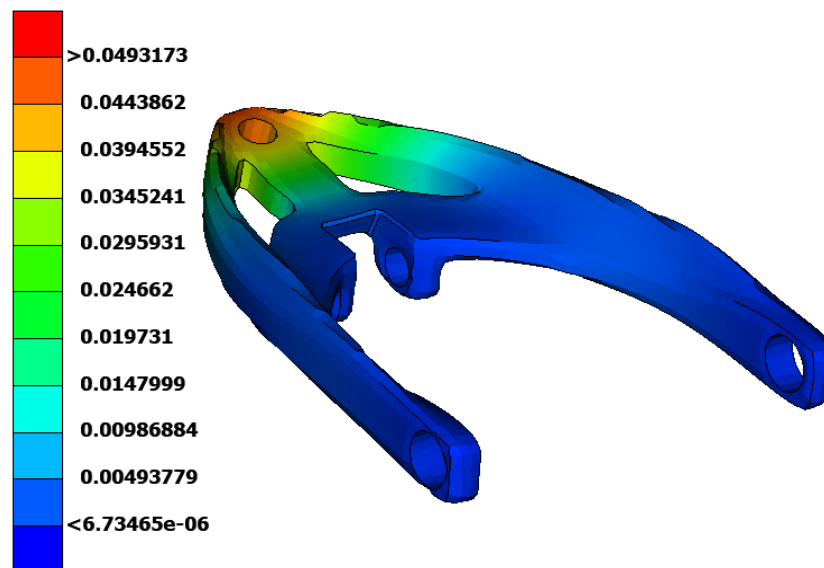
4.2.1 Αποτελέσματα 1^{ου} Επανασχεδιασμού

Αφού ολοκληρώθηκαν όλα τα βήματα της μοντελοποίησης, με τις των ίδιο αριθμό δυνάμεων σε στατική φόρτιση ($F = 1416.86\text{N}$) και σε πέδηση ($F = 3048.98\text{N}$), ο μετά επεξεργαστής μας δίνει τις εξής χρωματικές αναπαραστάσεις αποτελεσμάτων για τον πρώτο επανασχεδιασμό:

➤ Στατική Φόρτιση Ψαλιδιού A-ARM (Επανασχεδιασμός 1^{ος}) :

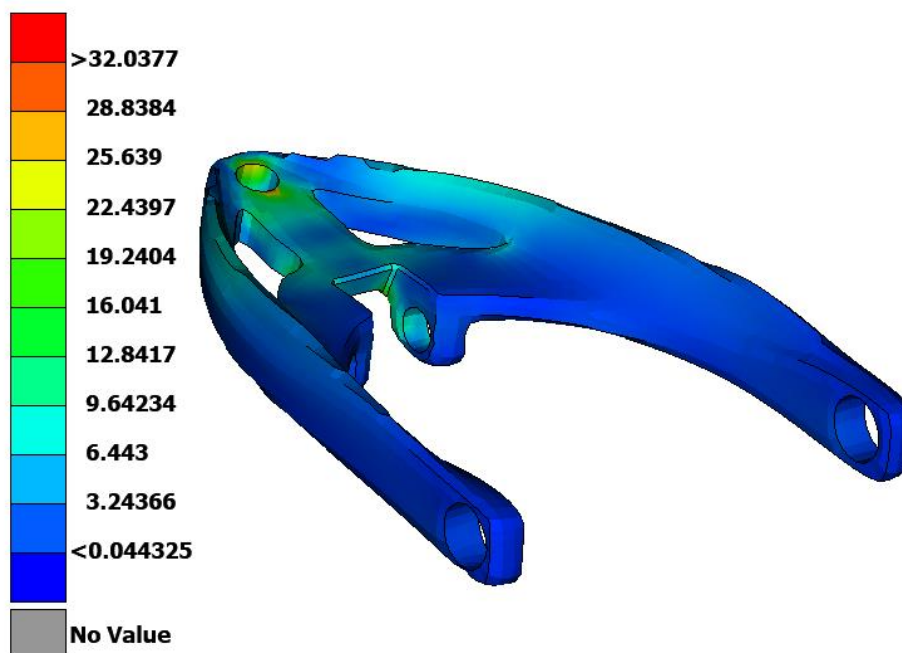


Εικόνα 38 : Αποτελέσματα Τάσεων Στατικής Φόρτισης (Επανασχεδιασμός 1^{ος}).

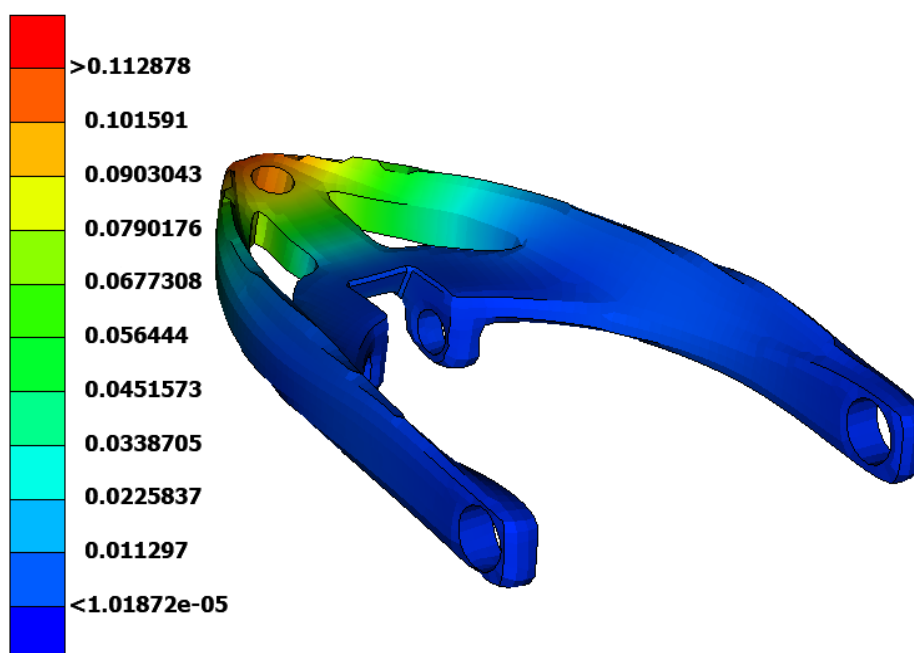


Εικόνα 39 : Αποτελέσματα Μετατοπίσεων Στατικής Φόρτισης (Επανασχεδιασμός 1^{ος}).

➤ Ακραία Πέδηση Ψαλιδιού A-ARM (Επανασχεδιασμός 1^{ος}) :



Εικόνα 40: Αποτελέσματα Τάσεων Ακραίας Πέδησης (Επανασχεδιασμός 1^{ος}).

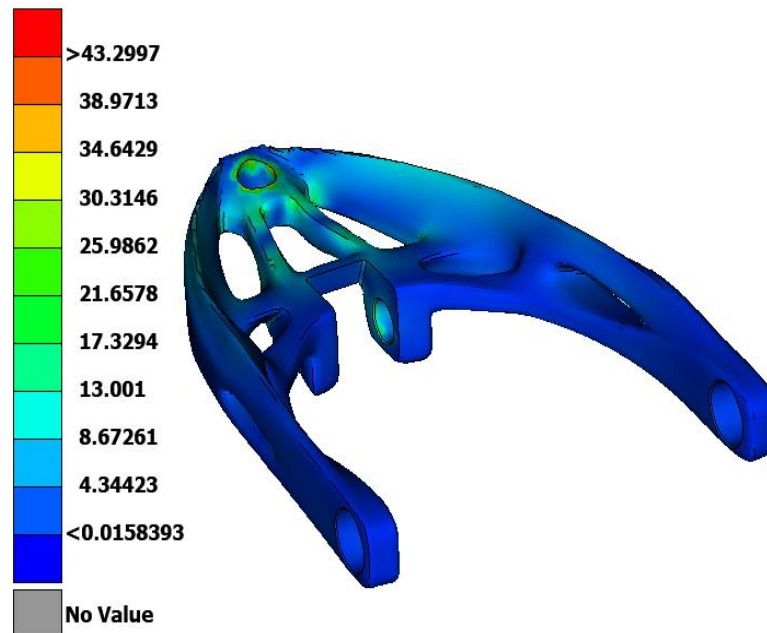


Εικόνα 41: Αποτελέσματα Μετατοπίσεων Ακραίας Πέδησης (Επανασχεδιασμός 1^{ος}).

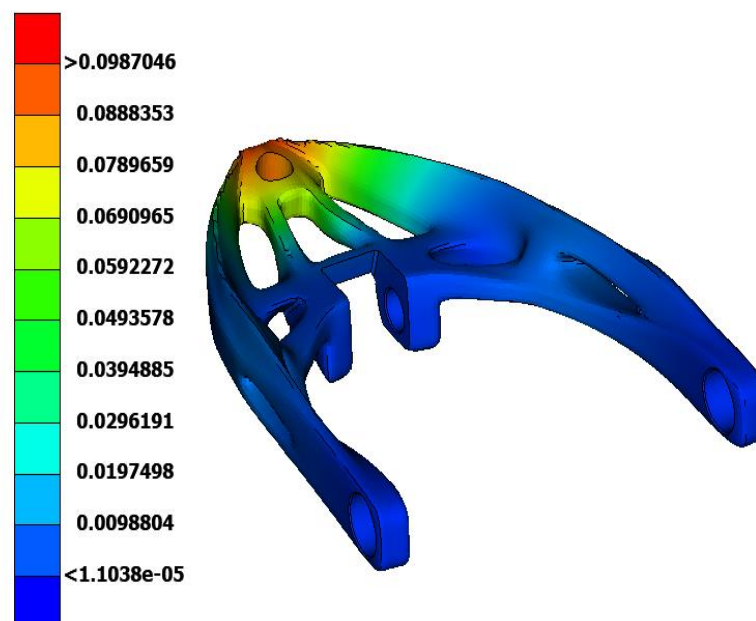
4.2.2 Αποτελέσματα 2^{ου} Επανασχεδιασμού

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο έχουν εξαχθεί και τα παρακάτω αποτελέσματα για τον δεύτερο επανασχεδιασμό του ψαλιδιού, ακολουθώντας τα ίδια βήματα μοντελοποίησης.

➤ Στατική Φόρτιση Ψαλιδιού A-ARM (Επανασχεδιασμός 2^{ος}) :

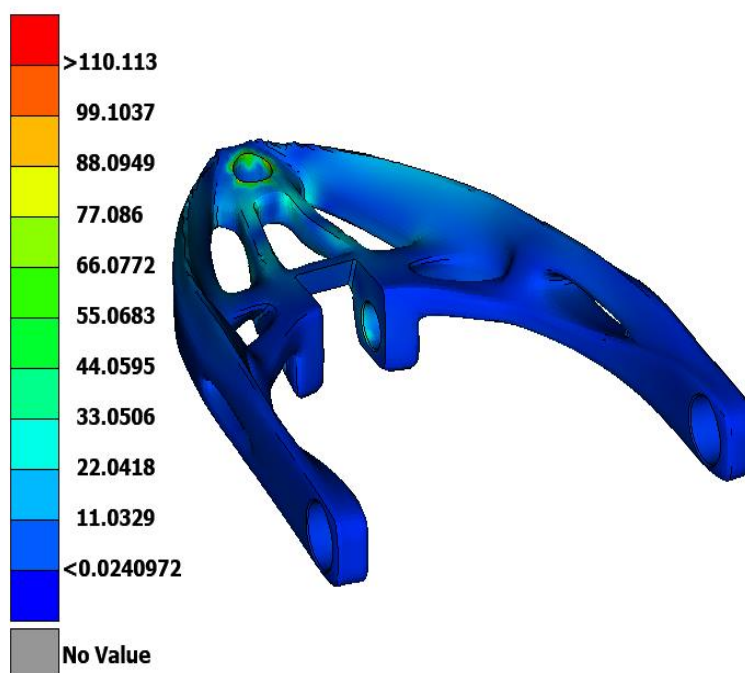


Εικόνα 42 : Αποτελέσματα Τάσεων Στατικής Φόρτισης (Επανασχεδιασμός 2^{ος}).

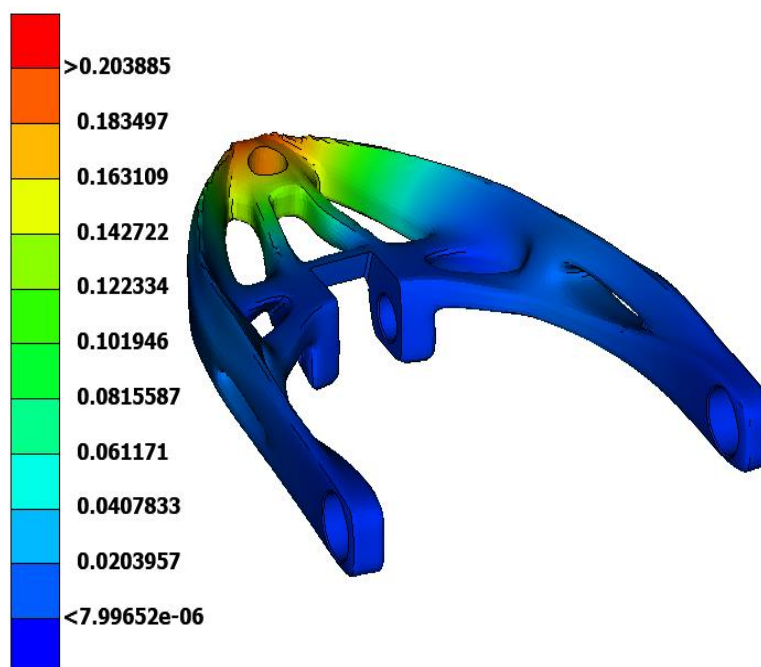


Εικόνα 43 : Αποτελέσματα Μετατοπίσεων Στατικής Φόρτισης (Επανασχεδιασμός 2^{ος}).

➤ Ακραία Πέδηση Ψαλιδιού A-ARM (Επανασχεδιασμός 2^{ος}) :



Εικόνα 44 : Αποτελέσματα Τάσεων Ακραίας Πέδησης (Επανασχεδιασμός 2^{ος}).

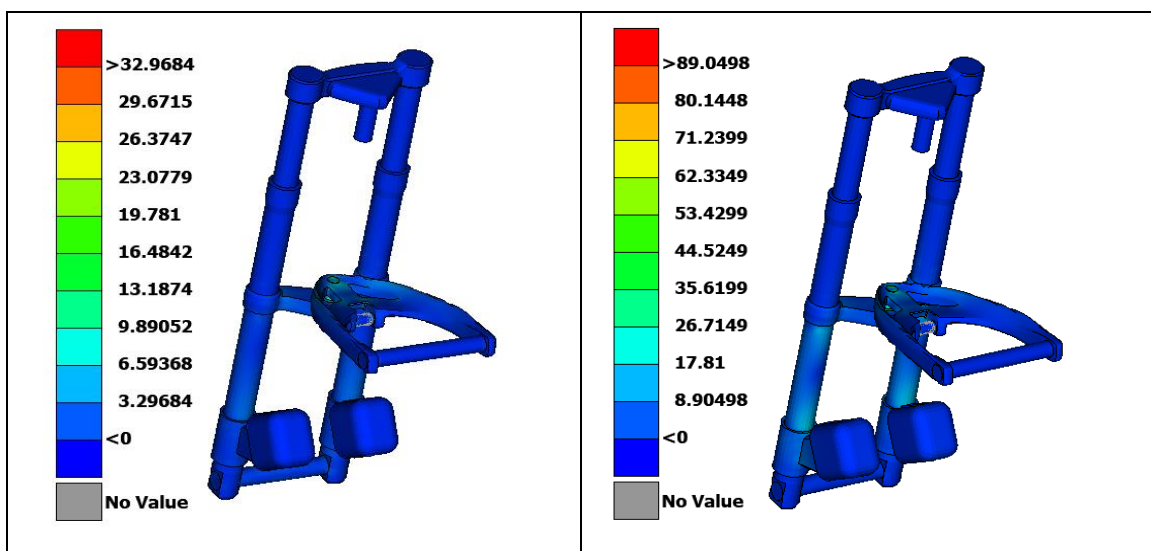


Εικόνα 45 : Αποτελέσματα Μετατοπίσεων Ακραίας Πέδησης (Επανασχεδιασμός 2^{ος}).

4.2.3 Αποτελέσματα Συνολικού Συστήματος

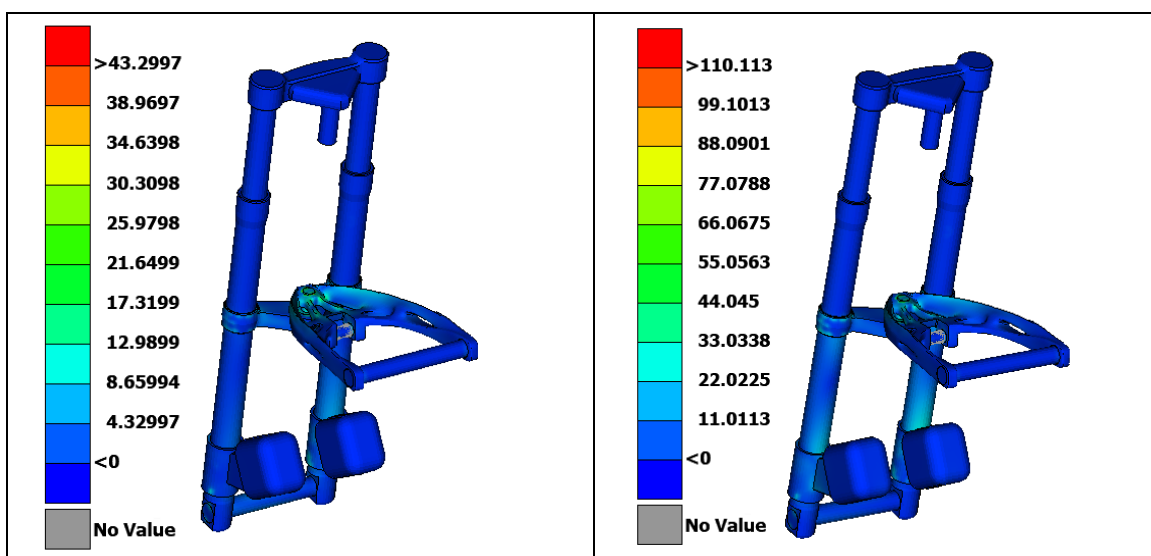
Σε αυτή την υποενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των τάσεων που πήραμε από τον μέτα-επεξεργαστή για τις δύο περιπτώσεις επανασχεδιασμένου ψαλιδιού στο συνολικό σύστημα. Τα αποτελέσματα του συνολικού συστήματος είναι σημαντικά, γιατί μπορεί το ψαλίδι σε αυτές τις συνθήκες που εξετάζουμε να μην υπερβαίνει το όριο διαρροής, αλλά αυτό πρέπει να ισχύει και στα υπόλοιπα εξαρτήματα που απαρτίζουν το σύστημα ανάρτησης Telelever.

➤ Συνολικό σύστημα (επανασχεδιασμός 1^{ος}) :



Εικόνα 46: Αποτελέσματα συνολικού συστήματος σε στατική φόρτιση (αριστερά) και ακραία πέδηση (δεξιά) στον 1^ο Επανασχεδιασμό.

➤ Συνολικό σύστημα (επανασχεδιασμός 2^{ος}) :



Εικόνα 47: Αποτελέσματα συνολικού συστήματος σε στατική φόρτιση (αριστερά) και ακραία πέδηση (δεξιά) στον 2^ο Επανασχεδιασμό.

4.3 Αριθμητικές Τιμές Επανασχεδιασμού

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των τάσεων στα επανασχεδιασμένα ψαλίδια, αλλά και στα δύο συνολικά συστήματα :

	Επανασχεδιασμός 1 ^{ος}		Επανασχεδιασμός 2 ^{ος}	
	Στατική Φόρτιση	Ακραία Πέδηση	Στατική Φόρτιση	Ακραία Πέδηση
Μέγιστη Τάση (MPa)	13.17	0.049	43.30	110.11
Μέγιστη Μετατόπιση (mm)	32.04	0.12	0.099	0.20

Πίνακας 3 : Μέγιστες τιμές τάσεων και μετατοπίσεων του Ψαλιδιού για τους δύο επανασχεδιασμούς.

	Επανασχεδιασμός 1 ^{ος}		Επανασχεδιασμός 2 ^{ος}	
	Στατική Φόρτιση	Ακραία Πέδηση	Στατική Φόρτιση	Ακραία Πέδηση
Μέγιστη Τάση (MPa)	32.97	89.05	43.30	110.11

Πίνακας 4 : Μέγιστες τιμές τάσεων του Συνολικού Συστήματος για τους δύο επανασχεδιασμούς.

4.4 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Συνοψίζοντας τα προηγούμενα αποτελέσματα που πήραμε από τον μετα-επεξεργαστή, θα δούμε σε συνδυασμό με αυτά τις τιμές της μάζας του Ψαλιδιού πριν τον επανασχεδιασμό και μετά από τους δύο επανασχεδιασμούς.

	Αρχικό Μοντέλο		1 ^{ος} Επανασχεδιασμός		2 ^{ος} Επανασχεδιασμός	
	Στατική Φόρτιση	Ακραία Πέδηση	Στατική Φόρτιση	Ακραία Πέδηση	Στατική Φόρτιση	Ακραία Πέδηση
Μέγιστη Τάση (MPa)	7.44	22.75	13.17	0.049	43.30	110.11
Μέγιστη Μετατόπιση (mm)	0.025	0.05	32.04	0.12	0.099	0.20

Πίνακας 5 : Μέγιστες τιμές τάσεων και μετατοπίσεων του Ψαλιδιού για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζουμε.

	Αρχικό Μοντέλο		1 ^{ος} Επανασχεδιασμός	2 ^{ος} Επανασχεδιασμός
Μάζα Ψαλιδιού (Kg)	<u>3.91Kg</u>		<u>3.41Kg</u>	<u>3.08Kg</u>

Πίνακας 6 : Η μάζα ψαλιδιού σε κάθε μία από τις περιπτώσεις.

Από τα συνολικά αποτελέσματα παρατηρούμε ότι η μέγιστη τάση που δέχεται το ψαλίδι είναι τα 110.11MPa (Εικόνα 44) στην περίπτωση του 2^{ου} επανασχεδιασμού στην ακραία πέδηση. Η μικρότερη τάση που δέχεται είναι 7.44MPa (Εικόνα 33) στην αρχική μορφή του ψαλιδιού και στην περίπτωση της στατικής φόρτισης.

Βασικό ζητούμενο, είναι η μείωση της αρχικής μάζας του ψαλιδιού, αφού αρχικά αυτό θα μειώσει το συνολικό υλικό που απαιτείται σε μια γραμμή παραγωγής του ψαλιδιού A-ARM και παράλληλα θα μειώσει, έστω και κατά ένα μικρό ποσοστό, το συνολικό βάρος της μοτοσυκλέτας στην οποία εφαρμόζεται. Στην αρχική μορφή του ψαλιδιού έχουμε βάρος ίσο με 3.91Kg, στον πρώτο επανασχεδιασμό 3.41Kg και στον δεύτερο επανασχεδιασμό 3.08Kg.

Όπως έχει προαναφερθεί με βάση την υποενότητα 2.3.3 της μοντελοποίησης υλικών, υλικό κατασκευής είναι το κράμα αλουμινίου-ψευδαργύρου 7075-T6 για το ψαλίδι και με βάση τα φορτία που δέχεται κατά τις δύο παραπάνω περιπτώσεις, απέχει αρκετά από το όριο διαρροής του υλικού το οποίο είναι ίσο με 503Mpa.

Επιπλέον μας ενδιαφέρει η κατεργασιμότητα που δέχεται το υλικό και η ευκολία χύτευση του υλικού, καθώς από τους πιθανούς τρόπους κατασκευής του ψαλιδιού της ενότητας 4.1.1 ο πιο σύνηθες είναι η χύτευση. Για μαζική παραγωγή η 3D Εκτύπωση δεν ενδείκνυται, καθώς είναι αρκετά πιο αργή μέθοδος από τις άλλες δύο για την κατασκευή πολλών τεμαχίων και οι ιδιότητες του υλικού δεν είναι πάντα ίδιες με εκείνες των παραδοσιακών μεθόδων, ειδικά σε μεταλλικά υλικά [19, 27]. Αντιθέτως, η χύτευση μόλις δημιουργηθεί το καλούπι (το οποίο απαιτεί χρόνο και κόστος), είναι εξαιρετικά γρήγορη για την κατασκευή μεγάλου αριθμού τεμαχίων.

Τέλος, παρατηρώντας τα αποτελέσματα μείωσης του βάρους του ψαλιδιού διαπιστώνουμε τα εξής:

- 1) Το βάρος του 1^{ου} Επανασχεδιασμού μειώθηκε κατά **12.69%** από το αρχικό βάρος. (Από 3.91Kg σε 3.41Kg)
- 2) Το βάρος του 2^{ου} Επανασχεδιασμού μειώθηκε κατά **21.17%** από το αρχικό βάρος. (Από 3.91Kg σε 3.08Kg)

Επομένως, με βάση την μεγαλύτερη μείωση βάρους που έχει ο 2^{ος} επανασχεδιασμός έναντι του 1^{ου}, η βέλτιστη επιλογή επανασχεδιασμού στην παρούσα εργασία θεωρείται η δεύτερη. Η κατασκευή του ψαλιδιού κατά τον 2^ο επανασχεδιασμό μπορεί να έχει μια αρκετά μεγαλύτερη πολυπλοκότητα αλλά το ποσοστό μείωσης βάρους κατά **21.17%** που επιτυγχάνει, κρίνεται ως μια αρκετά σημαντική μείωση, η οποία σε μια γραμμή παραγωγής μεγάλου αριθμού κομματιών μπορεί να αποφέρει αξιοσημείωτη εξοικονόμηση υλικού.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

5.1 Ανακεφαλαίωση και Τελικά Αποτελέσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, η παρούσα εργασία αποσκοπούσε στην μελέτη αντοχής του εμπρόσθιου συστήματος ανάρτησης τύπου Telelever σε πρώτο στάδιο και κατόπιν στον επανασχεδιασμό του ψαλιδιού A-ARM ως βασικό τμήμα που απαρτίζει το σύστημα. Βασικός στόχος, είναι η μείωση του βάρους του ψαλιδιού, μέσα από τον επανασχεδιασμό, διατηρώντας όμως παράλληλα την δομική του ασφάλεια και ικανοποιώντας τις όποιες απαιτήσεις αντοχής έχει.

Σχεδιάζοντας τα εξαρτήματα που απαρτίζουν το συνολικό σύστημα Telelever και συνθέτοντας τα μεταξύ τους (Συναρμολόγηση) στο πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης, μελετήθηκαν δύο σενάρια φόρτισης : α) με καταπόνηση μόνο από τα φορτία λόγω του αναρτώμενου βάρους και του οδηγού και β) με την καταπόνηση του εμπρόσθιου συστήματος κατά την ακραία περίπτωση πέδησης της μοτοσυκλέτας με χρήση μόνο του εμπρόσθιου φρένου, δηλαδή στο σημείο πριν την ανύψωση του πίσω τροχού. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε με βάση την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων από το εξειδικευμένο λογισμικό ANSA v24.0.1 και τα αποτελέσματα από την ανάλυση δόθηκαν από το λογισμικό META v24.0.1. Με βάση τα αποτελέσματα πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί επανασχεδιασμοί μόνο στο ψαλίδι, με στόχο την αφαίρεση υλικού και παράλληλα εστιάζοντας σε τρόπους κατασκευής όπως είναι κυρίως χύτευση ή και κατεργασία CNC.

Ολοκληρώνοντας τα παραπάνω βήματα, επιτεύχθηκε μια μείωση του βάρους του αρχικού ψαλιδιού από 3.91Kg σε 3.08Kg (Πίνακας 6), δηλαδή μία μείωση της τάξεως του 21.17% του αρχικού βάρους. Αυτό το αποτέλεσμα σε μαζική παραγωγή μπορεί να αποφέρει σημαντική μείωση του συνολικού υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του ψαλιδιού αλλά και στη μείωση του συνολικού βάρους της μοτοσυκλέτας, με οφέλη στην οδήγηση της.

5.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Με την παρούσα εργασία έγινε το πρώτο βήμα για την μερική κατανόηση κάποιων χαρακτηριστικών του συστήματος εμπρόσθιας ανάρτησης τύπου Telelever. Με τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, εξετάστηκε ένα μικρό φάσμα στον επανασχεδιασμό και την μοντελοποίηση του ψαλιδιού.

Σε επόμενο στάδιο θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μία δυναμική ανάλυση του εμπρόσθιου συστήματος η οποία θα αποσκοπούσε στην κατανόηση της παθητικής ασφάλειας στις μοτοσυκλέτες και πως το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να αξιοποιηθεί ώστε να αποτελέσει υπόβαθρο μελέτης και εφαρμογής του θέματος αυτού. Θα μπορούσε δηλαδή, να εξεταστεί η απόδοση του συστήματος υπό συνθήκες σύγκρουσης, προκειμένου να αξιολογηθούν οι μηχανικές του ιδιότητες και η αντοχή του σε ακραία φορτία.

Μια πιο συγκεκριμένη προσέγγιση του θέματος θα μπορούσε να είναι η μελέτη Μετωπικής Πρόσκρουσης. Σε αυτή την περίπτωση, η εργασία θα πρέπει να διερευνήσει την επίδραση των υλικών κατασκευής, όπως τα κράματα αλουμινίου και ο χάλυβας, καθώς και τον ρόλο της γεωμετρίας του συστήματος στην προστασία του πλαισίου και του οδηγού. Τα ευρήματα μπορούν να προσφέρουν σημαντικές γνώσεις για τη βελτίωση της ασφάλειας και την ανθεκτικότητα του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες ατυχήματος.

Βιβλιογραφία

- [1] D. Croccolo και M. De Agostinis, *Motorbike Suspensions Modern Design and Optimization*, Bologna, Italy: Springer, 2013.
- [2] Ευάγγελος Δ. Χρήστενας, «Μελέτη αντοχής και τοπολογική βελτιστοποίηση εμπρόσθιου ψαλιδιού ηλεκτρικής μοτοσυκλέτας», Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2020.
- [3] Ευάγγελος Σμαραγδής, «Μελέτη Αντοχής και Επανασχεδιασμός Τμημάτων Εμπρόσθιας Ανάρτησης Μοτοσυκλέτα», Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2024.
- [4] Μπαρδάκης Ιωάννης, «Εναλλακτικό Σύστημα Εμπρός Ανάρτησης Μοτοσυκλέτας», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013.
- [5] M. Keane, Interviewee, *History of Motorcycle Suspension*, [Συνέντευξη], 2023.
- [6] Foale T., *Motorcycle Handling & Chassis Design: The Art and science*, Spain, 2002.
- [7] Vittore Cossalter, *Motorcycle Dynamics*, Lulu Press, 2006.
- [8] Robin S. Sharp, Simos Evangelou and David J. N. Limebeer, «Multibody Aspects of Motorcycle Modelling with Special Reference to Autosim», United Kingdom: SAGE Publications, 2005.
- [9] Μπρούμα Ιωάννα, «Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για γραμμικές ελλειπτικές και παραβολικές διαφορικές εξισώσεις», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2020.
- [10] Μακρής Π., Ψυλάκης Γ., «Μελέτη αντοχής μηχανολογικών κατασκευών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων», Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2015.
- [11] Pär Emanuelsson, Ulf Nilsson, *A Comparative Study of Industrial Static Analysis Tools*, Linköping University, Sweden, 2008.
- [12] Dr. Greg, «Transcription of Calculating Motorcycle Center of Mass», The University of New Mexico, USA, 2015.
- [13] M. Milad, N. Zreiba, F. Elhalouani, C. Baradai, *The effect of cold work on structure and properties of AISI 304 stainless steel*, Amsterdam: Elsevier, 2008.
- [14] Μάνιος Στέφανος, «Πειραματική και Αριθμητική Προσομοίωση Μηχανικής Συμπεριφοράς Στοιχείων Taylor Spatial Frame», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013.
- [15] Μανιός Στέφανος, «Βελτιστοποίηση τοπολογίας πλαισίου δίκυκλου ηλεκτρικού οχήματος», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2018.
- [16] Μπαρμπάρης Ιωάννης, «Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση γεωμετρίας κορυφής ελικοειδούς τρυπανιού με πτερύγια απολήξεων για διάτρηση αλουμινίου 7075 με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων», Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 2024.

- [17] Καναβούτσος Σοφοκλής, «Πιλοτική εφαρμογή και αποτίμηση ελάφρυνσης μηχανολογικών εξαρτημάτων για προσθετική κατασκευή, με συνδυασμό τοπολογικής βελτιστοποίησης και πλεγματικών δομών», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2023.
- [18] Ηλιόπουλος Αναστάσιος, «Μηχανουργικές Κατεργασίες σε Σύνθετα Υλικά και Μελέτη Επίδρασης στις Μηχανικές Ιδιότητες Αυτών», Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2015.
- [19] Gaurav Verma, Autodesk Fusion 360 Black Book: Kogent Learning Solutions Inc., 2018.
- [20] Sandeep Dogra, Autodesk Fusion 360, A Power Guide for Beginners and Intermediate Users, 6th Edition: BPB Publications, 2022.
- [21] BETA CAE Systems S.A. ANSA version 24.1.x User's Guide, BETA CAE Systems S.A publishing, 2024.
- [22] MSC Software, MSC Nastran 2021 - Design Sensitivity and Optimization User's Guide, Hexagon, 2021.
- [23] Cycle World, Διαθέσιμο online: <https://www.cycleworld.com/2019-yamaha-niken-gt-firstride/>
- [24] Motorcycle Braking and Skidmarks, Διαθέσιμο online: <http://mfes.com/motorcyclebraking.html>
- [25] Basileios Mavroudakos, «Analysis of alternative front suspension systems for motorcycles», University of Stuttgart, Germany, 2007.
- [26] N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan, An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications, 2019.
- [27] Liu Changdong, A Multibody Dynamics Model of a Motorcycle with a Multi-Link Front Suspension, University of Windsor, Canada, 2017.
- [28] Ecker, Wassermann, Hauer, Ruspekhofer, Grill, Braking deceleration of motorcycle riders, Germany, Springer, 2001.
- [30] Motofomo, «BMW Telelever, Duolever Work, and EVO Telelever»
Διαθέσιμο online: <https://motofomo.com/bmw-telelever-duolever-evo-telelever/>
- [31] Pierluigi Zampieri, MOTORCYCLE DYNAMICS I, Scuola di Ingegneria E Architettura, Bologna, 2016.
- [32] João R., «Front and Rear Swing Arm Design of an Electric Racing Motorcycle», Técnico Lisboa, Lisbon, 2016.

[33] Cossalter V., Lot R., Maggio F., On the Braking Behavior of Motorcycles, SAE Int., 2004.

ΤΕΛΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ
