

Ορολογία

AFP	Automated fiber Placement	Αυτόματη τοποθέτηση ινών
CAE	Computational Aeroelasticity	Υπολογιστική Αεροελαστικότητα
CFD	Computational Fluid Dynamics	Υπολογιστική Ρευστομηχανική
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer	Πολυμερές με ίνες άνθρακα
CLPT	Classical Laminated Plate Theory	Κλασσική θεωρία πολύστρωτης πλακός
DLM	Doublet Lattice Method	Αεροδυναμική Μέθοδος πλέγματος διπόλων
FEM	Finite Element Method	Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων
FSI	Fluid Structure Interaction	Αλληλεπίδραση Στερεού με ρευστό
UD	Unidirectional	Μονοδιευθυντικο Ινώδες Σύνθετο
MTOW	Maximum Take-off Weight	Μέγιστο Βάρος Απογείωσης
VAT	Variable angle tow	Σύνθετο με μεταβλητή διεύθυνση ινών
VSL	Variable Stiffness Laminate	Πολύστρωτο μεταβλητής Δυσκαμψίας

Περίληψη

Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στην αεροδιαστημική βιομηχανία, εξαιτίας των εξαιρετικών τους μηχανικών ιδιοτήτων για ελαφρές κατασκευές και την επιπλέον ευελιξία που δίνουν στον σχεδιασμό. Παραδοσιακά, στις υψηλών απαιτήσεων εφαρμογές χρησιμοποιούνται πολύστρωτες δομές με μονοδιευθυντικές στρώσεις από ινώδες σύνθετο υλικό. Ωστόσο, με την εισαγωγή των αυτομάτων μηχανών τοποθέτησης ινών (AFP), πλέον είναι δυνατή η κατασκευή συνθέτων με ίνες που ακολουθούν καμπύλες διαδρομές εντός της κάθε στρώσης. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως “tow-steering” και τα αντίστοιχα σύνθετα ως “σύνθετα μεταβλητής δυσκαμψίας”.

Τα σύνθετα μεταβλητής δυσκαμψίας προσδίδουν ακόμα μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό δομών, εκμεταλλευόμενα την ανισοτροπία των ινών συνθέτων για βελτίωση της δομικής συμπεριφοράς, χωρίς επιπλέον προσθήκη βάρους. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα των προβλημάτων αεροελαστικότητας, δεν είναι ούτε προφανές ούτε εύκολο να βρεθούν οι βέλτιστες διευθύνσεις των ινών. Για αυτό, επιβάλλεται συχνά η χρήση προηγμένων υπολογιστικών μεθόδων και αλγόριθμων βελτιστοποίησης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναπτύσσεται ένα πλαίσιο δομικής βελτιστοποίησης για μια πτέρυγα υψηλού εκπετάσματος, με σκοπό να γίνει σύγκριση των συμβατικών και μεταβλητής δυσκαμψίας συνθέτων και αξιολόγηση των πιθανών οφελών της χρήσης των τελευταίων.

Ανάπτυξη Μοντέλου Πτέρυγας

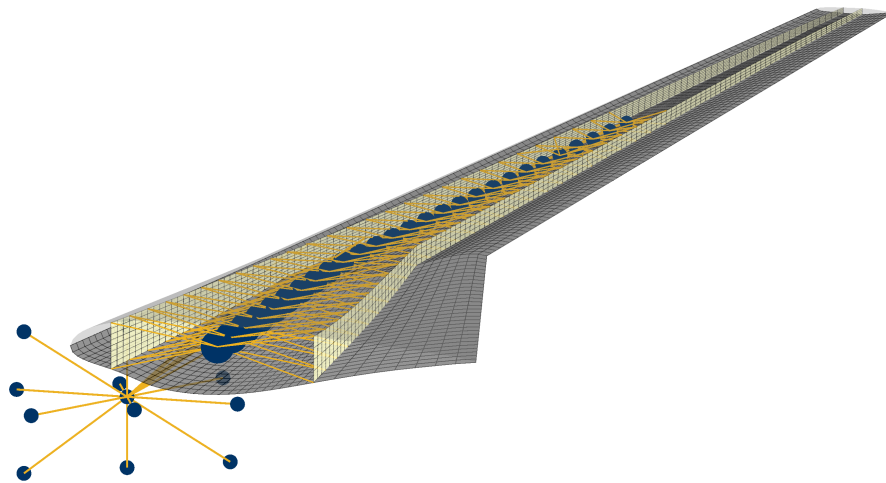
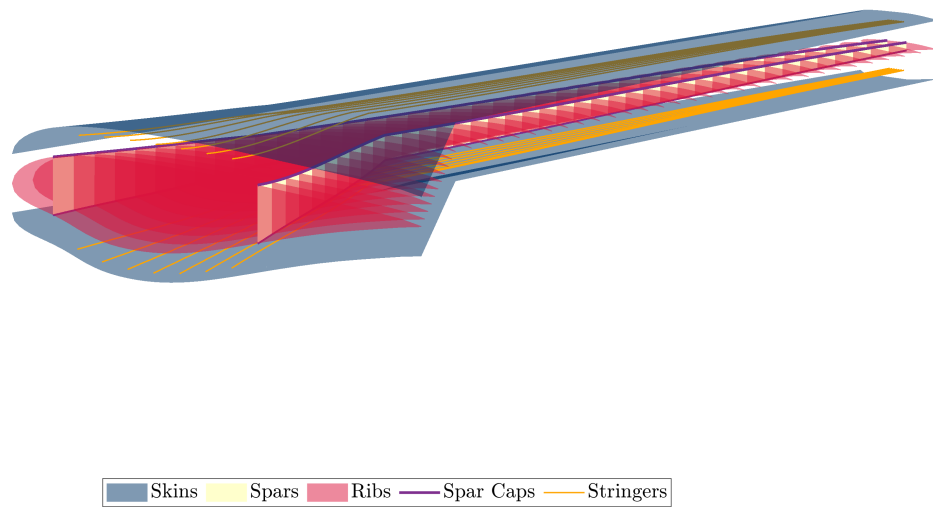
Η γεωμετρία της πτέρυγας που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία είναι το αεροελαστικό μοντέλο αναφοράς uCRM-13.5, με $AR=13.5$. Η εσωτερική γεωμετρία της πτέρυγας αποτελείται από 41 ισοκατανεμημένες νευρώσεις (ribs), μία μπροστινή και μία οπίσθια δοκό (spar) μαζί με spar caps (πέλματα/καπάκια), καθώς και 7 ζευγάρια από stringers (ενισχυτικές δοκίδες/ράβδοι) στην πάνω και κάτω επιδερμίδα (skin) της πτέρυγας και ενδιάμεσα από τις δοκούς. Η γεωμετρία της πτέρυγας μαζί με τα επιμέρους μέλη της παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.

Για το δομικό μοντέλο της πτέρυγας χρησιμοποιείται η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. Το μοντέλο αναπτύσσεται στο Nastran και η πτέρυγα διακριτοποιείται σε ένα σύνολο από 16.355 Πεπερασμένα Στοιχεία. Οι ράβδοι ενίσχυσης και τα πέλματα των δοκών προσομοιώνονται με στοιχεία δοκού ορθογωνικής διατομής, ενώ τα υπόλοιπα μέλη με στοιχεία κελύφους που είναι πιο ακριβή.

Όσον αφορά τα υλικά, όλη η εσωτερική δομή της πτέρυγας θεωρείται ότι είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο αεροδιαστημικών εφαρμογών, ενώ η επιδερμίδα είναι πολύστρωτη διάταξη από σύνθετο υλικό CFRP, πίο συγκεκριμένα το Hexcel IM7/8552 UD.

Το μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων περιλαμβάνει επίσης και συγκεντρωμένες μάζες που αντιστοιχούν στην μάζα του κινητήρα του αεροσκάφους (7.5 τόνοι) καθώς και σε μάζα καυσίμου ίση με 55 τόνους. Οι συγκεντρωμένες μάζες ενώνονται στο δομικό μοντέλο με άκαμπτες ενώσεις, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.

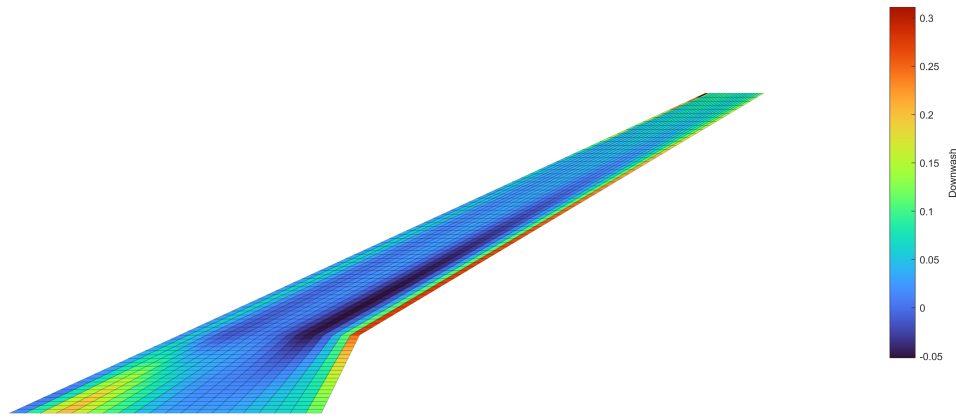
Σχήμα 1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του uCRM-13.5



Σχήμα 2: Συγκεντρωμένες μάζες για κινητήρα και καύσιμο του uCRM-13.5

Το αεροδυναμικό μοντέλο της πτέρυγας αναπτύσσεται επίσης στο Nastran μέσω της μεθόδου DLM. Η μέθοδος DLM αποτελεί μια αριθμητική μέθοδο του προβλήματος αεροδυναμικής επιφάνειας, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για αεροδυναμικά φορτία ταλαντωτικής μορφής, όπως έχουμε στην περίπτωση του περυγισμού. Για την χρήση αυτής της μεθόδου, η αεροδυναμική επιφάνεια της πτέρυγας προσομοιώνεται ως 2 επίπεδες επιφάνειες με ένα σύνολο από 1600 αεροδυναμικά στοιχεία. Για να αυξηθεί η ακρίβεια του μοντέλου, εισάγονται διορθώσεις της τοπικής γωνίας πρόσπτωσης για να ληφθεί υπόψη η καμπυλότητα και η συστολή της πραγματικής γεωμετρίας της πτέρυγας. Οι διορθώσεις αυτές παρουσιάζονται πάνω στα αεροδυναμικά στοιχεία στην Εικόνα 3.

Το τελευταίο βήμα για την ολοκλήρωση του μοντέλου της πτέρυγας, είναι η σύζευξη του μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων με το αεροδυναμικό μοντέλο. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα infinite plate spline στο Nastran, το οποίο επικοινωνεί δυνάμεις και μετατοπίσεις μεταξύ του δομικού και του αεροδυναμικού πλέγματος.



Σχήμα 3: Διόρθωση τοπικής γωνίας πρόπτωσης για το αεροδυναμικό μοντέλο της πτέρυγας

Ελαχιστοποίηση Μάζας Πτέρυγας με Συμβατικά Σύνθετα

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε παραπάνω, θα χρησιμοποιηθεί στις επόμενες παραγράφους για την βελτιστοποίηση της πτέρυγας. Για τους σκοπούς της βελτιστοποίησης, η πτέρυγα χωρίζεται σε 6 περιοχές κατά το εκπέτασμα της, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.



Σχήμα 4: Περιοχές για την βελτιστοποίηση της πτέρυγας

Σε αυτήν την παράγραφο θα γίνει η ελαχιστοποίηση της μάζας της πτέρυγας με χρήση συμβατικών συνθέτων. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται είναι ο MIDACO, που αποτελεί έναν gradient-free εξελικτικό αλγόριθμο που μιμείται την συμπεριφορά των βιολογικών μυρμηγκιών.

Οι μεταβλητές σχεδιασμού του συγκεκριμένου προβλήματος βελτιστοποίησης αφορούν την διαστασιολόγηση των διαφόρων μελών της δομής της πτέρυγας. Πιο συγκεκριμένα, για τις δοκούς και τις νευρώσεις από αλουμίνιο που μοντελοποιούνται με στοιχεία κελύφους, ορίζεται μια μεταβλητή σχεδιασμού για κάθε περιοχή. Έπειτα για τις ενισχυτικές ράβδους και τα πέλματα των δοκών, που μοντελοποιούνται από μονοδιάστατα στοιχεία δοκού ορθογωνικής διατομής, ορίζεται μια μεταβλητή σχεδιασμού για το πάχος σε κάθε περιοχή, ενώ το πλάτος και το ύψος της διατομής θεωρούνται ίσα και ορίζονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Τιμές για το πλάτος και ύψος των διατομών των στοιχείων δοκού

	Περιοχή 1	Περιοχή 2	Περιοχή 3	Περιοχή 4	Περιοχή 5	Περιοχή 6
Πλάτος Πελμάτων Δοκών	12 cm	12 cm	9 cm	7 cm	4 cm	1 cm
Πλάτος Ενισχυτικών Ράβδων	13 cm	13 cm	9 cm	7 cm	4 cm	1 cm

Η επιδερμίδα της πτέρυγας είναι πολύστρωτη δομή, και έτσι απαιτείται μια διαφορετική παραμετροποίηση του πάχους της. Στην παρούσα εργασία, θεωρούμε ότι η πολύστρωτη διάταξη της επιδερμίδας είναι συμμετρική και ισοσταθμισμένη και ακολουθεί τον γενικό κώδικα $[(45_{n_{45}}/0_{n_0}/-45_{n_{-45}}/90_{n_{90}})_S]_S$. Οι μεταβλητές σχεδιασμού για την πολύστρωτη διάταξη κάθε περιοχής και ξεχωριστά για την πάνω και κάτω επιδερμίδα είναι οπότε 3. Αυτές είναι ο αριθμός των στρώσεων σε κάθε προσανατολισμό 0° , 90° και $\pm 45^\circ$ στην πολύστρωτη διάταξη, όπως ορίζεται από τον κωδικα της πολύστρωτης. Οι στρώσεις με προσανατολισμό 0° θεωρούνται παράλληλες με το χείλος πρόπτωσης της πτέρυγας.

Ο συνολικός αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού για το πρόβλημα βελτιστοποίησης ανέρχεται τελικά σε 60, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Μεταβλητές Σχεδιασμού

Μεταβλητή Σχεδιασμού	Κατώτατο Όριο	Ανώτατο Όριο	Τύπος	Σύνολο στο Μοντέλο
Πάχος Δοκού	1 mm	25 mm	Συνεχής	6
Πάχος Νεύρωσης	1 mm	35 mm	Συνεχής	6
Πάχος Εν. Ράβδου	1 mm	20 mm	Συνεχής	6
Πάχος Πέλματος	1 mm	20 mm	Συνεχής	6
Αριθμός στρώσεων 0°	0	10	Ακέραια	12
Αριθμός στρώσεων 90°	0	10	Ακέραια	12
Αριθμός στρώσεων $\pm 45^\circ$	1	10	Ακέραια	12

Για να ολοκληρωθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης, θα πρέπει να ορίσουμε και κάποιους περιορισμούς. Οι κρίσιμες συνθήκες για τις οποίες θα ελεγχθεί η πτέρυγα, είναι μια μανούβρα ανόδου φόρτισης 2.5g, καθώς και η δυναμική ευστάθεια σε πτερυγισμό στην διηχητική περιοχή.

Ξεκινώντας με την πρώτη περίπτωση, θεωρούμε ότι το μέγιστο βάρος απογείωσης για το αεροσκάφος ανέρχεται σε 297 τόνους. Η άντωση που παράγει η πτέρυγα οπότε θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αντιστοιχεί σε 2.5 MTOW κατά το ήμισυ (συμμετρικό μοντέλο). Για να επτευχθεί αυτό, βρέθηκε ότι μια κλίση 4.5° είναι απαραίτητη. Οι περιορισμοί του προβλήματος βελτιστοποίησης που αντιστοιχούν σε αυτήν την κρίσιμη φόρτιση, είναι η στατική αντοχή όλων των μελών της πτέρυγας, καθώς και η ελαστική ευστάθεια τους σε λυγισμό.

Για τον έλεγχο της στατικής αντοχής των μελών, είναι βολικό να χρησιμοποιήσουμε την συνάρτηση KS, που συμπτύσσει όλες τις τιμές των δεικτών αστοχίας σε μία τιμή, η οποία πρέπει να είναι κάτω από την μονάδα για να εξασφαλίσουμε ότι δεν έχει αστοχήσει κάποιο μέλος της πτέρυγας. Επιπλέον, χρησιμοποιούμε έναν συντελεστή ασφαλείας 1.5 και για την στατική αντοχή αλλά και για την πρώτη ιδιοτιμή λυγισμού, η οποία πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1.5 για ένα αποδεκτό σχεδιασμό.

Τέλος, όσον αφορά την ευστάθεια σε πτερυγισμό, ορίζουμε ότι η ταχύτητα πτερυγισμού που προκύπτει θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1.2 φορές την dive velocity του αεροσκάφους, η οποία λαμβάνεται ως 221 m/s EAS.

Μια σύνοψη των περιορισμών του προβλήματος ελαχιστοποίησης της μάζας της πτέρυγας παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Σύνοψη Περιορισμών Προβλήματος Βελτιστοποίησης

Τύπος Περιορισμού	Οριακή Τιμή
KS(FI), Επιδερμίδα	≤ 1
KS(FI), Δοκοί	≤ 1
KS(FI), Νευρώσεις	≤ 1
KS(FI), Πέλματα Δοκών	≤ 1
KS(FI), Ενισχυτικές Ράβδοι	≤ 1
Πρώτη Ιδιοτιμή Λυγισμού	≥ 1.5
Ταχύτητα Πτερυγισμού	$\geq 1.2 \cdot V_{dive}$

Η μάζα της πτέρυγας στην οποία κατέληξε η βελτιστοποίηση είναι **16920 kg**, ενώ οι κρίσιμοι περιορισμοί είναι ο λυγισμός της άνω επιδερμίδας και η αστοχία των πελμάτων δοκών, όπως φαίνεται και στον πίνακα 4, που δίνει μια σύνοψη για τα αποτελέσματα των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης.

Οι τιμές για τα πάχη των μελών παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

Μάζα Πτέρυγας	16920 kg
KS(FI), Άνω Επιδερμίδα	0.945
KS(FI), Κάτω Επιδερμίδα	0.985
KS(FI), Δοκοί	0.959
KS(FI), Νευρώσεις	0.856
KS(FI), Πέλματα Δοκών	1.007
KS(FI), Ενισχυτικές Ράβδοι	1.000
Πρώτη Ιδιοτιμή Λυγισμού	1.492
Ταχύτητα Πτερυγισμού	474 m/s

Πίνακας 5: Αποτελέσματα για πάχη μελών αλουμινίου για την βέλτιστη δομή

	Περιοχή 1	Περιοχή 2	Περιοχή 3	Περιοχή 4	Περιοχή 5	Περιοχή 6
Πάχος δοκών	6.8 mm	7 mm	4.7 mm	2.5 mm	1.5 mm	1 mm
Πάχος νευρώσεων	24.8 mm	16.6 mm	5.3 mm	2.8 mm	2 mm	1.5 mm
Πάχος πελμάτων δοκών	8.5 mm	10 mm	5.8 mm	4 mm	2 mm	1 mm
Πάχος εν. ράβδων	9.8 mm	14.6 mm	6.5 mm	4 mm	3.8 mm	1 mm

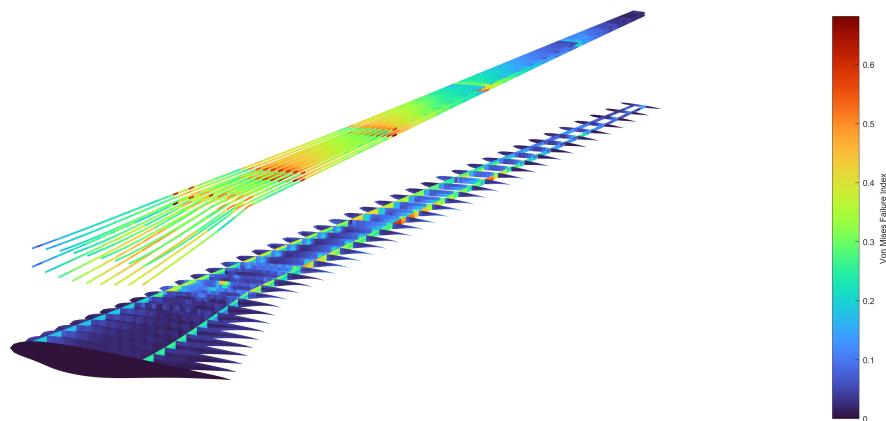
Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε την αναμενόμενη μείωση του πάχους κατά το εκπέτασμα της πτέρυγας προς το άκρο της, ενώ η δεύτερη περιοχή που εμπεριέχει το σπάσιμο της γεωμετρίας της πτέρυγας φαίνεται να απαιτεί το περισσότερο υλικό, κάτι που είναι χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης πτέρυγας. Επιπλέον, η άνω επιδερμίδα χρειάζεται περισσότερες στρώσεις σε σχέση με την κάτω, ειδικά κοντά την πάκτωση, εξαιτίας των υψηλών θλιπτικών τάσεων που ασκούνται σε αυτήν που οδηγούν σε φαινόμενα λυγισμού. Σημαντικό για αυτόν τον περιορισμό είναι και το πάχος των νευρώσεων στην πρώτη περιοχή.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα για πολύστρωτες διατάξεις επιδερμίδας για την βέλτιστη δομή

Άνω επιδερμίδα						
	Περιοχή 1	Περιοχή 2	Περιοχή 3	Περιοχή	Περιοχή	Περιοχή
Αριθμός στρώσεων 0°	7	5	3	1	2	1
Αριθμός στρώσεων 90°	10	2	3	4	2	1
Αριθμός στρώσεων $\pm 45^\circ$	4	7	7	5	3	3
Σύνολο στην διάταξη	100	84	80	60	40	32

Κάτω επιδερμίδα						
	Περιοχή 1	Περιοχή 2	Περιοχή 3	Περιοχή	Περιοχή	Περιοχή
Αριθμός στρώσεων 0°	4	7	5	3	0	0
Αριθμός στρώσεων 90°	2	4	3	1	1	1
Αριθμός στρώσεων $\pm 45^\circ$	2	5	3	1	3	2
Σύνολο στην διάταξη	40	84	56	24	28	20

Οι κατανομές των τάσεων (σε μορφή δεικτών αστοχίας) στην πτέρυγα παρουσιάζονται στην Εικόνα 5 για την εσωτερική δομή και στην Εικόνα 6 για την επιδερμίδα της πτέρυγας.



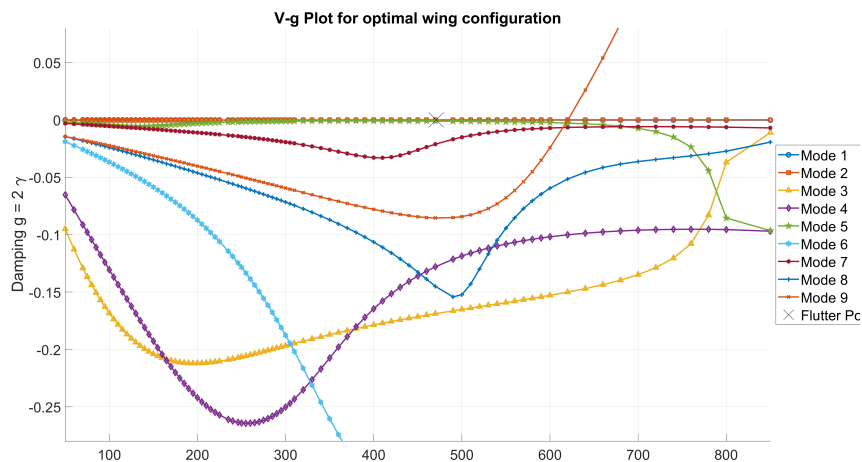
Σχήμα 5: Κατανομή τάσεων στα μέλη της εσωτερικής δομής της πτέρυγας (αλουμίνιο)

Από τις κατανομές των τάσεων παρατηρούμε συγκεντρώσεις τάσεων αρχικά στα σύνορα των περιοχών βελτιστοποίησης, κάτι που είναι λογικό και οφείλεται στην απότομη αλλαγή του πάχους των διατομών σε εκείνα τα σημεία. Επιπλέον, υπάρχουν συγκεντρώσεις τάσεων στο σπάσιμο της γεωμετρίας της πτέρυγας, κάτι που δεν οφείλεται στην διακριτοποίηση της βελτιστοποίησης, αλλά στην πραγματική γεωμετρία της πτέρυγας. Αυτό είναι μάλιστα και το σημείο στο οποίο παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τάσεις στην πτέρυγα, με τους περιορισμούς αντοχής να είναι ενεργοί.

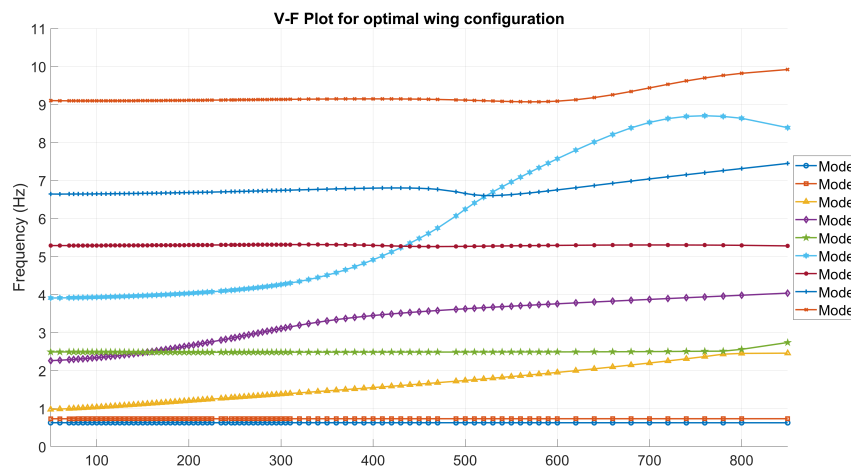
Όσον αφορά την ανάλυση λυγισμού, η πρώτη ιδιομορφή λυγισμού εμφανίζεται στην πρώτη περιοχή της άνω επιδερμίδας με μια ιδιοτιμή 1.492. Η ιδιοτιμή παραβιάζει τον περιορισμό του 1.5, ωστόσο θεωρείται αποδεκτή εξαιτίας της ανοχής που έχει οριστεί κατά την βελτιστοποίηση, που είναι της τάξης του 0.01. Τέλος, η ταχύτητα πτερυγισμού για αυτήν την δομή βρίσκεται ως 474 m/s, ενώ τα διαγράμματα V-g και V-F παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.



Σχήμα 6: Κατανομή τάσεων στην άνω (αριστερά) και κάτω (δεξιά) επιδερμίδα



(α') Διάγραμμα V-g



(β') Διάγραμμα V-F

Σχήμα 7: Διαγράμματα V-g και V-F για την βέλτιστη δομή με steering

Από τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ότι η ιδιομορφή που γίνεται ασταθής είναι η δεύτερη, η οποία είναι και η πρώτη χαμπτική, σε ταχύτητα 474 m/s και συχνότητα 0.731 Hz. Η ένατη ιδιομορφή γίνεται επίσης ασταθής και μάλιστα πιο βίαια, ωστόσο σε αρκετά μεγαλύτερη ταχύτητα.

Ελαχιστοποίηση Μάζας Πτέρυγας με Σύνθετα Μεταβλητής Δυσκαμψίας

Σε αυτήν την παράγραφο θα ασχοληθούμε ξανά με την ελαχιστοποίηση της μάζας της πτέρυγας, ωστόσο αντί για συμβατικά σύνθετα, η επιδερμίδα της πτέρυγας θα θεωρείται ότι κατασκευάζεται από σύνθετα μεταβλητής δυσκαμψίας, όπου οι ίνες θα επιτρέπεται να ακολουθούν κάμπυλες τροχιές κατά μήκος του εκπετάσματος.

Για να εισάγουμε κατεύθυνση ινών (**Tow-steering**) στο μοντέλο, θα πρέπει να καθορίσουμε αρχικά τις τροχιές σε κάθε στρώση της πτέρυγας. Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού μεταβλητών που θα απαιτούσε μια τέτοια παραμετροποίηση όπου η γωνία ορίζεται ξεχωριστά σε κάθε στρώση, θα ορίσουμε εναλλακτικά μια μεμονωμένη διαδρομή για την άνω και κάτω επιδερμίδα ξεχωριστά, και όλες οι στρώσεις θα θεωρείται ότι περιστρέφονται ομοιόμορφα κατά την γωνία που ορίζει σε εκείνο το σημείο, και οπότε η πολύστρωτη θα παραμένει τοπικά ειδικώς ορθότροπη. Ο αριθμός και η διάταξη των στρώσεων θα ορίζονται με τις ίδιες μεταβλητές με προηγουμένως, δηλαδή τον αριθμό των στρώσεων σε κάθε προσανατολισμό στην πολύστρωτη, ενώ πλέον θα έχουμε και μια επιπλέον μεταβλητή γωνίας περιστροφής της πολύστρωτης. Η διαδρομή των ινών θα οριστεί μέσω μιας τμηματικά γραμμικής μεταβολής της γωνίας προσανατολισμού από σύνορο σε σύνορο των 6 περιοχών στις οποίες έχει διαιρεθεί η πτέρυγα για την βελτιστοποίηση, σύμφωνα με την εξίσωση 1.

$$\theta(x) = \frac{(\theta_2 - \theta_1)x}{L} + \theta_1 \quad (1)$$

Η άνω επιδερμίδα έχει ξεχωριστές μεταβλητές από την κάτω, όπως και προηγουμένως. Το σύνολο των μεταβλητών γωνίας που προστίθενται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι 14 (7 πάνω και 7 κάτω). Τα όρια των γωνιών είναι από -45° έως 45° . Για το συγκεκριμένο πρόβλημα διατηρούνται και οι 60 μεταβλητές για το πάχος των μελών, οπότε το σύνολο των μεταβλητών σχεδιασμού είναι **70**.

Η δομή της πτέρυγας με την ελάχιστη μάζα που βρέθηκε από τον αλγόριθμο είναι **14.805 kg**, που είναι μια μείωση κατά **12.5 %** σε σχέση με την βέλτιστη δομή με συμβατικά σύνθετα που είχε βρεθεί παραπάνω. Οι κρίσιμοι περιορισμοί είναι για ακόμη μια φορά ο λυγισμός της άνω επιδερμίδας καθώς και αστοχία των πελμάτων δοκών στην δεύτερη περιοχή. Τα αποτελέσματα για τις τιμές των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης παρουσιάζονται στον πίνακα 7.

Πίνακας 7: Αποτελέσματα ελαχιστοποίησης μάζας με steering

Μάζα Πτέρυγας	14805 kg
KS(FI), Άνω Επιδερμίδα	0.605
KS(FI), Κάτω Επιδερμίδα	0.775
KS(FI), Δοκοί	0.951
KS(FI), Νευρώσεις	0.856
KS(FI), Πέλματα Δοκών	1.009
KS(FI), Ενισχυτικές Ράβδοι	0.999
Πρώτη Ιδιοτιμή Λυγισμού	1.491
Ταχύτητα πτερυγισμού	492 m/s

Οι κατανομές των τάσεων είναι ποιοτικά παρόμοιες με προηγουμένως, με τις μέγιστες τάσεις να εμφανίζονται στο σπάσιμο της γεωμετρίας της πτέρυγας. Σημαντική μείωση παρατηρείται στον μέγιστο δείκτη αστοχίας της επιδερμίδας σε σχέση με την βέλτιστη συμβατική δομή.

Η ιδιομορφή λυγισμού παραμένει και σε αυτήν την περίπτωση στην πρώτη περιοχή της άνω επιδερμίδας. Τέλος, όσον αφορά την ανάλυση πτερυγισμού, έχουμε μια αύξηση στην ταχύτητα πτερυγισμού σε 492 m/s. Η ασταθής ιδιομορφή συνεχίζει να είναι η δεύτερη, ενώ παρατηρείται ότι η ένατη ιδιομορφή σε αυτήν την περίπτωση γίνεται ασταθής σε πιο μικρή ταχύτητα, κοντά στην δεύτερη.

Τα αποτελέσματα για τα πάχη των μελών της εσωτερικής δομής συνοψίζονται στον πίνακα 8, ενώ για την άνω και κάτω επιδερμίδα στον πίνακα 9.

Πίνακας 8: Αποτελέσματα για πάχη μελών αλουμινίου για την βέλτιστη δομή με steering

	Περιοχή 1	Περιοχή 2	Περιοχή 3	Περιοχή 4	Περιοχή 5	Περιοχή 6
Πάχος δοκών	6 mm	6.5 mm	4 mm	2 mm	1.5 mm	1 mm
Πάχος νευρώσεων	20.1 mm	15.2 mm	5.3 mm	2 mm	1.8 mm	1.5 mm
Πάχος πελμάτων δοκών	8 mm	9.4 mm	5.3 mm	3 mm	2 mm	1 mm
Πάχος εν. ράβδων	9 mm	12.5 mm	6 mm	3.8 mm	3 mm	1 mm

Πίνακας 9: Αποτελέσματα για πολύστρωτες διατάξεις επιδερμίδας για την βέλτιστη δομή με steering

Άνω επιδερμίδα						
	Περιοχή 1	Περιοχή 2	Περιοχή 3	Περιοχή 4	Περιοχή 5	Περιοχή 6
Αριθμός στρώσεων 0°	7	1	1	1	0	0
Αριθμός στρώσεων 90°	9	3	3	2	2	2
Αριθμός στρώσεων ±45°	4	7	6	5	2	2
Σύνολο στην διάταξη	96	72	64	52	24	24

Κάτω επιδερμίδα						
	Περιοχή 1	Περιοχή 2	Περιοχή 3	Περιοχή 4	Περιοχή 5	Περιοχή 6
Αριθμός στρώσεων 0°	3	4	4	3	1	0
Αριθμός στρώσεων 90°	2	4	2	1	1	1
Αριθμός στρώσεων ±45°	2	5	3	1	2	2
Σύνολο στην διάταξη	36	72	48	24	24	20

Ο αλγόριθμος πετυχαίνει την μείωση της μάζας κυρίως αφαιρώντας υλικό από την άνω επιδερμίδα, αποφεύγοντας τον λυγισμό, καθώς και ανακατανέμοντας το φορτίο με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφορτιστεί η δεύτερη περιοχή από τάσεις, ώστε να μειωθούν και τα πάχη των μελών εκεί.

Τα αποτελέσματα για τις μεταβλητές των γωνιών που ορίζουν την κύρια διαδρομή των ινών στην πτέρυγα συνοψίζονται στον πίνακα 10. Οι διαδρομές που κατασκευάζονται βάσει των αποτελεσμάτων αυτών οπτικοποιούνται στην εικόνα 8. Υπενθυμίζεται ότι αυτή είναι ακριβώς η διαδρομή που ακολουθούν οι στρώσεις προσανατολισμού 0°, ενώ οι άλλες είναι περιστράμμενες κατά μια γωνία ±45° ή 90°.

Πίνακας 10: Αποτελέσματα για γωνίες περιστροφής της βέλτιστης δομής με steering

Άνω επιδερμίδα							
	Σύνоро 1	Σύνоро 2	Σύνоро 3	Σύνоро 4	Σύνоро 5	Σύνоро 6	Σύνоро 7
Γωνία περιστροφής	39°	-29°	-14°	-24°	-39°	-33°	10°

Κάτω επιδερμίδα							
Γωνία περιστροφής	16°	-45°	12°	43°	-2°	-44°	-8°



Σχήμα 8: Διαδρομές ινών για την άνω (αριστερά) και κάτω (δεξιά) επιδερμίδα της βέλτιστης δομής

Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος κατέληξε σε ένα σχέδιο που οι διαδρομές των ινών έχουν υψηλή καμπυλότητα κατά μήκος του εκπετάσματος. Στην πραγματικότητα, για κατασκευαστικούς λόγους, μπορεί τόσο απότομες μεταβολές της γωνίας να μην είναι επιτρεπτές, ωστόσο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα εργασία.

Ελαχιστοποίηση Δείκτη Αστοχίας Επιδερμίδας

Σε αυτήν και την επόμενη παράγραφο θα χρησιμοποιήσουμε άλλη αντικειμενική συνάρτηση, κρατώντας την μάζα της πτέρυγας και τις αντίστοιχες μεταβλητές σχεδιασμού σταθερές, λαμβάνοντας τις τιμές της βέλτιστης συμβατικής δομής. Το πρόβλημα που θα μελετήσουμε σε αυτήν την παράγραφο είναι η ελαχιστοποίηση του δείκτη αστοχίας της επιδερμίδας της πτέρυγας. Οι μοναδικές μεταβλητές που θα είναι ενεργές είναι αυτές των γωνιών περιστροφής, ώστε να απομονωθεί η επίδραση του tow-steering για μείωση των τάσεων χωρίς αύξηση της μάζας. Οι περιορισμοί της βελτιστοποίησης είναι οι ίδιοι με τις προηγούμενες βελτιστοποιήσεις.

Τα αποτελέσματα της παρούσας βελτιστοποίησης συνοψίζονται στον πίνακα 11. Σε σχέση με την συμβατική δομή, η χρήση συνθέτων με κάμπυλες ίνες έχει οδηγήσει σε μείωση κατά **47 %** στον μέγιστο δείκτη αστοχίας της επιδερμίδας, χωρίς αύξηση του βάρους. Επιπλέον παρατηρείται ότι πλέον η άνω και η κάτω επιδερμίδα αστοχούν σχεδόν ταυτόχρονα, κάτι που είναι καλή ένδειξη για βέλτιστο αποτέλεσμα.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα ελαχιστοποίησης δείκτη αστοχίας

KS(FI), Άνω Επιδερμίδα	0.5215
KS(FI), Κάτω Επιδερμίδα	0.5203
KS(FI), Δοκοί	0.963
KS(FI), Νευρώσεις	0.872
KS(FI), Πέλματα Δοκών	1.009
KS(FI), Ενισχυτικές Ράβδοι	0.967
Πρώτη Ιδιοτιμή Λυγισμού	1.494
Ταχύτητα πτερυγισμού	469 m/s

Αν και οι περιορισμοί λυγισμού της άνω επιδερμίδας και αστοχίας των πελμάτων είναι ενεργοί σε πολλά πιθανά σχέδια, είναι εδώ σημαντικό να αναφερθεί ότι ο κρίσιμότερος περιορισμός που δεν επέτρεψε την επιπλέον μείωση του μέγιστου δείκτη αστοχίας είναι η μείωση της ταχύτητας πτερυγισμού.

Οι γωνίες που βρήκε ο αλγόριθμος για την βέλτιστη διάταξη παρουσιάζονται στον πίνακα 12, ενώ οι διαδρομές στις οποίες αντιστοιχούν στην εικόνα 9. Οι γωνίες που έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στην αντικειμενική συνάρτηση, αλλά και στους περιορισμούς γενικότερα, είναι αυτές που αντιστοιχούν στην δεύτερη περιοχή, που περιλαμβάνει το σπάσιμο της γεωμετρίας της πτέρυγας.

Πίνακας 12: Αποτελέσματα για γωνίες περιστροφής - Ελαχιστοποίηση δείκτη αστοχίας

Άνω Επιδερμίδα							
	Σύνορο 1	Σύνορο 2	Σύνορο 3	Σύνορο 4	Σύνορο 5	Σύνορο 6	Σύνορο 7
Γωνία Περιστροφής	40°	-14°	-22°	-18°	-26°	-28°	8°
Κάτω Επιδερμίδα							
Γωνία Περιστροφής	37°	-1°	-37°	14°	15°	-5°	-6°



Σχήμα 9: Διαδρομές ινών για την άνω (αριστερά) και κάτω (δεξιά) επιδερμίδα - Ελαχιστοποίηση δείκτη αστοχίας

Μεγιστοποίηση Ταχύτητας Πτερυγισμού

Σε αυτήν την παράγραφο θα μελετηθεί το πρόβλημα της μεγιστοποίησης της ταχύτητας πτερυγισμού. Όπως και προηγουμένως, θα χρησιμοποιηθεί η βέλτιστη συμβατική δομή και η μάζα θα μείνει σταθερή, ώστε να απομονωθεί η επίδραση της καμπυλότητας των ινών στην ταχύτητα πτερυγισμού. Οι περιορισμοί είναι οι ίδιοι με τις υπόλοιπες βελτιστοποιήσεις.

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για μέγιστη ταχύτητα πτερυγισμού παρουσιάζονται στον πίνακα 13.

Πίνακας 13: Αποτελέσματα μεγιστοποίησης ταχύτητας πτερυγισμού

Ταχύτητα πτερυγισμού	667 m/s
KS(FI), Άνω Επιδερμίδα	0.942
KS(FI), Κάτω Επιδερμίδα	0.999
KS(FI), Δοκοί	0.934
KS(FI), Νευρώσεις	0.869
KS(FI), Πέλματα Δοκών	1.004
KS(FI), Ενισχυτικές Ράβδοι	0.991
Πρώτη Ιδιοτιμή Λυγισμού	1.503

Η ταχύτητα πτερυγισμού του σχεδιασμού που βρέθηκε από τον αλγόριθμο είναι **667 m/s**, που είναι μια βελτίωση κατά **29 %** σε σχέση με την συμβατική δομή. Ο πτερυγισμός εμφανίζεται εξαιτίας αστάθειας της δεύτερης ιδιομορφής, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Η ένατη ιδιομορφή γίνεται ασταθής σε ταχύτητα 675 m/s, δηλαδή σχεδόν ταυτόχρονα, και μάλιστα πολύ πιο απότομα.

Σε αυτήν την βελτιστοποίηση, ο λυγισμός δεν φαίνεται να είναι τόσο σημαντικός περιορισμός όσο σε προηγούμενες. Αντιθέτως, ο περιορισμός που παραβιάζεται σε σχεδιασμούς με μεγαλύτερη ταχύτητα πτερυγισμού είναι αυτός της αστοχίας της επιδερμίδας.

Οι γωνίες που βρήκε ο αλγόριθμος σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζονται στον πίνακα 14, ενώ οι διαδρομές στις οποίες αντιστοιχούν στην εικόνα 10.

Πίνακας 14: Αποτελέσματα για γωνίες περιστροφής - Μεγιστοποίηση Ταχύτητας Πτερυγισμού

Άνω Επιδερμίδα							
	Σύνορο 1	Σύνορο 2	Σύνορο 3	Σύνορο 4	Σύνορο 5	Σύνορο 6	Σύνορο 7
Γωνία Περιστροφής	33°	5°	-2°	-25°	-24°	-7°	19°
Κάτω Επιδερμίδα							
Γωνία Περιστροφής	-31°	-36°	36°	17°	24°	3°	-13°

Οι μεταβλητές που επηρεάζουν περισσότερο την ταχύτητα πτερυγισμού είναι και πάλι αυτές της δεύτερης περιοχής, εξαιτίας του ότι διαφορές στην δυσκαμψία σε αυτό το σημείο είναι ικανές να επηρεάσουν τις ιδιομορφές. Αυτό που παρατηρείται, είναι ότι οι γωνίες της βελτιστοποίησης για μέγιστη ταχύτητα πτερυγισμού και αυτές για ελάχιστο δείκτη αστοχίας είναι πολύ διαφορετικές, ειδικά στην κάτω επιδερμίδα όπου ο λυγισμός δεν είναι θέμα. Αυτό υποδεικνύει έναν πιθανό συμβιβασμό μεταξύ ταχύτητας πτερυγισμού και μέγιστων τάσεων, κάτι το οποίο θα μελετήσουμε και στην επόμενη παράγραφο μέσω βελτιστοποίησης πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων.

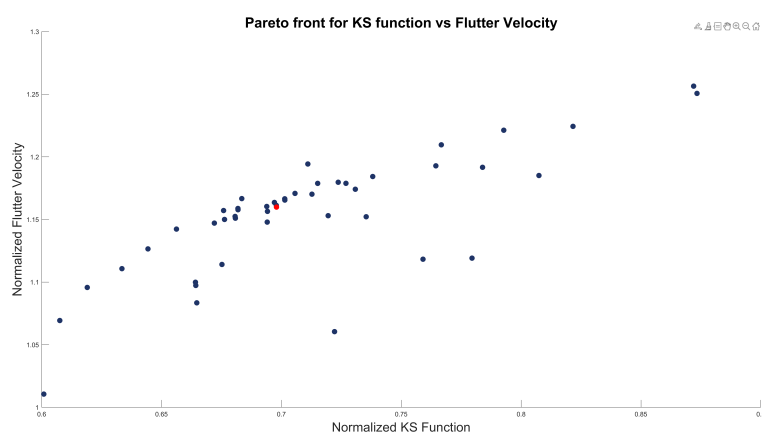


Σχήμα 10: Διαδρομές ιών για την άνω (αριστερά) και κάτω (δεξιά) επιδερμίδα - Μεγιστοποίηση Ταχύτητας Πτερυγισμού

Βελτιστοποίηση Πολλών Αντικειμενικών Συναρτήσεων (Multi-objective Optimization)

Σε αυτήν την παράγραφο θα μελετήσουμε το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της πτέρυγας για πολλές αντικειμενικές συναρτήσεις ταυτόχρονα με σκοπό της εύρεσης του Pareto front μεταξύ αυτών. Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα θα έχει 3 αντικειμενικές συναρτήσεις, την ταχύτητα πτερυγισμού, τον μέγιστο δείκτη αστοχίας της επιδερμίδας και την πρώτη ιδιοτιμή λυγισμού. Η μάζα της πτέρυγας είναι σταθερή και οι μόνες ενεργές μεταβλητές σχεδιασμού είναι οι γωνίες περιστροφής της πολύστρωτης επιδερμίδας.

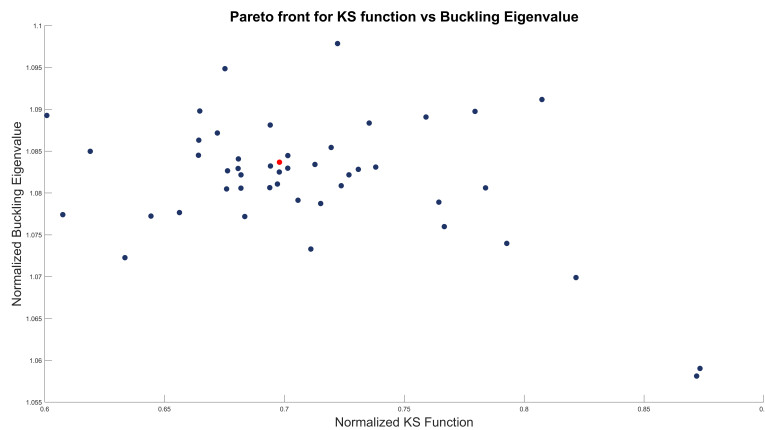
Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης οδήγησε στην εύρεση 47 σημείων που ορίζουν το Pareto front. Οι λύσεις αυτές λέγονται non-dominated γιατί δεν υπάρχει κάποια λύση που να υπερτερεί σε όλους τους αντικειμενικούς στόχους ταυτόχρονα. Το Pareto front του προβλήματος είναι τρισδιάστατο, ωστόσο για καλύτερη οπτικοποίηση θα παρουσιαστούν οι διδιάστατες προβολές του ανά 2 αντικειμενικούς στόχους. Ξεκινάμε με την προβολή του Pareto μεταξύ ταχύτητας πτερυγισμού και μέγιστου δείκτη αστοχίας που παρουσιάζεται στην εικόνα 11.



Σχήμα 11: Pareto front μεταξύ Ταχύτητας Πτερυγισμού και Δείκτη Αστοχίας Επιδερμίδας

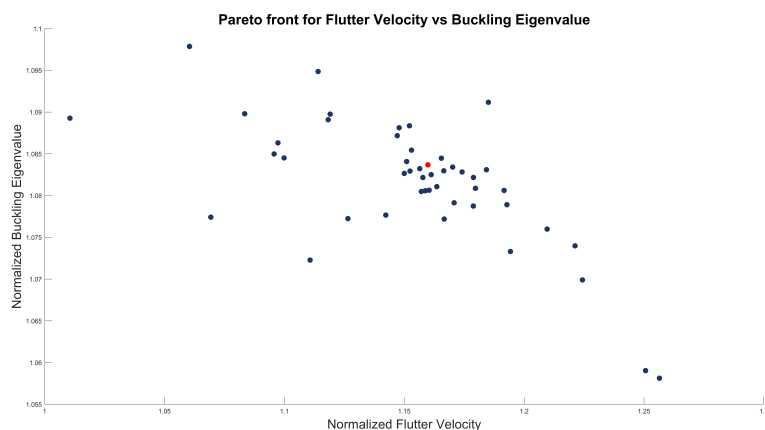
Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι υπάρχει ένας εμφανής συμβιβασμός μεταξύ ταχύτητας πτερυγισμού και μέγιστου δείκτη αστοχίας, κάτι που είχαμε παρατηρήσει και στην προηγούμενη παράγραφο. Η διάταξη με την καλύτερη ταχύτητα πτερυγισμού έχει ταυτόχρονα και τον χειρότερο δείκτη αστοχίας και το αντίστροφο.

Από την προβολή του Pareto μεταξύ μέγιστου δείκτη αστοχίας και ιδιοτιμής λυγισμού που παρουσιάζεται στην εικόνα 12 δεν παρατηρούμε κάποια συγκεκριμένη τάση μεταξύ αυτών των 2 αντικειμενικών στόχων, αφού υπάρχουν λύσεις με σχετικά καλές τιμές και για τους 2, ενώ επίσης και το αντίθετο. Οι λύσεις αυτές έχουν ωστόσο την υψηλότερη ταχύτητα πτερυγισμού.



Σχήμα 12: Pareto front μεταξύ Δείκτη Αστοχίας Επιδερμίδας και Ιδιοτιμής Λυγισμού

Τέλος, η προβολή του Pareto μεταξύ ταχύτητας πτερυγισμού και ιδιοτιμής λυγισμού παρουσιάζεται στην εικόνα 13. Παρατηρούμε ότι και εδώ υπάρχει μια τάση για συμβιβασμό μεταξύ των 2 αντικειμενικών στόχων, ωστόσο δεν είναι τόσο εμφανής όπως μεταξύ ταχύτητας πτερυγισμού και δείκτη αστοχίας που είδαμε πάνω.



Σχήμα 13: Pareto front μεταξύ Ταχύτητας Πτερυγισμού και Ιδιοτιμής Λυγισμού