



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ - ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη και βελτιστοποίηση σκελετού
ποδηλάτου για καθημερινή χρήση σε αστικό
περιβάλλον**

Κωνσταντίνος Δαμιανός

Επιβλέπων Καθηγητής:

Προβατίδης Χριστόφορος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2019

Σύνοψη

Ο σκελετός του ποδηλάτου είναι το πλέον σημαντικό κομμάτι ενός ποδηλάτου, καθώς είναι το πιο βαρύ μέρος του, ενώ παράλληλα πρέπει να στηρίζει το βάρος του ποδηλάτη, να αντέχει τις εξωτερικές φορτίσεις και να παρέχει ικανοποιητικές επιδόσεις και άνεση κατά την οδήγηση.

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η μελέτη και η βελτιστοποίηση σκελετού ποδηλάτου για καθημερινή χρήση σε αστικό περιβάλλον. Επιπροσθέτως, στόχος της εργασίας ήταν η σύνδεσή της με πρακτικές που συναντώνται ευρέως στον αντίστοιχο βιομηχανικό τομέα. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε ανασκόπηση σε βιομηχανικές πρακτικές που χρησιμοποιούνται από τις μεγαλύτερες κατασκευαστικές εταιρείες στον τομέα και έγινε χρήση πολλών εξ αυτών κατά την εκπόνηση της εργασίας, τόσο όσον αφορά το σχεδιαστικό όσο και το κατασκευαστικό κομμάτι. Έτσι, μελετήθηκε η επίδραση πραγματικών σχεδιαστικών πρακτικών στη συμπεριφορά του σκελετού κάτω από συγκεκριμένες φορτίσεις, ενώ πραγματοποιήθηκε και μια σύγκριση μεταξύ τους. Επιπλέον, έγινε μια μελέτη των διαφόρων κατασκευαστικών πρακτικών που υφίστανται και έγινε μια εκτίμηση της καταλληλότητας κάθε μεθόδου σε συνάρτηση με το υλικό κατασκευής και τη γεωμετρία.

Ως γεωμετρία του πλαισίου λήφθηκε η τυπική διάταξη διαμαντιού, η οποία είναι και η πιο ευρέως διαδεδομένη. Ο σχεδιασμός και η ανάλυση πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό ANSYS v.17. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη της συμπεριφοράς του σκελετού πραγματοποιήθηκε με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Τα τεστ που εφαρμόστηκαν στην εργασία θεωρήθηκαν ως ψευδο-στατικά. Δύο κύριες παράμετροι της συμπεριφοράς του σκελετού ταυτοποιήθηκαν: η κάθετη ενδοτικότητα και η πλευρική δυσκαμψία. Η πρώτη επηρεάζει άμεσα τη άνεση του αναβάτη κατά την οδήγηση, ενώ η δεύτερη επηρεάζει το ποδήλατο στις στροφές και κατά συνέπεια την ασφάλεια του αναβάτη. Επιπροσθέτως, κρίθηκε απαραίτητο πως ο σκελετός του ποδηλάτου έπρεπε να πληροί συγκεκριμένα κριτήρια, όσον αφορά τη μηχανική αντοχή, προκειμένου είναι κατασκευάσιμος και οι επιδόσεις που προκύπτουν από την ανάλυση να έχουν νόημα. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, επιλέχθηκαν τρία ψευδο-στατικά τεστ, τα οποία χρησιμοποιούνται και στη βιβλιογραφία.

Στο πρώτο στάδιο της εργασίας, μελετήθηκε η επίδραση των χαρακτηριστικών μεγεθών του πλαισίου, όπως π.χ. τα μήκη των σωληνών, οι γωνίες που σχηματίζουν με το επίπεδο και το ύψος της μεσαίας τριβής στην κάθετη ενδοτικότητα και στην πλευρική δυσκαμψία, ενώ παράλληλα διασφαλίστηκε πως ο σκελετός υπακούει κάθε φορά στα κριτήρια ασφαλείας που τέθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, ανα-

γνωρίστηκαν τα θεμελιώδη μεγέθη που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό και κατασκευή του σκελετού. Έπειτα, ορίστηκε ένα εύρος τιμών για κάθε ένα από αυτά, με τις τιμές αυτές να είναι τυπικές στη βιομηχανία. Ύστερα, μεταβάλλοντας τις τιμές των μεταβλητών μία προς μία στα ορισμένα εύρη τιμών, εξετάστηκε η επίδραση κάθε μίας εξ αυτών στην πλευρική δυσκαμψία και στην κάθετη ενδοτικότητα του σκελετού. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, το πάχος και οι διατομές των επιμέρους σωλήνων που απαρτίζουν το σκελετό παρέμειναν σταθερές. Επίσης, ως υλικό κατασκευής επιλέχθηκε ο ωστενιτικός χάλυβας Reynolds 931.

Στο δεύτερο στάδιο της εργασίας, μελετήθηκε η επίδραση διαφορετικών διατομών, κατανομών πάχους και μέγεθος διατομών για τους διάφορους σωλήνες από τους οποίους αποτελείται ο σκελετός. Χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες δοκιμές με το προηγούμενο στάδιο και οι σωλήνες που επιλέχθηκαν χρησιμοποιούνται εκτενώς στη βιβλιογραφία από μεγάλες κατασκευαστικές εταιρείες, όπως είναι π.χ. η Reynolds, η Tange και άλλες. Συνολικά, 35 διαφορετικά σετ σωληνών χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της εργασίας και η επίδρασή τους στη συμπεριφορά του σκελετού ποσοτικοποιήθηκε. Τέλος, οι διαστάσεις του σκελετού, ήτοι τα μήκη και οι γωνίες των επιμέρους δομικών τμημάτων του σκελετού παρέμειναν σταθερά. Επιπροσθέτως, σε κάθε περίπτωση υπολογίστηκε και η μάζα του σκελετού.

Στις δύο προηγούμενες φάσεις της μελέτης, το υλικό που επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε ήταν ο χάλυβας Reynolds 931. Στο τελικό κομμάτι της εργασίας, έγινε μελέτη τριών διαφορετικών υλικών, τα οποία και χρησιμοποιούνται σήμερα στην κατασκευή σκελετών ποδηλάτων. Πρόκειται για τον χάλυβα Reynolds 931, το κράμα αλουμινίου 6061 και ανθρακόνημα T300. Τόσο οι διαστάσεις του πλαισίου όσο και του των επιμέρους τμημάτων του σκελετού παρέμειναν σταθερές. Επίσης, υπολογίστηκε η μάζα του πλαισίου, καθώς πρόκειται για ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο στο σχεδιασμό σκελετών ποδηλάτου. Έτσι, μέσω βελτιστοποίησης, η εργασία καταλήγει σε έναν προτεινόμενο σκελετό ποδηλάτου, καθώς και σε συμπεράσματα και προτάσεις σχετικά με την επίδραση των διάφορων κατασκευαστικών επιλογών στις επιδόσεις του σκελετού.

Abstract

The frame of the bicycle is the most important structural part of a bicycle, because it comprises most of the bicycle's weight, while it needs to support the rider's weight, be durable enough to withstand external forces and loads and provide the rider with satisfactory ease and safety during transport.

The present thesis focuses on the design and optimization of a bicycle frame built for everyday use in an urban environment. Moreover, another aim of the present thesis was the utilization of common industrial practice in the respective industrial sector i.e. the manufacturing and design of bicycle frames. In order to achieve this, several manufacturing and designing techniques were reviewed and used. Thus, their effect on the frame's performance under specific boundary conditions was studied and a comparison of the results was made. Furthermore, a review of the manufacturing techniques found in the industry was studied and the appropriateness of each one in conjunction with the frame's geometry and the selected material was estimated.

The standard diamond-type tube infrastructure was implemented in the design of the bicycle frame, since it is the one mostly used today. ANSYS v.17 was used for the design and analysis of the frame. Moreover, the Finite Element Method was implemented for the structural analysis of the bicycle frame. The tests that were used in this thesis were considered quasi-static for the purpose of this entire study. Two main parameters of the frame's performance were identified: vertical compliance and lateral stiffness. The first one impacts heavily the ease of the rider during transport, while the second impacts the performance of the bicycle while turning and thus the rider's safety. Furthermore, it was deemed necessary that the frame must meet some requirements, when it comes to structural durability, so that the frame can be manufactured and so that the tests regarding its vertical compliance and lateral stiffness can be considered relevant. In order to achieve that, three quasi-static structural tests were implemented. Thus, it would be possible to confirm that the suggested frame would be compliant with the safety requirements.

In the first part of this thesis, the impact of the tubes' lengths and angles on the frame's behavior was studied. More specifically, the main dimensions of the frame were identified and then parameterized, so that the impact of each of these dimensions on the frame's vertical compliance and lateral stiffness could be determined. Throughout this phase, the tubes' diameter, thickness and shape specifications remained the same.

In the second part of this thesis, the impact of different cross sections, various sizes and thickness profiles on the frame's behavior was studied. For this purpose, tubes that are produced by big bicycle manufacturers' such as Reynolds, Tange and others were used to design the frame. A total of 35 different tube sets were tested and their impact on the frame's vertical compliance and lateral stiffness was quantified. Moreover, all three quasi-static structural tests were implemented as well, in order to confirm that all the different frames designed were compliant with the safety requirements. During this stage, the tubes lengths and angles remained the same, as they were studied in the previous stage. Moreover, the effect of each set of tubes on the mass of the frame was studied.

In the two previous stages of the present study, the material that was used during the analysis was considered to be the same for simplicity reasons. More specifically, the material selected was Reynolds 931. In the third and final part, the impact of the material used to manufacture the frame on its vertical compliance, its lateral stiffness and its mass was studied. Three different materials, which are often used to manufacture bicycles were selected: steel (Reynolds 931), aluminum (aluminum 6061) and carbon-fibre (T300). The frame dimensions and the tubes' dimensions remained the same throughout this phase, while each one of the different frames was designed so that it meets the safety requirements that were posed.

Στους γονείς μου, Γεώργιο και Ελένη.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δόκτωρ Γ. Σερέτη για την υποστήριξή του κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής. Οι συμβουλές του και η καθοδήγησή του υπήρξαν ιδιαίτερα σημαντικές για εμένα. Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Χ. Προβατίδη για την ευκαιρία να δουλέψω μαζί του και να φέρω εις πέρας τη συγκεκριμένη εργασία. Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δόκτωρ Α. Φιλιππάτο, ερευνητή στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο της Δρέσδης στη Γερμανία, για τις συμβουλές του και την καθοδήγηση του. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τους δικούς μου ανθρώπους, οι οποίοι στάθηκαν δίπλα μου από την αρχή των σπουδών μου, στις καλές και στις δύσκολες στιγμές και χωρίς στους οποίους δεν θα βρισκόμουν εδώ σήμερα.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	14
1.	Ιστορία του ποδηλάτου	14
2.	Μέρη του πλαισίου του ποδηλάτου	18
2	Θεωρητικό Μέρος	21
1.	Υλικά και μέθοδοι κατασκευής ποδηλάτων	21
1.1	Χάλυβας	21
1.2	Κράματα αλουμινίου	23
1.3	Ανθρακόνημα	24
1.4	Τιτάνιο	25
1.5	Μέθοδοι κατασκευής σκελετών ποδηλάτων	25
2.	Μοντελοποίηση μέσω της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων .	28
2.1	Computer Aided Design (CAD)	28
2.2	Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM)	29
2.3	Συνοπτική περιγραφή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοι- χείων	30

2.4	Εφαρμογή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων σε H/Y	32
2.5	Χρήση της μεθόδου FEM στη μελέτη σκελετού ποδηλάτου	33
3.	Θεωρία των κελύφων	35
3	Υπολογιστικό Μέρος	39
1.	Σχεδιασμός Ποδηλατικού Πλαισίου στο λογισμικό ANSYS v.17	39
2.	Ανάλυση της επίδρασης των χαρακτηριστικών διαστάσεων του σκελετού	43
2.1	Τεστ που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό και ο ρόλος τους	46
2.2	Αποτελέσματα	47
3.	Ανάλυση της επίδρασης των χαρακτηριστικών των επιμέρους σωλήνων του σκελετού	54
3.1	Προφίλ και κατανομή πάχους άνω σωλήνα	55
3.2	Προφίλ και κατανομή πάχους κάτω σωλήνα	57
3.3	Προφίλ και κατανομή πάχους σωλήνα κεφαλής	59
3.4	Προφίλ και κατανομή πάχους σωλήνα καθίσματος	61
3.5	Προφίλ και κατανομή πάχους σωλήνων κάτω διδύμων ψαλιδιών	65
3.6	Προφίλ και κατανομή πάχους σωλήνων άνω διδύμων ψαλιδιών	67
3.7	Προφίλ και κατανομή πάχους σωλήνα μεσαίας τριβής	68
3.8	Αποτελέσματα	72
3.9	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	81

4.	Ανάλυση της επίδρασης του υλικού κατασκευής του σκελετού . . .	82
4.1	Σκελετός από ανθρακόνημα	82
4.2	Σκελετός από αλουμίνιο	88
4.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	94
4	Συμπεράσματα	95
1.	Ανάλυση της επίδρασης των χαρακτηριστικών διαστάσεων του σκελετού	95
2.	Ανάλυση της επίδρασης των χαρακτηριστικών των επιμέρους σωλήνων του σκελετού	96
3.	Ανάλυση της επίδρασης του υλικού κατασκευής του σκελετού . . .	97
4.	Μελλοντικές προτάσεις για έρευνα	98

Κεφάλαιο 1

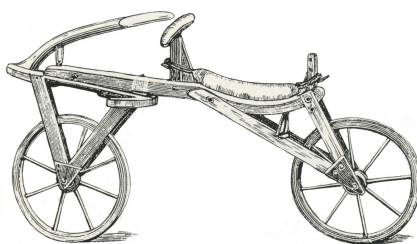
Εισαγωγή

1. Ιστορία του ποδηλάτου

Η ιστορία του ποδηλάτου χαρακτηρίζεται από καινοτομίες και εφευρέσεις, οι οποίες οδήγησαν από την αρχική, χονδροειδή μορφή του στο σημερινό μέσο μεταφοράς, το οποίο χρησιμοποιείται από εκατομμύρια ανθρώπους σε όλο τον πλανήτη για τις καθημερινές τους μετακινήσεις, για άθληση καθώς και για σκοπούς ψυχαγωγίας.

Η δημιουργία του πρώτου λειτουργικού μοντέλου ποδηλάτου αποδίδεται στο Γερμανό βαρόνο Karl von Drais το 1817 [1]. Επρόκειτο για έναν σκελετό κατασκευασμένο από ξύλο, ο οποίος στηρίζεται σε δύο ρόδες. Το μοντέλο αυτό δε διέθετε πετάλια και κατά συνέπεια ο χρήστης το έθετε σε κίνηση σπρώχνοντας τα πόδια του ενάντια στο έδαφος. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό εκείνης της μηχανής αποτελούσε η δυνατότητα να αλλάξει διεύθυνση, χαρακτηριστικό το οποίο απουσίαζε από παλαιότερα τροχήλατα οχήματα.

Η δημιουργία του μοντέλου αυτού διαδόθηκε από τα μέσα της εποχής στη Γερμανία, τη Γαλλία και τη Βρετανία. Στη Γαλλία, όπου κατοχύρωσε την πατέντα του ο von Drais, το μοντέλο του ονομάστηκε draisienne, το οποίο προέρχεται από το όνομα του κατασκευαστή του. Στη Μεγάλη Βρετανία, το ποδήλατο απέκτησε το προσωνύμιο hobbyhorse, επειδή ο χρήστης μπορούσε να ασχοληθεί μαζί του όποτε εκείνος επιθυμούσε, σε αντίθεση με τα πραγματικά άλογα, τα οποία απαιτούν συνεχή φροντίδα. Ένα τυπικό δείγμα ενός τέτοιου μοντέλου δίνεται στην εικόνα 1.1.



Σχήμα 1.1: Το ποδήλατο του von Drais.

Το εν λόγω μοντέλο ποδηλάτου αποδείχτηκε αρκετά γρήγορο, μέσα από τη συμμετοχή του σε αγώνες. Ωστόσο, αποδείχτηκε επίσης αρκετά άβολο για τους ποδηλάτες, ενώ η εμφάνισή του ήταν αρκετά χονδροειδής. Κατά συνέπεια, η χρήση του παραμελήθηκε για μερικά χρόνια. Αυτό το πρόβλημα οδήγησε πολλούς ερευνητές στην προσπάθεια βελτίωσης του ποδηλάτου τα επόμενα χρόνια. Το 1839, ο Kirkpatrick Macmillan σχεδίασε μία βελτιωμένη έκδοση του ποδηλάτου, στην οποία πρόσθεσε πετάλια, που συνδέονταν με τον πίσω τροχό, όπως και στα σημερινά ποδήλατα. Η βελτιωμένη κατασκευή του Macmillan ονομάστηκε velocipede. Παρόλ' αυτά, ο Macmillan δεν κατέβαλλε προσπάθεια προκειμένου να δημοσιεύσει ή να κατοχυρώσει την εφεύρεση αυτή.

Μετέπειτα, υπήρξαν πολλές προσπάθειες από ερευνητές για τη βελτίωση της κατασκευής του ποδηλάτου, αλλά σημαντική πρόοδος συντελέστηκε από το Γάλλο Pierre Michaux το 1861. Ο Michaux εισήγαγε στην κατασκευή πετάλια τα οποία ήταν συνδεδεμένα απευθείας στον εμπρόσθιο τροχό. Επιπλέον, ο Michaux υπήρξε ο πρώτος που προσπάθησε να διαφημίσει και να πουλήσει το ποδήλατο στο ευρύ κοινό. Ωστόσο, τα πρώτα ποδήλατα που κατασκευάστηκαν αποδείχτηκαν άσχημα από απόψη εμφάνισης και άβολα στην οδήγηση. Αυτό οδήγησε στην τροποποίηση του ποδηλάτου από το Michaux, με την εισαγωγή μεταξύ άλλων μίας μεγαλύτερης εμπρόσθιας ρόδας και ενός κυρτού σκελετού κατασκευασμένου από σφυρήλατο σίδηρο. Ένα τυπικό δείγμα αυτού του μοντέλου απεικονίζεται στην εικόνα 1.2.

Η προσθήκη των πεταλιών στον εμπρόσθιο τροχό του ποδηλάτου σήμαινε πως η ταχύτητά του εξαρτιόταν από το μέγεθος του εμπρόσθιου τροχού. Πιο συγκεκριμένα, η κίνηση του τροχού αποτελείται από το συνδυασμό μεταφορικής και στροφικής κίνησης. Επομένως, με δεδομένο πως το κέντρο μάζας του τροχού βρίσκεται στο κέντρο του τροχού, το κέντρο του τροχού εκτελεί ευθύγραμμη ομαλή κίνηση, με ταχύτητα η οποία ισούται με:



Σχήμα 1.2: Το ποδήλατο του Michaux.

$$u = \omega \cdot R \quad (1.1)$$

όπου u η γραμμική ταχύτητα του τροχού σε m/s, ω η γωνιακή ταχύτητα του τροχού σε rad/s και R η ακτίνα του τροχού mm. Επομένως, γίνεται σαφές πως, για ν' αυξηθεί η ταχύτητα του ποδηλατοου, απαιτείται:

- ▶ η αύξηση της γωνιακής ταχύτητας ω του τροχού ή/και
- ▶ η αύξηση της ακτίνας του τροχού R .

Συνεπώς, με δεδομένο πως δεν είχε επινοηθεί ακόμα το σημερινό σύστημα μετάδοσης και σε συνδυασμό με την ανερχόμενη τεχνολογία κατασκευής λεπτών ακτινών, οι κατασκευαστές ποδηλάτων οδηγήθηκαν στην αύξηση του μεγέθους του εμπρόσθιου τροχού. Η εξέλιξη αυτή οδήγησε στη δημιουργία των οικείων σε εμάς ποδηλάτων με το μεγάλο μπροστινό τροχό, τα οποία στη Μεγάλη Βρετανία απέκτησαν το παρατσούκλι penny – farthing. Ένα τυπικό παράδειγμα ενός τέτοιου ποδηλάτου απεικονίζεται στην εικόνα 1.3.

Ωστόσο, τα συγκεκριμένα ποδήλατα κρίθηκαν ανεπαρκή για λόγους ασφαλείας. Αρχικά, η βέλτιστη θέση οδήγησης βρισκόταν πάνω από την εμπρόσθια ρόδα. Συνεπώς, το κέντρο μάζας του ποδηλάτη βρισκόταν πολύ ψηλά, με αποτέλεσμα μια μικρή ανωμαλία του οδοστρώματος ή ένα λάθος του ποδηλάτη να μπορεί να οδηγήσει σε πτώση από ύψος άνω του ενός μέτρου. Αυτή το μειονέκτημα οδήγησε σε νέες βελτιώσεις στο σκελετό του ποδηλάτου. Έτσι, το 1885 οι John Kemp Starley και William Sutton παρουσίασαν τη σειρά ποδηλάτων ασφαλείας Rover [2], των



Σχήμα 1.3: Ποδήλατο penny-farthing.

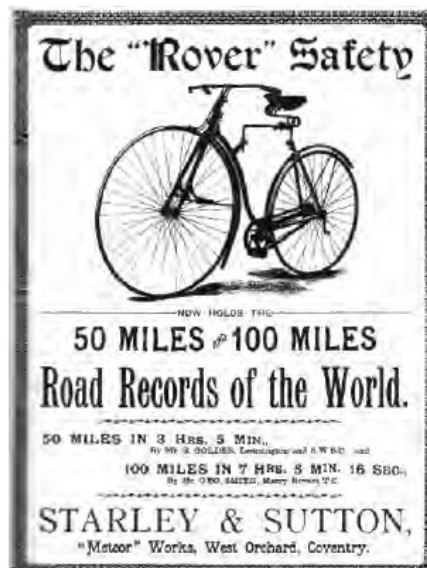
οποίων η γεωμετρία είναι σε μεγάλο βαθμό παρόμοια με τη γεωμετρία τύπου διαμάντι, η οποία συναντάται στα περισσότερα σύγχρονα ποδήλατα, όπως αυτή απεικονίζεται στις εικόνες 1.5 και 1.4.

Μια σημαντική καινοτομία που εισήχθη στη συγκεκριμένη κατηγορία ποδηλάτων ήταν η εισαγωγή του συστήματος μετάδοσης ταχυτήτων μέσω αλυσίδας, το οποίο προσαρμόστηκε στον οπίσθιο τροχό του ποδηλάτου. Η εν λόγω προσθήκη είχε προταθεί προηγουμένως και από άλλους κατασκευαστές, αλλά ο Starley ήταν εκείνος που κατάφερε να μαζικοποιήσει την παραγωγή του ποδηλάτου και να το διαθέσει στο ευρύ αγοραστικό κοινό. Επιπροσθέτως, η χρήση συστήματος μετάδοσης παρείχε τη δυνατότητα για διαφορετικές γωνιακές ταχύτητες περιστροφής, οδηγώντας έτσι σε μείωση του μεγέθους των τροχών. Μία ακόμα παράμετρος της εν λόγω καινοτομίας ήταν πως η κατασκευή συστημάτων μετάδοσης ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί με μεθόδους μαζικής παραγωγής, μειώνοντας έτσι σημαντικά το κόστος κατασκευής ενός ποδηλάτου. Κατά συνέπεια, το ποδήλατο έπαψε να αποτελεί αποκλειστικό προνόμιο των ανώτερων τάξεων, καθώς πλέον άτομα της μεσαίας τάξης καθώς και χαμηλότερων τάξεων μπορούσαν να το αγοράσουν.

Ένα άλλο ορόσημο στην ιστορία του ποδηλάτου υπήρξε η εισαγωγή των λαστίχων πεπιεσμένου αέρα από το John Boyd Dunlop στα 1888. Η καινοτομία αυτή οδήγησε σε μεγαλύτερη απορρόφηση των κραδασμών και δονήσεων που προκαλούνται από το οδόστρωμα, βελτιωμένο έλεγχο του ποδηλάτου και σημαντικά μειωμένη αντίσταση τριβής λόγω οδοστρώματος. Κατά τα επόμενα χρόνια εισήχθησαν και άλλες καινοτομίες όπως π.χ. οι κούφιοι σωλήνες, οδηγώντας έτσι στη μορφή του ποδηλάτου όπως τη γνωρίζουμε σήμερα.



Σχήμα 1.4: Ποδήλατο της σειράς Rover.

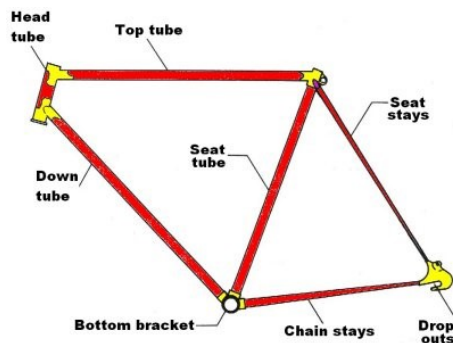


Σχήμα 1.5: Διαφήμιση της σειράς ποδηλάτων ασφαλείας Rover από τους Starley και Sutton

2. Μέρη του πλαισίου του ποδηλάτου

Η πλειοψηφία των των σημερινών ποδηλάτων διαθέτουν το πλαίσιο του διαμαντιού, ήτοι ένα σκελετό που αποτελείται από δύο τρίγωνα: το μπροστινό και το οπίσθιο τρίγωνο. Ένα τυπικό παράδειγμα ενός σκελετού ποδηλάτου φαίνεται στην εικόνα 1.6. Το εμπρόσθιο τρίγωνο αποτελείται από το σωλήνα κεφαλής (head tube), που απεικονίζεται στην εικόνα 1.7 τον άνω σωλήνα (top tube), τον κάτω σωλήνα (down tube) και το σωλήνα καθίσματος (seat tube). Το οπίσθιο τρίγωνο αποτελείται από το σωλήνα καθίσματος, τα άνω ψαλίδια (seat stays) και τα κάτω ψαλίδια (chain stays). Στην ένωση των άνω και κάτω ψαλιδίων υπάρχει ειδική διαμόρφωση (rear dropout) για την τοποθέτηση του οπίσθιου τροχού και κατά συνέπεια και της πι-

θανής τοποθέτησης κάποιου μετατροπέα ταχυτήτων και της ενδεχόμενης κασέτας, όπως αυτή απεικονίζεται στην εικόνα 1.8.



Σχήμα 1.6: Σκελετός ποδηλάτου και επιμέρους μέρη



Σχήμα 1.7: Σωλήνας κεφαλής(head tube)



Σχήμα 1.8: Κασέτα ποδηλάτου και μηχανισμός αλλαγής ταχυτήτων

Στην κατάληξη του σωλήνα θέσεως, του κάτω σωλήνα και των κάτω ψαλιδιών βρίσκεται η μεσαία τριβή (bottom bracket shell). Πρόκειται για έναν φαρδύ και λεπτό σωλήνα σε σχέση με τους άλλους σωλήνες, ο οποίος απορροφά την πλειοψηφία

των ασκούμενων δυνάμεων κατά την οδήγηση ή και στάση του ποδηλάτου. Ένα τυπικό παράδειγμα μεσαίας τριβής απεικονίζεται στην εικόνα 1.9.



Σχήμα 1.9: Μεσαία τριβή ποδηλάτου(bottom bracket shell)

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό Μέρος

1. Υλικά και μέθοδοι κατασκευής ποδηλάτων

Κατά το πέρασμα των χρόνων, διάφορα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή σκελετών ποδηλάτων. Οι πρώτοι σκελετοί ποδηλάτων κατασκευάζονταν από ξύλο, ενώ στη συνέχεια διάφορα κράματα χάλυβα επικράτησαν ως το πλέον σύνηθες υλικό κατασκευής. Σήμερα, τα επικρατέστερα υλικά κατασκευής σκελετών ποδηλάτων είναι τα ακόλουθα:

- ▶ χάλυβας
- ▶ κράματα αλουμινίου
- ▶ ανθρακόνημα
- ▶ τιτάνιο

1.1 Χάλυβας

Στα πρώτα ποδήλατα που παρασκευάστηκαν, τα είδη μετάλλων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν συνήθως σφυρήλατος και χυτός σίδηρος χαμηλής αντοχής σε θραύση. Έκτοτε, η συνεχής βελτίωση των μεθόδων κατασκευής μεταλλικών εξαρτημάτων έχει οδηγήσει στην ύπαρξη επεξεργασμένων χαλύβων με ιδιαίτερα υψηλά όρια αντοχής και υψηλή αντοχή σε κόπωση. Οι χάλυβες αυτοί αποτελούν στην πλειονότητά τους κράματα ατσαλιού με προσμίξεις όπως π.χ. χρώμιο, μαγγάνιο,

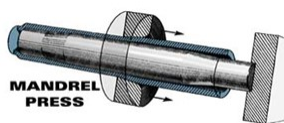
νικέλιο και μόλυβδο. Παραδείγματα τέτοιων χαλύβων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία είναι ο ωστενιτικός, ανοξείδωτος χάλυβας ψυχρής επεξεργασίας 921 της Reynolds και ο ανοξείδωτος χάλυβας XCr της Columbus.



Σχήμα 2.1: Σκελετός ποδηλάτου από χάλυβα (Reynolds)

Στα περισσότερα φθηνά ποδήλατα, τα οποία είναι κατασκευασμένα από χάλυβα, χρησιμοποιούνται σωλήνες με ομοιόμορφο πάχος κατά το μήκος τους και οι οποίοι συγκολλούνται μεταξύ τους, προκειμένου να προκύψει ο σκελετός του ποδηλάτου. Αντιθέτως, σε σκελετούς υψηλών επιδόσεων χρησιμοποιούνται σωλήνες με μεγαλύτερο πάχος στα άκρα σε σχέση με το μεσαίο τμήμα τους, κάτι το οποίο οδηγεί σε σημαντική μείωση του βάρους του ποδηλάτου. Επίσης, οι συγκεκριμένοι σωλήνες έχουν περάσει από συγκεκριμένη θερμική επεξεργασία, προκειμένου να βελτιωθούν οι μηχανικές τους ιδιότητες.

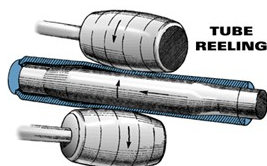
Για την κατασκευή σωλήνων με μεταβλητό πάχος κατά το μήκος τους, απαιτούνται δύο κύρια βήματα. Αρχικά, ο σωλήνας πιέζεται μέσω μίας μήτρας προς το μαντρέλι, έτσι ώστε το μαντρέλι τελικά να εγκλωβιστεί μέσα στο σωλήνα, δημιουργώντας τη γεωμετρία που αναπαρίσταται στην Εικόνα 2.2.



Σχήμα 2.2: Κατασκευή του σωλήνα - Πρώτο βήμα

Με αυτόν τον τρόπο, η μήτρα καθορίζει την διάμετρο του υπό κατασκευή σωλήνα και τη διατομή του, ενώ το μαντρέλι καθορίζει τις εσωτερικές διαμέτρους και το εσωτερικό πάχος του σωλήνα. Έπειτα, το μαντρέλι αφαιρείται από το εσωτερικό του σωλήνα, καθώς αυτός περιστρέφεται από δύο καρούλια, τα οποία βρίσκονται υπό γωνία. Αυτή διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εξωτερικής διαμέτρου του σωλήνα, με αμελητέα επίδραση στο εσωτερικό πάχος. Έπειτα, η τελική

εξωτερική διάμετρος οδηγείται στο ζητούμενο μέγεθος μέσω πίεσης μέσω της αρχικής μήτρας, χωρίς το μαντρέλι αυτή την φορά, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.3.



Σχήμα 2.3: Κατασκευή του σωλήνα - Δεύτερο βήμα

1.2 Κράματα αλουμινίου

Το αλουμίνιο χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην κατασκευή σκελετού ποδηλάτου κατά τη δεκαετία του 1890. Ωστόσο, η ποιότητα των υλικών δεν ευνόησε την χρήση του, με αποτέλεσμα την επικράτηση του χάλυβα. Παρόλ'αυτά, η σχεδίαση σκελετών ποδηλάτου με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών και η βελτίωση των υλικών οδήγησαν κατά τη δεκαετία του 1980 σε μία ανανέωση του ενδιαφέροντος για το αλουμίνιο ως υλικό κατασκευής σκελετών ποδηλάτου. Σημαντικό ρόλο σε αυτή την εξέλιξη έπαιξε η πίεση του αγοραστικού κοινού για συνεχώς ελαφρότερα ποδήλατα, τα οποία επιδείκνυαν παράλληλα υψηλές επιδόσεις. Η τεχνική που περιγράφηκε προηγουμένως για την κατασκευή σωλήνων από χάλυβα με μεταβλητό πάχος κατά το μήκος τους χρησιμοποιείται επίσης και για την παρασκευή σωλήνων από κράματα αλουμινίου. Σήμερα, τα πιο διαδεδομένα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία είναι τα 6061 και 7005, τα οποία φέρουν προσμίξεις υλικών όπως είναι το μαγνήσιο, η σιλικόνη και ο ψευδάργυρος.



Σχήμα 2.4: Σκελετός ποδηλάτου από αλουμίνιο

1.3 Ανθρακόνημα

Τα ανθρακονήματα (carbon fibers) είναι ένα υλικό το οποίο άρχισε σχετικά πρόσφατα να χρησιμοποιείται στη βιομηχανία για την κατασκευή σκελετών ποδηλάτων. Οι εξαιρετικές μηχανικές του ιδιότητες σε συνδυασμό με την χαμηλότερη πυκνότητα σε σύγκριση τόσο με το αλουμίνιο όσο και με τον χάλυβα έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον τόσο της επιστημονικής κοινότητας όσο και του εμπορικού κοινού [3]. Όπως και στην περίπτωση του χάλυβα, ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη και το κόστος του ποδηλάτου, η ποιότητα και οι μηχανικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων ινών διαφέρουν από σκελετό σε σκελετό. Ωστόσο, τα ανθρακονήματα παρουσιάζουν μειονεκτήματα σε σχέση με τα πιο συμβατικά υλικά παρασκευής κατασκευής σκελετών ποδηλάτων, όπως είναι το αλουμίνιο και ο χάλυβας. Αρχικά, η συμπεριφορά των ανθρακονημάτων κατά την θραύση είναι ψαθυρή, εν αντιθέσει με τη συμπεριφορά των προαναφερθέντων υλικών.



Σχήμα 2.5: Σκελετός ποδηλάτου από ανθρακόνημα

Επιπροσθέτως, έχει παρατηρηθεί πως η δημιουργία μικρορωγμών και η ύπαρξη ατελειών στην κατασκευή συχνά περνάνε απαρατήρητες, λόγω της δομής του υλικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την θραύση σε χρονική στιγμή μη αναμενόμενη από τον χρήστη, καθώς δεν έχει υπάρξει κάποιο προειδοποιητικό σημάδι. Ένα ακόμη πρόβλημα με ποδήλατα που περιλαμβάνουν μέρη από ανθρακονήματα είναι η διάθεση των μερών αυτών όταν το ποδήλατο πάψει να χρησιμοποιείται, μιας και η ανακύκλωση των ανθρακονημάτων σε βιομηχανικό επίπεδο είναι ακόμη σχετικά περιορισμένη. Κατά συνέπεια, τα μέρη αυτά οδηγούνται είτε σε χώρους ταφής απορριμμάτων είτε για αποτέφρωση. Αμφότερες επιλογές κρίνονται ως μη φιλικές προς το περιβάλλον, με αποτέλεσμα πολλές χώρες να θεσπίσουν ειδική νομοθεσία, προωθώντας την ανακύκλωση των ανθρακονημάτων ως βιώσιμη εναλλακτική.

1.4 Τιτάνιο

Πρόκειται για ένα ανερχόμενο υλικό στη βιομηχανία κατασκευής ποδηλάτων, το οποίο παρουσιάζει χαμηλή πυκνότητα συγκρίσιμη με εκείνη του αλουμινίου και μηχανικές ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες του χάλυβα. Ωστόσο, είναι από τα πλέον ακριβά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ποδηλάτων.



Σχήμα 2.6: Σκελετός ποδηλάτου από τιτάνιο

1.5 Μέθοδοι κατασκευής σκελετών ποδηλάτων

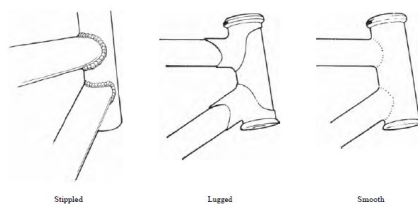
Η μέθοδος κατασκευής του σκελετού ενός ποδηλάτου παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην ποιότητα του σκελετού. Ένας σημαντικός παράγοντας ο οποίος πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την κατασκευή ενός σκελετού ποδηλάτου είναι το υλικό αυτό καθ'αυτό. Για παράδειγμα, χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα εμφανίζουν ψαθυρή συμπεριφορά αν υπερθερμανθούν. Συνεπώς, ένα τέτοιο υλικό απαιτεί μία μέθοδο κατασκευής με χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με χάλυβες με μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Σήμερα, υφίστανται δύο κύριες μέθοδοι κατασκευής σκελετών ποδηλάτων:

- ▶ η κατασκευή των επιμέρους μερών του σκελετού ξεχωριστά και έπειτα η συνένωση αυτών σε ένα ενιαίο κομμάτι με διάφορες μεθόδους (tube-to-tube manufacturing) και
- ▶ η κατασκευή του σκελετού είτε ως ενός ενιαίου κομματιού, συνήθως με την χρήση κάποιας μήτρας (monocoque manufacturing), όπως αυτή απεικονίζεται στην εικόνα 2.8 είτε η κατασκευή ενός κομματιού του σκελετού με τη συγκεκριμένη μέθοδο και η ένωση του με τα υπόλοιπα κομμάτια του σκελετού (semi-monocoque manufacturing)

Η πρώτη μέθοδος αποτελείται από δύο κυρίως μέρη. Αρχικά, κατασκευάζεται κάθε τμήμα του σκελετού του ποδηλάτου ξεχωριστά. Έπειτα, τα τμήματα αυτά ενώονται μεταξύ τους προκειμένου να σχηματίσουν ένα ενιαίο κομμάτι. Όσον αφορά τη συνένωση των επιμέρους τμημάτων σε ένα ενιαίο κομμάτι, αυτή μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, με τους κυριότερους να είναι:

- ▶ η χρήση ηλεκτροσυγκολλήσεων (MIG/TIG welding)
- ▶ η μηχανική συγκόλληση (lug and/or brazing)
- ▶ η χρήση κολλητικών μερών ή ειδικής κόλλας (adhesive bonding)

Στην πρώτη περίπτωση, το υλικό που χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση είναι το ίδιο με το υλικό που επρόκειτο να συγκολληθεί. Η τεχνική αυτή λειτουργεί καλύτερα για υλικά με μεγαλύτερη πυκνότητα και είναι κατάλληλη για μαζική παραγωγή. Στην περίπτωση που έχουμε πιο λεπτούς σωλήνες, συνήθως χρησιμοποιείται η ηλεκτροσυγκόλληση TIG, η οποία είναι και η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μαζική παραγωγή σκελετών με κράματα αλουμινίου και χρωμομολύβδου (chromoly). Ένα σχεδιάγραμμα των μεθόδων αυτών και του τελικού αποτελέσματος απεικονίζεται στην εικόνα 2.7. Ένα πιθανό μειονέκτημα αυτής της χρήσης συγκολλήσεων είναι πως η αντοχή του σκελετού σε καταπόνηση εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την αντοχή των επιμέρους συγκολλήσεων. Έτσι, μια ενδεχόμενη ατέλεια σε κάποιες από τις συγκολλήσεις ενδέχεται να οδηγήσει σε ξαφνική θραύση του σκελετού.



Σχήμα 2.7: Διαφορετικές μέθοδοι συνένωσης επιμέρους κομματιών σκελετού

Όσον αφορά τα ανθρακονήματα, συνήθως προτιμάται η δεύτερη μέθοδος. Η πλειονότητα των κατασκευαστών χρησιμοποιεί ανθρακόνημα με προεμποτισμένη εποξική ρητίνη (pre-impregnated carbon fibre). Η χρήση τέτοιου υλικού προτιμάται, διότι χρησιμοποιείται η ελάχιστη δυνατή ποσότητα ρητίνης, οδηγώντας αυτόματα σε μείωση του βάρους του σκελετού.

Το πρώτο βήμα για την κατασκευή μονοκόμματων σκελετών ποδηλάτου είναι η κοπή φύλλων προεμποτισμένου ανθρακονήματος, το οποίο έπειτα τοποθετείται σε ειδικά διαμορφωμένη μήτρα. Έπειτα, εφαρμόζεται πίεση εκ των έσω, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ικανοποιητική σύνδεση μεταξύ των κομματιών και να αποφευχθεί η ύπαρξη κενών. Έπειτα, ακολουθεί μία διαδικασία curing για το σκελετό [4]. Η όλη διαδικασία επιτρέπει πολύ μεγάλη ευελιξία στο σχεδιασμό του σκελετού, τόσο από άποψη σχήματος των σωληνών όσο και από την άποψη των στρώσεων που χρησιμοποιούνται.

Ωστόσο, πρόκειται για μία διαδικασία που γίνεται σε μεγάλο βαθμό χειροκίνητα και κατά συνέπεια δεν είναι αυτοματοποιημένη, ενώ για τη δημιουργία ενός σκελετού ποδηλάτου απαιτείται η σχεδίαση και χρήση μιας και μόνο μήτρας. Έτσι, η μέθοδος αυτή κρίνεται οικονομικά ασύμφορη για μαζική παραγωγή.



Σχήμα 2.8: Μήτρα ειδικά κατασκευασμένη για σκελετό ποδηλάτου

Επιπλέον, στην περίπτωση του ανθρακονήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η πρώτη μέθοδος κατασκευής (tube-to-tube manufacturing), με τους σωλήνες να εφαρμόζουν ο ένας μέσα στον άλλον [5]. Στα σημεία διασύνδεσης, χρησιμοποιείται ειδική κόλλα, με το σκελετό να περνάει μετά και από διαδικασία curing. Επίσης, στα σημεία διασύνδεσης τυλίγονται φύλλα προεμποτισμένου με εποξική ρητίνη ανθρακονήματος, για καλύτερη ενίσχυση. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι πιο φθηνή σε σχέση με την προηγούμενη, αλλά προσφέρει μειωμένη ευελιξία, καθώς πρέπει να παραχθούν πολλοί διαφορετικοί σωλήνες με τον καθένα τους να έχει διαφορετικό σχήμα και μέγεθος.

2. Μοντελοποίηση μέσω της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η διαδικασία του σχεδιασμού μπορεί να οριστεί είτε ως η μορφοποίηση ενός σχήματος-πλάνου για την ικανοποίηση μιας ορισμένης και συγκεκριμένης ανάγκης, είτε ως η πράξη λύσης ενός προβλήματος. Αν το πλάνο έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός αντικειμένου με φυσική παρουσία, τότε αυτό το αντικείμενο-προϊόν θα πρέπει να επληρώνει τις απαιτήσεις λειτουργικότητας, ασφάλειας, χρηστικότητας, αξιοπιστίας, ανταγωνιστικότητας, κατασκευασιμότητας και εμπορευσιμότητας. Η εκπλήρωσή τους είναι προϋπόθεση για την ίδια την ύπαρξη του σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός προϊόντων είναι μία καινοτόμος και ιδιαίτερα επαναληπτική διαδικασία, η οποία σαφώς εμπλέκει τη λήψη αποφάσεων. Στην περίπτωση σχεδιασμού ενός προϊόντος, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να φτάσουμε από τη σύλληψη του προϊόντος στην κατασκευή του πρωτοτύπου και εν συνεχεία στην παραγωγή είναι οι ακόλουθες:

- ▶ CAD (Computer Aided Design)
- ▶ CAE (Computer Aided Engineering) και
- ▶ Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method ή FEM)

2.1 Computer Aided Design (CAD)

Ο σχεδιασμός ενός προϊόντος με την χρήση Η/Υ αρχίζει με τη δημιουργία μια τρισδιάστατης απεικόνισής του. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένες διαδικασίες προσέγγισης επιφανειών ή/και όγκων, μέσω των παρεμβολών Coons, Bezier και Nurbs [6]. Έτσι, διευκολύνεται και επιταχύνεται η αλλαγή της γεωμετρίας ενός μηχανολογικού εξαρτήματος, μέχρις ότου ο μηχανικός να καταλήξει σε μία αρχική, αποδεκτή εκδοχή του προϊόντος. Επιπλέον, όλα τα συστήματα CAD διαθέτουν κατάλληλα φίλτρα (DXF, IGES, STEP), τα οποία δίνουν τη δυνατότητα μεταφοράς της γεωμετρικής πληροφορίας από το ένα σύστημα στο άλλο. Τα εργαλεία CAD παρέχουν μια πληθώρα λειτουργιών, η οποία συμπεριλαμβάνει τις ακόλουθες:

- ▶ Γεωμετρικά εργαλεία διαχείρισης σχημάτων

- ▶ Προγραμματισμός των παραγωγικών διαδικασιών, κυρίως σε μηχανές ψηφιακής καθοδήγησης (Computer Numerical Control - CNC), με χρήση των συστημάτων σχεδιασμού παραγωγής με χρήση υπολογιστή (Computer Aided and Manufacture - CAM)
- ▶ Ταχεία παραγωγή προτύπου και παραγωγή του προϊόντος (Rapid Prototyping and Manufacturing)
- ▶ Οπτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης
- ▶ Ανάλυση της μεθόδου παραγωγής με χρήση τεχνικών εικονικής πραγματικότητας

Επιπροσθέτως, εργαλεία CAD μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και για ανάλυση και βελτιστοποίηση μορφής, με χρήση συστημάτων μοντελοποίησης και μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, για τις ανάγκες τέτοιων εφαρμογών συνήθως προτιμούνται εργαλεία CAE. Ο σημαντικότερος ρόλος των εργαλείων CAD είναι ο καθορισμός της γεωμετρίας του υπό σχεδιασμού προϊόντος. Στη συνέχεια, η γεωμετρία αυτή αξιοποιείται από το CAE.

2.2 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM)

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων αποτελεί ισχυρό εργαλείο στη σύγχρονη μηχανολογία, καθώς χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, οι οποίες συμπεριλαμβάνουν μεταξύ άλλων τη μελέτη κατασκευών, προβλήματα θερμοδυναμικής και ρευστών. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται τόσο σε συμβατικά, γραμμικά προβλήματα, όσο και σε μη-γραμμικά, δυναμικά προβλήματα. Ένας σημαντικός παράγοντας που οδήγησε στην ευρύτερη διάδοση και χρήση της μεθόδου είναι οι εξελίξεις στην τεχνολογία των Η/Υ και των συστημάτων CAD. Αρχικά, σύνθετα προβλήματα, για τα οποία η εύρεση αναλυτικής λύσης είναι πρακτικά αδύνατη, απλοποιούνται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η μοντελοποίησή τους να γίνεται πολύ πιο εύκολα. Επιπροσθέτως, διάφορα μοντέλα ενός προβλήματος μπορούν να δοκιμαστούν σε Η/Υ, προτού φτάσουμε στην τελική λύση του προβλήματος.

Η κεντρική ιδέα που βρίσκεται πίσω από αυτήν τη μέθοδο είναι ότι ένα συνεχές μέσο, το οποίο μπορεί να είναι π.χ. μια κατασκευή, ένα μαγνητικό πεδίο ή ένα ρευστό, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία ονομάζονται Πεπερασμένα Στοιχεία (Finite Elements). Αυτά με τη σειρά τους ποικίλουν σε σχήμα και μορφολογία, ανάλογα φυσικά με το συνεχές μέσο το οποίο μοντελοποιείται και το

πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί. Στην περίπτωση των κατασκευών, στόχος είναι ο υπολογισμός του πεδίου μετατοπίσεων κάτω από συγκεκριμένες φορτίσεις και περιορισμούς, που ορίζονται και ως συνοριακές συνθήκες (boundary conditions). Με δεδομένο πως πρόκειται για μια μοντελοποίηση του συνεχούς μέσου με διακριτά στοιχεία, πρέπει να τονισθεί πως οδηγούμαστε μέσω της επίλυσης σε προσεγγιστική λύση, της οποίας η ακρίβεια εξαρτάται από το πολλούς παράγοντες.

Οι βάσεις της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων τέθηκαν κατά τη δεκαετία του 1940 και προήλθαν από τις εξελίξεις στη δομική ανάλυση αεροσκαφών. Το 1941, ο Hrenikoff παρουσίασε μια λύση των προβλημάτων ελαστικότητας με την χρήση της «μεθόδου των δικτυωμάτων». Επιστήμονες όπως ο Turner δημιούργησαν μητρώα ακαμψίας για δικτυώματα, δοκούς και άλλα στοιχεία και παρουσίασαν τα ευρήματά τους το 1956. Στις αρχές της δεκαετίας του 1960, οι μηχανικοί χρησιμοποίησαν τη μέθοδο για να δώσουν προσεγγιστικές λύσεις σε προβλήματα ανάλυσης τάσεων, ροής ρευστών, μεταφοράς θερμότητας και άλλων τομέων. Ο Αργύρης, το 1955, σε βιβλίο του για θεωρήματα ενέργειας και μητρικές μεθόδους, έθεσε τα θέματα για μελλοντική ανάπτυξη στις μελέτες των πεπερασμένων στοιχείων. Το πρώτο βιβλίο για πεπερασμένα στοιχεία των Zienkiewicz και Chung κυκλοφόρησε το 1967. Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και στις αρχές της δεκαετίας του 1970, η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόστηκε σε μη γραμμικά προβλήματα και μεγάλες παραμορφώσεις. Το βιβλίο του Oden για τα μη γραμμικά συνεχή εμφανίστηκε το 1972.

2.3 Συνοπτική περιγραφή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων

Έστω πως έχουμε ένα ελαστικό μέσο D , το οποίο μπορεί να είναι τρισδιάστατο, δισδιάστατο ή και μονοδιάστατο. Ο χώρος ή η επιφάνεια που καλύπτεται από το μέσο αυτό διακριτοποιείται σε έναν πεπερασμένο αριθμό στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός πεπερασμένου αριθμού σημείων, που ονομάζονται κόμβοι. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 2.9.

Στη μηχανική των στερεών, που είναι και το πεδίο από το οποίο προέκυψε η χρήση της μεθόδου, στόχος είναι ο προσδιορισμός του πεδίου παραμορφώσεων u , έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι εξισώσεις ισορροπίας, όπως αυτές φαίνονται παρακάτω.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y = 0$$

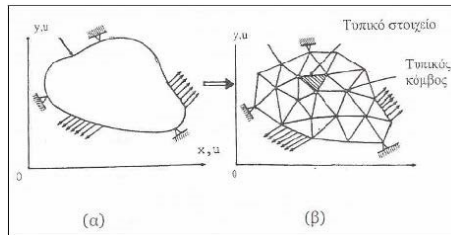
$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z = 0$$

Οι μετατοπίσεις αυτές συνδέονται με τις παραμορφώσεις, οι οποίες με τη σειρά τους συνδέονται με τις τάσεις, όπως φαίνεται παρακάτω.

$$\epsilon = Xq$$

$$\sigma = D\epsilon$$

, όπου ϵ το μητρώο των παραμορφώσεων, q το μητρώο των μετατοπίσεων, σ το μητρώο των τάσεων και D , X τα αντίστοιχα μητρώα τελεστών. Πιο συγκεκριμένα, το μητρώο D ονομάζεται και μητρώο ακαμψίας και οι συντελεστές προκύπτουν από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού από το οποίο αποτελείται το μέσο, όπως π.χ. το μέτρο ελαστικότητας E , ο λόγος Poisson ν και τα όρια αντοχής σε θραύσης, εφόσον πρόκειται για ιστροπικό υλικό.



Σχήμα 2.9: Διακριτοποίηση μέσου σε πεπερασμένα στοιχεία

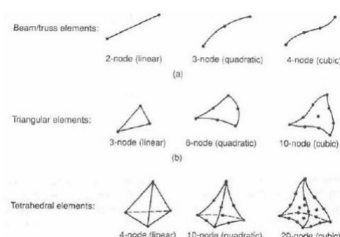
Οι εξισώσεις προς επίλυση προκύπτουν ως οι μερικές παράγωγοι της συνολικής δυναμικής ενέργειας Π του ελαστικού μέσου ως προς τους βαθμούς ελευθερίας του ελαστικού μέσου και βάσει της αρχής της ελάχιστης δυναμικής ενέργειας. Αν υποθέσουμε πως το ελαστικό μέσο έχεις τρεις βαθμούς ελευθερίας q_1 , q_2 και q_3 αντίστοιχα, τότε οι εξισώσεις διαμορφώνονται ως εξής.

$$\frac{\partial \Pi}{\partial q_1} = 0$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial q_2} = 0$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial q_3} = 0$$

Χάρη στη διακριτοποίηση του μέσου σε πεπερασμένα στοιχεία, οι βαθμοί ελευθερίας μπορούν να συσχετιστούν με τους κόμβους. Κατόπιν, οι συνοριακές συνθήκες εκφράζονται είτε ως μετατοπίσεις είτε ως δυνάμεις, σε συγκεκριμένους κόμβους του πλέγματος. Έπειτα, το πεδίο των μετατοπίσεων υπολογίζεται προσεγγιστικά είτε μέσω της μεθόδου Rayleigh-Ritz είτε μέσω της μεθόδου Galerkin. Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση του πεδίου των μετατοπίσεων είναι απλές και συνήθως πολυωνυμικής φύσεως. Συνεπώς, εφόσον γίνεται λόγος για προσεγγιστική λύση, γίνεται εύκολα σαφές πως η ακρίβεια της λύσης εξαρτάται από τον αριθμό των στοιχείων που δημιουργούνται, καθώς και από την καταλληλότητα του εκάστοτε στοιχείου για την εκάστοτε εφαρμογή.



Σχήμα 2.10: Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (α) μονοδιάστατα, (β) δισδιάστατα και (γ) τρισδιάστατα

2.4 Εφαρμογή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων σε Η/Υ

Για την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε Η/Υ, απαιτούνται εργαλεία CAE. Αυτά επιτρέπουν στο μηχανικό να προσομοιώσει και να μελετήσει τη συμπεριφορά του προϊόντος. Την ίδια στιγμή, το εργαλείο CAE πρέπει να προσφέρει στο μηχανικό την ευχέρια να αλλάζει και να βελτιστοποιεί το προϊόν κατά το δοκούν. Τα εργαλεία CAE διατίθενται σε ευρεία κλίμακα αναλύσεων. Κινηματικά προγράμματα, για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση λειτουργίας μηχανών.

Η εφαρμογή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων σε Η/Υ γίνεται συνήθως σε τρία βήματα. Τα στάδια αυτά είναι κατά σειρά η προ-επεξεργασία (pre-processing), η επεξεργασία (processing) και η μετα-επεξεργασία (post-processing). Κατά την φάση της προ-επεξεργασίας, το αντικείμενο προς επεξεργασία διαμορφώνεται ως ένα 2-D ή 3-D πλέγμα, εφαρμόζονται τα εξωτερικά φορτία και θέτονται οι περιορισμοί ως προς τους βαθμούς ελευθερίας του αντικειμένου. Σε αυτό το στάδιο γίνεται και η επιλογή της λεπτότητας του πλέγματος, η οποία είναι και καίρια κατά

την επίλυση.

Το επόμενο βήμα είναι η επεξεργασία. Κατά την φάση αυτή, πραγματοποιείται η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων όπως αυτές ορίστηκαν κατά το προηγούμενο στάδιο. Η είσοδος στο στάδιο αυτό συμπεριλαμβάνει τα εξωτερικά φορτία που ασκούνται στο μέσο, τους περιορισμούς όσον αφορά την κίνησή του και τις ελαστικές ιδιότητες του μέσου. Ακολούθως, πραγματοποιείται η αριθμητική επίλυση του προβλήματος και τα αριθμητικά αποτελέσματα αποθηκεύονται στο αρχείο εξόδου, το οποίο είναι αντίστοιχα το αρχείο εισόδου στην επόμενη φάση, δηλαδή αυτή της μετα-επεξεργασίας.

Κατά το στάδιο της μετα-επεξεργασίας, πραγματοποιείται καταγραφή των αποτελεσμάτων, ενώ είναι εφικτή η απεικόνισή τους με ποικίλους τρόπους. Μια συνηθισμένη μορφή απεικόνισης είναι μέσω ισοτασικών επιφανειών, όπου χρησιμοποιείται χρωματική κλίμακα. Το τασικό μέγεθος που χρησιμοποιείται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η τάση Von Mises. Άλλες μέθοδοι απεικόνισης είναι το παραμορφωσιακό πεδίο και το παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής. Συνοπτικά, τα βήματα επίλυσης του προβλήματος παρουσιάζονται παρακάτω.

- ▶ Εισαγωγή της γεωμετρίας στο πρόγραμμα
- ▶ Γένεση του πλέγματος και δημιουργία αρχείου εισόδου (προ-επεξεργασία)
- ▶ Αριθμητική επίλυση του προβλήματος και γένεση αποτελεσμάτων (επεξεργασία)
- ▶ Παρουσίαση αποτελεσμάτων, κατά τρόπο που να εξυπηρετεί το μηχανικό (μετα-επεξεργασία)

2.5 Χρήση της μεθόδου FEM στη μελέτη σκελετού ποδηλάτου

Από τη στιγμή που η απήχηση του ποδηλάτου στο καταναλωτικό κοινό άρχισε να αυξάνεται, θεσπίστηκαν πρότυπα ασφαλείας, των οποίων ο στόχος ήταν να καθορίσουν τις μηχανικές αντοχές του σκελετού, όπως π.χ. το πρότυπο της ASTM. Κατά επέκταση, οι κατασκευαστές οφείλουν συμμορφώνονται σε αυτά τα πρότυπα, προκειμένου τα ποδήλατα που κατασκευάζουν να θεωρηθούν πιστοποιημένα ασφαλείς για το κοινό και να διατεθούν στην αγορά. Ωστόσο, τόσο η ύπαρξη πολλών κατασκευαστών όσο και οι ιδιαιτερότητες του ποδηλάτου ως μεταφορικού μέσου έχουν

οδηγήσει στην ύπαρξη πολλών διαφορετικών προτύπων και πειραματικών δοκιμών, με τις διαφορές να έγκεινται στα φορτία και στους περιορισμούς που επιβάλλονται. Επιπλέον, τα περισσότερα πρότυπα και οι δοκιμές συμπεριλαμβάνουν δοκιμές για αντοχή σε κόπωση και δοκιμές για αντοχή σε πρόσκρουση.

Πέρα από τις δοκιμές και τα πρότυπα που υφίστανται στη βιομηχανία, υπάρχει πληθώρα μελετών σε ερευνητικό και πανεπιστημιακό επίπεδο από τη δεκαετία του 1980. Οι Peterson και Londry [7] αντιλήφθηκαν την χρησιμότητα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στο σχεδιασμό ενός σκελετού ποδηλάτου, καθώς και πως αυτή οδηγεί σε σημαντική μείωση του κόστους και του χρόνου παραγωγής. Έτσι, στην εργασία τους προσομοίωσαν φορτία που προκύπτουν κατά την οδήγηση. Το πλαίσιο που μελέτησαν ήταν κατασκευασμένο από αλουμίνιο, με κάθε σωλήνα να κατασκευάζεται ξεχωριστά και τη σύνδεση των επιμέρους μερών να γίνεται με ειδική κόλλα. Οι Covill και άλλοι χρησιμοποίησαν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να μελετήσουν αφενός την επίδραση διάφορων φορτίσεων στο σκελετό του ποδηλάτου και πως αυτός ανταποκρίνεται σε αυτές [8], καθώς και την επίδραση της γεωμετρίας του πλαισίου στην πλευρική ακαμψία και την κάθετη ενδοτικότητα του σκελετού [9]. Με αυτόν τον τρόπο, κατέδειξαν πως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενδεδειγμένη μελέτη του πλαισίου, προτού δημιουργηθεί το πρώτο πρωτότυπο.

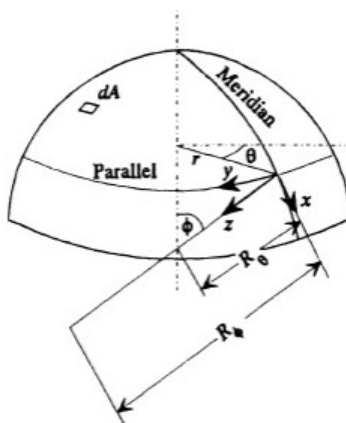
Στα επόμενα χρόνια, υπήρξε έντονο ενδιαφέρον όσον αφορά εναλλακτικά υλικά, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή σκελετών ποδηλάτων, όπως π.χ. τα ανθρακονήματα. Οι Lessard και άλλοι [10] ήταν μεταξύ των πρώτων που χρησιμοποίησαν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο σχεδιασμό σκελετού ποδηλάτου από ανθρακόνημα. Οι Liu και Wu [11] μελέτησαν την επίδραση της ακολουθίας στρώσεων από τις οποίες αποτελείται το ανθρακόνημα σε εμπρόσθια, κάθετη και στρεπτική καταπόνηση του σκελετού, ενώ έχει πραγματοποιηθεί ακόμα και μελέτη για σχεδιασμό σκελετού ποδηλάτου από μπαμπού [12].

Ένα σημαντικό κομμάτι της επιστημονικής έρευνας αφορά τη μελέτη των φορτίων που ασκούνται από τον ποδηλάτη, με τέτοιες εργασίες να έχουν ξεκινήσει από το 1974 με τους Soden και Adeyefa [13]. Επίσης, αρκετοί ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη συσκευών μετρήσεων, για την ακριβέστερη μέτρηση αυτών των δυνάμεων. Οι μετρήσεις αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την ανάπτυξη μηχανικών δοκιμών, οι οποίες θα προσομοιάζουν με ακρίβεια τις καταπονήσεις που δέχεται ένας σκελετός ποδηλάτου κατά την οδήγηση. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η εργασία των Boyd και άλλων [14].

3. Θεωρία των κελύφων

Κέλυφος είναι μια τρισδιάστατη δομή η οποία οριοθετείται από δύο κυρτές επιφάνειες. Η μέση επιφάνεια του κελύφους είναι η επιφάνεια που βρίσκεται παντού σε ίση απόσταση από τις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες του. Η μηχανική κατάσταση του κελύφους καθορίζεται από τις τιμές ορισμένων συνισταμένων τάσεων που δρουν στη μέση επιφάνεια. Ο μεσημβρινός του κελύφους σχηματίζεται από την τομή του επιπέδου παραγωγής με την μέση επιφάνεια. Παράλληλος ενός κελύφους είναι η τομή ενός επιπέδου κάθετου με τη μέση επιφάνεια, στον πολικό άξονα. Η εικόνα 2.12 αναπαριστά μια τυπική περίπτωση κελύφους.

Οι κύριες ακτίνες καμπυλότητας της μέσης επιφάνειας είναι οι ακτίνες καμπυλότητας των μεσημβρινών και των παράλληλων, $R\phi$ και $R\theta$ αντίστοιχα. Οι συντεταγμένες που ορίζουν ένα σημείο στην επιφάνεια του κελύφους φαίνονται στην εικόνα 2.11. Η ακτίνα $R\theta$ είναι η απόσταση από τον πολικό άξονα κατά μήκος του κελύφους, κάθετη στο σημείο της επιφάνειας. Η γωνία θ είναι η γωνία μεταξύ κάθε αυθαίρετης γραμμής αναφοράς και της ακτίνας του παράλληλου που διέρχεται από το σημείο. Η γωνία ϕ είναι η γωνία μεταξύ του πολικού άξονα και της $R\phi$. Ένα πρόσθετο σύστημα συντεταγμένων ορίζεται στην επιφάνεια κελύφους, ώστε ο άξονας x να είναι εφαπτόμενος στον μεσημβρινό, ο άξονας y να είναι εφαπτόμενος με την παράλληλη και ο z να συμπίπτει κάθετα με την επιφάνεια.



Σχήμα 2.11: Οι συντεταγμένες προσδιορίζοντας σημεία σε ένα κέλυφος

Οι βασικοί τύποι κελύφων είναι:

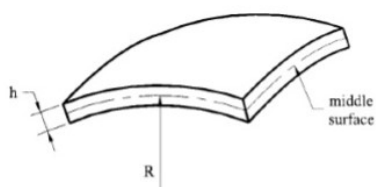
- σφαιρικά κέλυφη

- ▶ κυλινδρικά κελύφη
- ▶ υπερβολικά-παραβολοειδή κελύφη και
- ▶ τοροειδή κελύφη

Όσον αφορά τα κυλινδρικά κελύφη, για να θεωρηθεί λεπτό ένα κέλυφος, θα πρέπει να ισχύει η ακόλουθη συνθήκη:

$$\frac{h}{R} \ll 1$$

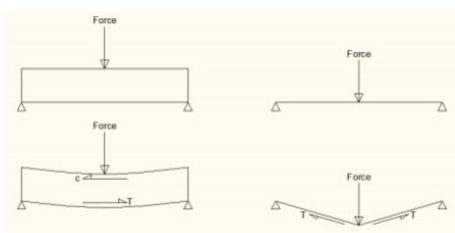
, όπου h το πάχος του κελύφους και R η ακτίνα καμπυλότητάς του.



Σχήμα 2.12: Σχηματική αναπαράσταση ενός κελύφους

Σήμερα, υφίστανται δύο μέθοδοι ανάλυσης κελυφών:

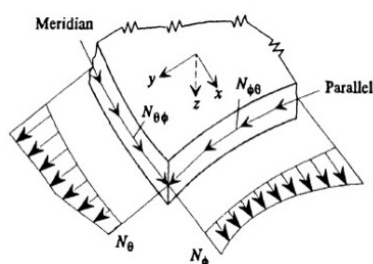
- ▶ η Μεμβρανική Θεωρία και
- ▶ η Καμπτική Ανάλυση



Σχήμα 2.13: Μεμβρανική έναντι καμπτικής θεωρίας

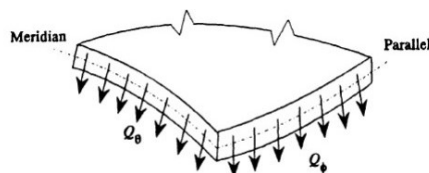
Στην περίπτωση ενός μεμβρανικού κελύφους, στη μέση επιφάνεια του κελύφους παρατηρείται η απουσία κάμπτικών και στρεπτικών ροπών, όπως επίσης και

εγκάρσιων διατμητικών δυνάμεων. Η μεμβρανική υπόθεση παράγει το απλούστερο και ευκολότερα επιλύσιμο σύστημα εξισώσεων για το κέλυφος. Έτσι, αν το τοίχωμα του κελύφους είναι λεπτό και δεν υπάρχουν απότομες μεταβολές στο πάχος, στην κλίση ή στην καμπυλότητα, και εφόσον τα φορτία που ασκούνται είναι ομοιόμορφα καταναμημένα ή ποικίλουν ομαλά και είναι συμμετρικά, οι καμπτικές αποκρίσεις μπορούν να είναι πολύ μικρές ώστε να αγνοηθούν. Ως εκ τούτου, μπορεί να υποθεθεί ότι στη μέση επιφάνεια του κελύφους δε δημιουργούνται ροπές και εγκάρσιες διατμητικές δυνάμεις. Οι συνισταμένες των τάσεων που είναι παρούσες είναι οι ορθές και διατμητικές τάσεις ανά μονάδα μήκους της επιφάνειας του κελύφους και φαίνονται στην εικόνα 2.14.

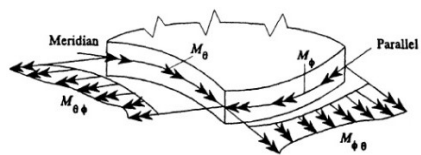


Σχήμα 2.14: Δυνάμεις της μεμβράνης σε ένα στοιχείο του κελύφους

Η χρήση της Μεμβρανικής Θεωρίας όμως δεν είναι κατάλληλη για όλες τις περιπτώσεις. Ας υποθέσουμε ένα κέλυφος με ελεύθερα άκρα. Κατά μήκος των άκρων του, η Μεμβρανική Θεωρία εξάγει ορθές και διατμητικές τάσεις. Αυτό όμως είναι λάθος αφού οι άκρες είναι ελεύθερες. Για να είναι σωστή η λύση πρέπει να εφαρμοστούν γραμμικά φορτία σε αντίθετη κατεύθυνση από τις δυνάμεις της μεμβράνης για να ακυρωθούν οι πιέσεις στα άκρα που προκύπτουν σύμφωνα με τη Μεμβρανική Θεωρία. Τα γραμμικά αυτά φορτία προκαλούν τη δημιουργία καμπτικών ροπών στα άκρα του κελύφους. Αυτή η ανάλυση ονομάζεται Καμπτική. Όταν αναφερόμαστε στην Καμπτική Θεωρία, ο όρος ‘καμπτική’ (bending), συνήθως αναφέρεται σε κέλυφος που παρουσιάζει και μεμβρανικές και καμπτικές παραμορφώσεις. Οι δυνάμεις και οι ροπές που ασκούνται σε ένα κέλυφος σύμφωνα με αυτή τη Θεωρία παρουσιάζονται στις εικόνες 2.15 και 2.16.



Σχήμα 2.15: Εγκάρσιες διατμητικές δυνάμεις ανά μονάδα μήκους



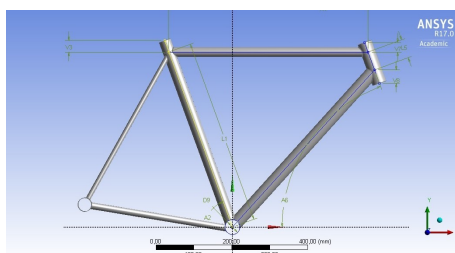
Σχήμα 2.16: Καμπτικές και στρεπτικές ροπές ανά μονάδα μήκους

Κεφάλαιο 3

Υπολογιστικό Μέρος

1. Σχεδιασμός Ποδηλατικού Πλαισίου στο λογισμικό ANSYS v.17

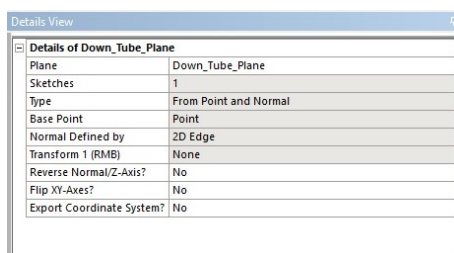
Στο κεφάλαιο αυτό, θα πραγματοποιηθεί μια συνοπτική περιγραφή του τρόπου σχεδίασης του σκελετού ποδηλάτου στο λογισμικό ANSYS. Ο λόγος που προτιμήθηκε το εν λόγω λογισμικό αντί του Solidworks έχει να κάνει με την απλότητα της κατασκευής και την ομοιότητα του περιβάλλοντος σχεδίασης που παρέχει το εν λόγω λογισμικό σε σύγκριση με το αντίστοιχο του Solidworks. Επιπλέον, από τη στιγμή που η ανάλυση πραγματοποιήθηκε επίσης στο Ansys, κρίθηκε αναγκαία η ευελιξία στο σχεδιασμό. Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα σκαρίφημα του εμπρόσθιου τριγώνου του σκελετού στο επίπεδο XY, όπως αυτό αναπαρίσταται στην εικόνα 3.1.



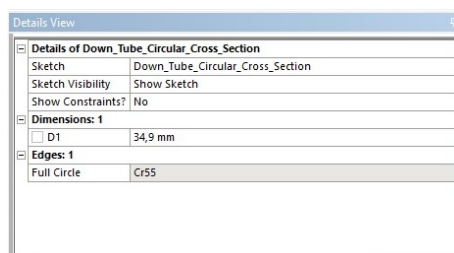
Σχήμα 3.1: Επίπεδο XY

Για κάθε σωλήνα δημιουργήθηκε μια ευθεία γραμμή με την εντολή Draw, που βρίσκεται στην επιλογή Sketching. Οι ευθείες γραμμές αυτές ταυτίζονται με τον άξονα συμμετρίας του εκάστοτε τμήματος. Έπειτα, οι σωλήνες δημιουργήθηκαν

με την εντολή Sweep. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε σωλήνα δημιουργήθηκε ένα καινούριο επίπεδο, στο οποίο σχεδιάστηκε η διατομή του. Για τη δημιουργία αυτού του επιπέδου, χρησιμοποιήθηκαν σημεία του πλέγματος που ήταν ενεργοποιημένο κατά το σχεδιασμό του σκελετού, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.2. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κυκλική διατομή του κάτω σωλήνα, της οποίας η διάμετρος φαίνεται στην εικόνα 3.3. Με αυτόν τον τρόπο, ήταν δυνατή η σχεδίαση πολλών εναλλακτικών διατομών στο ίδιο επίπεδο, στοιχείο απαραίτητο στη δεύτερη φάση της εργασίας.

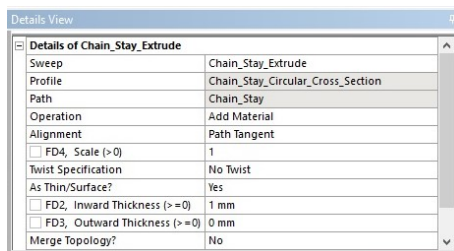


Σχήμα 3.2: Επίπεδο σχεδίασης διατομής κάτω σωλήνα



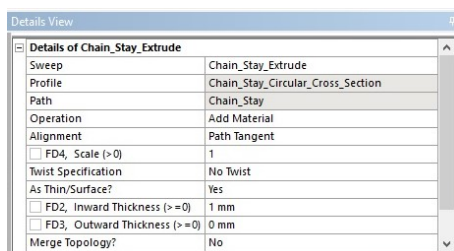
Σχήμα 3.3: Κυκλική διατομή κάτω σωλήνα

Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε και για τους υπόλοιπους σωλήνες του εμπρόσθιου τριγώνου, με τις λεπτομέρειες της εντολής Sweep που χρησιμοποιήθηκε να παρουσιάζονται στην εικόνα 3.5, με το παράδειγμα του κάτω ψαλιδιού.

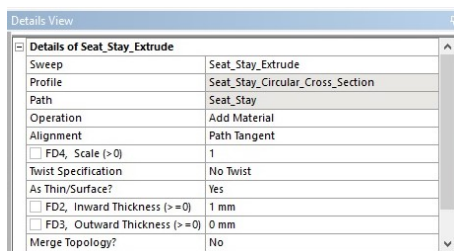


Σχήμα 3.4: Λεπτομέρειες εντολής Sweep για το κάτω ψαλίδι

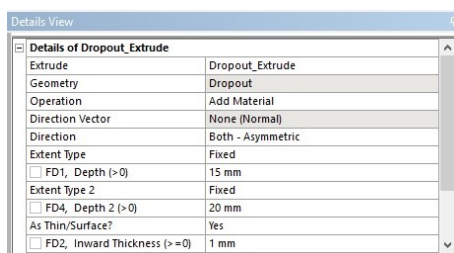
Μετά τη δημιουργία του εμπρόσθιου τριγώνου, δημιουργήθηκαν ένα άνω ψαλίδι και ένα κάτω ψαλίδι, τα οποία ενώνονται στα κάτω άκρα τους με την χρήση μιας ειδικής γεωμετρίας (dropout), με τις λεπτομέρειες της δημιουργίας τους να παρουσιάζονται στις εικόνες 3.5, 3.6 και 3.7 αντίστοιχα. Έπειτα, η γεωμετρία που αποτελούνταν από το άνω ψαλίδι, το κάτω ψαλίδι και την ειδική διαμόρφωση στα άκρα τους περιστράφηκε γύρω από επίπεδο που δημιουργήθηκε ειδικά για αυτόν το σκοπό κατά 15 μοίρες. Τα χαρακτηριστικά αυτού του επιπέδου και της εντολής Rotate παρουσιάζονται στις εικόνες 3.8 και 3.9 αντίστοιχα. Έπειτα, έγινε χρήση της εντολής Mirror, προκειμένου να δημιουργηθούν τα δίδυμα άνω και κάτω ψαλίδια, με τις λεπτομέρειες της εντολής να φαίνονται στην εικόνα 3.10.



Σχήμα 3.5: Λεπτομέρειες εντολής Sweep για το κάτω ψαλίδι

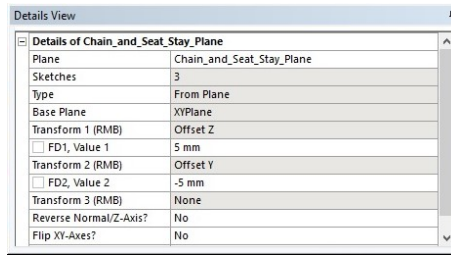


Σχήμα 3.6: Λεπτομέρειες εντολής Sweep για το άνω ψαλίδι

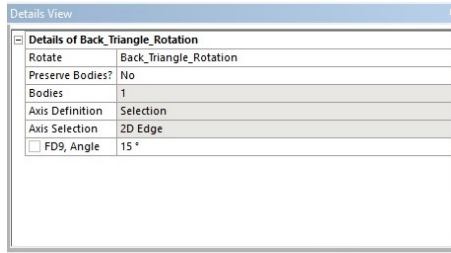


Σχήμα 3.7: Λεπτομέρειες εντολής Extrude για την ειδική διαμόρφωση

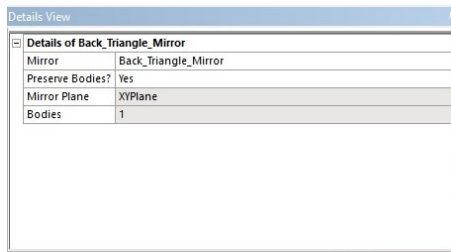
Τέλος, στα σημεία συνένωσης των σωλήνων χρησιμοποιήθηκε η εντολή Fillet για τη δημιουργία γεωμετριων που αντιστοιχούν σε αυτές που προκύπτουν από συγκολλήσεις. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε η εντολή Thin, για να δοθεί ένα αρχικό



Σχήμα 3.8: Λεπτομέρειες ειδικού επιπέδου για την εντολή Rotate

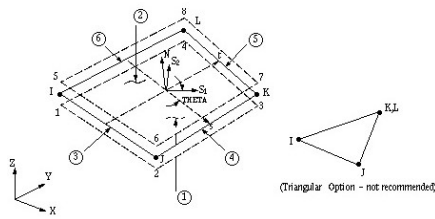


Σχήμα 3.9: Λεπτομέρειες εντολής Rotate για το οπίσθιο τρίγωνο



Σχήμα 3.10: Λεπτομέρειες εντολής Mirror για το οπίσθιο τρίγωνο

ομοιόμορφο πάχος στην κατασκευή, το οποίο μετά άλλαξε κατά την ανάλυση. Όσον αφορά την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που ακολούθησε, ο τύπος στοιχείου που χρησιμοποιήθηκε είναι ο SHELL181, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.11. Πρόκειται για κελυφοειδές στοιχείο, που χρησιμοποιείται για λεπτά ως και μεσαίου πάχους κελύφη. Πρόκειται για 4–κομβικό στοιχείο, με 6 βαθμούς ελευθερίας στον κάθε κόμβο, ήτοι 3 μετατοπίσεις (κατά τους άξονες x, y και z) και 3 περιστροφές (κατά τους άξονες x, y και z).



Σχήμα 3.11: Κελυφοειδές στοιχείο SHELL181

Μέτρο ελαστικότητας E(GPa)	Λόγος Poisson ν	Όριο αντοχής σε θραύση (MPa)
209	0.34	1850

Πίνακας 3.1: Ελαστικές ιδιότητες χάλυβα Reynolds 931

2. Ανάλυση της επίδρασης των χαρακτηριστικών διαστάσεων του σκελετού

Στο πρώτο κομμάτι του υπολογιστικού μέρους, αναλύθηκε η επίδραση των συνολικών χαρακτηριστικών της γεωμετρίας του σκελετού του ποδηλάτου τόσο από άποψη μεγέθους των αναπτυσσόμενων τάσεων όσο και από την άποψη επιδόσεων του σκελετού του ποδηλάτου στις δύο παραμέτρους που έχουν συζητηθεί, δηλαδή:

- ▶ την κάθετη ενδοτικότητα του σκελετού (vertical compliance), η οποία συνδέεται άμεσα με την άνεση της οδήγησης και
- ▶ την πλευρική δυσκαμψία του σκελετού (lateral stiffness), η οποία συνδέεται άμεσα με το βαθμό ελέγχου του ποδηλάτου σε στροφές και κατά συνέπεια με την ασφάλεια του αναβάτη.

Η ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε με τους επιμέρους σωλήνες του σκελετού να έχουν σταθερό πάχος κατά το μήκος τους και το υλικό τους να είναι χάλυβας Reynolds 931, ο οποίος προσομοιώνεται ως ισотροπικό υλικό. Επίσης, η διατομή των επιμέρους σωληνών παραμένει σταθερή σε αυτό το στάδιο της εργασίας. Το πάχος και το η ονομαστική διάμετρος των επιμέρους σωληνών του σκελετού δίνονται στον πίνακα 3.3.

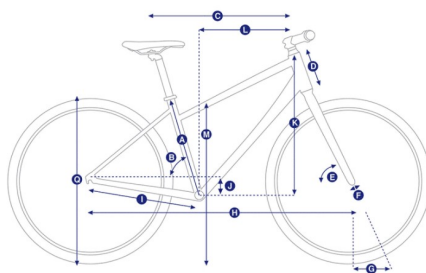
Τα μεγέθη εκείνα τα οποία μελετήθηκαν κατά την ανάλυση είναι τα ακόλουθα:

Μήκος σωλήνα καθίσματος A (mm)	450-490
Γωνία σωλήνα καθίσματος με τον άξονα x B (°)	70-74
Μήκος άνω σωλήνα C (mm)	525-645
Γωνία σωλήνα κεφαλής με τον άξονα x E (°)	70-74
Μήκος κάτω δίδυμων ψαλιδιών I (mm)	405-475
Ύψος μεσαίας τριβής J (mm)	45-80
Μήκος σωλήνα κεφαλής D (mm)	110-200

Πίνακας 3.2: Εύρη μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν

- ▶ μήκος σωλήνα καθίσματος (seat tube length) - A
- ▶ γωνία σωλήνα καθίσματος με τον άξονα x (seat tube angle) - B
- ▶ μήκος άνω σωλήνα (top tube length) - C
- ▶ γωνία σωλήνα κεφαλής με τον άξονα x (head tube angle) - E
- ▶ μήκος κάτω δίδυμων ψαλιδιών (chain stays length) - I
- ▶ ύψος μεσαίας τριβής (bottom bracket drop) – J
- ▶ μήκος σωλήνα κεφαλής (head tube length) – D

Τα εύρη των ανωτέρω μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση δίνονται στον πίνακα 3.2, ενώ απεικονίζονται στην εικόνα 3.12.

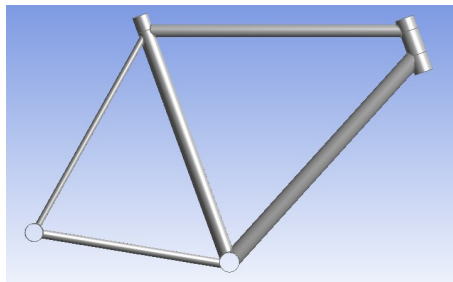


Σχήμα 3.12: Διαστάσεις σκελετού

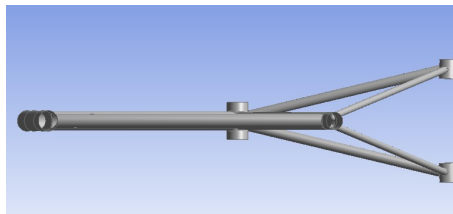
Ακολουθούν οι εικόνες 3.13, 3.14 και 3.15, οι οποίες απεικονίζουν την πρόσοψη, την κάτοψη και την τρισδιάστατη όψη του πλαισίου αντίστοιχα.

Τμήμα σκελετού	Διάμετρος (mm)	Πάχος (mm)
Άνω σωλήνας	25.4	0.9
Κάτω σωλήνας	34.9	1
Σωλήνας κεφαλής	38	1.1
Σωλήνας καθίσματος	31.8	0.7
Μεσαία τριβή	39	2.3
Άνω δίδυμο ψαλίδια	14	0.5
Κάτω δίδυμο ψαλίδια	18	0.7

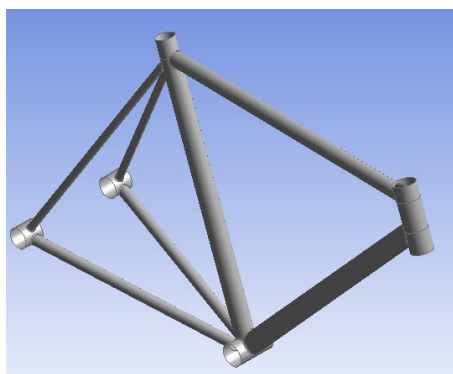
Πίνακας 3.3: Πάχος και ονομαστική διάμετρος τμημάτων του σκελετού



Σχήμα 3.13: Πρόσοψη σκελετού



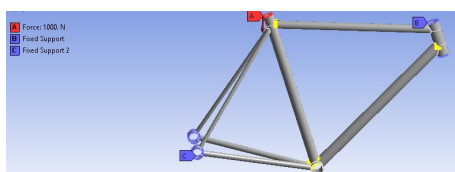
Σχήμα 3.14: Κάτοψη σκελετού



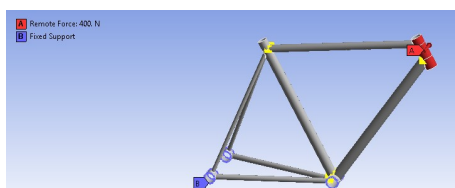
Σχήμα 3.15: Σκελετός ποδηλάτου - Iso

2.1 Τεστ που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό και ο ρόλος τους

Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν δύο τεστ για την ανάλυση της κάθετης ενδοτικότητας του σκελετού και για την ανάλυση της πλευρικής δυσκαμψίας του σκελετού, τα οποία πάρθηκαν από τη δημοσίευση του Lessard και άλλων [10]. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν τρία τεστ, για να εξασφαλιστεί ότι ο σκελετός ποδηλάτου ικανοποιεί τα κριτήρια ασφαλείας και πως οι αναπτυσσόμενες τάσεις δεν ξεπερνούν τα όρια που έχουν τεθεί. Τα τεστ αυτά πάρθηκαν από την εργασία των Liu και Wu [11]. Ο ελάχιστος λόγος ασφαλείας που πρέπει να προκύπτει σε αυτά τα τεστ πρέπει να ισούται με 1.2, με το λόγο ασφαλείας να ισούται με το λόγο της τάσης θραύσης προς τη μέγιστη τάση Von Mises που αναπτύσσεται.



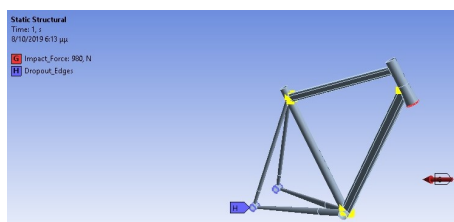
Σχήμα 3.16: Τεστ για την κάθετη ενδοτικότητα του σκελετού



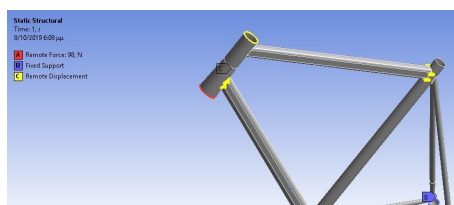
Σχήμα 3.17: Τεστ για την πλευρική δυσκαμψία του σκελετού

Για την προσομοίωση των δοκιμών, οι άκαμπτες ράβδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή των δυνάμεων αντικαταστάθηκαν από σημεία στον χώρο, στα οποία εφαρμόζονται οι δυνάμεις (remote forces), καθώς οι δύο μέθοδοι λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο. Έτσι, εξοικονομήθηκε χρόνος κατά την ανάλυση, μιας και για τις άκαμπτες ράβδους θα απαιτούνταν διακριτοποίηση όπως και για το σκελετό του ποδηλάτου. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε στην καταπόνηση του σκελετού σε πρόσκρουση, όπως αυτή απεικονίζεται στην εικόνα 3.18 και στην καταπόνηση του σκελετού σε στρέψη, όπως αυτή απεικονίζεται στις εικόνες 3.19 και 3.20. Στην πρώτη περίπτωση, το άκαμπτο πηρούνι (rigid fork) που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία των Liu και Wu αντικαταστάθηκε από ένα σημείο στον χώρο που αντιστοιχούσε στο μέσο της απόστασης μεταξύ των σκελών του πηρουνιού. Η δύναμη που εφαρμόστηκε ήταν ίση με 980 N, η οποία αντιστοιχεί στο άθροισμα των δύο δυνάμεων 490 N που ασκήθηκαν. Ένας άλλος λόγος που οι δύο δυνάμεις αντικαταστάθηκαν με μία είναι λόγω της μηδενικής ροπής που προκαλούνταν λόγω της συμμετρίας. Επίσης, τα σημεία άσκησης των δυνάμεων αντικαταστάθηκαν με ένα, στο οποίο ασκείται η

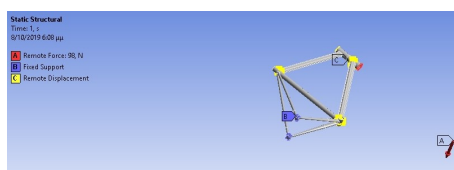
συνολική δύναμη. Όσον αφορά τη δοκιμή στρέψης, η άκαμπτη ράβδος(rigid bar), που χρησιμοποιήθηκε από τους Liu και Wu αντικαταστάθηκε από ένα σημείο και μια δύναμη, που αντιστοιχούσε στο άκρο της ράβδου, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.20. Επιπλέον, προσομοιώθηκε το τεστ συμπίεσης, το οποίο χρησιμοποιήθηκε επίσης από τους Liu και Wu [11] και το οποίο αναπαρίσταται στην εικόνα 3.21. Στη δεύτερη και στην τρίτη φάση της εργασίας, μετρήθηκε η μάζα του σκελετού για κάθε περίπτωση. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, χρησιμοποιήθηκε μια κύλιση στη βάση της μεσαίας τριβής, ενώ εφαρμόστηκε στο σκελετό επιτάχυνση ίση με 9.86 m/s^2 , δηλαδή ίση με το g . Η αντίδραση που μετρήθηκε στην κύλιση ισούται με το γινόμενο της μάζας επί την επιτάχυνση της βαρύτητας και επομένως με μια απλή διαίρεση υπολογίστηκε η μάζα του σκελετού. Οι συνοριακές συνθήκες απεικονίζονται στις εικόνες 3.22 και 3.23 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.18: Έλεγχος του σκελετού σε πρόσκρουση



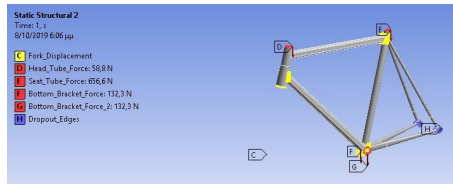
Σχήμα 3.19: Έλεγχος του σκελετού σε στρέψη - Remote Displacement



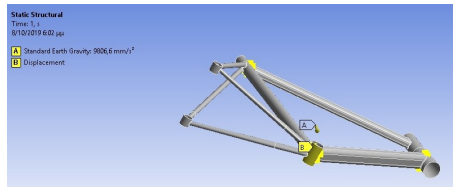
Σχήμα 3.20: Έλεγχος του σκελετού σε στρέψη - Remote Force

2.2 Αποτελέσματα

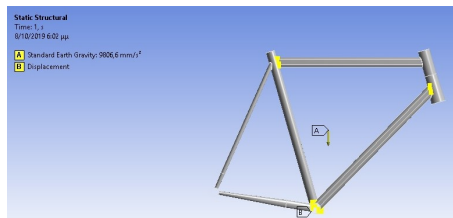
Εφόσον το πρόβλημα που έχει τεθεί και μελετάται είναι ελαστικό, ισχύει η ακόλουθη σχέση μεταξύ δυνάμεων και μετατοπίσεων.



Σχήμα 3.21: Έλεγχος του σκελετού σε θλίψη



Σχήμα 3.22: Υπολογισμός μάζας σκελετού - Κύλιση



Σχήμα 3.23: Υπολογισμός μάζας σκελετού - Επιτάχυνση βαρύτητας

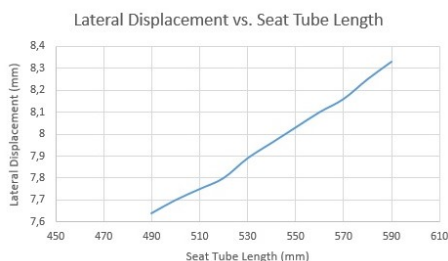
$$F = K \cdot X$$

, όπου K το μητρώο δυσκαμψίας του σκελετού και X το μητρώο των μετατοπίσεων. Κατά συνέπεια, αύξηση της μετατόπισης για την ίδια δύναμη συνεπάγεται και μείωση της δυσκαμψίας του σκελετού κατά την φορά άσκησης του φορτίου. Επομένως, με τον υπολογισμό της εκάστοτε μετατόπισης, γίνεται και εκτίμηση της μεταβολής της δυσκαμψίας του σκελετού.

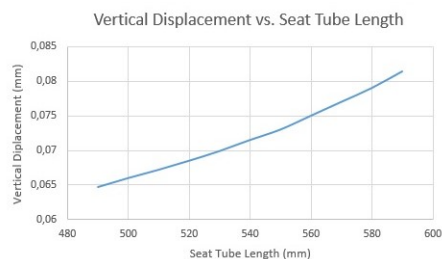
Παρακάτω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την επίδραση των επιμέρους τμημάτων του σκελετού τόσο στην κάθετη ενδοτικότητα όσο και στην πλευρική δυσκαμψία του σκελετού.

Επίδραση του μήκους του σωλήνα καθίσματος

Όπως φαίνεται στις εικόνες 3.24 και 3.25 αντίστοιχα, η αύξηση του μήκους του σωλήνα καθίσματος οδηγεί σε αύξηση της κάθετης μετατόπισης κατ'απόλυτο, κάτι που συνεπάγεται αύξηση της κάθετης ενδοτικότητας του σκελετού, το οποίο είναι μάλλον αναμενόμενο. Επιπλέον, η αύξηση του μήκους του σωλήνα καθίσματος οδηγεί σε αύξηση της πλευρικής μετατόπισης του σκελετού κατ'απόλυτο, γεγονός που δείχνει πως η πλευρική δυσκαμψία του σκελετού μειώνεται με αύξηση του μήκους του σωλήνα καθίσματος. Επίσης, προκύπτει πως ο σωλήνας καθίσματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την κάθετη ενδοτικότητα του σκελετού, καθώς η μεταβολή της κάθετης μετατόπισης ισούται με περίπου 20%, ενώ επηρεάζει σε σημαντικά μικρότερο βαθμό τη πλευρική δυσκαμψία του σκελετού, με την αντίστοιχη μεταβολή της πλευρικής μετατόπισης να ισούται με περίπου 9%.



Σχήμα 3.24: Πλευρική μετατόπιση του σκελετού συναρτήσει του μήκους του σωλήνα καθίσματος

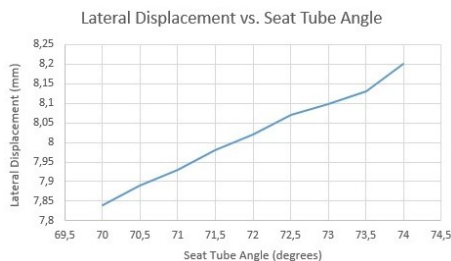


Σχήμα 3.25: Κάθετη μετατόπιση του σκελετού συναρτήσει του μήκους του σωλήνα καθίσματος

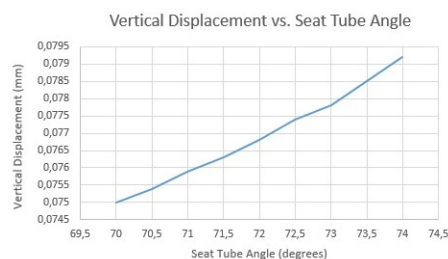
Επίδραση της γωνίας του σωλήνα καθίσματος

Όπως φαίνεται στις εικόνες 3.26 και 3.27 αντίστοιχα, η μεταβολή της γωνίας του σωλήνα καθίσματος δεν επηρεάζει σημαντικά την κάθετη ενδοτικότητα του

πλαisiού και την πλευρική δυσκαμψία του. Όσον αφορά την πρώτη, παρατηρείται μία κατ'απόλυτο αύξηση της τάξης του 5.6% στην κάθετη μετατόπιση, που συνεπάγεται και μείωση της κάθετης δυσκαμψίας. Στην περίπτωση της πλευρικής μετατόπισης παρουσιάζεται μια μικρή αύξηση κατ'απόλυτο, της τάξης του 4.6%, που συνεπάγεται μείωση της πλευρικής δυσκαμψίας, όπως συνέβη και με την κάθετη.



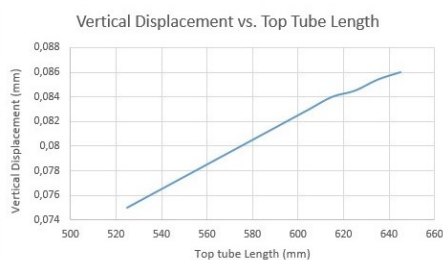
Σχήμα 3.26: Πλευρική μετατόπιση του σκελετού συναρτήσει της γωνίας του σωλήνα καθίσματος



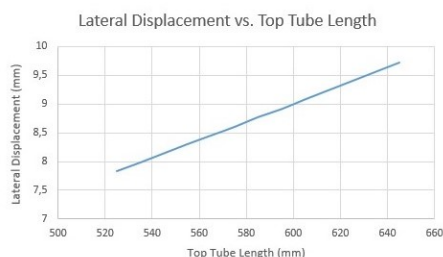
Σχήμα 3.27: Κάθετη μετατόπιση του σκελετού συναρτήσει της γωνίας του σωλήνα καθίσματος

Επίδραση του μήκους του άνω σωλήνα

Βάσει αποτελεσμάτων όπως αυτά απεικονίζονται στις εικόνες 3.28 και 3.29, το μήκος του άνω σωλήνα επηρεάζει σημαντικά τόσο την πλευρική δυσκαμψία του πλαisiού όσο και την κάθετη ενδοτικότητα του. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μια σχεδόν γραμμική αύξηση κατ'απόλυτο της πλευρικής μετατόπισης όσο αυξάνεται το μήκος του άνω σωλήνα, που με τη σειρά του οδηγεί σε μειωμένη πλευρική δυσκαμψία. Η μεταβολή της μετατόπισης ισούται με περίπου 24%. Όσον αφορά την κάθετη μετατόπιση, παρατηρείται επίσης μια σημαντική αύξηση της τάξης του 13%. Έτσι, προκύπτει πως αύξηση του μήκους του άνω σωλήνα συνεπάγεται και μείωση της κάθετης δυσκαμψίας.



Σχήμα 3.28: Κάθετη μετατόπιση του σκελετού συναρτήσει του μήκους του άνω σωλήνα



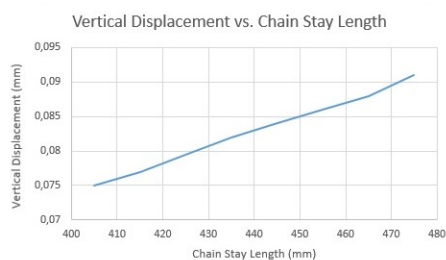
Σχήμα 3.29: Πλευρική μετατόπιση του σκελετού συναρτήσει του μήκους του άνω σωλήνα

Επίδραση του μήκους των κάτω δίδυμων ψαλιδιών

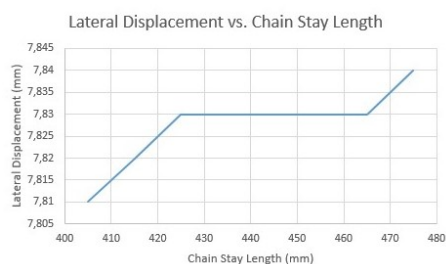
Το μήκος των κάτω ψαλιδιών παίζει επίσης ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην κάθετη ενδοτικότητα του σκελετού, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.30. Εξάλλου, αύξηση του μήκους των κάτω ψαλιδιών οδηγεί σε κατ' απόλυτο αύξηση της κάθετης μετατόπισης, που συνεπάγεται και μείωση της κάθετης ενδοτικότητας αντίστοιχα. Η αύξηση αυτή ισούται περίπου με 21%. Αντιθέτως, λόγω των συνοριακών συνθηκών της δοκιμής, το μήκος των κάτω ψαλιδιών δεν εηρεάζει σημαντικά την πλευρική μετατόπιση, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.31. Εφαρμόζοντας μια διαφορετική δοκιμή, τα αποτελέσματα που θα προκύψουν ενδέχεται να είναι διαφορετικά.

Επίδραση του μήκους του σωλήνα κεφαλής

Τα αποτελέσματα τα οποία απεικονίζονται στις εικόνες 3.32 και 3.33 δείχνουν πως η αύξηση του μήκους του σωλήνα κεφαλής οδηγεί σε σημαντική κατ' απόλυτο αύξηση της κάθετης μετατόπισης, κάτι που με τη σειρά του συνεπάγεται πως η κάθετη δυσκαμψία του σκελετού μειώνεται όσο αυξάνει το μήκος του σωλήνα κε-

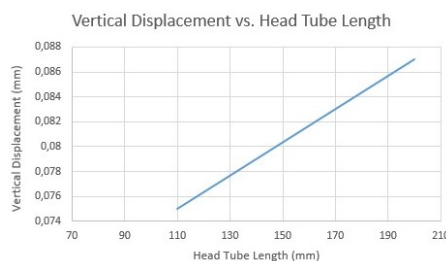


Σχήμα 3.30: Κάθετη μετατόπιση του σκελετού συναρτήσει του μήκους των κάτω ψαλιδιών



Σχήμα 3.31: Πλευρική μετατόπιση του σκελετού συναρτήσει του μήκους των κάτω ψαλιδιών

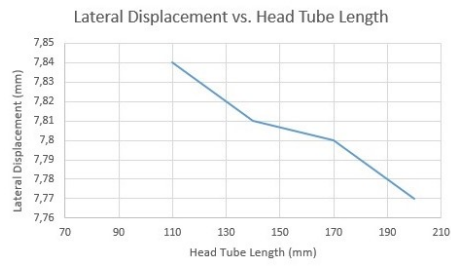
φαλής. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβολή της μετατόπισης ισούται περίπου με 16%.



Σχήμα 3.32: Κάθετη μετατόπιση του σκελετού συναρτήσει του μήκους του σωλήνα κεφαλής

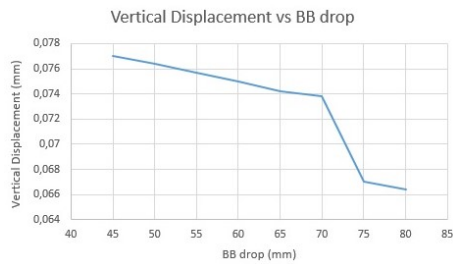
Επίδραση του ύψους της μεσαίας τριβής

Όπως φαίνεται στις εικόνες 3.34 και 3.35 αντίστοιχα, το ύψος της μεσαίας τριβής επηρεάζει σημαντικά την κάθετη μετατόπιση και κατά συνέπεια την κάθετη ενδοτικότητα του σκελετού. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μια κατ' απόλυτο μείωση της τάξης του 13% στην κάθετη μετατόπιση, που συνεπάγεται αύξηση της κά-

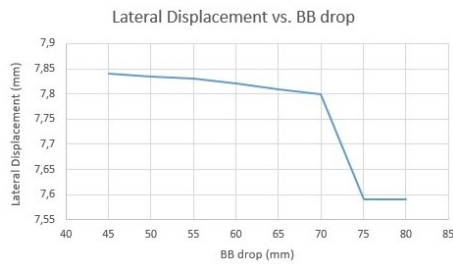


Σχήμα 3.33: Πλευρική μετατόπιση του σκελετού συναρτήσει του μήκους του σωλήνα κεφαλής

θετης δυσκαμψίας και άρα μείωση της κάθετης ενδοτικότητας. Όσον αφορά την πλευρική μετατόπιση, παρατηρείται μια μείωση της κατά περίπου 3.2%. Αυτό συνεπάγεται και αύξηση της πλευρικής δυσκαμψίας.



Σχήμα 3.34: Κάθετη μετατόπιση του σκελετού συναρτήσει του ύψους μεσαίας τριβής



Σχήμα 3.35: Πλευρική μετατόπιση του σκελετού συναρτήσει του ύψους μεσαίας τριβής

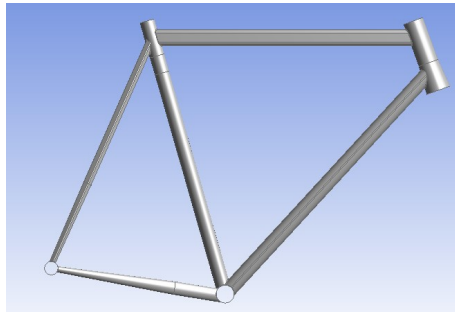
3. Ανάλυση της επίδρασης των χαρακτηριστικών των επιμέρους σωλήνων του σκελετού

Όσον αφορά το δεύτερο κομμάτι του υπολογιστικού μέρους, εξετάστηκε η επίδραση των χαρακτηριστικών των επιμέρους σωλήνων του σκελετού ποδηλάτου στις επιδόσεις και στο μέγεθος των αναπτυσσόμενων τάσεων σε κάθε τεστ. Επιπλέον, μελετήθηκε και η παράμετρος της μάζας του σκελετού ποδηλάτου, με στόχο τη μείωση του βάρους του και την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού κάθετης ενδοτικότητας κατά τον άξονα y , πλευρικής δυσκαμψίας κατά τον άξονα z και μάζας του σκελετού. Πιο συγκεκριμένα, αναλύθηκαν διαφορετικές κατανομές πάχους και διαφορετικές γεωμετρίες για τον άνω σωλήνα (top tube), τον κάτω σωλήνα (down tube), το σωλήνα καθίσματος (seat tube), τα άνω και κάτω δίδυμα ψαλίδια (seat/chain stays), το σωλήνα κεφαλής (head tube) και τη μεσαία τριβή (bottom bracket). Όπως και στο προηγούμενο στάδιο της ανάλυσης, έτσι και σε αυτό το στάδιο πραγματοποιήθηκαν τα ίδια τεστ, ενώ το υλικό του σκελετού του ποδηλάτου παραμένει το ίδιο.

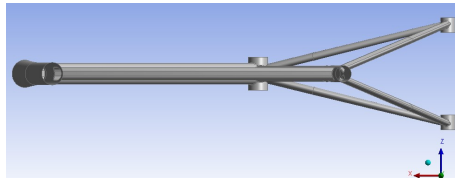
Κατά την ανάλυση, εξετάστηκαν συνολικά 35 διαφορετικά σκελετά για να ελεγχθεί η επίδραση των σωλήνων να έχουν σχήμα οβάλ, κυκλικό ή ψευδοορθογωνικό, το οποίο είναι ουσιαστικά ορθογωνικό με στρογγύλεμα (fillet) στις άκρες. Επιπλέον, το πάχος των σωλήνων μεταβάλλεται κατά το μήκος τους, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις ποικίλει και η διάμετρος των σωλήνων, όπως στην περίπτωση του σωλήνα καθίσματος (seat tube).

Τα προφίλ των σωλήνων έχουν παρθεί από το την ιστοσελίδα της εταιρείας κατασκευής ποδηλάτων Columbus. Οι διατομές των σωλήνων που χρησιμοποιήθηκαν και οι κατανομές του πάχους απεικονίζονται παρακάτω, με την κατηγοριοποίηση να έχει γίνει ανάλογα με το είδος του σωλήνα. Επίσης, δίνεται πίνακας ο οποίος περιέχει τα σκελετά σωλήνων, με τους σωλήνες να έχουν αριθμηθεί με τρόπο που επεξηγείται παρακάτω. Επιπροσθέτως, οι συνολικές διαστάσεις του σκελετού, οι οποίες εξετάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, διατηρούνται σταθερές σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης. Ακολουθούν η πρόσοψη, η κάτοψη και η τρισδιάστατη όψη του σκελετού με την αρχική του μορφή στις εικόνες 3.36, 3.37 και 3.38 αντίστοιχα.

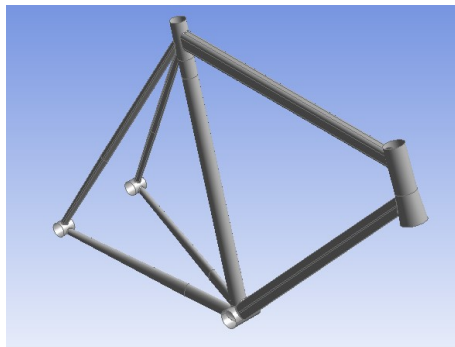
Οι σωλήνες που χρησιμοποιήθηκαν συναντώνται συχνά στη βιομηχανία και κατά συνέπεια επιλέχθηκαν για τους σκοπούς της ανάλυσης. Ακολουθούν εικόνες των σωλήνων αυτών, οι οποίοι αριθμούνται σειριακά, προκειμένου να γίνει αργότερα εμφανής η χρήση τους στους σκελετούς που ελέγχθηκαν.



Σχήμα 3.36: Πρόσωση σκελετού



Σχήμα 3.37: Κάτοψη σκελετού



Σχήμα 3.38: Σκελετός ποδηλάτου - Iso

Οι σκελετοί αυτοί θα παρασταθούν σε έναν πίνακα, με κάθε σωλήνα να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο αριθμό, ο οποίος δίνεται εδώ.

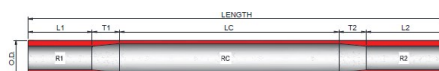
3.1 Προφίλ και κατανομή πάχους άνω σωλήνα

Όπως φαίνεται και στους ακόλουθους πίνακες και στην παρακάτω εικόνα, στη βιομηχανία αποτελεί συνηθισμένη πρακτική η κατασκευή των άνω σωληνών με μια κατανομή πάχους, η οποία ανταποκρίνεται στις κατανομές τάσεων που συναντώ-

Αριθμός Σωλήνα	1	2	3
Μήκος(mm)	600	600	600
L1(mm)	100	100	40
T1(mm)	40	40	40
LC(mm)	320	320	380
T2(mm)	40	40	40
L2(mm)	100	100	100
O.D.(mm)	25.4	28.6	31.7
R1(mm)	0.8	0.75	0.65
RC(mm)	0.6	0.45	0.45
R2(mm)	0.8	0.75	0.65

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά άνω σωλήνα - Σωλήνες υπ' αριθμόν 1, 2 και 3

νται συχνά σε διάφορες φορτίσεις στις οποίες υπόκεινται οι σκελετοί ποδηλάτων τόσο σε εργαστηριακές δοκιμές όσο και στην καθημερινότητα. Πιο συγκεκριμένα, το πάχος του άνω σωλήνα είναι πιο μεγάλο στα σημεία ένωσης με τα υπόλοιπα δομικά μέρη του σκελετού όπως π.χ. είναι ο σωλήνας κεφαλής και ο σωλήνας καθίσματος. Ο λόγος γι' αυτήν την πρακτική συνδέεται με τις υψηλότερες τιμές των τάσεων που παρουσιάζονται σε αυτά τα σημεία σε σύγκριση με το ενδιάμεσο κομμάτι του σωλήνα. Επιπροσθέτως, με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση του βάρους του σκελετού, μιας και το ενδιάμεσο κομμάτι του σωλήνα, το οποίο δεν υπόκειται σε σημαντική καταπόνηση, είναι αρκετά λεπτό, ενώ ο σωλήνας είναι παράλληλα ενισχυμένος στις περιοχές ενδιαφέροντος, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.39.



Σχήμα 3.39: Προφίλ και κατανομή πάχους άνω σωλήνα

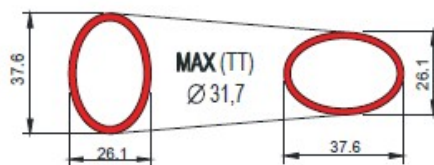
Στον πίνακα 3.4 παρουσιάζονται το μήκος, η ονομαστική διάμετρος και τα χαρακτηριστικά της κατανομής πάχους για τους άνω σωλήνες κυκλικής διατομής που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την φάση της εργασίας.

Πέρα από την κλασική κυκλική διατομή του άνω σωλήνα, διερευνήθηκαν και άλλες διατομές, όπως π.χ. η οβάλ διατομή που φαίνεται στην εικόνα 3.40, μιας και ο σκοπός του δεύτερου τμήματος της εργασίας είναι να ελεγχθεί κατά πόσο η αλλαγές στις διατομές και στα χαρακτηριστικά των σωληνών επηρεάζουν τις επιδόσεις του σκελετού. Τα χαρακτηριστικά των σωληνών με οβάλ διατομή που χρησιμοποι-

Αριθμός σωλήνα	4	5
Μήκος(mm)	600	600
L1(mm)	100	100
T1(mm)	40	40
LC(mm)	320	320
T2(mm)	40	40
L2(mm)	100	100
O.D.(mm)	34.9X28.8	26.1X37.6
R1(mm)	0.65	0.65
RC(mm)	0.45	0.45
R2(mm)	0.65	0.65

Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικά άνω σωλήνα - Σωλήνες υπ' αριθμόν 4 και 5

ήθηκαν για τους άνω σωλήνες δίνεται στον πίνακα 3.5.

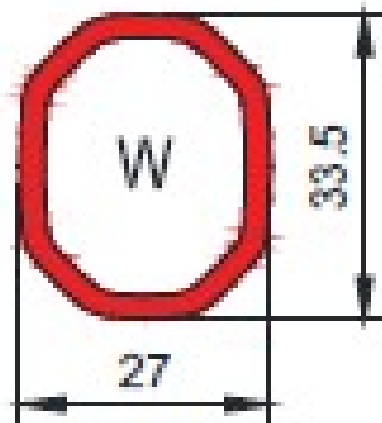


Σχήμα 3.40: Οβάλ διατομή άνω σωλήνα

Ένας άλλος τύπος διατομής που χρησιμοποιήθηκε είναι η ψευδο-ορθογωνική διατομή, που αναπαρίσταται στην εικόνα 3.41. Επίσης, τρεις τέτοιοι σωλήνες χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την φάση της εργασίας, με τα χαρακτηριστικά τους να παρουσιάζονται στον πίνακα 3.6.

3.2 Προφίλ και κατανομή πάχους κάτω σωλήνα

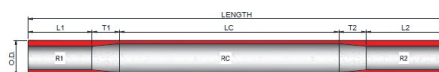
Όπως και με τον άνω σωλήνα, έτσι και στην περίπτωση του κάτω σωλήνα αποτελεί σύνηθης πρακτική η ανομοιόμορφη κατανομή πάχους, με στόχο την ενίσχυση του σκελετού στα σημεία που εντοπίζονται οι υψηλότερες τιμές των τάσεων, με την κατανομή πάχους να απεικονίζεται στην εικόνα 3.42. Επιπλέον, δοκιμάστηκαν διατομές διαφόρων σχημάτων, για τη διερεύνηση της επίδρασής τους στο σκελετό.



Σχήμα 3.41: Ψευδο-ορθογωνική διατομή άνω σωλήνα

Αριθμός Σωλήνα	6	7	8
Μήκος(mm)	600	600	600
L1(mm)	40	40	40
T1(mm)	40	40	40
LC(mm)	380	380	380
T2(mm)	40	40	40
L2(mm)	100	100	100
O.D.(mm)	27X33.5	28X33.5	25.5X36.5
R1(mm)	0.6	0.6	0.65
RC(mm)	0.4	0.4	0.45
R2(mm)	0.6	0.6	0.65

Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά άνω σωλήνα - Σωλήνες υπ' αριθμόν 6, 7 και 8



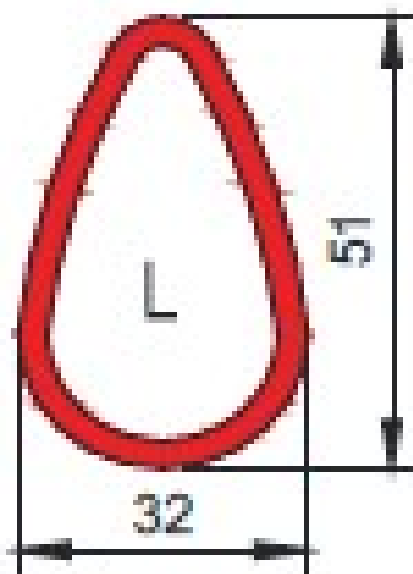
Σχήμα 3.42: Προφίλ και κατανομή πάχους κάτω σωλήνα

Τα χαρακτηριστικά των κάτω σωλήνων κυκλικής διατομής που χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της εργασίας παρουσιάζονται στον πίνακα 3.7.

Ένας εναλλακτικός τύπος διατομής που βρέθηκε στη σχετική βιβλιογραφία είναι η οβάλ διατομή, όπως αυτή απεικονίζεται στην εικόνα 3.43, με τα χαρακτηριστικά του να δίνονται στον πίνακα 3.8.

Αριθμός Σωλήνα	1	2	3	4	5
Μήκος(mm)	670	670	670	670	670
L1(mm)	125	40	60	60	60
T1(mm)	45	40	40	40	40
LC(mm)	310	450	410	410	410
T2(mm)	45	40	40	40	40
L2(mm)	125	100	120	120	120
O.D.(mm)	35	38	42	42	44
R1(mm)	0.8	0.65	0.7	0.6	0.6
RC(mm)	0.5	0.45	0.5	0.45	0.45
R2(mm)	0.8	0.65	0.7	0.6	0.6

Πίνακας 3.7: Χαρακτηριστικά κάτω σωλήνα - Σωλήνες υπ' αριθμόν 1, 2, 3, 4 και 5



Σχήμα 3.43: Οβάλ διατομή κάτω σωλήνα

3.3 Προφίλ και κατανομή πάχους σωλήνα κεφαλής

Μετά από βιβλιογραφική ανασκόπηση, προέκυψε πως οι διατομές που χρησιμοποιούνται στους σωλήνες κεφαλής είναι κυκλικές, όπως αυτή που απεικονίζεται

Μήκος(mm)	670
L1(mm)	60
T1(mm)	40
LC(mm)	410
T2(mm)	40
L2(mm)	120
O.D.(mm)	L(32X51)
R1(mm)	0.7
RC(mm)	0.5
R2(mm)	0.7

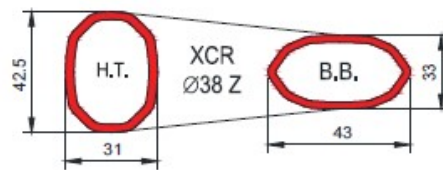
Πίνακας 3.8: Χαρακτηριστικά κάτω σωλήνα - Σωλήνας υπ' αριθμόν 6

Αριθμός Σωλήνα	7	8
Μήκος(mm)	670	670
L1(mm)	40	90
T1(mm)	40	40
LC(mm)	450	380
T2(mm)	40	40
L2(mm)	100	120
O.D.(mm)	BB(43X33)	BB(46X39)
R1(mm)	0.65	0.6
RC(mm)	0.45	0.45
R2(mm)	0.65	0.6

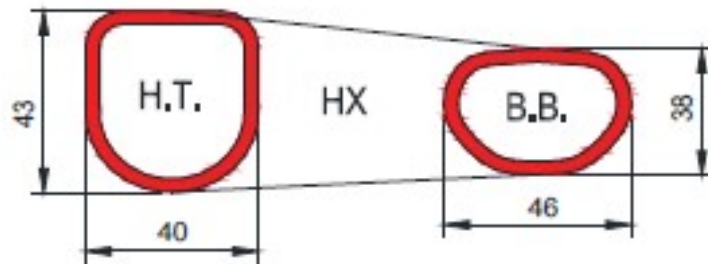
Πίνακας 3.9: Χαρακτηριστικά κάτω σωλήνα - Σωλήνες υπ' αριθμόν 7 και 8

Αριθμός Σωλήνα	9	10
Μήκος(mm)	670	670
L1(mm)	90	90
T1(mm)	40	40
LC(mm)	380	380
T2(mm)	40	40
L2(mm)	120	120
O.D.(mm)	BB(46X38)(HX)	BB(47X39)(GX)
R1(mm)	0.6	0.6
RC(mm)	0.45	0.45
R2(mm)	0.6	0.6

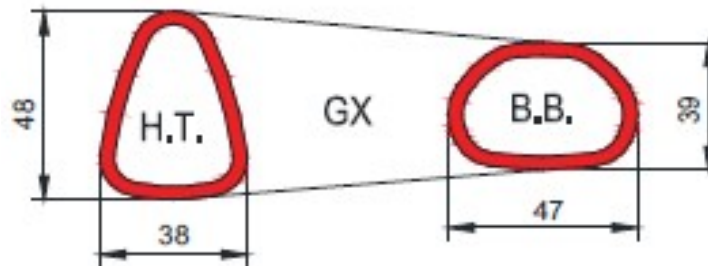
Πίνακας 3.10: Χαρακτηριστικά κάτω σωλήνα - Σωλήνες υπ' αριθμόν 9 και 10



Σχήμα 3.44: Ψευδο-ορθογωνική διατομή κάτω σωλήνα



(α')



(β')

Σχήμα 3.45: Ψευδο-ορθογωνική διατομή κάτω σωλήνα τύπου HX (α) και Ψευδο-ορθογωνική διατομή κάτω σωλήνα τύπου GX (β).

στην εικόνα 3.46, ενώ το πάχος παραμένει σταθερό κατά το μήκος του σωλήνα, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.12.

3.4 Προφίλ και κατανομή πάχους σωλήνα καθίσματος

Όπως και στις περιπτώσεις του άνω και του κάτω σωλήνα, έτσι και στην περίπτωση του σωλήνα καθίσματος είναι συνηθισμένη επιλογή η επιβολή ανομοιομορφίας πάχους, τόσο για την ενίσχυση του σωλήνα στα σημεία τα οποία καταπονούνται περισσότερο όσο και για την ελάττωση του βάρους του σκελετού. Επίσης, παρατηρήθηκε πως οι σωλήνες καθίσματος που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία

Μήκος(mm)	670	670
L1(mm)	90	90
T1(mm)	40	40
LC(mm)	380	380
T2(mm)	40	40
L2(mm)	120	120
O.D.(mm)	HT(35X49)(Y01)	HT(38X48)(GX)
R1(mm)	0.6	0.6
RC(mm)	0.45	0.45
R2(mm)	0.6	0.6

Πίνακας 3.11: Χαρακτηριστικά κάτω σωλήνα - Σωλήνες υπ' αριθμόν 11 και 12



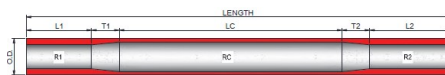
Σχήμα 3.46: Προφίλ και κατανομή πάχους σωλήνα κεφαλής

είναι ως επί το πλείστον κυκλικής διατομής, κάτι που ισχύει και στην παρούσα εργασία. Η εικόνα 3.47 αναπαριστά μια τυπική περίπτωση σωλήνα καθίσματος που συναντάται στη βιομηχανία, με ενίσχυση και στα δύο άκρα. Δύο τέτοιοι σωλήνες χρησιμοποιήθηκαν, με τα χαρακτηριστικά τους να παρουσιάζονται στον πίνακα 3.13.

Επίσης, στη βιομηχανία συναντώνται σωλήνες με μεγαλύτερο πάχος μόνο στη μία πλευρά, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.48. Τα χαρακτηριστικά των σωλήνων

Μήκος(mm)	160
RC(mm)	1
O.D.(mm)	56
O.D.2(mm)	46

Πίνακας 3.12: Χαρακτηριστικά σωλήνα κεφαλής

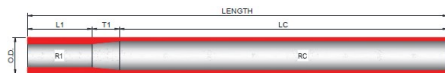


Σχήμα 3.47: Προφίλ και κατανομή πάχους σωλήνα καθίσματος

Αριθμός Σωλήνα	1	2
Μήκος(mm)	635	650
L1(mm)	130	200
T1(mm)	30	40
LC(mm)	285	270
T2(mm)	30	40
L2(mm)	160	100
O.D.(mm)	28.6	33
R1(mm)	0.75	0.65
RC(mm)	0.4	0.45
R2(mm)	0.6	0.65

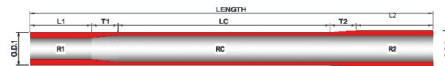
Πίνακας 3.13: Χαρακτηριστικά σωλήνα καθίσματος - Σωλήνες υπ' αριθμόν 1 και 2

με τέτοια κατανομή πάχους που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στους πίνακες 3.14.



Σχήμα 3.48: Προφίλ και κατανομή πάχους σωλήνα καθίσματος

Επιπροσθέτως, ένας άλλος τύπος σωλήνα καθίσματος που συναντάται στη βιομηχανία χαρακτηρίζεται από εσωτερική ενίσχυση στο ένα άκρο και από εξωτερική ενίσχυση στο άλλο άκρο, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.49. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διαφορά στην ονομαστική διάμετρο ανάμεσα στα δύο άκρα του σωλήνα. Τα χαρακτηριστικά των σωληνών με τη συγκεκριμένη κατανομή πάχους παρουσιάζονται στους πίνακες 3.15.



Σχήμα 3.49: Προφίλ και κατανομή πάχους σωλήνα καθίσματος

Αριθμός Σωλήνα	3	4
Μήκος(mm)	635	635
L1(mm)	100	135
T1(mm)	40	40
LC(mm)	495	460
R1(mm)	0.7	0.7
RC(mm)	0.5	0.5
O.D.(mm)	31.7	35

Πίνακας 3.14: Χαρακτηριστικά σωλήνα καθίσματος - Σωλήνες υπ' αριθμόν 3 και 4

Αριθμός Σωλήνων	5	6	7
Μήκος(mm)	635	635	635
L1(mm)	160	150	160
T1(mm)	40	40	40
LC(mm)	315	325	315
T2(mm)	40	40	40
L2(mm)	80	80	80
O.D.1(mm)	31.7	28.6	32.7
O.D.2(mm)	32.5	29.4	33.5
R1(mm)	0.7	0.8	0.7
RC(mm)	0.5	0.6	0.5
R2(mm)	0.9	1	0.9

Πίνακας 3.15: Χαρακτηριστικά σωλήνα καθίσματος - Σωλήνες υπ' αριθμόν 5, 6 και 7

Μήκος(mm)	410
O.D.(mm)	OVAL(18X28.5)
RC(mm)	0.7
LT(mm)	290
DT(mm)	12.5

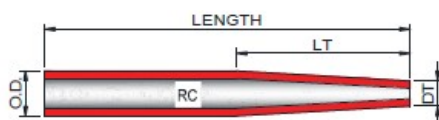
Πίνακας 3.16: Χαρακτηριστικά κάτω ψαλιδιών - Σωλήνας υπ' αριθμόν 1

Αριθμός Σωλήνα	2	3	4
Μήκος(mm)	410	410	410
O.D.(mm)	AJ(18X25.6)	24	OVAL(16X30)
R1(mm)	0.7	0.7	0.7
RC(mm)	0.5	0.5	0.5
L1(mm)	100	100	100
LT(mm)	290	290	290
DT(mm)	12.5	12.5	12.5

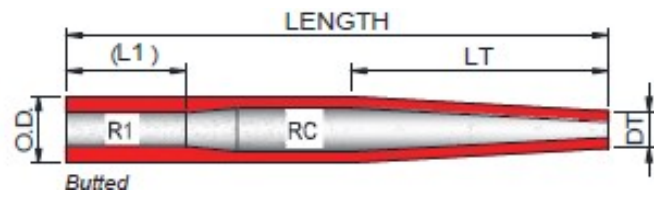
Πίνακας 3.17: Χαρακτηριστικά κάτω ψαλιδιών - Σωλήνες υπ' αριθμόν 2, 3 και 4

3.5 Προφίλ και κατανομή πάχους σωλήνων κάτω διδύμων ψαλιδιών

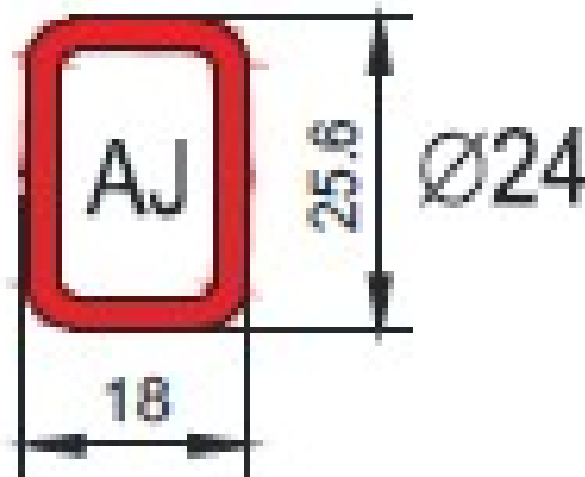
Είναι συνήθης πρακτική στη βιομηχανία η χρήση κάτω διδύμων ψαλιδιών οβάλ διατομής, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.50, με χαρακτηριστικά όπως αυτά που φαίνεται στους πίνακες 3.16 και 3.17. Επίσης, κυκλικές διατομές με χαρακτηριστικά όπως αυτά που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.17 είναι πολύ συνηθισμένες στην πρακτική. Άλλος ένας τύπος κάτω διδύμων ψαλιδιών απεικονίζεται στην εικόνα 3.51, με τα μεγέθη να δίνονται στον πίνακα 3.17. Επιπλέον, παρατηρήθηκε πως συνηθίζεται στη βιομηχανία το μέγεθος της διατομής των κάτω διδύμων ψαλιδιών να είναι μεγαλύτερη στο σημείο ένωσης με τη μεσαία τριβή λόγω του γεγονότος πως εκεί αναπτύσσονται οι υψηλότερες τάσεις.



Σχήμα 3.50: Προφίλ και κατανομή πάχους κάτω ψαλιδιών



(α')



(β')

Σχήμα 3.51: Προφίλ και κατανομή πάχους κάτω ψαλιδιών τύπου AJ (α) και Διατομή τύπου AJ (β).

Αριθμός Σωλήνων	1	2	3	4
Μήκος(mm)	560	560	560	560
O.D.(mm)	14	16	17	19
RC(mm)	0.7	0.5	0.5	0.6
LT(mm)	80	290	200	250
DT(mm)	10.5	12.5	12.5	12.5

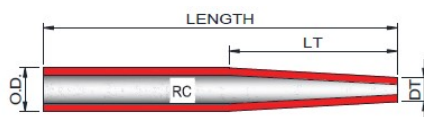
Πίνακας 3.18: Χαρακτηριστικά άνω ψαλιδιού - Σωλήνες υπ' αριθμόν 1, 2, 3 και 4- Κυκλική διατομή

Μήκος(mm)	560
O.D.(mm)	AI(15X19)
RC(mm)	0.5
LT(mm)	250
DT(mm)	12.5

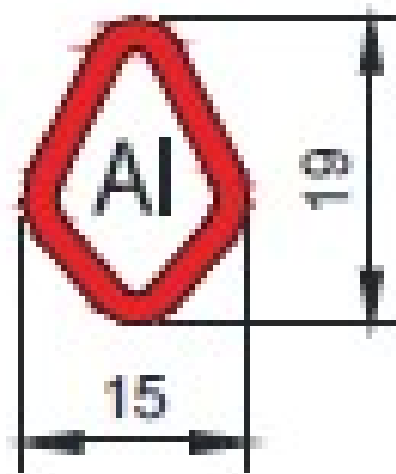
Πίνακας 3.19: Χαρακτηριστικά άνω ψαλιδιού - Σωλήνας υπ' αριθμόν 5 - Διατομή τύπου AI

3.6 Προφίλ και κατανομή πάχους σωλήνων άνω διδύμων ψαλιδιών

Όπως παρατηρήθηκε στη βιβλιογραφία, τα άνω δίδυμα ψαλίδια είναι συνήθως κυκλικής διατομής, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.52, με τυπικά χαρακτηριστικά όπως αυτά που φαίνονται στον πίνακα 3.18. Επίσης, επιλέχθηκαν και άνω δίδυμα ψαλίδια με διατομή όπως αυτή που παρουσιάζεται στην εικόνα 3.53 και χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά στον πίνακα 3.19. Όπως και στην περίπτωση των κάτω διδύμων ψαλιδιών, έτσι και εδώ παρατηρείται πως συνηθίζεται το μέγεθος της διατομής τους στο σημείο ένωσης με τα κάτω δίδυμα ψαλίδια είναι μικρότερο σε σύγκριση με το μέγεθος της διατομής τους στο σημείο που ενώνονται με τον σωλήνα καθίσματος. Αυτό είναι λογικό, διότι αφετέρου στο σημείο εκείνο αναπτύσσονται ισχυρότερες τάσεις και αφετέρου στο σημείο ένωσης με τα κάτω δίδυμα ψαλίδια υπάρχουν οι τροχοί του ποδηλάτου, θέτοντας έτσι περιορισμούς στο μέγεθος της διατομής στο σημείο εκείνο.



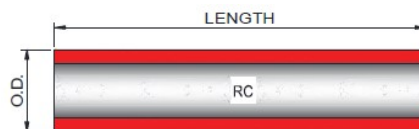
Σχήμα 3.52: Προφίλ και κατανομή πάχους άνω ψαλιδιών



Σχήμα 3.53: Διατομή AI

3.7 Προφίλ και κατανομή πάχους σωλήνα μεσαίας τριβής

Η μεσαία τριβή αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι του σκελετού, καθώς παραλαμβάνει σημαντικό κομμάτι των φορτίσεων και αποτελεί το σημείο που συναντώνται ο σωλήνας καθίσματος, ο κάτω σωλήνας και τα δίδυμα κάτω ψαλίδια. Επίσης, στο σημείο αυτό συνδέονται τα πετάλια του ποδηλάτου, με αποτέλεσμα την άσκηση σημαντικών δυνάμεων κατά την οδήγηση. Γι' αυτόν το λόγο, ο σωλήνας αυτός είναι σημαντικά πιο παχύς σε σχέση με τους υπόλοιπους σωλήνες του ποδηλάτου, όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.20. Επιπλέον, αυτός ο σωλήνας είναι κυκλικής διατομής, μιας και αυτός ο τύπος διατομής συναντάνται ευρέως στη βιομηχανία όσον αφορά αυτό κομμάτι του σκελετού, με σταθερό πάχος, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.54.



Σχήμα 3.54: Προφίλ και κατανομή πάχους μεσαίας τριβής

Ακολουθούν πίνακες, στους οποίους παρουσιάζονται οι σωλήνες που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε σετ. Πιο συγκεκριμένα, όλοι οι σωλήνες έχουν αριθμηθεί με τον τρόπο που παρουσιάστηκε προηγουμένως, προκειμένου να είναι πιο εύκολα κατανοητό ποιο προφίλ και ποια κατανομή πάχους χρησιμοποιείται στην εκάστοτε

Μήκος(mm)	68
RC(mm)	2.3
O.D.(mm)	40

Πίνακας 3.20: Χαρακτηριστικά μεσαίας τριβής - Σωλήνας υπ' αριθμόν 1

Αριθμός σετ	Άνω σωλήνας	Κάτω σωλήνας	Σωλήνας καθίσματος
1	1	1	1
2	1	2	1
3	1	3	1
4	1	4	1
5	1	5	3
6	1	3	3
7	2	3	3
8	2	3	2
9	3	3	2
10	3	3	4
11	3	3	4

Πίνακας 3.21: Άνω σωλήνες, κάτω σωλήνες και σωλήνες καθίσματος που χρησιμοποιήθηκαν - 1 ως 11

περίσταση. Να σημειωθεί εδώ το 10 και το 11 σετ είναι τα ίδια, με τη διαφοροποίηση να έγκειται στην κατανομή πάχους στον κάτω σωλήνα. Πιο συγκεκριμένα, στο 10 σετ, ο κάτω σωλήνας έχει πάχος 0.7 mm στα τμήματα που οδηγούν στην ένωση με τη μεσαία τριβή και το σωλήνα κεφαλής αντίστοιχα και 0.5 mm στο ενδιάμεσο τμήμα του. Από την άλλη, στο 11 σετ, τα μεγέθη αυτά είναι 0.6 και 0.45 mm αντίστοιχα.

Πιο συγκεκριμένα, οι πίνακες 3.21, 3.22 και 3.23 παρουσιάζουν τους άνω σωλήνες, τους κάτω σωλήνες και τους σωλήνες καθίσματος που επιλέχθηκαν για κάθε σετ, με κάθε αριθμό να αντιστοιχεί στον αριθμό που δώθηκε σε κάθε σωλήνα παραπάνω.

Οι πίνακες 3.24 3.25 και 3.26 παρουσιάζουν τα κάτω δίδυμα ψαλίδια, το σωλήνα κεφαλής και τα άνω δίδυμα ψαλίδια που επιλέχθηκαν για κάθε σετ, με κάθε αριθμό να αντιστοιχεί στον αριθμό που δώθηκε σε κάθε σωλήνα παραπάνω.

Αριθμός σετ	Άνω σωλήνας	Κάτω σωλήνας	Σωλήνας καθίσματος
12	3	3	4
13	3	3	4
14	3	3	4
15	3	3	4
16	4	3	4
17	5	3	4
18	5	6	4
19	5	7	4
20	5	8	4
21	5	9	4
22	5	10	4

Πίνακας 3.22: Άνω σωλήνες, κάτω σωλήνες και σωλήνες καθίσματος που χρησιμοποιήθηκαν - 12 ως 22

Αριθμός σετ	Άνω σωλήνας	Κάτω σωλήνας	Σωλήνας καθίσματος
23	5	11	4
24	5	12	4
25	6	7	4
26	7	7	4
27	8	7	4
28	8	7	6
29	8	7	5
30	8	7	7
31	8	7	7
32	8	7	7
33	8	7	7
34	8	7	7
35	8	7	7

Πίνακας 3.23: Άνω σωλήνες, κάτω σωλήνες και σωλήνες καθίσματος που χρησιμοποιήθηκαν - 23 ως 35

Αριθμός σετ	Σωλήνας κεφαλής	Κάτω ψαλίδια	Άνω ψαλίδια
1	1	1	1
2	1	1	1
3	1	1	1
4	1	1	1
5	1	1	1
6	1	1	1
7	1	1	1
8	1	1	1
9	1	1	1
10	1	1	1
11	1	1	1

Πίνακας 3.24: Σωλήνες κεφαλής, κάτω ψαλίδια και άνω ψαλίδια που χρησιμοποιήθηκαν - 1 ως 11

Αριθμός σετ	Σωλήνας κεφαλής	Κάτω ψαλίδια	Άνω ψαλίδια
12	1	1	2
13	1	1	4
14	1	4	2
15	1	2	2
16	1	2	2
17	1	2	2
18	1	2	2
19	1	2	2
20	1	2	2
21	1	2	2
22	1	2	2

Πίνακας 3.25: Σωλήνες κεφαλής, κάτω ψαλίδια και άνω ψαλίδια που χρησιμοποιήθηκαν - 12 ως 22

Αριθμός σετ	Σωλήνας κεφαλής	Κάτω ψαλίδια	Άνω ψαλίδια
23	1	1	2
24	1	1	4
25	1	4	2
26	1	2	2
27	1	2	2
28	1	2	1
29	1	2	1
30	1	2	1
31	1	2	2
32	1	2	3
33	1	2	5
34	1	3	5
35	1	4	5

Πίνακας 3.26: Σωλήνες κεφαλής, κάτω ψαλίδια και άνω ψαλίδια που χρησιμοποιήθηκαν - 23 ως 35

3.8 Αποτελέσματα

Παρακάτω, ακολουθούν τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν σε αυτήν την φάση της εργασίας, ήτοι η κάθετη μετατόπιση κατά τον άξονα y, η πλευρική μετατόπιση κατά τον άξονα z, η μάζα του σκελετού και οι μέγιστες τιμές της τάσης Von Mises στα τεστ πρόσκρουσης, στρέψης και συμπίεσης αντίστοιχα.

Στον πίνακα 3.27, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όσον αφορά τη μάζα, την κάθετη μετατόπιση και την πλευρική μετατόπιση για τους πρώτους 10 σκελετούς που δοκιμάστηκαν.

Στον πίνακα 3.28, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όσον αφορά τη μάζα, την κάθετη μετατόπιση και την πλευρική μετατόπιση για σκελετούς υπ' αριθμόν 11 ως 21.

Στον πίνακα 3.29, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όσον αφορά τη μάζα, την κάθετη μετατόπιση και την πλευρική μετατόπιση για τους σκελετούς υπ' αριθμόν 22 ως 35.

Αριθμός σετ	Μάζα (kg)	Κάθετη μετατόπιση (mm)	Πλευρική μετατόπιση (mm)
1	1.67	-0.056	-18.7
2	1.62	-0.057	-18.2
3	1.68	-0.056	-12.8
4	1.64	-0.057	-14.2
5	1.68	-0.065	-12.8
6	1.71	-0.064	-13.2
7	1.69	-0.059	-12.7
8	1.71	-0.058	-12.5
9	1.7	-0.058	-12.2
10	1.72	-0.064	-12.5

Πίνακας 3.27: Αποτελέσματα σετ 1-10

Αριθμός σετ	Μάζα (kg)	Κάθετη μετατόπιση (mm)	Πλευρική μετατόπιση (mm)
11	1.66	-0.067	-13.6
12	1.63	-0.067	-13.5
13	1.7	-0.056	-13.1
14	1.6	-0.068	-13.5
15	1.62	-0.068	-13.5
16	1.61	-0.069	-13
17	1.62	-0.075	-14.3
18	1.67	-0.08	-24.8
19	1.61	-0.076	-14.1
20	1.65	-0.075	-10.2
21	1.66	-0.076	-9.4

Πίνακας 3.28: Αποτελέσματα σετ 11-21

Αριθμός σετ	Μάζα (kg)	Κάθετη μετατόπιση (mm)	Πλευρική μετατόπιση (mm)
22	1.67	-0.074	-8.7
23	1.66	-0.075	-14.2
24	1.63	-0.078	-24.5
25	1.6	-0.074	-14
26	1.62	-0.072	-13.8
27	1.63	-0.075	-14
28	1.68	-0.056	-13.1
29	1.67	-0.059	-13.2
30	1.68	-0.06	-13.2
31	1.64	-0.063	-13.1
32	1.65	-0.061	-13.3
33	1.66	-0.062	-13.3
34	1.64	-0.064	-13.3
35	1.64	-0.063	-13.3

Πίνακας 3.29: Αποτελέσματα σετ 22-35

Στους πίνακες 3.30, 3.31 και 3.32 αντίστοιχα, παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή της τάσης Von Mises που αναπτύχθηκε στο τεστ πρόσκρουσης για κάθε ένα από τα σετ σωλήνων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την φάση της εργασίας.

Στους πίνακες 3.33, 3.34 και 3.35 αντίστοιχα, παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή της τάσης Von Mises που αναπτύχθηκε στο τεστ στρέψης για κάθε ένα από τα σετ σωλήνων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την φάση της εργασίας.

Στους πίνακες 3.36, 3.37 και 3.38 αντίστοιχα, παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή της τάσης Von Mises που αναπτύχθηκε στο τεστ συμπίεσης για κάθε ένα από τα σετ σωλήνων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την φάση της εργασίας.

Στους πίνακες 3.39, 3.40 και 3.41 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα αποτελέσματα όσον αφορά τη μάζα του σκελετού.

Αριθμός σετ	Μέγιστη τάση Von Mises στο τεστ πρόσκρουσης (MPa)
1	1592
2	1618
3	1601
4	1717
5	1891
6	1597
7	1564
8	1560
9	1521
10	1525

Πίνακας 3.30: Αποτελέσματα σετ 1-10 - Μέγιστες τιμές τάσης Von Mises στο τεστ πρόσκρουσης

Αριθμός σετ	Μέγιστη τάση Von Mises στο τεστ πρόσκρουσης (MPa)
11	1630
12	1628
13	1626
14	1628
15	1623
16	1657
17	1582
18	2580
19	1547
20	1463
21	1269

Πίνακας 3.31: Αποτελέσματα σετ 11-21 - Μέγιστες τιμές τάσης Von Mises στο τεστ πρόσκρουσης

Αριθμός σετ	Μέγιστη τάση Von Mises στο τεστ πρόσκρουσης (MPa)
22	1746
23	1215
24	2328
25	1547
26	1521
27	1481
28	1468
29	1467
30	1473
31	1468
32	1469
33	1471
34	1470
35	1472

Πίνακας 3.32: Αποτελέσματα σετ 22-35 - Μέγιστες τιμές τάσης Von Mises στο τεστ πρόσκρουσης

Αριθμός σετ	Μέγιστη τάση Von Mises στο τεστ στρέψης (MPa)
1	638
2	640
3	583
4	605
5	707
6	699
7	638
8	635
9	592
10	601

Πίνακας 3.33: Αποτελέσματα σετ 1-10 - Μέγιστες τιμές τάσης Von Mises στο τεστ στρέψης

Αριθμός σετ	Μέγιστη τάση Von Mises στο τεστ στρέψης (MPa)
11	673
12	625
13	620
14	659
15	641
16	716
17	565
18	523
19	597
20	652
21	649

Πίνακας 3.34: Αποτελέσματα σετ 11-21 - Μέγιστες τιμές τάσης Von Mises στο τεστ στρέψης

Αριθμός σετ	Μέγιστη τάση Von Mises στο τεστ στρέψης (MPa)
22	691
23	600
24	614
25	629
26	642
27	631
28	844
29	630
30	645
31	643
32	645
33	626
34	629
35	644

Πίνακας 3.35: Αποτελέσματα σετ 22-35 - Μέγιστες τιμές τάσης Von Mises στο τεστ στρέψης

Αριθμός σετ	Μέγιστη τάση Von Mises στο τεστ συμπίεσης (MPa)
1	82
2	92
3	87
4	89
5	185
6	163
7	143
8	81
9	73
10	126

Πίνακας 3.36: Αποτελέσματα σετ 1-10 - Μέγιστες τιμές τάσης Von Mises στο τεστ συμπίεσης

Αριθμός σετ	Μέγιστη τάση Von Mises στο τεστ συμπίεσης (MPa)
11	128
12	120
13	110
14	121
15	120
16	98
17	134
18	146
19	132
20	128
21	128

Πίνακας 3.37: Αποτελέσματα σετ 11-21 - Μέγιστες τιμές τάσης Von Mises στο τεστ συμπίεσης

Αριθμός σετ	Μέγιστη τάση Von Mises στο τεστ συμπίεσης (MPa)
22	125
23	136
24	148
25	128
26	131
27	133
28	60
29	79
30	79
31	80
32	79
33	80
34	69
35	73

Πίνακας 3.38: Αποτελέσματα σετ 22-35 - Μέγιστες τιμές τάσης Von Mises στο τεστ συμπίεσης

Αριθμός σετ	Μάζα(kg)
1	1.67
2	1.62
3	1.68
4	1.64
5	1.68
6	1.71
7	1.69
8	1.71
9	1.7
10	1.72

Πίνακας 3.39: Αποτελέσματα σετ 1-10 - Μάζα σκελετού

Αριθμός σετ	Μάζα(kg)
11	1.66
12	1.63
13	1.7
14	1.6
15	1.62
16	1.61
17	1.62
18	1.67
19	1.61
20	1.65
21	1.66

Πίνακας 3.40: Αποτελέσματα σετ 11-21 - Μάζα σκελετού

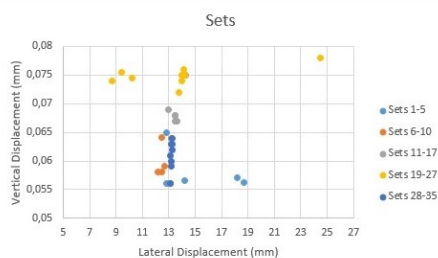
Αριθμός σετ	Μάζα(kg)
22	1.67
23	1.66
24	1.63
25	1.6
26	1.62
27	1.63
28	1.68
29	1.67
30	1.68
31	1.64
32	1.65
33	1.66
34	1.64
35	1.64

Πίνακας 3.41: Αποτελέσματα σετ 22-35 - Μάζα σκελετού

3.9 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως φαίνεται στους πίνακες 3.27, 3.28 και 3.29 αντίστοιχα, η μέγιστη απόλυτη τιμή της κάθετης μετατόπισης ισούται με 0.08 και αντιστοιχεί στο σετ υπ' αριθμόν 20, όταν η ελάχιστη απόλυτη τιμή είναι 0.056 και αντιστοιχεί στα σετ υπ' αριθμόν 3 και 30. Επιπλέον, η μέγιστη απόλυτη τιμή της πλευρικής μετατόπισης είναι 24.8 και αντιστοιχεί στο σετ υπ' αριθμόν 20, όταν η ελάχιστη απόλυτη τιμή είναι 8.7 και αντιστοιχεί στο σετ υπ' αριθμόν 24. Όλες οι προαναφερθείσες τιμές εκφράζονται σε mm. Επιπροσθέτως, ο πλέον ελαφρύς σκελετός αντιστοιχεί στο σετ 14, ενώ ο πλέον βαρύς σκελετός αντιστοιχεί στο σετ υπ' αριθμόν 10.

Επιπλέον, παρατηρείται πως τα σετ 17-25 αποδίδουν ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο όσον αφορά τη μάζα και την πλευρική και κάθετη μετατόπιση, όσο και όσον αφορά την αντοχή τους στις καταπονήσεις σε πρόσκρουση, στρέψη και συμπίεση. Παρατηρείται λοιπόν πως η χρήση άνω και κάτω σωλήνων με οβάλ ή τραπεζοειδή διατομή συνεισφέρει στη βελτίωση των επιδόσεων του σκελετού ποδηλάτου. Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 3.55.



Σχήμα 3.55: Διάγραμμα κάθετης μετατόπισης προς πλευρική μετατόπιση για όλα τα σετ

Επιπροσθέτως, παρατηρείται πως η αύξηση των διαστάσεων, είτε είναι η διάμετρος είτε το ύψος και το πλάτος των σωλήνων και η ταυτόχρονη μείωση του πάχους τους οδηγεί σε βελτίωση των επιδόσεων του σκελετού, ενώ η μάζα μεταβάλλεται ελάχιστα. Ωστόσο, όσο πιο λεπτοί γίνονται οι σωλήνες, τόσο περισσότερο αυξάνεται η πιθανότητα θραύσης του σκελετού λόγω λυγισμού. Επομένως, υπάρχει ένα όριο ως προς το πόσο λεπτότοιχος μπορεί να γίνει ένας σωλήνας.

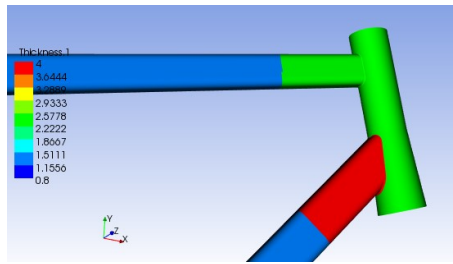
4. Ανάλυση της επίδρασης του υλικού κατασκευής του σκελετού

Κατά την τελευταία φάση της ανάλυσης εξετάστηκαν τρία διαφορετικά υλικά κατασκευής σκελετών ποδηλάτων, ως προς τις παραμέτρους οι οποίες εξετάστηκαν και στην προηγούμενη παράγραφο. Αυτά τα υλικά είναι ο χάλυβας Reynolds 931, το αλουμίνιο 6061 και το ανθρακόνημα T300, με τις στρώσεις που χρησιμοποιήθηκαν να είναι 0° και 90° . Με δεδομένο πως για την προηγούμενη φάση χρησιμοποιήθηκε χάλυβας Reynolds 931, τα αποτελέσματα σε αυτήν την ενότητα μπορούν να συγκριθούν απευθείας με τα αποτελέσματα της προηγούμενης ενότητας.

4.1 Σκελετός από ανθρακόνημα

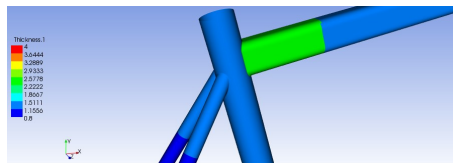
Όπως και στην περίπτωση του σκελετού ποδηλάτου από χάλυβα, έτσι και στη συγκεκριμένη περίπτωση σχεδιάστηκε ένας σκελετός ποδηλάτου, με τους σωλήνες να είναι πιο λεπτοί στο μεσαίο τμήμα τους, ενώ στα άκρα τους και στα σημεία ένωσης τους το πάχος αυξάνεται, με το πάχος σε ορισμένες περιοχές να φτάνει τα 4 mm. Οι ελαστικές ιδιότητες του ανθρακονήματος T300 που χρησιμοποιήθηκε και τα όρια θραύσης του πάρθηκαν από την εργασία των Liu και Wu [11] και φαίνονται στους πίνακες 3.42 και 3.43 αντίστοιχα. Επίσης, το κριτήριο θραύσης που χρησιμοποιήθηκε είναι η θεωρία της μέγιστης τάσης, όπως και στην εργασία των Liu και Wu [11].

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.56, στην περιοχή που ενώνονται ο σωλήνας κεφαλής με τον κάτω σωλήνα και τον άνω σωλήνα, ο άνω σωλήνας αποτελείται από 8 στρώσεις ανθρακονήματος, με κάθε στρώση να έχει πάχος 0.3 mm και τις στρώσεις να έχουν διάταξη $[0/90/90/0]_S$. Το ίδιο συμβαίνει και στο κομμάτι του άνω σωλήνα, που καταλήγει στο σημείο ένωσης με το σωλήνα κεφαλής. Ο σωλήνας κεφαλής και το συγκεκριμένο κομμάτι του άνω σωλήνα, μήκους 100 mm, έχουν μεγαλύτερο πάχος από άλλα μέρη του σκελετού, μιας και απορροφούν σημαντικό μέρος των αναπτυσσόμενων τάσεων στις φορτίσεις που προσομοιώθηκαν. Για τον ίδιο λόγο, το κομμάτι του κάτω σωλήνα, που καταλήγει στο σημείο ένωσης με το σωλήνα κεφαλής να αποτελείται από 8 στρώσεις πάχους 0.3 mm η κάθε μία και από 8 στρώσεις πάχους 0.2 mm η κάθε μία, με διάταξη $[0/90/90/0]_S$ και $[0/90/90/0]_S$ αντίστοιχα, ενώ έχει μήκος 150 mm.



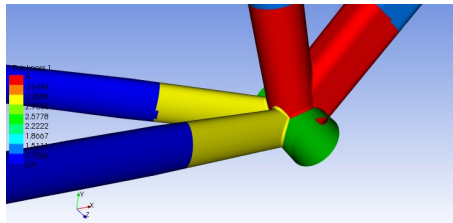
Σχήμα 3.56: Κατανομή πάχους στην περιοχή μεταξύ σωλήνα κεφαλής, κάτω σωλήνα και άνω σωλήνα

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.57, το άνω μέρος του σωλήνα καθίσματος αποτελείται από 4 στρώσεις πάχους 0.3 mm με διάταξη $[0/90]_S$. Το ίδιο ισχύει και για το τμήμα των άνω δίδυμων ψαλιδιών και μεσαίο τμήμα του άνω σωλήνα. Επίσης, το τμήμα του άνω σωλήνα που καταλήγει στο σημείο ένωσης με το σωλήνα καθίσματος αποτελείται από 8 στρώσεις πάχους 0.3 mm η κάθε μία με διάταξη $[0/90/90/0]_S$.



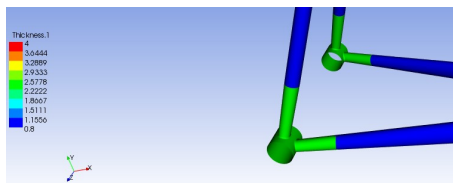
Σχήμα 3.57: Κατανομή πάχους στην περιοχή μεταξύ σωλήνα καθίσματος, άνω σωλήνα και κάτω δίδυμων ψαλιδιών

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.58, η περιοχή αυτή είναι πιο ενισχυμένη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες, επειδή παραλαμβάνει σημαντικό κομμάτι των τάσεων, τόσο στις φορτίσεις που προσομοιώθηκαν στην εν λόγω εργασία όσο και κατά την οδήγηση, λόγω των δυνάμεων που ασκεί ο αναβάτης στα πετάλια. Πιο συγκεκριμένα, τα τμήματα του σωλήνα καθίσματος και του κάτω σωλήνα που οδηγούν στο σημείο ένωσης με τη μεσαία τριβή, μήκους 100 mm, αποτελούνται από 8 στρώσεις πάχους 0.3 mm η κάθε μία με διάταξη $[0/90/90/0]_S$ και 8 στρώσεις πάχους 0.2 mm η κάθε μία με διάταξη $[0/90/90/0]_S$. Επίσης, η μεσαία τριβή αποτελείται από 8 στρώσεις πάχους 0.3 mm η κάθε μία με διάταξη $[0/90/90/0]_S$. Επίσης, το τμήμα των κάτω δίδυμων ψαλιδιών που οδηγεί στο σημείο ένωσης με τη μεσαία τριβή είναι ενισχυμένο και αποτελείται από 8 στρώσεις πάχους 0.3 mm η κάθε μία με διάταξη $[0/90/90/0]_S$ και 4 στρώσεις πάχους 0.2 mm η κάθε μία με διάταξη $[0/90]_S$. Τέλος, το τμήμα των κάτω δίδυμων ψαλιδιών μεταξύ του ενισχυμένου μέρους τους και του τμήματος που συνδέεται με την ειδική διαμόρφωση εκεί που συνδέονται με τα άνω δίδυμα ψαλίδια αποτελείται από 4 στρώσεις πάχους 0.2 mm η κάθε μία με διάταξη $[0/90]_S$.



Σχήμα 3.58: Κατανομή πάχους στην περιοχή μεταξύ κάτω σωλήνα, μεσαίας τριβής, σωλήνα καθίσματος και κάτω διδύμων ψαλιδιών

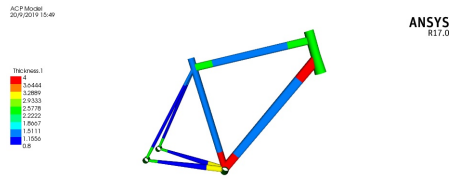
Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.59, η ειδική διαμόρφωση στο σημείο ένωσης των άνω διδύμων ψαλιδιών και των κάτω διδύμων ψαλιδιών αποτελείται από 8 στρώσεις πάχους 0.3 mm η κάθε μία με διάταξη $[0/90/90/0]_S$, όπως επίσης και ένα μικρό τμήμα των κάτω και άνω διδύμων ψαλιδιών.



Σχήμα 3.59: Κατανομή πάχους στην περιοχή μεταξύ κάτω διδύμων ψαλιδιών και των dropouts

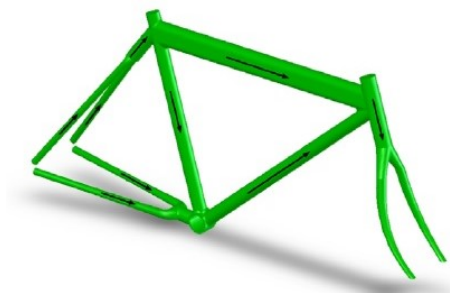
Στην εικόνα 3.60, παρουσιάζονται εποπτικά οι κατανομές πάχους στο σκελετό από ανθρακόνημα. Τα ενδιαμέσα τμήματα του άνω σωλήνα, του άνω σωλήνα, καθώς και το άνω τμήμα του σωλήνα καθίσματος αποτελούνται από 4 στρώσεις πάχους 0.3 mm η κάθε μία, με διάταξη $[0/90]_S$. Στη σχεδίαση του σκελετού από ανθρακονήματα, χρησιμοποιήθηκαν συμμετρικές διατάξεις για τις στρώσεις, οι οποίες είναι είτε 0 είτε 90 μοίρες. Αυτό έγινε, επειδή η εργασία των Liu και Wu [11] κατέδειξε πως η διάταξη $[0/90/90/0]_S$ είναι η πλέον αποτελεσματική, έτσι ώστε ο σκελετός να αντέξει τις καταπονήσεις που προκύπτουν από τα τεστ που χρησιμοποιήθηκαν και τα οποία χρησιμοποιούνται και στην παρούσα εργασία. Επίσης, για το σχεδιασμό του σκελετού, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ACP - Pre του ANSYS, το οποίο χρησιμοποιείται ειδικά για το σχεδιασμό σύνθετων κατασκευών. Επιπλέον, το λογισμικό ACP - Post χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, τα οποία προέκυψαν από την ανάλυση.

Στην εικόνα 3.61, παρουσιάζεται ο προσανατολισμός των στρώσεων στο σκελετό ποδηλάτου συνολικά, με την κατεύθυνση των 0 μοιρών να ταυτίζεται με τον



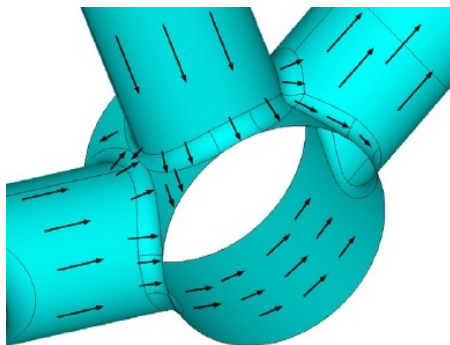
Σχήμα 3.60: Κατανομή πάχους στο σκελετό ποδηλάτου

x-άξονα στο εκάστοτε τοπικό σύστημα συντεταγμένων του κάθε σωλήνα και στο σύστημα συντεταγμένων του σκελετού.



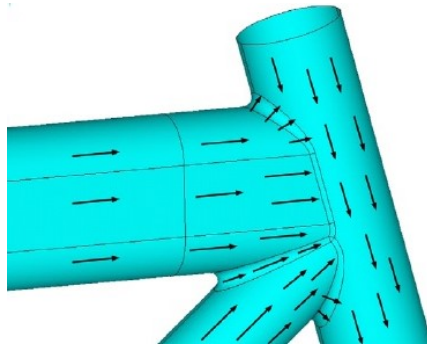
Σχήμα 3.61: Διεύθυνση του x-άξονα στο σκελετό του ποδηλάτου

Στις εικόνες 3.62 και 3.63, παρουσιάζεται η διεύθυνση των 0 μοιρών και του x-άξονα στα σημεία ένωσης στη μεσαία τριβή και στο σωλήνα κεφαλής αντίστοιχα. Επίσης, στην εικόνα 3.64 δίνεται ένα παράδειγμα του προσανατολισμού των στρώσεων στους σωλήνες, με κάθε στρώση να έχει πάχος 0.3 mm.

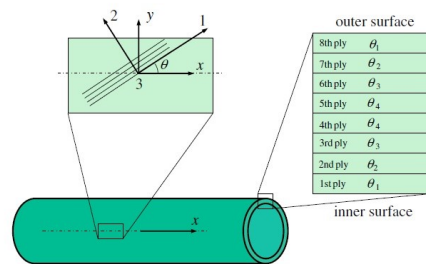


Σχήμα 3.62: Διεύθυνση του x-άξονα στο σημείο ένωσης στη μεσαία τριβή

Ακολουθεί η εικόνα 3.65, που αναπαριστά το σκελετό του ποδηλάτου από ανθρακόνημα. Όπως φαίνεται, ο συγκεκριμένος σκελετός διαφέρει ως προς το σκελετό από χάλυβα ως προς το ότι ο άνω σωλήνας σχηματίζει γωνία 12.5 μοιρών αντί για

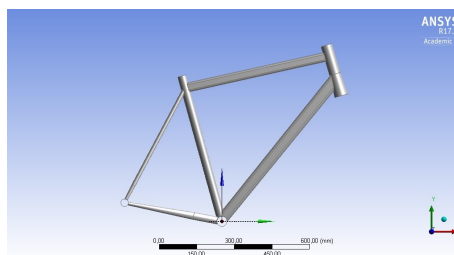


Σχήμα 3.63: Διεύθυνση του x-άξονα στο σημείο ένωσης στο σωλήνα κεφαλής



Σχήμα 3.64: Παράδειγμα του προσανατολισμού των στρώσεων στους σωλήνες

0 μοιρών με τον άξονα x. Αυτή η αλλαγή σε σχέση τόσο με το σκελετό από κράμα αλουμινίου όσο και με το σκελετό από χάλυβα πραγματοποιήθηκε, καθώς παρατηρήθηκε σε δοκιμαστικές προσομοιώσεις πως έτσι ο σκελετός από ανθρακόνημα πληρούσε τις προϋποθέσεις ασφαλείας που έχουν τεθεί. Επιπροσθέτως, η αλλαγή έγινε και για λόγους σύγκρισης ως προς τους σκελετούς, στους οποίους ο άνω σωλήνας είναι παράλληλος προς τον x άξονα.



Σχήμα 3.65: Πρόσωση του σκελετού από ανθρακόνημα

Στους πίνακες 3.44, 3.45, 3.46, 3.47, 3.48, 3.49 και 3.50 παρατίθενται οι χαρακτηριστικές διαστάσεις των σωλήνων που χρησιμοποιήθηκαν, οι οποίες προέκυψαν από την ανάλυση που έγινε στο δεύτερο στάδιο της εργασίας, καθώς πρόκειται για το σετ που απέδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα.

$E_1(\text{GPa})$	162
$E_2(\text{GPa})$	14.9
$E_3(\text{GPa})$	14.9
ν_{12}	0.283
ν_{13}	0.283
ν_{23}	0.386
$G_{12}(\text{GPa})$	5.7
$G_{13}(\text{GPa})$	5.7
$G_{23}(\text{GPa})$	5.4

Πίνακας 3.42: Ελαστικές ιδιότητες ανθρακονήματος T300

$S_{1t}(\text{MPa})$	1760
$S_{1c}(\text{MPa})$	1570
$S_{2t}(\text{MPa})$	80
$S_{2c}(\text{MPa})$	80
$S_{3t}(\text{MPa})$	80
$S_{3c}(\text{MPa})$	80
$S_{12}(\text{MPa})$	98
$S_{13}(\text{MPa})$	98
$S_{23}(\text{MPa})$	98

Πίνακας 3.43: Όρια αντοχής ανθρακονήματος T300

Μήκος(mm)	600
O.D.(mm)	W01(25.5X36.5)
R1(mm)	2.4
RC(mm)	0.8
R2(mm)	2.4
L1(mm)	100
LC(mm)	400
L2(mm)	100

Πίνακας 3.44: Χαρακτηριστικά άνω σωλήνα

Μήκος(mm)	750
O.D.(mm)	BB(46X39)
R1(mm)	4
RC(mm)	0.8
R2(mm)	4
L1(mm)	100
LC(mm)	500
L2(mm)	150

Πίνακας 3.45: Χαρακτηριστικά κάτω σωλήνα

4.2 Σκελετός από αλουμίνιο

Στην περίπτωση του σκελετού από αλουμίνιο, χρησιμοποιήθηκαν επίσης σωλήνες με μικρότερο πάχος στο μεσαίο τμήμα τους, με σκοπό την εξοικονόμηση βάρους. Το αλουμίνιο 6061 που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση προσομοιώθηκε ως ιστροπικό υλικό, με τις ελαστικές ιδιότητές του να παρουσιάζονται στον πί-

O.D.1mm)	56
O.D.2(mm)	46
RC(mm)	2.4
Μήκος(mm)	210

Πίνακας 3.46: Χαρακτηριστικά σωλήνα κεφαλής

Μήκος(mm)	635
O.D.(mm)	35
R1(mm)	4
RC(mm)	1.2
L1(mm)	100
LC(mm)	535

Πίνακας 3.47: Χαρακτηριστικά σωλήνα καθίσματος

Μήκος(mm)	410
O.D.(mm)	OVAL(16X30)
R1(mm)	3.2
RC(mm)	0.8
R2(mm)	2.4
L1(mm)	100
LC(mm)	250
L2(mm)	60
LT(mm)	290
DT(mm)	12.5

Πίνακας 3.48: Χαρακτηριστικά κάτω ψαλιδιών

Μήκος(mm)	560
O.D.1(mm)	16
O.D.2(mm)	12.5
L1(mm)	100
LC(mm)	350
L2(mm)	110
R1(mm)	1.2
RC(mm)	0.8
R2(mm)	2.4
LT(mm)	300

Πίνακας 3.49: Χαρακτηριστικά άνω ψαλιδιών

Μήκος(mm)	68
O.D.(mm)	40
RC(mm)	2.4

Πίνακας 3.50: Χαρακτηριστικά μεσαίας τριβής

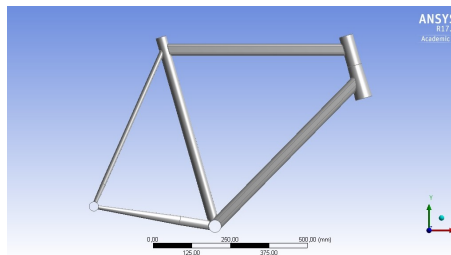
Μέτρο ελαστικότητας E(GPa)	Λόγος Poisson ν	Όριο αντοχής σε θραύση (MPa)
69	0.29	350

Πίνακας 3.51: Ελαστικές ιδιότητες κράματος αλουμινίου 6061

Μήκος(mm)	600
O.D.(mm)	W01(25.5X36.5)
R1(mm)	2.5
RC(mm)	1
R2(mm)	2.5
L1(mm)	40
T1(mm)	40
LC(mm)	380
T2(mm)	40
L2(mm)	60

Πίνακας 3.52: Χαρακτηριστικά άνω σωλήνα

νακα 3.51. Στην εικόνα 3.66, απεικονίζεται ο σκελετός από κράμα αλουμινίου που σχεδιάστηκε.



Σχήμα 3.66: Πρόσοψη του σκελετού από κράμα αλουμινίου

Στους πίνακες 3.52, 3.53, 3.54, 3.55, 3.56, 3.57 και 3.58 παρατίθενται οι χαρακτηριστικές διαστάσεις των σωλήνων που χρησιμοποιήθηκαν, οι οποίες προέκυψαν από την ανάλυση που έγινε στο δεύτερο στάδιο της εργασίας, καθώς πρόκειται για το σετ που απέδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα.

Μήκος(mm)	670
O.D.(mm)	BB(46X39)
R1(mm)	3
RC(mm)	1
R2(mm)	3
L1(mm)	90
T1(mm)	40
LC(mm)	410
T2(mm)	40
L2(mm)	90

Πίνακας 3.53: Χαρακτηριστικά κάτω σωλήνα

O.D.1mm)	56
O.D.2(mm)	46
RC(mm)	3
Μήκος(mm)	210

Πίνακας 3.54: Χαρακτηριστικά σωλήνα κεφαλής

Μήκος(mm)	635
O.D.(mm)	35
R1(mm)	3
RC(mm)	1
L1(mm)	135
T1(mm)	40
LC(mm)	460

Πίνακας 3.55: Χαρακτηριστικά σωλήνα καθίσματος

Μήκος(mm)	410
O.D.(mm)	OVAL(16X30)
R1(mm)	2
RC(mm)	0.8
L1(mm)	100
LC(mm)	40
L2(mm)	270
LT(mm)	290
DT(mm)	12.5

Πίνακας 3.56: Χαρακτηριστικά κάτω ψαλιδιών

Μήκος(mm)	560
O.D.1(mm)	16
O.D.2(mm)	12.5
RC(mm)	0.8
LT(mm)	300

Πίνακας 3.57: Χαρακτηριστικά άνω ψαλιδιών

Μήκος(mm)	68
O.D.(mm)	40
RC(mm)	3

Πίνακας 3.58: Χαρακτηριστικά μεσαίας τριβής

Μάζα (kg)	Κάθετη μετατόπιση (mm)	Πλευρική μετατόπιση (mm)
1.36	-0.097	-13.5

Πίνακας 3.59: Αποτελέσματα για το σκελετό από ανθρακονήματα

Ελάχιστος λόγος ασφαλείας στο τεστ πρόσκρουσης	1.2
Ελάχιστος λόγος ασφαλείας στο τεστ στρέψης	1.43
Ελάχιστος λόγος ασφαλείας στο τεστ συμπίεσης	4

Πίνακας 3.60: Ελάχιστες τιμές συντελεστών ασφαλείας για το σκελετό από ανθρακόνημα

Μάζα(kg)	Κάθετη μετατόπιση (mm)	Πλευρική δυσκαμψία (mm)
1.43	-0.083	-9.4

Πίνακας 3.61: Αποτελέσματα για το σκελετό από αλουμίνιο

Ελάχιστος λόγος ασφαλείας στο τεστ πρόσκρουσης	1.3
Ελάχιστος λόγος ασφαλείας στο τεστ στρέψης	1.8
Ελάχιστος λόγος ασφαλείας στο τεστ συμπίεσης	7.8

Πίνακας 3.62: Ελάχιστες τιμές συντελεστών ασφαλείας για το σκελετό από κράμα αλουμινίου

4.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως φαίνεται από τα παρακάτω αποτελέσματα και πιο συγκεκριμένα στους πίνακες 3.59 και 3.61, που περιλαμβάνουν την μάζα του σκελετού, την κάθετη μετατόπιση και την πλευρική μετατόπιση για τους σκελετούς από τα αντίστοιχα υλικά, οι σκελετοί από ανθρακόνημα T300 και από κράμα αλουμινίου 6061 κατάφεραν να επιδείξουν παρόμοιες επιδόσεις με το σκελετό από κράμα χάλυβα Reynolds 931 όσον αφορά την αντοχή, την κάθετη ενδοτικότητα και την πλευρική δυσκαμψία, ενώ αμφότεροι ήταν πιο ελαφροί. Πιο συγκεκριμένα, ο σκελετός από ανθρακόνημα είναι κατά 17% ελαφρύτερος από το σκελετό από κράμα χάλυβα, ενώ ο σκελετός από κράμα αλουμινίου είναι κατά 12% ελαφρύτερος. Επιπροσθέτως, ο σκελετός από αλουμίνιο παρουσιάζει μεγαλύτερη πλευρική δυσκαμψία σε σχέση με το σκελετό από ανθρακόνημα κατά 44%, ενώ ο σκελετός από ανθρακόνημα παρουσιάζει μεγαλύτερη κάθετη ενδοτικότητα σε σχέση με το σκελετό από κράμα αλουμινίου κατά 17%. Επιπλέον, στους πίνακες 3.62 και 3.60 παρατίθενται οι ελάχιστες τιμές των λόγων ασφαλείας για τους σκελετούς από κράμα αλουμινίου και ανθρακόνημα αντίστοιχα για τα τεστ πρόσκρουσης, στρέψης και συμπίεσης. Παρατηρείται πως οι τιμές αυτές βρίσκονται σε αρμονία με τον ελάχιστο λόγο ασφαλείας που έχει τεθεί.

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα - Μελλοντικές προτάσεις

1. Ανάλυση της επίδρασης των χαρακτηριστικών διαστάσεων του σκελετού

Η αύξηση του μήκους του σωλήνα καθίσματος οδηγεί σε μείωση της κάθετης παραμόρφωσης κατ'απόλυτο, κάτι που συνεπάγεται αύξηση της κάθετης δυσκαμψίας του σκελετού, το οποίο είναι μάλλον αναμενόμενο. Επιπλέον, η αύξηση του μήκους του σωλήνα καθίσματος οδηγεί σε αύξηση της πλευρικής μετατόπισης του σκελετού κατ'απόλυτο, γεγονός που δείχνει πως η πλευρική δυσκαμψία του σκελετού μειώνεται με αύξηση του μήκους του σωλήνα καθίσματος. Επίσης, προκύπτει πως ο σωλήνας καθίσματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την κάθετη ενδοτικότητα του σκελετού, καθώς η μεταβολή της κάθετης μετατόπισης ισούται με περίπου 20%, ενώ επηρεάζει σε σημαντικά μικρότερο βαθμό τη πλευρική δυσκαμψία του σκελετού, με την αντίστοιχη μεταβολή της πλευρικής μετατόπισης να ισούται με περίπου 9%.

Η μεταβολή της γωνίας του σωλήνα καθίσματος δεν επηρεάζει σημαντικά την κάθετη ενδοτικότητα του πλαισίου και την πλευρική δυσκαμψία του. Όσον αφορά την πρώτη, παρατηρείται μία κατ'απόλυτο αύξηση της τάξης του 5.6% στην κάθετη μετατόπιση, που συνεπάγεται και μείωση της κάθετης δυσκαμψίας. Στην περίπτωση της πλευρικής μετατόπισης παρουσιάζεται μια μικρή αύξηση κατ'απόλυτο, της τάξης του 4.6%, που συνεπάγεται μείωση της πλευρικής δυσκαμψίας, όπως συνέβη

και με την κάθετη.

Το μήκος του άνω σωλήνα επηρεάζει σημαντικά τόσο την πλευρική δυσκαμψία του πλαισίου όσο και την κάθετη ενδοκιμότητά του. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μια σχεδόν γραμμική αύξηση κατ'απόλυτο της πλευρικής μετατόπισης όσο αυξάνεται το μήκος του άνω σωλήνα, που με τη σειρά του οδηγεί σε μειωμένη πλευρική δυσκαμψία. Η μεταβολή της μετατόπισης ισούται με περίπου 24%. Όσον αφορά την κάθετη μετατόπιση, παρατηρείται επίσης μια σημαντική αύξηση της τάξης του 13%. Έτσι, προκύπτει πως αύξηση του μήκους του άνω σωλήνα συνεπάγεται και μείωση της κάθετης δυσκαμψίας.

Το μήκος των κάτω ψαλιδιών παίζει επίσης ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην κάθετη ενδοκιμότητα του σκελετού. Εξάλλου, αύξηση του μήκους των κάτω ψαλιδιών οδηγεί σε κατ'απόλυτο αύξηση της κάθετης μετατόπισης, που συνεπάγεται και μείωση της κάθετης ενδοκιμότητας αντίστοιχα. Η αύξηση αυτή ισούται περίπου με 21%. Αντιθέτως, λόγω των συντοριακών συνθηκών της δοκιμής, το μήκος των κάτω ψαλιδιών δεν επηρεάζει σημαντικά την πλευρική μετατόπιση. Εφαρμόζοντας μια διαφορετική δοκιμή, τα αποτελέσματα που θα προκύψουν ενδέχεται να είναι διαφορετικά.

Η αύξηση του μήκους του σωλήνα κεφαλής οδηγεί σε σημαντική κατ'απόλυτο αύξηση της κάθετης μετατόπισης, κάτι που με τη σειρά του συνεπάγεται πως η κάθετη δυσκαμψία του σκελετού μειώνεται όσο αυξάνει το μήκος του σωλήνα κεφαλής. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβολή της μετατόπισης ισούται περίπου με 16%.

Το ύψος της μεσαίας τριβής επηρεάζει σημαντικά την κάθετη μετατόπιση και κατά συνέπεια την κάθετη ενδοκιμότητα του σκελετού. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μια κατ'απόλυτο μείωση της τάξης του 13% στην κάθετη μετατόπιση, που συνεπάγεται αύξηση της κάθετης δυσκαμψίας και άρα μείωση της κάθετης ενδοκιμότητας. Όσον αφορά την πλευρική μετατόπιση, παρατηρείται μια μείωση της κατά περίπου 3.2%. Αυτό συνεπάγεται και αύξηση της πλευρικής δυσκαμψίας.

2. Ανάλυση της επίδρασης των χαρακτηριστικών των επιμέρους σωλήνων του σκελετού

Η μέγιστη απόλυτη τιμή της κάθετης μετατόπισης ισούται με 0.08 και αντιστοιχεί στο σετ υπ' αριθμόν 20, όταν η ελάχιστη απόλυτη τιμή είναι 0.056 και αντιστοιχεί στα σετ υπ' αριθμόν 3 και 30. Επιπλέον, η μέγιστη απόλυτη τιμή της πλευρικής μετατόπισης είναι 24.8 και αντιστοιχεί στο σετ υπ' αριθμόν 20, όταν η ελάχιστη απόλυτη τιμή είναι 8.7 και αντιστοιχεί στο σετ υπ' αριθμόν 24. Όλες οι προαναφερθείσες τιμές εκφράζονται σε mm. Επιπροσθέτως, ο πλέον ελαφρύς σκελετός αντιστοιχεί στο σετ 14, ενώ ο πλέον βαρύς σκελετός αντιστοιχεί στο σετ υπ' αριθμόν 10.

Επιπλέον, παρατηρείται πως τα σετ 24-35 αποδίδουν ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο όσον αφορά τη μάζα και την πλευρική και κάθετη μετατόπιση, όσο και όσον αφορά την αντοχή τους στις καταπονήσεις σε πρόσκρουση, στρέψη και συμπίεση. Παρατηρείται λοιπόν πως η χρήση άνω και κάτω σωλήνων με οβάλ ή τραπεζοειδή διατομή συνεισφέρει στη βελτίωση των επιδόσεων του σκελετού ποδηλάτου.

Επιπροσθέτως, παρατηρείται πως η αύξηση των διαστάσεων, είτε είναι η διάμετρος είτε το ύψος και το πλάτος των σωλήνων και η ταυτόχρονη μείωση του πάχους τους οδηγεί σε βελτίωση των επιδόσεων του σκελετού, ενώ η μάζα μεταβάλλεται ελάχιστα. Ωστόσο, όσο πιο λεπτοί γίνονται οι σωλήνες, τόσο περισσότερο αυξάνεται η πιθανότητα ζημιάς του σκελετού λόγω λυγισμού. Επομένως, υπάρχει ένα όριο ως προς το πόσο λεπτότοιχος μπορεί να γίνει ένας σωλήνας.

3. Ανάλυση της επίδρασης του υλικού κατασκευής του σκελετού

Οι σκελετοί από ανθρακόνημα T300 και από κράμα αλουμινίου 6061 κατάφεραν να επιδείξουν παρόμοιες επιδόσεις με το σκελετό από κράμα χάλυβα Reynolds 931 όσον αφορά την αντοχή, την κάθετη ενδοτικότητα και την πλευρική δυσκαμψία, ενώ αμφότεροι ήταν πιο ελαφροί. Πιο συγκεκριμένα, ο σκελετός από ανθρακόνημα είναι κατά 17% ελαφρύτερος από το σκελετό από κράμα χάλυβα, ενώ ο σκελετός από κράμα αλουμινίου είναι κατά 12% ελαφρύτερος. Επιπροσθέτως, ο σκελετός από αλουμίνιο παρουσιάζει μεγαλύτερη πλευρική δυσκαμψία σε σχέση με το σκε-

λετό από ανθρακόνημα κατά 44%, ενώ ο σκελετός από ανθρακόνημα παρουσιάζει μεγαλύτερη κάθετη ενδοτικότητα σε σχέση με το σκελετό από κράμα αλουμινίου κατά 17%. Επίσης, παρατηρείται πως όλοι οι σκελετοί πληρούν τα κριτήρια ασφαλείας που έχουν τεθεί.

4. Μελλοντικές προτάσεις για έρευνα

Η τάση κατασκευής σωλήνων μικρότερου πάχους και διατομών μεγαλύτερου μεγέθους αυξάνει, από ένα σημείο και μετά, την πιθανότητα εμφάνισης φαινομένων λυγισμού. Επομένως, αυτά τα φαινόμενα θα μπορούσαν να μελετηθούν σε μεγαλύτερο βάθος, προκειμένου να διερευνηθεί το κατά πόσο υπάρχει κάποιο όριο στο πόσο λεπτότοιχος μπορεί να γίνει ο άνω ή ο κάτω σωλήνας. Επιπροσθέτως, θα μπορούσε να διερευνηθεί η πιθανότητα χρήσης περισσότερων του ενός υλικού στην κατασκευή σκελετών ποδηλάτου, κάνοντας π.χ. ταυτόχρονη χρήση ανθρακονήματος και αλουμινίου.

Βιβλιογραφία

- [1] Richard Ballantine. *Richard's 21st century bicycle book*. 2000.
- [2] David Gordon Wilson, Jim Papadopoulos, and Frank Rowland Whitt. *Bicycling science*. MIT press, 2004.
- [3] Autar K Kaw. *Mechanics of composite materials*. CRC press, 2005.
- [4] Steven H Olson, James S Busby, and Stanley A Needle. Composite bicycle frame and method of manufacturing, September 8 1998. US Patent 5,803,476.
- [5] Ronald H Nelson, Dimitrije Milovich, Weston M Wilcox, and Robert F Read. Composite bicycle frame and methods for its construction, August 7 2001. US Patent 6,270,104.
- [6] Αλέξανδρος Χρόνης. Σχεδιασμός και μελέτη σκελετού ποδηλάτου από πλαστικό υλικό χωρίς ενίσχυση, με αυξημένη αντοχή στο φαινόμενο του ερπυσμού. 2018.
- [7] Leisha A Peterson and Kelly J Londry. Finite-element structural analysis: a new tool for bicycle frame design. *Bike Tech*, 5(2):1–9, 1986.
- [8] Derek Covill, Philippe Allard, Jean-Marc Drouet, and Nicholas Emerson. An assessment of bicycle frame behaviour under various load conditions using numerical simulations. *Procedia engineering*, 147:665–670, 2016.
- [9] Derek Covill, Steven Begg, Eddy Elton, Mark Milne, Richard Morris, and Tim Katz. Parametric finite element analysis of bicycle frame geometries. *Procedia Engineering*, 72:441–446, 2014.
- [10] Larry B Lessard, James A Nemes, and Patrick L Lizotte. Utilization of fea in the design of composite bicycle frames. *Composites*, 26(1):72–74, 1995.
- [11] Thomas Jin-Chee Liu and Huang-Chieh Wu. Fiber direction and stacking sequence design for bicycle frame made of carbon/epoxy composite laminate. *Materials & Design*, 31(4):1971–1980, 2010.

- [12] Ukoba Kingsley, Patrick Ehi Imoisili, and D Adgidzi. Finite element analysis of bamboo bicycle frame. *Journal of Advances in Mathematics and Computer Science*, pages 583–594, 2015.
- [13] PD Soden and BA Adeyefa. Forces applied to a bicycle during normal cycling. *Journal of Biomechanics*, 12(7):527–541, 1979.
- [14] Tom Boyd ML Hull and D Wootten. An improved accuracy six-load component pedal dynamometer for cycling. *Journal of biomechanics*, 29(8):1105–1110, 1996.