

ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΥΠΟ ΡΙΨΗ ΑΠΟ ΜΗ-ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΟ ΑΕΡΟΧΗΜΑ

Μητρίδης Δ.¹, Παναγιώτου Π.², Υάκινθος Κ.³

¹ Διπλωματούχος Μηχ. Μηχανικός ΑΠΘ, Υπ. Διδάκτωρ ΕΜΡΣ

² Διδάκτωρ Μηχ. Μηχανικός ΑΠΘ

³ Καθηγητής Τμήματος Μηχ. Μηχανικών, ΑΠΘ, Διευθυντής ΕΜΡΣ

Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη
dsmitrid@auth.gr, peripan@eng.auth.gr, kyak@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το παρόν άρθρο αφορά την κινηματική μελέτη της διαδικασίας απόρριψης φορτίου, εν πτήση, από ένα Μη-Επανδρωμένο-Αερόχημα σταθερής πτέρυγας, καινοτόμας γεωμετρίας Σώματος-Πτέρυγας-Ενσωματωμένη-σε-Ατρακτο. Το σκάφος φέρει την κωδική ονομασία RX-3 και υπάγεται στο ερευνητικό πρόγραμμα DELAER, που υλοποιείται στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η μοντελοποίηση των συνθηκών ρίψης του φορτίου εξοπλισμού από το αερόχημα, ο προσδιορισμός της πιθανότερης τροχιάς που αυτό πρόκειται να ακολουθήσει και, τέλος, ο προσδιορισμός των επιπέδων ασφαλείας της λειτουργίας απόρριψης όσον αφορά τον κίνδυνο σύγκρουσης του ελεύθερου φορτίου με κρίσιμα σημεία του σκάφους, και ειδικότερα την προπέλα αυτού. Η μοντελοποίηση των αεροδυναμικών δυνάμεων γίνεται με την εφαρμογή αναλυτικών εξισώσεων υπολογισμού της οπισθέλκουσας ενώ η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που προκύπτουν γίνεται αριθμητικά. Ο χρόνος επίλυσης περιορίζεται στο 1sec από την στιγμή της απελευθέρωσης. Τέλος, εξάγονται τα διαγράμματα της τροχιάς του φορτίου και δημιουργείται ένας χάρτης ασφαλούς ρίψης με μεταβλητές την ταχύτητα πτήσης, την στιγμή της ρίψης, και το βάρος του φορτίου.

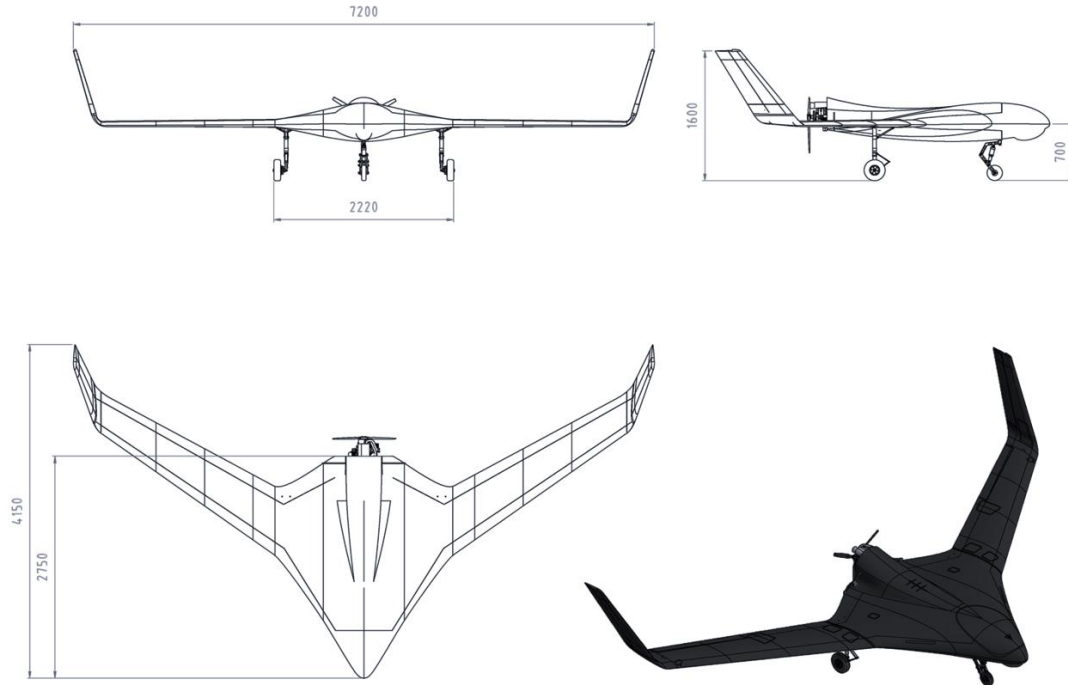
Λέξεις Κλειδιά: UAV, BWB, ρίψη φορτίου, προσδιορισμός τροχιάς, διαφορικές εξισώσεις

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έρευνα στον χώρο της αεροναυτικής, τα τελευταία χρόνια, εστιάζεται σαφώς και στα μη-επανδρωμένα αεροχήματα (Unmanned Aerial Vehicles, UAV). Οι λειτουργίες που αυτά καλούνται να εκτελέσουν δεν διαφέρουν από τις συνήθεις αποστολές των επανδρωμένων αεροσκαφών. Σε πιο συγκεκριμένες αποστολές, όπως είναι για παράδειγμα μια αποστολή διάσωσης, υπάρχει συχνά η απαίτηση για μεταφορά και ρίψη εφοδίων και ανθρωπιστικής βοήθειας από αέρος.

Στο Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών (ΕΜΡΣ), του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του ΑΠΘ, αναπτύχθηκε, μελετήθηκε και σχεδιάστηκε, ένα UAV βασισμένο στην καινοτόμα πλατφόρμα Σώματος-Πτέρυγας-Ενσωματωμένη-σε-Ατρακτο (Blended Wing Body ή BWB)[2] με στόχο την μεταφορά και την άφεση ωφέλιμου φορτίου. Ο σχεδιασμός αυτός εντάχθηκε στο ερευνητικό πρόγραμμα DELAER, του οποίου βασικός στόχος είναι η ανάπτυξη μιας εναέριας πλατφόρμας που θα μπορεί να παρέχει ανθρωπιστική βοήθεια στα νησιά της άγονης γραμμής και, γενικότερα, σε απομακρυσμένες περιοχές του Ελλαδικού χώρου, άμεσα και με χαμηλό κόστος. Η

κωδική ονομασία του BWB UAV για το πρόγραμμα είναι το DELAER RX3(Εικόνα 1.). Στο DELAER συμμετέχουν εγχώριοι ακαδημαϊκοί και βιομηχανικοί φορείς, ενώ συντονιστής του ερευνητικού προγράμματος είναι το ΕΜΡΣ. Το φορτίο, το οποίο φτάνει σε βάρος τα 45kg, καθορίζεται από την εκάστοτε αποστολή και μεταβάλλεται εντός ενός μεγάλου εύρους ειδών, όπως φιάλες αίματος, ασυρμάτους, απινιδωτές, φάρμακα, τρόφιμα κ.α.. Σημειώνεται ότι σημαντικό στοιχείο της αποστολής του DELAER RX-3 είναι η επιλεκτική δυνατότητα άφηση του φορτίου από αέρος.



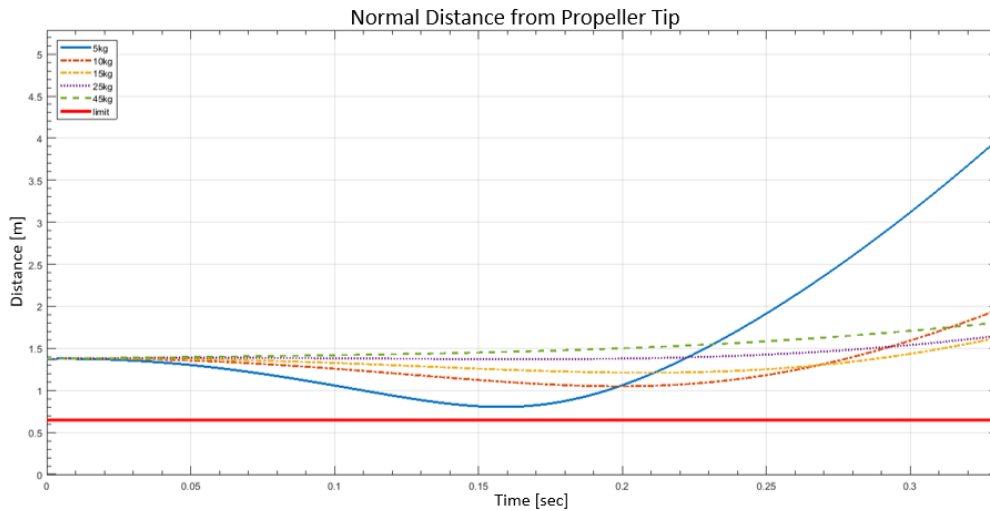
Εικόνα 1 Γεωμετρία RX-3

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται, σε προκαταρκτικό επίπεδο, η δυνατότητα άφησης φορτίου από το Μη-Επανδρωμένο Αεροσκάφος RX-3, κατά την διάρκεια της πτήσης του. Σε μια αρχική προσέγγιση, το φορτίο αντιμετωπίζεται ως απαραμόρφωτο στερεό με δεδομένο σχήμα ενώ η ταχύτητα πτήσης την στιγμή της άφησης καθώς και η μάζα του υπό άφηση φορτίου, μεταβάλλονται. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, μοντελοποιήθηκε το φορτίο ως ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο σώμα σταθερών διαστάσεων στο οποίο ασκούνται ως κύριες δυνάμεις οι αντιστάσεις του αέρα στην κατακόρυφη και την οριζόντια διεύθυνση, καθώς και το βάρος. Έχοντας ως βασική θεώρηση πως το σώμα δεν περιστρέφεται γύρω από το κέντρο εφαρμογής των πραγματικών δυνάμεων, ο υπολογισμός της οπισθέλκουσας γίνεται ως αντίσταση εμφανιζόμενη σε επίπεδη επιφάνεια γνωστών διαστάσεων, με ροή κάθετη σε αυτή. Η επίλυση του συστήματος των 2 μη-γραμμικών εξισώσεων που προκύπτει, εκτελείται αριθμητικά μέσω μιας ρουτίνας προγραμματισμένη σε περιβάλλον MATLAB. Η ρουτίνα αυτή, εν τέλει, υπολογίζει την τροχιά του υπό ρίψη φορτίου και προβλέπει το κατά πόσο αυτή θέτει σε κίνδυνο βασικά στοιχεία του αεροχήματος, όπως η προπέλα καθώς το RX-3 σχεδιάστηκε γύρω από μια φιλοσοφία pusher κινητήρα.



Εικόνα 2 Τυπικό φορτίο αποστολής RX-3

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συγκεντρώνονται σε χάρτες ρίψης, διαγράμματα, δηλαδή, όπου σχεδιάζονται η εκτιμώμενες τροχιές του φορτίου ανάλογα με την μάζα του και την ταχύτητα πτήσης την στιγμή της ρίψης.



Εικόνα 3 Διάγραμμα ελέγχου ασφάλειας ρίψης φορτίου

Ο χάρτης ρίψης, ουσιαστικά, αποτελεί σύνθεση των ελέγχων της ευκλείδειας απόστασης του κέντρου μάζας από το κάτω άκρο της προπέλας σε σχέση με τον χρόνο επίλυσης (Εικόνα 3). Έχοντας, λοιπόν, υπολογίσει τις τροχιές του φορτίου για διάφορες μάζες αυτού και σε διάφορες ταχύτητες πτήσης, δίνεται η δυνατότητα καθορισμού μιας σαφώς ορισμένης περιοχής ασφάλειας σε διάγραμμα με άξονες την μάζα φορτίου και την ταχύτητα πτήσης.

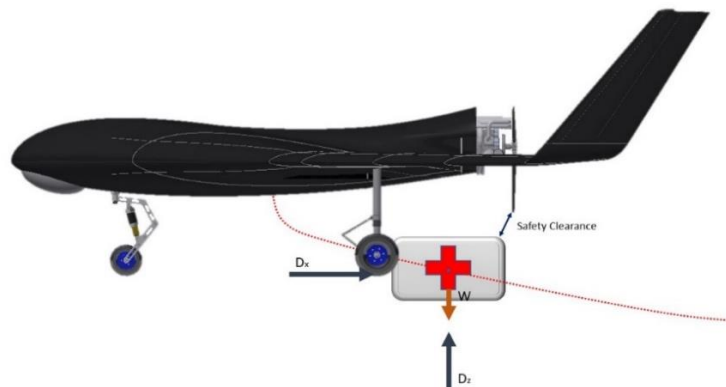
2. ΜΕΘΟΔΟΣ

Η μέθοδος με την οποία μελετήθηκε η διαδικασία απόρριψης, εν πτήση, του φορτίου του RX-3 πρόκειται για μια σύνθεση αναλυτικών υπολογισμών της οπισθέλκουσας σε δύο διευθύνσεις, μια οριζόντια και μια κατακόρυφη, και μιας γενικότερης αριθμητικής επίλυσης των μη-γραμμικών διαφορικών εξισώσεων κίνησης που προκύπτουν από τις παραπάνω δυνάμεις (Νατσιάβας, 2000). Οι δύο μη-γραμμικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση του φορτίου είναι οι εξής:

$$D_x(\dot{x}, \theta) = m * \ddot{x}$$

$$m * g - D_z(\dot{z}, \theta) = m * \ddot{z}$$

Βασικός παράγων μη γραμμικότητας στις παραπάνω μη γραμμικές εξισώσεις είναι το ότι η οπισθέλκουσα δύναμη εξαρτάται και από την ταχύτητα του αεροσκάφους αλλά και από την γωνία ρίψης του φορτίου ως προς την ροή.

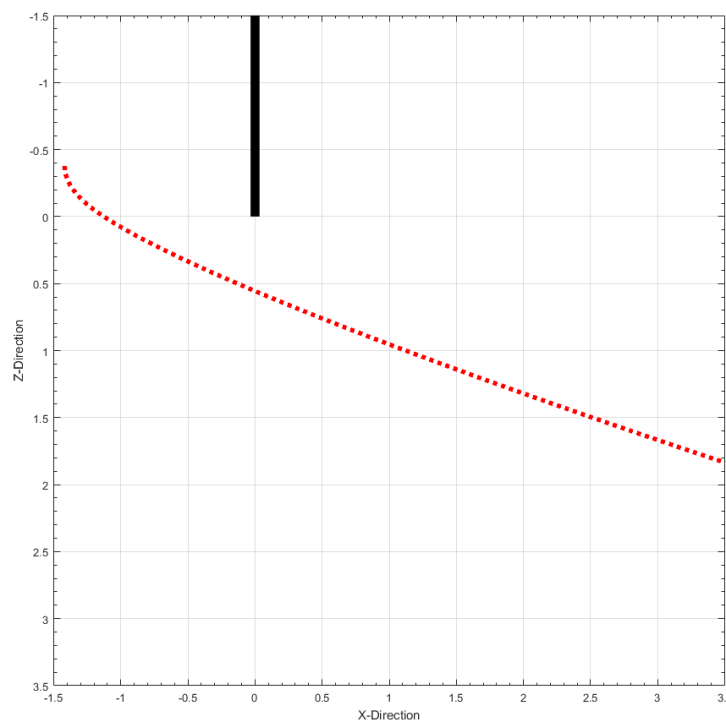


Εικόνα 4 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος του φορτίου υπό ρίψη

Ο παράγων της γωνίας του σώματος ως προς το διάνυσμα της V_∞ , σε αυτή την 2-D ανάλυση, θεωρήθηκε εκτός επιπέδου σημαντικότητας για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που απαιτούνται. Με στόχο την προκαταρκτική εξαγωγή της τροχιάς του κέντρου βάρους του σώματος, αμέσως μετά την ρίψη του, διατηρήθηκαν οι μη-γραμμικοί όροι της εξάρτησης της εκάστοτε οπισθέλκουσας από την ταχύτητα της ροής που η κάθε επιφάνεια 'βλέπει' κάθετα την κάθε χρονική στιγμή της επίλυσης. Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται αριθμητικά με την μέθοδο τραπεζίου και χρονικό βήμα 0.001sec, μέχρι την επίτευξη του πρώτου δευτερολέπτου της κίνησης του φορτίου (Νατσιάβας, 2000; Νατσιάβας, 2001).

Μετά την επίλυση εξάγονται τα διαγράμματα της κατ' άξονα επιτάχυνσης, ταχύτητας και θέσης του σώματος συναρτήσει του χρόνου καθώς και τα διαγράμματα των δρυσών δυνάμεων σε αυτό συναρτήσει και πάλι του χρόνου.

Σημαντικό βήμα για την για την επαλήθευση της ασφάλειας της διαδικασίας απόρριψη φορτίου εν πτήση, είναι εξαγωγή διαγραμμάτων τροχιάς, δηλαδή της απεικόνισης των συντεταγμένων της θέσης κατ' άξονα. Η καμπύλη της τροχιάς του κέντρου βάρους το ελεύθερου σώματος επιτρέπει μια αρχική οπτική εκτίμηση της ελάχιστης απόστασης που παρατηρείται, από το κάτω άκρο της προπέλας, όντας το κοντινότερο σημείο του αεροσκάφους σε αυτή την τροχιά.



Εικόνα 5 Τροχιά ελεύθερου σώματος μετά την απόρριψη

Τελικό βήμα της ανάλυσης είναι η εξαγωγή της καμπύλης της ευκλείδειας επίπεδης απόστασης του κέντρου βάρους του σώματος από το κάτω άκρο της προπέλας. Εκτελείται η σύγκριση του ελάχιστου αυτής της συνάρτησης με ένα κρίσιμο διάστημα ασφάλειας. Το διάστημα αυτό ορίζεται ως το μισό της μέγιστης χωρικής διάστασης του αντικειμένου υπό ρίψη, όταν ο όγκος αυτού συμπίπτει πλήρως με τον σχεδιασμένο όγκο του payload bay στο αερόχημα, έχει δηλαδή τον μέγιστο όγκο που μπορεί να χωρέσει στο αεροσκάφος.

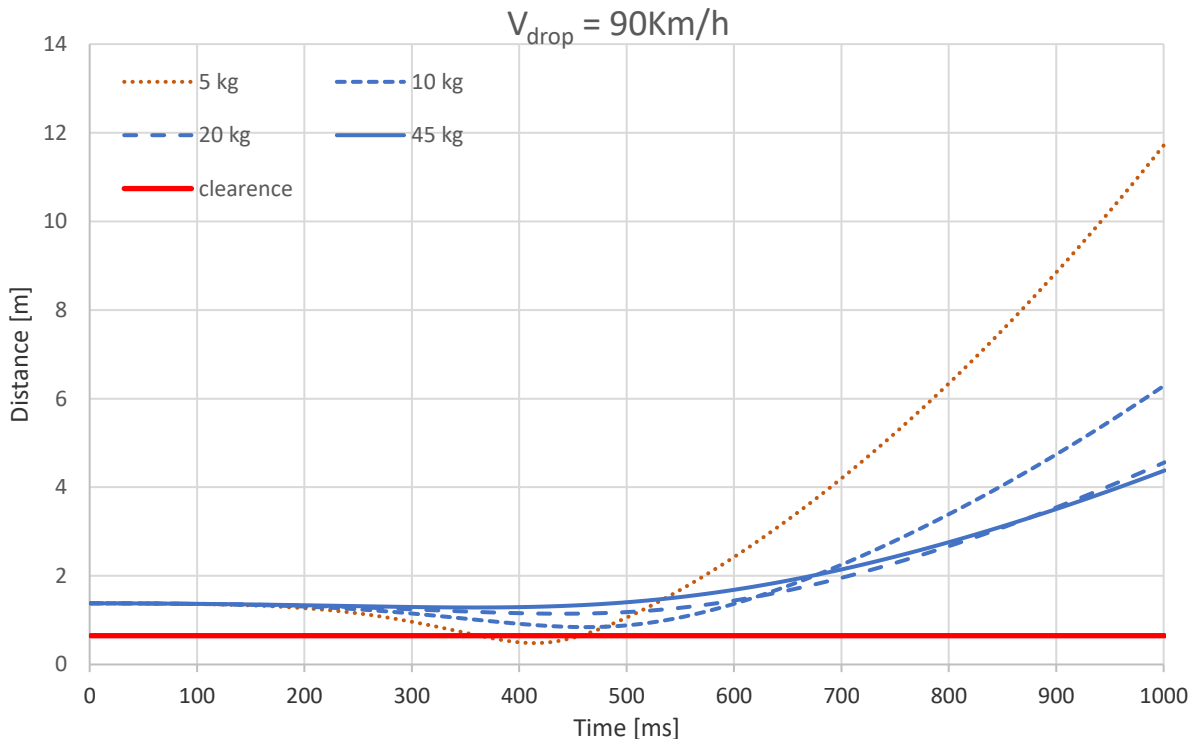
Η πυκνότητα του αέρα καθώς και η επιτάχυνση της βαρύτητας εκλέχθηκαν θεωρώντας ύψος πτήσης πολύ κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας ενώ οι συντελεστές C_D εκλέχθηκαν από την βιβλιογραφία ως 1.6 και 1.9 αντίστοιχα για την μπροστά και κάτω επιφάνεια του σώματος (Anderson, 2010).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα που αφορούν κυρίως τις καμπύλες της ευκλείδειας απόστασης του κέντρου βάρους του σώματος από το κάτω άκρο της προπέλας. Το πρωτόκολλο αναλύσεων περιλαμβάνει μια περιοχή μεταβολής του βάρους του φορτίου και μια περιοχή μεταβολής της ταχύτητας του σκάφους την στιγμή της άφεσης. Τα βάρη που αναλύθηκαν αφορούν φορτία 5, 10, 20 και 45kg ενώ οι ταχύτητες προσομοίωσης της ρίψης ορίστηκαν στα 90, 120, 150 και 180Km/h. Η οριακή απόσταση ασφάλειας υπολογίστηκε στα 65cm από το άκρο της προπέλας.

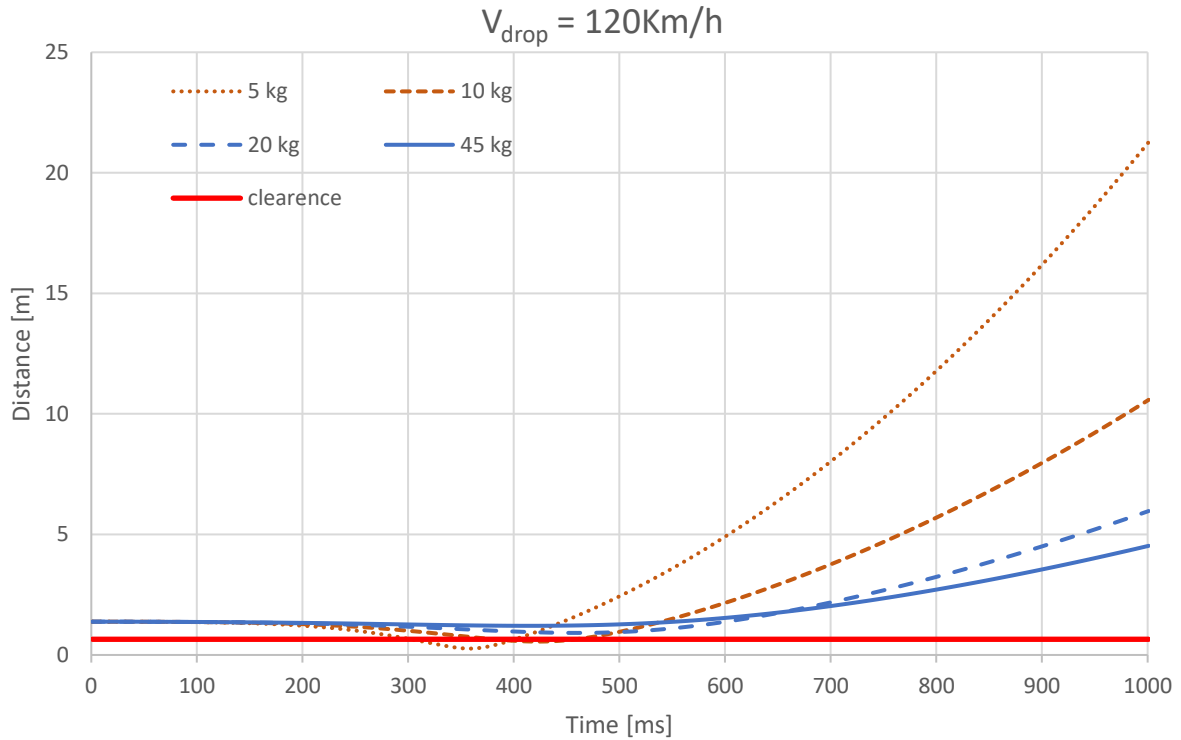
Η ανάλυση στα 90Km/h, για όλες τις περιπτώσεις βάρους φορτίου, εξήγαγε το παρακάτω διάγραμμα. Η καμπύλες παρουσιάζουν τυπική και ομοιόμορφη συμπεριφορά, ξεκινώντας από κοινό αρχικό σημείο (την απόσταση προπέλας-σημείου πρόσδεσης), πλησιάζουν στο μηδέν καθώς κινούνται προς το πίσω μέρος του σκάφους και εν τέλει απομακρύνονται καθώς πέφτουν και το αερόχημα συνεχίζει την πτήση του.

Στα 90Km/h παρατηρείται πως η ρίψη φορτίου 5kg κρίνεται μη ασφαλής.

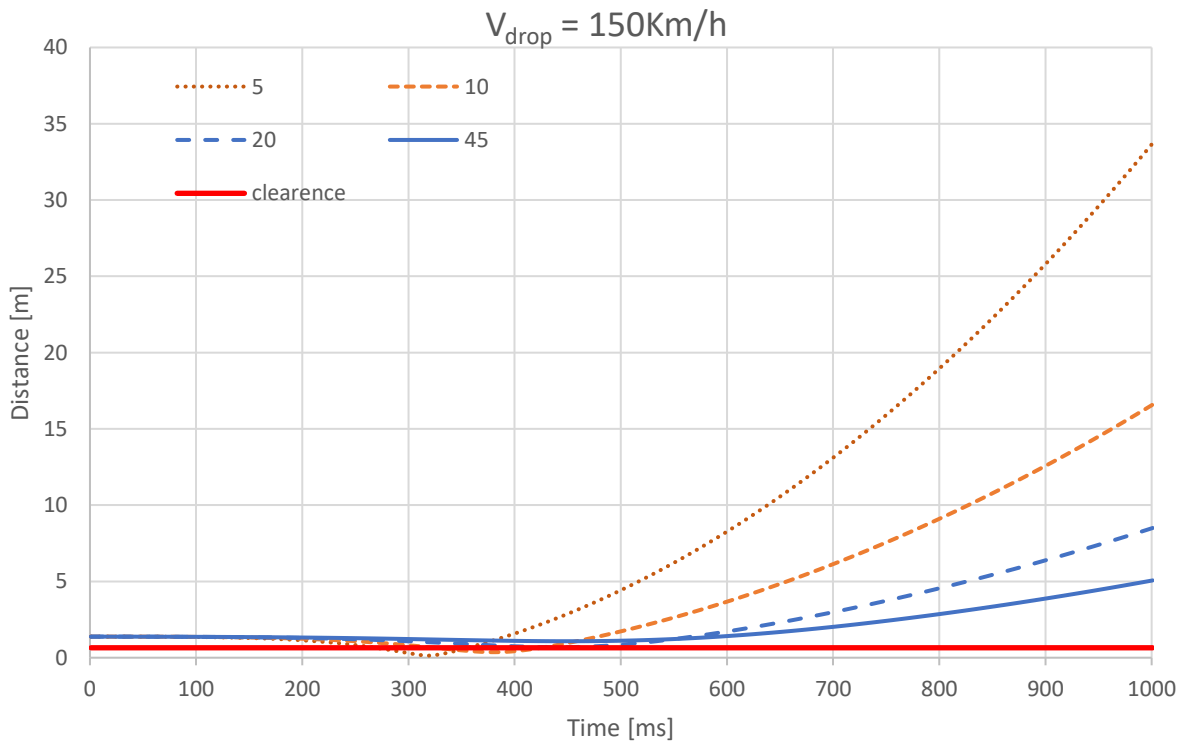


Εικόνα 6 Καμπύλες απόστασης από το άκρο της προπέλας για ταχύτητα πτήσης 90Km/h

Με παρόμοιο τρόπο οι καμπύλες για τα 120Km/h και 150Km/h ακολουθούν πανομοιότυπη συμπεριφορά περιορίζοντας όμως ταυτόχρονα την ικανότητα ρίψης φορτίου βάρους 20Kg και άνω. Αυτό εξηγείται βάσει των ισχυρότερων αεροδυναμικών φορτίων που ασκούνται στο σώμα με την αύξηση της ταχύτητας. Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο που εξάγεται από τα διαγράμματα είναι, όπως αναμένεται, η τοποθέτηση του ελαχίστου των συναρτήσεων σε μικρότερους χρόνους. Για παράδειγμα, το φορτίο των 5kg φτάνει σε ελάχιστο σημείο από την προπέλα σε περίπου 0.43sec για τα 90Km/h, 0.37sec για τα 120Km/h και σε 0.31sec για την ταχύτητα των 150Km/h.

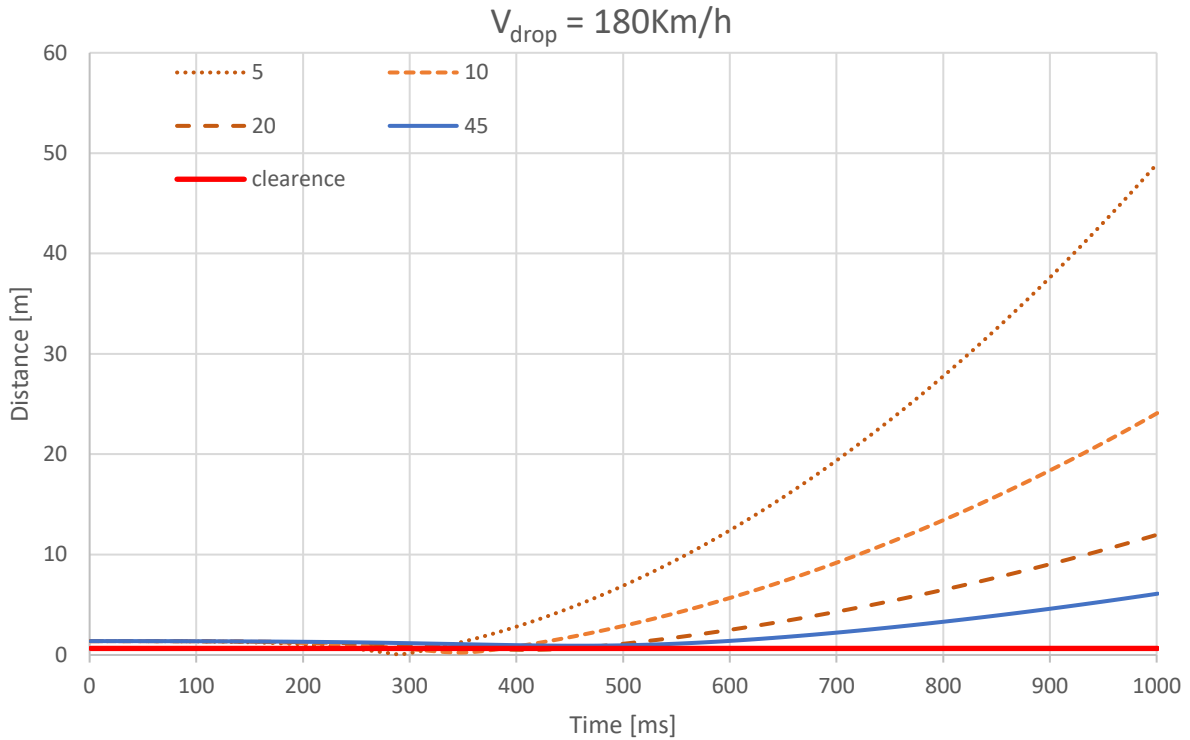


Εικόνα 7 Καμπύλες απόστασης από το άκρο της προπέλας για ταχύτητα πτήσης 120Km/h



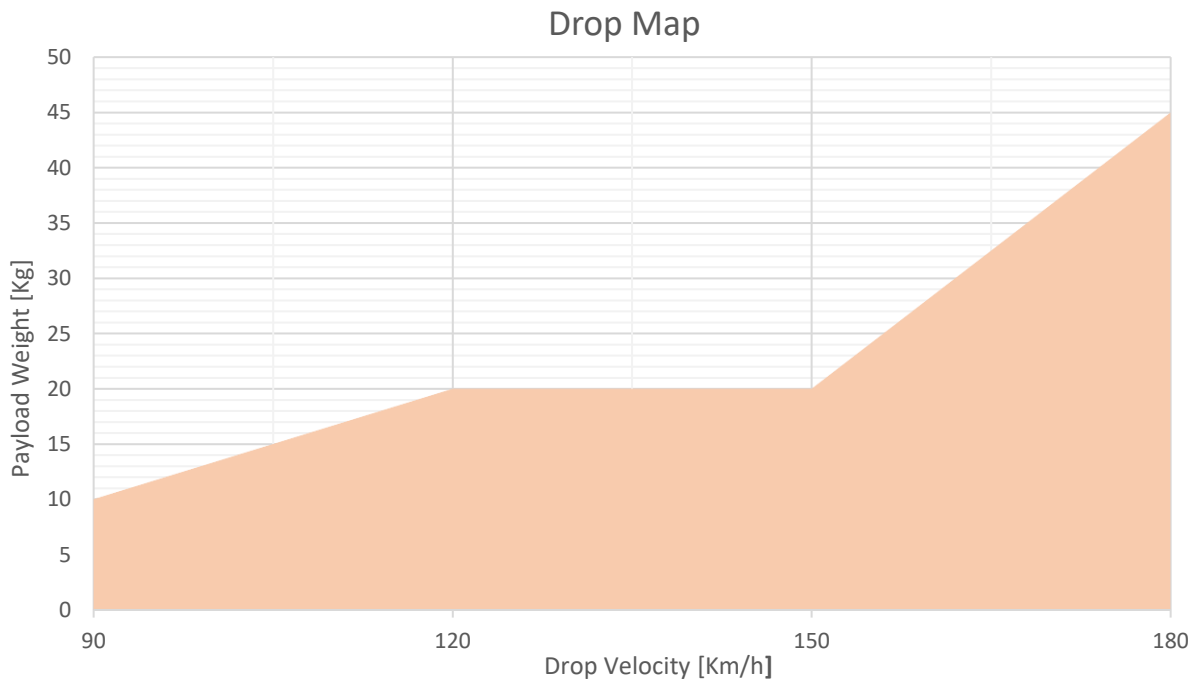
Εικόνα 8 Καμπύλες απόστασης από το άκρο της προπέλας για ταχύτητα πτήσης 150Km/h

Τέλος, για ταχύτητες ρίψης περί τα 180Km/h, παρατηρείτε η ικανότητα ασφαλούς ρίψης για φορτία 45kg καθώς πλέον οι αεροδυναμικές δράσεις πάνω στο ελεύθερο σώμα είναι αρκετά σφοδρές ώστε να απαιτούνται μεγάλα αδρανειακά φορτία ικανά να διατηρήσουν το σώμα μακριά από την προπέλα.



Εικόνα 9 Καμπύλες απόστασης από το άκρο της προπέλας για ταχύτητα πτήσης 180Km/h

Τα τελικά αποτελέσματα, των παραπάνω αναλύσεων, πρακτικά συγκεντρώνονται σε ένα γράφημα ασφαλούς ρίψης, απλούστερα έναν χάρτη ρίψεων. Οι άξονες αποτελούνται από το βάρος του, υπό ρίψη, φορτίου και την ταχύτητα πτήσης. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων ορίζουν σε ένα τέτοιο διάγραμμα μια περιοχή μη-ασφαλούς ρίψης και μια ασφαλούς ακριβώς από πάνω της. Η περιοχή μη-ασφαλούς ρίψης χρωματίζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 10 Χρωματισμένη περιοχή μη-ασφαλούς ρίψης φορτίου συναρτήσει βάρους φορτίου και ταχύτητας πτήσης

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων που παρουσιάστηκαν συμπεραίνεται πως, αρχικά, η απόρριψη φορτίου κατά την διάρκεια της πτήσης, από ένα Μη-Επανδρωμένο-Αερόχημα των χαρακτηριστικών του RX-3, είναι δυνατή χωρίς κίνδυνο ως προς την ακεραιότητα του αεροχήματος.

Όσο η ταχύτητα πτήσης αυξάνεται και η μάζα του φορτίου μειώνεται, τόσο πιο κοντά βρισκόμαστε σε περιοχές μη-ασφαλούς ρίψης, και οι συνθήκες αυτές θα πρέπει σαφώς να αποφεύγονται. Η παραγωγή ενός πρακτικού εργαλείου εντοπισμού των αποδεκτών συνθηκών άφεσης φορτίου αποτελεί μια μέθοδο προκαθορισμού των επιχειρησιακών δυνατοτήτων του RX-3 και συνεισφέρει στον πλήρη σχεδιασμό της αποστολής και όλου του αεροσκάφους.

Οι μελλοντικές έρευνες πάνω στο θέμα της τροχιάς του φορτίου αμέσως μετά της άφεσής του πρόκειται να επικεντρωθούν στην δημιουργία ενός πιο λεπτομερούς εργαλείου, το οποίο θα λαμβάνει δεδομένα από την μοντελοποίηση μέσω CFD του σώματος στις συνθήκες ρίψης και θα επιλύει την μηχανική της τροχιάς που αυτό πρόκειται να ακολουθήσει, συμπεριλαμβανόμενων και των περιστροφών που πρόκειται να εκτελέσει.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ - ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) (κωδικός έργου:Τ1ΕΔΚ-01262).



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anderson J. "Fundamentals of Aerodynamics", 5th Ed., McGraw-Hill Education, 2010.
P. Panagiotou, "Aerodynamic efficiency and performance enhancement of fixed-wing unmanned aerial vehicles using novel configurations and techniques", LFMT AUTH, 2018.
Νατσιάβας Σ. "Εφαρμοσμένη Δυναμική", 1^η Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, 2000.
Νατσιάβας Σ. "Ταλαντώσεις Δυναμικών Συστημάτων με Μη Γραμμικά Χαρακτηριστικά", 1^η Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, 2000.
Νατσιάβας Σ. "Ταλαντώσεις Μηχανικών Συστημάτων", 1^η Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, 2001.

PRELIMINARY TRAJECOTRY NUMERICAL CALCULATION OF A BODY BEING RELEASED FROM A UAV

ABSTRACT

This article concerns the kinematic study of the cargo release process in flight from a Blended-Wing-Body Unmanned Aerial Vehicle. The vehicle is codenamed RX-3 and is part of the DELAER research program. The purpose of the study is to determine the likely trajectory to be followed and, finally, to determine the levels of safety in terms of the possibility of collision between the falling object and a critical point of the aircraft, more crucially its propeller. The determination of the aerodynamic forces, applied on the falling cargo, is done by executing analytical calculations of drag forces, for both the horizontal and vertical axis, while solving numerically the differential equations that arise. The lysis time is limited to 1 second from the time of release. The output of the methodology is a drop map which depicts, in a 2-D “Flight Velocity” versus “Payload Weight” graph, the region where the drop is safe to be executed.