



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

Σχεδίαση Αεροτομών Για Την Κατασκευή Πτερυγίων Σύγχρονων Ανεμογεννητριών Βέλτιστων ως Προς τις Αεροακουστικές Εκπομπές

Τσικριτέας Ανδρέας

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Σ. Βουτινάς, Καθηγητής

Συνεπιβλέπων: Ι. Προσπαθόπουλος, Δρ.Ε.ΔΙ.Π

Αθήνα 2022

Στον πατέρα μου Βασίλη

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου τον κύριο Σπύρο Βουτρινά επιβλέποντα της εργασίας μου και κυρίως τον συνεπιβλέποντα κύριο Ιωάννη Προσπαθόπουλο για την αμέριστη, ανιδιοτελή και συνεχή βοήθειά του σε διάφορα θέματα τεχνικής και ψυχολογικής φύσεως. Χωρίς εκείνον η πραγμάτωση της εργασίας θα ήταν πολλαπλές φορές δυσκολότερη.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την στήριξή τους όλα τα χρόνια της ακαδημαϊκής μου ζωής και κυρίως για την ευκαιρία που μου έδωσαν προκειμένου να αποκτήσω πολύτιμες γνώσεις. Τέλος ευχαριστώ ιδιαίτερος τον αδερφό μου Παναγιώτη, τους αδελφικούς μου φίλους Ι.Φίλιππα, Φ.Καμπέλο, Π.Λεόντιο αλλά και τους υπόλοιπους φίλους μου, που στάθηκαν στο πλευρό μου και περάσαν μαζί μου καλές και άσχημες στιγμές αλλά παρέμειναν σε αυτό χωρίς τα δεσμά της οικογενειακής υποχρεωτικότητας και γι αυτό τους ευχαριστώ διπλά και σε βάθος.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Τσικριτέας Ανδρέας

Περίληψη

Ο θόρυβος που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες είναι μία σημαντική περιβαλλοντική επίπτωση που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου. Η παρούσα εργασία στοχεύει στην σχεδίαση του εξωτερικού τμήματος των φτερών από δύο πρότυπες σύγχρονες ανεμογεννήτριες, βέλτιστες ως προς τις ακουστικές εκπομπές. Κατά μήκος του εξωτερικού τμήματος του περυγίου, το σχήμα των αεροτομών είναι το ίδιο οπότε τελικά ο στόχος είναι η βελτιστοποίηση των αρχικών αεροτομών FFA241 και DU240. Θεωρήσαμε μόνο τις δύο συνιστώσες του αυτοεπαγόμενου θορύβου, εκείνη λόγω τυρβώδους και εκείνη λόγω στρωτού οριακού στρώματος ακμής εκφυγής (LBL-TE, TBL-TE) οι οποίες εξαρτώνται κυρίως από τη γεωμετρία της αεροτομής. Ο μετα-ευριστικός αλγόριθμος PSO χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να γίνει η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του ισοδύναμου επιπέδου θορύβου με αλλαγή του σχήματος των αεροτομών μέσω της παραμετροποίησης Parsec. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μέγιστο της πτώσης του θορύβου μπορεί να φτάσει το 8% με σημαντική μείωση στην αεροδυναμική απόδοση. Περιορίζοντας την μείωση της αεροδυναμικής απόδοσης, η μείωση θορύβου αγγίζει το 1-1.5%. Ακόμα, η γεωμετρία των βέλτιστων αεροτομών διαφέρει ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται A-στάθμιση στο φάσμα του θορύβου κατά την βελτιστοποίηση. Τελικώς, έγινε εκπαίδευση 2 γραμμικών μοντέλων παλινδρόμησης και μοντέλα νευρωνικών δικτύων ώστε να φανεί η δυνατότητα πρόβλεψης του θορύβου και των συντελεστών (CL, CD), με χρήση δεδομένων από προηγούμενες βελτιστοποιήσεις. Τα μοντέλα μας δίνουν την δυνατότητα κατανόησης της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών εισόδου Parsec και του θορύβου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντικαθιστώντας τους κοστοβόρους αεροδυναμικούς και αεροακουστικούς κώδικες. Δείχθηκε πως αντικαθιστώντας τα φυσικά αεροδυναμικά και αεροακουστικά μοντέλα με το νευρωνικό δίκτυο οδηγούμαστε σε παρόμοιες βέλτιστες γεωμετρίες και τελικά φάσματα. Επιπλέον, το πολύ χαμηλό υπολογιστικό κόστος του μοντέλου μας επιτρέπει να διερευνήσουμε και να συντονίσουμε καλύτερα τις παραμέτρους του αλγόριθμου βελτιστοποίησης PSO.

Abstract

Noise produced by wind turbines is an important environmental impact that must be considered in wind farm installations. The present work aims to design the outer section of the blades of two prototype contemporary wind turbines optimized for noise emissions. Along the outer blade section the airfoil shape does not change, so finally the target is to optimize the shapes of the initial airfoils FFA241 and DU240. We considered only two of the self-noise components, the turbulent and laminar boundary layer noise (TBL-TE and LBL-TE), that are mainly dependent on the geometry of the airfoil. The meta-heuristic optimization algorithm PSO was employed minimizing the objective function of the equivalent noise level by changing the airfoil shape through a Parsec parameterization. Results showed that the maximum noise reduction may reach 8%, but at the expense of aerodynamic performance. Setting as a constraint that the aerodynamic performance should not be decreased, the benefit in noise is reduced to 1-1.5%. Moreover, the optimum airfoil designs are essentially different when the A-weighted spectra are used for noise minimization. Finally, a training of 2 linear model regressors and neural network regressors was made in order to predict the noise and the coefficients (CL, CD), using data from previous optimizations. Models give us a better understanding of the relation between the PARSEC parameters of the airfoil geometry and the output noise and can also be used in substitution of the costly aerodynamic and aeroacoustic code. It was demonstrated that replacing the physical aerodynamic and aeroacoustic models with the neural network results in similar optimized airfoil geometries and noise spectra. In addition, the low cost of the machine learning model permits a thorough investigation of the PSO parameters and a better calibration of the algorithm.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Το τεχνολογικό πρόβλημα	1
1.1.1	Ενέργεια, ΑΠΕ και ανεμογεννήτριες	1
1.1.2	Το πρόβλημα του θορύβου	2
1.1.3	Στόχος εργασίας	3
1.2	Βιβλιογραφική Επισκόπηση	3
1.2.1	Μέθοδοι πρόλεξης θορύβου ανεμογεννητριών	3
1.2.2	Σχεδιασμών αεροτομών και ανεμογεννητριών χαμηλού θορύβου	4
1.3	Περιεχόμενο της εργασίας	6
2	Μεθοδολογία	8
2.1	Αντιμετώπιση του Προβλήματος	8
2.2	Επίλυση του Πεδίου Ροής-Μέθοδος Συνεκτικής-Μη Συνεκτικής Αλληλεπίδρασης	12
2.3	Θόρυβος Ανεμογεννητριών	14
2.3.1	Ημιεμπειρικές Σχέσεις	16
2.3.2	Αεροακουστικός Κώδικας και Δρομέας Ανεμογεννήτριας	17
2.4	Παραμετροποίηση Αεροτομών	19
2.4.1	Παραμετροποίηση με την μέθοδο Parsec	20
2.5	Βελτιστοποίηση και Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης	22
2.5.1	Αλγόριθμος Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization-PSO)	24
2.6	Μοντέλα Ανάλυσης Δεδομένων και Μηχανικής Μάθησης	26
2.6.1	Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Regression) - Γραμμικό μοντέλο OLS	26
2.6.2	Γραμμική Παλινδρόμηση με όρο απαγόρευσης (Penalized Linear Regression-LASSO)	27
2.6.3	Νευρωνικά Δίκτυα πολλών στρωμάτων (Multilayer Neural Networks)	27
3	Λεπτομέρειες μεθοδολογίας	30
3.1	Παραμετροποίηση Parsec στο Πρόβλημα	30

Περιεχόμενα

3.2	Εύρος Μεταβλητών Σχεδιασμού	33
3.3	Επιλογή Υπερπαραμέτρων αλγόριθμου PSO	34
3.4	Περιορισμοί	37
4	Αποτελέσματα	39
4.1	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης	39
4.2	Εκπαίδευση Μοντέλων Μηχανικής Μάθησης	49
4.3	Χρήση Μοντέλων για Πρόβλεψη Δεδομένων από Βελτιστοποιήσεις με Υπολογιστικό Κώδικα	58
4.4	Σύγκριση Αποτελεσμάτων Βελτιστοποίησης με Χρήση Μοντέλων Μηχανικής Μάθησης	60
5	Αποτίμηση και Συμπεράσματα	63
5.1	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	66
A'	Παράρτημα	67
	Αναφορές	70

1 Εισαγωγή

1.1 Το τεχνολογικό πρόβλημα

1.1.1 Ενέργεια, ΑΠΕ και ανεμογεννήτριες

Η περίοδος μετά την βιομηχανική επανάσταση χαρακτηρίζεται από μια συνεχόμενη και με πρωτόγνωρους ρυθμούς τεχνολογική εξέλιξη. Οι απαιτήσεις, σε ενεργειακή κατανάλωση, καθίστανται όλο και μεγαλύτερες. Η πιο επιβεβλημένη μορφή ενέργειας είναι τα ορυκτά καύσιμα. Το 2019 η παραγωγή ενέργειας μέσω ορυκτών, άνθρακα (coal) και πετρελαίου (oil), άγγιξε τις 43.849 TWh και 54.620 TWh αντίστοιχα, με συνολική παγκόσμια κατανάλωση 173.340 TWh. [1] Η καύση ορυκτών καυσίμων επιφέρει σημαντικά προβλήματα στο περιβάλλον όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Χαρακτηριστικά, το 75% των εκπεμπόμενων αερίων του θερμοκηπίου (greenhouse gas emissions) προέρχονται από την καύση ορυκτών. Προκειμένου να αντιμετωπισθούν τα προβλήματα στο περιβάλλον και στις ζωές των ανθρώπων αλλά με ταυτόχρονη ικανοποίηση των απαιτήσεων σε ενέργεια, έχει ξεκινήσει μία στροφή προς άλλες μορφές ενέργειας όπως η πυρηνική και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Από τις ΑΠΕ, με συνολικό ποσοστό παραγόμενης ενέργειας τις 7.017 TWh (2019), το μεγαλύτερο ποσοστό καλύπτεται από υδροηλεκτρικά έργα με 4.297 TWh, όμως τα τελευταία χρόνια έχουν δει άνθηση τα ηλιακά αλλά και οι ανεμογεννήτριες, με 708 και 1.418 TWh αντίστοιχως.

Πολλές Ευρωπαϊκές χώρες έχουν θέσει υψηλούς στόχους για την παραγωγή ενέργειας από ανεμογεννήτριες, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη Δανία, που μέχρι το 2050 θέλει να παράγει το 100% της ενέργειάς της από αυτές. Προκειμένου να γίνει η εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας ή ενός αιολικού πάρκου πρέπει να τηρείται η νομοθεσία που προσπαθεί να περιορίσει τις επιπτώσεις που μπορεί να έχει αυτή η διαδικασία τόσο στο περιβάλλον όσο και στην καθημερινότητα των πολιτών.

Για τους πολίτες λόγοι δυσαρέσκειας είναι η δόμηση της εγκατάστασης του πάρκου και οι αλλαγές στο περιβάλλοντα χώρο ή η καταστροφή του τουριστικού χαρακτήρα της περιοχής. Σημαντικότερος παράγοντας, που μπορεί να έχει επιπτώσεις στην υγεία και στην εύρυθμη καθημερινότητα των ανθρώπων και του βιότοπου στην περιοχή, είναι ο **θόρυβος** που παράγεται κατά την λειτουργία των ανεμογεννητριών.

1.1.2 Το πρόβλημα του θορύβου

Ο **ήχος** ορίζεται ως το κύμα πίεσης-διαδιδόμενη διαταραχή πίεσης γύρω από μέση τιμή- που παράγεται από μία πηγή και διαδίδεται σε διάφορα μέσα σαν τον αέρα και όπως κάθε κύμα, έχει κάποια μεγέθη που το χαρακτηρίζουν όπως συχνότητα, ένταση και ταχύτητα διάδοσης. Ως **θόρυβος** χαρακτηρίζεται ο ήχος που δεν αποτελεί ευχάριστη αίσθηση στο άκουσμά του και προκαλεί ενόχληση (annoyance). Το μέγεθος της ενόχλησης, για τον ίδιο θόρυβο, διαφέρει από άνθρωπο σε άνθρωπο. Συνήθως μέτρηση της έντασης του θορύβου αποτελεί το μέγεθος του **επίπεδου ηχητικής πίεσης** (Sound Pressure Level-SPL) και συνήθως μετράται σε ντεσιμπέλ (dB-decibel), η οποία είναι λογαριθμική κλίμακα, με το 0 να δίνει τον ασθενέστερο ήχο που μπορεί να γίνει αντιληπτός από άνθρωπο. Αύξηση των 10 ντεσιμπέλ δίνει 10-πλασιασμό της έντασης του θορύβου. Το **ανθρώπινο ακουστικό φάσμα συχνοτήτων** συνήθως κυμένεται από 20 Hz έως 20.000 KHz, με μεγαλύτερη ευαισθησία να υπάρχει στις 500 Hz έως 6 kHz.

Ο **θόρυβος που εκπέμπεται από τις ανεμογεννήτριες** μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες, τον μηχανικό θόρυβο λόγω ταλαντώσεων και επαφής μηχανικών μερών μεταξύ τους και τον αεροακουστικό θόρυβο λόγω των μη-μόνιμων αεροδυναμικών φαινομένων που εμφανίζονται στον δρομέα. Η πρώτη κατηγορία έχει περιοριστεί σημαντικά με χρήση τεχνικών απόσβεσης ή απομόνωση των μηχανικών ταλαντώσεων ή χρήση ηχομονωτικών υλικών[2]. Ο αεροακουστικός θόρυβος είναι πιο δύσκολο να μετρηθεί και είναι η κύρια πηγή θορύβου στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες[3].

Μελέτες έχουν δείξει πως ο θόρυβος από ανεμογεννήτριες, μπορεί να προκαλέσει διαταραχές ύπνου και άλλα προβλήματα στην υγεία και στην καθημερινότητα των κατοίκων κοντινών περιοχών. Για αυτό, έχουν θεσπιστεί όρια έντασης θορύβου και όρια απόστασης του αιολικού πάρκου, ανάλογα με την κατηγορία της περιοχής. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (Π.Ο.Υ-W.H.O) έχει προτείνει κατά περίπτωση, μέγιστο όριο για την Ευρωπαϊκή περιοχή(2018) τα 45 dB, ως προς L_{den} μέτρηση, δηλαδή την μέση τιμή 24ώρου για μετρήσεις ανά 1 ώρα. Η Δανία έχει όριο βάσης τα 37 και 39 dB(A) για ευαίσθητες περιοχές και ταχύτητες ανέμου 6 και 10 m/s, αντίστοιχα, σε ύψος των 10 μέτρων. Περισσότερες λεπτομέρειες που αφορούν τα όρια μπορούν να αναζητηθούν είτε στην ιστοσελίδα του WHO, είτε στην αντίστοιχη ιστοσελίδα και νομοθεσία της κάθε χώρας όπως στην αναφορά της Αρχής Προστασίας Περιβάλλοντος (Environmental Protection Authority-EPA) της Ανατολικής Αυστραλίας[4].

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων του θορύβου, κρίνεται απαραίτητη η επιστημονική έρευνα γύρω από τις πηγές παραγωγής ήχου στις ανεμογεννήτριες και διατύπωση μοντέλων πρόλεξης θορύβου. Με χρήση αυτών δύναται να γίνει σχεδιασμός δρομέων ανεμογεννητριών με ταυτόχρονη διατήρηση μιας υψηλής ενεργειακής απόδοσης.

1.1.3 Στόχος εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι ο σχεδιασμός του εξωτερικού τμήματος του πτερυγίου σύγχρονων ανεμογεννητριών βελτιστοποιώντας τη γεωμετρία της αεροτομής ως προς τις ακουστικές εκπομπές. Το εξωτερικό μέρος του πτερυγίου χωρίζεται σε κομμάτια (sections), το κάθε κομμάτι έχει μία αεροτομή που παραμετροποιείται με την μέθοδο Parsec και ορίζονται ως μεταβλητές σχεδιασμού οι παράμετροι Parsec. Ως αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται η στάθμη του αεροδυναμικού θορύβου και γίνεται χρήση κάποιων περιορισμών γεωμετρίας. Για τον τελικό υπολογισμό του θορύβου χρησιμοποιήθηκαν δύο κώδικες του εργαστηρίου ρευστοδυναμικής του ΕΜΠ, ένας για τον υπολογισμό του πεδίου ροής, ένας για τον καθαρό υπολογισμό του θορύβου, σε απόσταση 2,5 περίπου διαμέτρων από τον παρατηρητή. Ο τελευταίος έχει πιστοποιηθεί στην διπλωματική εργασία της Γ.Καλομενοπούλου[5] και βασίζεται σε ημιεμπειρικά μοντέλα. Για την βελτιστοποίηση χρησιμοποιείται ένας μετα-ευριστικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ο Particle Swarm Optimization (PSO). Οι δύο πρώτοι κώδικες, γραμμένοι σε γλώσσα FORTRAN, συνδυάστηκαν με ένα κώδικα σε γλώσσα python3 στην οποία ήταν γραμμένος ο αλγόριθμος PSO.

1.2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

1.2.1 Μέθοδοι πρόλεξης θορύβου ανεμογεννητριών

Οι μέθοδοι πρόλεξης θορύβου ανεμογεννητριών (wind turbine noise prediction methods) είναι πολύτιμα εργαλεία που χρησιμοποιούνται στη σχεδίαση των αεροτομών και ανεμογεννητριών χαμηλού θορύβου καθώς δίνουν την δυνατότητα εκτίμησης του μεγέθους του θορύβου ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος. Μία κατηγοριοποίησή τους είναι σε υπολογιστικές μεθόδους και ημιεμπειρικά μοντέλα.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν αναλυτικές εξισώσεις μηχανικής ρευστών όπως οι ακουστικές εξισώσεις Euler και το μοντέλο Ffowcs Williams-Hawkins[6]. Σε αυτήν διατυπώνονται κάποιες εξισώσεις που συνήθως δεν έχουν αναλυτική λύση και επιλύονται με χρήση αριθμητικών τεχνικών όπως οι πεπερασμένες διαφορές (finite differences) και οι πεπερασμένοι όγκοι (finite volumes).

Όμως ο θόρυβος στις ανεμογεννήτριες είναι κυρίως υψίσυχνος διπολικού και τετραπολικού χαρακτήρα, που σημαίνει πως απαιτούνται περισσότερο πυκνά χρονικά και χωρικά πλέγματα, πράγμα που αυξάνει κατά πολύ το υπολογιστικό κόστος. Έτσι αναπτύχθηκαν οι μέθοδοι των ημιεμπειρικών μοντέλων όπως των Brooks, Pope, Marcolini[7], [5] οι οποίοι διατύπωσαν κάποιες εξισώσεις υπολογισμού του αυτοεπαγόμενου θορύβου μέσα από πειραματικές μετρήσεις σε αεροτομή NACA0012. Για τον χαμηλοσυχνό θόρυβο, που προκαλείται από την διέλευση των πτερυγίων μπροστά από τον πύργο της ανεμογεννήτριας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η υπολογιστική

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

μέθοδος ή σε περιπτώσεις χρήσης υπερυπολογιστών.

Μερικές ακόμα δημοσιεύσεις που αξίζουν σημείωσης είναι η δημοσίευση του Blanchard[8], όπου γίνεται πρόβλεψη του θορύβου και της ταχύτητας του ανέμου σε 4 περιοχές με χρήση μοντέλου διάδοσης (πακέτο OPenwind) και νευρωνικών δικτύων (NAR και NARX) αντίστοιχα, με τα μοντέλα να δείχνουν ότι είναι δυνατή η πρόβλεψη του αέρα στην κάθε περιοχή. Επίσης, στη δημοσίευση του Sucameli[9], γίνεται σύγκριση διαφόρων ημι-εμπειρικών μοντέλων συχνότητας πεδίου (frequency-domain) που αφορούν τη συνιστώσα θορύβου TBL-TE και TI (Turbulent Inflow) συμπλεγμένα με ένα μοντέλο θεωρίας ορμής στοιχείου πτερύγωσης (BEM) και ερευνάται και διαπιστώνεται η δυνατότητα πρόβλεψης χαμηλόσυχνου θορύβου με χρήση του μοντέλου χρονικού-πεδίου (time-domain), Ffowcs Williams-Hawkings.

1.2.2 Σχεδιασμών αεροτομών και ανεμογεννητριών χαμηλού θορύβου

Οι μέθοδοι σχεδίασης αεροτομών[10], αφορούν την διαδικασία που ακολουθεί ο σχεδιαστής προκειμένου να επιλύσει ένα πρόβλημα που σχετίζεται με την γεωμετρία της εκάστοτε αεροτομής, μεταβάλλοντας το σχήμα της. Ο στόχος της σχεδίασης ποικίλει και η τελική γεωμετρία της αεροτομής εξαρτάται από αυτόν όπως και η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί. Μπορεί να τεθούν περισσότεροι του ενός στόχοι που συχνά να βρίσκονται αντικρουόμενοι μεταξύ τους, οπότε είναι στην ευχέρεια του σχεδιαστή να επιλέξει την τελική γεωμετρία.

Μέθοδοι σχεδίασης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ευθύ (direct) και αντίστροφο (inverse) σχεδιασμό.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι όπου, αφού έχει οριστεί το πρόβλημα, ο σχεδιαστής επεμβαίνει άμεσα στο σχήμα της αεροτομής και μέσω μιας διαδικασίας προσπάθειας-σφάλματος (trial-error) καταλήγει στο τελικό αποτέλεσμα. Η μέθοδος αυτή συνήθως έχει μεγαλύτερο χρονικό-υπολογιστικό κόστος σε σχέση με την πρώτη μέθοδο αλλά μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών. Η διαδικασία αυτής της μεθόδου ακολουθεί τα εξής βήματα:

- Με το χέρι, όπου απαιτείται γνώση και εμπειρία του σχεδιαστή στο πρόβλημα
- Με χρήση υπολογιστικών μεθόδων και αριθμητικής βελτιστοποίησης (numeric optimization design). Εδώ θα πρέπει να έχει οριστεί μία μορφή μαθηματικής σχέσης που να συνδέει τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας με τον τελικό στόχο-λύση του προβλήματος

Στην δεύτερη κατηγορία, του αντίστροφου σχεδιασμού, ανήκουν μέθοδοι όπου γίνεται χρήση κάποιας σχέσης που να συσχετίζει το τελικό-επιθυμητό αποτέλεσμα με το υπάρχον. Για παράδειγμα, εάν έχουμε μια αεροτομή με δεδομένη διανομή πίεσης κατά το μήκος της (cp distribution) και καθορίσουμε μία διανομή πίεσης στόχου (target

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

cp distribution), εφαρμόζουμε τη μέθοδο διαφοράς των ελαχίστων τετραγώνων (least squares difference) και καταλήγουμε σε μία βέλτιστη αεροτομή. Συνήθως αυτές οι μέθοδοι απαιτούν λιγότερο χρόνο σχεδίασης. Παράδειγμα τέτοιας μεθόδου δίνεται στον Rahmati[11], όπου περιγράφεται μία συνεκτική αντίστροφη μέθοδος (inviscid inverse method). Στη συγκεκριμένη καθορίζεται μία τελική επιφανειακή διανομή πίεσης σύμφωνα με την οποία σχεδιάζεται η τελική αεροτομή. Επίσης εφαρμόζεται σε τυχαίες αρχικές γεωμετρίες καταδεικνύοντας την στιβαρότητα (robustness) της μεθόδου.

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με την πρώτη κατηγορία αφού γίνεται χρήση μεθόδου βελτιστοποίησης, δηλαδή αξιολόγηση διαφόρων γεωμετριών πρώτου καταλήξουμε στην βέλτιστη αεροτομή-λύση.

Πλήθος μελετών έχουν πραγματοποιηθεί για την περίπτωση **σχεδίασης ανεμογεννητριών χαμηλού θορύβου**. Στην εργασία του Simao Santos Rodrigues[12] γίνεται προσπάθεια μείωσης του αεροδυναμικού θορύβου μίας ανεμογεννήτριας με χρήση ενός (BEM) μοντέλου για την αεροδυναμική απόδοση, τις ημιεμπειρικές σχέσεις του Pope, Brooks, Marcolini και Amiet για το θόρυβο, καθώς και τα μεγέθη του οριακού στρώματος με χρήση του XFOIL. Οι αεροτομές παραμετροποιούνται με τη μέθοδο των καμπυλών NURBS και χρησιμοποιείται γενετικός αλγόριθμος για βελτιστοποίηση πολλών στόχων μέσω του πακέτου ανοιχτού κώδικα της python, pyOpt. Το τελικό μέτωπο παρέτο έχει λύσεις που κυμαίνονται από αύξηση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας κατά 139.9 % μέχρι μείωση θορύβου 10.7 % με κόστος κάποια μικρή αεροδυναμική μείωση.

Στο βιβλίο του Wei Zhu[13] σχεδιάζονται πτερύγια για ανεμογεννήτριες των 3 και 20 MW όπου η σχεδίαση αεροτομών και πτερυγίων είναι ενσωματωμένη. Αφού τα πτερύγια χωρισθούν σε στοιχεία (sections), οι αεροτομές που αντιστοιχούν, παραμετροποιούνται με χρήση της μετατροπής Jukowski και γίνεται χρήση σειράς τριγωνομετρικών συναρτήσεων και γίνεται βελτιστοποίηση για το κάθε στοιχείο. Επίσης ενσωματώνεται ένα 2-διάστατο μοντέλο BEM στην βελτιστοποίηση όπου επαναληπτικά υπολογίζει τον συντελεστή πίεσης C_p . Συνδυασμός του C_p και σχέση που αφορά την στιβαρότητα (solidity) του ρότορα αποτελούν την αντικειμενική συνάρτηση. Εδώ ο αεροακουστικός θόρυβος εισέρχεται ως περιορισμός και εκτιμάται με χρήση των ημιεμπειρικών μοντέλων των Pope, Brooks, Marcolini (BPM). Στο τέλος παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα του C_p που έχει προκύψει με χρήση των QUIC, EllipSys, XFOIL και πειράματος, καθώς και συγκριση μεταξύ ενός CFD επιλύτη. Τα μεγέθη θορύβου με A-στάθμιση για τις 20 και 3 MW ανεμογεννήτριες είναι 47.4 dBA και 42.9 dBA, τα ακουστικά φάσματα είναι παρόμοια με την μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια να έχει μικρότερη συχνότητα μεγίστου.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Στη δημοσίευση του Shen[14] έγινε χρήση των Betz και Jukowski ιδεών(concepts), που βασίζονται σε θεωρητικά μοντέλα, για ανεμογεννήτρια 80 μέτρων και ονομαστικής ισχύς 2.75MW. Αντικαθιστώντας την αρχική αεροτομή με αεροτομή LN1 και εφαρμόζοντας τον σχεδιασμό πετυχαίνει 6 και 1.5 dBA μείωση για Betz και Jukowski αντιστοίχως, με διατήρηση της ονομαστικής ισχύς στα ίδια επίπεδα.

Στη δημοσίευση του Seunghoon Lee[15] πραγματοποιείται βελτιστοποίηση ανεμογεννήτριας 10 KW με χρήση γενετικών αλγορίθμων. Στην αρχή πραγματοποιείται βελτιστοποίηση μιας αεροτομής σε ένα συγκεκριμένο σημείο του πτερυγίου, σε απόσταση 75% της ακτίνας και στη συνέχεια γίνεται νέα βελτιστοποίηση με εφαρμογή γραμμικής εξίσωσης της διανομής της χορδής και του πάχους αεροτομής κατά μήκος του πτερυγίου. Το πτερύγιο και πάλι χωρίζεται σε 20 στοιχεία, για τον θόρυβο χρησιμοποιείται το ημιεμπειρικό μοντέλο BPM σε κλίμακα 1/3 της οκτάβας. Ως περιορισμοί μπαίνουν για την πρώτη βελτιστοποίηση, ο αεροδυναμικός συντελεστής άνωση προς οπισθέλκουσα L/D και επιτρεπτή μεταβολή πάχους 5% και για την δεύτερη περιορισμός ενεργειακής απόδοσης και περιορισμοί για το μήκος χορδής και για τη στιβαρότητα (solidity). Πιστοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω πειραμάτων σε μειωμένη κλίμακα και τα τελικά αποτελέσματα δίνουν μείωση θορύβου 2.3 dB υπολογιστικά και 2.6 dB πειραματικά.

Συνοψίζοντας, στα περισσότερα από τα παραπάνω, για τον υπολογισμό του ακουστικού θορύβου, γίνεται μία σύμπλεξη (coupled) μεταξύ κώδικα που βασίζεται στη θεωρία στοιχείου πτερυγίου ορμής (Blade Element Momentum theory-BEM), ενός κώδικα υπολογισμού των μεγεθών του οριακού στρώματος, όπως το XFOIL, και χρήση των ημιεμπειρικών μοντέλων των Pope, Brooks, Marcolini και Amiet για τον τελικό θόρυβο. Χρησιμοποιούνται πολύ στοχαστικοί αλγόριθμοι και συνήθεις περιορισμοί αφορούν είτε αεροδυναμική απόδοση είτε απόδοση ισχύς ανεμογεννήτριας σε συγκεκριμένη ταχύτητα αέρα. Από κάποια αποτελέσματα φαίνεται πως η πτώση σε θόρυβο δεν μπορεί να ξεπεράσει κάποιο όριο συνήθως 2 με 3 dB χωρίς να υπάρχει ταυτόχρονη μείωση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών. Για περαιτέρω εμβάθυνση γενικά στον σχεδιασμό πτερυγίων προτείνεται η δημοσίευση των Schubel, Richard [16].

1.3 Περιεχόμενο της εργασίας

Η εργασία έχει χωρισθεί σε 5 κεφάλαια. Στο κεφάλαιο 2, περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προκειμένου να γίνει ο σχεδιασμός, μέσω βελτιστοποίησης, των εξωτερικών τμημάτων των πτερυγίων των 2 πρότυπων ανεμογεννητριών καθώς και μικρή εισαγωγή στη θεωρία των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται κάποιες λεπτομέρειες που αφορούν την πρακτική εφαρμογή των θεωριών του κεφαλαίου 2 στο πρόβλημα, όπως

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

η εκλογή παραμέτρων του αλγόριθμου βελτιστοποίησης, οι μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος και το εύρος τους αλλά και η εκλογή περιορισμών. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης καθώς και τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης μοντέλων μηχανικής μάθησης σε δεδομένα που προέκυψαν από βελτιστοποιήσεις. Το κεφάλαιο 5 παρουσιάζει επιγραμματικά το σύνολο της δουλειάς που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία καθώς και κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2 Μεθοδολογία

2.1 Αντιμετώπιση του Προβλήματος

Η επίλυση του προβλήματος εξαρτάται από τις απαντήσεις στα εξής ερωτήματα:

1. Ποια θα είναι η αντικειμενική συνάρτηση που θα χρειαστεί να βελτιωθεί και υπό ποιούς περιορισμούς
2. Ποιες είναι οι μεταβλητές σχεδιασμού-μεταβλητές που μεταβάλλουν την αντικειμενική συνάρτηση και ποιο το εύρος αυτών
3. Πως προκύπτει η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης
4. Ποια μέθοδος χρησιμοποιείται προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση

Ως αντικειμενική συνάρτηση ορίζουμε το επίπεδο του θόρυβου που θα θέλαμε να ελαχιστοποιηθεί. Ο θόρυβος στις ανεμογεννήτριες αναλύεται σε συνιστώσες. Για την παρούσα μελέτη, επιλέγονται συνιστώσες που εξαρτώνται κυρίως από την γεωμετρία και συνεπώς από το πεδίο ροής που δημιουργείται γύρω από αυτήν. Αυτές είναι, ο θόρυβος λόγω στρωτού οριακού στρώματος και θόρυβος λόγω τυρβώδους οριακού στρώματος και αλληλεπίδραση με την ακμή εκφυγής. Ο περιορισμός που επιλέχθηκε αφορά την καμπυλότητα της πάνω πλευράς των αεροτομών που εξετάζονται.

Συνεπώς ο θόρυβος που εξετάζεται εξαρτάται από την γεωμετρία. Το ερώτημα είναι πώς αυτή μπορεί να αναπαρασταθεί από μεταβλητές, οι οποίες όταν μεταβληθούν θα αλλάξει και η τιμή του θορύβου. Αυτές ονομάζονται μεταβλητές σχεδιασμού (ΜΣ). Η καμπύλη της αεροτομής αποτελείται από άπειρο αριθμός σημείων και ένα υποσύνολο αυτών θα μπορούσαν να επιλεγούν ως ΜΣ. Όμως όσο πιο πολλά σημεία επιλέγονται τόσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα του προβλήματος, δηλαδή οι συνδυασμοί που γίνονται ανάμεσα στις διάφορες μεταβλητές μεταξύ τους προκειμένου να διερευνηθεί η βέλτιστη λύση. Ο χώρος των λύσεων μεγαλώνει κατά πολύ. Το πρόβλημα αυτό λύνουν οι διάφοροι μέθοδοι παραμετροποίησης, όπου ένας περιορισμένος μικρός αριθμός μεταβλητών, ελέγχουν ολόκληρη τη γεωμετρία της αεροτομής. Οι μεταβλητές αυτές συνήθως καθορίζουν τους συντελεστές ενός πολυωνυμου, δηλαδή μία προσεγγιστική καμπύλη που περιγράφει την γεωμετρία. Στη συνέχεια επιλέγεται

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία

πεπερασμένος αριθμός σημείων πάνω σε αυτή την καμπύλη, προκειμένου να βρεθούν τα μεγέθη του πεδίου ροής. Η μέθοδος παραμετροποίησης που επιλέχθηκε στην παρούσα εργασία, είναι η PARSEC και οι παράμετροί της ορίζονται ως μεταβλητές σχεδιασμού. Οι παράμετροι PARSEC αντιπροσωπεύουν βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αεροτομής, όπως η ακτίνα καμπυλότητας στην ακμή πρόσπτωσης ή η γωνία που σχηματίζεται στην ακμή εκφυγής, κάτι που διευκολύνει την εξαγωγή και ομαδοποίηση των συμπερασμάτων ως προς τα χαρακτηριστικά αυτά.

Σε επόμενο βήμα επιλύεται το πεδίο ροής με χρήση της μεθόδου συνεκτικής-μη συνεκτικής αλληλεπίδρασης και χρήση του κώδικα του εργαστηρίου αεροδυναμικής του τομέα ρευστών του ΕΜΠ, FOIL2W. Μέσω αυτού υπολογίζονται τα πάχη ορμής και μετατόπισης του οριακού στρώματος δ , δ^* και στη συνέχεια εκτελείται ο αεροακουστικός κώδικας του εργαστηρίου, ο οποίος με χρήση των ημιεμπειρικών σχέσεων θορύβου των Brooks, Pope, Marcolini, υπολογίζει το μέγεθος του τελικού θορύβου, σε κλίμακα 1/3 της οκτάβας.

Ως μέθοδος βελτιστοποίησης επιλέγεται η μέθοδος με σμήνος σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO). Ο χώρος που θα εξερευνηθεί για εύρεση βέλτιστης λύσης ορίζεται από το εύρος των μεταβλητών σχεδιασμού που περιορίζεται στο $\pm 8\%$ της αρχικής τιμής.

Οι αρχικές αεροτομές που επιλέχθηκαν είναι οι FFA241 και DU240, οι οποίες χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό σύγχρονων ανεμογεννητριών διαγράμματα των οποίων δίνονται σε επόμενο κεφάλαιο. Γενικά, σε μία αρχική αεροτομή αντιστοιχεί μία (αρχική) τιμή θορύβου και με εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης αναμένουμε εύρεση αεροτομής με τιμή μικρότερη της αρχικής, αν είναι δυνατόν της ελάχιστης τιμής στον υπό εξέταση χώρο. Το πρόβλημα εμπίπτει στην κατηγορία ελαχιστοποίησης βαθμωτής συνάρτησης πολλών μεταβλητών, ενός στόχου, με περιορισμούς (Single Objective Minimization with Bounds and Constraints-Minimization of Scalar Function with More Than One Variables).

Όπως έχει προαναφερθεί, γίνεται προσπάθεια ελαχιστοποίησης ως προς τον αεροδυναμικό θόρυβο. Επειδή όμως η αεροδυναμική απόδοση του πτερυγίου είναι πολύ σημαντικό μέγεθος, αποθηκεύεται ο όρος CL/CD (συντελεστής άνωσης προς συντελεστή οπισθέλκουσας), για όλες τις γεωμετρίες που θα ελεγχθούν μέσω του PSO. Οι συντελεστές αυτοί υπολογίζονται από τον κώδικα FOIL2W για κάθε ακτινική θέση του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας, όμως θεωρείται αντιπροσωπευτική η τιμή σε ακτινική θέση $r/R = 80\%$ η οποία και τελικά αποθηκεύεται. Η καταγραφή του θορύβου σε συνδυασμό με την αεροδυναμική απόδοση χρησιμοποιείται στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την σχέση τους με τις ΜΣ. Αυτό θα γίνει με την παρατήρηση διαγραμμάτων όλων αυτών των τιμών συναρτήσει των μεταβλητών

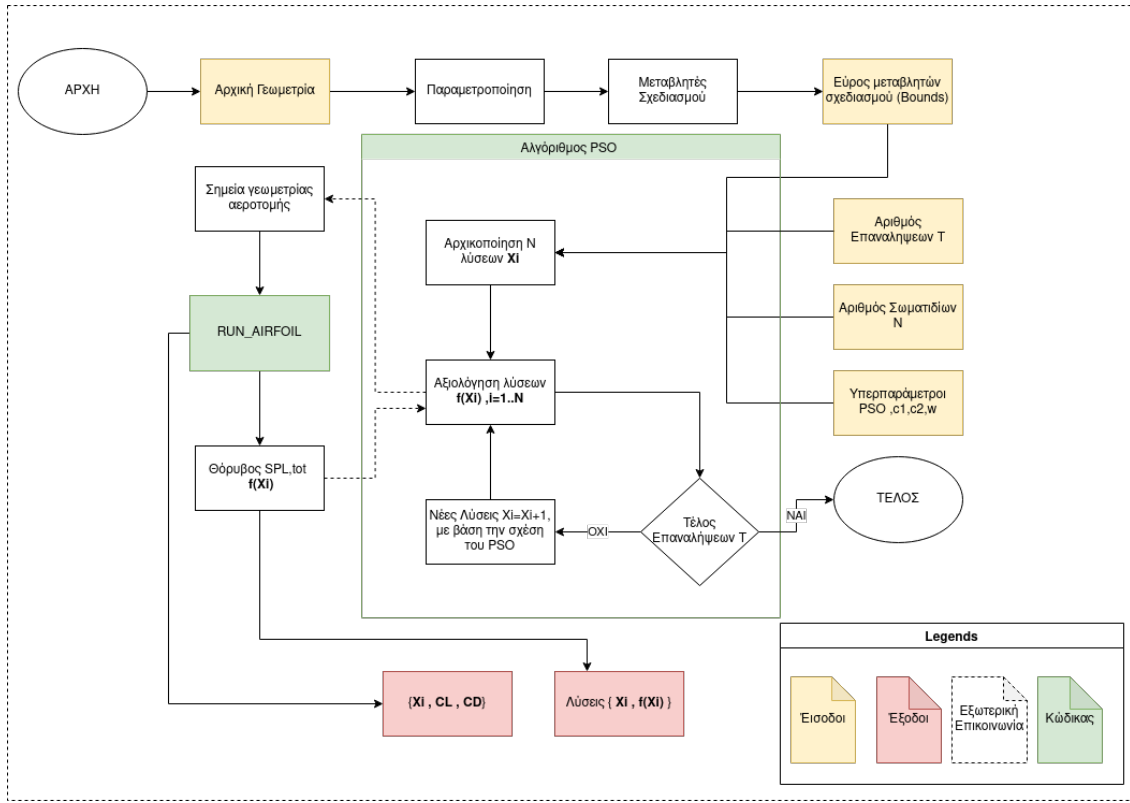
Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία

σχεδιασμού αλλά και με την εκπαίδευση μοντέλων μηχανικής μάθησης.

Η χρήση των μοντέλων μηχανικής μάθησης ενδείκνυται για τους εξής λόγους: α) Χρήσιμα στην εξαγωγή σχέσεων οι οποίες εκφράζουν την εξάρτηση της στάθμης του θορύβου και της αεροδυναμικής απόδοσης από τις γεωμετρικές παραμέτρους, β) Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης αντικαθιστώντας την αεροδυναμική και αεροακουστική επίλυση με πολύ χαμηλότερο υπολογιστικό κόστος. Έτσι δίνεται η δυνατότητα ευρείας διερεύνησης των παραμέτρων του αλγορίθμου PSO (πλήθος επαναλήψεων, αριθμός σωματιδίων κ.α).

Τέλος, το βασικό μέρος του κώδικα αναπτύχθηκε με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού python3, στην οποία ενσωματώθηκε η βιβλιοθήκη ανοιχτού κώδικα ("pyswarms"). Ο κώδικας βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί τον κώδικα του εργαστηρίου RUN_AIRFOIL, ο οποίος καλεί τους κώδικες των αεροδυναμικών και αεροακουστικών υπολογισμών, FOIL2W και CALC_SOUND, γραμμένους σε γλώσσα FORTRAN. Μερικές ακόμα βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι: pandas, scipy, matplotlib, seaborn, sklearn- όλες ανοιχτού κώδικα. Η εκπαίδευση των μοντέλων μηχανικής μάθησης έγινε σε υπολογιστή με 4GB μνήμη RAM και επεξεργαστή Intel(R) Pentium(R) CPU B960 @ 2.20GHz. Δεν έγινε χρήση κάρτας γραφικών. Η υπολογιστική επίλυση του πεδίου ροής και η βελτιστοποίηση έγινε με χρήση επεξεργαστή 8 πυρήνων Intel(R) Core(TM) i7-9700 CPU @ 3.00GH. Όλες οι αξιολογήσεις της αντικειμενικής συνάρτησης (function evaluations) έγιναν σειριακά. Στη συνέχεια δίνεται διάγραμμα ροής της παραπάνω διαδικασίας για μία πιο ευρεία απεικόνιση:

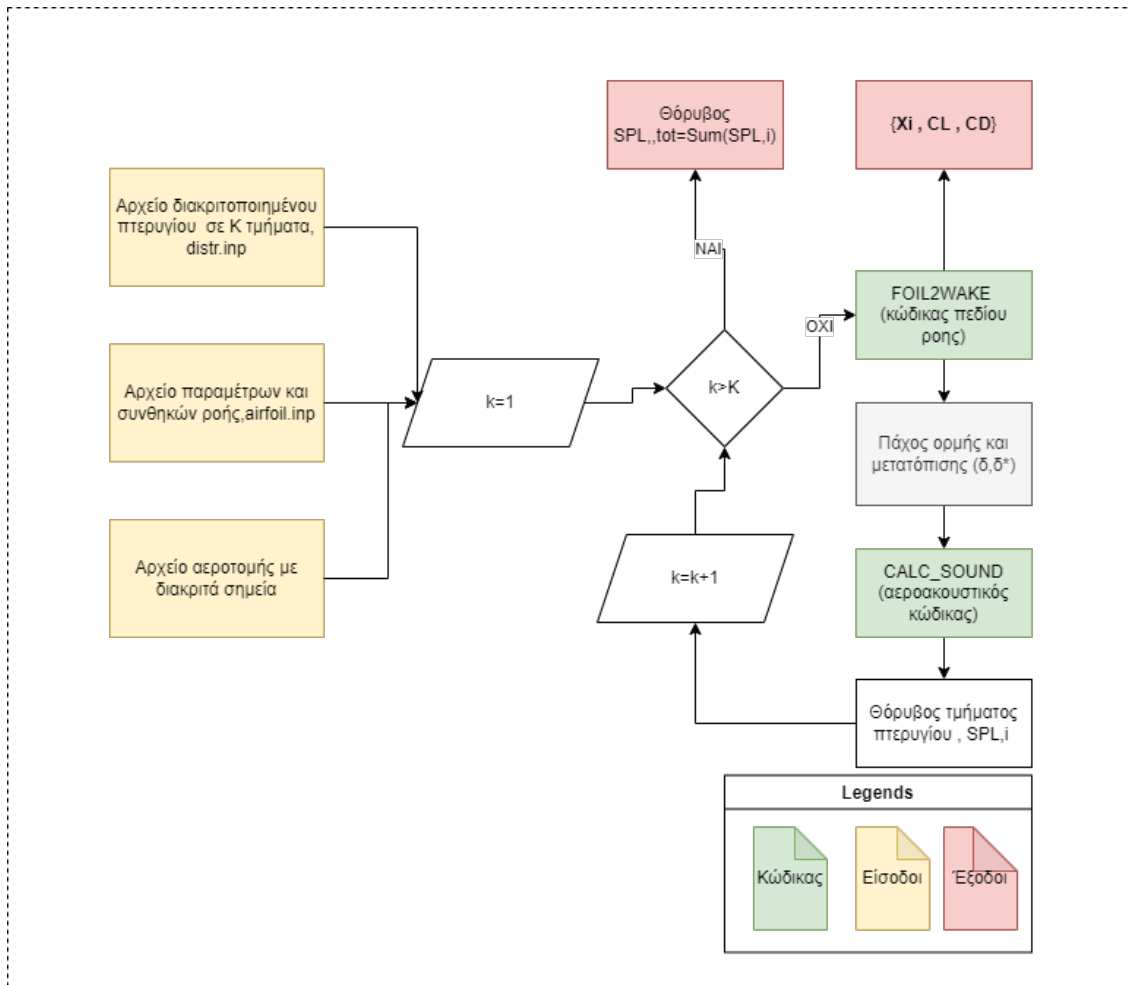
Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας

Με βάση το διάγραμμα του σχήματος 2.1 και τα προαναφερθέντα, ο RUN_AIRFOIL διαχειρίζεται τον αεροδυναμικό και αεροακουστικό κώδικα, μέσω μιας απλής συνάρτησης. Αυτή αποτελεί "μαύρο κουτί" για τον αλγόριθμο (black box optimization), καθώς το μόνο που βλέπει είναι οι μεταβλητές σχεδιασμού και ως έξοδο τον θόρυβο SPL,tot(dB). Προκειμένου το προηγούμενο σχήμα να παραμείνει ευδιάκριτο, παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2 ο αλγόριθμος του RUN_AIRFOIL:

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία



Σχήμα 2.2: Λογικό διάγραμμα κώδικα υπολογισμού του θορύβου για δεδομένη αεροτομή και γεωμετρία πτερυγίου, RUN_AIRFOIL

2.2 Επίλυση του Πεδίου Ροής-Μέθοδος Συνεκτικής-Μη Συνεκτικής Αλληλεπίδρασης

Ο κώδικας FOIL2W, [17], [18], αναπαριστά το πεδίο ταχύτητας τοποθετώντας πηγές και δίνες στροβιλότητας κατά μήκος της επιφάνειας της αεροτομής και του ομόρρου. Η παραπάνω μη συνεκτική μεθοδολογία συνδυάζεται με μια συνεκτική διόρθωση που βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων του οριακού στρώματος σε ολοκληρωματική μορφή. Η αλληλεπίδραση της συνεκτικής και της μη συνεκτικής ροής πραγματοποιείται με μία διανομή κάθετης ταχύτητας στην επιφάνεια της αεροτομής και στον ομόρρο, η οποία αντιστοιχεί στο έλλειμμα μάζας της συνεκτικής ροής συγκριτικά με τη μη-συνεκτική, στο πάχος του οριακού στρώματος. Οι συζευγμένες μη-γραμμικές εξισώσεις που προκύπτουν από την παραπάνω μεθοδολογία επιλύονται ταυτόχρονα,

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία

διευκολύνοντας τη σύγκλιση και σε περιπτώσεις ισχυρής αποκόλλησης.

Η μεθοδολογία του FOIL2W βασίζεται στον ορισμό μίας ισοδύναμης μη συνεκτικής ροής, η οποία αποτελείται από τη συνεισφορά του μη συνεκτικού πεδίου και από μία συνεκτική διόρθωση ως:

$$\vec{u}_e(\vec{x}, t) = \vec{u}(\vec{x}, t) + \vec{u}^*(\vec{x}, t), \quad \vec{x} \in D \quad (2.1)$$

όπου D το πεδίο ροής, $\vec{u}(\vec{x}, t)$ το μη συνεκτικό πεδίο, $\vec{u}^*(\vec{x}, t)$ η συνεκτική διόρθωση και $\vec{u}_e(\vec{x}, t)$ το ισοδύναμο μη συνεκτικό πεδίο.

Οι εξισώσεις συνέχειας, ορμής και ενέργειας διατυπώνονται σε ολοκληρωματική μορφή ως προς το ισοδύναμο μη συνεκτικό πεδίο. Η εξίσωση της συνέχειας αποτελεί συνοριακή συνθήκη κατά τον υπολογισμό της ισοδύναμης μη συνεκτικής ροής, ενώ από τις εξισώσεις ορμής και ενέργειας προκύπτουν τα χαρακτηριστικά του οριακού στρώματος. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται, επιπλέον, μια σειρά από εμπειρικές σχέσεις, μια εξίσωση προσδιορισμού του σημείου μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή, καθώς και μία εξίσωση υπολογισμού των τυρβωδών τάσεων στο οριακό στρώμα. Τα χαρακτηριστικά της ισοδύναμης μη συνεκτικής ροής δίνονται από την εξίσωση:

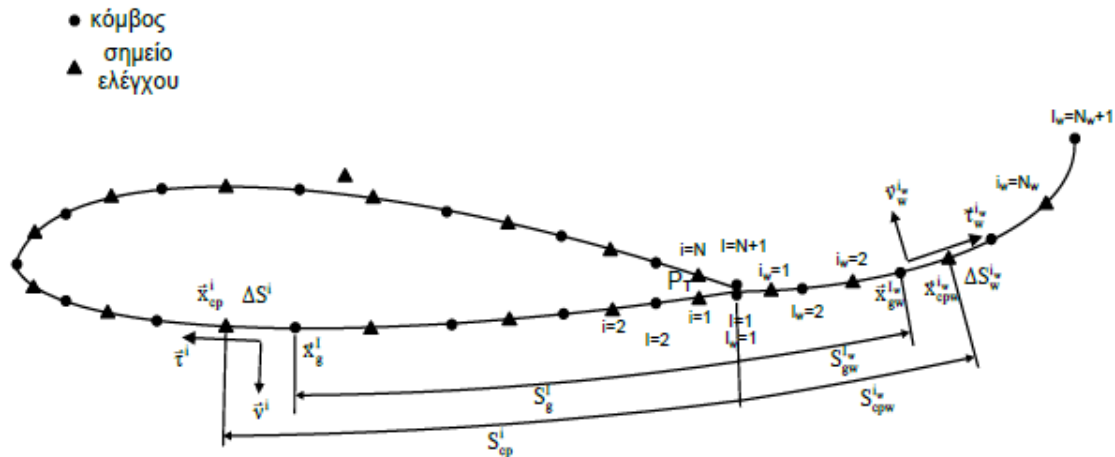
$$\vec{u}_e(\vec{x}, t) = \vec{U}_\infty(t) + \phi(\vec{x}, t) + \times(\psi(\vec{x}, t)\vec{k}) + \vec{u}^*(\vec{x}, t) = \vec{u}(\vec{x}, t) + \vec{u}^*(\vec{x}, t) \quad (2.2)$$

όπου: $\vec{U}_\infty(t)$ η επ'άπειρον ταχύτητα της ροής, $\phi(\vec{x}, t)$ το δυναμικό της ροής, $\psi(\vec{x}, t)$ η ροϊκή συνάρτηση, \vec{k} το κάθετο διάνυσμα στο δισδιάστατο πεδίο. Το πεδίο ταχύτητας της μη συνεκτικής ροής $\vec{u}(\vec{x}, t)$, προκύπτει από την ολοκληρωματική μορφή του δυναμικού και της ροϊκής συνάρτησης, σε συνδυασμό με την συνθήκη μη εισχώρησης. Από την εξίσωση της συνέχειας για την ισοδύναμη μη συνεκτική ροή υπολογίζεται η κάθετη ταχύτητα στην επιφάνεια της αεροτομής, από την οποία προκύπτει, μέσω των συνοριακών συνθηκών, η συνεκτική διόρθωση $\vec{u}^*(\vec{x}, t)$. Στις παραπάνω σχέσεις προστίθεται επιπλέον η συνθήκη Kelvin για τον ρυθμό της κυκλοφορίας και η συνθήκη της έντασης της αποβαλλόμενης στροβιλότητας στην ακμή εκφυγής.

Αριθμητική επίλυση Για την επίλυση του προβλήματος χωρίζουμε την αεροτομή σε N στοιχεία ($N + 1$ κόμβοι), με την αρίθμηση να ξεκινά στην ακμή εκφυγής και να συνεχίζει στην κάτω πλευρά. Μεγαλύτερη πυκνότητα κόμβων έχουμε στην ακμή πρόσπτωσης και στην ακμή εκφυγής, όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμών. Επιπλέον, χωρίζουμε σε N_w τμήματα το φύλλο του ομόρρου, με την αρίθμηση να ξεκινά από το σημείο εκφυγής του φύλλου. Οι εξισώσεις του οριακού στρώματος διακριτοποιούνται με πεπερασμένες διαφορές, με την επίλυση να ξεκινά στο σημείο

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία

ανακοπής και να ακολουθεί ξεχωριστά την άνω και κάτω πλευρά της αεροτομής, όπως φαίνεται στο (Σχήμα 2.3). Το τμήμα που περιέχει το σημείο μετάβασης χωρίζεται σε δύο στοιχεία, όπου πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί της στρωτής και τυρβώδους ροής αντίστοιχα.



Σχήμα 2.3: Διακριτοποίηση αεροτομής για υπολογισμό του μη συνεκτικού πεδίου ροής, κώδικας FOIL2W, το διάγραμμα είναι από την εργασία [19]

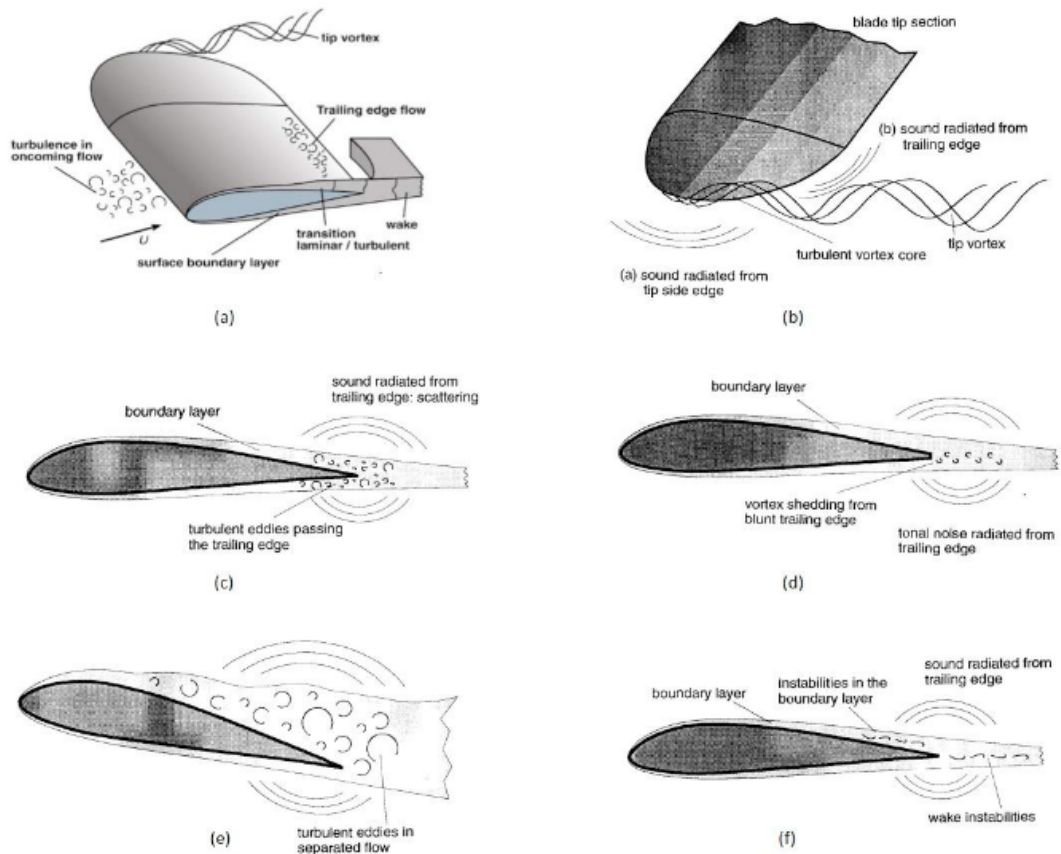
Για τον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών του προβλήματος, επιλύεται αρχικά η περίπτωση της μόνιμης, ασυμπίεστης, μη συνεκτικής ροής. Σε κάθε χρονικό βήμα που ακολουθεί, επιλύονται ταυτόχρονα οι εξισώσεις του οριακού στρώματος και οι εξισώσεις της ισοδύναμης μη συνεκτικής ροής. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ο κώδικας FOIL2W χρησιμοποιήθηκε σε μόνιμη ροή για τον υπολογισμό των παχών δ , δ^* του οριακού στρώματος, τα οποία απαιτούνται στη συνέχεια για την αεροακουστική επίλυση της αεροτομής.

2.3 Θόρυβος Ανεμογεννητριών

Ο αεροδυναμικός θόρυβος χωρίζεται σε 2 κατηγορίες, τον **θόρυβο λόγω τύρβης αέρα (Inflow turbulence)** και τον **αυτοεπαγόμενο θόρυβο (airfoil self-noise)**. Στην πρώτη, η αιτία είναι κυρίως η αλληλεπίδραση κυρίως της ακμή εκφυγής, με την τύρβη του ατμοσφαιρικού αέρα. Αυτή η αλληλεπίδραση προκαλεί θόρυβο ευρέος φάσματος και είναι σε μεγάλο βαθμό εξαρτώμενος από την ένταση της τύρβης του αέρα και την κλίμακα μήκους αυτής. Η δεύτερη κατηγορία διαχωρίζεται σε συνιστώσες, το θόρυβο λόγω τυρβώδους οριακού στρώματος ακμής εκφυγής (Turbulent boundary layer-Trailing edge noise, TBL-TE) που είναι συνήθως η πιο σημαντική συνιστώσα του

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία

θορύβου, θόρυβος ακροπτερυγίου (Tip noise), θόρυβος λόγω πάχους ακμής εκφυγής (Blunt trailing edge noise), θόρυβος λόγω αποκόλλησης (Separated/stalled flow noise), θόρυβος λόγω στρωτού οριακού στρώματος (Laminar boundary layer noise- LBL). Παρακάτω δίνονται σχηματικά οι παραπάνω συνιστώσες.



Σχήμα 2.4: Συνιστώσες θορύβου, το (a) δείχνει την ροή του εξωτερικού τμήματος του πτερυγίου, (b)-(f) αυτοεπαγόμενος θόρυβος, πηγή [20]

Σε αυτήν την εργασία ασχολούμαστε κυρίως με δύο συνιστώσες θορύβου που εξαρτώνται κυρίως από το σχήμα της αεροτομής. Αυτός είναι ο θόρυβος λόγω τυρβώδους οριακού στρώματος ακμής εκφυγής (TBL-TE) και θόρυβος λόγω στρωτού οριακού στρώματος (LBL). Προκειμένου να υπολογισθούν αυτές γίνεται χρήση ημειμπειρικών μοντέλων των Brooks, Pope Marcolini. Στη συνέχεια περιγράφονται με λεπτομέρεια αυτά τα δύο μοντέλα.

2.3.1 Ημιεμπειρικές Σχέσεις

Θόρυβος Τυρβώδους Οριακού Στρώματος Ακμής Εκφυγής- TBL-TE Ο θόρυβος τυρβώδους οριακού στρώματος οφείλεται στην αλληλεπίδραση της τύρβης του οριακού στρώματος, στην πλευρά υποπίεσης και υπερπίεσης, με την ακμή εκφυγής της αεροτομής. Το φάσμα του θορύβου προκύπτει, σε κλίμακα 1/3 της οκτάβας, από το λογαριθμικό άθροισμα τριών όρων ως:

$$SPL_{TBL} = 10 \log (10^{SPL_\alpha/10} + 10^{SPL_s/10} + 10^{SPL_p/10}) \quad (2.3)$$

,όπου: SPL_s η συνεισφορά της πλευράς υποπίεσης (suction side), SPL_p η συνεισφορά της πλευράς υπερπίεσης (pressure side) και SPL_a η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης. Συγκεκριμένα,

$$\begin{aligned} SPL_p &= 10 \log \left(\frac{\delta_p^* M^5 L \bar{D}_h}{r_e^2} \right) + A \left(\frac{St_p}{St_1} \right) + (K_1 - 3) + \Delta K_1 \\ SPL_s &= 10 \log \left(\frac{\delta_s^* M^5 L \bar{D}_h}{r_e^2} \right) + A \left(\frac{St_s}{St_1} \right) + (K_1 - 3) \\ SPL_a &= 10 \log \left(\frac{\delta_s^* M^5 L \bar{D}_h}{r_e^2} \right) + B \left(\frac{St_s}{St_2} \right) + K_2 \end{aligned} \quad (2.4)$$

,όπου: δ_s^* , δ_p^* το πάχος μετατόπισης της πλευράς υποπίεσης και υπερπίεσης αντίστοιχα, M ο αριθμός Mach της ροής, L το μήκος της ακμής εκφυγής, \bar{D}_h συνάρτηση κατευθυντικότητα, r_e η απόσταση του παρατηρητή, K_1 εμπειρική σταθερά, συνάρτηση του αριθμού Reynolds ως προς τη χορδή R_c , K_1 εμπειρική σταθερά, συνάρτηση του αριθμού Reynolds ως προς το δ_p^* και της γωνίας πρόσπτωσης, K_2 εμπειρική σταθερά, συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης και του αριθμού Mach, Οι συναρτήσεις A , B αποτελούν εμπειρικές συναρτήσεις του αριθμού Strouhal και του αριθμού Reynolds ως προς τη χορδή. Για τους αριθμούς Strouhal ισχύει:

$$St_p = \frac{f \delta_p^*}{U}, St_s = \frac{f \delta_s^*}{U}, St_1 = 0.02 M^{-0.6}, St_2 = \begin{cases} 1 & \alpha < 1.33^\circ \\ 10^{0.0054(\alpha-1.33)^2} & 1.33^\circ \leq \alpha \leq 12.5^\circ \\ 4.72 & \alpha > 12.5^\circ \end{cases} \quad (2.5)$$

,όπου: f η συχνότητα, U η ταχύτητα της ροής και α η γωνία πρόσπτωσης.

Σε μη μηδενικές γωνίες πρόσπτωσης μπορεί να δημιουργηθεί αποκόλληση στην πλευρά υποπίεσης κοντά στην ακμή εκφυγής, η οποία οδηγεί σε αποβολή στροβιλότητας και συνεπώς παραγωγή θορύβου. Σε μεγάλες γωνίες εμφανίζεται αποκόλληση μεγάλης κλίμακας κατά μήκος μεγάλου ποσοστού της χορδής, η οποία οδηγεί σε θόρυβο χαμηλότερων συχνοτήτων. (Σχήμα 2.4) Με βάση τους Brooks, Pope Marcolini, γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη της μεταβλητής $g_0 = 23.43M + 4.651$ ή των

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία

12.5^ο, αντιστοιχεί σε κατάσταση αποκόλλησης και οι παραπάνω σχέσεις γίνονται:

$$SPL_p = \infty, SPL_s = \infty, SPL_a = 10 \log \left(\frac{\delta_s^* M^5 L \bar{D}_h}{r_e^2} \right) + A' \left(\frac{St_s}{St_2} \right) + (K_2) \quad (2.6)$$

Θόρυβος στρωτού οριακού στρώματος Σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds το οριακό στρώμα είναι στρωτό. Στην περίπτωση αυτή, η παραγωγή θορύβου οφείλεται στις αστάθειες του οριακού στρώματος που οδηγούν σε αποβολή στροβιλότητας από την ακμή εκφυγής. Το φάσμα του θορύβου του στρωτού οριακού στρώματος είναι, σε κλίμακα 1/3 της οκτάβας, ίσο με:

$$SPL_{LBL} = 10 \log \left(\frac{\delta_p^* M^5 L \bar{D}_h}{r_e^2} \right) + G_1 \left(\frac{St'}{St'_{peak}} \right) + \left(G_2 \frac{R_c}{(R_c)_0} \right) + G_3(a) \quad (2.7)$$

,όπου: δ_p^* το πάχος του οριακού στρώματος στην πλευρά υπερπίεσης, $(R_c)_0$ τιμή αναφοράς του αριθμού Reynolds, συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης a . Οι συναρτήσεις G_1, G_2, G_3 εξαρτώνται από τους αριθμούς Strouhal, τον αριθμό Reynolds ως προς τη χορδή R_c και τη γωνία πρόσπτωσης a . Για τους αριθμούς Strouhal ισχύει:

$$St' = \frac{f \delta_p^*}{U}, St_2 = \begin{cases} 0.18 & R_c \leq 1.3 \cdot 10^5 \\ 0.001756 R_c^{0.3931} & 1.3 \cdot 10^5 < R_c \leq 4 \cdot 10^5 \\ 0.28 & R_c > 4 \cdot 10^5 \end{cases} \quad (2.8)$$

2.3.2 Αεροακουστικός Κώδικας και Δρομέας Ανεμογεννήτριας

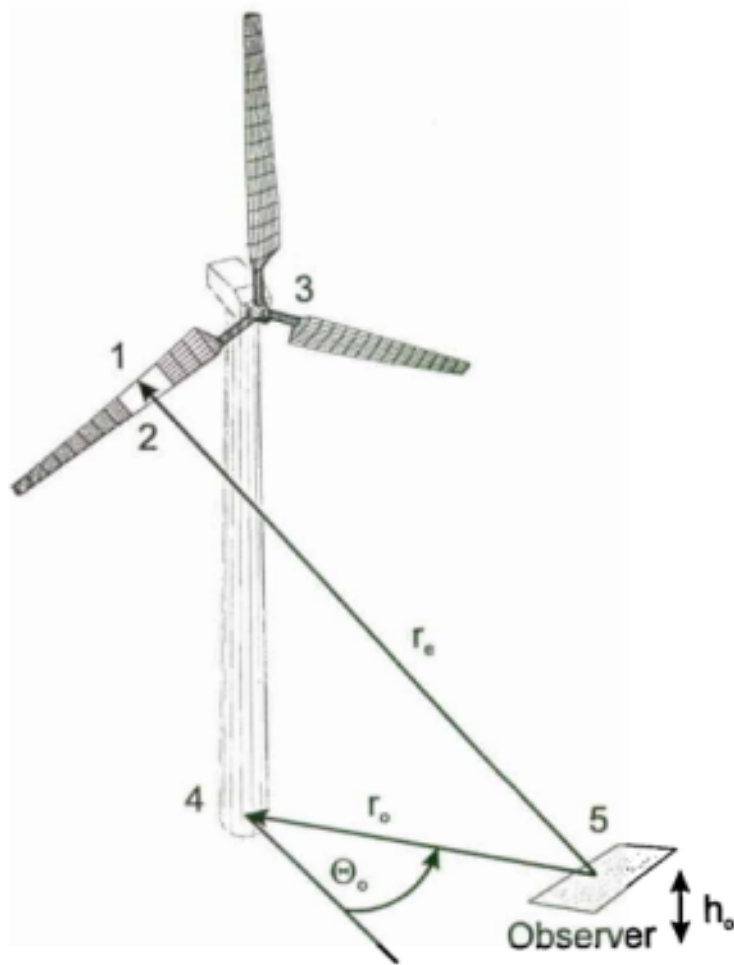
Για την επίλυση του αεροακουστικού προβλήματος σε δρομέα ανεμογεννήτριας, το πτερύγιο χωρίζεται σε στοιχεία εντός των οποίων η γεωμετρία θεωρείται σταθερή. Σε κάθε στοιχείο θεωρούμε πως η ροή είναι διδιάστατη και μπορούμε να εφαρμόσουμε τον αεροδυναμικό και αεροακουστικό κώδικα. Από τη γεωμετρία της ανεμογεννήτριας και τα χαρακτηριστικά της ροής υπολογίζουμε σε κάθε θέση τα δεδομένα εισόδου του αεροδυναμικού κώδικα FOIL2W, από τον οποίον προκύπτουν, στη συνέχεια, το πάχος δ και το πάχος μετατόπισης δ^* του οριακού στρώματος, για την πλευρά υποπίεσης και υπερπίεσης της αεροτομής. Καθώς ο αεροακουστικός κώδικας βασίζεται σε μετρήσεις της NACA 0012, απαιτείται αναγωγή στην αντίστοιχη αεροτομή του στοιχείου πτερύγωσης. Για τον σκοπό αυτό οι αεροδυναμικοί υπολογισμοί πραγματοποιούνται δύο φορές, για την NACA 0012 και για την πραγματική αεροτομή και υπολογίζονται οι αντίστοιχοι λόγοι ομοιότητας μεταξύ των αεροτομών ως:

$$\alpha_\delta = \frac{\delta_{air\,foil}}{\delta_{012}} \quad (2.9)$$

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία

Οι λόγοι ομοιότητας πολλαπλασιάζονται στη συνέχεια με τις πειραματικές τιμές των Brooks, Pope, Marcolini, οπότε και προκύπτουν τα τελικά μεγέθη του πάχους και του πάχους μετατόπισης του οριακού στρώματος για κάθε πλευρά της αεροτομής. Με τα απαραίτητα χαρακτηριστικά του οριακού στρώματος να είναι γνωστά, μπορεί να επιλυθεί στη συνέχεια ο αεροακουστικός κώδικας. Ο συνολικός θόρυβος που εκπέμπει ένα στοιχείο του περυγίου υπολογίζεται από το λογαριθμικό άθροισμα των επιμέρους πηγών θορύβου.

Η θέση του παρατηρητή ορίζεται πάντα ως προς την ακμή εκφυγής (Σχήμα 2.8). Αφού υπολογιστεί ο παραγόμενος θόρυβος από κάθε στοιχείο του περυγίου, περιστρέφουμε το περυγίο κατά μικρή γωνία και επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς έως ότου να καλύψει μία πλήρη περιστροφή. Το τελικό φάσμα του θορύβου ολόκληρου του δρομέα προκύπτει από το λογαριθμικό άθροισμα της μέσης τιμής της έντασης για μία περιστροφή για το σύνολο των περυγίων της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 2.5: Θέση παρατηρητή ως προς την ανεμογεννήτρια στους υπολογισμούς, πηγή Καλομενοπούλου [5]

2.4 Παραμετροποίηση Αεροτομών

Κάθε φορά που θέλουμε να εξετάσουμε ένα μέγεθος που συνδέεται με την γεωμετρία της αεροτομής πρέπει να βρούμε ένα τρόπο να μεταβάλλουμε το σχήμα της και στη συνέχεια να εξετάσουμε την τιμή του μεγέθους. Οι μέθοδοι παραμετροποίησης[21] αναπτύχθηκαν προκειμένου να υπάρχει δυνατότητα μεταβολής της γεωμετρίας αλλάζοντας έναν συγκεκριμένο μικρό αριθμό μεταβλητών. Συνήθεις μέθοδοι που αναπτύχθηκαν για αυτόν το σκοπό αφορούν πολυώνυμα, όπως η μέθοδος Bezier [22, 23], μέθοδος Ferguson Cubic Splines [24], μέθοδος Parsec[25], καθώς και συνδυασμός αυτών όπως η Bezier-Parsec [26]. Το κοινό μοτίβο που βλέπουμε σε αυτές τις

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία

μεθόδους είναι:

- Αρχική επιλογή πολυωνύμου που θέλουμε να προσεγγίζει την αεροτομή μας με αγνώστους συντελεστές
- Επιβολή σχέσεων που αφορούν την γεωμετρία (ένα παράδειγμα είναι το πολυώνυμο να περνάει από το τελευταίο σημείο της αεροτομής $x=1, y=0$)
- Κατασκευή συστήματος εξισώσεων μέσω των προηγούμενων σχέσεων
- Επίλυση του συστήματος και εύρεση συντελεστών
- Έχοντας το πολυώνυμο που περιγράφει τη γεωμετρία μπορεί να γίνει εκλογή διαφόρων σημείων πάνω σε αυτή, για περεταίρω υπολογισμούς ή μεταβολή της γεωμετρίας μέσω μεταβολής των συντελεστών

Η μέθοδος που θα επιλεγεί για την επίλυση του προβλήματος σε αυτή την εργασία θα είναι η Parsec και αναλύεται εκτενέστερα στη συνέχεια.

2.4.1 Παραμετροποίηση με την μέθοδο Parsec

Η μέθοδος Parsec αναπτύχθηκε προκειμένου να υπάρχει μία σύνδεση μεταξύ κάποιων φυσικών χαρακτηριστικών της γεωμετρίας της αεροτομής και του πολυωνύμου που την περιγράφει. Επιλέγεται πολυώνυμο με 6 βαθμούς ελευθερίας, ένα για την κάθε πλευρά της αεροτομής (υπερπίεσης και υποπίεσης), που περιγράφεται από τη σχέση:

$$y(x) = \sum_{i=1}^6 a_i \cdot x^{i-1/2} \quad (2.10)$$

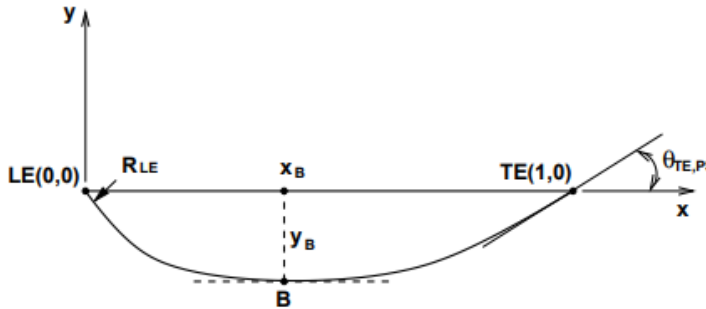
Προκειμένου το παραπάνω πολυώνυμο να περιγράφει την πλευρά απαιτείται να προσδιοριστούν οι άγνωστοι συντελεστές του. Οι σχέσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια αφορούν μόνο την μία πλευρά (πχ υπερπίεσης) και αντίστοιχες σχέσεις

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία

πρέπει να διατυπωθούν και για την άλλη. Για αυτόν το σκοπό έχουμε:

$$\begin{aligned}
 y(1) &= 0 \\
 y_B &= y(x_B) = \sum_{i=1}^6 a_i \cdot x^{i-1/2} \\
 \tan(\theta_{TE,p}) &= \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=1} = \sum_{i=1}^6 (i - 1/2) \cdot a_i \\
 \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_B} &= 0 = \sum_{i=1}^6 (i - 1/2) \cdot a_i \cdot x_B^{i-3/2} \\
 s_B &= \left. \frac{d^2y}{dx^2} \right|_{x=x_B} = \sum_{i=1}^6 (i - 1/2) \cdot (i - 3/2) \cdot a_i \cdot x_B^{i-5/2} \\
 R_{LE} &= \left. \frac{(1 + y'^2)^{3/2}}{y''} \right|_{x=0} = \frac{a_1^2}{2}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Ένα διάγραμμα που παρουσιάζει τις παραπάνω σχέσεις είναι:



Σχήμα 2.6: Γεωμετρία και παράμετροι Parsec , πηγή βιβλίο Γιαννάκογλου [23]

Με χρήση των σχέσεων (2.10) προκύπτει ένα γραμμικό σύστημα με αγνώστους τους συντελεστές της καμπύλης Parsec, που αναπαρίσταται στη συνέχεια με τον

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία

πίνακα A. Οι πίνακες X, B είναι πλήρως ορισμένοι. Το σύστημα έρχεται στη μορφή:

$$\begin{aligned} X \cdot A &= B, \\ X &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_b^{3/2} & x_b^{5/2} & x_b^{7/2} & x_b^{9/2} & x_b^{11/2} \\ 3/2 & 5/2 & 7/2 & 9/2 & 11/2 \\ (3/2)x_b^{1/2} & (5/2)x_b^{3/2} & (7/2)x_b^{5/2} & (9/2)x_b^{7/2} & (11/2)x_b^{9/2} \\ (3/4)x_b^{-1/2} & (15/4)x_b^{1/2} & (35/4)x_b^{3/2} & (63/4)x_b^{5/2} & (99/4)x_b^{7/2} \end{pmatrix} \\ A &= \begin{pmatrix} a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{pmatrix} \\ B &= \begin{pmatrix} -a_1 \\ y_b - a_1 x_b^{1/2} \\ \tan(\theta_{TE,ps}) - (1/2)a_1 \\ -(1/2)a_1 x_b^{-1/2} \\ s_b + (1/4)a_1 x_b^{-3/2} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Τέλος σημειώνεται πως υπάρχουν και παραλλαγές που χρησιμοποιούν άλλα φυσικά χαρακτηριστικά της αεροτομής όπως για παράδειγμα το πάχος στην ακμή εκφυγής. Εδώ θεωρήθηκε ότι η αεροτομή έχει μηδενικό πάχος ακμής εκφυγής και οι δύο πλευρές καταλήγουν ακριβώς στο ίδιο τελικό σημείο.

2.5 Βελτιστοποίηση και Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

Βελτιστοποίηση (optimization) ενός μεγέθους ορίζεται η διαδικασία αναζήτησης μίας καλύτερης, αν είναι δυνατών της βέλτιστης, τιμής του μεγέθους αυτού προς μία κατεύθυνση, μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης, μεταβάλλοντας κάποιες παραμέτρους από τις οποίες εξαρτάται. Το μέγεθος που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε ονομάζεται **αντικειμενική συνάρτηση** (objective function) ή συνάρτηση στόχος και οι τιμές από τις οποίες εξαρτάται ονομάζονται **μεταβλητές σχεδιασμού** (design variables). Το πρόβλημα βελτιστοποίησης, μπορεί να υπόκειται σε περιορισμούς (constraint optimization problem) είτε προς τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης είτε ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού που ονομάζονται συνήθως **όρια των μεταβλητών** (bounds). Λύση στο πρόβλημα νοείται η εύρεση των μεταβλητών σχεδιασμού όπου διαμορφώνουν την αντικειμενική συνάρτηση σε μία ελάχιστη (μέγιστη) ή έστω μικρότερη (μεγαλύτερη) τιμή μίας αρχικά γνωστής λύσης. Τα βήματα που ακολουθούνται για εύρεση μιας τέτοιας λύσης δομούν έναν **αλγόριθμο βελτιστοποίησης**.

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να χωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες, αυτές των **αιτιοκρατικών** (deterministic) και των **στοχαστικών** (stochastic) αλγορίθμων, [23]. Οι τελευταίοι κάνουν χρήση παραμέτρων που είναι τυχαίες όπως η μεταβλητή μετάλλαξης στους γενετικούς αλγορίθμους[27] που δηλώνει την πιθανότητα που θα υποστεί μετάλλαξη μία υποψήφια λύση. Η λέξη πιθανότητα υποδηλώνει τη στοχαστικότητα με την έννοια ότι όσες φορές και αν προκύψει η ίδια λύση, η μετάλλαξη που θα υποστεί και συνεπώς η επόμενη υποψήφια λύση, δεν είναι βέβαιο ότι θα υπάρξει. Αντίθετα στην κατηγορία των αιτιοκρατικών-ντετερμινιστικών αλγορίθμων εμπεριέχονται αλγόριθμοι που κάνουν **χρήση των παραγώγων** (αλγόριθμος απότομης καθόδου-Gradient Descent Algorithm) ή προσεγγίσεις αυτών (μέθοδοι Quasi-Newton) και συνεπώς στην περίπτωση μίας προκύπτουσας λύσης όσες φορές και να εφαρμοστεί το βήμα που πηγαίνει στην επόμενη, εφόσον υπάρχει γνώση της παραγώγου, το επόμενο βήμα είναι δεδομένο. Ακόμη σε περίπτωση που υπάρχει αναλυτική μορφή της συνάρτησης και η παράγωγος αποτελεί σχετικά απλή συνάρτηση της μεταβλητής σχεδιασμού, εύρεση της ρίζας της παραγώγου της συνάρτησης δύναται να αποτελεί και τη βέλτιστη λύση, έτσι έχουμε ολοκλήρωση της βελτιστοποίησης σε ένα μόνο βήμα, πράγμα που συμβαίνει σπανίως σε πρακτικά προβλήματα. Συνήθως, απαιτείται **επαναληπτική διαδικασία** που οδηγεί σε συνεχώς καλύτερες λύσεις. Σημαντικό μειονέκτημα των αιτιοκρατικών μεθόδων είναι ότι απαιτούν χρόνο από τον μηχανικό προκειμένου να υπολογίσει τις παραγώγους της συνάρτησης. Επίσης υπάρχει ενδεχόμενο να εγκλωβιστούν σε τοπικό ελάχιστο μή έχοντας την δυνατότητα εξερεύνησης όλου του χωρίου των λύσεων. Στο τελευταίο οι στοχαστικές μπορούν με τον κατάλληλο σχεδιασμό να κάνουν έναν πιο εκτενές ψάξιμο του χωρίου των λύσεων, με την ανταλλαγή σε υπολογιστικό κόστος. Σήμερα υπάρχουν μέθοδοι που κάνουν χρήση συνδυασμού των 2 κατηγοριών.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικές μέθοδοι που προσομοιώνουν κάποιες διαδικασίες που ακολουθούν βιολογικοί οργανισμοί όπως κάποια είδη ψαριών, πουλιών, μυρμηγκιών και άλλα. Αυτές οι μέθοδοι ανήκουν στην κατηγορία των μεταευριστικών (Metaheuristics). Ένα από τα σημαντικά τους πλεονεκτήματα είναι η εύρεση βέλτιστης λύσης χωρίς την απαίτηση η συνάρτηση να είναι παραγωγίσιμη (Derivative Free Optimization) και μερικά παραδείγματα αυτών είναι: βελτιστοποίηση με αποικία μυρμηγκιών (Ant colony optimization algorithms), τεχνική αποικία μελισσών (Artificial bee colony algorithm), αλγόριθμος μελισσών (Bees algorithm), βελτιστοποίηση με σμήνος σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) και παραλλαγή αυτού όπως η βελτιστοποίηση με πολύ-σμήνος (Multi-swarm optimization). Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει χρήση του PSO αλγορίθμου όπως έχει εφαρμοστεί στο ερευνητικό εργαλείο της Lester James V. Miranda [28], γραμμένο σε γλώσσα python.

2.5.1 Αλγόριθμος Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization-PSO)

Η μέθοδος PSO βασίζεται στην συνεργασία μεταξύ ενός πλήθους λύσεων (swarm), όπου σε κάθε επανάληψη μέσω επικοινωνίας μεταξύ τους γνωρίζουν ποιά είναι η καλύτερη λύση και ερευνούν τις θέσεις όπου θα μπορούσε να υπάρξει καλύτερη. Αρχικά, ορίζεται ένα πλήθος λύσεων και σε κάθε επανάληψη γίνεται αναβάθμιση της θέσης του κάθε σωματιδίου του σμήνους και αξιολόγηση της αντικειμενικής συνάρτησης.

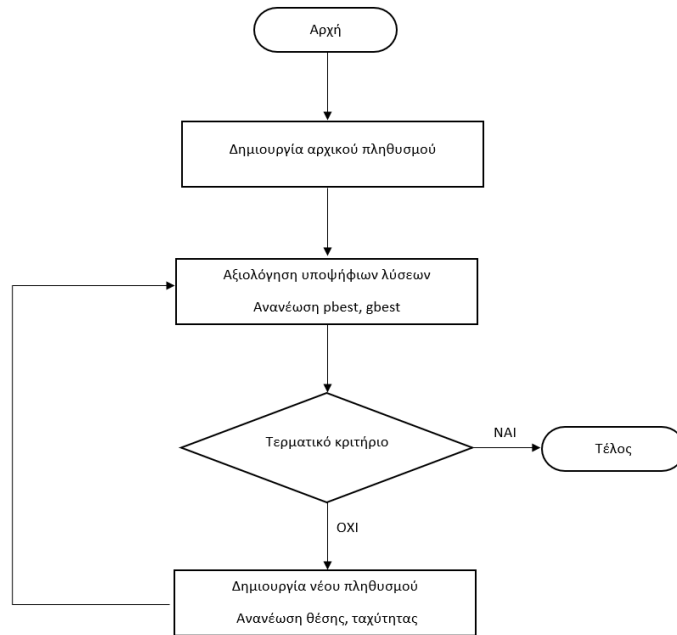
Η βασική σχέση που καθορίζει την θέση του κάθε σωματιδίου σε κάθε επανάληψη είναι η:

$$v_{id} = w \cdot v_{id} + c1 \cdot rand() \cdot (p_{id} - x_{id}) + c2 \cdot Rand() \cdot (p_{gd} - x_{id}) \quad (2.13)$$

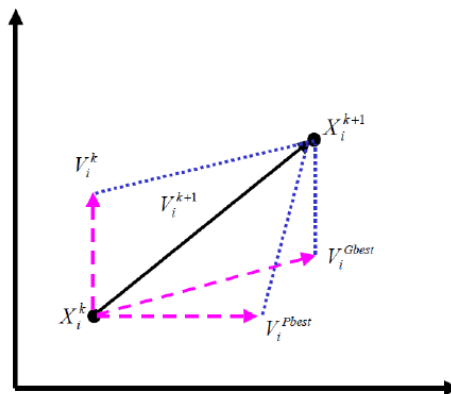
$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (2.14)$$

όπου: τα x_{id}, v_{id} είναι η θέση (υποψήφια λύση) και ταχύτητα του d σωματιδίου, $c1, c2, w$ είναι συντελεστές ατομικής συμπεριφοράς, κοινωνικής συμπεριφοράς και όρος αδρανείας αντίστοιχα, $rand(), Rand()$ τυχαίοι αριθμοί από 0 έως 1 και p_{id}, p_{gd} η καλύτερη προσωπική λύση και καλύτερη λύση όλου του σμήνους. Η ταχύτητα ορίζεται με την έννοια του μεγέθους που προσδιορίζει κάθε φορά τη θέση του σωματιδίου την επόμενη επανάληψη, η οποία όπως φαίνεται ορίζεται από τους συντελεστές $(c1, c2, w)$, δηλαδή αυτοί καθορίζουν τον τρόπο συνεργασίας του σμήνους. Τέλος δίνεται και ένα διάγραμμα ροής του αλγόριθμου και η σχέση που μεταβάλλει την θέση του κάθε σωματιδίου:

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία



(α') Διάγραμμα ροής αλγορίθμου PSO, πηγή Θεμιστοκλέους [19]



(β') Αναπαράσταση της σχέσης αναβάθμισης της θέσης σωματιδίου

Σχήμα 2.7: Στο (α') έχουμε το Διάγραμμα ροής αλγορίθμου PSO και στο (β') την γεωμετρική αναπαράσταση σχέσης αναβάθμισης της θέσης των σωματιδίων. Η σχέση εφαρμόζεται σε κάθε σωματίδιο και βλέπουμε ότι εξαρτάται και από την προηγούμενη θέση.

2.6 Μοντέλα Ανάλυσης Δεδομένων και Μηχανικής Μάθησης

2.6.1 Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Regression) - Γραμμικό μοντέλο OLS

Η τεχνική της γραμμικής παλινδρόμησης εφαρμόζεται αρκετά συχνά σε προβλήματα όπου έχουμε δεδομένα και θέλουμε να κάνουμε είτε κάποια πρόβλεψη της συνάρτησης μελλοντικά είτε θέλουμε να δούμε αν η συνάρτηση στόχος έχει γραμμική σχέση με τις ανεξάρτητες μεταβλητές που έχουμε παρατηρήσει. Η τεχνική βασίζεται στην υπόθεση πως η εξαρτημένη μεταβλητή y καθορίζεται από μία γραμμική σχέση, από τις ανεξάρτητες μεταβλητές X . Στην ουσία η συνάρτηση που συνδέει την ανεξάρτητη μεταβλητή εισόδου X , με την εξαρτημένη μεταβλητή εξόδου y , είναι ο γραμμικός συνδυασμός των X . Αναλυτικά:

$$\hat{y}(w, x) = f(Xi, w) = \sum w \cdot X = w_0 + w_1x_1 + \dots + w_px_p, \quad (2.15)$$

$$\min_w \|\hat{y} - y\|_2^2 == \min_w \|Xw - y\|_2^2 \quad (2.16)$$

Ως \hat{y} ορίζεται η συνάρτηση προσέγγισης και y οι τιμές των παρατηρήσεων που έχουμε διαθέσιμες. Προκειμένου να βρούμε αυτή την σχέση το μόνο που απαιτείται είναι ο υπολογισμός των συντελεστών w_i , δηλαδή η εύρεση του διανύσματος w . Όταν γνωρίζουμε τα βάρη, η έξοδος της συνάρτησης f είναι πλήρως καθορισμένη για ορισμένες τιμές των i . Η διαδικασία εύρεσης των βαρών αποκαλείται συνήθως "εκπαίδευση" (training) του μοντέλου. Σε μοντέλα επιβλεπόμενης μάθησης (supervised learning), προκειμένου να γίνει εκπαίδευση, ορίζεται μία συνάρτηση κόστους, που συνδέει τα δεδομένα που ήδη γνωρίζουμε y , με τις εξόδους του μοντέλου \hat{y} . Ως συνάρτηση κόστους συνήθως ορίζεται η συνάρτηση μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Mean Squared Error Loss Function) ή και το αθροισμα τετραγωνικών υπολοίπων (Residuals Sum of Squares-RSS). Στην βιβλιοθήκη ανοιχτού λογισμικού scikit-learn (python), για το γραμμικό μοντέλο έχει οριστεί η δεύτερη συνάρτηση κόστους RSS. Το γραμμικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη και εκτός του πεδίου τιμών X_i στις οποίες έχει εκπαιδευτεί (προεκβολή-extrapolation), υποθέτοντας προφανώς πως η γραμμική σχέση ισχύει και έξω από αυτό. Τέλος διευκρινίζουμε πως ακόμα και η εύρεση των βαρών είναι πρόβλημα βελτιστοποίησης, εύκολο προς την επίλυσή του καθώς γνωρίζουμε αναλυτικά την αντικειμενική συνάρτηση, που δεν είναι άλλη από την συνάρτηση κόστους η οποία και θέλουμε να ελαχιστοποιηθεί. Το μοντέλο όπως έχει οριστεί εδώ ονομάζεται Κοινά Ελάχιστα Τετράγωνα (Ordinary Least Squares - OLS).

2.6.2 Γραμμική Παλινδρόμηση με όρο απαγόρευσης (Penalized Linear Regression-LASSO)

Το μοντέλο αυτό είναι μία παραλλαγή του κλασσικού μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης, με πρόσθεση ενός όρου κόστους επιπλέον. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται προκειμένου να γίνει η προσαρμογή του μοντέλου (model fit) είναι:

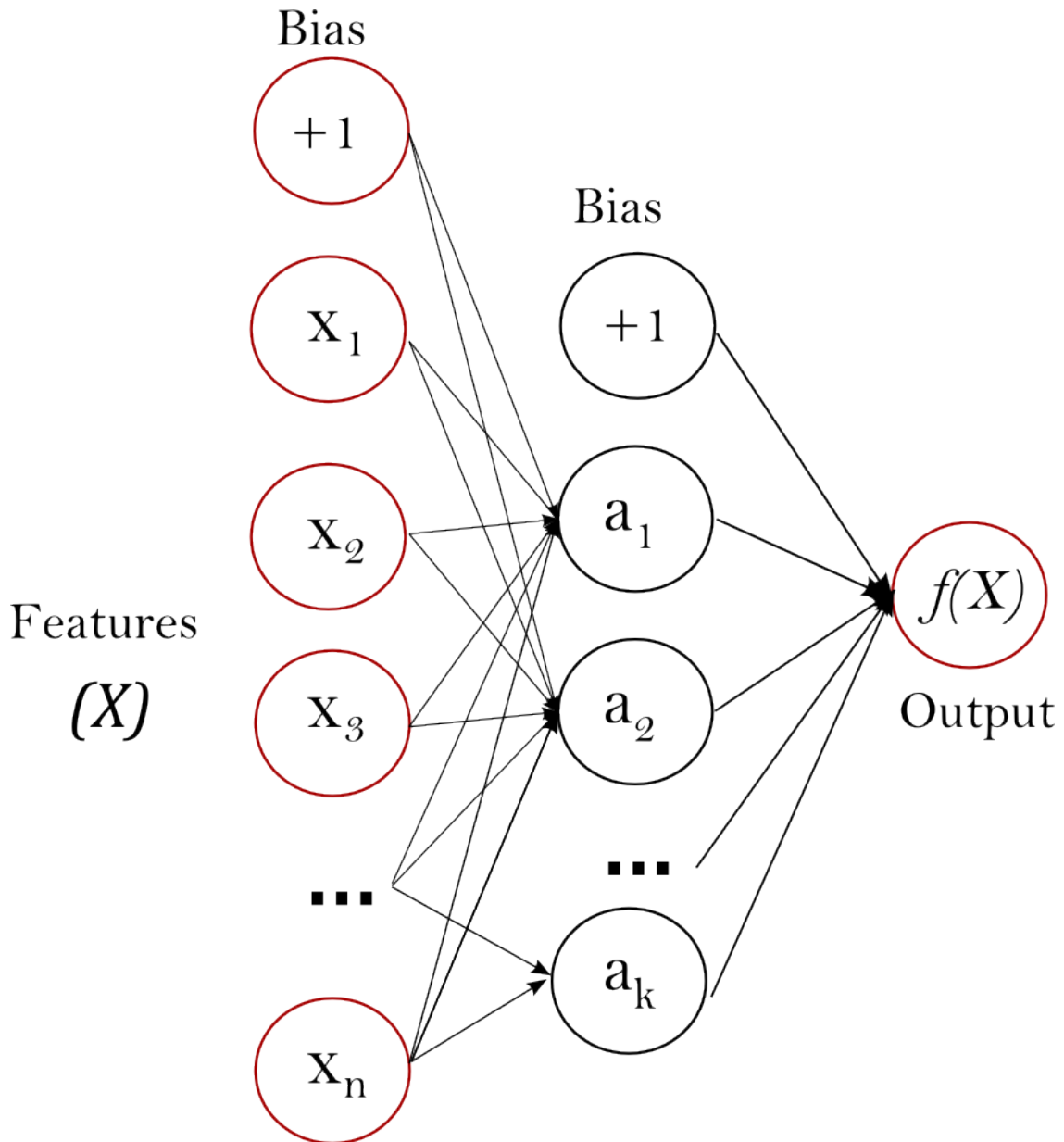
$$\min_w \frac{1}{2n_{\text{σαμπλ.εξ}}}}{\|Xw - y\|_2^2 + \alpha \|w\|_1} \quad (2.17)$$

Το μοντέλο αυτό, ανάλογα με το μέγεθος της τιμής του συντελεστή α , έχει την τάση να μηδενίζει του συντελεστές w . Αντιστρόφως, έχει την τάση να "κρατάει" τους συντελεστές εκείνους που θεωρεί πιο χρήσιμους για την πρόβλεψη. Λόγω αυτής της ιδιότητάς του, χρησιμοποιείται ως τεχνική μείωσης των διαστάσεων (Dimensionality Reduction) του προβλήματος, δηλαδή εκλογή των πιο χρήσιμων χαρακτηριστικών-εισόδων του προβλήματος. Για περισσότερες λεπτομέρειες επί των μοντέλων παραπέμπουμε στο διαδικτυακό εγχειρίδιο (documentation) του scikit-learn [29], στην παράγραφο της παλινδρόμησης (Regression) και των γραμμικών μοντέλων.

2.6.3 Νευρωνικά Δίκτυα πολλών στρωμάτων (Multilayer Neural Networks)

Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν αποκτήσει τεράστιες εφαρμογές τα τελευταία χρόνια λόγω της εξέλιξης των υπολογιστών και τις δυνατότητάς του να προσεγγίζουν μη γραμμικά (αλλά και γραμμικά) προβλήματα αλλά και για μάθηση σε-πραγματικό χρόνο on-line learning.

Ένας νευρώνας του δικτύου αποτελείται πρακτικά από ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης, που όμως λίγο πριν πάρουμε την έξοδο του εφαρμόζεται μία μη γραμμική συνάρτηση, t . Συνδυασμός πολλών νευρώνων παράλληλα (που βλέπουν την ίδια είσοδο) αποτελούν ένα στρώμα (layer). Πολλά στρώματα σειριακά διαμορφώνουν ένα Πολυστρωματικό Νευρωνικό Δίκτυο. Αξίζει να σημειωθεί πως χωρίς την μη γραμμική συνάρτηση στην έξοδο του κάθε νευρώνα, το πολυστρωματικό δίκτυο μπορεί να εκφυλιστεί σε έναν και μόνον νευρώνα. Εικονική αναπαράσταση του νευρωνικού δικτύου πολλών στρωμάτων φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.8: Πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο με 1 κρυφό στρώμα και k νευρώνες, πηγή[29]

Το πρόβλημα και εδώ είναι ο προσδιορισμός των βαρών w που είναι αυξημένα σε αριθμό αφού σε κάθε νευρώνα αντιστοιχούν τόσα βάρη όσες και οι εισοδοι που εισέρχονται σε αυτόν. Πάλι επιλύεται πρόβλημα βελτιστοποίησης με συνήθως αλγόριθμο τον αλγόριθμο απότομης καθόδου (Gradient Descent). Το νευρωνικό δίκτυο, παρόλο που έχει αρκετά καλή προβλεπτική ικανότητα και προσεγγίζει και μη γραμμικές σχέσεις, απαιτεί χρόνο προκειμένου να επιλεγούν οι κατάλληλες υπερπαραμέτροι

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία

του, διαδικασία λεγόμενη και ως, ρύθμιση (tuning). Μερικές από τις υπερπαραμέτρους είναι το μέγεθος α , στρώματα του δικτύου, αριθμός νευρώνων στο κάθε στρώμα, μέθοδος βελτιστοποίησης βαρών (Gradient Descent, Stochastic Gradient Descent, LBFGS), μη γραμμική συνάρτηση κ.α. Επίσης μερικά ακόμα μειονεκτήματά του είναι ότι: α) απαιτείται αρκετός χρόνος για την εκπαίδευσή του όσο αυξάνονται τα βάρη που πρέπει να υπολογιστούν και όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος των διαθέσιμων δεδομένων-παρατηρήσεων αλλά και χαρακτηριστικών (features) , β) είναι ευαίσθητο στο μέγεθος των εισόδων και γ) έχει μη κυρτή συνάρτηση κόστους με πολλά ελάχιστα οπότε η αρχικοποίηση των βαρών οδηγεί σε διαφορετικές λύσεις.

3 Λεπτομέρειες μεθοδολογίας

Για τον υπολογισμό του θορύβου θεωρήθηκε το εξωτερικό τμήμα των πτερυγίων 2 πρότυπων ανεμογεννητριών. Η ανεμογεννήτρια INNWIND έχει ακτίνα 102.88 μέτρα και το εξεταζόμενο τμήμα του πτερυγίου αποτελείται από την αεροτομή FFA241, ενώ η ανεμογεννήτρια AVATAR έχει ακτίνα 89.166 και το εξεταζόμενο τμήμα του πτερυγίου αποτελείται από την αεροτομή DU240. Τα εξωτερικά τμήματα ξεκινάνε από το 73.7%, 65.9%, ως ποσοστό επί του συνολικού μήκους του πτερυγίου, αντίστοιχα. Η διακριτοποίηση του κάθε πτερυγίου έγινε με 5 στοιχεία κατά την παραμετρική ανάλυση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης (έλεγχο ανεξαρτησίας παραμέτρων) και με 18, 17 στοιχεία, αντίστοιχως, για την τελική βελτιστοποίηση. Οι συνθήκες λειτουργίας των 2 ανεμογεννητριών δίνονται στον Πίνακα (3.1).

Συνθήκες ροής και περιβάλλοντος	ffa241	du240
Ταχύτητα Ελεύθερης Ροής (m/s)	12	10.5
Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)	9.6	9
Κινηματική Συνεκτικότητα Αέρα (m ² /s)	1.56E-05	1.56E-05
Ταχύτητα του Ήχου(m/sec)	340	340
Γωνία στροφής-Pitch angle (degrees)	4.502	0

Πίνακας 3.1: Συνθήκες ροής και περιβάλλοντος που έγινε η προσομοίωση

3.1 Παραμετροποίηση Parsec στο Πρόβλημα

Στο πρόβλημά μας κάποιες από τις παράμετρους Parsec, δηλαδή τα φυσικά χαρακτηριστικά των αεροτομών, όπως ακτίνα καμπυλότητας και γωνία ακμής εκφυγής, δεν δίνονται και πρέπει να εκτιμηθούν. Αυτό που υπάρχει ως δεδομένο είναι κάποια σημεία της αεροτομής. Προκειμένου να βρούμε αυτές τις παραμέτρους, προσεγγίζουμε τα σημεία με μία καμπύλη (curve fitting), πολώνυμο ιδίου βαθμού και μορφής με την Parsec και με χρήση της μεθόδου των μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων (non-linear least squares) υπολογίζουμε τους συντελεστές του. Στη συνέχεια χρησιμοποιούμε τις σχέσεις (2.11) για τον υπολογισμό των s_b , $\tan(\theta_{TE})$, a_1 . Τα x_b , y_B εκλέγονται από τα δεδομένα σημεία κατευθείαν. Οι παράμετροι τελικά χρησιμοποιούνται προκειμένου να δημιουργηθεί το σύστημα εξισώσεων (2.12) το οποίο επιλύεται και

Κεφάλαιο 3. Λεπτομέρειες μεθοδολογίας

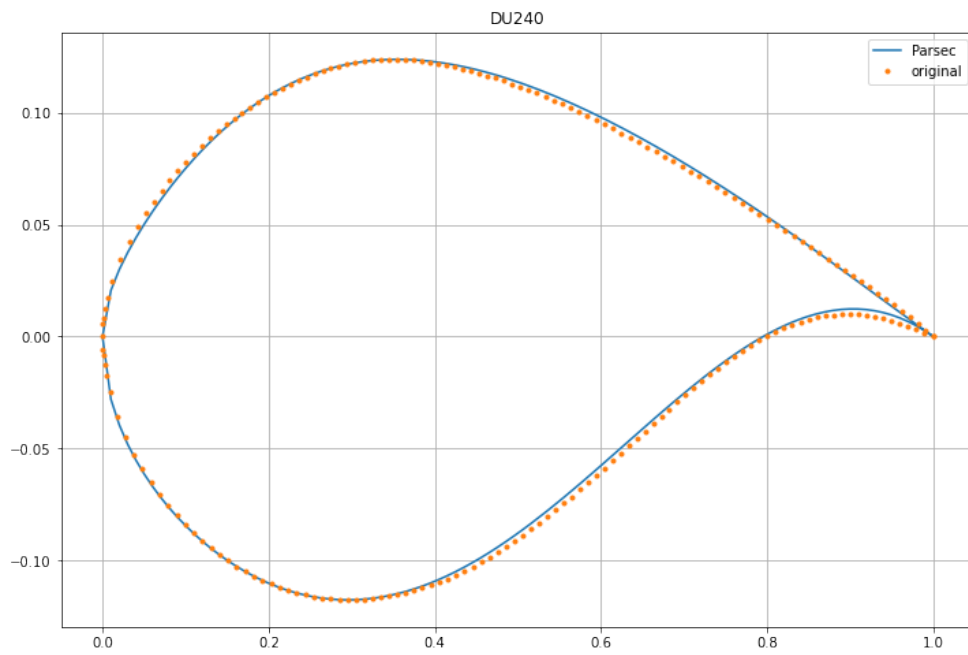
δίνει τους συντελεστές Parsec. Ουσιαστικά η διαδικασία εκτίμησης των αγνώστων παραμέτρων και των συντελεστών είναι:

- εκλογή νέου πολυωνύμου για προσέγγιση
- υπολογισμός των συντελεστών πολυωνύμου από τα σημεία αεροτομής (με προσέγγιση μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων)
- εκτίμηση των αγνώστων παραμέτρων Parsec ($s_b, \tan(\theta_{TE}), a_1$) από το νέο πολυώνυμο με χρήση της αναλυτικής του μορφής
- από σχέσεις (2.11),(2.12) γίνεται ο υπολογισμός συντελεστών Parsec (αφού όλες οι παράμετροι γνωστοί)

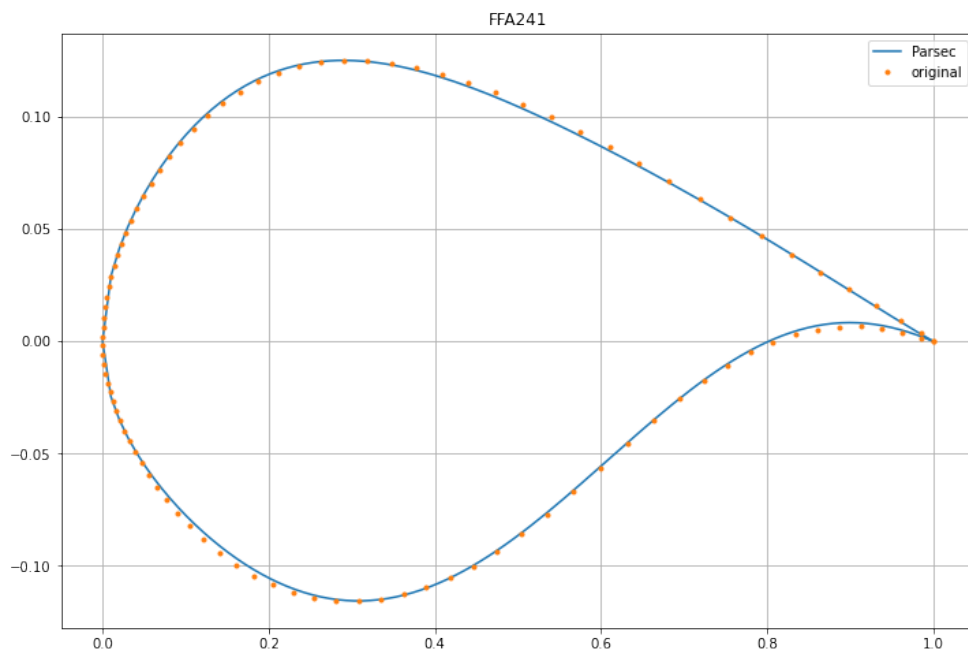
Για περισσότερες λεπτομέρειες για την μέθοδο προσέγγισης καμπύλης παραμπέμπου-με στον οδηγό της SciPy[30].

Μία άλλη μέθοδος που θα μπορούσε να ακολουθηθεί είναι εκείνη των πεπερασμένων διαφορών σε ανομοιόμορφο πλέγμα, με σημεία αυτά που ήδη έχουμε, που εκτός από την πολυπλοκότητά του δεν δίνει καλά αποτελέσματα λόγω κυρίως των μεγάλων κλίσεων που υπάρχουν στο σημείο πρόσπτωσης της αεροτομής (Leading Edge). Οι αρχικές γεωμετρικές αεροτομών και η προσεγγιστική καμπύλη Parsec φαίνονται στο σχήμα 3.1:

Κεφάλαιο 3. Λεπτομέρειες μεθοδολογίας



(α') Σημεία αεροτομής DU240 και προσέγγιση με Parsec



(β') Σημεία αεροτομής FFA241 και προσέγγιση με Parsec

Σχήμα 3.1: Στο (α) και (β) έχουμε προσέγγιση με καμπύλες Parsec στις FFA241 και DU240 αεροτομές

3.2 Εύρος Μεταβλητών Σχεδιασμού

Οι παράμετροι $Parsec$, $param_i$, θα αποτελέσουν τις μεταβλητές σχεδιασμού, όμως προκειμένου να ορίσουμε το εύρος τους βρίσκουμε τις παραμέτρους στις αρχικές αεροτομές και εφαρμόζουμε την σχέση:

$$\begin{aligned} param_{i,upperBound} &= param_{i,base} + 8\% \cdot param_{i,base} \\ param_{i,downBound} &= param_{i,base} - 8\% \cdot param_{i,base} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Οι δείκτες $upperBound$, $downBound$, $base$ συμβολίζουν το άνω, το κάτω όριο και τη βάση αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται ότι οι παράμετροι αυτοί θα χρησιμοποιηθούν στις σχέσεις (2.11) προκειμένου να βρεθούν οι συντελεστές $Parsec$ των 2 πολυωνύμων που περιγράφουν την κάτω και την πάνω πλευρά. Αναλυτικά τα εύρη των παραμέτρων δίνονται στον επόμενο πίνακα. Η στήλη με όνομα "Βάση", περιγράφει τις αρχικές παραμέτρους οι καμπύλες των οποίων παρουσιάστηκαν στο σχήμα 3.1.

Κεφάλαιο 3. Λεπτομέρειες μεθοδολογίας

Παράμετροι Parsec			
FFA241			
	Βάση	Κάτω Όριο (-8%)	Άνω Όριο (8%)
a_{1up}	0.28724	0.26426	0.31022
$\tan(\theta_{TEup})$	-0.21362	-0.23071	-0.19653
$x_{b,up}$	0.28980	0.26662	0.31298
$y_{b,up}$	0.12524	0.11522	0.13526
$s_{b,up}$	-1.32972	-1.43610	-1.22334
a_{1down}	-0.24510	-0.26471	-0.22549
$\tan(\theta_{TEdown})$	-0.15656	-0.16908	-0.14404
$x_{b,down}$	0.30788	0.28325	0.33251
$y_{b,down}$	-0.11569	-0.12495	-0.10643
$s_{b,down}$	1.74914	1.60921	1.88907

DU240			
	Βάση	Κάτω Όριο (-8%)	Άνω Όριο (8%)
a_{1up}	0.22908	0.21075	0.24741
$\tan(\theta_{TEup})$	-0.31514	-0.34035	-0.28993
$x_{b,up}$	0.35492	0.32653	0.38331
$y_{b,up}$	0.12372	0.11382	0.13362
$s_{b,up}$	-1.15590	-1.24837	-1.06343
a_{1down}	-0.27889	-0.30120	-0.25658
$\tan(\theta_{TEdown})$	-0.26888	-0.29039	-0.24737
$x_{b,down}$	0.29527	0.27165	0.31889
$y_{b,down}$	-0.11750	-0.12690	-0.10810
$s_{b,down}$	1.58879	1.46169	1.71589

Πίνακας 3.2: Τιμές Παραμέτρων Parsec και εύρος τους για τη βελτιστοποίηση

3.3 Επιλογή Υπερπαραμέτρων αλγόριθμου PSO

Ο αλγόριθμος PSO απαιτεί την επιλογή κάποιων παραμέτρων που καθορίζουν:

- α) τον τρόπο κίνησης και "συνεργασίας" μεταξύ των σωματιδίων προκειμένου να εξευρενηθούν τον χώρο των λύσεων. Αυτές είναι τα $c1$, $c2$, w
- β) τον αριθμό επαναλήψεων πριν τον τερματισμό, T
- γ) τον αριθμό σωματιδίων σμήνους, N

Για την επιλογή των $c1$, $c2$, w επιλέγουμε τιμές που αυξάνουν την εκμετάλλευση της γενικής λύσης (exploitation) αφού όταν βρεθεί μία καλή λύση θέλουμε να ψάξουμε γύρω από αυτή γρήγορα καθώς ο υπολογισμός της τελικής συνάρτησης είναι

Κεφάλαιο 3. Λεπτομέρειες μεθοδολογίας

κοστοβόρος. Επίσης η τιμή του w επιλέχθηκε από τιμές που έχουν χαρακτηριστεί αποδοτικές από την βιβλιογραφία. Για την επιλογή των παραμέτρων T και N , έγινε ένας έλεγχος ανεξαρτησίας χρησιμοποιώντας 5 στοιχεία ανά πτερύγιο για λόγους υπολογιστικού κόστους. Ξεκινήσαμε με έναν σταθερό αριθμό σωματιδίων ($N=50$) και οι τιμές επαναλήψεων αυξάνοντας ξεκινώντας από λογική αρχική τιμή, όπως φαίνονται στον πίνακα (3.3). Στη συνέχεια κρατώντας σταθερό τον αριθμό T , ελέγχθηκε ο αριθμός N με παρόμοια διαδικασία, όπως φαίνεται στον πίνακα (3.4). Η διερεύνηση έγινε μόνο για την FFA241, με A-weighting και τα τελικά μεγέθη χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό και των 2 αεροτομών. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

FFA241 (original) OF: 54.20313, CLCD: 165.962				
50 particles	OF	CLCD	%OF	%CLCD
		4iters		
min-OF	50.755	121.479	-6.362	-26.803
max-CLCD	54.203	179.707	-0.001	8.282
min-OF & %CLCD >0	53.298	168.019	-1.670	1.240
max-CLCD & %OF <0	54.203	179.707	-0.001	8.282
		8iters		
min-OF	50.579	115.633	-6.686	-30.325
max-CLCD	54.182	180.126	-0.039	8.535
min-OF & %CLCD >0	53.246	166.222	-1.766	0.157
max-CLCD & %OF <0	54.182	180.126	-0.039	8.535
		16iters		
min-OF	50.505	120.229	-6.823	-27.556
max-CLCD	54.154	184.077	-0.090	10.915
min-OF & %CLCD >0	53.380	169.203	-1.518	1.953
max-CLCD & %OF <0	54.154	184.077	-0.090	10.915
		32iters		
min-OF	50.223	112.696	-7.343	-32.095
max-CLCD	54.234	182.926	0.056	10.222
min-OF & %CLCD >0	53.423	166.056	-1.440	0.057
max-CLCD & %OF <0	54.169	180.562	-0.063	8.797

Πίνακας 3.3: Έλεγχος επαναλήψεων και αποτελέσματα με 5 στοιχεία πτερύγωσης και $N=50$ σωματίδια σμήνους (particles), οι στήλες OF, OF% είναι η αντικειμενική συνάρτηση (θόρυβος) και το ποσοστό μεταβολής της σε σχέση με την αρχική τιμή και CLCD, CLCD% ο συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης και το ποσοστό μεταβολής του σε σχέση με την αρχική τιμή. Οι γραμμές με τους συμβολισμούς min-OF & %CLCD >0, max-CLCD & %OF <0 έχουν τιμές όπου η αντικειμενική συνάρτηση και η αεροδυναμική απόδοση είναι ταυτόχρονα καλύτερες από τις τιμές που δίνει η αρχική γεωμετρία της FFA241. Καλύτερες νοείται χαμηλότερη τιμή θορύβου και υψηλότερη τιμή αεροδυναμικής απόδοσης

Κεφάλαιο 3. Λεπτομέρειες μεθοδολογίας

FFA241 (original) OF: 54.20313, CLCD: 165.962				
16 iterations	OF	CLCD	%OF	%CLCD
12parts				
min-OF	51.247	122.456	-5.454	-26.214
max-CLCD	54.241	183.186	0.069	10.378
min-OF & %CLCD >0	53.483	166.167	-1.329	0.124
max-CLCD & %OF <0	54.089	176.439	-0.210	6.313
25parts				
min-OF	50.487	112.169	-6.856	-32.413
max-CLCD	54.239	180.665	0.065	8.859
min-OF & %CLCD >0	53.582	167.637	-1.145	1.010
max-CLCD & %OF <0	54.194	179.437	-0.017	8.119
50parts				
min-OF	50.505	120.229	-6.823	-27.556
max-CLCD	54.154	184.077	-0.090	10.915
min-OF & %CLCD >0	53.380	169.203	-1.518	1.953
max-CLCD & %OF <0	54.154	184.077	-0.090	10.915
100parts				
min-OF	50.453	110.045	-6.918	-33.692
max-CLCD	54.204	182.347	0.002	9.872
min-OF & %CLCD >0	53.364	168.930	-1.549	1.788
max-CLCD & %OF <0	54.171	180.714	-0.059	8.889

Πίνακας 3.4: Έλεγχος σωματιδίων και αποτελέσματα με 5 στοιχεία περύγωσης και $T=16$ επαναλήψεις (iterations), οι στήλες OF, OF% είναι η αντικειμενική συνάρτηση (θόρυβος) και το ποσοστό μεταβολής της σε σχέση με την αρχική τιμή και CLCD, CLCD% ο συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης και το ποσοστό μεταβολής του σε σχέση με την αρχική τιμή. Οι γραμμές με τους συμβολισμούς min-OF & %CLCD >0, max-CLCD & %OF <0 έχουν τις καλύτερες τιμές όπου όμως η αντικειμενική συνάρτηση και η αεροδυναμική απόδοση είναι ταυτόχρονα καλύτερες από αυτές που δίνει η αρχική γεωμετρία της FFA241. Καλύτερες νοείται χαμηλότερη τιμή θορύβου και υψηλότερη τιμή αεροδυναμικής απόδοσης

Τελικά, επιλέχθηκε ο αριθμός επαναλήψεων και σωματιδίων με βάση:

- α) Ο αριθμός $T = T_i$ για τον οποίο η τελική (βελτιστοποιημένη) αντικειμενική συνάρτηση OF_i είχε μικρή μεταβολή από την προηγούμενη τιμή OF_{i-1} με T_{i-1} . Αντίστοιχη σχέση ισχύει και για τον αριθμό N. Πιο φορμαλιστικά:
 - Αν $OF_i - OF_{i-1} < 1\% \rightarrow T_i = \text{αποδεκτό}$, αλλιώς $T_i = T_{i+1}$ και επανέλαβε
- β) Να έχουμε αρκετές λύσεις ώστε να διερευνηθούν οι σχέσεις εξάρτησης μεταξύ των παραμέτρων, θορύβου και αεροδυναμικής απόδοσης.

Κεφάλαιο 3. Λεπτομέρειες μεθοδολογίας

Για την τελική βελτιστοποίηση επιλέχθηκαν $(c1, c2, w) = (0.5, 2, 0.8)$, 16 επαναλήψεις ($T=16$) και 50 σωματίδια σμήνους ($N=50$).

3.4 Περιορισμοί

Ο περιορισμός που επιβάλλεται από εμάς όσον αφορά τη γεωμετρία των αεροτομών, είναι σε αεροτομές όπου αλλαγές της κλίσης οδηγούν σε κυματοειδή μορφή, πράγμα σχεδιαστικά ανεπίτρεπτο. Αυτό συμβαίνει στην πάνω πλευρά, σε σημείο που η καμπυλότητα τέμνει τον άξονα $y = 0$, 2 φορές, δηλαδή αλλάζει 2 φορές πρόσημο. Εφόσον έχουμε αναλυτική σχέση της καμπύλης της πάνω πλευράς (πολυώνυμα Parsec), η καμπυλότητα υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\kappa_{up} = \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}} = \kappa(x), x = x_{real}/c \quad (3.2)$$

όπου: κ_{up} η καμπυλότητα της πάνω πλευράς, x, y είναι το αδιάστατο μήκος και η καμπύλη της αεροτομής ή αδιάστατο πλάτος και y', y'' η 1η και 2η παράγωγος της καμπύλης αντίστοιχα.

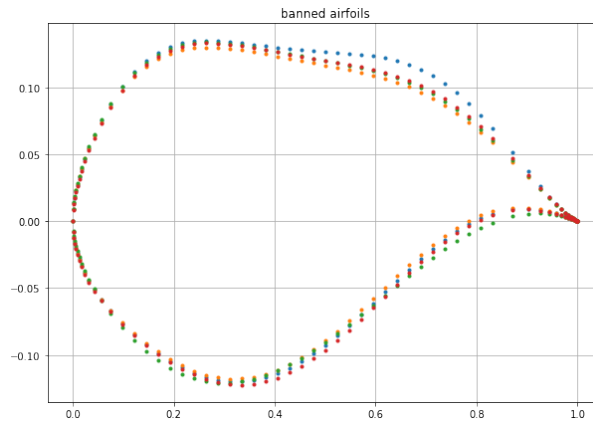
Η εύρεση των ριζών της, γίνεται υπολογιστικά, με εκλογή διακριτών σημείων κατά x και αξιολόγηση της τιμής της μέσα στο εύρος $(x/c)=(0.2-0.6)$. Αν δύο διαδοχικά σημεία έχουν διαφορετικό πρόσημο έχουμε ρίζα της εξίσωσης. Έτσι ο περιορισμός είναι μία συνάρτηση που καλείται από τον κώδικα. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε την συνάρτηση περιορισμού σε ψευδοκώδικα:

Algorithm 1 Περιορισμός Βελτιστοποίησης ως προς την καμπυλότητα

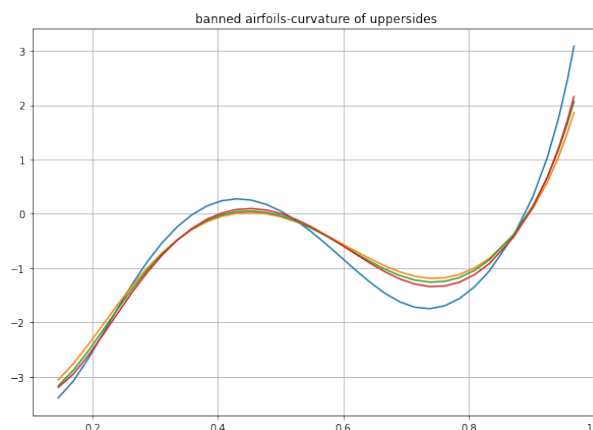
```
Require:  $k(\text{curvature}) \leftarrow \text{array}$   
   $zeros \leftarrow 0$   
   $violation \leftarrow FALSE$   
  while  $i < \text{lenght}(k)$  do  
    if  $k(i) * k(i + 1) < 0$  then  
       $zeros \leftarrow zeros + 1$   
    end if  
  end while  
  if  $zeros > 1$  then  
     $violation = TRUE$   
  end if  
  return  $violation$ 
```

Κεφάλαιο 3. Λεπτομέρειες μεθοδολογίας

Καμπυλότητες και παράδειγματα αεροτομών που απορρίπτονται φαίνονται στο σχήμα:



(α') Αεροτομές που παραβίασαν τον περιορισμό



(β') Καμπυλότητα Άνω Πλευράς Αεροτομών που παραβίασαν τον περιορισμό

Σχήμα 3.2: Διαγράμματα αεροτομών που παραβίασαν τους περιορισμούς και οι καμπυλότητες των άνω πλευρών τους. Παρατηρήθηκε πως η καμπυλότητα είχε, στην περιοχή από 0.2-0.6 x/c (κοντά στο 0.4) διπλή αλλαγή στο πρόσημό της, αιτία που δημιουργούσε κυματοειδές σχήμα.

4 Αποτελέσματα

4.1 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

Συνολικά έγινε βελτιστοποίηση για τις παρακάτω περιπτώσεις:

- FFA241 με θόρυβο χωρίς A-στάθμιση (A-weighting, WA)
- FFA241 με θόρυβο με WA
- DU240 με θόρυβο χωρίς WA
- DU240 με θόρυβο με WA

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για να βελτιστοποιηθούν οι αρχικές αεροτομές είναι ο PSO για $N=50$ (σωματίδια) και $T=16$ (επαναλήψεις), οπότε συνολικά ελέγχθηκαν 800 λύσεις στην κάθε υποπερίπτωση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στους πίνακες 4.2, 4.1 στη συνέχεια.

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

	FFA241	με WA		
αρχική αεροτομή	54.054	165.960		
T=16,N=50	OF	CLCD	%OF	%CLCD
min-OF	49.674	118.125	-8.103	-28.823
max-CLCD	54.189	184.393	0.250	11.107
min-OF & %CLCD >0	53.248	169.950	-1.492	2.404
max-CLCD & %OF <0	53.755	178.387	-0.552	7.488
	DU240	με WA		
αρχική αεροτομή	52.370	154.529		
T=16,N=50	OF	CLCD	%OF	%CLCD
min-OF	51.407	133.517	-1.839	-13.597
max-CLCD	52.278	182.931	-0.175	18.380
min-OF & %CLCD >0	51.844	156.900	-1.003	1.534
max-CLCD & %OF <0	52.278	182.931	-0.175	18.380

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για θόρυβο με Α-στάθμιση. Οι στήλες OF,%OF και CLCD,%CLCD απεικονίζουν την αντικειμενική συνάρτηση και την αεροδυναμική απόδοση καθώς και τις ποσοστιαίες μεταβολές τους, αντιστοίχα. Οι γραμμές με τους συμβολισμούς min-OF & %CLCD >0, max-CLCD & %OF <0 έχουν τις καλύτερες τιμές όπου όμως η αντικειμενική συνάρτηση και η αεροδυναμική απόδοση είναι ταυτόχρονα καλύτερες από αυτές που δίνει η αρχική γεωμετρία της FFA241. Με κόκκινο φαίνεται η ποσοστιαία μεταβολή στις αεροτομές που επιλέχθηκαν

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

	FFA241	χωρίς WA		
αρχική αεροτομή	59.610	165.960		
T=16-N=50	OF	CLCD	%OF	%CLCD
min-OF	58.422	157.770	-1.993	-4.935
max-CLCD	59.199	180.434	-0.691	8.721
min-OF & %CLCD >0	58.848	167.714	-1.280	1.057
max-CLCD & %OF <0	59.198	180.434	-0.691	8.721
	DU240	χωρίς WA		
αρχική αεροτομή	57.796	154.529		
T=16-N=50	OF	CLCD	%OF	%CLCD
min-OF	57.097	156.847	-1.210	1.500
max-CLCD	57.639	184.078	-0.272	19.122
min-OF & %CLCD >0	57.097	156.847	-1.210	1.500
max-CLCD & %OF <0	57.639	184.078	-0.272	19.122

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για θόρυβο χωρίς Α-στάθμιση. Οι στήλες OF,%OF και CLCD,%CLCD απεικονίζουν την αντικειμενική συνάρτηση και την αεροδυναμική απόδοση καθώς και τις ποσοστιαίες μεταβολές τους, αντιστοίχα. Οι γραμμές με τους συμβολισμούς min-OF & %CLCD >0, max-CLCD & %OF <0 έχουν τις καλύτερες τιμές όπου όμως η αντικειμενική συνάρτηση και η αεροδυναμική απόδοση είναι ταυτόχρονα καλύτερες από αυτές που δίνει η αρχική γεωμετρία της FFA241. Με κόκκινο φαίνεται η ποσοστιαία μεταβολή στις αεροτομές που επιλέχθηκαν

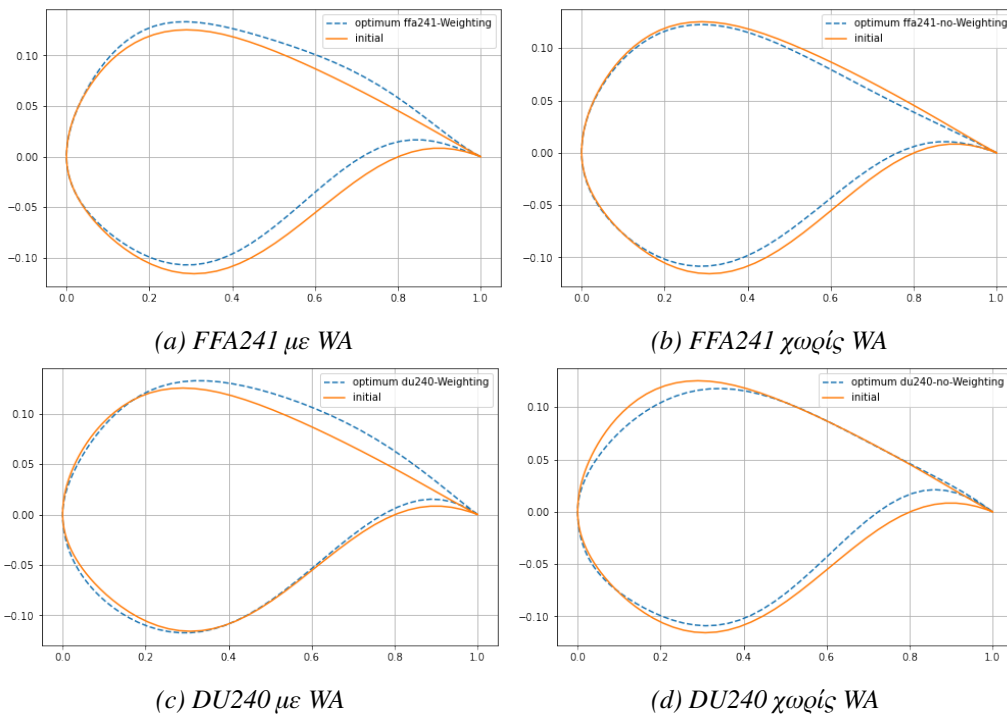
Στους παραπάνω πίνακες 4.1, 4.2, φαίνονται οι αρχικές τιμές της παραμετροποιημένης αεροτομής ως προς το θόρυβο και την αεροδυναμική απόδοση, στη συνέχεια οι καλύτερες τιμές αυτών (min-OF), (max-CLCD) αλλά και οι τιμές όπου ταυτόχρονα και τα δύο μεγέθη είναι καλύτερα των αρχικών (min-OF & %CLCD>0), (max-CLCD & %OF<0). Από τις τιμές του πίνακα επιλέγονται ως τελικές αεροτομές εκείνες που ικανοποιούν τις απαιτήσεις: α) όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση του θορύβου με β) ταυτόχρονη διατήρηση της αεροδυναμικής απόδοσης τουλάχιστον στα επίπεδα της αρχικής αεροτομής. Οι επιλεγμένες αεροτομές έχουν σημειωθεί με κόκκινο στους δύο πίνακες. Με βάση αυτά οι αεροτομές που επιλέγονται πετυχαίνουν:

- a) **FFA241 με WA** : Μείωση θορύβου κατά 1.492% ή 0.806 dB, με αύξηση CL/CD κατά 2.404% ή 3.989 μονάδες
- b) **FFA241 χωρίς WA** : Μείωση θορύβου κατά 1.28% ή 0.763 dB, με αύξηση CL/CD κατά 1.057% ή 1.754 μονάδες

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

- **c) DU240 με WA** : Μείωση θορύβου κατά 1.003% ή 0.525 dB, με αύξηση CL/CD κατά 1.534% ή 2.371 μονάδες
- **d) DU240 χωρίς WA** : Μείωση θορύβου κατά 1.210% ή 0.699 dB, με αύξηση CL/CD κατά 1.500% ή 2.318 μονάδες

Διαγράμματα των παραπάνω αεροτομών σε σχέση με τις αρχικές είναι:



Σχήμα 4.1: Επιλεγμένες Βελτιωμένες αεροτομές με ελάχιστο θόρυβο και ίδιο ή μεγαλύτερο συντελεστή CL/CD του αρχικού. Με συνεχής πορτοκαλί γραμμή συμβολίζονται οι αρχικές αεροτομές.

Οι παράμετροι Parsec των βελτιστοποιημένων αεροτομών που επιλέχθηκαν του σχήματος 4.1 έχουν τιμές:

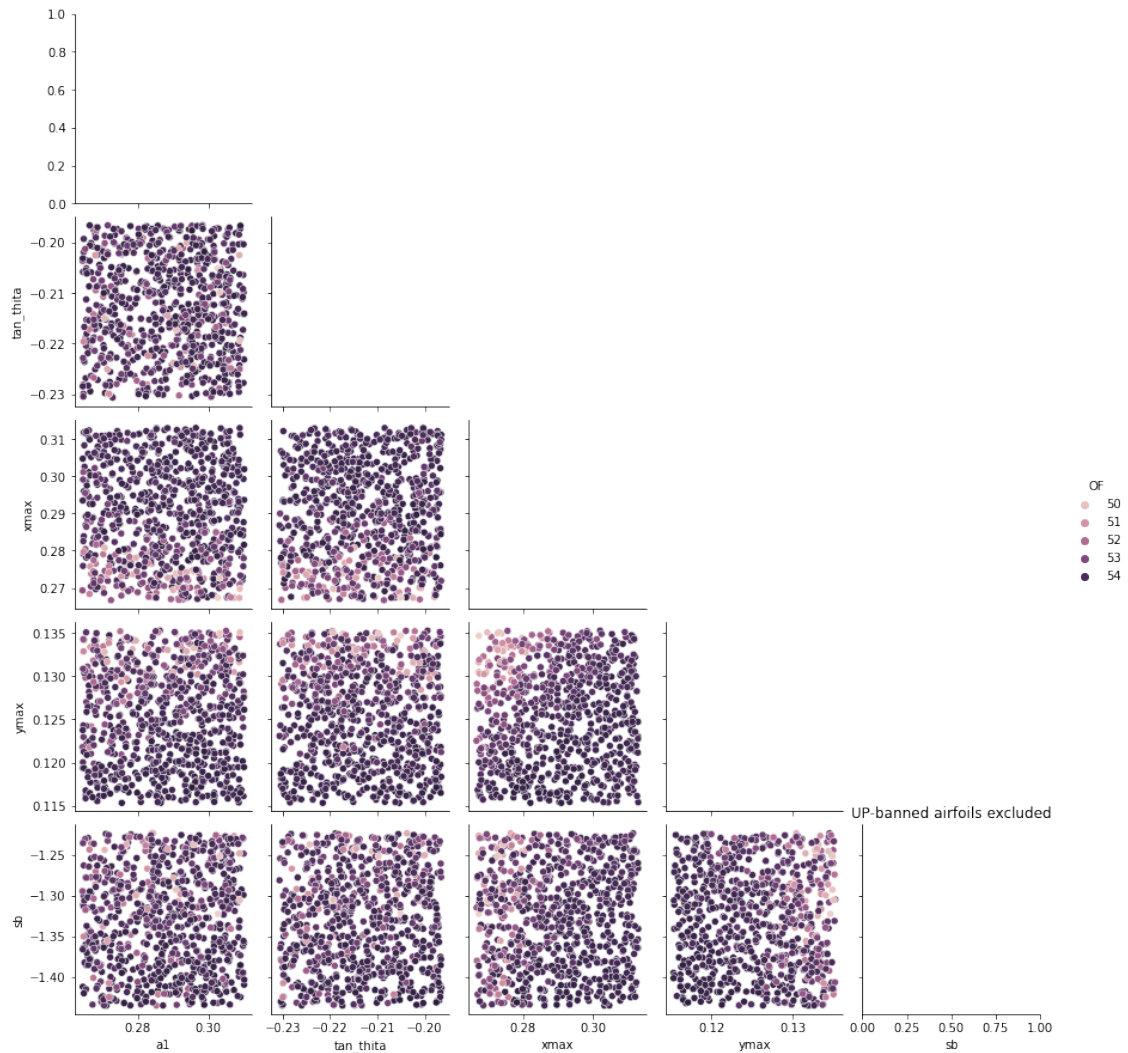
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

	$a_{1,up}$	$\tan(\theta_{TEup})$	$X_{b,up}$	$Y_{b,up}$	$S_{b,up}$
FFA241 με WA	0.27527	-0.20629	0.28462	0.13323	-1.36588
FFA241 χωρίς WA	0.28432	-0.2121	0.28966	0.12258	-1.41108
DU240 με WA	0.24267	-0.31376	0.32966	0.13256	-1.10955
DU240 χωρίς WA	0.22887	-0.30442	0.34108	0.1178	-1.22614
	$a_{1,down}$	$\tan(\theta_{TEdown})$	$X_{b,down}$	$Y_{b,down}$	$S_{b,down}$
FFA241 με WA	-0.24902	-0.14859	0.29203	-0.10704	1.87756
FFA241 χωρίς WA	-0.25686	-0.14542	0.28849	-0.10857	1.70903
DU240 με WA	-0.29061	-0.28755	0.29446	-0.11727	1.62316
DU240 χωρίς WA	-0.29062	-0.27019	0.31141	-0.10903	1.70287

Πίνακας 4.3: Παράμετροι βέλτιστων αεροτομών του σχήματος 4.1

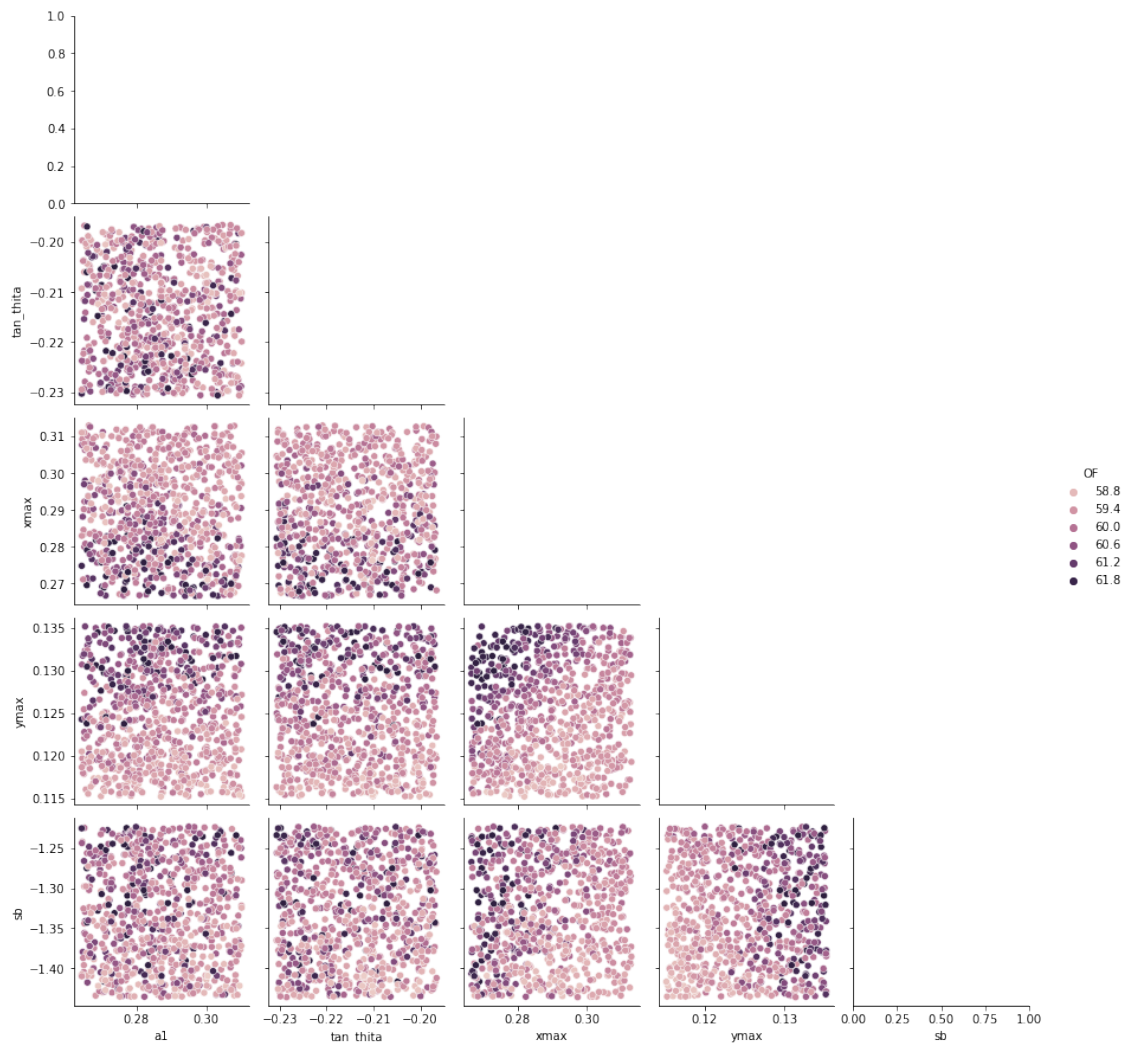
Για οπτικοποίηση της σχέσης των μεταβλητών Parsec και της αντικειμενικής συνάρτησης παρουσιάζεται το επόμενο σχήμα για την αεροτομή FFA241. Ίδια διαγράμματα για την αεροτομή DU240 καθώς και διαγράμματα της κάτω πλευράς παραλείπονται λόγω ομοιότητας και λόγω του ότι τα διαγράμματα της κάτω πλευράς παρουσιάζουν ανάμεικτα χρώματα σε όλα τα ζευγάρια μεταβλητών οπότε δεν περιέχουν κάποια ευδιάκριτη πληροφορία. Έτσι έχουμε:

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα



Σχήμα 4.2: Διαγράμματα μεταβλητών σχεδιασμού της πάνω πλευράς με A-στάθμιση. Το χρώμα της κάθε κουκίδας δηλώνει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Σκούρα χρώματα αφορούν θόρυβο μεγαλύτερης συχνότητας από τα ανοιχτά. Τα όνομα των μεταβλητών x_{max} , y_{max} , \tan_{θ} αντιπροσωπεύουν τις x_B , y_B , $\tan(\theta_{TE})$ της πάνω πλευράς, αντίστοιχα

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

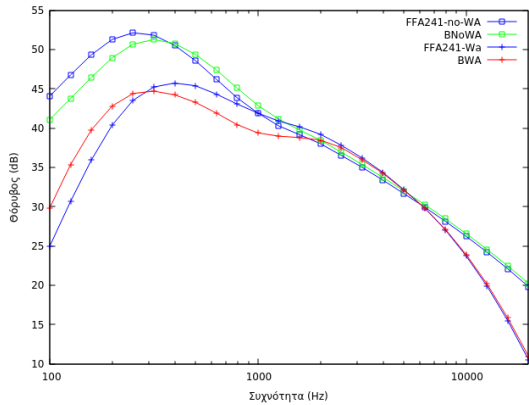


Σχήμα 4.3: Διαγράμμα μεταβλητών σχεδιασμού της πάνω πλευράς χωρίς Α-στάθμιση. Το χρώμα της κάθε κουκίδας δηλώνει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Σκούρα χρώματα αφορούν θόρυβο μεγαλύτερης συχνότητας από τα ανοιχτά. Τα όνομα των μεταβλητών x_{max} , y_{max} , \tan_theta αντιπροσωπεύουν τις x_B , y_B , $\tan(\theta_{TE})$ της πάνω πλευράς, αντίστοιχα

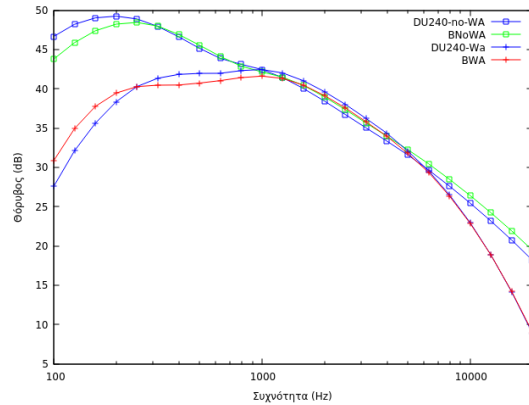
Στα παραπάνω διαγράμματα 4.2, 4.3 μπορούμε να διακρίνουμε ένα διαχωρισμό των χρωμάτων κυρίως στα διαγράμματα που υπάρχουν οι μεταβλητές x_{max} , y_{max} (x_B , y_B). Αυτό ίσως υποδηλώνει μία συσχέτιση μεταξύ αυτών των μεταβλητών και της αντικειμενικής συνάρτησης (OF), πράγμα που θα διερευνηθεί με ανάλυση των δεδομένων με την χρήση (γραμμικών) μοντέλων. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης αυτής φαίνεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

Τα φάσματα θορύβου των αεροτομών που επιλέχθηκαν (σχήμα 4.1) με και χωρίς A-στάθμιση είναι:



(a) φάσματα της βέλτιστης FFA241 σε σύγκριση με την αρχική γεωμετρία, με A-στάθμιση (BWA) και χωρίς A-στάθμιση (BNOWA)

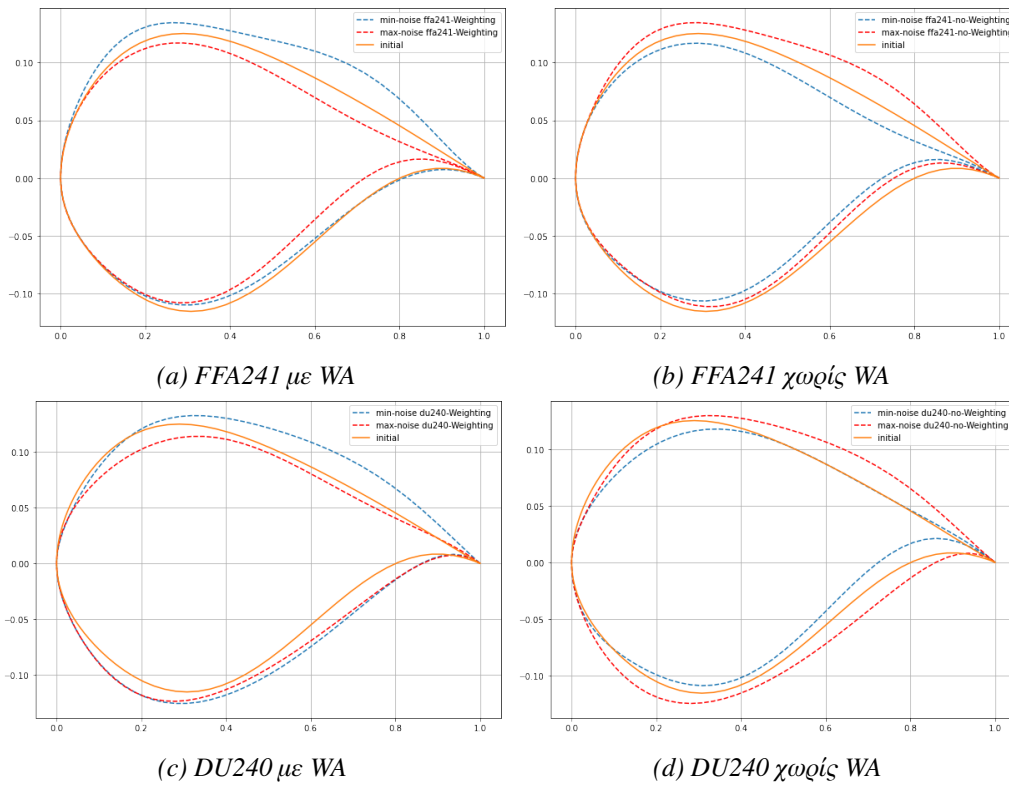


(b) φάσματα της βέλτιστης DU240 σε σύγκριση με την αρχική γεωμετρία, με A-στάθμιση (BWA) και χωρίς A-στάθμιση (BNOWA)

Σχήμα 4.4: Φάσματα των επιλεγμένων αεροτομών του σχήματος 4.1. Με μπλε γραμμή απεικονίζονται τα φάσματα των αρχικών αεροτομών με και χωρίς A-στάθμιση

Διαγράμματα των αεροτομών με τον χαμηλότερο και το υψηλότερο θόρυβο από αυτές που εξετάστηκαν από τον αλγόριθμο PSO φαίνονται παρακάτω:

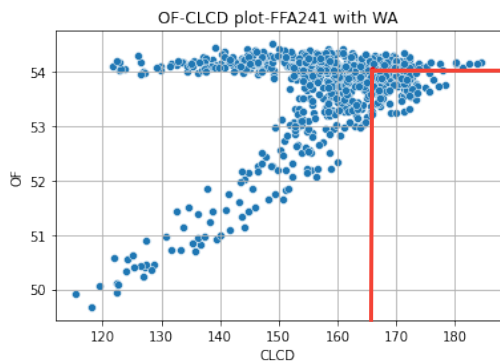
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα



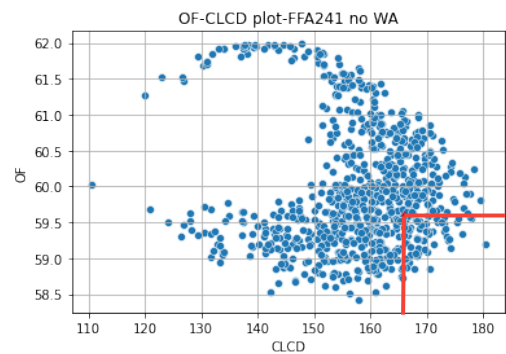
Σχήμα 4.5: Αεροτομές με μέγιστο (κόκκινο) και ελάχιστο (μπλε) θόρυβο.

Η σχέση μεταξύ της CL/CD και της OF (θόρυβος) φαίνονται στην συνέχεια:

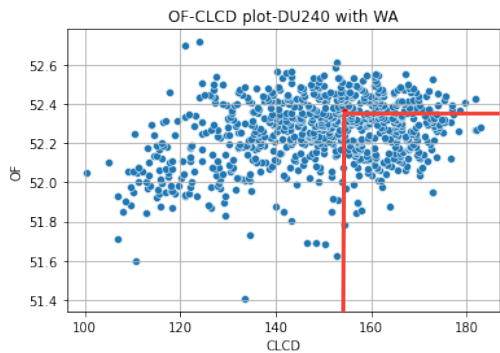
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα



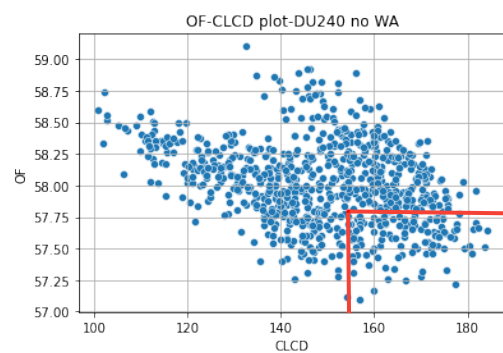
(a) διάγραμμα διασποράς OF-CLCD για την FFA241 με A-στάθμιση



(b) διάγραμμα διασποράς OF-CLCD για την FFA241 χωρίς A-στάθμιση



(c) διάγραμμα διασποράς (scatter-plot) OF-CLCD για την DU240 με A-στάθμιση



(d) διάγραμμα διασποράς OF-CLCD για την DU240 χωρίς A-στάθμιση

Σχήμα 4.6: Διαγράμματα διασποράς (scatter-plots) θορύβου (OF) - αεροδυναμικής απόδοσης (CLCD) που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση για τις 4 περιπτώσεις, με και χωρίς A-στάθμιση, για τις 2 αεροτομές FFA241 και DU240. Οι κόκκινες κουκίδες (σημείο τομής κόκκινων ευθειών) αφορούν τιμές των αρχικών αεροτομών. Το παραλληλόγραμο που σχηματίζουν οι δύο κόκκινες ευθείες είναι αυτό που οποιαδήποτε επιλογή είναι καλύτερη από την αρχική είτε σε θόρυβο είτε σε αεροδυναμική απόδοση.

Από τα παραπάνω διακρίνουμε πως:

1) Παίξει σημαντικό ρόλο η διόρθωση στο φάσμα του θορύβου με βάση την A-στάθμιση (A-weighting) στο τελικό βέλτιστο σχήμα της αεροτομής. Οι βέλτιστες γεωμετρίες με και χωρίς διόρθωση έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της υψηλής ενέργειας σε χαμηλές συχνότητες στις γεωμετρίες χωρίς στάθμιση έχουμε την βέλτιστη γεωμετρία σε αεροτομή που πετυχαίνει μείωση στο φάσμα θορύβου σε εκείνες τις τιμές της συχνότητας. Αυτό πετυχαίνεται με αεροτομές που η πάνω πλευρά τους βρίσκεται σε χαμηλότερο μέγιστο ύψος από αυτές των αρχικών αεροτομών και φαίνεται να έχουν και μικρότερο πάχος, όπως φαίνεται από τα σχήματα (b), (d) του 4.6 και 4.5. Αντίθετα στην περίπτωση με A-στάθμιση,

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

βλέπουμε ότι οι βέλτιστες αεροτομές έχουν υψηλότερο φάσμα στις αρχικές συχνότητες αλλά χαμηλότερο στις μεσαίες πράγμα που συνολικά μειώνει το λογαριθμικό άθροισμα, συνεπώς και την τελική τιμή θορύβου. Αυτό γίνεται με γεωμετρίες που έχουν το μέγιστο σημείο, στην πάνω πλευρά, σε μεγαλύτερο ύψος της αρχικής και φαίνεται να έχουν και μεγαλύτερο πάχος. Αυτή η αντίθετη τάση των αεροτομών με και χωρίς A-στάθμιση, μπορεί να διακριθεί και από την αντιστροφή της χρωματικής διάταξης των κουκίδων των σχημάτων 4.2, 4.3.

2) Από τα διαγράμματα μεταξύ των μεταβλητών σχεδιασμού (4.2, 4.3) διακρίνουμε μία συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών x_b , y_b και θορύβου. Η συσχέτιση είναι αντιστροφή στις αεροτομές με και χωρίς διόρθωση. Για την πιστοποίηση αυτού του συμπεράσματος θα γίνει χρήση μοντέλων μηχανικής μάθησης τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

3) Από το διάγραμμα 4.6 των CL/CD και της OF, μπορεί να γίνει επιλογή οποιουδήποτε σημείου που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του σχεδιαστή. Εμείς σε αυτήν την εργασία επιλέξαμε σημείο που βρίσκεται όσο το δυνατόν περισσότερο κάτω και δεξιά του διαγράμματος, δηλαδή μεγάλη αεροδυναμική απόδοση και όσο τον δυνατόν μικρότερο θόρυβο. Άλλες επιλογές έχουν μεγαλύτερο συντελεστή αεροδυναμικής απόδοσης και θα μπορούσαν να αποτελούν εναλλακτική επιλογή.

4.2 Εκπαίδευση Μοντέλων Μηχανικής Μάθησης

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης με χρήση του αλγορίθμου PSO. Είδαμε τα διαγράμματα των τελικών αεροτομών καθώς και διάγραμματα των ΜΣ μεταξύ τους. Μέσω αυτών μπορούμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα για την εξάρτηση των ΜΣ και OF, τα οποία όμως δεν είναι και πολύ ξεκάθαρα (και αξιόπιστα) καθώς βασίζονται στην οπτική ανάλυση των διαγραμμάτων. Εφόσον έχουμε αποθηκεύσει τα δεδομένα (ΜΣ, OF, CL, CD, CLCD) τα μετατρέπουμε σε κατάλληλη μορφή και χρησιμοποιούμε μοντέλα ανάλυσης δεδομένων προκειμένου να πιστοποιήσουμε ή/και να εξάγουμε επιπλέον αξιολογικά συμπεράσματα. Αυτό φυσικά προϋποθέτει τα μοντέλα αυτά να μπορούν να αναπαραστήσουν την συνάρτηση μεταξύ των ΜΣ-θορύβου ικανοποιητικά. Αφού πιστοποιήσουμε τα μοντέλα, στη συνέχεια έχουμε την δυνατότητα να τα χρησιμοποιήσουμε αντικαθιστώντας τον υπολογιστικό και αεροακουστικό κώδικα πράγμα που μειώνει πολλές τάξεις μεγέθους το υπολογιστικό κόστος της όλης διαδικασίας.

Γενικά εκπαιδεύονται 3 μοντέλα, 2 γραμμικά (LASSO, LR) και 1 νευρωνικό δίκτυο (NN) και συγκρίνεται η προβλεπτική τους ικανότητα για τις περιπτώσεις:

- α) Πρόβλεψη θορύβου με εισόδους τις 10 ΜΣ (παράμετροι Parsec) και τους συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας (CL, CD)
- β) Πρόβλεψη συντελεστών CL και CD, με εισόδους τις 10 ΜΣ (παράμετροι Parsec)

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

- γ) Πρόβλεψη θορύβου με εισόδους τις 10 ΜΣ (παράμετροι Parsec)

Βλέπουμε ότι στο (β) γίνεται προσπάθεια πρόβλεψης για τους αεροδυναμικούς συντελεστές. Σε περίπτωση θετικών αποτελεσμάτων αυτό δίνει την δυνατότητα αντικατάστασης του χρονοβόρου κώδικα σε περίπτωση που χρειαστεί ο υπολογισμός τους, για παράδειγμα με εισαγωγή περιορισμών ως προς αυτούς τους συντελεστές.

Διευκρινίζεται επίσης πως για την εξαγωγή συμπερασμάτων της σχέσης ΜΣ και OF αξιοποιείται το γραμμικό μοντέλο Lasso με 13 μεταβλητές εισόδου (10 ΜΣ + CL, CD, CLCD) καθώς οι συντελεστές του τείνουν σε μηδενικές τιμές για εισόδους που φαίνεται να μην έχουν εξάρτηση με την εξαρτημένη μεταβλητή εξόδου. Τα γραμμικά μοντέλα δεν παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα με τις 10 ΜΣ, αλλά με επιπρόσθετη την είσοδο των 3 αεροδυναμικών συντελεστών τα αποτελέσματα βελτιώνονται κατά πολύ.

Η διαδικασία εκπαίδευσης μοντέλων μηχανικής μάθησης, η χρήση τους και τα αποτελέσματα τους αφορούν την περίπτωση της FFA241 με Α-στάθμιση. Για τις περιπτώσεις (α,β,γ) του παρόντος κεφαλαίου, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για εκπαίδευση των μοντέλων είναι από την βελτιστοποίηση PSO με $T=16$, $N=50$ συνολικά 800 παρατηρήσεις. Τα διαγράμματα διασποράς, τα σκορ (test score) και το μέγιστο σφάλμα (max error) αφορούν ένα τυχαίο υποσύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης, συγκεκριμένα το 10% αυτού (εκτός από τα διαγράμματα των CD που αφορούν το 20%), και ονομάζεται δεδομένα δοκιμής (τεστ σετ), το οποίο αποτελείται από παρατηρήσεις που δεν έχουν ξαναδεί τα μοντέλα και εκεί πιστοποιείται η προσαρμογή τους στα δεδομένα και αυτό αφορούν οι μετρικές. Επίσης μία δεύτερη πιστοποίηση γίνεται με την μέθοδο της δεκαπλής-διεπικύρωσης (10-fold cross validation), όπου χωρίζονται τα δεδομένα εκπαίδευσης (training set) σε 10 υποσύνολα, μένει το ένα εκτός ως δεδομένα πιστοποίησης (test set) και το μοντέλο εκπαίδευεται στα υπολοιπόμενα 9. Αυτό γίνεται για όλα τα υποσύνολα και στο τέλος βγαίνει μία μέση τιμή (10fold-CV-score-mean) και μία τυπική απόκλιση (10fold-CV-score-Std) των τιμών των μετρικών. Ως μετρική για την αξιολόγηση των μοντέλων σε προσέγγιση (regressors) χρησιμοποιείται ο συντελεστής συσχέτισης R^2 με βέλτιστο σκορ την τιμή 1 (test score) και το μέγιστο σφάλμα (μέγιστη τιμή σφάλματος μεταξύ πραγματικής και τιμής πρόβλεψης). Το νευρωνικό δίκτυο επίσης εξετάζεται σε δεδομένα εκπαίδευσης που έχουν προκύψει από πραγματική βελτιστοποίηση με $T=4$, $T=8$ και $N=50$, δηλαδή σε 200 και 400 παρατηρήσεις από πραγματική εφαρμογή του υπολογιστικού κώδικα με υπολογιστικό κόστος περίπου τις 4 και 8 ώρες αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο κεφάλαιο 4.3.

Στο τέλος αφού πιστοποιηθεί η ικανότητα πρόβλεψης του νευρωνικού δικτύου κάνουμε μία βελτιστοποίηση παρόμοια με την πραγματική (με ίδιες παραμέτρους του αλγορίθμου PSO) προκειμένου να δούμε την γεωμετρία της βέλτιστης αεροτομής και δοκιμάζουμε διάφορα σενάρια που αφορούν τις παραμέτρους του αλγορίθμου βελτιστοποίησης OF.

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

α) Εκπαίδευση μοντέλων με ΜΣ και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά για πρόβλεψη θορύβου

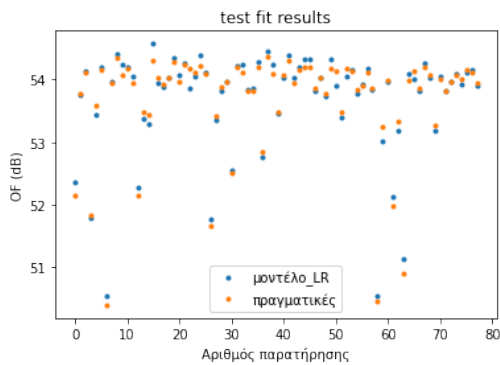
Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Μοντέλα Θορύβου	σκορ (test score)	Μέγιστο σφάλμα (test max error)	μέση τιμή σκορ 10-πλης διεπικύρωσης (10fold-CV-score-mean)	τυπική απόκλιση σκορ 10-πλης διεπικύρωσης (CV-score-Std)
LR	0.9849	0.9849	0.9776	-0.0145
LASSO	0.9132	0.9430	0.8980	0.0302
NN	0.9936	0.5297	0.9955	0.0030

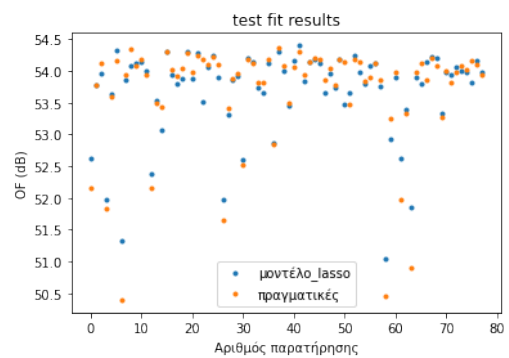
Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα από την δοκιμή των 3 εκπαιδευμένων μοντέλων στην πρόβλεψη θορύβου. Είσοδοι των μοντέλων είναι οι 10 ΜΣ(Παράμετροι Parsec) και οι αεροδυναμικοί συντελεστές CL, CD, CLCD-σύνολο 13 είσοδοι. Το δείγμα δοκιμής είναι 10% του συνολικού δείγματος. Το σκορ αφορά την μετρική R^2 με καλύτερη τιμή 1.

Από τον πίνακα 4.4 βλέπουμε πως τα μοντέλα έχουν πολύ μεγάλα σκορ, πολύ κοντά στην τιμή 1 αλλά και μικρά μέγιστα σφάλματα, με το μικρότερο να παρουσιάζεται στο μοντέλο νευρωνικού δικτύου. Στη συνέχεια στο διάγραμμα 4.7 φαίνεται πόσο κοντά βρίσκονται οι πραγματικές τιμές με τις τιμές πρόβλεψης των μοντέλων:

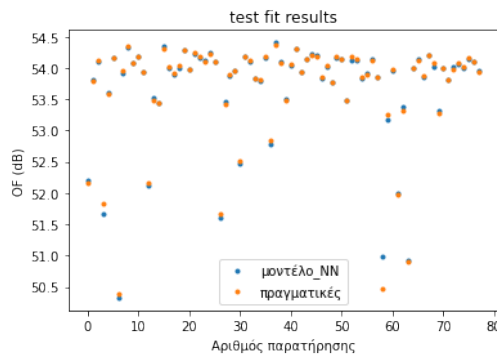
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα



(a) διάγραμμα διασποράς OF για το μοντέλο *Linear Regression*



(b) διάγραμμα διασποράς OF για το μοντέλο *Lasso*



(c) διάγραμμα διασποράς OF για το νευρωνικό δίκτυο με 2 στρώματα των 12,25 νευρώνων

Σχήμα 4.7: Διαγράμματα διασποράς (*scatter-plots*) θορύβου (OF) των πραγματικών και των προβλέψεων 3 μοντέλων. Οι παρατηρήσεις δοκιμής (*test set*) είναι υποσύνολο των 800 παρατηρήσεων της βελτιστοποίησης με $T=16$ και $N=50$. Είσοδοι των μοντέλων είναι οι 10 ΜΣ(Παράμετροι *Parsec*) και οι αεροδυναμικοί συντελεστές CL , CD , $CLCD$ -σύνολο 13 είσοδοι.

Φαίνεται, από το σχήμα 4.7, πως τα μοντέλα παράλο που παρουσιάζουν μικρά και παρεμφερή μέγιστα σφάλματα βλέπουμε ότι οι προλέψεις του νευρωνικού δικτύου είναι πιο κοντά από τις προβλέψεις των υπόλοιπων 2 γραμμικών μοντέλων. Αυτό είναι θετικό μόνο σε περίπτωση που το μοντέλο παρουσιάζει τέτοια συμπεριφορά σε σκορ πιστοποίησης (*test score*) καθώς εάν εμφανίζεται σε σκορ εκπαίδευσης μπορεί να δημιουργεί μεγάλα σφάλματα σε περιπτώσεις που δεν έχει ξαναδει το μοντέλο. Επίσης μπορεί να μαθαίνονται κατα περιπτώσεις σφάλματα του κώδικα που παρουσιάζονται σε συγκεκριμένες γεωμετρίες (*overfitting*).

Οι συντελεστές του γραμμικού μοντέλου *Lasso* μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να δειχθεί ποιες μεταβλητές έχουν μεγαλύτερη συσχέτιση με την μεταβλητή-στόχο που εδώ είναι ο θόρυβος. Οι συντελεστές αυτοί παρουσιάζονται στον επόμενο

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

πίνακα ως:

Είσοδοι (x_i)	Βάρη (W_i)
a_{1up}	0.04614503301133469,
$\tan(\theta_{TEup})$	0.0
$x_{b,up}$	0.15176178658462589
$y_{b,up}$	-0.21698031553590302
$x_{b,up}$	-0.0
a_{1down}	-0.0
$\tan(\theta_{TEdown})$	-0.0
$x_{b,down}$	-0.0
$y_{b,down}$	0.0
$s_{b,down}$	0.0
CL	-0.0
CD	-0.5389028199856911
CL/CD	0.0

Πίνακας 4.5: Συντελεστές μοντέλου Lasso με $\alpha=0.1$

Φαίνεται πως το μοντέλο LASSO με συντελεστή $\alpha=0.1$, δίνει μεγάλη βαρύτητα στις παραμέτρους x_b , y_b πράγμα που δείχνει ότι υπάρχει συσχέτιση αυτών και της τιμής θορύβου. Επίσης φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή αντίσταση και της τελικής τιμής θορύβου. Επίσης δίνει μεγάλη βαρύτητα στον συντελεστή οπισθέλκουσας CD .

β) Εκπαίδευση μοντέλων για πρόβλεψη αεροδυναμικών συντελεστών με χρήση μόνο των ΜΣ (παραμέτρων Parsec)

Τα αποτελέσματα από την εκπαίδευση και την δοκιμή των 3 μοντέλων φαίνεται στη συνέχεια. Διευκρινίζεται ότι οι συντελεστές μεταβλήθηκαν ώστε να μπορούν να επεξεργαστούν από τα μοντέλα. Ο συντελεστής άνωσης πολλαπλασιάστηκε επί 100 και ο συντελεστής οπισθέλκουσας επί 10.000. Έτσι:

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

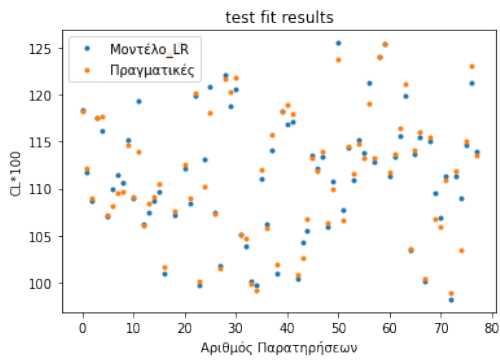
Πρόβλεψη CL				
Μοντέλα	σκορ (test score)	Μέγιστο σφάλμα (test max error)	μέση τιμή σκορ 10-πλης διεπικύρωσης (10fold-CV-score-mean)	τυπική απόκλιση σκορ 10-πλης διεπικύρωσης (CV-score-Std)
LR	0.9625	5.4507	0.9684	0.0104
LASSO	0.9628	5.3419	0.9661	0.0103
NN	0.9899	5.2185	0.9972	0.0022
Πρόβλεψη CD				
Μοντέλα	σκορ (test score)	Μέγιστο σφάλμα (test max error)	μέση τιμή σκορ 10-πλης διεπικύρωσης (10-fold-CV-score-mean)	τυπική απόκλιση σκορ 10-πλης διεπικύρωσης (CV-score-Std)
LR	0.09153	16.82184	0.20391	0.09477
LASSO	0.09241	17.17076	0.20277	0.08629
NN	0.97704	4.81197	0.98526	0.00499

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα από την δοκιμή των 3 εκπαιδευμένων μοντέλων στην πρόβλεψη των αεροδυναμικών συντελεστών CL,CD. Το δείγμα δοκιμής είναι 10%, 20% του συνολικού δείγματος για CL, CD αντιστοίχως. Το σκορ αφορά την μετρική R^2 με καλύτερη τιμή 1

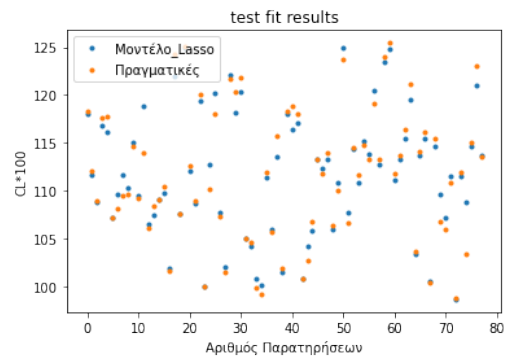
Από τις τιμές του πίνακα 4.6 διακρίνουμε πως για τα γραμμικά μοντέλα έχουμε καλή δυνατότητα πρόβλεψης για τον συντελεστή άνωσης αλλά κακή για τον συντελεστή αντίστασης. Αντιθέτως το νευρωνικό δίκτυο και πάλι φαίνεται ότι μπορεί να "μάθει" τις σχέσεις εξάρτησης μεταξύ των 10 μεταβλητών εισόδου και των 2 συντελεστών με κόστος κάποια ώρα για την διερεύνηση των υπερπαραμέτρων του.

Διαγράμματα που απεικονίζουν την πρόβλεψη και την πραγματική τιμή για τον συντελεστή άνωσης και αντίστασης είναι:

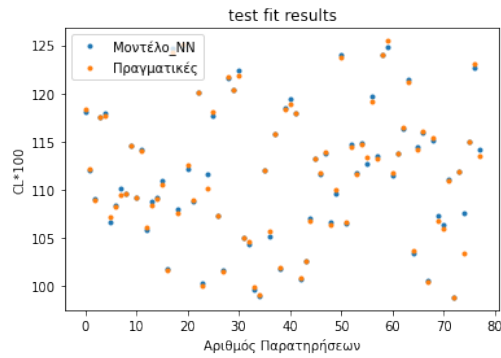
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα



(a) διάγραμμα διασποράς CL για το μοντέλο *Linear Regression*



(b) διάγραμμα διασποράς CL για το μοντέλο *Lasso*



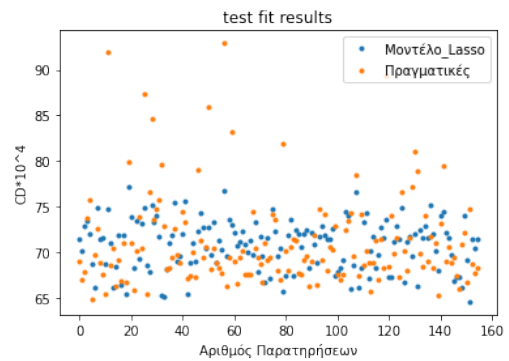
(c) διάγραμμα διασποράς CL για το νευρωνικό δίκτυο με 2 στρώματα των 12,25 νευρώνων

Σχήμα 4.8: Διαγράμματα διασποράς (*scatter-plots*) συντελεστή άνωσης (CL) των πραγματικών και των προβλέψεων 3 μοντέλων. Οι τιμές δοκιμής (*test set*) είναι υποσύνολο (10%) των 800 παρατηρήσεων της βελτιστοποίησης με $T=16$ και $N=50$. Είσοδοι των μοντέλων είναι οι 10 ΜΣ(Παράμετροι *Parsec*)

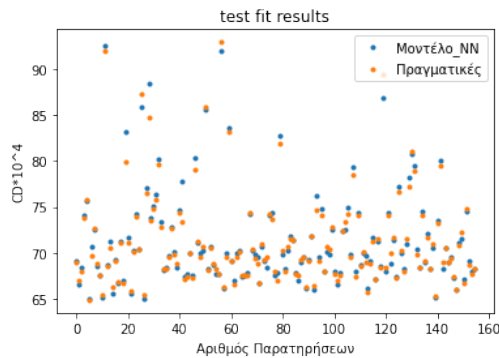
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα



(a) διάγραμμα διασποράς CD για το μοντέλο Linear Regression



(b) διάγραμμα διασποράς CD για το μοντέλο Lasso



(c) διάγραμμα διασποράς CD για το νευρωνικό δίκτυο με 2 στρώματα των 12,25 νευρώνων

Σχήμα 4.9: Διάγραμμα διασποράς (scatter-plots) συντελεστή οπισθέλκουσας (CD) των πραγματικών και των προβλέψεων 3 μοντέλων. Οι τιμές δοκιμής (test set) είναι υποσύνολο (20%) των 800 παρατηρήσεων της βελτιστοποίησης με $T=16$ και $N=50$. Είσοδοι των μοντέλων είναι οι 10 ΜΣ(Παράμετροι Parsec)

Τα αρνητικά αποτελέσματα πρόβλεψης των γραμμικών μοντέλων πιστοποιούνται και οπτικά από τα διαγράμματα διασποράς 4.9 αφού οι περισσότερες μπλε κουκίδες βρίσκονται συγκεντρωμένες γύρω από μία τιμή πράγμα που δείχνει ότι το μοντέλο δε μπορεί να προβλεψει τις διακυμάνσεις των πορτοκαλί κουκίδων. Σε αντίθεση, το νευρωνικό δίκτυο βλέπουμε ότι αντιλαμβάνεται τις διακυμάνσεις αλλά σε κάποιες τιμές έχουμε μεγαλύτερη τιμή σφάλματος (απόκλιση μπλε-πορτοκαλι κουκίδων). Σε κάθε περίπτωση εάν χρειαστεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο νευρωνικού δικτύου θα πρέπει να δοκιμαστεί σε μεγαλύτερο πλήθος παρατηρήσεων, όπως θα γίνει στο κεφάλαιο 4.3 πριν την εφαρμογή του μοντέλου σε βελτιστοποίηση με αντικατάσταση του υπολογιστικού κώδικα.

γ) Εκπαίδευση μοντέλων για πρόβλεψη θορύβου με χρήση μόνο των ΜΣ(παραμέτρων Parsec)

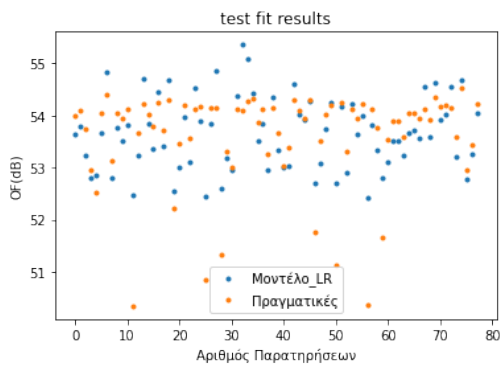
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

Ο πίνακας των αποτελεσμάτων για τα 2 μοντέλα, το γραμμικό (LR) και το νευρωνικό δίκτυο (NN), κατά την δοκιμή σε δείγμα δοκιμής είναι:

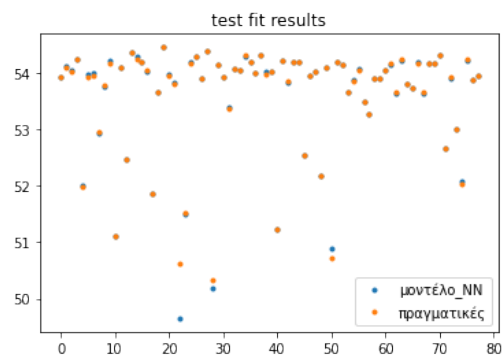
Πρόβλεψη θορύβου (OF)				
Μοντέλα	σκορ (test score)	Μέγιστο σφάλμα (test max error)	μέση τιμή σκορ 10-πλης διεπικύρωσης (10fold-CV-score-mean)	τυπική απόκλιση σκορ 10-πλης διεπικύρωσης (CV-score-Std)
LR	0.6298	2.1662	0.5873	0.0468
NN	0.9962	0.9655	0.9810	0.0040

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα γραμμικού μοντέλου (LR) και νευρωνικού δικτύου (NN) σε δεδομένα δοκιμής. Το σκορ και το μέγιστο σφάλμα αφορούν το 10% του συνολικού δείγματος

Διαγράμματα που απεικονίζουν την πρόβλεψη και την πραγματική τιμή για τον θόρυβο είναι:



(a) διάγραμμα διασποράς OF για το μοντέλο Linear Regression



(b) διάγραμμα διασποράς OF για το νευρωνικό δίκτυο με 2 στρώματα των 10,3 νευρώνων

Σχήμα 4.10: Διαγράμματα διασποράς (scatter-plots) θορύβου (OF) των πραγματικών και των προβλέψεων 2 μοντέλων. Οι τιμές δοκιμής (test set) είναι υποσύνολο των 800 παρατηρήσεων της βελτιστοποίησης με $T=16$ και $N=50$. Είσοδοι των μοντέλων είναι οι 10 ΜΣ (Παράμετροι Parsec)

Από το σχήμα (4.10) αλλά και τον πίνακα (4.7) βλέπουμε πως το γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης αδυνατεί να προβλέψει τις διακυμάνσεις στις τιμές εξόδου δηλαδή αδυνατεί να μάθει την σχέση σύνδεσης μεταξύ εισόδων και εξόδου έχοντας πολύ μικρά σκορ εκπαίδευσης και σε 10-πλη διεπικύρωση και μεγάλο μέγιστο σφάλμα. Αντιθέτως το νευρωνικό δίκτυο μπορεί και κάνει πολύ καλύτερες προβλέψεις καθώς έχει και υψηλότερο σκορ, χαμηλότερο μέγιστο σφάλμα αλλά και στο διάγραμμα διασποράς του (4.10,b), οι μπλε κουκίδες βρίσκονται πολύ κοντινότερα με τις πορτοκαλί.

4.3 Χρήση Μοντέλων για Πρόβλεψη Δεδομένων από Βελτιστοποιήσεις με Υπολογιστικό Κώδικα

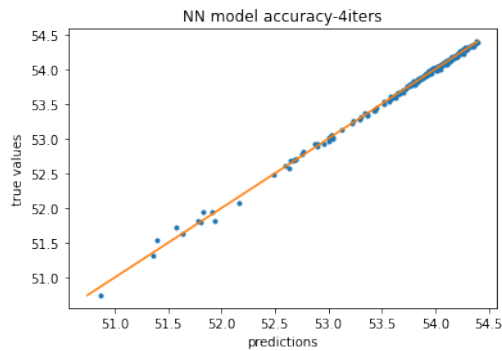
Λόγω της καλής ικανότητας που φαίνεται να παρουσιάζει το νευρωνικό δίκτυο στην πρόβλεψη του θορύβου **με εισόδους μόνο τις 10 ΜΣ**, στην συνέχεια εξετάζουμε πόσο καλή είναι η πρόβλεψή του σε δεδομένα από πραγματικές βελτιστοποιήσεις με $T=8$, $T=4$ και $N=50$, **μόνο για την περίπτωση θορύβου με Α-στάθμιση**. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον επόμενο πίνακα ως:

Πρόβλεψη Θορύβου (OF)	Σκορ (test score)	Μέγιστο σφάλμα (test max error)
Σύνολο δεδομένων		
200	0.9987	0.0942
400	0.9782	2.1262

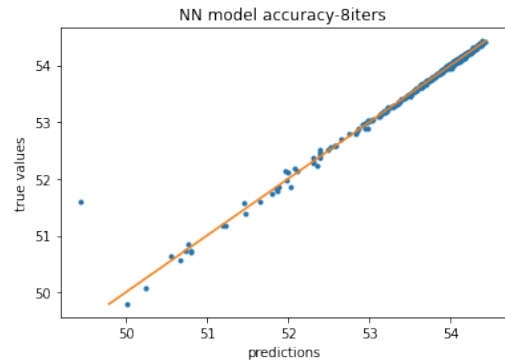
Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα μοντέλου νευρωνικού δικτύου με είσοδο τις 10 ΜΣ και έξοδο τον θόρυβο σε σύνολο δεδομένων από υπολογιστικές βελτιστοποιήσεις με 4, 8 επαναλήψεις και 50 σωματίδια σμήνους (200 και 400 παρατηρήσεις)

Στη συνέχεια παρουσιάζεται κάποια γραφήματα που δείχνουν πόσο κοντά βρίσκεται η προβλεψη του μοντέλου και των τιμών από την υπολογιστική διαδικασία:

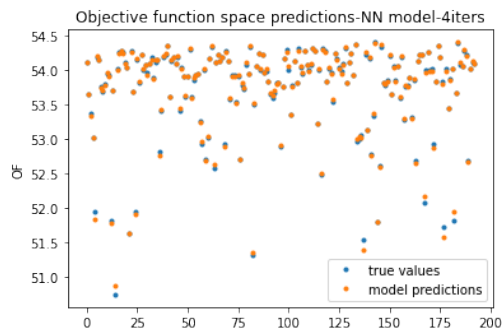
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα



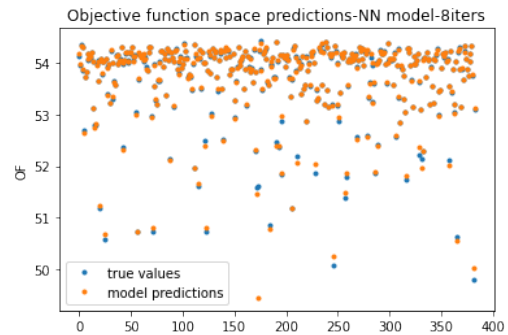
(a) Διάγραμμα ακρίβειας για 200 παρατηρήσεις. Στην μπλε ευθεία βρίσκονται οι προβλέψεις που είναι ακριβώς ίδιες με τις πραγματικές



(b) Διάγραμμα ακρίβειας για 400 παρατηρήσεις. Στην μπλε ευθεία βρίσκονται οι προβλέψεις που είναι ακριβώς ίδιες με τις πραγματικές



(c) Διάγραμμα διασποράς, για 200 παρατηρήσεις



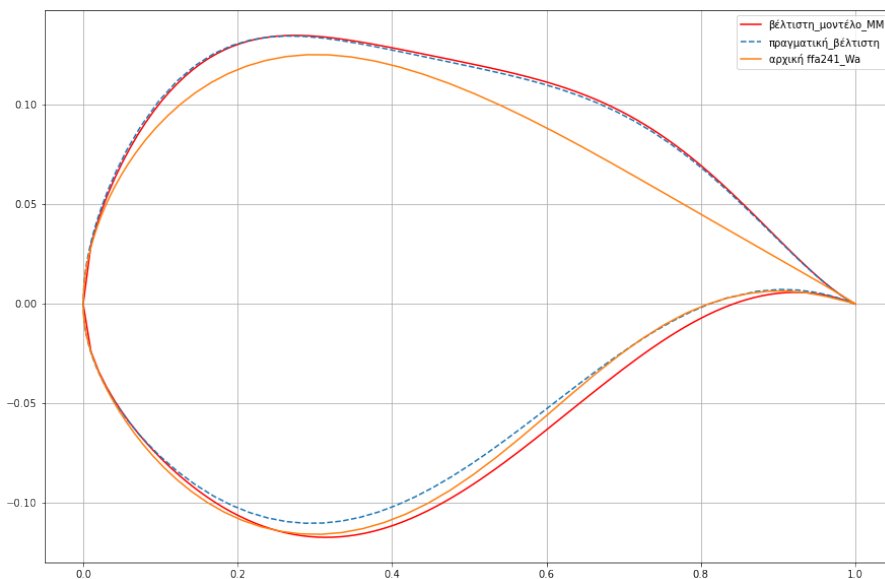
(d) Διάγραμμα διασποράς, για 400 παρατηρήσεις

Σχήμα 4.11: Διαγράμματα οπτικοποίησης των προβλεπτικών δυνατοτήτων του μοντέλου. Οι πραγματικές τιμές (*true values*) και οι τιμές πρόβλεψης (*predictions*) δίνονται σε dB

Από το παραπάνω διάγραμμα διακρίνουμε πως το μοντέλο μπορεί και προβλέπει πολύ καλά τα δεδομένα που εξάχθηκαν από τις βελτιστοποιήσεις με τον υπολογιστικό κώδικα καθώς στον πίνακα τα σκορ είναι πολύ κοντά στο 1 και το μέγιστο σφάλμα έχει μικρή τιμή. Τα διαγράμματα διασποράς δείχνουν πόσο κοντά βρίσκονται οι προβλέψεις με τις πραγματικές τιμές στα οποία δεν παρατηρείται σοβαρή απόκλιση. Επίσης τα διαγράμματα ακρίβειας δείχνουν ότι όλες οι μπλε κουκίδες είναι πολύ κοντά στην πορτοκαλί ευθεία, με ιδανική περίπτωση όλες οι ευθείες να βρίσκονται ακριβώς πάνω σε αυτή. Όμως στο (b) του σχήματος 4.11 φαίνεται πως μία παρατήρηση (μπλε κουκίδα μακριά από την πορτοκαλί ευθεία) παρουσιάζει μεγάλο σφάλμα πρόβλεψης. Αφού ελέγχθηκε αυτό το σημείο βρέθηκε πως λόγω αριθμητικού προβλήματος ο κώδικας αδυνατούσε να εκτελεστεί και έβγαζε σήμα σφάλματος. Έτσι με την παρατήρηση του σχήματος μπορέσαμε και είδαμε σε μεγαλύτερη κλίμακα κατά πόσο ο κώδικας εκτελείται και σε ποια σημεία δημιουργείται πρόβλημα.

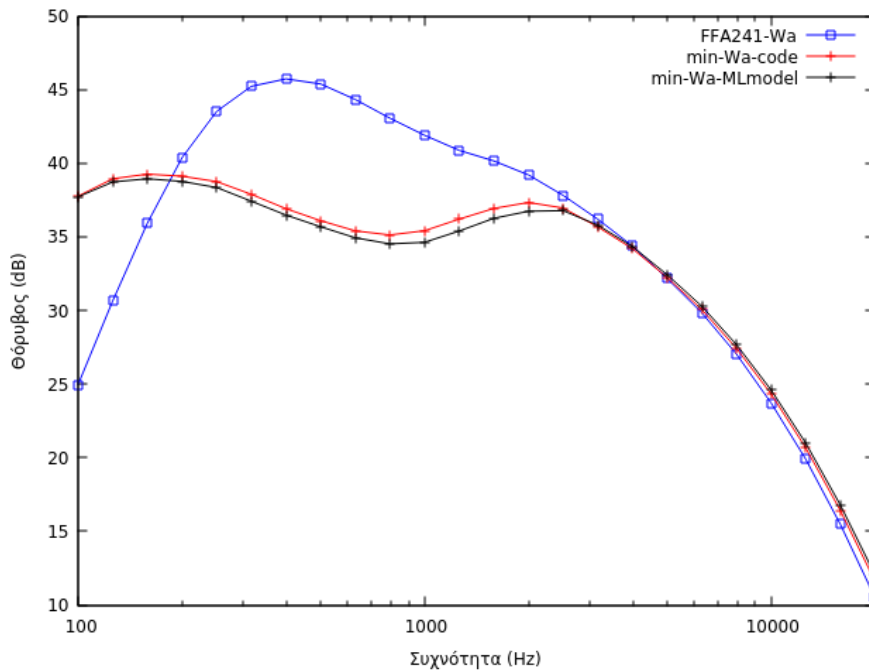
4.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Βελτιστοποίησης με Χρήση Μοντέλων Μηχανικής Μάθησης

Το μη γραμμικό μοντέλο του νευρωνικού δικτύου παρουσιάζει πολύ καλή προβλεπτική ικανότητα όσον αφορά την πρόλεξη του θορύβου αλλά και την πρόβλεψη των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να αντικαταστήσουμε το κομμάτι του αεραδυναμικού κώδικα και του κώδικα υπολογισμού θορύβου με το μοντέλο αυτό. Όπως αναφέρθηκε η όλη διαδικασία βελτιστοποίησης με χρήση του υπολογιστικού κώδικα έχει πολύ υψηλό υπολογιστικό κόστος. Πιο συγκεκριμένα για την βελτιστοποίηση με 16 επαναληψεις και 50 σωματίδια, χρειάστηκαν περίπου 16 ώρες για να βρεθεί η βέλτιστη λύση, πράγμα που μας περιορίζει τη δυνατότητα να κάνουμε έλεγχο για διάφορες παραμέτρους του αλγορίθμου, να συγκρίνουμε πως ανταποκρίνονται διάφοροι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης κ.α. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από βελτιστοποίηση με τον ίδιο αλγόριθμο PSO ($N=50$, $T=16$, $(c1, c2, w)=(0.5, 2, 0.8)$), για θόρυβο με Α-στάθμιση, αλλά με αντικατάσταση των υπολογιστικών μοντέλων με το μοντέλο του νευρωνικού δικτύου.



Σχήμα 4.12: Σχήμα αεροτομών από την (πραγματική) βελτιστοποίηση με χρήση υπολογιστικού κώδικα, βελτιστοποίηση με χρήση του νευρωνικού δικτύου και αρχική αεροτομή

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

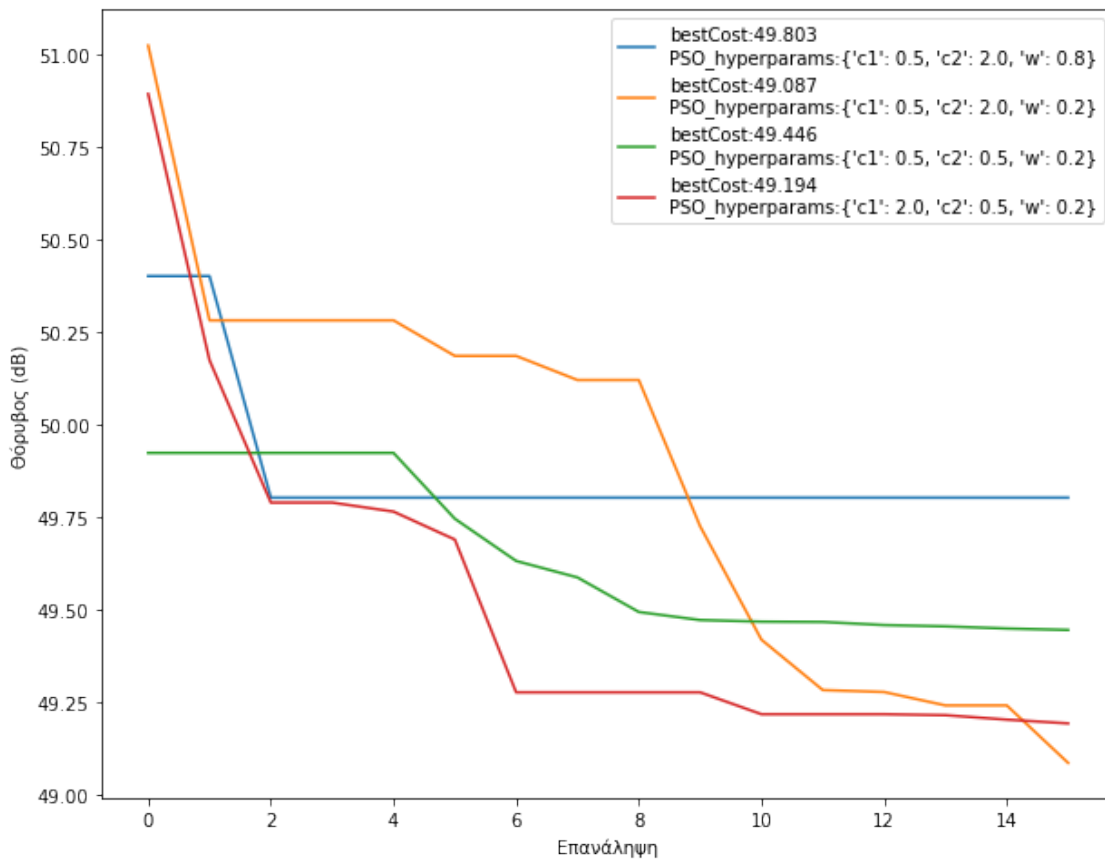


Σχήμα 4.13: Φάσματα αεροτομών. Φαίνεται πως το φάσμα της βελτιστοποίησης με κώδικα (κόκκινο) και με χρήση του νευρωνικού δικτύου (μαύρο) είναι πολύ κοντά. Το μοντέλο δίνει καλύτερο φάσμα με συνολικό λογαριθμικό άθροισμα 49.333 dB

Η βέλτιστη γεωμετρία με το μοντέλο του σχήματος 4.13 συμπίπτει στην πάνω πλευρά αλλά έχει διαφορά στην κάτω με την πραγματική βελτιστοποίηση, καθώς όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, τα μεγέθη της πάνω πλευράς (πλευρά υποπίεσης) έχουν πολύ μεγάλη συσχέτιση με την τελική τιμή του θορύβου. Επίσης αυτό μας δείχνει ότι το μοντέλο ψάχνει τον χώρο των λύσεων και μπορεί να αναπαράξει ίσως και καλύτερες γεωμετρίες που θα μπορούσαν να επαναξιολογηθούν με τον υπολογιστικό κώδικα. Η παραπάνω διαδικασία του σχήματος **υπολογιστικά κόστισε 2.22 δευτερόλεπτα**, κατά πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερη από τον χρόνο που θα απαιτούσε η διαδικασία με χρήση του υπολογιστικού κώδικα. Η τελική τιμή θορύβου είναι 49.33 dB **μικρότερη από την τιμή που προέκυψε με χρήση του υπολογιστικού κώδικα** η οποία είναι στα 49.6737 dB.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε διαγράμματα με την πορεία της εξέλιξης της βελτιστοποίησης για διάφορες τιμές των παραμέτρων του PSO, c_1 , c_2 , w .

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα



Σχήμα 4.14: Διαγράμματα επαναλήψεων-ελάχιστης αντικειμενικής συνάρτησης. Η μπλε καμπύλη έχει τις ίδιες παραμέτρους με αυτές που χρησιμοποιήσαμε στην πραγματική βελτιστοποίηση

Στο προηγούμενο σχήμα (4.14) βλέπουμε πως η μπλε καμπύλη, που έχει παραμέτρους ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήσαμε στην πραγματική βελτιστοποίηση (c_1 , c_2 , $w=0.5, 2, 0.8$), παρουσιάζει απότομη μεταβολή και μπορεί να εγκλωβιστεί σε κάποια τιμή ελαχίστου για πολλές επαναλήψεις. Οι τιμές με μικρότερο w παρουσιάζουν πιο ομαλή μετάβαση. Μια επιλογή παραμέτρων που θα μπορούσε να γίνει για εκ νέου βελτιστοποίηση θα ήταν η πορτοκαλί καμπύλη ($c_1, c_2, w=0.5, 2, 0.2$). Η παραπάνω διαδικασία υπολογίζεται πως θα κόστιζε υπολογιστικά περίπου 64 ώρες ενώ με την χρήση του μοντέλου κόστισε 6.75 δευτερόλεπτα.

Σε κάθε περίπτωση θα χρειαστεί να συλλεγούν δεδομένα και από άλλες γεωμετρίες εκτός της FFA241, αφήνοντας αμετάβλητες όλες τις υπόλοιπες συνθήκες λειτουργίας της ανεμογεννήτριες, έτσι ώστε να έχουμε μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στην αναπαράσταση που πραγματοποιεί το μοντέλο, ανάμεσα στις μεταβλητές σχεδιασμού και τον τελικό θόρυβο.

5 Αποτίμηση και Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε σχεδιασμός των εξωτερικών τμημάτων δύο πρότυπων ανεμογεννητριών, με διαφορετικό σχήμα αεροτομών η κάθε μία, τις FFA241, DU240. Η σχεδίαση έγινε με χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης PSO ο οποίος είχε ως στόχο την ελαχιστοποίηση των αεροακουστικών εκπομπών. Τα φάσματα μελετήθηκαν για τις περιπτώσεις με και χωρίς A-στάθμιση.

Ο αεροδυναμικός θόρυβος που παράγεται από την κάθε ανεμογεννήτρια, θεωρείται πως προέρχεται από την συνεισφορά κομματιών που χωρίζεται το εξωτερικό τμήμα του πτερυγίου καθένα από τα οποία έχει διαφορετικό μήκος χορδής πάχος αλλά όλα αποτελούνται από το ίδιο σχήμα αεροτομής. Επίσης διερευνώνται οι συνιστώσες θορύβου που έχει βρεθεί πως εξαρτώνται περισσότερο από την γεωμετρία της αεροτομής και αυτές είναι οι TBLE και LBL. Για τον τελικό θόρυβο επιλύεται το πεδίο ροής μέσω του κώδικα FOIL2W και τα μεγέθη του οριακού στρώματος δ, δ^* εισέρχονται ως είσοδοι στον αεροακουστικό κώδικα CALC_SOUND. Αυτή η διαδικασία είναι ενσωματωμένη στον κώδικα RUN_AIRFOIL.

Οι αεροτομές των εξωτερικών τμημάτων, παραμετροποιήθηκαν με χρήση της παραμετροποίησης Parsec και ως μεταβλητές σχεδιασμού επιλέχθηκαν οι παράμετροι Parsec όπως αυτοί έχουν οριστεί στο παρόν κείμενο. Η βέλτιστη λύση διερευνήθηκε σε ένα εύρος $\pm 8\%$ σε σχέση με τις αρχικές ΜΣ και έγινε εισαγωγή περιορισμού γεωμετρίας. Επίσης έγινε αποθήκευση του συντελεστή αεροδυναμικής απόδοσης ο οποίος θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικός στην θέση περίπου του 80% του μήκους του πτερυγίου.

Ως τελικές αεροτομές επιλέχθηκαν εκείνες που ικανοποιούν τον αρχικό στόχο μείωσης θορύβου αλλά και παρουσιάζουν συντελεστή αεροδυναμικής απόδοσης τουλάχιστον ίδιο με αυτόν των αρχικών αεροτομών (4.1).

Προκειμένου να βγουν επιπλέον συμπεράσματα τα δεδομένα από την κύρια βελτιστοποίηση, αλλά και από άλλες με μικρότερο αριθμό επαναλήψεων, χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση και πιστοποίηση μοντέλων μηχανικής μάθησης, 2 γραμμικά μοντέλα (LASSO, LR) και 1 μη-γραμμικό νευρωνικό δίκτυο. Επίσης ένα από τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκε ως αντικατάσταση στους αεροδυναμικούς και αεροακουστικούς κώδικες αφού είχε πιστοποιηθεί. Στη συνέχεια έγινε βελτιστοποίηση με ίδιες παραμέτρους PSO όπως αυτές της πραγματικής βελτιστοποίησης (τις οποίας οι αεροτομές σχεδιάστηκαν στο σχήμα 4.1) και συγκρίθηκαν το σχήμα και το φάσμα της αεροτομής με τον ελάχιστο θόρυβο από τις 2 βελτιστοποιήσεις. Από τα

Κεφάλαιο 5. Αποτίμηση και Συμπεράσματα

παραπάνω προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- **Θόρυβος:**

- Μείωση θορύβου για αεροτομές FFA241, DU240 -1.492% και -1.003% με A-στάθμιση και -1.28%, -1.21% χωρίς A-στάθμιση με ταυτόχρονη διατήρηση ή ελάχιστη αύξηση του συντελεστή (CL/CD). Για περεταίρω μείωση του θορύβου σε ποσοστά -8%, -1.839% με στάθμιση και περίπου -2%, -1.21% χωρίς στάθμιση, παρατηρείται σημαντική μείωση των αεροδυναμικών συντελεστών κατά -28.8%, -13.597% , -4.935 αντίστοιχα με μικρή αύξηση κατά +1.5% για την περίπτωση DU240 χωρίς A-στάθμιση. Έτσι φαίνεται ότι υπάρχει αντιστρόφως ανάλογη σχέση του θορύβου και του αεροδυναμικού συντελεστή (πίνακες 4.1, 4.2).

- Παρουσιάζεται σημαντική εξάρτηση από τα χαρακτηριστικά της πάνω πλευράς (πλευρά υποπίεσης) και ιδιαίτερα από το σημείο μέγιστης καμπυλότητας (y_b) και της απόστασης του σημείου πάνω στη χορδή (x_b), όπως φαίνεται από τα διαγράμματα των αεροτομών (4.1, 4.5), τα διαγράμματα των μεταβλητών Parsec (4.2, 4.3). Η οπτική αυτή παρατήρηση ενισχύεται από το γραμμικό μοντέλο μηχανικής μάθησης Lasso, που οι συντελεστές του δείχνουν την σημαντικότητα των μεταβλητών εισόδου σε σχέση με την μεταβλητή εξόδου.

- Η A-στάθμιση (διόρθωση στο φάσμα του θορύβου) αποτελεί σημαντική παράμετρος για την τελική τιμή του συνολικού θορύβου αλλά και για την τελική γεωμετρία στην οποία θα συγκλίνει η βελτιστοποίηση. Αυτό συμβαίνει διότι οι αρχικές αεροτομές χωρίς στάθμιση έχουν αρκετή ενέργεια στις χαμηλές συχνότητες και οι τελικές γεωμετρίες επιτυγχάνουν πτώση της τιμής σε αυτές οπότε και η συνολική τιμή θορύβου είναι μικρότερη. Αντίθετα, στις σταθμισμένες, οι τελικές γεωμετρίες φαίνεται να έχουν μεγαλύτερες τιμές θορύβου στις χαμηλές συχνότητες, από τις αρχικές γεωμετρίες, αλλά χαμηλότερες στο μεγαλύτερο μέρος του φάσματος στις ενδιάμεσες πράγμα που οδηγεί σε χαμηλή συνολική τελική τιμή θορύβου. Αυτά διακρίνονται στο διάγραμμα φασμάτων (4.4).

- **Μοντέλα μηχανικής μάθησης:**

- Με χρήση γραμμικών μοντέλων πιστοποιήθηκε η εξάρτηση του θορύβου από τις μεταβλητές Parsec x_B, y_B αλλά και από τον συντελεστή αντίστασης για την FFA241 με A-στάθμιση. Καθώς βλέπουμε πως τα διαγράμματα της DU240 έχουν όμοια χαρακτηριστικά περιμένουμε την ίδια εξάρτηση όπως και περιμένουμε αντίστροφη εξάρτηση με τις ίδιες αεροτομές χωρίς A-στάθμιση. Τα διαγράμματα αυτών των περιπτώσεων εξήχθησαν αλλά παραλείπονται για λόγους ομοιότητας και περιορισμού του κειμένου.

- Τα γραμμικά μοντέλα παρουσιάζουν πολύ καλά αποτελέσματα πρόβλεψης σε

Κεφάλαιο 5. Αποτίμηση και Συμπεράσματα

περιπτώσεις που εκτός των 10 ΜΣ έχουμε και δεδομένα των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών CL, CD. Σε περίπτωση χρήση μόνον των 10 ΜΣ ως εισόδους δεν παρουσιάζονται καλά αποτελέσματα πρόβλεψης όπως φαίνονται από τις χαμηλές τιμές μετρικών και μεγάλων τιμών σφάλματος.

- Στην προσπάθεια εκπαίδευσης των μοντέλων LR, LASSO, νευρωνικό δίκτυο για πρόβλεψη των συντελεστών CL, CD με εισόδους μόνο τις 10 ΜΣ, είχαμε αποτελέσματα 10-πλής διεπικύρωσης 0.9684, 0.9661, 0.9972 για τον συντελεστή άνωσης CL και 0.20391, 0.20277, 0.9852 για τον συντελεστή οπισθέλκουσας CD. Βλέπουμε ότι τα γραμμικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πρόβλεψη του CL αλλά όχι του CD.

- Με χρήση νευρωνικού δικτύου έπιτεύχθηκε πρόβλεψη του θορύβου (για FFA241 με Α-στάθμιση) με εισόδους μόνο τις 10 μεταβλητές Parsec (ΜΣ) με μέση τιμή σκορ 10-πλής διεπικύρωσης (στο training set) 0.9810 και πολύ μικρή τυπική απόκλιση. Στη συνέχεια πιστοποιήθηκε με δεδομένα που είχαν αποθηκευτεί από βελτιστοποιήσεις με χρήση του υπολογιστικού κώδικα, με σκορ 0.9987 και 0.9782 για 200 και 400 παρατηρήσεις αντιστοίχως. Φάνηκε πως εκτός από την πολύ καλή πρόβλεψη του μοντέλου μπορούσε να εντοπιστεί και αεροτομή όπου δημιουργούσε αριθμητικό πρόβλημα στον κώδικα. Έτσι τα μη-γραμμικά μοντέλα μπορούν να προβλέψουν μη-γραμμικές σχέσεις και να χρησιμοποιηθούν για αντικατάσταση του υπολογιστικού κώδικα για μείωση του υπολογιστικού κόστους.

- Με χρήση νευρωνικού δικτύου έγινε δοκιμή 4 συνδυασμών των παραμέτρων του αλγόριθμου βελτιστοποίησης όπως φαίνεται στο σχήμα 4.14, ώστε να φανεί ο τρόπος εξερεύνησης του χώρου των λύσεων από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Βρέθηκε πως συνδυασμός παραμέτρων με μικρότερο ω θα ήταν καλύτερη επιλογή για την καλύτερη εξερεύνηση του χώρου των λύσεων και μία καλή πρόταση θα ήταν η $(c1, c2, w) = (0.5, 2, 0.2)$. Επίσης συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης (γεωμετρία με ελάχιστο θόρυβο) με χρήση του μοντέλου σε σχέση με τον υπολογιστικό κώδικα και φάνηκε ότι στην επάνω πλευρά συμπίπτουν ακριβώς αλλά διαφέρουν στην από κάτω, πράγμα αναμενόμενο αφού η πάνω πλευρά φαίνεται να καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την τελική τιμή θορύβου. Επίσης η γεωμετρία της βελτιστοποίησης με χρήση μοντέλου είχε καλύτερη τελική τιμή θορύβου, στα 49.333 dB συγκριτικά με την 49.6737 που δίνει η βελτιστοποίηση με χρήση του κώδικα.

- Η βελτιστοποίηση με χρήση μοντέλων μειώθηκε από τις 16 ώρες στα 2.22 δευτερόλεπτα. Για τον έλεγχο των παραμέτρων με χρήση μοντέλων, δηλαδή για την διερεύνηση 4 σεναρίων με διαφορετικές παραμέτρους PSO, με τον

Κεφάλαιο 5. Αποτίμηση και Συμπεράσματα

υπολογιστικό κώδικα αναμενόταν χρόνος περίπου 64 ώρες ενώ με το πιστοποιημένο μοντέλο νευρωνικού δικτύου κόστισε 6.75 δευτερόλεπτα.

5.1 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Μερικές προτάσεις για μελλοντική έρευνα είναι:

- Συγκριτική μελέτη με χρήση διαφορετικών αλγόριθμων βελτιστοποίησης (όπως η μέθοδος SIMPLEX ή η προσομοιωμένη απόκτηση) και σύγκρισης αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του PSO, της παρούσας εργασίας, στο ίδιο εύρος μεταβλητών σχεδιασμού. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην αρχή οι υπολογιστικοί κώδικες και στην συνέχεια να γίνει διερεύνηση με αντικατάσταση των μοντέλων μηχανικής μάθησης. Μία άλλη κατηγορία μοντέλων για χρονοβόρες διεργασίες βελτιστοποίησης είναι τα μοντέλα μπαγιεσιανής βελτιστοποίησης (Bayesian optimization) για τα οποία παροτρύνουμε στην ιστοσελίδα του ανοιχτού project, scikit-optimize [31].

Σημειώνεται πως η τεράστια μείωση του υπολογιστικού κόστους με χρήση των μοντέλων κάνει εφικτή την χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης που προσεγγίζουν τις παραγώγους της συνάρτησης όπως οι μέθοδοι quasi-Newton.

- Σχεδίαση αεροτομών μέσω βελτιστοποίησης με παράλληλη χρήση μοντέλων και αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα στην παρούσα εργασία φάνηκε πως η βελτιστοποίηση με μοντέλα μηχανικής μάθησης παίρνει πολύ λιγότερο χρόνο. Έτσι θα μπορούσε να γίνει βελτιστοποίηση με υπολογιστικό κώδικα για λίγες επαναλήψεις, στη συνέχεια με χρήση των δεδομένων που έχουν αποθηκευτεί να εκπαιδευτεί μοντέλο μηχανικής μάθησης και να γίνεται μία συνεχής πιστοποίηση των αποτελεσμάτων, που προκύπτουν από αυτό, μέσω του υπολογιστικού κώδικα. Δηλαδή θα υπάρχει μία εναλλαγή:

βέλτιστη λύση μοντέλου → αξιολόγηση με τον πραγματικό κώδικα → επανεκπαίδευση μοντέλου → νέα βέλτιστη λύση ...(συνέχιση μέχρι τερματισμό)

- Βελτιστοποίηση μεγαλύτερου πλήθους αεροτομών και εκπαίδευση μοντέλου με χρήση των δεδομένων από όλες τις βελτιστοποιήσεις.

- Σχεδίαση ολόκληρου φτερού ανεμογεννήτριας μέσω βελτιστοποίησης παραμετροποιώντας την διανομή πάχους ή/και στροφής του φτερού. Επίσης μπορεί να γίνει διερεύνηση χρησιμοποιώντας όλα τα είδη θορύβου.

- Επανεκτέλεση βελτιστοποίησης με περιορισμούς που να αφορούν τον συντελεστή αεροδυναμικής απόδοση ή/και την ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας.

Α΄ Παράρτημα

Παρουσιάζεται ο πλήρης πίνακας με τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα προκειμένου να δημιουργηθούν τα μοντέλα νευρωνικών δικτύων και συγκεκριμένα τα μοντέλα προσέγγισης (neural network regressors) της βιβλιοθήκης sklearn. Αν γίνει αντιγραφή των υπερπαραμέτρων του επόμενου πίνακα σε κώδικα και έχουμε στην κατάλληλη μορφή τα δεδομένα εισόδου τότε μπορούμε να αναπαράξουμε τα μοντέλα ακριβώς όπως παρουσιάζονται στο παρόν κείμενο, προφανώς εισάγωντας τις κατάλληλες και τετρισμένες εντολές για την εκπαίδευση τέτοιων μοντέλων :

Πρόβλεψη θορύβου με 10 ΜΣ	Πρόβλεψη θορύβου με 13 εισόδους(10ΜΣ +3 "Λ,"Δ,"Λ^Δ)	Πρόβλεψη αεροδυναμικών συντελεστών CL,CD με εισόδους τις 10 ΜΣ
hidden_layer_sizes=(10,3) activation='logistic', solver='lbfgs', alpha=0.0001, batch_size='auto', learning_rate='constant', learning_rate_init=0.0001, power_t=0.5, max_iter=20000, shuffle=True, random_state=100, tol=0.00001, verbose=False, warm_start=False, momentum=0.9, nesterovs_momentum=True, early_stopping=False, validation_fraction=0.1, beta_1=0.9, beta_2=0.999, epsilon=1e-08, n_iter_no_change=15, max_fun=35000,	hidden_layer_sizes=(12,20), activation='relu', solver='lbfgs', alpha=0.0001, batch_size='auto', learning_rate='constant', learning_rate_init=0.01, power_t=0.5, max_iter=10000, shuffle=True, random_state=100, tol=0.001, verbose=False, warm_start=False, momentum=0.9, nesterovs_momentum=True, early_stopping=False, validation_fraction=0.1, beta_1=0.9, beta_2=0.999, epsilon=1e-08, n_iter_no_change=10, max_fun=15000,	hidden_layer_sizes=(12,25), activation='relu', solver='lbfgs', alpha=0.0001, batch_size='auto', learning_rate='constant', learning_rate_init=0.01, power_t=0.5, max_iter=10000, shuffle=True, random_state=100, tol=0.001, verbose=False, warm_start=False, momentum=0.9, nesterovs_momentum=True, early_stopping=False, validation_fraction=0.1, beta_1=0.9, beta_2=0.999, epsilon=1e-08, n_iter_no_change=10, max_fun=15000,

Πίνακας Α΄.1: Υπερπαραμέτροι νευρωνικών δικτύων για τις 3 περιπτώσεις εκπαίδευσης. Τα ονόματα αφορούν τις υπερπαραμέτρους (του κώδικα) των νευρωνικών δικτύων έτσι όπως παρουσιάζονται μέσα στην βιβλιοθήκη του sklearn. Οι πρώτες 3 γραμμές αφορούν τις βασικές υπερπαραμέτρους, το πλήθος εσωτερικών νευρώνων, συνάρτηση ενεργοποίησης και επιλύτης (για βελτιστοποίηση των βαρών του δικτύου).

Αναφορές

- [1] M. R. Hannah Ritchie and P. Rosado. “Energy”. In: *Our World in Data* (2020). URL: <https://ourworldindata.org/energy>, <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>.
- [2] S. Wagner, R. Bareiß, and G. Guidati. *Wind Turbine Noise*. Springer Berlin Heidelberg, 1996. DOI: 10.1007/978-3-642-88710-9. URL: <https://doi.org/10.1007%2F978-3-642-88710-9>.
- [3] “Location and quantification of noise sources on a wind turbine”. In: *Journal of Sound and Vibration* 299.4 (2007), pp. 869–883. ISSN: 0022-460X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.07.032>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X06006316>.
- [4] J. Song and I. Yorke. *Wind farms environmental noise guidelines*. Nov. 2021. URL: https://www.epa.sa.gov.au/files/47788_windfarms.pdf.
- [5] Χριστίνα Καλομενοπούλου. “Υπολογισμός αεροδυναμικού θορύβου ευρέως φάσματος από δρομείς ανεμογεννητριών”. MA thesis. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2020.
- [6] F. W. J. E. and H. D. L. “Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion”. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*.264 (1969), pp. 321–342. DOI: 10.5194/wes-1-71-2016. URL: <https://wes.copernicus.org/articles/1/71/2016/>.
- [7] T. Brooks, S. Pope, and M. Marcolini. “Airfoil self-noise and prediction”. In: *NASA Reference Publication* 1218 (1989). URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19890016302/downloads/19890016302.pdf>.
- [8] B. T. H. “Wind Turbine Noise and Wind Speed Prediction”. Diploma Thesis. Georgia Southern University, Summer 2017. URL: <https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/etd/1640>.
- [9] C. Sucameli et al. “Comparison of some wind turbine noise emission models coupled to BEM aerodynamics”. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1037 (June 2018), p. 022038. DOI: 10.1088/1742-6596/1037/2/022038.

Αναφορές

- [10] J. J. Alonso. *Lectures on Applied Aerodynamics II(AA200b)*. 2004-2005. URL: aero-comlab.stanford.edu/aa200b/lect%5C_notes/AirfoilDesign.pdf.
- [11] M. Rahmati, G. Aggidis, and M. Zangeneh. “An inverse approach for airfoil design”. In: *WIT Transactions on Engineering Sciences* 59 (May 2008). DOI: 10.2495/AFM080041.
- [12] S. S. Rodriguez. “Aeroacoustic Optimization of Wind Turbine Blades”. Diploma Thesis. Técnico Lisboa, Nov. 2012.
- [13] W. J. Zhu, W. Z. Shen, and J. N. Sørensen. “Low-Noise Airfoil and Wind Turbine Design”. In: *Wind Turbines*. Ed. by A. G. Aissaoui and A. Tahour. Rijeka: IntechOpen, 2016. Chap. 3. DOI: 10.5772/63335. URL: <https://doi.org/10.5772/63335>.
- [14] W. Z. Shen et al. “Design of low noise wind turbine blades using Betz and Joukowski concepts”. In: *Journal of Physics: Conference Series* 524 (June 2014), p. 012131. DOI: 10.1088/1742-6596/524/1/012131.
- [15] S. Lee et al. “Design optimization of wind turbine blades for reduction of airfoil self-noise”. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* 27.2 (Feb. 2013), pp. 413–420. ISSN: 1976-3824. DOI: 10.1007/s12206-012-1254-1. URL: <https://doi.org/10.1007/s12206-012-1254-1>.
- [16] P. Schubel and R. Crossley. “Wind Turbine Blade Design”. In: Mar. 2014, pp. 1–34. ISBN: 978-1-77188-015-2. DOI: 10.1201/b16587-3.
- [17] Βασίλης Α. Ριζιώτης. “Διερεύνηση της δυνατότητας προσομοίωσης της απώλειας στήριξης με στροβιλές μεθοδολογίες”. MA thesis. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1994.
- [18] V. Riziotis and S. Voutsinas. “Dynamic stall modeling on airfoils based on strong viscous–inviscid interaction coupling”. In: *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 56 (Jan. 2008), pp. 185–208. DOI: 10.1002/flid.1525.
- [19] Χαράλαμπος Θεμιστοκλέους. “Βελτιστοποίηση σχεδιασμού υπεραντωπικών διατάξεων και μεταπτερυγίων καμπυλότητας για εφαρμογή σε μηχανική μορφοποίηση της ακμής πρόσπτωσης και ακμής εκφυγής αεροπορικής πτέρυγας”. MA thesis. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2019.
- [20] S. Deshmukh et al. “Wind turbine noise and its mitigation techniques: A review”. In: *Energy Procedia* 160 (2019). 2nd International Conference on Energy and Power, ICEP2018, 13–15 December 2018, Sydney, Australia, pp. 633–640. ISSN: 1876-6102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.215>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610219313074>.

Αναφορές

- [21] N. P. Salunke, J. A. R. A., and S. Channiwala. “Airfoil Parameterization Techniques: A Review”. In: *American Journal of Mechanical Engineering* 2.4 (2014), pp. 99–102. DOI: 10.12691/ajme-2-4-1. URL: <http://pubs.sciepub.com/ajme/2/4/1>.
- [22] S. Jaiswal. “Shape Parameterization of Airfoil Shapes Using Bezier Curves”. In: Sept. 2017, pp. 79–85. ISBN: 978-981-10-1770-4. DOI: 10.1007/978-981-10-1771-1_13.
- [23] Γιαννάκογλου. *Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην αεροδυναμική, 4 Έκδοση*. Αθήνα, 2006.
- [24] A. Sobester and A. Keane. “Airfoil Design via Cubic Splines - Ferguson’s Curves Revisited”. In: vol. 2. May 2007. ISBN: 978-1-62410-017-8. DOI: 10.2514/6.2007-2881.
- [25] H. Sobieczky. “Geometry Generator for CFD and Applied Aerodynamics”. In: Jan. 1997, pp. 137–157. ISBN: 978-3-211-82815-1. DOI: 10.1007/978-3-7091-2658-5_9.
- [26] T. Rogalsky and R. Derksen. “Bézier-PARSEC parameterization for airfoil optimization”. In: *Canadian Aeronautics and Space Journal* 55 (Dec. 2009), pp. 163–174. DOI: 10.5589/q10-002.
- [27] M. Mitchell. *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge: MA: MIT Press. ISBN 9780585030944., 1996.
- [28] L. J. V. Miranda. “PySwarms, a research-toolkit for Particle Swarm Optimization in Python”. In: *Journal of Open Source Software* 3 (21 2018). DOI: 10.21105/joss.00433. URL: <https://doi.org/10.21105/joss.00433>.
- [29] F. Pedregosa et al. “Scikit-learn: Machine Learning in Python”. In: *Journal of Machine Learning Research* 12 (2011), pp. 2825–2830.
- [30] *Scipy documentation - scipy.optimize.curve_fit*. URL: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html.
- [31] *Scikit optimization*. URL: https://scikit-optimize.github.io/stable/auto_examples/bayesian-optimization.html.