



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

“ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ”
Διευθυντής του Δ.Π.Μ.Σ: Καθηγητής Ε. Παπαδόπουλος

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΡΦΗΣ
ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ
ΣΕ ΑΓΩΝΕΣ ΠΟΔΗΛΑΣΙΑΣ ΠΙΣΤΑΣ**

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ:
ΖΩΗΣ ΔΙΟΝΥΣΗΣ
(ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΚΑΙ ΜΗΧ/ΚΟΣ Η/Υ)

ΕΠΙΒΛΕΨΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ.Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ - ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2011

Ζώης Διονύσης

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Η/Υ ΔΠΘ, 2008.

ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού ΕΜΠ, 2011.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|--|-----------|
| Πρόλογος..... | 1 |
| Περίληψη..... | 2 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ..... | 3 |
| 1.1 Βασικές Αρχές Μοντελοποίησης..... | 3 |
| 1.2 Φάσεις του Μηχανολογικού Σχεδιασμού..... | 8 |
| 1.3 Αναγκαίες θεωρήσεις για τον σχεδιασμό..... | 11 |
| 1.4 Σχεδιαστικά εργαλεία και πηγές | 12 |
| 1.5 Ασφάλεια και Αξιοπιστία προϊόντος..... | 14 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ..... | 18 |
| 2.1 Γενικά..... | 18 |
| 2.2 Ιστορική αναδρομή..... | 18 |
| 2.3 Ανατομία σκελετού ποδηλάτου..... | 21 |
| 2.4 Γεωμετρία πλαισίου (Σκελετού)..... | 25 |
| 2.5 Μηχανικές ιδιότητες υλικών..... | 29 |
| 2.6 Υλικά σκελετών ποδηλάτου..... | 32 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ..... | 41 |
| 3.1 Εισαγωγή..... | 41 |
| 3.2 Σκληρότητα..... | 45 |
| 3.3 Ιδιότητες Κρούσης..... | 46 |
| 3.4 Επιδράσεις της θερμοκρασίας..... | 47 |
| 3.5 Διαδικασίες επιλογής υλικών..... | 49 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ..... | 54 |
| 4.1 Εισαγωγή..... | 54 |
| 4.2 Δικτύωμα-Ορισμός..... | 55 |
| 4.3 Απλά Δικτυώματα..... | 58 |
| 4.4 Ανάλυση δικτυωμάτων με την μέθοδο των αρθρώσεων..... | 58 |
| 4.5 Ανάλυση δικτυωμάτων με την μέθοδο των τμημάτων..... | 60 |
| 4.6 Κατασκευές με πολλαπλές δυνάμεις..... | 61 |
| 4.7 Ανάλυση Πλαισίου..... | 61 |
| 4.8 Μηχανισμοί..... | 63 |
| 4.9 Η μέθοδος της αρχής διατήρησης ενέργειας..... | 64 |
| 4.10 Αρχή του εικονικού έργου..... | 66 |

| | |
|---|------------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ..... | 67 |
| 5.1 Εισαγωγή..... | 67 |
| 5.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων..... | 70 |
| 5.3 Γεωμετρίες των στοιχείων..... | 72 |
| 5.4 Η διαδικασία επίλυσης προβλημάτων FEA..... | 73 |
| 5.5 Παραγωγή πλέγματος..... | 74 |
| 5.6 Εφαρμογή Φορτίων..... | 77 |
| 5.7 Οριακές Συνθήκες..... | 78 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ: ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ..... | 79 |
| 6.1 Εισαγωγή..... | 79 |
| 6.2 Σχεδιαστικές επιλογές του Solidworks..... | 80 |
| 6.3 Παρουσίαση μοντέλων σκελετού ποδηλάτου..... | 84 |
| 6.4 Τεστ επιλογής υλικού και γεωμετρίας σωλήνων του σκελετού..... | 107 |
| 6.5 Ορισμός Φορτίσεων..... | 113 |
| 6.6 Αποτελέσματα στατικών φορτίσεων σκελετών ποδηλάτου..... | 125 |
| 6.7 Συμπεράσματα..... | 150 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α..... | 157 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β..... | 159 |

Πρόλογος

Ο σχεδιασμός αγωνιστικών ποδηλάτων αποτελεί μία αρκετά πολύπλοκη και απαιτητική διαδικασία, τον βασικό κορμό της οποίας αναλύει διεξοδικά η παρακάτω μεταπτυχιακή διατριβή. Ο τομέας του fine-tuning για σκελετούς αγωνιστικών ποδηλάτων, δεν είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένος στην χώρα μας, ωστόσο η διεθνής εμπειρία μας δείχνει ότι σαν μηχανική διαδικασία είναι απολύτως απαραίτητη και εντέλει καταφέρνει να συνδράμει τον αναβάτη στην κατάρριψη αγωνιστικών ρεκόρ. Η διαδικασία αυτή εκτός από την χρήση σε αγωνιστικά ποδήλατα, μπορεί να έχει και χρήση στα εμπορικά ποδήλατα καθορίζοντας χαρακτηριστικά όπως η λειτουργικότητα, η απόδοση, η αντικραδασμικότητα κ.α.

Η μεταπτυχιακή διατριβή υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ΔΠΜΣ "Συστήματα Αυτοματισμού" από τον Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Η/Υ κ. Ζώη Διονύση, υπό την επίβλεψη του κ. Καθηγητή Δ.Ε. Μανωλάκου και την επιτήρηση του υποψήφιου διδάκτορα κ. Αλέξανδρου Κιτσέλη.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω και πρωτίστως την οικογένεια μου, που όπως και όλες οι οικογένειες στην ελληνική πραγματικότητα, έχουν αναλάβει εξολοκλήρου το κόστος κατάρτισης και ερευνητικής δραστηριότητας των νέων επιστημόνων της χώρας, αντικαθιστώντας στην ουσία τον ανύπαρκτο κρατικό ρόλο χρηματοδότησης της έρευνας.

Θα ήθελα φυσικά να ευχαριστήσω εξίσου ιδιαίτερα τον κ. Καθηγητή Δ.Ε. Μανωλάκο, για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε στην ανάληψη και εκπλήρωση εκ μέρους μου της μεταπτυχιακής αυτής διατριβής.

Τέλος, να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Αλέξανδρο Κιτσέλη, χωρίς την συμβολή του οποίου η μεταπτυχιακή διατριβή δεν θα είχε εκπληρωθεί. Θέλω να τον ευχαριστήσω ιδιαίτερα για την παροχή των γεωμετρικών μοντέλων που σχεδίασε ο ίδιος, και τα οποία απέδωσαν αρκετά ενδιαφέροντα αποτελέσματα μέσω των προσομοιώσεων.

Ζώης Διονύσης
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Η/Υ
Φεβρουάριος 2011, Αθήνα, ΕΜΠ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο 1ο κεφάλαιο γίνεται μία βασική εισαγωγή στην μοντελοποίηση και στις αρχές που την διέπουν. Οριοθετούνται οι φάσεις της μηχανολογικής σχεδίασης και οι υποχρεώσεις θεώρησης του μηχανικού.

Στο 2ο κεφάλαιο γίνεται μία ιστορική επισκόπηση των εμπορικών μοντέλων του μοντέλου καθώς επίσης και ανάλυση των μηχανικών μερών από τα οποία αποτελείται ένας κλασικός τύπος σκελετού. Παράλληλα εξετάζονται οι γεωμετρίες και τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας.

Στο 3ο κεφάλαιο, γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών και παρατίθενται διάφοροι μέθοδοι επιλογής υλικού κατά τον σχεδιασμό.

Στο 4ο κεφάλαιο, θίγονται βασικά ζητήματα στατικής ανάλυσης δικτυωμάτων, με την μέθοδο των αρθρώσεων και των τμημάτων, όπως και η στατική ανάλυση μηχανισμών.

Στο 5ο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, στις μεθόδους πλεγματοποίησης, στις οριακές συνθήκες κ.α.

Τέλος στο 6ο κεφάλαιο περιλαμβάνονται τα σχέδια των μοντέλων που εξετάστηκαν, τα αποτελέσματα της επιλογής υλικού και γεωμετρίας σωλήνων, τα σενάρια στατικής φόρτισης που χρησιμοποιήθηκαν, τα αποτελέσματα παραμορφώσεων και απορροφούμενης ενέργειας για κάθε ξεχωριστό σκελετό και τέλος υπάρχει ειδική ενότητα με συγκεντρωμένα αποτελέσματα και συμπερασματική ανάλυση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.

Το έργο της μοντελοποίησης ή αλλιώς της μοντελοποίησης στερεών αποτελεί ένα συνεκτικό σύνολο αρχών με σκοπό την μαθηματική και υπολογιστική αναπαράσταση τρισδιάστατων στερεών. Η στερεά μοντελοποίηση διακρίνεται από τους συναφείς τομείς της Γεωμετρικής μοντελοποίησης και των Computer Graphics, αφού η φυσική και έγκυρη πιστότητα διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο. Οι δύο πρώτοι τομείς που αναφέρθηκαν καθορίζουν το αντικείμενο του υπολογιστικά υποβοηθούμενου σχεδιασμού (CAD) που θα αναλύσουμε στην συνέχεια, ενώ παράλληλα επικουρούν και υποστηρίζουν την δημιουργία, ανταλλαγή, οπτικοποίηση και γενικότερα επεξεργασία των ψηφιακών αναπαραστάσεων φυσικών αντικειμένων.

Η χρήση των τεχνικών στερεάς μοντελοποίησης επιτρέπει την αυτοματοποίηση πολλών σύνθετων μηχανικών υπολογισμών που αποτελούν μέρος της διαδικασίας του σχεδιασμού. Η προσομοίωση, ο σχεδιασμός, η επαλήθευση των διαδικασιών, εργασίες όπως το machining και η συναρμολόγηση (assembly) αποτελούν διεργασίες-καταλύτες για την ανάπτυξη της στερεάς μοντελοποίησης. Πρόσφατα, το φάσμα των υποστηριζόμενων εφαρμογών έχει διευρυνθεί για να συμπεριλάβει την κατασκευή μεταλλικών φύλλων, την χύτευση με έγχυση, την συγκόλληση, τους σωλήνες δρομολόγησης κ.α. Πέρα από την χρήση της στην παραδοσιακή κατασκευή, οι τεχνικές στερεάς μοντελοποίησης χρησιμεύουν ως βάση για την ταχεία ανάπτυξη πρωτοτύπων, την ψηφιοποίηση φυσικών αντικειμένων και για εφαρμογές αντίστροφης μηχανικής (reverse engineering) όπως η ανακατασκευή στερεών μέσω δειγματοληψίας σημείων σε φυσικά αντικείμενα. Άλλες εφαρμογές είναι η μηχανική ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, ο

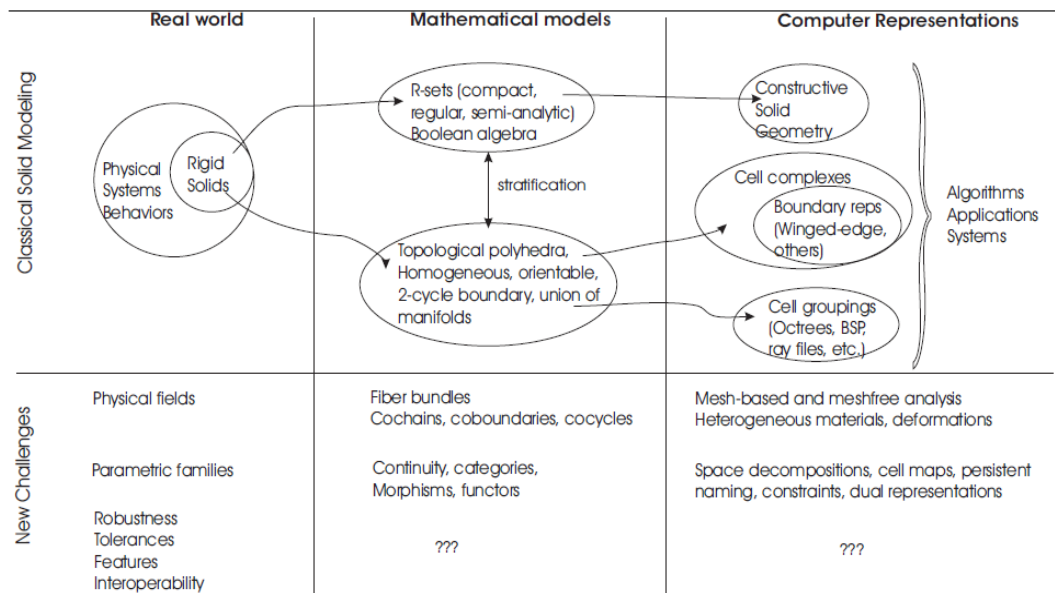
σχεδιασμός κίνησης η κινηματική και δυναμική ανάλυση των μηχανισμών κοκ. Ένα κεντρικό πρόβλημα σε όλες αυτές τις εφαρμογές είναι ο βαθμός αποτελεσματικής αναπαράστασης και χειρισμού της τρισδιάστατης γεωμετρίας, με τρόπο ο οποίος θα είναι συνεπής με τη φυσική συμπεριφορά των πραγματικών αντικειμένων. Η έρευνα και η ανάπτυξη της στερεάς μοντελοποίησης αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά πολλά από τα ζητήματα αυτά, που συνεχίζουν να είναι το επίκεντρο του τομέα του υπολογιστικά-υποβοηθούμενου σχεδιασμού(CAD).

Η έννοια της μοντελοποίησης στερεών, όπως εφαρμόζεται σήμερα, αναπτύχθηκε στις αρχές μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1970, απαντώντας σε μια πολύ συγκεκριμένη ανάγκη για πληροφοριακή πληρότητα των μηχανολογικών και γεωμετρικών συστημάτων μοντελοποίησης. Η μοντελοποίηση στερεών έχει λοιπόν εισαχθεί ως μία καθολική τεχνολογία για την ανάπτυξη συστημάτων μηχανικής που θα εγγυώνται την αξιοπιστία με την παραπάνω επακριβής έννοια. Και είναι αυτή η βασική και αυστηρή αρχή της μοντελοποίησης στερεών συγκεκριμένα η επακριβής αναπαράσταση του φυσικού κόσμου.

- Κάθε υλοποιημένη αναπαράσταση πρέπει να είναι έγκυρη υπό την έννοια ότι θα αντιστοιχεί σε κάποιο υπαρκτό και πραγματικό αντικείμενο.
- Κάθε υλοποιημένη αναπαράσταση θα πρέπει να αντιπροσωπεύει αναμφίβολα το αντίστοιχο φυσικό αντικείμενο
- Η αναπαράσταση θα πρέπει να υποστηρίζει (τουλάχιστον στην αρχή) κάθε γεωμετρικό ζήτημα που μπορεί να εγερθεί από το φυσικό αντικείμενο.

Η πληροφοριακή πληρότητα εμφανίζεται συχνά ως τελευταία από αυτές τις απαιτήσεις, καθώς απορρέει από τις δύο πρώτες. Αυτό συνεπάγεται ότι μπορούν να υπάρξουν παραπάνω από μία αναπαραστάσεις του ίδιου φυσικού αντικειμένου, ωστόσο αυτές θα πρέπει να είναι συνεκτικές. Οι δυσκολίες εμφανίζονται επειδή οι απαιτήσεις ορίζονται από την άποψη των «φυσικών αντικειμένων» που δεν μπορούν να υποβληθούν σε αντικειμενικό έλεγχο και συγκρίσεις. Επί παραδείγματι, ένας χειριστής μπορεί πράγματι να είναι σε θέση να δώσει μια ασαφή και υποκειμενική εκτίμηση της απόδοσης ενός ηλεκτρονικού προγράμματος, αλλά αντιθέτως δεν υπάρχει κάποιο πρόγραμμα που να μπορεί να ελέγχει αν οι δοθέντες αναπαραστάσεις ενός προβλήματος είναι πληροφοριακά ολοκληρωμένες, μέχρις ότου και εκτός εάν η έννοια του φυσικού αντικειμένου καθοριστεί με όρους υπολογίσιμων μαθηματικών ιδιοτήτων ανεξάρτητα από κάθε υπολογιστική αναπαράσταση. Χωρίς αυτούς τους παραπάνω ορισμούς, δεν μπορούν να υπάρχουν εγγυήσεις, αυτοματοποίηση λειτουργιών, πρότυπα και εντέλει μοντελοποίηση στερεών.

Πιο συγκεκριμένα οι Requicha and Voelcker πρότειναν το παρακάτω σχήμα μοντελοποίησης, το οποίο επηρέασε και εντέλει καθιέρωσε την σύγχρονη μοντελοποίηση στερεών όπως είναι γνωστή στις μέρες μας. Τα αντικείμενα του φυσικού κόσμου και οι σχετικές τους διαδικασίες περιγράφονται με αφηρημένο τρόπο από τα αξιωματικά μαθηματικά μοντέλα.



Σχήμα 1.1

Το πεδίο των μαθηματικών μοντέλων και διεργασιών χρησιμεύουν επιπλέον στον ορισμό του αντίστοιχου τύπου δεδομένων (τάξη-class) που αναπαριστά ένας υπολογιστής (με πολλαπλούς τρόπους) από ένα αντιπροσωπευτικό «σχήμα». Τυπικά, ένα σχήμα αναπαράστασης μπορεί να οριστεί ως η αντιστοιχίση μίας υπολογιστικής έννοιας σε ένα σαφώς καθορισμένο μαθηματικό αντικείμενο. Τέλος, τα σχήματα αναπαράστασης και οι παρελκόμενοι αλγόριθμοι είναι οργανωμένα σε συστήματα και εφαρμογές λογισμικού που εξομοιώνουν τη συμπεριφορά των αντικειμένων και των διεργασιών του πραγματικού κόσμου. Στο σημείο αυτό αρμόζει να αναλύσουμε μία ακόμη κρίσιμη διαδικασία της μηχανικής κατασκευής που δεν είναι άλλη από τον μηχανολογικό σχεδιασμό.

Ο μηχανολογικός σχεδιασμός αποτελεί ένα σύνθετο εγχείρημα, το οποίο απαιτεί πολλές και ετερογενείς ικανότητες. Κάθε πολυδιάστατο και απαιτητικό εγχείρημα πρέπει να υποδιαιρείται σε μια σειρά από απλές διεργασίες. Η πολυπλοκότητα ενός εγχειρήματος ή πιο γενικά προβλήματος, απαιτεί μια συγκεκριμένη ακολουθία ενεργειών, μέσω της οποίας θα ενταχθούν κάποιες τεχνικές οι οποίες μετέπειτα θα επαναλαμβάνονται με τελικό σκοπό την επίλυση του προβλήματος.

Στην αρχή θα προσεγγίσω τον χαρακτήρα του μηχανικού σχεδιασμού στην φύση του, για να εξειδικεύσω έπειτα την προσέγγιση στον μηχανολογικό σχεδιασμό. Ο σχεδιασμός είναι στην ουσία του μία επαναληπτική διαδικασία με πολλές αλληλεπιδραστικές και δια-δραστικές φάσεις. Η εποχή της πληροφορίας έχει σαφώς δώσει πολλαπλές δυνατότητες και έχει πολλαπλασιάσει τις πηγές πληροφόρησης που μπορούν να επικουρήσουν την προσπάθεια του μηχανικού για διεκπεραίωση ενός έργου. Οι παράμετροι όμως αυτοί έχουν οδηγήσει σε ένα κρίσιμο trade-off μεταξύ πληροφόρησης και απαιτήσεων. Έτσι την ίδια στιγμή που υπάρχει ένας ολόκληρος γαλαξίας πηγών πληροφόρησης, σε αμελητέο κόστος και σε ευχειρίσιμη μορφή, την ίδια ώρα οι απαιτήσεις σχεδίασης για τον μηχανικό είναι κατά πολλές τάξεις αυστηρότερες αν συγκριθούν με το καθεστώς μόλις της προηγούμενης εικοσαετίας. Η πολυνομία, πολύ-προτυποποίηση, απαιτούν πολύ περισσότερες ώρες μελέτης και ανάλυσης μέχρι την υλοποίηση του έργου, ενώ ταυτόχρονα οι απαιτήσεις της κοινωνίας και των επιχειρήσεων έχουν βάση την λογική fast-track και fast-construction. Οι αντιφάσεις αυτές συμβιβάζονται μόνο από επιστήμονες πολύπλοκης μόρφωσης και ετερογενών ικανοτήτων.

Ταυτόχρονα τα σχεδιαστικά εργαλεία του μηχανικού έχουν τα τελευταία χρόνια πολλαπλασιαστεί, ικανοποιώντας τις ανάγκες διαφόρων επιπέδων γνώσης αλλά και χρήσης. Τα παράπλευρα οφέλη είναι σαφώς μεγάλα, αφού ελαχιστοποιούν τόσο τα κόστη σχεδιασμού, προγραμματισμού, ελέγχου, υλοποίησης, αποθήκευσης, προβολής κ.α. όσο και τον ίδιο τον χρόνο που απαιτείται για την υλοποίηση ενός project. Είναι ατσαλωμένη η άποψη, ότι ο μηχανικός οφείλει να διακατέχεται από ανταγωνιστικές προδιαθέσεις στον χώρο απασχόλησης του (κάτι που αναμφισβήτητα, και ανεξάρτητα από την ανταγωνιστικότητα του μηχανικού, τον βελτιώνει ως επιστήμονα), αλλά επιπλέον ακόμα πιο κρίσιμο είναι επίσης να εμφορείται από υψηλό αίσθημα ευθύνης και επαγγελματικής ηθικής. Μόνο έτσι θα μπορεί να αναλαμβάνει και να διεκπεραιώνει την ευθύνη που αρμόζει στον μηχανικό: τα έργα δηλαδή υψηλής προστιθέμενης και κοινωνικής αξίας.

Σε αυτήν λοιπόν την επαναλαμβανόμενη διαδικασία, ξεχωριστό και ιδιαίτερο χώρο κατέχουν οι Κώδικες και τα Πρότυπα (που καθορίζονται από διεθνείς αλλά και κρατικούς οργανισμούς), τα πανταχού παρόντα οικονομικά (που στην εποχή μας κατέχουν ακόμα μεγαλύτερη κρισιμότητα), η ασφάλεια των προϊόντων και οπωσδήποτε χρειάζεται ιδιαίτερη φροντίδα για την διασφάλιση της αξιοπιστίας των προϊόντων. Η μηχανική αντοχή ενός μηχανικού στοιχείου σχετίζεται συχνά άμεσα με τα μεγέθη της δύναμης και της πίεσης. Τα ζητήματα της αβεβαιότητας είναι αναπόφευκτα σαφώς στον μηχανικό σχεδιασμό, και η συνήθης αντιμετώπιση τους περνάει μέσα από τον αποκαλούμενο παράγοντα σχεδιασμού (design factor) και τον παράγοντα ασφαλείας (factor of safety), είτε μιλάμε για μία ντετερμινιστική είτε για μία στατιστική προσέγγιση. Η τελευταία προσέγγιση παραλλάζει την αξιοπιστία του σχεδιασμού για αυτό και απαιτείται η ύπαρξη

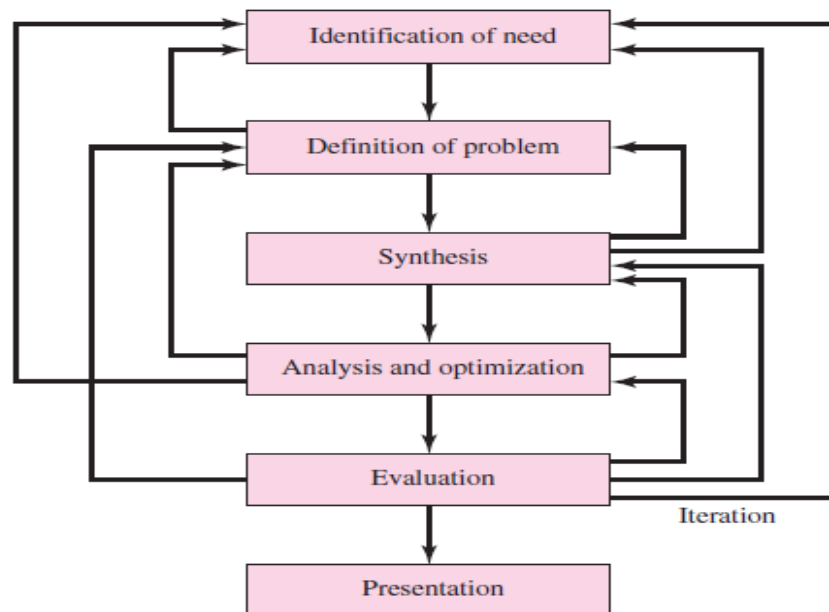
επαρκών στατιστικών δεδομένων. Στον μηχανικό σχεδιασμό, οι παράγοντες που επιπλέον πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψιν είναι μεταξύ άλλων οι διαστάσεις, οι ανοχές, οι μονάδες και οι υπολογισμοί.

Η διαδικασία του σχεδιασμού μπορεί να οριστεί είτε ως η μορφοποίηση ενός σχήματος-πλάνου για την ικανοποίηση μίας ορισμένης και συγκεκριμένης ανάγκης είτε ως η πράξη της λύσης ενός προβλήματος. Εάν το πλάνο έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός αντικειμένου με φυσική παρουσία, τότε αυτό το αντικείμενο –το προϊόν θα πρέπει να εκπληρώνει τις απαιτήσεις λειτουργικότητας, ασφάλειας, χρηστικότητας, αξιοπιστίας, ανταγωνιστικότητας, κατασκευασιμότητας και εμπορευσιμότητας. Η εκπλήρωση τους είναι προϋπόθεση για την ίδια την ύπαρξη του σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός είναι μία καινοτόμος και ιδιαίτερα επαναληπτική διαδικασία, που σαφώς εμπλέκει την λήψη αποφάσεων. Πιο συγκεκριμένα, οι αποφάσεις τις περισσότερες φορές πρέπει να λαμβάνονται είτε υπό το καθεστώς ελλιπών πληροφοριών, είτε με τις απολύτως απαραίτητες πληροφορίες είτε ακόμα με την ύπαρξη πληθώρας αντιφατικών πληροφοριών. Απαιτείται επιπλέον σε ορισμένες περιπτώσεις να ληφθούν γενναίες ή μη τεκμηριωμένες αποφάσεις διατηρώντας ωστόσο το δικαίωμα διόρθωσης αυτών κατά την πορεία εξέτασης του προβλήματος. Κοινό σημείο των παραπάνω, είναι ότι ο μηχανικός θα πρέπει πάντα να αναλαμβάνει και να αισθάνεται οικεία με τον ρόλο του αποφασιστικού επαγγελματία αλλά και με το χρέος επίλυσης παντός είδους προβλήματος. Ο σχεδιασμός είναι μία δραστηριότητα έντονα επικοινωνιακή κατά την οποία χρησιμοποιούνται λέξεις και εικόνες, ενώ παράλληλα γίνεται χρήση γραπτών και προφορικών μορφών αναφοράς. Οι μηχανικοί απαιτείται να επικοινωνούν αποτελεσματικά και να συνδιαλέγονται με επαγγελματίες πολλών και ετερογενών ειδικοτήτων. Αυτές οι ικανότητες είναι σημαντικές και η επιτυχία του μηχανικού εξαρτάται άμεσα από αυτές. Τα προσωπικά αποθέματα ενός σχεδιαστή σε ζητήματα δημιουργικότητας, ικανότητας επικοινωνίας και δεξιότητας επίλυσης προβλημάτων, είναι συνυφασμένα και όχι ανεξάρτητα με την γνώση των τεχνολογιών και των βασικών αρχών της μηχανικής. Τα εργαλεία του μηχανικού (όπως είναι τα μαθηματικά, η στατιστική, οι υπολογιστές, τα γραφικά, οι γλώσσες προγραμματισμού κ.α.) επιλέγονται και συνδυάζονται αποτελεσματικά για να σχηματίσουν ένα πλάνο που όταν υλοποιηθεί θα παράξει ένα προϊόν λειτουργικό, ασφαλές, ανταγωνιστικό, χρηστικό, κατασκευάσιμο και φυσικά εμπορεύσιμο, ανεξάρτητα από το υποκείμενο της κατασκευής ή χρήσης του προϊόντος.

1.2 ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Για να οριστούν οι φάσεις του σχεδιασμού θα πρέπει να ξεκαθαριστεί εκ των προτέρων τι πρακτικά εννοούμε ως ενέργειες σχεδιασμού. Τι είναι αυτές δηλαδή; Είναι απλά κάποιες ιδέες που αποτυπώνονται σε μία κόλλα χαρτί; Τι γίνεται στην συνέχεια; Ποιοι παράγοντες επηρεάζουν και ελέγχουν τις αποφάσεις που θα εγκριθούν; Τέλος, πώς η διαδικασία αυτή τελειώνει;

Το σχήμα της διαδικασίας, οι ενέργειες που πραγματοποιούνται από την αρχή μέχρι το τέλος περιγράφονται συνήθως από το σχήμα 1.2 παρακάτω, το οποίο δίνει ένα αραιό αλλά έγκυρο πλαίσιο ενεργειών. Η διαδικασία αρχίζει με την αναγνώριση μιας ανάγκης και με την απόφαση να κάνουμε κάτι για την εξυπηρέτηση αυτής. Μετά από πολλές επαναλήψεις, η διαδικασία ολοκληρώνεται,



Σχήμα 1.2 Τα βήματα μηχανολογικής σχεδίασης.

με την παρουσίαση των σχεδίων για την ικανοποίηση της ανάγκης. Ανάλογα με τη φύση της εργασίας του σχεδιασμού, αρκετά στάδια του σχεδιασμού μπορεί να επαναλαμβάνονται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του προϊόντος, από την αρχή μέχρι το τέλος. Στην συνέχεια θα επεκταθούμε αναλυτικότερα στις επιμέρους διεργασίες του σχεδιασμού.

Ο προσδιορισμός της ανάγκης εκκινεί σε γενικά πλαίσια την διαδικασία του σχεδιασμού. Η αναγνώριση της ανάγκης και η διατύπωση της αποτελεί συχνά μια

ιδιαίτερα δημιουργική πράξη, διότι η ανάγκη μπορεί να είναι απλά και μόνο μια αόριστη δυσφορία, ένα αίσθημα ανησυχίας, ή μια αίσθηση ότι κάτι δεν πάει καλά. Η ανάγκη πολλές φορές δεν είναι εμφανής και ευδιάκριτη. Η ανάγκη αυτή συχνά δεν είναι καθόλου εμφανής. Η αναγνώριση συνήθως προκαλείται από μία συγκεκριμένη δυσμενή περίπτωση ή από ένα σύνολο τυχαίων περιστάσεων που προκύπτουν σχεδόν ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, η ανάγκη να ασχοληθούμε με μια μηχανή συσκευασίας τροφίμων μπορεί να υποδεικνύεται από το επίπεδο θορύβου, από μία απόκλιση στο βάρος της συσκευασίας είτε από μικρή αλλά αισθητή διαφορά στην ποιότητα της συσκευασίας ή του περιτυλίγματος.

Υπάρχει σαφής διαφορά μεταξύ του προσδιορισμού της ανάγκης και του ορισμού του προβλήματος. Ο ορισμός του προβλήματος είναι πιο συγκεκριμένη διεργασία και περιλαμβάνει όλες τις προδιαγραφές για το αντικείμενο που πρόκειται να σχεδιαστεί. Οι προδιαγραφές είναι οι ποσότητες εισόδου και εξόδου, τα χαρακτηριστικά και οι διαστάσεις του χώρου που το αντικείμενο πρέπει να καταλάβει, και όλοι οι περιορισμοί σε αυτές τις ποσότητες. Μπορούμε να θεωρούμε το αντικείμενο που θα σχεδιαστεί ως ένα μαύρο κουτί. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να διευκρινισθούν οι εισοδοί και έξοδοι του κουτιού, μαζί με τα χαρακτηριστικά και τις οριακές τους τιμές. Οι προδιαγραφές καθορίζουν το κόστος, τον αριθμό προϊόντων που θα κατασκευαστεί, την αναμενόμενη διάρκεια ζωής, το εύρος, την θερμοκρασία λειτουργίας και την αξιοπιστία. Τα καθορισμένα χαρακτηριστικά μπορούν να περιλαμβάνουν την ταχύτητα, τους περιορισμούς θερμοκρασίας, το μέγιστο εύρος, τις αναμενόμενες διακυμάνσεις των μεταβλητών, τους περιορισμούς διαστάσεων, βάρους κ.α.

Υπάρχουν πολλές επαγόμενες προδιαγραφές που προκύπτουν είτε από το ιδιαίτερο περιβάλλον του σχεδιαστή είτε από τη φύση του ίδιου του προβλήματος. Οι διαθέσιμες διεργασίες κατασκευής μαζί με τις δυνατότητες μίας συγκεκριμένης εγκατάστασης υποβάλουν περιορισμούς στην ελευθερία του σχεδιαστή και επομένως αποτελούν μέρος των επαγόμενων προδιαγραφών. Μπορεί για παράδειγμα μία μικρή εργοστασιακή μονάδα, να μην διαθέτει μηχανήμα ψυχρών εργασιών. Γνωρίζοντας αυτό, ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει άλλες μεθόδους επεξεργασίας μετάλλων οι οποίες διενεργούνται στη μονάδα. Οι διαθέσιμες δεξιότητες του εργατικού δυναμικού και η ανταγωνιστική συμπεριφορά, συνιστούν και αυτά έμμεσους περιορισμούς. Οτιδήποτε περιορίζει την ελευθερία επιλογής του σχεδιαστή είναι ένας περιορισμός. Για παράδειγμα παρά τα πολλά υλικά και τα μεγέθη που αναφέρονται στους καταλόγους ενός προμηθευτή, δεν είναι όλα αυτά εύκολα διαθέσιμα και πολλές φορές τα αποθέματα ενός συγκεκριμένου υλικού είναι μηδενικά. Επιπλέον, πολλοί προμηθευτές ακολουθούν πολιτική, κατά την οποία διατηρούν στο απόθεμα μόνο ένα μέρος από τα υλικά και τα μεγέθη που διαφημίζουν ότι παρέχουν.

Η σύνθεση ενός σχήματος το οποίο ενώνει τα διάφορα στοιχεία του συστήματος αναφέρεται ορισμένες φορές ως εφεύρεση της έννοιας ή ως σχεδιασμός έννοιας. Αυτό είναι το πρώτο και το πιο σημαντικό βήμα στην διεργασία της σύνθεσης. Θα πρέπει να προταθούν, διερευνηθούν και ποσοτικοποιηθούν πολλά και διάφορα σχήματα σύμφωνα με τα καθιερωμένα μετρικά πρότυπα. Όσο προχωράει η μορφοποίηση του σχήματος, υπάρχει ανάγκη να διεξαχθούν αναλύσεις για να εκτιμηθεί κατά πόσον η απόδοση του συστήματος είναι ικανοποιητική ή καλύτερη, και, εάν ναι, να εξακριβωθεί η αποτελεσματι-

κότητα του. Τα σχήματα συστημάτων που δεν επιτυγχάνουν στην ανάλυση, αναθεωρούνται, βελτιώνονται ή απορρίπτονται. Εκείνα που διαθέτουν κάποια δυναμική επιτυχία βελτιστοποιούνται με στόχο την καλύτερη δυνατή απόδοση για αυτό το σχήμα. Τα ανταγωνιζόμενα σχήματα συγκρίνονται διεξοδικά, έτσι ώστε να οδηγηθούμε στην επιλογή του πιο ανταγωνιστικού προϊόντος.

Το Σχήμα 1-2 δείχνει ότι η σύνθεση, η ανάλυση και η βελτιστοποίηση σχετίζονται άρρηκτα και επαναληπτικά μεταξύ τους. Όπως προηγουμένως υπογραμμίστηκε, ο σχεδιασμός είναι μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία προχωράμε μέσα από διάφορα στάδια, αξιολογούμε τα αποτελέσματα, και στη συνέχεια επιστρέφουμε σε ένα προηγούμενο στάδιο της διαδικασίας. Έτσι, μπορούμε να συνθέσουμε διάφορα στοιχεία ενός συστήματος, να τα αναλύσουμε και βελτιστοποιήσουμε αλλά και να επιστρέψουμε στην σύνθεση για να δούμε τι επιπτώσεις έχουν αυτά για τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος. Ωστόσο, όπως συμβαίνει συχνά στο σχεδιασμό, αυτά τα στοιχεία δεν είναι ανεξάρτητα.

Επί παραδείγματι, ο σχεδιασμός ενός άξονα με προδιαγραφές τάσης και παραμόρφωσης, απαιτείται να γνωρίζουμε τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις. Εάν οι δυνάμεις μεταδίδονται μέσω ρουλεμάν, είναι απαραίτητο να γνωρίζονται οι προδιαγραφές τους, προκειμένου να καθοριστούν οι δυνάμεις που θα διαβιβαστούν στον άξονα. Όμως και η ίδια η χρήση του ρουλεμάν απαιτεί την γνώση των γεωμετρικών του ιδιοτήτων. Σαφώς, θα πρέπει να γίνουν προσεγγιστικές εκτιμήσεις προκειμένου να προχωρήσει ο σχεδιασμός, επαναλαμβάνοντας και αναθεωρώντας κάποιες διαδικασίες, και μέχρι να οριστικοποιηθεί μία εκδοχή του σχεδιασμού, η οποία θα καλύπτει τους περιορισμούς του κάθε μεμονωμένου στοιχείου, καθώς και τις γενικές προδιαγραφές σχεδιασμού. Τόσο η ανάλυση όσο και η βελτιστοποίηση απαιτούν την κατασκευή και επινόηση αφηρημένων μοντέλων του συστήματος, τα οποία θα δεχθούν κάποια μορφή μαθηματικής ανάλυσης.

Τα μοντέλα αυτά τα ονομάζουμε μαθηματικά μοντέλα. Με την δημιουργία τους ευελπιστείται ότι θα μπορούν να προσομοιώσουν όσο δυνατόν πιστά το φυσικό σύστημα. Όπως δείχνει και το σχήμα 1-2, η αξιολόγηση είναι μια σημαντική φάση της συνολικής διαδικασίας σχεδιασμού. Κατά την φάση της αξιολόγησης αποδεικνύεται ή όχι η επιτυχία ή μη ενός σχεδιασμού και συνήθως περιλαμβάνει και την δοκιμή ενός πρωτοτύπου στο εργαστήριο. Σε αυτό το σημείο είναι επιθυμητό να ανακαλυφθεί, εάν το σχέδιο ικανοποιεί πραγματικά τις ανάγκες. Προέκυψε τελικά αξιόπιστο; Θα ανταγωνίζεται επιτυχώς παρόμοια προϊόντα; Είναι οικονομικό στην κατασκευή και στη χρήση; Είναι εύκολα διατηρήσιμο και προσαρμόσιμο; Τα κέρδη θα προκύψουν από την πώληση ή από την χρήση του; Πόσο πιθανό είναι να προκαλέσει νομοθετικές ή κατά τα πρότυπα ασυμβατότητες; Μπορεί εύκολα και ανώδυνα να ασφαλιστεί ή ακόμα θα είναι εφικτή η εγγύηση του προϊόντος και για πόσο χρόνο; Είναι πιθανό να χρειαστεί η αντικατάσταση ελαττωματικών εξαρτημάτων ή και συστημάτων;

Επιπλέον η επικοινωνία του σχεδιασμού στους υπόλοιπους είναι το τελικό ζωτικής σημασίας βήμα, στην διαδικασία σχεδιασμού. Αναμφίβολα, υπάρχουν πολλά μεγάλα σχέδια, πολλές εφευρέσεις και εργασίες που έχουν χαθεί στην ιστορία μόνο και μόνο επειδή οι συντάκτες ήταν ανίκανοι ή απρόθυμοι να εξηγήσουν τα επιτεύγματά τους σε άλλους. Η παρουσίαση είναι δουλειά πωλητή. Ο μηχανικός, κατά την παρουσίαση μιας νέας λύσης μπροστά στο

διοικητικό, διευθυντικό, ή εποπτικό προσωπικό, προσπαθεί να τους πουλήσει ή να τους πείσει ότι αυτή η λύση είναι μια καλύτερη από τις εναλλακτικές. Αν αυτό δεν μπορεί να γίνει με επιτυχία, ο χρόνος και η προσπάθεια που δαπανήθηκε για την υλοποίηση του σχεδιασμού θα είναι σε μεγάλο βαθμό ανεκμετάλλευτες. Όταν οι σχεδιαστές πουλούν μια νέα ιδέα, πουλούν τους ίδιους τους, τους εαυτούς. Αν αυτοί επανειλημμένα επιτυγχάνουν την πώληση ιδεών, σχεδίων και νέων λύσεων στην Διοίκηση, τότε θα αρχίζουν να παίρνουν αυξήσεις των μισθών τους και μπόνους. Στην πραγματικότητα, αυτός είναι και ο τρόπος με τον οποίο κάποιος πετυχαίνει στο επάγγελμά του.

1.3 ΑΝΑΓΚΑΙΕΣ ΘΕΩΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ

Μερικές φορές, η δύναμη που απαιτείται από ένα στοιχείο του συστήματος είναι σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας και των διαστάσεων του στοιχείου. Σε αυτήν την περίπτωση, εκτιμείται ότι η δύναμη είναι καθοριστικός παράγοντας του σχεδιασμού. Όταν αναφερόμαστε στις θεωρήσεις του σχεδιασμού, υπονοούμε τα χαρακτηριστικά εκείνα που επηρεάζουν καταλυτικά τον σχεδιασμό ενός στοιχείου ή ίσως και ολόκληρο το σύστημα. Συνήθως οι καταλυτικοί αυτοί παράγοντες αποτελούν έναν μεγάλο αριθμό χαρακτηριστικών, και τα οποία πρέπει να μπαίνουν σε προτεραιότητα για μια δεδομένη κατάσταση σχεδιασμού. Μερικά από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του μηχανικού σχεδιασμού, μπορούν να συνοψισθούν παρακάτω (όχι απαραίτητα κατά σειρά κρισιμότητας):

- 1 Λειτουργικότητα
- 2 Δύναμη/πίεση
- 3 Παραμόρφωση/εκτροπή/δυσκαμψία
- 4 Φθορά
- 5 Διάβρωση
- 6 Ασφάλεια
- 7 Αξιοπιστία
- 8 Κατασκευασιμότητα
- 9 Χρηστικότητα
- 10 Κόστος
- 11 Τριβή
- 12 Βάρος
- 13 Χρόνος ζωής

- 14 Θόρυβος (ηλεκτρικός, ακουστικός κ.α.)
- 15 Εμφάνιση
- 16 Σχήμα
- 17 Μέγεθος
- 18 Έλεγχος
- 19 Θερμικές ιδιότητες
- 20 Επιφάνεια
- 21 Λίπανση
- 22 Εμπορευσιμότητα
- 23 Συντήρηση
- 24 Όγκος
- 25 Αξιοπιστία
- 26 Ανακατασκευή/Αποκατάσταση

Μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι πλήρως εξαρτημένα από τις διαστάσεις, το υλικό, την επεξεργασία, καθώς και με την ένωση των στοιχείων του συστήματος. Αρκετά χαρακτηριστικά μπορεί να είναι αλληλένδετα, και επιδρούν στη διαμόρφωση του συνολικού συστήματος.

1.4 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ

Στην εποχή μας, ο μηχανικός διαθέτει μια μεγάλη ποικιλία εργαλείων και πόρων που προσφέρονται επικουρικά στην επίλυση των προβλημάτων σχεδιασμού. Οι χαμηλού-κόστους μικροϋπολογιστές μαζί με τα ισχυρά πακέτα λογισμικού αποτελούν εργαλεία τεράστιας δυναμικότητας για τον σχεδιασμό, την ανάλυση και την προσομοίωση των μηχανικών μερών. Εκτός από αυτά τα εργαλεία, ο μηχανικός πρέπει πάντα να συμβουλευείται τις τεχνικές πληροφορίες, είτε αυτές έχουν την μορφή επιστημονικών έργων είτε αφορούν φυλλάδια και καταλόγους κατασκευαστών. Και σε αυτήν την περίπτωση, ο υπολογιστής μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη συγκέντρωση των πληροφοριών.

Υπολογιστικά εργαλεία.

Ο υπολογιστικά υποβοηθούμενος σχεδιασμός (CAD), επιτρέπει την ανάπτυξη τρισδιάστατων (3-D) σχεδίων, από τα οποία μπορούν να προκύψουν οι συμβατικές δισδιάστατες όψεις, κάνοντας χρήση επιπλέον της αυτόματης διαστασιολόγησης. Επιπλέον μπορούν να οριστούν οι διαδρομές των εργαλείων για την κατασκευή των πρωτοτύπων, και ο ορισμός τους να προκύψει κατευθείαν από τα μοντέλα 3-D. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα μέρη του πρωτοτύπου μπορούν

να δημιουργηθούν απευθείας από μία 3-D βάση δεδομένων, χρησιμοποιώντας την μέθοδο της ταχείας προτυποποίησης και κατασκευής (stereolithography- paperless design)!

Ένα άλλο πλεονέκτημα των δεδομένων 3-D, είναι ότι επιτρέπουν τον ταχύ και ακριβή υπολογισμό ιδιοτήτων όπως η μάζα, το κέντρο βάρους, και οι μάζες αδρανείας. Άλλες γεωμετρικές ιδιότητες όπως το εμβαδό κάποιων περιοχών είτε οι αποστάσεις μεταξύ κάποιων σημείων, υπολογίζονται εξίσου εύκολα. Υπάρχουν πάρα πολλά πακέτα λογισμικού CAD και κάθε μέρα προκύπτουν καινούρια. Ενδεικτικά μερικά από αυτά είναι : Aries, AutoCAD, CadKey, I-Deas, Unigraphics, Solid Works και ProEngineer.

Ο όρος υπολογιστικά υποβοηθούμενος μηχανικός σχεδιασμός (CAE) χαρακτηρίζει γενικά όλες τις σχετικές με υπολογιστή μηχανολογικές εφαρμογές. Με τον ορισμό αυτό, το CAD μπορεί να θεωρηθεί ως υποσύνολο του CAE. Μερικά πακέτα εκτελούν ειδική τεχνική ανάλυση και/ή προσομοίωση διεργασιών, τα οποία βοηθούν τον σχεδιαστή, ωστόσο δεν θεωρούνται εργαλεία σχεδιασμού, κάτι που είναι το CAD. Τέτοιου είδους λογισμικά εντάσσονται σε δύο κατηγορίες: μηχανικο-στρεφή και μη μηχανικο-στρεφή. Μερικά παραδείγματα μηχανικο-στρεφούς λογισμικού τα οποία θα μπορούσαν επίσης να ενταχθούν σε ένα σύστημα CAD-περιλαμβάνουν τα προγράμματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA), προγράμματα ανάλυσης της τάσης και των παραμορφώσεων δονήσεων και μεταφοράς θερμότητας (π.χ., Algor, ANSYS, και MSC / NASTRAN). Υπάρχουν προγράμματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, ανάλυσης και προσομοίωσης (π.χ. CFD + +, FIDAP, και FLUENT) όπως και προγράμματα προσομοίωσης δυναμικής και κίνησης των μηχανισμών (π.χ. ADAMS, DADS και Working Model). Παραδείγματα μη-μηχανικο-στρεφούς λογισμικού περιλαμβάνουν τα λογισμικά επεξεργασίας κειμένου, υπολογιστικών φύλλων (π.χ. Excel, Lotus, και Quattro-Pro), αλλά και εξειδικευμένα μαθηματικά εργαλεία (π.χ., Maple, Mathcad, Matlab, Mathematica, και TKsolver).

Φυσικά χρειάζεται να είμαστε συνεχώς ενήμεροι για την ύπαρξη νέων υπολογιστικών εργαλείων, κάτι που προϋποθέτει την προσωπική αναζήτηση και το προσωπικό ενδιαφέρον μεμονωμένα για τον σχεδιαστή. Ωστόσο δεν πρέπει ποτέ να ξεχνάμε το εξής παρακάτω: Τα υπολογιστικά εργαλεία δεν αποτελούν υποκατάστατο της ανθρώπινης διαδικασίας σκέψης. Αντιθέτως ο σχεδιαστής θα πρέπει να τα καθοδηγεί. Ο υπολογιστής είναι απλά το μέσο για να οδηγηθεί ο σχεδιαστής σε μία λύση. Οι αριθμοί που παράγονται από έναν υπολογιστή μπορεί να είναι μακριά από την πραγματικότητα, αν για παράδειγμα έχει εισαχθεί λανθασμένη είσοδος, εάν παρερμηνεύτηκε η εφαρμογή ή η έξοδος του προγράμματος, εάν το πρόγραμμα περιέχει σφάλματα κλπ. Είναι στην ευχέρεια του σχεδιαστή να εξασφαλίσει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων, οπότε πρέπει να είμαστε προσεκτικοί ελέγχοντας το πρόγραμμα και τα αποτελέσματα, εκτελώντας τεστ επιδόσεων (benchmark testing), υποβάλλοντας προβλήματα με γνωστές λύσεις και τέλος παρακολουθώντας τα ενημερωτικά δελτία της εταιρείας λογισμικού ή τα σχόλια των χρηστών της εφαρμογής.

Εύρεση Τεχνικών Πληροφοριών.

Συχνά αναφέρεται δικαίως, ότι ζούμε στην εποχή της πληροφορίας, όπου οι

πληροφορίες παράγονται με έναν εκπληκτικά ογκώδη ρυθμό. Είναι δύσκολο, αλλά εξαιρετικά σημαντικό, να συμβαδίζει κανείς με τις παρελθοντικές και τρέχουσες εξελίξεις σε κάποιο επιστημονικό τομέα ή επάγγελμα. Μερικές από τις πηγές πληροφόρησης και γνώσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Βιβλιοθήκες (δήμου, πανεπιστημίων και ιδιωτικές): Λεξικά μηχανικής και εγκυκλοπαίδειες, εγχειρίδια, μονογραφίες, εγχειρίδια, υπηρεσίες αναζήτησης, περιοδικά, μεταφράσεις, τεχνικές εκθέσεις, πατέντες καθώς και επιχειρηματικά φυλλάδια / κατάλογοι.
- Κυβερνητικές πηγές: Υπουργεία, Εθνικοί και Διεθνείς Οργανισμοί Τυποποίησης, Νομοθετικές Διατάξεις, Οδηγίες τεχνικών συλλόγων, Ευρωπαϊκές Οδηγίες προτυποποίησης κ.α.
- Επαγγελματικοί σύλλογοι: ΤΕΕ, Σύλλογοι Μηχανολόγων, Διεθνείς σύλλογοι εξειδικευμένων τομέων κ.α.
- Εμπορικοί κατασκευαστές: Εμπορικοί κατάλογοι, τεχνική βιβλιογραφία, δεδομένα πειραμάτων και δοκιμών, δείγματα, και πληροφορίες κόστους.
- Ιντερνέτ. Αποτελεί σίγουρα μία πύλη εξόδου και πρόσβασης σε όλες τις παραπάνω πηγές και σε ακόμα περισσότερες.

Ο κατάλογος δεν είναι πλήρης. Ο μηχανικός πρέπει να διερευνεί τις διάφορες πηγές πληροφοριών σε τακτική βάση και να τηρεί τα αρχεία των πληροφοριών που αποκτήθηκαν.

1-5 ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΡΟΙΟΝΤΟΣ

Η έννοια της αυστηρής ευθύνης για την αξιοπιστία των παραγόμενων προϊόντων είναι ευρέως διαδεδομένη στις κοινωνίες της εποχής μας. Η έννοια αυτή ορίζει ότι ο κατασκευαστής του προϊόντος είναι υπεύθυνος για οποιαδήποτε βλάβη ή ζημία που μπορεί να προκληθεί εξαιτίας ενός ελαττώματος. Και δεν έχει σημασία αν ο κατασκευαστής γνώριζε σχετικά με το ελάττωμα, ούτε και αν μπορούσε να γνωρίζει για αυτό. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι ένα προϊόν κατασκευάστηκε, ας πούμε, πριν από 10 χρόνια. Και ας υποθέσουμε, ότι εκείνη τη στιγμή το προϊόν δεν θα μπορούσε να έχει θεωρηθεί ως ελαττωματικό, βάσει των τεχνολογικών γνώσεων που διέθεταν τότε. Δέκα χρόνια αργότερα, σύμφωνα με την έννοια της αυστηρής ευθύνης, ο κατασκευαστής εξακολουθεί να είναι υπεύθυνος. Έτσι, σύμφωνα με την έννοια αυτή, ο ενάγων πρέπει απλώς να αποδείξει ότι το προϊόν είναι ελαττωματικό και ότι το ελάττωμα του προκάλεσε κάποια βλάβη ή ζημία. Η αμέλεια του κατασκευαστή δεν χρειάζεται να αποδειχθεί.

Οι καλύτερες προσεγγίσεις για την πρόληψη της αξιοπιστίας των προϊόντων

είναι η άριστη μηχανική ανάλυση, ο άριστος σχεδιασμός, ποιοτικός έλεγχος, και οι ολοκληρωμένες διαδικασίες δοκιμών. Οι διευθυντές Μάρκετινγκ δίνουν συχνά γενναιόδωρες υποσχέσεις και εγγυήσεις ένα προϊόν. Οι δηλώσεις αυτές πρέπει να επανεξετάζονται προσεκτικά από το προσωπικό της εταιρίας για την εξάλειψη υπερβολών και για να εισάγονται οι κατάλληλες προειδοποιήσεις και οδηγίες χρήσης.

Φορτία και Αντοχή (Stress and Strength).

Η επιβίωση πολλών προϊόντων εξαρτάται από το πώς ο σχεδιαστής ρυθμίζει την μέγιστη τάση που προκαλείται σε ένα στοιχείο, ώστε αυτή να είναι μικρότερη από την αντοχή του εξαρτήματος σε συγκεκριμένες θέσεις ενδιαφέροντος. Ο σχεδιαστής πρέπει να παίρνει τα κατάλληλα μέτρα ώστε η μέγιστη τάση να είναι μικρότερη από την αντοχή κατά μία τάξη μεγέθους αρκετή (το αποκαλούμενο περιθώριο ασφαλείας), ώστε εξαιρουμένων των περιπτώσεων αβεβαιότητας, η αποτυχία να είναι σπάνια. Όταν επικεντρώνουμε την μελέτη μας στην σύγκριση τάσης-αντοχής, συχνά μελετούμε την "αντοχή της γεωμετρίας και τις συνθήκες χρήσης". Η αντοχή είναι το μέγεθος της τάσης εκείνο κατά το οποίο συμβαίνει κάποιο μη επιθυμητό μηχανικό φαινόμενο, όπως η θραύση κ.α. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτά τα οριακά γεγονότα υποδηλώνουν τα επίπεδα τάσεων, κατά τα οποία εμφανίζεται η λανθασμένη λειτουργία του προϊόντος.

Η αντοχή είναι ιδιότητα ενός υλικού ή ενός μηχανικού στοιχείου. Η αντοχή ενός στοιχείου εξαρτάται από την επιλογή του, την χρήση του και από την επεξεργασία του υλικού. Αν πάρουμε ως παράδειγμα τα μηχανικά ελατήρια, κάθε ένα από αυτά μπορεί να συνδεθεί με μία συγκεκριμένης τάξης αντοχή. Όταν το ελατήριο ενσωματώνεται σε ένα μηχάνημα, οι εξωτερικές δυνάμεις που εφαρμόζονται έχουν ως αποτέλεσμα την πρόκληση τάσεων λόγω των μηχανικών φορτίσεων, τα μεγέθη των οποίων εξαρτώνται από την γεωμετρία του ελατηρίου και είναι ανεξάρτητες από το υλικό και την επεξεργασία τους. Αν το ελατήριο αφαιρεθεί από τη μηχανή χωρίς την πρόκληση μόνιμων παραμορφώσεων, η τάση λόγω των εξωτερικών δυνάμεων θα επιστρέψει σε μηδενικές τιμές. Ωστόσο η αντοχή παραμένει ως μία από τις ιδιότητες του ελατηρίου. Επομένως, η αντοχή είναι μια εγγενής ιδιότητα ενός αντικειμένου, μια ιδιότητα ενσωματωμένη στο αντικείμενο λόγω της χρήσης ενός συγκεκριμένου υλικού με συγκεκριμένη επεξεργασία.

Υπάρχουν ποικίλες διαδικασίες μεταλλουργίας και θερμικής επεξεργασίας, όπως η σφυρηλάτηση, ο ψυχρός σχηματισμός κ.α. που μπορούν να προκαλέσουν μεταβολές στην αντοχή από σημείο σε σημείο σε όλο το αντικείμενο. Για παράδειγμα το ελατήριο που προαναφέρθηκε είναι πολύ πιθανό να έχει αντοχή εξωτερικά των σπειρών διαφορετική από την αντοχή στο εσωτερικό τους, και αυτό διότι το ελατήριο έχει σχηματιστεί από διαδικασία ψυχρής εκκαθάρισης, με αποτέλεσμα οι δύο πλευρές να μην έχουν παραμορφωθεί κατά την ίδια ποσότητα. Επομένως διαπιστώνουμε, ότι μια τιμή αντοχής που δίνεται για ένα μέρος του αντικειμένου ισχύει μόνο για ένα ιδιαίτερο σημείο ή για ένα σύνολο σημείων επί του εξαρτήματος.

Η τάση είναι μία ιδιότητα κατάστασης σε ένα συγκεκριμένο σημείο του αντικειμένου και εξαρτάται από το φορτίο, τη γεωμετρία, τη θερμοκρασία και την επεξεργασία του υλικού.

Παράγοντας σχεδιασμού (design factor) και συντελεστής ασφαλείας (factor of safety).

Μια γενική προσέγγιση όσον αφορά το επιτρεπόμενο φορτίο έναντι του οριακού φορτίου πρόκλησης βλάβης είναι η ντετερμινιστική μέθοδος του παράγοντα σχεδιασμού (design factor), που μερικές φορές αποκαλείται ως κλασική μέθοδος σχεδιασμού. Η βασική εξίσωση είναι η εξίσωση (1-1), όπου το n_d καλείται παράγοντας σχεδιασμού. Σε μία τέτοια διαδικασία, θα πρέπει να μελετηθούν όλες οι περιπτώσεις λανθασμένης λειτουργίας, και στο τέλος να επικρατήσει η περίπτωση που οδηγεί στον μικρότερο παράγοντα σχεδιασμού. Αφού ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός, ο πραγματικός παράγοντας σχεδιασμού μπορεί να μεταβληθεί, λόγω κάποιων στρογγυλοποιήσεων είτε λόγω της χρήσης άλλων υλικών από αυτά που προβλέπονταν. Ο παράγοντας αυτός στη συνέχεια αναφέρεται ως παράγοντας ασφάλειας, n . Ο παράγοντας ασφάλειας ορίζεται ομοίως όπως και ο παράγοντας σχεδιασμού, ωστόσο σε γενικές γραμμές διαφέρει αριθμητικά.

$$n_d = \frac{\text{loss-of-function parameter}}{\text{maximum allowable parameter}}$$

Εξίσωση 1-1

Εφόσον η τάση μπορεί να μην μεταβάλλεται γραμμικά με το φορτίο, η χρήση του φορτίου ως παράμετρος απώλειας της λειτουργίας μπορεί να μην είναι αρκετή. Για αυτό και ορισμένες φορές ο παράγοντας σχεδιασμού εκφράζεται από τα μεγέθη της τάσης και της αντοχής. Επομένως η εξίσωση 1-1 μπορεί να επαναδιατυπωθεί ως εξής:

$$n_d = \frac{\text{loss-of-function strength}}{\text{allowable stress}} = \frac{S}{\sigma \text{ (or } \tau)}$$

Εξίσωση 1-2

Αξιοπιστία (Reliability)

Στις μέρες μας, η σημαντική αύξηση του αριθμού των νομοθετικών υποχρεώσεων αξιοπιστίας των προϊόντων, και η ανάγκη συμμόρφωσης με αυστηρούς κανονισμούς που εκδίδουν οι διάφοροι οργανισμοί προτυποποίησης, δημιουργούν την ανάγκη για τον σχεδιαστή και τον κατασκευαστή να γνωρίζουν την αξιοπιστία του προϊόντος τους. Η μέθοδος σχεδιασμού βάσει αξιοπιστίας, είναι εκείνη κατά την οποία μελετούμε την κατανομή των τάσεων και της αντοχής ενώ στην συνέχεια, συνδυάζουμε αυτά τα δύο, προκειμένου να επιτευχθεί ένα αποδεκτό ποσοστό επιτυχίας. Το στατιστικό μέτρο της πιθανότητας ότι ένα μηχανικό στοιχείο δεν θα αποτύχει κατά την χρήση του καλείται η

αξιοπιστία του εν λόγω στοιχείου, και μπορεί να εκφραστεί στις παρακάτω κανονικοποιημένες τιμές : $0 \leq R \leq 1$. Για παράδειγμα η αξιοπιστία της τάξης του $R = 0.90$, σημαίνει ότι υπάρχει 90 τοις εκατό πιθανότητα για το αντικείμενο να λειτουργεί κανονικά και χωρίς αποτυχία. Η αποτυχία των 6 από τα 1000 προϊόντα μίας βιομηχανικής παραγωγής θα μπορούσε να θεωρηθεί αποδεκτό ποσοστό αποτυχίας για μια ορισμένη κατηγορία προϊόντων. Αυτή η περίπτωση αντιπροσωπεύει αξιοπιστία μεγέθους 0.994.

Στη μέθοδο του σχεδιασμού βάσει αξιοπιστίας, το καθήκον του σχεδιαστή είναι να κάνει μια ορθολογική επιλογή υλικών, διαδικασιών, και γεωμετρίας (μεγέθους), ώστε να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος στόχος αξιοπιστίας. Επομένως αν η επιθυμητή αξιοπιστία είναι 99,4 τοις εκατό, όπως προηγουμένως, το ερώτημα που τίθεται είναι ποιός συνδυασμός υλικών, επεξεργασίας, και διαστάσεων είναι αναγκαίος για την επίτευξη αυτού του στόχου. Είναι απαραίτητο να τονίσουμε, ότι οι σωστές εκτιμήσεις και τα πλήρη στατιστικά δεδομένα είναι προϋπόθεση για την εκτέλεση μίας αποτελεσματικής ανάλυσης αξιοπιστίας. Αυτό απαιτεί ικανές διαδικασίες δοκιμών και την ύπαρξη έγκυρων δεδομένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ

2.1 Γενικά

Ποδήλατο ονομάζεται το δίτροχο (μερικές φορές τρίτροχο) όχημα, που κινείται καθώς ο αναβάτης του χρησιμοποιεί τη μυϊκή δύναμη των ποδιών του. Το ποδήλατο αποτελεί ένα ιδιαίτερα διαδεδομένο μεταφορικό μέσο. Ο αριθμός των ποδηλάτων του πλανήτη στις μέρες μας υπολογίζεται ότι ξεπερνά το ένα δισεκατομμύριο. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του ποδηλάτου αποτελεί η δυνατότητα του να ανταποκρίνεται σε αρκετά διαφορετικές απαιτήσεις, όπως είναι η μετακίνηση, η άθληση και η ψυχαγωγία.

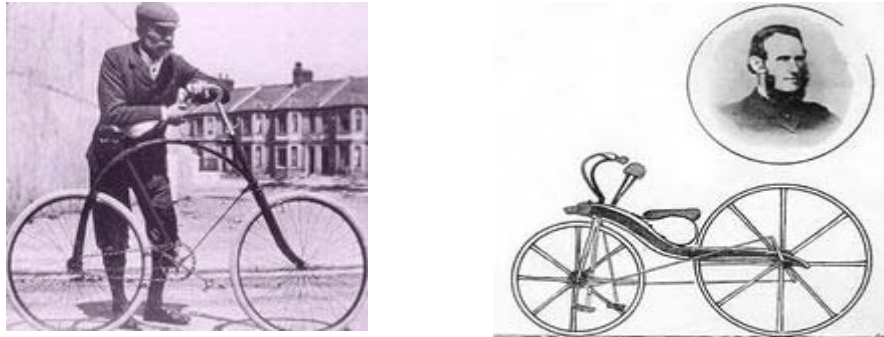
Στην κλασική του μορφή, το ποδήλατο αποτελείται από δύο τροχούς, οι οποίοι βρίσκονται ο ένας πίσω από τον άλλο και συνδέονται μεταξύ τους με μεταλλικό σκελετό. Βασικά επίσης μέρη ενός τυπικού ποδηλάτου αποτελούν το τιμόνι, η σέλα, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης και τα φρένα. Ως συμπληρωματικός εξοπλισμός, όχι δηλαδή απαραίτητος για τη λειτουργικότητα του ποδηλάτου, χρησιμοποιείται ένα πλήθος εξαρτημάτων.

2.2 Ιστορική Αναδρομή

Δεν υπάρχει συγκεκριμένη χρονολογία στην οποία να αποδίδεται η εφεύρεση του ποδηλάτου, επομένως ούτε συγκεκριμένος 'εφευρέτης' αυτού. Πολύ πριν την εμφάνιση κάποιας κατασκευής παρόμοιας με ένα τυπικό σύγχρονο ποδήλατο, έχει καταγραφεί ένα ποικίλο φάσμα οχημάτων που εκμεταλλεύονταν μόνο τη μυϊκή δύναμη του αναβάτη τους.

Μία από τις κατασκευές αυτές, που από πολλούς θεωρείται ο πρόγονος του ποδηλάτου, ήταν η 'draisienne'. Η draisienne κατασκευάστηκε από το Γερμανό βαρόνο Καρλ Φον Ντράις, το 1817 (η ονομασία 'draisienne' αποτελεί γαλλική απόδοση του ονόματος του κατασκευαστή της). Η draisienne ήταν σχεδόν εξολοκλήρου κατασκευασμένη από ξύλο. Μη διαθέτοντας πετάλια, ο αναβάτης την

έθετε σε κίνηση σπρώχνοντας με τα πόδια του προς τα πίσω. Η κατασκευή του Φον Ντράις έγινε γνωστή και ως hobby-horse, αντανakλώντας την πεποίθηση των οπαδών της ότι θα αντικαθιστούσε το βασικό μεταφορικό μέσο του 19ου αιώνα, το άλογο.



Σχήμα 2-1 Φωτογραφίες του Kirkpatrick Macmillan στον οποίο αποδίδεται η σύλληψη του ποδηλάτου.

Το 1839, ο Σκωτσέζος σιδηρουργός Κιρκπάτρικ Μακμίλαν σχεδιάζει την 'velocipede'. Ο Μακμίλαν βελτίωσε την κατασκευή του Φον Ντράις, εισάγοντας τη χρήση των πεταλιών, συνδεδεμένων με ράβδους με τον οπίσθιο τροχό. Με αυτό τον τρόπο, ο αναβάτης δεν ήταν πλέον αναγκασμένος να φέρνει τα πόδια του σε επαφή με το έδαφος, κάτι που περιόριζε σημαντικά την ταχύτητα του οχήματος. Είκοσι χρόνια αργότερα, το 1860, ο Γάλλος Πιέρ Μισώ αλλάζει το σχέδιο της velocipede, συνδέοντας τα πετάλια απευθείας με τον μπροστινό τροχό. Αργότερα, ο Μισώ θα εισάγει τη χρήση συμπαγούς καουτσούκ στους τροχούς, δείχνοντας ουσιαστικά το δρόμο προς τα γνωστά στις μέρες μας λάστιχα.

Το 1870 οι Βρετανοί Τζέιμς Στάρλεϋ και Γουίλλιαμ Χίλμαν σχεδιάζουν ένα ποδήλατο με αρκετά μεγαλύτερο μπροστινό τροχό. Με αυτό τον τρόπο καταφέρνουν την εκπληκτική, για την εποχή, ταχύτητα των 24 χλμ/ώρα. Το μοντέλο που κατασκεύασαν ονομάστηκε 'ariel' και ήταν το πρώτο ποδήλατο εξ' ολοκλήρου κατασκευασμένο από μέταλλο. Βασικό μειονέκτημα του μεγέθους του μπροστινού τροχού του ariel αποτελούσε η ιδιαίτερα υψηλή θέση της σέλας που, λόγω της φτωχής κατανομής βάρους, είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της ασφάλειας του αναβάτη.

Στην Αγγλία, στα χαρακτηριστικά ποδήλατα με μεγάλο μπροστινό τροχό, αποδόθηκε η χαϊδευτική ονομασία 'renny-farthings'. Η αιτία βρίσκεται στην παρομοίωση του μεγέθους των τροχών ενός τέτοιου ποδηλάτου με τα νομίσματα της εποχής: Ο μεγάλος μπροστινός τροχός δίπλα στον μικρό οπίσθιο, θύμιζε το μεγάλο νόμισμα του ενός renny δίπλα σε αυτό του ενός farthing.

Τα επόμενα χρόνια, μια σειρά ενδιαφερουσών ιδεών και εφευρέσεων εφαρμόζονται στο ποδήλατο, βελτιώνοντας το συνεχώς: η μετάδοση κίνησης μέσω αλυσίδας, η χρήση ταχυτήτων, τα φρένα, ο 'κούφιος' σκελετός, το 'δυναμό' και η σαμπρέλα αποτελούν τις πλέον χαρακτηριστικές αυτών των εφευρέσεων. Για παράδειγμα, μετά την εισαγωγή της αλυσίδας και των ταχυτήτων, δεν υπήρχε η ανάγκη ένα ποδήλατο να διαθέτει μεγάλου μεγέθους μπροστινό τροχό προκειμένου να κατορθώνει μεγάλες ταχύτητες. Έτσι, το 1885 είναι η χρονιά που κατασκευάζεται

το μοντέλο 'rover', που συχνά χαρακτηρίζεται ως το πρώτο σύγχρονο ποδήλατο. Κατασκευαστής του ήταν ο Τζον Κέμπ Στάρλεϋ, ανιψιός του Τζέιμς Στάρλεϋ.

Η επιστροφή σε μικρότερου μεγέθους τροχούς βελτίωσε σημαντικά την άνεση με την οποία κανείς θα μπορούσε πλέον να κάνει ποδήλατο. Ως φυσικό επακόλουθο, τα τελευταία χρόνια του 19ου αιώνα το ενδιαφέρον του αγοραστικού κοινού για το ποδήλατο έχει αυξηθεί κατακόρυφα. Με το πέρασμα στον 20ο αιώνα ένας μεγάλος αριθμός ποδηλατικών λεσχών κατακλύζει και τις δύο πλευρές του ατλαντικού ωκεανού, αντικατοπτρίζοντας την καινούργια μόδα. Παράλληλα,



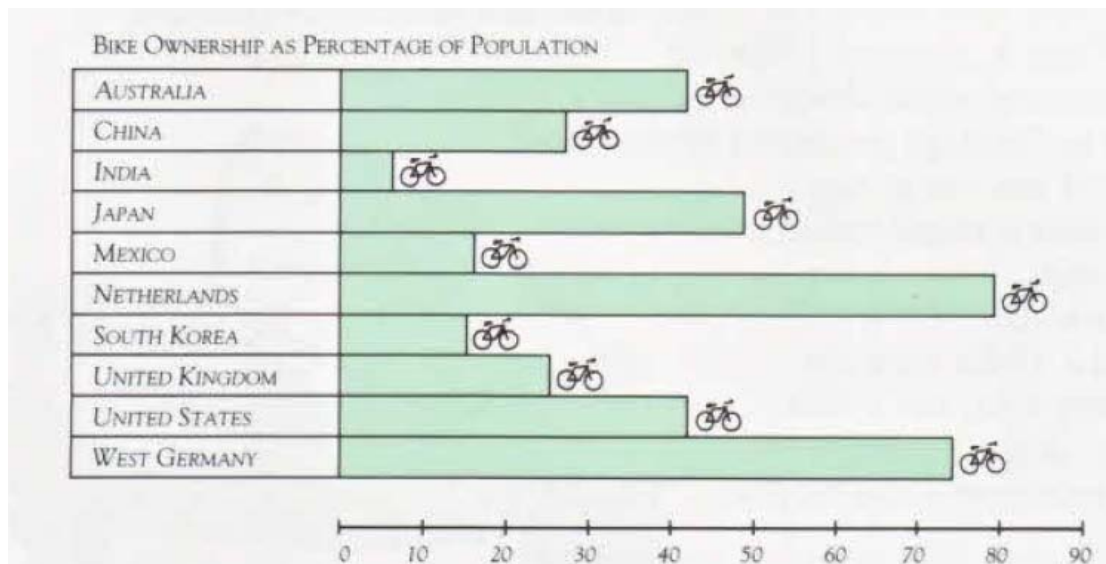
Σχήμα 2-2 Διάφοροι ιστορικοί τύποι ποδηλάτων.

εμφανίζονται οι πρώτες βιομηχανίες κατασκευής ποδηλάτων. Ως παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί η βιομηχανία Raleigh, η οποία λίγα χρόνια μετά την ίδρυσή της έφτασε να παράγει περίπου 30.000 ποδήλατα το χρόνο. Ιδρυτής της ήταν ο Άγγλος Φρανκ Μπάουντεν.

Μέσα στο πρώτο μισό τα μέσα του 20ου αιώνα, το ποδήλατο έχει γίνει το βασικό μέσο μετακίνησης για εκατομμύρια κατοίκους του πλανήτη. Ιδιαίτερα βοηθητική προς αυτή την κατεύθυνση ήταν η επαφή πολλών υπανάπτυκτων χωρών με τις ευρωπαϊκές χώρες, λόγω της αποικιοκρατίας. Από την άλλη πλευρά βέβαια, η ανάπτυξη των μηχανοκίνητων μέσων μεταφοράς είχε ως αποτέλεσμα να μειωθεί αρκετά το ενδιαφέρον για το ποδήλατο σε αρκετές ανεπτυγμένες χώρες. Εξαιρέση αποτελούν ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Γερμανία, η Δανία και η Ολλανδία, στις οποίες η χρήση του ποδηλάτου διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα.

Στην Ελλάδα το πρώτο ποδήλατο ήρθε το 1885, ενώ το 1890, τη χρονιά

ίδρυσης της Διεθνούς Ποδηλατικής Ομοσπονδίας, έγιναν οι πρώτοι ποδηλατικοί αγώνες. Το πρώτο ποδηλατοδρόμιο της χώρας κατασκευάζεται στην Αθήνα για τις ανάγκες των πρώτων Ολυμπιακών Αγώνων, Πρόκειται για το μετέπειτα ποδοσφαιρικό Γήπεδο Καραϊσκάκη. Στους Αγώνες του 1896 οι ποδηλάτες Κωνσταντινίδης και Παρασκευόπουλος αναδεικνύονται Ολυμπιονίκες στα δύο αγωνίσματα ποδηλασίας (85 και 320 χιλιόμετρα αντίστοιχα).



Σχήμα 2-3 Πίνακας ενδεικτικός της ποδηλατικής διείσδυσης σε κάθε χώρα (παρά τα χαμηλά ποσοστά της Κίνας, διατηρεί τα πρωτεία σε κουλτούρα ποδηλατικής οδήγησης κυρίως στις μεγαλουπόλεις).

2.3 ANATOMIA ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ

Ο σκελετός του ποδηλάτου είναι το κύριο στοιχείο ενός ποδηλάτου, πάνω στο οποίο προσαρμόζονται οι τροχοί και τα άλλα μέρη του. Ένα σύγχρονο και πολύ κοινό σχέδιο αποτελείται από δύο τρίγωνα, ένα κεντρικό τρίγωνο και ένα ζευγαρωτό οπίσθιο τρίγωνο. Αυτός είναι ο πιο γνωστός σκελετός ποδηλάτου που αποκαλείται και σκελετός-διαμάντι. Εκτός από τον κυρίαρχο σκελετό-διαμάντι, υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι πλαισίων που έχουν αναπτύ-

χθεί για το ποδήλατο, μερικοί από τους οποίους χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα.

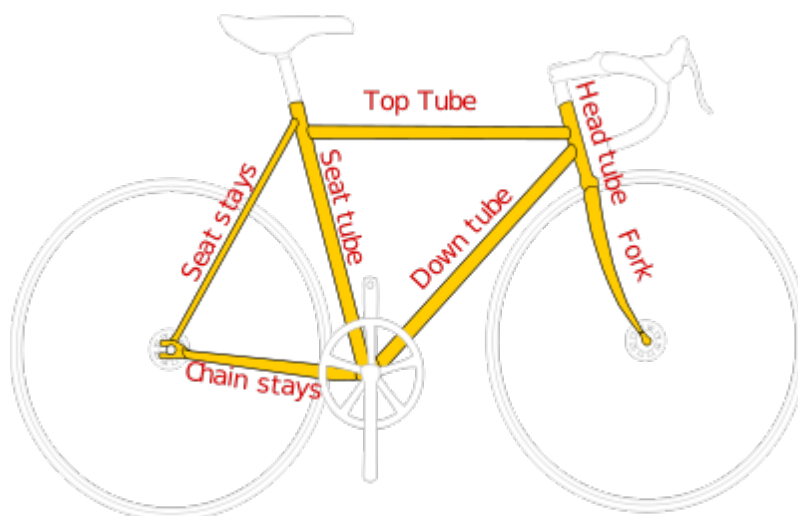
Στον σκελετό διαμάντι, το κεντρικό τρίγωνο αποτελείται από το κούτελο (head tube), τον πάνω σωλήνα (top tube), τον κάτω σωλήνα (down tube) και τον σωλήνα της σέλας (seat tube). Το πίσω τρίγωνο αποτελείται από τον σωλήνα της σέλας και τα ζευγαρωτά seatstays και chainstays. Το κούτελο ενσωματώνει το headset, το οποίο συνδέεται με το εμπρόσθιο πιρούνι. Ο πάνω σωλήνας συνδέει το κούτελο με τον σωλήνα της σέλας στην κορυφή, ενώ ο κάτω σωλήνας συνδέει το κούτελο με την μεσαία τριβή και το κάτω άκρο του σωλήνα της σέλας. Το πίσω τρίγωνο ενώνεται στα οπίσθια άκρα των πιρουνιών, όπου επισυνάπτεται ο πίσω τροχός. Αποτελείται από τον σωλήνα της σέλας και τα ζευγαρωτά chain stays and seat stays. Τα chain stays τρέχουν παράλληλα με την αλυσίδα και συνδέουν την μεσαία τριβή με τα πίσω άκρα του πιρουνιού. Τα seat stays συνδέονται με το επάνω μέρος του σωλήνα της σέλας (συχνά στο ίδιο ή σε πλησιέστερο σημείο σε σχέση με την κορυφή του σωλήνα σέλας) και τα πίσω άκρα των πιρουνιών.

Σωλήνες σκελετού.

Ο σκελετός- διαμάντι όπως προαναφέρθηκε, αποτελείται από δύο τρίγωνα, ένα κεντρικό τρίγωνο και ένα ζευγαρωτό οπίσθιο τρίγωνο. Το κύριο τρίγωνο αποτελείται από το κούτελο, τον πάνω σωλήνα, τον κάτω σωλήνα και τον σωλήνα της σέλας. Το οπίσθιο τρίγωνο αποτελείται από τον σωλήνα της σέλας και τα ζευγαρωτά chain stays και seat stays.

Κούτελο (Head tube)

Το κούτελο περιέχει το headset και τα ρουλεμάν για το εμπρόσθιο πιρούνι μέσω του steerer tube. Σε ένα ενσωματωμένο headset, το ρουλεμάν διασυνδέεται απευθείας με την εσωτερική επιφάνεια του κούτελου, ενώ σε ένα μη ενσωματωμένο headset ενώνονται με εγκοπές που χαράσσονται στο κούτελο.



Σχήμα 2-4 Τα μηχανικά μέρη ενός σκελετού-διαμάντι.

Άνω σωλήνας (Top tube)

Ο άνω σωλήνας, ή αλλιώς cross-bar, συνδέει την κορυφή του κούτελου με την κορυφή του σωλήνα της σέλας. Στην παραδοσιακή γεωμετρία ενός κλασσικού σκελετού αγωνιστικού ποδηλάτου ο άνω σωλήνας τοποθετείται οριζόντια. Σε έναν σκελετό σύνθετης γεωμετρίας, ο άνω σωλήνας έχει κλίση προς τον σωλήνα της σέλας. Σε ένα σκελετό για ποδήλατο βουνού, ο άνω σωλήνας έχει σχεδόν πάντα κλίση προς τα κάτω προς τον σωλήνα της σέλας. Στα πλαίσια για ποδήλατα τύπου step-through ο άνω σωλήνας έχει πάντα απότομη κλίση για να επιτρέπει στον αναβάτη να ανεβοκατεβαίνει από το ποδήλατο πιο εύκολα.

Τα καλώδια ελέγχου ενσωματώνονται κατά μήκος της δοκού του άνω σωλήνα, ή μερικές φορές μέσα στον άνω σωλήνα. Συνήθως, αυτά τα καλώδια είναι των πίσω φρένων, αλλά ωστόσο σε μερικά ποδήλατα βουνού ή και σε υβριδικά, κατά μήκος του άνω σωλήνα περνάνε επιπλέον τα εμπρόσθια και τα οπίσθια καλώδια ντεραγιέ.

Ο χώρος μεταξύ του άνω σωλήνα και της βουβωνικής χώρας του αναβάτη, όσο αυτός στέκεται στο έδαφος ονομάζεται clearance. Το συνολικό ύψος από το έδαφος μέχρι αυτόν τον σωλήνα αποκαλείται height lever.

Κάτω σωλήνας (Down tube)

Ο κάτω σωλήνας συνδέει το κούτελο με το περίβλημα της μεσαίας τριβής. Στα αγωνιστικά ποδήλατα, σε μερικά ποδήλατα βουνού και σε μερικά υβριδικά, τα καλώδια ντεραγιέ τρέχουν κατά μήκος αυτού του σωλήνα, είτε στο εσωτερικό του κάτω σωλήνα. Στα παλαιότερα αγωνιστικά ποδήλατα, οι μοχλοί αλλαγής ήταν τοποθετημένοι στον κάτω σωλήνα. Στα νεώτερα, είναι τοποθετημένα μαζί με τις μανέτες των φρένων στο τιμόνι. Οι αναρτήσεις της παγουροθήκης είναι επίσης στον κάτω σωλήνα, συνήθως στην επάνω πλευρά, ενίοτε και στην κάτω πλευρά. Εκτός από την παγουροθήκη, ορισμένες φορές τοποθετούνται σε αυτόν τον σωλήνα και μικρές αντλίες αέρα.

Κάθετος Σωλήνας (Seat tube).

Ο σωλήνας θέσης ή αλλιώς κεντρικός σωλήνας περιέχει τον λαιμό της σέλας (seatpost), ο οποίος συνδέεται με τη σέλα. Το ύψος της σέλας είναι ρυθμιζόμενο, με την αλλαγή του βαθμού εισδοχής του λαιμού της σέλας στον σωλήνα θέσης. Σε μερικά ποδήλατα, αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας έναν γρήγορο μοχλό απελευθέρωσης. Ο λαιμός της σέλας πρέπει να εισάγεται κατά ένα τουλάχιστο (μίνιμουμ) μήκος, το οποίο επισημαίνεται με έναν δείκτη μίνιμουμ εισδοχής. Ο σωλήνας θέσης, μπορεί επίσης να έχει αναρτήσεις για την παγουροθήκη ή για τα εμπρόσθια καλώδια ντεραγιέ.

Κάτω ψαλίδια (chainstays)

Τα chainstays διατρέχουν παράλληλα με την αλυσίδα, και συνδέουν το περίβλημα της μεσαίας τριβής με τα πίσω άκρα του πιρουνιού. Όταν το πίσω καλώδιο ντεραγιέ δρομολογείται εν μέρει κατά μήκος του κάτω σωλήνα, τότε θα κατευθύνεται επίσης κατά μήκος των chainstays. Μερικές φορές (κυρίως για σκελετούς με χρονολογία κατασκευής προ της δεκαετίας του 1990) οι βάσεις για τα δισκόφρενα συνδέονται στα chainstays. Επιπλέον μπορεί να υπάρχει ένα μικρό στήριγμα που θα συνδέει τα chainstays μπροστά από τον οπίσθιο τροχό και πίσω από την μεσαία τριβή. Τα chainstays μπορεί να είναι ευθεία είτε υπό την μορφή κωνικών σωλήνων.

Άνω ψαλίδια (Seat stays)

Τα seat stays συνδέουν το επάνω μέρος του σωλήνα θέσης (συχνά στο ίδιο ή κοντά στο ίδιο σημείο που συνδέεται και ο άνω σωλήνας) με τα πίσω άκρα του πιρουνιού. Υπάρχει μία παραλλαγή σκελετού όπου τα seat stays διαπερνούν τον σωλήνα θέσης και καταλήγουν λίγο πιο μπροστά από τις οπίσθιες καταλήξεις του άνω σωλήνα, δημιουργώντας ένα μικρό τρίγωνο. Το στυλ αυτό τον ονομάζουμε Hellenic, ελέω του κατασκευαστή του Fred Hellens που το εισήγαγε το 1923.

Οι εκφράσεις *single seatstay*, *mono stay* και *wishbone*, όλες αναφέρονται σε Seat stays που ενώνονται σε ένα σημείο προτού ενωθούν με το εμπρόσθιο τρίγωνο του ποδηλάτου. Ο όρος *dual seatstay* αναφέρεται σε Seat stays που ενώνονται σε δύο ξεχωριστά σημεία.

Τα Fastback seatstays συναντούν τον σωλήνα θέσης στην πίσω πλευρά αντί πλαγίως. Μπορεί επιπλέον να υπάρχει βραχίονας που συνδέει τα stays πάνω από τον οπίσθιο τροχό και κάτω από το σημείο σύνδεσης με τον σωλήνα θέσης. Προσφέρει εκτός από πρόσθετη αντιστήριξη και ένα σημείο στήριξης για τα οπίσθια φρένα. Τα seat stays επιπλέον παρέχουν ένα σημείο στήριξης για την οπίσθια ζάντα και τα δισκόφρενα. Στην περίπτωση που το οπίσθιο καλώδιο ντεραγιέ δρομολογείται εν μέρει κατά μήκος του επάνω σωλήνα, είναι επίσης σύνηθες να κατευθύνεται και κατά μήκος του σωλήνα της σέλας.

Στις μέρες μας υπάρχουν σκελετοί για αγωνιστικά ποδήλατα με συνδυασμό αλουμινίου και ανθρακονημάτων. Σε αυτά χρησιμοποιούνται ανθρακονήματα για τα seat stays και αλουμίνιο για τους υπόλοιπους σωλήνες. Ο σχεδιασμός αυτός εκμεταλλεύεται την καλύτερη απορρόφηση κραδασμών που προσφέρουν οι ίνες άνθρακα σε σύγκριση με το αλουμίνιο.



Σχήμα 2-5 Παράδειγμα σκελετού με dual-stay seatstays.

Μεσαία Τριβή (Bottom bracket shell)

Η μεσαία τριβή είναι ένας φαρδύς και λεπτός σωλήνας, σε σχέση με τους άλλους σωλήνες του πλαισίου. Τοποθετείται κάθετα σε σχέση με τον σωλήνα θέσης, τον κάτω σωλήνα και τα chainstays, οι οποίοι και οι τρεις καταλήγουν στο μεσαίο σημείο της μεσαίας τριβής. Σε μερικές παραλλαγές σκελετών η μεσαία τριβή είναι προσαρμόσιμη επιτρέποντας το τέντωμα και την χαλάρωση της αλυσίδας.

Υπάρχουν κάποια παραδοσιακά πρότυπα για το πλάτος του κελύφους (68, 70 ή 73mm). Μερικά σύγχρονα ποδήλατα έχουν κελύφος πλάτους 83 ή 100 mm κυρίως όμως εφαρμόζονται σε ειδικά ποδήλατα βουνού ή χιονιού. Το πλάτος του κελύφους επηρεάζει τον παράγοντα Q ή αλλιώς το πέγμα του ποδηλάτου. Ενδιαφέρον είναι ότι στην μεσαία τριβή απορροφάται η πλειοψηφία των ασκούμενων δυνάμεων (επομένως και η απορροφούμενη από το ποδήλατο ενέργεια), κατά την οδήγηση ή και στάση του ποδηλάτου.

2.4 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΛΑΙΣΙΟΥ (ΣΚΕΛΕΤΟΥ)

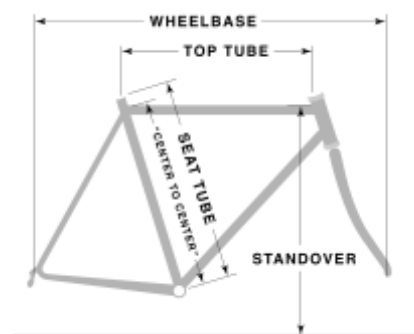
Το μήκος των σωλήνων, και οι γωνίες με τις οποίες προσδένονται καθορίζουν την γεωμετρία του σκελετού. Κατά την σύγκριση διαφορετικών γεωμετρικών πλαισίων, οι σχεδιαστές συχνά συγκρίνουν τη γωνία του σωλήνα θέσης, την γωνία του κούτελου, το μήκος του άνω σωλήνα και το μήκος του σωλήνα θέσης. Για να ολοκληρωθεί η προδιαγραφή ενός ποδηλάτου προς χρήση, ο αναβάτης ρυθμίζει τις σχετικές θέσεις του πεντάλ, της σέλας και του τιμονιού:

- ✚ ύψος της σέλας: η απόσταση από το κέντρο της μεσαίας τριβής μέχρι το μεσαίο σημείο της σέλας.

- reach: η απόσταση από τη σέλα μέχρι το τιμόνι.
- drop: η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της κορυφής της σέλας και του τιμονιού.
- setback, η οριζόντια απόσταση μεταξύ του εμπρόσθιου μέρους της σέλας και του κέντρου της μεσαίας τριβής.
- ύψος standover: το μέσο ύψος που βρίσκεται ο άνω σωλήνας πάνω από το έδαφος.
- toe overlap: η απόσταση των ποδιών από την διεύθυνση του εμπρόσθιου τροχού.

Η γεωμετρία του πλαισίου εξαρτάται από την προοριζόμενη χρήση. Για παράδειγμα, ένα ποδήλατο δρόμου θα έχει το τιμόνι σε μια χαμηλότερη θέση σε σχέση με την σέλα, καταλήγοντας σε μία κεκλιμένη θέση οδήγησης. Αντιθέτως άλλα ποδήλατα δίνουν έμφαση στην άνεση του αναβάτη με αποτέλεσμα να δίνουν υψηλότερη θέση στο τιμόνι και να διαθέτουν όρθια θέση οδήγησης. Η γεωμετρία του σκελετού επιπλέον καθορίζει τα χαρακτηριστικά χειρισμού του ποδηλάτου.

Μέγεθος σκελετού



Σχήμα 2-6 Συνήθεις μετρούμενες διαστάσεις.

Το μέγεθος του σκελετού τυπικά μετράται από το κέντρο της μεσαίας τριβής έως το κέντρο του άνω σωλήνα. Τα "μέσα" τυπικά μεγέθη είναι μεταξύ των 54 ή 56 εκατοστών (21,2 - 22 ίντσες) για ένα αγωνιστικό ευρωπαϊκό ποδήλατο ή 46 cm (περίπου 18,5 ίντσες) για ένα ποδήλατο βουνού. Στις ημέρες μας, κατασκευάζεται ένα ευρύ φάσμα γεωμετριών, το οποίο δίνει βάση σε άλλους μεθόδους μέτρησης, τους οποίους δεν θα αναλύσουμε σε αυτήν την εργασία. Τα τυπικά πλαίσια τείνουν να είναι μακρύτερα σε σχέση με τα αγωνιστικά που είναι πιο συμπαγή.

Ποδήλατα δρόμου και τρίαθλου.

Ένα οδικό αγωνιστικό ποδήλατο σχεδιάζεται με τρόπο ώστε να είναι εφικτή η αποτελεσματική μεταφορά ισχύος συνδυάζοντας ελάχιστο βάρος και ελάχιστη έλξη. Σε γενικές γραμμές, η γεωμετρία ενός ποδηλάτου δρόμου με οριζόντιο άνω σωλήνα ταξινομείται στην παραδοσιακή γεωμετρία, και ως συμπαγής γεωμετρία με την ύπαρξη επικλινή άνω σωλήνα.

Τα οδικά πλαίσια τυπικής γεωμετρίας χαρακτηρίζονται συχνά από περισσότερη άνεση και μεγαλύτερη σταθερότητα, ενώ τείνουν να έχουν ένα μακρύτερο μεταξόνιο, το οποίο συμβάλλει στα παραπάνω χαρακτηριστικά. Τα οδικά πλαίσια συμπαγούς γεωμετρίας έχουν χαμηλότερο κέντρο βάρους και τείνουν να έχουν μικρότερο μεταξόνιο και μικρότερο οπίσθιο τρίγωνο, που δίνουν στο ποδήλατο ταχύτερο χειρισμό. Επιπλέον στην συμπαγή γεωμετρία η κορυφή του κούτελου βρίσκεται πάνω από την κορυφή του σωλήνα σέλας, μειώνοντας το ύψος standover, αυξάνοντας έτσι το clearance του standover και μειώνοντας το ύψος του κέντρου βάρους. Υπάρχουν διχογνωμίες σχετικά με τα οδηγικά πλεονεκτήματα του συμπαγούς πλαισίου.

Τα αγωνιστικά ποδήλατα τείνουν να έχουν πιο απότομη γωνία για τον σωλήνα σέλας, μετρούμενη σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Η θέση αυτή τοποθετεί τον αναβάτη σε αεροδυναμική και σαφώς σε πιο δυναμική θέση. Η υιοθέτηση αυτού του σχεδιασμού υστερεί σε άνεση (trade off άνεσης και θέσης). Τα οδικά και άνετα ποδήλατα τείνουν να έχουν πιο μικρή γωνία για τον σωλήνα σέλας. Με αυτόν τον σχεδιασμό ο αναβάτης στηρίζεται περισσότερο στα κάτω οστά, ενώ αφαιρεί βάρος από τα χέρια, τους καρπούς, το λαιμό, και ειδικά για τους άνδρες, βελτιώνει την κυκλοφορία των ουροποιητικών και αναπαραγωγικών περιοχών. Με την υιοθέτηση μικρότερης και λιγότερο απότομης γωνίας, οι σχεδιαστές υποχρεώνονται να επιμηκύνουν τα chainstays, έτσι ώστε το κέντρο βάρους (που ειδικά θα ήταν πιο πίσω προς τον τροχό) να επανατοποθετηθεί στην μέση του πλαισίου του ποδηλάτου (έτσι όπως αρμόζει να είναι δηλαδή). Το μακρύτερο μεταξόνιο συμβάλλει στην αποτελεσματική απορρόφηση των κραδασμών. Στα σύγχρονα μαζικά κατασκευαζόμενα οδικά (άνετα) ποδήλατα, η γωνία του σωλήνα σέλας είναι λιγότερο ομαλή, ίσως για να μειώνεται το κόστος παραγωγής αποφεύγοντας την επαναφορά των μηχανισμών συγκόλλησης στις αυτοματοποιημένες διαδικασίες, και επομένως δεν παρέχουν την άνεση που πρόσφεραν τα παραδοσιακά ποδήλατα τα οποία είχαν ακόμα πιο ομαλή γωνία στον σωλήνα σέλας.



Σχήμα 2-7 Ένα τυπικό αγωνιστικό ποδήλατο

Αξίζει να τονίσουμε, ότι τα αγωνιστικά ποδήλατα δρόμου ρυθμίζονται από τις οδηγίες του οργανισμού UCI. Έτσι κάθε αγωνιστικό ποδήλατο θα πρέπει να συμφωνεί με αυτούς τους κανονισμούς ώστε να συμμετέχει στους αγώνες, κάτι που σημαίνει ότι οι σχεδιασμοί χωρίς δύο τρίγωνα, είτε με έλλειψη άνω σωλήνα δεν είναι επιτρεπτοί.

Τα ποδήλατα Τρίαθλου περιστρέφουν τον αναβάτη προς τα εμπρός γύρω από τον άξονα της μεσαίας τριβής του ποδηλάτου, σε σύγκριση με το κλασσικό πλαίσιο ποδηλάτου δρόμου. Αυτό γίνεται προκειμένου να τεθεί ο αναβάτης σε ακόμη χαμηλότερη, πιο αεροδυναμική θέση. Καθόσον ο χειρισμός και η σταθερότητα μειώνονται, τα ποδήλατα αυτά σχεδιάζονται για να χρησιμοποιούνται σε περιβάλλον λιγότερο ομαδικό. Τα πλαίσια αυτά τείνουν να έχουν απότομες γωνίες για τον σωλήνα σέλας και χαμηλά κούτελα, όπως και κοντύτερο μεταξόνιο, για να υπάρχει η σωστή απόσταση από τη σέλα μέχρι το τιμόνι. Επιπλέον, δεδομένου ότι αυτά δεν καθορίζονται από τους κανονισμούς του UCI, μερικά ποδήλατα τρίαθλου, όπως το Zipp 2001, διαθέτουν διαφορετικά σχέδια πλαισίου, τα οποία μπορούν να παράξουν καλύτερη αεροδυναμική.

Ποδήλατα βουνού

Στα ποδήλατα βουνού, χρησιμοποιούνται συχνά αμορτισέρ για την βελτίωση της οδηγικής άνεσης και για καλύτερο χειρισμό. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές, συμπεριλαμβανομένων των μοντέλων πλήρους ανάρτησης τα οποία προσφέρουν απορρόφηση των κραδασμών τόσο για τους εμπρόσθιους όσο και για τους οπίσθιους τροχούς, καθώς και μοντέλα εμπρόσθιας ανάρτησης, τα οποία φροντίζουν για την αντικραδασμικότητα μόνο της εμπρόσθιας ρόδας. Η ανάπτυξη εξελιγμένων συστημάτων ανάρτησης κατά την δεκαετία του 1990, γρήγορα οδήγησε σε πολλές τροποποιήσεις για το κλασσικό πλαίσιο-διαμάντι. Τα σύγχρονα ποδήλατα βουνού που διαθέτουν συστήματα οπίσθιας ανάρτησης έχουν μηχανισμό για την ενεργοποίηση των οπίσθιων αμορτισέρ. Για το ζήτημα της πλήρους ανάρτησης, υπάρχουν πολλές παραλλαγές που προσφέρουν οι κατασκευαστές για διάφορους οδηγικούς σκοπούς.

Ποδήλατα Roadster

Τα ποδήλατα αυτά έχουν συνήθως μία αρκετά ομαλή γωνία σέλας και μία γωνία κούτελου της τάξης των 66 ή 67 μοιρών, σχεδιασμός που προσφέρει μεγάλη άνεση στον αναβάτη τοποθετώντας τον στην σωστή θέση ανάβασης. Τα επιπλέον χαρακτηριστικά του είναι το μακρύ μεταξόνιο, που είναι συνήθως παραπάνω από 40 ίντσες (συνήθως μεταξύ 43 και 47 ιντσών), καθώς και το μεγάλο fork rake (απόσταση άξονα εμπρόσθιου πιρουνιού με κέντρο τροχού-περίπου 76 χιλιοστά σε σύγκριση με τα υπόλοιπα που έχουν 40 χιλιοστά). Αυτή η παραλλαγή σκελετού απέκτησε δημοτικότητα τα τελευταία χρόνια που οφείλεται στο ότι προσφέρουν μεγαλύτερη άνεση σε σύγκριση με τα ποδήλατα βουνού ή σε σχέση με τα οδικά.

Μια παραλλαγή αυτού του ποδηλάτου είναι το "αθλητικό roadster" (επίσης γνωστό και ως "ελαφρύ roadster»), το οποίο διαθέτει ελαφρύτερο πλαίσιο, ελαφριά κλίση του σωλήνα σέλας ενώ η γωνία του κούτελου είναι περίπου 70 με 72 βαθμούς μοίρες.

2.5 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ιστορικά, το πιο διαδεδομένο υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των σωλήνων ενός σκελετού ποδηλάτου είναι το αστάλι. έχει χάλυβα. Τα αστάλινα πλαίσια μπορούν να αποτελούνται από απλό φθηνό ανθρακούχο χάλυβα έως εξαιρετικά εξειδικευμένα κράματα υψηλής απόδοσης. Τα πλαίσια μπορούν επίσης να κατασκευάζονται από κράματα αλουμινίου, τιτανίου, από ανθρακονήματα, ακόμη και από μπαμπού. Μερικές μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού βοηθούν να αποφασιστεί κατά πόσον είναι κατάλληλο το υλικό για την κατασκευή ενός πλαισίου ποδηλάτου, και επιπλέον μας βοηθούν στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων που είναι ικανοποιητικές για τον σκελετό, δίνοντας έτσι προδιαγραφές για περαιτέρω έρευνα στο αντικείμενο της μηχανικής των υλικών. Οι ιδιότητες αυτές αναλύονται παρακάτω διεξοδικά.

Πυκνότητα ή ειδική βαρύτητα (Density): είναι ένα μέτρο του κατά πόσο βαρύ ή ελαφρύ είναι το υλικό ανά μονάδα όγκου. Ορίζεται ως το πηλίκο της μάζας (μίας περιοχής) ανά τον όγκο αυτής (της περιοχής). Μπορεί να βρεθεί και από την παρακάτω εξίσωση :

$$m = \int_V \rho(r) dV$$

Ακαμψία ή μέτρο ελαστικότητας (Elastic modulus): είναι η ιδιότητα των υλικών σωμάτων να επανέρχονται στο αρχικό τους σχήμα μετά από άσκηση εξωτερικής τάσης. Το μέτρο ελαστικότητας ορίζεται ως η κλίση που παρουσιάζει ένα υλικό στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για την ζώνη ελαστικής παραμόρφωσης. Ορίζεται ως ο λόγος:

$$\lambda = \frac{\text{stress}}{\text{strain}}$$

όπου λ είναι το μέτρο ελαστικότητας, stress (τάση) είναι η δύναμη επαναφοράς που προκαλείται εξαιτίας της παραμόρφωσης διαιρούμενη με την περιοχή στην οποία εφαρμόζεται η δύναμη, ενώ παραμόρφωση ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής που προκαλείται από την τάση σε σχέση με την αρχική κατάσταση του αντικειμένου. Το μέτρο ελαστικότητας μετράται σε μονάδες Pascal (Pa για το σύστημα SI) είτε σε μονάδες psi (Pounds per Square Inch).

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές κατηγορίες παραμόρφωσης που χαρακτηρίζονται από διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας. Η γραμμική παραμόρφωση χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας Young, η παραμόρφωση σχήματος χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας σχήματος και η παραμόρφωση όγκου που χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας όγκου.

Στην σχεδίαση ποδηλάτων, το μέτρο ελαστικότητας μπορεί θεωρητικά να επηρεάσει την άνεση οδήγησης και την αποτελεσματική μετάδοση της ισχύος. Πρακτικά και επειδή ο σκελετός έχει πάντα μεγαλύτερη ακαμψία από τα λάστιχα και την σέλα, η άνεση εντέλει της οδήγησης επηρεάζεται περισσότερο από την επιλογή της σέλλας, της γεωμετρίας του σκελετού, την επιλογή των λάστιχων κ.α. παραγόντων. Η πλευρική ακαμψία είναι πολύ πιο δύσκολο να επιτευχθεί λόγω του περιορισμένου προφίλ του σκελετού, ενώ η μεγάλη ευελιξία μπορεί να επηρεάσει τη μετάδοση της ισχύος, κυρίως μέσω της τριβής των ελαστικών στο δρόμο που οφείλονται στην στρέβλωση του οπίσθιου τριγώνου, στην τριβή των φρένων με τις ζάντες και τέλος με την τριβή της αλυσίδας με τον δίσκο ταχυτήτων.

Μέτρο ελαστικότητας Young (Young's modulus)

Το μέτρο ελαστικότητας Young (E), εκφράζει την παραμόρφωση ενός μονοδιάστατου σώματος, πρακτικά ενός σώματος με μεγάλο μήκος και μικρή διατομή, όπως μία μακριά ράβδος. Το μέτρο ελαστικότητας Young ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει κατά μήκος προς την μεταβολή του μήκους του (ή αλλιώς με την παραμόρφωση του), δηλαδή:

$$Y = \frac{F/A_0}{\Delta L/L_0}$$

Συνήθως το μέτρο ελαστικότητας Young συγχέεται με το μέτρο ελαστικότητας ωστόσο είναι δύο διαφορετικά μεγέθη.

Μέτρο διάτμησης

Το μέτρο διάτμησης (*shear modulus* ή *modulus of rigidity* : G ή μ) χαρακτηρίζει τα τρισδιάστατα υλικά σώματα στα οποία παραμορφώνεται το σχήμα τους χωρίς να μεταβάλλεται ο όγκος του. Ισούται με την τάση που εφαρμόζεται και παραμορφώνει το σώμα προς την διατμητική παραμόρφωση, δηλαδή την μεταβολή του μήκους της μίας του πλευράς στην οποία ασκείται η τάση προς το μήκος της πλευράς στην οποία δεν εφαρμόζεται τάση. Περιγράφεται από την μαθηματική σχέση:

$$S = \frac{F/A_0}{\Delta x/h}$$

Μέτρο ελαστικότητας όγκου (*bulk modulus K*)

Το μέτρο ελαστικότητας όγκου χαρακτηρίζει τα τρισδιάστατα υλικά σώματα στα οποία κατά την παραμόρφωσή τους μεταβάλλεται ο όγκος τους. Ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει, προς την μεταβολή του όγκου του σώματος. Δίνεται από την σχέση:

$$B = \frac{F/A_0}{\Delta V/V_0}$$

yield strength ή yield point: με αυτήν την ποσότητα ορίζουμε την τάση για την οποία ένα υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά. Πριν από αυτό το σημείο το υλικό θα συμπεριφέρεται ελαστικά και θα επιστρέφει στο αρχικό του σχήμα όταν αφαιρείται η ασκούμενη τάση. Όταν αυτό το σημείο ξεπεραστεί ένας μέρος της παραμόρφωσης θα είναι μόνιμο και μη αναστρέψιμο. Στον τρισδιάστατο χώρο μιλάμε πλέον για έναν άπειρο αριθμό σημείων yield ή αλλιώς για μία επιφάνεια yield.

Το σημείο yield εξαρτάται τόσο από το ποσοστό παραμόρφωσης (strain rate) και επιπλέον ίσως ακόμα πιο κρίσιμα από την θερμοκρασία στην οποία γίνεται η παραμόρφωση. Μία εργασία των Alder και Philips το 1954, απέδειξε ότι η τάση yield και το ποσοστό παραμόρφωσης μπορούν να υπολογισθούν από τον παρακάτω νόμο ενέργειας:

$$\sigma_y = C(\dot{\epsilon})^m$$

όπου το C είναι μία σταθερά και το m είναι η ευαισθησία του ποσοστού παραμόρφωσης. Ο τελευταίος παράγοντας αυξάνει μαζί με την θερμοκρασία ενώ τα υλικά που αποκτούν τιμές μεγαλύτερες του 0.5 τείνουν να έχουν υπερ-πλαστική συμπεριφορά.

Λόγος Poisson ή Poisson's ratio (ν): είναι ο λόγος, κατά την έκταση ενός αντικειμένου, της συρρίκνωσης ή εγκάρσιας τάσης (κάθετη προς το φορτίο), προς την επέκταση ή την αξονική τάση (στην ίδια κατεύθυνση με το εφαρμοζόμενο φορτίο). Όταν ένα υλικό συμπιέζεται προς μια κατεύθυνση, τείνει συνήθως να επεκταθεί στις άλλες δύο κατευθύνσεις κάθετα προς την κατεύθυνση της συμπίεσης. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται Poisson. Ο Λόγος Poisson (ν) είναι το μέτρο του αποτελέσματος Poisson. Ο λόγος Poisson είναι ο λόγος του ποσοστού της επέκτασης διαιρούμενος με το ποσοστό συμπίεσης. Αντίθετα, εάν το υλικό είναι τεντωμένο και όχι συμπιεσμένο, τότε ο λόγος αυτός θα είναι ο λόγος της συμπίεσης προς τον λόγο της επέκτασης.

Ένα σταθερό, γραμμικά ελαστικό υλικό δεν μπορεί να έχει τιμή λόγου Poisson μικρότερη από -1 ή μεγαλύτερη από 0.5, εξαιτίας της απαίτησης ότι οι ποσότητες Young's modulus, shear modulus και bulk modulus πρέπει να είναι θετικές.

Elongation : καθορίζει την επιτρεπόμενη παραμόρφωση για ένα υλικό μέχρι αυτό να σπάσει (χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αντοχής του σκελετού).

Fatigue limit ή Endurance limit : καθορίζει την αντοχή ενός σκελετού όταν υπόκειται σε κυκλική πίεση ή τάση από την ενέργεια του πεντάλινγκ ή των οδικών προσκρούσεων και δονήσεων.

2.6 ΥΛΙΚΑ ΣΚΕΛΕΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ

Ατσάλι(χάλυβας)



Σχήμα 2-8 Σκελετός από ατσάλι Trek 800.

Τα ατσάλινα πλαίσια είναι συχνά φτιαγμένα με διάφορους τύπους κραμάτων χάλυβα, που συμπεριλαμβάνουν και τους τύπους-chromoly. Είναι ισχυρά, εύκολα επεξεργάσιμα, σχετικά φθηνά, ωστόσο είναι πυκνότερα (βαρύτερα) από πολλά άλλα δομικά υλικά.

Οι χαλύβδινες σωληνώσεις με τυπικές και παραδοσιακές διαμέτρους είναι συχνά λιγότερο άκαμπτες σε σχέση με άλλα υλικά σε μεγαλύτερες διαστάσεις. Αυτή η ελαστικότητα επιτρέπει μία μερική απορρόφηση των κραδασμών δίνοντας στον αναβάτη μία ελαφριά λιγότερο ενοχλητική αίσθηση σε σύγκριση με άλλες πιο άκαμπτες σωληνώσεις όπως το υπερμέγεθες αλουμίνιο.

Ένα κλασικός τύπος κατασκευής τόσο για τα ποδήλατα δρόμου όσο και για τα ποδήλατα βουνού χρησιμοποιεί τυπικούς κυλινδρικούς χαλύβδινους σωλήνες οι οποίοι συνδέονται με αποφύσεις. Οι αποφύσεις είναι εσοχές που φτιάχνονται από πιο χοντρά κομμάτια χάλυβα. Οι σωλήνες προσαρμόζονται στις αποφύσεις οι οποίες περιβάλλουν την απόληξη του σωλήνα και έπειτα γίνεται η συγκόλληση τους. Εμπειρικά, αποδεικνύεται ότι οι συγκολλήσεις χαμηλής θερμοκρασίας έχουν λιγότερο αρνητικές επιπτώσεις στην αντοχή του σωλήνα σε σχέση με την συγκόλληση υψηλής θερμοκρασίας, επιτρέποντας την χρήση ελαφριών σωληνών χωρίς να παρατηρείται απώλεια αντοχής.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στη μεταλλουργία («air hardening»), μας παρέχουν σωληνώσεις που έχουν μεγάλη αντοχή και των οποίων οι ιδιότητες είναι ακόμη καλύτερες λόγω των υψηλών θερμοκρασιών συγκόλλησης, κάτι που επιτρέπει στις συγκολλήσεις TIG και MIG να παραγκωνίσουν τις ακριβές κατασκευές lugged σε όλα τα μοντέλα εκτός από κάποια εξειδικευμένα και περιορισμένης παραγωγής ποδήλατα. Σε αντίθεση με τα πλαίσια συγκόλλησης MIG ή TIG, ένας σκελετός διεργασίας lugged μπορεί και είναι πιο εύκολο να επισκευαστεί λόγω της απλής κατασκευής του. Επιπλέον, δεδομένου ότι οι σωληνώσεις από χάλυβα μπορούν να σκουριάσουν (αν και στην πράξη η χρήση χρώματος και αντιδιαβρωτικών σπρέι μπορούν να αποτρέψουν αποτελεσματικά την σκουριά), τα πλαίσια lugged επιτρέπουν την γρήγορη αντικατάσταση των σωληνών χωρίς να υπάρχει σχεδόν καμία φυσική βλάβη στους γειτονικούς σωλήνες.

Μια πιο οικονομική μέθοδος κατασκευής σκελετών ποδηλάτων είναι αυτή που χρησιμοποιεί κυλινδρικούς σωλήνες χάλυβα με συγκόλληση TIG, η οποία δεν

απαιτεί εξοχές για να συγκρατήσει τους σωλήνες. Αντιθέτως, οι σωλήνες του πλαισίου ευθυγραμμίζονται στο ικρίωμα και σταθεροποιούνται στη θέση τους μέχρι να ολοκληρωθεί η συγκόλληση. Η συγκόλληση fillet είναι μια ακόμη μέθοδος που ενώνει τους σωλήνες χωρίς εξοχές. Απαιτεί περισσότερη εργασία και κατά συνέπεια είναι λιγότερο πιθανό να χρησιμοποιηθεί στην βιομηχανική παραγωγή σκελετών. Όπως και με την TIG συγκόλληση, οι σωλήνες fillet του σκελετού συγκολλούνται και στη συνέχεια συγκολλείται μία επιφάνεια μπρούντζου στον κοινό σύνδεσμο, παρόμοια όπως με την διαδικασία κατασκευής lugged. Η επιχαλκωμένη αυτή επιφάνεια επιτυγχάνει περισσότερη αισθητική ομοιομορφία στον σκελετό. Στα χαλύβδινα πλαίσια, η χρήση ενισχυμένου σωλήνα μειώνει το βάρος ωστόσο αυξάνει το κόστος. Με την ενίσχυση εννοείται ότι το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα δεν είναι ομοιόμορφο, και αλλάζει από παχύτερο στα άκρα (για σκοπούς αντοχής και πιέσεων) σε λεπτότερο στη μέση των δοκών (ώστε να είναι πιο ελαφρύς ο σκελετός).

Υπάρχουν και φθηνότεροι χαλύβδινοι σκελετοί, οι οποίοι κατασκευάζονται από μαλακό χάλυβα, ο οποίος χρησιμοποιείται επιπλέον και για την παραγωγή αυτοκινήτων ή άλλων μηχανολογικών προϊόντων. Ωστόσο, τα ποδήλατα υψηλής ποιότητας και προστιθέμενης αξίας, κατασκευάζονται από κράματα χάλυβα υψηλής αντοχής (εν γένει χρωμίου-μολύβδου-χάλυβα είτε απλά κράματα χρωμίου-χάλυβα), και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ελαφριών σωλήνων με πολύ λεπτό πάχος τοιχωμάτων (ο σωλήνας δηλαδή δεν είναι συμπαγής). Ένα από τα πιο επιτυχημένα κράματα χάλυβα είναι το Reynolds "531", ένα κράμα χάλυβα και μαγγανίου-μολύβδου. Το πιο κοινό σήμερα κράμα είναι το κράμα χρωμίου 4130 chromoly και οι παραλλαγές του. Οι βιομηχανίες Reynolds και Columbus είναι δύο από τους πιο γνωστούς (και με μεγαλύτερο κύκλο εργασιών) κατασκευαστές σωλήνων για ποδήλατα.

Ένα υψηλής ποιότητας ατσάλινο πλαίσιο είναι ελαφρύτερο από έναν τυπικό ατσάλινο σκελετό. Η ελαφρότητα κάνει πιο εύκολη την ανηφορική οδήγηση, όπως και την επιτάχυνση από επίπεδη θέση. Επίσης, πολλοί αναβάτες αισθάνονται ότι τα ελαφριά πλαίσια χάλυβα λεπτών τοιχωμάτων έχουν μια "ζωντάνια" και "ελαστικότητα" κατά την οδήγηση.

Ο υψηλής ποιότητας (με κράμα χρωμίου ή μαγγανίου) ατσάλινος σκελετός μπορεί να αναγνωριστεί από το απλό χτύπημα με την άκρη του νυχιού. Ένα υψηλής ποιότητας πλαίσιο θα παράξει ένα ήχο-"κουδούνισμα", όταν ο τυπικής ποιότητας ατσάλινος σκελετός θα παράξει έναν πιο μπάσο και βαθύ ήχο. Μπορούν επίσης να αναγνωριστούν από το βάρος τους (περίπου στα 2,5 kg ζυγίζει το πλαίσιο μαζί με τα πιρούνια), καθώς από τον τύπο των συνδέσμων και των απολήξεων των πιρουνιών που χρησιμοποιούν.

Παρακάτω παρατίθενται πίνακες των εμπορικών κραμάτων χάλυβα (steel alloys) με τους τυποποιημένους κωδικούς για την αναγνώριση τους. Επιπλέον παρατίθεται και ενδεικτικός πίνακας των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων αυτών.

| Steel Alloy Designation System | |
|--|--|
| AISI-SAE Designation Number | Type and Description |
| Carbon steels | |
| 10xx | Plain Carbon (Mn. 1.00% max.) |
| 11xx | Resulturized |
| 12xx | Resulturized and rephosphorized |
| 15xx | Plain Carbon (max. Mn. range 1.00-1.65%) |
| Manganese steels | |
| 13xx | Mn 1.75 |
| Nickel steels | |
| 23xx | Ni 3.50 |
| 25xx | Ni 5.00 |
| Nickel-chromium steels | |
| 31xx | Ni 1.25; Cr 0.65, 0.80 |
| 32xx | Ni 1.75; Cr 1.07 |
| 33xx | Ni 3.50; Cr 1.50, 1.57 |
| 34xx | Ni 3.00; Cr 0.77 |
| Molybdenum steels | |
| 40xx | Mo 0.20, 0.25 |
| 44xx | Mo 0.40, 0.52 |
| Chromium-molybdenum steels | |
| 41xx | Cr 0.50, 0.80, 0.95; Mo 0.12, 0.20, 0.25, 0.30 |
| Nickel-chromium-molybdenum steels | |
| 43xx | Ni 1.82; Cr 0.50, 0.80; Mo 0.25 |
| 43BVxx | Ni 1.82; Cr 0.50; Mo 0.12, 0.25; V 0.03 min. |
| 47xx | Ni 1.05; Cr 0.45; Mo 0.20, 0.35 |
| 81xx | Ni 0.30; Cr 0.40; Mo 0.12 |
| 86xx | Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.20 |
| 87xx | Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.25 |
| 88xx | Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.35 |
| 93xx | Ni 3.25; Cr 1.20; Mo 0.12 |
| 94xx | Ni 0.45; Cr 0.40; Mo 0.12 |
| 97xx | Ni 1.00; Cr 0.20; Mo 0.20 |
| 98xx | Ni 1.00; Cr 0.80; Mo 0.25 |
| Nickel-molybdenum steels | |
| 46xx | Ni 0.85, 1.82; Mo 0.20, 0.25 |
| 48xx | Ni 3.50; Mo 0.25 |

| | |
|---------------------------------------|---|
| Chromium steels | |
| 50xx | Cr 0.27, 0.40, 0.50, 0.65 |
| 51xx | Cr 0.80, 0.87, 0.92, 0.95, 1.00, 1.05 |
| 50xxx | Cr 0.50; C 1.00 min. |
| 51xxx | Cr 1.02; C 1.00 min. |
| 52xxx | Cr 1.45; C 1.00 min. |
| Chromium-vanadium steels | |
| 61xx | Cr 0.60, 0.80, 0.95; V 0.10, 0.15 |
| Tungsten-chromium steels | |
| 72xx | W 1.75; Cr 0.75 |
| Silicon-manganese steels | |
| 92xx | Si 1.40, 2.00; Mn 0.65, 0.82, 0.85; Cr 0.00, 0.65 |
| High-strength low-alloy steels | |
| 9xx | Various SAE grades |
| Boron steels | |
| xxBxx | B denotes boron steels |
| Leaded steels | |
| xxLxx | L denotes leaded steels |

Σχήμα 2-9 Τύποι κραμάτων χάλυβα με τις αναλογίες τους.

| Properties | Carbon Steels | Alloy Steels | Stainless Steels |
|---|---------------|--------------|------------------|
| Density (1000 kg/m ³) | 7.85 | 7.85 | 7.75-8.1 |
| Elastic Modulus (GPa) | 190-210 | 190-210 | 190-210 |
| Poisson's Ratio | 0.27-0.3 | 0.27-0.3 | 0.27-0.3 |
| Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /K) | 11-16.6 | 9.0-15 | 9.0-20.7 |
| Melting Point (°C) | | | 1371-1454 |
| Thermal Conductivity (W/m-K) | 24.3-65.2 | 26-48.6 | 11.2-36.7 |
| Specific Heat (J/kg-K) | 450-2081 | 452-1499 | 420-500 |
| Electrical Resistivity (10 ⁻⁹ Ω-m) | 130-1250 | 210-1251 | 75.7-1020 |
| Tensile Strength (MPa) | 276-1882 | 758-1882 | 515-827 |
| Yield Strength (MPa) | 186-758 | 366-1793 | 207-552 |
| Percent Elongation (%) | 10-32 | 4-31 | 12-40 |
| Hardness (Brinell 3000kg) | 86-388 | 149-627 | 137-595 |

Σχήμα 2-10 Μηχανικές, Θερμικές και Ηλεκτρικές Ιδιότητες διάφορων τύπων χάλυβα.

Κράματα Αλουμινίου (Aluminum alloys)



Σχήμα 2-11 Downtube από αλουμίνιο με εσοχές στις απολήξεις. Συνδέεται με διπλό chain stay από ανθρακονήματα. Τα τμήματα από αλουμίνιο συγκολλήθηκαν κατά TIG, ενώ τα τμήματα από ανθρακονήματα συνδέονται πάνω στα τμήματα του αλουμινίου.

Τα κράματα αλουμινίου έχουν χαμηλότερη πυκνότητα και χαμηλότερη αντοχή σε σύγκριση με τα κράματα χάλυβα, ωστόσο, έχουν καλύτερο λόγο αντοχής προς βάρος, δίνοντάς τους αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα βάρους, σε σχέση με τον χάλυβα. Οι πρώτες κατασκευές αλουμινίου έδειχναν ότι είναι πιο

ευάλωτες στην καταπόνηση, είτε λόγω αναποτελεσματικότητας των κραμάτων, είτε λόγω ατελών τεχνικών συγκόλλησης που τότε χρησιμοποιούσαν. Προβλήματα που δεν αντιμετωπίζουν τα κράματα χάλυβα και τιτανίου, τα οποία έχουν μεγαλύτερα όρια καταπόνησης (fatigue) ενώ γενικά είναι πιο εύκολη η συγκόλληση και η επιχάλκωση τους.

Ωστόσο, ορισμένα από αυτά τα μειονεκτήματα που υπήρχαν τότε έχουν εν μέρει αναιρεθεί (μερικώς βέβαια, δηλαδή έχει βελτιωθεί η συμπεριφορά τους), με την χρήση περισσότερο εξειδικευμένης εργασίας, που είναι ικανή να παράγει συγκολλήσεις καλύτερης ποιότητας, να προσαρμόζει σύγχρονα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές εμπορικών αεροσκαφών, εξασφαλίζοντας αντοχή και αξιοπιστία συγκρίσιμη με αυτή των χαλύβδινων σκελετών. Η ελκυστικότητα του λόγου αντοχής-βάρους που διαθέτει το αλουμίνιο σε σχέση με το χάλυβα, και ορισμένες μηχανικές του ιδιότητες, το καθιστούν ως ένα από τα προτιμώμενα υλικά για κατασκευή σκελετών (για παράδειγμα, ένας δυνατός αναβάτης, ο οποίος κάνει συχνά αναρρίχηση με ποδήλατο, μπορεί να προτιμήσει την ακαμψία του αλουμινίου). Τα μειονεκτήματα του αλουμινένιου σκελετού είναι ότι δεν έχει την ίδια αίσθηση όπως ο χαλύβδινος σκελετός, η τραχύτητα κατά την οδήγηση, και η δυσκολία επιδιόρθωσης.

Μερικά δημοφιλή κράματα για σκελετούς ποδηλάτων είναι το αλουμίνιο 6061 και 7005 (6061 aluminum, 7005 aluminum). Σήμερα είναι πολύ δημοφιλείς οι κατασκευές από κράματα αλουμινίου τα οποία συνδέονται με TIG συγκόλληση. Οι σκελετοί ποδηλάτων από αλουμίνιο να εμφανίζονται στην αγορά μόνο αφού αυτό το είδος της συγκόλλησης έγινε οικονομικό κατά την δεκαετία του 1970.

Το Αλουμίνιο έχει διαφορετικό βέλτιστο πάχος για τα τοιχώματα των σωλήνων σε σχέση με αυτούς από ατσάλι. Η βέλτιστη αναλογία είναι περίπου 200:1, ενώ για τον χάλυβα είναι μόλις ένα μικρό κλάσμα αυτής της αναλογίας. Ωστόσο, με τη σχέση αυτή, το πάχος του τοιχώματος θα είναι πολύ μικρό άρα και εύθραυστο τρωτό απέναντι σε κρούσεις. Έτσι οι σωλήνες αλουμινίου σχεδιάζονται ως υπερμεγέθεις, με αεροδυναμικά αποδεκτές αναλογίες και καλή αντοχή στην κρούση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το πλαίσιο να είναι πολύ πιο σκληρό από το ατσάλι. Ενώ πολλοί αναβάτες ισχυρίζονται ότι χαλύβδινα πλαίσια προσφέρουν μια ομαλότερη οδήγηση σε σχέση με το αλουμίνιο, επειδή οι σωλήνες αλουμινίου σχεδιάζονται ώστε να είναι πιο άκαμπτοι, ο ισχυρισμός αυτός είναι αμφίβολης ισχύος: το πλαίσιο του ποδηλάτου ίδιος είναι εξαιρετικά άκαμπτο στην κάθετη κατεύθυνση γιατί είναι κατασκευασμένο από τρίγωνα, των οποίων οι πλευρές δεν αλλάζουν στο μήκος κάτω από την εφαρμογή τάσης. Επιπλέον, η πλευρική και τη συστροφική (στρέψη) ακαμψία βελτιώνουν την επιτάχυνση και τον χειρισμό σε ορισμένες περιπτώσεις.

Οι σωλήνες αλουμινίου θεωρείται γενικά ότι έχουν μικρότερο βάρος από το χάλυβα, αν και αυτό δεν ισχύει πάντα. Ένα οικονομικό πλαίσιο αλουμινίου μπορεί να είναι βαρύτερο από έναν ακριβό χαλύβδινο σκελετό. Οι ενισχυμένοι σωλήνες αλουμινίου-όπου το πάχος του τοιχώματος των μεσαίων τμημάτων είναι πιο λεπτό από τα τμήματα στις άκρες- χρησιμοποιούνται από ορισμένους κατασκευαστές για την εξοικονόμηση βάρους. Υλοποιούνται διάφορες γεωμετρίες σωλήνων που σκοπεύουν είτε στην βελτίωση της ακαμψίας, της αεροδυναμικής και άλλων χαρακτηριστικών.

Τιτάνιο



Σχήμα 2-11 Χαρακτηριστικές συγκολλήσεις σε ένα σκελετό από τιτάνιο.

Το Τιτάνιο είναι πιθανόν ένα από τα πιο εξωτικά και ακριβά μέταλλα και χρησιμοποιούνται και αυτά για σωλήνες σκελετού ποδηλάτου. Συνδυάζει πολλά επιθυμητά χαρακτηριστικά, όπως η υψηλή αναλογία αντοχής-βάρους και η εξαιρετική αντίσταση στη διάβρωση. Το υλικό παρουσιάζει ικανοποιητική δυσκαμψία (περίπου το ήμισυ αυτής του χάλυβα) και επιτρέπει σε πολλά πλαίσια του τιτανίου, να κατασκευάζονται με τυπικά μεγέθη σωλήνων, αν και οι μεγαλύτερης διαμέτρου σωλήνες χρησιμοποιούνται όλο και πιο συχνά για περισσότερη ακαμψία. Το κόστος είναι συνήθως απαγορευτικό για τους περισσότερους ποδηλάτες, αφού τα περισσότερα πλαίσια τιτανίου είναι πολύ πιο ακριβά από τα αντίστοιχα κράματος χάλυβα. Οι σωλήνες τιτανίου για σκελετούς σχεδόν πάντα συγκολλούνται με την τεχνική GasTungsten Arc Welding (GTAW ή TIG). Είναι πιο δύσκολη η επεξεργασία του σε σχέση με τον χάλυβα ή το αλουμίνιο, κάτι που συνήθως αποθαρρύνει την χρήση του και την περιορίζει σε ολιγάριθμες εφαρμογές.

Ανθρακονήματα (Carbon fiber)



Σχήμα 2-12 Χρήση ανθρακονήματος σε σκελετό ποδηλάτου.

Τα ανθρακονήματα είναι ένα είδος σύνθετων υλικών μη-μεταλλικό, το οποίο γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλές στην χρήση για σκελετούς ποδηλάτων. Παρόλο το μεγάλο κόστος του, είναι ελαφρύ, ανθεκτικό στη διάβρωση και ισχυρό, και μπορεί να διαμορφωθεί σε σχεδόν οποιοδήποτε επιθυμητό σχήμα. Με την χρήση τους επιτυγχάνεται η σχεδίαση και τελειοποίηση σκελετών μέσω της διαδικασίας fine-tuning, ώστε αυτοί να αντιμετωπίζουν τις τάσεις και τις δυνάμεις σε συγκεκριμένα σημεία (όπως για παράδειγμα στην μεσαία τριβή λόγω των δυνάμεων pedaling) ενώ παράλληλα επιτρέπουν την ευελιξία σε άλλα τμήματα του πλαισίου (για να υπάρχει πιο άνετη ποδηλασία). Επιπλέον μπορούν να σχεδιαστούν σκελετοί από ανθρακονήματα οι οποίοι σε συγκεκριμένους σωλήνες θα είναι ανθεκτικοί σε ορισμένες αξονικές δυνάμεις (π.χ. στις κάθετες καταπονήσεις), ενώ θα συμπεριφέρονται πιο ελαστικά στις άλλες αξονικές δυνάμεις. Η ικανότητα αυτή να σχεδιάζεται ένας μεμονωμένος σύνθετος σωλήνας με ιδιότητες που διαφέρουν ανάλογα με τον προσανατολισμό, δεν μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση άλλων κοινών μετάλλων, αποτελεί δηλαδή μία μοναδική εξαιρετικής χρηστικότητας ικανότητα των ανθρακονημάτων.

Ορισμένα πλαίσια από ανθρακονήματα χρησιμοποιούν κυλινδρικούς σωλήνες που ενώνονται με συγκολλήσεις και εξοχές όπως και στην μέθοδο μεταλλικού σκελετού lugged. Ένας άλλος τύπος πλαισίων από ίνες άνθρακα συντίθεται σε ένα ενιαίο κομμάτι, που ονομάζεται κατασκευή monocoque. Παρόλο που αυτά τα σύνθετα υλικά παρέχουν μικρό βάρος και υψηλή αντοχή, έχουν πολύ μικρότερη αντοχή επίδρασης (impact resistance) και κατά συνέπεια είναι επιρρεπή σε ζημιές, εάν συντριβούν είτε από λάθος χειρισμό τους. Έχει επιπλέον αναφερθεί προταθεί ότι τα υλικά αυτά είναι ευάλωτα στο fatigue failure, μια δηλαδή κατά την παρατεταμένη και για μεγάλο χρονικό διάστημα χρήση τους.

| FIBER TYPE | Filaments per tow | Tensile Strength | | Tensil Modulus | | Elongation | Yiel g/1000m | Density g/cm³ |
|------------|-------------------|------------------|-------|----------------|-----|------------|--------------|---------------|
| | | ksi | Mpa | Msi | Gpa | | | |
| T300 | 1K | 512 | 3,560 | 33.4 | 230 | 1.5% | 66 | 1.76 |
| | 3K | | | | | | 198 | |
| | 6K | | | | | | 396 | |
| | 12K | | | | | | 800 | |
| T400H | 3K | 640 | 4,410 | 36.3 | 250 | 1.8% | 198 | 1.80 |
| | 6K | | | | | | 396 | |
| T700S | 12K | 711 | 4,900 | 33.4 | 230 | 2.1% | 800 | 1.80 |
| | 24K | | | | | | 1650 | |
| T800S | 24K | 853 | 5,880 | 42.7 | 294 | 2.0% | 1030 | 1.80 |
| T1000G | 12K | 924 | 6,370 | 42.7 | 294 | 2.2% | 485 | 1.80 |
| M35J | 6K | 683 | 4,700 | 49.8 | 343 | 1.4% | 225 | 1.75 |
| | 12K | | | | | | 450 | |
| M40J | 3K | 640 | 4,410 | 54.7 | 377 | 1.2% | 113 | 1.77 |
| | 6K | | | | | | 225 | |
| | 12K | | | | | | 450 | |
| M46J | 6K | 611 | 4,210 | 63.3 | 436 | 1.0% | 223 | 1.84 |
| | 12K | | | | | | 445 | |
| M50J | 3K | 597 | 4,120 | 69 | 475 | 0.8% | 109 | 1.88 |
| | 6K | | | | | | 218 | |
| M55J | 6K | 583 | 4,020 | 78.2 | 540 | 0.8% | 218 | 1.91 |
| M60J | 3K | 569 | 3,920 | 85.3 | 588 | 0.7% | 103 | 1.93 |
| | 6K | | | | | | 206 | |
| M30S | 18K | 796 | 5,490 | 42.7 | 294 | 1.9% | 760 | 1.73 |
| M40 | 1K | 398 | 2,740 | 56.9 | 392 | 0.7% | 61 | 1.81 |
| | 3K | | | | | | 182 | |
| | 6K | | | | | | 364 | |
| | 12K | | | | | | 728 | |

Σχήμα 2-13 Πίνακας τυποποιημένων ανθρακονημάτων με τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά.

Τα περισσότερα αγωνιστικά ποδήλατα μεμονωμένων αγώνων είτε για χρήση στο τρίαθλο, κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά. Και αυτό επειδή μόνο με αυτά τα υλικά μπορεί να διαμορφωθεί πλαίσιο με αεροδυναμικό προφίλ, σε αντίθεση με άλλα υλικά που θα το έκαναν υπερβολικά βαρύ. Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός μπορεί να προσθέτει στο βάρος ωστόσο λόγω της αεροδυναμικότητας επιτυγχάνει μεγαλύτερες ταχύτητες ο αναβάτης. Υπάρχουν και άλλα υλικά εκτός από τα ανθρακονήματα, όπως το μεταλλικό βόριο, το οποίο μπορεί να προστεθεί σε σημεία του σκελετού ώστε να ενισχύσει περαιτέρω την ακαμψία του. Ορισμένα νεώτερα και επιτυχημένα μοντέλα σκελετών ενσωματώνουν ίνες Kevlar στις ίνες του άνθρακα βελτιώνοντας το σύστημα απόσβεσης των κραδασμών και την αντοχή στις επιδράσεις, ιδιαίτερα για τους σωλήνες downtubes και για τα ψαλίδια seat/chain.

Θερμοπλαστικά

Τα Θερμοπλαστικά, σύμφωνα με μια μελέτη του 2001 από την Advanced Technology Project (ATP), είναι νέα υπό δοκιμή ακόμα υλικά. Αναπτύχθηκαν αρχικά από "τη Ford Motor Company Scientific Research Laboratory» και την «General Electric». Η ATP καινοτόμησε με την χρήση των ανακυκλώσιμων θερμοπλαστικών σε εξαρτήματα αυτοκινήτων. Τέτοιου είδους εξαρτήματα χρησιμοποιούνται στο μοντέλο της Ford, Martin.

Μία κοινή εφαρμογή με θερμοπλαστικά πλαίσια ποδηλάτων είναι η ενσωμάτωση ανθρακονημάτων σε θερμοπλαστικά υλικά. Μία από τις πρώτες εταιρίες που χρησιμοποίησαν σε μοντέλα ποδηλάτου αυτά τα υλικά είναι η GT Bicycles. Τα ανθρακονήματα περιπλέκονται μαζί με ίνες πλαστικού σε έναν σωλήνα. Ο σωλήνας τοποθετείται σε ένα καλούπι όπου εκεί με φύσημα εξαναγκάζεται το υλικό να ακουμπήσει τα εσωτερικά τοιχώματα του καλουπιού. Αφού θερμανθεί και λιώσει το πλαστικό, έπειτα ψυχραίνεται και αφαιρείται από το καλούπι στην τελική του μορφή.

Μαγνήσιο

Ένα μικρό ποσοστό πλαισίων για ποδήλατο κατασκευάζονται από μαγνήσιο, το οποίο έχει μόλις το 64% της πυκνότητας του αλουμινίου. Στη δεκαετία του 1980, ο μηχανικός Frank Kirk, επινόησε έναν σκελετό ποδηλάτου που απαρτίζεται από δοκούς και όχι από σωλήνες. η εταιρεία Kirk Precision Ltd, ειδικεύονταν στην κατασκευή ποδηλάτων δρόμου και ποδήλατο βουνού με χρήση αυτής της τεχνολογίας. Ωστόσο, εκτός από μία μικρή αρχική εμπορική επιτυχία, αντιμετώπισε προβλήματα αξιοπιστίας και η παραγωγή τους σταμάτησε το 1992. Οι σύγχρονοι σκελετοί από μαγνήσιο υιοθετούν την κλασική μέθοδο των σωλήνων.

Πληροφοριακά, ένα μεγάλο πρόβλημα με αυτά τα πλαίσια είναι η διάβρωση που προκαλείται από τη χημική αντιδραστικότητα του μαγνησίου. Αν δεν λαμβάνεται μέριμνα κατά τη συναρμολόγηση του ποδηλάτου, είναι πιθανόν να υπάρξει γαλβανική διάβρωση σε σημεία όπου χάλυβας ή αλουμίνιο έρθουν σε επαφή με το πλαίσιο .

Συνδυασμοί υλικών

Μια πρόσφατη καινοτομία είναι η κατασκευή πλαισίων από σωλήνες διαφορετικών υλικών. Αυτό έχει ως σκοπό να παρέχει την επιθυμητή ακαμψία, ευλυγισία και απόσβεση σε διάφορους τομείς, με διαφορετικό τόνο κάθε φορά για κάθε σημείο, κάτι που δεν επιτυγχάνεται εύκολα με ένα και μόνο υλικό. Τα συνδυασμένα υλικά είναι συνήθως ανθρακονήματα και μέταλλα, είτε αυτός είναι χάλυβας, αλουμίνιο ή τιτάνιο. Μια εφαρμογή αυτής της προσέγγισης περιλαμβάνει μεταλλικούς σωλήνες down tube και chain stays με ανθρακονηματικούς σωλήνες top tube, seat tube και seat stays. Σε άλλη εφαρμογή τα ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται μόνο στα seat stays και οι υπόλοιποι σωλήνες είναι μεταλλικοί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥΣ

3.1 Εισαγωγή

Η επιλογή του υλικού ενός στοιχείου μίας μηχανής ή μίας δομικής μονάδας είναι μία από τις πιο σημαντικές αποφάσεις που καλείται να κάνει ο σχεδιαστής. Η απόφαση αυτή λαμβάνεται συνήθως πριν τον καθορισμό των διαστάσεων του μηχανικού στοιχείου. Οι διαδικασίες της επιλογής της επιθυμητής γεωμετρίας και του υλικού δεν μπορούν εύκολα να διαχωριστούν, και συνήθως υλοποιούνται παράλληλα. Όλες οι μέθοδοι υπολογισμού τάσεων και παραμορφώσεων βασίζονται κυρίως στις υποθέσεις για τις ιδιότητες των υλικών, οπότε ο λανθασμένος υπολογισμός τους οδηγεί σε λανθασμένες εκτιμήσεις. Τέτοιες ιδιότητες είναι για παράδειγμα οι ελαστικές ιδιότητες του υλικού και η μηχανική του αντοχή, η ποσοτικοποίηση των οποίων γίνεται με γενικά αποδεκτά και προτυποποιημένα πειράματα.

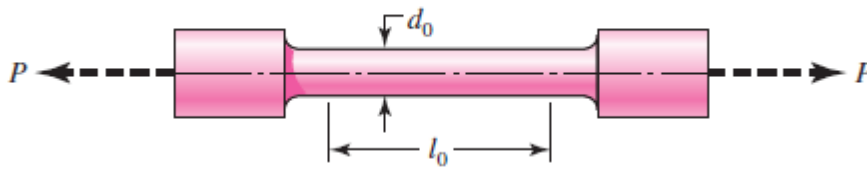
Παρόλη την κρισιμότητα των μεγεθών της τάσης και της παραμόρφωσης, η επιλογή ενός υλικού κατά τον σχεδιασμό των μηχανικών μερών, δεν εξαρτάται πάντα από αυτούς τους παράγοντες. Πολλά μηχανικά μέρη δεν αντιμετωπίζουν καν φορτία και είναι ανεξάρτητα. Ορισμένα τμήματα μπορεί να έχουν ως αποκλειστικό προορισμό να γεμίσουν χώρο ή να διαδραματίσουν αισθητικό ρόλο. Τα μηχανικά μέρη συχνά πρέπει να είναι σχεδιασμένα για να έχουν αντοχή στη διάβρωση. Άλλες φορές οι επιδράσεις της θερμοκρασίας είναι πιο σημαντικές για την σχεδίαση από την τάση και την πίεση. Υπάρχουν πολλοί άλλοι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν στον σχεδιασμό. Για αυτό και ο σχεδιαστής οφείλει να έχει ένα ολοκληρωμένο υπόβαθρο γνώσης γύρω από τις ιδιότητες των υλικών αλλά και τις μεθόδους επεξεργασίας τους.

Τα τυποποιημένα πειράματα εφελκυσμού υπολογίζουν μια ποικιλία χαρακτηριστικών του υλικού και της αντοχής του, τα οποία είναι χρήσιμα για τον σχεδιασμό. Στο σχήμα 3-1 απεικονίζεται ένα τυπικό δείγμα πειράματος εφελκυσμού με τις χαρακτηριστικές του διαστάσεις. Πριν ξεκινήσει το πείραμα μετράται η αρχική διάμετρος d_0 και το μήκος l_0 , ώστε να εκτιμηθεί η παραμόρφωση που θα προκληθεί.

Το δείγμα στη συνέχεια, τοποθετείται σε ένα μηχάνημα δοκιμών, το οποίο εφαρμόζει σταδιακά φόρτιση εφελκυσμού, και έπειτα μετράται το φορτίο που ασκείται και η παραμόρφωση. Το φορτίο μετατρέπεται σε τάση από την παρακάτω εξίσωση:

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

όπου $A_0 = \frac{1}{4} \pi d^2$, όπου A_0 είναι το εμβαδό της διατομής του δείγματος.



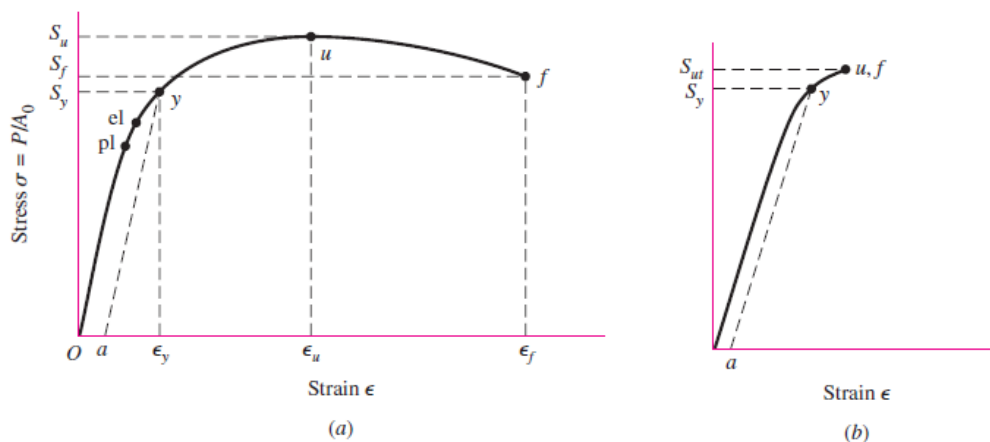
Σχήμα 3-1 Πείραμα εφελκυσμού για υπολογισμό τάσης και παραμόρφωσης.

Η παραμόρφωση, ή αλλιώς επέκταση του μήκους του δείγματος, υπολογίζεται από το $l - l_0$ όπου l είναι το μήκος του δείγματος που αντιστοιχεί στο φορτίο P . Η ένταση (strain) υπολογίζεται ως εξής:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Μετά το πέρας, ή κατά την διάρκεια του πειράματος, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε ένα διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. Το σχήμα 3-2 απεικονίζει τυπικά διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για όλκιμα και εύθραυστα υλικά. Τα όλκιμα υλικά παραμορφώνονται πολύ περισσότερο από τα εύθραυστα. Το σημείο p_l στο σχήμα 3-2α ονομάζεται όριο αναλογικής συμπεριφοράς. Αυτό είναι το σημείο μετά το οποίο η καμπύλη ξεκινάει να αποκλίνει από την ευθεία, δηλαδή από το γραμμικό τμήμα της. Σε αυτό το σημείο αν αφαιρεθεί το φορτίο δεν θα παρατηρηθεί καμία παραμόρφωση, εξού και ονομάζουμε την περιοχή ως ελαστική, επειδή έχει μνήμη σχήματος. Σε αυτό το γραμμικό τμήμα της καμπύλης η μονοαξονική σχέση τάσης-παραμόρφωσης δίνεται από το νόμο του Hooke, ως εξής:

$$\sigma = E * \varepsilon$$



Σχήμα 3-2 Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για όλκιμα και εύθραυστα υλικά.

όπου η σταθερά αναλογικής συμπεριφοράς E , που είναι και η κλίση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, ονομάζεται μέτρο Young ή πιο συχνά μέτρο ελαστικότητας. Η σταθερά E είναι ένα μέτρο της δυσκαμψίας ενός υλικού, και δεδομένου ότι η ένταση (strain) είναι αδιάστατη, οι μονάδες του E είναι ίδιες με αυτές της τάσης. Το ασάλι, για παράδειγμα, έχει μέτρο ελαστικότητας περίπου 30 Mpsi (207 GPa) ανεξάρτητα από τη θερμική επεξεργασία, την περιεκτικότητα σε άνθρακα, ή το είδος του κράματος. Ο ανοξείδωτος χάλυβας έχει περίπου 27,5 Mpsi (190 GPa). Το σημείο e_l στο σχήμα 3-2 καλείται όριο ελαστικότητας. Εάν το δείγμα φορτίζεται πέραν αυτού του σημείου, η παραμόρφωση λέγεται ότι είναι πλαστική και το υλικό θα υποστεί μόνιμη παραμόρφωση ακόμα και όταν αφαιρεθεί η φόρτιση. Μεταξύ των σημείων p_l και e_l η καμπύλη δεν είναι μια τέλεια ευθεία γραμμή, ακόμα και αν το δείγμα εξακολουθεί να είναι ελαστικό.

Κατά την διάρκεια της δοκιμασίας εφελκυσμού, πολλά υλικά φθάνουν στο σημείο στο οποίο η ένταση αρχίζει να αυξάνεται απότομα με μία αναντίστοιχη αύξηση της πίεσης. Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο απόδοσης (yield point). Το σημείο αυτό απόδοσης δεν είναι πάντα ευδιάκριτο σε όλα τα υλικά, ιδίως στα εύθραυστα. Για τον λόγο αυτό, το μέγεθος αντοχή διαρροής (yield strength) S_y ορίζεται συχνά από μία μέθοδο όφσετ όπως φαίνεται στο σχήμα 3-3, όπου η γραμμή a - γ γραμμή επεκτείνεται παράλληλα με την γραμμική περιοχή, δηλαδή με κλίση E . Το σημείο a αντιστοιχεί σε ένα καθορισμένο και συγκεκριμένο μέγεθος, που είναι συνήθως το 0,2 τοις εκατό του αρχικού μήκους του δείγματος ($Q = 0,002$).

Η απόλυτη, ή εφελκυστική αντοχή S_u αντιστοιχεί στο σημείο u του σχήματος 3-2 και είναι η μέγιστη τάση που επιτεύχθηκε στο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3-3a, ορισμένα υλικά εμφανίζουν πτωτική τάση μετά την μέγιστη καταπόνηση και θραύση στο σημείο f του διαγράμματος. Άλλα υλικά, όπως για παράδειγμα ο υψηλής αντοχής χάλυβας, υπόκεινται θραύση ενόσω η καμπύλη τάσης-έντασης έχει ακόμη θετική κλίση, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-2b, όπου τα σημεία u και f είναι ταυτόσημα.

Αξίζει να αναφερθώ στο ότι η αντοχή (strength), είναι μια ενδογενής ιδιότητα του υλικού, ή του μηχανικού στοιχείου εξαιτίας της επιλογής ενός συγκεκριμένου υλικού ή επεξεργασίας. Αντιθέτως η τάση είναι κάτι που συμβαίνει σε ένα μηχανικό μέρος, συνήθως ως αποτέλεσμα της συναρμολόγησης του σε μια μηχανή και λόγω της καταπόνησης του. Ωστόσο, μπορούν να προκληθούν επιπλέον τάσεις σε ένα υλικό λόγω κάποιων συγκεκριμένων επεξεργασιών. Για παράδειγμα, η επεξεργασία shot-peening παράγει μια συμπιεστική τάση στην εξωτερική επιφάνεια ενός μηχανικού μέρους, και βελτιώνει έτσι την αντοχή σε κόπωση (fatigue strength) του υλικού.

Τα διαγράμματα στο σχήμα 3-2 ονομάζονται μηχανικά (engineering) διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων, διότι οι τάσεις και οι εντάσεις που υπολογίζονται δεν έχουν πραγματικές τιμές. Η τάση υπολογίζεται με βάση το αρχικό εμβαδό της περιοχής, πριν εφαρμοστεί το φορτίο. Στην πραγματικότητα, καθώς εφαρμόζεται το φορτίο, το εμβαδό της περιοχής μειώνεται αισθητά τόσο ώστε η πραγματική τάση να είναι μεγαλύτερη από την μηχανική τάση που υπολογίζουμε. Για να ληφθεί η πραγματική τάση, θα πρέπει να μετρώνται ταυτόχρονα το φορτίο και η διατομή της περιοχής ενδιαφέροντος. Το σχήμα 3-3a απεικονίζει ένα όλκιμο υλικό, στο οποίο η τάση φαίνεται να μειώνεται από τα

σημεία u έως το f . Στην πράξη, πέρα από το σημείο u , η περιοχή του δείγματος μειώνεται δραματικά, και για τον λόγο αυτό, η πραγματική τάση είναι πολύ μεγαλύτερη από την μηχανική τάση στο τμήμα που υφίσταται "neck" δηλαδή υπερβολική συμπίεση.

Η μηχανική ένταση υπολογίζεται με βάση την καθαρή μεταβολή του μήκους του δείγματος σε σχέση με το αρχικό μήκος. Για την αποτύπωση του πραγματικού διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων, μερικές φορές χρησιμοποιείται ο όρος πραγματική ή λογαριθμική ένταση. Η πραγματική ένταση είναι το άθροισμα των στοιχειωδών επιμηκύνσεων διαιρούμενων με το μήκος του δείγματος κατά την άσκηση φόρτισης μεγέθους P , δηλαδή:

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$

όπου το ε συμβολίζει την πραγματική πίεση. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός πραγματικού διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης, είναι ότι η πραγματική τάση μέχρι το σημείο θραύσεως. Για αυτό όπως φαίνεται και στο σχήμα 3-3 η αληθινή τάση θραύσης σ_f είναι μεγαλύτερη από την τάση σ_u . Και αυτό σε αντίθεση με το σχήμα. 3-2α, όπου η μηχανική αντοχή θραύσης S_f είναι μικρότερη από την μηχανική αντοχή S_u .

Οι δοκιμές συμπίεσης είναι πιο δύσκολο να υλοποιηθούν, καθώς η γεωμετρία των δοκιμών διαφέρει από τη γεωμετρία των δειγμάτων στις δοκιμές εφελκυσμού. Ο λόγος για αυτό είναι ότι το δείγμα μπορεί να καμφθεί κατά τη διάρκεια της δοκιμής ή γενικά επειδή είναι δύσκολο να κατανείμει τις τάσεις ομοιόμορφα. Ωστόσο, τα αποτελέσματα μπορούν να αποτυπωθούν σε διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης, και επιπλέον μπορούν να οριστούν τα μεγέθη αντοχής που ορίσαμε στον εφελκυσμό. Στα περισσότερα όλκιμα υλικά η αντοχή συμπίεσης είναι περίπου ίδια με την αντοχή εφελκυσμού. Όταν όμως παρατηρούνται αισθητές διαφορές μεταξύ των εφελκυστικών και των συμπιεστικών αντοχών, όπως συμβαίνει με τον χυτοσίδηρο, αυτές θα πρέπει να αναφέρονται ξεχωριστά ως S_{ut} και S_{uc} .

Οι δυνάμεις στρέψης υπολογίζονται από την συστροφή στερεών κυλινδρικών σωμάτων, και μέσω της καταγραφής της ροπής και της γωνίας συστροφής που τους προκαλείται. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα διάγραμμα ροπής-στρέψης. Οι διατμητικές τάσεις του δείγματος είναι γραμμικές εν σχέσει με την ακτινική θέση, και επιπλέον είναι μηδενικές στο κέντρο του δείγματος μεγιστοποιούμενες στην εξωτερική ακτίνα r . Η μέγιστη διατμητική τάση τ_{max} είναι ανάλογη με την γωνία συστροφής και υπολογίζεται ως εξής:

$$\tau_{max} = \frac{Gr}{l_0} \theta$$

όπου το θ μετρείται σε ακτίνια, το r είναι η ακτίνα του δείγματος, το l_0 είναι το μήκος του δείγματος, και G είναι το μέτρο ακαμψίας του υλικού, που αποκαλείται και μέτρο διάτμησης ή μέτρο ακαμψίας. Επιπλέον η μέγιστη διατμητική τάση σχετίζεται με την εφαρμοζόμενη ροπή T ως παρακάτω:

$$\tau_{max} = \frac{Tr}{J}$$

όπου $J = \frac{\pi\rho^4}{2}$. Το διάγραμμα ροπής-συστροφής θα είναι παρόμοιο με αυτό του σχήματος 3-2. Χρησιμοποιώντας τις προαναφερθείσες εξισώσεις μπορούν να βρεθούν το όριο ελαστικότητας και η στρεπτική αντοχή (*torsional yield strength*) S_{sy} . Το μέγιστο σημείο σε ένα διάγραμμα ροπής-συστροφής, που αντιστοιχεί στο σημείο u του σχήματος 3-2, είναι το αντίστοιχο T_u . Η εξίσωση

$$S_{su} = \frac{T_u r}{J}$$

υπολογίζει το μέτρο θλάσης για την δοκιμή στρέψης. Σημειώνεται ότι είναι λάθος να ονομάζεται το S_{su} ως απόλυτη αντοχή στρέψης, καθώς οι εξωτερικές επιφάνειες του δείγματος βρίσκονται στην πλαστική περιοχή για ροπή T_u , και η κατανομή των τάσεων δεν είναι πλέον γραμμική. Η τάση και η αντοχή που υπολογίζονται από το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος 3-2 και από αντίστοιχα διαγράμματα, είναι γνωστά ως μηχανική τάση και αντοχή ή αλλιώς ως ονομαστική τάση και αντοχή. Αυτά είναι τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται σε κάθε τεχνική μελέτη για τους αναγκαίους υπολογισμούς. Ο χαρακτηρισμός τους ως μηχανικά μεγέθη, υποδηλώνει ότι ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται με την χρήση της αρχικής ή αλλιώς της μη παραμορφωμένης διατομής του δείγματος.

3.2 Σκληρότητα

Η αντίσταση ενός υλικού στην διείδυση από ένα εργαλείο ονομάζεται σκληρότητα. Αν και υπάρχουν πολλά συστήματα μέτρησης της σκληρότητας, εδώ θα αναφερθώ σε μόνο δύο που έχουν και την μεγαλύτερη χρήση.

Οι δοκιμές σκληρότητας Rockwell που περιγράφονται από τις προδιαγραφές ASTM (μέθοδος E-18) και οι μετρήσεις γίνονται εύκολα και γρήγορα και έχουν καλή επαναληψιμότητα. Οι κλίμακες σκληρότητας Rockwell ταξινομούνται ως A, B, C, . . . , κλπ. Τα εργαλεία διείδυσης είναι διαμάντι σχήματος σφαίρας διαμέτρου 16χιλ., και η εφαρμογή φορτίου 60, 100 ή 150 kg αντίστοιχα για τις κλίμακες A, B και C. Επομένως οι αριθμοί σκληρότητας που προκύπτουν έχουν νόημα μόνο σε σχέση με έναν άλλο αριθμό σκληρότητας που χρησιμοποιεί την ίδια κλίμακα.

Η σκληρότητα Brinell είναι μια ακόμη δοκιμή που χρησιμοποιείται επίσης αρκετά. Κατά την δοκιμή, το εργαλείο διείδυσης μέσω του οποίου εφαρμόζεται η δύναμη, είναι σφαίρα, ενώ η σκληρότητα H_B υπολογίζεται ως το πηλίκο του εφαρμοζόμενου φορτίου διά την σφαιρική επιφάνεια της προκαλούμενης εσοχής. Έτσι, οι μονάδες του H_B είναι οι ίδιες με αυτές της τάσης. Οι δοκιμές σκληρότητας Brinell παίρνουν περισσότερο χρόνο, δεδομένου ότι το H_B θα πρέπει να υπολογίζεται από την σφαιρική επιφάνεια των δοκιμών. Το κύριο πλεονέκτημα και των δύο μεθόδων είναι ότι είναι μη καταστροφικές στις περισσότερες περιπτώσεις. Και οι δύο είναι εμπειρικές και συνδέονται άμεσα με

την αντοχή του υλικού υπό δοκιμήν. Αυτό σημαίνει ότι η αντοχή των μηχανικών μερών θα μπορούσε, εφόσον είναι επιθυμητό, να δοκιμάζεται κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Για το ατσάλι, η σχέση μεταξύ της ελάχιστης απόλυτης αντοχής και της αντοχής Brinell για $200 \leq HB \leq 450$, έχει βρεθεί να είναι ίση με:

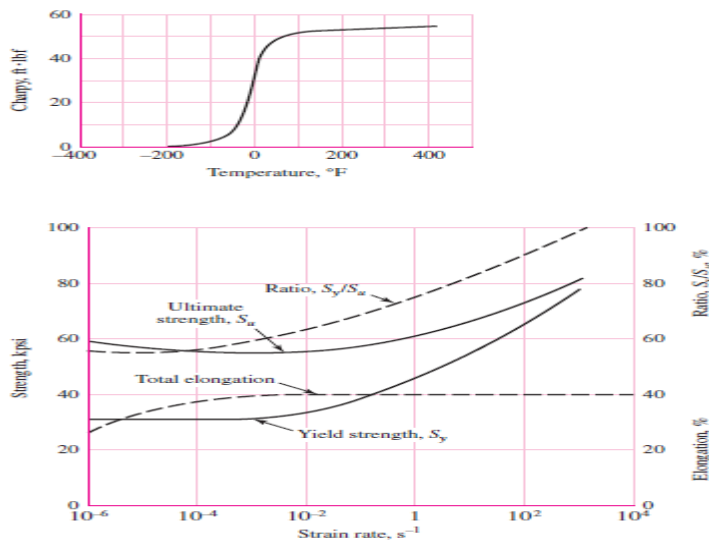
$$S_u = \begin{cases} 0.495 H_B & \text{kpsi} \\ 3.41 H_B & \text{MPa} \end{cases}$$

3.3 Ιδιότητες κρούσης

Η εξωτερική δύναμη που ασκείται σε μία κατασκευή ή σε ένα μηχανικό τμήμα ονομάζεται φορτίο επίδρασης, εφόσον ο χρόνος εφαρμογής της είναι λιγότερος από το ένα τρίτο της χαμηλότερης φυσικής περιόδου δόνησης του μηχανικού μέρους ή της κατασκευής. Διαφορετικά καλείται απλά ως στατικό φορτίο. Οι δοκιμές Charpy (πιο κοινή και Izod (πιο σπάνια) χρησιμοποιούν ράβδους ειδικής γεωμετρίας για τον καθορισμό της ευθραυστότητας και της αντοχής επίδρασης. Οι δοκιμές αυτές είναι χρήσιμες για την σύγκριση διαφόρων υλικών και για τον προσδιορισμό της ευθραυστότητας χαμηλής θερμοκρασίας. Και στις δύο δοκιμές, το δείγμα κρούεται από ένα εκκρεμές, το οποίο απελευθερώνεται από ένα σταθερό ύψος ενώ η ενέργεια που απορροφάται από το δείγμα, που ονομάζεται μέγεθος επίδρασης, μπορεί να υπολογιστεί από το ύψος της αιώρησης μετά την θραύση.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στο μέγεθος επίδρασης απεικονίζεται στο σχήμα 3-3 για ένα υλικό που υφίσταται μετάβαση από όλκιμη σε εύθραυστη κατάσταση. Αυτή η μετάβαση δεν παρουσιάζεται σε όλα τα υλικά. Όπως παρατηρείται από το σχήμα υπάρχει μία κρίσιμη περιοχή θερμοκρασιών κατά την οποία το μέγεθος επίπτωσης αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς. Στην περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας η θραύση είναι θριμματισμένου τύπου, ενώ πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία της περιοχής η θραύση υλοποιείται ως αποκόλληση. Η κρίσιμη θερμοκρασία φαίνεται να εξαρτάται τόσο από το υλικό όσο και από την γεωμετρία της εγκοπής. Για το λόγο αυτό οι σχεδιαστές δεν θα πρέπει να στηρίζονται υπερβολικά στα αποτελέσματα των δοκιμών. Όταν το ποσοστό παραμόρφωσης αυξάνεται, όπως γίνεται κάτω από συνθήκες κρούσης, αυξάνεται επιπλέον και η τιμή αντοχής όπως φαίνεται στο σχήμα 3-3.

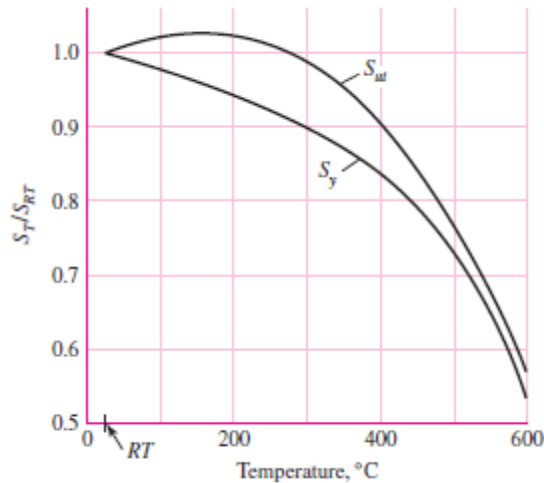
Στην πραγματικότητα, για πολύ υψηλά επίπεδα ποσοστού έντασης η αντοχή απόδοσης (yield strength) φαίνεται να προσεγγίζει οριακά την απόλυτη αντοχή. Αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι οι καμπύλες δείχνουν μικρή αλλαγή κατά την επιμήκυνση. Αυτό σημαίνει ότι η ολκιμότητα παραμένει περίπου ίδια. Επίσης, ενόσω αυξάνει η αντοχή απόδοσης, ένα υλικό όπως ο χάλυβας αναμένεται να συμπεριφέρεται ελαστικά σε όλο σχεδόν το φάσμα της αντοχής του υπό συνθήκες κρούσης. Οι δοκιμές Charpy και Izod παρέχουν δεδομένα σκληρότητα κάτω από δυναμικές και όχι στατικές συνθήκες.



Σχήμα 3-3 α) Επίδραση θερμοκρασίας στο μέγεθος κρούσης
β) Επίδραση του ποσοστού έντασης στην αντοχή.

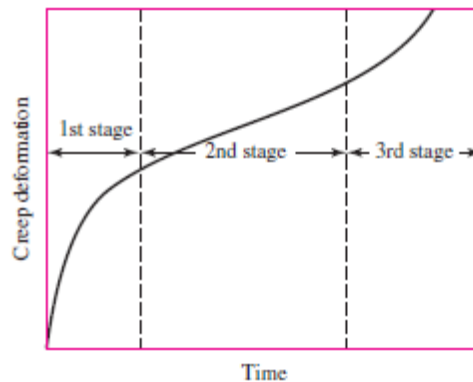
3.4 Επιδράσεις της θερμοκρασίας

Τα μεγέθη της αντοχής, της ολκιμότητας, ή της ευθραυστότητας, είναι ιδιότητες που επηρεάζονται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος λειτουργίας. Στο σχήμα 3-4 απεικονίζεται η επίδραση της θερμοκρασίας στις στατικές ιδιότητες του χάλυβα. Παρατηρείται ότι η εφελκυστική αντοχή αλλάζει μόνο κατά ένα μικρό ποσοστό μέχρι μια ορισμένη θερμοκρασία. Μετά από εκείνο το σημείο, φθίνει ραγδαία. Η αποδοτική αντοχή, ωστόσο, μειώνεται συνεχώς καθώς η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αυξάνεται. Υπάρχει μια σημαντική αύξηση της ολκιμότητας, όπως είναι αναμενόμενο, στις υψηλότερες θερμοκρασίες. Έχουν γίνει πολλές δοκιμές σε σιδηρούχα μέταλλα, τα οποία υποβάλλονται σε σταθερά φορτία για μεγάλο χρονικό διάστημα και σε υψηλές θερμοκρασίες. Βρέθηκε ότι τα δείγματα παραμορφώνονται μόνιμα κατά τις δοκιμές, ενώ ορισμένες φορές οι πραγματικές τάσεις είναι μικρότερες από την αποδοτική αντοχή του υλικού. Αυτή η συνεχόμενη παραμόρφωση υπό φορτίο, καλείται ερπυσμός.



Σχήμα 3-4 Αντοχή συναρτήσει θερμοκρασίας.

Ένα ακόμη ενδιαφέρον πείραμα είναι ο μακροχρόνιος ερπυσμός υπό σταθερό φορτίο. Το σχήμα 3-5 απεικονίζει μια καμπύλη ενός τέτοιου πειράματος. Το πείραμα γίνεται υπό σταθερή θερμοκρασία. Στην καμπύλη διακρίνονται τρεις κυρίως περιοχές. Στην πρώτη έχουμε τόσο ελαστική όσο και πλαστική παραμόρφωση. Εδώ παρατηρούνται χαμηλά ποσοστά ερπυσμού, που οφείλονται στην σκλήρυνση του υλικού. Στην δεύτερη περιοχή, παρατηρείται μία ελάχιστη αύξηση του ερπυσμού. Στο τρίτο στάδιο του διαγράμματος παρατηρείται μία σημαντική μείωση του εμβαδού του υλικού, η πραγματική τάση αυξάνεται ραγδαία, ενώ η μεγάλη αύξηση του ερπυσμού οδηγεί τελικά στην θραύση του.



Σχήμα 3-5 Παραμόρφωση ερπυσμού

Η θερμική επεξεργασία, χρησιμοποιείται για την αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Η θέρμανση, που προκαλείται από την ηλεκτρική ή μέσω φυσικού αερίου συγκόλληση αλλάζει επίσης τις μηχανικές του ιδιότητες. Οι αλλαγές αυτές οφείλονται στην σύσφιξη κατά την διάρκεια της συγκόλλησης αλλά και λόγω της θέρμανσης. Οι προκαλούμενες τάσεις από την διαδικασία, παραμένουν όταν το υλικό ψυχραίνεται και όταν αφαιρούνται οι σφικτήρες. Χρειάζεται κάθε φορά να γίνουν δοκιμές σκληρότητας για να εξακριβωθεί αν η

αντοχή έχει αλλάξει λόγω της συγκόλλησης, ωστόσο οι δοκιμές αυτές δεν αποκαλύπτουν την παρουσία των παραμενουσών τάσεων.

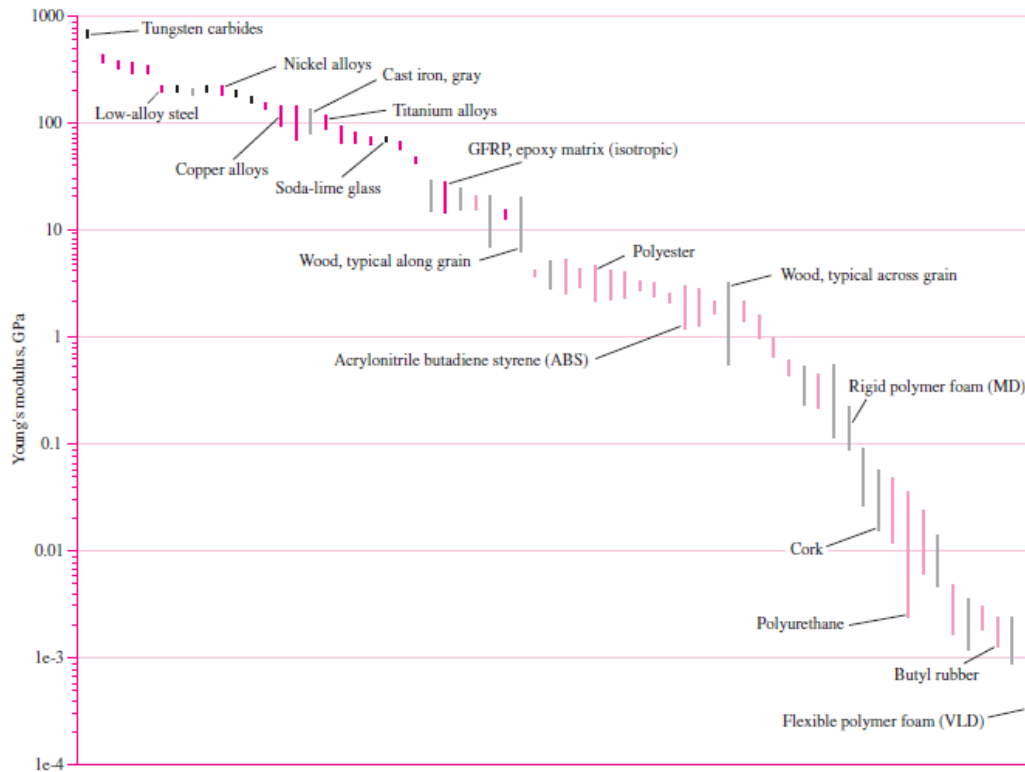
3.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ

Όπως και προαναφέρθηκε η επιλογή του υλικού για ένα μηχανικό μέρος ή μία δομική κατασκευή είναι μία από τις μεγαλύτερες αποφάσεις που καλείται να λάβει ο σχεδιαστής. Στις προηγούμενες ενότητες αναλύθηκαν και εκτέθηκαν πολλές βασικές φυσικές ιδιότητες των υλικών. Η επεξεργασία των υλικών βρίσκεται έξω από τους επιστημονικούς στόχους της εργασίας, ωστόσο και αυτή επηρεάζει καθοριστικά την τελική μορφή και τις ιδιότητες του υλικού και πρέπει να λαμβάνει της δέουσας προσοχής.

Η πραγματική όμως επιλογή του υλικού, μπορεί είτε να είναι μία απλή ρουτίνα αν βασιζόμαστε σε προηγούμενες επιτυχημένες εφαρμογές, μπορεί και όμως σαν διαδικασία να είναι επίσης απαιτητική, αν θα χρειάζεται να συνυπολογίσουμε και άλλους παράγοντες όπως οικονομικούς, λειτουργικούς, φυσικούς και επεξεργαστικούς. Σε γενικές γραμμές, χρειάζεται να υπάρχει μία συστηματική προσέγγιση βελτιστοποίησης του επιλεγόμενου υλικού. Σε αυτό το σημείο θα αναλυθεί η διαδικασία αξιολόγησης των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, και πως γίνεται αντιμετώπιση τους με βάση το κριτήριο κρισιμότητας. Οι ιδιότητες αυτές θα πρέπει να μπουν σε προτεραιότητα, με βάση ένα "ειδικό" βάρος που αυτές κατέχουν κάθε φορά για τον σχεδιασμό.

Μία ικανοποιητική μέθοδος επιλογής, στηρίζεται στην ταξινόμηση των υλικών με βάση κάποια χαρακτηριστικά τους. Ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει μία ομάδα από υλικά που για όλες τις λίστες βρίσκεται σε υψηλή θέση. Όταν περιορίσει τις επιλογές του σε μία μικρή ομάδα, μπορεί έπειτα μέσω περαιτέρω δοκιμών να συγκεκριμενοποιήσει την επιλογή του σε ένα τελικό υλικό.

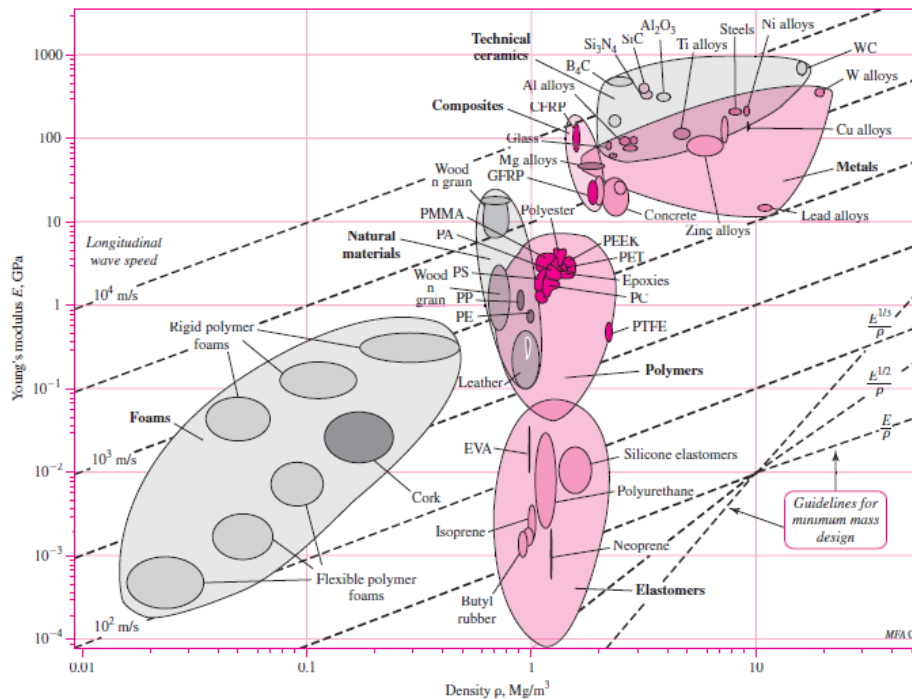
Ο Δρ. Μ. F. Ashby έχει αναπτύξει μία αποτελεσματική και συστηματική μέθοδο με την χρήση διαγραμμάτων επιλογής υλικών που φαίνονται και στα παρακάτω σχήματα. Αυτή η μέθοδος έχει υλοποιηθεί και σε λογισμικό πακέτο, το CES Edupack, το οποίο μπορεί να επικουρήσει την όλη διαδικασία. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν διάφορες ιδιότητες μερικών οικογενειών και κλάσεων των υλικών. Για παράδειγμα το σχήμα 3-6 απεικονίζει τις τιμές του Young modulus E, για κάθε οικογένεια υλικού. Σε μία άλλη παραλλαγή ο άξονας χ θα μπορούσε να απεικονίσει μία άλλη ιδιότητα, όπως για παράδειγμα την πυκνότητα του υλικού για να υπάρχει ακόμα πιο λεπτομερέστερη εικόνα των ιδιοτήτων.



Σχήμα 3-6 Διάγραμμα τιμών σταθεράς ελαστικότητας για διάφορα υλικά.

Το σχήμα 3-7 που ονομάζεται και διάγραμμα-"φούσκα", απεικονίζει το μέτρο ελαστικότητας E συναρτήσει της πυκνότητας ρ . Εδώ πλέον οι γραμμές δίνουν θέση σε καμπύλες οι οποίες απεικονίζουν το εύρος τιμών για κάθε μία από τις δύο μεταβλητές. Η απεικόνιση αυτή είναι πιο λειτουργική και χρήσιμη σε σχέση με αυτή του σχήματος 3-6. Επιπλέον, σε αυτό το διάγραμμα γίνεται εμφανής η σχέση μεταξύ βάρους και ελαστικότητας(ακαμψίας). Οι διακεκομμένες γραμμές στην κάτω δεξιά γωνία του διαγράμματος δείχνουν την αναλογία E/ρ , η οποία βοηθάει στην επιλογή του υλικού κατά τον σχεδιασμό. Επομένως όλες αυτές οι παράλληλες γραμμές δείχνουν διαφορετικές τιμές αυτής της αναλογίας. Δεδομένου ότι η ταχύτητα του ήχου σε ένα υλικό δίνεται από το $(E/\rho)/ 2$, κάθε διακεκομμένη γραμμή του πηλίκου E/ρ , αντιπροσωπεύει και μια διαφορετική ταχύτητα για το υλικό. Το μετρό απόδοσης P ενός δομικού στοιχείου εξαρτάται από (1) τις λειτουργικές απαιτήσεις, (2) την γεωμετρία, και (3) τις ιδιότητες του υλικού της δομής, δηλαδή,

$$P = \left[\left(\text{functional requirements } F \right), \left(\text{geometric parameters } G \right), \left(\text{material properties } M \right) \right]$$



Σχήμα 3-7 Διάγραμμα τιμών σταθεράς ελαστικότητας ως προς την πυκνότητα, και οικογένειες υλικών.

Η συνάρτηση γίνεται,

$$P = f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$$

Για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, απαιτείται η μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση του P . Αυτό επιτυγχάνεται με την μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση του $f_3(M)$, που αφορά τις ιδιότητες του υλικού, και ονομάζεται συντελεστής αποδοτικότητας του υλικού.

Χάριν παραδείγματος, έστω ότι ζητείται να κατασκευαστεί μία ελαφριά, άκαμπτη και φορτισμένη δοκός κυκλικής διατομής. Εδώ το ζητούμενο του αποδοτικού σχεδιασμού, θα είναι η ελαχιστοποίηση της μάζας m της δοκού. Η ακαμψία μίας δοκού σχετίζεται με το υλικό και τη γεωμετρία του. Η ακαμψία της δοκού υπολογίζεται από την σχέση $k = F / \delta$, όπου F και δ είναι το φορτίο και η παραμόρφωση, αντίστοιχα. Η τελική παραμόρφωση μίας δοκού θα είναι ίση με $\delta = \gamma_{\max} = (F_3 l) / (3E I)$, όπου E είναι το μέτρο του Young, I είναι η μάζα αδρανείας, και l είναι το μήκος της δοκού. Έτσι, η ακαμψία δίνεται από τον τύπο:

$$K = \frac{F}{\delta} = \frac{3EI}{l^3}$$

ενώ η μάζα αδρανείας της διατομής:

$$I = \frac{\pi D^4}{64} = \frac{A^2}{4\pi}$$

όπου D και A είναι αντίστοιχως η διάμετρος και το εμβαδό της διατομής. Αν λύσω ως προς A θα έχω:

$$A = \left(\frac{4\pi k l^3}{3E} \right)^{1/2}$$

Η μάζα της δοκού είναι:

$$m = Al\rho$$

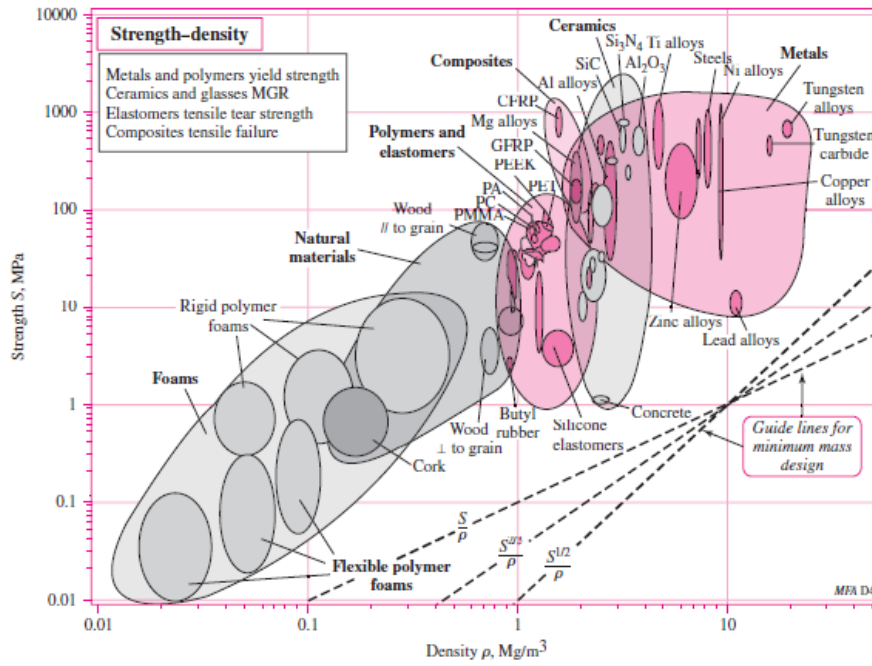
Αντικαθιστώντας τις παραπάνω εξισώσεις θα έχω:

$$m = 2 \sqrt{\frac{\pi}{3}} (\sqrt{k}) \left(l^{\frac{5}{2}} \right) \left(\frac{\rho}{E^{0.5}} \right)$$

Στην παραπάνω εξίσωση ο όρος $2\sqrt{\frac{\pi}{3}}$ είναι μία απλή σταθερά και μπορεί να συσχετιστεί με οποιαδήποτε συνάρτηση. Επομένως η συνάρτηση $f_1(F) = 2\sqrt{\frac{\pi}{3}}$ είναι η λειτουργική συνάρτηση που εκφράζει τις απαιτήσεις ακαμψίας, $f_2(G) = \left(l^{\frac{5}{2}} \right)$ είναι η γεωμετρική συνάρτηση που εκφράζει το μήκος, και ο τελευταίος όρος είναι ο συντελεστής αποδοτικότητας του υλικού που είναι ίσος με την συνάρτηση $f_3(M) = \left(\frac{\rho}{E^{0.5}} \right)$.

Για να ελαχιστοποιηθεί το M θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η $f_3(M)$, ή αλλιώς να μεγιστοποιηθεί το M^{-1} , όπου M είναι ο δείκτης υλικού και $\beta=1/2$. Αφού υπολογίστηκαν αυτοί οι παράμετροι, η επιλογή των υλικών θα γίνει βάσει του σχήματος 3-7, βάσει των διακεκομμένων γραμμών. Παρατηρείται ότι για $E^{0.5}$, οι επιλογές μας περιορίζονται σε συνθετικά και κεραμικά υλικά για το συγκεκριμένο πρόβλημα της δοκού με κυκλική διατομή. Αν ληφθούν και άλλοι περιορισμοί και συγκεκριμένα κάποιες τιμές του μέτρου ελαστικότητας, τότε καταλήγουμε στην επιλογή ενός συγκεκριμένου υλικού.

Για τις ανάγκες μίας σχεδιαστικής εργασίας, φυσικά θα υπάρχουν και άλλοι περιορισμοί παραμέτρων που θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν, όπως η αντοχή, το κόστος κ.α. Στο σχήμα 3-8 βλέπουμε για παράδειγμα ένα διάγραμμα αντοχής σε σχέση με πυκνότητα για πολλές κατηγορίες υλικών. Υπάρχουν και άλλα διαγράμματα που μπορούν να μας βοηθήσουν στην επιλογή του υλικού. Τα λογισμικά πακέτα όπως το CES Edupack, μας δίνουν μία ολοκληρωμένη εικόνα και μπορούν σίγουρα να μας βοηθήσουν στην επιλογή τους.



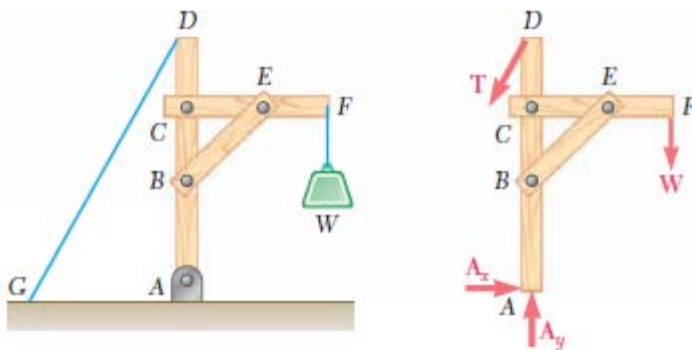
Σχήμα 3-8 Διάγραμμα Αντοχής ως προς πυκνότητα για διάφορες οικογένειες υλικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθώ με προβλήματα εύρεσης ισορροπίας σε κατασκευές που αποτελούνται από διάφορα συνδεδεμένα μεταξύ τους μηχανικά μέρη. Αυτά τα προβλήματα απαιτούν όχι μόνο τον προσδιορισμό των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν στην δομή, αλλά και των δυνάμεων που συγκρατούν τα διάφορα μέρη της δομής. Από πλευράς συνολικής δομής, οι δυνάμεις αυτές είναι εσωτερικές. Εξετάζοντας το παράδειγμα του σχήματος 4-1, παρατηρείται ότι ένας γερανός μεταφέρει ένα φορτίο W . Ο γερανός αποτελείται από τρεις δοκούς τους AD , CF και BE , οι οποίοι δοκοί συνδέονται με καρφιά που δεν προκαλούν τριβή (ο συνυπολογισμός της τριβής δεν εξετάζεται εδώ). Στην διπλανή εικόνα έχει σχεδιαστεί το διάγραμμα ελευθέρου σώματος του γερανού. Οι εξωτερικές δυνάμεις, που παρουσιάζονται στο διάγραμμα, περιλαμβάνουν το βάρος W , τις δύο συνιστώσες A_x και A_y αντίδρασης στο σημείο A , και την δύναμη T που ασκείται από το καλώδιο στο σημείο D . Οι εσωτερικές δυνάμεις που κατέχουν τα διάφορα τμήματα του γερανού δεν εμφανίζονται στο διάγραμμα. Εάν, ωστόσο, ο γερανός επιμεριστεί στα διάφορα τμήματα του, θα σχεδιαστούν και οι δυνάμεις συγκράτησης των δοκών μεταξύ τους, καθότι αυτές οι δυνάμεις είναι εξωτερικές για την κάθε δοκό.



Σχήμα 4-1 Ένα τυπικό πρόβλημα δικτυώματος.

Οι παραπάνω υπολογισμοί είναι σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα, που ορίζει ότι οι δυνάμεις δράσης και αντίδρασης μεταξύ των φορέων που έρχονται σε επαφή έχουν το ίδιο μέτρο και ίδιο άξονα δράσης. Ο νόμος αυτός του Νεύτωνα, αποτελεί την μία από τις έξι βασικές αρχές της στοιχειώδους μηχανικής, και η εφαρμογή του νόμου είναι απαραίτητη για τη λύση των προβλημάτων που αφορούν συνδεδεμένους φορείς.

Υπάρχουν τρεις μεγάλες κατηγορίες μηχανικών δομών που συνήθως εξετάζονται:

1. Δικτυώματα: σχεδιάζονται για να υποστηρίξουν τα φορτία και είναι συνήθως στατικές και πλήρως περιορισμένες δομές. Τα δικτυώματα αποτελούνται αποκλειστικά από απλά μέλη που συνδέονται με αρθρώσεις στα άκρα του κάθε μέλους. Επομένως τα μέλη ενός δικτυώματος, είναι μέλη τα οποία υφίστανται δύο ίσες και αντίρροπες δυνάμεις κατά μήκος τους.

2. Πλαίσια: επίσης σχεδιάζονται για την υποστήριξη φορτίων και είναι εξίσου στατικές πλήρως περιορισμένες δομές. Ωστόσο, όπως στο παράδειγμα του γερανού, τα πλαίσια περιέχουν πάντοτε τουλάχιστον ένα μέλος με πολλές δυνάμεις, δηλαδή, ένα μέλος το οποίο υφίσταται τρεις ή περισσότερες δυνάμεις οι οποίες δεν έχουν κατεύθυνση κατά μήκος του μέλους.

3. Μηχανισμοί: οι οποίοι σχεδιάζονται για να μεταδίδουν και να τροποποιούν τις δυνάμεις, και είναι στην ουσία τους, δομές που περιέχουν κινούμενα μέρη.

4.2 ΔΙΚΤΥΩΜΑ-ΟΡΙΣΜΟΣ

Το δικτύωμα είναι ένας από τους σημαντικότερους τύπους μηχανικών κατασκευών. Παρέχει μια πρακτική και οικονομική λύση σε πολλά μηχανικά προβλήματα, ειδικά για τον σχεδιασμό γεφυρών και κτιρίων.

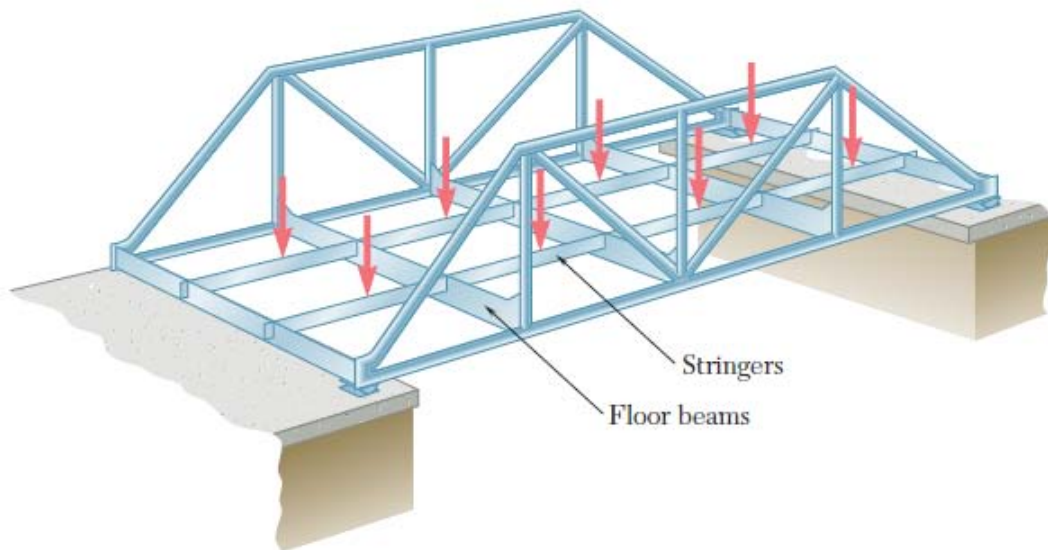
Ένα δικτύωμα αποτελείται από ευθεία μέλη που συνδέονται στις αρθρώσεις. Τα μέλη του δικτυώματος συνδέονται στα άκρα τους και μόνο, οπότε η ανάλυση των δικτυωμάτων θεωρεί κάθε άρθρωση ως αρχή και τέλος ενός ή περισσότερων δοκών-μελών του δικτυώματος. Οι περισσότερες πραγματικές κατασκευές αποτελούνται από μερικά δικτυώματα τα οποία ενώνονται και σχηματίζουν την μηχανική δομή. Το κάθε δικτύωμα σχεδιάζεται για να υποστηρίξει τα φορτία που ενεργούν στο επίπεδο του, επομένως πρέπει να αντιμετωπίζεται ως μία δισδιάστατη δομή.

Σε γενικές γραμμές, τα μέλη ενός δικτυώματος είναι λεπτά και υποστηρίζουν μικρή πλευρική φόρτιση. Ως εκ τούτου όλα τα φορτία, πρέπει να εφαρμόζονται στις αρθρώσεις, και όχι στα ίδια τα μέλη. Όταν ένα συγκεντρωμένο φορτίο πρέπει να εφαρμοστεί στο ενδιαμέσο μεταξύ δύο αρθρώσεων, ή όταν ένα κατανεμημένο φορτίο πρέπει να υποστηρίζεται από το δικτύωμα, όπως στην περίπτωση του δικτυώματος της γέφυρας, πρέπει να σχεδιαστεί ένα δικτύωμα δαπέδου, το οποίο μέσω των δοκών stringers και floor, θα μεταδίδει το φορτίο στις αρθρώσεις. Στο σχήμα 4-2 δίνεται μία απεικόνιση μίας τέτοιας κατασκευής, που χρησιμοποιεί δικτύωμα δαπέδου.

Το ζήτημα της κατασκευής του ποδηλάτου, προσομοιώνεται βέλτιστα, με το πρόβλημα του δικτυώματος, με τους σωλήνες του ποδηλάτου να αποτελούν τους δοκούς του δικτυώματος. Τα φορτία που ασκούνται στην δομή του ποδηλάτου, είναι κατά βάση συγκεντρωμένα (βάρος αναβάτη, δυνάμεις στο τιμόνι και στο πεντάλ), εκτός από ορισμένες περιπτώσεις όπως η επίδραση του αέρα, που ασκεί

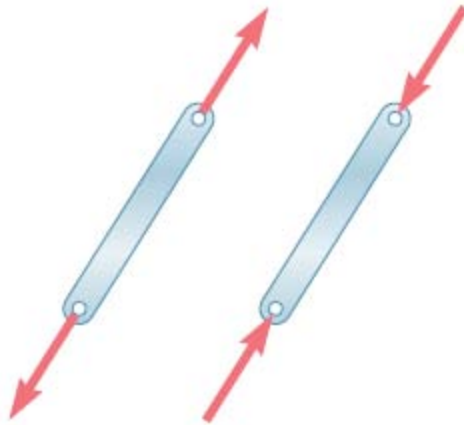
κατανεμημένα φορτία. Έτσι εκτός από ειδικές περιπτώσεις μπορούμε να θεωρήσουμε το πρόβλημα του ποδηλάτου ως ένα δισδιάστατο πρόβλημα δικτυώματος, και με βάσει αυτήν την ανάλυση, επιλύουμε στατικά το πρόβλημα του ποδηλάτου.

Το βάρος της κάθε δοκού του δικτυώματος, θεωρείται ότι πρέπει να εφαρμόζεται στις αρθρώσεις, με το ήμισυ του βάρους του της κάθε δοκού, να εφαρμόζεται σε καθεμία από τις δύο αρθρώσεις στις οποίες συνδέεται αυτή. Παρόλο που οι πραγματικοί δοκοί ενώνονται είτε με συγκόλληση, με κοχλίες, ή με άλλους μηχανισμούς σύνδεσης, συνήθως γίνεται η υπόθεση ότι οι δοκοί είναι μεταξύ τους καρφωμένοι και ως εκ τούτου, οι δυνάμεις που ενεργούν σε κάθε απόληξη της δοκού καταλήγουν σε μία και μόνο δύναμη και όχι σε περισσότερες.

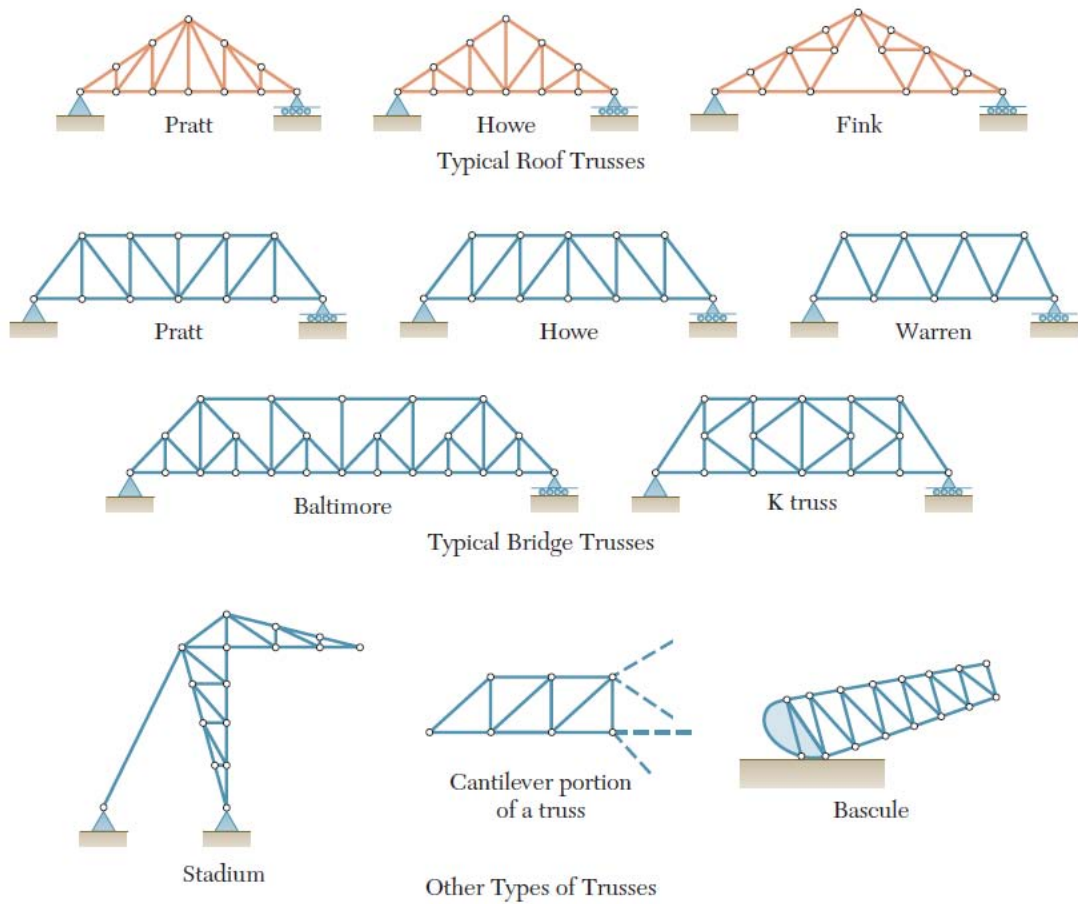


Σχήμα 4-2 Κατασκευή γέφυρας με χρήση δικτυώματος δαπέδου.

Επομένως κάθε δοκός θεωρείται ως ένα μέλος δύο δυνάμεων, και το σύνολο του δικτυώματος μπορεί να θεωρηθεί ως μία ομάδα συνδέσμων και δοκών δύο δυνάμεων. Στο σχήμα 4-3 παρατηρούνται δύο δοκοί, με την πρώτη να υφίστανται δυνάμεις που προσπαθούν να την διαχωρίσουν, κατάσταση που την ονομάζουμε εφελκυσμό. Η δεύτερη υφίσταται δυνάμεις που τείνουν προς την συμπίεση της, κατάσταση που την ονομάζουμε θλίψη. Στο σχήμα 4-4 απεικονίζονται επιπλέον διάφοροι τύποι δικτυωμάτων.



Σχήμα 4-3 Πρόκληση εφελκυσμού και θλίψης σε δύο δοκούς.

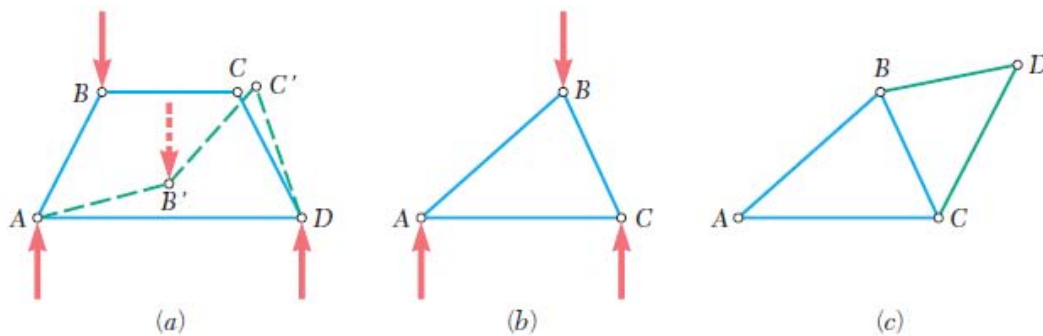


Σχήμα 4-4 Κλασικοί τύποι δικτυωμάτων.

4.3 Απλά δικτύωμα

Στην περίπτωση που εφαρμόζεται φορτίο στο σημείο B, το δικτύωμα θα υποστεί σημαντική παραμόρφωση, και θα χάσει την αρχική του μορφή. Αντίθετα, το δικτύωμα του σχήματος 4-5b, το οποίο αποτελείται από τρεις συνδεδεμένες δοκούς στα σημεία A, B και Γ, θα παραμορφωθούν μόνο μερικώς λόγω του φορτίου που εφαρμόζεται στην άρθρωση B. Η μόνη παραμόρφωση που θα υποστεί το δικτύωμα είναι η μικρή αλλαγή του μήκους των δοκών λόγω θλίψεως. Το δικτύωμα του σχήματος 4-5b ονομάζεται σταθερό δικτύωμα, εννοώντας ότι το δικτύωμα δεν καταρρέει κάτω από την επίδραση της δύναμης.

Όπως φαίνεται στο σχήμα. 4-5c, με την προσθήκη των δύο δοκών BD και CD μπορεί να κατασκευαστεί ένα μεγαλύτερο σε σχέση με το προηγούμενο σταθερό δικτύωμα. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές, και το προκύπτων δικτύωμα θα είναι ομοίως σταθερό, αν κάθε φορά τα δύο νέα μέλη που θα προστίθενται, θα συνδέονται σε δύο υπάρχουσες αρθρώσεις και θα σχηματίζουν μία νέα. Τα δικτύωμα που προκύπτουν με αυτήν την νέα διαδικασία ονομάζεται απλά δικτύωμα.



Σχήμα 4-5 Απλό δικτύωμα.

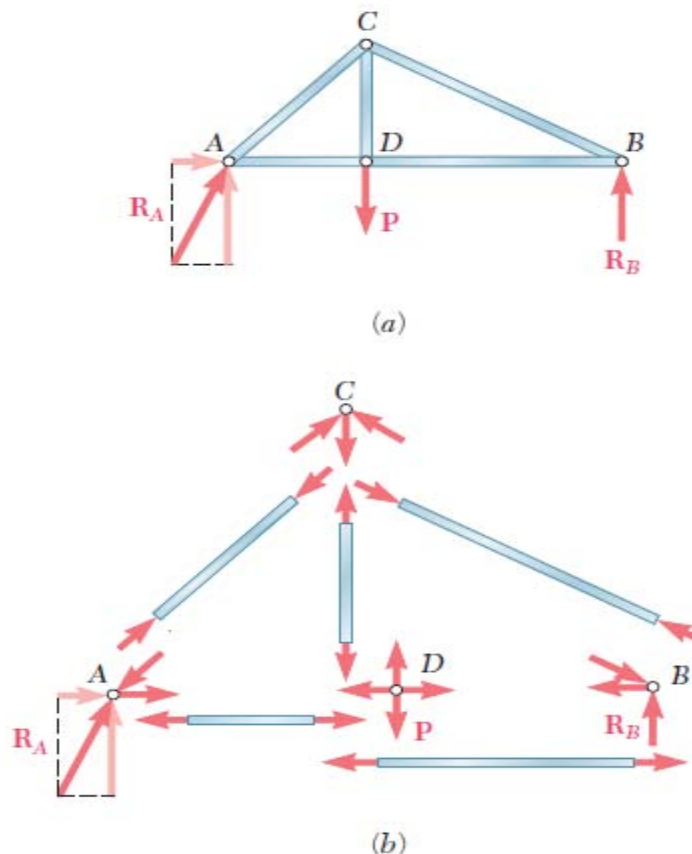
Παρατηρείται ότι το δικτύωμα του σχήματος 4-5b έχει τρεις δοκούς και τρεις αρθρώσεις. Αντίθετα το δικτύωμα του σχήματος 4-5 έχει δύο επιπλέον δοκούς και μία επιπλέον άρθρωση. Παρατηρώντας ότι κάθε φορά που προστίθενται δύο νέα μέλη, ο αριθμός των αρθρώσεων αυξάνεται κατά ένα, διαπιστώνεται ότι σε ένα απλό δικτύωμα ο συνολικός αριθμός των δοκών είναι $m = 2n - 3$, όπου n ο συνολικός αριθμός των αρθρώσεων.

4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ.

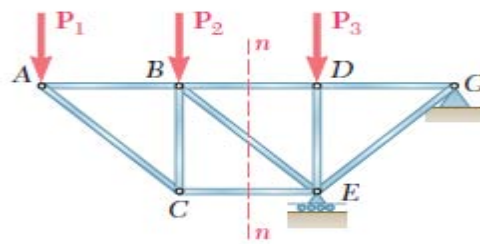
Όπως ήδη αναφέρθηκε το δικτύωμα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο από αρθρώσεις και δοκούς δύο δυνάμεων. Στο σχήμα 4-6 a σχεδιάζεται το διάγραμμα ελευθέρου σώματος ενός δικτυώματος, το οποίο αναλύεται περαιτέρω για κάθε δοκό στο σχήμα 4-6b το οποίο δείχνει και τις εσωτερικές του δυνάμεις. Κάθε δοκός όπως παρατηρείται υφίσταται δύο δυνάμεις, μία σε κάθε άκρο, οι οποίες είναι ίδιου μέτρου, άξονα, και αντίθετης κατεύθυνσης.

Επιπλέον, σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα, οι δυνάμεις δράσης και αντίδρασης, σε μία δοκό και μία άρθρωση είναι ίσες και αντίθετες. Ως εκ τούτου, οι δυνάμεις που ασκούνται από μία δοκό στις δύο της αρθρώσεις πρέπει να είναι ομοαξονικές με την ίδια την δοκό, και να είναι ίσες και αντίθετες. Δεδομένου ότι οι άξονες δράσης των εσωτερικών δυνάμεων είναι γνωστές για το δικτύωμα, η ανάλυση του δικτυώματος περιορίζεται στον υπολογισμό των δυνάμεων στις δοκούς, και στον καθορισμό της παραμόρφωσης που υφίστανται, εάν δηλαδή είναι εφελκυστική ή θλιπτική.

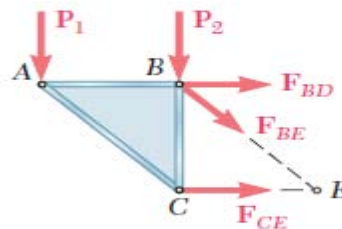
Με δεδομένο ότι το σύνολο του δικτυώματος βρίσκεται σε ισορροπία, η κάθε ξεχωριστή άρθρωση θα είναι εξίσου σε ισορροπία. Αν το δικτύωμα επομένως έχει n αρθρώσεις, θα υπάρχουν, συνεπαγωγικά, $2n$ εξισώσεις, για την εύρεση $2n$ αγνώστων. Στην περίπτωση του απλού δικτυώματος, έχουμε $m = 2n - 3$ δηλαδή $2n = m + 3$ αρθρώσεις άρα και εξισώσεις, άρα ο αριθμός των αγνώστων που μπορούν να επιλυθούν θα είναι $m + 3$. Αυτό σημαίνει ότι οι δυνάμεις σε όλες τις δοκούς, δηλαδή για το παράδειγμα μας, οι συνιστώσες της αντίδρασης R_A , και η αντίδραση R_B , μπορούν να υπολογισθούν με τα διαγράμματα ελεύθερου σώματος των αρθρώσεων. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, μέχρι να προσδιοριστούν όλες οι άγνωστες εσωτερικές δυνάμεις, ώστε να έχουμε μία πλήρη προσέγγιση του στατικού προβλήματος του δικτυώματος.



Σχήμα 4-6 Ανάλυση εσωτερικών δυνάμεων διαγράμματος ελεύθερου σώματος.



(a)



(b)

Σχήμα 4-7

4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ.

Η μέθοδος των αρθρώσεων είναι πιο αποτελεσματική όταν θέλουμε να υπολογίσουμε όλες τις δυνάμεις στις δοκούς ενός δικτύωματος. Εάν, ωστόσο, επιθυμούμε τον υπολογισμό μόνο ενός μέρους αυτών των δυνάμεων, είναι πιο αποτελεσματικό να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των τμημάτων. Για παράδειγμα, έστω ότι χρειάζεται να καθοριστεί η δύναμη στην δοκό BD του δικτύωματος του σχήματος 4-7. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει να καθοριστούν οι δυνάμεις τις οποίες η δοκός BD , ασκεί στις αρθρώσεις B και D . Αν χρησιμοποιούνταν η μέθοδος των αρθρώσεων, θα επιλέγονταν η άρθρωση B ή D ως ελεύθερο σώμα. Ωστόσο, είναι δυνατόν να επιλεγθεί ένα μεγαλύτερο τμήμα του δικτύωματος, το οποίο θα αποτελείται από διάφορες αρθρώσεις και δοκούς, υπό την προϋπόθεση ότι η άγνωστη δύναμη είναι εξωτερική σε σχέση με αυτό το τμήμα που θα επιλεγθεί.

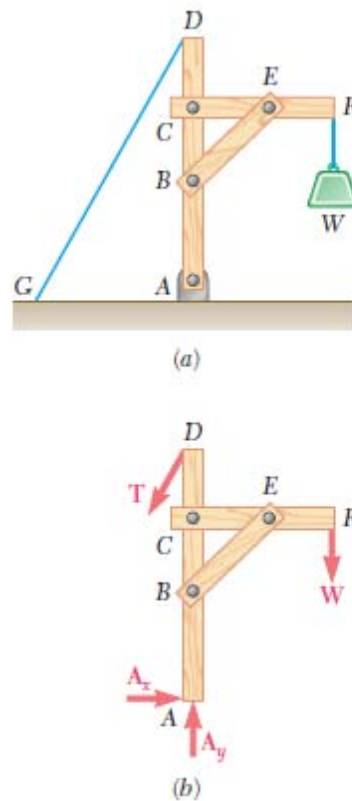
Εάν επιπλέον, επιλεγθεί κατάλληλα το τμήμα του δικτύωματος έτσι ώστε να υπάρχουν μόνο τρεις άγνωστες δυνάμεις, η επιθυμητή δύναμη μπορεί να ευρεθεί με την επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας για αυτό το τμήμα του δικτύωματος. Στην πράξη, το τμήμα του δικτύωματος λαμβάνεται μέσω του διαχωρισμού των τριών δοκών του δικτύωματος, έτσι ώστε να προκύψουν δύο ξεχωριστά τμήματα, τα οποία στην συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ελεύθερα σώματα. Η επίλυση με αυτήν την μέθοδο μειώνει τις απαραίτητες για υπολογισμό εξισώσεις και περιορίζει ένα πρόβλημα στην εύρεση μόνο κάποιων επιθυμητών δυνάμεων.

4.6 ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ

Εκτός από τις δομές δικτυωμάτων στα οποία επιδρούν υπάρχουν και δομές στις οποίες τουλάχιστον μία δοκός υφίσταται πολλαπλές δυνάμεις. Στο σημείο θα γίνει εξέταση αυτών των δομών. Οι δυνάμεις αυτές συνήθως δεν κατευθύνονται κατά μήκος της δοκού είναι επομένως άγνωστη, και εκφράζεται με δύο άγνωστες συνιστώσες. Τα πλαίσια και οι μηχανές είναι δομές που περιέχουν δοκούς με πολλαπλές δυνάμεις. Τα πλαίσια επίσης σχεδιάζονται για να υποστηρίξουν φορτία και συνήθως είναι πλήρως περιορισμένες κατασκευές. Οι μηχανές κατασκευάζονται για την μετάδοση και την τροποποίηση των δυνάμεων, και μπορούν να είναι είτε στατικής μορφής είτε να περιέχουν κινούμενα μέρη.

4.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Για την περιγραφή της ανάλυσης του πλαισίου θα χρησιμοποιηθεί και πάλι το παράδειγμα του γερανού που νωρίτερα περιγράψαμε.



Σχήμα 4-8

Το διάγραμμα ελεύθερου σώματος του πλαισίου παρουσιάζεται στο σχήμα 4-8b'. Το διάγραμμα χρησιμεύει στον καθορισμό των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν στο πλαίσιο. Καταρχήν υπολογίζεται η δύναμη T που ασκείται από το καλώδιο, και έπειτα υπολογίζονται οι συνιστώσες A_x και A_y στην πάκτωση A . Για να καθοριστούν οι εσωτερικές δυνάμεις που συγκρατούν τα διάφορα μέρη του πλαισίου, απομονώνουμε τα μέρη του πλαισίου και σχεδιάζουμε το διάγραμμα

ελεύθερου σώματος για καθένα από τα τμήματα του πλαισίου σχήμα 4-8c. Η δοκός BE θα πρέπει να διαθέτει δυνάμεις ίδιου μέτρου και αντίθετης κατεύθυνσης, επομένως κατανέμονται κατά μήκος της δοκού όπως στο σχήμα. Στην συνέχεια θα επιβεβαιωθεί ότι οι δύο δυνάμεις είναι του ίδιου μέτρου.

Στην συνέχεια οι υπόλοιποι δοκοί υφίστανται τουλάχιστον τρεις δυνάμεις. Σύμφωνα με τον 3ο νόμο του Newton, η δύναμη που ασκείται από την δοκό BE στην δοκό AD, θα πρέπει να είναι ίδιου μέτρου και αντίθετης κατεύθυνσης σε σχέση με την δύναμη της δοκού AD στην BE. Ομοίως για την δοκό BE στην CF. Επομένως οι δυνάμεις που ασκεί η δοκός BE στις AD και CF είναι αντιστοίχως ίσες με $-F_{BE}$ και F_{BE} .

Στην άρθρωση C συνδέονται δύο δοκοί με πολλαπλές δυνάμεις. Εφόσον δεν γνωρίζουμε ούτε το μέγεθος ούτε και την φορά της δύναμης, θα σχεδιάσουμε τις δύο άγνωστες συνιστώσες x και y όπως στο σχήμα. Ομοίως με την χρήση του 3ου νόμου του Νεύτωνα, οι δυνάμεις που ασκούνται από την δοκό CF στην AD και αντίθετως θα είναι ίσες και αντίθετες. Τα διαγράμματα ελεύθερου σώματος των δοκών με πολλαπλές δυνάμεις ολοκληρώνονται με την σχεδίαση των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν στο πλαίσιο.

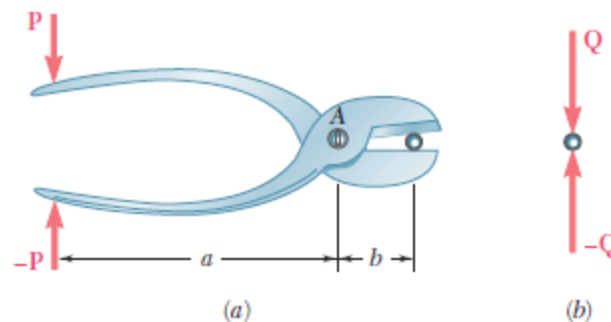
Οι εσωτερικές δυνάμεις σε αυτό το σημείο υπολογίζονται από το διάγραμμα ελεύθερου σώματος ενός από τις δύο δοκούς με πολλαπλές δυνάμεις. Η δοκός CF για παράδειγμα μας δίνει τις εξισώσεις $\sum M_C = 0$, $\sum M_E = 0$ και $\sum F_x = 0$, από τις οποίες προκύπτουν τα μεγέθη F_{BE} , C_y , και C_x αντιστοίχως. Οι τιμές αυτές μπορούν να ελεγχθούν με τον έλεγχο ότι η δοκός AD βρίσκεται σε ισορροπία. Εδώ επιπλέον θεωρήθηκε ότι οι αρθρώσεις του προβλήματος ήταν εσωτερικές των δοκών, και ότι δεν χρειάζονταν η σχεδίαση του ΔΕΣ για αυτές. Η υπόθεση αυτή πολλές φορές απλοποιεί το πρόβλημα χωρίς απώλεια της γενικότητας. Ωστόσο όταν μία άρθρωση συνδέει πολλαπλούς δοκούς ή όταν σε αυτήν ασκείται δύναμη μπορεί και να χρειαστεί η σχεδίαση για αυτήν ΔΕΣ.

Το πλαίσιο του προβλήματος λόγω του σχήματος μπορεί να διατηρηθεί ακόμα και αν χάσει τις στηρίξεις του οπότε και θεωρείται στέρεο ως πλαίσιο. Πολλά ωστόσο πλαίσια δεν διατηρούν το σχήμα τους με την απώλεια των στηρίξεων τους για αυτό και ονομάζονται μη-στερεά.

Το γενικό πρόβλημα στην ανάλυση των πλαισίων ξεκινά από την αναγνώριση των άγνωστων δυνάμεων ή συνιστωσών και την εύρεση των εξισώσεων ισορροπίας. Εάν αυτοί οι άγνωστοι μπορούν να προσδιοριστούν και οι εξισώσεις ισορροπίας μπορούν να ικανοποιηθούν, τότε θεωρούμε ότι το πλαίσιο είναι στατικά προσδιορισμένη και στερεή (determinate and rigid). Ο προσδιορισμός αυτός συνήθως επιτυγχάνεται με τα διαγράμματα ελεύθερου σώματος για κάθε μηχανικό μέρος του πλαισίου, στα οποία υπολογίζουμε τις αντιδράσεις και τις εσωτερικές δυνάμεις. Επιπλέον καθορίζουμε τον αριθμό των ανεξάρτητων εξισώσεων ισορροπίας. Εάν υπάρχουν περισσότεροι άγνωστοι από εξισώσεις, η κατασκευή θεωρείται απροσδιόριστη στατικά. Εάν οι εξισώσεις είναι περισσότερες από τους άγνωστους η κατασκευή είναι μη στέρεα. Εάν τέλος λόγω κάποιου ανακριβούς προσδιορισμού των δοκών και των αρθρώσεων, δεν μπορούν να καθοριστούν όλοι οι άγνωστοι και δεν μπορούν ακόμη να ικανοποιηθούν όλες οι εξισώσεις, τότε η κατασκευή θεωρείται απροσδιόριστη και μη στερεή.

4.8 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ.

Οι μηχανισμοί είναι κατασκευές που σχεδιάζονται για την μετάδοση και την μετατροπή δυνάμεων. Είτε αυτοί είναι απλά εργαλεία είτε πιο πολύπλοκοι μηχανισμοί, ο κύριος σκοπός τους είναι να μετατρέπουν τις δυνάμεις εισόδου σε δυνάμεις εξόδου. Θεωρώντας το παράδειγμα ενός κόπτη καλωδίων του σχήματος 4-9, η άσκηση δύο ίσων και αντίθετων κατά φορά δυνάμεων έστω P and $-P$ στα χερούλια, θα προκαλέσουν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις Q και $-Q$ στο καλώδιο.



Σχήμα 4-9 Δυνάμεις εισόδου και εξόδου σε έναν κόπτη.

Για να καθοριστεί το μέγεθος Q των δυνάμεων εξόδου, όταν το είναι γνωστό το μέγεθος P των δυνάμεων εισόδου (ή, αντίστροφα, για τον καθορισμό του P όταν το Q είναι γνωστό), σχεδιάζεται ένα διάγραμμα ελεύθερου σώματος του κόπτη καλωδίων, το οποίο δείχνει τις δυνάμεις εισόδους P και $-P$ και τις αντιδράσεις $-Q$ και Q που το καλώδιο ασκεί στην πένσα. Ωστόσο, επειδή ο κόπτης αποτελεί μία μη στερεή δομή, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα από τα μηχανικά του μέρη, ως ελεύθερο σώμα προκειμένου να καθοριστούν οι άγνωστες δυνάμεις. Λαμβάνοντας υπόψη το παράδειγμα του σχήματος 4-9, στο σημείο A θα προκύψει η εξίσωση $Pa = Qb$, η οποία καθορίζει το μέγεθος Q σε σχέση με το P ή το P σε σχέση με το Q . Το ίδιο διάγραμμα ελεύθερου σώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστούν οι συνιστώσες της εσωτερικής δύναμης στο σημείο A. Βρίσκουμε ότι $A_x = 0$ και $A_y = P + Q$.

Στην περίπτωση των πιο πολύπλοκων μηχανισμών, θα είναι απαραίτητη η χρήση αρκετών διαγραμμάτων ελεύθερου σώματος και, ενδεχομένως, την λύση εξισώσεων που αφορούν τις εσωτερικές δυνάμεις. Θα πρέπει να συμπεριληφθούν στους ελεύθερους φορείς οι δυνάμεις εισόδου και οι αντιδράσεις στις δυνάμεις εξόδου. Επιπλέον θα πρέπει να υπολογιστεί ο συνολικός αριθμός των αγνώστων συνιστωσών δύναμης ο οποίος δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τον αριθμό των διαθέσιμων ανεξάρτητων εξισώσεων. Είναι χρήσιμο, να καθοριστεί εκ των προτέρων πριν την λύση του προβλήματος αν η εξεταζόμενη δομή είναι ορισμένη. Όσον αφορά την ακαμψία (rigidity) του μηχανισμού, αυτή είναι δεδομένη, δεδομένου ότι μια μηχανή περιλαμβάνει κινούμενα μέρη και κατά συνέπεια, πρέπει να είναι μη-στερεή

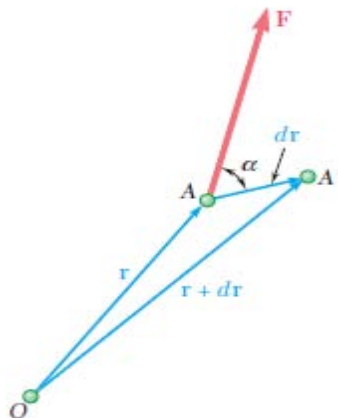
4.9 Η Μέθοδος της Αρχής Διατήρησης Ενέργειας.

Στις προηγούμενες ενότητες ασχολήθηκα με προβλήματα που αφορούν την ισορροπία συμπαγών φορέων τα οποία επιλύθηκαν με βάση την αρχή ότι ο εξωτερικός δυνάμεις που επενεργούν σε αυτά έχουν συνολικό άθροισμα μηδενικό. Από τις εξισώσεις ισορροπίας $\Sigma F_x=0$, $\Sigma F_y = 0$ και $\Sigma M_A = 0$, βρίσκονται οι επιθυμητοί για τον υπολογισμό άγνωστοι. Σε αυτό το σημείο θα ασχοληθώ με μια διαφορετική μέθοδο, η οποία είναι και πιο αποτελεσματική στην επίλυση ορισμένων τύπων προβλημάτων ισορροπίας. Αυτή η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αρχή της διατήρησης της ενέργειας και εισήχθη για πρώτη φορά από τον Ελβετό μαθηματικό Jean Bernoulli τον δεκατοόγδοο αιώνα.

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας, υποστηρίζει ότι δεδομένου ενός μηχανικού τμήματος η στερεού σώματος ή γενικότερα ενός συστήματος συνδεδεμένων φορέων το οποίο βρίσκεται σε ισορροπία υπό την άσκηση εξωτερικών δυνάμεων, εάν σε αυτό το σύστημα φορέων ασκηθεί μία αυθαίρετη μετατόπιση από τη θέση ισορροπίας, το συνολικό έργο των εξωτερικών δυνάμεων κατά τη διάρκεια της μετατόπισης είναι μηδέν. Η αρχή αυτή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική όταν εφαρμόζεται στην επίλυση προβλημάτων που αφορούν την ισορροπία μηχανισμών που αποτελούνται από πολλά συνδεδεμένα μέλη. Η αρχή αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και για τον υπολογισμό της δυναμικής ενέργειας.

Το έργο μία δύναμης.

Στην αρχή θα προσδιορίσω τους όρους μετατόπιση και έργο όπως τους χρησιμοποιούμε στην μηχανική. Ας θεωρήσουμε ένα σωματίδιο που κινείται από ένα σημείο A σε ένα γειτονικό σημείο A' όπως στο σχήμα 4-10. Εάν το r συμβολίζει το διάνυσμα θέσης που αντιστοιχεί στο σημείο A, το μικρό διάνυσμα που ενώνει το A και A' θα συμβολίζεται από το διαφορικό dr διαφορικό. Το διάνυσμα dr ονομάζεται μετατόπιση του σωματιδίου. Τώρα, ας υποθέσουμε ότι μια δύναμη F επενεργεί στο σωματίδιο. Το έργο της δύναμης F που αντιστοιχεί στη μετατόπιση dr ορίζεται ως η ποσότητα:



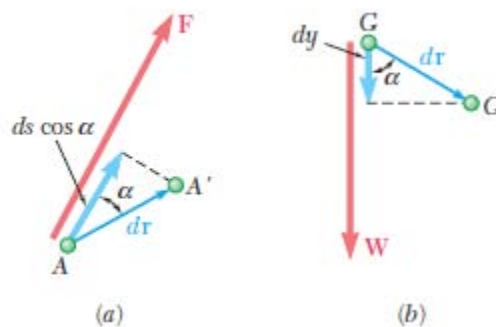
Σχήμα 4-10 Μετατόπιση AA' λόγω δύναμης F.

$$dU = F \cdot dr$$

είναι δηλαδή το γινόμενο της δύναμης F και της μετατόπισης dr . Δηλώνοντας ως F και ds αντίστοιχα τα μεγέθη της δύναμης και της μετατόπισης, και με α την γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα F με το dr , θα έχουμε επίσης:

$$dU = F \cdot ds \cdot \cos\alpha$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι το έργο αν εκφράζεται σε αμερικανικές τυποποιημένες μονάδες θα είναι ίσο με $\text{ft} \cdot \text{lb}$ ή αλλιώς ως $\text{in} \cdot \text{lb}$, ενώ στο σύστημα μονάδων SI θα εκφράζεται σε μονάδες $\text{N} \cdot \text{m}$. Η μονάδα αυτή ονομάζεται και *joule* (J). Όπως προκύπτει από την γωνιακή εξίσωση το έργο dU είναι θετικό εάν η γωνία α είναι οξεία και αρνητικό εάν η γωνία είναι αμβλεία. Τρεις ειδικές περιπτώσεις χρειάζονται προσοχής. Αν για παράδειγμα η δύναμη F έχει την ίδια κατεύθυνση με το διάνυσμα dr , το έργο dU γίνεται $ds \cdot F$. Αν το διάνυσμα F έχει κατεύθυνση αντίθετη με εκείνη του dr , το έργο θα ισούται με $dU = -F \cdot ds$. Τέλος, εάν το F είναι κάθετο ως προς το dr , το έργο dU θα είναι μηδέν. Το έργο dU μιας δύναμης F κατά τη διάρκεια μιας μετατόπισης dr μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως το γινόμενο του F και της συνιστώσας $ds \cdot \cos\alpha$ της μετατόπισης dr κατά μήκος του διανύσματος F . Αυτή η άποψη είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον υπολογισμό του έργου που δημιουργεί ένα βάρος W ενός σώματος.



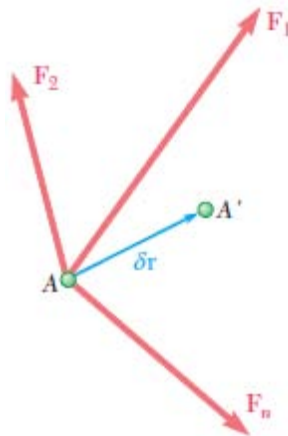
Σχήμα 4-11

Το έργο της W είναι ίσο με το γινόμενο του W και της κατακόρυφης μετατόπισης dy του κέντρου βάρους G του σώματος. Εάν η μετατόπιση είναι προς τα κάτω, το έργο είναι θετικό ενώ αν είναι προς τα πάνω, το έργο είναι αρνητικό. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις δυνάμεων στην στατική οι οποίες δεν παράγουν έργο: οι δυνάμεις που ασκούνται σε σταθερά σημεία ($ds=0$) ή που ενεργούν σε μια κατεύθυνση κάθετη προς την μετατόπιση ($\cos\alpha = 0$). Μεταξύ αυτών των δυνάμεων είναι και η αντίδραση μιας άρθρωσης χωρίς τριβές, όταν το σώμα που υποστηρίζεται, περιστρέφεται σε σχέση με την άρθρωση. Επίσης η αντίδραση σε μια επιφάνεια χωρίς τριβές όταν το σώμα κινείται επιφανειακά και κατά μήκος της επιφάνειας, το βάρος ενός σώματος όταν το κέντρο βάρους του κινείται οριζόντια και η δύναμη τριβής που δημιουργείται σε μια κυλιόμενη αλλά μη ολισθήσα ρόδα (δεδομένου ότι ανά πάσα στιγμή το σημείο επαφής δεν κινείται).

Τα παραδείγματα δυνάμεων που κάνουν έργο είναι το βάρος ενός σώματος (εκτός των παραπάνω αναφερθέντων περιπτώσεων), η δύναμη τριβής που ενεργεί σε ένα σώμα το οποίο γλιστράει σε μια τραχιά επιφάνεια, οι δυνάμεις που ασκούνται σε έναν σκελετό ποδηλάτου όπως αυτό που εξετάζει η εργασία και γενικότερα οι περισσότερες δυνάμεις που εφαρμόζονται σε ένα κινούμενο σώμα. Τέλος σε ορισμένες περιπτώσεις, το συνολικό έργο που προκαλούν οι δυνάμεις είναι μηδέν για παράδειγμα όταν δύο δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σώμα έχουν την ίδια κατεύθυνση εφαρμογής αντίθετη φορά και μέτρο.

4.10 Αρχή του εικονικού έργου (virtual work)

Ας θεωρήσουμε ένα σωματίδιο στο οποίο επιδρούν πολλές δυνάμεις F_1, F_2, \dots, F_n όπως στο σχήμα. Υποθέτουμε ότι το σωματίδιο υφίσταται μια μικρή μετατόπιση από το σημείο A ως το A' . Η μετατόπιση αυτή είναι δυνατή, ωστόσο δεν είναι απαραίτητο ότι θα πραγματοποιηθεί. Οι δυνάμεις μπορεί να είναι σε ισορροπία και το σωματίδιο σε κατάσταση ηρεμίας, ή ακόμα μπορεί το σωματίδιο να μετακινείται στο πλαίσιο της δράσης δυνάμεων με κατεύθυνση διαφορετική από εκείνη του AA' . Δεδομένου ότι η μετατόπιση δεν υφίσταται στην πραγματικότητα, την αποκαλούμε εικονική μετατόπιση και συμβολίζεται με dr . Οι εικονικές μετατοπίσεις χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουμε αν ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας σε ένα σωματίδιο.



Σχήμα 4-12

Το έργο καθεμιάς από τις δυνάμεις F_1, F_2, \dots, F_n κατά την διάρκεια της εικονικής μετατόπισης dr ονομάζεται εικονικό έργο. Αυτό ισούται με:

$$dU = dr * (\Sigma F_i) = dr * R$$

όπου R είναι η συνισταμένη των δοθέντων δυνάμεων. Έτσι, το συνολικό εικονικό έργο των δυνάμεων F_1, F_2, \dots, F_n είναι ίσο με το εικονικό έργο της συνισταμένης

τους R.

Η αρχή του εικονικού έργου για ένα σωματίδιο ορίζει ότι εάν ένα σωματίδιο βρίσκεται σε ισορροπία, το συνολικό εικονικό έργο των δυνάμεων που δρουν στο σωματίδιο είναι μηδέν για κάθε εικονική μετατόπιση του σωματιδίου. Η συνθήκη είναι αναγκαία: αν το σωματίδιο βρίσκεται σε ισορροπία, η συνισταμένη R των δυνάμεων είναι μηδέν, και όπως προκύπτει από τις σχέσεις το σύνολο των δυνατών έργων dU θα είναι ομοίως μηδέν. Ωστόσο είναι και ικανή (η συνθήκη): εάν το σύνολο των δυνατών έργων dU είναι μηδέν για κάθε εικονική μετακίνηση, το βαθμωτό μέγεθος $R \cdot dr$ είναι μηδέν για κάθε dr , και η συνισταμένη R πρέπει να είναι μηδέν. Στην περίπτωση ενός στερεού σώματος, η αρχή του εικονικού έργου δηλώνει ότι, εάν ένα στέρεο σώμα είναι σε ισορροπία, το συνολικό εικονικό έργο των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν στο στερεό σώμα είναι μηδέν για κάθε εικονική μετατόπιση του σώματος. Η προϋπόθεση αυτή είναι αναγκαία: εάν το σώμα είναι σε ισορροπία, όλα τα μέρη που αποτελούν το σώμα είναι σε ισορροπία και το συνολικό εικονικό έργο των δυνάμεων που δρουν σε όλα τα μέρη του στερεού πρέπει να είναι μηδέν. Αφού όπως είδαμε το συνολικό έργο των εσωτερικών δυνάμεων είναι μηδέν έπεται ότι το συνολικό έργο των εξωτερικών δυνάμεων είναι μηδέν. Η συνθήκη αποδεικνύεται επίσης ότι είναι και ικανή.

Η αρχή της εικονικής εργασίας μπορεί να επεκταθεί στην περίπτωση ενός συστήματος συνδεδεμένων στερεών σωμάτων. Εάν το σύστημα παραμένει συνδεδεμένο κατά τη διάρκεια της εικονικής μετατόπισης, θα πρέπει να συμπεριληφθεί μόνο το έργο των δυνάμεων των εξωτερικών προς το σύστημα, δεδομένου ότι το συνολικό έργο των εσωτερικών δυνάμεων στις διάφορες αρθρώσεις είναι μηδέν.

Η αρχή της εικονικής εργασίας είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική όταν εφαρμόζεται στην επίλυση των προβλημάτων που αφορούν μηχανήματα ή μηχανισμούς που αποτελούνται από συνδεδεμένα στερεά σώματα. Η μέθοδος του εικονικού έργου υπερέχει σε πολλές περιπτώσεις σε σχέση με τις συμβατικές εξισώσεις ισορροπίας. Πολλές φορές χρησιμοποιώντας την μέθοδο του εικονικού έργου, ήμασταν σε θέση να εξαλείψουμε όλες τις άγνωστες αντιδράσεις, που οι εξισώσεις ισορροπίας δεν θα μπορούσαν. Αυτή η ιδιότητα της μεθόδου του εικονικού έργου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση πολλών προβλημάτων που αφορούν μηχανές και μηχανισμούς. Εάν η εξεταζόμενη εικονική μετατόπιση συνάδει με τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τις στηρίξεις και τις συνδέσεις, όλες οι αντιδράσεις και οι εσωτερικές δυνάμεις εξαλείφονται και θα χρειάζεται να εξεταστούν μόνο το έργο των φορτίων, οι εφαρμοζόμενες οι δυνάμεις και οι δυνάμεις τριβής.

Η μέθοδος της εικονικής εργασίας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων εντελώς περιορισμένων δομών, παρόλο που οι υποθέσεις των εικονικών μετατοπίσεων δεν λαμβάνουν χώρα σε αυτές τις κατασκευές. Θα πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι η ελκυστικότητα της μεθόδου του εικονικού έργου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη απλών γεωμετρικών σχέσεων μεταξύ των διαφόρων εικονικών μετατοπίσεων που εμπλέκονται στην επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος. Όταν δεν υπάρχουν τέτοιες απλοϊκές σχέσεις, συνήθως συνιστάται η χρησιμοποίηση των εξισώσεων ισορροπίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση των μηχανικών μερών υπό την μορφή απλών ράβδων, δοκών, κ.α. μπορεί να γίνει εύκολη υπόθεση με την χρήση βασικών μεθόδων μηχανικής, που παρέχουν λύσεις κλειστής μορφής. Ωστόσο τα μηχανικά μέρη σε μία πραγματική κατασκευή, σπάνια έχουν τόσο απλή μορφή, και ο σχεδιαστής είναι αναγκασμένος είτε να κάνει απλοποιήσεις επιλύοντας το πρόβλημα του με προσεγγίσεις λύσεων κλειστής μορφής (που έχουν μειωμένη αποτελεσματικότητα), είτε να χρησιμοποιήσει πειραματικές και αριθμητικές μεθόδους.

Υπάρχουν αρκετές αριθμητικές τεχνικές για μηχανολογικές εφαρμογές, οι οποίες επιλύονται εύκολα με την χρήση Η/Υ. Στον σύγχρονο μηχανικό σχεδιασμό, χρησιμοποιείται αρκετά όπως αναφέραμε ο υπολογιστικά υποβοηθούμενος σχεδιασμός (CAD), το οποίο ως λογισμικό συνεργάζεται πολύ αρμονικά με τις μεθόδους ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA), με αποτέλεσμα τα περισσότερα τα περισσότερα προγράμματα CAD πλέον να ενσωματώνουν δυνατότητες ανάλυσης FEA όπως το SolidWorks στο οποίο βασίστηκε η παρούσα εργασία. Οι μαθηματικές θεωρίες και οι εφαρμογές της μεθόδου είναι τεράστιες. Υπάρχει επίσης ένας μεγάλος αριθμός εμπορικών πακέτων εξειδικευμένου λογισμικού για πεπερασμένα στοιχεία, όπως το ANSYS, NASTRAN, Algor, κλπ.

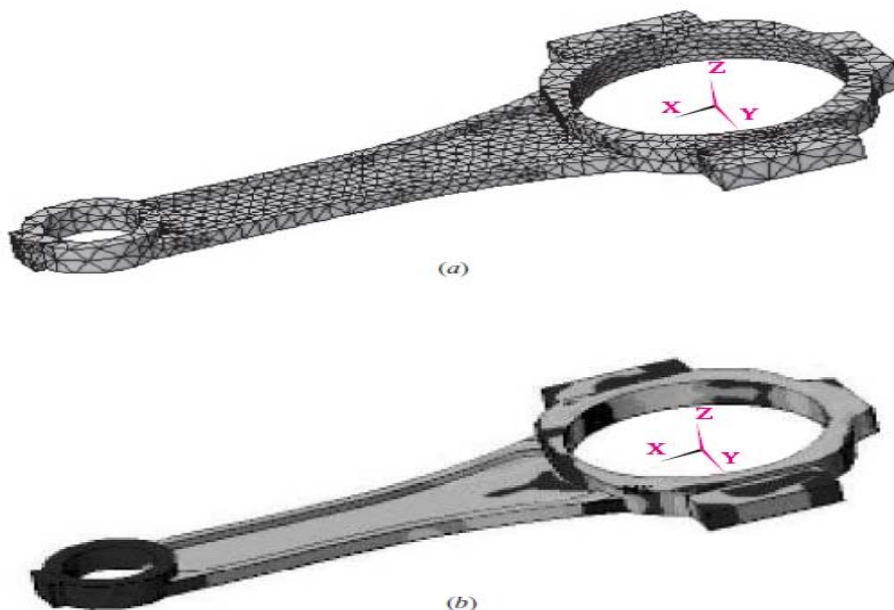
Σε αυτό το κεφάλαιο θα επιχειρηθεί μία συνοπτική εισαγωγή σε μερικές από τις θεμελιώδεις πτυχές της FEA, προκειμένου να γίνουν περισσότερο κατανοητές οι πειραματικές μετρήσεις του επόμενου κεφαλαίου. Στο σχήμα 3-1 απεικονίζεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ενός στροφαλοφόρου άξονα που αναπτύχθηκε για να μελετηθούν τα αποτελέσματα της μηχανικής του καταπόνησης και φόρτισης στην κατασκευαστική του απόδοση.

Υπάρχει μια πληθώρα εφαρμογών FEA, όπως η στατική και η δυναμική ανάλυση (γραμμική και μη γραμμική), αναλύσεις τάσης και παραμόρφωσης, ελεύθερων ή εξαναγκασμένων κραδασμών, αναλύσεις μεταφοράς θερμότητας (η οποία μπορεί να συνδυαστεί με την ανάλυση τάσεων και παραμόρφωσης ώστε να υπολογιστούν οι θερμικά προκαλούμενες τάσεις και παραμορφώσεις), ελαστικής αστάθειας (κύρτωση), ακουστική ανάλυση, ηλεκτροστατική και μαγνητική (συνδυασμένη με μεταφορά θερμότητας), υδραυλική, αναλύσεις σωληνώσεων (ripping) και φυσικά αναλύσεις συνδυασμού των παραπάνω (multiphysics analysis).

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε περισσότερο με την βασική μηχανική ανάλυση.

Ένα πραγματικό μηχανικό μέρος είναι μία συνεχής ελαστική δομή. Η ανάλυση FEA τμηματοποιεί (διακριτοποιεί) την δομή σε μικρά ωστόσο πεπερασμένα, αυστηρά ορισμένα, ελαστικά υποδομήματα (τα αποκαλούμενα και στοιχεία). Με την χρήση πολυωνυμικών εξισώσεων και μητρών, ορίζεται η συνεχής ελαστική συμπεριφορά του κάθε στοιχείου εκφρασμένη γύρω από τις ιδιότητες του υλικού του στοιχείου, αλλά και βάσει της γεωμετρίας του. Τα φορτία μπορούν να εφαρμόζονται μέσα στο στοιχείο (βαρυτικές, δυναμικές, θερμικές ή άλλες επιδράσεις), στην επιφάνεια του, ή ακόμα στους κόμβους του στοιχείου. Οι κόμβοι του στοιχείου είναι οι βασικές και κυρίαρχες οντότητες του στοιχείου, αφού εκεί το στοιχείο ενώνεται με άλλα στοιχεία, με βάση αυτή την σύνδεση καθορίζονται οι ελαστικές ιδιότητες του, εκεί εφαρμόζονται οι οριακές συνθήκες και τέλος εκεί εφαρμόζονται οι δυνάμεις. Ο κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από βαθμούς ελευθερίας (doF's).

Οι βαθμοί ελευθερίας είναι οι ανεξάρτητες καρτεσιανές και στρεπτικές κινήσεις που μπορεί να υπάρχουν σε έναν κόμβο. Στην καλύτερη περίπτωση, ένας κόμβος μπορεί να διαθέτει τρεις καρτεσιανούς και τρεις περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας. Εφόσον το κάθε στοιχείο μέσα σε μια δομή ορίζεται τοπικά με την μορφή του πίνακα, συνεπαγωγικά τα στοιχεία στο σύνολο τους εκφράζονται μέσω των κοινών κόμβων τους (μέσω των DOF που κάθε φορά έχουν) σε μία καθολική μήτρα του συστήματος. Στην συνέχεια καθορίζονται τα εφαρμοζόμενα φορτία και οι οριακές συνθήκες, και έπειτα προσδιορίζονται μέσα από πράξεις πινάκων όλες οι άγνωστες μετατοπίσεις για κάθε βαθμό ελευθερίας των επιμέρους στοιχείων. Μόλις γίνει αυτό, είναι έπειτα εύκολο να υπολογισθούν οι εντάσεις και οι τάσεις για κάθε στοιχείο, με την χρήση των θεμελιωδών εξισώσεων της ελαστικότητας.



Σχήμα 5-1 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για έναν στροφαλοφόρο άξονα.

5.2 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η σύγχρονη ανάπτυξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ξεκίνησε το 1940 από τον τομέα Δομικής Μηχανικής με το έργο των Hennrikoff, McHenry και Newmark, οι οποίοι χρησιμοποίησαν ένα πλέγμα στοιχείων γραμμής (ράβδους και δοκούς) για την επίλυση και εύρεση των τάσεων σε συνεχή στερεά. Το 1943, ο Courant πρότεινε την χρήση πολυωνυμικής παρεμβολής σε τριγωνικές υποπεριοχές, ως μία μέθοδο εύρεσης των περιστροφικών τάσεων. Με την διάδοση των ψηφιακών υπολογιστών κατά την δεκαετία του 1950, έγινε όλο και πιο διαδεδομένο αλλά και πρακτικό για τους μηχανικούς, η επίλυση των εξισώσεων δυσκαμψίας με την χρήση μητρών. Μία γνωστή δημοσίευση των Turner, Clough, Martin, και Torpp το 1956, παρουσίασε τις εξισώσεις του πίνακα ακαμψίας για μία δομή από δοκούς και άλλα στοιχεία. Ο όρος πεπερασμένα στοιχεία αποδίδεται στον Clough. Από εκείνες τις αρχικές και πρώιμες έρευνες μέχρι σήμερα, έχουν γίνει μεγάλες προσπάθειες στην ανάπτυξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για κατασκευαστικά προβλήματα, αλλά και για την ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων βασισμένα στις μεθόδους αυτής της ανάλυσης. Μερικά παραδείγματα της συνεισφοράς της τεχνολογίας των υπολογιστών στην δομική μηχανική, είναι οι σύγχρονες επεξεργαστικές δυνατότητες που γίνονται όλο και μεγαλύτερες, η ύπαρξη αποτελεσματικών άμεσων και επακριβών ρουτινών υπολογισμού μητρών, τα γραφικά των υπολογιστών που κάνουν πιο εύκολη την σύγχρονη σχεδίαση κτιρίων, η αυτόματη και προσαρμοστική παραγωγή πλέγματος καθώς και οι δυνατότητες προ- και μετα- εκτίμησης του σχεδιασμού.

Δεδομένου ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία αριθμητική τεχνική η οποία διακριτοποιεί μία συνεχή δομή, τα λάθη είναι αναπόφευκτα. Αυτά τα λάθη είναι κυρίως:

1. Υπολογιστικά λάθη.

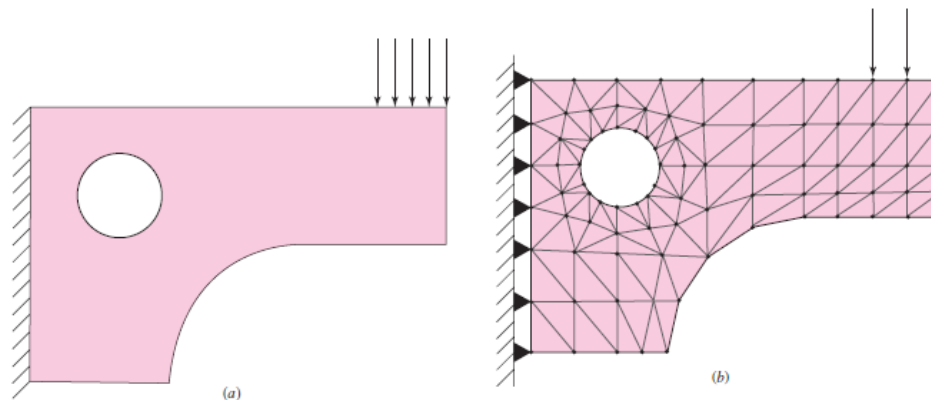
Οφείλονται στις στρογγυλοποιήσεις που κάνει ο υπολογιστής με την χρήση floating-point μεταβλητών, και από την χρήση των αριθμητικών ολοκληρώσεων. Τα περισσότερα εμπορικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων επικεντρώνονται στην μείωση αυτών των σφαλμάτων, κατά συνέπεια ο αναλυτής μπορεί να τα θεωρήσει αμελητέα και να ασχολείται περισσότερο με τα παρακάτω σφάλματα.

2. Σφάλματα Διακριτοποίησης.

Η γεωμετρία και η κατανομή της μετατόπισης μίας πραγματικής δομής συνεχώς διαφέρει. Η χρήση ενός πεπερασμένου αριθμού στοιχείων για την μοντελοποίηση μίας δομής, εισάγει σαφώς λάθη στην αντιστοίχιση γεωμετρίας και μετατοπίσεων, λόγω των εγγενών μαθηματικών περιορισμών των στοιχείων.

Ένα παράδειγμα σφάλματος διακριτοποίησης μπορεί να παρουσιαστεί στην συνέχεια. Θεωρώ μία λεπτή πλάκα ομοιόμορφου πάχους όπως στο παρακάτω σχήμα. Στην διπλανή εικόνα φαίνεται το ισοδύναμο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της δομής, όπου έχουν χρησιμοποιηθεί στοιχεία τριών κόμβων, τριγωνικά και επίπεδα. Αυτός ο τύπος στοιχείου έχει ένα ελάττωμα που δημιουργεί δύο βασικά προβλήματα. Το στοιχείο έχει ευθείες πλευρές οι οποίες παραμένουν ευθείες μετά την παραμόρφωση. Οι εντάσεις (strains) μέσα στο στοιχείο

παραμένουν σταθερές. Το πρώτο πρόβλημα είναι κυρίως γεωμετρικό και αφορά τον σχεδιασμό των καμπυλόγραμμων τμημάτων. Είναι εμφανές για παράδειγμα ότι σε αυτήν την μοντελοποίηση η εξωτερική καμπυλόγραμμη επιφάνεια έχει προσεγγιστική μοντελοποίηση, ενώ η κεντρική οπή έχει λεπτομερέστερα μοντελοποιηθεί με την χρήση μικρότερων σε εμβαδό στοιχείων. Το δεύτερο πρόβλημα, είναι ακόμα πιο σοβαρό, και έγκειται στο ότι οι εντάσεις σε μερικές περιοχές της πραγματικής δομής αλλάζουν απότομα, επομένως τα επιμέρους στοιχεία θα παρουσιάζουν μόνο μία προσέγγιση ή έναν μέσο όρο της πραγματικής έντασης στην περιοχή τους. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της ανάλυσης θα είναι εξαιρετικά ανακριβή.




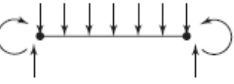
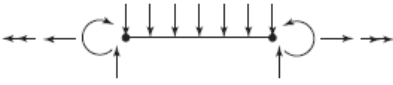




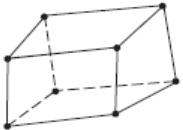
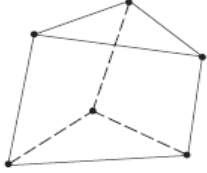

Σχήμα 5-2 Μοντελοποίηση δομής με πλέγμα από τριγωνικά στοιχεία.

Τα αποτελέσματα μπορούν να βελτιωθούν με την αύξηση του αριθμού των στοιχείων (αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος). Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιος άλλος τύπος στοιχείου, όπως το οκτακομβικό στοιχείο, το οποίο ταιριάζει καλύτερα σε αυτήν την γεωμετρία, και μπορεί να ρεαλιστικοποιήσει τα αποτελέσματα. Σε ένα οκτακομβικό στοιχείο, οι συναρτήσεις παρεμβολής είναι μεγαλύτερης τάξης, επομένως μοντελοποιεί ακριβέστερα τις καμπυλόγραμμες άκρες της δομής, και επιπλέον παρέχει συναρτήσεις ανώτερης τάξης για τον υπολογισμό της κατανομής των εντάσεων.

Στο σχήμα 5-2, τα τριγωνικά στοιχεία και οι κόμβοι τους απεικονίζονται με μαύρες γραμμές και κουκίδες αντιστοίχως. Οι δυνάμεις και οι οριακές συνθήκες μπορούν να τοποθετηθούν μόνο στους κόμβους. Οι κόμβοι ενός απλού τριγωνικού στοιχείου έχουν μόνο δύο βαθμούς ελευθερίας, που αφορούν την μετατόπιση στο διδιάστατο επίπεδο. Τα τρίγωνα στην αριστερή άκρη της δεύτερης εικόνας, απεικονίζουν την ισοδύναμη πάκτωση υφίσταται το μοντέλο. Επίσης, το κατανεμημένο φορτίο της πραγματικής δομής, στο μοντέλο θα εφαρμοστεί μόνο σε τρεις κόμβους, όπως και φαίνεται. Το μοντελοποιημένο φορτίο θα πρέπει φυσικά να είναι ίσου μεγέθους με το πραγματικό για να έχουμε αληθοφανή αποτελέσματα.

5.3 Γεωμετρίες των στοιχείων.

Υπάρχουν πολλά γεωμετρικά σχήματα στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για συγκεκριμένες εφαρμογές. Τα διάφορα στοιχεία που χρησιμοποιεί μία γενικού-σκοπού εμπορική εφαρμογή FEA, ονομάζονται ως η βιβλιοθήκη των στοιχείων (element library). Τα στοιχεία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: στοιχεία γραμμής, επιφανειακά στοιχεία, στερεά στοιχεία, και στοιχεία ειδικού σκοπού. Ο πίνακας 5-3 παρουσιάζει ορισμένες, αλλά όχι όλες, από τις κατηγορίες των στοιχείων που διατίθενται για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στην επίλυση δομικών προβλημάτων.

| Element Type | None | Shape | Number of Nodes | Applications |
|--------------|---------------------------|---|-----------------|--|
| Line | Truss |  | 2 | Pin-ended bar in tension or compression |
| | Beam |  | 2 | Bending |
| | Frame |  | 2 | Axial, torsional, and bending. With or without load stiffening. |
| Surface | 4-node quadrilateral |  | 4 | Plane stress or strain, axisymmetry, shear panel, thin flat plate in bending |
| | 8-node quadrilateral |  | 8 | Plane stress or strain, thin plate or shell in bending |
| | 3-node triangular |  | 3 | Plane stress or strain, axisymmetry, shear panel, thin flat plate in bending. Prefer quad where possible. Used for transitions of quads. |
| | 6-node Triangular |  | 6 | Plane stress or strain, axisymmetry, thin plate or shell in bending. Prefer quad where possible. Used for transitions of quads. |
| Solid† | 8-node hexagonal (brick) |  | 8 | Solid, thick plate |
| | 6-node pentagonal (wedge) |  | 6 | Solid, thick plate. Used for transitions. |
| | 4-node tetrahedron (tet) |  | 4 | Solid, thick plate. Used for transitions. |

Σχήμα 5-3 Διάφοροι τύποι στοιχείων για γραμμές, επιφάνειες και στερεά.

Μερικά από τα στοιχεία δεν υποστηρίζουν όλους τους βαθμούς ελευθερίας. Για παράδειγμα, ένα τρισδιάστατο δικτύωμα υποστηρίζει μόνο τρεις καρτεσιανές παραμορφώσεις σε κάθε κόμβο. Η σύνδεση διαφορετικών στοιχείων τα οποία έχουν και διαφορετικούς βαθμούς ελευθερίας απαιτεί σαφώς κάποιες τροποποιήσεις. Αν πάρουμε το παράδειγμα της σύνδεσης ενός πλαισίου που υποστηρίζει και τους έξι βαθμούς ελευθερίας, με ένα δικτύωμα παρατηρούμε ότι ο ένας κόμβος του στοιχείου, μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα στην σύνδεση δηλαδή στον κόμβο του.

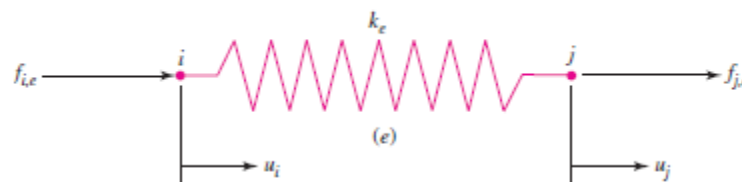
5.4 Η διαδικασία επίλυσης προβλημάτων FEA.

Σε αυτό το σημείο θα γίνει μία περιγραφή της διαδικασίας επίλυσης ενός προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων για ένα απλό μονοδιάστατο πρόβλημα, χρησιμοποιώντας ως στοιχεία γραμμικά δικτυώματα (linear truss element). Το δικτύωμα είναι μία μπάρα η οποία υφίσταται είτε εφελκυσμό είτε θλίψη και έχει σταθερή γεωμετρία με διατομή A , μήκος l και μέτρο ελαστικότητας E . Το βασικό δικτύωμα έχει μόνο δύο κόμβους, επομένως για ένα μονοδιάστατο πρόβλημα, ο κάθε κόμβος θα έχει μόνο έναν βαθμό ελευθερίας. Το δικτύωμα μπορεί επιπλέον να μοντελοποιηθεί ως ένα απλό γραμμικό ελατήριο με σταθερά ελατηρίου:

$$k = \frac{A * E}{l}$$

Ας θεωρήσουμε ένα ελατήριο (e), σταθεράς k_e , με κόμβους i και j , όπως δείχνει και το παρακάτω σχήμα. Αν όλες οι δυνάμεις και οι μετατοπίσεις είχαν κατεύθυνση προς τα δεξιά, οι δυνάμεις σε κάθε κόμβο θα είναι:

$$f_{i,e} = k_e (u_i - u_j) = k_e u_i - k_e u_j$$
$$f_{j,e} = k_e (u_j - u_i) = -k_e u_i + k_e u_j$$



Σχήμα 5-4 Ανάλυση ελατηρίου.

Υπό την μορφή μητρών θα γραφεί ως:

$$\begin{Bmatrix} f_{i,e} \\ f_{j,e} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_e & -k_e \\ -k_e & k_e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix}$$

Στην συνέχεια θέλουμε να επιλύσουμε ένα σύστημα δύο ελατηρίων συνδεδεμένων σε έναν κόμβο. Μελετώντας το κάθε ελατήριο ως ξεχωριστό ελεύθερο σώμα, προκύπτουν οι εξισώσεις που μόλις βρήκαμε για το κάθε ελατήριο ξεχωριστά. Οι δυνάμεις που θα ασκούνται σε κάθε κόμβο θα είναι: $F_1 = f_{1,1}$, $F_2 = f_{2,1} + f_{2,2}$ και $F_3 = f_{3,2}$. Συνδυάζοντας τους δύο πίνακες που βρήκαμε, προκύπτει η ενοποιημένη παρακάτω εξίσωση.

$$\begin{Bmatrix} f_{1,1} \\ f_{2,1} + f_{2,2} \\ f_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix}$$

Με βάση την παραπάνω εξίσωση μητρών, μπορούν να υπολογιστούν οι δυνάμεις σε κάθε κόμβο αν ξέρουμε τις μετατοπίσεις αλλά και αντιθέτως τις μετατοπίσεις από τις δυνάμεις.

5.5 Παραγωγή πλέγματος.

Το δίκτυο των στοιχείων και των κόμβων που διακριτοποιεί μια περιοχή αναφέρεται ως πλέγμα. Η πυκνότητα του πλέγματος αυξάνεται όσο τοποθετούνται περισσότερα στοιχεία σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Η αναθεώρηση ενός πλέγματος σημαίνει την τροποποίηση ενός πλέγματος μίας ανάλυσης ώστε να προκύψει μία άλλη που θα δίνει βελτιωμένα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα γενικά βελτιώνονται, όταν η πυκνότητα του πλέγματος αυξάνεται σε περιοχές με υψηλή μεταβολή της τάσης και όταν οι γεωμετρικές περιοχές πλεγματοποιούνται πιο ομαλά. Σε γενικές γραμμές, αλλά όχι πάντα, η ανάλυση FEA συγκλίνει προς τα ακριβή αποτελέσματα, με την συνεχή τροποποίηση του πλέγματος. Για παράδειγμα, όταν έχουμε περιοχές με υψηλή τάση, η δομή θα πρέπει να επαναπλεγματοποιηθεί με υψηλότερη πυκνότητα πλέγματος για αυτήν την περιοχή. Εάν η μεταβολή της τάσης δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη σε σχέση με την προηγούμενη πυκνότητα πλέγματος, είναι λογικό να θεωρήσουμε ότι υπάρχει σύγκλιση σε μία λύση. Υπάρχουν τρεις κυρίως τρόποι παραγωγής πλέγματος από στοιχεία: από τον ίδιο τον σχεδιαστή, ημιαυτόματα και τέλος πλήρως αυτοματοποιημένα.

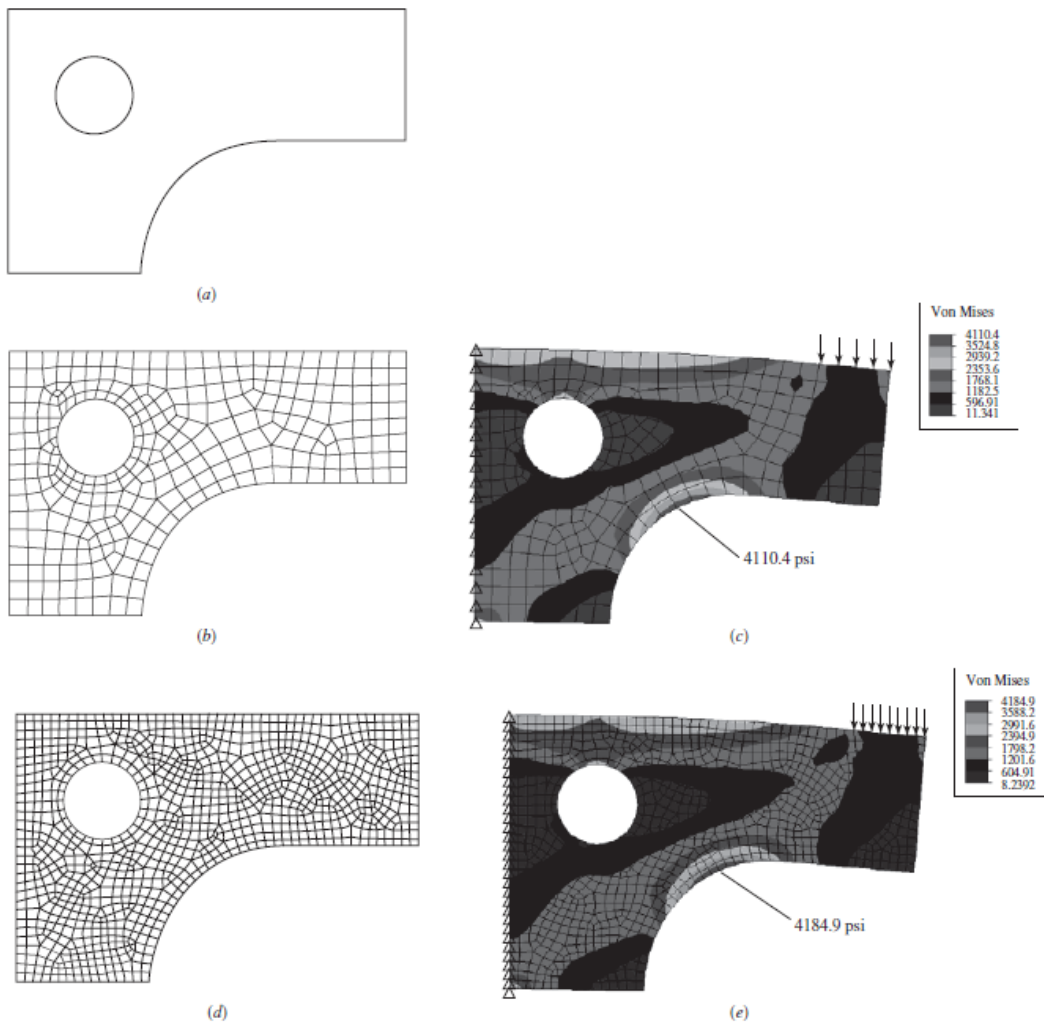
1. Δημιουργία πλέγματος από τον σχεδιαστή (manually). Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνταν το πλέγμα παλαιότερα στην ανάλυση FEA. Αποτελεί μία πολύ κοπιαστική και απαιτητική μέθοδο δημιουργίας πλέγματος, και σπάνια χρησιμοποιείται εκτός από την περίπτωση κάποιων ειδικών περιοχών της κατασκευής που μας ενδιαφέρει η ακρίβεια, και στις οποίες ο σχεδιαστής θα πρέπει να επιλέξει μόνος του το πλέγμα. Η μη-αυτόματη επιλογή πλέγματος έχει περισσότερο εκπαιδευτικό πλέον χαρακτήρα και χρησιμοποιείται κυρίως σε πολύ απλά προβλήματα.

2. Ημιαυτόματη δημιουργία πλέγματος. Με την πάροδο των χρόνων, έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι που επιτρέπουν στον σχεδιαστή αυτόματα να πλεγματοποιεί περιοχές της κατασκευής, τις οποίες έχει διαχωρίσει χρησιμοποιώντας κάποιες αυστηρά ορισμένες οριακές συνθήκες. Επειδή είναι αναγκαία η επιλογή από τον χρήστη των οριακών συνθηκών για αυτό και η τεχνική θεωρείται ημιαυτόματη. Η ανάπτυξη αυτών των αλγορίθμων για την παραγωγή του πλέγματος προέρχεται από το χώρο των γραφικών των υπολογιστών.

3. Πλήρως αυτοματοποιημένη δημιουργία πλέγματος. Οι περισσότεροι σχεδιαστές λογισμικού επικεντρώνουν τις προσπάθειές τους στην ανάπτυξη μίας πλήρως αυτοματοποιημένης δημιουργίας πλέγματος, και σε ορισμένες περιπτώσεις στην αυτόματη και αυτοπροσαρμοζόμενη τελειοποίηση του πλέγματος (mesh refinement). Ο προφανής στόχος είναι να μειωθεί σημαντικά ο προ-επεξεργαστικός χρόνος και να μειωθεί η προσπάθεια του σχεδιαστή για να καταλήξει σε ένα τελικό και καλά δομημένο πλέγμα FEA. Μόλις καθοριστούν οι οριακές συνθήκες, χωρίς υποδιαιρέσεις, όπως κάναμε στην ημιαυτόματη δημιουργία πλέγματος και με την ελάχιστη παρέμβαση του χρήστη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι διακριτοποίησης με ένα στοιχείο. Σε προβλήματα επίπεδης ελαστικότητας οι οριακές συνθήκες καθορίζονται από μια σειρά εσωτερικών και εξωτερικών γεωμετρικών γραμμών και το στοιχείο που θα πλεγματοποιηθεί αυτόματα θα είναι επίσης το επίπεδο ελαστικό στοιχείο. Για κατασκευές λεπτού πάχους, η γεωμετρία θα ορίζεται από τρισδιάστατες επιφανειακές αναπαραστάσεις και το αυτόματα πλεγματοποιημένο στοιχείο θα είναι μία τρισδιάστατη πλάκα. Όσον αφορά τις στερεές δομές, το όριο θα μπορούσε να κατασκευαστεί με τη χρήση μεθόδων όπως η *constructive solid geometry (CSG)* και η *boundary representation (B-rep)*.

Τα αυτόματα και αυτοπροσαρμοζόμενα προγράμματα τελειοποίησης του πλέγματος, κάνουν μία εκτίμηση του σφάλματος της ανάλυσης FEA. Με βάση αυτό το σφάλμα, αναθεωρείται αυτόματα το πλέγμα και επανα-αναλύεται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου κάποιο κριτήριο σύγκλισης ή μία συνθήκη ικανοποιηθεί.

Στο σχήμα 6-5 παρουσιάζεται μία τυπική διαδικασία refinement. Στην εικόνα α) φαίνεται ο ορισμός με γραμμές των οριακών συνθηκών. Στην συνέχεια δημιουργήθηκε αυτόματο πλέγμα με 294 στοιχεία και 344 κόμβους. Στα όρια της κατασκευής παρατηρείται η ομοιομορφία των στοιχείων. Στην εικόνα c) βλέπουμε τους υπολογισμούς παραμόρφωσης και τάσης von Misses που υπολόγισε το πρόγραμμα για αυτό το πλέγμα. Η μέγιστη τάση von Misses είναι 4110,4 psi. Στην συνέχεια και στην επόμενη εικόνα φαίνεται ένα άλλο πιο πυκνό πλέγμα, το οποίο έδωσε μέγιστη τάση von Misses 4184,9 psi, η οποία είναι μόλις 1,8 τοις εκατό υψηλότερη. Σε αυτήν την περίπτωση μπορούμε με ασφάλεια να υποθέσουμε ότι έχουμε συγκλίνει αρκετά προς την λύση. Στην περίπτωση πάλι, που έχουμε ιδιαίτερα υψηλές τιμές τάσης σε κάποιες περιοχές, θα είναι προτιμότερο να αυξήσουμε την πυκνότητα πλέγματος σε αυτές τις περιοχές.



Σχήμα 5-5 Διαδικασία Refinement.

5.6 Εφαρμογή φορτίων

Υπάρχουν δύο βασικές μορφές εφαρμογής φορτίων σε μία κατασκευή: η κομβική φόρτιση και η φόρτιση στοιχείων. Ωστόσο, και η φόρτιση στοιχείων τελικά εφαρμόζεται στους κόμβους, με τον υπολογισμό των ισοδύναμων κομβικών φορτίσεων. Μια πτυχή της εφαρμογής φορτίων έχει σχέση με την αρχή του Saint-Venant.

Αν κάποιος δεν ενδιαφέρεται για τον υπολογισμό των πιέσεων κοντά στα σημεία εφαρμογής των φορτίων, δεν είναι απαραίτητο να κατανείμει την φόρτιση με μεγάλη ακρίβεια. Η δύναμη μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα κόμβο, εφόσον το στοιχείο υποστηρίζει τους βαθμούς ελευθερίας που αφορούν την εφαρμοζόμενη δύναμη. Ο σχεδιαστής δεν θα πρέπει να εκπλήσσεται, όταν τα αποτελέσματα των καταπονήσεων και των τάσεων στην περιοχή του σημείου εφαρμογής του φορτίου διαπιστώνονται να είναι πολύ μεγάλα. Οι συγκεντρωμένες δυνάμεις μπορούν να εφαρμόζονται στους κόμβους μίας δοκού και σε στοιχεία πλάκας. Ωστόσο, οι συγκεντρωμένες δυνάμεις δεν μπορούν να εφαρμόζονται σε δικτυώματα, σε δισδιάστατα ελαστικά επίπεδα ή σε αξονομετρικά στοιχεία. Και αυτό γιατί αυτά τα στοιχεία δεν υποστηρίζουν περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας. Η συγκεντρωμένη δύναμη μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτά τα στοιχεία μόνο με την χρήση ζεύγους δυνάμεων. Από στατικής άποψης, το ζεύγος δυνάμεων μπορεί να παραχθεί με τη χρήση δύο ή περισσότερων δυνάμεων που επενεργούν σε ένα επίπεδο και όπου η συνολική τους δύναμη είναι μηδέν. Η ολική δύναμη είναι ένα διάνυσμα κάθετο στο επίπεδο είναι και το ολοκλήρωμα των δυνάμεων γύρω από ένα σημείο.

Τα φορτία των στοιχείων μπορεί να είναι στατικά φορτία λόγω βαρύτητας (βάρος), θερμικές επιδράσεις, επιφανειακά φορτία όπως η ομοιόμορφη και η υδροστατική πίεση αλλά και δυναμικά φορτία λόγω σταθερής επιτάχυνσης ή σταθερής περιστροφής (φυγόκεντρη επιτάχυνση). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα φορτία των στοιχείων μετατρέπονται από το λογισμικό σε ισοδύναμα κομβικά φορτία και στο τέλος αντιμετωπίζονται ως συγκεντρωμένα φορτία που εφαρμόζονται στους κόμβους. Για την εφαρμογή φορτίου βαρύτητας, ο σχεδιαστής θα πρέπει να καθορίσει την σταθερά της βαρύτητας στις κατάλληλες μονάδες καθώς και την κατεύθυνση της βαρύτητας. Για παράδειγμα εάν το μήκος του μοντέλου και οι ασκούμενες δυνάμεις εκφράζονται αντίστοιχα σε ίντσες και lbf, τότε η σταθερά θα εκφράζεται ως $g = 386,1 \text{ ips}^2$. Εάν οι μονάδες μήκους και δύναμης του μοντέλου εκφράζονται σε μέτρα και Newton τότε αυτή θα είναι $g = 9.81 \text{ m/s}^2$. Η κατεύθυνση της βαρύτητας συνήθως σχεδιάζεται προς το κέντρο της γης.

Για τη θερμική φόρτιση, θα πρέπει να δίνεται πάντα ο συντελεστής θερμικής διαστολής του κάθε υλικού, η αρχική θερμοκρασία της κατασκευής, και οι τελικές κομβικές θερμοκρασίες. Τα περισσότερα πακέτα λογισμικού έχουν την δυνατότητα να εκτελούν θερμικές αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία στην κατασκευή για να καθορίσουν τις τελικές κομβικές θερμοκρασίες. Τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών καταγράφονται σε ένα αρχείο, το οποίο μπορεί να εισαχθεί στην στατική ανάλυση τάσεων. Το μοντέλο μεταφοράς θερμότητας θα πρέπει να έχει τους ίδιους κόμβους και τύπους στοιχείων με το

μοντέλο της στατικής ανάλυσης τάσεων, αλλιώς δεν θα μπορέσει να εκτιμήσει τα στατικά φορτία λόγω θερμικών φορτίσεων.

Οι επιφανειακές φορτίσεις μπορούν να εφαρμοστούν στα περισσότερα στοιχεία. Για παράδειγμα, η ομοιόμορφη ή η γραμμική εγκάρσια φόρτιση μπορεί να εφαρμοστεί σε δοκούς. Η ομοιόμορφη και γραμμική πίεση μπορεί να εφαρμοστεί στα άκρα ενός δισδιάστατου επιπέδου ή ενός αξονομετρικού στοιχείου. Η πλευρική πίεση μπορεί να εφαρμοστεί σε στοιχεία πλάκας. Κάθε πακέτο λογισμικού έχει έναν μοναδικό τρόπο με τον οποίο προσδιορίζει αυτά τα επιφανειακά φορτία, συνδυάζοντας γραφικές και παραμετρικές λειτουργίες.

5.7 Οριακές συνθήκες

Η προσομοίωση οριακών συνθηκών και άλλων περιορισμών είναι ίσως το πιο δύσκολο κομμάτι της επακριβής μοντελοποίησης μίας κατασκευής με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Κατά τον καθορισμό των περιορισμών, είναι σχετικά εύκολο να γίνουν λάθη παράλειψης ή λανθασμένης αποτύπωσης. Μπορεί να είναι απαραίτητο για την ανάλυση, να εξετάζονται διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης των εσωτερικών περιορισμών, όπως οι αρθρώσεις, συγκολλήσεις, κ.α., τα οποία δεν είναι τόσο απλά στην μοντελοποίηση όσο οι εξιδανικευμένες σταθερές αρθρώσεις. Οι δοκιμές πρέπει να γίνονται σε απλά προβλήματα και όχι σε μεγάλες, σύνθετες κατασκευές. Μερικές φορές, όταν ο ακριβής ορισμός μιας οριακής συνθήκης είναι αβέβαιος, μπορούν να οριστούν μόνο κάποια όρια συμπεριφοράς.

Οι οριακές εξισώσεις πολλών σημείων (*Multipoint constraint equations*) χρησιμο-ποιούνται αρκετά συχνά για τη μοντελοποίηση οριακών συνθηκών και άκαμπτων συνδέσεων μεταξύ των ελαστικών μηχανικών μερών. Όταν χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μορφή, οι εξισώσεις λειτουργούν ως στοιχεία και ως εκ τούτου αναφέρονται ως άκαμπτα στοιχεία.

Τα οριακά στοιχεία χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή ειδικών μη μηδενικών μετατοπίσεων σε μια κατασκευή. Τα οριακά στοιχεία μπορεί επίσης να είναι χρήσιμα στην μοντελοποίηση οριακών συνθηκών σε ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ

6.1 Εισαγωγή

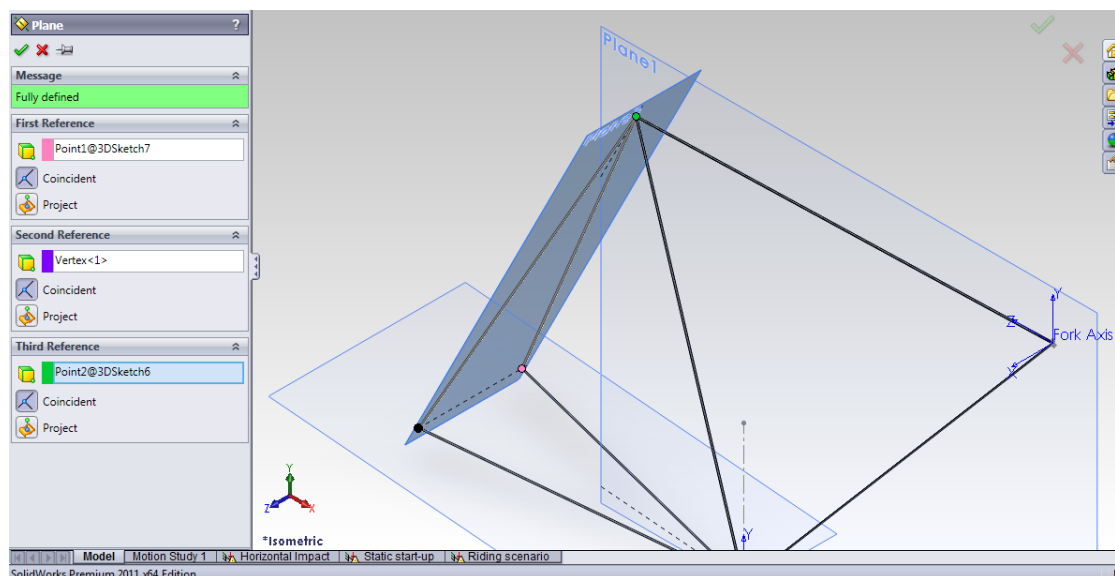
Αφού εξετάσθηκε λεπτομερώς η θεωρία που αφορά τον σχεδιασμό των ποδηλάτων, σε αυτό το σημείο θα γίνει μία εκτενής παρουσίαση των προσομοιώσεων στατικής εξέτασης και ανάλυσης των προτεινόμενων από την εργασία σκελετών. Στο κεφάλαιο θα γίνει μία αρχική παρουσίαση των κατασκευαστικών σχεδίων με όλες τις διαστασιακές λεπτομέρειες, έπειτα θα αναπτυχθεί η μέθοδος του "ισοδύναμου προβλήματος", από την οποία θα προκύψει η επιλογή της γεωμετρίας των σωλήνων και το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί. Έπειτα και βάσει τεκμηρίωσης, θα γίνει ο ορισμός των στατικών τεστ καταπόνησης και η ανταπόκριση τους στις ρεαλιστικές καταπονήσεις, με βάσει τα διεθνή πρότυπα και την επιστημονική βιβλιογραφία. Στο τελευταίο μέρος θα γίνει μία αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, που θα περιλαμβάνει εκτός από τους πίνακες τάσεων και παραμορφώσεων, και ειδικά διαγράμματα κατανομής της ενέργειας strain στον σκελετό, παράλληλα με μία συμπερασματική ανάλυση των προκύπτοντων αποτελεσμάτων.

Πριν προχωρήσω στην παράθεση των σχεδιαστικών μοντέλων θα γίνει μία σύντομη εισαγωγή στην σχεδιαστική τεχνική που χρησιμοποιήθηκε και στις σχεδιαστικές επιλογές του Solidworks, με βάσει τα οποία έγινε η παραγωγή των σχεδίων. Αξίζει να αναφερθεί ότι το Solidworks, ήταν το βασικό εργαλείο υλοποίησης της εργασίας, και ότι ως λογισμικό CAD, προσφέρει αρκετές δυνατότητες σχεδιασμού με τον εξαιρετο συνδυασμό στατικής, θερμικής, κινηματικής κ.α. ανάλυσης. Ένα τρανό παράδειγμα είναι η δυνατότητα μοντελοποίησης με χρήση γεωμετρικών σχέσεων, η οποία βοηθάει την αναθεώρηση του σχεδιασμού όταν αυτή απαιτείται γλυτώνοντας για τον μηχανικό αρκετές ώρες σχεδίασης. Επίσης δίνει δυνατότητες τρισδιάστατης σχεδίασης ή σχεδίασης σε επίπεδα που καθορίζει ο χρήστης. Ένα επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό του σχεδιαστικού πακέτου είναι η δυνατότητα σχεδίασης με επιφάνειες, που επιταχύνει την διαδικασία του σχεδιασμού, επιτρέποντας την σχεδίαση πολύπλοκων αντικειμένων με απλές τεχνικές. Ωστόσο η εργασία

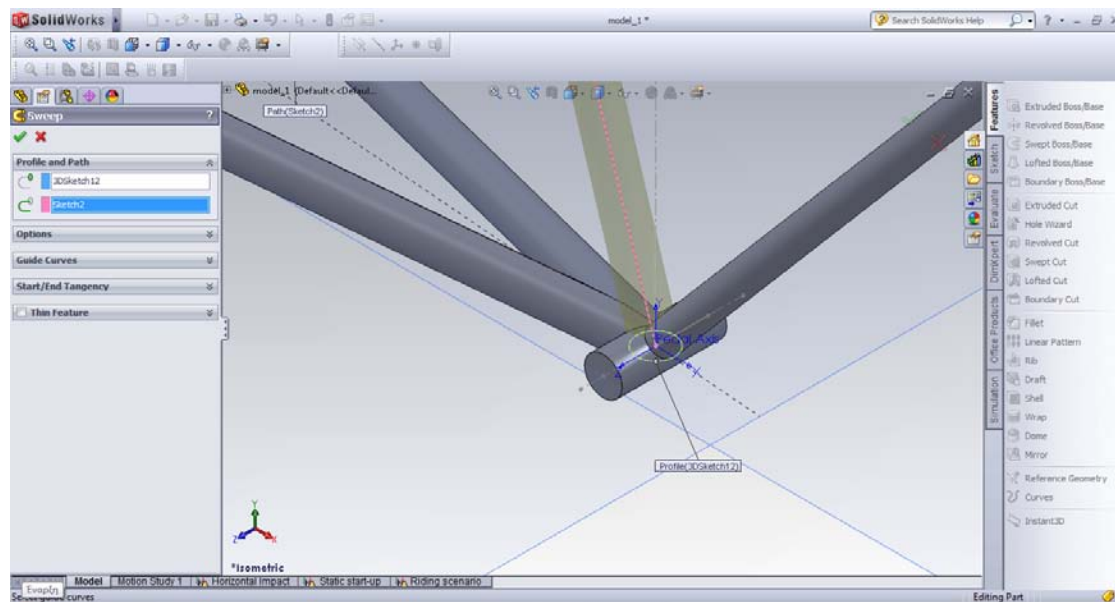
ασχολήθηκε με τις βασικές δυνατότητες του Solidworks, μερικές από τις οποίες θα αναλυθούν στην συνέχεια.

6.2 Σχεδιαστικές επιλογές του Solidworks.

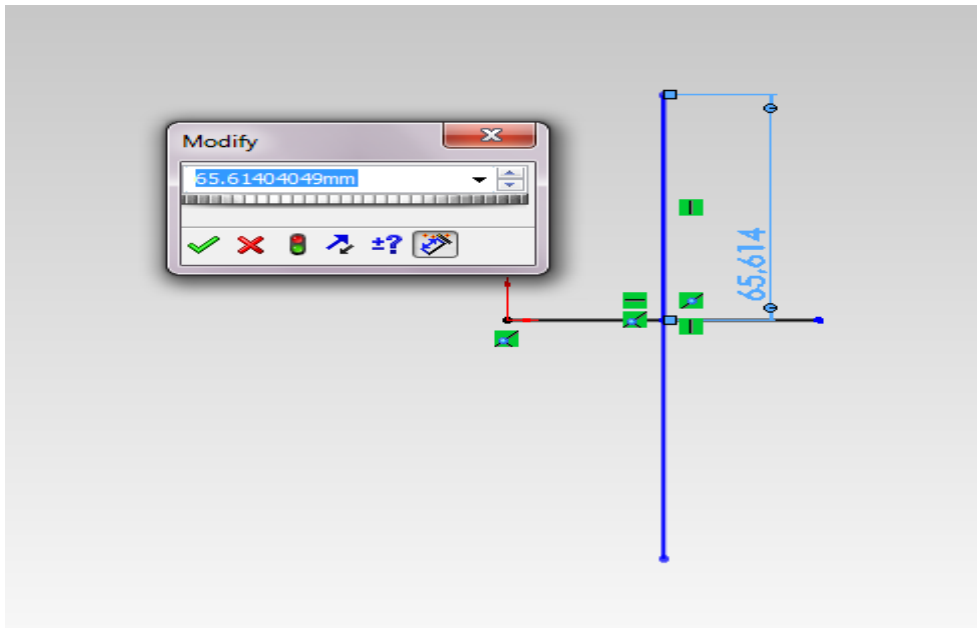
Η σχεδίαση ενός μηχανικού αντικειμένου καταρχήν απαιτεί τον καθορισμό των επιπέδων σχεδίασης. Αυτό είτε γίνεται από την αρχή της διαδικασίας, είτε προκύπτει ως ανάγκη κατά την διάρκεια της σχεδίασης. Επειδή όμως το Solidworks ως λογισμικό πακέτο, λειτουργεί με οντότητες γονικές και εξαρτώμενες, ο σχεδιαστής είναι αναγκασμένος να έχει από την αρχή μία βασική άποψη του σχεδιαστικού στόχου και αυτό γιατί η αναθεώρηση του στην συνέχεια μπορεί να είναι από δύσκολη έως πολύ χρονοβόρα. Για παράδειγμα εάν οριστεί ένα επίπεδο από τον χρήστη μέσω μίας εξαρτώμενης οντότητας η οποία στην συνέχεια θα πρέπει να επαλειφθεί, αυτό θα δημιουργήσει σχεδιαστικό λάθος στο λογισμικό πακέτο. Και εάν από αυτό το επίπεδο εξαρτάται μία πολύπλοκη και σημαντική γεωμετρία, είναι κατανοητό ότι θα προκύψουν προβλήματα για τον σχεδιαστή. Το λογισμικό παρέχει τα βασικά τρισδιάστατα επίπεδα top, front, right planes και παρακάτω απεικονίζεται η διαδικασία ορισμού ενός επιπέδου από τον χρήστη. Όπως φαίνεται ο καθορισμός γίνεται είτε με την επιλογή τριών σημείων είτε με τον καθορισμό μίας γωνίας σε σχέση με ένα βασικό επίπεδο είτε και με άλλες μεθόδους. Η εργασία χρησιμοποιεί τρία επίπεδα. Ένα είναι το front plane, και τα άλλα δύο είναι για την σχεδίαση των seatstays και chainstays αντίστοιχα. Το επίπεδο των chainstays ορίστηκε υπό γωνία σε σχέση με τον σωλήνα σέλας ενώ το επίπεδο των seatstays καθορίστηκε από τρία σημεία: δύο από τις απολήξεις των chainstays και το τελευταίο αφορούσε το σημείο σύνδεσης με τον σωλήνα σέλας.



Στην συνέχεια οι σωλήνες σχεδιάστηκαν με την επιλογή 3D Sketch on Plane η οποία επιτρέπει να σχεδιάζεις πάνω σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, κάτι που βοηθάει τον σχεδιαστή ώστε να αποφύγει τα λάθη. Το λογισμικό παρέχει μόνο τις απλές επιλογές 3D Sketch και Sketch και για να εμφανίσει την επιλογή 3D Sketch on Plane, θα πρέπει να επιλεγεί ένα επίπεδο σχεδίασης πρώτα. Στην συνέχεια το μοντέλο σχεδιάζεται με τις εντολές line οι οποίες απλά δημιουργούν ένα χωρίς πάχος δικτύωμα. Για κάθε γραμμή που παριστάνει σωλήνα πρόσθετα έναν κύκλο κάθετα στην κατεύθυνση της γραμμής, ο οποίος είχε διάμετρο 18χιλ. Στην συνέχεια από τον κατάλογο Features διαλέγω την επιλογή Swept Boss η οποία θα δημιουργήσει τους συμπαγείς και στέρεους σωλήνες. Η γραμμή έχει τον ρόλο του path ενώ ο κύκλος έχει τον ρόλο του προφίλ για την σχεδίαση του στερεού σωλήνα. Όλοι οι σωλήνες των σχεδίων έχουν σχεδιαστεί με αυτήν την επιλογή.



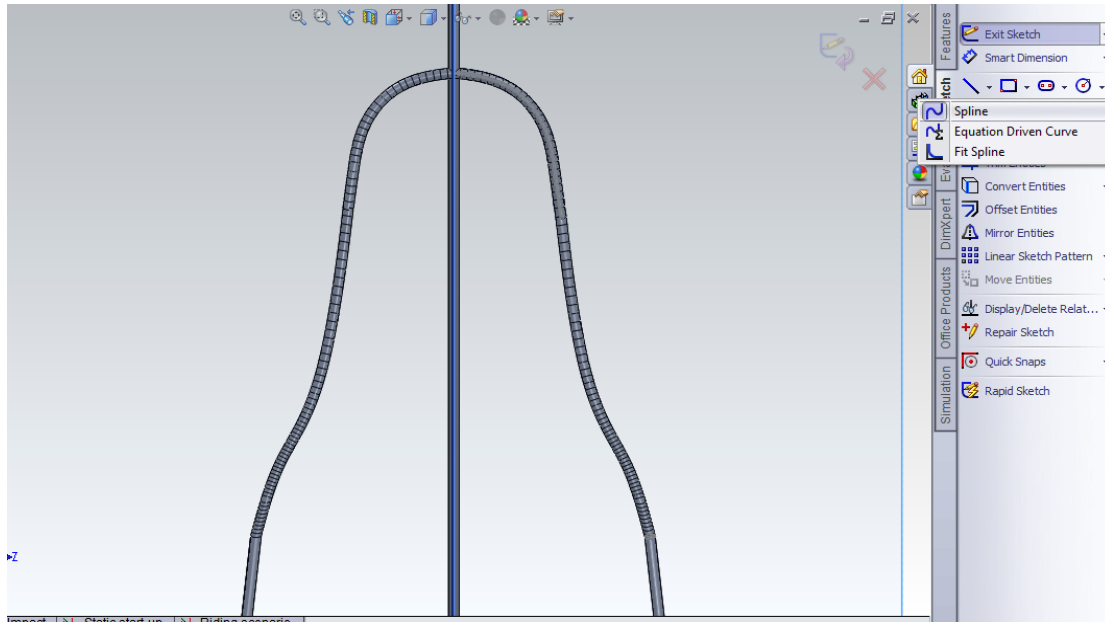
Το μέγεθος των γραμμών και οι γωνίες μεταξύ τους καθορίζονται με δύο κυρίως τρόπους. Ο ένας γίνεται με το χρήσιμο εργαλείο Smart dimension, η οποία επιτρέπει την δυναμική διαστασιοποίηση μίας γεωμετρίας. Η επιλογή αυτή ωστόσο είναι ενεργοποιημένη μόνο όταν επεξεργαζόμαστε ένα συγκεκριμένο Sketch. Ο ορισμός μίας γωνίας γίνεται με την επιλογή δύο γραμμών ακόμα και αν δεν ενώνονται αυτές αφού το σχέδιο υπολογίζει την νοητή τους προέκταση. Η γωνία μπορεί να καθοριστεί ακόμα και σε σχέση με γεωμετρία που ανήκει σε άλλο Sketch. Ένας δεύτερος τρόπος διαστασιοποίησης είναι μέσω των ιδιοτήτων κάθε οντότητας.



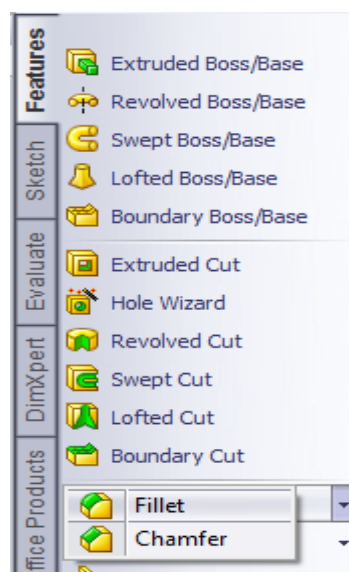
Ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει εκτός από το καθολικό σύστημα συντεταγμένων του προγράμματος και ένα δυναμικά καθορισμένο από τον ίδιο σύστημα συντεταγμένων. Στην εργασία ο ορισμός των δυνάμεων στα στατικά τεστ χρειάστηκε να γίνει με αυτήν την επιλογή. Η επιλογή ανήκει στον κατάλογο Reference Geometry και ονομάζεται Coordinate System. Με την επιλογή ενός σημείου, μπορείς να δημιουργήσεις ένα σύστημα συντεταγμένων με αρχή αυτό το σημείο.

Ορισμένα σχεδιαστικά μοντέλα της εργασίας αποτελούνται από τμηματοποιημένες καμπύλες οι οποίες προσεγγίζουν τις κανονικές καμπύλες. Η σχεδίαση τους γίνεται με την χρήση κανονικών καμπυλών από τις επιλογές του προγράμματος. Στην συνέχεια δημιουργούνται με απλές γραμμές αυτές οι τμηματοποιημένες καμπύλες μία διαδικασία εξαιρετικά χρονοβόρα και πολύπλοκη αφού ορισμένες φορές δεν θα πρέπει τα τμήματα να ακολουθούν ακριβώς τα σημεία της καμπύλης. Έπειτα η βοηθητική καμπύλη που σχεδιάστηκε θα πρέπει να αφαιρεθεί, κάτι που στην αρχή δημιουργεί λάθη αφού το πρόγραμμα δεν κατανοεί πλέον με ποια σημεία σχεδιάστηκαν τα τμήματα που έχουν παραμείνει. Σε αυτά τα τμήματα θα πρέπει να αφαιρεθεί η επιλογή coincident point η οποία καθορίζει ότι τα σημεία είναι κοινά με τα σημεία της καμπύλης ώστε να αποσφαλματωθεί το σχέδιο. Όπως είναι προφανές, η διαδικασία αυτή είναι εξαιρετικά χρονοβόρα και επίπονη. Επιπλέον με αυτήν την διαδικασία τα τμήματα δεν αντιμετωπίζονται ως ολοκληρωμένες οντότητες αλλά ως απομονωμένα τμήματα ακόμα και αν ανήκουν στο ίδιο Sketch. Για αυτό και η στερεοποίηση τους με την εντολή Swept Boss θα πρέπει να γίνει με την επιλογή ως path ξεχωριστά για κάθε τμήμα. Η σχεδίαση αυτών των τμηματοποιημένων στοιχείων έχει ως στόχο την βέλτιστη

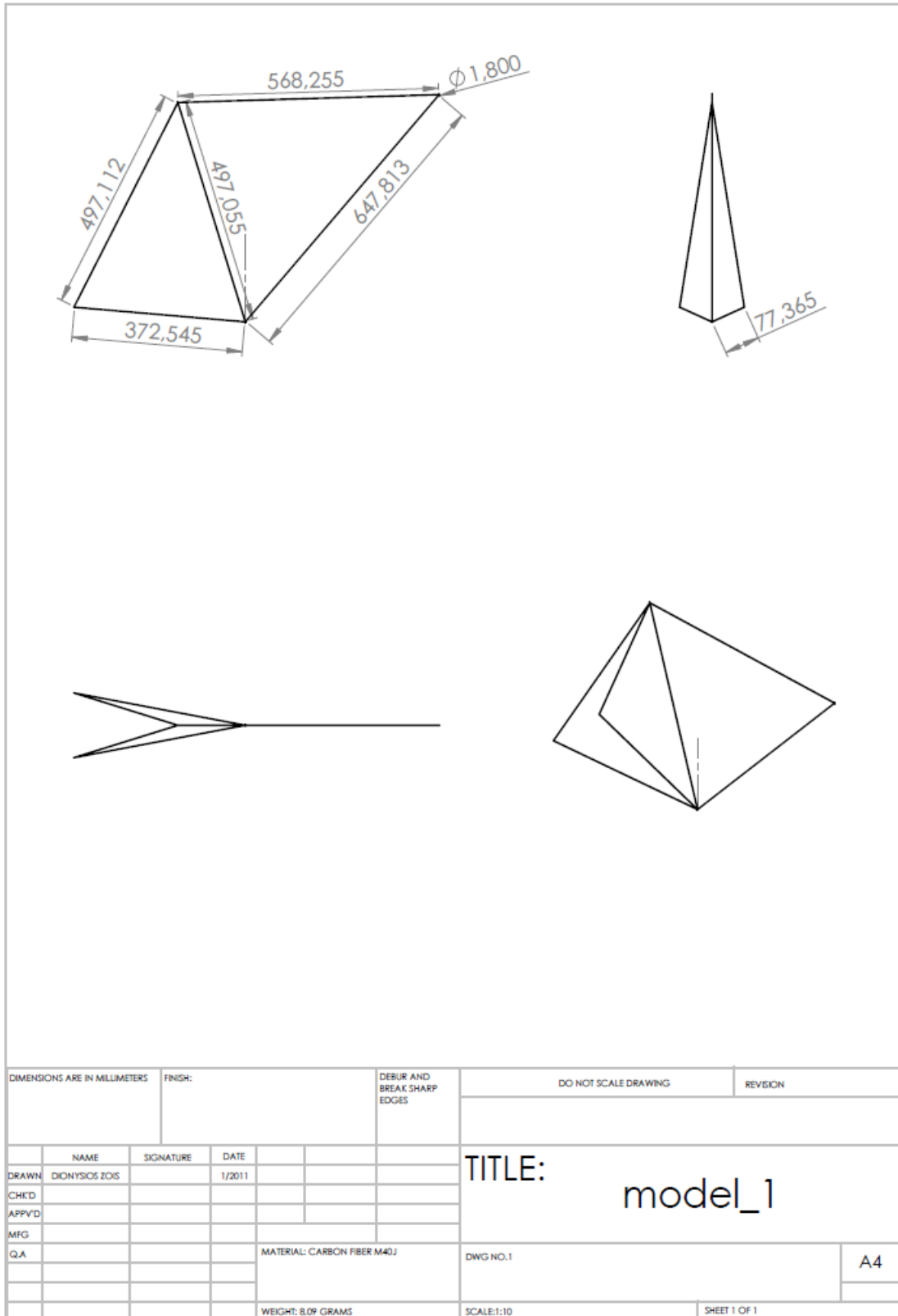
πλεγματοποίηση και κατά συνέπεια την βελτιστοποιημένη Ανάλυση FEA. Επειδή το λογισμικό δεν μας δίνει μεγάλες δυνατότητες επιλογής γεωμετρίας πεπερασμένων στοιχείων, ως σχεδιαστές επιλέξαμε τον ορισμό ως πεπερασμένων στοιχείων τα ευθύγραμμα αυτά τμήματα που προσεγγίζουν τις καμπύλες. Έτσι ο υπολογισμός των παραμορφώσεων θα είναι πιο ακριβής, ενώ παράλληλα η απορρόφηση των φορτίσεων είναι αποτελεσματικότερη.



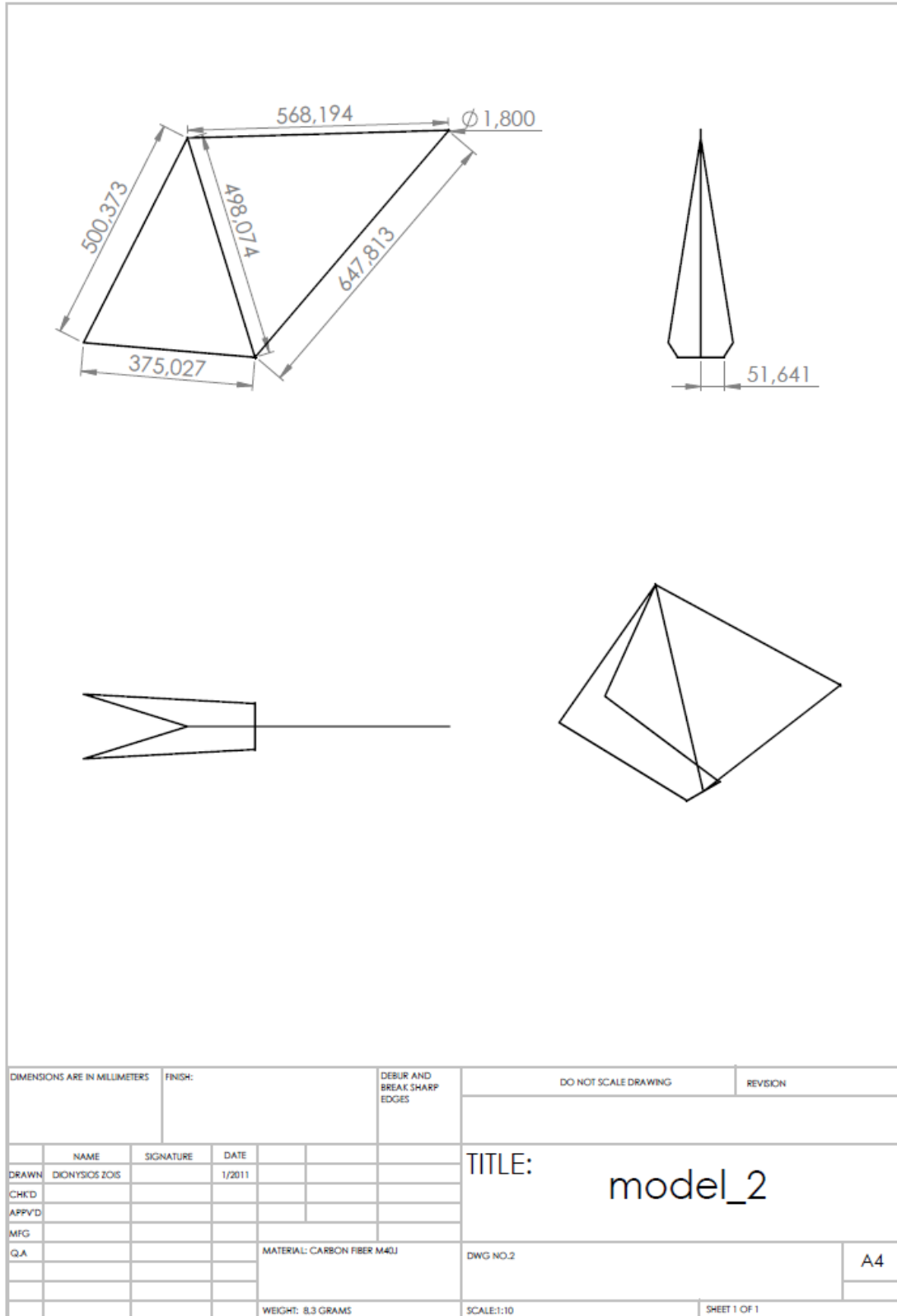
Επίσης με την επιλογή Mirror entities το κάθε σχεδιασμένο τμήμα μπορεί να συμμετροποιηθεί γύρω από έναν βοηθητικό άξονα. Η επιλογή αυτή, της συμμετρίας χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό και των δύο σωλήνων stays. Τέλος οι ενώσεις των σωλήνων χρειάστηκε πολλές φορές να ομαλοποιηθούν γεωμετρικά για λόγους αισθητικής αλλά και για την διευκόλυνση της πλεγματοποίησης κατά την Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση των εντολών Fillet και Chamfer όπως το σχήμα δείχνει.



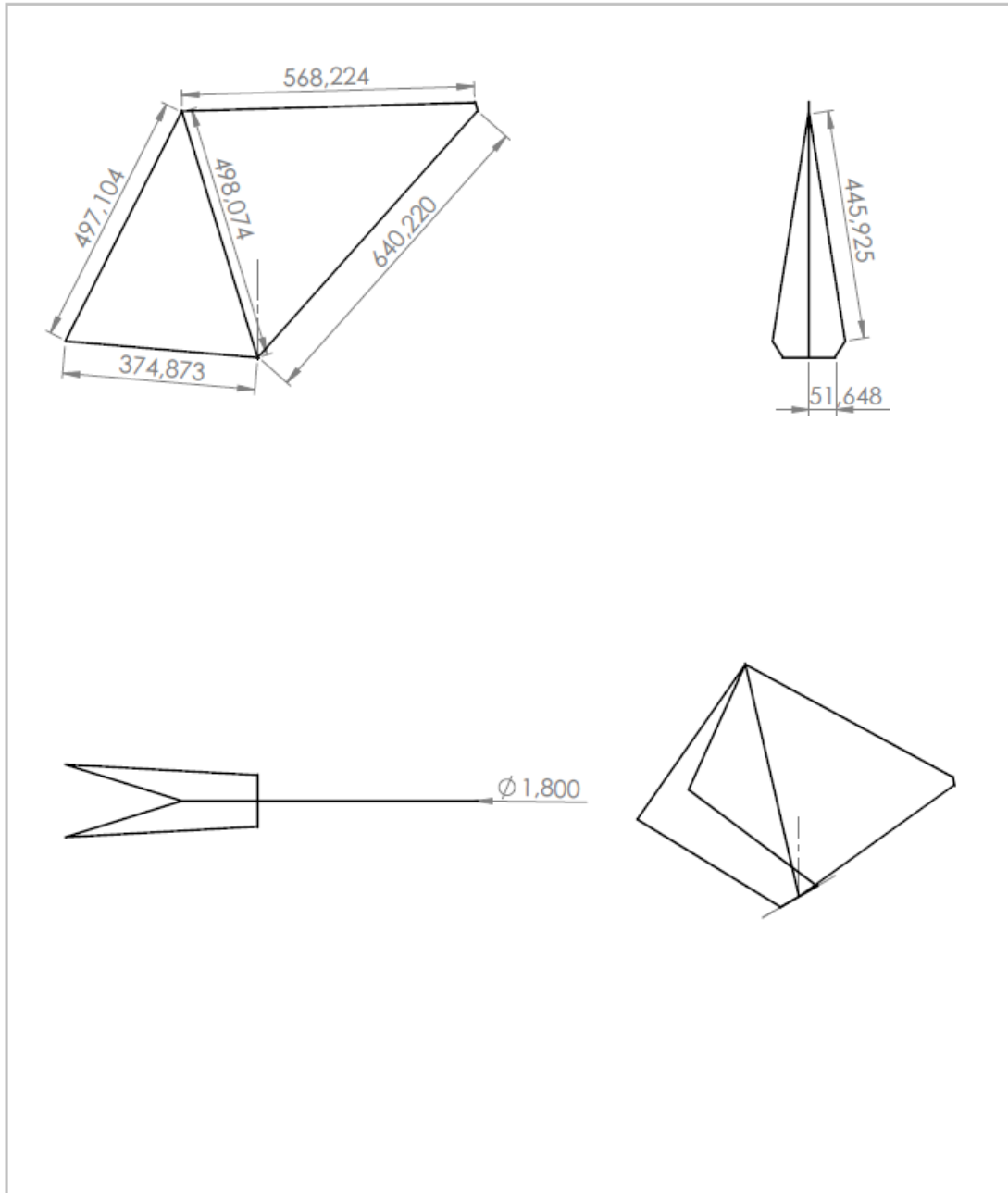
6.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΚΕΛΕΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ



1ο μοντέλο : Απλό δικτύωμα

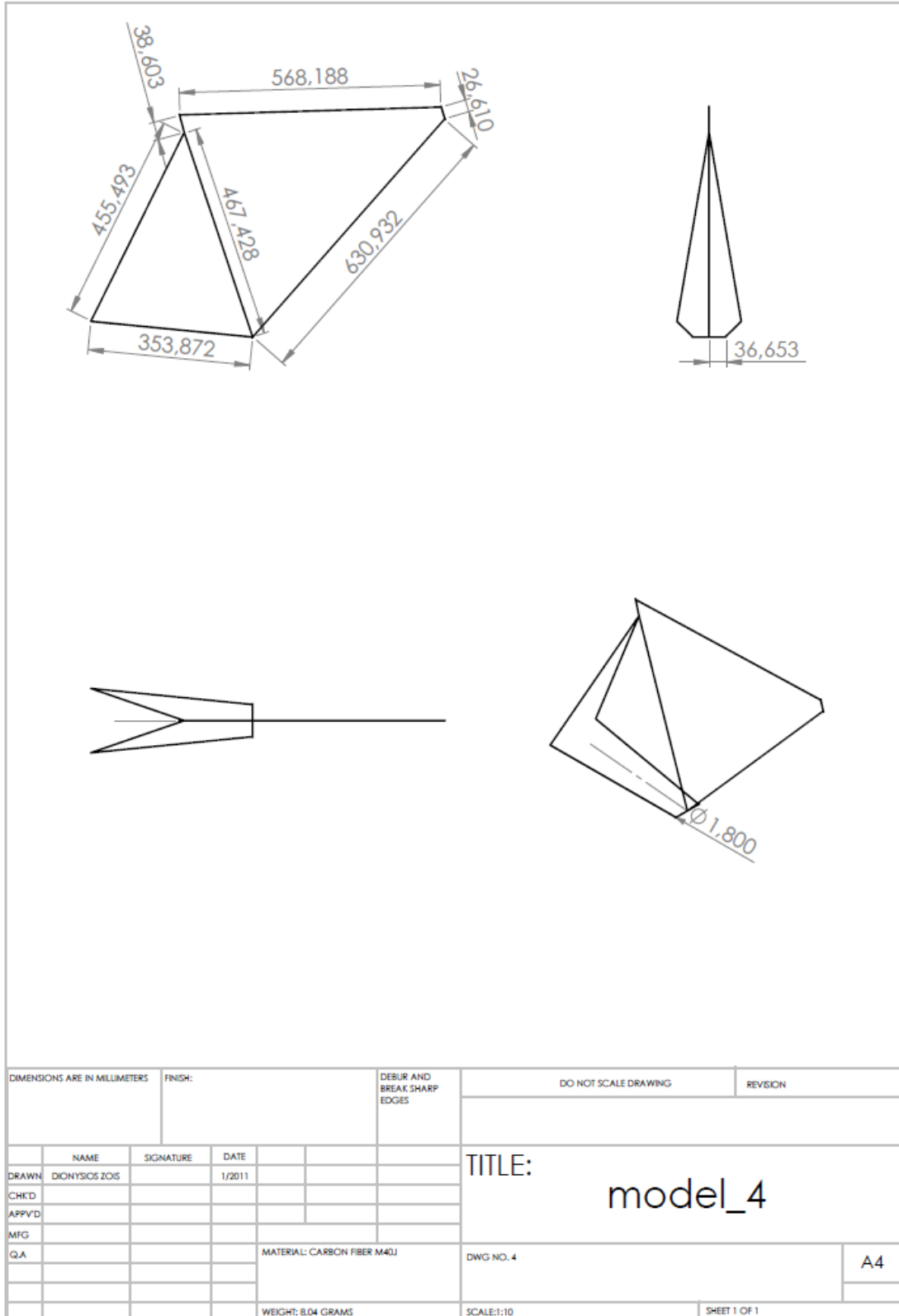


2ο μοντέλο: Προσθήκη μεσαίας τριβής.



| | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--|----------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|------------|----------|--------------|
| DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | FINISH: | | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| | | | | | | | | | |
| DRAWN | | NAME | SIGNATURE | DATE | TITLE: | | | | |
| CHK'D | | DIONYSIOS ZOIS | | 1/2011 | model_3 | | | | |
| APPV'D | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | |
| QA | | | | | MATERIAL: CARBON FIBER M40J | | DWG NO.3 | | A4 |
| | | | | | WEIGHT: 8,36 GRAMS | | SCALE:1:10 | | SHEET 1 OF 1 |

3ο μοντέλο: Προσθήκη εμπρόσθιου σωλήνα (headtube).



Μοντέλο 4: Χαμήλωμα του σωλήνα σέλας (seattube).

Τα παραπάνω τέσσερα μοντέλα που παρουσιάζω, είναι απλοϊκής και ακατέργαστης μορφής. Ο σκοπός της σχεδίασης τους είναι να εξετάσουμε την στατική συμπεριφορά σε ίδια φορτικά σενάρια, και ο εντοπισμός των διαφοροποιήσεων που προκαλεί η προσθήκη των επιμέρους σωλήνων-μηχανικών μερών του ποδηλάτου. Είναι μία μέθοδος που μας βοηθάει στην περαιτέρω κατανόηση και εξέταση του μηχανικού ρόλου κάθε τμήματος, ώστε να βελτιστοποιηθεί η τελική σχεδίαση. Και τα 4 μοντέλα είναι ξεκάθαρα πειραματικά και σε καμία περίπτωση δεν εξετάζονται ως προτεινόμενα για παραγωγή, αφού δεν πληρούν τις βασικές προδιαγραφές των ποδηλάτων.

Το 1ο μοντέλο αναπαριστά μία αρχαϊκή, γενική ή αφαιρετική κάπως άποψη του σκελετού του ποδηλάτου. Στερείται όλων των πρόσθετων σωλήνων με εξαίρεση τους βασικούς (torrtube, downtube, seattube, chainstays και seatstays) οι οποίοι επίσης μοντελοποιούνται σαν απλές γραμμές οι οποίες έπειτα γίνονται σωλήνες κυλινδρικής γεωμετρίας με διάμετρο 18 χιλ. Αποκαλείται δικτύωμα για να καταδείξει την απλοϊκή του σχεδίαση. Τα αποτελέσματα των τεστ φορτίσεως δεν αναμένεται να είναι ικανοποιητικά, αφού η φύση της σχεδίασης του δεν είναι ικανή για την ισοκατανομή της απορροφούμενης ενέργειας, οπότε και δεν μπορεί να αποφύγει τις παραμορφώσεις λόγω των μηχανικών καταπονήσεων. Επιπλέον δεν διαθέτει καμία εργονομία για τον αναβάτη. Οι διαστάσεις των βασικών σωλήνων, πέραν κάποιων εσκεμμένων τροποποιήσεων, θα ακολουθηθούν ως υπόδειγμα για τις επόμενες παραλλαγές του μοντέλου.

Στο 2ο μοντέλο γίνεται προσθήκη του εμπρόσθιου σωλήνα. Η χρήση του είναι σαφώς αναγκαία, καθότι μπορεί να απορροφάει τα κάθετα προς αυτό φορτία, τα οποία σε άλλη περίπτωση θα επιβάρυναν τον ήδη αρκετά επιφορτισμένο κάτω σωλήνα. Επιπλέον στον εμπρόσθιο σωλήνα θα πρέπει να προσδεθεί ή ενσωματωθεί μηχανισμός που θα συγκρατά το εμπρόσθιο πιρούνι αλλά και το τιμόνι. Άρα σε κάθε περίπτωση μας είναι αναγκαίος. Αναμένεται να δίνει καλύτερα αποτελέσματα παραμόρφωσης ιδιαίτερα στο σενάριο φόρτισης του ίδιου του σωλήνα, αφαιρώντας ενέργεια από τον κάτω σωλήνα.

Στο 3ο μοντέλο γίνεται η προσθήκη της μεσαίας τριβής, η οποία σαν μηχανικό μέρος απορροφά ένα μεγάλο μέρος των κραδασμών του μοντέλου. Η χρήση του είναι αναγκαία, για να είναι ομαλότερη η σύνδεση των υπόλοιπων σωλήνων που καταλήγουν στην μεσαία τριβή. Επιλέχθηκε μήκος μεσαίας τριβής 68 χιλ. ωστόσο αυτό μπορεί και να παραλλαχθεί με βάση τους στόχους της σχεδίασης. Πρέπει επιπλέον να γίνεται ειδική μέριμνα για το πλάτος της μεσαίας τριβής, το οποίο επηρεάζει το πέλμα του ποδηλάτου. Αν και σε αυτό το μοντέλο το πάχος της μεσαίας τριβής είναι ίδιο με των υπολοίπων, στο τελικό σχέδιο της σύνθετης γεωμετρίας σωλήνων θα γίνει μεγαλύτερο, με σκοπό να παραμορφώνεται λιγότερο εφόσον και επιβαρύνεται με αρκετά μηχανικά φορτία. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την οδήγηση, ο ποδηλάτης ασκεί σε αυτόν τον σωλήνα, δυνάμεις πεντάλινγκ, οι οποίες επιπροσθέτως επιβαρύνουν τον σωλήνα.

Στο 4ο μοντέλο, επιλέγω το χαμήλωμα των seatstays, αφού με τα προηγούμενα μοντέλα το κέντρο βάρους του σκελετού ήταν ιδιαίτερα υψηλό, και θα προκαλούσαν προβλήματα κατά την οδήγηση. Με το χαμήλωμα των σωλήνων το κέντρο βάρους πλέον θα τοποθετείται κοντά ή και πάνω στον σωλήνα σέλας, κάτι που είναι επιθυμητό. Επιπλέον η σχεδίαση αυτή επιτρέπει την αύξηση της στιβαρότητας (stiffness), ενώ παράλληλα βελτιώνει την αεροδυναμική συμπεριφορά του μοντέλου.

Ενδιαφέρον είναι επίσης να εξετασθούν οι ιδιότητες μάζας για το κάθε μοντέλο ξεχωριστά όπως φαίνονται και παρακάτω με βάση τα αποτελέσματα του Solidworks:

Mass properties of model_1

Density = 0.00 grams per cubic millimeter

Mass = 8.09 grams

Volume = 8090.37 cubic millimeters

Surface area = 18891.74 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

$$X = 81.96$$

$$Y = -338.48$$

$$Z = -0.08$$

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

$$I_x = (0.80, 0.60, 0.00) \quad P_x = 163265.83$$

$$I_y = (-0.60, 0.80, -0.00) \quad P_y = 486246.97$$

$$I_z = (-0.00, -0.00, 1.00) \quad P_z = 635741.95$$

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

$$L_{xx} = 278025.57 \quad L_{xy} = 154581.46 \quad L_{xz} = 98.53$$

$$L_{yx} = 154581.46 \quad L_{yy} = 371487.27 \quad L_{yz} = 72.84$$

$$L_{zx} = 98.53 \quad L_{zy} = 72.84 \quad L_{zz} = 635741.92$$

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

$$\begin{array}{lll} I_{xx} = 1204941.27 & I_{xy} = -69867.66 & I_{xz} = 43.44 \\ I_{yx} = -69867.66 & I_{yy} = 425836.83 & I_{yz} = 300.36 \\ I_{zx} = 43.44 & I_{zy} = 300.36 & I_{zz} = 1617007.07 \end{array}$$

Mass properties of model_2

Density = 0.00 grams per cubic millimeter

Mass = 8.30 grams

Volume = 8298.84 cubic millimeters

Surface area = 19437.01 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

$$X = 83.45$$

$$Y = -345.26$$

$$Z = -0.16$$

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

$$I_x = (0.79, 0.61, 0.00) \quad P_x = 179772.38$$

$$I_y = (-0.61, 0.79, 0.00) \quad P_y = 490217.89$$

$$I_z = (-0.00, -0.00, 1.00) \quad P_z = 648212.32$$

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

$$\begin{array}{lll} L_{xx} = 295628.09 & L_{xy} = 150147.66 & L_{xz} = 139.68 \\ L_{yx} = 150147.66 & L_{yy} = 374362.32 & L_{yz} = 196.65 \end{array}$$

$$L_{zx} = 139.68$$

$$L_{zy} = 196.65$$

$$L_{zz} = 648212.17$$

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

$$I_{xx} = 1284906.98$$

$$I_{xy} = -88956.82$$

$$I_{xz} = 25.90$$

$$I_{yx} = -88956.82$$

$$I_{yy} = 432153.09$$

$$I_{yz} = 667.44$$

$$I_{zx} = 25.90$$

$$I_{zy} = 667.44$$

$$I_{zz} = 1695281.39$$

Mass properties of model_3

Density = 0.00 grams per cubic millimeter

Mass = 8.36 grams

Volume = 8360.28 cubic millimeters

Surface area = 19461.83 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

$$X = 85.34$$

$$Y = -346.01$$

$$Z = -0.02$$

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

$$I_x = (0.80, 0.60, 0.00)$$

$$P_x = 182645.13$$

$$I_y = (-0.60, 0.80, -0.00)$$

$$P_y = 498965.65$$

$$I_z = (-0.00, 0.00, 1.00)$$

$$P_z = 659684.56$$

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

$$L_{xx} = 296763.15$$

$$L_{xy} = 151904.41$$

$$L_{xz} = 44.81$$

$$L_{yx} = 151904.41$$

$$L_{yy} = 384847.64$$

$$L_{yz} = -1.42$$

$$L_{zx} = 44.81$$

$$L_{zy} = -1.42$$

$$L_{zz} = 659684.56$$

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

$$I_{xx} = 1297669.66$$

$$I_{xy} = -94973.04$$

$$I_{xz} = 30.23$$

$$I_{yx} = -94973.04$$

$$I_{yy} = 445740.92$$

$$I_{yz} = 57.72$$

$$I_{zx} = 30.23$$

$$I_{zy} = 57.72$$

$$I_{zz} = 1721484.34$$

Mass properties of model_4

Density = 0.00 grams per cubic millimeter

Mass = 8.04 grams

Volume = 8037.57 cubic millimeters

Surface area = 18684.07 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

$$X = 104.94$$

$$Y = -348.61$$

$$Z = 0.00$$

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

$$I_x = (0.78, 0.62, 0.00)$$

$$P_x = 165621.03$$

$$I_y = (-0.62, 0.78, -0.00)$$

$$P_y = 465464.93$$

$$I_z = (-0.00, 0.00, 1.00)$$

$$P_z = 613849.48$$

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

$$L_{xx} = 281294.98$$

$$L_{xy} = 145957.76$$

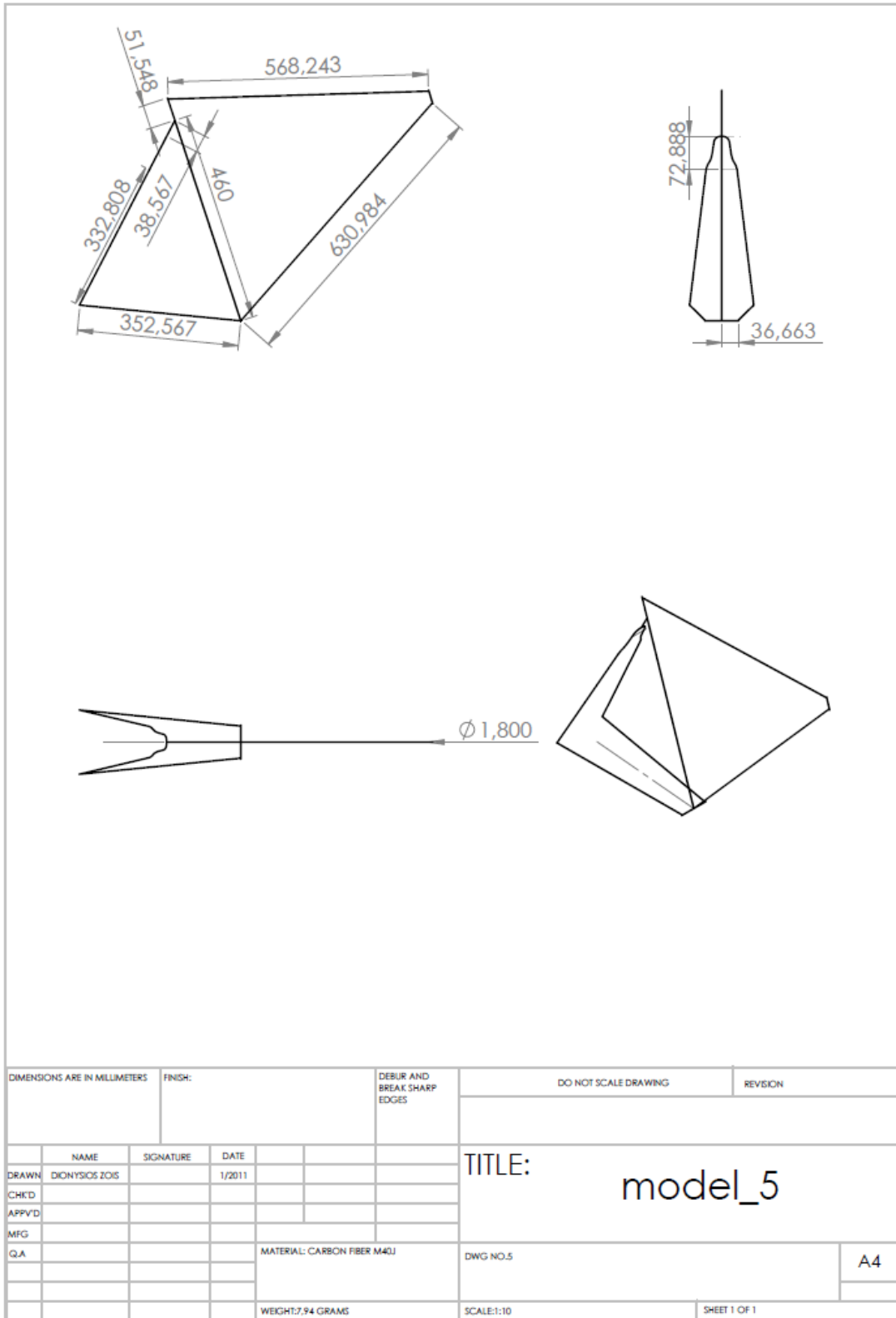
$$L_{xz} = 25.47$$

$$\begin{array}{lll} L_{yx} = 145957.76 & L_{yy} = 349790.99 & L_{yz} = -20.04 \\ L_{zx} = 25.47 & L_{zy} = -20.04 & L_{zz} = 613849.47 \end{array}$$

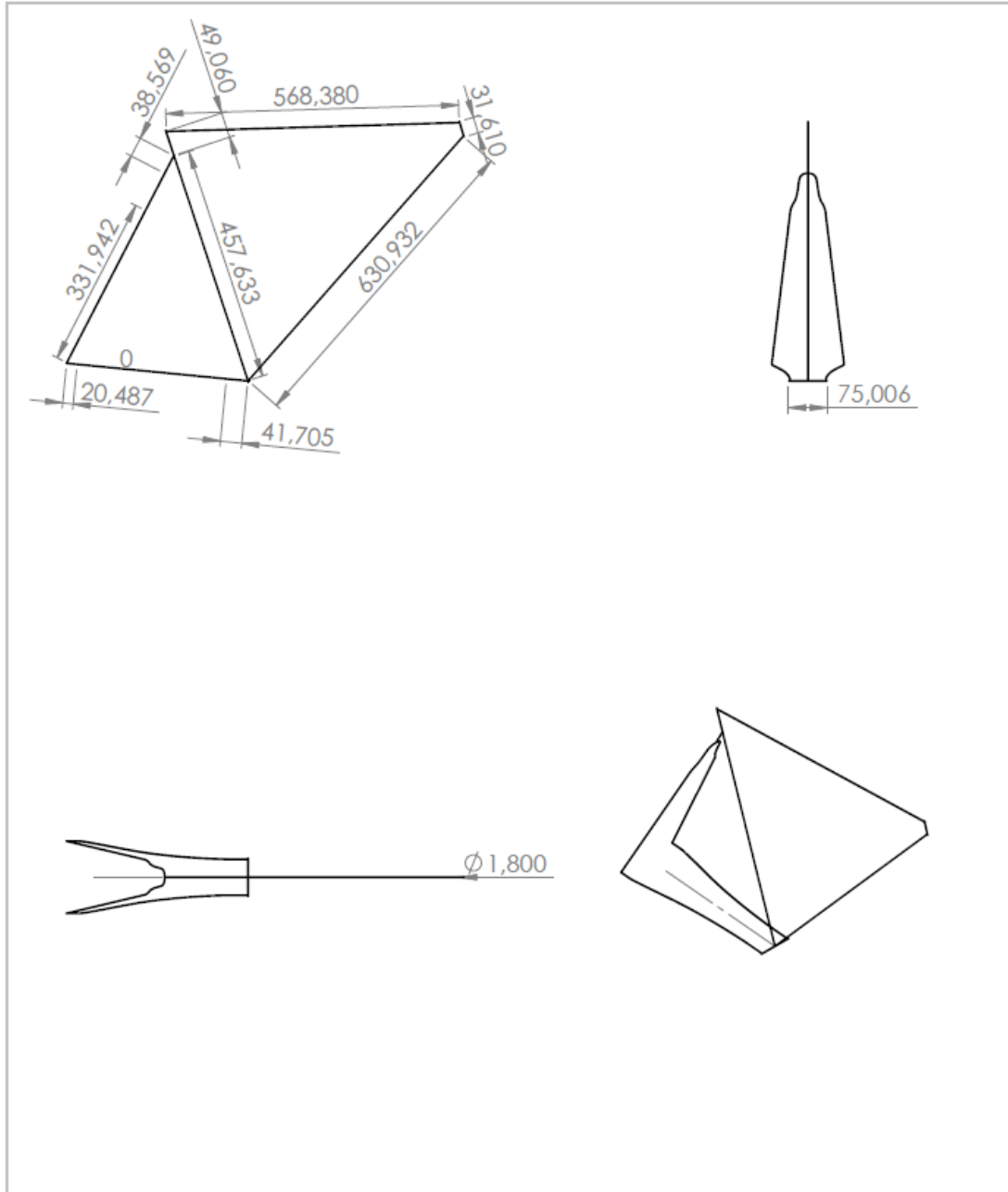
Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

$$\begin{array}{lll} I_{xx} = 1258097.44 & I_{xy} = -148075.74 & I_{xz} = 25.65 \\ I_{yx} = -148075.74 & I_{yy} = 438299.87 & I_{yz} = -20.64 \\ I_{zx} = 25.65 & I_{zy} = -20.64 & I_{zz} = 1679160.82 \end{array}$$

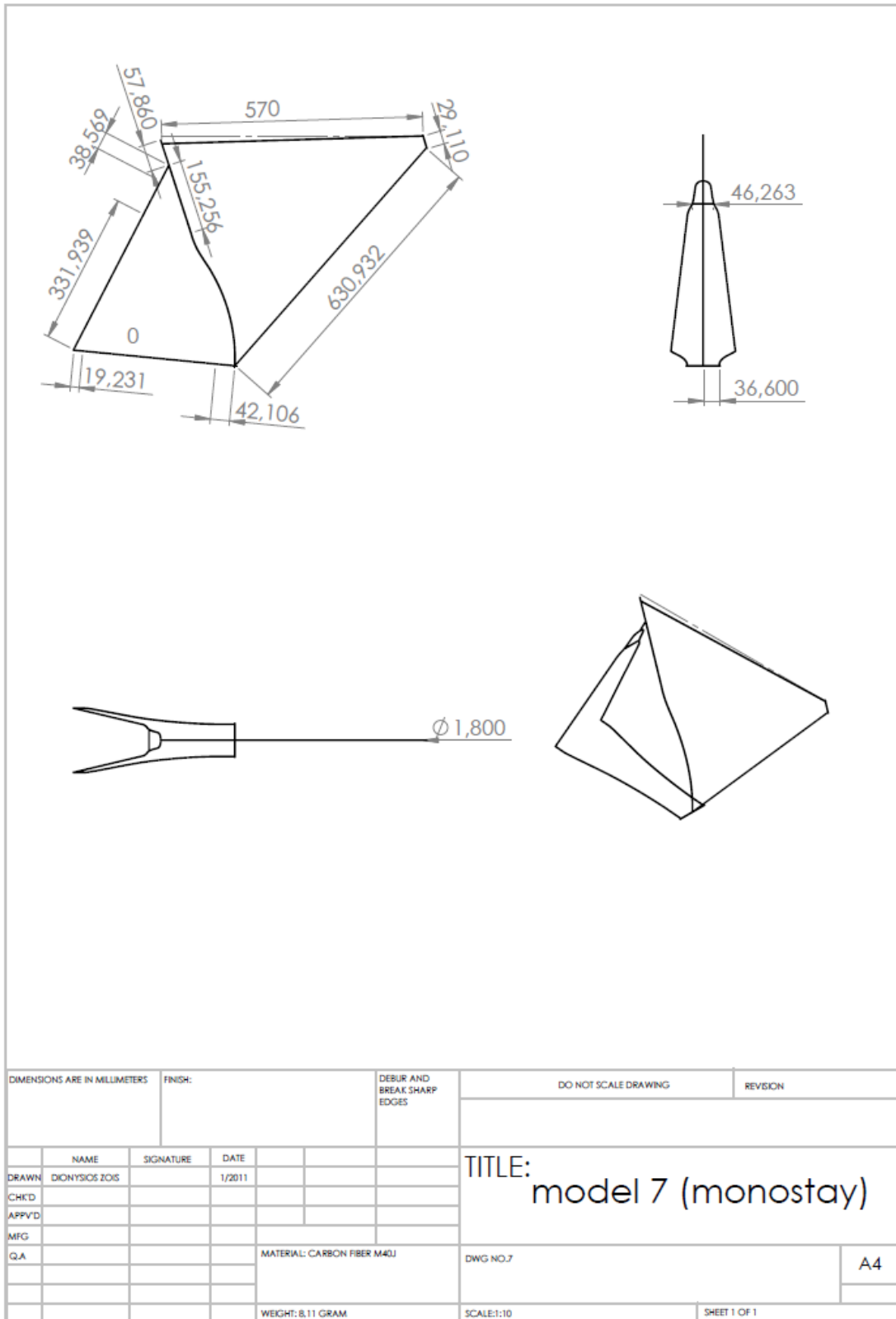


Μοντέλο 5: Αλλαγή seatstays.

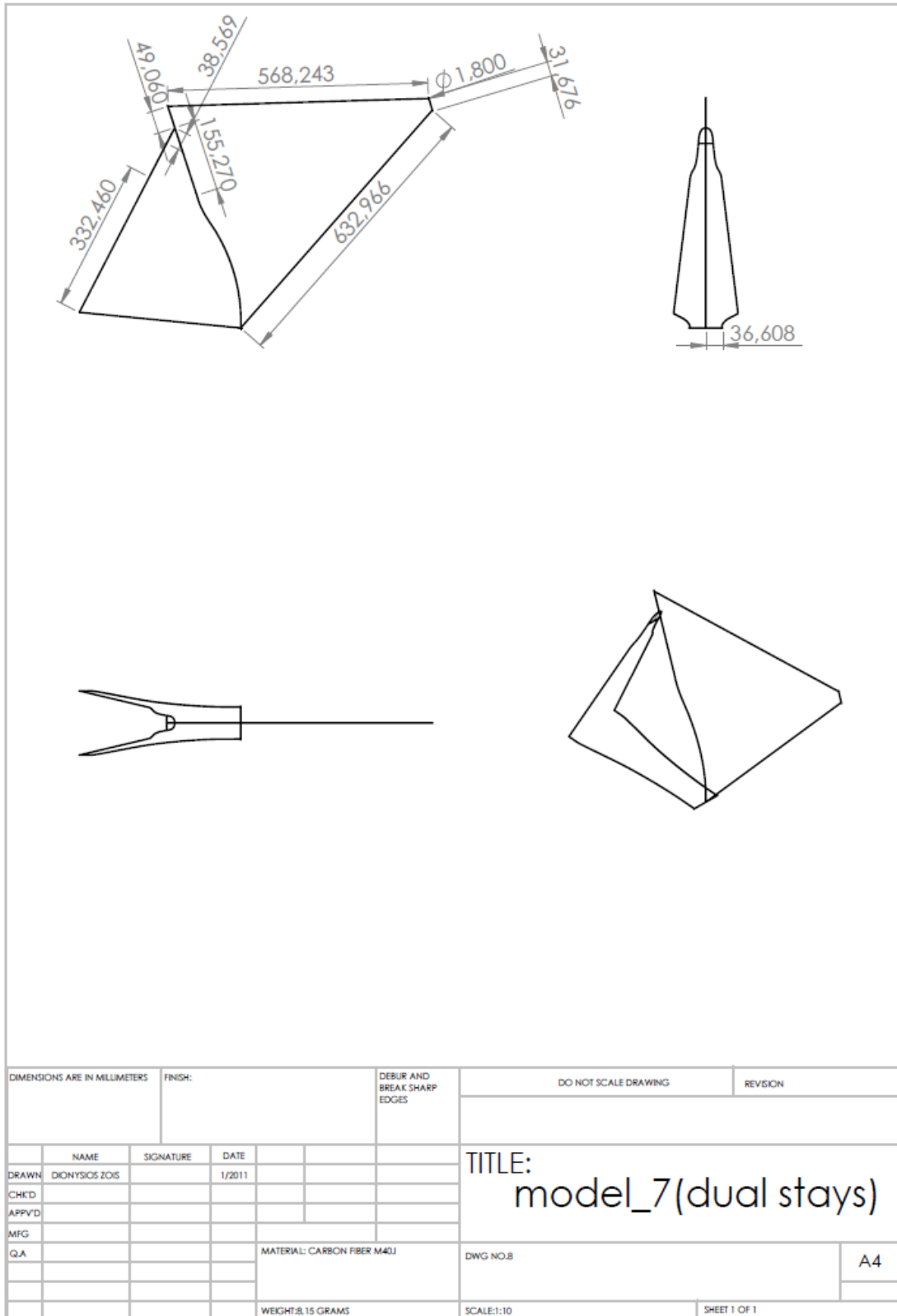


| | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--|----------------|--|-----------------------------|--|-----------------------|--|--------------|--|
| DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | FINISH: | | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| | | | | | | | | | |
| NAME | | SIGNATURE | | DATE | | TITLE: model 6 | | | |
| DRAWN | | DIONYSIOS ZOIS | | 1/2011 | | | | | |
| CHKD | | | | | | | | | |
| APPVD | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | |
| Q.A | | | | MATERIAL: CARBON FIBER M40J | | DWG NO.6 | | A4 | |
| | | | | WEIGHT: 7,94 GRAM | | SCALE:1:10 | | SHEET 1 OF 1 | |

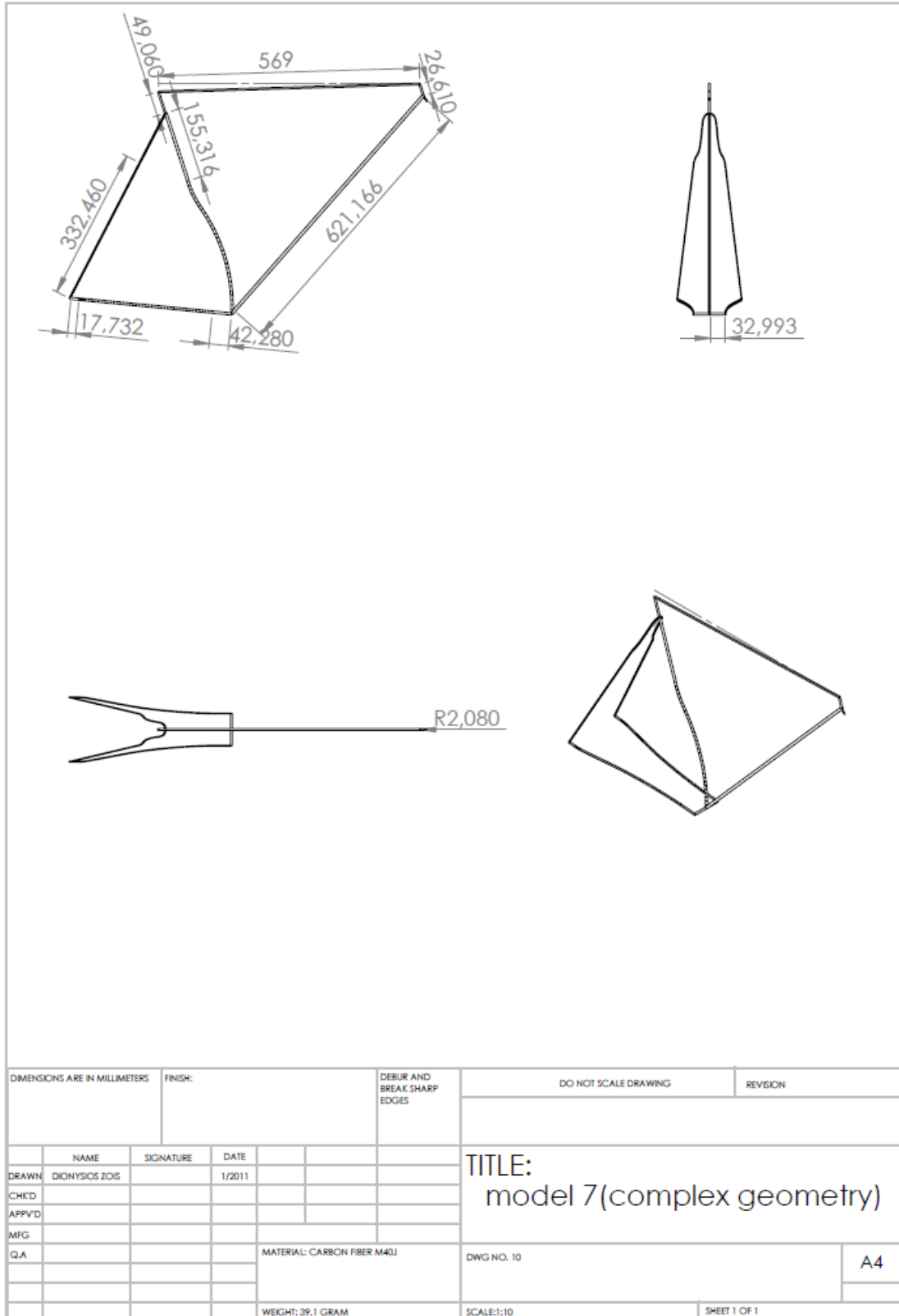
Μοντέλο 6: Αλλαγή chainstays.



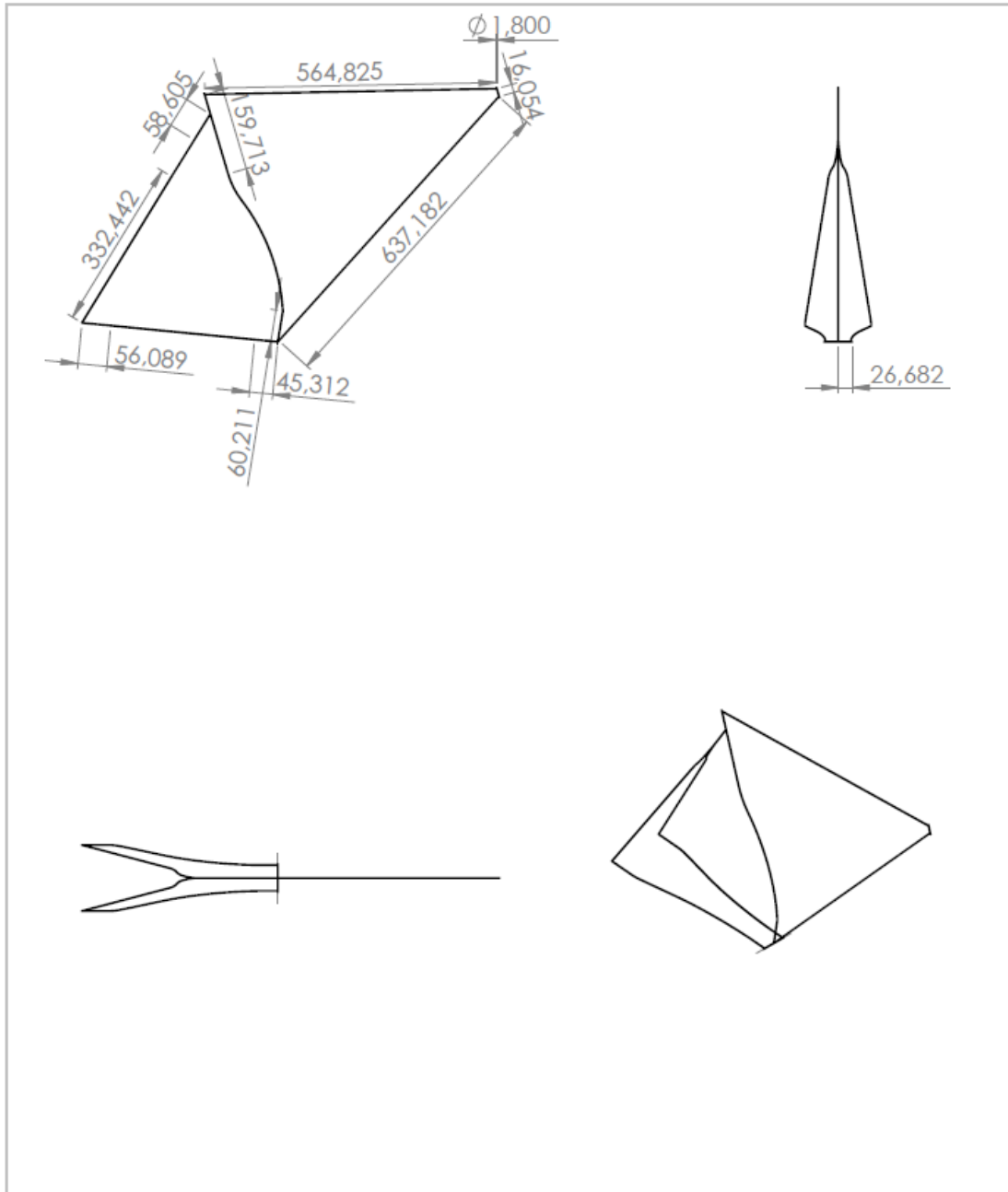
Μοντέλο 7(monostays): Αλλαγή seattube-σχέδιο με monostay seatstays.



Μοντέλο 7(dualstays): Παραλλαγή με προσθήκη διπλών seatstays.



Μοντέλο 7 (σύνθετη γεωμετρία): Προσθήκη σωλήνων με σύνθετες γεωμετρίες.



| | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--|---------------------|--|-----------------------------|--|-------------------------------------|--|--------------|--|
| DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | FINISH: | | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| DRAWN | | NAME | | DATE | | TITLE: model 7 (optimized model) | | | |
| CHK'D | | ALEKSANDROS KITSELI | | 1/2011 | | | | | |
| APP'VD | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | |
| Q.A. | | | | MATERIAL: CARBON FIBER M40J | | DWG NO.9 | | A4 | |
| | | | | WEIGHT: 8.06 GRAM | | SCALE:1:10 | | SHEET 1 OF 1 | |

Μοντέλο 7(optimized model): Βελτιστοποιημένο μοντέλο.

Τα επόμενα 6 μοντέλα που παρουσιάστηκαν διαθέτουν ειδική σχεδιαστική γεωμετρία στα οπίσθια ψαλίδια και στον σωλήνα σέλας. Αντί να σχεδιάζονται ως απλοί σωλήνες συγκεκριμένου μήκους, επιλέχθηκε μία γεωμετρική προσέγγιση των καμπυλωτών σωλήνων, η οποία επιτυγχάνεται με μικρά τμήματα σωλήνων. Η κατανομή του φορτίου από αυτές τις τμηματοποιημένες καμπύλες είναι βελτιωμένη σε σχέση με τους απλούς σωλήνες, απορροφούν πιο αποτελεσματικά τις μηχανικές καταπονήσεις και περιορίζουν τις παραμορφώσεις. Η σχεδίαση γίνεται βήμα βήμα με την προσθήκη κάθε φορά της τμηματοποιημένης καμπύλης για κάθε ένα από τα τρία μηχανικά μέρη του ποδηλάτου. Με αυτόν τον τρόπο είναι πιο εύκολο να παρατηρηθεί στις μηχανικές προσομοιώσεις, πως αυτές οι τμηματοποιημένες καμπύλες επηρεάζουν το τελικό σχέδιο. Επιπλέον για τις ανάγκες της εργασίας, συγκρίνονται τα μοντέλα dualstays και monostay με την προσθήκη μίας εγκάρσιας δοκού στήριξης των stays, ενώ επιπλέον παρουσιάζεται και ένα βελτιστοποιημένο μοντέλο με seatstays χαμηλωμένα (για την χαμήλωση του κέντρου βάρους) τα οποία παρουσιάζουν πιο απότομη σύγκλιση στον σωλήνα σέλας ενώ ταυτόχρονα είναι ασυμπτωτικά παράλληλες με τον σωλήνα monostay. Το βελτιστοποιημένο αυτό μοντέλο έχει γεωμετρία κατάλληλη ώστε να περιορίζει τις υπερακοντίσεις τάσεων (stress raisers) λόγω των επιδράσεων πέδησης. Τέλος, σχεδιάστηκε ένα υλοποιημένο μοντέλο με χρήση σύνθετης γεωμετρίας σωλήνων, το οποίο και πλησιάζει περισσότερο στην φυσική και εμπορική εκδοχή του σκελετού του ποδηλάτου. Το συγκεκριμένο σχέδιο έχει υλοποιηθεί ως πρωτότυπο από τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Αλέξανδρο Κιτσέλη.

Σε αυτό το σημείο θα δοθούν οι ιδιότητες μάζας των σχεδίων monostay, doublestays, optimized model και complex geometry.

Mass properties of model_7(monostay)

Density = 0.00 grams per cubic millimeter

Mass = 8.11 grams

Volume = 8113.22 cubic millimeters

Surface area = 18915.88 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

X = 105.39

Y = -348.53

Z = -0.02

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters) Taken at the center of mass.

Ix = (0.78, 0.62, 0.00) Px = 165983.77

Iy = (-0.62, 0.78, -0.00) Py = 461773.16

Iz = (-0.00, 0.00, 1.00) Pz = 609844.81

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

$$L_{xx} = 280649.18 \quad L_{xy} = 144113.35 \quad L_{xz} = 37.77$$

$$L_{yx} = 144113.35 \quad L_{yy} = 347107.75 \quad L_{yz} = -17.91$$

$$L_{zx} = 37.77 \quad L_{zy} = -17.91 \quad L_{zz} = 609844.80$$

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

$$I_{xx} = 1266169.69 \quad I_{xy} = -153888.11 \quad I_{xz} = 16.66$$

$$I_{yx} = -153888.11 \quad I_{yy} = 437217.37 \quad I_{yz} = 51.92$$

$$I_{zx} = 16.66 \quad I_{zy} = 51.92 \quad I_{zz} = 1685474.92$$

Mass properties of model_7(dual stays)

Density = 0.00 grams per cubic millimeter

Mass = 8.15 grams

Volume = 8150.33 cubic millimeters

Surface area = 18963.78 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

$$X = 106.15$$

$$Y = -347.09$$

$$Z = -0.02$$

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

$$I_x = (0.78, 0.63, 0.00) \quad P_x = 167844.13$$

$$I_y = (-0.63, 0.78, -0.00) \quad P_y = 463320.15$$

$$I_z = (-0.00, 0.00, 1.00) \quad P_z = 613221.56$$

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

$$L_{xx} = 283621.66 \quad L_{xy} = 144239.55 \quad L_{xz} = 42.92$$

$$L_{yx} = 144239.55 \quad L_{yy} = 347542.63 \quad L_{yz} = 5.46$$

$$L_{zx} = 42.92 \quad L_{zy} = 5.46 \quad L_{zz} = 613221.55$$

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

$$I_{xx} = 1265521.08 \quad I_{xy} = -156051.24 \quad I_{xz} = 24.83$$

$$I_{yx} = -156051.24 \quad I_{yy} = 439379.49 \quad I_{yz} = 64.64$$

$$I_{zx} = 24.83 \quad I_{zy} = 64.64 \quad I_{zz} = 1686957.83$$

Mass properties of model _7(optimized model)

Density = 0.00 grams per cubic millimeter

Mass = 8.06 grams

Volume = 8056.44 cubic millimeters

Surface area = 18758.25 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

$$X = -54.34$$

$$Y = 225.15$$

$$Z = 0.04$$

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

$$I_x = (0.81, 0.58, -0.00) \quad P_x = 153915.20$$

$$I_y = (-0.58, 0.81, 0.00) \quad P_y = 497073.48$$

$$I_z = (0.00, -0.00, 1.00) \quad P_z = 637825.95$$

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

$$L_{xx} = 269907.63 \quad L_{xy} = 162325.35 \quad L_{xz} = -45.16$$

$$L_{yx} = 162325.35 \quad L_{yy} = 381081.05 \quad L_{yz} = -15.03$$

$$L_{zx} = -45.16 \quad L_{zy} = -15.03 \quad L_{zz} = 637825.94$$

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

$$I_{xx} = 678302.76 \quad I_{xy} = 63765.57 \quad I_{xz} = -62.01$$

$$I_{yx} = 63765.57 \quad I_{yy} = 404866.92 \quad I_{yz} = 54.79$$

$$I_{zx} = -62.01 \quad I_{zy} = 54.79 \quad I_{zz} = 1070006.92$$

Mass properties of model_7(complex geometry)

Density = 0.00 grams per cubic millimeter

Mass = 39.10 grams

Volume = 39102.75 cubic millimeters

Surface area = 42999.94 square millimeters

Center of mass: (millimeters)

X = 203.83

Y = -329.56

Z = -0.07

Principal axes of inertia and principal moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass.

I_x = (0.80, 0.60, 0.00) P_x = 788531.57

I_y = (-0.60, 0.80, -0.00) P_y = 2181363.85

I_z = (-0.00, 0.00, 1.00) P_z = 2925410.73

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

L_{xx} = 1294868.30 L_{xy} = 669973.86 L_{xz} = 1118.80

L_{yx} = 669973.86 L_{yy} = 1675027.94 L_{yz} = 235.01

L_{zx} = 1118.80 L_{zy} = 235.01 L_{zz} = 2925409.91

Moments of inertia: (grams * square millimeters)

Taken at the output coordinate system.

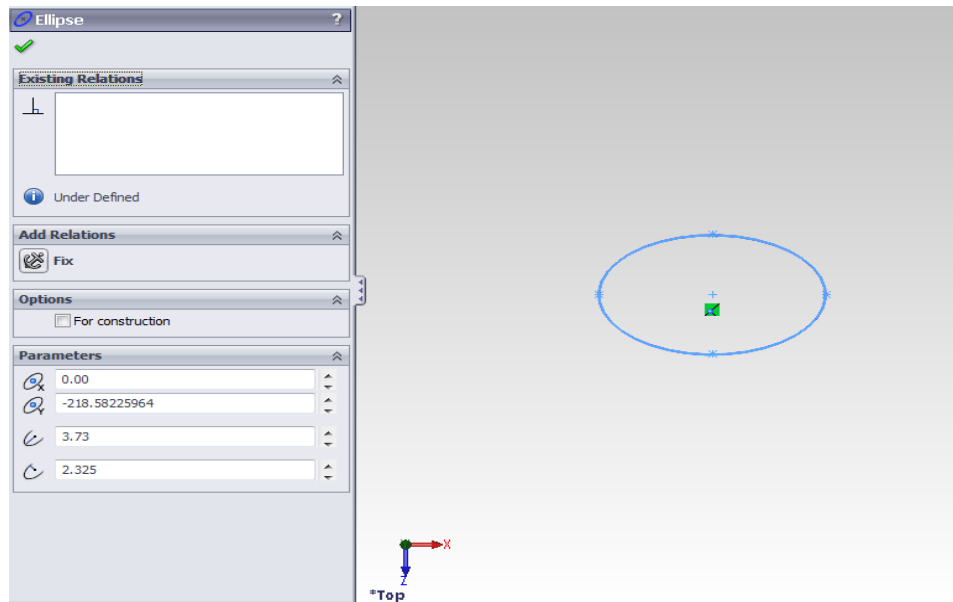
I_{xx} = 5541909.69 I_{xy} = -1956721.61 I_{xz} = 550.63

I_{yx} = -1956721.61 I_{yy} = 3299577.74 I_{yz} = 1153.67

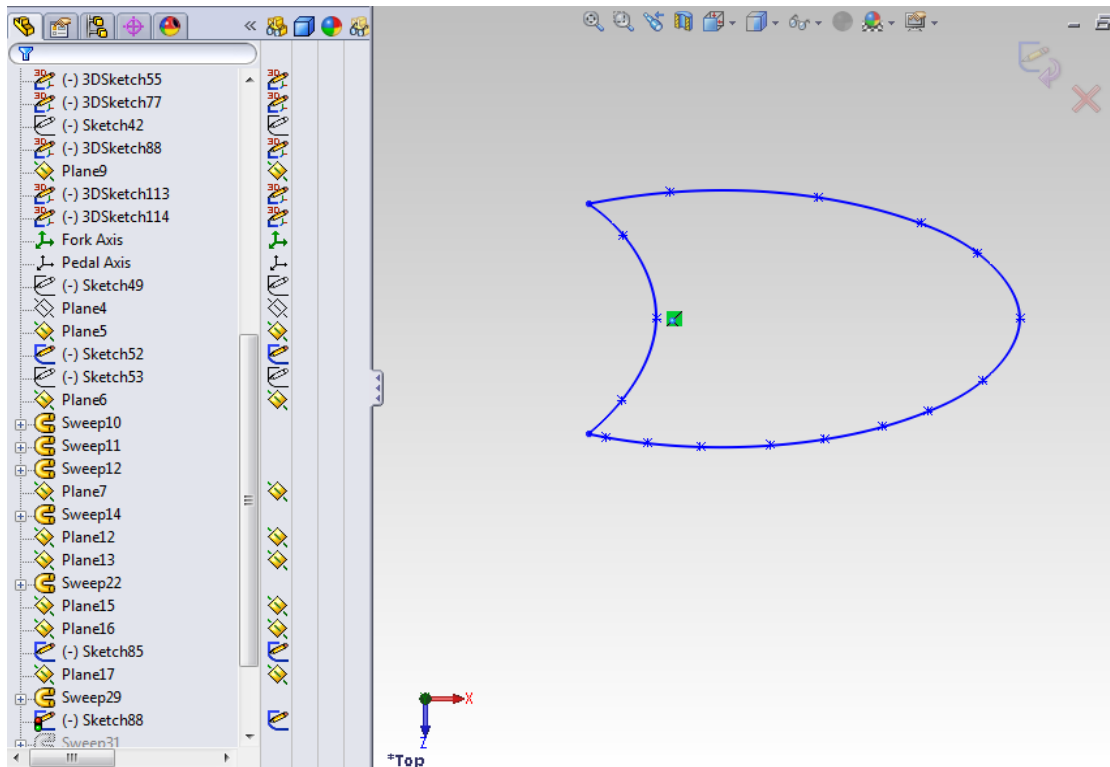
I_{zx} = 550.63 I_{zy} = 1153.67 I_{zz} = 8797000.71

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν οι διατομές του κάθε σωλήνα του μοντέλου σύνθετης γεωμετρίας με όλες τις απαραίτητες διαστάσεις.

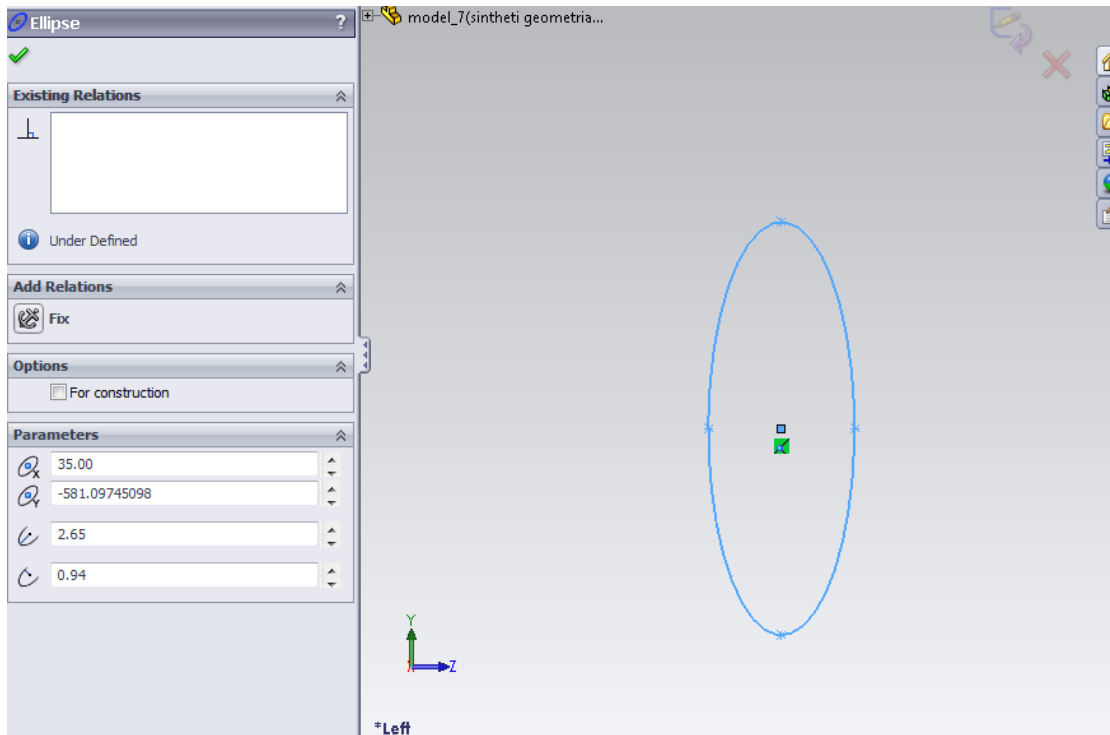
Διαστάσεις διατομής σωλήνα *downtube* (έλλειψη)



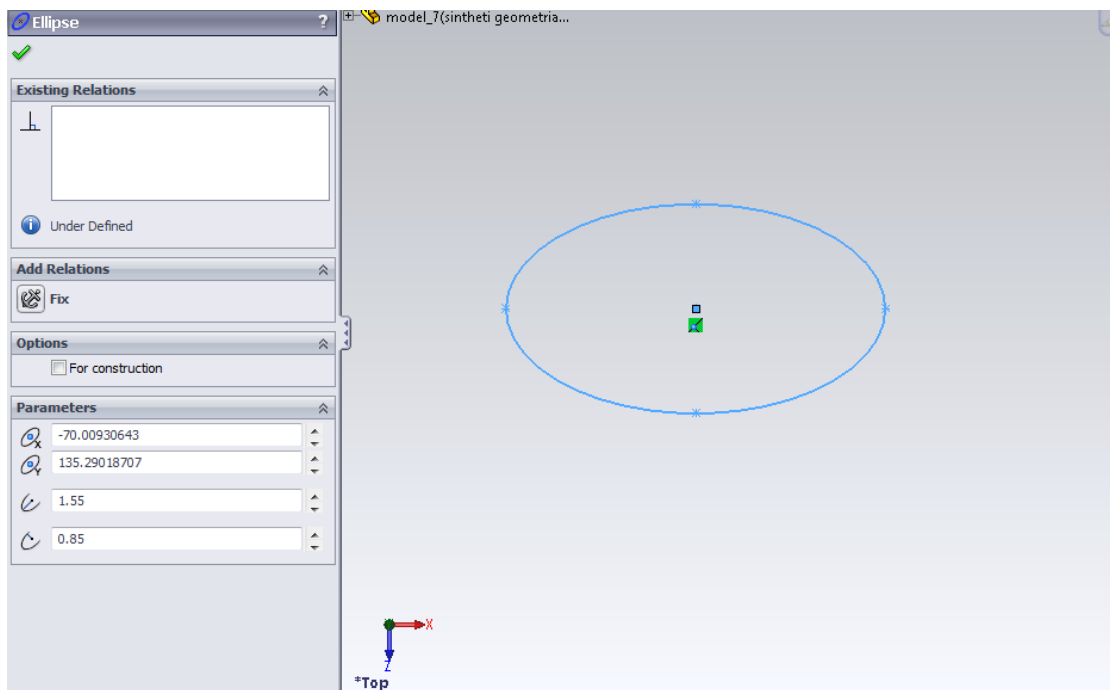
Διαστάσεις διατομής σωλήνα *seattube*



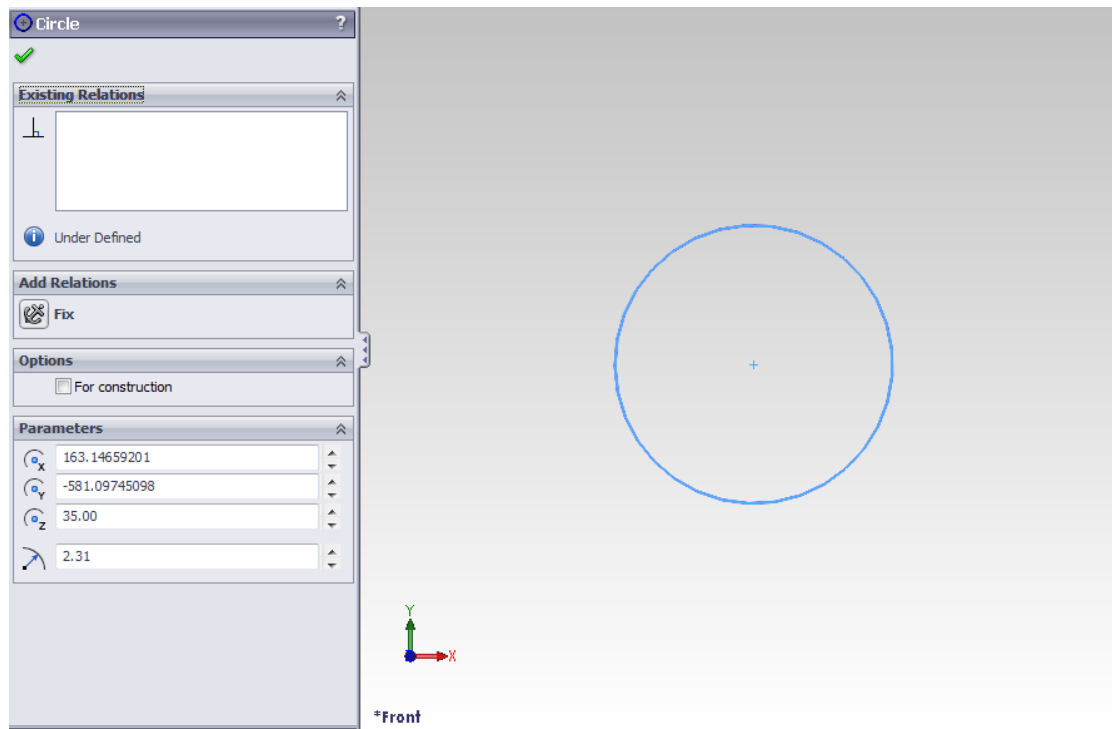
Διαστάσεις διατομής σωλήνα *chainstays* (έλλειψη)



Διαστάσεις διατομής σωλήνα *seatstays* (έλλειψη)



Διαστάσεις διατομής σωλήνα *Bottom Bracket Shell* (κύκλος)



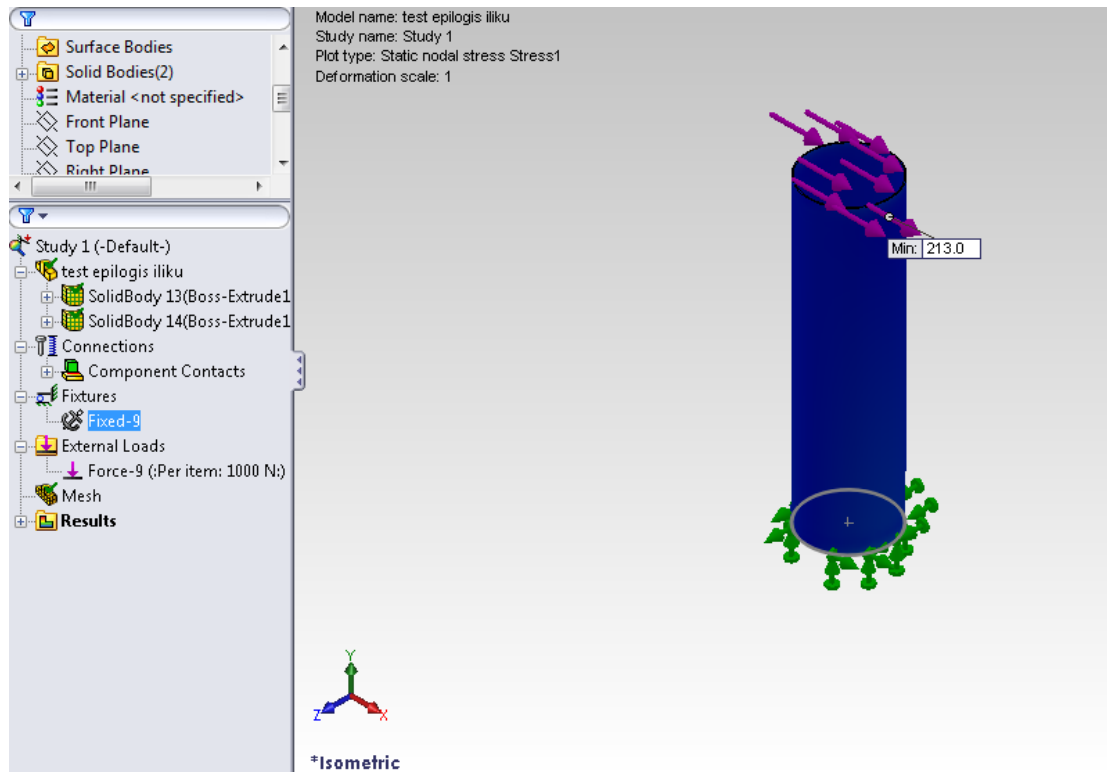
Οι σωλήνες headtube και toprtube έχουν ομοίως διατομές κύκλου με διάμετρο 2,08 και 2,035 χιλ. αντιστοίχως.

6.4 ΤΕΣΤ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΤΟΥ ΣΚΕΛΕΤΟΥ

Το πείραμα περιλαμβάνει την δοκιμή καταρχήν ενός σωλήνα μεγάλης διαμέτρου ($\delta=40$ χιλ.) και μικρού πάχους (1χιλ.) σε φόρτιση στρέψης μεγέθους 1000N και πάκτωση στο κάτω άκρο του. Το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε είναι ένα απλό κράμα αλουμινίου το 3.0205 EN AW-1200. Η γεωμετρία του σωλήνα, τα αποτελέσματα του πειράματος (σε μονάδες συστήματος SI) και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού παρατίθενται παρακάτω:

| ΥΛΙΚΑ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------------|----------------|
| | max displacement (mm) | max stress (psi) | max strain EQV |
| Aluminium 3.0205 EN AW-1200 | 0,79018 | 1,78E+07 | 8,80E-04 |

| ΥΛΙΚΑ | ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| | Elastic modulus (N/m ²) | Poisson ratio | Mass density (kg/m ³) | Yield strength (N/m ²) |
| Aluminium 3.0205 EN AW- 1200 | 7,00E+10 | 0.3897 | 2700 | 2,00E+08 |



Γεωμετρία και φόρτιση του ογκώδους σωλήνα.

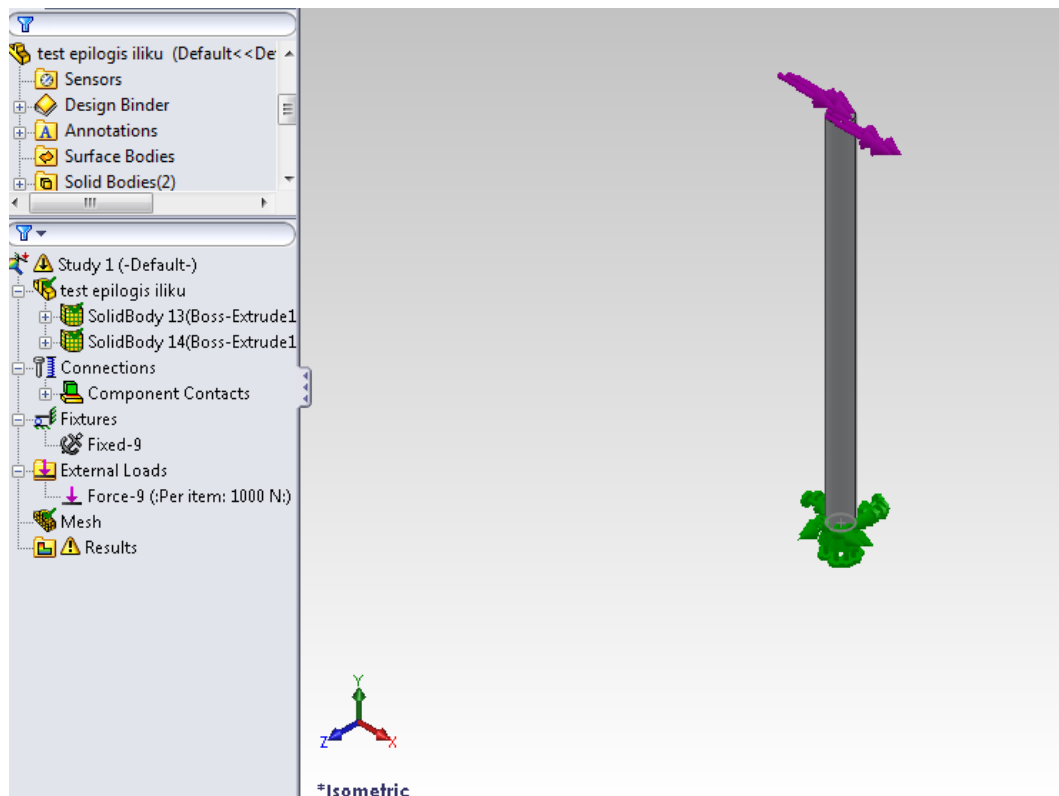
Παρατηρούμε ότι η παραμόρφωση στον σωλήνα είναι εξαιρετικά μικρή, το οποίο ήταν αναμενόμενο λόγω της γεωμετρίας του σωλήνα. Ο ογκώδης αυτός σωλήνας, θα χρησιμεύσει ως υπόδειγμα μηχανικής συμπεριφοράς, του οποίου τα αποτελέσματα παραμόρφωσης θα πρέπει να προσεγγίσει ένας λεπτός συμπαγής σωλήνας-ράβδος, ώστε έπειτα να υιοθετηθεί η γεωμετρία και το υλικό που αυτό θα χρησιμοποιεί. Το πρόβλημα μπορεί δηλαδή να επονομαστεί ως ισοδύναμο, απλοποιώντας το πρόβλημα εύρεσης υλικού και γεωμετρίας σε μία ράβδο, η οποία έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτά που θα χρησιμοποιούν οι σωλήνες του τελικού σκελετού. Η τεχνική αυτή μας βοηθάει στο να αποφύγουμε τα χρονοβόρα και αν είναι επιπλέον και φυσικά τεστ ακριβώς τεστ με τον πραγματικό σκελετό, ενώ παράλληλα δίνουν μία ρεαλιστική λύση για το υλικό και την γεωμετρία που θα πρέπει να ακολουθηθεί.

Έτσι λοιπόν, σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν μία σειρά από πειράματα σε μία πολύ λεπτή και συμπαγής ράβδο με τρία διαφορετικά μεγέθη διαμέτρου συγκεκριμένα 12,15 και 18 χιλιοστών. Τα χαρακτηριστικά φόρτισης θα είναι ίδια ενώ επιπλέον θα δοκιμαστούν 10 διαφορετικά υλικά που θα είναι είτε αλουμίνιο, κράμα ατσαλιού, τιτάνιο και ανθρακονήματα. Όταν μας προκύψει ένα υλικό και μια γεωμετρία, τα οποία θα δίνουν όμοια αποτελέσματα παραμόρφωσης, με το πείραμα του ογκώδους σωλήνα, θα θεωρήσουμε ότι το υλικό αυτό με τα συγκεκριμένα μηχανικά του χαρακτηριστικά είναι κατάλληλο για χρήση στο μοντέλο του ποδηλάτου. Κατά τους υπολογισμούς θα υπάρχουν δύο κριτήρια ή όροι επιτυχίας ένα σε κίτρινο φόντο με μετατόπιση μικρότερη των 30 χιλ. και ένα σε πράσινο φόντο με μετατόπιση μικρότερη των 10 χιλ.

Το υλικό που θα προκύψει θα είναι εικονικό υλικό θεωρητικής φύσεως με την έννοια ότι θα χρησιμοποιηθεί απλά για να συγκριθούν τα αποτελέσματα στατικής καταπόνησης σε διαφορετικές γεωμετρίες με σκοπό την εξακρίβωση των βέλτιστων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μοντέλου.

Όπως λοιπόν ήδη αναφέρθηκε, θα εκτελέσω πείραμα σε μία ράβδο μικρής διαμέτρου ($\delta=12\text{χιλ.}$). Στην συνέχεια θα αυξήσω δύο φορές την διάμετρο με βήμα 3χιλ καθώς επιθυμούμε να προσεγγίσουμε και την κατάλληλη διάμετρο της ράβδου, η οποία θα της επιτρέψει να έχει την κατάλληλη συμπεριφορά στις μηχανικές καταπονήσεις. Επιπλέον σε κάθε πείραμα με συγκεκριμένη διάμετρο θα γίνεται επιπλέον πειράματα με κάποια από τα υλικά, στα οποία κάθε φορά θα αυξάνεται κατά τάξη του 10 το Elastic modulus του. Τα αποτελέσματα παραμόρφωσης και τάσης για κάθε ξεχωριστή επιλογή διαμέτρου και υλικού παρατίθενται παρακάτω όπως και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν με τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά.

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα η φόρτιση της ράβδου είναι ακριβώς όμοια με αυτής του ογκώδους σωλήνα, ωστόσο λόγω της εντελώς διαφορετικής γεωμετρίας θα περιμένουμε πολύ διαφορετικά αποτελέσματα παραμόρφωσης. Η ράβδος θα έχει μεταβλητή παράμετρο το υλικό, το οποίο θα έχει πολύ μεγαλύτερη μηχανική αντοχή και χαρακτηριστικά σε σχέση με το αλουμίνιο του σωλήνα, για αυτό και θα αναμένουμε με κάποια από τα υλικά η συμπεριφορά της ράβδου να είναι όμοια με αυτής του σωλήνα.



Γεωμετρία και φόρτιση της ράβδου.

| ΥΛΙΚΑ | ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | Elastic modulus (N/m ²) | Poisson ratio | Mass density (kg/m ³) | Yield strength(N/m ²) |
| Aluminium 6061 T-6 | 6,90E+10 | 0,33 | 2700 | 2,75E+08 |
| Aluminium 7050- T7451 | 7,20E+10 | 0,33 | 2830 | 4,70E+08 |
| Aluminum 7075 T6 (SN) | 7,20E+10 | 0,33 | 2810 | 5,05E+08 |
| Titanium 3Al 8V 6Cr 4Mo 4Zr | 2,07E+11 | 0,29 | 7750 | 4,37E+12 |
| Titanium 6Al 4V | 1,40E+11 | 0,36 | 6100 | 1,00E+13 |
| Steel alloy 1.7320 (20MoCr3) | 2,10E+11 | 0,28 | 7800 | 2,96E+08 |
| Carbon Fiber T300 | 2,30E+11 | 0,33 | 1760 | 3,56E+09 |
| Carbon Fiber T700 | 2,30E+11 | 0,33 | 1800 | 4,90E+09 |
| Carbon Fiber T1000G | 2,94E+11 | 0,33 | 1800 | 6,37E+09 |
| Carbon Fiber M40J | 3,77E+11 | 0,33 | 1770 | 4,41E+09 |

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι τα υλικά που επιλέχθηκαν στην εργασία, έχουν αύξουσα ταξινόμηση με βάση τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, και ιδιαίτερα με βάση την σταθερά ελαστικότητας που είναι και η πιο σημαντική παράμετρος του υλικού στις στατικές καταπονήσεις. Παρατηρείται ότι τα ανθρακονήματα έχουν μεγαλύτερη σταθερά ελαστικότητας από τα υπόλοιπα υλικά και επιπλέον η πυκνότητα των υλικών αυτών είναι μόλις μισή σε σχέση με τα άλλα υλικά. Αυτό μας προϊδεάζει ότι τα ανθρακονήματα θα έχουν την βέλτιστη συμπεριφορά. Τα τεστ ωστόσο δεν γίνονται μόνο με βάση μόνο το κριτήριο αντοχής του υλικού, αλλά και με βάση το κόστος που στην περίπτωση των ανθρακονημάτων είναι μεγάλο. Επομένως αν κάποιο πιο φθηνό υλικό μας εξασφαλίζει παρόμοια μηχανική συμπεριφορά με μικρότερο κόστος είναι πιθανό να προτιμηθεί στην διαδικασία του σχεδιασμού.

Διάμετρος ράβδου: 12mm

| ΥΛΙΚΑ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | | |
|------------------------------|-----------------------|------------------|----------------|
| | max displacement (mm) | max stress (psi) | max strain EQV |
| Aluminium 6061 T-6 | 128,1 | 313334 | 2,08E-02 |
| Aluminium 7050- T7451 | 122,8 | 313393 | 2,00E-02 |
| Aluminum 7075 T6 (SN) | 122,8 | 313393 | 2,00E-02 |
| Titanium 3Al 8V 6Cr 4Mo 4Zr | 84,99 | 313401 | 1,38E-02 |
| Titanium 6Al 4V | 84,33 | 318188 | 1,36E-02 |
| Steel alloy 1.7320 (20MoCr3) | 42,19 | 324958 | 6,74E-03 |
| Carbon Fiber T300 | 38,43 | 313431 | 6,25E-03 |
| Carbon Fiber T700 | 38,43 | 313431 | 6,25E-03 |
| Carbon Fiber T1000G | 30,07 | 313439 | 4,89E-03 |
| Carbon Fiber M40J | 23,45 | 3134477 | 3,82E-03 |

Παρατηρούμε ότι μόνο τα δύο ανθρακονήματα πληρούν τον 1ο όρο και κανέναν τον 2ο. Παρακάτω γίνεται πείραμα με τα δύο αυτά υλικά στα οποία αυξάνεται το EI.modulus κατά τάξη του 10 δηλαδή γίνεται της τάξης του E12. Τα αποτελέσματα είναι σαφώς βελτιωμένα όπως βλέπουμε και παρακάτω:

Δοκιμές με σταθερά ελαστικότητας της τάξης του E12.

| ΥΛΙΚΑ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | | |
|-----------------------------|-----------------------|------------------|----------------|
| | max displacement (mm) | max stress (psi) | max strain EQV |
| Virtual Carbon Fiber T1000G | 28,34 | 313355 | 8,81E-04 |
| Virtual Carbon Fiber M40J | 21,33 | 313304 | 8,81E-04 |

Διάμετρος ράβδου: 15mm

| ΥΛΙΚΑ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | | |
|------------------------------|-----------------------|------------------|----------------|
| | max displacement (mm) | max stress (psi) | max strain EQV |
| Aluminium 6061 T-6 | 53,18 | 203341 | 9,54E-03 |
| Aluminium 7050- T7451 | 50,96 | 203341 | 9,15E-03 |
| Aluminum 7075 T6 (SN) | 50,96 | 203341 | 9,15E-03 |
| Titanium 3Al 8V 6Cr 4Mo 4Zr | 35,28 | 203342 | 6,33E-03 |
| Titanium 6Al 4V | 35,05 | 204976 | 6,21E+00 |
| Steel alloy 1.7320 (20MoCr3) | 17,52 | 207449 | 3,05E-03 |
| Carbon Fiber T300 | 15,95 | 203366 | 2,86E-03 |
| Carbon Fiber T700 | 15,95 | 203366 | 2,86E-03 |
| Carbon Fiber T1000G | 12,48 | 203364 | 2,24E-03 |
| Carbon Fiber M40J | 9,733 | 203350 | 1,75E-03 |

Δοκιμές με σταθερά ελαστικότητας της τάξης του E¹².

| ΥΛΙΚΑ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | | |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------|----------------|
| | max displacement (mm) | max stress (psi) | max strain EQV |
| Virtual Steel alloy 1.7320 (20MoCr3) | 1,752 | 207446 | 8,81E-04 |
| Virtual Carbon Fiber T300 | 1,596 | 203325 | 8,80E-04 |
| Virtual Carbon Fiber T700 | 1,596 | 203325 | 8,80E-04 |
| Virtual Carbon Fiber T1000G | 1,248 | 203305 | 8,80E-04 |
| Virtual Carbon Fiber M40J | 0,9734 | 203322 | 8,80E-04 |

Η αύξηση της διαμέτρου σαφώς και επηρέασε τον περιορισμό της παραμόρφωσης η οποία είναι εμφανής στον παραπάνω πίνακα, ενώ παράλληλα

δεν παρατηρούμε καμία αλλαγή στην αύξουσα ταξινόμηση των υλικών όσον αφορά την παραμόρφωση. Όπως και προηγουμένως το υλικό Carbon Fiber M40J εξακολουθεί να έχει την χαμηλότερη παραμόρφωση. Παρατηρούμε ότι με το παρόν πάχος ένα από τα ανθρακονήματα επιτυγχάνει την επιθυμητή παραμόρφωση ενώ με την αύξηση του Elastic modulus (κατά τάξη του 10) όπως δείχνει ο παρακάτω πίνακας, 5 από τα υλικά αν όχι περισσότερα έχουν επίσης επιθυμητή παραμόρφωση. Σε αυτό το σημείο η ράβδος έχει παρόμοια μηχανική απόκριση όπως και ο σωλήνας ειδικά για το υλικό Carbon Fiber M40J, ωστόσο διατηρεί πολύ χαμηλότερη (μία τάξη χαμηλότερη) τάση. Στο επόμενο βήμα και τελικό αυξάνουμε την διάμετρο της ράβδου στα 18χιλ.

Διάμετρος ράβδου: 18mm

| ΥΛΙΚΑ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | | |
|------------------------------|-----------------------|------------------|----------------|
| | max displacement (mm) | max stress (psi) | max strain EQV |
| Aluminium 6061 T-6 | 25,68 | 114560 | 4,52E-03 |
| Aluminium 7050- T7451 | 24,61 | 114560 | 4,34E-03 |
| Aluminum 7075 T6 (SN) | 24,61 | 114560 | 4,33E-03 |
| Titanium 3Al 8V 6Cr 4Mo 4Zr | 17,04 | 114560 | 3,00E-03 |
| Titanium 6Al 4V | 16,93 | 115524 | 2,93E-03 |
| Steel alloy 1.7320 (20MoCr3) | 8,465 | 116987 | 1,43E-03 |
| Carbon Fiber T300 | 7,705 | 114560 | 1,36E-03 |
| Carbon Fiber T700 | 7,705 | 114560 | 1,36E-03 |
| Carbon Fiber T1000G | 6,028 | 114560 | 1,06E-03 |
| Carbon Fiber M40J | 4,701 | 114560 | 8,28E-04 |

Δοκιμές με σταθερά ελαστικότητας της τάξης του E^{12} .

| ΥΛΙΚΑ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | | |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------|----------------|
| | max displacement (mm) | max stress (psi) | max strain EQV |
| Virtual Steel alloy 1.7320 (20MoCr3) | 0,8465 | 116987 | 1,43E-04 |
| Virtual Carbon Fiber T300 | 0,7705 | 114560 | 1,36E-04 |
| Virtual Carbon Fiber T700 | 0,7705 | 114560 | 1,36E-04 |
| Virtual Carbon Fiber T1000G | 0,6028 | 114560 | 1,06E-04 |
| Virtual Carbon Fiber M40J | 0,4701 | 114560 | 8,28E-05 |

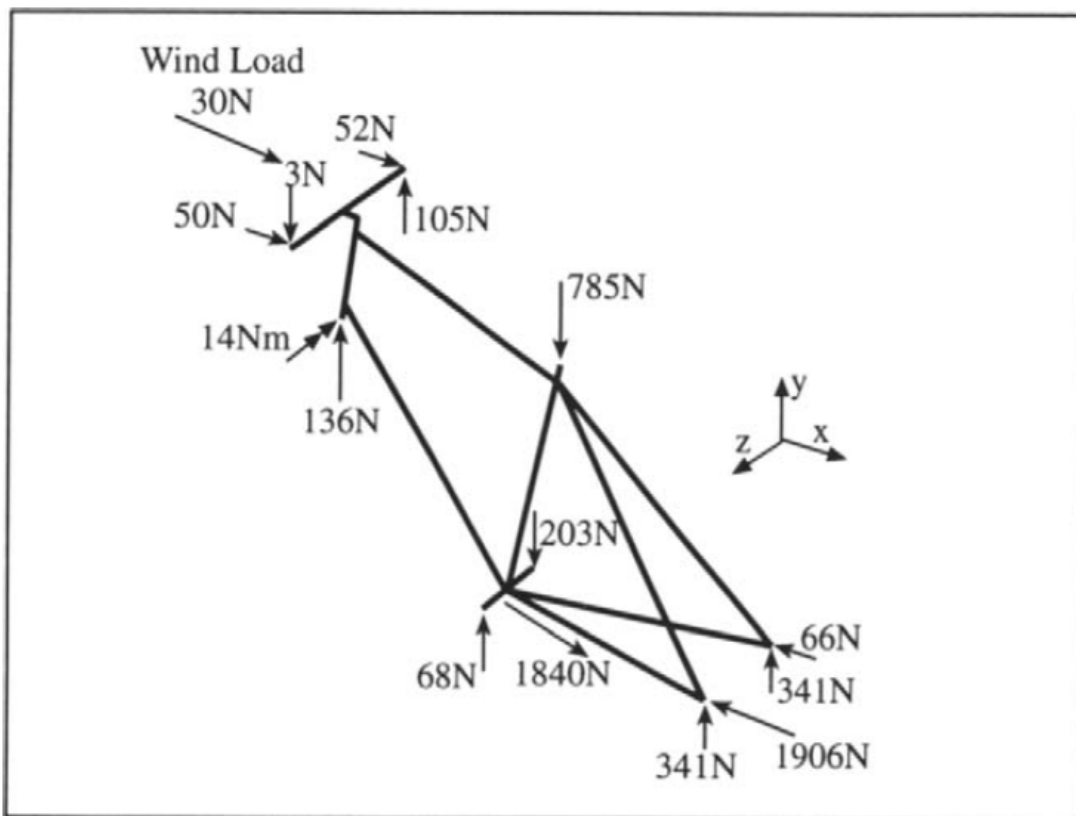
Τελικώς παρατηρούμε ότι με αυτήν την επιλογή της διαμέτρου οι παραμορφώσεις μειώνονται στο μισό σε σχέση με την περίπτωση της διαμέτρου των 15χιλ. Οι παραμορφώσεις δεν περιορίζονται κάτω από το 1 χιλ. όπως γίνεται στον ογκώδη σωλήνα ωστόσο είναι αρκετά πάλι μικρές. Η αύξηση της ελαστικότητας κατά 10 στα

ανθρακονήματα επιτυγχάνει εντέλει παραμόρφωση κάτω από 1 χιλ. για αυτό και εντέλει καταλήγουμε στην χρήση του ανθρακονήματος τύπου Carbon Fiber M40J, με σωλήνα διαμέτρου 18 χιλιοστών και μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού ως εξής:

| ΥΛΙΚΑ | ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ | | | |
|-------------------|-------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | Elastic modulus (N/m ²) | Poisson ratio | Mass density (kg/m ³) | Yield strength(N/m ²) |
| Carbon Fiber M40J | 3,77E+11 | 0,33 | 1770 | 4,41E+09 |

6.5 ΟΡΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

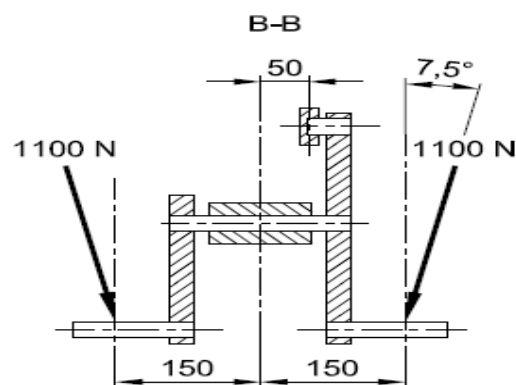
Αφού έχουν σχεδιαστεί τα επιθυμητά για τον στατικό έλεγχο πλαίσια ποδηλάτου, και αφού ολοκληρωθεί η επίλυση του ισοδύναμου προβλήματος του σωλήνα για τον καθορισμό του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις, χρειάζεται να καθοριστούν τα σενάρια φόρτισης, που θα εξετάσουν την στατική αντοχή του πλαισίου. Στο παρακάτω σχήμα, μπορούμε να δούμε τις μηχανικές καταπονήσεις που δέχεται ένα πλαίσιο ποδηλάτου, το οποίο κινείται με 50km/ώρα και το οποίο βρίσκεται σε κατάσταση έντονης καταπόνησης. Το σχήμα επιδεικνύει τόσο στατικές όσο και δυναμικές φορτίσεις ενώ άξιον παρατήρησης είναι ότι αυτές δεν εφαρμόζονται συμμετρικά του σκελετού και είναι μεγαλύτερες στην μία πλευρά σε σχέση με την άλλη. Απεικονίζονται οι αεροδυναμικές, βαρυτικές επιδράσεις και οι δυνάμεις που ασκεί ο αναβάτης στην σέλα στα πεντάλ και στο τιμόνι καθώς και άλλες πρόσθετες δυνάμεις.



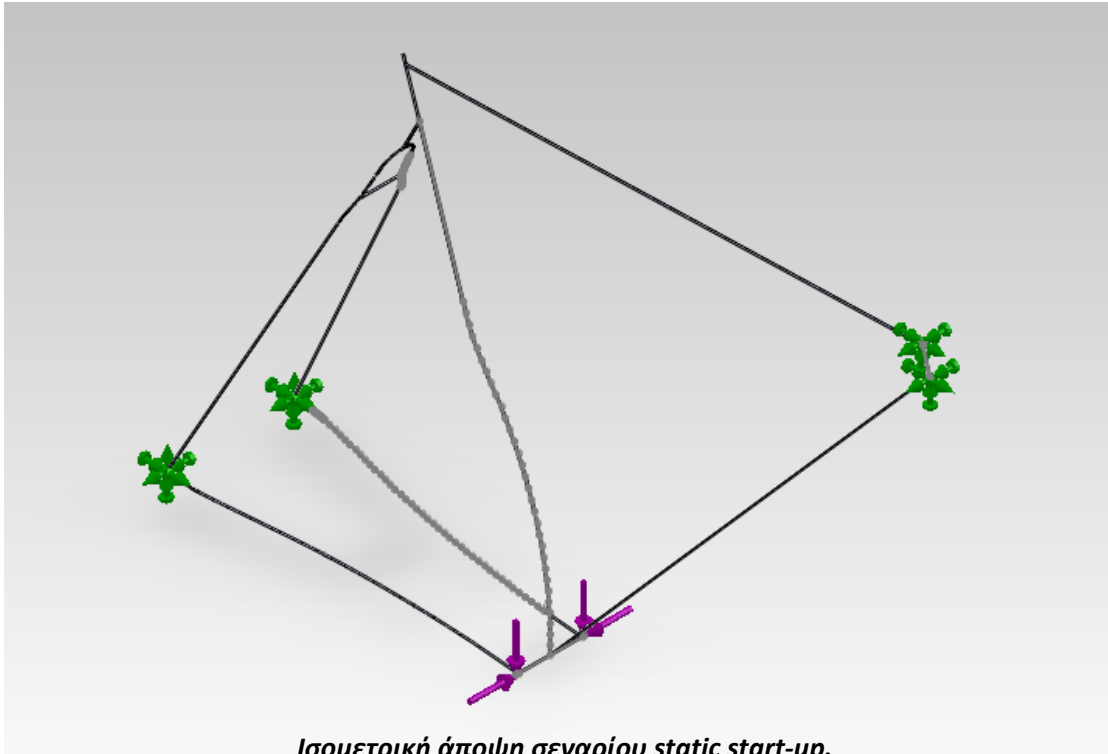
Για τις ανάγκες του σχεδιασμού αυτής της εργασίας, θα χρησιμοποιηθούν διάφορα φορτικά σενάρια, τα οποία καθορίζονται από το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 14781, και από τις δημοσιεύσεις των Lesser, Nemes, Lizotte (Utilization of FEA in the design of composite bicycle frames,1994) και των Peterson, Londry (Finite Element Structural Analysis: A New Tool for Bicycle Frame Design,1986).

Scenario Static start-up

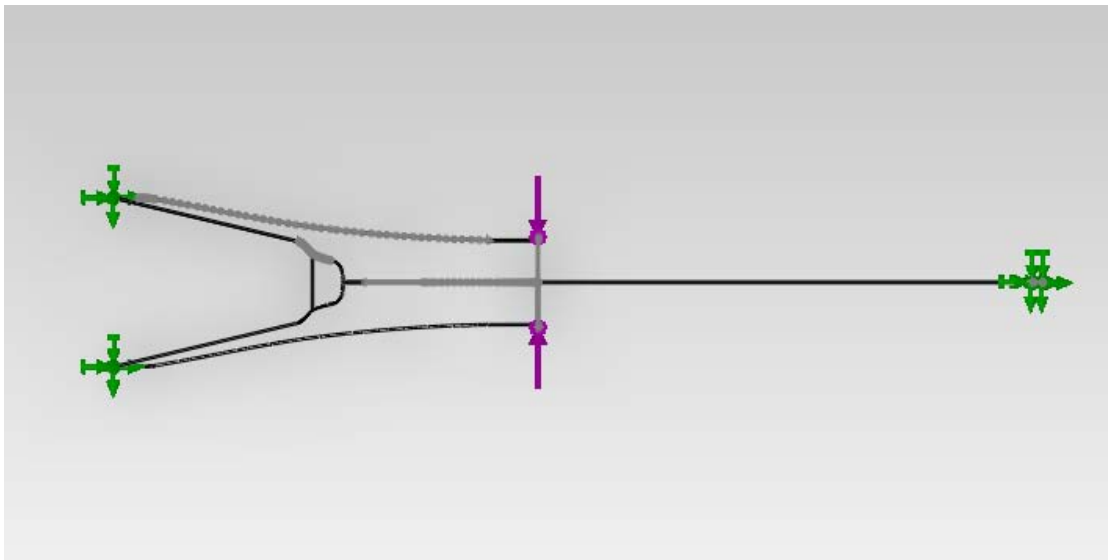
Το 1ο σενάριο φόρτισης ονομάζεται Static start-up, και σε γενικές γραμμές αφορά την εξέταση της καταπόνησης και της αντοχής της μεσαίας τριβής του σκελετού απομονωμένα (δηλαδή χωρίς την ύπαρξη επιπλέον μηχανικών καταπονήσεων). Το σενάριο αυτό περιλαμβάνεται στις περισσότερες ερευνητικές εργασίες στατικής ανάλυσης ποδηλάτων, και είναι σαφώς το πιο αναγκαίο, καθώς όπως πολλάκις ήδη αναφέρθηκε, η μεσαία τριβή αναλαμβάνει την απορρόφηση των περισσότερων καταπονήσεων του σκελετού. Η φυσική εκδοχή του πειραματικού σεναρίου, αναφέρεται στην κατάσταση όπου ένας ποδηλάτης υπερβολικού βάρους (το σενάριο εξετάζει ακραίες περιπτώσεις), δεν κάθεται στην σέλα ενώ παράλληλα ασκεί μέγιστες δυνάμεις πεντάλινγκ στα πεντάλ(οι οποίες μεταδίδονται έστω αυτούσια στην μεσαία τριβή- δηλαδή το πείραμα κάνει ακόμα πιο δύσκολες τις συνθήκες φόρτισης) για να εκκινήσει το ποδήλατο το οποίο βρίσκεται σε στάση. Η δύναμη που ασκείται στην μεσαία τριβή είναι καταρχήν σημειακή μεγέθους 1200N, και ασκείται στα άκρα της μεσαίας τριβής υπό γωνία όπως ξεκάθαρα υποδεικνύει το παρακάτω σχήμα. Προτιμήθηκε αντί της υπό γωνίας άσκησης της δύναμης η ισοδύναμη ανάλυση της δύναμης στις δύο αξονικές συνιστώσες, οι οποίες φαίνονται και στα παρακάτω σχήματα που προέκυψαν από το Solidworks. Οι δυνάμεις αυτές ασκούνται κατά τον Z και Y άξονα και έχουν μεγέθη $F_z=1090$ N και $F_y=143,6$ N. Το σενάριο ολοκληρώνεται με την πάκτωση των συνδέσεων των σωλήνων stays και της επιπλέον πάκτωσης του σωλήνα headtube στο άνω και κάτω άκρο του. Θεωρείται ότι οι αεροδυναμικές και περιστροφικές δυνάμεις είναι αμελητέες. Το σενάριο αυτό ομοιάζει αρκετά με το σενάριο hill-climbing, δηλαδή της ανάβασης σε ανηφόρα από τον ποδηλάτη. Το σενάριο θεωρείται "αυστηρό" με την έννοια ότι οι δυνάμεις που ασκούνται θα μπορούσαν να είναι ίσες με τις προκαλούμενες από έναν αναβάτη 80 κιλών, οι οποίες θα ήταν κατά πολύ μικρότερες, ωστόσο το σενάριο εξετάζει τις ακραίες περιπτώσεις φόρτισης.



Υπό γωνία 7,5 μοιρών άσκηση σημειακών δυνάμεων.



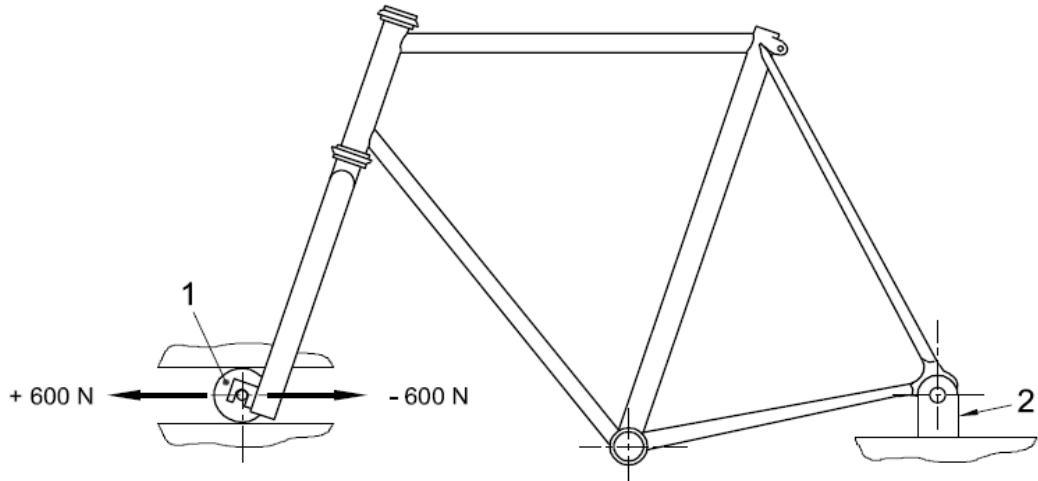
Ισομετρική άποψη σεναρίου static start-up.



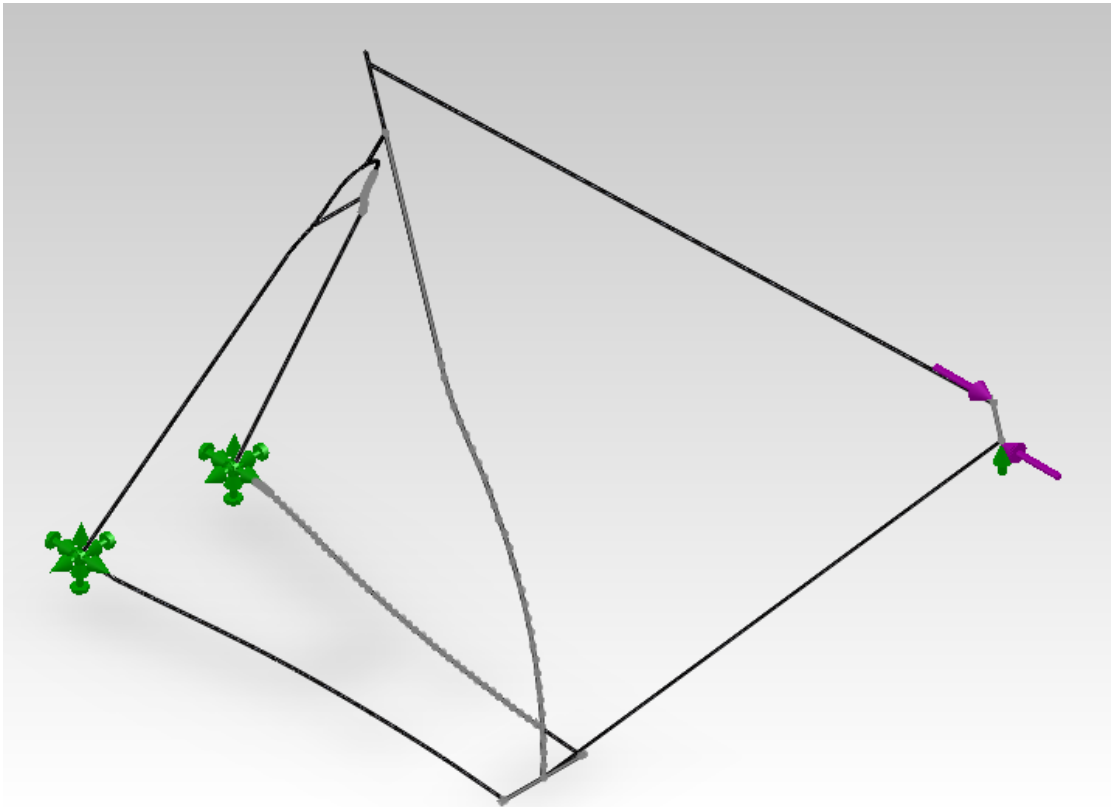
Κάτοψη σεναρίου static start-up.

Scenario Horizontal Impact

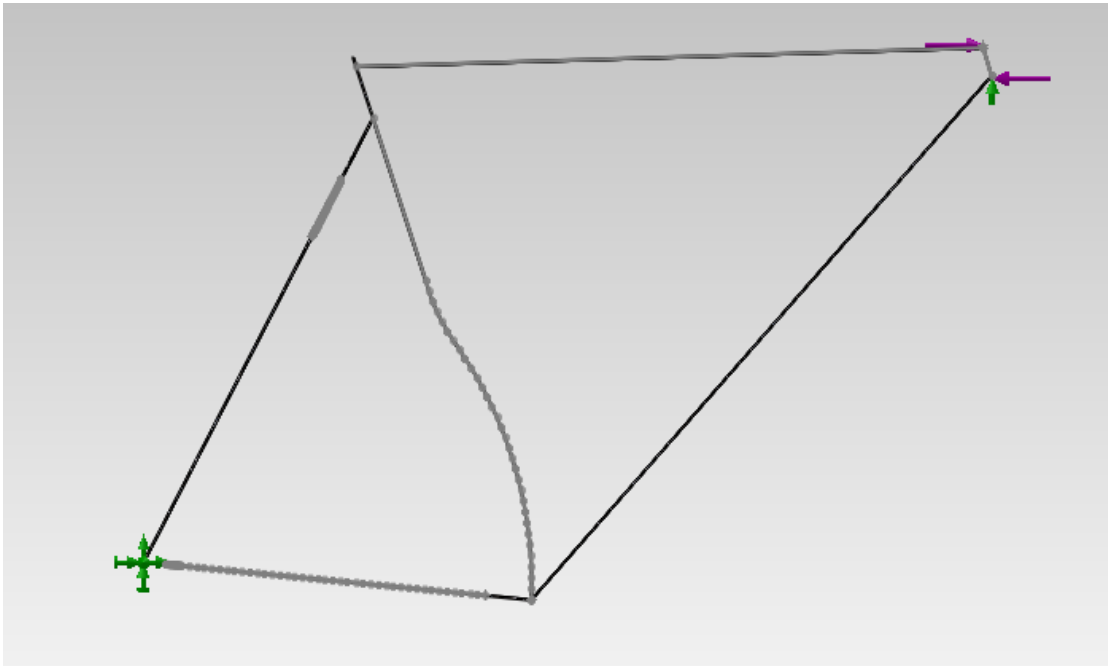
Το 2ο σενάριο επονομάζεται Scenario Horizontal Impact, και έχει ως σκοπό την εξέταση των οριζόντιων επιδράσεων στον σκελετό του ποδηλάτου. Το σενάριο αυτό καταπονεί ιδιαίτερα τους εμπρόσθιους σωλήνες, δηλαδή το κούτελο, τον άνω και τον κάτω σωλήνα. Ενδιαφέρον σε κάθε σχεδίαση, είναι η απόκριση του κάτω σωλήνα σε αυτήν την μηχανική καταπόνηση, καθότι ο κάτω σωλήνας απορροφάει ένα μεγάλο ποσοστό των καταπονήσεων του σκελετού. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 14781, ο ορισμός αυτής της φόρτισης προϋποθέτει την πάκτωση των συνδέσεων των stays (οπίσθιοι σωλήνες) και την εφαρμογή στο εμπρόσθιο πιρούνι ενός guided roller που θα επιτρέπει την κύλιση του πιρουνιού. Σύμφωνα με το πρότυπο οι δυνάμεις θα πρέπει να ασκούνται οριζόντια, με αντίθετη κατεύθυνση και μέγεθος για την καθεμία 600N, και επιπλέον θα πρέπει να ασκούνται επαναληπτικά με μέγιστη συχνότητα τα 25Hz. Ωστόσο η φόρτιση του προτύπου, είναι κυρίως δυναμική ενώ εδώ εξετάζεται η στατική του φόρτιση. Για αυτό και έχει σχεδιαστεί μία παραλλαγή της φόρτισης στον παρόντα σχεδιασμό, η οποία προσομοιάζει ικανοποιητικά την προτεινόμενη από το πρότυπο φόρτιση. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα από το Solidworks, έχουν πακτωθεί οι συνδέσεις των stays και έχει προστεθεί κύλιση στο εμπρόσθιο άκρο του εμπρόσθιου πιρουνιού. Οι δύο δυνάμεις είναι σημειακές με μέγεθος 600 N, και ασκούνται στο πάνω και κάτω άκρο του headtube. Η κύλιση θεωρείται τόσο αναγκαία(για να έχουμε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα) όσο και ρεαλιστική αφού σε μία παρόμοια πραγματική κατάσταση ο σκελετός θα στηρίζεται στην εμπρόσθια ρόδα η οποία θα μπορεί να κυλάει στο οδόστρωμα. Άλλες ερευνητικές εργασίες προτείνουν κάποιες παραλλαγές του σεναρίου, με την μόνη διαφορά της χρήσης μονοκατευθυντικής δύναμης μεγέθους 960N, ή σε άλλες περιπτώσεις η κάθετη επίδραση της δύναμης στο headtube. Εδώ προτιμήθηκε το σενάριο του προτύπου. Ως σενάριο προσομοιάζει την φυσική κατάσταση εμπρόσθιας πρόσκρουσης σε τοίχο ή άλλο εμπόδιο με χαμηλή ταχύτητα. Το σενάριο αυτό είναι εξίσου κρίσιμο για τον χαρακτηρισμό του σκελετού όπως και το 1ο σενάριο.



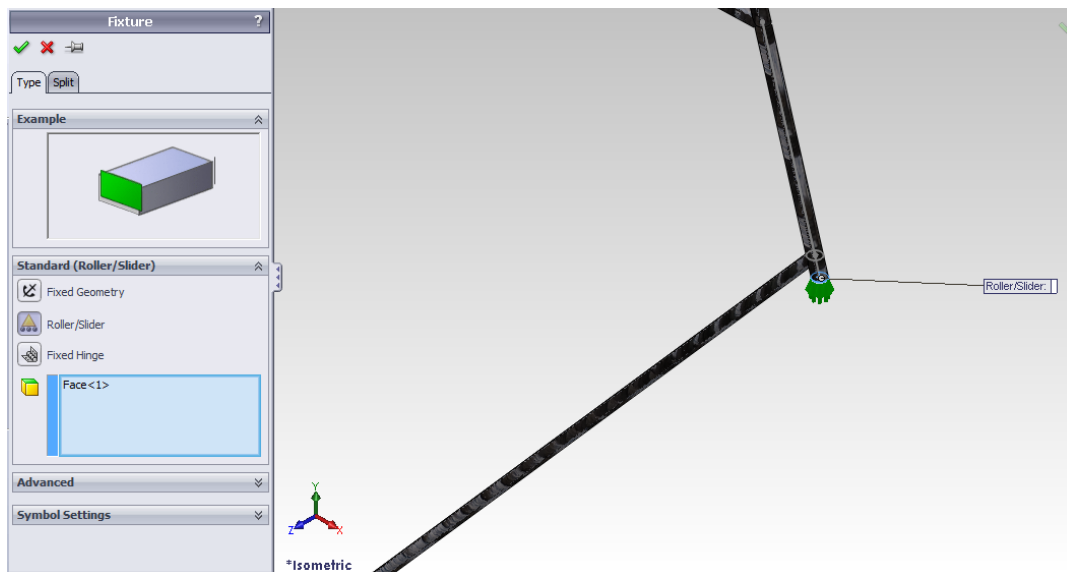
Σενάριο fatigue test EN 14781.



Ισομετρική άποψη του σεναρίου Horizontal Impact.



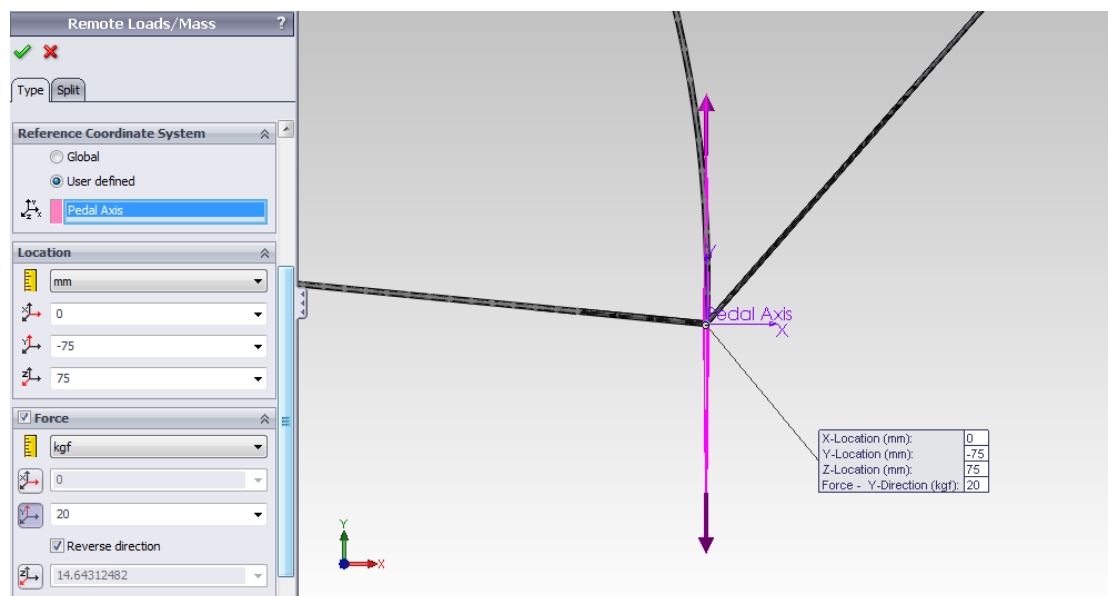
Πλάγια όψη του σεναρίου Horizontal Impact.



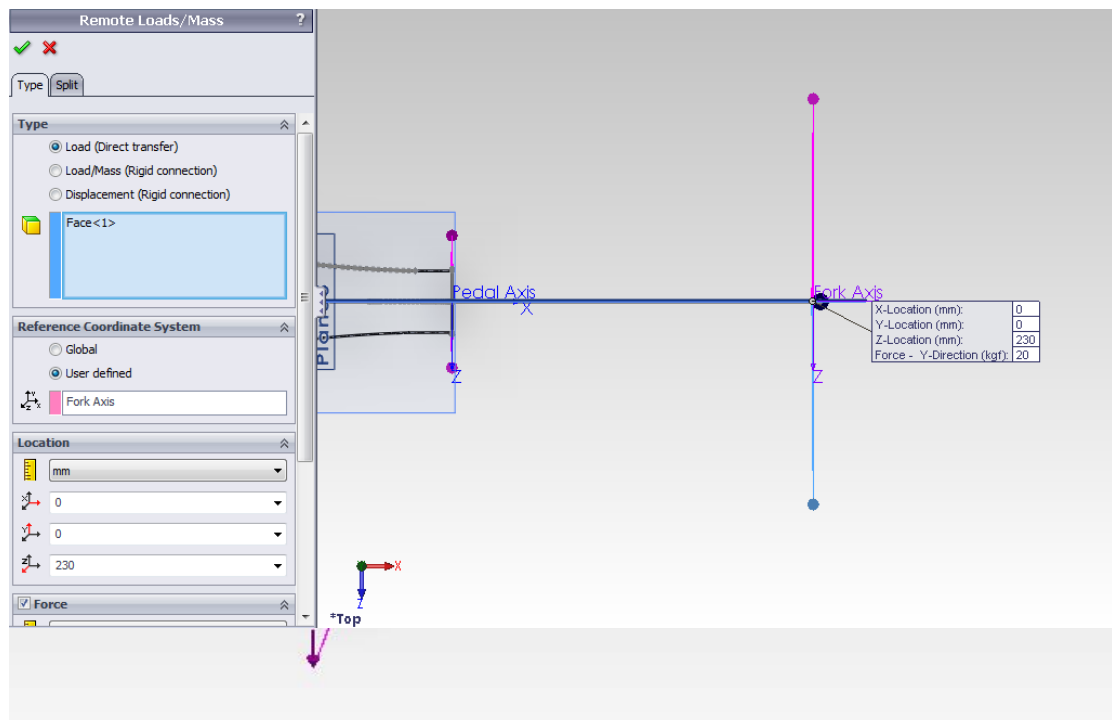
Όπως δείχνει και η εικόνα η κύλιση εφαρμόζεται στο κάτω άκρο του κούτελου και επιτρέπει την κύλιση του σωλήνα γύρω από μία περιοχή.

Scenario Riding

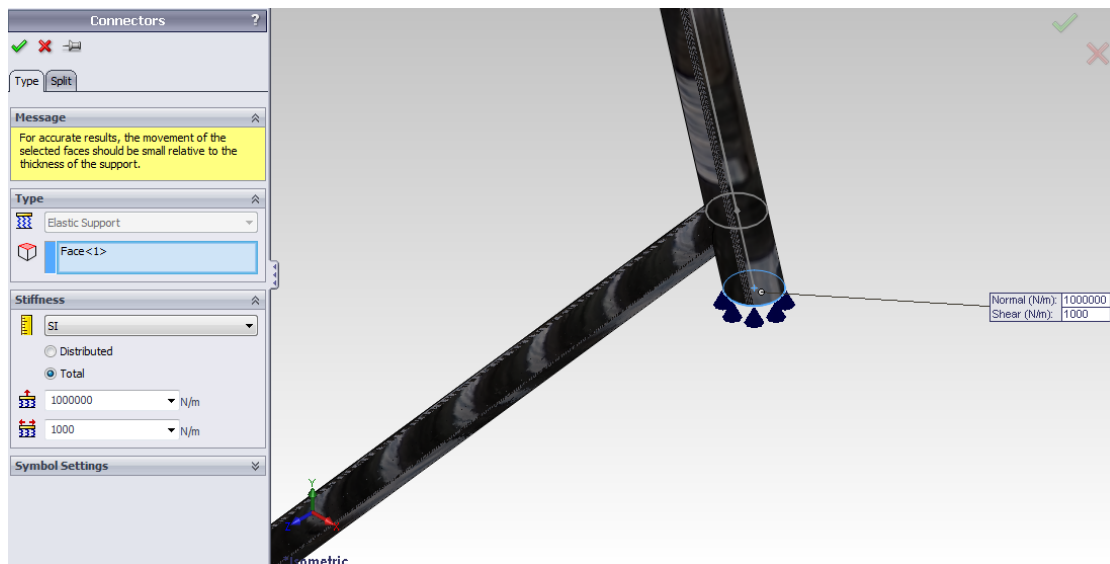
Το 3ο σενάριο το οποίο όπως και τα δύο προηγούμενα εφαρμόζεται και στα δέκα σχεδιαστικά μοντέλα της εργασίας, προσομοιάζει την κατάσταση σύνθετης φόρτισης, η οποία είναι και πιο αληθοφανής και ρεαλιστική σε σχέση με την πραγματική φόρτιση. Στην βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες παραλλαγές σύνθετης φόρτισης ή φόρτισης οδήγησης, και είναι δύσκολο να προτυποποιηθεί καθότι ο σχεδιαστής θα πρέπει να επιλέξει ποιές από τις φορτίσεις που στην πραγματικότητα γίνονται θα πρέπει να απαλείψει ως αμελητέες. Η εργασία επέλεξε το σενάριο Riding το οποίο προτείνει το λογισμικό Solidworks στο εκπαιδευτικό του υλικό. Σε αυτό το σενάριο θεωρούνται αμελητέες οι περιστροφικές, οι αεροδυναμικές καταπονήσεις και οι καταπονήσεις τριβής. Ο αναβάτης βρίσκεται σε θέση οδήγησης, και ασκεί δυνάμεις στα πεντάλ για να επιταχύνει τον σκελετό. το βαρυντικό και δυναμικό του φορτίο επιμερίζεται στην σέλα, στα πεντάλ και στο τιμόνι όπως δείχνουν και τα σχήματα. Επιλέχθηκε η εφαρμογή απομακρυσμένων δυνάμεων, όπως στα σχήματα, ενώ πρέπει να σημειωθεί, ότι και εδώ οι συνδέσεις των stays έχουν πακτωθεί ενώ παράλληλα το headtube διαθέτει στο κάτω άκρο του έναν roller βρίσκεται δηλαδή σε κύλιση. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι ορισμοί των συνθηκών φόρτισης για αυτό το σενάριο.



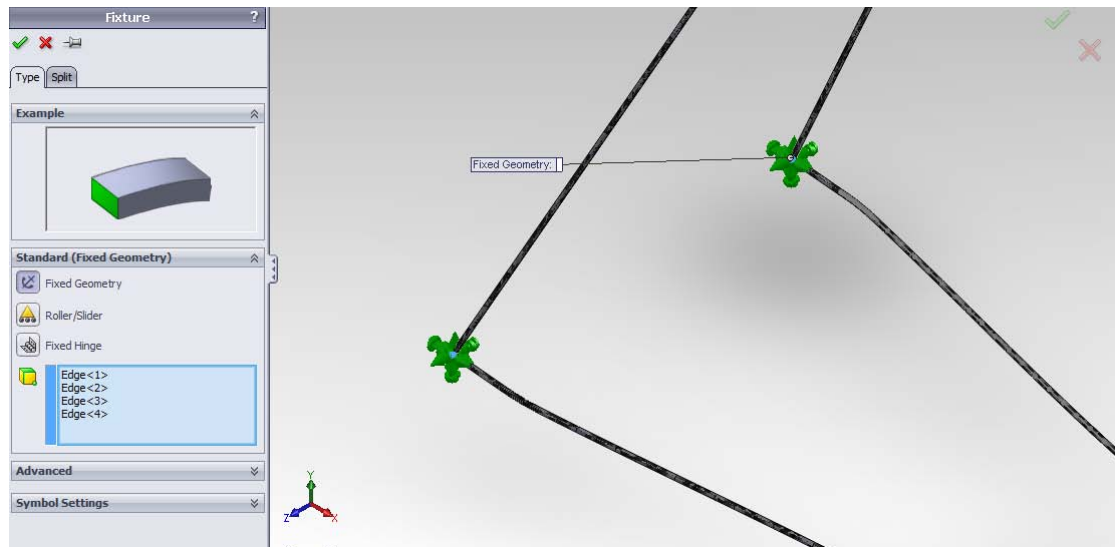
Όπως φαίνεται και από το σχήμα οι δυνάμεις στην μεσαία τριβή ασκούνται από την θέση (Y:-75, Z: 75) και καταλήγουν στα δύο άκρα της μεσαίας τριβής. Το μέγεθος των δύο δυνάμεων είναι 20kgf με κατεύθυνση όπως αυτή του σχήματος. Η άλλη δύναμη έχει το ίδιο μέγεθος αλλά ασκείται από την θέση (Y:75,Z:75). Για τον ορισμό των δυνάμεων έγινε ο καθορισμός του άξονα Pedal Axis, ο οποίος τοποθετείται στο κέντρο της μεσαίας τριβής στο σημείο που ενώνονται οι σωλήνες downtube και seattube.



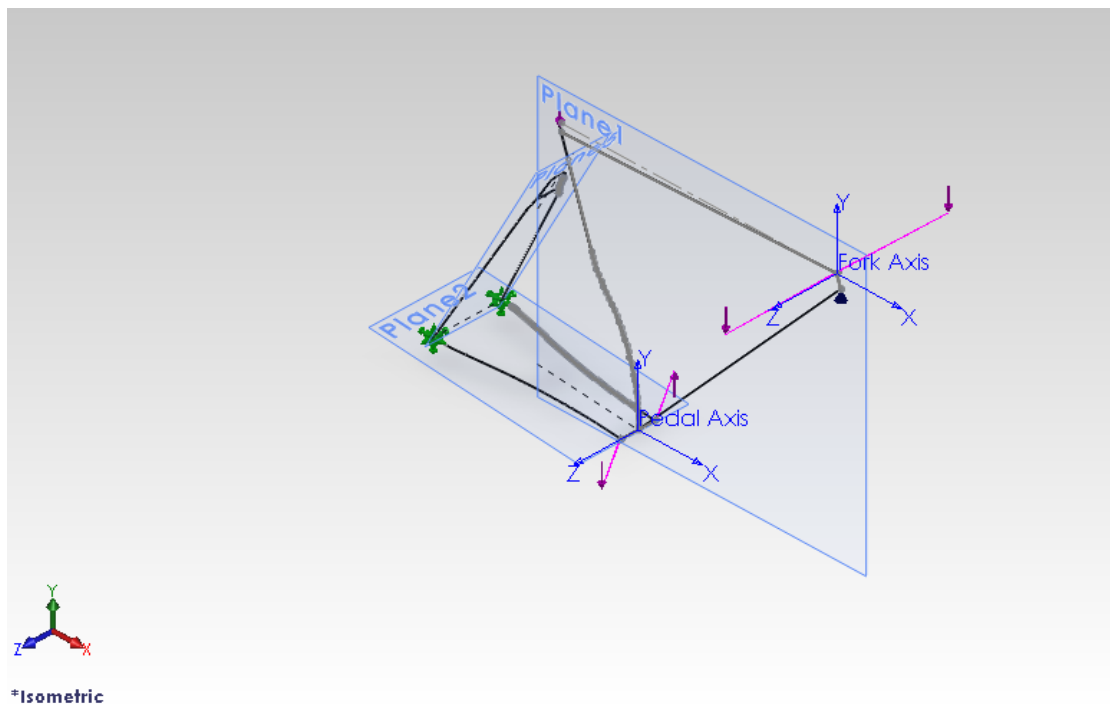
Οι δυνάμεις στο τιμόνι όπως φαίνεται και από το σχήμα ασκούνται από απόσταση 230χιλ. κατά τον Z άξονα και έχουν μέτρο 20 kgf. Η κατεύθυνση τους είναι κάθετη στο σχήμα προς τον Y άξονα. Η άλλη δύναμη εφαρμόζεται από την θέση Z:-230. Η εφαρμογή τους γίνεται στο άνω άκρο του σωλήνα headtube ενώ για τον ορισμό τους σχεδιάστηκε το σύστημα συντεταγμένων Fork Axis όπως δείχνει το σχήμα.



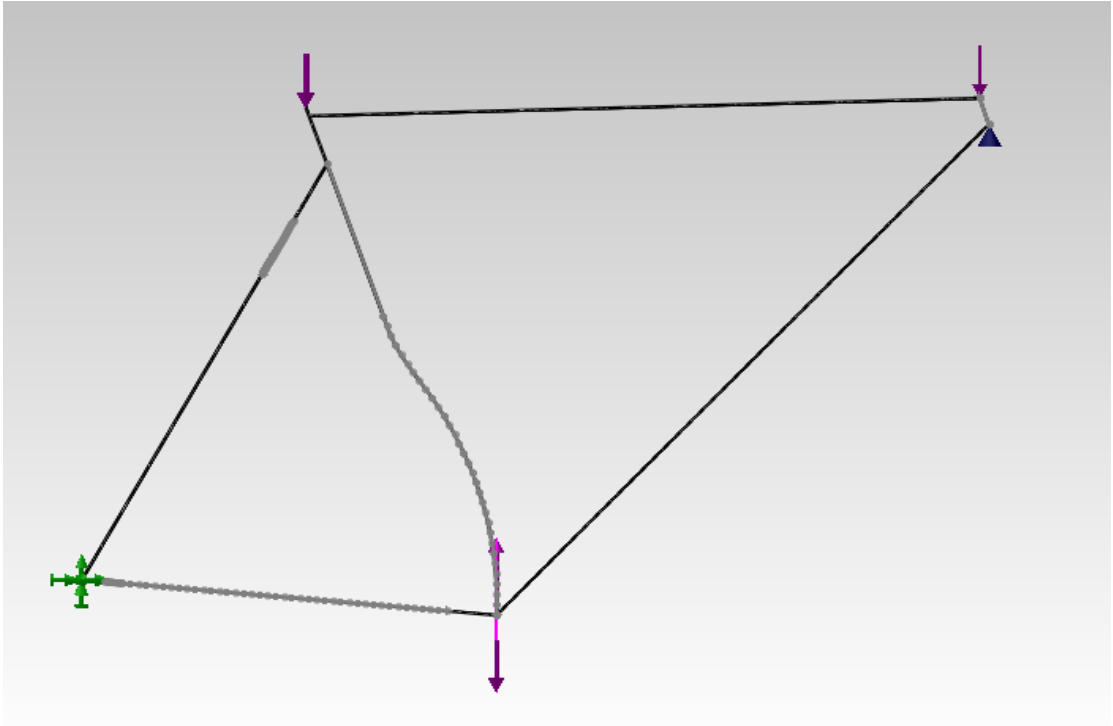
Σε αυτό το σχήμα απεικονίζεται η επιλογή της ελαστικής σύνδεσης η οποία γίνεται με τις εξής παραμέτρους Normal Stress: 10^6 N/m και Shear Stress: 10^3 N/m. Όπως φαίνεται από το σχήμα η σύνδεση εφαρμόζεται στο κάτω άκρο του κούτελου.



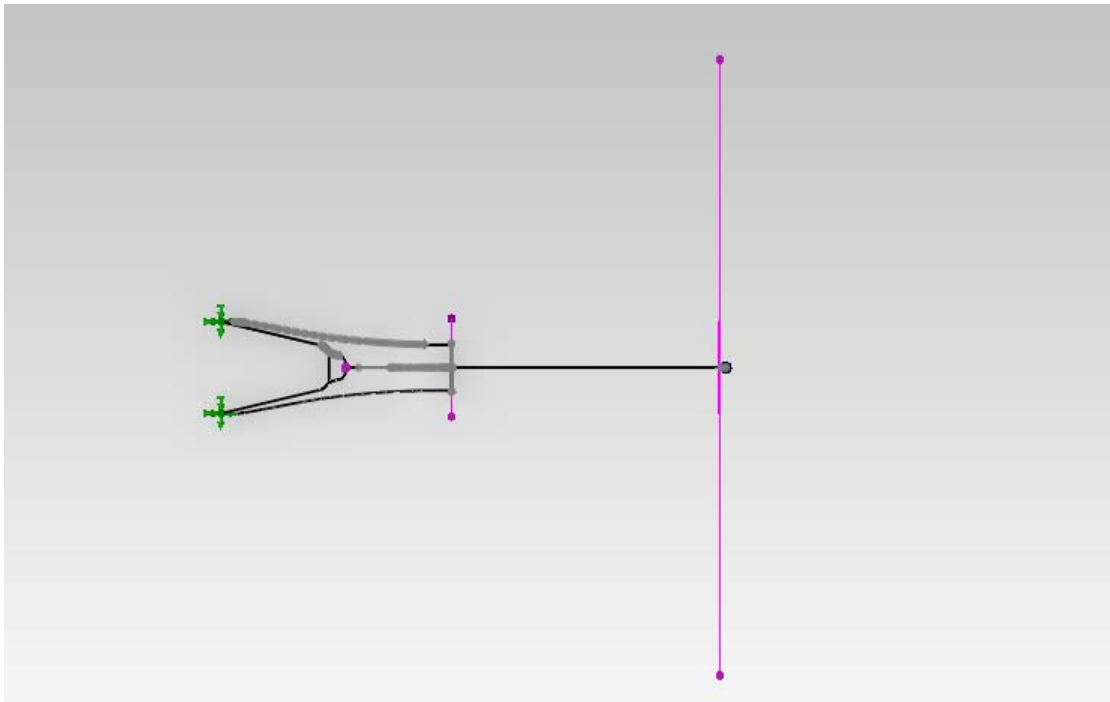
Τέλος σε αυτό το σχήμα απεικονίζεται η μέθοδος πάκτωσης των οπίσθιων συνδέσμων των οπίσθιων σωλήνων. Η επιλογή της σταθερής γεωμετρίας εξασφαλίζει την μη μετατόπιση των σημείων αυτών που επιβεβαιώνουν και τα αποτελέσματα. Αυτός ο τρόπος πάκτωσης ακολουθείται και στα υπόλοιπα σενάρια για όλα τα γεωμετρικά μοντέλα σκελετών.



Ισομετρική άποψη του σεναρίου Riding.



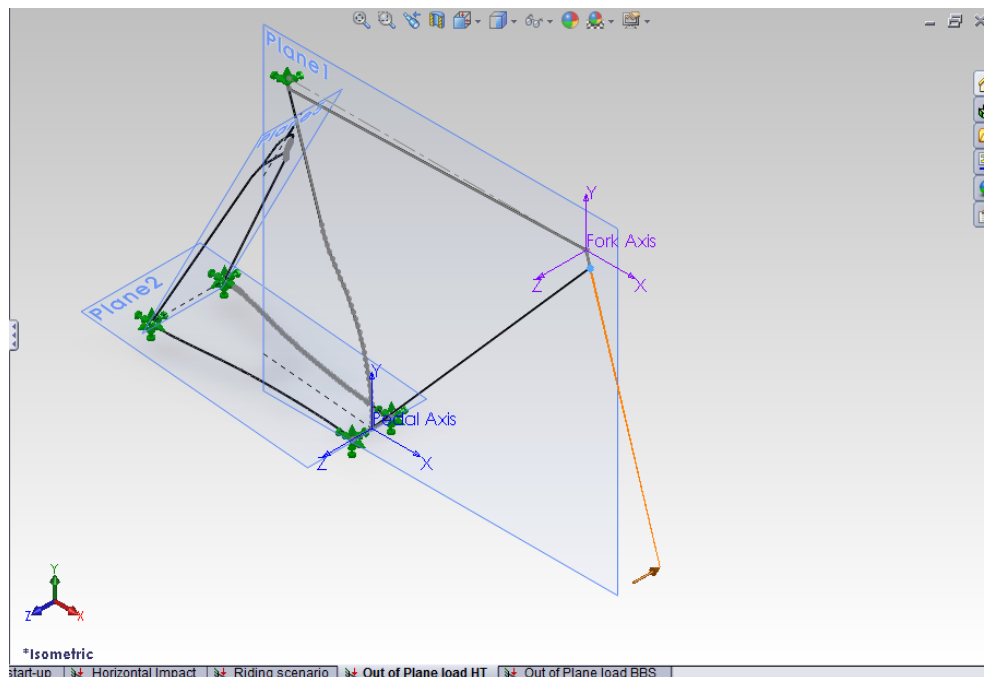
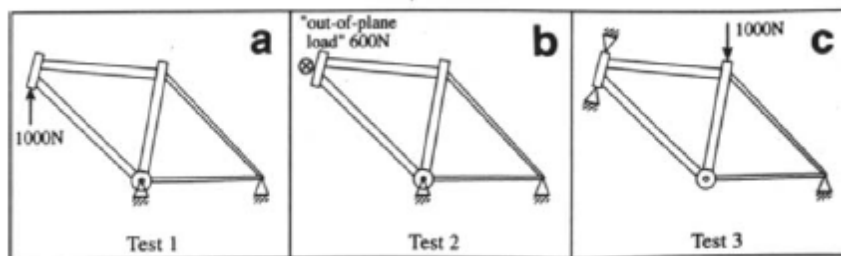
Πλάγια όψη του σεναρίου Riding.



Κάτοψη του σεναρίου Riding.

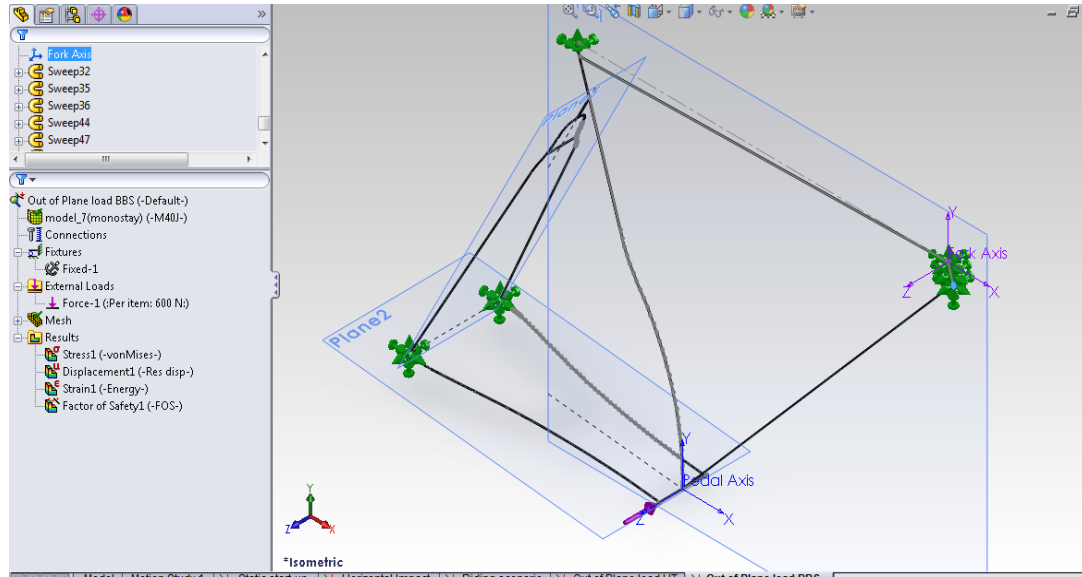
Σενάριο Στρέψης

Το σενάριο αυτό προσπαθεί να εξετάσει τις επιπτώσεις των στρεπτικών φορτίσεων στον σκελετό. Η φόρτιση αυτή έχει προταθεί μέσω μίας ερευνητικής εργασίας των Lessard, Nemes, Lizotte (Utilization of FEA in the design of composite bicycle frames, 1994), οι οποίοι είχαν προτείνει τα σενάρια φόρτισης του παρακάτω σχήματος. Η εργασία θα ασχοληθεί με το σενάριο b, το οποίο θα δοκιμαστεί μόνο σε επιλεγμένα μοντέλα της εργασίας και όχι σε όλα όπως τα προηγούμενα τρία σενάρια και με παρόμοιο σενάριο στρέψης της μεσαίας τριβής. Στο σενάριο στρέψης του εμπρόσθιου σωλήνα, η μεσαία τριβή, το άνω άκρο του σωλήνα σέλας και οι οπίσθιες συνδέσεις θεωρούνται πακτωμένες, ενώ ασκείται ένα στρεπτικό φορτίο στο κούτελο όπως απεικονίζει το σχέδιο.



Όπως μπορεί να παρατηρηθεί η στρεπτική δύναμη έχει μέγεθος 600N, και ασκείται απομακρυσμένα στην θέση $X=141.5$, $Y=-455$ δηλαδή στο σημείο απόληξης του εμπρόσθιου πιρουνιού το οποίο δεν περιλαμβάνεται στο μοντέλο. Η

κατεύθυνση της δύναμης είναι κατά τον άξονα Z. Το σενάριο εξετάζει την αντοχή του σκελετού σε στρεπτικές φορτίσεις.



Στο σενάριο στρέψης του της μεσαίας τριβής, ο εμπρόσθιος σωλήνας, το άνω άκρο του σωλήνα σέλας και οι οπίσθιες συνδέσεις θεωρούνται πακτωμένες, ενώ ασκείται ένα στρεπτικό φορτίο στην μεσαία τριβή μεγέθους 600N και κατεύθυνσης στον άξονα Z όπως απεικονίζει το σχέδιο.

6.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΣΚΕΛΕΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ.

Η διαδικασία προσομοίωσης και αποτελεσμάτων παρουσιάστηκε εν'ολίγοις στις προηγούμενες ενότητες. Να υπενθυμίσω για τις ανάγκες της παρούσας ενότητας ότι θα δοκιμαστούν τα 10 μοντέλα τα οποία παρουσιάστηκαν, με διάμετρο σωλήνων 18 χιλιοστών και με την χρήση ως υλικού του ανθρακονήματος Carbon Fiber M40J, του οποίου τα μηχανικά χαρακτηριστικά είναι αλλαγμένα (σε σχέση με αυτά που παρουσιάζει το Solidworks) μόνο κατά την σταθερά ελαστικότητα η οποία για τα πειράματα θα έχει τιμή $E = 3,77 \cdot 10^{12} \text{ N/m}$. Επιπλέον στο σενάριο Riding, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο υλικό αλλά με διαφοροποιημένη σταθερά ελαστικότητας της τάξης των $3,77 \cdot 10^{13} \text{ N/m}$.

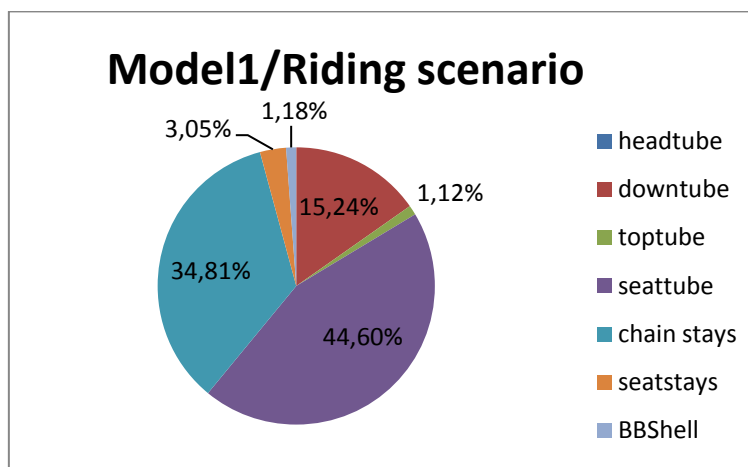
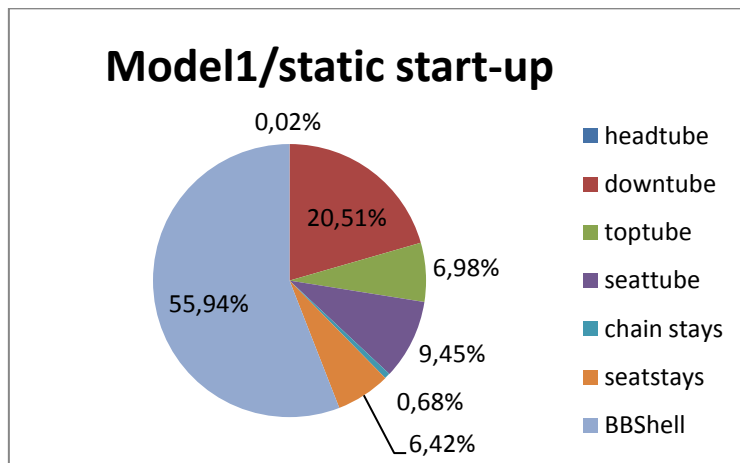
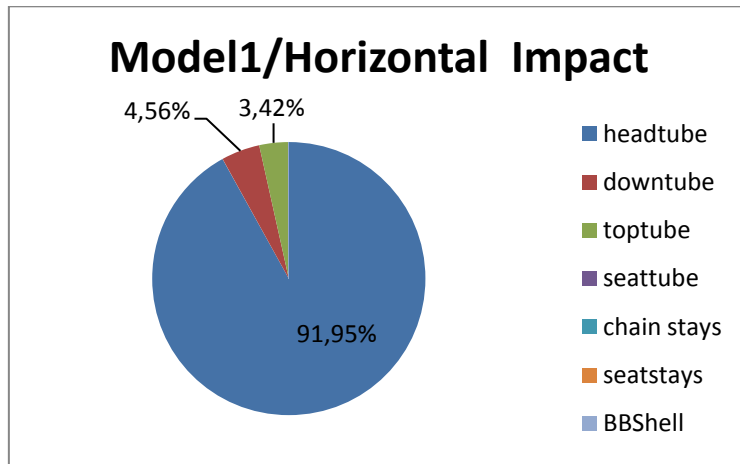
Αναλυτικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες, οι οποίοι μετράνε την μέγιστη παραμόρφωση, τάση, ισοδύναμη ένταση (equivalent strain) καθώς και την μέγιστη παραμόρφωση στο κούτελο την μεσαία τριβή και τις συνδέσεις των stays. Σε δεύτερο πίνακα για κάθε φόρτιση και μοντέλο παρουσιάζεται η ενέργεια strain για κάθε μηχανικό μέρος του μοντέλου η οποία και αντιστοιχεί στην απορροφούμενη από το μοντέλο ενέργεια που δέχεται από τις εξωτερικές φορτίσεις και επιδράσεις. Απεικονίζονται και διάφορα διαγράμματα-"πίτας" τα οποία είναι χρήσιμα για την εξέταση της κατανομής της ενέργειας strain στο μοντέλο. Η προκύπτουσα κατανομή και το μέγεθος ομοιομορφίας της είναι ένας επιπλέον παράγοντας που θα καθορίσει την επιλογή του σχεδιαστικού μοντέλου.

Model 1

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ MAX (VALUES) | | | |
|-------------------|---------------------------|-------------------|------------|----------|
| | stress (psi) | displacement (mm) | strain EQV | FOS |
| Horizontal Impact | 927534 | 2,58E-02 | 8,22E-05 | 2,95E+06 |
| Static start-up | 4,13E+05 | 1,61E-02 | 5,79E-05 | 2,60E+03 |
| Riding scenario | 4,27E+06 | 1,43E+01 | 5,08E-04 | 1,31E+03 |

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | Max Displacements (mm) | | |
|-------------------|------------------------|----------|-------------------|
| | BBSHELL | Headtube | Stays connections |
| Horizontal Impact | 4,10E-05 | 3,43E-03 | 1,00E-08 |
| Static start-up | 1,60E-02 | 1,98E-05 | 1,34E-05 |
| Riding scenario | 5,90E-01 | 9,82E+00 | 9,50E-05 |

| | Horizontal Impact | Static start-up | Riding scenario |
|------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| headtube | 2,18E-04 | 3,92E-06 | 8,30E-06 |
| downtube | 1,08E-05 | 4,73E-03 | 0,19 |
| toptube | 8,10E-06 | 1,61E-03 | 1,40E-02 |
| seattube | 7,70E-08 | 2,18E-03 | 5,56E-01 |
| chainstays | 8,20E-09 | 1,57E-04 | 4,34E-01 |
| seatstays | 9,13E-08 | 1,48E-03 | 3,80E-02 |
| BBSHELL | 6,76E-11 | 1,29E-02 | 1,47E-02 |
| Total | 2,37E-04 | 2,31E-02 | 1,25E+00 |

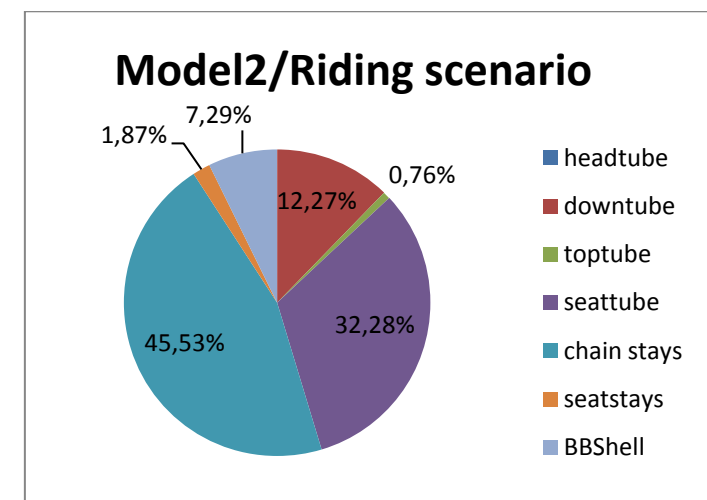
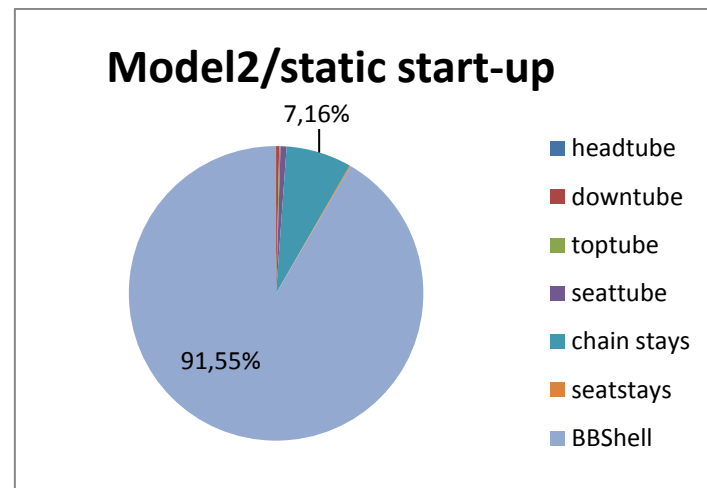
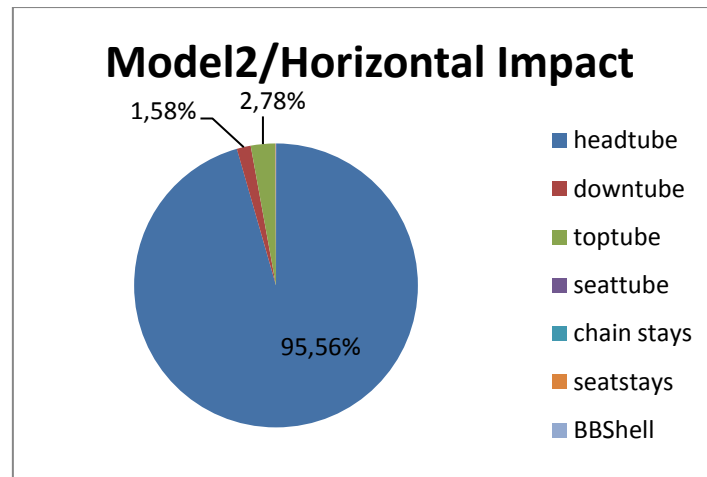


Model 2

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ MAX (VALUES) | | | |
|-------------------|---------------------------|-------------------|------------|----------|
| | stress (psi) | displacement (mm) | strain EQV | FOS |
| Horizontal Impact | 1,13E+06 | 2,63E-01 | 8,38E-04 | 1,93E+06 |
| Static start-up | 1,50E+07 | 2,47E+01 | 1,98E-02 | 2,35E+03 |
| Riding scenario | 4,73E+06 | 1,11E+01 | 5,47E-04 | 6,43E+02 |

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | Max Displacements (mm) | | |
|-------------------|------------------------|----------|-------------------|
| | BBSHELL | Headtube | Stays connections |
| Horizontal Impact | 8,00E-04 | 9,00E-03 | 4,00E-07 |
| Static start-up | 2,47E+01 | 2,15E-04 | 6,00E-04 |
| Riding scenario | 6,33E+00 | 8,39E+00 | 1,48E-04 |

| Strain energy (N*m) | ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | | |
|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | Horizontal Impact | Static start-up | Riding scenario |
| headtube | 2,30E-03 | 3,47E-05 | 9,40E-06 |
| downtube | 3,80E-05 | 5,97E-02 | 1,38E-01 |
| toptube | 6,70E-05 | 2,57E-02 | 8,55E-03 |
| seattube | 8,80E-07 | 1,17E-01 | 3,63E-01 |
| chainstays | 5,70E-08 | 1,27E+00 | 5,12E-01 |
| seatstays | 9,30E-07 | 2,50E-02 | 2,10E-02 |
| BBSHELL | 4,40E-08 | 1,62E+01 | 8,20E-02 |
| Total | 2,41E-03 | 1,77E+01 | 1,12E+00 |

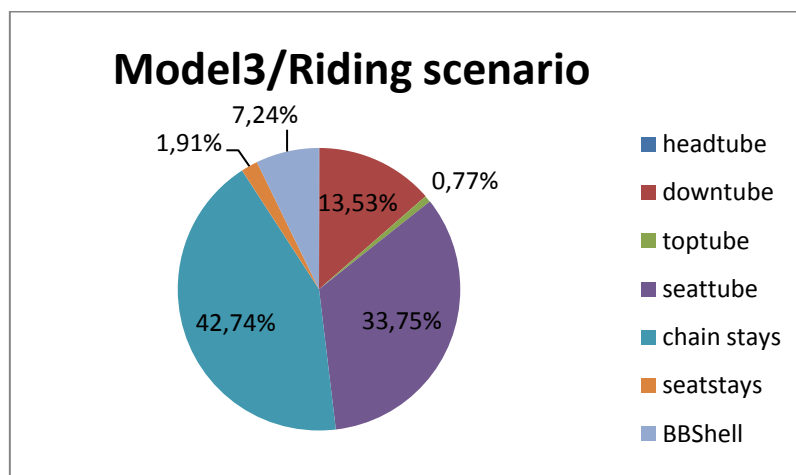
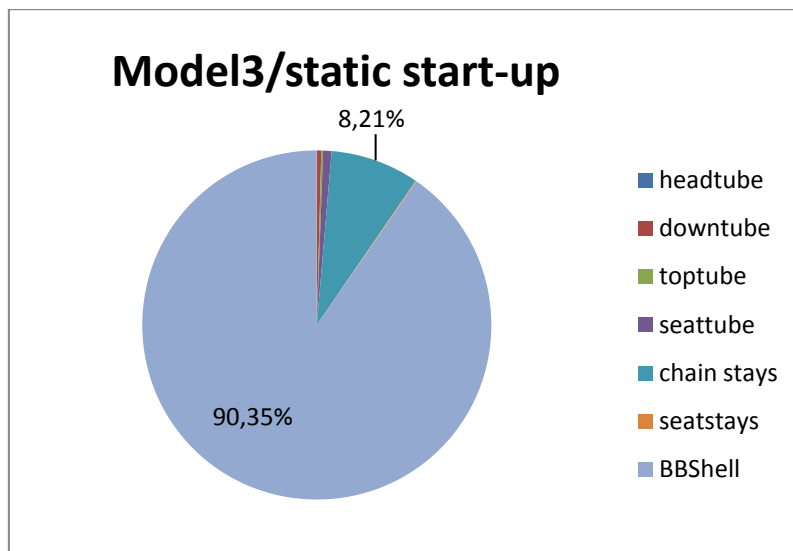
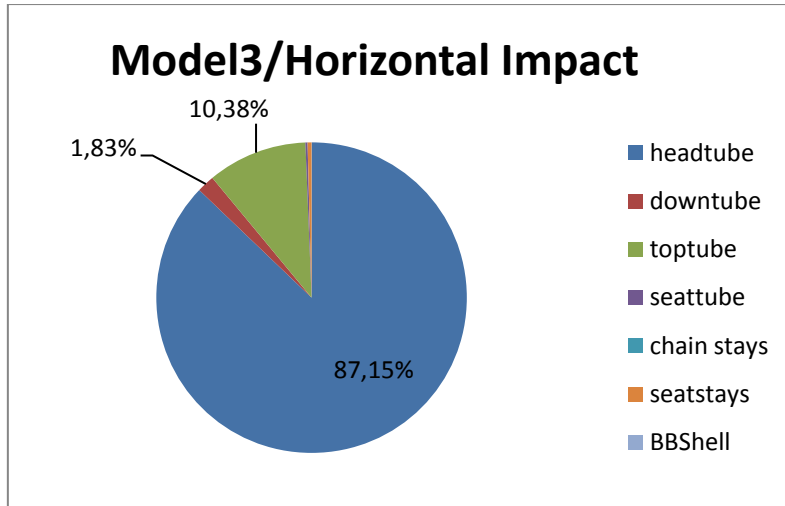


Model 3

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | | | MAX (VALUES) |
|-------------------|--------------|-------------------|------------|--------------|
| | stress (psi) | displacement (mm) | strain EQV | FOS |
| Horizontal Impact | 4,29E+06 | 5,96E+00 | 4,34E-03 | 5,63E+02 |
| Static start-up | 1,47E+07 | 2,47E+01 | 1,80E-02 | |
| Riding scenario | 5,10E+06 | 1,17E+01 | 5,93E-04 | |

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | Max Displacements (mm) | | |
|-------------------|------------------------|----------|-------------------|
| | BBSHELL | Headtube | Stays connections |
| Horizontal Impact | 3,11E-01 | 6,00E-01 | 1,02E-05 |
| Static start-up | 2,47E+01 | 3,70E-03 | 5,70E-04 |
| Riding scenario | 7,73E+00 | 9,05E+00 | 1,60E-04 |

| Strain energy (N*m) | ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | | |
|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | Horizontal Impact | Static start-up | Riding scenario |
| headtube | 2,30E-03 | 3,47E-05 | 9,40E-06 |
| downtube | 3,80E-05 | 5,97E-02 | 1,38E-01 |
| toptube | 6,70E-05 | 2,57E-02 | 8,55E-03 |
| seattube | 8,80E-07 | 1,17E-01 | 3,63E-01 |
| chainstays | 5,70E-08 | 1,27E+00 | 5,12E-01 |
| seatstays | 9,30E-07 | 2,50E-02 | 2,10E-02 |
| BBSHELL | 4,40E-08 | 1,62E+01 | 8,20E-02 |
| Total | 2,41E-03 | 1,77E+01 | 1,12E+00 |

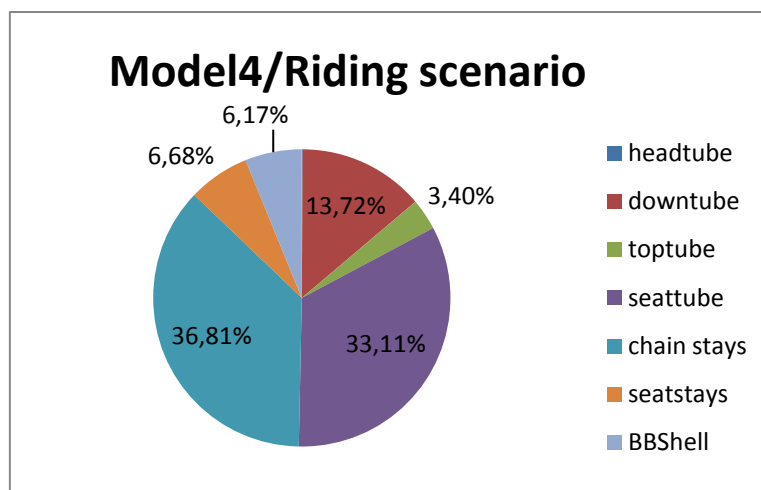
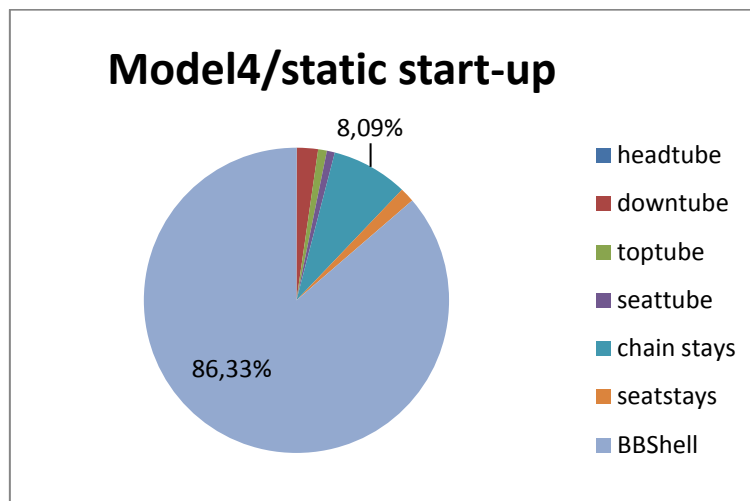
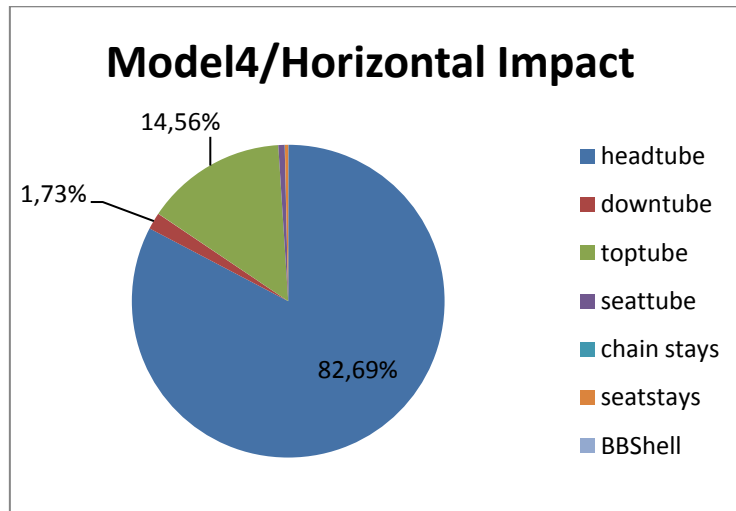


Model 4

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ MAX (VALUES) | | | |
|-------------------|---------------------------|-------------------|------------|----------|
| | stress (psi) | displacement (mm) | strain EQV | FOS |
| Horizontal Impact | 5,68E+06 | 1,25E+01 | 5,52E-03 | 1,44E+05 |
| Static start-up | 1,18E+07 | 1,46E+01 | 1,40E-02 | 5,32E+03 |
| Riding scenario | 3,75E+06 | 1,23E+01 | 4,50E-04 | 5,89E+02 |

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | Max Displacements (mm) | | |
|-------------------|------------------------|----------|-------------------|
| | BBSHELL | Headtube | Stays connections |
| Horizontal Impact | 1,60E-04 | 1,61E+00 | 1,28E+00 |
| Static start-up | 1,20E+01 | 1,60E-02 | 8,30E-04 |
| Riding scenario | 5,68E+00 | 9,18E+00 | 4,29E-04 |

| Strain energy (N*m) | ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | | |
|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | Horizontal Impact | Static start-up | Riding scenario |
| headtube | 4,77E-01 | 4,15E-03 | 1,36E-03 |
| downtube | 1,00E-02 | 2,16E-01 | 1,89E-01 |
| toptube | 8,40E-02 | 9,00E-02 | 4,68E-02 |
| seattube | 3,76E-03 | 8,10E-02 | 4,56E-01 |
| chainstays | 1,45E-04 | 7,83E-01 | 5,07E-01 |
| seatstays | 1,94E-03 | 1,50E-01 | 9,20E-02 |
| BBSHELL | 6,75E-06 | 8,36E+00 | 8,50E-02 |
| Total | 5,77E-01 | 9,68E+00 | 1,38E+00 |

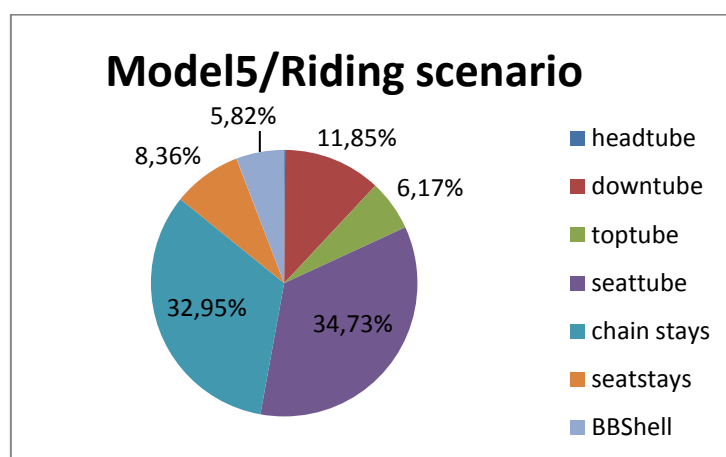
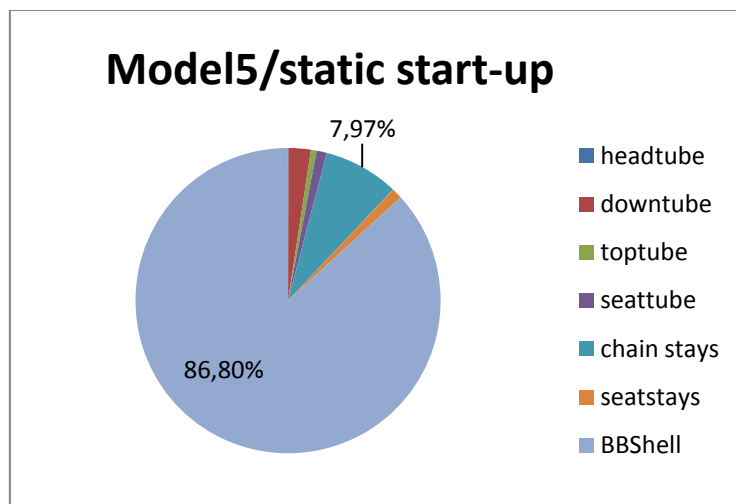
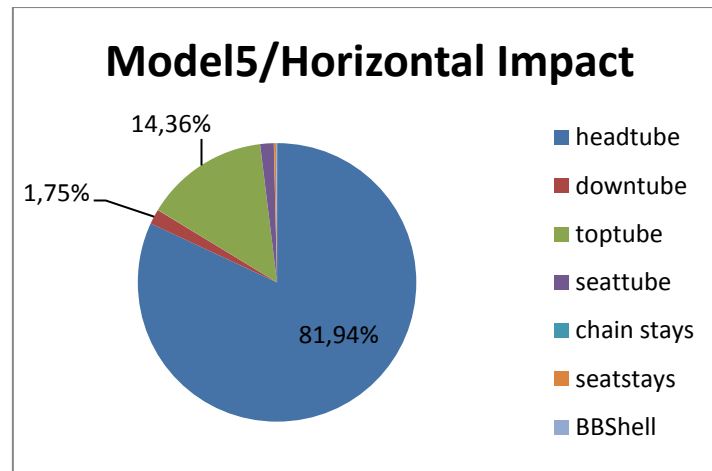


Model 5

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ MAX (VALUES) | | | |
|-------------------|---------------------------|-------------------|------------|----------|
| | stress (psi) | displacement (mm) | strain EQV | FOS |
| Horizontal Impact | 5,95E+06 | 1,25E+01 | 6,13E-03 | 2,31E+05 |
| Static start-up | 1,24E+07 | 1,31E+01 | 1,58E-02 | 4,61E+03 |
| Riding scenario | 6,25E+06 | 1,23E+01 | 6,17E-04 | 6,99E+02 |

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | Max Displacements (mm) | | |
|-------------------|------------------------|----------|-------------------|
| | BBSHELL | Headtube | Stays connections |
| Horizontal Impact | 1,38E+00 | 1,73E+00 | 1,60E-04 |
| Static start-up | 1,58E+01 | 1,69E-02 | 9,45E-04 |
| Riding scenario | 6,16E+00 | 9,06E+00 | 2,00E-04 |

| | Horizontal Impact | Static start-up | Riding scenario |
|------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| headtube | 4,68E-01 | 4,29E-03 | 1,70E-03 |
| downtube | 1,00E-02 | 2,13E-01 | 1,73E-01 |
| toptube | 8,20E-02 | 5,55E-02 | 9,00E-02 |
| seattube | 9,00E-03 | 9,80E-02 | 5,07E-01 |
| chainstays | 1,58E-04 | 7,22E-01 | 4,81E-01 |
| seatstays | 1,40E-03 | 1,03E-01 | 1,22E-01 |
| BBSHELL | 6,13E-04 | 7,86E+00 | 8,50E-02 |
| Total | 5,71E-01 | 9,06E+00 | 1,46E+00 |

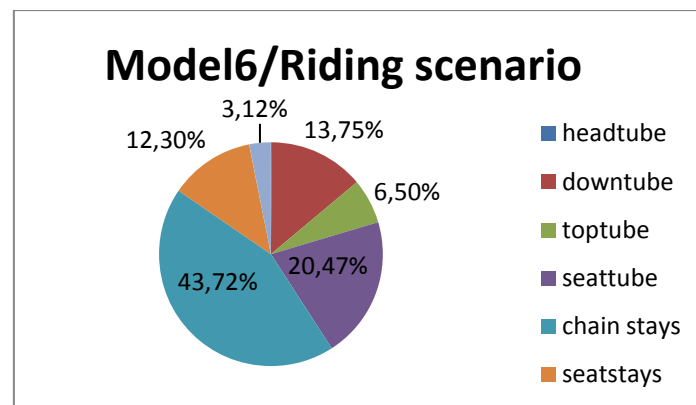
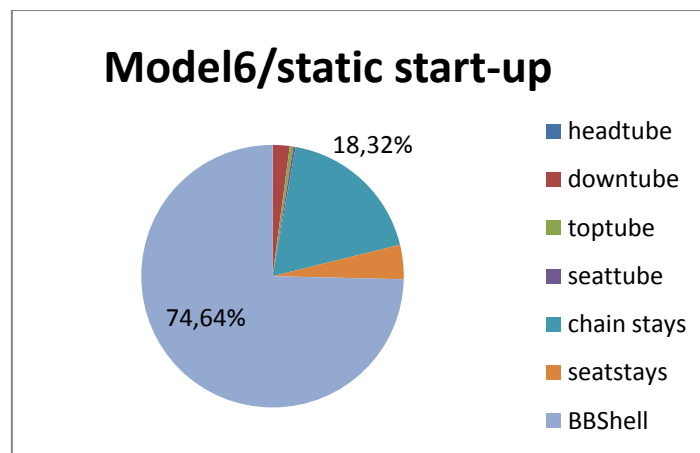
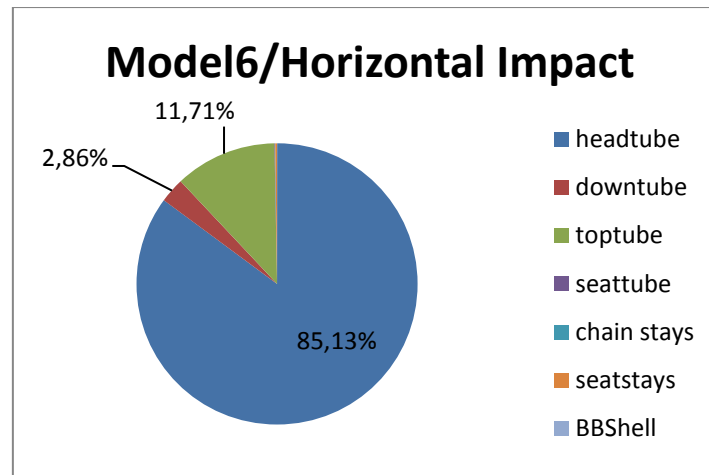


Model 6

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | | | MAX (VALUES) |
|-------------------|--------------|-------------------|------------|--------------|
| | stress (psi) | displacement (mm) | strain EQV | FOS |
| Horizontal Impact | 3,44E+06 | 1,28E+01 | 5,58E-03 | 5,51E+04 |
| Static start-up | 1,19E+07 | 1,45E+01 | 1,58E-02 | 2,66E+03 |
| Riding scenario | 2,99E+07 | 1,62E+01 | 2,88E-04 | 3,86E+02 |

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | Max Displacements (mm) | | |
|-------------------|------------------------|----------|-------------------|
| | BBSHELL | Headtube | Stays connections |
| Horizontal Impact | 1,44E+00 | 1,13E+00 | 2,60E-04 |
| Static start-up | 1,45E+01 | 1,70E-02 | 4,60E-04 |
| Riding scenario | 7,60E+00 | 1,13E+01 | 1,44E-04 |

| Strain energy (N*m) | ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | | |
|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | Horizontal Impact | Static start-up | Riding scenario |
| headtube | 4,47E-01 | 4,36E-03 | 2,95E-03 |
| downtube | 1,50E-02 | 2,20E-01 | 3,13E-01 |
| toptube | 6,15E-02 | 4,80E-02 | 1,48E-01 |
| seattube | 3,52E-04 | 2,90E-02 | 4,66E-01 |
| chainstays | 1,70E-04 | 1,96E+00 | 9,95E-01 |
| seatstays | 1,07E-03 | 4,51E-01 | 2,80E-01 |
| BBSHELL | 1,00E-05 | 7,97E+00 | 7,10E-02 |
| Total | 5,25E-01 | 1,07E+01 | 2,28E+00 |

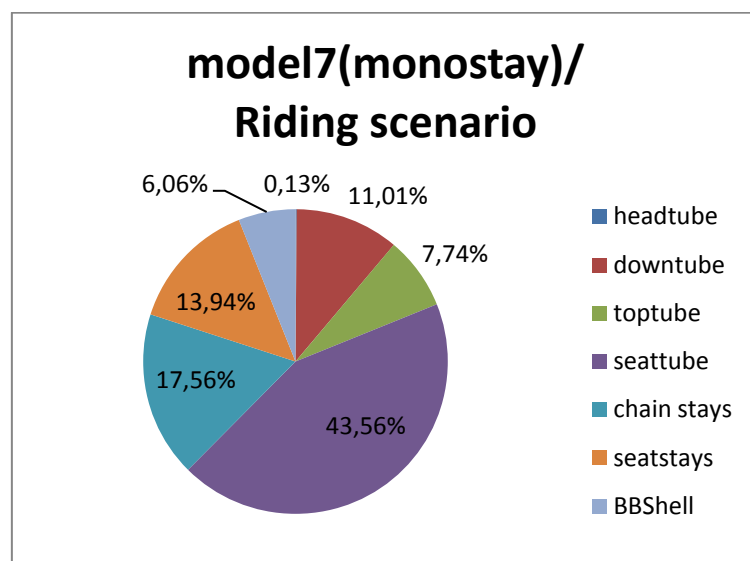
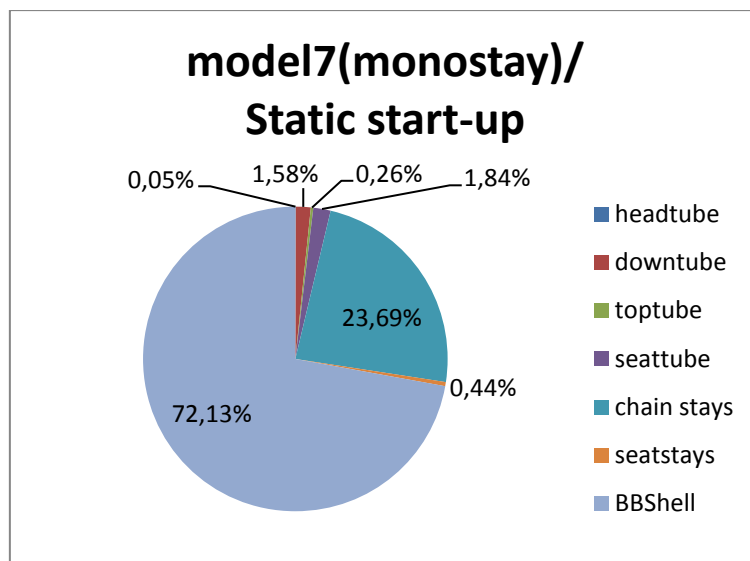
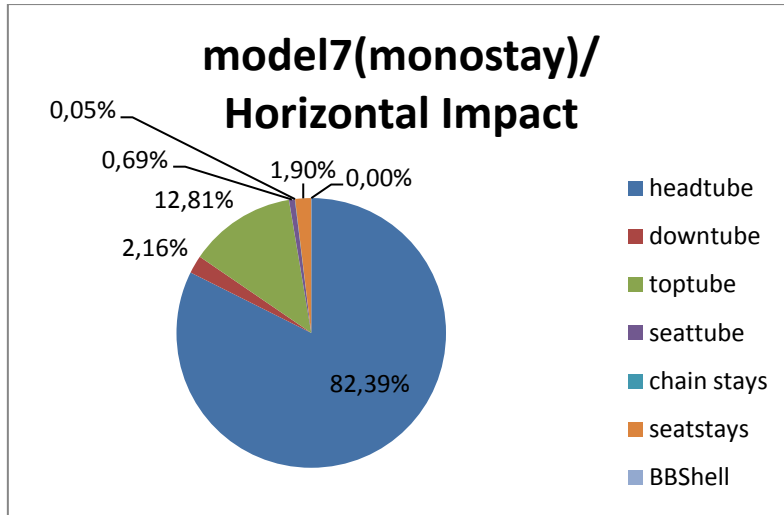


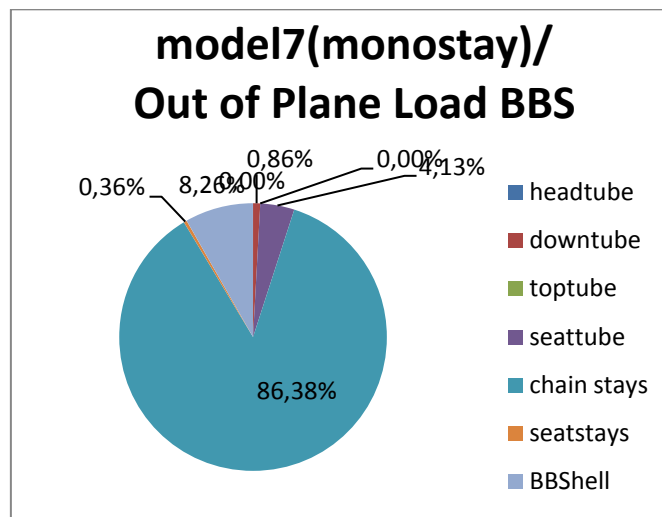
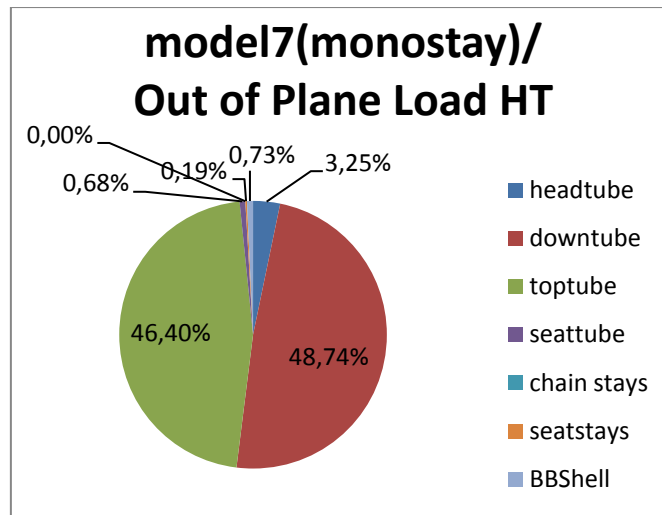
Model 7(monostay)

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ MAX (VALUES) | | | |
|-----------------------|---------------------------|-------------------|------------|----------|
| | stress (psi) | displacement (mm) | strain EQV | FOS |
| Horizontal Impact | 5,49E+06 | 1,24E+01 | 6,13E-03 | 8,09E+05 |
| Static start-up | 1,46E+07 | 1,57E+01 | 1,43E-02 | 1,28E+06 |
| Riding scenario | 7,41E+06 | 1,26E+01 | 7,73E-04 | 5,26E+02 |
| Out of Plane Load HT | 9,56E+07 | 1,25E+01 | 1,20E-04 | 8,68E+02 |
| Out of Plane Load BBS | 6,29E+07 | 2,00E-01 | 5,10E-05 | 1,96E+09 |

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | Max Displacements (mm) | | |
|-----------------------|------------------------|----------|-------------------|
| | BBSHELL | Headtube | Stays connections |
| Horizontal Impact | 1,38E+00 | 1,12E+00 | 2,90E-05 |
| Static start-up | 1,19E+01 | 1,74E-02 | 5,80E-04 |
| Riding scenario | 9,30E+00 | 4,74E+00 | 1,37E-04 |
| Out of Plane Load HT | 2,24E+00 | 6,24E+00 | 9,17E-06 |
| Out of Plane Load BBS | 1,98E-01 | 0,00E+00 | 7,20E-06 |

| Strain energy (N*m) | ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | | | | |
|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
| | Horizontal Impact | Static start-up | Riding scenario | Out of Plane Load HT | Out of Plane Load BBS |
| headtube | 5,34E-01 | 8,95E-05 | 1,93E-03 | 1,00E-01 | 1,10E-09 |
| downtube | 1,40E-02 | 3,00E-03 | 0,158 | 1,5 | 5,50E-04 |
| toptube | 8,30E-02 | 5,00E-04 | 1,11E-01 | 1,43E+00 | 1,35E-06 |
| seattube | 4,50E-03 | 3,50E-03 | 6,25E-01 | 2,10E-02 | 2,65E-03 |
| chainstays | 3,20E-04 | 4,50E-02 | 2,52E-01 | 1,50E-04 | 5,54E-02 |
| seatstays | 1,23E-02 | 8,40E-04 | 2,00E-01 | 6,00E-03 | 2,33E-04 |
| BBSHELL | 8,53E-06 | 0,137 | 8,70E-02 | 2,24E-02 | 5,30E-03 |
| Total | 6,48E-01 | 1,90E-01 | 1,43E+00 | 3,08E+00 | 6,41E-02 |



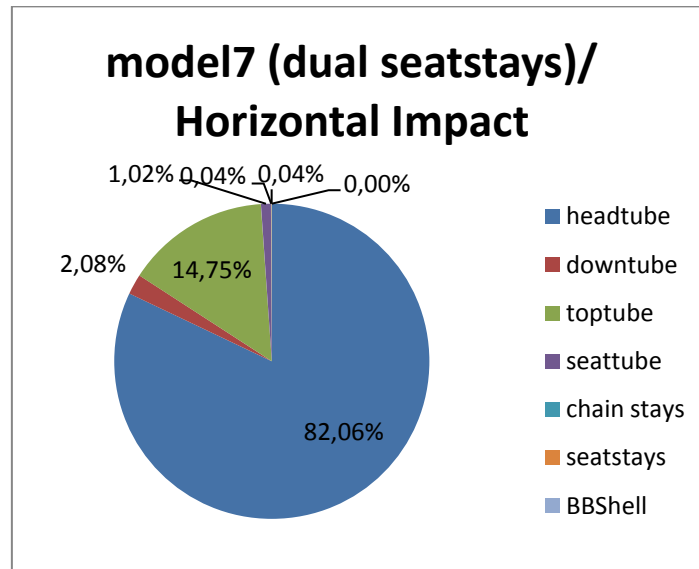


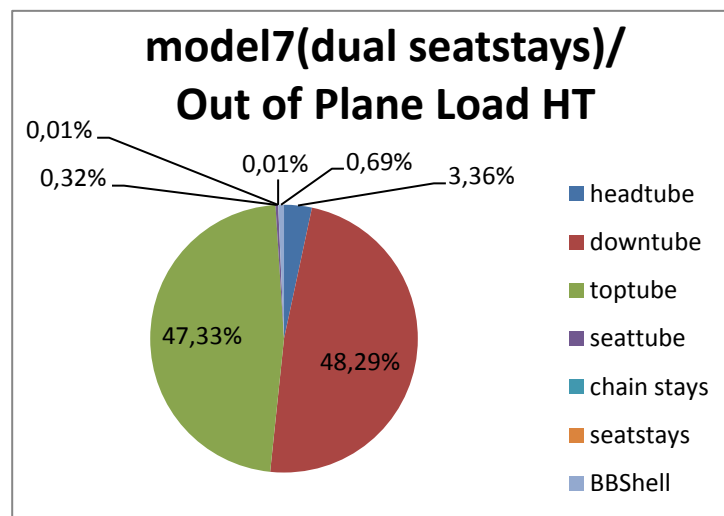
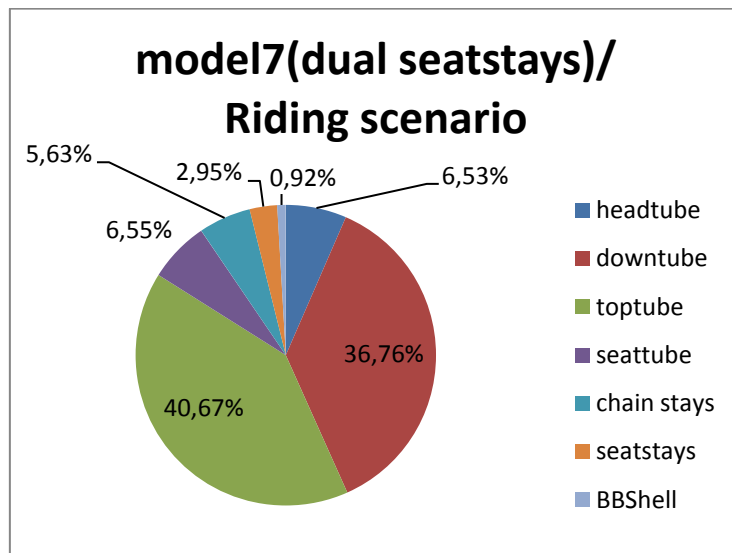
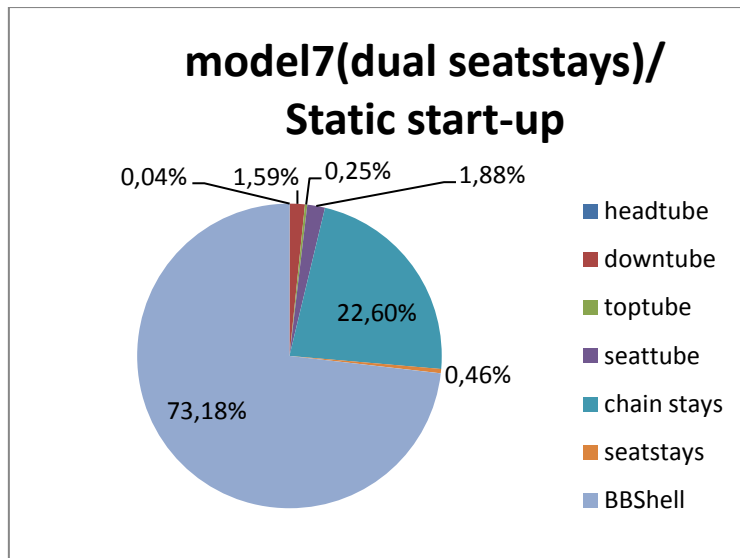
Model 7 (dual seatstays)

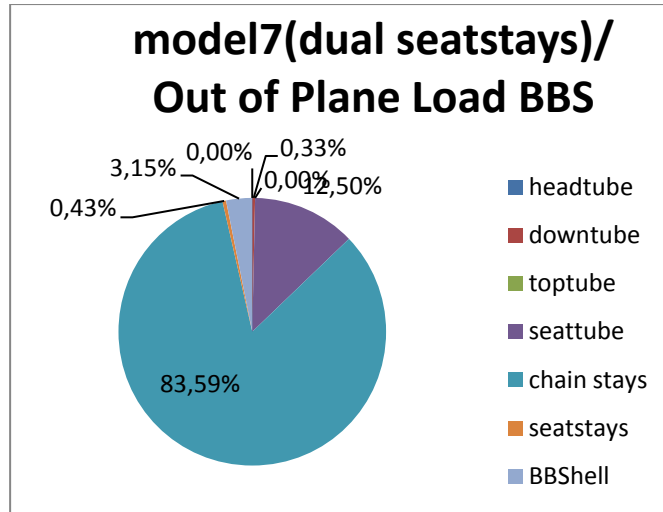
| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ MAX (VALUES) | | | |
|-----------------------|---------------------------|-------------------|------------|----------|
| | stress (psi) | displacement (mm) | strain EQV | FOS |
| Horizontal Impact | 5,98E+06 | 1,26E+01 | 6,80E-03 | 8,51E+04 |
| Static start-up | 1,74E+06 | 1,57E+00 | 2,28E-03 | 1,28E+05 |
| Riding scenario | 1,49E+07 | 4,60E+01 | 2,02E-03 | 3,38E+02 |
| Out of Plane Load HT | 8,16E+07 | 1,23E+01 | 1,15E-04 | 4,46E+02 |
| Out of Plane Load BBS | 3,40E+07 | 2,00E-02 | 2,84E-04 | 2,41E+04 |

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | Max Displacements (mm) | | |
|-----------------------|------------------------|----------|-------------------|
| | BBSHELL | Headtube | Stays connections |
| Horizontal Impact | 1,37E+00 | 1,72E+00 | 3,80E-05 |
| Static start-up | 1,57E+00 | 7,26E+00 | 1,00E-03 |
| Riding scenario | 4,50E+00 | 4,60E+01 | 2,00E-03 |
| Out of Plane Load HT | 3,10E-03 | 1,23E+01 | 9,50E-06 |
| Out of Plane Load BBS | 2,00E-01 | 9,50E-07 | 1,88E-04 |

| Strain energy (N*m) | ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | | | | |
|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
| | Horizontal Impact | Static start-up | Riding scenario | Out of Plane Load HT | Out of Plane Load BBS |
| headtube | 4,73E-01 | 7,37E-05 | 5,68E-01 | 2,10E-01 | 2,45E-07 |
| downtube | 1,20E-02 | 2,95E-03 | 3,2 | 3,02 | 5,82E-04 |
| toptube | 8,50E-02 | 4,64E-04 | 3,54E+00 | 2,96E+00 | 1,78E-06 |
| seattube | 5,90E-03 | 3,50E-03 | 5,70E-01 | 2,00E-02 | 2,18E-02 |
| chainstays | 2,50E-04 | 4,20E-02 | 4,90E-01 | 3,75E-04 | 1,46E-01 |
| seatstays | 2,40E-04 | 8,50E-04 | 2,57E-01 | 4,14E-04 | 7,58E-04 |
| BBSHELL | 1,06E-05 | 0,136 | 8,00E-02 | 4,30E-02 | 5,50E-03 |
| Total | 5,76E-01 | 1,86E-01 | 8,70E+00 | 6,25E+00 | 1,75E-01 |





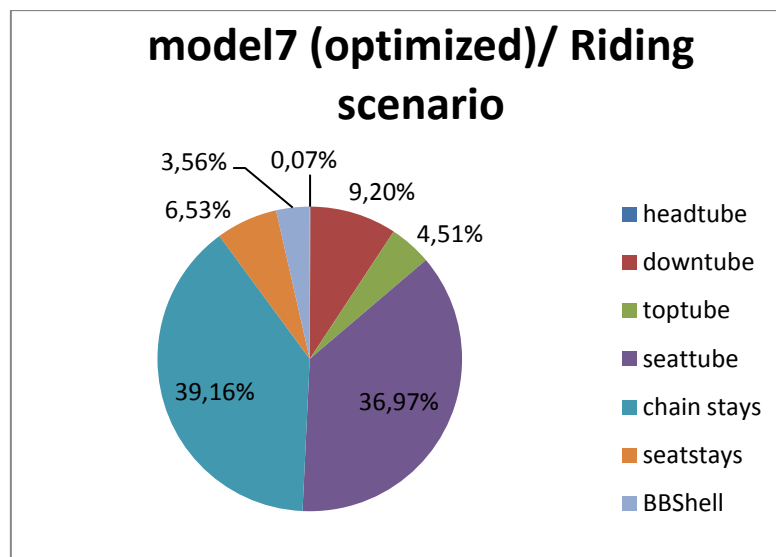
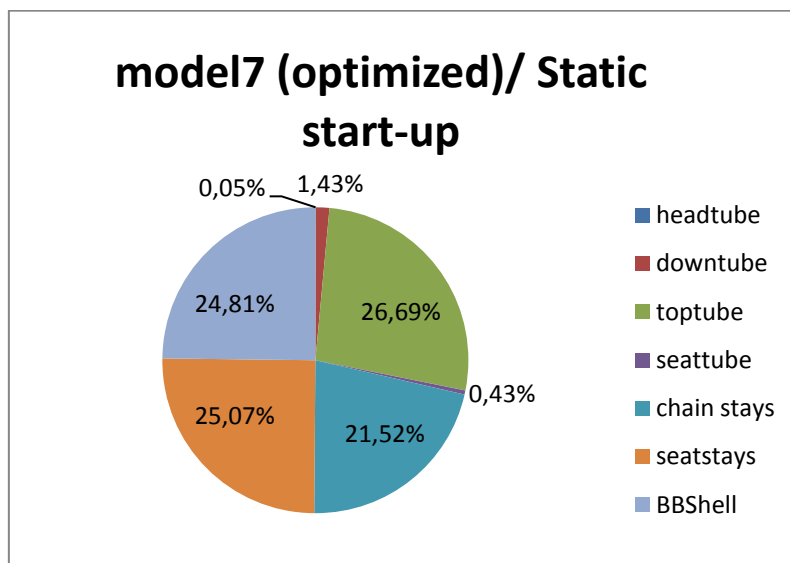


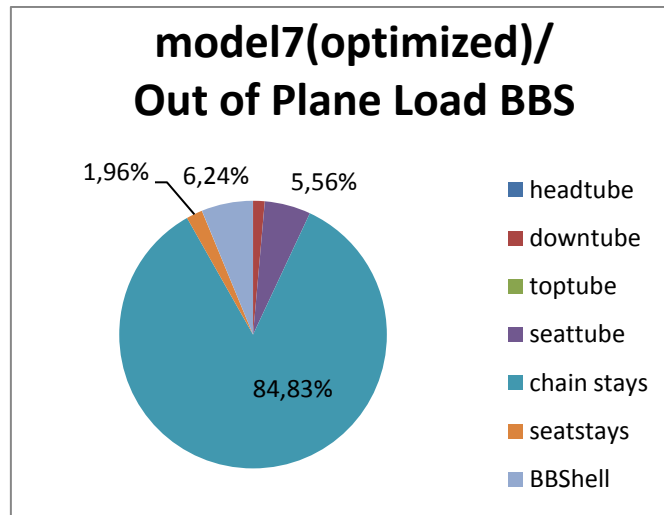
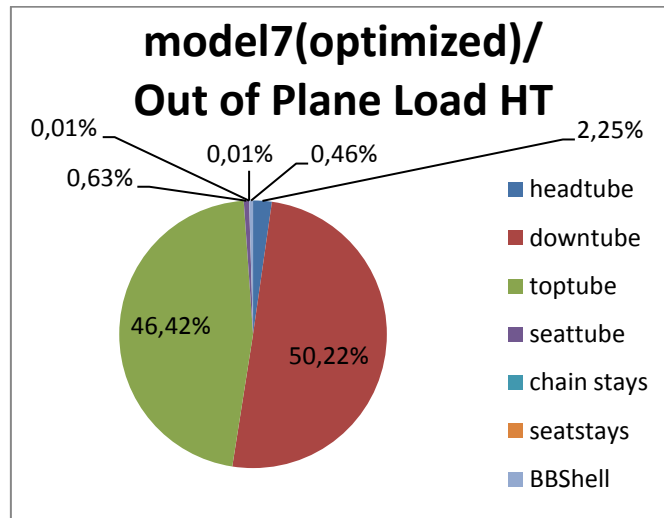
Model 7 (optimized)

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | | | MAX (VALUES) |
|-----------------------|--------------|-------------------|------------|--------------|
| | stress (psi) | displacement (mm) | strain EQV | FOS |
| Horizontal Impact | 3,82E+06 | 5,60E+00 | 4,72E-03 | 8,51E+04 |
| Static start-up | 1,23E+06 | 1,55E+00 | 1,60E-03 | 1,28E+05 |
| Riding scenario | 2,89E+07 | 1,20E+01 | 4,76E-03 | 3,38E+02 |
| Out of Plane Load HT | 9,46E+07 | 1,19E+01 | 1,11E-04 | 9,75E+02 |
| Out of Plane Load BBS | 3,70E+07 | 1,40E-01 | 3,07E-05 | 3,94E+04 |

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | Max Displacements (mm) | | |
|-----------------------|------------------------|----------|-------------------|
| | BBSshell | Headtube | Stays connections |
| Horizontal Impact | 4,00E-01 | 3,59E-01 | 2,30E-05 |
| Static start-up | 7,94E-01 | 2,00E-03 | 1,49E-04 |
| Riding scenario | 3,48E+00 | 8,97E+00 | 2,97E-01 |
| Out of Plane Load HT | 1,19E+01 | 1,70E-03 | 9,50E-06 |
| Out of Plane Load BBS | 1,27E-01 | 2,40E-06 | 7,20E-06 |

| Strain energy (N*m) | ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | | | | |
|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
| | Horizontal Impact | Static start-up | Riding scenario | Out of Plane Load HT | Out of Plane Load BBS |
| headtube | 1,41E-01 | 1,00E-04 | 1,23E-03 | 1,42E-01 | 1,60E-07 |
| downtube | 4,59E-03 | 2,82E-03 | 0,155 | 3,17 | 6,38E-04 |
| toptube | 1,50E-02 | 5,27E-02 | 7,60E-02 | 2,93E+00 | 1,78E-06 |
| seattube | 6,00E-04 | 8,52E-04 | 6,23E-01 | 4,00E-02 | 2,52E-03 |
| chainstays | 3,30E-05 | 4,25E-02 | 6,60E-01 | 5,00E-04 | 3,85E-02 |
| seatstays | 1,80E-04 | 4,95E-02 | 1,10E-01 | 4,52E-04 | 8,90E-04 |
| BBSshell | 8,00E-08 | 0,049 | 0,06 | 2,90E-02 | 2,83E-03 |
| Total | 1,61E-01 | 1,97E-01 | 1,69E+00 | 6,31E+00 | 4,54E-02 |



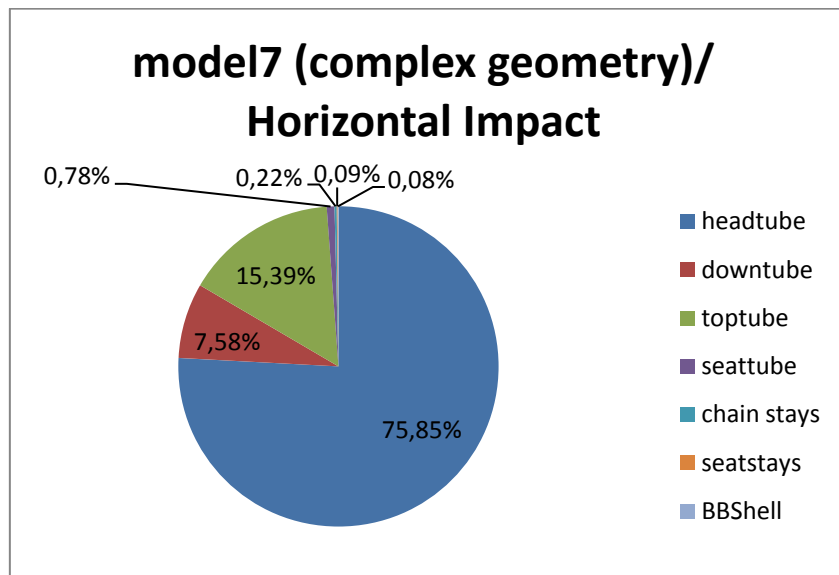


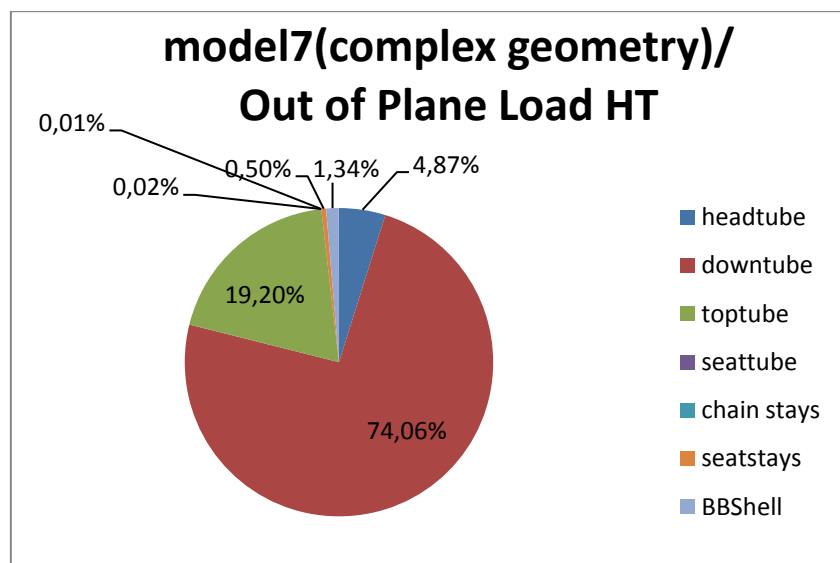
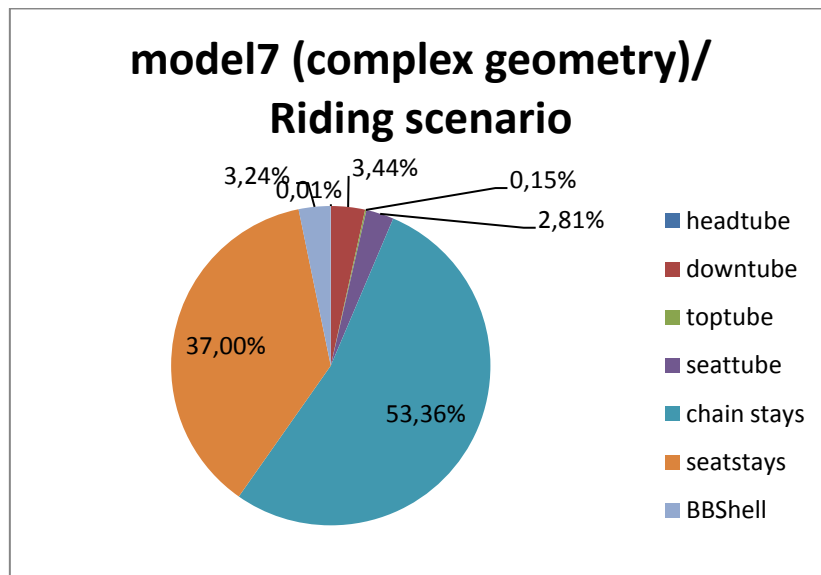
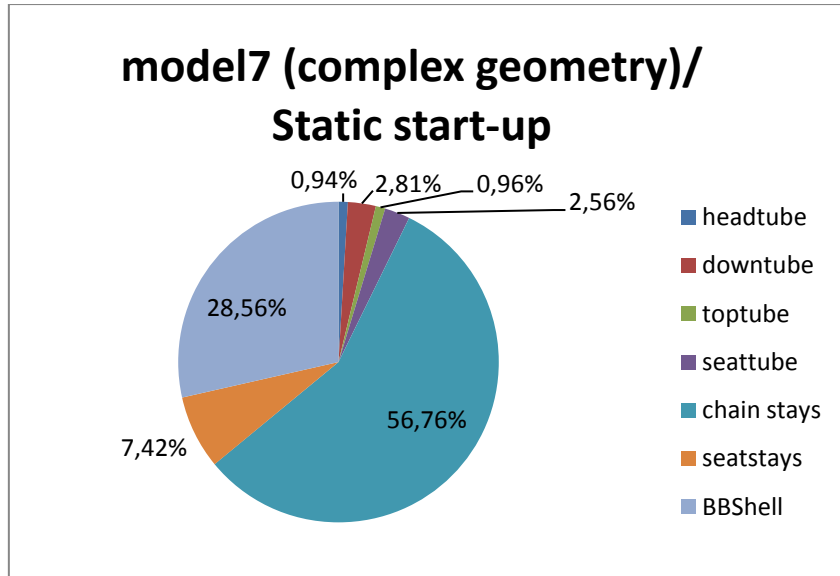
Model 7 (complex geometry)

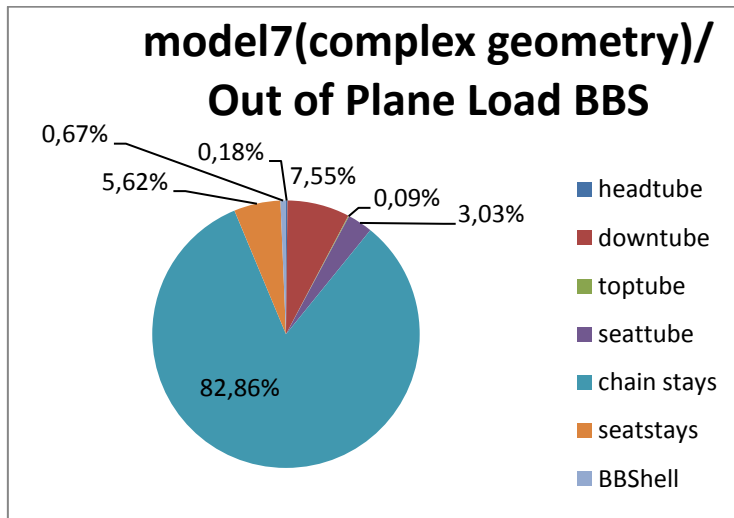
| | stress (psi) | displacement (mm) | strain EQV | FOS |
|-----------------------|--------------|-------------------|------------|----------|
| Horizontal Impact | 5,30E+05 | 7,95E-01 | 7,00E-04 | 1,41E+05 |
| Static start-up | 1,81E+06 | 3,07E+00 | 1,22E-03 | 2,65E+04 |
| Riding scenario | 9,57E+08 | 1,32E+01 | 1,20E-03 | 3,57E+02 |
| Out of Plane Load HT | 6,30E+06 | 2,10E-01 | 8,10E-06 | 1,47E+04 |
| Out of Plane Load BBS | 5,92E+06 | 3,94E-02 | 3,90E-06 | 2,40E+03 |

| ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | Max Displacements (mm) | | |
|-----------------------|------------------------|----------|-------------------|
| | BBSHELL | Headtube | Stays connections |
| Horizontal Impact | 8,30E-02 | 1,67E-01 | 6,00E-06 |
| Static start-up | 6,48E-01 | 1,00E-02 | 6,50E-05 |
| Riding scenario | 5,19E+00 | 1,32E+01 | 2,67E-01 |
| Out of Plane Load HT | 2,06E-01 | 9,40E-05 | 7,20E-06 |
| Out of Plane Load BBS | 3,76E-02 | 2,40E-06 | 7,20E-06 |

| Strain energy (N*m) | ΣΕΝΑΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | | | | |
|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
| | Horizontal Impact | Static start-up | Riding scenario | Out of Plane Load HT | Out of Plane Load BBS |
| headtube | 3,40E-02 | 4,00E-03 | 1,50E-03 | 4,44E-03 | 2,40E-05 |
| downtube | 3,40E-03 | 1,20E-02 | 0,608 | 6,75E-02 | 1,02E-03 |
| toptube | 6,90E-03 | 4,10E-03 | 2,60E-02 | 1,75E-02 | 1,28E-05 |
| seattube | 3,50E-04 | 8,00E-03 | 3,16E-01 | 2,15E-05 | 4,10E-04 |
| chainstays | 1,00E-04 | 9,60E-02 | 9,43E+00 | 5,60E-06 | 1,12E-02 |
| seatstays | 3,99E-05 | 8,22E-03 | 6,54E+00 | 4,52E-04 | 7,60E-04 |
| BBSHELL | 3,70E-05 | 0,122 | 0,573 | 1,22E-03 | 9,00E-05 |
| Total | 4,48E-02 | 2,54E-01 | 1,75E+01 | 9,11E-02 | 1,35E-02 |

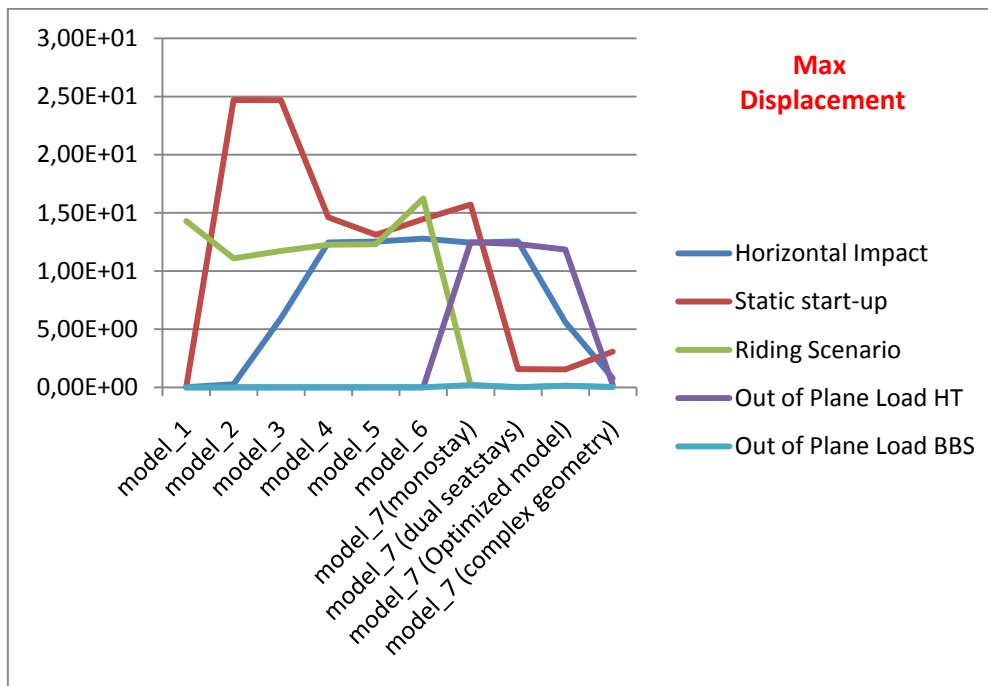




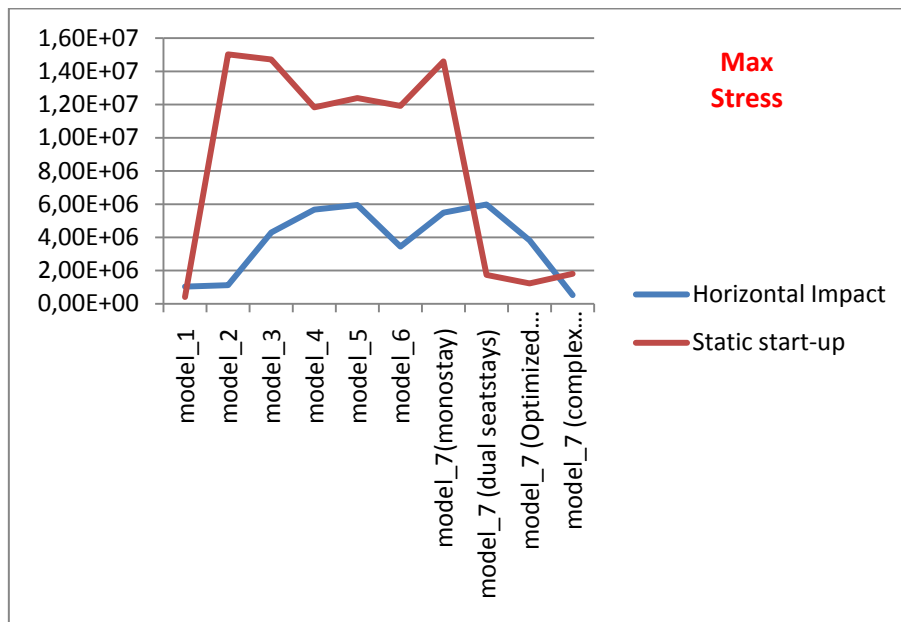
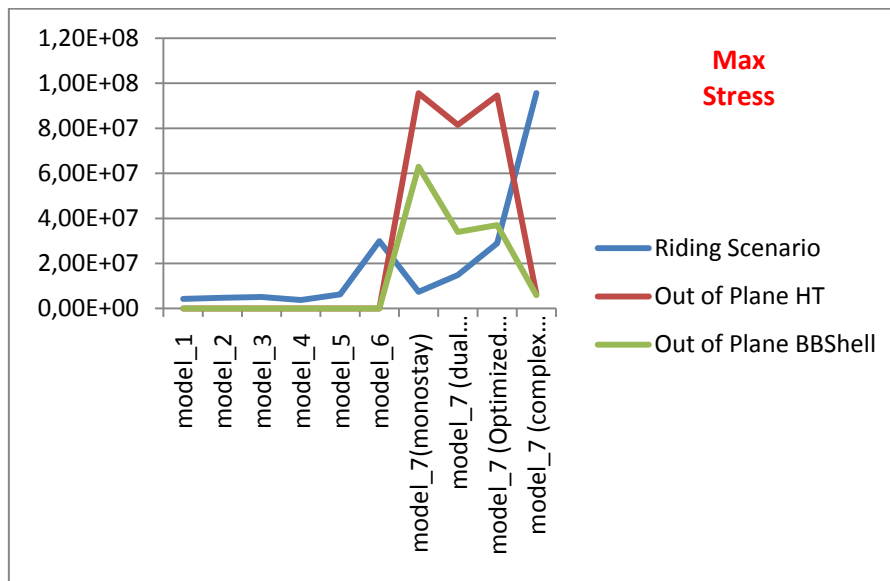


6.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα μέγιστης παραμόρφωσης και απορρόφησης ενέργειας ανά σενάριο φόρτισης. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν βέλτιστα να μας βοηθήσουν στην συμπερασματική ανάλυση αφού η σύγκριση των γεωμετρικών μοντέλων είναι πιο εμφανής σε αυτήν την περίπτωση. Στα πρώτα διαγράμματα παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα για κάθε μηχανική παράμετρο (μέγιστη παραμόρφωση, μέγιστη τάση και μέγιστη απορροφούμενη ενέργεια).

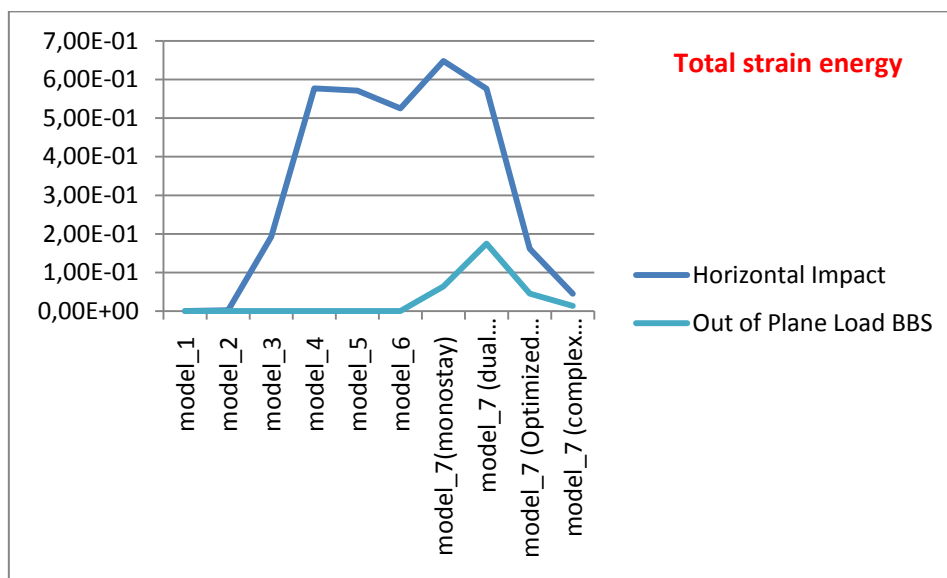
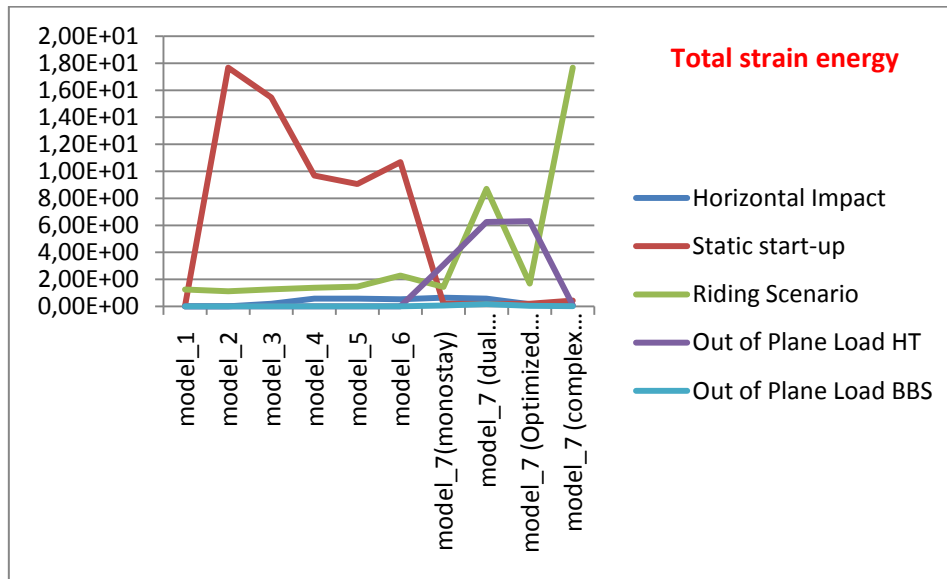


Από τα διαγράμματα είναι εμφανές ότι το γεωμετρικό μοντέλο monostay και οι επόμενες εκδοχές κατορθώνει να μειώνει αισθητά στο σενάριο Riding την παραμόρφωση του σκελετού. Ωστόσο στα άλλα σενάρια φόρτισης η παραμόρφωση υφίσταται αισθητή μείωση μόνο στα γεωμετρικά μοντέλα dualstays, optimized και complex_geometry. Η σύγκριση των παραμορφώσεων μας βοηθάει στην επιλογή του μοντέλου optimized, ως αυτού που δίνει την μικρότερη παραμόρφωση για όλα τα σενάρια φόρτισης.



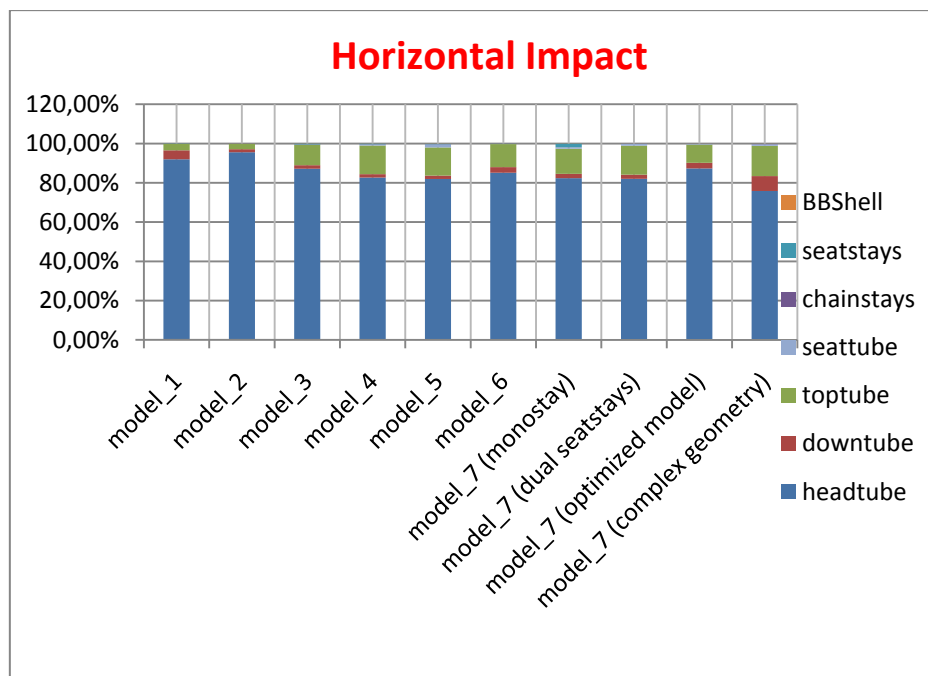
Στην συνέχεια σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα τάσης για κάθε μοντέλο και σενάριο. Χρειάστηκε η σχεδίαση δύο διαγραμμάτων λόγω διαφοράς τάξεως για την τάση κάθε σεναρίου φορτίσεως. Εδώ παρατηρείται ότι τα μοντέλα dualstays, optimized και complex_geometry κατορθώνουν να μειώσουν εκτός από την παραμόρφωση και την μέγιστη τάση που προκαλείται στον σκελετό. Η μέγιστη προκαλούμενη τάση είναι το δεύτερο κρίσιμο μηχανικό χαρακτηριστικό ενός μοντέλου, και τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης ήδη περιόρισαν τις επιλογές μας βάσει των αποτελεσμάτων, στην ομάδα των τριών μοντέλων: dualstays, optimized και complex_geometry. Ωστόσο και σε αυτήν την περίπτωση το

μοντέλο optimized παρουσιάζει στο σύνολο την μικρότερη προκαλούμενη τάση στο μοντέλο.

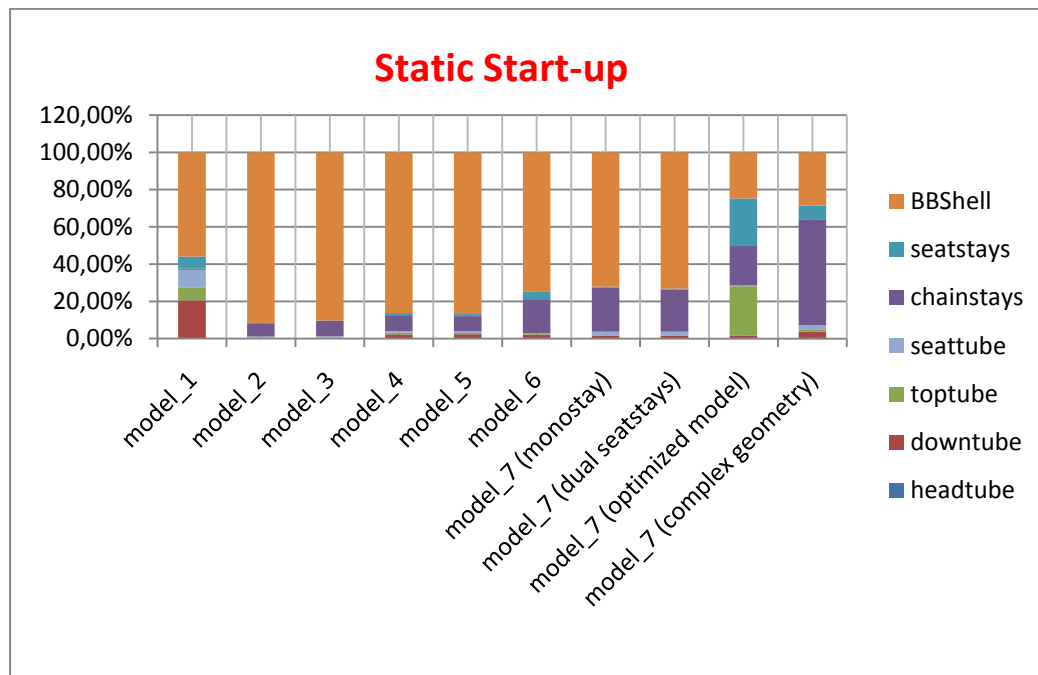


Τα διαγράμματα εδώ απεικονίζουν την ολική απορροφούμενη από τα μοντέλα ενέργεια ή αλλιώς την ενέργεια που αποδίδουν τα σενάρια φόρτισης σε κάθε μοντέλο. Το δεύτερο διάγραμμα σχεδιάστηκε επίσης λόγω της διαφοράς τάξεως μεταξύ των σεναρίων φορτίσεως. Εδώ παρατηρείται ότι τα μοντέλα optimized και complex geometry απορροφούν λιγότερη ενέργεια σε σχέση με τα μοντέλα dualstays και monostay. Η εύρεση του κατάλληλου σκελετού αναφορικά με το κριτήριο της απορροφούμενης ενέργειας, είναι σύνθετη, καθώς θα πρέπει να συνεκτιμηθεί η χρήση που προορίζεται για τον σκελετό. Αναλόγως δηλαδή της προοριζόμενης χρήσης ένα από τα παραπάνω μοντέλα θα είναι το κατάλληλο.

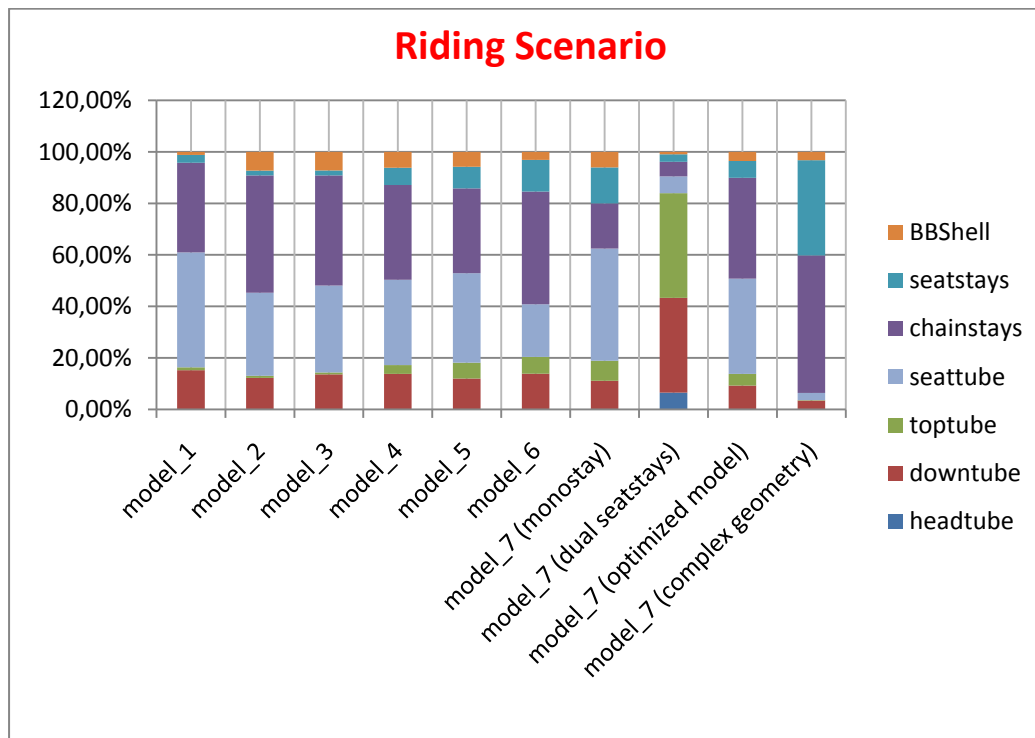
Στο σημείο αυτό μας ενδιαφέρει ομοίως η τελική απορροφούμενη ενέργεια από τους σκελετούς, ωστόσο το πρόβλημα εδώ εξειδικεύεται στην εξακρίβωση των τμημάτων του σκελετού που απορροφούν την περισσότερη ενέργεια. Αυτό που μας ενδιαφέρει δηλαδή σε αυτήν την περίπτωση είναι η κατανομή της απορροφούμενης ενέργειας στα τμήματα των σκελετών, και πως η γεωμετρία του σκελετού μπορεί να επηρεάσει την κατανομή αφαιρώντας ή προσθέτοντας απορροφούμενη ενέργεια σε μηχανικά σημεία ενδιαφέροντος. Επιπλέον η εύρεση της κατανομής μπορεί να βοηθήσει τον σχεδιασμό, εξακριβώνοντας ποια μηχανικά μέρη απορροφούν την περισσότερη ενέργεια. Τα μηχανικά αυτά μέρη μπορούν να σχεδιαστούν με διαφορετικά υλικά αν το ποσοστό απορρόφησης δεν υποχωρεί με βάσει την γεωμετρία, ή ακόμα να προταθούν κάποιες άλλες μηχανικές λύσεις οι οποίες θα βελτιώνουν την κατανομή ή θα την προσαρμόζουν στην επιθυμητή κάθε φορά. Στην συγκεκριμένη εργασία, το μέτρο αποδοτικότητας της γεωμετρίας των σκελετών είναι η ομοιόμορφη κατανομή ή αλλιώς η ισοκατανεμημένη απορρόφηση ενέργειας από τα μηχανικά μέρη του σκελετού. Όπως παρατηρείται στα επόμενα διαγράμματα στοίβας, τα μοντέλα σκελετών *monostay*, *dualstays*, *optimized* και *complex_geometry* προσεγγίζουν την ιδεατή πλήρως κατανεμημένη απορρόφηση ενέργειας από τα μηχανικά μέρη του σκελετού. Όπως και πριν με την ανάλυση των διαγραμμάτων, μπορεί να βγει συμπέρασμα σχετικά με το ποιός σκελετός είναι αποδοτικότερος αναφορικά με την κατανομή της απορροφούμενης ενέργειας.



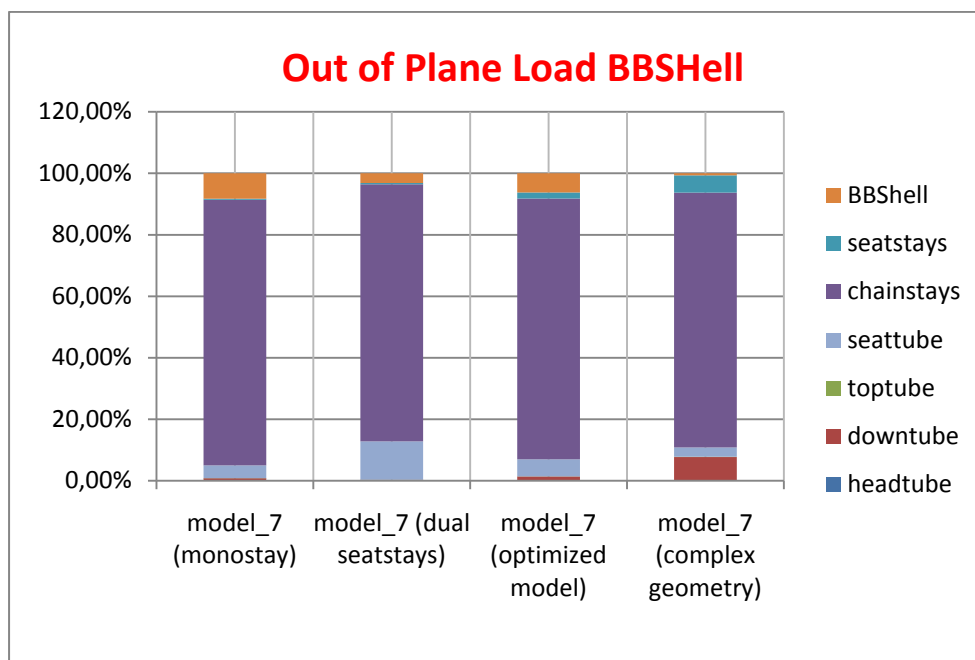
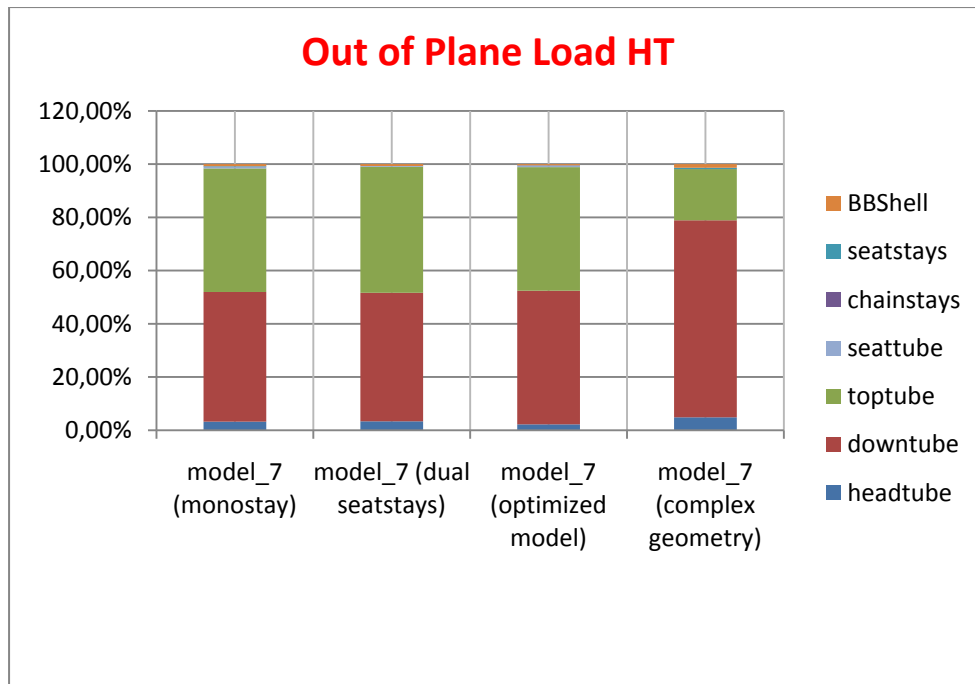
Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάστηκαν οι κατανομές απορροφούμενης ενέργειας για το σενάριο της οριζόντιας κρούσης. Όπως είναι αναμενόμενο το κούτελο ως μηχανικό μέρος του σκελετού, απορροφάει την μεγάλη πλειοψηφία της ενέργειας, ενώ κανένας βελτιωμένος σκελετός δεν μπορεί να περιορίσει αυτήν την ενέργεια κάτω του 50%. Παρ'ολαυτά παρατηρείται ότι το μοντέλο σύνθετης γεωμετρίας, με την γεωμετρία των σωλήνων που χρησιμοποιεί να ισοκατανέμει περισσότερο την ενέργεια σε σχέση με τους υπόλοιπους σκελετούς. Οι σωλήνες που εκτός από το κούτελο απορροφούν κάποια αισθητή ενέργεια είναι ο άνω και ο κάτω σωλήνας.



Στην συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή απορροφούμενης ενέργειας για το σενάριο Static Start-up. Στο σενάριο αυτό όπως επίσης ήταν αναμενόμενο λόγω της φόρτισης, η μεσαία τριβή λαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας σχεδόν σε όλα τα μοντέλα σκελετών. Εξαίρεση αποτελούν τα μοντέλα optimized και complex_geometry, στα οποία η απορρόφηση ενέργειας γίνεται ισοκατανομημένα μεταξύ των σωλήνων του σκελετού. Η ισοκατανομή μάλιστα στον σκελετό optimized, είναι εντυπωσιακή και αποτελεί ένα συγκριτικό πλεονέκτημα του σκελετού για αυτό το σενάριο φόρτισης.



Το σενάριο Riding, είναι και το πιο πολύπλοκο, αφού αφορά τις κανονικές συνθήκες οδήγησης του σκελετού. Σε αυτό το σενάριο τα αποτελέσματα ποικίλλουν ανάλογα με την γεωμετρία του σκελετού. Ένα θετικό συμπέρασμα είναι ότι η πλειοψηφία της απορροφούμενης ενέργειας για τους περισσότερους σκελετούς, καταλήγει στους σωλήνες seatstays, chainstays και seattube, οι οποίοι έχουν την ειδική σχεδιαστική λεπτομέρεια των τμηματοποιημένων καμπύλων που περιγράφηκαν σε προηγούμενες ενότητες. Είναι αν μη τι άλλο απόδειξη, της αποδοτικότητας αυτού του γεωμετρικού σχεδιασμού στην αντιμετώπιση των εξωτερικών μηχανικών φορτίσεων. Με εξαίρεση την περίπτωση των dualstays, σε όλους τους άλλους σκελετούς, το μεγαλύτερο ποσοστό απορρόφησης ενέργειας το παρουσιάζει ο σωλήνας chainstays, δεύτερο στην σειρά το seattube ενώ τρίτος πιο κρίσιμος σωλήνας είναι τα seatstays. Καταλήγω στο συμπέρασμα ότι ο σκελετός optimized διατηρεί την πιο ισοκατανεμημένη απορρόφηση ενέργειας μεταξύ των άλλων σκελετών. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί, ότι για κάποιες άλλες ποδηλατικές χρήσεις η κατανομή που παρουσιάζει το μοντέλο dualstays είτε η κατανομή του μοντέλου complex_geometry, μπορεί να είναι καταλληλότερη. Όπως ήδη αναφέρθηκε το κάθε μοντέλο σκελετού ποδηλάτου θα μπορούσε να εξυπηρετήσει κάποια συγκεκριμένους σχεδιαστικούς σκοπούς/στόχους.



Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των στρεπτικών φορτίσεων, πρώτα για την στρέψη στο κούτελο και έπειτα στην μεσαία τριβή. Οι κατανομές σε αυτές τις περιπτώσεις δεν έχουν ιδιαίτερες αποκλίσεις, επομένως η επιλογή σκελετού βάσει μόνο των παραπάνω δύο αποτελεσμάτων θα ήταν μη ενδεικτική και αντιπροσωπευτική του σκελετού με την βέλτιστη μηχανική απόκριση.

Από τις παραπάνω αναλύσεις προκύπτει το τελικό συμπέρασμα ότι πέραν των βελτιωμένων χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν κάποια μοντέλα όπως το `monostays`, `dualstays` οι σκελετοί `optimized` και `complex_geometry` φαίνεται να υπερτερούν όλων των υπολοίπων σε όλα τα σενάρια φόρτισης και για κάθε παραμετρικό κριτήριο. Το αντικείμενο της εργασίας μπορεί να τύχει περαιτέρω έρευνας, η οποία θα εξετάζει την βελτιστοποίηση του σκελετού με βάση σύνθετα υλικά ανθρακονημάτων, ή με την κατασκευή σκελετού από διαφορετικά υλικά (πιο φθηνά σε αδιάφορες περιοχές και πιο ακριβά ίσως σε πιο κρίσιμα σημεία). Επιπλέον θα μπορούσε να μελετηθεί με εργαλεία πραγματικής τρισδιάστατης σχεδίασης που παρέχουν τα πακέτα λογισμικού CAD όπως το Solidworks, η βέλτιστη για κάθε αγωνιστική χρήση γεωμετρία σκελετού. Η μέθοδος αυτή σχεδίασης μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη της αεροδυναμικότητας και της απόδοσης του σκελετού. Σε κάθε περίπτωση η διαδικασία μετρήσεων που ακολουθήθηκε στην εργασία μπορεί να αποτελεί οδηγό για την εκπόνηση αυτών, και σίγουρα δίνει μία ακριβή θεώρηση της αποτελεσματικότητας των σκελετών.

Όπως τονίστηκε και νωρίτερα ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζεται ο σκελετός και αναλόγως του αγωνίσματος στο οποίο θα χρησιμοποιηθεί, η κατανομή ενέργειας και φορτίων μας δείχνει ποιο κομμάτι πρέπει να ενισχυθεί και ποιο κομμάτι χρειάζεται βελτιστοποιημένη σχεδίαση. Στην σύγχρονη αγωνιστική ποδηλασία, είναι πλέον κατανοητό ότι ο κάθε αγωνιστικός σκελετός πρέπει να είναι ειδικά σχεδιασμένος (*fine-tuning*) ώστε να ανταποκρίνεται στις ανάγκες του αγωνίσματος και φυσικά του ίδιου του αναβάτη. Στα αγωνίσματα αυτά ακόμα και τα μικρά κλάσματα του χρόνου δίνουν σαφώς συγκριτικό πλεονέκτημα στον αναβάτη. Για να μπορεί όμως ο αναβάτης να εκμεταλλευθεί αυτό το πλεονέκτημα, ο σκελετός του θα πρέπει να είναι εξατομικευμένος, αφού κάθε λεπτομέρεια του σκελετού και της ανατομίας του αναβάτη θα πρέπει να τύχει της κατάλληλης προσοχής. Δεν θα είναι υπερβολή αν τονίσω ότι για κάθε αγώνισμα και για κάθε αναβάτη υπάρχει μόνο μία βέλτιστη γεωμετρία σκελετού. Η εύρεση αυτής της γεωμετρίας που θα δώσει εντέλει και την νίκη, είναι αντικείμενο που μπορεί να εξεταστεί με την διαδικασία που περιέγραψα, σαφώς απαιτεί την ενασχόληση εξειδικευμένων μηχανικών, αλλά και τέλος την αναπόφευκτη εμπλοκή σε έξοδα μελέτης που θα πρέπει να αναλάβει η αγωνιστική ομάδα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

| Design_models | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | | | |
|----------------------------|------------------|-----------------------|------------|----------|
| | max stress (psi) | max displacement (mm) | max strain | max FOS |
| model_1 | | | | |
| Horizontal impact | 1,03E+06 | 2,58E-02 | 8,22E-05 | 2,95E+06 |
| Static start-up | 4,13E+05 | 1,61E-02 | 5,79E-05 | 2,60E+03 |
| Riding scenario | 4,27E+06 | 1,43E+01 | 5,08E-04 | 1,31E+03 |
| model_2 | | | | |
| Horizontal impact | 1,13E+06 | 2,63E-01 | 8,38E-04 | 1,93E+06 |
| Static start-up | 1,50E+07 | 2,47E+01 | 1,98E-02 | 2,35E+03 |
| Riding scenario | 4,73E+06 | 1,11E+01 | 5,47E-04 | 6,43E+02 |
| model_3 | | | | |
| Horizontal impact | 4,29E+06 | 5,96E+00 | 4,34E-03 | 2,06E+05 |
| Static start-up | 1,47E+07 | 2,47E+01 | 1,80E-02 | 2,28E+03 |
| Riding scenario | 5,10E+06 | 1,17E+01 | 5,93E-04 | 5,63E+02 |
| model_4 | | | | |
| Horizontal impact | 5,68E+06 | 1,25E+01 | 5,52E-03 | 1,44E+05 |
| Static start-up | 1,18E+07 | 1,46E+01 | 1,40E-02 | 5,32E+03 |
| Riding scenario | 3,75E+06 | 1,23E+01 | 4,50E-04 | 5,89E+02 |
| model_5 | | | | |
| Horizontal impact | 5,95E+06 | 1,25E+01 | 6,13E-03 | 2,31E+05 |
| Static start-up | 1,24E+07 | 1,31E+01 | 1,58E-02 | 4,61E+03 |
| Riding scenario | 6,25E+06 | 1,23E+01 | 6,17E-04 | 6,99E+02 |
| model_6 | | | | |
| Horizontal impact | 3,44E+06 | 1,28E+01 | 5,58E-03 | 5,51E+04 |
| Static start-up | 1,19E+07 | 1,45E+01 | 1,58E-02 | 2,66E+03 |
| Riding scenario | 2,99E+07 | 1,62E+01 | 2,88E-04 | 3,86E+02 |
| model_7(monostay) | | | | |
| Horizontal impact | 5,49E+06 | 1,24E+01 | 6,13E-03 | 8,09E+05 |
| Static start-up | 1,46E+07 | 1,57E+01 | 1,43E-02 | 1,28E+06 |
| Riding scenario | 7,41E+06 | 1,26E+01 | 7,73E-04 | 5,26E+02 |
| Out of Plane Load HT | 9,56E+07 | 1,25E+01 | 1,20E-04 | 8,68E+02 |
| Out of Plane Load BBS | 6,29E+07 | 2,00E-01 | 5,10E-05 | 1,96E+09 |
| model_7 (dual seatstays) | | | | |
| Horizontal impact | 5,98E+06 | 1,26E+01 | 6,80E-03 | 8,51E+04 |
| Static start-up | 1,74E+06 | 1,57E+00 | 2,28E-03 | 1,28E+05 |
| Riding scenario | 1,49E+07 | 4,60E+01 | 2,02E-03 | 3,38E+02 |
| Out of Plane Load HT | 8,16E+07 | 1,23E+01 | 1,15E-04 | 4,46E+02 |
| Out of Plane Load BBS | 3,40E+07 | 2,00E-02 | 2,84E-04 | 2,41E+04 |
| model_7 (Optimized model) | | | | |
| Horizontal impact | 3,82E+06 | 5,60E+00 | 4,72E-03 | 7,94E+04 |
| Static start-up | 1,23E+06 | 1,55E+00 | 1,60E-03 | 8,58E+04 |
| Riding scenario | 2,89E+07 | 1,20E+01 | 4,76E-03 | 3,73E+02 |
| Out of Plane Load HT | 9,46E+07 | 1,19E+01 | 1,11E-04 | 9,75E+02 |
| Out of Plane Load BBS | 3,70E+07 | 1,40E-01 | 3,07E-05 | 3,94E+04 |
| model_7 (complex geometry) | | | | |
| Horizontal impact | 5,30E+05 | 7,95E-01 | 7,00E-04 | 1,41E+05 |
| Static start-up | 1,81E+06 | 3,07E+00 | 1,22E-03 | 2,65E+04 |
| Riding scenario | 9,57E+08 | 1,32E+01 | 1,20E-03 | 3,57E+02 |
| Out of Plane Load HT | 6,30E+06 | 2,10E-01 | 8,10E-06 | 1,47E+04 |

| Design_models | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ////////////////Max Displacements ////////// | | | |
|----------------------------|---|----------|----------|-------------------|
| | Total strain energy | BBSHELL | Headtube | Stays connections |
| model_1 | | | | |
| Horizontal impact | 2,37E-04 | 4,10E-05 | 3,43E-03 | 1,00E-08 |
| Static start-up | 2,31E-02 | 1,60E-02 | 1,98E-05 | 1,34E-05 |
| Riding scenario | 1,25E+00 | 5,90E-01 | 9,82E+00 | 9,50E-05 |
| model_2 | | | | |
| Horizontal impact | 2,41E-03 | 8,00E-04 | 9,00E-03 | 4,00E-07 |
| Static start-up | 1,77E+01 | 2,47E+01 | 2,15E-04 | 6,00E-04 |
| Riding scenario | 1,12E+00 | 6,33E+00 | 8,39E+00 | 1,48E-04 |
| model_3 | | | | |
| Horizontal impact | 1,93E-01 | 3,11E-01 | 6,00E-01 | 1,02E-05 |
| Static start-up | 1,55E+01 | 2,47E+01 | 3,70E-03 | 5,70E-04 |
| Riding scenario | 1,26E+00 | 7,73E+00 | 9,05E+00 | 1,60E-04 |
| model_4 | | | | |
| Horizontal impact | 5,77E-01 | 1,60E-04 | 1,61E+00 | 1,28E+00 |
| Static start-up | 9,68E+00 | 1,20E+01 | 1,60E-02 | 8,30E-04 |
| Riding scenario | 1,38E+00 | 5,68E+00 | 9,18E+00 | 4,29E-04 |
| model_5 | | | | |
| Horizontal impact | 5,71E-01 | 1,38E+00 | 1,73E+00 | 1,60E-04 |
| Static start-up | 9,06E+00 | 1,58E+01 | 1,69E-02 | 9,45E-04 |
| Riding scenario | 1,46E+00 | 6,16E+00 | 9,06E+00 | 2,00E-04 |
| model_6 | | | | |
| Horizontal impact | 5,25E-01 | 1,44E+00 | 1,13E+00 | 2,60E-04 |
| Static start-up | 1,07E+01 | 1,45E+01 | 1,70E-02 | 4,60E-04 |
| Riding scenario | 2,28E+00 | 7,60E+00 | 1,13E+01 | 1,44E-04 |
| model_7(monostay) | | | | |
| Horizontal impact | 6,48E-01 | 1,38E+00 | 1,12E+00 | 2,90E-05 |
| Static start-up | 1,90E-01 | 1,19E+01 | 1,74E-02 | 5,80E-04 |
| Riding scenario | 1,43E+00 | 9,30E+00 | 4,74E+00 | 1,37E-04 |
| Out of Plane Load HT | 3,08E+00 | 2,24E+00 | 6,24E+00 | 9,17E-06 |
| Out of Plane Load BBS | 6,41E-02 | 1,98E-01 | 0,00E+00 | 7,20E-06 |
| model_7 (dual seatstays) | | | | |
| Horizontal impact | 5,76E-01 | 1,37E+00 | 1,72E+00 | 3,80E-05 |
| Static start-up | 1,86E-01 | 1,57E+00 | 7,26E+00 | 1,00E-03 |
| Riding scenario | 8,70E+00 | 4,50E+00 | 4,60E+01 | 2,00E-03 |
| Out of Plane Load HT | 6,25E+00 | 3,10E-03 | 1,23E+01 | 9,50E-06 |
| Out of Plane Load BBS | 1,75E-01 | 2,00E-01 | 9,50E-07 | 1,88E-04 |
| model_7 (Optimized model) | | | | |
| Horizontal impact | 1,61E-01 | 4,00E-01 | 3,59E-01 | 2,30E-05 |
| Static start-up | 1,97E-01 | 7,94E-01 | 2,00E-03 | 1,49E-04 |
| Riding scenario | 1,69E+00 | 3,48E+00 | 8,97E+00 | 2,97E-01 |
| Out of Plane Load HT | 6,31E+00 | 1,19E+01 | 1,70E-03 | 9,50E-06 |
| Out of Plane Load BBS | 4,54E-02 | 1,27E-01 | 2,40E-06 | 7,20E-06 |
| model_7 (complex geometry) | | | | |
| Horizontal impact | 4,48E-02 | 8,30E-02 | 1,67E-01 | 6,00E-06 |
| Static start-up | 4,27E-01 | 6,48E-01 | 1,00E-02 | 6,50E-05 |
| Riding scenario | 1,77E+01 | 5,19E+00 | 1,32E+01 | 2,67E-01 |
| Out of Plane Load HT | 9,11E-02 | 2,06E-01 | 9,40E-05 | 7,20E-06 |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.

| Design_models | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ STRAIN ENERGY(N*m) ΑΝΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΣΚΕΛΕΤΟΥ | | | | | | | Total |
|-------------------|---|----------|----------|----------|------------|-----------|----------|----------|
| | headtube | downtube | toptube | seattube | chain stay | seatstays | BBSHell | |
| model_1 | | | | | | | | |
| horizontal impact | 2,18E-04 | 1,08E-05 | 8,10E-06 | 7,70E-08 | 8,20E-09 | 9,13E-08 | 6,76E-11 | 2,37E-04 |
| | 91,95% | 4,56% | 3,42% | 0,03% | 0,00% | 0,04% | 0,00% | 100,00% |
| static start-up | 3,92E-06 | 4,73E-03 | 1,61E-03 | 2,18E-03 | 1,57E-04 | 1,48E-03 | 1,29E-02 | 2,31E-02 |
| | 0,02% | 20,51% | 6,98% | 9,45% | 0,68% | 6,42% | 55,94% | 100,00% |
| Riding scenario | 8,30E-06 | 0,19 | 1,40E-02 | 5,56E-01 | 4,34E-01 | 3,80E-02 | 1,47E-02 | 1,25E+00 |
| | 0,00% | 15,24% | 1,12% | 44,60% | 34,81% | 3,05% | 1,18% | 100,00% |
| model_2 | | | | | | | | |
| horizontal impact | 2,30E-03 | 3,80E-05 | 6,70E-05 | 8,80E-07 | 5,70E-08 | 9,30E-07 | 4,40E-08 | 2,41E-03 |
| | 95,56% | 1,58% | 2,78% | 0,04% | 0,00% | 0,04% | 0,00% | 100,00% |
| static start-up | 3,47E-05 | 5,97E-02 | 2,57E-02 | 1,17E-01 | 1,27E+00 | 2,50E-02 | 1,62E+01 | 1,77E+01 |
| | 0,00% | 0,34% | 0,15% | 0,66% | 7,16% | 0,14% | 91,55% | 100,00% |
| Riding scenario | 9,40E-06 | 1,38E-01 | 8,55E-03 | 3,63E-01 | 5,12E-01 | 2,10E-02 | 8,20E-02 | 1,12E+00 |
| | 0,00% | 12,27% | 0,76% | 32,28% | 45,53% | 1,87% | 7,29% | 100,00% |
| model_3 | | | | | | | | |
| horizontal impact | 1,68E-01 | 3,53E-03 | 2,00E-02 | 4,33E-04 | 9,20E-06 | 7,86E-04 | 3,64E-06 | 1,93E-01 |
| | 87,15% | 1,83% | 10,38% | 0,22% | 0,00% | 0,41% | 0,00% | 100,00% |
| static start-up | 1,36E-03 | 6,20E-02 | 2,60E-02 | 1,21E-01 | 1,27E+00 | 1,26E-02 | 1,40E+01 | 1,55E+01 |
| | 0,01% | 0,40% | 0,17% | 0,78% | 8,21% | 0,08% | 90,35% | 100,00% |
| Riding scenario | 6,50E-04 | 1,70E-01 | 9,65E-03 | 4,24E-01 | 5,37E-01 | 2,40E-02 | 9,10E-02 | 1,26E+00 |
| | 0,05% | 13,53% | 0,77% | 33,75% | 42,74% | 1,91% | 7,24% | 100,00% |
| model_4 | | | | | | | | |
| horizontal impact | 4,77E-01 | 1,00E-02 | 8,40E-02 | 3,76E-03 | 1,45E-04 | 1,94E-03 | 6,75E-06 | 5,77E-01 |
| | 82,69% | 1,73% | 14,56% | 0,65% | 0,03% | 0,34% | 0,00% | 100,00% |
| static start-up | 4,15E-03 | 2,16E-01 | 9,00E-02 | 8,10E-02 | 7,83E-01 | 1,50E-01 | 8,36E+00 | 9,68E+00 |
| | 0,04% | 2,23% | 0,93% | 0,84% | 8,09% | 1,55% | 86,33% | 100,00% |
| Riding scenario | 1,36E-03 | 1,89E-01 | 4,68E-02 | 4,56E-01 | 5,07E-01 | 9,20E-02 | 8,50E-02 | 1,38E+00 |
| | 0,10% | 13,72% | 3,40% | 33,11% | 36,81% | 6,68% | 6,17% | 100,00% |
| model_5 | | | | | | | | |
| horizontal impact | 4,68E-01 | 1,00E-02 | 8,20E-02 | 9,00E-03 | 1,58E-04 | 1,40E-03 | 6,13E-04 | 5,71E-01 |
| | 81,94% | 1,75% | 14,36% | 1,58% | 0,03% | 0,25% | 0,11% | 100,00% |
| static start-up | 4,29E-03 | 2,13E-01 | 5,55E-02 | 9,80E-02 | 7,22E-01 | 1,03E-01 | 7,86E+00 | 9,06E+00 |
| | 0,05% | 2,35% | 0,61% | 1,08% | 7,97% | 1,14% | 86,80% | 100,00% |
| Riding scenario | 1,70E-03 | 1,73E-01 | 9,00E-02 | 5,07E-01 | 4,81E-01 | 1,22E-01 | 8,50E-02 | 1,46E+00 |
| | 0,12% | 11,85% | 6,17% | 34,73% | 32,95% | 8,36% | 5,82% | 100,00% |
| model_6 | | | | | | | | |
| horizontal impact | 4,47E-01 | 1,50E-02 | 6,15E-02 | 3,52E-04 | 1,70E-04 | 1,07E-03 | 1,00E-05 | 5,25E-01 |
| | 85,13% | 2,86% | 11,71% | 0,07% | 0,03% | 0,20% | 0,00% | 100,00% |
| static start-up | 4,36E-03 | 2,20E-01 | 4,80E-02 | 2,90E-02 | 1,96E+00 | 4,51E-01 | 7,97E+00 | 1,07E+01 |
| | 0,04% | 2,06% | 0,45% | 0,27% | 18,32% | 4,22% | 74,64% | 100,00% |
| Riding scenario | 2,95E-03 | 3,13E-01 | 1,48E-01 | 4,66E-01 | 9,95E-01 | 2,80E-01 | 7,10E-02 | 2,28E+00 |

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ζωή Διονύση, Υπεύθυνος: Καθηγητής Δ.Ε. Μανωλάκος
 "Μοντελοποίηση και Στατικός Έλεγχος Σκελετών Ποδηλάτου"

| | | | | | | | | |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| model_7 (monostay) | | | | | | | | |
| horizontal impact | 5,34E-01 | 1,40E-02 | 8,30E-02 | 4,50E-03 | 3,20E-04 | 1,23E-02 | 8,53E-06 | 6,48E-01 |
| | 82,39% | 2,16% | 12,81% | 0,69% | 0,05% | 1,90% | 0,00% | 100,00% |
| static start-up | 8,95E-05 | 3,00E-03 | 5,00E-04 | 3,50E-03 | 4,50E-02 | 8,40E-04 | 0,137 | 1,90E-01 |
| | 0,05% | 1,58% | 0,26% | 1,84% | 23,69% | 0,44% | 72,13% | 100,00% |
| Riding scenario | 1,93E-03 | 0,158 | 1,11E-01 | 6,25E-01 | 2,52E-01 | 2,00E-01 | 8,70E-02 | 1,43E+00 |
| | 0,13% | 11,01% | 7,74% | 43,56% | 17,56% | 13,94% | 6,06% | 100,00% |
| Out of Plane Load H | 1,00E-01 | 1,5 | 1,43E+00 | 2,10E-02 | 1,50E-04 | 6,00E-03 | 2,24E-02 | 3,08E+00 |
| | 3,25% | 48,74% | 46,40% | 0,68% | 0,00% | 0,19% | 0,73% | 100,00% |
| Out of Plane Load E | 1,10E-09 | 5,50E-04 | 1,35E-06 | 2,65E-03 | 5,54E-02 | 2,33E-04 | 5,30E-03 | 6,41E-02 |
| | 0,00% | 0,86% | 0,00% | 4,13% | 86,38% | 0,36% | 8,26% | 100,00% |
| model_7 (dual seatstays) | | | | | | | | |
| horizontal impact | 4,73E-01 | 1,20E-02 | 8,50E-02 | 5,90E-03 | 2,50E-04 | 2,40E-04 | 1,06E-05 | 5,76E-01 |
| | 82,06% | 2,08% | 14,75% | 1,02% | 0,04% | 0,04% | 0,00% | 100,00% |
| static start-up | 7,37E-05 | 2,95E-03 | 4,64E-04 | 3,50E-03 | 4,20E-02 | 8,50E-04 | 0,136 | 1,86E-01 |
| | 0,04% | 1,59% | 0,25% | 1,88% | 22,60% | 0,46% | 73,18% | 100,00% |
| Riding scenario | 5,68E-01 | 3,2 | 3,54E+00 | 5,70E-01 | 4,90E-01 | 2,57E-01 | 8,00E-02 | 8,70E+00 |
| | 6,53% | 36,76% | 40,67% | 6,55% | 5,63% | 2,95% | 0,92% | 100,00% |
| Out of Plane Load H | 2,10E-01 | 3,02 | 2,96E+00 | 2,00E-02 | 3,75E-04 | 4,14E-04 | 4,30E-02 | 6,25E+00 |
| | 3,36% | 48,29% | 47,33% | 0,32% | 0,01% | 0,01% | 0,69% | 100,00% |
| Out of Plane Load E | 2,45E-07 | 5,82E-04 | 1,78E-06 | 2,18E-02 | 1,46E-01 | 7,58E-04 | 5,50E-03 | 1,75E-01 |
| | 0,00% | 0,33% | 0,00% | 12,50% | 83,59% | 0,43% | 3,15% | 100,00% |
| model_7 (optimized model) | | | | | | | | |
| horizontal impact | 1,41E-01 | 4,59E-03 | 1,50E-02 | 6,00E-04 | 3,30E-05 | 1,80E-04 | 8,00E-08 | 1,61E-01 |
| | 87,36% | 2,84% | 9,29% | 0,37% | 0,02% | 0,11% | 0,00% | 100,00% |
| static start-up | 1,00E-04 | 2,82E-03 | 5,27E-02 | 8,52E-04 | 4,25E-02 | 4,95E-02 | 0,049 | 1,97E-01 |
| | 0,05% | 1,43% | 26,69% | 0,43% | 21,52% | 25,07% | 24,81% | 100,00% |
| Riding scenario | 1,23E-03 | 0,155 | 7,60E-02 | 6,23E-01 | 6,60E-01 | 1,10E-01 | 0,06 | 1,69E+00 |
| | 0,07% | 9,20% | 4,51% | 36,97% | 39,16% | 6,53% | 3,56% | 100,00% |
| Out of Plane Load H | 1,42E-01 | 3,17 | 2,93E+00 | 4,00E-02 | 5,00E-04 | 4,52E-04 | 2,90E-02 | 6,31E+00 |
| | 2,25% | 50,22% | 46,42% | 0,63% | 0,01% | 0,01% | 0,46% | 100,00% |
| Out of Plane Load E | 1,60E-07 | 6,38E-04 | 1,78E-06 | 2,52E-03 | 3,85E-02 | 8,90E-04 | 2,83E-03 | 4,54E-02 |
| | 0,00% | 1,41% | 0,00% | 5,56% | 84,83% | 1,96% | 6,24% | 100,00% |
| model_7 (complex geometry) | | | | | | | | |
| horizontal impact | 3,40E-02 | 3,40E-03 | 6,90E-03 | 3,50E-04 | 1,00E-04 | 3,99E-05 | 3,70E-05 | 4,48E-02 |
| | 75,85% | 7,58% | 15,39% | 0,78% | 0,22% | 0,09% | 0,08% | 100,00% |
| static start-up | 4,00E-03 | 1,20E-02 | 4,10E-03 | 1,09E-02 | 2,43E-01 | 3,17E-02 | 0,122 | 4,27E-01 |
| | 0,94% | 2,81% | 0,96% | 2,56% | 56,76% | 7,42% | 28,56% | 100,00% |
| Riding scenario | 1,50E-03 | 0,608 | 2,60E-02 | 4,96E-01 | 9,43E+00 | 6,54E+00 | 0,573 | 1,77E+01 |