

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΑΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ BWB UAV ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Σ. Καψάλης¹, Π. Παναγιώτου², Κ. Υάκινθος³

¹Διπλωματούχος Μηχ. Μηχανικός ΑΠΘ

²Διδάκτωρ Μηχ. Μηχανικός ΑΠΘ

³Καθηγητής Τμήματος Μηχ. Μηχανικών, ΑΠΘ, Διευθυντής ΕΜΡΣ

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τη παραμετρική βελτιστοποίηση ενός μη-επανδρωμένου αεροχήματος BWB με τη χρήση του σχεδιασμού πειραμάτων και πιο συγκεκριμένα της μεθόδου Taguchi. Σκοπός της πειραματικής μελέτης είναι η εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών της πλατφόρμας, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της πτητικής του απόδοσης. Η επίδραση 3 παραμέτρων σχεδιασμού μελετήθηκε, όπου αυτές είναι το διάταμα, ο λόγος εγκλεισμού και η γωνία οπισθόκλισης και καθεμία 3 επίπεδα. Στη μέθοδο σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi, η μέγιστη ταχύτητα, ο διάδρομος απογείωσης και το μέγιστο βάρος απογείωσης ορίζονται ως παράμετροι βελτιστοποίησης. Για το σχεδιασμό του πειραματικού πλάνου χρησιμοποιήθηκε ένας L_9 ορθογώνιος πίνακας. Κάθε πειραματική διάταξη μελετάται με μεθόδους υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) και στη συνέχεια ακολουθεί εκτίμηση της απόδοσης της. Η ανάλυση της μεθόδου Taguchi γίνεται με στόχο της διαδικασίας βελτιστοποίησης την επίτευξη της καλύτερης μέγιστης ταχύτητας, του ελάχιστου διαδρόμου απογείωσης και του ελάχιστου μέγιστου βάρους απογείωσης. Οι βέλτιστοι συνδυασμοί των παραγόντων ελέγχου για τη μέγιστη ταχύτητα, το διάδρομο απογείωσης και το βάρος απογείωσης είναι $A_3B_1C_1$, $A_1B_2C_3$ και $A_1B_1C_1$, αντίστοιχα.

Λέξεις Κλειδιά: UAV, BWB, βελτιστοποίηση, DOE, Taguchi

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή στα μη-επανδρωμένα αεροχήματα UAVs

Ένα Μη-Επανδρωμένο Αερόχημα (Unmanned Aerial Vehicle ή UAV) είναι ένας τύπος αεροσκάφους που δεν έχει καμία ανθρώπινη παρουσία, πλήρωμα ή επιβάτες. Ελέγχεται δε με τηλεχειρισμό, από χειριστή-πλότο που βρίσκεται σε σταθμό εδάφους ή επιχειρεί με αυτόματους ελεγκτές πτήσης. Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη των UAVs είναι ραγδαία, κυρίως λόγω της αυξανόμενης απαίτησης για ασφάλεια, αυτονομία και αξιοπιστία, ενώ ιδιαίτερα μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα UAVs σταθερής πτέρυγας Μέσου Ύψους Μεγάλης Αυτονομίας (Medium Altitude Long Endurance ή MALE), τα οποία μπορούν να επιχειρούν πολλές ώρες στον αέρα φέροντας παράλληλα ωφέλιμο φορτίο αρκετών κιλών. Ως εκ τούτου είναι κατάλληλα για διαφόρων τύπων αποστολές όπως επιτήρησης, παροχής ανθρωπιστικής βοήθειας καθώς και υποστήριξης σε περίπτωση φυσικών καταστροφών, μεταξύ άλλων.

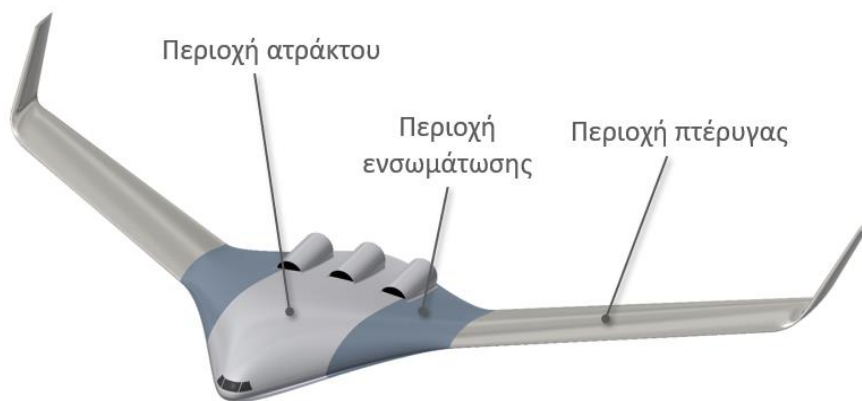
1.2 Εισαγωγή στη γεωμετρία Blended Wing Body

Η αυξανόμενη ζήτηση των UAVs έχει γεννήσει την ανάγκη για ανάπτυξη καινοτόμων γεωμετριών που μπορούν να επιχειρούν για περισσότερο χρόνο στον αέρα, με μεγαλύτερο φορτίο και βελτιωμένες πτητικές επιδόσεις. Μια τέτοια γεωμετρία είναι το Σώμα-Ενσωματωμένης-Πτέρυγας-Σε-Άτρακτο (Blended Wing Body ή BWB), το οποίο παρουσιάζει αυξημένη αεροδυναμική απόδοση, χαμηλή κατανάλωση και μεγάλο διαθέσιμο χώρο στο εσωτερικό του. Στη γενική περίπτωση αποτελείται από ένα κεντρικό τμήμα (κεντρικό “σώμα” ή άτρακτος) και ένα εξωτερικό τμήμα (πτέρυγα), ενώ το κομμάτι ανάμεσα στα δύο τμήματα είναι η “περιοχή ενσωμάτωσης” (blending area), όπου η άτρακτος ενώνεται ομαλά με τη γεωμετρία της πτέρυγας (Εικόνα 1).

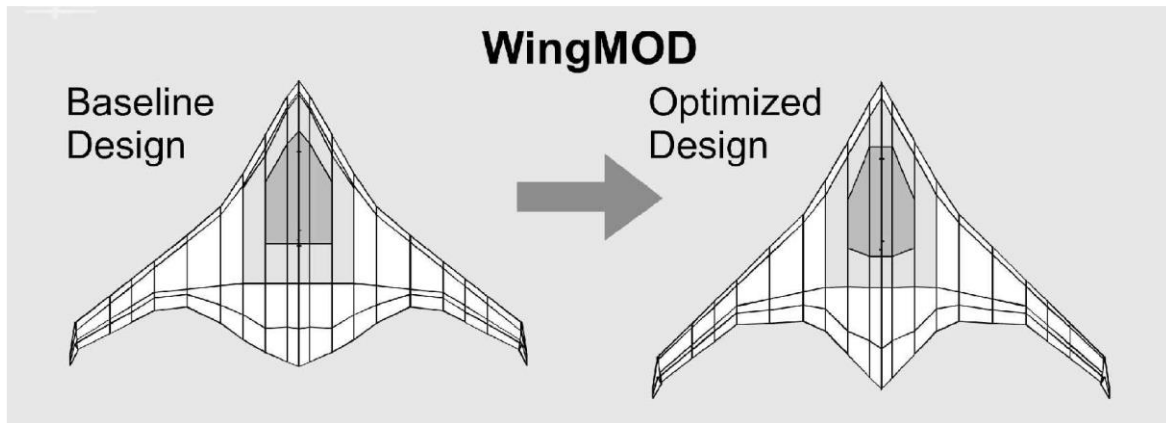
Ο σχεδιασμός του BWB αποτελεί ένα σύνθετο πολυπαραμετρικό πρόβλημα και αποτελεί ιδανική πλατφόρμα για μελέτες βελτιστοποίησης.

1.3 Εισαγωγή στις μεθόδους βελτιστοποίησης για αεροχήματα

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος βελτιστοποίησης στο σχεδιασμό αεροσκαφών είναι η Multidisciplinary Design Optimization (MDO). Η Boeing έχει αναπτύξει ένα πρωταρχικό κώδικα που ονομάζεται WingMOD (Liebeck, 2004). Η διαδικασία ανάλυσης του προγράμματος αυτού ξεκινάει με το χειροκίνητο ορισμό ενός βασικού σχεδίου. Λαμβάνοντας υπόψη του την αποστολή και τους περιορισμούς της (εμβέλεια, απόσταση απογείωσης, ταχύτητα προσέγγισης, εσωτερικός σχεδιασμός και άλλους) το WingMOD ορίζει τη διάταξη με το ελάχιστο βάρος απογείωσης που θα ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς της αποστολής. Με άλλα λόγια, το βελτιστοποιημένο αεροσκάφος έχει κλείσει και τηρεί όλες τις απαιτήσεις σχεδιασμού με το ελάχιστο βάρος απογείωσης. Μία ακόμη μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση στη φάση του προκαταρκτικού σχεδιασμού είναι η χρήση γενετικών αλγορίθμων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι ένα είδος ερευνητικών μεθόδων που είναι ειδικά διαμορφωμένες για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Οι ΓΑ λειτουργούν παράγοντας ένα μεγάλο αριθμό πιθανών λύσεων σε ένα δοθέν πρόβλημα. Στη συνέχεια ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία και φιλτράρισμα των λύσεων μέχρι να καταλήξουμε στη βέλτιστη. Οι ΓΑ χρησιμοποιούνται με επιτυχία στο σχεδιασμό αεροσκαφών. Μια ακόμα μέθοδος που χρησιμοποιούνται είναι ο σχεδιασμός πειραμάτων ο οποίος και αποτελεί το αντικείμενο αυτής της μελέτη και θα αναλυθεί εκτενέστατα στη συνέχεια.



Εικόνα 1 Τυπικό σχέδιο BWB



Εικόνα 2 Παράδειγμα της μεθόδου WingMod για ένα τυπικό σχέδιο BWB (Liebeck, 2004)

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται βελτιστοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών πλατφόρμας BWB UAV με τη χρήση του σχεδιασμού πειραμάτων και πιο συγκεκριμένα της μεθόδου Taguchi. Η τεχνική του καθορισμού και της έρευνας όλων των πιθανών συνδυασμών σε ένα πείραμα συμπεριλαμβανομένων και πολλαπλών παραγόντων είναι γνωστή ως σχεδιασμός πειραμάτων (DOE).

2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ-ΜΕΘΟΔΟΣ TAGUCHI

2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Πιο συγκεκριμένα, για το σχεδιασμό ενός πλήρως παραγοντικού πειράματος, ο αριθμός των πιθανών πειραματικών διατάξεων (N) είναι $N = L^m$, όπου L = αριθμός των επιπέδων του κάθε παράγοντα και m = αριθμός παραγόντων υπό μελέτη. Οπότε αν μιλάμε για ένα συνδυασμό 3 παραγόντων, όπου κάθε παράγοντας πρέπει να ελεγχθεί σε 2 επίπεδα το έχουμε 2^3 (8) πιθανούς συνδυασμούς. Σε περίπτωση που ο αριθμός των παραγόντων και των επιπέδων τους αυξηθεί δραματικά, το μέγεθος του προβλήματος, όσον αφορά το κόστος και το χρόνο, γίνεται εξωφρενικό. Σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα κλασματικά παραγοντικά πειράματα, τα οποία διερευνούν μόνο ένα κλάσμα των πιθανών συνδυασμών. Αυτή η προσέγγιση εξοικονομεί χρόνο και χρήματα, αλλά απαιτεί απαιτητικά μαθηματικά, τόσο στο σχεδιασμό του πειράματος όσο και στην ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Σε αυτό το σημείο εμφανίστηκε ο Δρ. Taguchi για να προτείνει μια λύση η οποία ξεπερνά όλους τους περιορισμούς των πλήρως και κλασματικών παραγοντικών πειραμάτων. Για να κάνει το DOE πιο εύκολο και πιο ελκυστικό στη βιομηχανία, ο Δρ. Taguchi πρότεινε τις εξής σκέψεις για την εφαρμογή της τεχνικής:

1. Ορισμός της ποιότητας - Ο Taguchi όρισε την ποιότητα σε σχέση με το ελάχιστο κόστος στην κοινωνία, το οποίο μετρημένο σε μηχανολογικούς όρους μεταφράζεται σε ποιότητα απόδοσης. Ανεξάρτητα από την εφαρμογή, είτε είναι ένα προϊόν είτε μια διαδικασία, ή πως μετρούνται τα αποτελέσματα, η συνέπεια στην απόδοση θεωρείται το πρωταρχικό χαρακτηριστικό. Η συνέπεια επιτυγχάνεται όταν η απόδοση είναι όσο πιο κοντά στο στόχο με την ελάχιστη μεταβλητότητα. Για τη βελτίωση της ποιότητας, ο Taguchi πρότεινε βελτιστοποίηση δύο βημάτων:
 - a. Εύρεση των επιπέδων των παραγόντων που μειώνουν τη μεταβλητότητα στην απόδοση.
 - b. Προσαρμογή των επιπέδων των παραγόντων που φέρνουν την απόδοση πιο κοντά στο στόχο.
2. Τυποποιημένο DOE – Για το σχεδιασμό των πειραμάτων, ο Taguchi εφάρμοσε ένα ειδικό σετ πινάκων, τους ορθογώνιους πίνακες, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τα πιο μικρά κλασματικά παραγοντικά και χρησιμοποιούνται για τους πιο κοινούς σχεδιασμούς πειραμάτων.
3. Στιβαρή στρατηγική σχεδιασμού (Robust design strategy) – Για την κατασκευή προϊόντων και διαδικασιών τα οποία θα είναι ανεπηρέαστα από την επίδραση ανεξέλεγκτων παραγόντων (θόρυβος), ο Taguchi ενσωματώνει ένα τρόπο για να συμπεριλάβει τους παράγοντες θορύβου στη

διάταξη του πειράματος. Αυτή η νέα δομή διευκολύνει τη χρήση πειραμάτων μικρότερου μεγέθους για τη μελέτη της επίδρασης ενός μεγαλύτερου αριθμού παραγόντων θορύβου, το οποίο οδηγεί σε μια ευνοϊκή απόδοση με μέση τιμή κοντά στον στόχο και μειωμένη μεταβλητότητα κοντά στη μέση τιμή.

4. Συνάρτηση απώλειας – Η μαθηματική εξίσωση που σχετίζεται με την έννοια τη απώλειας που προτάθηκε από το Taguchi επιτρέπει τη ποσοτικοποιήσεις της βελτίωσης σε χρηματικές μονάδες με ένα απλό τρόπο. Οι ιδέες μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν για να εκφράσουν την προβλεπόμενη βελτίωση από το DOE σε όρους εξοικονόμησης κόστους.
5. Σήμα-σε-θόρυβο ανάλυση (Signal to noise analysis) – Για την ανάλυση των πειραμάτων από τα πολλαπλά δείγματα του πειράματος, η χρήση του λόγου S/N αντί των αποτελεσμάτων καθιστά την ανάλυση των αποτελεσμάτων του DOE πιο εύκολη. Επιπροσθέτως, ο λογαριθμικός μετασχηματισμός των αποτελεσμάτων σε λόγους S/N ενδυναμώνει την πρόβλεψη της βελτίωσης στην απόδοση από την ανάλυση.

Για να εξασφαλίσει ένα πιο οικονομικό πλάνο δοκιμής, ο Taguchi κατασκεύασε ένα ειδικό σετ γενικού σχεδιασμού παραγοντικών πειραμάτων, το οποίο αποτελείται από πίνακες αριθμών που ονομάζονται ορθογώνιοι πίνακες και η χρήση αυτών μειώνει σημαντικά το συνολικό αριθμό πειραμάτων για το καθορισμένο σετ παραγόντων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

Για κάποια πειράματα, οι δοκιμές είναι εύκολες και φθηνές να επαναληφθούν. Για άλλα, οι επαναλήψεις είναι τόσο ακριβές όσο και χρονοβόρες. Η επανάληψη προσφέρει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα. Πρώτα από όλα, τα επιπρόσθετα δοκιμαστικά δεδομένα επιβεβαιώνουν τα αρχικά. Επιπλέον, αν οι παράγοντες θορύβου ποικίλουν κατά τη διάρκεια της ημέρας, τότε η επανάληψη των δοκιμών μπορεί να αποκαλύψει τις επιρροές. Τέλος, τα επιπρόσθετα δεδομένα μπορούν να αναλυθούν για διακύμανση γύρω από ένα στόχο. Ένα πλεονέκτημα του σχεδιασμού του σχεδιασμού πειραμάτων για τους σκοπούς αυτής της εργασίας είναι ότι τα αποτελέσματά μας όσες φορές και να επαναληφθούν δε θα παρουσιάσουν μεταβλητότητα καθώς οι συνθήκες του πειράματος είναι πάντα ελεγχόμενες (υπολογιστική ρευστομηχανική).

Ο Taguchi προτείνει το λόγο S/N (Signal-to-Noise) για την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Ο λόγος S/N γενικά αντιπροσωπεύει το βαθμό απόδοσης και είναι ένα μέτρο ποιότητας συνδεδεμένο με τη συνάρτηση κόστους. Μεγιστοποιώντας τον, οι απώλειες που σχετίζονται με τη διαδικασία ελαχιστοποιούνται. Ο λόγος S/N καθορίζει το πιο εύρωστο πακέτο λειτουργικών συνθηκών από τη διακύμανση στα αποτελέσματα. Οι πειραματικές παρατηρήσεις μετατρέπονται σε λόγο S/N. Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για το λόγο S/N ανάλογα με την επιθυμητή κατεύθυνση των αποτελεσμάτων:

➤ Smaller the better: $\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} (\sum y^2)$

➤ Nominal the better: $\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \left(\sum \frac{\bar{Y}}{S_y^2} \right)$

➤ Bigger the better: $\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \left(\sum \frac{1}{y^2} \right)$

Όπου \bar{Y} είναι η μέση τιμή των παρατηρούμενων δεδομένων, S_y^2 είναι η μεταβλητότητα του y , n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων και y είναι τα παρατηρούμενα δεδομένα.

2.2 Σχεδιασμός πειράματος

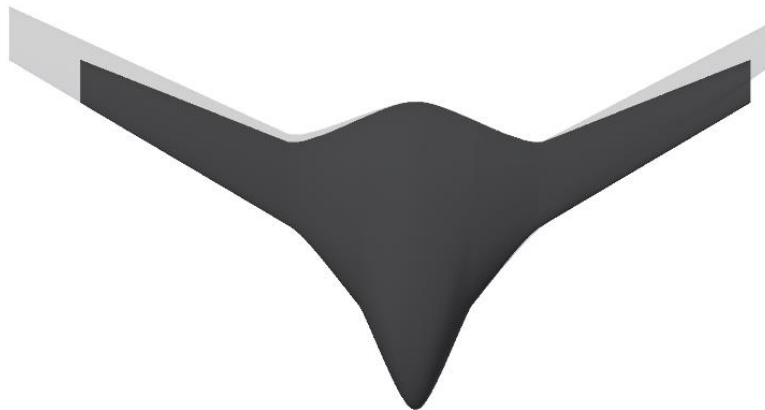
Ως παράμετροι σχεδιασμού ορίζονται η γωνία οπισθόκλισης (A), το διάταμα (B) και ο λόγος εγκλεισμού (C). Κάθε παράγοντας υπό μελέτη έχει 3 επίπεδα (Πίνακας 2). Η γεωμετρία που θα μελετηθεί παρουσιάζεται στην Εικόνα 3 (Panagiotou, 2018). Αριστερά γίνεται σύγκριση 2 διατάξεων με διαφορετικό λόγο εγκλεισμού, ενώ δεξιά με διαφορετική γωνία οπισθόκλισης

Πίνακας 1 Σύγκριση του αριθμού πειραμάτων πλήρως παραγοντικού σχεδιασμού με τον αριθμό πειραμάτων που προκύπτουν με τη μέθοδο Taguchi

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	ΕΠΙΠΕΔΑ	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	
		ΠΛΗΡΩΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ TAGUCHI
2	2	4 (2 ²)	4
3	2	8 (2 ³)	4
4	2	16 (2 ⁴)	8
7	2	128 (2 ⁷)	8
15	2	32.768 (2 ¹⁵)	16
4	3	81 (3 ⁴)	9

Πίνακας 2 Παράμετροι και τιμές που αντιστοιχούν στα επίπεδά τους

Παράγοντες	Επίπεδα		
	I	II	III
A, Γωνία οπισθόκλισης (C/4)	32.5	35	37.5
B, Διάταμα	7.5	8	8.5
C, Λόγος εγκλεισμού	0.4	0.45	0.5



Εικόνα 3 Γεωμετρία BWB υπό μελέτη

Πίνακας 3 Συνδυασμός επιπέδων των παραγόντων με την L₉ διάταξη

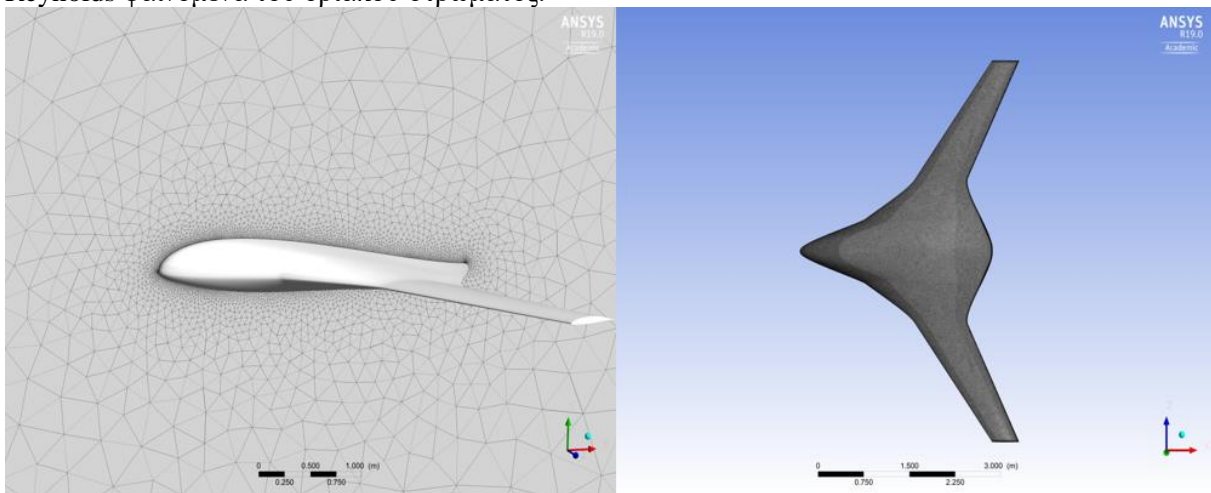
EXPERIMENT RUN	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Ο ορθογώνιος πίνακας που προκύπτει για μελέτη, σύμφωνα με τη μέθοδο Taguchi, παρουσιάζεται στον Πίνακα 3. Για την εκτέλεση του πειράματος πραγματοποιούνται αναλύσεις CFD για κάθε πλατφόρμα που δίνουν αυτοί οι συνδυασμοί, σε 4 γωνίες προσβολής, έτσι ώστε να εξαχθεί η πολική αντίσταση της κάθε πλατφόρμας. Αν έπρεπε να μελετηθεί μια πλήρως παραγοντική διάταξη, 27 συνδυασμοί, αυτό

θα απαιτούσε στην προκειμένη περίπτωση 108 επιλύσεις CFD, γεγονός που καθιστά το πείραμα χρονοβόρο. Με τη χρήση της μεθόδου Taguchi οι επιλύσεις αυτές μειώνονται σε 36.

2.3 Μέθοδοι υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD)

Οι αναλύσεις CFD για κάθε διάταξη έγιναν με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού ANSYS CFX (ANSYS@ Scientific Research, Release 18.1). Δημιουργήθηκε ένα μη δομημένο πλέγμα γύρω από τη γεωμετρία υπό μελέτη, αποτελούμενο από περίπου 9.500.000 υπολογιστικούς κόμβους. Επιλύθηκαν οι εξισώσεις Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), συζευγμένες με το μοντέλο τύρβης Spalart-Allmaras, έτσι ώστε να διασφαλιστεί υψηλή ακρίβεια στους υπολογισμούς των κάθετων και διατμητικών τάσεων που ασκούνται στην επιφάνεια της πτέρυγας. Η ένταση της τύρβης και ο λόγος των ιξωδών της τύρβης (eddy viscosity ratio) στην είσοδο τέθηκαν ίσα με 0.01 και 0.2 αντίστοιχα, για να προσεγγιστούν τυπικές συνθήκες πτήσης. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε ήταν χρονική ανεξάρτητη (steady-state). Για να προσομοιωθεί το οριακό στρώμα χρησιμοποιήθηκαν 20 στρώματα γύρω από το τοίχωμα του αεροχήματος, με το πρώτο να απέχει $2.5 \cdot 10^{-5}$ m από αυτό, έτσι ώστε το y^+ στο τοίχωμα να μην πάρει τιμές μεγαλύτερες του 5 και να μοντελοποιηθούν κατάλληλα τα τοπικά χαμηλού Reynolds φαινόμενα του οριακού στρώματος.



Εικόνα 4 Περιοχές πυκνώσεως

Πίνακας 4 Τιμές SNR για κάθε διάταξη και κάθε κριτήριο βελτιστοποίησης

Configuration	A	B	C	Vmax (km/h)	SNR	Stakeoff (m)	SNR	GTOW (lbs)	SNR
1	1	1	1	254	48.10	653	-56.30	414	-52.35
2	1	2	2	248	47.89	544	-54.71	422	-52.50
3	1	3	3	238	47.53	461	-53.27	429	-52.66
4	2	1	2	250	47.96	613	-55.75	418	-52.43
5	2	2	3	244	47.75	515	-54.24	426	-52.59
6	2	3	1	248	47.89	711	-57.03	424	-52.55
7	3	1	3	248	47.89	582	-55.30	423	-52.52
8	3	2	1	251	47.99	662	-56.42	421	-52.49
9	3	3	2	245	47.78	617	-55.81	429	-52.65

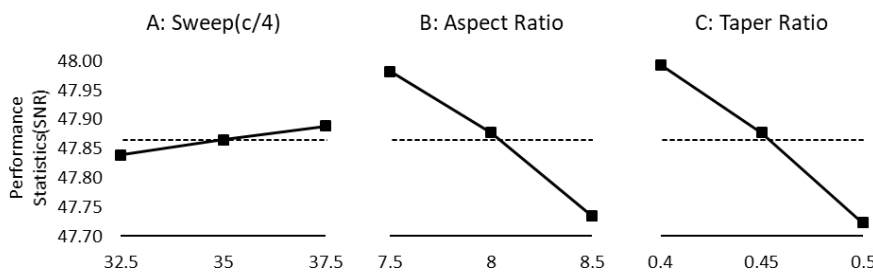
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται χρήση του λόγου S/N (Signal-to-Noise), όπως προτείνει ο Taguchi (Madhav S. Phadke, 1989). Ως κριτήρια βελτιστοποίησης έχουν επιλεγθεί η μέγιστη ταχύτητα, η απόσταση απογείωσης και το μέγιστο βάρος απογείωσης. Από τις επιλύσεις CFD εξάγεται η πολική αντίσταση της κάθε διάταξης και στη συνέχεια εκτιμώνται τα χαρακτηριστικά απόδοσης. Ακολουθεί ο υπολογισμός του SNR.

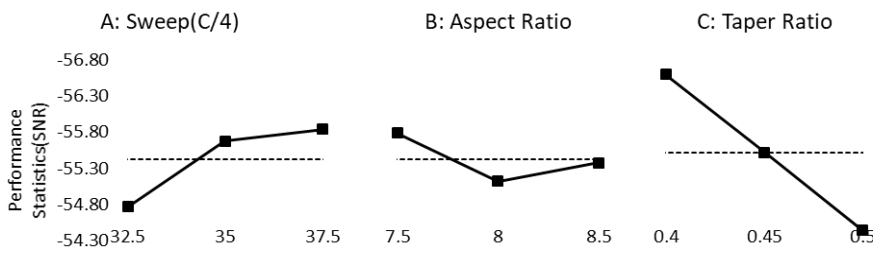
Από την εκτέλεση του πειράματος προκύπτει ότι ο μέσος SNR για τη μέγιστη ταχύτητα, το διάδρομο απογείωσης και το μέγιστο βάρος απογείωσης είναι 47.86 dB, -52.43 dB και -52.53 dB αντίστοιχα. Για τη βελτιστοποίηση της μέγιστης ταχύτητας χρησιμοποιείται ο “Bigger is better” ορισμός του SNR, ενώ για το διάδρομο απογείωσης και το βάρος απογείωσης έχει επιλεγθεί ο ορισμός “Smaller is Better”. Ο συνδυασμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών με το μέγιστο λόγο S/N αποτελεί τη βέλτιστη λύση. Στις Εικόνες 5, 6 και 7 παρουσιάζονται οι καμπύλες SNR για κάθε κριτήριο βελτιστοποίησης. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι οι βέλτιστοι συνδυασμοί για τη μέγιστη ταχύτητα, το διάδρομο απογείωσης και το βάρος απογείωσης αντίστοιχα είναι οι [A3 (37.5°), B1 (7.5), C1 (0.4)], [A1 (32.5°), B2 (8), C3 (0.5)] και [A1 (32.5°), B1 (7.5), C1 (0.4)], αντίστοιχα (Πίνακας 5).

Πίνακας 5 Βέλτιστοι συνδυασμοί παραμέτρων για κάθε κριτήριο βελτιστοποίησης

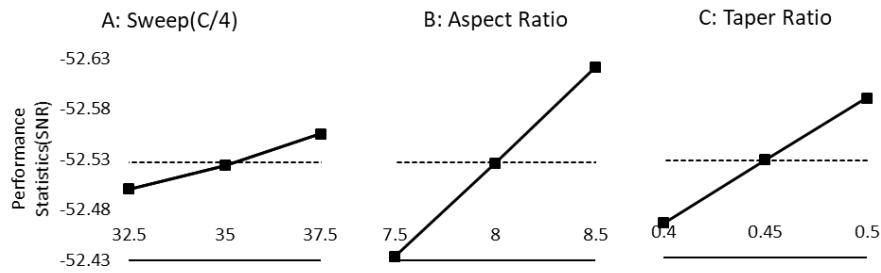
	Parameters		
	A (Sweep _{c/4})	B (AR)	C (λ)
	<i>V_{max}</i>		
Optimum level	3	1	1
Optimum value	37.5°	7.5	0.4
	<i>S_{takeoff}</i>		
Optimum level	1	2	3
Optimum value	32.5°	8	0.5
	<i>GTOW</i>		
Optimum level	1	1	1
Optimum value	32.5°	7.5	0.4



Εικόνα 5 Επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού στη μέγιστη ταχύτητα πτήσης

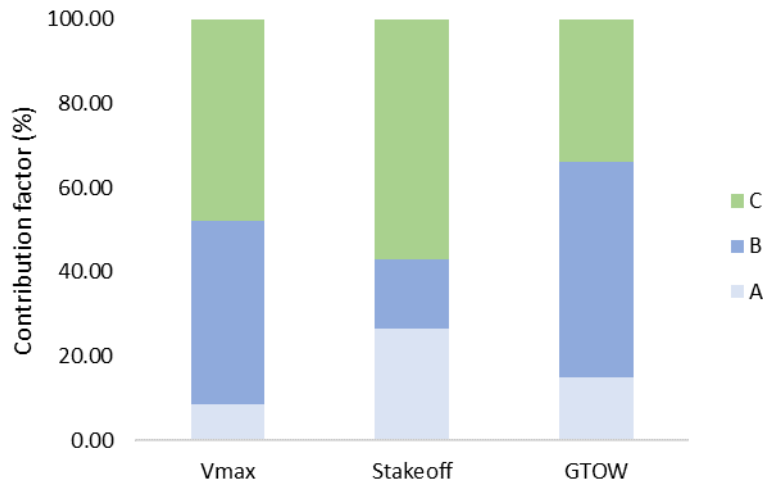


Εικόνα 6 Επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού στο διάδρομο απογείωσης



Εικόνα 7 Επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού στο μέγιστο βάρος απογείωσης

Ακόμη καθορίζεται η συνεισφορά που έχει η κάθε παράμετρος ελέγχου στο κάθε χαρακτηριστικό απόδοσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8. Η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο τη μέγιστη ταχύτητα είναι ο λόγος εγκλεισμού, ομοίως και το διάδρομο απογείωσης, ενώ τη μεγαλύτερη συνεισφορά στο μέγιστο βάρος απογείωσης έχει το διάταμα, με συντελεστή συνεισφοράς 47.69%, 57.08% και 51.09%, αντίστοιχα.



Εικόνα 8 Συνεισφορά της κάθε παραμέτρου σε κάθε χαρακτηριστικό απόδοσης

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εν κατακλείδι, στην παρούσα εργασία καθορίστηκαν οι βέλτιστες γεωμετρικές παράμετροι ενός μη-επανδρωμένου αεροχήματος BWB. Η βελτιστοποίηση έγινε με τη χρήση του σχεδιασμού πειραμάτων (DOE), και πιο συγκεκριμένα της μεθόδου Taguchi. Τα χαρακτηριστικά απόδοσης που επιλέχθηκαν ως κριτήρια βελτιστοποίησης είναι η μέγιστη ταχύτητα, ο διάδρομος απογείωσης και το μέγιστο βάρος απογείωσης. Οι γεωμετρικοί παράμετροι που επιλέχθηκαν ως παράμετροι ελέγχου του πειράματος είναι η γωνιά οπισθόκλισης, το διάταμα και ο λόγος εγκλεισμού. Τα βασικά συμπεράσματα μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων ελέγχου για τη βελτιστοποίηση της μέγιστης ταχύτητας πτήσης είναι $A_3B_1C_1$ και οι τιμές των βέλτιστων επιπέδων τους 37.5°, 7.5 και 0.4, αντίστοιχα. Επίσης, το διάταμα είναι η παράμετρος με τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη μέγιστη ταχύτητα.
2. Όσον αφορά το διάδρομο απογείωσης η παράμετρος που τον επηρεάζει περισσότερο από όλους είναι ο λόγος εγκλεισμού, ενώ ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων ελέγχου για την ελαχιστοποίηση του διαδρόμου απογείωσης είναι $A_1B_2C_3$ και οι τιμές των βέλτιστων επιπέδων τους 32.5°, 8 και 0.5, αντίστοιχα.
3. Τέλος, ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων ελέγχου για την ελαχιστοποίηση του διαδρόμου απογείωσης είναι $A_1B_2C_3$ και οι τιμές των βέλτιστων επιπέδων τους 32.5°, 8 και 0.5, αντίστοιχα. Η πιο καθοριστική παράμετρος ελέγχου είναι το διάταμα.

4. Με τη μέθοδο Taguchi δεν είναι αναγκαίο να μελετήσουμε και τους 27 συνδυασμούς που μας δίνει ο συνδυασμός των παραμέτρων ελέγχου και των επιπέδων τους σε ένα πλήρως παραγοντικό πείραμα. Αυτό το γεγονός εξοικονομεί αρκετό χρόνο, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό στη φάση του προκαταρκτικού σχεδιασμού.

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. D., Aircraft performance and design, WCB/McGraw-Hill, 1999.

Anderson, J. D., Fundamentals of aerodynamics, McGraw-Hill, 1984.

Balu R., Ulaganathan, S. and Asproulis, N. (2012). "Effect of variogram types on surrogate model based optimisation of aircraft wing shapes", Procedia engineering 38, p.2713.

DeLoach R., Cler D. and Graham A., "Fractional factorial experiment designs to minimize configuration changes in wind tunnel testing.", in 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 2002.

Chamoli S. (2015). "A Taguchi approach for optimization of flow and geometrical parameters in a rectangular channel roughened with V down perforated baffles", Case Studies in Thermal Engineering 5, p.59.

Haghighat S., Martins J. R. and Liu Hugh H.T. (2012), "Aeroservoelastic design optimization of a flexible wing", Journal of Aircraft 49, p.432.

Liebeck R. H. (2004), "Design of the blended wing body subsonic transport", Journal of aircraft 41, p.10.

Lyu Z. and Martins J. R. (2014), "Aerodynamic design optimization studies of a blended-wing-body aircraft", Journal of Aircraft 51, p.1604.

Overmeyer A. D., Martin P. B., Tanner P. E. and Commo S. A., "Case Studies for the Statistical Design of Experiments Applied to Powered Rotor Wind Tunnel Tests", in 31st AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 2015.

Panagiotou P., Fotiadis-Karras S. and Yakinthos K. (2018), "Conceptual design of a Blended Wing Body MALE UAV", Aerospace Science and Technology 73, p.32.

Panagiotou P. and Yakinthos, K., “Parametric aerodynamic study of Blended-Wing-Body platforms at low subsonic speeds for UAV applications”, in 35th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2017.

Phadke M. S., Quality engineering using robust design, AT & T Bell Laboratories, PTR Prentice Hall Inc, New Jersey, 1989.

Qin N., Vavalle A., Le Moigne A., Laban M., Hackett K., and Weinerfelt P. (2004), “Aerodynamic considerations of blended wing body aircraft”, Progress in Aerospace Sciences 40, p.321.

Raymer, D. P., Aircraft design: a conceptual approach, Washington, D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1989.

Roskam, J., Airplane design, Roskam Aviation and Engineering Corp., 1985.

Roy, R. K., A primer on the Taguchi method, Society of Manufacturing Engineers, 2010.

Siouris S., & Qin N. (2007). “Study of the effects of wing sweep on the aerodynamic performance of a blended wing body aircraft”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering 221, p.47.

Thakre A. A. (2013), “Optimization of milling parameters for minimizing surface roughness using Taguchi’s approach”, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering 3, p.226.

Vankanti V. K and Ganta V. (2014). “Optimization of process parameters in drilling of GFRP composite using Taguchi method”, Journal of Materials Research and Technology 3, p.35.

AERODYNAMIC DESIGN, SIZING AND OPTIMIZATION OF A BLENDED WING BODY UAV

ABSTRACT

In the present study a parametrical optimization of a Blended Wing Body (BWB) UAV with the use of design of experiments (DOE) and more specifically Taguchi method is presented. The purpose of the experimental study is to define the optimum combination of the basic geometrical characteristics of a BWB configuration, so that its performance is maximized. The effect of 3 control factors, such as sweep, aspect ratio and taper ratio, was studied, which have 3 levels each. In the Taguchi experiment design method, maximum velocity, takeoff runway and gross takeoff weight are selected as optimization parameters. An L_9 orthogonal array was used for the design of the experiment plan. For each experimental configuration Computational Fluid Dynamics simulations are conducted, so that the drag polar of each configuration is calculated and the performance characteristics are assessed. The goal of Taguchi analysis optimization method is to maximize the maximum flight velocity and minimize takeoff runway and gross takeoff weight. The optimum combination of control factors and their levels for optimization of maximum velocity, takeoff runway and gross takeoff weight is $A_3B_1C_1$, $A_1B_2C_3$ και $A_1B_1C_1$, respectively.