



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Σχεδιασμός εναέριου μεταφορέα φορτίων

ΜΑΡΙΟΣ ΚΟΣΚΙΝΑΣ

ΑΜ:45882

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΤΣΟΛΑΚΗΣ

Αθήνα , Ιούλιος '21

ΥΠΟΓΡΑΦΕΣ ΜΕΛΩΝ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

ΤΣΟΛΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΡΑΠΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΜΥΛΩΝΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η **ΜΑΡΙΟΣ ΚΟΣΚΙΝΑΣ**

.....
του...**ΣΠΥΡΙΔΩΝΟΣ**....., με αριθμό
μητρώου**45882**..... φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου
Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών,
δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία
είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην
εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή
λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη
αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό,
συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το
διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα
αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και
του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την
ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα
ΜΑΡΙΟΣ ΚΟΣΚΙΝΑΣ



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όσους συνέβαλαν να ολοκληρωθεί η διπλωματική μου εργασία και στάθηκαν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Συγκεκριμένα , ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου , κύριο Τσολάκη Αντώνιο για την εμπιστοσύνη και τη βοήθεια του ,καθώς επίσης και τον διδακτορικό φοιτητή του ΠΑ.ΔΑ , κύριο Παπαλέξη Χρήστο.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου, που μου παρείχαν τόσο υλική όσο και ψυχολογική υποστήριξη κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας είναι ο σχεδιασμός ενός εναέριου μεταφορέα φορτίων. Το σύστημα που γίνονται οι υπολογισμοί αποτελείται από δύο πυλώνες, ένα ακίνητο συρματόσχοινο και ένα φορείο που φέρει κινητήρια διάταξη.

Στην εργασία παρατίθεται αρχικά ο υπολογισμός της μορφής του φορτισμένου καλωδίου και των αναπτυσσόμενων δυνάμεων που μεταφέρονται στους πυλώνες στήριξης. Έπειτα, γίνεται επιλογή της βέλτιστης- για τα δεδομένα – γεωμετρίας της στήριξης του συρματόσχοινου στο έδαφος.

Το κυρίως σώμα της εργασίας, επικεντρώνεται στον σχεδιασμό των πυλώνων και στην στατική ανάλυση τους, μέσω πεπερασμένων στοιχείων. Μεγάλη έμφαση έχει δοθεί στο να επιτευχθεί χαμηλό βάρος στα επιμέρους στοιχεία της κατασκευής και η συναρμολόγηση τους να είναι εύκολη.

Τέλος, μελετήθηκε η αγκύρωση του πυλώνα στο έδαφος και επιλέχθηκε συγκεκριμένος τύπος αγκυρίων από σχετικά τεχνικά φυλλάδια.

ABSTRACT

The aim of this thesis is the design of Cargo Cable Trolley System. The system investigated consists of two pillars, one immobile wire ropeway and a car that houses the primal mover.

Initially, the load applied on the wire and how that is transferred to the supporting pillars is studied. In addition, the optimal technique for the connection of the wire to the ground is considered.

The main body of this work focuses on the design of the pillars and their static strength analysis through the use of Finite Element Analysis (FEA). Great attention is given to achieve a structure with low weight and which is easy to assemble.

Finally, the method of supporting the pillars is studied and a suitable type of foundation is opted based on available catalogues of manufacturers.

Περιεχόμενα

2.Εισαγωγή	1
2.1 Γενικά.....	1
2.2 Ιστορική Εξέλιξη.....	1
2.3 Είδη εναέριων μεταφορέων.....	3
2.4 Είδος Μεταφορέα Διπλωματικής Εργασίας.....	6
2.5 Τεχνικά Χαρακτηριστικά.....	6
3.Υπολογισμός Δυνάμεων.....	7
3.1 Υπολογισμός της μορφής του φορτισμένου καλωδίου και των αναπτυσσόμενων δυνάμεων.....	7
3.2 Αποτελέσματα.....	8
3.3 Υπολογισμός δυνάμεων στους πυλώνες για το επίπεδο x-y.....	10
3.4 Υπολογισμών πλευρικών δυνάμεων κατά τη διεύθυνση z.....	13
4.Σχεδιασμός Πυλώνα.....	15
4.1 Αρχική προσέγγιση	15
4.2 Επιλογή γωνίας Φ , στήριξης καλωδίου και περιεχόμενης γωνίας Φ_L	16
4.3 Πρώτος σχεδιασμός.....	22
4.4 Δεύτερος Σχεδιασμός.....	23
4.5 Τρίτος – Τελικός Σχεδιασμός.....	26
5.Αγκύρωση στο έδαφος.....	30
5.1 Υπολογισμός δυνάμεων στα αγκύρια.....	30
5.2 Επιλογή αγκυρίων	32
6.Συμπεράσματα.....	34
8.Βιβλιογραφία.....	35
8.1 Κατάλογος Εικόνων	36
7.Παράρτημα.....	38
7.1 Δισδιάστατα Σχέδια Επιμέρους Στοιχείων.....	38
7.2 Οι τιμές κρίσιμων μεγεθών για ορισμένες θέσεις του φορτίου στο καλώδιο.....	46

2.Εισαγωγή

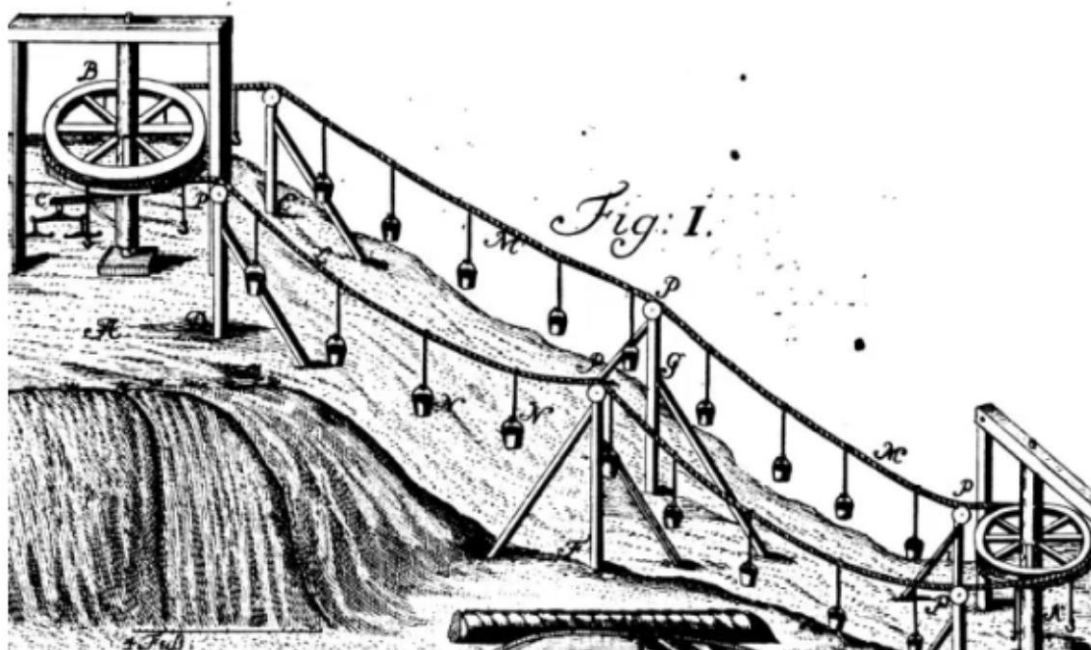
2.1 Γενικά

Ο εναέριος μεταφορέας φορτίων είναι ένα σύστημα μεταφοράς του οποίου η βασική αρχή λειτουργίας, είναι ένα φορείο το οποίο συγκρατείται και κινείται σε διάταξη συρματοσχοινών ανάμεσα σε πυλώνες.

Η συνηθέστερη ονομασία τους είναι ‘Τελεφερίκ’ και προέρχεται από την γαλλική λέξη *telepherique*. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε βουνά , όπου η δημιουργία οδικού δικτύου σε βραχώδη εδάφη και τέτοιας κλίσης είναι δύσκολη. Επίσης χρησιμοποιούνται για να διασχίσουν ποτάμια και χαράδρες. Τα τελευταία χρόνια όμως έχουν εμφανιστεί και σε αστικές περιοχές[1][2].

2.2 Ιστορική Εξέλιξη

Ο πρώτη μορφή εναέριου μεταφορέα που βοήθησε τον άνθρωπο για πρώτη φορά να μεταφέρει μεγάλα φορτία σε μεγάλα ύψη και δύσβατα μέρη εφευρέθηκε από τον Adam Wybe το 1644 στο Γκντανσκ της Πολωνίας[3] και χρησιμοποιούταν για να μεταφέρει λάσπη σε αμυντικά έργα.(Εικόνα 1)



Mechanism of the Wybe's cable car presented in »Theatrum machinarum hydrotechnicarum« by Jacon Leupold, 1724. Source: Google Books

Εικόνα 1 . Μηχανισμός του Wybe για τον εναέριο μεταφορέα

Γρήγορα, η απλή αυτή ιδέα , ξεκινώντας από συμβατικά σχοινιά , ξύλινους πυλώνες και 4 άλογα να τραβούν τα βαγόνια-καλάθια εξελίχθηκε μαζί με την βιομηχανική επανάσταση και συρματοσχοίνα και ατμομηχανές .

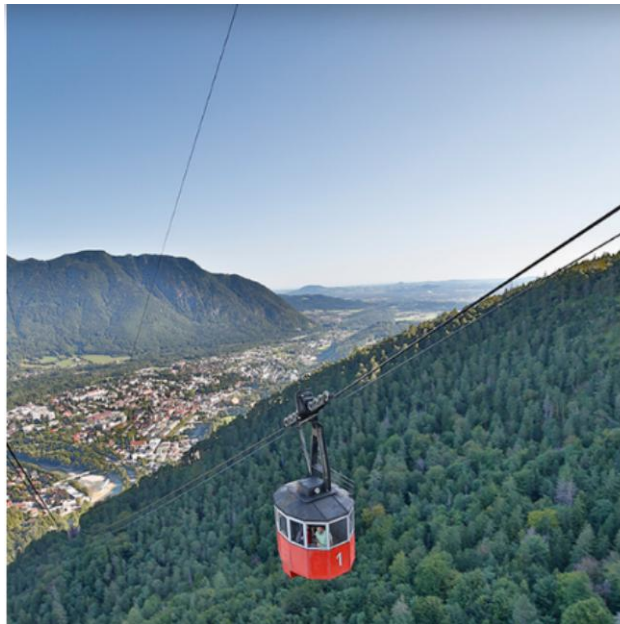
Έχουμε ακόμη δύο ακόμη πρώιμες κατασκευές που κατέγραψε η ιστορία.

Η πρώτη είναι το Whirlpool Aero car ή Spanish Aero car(Εικόνα2) του ισπανού μηχανικού Leonardo Torres Quevedo το 1916 στους καταρράκτες του Νιαγάρα στο Οντάριο του Καναδά. Χρησιμοποιούνται μεταλλικά συρματόσχοινα και ένα ηλεκτρικό μοτέρ 50 ίππων το οποίο κινεί το βαγόνι με 7 km/h. Ένας εφεδρικός πετρελαιοκινητήρας συνόδευε την κατασκευή[5].



Εικόνα 2 . Whirlpool Aero car ή Spanish Aero car

Η δεύτερη άξια αναφοράς κατασκευή είναι το Predigtstuhl Cable Car (Εικόνα 3) που ξεκίνησε το 1928 στο Μόναχο της Γερμανίας και μεταφέρει επιβάτες έως και σήμερα. Η διαφορά ύψους των πυλώνων ήταν 1410 μ , και η ισχύς ήταν στους 150 ίππους.



Εικόνα 3. Το Predigtstuhl Cable Car

Σήμερα μελέτες έχουν δείξει[4] πως το μέλλον των εναέριων μεταφορέων είναι στις πόλεις, μιας και έχουν το μικρότερη κατανάλωση ενέργειας ανά επιβάτη.(Εικόνα 4)

Table 1. Specific energy consumption of selected public transport modes (source: Fickert, 2017)

Vehicle	kwh (passenger-kilometers)	kwh / passenger
Bus (LPG)	0,1 – 0,15	1,23
Metro	0,02 – 0,05	0,74
Tram	0,07 – 0,08	0,40
Cable Car	0,11	0,29

Εικόνα 4. Πίνακας κατανομής κατανάλωσης ενέργειας ανά άτομο ανά όχημα

Με την πάροδο των χρόνων, καταλήξαμε στις εξής υποκατηγορίες μεταφορέων.

2.3 Είδη εναέριων μεταφορέων

- 1) **Cable car- Aerial tramway** (Εικόνα 5). Χρησιμοποιούνται ένα ή παραπάνω συρματόσχοινα που παρέχουν στήριξη ενώ ένα κινούμενο συρματόσχοινο τροφοδοτούμενο από ηλεκτρικό κινητήρα παρέχει την κίνηση. Είναι ιδανικά για ακραία εδάφη μεγάλων κλίσεων. Οι πυλώνες μπορούν να έχουν μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους σε σχέση με άλλα είδη. Επίσης παρέχουν καλή ευστάθεια απέναντι στους ανέμους.[2]



Εικόνα 5. Cable Car της εταιρείας Leitner

- 2) **Gondola lift** (Εικόνα 6). Αποτελείται από ένα συνεχώς κινούμενο συρματόσχοινο το οποίο είναι συνδεδεμένο με δύο ή περισσότερους σταθμούς. Το συρματόσχοινο παίρνει κίνηση από μια μεγάλη τροχαλία που βρίσκεται σε έναν σταθμό η οποία με τη σειρά της κινείται από ένα ηλεκτρικό μοτέρ. Το βαγόνι φέρει ένα βραχίονα που συνδέεται με το συρματόσχοινο. Η σύνδεση με το συρματόσχοινο μπορεί να διακόπτεται κατά την άφιξη στο σταθμό για την εύκολη επιβίβαση και στη συνέχεια να υπάρχει ξανά εμπλοκή με το κινούμενο συρματόσχοινο.[2][1]

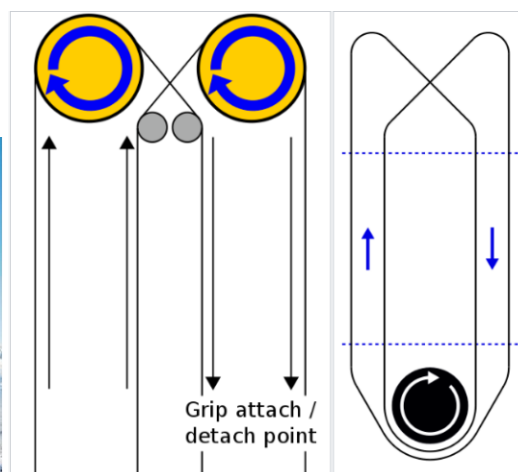


Εικόνα 6. Gondola lift της εταιρείας Doppelmayr

- 3) **Funitel** (Εικόνα 7) Διαφέρει από την κλασική gondola διότι χρησιμοποιεί δύο βραχίονες για την σύνδεση του βαγονιού με τα συρματόσχοινα, παρέχοντας μεγαλύτερη σταθερότητα σε δυνατούς ανέμους. Εδώ τα κινούμενα συρματόσχοινα είναι αναγκαστικά δύο τα οποία πρέπει να είναι συγχρονισμένα. Αυτό επιτυγχάνεται με την έξης διάταξη (Εικόνα 8).[2]



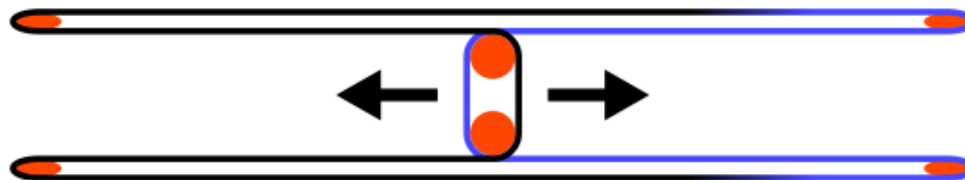
Εικόνα 7. Funitel της εταιρείας Doppelmayr



Εικόνα 8. Διάταξη Funitel

- 4) **Funifor**(Εικόνα 9). Είναι ένα είδος μεταφορέα το οποίο έχει δύο συρματόσχοινα στήριξης και ένα κίνησης. Και λειτουργεί όπως φαίνεται στο σχεδιάγραμμα παρακάτω. Το πλεονέκτημα του είναι ότι λόγω μεγάλης οριζόντιας απόστασης που

μπορεί να επιτευχθεί στα δυο επιμέρους συρματόσχοινα στήριξης , επιτυγχάνεται αυξημένη σταθερότητα.



Εικόνα 9 . Μηχανισμός Funitel

- 5) **Chairlift** (Εικόνα 10). Σε αυτή τη περίπτωση έχουμε ένα μονίμως κινούμενο συρματόσχοινο σε κλειστό βρόγχο. Το συρματόσχοινο ουσιαστικά σχηματίζει ένα κύκλο ο οποίος βρίσκεται μόνιμα σε αργή κίνηση ώστε οι επιβάτες να επιβιβάζονται καθώς το βαγόνι κινείται . Συνήθως το βρίσκουμε σε χιονοδρομικά κέντρα. [2])



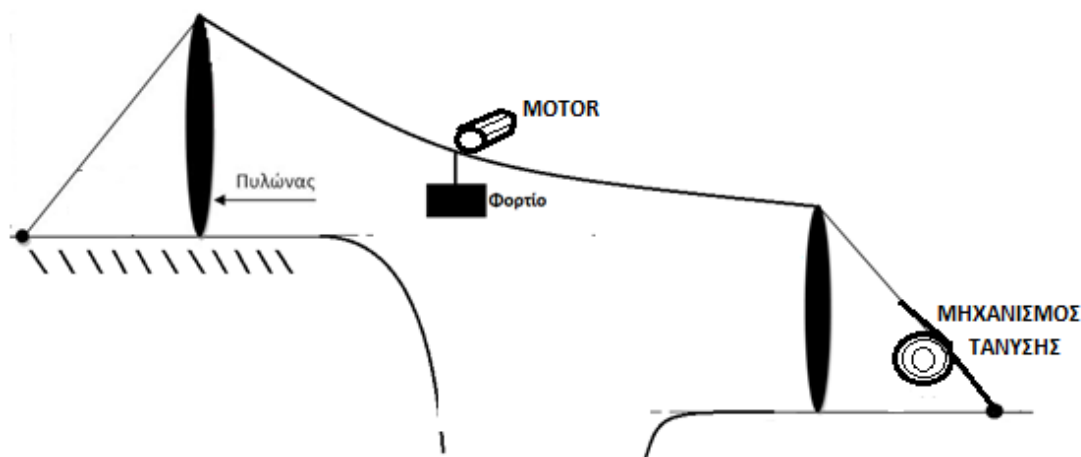
Εικόνα 10. Chairlift της εταιρείας Doppelmayr

- 6) **Hybrid lifts** . Οι λεγόμενοι υβριδικοί μεταφορείς είναι διατάξεις που χρησιμοποιούν συνδυασμούς από τις παραπάνω τεχνολογίες ανάλογα τις απαιτήσεις του εκάστοτε έργου.[2])

2.4 Είδος Μεταφορά Διπλωματικής Εργασίας

Στη συγκεκριμένη εργασία θα ασχοληθούμε με μια διάταξη η οποία περιλαμβάνει(Εικόνα 11):

- δυο πυλώνες
- ένα σταθερό συρματόσχοινο
- ένα φορείο που κυλά πάνω στο συρματόσχοινο χρησιμοποιώντας μια διάταξη τροχαλιών οι οποίες παίρνουν κίνηση από μοτέρ και δια της τριβής ανάμεσα στις τροχαλίες και το συρματόσχοινο το φορείο αναρριχάται ή καταρριχάται.
- Μηχανισμό τάνυσης του συρματόσχοινου με ένδειξη τάσης



Εικόνα 11. Σκαρίφημα διάταξης διπλωματικής εργασίας

2.5 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Για τον σχεδιασμό είναι απαραίτητο να ορίσουμε μερικά βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά .

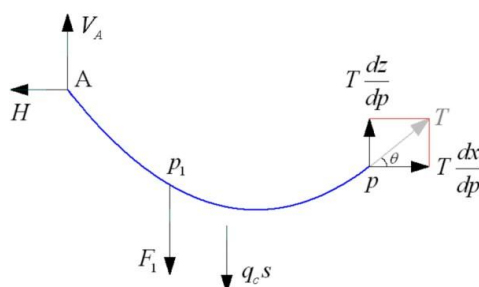
- Μέγιστο μήκος μεταξύ των πυλώνων = 300 m
- Μέγιστο βάρος φορτίου = 300 kg
- Μέγιστο ύψος πυλώνων = 3 m
- Λειτουργία σε άνεμο έως 9 Β (90 km/h)

Επίσης , θα δοθεί έμφαση να γίνει η κατασκευή όσο δυνατόν ελαφρύτερη ώστε να μεταφέρονται τα επιμέρους στοιχεία από πεζούς ενήλικες. Ακόμη ,η συναρμολόγηση και η ρύθμιση θα πρέπει να είναι εύκολη ώστε να μπορούν άτομα χωρίς ιδιαίτερες τεχνικές γνώσεις να την φέρουν εις πέρας.

3.Υπολογισμός Δυνάμεων

3.1 Υπολογισμός της μορφής του φορτισμένου καλωδίου και των αναπτυσσόμενων δυνάμεων

Υπολογισμός της μορφής του φορτισμένου καλωδίου και των αναπτυσσόμενων δυνάμεων:



Εικόνα 12. Οι δυνάμεις σε τμήμα του καλωδίου . Το μήκος του παραμορφωμένου τμήματος είναι p και το ίδιο βάρος του $q_c s$.

Εάν q_c το ίδιο βάρος του καλωδίου ανά μονάδα μήκους του και F_1 το κάθετο φορτίο που ασκείται στο καλώδιο στην θέση s_1 του αρχικού - απαραμόρφωτου μήκους (L_0), προκύπτει σύμφωνα με την θεωρία του **Papini**[6] ότι οι συντεταγμένες (x, z) της παραμορφωμένης μορφής του δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις

$$x = f_x(s) = x_A + \frac{H}{EA_0} s + \frac{H}{q_c} \left(\sinh^{-1} \left(\frac{q_c s - V_A}{H} \right) - \sinh^{-1} \left(-\frac{V_A}{H} \right) \right), \quad 0 \leq s \leq s_1,$$

$$x = f_x(s) = x_A + \frac{H}{EA_0} s + \frac{H}{q_c} \left(\sinh^{-1} \left(\frac{q_c s - V_A + F_1}{H} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{q_c s_1 - V_A + F_1}{H} \right) \right) + \frac{H}{q_c} \left(\sinh^{-1} \left(\frac{q_c s_1 - V_A}{H} \right) - \sinh^{-1} \left(-\frac{V_A}{H} \right) \right), \quad s_1 \leq s \leq L_0.$$

$$z = f_z(s) = z_A + \frac{1}{EA_0} \left(\frac{q_c}{2} s^2 - V_A s \right) + \frac{1}{q_c} \left(\sqrt{H^2 + (q_c s - V_A)^2} - \sqrt{H^2 + V_A^2} \right), \quad 0 \leq s \leq s_1,$$

$$z = f_z(s) = z_A + \frac{1}{EA_0} \left(\frac{q_c}{2} s^2 - V_A s + F_1 s - F_1 s_1 \right) + \frac{1}{q_c} \left(\sqrt{H^2 + (q_c s - V_A + F_1)^2} - \sqrt{H^2 + (q_c s_1 - V_A + F_1)^2} \right) + \frac{1}{q_c} \left(\sqrt{H^2 + (q_c s_1 - V_A)^2} - \sqrt{H^2 + V_A^2} \right), \quad s_1 \leq s \leq L_0.$$

Όπου θεωρούμε ότι (x_A, z_A) και (x_B, z_B) οι συντεταγμένες των στηρίξεων, ενώ E και A_0 συμβολίζουν το μέτρο ελαστικότητας και η αρχική διατομή του καλωδίου. Να σημειωθεί ότι οι σταθερές H και V_A , που εκφράζουν την οριζόντια και κατακόρυφη δύναμη στην

στήριξη αντίστοιχα, μπορούν να βρεθούν λύνοντας αριθμητικά το παραπάνω σύστημα για: $s=L_0$, $x=xB$, $z=zB$.

3.2 Αποτελέσματα

Στην συνέχεια παρατίθενται αποτελέσματα για καλώδιο με χαρακτηριστικά:

$$\text{Διάμετρος} = 19 \text{ mm}$$

$$\text{Μέτρο Ελαστικότητας} = 206 \text{ GPa}$$

$$\text{Ίδιον βάρος} = 1.92 \text{ kg/m}$$

Το οποίο τοποθετείται σε στηρίξεις με (x,z) συντεταγμένες:

$$(xA, zA) = (0,0)$$

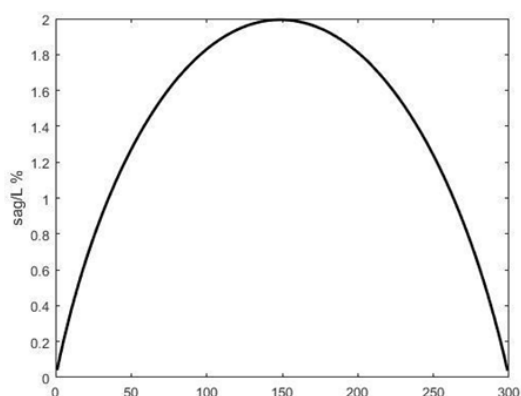
$$(xB, zB) = (300\cos(\tan^{-1}(0.4)), 300\sin(\tan^{-1}(0.4)))$$

Πριν προχωρήσουμε στην παράθεση των αποτελεσμάτων πρέπει να σημειωθεί ότι για την εξαγωγή αυτών πριν από κάθε προσομοίωση θεωρούμε ένα ορισμένο αρχικό μήκος καλωδίου (L_0) μεταξύ των στηρίξεων το ίδιο για όλη την διαδρομή του φορτίου.

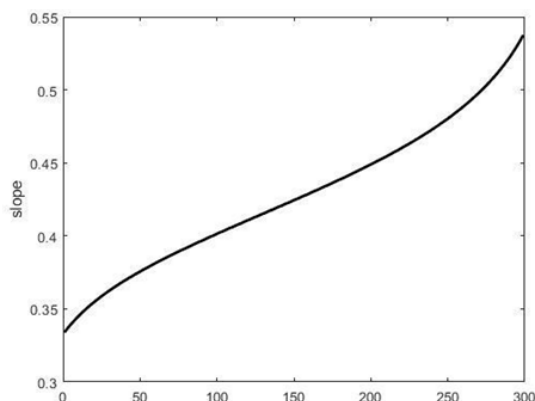
Με άλλα λόγια κατά την κίνηση του φορτίου θεωρούμε ότι δεν ξετυλίγεται καθόλου καλώδιο από το τμήμα που βρίσκεται τυλιγμένο στο τύμπανο και επομένως το μέγεθος που αλλάζει με την θέση του φορτίου είναι η δύναμη προέκτασης και όχι το L_0 . Το φορτίο $F1$ είναι ίσο με 300kg.

Η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων είναι 300m. Εάν το απαραμόρφωτο μήκος του καλωδίου μεταξύ των στηρίξεων είναι και αυτό 300m έχουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Στα επόμενα διαγράμματα φαίνεται πώς μεταβάλλεται το sag και η κλίση στο φορείο καθώς αυτό κινείται από τα 0 στα 300 μέτρα:

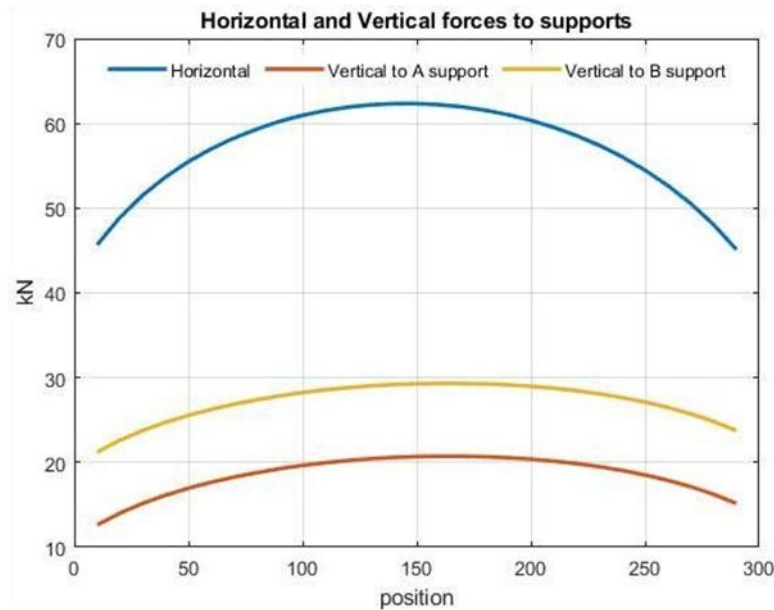


Εικόνα 13. Sag στην εκάστοτε θέση του φορείου



Εικόνα 14. Κλίση καλωδίου στην εκάστοτε θέση

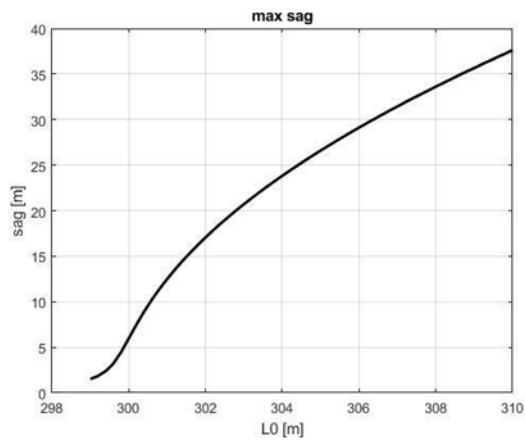
Στην συνέχεια φαίνεται πώς μεταβάλλονται οι δυνάμεις στις στηρίξεις ανάλογα με την θέση του φορείου. Οι οριζόντιες συνιστώσες των δυνάμεων στις στηρίξεις από την ισορροπία των δυνάμεων θα είναι μεταξύ τους ίσες.



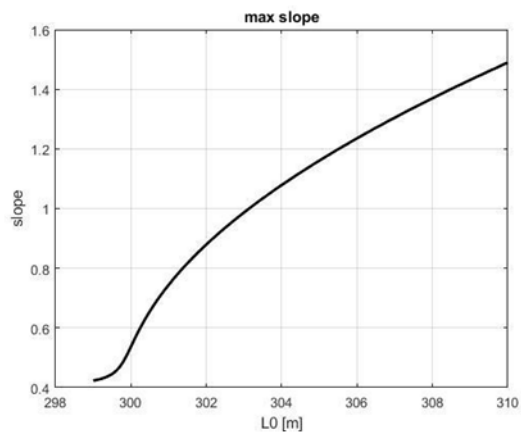
Εικόνα 15. Οι δυνάμεις στις στηρίξεις συναρτήσει της θέσης του φορτίου.

Παρατηρείται ότι τόσο το μέγιστο sag όσο και οι μέγιστες δυνάμεις στις στηρίξεις εμφανίζονται όταν το φορτίο είναι περίπου στην μέση της διαδρομής.

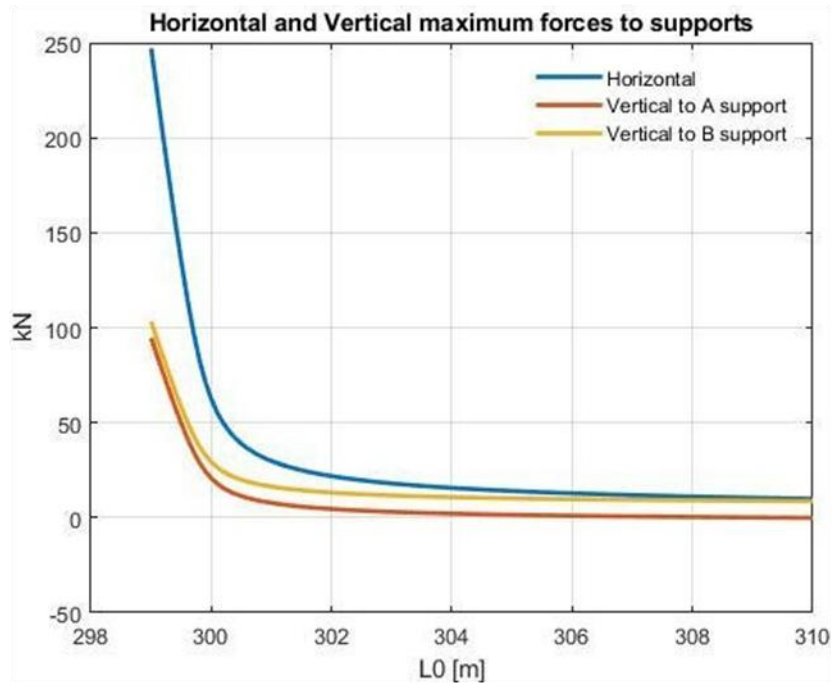
Ακολούθως ερευνούμε πώς εξελίσσονται τα παραπάνω μεγέθη συναρτήσει του αρχικού μήκους του καλωδίου L_0 που υπάρχει μεταξύ των στηρίξεων.



Εικόνα 16. Μέγιστο εμφανιζόμενο sag σε σχέση με το επιλεγμένο αρχικό μήκος καλωδίου



Εικόνα 17. Μέγιστη εμφανιζόμενη κλίση στο φορτίο σε σχέση με το επιλεγμένο αρχικό μήκος



Εικόνα 18. Μέγιστες εμφανιζόμενες δυνάμεις στις στηρίξεις σε σχέση με το επιλεγμένο αρχικό μήκος καλωδίου

Με την επιλογή μικρότερου αρχικού μήκους παρατηρείται και ραγδαία μείωση στο sag και στην κλίση όπου είναι το φορείο. Όταν όμως φτάσουμε L_0 ίσο με 300m τότε παρατηρείται σημείο καμψής και τον μεν sag τείνει ασυμπτωτικά στο μηδέν με την μείωση του L_0 η δε μέγιστη κλίση στο φορείο τείνει ασυμπτωτικά στο 0.4, η οποία είναι και η επιλεγμένη κλίση στην τοπογραφία των στηρίξεων.

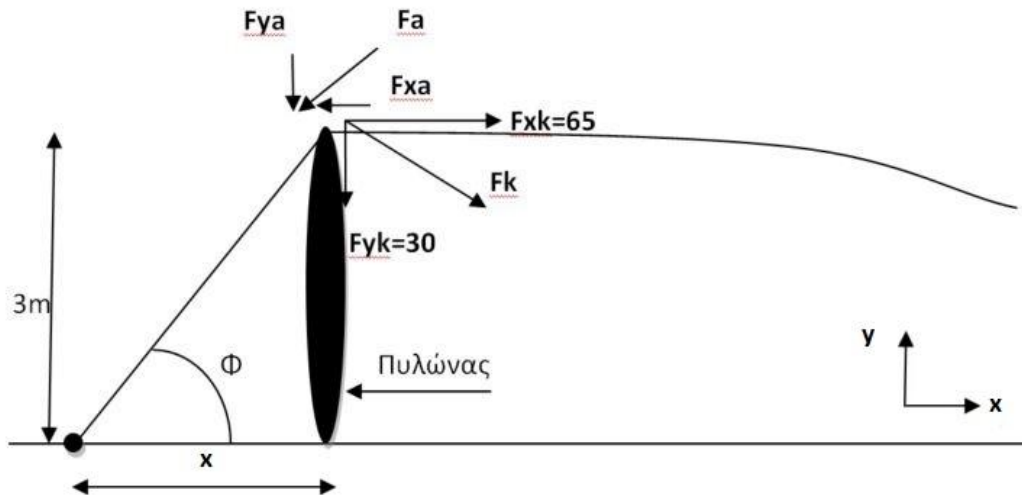
Συμπερασματικά, για το καλώδιο με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά η προτεινόμενη επιλογή αρχικού απαραμόρφωτου μήκους καλωδίου μεταξύ των στηρίξεων είναι και αυτή που παρατέθηκε ($L_0=300m$), καθώς το μέγιστο sag παραμένει μικρότερο του 2%, χωρίς να αυξάνονται υπερβολικά οι δυνάμεις (Εικόνα 18).

3.3 Υπολογισμός δυνάμεων στους πυλώνες για το επίπεδο x-y

Από τους πίνακες αποτελεσμάτων των δυνάμεων περίπου στη μέση του καλωδίου βρίσκονται οι μέγιστες δυνάμεις. Οι οριζόντιες συνιστώσες στις στηρίξεις είναι κοινές και για τους δυο πυλώνες.

Οπότε ξεκινώντας από τον **πυλώνα (No 1)** που βρίσκεται στο υψηλό επίπεδο έχουμε :

$$F_{xk} = 65 \text{ (KN)} \text{ και } F_{yk} = 30 \text{ (KN)}$$



Εικόνα 19. Σχήμα με δυνάμεις πυλώνα άνω επιπέδου

Το καλώδιο στηρίζεται στο έδαφος, οπότε με τη σειρά του δημιουργεί την δύναμη \mathbf{F}_a , η οποία είναι ίση και αντίθετη της \mathbf{F}_k .

$$F_k = \sqrt{F_{xk}^2 + F_{yk}^2} = \sqrt{65^2 + 30^2} \Rightarrow F_k = 72 \text{ (KN)}$$

Εν συνεχεία, για τον υπολογισμό των επιμέρους συνιστωσών (F_{ya}, F_{xa}) πρέπει να επιλέξουμε με ποια γωνία Φ θα στηρίζουμε το καλώδιο στο έδαφος.

Για παράδειγμα, θα υπολογίσουμε τις συνιστώσες για την περίπτωση $\Phi = 60^\circ$

Καταρχάς για το δεδομένο ύψος πυλώνα (3m) η απόσταση του σημείου στήριξης από την βάση του πυλώνα θα είναι :

$$x = \frac{3}{\tan \Phi} = \frac{3}{\tan 60} \Rightarrow x = 1.7 \text{ (m)}$$

Για τις συνιστώσες έχουμε :

$$F_{xa} = F_a \cdot \cos 60 = 72 \text{ (KN)} \cdot 0.5 \Rightarrow F_{xa} = 36 \text{ KN}$$

$$F_{ya} = F_a \cdot \sin 60 = 72 \text{ (KN)} \cdot 0.86 \Rightarrow F_{ya} = 62 \text{ KN}$$

Οπότε, για να βρούμε τις συνισταμένες που δρουν κατά τον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα στον πυλώνα, θα εξισώσουμε τις συνιστώσες των δυνάμεων του καλωδίου με εκείνες της στήριξης του στο έδαφος.

Πυλώνας No 1. : Οριζόντια : $F_{x1} = F_{xk} - F_{xa} = 65 - 36 \Rightarrow F_{x1} = 29 \text{ KN}$

Κατακόρυφα : $F_{y2} = F_{yk} + F_{ya} = 30 + 62 \Rightarrow F_{y1} = 92 \text{ KN}$

Τελικά η συνολική συνισταμένη δύναμη που δέχεται ο πυλώνας No 1, είναι :

$$F_1 = \sqrt{F_{x1}^2 + F_{y1}^2} = \sqrt{29^2 + 92^2} \Rightarrow F_1 = 97 \text{ KN}.$$

Η γωνία που σχηματίζει η F_1 με το οριζόντιο επίπεδο είναι :

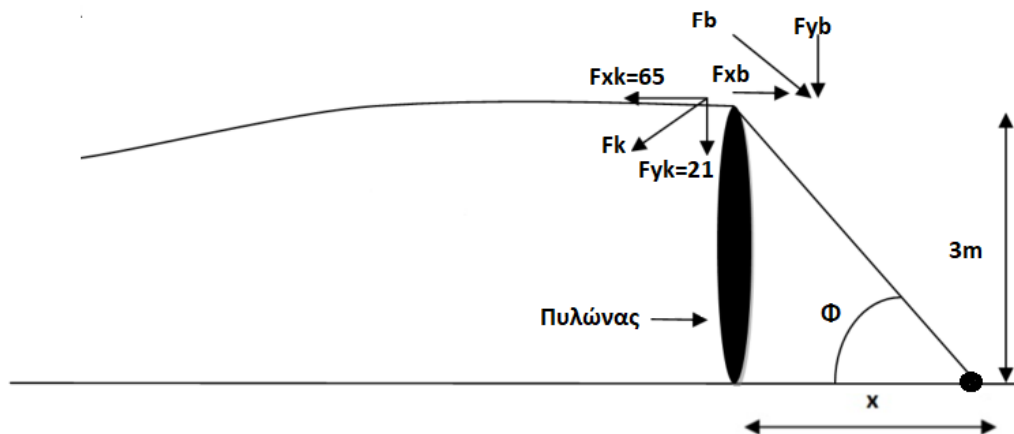
$$\tan\theta_1 = \frac{F_1}{F_{x1}} \Rightarrow \tan\theta_1 = 3,34 \Rightarrow \theta_1 = 73^\circ$$

Ακολουθώντας το ίδιο σκεπτικό υπολογισμού λαμβάνουμε τις τιμές για διάφορες γωνίες Φ .

(m)	deg	Fx1	Fy1	F1	θ_1 (deg)
3,0	45	14,09	80,91	82	80
2,5	50	18,72	85,16	87	78
2,1	55	23,70	88,98	92	76
1,7	60	29,00	92,35	97	73
1,4	65	34,57	95,25	101	71
1,1	70	40,37	97,66	106	69
0,8	75	46,37	99,55	110	67
0,5	80	52,50	100,91	114	65
0,3	85	58,72	101,73	117	63

Στον Πυλώνα Νο2, ο οποίος βρίσκεται στο χαμηλό επίπεδο οι δυνάμεις είναι :

$$F_{xk} = 65 \text{ (KN)} \text{ και } F_{yk} = 21 \text{ (KN)}$$



Εικόνα 20. Σχήμα με δυνάμεις πυλώνα κάτω επιπέδου

Ομοίως με τον πυλώνα Νο1, λαμβάνουμε τις τιμές για τον πυλώνα Νο2.

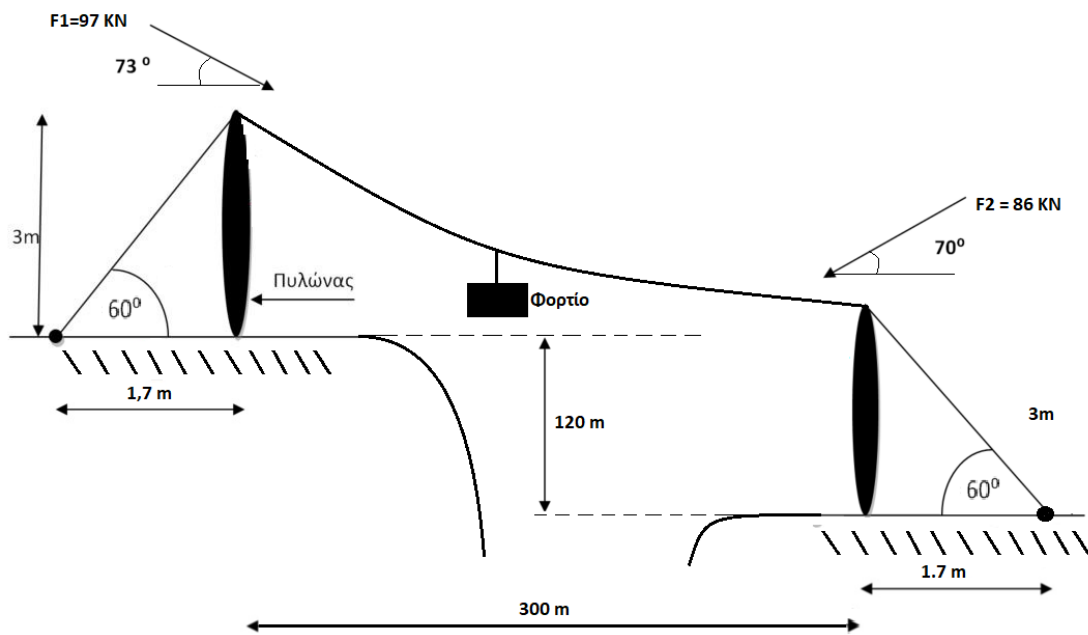
(m)	deg	Fx1	Fy1	F1	θ_1 (deg)	Fx2	Fy2	F2	θ_2 (deg)
3,0	45	14,09	80,91	82	80	16,70	69,30	71	77
2,5	50	18,72	85,16	87	78	21,09	73,33	76	75
2,1	55	23,70	88,98	92	76	25,82	76,95	81	72
1,7	60	29,00	92,35	97	73	30,85	80,16	86	70
1,4	65	34,57	95,25	101	71	36,13	82,91	90	68
1,1	70	40,37	97,66	106	69	41,64	85,19	95	66
0,8	75	46,37	99,55	110	67	47,32	86,98	99	64
0,5	80	52,50	100,91	114	65	53,14	88,27	103	63
0,3	85	58,72	101,73	117	63	59,05	89,05	107	61

Για το παράδειγμα των 60° έχουμε $F_2 = 86 \text{ KN}$ και $\theta_2 = 70^\circ$.

Συγκεντρωτικά για $\Phi = 60^\circ$ και για σταθερά τα υπόλοιπα μεγέθη στην δυσμενέστερη επιβαρυντική κατάσταση που προκαλούν στους πυλώνες, όπως βάρος φορτίου, απόσταση πυλώνων και την μεταξύ τους υψομετρική διαφορά έχουμε :

$$F_1 = 97 \text{ KN} , \theta_1 = 73^\circ$$

$$F_2 = 86 \text{ KN} , \theta_2 = 70^\circ$$



Εικόνα 21. Συγκενρωτικό σχήμα διαστάσεων και δυνάμεων της διάταξης.

Η επιλογή της γωνίας Φ θα γίνει κατά τον σχεδιασμό της γεωμετρίας των πυλώνων και ανάλογα τις τάσεις που θα προκύψουν .

3.4 Υπολογισμών πλευρικών δυνάμεων κατά τη διεύθυνση z

Για τον υπολογισμό των πλευρικών δυνάμεων θα χρειαστεί να υπολογίσουμε την δύναμη που ασκεί ο άνεμος στο φορείο, αλλά και στο καλώδιο. Ένας ακριβής υπολογισμός αυτής της δύναμης θα απαιτούσε χρήση υπολογιστικής ρευστομηχανικής (Computational fluid dynamics ,CFD) κάτι το οποίο υπερβαίνει το σκοπό και το θέμα της συγκεκριμένης μελέτης.

Για τον λόγο αυτόν, θα υπολογίσουμε την δύναμη που δέχεται το φορείο και το καλώδιο μέσω της δυναμικής αντίστασης η οποία είναι η δύναμη που αντιτίθεται στην κίνηση ενός αντικειμένου εντός κάποιου ρευστού.

Ο μαθηματικός τύπος της δυναμικής αντίστασης : $F_d = C_d \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} \cdot A$

Όπου :

C_d : συντελεστής αντίστασης (εξαρτάται από τη γεωμετρία)

ρ : πυκνότητα του ρευστού σε (kg/m^3)

V: η σχετική ταχύτητα του ρευστού σε m/s

A : η μετωπική επιφάνεια του σώματος σε m^2

Για τη δύναμη που δέχεται το καλώδιο :

$$F_{dκαλ} = C_{dκαλ} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot A_{καλ}$$

$$C_{dκαλ} = \frac{1}{2} \int_{\frac{3\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} ((1 - 4(\sin \theta)^2) \cos \theta) d\theta = \frac{5}{3}$$

$$A_{καλ} = D(m) \cdot L (m) \quad (\text{όπου } D \text{ η διάμετρος του καλωδίου και } L \text{ το μήκος του})$$

$$A_{καλ} = 0,0095 \cdot 300 \Rightarrow A_{καλ} = 2,85 \text{ m}^2.$$

$$\rho_{αέρα} = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$$

$$\text{Οπότε : } F_{dκαλ} = \frac{5}{3} \cdot 1,2 \cdot \frac{25^2}{2} \cdot 2,85 \Rightarrow \boxed{F_{dκαλ} = 1781,3 \text{ N}}$$

Για την δύναμη που δέχεται το φορείο :

$$F_{dβαγ} = C_{dβαγ} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot A_{βαγ}$$

$C_{dβαγ} = 1,05$ (Στην πιο απλή περίπτωση και συγχρόνως δυσμενέστερη που το βαγόνι είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο)

$$A_{βαγ} = 2 (m) \cdot 1(m) \Rightarrow A_{βαγ} = 2 \text{ m}^2 . \quad (2m \text{ ύψος , } 1m \text{ πλάτος })$$

$$\text{Οπότε : } F_{dβαγ} = 1,05 \cdot 1,2 \cdot \frac{25^2}{2} \cdot 2 \Rightarrow \boxed{F_{dβαγ} = 787,5 \text{ N}}$$

Η δύναμη αυτή στο βαγόνι στην πραγματικότητα δεν επιδρά αυτούσια επάνω στο συρματόσχοινο και κατ'επέκταση στους πυλώνες , διότι κατά κανόνα ένα βαγόνι σε διάταξη με μονό καλώδιο δεν είναι άκαμπτα συνδεδεμένο με το συρματόσχοινο και μπορεί να λαμβάνει κλίσεις αποσβένοντας την δύναμη χωρίς να παραμορφώνει το καλώδιο.

Ωστόσο θα την θεωρήσουμε αυτούσια, για να λάβουμε υπόψη και την ιδιαίτερη περίπτωση που το βαγόνι δεν μπορεί να λάβει κλίσεις και για να μην προσθέσουμε περιορισμούς όσο αναφορά την σχεδίαση και λειτουργία του φορείου.

Τελικά η συνολική θεωρητική δυναμική αντίσταση θα είναι :

$$F_d = F_{dκαλ} + F_{dβαγ} \Rightarrow \boxed{F_d = 2568,8 \text{ N}}$$

Σύμφωνα με τον οδηγό (Guidance of the design of cableways) που εξέδωσε η HYDROLOGY PROJECT, Technical Assistance για την κυβέρνηση της Ινδίας και της Ολλανδίας (Οκτώβριος 1998) , προτείνεται για υπολογισμό της δύναμης από αέρα ,**120 Kg / m² (IS : 5528 1969)**.

Για άμεση σύγκριση θα λάβουμε : $\frac{120(\text{kg}) \cdot 9.81 (\text{m/s}^2)}{(\text{m}^2)} = 1177 \text{ N/m}^2$.

Οπότε για το καλώδιο θα λάβουμε :

$$F_{\kappa_{\text{hp}}} = 1177(\text{N}) \cdot 2.85(\text{m}^2) \Rightarrow \boxed{F_{\kappa_{\text{hp}}} = 3355 \text{ N}}$$

Ενώ για το φορείο :

$$F_{\phi_{\text{hp}}} = 1177 (\text{N}) \cdot 2(\text{m}^2) \Rightarrow \boxed{F_{\phi_{\text{hp}}} = 2354 \text{ N}}$$

Συνολικά , έχουμε :

$$F_{\text{hp}} = F_{\kappa_{\text{hp}}} + F_{\phi_{\text{hp}}} = 3355 + 2354 \Rightarrow \boxed{F_{\text{hp}} = 5709 \text{ N}}$$

Παρατηρούμε ότι λάβαμε μεγαλύτερη δύναμη από ότι στους θεωρητικούς υπολογισμούς , επειδή στον αναφερθέντα οδηγό, συμπεριλαμβάνεται κάποιος συντελεστής ασφαλείας.

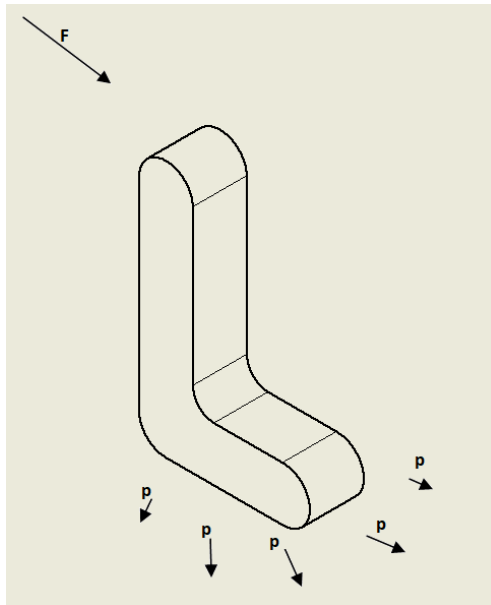
Για την συνέχεια του σχεδιασμού , θα θεωρήσουμε ως «πλευρική» δύναμη που δέχεται ο καθένας από τους δυο πυλώνες την :

$$F_z = F_{\text{hp}}/2 = 5709 /2 \Rightarrow \boxed{F_z = 2855 \text{ N}}$$

4.Σχεδιασμός Πυλώνα

4.1 Αρχική προσέγγιση

Διαισθητικά , η αρχική προσέγγιση στην σχεδίαση του πυλώνα είναι μια γεωμετρία σχήματος “L” , ώστε με το άνω σκέλος να επιτύχουμε το ζητούμενο ύψος , και με το κάτω που εφάπτεται στο έδαφος ,τη διαμοίραση του φορτίου.



Εικόνα 22. Σκαρίφημα αρχικής προσέγγισης πυλώνα

Η σχεδίαση και η στατική ανάλυση του πυλώνα θα γίνει με τη βοήθεια του **Autodesk Inventor Professional (Student Version)**.

Καταρχάς θα σχεδιάσουμε μια βασική γεωμετρία τύπου “L” ορίζοντας μόνο το απαιτούμενο ύψος και θα διενεργήσουμε κάποιες στατικές αναλύσεις (“Stress Analysis”) για να δούμε πως συμπεριφέρεται η κατασκευή.

Για να συνεχίσουμε, θα πρέπει να προσδιορίσουμε τις δυνάμεις με τις οποίες θα κάνουμε την ανάλυση, το υλικό της κατασκευής και την περιεχόμενη γωνία Φ_L του πυλώνα.

Ο δυο πυλώνες θα είναι ακριβώς ίδιοι σε όλα τα χαρακτηριστικά τους.

4.2 Επιλογή γωνίας Φ , στήριξης καλωδίου και περιεχόμενης γωνίας Φ_L

Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 3.3, κατά τον υπολογισμό των δυνάμεων στους πυλώνες η γωνία Φ , η οποία είναι η γωνία που το καλώδιο πακτώνεται στο έδαφος, προσδιορίζει το μέτρο και την διεύθυνση της συνιστάμενης δύναμης F που δρα στο πυλώνα, αλλά και την απόσταση του σημείου πάκτωσης από την βάση του.

Θα ασχοληθούμε με δύο περιπτώσεις, που αφορούν την γωνία Φ στις 45° και στις 60° .

(m)	deg	Fx1	Fy1	F1	θ_1 (deg)	Fx2	Fy2	F2	θ_2 (deg)
3.0	45	14,09	80,91	82	80	16,70	69,30	71	77
2,5	50	18,72	85,16	87	78	21,09	73,33	76	75
2,1	55	23,70	88,98	92	76	25,82	76,95	81	72
1,7	60	29,00	92,35	97	73	30,85	80,16	86	70
1,4	65	34,57	95,25	101	71	36,13	82,91	90	68
1,1	70	40,37	97,66	106	69	41,64	85,19	95	66
0,8	75	46,37	99,55	110	67	47,32	86,98	99	64
0,5	80	52,50	100,91	114	65	53,14	88,27	103	63
0,3	85	58,72	101,73	117	63	59,05	89,05	107	61

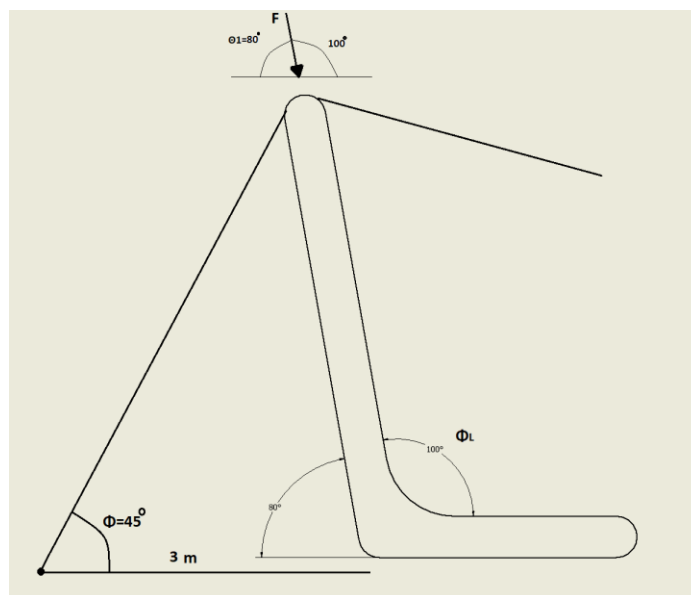
Παρατηρούμε ότι ο πυλώνας No1 (άνω επιπέδου) εμφανίζει συνολικά μεγαλύτερες δυνάμεις σε σχέση με τον No2, οπότε θα σχεδιάσουμε ένα πυλώνα, ο οποίος δεν αστοχεί στις

δυνάμεις του άνω επιπέδου και κατ' επέκταση δεν αστοχεί ούτε όταν βρίσκεται στο κάτω επίπεδο, αφού οι δυνάμεις είναι μικρότερες.

Η γωνία θ_1 που σχηματίζει η δύναμη F_1 με το οριζόντιο επίπεδο θα είναι παραπληρωματική με την γωνία Φ_L που θα επιλέξουμε ως περιεχόμενη γωνία του "L". Με αυτό τον τρόπο, επιλέγοντας η δύναμη F_1 να έχει ίδια διεύθυνση με το άνω σκέλος του "L" επιβάλλουμε στον πυλώνα μια κατάσταση θλίψης που είναι πιο επιθυμητή σε σχέση με την κάμψη.

Για γωνίες $\Phi=45^\circ$, $\Phi_L=100^\circ$ (Εικόνα 23)

Λαμβάνοντας από τον πίνακα τις απαιτούμενες τιμές έχουμε :



Εικόνα 23. Σχήμα με γωνίες $\Phi=45$ και $\Phi_L=100^\circ$

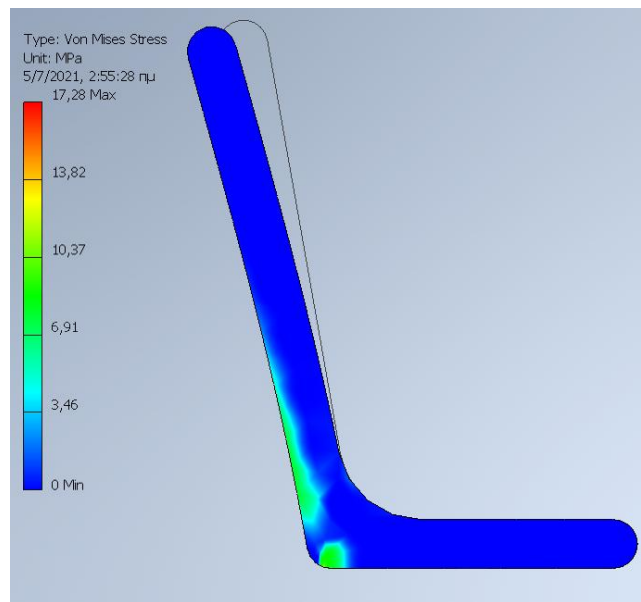
$$F_1 = 82 \text{ KN} \rightarrow \begin{cases} F_{x1} = 14.09 \text{ KN} \\ F_{y1} = 80.91 \text{ KN} \\ F_z = 0 \text{ (θα εφαρμοσθεί σε επόμενο στάδιο)} \end{cases}$$

Για να κάνουμε την Στατική Ανάλυση θα χρειαστεί ακόμη να επιλέξουμε :

Υλικό \rightarrow Mild Steel

Πάχος(Διάσταση Z) = 100 mm = 10cm (αυθαίρετο, τηρώντας ελάχιστες αναλογίες)

Αποτέλεσμα Στατικής Ανάλυσης , $\Phi = 45^\circ$, $\Phi_L = 100^\circ$.



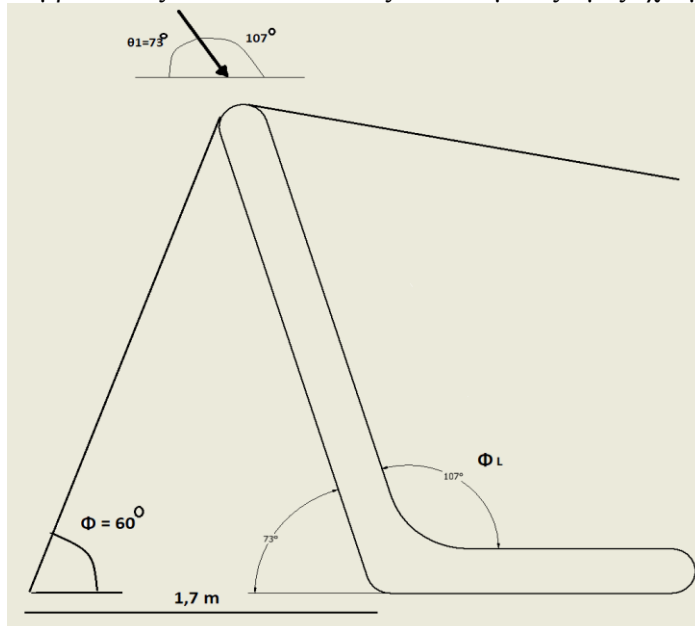
Εικόνα 24.Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης , $\Phi=45$, $\Phi_L=100$

$$\sigma_v = 17.28 \text{ MPa}$$

Δεν θα εξάγουμε μεμονωμένα συμπεράσματα από την συγκεκριμένη τιμή ακόμη, διότι έχουμε επιλέξει αυθαίρετα κάποιες παραμέτρους. Έπειτα, χωρίς να μεταβάλλουμε τις παραμέτρους , παρά μόνο το Φ και Φ_L , θα την συγκρίνουμε σχετικά με τα αποτελέσματα επόμενων αναλύσεων.

Για γωνία $\Phi= 60^\circ$ και $\Phi_L = 107^\circ$ (Εικόνα 25).

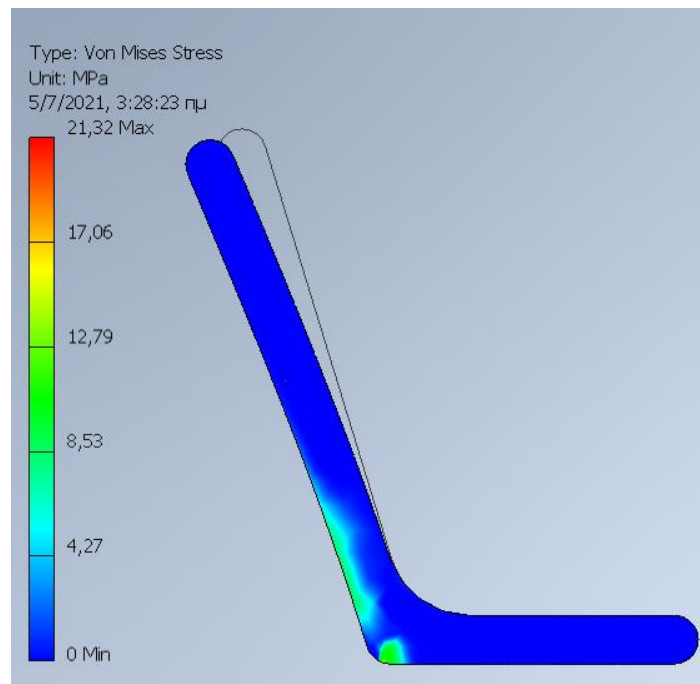
Λαμβάνοντας από τον πίνακα τις απαιτούμενες τιμές έχουμε:



Εικόνα 25.Σχήμα με γωνία $\Phi=60$ και $\Phi_L=107$

$$F1 = 97 \text{ KN} \rightarrow \begin{cases} Fx1 = 29.00 \text{ KN} \\ Fy1 = 92.35 \text{ KN} \\ Fz = 0 \end{cases}$$

Αποτέλεσμα Στατικής Ανάλυσης για $\Phi = 60^\circ$, $\Phi_L = 107^\circ$ (Εικόνα26).



Εικόνα 26. Αποτέλεσμα Στατικής Ανάλυσης για $\Phi = 60^\circ$, $\Phi_L = 107^\circ$.

$$\sigma_v = 21,32 \text{ MPa}$$

Συγκεντρωτικά :

Φ	Φ_L	F1(KN)	VMS(Mpa)
45	100	82	17,28
60	107	97	21,32

Παρατηρούμε ότι όπως ήταν λογικό με μεγαλύτερη την δύναμη F1 , λάβαμε και μεγαλύτερες τάσεις κατά Von Mises.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ενώ η F1 αυξήθηκε κατά 18% , η τάση αυξήθηκε κατά 24%.Οπότε ο ρυθμός αύξησης των τάσεων είναι μεγαλύτερος από εκείνον της αύξησης της δύναμης.

Για το λόγο αυτό θα εξετάσουμε την περίπτωση η διεύθυνση της F1 να μην συμπίπτει με εκείνη του άνω σκέλους και άρα να μην έχουμε κατά κύριο λόγο θλίψη αλλά να εμφανιστεί και μεγαλύτερη κάμψη. Μια πρώτη σκέψη είναι να συνδυάσουμε τις δυο προηγούμενες περιπτώσεις.

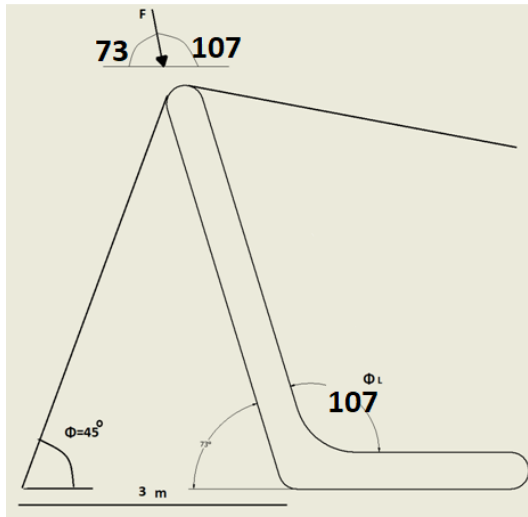
Συνδυάζοντας τις δυο περιπτώσεις :

Φ	Φ_L	F1(KN)
45	100	82
60	107	97



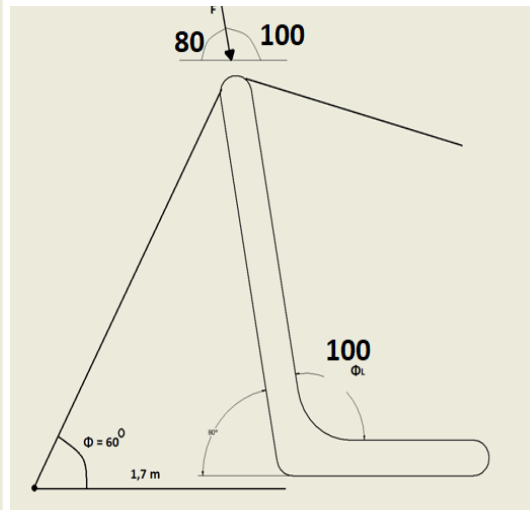
Φ	Φ_L	F1	VMS
45	107	82	...
60	100	97	...

Τα αντίστοιχα σχήματα :



Εικόνα 27. Σχήμα για $\Phi=45$ και $\Phi_L=107$

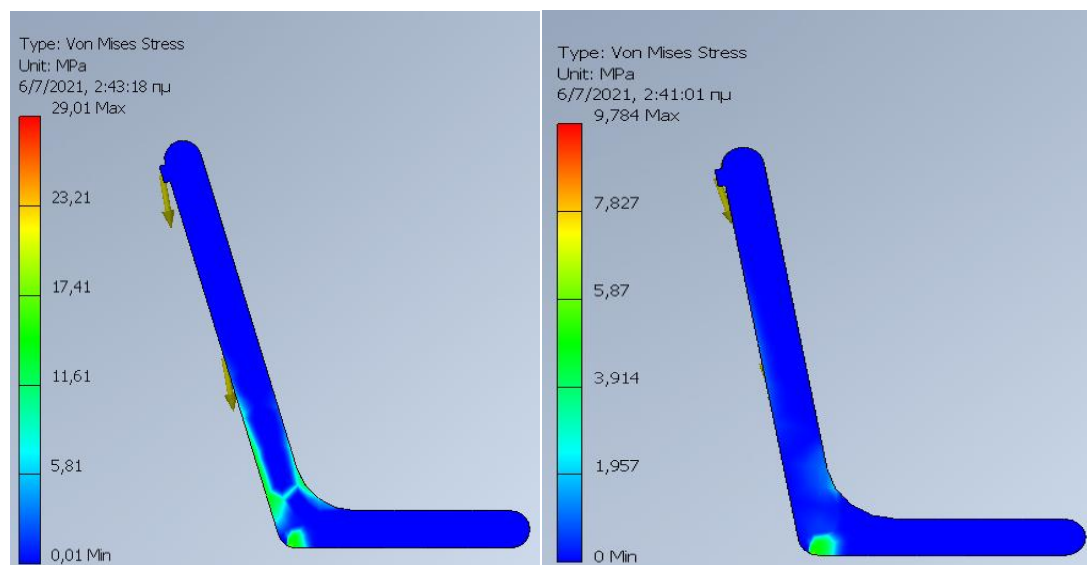
$$F1 = 82 \text{ KN}$$



Εικόνα 28. Σχήμα για $\Phi=60$ και $\Phi_L=100$

$$F2 = 97 \text{ KN}$$

Αποτελέσματα:



Εικόνα 29.Αποτελέσματα για Φ=45 ,ΦL=107

Εικόνα 30.Αποτελέσματα Σ.Α για Φ=60 ,ΦL=100

$$\sigma_v = 29,01 \text{ MPa}$$

$$\sigma_v = 9.78 \text{ MPa}$$

Φ	ΦL	F1(KN)	VMS(Mpa)
45	107	82	29,01
60	100	97	9,78

Παρατηρούμε ότι όταν εφαρμόστηκε δύναμη που δημιούργησε κάμψη αποκλίνουσα από το κάτω σκέλος του “L”, λάβαμε την μεγαλύτερη τάση, ενώ όταν δημιουργήθηκε κάμψη συγκλίνουσα προς το κάτω σκέλος, πετύχαμε την μικρότερη τιμή κάμψης και από τις τέσσερις περιπτώσεις που μελετήσαμε.

Αυτή η έκβαση της ανάλυσης, μας ωθεί να διενεργήσουμε Stress Analysis με διάφορες περιεχόμενες γωνίες Φ_L μεγαλύτερες της γωνίας εφαρμογής της F₁, ώστε ο πυλώνας να κάμπτεται με φορά προς το κάτω σκέλος του.

Η F₁ θα είναι εκείνη που προκύπτει από την Φ=60° (F₁=97 KN), διότι απαιτείται μικρότερη απόσταση στήριξης του καλωδίου στο έδαφος(1,7 m αντί 3m). Κάτι τέτοιο είναι επιθυμητό διότι όλη η κατασκευή θα κλιθεί να τοποθετηθεί σε δύσβατα σημεία, όπου ο χώρος που θα υπάρχει πίσω από την κατασκευή πολύ πιθανόν να είναι περιορισμένος. Ακόμη, είναι φανερό πως θα έχουμε μια ασφαλέστερη κατασκευή αφού θα υπολογιστεί να αντέχει 97 KN, έναντι των 82.

Η γωνία εφαρμογής της F₁ είναι θ₁= 73° και η παραπληρωματική της Φ_L=107°, οπότε για να έχουμε την επιθυμητή εμφάνιση κάμψης θα αναλύσουμε τις γωνίες 105°,100°,95°,90.

Και θα λάβουμε:

Φ_L	VMS(Mpa)
105	15,93
100	9,78
95	10,43
90	16,16

Βλέπουμε πως για γωνία $\Phi_L=100^\circ$, λαμβάνουμε την μικρότερη τάση. Αυτό κατ'επέκταση σημαίνει ότι είναι ο καλύτερος συνδυασμός θλίψης και κάμψης που μπορούμε να έχουμε στον πυλώνα μας.

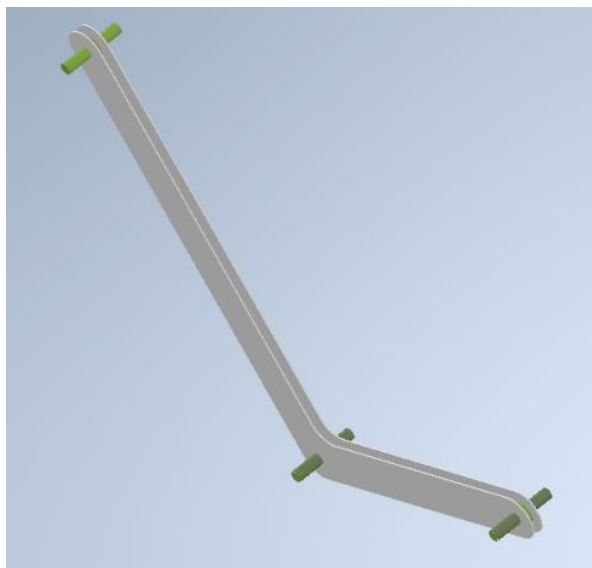
4.3 Πρώτος σχεδιασμός

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η επιλογή πάχους του πυλώνα έγινε αυθαίρετα και με μόνο σκοπό να λάβουμε κάποιες τιμές για να γίνουν συγκρίσεις μεταξύ τους και όχι για παράδειγμα για σύγκριση με το όριο διαρροής του υλικού μας, Mild Steel (210 MPa). Το παράδειγμα μας με πάχος 100mm, εμφάνισε τάση 9,78 MPa, δηλαδή εξαιρετικά μικρότερη του ορίου διαρροής του υλικού, αλλά ο πυλώνας είχε βάρος περίπου 1200 κιλών.

Ένα τέτοιο βάρος είναι απαγορευτικό για την κατεύθυνση που έχουμε δώσει στο σχεδιασμό μας. Δηλαδή μια κατασκευή που θα μπορεί εύκολα να μεταφερθεί από έναν ή δύο ενήλικες.

Επίσης, παραλήφθηκε η επιβολή της πλάγιας δύναμης F_z , διότι ακόμη, ο πυλώνας δεν είχε κάποια ικανή διάσταση να δεχθεί δύναμη προς την πλάγια διεύθυνση z.

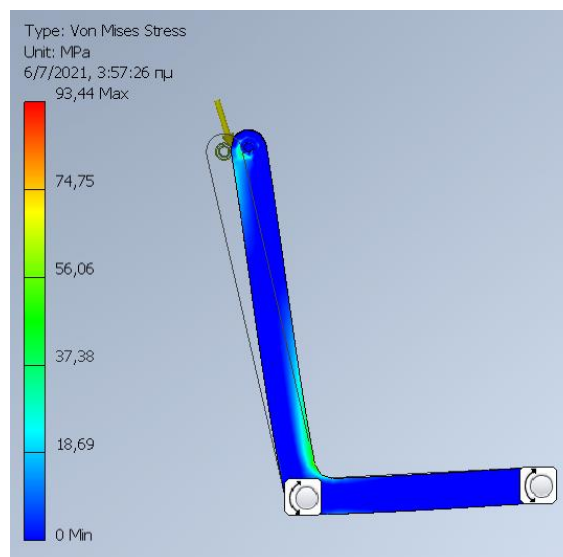
Τα παραπάνω μας ώθησαν να σκεφτούμε μια λύση με δύο μικρότερου πάχους ελάσματα σε γεωμετρία "L" με ένα διάκενο ώστε να προβάλλουν αντίσταση στις πλευρικές δυνάμεις (Εικόνα 31).



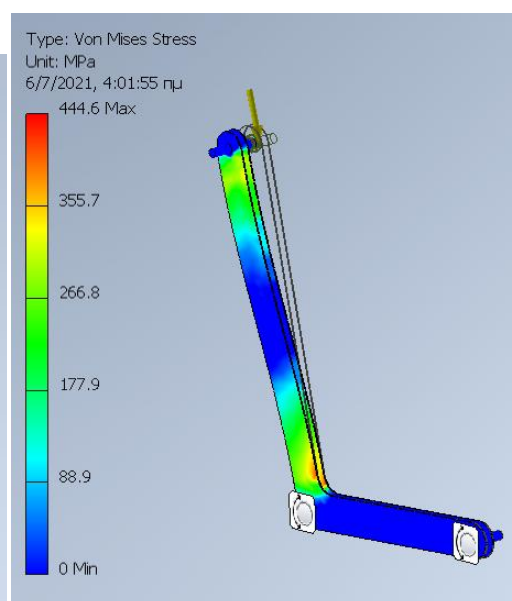
Εικόνα 31. Πρώτος Σχεδιασμός

Το πάχος του κάθε σκέλους αυτήν την φορά είναι 10mm αλλά με βάρος περίπου στα 120 Kg , παραμένει απαγορευτικό.

Τα αποτελέσματα με επιβολή Fx και Fy και Fx,Fy,Fz ήταν τα εξής :



Εικόνα 32.Αποτελέσματα Σ.Α με επιβολή Fx,Fy



Εικόνα 33.Αποτελέσματα Σ.Α με επιβολή Fx,Fy,Fz

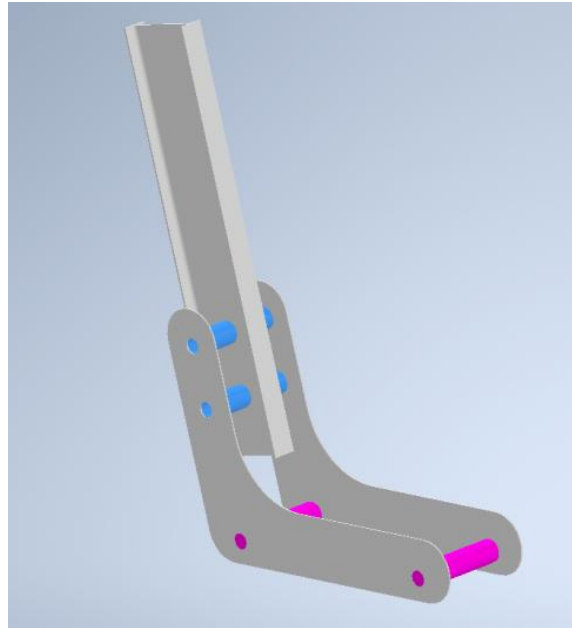
$$\sigma_v = 93 \text{ MPa}$$

$$\sigma_v = 444 \text{ MPa}$$

Παρατηρούμε πως ακόμη, η κατασκευή δεν είναι ικανή να δεχτεί πλευρικά φορτία , λόγω του μη αρκετού πάχους και ελλιπής στήριξης των άνω σκελών του “L”.

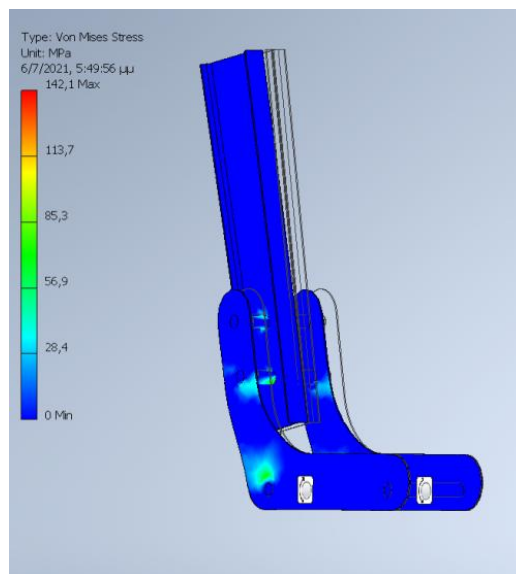
4.4 Δεύτερος Σχεδιασμός

Λόγω του αυξημένου βάρους επιλέχθηκε να χωρισθεί ο πυλώνας σε τρία επιμέρους τμήματα , με το «μεσαίο» τμήμα που παρέχει το ύψος να είναι ικανό να δεχθεί πλάγιες δυνάμεις. Μια τέτοια γεωμετρία είναι η δοκός τύπου “Γ” .Επίσης, το διάκενο ανάμεσα στα δυο τμήματα βάσης αυξήθηκε για καλύτερη συμπεριφορά στις πλευρικές δυνάμεις(Εικόνα 34).



Εικόνα 34.Δεύτερος Σχεδιασμός

Αποτελέσματα Stress Analysis με επιβολή Fx,Fy,Fz :



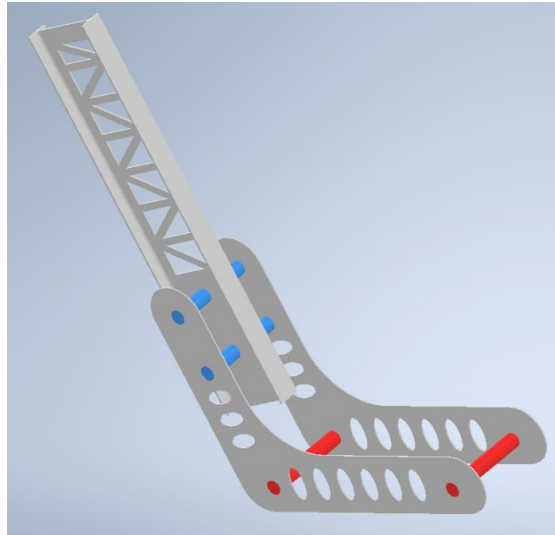
Εικόνα 35.Αποτελέσματα Σ.Α στον δεύτερο σχεδιασμό

$$\sigma_v = 142 \text{ MPa}$$

Για πρώτη φορά η τάση είναι χαμηλότερη του ορίου διαρροής και η κατασκευή δεν αστοχεί από πλευρικές δυνάμεις. Το βάρος του ενός από τα δύο ελάσματα βάσης παραμένει υψηλό στα 100 kg. Το βάρος της δοκού “I” είναι στα 220 kg. Είναι φανερό πως είναι απαραίτητο τα επιμέρους τμήματα να γίνουν πιο ελαφριά.

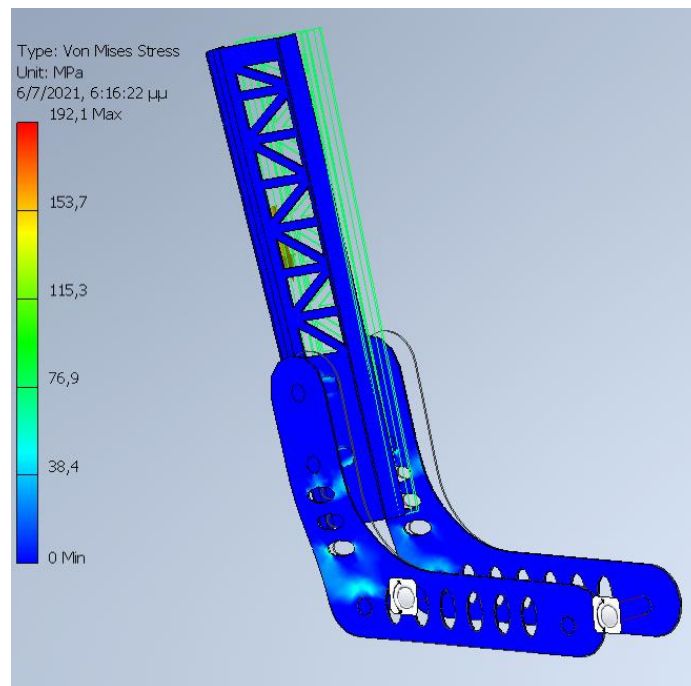
Παρατηρώντας το γράφημα του Stress Analysis βλέπουμε ότι στα «μπλε» σημεία έχουμε σχεδόν μηδενική τάση . Οπότε θα προσπαθήσουμε να αφαιρέσουμε υλικό από εκείνες τις περιοχές , χωρίς να αποδυναμώσουμε την κατασκευή(Εικόνα 36).

Έπειτα από στοχευόμενη αφαίρεση υλικού :



Εικόνα 36. Έπειτα από αφαίρεση υλικού

Αποτελέσματα Στατικής Ανάλυσης μετά την αφαίρεση υλικού :



Εικόνα 37. Αποτελέσματα Σ.Α μετά την αφαίρεση υλικού

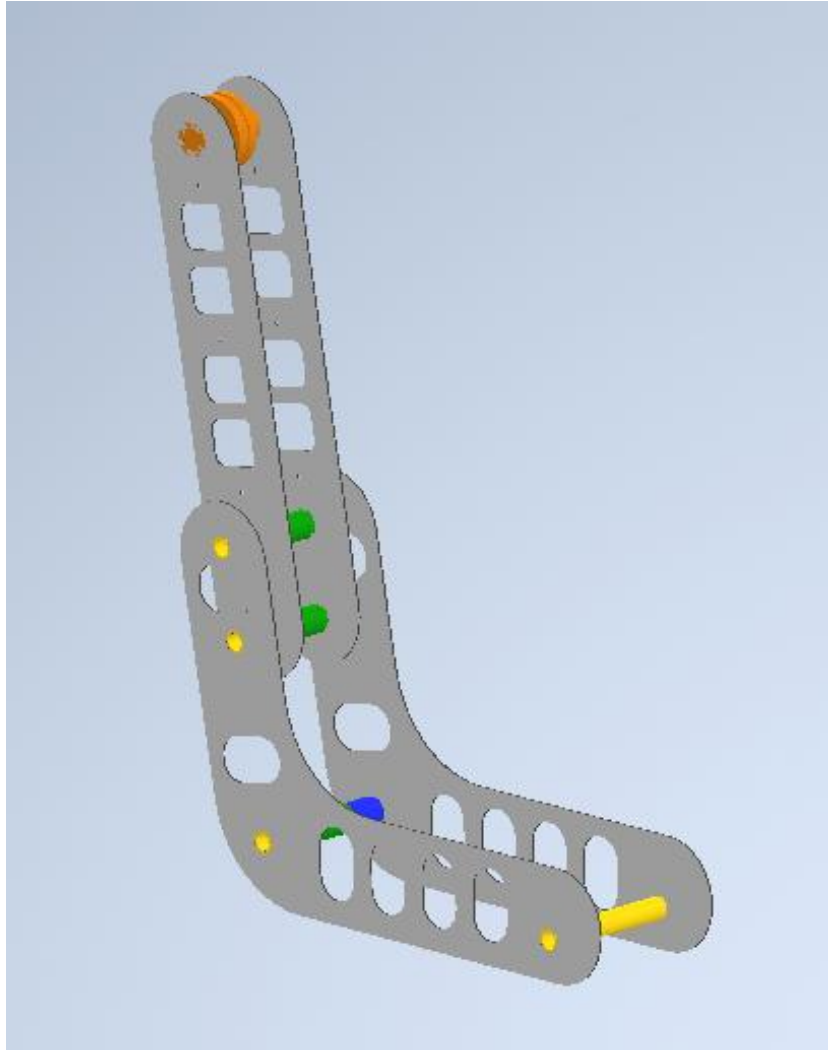
$$\sigma_v = 192 \text{ MPa (Αύξηση 35 \%)}$$

Αφαιρέσαμε υλικό και η τάση ενώ αυξήθηκε, παρέμεινε μικρότερη από το όριο διαρροής. Πάραυτα δεν μπορούμε να δεχτούμε ούτε αυτή την λύση επειδή κατά πρώτον το βάρος από 220 kg , είναι πλέον 200kg , μείωση που δεν είναι αρκετή και η τάση είναι πολύ κοντά στη διαρροή.

Τα παραπάνω συντελούν στο να απορρίψουμε την προσθήκη της δοκού «I» στον σχεδιασμό μας , διότι το βάρος της δεν μπορεί να περιορισθεί επαρκώς.

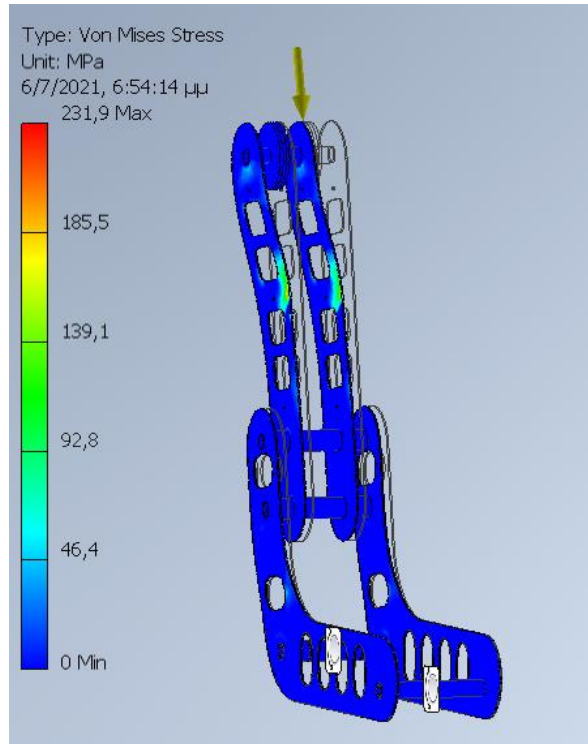
4.5 Τρίτος – Τελικός Σχεδιασμός

Αυτή τη φορά έναντι της δοκού “ I “ , επιλέχθηκε να μπουν δυο ελάσματα , τα οποία κατά πρώτον είναι κατά πολύ ελαφρύτερα (76 kg , ανεκτό για δύο ενήλικες) και κατά δεύτερον θα έχουν απόσταση μεταξύ τους ώστε να δέχονται τις πλάγιες δυνάμεις. Εξαρχής αφαιρέθηκε υλικό από «στρατηγικά» σημεία , για μείωση του βάρους(Εικόνα 38).



Εικόνα 38. Τρίτος Σχεδιασμός

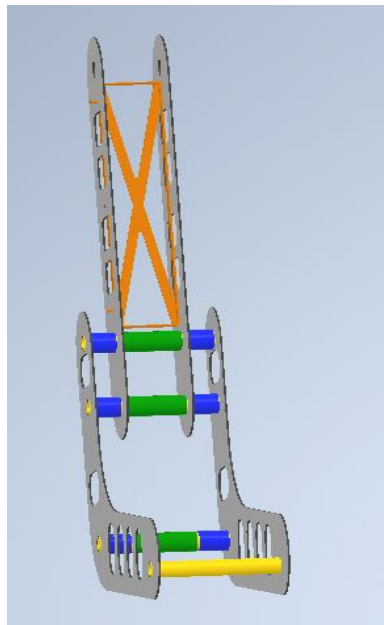
Αποτελέσματα Στατικής Ανάλυσης :



Εικόνα 39.Αποτελέσματα Σ.Α στον τρίτο σχεδιασμό

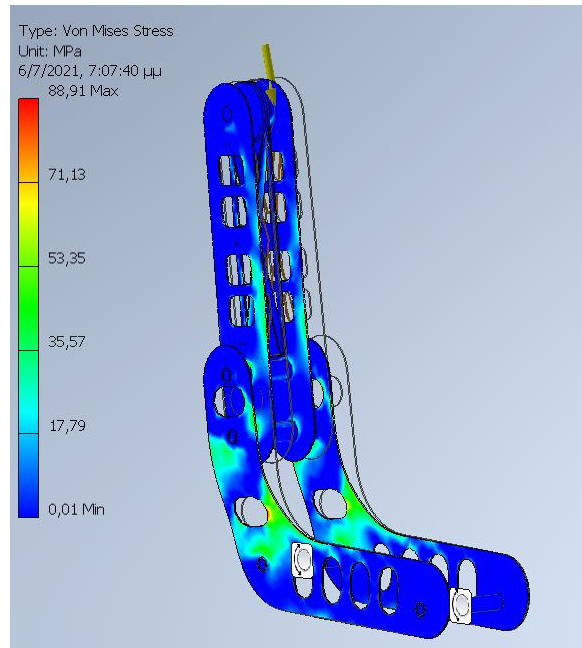
$$\sigma_v = 231 \text{ MPa (Αστοχεί)}$$

Ο πυλώνας αστοχεί στην μέση από τα δύο άνω ελάσματα λόγω του ότι έχουν αρκετά μικρό πάχος για το μήκος τους. Θα προσπαθήσουμε να ξεπεράσουμε το πρόβλημα προσθέτοντας μια εγκάρσια στήριξη(Εικόνα 40).



Εικόνα 40.Σχέδιο μετά από την πρόσθεση εγκάρσιας στήριξης

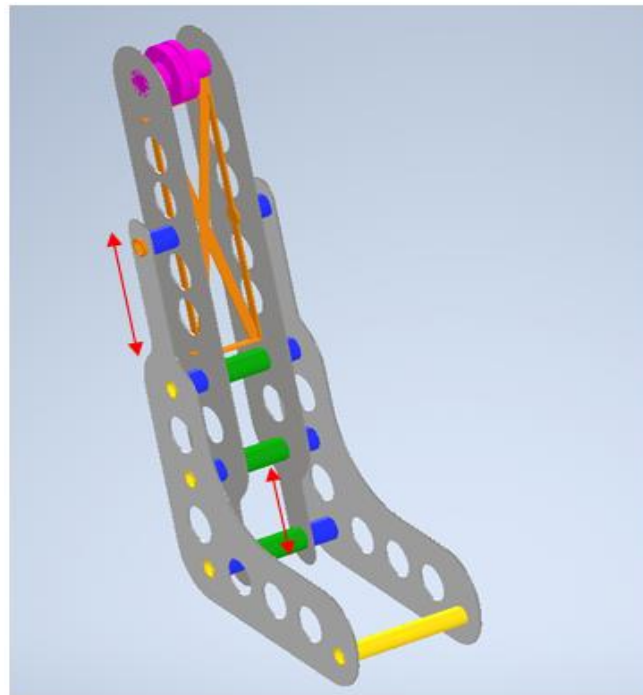
Αποτελέσματα μετά την προσθήκη του «πορτοκαλί X»(Εικόνα 41) :



Εικόνα 41.Αποτελέσματα Σ.Α έπειτα την προσθήκη εγκάρσιας στήριξης

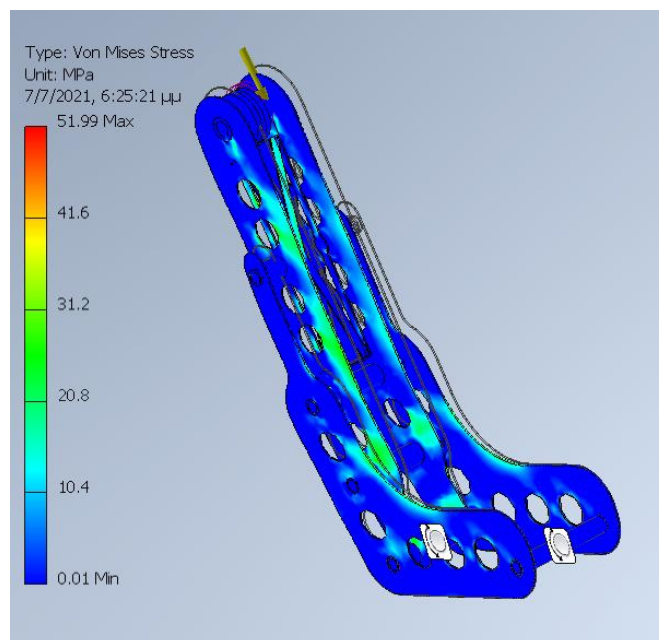
$$\sigma_v = 89 \text{ MPa.}$$

Πετύχαμε μείωση της τάσης από τα 231 \rightarrow 89 MPa. Βλέπουμε όμως ότι το πρόβλημα «μεταφέρθηκε» στο κάτω μέρος του πυλώνα. Θα προσπαθήσουμε με επιμηκύνσεις των ελασμάτων να ξεπεράσουμε την αστοχία.(Επισημάνσεις με κόκκινο χρώμα)(Εικόνα 42).



Εικόνα 42.Σχέδιο έπειτα από επιμηκύνσεις των ελασμάτων

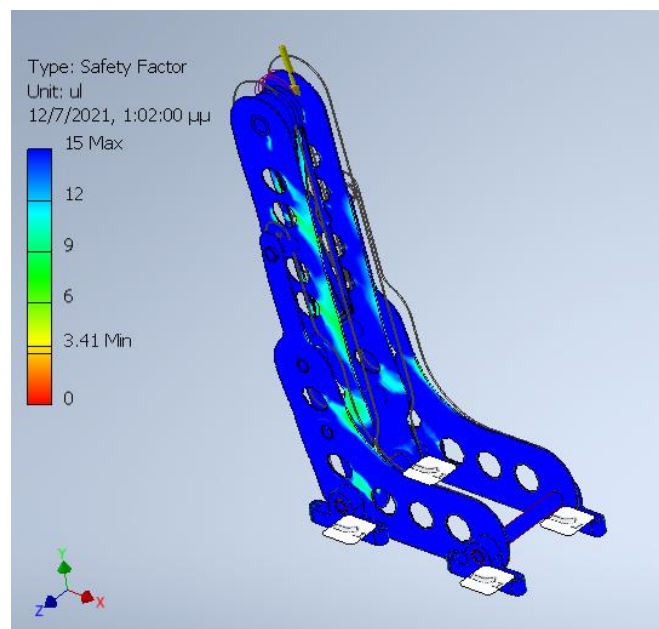
Αποτελέσματα Στατικής Ανάλυσης (Εικόνα 42) :



Εικόνα 43.Αποτελέσματα Σ.Α μετά τις επιμηκύνσεις

$$\sigma_v = 52 \text{ MPa.}$$

Κατανομή Συντελεστή Ασφαλείας



Εικόνα 44.Κατανομή Συντελεστή Ασφαλείας

$$\sigma_a=3,4$$

Επιτύχαμε συντελεστή ασφαλείας $\sigma_a=3,4$. Τα επιμέρους 4 ελάσματα πάχους 10 mm παραμένουν σε υψηλή τιμή βάρους (90 kg έκαστος) .Επειτα από πολλές δοκιμές με αφαιρέσεις υλικού διαπιστώθηκε ότι το βάρος δεν μπορεί να ελαττωθεί περαιτέρω. Για το λόγο αυτό , θα επιλέξουμε να έχουμε 8 ελάσματα πάχους 5mm τα οποία θα ταυτίζονται ανά

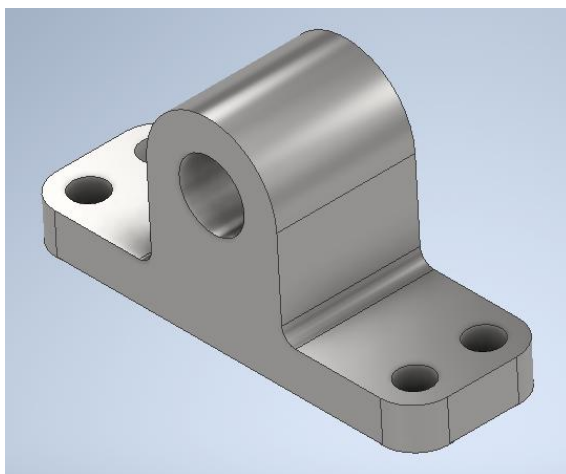
δύο και θα ενώνονται κατά την συναρμολόγηση του πυλώνα , δημιουργώντας έτσι το απαιτούμενο πάχος . Το καθένα πλέον , θα ζυγίζει 45 kg.

5.Αγκύρωση στο έδαφος.

5.1 Υπολογισμός δυνάμεων στα αγκύρια

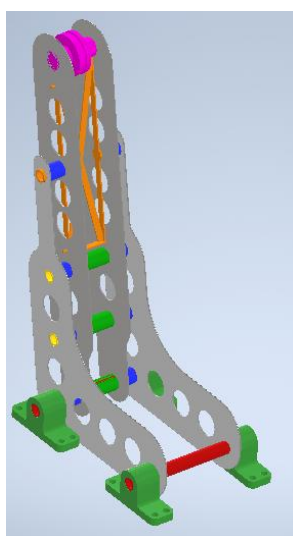
Για την αγκύρωση στο έδαφος, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα στοιχείο το οποίο θα συνδέει τους δύο οριζόντιους άξονες της βάσης του πυλώνα με το έδαφος μέσω αγκυρίων.

Θα χρησιμοποιήσουμε μια μορφή της συνηθέστερης γεωμετρίας για τέτοιου είδους εφαρμογές , η οποία είναι η εκείνη των εδράνων «ωμέγα».



Εικόνα 45.Έδρανο "ωμέγα"

Επάνω στο συναρμολόγημα (Εικόνα 46) :



Εικόνα 46.Έδρανο επάνω στο συναρμολόγημα

Οι αντιδράσεις στήριξης για κάθε έδρανο ξεχωριστά, αναγράφονται στο φύλλο αναφοράς της στατικής μελέτης που διενεργήθηκε.

Οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης σε δυνάμεις είναι Frx,Fry,Frz :

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fr _x (N)	-3041	-3165	-1121	-5949	-2974	-2841	-1062	-5332	-4837
Fr _y (N)	2267	3250	-3166	8488	3085	2136	-3049	7825	25068
Fr _z (N)	1561	-875	1335	34	830	1491	-1278	17	4978
No	10	11	12	13	14	15	16	MAX(Absolute)	
Fr _x (N)	-3235	3222	4150	-6111	-9078	7835	4995	9078	
Fr _y (N)	101	-1574	3049	1025	33066	11330	-560	33066	
Fr _z (N)	2359	4537	3662	-3199	-5931	-4154	-5107	5931	

Και οι συνιστάμενες από συγκεντρωμένες ροπές :

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TOTAL(Nm)	71	105	58	356	101	68	53	323	652
No	10	11	12	13	14	15	16	MAX(Absolute)	
TOTAL(Nm)	185	193	152	256	869	413	207	869	

Επιλέγουμε να ασχοληθούμε με τις μέγιστες τιμές δυνάμεων (κατά απόλυτη τιμή) .

Οι συγκεντρωμένες ροπές θα αμεληθούν ,διότι είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις δυνάμεις .
Ακόμη, τα αγκύρια θα υπολογιστούν με συντελεστή ασφαλείας , οπότε θα είμαστε καλυμμένοι ότι δεν θα αστοχήσουν.

Τα τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστών, μας δίνουν τις τιμές αντοχής των αγκυρίων , στον εφελκυσμό και στην διάτμηση. Ο εφελκυσμός αφορά την δύναμη κατά τη διεύθυνση **y** ενώ η διάτμηση την συνισταμένη των δυνάμεων κατά τις διευθύνσεις **x** και **z**.

$$\text{Συνισταμένη (x,z) : } Fr_{xz} = \sqrt{Fr_x^2 + Fr_z^2} = \sqrt{9078^2 + 5931^2} \Rightarrow Fr_{xz} = 10844 \text{ N.}$$

Τελικά το αγκύριο πρέπει να έχει :

- **33,1 KN αντοχή σε εφελκυσμό(tension)**
- **10,8 KN αντοχή σε διάτμηση (shear)**

5.2 Επιλογή αγκυρίων

Ερευνώντας τα τεχνικά φυλλάδια της εταιρείας HILTI , στα σφηνωτά αγκύρια βαρέως τύπου επιλέχθηκε το αγκύριο που παρέχει ένδειξη ροπής σύσφιξης, ονομασίας **HSL-3-B**.



Εικόνα 47. Σφηνωτό αγκύριο βαρέως τύπου HSL-3-B της HILTI

Ξεκινώντας, ερευνούμε ποια διάμετρος αγκυρίου μας παρέχει την κατάλληλη αντοχή. Θα ερευνήσουμε στην κατηγορία Recommended Load (Προτεινόμενο Φορτίο) το οποίο έχει υπολογιστεί με συντελεστή ασφαλείας 1,4.

Παρατηρούμε πως την βρίσκουμε από την **M20 και πάνω**.

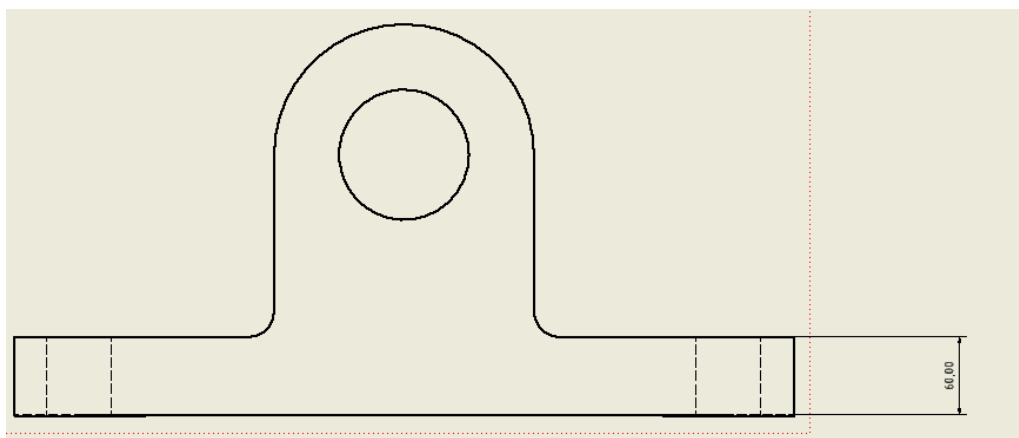
Recommended loads ¹

Anchor size			M16			M20			M24		
Non-cracked concrete											
Tension	HSL-3 / HSL-3-B	[kN]	24,0	31,0	31,0	33,6	45,2	45,2	44,2	47,6	47,6
N _{Rec}	HSL-3-G										
Shear	HSL-3 / HSL-3-B	[kN]	48,1	67,2	88,4	67,2	92,8	106,3	88,4	116,1	116,9
V _{Rec}	HSL-3-G										

b) With overall partial safety factor for action $\gamma = 1,4$. The partial safety factors for action depend on thy type of loading and shall be taken from national regulations.

Εικόνα 48. Προτεινόμενα Φορτία από το τεχνικό φυλλάδιο της HILTI

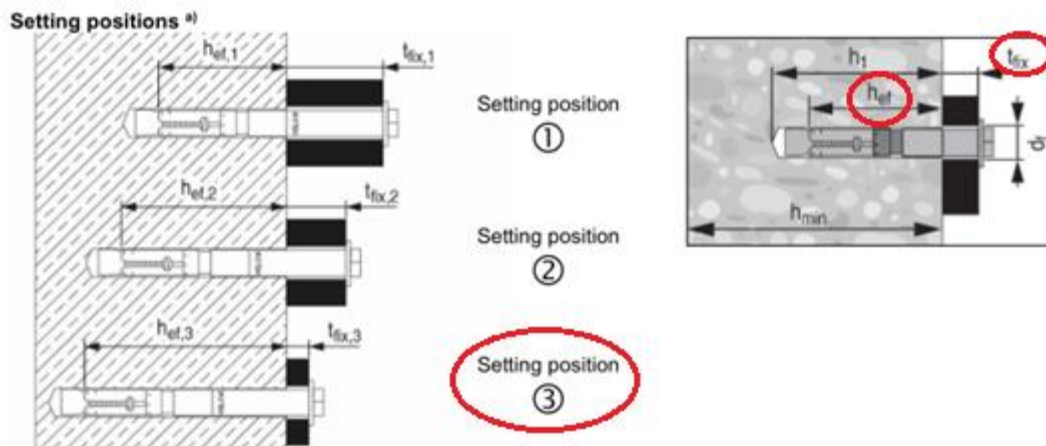
Οι τρεις τιμές σε κάθε διάμετρο αφορούν το ωφέλιμο μήκος του αγκυρίου ,δηλαδή το **hef**. Το hef υπολογίζεται ανάλογα με το μήκος που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του σκυροδέματος, το **tfix**. Στην περίπτωση μας ισούται με το πάχος του εδράνου (**60mm**).




Εικόνα 49. Πάχος εδράνου

Έπειτα , θα επιλέξουμε αγκύριο με ωφέλιμο μήκος τουλάχιστον τριπλάσιο του πάχους του εδράνου ώστε να βρίσκονται τα 2/3 του αγκυρίου μέσα στο σκυρόδεμα.

Setting information



Setting details for HSL-3-B

Anchor version		M12			M16			M20			M24		
		d_0 [mm]	d_{cut} [mm]	d_r [mm]	i	$t_{fix,1}$ [mm]	$t_{fix,i}$	Δi [mm]	$h_{ef,i}$ [mm]	$h_{1,i}$ [mm]	$h_{min,i}$ [mm]	SW [mm]	T_{inst} [Nm]
Nominal diameter of drill bit	d_0 [mm]	18	24	28	32								
Max. cutting diameter of drill bit	d_{cut} [mm]	18,5	24,55	28,55	32,7								
Max. diameter of clearance hole in the fixture	d_r [mm]	20	26	31	35								
Setting position	i	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
Fixture thickness	$t_{fix,1}$ [mm]	5 - 200			10 - 200			10 - 200			10 - 200		
Effective fixture thickness	$t_{fix,i}$	$t_{fix,1^{(1)}} - \Delta i$											
Reduction of fixture thickness	Δi [mm]	0	25	50	0	25	50	0	30	60	0	30	60
Effective anchorage depth	$h_{ef,i}$ [mm]	80	105	130	100	125	150	125	155	185	150	180	210
Min. depth of drill hole	$h_{1,i}$ [mm]	105	130	155	125	150	175	155	185	215	180	210	240
Min. thickness of concrete member	$h_{min,i}$ [mm]	160	225	250	200	275	300	250	380	410	300	405	435
Width across flats	SW [mm]	24			30			36			41		
Installation torque	T_{inst} [Nm]	The torque moment is controlled by the safety cap											

Effective anchorage depth ^{a)}

Anchor size	h_{ef} [mm]	M16			M20			M24		
Eff. Anchorage depth		$h_{ef,1}$	$h_{ef,2}$	$h_{ef,3}$	$h_{ef,1}$	$h_{ef,2}$	$h_{ef,3}$	$h_{ef,1}$	$h_{ef,2}$	$h_{ef,3}$
		100	125	150	125	155	185	150	180	210

Recommended loads ¹

Anchor size		M16			M20			M24			
Non-cracked concrete											
Tension	HSL-3 / HSL-3-B	[kN]	24,0	31,0	31,0	33,6	45,2	45,2	44,2	47,6	47,6
N_{Rec}	HSL-3-G										
Shear	HSL-3 / HSL-3-B	[kN]	48,1	67,2	88,4	67,2	92,8	106,3	88,4	116,1	116,9
V_{Rec}	HSL-3-G										

b) With overall partial safety factor for action $\gamma = 1,4$. The partial safety factors for action depend on thy type of loading and shall be taken from national regulations.

Εικόνα 50.Τεχνικό Φυλλάδιο της HILTI για την σειρά σφηνωτών αγκυριών HSL-3.

Τελικά , παρατηρούμε ότι το αγκύριο **M20** της σειράς **HSL-3-B** , μας παρέχει αντοχή σε εφελκυσμό (με συντελεστή ασφαλείας=1,4) **45,2 KN** έναντι απαιτούμενου **33,1 KN**(36,5 % μεγαλύτερο , εξαιρουμένου του σ_a). Όσο αναφορά την αντοχή σε διάτμηση , λαμβάνουμε την τιμή των **106,3 KN** , έναντι του απαιτούμενου **10,8 KN**(844% μεγαλύτερο, εξαιρουμένου του σ_a).

6.Συμπεράσματα

Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε μια προσπάθεια μελέτης ενός εναέριου μεταφορέα φορτίων .Στα πλαίσια αυτής , παρουσιάστηκε η μεθοδολογία για τον υπολογισμό των δυνάμεων που δέχονται οι πυλώνες και έπειτα τα βήματα για τον σχεδιασμό αυτού.

Εντύπωση προκάλεσε ότι οι δυνάμεις που δέχονται οι πυλώνες από το βάρος του φορτίου είναι ελάχιστες σε σχέση με εκείνες από την τάνυση του συρματόσχοινου ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό sag.

Ωστόσο, δεν καλύπτονται όλες οι παράμετροι του προβλήματος , όπως η δυναμική καταπόνηση που δέχεται ο πυλώνας από την πιθανή ταλάντωση του φορείου. Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε ακριβή και εκτενή υπολογισμό των δυνάμεων των ανέμων. Στο παραπάνω συμβάλλει ότι η μελέτη έγινε στα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας με συγκεκριμένο σκοπό και θέμα.

8.Βιβλιογραφία

- 1) Βικιπαίδεια. «Βικιπαίδεια.» *Τελεφερίκ*.
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CF%86%CE%B5%CF%81%CE%AF%CE%BA>.
- 2) Wikipedia. *Aerial lift*. https://en.wikipedia.org/wiki/Aerial_lift.
- 3) GEDANARIUM. *The first multi-legged cable car was built in 1644, and it worked perfectly*. <https://atlastrojmiejskichosobliwosci.pl/the-first-multi-legged-cable-car-was-built-in-1644-and-it-worked-perfectly/>.
- 4) MarkusMailer, StephanTischler. «Science Direct .»
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235214651930448X>.
- 5) Niagara Parks. "Niagara Parks."
<https://www.niagaraparks.com/visit/attractions/whirlpool-aero-car/>.
- 6) Daniel, Papini. «On shape control of cables under vertical static loads.» *Lund University*, 2010: p7-60
- 7) HYDROLOGY PROJECT Technical Assistance “Guidance of the design of Cableways”(1998)
- 8) ΣΤΕΡΓΙΟΥ, Ι, και Κ ΣΤΕΡΓΙΟΥ. *Στοιχεία Μηχανών Ι*. Σύγχρονη Εκδοτική, 2003.
- 9) ΣΤΕΡΓΙΟΥ, Ι, and Κ ΣΤΕΡΓΙΟΥ. *Ανυψωτικά και Μεταφορικά Μηχανήματα*. ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΕΚΔΟΤΙΚΗ, 2006.
- 10) ΒΟΥΘΟΥΝΗΣ, ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Α, ΑΙΚ Ε ΣΤΑΜΑΤΙΟΥ, and Π Π ΒΟΥΘΟΥΝΗ. *Μηχανική παραμορφώσιμου στερεού - ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ*. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΒΟΥΘΟΥΝΗΣ, 2014.
- 11) ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΣ, ΠΡΟΒΑΤΙΔΗΣ. *Πεπερασμένα Στοιχεία στην Ανάλυση Μηχανολογικών Κατασκευών, 2η Έκδοση*. ΕΚΔΟΣΕΙΣ Α.ΤΖΙΟΛΑ & ΥΙΟΙ Α.Ε, 2015.
- 12) HILTI. *Technical Datasheet of HSL-3 EXPANSION ANCHOR*. HILTI, 2020.

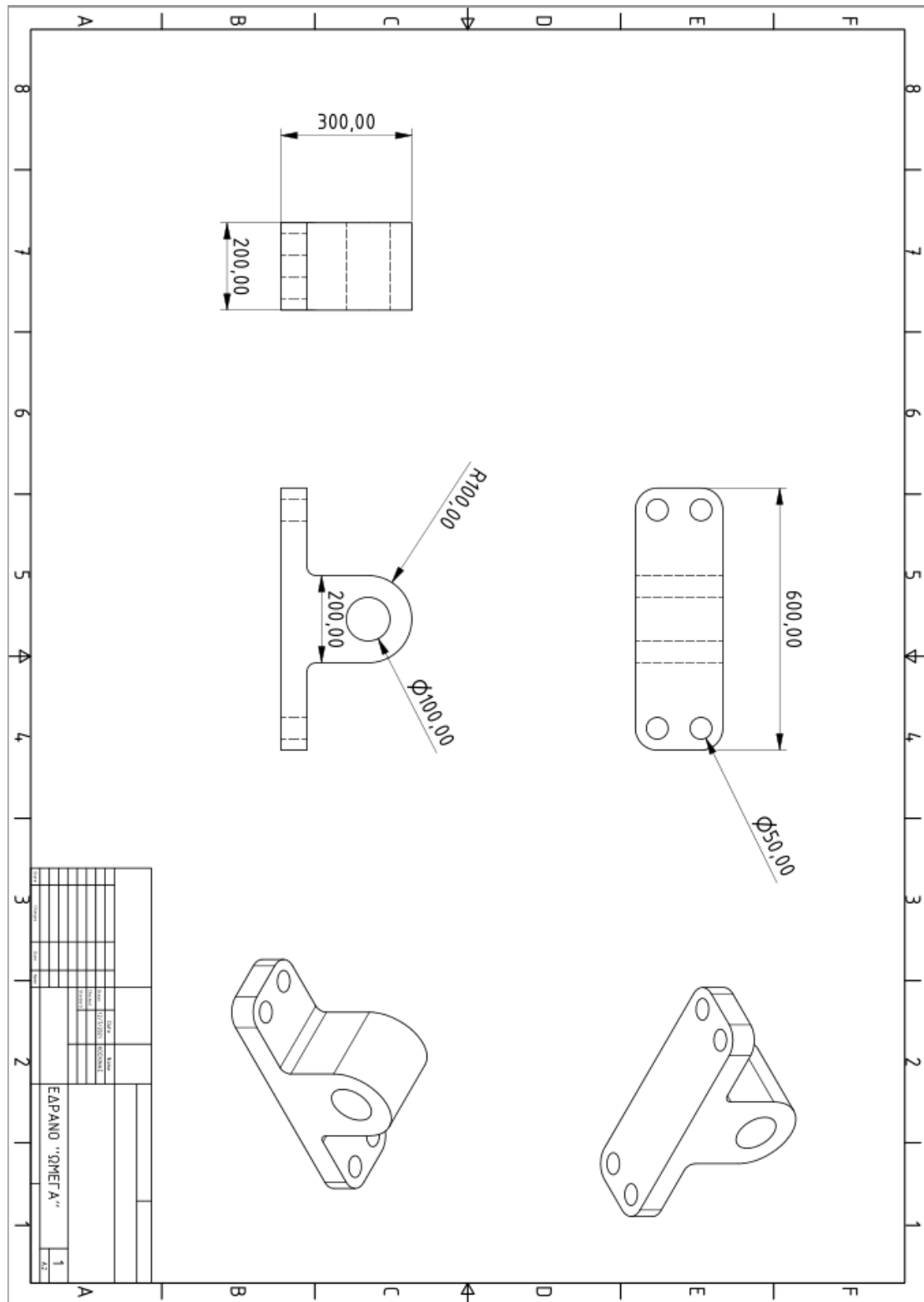
8.1 Κατάλογος Εικόνων

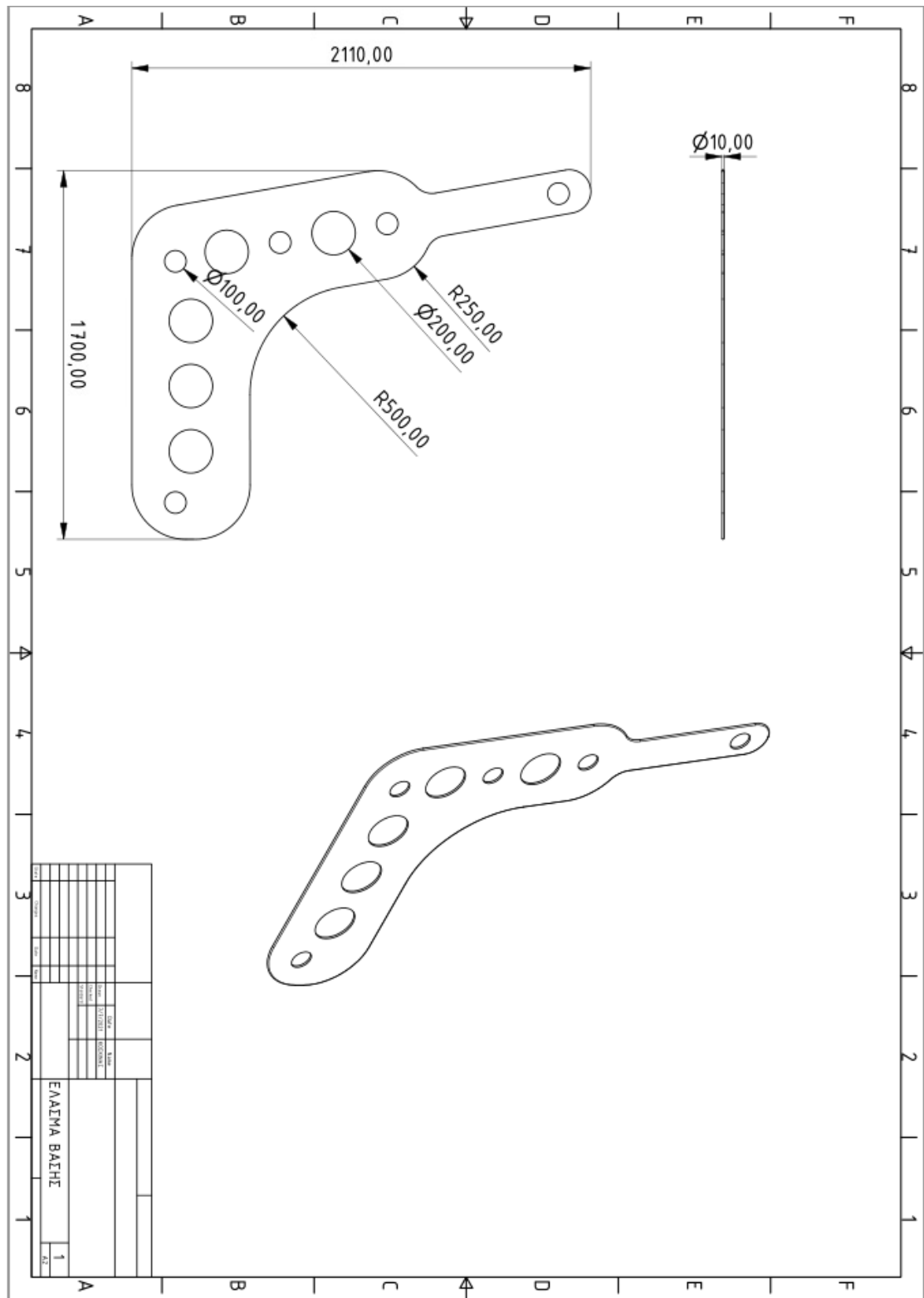
Εικόνα 1 . Μηχανισμός του Wybe για τον εναέριο μεταφορέα	1
Εικόνα 2 . Whirpool Aero car ή Spanish Aero car	2
Εικόνα 3. Το Predigtstuhl Cable Car.....	2
Εικόνα 4. Πίνακας κατανομής κατανάλωσης ενέργειας ανά άτομο ανά όχημα	3
Εικόνα 5. Cable Car της εταιρείας Leitner	3
Εικόνα 6. Gondola lift της εταιρείας Doppelmayr	4
Εικόνα 7.Funitel της εταιρείας Doppelmayr	Εικόνα 8. Διάταξη Funitel
.....	4
Εικόνα 9 . Μηχανισμός Funitel	5
Εικόνα 10.Chairlift της εταιρείας Doppelmayr	5
Εικόνα 11.Σκαρίφημα διάταξης διπλωματικής εργασίας.....	6
Εικόνα 12. Οι δυνάμεις σε τμήμα του καλωδίου . Το μήκος του παραμορφωμένου τμήματος είναι ρ και το ίδιο βάρος του q_s	7
Εικόνα 13. Sag στην εκάστοτε θέση του φορείου	Εικόνα 14. Κλίση καλωδίου
στην εκάστοτε θέση.....	8
Εικόνα 15. Οι δυνάμεις στις στηρίξεις συναρτήσει της θέσης του φορτίου.	9
Εικόνα 16. Μέγιστο εμφανιζόμενο sag σε σχέση με	Εικόνα 17.Μέγιστη
εμφανιζόμενη κλίση στο	το επιλεγμένο αρχικό μήκος καλωδίου
φορείο σε σχέση με το επιλεγμένο αρχικό μήκος	9
Εικόνα 18. Μέγιστες εμφανιζόμενες δυνάμεις στις στηρίξεις σε σχέση με το επιλεγμένο αρχικό μήκος καλωδίου.....	10
Εικόνα 19. Σχήμα με δυνάμεις πυλώνα άνω επιπέδου	11
Εικόνα 20.Σχήμα με δυνάμεις πυλώνα κάτω επιπέδου	12
Εικόνα 21. Συγκεντρωτικό σχήμα διαστάσεων και δυνάμεων της διάταξης.	13
Εικόνα 22. Σκαρίφημα αρχικής προσέγγισης πυλώνα	16
Εικόνα 23.Σχήμα με γωνίες $\Phi=45$ και $\Phi_L=100^\circ$	17
Εικόνα 24.Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης , $\Phi=45$, $\Phi_L=100$	18
Εικόνα 25.Σχήμα με γωνία $\Phi=60$ και $\Phi_L=107$	18
Εικόνα 26. Αποτέλεσμα Στατικής Ανάλυσης για $\Phi = 60^\circ$, $\Phi_L = 107^\circ$	19
Εικόνα 27. Σχήμα για $\Phi=45$ και $\Phi_L=107$	Εικόνα 28.Σχημα για $\Phi=60$ και
$\Phi_L=100$	20
Εικόνα 29.Αποτελέσματα για $\Phi=45$, $\Phi_L=107$	Εικόνα 30.Αποτελέσματα Σ.Α για $\Phi=60$, $\Phi_L=100$
.....	21
Εικόνα 31.Πρώτος Σχεδιασμός	22
Εικόνα 32.Αποτελέσματα Σ.Α με επιβολή F_x,F_y	Εικόνα 33.Αποτελέσματα Σ.Α με
επιβολή F_x,F_y,F_z	23
Εικόνα 34.Δεύτερος Σχεδιασμός.....	24
Εικόνα 35.Αποτελέσματα Σ.Α στον δεύτερο σχεδιασμό	24
Εικόνα 36.Έπειτα από αφαίρεση υλικού.....	25
Εικόνα 37.Αποτελέσματα Σ.Α μετά την αφαίρεση υλικού	25
Εικόνα 38.Τρίτος Σχεδιασμός	26
Εικόνα 39.Αποτελέσματα Σ.Α στον τρίτο σχεδιασμό.....	27
Εικόνα 40.Σχέδιο μετά από την πρόσθεση εγκάρσιας στήριξης	27
Εικόνα 41.Αποτελέσματα Σ.Α έπειτα την προσθήκη εγκάρσιας στήριξης.....	28
Εικόνα 42.Σχέδιο έπειτα από επιμηκύνσεις των ελασμάτων	28
Εικόνα 43.Αποτελέσματα Σ.Α μετά τις επιμηκύνσεις.....	29

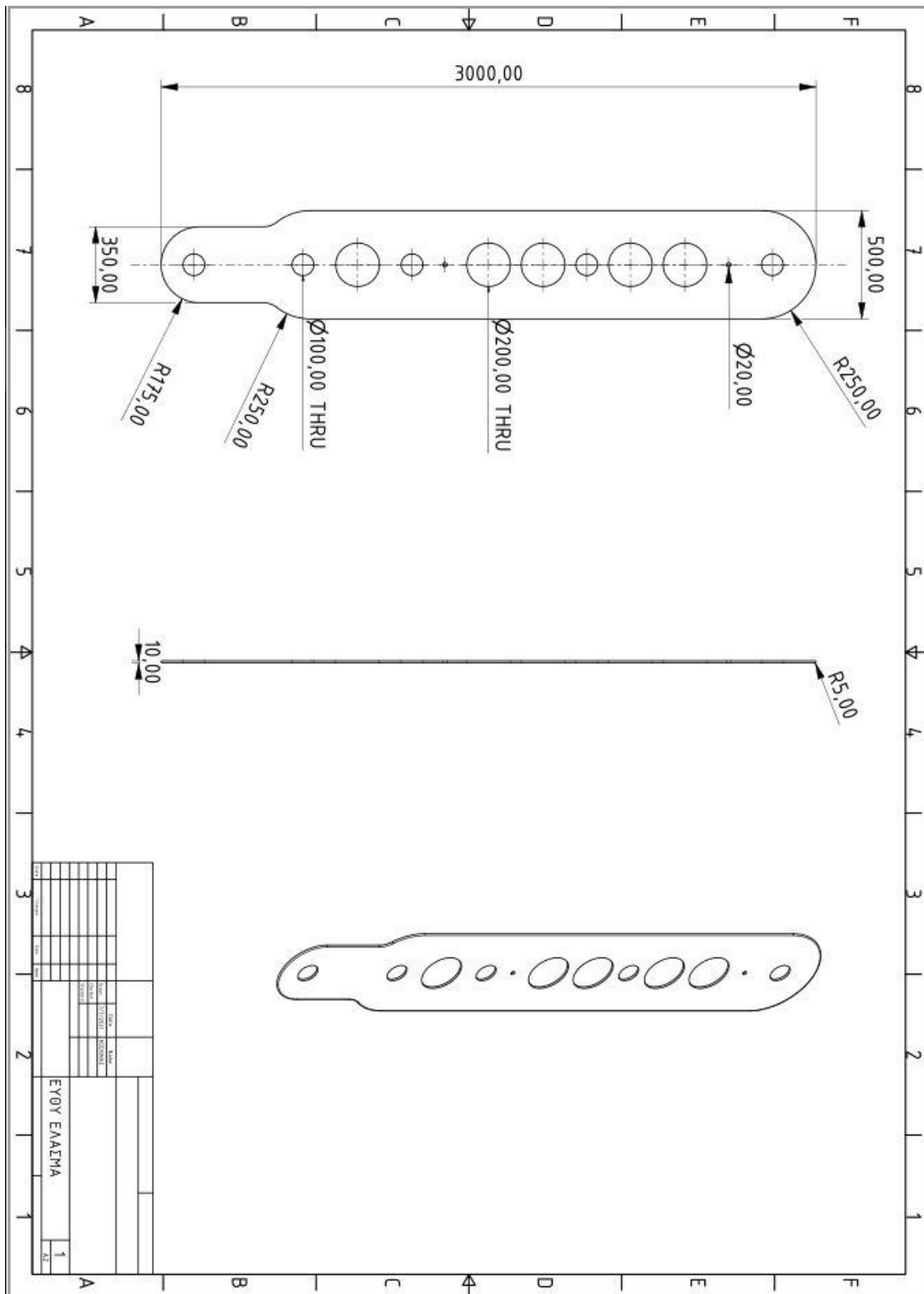
Εικόνα 44.Κατανομή Συντελεστή Ασφαλείας	29
Εικόνα 45.Έδρανο "ωμέγα"	30
Εικόνα 46.Έδρανο επάνω στο συναρμολόγημα	30
Εικόνα 47.Σφηνωτό αγκύριο βαρέως τύπου HSL-3-B της HILTI.....	32
Εικόνα 48.Προτεινόμενα Φορτία από το τεχνικό φυλλάδιο της HILTI.....	32
Εικόνα 49. Πάχος εδράνου.....	32
Εικόνα 50.Τεχνικό Φυλλάδιο της HILTI για την σειρά σφηνωτών αγκυρίων HSL-3.....	33

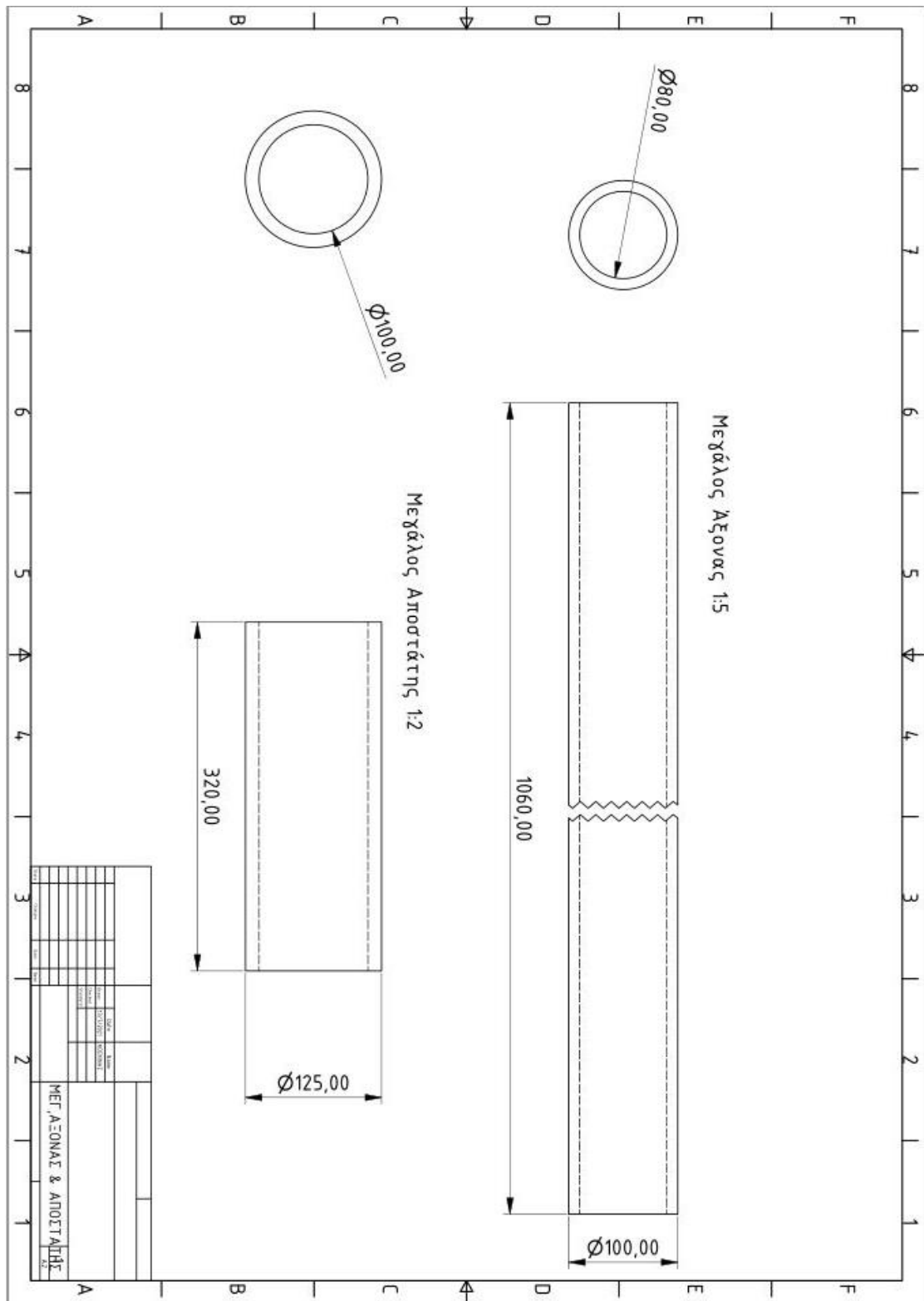
7. Παράρτημα

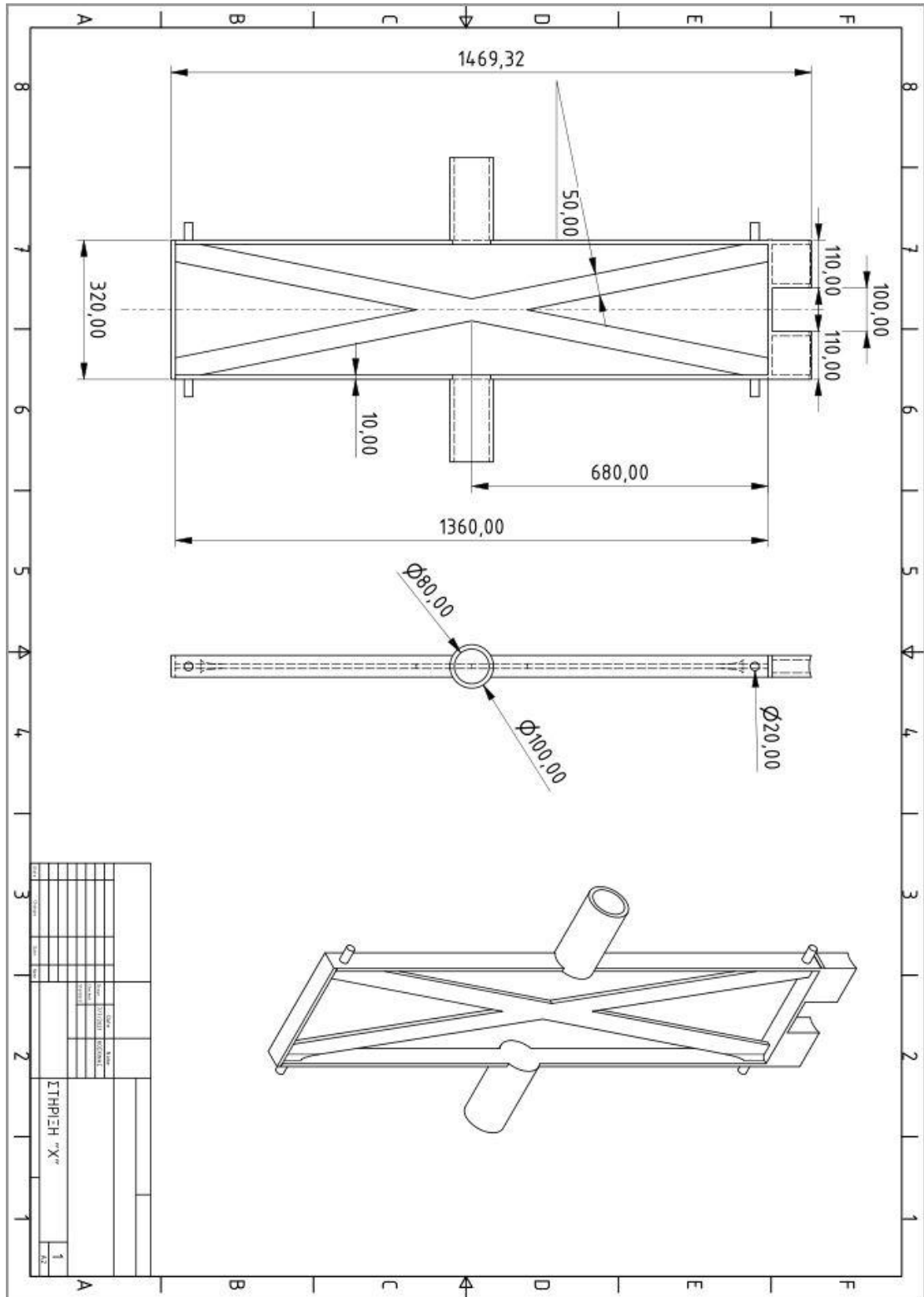
7.1 Δισδιάστατα Σχέδια Επιμέρους Στοιχείων

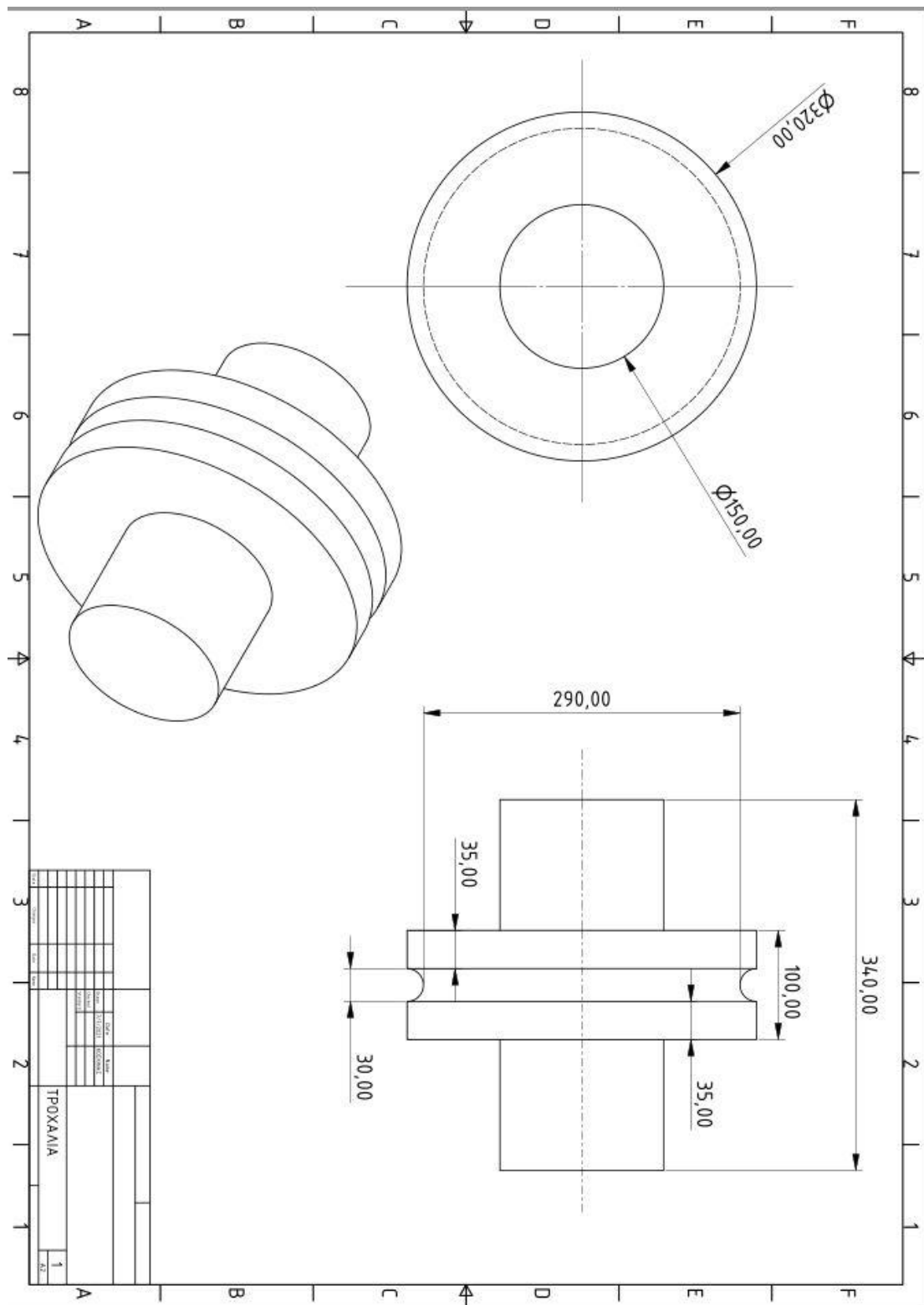


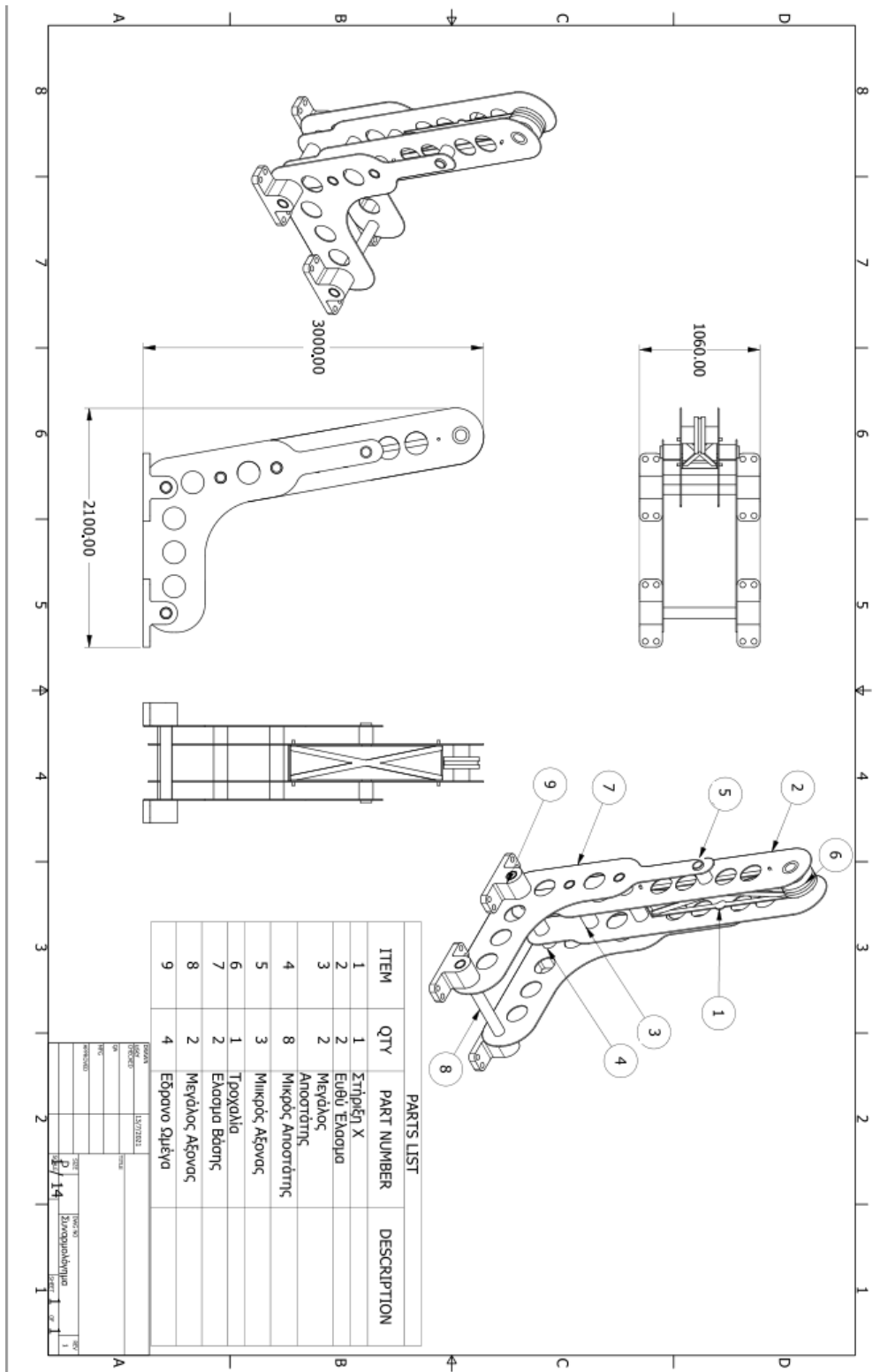












7.2 Οι τιμές κρίσιμων μεγεθών για ορισμένες θέσεις του φορτίου στο καλώδιο

Θέση φορτίου s(m)	Sag καλωδίου (m)	Κλίση καλωδίου	Οριζόντιες συνιστώσες στις στηρίξεις (N)	Κατακόρυφη συνιστώσα 1 ^{ης} στήριξης (N)	Κατακόρυφη συνιστώσα 2 ^{ης} στήριξης (N)	Μέγιστη τάση νήματος (N)	Μήκος τεταμένου καλωδίου(m)
1	0,122	0,334	42026,621	11074,573	19668,133	46401,210	300,175
10	1,088	0,345	45676,637	12626,024	21219,584	50364,927	300,190
20	1,954	0,355	48896,727	14015,447	22609,007	53870,745	300,203
30	2,674	0,362	51521,330	15166,408	23759,968	56736,086	300,214
40	3,285	0,369	53682,203	16131,601	24725,161	59102,559	300,223
50	3,811	0,376	55486,649	16953,959	25547,519	61085,546	300,231
60	4,263	0,381	57001,657	17660,293	26253,853	62757,101	300,237
70	4,652	0,387	58271,352	18268,266	26861,826	64164,695	300,243
80	4,984	0,392	59328,450	18790,971	27384,531	65343,535	300,247
90	5,260	0,397	60243,688	19256,748	27850,308	66369,734	300,251
100	5,490	0,401	60956,660	19641,380	28234,940	67178,317	300,254
110	5,674	0,406	61513,050	19963,171	28556,731	67818,451	300,257
120	5,814	0,411	61922,027	20225,789	28819,349	68300,017	300,258
130	5,911	0,415	62192,356	20432,744	29026,304	68632,467	300,260
140	5,967	0,420	62327,230	20585,311	29178,871	68819,257	300,260
150 MAX	5,981	0,424	62330,206	20684,913	29278,473	68864,241	300,260
160	5,955	0,429	62202,820	20732,161	29325,721	68769,098	300,260
170	5,888	0,434	61943,868	20726,570	29320,130	68532,567	300,259
180	5,780	0,439	61553,078	20668,027	29261,587	68154,397	300,258
190	5,629	0,444	61025,975	20554,736	29148,296	67629,822	300,256
200	5,434	0,449	60356,251	20384,162	28977,722	66952,113	300,253
210	5,194	0,454	59536,599	20153,375	28746,935	66113,485	300,250
220	4,905	0,460	58556,313	19858,077	28451,637	65102,515	300,246
230	4,566	0,466	57401,311	19492,618	28086,178	63904,177	300,241
240	4,170	0,473	56052,897	19049,497	27643,057	62498,527	300,236
250	3,713	0,480	54482,993	18517,451	27111,011	60855,595	300,230
260	3,184	0,488	52666,261	17886,313	26479,873	58948,442	300,222
270	2,574	0,498	50544,634	17132,790	25726,350	56715,122	300,214
280	1,863	0,509	48069,103	16237,218	24830,778	54103,662	300,204
290	1,022	0,522	45124,572	15153,415	23746,975	50991,625	300,192
299	0,113	0,537	41934,667	13961,345	22554,905	47615,544	300,179