



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη Αντοχής και Επανασχεδιασμός Τμημάτων
Εμπρόσθιας Ανάρτησης Μοτοσυκλέτας

Stress Analysis and Redesign of Motorcycle Front Suspension System Components

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΣΜΑΡΑΓΔΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΧΑΝΙΑ 2024

Επιτροπή Εξέτασης

Επιβλέπων:

Δρ. Δοϊτσίδης Ελευθέριος

Επίκουρος Καθηγητής

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης

1^ο Μέλος Επιτροπής:

Δρ. Σπανουδάκης Πολυχρόνης

Ε.Δ.Π

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης

2^ο Μέλος Επιτροπής:

Δρ. Ιψάκης Δημήτριος

Επίκουρος Καθηγητής

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης

Με την ολοκλήρωση αυτής της μελέτης, γράφεται ο επίλογος σε ένα ταξίδι επτά ετών γεμάτο εμπειρίες που θα με συνοδεύουν μια ζωή. Οι σπουδές μου στο τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης αφήσαν ανεξίτηλα σημάδια στην προσωπικότητά μου και ενίσχυσαν την επιθυμία μου να γίνω ένας ανταγωνιστικός επαγγελματίας. Όπως σε κάθε μεγάλη δοκιμασία, υπήρξαν δυσκολίες και αβεβαιότητες. Παρόλα αυτά ένας καλός μηχανικός είναι ικανός να λύσει κάθε είδους πρόβλημα, χωρίς διακρίσεις. Γιατί δεν έχει αξία να γνωρίζεις άρτια μια επιστήμη, αν δε μπορείς να βάλεις τάξη στη ζωή σου. Η δύναμη της θέλησης και οι άνθρωποι που στάθηκαν στο πλευρό μου με βοήθησαν να ξεπεράσω κάθε εμπόδιο μέχρι τον τελικό στόχο του πτυχίου. Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους ακόλουθους φορείς:

- Την εταιρία BETA CAE Systems για την παροχή εξειδικευμένου λογισμικού για την εκπόνηση της μελέτης
- Την εταιρία KMF International Ltd για την παροχή εργαλείων ζυγίσματος ώστε να εξαχθούν πολύτιμα αποτελέσματα
- Την εταιρία Γερανοί Μακρυγιαννάκη γιατί ως εργοδότες μου άφησαν ανοιχτή την πόρτα της ευκαιρίας και χάρη στη συνεργασία μας, μπόρεσα να κάνω ένα σημαντικό βήμα

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και επιβλέποντα της μελέτης κ. Πολυχρόνη Σπανουδάκη για την πολύτιμη βοήθεια του. Ευχαριστώ επίσης όλα τα μέλη της εταιρίας BETA CAE που με βοήθησαν να εξοικειωθώ με το λογισμικό τους, ειδικά τον κ. Markus Herbst. Ακόμη, ευχαριστώ το άτομο εκείνο που με συντροφεύει από την αυγή της φοιτητικής μου ζωής μέχρι σήμερα, γιατί η αγάπη του είναι η κινητήριος δύναμη μου για να εξελίσσομαι. Τελευταίο και σημαντικότερο, ευχαριστώ τους γονείς μου Μιχαήλ και Δέσποινα, για την ανατροφή που μου έδωσαν.

Αφιερώνω την εργασία μου σε κάθε νέο μηχανικό που πιστεύει στον εαυτό του και βγαίνει στο κυνήγι της γνώσης.

Περίληψη

Η συγκεκριμένη εργασία αφορά τη μελέτη αντοχής ενός εμπρόσθιου συστήματος ανάρτησης δίτροχης μοτοσυκλέτας. Σκοπός της εργασίας είναι μέσω επανασχεδιασμού συγκεκριμένων τμημάτων, να προκύψει μια βελτιωμένη έκδοση του συστήματος ως προς το βάρος και την αντοχή. Σε πρώτη φάση πραγματοποιείται ο σχεδιασμός κάθε εξαρτήματος ξεχωριστά, καθώς και η συναρμολόγηση τους σε λογισμικό 3D-σχεδιασμού (CAD). Στη συνέχεια θα γίνει χρήση εξειδικευμένου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (CAE), όπου εφαρμόζονται τα φορτία που του ασκούνται σε πραγματικές συνθήκες και μέσω της προσομοίωσης αξιολογούνται τα αποτελέσματα τάσεων και μετατοπίσεων. Με βάση τα αποτελέσματα τροποποιείται ο σχεδιασμός σε συγκεκριμένα τμήματα με στόχο τη μείωση του βάρους χωρίς να επηρεαστεί η ακαμψία και η αντοχή τους. Ανάλογα με τα ευρήματα του επανασχεδιασμού, θα εξεταστεί η δυνατότητα χρήσης της μεθόδου τοπολογικής βελτιστοποίησης στις προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων. Για τα τελικά αποτελέσματα του επανασχεδιασμού θα ληφθεί υπόψη ο τρόπος και η δυνατότητα παραγωγής των μελετώμενων τμημάτων του συστήματος.

Abstract

The present study is focused on the mechanical stress analysis of a two-wheeled motorcycle front suspension system. The main scope is to redesign specific parts, towards an improved version of the system, considering lower weight and adequate stiffness. Initially, each component is designed separately using a 3D-design software (CAD) and an assembly of the system is developed. As a next step, an advanced Computer Aided Engineering software (CAE) is used to apply forces to the system. Through simulation, the results of stress and displacement at each part of the system are demonstrated and evaluated. Based on the results, some specific components will be modified aiming to reduce their weight without affecting the stiffness. According to the results of the redesign process, the possibility of performing a topology optimization method in the finite element simulations will be considered. As a last step, the manufacturing feasibility of the final components will be evaluated.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Περιγραφή.....	3
1.1 Εμπρόσθια Συστήματα Μοτοσυκλέτας.....	3
1.1.1 Ιστορική πορεία.....	3
1.1.2 Νεότερα μοντέλα αναρτήσεων.....	11
1.1.3 Τηλεσκοπικό σύστημα	16
1.1.4 Ερευνητικές εργασίες σε εμπρόσθια συστήματα.....	20
1.2 Στόχος Εργασίας.....	21
Κεφάλαιο 2: Μοντελοποίηση.....	22
2.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	22
2.1.1 Περιγραφή της μεθόδου.....	22
2.1.2 Θεωρίες αστοχίας.....	24
2.2 Ανάλυση Συστήματος.....	25
2.2.1 Γεωμετρία συστήματος και κατανομή μάζας	25
2.2.2 Φορτίσεις	28
2.3 Μοντελοποίηση Συστήματος.....	30
2.3.1 Δημιουργία πλέγματος.....	30
2.3.2 Μοντελοποίηση συνδέσεων	33
2.3.3 Μοντελοποίηση υλικών.....	36
2.3.4 Μοντελοποίηση περιορισμών.....	37
2.3.5 Μοντελοποίηση δυνάμεων.....	38
2.3.6 Αρχείο επιλυτή	40
Κεφάλαιο 3: Τοπολογική Βελτιστοποίηση.....	41
3.1 Βελτιστοποίηση Κατασκευών	41
3.1.1 Περιγραφή τοπολογικής βελτιστοποίησης	41
3.1.2 Διατύπωση προβλήματος	41

3.2 Εφαρμογή.....	43
3.2.1 Διαδικασία επίλυσης.....	43
3.2.2 Μεταβλητές σχεδιασμού.....	44
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Επανασχεδίαση	45
4.1 Ανάλυση Αρχικού Σχεδίου	45
4.1.1 Στατική φόρτιση.....	45
4.1.2 Πέδηση.....	47
4.1.3 Τοπολογική βελτιστοποίηση τιμονόπλακας	48
4.2 Επανασχεδιασμός Τιμονόπλακας	49
4.2.1 Επανασχεδιασμός	49
4.2.2 Μοντελοποίηση	50
4.3 Αποτελέσματα Επανασχεδιασμού Τιμονόπλακας.....	51
4.3.1 Στατική φόρτιση.....	51
4.3.2 Πέδηση.....	53
4.3.3 Τοπολογική βελτιστοποίηση τριπλής σύνδεσης.....	56
4.4 Επανασχεδιασμός Τριπλής Σύνδεσης	57
4.4.1 Επανασχεδιασμός	57
4.4.2 Μοντελοποίηση	57
4.5 Αποτελέσματα Επανασχεδιασμού Τριπλής Σύνδεσης.....	58
4.5.1 Στατική φόρτιση.....	58
4.5.2 Πέδηση.....	60
4.6 Συμπέρασμα	62
4.7 Σύνοψη Αποτελεσμάτων.....	62
Κεφάλαιο 5: Επίλογος.....	64
5.1 Ανακεφαλαίωση	64
5.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις	65
Βιβλιογραφία	66

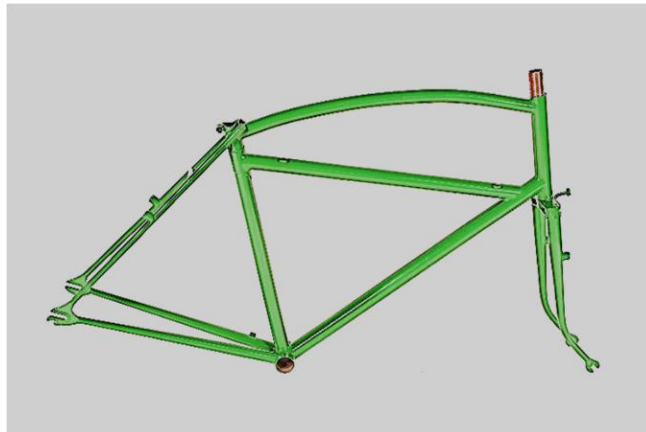
Κεφάλαιο 1: Περιγραφή

1.1 Εμπρόσθια Συστήματα Μοτοσυκλέτας

Η εμπρός ανάρτηση της μοτοσυκλέτας είναι μια μηχανολογική κατασκευή που έχει εμφανιστεί σε διάφορες εκδοχές, με διαφορετική πολυπλοκότητα. Αποτελεί αναμφίβολα ένα τμήμα με τεράστια επιρροή στην κινηματική συμπεριφορά της μοτοσυκλέτας. Αποστολή της είναι να διατηρεί συνεχή επαφή με το οδόστρωμα για να μεγιστοποιήσει το κράτημα, να ανταποκρίνεται στον έλεγχο του αναβάτη με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια, ενώ παράλληλα στοχεύει και στη βελτίωση της ασφάλειας του σε διαφορετικές συνθήκες οδήγησης.

1.1.1 Ιστορική πορεία

Οι πρώτες μοτοσυκλέτες ήταν στην πραγματικότητα ποδήλατα, με πολύ υποτυπώδη στοιχεία μηχανής και μικρούς κινητήρες που μετέδιδαν την κίνηση στον πίσω άξονα συνήθως μέσω κάποιου ιμάντα (ή αλυσίδας) [1]. Για πολλά χρόνια, με βάση αυτό το σχήμα «διαμαντιού» που χαρακτηρίζει το πλαίσιο του ποδηλάτου καθοριζόταν ολόκληρη η διάταξη του σασί, συνεπώς και ο τρόπος που σχεδιάζοταν και χρησιμοποιούνταν το μπροστινό πιρούνι εκατέρωθεν του μπροστινού τροχού.



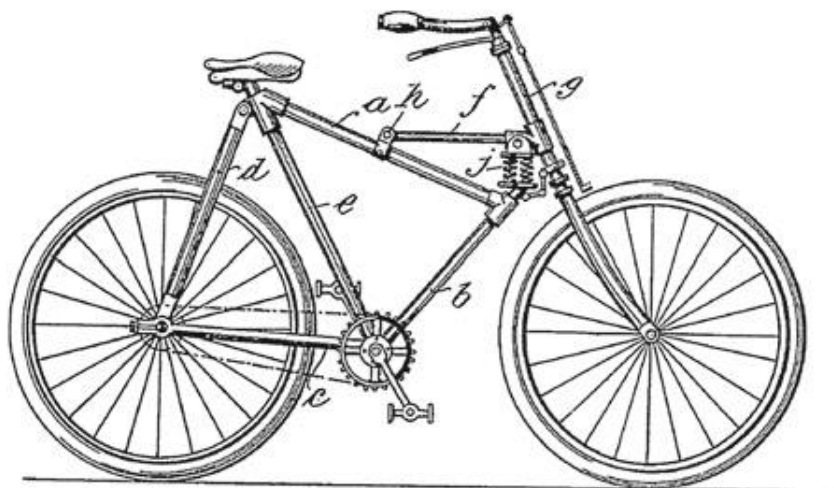
Εικόνα 1: Πλαίσιο ποδηλάτου

Ακολουθώντας τη φιλοσοφία του ποδηλάτου, στις αρχές του 20^{ου} αιώνα τα πρώτο μπροστινό πιρούνι ήταν απλώς ένας συνδυασμός δύο άκαμπτων δοκών που πηγαίνουν από το τιμόνι προς τα κάτω, εκατέρωθεν του τροχού, με τον άξονα του τροχού στερεωμένο στο κάτω μέρος τους. Ουσιαστικά, δεν υφίσταντο η έννοια της ανάρτησης και η οδήγηση ενός τέτοιου οχήματος ήταν ιδιαίτερα άβολη.

Όταν τα ελατήρια έκαναν την πρώτη τους εμφάνιση κατά πρώτες προσπάθειες για επίλυση του προβλήματος των κραδασμών, ήταν τοποθετημένα σε κάποιο άλλο σημείο του πλαισίου και όχι στο πιρούνι. Ένα παράδειγμα τέτοιου εγχειρήματος φαίνεται σε μια μοτοσυκλέτα Harley-Davidson του 1915 (Εικόνα 2), η οποία διέθετε ελατήριο προσαρμοσμένο στη σέλα της. Επιπλέον, μια πατέντα ανάρτησης μοτοσυκλέτας από τις Η.Π.Α. του 1901 (Εικόνα 3) με το ελατήριο στη θέση που φαίνεται παρακάτω εμφάνισε τις πρώτες ενδείξεις καθαρά εμπρόσθιας ανάρτησης.

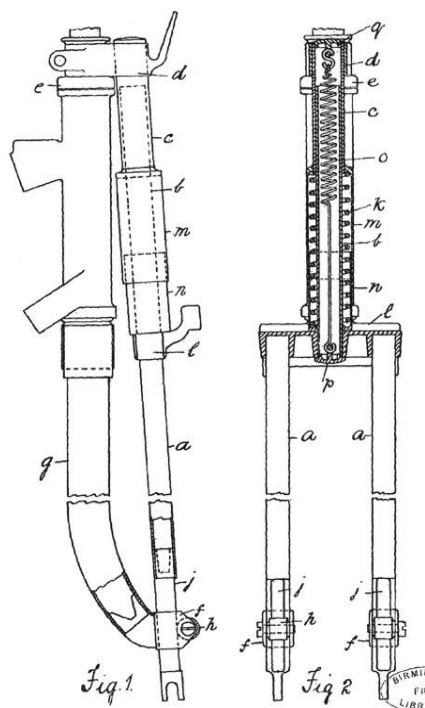


Εικόνα 2: Harley-Davidson του 1915 (πηγή: bikeexif.com)

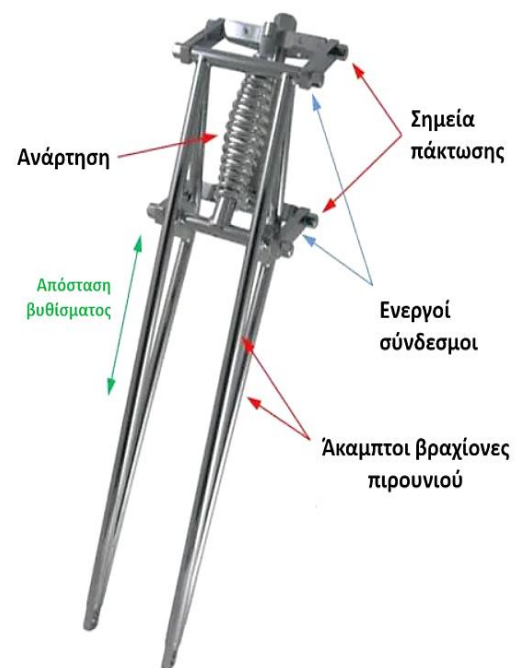


Εικόνα 3: Η πατέντα από τις Η.Π.Α. του 1901 [2]

Τα επόμενα χρόνια θα ακολουθήσουν πιο ολοκληρωμένες εφαρμογές συστημάτων ανάρτησης. Το 1909 παρουσιάζεται στο Ηνωμένο Βασίλειο από τη Scott Motorcycle Company του Alfred Angus Scott ένα σύστημα ενός ελατηρίου προσαρμοσμένου πάνω από τις άκαμπτες δοκούς του πιρουνιού. Το σύστημα φέρει τον μπροστινό τροχό της μοτοσυκλέτας στα κάτω άκρα των δοκών, σχήματος U. Αυτό το σύστημα δε χρησιμοποιήθηκε για πολύ, διότι αποδείχθηκε πως το ελατήριο υπό αυτή τη διάταξη δε μπορούσε να αντιμετωπίσει τους κραδασμούς μιας κοινής διαδρομής, οποιοδήποτε επίπεδο ακαμψίας και να είχε [2]. Το 1907 πρωτοεμφανίζεται το girder, ένα σύστημα στήριξης με δοκούς. Το πιρούνι girder διαθέτει δύο άκαμπτους βραχίονες (uprights), που συνδέονται μεταξύ τους με συνδέσμους (links ή linkages). Συνήθως διαθέτει ένα ελατήριο μεταξύ των συνδέσμων και είναι πακτωμένο στον κορμό της μοτοσυκλέτας.



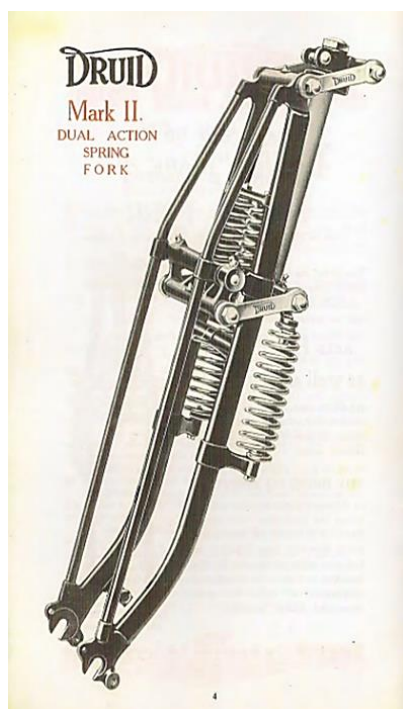
Εικόνα 4: Ανάρτηση A.A. Scott [2]



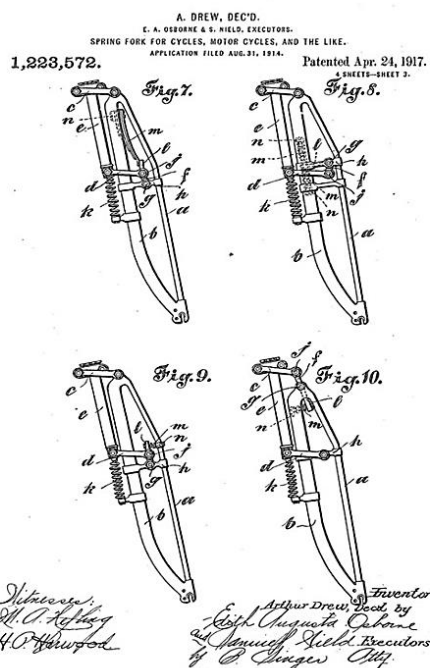
Εικόνα 5: Ανάρτηση Girder
(πηγή: designandbuildingcustommoto.wordpress.com)

Είναι μια περίοδος γενικότερης έξαρσης στην εξέλιξη της μοτοσυκλέτας. Νέες πατέντες για πιο άνετη οδήγηση άνθισαν ταχύτατα και όλες περιστρέφονταν γύρω από το ίδιο κατασκευαστικό μοτίβο. Υπάρχει λοιπόν μια σύγχυση όταν προσπαθούμε να τις τοποθετήσουμε χρονικά. Κάτι αντιστοιχεί συμβαίνει και στη περίπτωση της πατέντας του Druid forks, που πιθανότατα αποτελεί το πρώτο σύστημα παράλληλου τύπου.

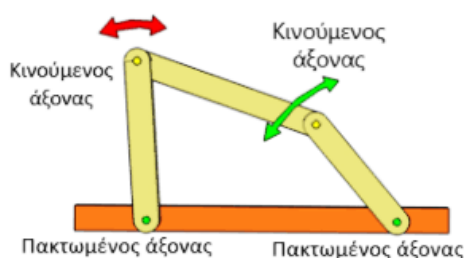
Ο εφευρέτης της ονομαζόταν Arthur Drew και η πατέντα εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1913 σε μοτοσυκλέτα της Ariel Company [1]. Το Druid fork ξεχωρίζει από τα άλλα, λόγω της άρθρωσης στο μπροστινό μέρος και των δύο ελατηρίων στο πίσω μέρος και των δύο ελατηρίων στο πίσω μέρος. Έτσι παρουσιάστηκε επίσημα το σχέδιο το 1917, ενώ σε παραλλαγές του υπήρχαν ελατήρια επαναφοράς (για απόσβεση) [3].



Εικόνα 6: Το Druid fork



Εικόνα 7: Παρουσίαση του Druid fork



Εικόνα 8: Σύστημα Four-Bar Linkage

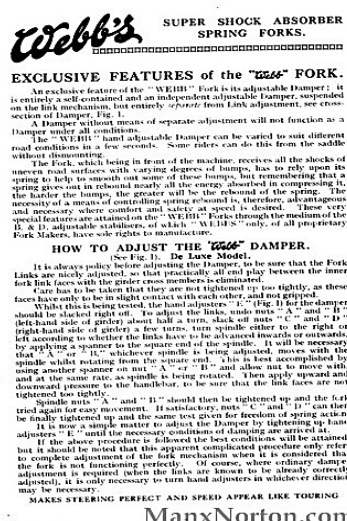
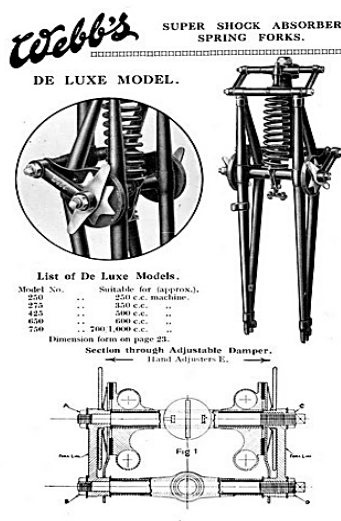
Η σχεδιαστική φιλοσοφία των πρώτων αναρτήσεων μοτοσυκλέτας βασίζεται στο σύστημα «Four-Bar Linkage» (ή αλλιώς «parallelogram linkage»):

- 4 άξονες περιστροφής
- 4 βραχίονες
- 2 σημεία πακτωμένα στο πλαίσιο της μοτοσυκλέτας, 2 σημεία που κινούνται ελεύθερα

Ο εκάστοτε σχεδιαστής μπορεί να μεταβάλλει το μήκος των άνω και κάτω συνδέσμων, την απόσταση και τη γωνία μεταξύ τους έτσι ώστε ανάλογα με τις επιδιώξεις του να κάνει το τροχό να κινείται είτε κάθετα προς το επίπεδο του οδοστρώματος, είτε σε ελαφρά επικλινές επίπεδο ως προς το επίπεδο του οδοστρώματος [17].

Πριν το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, το πιο δημοφιλές στη βρετανική αγορά – που ήταν και η κυρίαρχη – ήταν το πιρούνι Webb που ήταν κατασκευασμένο στα πρότυπα του girder που παρουσιάστηκε παραπάνω (Εικόνα 5). Συγκριτικά με το Druid, το Webb πλεονεκτούσε στην απόσβεση περιστροφικών τριβών και στην προοδευτική συμπίεση χάρη στο κωνικό σπειροειδές ελατήριο που διέθετε. Μόλις διαδόθηκε η εν λόγω πατέντα, το βασικό σχέδιο Webb υιοθέτησαν κι άλλοι Βρετανοί κατασκευαστές [3].

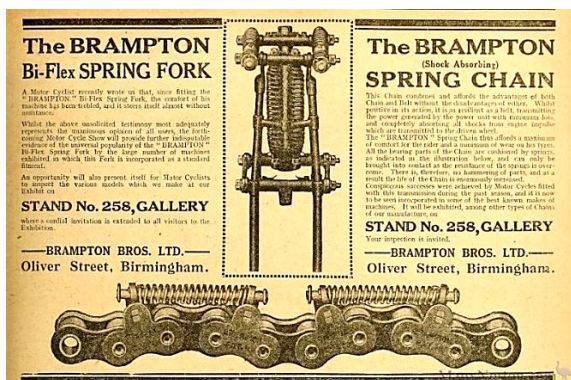
Ακολούθησε το πιρούνι Brampton, που βασίστηκε στο σχέδιο του Webb (Εικόνα 9) και έδωσε έμφαση στην . Την εξέλιξη του συστήματος των Brampton Bros αποτέλεσε το σύστημα του Vincent [3], το πιρούνι «Girdraulic». Στο Vincent χρησιμοποιήθηκαν ενιαίοι βραχίονες από σφυρήλατο κράμα με αυξημένη αντοχή, έναντι των συγκολλημένων κοίλων βραχιόνων του Brampton. Όσον αφορά τη λειτουργία απορρόφησης κραδασμών (shock absorbing), στο πιρούνι Vincent το ελατήριο αντικαταστάθηκε με σύστημα υδραυλικής απόσβεσης (Εικόνα 12).



Εικόνα 9: Φυλλάδιο του πιρουνιού Webb (1929) [4]



Εικόνα 10: Ανάρτηση Brampton



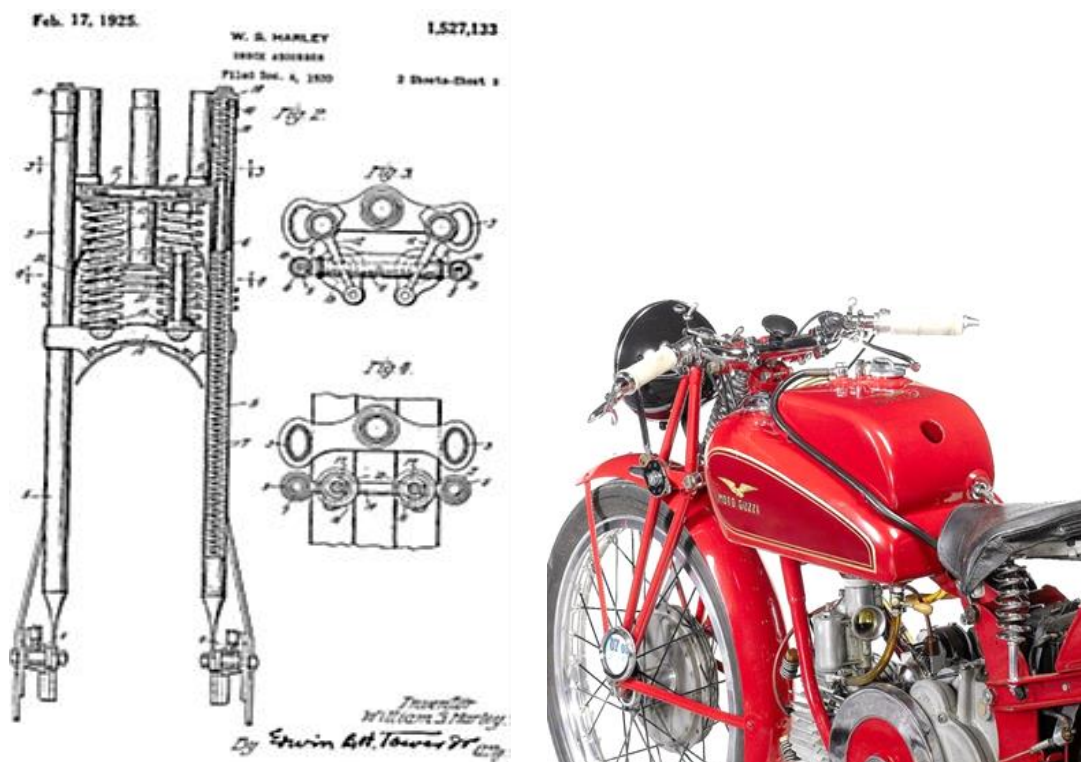
Εικόνα 11: Φολιάδιο των Brampton Bros για την έκθεση στο Olympia Exhibition Centre (1920-22), για σύστημα ανάρτησης και αλυσίδα μετάδοσης ισχύος [4]



Εικόνα 12: Το πιρούνι Girdraulic

Ο W.S. Harley, χρησιμοποιώντας προφορισμένα ελατήρια κατασκεύασε το 1925 μια δική του εκδοχή με αυξημένη πολυπλοκότητα. Η χρήση πολλών ελατηρίων απεδείχθη καθοριστική για να επιλυθεί το πρόβλημα της ακαμψίας. Ο ορισμός της επιθυμητής ακαμψίας σε κάθε επίπεδο επιτυγχάνεται με τον καθορισμό στα ελατήρια συγκεκριμένων τιμών για τις εξής παραμέτρους: αριθμός σπειρών, εμβαδόν διατομής, συντελεστή ελατηρίου, μέτρο ελαστικότητας υλικού. Η συγκεκριμένη κατασκευή, με κάποιες βελτιώσεις, βρίσκει εφαρμογή και τη σήμερα ημέρα σε κάποια μοντέλα της Harley [2]. Το μεγάλο μειονέκτημα στην πατέντα του Harley αφορούσε το βάρος, την απουσία συστήματος απόσβεσης, την πολυπλοκότητα στη διάταξη των ελατηρίων και τη δυσκολία συντήρησης (σέρβις, αποσυναρμολόγησης, κλπ). Έτσι, εφόσον ήδη είχαν αρχίσει εφαρμογές με υδραυλική απόσβεση, έγινε επιθυμητός ο προσανατολισμός σε πατέντες κατάλληλες για μαζική παραγωγή.

Οι κατασκευαστές δίνουν βάση στην απόδοση της κατασκευής και όχι στις δαπάνες, οπότε προχώρησαν σε μια νέα καινοτομία: το leading link. Ήταν μια παραλλαγή του girder, στην οποία προστέθηκε οριζόντια ράβδος για πλευρική στήριξη. Το leading link από εκεί και ύστερα έγινε το μοντέλο στο οποίο βασίστηκαν διάφορες φίρμες για να εφεύρουν βελτιωμένες παραλλαγές (κυρίως στο μηχανοκίνητο αθλητισμό και οπουδήποτε αλλού δεν υπήρχε ανάγκη για γρήγορη και συμφέρουσα παραγωγή). Η φίρμα της Moto Guzzi είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα υιοθέτησης του συστήματος [5].



Εικόνα 13: Η πατέντα του W.S. Harley (αριστερά) και η Moto Guzzi (δεξιά)

Η Indian Motorcycles (Εικόνα 14) πρόσθεσε στο μοντέλο ένα σύστημα μόχλευσης (μιας άρθρωσης) που διέρχεται πάνω από τον τροχό, ώστε να μετριάσει το πάτημα (trail) της μοτοσυκλέτας. Η πατέντα αυτή ονομάστηκε trailing link, αλλά δε βρήκε ευρεία εφαρμογή λόγω της πολυπλοκότητάς της. Επιπλέον, τα μοντέλα της Harley-Davidson και άλλα «κλασάτα» δίκυκλα (τσόπερ, κλπ) υιοθέτησαν το springer fork. Η κύρια διαφοροποίηση με το leading link ήταν η ανεξαρτησία του από τους ορθοστάτες (fork tubes), καθώς το κάτω

άκρο του κορμού με τα ελατήρια βίδωνε στο φρένο και το πάνω στην τριπλή σύνδεση (triple clamp). Ακόμη, το 1953 ο Ernest Earles λανσάρει την πατέντα του Earles fork (Εικόνα 15). Με κοίλους, ελαφρείς συνδέσμους, το βασικό γνώρισμα αυτού του μοντέλου ήταν η υδραυλική απόσβεση. Έγινε σήμα κατατεθέν της BMW έως το 1968, καθώς το προσάρμοσε σε όλες τις μοτοσυκλέτες της. Στον αγωνιστικό τομέα, εκτός της BMW το υιοθέτησαν επίσης η MV Agusta και η off-road μηχανή Douglas [6].



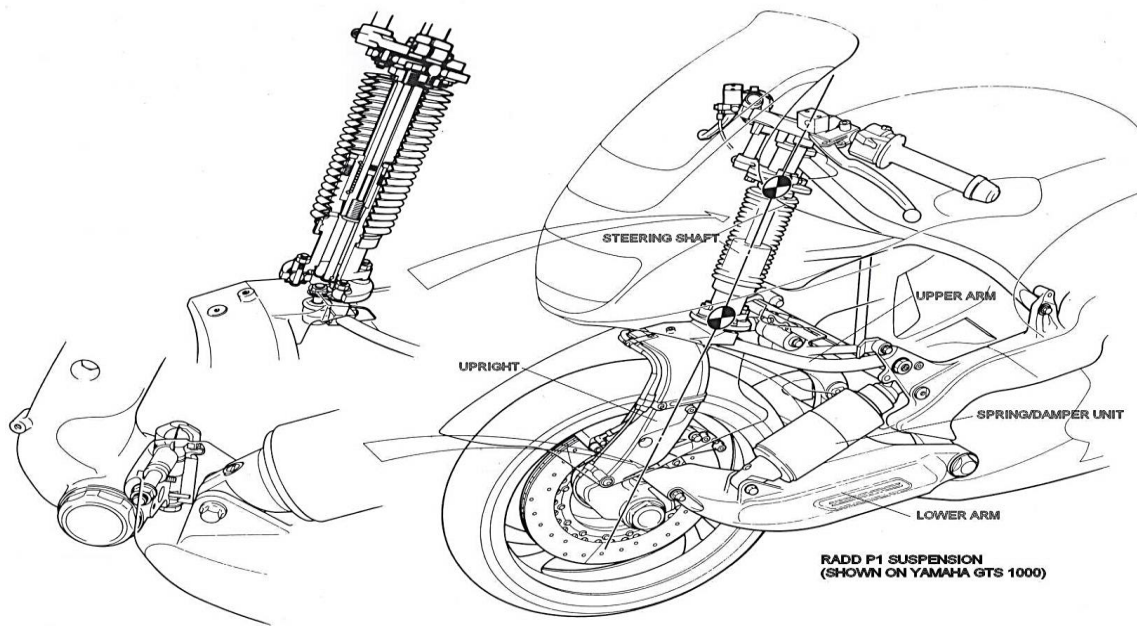
Εικόνα 14: Η Indian Motorcycles
(πηγή: parkerindian.com)



Εικόνα 15: Μοντέλο της BMW με το Earles fork (πηγή: bmwdean.com)

Η τελευταία αξιοσημείωτη προσπάθεια για ένα καινοτόμο μοντέλο έγινε το 1980 από τον James Parker, τον βιομηχανικό σχεδιαστή και ιδρυτή της Rationally Advanced Design Development (RADD) (Εικόνα 16). Παίρνοντας στοιχεία απ' όλες τις εφαρμογές του παρελθόντος, ο Parker εισήγαγε τον άξονα στρέψης (steering shaft) στο σύστημα του τιμονιού. Ουσιαστικά το RADD ήταν η πατέντα που έφερε το hub steering, το οποίο όμως ανήκει στα σύγχρονα μοντέλα και θα αναλυθεί στην επόμενη υποενότητα [7].

Οτιδήποτε ακολούθησε όσον αφορά την εξέλιξη των συστημάτων εμπρόσθιας ανάρτησης, αποτελεί σημερινές εκδοχές. Στις επόμενες υποενότητες, θα αναλυθούν τόσο οι σύγχρονες εκδοχές συστημάτων ανάρτησης, όσο και τα τηλεσκοπικά πιρούνια που είναι το αντικείμενο μελέτης της εργασίας.



Εικόνα 16: Το σύστημα RADD μιας Yamaha GTS1000 (πηγή: silodrome.com)

1.1.2 Νεότερα μοντέλα αναρτήσεων

Πλέον κάθε κατασκευαστής επιλέγει την επιθυμητή έκδοση ανάλογα με τις δαπάνες που διατίθεται να κάνει ή την απόδοση που θέλει να επιτύχει. Ακόμη και σε σχέδια για μελλοντικές μοτοσυκλέτες (Εικόνα 17), φαίνεται ότι η εμπρόσθια ανάρτηση ανταποκρίνεται σε κάποιο από τα συστήματα που αναπτύχθηκαν εκείνη την εποχή.



Εικόνα 17: Η μοτοσυκλέτα Arc Vector (πηγή: damon.com)

Το κυρίαρχο σύστημα της αγοράς μέχρι και σήμερα είναι τα **τηλεσκοπικά πιρούνια (telescopic forks)**. Χαρακτηρίζεται από απλή σχεδίαση και χαμηλό κόστος κατασκευής και συναρμολόγησης. Είναι πολύ ελαφρύτερο σε σύγκριση με παλαιότερα σχέδια που χρησιμοποιούν εξωτερικά εξαρτήματα και συνδέσμους. Το συγκεκριμένο σύστημα κυκλοφορεί σε δύο εκδοχές: συμβατική μορφή (conventional ή up-right forks) και αντεστραμμένη μορφή (inverted forks ή USD “upside-down” forks) (Εικόνα 18). Ο τρόπος λειτουργίας και ο μηχανισμός απόσβεσης παραμένουν ίδια, ωστόσο οι δύο εκδοχές διαφέρουν ως προς τη διάταξη των τμημάτων τους. Η αντεστραμμένη μορφή είναι πιο αποδοτική στις απότομες στροφές λόγω ενισχυμένης ακαμψίας. Παρέχει όμως ελλιπή στεγανοποίηση, με αποτέλεσμα να εμφανίζει απώλειες λαδιού. Η συμβατική μορφή είναι πιο οικονομική και επαρκής για χρήση σε συνθήκες ομαλής οδήγησης [5].



Εικόνα 18: Συμβατική (αριστερά) και αντεστραμμένη (δεξιά) εκδοχή του τηλεσκοπικού πιρουνιού
(πηγή: topgearmag.in)

Ένα άλλο μοντέλο που χρησιμοποιούν σύγχρονες μοτοσυκλέτες είναι το **HCS (hub-center steering)** (Εικόνα 19). Ουσιαστικά, η εντολή στρέψης του τιμονιού μεταδίδεται από το τιμόνι στον τροχό όχι άμεσα (όπως π.χ. στα τηλεσκοπικά πιρούνια), αλλά μέσω των αρθρώσεων του συστήματος που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και μετακινούν τον τροχό. Είναι βασισμένο στην πατέντα RADD του James Parker και η χρήση του ξεκίνησε αρχές της δεκαετίας του 1990, όταν εμφανίστηκε στις μοτοσυκλέτες Bimota Tesi και Yamaha GTS1000. Σημαντικό πλεονέκτημα του HCS είναι ότι κατά την πέδηση, χάρη στη μορφή του δεν ασκούνται θλιπτικές δυνάμεις στα κομβικά σημεία του συστήματος. Σε ένα σύστημα κάθετης διάταξης, το «βύθισμα» που συμβαίνει κατά το φρενάρισμα επηρεάζει τόσο το σύστημα απόσβεσης όσο και τη στρέψη της μοτοσυκλέτας. Στο HCS αυτό δε συμβαίνει, οπότε το μοντέλο χαρακτηρίζεται από μειωμένη καταπόνηση. Παρόλα αυτά το HCS δε βρήκε ευρεία εφαρμογή στην αγορά καθώς στην πράξη, η πολυπλοκότητα του επηρέαζε την αποτελεσματικότητα της στρέψης [5].



Εικόνα 19: Το HCS σε μοτοσυκλέτα Aprilia (πηγή: bikeexif.com)

Η BMW εισήγαγε το πιρούνι **Telelever** (Εικόνα 20). Αποτελεί μια κλασική κάθετη διάταξη στην οποία προστίθεται ένα ψαλίδι πακτωμένο στο πλαίσιο της μηχανής. Το ψαλίδι φέρει ένα επιπλέον ελατήριο, τύπου monoshock (central spring strut). Ο σχεδιασμός του Telelever επιτρέπει την εξομάλυνση ακόμη και ισχυρών ροπών κάμψης που ασκούνται στο τηλεσκοπικό πιρούνι, μέσω της ενισχυμένης απόσβεσης που διαθέτει. Με αυτό τον τρόπο, διατηρείται ακέραια και ομαλή η «βύθιση» του τηλεσκοπικού πιρουνιού κατά την πέδηση. Ακόμη ένα μεγάλο πλεονέκτημα του Telelever έναντι του συμβατικού τηλεσκοπικού μοντέλου είναι πως αυξάνεται η αναρτώμενη μάζα (sprung mass) [8].



Εικόνα 20: Το πιρούνι Telelever



Εικόνα 21: Το πιρούνι Duolever

Ακόμη μια εισαγωγή της BMW αποτελεί το πιρούνι **Duolever** (Εικόνα 21). Το προσάρμοσε για πρώτη φορά το 2004 στο μοντέλο K1200R και το υιοθέτησαν όλα τα διάδοχα μοντέλα της K-series. Σχεδιάστηκε από τον Σκωτσέζο εφευρέτη Norman Hugh Hossack και αποτελείται από διπλό ψαλίδι (A-arm) άνω και κάτω του ελατηρίου, καθώς κι ένα σύστημα διεύθυνσης (up-right and steering linkage) [8].

Χαρακτηριστικά από συστήματα του παρελθόντος εμφανίζονται σε επαναστατικές κυκλοφορίες, όπως η Honda Valkyrie Rune του 2004 (Εικόνα 22) με την ανάρτηση-trailing link [8]. Ακόμη, η αγωνιστική μηχανή Ariel Ace (Εικόνα 23) κυκλοφόρησε το 2014 τόσο με συμβατικό τηλεσκοπικό πιρούνι, όσο και με το κλασικό πιρούνι girder. Υπάρχει επίσης και η πρωτοτυπία της αμερικανικής MotoCzysz (Εικόνα 24), όπου η στρέψη και η κίνηση της ανάρτησης γίνονται σε κοινό άξονα (coaxial steering front suspension). Διαθέτει τηλεσκοπικά πιρούνια, όμως η ανάρτηση του εκτελείται στον άξονα στρέψης από μοναδικό ελατήριο. Αυτό μειώνει σημαντικά το βάρος του συστήματος. Διαθέτει επίσης ευκολία ρύθμισης παραμέτρων [6].



Εικόνα 22: Honda Valkyrie Rune



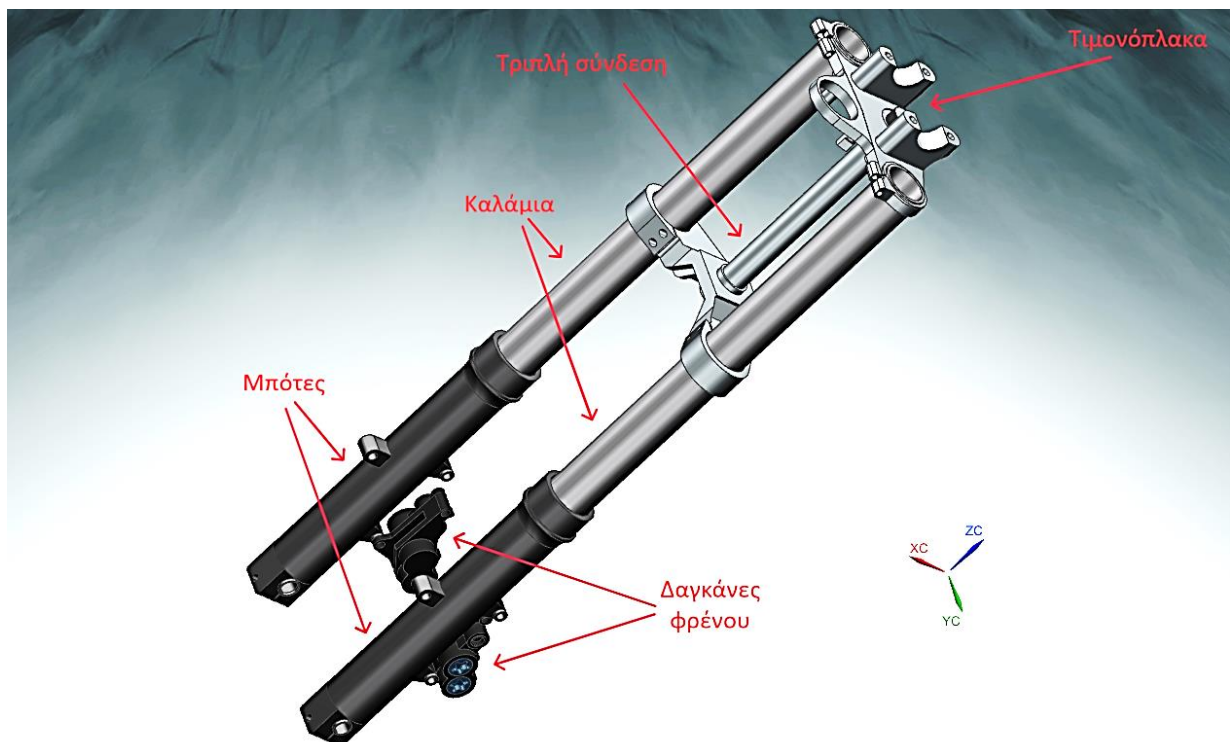
Εικόνα 23: Ariel Ace



Εικόνα 24: Σχέδιο ηλεκτροκίνητης μοτοσυκλέτας MotoCzysz

1.1.3 Τηλεσκοπικό σύστημα

Ο κορμός στήριξης του τηλεσκοπικού πυρουνιού (Εικόνα 25) αποτελείται από τα καλάμια (inner tubes) και τους εξωτερικούς κυλίνδρους ολίσθησης ή όπως έχει επικρατήσει για συντομία, τις μπότες (sliders). Οι μπότες περιέχουν μέσα τους τα ελατήρια απόσβεσης, με τα καλάμια να διεισδύουν μέσα τους και να συμπιέζουν τα ελατήρια. Τα τηλεσκοπικά πυρούνια στη συμβατική τους μορφή έχουν ως κινητό μέρος τα καλάμια, που διεισδύουν στις μπότες. Στην αντεστραμμένη μορφή, οι μπότες βρίσκονται στο άνω τμήμα της ανάρτησης που «βυθίζεται». Και στις δύο εκδοχές, τα βυθιζόμενα μέρη της ανάρτησης συγκρατούνται από μια τριπλή σύνδεση (triple clamp) (Εικόνα 26), που στο πάνω μέρος της περιλαμβάνει την τιμονόπλακα (top yoke), στο κάτω μέρος ένα βραχίονα (bottom yoke). Η τριπλή σύνδεση κουμπώνει στο πλαίσιο της μηχανής μέσω του τρίτου εξαρτήματος. Αυτό είναι η ράβδος που ενώνει την τιμονόπλακα με τον κάτω βραχίονα κι αποτελεί άξονα περιστροφής του συστήματος κατά το στρίψιμο του τιμονιού. Μέσα στο πυρούνι περιέχεται αέρας, λάδι, ένα ελατήριο και πολλά μικρά εξαρτήματα (Εικόνα 27). Όλα μαζί συμβάλουν στην εκτέλεση μιας παλινδρομικής απόσβεσης [2].



Εικόνα 25: Τηλεσκοπικό πυρούνι συμβατικής μορφής

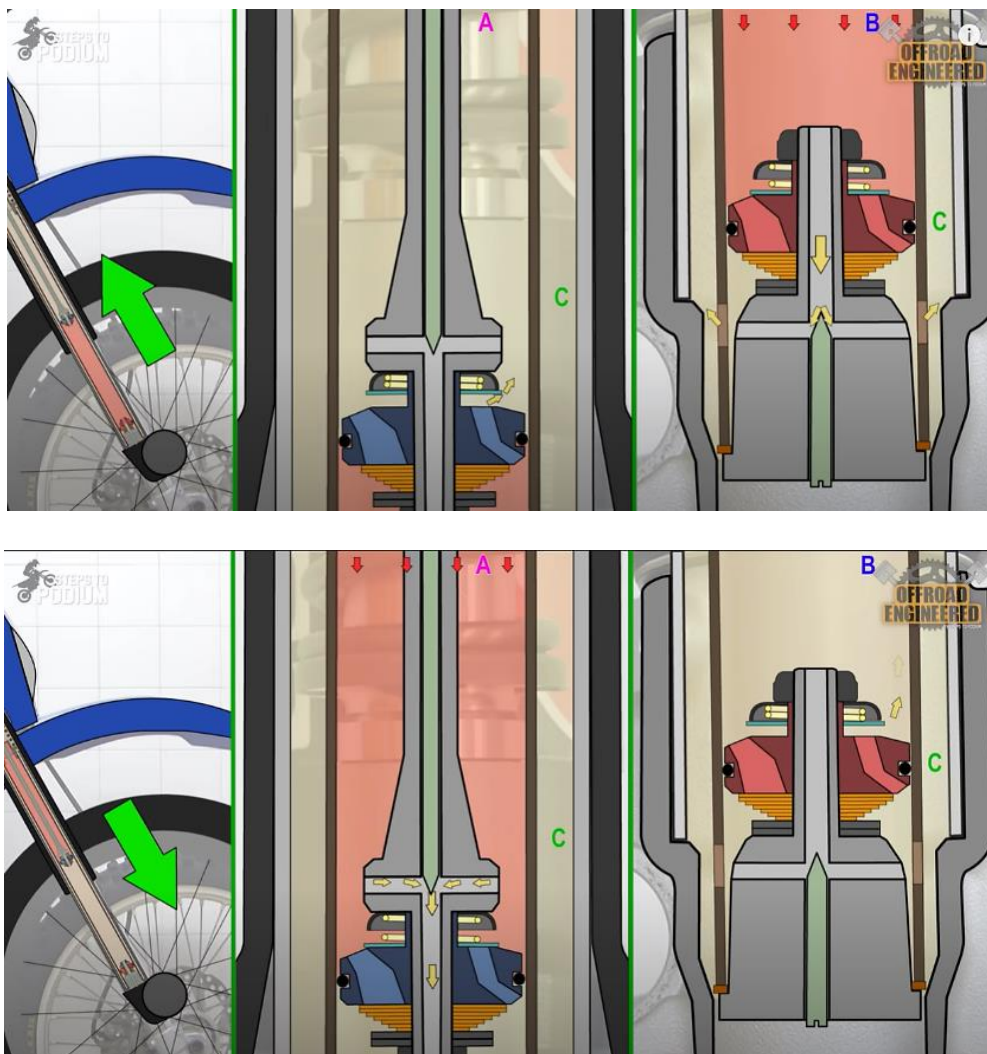


Εικόνα 26: Σύστημα τριπλής σύνδεσης
(πάνω διακρίνεται η τιμονόπλακα με τις δύο υποδοχές του τιμονιού)

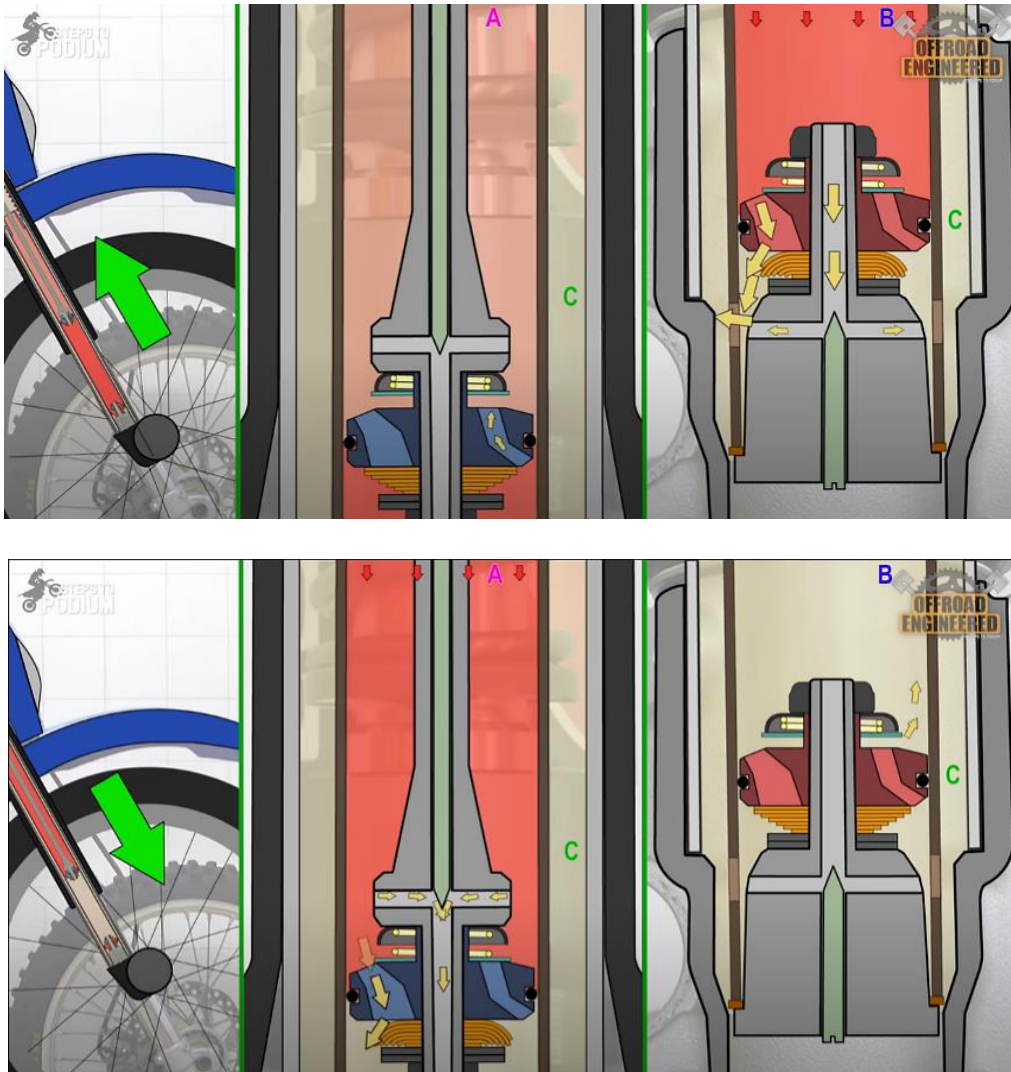


Εικόνα 27: Εξαρτήματα του τηλεσκοπικού πιρουνιού

Μέσα στην ανάρτηση, υπάρχει ένα ακινητοποιημένο έμβολο (fixed compression piston) που στο κάτω μέρος του φέρει μια βαλβίδα συμπίεσης (compression valve). Υπάρχει ακόμα ένα έμβολο επαναφοράς (rebound piston) που διεισδύει εντός του πρώτου, ανάλογα με τη συμπίεση που δέχεται η ανάρτηση. Περιβάλλεται από το ελατήριο και φέρει επίσης βαλβίδα. Οι βαλβίδες είναι υπεύθυνες για τη ροή του λαδιού, την οποία ρυθμίζουν μηχανικά με βάση την ένταση της απόσβεσης. Έχουν δύο επίπεδα απόσβεσης: το αργό (Εικόνα 28) και το ταχύ (Εικόνα 29). Ουσιαστικά πρόκειται για την ταχύτητα επαναφοράς της ανάρτησης στη στατική της κατάσταση, μετά την άσκηση δυνάμεων παραμόρφωσης [9].



Εικόνα 28: Αργή απόσβεση [9]



Εικόνα 29: Γρήγορη απόσβεση [9]

1.1.4 Ερευνητικές εργασίες σε εμπρόσθια συστήματα

Η έρευνα γύρω από τα εμπρόσθια συστήματα ανάρτησης μοτοσυκλέτας επικεντρώνεται στην επίλυση προβλημάτων ώστε να βελτιωθούν τα μοντέλα που ήδη υπάρχουν. Σε αντίθεση με το παρελθόν όπου ποικίλες νέες πατέντες έβρισκαν εφαρμογή, η σύγχρονη αγορά χρησιμοποιεί εκτεταμένα το τηλεσκοπικό σύστημα. Γενικότερα, έχουν εκφραστεί απόψεις ότι το σύστημα αυτό δε γίνεται να εξελιχθεί περαιτέρω [10]. Αν και πρόκειται για ένα σύστημα που συμφέρει για μαζική παραγωγή, τα τρωτά σημεία του πιο πιθανό είναι να οδηγήσουν στην αντικατάσταση παρ'ά στη βελτίωση του. Παρόλα αυτά, οι πρόσφατες έρευνες κλίνουν και προς τις δύο κατευθύνσεις. Ορισμένες αξιολογικές αναφορές παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Αναφορά	Τύπος ανάρτησης	Αντικείμενο μελέτης
[11]	Τηλεσκοπικό πιρούνι	Προσθήκη ενισχυτών απόσβεσης
[12]	Τηλεσκοπικό πιρούνι	Αντιμετώπιση δόνησης τιμονιού με εξάρτημα TMD (tuned mass damper)
[13]	Duolever με ελατήριο monoshock	Αντικατάσταση τηλεσκοπικού συστήματος με πιο εξελιγμένο μοντέλο μαζικής παραγωγής
[14]	Αντεστραμμένο τηλεσκοπικό πιρούνι	Εφαρμογή FEM για εντοπισμό αδύναμων σημείων
[15]	F.A.B. (fully adjustable bike)	Εμπρόσθιο σύστημα με δυνατότητα προσαρμογής
[16]	Duolever με trailing link	Δοκιμή Duolever σε δημοφιλή μοτοσυκλέτα με τηλεσκοπική ανάρτηση
[17]	Ψαλίδι (swingarm)	Κατασκευή βέλτιστου ψαλιδιού για ηλεκτρική μοτοσυκλέτα με 3 τροχούς

Στις αναφορές [11, 12] οι ερευνητές αναζητούν τρόπους ώστε το ήδη υπάρχον σύστημα της τηλεσκοπικής ανάρτησης να αποδίδει καλύτερα. Η πρώτη μελέτη εισάγει ενισχυτή απόσβεσης (jounce bumper) μεταξύ του ελατηρίου και της ράβδου απόσβεσης (damper rod), κατασκευασμένο από πολυουρεθάνη. Η δεύτερη, μέσω πειραματικού σχεδιασμού (design of experiments ή DOE), εξετάζει τον τρόπο μετάδοσης των κραδασμών από το πλαίσιο της μηχανής στο τιμόνι και το χέρι του αναβάτη. Η εξασθένηση των κραδασμών επιτυγχάνεται με χρήση ελαστομερούς τεμαχίου TMD (tuned mass damper), το οποίο τοποθετεί στη βέλτιστη θέση βάσει των αποτελεσμάτων του DOE. Κοινός στόχος και για τις δύο μελέτες λοιπόν είναι η άνεση στην οδήγηση χωρίς απώλεια ελέγχου, ενώ χρησιμοποιούνται υλικά με παρόμοιες ιδιότητες. Αντίθετα, στις αναφορές [13, 15] γίνεται προσπάθεια καινοτομίας και το τηλεσκοπικό πιρούνι αντικαθίσταται από μοντέλα άλλης σχεδιαστικής φιλοσοφίας. Η πρώτη

αναφορά μελετάει την περίπτωση ενός μοντέλου Duolever με απλοποιημένο σχεδιασμό, θεωρώντας ότι το κεντράρισμα της μάζας (mass centralization) με το ελατήριο monoshock οδηγεί σε καλύτερο έλεγχο της μοτοσυκλέτας. Ωστόσο, η δεύτερη αναφορά με το σχέδιο FAB (fully adjustable bike) στοχεύει στο σχεδιασμό μιας ανάρτησης με μεγάλη ευκολία ρύθμισης των παραμέτρων της σύμφωνα με τις συνθήκες οδήγησης. Η απόσβεση στο FAB γίνεται μέσω μιας διάταξης που εκτείνεται προς το πίσω μέρος της μοτοσυκλέτας. Αναλόγως τις εφαρμογές, αντί του χάλυβα τα τμήματα του FAB μπορεί να κατασκευάζονται από CFRP ή τιτάνιο. Οι αναφορές [14, 16, 17] μέσω αναλύσεων με χρήση λογισμικού στοχεύουν στην εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών. Στην [14], η χρήση της FEM στο αντεστραμμένο πιρούνι οδηγεί στον εντοπισμό αδύναμων σημείων του μοντέλου. Επιπλέον, από την ανάλυση στην [16] ο ερευνητής μπορεί να αποφανθεί αν το Duolever με trailing link είναι σε θέση να αντικαταστήσει το τηλεσκοπικό πιρούνι σε ένα υπάρχον μοντέλο μοτοσυκλέτας. Τέλος, η αναφορά [17] εφαρμόζει τη μέθοδο της τοπολογικής βελτιστοποίησης σε εμπρόσθιο σύστημα με ψαλίδι (swingarm), μοτοσυκλέτας τριών τροχών. Η μέθοδος κατευθύνει τον ερευνητή ώστε να σχεδιάζει ένα νέο, ελαφρύτερο ψαλίδι που θα αποδίδει εξίσου καλά. Όλες οι παραπάνω ερευνητικές εργασίες περιέχουν χρήσιμες εφαρμογές, πολλές από τις οποίες συμπεριλαμβάνονται και στην παρούσα έρευνα για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

1.2 Στόχος Εργασίας

Η παρούσα εργασία θα μελετήσει ένα τυπικό τηλεσκοπικό σύστημα ως προς τις καταπονήσεις που δέχεται. Στόχος είναι να προκύψει, μέσω των συμπερασμάτων που θα βγουν, ένα μοντέλο παρόμοιας φύσης που θα ανταποκρίνεται καλύτερα στις ίδιες συνθήκες φόρτισης. Για το στόχο αυτό, λαμβάνονται υπόψιν παράμετροι όπως το υλικό κατασκευής, η δομή και η κινηματική συμπεριφορά.

Κεφάλαιο 2: Μοντελοποίηση

2.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM: Finite-Element Method) αποτελεί μια υπολογιστική τεχνική που ανέπτυξαν οι μηχανικοί, μέσω της προσέγγισης, να δίνουν αποτελεσματικές λύσεις στα προβλήματα που αντιμετωπίζουν. Αυτό το πετυχαίνουν μέσω της επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων (partial differential equations), που προκύπτουν από τη μαθηματική μοντελοποίηση υπαρκτών συστημάτων. Η μέθοδος επιδιώκει να μετατρέψει τα συνεχή χαρακτηριστικά που έχει ένα σύστημα από τη φύση του σε διακριτά, ώστε το πρόβλημα να απλοποιηθεί και να αναλυθεί με ευκολία. Αυτή η διακριτοποίηση αντικαθιστά τις μερικές διαφορικές εξισώσεις με σύστημα γραμμικών εξισώσεων, το οποίο επιλύεται από τον Η/Υ. Η αξία της μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι μέσα από την προσομοίωση της συμπεριφοράς διάφορων συστημάτων, ουσιαστικά οδηγεί στη δοκιμή τους δίχως να επιβαρύνει την έρευνα με το κόστος μιας πραγματικής δοκιμής [18]. Χρησιμοποιείται για αναλύσεις σε δομικές εφαρμογές, μετάδοση θερμότητας, ηλεκτρικά φορτία, κινηματική ρευστών, κλπ.



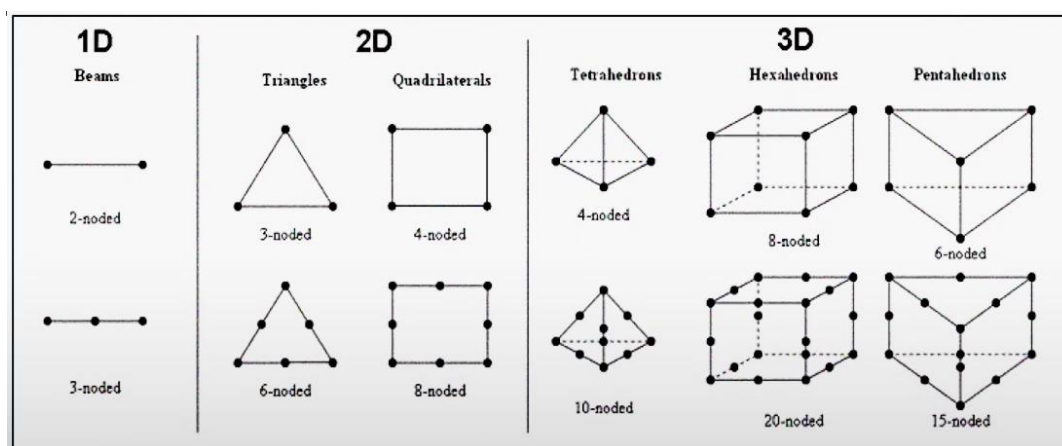
Εικόνα 30: Διάγραμμα για τα οφέλη της FEM

2.1.1 Περιγραφή της μεθόδου

Βασική ενέργεια της μεθόδου FEM είναι η διαίρεση ενός συνεχούς ορισμένου πεδίου (domain) σε μικρά διακριτά τμήματα, τα οποία αποκαλούνται στοιχεία (elements). Αυτά τα

τμήματα ποικίλουν ως προς το γεωμετρικό τους σχήμα και η σύνθεση τους ονομάζεται πλέγμα (mesh). Βασική ιδιότητα του πλέγματος είναι ότι διαθέτει πεπερασμένο αριθμό στοιχείων, πράγμα που κάνει την ανάλυση του πιο αποδοτική από την ανάλυση ενός πραγματικού μοντέλου. Πάνω στο πλέγμα, στα σύνορα (boundaries) μεταξύ των στοιχείων του, υπάρχουν οι κόμβοι (nodes). Αυτοί συγκρατούν τα στοιχεία ενωμένα μεταξύ τους και διαθέτουν κάποιους βαθμούς ελευθερίας (degrees of freedom ή DOFs). Σε ένα συνεχές μοντέλο (continuum ή continuous medium) όπως αυτά που υπάρχουν στη φύση, οι βαθμοί ελευθερίας στους κόμβους του είναι άπειροι. Η FEM παράγει μοντέλο διακριτοποιημένο, με τους κόμβους του να έχουν καθορισμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας.

Η μέθοδος ακολουθεί την προσέγγιση «διαίρει και βασίλευε» (divide-and-conquer approach): 1) διακριτοποίηση του συνεχούς μοντέλου, 2) ορισμός συνάρτησης παρεμβολής των δημιουργημένων κόμβων, 3) εύρεση των ιδιοτήτων – φορτίσεων κλπ. – των στοιχείων, 4) σύνθεση των εξισώσεων των στοιχείων σε ένα ενιαίο σύστημα, 5) επίλυση του συστήματος και 6) εξαγωγή αποτελεσμάτων (τάσεις, διατμήσεις, στρέψεις, μετατοπίσεις, κλπ) [18].



Εικόνα 31: Είδη στοιχείων για 1D, 2D και 3D σύστημα

Ως CAD (computer-aided design) ορίζεται η χρήση Η/Υ ή άλλων μέσων εργασίας για τη δημιουργία, την τροποποίηση, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση ενός σχεδίου [19]. Από την άλλη, ο όρος CAE (computer-aided engineering) αναφέρεται σε οποιασδήποτε μορφής διαδικασία τεχνικής ανάλυσης συμβαίνει με τη βοήθεια τεχνολογικών μέσων. Συνεπώς, τόσο τα λογισμικά CAD όσο και τα λογισμικά FEM ανήκουν στα CAE.

Η FEM εφαρμόζεται είτε με αλληλεπίδραση του χρήστη (user interface) είτε αυτόματα. Το λογισμικό μέσω του οποίου το συνεχές 3D-μοντέλο διακριτοποιείται σε πεπερασμένα στοιχεία είναι ο προ-επεξεργαστής (pre-processor). Στο ίδιο περιβάλλον λαμβάνει χώρα και ο ορισμός των φορτίσεων που δέχεται. Ο προ-επεξεργαστής διαθέτει εργαλεία επίλυσης του

μοντέλου (solvers), τα οποία όταν «τρέξουν» εξάγουν κάποια αρχεία με δεδομένα αποτελεσμάτων. Με το πέρας της ανάλυσης, αυτά τα αρχεία εισάγονται στο λογισμικό του μετα-επεξεργαστή (meta-processor). Εκεί, οι τιμές τάσεων, μετατοπίσεων, κάμψεων κλπ. αντιστοιχίζονται με χρωματικές αποχρώσεις, βέλη και άλλα οπτικά μέσα. Οπότε και γίνεται μια ευδιάκριτη παρουσίαση των αποτελεσμάτων [20].

2.1.2 Θεωρίες αστοχίας

Στα όλκιμα υλικά, η αστοχία συμβαίνει κατά την έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης (όριο διαρροής σ_y). Αντίστοιχα, στα ψαθυρά υλικά, συμβαίνει όταν επέλθει θραύση στο τεμάχιο (μέγιστη τάση σ_u). Τα σημεία αστοχίας είναι εύκολο να καθοριστούν σε συνθήκες ομοαξονικής φόρτισης, όπως η δοκιμή εφελκυσμού. Όμως, σε συνθήκες φόρτισης σε τρεις άξονες, η πρόβλεψη της αστοχίας είναι πιο περίπλοκη. Συγκεκριμένα, υπάρχουν περισσότερες από μια μέθοδοι για να ορίσει κανείς τα σημεία αστοχίας σε αυτή την περίπτωση. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κάθε προβλήματος, επιλέγεται η ιδανική μέθοδος για αυτό το στόχο [21].

Αυτό που κάνουν οι θεωρίες αστοχίας είναι να συγκρίνουν την τρέχουσα κατάσταση φόρτισης σε ένα σώμα με τις μέγιστες τάσεις του. Για κάθε έναν από τους τρεις άξονες, καθορίζονται με δοκιμή ομοαξονικής φόρτισης στον αντίστοιχο άξονα, οπότε και προκύπτει μια τιμή για τον καθένα ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) [21].

Στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), ανταποκρίνεται καλύτερα η θεωρία μέγιστης ενέργειας παραμόρφωσης (maximum distortion energy theory) ή αλλιώς θεωρία Von Mises. Υποστηρίζει πως η αστοχία συμβαίνει όταν η ενέργεια παραμόρφωσης (συνολική ένταση ενός στοιχείου υπό φόρτιση τριών αξόνων) εξισώνεται με την ενέργεια παραμόρφωσης του υλικού στο όριο διαρροής του: [21]

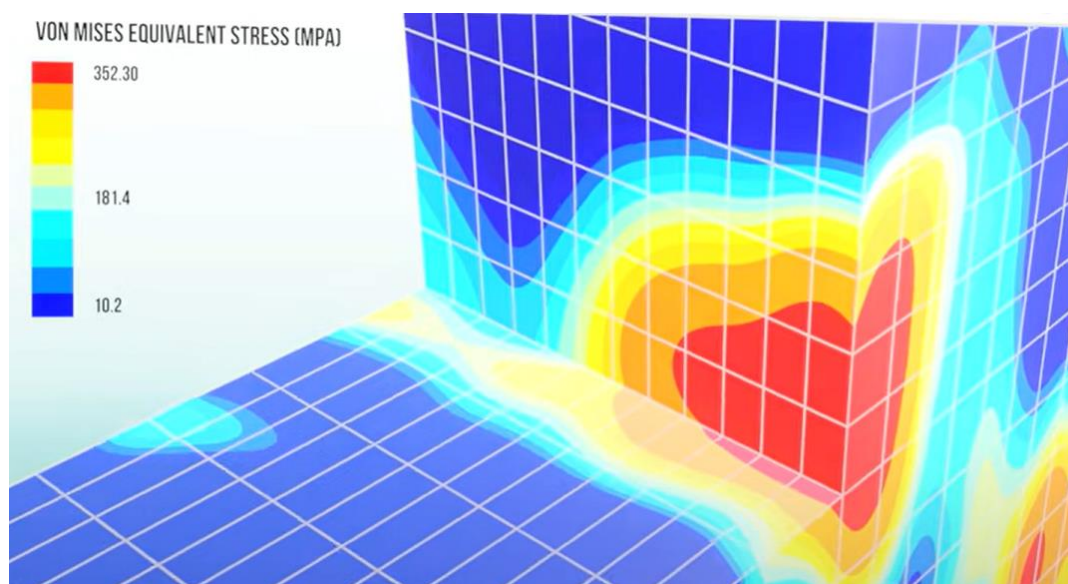
$$u_d = \frac{1+\nu}{6E} * [(\sigma_1-\sigma_2)^2 + (\sigma_2-\sigma_3)^2 + (\sigma_3-\sigma_1)^2] \quad \nu: \text{λόγος Poisson}, E: \text{μέτρο ελαστικότητας}$$

$$\text{για εφελκυσμό στον άξονα 1: } u_{d,y} = \frac{1+\nu}{6E} * [(\sigma_y-0)^2 + (0-0)^2 + (\sigma_3-\sigma_y)^2]$$

Η εξίσωση των παραπάνω σχέσεων μας δίνει την ισοδύναμη τάση Von Mises:

$$\sigma_{eq} = \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{2} * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

Με βάση αυτό τον τύπο, σε ένα μοντελοποιημένο τεμάχιο η FEM μπορεί να εντοπίσει ποιες συνιστώσες του πλέγματος του βρίσκονται υπό τον κίνδυνο αστοχίας. Οπότε και τους δίνει το ανάλογο χρώμα.



Εικόνα 32: Θεωρία Von Mises στη FEM (πηγή: YouTube)

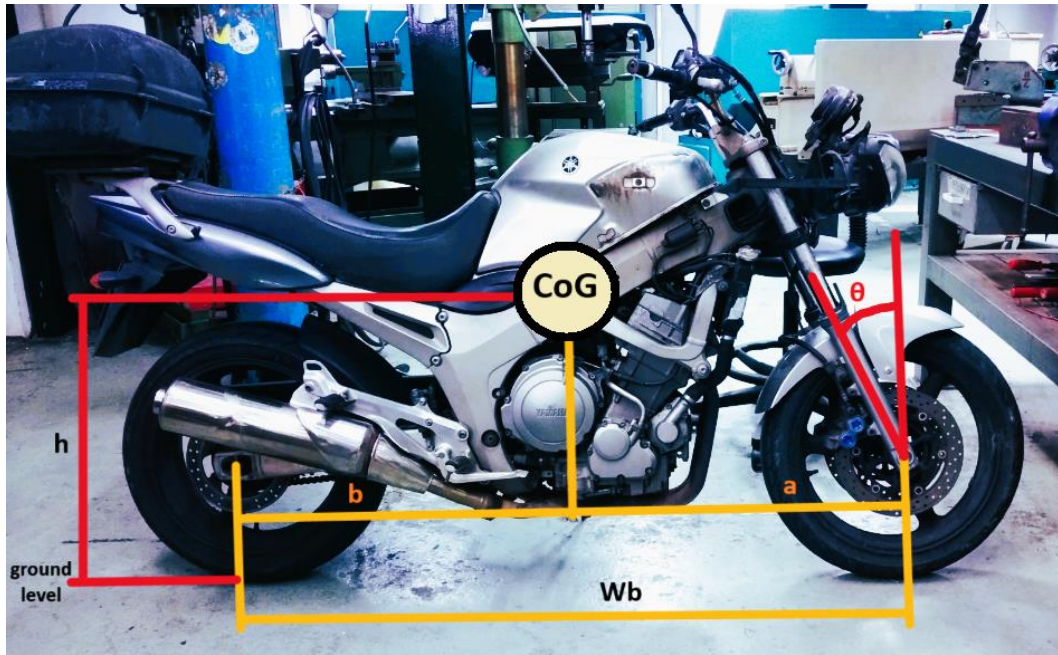
2.2 Ανάλυση Συστήματος

Το μοντέλο προς μελέτη είναι μια εμπρόσθια τηλεσκοπική ανάρτηση, σχεδιασμένη στα πρότυπα της μοτοσυκλέτας Yamaha TDM900 (Εικόνα 33). Αυτό είναι το σύστημα με βάση το οποίο δόθηκαν οι βασικές διαστάσεις στο μοντέλο. Ωστόσο, για λόγους ευκολίας της ανάλυσης, η σχεδιαστική πολυπλοκότητα μειώνεται όπου αυτό είναι εφικτό.

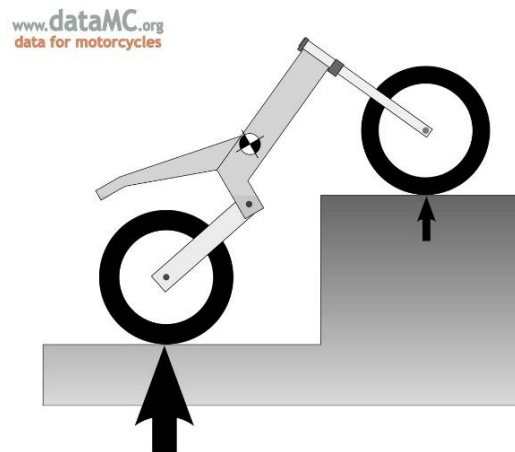
2.2.1 Γεωμετρία συστήματος και κατανομή μάζας

Η ανάλυση ξεκινάει από τον προσδιορισμό της θέσης του κέντρου βάρους (center of gravity ή CoG). Η μοτοσυκλέτα Yamaha TDM900 έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- a : Απόσταση μεταξύ εμπρός τροχού και κέντρου βάρους = 745.47 mm
- b : Απόσταση μεταξύ πίσω τροχού και κέντρου βάρους = 739.53 mm
- θ : γωνία Caster = 25°
- W_b : Απόσταση μεταξύ αξόνων (μεταξόνιο) εμπρός και πίσω τροχού = 1485 mm
- M_{moto} : Βάρος μοτοσυκλέτας = 205 kg (με 10% πληρότητα καυσίμου)
- M_{wheel} : Βάρος τροχών = 30 kg (προσέγγιση)
- Ποσοστό κατανομής μάζας της μοτοσυκλέτας: 49.8% εμπρός και 50.2% πίσω [22]



Εικόνα 33: Μεταξόνιο, θέση CoG και γωνία Caster στην TDM900



Εικόνα 34: Τρόπος εύρεσης της κάθετης θέσης h του CoG

Για να υπολογισθεί το ύψος h του CoG, υπάρχει μια μέθοδος: εάν ο ένας τροχός της μηχανής ανυψωθεί κατά ύψος y , το βάρος που ασκείται στον άλλο τροχό μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την κάθετη θέση του CoG μέσω του παρακάτω τύπου [23]:

(για ανύψωση του **μπροστινού** τροχού)

$$h = \cot\left[\arcsin\left(\frac{y}{Wb}\right)\right] * \left[\frac{Wr * Wb}{(Wr + Wf)} - x\right] + \frac{Rf + Rr}{2}$$

όπου Wr, Wf βάρος πίσω και μπροστά τροχού και Rr, Rf ακτίνα πίσω και μπροστά τροχού

$$x = \frac{Wr * Wb}{(Wr + Wf)} \quad \text{για } y=0$$

Για τις αρχικές συνθήκες με $y=0$, η τιμή x θα είναι η εξής:

$$W_r = M_{\text{moto}} * 50.2\% = 205 * 50.2\% = 102.91 \text{ kg} \rightarrow x = \frac{W_r * W_b}{(W_r + W_f)} = \frac{102.91 \text{ kg} * 1485 \text{ mm}}{205 \text{ kg}} \rightarrow$$

$$x = 745.47 \text{ mm}$$

Από τα χαρακτηριστικά της μοτοσυκλέτας, είναι γνωστό ότι το εμπρός ελαστικό είναι 120/70 ZR18M/C (59W) και το πίσω 160/60 ZR17M/C (69W). Αυτό σημαίνει πως για τον εμπρός και πίσω τροχό αντίστοιχα, η ακτίνα είναι ίση με:

$$R_f = 120 * 70\% \text{ mm} + \frac{18 \text{ inch}}{2} * \frac{1 \text{ mm}}{0.039 \text{ inch}} = 314.77 \text{ mm}$$

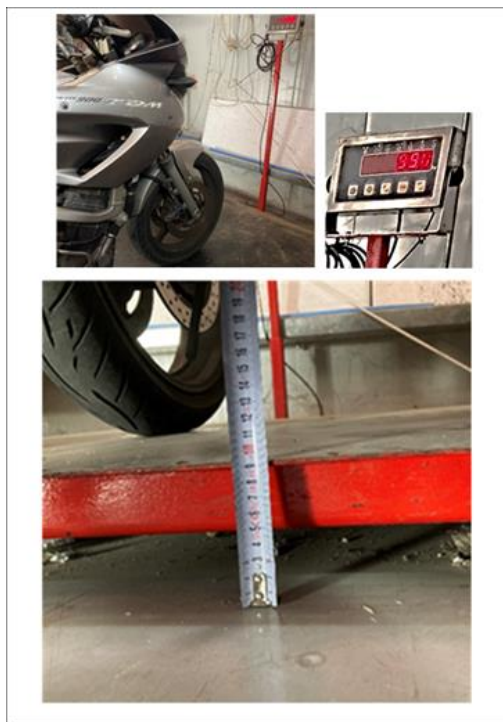
$$R_r = 160 * 60\% \text{ mm} + \frac{17 \text{ inch}}{2} * \frac{1 \text{ mm}}{0.039 \text{ inch}} = 313.95 \text{ mm}$$

Εφαρμόζοντας την εν λόγω μέθοδο με ανύψωση του μπροστινού τροχού κατά $y = 90 \text{ mm}$ και βρέθηκαν τα εξής αποτελέσματα: $W_r = 106 \text{ kg}$, $W_f = 99 \text{ kg}$

Συνεπώς, το ύψος του CoG θα είναι:

$$h = \cot[\arcsin(\frac{90 \text{ mm}}{1485 \text{ mm}})] * [\frac{106 \text{ kg} * 1485 \text{ mm}}{205 \text{ kg}} - 745.47 \text{ mm}] + \frac{314.77 \text{ mm} + 313.95 \text{ mm}}{2} \rightarrow$$

$$h = 392.04 \text{ mm}$$



Εικόνα 35: Ανύψωση εμπρός τροχού στα 90 mm (ύψος ζυγαριάς)



Εικόνα 36: Ανύψωση εμπρός τροχού στα 180 mm όσο ο πίσω πατάει στη ζυγαριά



Εικόνα 37: Υπολογισμός βάρους πίσω τροχού

2.2.2 Φορτίσεις

Στην εργασία αυτή εξετάζουμε δύο βασικά σενάρια φορτίσεων. Το πρώτο αφορά στατική φόρτιση του συστήματος όταν η μοτοσυκλέτα απλά ισορροπεί και το δεύτερο την περίπτωση της πέδησης, η οποία έχει απλοποιηθεί ώστε πάλι τα φορτία να είναι στατικά.

Στην πρώτη περίπτωση, τα φορτία που αναπτύσσονται στο τηλεσκοπικό πιρούνι οφείλονται στην επίδραση της βαρύτητας και χαρακτηρίζονται ως αναρτώμενη μάζα M_g (sprung mass). Σε αυτή συμπεριλαμβάνεται η μάζα του αναβάτη M_{rider} (π.χ. 100 kg) μαζί με τη μάζα M_{moto} του οχήματος που ασκείται πάνω στην ανάρτηση, αλλά όχι τη μάζα M_{wheel} των τροχών, καθώς δε παίζουν κάποιο ρόλο στη στατική καταπόνηση. Οπότε προκύπτει:

$$M_g = M_{moto} + M_{rider} - M_{wheel} = 205 \text{ kg} + 100 \text{ kg} - 30 \text{ kg} = 275 \text{ kg} \quad (i)$$

Από την επίδραση του βάρους του οχήματος, η αντίδραση του εδάφους στο μπροστινό τροχό προκύπτει:

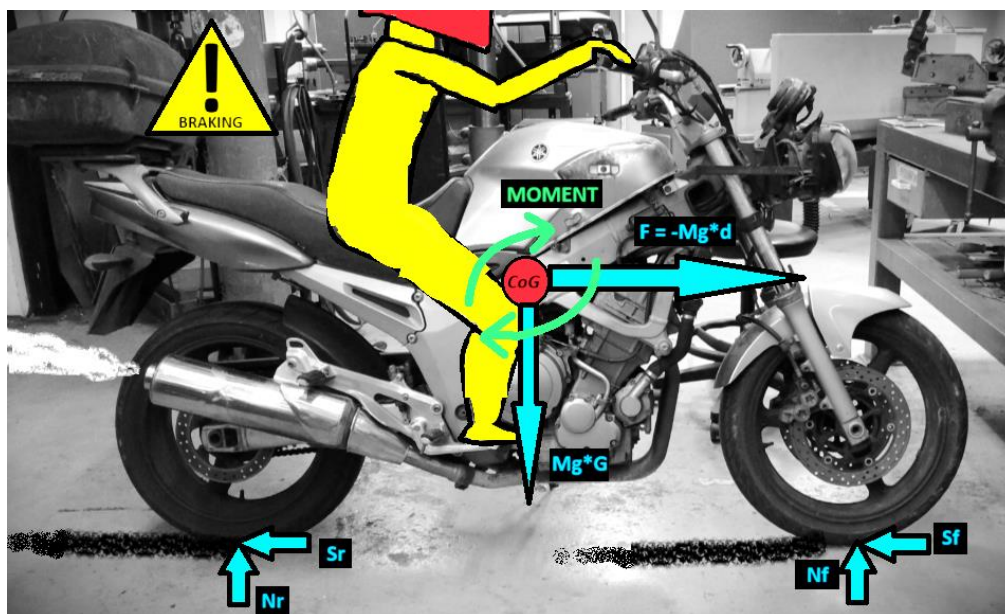
$$N_{f1} = M_g \cdot G \cdot \left(\frac{b}{w_b} \right) = 275 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \left(\frac{739,53 \text{ mm}}{1485 \text{ mm}} \right) = 1343.48 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 1343.48 \text{ N} \quad (ii)$$

Συνεπώς, η κάθετη αντίδραση προς την ανάρτηση θα είναι:

$$N_f = N_{f1} \cdot \cos\theta = 1217.61 \text{ N} \quad (iii)$$

Αυτή η δύναμη φυσικά προκαλεί «βύθιση» της ανάρτησης λόγω συρρίκνωσης του ελατηρίου και την οδηγεί σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας.

Το άλλο σενάριο προς μελέτη είναι αυτό της **πέδησης**. Έστω ότι η μοτοσυκλέτα κινείται σε στεγνό οδόστρωμα, μηδενικής κλίσης, όπου επιβραδύνει σταθερά με ρυθμό **d**. Ορίζοντας τη μοτοσυκλέτα μαζί με τον αναβάτη ως άκαμπτο σώμα (rigid body), η δυναμική κατάσταση της μοτοσυκλέτας είναι η εξής:



Εικόνα 38: Δυνάμεις κατά την πέδηση

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

- Οριζόντιος άξονας: $S_f + S_r = Mg*d$ (1)
- Κατακόρυφος άξονας: $N_f + N_r = Mg*G$ (2)
- Ροπές γύρω από το κέντρο βάρους: $N_r*b - N_f*a + (S_f + S_r)*h = 0$ (3)

Από την επίλυση των εξισώσεων (1), (2) και (3) για την αντίδραση του εδάφους προκύπτει:

$$N_f = Mg*G*\frac{b}{a+b} + Mg*d*\frac{h}{a+b} \quad (4)$$

$$N_r = Mg*G*\frac{a}{a+b} - Mg*d*\frac{h}{a+b} \quad (5)$$

Συνθήκη μη ανύψωσης πίσω τροχού: $N_r > 0 \rightarrow Mg*d*\frac{h}{a+b} < Mg*G*\frac{a}{a+b} \rightarrow$

$$d < G*\frac{a}{h} \quad (6)$$

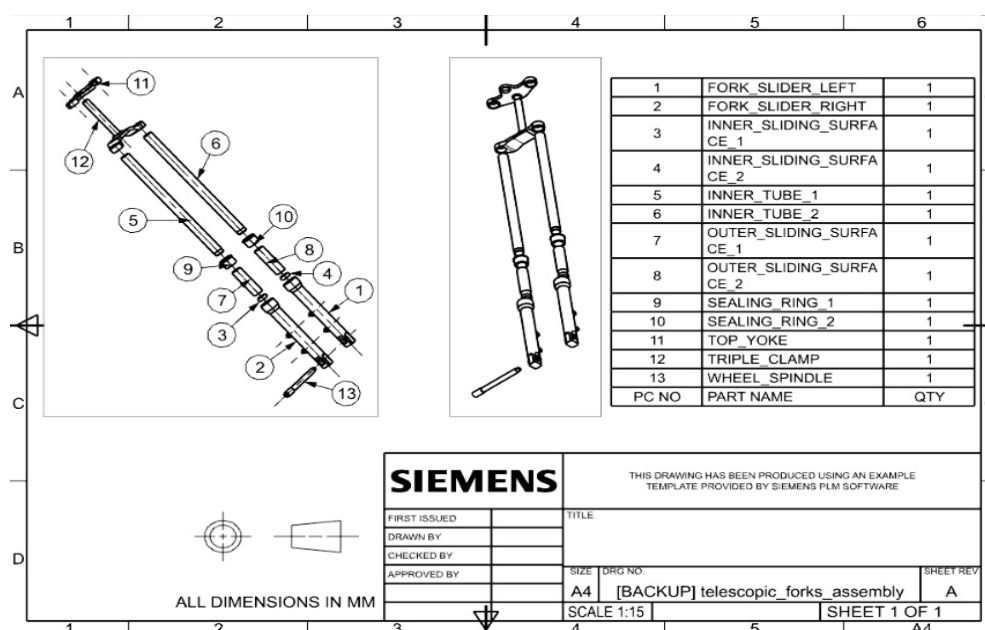
Συνεπώς, ο ρυθμός επιβράδυνσης του οχήματος δε θα πρέπει να ξεπερνάει το όριο $G*\frac{a}{h}$, ειδάλλως ο πίσω τροχός θα ανυψωθεί. Αντικαθιστώντας με τις ήδη γνωστές τιμές, η συνθήκη γίνεται $d < 9,81 \text{ m/s}^2 * (\frac{745.47 \text{ mm}}{1485 \text{ mm}}) \rightarrow d < 4,92462 \text{ m/s}^2$

2.3 Μοντελοποίηση Συστήματος

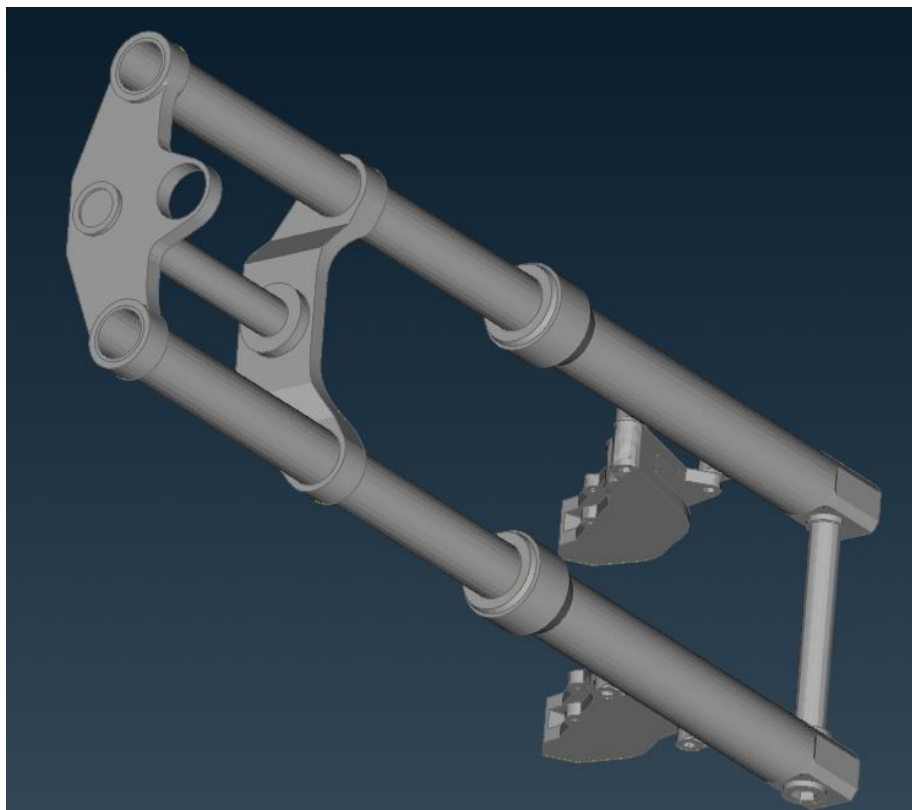
Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας, στο πρόγραμμα Siemens NX – Student Version σχεδιάζονται ένα προς ένα τα τμήματα του μοντέλου και έπειτα διαμορφώνεται η συνδεσμολογία τους. Κατόπιν, για τις ανάγκες της ανάλυσης του χρησιμοποιείται εξειδικευμένο πακέτο λογισμικών της εταιρίας BETA CAE Systems S.A. Το 3D-μοντέλο εισάγεται στον προ-επεξεργαστή ANSA v24.0.1, όπου και εφαρμόζεται η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Από τους διάφορους επιλυτές που διαθέτει το ANSA, χρησιμοποιείται ο EPILYSIS. Έπειτα, το κατάλληλο από τα αρχεία που εξάγει ο επιλυτής εισάγεται στον μετα-επεξεργαστή META v24.0.1, ώστε να γίνει ανάγνωση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

2.3.1 Δημιουργία πλέγματος

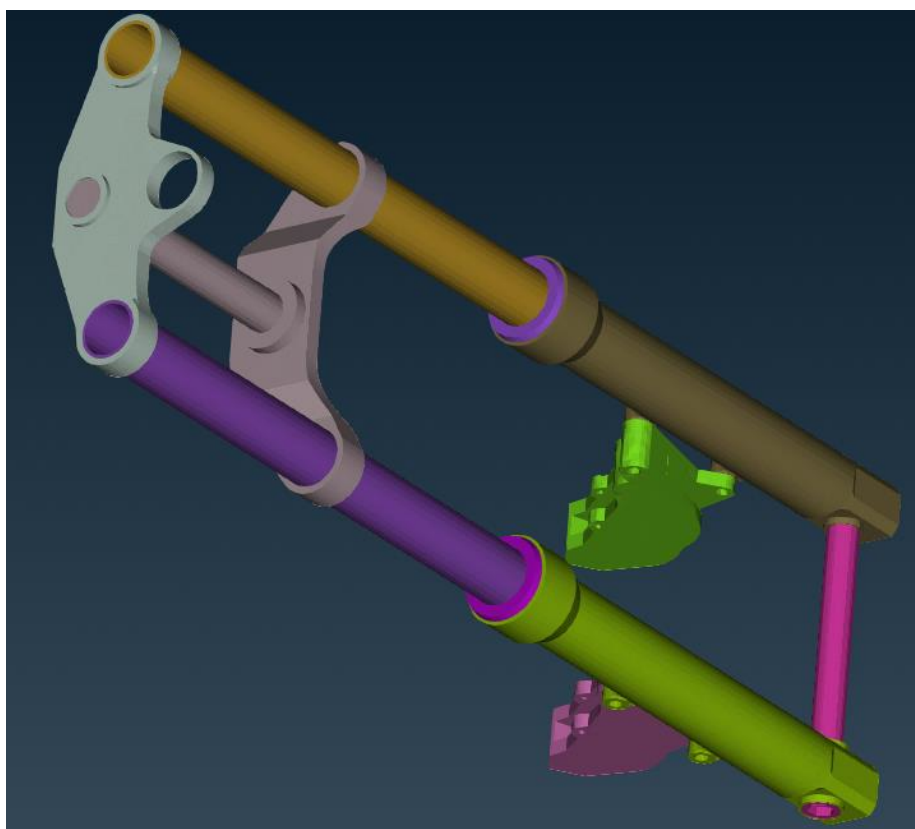
Το μοντέλο της τηλεσκοπικής ανάρτησης εισάγεται στο ANSA. Πρόκειται για μια συνδεσμολογία (assembly) 13 εξαρτημάτων (συν τις δαγκάνες του φρένου) (Εικόνα 39), στα οποία αρχικά διαμορφώνεται πλέγμα κελύφους (shell mesh) ώστε μετά να προκύψει το στερεό πλέγμα τους (solid mesh). Ουσιαστικά, η ανάλυση γίνεται σε μοντέλο με στερεά στοιχεία **μόνο**, αφού το κέλυφος χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς της στερεάς μορφής και κατόπιν διαγράφεται. Μόνο σε τέσσερα τμήματα δε διαμορφώνεται στερεό πλέγμα, καθώς δεν αποτελούν συμπαγή εξαρτήματα αλλά απλώς επιφάνειες τριβής. Αυτά συμμετέχουν και στην μετέπειτα ανάλυση με το πλέγμα κελύφους.



Εικόνα 39: Explosion του μοντέλου CAD, με λίστα των εξαρτημάτων.

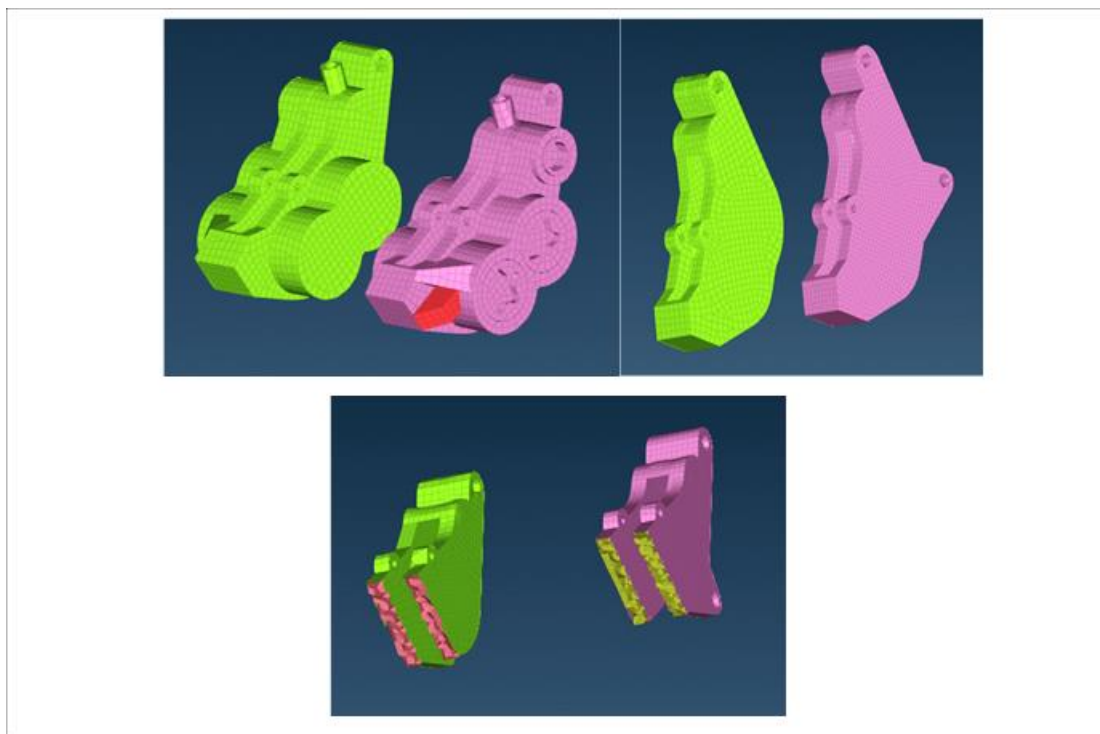


Εικόνα 40: Η τηλεσκοπική ανάρτηση στο ANSA



Εικόνα 41: Χρωματικός διαχωρισμός των εξαρτημάτων

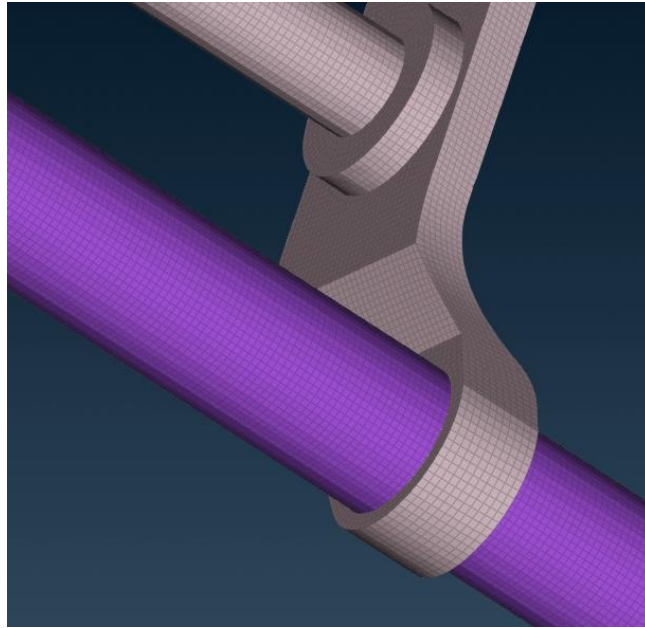
Βασική προϋπόθεση για τη δημιουργία στερεού πλέγματος σε ένα εξάρτημα είναι να μην εμφανίζει σφάλματα διεισδύσεων ή ασυνέχειας. Τέτοια φαινόμενα προέρχονται συνήθως από το σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD και διαπιστώνονται κατά τη δημιουργία πλέγματος. Χάρη στην δυνατότητα του ANSA να τροποποιεί τη γεωμετρία πλέγματος, τα σφάλματα αυτά διορθώνονται (Εικόνα 42).



Εικόνα 42: Πάνω οι δαγκάνες φρένου πριν και μετά τη διόρθωση της γεωμετρίας, κάτω διακρίνεται σε τομή το στερεό πλέγμα τους.

Τα στοιχεία πλέγματος που επιλέχθηκαν για την ανάλυση είναι μικτής γεωμετρίας, τετράπλευρα (quads) και τριγωνικά (trias). Το μέγεθος αναφοράς (target length) για τη δημιουργία πλέγματος σε όλο το μοντέλο επιλέχθηκε 2 ώστε να παράγει στοιχεία πλέγματος διαστάσεων 2x2 mm. Ως αποτέλεσμα της γεωμετρίας του μοντέλου, το πλέγμα κελύφους περιλαμβάνει 234471 quads και 1739 trias.

Το πάχος των εξαρτημάτων εκφράζεται με το στερεό πλέγμα ή πλέγμα όγκου (solid mesh ή volume mesh). Στην κατηγορία Tetra/Hybrid Mesh του προγράμματος, με την εντολή Define ορίζεται το τμήμα του μοντέλου προς ανάγνωση ώστε να ταυτοποιηθούν οι περιοχές δημιουργίας στερεού πλέγματος. Κατόπιν, ο αλγόριθμος Tetra Rapid παράγει στοιχεία κύβου (tetras) και στοιχεία πυραμίδας (pyramids). Το στερεό πλέγμα αποτελείται από 1394191 tetras και 211656 pyramids.

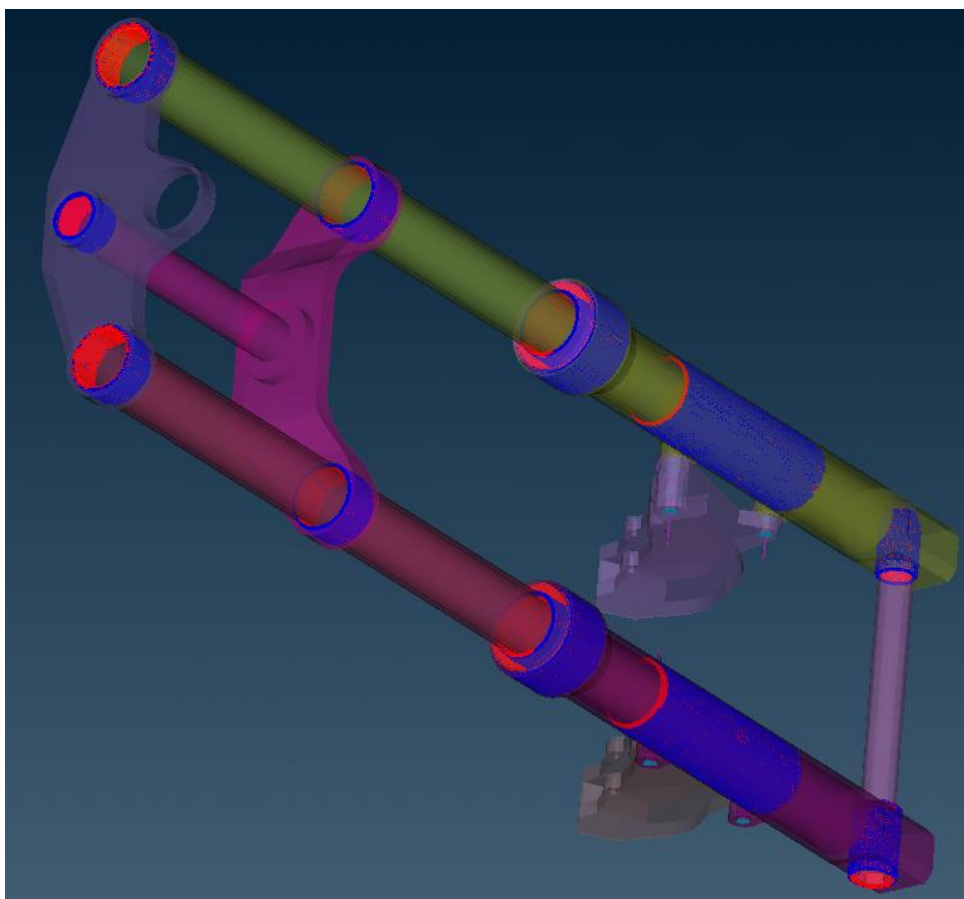


Εικόνα 43: Δημιουργία πλέγματος 2x2

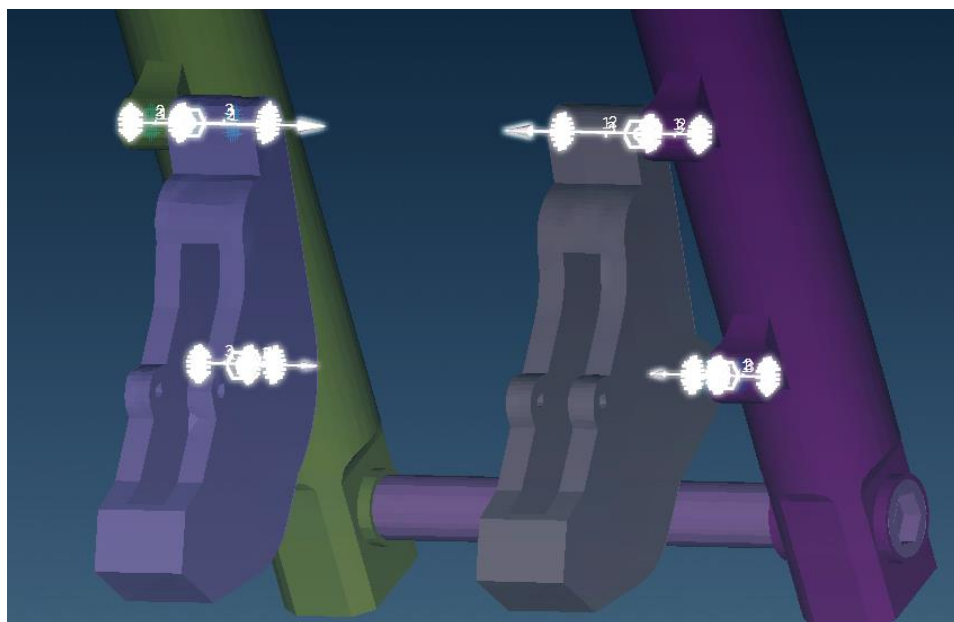
2.3.2 Μοντελοποίηση συνδέσεων

Η τηλεσκοπική ανάρτηση περιέχει ένα σύνολο άκαμπτων (rigid) συνδέσεων. Συγκεκριμένα, 9 συνδέσεις (ή ζεύγη συνδέσεων) (Εικόνα 44) έχουν ορισθεί ως επαφές (contacts) με τη συνάρτηση CONTACT της καρτέλας NASTRAN, ενώ υπάρχει και μια τετράδα (Εικόνα 45) από συνδέσεις με βίδα (bolt connections). Τα Contacts έχουν ορισθεί με τη μέθοδο των Master/Slave sets. Για να αναγνωριστεί μια επαφή ως άκαμπτη πρέπει αφ' ενός τα sets που συμμετέχουν σε αυτή να είναι ορισμένα πάνω σε στερεό πλέγμα (solid mesh), αφ' ετέρου να έχει συμπεριληφθεί σε αυτή η παρακάτω ρύθμιση (Εικόνα 46). Όσον αφορά τις συνδέσεις με βίδα, θα πρέπει να υπάρχουν στοιχεία RBE (rigid body elements) κατά μήκος της διαδρομής της.

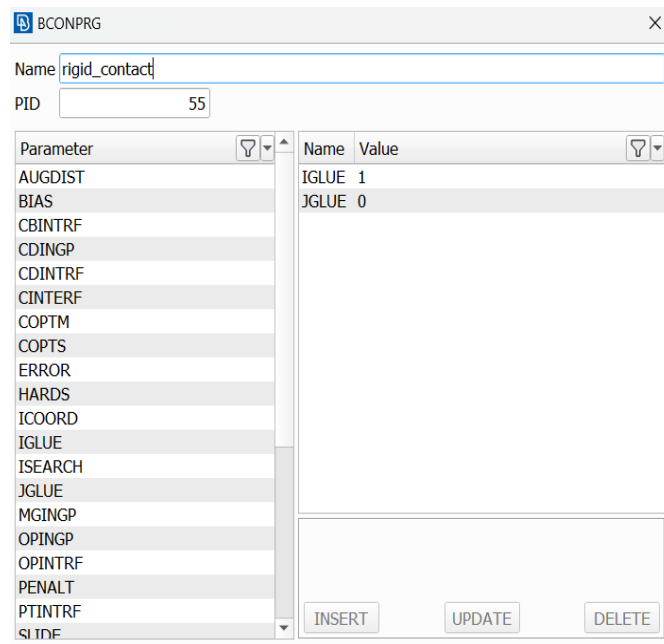
Το παρόν μοντέλο δεν περιλαμβάνει στα εξαρτήματα του κάποιο ελατήριο. Δεδομένου ότι εξετάζουμε μόνο 2 περιπτώσεις (στατικές συνθήκες και συνθήκες μέγιστης επιβράδυνσης πριν την ανύψωση του πίσω τροχού), ο μηχανισμός ανάρτησης δεν είναι απαραίτητος. Αντ' αυτού έχουν σχεδιαστεί δυο ζεύγη κυλινδρικών εξαρτημάτων που εφαρμόζουν στις μπότες και στα καλάμια, ώστε να αποτελέσουν επιφάνειες τριβής κατά τη λειτουργία της ανάρτησης. Τα ζεύγη των εξαρτημάτων είναι συνδεδεμένα με το δικό τους Contact τόσο στη στατική περίπτωση, όσο και στην περίπτωση της πέδησης (Εικόνα 47).



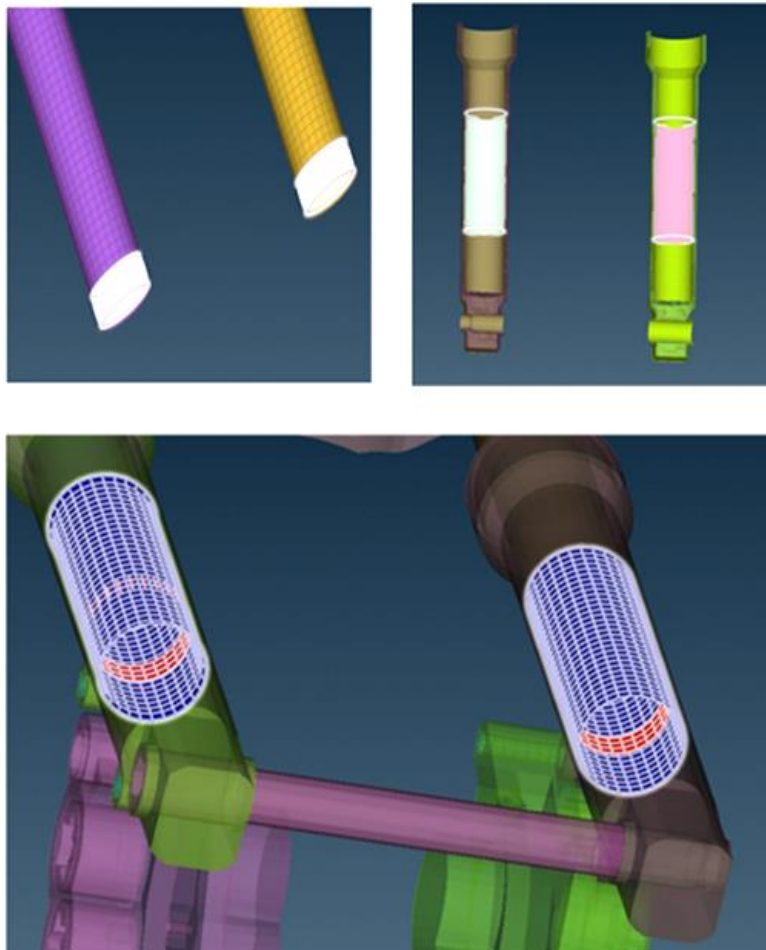
Εικόνα 44: Καθορισμός επαφών (Contacts)



Εικόνα 45: Συνδέσεις με βίδα



Εικόνα 46: Ρύθμιση για άκαμπτα Contacts στο ANSA



Εικόνα 47: Επιφάνειες τριβής και το Contact τους

2.3.3 Μοντελοποίηση υλικών

Για την ανάλυση είναι απαραίτητη η εισαγωγή των υλικών κατασκευής και των τεχνικών χαρακτηριστικών τους. Ο ακόλουθος πίνακας δείχνει τα υλικά που επιλέχθηκαν για κάθε συνιστώσα του μοντέλου της ανάρτησης, καθώς και τις βασικές μηχανικές τους ιδιότητες. Η αρίθμηση τους έγινε με βάση την [Εικόνα 39](#).

Component Name	Num.	Material	E (GPa)	ν	G (GPa)	ρ (g/cm ³)	σ_y (MPa)
Fork sliders	(1),(2)	A356.0-T6	70	0.33	26	2.60	200
Inner tubes	(5),(6)	AISI 304	190	0.27	74	7.85	510
Sealing Rings	(9),(10)	Rubber	0.003	0.4999	0.0003	1.34	40
Top Yoke	(11)	6061-T6	68	0.33	26	2.70	290
Triple Clamp	(12)	6061-T6	68	0.33	26	2.70	290
Wheel Spindle	(13)	AISI 4130	210	0.30	80	7.85	560
Outer Sliding Surface	(7),(8)	A356.0-T6	70	0.33	26	2.60	200
Inner Sliding Surface	(3),(4)	Copper plated steel	210	0.30	80	7.85	560
Brake Calipers	none	Cast iron G4000	180	0.29	70	7.60	290

Ως υλικό κατασκευής για τις μπότες (sliders) επιλέχθηκε το χυτό κράμα αλουμινίου A356.0-T6. Για τα καλάμια (stanchions ή inner tubes), επιλέχθηκε ο ανοξείδωτος χάλυβας AISI 304 (stainless steel) ωστενιτικής κατηγορίας ώστε να προσφέρει την επιθυμητή ακαμψία. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό το ενισχυμένο ανθρακόνημα (carbon fiber reinforced polymers ή CFRP), το οποίο όμως έχει αυξημένο κόστος και περιορισμούς μορφοποίησης. Το κράμα αλουμινίου 6061-T6 είναι το υλικό για την άνω τιμονόπλακα (top yoke) και την τριπλή σύνδεση (triple clamp), εξαρτήματα όπου απαιτείται ευρεία κατανομή των φορτίσεων σε όλο το σώμα τους. Για τις δαγκάνες του φρένου (brake calipers) χρησιμοποιείται χυτοσίδηρος. Για τον άξονα του τροχού (wheel spindle), επιλέχθηκε ενισχυμένος χάλυβας AISI 4130. Για τις τσιμούχες (sealing rings) χρησιμοποιείται καουτσούκ. Για την επιφάνεια τριβής εσωτερικά της μπότας (outer sliding surface), επιλέγεται ίδιο υλικό με τη μπότα. Τέλος, το υλικό κατασκευής του δαχτυλιδιού (inner sliding surface) είναι ενισχυμένος χάλυβας με επιστρωση χαλκού. Επισημώς, το δαχτυλίδι αμορτισέρ ονομάζεται «fork outer guide bushing». Ο εμπλουτισμός του ενισχυμένου χάλυβα με χαλκό

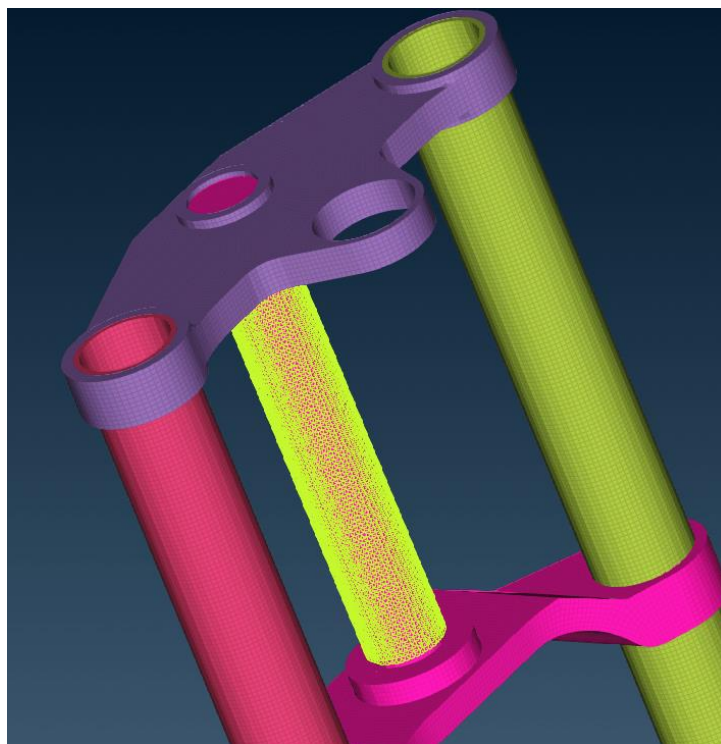
προσφέρει στο υλικό προστασία και αυξημένες αποδόσεις (διάβρωση, θερμότητα, συγκράτηση, κλπ) [26, 27].

Σε ό,τι αφορά τις ιδιότητες των υλικών, ο προ-επεξεργαστής ANSA για να ορίσει ένα υλικό χρειάζεται ως δεδομένα το μέτρο ελαστικότητας **E** (elastic modulus ή Young's modulus), τον λόγο Poisson **ν** (Poisson's ratio), την πυκνότητα **ρ** (density), το μέτρο διάτμησης **G** (shear modulus) και το όριο διαρροής **σ_y** (yield point).

➤ **Παρατήρηση:** Οι μονάδες μέτρησης στο ANSA είναι προεπιλεγμένες ως εξής: mm (μήκος), t (βάρος), sec (χρόνος), MPa (πίεση), N (δύναμη). Σύμφωνα λοιπόν με αυτές τις μονάδες πρέπει να τροποποιούνται και οι τιμές των χαρακτηριστικών κάθε υλικού, προκειμένου να καταχωρηθούν σωστά.

2.3.4 Μοντελοποίηση περιορισμών

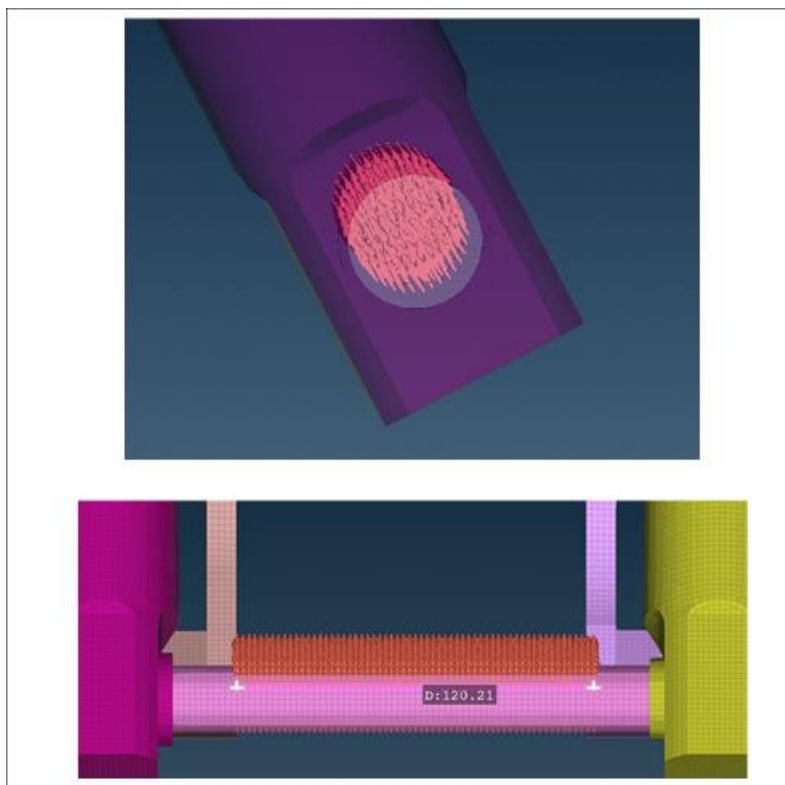
Στο μοντέλο της ανάρτησης υπάρχει μόνο ένας περιορισμός: αυτός της πάκτωσης της τριπλής σύνδεσης στο πλαίσιο της μοτοσυκλέτας. Πρακτικά, ορίζεται στην πακτωμένη επιφάνεια (σύνολο από RBE) και πάνω σε αυτό εφαρμόζεται περιορισμός SPC (single body constraint) στους βαθμούς ελευθερίας των τριών κατευθύνσεων. Αυτό γίνεται στην καρτέλα SPC μεταβάλλοντας τη μεταβλητή C σε 123 (αντί 123456 που είναι το default του προγράμματος). Ο περιορισμός ορίζεται με τον τρόπο που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 48: Πάκτωση της ανάρτησης στο πλαίσιο της μοτοσυκλέτας

2.3.5 Μοντελοποίηση δυνάμεων

Σε συνθήκες στατικής φόρτισης, η μόνη δύναμη που επιδρά στο σύστημα είναι το βάρος της μοτοσυκλέτας στον άξονα του τροχού. Από τα χαρακτηριστικά της TDM900 είναι γνωστό πως ο μπροστά τροχός της έχει πάχος 120 mm. Ορίζεται λοιπόν η ανάλογη περιοχή άσκησης του κάθετου φορτίου πάνω στον άξονα του τροχού (Εικόνα 49). Από την εξίσωση (ii), το αναρτώμενο φορτίο στον εμπρός τροχό ισοδυναμεί με 1343.48 N. Άρα αυτό θα είναι και το μέτρο της δύναμης που επιδρά στον άξονα του τροχού.



Εικόνα 49: Περίπτωση στατικής φόρτισης

Στην περίπτωση πέδησης, υπάρχουν δύο διαφοροποιήσεις: 1) κάθετο βύθισμα της ανάρτησης και 2) προσθήκη νέου φορτίου στις δαγκάνες. Υποθέτουμε πως για συνθήκες μέγιστης επιτρεπτής επιβράδυνσης (δηλ. ακριβώς πριν ανυψωθεί ο πίσω τροχός), το κάθετο βύθισμα της ανάρτησης φτάνει τα 80 mm. Με την παρακάτω ρύθμιση (Εικόνα 50) και επιλέγοντας τα τεμάχια που απαρτίζουν το βυθιζόμενο μέρος του συστήματος, το τηλεσκοπικό πιρούνι παίρνει τη μορφή που έχει για τις εν λόγω συνθήκες. Οι συντεταγμένες μετακίνησης του άνω τμήματος προκύπτουν από τη γωνία Caster $\theta=25^\circ$ της συγκεκριμένης μοτοσυκλέτας.

Επιπλέον, για συνθήκες μέγιστης επιτρεπτής επιβράδυνσης υπάρχει η δύναμη πέδησης S_f που επιδρά στο σημείο επαφής του μπροστά τροχού με το οδόστρωμα. Ο εμπρός τροχός

της TDM900 έχει ακτίνα $R = 312.6 \text{ mm}$ μαζί με το πάχος του ελαστικού. Η ακτίνα του δίσκου φρεναρίσματος είναι περίπου $r = 152 \text{ mm}$.

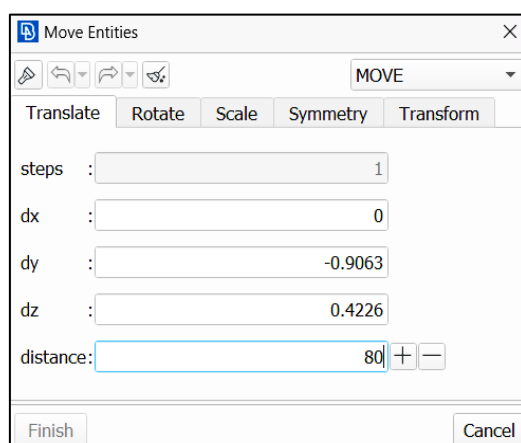
Η ανύψωση του πίσω τροχού συνεπάγεται ότι $Sr=0$, άρα από την εξίσωση (1) θα ισχύει

$$Sf = Mg \cdot d = 1354.27 \text{ N}$$

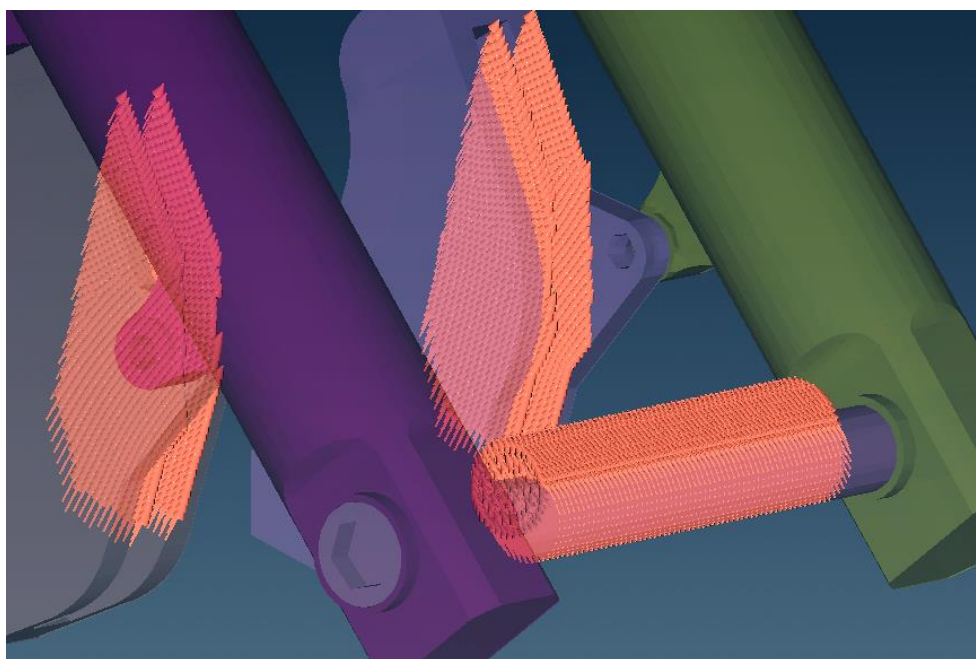
Συνεπώς, η ροπή που εφαρμόζεται στον τροχό είναι

$$M_{br} = Sf \cdot R = 423.34 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Η ίδια ροπή εφαρμόζεται και στους δίσκους φρεναρίσματος, οπότε η δύναμη αντίδρασης στις δαγκάνες φρένου θα είναι: $M_{br}/r = 2785.13 \text{ N}$. Υπάρχουν όμως δύο δαγκάνες, οπότε αυτή η δύναμη μοιράζεται στα δύο και ισχύει: $F_{calipers} = 2785.13/2 = 1392.57 \text{ N}$.



Εικόνα 50: Ρύθμιση για βύθισμα της ανάρτησης κατά 80 mm



Εικόνα 51: Περίπτωση πέδησης

2.3.6 Αρχείο επιλυτή

Η μοντελοποίηση ολοκληρώνεται με τη σύνταξη του αρχείου ανάγνωσης του επιλυτή (header file). Μέσω του αρχείου αυτού ο επιλυτής βρίσκει πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά της μοντελοποίησης (πακτώσεις, συνδέσεις, φορτίσεις) καθώς και για το είδος της ανάλυσης που πρόκειται να εκτελέσει. Είναι αναγκαίο τα χαρακτηριστικά της μοντελοποίησης να έχουν ενταχθεί σωστά σε B.C. Sets ώστε να γίνει η ανάγνωση τους από το αρχείο. Για παράδειγμα, στην παρούσα ανάλυση υπάρχουν 2 Load Sets: ένα για τη στατική φόρτιση (με ID=1) που περιλαμβάνει μόνο τη φόρτιση βάρους και ένα για την πέδηση (με ID=2) που περιλαμβάνει τόσο το βάρος όσο και τη δύναμη στις δαγκάνες. Επιπλέον, εφόσον αυτό που πρέπει να εξεταστεί είναι οι ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises και οι παραμορφώσεις, το αρχείο συντάσσεται όπως φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 52). Με την προετοιμασία του αρχείου, ολοκληρώνεται η εργασία στον προ-επεξεργαστή και σειρά έχει η εξαγωγή των αρχείων επίλυσης.

```
1 SOL 101
2 CEND
3 $
4  ✓ DISPLACEMENT (PLOT) = ALL
5 STRESS (PLOT) = ALL
6 STRAIN (PLOT) = ALL
7 SPC = 1
8 LOAD = 1 ή 2 για το σενάριο πέδησης
9 BCONTACT = 10
10 $
11 PARAM, POST, -1
```

Εικόνα 52: Header file

Κεφάλαιο 3: Τοπολογική Βελτιστοποίηση

3.1 Βελτιστοποίηση Κατασκευών

Ως βελτιστοποίηση μιας κατασκευής ορίζεται από τους μηχανικούς η διαδικασία εύρεσης τρόπων μείωσης του κατασκευαστικού/λειτουργικού κόστους, τηρώντας παράλληλα όλες τις προδιαγραφές και τα πρωτόκολλα λειτουργίας. Αντικείμενα προς βελτιστοποίηση σε μια κατασκευή είναι το σχήμα της, το μέγεθος των χαρακτηριστικών της (π.χ. οπές), αλλά και η κατανομή του υλικού σε αυτή. Στην τελευταία περίπτωση, υλικό προσθαφαιρείται εντός προκαθορισμένου χώρου ώστε να επιτευχθεί ακαμψία στην κατασκευή [17].

3.1.1 Περιγραφή τοπολογικής βελτιστοποίησης

Η τοπολογική βελτιστοποίηση είναι μια μαθηματική μέθοδος που βελτιστοποιεί τη διάταξη του υλικού μέσα σε ένα δεδομένο χώρο σχεδιασμού, για ένα δεδομένο σύνολο φορτίων, οριακών συνθηκών και περιορισμών με στόχο τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Διαφέρει από τη βελτιστοποίηση σχήματος (shape optimization) και τη βελτιστοποίηση μεγέθους (sizing optimization) με την έννοια ότι το σχέδιο μπορεί να αποκτήσει οποιοδήποτε σχήμα εντός του σχεδιαστικού χώρου, αντί να ασχολείται με προκαθορισμένες διαμορφώσεις [24]. Σε αντίθεση με το λεπτομερή σχεδιασμό (detail design) όπου εφαρμόζονται οι βελτιστοποιήσεις μεγέθους και σχήματος, ο αρχικός προκαταρκτικός σχεδιασμός (conceptual design) για τη μελέτη διάταξης και διανομής των φορτίσεων στο σώμα χρησιμοποιεί την τοπολογική βελτιστοποίηση. Πρόκειται δηλαδή για μέθοδο που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της βασικής ιδέας, πάνω στην οποία εφαρμόζονται ακολούθως βελτιστοποιήσεις μεγέθους και σχήματος [25].

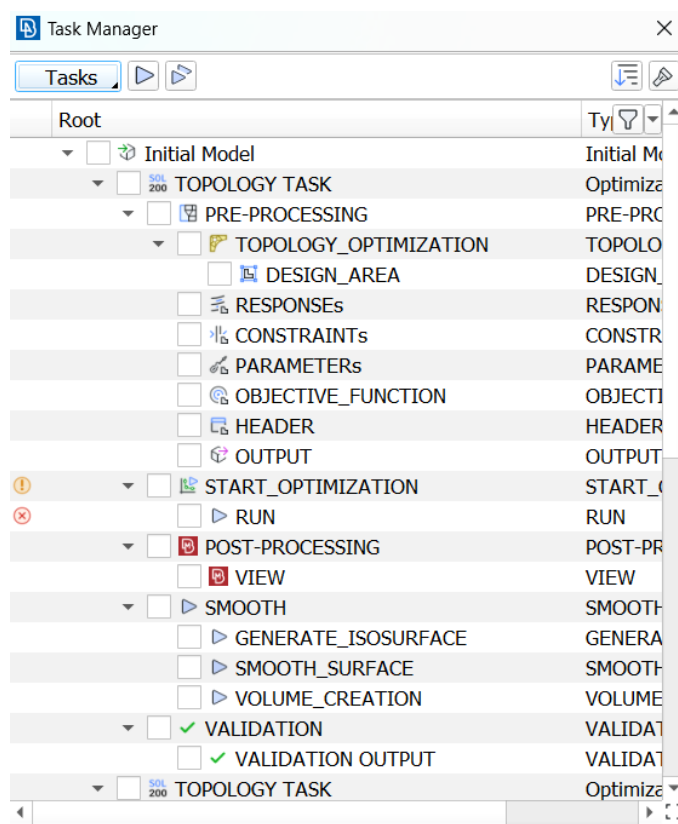
3.1.2 Διατύπωση προβλήματος

➤ **Μεταβλητές σχεδιασμού:** Οι παράμετροι εκείνες οι οποίες όταν λάβουν συγκεκριμένη τιμή καθορίζουν πλήρως έναν σχεδιασμό. Στην τοπολογική βελτιστοποίηση, χρησιμοποιείται μοντέλο στο οποίο εφαρμόστηκε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Συνεπώς, έχει γίνει διακριτοποίηση του πεδίου σχεδιασμού (design area) σε πεπερασμένα στοιχεία. Οι πυκνότητες υλικών μέσα σε αυτά τα στοιχεία αποτελούν τις μεταβλητές του προβλήματος. Η πυκνότητα υλικού που ισούται με 1 υποδηλώνει την παρουσία υλικού, ενώ η πυκνότητα που ισούται με 0 υποδηλώνει απουσία υλικού [24].

➤ **Αντικειμενική συνάρτηση:** Ελαχιστοποίηση της δομικής υποχωρητικότητας (min. structural compliance) του μοντέλου, που συνεπάγεται μεγιστοποίηση ακαμψίας (max. stiffness).

➤ **Περιορισμοί:** Η μία κατηγορία περιορισμών είναι οι κατασκευαστικοί (manufacturing constraints). Σε αυτούς περιλαμβάνονται ο περιορισμός συμμετρίας - όπου ορίζεται πως το προκύπτον μοντέλο θα είναι συμμετρικό ως προς τον επιθυμητό άξονα - (symmetry constraint), ο περιορισμός προεξοχής - όπου ορίζεται πως θα εκτείνεται κατά μήκος του επιθυμητού άξονα - (extrusion constraint) και τέλος ο περιορισμός μεγέθους των μελών - όπου ορίζεται το ελάχιστο και μέγιστο μέγεθος που θα έχει ένα μέλος του μοντέλου - (member size constraint). Μέλος είναι μια ομάδα πεπερασμένων στοιχείων τα οποία βρίσκονται μέσα στο μοντέλο στο ευθεία διάταξη.

➤ **Αποκρίσεις:** Η άλλη κατηγορία περιορισμών είναι οι αποκρίσεις (responses). Εδώ κατατάσσονται όλες οι αποκρίσεις που εμφανίζει το μοντέλο με βάση την ακαμψία που διαθέτει. Αυτές μπορεί να προέρχονται από κάθε είδους φόρτιση (εφελκυστική, στρεπτική, καμπτική, κλπ). Επιπλέον, στις αποκρίσεις κατατάσσονται οι λόγοι μάζας και όγκου του προκύπτοντος μοντέλου (δηλ. η τελική τιμή μάζας ή όγκου ως προς την αρχική).



Εικόνα 53: Παράμετροι τοπολογικής με SOL 200 στον Task Manager του ANSA

3.2 Εφαρμογή

Για τις ανάγκες αυτής της μελέτης, η τοπολογική βελτιστοποίηση στο σύστημα της τηλεσκοπικής ανάρτησης εφαρμόζεται με χρήση της λειτουργίας SOL 200 του ANSA. Έχοντας ήδη διαμορφώσει τις συνθήκες ακραίας πέδησης στο μοντέλο, επόμενο βήμα είναι να διατυπωθεί το πρόβλημα στο περιβάλλον του προγράμματος. Αυτό γίνεται μέσω του εργαλείου Task Manager, στο οποίο εισάγεται το μοντέλο σε συνθήκες πέδησης και ακολούθως ορίζονται τα απαραίτητα δεδομένα (Εικόνα 53).

3.2.1 Διαδικασία επίλυσης

Αρχικά ορίζεται η πεδίο σχεδιασμού (design area). Στο πεδίο αυτό περιλαμβάνεται ως μεταβλητή σχεδιασμού ένα στερεό στοιχείο (solid property). Ο ορισμός της μεταβλητής περιλαμβάνει και την επιλογή κατασκευαστικών περιορισμών, με βάση τους οποίους προκύπτει η νέα μορφή του προς βελτιστοποίηση στοιχείου. Στη συνέχεια, ορίζονται δύο αποκρίσεις (responses). Η πρώτη αφορά τη δομική υποχωρητικότητα του μοντέλου, ενώ η δεύτερη τη μείωση μάζας. Σειρά έχει ο σχεδιαστικός περιορισμός που καθορίζει το μέγιστο επιτρεπτό ποσοστό μείωσης της μάζας. Το επόμενο βήμα είναι να ορισθεί η παράμετρος για τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων σχεδίασης. Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο αριθμός, τόσο πλησιάζει το αποτέλεσμα τη βέλτιστη σχεδίαση. Στο ίδιο βήμα ενεργοποιείται και ο αλγόριθμος φιλτραρίσματος (filtering algorithm), ο οποίος βελτιώνει την κατανομή των στοιχείων στο πλέγμα αντιμετωπίζοντας ελαττώματα όπως η κατανομή «σκακιέρα» (checkerboard patterns). Η χρήση του αλγορίθμου φιλτραρίσματος είναι προαιρετική, καθώς έχει υπολογιστικό κόστος. Ακολουθεί η αντικειμενική συνάρτηση, η σύνταξη του αρχείου επίλυσης SOL 200 και η εκτέλεση της επίλυσης. Τα αρχεία επίλυσης που προκύπτουν, χρησιμοποιούνται για να διαμορφωθεί η γεωμετρία του αποτελέσματος της τοπολογικής (smooth procedure). Αυτή σε επόμενο βήμα απεικονίζεται χρωματικά στον μετα-επεξεργαστή META.

3.2.2 Μεταβλητές σχεδιασμού

Στην παρούσα εργασία, ως μεταβλητές σχεδιασμού επιλέχθηκαν η **τιμονόπλακα** (top yoke) και η **τριπλή σύνδεση** (triple clamp). Είναι δύο διαφορετικά τμήματα της τηλεσκοπικής ανάρτησης και επιλέχθηκαν διότι έχουν προοπτικές βελτίωσης ως προς τη μάζα και το σχεδιασμό τους. Η θέση τους στην ανάρτηση δεν απαιτεί μεγάλη ακαμψία, ωστόσο πρέπει η κατανομή των τάσεων που δέχονται να γίνεται ομοιόμορφα στην επιφάνειά τους. Γι' αυτό το λόγο και ως υλικό κατασκευής τους επιλέχθηκε στο αλουμίνιο 6061-T6. Δεδομένου ότι πρόκειται για διαφορετικά στερεά σώματα (solid bodies), η τοπολογική βελτιστοποίηση εφαρμόζεται δύο φορές: μια στο αρχικό μοντέλο και μια στο μοντέλο με επανασχεδιασμένο το ένα από τα δύο εξαρτήματα. Στο κεφάλαιο παρουσίασης των αποτελεσμάτων, μαζί με την κατανομή τάσεων στο μοντέλο παρατίθενται και οι κατανομές τάσεων στα δύο εξαρτήματα προς βελτιστοποίηση.



Εικόνα 54: Η τιμονόπλακα (πάνω) και η τριπλή σύνδεση (κάτω)

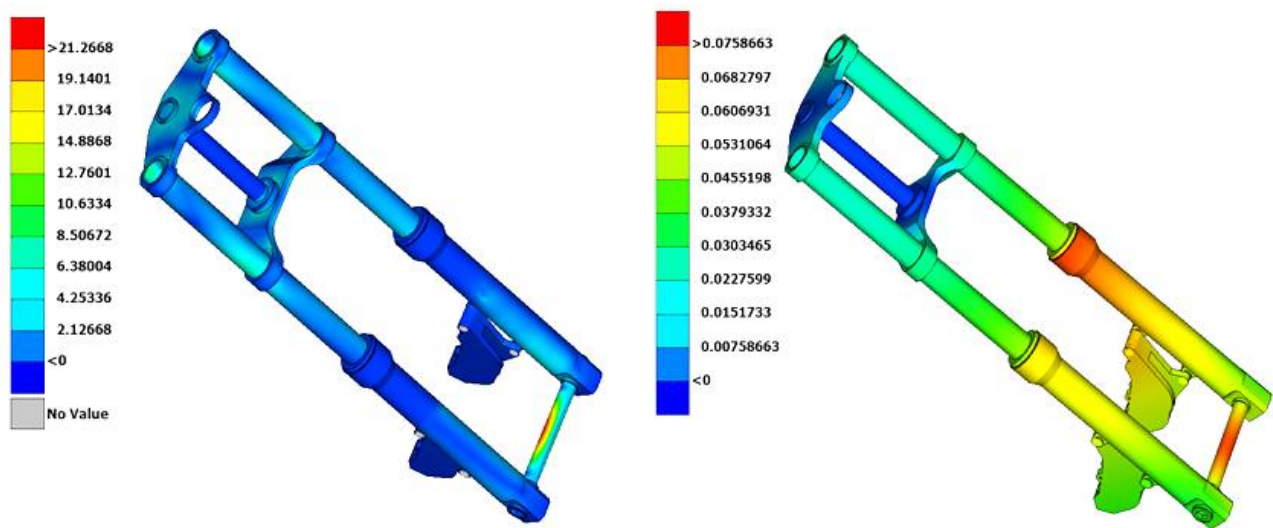
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Επανασχεδίαση

4.1 Ανάλυση Αρχικού Σχεδίου

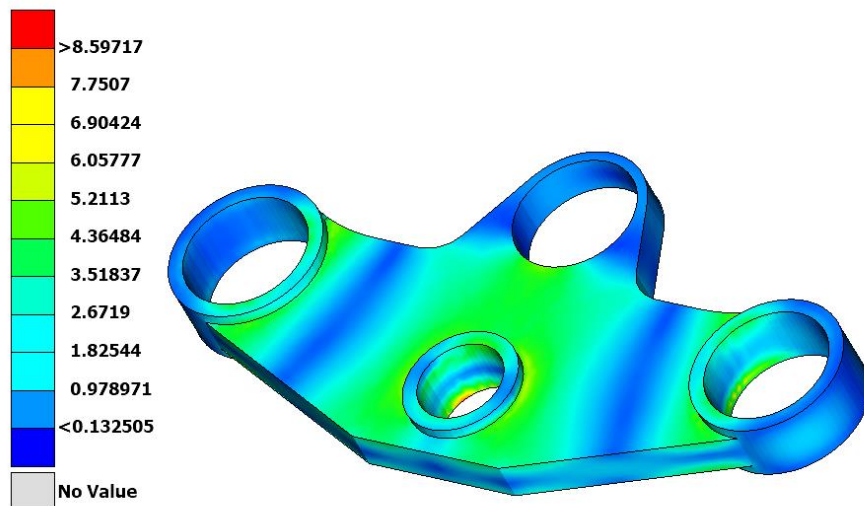
Στο αρχικό σχέδιο του τηλεσκοπικού πιρουνιού, γίνεται με χρήση του προ-επεξεργαστή ANSA η μοντελοποίηση των δύο σεναρίων φόρτισης. Ο επιλυτής EPILYSIS επεξεργάζεται τα δεδομένα του μοντέλου και υπολογίζει τα μεγέθη προς μελέτη. Αυτά είναι οι ορθές τάσεις κατά Von Mises (Von Mises stresses) που μετρούνται σε MPa και οι μετατοπίσεις (displacements) που μετρούνται σε mm. Τα αρχεία αποτελεσμάτων εισάγονται στον μετα-επεξεργαστή META, όπου γίνεται η χρωματική απεικόνιση τους.

4.1.1 Στατική φόρτιση

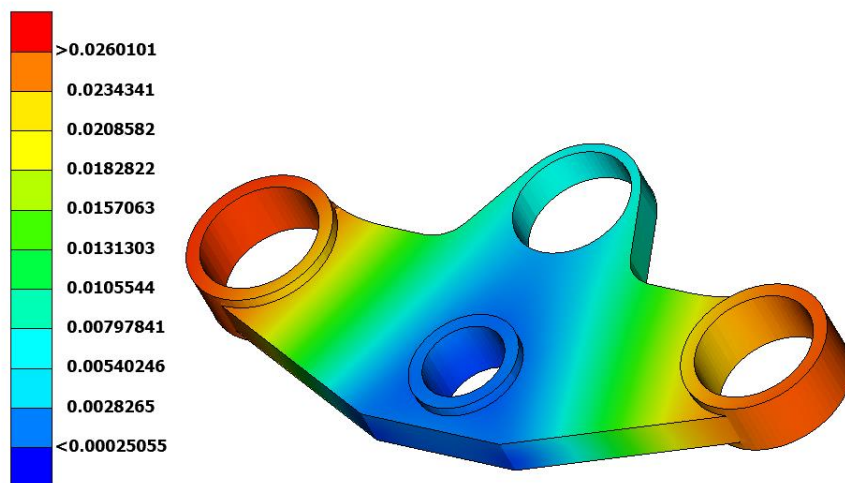
Στο σενάριο της στατικής φόρτισης, επιδρά μόνο η δύναμη των 1343.48 N στον άξονα του τροχού, που αντιστοιχεί στο ποσοστό του συνολικού βάρους που αναρτάται από την εμπρός ανάρτηση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής παρουσιάζονται στις Εικόνες 55-57.



Εικόνα 55: Κατανομή τάσεων (αριστερά) και μετατοπίσεων (δεξιά) στην ανάρτηση υπό στατική φόρτιση



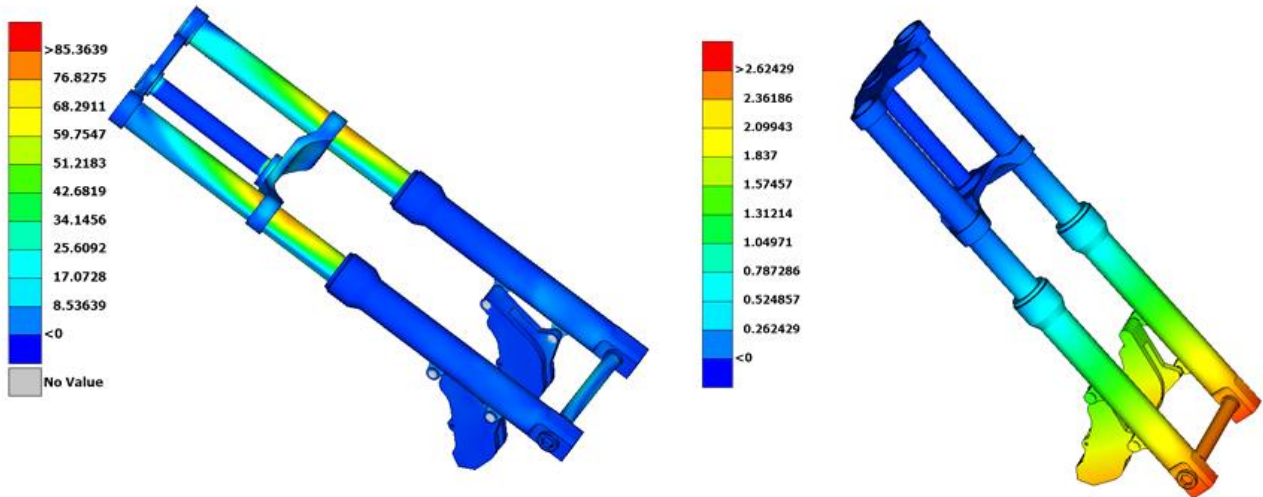
Εικόνα 56: Κατανομή τάσεων στην τιμονόπλακα υπό στατική φόρτιση



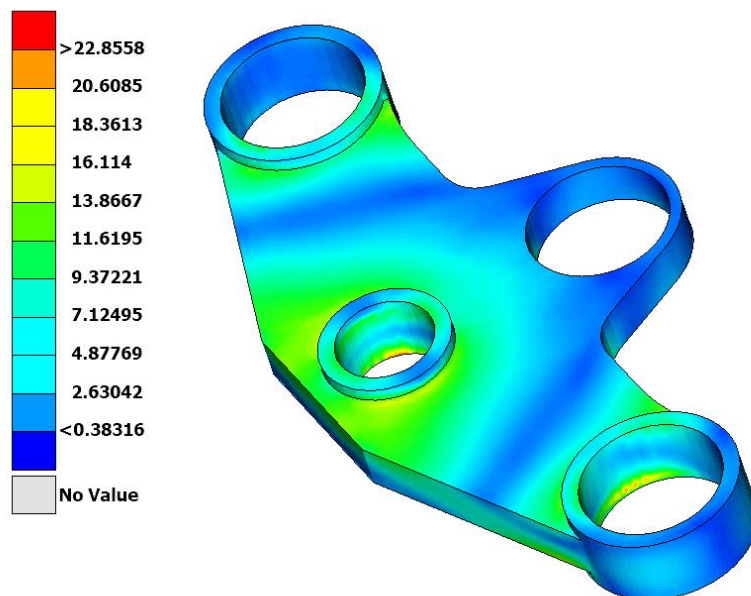
Εικόνα 57: Μετατοπίσεις στην τιμονόπλακα υπό στατική φόρτιση

4.1.2 Πέδηση

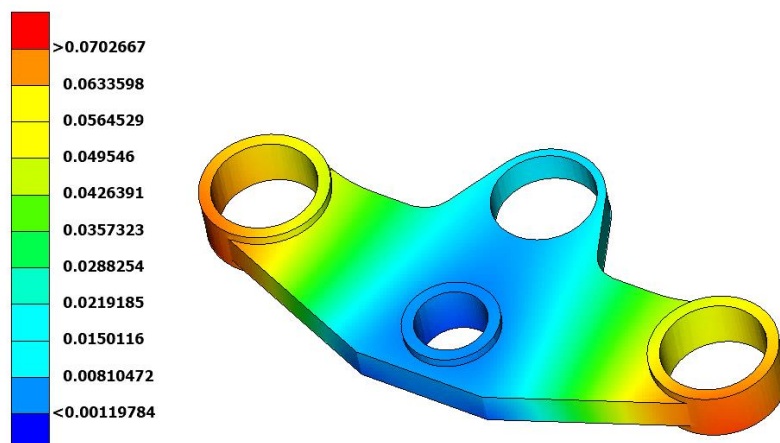
Στο σενάριο πέδησης, εκτός από τη δύναμη στον άξονα του τροχού υπάρχουν και οι δυνάμεις που αντιστοιχούν στη ροπή επιβράδυνσης του τροχού. Αυτές μοιράζονται ισότιμα στις δύο δαγκάνες φρεναρίσματος, έχουν μέτρο 1392.57 N και εφαρμόζονται στις εσωτερικές επιφάνειες της κάθε δαγκάνας φρένου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 58-60.



Εικόνα 58: Κατανομή τάσεων (αριστερά) και μετατοπίσεων (δεξιά) στην ανάρτηση υπό πέδηση



Εικόνα 59: Κατανομή τάσεων στην τιμονόπλακα υπό πέδηση



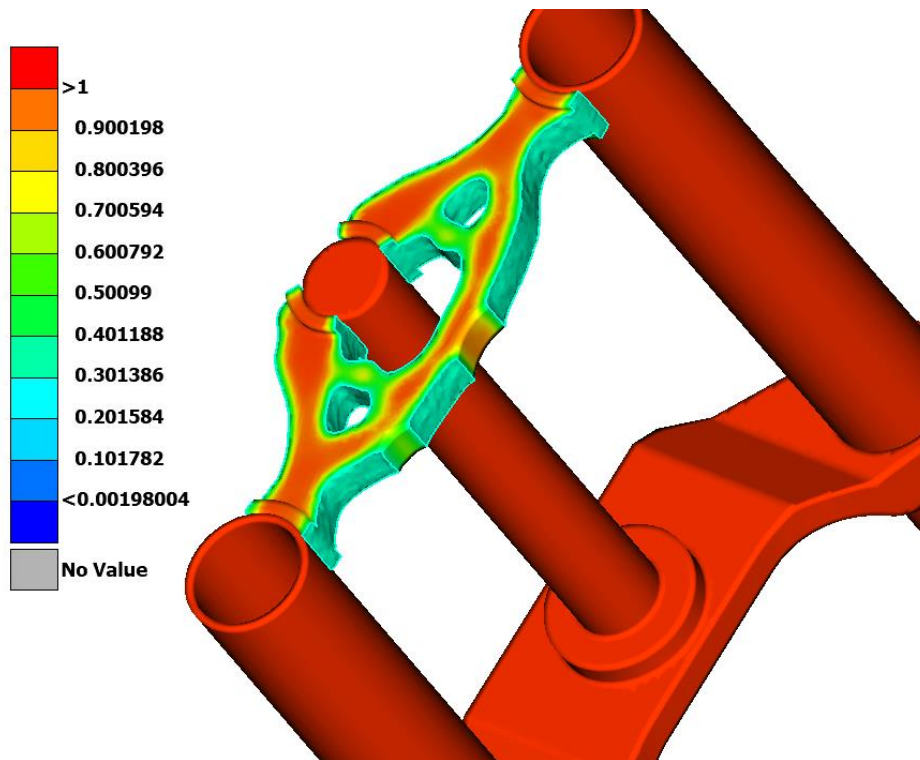
Εικόνα 60: Μετατοπίσεις στην τιμονόπλακα υπό πέδηση

Πίνακας 1: ΑΡΧΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΙΜΟΝΟΠΛΑΚΑΣ

	ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	ΠΕΔΗΣΗ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ	8.60 MPa	22.56 MPa
ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ	0.026 mm	0.070 mm

4.1.3 Τοπολογική βελτιστοποίηση τιμονόπλακας

Με χρήση του Task Manager στον προ-επεξεργαστή ANSA, διαμορφώνεται το πρόβλημα προς βελτιστοποίηση με περιοχή σχεδιασμού την τιμονόπλακα. Το αρχικό βάρος του εξαρτήματος είναι **0.546 kg**. Ο επιλυτής SOL 200 εξάγει τα αρχεία αποτελεσμάτων, κατόπιν διαμορφώνεται η γεωμετρία του αποτελέσματος και τέλος ο μετα-επεξεργαστής ΜΕΤΑ παρουσιάζει το αποτέλεσμα. Η τοπολογική βελτιστοποίηση της τιμονόπλακας τερμάτισε μετά από 17 κύκλους βελτιστοποίησης. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 61.



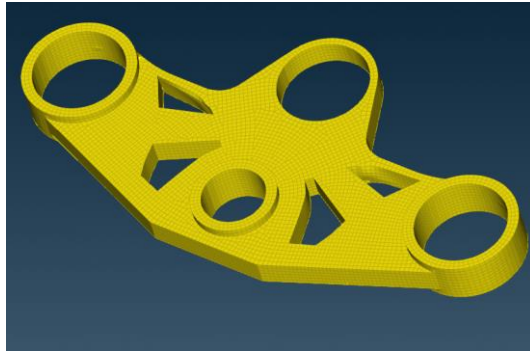
Εικόνα 61: Αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης τιμονόπλακας (κύκλος 17, *threshold value* = 30%)

Από τις Εικόνες 59-61 εξάγεται το συμπέρασμα ότι η αφαίρεση υλικού στην τιμονόπλακα πρέπει να γίνει σε περιοχές κεντρικά του τεμαχίου. Διαφορετικά, θα επηρεαστεί η ακαμψία του και θα προκύψουν σημεία με μειωμένη αντοχή. Η οπή της κλειδαριάς δε μπορεί να παραληφθεί από το νέο σχεδιασμό, παρόλο που δέχεται αμελητέες τάσεις.

4.2 Επανασχεδιασμός Τιμονόπλακας

4.2.1 Επανασχεδιασμός

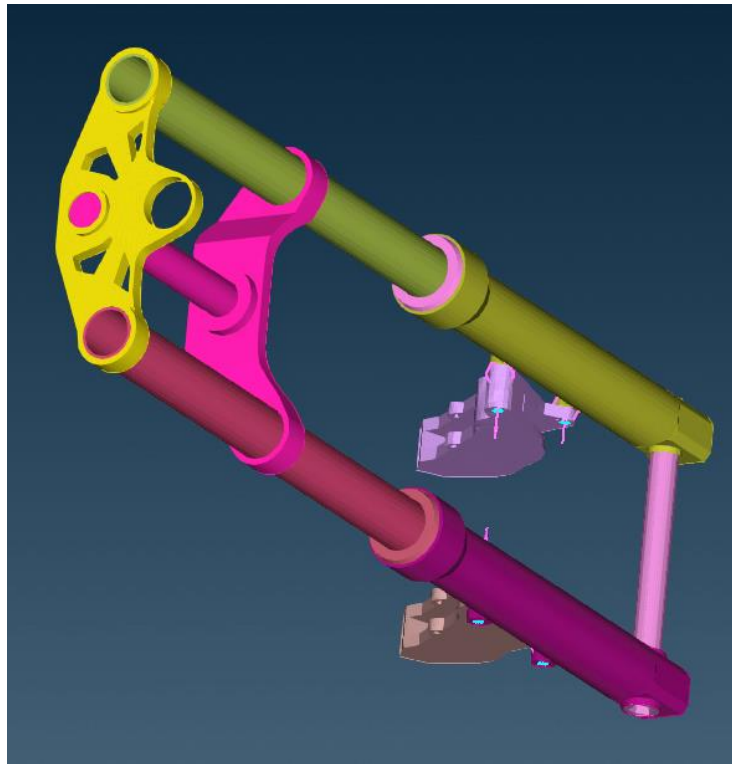
Μετά από διάφορους πειραματισμούς, καταλήγουμε στο παρακάτω σχέδιο της Εικόνας 62. Η οπή της κλειδαριάς, αν και περιοχή που δεν αναπτύσσονται σχεδόν καθόλου τάσεις, όπως φαίνεται διατηρείται στο σχέδιο για πρακτικούς λόγους. Παρ' όλα αυτά, η νέα τιμονόπλακα έχει πάχος μειωμένο κατά 2 mm, ενώ έχει αφαιρεθεί υλικό κι από τα εμφανή σημεία στο κέντρο. Το βάρος της νέας τιμονόπλακας είναι **0.413 kg**, δηλαδή 24.4% λιγότερο από το βάρος του αρχικού σχεδίου.



Εικόνα 62: Επανασχεδιασμός τιμονόπλακας

4.2.2 Μοντελοποίηση

Η νέα τιμονόπλακα προέκυψε από επεξεργασία της γεωμετρίας στο πλέγμα κελύφους του εξαρτήματος. Σε πρώτη φάση, τα περισσότερα πεπερασμένα στοιχεία διαγράφηκαν και έμεινε περίπου το $\frac{1}{4}$ του κελύφους. Αφαιρέθηκε υλικό από σημεία με τρόπο που να επιτρέπει την ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στο εξάρτημα. Στη συνέχεια, με χρήση εργαλείων του ANSA για συμμετρική σχεδίαση αντιγράφηκε το υπάρχον τμήμα του κελύφους τόσο κατά μήκος, όσο και κατά πάχος. Τα πεπερασμένα στοιχεία που παρουσίαζαν σφάλματα διείσδυσης (intersection – penetration errors) σβήστηκαν και στη θέση τους σχεδιάστηκαν καινούργια. Τέλος, δόθηκε στο ενοποιημένο κέλυφος μια νέα μορφή πλέγματος και κατόπιν προέκυψε το νέο στερεό πλέγμα.

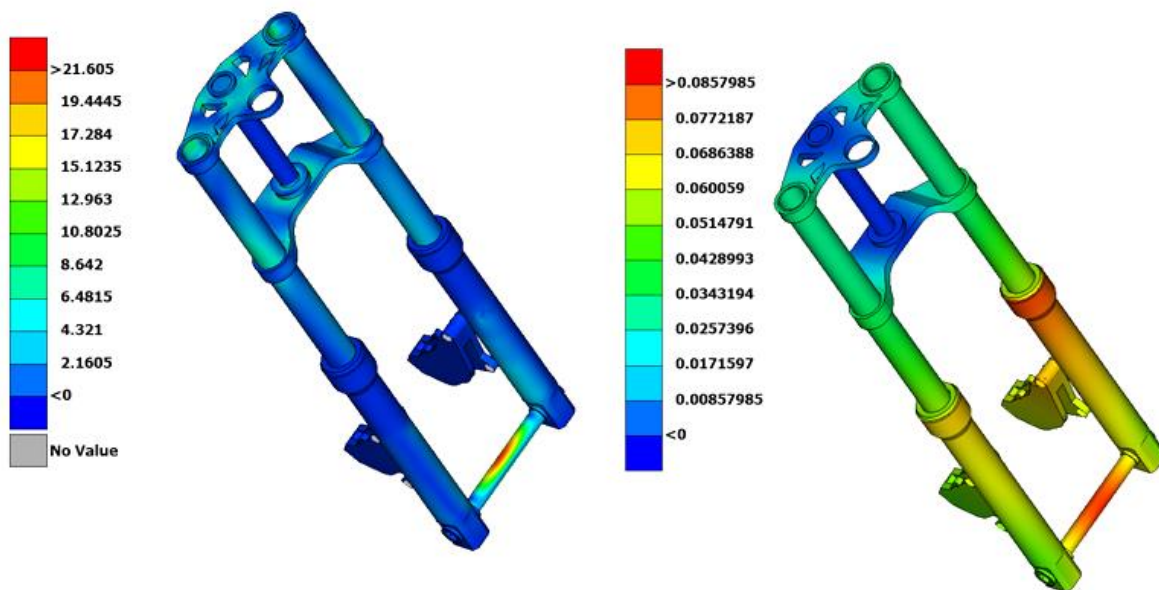


Εικόνα 63: Η τηλεσκοπική ανάρτηση με τη νέα τιμονόπλακα

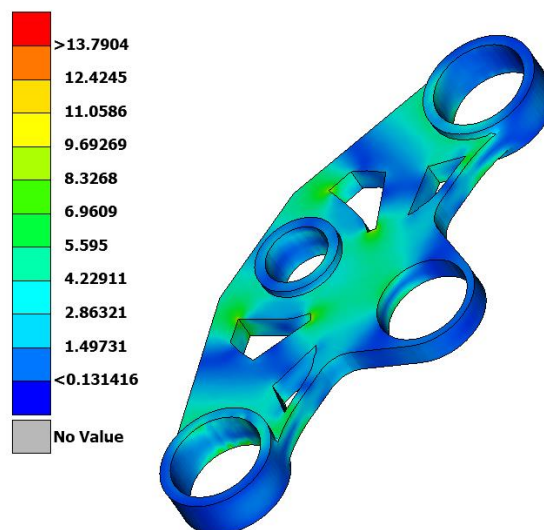
4.3 Αποτελέσματα Επανασχεδιασμού Τιμονόπλακας

4.3.1 Στατική φόρτιση

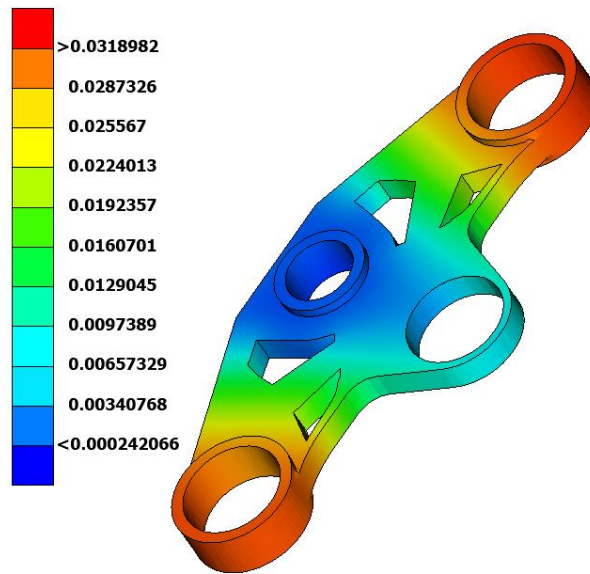
Ομοίως, στη στατική φόρτιση επιδρά μόνο η δύναμη των 1343.48 N στον άξονα του τροχού ως ποσοστό του συνολικού βάρους που αναρτάται από την εμπρός ανάρτηση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 64-67.



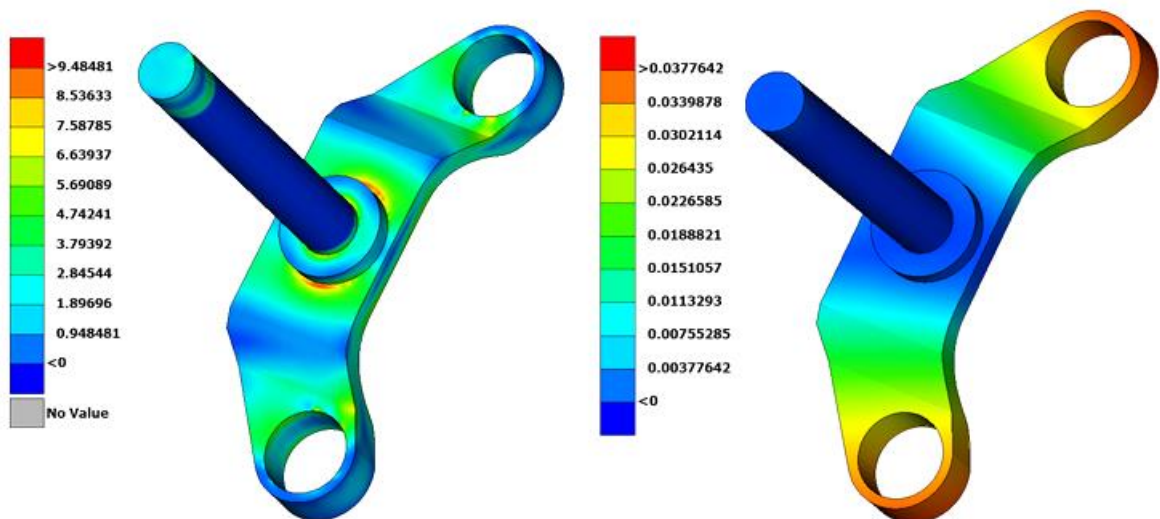
Εικόνα 64: Κατανομή τάσεων (αριστερά) και μετατοπίσεων (δεξιά) στην ανάρτηση υπό στατική φόρτιση



Εικόνα 65: Κατανομή τάσεων στη νέα τιμονόπλακα υπό στατική φόρτιση



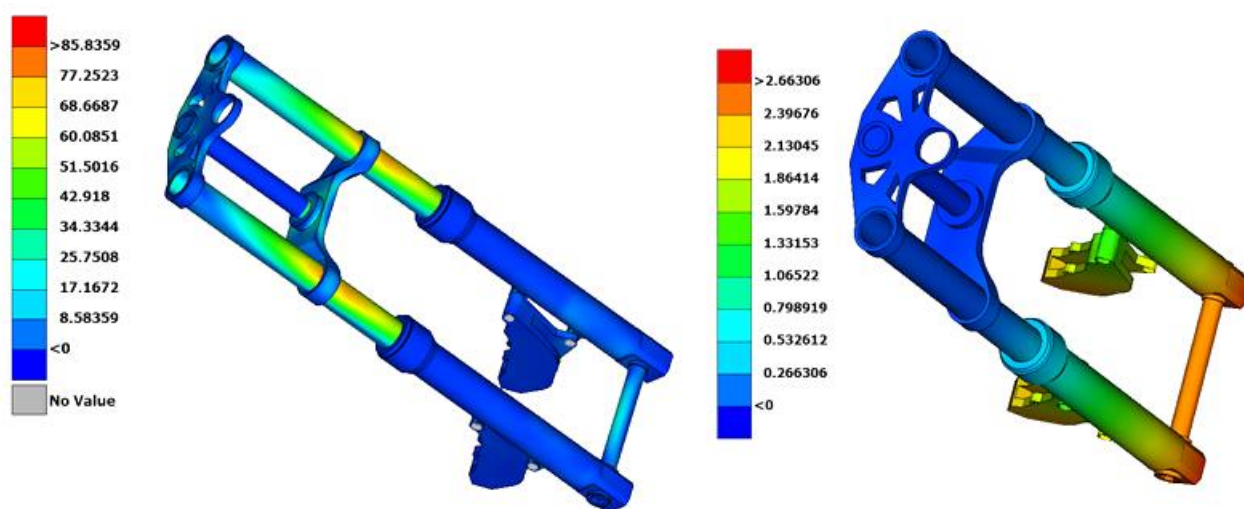
Εικόνα 66: Μετατοπίσεις στη νέα τιμονόπλακα υπό στατική φόρτιση



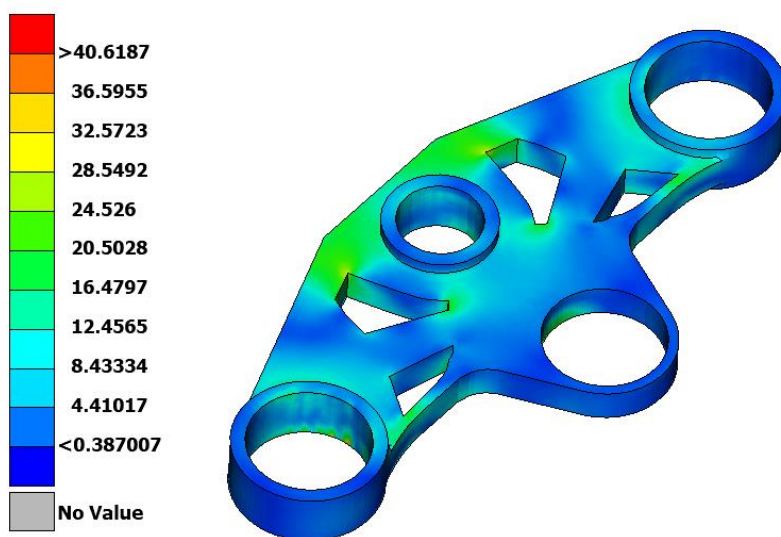
Εικόνα 67: Κατανομή τάσεων (αριστερά) και μετατοπίσεων (δεξιά) στην τριπλή σύνδεση υπό στατική φόρτιση

4.3.2 Πέδηση

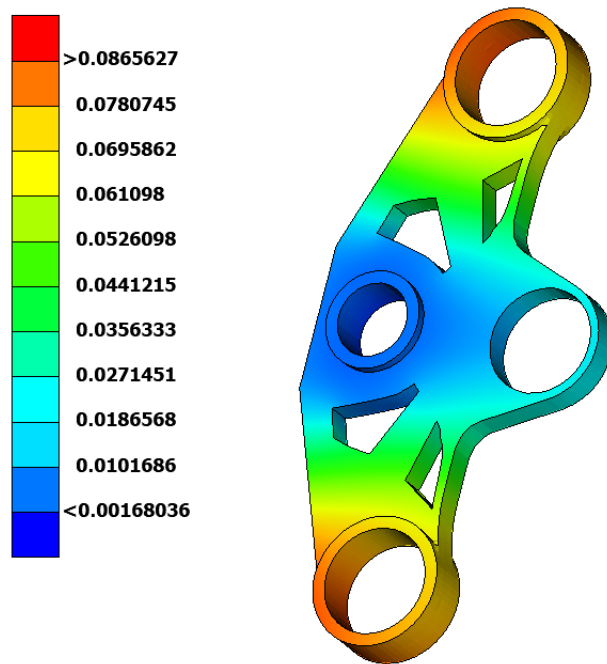
Ομοίως, στην πέδηση προστίθενται και οι δυνάμεις επιβράδυνσης του τροχού με μέτρο 1392.57 N, που εφαρμόζονται στις εσωτερικές επιφάνειες της κάθε δαγκάνας φρένου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 68-71.



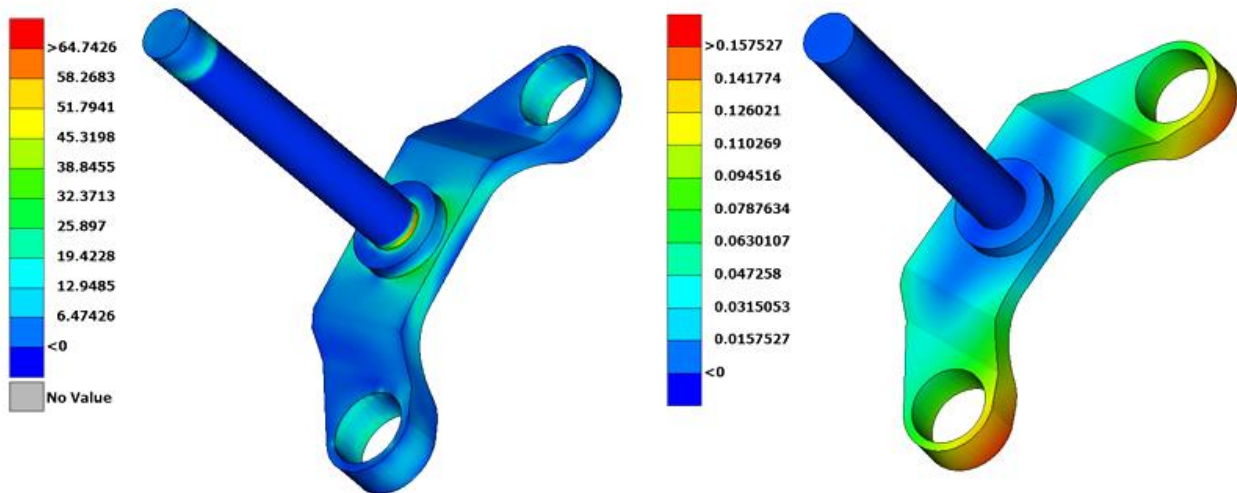
Εικόνα 68: Κατανομή τάσεων (αριστερά) και μετατοπίσεων (δεξιά) στην ανάρτηση υπό πέδηση



Εικόνα 69: Κατανομή τάσεων στη νέα τιμονόπλακα υπό πέδηση



Εικόνα 70: Μετατοπίσεις στη νέα τιμονόπλακα υπό πέδηση



Εικόνα 71: Κατανομή τάσεων (αριστερά) και μετατοπίσεων (δεξιά) στην τριπλή σύνδεση υπό πέδηση

Πίνακας 2: ΣΧΕΔΙΟ ΜΕ ΝΕΑ ΤΙΜΟΝΟΠΛΑΚΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΙΜΟΝΟΠΛΑΚΑΣ

	ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	ΠΕΔΗΣΗ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ	13.79 MPa	40.62 MPa
ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ	0.032 mm	0.087 mm

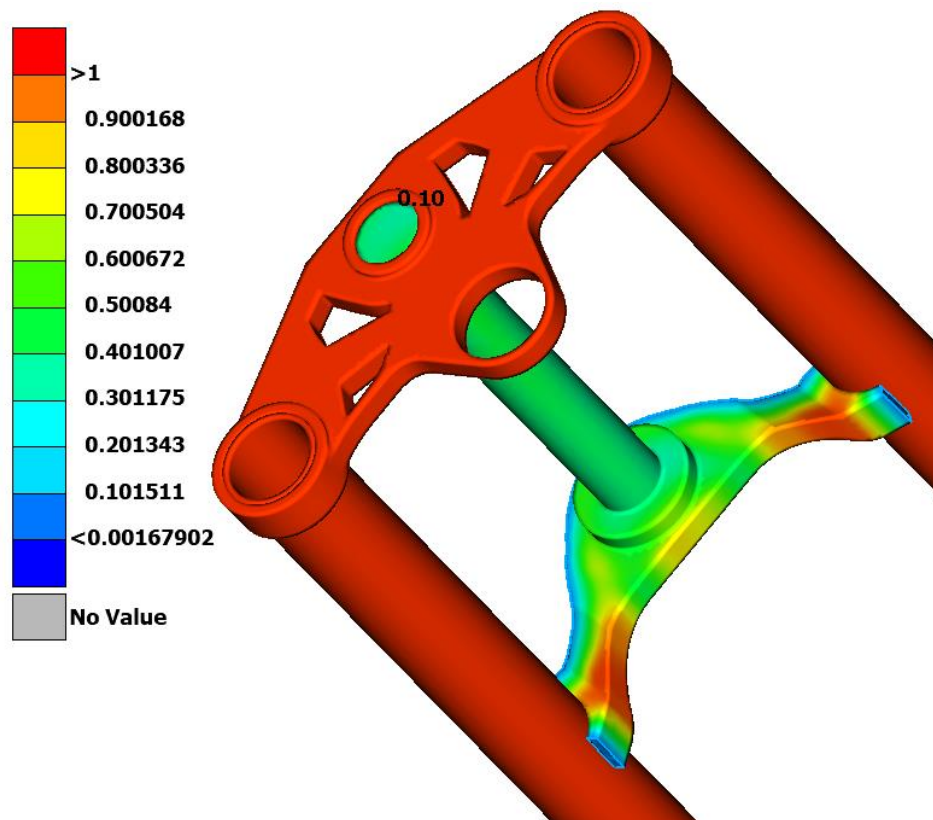
Πίνακας 3: ΣΧΕΔΙΟ ΜΕ ΝΕΑ ΤΙΜΟΝΟΠΛΑΚΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΙΠΛΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

	ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	ΠΕΔΗΣΗ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ	9.48 MPa	64.74 MPa
ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ	0.037 mm	0.1575 mm

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα στο μοντέλο με τη νέα τιμονόπλακα, παρατηρούμε αυξήσεις σε τάσεις και μετατοπίσεις. Παρόλα αυτά, σε συνθήκες ακραίας πέδησης οι μέγιστες τάσεις δεν πλησιάζουν το όριο διαρροής του υλικού και η καταπόνηση είναι ομοιόμορφη στην επιφάνεια του τεμαχίου (Εικόνα 69). Συνεπώς, ο επανασχεδιασμός είναι αποδεδειγμένος. Επιπλέον, από την ανάλυση τάσεων και μετατοπίσεων στο τεμάχιο της τριπλής σύνδεσης, φαίνεται πως υπάρχουν περιθώρια για αφαίρεση υλικού.

4.3.3 Τοπολογική βελτιστοποίηση τριπλής σύνδεσης

Στον Task Manager του ANSA, διαμορφώνεται το πρόβλημα προς βελτιστοποίηση με περιοχή σχεδιασμού την τριπλή σύνδεση. Το αρχικό βάρος της είναι **1.056 kg**. Ο επιλυτής SOL 200 εξάγει τα αρχεία αποτελεσμάτων, διαμορφώνεται η γεωμετρία του αποτελέσματος και τέλος στο META παρουσιάζεται το αποτέλεσμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 72. Η τοπολογική βελτιστοποίηση της τριπλής σύνδεσης τερμάτισε μετά από 12 κύκλους βελτιστοποίησης.



Εικόνα 72: Αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης τριπλής σύνδεσης (κύκλος 12, *threshold value* = 10%)

4.4 Επανασχεδιασμός Τριπλής Σύνδεσης

4.4.1 Επανασχεδιασμός

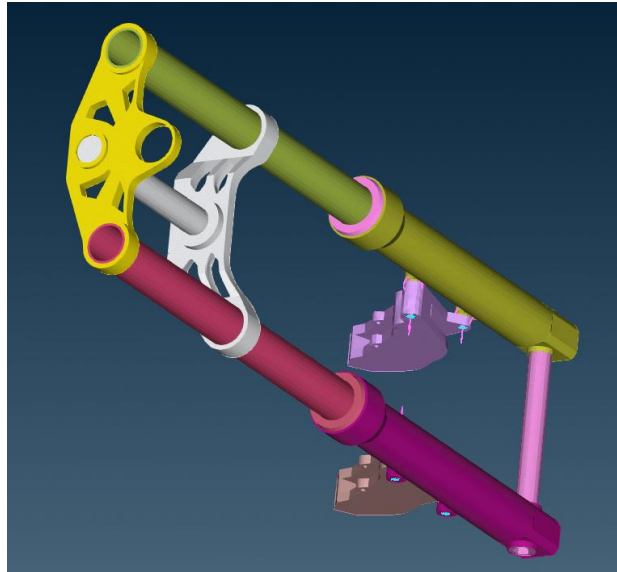
Όπως στον επανασχεδιασμό της τιμονόπλακας, έτσι και σε αυτόν της τριπλής σύνδεσης οι στόχοι παραμένουν ίδιοι. Οι πειραματισμοί αφαίρεσης υλικού οδηγούν στο σχέδιο της Εικόνας 73. Η ράβδος που πακτώνεται στο πλαίσιο της μοτοσυκλέτας, για πρακτικούς λόγους, παραμένει ανέπαφη. Δεδομένου ότι το συγκεκριμένο τεμάχιο με τις οπές του συγκρατεί τα καλάμια της μοτοσυκλέτας, μια μείωση στο πάχος του θα επηρέαζε σημαντικά ένα σημείο του συστήματος που απαιτεί ενισχυμένη συγκράτηση και ακαμψία. Γι' αυτό το λόγο έμεινε ανέπαφο και το πάχος του. Άρα έχει αφαιρεθεί υλικό μόνο από τα εμφανή σημεία εκατέρωθεν της ράβδου. Το βάρος της νέας τριπλής σύνδεσης είναι **0.947 kg**, δηλαδή 10.3% λιγότερο από το βάρος του αρχικού σχεδίου.



Εικόνα 73: Επανασχεδιασμός τριπλής σύνδεσης

4.4.2 Μοντελοποίηση

Η νέα τριπλή σύνδεση προέκυψε με παρόμοια διαδικασία. Αφαιρέθηκε υλικό με τρόπο που να επιτρέπει την ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στο εξάρτημα. Τα πεπερασμένα στοιχεία που παρουσίαζαν σφάλματα διεύθυνσης σβήστηκαν και επιδιορθώθηκαν. Τέλος, δόθηκε στο ενοποιημένο κέλυφος μια νέα μορφή πλέγματος και προέκυψε το στερεό πλέγμα. Στην Εικόνα 74 φαίνεται η νέα τριπλή σύνδεση, προσαρμοσμένη στο σύστημα.

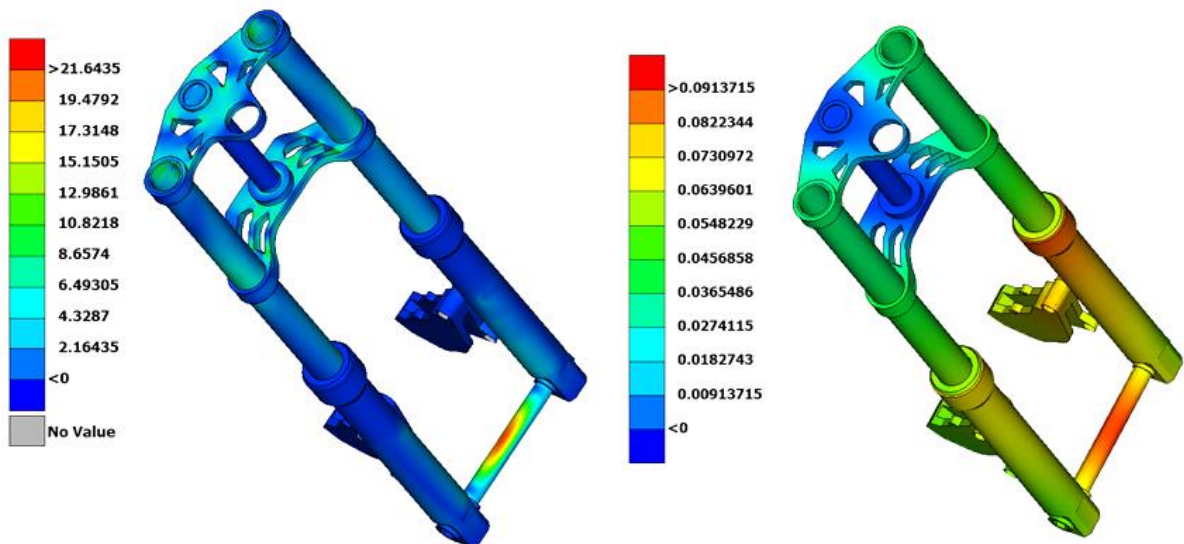


Εικόνα 74: Η τηλεσκοπική ανάρτηση με τη νέα τριπλή σύνδεση

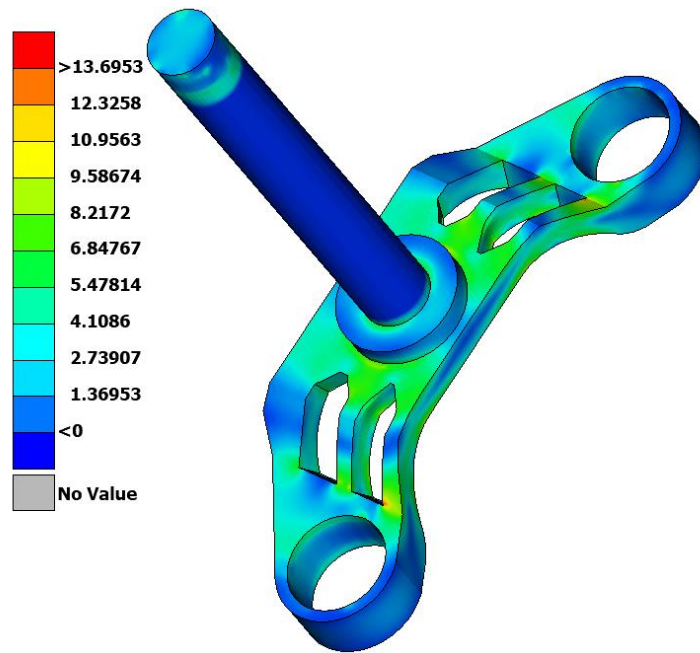
4.5 Αποτελέσματα Επανασχεδιασμού Τριπλής Σύνδεσης

4.5.1 Στατική φόρτιση

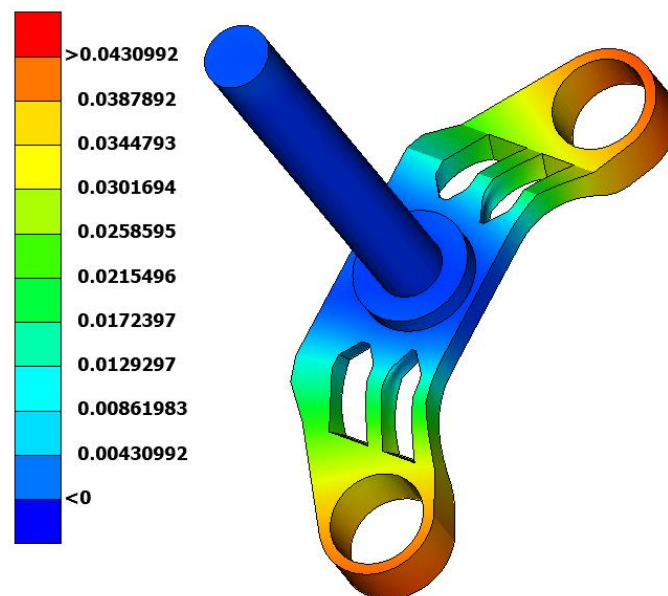
Στη στατική φόρτιση επιδρά μόνο η δύναμη των 1343.48 N στον άξονα του τροχού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 75-77.



Εικόνα 75: Κατανομή τάσεων (αριστερά) και μετατοπίσεων (δεξιά) στην ανάρτηση υπό στατική φόρτιση



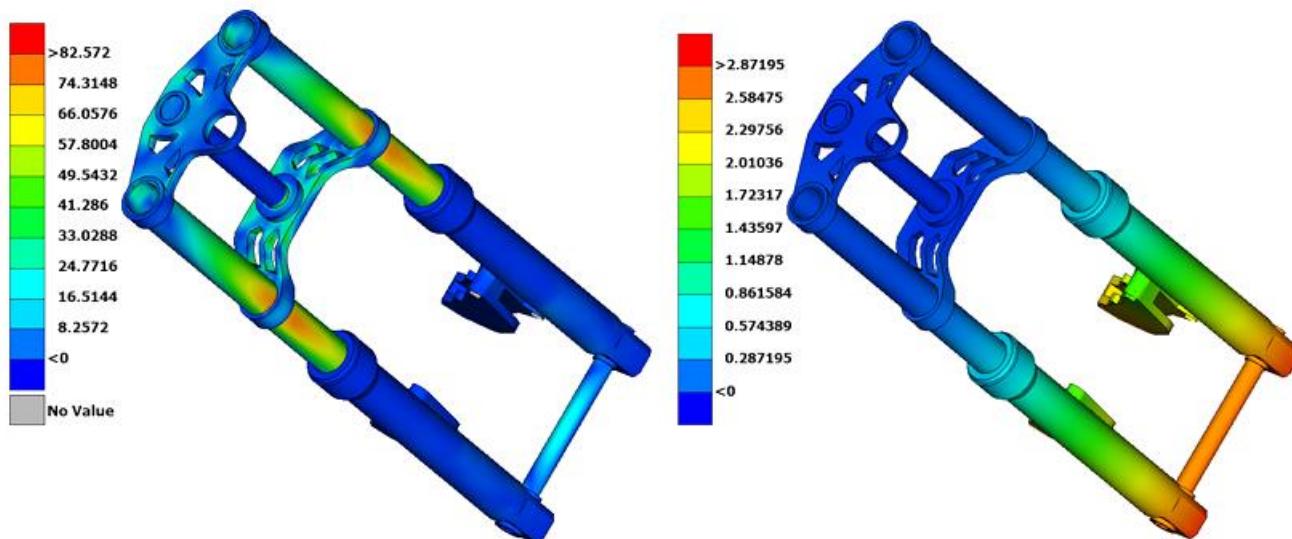
Εικόνα 76: Κατανομή τάσεων στη νέα τριπλή σύνδεση υπό στατική φόρτιση



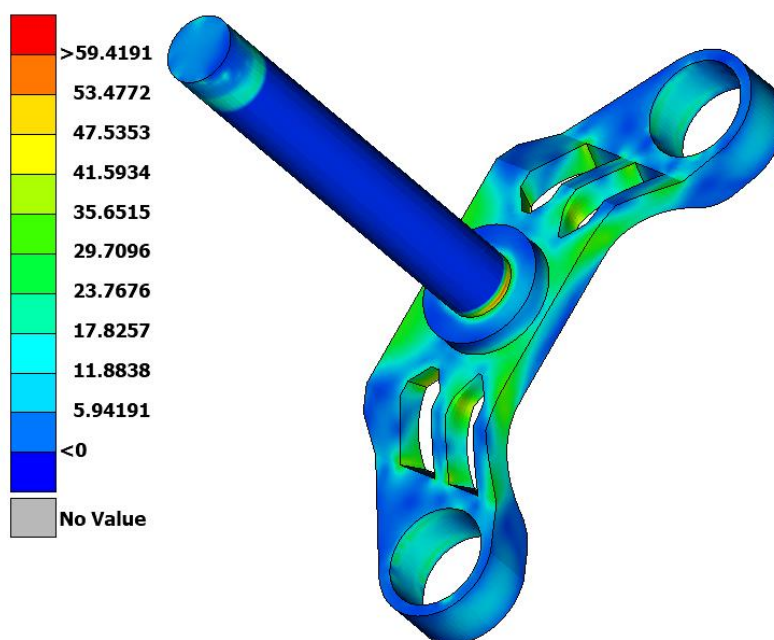
Εικόνα 77: Μετατοπίσεις στη νέα τριπλή σύνδεση υπό στατική φόρτιση

4.5.2 Πέδηση

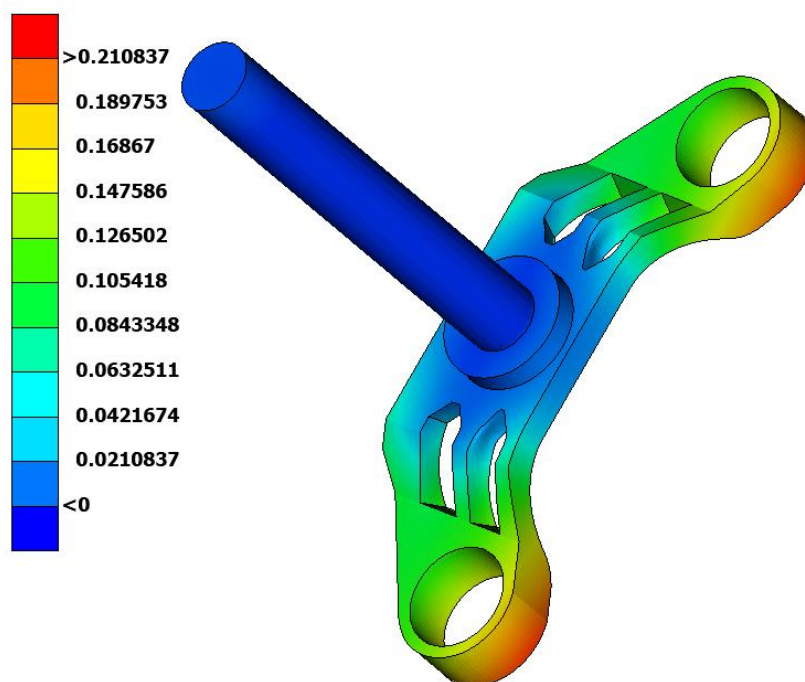
Στην πέδηση προστίθενται και οι δυνάμεις επιβράδυνσης του τροχού με μέτρο 1392.57 N, που εφαρμόζονται στις εσωτερικές επιφάνειες της κάθε δαγκάνας φρένου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 78-80.



Εικόνα 78: Κατανομή τάσεων (αριστερά) και μετατοπίσεων (δεξιά) στην ανάρτηση υπό πέδηση



Εικόνα 79: Κατανομή τάσεων στη νέα τριπλή σύνδεση υπό πέδηση



Εικόνα 80: Μετατοπίσεις στη νέα τριπλή σύνδεση υπό πέδηση

Πίνακας 4: ΣΧΕΔΙΟ ΜΕ ΝΕΑ ΤΡΙΠΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΙΠΛΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

	ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	ΠΕΔΗΣΗ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ	13.69 MPa	59.42 MPa
ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ	0.043 mm	0.2108 mm

Στο μοντέλο με τη νέα τριπλή σύνδεση, παρατηρούμε αυξήσεις σε τάσεις και μετατοπίσεις. Σε συνθήκες ακραίας πέδησης οι μέγιστες τάσεις δεν πλησιάζουν το όριο διαρροής του υλικού και η καταπόνηση είναι ομοιόμορφη (Εικόνα 79). Άρα ο επανασχεδιασμός είναι αποδεδειγμένος.

4.6 Συμπέρασμα

Με τον επανασχεδιασμό στα τεμάχια της τιμονόπλακας και της τριπλής σύνδεσης, το συνολικό βάρος τους μειώθηκε κατά 0.242 kg - δηλαδή 15,1% του αρχικού. Βάση αυτού του ποσοστού, σε κλίμακα μαζικής παραγωγής εξοικονομούνται μεγάλες ποσότητες υλικού. Ακόμη, οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσουν τα επανασχεδιασμένα τεμάχια απέχουν πολύ από το όριο διαρροής του αλουμινίου 6061-T6. Τέλος, η κατανομή των φορτίσεων είναι πιο ομοιόμορφη και οι περιοχές άνευ φορτίου μειώνονται σημαντικά. Το νέο σχέδιο παράγεται αλλά με πρόσθετη επιβάρυνση, αναλόγως την τεχνολογία παραγωγής που χρησιμοποιείται (π.χ. κατεργασία CNC ή χύτευση με καλούπι) - το οποίο αποτελεί τελική απόφαση σε σχέση με την παραγωγή του.

4.7 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

ΦΑΣΗ ΣΧΕΔΙΟΥ:		ΑΡΧΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ
ΕΞΑΡΤΗΜΑ:		ΤΙΜΟΝΟΠΛΑΚΑ
ΥΛΙΚΟ:		ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6061-T6
ΑΡΧΙΚΟ ΒΑΡΟΣ (kg):		0,546
<u>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</u>		
	ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	ΠΕΔΗΣΗ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ (MPa)	8,6	22,56
ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	0,026	0,07
ΒΑΡΟΣ ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ (kg):		0,413
<u>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</u>		
	ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	ΠΕΔΗΣΗ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ (MPa)	13,79	40,62
ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	0,032	0,087
<u>ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ (%)</u>		
	ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	ΠΕΔΗΣΗ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ (MPa)	60,3%	80,1%
ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	23,1%	24,3%
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΒΑΡΟΥΣ (%):		-24,4%

ΦΑΣΗ ΣΧΕΔΙΟΥ:	ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕ ΝΕΑ ΤΙΜΟΝΟΠΛΑΚΑ
---------------	----------------------------

ΕΞΑΡΤΗΜΑ:	ΤΡΙΠΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ
-----------	----------------

ΥΛΙΚΟ:	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6061-T6
--------	-------------------

ΑΡΧΙΚΟ ΒΑΡΟΣ (kg):	1,056
--------------------	-------

<u>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</u>		
	ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	ΠΕΔΗΣΗ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ (MPa)	9,48	64,74
ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	0,037	0,1575

ΒΑΡΟΣ ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ (kg):	0,947
-----------------------------	-------

<u>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</u>		
	ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	ΠΕΔΗΣΗ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ (MPa)	13,69	59,42
ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	0,043	0,2108

<u>ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ (%)</u>		
	ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	ΠΕΔΗΣΗ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ (MPa)	44,4%	-8,2%
ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)	16,2%	33,8%
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΒΑΡΟΥΣ (%):		-10,3%

ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΤΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ (kg):	-0,242
--	---------------

ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ (%):	-15,1%
-------------------------------	---------------

Κεφάλαιο 5: Επίλογος

5.1 Ανακεφαλαίωση

Η εργασία που εκπονήθηκε είχε ως στόχο τη μελέτη αντοχής ενός εμπρόσθιου συστήματος ανάρτησης μοτοσυκλέτας, καθώς και τη σχεδιαστική βελτίωση συγκεκριμένων τμημάτων του. Πρόκειται για μια ανάρτηση με τηλεσκοπικά πιρούνια, σχεδιασμένη στα πρότυπα του μοντέλου TDM900 της Yamaha. Ο επανασχεδιασμός στόχευε στο να προκύψει μια νέα εκδοχή με μειωμένο βάρος, χωρίς όμως να γίνουν υποχωρήσεις ως προς την ασφάλεια.

Σε πρώτη φάση, το μοντέλο της ανάρτησης σχεδιάστηκε σε περιβάλλον CAD. Έπειτα έγινε εισαγωγή του σε λογισμικό CAE και διαμορφώθηκε κατάλληλα, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων. Η δυναμική ανάλυση του μοντέλου έγινε σε δύο σενάρια. Πρώτο σενάριο ήταν αυτό της στατικής φόρτισης, όπου μόνη δύναμη που επιδρά στην ανάρτηση είναι το εμπρόσθιο βάρος της μοτοσυκλέτας. Δεύτερο σενάριο ήταν αυτό της ακραίας πέδησης, όπου εκτός από το αναρτώμενο βάρος υπήρχε και η δύναμη πέδησης που ασκείται από τους δίσκους στις δαγκάνες των φρένων. Ως ακραία πέδηση ορίστηκε η μέγιστη επιτρεπτή επιβράδυνση της μοτοσυκλέτας, χωρίς να ανυψωθεί ο πίσω τροχός της.

Μετά την ανάλυση σειρά είχε η εφαρμογή τοπολογικής βελτιστοποίησης, με το μέγεθος προς ελαχιστοποίηση να είναι η δομική υποχωρητικότητα του υλικού. Ως περιοχές βελτιστοποίησης επιλέχθηκαν τα εξαρτήματα της τιμονόπλακας και της τριπλής σύνδεσης. Αρχικά έγινε εξαγωγή αποτελέσματος της διαδικασίας για την τιμονόπλακα, οπότε ακολούθησε επανασχεδιασμός της στα πρότυπα του αποτελέσματος. Στο μοντέλο με τη νέα τιμονόπλακα, έγινε ξανά τοπολογική βελτιστοποίηση για το εξάρτημα της τριπλής σύνδεσης και εξήχθησαν αποτελέσματα για αυτό. Ομοίως, ακολούθησε επανασχεδιασμός της τριπλής σύνδεσης στα πρότυπα του αποτελέσματος. Τελικώς, γίνεται ανάλυση στο μοντέλο με τα επανασχεδιασμένα εξαρτήματα ώστε να αποδειχθεί ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις δεν υπερβαίνουν τα όρια ασφαλούς χρήσης του.

Το υλικό κατασκευής που επιλέχθηκε για την τιμονόπλακα και την τριπλή σύνδεση είναι το αλουμίνιο 6061-T6, με όριο διαρροής περίπου 270 MPa. Στα επανασχεδιασμένα εξαρτήματα, οι μέγιστες τάσεις που προέκυψαν υπό συνθήκες ακραίας πέδησης απέχουν σημαντικά από την τιμή του ορίου διαρροής. Η χρωματική απεικόνιση της κατανομής των

τάσεων φανερώνει την αποδοτικότητα του νέου σχεδίου, καθώς γίνεται ομοιόμορφη φόρτιση και δεν υπάρχουν σχεδόν καθόλου περιοχές μηδενικών τάσεων. Υπό αυτές τις συνθήκες, επετεύχθη μείωση του συνολικού βάρους τιμονόπλακας και τριπλής σύνδεσης κατά 15.1%.

5.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Η συγκεκριμένη εργασία μελέτησε ένα σύστημα που περιλαμβάνει πολλά εξαρτήματα που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Πρόκειται για ένα παράδειγμα εφαρμογής τοπολογικής βελτιστοποίησης σε τεμάχια που δε δέχονται φορτίσεις ευθέως, αλλά μέσω συνολικής φόρτισης του μοντέλου. Η επέκταση της τοπολογικής βελτιστοποίησης σε συνθήκες δυναμικής φόρτισης θα μπορούσε να βελτιώσει ακόμα περισσότερο το σχεδιασμό συγκεκριμένων τμημάτων.

Στο ίδιο πλαίσιο μελέτης μπορούν να κινηθούν και μελλοντικές έρευνες σε άλλα εμπρόσθια συστήματα μοτοσυκλέτας με αυξημένη πολυπλοκότητα, όπου περιλαμβάνονται κι άλλα εξαρτήματα (π.χ. ψαλίδι A-arm, ελατήριο monoshock, κλπ). Εκεί, ανάλογα με το τι επιχειρεί κάθε μελέτη να βελτιώσει (π.χ. μέγεθος τεμαχίου, μέγεθος οπών, βάρος, ακαμψία, κλπ), διαμορφώνεται το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης μέσω του λογισμικού CAE. Ακόμη, μπορεί να μελετηθεί οποιοδήποτε άλλο σενάριο φόρτισης (π.χ. συνθήκες στροφής ή σύγκρουσης) με στόχο την αποδοτικότητα του συστήματος. Τέλος, υπάρχει μεγάλο εύρος πειραματισμού με τα υλικά κατασκευής των εξαρτημάτων και τις τεχνολογίες παραγωγής τους - τα οποία επηρεάζουν σημαντικά τις τελικές αποφάσεις σχετικά με το σχεδιασμό και την μαζική παραγωγή τους.

Βιβλιογραφία

- [1] M. Keane, Interviewee, *History of Motorcycle Suspension*. [Συνέντευξη]. 2023.
- [2] D. Croccolo και M. De Agostinis, *Motorbike Suspensions Modern Design and Optimization*, Bologna, Italy: Springer, 2013.
- [3] R. Smith, «A Brief History of Girder Forks», *Motorcycle Classics*, Διαθέσιμο online: <https://www.motorcycleclassics.com/classic-motorcycle-repair/brief-history-of-girder-forks/>.
- [4] Sheldon's EMU, «Druid Motorcycle Forks» Διαθέσιμο online: <https://cybermotorcycle.com/components/druid-forks.htm>.
- [5] T. Foale, *Motorcycle Handling and Chassis Design: the art and science*, Spain, 2002.
- [6] Wikipedia, «Motorcycle fork» . Διαθέσιμο online: https://en.wikipedia.org/wiki/Motorcycle_fork.
- [7] J. Karr, «GSX-Radd P3 - Raddical - The Future Of Motor Cycling» 2009. Διαθέσιμο online: <https://www.motorcyclistonline.com/gsx-radd-p3-raddical-future-motor-cycling/>.
- [8] Motofomo, «BMW Telelever, Duolever Work, and EVO Telelever» Διαθέσιμο online: <https://motofomo.com/bmw-telelever-duolever-evo-telelever/>.
- [9] Steps to Podium (YouTube channel), «How cartridge front forks work | Offroad Engineered» 2020.
- [10] R. Rae, «Replacement Front Suspension System For Telescopic Forks On Sports Motorcycles.» σε *Symposium on the Dynamics and Control of Single Track Vehicles*, Padova, Italy, 2019.

- [11] T. Babu, R. Sudharshan, Mohammed Suhail και K. Pradeep, «Framework Execution and Schematic of Jounce Bumper in Two-Wheeler Fork» Sri Sai Ram Engineering College, Chennai, India, 2019.
- [12] S. Khune και A. Bhende, «Vibration analysis of motorcycle handlebar for riding comfort using tuned mass damper» Automotive Research Association of India (ARAI), Pune, India, 2020.
- [13] K. Dhayakar, T.kamalahar, T.Vinu sakthi, R.S.Manoj και S.Shanmugasundaram, «Design and Analysis of Front Mono Suspension in Motorcycle» IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2015.
- [14] Research India Publications, «Static and Fatigue Simulation of Telescopic Fork» *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015.
- [15] D. Chindamo, «The Design of A Motorcycle Featuring Fully Independent Adjustability for Front Suspension and Steering Geometry» σε *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Brescia, Italy, 2019.
- [16] S. Evangelou, C. Ramirez Moreno και M. Tomas-Rodriguez, «Dynamical Analysis of a Duolever Suspension System» Cardiff, UK, 2012.
- [17] E. Χρήστενας, «Μελέτη αντοχής και τοπολογική βελτιστοποίηση εμπρόσθιου φαλιδίου ηλεκτρικής μοτοσυκλέτας» Χανιά, 2020.
- [18] T. J. R. Hughes, The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis, Dover Publications, 2000.
- [19] I. Y. K. Olivier de Weck, «Lecture 3: Computer-aided design» σε *Engineering Design and Rapid Prototyping*, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [20] BETA CAE Systems S.A., ANSA version 24.0.x User Guide, Thessaloniki, Greece, 2023.
- [21] «Understanding Failure Theories (Tresca, von Mises etc...)» The Efficient Engineer (YouTube channel)

- [22] Wikipedia, «Yamaha TDM 900» . Διαθέσιμο online:
https://en.wikipedia.org/wiki/Yamaha_TDM_900.
- [23] Data for motorcycles, «Mass, Weight and Center of Gravity» . Διαθέσιμο online:
<https://www.datamc.org/data-acquisition/gps-data-analysis/mass-weight-and-center-of-gravity/>.
- [24] O. S. Martin P. Bendsøe, Topology optimization: Theory, Methods, and Applications, Springer, 2004.
- [25] MSC Software, MSC Nastran 2021 - Design Sensitivity and Optimization User's Guide, Hexagon, 2021.
- [26] Tata Steel, «Copper-plated steel» . Διαθέσιμο online:
<https://www.tatasteeleurope.com/engineering/products/electro-plated/copper-plated-steel>.
- [27] Metal Supermarkets, «5 more common alloy elements» . Διαθέσιμο online:
<https://www.metalsupermarkets.com/5-more-common-alloying-elements/>.

ΤΕΛΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ