



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

***Μοντελοποίηση και σχεδιασμός συστήματος αυτόματης
πρόσδεσης πλοίων με χρήση πνευματικά εκτοξευόμενου
βλήματος***

Διπλωματική Εργασία

Νικόλαος Καψαμπέλης

Επιβλέπων : Επίκουρος Καθηγητής Β. Σπιτάς

ΑΘΗΝΑ 2017

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσει έναν εναλλακτικό τρόπο πρόσδεσης πλοίων με στόχο την ανεύρεση διαδικασίας που προσφέρει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, μεγαλύτερη ευκολία χειρισμού και μικρότερο χρόνο εκτέλεσης. Αφορά την πρόσδεση υπό δυσμενείς καιρικές συνθήκες (10 Beaufort) σε εκτεθειμένους λιμένες, δηλαδή την ελληνική ακτοπλοΐα κατά τους χειμερινούς μήνες. Η υλοποίηση πραγματοποιείται με βολή, με χρήση πνευματικού κανονιού από το πλοίο, σφαίρας με αναρτημένο βοηθητικό σχοινί, στο οποίο αναρτάται ο κάβος πρόσδεσης. Στο λιμένα, η σφαίρα οδηγείται με κατάλληλη χοάνη σε τύμπανο περιέλιξης του βοηθητικού σχοινιού και ακολούθως του κάβου. Τα συστήματα που μελετήθηκαν αναλύθηκαν σύμφωνα με τις αρχές της Μηχανικής, των Πνευματικών Κυκλωμάτων, των Ηλεκτρικών Μηχανών, των Μειωτήρων Στροφών, της Αριθμητικής Ανάλυσης. Από την ανάλυση προέκυψαν οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά των κύριων μερών του σχεδιαζόμενου μηχανισμού, ώστε να είναι ποσοτικοποιημένα ο απαιτούμενος όγκος και η τάξη μεγέθους του κόστους της εγκατάστασης. Σκοπός είναι η συγκεκριμένη εργασία να αποτελέσει ένα βήμα προς τη βελτίωση της δυσλειτουργικής κατάστασης που οφείλεται στην έλλειψη και την αδυναμία απόκτησης μεγάλης κλίμακας λιμενικών υποδομών στο άμεσο μέλλον.

Abstract

The goal of this study is to develop an alternative, more effective, effortless and less time-consuming mooring procedure in comparison to the method which is currently used. The study examines the case of mooring in vulnerable ports under adverse weather conditions (Beaufort 10), simulating the worst-case mooring conditions prevailing in small Greek island ports during the winter. The procedure involves the projection of a spherical tethered mass from the ship to the port using a pneumatic cannon. The mooring line is connected to the tether. At the port, the mass is lead by a guiding surface to a winch, where the tether and mooring line are consecutively winded. The design of the mechanisms follows the principles of Mechanics, Pneumatic Circuits, Electric Machinery, Gear Reducers and Numerical Analysis. The study estimates the dimensions and characteristics of the components, providing a quantitative representation of the space required and a rough estimation of the cost of the installation. This study aims to offer a feasible and cost-effective suggestion towards the improvement of the accessibility of the islands during severe weather.

Αφιερώνεται στην οικογένειά μου

Ευχαριστίες

Στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας συνέβαλαν πολλοί άνθρωποι που οφείλω και θέλω να ευχαριστήσω.

Ευχαριστώ θερμά τον επίκουρο καθηγητή ΕΜΠ Βασίλειο Σπιτά που δέχτηκε την ιδέα μου, με εμπιστεύτηκε στην εκπόνηση της εργασίας υπό την επίβλεψή του και με κατηύθυνε, χωρίς την επιβολή περιορισμών ως προς την επιλογή συγκεκριμένης επιστημονικής μεθόδου προσέγγισης των κεφαλαίων που ερευνήθηκαν και αναλύθηκαν.

Καθώς στην εργασία χρειάστηκε συχνά να συνδυάσω γνώσεις που αποκόμισα γενικότερα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το διδακτικό προσωπικό της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ για τη συμβολή του.

Ακόμη, ευχαριστώ τα μέλη του εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών που αναζητήσαμε μαζί λύσεις σε προβλήματα που συνάντησα, ξεχωρίζοντας τους υποψήφιους διδάκτορες Ευστράτιο Τσολάκη και Γεώργιο Βασιλείου.

Ευχαριστώ πολύ τους φίλους μου, που ήταν πάντα δίπλα μου.

Τέλος, περισσότερο από όλους ευχαριστώ τους γονείς μου Θόοντα και Ευθαλία και την αδελφή μου Βερονίκη, που με έχουν στηρίξει όλα αυτά τα χρόνια ανελλιπώς, από κάθε άποψη. Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη σε εκείνους.

Περιεχόμενα

	Περίληψη	3
	Abstract	5
	Ευχαριστίες	9
	Περιεχόμενα	11
1	Εισαγωγή	13
1.1	Σκοπός της εργασίας	13
1.2	Παρούσα διαδικασία πρόσδεσης	17
1.3	Αναζήτηση πιθανών υλοποιήσεων εναλλακτικής διαδικασίας πρόσδεσης	18
1.4	Προτεινόμενη υλοποίηση εναλλακτικής διαδικασίας πρόσδεσης	21
2	Υπολογισμός βοηθητικού νήματος	22
3	Δυναμικές εξισώσεις πτήσης σφαίρας – συρματοσχοίνου	25
3.1	Μεταβολή Μάζας	25
3.2	Επιτάχυνση Βαρύτητας	27
3.3	Επίδραση Ανέμου	27
3.4	Παραμετρική Ανάλυση	31
3.5	Εύρεση βέλτιστων γωνιών εκτόξευσης – Αριθμητική Μέθοδος Στόχου	36
3.6	Ακρίβεια επίτευξης στόχου – Περιοχές Εμπιστοσύνης	37
4	Πνευματικό υποσύστημα	44
4.1	Σύστημα εκτόξευσης	44
4.2	Πνευματικό κύκλωμα	53
4.2.1	Συμπιεστής	54
4.2.2	Κάννη	56
4.2.3	Ψύκτης	57
4.2.4	Δευτερεύον αεροφυλάκιο	58
4.2.5	Φιάλη Αζώτου	59
5	Έλεγχος βάσης κανονιού	60
5.1	Υπολογισμός ροπής & ισχύος συστήματος	60
5.2	Εκλογή κινητήρα & μειωτήρα στροφών για τον άξονα y	67
5.3	Εκλογή κινητήρα & μειωτήρα στροφών για τον άξονα z	74
6	Διάταξη υποδοχής σφαίρας	81
6.1	Τύμπανο υποδοχής	81
6.2	Χοάνη οδήγησης σφαίρας	84
7	Αναγνώριση & παρακολούθηση στόχου	89
7.1	Σύστημα Εντοπισμού Ραδιοκυμάτων	89
8	Συμπεράσματα – Μελλοντική Εξέλιξη	92
8.1	Αξιολόγηση προτεινόμενης λύσης - Κοστολόγηση βασικού εξοπλισμού	92
8.2	Θέματα μελλοντικής εξέλιξης	93
	Βιβλιογραφία	94
	Παράρτημα	96

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της εργασίας

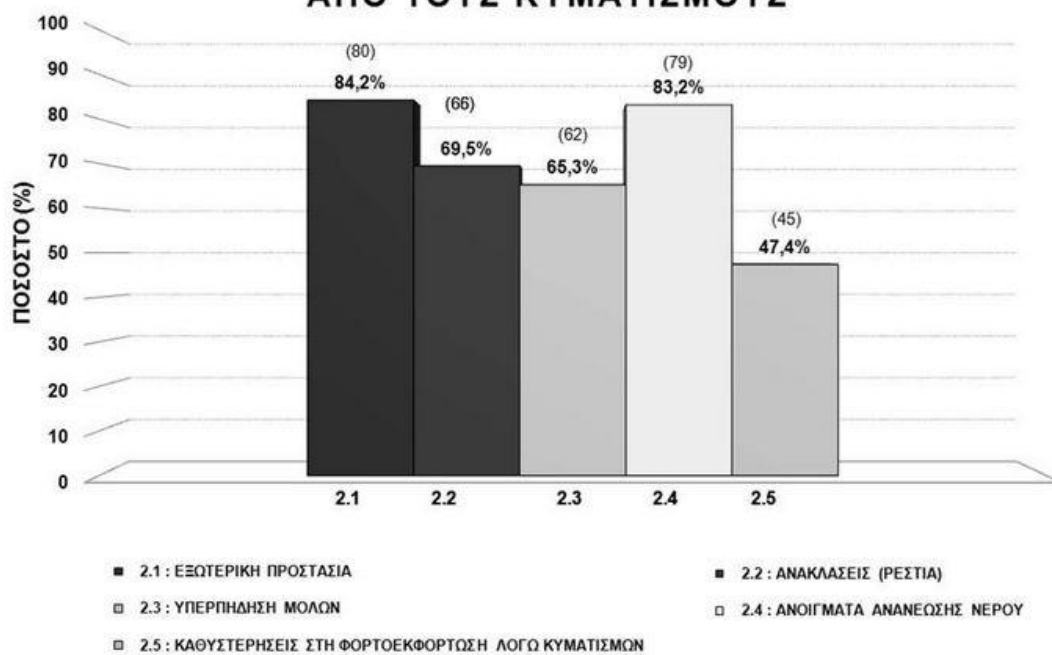
Έχοντας παρακολουθήσει και ενημερωθεί για πλήθος ανεπιτυχών προσπαθειών πρόσδεσης πλοίων σε ελληνικούς λιμένες κατά τους χειμερινούς μήνες, εντοπίστηκε η ανάγκη για ύπαρξη ασφαλέστερης και ταχύτερης διαδικασίας πρόσδεσης των επιβατηγών πλοίων σε περιπτώσεις δυσμενών καιρικών συνθηκών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ανεπαρκώς θωρακισμένων λιμένων, για παράδειγμα σε μικρά νησιά του Αιγαίου.

Την προσωπική επισήμανση της ανάγκης ακολούθησε έρευνα για την επιβεβαίωση ύπαρξής της. Όπως σημειώνει ο καθηγητής Κ. Μουτζούρης, διευθυντής του εργαστηρίου Λιμενικών Έργων των Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, στους ελληνικούς λιμένες παρατηρούνται ζητήματα ελλιπούς προστασίας από κυματισμούς σε ποσοστό 84% επί των 93 ενεργών λιμένων, ζητήματα ελλιπούς ασφάλειας σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες στο 75% και καθυστερήσεις στη φορτοεκφόρτωση λόγω κυματισμών στο 47% των λιμένων (Σχήματα 1.1-1.4) [1].

a/a	ΛΙΜΕΝΑΣ	a/a	ΛΙΜΕΝΑΣ	a/a	ΛΙΜΕΝΑΣ	a/a	ΛΙΜΕΝΑΣ
1	Αγ. Ευστράτιος	25	Ζάκυνθος	50	Λειψοί	73	Σάμη
2	Αγ. Μαρίνα (Αίγινας)	26	Ηγουμινίτσα	51	Λιβαριά (Σκύρου)	74	Σέρφορος
3	Αγ. Νικόλαος	27	Ηράκλεια	52	Μαρμάρι	75	Σητεία
4	Αγκίστρι	28	Ηράκλειο	53	Μέθυνα	76	Σίγρι (Λέσβου)
5	Αδάμας (Μήλου)	29	Θεσσαλονίκη	54	Μέριγγας (Κόθνου)	77	Σίκινος
6	Αθηνός (Θήρας)	30	Θηρασιά (Θήρας)	55	Μονεμβασιά	78	Σκάθος
7	Αιγάλη (Αμοργού)	31	Ιθάκη	56	Μουδανιά (Νέα)	79	Σκόπελος
8	Αίγινα	32	Ίος	57a	Μύκονος (Νέος Λιμένας)	80	Σουβάλα
9	Αλόνησος	33	Καβάλα	57b	Μύκονος (Παλαιός Λιμένας)	81	Σουδα
10	Ανάφη	34	Κάλυμνος	58	Μύρινα (Λήμνου)	82	Σπέτσες
11	Αντικύθηρα	35	Καμάρες (Σίφνου)	59	Μυτιλήνη	83	Σύμη
12	Αργοντόλι	36	Καρίδιβασι (Σάμου)	60	Νάξος	84	Σχοινούσα
13a	Αστυπάλαια (Αγίου Ανδρέα)	37	Κάρσος	61	Νεάπολη	85	Τήλος
13b	Αστυπάλαια (Χώρας)	38	Κάσος	62	Νίσυρος	86	Τήνος
14	Βαθό (Σάμου)	39	Καστελόριζο	63	Παροικιά (Πάρου)	87	Ύδρα
15	Βόλος	40	Κατάπολα (Αμοργού)	64	Πάτιμος	88	Φοιλέγανδρος
16	Γάϊος (Παξών)	41	Κέα	65	Πάτρα	89	Φοόρνοι (Ικαρίας)
17	Γαύριο (Λαύρου)	42	Κέρκυρα	66	Πειραιάς	90	Χάλκη
18	Γύθειο	44	Κουφονήσια	67	Πηγάδια (Καρπάθου)	91	Χίος
19	Διακόφτι (Κυθήρων)	45	Κυλλήνη	68	Πόρος (Αττικής)	92	Ψάθη (Κιμώλου)
20	Διαφάνι (Καρπάθου)	46	Κύμη	69	Πόρος (Κορινθίας)	93	Ψαρά
21	Δονούσα	47	Κως	70	Ραφήνα		
22	Ερμιόνη	48	Λακκί (Λέρου)	71	Ρέθυμνο		
23	Ερμιόπολη (Σύρου)	49	Λαύριο	72	Ρόδος		
24	Εύδηλος (Ικαρίας)						

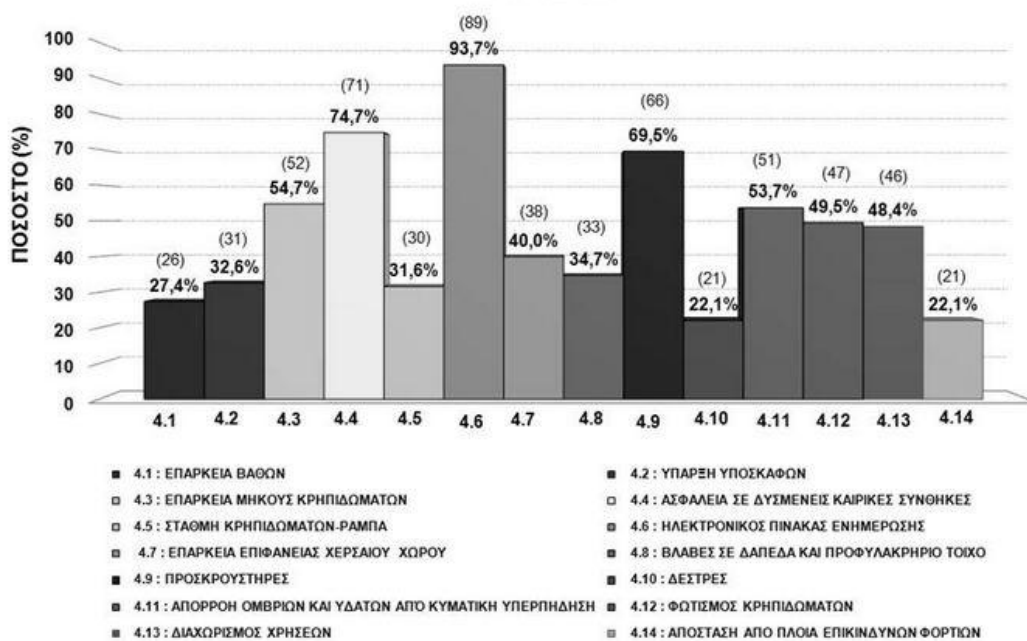
Σχήμα 1.1

2. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΗΣ ΛΙΜΕΝΟΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ



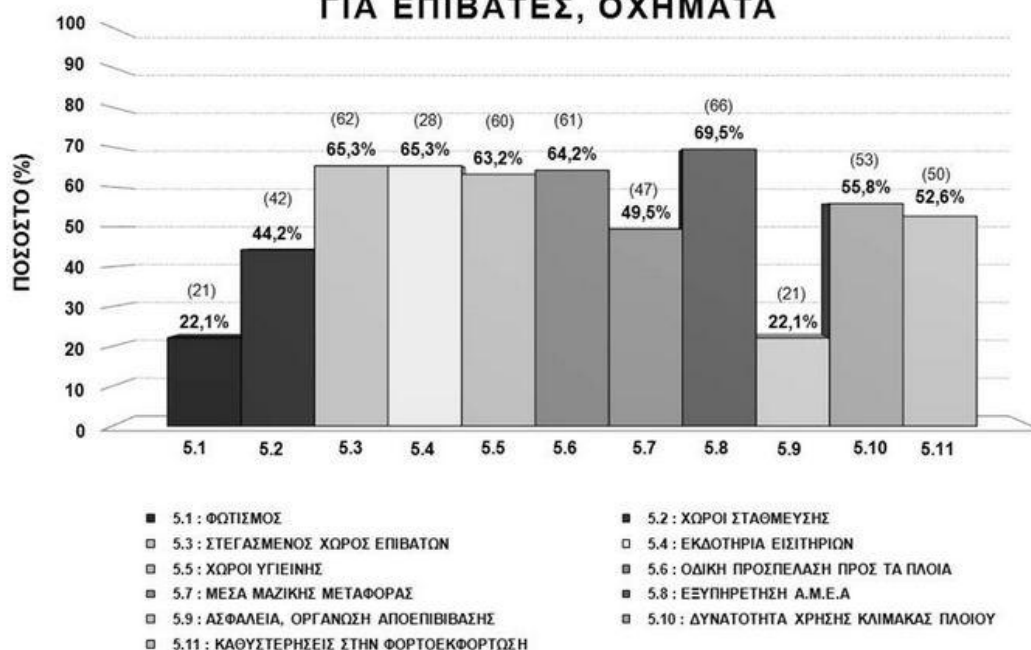
Σχήμα 1.2

4. ΘΕΣΕΙΣ ΠΡΟΣΔΕΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ



Σχήμα 1.3

5. ΔΙΕΥΚΟΛΥΝΣΕΙΣ ΣΤΗ ΧΕΡΣΑΙΑ ΖΩΝΗ ΓΙΑ ΕΠΙΒΑΤΕΣ, ΟΧΗΜΑΤΑ



Σχήμα 1.4

Σε επικοινωνία με τον πλοίαρχο του Εμπορικού Ναυτικού срt. Κωνσταντίνο Καλλιοντζή επιβεβαιώθηκε η ύπαρξη περιθωρίου βελτίωσης της εφαρμοζόμενης διαδικασίας πρόσδεσης, λόγω της αυξημένης επικινδυνότητας και των νεκρών χρόνων που προκύπτουν από την παροντική υλοποίηση.

Με απώτερο στόχο τη βελτίωση της ποιότητας ζωής του κοινωνικού συνόλου, μέσω της ανάπτυξης ταχύτερων και ασφαλέστερων διαδικασιών, γνώμονα σύμφωνα με τον οποίο οφείλει να ενεργεί ο Μηχανικός, αποφασίστηκε η μελέτη ενός εναλλακτικού τρόπου πρόσδεσης πλοίων. Σημειώνεται ότι η μελέτη αυτή λαμβάνει υπόψιν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ελληνικών νησιών και των λιμένων τους, για τα οποία προορίζεται, και η λήψη αποφάσεων σχετικά με την υλοποίηση της διαδικασίας προκύπτει με βάση τα συγκεκριμένα δεδομένα: ανεπαρκώς θωρακισμένοι λιμένες, μικρή πιθανότητα πραγματοποίησης λιμενικών έργων στο άμεσο μέλλον, αυξημένη πιθανότητα ολιγώρων διακοπών ηλεκτροδότησης.

Επιπλέον, όπως σε κάθε τεχνική μελέτη, η ανθρώπινη ασφάλεια, το ελάχιστο απαιτούμενο κόστος κατασκευής και η ελάχιστη δυνατή παρέμβαση, ιδιαίτερα στο λιμένα αλλά και στο πλοίο κατείχαν καθοριστικό ρόλο.

1.2 Παρούσα διαδικασία πρόσδεσης

Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται, ώστε να επισημανθούν τα σημεία που επιδέχονται βελτίωση:

- προσέγγιση στο λιμένα διατηρώντας ασφαλή απόσταση – διαρκής ετοιμότητα για πραγματοποίηση ελιγμών καθ'όλη τη διάρκεια της διαδικασίας
- ρίψη βοηθητικών σχοινιών (ιβιλιά<heaving line) από το προσωπικό του πλοίου
- εκτύλιξη κάβων από τα τύμπανα του πλοίου
- εντοπισμός και τύλιξη του βοηθητικού σχοινιού έως την προβλήτα από το προσωπικό του λιμένα
- δέσιμο των κάβων στις δέστρες

Υπό δυσμενείς καιρικές συνθήκες, το πλοίο ενδέχεται να μη μπορέσει να προσεγγίσει το λιμένα με ασφάλεια προκειμένου να προσδεθεί. Επιπλέον, σε περίπτωση προσέγγισης, το προσωπικό του λιμένα θέτει σε κίνδυνο τη σωματική του ακεραιότητα εκτιθέμενο στους ισχυρούς κυματισμούς που καλύπτουν ορισμένες φορές την προβλήτα (Σχήμα 1.5 [2]).



Σχήμα 1.5

Επιπλέον, η ρίψη των βοηθητικών σχοινιών από το πλήρωμα στην προβλήτα προϋποθέτει μικρή απόσταση του πλοίου από την προβλήτα, άρα ιδιαίτερα προσεκτικούς ελιγμούς στο χειρισμό του πλοίου και χαμηλή ταχύτητα προσέγγισης μέχρι να προσδεθεί.

1.3 Αναζήτηση πιθανών υλοποιήσεων εναλλακτικής διαδικασίας πρόσδεσης

Προκειμένου να αναπτυχθεί μια νέα διαδικασία με ρεαλιστικές πιθανότητες να υλοποιηθεί στην πραγματικότητα και να προσφέρει λύση ή βελτίωση της κατάστασης, αναζητήθηκαν και μελετήθηκαν σε αρχικό στάδιο διαφορετικές εναλλακτικές μέθοδοι:

Η αρχική πρόταση υλοποίησης εναλλακτικής διαδικασίας πρόσδεσης περιλάμβανε τη χρήση ρομποτικού φιδιού (snake robot) (Σχήμα 1.6 [3]) για τη μεταφορά του κάβου, κινούμενου αρχικά εντός του νερού από το πλοίο έως το λιμένα και στη συνέχεια εξερχόμενου από το νερό και κινούμενου έως τη δέστρα για την κατάλληλη τοποθέτηση του κάβου.



Σχήμα 1.6

Η λύση απορρίφθηκε, καθώς ο μηχανισμός εκτίθεται στους βίαιους κυματισμούς της μελετούμενης περίπτωσης (δυσμενείς καιρικές συνθήκες) και, διαρκώς παρασυρόμενος, απαιτεί μεγάλους χρόνους και δαπανούμενη ενέργεια μέχρι να ολοκληρώσει τη μετακίνηση στην επιθυμητή θέση.

Ως επόμενη εναλλακτική λύση μεταφοράς του κάβου στο λιμένα προτάθηκε η χρήση drone/quadrocopter (Σχήμα 1.7 [4],[5]). Οι συνθήκες των 10 βαθμών της κλίμακας Beaufort σημαίνουν σοβαρές διαταραχές κατά την πτήση. Επιπλέον, η υψηλή γραμμική πυκνότητα

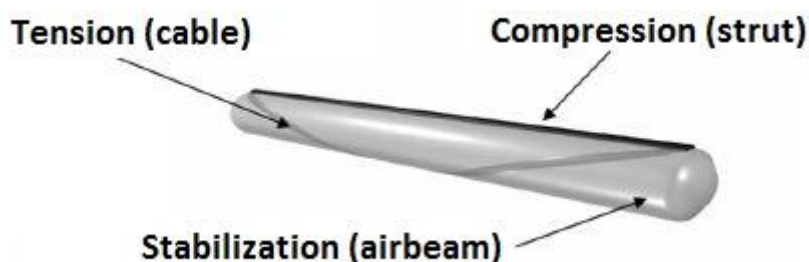
του κάβου ($\lambda \approx 2kg / m$) ο οποίος μεταφέρεται σε μεγάλη απόσταση ($20 \div 30m$) οδηγεί σε υψηλά φορτία ανύψωσης και μεταφοράς ($\geq 30kg$). Αναζητώντας σε καταλόγους του εμπορίου δε βρέθηκε προϊόν ανταποκρινόμενο στις παραπάνω συνθήκες ταχύτητας ανέμου και φορτίου. Σημειώνεται ότι το κόστος drones που ανταποκρίνονται μόνο στις συνθήκες ταχύτητας του ανέμου, ή μόνο στο μεταφερόμενο φορτίο είναι τάξης μεγέθους 10^4€ [6]. Άρα, εμφανίζεται η ανάγκη απόκτησης/σχεδιασμού ενός ισχυρού, υψηλού κόστους drone. Έτσι, η συγκεκριμένη υλοποίηση δεν αναλύθηκε περαιτέρω.



Σχήμα 1.7

Τέλος, εκτιμήθηκε η πιθανότητα χρήσης βραχίονα που θα κάλυπτε την απόσταση μεταξύ πλοίου και λιμένα για την τοποθέτηση του κάβου στη δέστρα. Η προοπτική αυτή απορρίφθηκε αμέσως σε ότι αφορά τη χρήση μεταλλικού βραχίονα, καθώς το μήκος των 20 περίπου μέτρων καθιστά απαγορευτικό το βάρος που προκύπτει: οι απαιτήσεις σε φορτία λειτουργίας των κινητήρων του βραχίονα είναι πολύ υψηλές και επιπλέον δημιουργείται το θέμα της αποθήκευσης του βραχίονα.

Ωστόσο, η περίπτωση του βραχίονα δεν απορρίφθηκε συνολικά. Αναζητήθηκαν λύσεις σε τεχνολογίες ελαφρών φορέων, όπως το προϊόν *Tensairity* (Σχήμα 1.8 [7]).

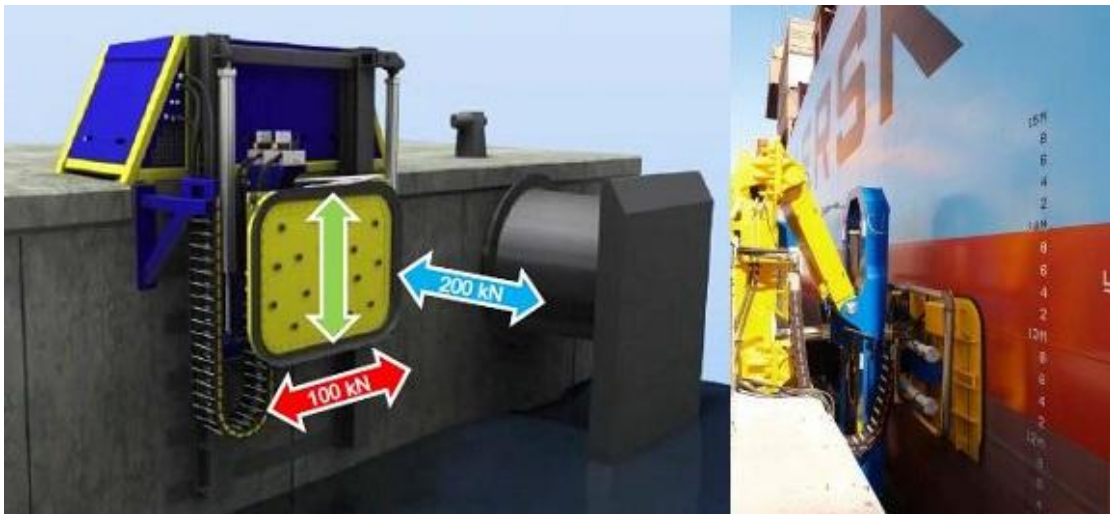


Σχήμα 1.8

Η κατασκευή αποτελείται από ράβδο που παραλαμβάνει τα θλιπτικά φορτία, ελαστικό φορέα (καλώδιο) που παραλαμβάνει τα εφελκυστικά φορτία και τέλος ένα φουσκωτό στέλεχος (μπαλόνη) που σταθεροποιεί τη διεπαφή ράβδου – καλωδίου. Για την παραλαβή

φορτίου στους τρεις άξονες, απαιτείται προσθήκη φορέων (τουλάχιστον δύο επιπλέον ζευγών ράβδου – καλωδίου ανά 120 μοίρες) . Για την κάλυψη της απόστασης πλοίου – λιμένα προστίθενται πολλαπλά στοιχεία *Tensairity* με τις απαιτούμενες συνδέσεις, επιτρέποντας με τον κατάλληλο σχεδιασμό την σύμπτυξη του μηχανισμού για την αποθήκευσή του και την ανάπτυξή του αποκλειστικά κατά τη διαδικασία της πρόσδεσης. Και η περίπτωση της ελαφράς κατασκευής, όμως, παρουσιάζει το μειονέκτημα της μεγάλης επιφάνειας προσβολής από τον άνεμο. Η δύναμη που ασκείται είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας του ανέμου, $28m/s \approx 100km/h$, και το μήκος των $20m$ οδηγεί σε πολύ υψηλές ροπές, της τάξης των $10^3 Nm$, συνεπώς δημιουργεί υψηλές απαιτήσεις όσον αφορά τη διάταξη ελέγχου θέσης, άρα ακριβό εξοπλισμό για το κάθε πλοίο.

Σημειώνεται πως ερευνήθηκαν και ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες αυτόματης πρόσδεσης πλοίων, οι οποίες, όμως, δεν ανταποκρίνονται στις υπάρχουσες υποδομές και στα έργα που ενδέχεται να πραγματοποιηθούν, όπως για παράδειγμα το σύστημα Automated Vacuum Mooring (Σχήμα 1.9 [8]), που προϋποθέτει την ύπαρξη θωρακισμένου λιμένα εκτός από την απόκτηση του εξοπλισμού δημιουργίας κενού και ανύψωσης του πλοίου.



Σχήμα 1.9

1.4 Προτεινόμενη υλοποίηση εναλλακτικής διαδικασίας πρόσδεσης

Η λύση που φάνηκε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του σύντομου χρόνου πρόσδεσης και του χαμηλού κόστους κατασκευής, αποθήκευσης και λειτουργίας, αφορά την εκτόξευση, μέσω πνευματικού συστήματος, μιας σφαίρας με αναρτημένο βοηθητικό νήμα το οποίο καταλήγει στον κάβο. Η σφαίρα παραλαμβάνεται από μια διάταξη υποδοχής στο λιμένα και το βοηθητικό σχοινί περιτυλίσσεται στο τύμπανο της υποδοχής, έλκοντας τον κάβο. Ο κάβος επίσης περιτυλίσσεται στο τύμπανο, ολοκληρώνοντας τη διαδικασία της πρόσδεσης. Για την υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας αναπτύσσονται τα εξής υποσυστήματα:

- πνευματικό υποσύστημα εκτόξευσης σφαίρας
- ηλεκτρομηχανικό υποσύστημα ελέγχου θέσης του εκτοξευτήρα
- ηλεκτρομηχανικό υποσύστημα υποδοχής της σφαίρας και περιτύλιξης νήματος και κάβου
- υποσύστημα ραδιοκυμάτων για τον εντοπισμό του στόχου-υποδοχής

Τα κεφάλαια παρατίθενται με τη σειρά που ακολούθησαν σχεδόν μονοσήμαντα οι υπολογισμοί: η εκλογή κινητήρων για τον έλεγχο θέσης του εκτοξευτήρα (πνευματικό κανόνι) εξαρτάται από την μάζα και τη γεωμετρία του πνευματικού συστήματος, ο σχεδιασμός του οποίου εξαρτάται από το δυναμικό μοντέλο πτήσης σφαίρας – νήματος κ.ο.κ..

Κεφάλαιο 2 – Υπολογισμός βοηθητικού νήματος

Όπως έχει αναφερθεί, στην εκτοξευόμενη σφαίρα αναρτάται βοηθητικό νήμα. μικρής γραμμικής πυκνότητας και διαμέτρου, προκειμένου η πτήση να προσεγγίζει την πτήση σφαίρας χωρίς αναρτημένο νήμα. Δηλαδή, να υπάρχει κατά το δυνατόν μικρή μεταβολή μάζας του συστήματος, συνεπώς και μικρή μεταβολή της επίδρασης της βαρύτητας, καθώς και της επίδρασης του ανέμου, λόγω της μεταβαλλόμενης επιφάνειας. Αφού η σφαίρα παραληφθεί από τη διάταξη υποδοχής, ακολουθεί η περιέλιξη του βοηθητικού νήματος στο τύμπανο που έλκει τον κάβο, ο οποίος στη συνέχεια επίσης τυλίσσεται στο τύμπανο.

Με βάση τα ποιοτικά κριτήρια που έχουν τεθεί για το νήμα, η αναζήτηση στρέφεται σε εύκαμπτα συρματοσχοινία, που σε σύγκριση με τα συνθετικά σχοινιά με την ίδια διάμετρο, εργάζονται σε μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο λειτουργίας.

Το φορτίο λειτουργίας προσδιορίζεται κατά τη δυσμενέστερη φόρτιση του νήματος. Στο Σχήμα 2.1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η σύνδεση του νήματος με τον κάβο. Σύμφωνα με τη Μηχανική των Εύκαμπτων Φορέων [9], το κάθε σχοινί παίρνει τη μορφή αλυσοειδούς καμπύλης, που διαμορφώνεται από την τάση που ασκείται στα άκρα του και από τη γραμμική του πυκνότητα, η οποία λόγω της βαρύτητας εκφράζεται ως ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο κατά μήκος του σχοινιού.

Η εξίσωση της αλυσοειδούς καμπύλης περιγράφεται από τη σχέση:

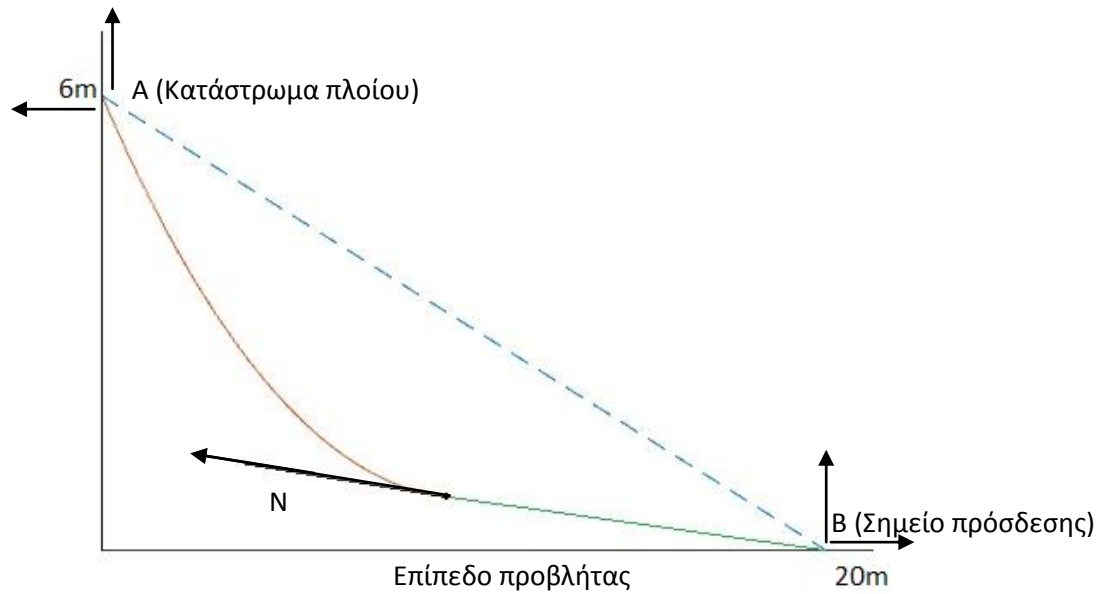
$$y = \frac{F_0}{q} \left[\cosh\left(\frac{q}{F_0} x\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

$$\text{και } q = \lambda g \quad (2.2)$$

όπου F_0 η οριζόντια τάση του σχοινιού,

λ η γραμμική πυκνότητα του σχοινιού,

g η επιτάχυνση της βαρύτητας.



Σχήμα 2.1: Το βοηθητικό σχοινί καθώς τυλίσσεται έλκει τον κάβο προς το σημείο B . Από τον κάβο δέχεται το φορτίο N .

Οι παραδοχές σύμφωνα με τις οποίες υπολογίζονται τα ασκούμενα φορτία είναι πως:

- τη στιγμή της πλήρους περιέλιξης του νήματος, δηλαδή ακριβώς πριν ξεκινήσει η περιέλιξη του κάβου, η εφαπτομένη της αλυσοειδούς του κάβου στο πέρας του ($x = 20m$) είναι οριζόντια ($y' = 0$),
- η αρχή του κάβου ($x = 0$) βρίσκεται σε ύψος 6 μέτρων ($y = 6m$).

Έτσι, η εξίσωση της καμπύλης του κάβου για την παραπάνω στιγμή διαμορφώνεται ως εξής:

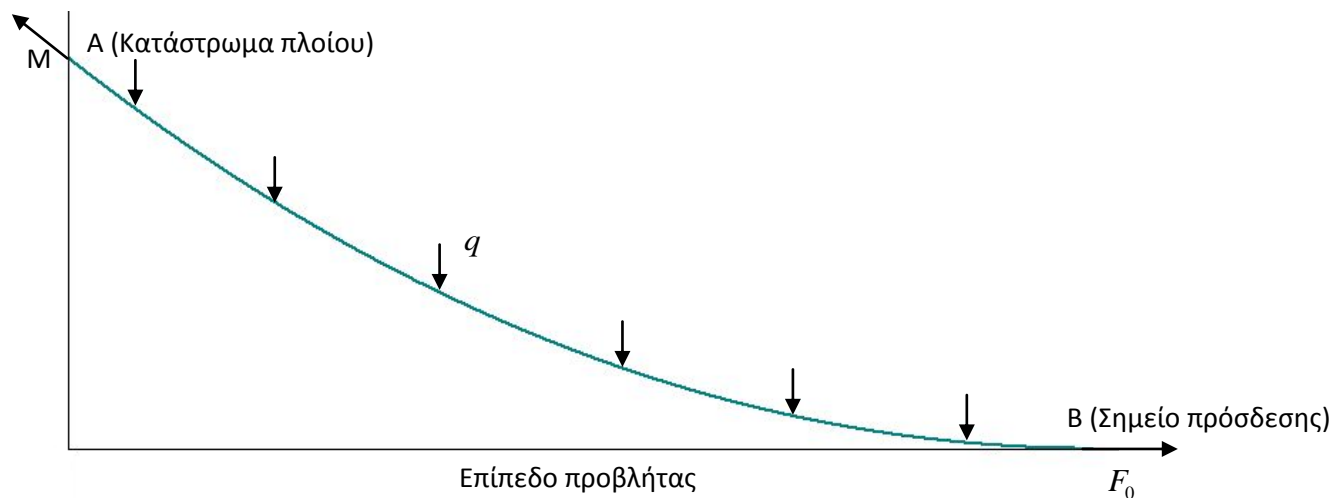
$$y = \frac{F_0}{q} \left[\cosh\left(\frac{q}{F_0}(x - 20)\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Επιλύοντας ως προς $\frac{F_0}{q}$ την εξίσωση της δεύτερης παραδοχής

$$6 = \frac{F_0}{q} \left[\cosh\left(\frac{q}{F_0}(0 - 20)\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

ταχύτατα σε περιβάλλον Mathematica, προκύπτει $\frac{F_0}{q} \approx 34.3m$.

Δεδομένης της γραμμικής πυκνότητας του κάβου από εμπορικό κατάλογο [10], $\lambda = 2kg/m$, προκύπτει $q = 19.6N/m$ και $F_0 \approx 672N$.



Σχήμα 2.2: Το βοηθητικό σχοινί έχει τυλιχθεί σχεδόν πλήρως και δέχεται τη μέγιστη φόρτιση, καθώς παραλαμβάνει τη μέγιστη μάζα κάβου.

Η τιμή $F_0 \approx 672N$ είναι η μέγιστη φόρτιση την οποία παραλαμβάνει το νήμα, δεδομένου ότι είναι η στιγμή που παραλαμβάνει το μέγιστο μήκος κάβου. Αναζητώντας προϊόντα του εμπορίου που καλύπτουν τις ανάγκες της εφαρμογής, επιλέγεται ανοξείδωτο εύκαμπτο συρματόσχοινο διαμέτρου $2.5mm$ με μέγιστο φορτίο εργασίας (working load limit - WLL) τα $710N$, γραμμική πυκνότητα $0.23 \cdot 10^{-3} kg / m$ και συντελεστή ασφαλείας $S_f = 5$ [11].

Κεφάλαιο 3 – Δυναμικές εξισώσεις πτήσης σφαίρας - συρματοσχοινο

Η ρεαλιστική ανάλυση του φυσικού μοντέλου πτήσης του συστήματος σφαίρας-σχοινοίου επέχει κρίσιμο ρόλο στην επιτυχή διαστασιολόγηση και το συνολικό σχεδιασμό της διάταξης εκτόξευσης-υποδοχής.

Παρατηρώντας το φυσικό μοντέλο, διακρίνονται τρεις βασικοί παράγοντες:

- η μεταβολή της μάζας του συστήματος κατά το ξετύλιγμα του συρματοσχοινοίου
- η επιτάχυνση της βαρύτητας
- η επίδραση της ροής του ανέμου στο κινούμενο σύστημα

Στο σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται, ορίζονται ως z ο κατακόρυφος άξονας και xy το επίπεδο.

3.1 Μεταβολή Μάζας

Καθώς η εκτοξευόμενη μάζα πραγματοποιεί μεταφορική κίνηση σύμφωνα με την αρχική της ταχύτητα, το αναρτημένο σχοινί αναγκάζεται να ακολουθήσει, προσθέτοντας σε κάθε χρονική στιγμή t μια απειροστή μάζα dm στο συνολικό σύστημα.

Για την περιγραφή του φαινομένου εφαρμόζονται οι σχέσεις μεταβολής της ορμής ανά άξονα κίνησης, όπως συνηθίζεται σε τέτοιου είδους συστήματα [12].

Αν θεωρηθεί ότι το κέντρο μάζας του συστήματος τη χρονική στιγμή t κινείται με ταχύτητα

$$\vec{U} = [u, v, w] = [U_x, U_y, U_z] = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} \quad (3.1)$$

τότε σε χρόνο dt στο σύστημα θα εισέλθει μάζα σχοινοίου ίση με

$$dm = \|\vec{U}\| \lambda dt \quad (3.2)$$

όπου λ η γραμμική πυκνότητα του σχοινοίου.

Αναλύοντας τον τυχαίο άξονα κίνησης, i , τη χρονική στιγμή t η ορμή του συστήματος με μάζα m και ταχύτητα του κέντρου μάζας κατά i , U_i , θα είναι

$$p|_{i,t} = mU_i \quad (3.3)$$

Μετά από χρόνο dt , η μάζα και η ταχύτητά του θα έχουν μεταβληθεί έτσι ώστε

$$p|_{i,t+dt} = (m + dm)(U_i + dU_i) \quad (3.4)$$

Σύμφωνα με το β' νόμο του Νεύτωνα, ο ρυθμός μεταβολής της ορμής ενός συστήματος ισούται με τη συνισταμένη δύναμη που ενεργεί σε αυτό:

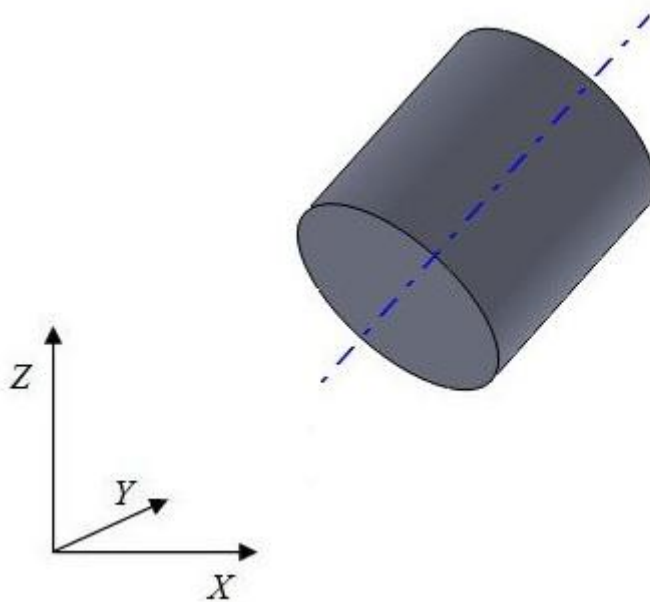
$$\begin{aligned} \frac{dp_i}{dt} &= \sum F_i \Rightarrow \frac{(m + dm)(U_i + dU_i) - mU_i}{dt} = \sum F_i \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{mdU_i + dm}{dt} = \sum F_i \Rightarrow \\ &\Rightarrow \sum F_i = ma_i + \lambda U U_i \end{aligned} \quad (3.5)$$

Έτσι, η επιτάχυνση που προκύπτει ανά άξονα i είναι :

$$a_i = \frac{\sum F_i - \lambda U U_i}{m} \quad (3.6)$$

Στη συνέχεια, ολοκληρώνοντας αριθμητικά προκύπτει η ταχύτητα και ακολούθως η μετατόπιση.

Για τις απειροστές μάζες dm (Σχήμα 3.1) που εισέρχονται κάθε στιγμή στο σύστημα θεωρείται ότι λόγω της απειροστής τους διάστασης δεν πραγματοποιούν περιστροφική, αλλά μόνο μεταφορική κίνηση. Η θεώρηση αυτή είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα εφόσον είναι υψηλή η διαμέριση του σχοινιού και οι στοιχειώδεις μάζες του σχοινιού μπορούν να θεωρηθούν ως κρίκοι αλυσίδας.



Σχήμα 3.1: Απειροστή μάζα σχοινιού στο χώρο

3.2 Επιτάχυνση της βαρύτητας

Σε κάθε μάζα του συστήματος ασκείται κατά τον άξονα z η δύναμη που οφείλεται στο βαρυτικό πεδίο:

$$\vec{F}_g = -mg\vec{k} \quad (3.7)$$

όπου $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

3.3 Επίδραση ανέμου

Το σύστημα επηρεάζεται από την κίνησή του σχετικά με τον άνεμο. Με δεδομένα την πυκνότητα ρ και το διάνυσμα της ταχύτητας του ανέμου \vec{U}_{wind} , η δύναμη που ασκείται στο κάθε στοιχείο στη διεύθυνση i εξαρτάται από τη δική του ταχύτητα και από τη γεωμετρία του: επιφάνεια A και αεροδυναμικός συντελεστής c_D , σύμφωνα με τη σχέση:

$$F_{i,wind} = \frac{\rho}{2} c_D A \Delta U_i |\Delta U_i| \quad (3.8)$$

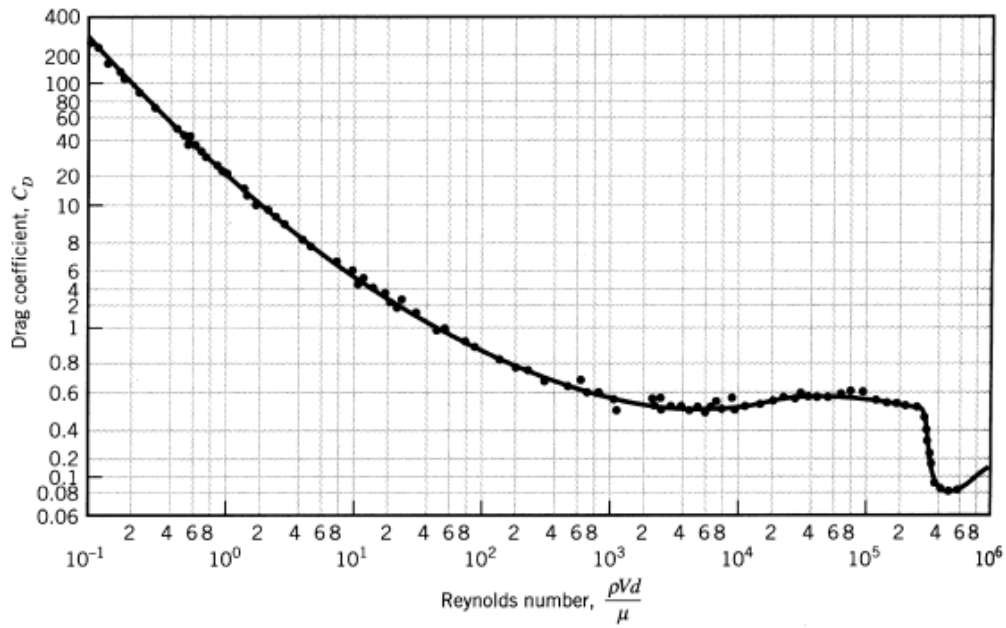
$$\text{όπου } \Delta U_i = U_{i,wind} - U_i \quad (3.9)$$

δηλαδή η διαφορά των συνιστωσών των ταχυτήτων του ανέμου και του στοιχείου κατά τη διεύθυνση i .

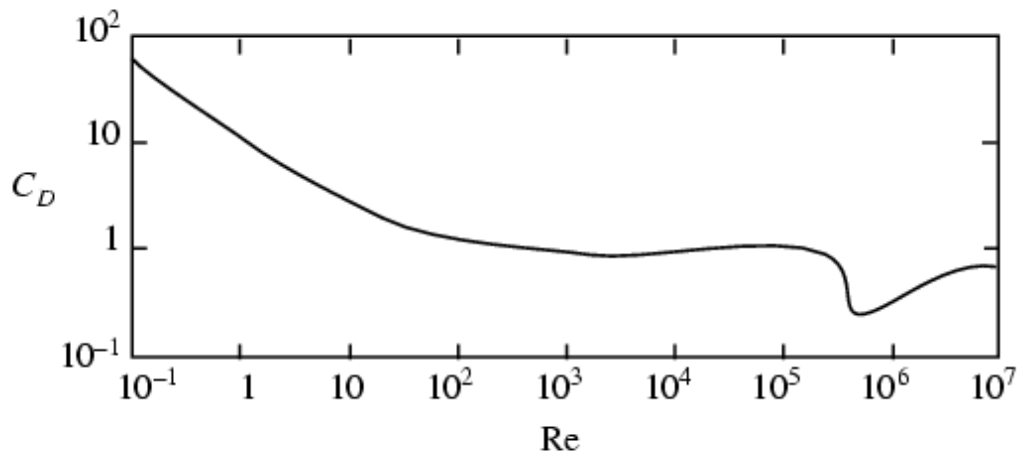
Η πυκνότητα του αέρα για τις συνθήκες που μελετώνται, δηλαδή σε θερμοκρασία $\theta \approx 0^\circ \text{C}$ και μηδενικό υψόμετρο λαμβάνει την τιμή $\rho = 1.3 \text{ kg/m}^3$.

Οι συντελεστές αεροδυναμικής αντίστασης έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τα επόμενα σχήματα [13]&[14], για αριθμό Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{UD}{\nu} = \frac{30 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0.05 \text{m}}{13.30 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \approx 1.1 \cdot 10^5 \quad (3.10)$$



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα Reynolds - C_D για λεία σφαίρα.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα Reynolds - C_D για λείο κύλινδρο

Σχετικά με τα στοιχεία του σχοινοῦ, λόγω κυλινδρικής γεωμετρίας, η προβαλλόμενη επιφάνεια είναι, με κυκλική εναλλαγή για τις τρεις διαστάσεις:

$$A_x = D_{line} \sqrt{\Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (3.11)$$

όπου Δi η διαφορά τεταγμένης $i_{\text{πέρατος}} - i_{\text{αρχής}}$ του στοιχείου κατά τον άξονα i και

ο αεροδυναμικός συντελεστής:

$$c_{D,line} = 1.2.$$

Τελικά, ανά άξονα προκύπτουν οι παρακάτω δυνάμεις ανέμου στο σχοινί:

$$\begin{aligned} F_{x,wind} &= \frac{\rho}{2} c_{D,line} D_{line} \sqrt{\Delta y^2 + \Delta z^2} (U_{x,wind} - U_x) |U_{x,wind} - U_x| \\ F_{y,wind} &= \frac{\rho}{2} c_{D,line} D_{line} \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2} (U_{y,wind} - U_y) |U_{y,wind} - U_y| \\ F_{z,wind} &= \frac{\rho}{2} c_{D,line} D_{line} \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} (U_{z,wind} - U_z) |U_{z,wind} - U_z|. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Σχετικά με τη σφαίρα, η προβαλλόμενη επιφάνεια είναι:

$$A = \pi \frac{D^2}{4} \quad (3.13)$$

και ο αεροδυναμικός συντελεστής:

$$c_D = 0.5 .$$

Για τη σφαίρα είναι:

$$\begin{aligned} F_{x,wind} &= \frac{\rho}{2} c_D \pi \frac{D^2}{4} (U_{x,wind} - U_x) |U_{x,wind} - U_x| \\ F_{y,wind} &= \frac{\rho}{2} c_D \pi \frac{D^2}{4} (U_{y,wind} - U_y) |U_{y,wind} - U_y| \\ F_{z,wind} &= \frac{\rho}{2} c_D \pi \frac{D^2}{4} (U_{z,wind} - U_z) |U_{z,wind} - U_z| \end{aligned} \quad (3.14)$$

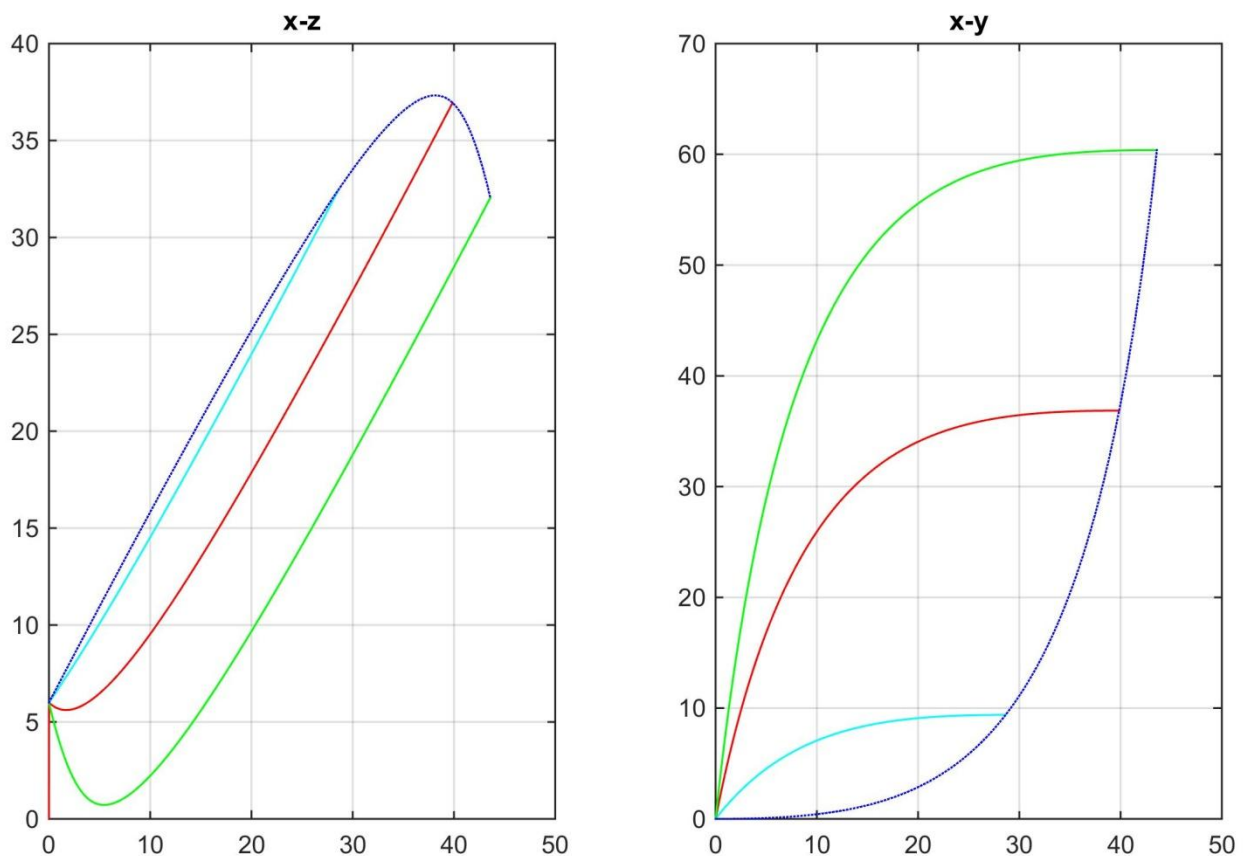
Τελικά, συγκεντρώνοντας τα παραπάνω στοιχεία, προκύπτουν οι εξής εξισώσεις ανά άξονα:

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{\sum F_{x,wind} - \lambda U U_x}{m} \\ a_y &= \frac{\sum F_{y,wind} - \lambda U U_y}{m} \\ a_z &= -g + \frac{\sum F_{z,wind} - \lambda U U_z}{m} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Παράγοντας τον αντίστοιχο κώδικα, [Παράρτημα 3.1], και δίνοντας τιμές που διαμορφώνουν τις συνθήκες υπό τις οποίες πρόκειται να λειτουργήσει ο σχεδιαζόμενος μηχανισμός, λαμβάνεται η τροχιά που διαγράφει το σύστημα σφαίρας-σχοινοῦ.

Ενδεικτικά, στο επόμενο Σχήμα παρατίθεται η τροχιά που αντιστοιχεί στην περίπτωση εκτόξευσης σφαίρας μάζας $m = 1kg$ και διαμέτρου $D = 0.05m$ και νήματος με τα χαρακτηριστικά που ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 2, δηλαδή με γραμμική πυκνότητα $\lambda = 0.23 \cdot 10^{-3} kg/m$ και διάμετρο $D_{line} = 2.5 \cdot 10^{-3} m$, για ταχύτητα εκτόξευσης

$U_0 = 80 \frac{m}{s}$ στο επίπεδο xz , υπό γωνία $\theta = 45^\circ$ και ανέμου $U_w = 33 \frac{m}{s}$ κατά τον άξονα των y . Σημειώνεται ότι το επίπεδο των κάβων, όπου πρόκειται να εγκατασταθεί ο μηχανισμός εκτόξευσης, απέχει $\sim 6m$ κατά z από το επίπεδο των δεστρών. Για καλύτερη εποπτεία της τριδιάστατης μετατόπισης στο χώρο, οι διαγραφόμενες τροχιές παρουσιάζονται στα δύο επίπεδα xz και xy σε στιγμιότυπα σε χρόνους $t = 0.9sec$, $t = 2.1sec$, $t = 3sec$.



Σχήμα 3.4: Τροχιά της σφαίρας (μπλε καμπύλη) και στιγμιότυπα του συστήματος σφαίρας – σχοινιού για τις χρονικές στιγμές $t = 0.9sec$ (κυανή καμπύλη)
 $t = 2.1sec$ (κόκκινη καμπύλη)
 $t = 3sec$ (πράσινη καμπύλη)

3.4 Παραμετρική Ανάλυση

Θεωρώντας αμετάβλητο το διάνυσμα ταχύτητας ανέμου συναρτήσει του χρόνου, παράγεται η τροχιά κίνησης για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων του συστήματος, π.χ. διάμετρος σχοινιού, μάζα σφαίρας, ώστε να γίνει αντιληπτή η μεταβολή της συμπεριφοράς του συστήματος ανάλογα με την παράμετρο που εξετάζεται. Παρότι η επιλογή του βοηθητικού σχοινιού έχει ολοκληρωθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, στη συνέχεια θα παρουσιαστούν διαγράμματα για διάφορες τιμές των τεχνικών χαρακτηριστικών του, ώστε να καταστεί σαφής η επίδραση που έχει στο σύστημα συνολικά.

Οι τιμές που προσδίδονται στις παραπάνω παραμέτρους δεν είναι αυθαίρετες, αλλά διαμορφώνονται από ποιοτικούς περιορισμούς και κατευθύνσεις (μικρή μάζα σφαίρας για την περίπτωση ατυχούς περιστατικού κρούσης σε άνθρωπο) ή προέρχονται από καταλόγους κατασκευαστών (χαρακτηριστικά βοηθητικού σχοινιού). Επιπλέον, οι τιμές αυτές επηρεάζονται από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του πνευματικού συστήματος εκτόξευσης, όπως αυτό περιγράφεται σε επόμενο εδάφιο, δημιουργώντας ένα βρόχο επαναπροσδιορισμού των τιμών.

Δηλαδή, σε πρώτο στάδιο ορίζονται οι παράμετροι από ενδεικτικές μέσες τιμές:

Μάζα σφαίρας: $m = 1kg$

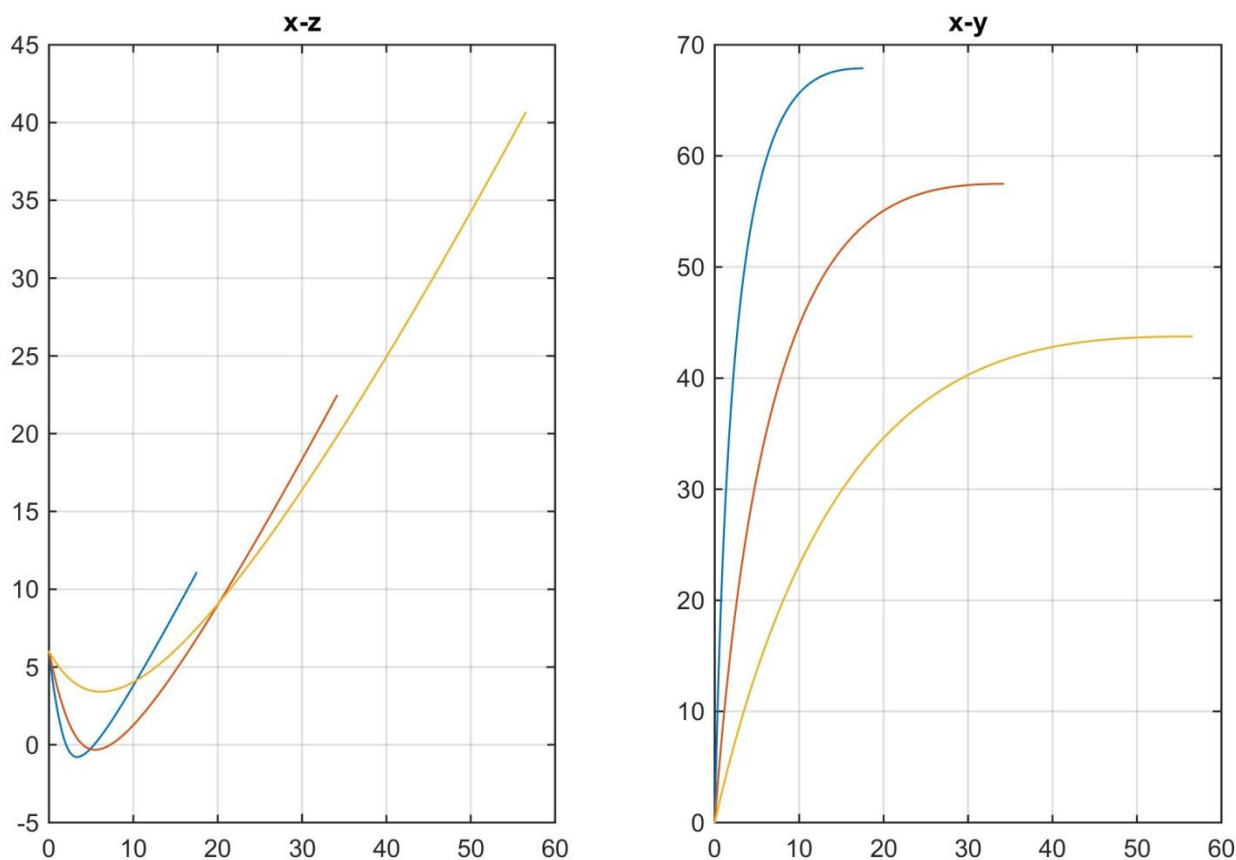
Διάμετρος σφαίρας: $D = 0.05m$

Γραμμική πυκνότητα σχοινιού: $\lambda = 0.23 \cdot 10^{-3} kg / m$

Διάμετρος σχοινιού: $D_{line} = 2.5 \cdot 10^{-3} m$.

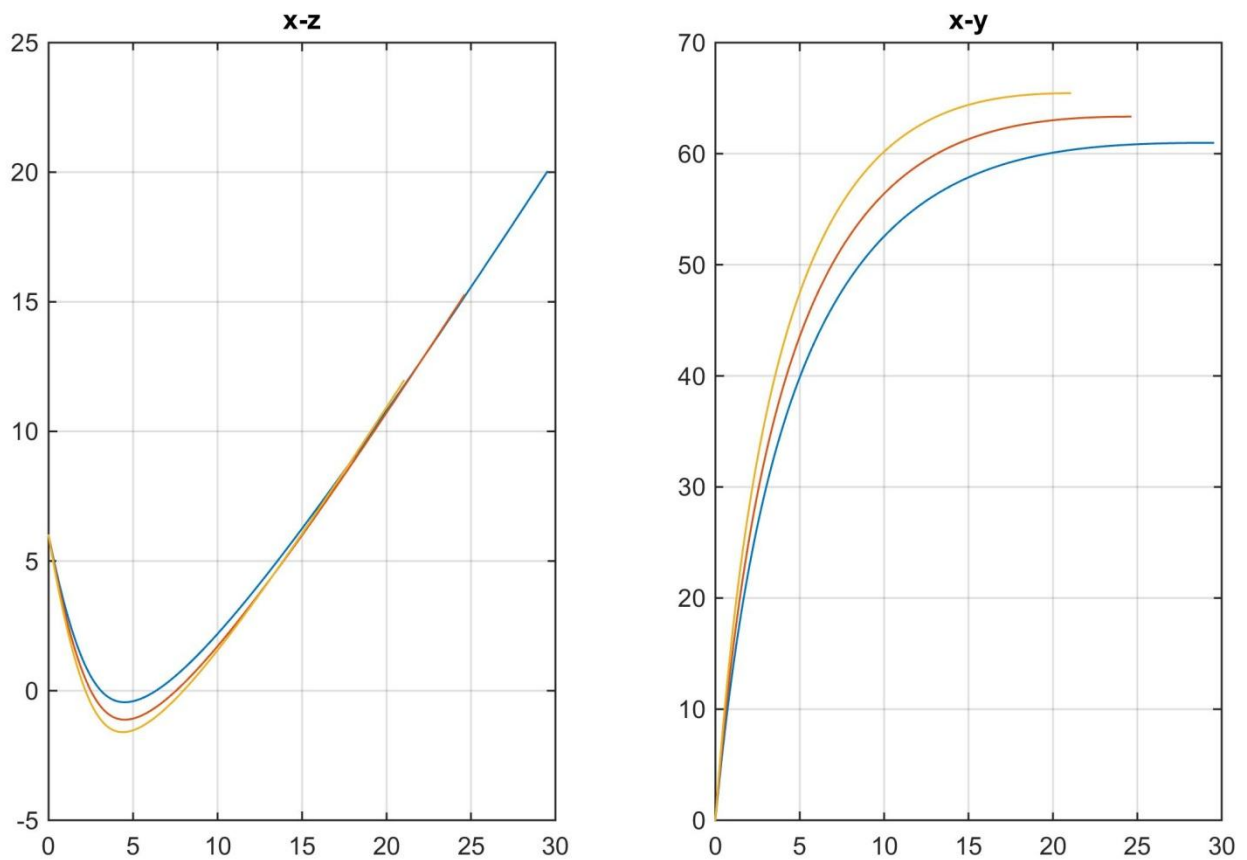
Στη συνέχεια, αυξομειώνονται οι παραπάνω τιμές, προκειμένου η σφαίρα να διανύσει την επιθυμητή απόσταση στο δεδομένο χρόνο, 3sec, και παράλληλα να οδηγήσει σε οικονομικό και εργονομικό σχεδιασμό το μηχανισμό εκτόξευσης: μικρό μήκος κανονιού, χαμηλές τιμές απαιτούμενης πίεσης.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται στιγμιότυπα του συστήματος για χρόνο $t = 3sec$. Οι μονάδες μέτρησης των αξόνων είναι μέτρα (m). Ο κώδικας που έχει αναπτυχθεί σχετικά βρίσκεται στο [Παράρτημα 3.2].



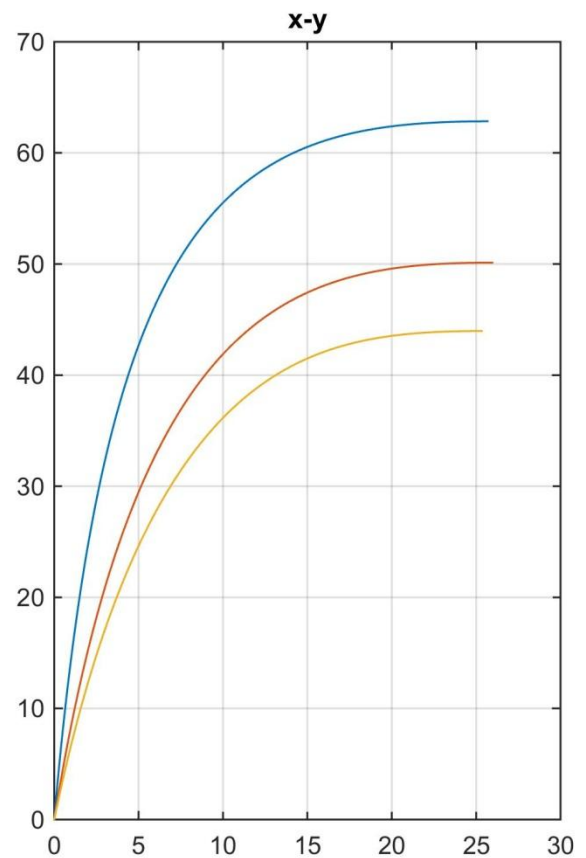
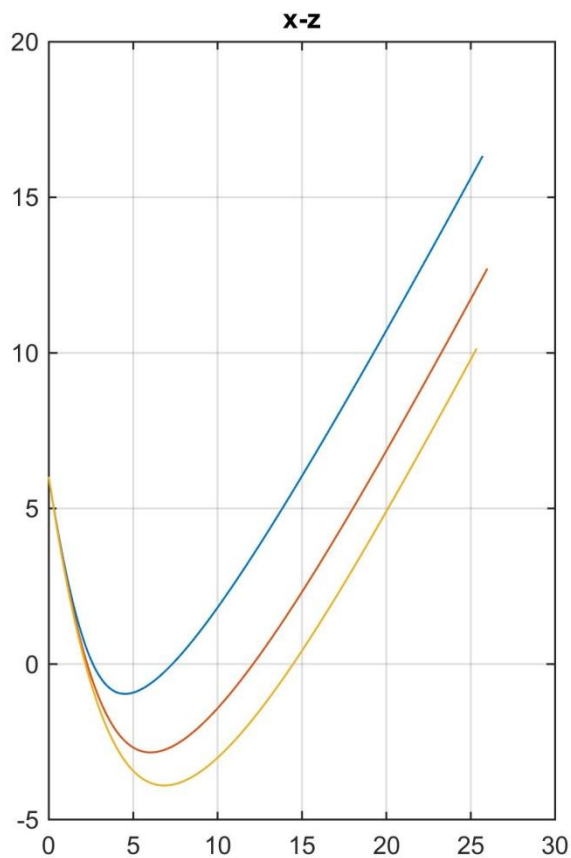
Σχήμα 3.5: Στιγμιότυπα της τελικής θέσης ($t = 3\text{sec}$) σφαίρας – σχοινοῦ για διαφορετικές μάζες σφαίρας. Αριστερά: επίπεδο $x-z$. Δεξιά: επίπεδο $x-y$
 $m = 0.2\text{kg}$ (μπλε καμπύλη), $m = 0.7\text{kg}$ (καφέ καμπύλη),
 $m = 2.2\text{kg}$ (πορτοκαλί καμπύλη)

Όπως ήταν αναμενόμενο η μάζα της σφαίρας επηρεάζει σημαντικά την ευαισθησία του συστήματος ως προς τις εξωτερικές δυνάμεις που δέχεται. Όσο η μάζα αυξάνεται, αυξάνεται η απόσταση που διανύει η σφαίρα στον ίδιο χρόνο (αριστερό γράφημα) και αποκλίνει λιγότερο από την αρχική της πορεία λόγω του ανέμου (δεξί γράφημα). Αντιθέτως, αυξημένη μάζα συνεπάγεται μεγαλύτερες πιέσεις για επίτευξη της ταχύτητας εκτόξευσης, καθώς και αυξημένη ορμή κατά την υποδοχή τη σφαίρας, δηλαδή μεγαλύτερες φθορές για τη διάταξη υποδοχής και ενδεχομένως κίνδυνο εάν βρίσκονται άνθρωποι σε κοντινή απόσταση.



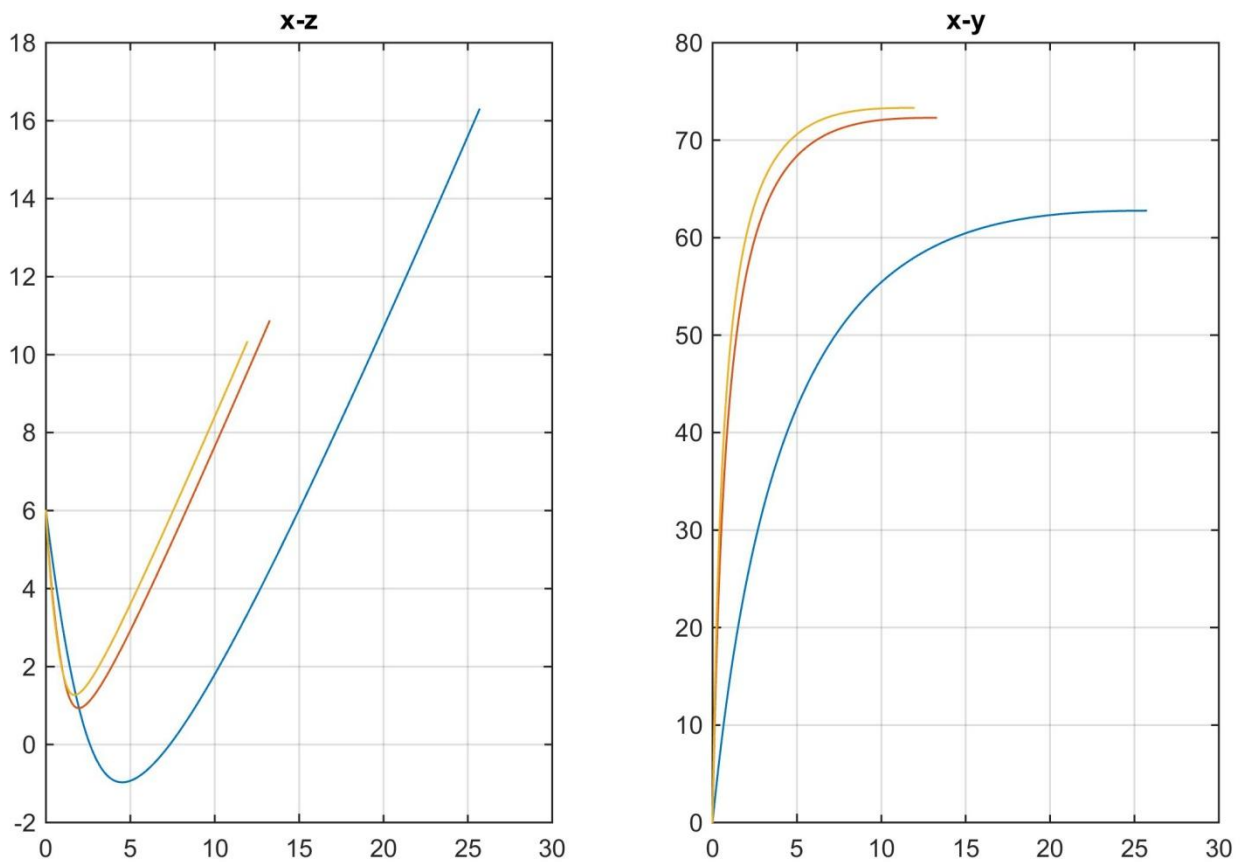
Σχήμα 3.6: Στιγμιότυπα της τελικής θέσης ($t = 3\text{sec}$) σφαίρας – σχοινοῦ για διαφορετικές διαμέτρους σφαίρας. Αριστερά: επίπεδο $x - z$. Δεξιά: επίπεδο $x - y$
 $D = 0.02\text{m}$ (μπλε καμπύλη), $D = 0.06\text{m}$ (καφέ καμπύλη),
 $D = 0.1\text{m}$ (πορτοκαλί καμπύλη)

Μικρή διάμετρος σφαίρας οδηγεί σε μικρή επιφάνεια πρόσπτωσης του ανέμου, συνεπώς σε πιο στιβαρό σύστημα ως προς τον άνεμο. Υπενθυμίζεται, άλλωστε ότι στις εξισώσεις της Παραγράφου 3.3 είναι $F_{wind} \propto D_{proj}^2$. Στον αντίποδα, όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4 είναι επιθυμητή μια μεγάλη διάμετρος σφαίρας, για ανάπτυξη μεγαλύτερης ταχύτητας εκτόξευσης από το πνευματικό σύστημα.



Σχήμα 3.7: Στιγμιότυπα της τελικής θέσης ($t = 3\text{sec}$) σφαίρας – σχοινοῦ για διαφορετικές γραμμικές πυκνότητες σχοινοῦ. Αριστερά: επίπεδο $x - z$. Δεξιά: επίπεδο $x - y$
 $\lambda = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{kg} / \text{m}$ (μπλε καμπύλη), $\lambda = 10.2 \cdot 10^{-3} \text{kg} / \text{m}$ (καφέ καμπύλη),
 $\lambda = 20.2 \cdot 10^{-3} \text{kg} / \text{m}$ (πορτοκαλί καμπύλη)

Αύξηση της γραμμικής πυκνότητας του νήματος προσδίδει στο σύστημα στιβαρότητα, ωστόσο, όσο η γραμμική πυκνότητα τείνει στο μηδέν το σύστημα προσεγγίζει την πτήση σφαίρας χωρίς αναρτημένο νήμα, επομένως το σύστημα γίνεται πιο ευέλικτο.



Σχήμα 3.8: Στιγμιότυπα της τελικής θέσης ($t = 3\text{sec}$) σφαίρας – σχοινοῦ για διαφορετικές διαμέτρους σχοινοῦ. Αριστερά: επίπεδο $x - z$. Δεξιά: επίπεδο $x - y$
 $d = 2.5 \cdot 10^{-3} m$ (μπλε καμπύλη), $d = 14.5 \cdot 10^{-3} m$ (καφέ καμπύλη),
 $d = 18.5 \cdot 10^{-3} m$ (πορτοκαλί καμπύλη)

Είναι εμφανές ότι η διάμετρος του νήματος επιδρά σημαντικά στη συμπεριφορά του συστήματος. Η προσβαλλόμενη επιφάνεια διαρκώς αυξάνεται, αφού κατά την πτήση εισέρχεται συνεχώς μήκος νήματος που, στην περίπτωση που μελετάται, είναι αρκετά μέτρα. Έτσι η επιλογή μικρής διαμέτρου είναι καθοριστική για τη μείωση της επίδρασης του ανέμου στο σύστημα.

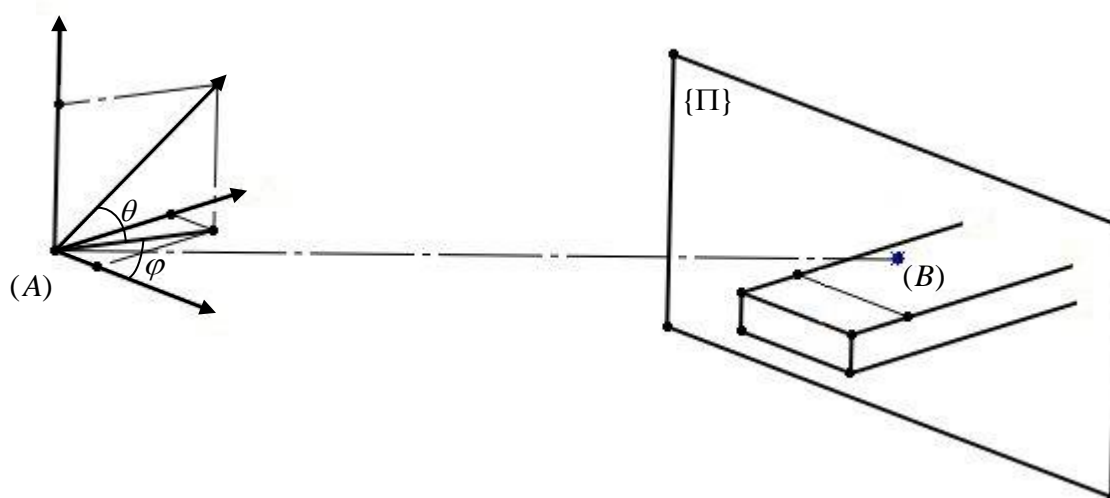
Από τις τροχιές που προέκυψαν και σύμφωνα με την ανάλυση του πνευματικού συστήματος (παρουσιάζεται ξεχωριστά στο Κεφάλαιο 4) επιλέγονται τα τελικά μεγέθη της σφαίρας:

Μάζα $m = 1.4\text{kg}$ και διάμετρος $D = 0.05\text{m}$.

3.5 Εύρεση βέλτιστων γωνιών εκτόξευσης – Αριθμητική Μέθοδος του Στόχου

Έχοντας δώσει τιμές στις παραμέτρους των στοιχείων του συστήματος και γνωρίζοντας το διάνυσμα της ταχύτητας του ανέμου, τη θέση εκτόξευσης, τη θέση της υποδοχής και το μέτρο της ταχύτητας εκτόξευσης της σφαίρας, είναι κρίσιμο να βρεθούν οι γωνίες εκτόξευσης της σφαίρας. Η επιλογή των κατάλληλων τιμών οδηγεί σε ελαχιστοποίηση της απόκλισης της τελικής θέσης της σφαίρας από τη θέση υποδοχής. Η εκτίμηση των τιμών αυτών γίνεται με εφαρμογή της αριθμητικής Μεθόδου του Στόχου.

Κατά τα γνωστά από την Αριθμητική Ανάλυση [15], αρχικά ορίζεται μια συνάρτηση $f(u, v)$, με γνωστό το πεδίο μεταβολής των u, v . Σκοπός της διαδικασίας είναι η ελαχιστοποίηση της f . Το πεδίο μεταβολής των u, v χωρίζεται σε M υποδιαστήματα ανά διεύθυνση και υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές της f . Οι περιοχές εμφάνισης ελάχιστου υποδιαιρούνται σε M νέα υποδιαστήματα και ακολουθείται επαναληπτικά η παραπάνω διαδικασία μέχρις ότου εντοπιστούν οι τιμές των u, v που ελαχιστοποιούν την f με την επιθυμητή ακρίβεια.

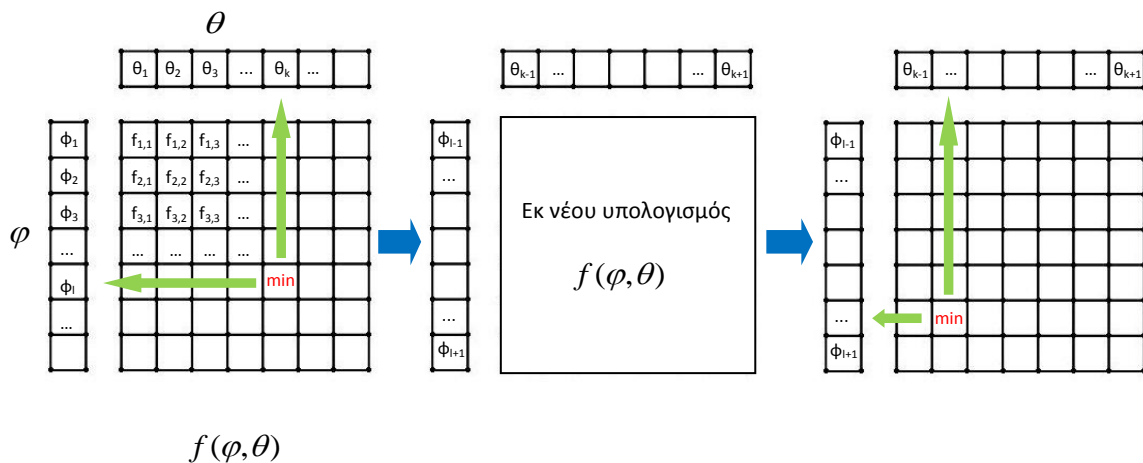


Σχήμα 3.9: Σημείο A - θέση εκτόξευσης σφαίρας, σημείο B - θέση υποδοχής στο λιμένα

Εκτοξεύοντας με γωνίες φ, θ , από την τροχιά που διαγράφεται σημειώνονται οι συντεταγμένες $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ της θέσης που η σφαίρα απέχει την ελάχιστη απόσταση από το σημείο B . Ως f ορίζεται η απόσταση των σημείων $B(x_B, y_B, z_B)$ και $T(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$, δηλαδή,

$$f = \sqrt{(x_B - \hat{x})^2 + (y_B - \hat{y})^2 + (z_B - \hat{z})^2} \quad (3.16)$$

Η f υπολογίζεται $(M+1) \times (M+1)$ φορές και βρίσκεται η ελάχιστη τιμή της. Οι περιοχές των φ, θ για τις οποίες η f ελαχιστοποιείται χωρίζονται σε M νέα υποδιαστήματα κ.ο.κ.



Σχήμα 3.10: Απεικόνιση της αριθμητικής μεθόδου του στόχου για ελαχιστοποίηση συνάρτησης 2 μεταβλητών

Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία για ένα πλήθος διαφορετικών αρχικών θέσεων (A), είναι δυνατό να χαρτογραφηθεί μια επιθυμητή περιοχή, στην οποία θα είναι γνωστές εκ των προτέρων οι βέλτιστες γωνίες εκτόξευσης όταν το πλοίο πραγματοποιήσει πρόσδεση.

3.6 Ακρίβεια επίτευξης στόχου – Περιοχές Εμπιστοσύνης

Κατά τη μέχρι τώρα ανάλυση έχει γίνει σιωπηρή αποδοχή σταθερού μέτρου και σταθερής διεύθυνσης του ανέμου. Φυσικά, αυτό δεν ισχύει στην πραγματικότητα. Οι τιμές των συνιστωσών της ταχύτητας του ανέμου δεν είναι σταθερές, αλλά ακόμη και στο σύντομο διάστημα που διαρκεί η πτήση της σφαίρας με το σχοινί, η κάθε συνιστώσα παρουσιάζει διακυμάνσεις γύρω από μια μέση τιμή.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [16], η διακύμανση ακολουθεί κανονική κατανομή. Ανάλογα με τη μέση τιμή V της ταχύτητας που ορίζεται, η τυπική της απόκλιση δίνεται από τη σχέση:

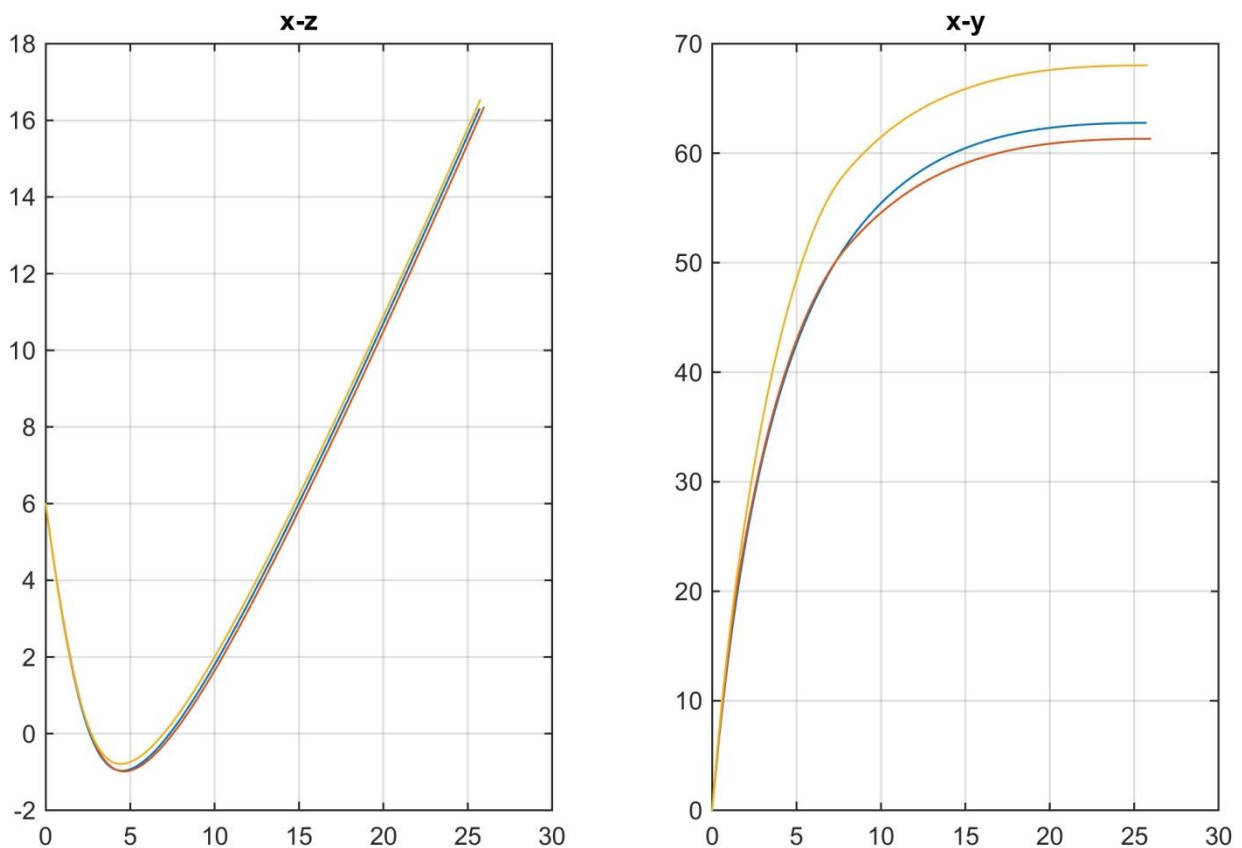
$$\sigma_u = V I_u \quad (3.17)$$

όπου I_u είναι συντελεστής έντασης της τύρβης και για άνεμο με κατεύθυνση από τη θάλασσα προς τη στεριά (onshore wind) λαμβάνει την τιμή 0.15, ενώ για αντίθετη κατεύθυνση του ανέμου (offshore wind) λαμβάνει την τιμή 0.20.

Η ανάλυση που ακολουθεί πραγματοποιείται για $V = 28m/s$, δηλαδή για άνεμο έντασης 10 βαθμών της κλίμακας Beaufort, με τυπική απόκλιση $\sigma_u = 28m/s \cdot 0.15 = 4.2m/s$.

Το κάθε διακριτό διάστημα, κατά το οποίο η ταχύτητα θεωρείται σταθερή, έχει χρονική διάρκεια $t = 0.2sec$, όπως ορίζεται η ελάχιστη διάρκεια ριπής ανέμου, σύμφωνα με τα δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών [17]. Είναι σαφές ότι τα μετεωρολογικά δεδομένα μεταβάλλονται ανά περιοχή και συνεπώς οι τιμές που χρησιμοποιούνται πρέπει να αναπροσαρμόζονται κατά τόπους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται προς σύγκριση τα τελικά στιγμιότυπα για τις περιπτώσεις σταθερής ταχύτητας και στατιστικής διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου:



Σχήμα 3.11: Σύγκριση των τελικών στιγμιότυπων ($t = 3sec$) για τις περιπτώσεις που η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται σταθερή (μπλε καμπύλη) και κυμαινόμενη (καφέ και πορτοκαλί καμπύλη)

Είναι εμφανές πως η τροχιά κάθε φορά αποκλίνει σημαντικά, τόσο συγκρίνοντας τις περιπτώσεις σταθερής - κυμαινόμενης ταχύτητας, όσο και τις περιπτώσεις κυμαινόμενης ταχύτητας μεταξύ τους, που διαφοροποιούνται λόγω της τυχαιότητας της απόκλισης από τη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου.

Αμέσως, γίνεται ξεκάθαρη η ανάγκη ποσοτικοποίησης της απόκλισης που παρατηρείται και ο περιορισμός της εντός γνωστών ορίων, ώστε να καταστεί σαφής η δυνατότητα ή μη πρακτικής εφαρμογής της όλης διαδικασίας πρόσδεσης: εάν για παράδειγμα προκύψει πως η απόκλιση είναι της τάξης των δεκάδων μέτρων ή μεγαλύτερη, τότε η διαδικασία που προτείνεται χαρακτηρίζεται από υπερβολικά υψηλές απαιτήσεις χώρου και απορρίπτεται. Εάν, αντιθέτως, η απόκλιση είναι της τάξης των μέτρων ή μικρότερη, η διαδικασία είναι εφικτή και υλοποιήσιμη. Η απόκλιση περιορίζεται εντός μιας έλλειψης εμπιστοσύνης. Οι διαστάσεις των περιοχών εμπιστοσύνης καθορίζονται από τη βεβαιότητα με την οποία η απόκλιση δεν υπερβαίνει τα όρια των περιοχών, όπως αναπτύσσεται παρακάτω.

Για την εκτίμηση της απόκλισης από το στόχο με όρους πιθανοτήτων ακολουθείται η εξής διαδικασία:

Με τη Μέθοδο του Στόχου που περιγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, βρίσκονται οι βέλτιστες γωνίες φ, θ υπό τις οποίες εκτοξεύεται η σφαίρα, θεωρώντας σταθερή ταχύτητα του ανέμου. Για αυτές τις γωνίες εκτόξευσης πραγματοποιείται προσομοίωση της τροχιάς N φορές, εισάγοντας τώρα στις εξισώσεις την παράμετρο της τυχαιότητας στο προφίλ της ταχύτητας του ανέμου. Από τις N επαναλήψεις προκύπτουν N σημεία $T(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$. Από τα συγκεκριμένα σημεία υπολογίζονται οι μέσες τιμές των $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ που ορίζουν το κέντρο $\Lambda(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ στο $\{\Pi\}$ [18]:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{x}_i, \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{y}_i, \bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{z}_i \quad (3.18)$$

Καθώς το σημείο $\Lambda(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ απέχει από το σημείο της υποδοχής, πρέπει εκ νέου να υπολογιστούν οι γωνίες εκτόξευσης. Συνεπώς, χρησιμοποιείται και πάλι η Μέθοδος του Στόχου, μέχρις ότου μηδενιστεί (ελαχιστοποιηθεί επαρκώς κοντά στο 0) η απόσταση της τελικής θέσης της σφαίρας από την υποδοχή. Τονίζεται πως σε αυτή την περίπτωση, η συνάρτηση f που μηδενίζεται χρησιμοποιεί μέσες τιμές των N συντεταγμένων και όχι τις ίδιες τις συντεταγμένες, δηλαδή είναι:

$$f = \sqrt{(x_B - \bar{x})^2 + (y_B - \bar{y})^2 + (z_B - \bar{z})^2} \quad (3.19)$$

Ανακεφαλαιώνοντας μέχρι αυτό το σημείο, είναι πλέον γνωστές οι γωνίες φ, θ για τις οποίες οι μέσες τιμές $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ των συντεταγμένων της σφαίρας ταυτίζονται με τη θέση υποδοχής $B(x_B, y_B, z_B)$.

Πραγματοποιώντας Q επαναλήψεις του κώδικα της τροχιάς για τις φ, θ , υπολογίζεται η μέση τιμή της κλίσης της τροχιάς της σφαίρας στο σημείο $B(x_B, y_B, z_B)$. Από την προκύπτουσα κλίση ορίζεται το αντίστοιχο μοναδιαίο διάνυσμα \vec{n} και ακολούθως το κάθετο σε αυτό επίπεδο $\{\Pi_{\vec{n}}\}$. Επί του $\{\Pi_{\vec{n}}\}$ ορίζεται το διδιάστατο χωρόδετο σύστημα (y_{Π}, z_{Π}) , όπου η διεύθυνση του άξονα y_{Π} ταυτίζεται με τη διεύθυνση του άξονα y του τριδιάστατου χωρόδετου συστήματος, και ισχύει $y_{\Pi} = y - y_B$, και η διεύθυνση του άξονα z_{Π} είναι κάθετη σε αυτή του άξονα y_{Π} και ισχύει:

$$z_{\Pi} = \text{sign}(x - x_B) \sqrt{(x - x_B)^2 + (z - z_B)^2} \quad (3.20)$$

Οι μέσες τιμές των y_{Π}, z_{Π} είναι μηδενικές (ελαχιστοποιημένες στο 0), δηλαδή το $\Xi(\bar{y}_{\Pi}, \bar{z}_{\Pi})$ ταυτίζεται με το σημείο $B(x_B, y_B, z_B)$, ενώ οι τυπικές αποκλίσεις των επίπεδων συντεταγμένων Q των σημείων είναι:

$$\sigma_{y_{\Pi}} = \sqrt{\frac{1}{Q-1} \sum_{i=1}^Q y_{\Pi}^2}, \quad \sigma_{z_{\Pi}} = \sqrt{\frac{1}{Q-1} \sum_{i=1}^Q z_{\Pi}^2} \quad (3.21)$$

Με γνωστά τα παραπάνω στοιχεία ορίζεται η έλλειψη εμπιστοσύνης (confidence ellipse/elliptical error probable – EEP) στο επίπεδο $\{\Pi_{\vec{n}}\}$ [19],[20]. Πρόκειται για έλλειψη με κέντρο το $\Xi(\bar{y}_{\Pi}, \bar{z}_{\Pi})$, εντός της οποίας βρίσκεται η σφαίρα με συγκεκριμένη πιθανότητα. Καθώς οι διαστάσεις των ημιαξόνων αυξάνονται, αυξάνεται η πιθανότητα η σφαίρα να περιέχεται στην έλλειψη, μέσω της εξής συσχέτισης:

Έστω

$$\sigma_{\max} = \max(\sigma_{y_{\Pi}}, \sigma_{z_{\Pi}}) \quad (3.22)$$

$$\sigma_{\min} = \min(\sigma_{y_{\Pi}}, \sigma_{z_{\Pi}}) \quad (3.23)$$

$$\text{Τότε, για } c = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (3.24)$$

και ορίζοντας το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης (την πιθανότητα) P , προκύπτει η τιμή του συντελεστή K από τον Πίνακα 3.1.

$\frac{K}{\sigma}$.05	.10	.15	.20	.25	.30	.35	.40	.45	.50
.05	0.08149	0.10697	0.12806	0.14627	0.16251	0.17730	0.19007	0.20375	0.21579	0.22721
.10	0.13631	0.16328	0.19017	0.21449	0.23662	0.25701	0.27599	0.29383	0.31070	0.32675
.15	0.19590	0.21757	0.24565	0.27316	0.29897	0.32313	0.34585	0.36734	0.38777	0.40729
.20	0.25834	0.27454	0.30048	0.32894	0.35690	0.38367	0.40917	0.43349	0.45676	0.47910
.25	0.32250	0.33506	0.35715	0.38470	0.41348	0.44188	0.46941	0.49506	0.52155	0.54624
.30	0.38858	0.39867	0.41855	0.44210	0.47050	0.49965	0.52853	0.55677	0.58424	0.61093
.35	0.45653	0.46500	0.48004	0.50225	0.52924	0.55829	0.58788	0.61731	0.64626	0.67463
.40	0.52679	0.53409	0.54679	0.56592	0.59073	0.61880	0.64854	0.67866	0.70872	0.73846
.45	0.59986	0.60623	0.61721	0.63363	0.65585	0.68244	0.71154	0.74184	0.77260	0.80339
.50	0.67635	0.68199	0.69163	0.70585	0.72543	0.74994	0.77788	0.80785	0.83890	0.87042
.55	0.75707	0.76210	0.77066	0.78314	0.80039	0.82243	0.84870	0.87782	0.90870	0.94060
.60	0.84311	0.84761	0.85527	0.86634	0.88142	0.90113	0.92532	0.95307	0.98332	1.01520
.65	0.93503	0.93998	0.94685	0.95675	0.97008	0.98751	1.00939	1.03532	1.06444	1.09586
.70	1.03764	1.04129	1.04748	1.05635	1.06822	1.08361	1.10311	1.12685	1.15433	1.18481
.75	1.15144	1.15473	1.16029	1.16825	1.17884	1.19246	1.20968	1.23100	1.25637	1.28534
.80	1.28253	1.28548	1.29046	1.29759	1.30704	1.31908	1.33421	1.35302	1.37588	1.40275
.85	1.44040	1.44303	1.44746	1.45379	1.46215	1.47277	1.48599	1.50233	1.52238	1.54653
.90	1.64561	1.64791	1.65179	1.65731	1.66461	1.67383	1.68523	1.69918	1.71626	1.73708
.95	1.96060	1.96253	1.96578	1.97041	1.97651	1.98420	1.99366	2.00514	2.01902	2.03586
.96	2.05436	2.05620	2.05930	2.06371	2.06953	2.07686	2.08587	2.09679	2.10995	2.12588
.97	2.17067	2.17241	2.17534	2.17952	2.18502	2.19195	2.20045	2.21075	2.22314	2.23806
.98	2.32689	2.32851	2.33124	2.33514	2.34026	2.34672	2.35464	2.36421	2.37569	2.38948
.99	2.57632	2.57778	2.58025	2.58377	2.58839	2.59421	2.60134	2.60995	2.62025	2.63257

$\frac{K}{\sigma}$.55	.60	.65	.70	.75	.80	.85	.90	.95	1.0
.05	0.23810	0.24852	0.25854	0.26820	0.27753	0.28657	0.29534	0.30388	0.31219	0.32029
.10	0.34210	0.35683	0.37101	0.38472	0.39798	0.41085	0.42336	0.43555	0.44744	0.45904
.15	0.42601	0.44402	0.46142	0.47825	0.49458	0.51043	0.52591	0.54099	0.55571	0.57012
.20	0.50060	0.52136	0.54145	0.56094	0.57990	0.59835	0.61636	0.63396	0.65118	0.66805
.25	0.57012	0.59326	0.61573	0.63758	0.65888	0.67967	0.69999	0.71989	0.73939	0.75853
.30	0.63688	0.66213	0.68672	0.71072	0.73418	0.75712	0.77960	0.80166	0.82331	0.84460
.35	0.70237	0.72950	0.75604	0.78202	0.80748	0.83246	0.85699	0.88110	0.90483	0.92821
.40	0.76775	0.79655	0.82486	0.85268	0.88004	0.90696	0.93346	0.95958	0.98534	1.01077
.45	0.83399	0.86428	0.89421	0.92375	0.95291	0.98170	1.01013	1.03822	1.06599	1.09347
.50	0.90207	0.93365	0.96505	0.99621	1.02709	1.05769	1.08801	1.11807	1.14786	1.17741
.55	0.97303	1.00569	1.03841	1.07107	1.10361	1.13599	1.16819	1.20021	1.23206	1.26373
.60	1.04810	1.08162	1.11549	1.14954	1.18366	1.21779	1.25187	1.28590	1.31985	1.35373
.65	1.12888	1.16298	1.19781	1.23312	1.26875	1.30460	1.34058	1.37666	1.41281	1.44901
.70	1.21752	1.25187	1.28742	1.32384	1.36090	1.39845	1.43637	1.47459	1.51306	1.55176
.75	1.31724	1.35143	1.38739	1.42471	1.46309	1.50231	1.54222	1.58271	1.62369	1.66511
.80	1.43320	1.46968	1.50262	1.54055	1.58010	1.62096	1.66294	1.70586	1.74962	1.79412
.85	1.57477	1.60677	1.64206	1.68015	1.72059	1.76302	1.80717	1.85280	1.89974	1.94788
.90	1.76212	1.79152	1.82511	1.86253	1.90335	1.94716	1.99359	2.04236	2.09321	2.14575
.95	2.05638	2.08130	2.11111	2.14598	2.18580	2.23029	2.27908	2.33180	2.38812	2.44775
.96	2.14527	2.16891	2.19748	2.23134	2.27054	2.31491	2.36413	2.41782	2.47565	2.53727
.97	2.25619	2.27835	2.30537	2.33788	2.37617	2.42021	2.46978	2.52455	2.58415	2.64823
.98	2.40614	2.42650	2.45153	2.48214	2.51895	2.56226	2.61202	2.66799	2.72983	2.79715
.99	2.64736	2.66533	2.68750	2.71505	2.74916	2.79069	2.84010	2.89743	2.96249	3.03485

Πίνακας 3.1: Συντελεστής ημιαξόνων εμπιστοσύνης K , συναρτήσεως του επιπέδου εμπιστοσύνης P και του λόγου των τυπικών αποκλίσεων σ .

Οι ημιάξονες της έλλειψης εμπιστοσύνης ορίζονται ως

$$a = K \sigma_{\max} \quad (3.25)$$

$$\text{και } b = K \sigma_{\min} \quad (3.26)$$

Επιπλέον, για να οριστεί πλήρως ο γεωμετρικός τόπος της έλλειψης, υπολογίζεται η γωνία κλίσης του μεγάλου ημιάξονα της έλλειψης ως προς τον άξονα y_{Π} . Η γωνία αυτή εξαρτάται από τις τυπικές αποκλίσεις των μεταβλητών y_{Π}, z_{Π} , καθώς και από τη συνδιακύμανση (covariance) που τις χαρακτηρίζει $\text{COV}(y_{\Pi}, z_{\Pi})$. Είναι, λοιπόν [21],[22],

$$\omega = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\text{COV}(y_{\Pi}, z_{\Pi})}{\sigma_{y_{\Pi}}^2 - \sigma_{z_{\Pi}}^2}\right) \quad (3.27)$$

Η όλη διαδικασία αποσαφηνίζεται μέσω του παραδείγματος που ακολουθεί. Υπενθυμίζεται πως όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται μέσω του κώδικα που έχει αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό και παρουσιάζεται στο Παράρτημα:

Θεωρείται μέση ταχύτητα ανέμου $V = 28m/s \approx 100km/h$. Η τυπική απόκλιση ορίζεται $\sigma_u = V I_u = 4.2m/s$.

Από τη θέση $A(0,0,6)$ και με στόχο τη θέση $B(20,0,0)$, η σφαίρα εκτοξεύεται με μέτρο ταχύτητας $\|U\| = 43m/s$.

Με την αριθμητική μέθοδο του στόχου υπολογίζονται οι βέλτιστες γωνίες εκτόξευσης $\varphi = -12.0^\circ$ και $\theta = -6.6^\circ$, για την περίπτωση σταθερής ταχύτητας ανέμου. Στη γειτονιά των γωνιών αυτών αναζητούνται και πάλι οι βέλτιστες γωνίες, αυτή τη φορά λαμβάνοντας υπόψη τις διακυμάνσεις της ταχύτητας. Προκύπτουν οι τιμές $\varphi = -11.8^\circ$ και $\theta = -7.5^\circ$.

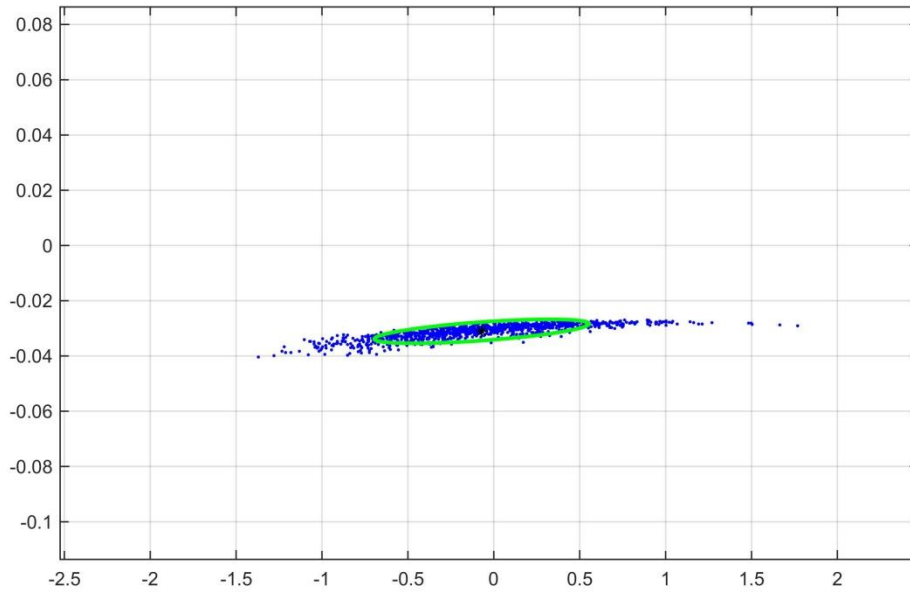
Για τις παραπάνω τιμές των βέλτιστων γωνιών εκτόξευσης πραγματοποιούνται επαναλήψεις, από τις οποίες λαμβάνονται οι μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις: $\bar{y}_{\Pi} = -0.100m$, $\bar{z}_{\Pi} = -0.018m$, $\sigma_{y_{\Pi}} = 0.492m$, $\sigma_{z_{\Pi}} = 0.003m$.

Συνεπώς, είναι $c = 0.006$.

Με ζητούμενη πιθανότητα $P = 0.80$, είναι $K = 1.2825$.

Προκύπτει η έλλειψη με κέντρο το $\Xi(-0.100, -0.018)$, μεγάλο και μικρό ημιάξονα $a = 0.631m$, $b = 0.004m$ αντίστοιχα και κλίση ως προς τον οριζόντιο άξονα γωνίας $\omega = 0.263^\circ$ (Σχήμα 3.12).

Σημειώνεται πως η διαφορά των $\bar{y}_{\Pi}, \bar{z}_{\Pi}$ από το μηδέν οφείλεται στην ακρίβεια που έχει οριστεί στην αριθμητική μέθοδο του στόχου. Όσο ο περιορισμός πλησιάζει τη μηδενική διαφορά, τόσο αυξάνεται το πλήθος των επαναλήψεων και ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου.



Σχήμα 3.12: Έλλειψη για επίπεδο εμπιστοσύνης 80% , σε πλήθος 10^3 βολών.

Οι διαστάσεις της έλλειψης καθορίζουν τη διαμόρφωση της διάταξης υποδοχής της σφαίρας. Τα μήκη των δύο ημιαξόνων, καθορίζονται από τη διακύμανση των συνιστωσών της ταχύτητας ανέμου ανά άξονα.

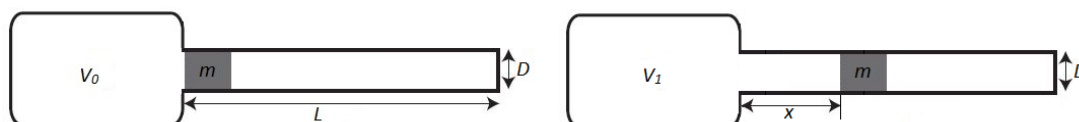
Κεφάλαιο 4 - Πνευματικό υποσύστημα

4.1 Σύστημα εκτόξευσης

Η εκτόξευση της σφαίρας επιλέχθηκε να πραγματοποιείται μέσω πνευματικού συστήματος επειδή σε σύγκριση με αντίστοιχα ηλεκτρικά συστήματα (εκτοξευτήρας μπαλών tennis) έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει χωρίς παροχή ρεύματος αν χρειαστεί, αντλώντας τον απαιτούμενο όγκο αέρα από αεροφυλάκιο.

Οι ανάγκες σε παροχή και πίεση αέρα θα προκύψουν με βάση την επιθυμητή ταχύτητα εκτόξευσης της σφαίρας, η οποία είναι γνωστή από το κεφάλαιο της τροχιάς.

Ακολουθεί η ανάλυση της διαδικασίας εκτόξευσης, στην οποία θεωρείται ότι ο αέρας αρχικά βρίσκεται σε δοχείο υπό πίεση (αεροφυλάκιο), όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 4.1. Σε χρόνο t_0 απελευθερώνεται (άνοιγμα βαλβίδας) και επιδρά στην αρχικά ακίνητη σφαίρα.



Σχήμα 4.1: Εκτόνωση όγκου αέρα V_0 για εκτόξευση μάζας m .

όπου

V_0 : όγκος αεροφυλακίου, αρχικός όγκος αέρα,

V_1 : όγκος αέρα μετά από χρόνο t ,

L : μήκος κλειστής διαδρομής σφαίρας,

m : μάζα σφαίρας,

x : μετατόπιση σφαίρας σε χρόνο t ,

$$A = \pi D^2 / 4 \quad (4.1)$$

$$V_1 = V_0 + Ax \quad (4.2)$$

Όπως στα συνήθη πνευματικά συστήματα και για πιέσεις έως 10bar , χρησιμοποιείται η εξίσωση των τελείων αερίων

$$p = \rho RT \quad (4.3)$$

όπου

p : απόλυτη πίεση,

ρ : πυκνότητα,

R : σταθερά του αερίου,

T : απόλυτη θερμοκρασία

Επιπλέον, λόγω της μεγάλης ταχύτητας με την οποία πραγματοποιείται, η διαδικασία θεωρείται αδιαβατική, άρα ισχύει η σχέση:

$$p_1 = p_0 \left(\frac{V_0}{V_0 + Ax} \right)^\gamma \quad (4.4)$$

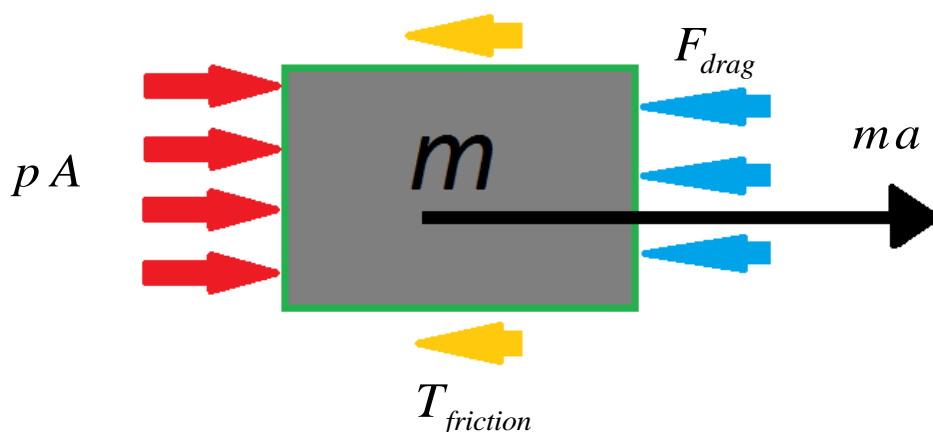
όπου

p_0 : αρχική πίεση αέρα

p_1 : πίεση αέρα μετά από χρόνο t

γ : λόγος αδιαβατικής μεταβολής = 1.4

Η εξίσωση της εκτόξευσης καταστρώνεται σύμφωνα με το Σχήμα 4.2 ως εξής:



Σχήμα 4.2: Μοντέλο δυνάμεων στην εκτοξευόμενη μάζα

$$p_0 \left(\frac{V_0}{V_0 + Ax} \right)^\gamma A = m\ddot{x} + BA\dot{x}^2 + T_{fr} \quad (4.5)$$

όπου

m : μάζα σφαίρας

B : συντελεστής αεροδυναμικών απωλειών, με μονάδες kg / m^3

T_{fr} : τριβή ολίσθησης μεταξύ σφαίρας και κάννης εκτόξευσης

Η παραπάνω εξίσωση λύνεται ως προς \ddot{x}

$$\ddot{x} = -C_1 \dot{x}^2 + C_2 (C_3 x + 1)^{-\gamma} - C_4 \quad (4.6)$$

όπου

$$C_1 = BA / m$$

$$C_2 = p_0 A / m$$

$$C_3 = A / V_0$$

$$C_4 = T_{fr} / m$$

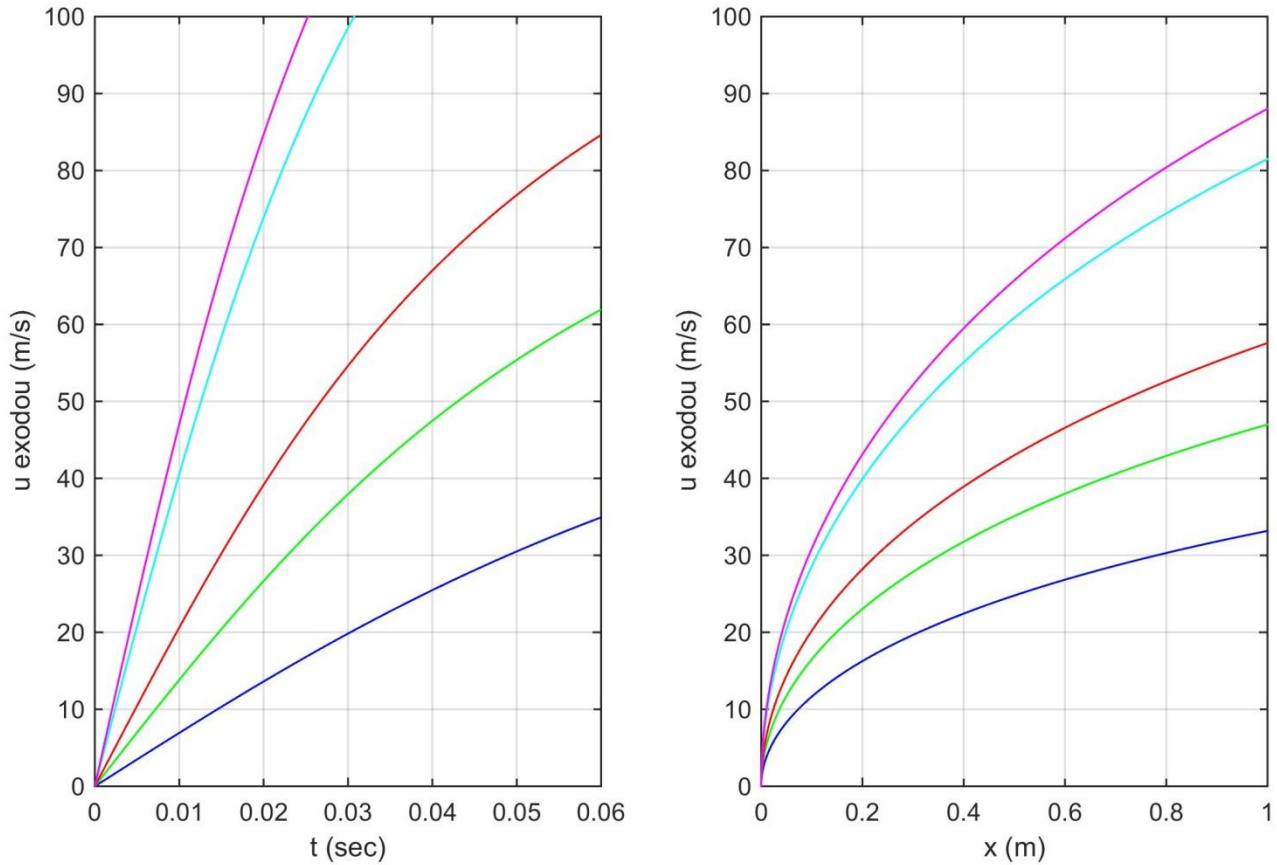
Για την επίλυσή της χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδος Runge – Kutta 4^{ης} τάξης σύμφωνα με τον κώδικα του Παραρτήματος 4.1.

Η εξίσωση επιλύεται για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων “μάζα” και “διάμετρος σφαίρας”, “αρχική πίεση αέρα” κλπ., προκειμένου να παρατηρηθεί η συμπεριφορά της.

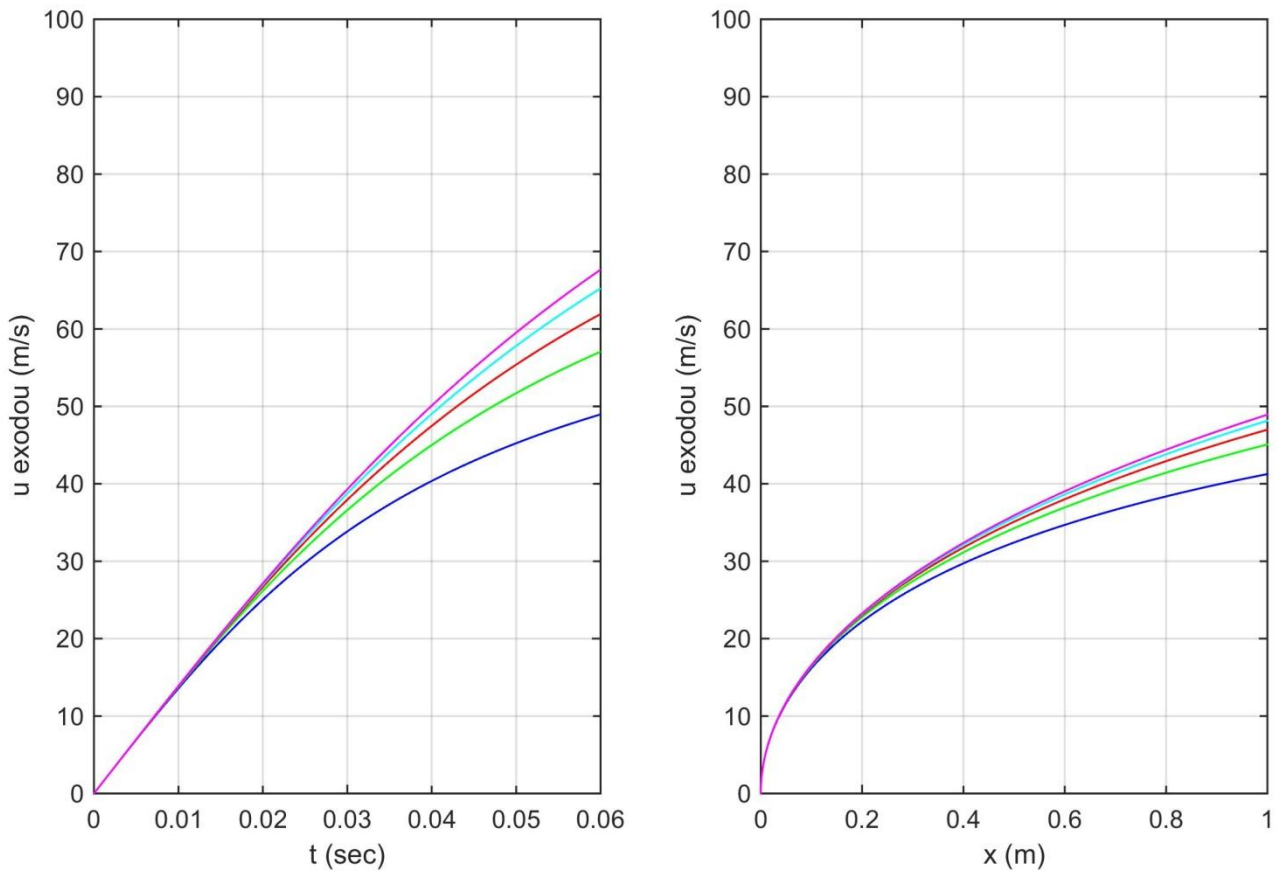
Γενικά κριτήρια επιλογής τιμών είναι η ανθρώπινη ασφάλεια και το χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Για παράδειγμα, το γινόμενο αρχικού όγκου-πίεσης αέρα προτιμάται να είναι μικρό προκειμένου να μην απαιτείται ογκώδες και μαζικό αεροφυλάκιο που θα απορροφά μεγάλη μηχανική ισχύ για την περιστροφή του κατά τη στόχευση.

Φυσικά, τα κριτήρια επιλογής τιμών των παραμέτρων είναι συχνά αντικρουόμενα, πχ. με μικρή μάζα σφαίρας, η ορμή της δεν είναι επικίνδυνη αν σε περίπτωση ατυχήματος καταλήξει σε κρούση με άνθρωπο, ωστόσο μεγάλη μάζα σφαίρας οδηγεί σε πιο «στιβαρή» τροχιά. Μεγάλο μήκος κάννης προσφέρει υψηλότερη ταχύτητα εξόδου (αξιοποίηση της υψηλής πίεσης για μεγαλύτερο διάστημα), αλλά καταλαμβάνει μεγάλο χώρο εργασίας και αυξάνει τη ροπή αδράνειας.

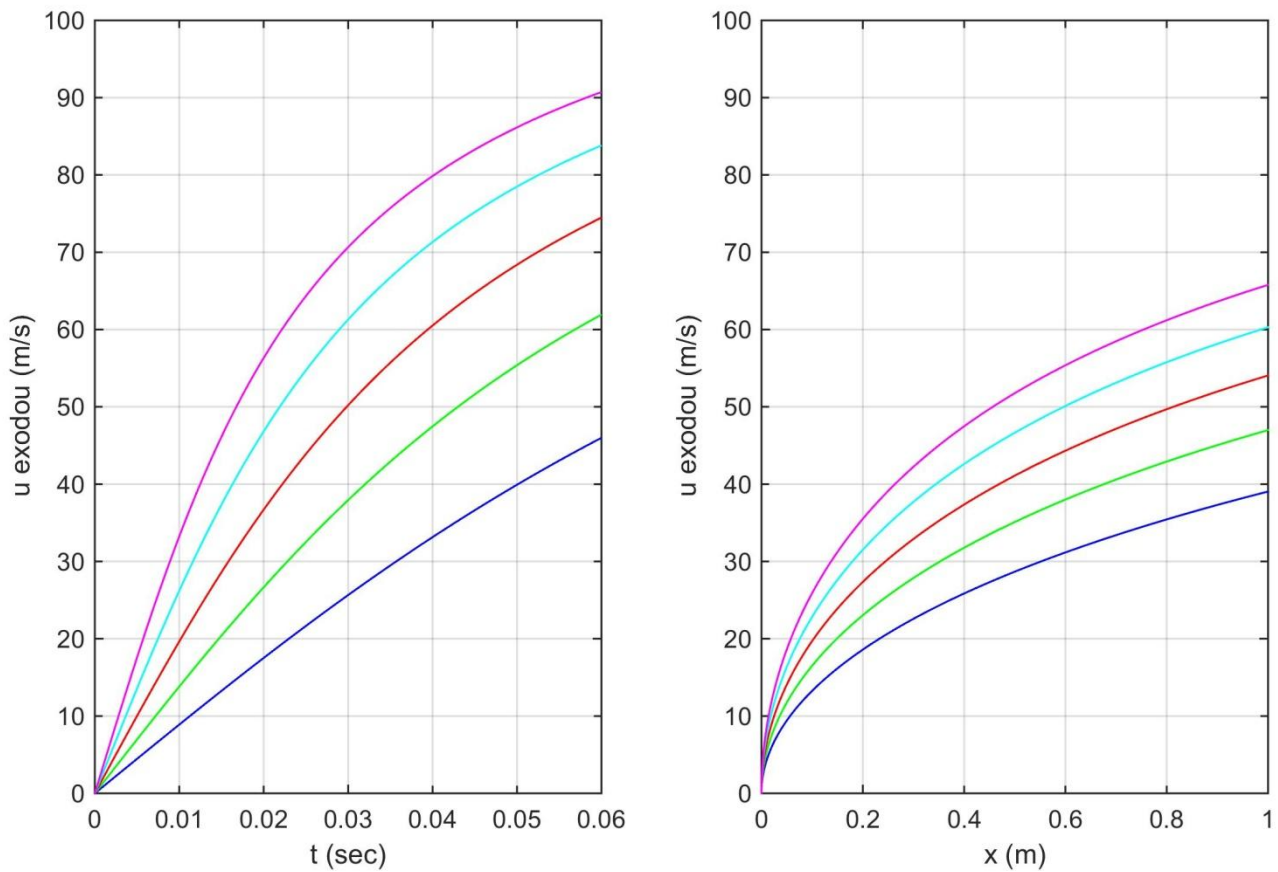
Τα διαγράμματα (Σχήματα 4.3 – 4.7) που ακολουθούν βοηθούν στον περιορισμό του εύρους τιμών:



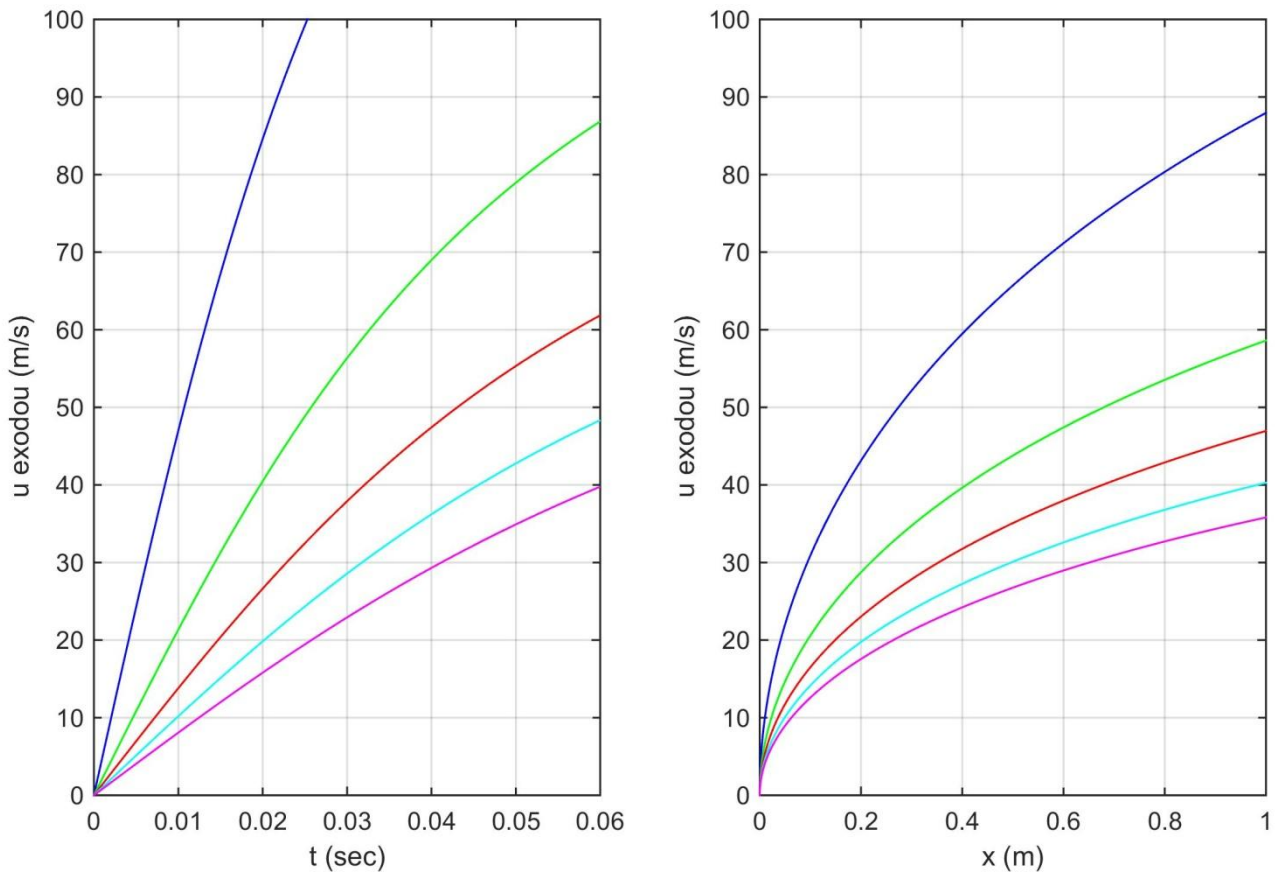
Σχήμα 4.3: Ταχύτητα εκτοξευόμενης σφαίρας συναρτήσει διάφορων τιμών αρχικής πίεσης
αριστερά: ως προς το χρόνο t , δεξιά: ως προς τη μετατόπιση της σφαίρας x
 $p = 5bar$ (μπλε καμπύλη), $p = 10bar$ (πράσινη καμπύλη), $p = 15bar$ (κόκκινη
καμπύλη), $p = 30bar$ (κυανή καμπύλη), $p = 35bar$ (ιώδης καμπύλη)



Σχήμα 4.4: Ταχύτητα εκτοξευόμενης σφαίρας συναρτήσει διάφορων τιμών αρχικού όγκου
 αριστερά: ως προς το χρόνο t , δεξιά: ως προς τη μετατόπιση της σφαίρας x
 $V = 2lt$ (μπλε καμπύλη), $V = 3.5lt$ (πράσινη καμπύλη), $V = 5lt$ (κόκκινη καμπύλη),
 $V = 6.5lt$ (κυανή καμπύλη), $V = 8lt$ (ιώδης καμπύλη)

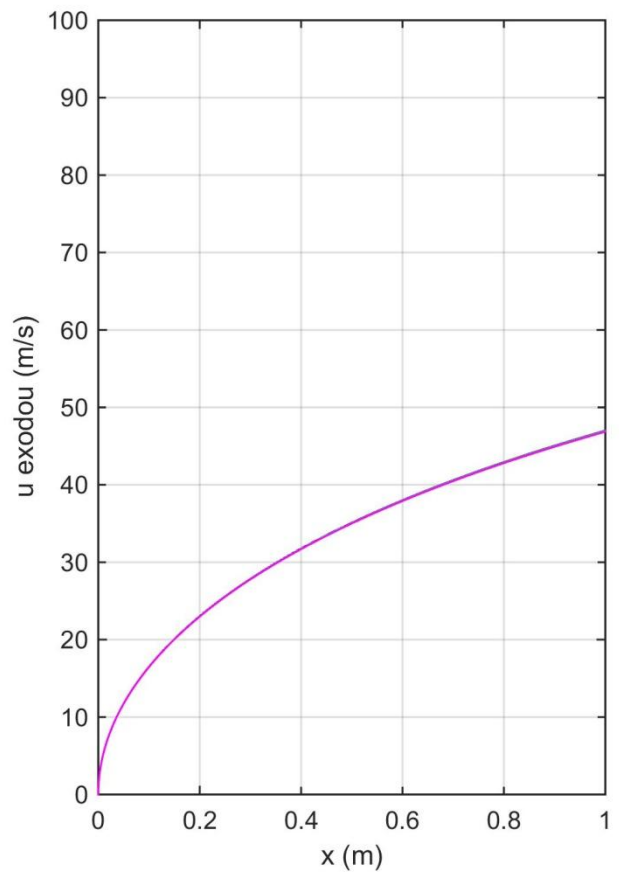
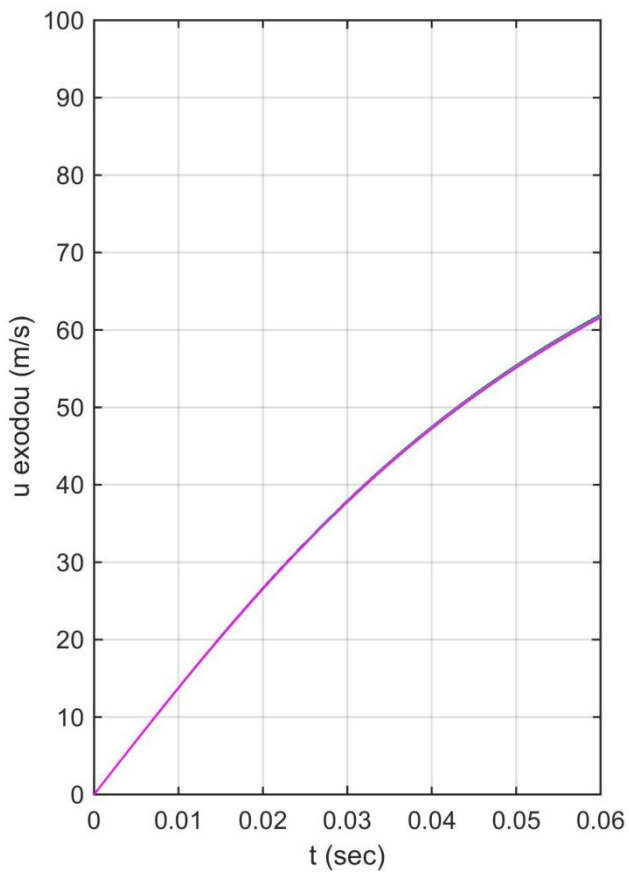


Σχήμα 4.5: Ταχύτητα εκτοξευόμενης σφαίρας συναρτήσει διάφορων τιμών εσωτερικής διαμέτρου κανονιού = διαμέτρου σφαίρας
 αριστερά: ως προς το χρόνο t , δεξιά: ως προς τη μετατόπιση της σφαίρας x
 $D = 40mm$ (μπλε καμπύλη), $D = 50mm$ (πράσινη καμπύλη), $D = 60mm$ (κόκκινη καμπύλη), $D = 70mm$ (κυανή καμπύλη), $D = 80mm$ (ιώδης καμπύλη)



Σχήμα 4.6: Ταχύτητα εκτοξευόμενης σφαίρας συναρτήσει διάφορων τιμών της μάζας σφαίρας

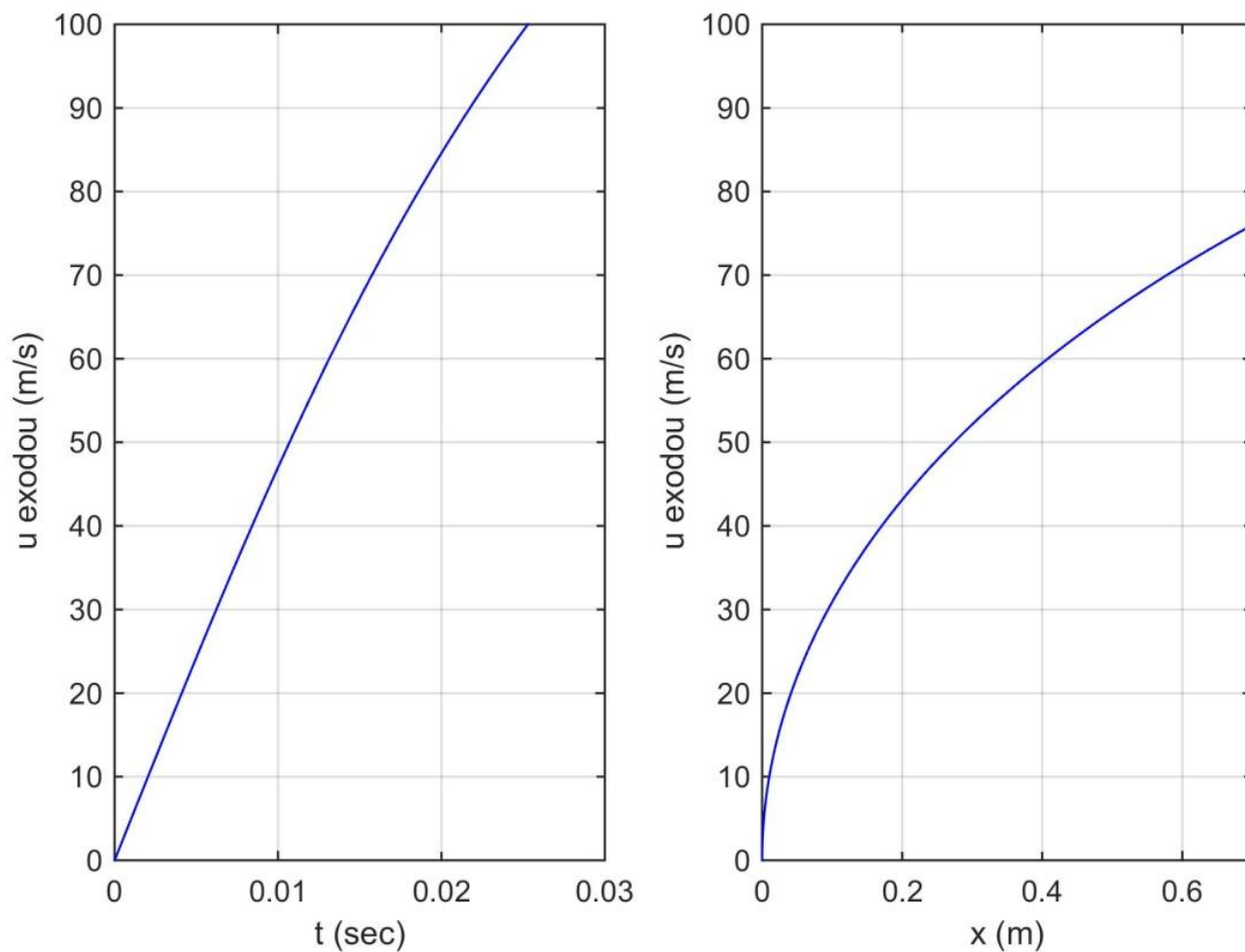
αριστερά: ως προς το χρόνο t , δεξιά: ως προς τη μετατόπιση της σφαίρας x
 $m = 0.4kg$ (μπλε καμπύλη), $m = 0.9kg$ (πράσινη καμπύλη), $m = 1.4kg$ (κόκκινη καμπύλη),
 $m = 1.9kg$ (κυανή καμπύλη), $m = 2.4kg$ (ιώδης καμπύλη)



Σχήμα 4.7: Ταχύτητα εκτοξευόμενης σφαίρας συναρτήσει διάφορων τιμών του συντελεστή τριβής ολίσθησης μεταξύ σφαίρας και τοιχώματος κανονιού ($\mu = 0.3 \div 1$)
 αριστερά: ως προς το χρόνο t , δεξιά: ως προς τη μετατόπιση της σφαίρας x

Στο τελευταίο διάγραμμα φαίνεται πως η μεταβολή του συντελεστή τριβής δεν επηρεάζει τη διαδικασία.

Με βάση τα ανωτέρω διαγράμματα επιλέγεται η τελική υλοποίηση με τις τιμές :
 $V = 5lt$, $d = 50mm$, $m = 1.4kg$, $L = 0.8m$ (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8: Ταχύτητα εκτοξευόμενης σφαίρας για τις επιλεγείσες τιμές των παραμέτρων του συστήματος

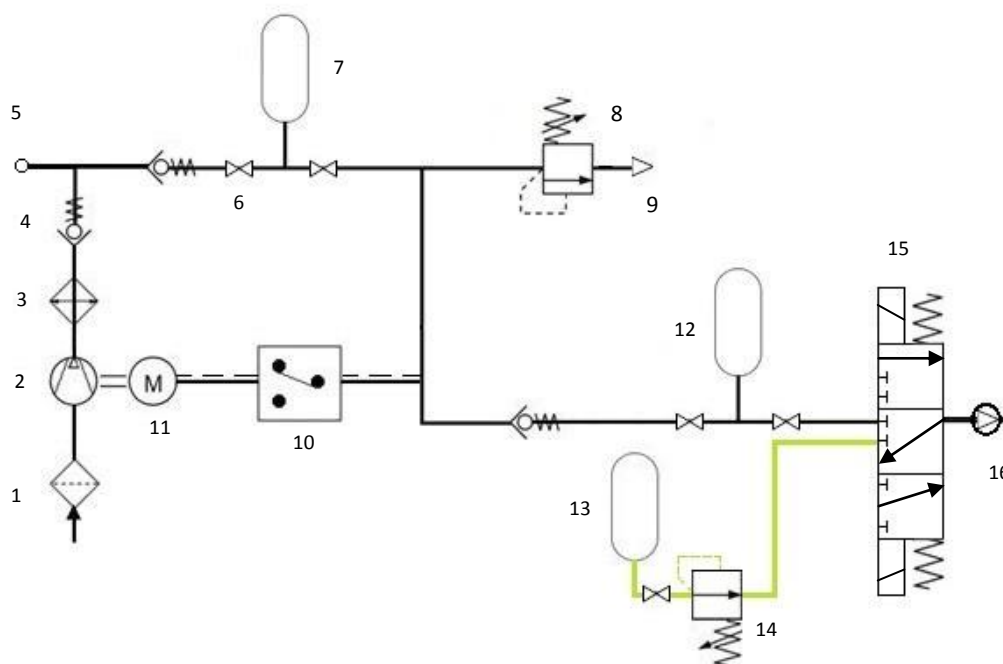
4.2 Πνευματικό κύκλωμα

Όπως έχει παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 3, η σχετική θέση πλοίου και στόχου σε συνδυασμό με την κατεύθυνση του ανέμου οδηγούν στο απαιτούμενο διάνυσμα της ταχύτητας εκτόξευσης της σφαίρας. Επειδή η απαιτούμενη ταχύτητα εκτόξευσης διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με τη συμβολή του ανέμου στην προσέγγιση ή στην απομάκρυνση από το στόχο, προκύπτουν διαφορετικές απαιτούμενες παρεχόμενες πιέσεις από το πνευματικό κύκλωμα της διάταξης.

Έτσι, για ένα εύρος περιπτώσεων είναι αρκετή η πίεση των $10bar$, ενώ όταν πρόκειται για σχεδόν αντίθετα διανύσματα ταχύτητας ανέμου – ταχύτητας εκτόξευσης απαιτούνται πιέσεις των $30bar$.

Επιλέγεται η χρήση συμπιεστή και αεροφυλακίου για την εξασφάλιση της πίεσης των $10bar$, και για τις περιπτώσεις των $30bar$ επιλέγεται η χρήση φιάλης αζώτου.

Ακολούθως (Σχήμα 4.9) σχεδιάζεται το πνευματικό κύκλωμα που παρέχει την απαραίτητη πίεση και όγκο αέρα όπως υπολογίστηκαν παραπάνω.



Σχήμα 4.9: Πνευματικό κύκλωμα εκτόξευσης σφαίρας

Τα στοιχεία 1 ως 14 αποτελούν το βασικό πνευματικό κύκλωμα που παρέχει αέρα/άζωτο στις ζητούμενες συνθήκες, ενώ τα επόμενα συγκροτούν το υποσύστημα του κανονιού.

Συγκεκριμένα, είναι:

- 1: Είσοδος και φίλτρο αέρα
- 2: Συμπιεστής
- 3: Ψύκτης
- 4: Βαλβίδα Αντεπιστροφής

- 5: Παροχή 10 bar από το κύκλωμα του πλοίου (εάν υπάρχει δυνατότητα)
- 6: Διακόπτης ροής (βάννα)
- 7: Κύριο αεροφυλάκιο
- 8: Βαλβίδα υπερπίεσης
- 9: Έξοδος στην ατμόσφαιρα
- 10: Διακόπτης πίεσης για έναρξη/διακοπή λειτουργίας κινητήρα
- 11: Κινητήρας συμπιεστή
- 12: Δευτερεύον αεροφυλάκιο
- 13: Φιάλη αζώτου
- 14: Βαλβίδα ελέγχου πίεσης
- 15: Βαλβίδα ρύθμισης κατεύθυνσης της ροής, με πηνία και ελατήρια
- 16: Έξοδος προς κανόνι

Το δευτερεύον αεροφυλάκιο χρησιμοποιείται προκειμένου μετά από μία εκτόξευση να μην απαιτείται λειτουργία του κινητήρα για επαναπλήρωση, όπως θα συνέβαινε εάν υπήρχε μόνο ένα αεροφυλάκιο. Με αυτόν τον τρόπο, μετά από μία εκτόξευση το δευτερεύον πληρούται από το κύριο αεροφυλάκιο και ο συμπιεστής λειτουργεί για την πλήρωση του κύριου αεροφυλακίου μετά από ορισμένο πλήθος εκτοξεύσεων.

Σημειώνεται πως στα επιβατηγά πλοία, για τα οποία προορίζεται το σύστημα πρόσδεσης, υπάρχει εγκατεστημένο πνευματικό κύκλωμα υψηλής πίεσης, που καλύπτει τις ανάγκες του πνευματικού κυκλώματος του Σχήματος 4.9. Επομένως, ο συμπιεστής είναι απαραίτητος για τις περιπτώσεις που το πνευματικό σύστημα του πλοίου παρέχει αέρα για την κάλυψη των κύριων λειτουργιών του.

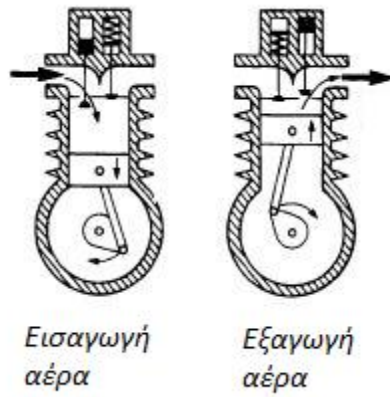
Βασικά στοιχεία

4.2.1 Συμπιεστής

Το γεγονός ότι ο αέρας διοχετεύεται στο κανόνι μέσω του αεροφυλακίου και όχι απευθείας από το συμπιεστή δίνει την ελευθερία επιλογής ανάμεσα στους διάφορους τύπους συμπιεστών χωρίς περιορισμούς που αφορούν τις ιδιότητες της ροής, όπως είναι οι παλμοί (pressure pulses) και το ύψος της παροχής.

Δεδομένου του μικρού όγκου αέρα που απαιτείται (2-4 εκτοξεύσεις ανά λιμένα), είναι σαφές ότι δεν υπάρχει ανάγκη υψηλής παροχής.

Έτσι, επιλέγεται ένας piston compressor (Σχήμα 4.10), ένας από τους πλέον διαδεδομένους τύπους συμπιεστών, με τα χαρακτηριστικά του υψηλού λόγου πίεσης, της μικρής παροχής και του χαμηλού κόστους σχετικά με άλλους τύπους για την ίδια εφαρμογή.



Σχήμα 4.10: Piston compressor

Αναζητώντας στο εμπόριο, επιλέγεται μονάδα κινητήρα-συμπιεστή-αεροφυλακίου (Σχήμα 4.11 [23]) που παρέχει 220lt / min αέρα σε πίεση 10bar , σε ισχύ 1.5kW .

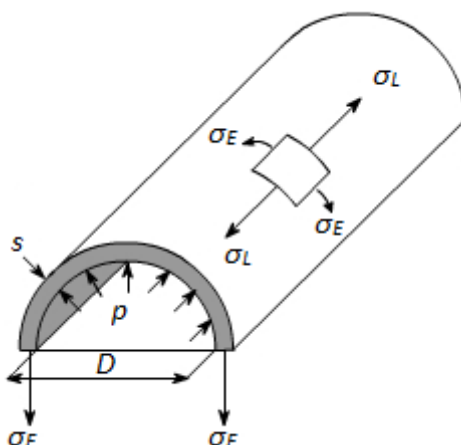


	C	F	l/min.	m ³ /h	c.f.m.	KW	HP	VOLT	Hz	r.p.m.	bar	p.s.i.	n.	n.	x	y	z	kg	
250/25	•		220	13	7,8	K11	1,5	2	230 400	50	1000	10	145	2	1	760	372	550	49

Σχήμα 4.11: Μονάδα συμπιεστή - αεροφυλακίου

4.2.2 Κάννη

Το πάχος του τοιχώματος του κανονιού υπολογίζεται να παραλαμβάνει το εφελκυστικό φορτίο που αναπτύσσεται εφαπτομενικά (και είναι διπλάσιο του φορτίου κατά μήκος της γενέτειρας [24])



Σχήμα 4.12: Εκτίμηση πάχους τοιχώματος κάννης υπό εφελκυστική τάση

$$\sigma_E = p \frac{r}{s} \quad (4.7)$$

όπου

p : πίεση αέρα

r : εσωτερική ακτίνα κάννης

s : πάχος τοιχώματος

Επιλέγοντας, λόγω του ιδιαίτερα διαβρωτικού περιβάλλοντος, υλικό αλουμίνιο, το κοινό κράμα 1100-H14 με εφελκυστικό φορτίο διαρροής $\sigma = 55MPa$, για την πίεση των $30bar$ έχει $s = 0.9mm$.

Επιπλέον περιορισμός ως προς το πάχος του κανονιού αφορά την ακτινική παραμόρφωση του τοιχώματος: λόγω της αναπτυσσόμενης εφαπτομενικής τάσης η εσωτερική διάμετρος του κανονιού αυξάνεται και δημιουργείται διάκενο μεταξύ τοιχώματος και σφαίρας. Έτσι, ο αέρας υψηλής πίεσης διαρρέει στην ατμόσφαιρα χωρίς να αξιοποιείται για την ανάπτυξη ταχύτητας εκτόξευσης. Για το λόγο αυτό τίθεται μέγιστο όριο για την παραμόρφωση του κανονιού κατά την ακτινική έννοια που περιγράφεται από τη σχέση [25]:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta r}{r} = \frac{p r}{s E} \quad (4.8)$$

όπου

E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

Είναι:

$$\varepsilon_r \leq 0.001 \Rightarrow \frac{p r}{s E} \leq 0.001 \Rightarrow s \geq \frac{30 \cdot 10^5 Pa \cdot 5 \cdot 10^{-2} m}{70 \cdot 10^9 Pa} \cdot 10^3 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow s \geq 2.1 \cdot 10^{-3} m = 2.1 mm$$

Επιλέγεται $s = 2.5 mm$.

Συνεπώς, η μάζα του κανονιού υπολογίζεται:

$$\begin{aligned} m &= \rho_{alum} L \pi ((D + 2s)^2 - D^2) / 4 = \\ &= 2710 \cdot 0.4000 \cdot ((0.0500 + 2 \cdot 0.0025)^2 - 0.0500^2) / 4 \Rightarrow \\ m &\approx 0.45 kg \end{aligned} \quad (4.9)$$

και ροπή αδράνειας ως προς το άκρο του

$$I = ml^2 / 3 = 0.024 kg \cdot m^2 \quad (4.10)$$

4.2.3 Ψύκτης

Η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο κύκλωμα είναι αμέσως μετά το συμπιεστή και βρίσκεται σύμφωνα με τις προαναφερθείσες σχέσεις των τελείων αερίων και της αδιαβατικής μεταβολής:

$$\begin{aligned} p_0 V_0^\gamma &= p_1 V_1^\gamma \Rightarrow p_0 V_0 V_0^{\gamma-1} = p_1 V_1 V_1^{\gamma-1} \Rightarrow mRT_0 V_0^{\gamma-1} = mRT_1 V_1^{\gamma-1} \Rightarrow \\ \Rightarrow T_1 &= T_0 \left(\frac{V_0}{V_1} \right)^{\gamma-1} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Θεωρείται θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_0 = 273K + 17K = 290K$. Το σύστημα προορίζεται για χαμηλότερες θερμοκρασίες, αλλά ο ψύκτης υπολογίζεται στη δυσμενέστερη περίπτωση.

Ανά λεπτό ο συμπιεστής παρέχει $220lt$ και περιστρέφεται με $1000rpm$, συνεπώς παρέχει $220lt / 1000rev = 220ml / rev$ ανά περιστροφή. Ο αρχικός όγκος είναι

$$V_0 = V_1 \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{1/\gamma} = 220 \left(\frac{10}{1.013} \right)^{1/1.4} ml \approx 1130ml \quad (4.12)$$

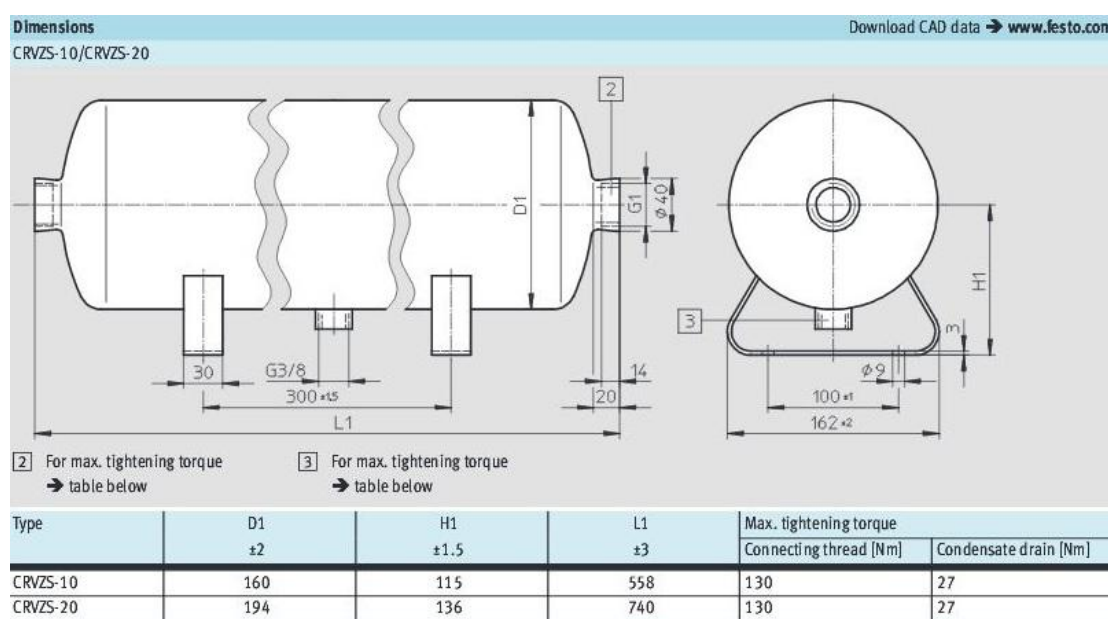
Άρα, $T_1 = 558K = 285^\circ C$. Μια τέτοια θερμοκρασία μας παραπέμπει στην αναζήτηση κατάλληλου ψύκτη αφενός λόγω άνω ορίου του πνευματικού κυκλώματος ως προς τη θερμοκρασία λειτουργίας, αφετέρου για προστασία του κυκλώματος από την υγρασία του

εργαζόμενου αέρα. Ωστόσο, όπως προκύπτει από επαφή με εκπροσώπους του εμπορίου, επειδή ο συμπιεστής δεν είναι θερμικά μονωμένος, η θερμοκρασία εξόδου με έναν τυπικό εμβολοφόρο συμπιεστή ανεβαίνει στους 70°C . Επιπλέον, τα αεροφυλάκια, ακόμη και χωρίς χρήση ψύκτη για αφύγρανση, εμφανίζουν χρόνο ζωής περίπου 10 ετών και αντικαθίστανται όταν παρατηρηθεί φθορά τους. Έτσι, δεν απαιτείται χρήση ψύκτη στο σχεδιαζόμενο κύκλωμα.

4.2.4 Δευτερεύον αεροφυλάκιο

Με βάση τον αρχικό όγκο και την αρχική πίεση αέρα που επιλέχθηκε για την εκτόξευση, επιλέγεται αντίστοιχης χωρητικότητας και αντοχής αεροφυλάκιο, που τοποθετείται πλησίον του κανονιού για την μείωση των γραμμικών απωλειών σε περίπτωση που η εγκατάσταση συμπιεστή – κύριου αεροφυλακίου βρίσκεται σε απομακρυσμένο σημείο λόγω έλλειψης χώρου.

Ενδεικτικά επιλέγεται αεροφυλάκιο (Σχήμα 4.13 [26]) χωρητικότητας 20 λίτρων μήκους $L=0.74\text{m}$, διαμέτρου $D=0.16\text{m}$, με μάζα $m=10.2\text{kg}$.



Σχήμα 4.13: Δευτερεύον αεροφυλάκιο

4.2.5 Φιάλη Αζώτου

Ενδεικτικά επιλέγεται φιάλη χωρητικότητας 50lt για πολλαπλές εκτοξεύσεις χωρίς την ανάγκη πλήρωσης της φιάλης (Σχήμα 4.14 [27]).

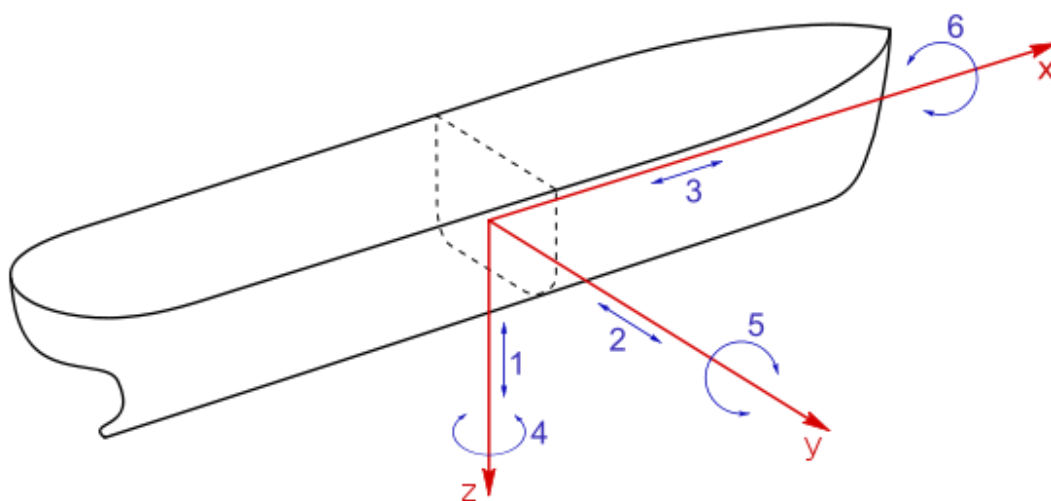


Χωρητικότητα Φιάλης 📏 :	50 Lit.
Διάμετρος Φιάλης 📏 :	24 cm
Ύψος Φιάλης 📏 :	170 cm
Βάρος φιάλης 📏 :	75 Kg
Πίεση φιάλης 📏 :	200 Bar

Σχήμα 4.14: Φιάλη Αζώτου

Κεφάλαιο 5 – Έλεγχος βάσης κανονιού

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εκτόξευση της σφαίρας με το επιθυμητό διάνυσμα αρχικής ταχύτητας, απαιτείται η κατάλληλη στόχευση προς την υποδοχή, δηλαδή η κατάλληλη φορά του κανονιού ως προς την υποδοχή, συναρτήσει της θέσης του. Καθώς η θέση του μεταβάλλεται σύμφωνα με την κίνηση του πλοίου, η φορά του θα πρέπει να επαναπροσδιορίζεται αυτόματα. Απαιτείται, λοιπόν, σύστημα Αυτομάτου Ελέγχου για την κίνηση της βάσης όπου εδράζεται το πνευματικό κανόνι περί τους άξονες x , y και z , συναρτήσει των ταλαντώσεων που εκτελεί το πλοίο (Σχήμα 5.1 [28]).



Σχήμα 5.1: Οι γωνιακές ταλαντώσεις του πλοίου περί τους 3 άξονες

5.1 Υπολογισμός ροπής & ισχύος συστήματος

Η μελέτη αφορά δυσμενείς καιρικές συνθήκες, συνεπώς μελετάται η περίπτωση των 10 βαθμών της κλίμακας Beaufort, δηλαδή ταχύτητα ανέμου $100km/h \approx 28m/s$ και πλάτος κύματος $2m$ (περιορισμένη τιμή σε σχέση με το ανοιχτό πέλαγος) και περίοδο κυματισμού $T_k = 7.5sec$.

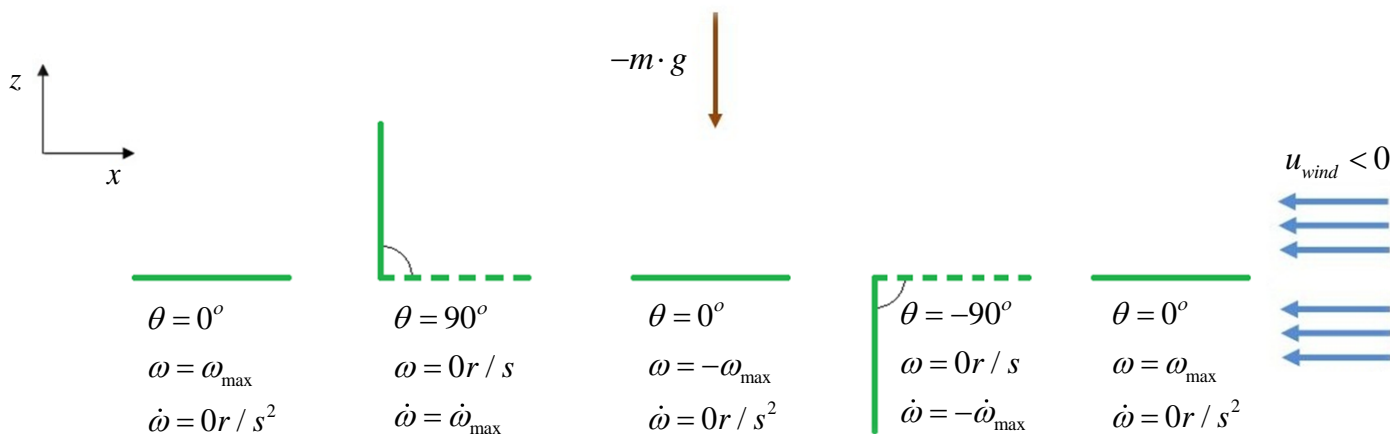
Η κατακόρυφη κίνηση που πραγματοποιεί η πρύμνη του πλοίου περιγράφεται από τη σχέση:

$$z = 2 \sin\left(\frac{2\pi}{7.5}t\right) = 2 \sin(0.84t) \quad (5.1)$$

Για να υπολογιστεί η απαιτούμενη ροπή και ισχύς του κινητήρα στη ζητούμενη ταχύτητα περιστροφής, θεωρείται η περίπτωση κατά την οποία ο κινητήρας καλείται να περιστρέψει το κανόνι σύμφωνα με τη σχέση:

$$\theta = \frac{\pi}{2} \sin(0.84t) \quad (5.2)$$

δηλαδή να περιστρέψει το κανόνι στο χρόνο της περιόδου T_k από τις 0° στις 90° , στη συνέχεια 90° ως -90° και τέλος -90° ως 0° (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2: Περιστροφή του κανονιού υπό την επίδραση της βαρύτητας και του ανέμου

Παραγωγίζοντας, προκύπτει για την ταχύτητα και την επιτάχυνση αντίστοιχα:

$$\omega = \frac{\pi}{2} 0.84 \cos(0.84t) = 1.32 \cos(0.84t) \quad (5.3)$$

$$\dot{\omega} = -1.11 \sin(0.84t) \quad (5.4)$$

Το φορτίο του κινητήρα περιγράφεται από τη σχέση:

$$M_{motor} = I_{pneu} \dot{\omega} + M_{wind} + M_{grav} \quad (5.5)$$

, όπου I_{pneu} η ροπή αδράνειας που οφείλεται στα μέρη του πνευματικού συστήματος που περιστρέφονται, δηλαδή το κανόνι (Εξίσωση 4.10) και η σφαίρα στο άκρο του:

$$\begin{aligned} I_{pneu} &= I_{κανονιού} + I_{σφαίρας} = \\ &= I_{κανονιού} + \left[\frac{2}{5} m_{σφ} \left(\frac{D_{σφ}}{2} \right)^2 + m_{σφ} \left(\frac{D_{σφ}}{2} \right)^2 \right] = \\ &= 0.024 kg m^2 + 0.0012 kg m^2 \approx 0.025 kg m^2 \end{aligned} \quad (5.6)$$

M_{wind} η κατά y συνιστώσα της φόρτισης λόγω ανέμου:

$$(5.7)$$

$$\vec{M}_{wind} = \vec{F}_{wind} \times \vec{l} / 2 ,$$

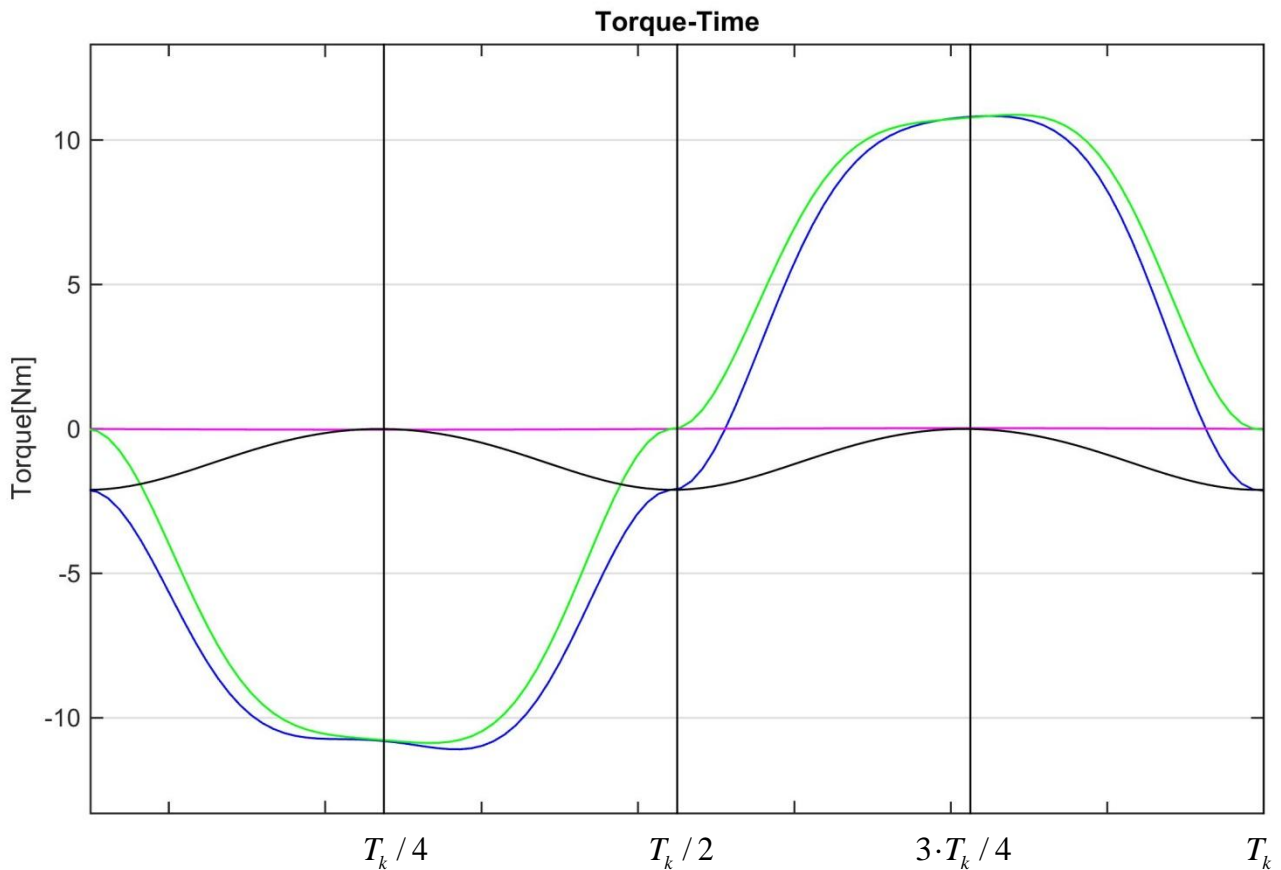
\vec{l} το διάνυσμα του κανονιού με ακτινική διεύθυνση και φορά προς το πέρας του M_{grav} η ροπή λόγω βαρυτικού φορτίου:

$$M_{grav} = -m g l / 2 \quad (5.8)$$

Η ισχύς P_{motor} προκύπτει ως γινόμενο της γωνιακής ταχύτητας και της ροπής του κινητήρα:

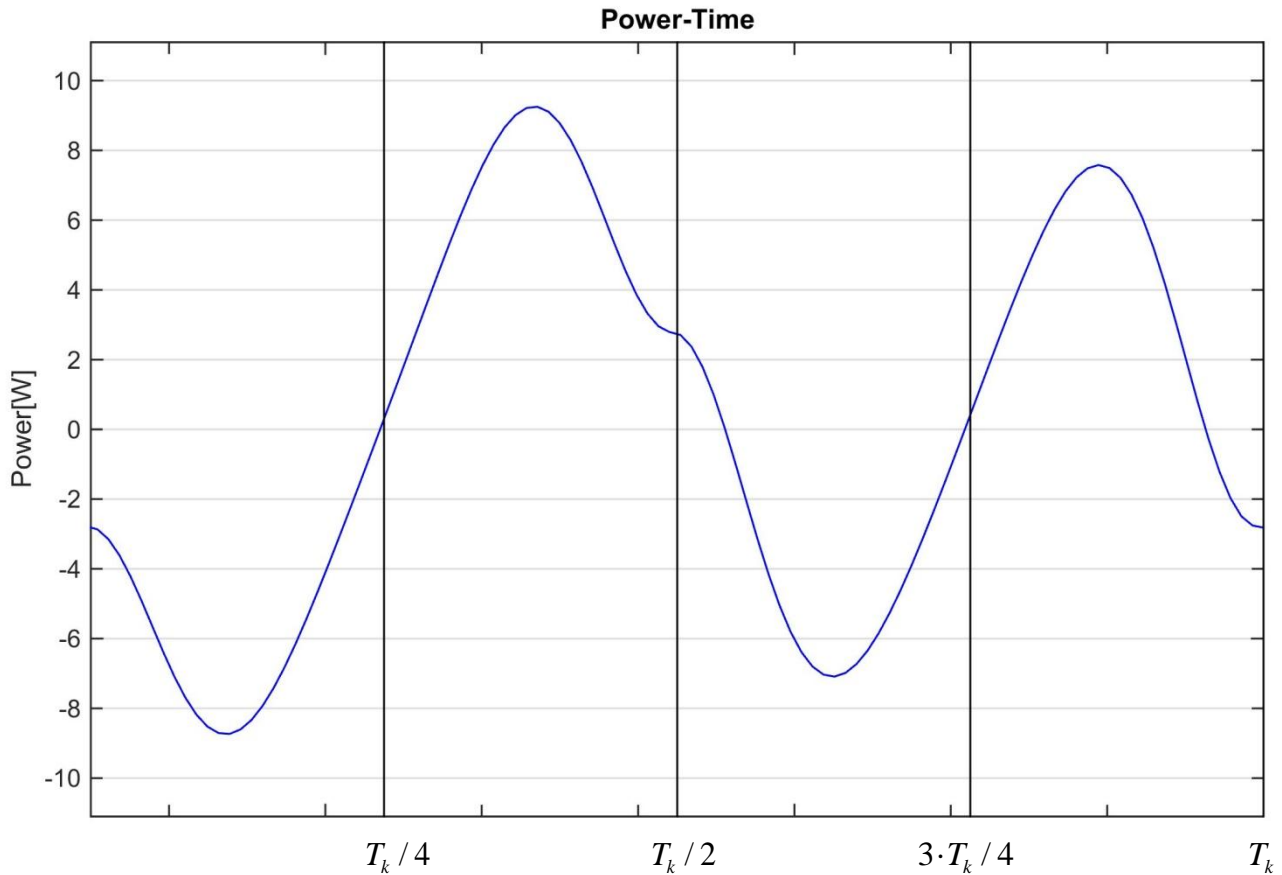
$$P_{motor} = \omega M_{motor} \quad (5.9)$$

Στα Σχήματα 5.3, 5.4 παρουσιάζονται οι καμπύλες του φορτίου και της απαιτούμενης ισχύος, αντίστοιχα, συναρτήσει του χρόνου κατά την εκτέλεση της ορισμένης ταλάντωσης.



Σχήμα 5.3: Η ροπή που ο κινητήρας καλείται να παρέχει ως σύνθεση των επιμέρους ροπών

- συνολική ροπή κινητήρα (μπλε καμπύλη)
- ροπή λόγω αδράνειας (ιώδης καμπύλη)
- ροπή λόγω φορτίου ανέμου (πράσινη καμπύλη)
- ροπή λόγω βαρυτικού φορτίου (μαύρη καμπύλη)



Σχήμα 5.4: Η ισχύς του κινητήρα σε μια περίοδο ταλάντωσης

Ως μέγιστες τιμές σημειώνονται $\max M_{motor} \approx 12Nm$ και $\max P_{motor} \approx 9W$.

Σημειώνεται πως ανάμεσα στις συνιστώσες της ροπής, οι M_{wind} και M_{grav} είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, $10^0 Nm$, ενώ η συνιστώσα της ροπής αδράνειας είναι της τάξης των $10^{-2} Nm$. Ακόμη, παρατηρείται διαφορά φάσης $\Delta\varphi = \pi/2$ μεταξύ των M_{wind} , M_{grav} , γεγονός που συνάδει με το Σχήμα 5.2 και τις Εξισώσεις 5.7, 5.8.

Η ροπή M_{grav} είναι δυνατό να εξαλειφθεί προσθέτοντας στο κανόνι αντίβαρο. Έτσι, η Εξίσωση 5.5 μετατρέπεται σε :

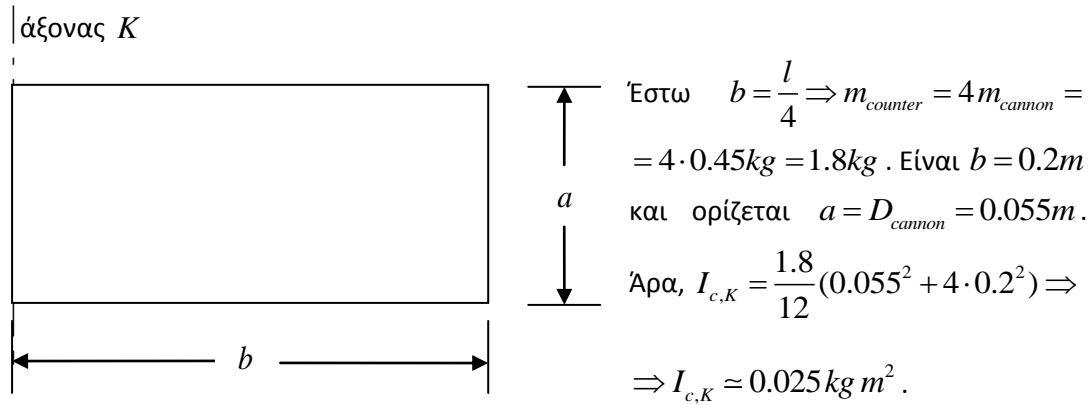
$$M_{motor} = (I_{pneu} + I_{counterweight})\dot{\omega} + M_{wind} \quad (5.10)$$

Καθώς το αντίβαρο εξισορροπεί τη ροπή του βάρους του κανονιού ως προς το άκρο του, θα είναι:

$$m_c g \frac{b}{2} = m_{\text{cannon}} g \frac{l}{2} \Rightarrow m_c b = m_{\text{cannon}} l \quad (5.11)$$

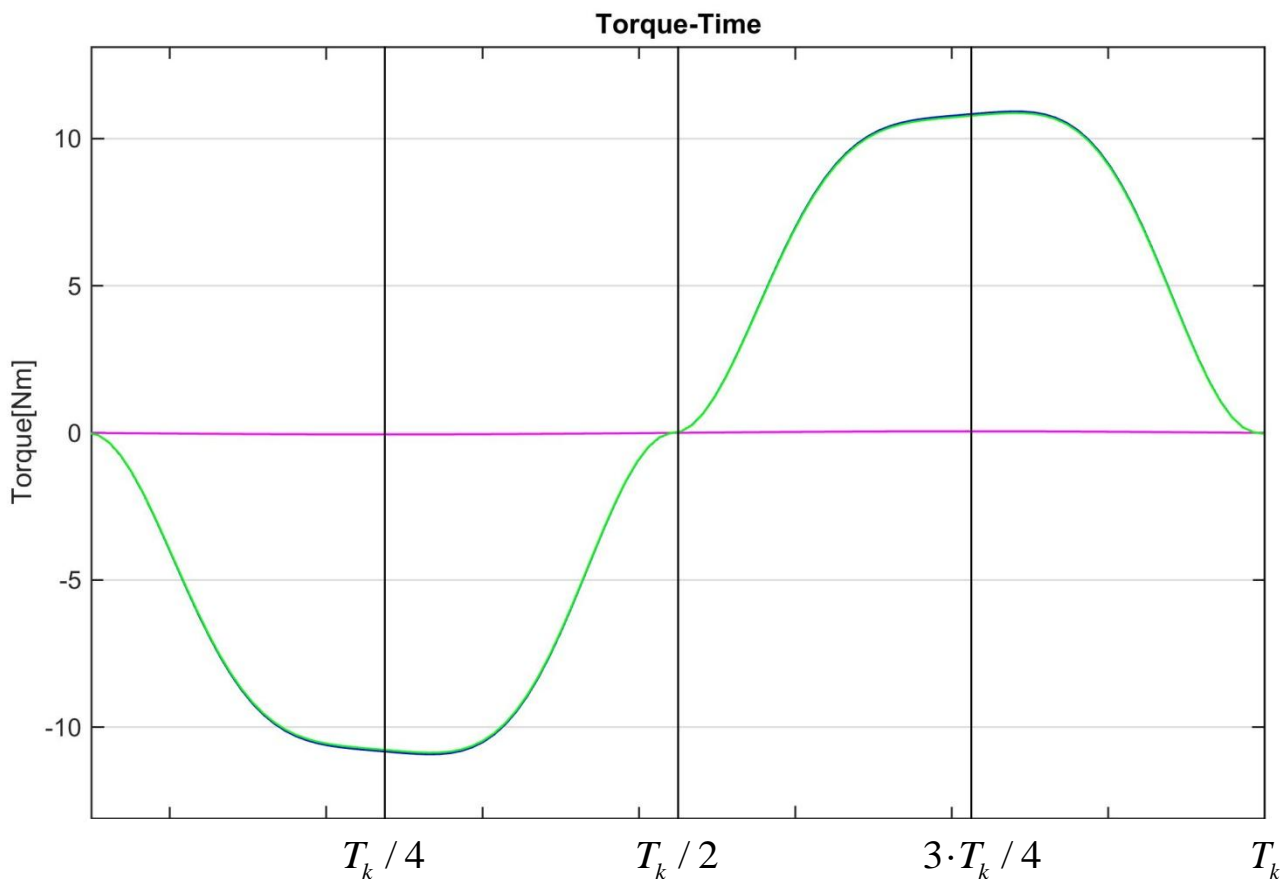
Για ορθογωνικής διατομής αντίβαρο, η ροπή αδράνειας ως προς το άκρο του είναι:

$$I_{c,K} = \frac{m}{12}(a^2 + b^2) + m\left(\frac{b}{2}\right)^2 = \frac{m}{12}(a^2 + 4b^2) \quad (5.12)$$

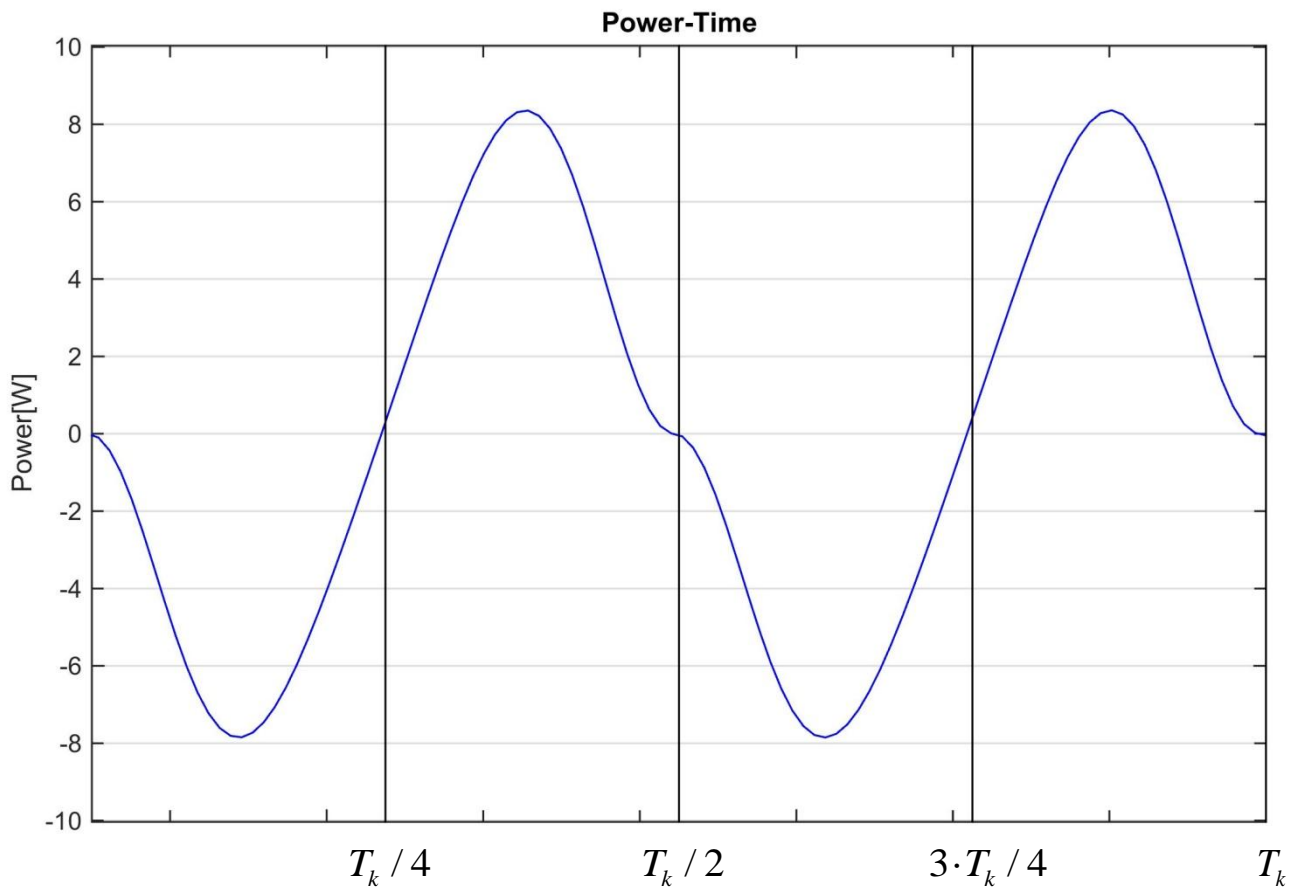


Σχήμα 5.5: Κάτοψη αντίβαρου

Προκύπτουν οι νέες καμπύλες ροπής και ισχύος ως προς το χρόνο:



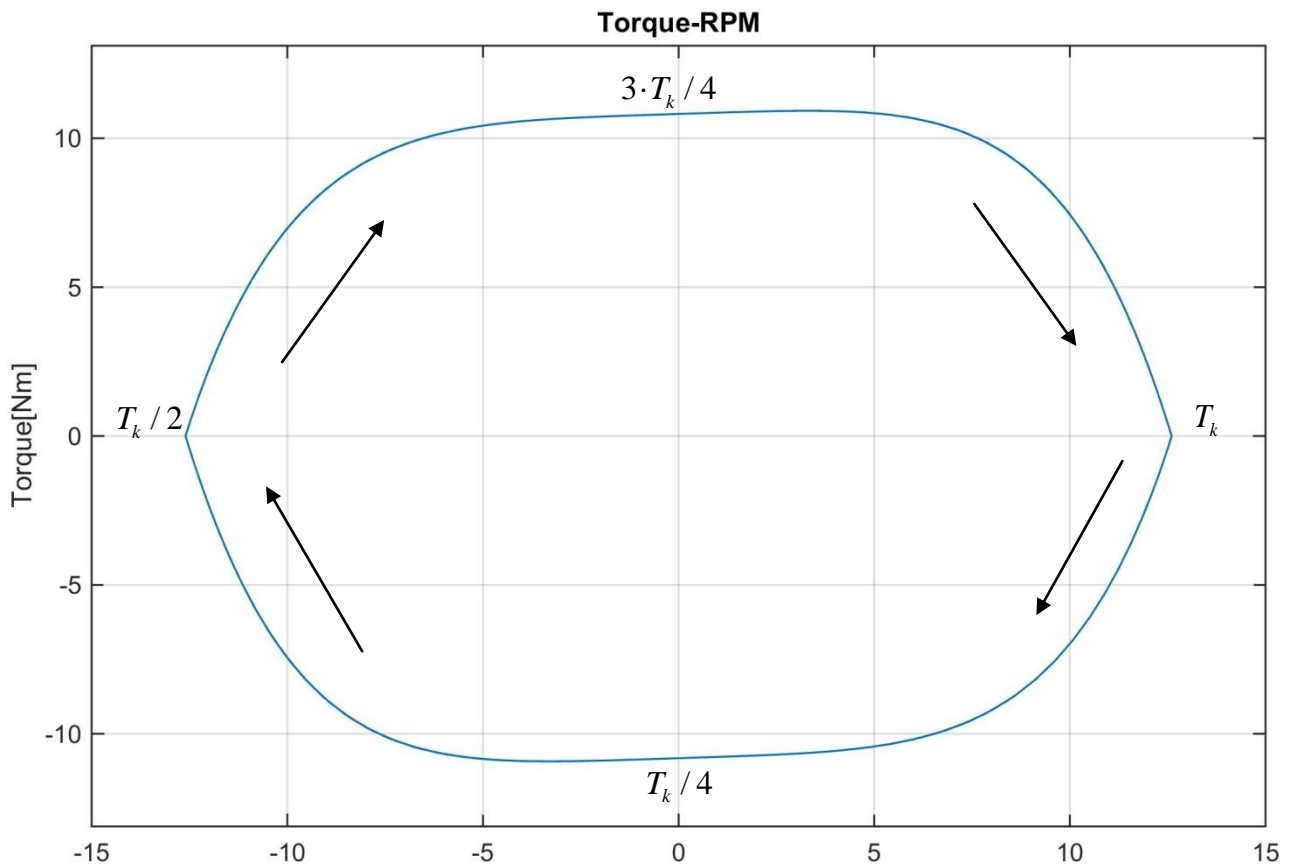
Σχήμα 5.6: Η ροπή του κινητήρα σε μια περίοδο ταλάντωσης



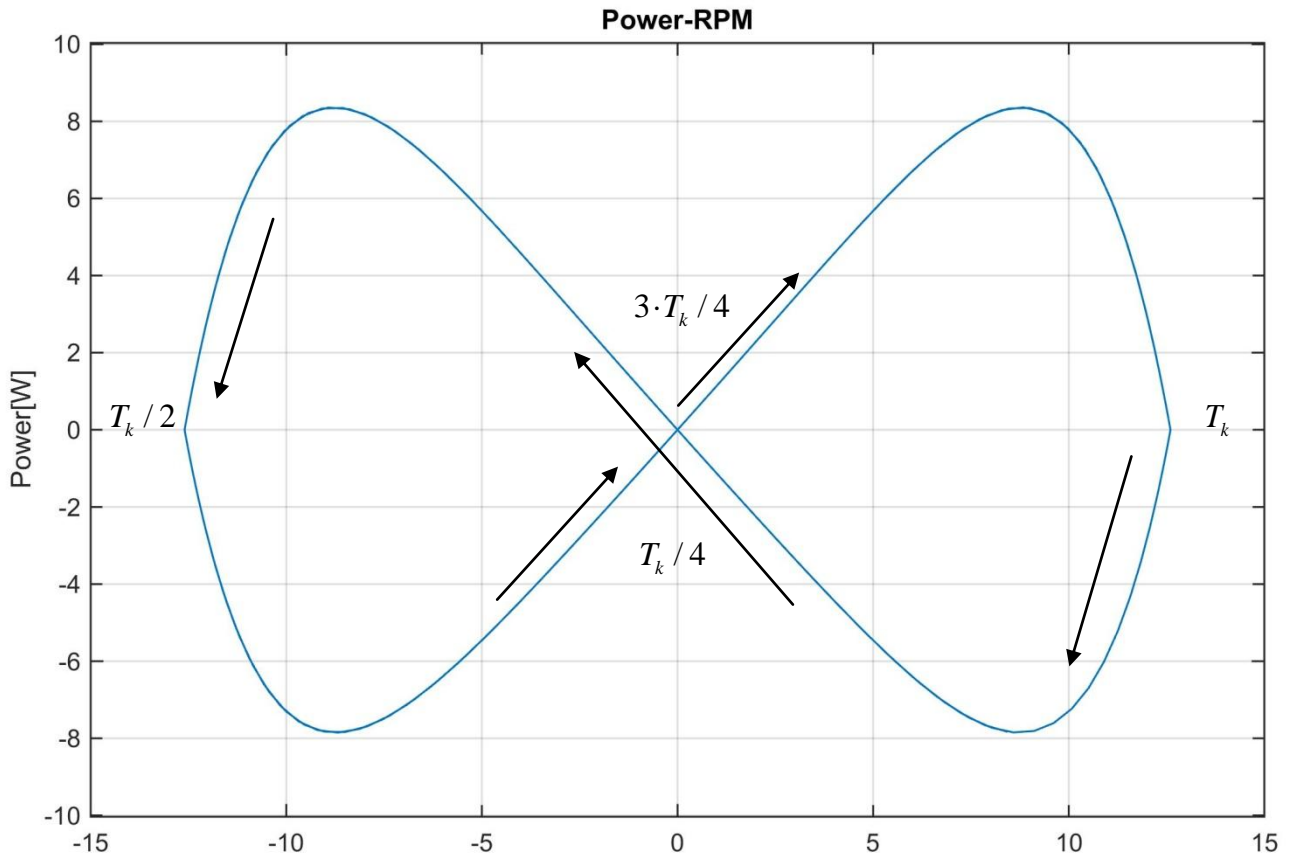
Σχήμα 5.7: Η ισχύς του κινητήρα σε μια περίοδο ταλάντωσης

Συγκρίνοντας τις καμπύλες με και χωρίς αντίβαρο, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στις μέγιστες τιμές ροπής και ισχύος. Όμως, με την προσθήκη αντίβαρου απαλείφεται το βαρυτικό φορτίο της κάννης, που διαφορετικά θα πρέπει να υπερνικά ο κινητήρας καταναλώνοντας ισχύ.

Στα Σχήματα 5.8 και 5.9 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες της ροπής και της ισχύος, αντίστοιχα, ως προς τις στροφές (RPM) του κινητήρα.



Σχήμα 5.8: Η ροπή του κινητήρα συναρτήσει των RPM. Για ευκολότερη κατανόηση αναφέρεται η φορά εξέλιξης της ταλάντωσης της θ .



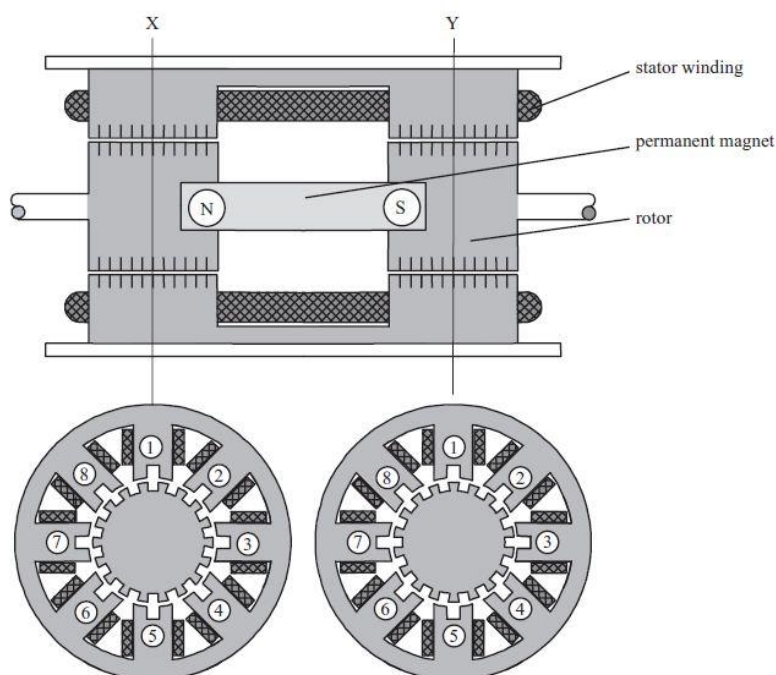
Σχήμα 5.9: Η ισχύς του κινητήρα συναρτήσει των RPM. Για ευκολότερη κατανόηση αναφέρεται η φορά εξέλιξης της ταλάντωσης της θ .

5.2 Εκλογή κινητήρα & μειωτήρα στροφών για τον άξονα y

Η επιλογή κινητήρα προκύπτει από τις ανάγκες που παρουσιάζει η εφαρμογή και από τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων τύπων κινητήρων. Για ακριβή στόχευση, με δεδομένες τη διαρκή μετακίνηση και τη στροφική ταλάντωση του πλοίου, καθώς και το φορτίο που προκύπτει από την πρόσπτωση του ανέμου στο κανόνι, επισημαίνονται τις ανάγκες για:

- συχνή αλλαγή της φοράς περιστροφής
- χαμηλή γωνιακή ταχύτητα (ανάλογη της συχνότητας ταλάντωσης του πλοίου)
- ροπή αντιστάθμισης του φορτίου διαταραχής του ανέμου
- έλεγχο θέσης – όχι στροφών

Η επιλογή βηματικού κινητήρα (stepper) ικανοποιεί τις παραπάνω απαιτήσεις. Ειδικότερα, επειδή ενδιαφέρει η ακρίβεια θέσης και η παροχή υψηλής ροπής, από τους βασικούς τύπους βηματικού κινητήρα επιλέγεται ο υβριδικός (Σχήματα 5.10 & 5.11 [29]), με χαρακτηριστικά του τις υψηλές ροπές και το μικρό γωνιακό βήμα που είναι συνήθως $< 1.8^\circ$, σε αντίθεση με το τυπικό βήμα $> 30^\circ$ των κινητήρων μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης [29].



Σχήμα 5.10: Υβριδικός βηματικός κινητήρας

Όταν τα τυλίγματα του βηματικού κινητήρα είναι διεγερμένα, ο δρομέας εμφανίζει ροπή συγκράτησης (holding torque), δηλαδή εάν επιχειρηθεί γωνιακή μετατόπιση του δρομέα από εξωτερικό παράγοντα, τότε εμφανίζεται ροπή που δεν επιτρέπει μετακίνηση του δρομέα από την ορισμένη του θέση [29]. Έτσι, η παρουσία ροπής που προκύπτει από την πρόσπτωση του ανέμου στο κανόνι δε δημιουργεί την ανάγκη ανάδρασης θέσης που θα χρειαζόνταν άλλοι τύποι κινητήρα, αρκεί η ροπή αυτή να μην ξεπερνά τη ροπή συγκράτησης.



Σχήμα 5.11: Υβριδικός βηματικός κινητήρας

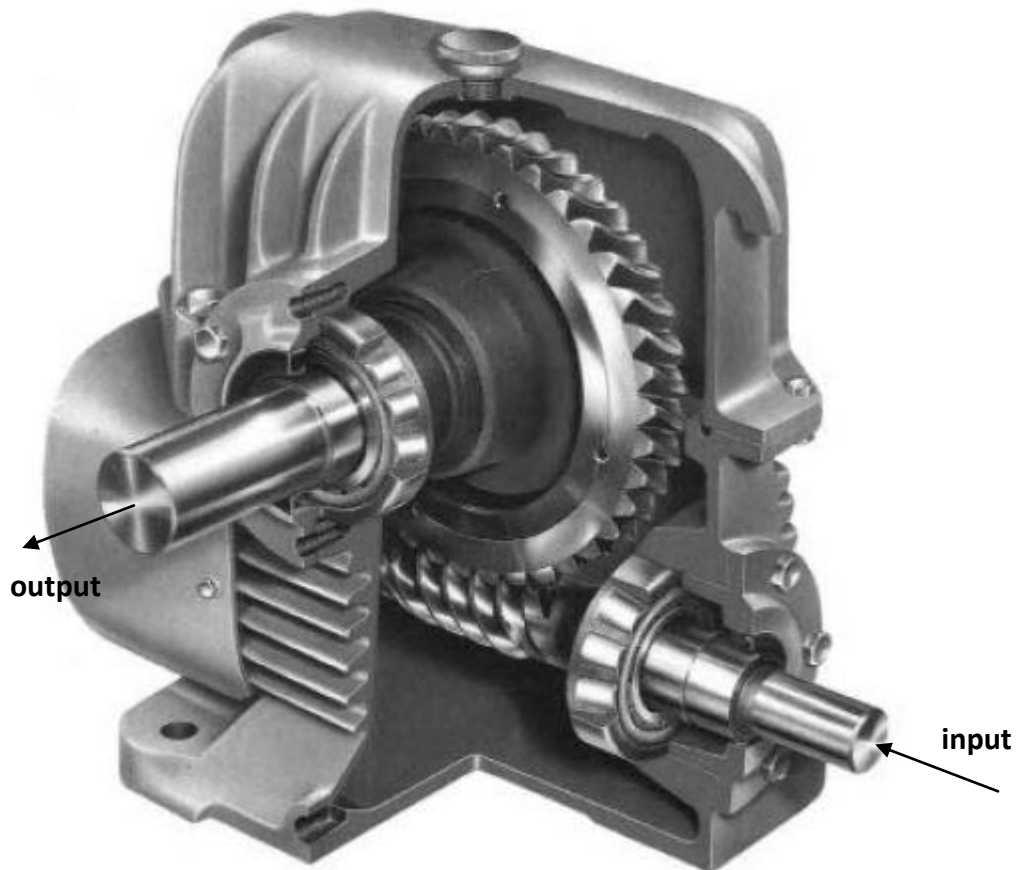
Η ροπή που καλείται να παρέχει ο κινητήρας ($12Nm$) είναι υψηλή και οδηγεί στην ανάγκη χρήσης μειωτήρα στροφών.

Ένα ακόμη στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι η ανάγκη ύπαρξης μηχανικού φρένου για τη διατήρηση σταθερής θέσης του κανονιού όταν αυτό δε λειτουργεί:

Καθώς το σύστημα του κανονιού πρόκειται να τοποθετηθεί εντός χώρου εργασίας, είναι προφανές ότι θα πρέπει να ακολουθηθούν τα πρότυπα της Ασφάλειας στην Εργασία [30], ώστε να αποφευχθούν ατυχήματα και να διασφαλιστεί η ακεραιότητα των εργαζομένων και ακολούθως του εξοπλισμού.

Κατά τη λειτουργία του, θα πρέπει να είναι σαφώς ορισμένα τα όρια ασφαλούς διέλευσης γύρω από το κανόνι (κίνδυνος πρόσκρουσης σε κινούμενο μέρος μηχανής). Στην κατάσταση μη-τροφοδότησης του κινητήρα, είναι σκόπιμο ο άξονάς του να παραμένει ακίνητος, διαφορετικά είναι πιθανό ο εργαζόμενος να υποπέσει σε λάθος παρερμηνείας του κινητού μέρους ως ακίνητου και π.χ. στηριζόμενος σε αυτό να τραυματιστεί από πτώση.

Ως λύση που ικανοποιεί τόσο τη μείωση στροφών όσο και την ύπαρξη φρένου προτείνεται η χρήση μειωτήρα στροφών ατέρμονα κοχλία – κορώνας (Σχήμα 5.12 [31]), που αποτελεί αφ'εαυτού σταθερό σύστημα, δηλαδή μόνο ο κοχλίας μπορεί να περιστρέψει την κορώνα και όχι το αντίστροφο [32].



Σχήμα 5.12: Μειωτήρας ατέρμονα κοχλία - κορώνας

Τελικά, εκτός από τον πολλαπλασιασμό ροπής και τη συγκράτηση, επιτυγχάνεται και αύξηση της ακρίβειας της γωνιακής θέσης του συστήματος, μέσω της γνωστής σχέσης [32]:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\theta_1}{\theta_2} \quad (5.13)$$

όπου i η σχέση μετάδοσης.

Κινητήρας και μειωτήρας στροφών τελικά εκλέγονται όχι μεμονωμένα, αλλά ως συνεργαζόμενο ζεύγος.

Επιλέγοντας λόγο μείωσης στροφών $i = 15$, η μέγιστη ροπή που ο κινητήρας καλείται να αποδώσει είναι: $12Nm / i = 0.8Nm$, στις $15 \cdot i = 225rpm$.

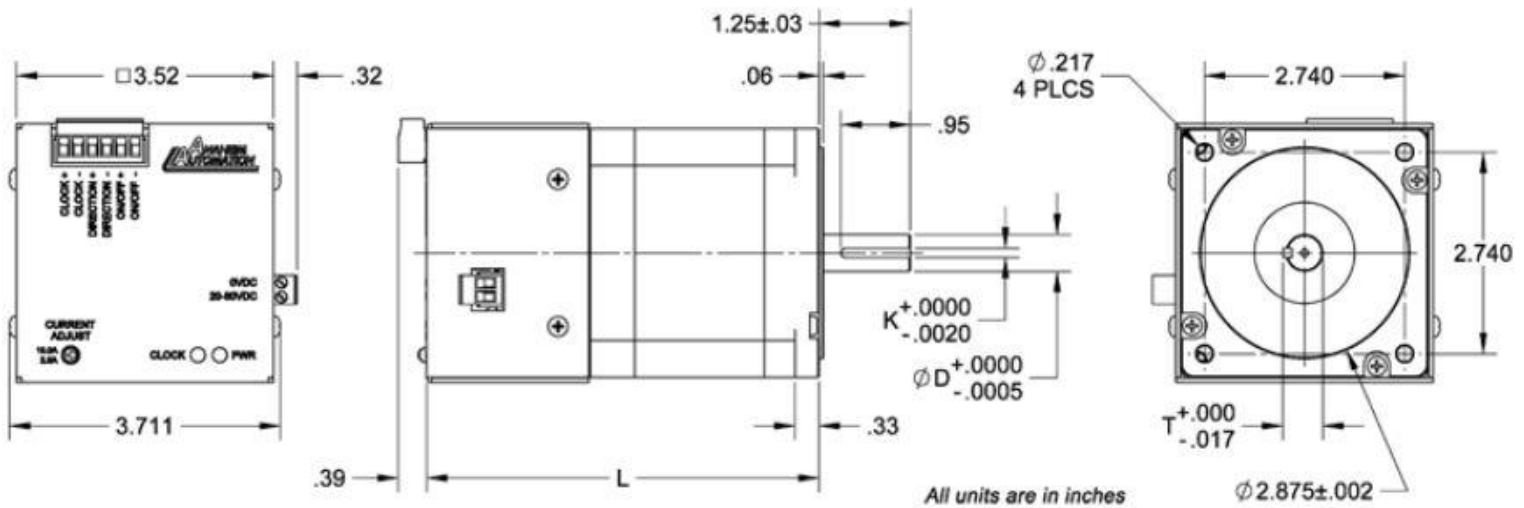
Ακολουθώντας την οδηγία των κατασκευαστών βηματικών κινητήρων [33] για εκλογή κινητήρα με απαιτήσεις ροπής κάτω του 50% της ροπής αποσυγχρονισμού του (pull-out torque) στις αντίστοιχες στροφές, αναζητείται κινητήρας με ροπή αποσυγχρονισμού άνω των $1.6Nm$ στις $225rpm$.

Εκλέγεται, ενδεικτικά, ο κινητήρας NEMA 34MD112S (Σχήμα 5.13, 5.14 [34]), που σύμφωνα με τη χαρακτηριστική του καμπύλη (Σχήμα 5.15 [34]) πληροί τις ανωτέρω προδιαγραφές.

Στα χαρακτηριστικά του σημειώνονται: $I_{shaft} = 1.4 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $m_{stepper} = 2.6 \text{ kg}$, $L = 0.136 \text{ m}$.

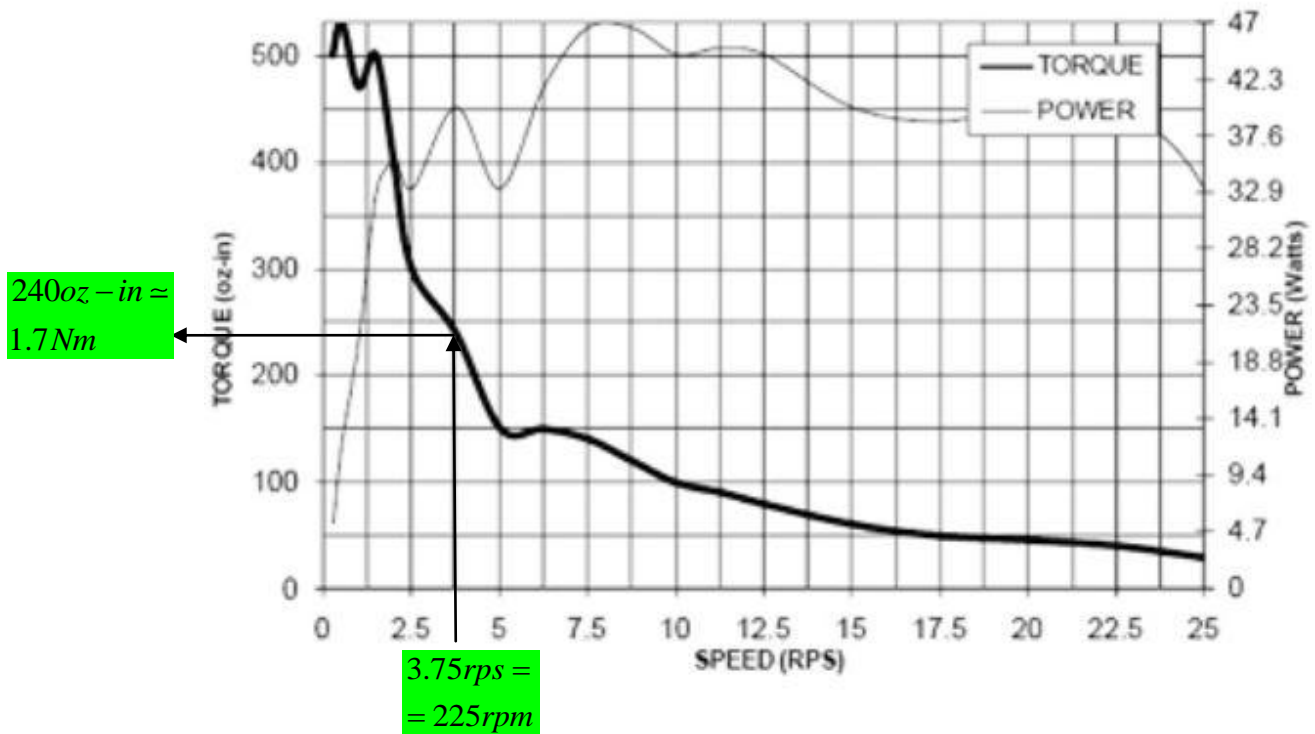


Σχήμα 5.13: Κινητήρας NEMA 34



Σχήμα 5.14: Διαστάσεις κινητήρα NEMA 34MD112S

34Y112S-LW8 w/34MD, 24VDC



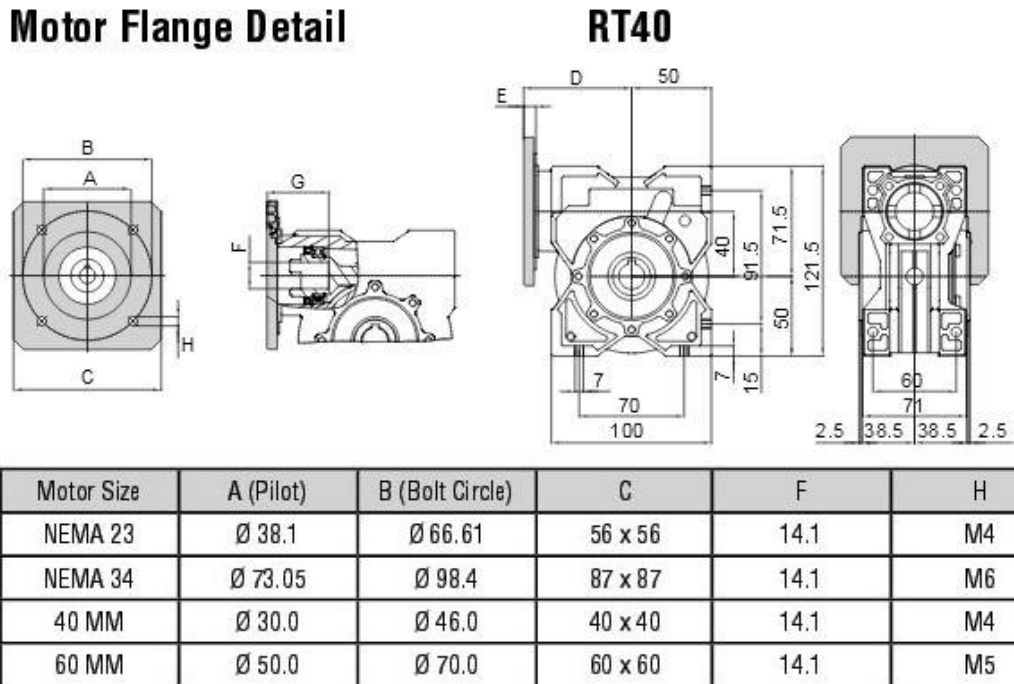
Σχήμα 5.15: Χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής-στροφών και ισχύος-στροφών του κινητήρα 34MD112S. Στις 225rpm παρέχει ροπή 1.7Nm και ισχύ που ξεπερνά τα 40W .

Επιπλέον, εκλέγεται ο αντίστοιχος μειωτήρας στροφών (Σχήματα 5.16, 5.17 [35]) με λόγο μείωσης $i = 15$, ροπή αδράνειας $I_{reducer} \approx 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $m = 1.15 \text{ kg}$ και βαθμό απόδοσης $\eta = 78\%$



Σχήμα 5.16: Μειωτήρας στροφών ατέρμονα κοχλία – κορώνας σε ζεύξη με τον κινητήρα NEMA 34

Motor Flange Detail



Σχήμα 5.17: Διαστάσεις μειωτήρα

Δεδομένης της σημαντικής απώλειας ισχύος στο μειωτήρα, ελέγχεται εάν η συνεργασία των επιλεγμένων κινητήρα και μειωτήρα προσδίδει την απαιτούμενη ισχύ στο σύστημα, δηλαδή

εάν $P_{\text{κινητήρα}} \cdot \eta_{\text{μειωτήρα}} \geq P_{\text{κανονιού}} \Rightarrow P_{\text{κινητήρα}} \geq \frac{P_{\text{κανονιού}}}{\eta_{\text{μειωτήρα}}}$. Για τη μέγιστη τιμή της

απορροφώμενης ισχύος από το σύστημα, $P_{\text{κανονιού}} = 9W$ θα πρέπει $P_{\text{κινητήρα}} \geq \frac{9W}{0.78}$

$\Rightarrow P_{\text{κινητήρα}} \geq 11.5W$.

Από την καμπύλη ισχύος – στροφών του κινητήρα (Σχήμα 5.15) βρίσκεται ότι για τις στροφές στις οποίες απορροφάται η μέγιστη ισχύς, $n = 150 \text{rpm} = 2.5 \text{rps}$, ο κινητήρας μπορεί να παρέχει περισσότερα από $25W$, επομένως, όσον αφορά την ισχύ, μπορεί να υπάρξει συνεργασία των συγκεκριμένων μερών.

Τέλος, για την ομαλή λειτουργία του συστήματος κινητήρα – μειωτήρα ελέγχεται ο λόγος των ροπών αδράνειας του φορτίου του κινητήρα προς τη ροπή αδράνειας της ατράκτου του [33], [36],[37]:

$$\lambda = \frac{I_{\text{shaft}} + I_{\text{reducer}} + I_{\text{pneu}} / i^2}{I_{\text{shaft}}} = \frac{1.4 \cdot 10^{-4} + 1.8 \cdot 10^{-5} + 0.050 / 15^2}{1.4 \cdot 10^{-4}} = \frac{3.8}{1.4} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \lambda \approx 2.72$$

$$(5.14)$$

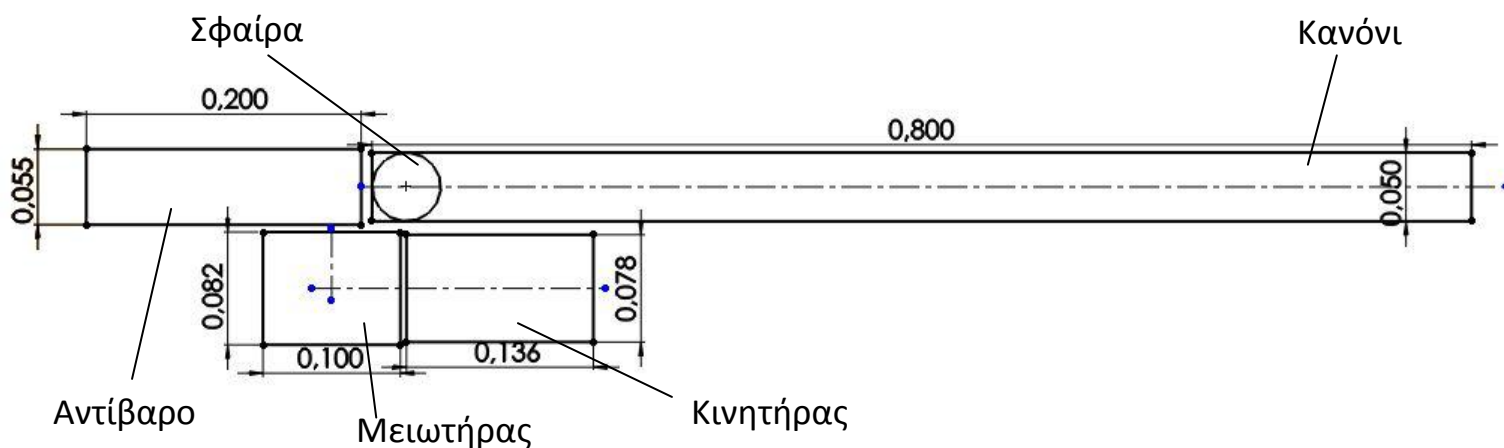
Ο λόγος λ είναι < 10 , γεγονός που συνεπάγεται την ομαλή λειτουργία του κινητήρα, προσεγγίζοντας πραγματικά τη συμπεριφορά που περιγράφεται από τη χαρακτηριστική του καμπύλη [33]. Επομένως, ο συγκεκριμένος μειωτήρας καλύπτει επαρκώς την εφαρμογή.

5.3 Εκλογή κινητήρα & μειωτήρα στροφών για τον άξονα z

Η εκλογή του ζεύγους κινητήρα – μειωτήρα για την περιστροφή στο δεύτερο άξονα (κάθετα στο επίπεδο του καταστρώματος) πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο, διαφέροντας ως προς την απουσία βαρυτικού φορτίου και την αυξημένη ροπή αδράνειας λόγω του πρώτου κινητήρα και του μειωτήρα στροφών:

$$M'_{motor} = I'_{pneu} \dot{\omega} + M_{wind} \quad (5.15)$$

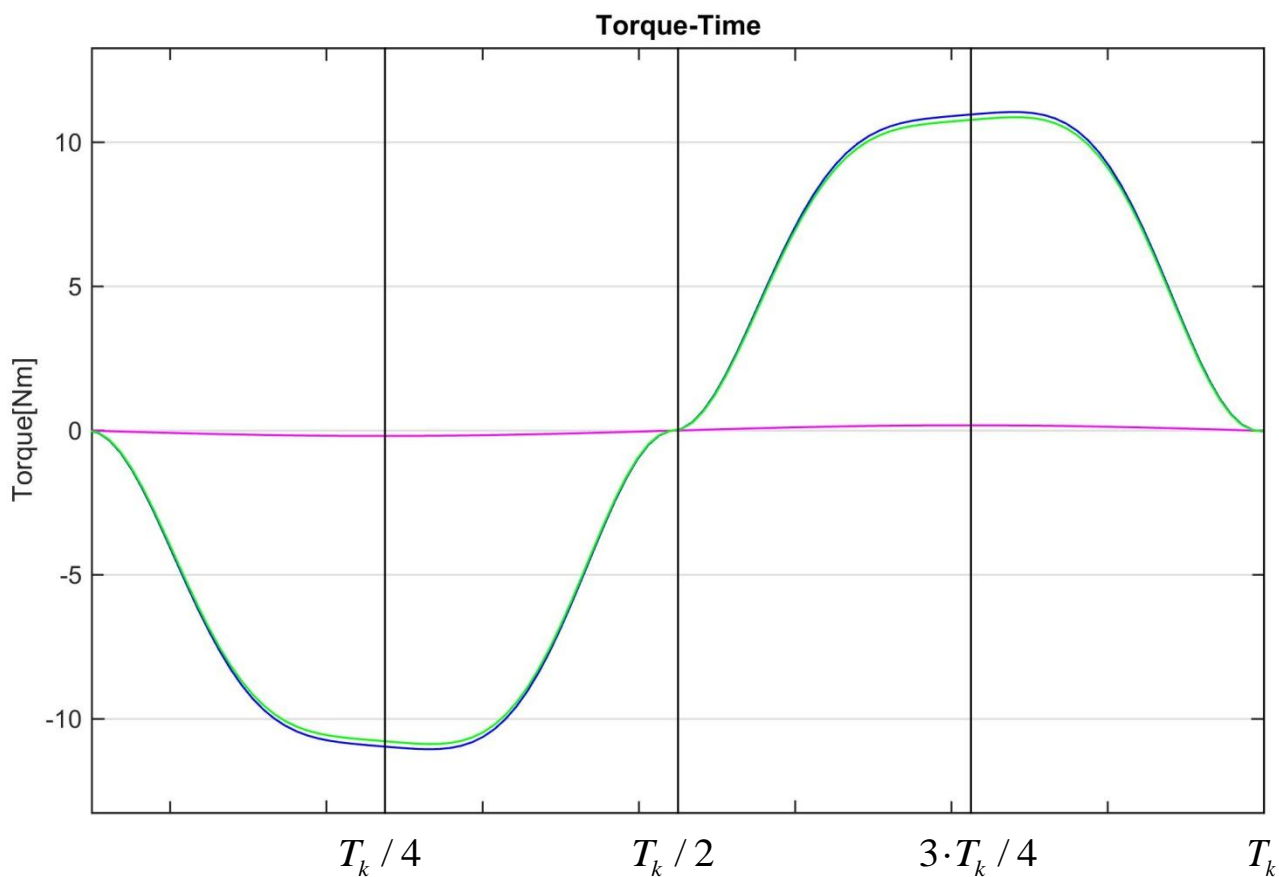
, όπου I'_{pneu} η ροπή αδράνειας που οφείλεται στα μέρη του πνευματικού συστήματος και στο πρώτο ζεύγος κινητήρα – μειωτήρα σύμφωνα με το Σχήμα 5.18.



Σχήμα 5.18: Τοποθέτηση κανονιού-σφαίρας-κινητήρα-μειωτήρα στο επίπεδο xy για υπολογισμό της ροπής αδράνειας ως προς τον άξονα z .

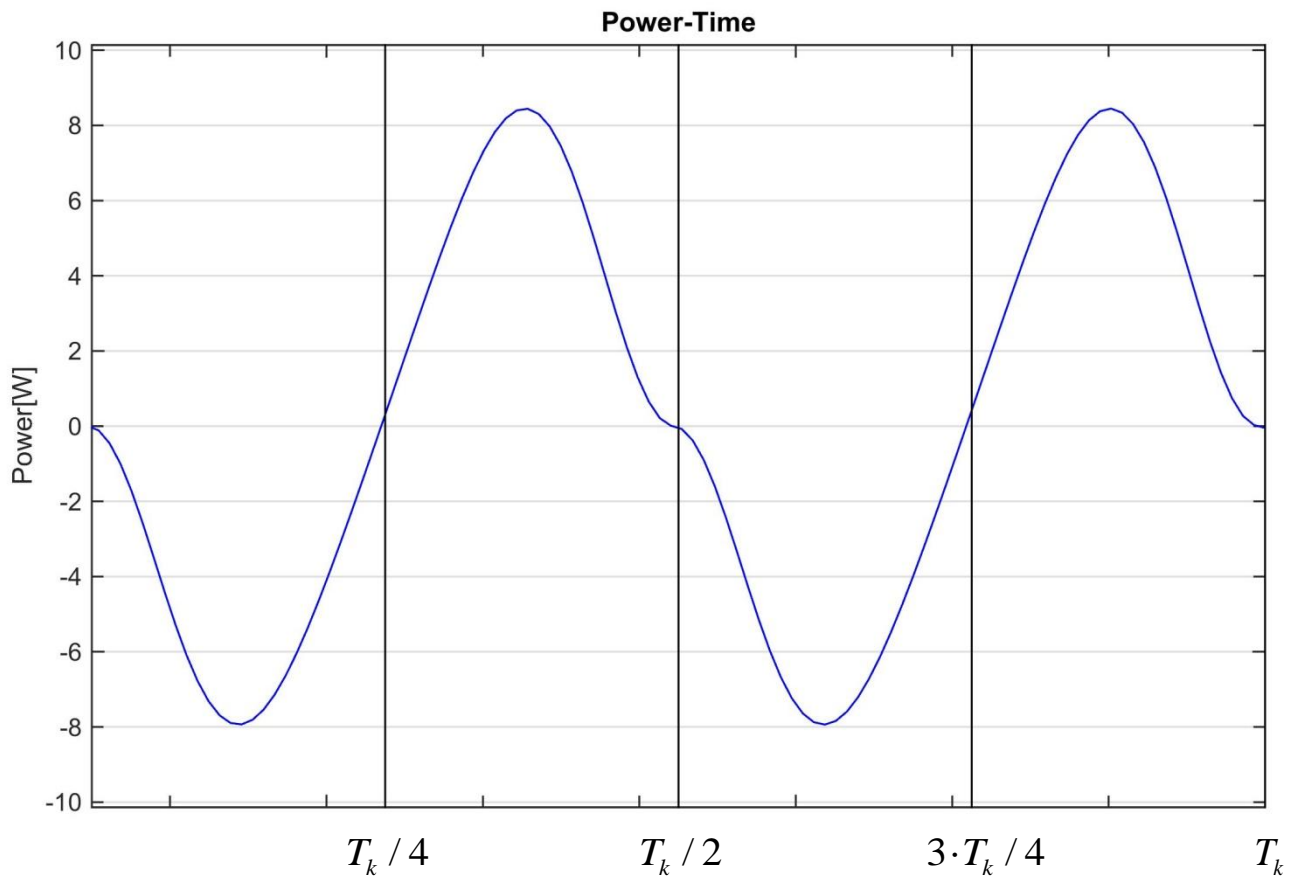
$$\begin{aligned} I'_{pneu} &= I_{pneu} + I_{\text{κινητήρα}} + m_{\text{κινητήρα}} \cdot r_{\text{κινητήρα}}^2 + I_{\text{μειωτήρα}} + m_{\text{μειωτήρα}} \cdot r_{\text{μειωτήρα}}^2 = \\ &= 0.1676 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned} \quad (5.16)$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα ροπής και ισχύος (Σχήματα 5.19 – 5.22).

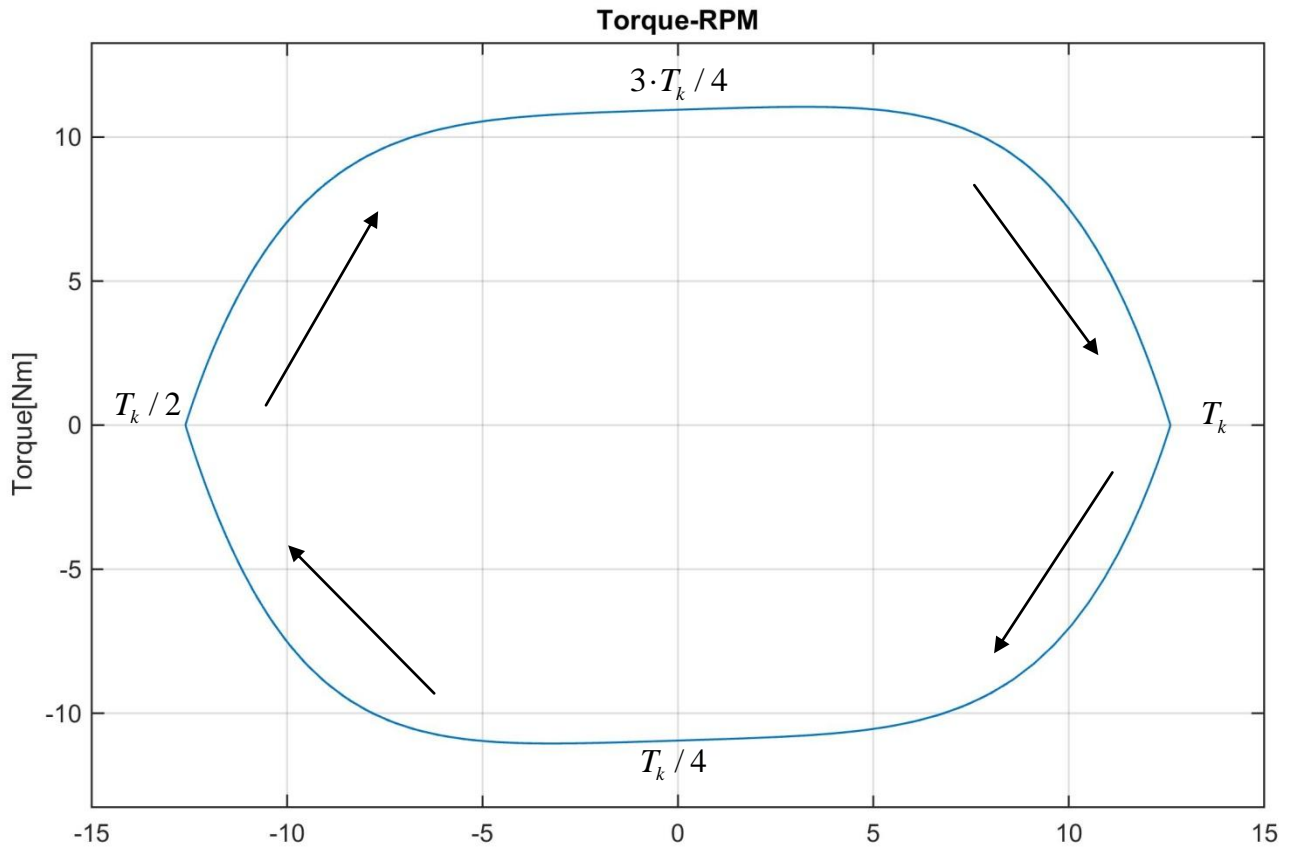


Σχήμα 5.19: Η ροπή που ο κινητήρας καλείται να παρέχει ως σύνθεση των επιμέρους ροπών

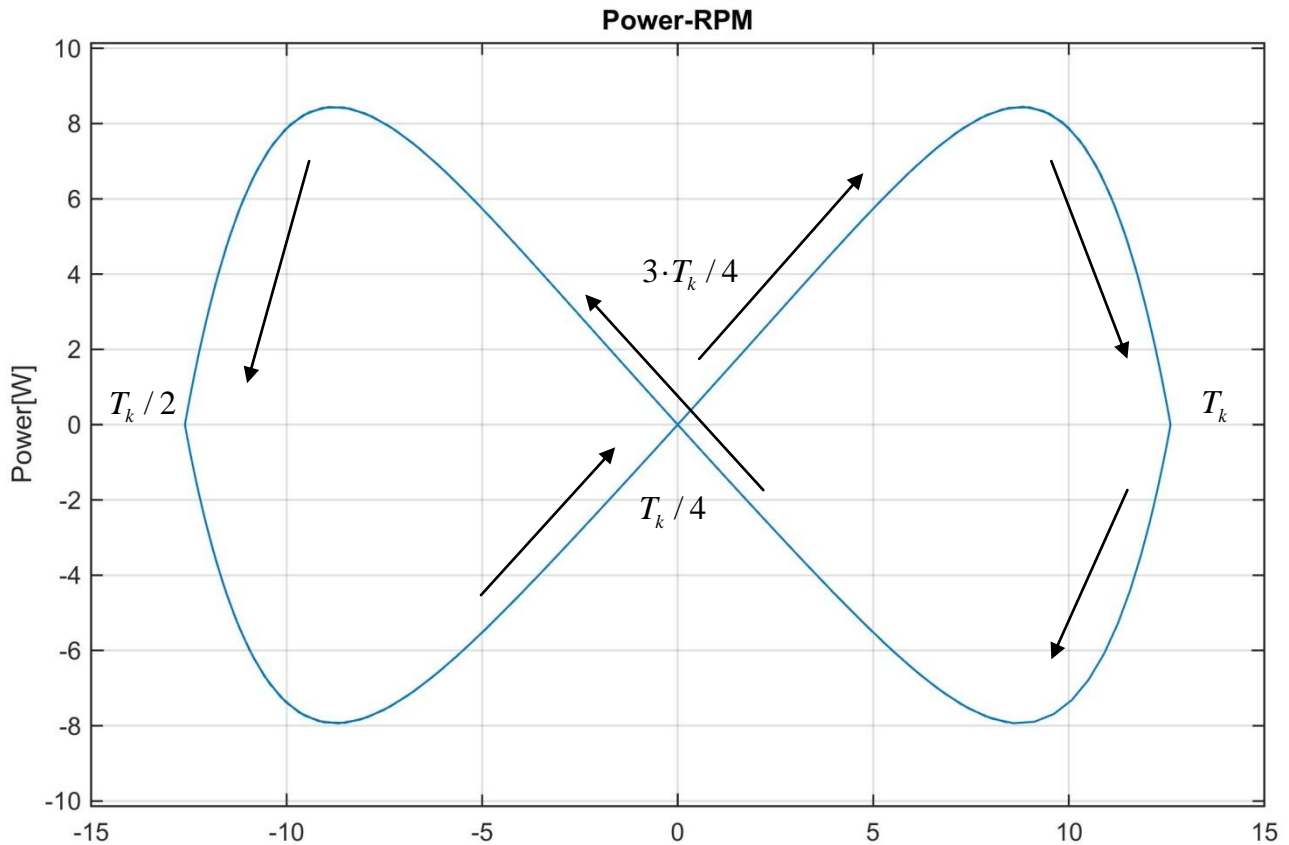
- συνολική ροπή κινητήρα (μπλε καμπύλη)
- ροπή λόγω αδράνειας (ιώδης καμπύλη)
- ροπή λόγω φορτίου ανέμου (πράσινη καμπύλη)



Σχήμα 5.20: Η ισχύς του κινητήρα σε μια περίοδο ταλάντωσης



Σχήμα 5.21: Η ροπή του κινητήρα συναρτήσει των RPM. Για ευκολότερη κατανόηση αναφέρεται η φορά εξέλιξης της ταλάντωσης της θ .



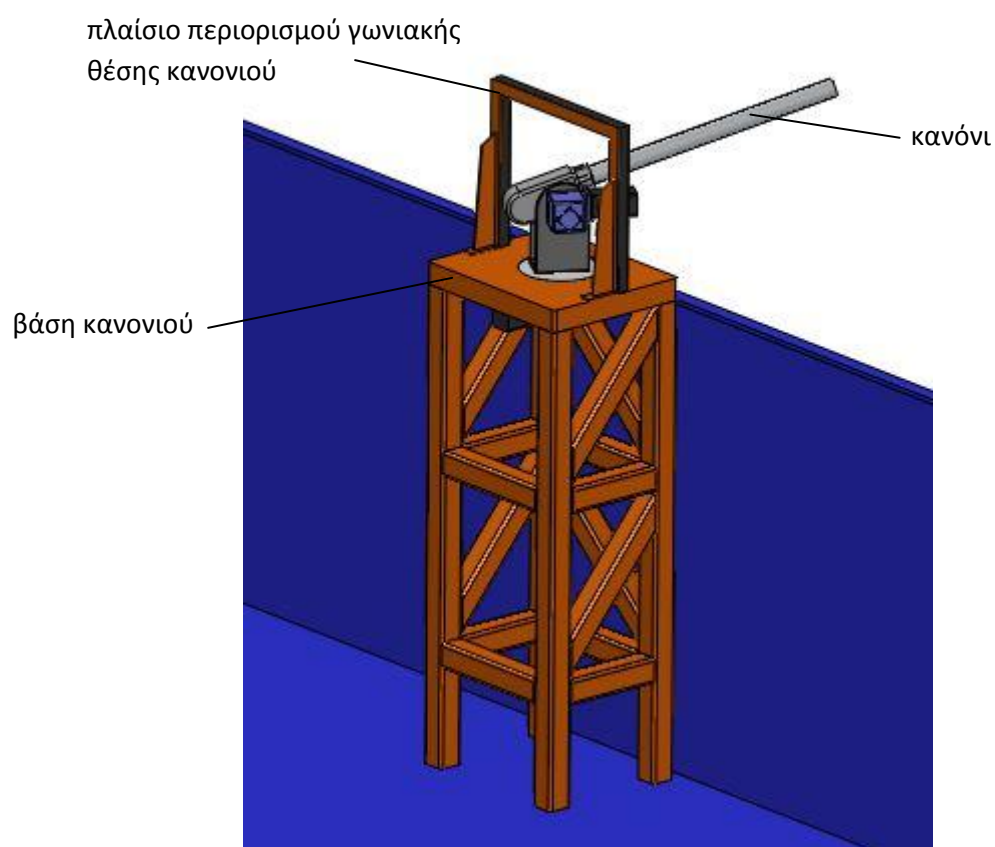
Σχήμα 5.22: Η ισχύς του κινητήρα συναρτήσει των RPM. Για ευκολότερη κατανόηση αναφέρεται η φορά εξέλιξης της ταλάντωσης της θ .

Αξίζει να σημειωθεί πως παρά τη σημαντική μεταβολή της ροπής αδράνειας, η τελευταία και πάλι δεν επηρεάζει σοβαρά την ανάπτυξη ροπών στο σύστημα. Καθώς τα μεγέθη της ροπής και της ισχύος δεν έχουν μεταβληθεί σημαντικά, ελέγχεται εάν ο λόγος των ροπών αδράνειας βρίσκεται εντός του περιορισμού $\lambda < 10$:

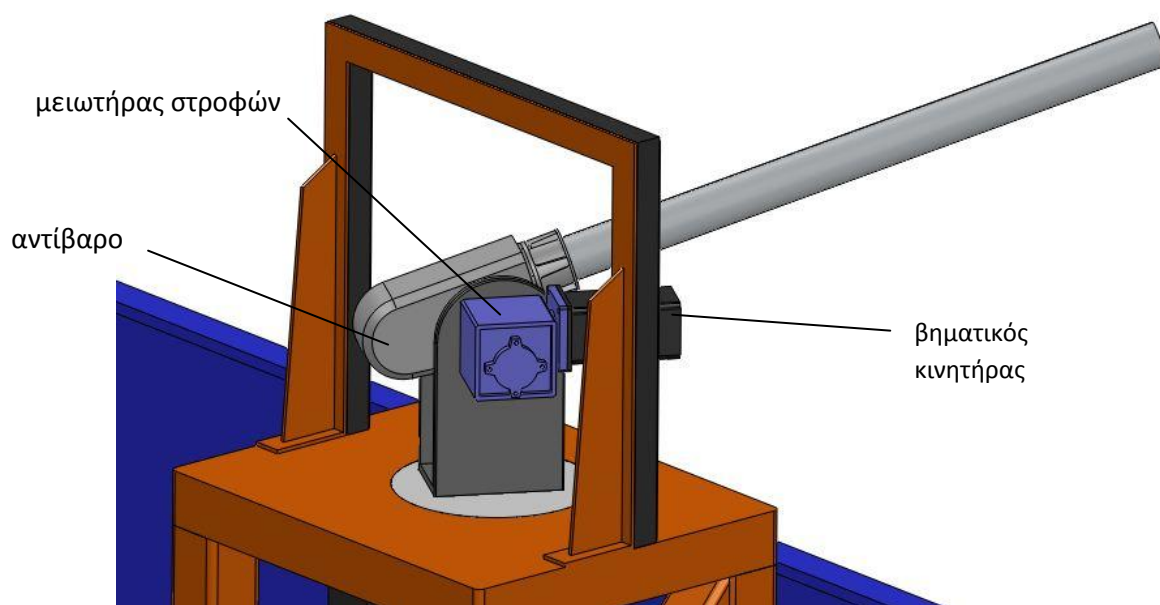
$$\lambda = \frac{1.4 \cdot 10^{-4} + 1.8 \cdot 10^{-5} + 0.1676 / i^2}{1.4 \cdot 10^{-4}} \approx 6.45 < 10 \quad (5.17)$$

Συνεπώς, εκλέγεται το ίδιο ζεύγος κινητήρα – μειωτήρα και για το δεύτερο άξονα περιστροφής.

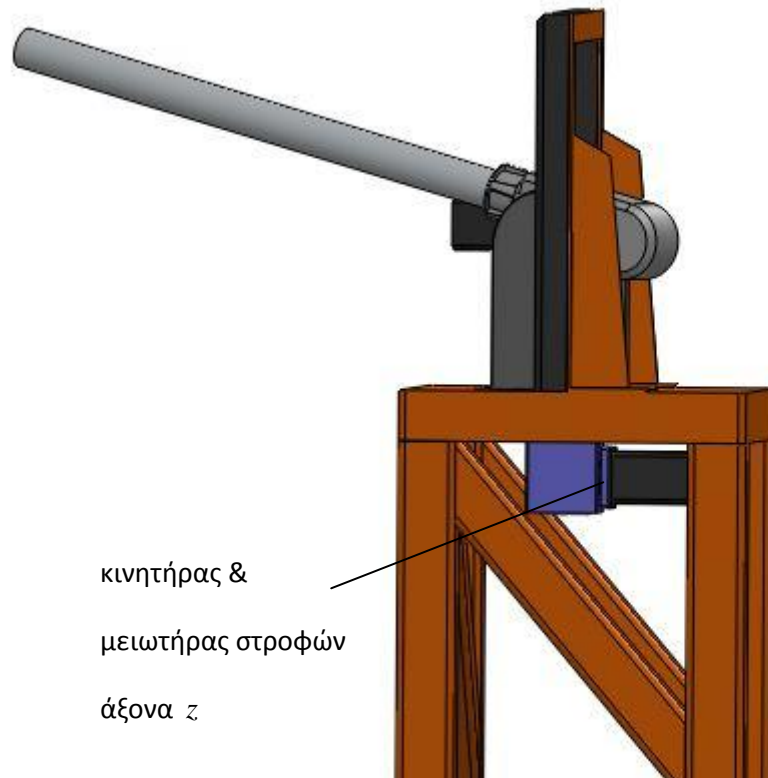
Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται η διάταξη του κανονιού με τους κινητήρες και μειωτήρες που επιλέχθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 5.23: Διάταξη κανονιού



Σχήμα 5.24: Διάταξη κανονιού



κινητήρας &
μειωτήρας στροφών
άξονα z

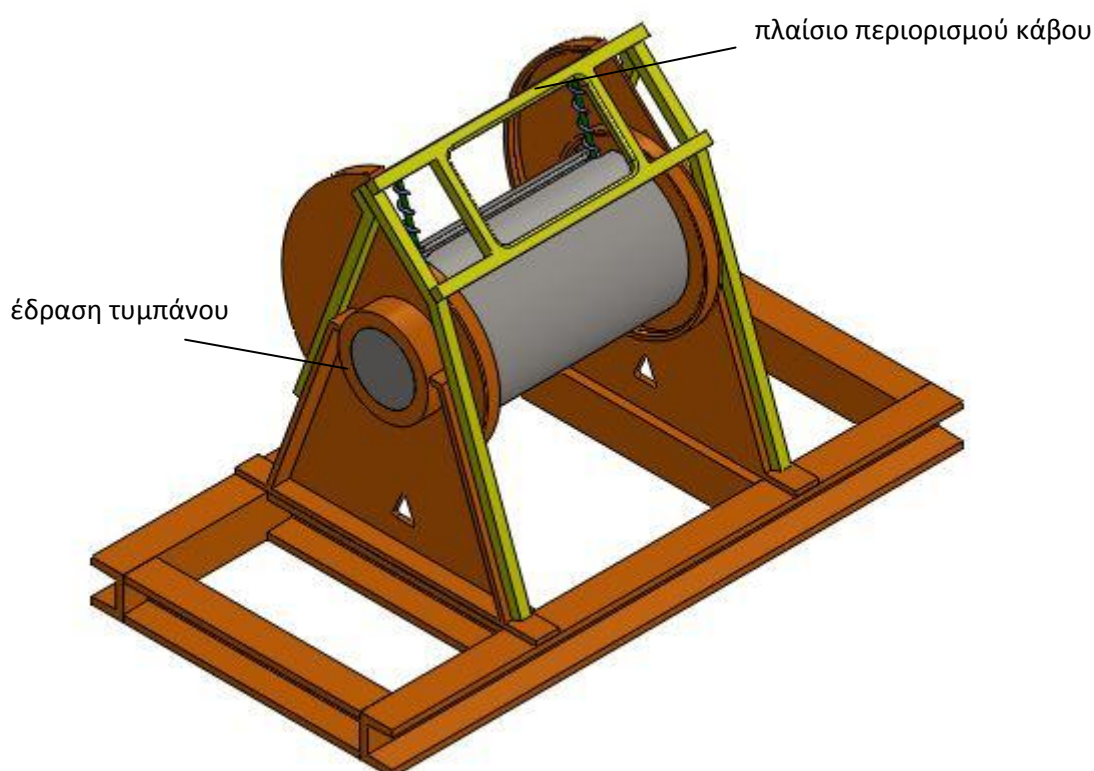
Σχήμα 5.25: Διάταξη κανονιού

Κεφάλαιο 6 – Διάταξη υποδοχής σφαίρας

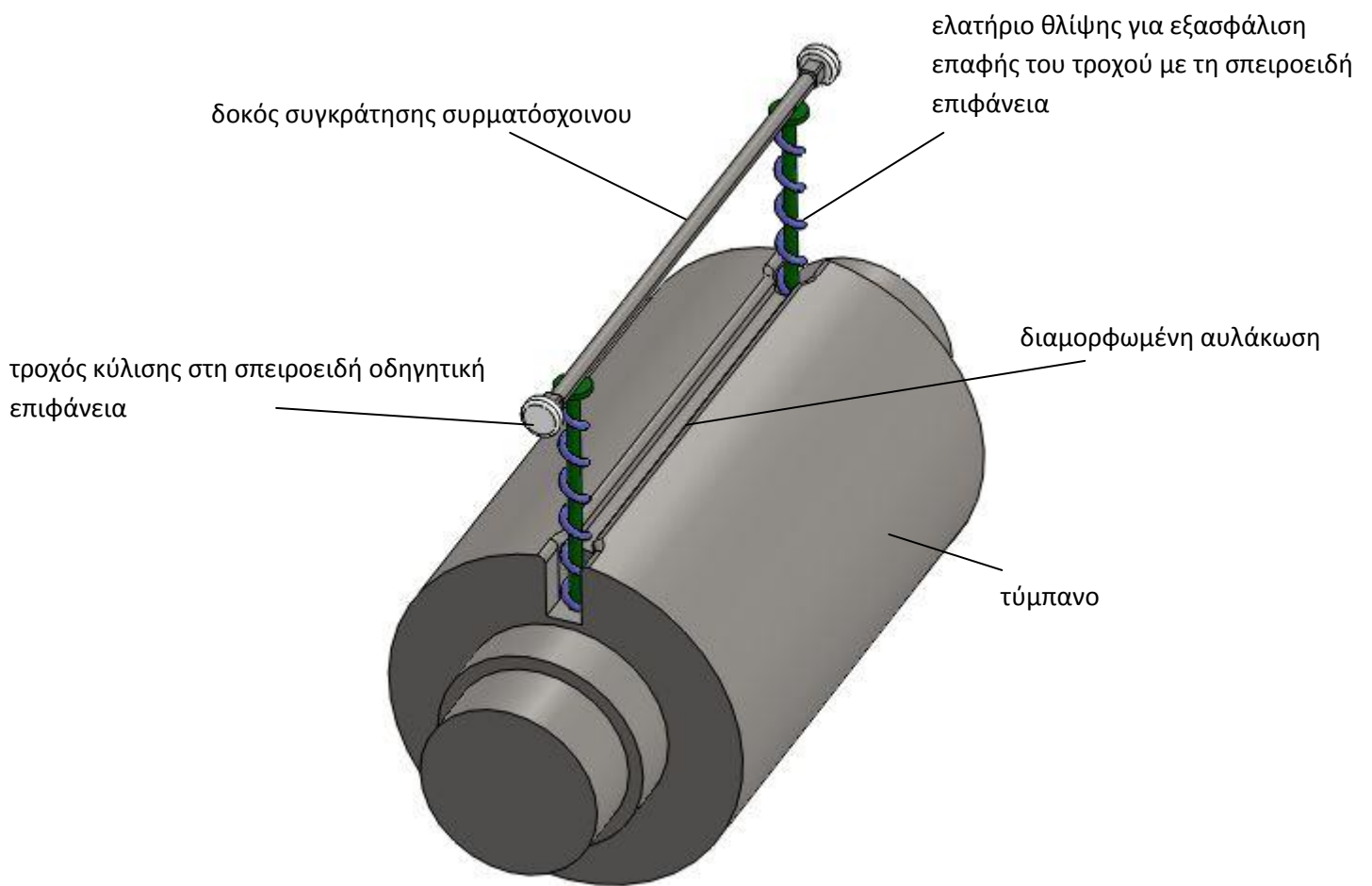
Η σφαίρα ολοκληρώνοντας την τροχιά της παραλαμβάνεται από τη διάταξη υποδοχής προκειμένου να πραγματοποιηθεί η περιέλιξη του συρματόσχοιου στο τύμπανο, και τελικά η περιέλιξη του κάβου στο τύμπανο. Η διάταξη υποδοχής της σφαίρας αποτελείται από τα μέρη της χοάνης και του τυμπάνου περιέλιξης.

6.1 Τύμπανο υποδοχής

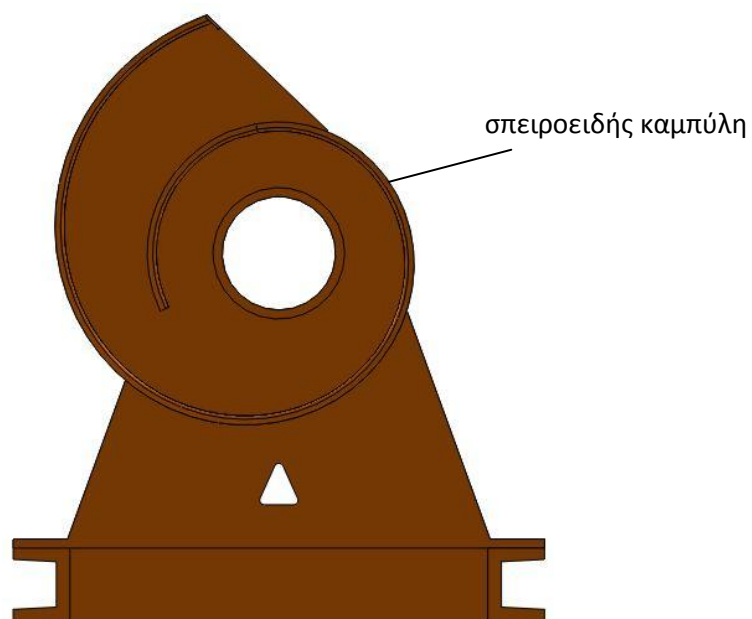
Το τύμπανο υποδοχής είναι ένα κοινό τύμπανο περιέλιξης κάβων με την προσθήκη ενός μηχανισμού συγκράτησης του συρματόσχοιου (Σχήμα 6.1). Ο μηχανισμός (Σχήμα 6.2) αποτελείται από μία δοκό η οποία ακολουθώντας σπειροειδή τροχιά κατά την περιστροφή του τυμπάνου μετατοπίζεται ακτινικά προς το κέντρο του τυμπάνου και εισέρχεται σε μία κατάλληλα διαμορφωμένη αυλάκωση. Με αυτό τον τρόπο, παρασύρει το συρματόσχοινο εντός της αυλάκωσης και έτσι το συγκρατεί, ώστε το συρματόσχοινο να ακολουθήσει τις περιστροφές του τυμπάνου. Όταν το συρματόσχοινο τυλιχθεί στο τύμπανο, ξεκινά να τυλίσσεται και ο κάβος.



Σχήμα 6.1: Τύμπανο υποδοχής. Με πορτοκαλί χρώμα απεικονίζεται η έδραση του τυμπάνου και με κίτρινο το πλαίσιο που περιορίζει τον κάβο.

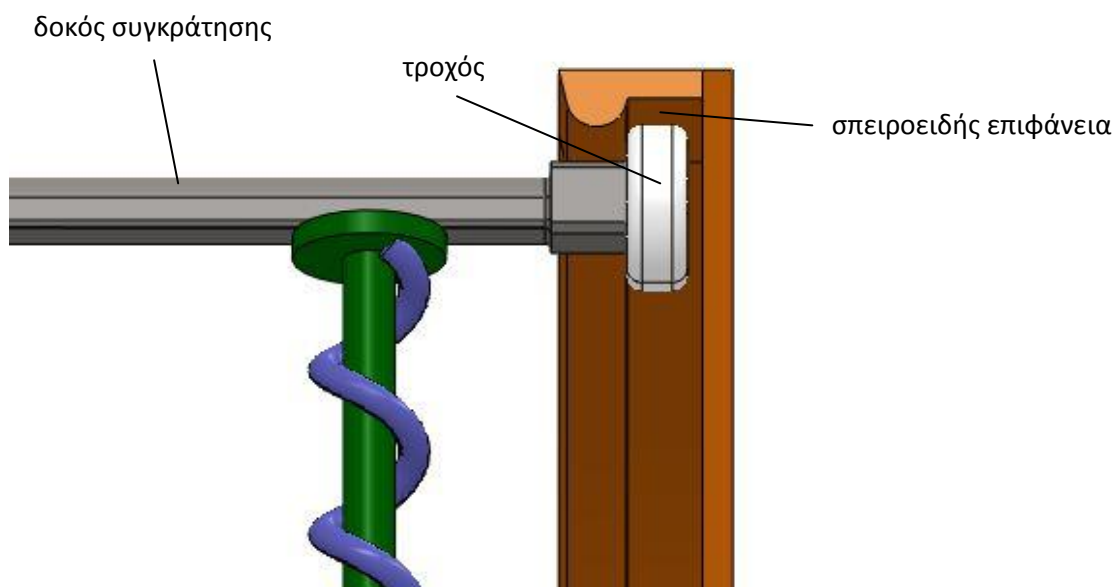


Σχήμα 6.2: Μηχανισμός συγκράτησης συρματόσχοινου

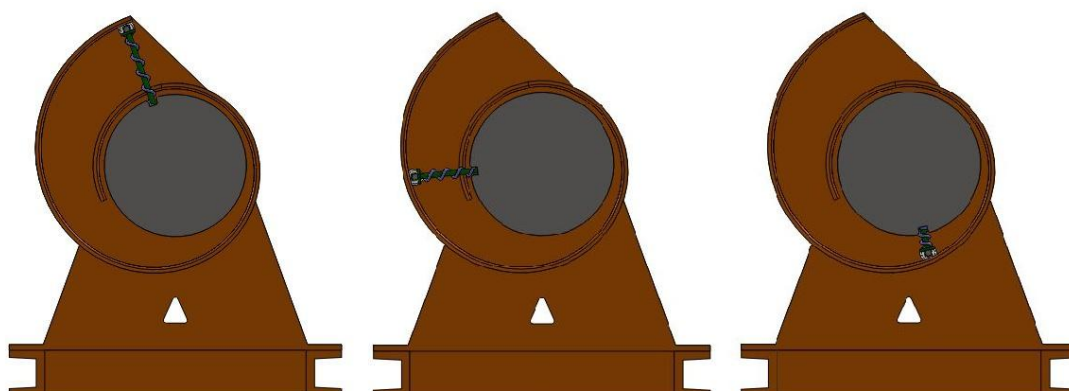


Σχήμα 6.3: Έδραση τυμπάνου και σπειροειδής καμπύλη για την οδήγηση της δοκού

συγκράτησης εντός της διαμορφωμένης αυλάκωσης



Σχήμα 6.4: Κύλιση του τροχού στη σπειροειδή οδηγητική επιφάνεια



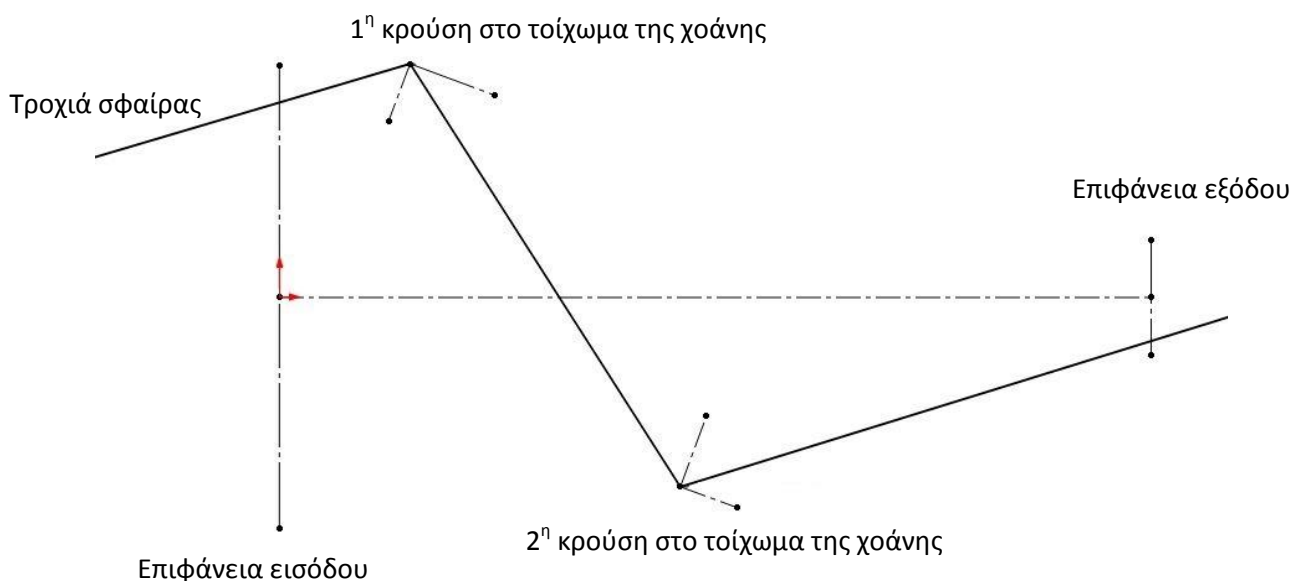
Σχήμα 6.5: Κύλιση στη σπειροειδή επιφάνεια σε διαφορετικά στιγμιότυπα κατά την περιστροφή του τυμπάνου

Κατά τη εκτύλιξη, η ράβδος απελευθερώνεται και το συρματοσχοινο είναι ελεύθερο να επιστρέψει στο πλοίο.

6.2 Χοάνη οδήγησης σφαίρας

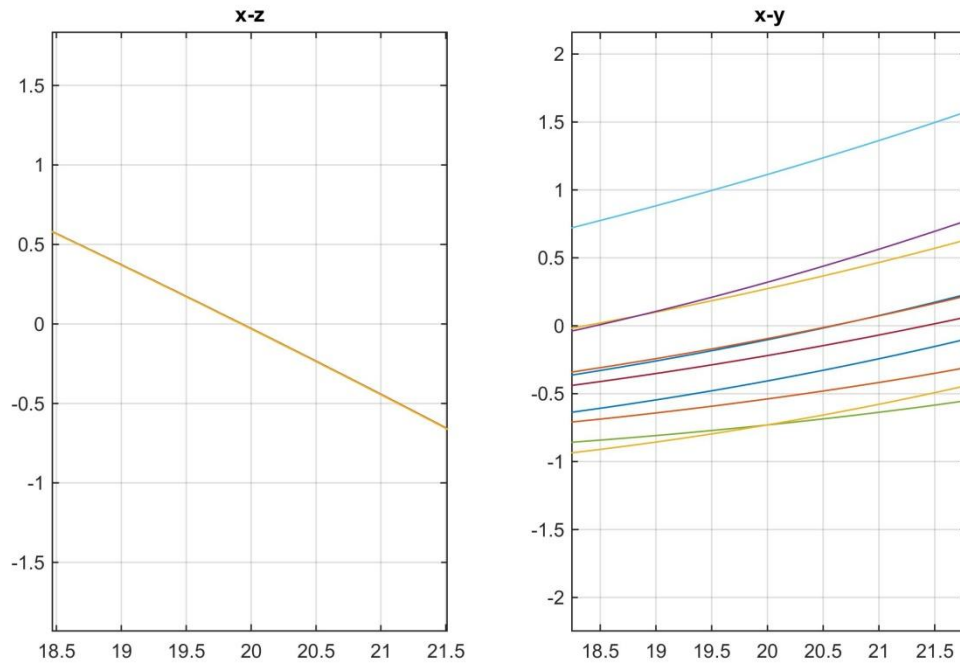
Στην παράγραφο 3.6 αναπτύχθηκε η διαδικασία εκτίμησης της περιοχής (έλλειψης εμπιστοσύνης) εντός της οποίας αναμένεται να καταλήξει η τροχιά της σφαίρας με δεδομένη πιθανότητα. Θεωρώντας ως επιφάνεια εισόδου τη συγκεκριμένη έλλειψη και ως επιφάνεια εξόδου τη γεωμετρία που καθορίζεται από το πλαίσιο περιορισμού του κάβου (Σχήμα 6.1) ορίζεται μια επιφάνεια οδήγησης (χοάνη) που κατευθύνει τη σφαίρα στο τύμπανο.

Για τη διαμόρφωση της γεωμετρίας της χοάνης λαμβάνονται υπόψη οι κλίσεις με τις οποίες η σφαίρα εισέρχεται στα άκρα της έλλειψης. Θεωρώντας πως η σφαίρα πραγματοποιεί ελαστικές κρούσεις κατά την επαφή της με τη χοάνη, και με τον περιορισμό να πραγματοποιούνται μέχρι τρεις κρούσεις έως την έξοδο της σφαίρας, ορίζονται οι οδηγητικές καμπύλες που παράγουν τη ζητούμενη επιφάνεια.



Σχήμα 6.6 : Η τροχιά της σφαίρας οδηγούμενη από την επιφάνεια εισόδου στην επιφάνεια εξόδου, σε όψη κάθετη στα επίπεδα των δύο επιφανειών.

Σε συνέχεια του παραδείγματος της παραγράφου 3.6, εκτελείται ο κώδικας της τροχιάς της σφαίρας για τις βέλτιστες γωνίες εκτόξευσης, ώστε να βρεθούν οι κλίσεις εισόδου (Σχήμα 6.7).



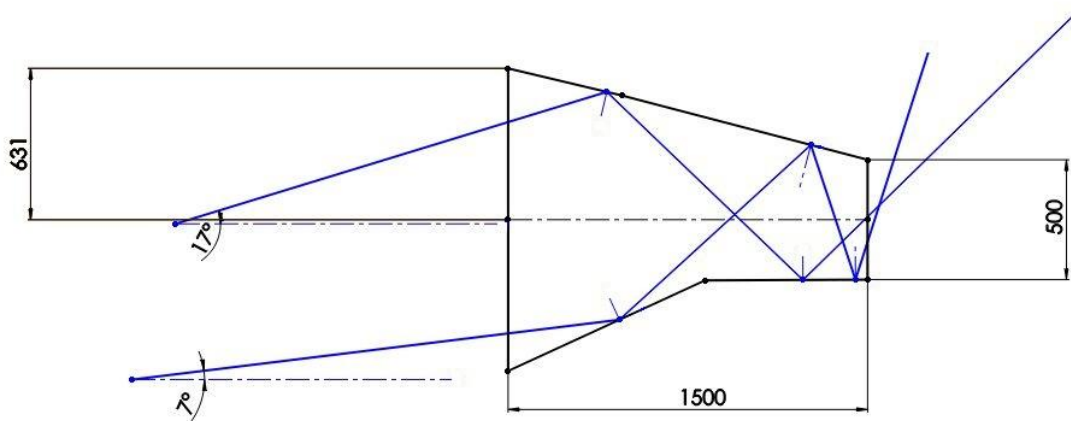
Σχήμα 6.7: Τροχιές της σφαίρας καθώς προσεγγίζει το στόχο. Με βάση την κλίση της τροχιάς διαμορφώνεται η γεωμετρία της χοάνης εισόδου. Οι μονάδες μέτρησης των αξόνων είναι m .

Όπως αναμενόταν, καθώς ο άνεμος κατά τους άξονες x και z δεν παρουσίαζε υψηλές διακυμάνσεις η τροχιά στο επίπεδο xz δεν παρουσιάζει διαφορές κατά τις διαφορετικές εκτοξεύσεις. Αντίθετα, λόγω της υψηλής διακύμανσης κατά y , παρατηρούνται διαφοροποιημένες τροχιές στο επίπεδο xy . Υπολογίζονται δύο ακραίες τιμές της κλίσης και για αυτές αναζητείται η κατάλληλη κλίση του τοιχώματος της χοάνης.

Για κλίση $m \approx 0.30$ προκύπτει γωνία $\theta_m \approx 17^\circ$.

Για κλίση $m \approx 0.12$ προκύπτει γωνία $\theta_m \approx 7^\circ$.

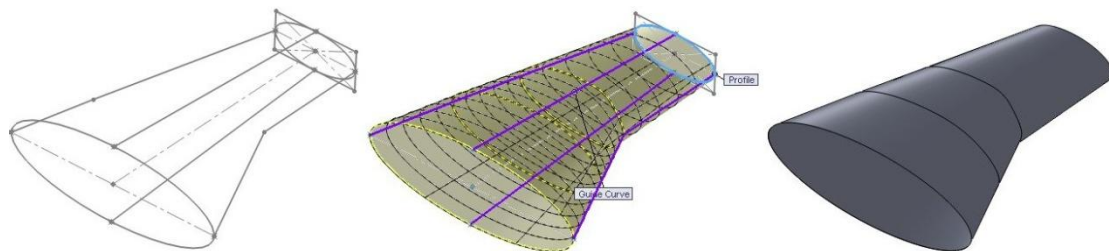
Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται η ασύμμετρη γεωμετρία που ικανοποιεί την υποδοχή της σφαίρας για όλες τις γωνίες μεταξύ των παραπάνω τιμών.



Σχήμα 6.8 : Εκτίμηση των οδηγητικών καμπυλών της χοάνης υποδοχής. Οι διαστάσεις είναι σε mm.

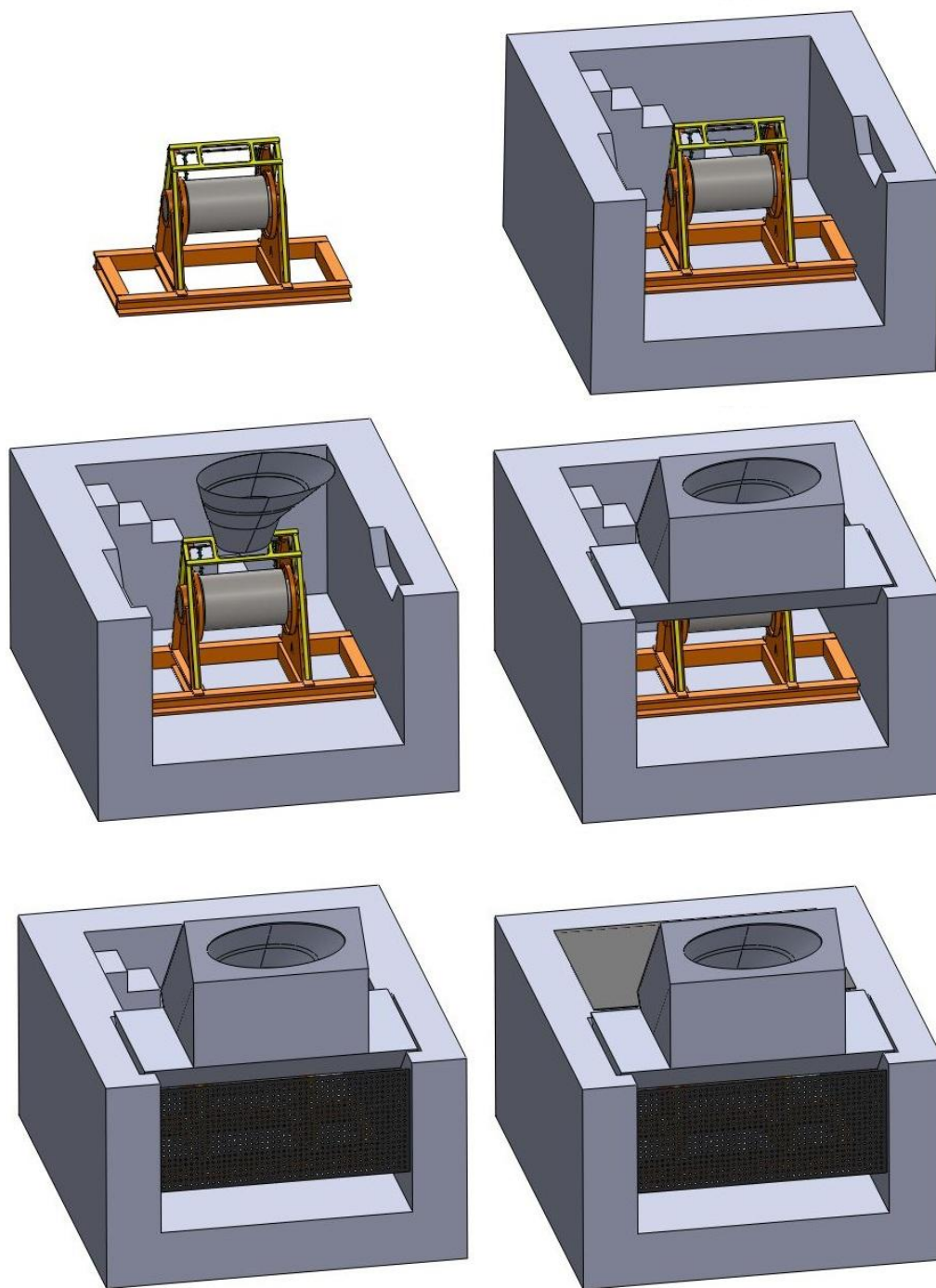
Στο κατακόρυφο επίπεδο, καθώς δεν παρατηρούνται αντίστοιχες διακυμάνσεις, οι οδηγητικές καμπύλες είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα των γεωμετρικών κέντρων των επιφανειών εισόδου – εξόδου.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η γεωμετρία της χοάνης σε περιβάλλον SolidWorks.

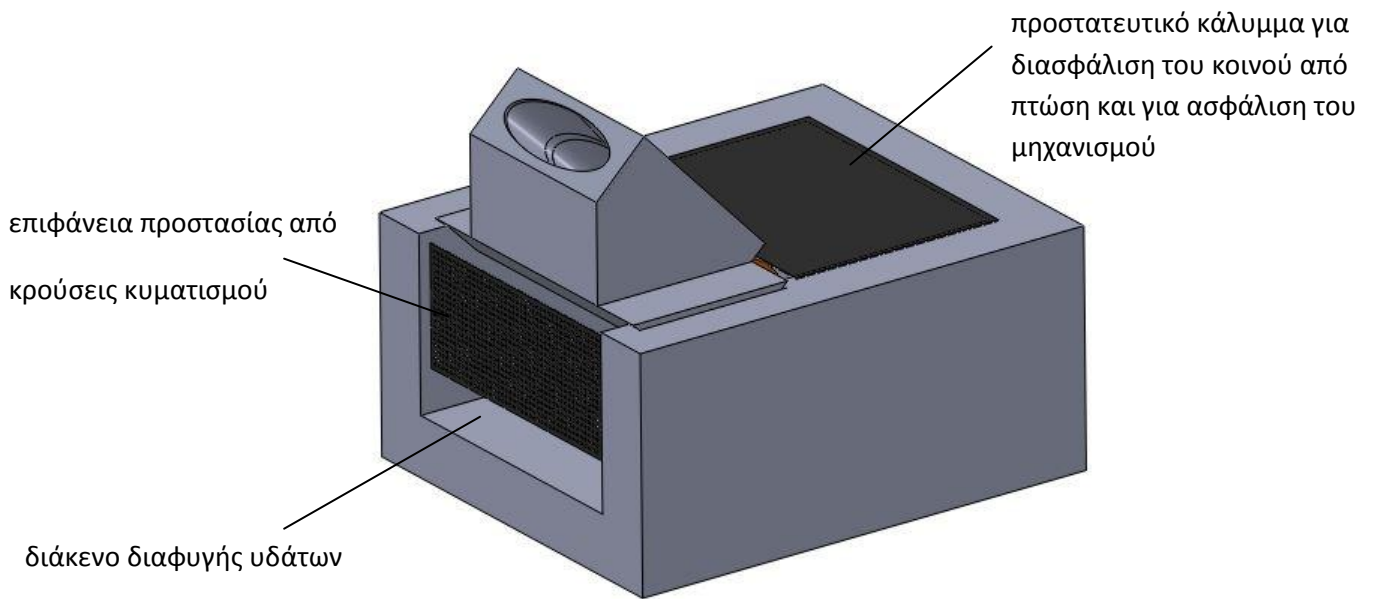


Σχήμα 6.9: Η γεωμετρία που παράγεται σε περιβάλλον SolidWorks έχοντας ορίσει τις γεωμετρίες εισόδου – εξόδου και 4 οδηγητικές καμπύλες

Για την έδραση του τυμπάνου προτείνεται η εκσκαφή της προβλήτας και η εγκατάσταση του τυμπάνου σε χαμηλότερο επίπεδο από αυτό της προβλήτας. Η χοάνη τοποθετείται εντός μεταλλικού πλαισίου ή περιβάλλεται από σκυρόδεμα. Στα επόμενα σχήματα απεικονίζεται συνολικά η εγκατάσταση.



Σχήμα 6.10: Τοποθέτηση διάταξης υποδοχής στο λιμένα & τελική μορφή



Σχήμα 6.11: Τελική μορφή διάταξης υποδοχής στο λιμένα

Στο σχεδιασμό προστίθενται επιφάνειες προστασίας του κοινού από πτώση στο επίπεδο της διάταξης και προστασίας της διάταξης από κυματισμούς. Στη δεύτερη περίπτωση προβλέπεται περιθώριο για διαφυγή των υδάτων από το χώρο της διάταξης.

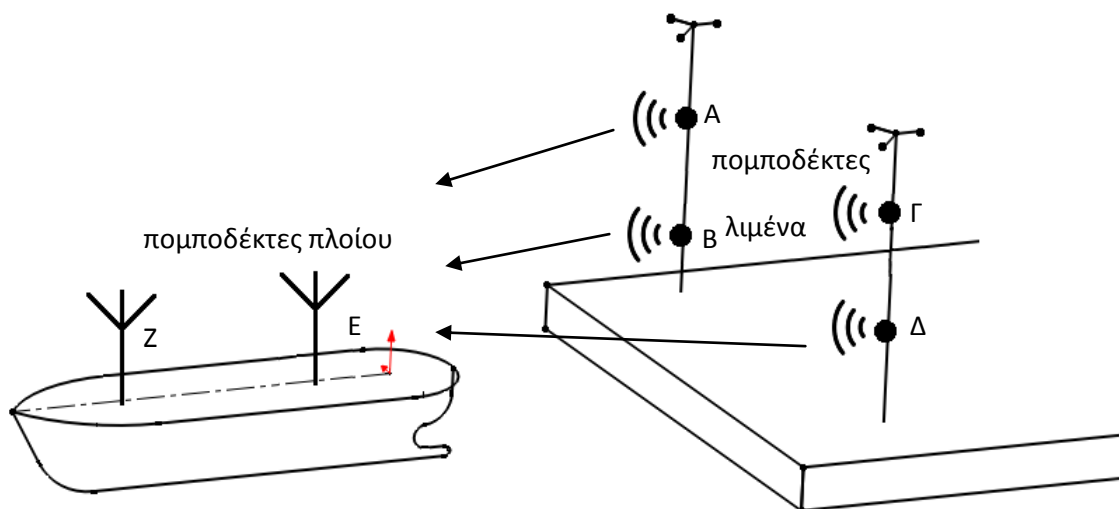
Κεφάλαιο 7 – Αναγνώριση & παρακολούθηση στόχου

Έχοντας καταλήξει σε συγκεκριμένη υλοποίηση της διάταξης εκτόξευσης, κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχία της διαδικασίας αποτελεί ο εντοπισμός της υποδοχής της βαλλόμενης μάζας, δηλαδή της θέσης στην οποία στοχεύει το σύστημα εκτόξευσης.

7.1 Σύστημα Εντοπισμού Ραδιοκυμάτων

Λόγω των δυσμενών καιρικών συνθηκών υπό τις οποίες καλείται να λειτουργήσει το σύστημα πρόσδεσης, η αναζήτηση στράφηκε στη χρήση ραδιοκυμάτων, που για παράδειγμα σε σύγκριση με τα οπτικά συστήματα εντοπισμού δεν επηρεάζονται από ενδεχόμενη βροχόπτωση ή υψηλή υγρασία, σε ότι αφορά τα μικρά εύρη των μερικών δεκάδων μέτρων.

Το σύστημα εντοπισμού αποτελείται από τέσσερις πομποδέκτες (τρεις ενεργούς, και έναν εφεδρικό) στο λιμένα, και από έξι πομποδέκτες τοποθετημένους ανά ομάδες των τριών σε δύο θέσεις στο πλοίο (Σχήμα 7.1).



Σχήμα 7.1: Εκπομπή κυμάτων στους δέκτες του πλοίου

Κάθε πομποδέκτης A, B, Γ του λιμένα εκπέμπει σήμα διαφορετικής συχνότητας προς το πλοίο. Κάθε ένας από τους έξι πομποδέκτες του πλοίου στις θέσεις E, Z είναι συντονισμένος στη συχνότητα ενός από τους A, B, Γ . Έτσι, στο πλοίο είναι οι E_A, E_B, E_Γ

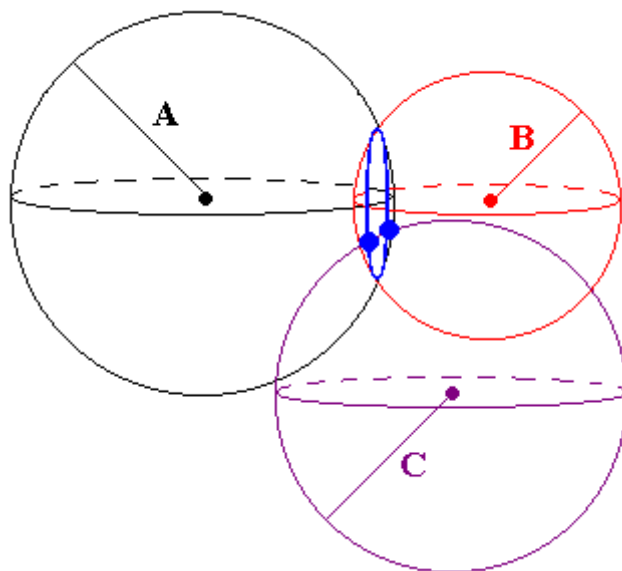
και αντίστοιχα Z_A, Z_B, Z_Γ . Όταν ο Α εκπέμψει, ξεκινά από την ηλεκτρονική διάταξη ελέγχου των πομποδεκτών η χρονομέτρηση μέχρι την επιστροφή του σήματος. Όταν το σήμα του αναγνωριστεί από τους E_A, Z_A , οι τελευταίοι εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα. Ο Α λαμβάνει δύο σήματα και είναι έτσι γνωστός ο χρόνος πτήσης t (time of flight) του κάθε σήματος για απόσταση διπλάσια της AE και AZ αντίστοιχα. Η κάθε απόσταση υπολογίζεται ως:

$$l = \frac{t}{2}c \quad (7.1)$$

όπου

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ η ταχύτητα διάδοσης του ραδιοκύματος.

Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται οι αποστάσεις των σημείων E, Z του πλοίου από τα σημεία A, B, Γ του λιμένα και μέσω αλγοριθμικής επεξεργασίας που περιλαμβάνει την πληροφορία της σχετικής θέσης των A, B, Γ μεταξύ τους και των E, Z μεταξύ τους, πραγματοποιείται τριπλευρισμός (trilateration, Σχήμα 7.2 [38]) για την εκτίμηση της θέσης των E, Z .



Σχήμα 7.2: Τριπλευρισμός – η διαδικασία αναγνώρισης της θέσης βάσει τριών γνωστών σημείων. Μπορεί να πραγματοποιηθεί και με περισσότερα των τριών σημεία (πολυπλευρισμός - multilateration).

Ο πομποδέκτης Z χρησιμοποιείται προκειμένου να εκτιμηθεί και δεύτερη θέση σημείου του πλοίου, ώστε ορίζοντας πλέον την ευθεία EZ να είναι γνωστή η διεύθυνση του πλοίου ως προς το στόχο.

Με κατάλληλη αρχικοποίηση και συσχετισμό των θέσεων των κινητήρων stepper που επιλέχθηκαν στο κεφάλαιο 5 ως προς τους δέκτες, είναι γνωστή η θέση και ο προσανατολισμός του κανονιού.

Κεφάλαιο 8 – Συμπεράσματα & Μελλοντική Εξέλιξη

8.1 Αξιολόγηση προτεινόμενης λύσης - Κοστολόγηση βασικού εξοπλισμού

Ως προς τη διαστασιολόγηση των μερών της εγκατάστασης, τα μεγέθη που προκύπτουν καθιστούν εφικτή την εφαρμογή της λύσης που προτείνεται:

Οι απαιτήσεις της διάταξης εκτόξευσης, περίπου $6 m^2$, είναι χαμηλές ως προς το διατιθέμενο χώρο σε ένα πλοίο.

Όσον αφορά το λιμένα, στις συνήθεις περιπτώσεις υπάρχει μεγάλο περιθώριο διάθεσης χώρου, που στην περίπτωση της κάθε διάταξης υποδοχής είναι περίπου $10 m^2$.

Φυσικά, οι παραπάνω διαστάσεις αξιολογούνται από τον εκάστοτε ενδιαφερόμενο τελικό χρήστη.

Από την ανάλυση που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, ο βασικός εξοπλισμός που επιλέχθηκε κοστολογείται ως εξής, με τιμές λιανικής αγοράς:

Εξοπλισμός πλοίου:

Βηματικός κινητήρας: $250 \times 2 = 500 \text{ €}$

Μειωτήρας στροφών: $200 \times 2 = 400 \text{ €}$

Συμπιεστής – αεροφυλάκιο: 400 €

Δευτερεύον αεροφυλάκιο: 250 €

Φιάλη αζώτου: 250 €

Κανόνι, παρελκόμενα πνευματικού κυκλώματος,

ηλεκτρονικά ελέγχου: 10,000 €

Ηλεκτρονικά παρακολούθησης στόχου: 3,000 €

Συνολικά, δηλαδή, το κόστος του εξοπλισμού που εγκαθίσταται στο πλοίο προσεγγίζει τα 15,000 €.

Εξοπλισμός λιμένα:

Διάταξη τυμπάνου κάβου: $15,000 \times 2 = 30,000 \text{ €}$

Εργασίες εκσκαφής και τοποθέτησης τυμπάνου: $10,000 \times 2 = 20,000 \text{ €}$

Ηλεκτρονικά παρακολούθησης στόχου: 2,000 €

Συνολικά, το κόστος ανά λιμένα για την τοποθέτηση δύο τυμπάνων είναι προσεγγιστικά 52,000 €.

Διαθέτοντας, λοιπόν, μια αρχική εκτίμηση του κόστους, οι ενδιαφερόμενες κοινότητες καθώς και οι ενδιαφερόμενες πλοιοκτήτριες εταιρίες έχουν τη δυνατότητα βάσει των αναγκών τους να αξιολογήσουν μια ενδεχόμενη επένδυση για την απόκτηση του απαιτούμενου εξοπλισμού και για την πραγματοποίηση της εγκατάστασης.

8.2 Θέματα μελλοντικής εξέλιξης

Οι μέθοδοι που αναπτύσσονται στην παρούσα εργασία αποτελούν μια πρώτη απόπειρα προσέγγισης του ζητήματος της πρόσδεσης σε εκτεθειμένους λιμένες. Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένα μέρη της εργασίας που παρουσιάζουν περιθώριο βελτίωσης και ενδιαφέρον για περαιτέρω εξέλιξη:

- βελτιστοποίηση του κώδικα προσομοίωσης της τροχιάς σφαίρας – σχοινιού και διαμόρφωσή του για παράλληλη εκτέλεση
- βελτιστοποίηση της επιφάνειας της χοάνης οδήγησης, ώστε να επιτυγχάνεται το μέγιστο ποσοστό παραλαβής της σφαίρας, για μεγάλο εύρος κλίσεων προσέγγισης στο στόχο
- προσθήκη φαινομένων της Εσωτερικής Βαλλιστικής (Internal Ballistics) στο μοντέλο προσομοίωσης της εκτόξευσης
- σχεδιασμός ράουλου τύλιξης-εκτύλιξης συρματοσχοινού
- κατασκευή πρωτοτύπων κανονιού και υποδοχής και διεξαγωγή πειραμάτων για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της τροχιάς

Βιβλιογραφία

- [1] Ομιλία του καθηγητή Πολ.Μηχ. ΕΜΠ Κ.Μουτζούρη στην ημερίδα "Ανάπτυξη από τη Θάλασσα", γραφείο του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου στην Ελλάδα, 25/6/2015. Η μαγνητοσκοπημένη ομιλία του κ.Μουτζούρη μαζί με τις παραπάνω διαφάνειες διατίθενται στην ιστοσελίδα <http://www.blod.gr/lectures/Pages/viewlecture.aspx?LectureID=2149#>
- [2] <https://www.youtube.com/watch?v=PytXU6yiCaM>
- [3] www.diginfo.tv
- [4] https://i.ytimg.com/vi/jz_pLau6ocw/maxresdefault.jpg
- [5] <https://www.parrot.com>
- [6] <https://www.prodrone.jp/>
- [7] EMPA, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research
- [8] Cavotec S.A.
- [9] Στατική - Μηχανική του Απαραμόρφωτου Στερεού, Α.Χρυσάκης, αυτοέκδοση, 1999
- [10] <https://www.marlowropes.com/>
- [11] <http://www.tecni-cable.co.uk/>
- [12] Μηχανική, C.Kittel, W.Knight et al. , ΕΜΠ, 1998
- [13] <http://www.chem.mtu.edu/~fmorriso/DataCorrelationForSphereDrag2016.pdf>
- [14] <http://scienceworld.wolfram.com/physics/CylinderDrag.html>
- [15] Αριθμητική Ανάλυση για Μηχανικούς, ΕΜΠ, 2003
- [16] Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions, World Meteorological Organization, 2008
- [17] The gust wind speed duration in AS/NZS 1170.2, Australian Journal of Structural Engineering
- [18] Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών, Σ.Σιμόπουλος, ΕΜΠ, 1989
- [19] Principles of Error Theory and Cartographical Applications, USAF , 1962
- [20] A Table of Generalized Circular Error, American Mathematical Society, 1961
- [21] Algorithms for Confidence Circles and Ellipses, US Department of Commerce, 1984
- [22] <http://www.stat-athens.aueb.gr/~jpan/statistiki-skepsi-II/chapter6.pdf>
- [23] <http://www.shamalsrl.com/en/>
- [24] Υδραυλικά και Πνευματικά Συστήματα , Θ.Κωστόπουλος, εκδόσεις Συμεών, 2009
- [25] <http://web.mit.edu/course/3/3.11/www/modules/pv.pdf>
- [26] www.festo.com
- [27] <http://www.alphastar.gr/fiales-aerion/azotoy/azoto-001.346.038/>
- [28] https://el.wikipedia.org/wiki/Ταλάντωση_πλοίου
- [29] Stepping Motors – A guide to theory and practice, P.Acarney, The Institution of Engineering and Technology, 2002
- [30] Ασφάλεια και Υγιεινή στην Εργασία, Ν.Μαρμαράς, ΕΜΠ, 2005
- [31] Gears and Gear Drives, Damir Jelaska, Wiley, 2012
- [32] Οδοντώσεις και Μειωτήρες Στροφών, Θ.Κωστόπουλος, Συμεών, 2009
- [33] <https://users.obs.carnegiescience.edu/crane/pfs/man/Electronics/StepperDriver-SureStep-manual.pdf>
- [34] <http://www.anaheimautomation.com/products/stepper/stepper-integrated-item.php?SID=51&pt=i&tID=132&CID=50>
- [35] http://www.diequa.com/download/varvel/varvel_wormgearheads.pdf

[36] Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας, Ε.Παπαδόπουλος, ΕΜΠ, 2000

[37] Σημειώσεις Ρομποτικής, Ε.Παπαδόπουλος, Κ.Κυριακόπουλος, εκδόσεις ΕΜΠ, 2008

[38] <http://ixbtlabs.com/articles/gpsystem/>

Παράρτημα

3.1 Κώδικας υπολογισμού τροχιάς για σταθερή ταχύτητα ανέμου

```
clear all
g=9.81;
lamd=0.23e-3;
Dt=0.003;
N=1000;
rho=1.3;
Cdrope=1.2;
drope=2.5e-3;
Cdprojectile=0.5;
Dprojectile=5e-2;
m0=1;
x0=0;
z0=6;
y0=0;
Uwx=0;
Uwy=30;
Uwz=0;
U0=80;
phi0=pi/4;
theta0=0;
u0=U0*cos(phi0)*cos(theta0);
v0=U0*sin(phi0);%PROSOXH: einai h taxyhtta kata z
w0=U0*cos(phi0)*sin(theta0);
t=zeros(1,N);
ax=zeros(1,N); %epitaxynseis kentrou mazas
az=zeros(1,N);
ay=zeros(1,N);
u=zeros(1,N); %taxyhtta kentrou mazas kata x
v=zeros(1,N); %taxyhtta kentrou mazas kata z
w=zeros(1,N); %taxyhtta kentrou mazas kata y
U=zeros(1,N); %synistamenh taxyhtta kentrou mazas
u(1)=u0;
v(1)=v0;
w(1)=w0;
U(1)=U0;
x=zeros(N);
z=zeros(N);
y=zeros(N);
x(1,1)=x0;
z(1,1)=z0;
y(1,1)=y0;
m=zeros(N,1); %arxikopoihsh mitrwou mazwn
m(1)=m0; %maza blimatos
M=sum(m); %olikh maza
Dl=zeros(1,N); %arxikopoihsh mitrwou mhkwn
for i=1:N-1
m(i+1)=lamd*U(i)*Dt;
Dl(i+1)=U(i)*Dt;
t(i+1)=Dt*i;
%ypologismos dynamhs anemou sto sxoini-----
xB=x(i,1);
yB=y(i,1);
zB=z(i,1);
X=zeros(1,i);
```



```

X(1)=xB;
Z=zeros(1,i);
Z(1)=zB;
Y=zeros(1,i);
Y(1)=yB;
for j=2:i
theta=asin(2*(zB-z(i,j))/Dl(j));
phi=asin(2*(yB-y(i,j))/(Dl(j)*cos(theta)));
xB=x(i,j)-Dl(j)*cos(theta)*cos(phi)/2;
yB=y(i,j)-Dl(j)*cos(theta)*sin(phi)/2;
zB=z(i,j)-Dl(j)*sin(theta)/2;
X(j)=xB;
Y(j)=yB;
Z(j)=zB;
end
Fwropex=0;
Fwropey=0;
Fwropez=0;
if i>1
Z2=Z(1:i-1);
Z3=Z(2:i);
X2=X(1:i-1);
X3=X(2:i);
Y2=Y(1:i-1);
Y3=Y(2:i);
XZ=(Z2-Z3).^2+(X2-X3).^2;
XZ2=XZ.^0.5;
YZ=(Z2-Z3).^2+(Y2-Y3).^2;
YZ2=YZ.^0.5;
XY=(Y2-Y3).^2+(X2-X3).^2;
XY2=XY.^0.5;
Fwropey=(rho/2)*Cdrope*drope*sum(XZ2)*sign(Uwy-w(i))*(Uwy-w(i))^2;
Fwropex=(rho/2)*Cdrope*drope*sum(YZ2)*sign(Uwx-u(i))*(Uwx-u(i))^2;
Fwropez=(rho/2)*Cdrope*drope*sum(XY2)*sign(Uwz-v(i))*(Uwz-v(i))^2;
end
Fwindprojectiley=(rho/2)*Cdprojectile*Dprojectile*sign(Uwy-w(i))*(Uwy-w(i))^2;
Fwindprojectilex=(rho/2)*Cdprojectile*Dprojectile*sign(Uwx-u(i))*(Uwx-u(i))^2;
Fwindprojectilez=(rho/2)*Cdprojectile*Dprojectile*sign(Uwz-v(i))*(Uwz-v(i))^2;
Fwindy=Fwropey+Fwindprojectiley;
Fwindx=Fwropex+Fwindprojectilex;
Fwindz=Fwropez+Fwindprojectilez;
%-----
ax(i+1)=(Fwindx-lamd*u(i)*U(i))/M;
az(i+1)=-g+(Fwindz-lamd*v(i)*U(i))/M;
ay(i+1)=(Fwindy-lamd*w(i)*U(i))/M;
u(i+1)=ax(i+1)*Dt+u(i);
v(i+1)=az(i+1)*Dt+v(i);
w(i+1)=ay(i+1)*Dt+w(i);
U(i+1)=(u(i+1)^2+v(i+1)^2+w(i+1)^2)^0.5;
for j=1:i
x(i+1,j)=u(i+1)*Dt+x(i,j);
z(i+1,j)=v(i+1)*Dt+z(i,j);
y(i+1,j)=w(i+1)*Dt+y(i,j);
end
x(i+1,i+1)=u(i+1)*Dt/2+x(1,1);
z(i+1,i+1)=v(i+1)*Dt/2+z(1,1);
y(i+1,i+1)=w(i+1)*Dt/2+y(1,1);
M=M+m(i+1);

```

```

end
figure('Color','w')
subplot(1,2,1)
plot(x(300,:),z(300:700:1000,:), 'c',x(700,:),z(700:1000:1000,:), 'r',x(1000,:),z(1000:1000:1000,:), 'g',x(:,1),z(:,1), 'b:')
title('x-z')
legend('t=0.9sec','t=2.1sec','t=3sec','troxia sfairas','Location','northwest')
subplot(1,2,2)
plot(x(300,:),y(300:700:1000,:), 'c',x(700,:),y(700:1000:1000,:), 'r',x(1000,:),y(1000:1000:1000,:), 'g',x(:,1),y(:,1), 'b:')
title('x-y')

```

3.2 Κώδικας παραμετρικής ανάλυσης συστήματος

```

%--parametrikh analysi--
clear all
arxikes_times %trexw to arxeio tis ptisis/troxias wste na paroun tis
arxikes times tous oi metavlites
original_m0=m0;
original_Dprojectile=Dprojectile;
original_lamd=lamd;
original_drope=drope;
N_xronikis_diamerisis=1000; %h xroniki stigmh pou thelw na elegjw ti
thesi toy vlimatos-sxoiniou
Xparam=zeros(5,N,4); % o arithmos 5 prokyptei epeidh dinw stin kathe
parametro 5 times
Yparam=zeros(5,N,4); % o arithmos 4 prokyptei apo tis 4 metavlites
pou elegxw
Zparam=zeros(5,N,4);
k=1;
for m0=0.2:0.5:2.2
    flight2
    Xparam(k,:,1)=x(N_xronikis_diamerisis, :)';
    Yparam(k,:,1)=y(N_xronikis_diamerisis, :)';
    Zparam(k,:,1)=z(N_xronikis_diamerisis, :)';
    k=k+1;
end
m0=original_m0;
k=1;
for Dprojectile=0.02:0.02:0.1
    flight2
    Xparam(k,:,2)=x(N_xronikis_diamerisis, :)';
    Yparam(k,:,2)=y(N_xronikis_diamerisis, :)';
    Zparam(k,:,2)=z(N_xronikis_diamerisis, :)';
    k=k+1;
end
Dprojectile=original_Dprojectile;
k=1;
for lamd=0.2e-3:5e-3:2.02e-2
    flight2
    Xparam(k,:,3)=x(N_xronikis_diamerisis, :)';
    Yparam(k,:,3)=y(N_xronikis_diamerisis, :)';
    Zparam(k,:,3)=z(N_xronikis_diamerisis, :)';
    k=k+1;
end
lamd=original_lamd;
k=1;
for drope=0.0025:0.004:0.0185
    flight2

```

```

Xparam(k, :, 4)=x(N_xronikis_diamerisis, :)' ;
Yparam(k, :, 4)=y(N_xronikis_diamerisis, :)' ;
Zparam(k, :, 4)=z(N_xronikis_diamerisis, :)' ;
k=k+1;
end
drope=original_drope;
figure('name', 'Troxia gia euros timwn MAZAS vlimatos')
subplot(1,2,1)
plot(Xparam(1, :, 1), Zparam(1, :, 1), Xparam(2, :, 1), Zparam(2, :, 1), Xparam(5, :, 1), Zparam(5, :, 1))
legend('m0= 0.2kg', 'm0= 0.7kg', 'm0= 2.2 kg', 'Location', 'northwest')
title('x-z')
subplot(1,2,2)
plot(Xparam(1, :, 1), Yparam(1, :, 1), Xparam(2, :, 1), Yparam(2, :, 1), Xparam(5, :, 1), Yparam(5, :, 1))
title('x-y')
figure('name', 'Troxia gia euros timwn DIAMETROY vlimatos')
subplot(1,2,1)
plot(Xparam(1, :, 2), Zparam(1, :, 2), Xparam(3, :, 2), Zparam(3, :, 2), Xparam(5, :, 2), Zparam(5, :, 2))
legend('D= 0.02 m', 'D= 0.06 m', 'D= 0.1 m', 'Location', 'northwest')
title('x-z')
subplot(1,2,2)
plot(Xparam(1, :, 2), Yparam(1, :, 2), Xparam(3, :, 2), Yparam(3, :, 2), Xparam(5, :, 2), Yparam(5, :, 2))
title('x-y')
figure('name', 'Troxia gia euros timwn grammikis PYKNOTHTAS sxoiniou')
subplot(1,2,1)
plot(Xparam(1, :, 3), Zparam(1, :, 3), Xparam(3, :, 3), Zparam(3, :, 3), Xparam(5, :, 3), Zparam(5, :, 3))
legend('lamda= 0.2e-3 kg/m', 'lamda= 10.2e-3 kg/m', 'lamda= 20.2e-3 kg/m', 'Location', 'northwest')
title('x-z')
subplot(1,2,2)
plot(Xparam(1, :, 3), Yparam(1, :, 3), Xparam(3, :, 3), Yparam(3, :, 3), Xparam(5, :, 3), Yparam(5, :, 3))
title('x-y')
figure('name', 'Troxia gia euros timwn DIAMETROY sxoiniou')
subplot(1,2,1)
plot(Xparam(1, :, 4), Zparam(1, :, 4), Xparam(4, :, 4), Zparam(4, :, 4), Xparam(5, :, 4), Zparam(5, :, 4))
legend('D= 2.5 mm', 'D= 14.5 mm', 'D= 18.5 mm', 'Location', 'northwest')
title('x-z')
subplot(1,2,2)
plot(Xparam(1, :, 4), Yparam(1, :, 4), Xparam(4, :, 4), Yparam(4, :, 4), Xparam(5, :, 4), Yparam(5, :, 4))
title('x-y')

```

3.3 Κώδικας Αριθμητικής Μεθόδου του Στόχου

```

arxikes_times
r_Final=[20,0,0];
Dx=r_Final(1)-x0;
Dy=r_Final(2)-y0;
Dz=r_Final(3)-z0;
% oi gwnies pou prokypnont apo to euthygrammo tmima telikis - arxikis
thesis
phi0=asin(Dz/sqrt(Dx^2+Dy^2+Dz^2));
theta0=acos(Dx/sqrt(Dx^2+Dy^2+Dz^2));
%
phi0const=phi0;

```

```

theta0const=theta0;
% orizw to arxiko diasthma apo to opoio proerxontai oi arxikes times
ektojeusis
% Arxika,
% h gwnia phi pairnei times apo phi0 ews 60 moires panta, anejarthws
timhs Uwz
% h gwnia theta pairnei times apo theta0 ews +- 80 moires, opou to +-
% kathorizetai apo to proshmo ths Uwy.
Dphi=pi/3-phi0;
if Uwy>0
    Dtheta=-80*pi/180-theta0;
elseif Uwy<0
    Dtheta=80*pi/180-theta0;
end
%
Num=7;
n_rep=1; % arithmos epanalipsewn me ti methodo tou stoxou
Dr=2; %orizw megalo Dr gia na jekinisei to loop stoxou
while Dr>0.4 && n_rep<7
A=zeros(Num);
phi_vector=zeros(1,Num);
for i22=1:Num
    phi0=phi0const+(i22-1)*Dphi/(Num-1);
    phi_vector(i22)=phi0;
    theta_vector=zeros(1,Num);
    for j22=1:Num
        theta0=theta0const+(j22-1)*Dtheta/(Num-1);
        theta_vector(j22)=theta0;
        flight2
        [m20,n20]=min(abs(x(:,1)-r_Final(1)));
        if m20<=0.05 %diasfalizw mikrh apostash apo to epipedo tou x
            Dr=sqrt((y(n20,1)-r_Final(2))^2+(z(n20,1)-r_Final(3))^2);
        else
            Dr=100;
        end
        A(i22,j22)=Dr;
    end
end
end
[minNum,minIndex]=min(A(:));
[m30,n30]=ind2sub(size(A), minIndex);
% neo diasthma opou anazhtw ti veltisti gwnia: phi(m-1) ws phi(m+1)
kai theta(n-1) ws theta(n+1) ,
if m30-1>=1
    phi0=phi_vector(m30-1);
else
    phi0=phi_vector(m30);
end
if m30+1<=Num
    Dphi=phi_vector(m30+1)-phi0;
else
    Dphi=phi_vector(m30)-phi0;
end
if n30-1>=1
    theta0=theta_vector(n30-1);
else
    theta0=theta_vector(n30);
end
if n30+1<=Num
    Dtheta=theta_vector(n30+1)-theta0;
else
    Dtheta=theta_vector(n30)-theta0;
end

```

```

end
phi0const=phi0;
theta0const=theta0;
n_rep=n_rep+1;
end
phrase=['H elaxisth apostash apo to stoxo ypologisthke sta
Dr=',num2str(A(m30,n30)), ' metra, gia gwnies ektojeusis
phi0=',num2str(phi_vector(m30)*180/pi), ' kai
theta0=',num2str(theta_vector(n30)*180/pi), ' meta apo
n_rep=',num2str(n_rep), ' epanalhapseis me thn arithmitikh methodo tou
stoxou'];
disp(phrase)
figure(10)
subplot(1,2,1)
plot(x(1,:),z(1,:),x(50,:),z(50,:),x(100,:),z(100,:),x(250,:),z(250,
),x(300,:),z(300,:),x(400,:),z(400,:),x(700,:),z(700,:),x(1000,:),z(1
000,:))
title('x-z')
subplot(1,2,2)
plot(x(1,:),y(1,:),x(50,:),y(50,:),x(100,:),y(100,:),x(250,:),y(250,
),x(300,:),y(300,:),x(400,:),y(400,:),x(700,:),y(700,:),x(1000,:),y(1
000,:))
title('x-y')

```

3.4 Κώδικας υπολογισμού τροχιάς για στατιστική διακύμανση ταχύτητας

```

clear all
g=9.81;
lamd=0.23e-3;
Dt=0.003;
N=1000;
rho=1.3;
Cdrope=1.2;
drope=2.5e-3;
Cdprojectile=0.5;
Dprojectile=5e-2;
m0=0.4;
x0=0;
z0=6;
y0=0;
Uwx=0.001;
Uwy=28;
Uwz=0.001;
% ftiaxnw profil taxytitwn me katanomi Gauss
K=10;
pdX=makedist('Normal',Uwx,Uwx*.15);
Uwx_array=random(pdX,1,K);
%Uwx_array=zeros(1,K);
pdY=makedist('Normal',Uwy,Uwy*.15);
Uwy_array=random(pdY,1,K);
pdZ=makedist('Normal',Uwz,Uwz*.15);
Uwz_array=random(pdZ,1,K);
%Uwz_array=zeros(1,K);
U0=60;
phi0=pi/20;
theta0=-pi*.2;
u0=U0*cos(phi0)*cos(theta0);
v0=U0*sin(phi0);
w0=U0*cos(phi0)*sin(theta0);
t=zeros(1,N);
ax=zeros(1,N); %epitaxynseis kentrou mazas

```

```

az=zeros(1,N);
ay=zeros(1,N);
u=zeros(1,N); %taxythta kentrou mazas kata x
v=zeros(1,N); %taxythta kentrou mazas kata z
w=zeros(1,N); %taxythta kentrou mazas kata y
U=zeros(1,N); %synistamenh taxythta kentrou mazas
u(1)=u0;
v(1)=v0;
w(1)=w0;
U(1)=U0;
x=zeros(N);
z=zeros(N);
y=zeros(N);
x(1,1)=x0;
z(1,1)=z0;
y(1,1)=y0;
m=zeros(N,1); %arxikopoihsh mitrwou mazwn
m(1)=m0; %maza blimatos
M=sum(m); %olikh maza
Dl=zeros(1,N); %arxikopoihsh mitrwou mhkwn
for i=1:N-1
m(i+1)=lamd*U(i)*Dt;
Dl(i+1)=U(i)*Dt;
t(i+1)=Dt*i;
%ypologismos dynamhs anemou sto sxoini-----
xB=x(i,1);
yB=y(i,1);
zB=z(i,1);
X=zeros(1,i);
X(1)=xB;
Z=zeros(1,i);
Z(1)=zB;
Y=zeros(1,i);
Y(1)=yB;
for j=2:i
theta=asin(2*(zB-z(i,j))/Dl(j));
phi=asin(2*(yB-y(i,j))/(Dl(j)*cos(theta)));
xB=x(i,j)-Dl(j)*cos(theta)*cos(phi)/2;
yB=y(i,j)-Dl(j)*cos(theta)*sin(phi)/2;
zB=z(i,j)-Dl(j)*sin(theta)/2;
X(j)=xB;
Y(j)=yB;
Z(j)=zB;
end
Fwropex=0;
Fwropey=0;
Fwropez=0;
UwxDistrib=Uwx_array(ceil(i/(N/K)));
UwyDistrib=Uwy_array(ceil(i/(N/K)));
UwzDistrib=Uwz_array(ceil(i/(N/K)));
if i>1
Z2=Z(1:i-1);
Z3=Z(2:i);
X2=X(1:i-1);
X3=X(2:i);
Y2=Y(1:i-1);
Y3=Y(2:i);
XZ=(Z2-Z3).^2+(X2-X3).^2;
XZ2=XZ.^0.5;
YZ=(Z2-Z3).^2+(Y2-Y3).^2;
YZ2=YZ.^0.5;

```

```

XY=(Y2-Y3).^2+(X2-X3).^2;
XY2=XY.^0.5;
Fwropey=(rho/2)*Cdrope*drope*sum(XZ2)*sign(UwyDistrib-
w(i))*(UwyDistrib-w(i))^2;
Fwropex=(rho/2)*Cdrope*drope*sum(YZ2)*sign(UwxDistrib-
u(i))*(UwxDistrib-u(i))^2;
Fwropez=(rho/2)*Cdrope*drope*sum(XY2)*sign(UwzDistrib-
v(i))*(UwzDistrib-v(i))^2;
end
Fwindprojectiley=(rho/2)*Cdprojectile*Dprojectile*sign(UwyDistrib-
w(i))*(UwyDistrib-w(i))^2;
Fwindprojectilex=(rho/2)*Cdprojectile*Dprojectile*sign(UwxDistrib-
u(i))*(UwxDistrib-u(i))^2;
Fwindprojectilez=(rho/2)*Cdprojectile*Dprojectile*sign(UwzDistrib-
v(i))*(UwzDistrib-v(i))^2;
Fwindy=Fwropey+Fwindprojectiley;
Fwindx=Fwropex+Fwindprojectilex;
Fwindz=Fwropez+Fwindprojectilez;
%-----
ax(i+1)=(Fwindx-lamd*u(i)*U(i))/M;
az(i+1)=-g+(Fwindz-lamd*v(i)*U(i))/M;
ay(i+1)=(Fwindy-lamd*w(i)*U(i))/M;
u(i+1)=ax(i+1)*Dt+u(i);
v(i+1)=az(i+1)*Dt+v(i);
w(i+1)=ay(i+1)*Dt+w(i);
U(i+1)=(u(i+1)^2+v(i+1)^2+w(i+1)^2)^0.5;
for j=1:i
x(i+1,j)=u(i+1)*Dt+x(i,j);
z(i+1,j)=v(i+1)*Dt+z(i,j);
y(i+1,j)=w(i+1)*Dt+y(i,j);
end
x(i+1,i+1)=u(i+1)*Dt/2+x(1,1);
z(i+1,i+1)=v(i+1)*Dt/2+z(1,1);
y(i+1,i+1)=w(i+1)*Dt/2+y(1,1);
M=M+m(i+1);
end
figure(6)
subplot(1,2,1)
plot(x(1,:),z(1,:),x(50,:),z(50,:),x(100,:),z(100,:),x(250,:),z(250,
),x(300,:),z(300,:),x(400,:),z(400,:),x(700,:),z(700,:),x(1000,:),z(1
000,:))
title('x-z')
subplot(1,2,2)
plot(x(1,:),y(1,:),x(50,:),y(50,:),x(100,:),y(100,:),x(250,:),y(250,
),x(300,:),y(300,:),x(400,:),y(400,:),x(700,:),y(700,:),x(1000,:),y(1
000,:))
title('x-y')

```

3.5 Κώδικας υπολογισμού μέσης κλίσης της τροχιάς κατά την προσέγγιση του στόχου και καθορισμού του κάθετου επιπέδου στο οποίο θα ευρεθούν οι περιοχές εμπιστοσύνης

```

phi0_teliko=phi0;
theta0_teliko=theta0;
klisi=zeros(1,1000);
%exw tis phi0,theta0
for i=1:1000
flight_Normal_Distribution
[m,n]=min(sqrt((x(:,1)-r_Final(1)).^2+(y(:,1)-
r_Final(2)).^2+(z(:,1)-r_Final(3)).^2));
klisi(i)=(z(n,1)-z(n-1,1))/(x(n,1)-x(n-1,1));

```

```

end
klisi_mean=mean(klisi);
klisi_apokl=std(klisi);
n_monadiaio=[1/sqrt(1+(klisi_mean)^2),0,(klisi_mean)/sqrt(1+(klisi_me
an)^2)];

```

3.6 Κώδικας υπολογισμού έλλειψης εμπιστοσύνης

```

y_=zeros(1,1000);
z_=zeros(1,1000);
%entos loop
for i=1:1000
    flight_Normal_Distribution
    %apostasi shmeiou ths troxias tis sfairas apo to epipedo:
    [m,n]=min(abs(n_monadiaio(1)*x(:,1)+0+n_monadiaio(3)*z(:,1)-
    (n_monadiaio(1)*(r_Final(1)) + 0*(r_Final(2)) + n_monadiaio(3)*
    (r_Final(3))))/sqrt(n_monadiaio(1)^2+n_monadiaio(2)^2+n_monadiaio(3)
    ^2));
    y_(i)=y(n,1)-r_Final(2);
    z_(i)=sign(x(n,1)-r_Final(1))*sqrt((x(n,1)-r_Final(1))^2+(z(n,1)-
    r_Final(3))^2);
end
y_mean=mean(y_);
z_mean=mean(z_);
y_std=std(y_);
z_std=std(z_);
c=min(y_std,z_std)/max(y_std,z_std);
% times apo ton pinaka gia pithanotita P=80%
if c<=.05
    Kappa=1.28253;
elseif c<=.1
    Kappa=1.28548;
elseif c<=.15
    Kappa=1.29046;
elseif c<=.2
    Kappa=1.29759;
elseif c<=.25
    Kappa=1.30704;
elseif c<=.3
    Kappa=1.31908;
elseif c<=.35
    Kappa=1.33421;
elseif c<=.4
    Kappa=1.35302;
elseif c<=.45
    Kappa=1.37588;
elseif c<=.5
    Kappa=1.40275;
elseif c<=.55
    Kappa=1.43320;
elseif c<=.6
    Kappa=1.46668;
elseif c<=.65
    Kappa=1.50262;
elseif c<=.7
    Kappa=1.54055;
elseif c<=.75
    Kappa=1.58010;
elseif c<=.8
    Kappa=1.62096;
elseif c<=.85

```



```

        Kappa=1.66294;
elseif c<=.9
        Kappa=1.70586;
elseif c<=.95
        Kappa=1.74692;
else
        Kappa=1.79412;
end
Semimajor=Kappa*max(y_std,z_std);
Semiminor=Kappa*min(y_std,z_std);
yz_cov_matrix=cov(y_,z_);
yz_cov=yz_cov_matrix(2,1);
ellipse_orientation=atan2(2*yz_cov,(y_std^2-z_std^2))/2;
angle_plot=linspace(0,2*pi,360);
y_ell=y_mean+Semimajor*cos(angle_plot)*cos(ellipse_orientation)+Semiminor*sin(angle_plot)*(-sin(ellipse_orientation));
z_ell=z_mean+Semiminor*sin(angle_plot)*cos(ellipse_orientation)+Semimajor*cos(angle_plot)*sin(ellipse_orientation);
figure('name','Circular VS Elliptical Error Probable')
plot(y_,z_,'b.',y_ell,z_ell,'g',y_mean,z_mean,'k*')
axis([-10 20 -10 20],'equal')

```

4. Αρχικές Τιμές

```

gma=1.4;           %           ekthetis adiavatikis metavolis
g=9.81;           %m/s^2     , epitaxyynsi varytitas
R=287;           %J/(kg*K)
%AERAS
p0=1.01325e5;    %Pa         , piesi atmosfairikou aera
T0=273+15;      %K         , thermokrasia atmosfairikou aera
r0=p0/(R*T0);   %kg/m^3    , pyknotita atmosfairikou aera
%VLIMA
Cd=0.4;         %           aerodynamikos syntel vlimatos
d=0.05;         %m         , diametros vlimatos=diametros
kanoniou
A=pi*(d^2)/4;   %m^2       , emvadon kanoniou
M=0.4;          %kg        , maza vlimatos
B=(r0/2)*Cd;    %           aerodynamikos syntelestis
vlimatos(xwris to emvadon)
mu=0.5;         %           syntelestis trivis olisthis
vlimatos-kanoniou
theta=pi/4;     %rad       , gwnia ektokseusis vlimatos(gia
ypologismo trivis)
N=M*g*cos(theta); %N         , katheti dynami apo to kanoni sto
vlima
Tfr=mu*N;       %N         , trivi olisthis
%PARAMETROI AEROFYLAKIOU
p=10e5;         %Pa         , arxiki piesi mesa se deutereuon
aerofylakio
V=5e-3;         %m^3       , ogkos aerofylakiou
V0=V*(p/p0)^(1/gma); %         , apaitoumenos ogkos aera se piesi
atmosfairas p0
T=T0*(V0/V)^(gma-1); %K         , prokryptousa thermokrasia sto
aerofylakio
r=p/(R*T);      %kg/m^3    , pyknotita aera sto aerofylakio
m=r*V;         %kg        , maza aera
%

```

```

C1=B*A/M;
C2=p*A/M;
C3=A/V;
C4=(Tfr)/M;

```

4.2 Κώδικας Παραμετρικής Ανάλυσης

```

n=3e2; %plithos xronikwn diamerisewn
Dt=1e-4; %xroniki diamerisi
% synolikos xronos exelixis tou fainomenou = n*Dt seconds
orismos_timwn_parametrwn_pneu
% A=pi*(d^2)/4;
% Tfr=mu*M*g;
% C1=B*A/M;
% C2=p*A/M;
% C3=A/V;
% C4=(Tfr)/M;
k=zeros(2,4);
xf=zeros(2,3);
X=zeros(1,n); % metatopisi vlimatos entos tou kanoniou, x
F=zeros(1,n); % taxytita vlimatos, u
Xp=zeros(5,n);
Up=zeros(5,n);
XV=zeros(5,n);
UV=zeros(5,n);
Xd=zeros(5,n);
Ud=zeros(5,n);
XM=zeros(5,n);
UM=zeros(5,n);
Xmu=zeros(5,n);
Umu=zeros(5,n);
%original ode: x2dot +c1*xdot^2 - c2*(c3*x+1)^-gma +c4=0
% ws pros arxiki piesi aera-> p
i=1;
for p=6e5:(6e5/4):12e5
    C2=p*A/M;
    %Runge-Kutta ode-system solver
    for nt=1:n-1
        k(1,1)=Dt*F(nt);
        k(2,1)=Dt*(C2*(C3*X(nt)+1)^(-gma) -C1*(F(nt))^2 -C4);
        xf(1,1)=X(nt)+(1/2)*k(1,1); %x(1)
        xf(2,1)=F(nt)+(1/2)*k(2,1); %f(1)
        k(1,2)=Dt*xf(2,1);
        k(2,2)=Dt*(C2*(C3*xf(1,1)+1)^(-gma) -C1*(xf(2,1))^2 -C4);
        xf(1,2)=X(nt)+(1/2)*k(1,2); %x(2)
        xf(2,2)=F(nt)+(1/2)*k(2,2); %f(2)
        k(1,3)=Dt*xf(2,2);
        k(2,3)=Dt*(C2*(C3*xf(1,2)+1)^(-gma) -C1*(xf(2,2))^2 -C4);
        xf(1,3)=X(nt)+k(1,3); %x(3)
        xf(2,3)=F(nt)+k(2,3); %f(3)
        k(1,4)=Dt*xf(2,3);
        k(2,4)=Dt*(C2*(C3*xf(1,3)+1)^(-gma) -C1*(xf(2,3))^2 -C4);
        X(nt+1)=X(nt)+(1/6)*(k(1,1)+2*k(1,2)+2*k(1,3)+k(1,4));
        F(nt+1)=F(nt)+(1/6)*(k(2,1)+2*k(2,2)+2*k(2,3)+k(2,4));
    end
    Xp(i,:)=X;
    Up(i,:)=F;
    i=i+1;
end
orismos_timwn_parametrwn_pneu %epanafora parametrwn

```

```

% ws pros arxiko ogko aera-> V
i=1;
for V=2e-3:6e-3/4:8e-3
    C3=A/V;
    %Runge-Kutta ode-system solver
    for nt=1:n-1
        k(1,1)=Dt*F(nt);
        k(2,1)=Dt*(C2*(C3*X(nt)+1)^(-gma) -C1*(F(nt))^2 -C4);
        xf(1,1)=X(nt)+(1/2)*k(1,1); %x(1)
        xf(2,1)=F(nt)+(1/2)*k(2,1); %f(1)
        k(1,2)=Dt*xf(2,1);
        k(2,2)=Dt*(C2*(C3*xf(1,1)+1)^(-gma) -C1*(xf(2,1))^2 -C4);
        xf(1,2)=X(nt)+(1/2)*k(1,2); %x(2)
        xf(2,2)=F(nt)+(1/2)*k(2,2); %f(2)
        k(1,3)=Dt*xf(2,2);
        k(2,3)=Dt*(C2*(C3*xf(1,2)+1)^(-gma) -C1*(xf(2,2))^2 -C4);
        xf(1,3)=X(nt)+k(1,3); %x(3)
        xf(2,3)=F(nt)+k(2,3); %f(3)
        k(1,4)=Dt*xf(2,3);
        k(2,4)=Dt*(C2*(C3*xf(1,3)+1)^(-gma) -C1*(xf(2,3))^2 -C4);
        X(nt+1)=X(nt)+(1/6)*(k(1,1)+2*k(1,2)+2*k(1,3)+k(1,4));
        F(nt+1)=F(nt)+(1/6)*(k(2,1)+2*k(2,2)+2*k(2,3)+k(2,4));
    end
    XV(i,:)=X;
    UV(i,:)=F;
    i=i+1;
end
orismos_timwn_parametrwn_pneu
% ws pros eswteriki diametro kanoniou = diametros vlimatos -> d
i=1;
for d=0.04:0.04/4:0.08
    A=pi*(d^2)/4;
    C1=B*A/M;
    C2=p*A/M;
    C3=A/V;
    %Runge-Kutta ode-system solver
    for nt=1:n-1
        k(1,1)=Dt*F(nt);
        k(2,1)=Dt*(C2*(C3*X(nt)+1)^(-gma) -C1*(F(nt))^2 -C4);
        xf(1,1)=X(nt)+(1/2)*k(1,1); %x(1)
        xf(2,1)=F(nt)+(1/2)*k(2,1); %f(1)
        k(1,2)=Dt*xf(2,1);
        k(2,2)=Dt*(C2*(C3*xf(1,1)+1)^(-gma) -C1*(xf(2,1))^2 -C4);
        xf(1,2)=X(nt)+(1/2)*k(1,2); %x(2)
        xf(2,2)=F(nt)+(1/2)*k(2,2); %f(2)
        k(1,3)=Dt*xf(2,2);
        k(2,3)=Dt*(C2*(C3*xf(1,2)+1)^(-gma) -C1*(xf(2,2))^2 -C4);
        xf(1,3)=X(nt)+k(1,3); %x(3)
        xf(2,3)=F(nt)+k(2,3); %f(3)
        k(1,4)=Dt*xf(2,3);
        k(2,4)=Dt*(C2*(C3*xf(1,3)+1)^(-gma) -C1*(xf(2,3))^2 -C4);
        X(nt+1)=X(nt)+(1/6)*(k(1,1)+2*k(1,2)+2*k(1,3)+k(1,4));
        F(nt+1)=F(nt)+(1/6)*(k(2,1)+2*k(2,2)+2*k(2,3)+k(2,4));
    end
    %
    Xd(i,:)=X;
    Ud(i,:)=F;
    i=i+1;
end
orismos_timwn_parametrwn_pneu
% ws pros maza vlimatos-> M

```

```

i=1;
for M=0.2:0.3:1.4
    Tfr=mu*M*g;
    C1=B*A/M;
    C2=p*A/M;
    C4=(Tfr)/M;
    %Runge-Kutta ode-system solver
    for nt=1:n-1
        k(1,1)=Dt*F(nt);
        k(2,1)=Dt*(C2*(C3*X(nt)+1)^(-gma) -C1*(F(nt))^2 -C4);
        xf(1,1)=X(nt)+(1/2)* k(1,1); %x(1)
        xf(2,1)=F(nt)+(1/2)* k(2,1); %f(1)
        k(1,2)=Dt*xf(2,1);
        k(2,2)=Dt*(C2*(C3*xf(1,1)+1)^(-gma) -C1*(xf(2,1))^2 -C4);
        xf(1,2)=X(nt)+(1/2)* k(1,2); %x(2)
        xf(2,2)=F(nt)+(1/2)* k(2,2); %f(2)
        k(1,3)=Dt*xf(2,2);
        k(2,3)=Dt*(C2*(C3*xf(1,2)+1)^(-gma) -C1*(xf(2,2))^2 -C4);
        xf(1,3)=X(nt)+ k(1,3); %x(3)
        xf(2,3)=F(nt)+ k(2,3); %f(3)
        k(1,4)=Dt*xf(2,3);
        k(2,4)=Dt*(C2*(C3*xf(1,3)+1)^(-gma) -C1*(xf(2,3))^2 -C4);
        X(nt+1)=X(nt)+ (1/6)*(k(1,1)+ 2*k(1,2)+ 2*k(1,3)+ k(1,4));
        F(nt+1)=F(nt)+ (1/6)*(k(2,1)+ 2*k(2,2)+ 2*k(2,3)+ k(2,4));
    end
    %
    XM(i,:)=X;
    UM(i,:)=F;
    i=i+1;
end
orismos_timwn_parametrwn_pneu
% ws pros syntelesti trivis vlimatos me kanoni-> mu
i=1;
for mu=0.3:0.7/4:1
    Tfr=mu*M*g;
    C4=(Tfr)/M;
    %Runge-Kutta ode-system solver
    for nt=1:n-1
        k(1,1)=Dt*F(nt);
        k(2,1)=Dt*(C2*(C3*X(nt)+1)^(-gma) -C1*(F(nt))^2 -C4);
        xf(1,1)=X(nt)+(1/2)* k(1,1); %x(1)
        xf(2,1)=F(nt)+(1/2)* k(2,1); %f(1)
        k(1,2)=Dt*xf(2,1);
        k(2,2)=Dt*(C2*(C3*xf(1,1)+1)^(-gma) -C1*(xf(2,1))^2 -C4);
        xf(1,2)=X(nt)+(1/2)* k(1,2); %x(2)
        xf(2,2)=F(nt)+(1/2)* k(2,2); %f(2)
        k(1,3)=Dt*xf(2,2);
        k(2,3)=Dt*(C2*(C3*xf(1,2)+1)^(-gma) -C1*(xf(2,2))^2 -C4);
        xf(1,3)=X(nt)+ k(1,3); %x(3)
        xf(2,3)=F(nt)+ k(2,3); %f(3)
        k(1,4)=Dt*xf(2,3);
        k(2,4)=Dt*(C2*(C3*xf(1,3)+1)^(-gma) -C1*(xf(2,3))^2 -C4);
        X(nt+1)=X(nt)+ (1/6)*(k(1,1)+ 2*k(1,2)+ 2*k(1,3)+ k(1,4));
        F(nt+1)=F(nt)+ (1/6)*(k(2,1)+ 2*k(2,2)+ 2*k(2,3)+ k(2,4));
    end
    %
    Xmu(i,:)=X;
    Umu(i,:)=F;
    i=i+1;
end
orismos_timwn_parametrwn_pneu

```

```

% definition of time , t
t=Dt*linspace(0,n-1,n);
%plots
%p
figure('name','Taxytita exodou gia euros timwn arxikis PIESIS
pepiesmenou aera')
subplot(1,2,1);
plot(t,Up(1,:), 'b',t,Up(2,:), 'g',t,Up(3,:), 'r',t,Up(4,:), 'c',t,Up(5,
), 'm')
legend('p=6 bar', 'p=7.5 bar', 'p=9 bar', 'p=10.5 bar', 'p=12
bar', 'Location', 'northwest')
grid on
axis([0 0.03 0 100])
%title('TAXYTITA exodou gia euros timwn arxikis piesis pepiesmenou
aera vs XRONOS')
ylabel('u exodou (m/s)')
xlabel('t (sec)')
subplot(1,2,2);
plot(Xp(1,:),Up(1,:), 'b',Xp(2,:),Up(2,:), 'g',Xp(3,:),Up(3,:), 'r',Xp(4
,:),Up(4,:), 'c',Xp(5,:),Up(5,:), 'm')
grid on
axis([0 0.7 0 100])
%title('TAXYTITA exodou gia euros timwn arxikis piesis pepiesmenou
aera vs METATOPIISI')
ylabel('u exodou (m/s)')
xlabel('x (m)')
%V
figure('name','Taxytita exodou gia times arxikou OGKOY pepiesmenou
aera')
subplot(1,2,1);
plot(t,UV(1,:), 'b',t,UV(2,:), 'g',t,UV(3,:), 'r',t,UV(4,:), 'c',t,UV(5,
), 'm')
legend('V=2 litre', 'V=3.5 litre', 'V=5 litre', 'V=6.5 litre', 'V=8
litre', 'Location', 'northwest')
grid on
axis([0 0.03 0 100])
%title('TAXYTITA exodou gia times arxikou ogkou pepiesmenou aera vs
XRONOS')
ylabel('u exodou (m/s)')
xlabel('t (sec)')
subplot(1,2,2);
plot(XV(1,:),UV(1,:), 'b',XV(2,:),UV(2,:), 'g',XV(3,:),UV(3,:), 'r',XV(4
,:),UV(4,:), 'c',XV(5,:),UV(5,:), 'm')
grid on
axis([0 0.7 0 100])
%title('TAXYTITA exodou gia euros timwn parexomenou ogkou pepiesmenou
aera vs METATOPIISI')
ylabel('u exodou (m/s)')
xlabel('x (m)')
%d
figure('name','Taxytita exodou gia euros timwn DIAMETROY vlimatos')
subplot(1,2,1);
plot(t,Ud(1,:), 'b',t,Ud(2,:), 'g',t,Ud(3,:), 'r',t,Ud(4,:), 'c',t,Ud(5,
), 'm')
legend('d=40 mm', 'd=50 mm', 'd=60 mm', 'd=70 mm', 'd=80
mm', 'Location', 'northwest')
grid on
axis([0 0.03 0 100])
%title('TAXYTITA exodou gia euros timwn diametrou vlimatos vs
XRONOS')
ylabel('u exodou (m/s)')

```

```

xlabel('t (sec)')
subplot(1,2,2);
plot(Xd(1,:),Ud(1,:), 'b',Xd(2,:),Ud(2,:), 'g',Xd(3,:),Ud(3,:), 'r',Xd(4
,:),Ud(4,:), 'c',Xd(5,:),Ud(5,:), 'm')
grid on
axis([0 0.7 0 100])
%title('TAXYTITA exodou gia euros timwn diametrou vlimatos vs
METATOPIISI')
ylabel('u exodou (m/s)')
xlabel('x (m)')
%M
figure('name','Taxytita exodou gia euros timwn MAZAS vlimatos')
subplot(1,2,1);
plot(t,UM(1,:), 'b',t,UM(2,:), 'g',t,UM(3,:), 'r',t,UM(4,:), 'c',t,UM(5,
),'m')
legend('M= 0.2 kg','M= 0.5 kg','M= 0.8 kg','M= 1.1 kg','M= 1.4
kg','Location','northwest')
grid on
axis([0 0.03 0 100])
%title('TAXYTITA exodou gia euros timwn mazas vlimatos vs XRONOS')
ylabel('u exodou (m/s)')
xlabel('t (sec)')
subplot(1,2,2);
plot(XM(1,:),UM(1,:), 'b',XM(2,:),UM(2,:), 'g',XM(3,:),UM(3,:), 'r',XM(4
,:),UM(4,:), 'c',XM(5,:),UM(5,:), 'm')
grid on
axis([0 0.7 0 100])
%title('TAXYTITA exodou gia euros timwn mazas vlimatos vs
METATOPIISI')
ylabel('u exodou (m/s)')
xlabel('x (m)')
%mu
figure('name','Taxytita exodou gia euros timwn syntel. TRIVIS
olisthisis')
subplot(1,2,1);
plot(t,Umu(1,:), 'b',t,Umu(2,:), 'g',t,Umu(3,:), 'r',t,Umu(4,:), 'c',t,Umu
(5,:), 'm')
legend('mu= 0.3','mu= 0.475','mu= 0.65','mu= 0.825','mu=
1','Location','northwest')
grid on
axis([0 0.03 0 100])
%title('TAXYTITA exodou gia euros timwn syntel. trivis olisthisis vs
XRONOS')
ylabel('u exodou (m/s)')
xlabel('t (sec)')
subplot(1,2,2);
plot(Xmu(1,:),Umu(1,:), 'b',Xmu(2,:),Umu(2,:), 'g',Xmu(3,:),Umu(3,:), 'r
',Xmu(4,:),Umu(4,:), 'c',Xmu(5,:),Umu(5,:), 'm')
grid on
axis([0 0.7 0 100])
%title('TAXYTITA exodou gia euros timwn syntel. trivis olisthisis vs
METATOPIISI')
ylabel('u exodou (m/s)')
xlabel('x (m)')

```

5 Κώδικας καμπυλών ροπής και ισχύος κινητήρα

```

Tk=7.5;%sec,periodos kinisis
Nxron=200;
Ndiamer=100;
t=linspace(1,2*Tk,Nxron);
ro=1.3; %pyknotita aera
g=9.81; %epitaxynsi varytitas
%megethi kanoniou
L=0.8;%mikos kanis
n=100;%plithos diamerisewn kanis
I=0.1676;%kg*m^2
m=0.45;%kg
mSf=1.4;%kg, maza sfairas
dSf=0.05;
%anemos
uw=-28; % m/s. ejetazw ti roi anemou se enan ajona, ara ypologizw
mono gia mia timi tou.
theta=zeros(1,Nxron);
Mwind=zeros(1,Nxron);
Minert=zeros(1,Nxron);
Mmotor=zeros(1,Nxron);
Pmotor=zeros(1,Nxron);
Nrpm=zeros(1,Nxron);
Cd=1.2;
d=0.055;
for j=1:Nxron
    theta(j)=pi/2*sin(0.84*t(j));
    w=pi/2*0.84*cos(0.84*t(j));
    wDot=-pi/2*0.84^2*sin(0.84*t(j));
    Mwind_i=zeros(1,Ndiamer);
    Nrpm(j)=w*30/pi;
    for i=1:Ndiamer
        r=(i-1/2)*(L/Ndiamer);
        wVector=[0 0 w];
        rVector=[r*cos(theta(j)) r*sin(theta(j)) 0];
        alpha=cross(wVector,rVector);
        ux_kanon=alpha(1);
        A=d*L/Ndiamer*abs(sin(theta(j)));
        Fwind=ro/2*Cd*A*(ux_kanon-uw)*abs(ux_kanon-uw);
        FVector=[Fwind 0 0];
        aa=cross(rVector,FVector);
        Mwind_i(i)=aa(3);
    end
    Mwind(j)=sum(Mwind_i);
    Minert(j)=I*wDot;
    Mmotor(j)=Minert(j)+Mwind(j);
    Pmotor(j)=Mmotor(j)*w;
end
maxabsM=max(abs(Mmotor));
maxabsP=max(abs(Pmotor));
xx=zeros(4,2);
for i=1:4
    xx(i,:)=[(i+4)*Tk/4,(i+4)*Tk/4];
end
yym=[-1.2*maxabsM,1.2*maxabsM];
yyp=[-1.2*maxabsP,1.2*maxabsP];
figure('name','Motor Torque - Time');
plot(t,Mmotor,'b',t,Minert,'m',t,Mwind,'g')
hold on
plot(xx(1,:),yym,'k',xx(2,:),yym,'k',xx(3,:),yym,'k',xx(4,:),yym,'k')
set(gca,'ygrid','on')
axis([Tk 2*Tk -1.2*maxabsM 1.2*maxabsM])

```

```

title('Torque-Time')
ylabel('Torque[Nm]')
figure('name','Motor Power - Time');
plot(t,Pmotor,'b')
hold on
plot(xx(1,:),yyp,'k',xx(2,:),yyp,'k',xx(3,:),yyp,'k',xx(4,:),yyp,'k')
set(gca,'ygrid','on')
axis([Tk 2*Tk -1.2*maxabsP 1.2*maxabsP])
title('Power-Time')
ylabel('Power[W]')
figure('name','Motor Torque - RPM');
plot(Nrpm,Mmotor)
grid on
axis([-15 15 -1.2*maxabsM 1.2*maxabsM])
title('Torque-RPM')
ylabel('Torque[Nm]')
figure('name','Motor Power - RPM');
plot(Nrpm,Pmotor)
grid on
axis([-15 15 -1.2*maxabsP 1.2*maxabsP])
title('Power-RPM')
ylabel('Power[W]')

```