



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης

Προγραμματισμός Λογισμικού Παραμετροποίησης Μορφής και Δομής Πτερύγων και Διεπιφάνειας με Κώδικες Αερο-δομικής Ανάλυσης

Διπλωματική Εργασία:

Παπακωνσταντίνου Δημήτρης

Επιβλέπων: Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2022

Ευχαριστίες

Πάντα και σε οτιδήποτε καταφέρνουμε στην ζωή μας, οφείλουμε σημαντικό κομμάτι της επιτυχίας μας στη διαρκή υποστήριξη, γνωστική και συναισθηματική, ανθρώπων οι οποίοι συμμερίστηκαν τις ανάγκες και τους στόχους μας, και πίστεψαν έμπρακτα σε εμάς και τις ικανότητες μας.

Ευχαριστώ τον καθηγητή μου Κ. Χ. Γιαννάκογλου που αφιέρωσε χρόνο και προσπάθεια στην ανάπτυξη ενός θέματος κατασκευαστικής φύσεως παρά την πρωτίστως ρευστομηχανική δραστηριοποίηση του τομέα του. Στην πορεία της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας ήταν πάντα διαθέσιμος για συμβουλές και διευκρινήσεις και έδειχνε κατανόηση στις ιδιομορφίες του προγράμματος μου λόγω της παράλληλης εργασίας μου.

Ευχαριστώ την Δρ. Ασούτη για την λεπτομερή και κατατοπιστική επεξήγηση του τρόπου λειτουργίας των εφαρμογών που έχουν αναπτυχθεί από τον τομέα και την βοήθεια της σε ζητήματα που προέκυψαν κατά την αλληλεπίδραση των ανωτέρω κωδίκων με το πρόγραμμα που συνέτασσα.

Ευχαριστώ τους φίλους μου που μου στέκονται, και για τον μοναδικό τρόπο με τον οποίο με ξεκουράζουν ακόμα και από την πιο δύσκολη μέρα.

Ευχαριστώ τους γονείς μου και την μικρή μου αδερφή, που με την ανιδιοτελή πίστη, στήριξη και αγάπη τους, με έχουν κάνει τον άνθρωπο που είμαι σήμερα.



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης

Προγραμματισμός Λογισμικού Παραμετροποίησης Μορφής και Δομής Πτερυγών και Διεπιφάνειας με Κώδικες Αερο-δομικής Ανάλυσης

Διπλωματική Εργασία:

Παπακωνσταντίνου Δημήτρης

Επιβλέπων: Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2022

Περίληψη

Βασική προαπαίτηση για την πολυ-τομεακή βελτιστοποίηση (Multi-Disciplinary Optimization, MDO) της μορφής μιας πτέρυγας αεροσκάφους αποτελεί η παραμετροποίηση του σχήματος της, διαδικασία που θα αναδείξει τις ελεύθερες μεταβλητές ή μεταβλητές σχεδιασμού/βελτιστοποίησης που η βελτιστοποίηση πρόκειται να χειριστεί. Σε αυτήν την κατεύθυνση κινείται η διπλωματική αυτή εργασία, δημιουργώντας εκ του μηδενός ένα λογισμικό φιλικό προς τον χρήστη, που πραγματοποιεί αρχικά τη σχεδίαση μιας πτέρυγας, τη γένεση υπολογιστικών πλεγμάτων και, στο τέλος, την αερο-δομική ανάλυσή της. Στην τρέχουσα μορφή του, το λογισμικό αυτό είναι έτοιμο να ενταχθεί σε διαδικασία αερο-δομικής βελτιστοποίησης μιας πτέρυγας, με μεθόδους που χρησιμοποιούν κλειστό λογισμικό αξιολόγησης, όπως λ.χ. με χρήση εξελικτικών αλγόριθμων.

Ο καθορισμός των παραμέτρων και των σχεδιαστικών βαθμών ελευθερίας γίνεται με την απλή συμπλήρωση πεδίων σε φύλλο Excel, σύμφωνα με τα οποία διαμορφώνεται η πτέρυγα και το εσωτερικό της μέσω του εμπορικού πακέτου (SolidWorks). Στη συνέχεια, γίνεται γένεση του CFD πλέγματος γύρω από το δημιουργημένο μοντέλο, με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού (PointWise) και πραγματοποιείται αεροδυναμική ανάλυση με τον επιλύτη ροής PUMA της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ, ο οποίος μάλιστα τρέχει σε επεξεργαστές καρτών γραφικών. Ταυτόχρονα με την αεροδυναμική ανάλυση, γίνεται και η δομική ανάλυση της πτέρυγας με τη χρήση του SolidWorks με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Αναπόσπαστο τμήμα της διαδικασίας είναι η επαναληπτική, μέχρι σύγκλισης, αλληλεπίδραση ροής και κατασκευής (Fluid-Structure Interaction, FSI).

Κατά τη περιγραφή του λογισμικού, η διπλωματική εργασία παρουσιάζει ενδεικτικές εκτελέσεις του μαζί με τα προκύψαντα αποτελέσματα, τα οποία πρέπει να θεωρηθούν ως μια δοκιμή παραμετροποίησης και αερο-δομικής ανάλυσης πτέρυγας αεροσκάφους ενόψει μελλοντικής αερο-δομικής βελτιστοποίησης, με λογισμικό εξελικτικών αλγορίθμων.



National Technical University of Athens
School of Mechanical Engineering
Fluids Department
Parallel CFD & Optimization Unit

Programming of a Software for the Shape/Structure Parameterization of Wings and an Interface with Aero-structural Analysis Tools

Diploma Thesis of

Papakonstantinou Dimitris

Supervisor: Kyriakos C. Giannakoglou, Professor NTUA

Athens 2022

Abstract

Creating a wing's geometry in parametric form is a prerequisite regarding its Multi-Disciplinary Optimization, since this defines all the design/optimization variables to be handled by an optimization process. This diploma thesis contributes in the aforementioned field by developing a new user-friendly software which designs wings with desired characteristics, generates computational grids inside and around the wing and performs their aerostructural analysis. In its current state, the developed software is ready to support an aerostructural optimization process, such as evolutionary algorithms.

Parameters, including all design variables, take on their initial values using an Excel worksheet, and these are then being used to create the models of the wing and its components (spars, ribs) through the use of third-party commercial software (SolidWorks). Then, the CFD grid is being generated around the wing model by using PointWise, and then the CFD grid is used to successfully run the CFD analysis which is performed on Graphics Processing Units (GPUs) using the PUMA solver, developed by the PCOpt/NTUA Unit. In addition to the aerodynamic analysis, the program simultaneously performs the wing's structural analysis with the aid of SolidWorks and the finite element method. The process involves a closed loop of fluid – structure interaction (FSI) which ends upon convergence or wing failure.

During the presentation of the software, the modelling and aerostructural analysis of a wing will be presented, in view of a future optimization based on evolutionary algorithms, such as the software EASY developed by the PCOpt/NTUA Unit.

Περιεχόμενα:

Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά – Η Προς Υλοποίηση Διαδικασία.....	1
1.2 Συνεργαζόμενα Λογισμικά	3
1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας.....	5
Σχεδίαση Πτέρυγας.....	7
2.1 Νευρώσεις.....	8
2.2 Δοκοί.....	12
2.3 Εξωτερικό Τοίχωμα	18
2.4 Συναρμολόγηση Διάταξης	21
Γένεση Πλέγματος.....	24
Επίλυση Ροής.....	32
Δομική Ανάλυση.....	35
5.1 Επικοινωνία Αεροδυναμικών Δυνάμεων	36
5.2 Μη-Γραμμική Στατική Προσομοίωση.....	42
Αερο-Δομική Σύγκλιση	51
Συμπεράσματα	56
Φύλλο Εισαγωγής Δεδομένων	58
A'.1 Παράμετροι Σχεδίασης	58
A'.2 Παράμετροι Γένεσης Πλέγματος.....	63
A'.3 Παράμετροι Επίλυσης Ροής.....	65
A'.4 Παράμετροι Δομικής Ανάλυσης.....	66
A'.5 Τύπος Αεροτομής.....	68
Λογισμικό Αερο-δομικής Ανάλυσης	69
Βιβλιογραφία	73

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά – Η Προς Υλοποίηση Διαδικασία

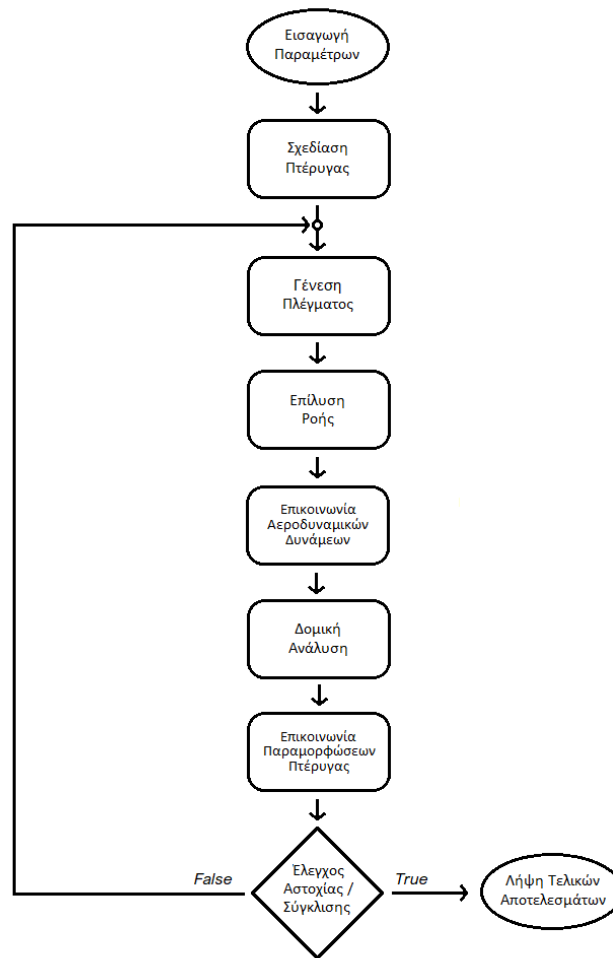
Σε αντικείμενα όπως αυτό της αεροναυπηγικής, η κατά το δυνατόν ικανοποίηση πολλών διαφορετικών κριτηρίων / περιορισμών / συνθηκών διαφόρων επιστημονικών πεδίων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την λήψη απόφασης του τύπου κατασκευής όλων των επιμέρους μερών του σκελετού ενός αεροσκάφους. Τέτοιας μορφής προβλήματα πραγματεύεται η διατομεακή βελτιστοποίηση (Multi-Disciplinary Optimization). Η αντιμετώπισή τους κατά τον σχεδιασμό πτερύγων αεροσκαφών αποτελεί την κύρια αφορμή προγραμματισμού του λογισμικού που θα παρουσιαστεί στη διπλωματική εργασία.

Ο σχεδιασμός πτερύγων αεροσκαφών συνιστά διεργασία έντονης περιπλοκότητας. Αρχικά, προκύπτει η ανάγκη σχεδίασης μιας πτέρυγας ώστε να πληροί συγκεκριμένα γεωμετρικά και διαστασιολογικά χαρακτηριστικά. Ύστερα, πρέπει να γίνει διερεύνηση και ανάλυση όσον αφορά τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά που διέπουν τόσο τη ροή που περιβάλλει το εν λόγω μοντέλο, όσο και τη δομική του συμπεριφορά (τάσεις, παραμορφώσεις) λόγω των αναπτυσσόμενων αεροδυναμικών δυνάμεων. Τα παραπάνω απαιτούν προσομοιώσεις (ρευστοδυναμική και δομική ανάλυση) και ανατροφοδότηση αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφορετικών διαδικασιών μέχρι σύγκλισης. Ο προγραμματισμός του παρόντος λογισμικού έγινε λαμβάνοντας υπόψη την αναγκαιότητα εκτέλεσης όλων των παραπάνω διεργασιών.

Οι δυνατότητες του προγράμματος περιλαμβάνουν τη σχεδίαση, τη ρευστομηχανική και τη δομική ανάλυση πτέρυγας. Κατά την εκκίνηση του προγράμματος γίνεται άντληση όλων των απαραίτητων στοιχείων για τη σχεδίαση της πτέρυγας (πλήθος, τύπος, διαστάσεων και κλίσης αεροτομών, δοκών και εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας), του πλέγματος της ροής (πλήθος

και κατανομή των σημείων του) και της δομικής ανάλυσής της (ευκρίνεια και κριτήριο σύγκλισης) από αρχείο Excel. Με όλες τις παραμέτρους πλέον διαθέσιμες, δημιουργείται η γεωμετρία της πτέρυγας σύμφωνα με όλα τα δοσμένα χαρακτηριστικά, καθώς και των εσωτερικών εξαρτημάτων της, που απαιτούνται για τη δομική της ανάλυση. Έπειτα, δημιουργείται πλέγμα γύρω από την πτέρυγα στο οποίο θα επιλυθεί η ροή, για τον υπολογισμό των αεροδυναμικών δυνάμεων στα τοιχώματα της πτέρυγας που θα λειτουργήσουν ως είσοδος της δομικής ανάλυσης. Για την πραγματοποίηση της δομικής ανάλυσης επικοινωνούνται οι αεροδυναμικές δυνάμεις στο FEM και δημιουργείται διαφορετικό πλέγμα, αυτή τη φορά στο εσωτερικό της πτέρυγας. Οι μετατοπίσεις των τοιχωμάτων της πτέρυγας χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή του πλέγματος CFD στην επόμενη επανάληψη της αερο-δομικής μελέτης.

Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την επαναληπτική χρήση της αεροδυναμικής και δομικής της ανάλυσης. Οι δύο αυτές αναλύσεις υλοποιούνται με εσωτερικό βρόχο ο οποίος επαναλαμβάνει τα βήματα της ρευστομηχανικής – δομικής ανάλυσης ικανό αριθμό φορές ώστε να συγκλίνουν τα δύο αλληλοεπιδρώντα προβλήματα. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η σειρά εκτέλεσης των προαναφερθεισών λειτουργιών του προγράμματος για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων.



Σχήμα 1.1: Λογικό διάγραμμα του συνόλου της διαδικασίας που ακολουθεί το αναπτυγμένο πρόγραμμα για τη λήψη των τελικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιώντας τις δοσμένες παραμέτρους από τον χρήστη.

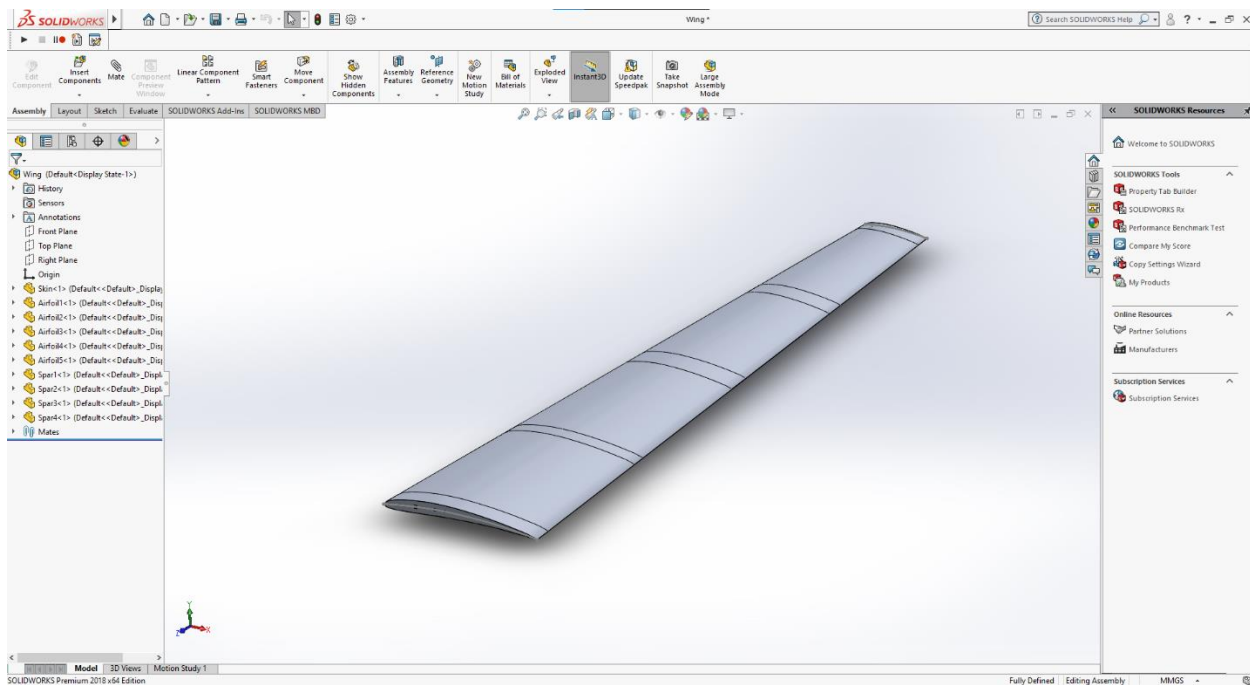
Από τα πιο σημαντικά στοιχεία αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι το πρώτο στάδιο του λογικού διαγράμματος του σχήματος 1.1, που αποτελεί η παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών των διαφόρων σταδίων της διαδικασίας. Ο χρήστης πριν την εκκίνηση του προγράμματος, έχει τη δυνατότητα να ορίσει όλα τα χαρακτηριστικά που αφορούν την αρχική γεωμετρία της πτέρυγας, τη ροή γύρω από αυτήν, τη δομική ανάλυση αλλά και τις μεθόδους και τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία θα προκύψουν τα αποτελέσματα των παραπάνω διεργασιών. Επομένως, το πρόγραμμα όχι μόνο αυτοματοποιεί και συγχρονίζει απαιτητικές και σύνθετες λειτουργίες μεταξύ τους, αλλά και δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη, με την απλή συμπλήρωση πεδίων σε ένα φύλλο Excel, να τις εκμεταλλευτεί για συναφείς μελέτες. Για αυτόν τον λόγο, το παρόν πρόγραμμα μπορεί εκτός από μεμονωμένες εκτελέσεις, να χρησιμοποιηθεί και στο πλαίσιο διαδικασίας διατομεακής (αερο-δομικής) βελτιστοποίησης.

Μεταξύ άλλων, το πρόγραμμα διαχειρίζεται θέματα συμβατότητας μεταξύ των αρχείων των αποτελεσμάτων των διαφόρων λογισμικών. Κατά την πραγματοποίηση των επιμέρους λειτουργιών της διαδικασίας, χρησιμοποιούνται διαφορετικά λογισμικά τα οποία χειρίζονται αρχεία διαφορετικών τύπων και μορφών. Η κατασκευή μιας σειριακής διαδικασίας ικανής να ανατροφοδοτεί κάθε εμπλεκόμενο λογισμικό, έχει ως απαραίτητη προϋπόθεση προσαρμογής αυτών των αρχείων ώστε τα αρχεία εξόδου του ενός σταδίου να αποτελούν έγκυρη είσοδο για το επόμενο. Το λογισμικό που υλοποιήθηκε δίνει λύση σε αυτό το ζήτημα συμβατότητας με την κατάλληλη επεξεργασία των αρχείων πριν την επικοινωνία των εισόδων – εξόδων από το ένα πρόγραμμα στο άλλο.

1.2 Συνεργαζόμενα Λογισμικά

Στο αναπτυχθέν λογισμικό, επιστρατεύονται διάφορα επιμέρους λογισμικά για την εκτέλεση των επιμέρους λειτουργιών του. Η διπλωματική εργασία αποτελεί το σύνολο του κώδικα που συντάχθηκε για τη δημιουργία ενός ενιαίου προγράμματος συνεργατικής χρήσης ξεχωριστών ειδικευμένων λογισμικών και για την αυτοματοποίηση της εκτέλεσής τους. Σημειώνεται ότι στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται τα πακέτα που αφορούν αυστηρά τις μηχανικής φύσης διαδικασίες του προγράμματος (σχεδίαση, πλέγμα, επίλυση ροής, δομική ανάλυση), και όχι τον τρόπο και τις μεθόδους προγραμματισμού (σύνταξη κώδικα, αρχεία, εντολές) που θα αναλυθούν επαρκώς σε ξεχωριστό παράρτημα.

Παρατηρώντας το λογικό διάγραμμα του σχήματος 1.1, από τα οκτώ στάδια της διαδικασίας τέσσερα αποτελούν η σχεδίαση και η ανάλυση της συμπεριφοράς της πτέρυγας και της περιβάλλουσας ροής, επομένως σε αυτά εμπλέκονται το SolidWorks, το PointWise και ο PUMA της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ, ο οποίος επιλύει την ροή. Για την αυτοματοποίηση των ενεργειών του SolidWorks χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού VBA, του PointWise η γλώσσα Glyph (TCL) και του PUMA τύποι μακροεντολών του προγράμματος MobaXterm. Επιπροσθέτως συντάχθηκε ευρύτερος ξεχωριστός κώδικας συγχρονισμού των ανωτέρω λογισμικών σε γλώσσα Fortran.

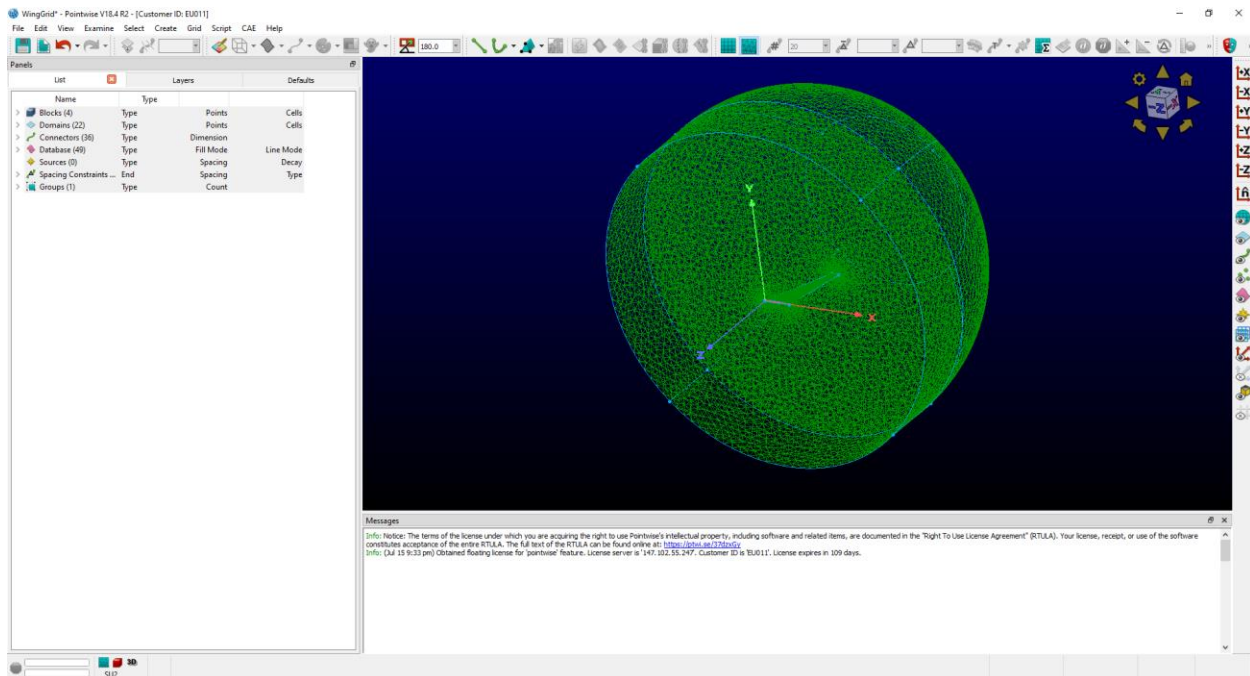


Σχήμα 1.2: Πτέρυγα που έχει παραχθεί από το πρόγραμμα στο περιβάλλον του SolidWorks, όπου φαίνονται οι διάφορες καρτέλες στο πάνω μέρος και ο λεπτομερής κατάλογος των επιπέδων και αξόνων που καθορίζουν τη θέση και τον προσανατολισμό των αντίστοιχων εξαρτημάτων στην αριστερή λίστα.

Το εμπορικό πακέτο του SolidWorks είναι υπεύθυνο τόσο για τη σχεδίαση των επιμέρους τμημάτων και του συνολικού μοντέλου της πτέρυγας, όσο και για τη δομική ανάλυσή της. Με το SolidWorks γίνεται η γένεση 3D πλέγματος στη δομή της πτέρυγας, και βάσει αυτού μελετάται η συμπεριφορά της, με την επιβολή των αεροδυναμικών δυνάμεων που προκύπτουν από την επίλυση της ροής στην επιφάνειά της.

Στη συνέχεια, το λογισμικό του PointWise αναλαμβάνει να δημιουργήσει το πλέγμα γύρω από την πτέρυγα ώστε να επιλυθούν σε αυτό οι εξισώσεις ροής με χρήση του επιλύτη PUMA. Το PointWise λαμβάνει το εξωτερικό κέλυφος του μοντέλου που παρήχθη από το πακέτο του SolidWorks και κατασκευάζει 3D πλέγμα ροής, ακολουθώντας τις απαιτήσεις της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Η ροή του πλέγματος επιλύεται από τον οικείο επιλύτη PUMA, ο οποίος τρέχει σε επεξεργαστές καρτών γραφικών, και με αυτόν υπολογίζονται οι αεροδυναμικές δυνάμεις στην επιφάνεια της πτέρυγας.

Η αντικατάσταση των παραπάνω πακέτων που χρησιμοποιούνται για τις επιμέρους λειτουργίες της διαδικασίας με κάποια άλλα, είναι θεωρητικά δυνατή. Παρόλα αυτά, μια τέτοια αλλαγή θα απαιτούσε τον προγραμματισμό νέων τμημάτων κώδικα για την αυτοματοποίηση των ενεργειών που αναλύθηκαν προηγουμένως (κάθε πρόγραμμα χρησιμοποιεί άλλη γλώσσα ή/και βιβλιοθήκες) και κατά πάσα πιθανότητα και αλλαγές στο κεντρικό πρόγραμμα λόγω του διαφορετικού τύπου αρχείων που θα χρησιμοποιούσαν αυτά ως εισόδους – εξόδους.



Σχήμα 1.3: Επιφάνεια εργασίας λογισμικού PointWise όπου παρουσιάζονται οι δυνατότητες καθορισμού και διάταξης σημείων και πλεγμάτων στο πάνω μενού, η λίστα των διαφόρων οντοτήτων στα αριστερά και οι επιλογές προβολής τους στη δεξιά κολώνα.

1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Στην εργασία, θα γίνει αναλυτική παρουσίαση των διαδοχικών σταδίων που ακολουθεί το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε για τη ρευστοδυναμική και δομική ανάλυση πτέρυγας, με ενδεικτικά αποτελέσματα αυτών σε κάθε κεφάλαιο για πτέρυγα τύπου αεροτομής NACA 4507. Η όλη ανάλυση εστιάζει στις μεθόδους, τις τεχνικές και τους τρόπους με τους οποίους πραγματοποιούνται τα επιμέρους αυτά στάδια. Προγραμματιστικές λεπτομέρειες που αφορούν τον κώδικα παρατίθενται σε ξεχωριστό παράρτημα.

Συγκεκριμένα:

- Στο **Κεφάλαιο § 2** γίνεται ανάλυση του τρόπου και των μεθόδων σχεδίασης και συναρμολόγησης των διαφόρων τμημάτων της πτέρυγας στο SolidWorks, σύμφωνα με τις παραμέτρους που έχει ορίσει ο χρήστης.
- Στο **Κεφάλαιο § 3** παρουσιάζεται η μέθοδος δημιουργίας του 3D CFD πλέγματος βάσει του μοντέλου της πτέρυγας στο PointWise.
- Στο **Κεφάλαιο § 4** σχολιάζεται η διαδικασία επίλυσης της ροής με τη χρήση του λογισμικού PUMA της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ.
- Στο **Κεφάλαιο § 5** περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής του 3D FEM πλέγματος στην πτέρυγα με σκοπό τη δομική ανάλυση με χρήση των αεροδυναμικών δυνάμεων που προέκυψαν από την επίλυση της ροής. Η διαδικασία αυτή γίνεται στο SolidWorks.

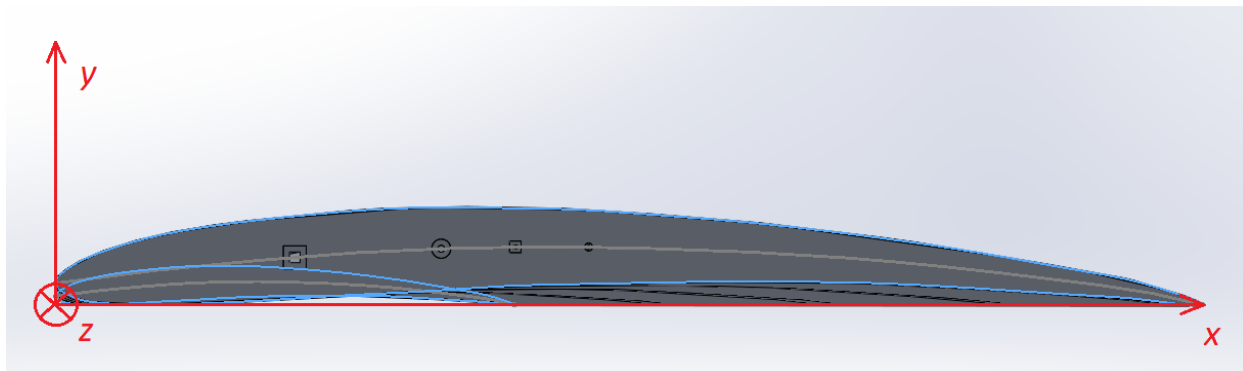
- Στο **Κεφάλαιο § 6** παρουσιάζεται ο εσωτερικός βρόχος που επαναλαμβάνει την διαδικασία λήψης μοντέλου παραμορφωμένης πτέρυγας (SolidWorks) – γένεσης πλέγματος (PointWise) – επίλυσης ροής (PUMA) – δομικής ανάλυσης (SolidWorks) μέχρι την αστοχία της πτέρυγας ή σύγκλισης των προσομοιώσεων.
- Στο **Κεφάλαιο § 7** παρατίθενται συνολικές παρατηρήσεις και συμπεράσματα για την διαδικασία της αερο-δομικής σύγκλισης σύμφωνα με την ανάλυση που έχει προηγηθεί.

Κεφάλαιο 2

Σχεδίαση Πτέρυγας

Το πρώτο στάδιο που ακολουθεί το πρόγραμμα για την πραγματοποίηση της ρευστοδυναμικής – δομικής ανάλυσης της πτέρυγας αποτελεί η σχεδίασή της βάσει των παραμέτρων που έχει ορίσει ο εκάστοτε χρήστης. Η διαδικασία πραγματοποιείται με την εκκίνηση του SolidWorks και την εκτέλεση πακέτων εντολών γλώσσας VBA, όπου το λογισμικό λαμβάνει τα ορίσματα (διαστάσεις, πλήθος, υλικό κλπ.) και σχεδιάζει τα τμήματα της πτέρυγας (νευρώσεις, δοκοί, επιφάνεια πτέρυγας) προτού τα συναρμολογήσει κατάλληλα για να προκύψει η τελική διάταξη. Η παρουσίαση τους θα γίνει διαδοχικά, ξεκινώντας από τις νευρώσεις και συνεχίζοντας στις δοκούς και στο εξωτερικό τοίχωμα (όπως είναι δηλαδή και η σειρά σχεδίασής τους από το λογισμικό), και ολοκληρώνοντας με την συναρμολόγησή τους. Κάθε υποκεφάλαιο θα εμπεριέχει και αναφορά των ανάλογων παραμέτρων βάσει των οποίων ο χρήστης καθορίζει τη μορφή της πτέρυγας.

Για την υποβοήθηση της διαδικασίας ανάλυσης θα οριστούν μεγέθη, άξονες και επιφάνειες που χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς. Η αεροτομή μέσω της οποίας η πτέρυγα του αεροσκάφους έρχεται σε επαφή με τον υπόλοιπο σκελετό του αεροσκάφους (άτρακτος) θα αναφέρεται ως αεροτομή βάσης, ενώ αυτή στην οποία καταλήγει η γεωμετρία της πτέρυγας (ακροπτερύγιο) θα αναφέρεται ως αεροτομή τέλους. Ως άξονας $x'x$ και θετική του κατεύθυνση ορίζεται όπως κινούμαστε από το ακμή προσβολής προς την ακμή εκφυγής της αεροτομής βάσης (κατά τη χορδή), ενώ ως άξονας $y'y$ και η θετική του κατεύθυνση από την κίνηση από την πλευρά υπερπίεσης προς την πλευρά υποπίεσης της αεροτομής, κάθετα ως προς την χορδή της αεροτομής βάσης. Αντιστοίχως, ο άξονας $z'z$ και η θετική του κατεύθυνση ορίζεται καθώς κινούμαστε κάθετα στο εν λόγω επίπεδο των $x'x$ και $y'y$ και με κατεύθυνση προς το άκρο της πτέρυγας. Οι παραπάνω πληροφορίες απεικονίζονται σχεδιαστικά στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Πλάγια όψη πτέρυγας με μηδενική κλίση ως προς τον άξονα z' όπου απεικονίζεται η αεροτομή βάσης, με την οποία η πτέρυγα έρχεται σε επαφή με την άτρακτο, η αεροτομή τέλους στην οποία η πτέρυγα καταλήγει, καθώς και οι άξονες x' , y' και z' όπως ορίστηκαν παραπάνω.

2.1 Νευρώσεις

Τα πρώτα τμήματα της πτέρυγας που σχεδιάζονται από το λογισμικό του SolidWorks είναι οι νευρώσεις στο εσωτερικό της. Μέσω προσαρμογής των παραμέτρων, ο χρήστης μπορεί να επηρεάσει πρακτικά κάθε τμήμα της γεωμετρίας τους, έχοντας τη δυνατότητα προσθήκης έως και 20 νευρώσεων εντός της πτέρυγας, με συγκεκριμένες θέσεις και πάχη. Το σχήμα τους καθορίζεται από τον τύπο αεροτομής ο οποίος χρησιμοποιείται και γίνεται κατάλληλη προσαρμογή τους στο εσωτερικό της πτέρυγας.

Η σχεδίαση των νευρώσεων ξεκινά από τον προσδιορισμό των διαστάσεων και της θέσης των 2 αεροτομών που ορίζουν το εξωτερικό τοίχωμα της πτέρυγας, διότι έτσι επιτυγχάνεται η σωστή διαστασιολόγηση της κάθε νευρώσης, ανάλογα με τη θέση της εντός της πτέρυγας. Όπως προαναφέρθηκε, παράμετρος σχεδίασης αποτελεί και ο τύπος αεροτομής, ο οποίος δίνεται στο λογισμικό υπό τη μορφή συνόλου διατεταγμένων σημείων. Οι συντεταγμένες αυτών των σημείων αποθηκεύονται, επεξεργάζονται και μετατοπίζονται κατάλληλα ώστε να προκύψουν οι καμπύλες αεροτομών που θα ορίζουν την τελική μορφή της πτέρυγας (κεφάλαιο 2.3). Η αεροτομή τέλους επίσης περιστρέφεται κατάλληλα για να προσδώσει καμπυλότητα στην πτέρυγα εφόσον έχει οριστεί με τέτοιο τρόπο η αντίστοιχη παράμετρος. Ανάλογη επεξεργασία γίνεται για την κατασκευή της γραμμής κυρτότητας των δύο αεροτομών και τον σχεδιαστικό προσδιορισμό της, όπου προκύπτει λαμβάνοντας τη μέση τιμή της τετμημένης των ζευγών σημείων κοινής τεταγμένης. Ο λόγος υπολογισμού και απεικόνισης της γραμμής κυρτότητας είναι ότι μέσω αυτής μπορούν να οριστούν τα σημεία μέγιστης αντοχής υπό φόρτιση της κάθε νευρώσης. Έτσι, οι οπές διέλευσης των δοκών κατά πλάτος αυτών τοποθετούνται με το κέντρο τους πάνω σε αυτήν, για βέλτιστη κατασκευαστική αντοχή. Οι ανωτέρω καμπύλες, καθώς και τα επίπεδα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους και τον σχηματισμό της νευρώσης φαίνονται στο σχήμα 2.2.

Για τη σχεδίαση των νευρώσεων, το πρόγραμμα ακολουθεί μια «αφαιρετική» διαδικασία, όπου αρχικά γεμίζει τον εσωτερικό χώρο της πτέρυγας με υλικό και, στη συνέχεια, αφαιρεί τα περιττά τμήματα. Ο λόγος που πραγματοποιείται έτσι η δημιουργία των νευρώσεων είναι λόγω της

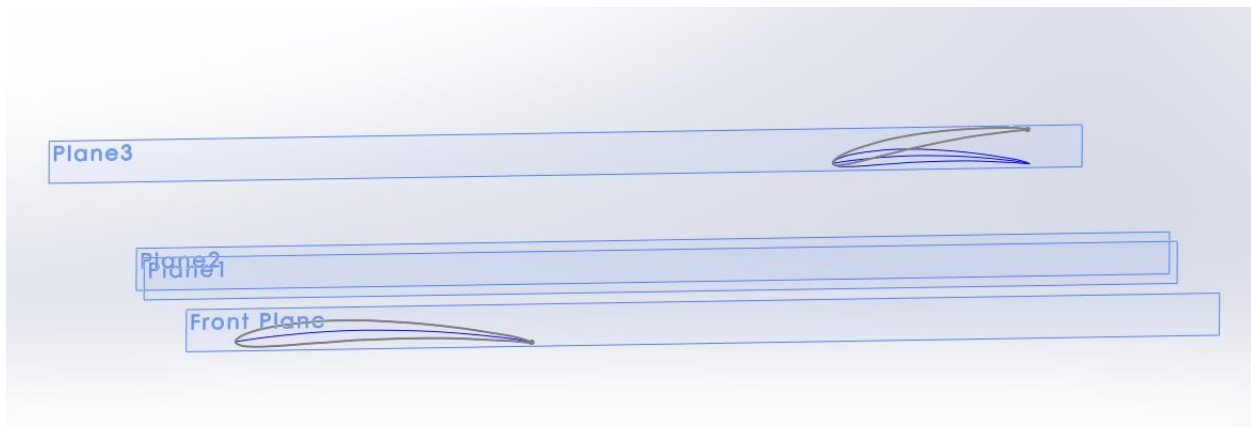
σχεδιαστικής του αποδοτικότητας. Με αυτήν τη μέθοδο, ο ορισμός 2 μόνο καμπύλων αεροτομών επαρκεί για τον πλήρη καθορισμό τόσο του σχήματος τους, όσο και της θέσης τους. Σε διαφορετική περίπτωση, θα έπρεπε να γίνεται διαρκής ανακατασκευή και επανατοποθέτηση των καμπυλών που ορίζουν την κάθε νεύρωση, διαδικασία ιδιαίτερος πιο σύνθετη λόγω των μαθηματικών μετατροπών. Η παραπάνω διεργασία παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3, όπου αρχικά παράγεται το συμπαγές σώμα κατά μήκος των δύο αεροτομών, ύστερα γίνεται αφαίρεση του περιττού τμήματος από την αεροτομή βάσης μέχρι την αρχή της εκάστοτε νεύρωσης. Τέλος αφαιρείται και το υπόλοιπο υλικό από το τέλος της εκάστοτε νεύρωσης έως την αεροτομή τέλους. Ειδικότερα, οι αποστάσεις των δύο παράλληλων επιπέδων του xy (Front Plane στο σχήμα 2.3) που πλαισιώνουν τη νεύρωση i ορίζονται ως:

$$d_{E1,i} = d_{v,i}^x \cdot \cos\varphi_X \quad , \quad d_{E2,i} = d_{v,i}^x \cdot \cos\varphi_X + b_i^X \quad (2.1)$$

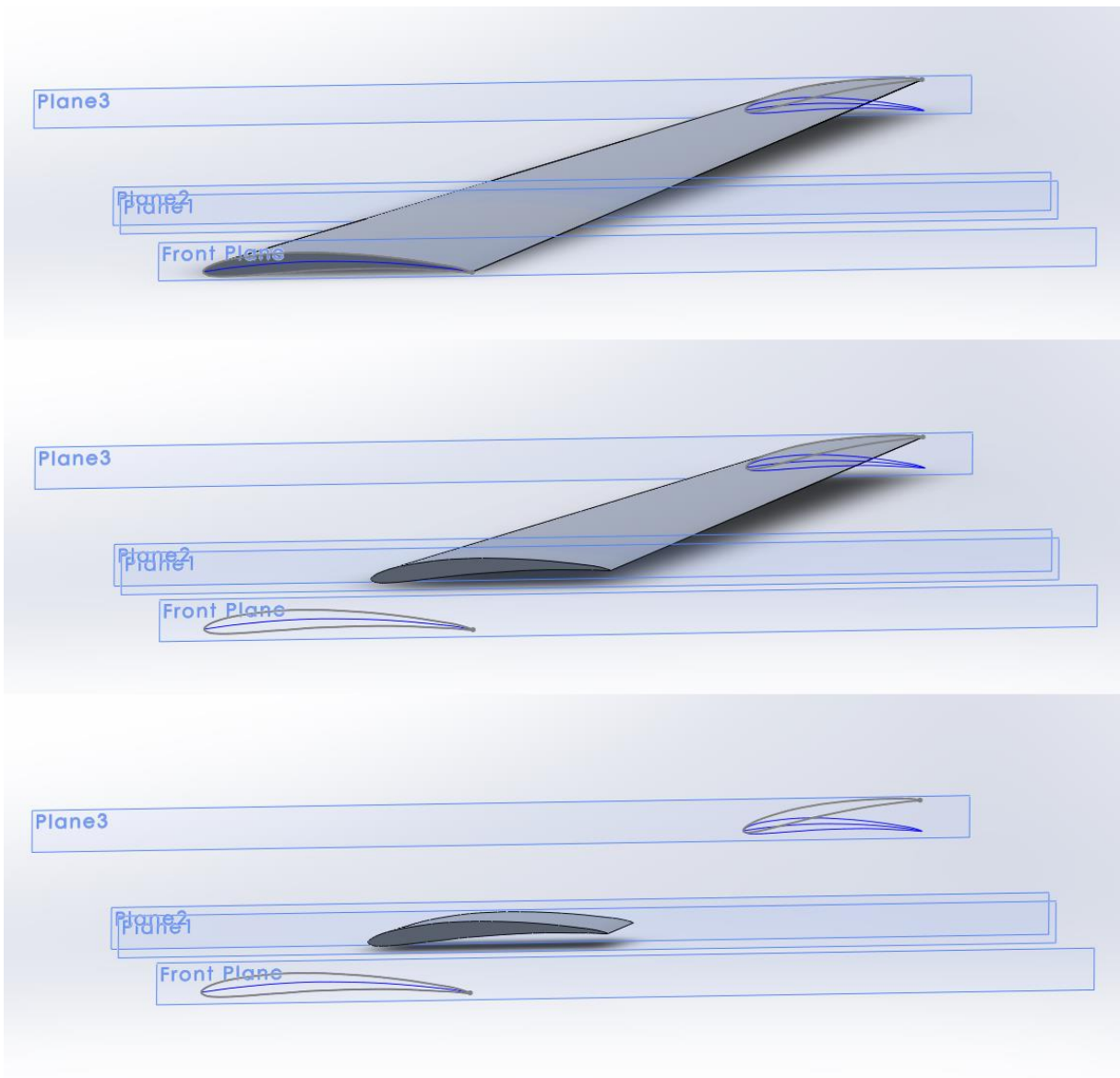
όπου:

- $d_{v,i}^x$: απόσταση που έχει ορίσει ο χρήστης να τοποθετηθεί η νεύρωση i (m)
- φ_X : γωνία ακμών προσβολής πτέρυγας - επιπέδου yz
- b_i^X : το πάχος της νεύρωσης i (m)

Έτσι προκύπτει το σώμα της τελικής νεύρωσης με τις επιθυμητές διαστάσεις, αλλά και τη σωστή σχετική θέση στο εσωτερικό της πτέρυγας.

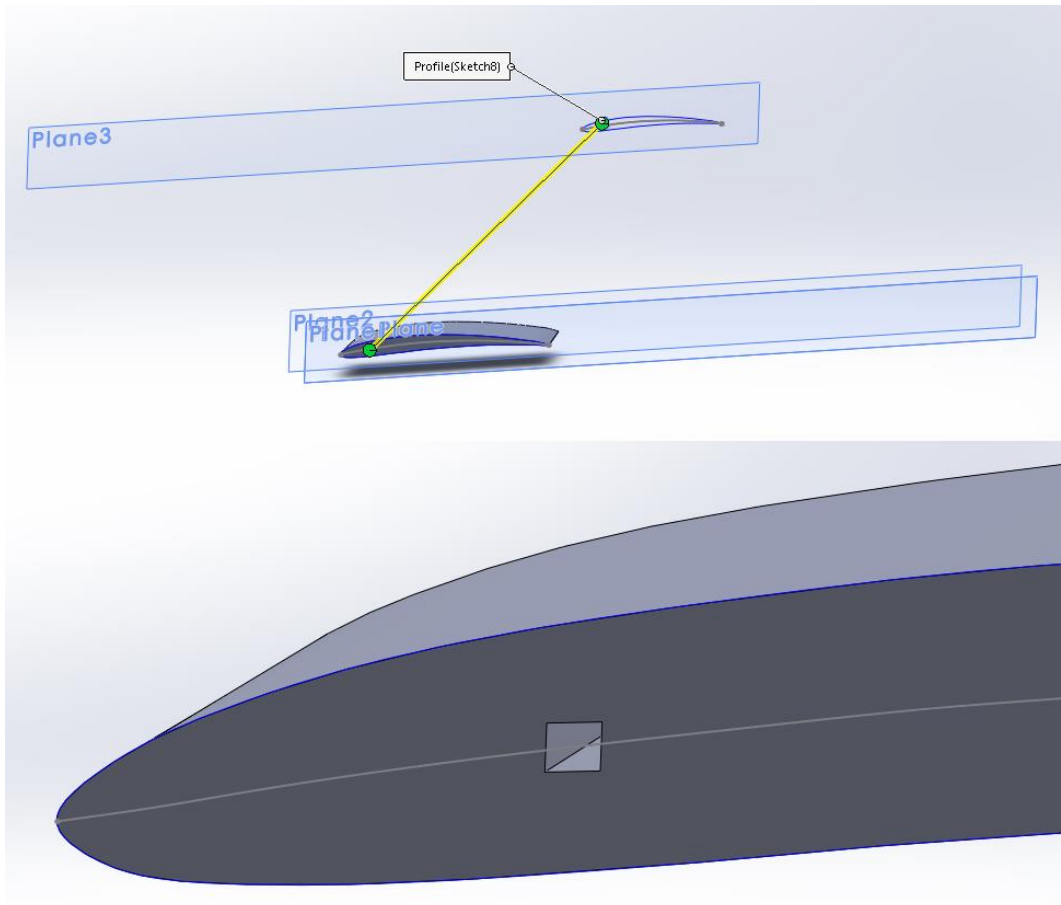


Σχήμα 2.2: Στιγμιότυπο κατασκευής νεύρωσης όπου έχουν σχεδιαστεί από το SolidWorks οι καμπύλες αεροτομής βάσης και τέλους, οι αντίστοιχες γραμμές κυρτότητας τους και τα επίπεδα σύμφωνα με τα οποία θα γίνει η προσθήκη και η αφαίρεση υλικού.



Σχήμα 2.3: Αλληλουχία στιγμιότυπων κατασκευής του συμπαγούς σώματος και περικοπής του υλικού αρχικά από την αεροτομή βάσης έως το Plane 1 και, στη συνέχεια, από την αεροτομή τέλους έως το Plane 2.

Η κατασκευή του κύριου σώματος της νεύρωσης έχει πλέον ολοκληρωθεί, και απομένει μόνο το στάδιο δημιουργίας οπών διαμέσου αυτών από όπου διέρχονται οι δοκοί. Το λογισμικό γνωρίζοντας τι παραμέτρους έχει ορίσει ο χρήστης για την κατασκευή των δοκών, χρησιμοποιεί τις διατομές τους για να ορίσει το χωρίο το οποίο θα καταλαμβάνουν, και αφαιρεί υλικό από το σώμα της νεύρωσης. Ειδικότερα, αφού κατασκευαστεί 2D σχέδιο αντίστοιχο της διατομής της δοκού, το κέντρο αυτού προσαρμόζεται πάνω στη γραμμή κυρτότητας της αεροτομής βάσης και τέλους (για τους λόγους που αναλύθηκαν προηγουμένως), και αφαιρείται το υλικό που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο αυτών διατομών, αφού αυτός είναι ο της δοκού που θα περάσει μέσα από την εν λόγω νεύρωση στη τελική διάταξη (σχήμα 2.4). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθούν οι οπές για όλες τις δοκούς της πτέρυγας. Περισσότερα σχετικά με τη διάνοιξη των οπών αναλύονται στο κεφάλαιο 2.2.

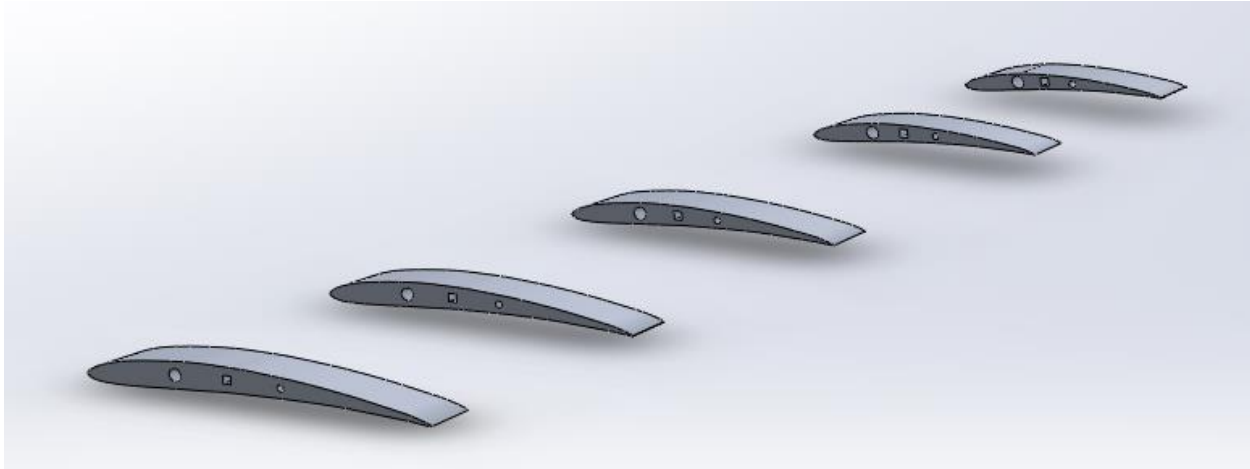


Σχήμα 2.4: Στιγμιότυπο τελικού σταδίου βήματος διάνοιξης οπής στην εκάστοτε νεύρωση, όπου απεικονίζεται με κίτρινο το χωρίο που ορίζεται μεταξύ των δύο διατομών αφαίρεσης υλικού και η οπή που προκύπτει μετά την εκτέλεση της ενέργειας από το SolidWorks.

Παράδειγμα αποτελεσμάτων της διαδικασίας σχεδίασης 5 νευρώσεων – 3 δοκών πτέρυγας φαίνεται στο σχήμα 2.6. Υπενθυμίζεται ότι ο τύπος της πτέρυγας είναι NACA 4507. Το εκπέτασμα της πτέρυγας είναι 1,45m. Οι παράμετροι που ορίστηκαν για την κατασκευή των νευρώσεων από τον χρήστη παρουσιάζονται στον πίνακα 2.5. Οι παράμετροι που αφορούν την σχεδίαση των δοκών, και επομένως τα χαρακτηριστικά των οπών, παρουσιάζονται στον πίνακα 2.11 του επόμενου κεφαλαίου.

Ribs		
No.	Pos.(mm)	Width(mm)
1	0	70
2	400	60
3	800	60
4	1200	50
5	1450	50

Πίνακας 2.5: Θέσεις – πάχη των νευρώσεων εντός της πτέρυγας τύπου NACA 4507



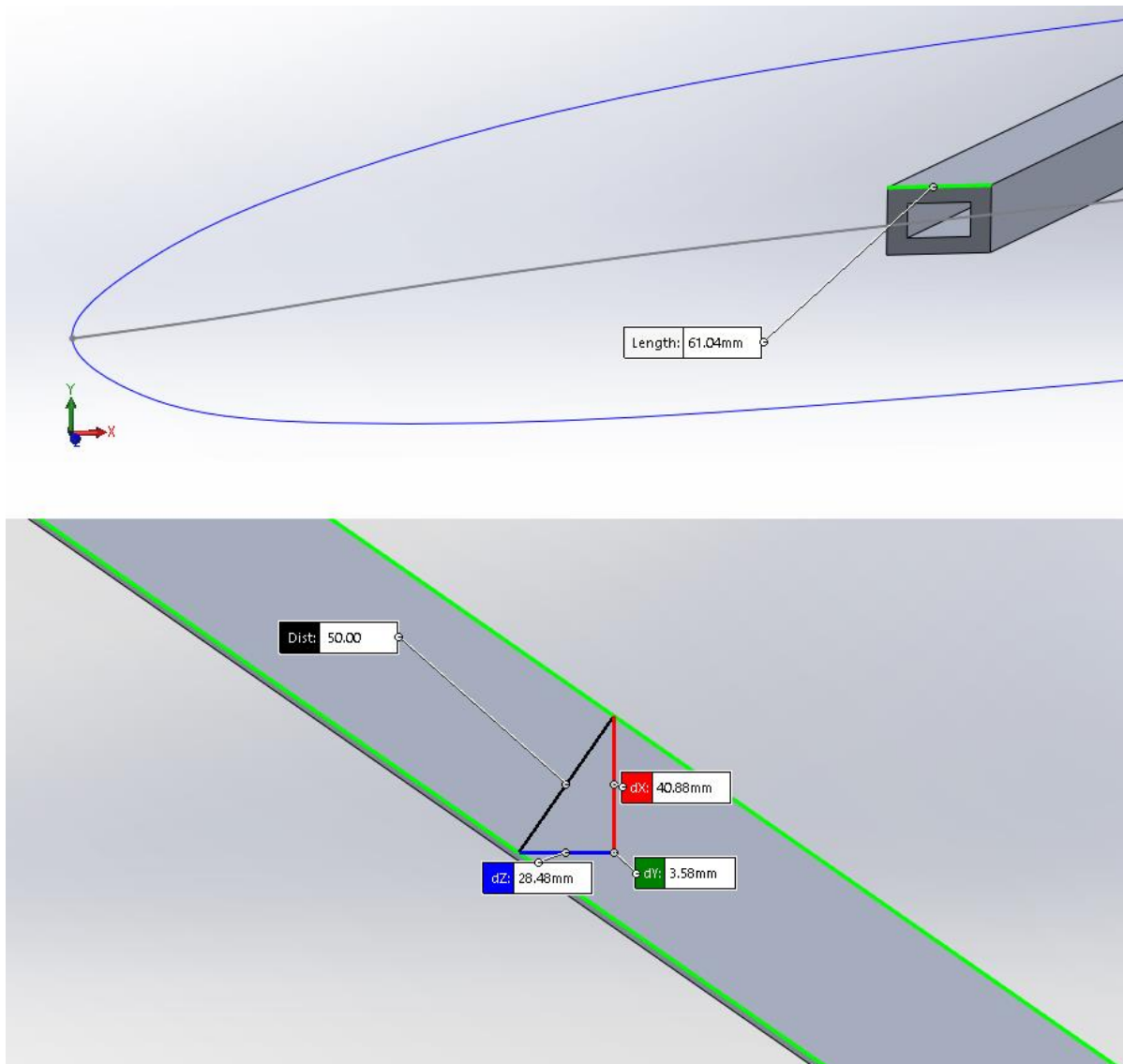
Σχήμα 2.6: Αποτέλεσμα σχεδίασης 5 νευρώσεων πτέρυγας τύπου NACA 4507, όπου φαίνεται η τοποθέτηση τους εντός της γεωμετρίας της, η διάνοιξη των οπών των δοκών και η προσαρμογή του σχήματός της βάσει του χρησιμοποιούμενου τύπου αεροτομής πτέρυγας.

2.2 Δοκοί

Μετά τη σχεδίαση και την αποθήκευση των μοντέλων όλων των νευρώσεων, αρχίζει η σχεδίαση των δοκών του εσωτερικού της πτέρυγας. Όσον αφορά τις δοκούς, από το λογισμικό δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να προσθέσει έως και 10 στο εσωτερικό της πτέρυγας, διαστάσεων, θέσεως, πάχους, τρόπου σύνδεσης και τύπου (ορθογωνικής ή κυκλικής διατομής) που ο ίδιος επιθυμεί για την καθεμιά. Σχεδιαστικά, η διαδικασία αυτή θα μπορούσε να χαρακτηριστεί απλή, αφού πρόκειται για ορθογωνικές ή κυκλικές διατομές σταθερού πάχους που εκτείνονται κατά μήκος του εσωτερικού της πτέρυγας. Όμως ο τρόπος κατασκευής 3D γεωμετριών υπό κλίση στο SolidWorks χρησιμοποιεί μόνο δύο 2D διατομές ως περιοχές έναρξης και τερματισμού του υπό κατασκευή στερεού σώματος, διαδικασία που χρειάζεται ιδιαίτερους χειρισμούς για να προκύψει η επιθυμητή γεωμετρία.

Συγκεκριμένα, η διατομές οι οποίες σχεδιάζονται στα επίπεδα των αεροτομών βάσης και τέλους χρειάζονται διαστασιολογικές προσαρμογές ανάλογες της κλίσης που έχει η δοκός ως προς τον άξονα z'z. Στο σχήμα 2.7 παρατίθεται μία τέτοια περίπτωση. Συγκεκριμένα, ο χρήστης έχει εισάγει διαστάσεις κατασκευής δοκού 50mm x 40mm. Παρατηρείται ότι για την επιτυχή κατασκευή της διατομής με το κατάλληλο πάχος η διάσταση της βάσης του ορθογώνιου που σχηματίζεται στην άκρη της δοκού είναι σαφώς μεγαλύτερη (61.05mm) από το ορισμένο πάχος, ως υποτείνουσα του ορθογώνιου τριγώνου που πρέπει να επιλύσουμε για την εύρεση του πάχους. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία κλίσης της πτέρυγας, τόσο εντονότερα παρατηρείται αυτό το φαινόμενο, δημιουργώντας όλο και μεγαλύτερη ανάγκη παραμόρφωσης της διατομής στην άκρη της δοκού ώστε να προκύψει το επιθυμητό πάχος.

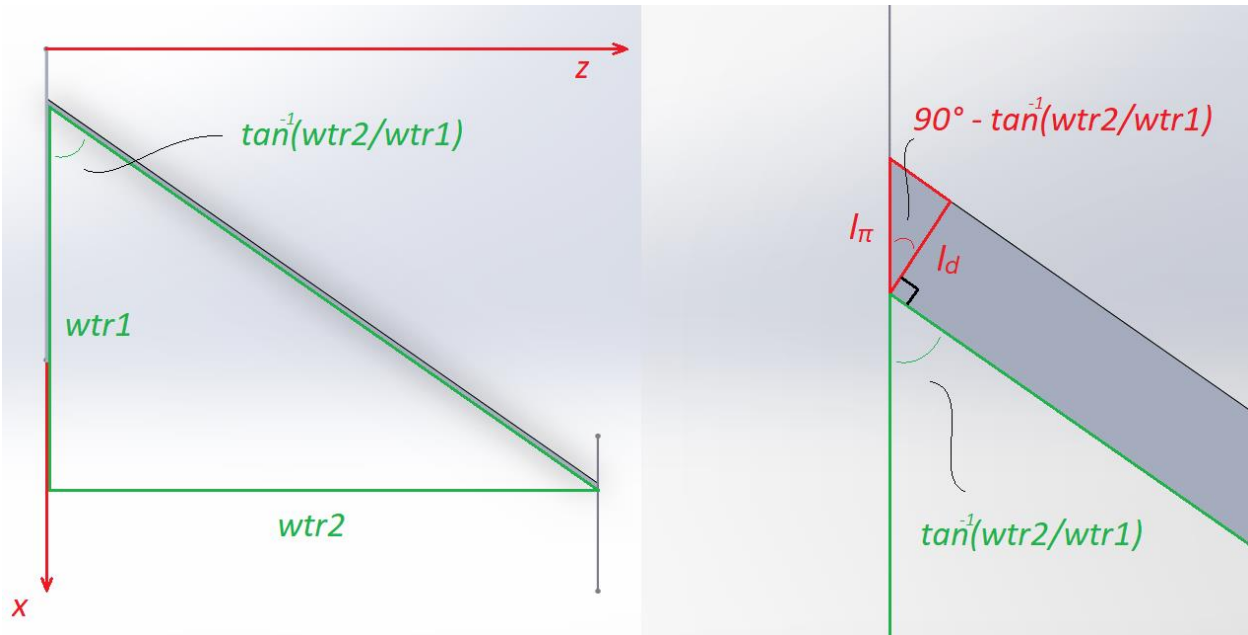
Ο τρόπος υπολογισμού των διαστάσεων της διατομής στην αεροτομή βάσης γίνεται μέσω της γωνίας που σχηματίζει το μήκος της προαναφερθείσας γεωμετρίας με το πάχος της διατομής, ορισμένο κάθετα στην κατεύθυνση προέκτασης της δοκού. Για την εύρεση αυτής της γωνίας



Σχήμα 2.7: Στο πρώτο σχήμα παρουσιάζεται όψη στην οποία αναγράφεται το μήκος της βάσης του ορθογώνια που έχει σχεδιαστεί στην αεροτομή βάσης ώστε να προκύψει το αναγκαίο πάχος, και στο δεύτερο σχήμα φαίνεται πως κατά την υπό κλίση επέκταση της παρουσιασμένης διατομής προκύπτει το πάχος των 50 χιλιοστών που ο χρήστης είχε εισάγει στο φύλλο δεδομένων.

πρέπει να βρεθεί η γωνία που σχηματίζει η δοκός με την αεροτομή βάσης. Έχοντας την προβολή του ύψους της πτέρυγας στον άξονα $z'z$, εκκρεμεί ο υπολογισμός της βάσης του ορθογώνιου τριγώνου προς επίλυση, που προκύπτει υπολογίζοντας τη συνολική απόσταση της απομακρυσμένης άκρης της δοκού στην αεροτομή τέλους από τον άξονα $z'z$, όπου χρησιμοποιείται η αρχή της αεροτομής τέλους, η θέση του κέντρου της διατομής της δοκού σε αυτήν τη νεύρωση και το ήμισυ του πάχους της, και στη συνέχεια αφαιρώντας από αυτήν την απόσταση της απομακρυσμένης άκρης της δοκού σε επαφή με την αεροτομή βάσης από τον άξονα $z'z$, με την χρήση πάλι της θέσης της εκάστοτε δοκού και του ήμισυ του πάχους της. Έτσι με τον υπολογισμό της ζητούμενης γωνίας μέσω της εφαπτομένης των γνωστών πλευρών, προκύπτει η γωνία υπολογισμού της διατομής με αφαίρεση από την τιμή των 90 μοιρών (το άθροισμα των δύο

ισούνται με 90 μοίρες), από της οποίας το συνημίτονο εύκολα υπολογίζουμε την κατάλληλη τιμή της διάστασης του μήκους της παραμορφωμένης διατομής για να προκύψει το πάχος και η επιθυμητή γεωμετρία μέσω του συνημίτονου. Όλα τα παραπάνω απεικονίζονται στο σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Στην αριστερή κάτοψη παρουσιάζεται το ορθογώνιο τρίγωνο που σχηματίζεται μεταξύ της αρχής, του τέλους και της προβολή του τέλους στον άξονα x'x της δοκού και τα ονόματα των αντίστοιχων μεταβλητών στο πρόγραμμα και στην δεξιά εικόνα παρουσιάζεται μεγεθυμένη κάτοψη στην περιοχή σύνδεσης της δοκού με την αεροτομή βάσης και περαιτέρω ανάλυση των τριγώνων και της μεθόδου που μας οδηγεί της εύρεσης της γωνίας που μας δίνει το μήκος της διατομής για το εκάστοτε επιθυμητό πάχος.

Σύμφωνα με τα ορίσματα του σχήματος 2.8, το μήκος του αρχικού 2Δ σχεδίου, για να μας δίνει το μήκος της επιθυμητής διατομής πρέπει να ισούται με:

$$l_{\pi} = \frac{l_{\delta}^x}{\cos [90^{\circ} - \tan^{-1}(wtr_2 - wtr_1)]} \quad (2.2)$$

Με χρήση των παραπάνω, το λογισμικό υπολογίζει την απαιτούμενη διαμήκη παραμόρφωση και κατασκευάζει διατομές κατάλληλες ώστε να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των δοκών κατά μήκος της πτέρυγας προκύπτουν οι σχέσεις:

$$d_{\alpha,\tau} = l_{\pi\tau\epsilon\rho}^x \cdot \sin\varphi_x \quad , \quad (2.3)$$

$$[[I - S]]: wtr_1 = d_{\alpha,\tau} \quad (2.4)$$

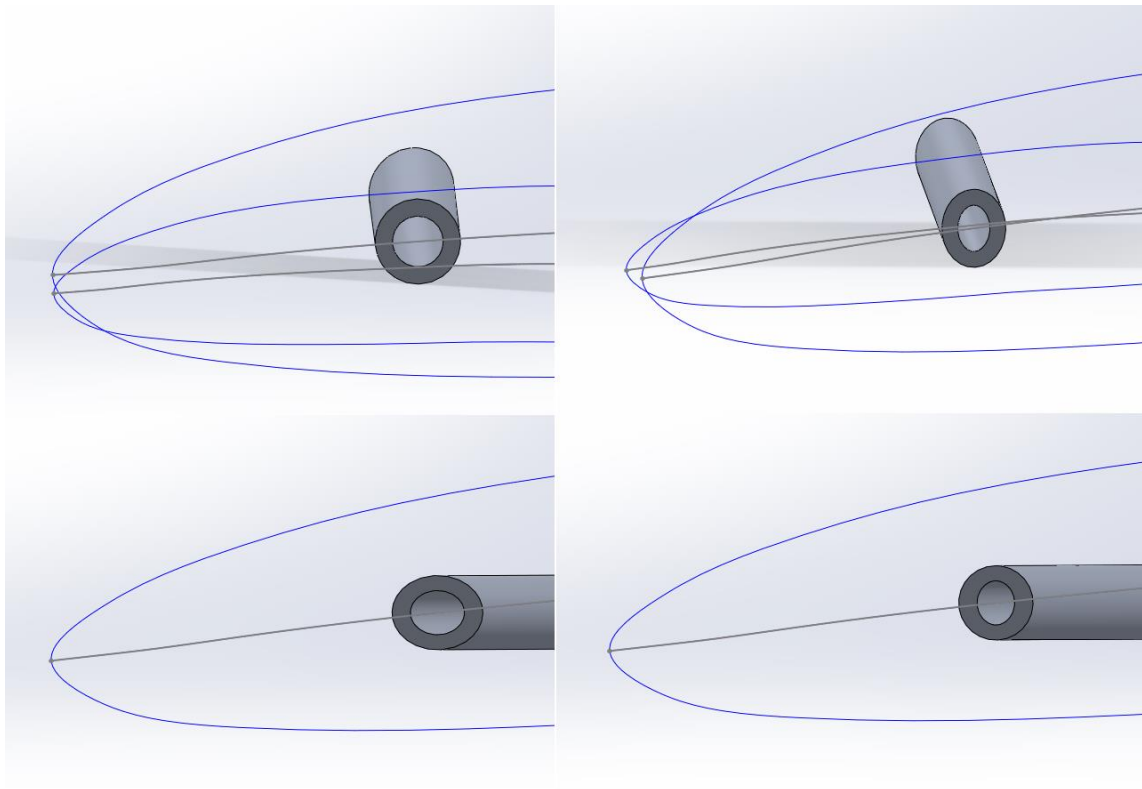
$$[[I - P]]: wtr_1 = d_{\alpha,\tau} + \frac{d_{\delta,i}^x}{l_{\alpha,\beta}^x} \cdot l_{\alpha,\tau}^x - d_{\delta,i}^x \quad , \quad i = 1,2, \dots, n_{\delta} \quad (2.5)$$

$$wtr_2 = l_{\pi\tau\epsilon\rho} \cdot \cos\varphi_x \quad (2.6)$$

όπου:

- $d_{\alpha,\tau}$: Απόσταση ακμής προσβολής αεροτομής τέλους – επιπέδου yz
- $d_{\delta,i}^X$: Απόσταση δοκού i – επιπέδου yz στην αεροτομή βάσης που έχει ορίσει ο χρήστης
- $l_{\alpha,\beta}^X$: Μήκος αεροτομής βάσης που έχει ορίσει ο χρήστης
- $l_{\alpha,\tau}^X$: Μήκος αεροτομής τέλους που έχει ορίσει ο χρήστης
- $l_{\pi\tau\epsilon\rho}^X$: Μήκος πτέρυγας που έχει ορίσει ο χρήστης
- n_{δ} : Συνολικό πλήθος δοκών

Ο τρόπος σύνδεσης των δοκών μπορεί να είναι ποσοστιαίος του μήκους αεροτομών (P) ή το κέντρο των διατομών να είναι κατά απόλυτη τιμή ίσο σε αεροτομή τέλους και βάσης (S). Επιπλέον οι δοκοί μπορούν να είναι τετραγωνικής διατομής (I) ή κυκλικής (O). Τα παραπάνω αποτελούν τον τρόπο υπολογισμού των διατομών σε περίπτωση I-S και I-P. Το λογισμικό διαθέτει τρόπους υπολογισμού για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς, αλλά και σε περιπτώσεις αλλαγής της μορφής των τριγώνων υπολογισμού λόγω των διαστάσεων που μπορεί να έχει εισάγει ο χρήστης.



Εικόνα 2.9: Διαφορετική όψη της δοκού σε περίπτωση αρχικής διατομής μορφής έλλειψης (αριστερά) και κύκλου (δεξιά) όπου φαίνεται η κυκλική και η ελλειψοειδής μορφή που προκύπτει τελικά κατά την κατασκευή της δοκού αντιστοίχως.

Στην περίπτωση των δοκών τετραγωνικών διατομών, αυτό επιτυγχάνεται με απλή επέμβαση στο μήκος της ορθογωνικής διατομής. Στις δοκού κυκλικών διατομών όμως, προφανώς το να γίνει αλλαγή στο μήκος της διατομής χωρίς να επηρεαστεί το ύψος δεν είναι εφικτό. Για την κατασκευή κυκλικών διατομών επομένως, χρησιμοποιούνται 2D ελλειψοειδείς διατομές με εστίες κοινής τετμημένης, ώστε να υπάρξει διαχωρισμός του μήκους της διατομής από το ύψος της, και η παραγωγή 3D χωρίου βάσει αυτών να οδηγήσει σε δοκό κυκλικής διατομής. Προφανώς, η ίδια

ακριβώς διαδικασία ακολουθείται κατά τη διαμόρφωση του χωρίου αφαίρεσης υλικού από τις νευρώσεις για τη διέλευση των δοκών στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο σχήμα 2.9 φαίνονται ενδεικτικά αποτελέσματα προσπάθειας κατασκευής δοκών με αρχικές διατομές κυκλικές και ελλειψοειδείς.

Η διαδικασία σχεδίασης των δοκών χρησιμοποιεί τα ίδια ορίσματα με τη διαδικασία σχεδίασης των νευρώσεων. Αρχικά γίνεται προσθήκη των καμπυλών αεροτομής βάσης και τέλους και των γραμμών κυρτότητας τους ως σημεία αναφοράς τη σωστή τοποθέτηση και κατασκευή τους, αφού βάσει αυτών δεν καθορίζεται μόνο η θέση της κάθε δοκού στην τελική διάταξη, αλλά και η απαιτούμενη κλίση και μορφή που πρέπει να έχει αναλόγως του σχήματος της πτέρυγας. Έτσι σχεδιάζονται, στη συνέχεια, οι 2Δ αρχικές διατομές των δοκών βάσει των μεθόδων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως και κατασκευάζεται το συμπαγές της σώμα. Οι συντεταγμένες των κέντρων των διατομών της εκάστοτε δοκού i είναι:

$$A_i(d_{\delta,i}^X, y_{\kappa\rho\rho\tau,\beta,i}(d_{\delta,i}^X), 0) , B_i(x_{B,i}, y_{B,i}, z_B) , i = 1, 2, \dots, n_\delta \text{ όπου}$$

$$x_{B,i} = \frac{-b_{1,i} \pm \sqrt{b_{1,i}^2 - 4(1 + a_{l1,i}^2) \cdot (d_{\alpha,\tau}^2 + b_{l1,i}^2 - 2b_{l1,i}y_{0\tau} + y_{0\tau}^2 - r_{i1}^2)}}{2(1 + a_{l1,i}^2)} \quad (2.7)$$

$$y_{B,i} = \frac{-b_{2,i} \pm \sqrt{b_{2,i}^2 - 4\left(1 + \frac{1}{a_{l1,i}^2}\right) \cdot \left(\frac{b_{l1,i}^2}{a_{l1,i}^2} + 2\frac{b_{l1,i}d_{\alpha,\tau}}{a_{l1,i}} + d_{\alpha,\tau}^2 - r_{i1}^2\right)}}{2\left(1 + \frac{1}{a_{l1,i}^2}\right)} \quad (2.8)$$

$$z_B = l_{\pi\tau\epsilon\rho}^X \cdot \cos\varphi_X \quad (2.9)$$

όπου:

$$\llbracket P \rrbracket: r_i = \sqrt{\left(\frac{d_{\delta,i}^X}{l_{\alpha,\beta}^X}\right)^2 + y_{\kappa\rho\rho\tau,\tau,i}^2 \left(\frac{d_{\delta,i}^X}{l_{\alpha,\beta}^X}\right)} \quad (2.10) , \llbracket S \rrbracket: r_i = \sqrt{d_{\delta,i}^X{}^2 + y_{\kappa\rho\rho\tau,\tau,i}^2 (d_{\delta,i}^X)} \quad (2.11)$$

$$b_{1,i} = -2d_{\alpha,\tau} + 2a_{l,i}b_{l,i} - 2a_{l,i}y_{0\tau} \quad (2.12) , b_{2,i} = 2\left(\frac{b_{l,i}}{a_{l,i}^2} - \frac{d_{\alpha,\tau}}{a_{l,i}} - 2y_{0\tau}\right) \quad (2.13)$$

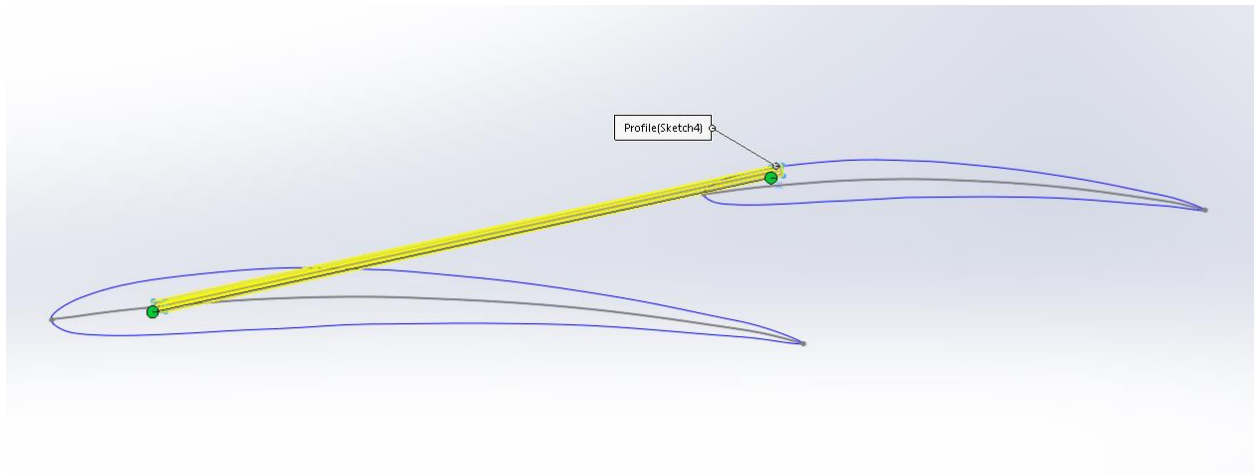
$$y_{l,i}^{\pi 1} = a_{l1,i}x + b_{l1,i} \quad (2.14)$$

$$a_{l1,i} = \tan\left(\theta_X - \tan^{-1}(a_{\kappa\rho\rho\tau,\tau,i})\right) \quad (2.15) , b_{l1,i} = \frac{y_{0\tau}}{\tan\left(\theta_X - \tan^{-1}(a_{\kappa\rho\rho\tau,\tau,i})\right) \cdot d_{\alpha,\tau}} \quad (2.16)$$

- A_i : Κέντρο διατομής δοκού στην αεροτομή βάσης

- B_i : Κέντρο διατομής δοκού στην αεροτομή τέλους
- θ_X : Γωνία περιστροφής αεροτομής τέλους – επιπέδου xz που έχει ορίσει ο χρήστης
- $y_{0\beta}$: Συντεταγμένη y της ακμής προσβολής της αεροτομής βάσης
- $y_{0\tau}$: Συντεταγμένη y της ακμής προσβολής της αεροτομής τέλους
- $y_{\kappa\rho\tau,\tau,i}(x)$: Εξίσωση ευθείας σύνδεσης κέντρου διατομής δοκού i πάνω στην καμπύλη κυρτότητας της αεροτομής τέλους και του σημείου ακμής προσβολής της ($d_{\alpha,\tau}, y_{0\tau}, z_B$).
- $y_{\kappa\rho\tau,\beta,i}(x)$: Εξίσωση ευθείας σύνδεσης κέντρου διατομής δοκού i πάνω στην καμπύλη κυρτότητας της αεροτομής βάσης και του σημείου ακμής προσβολής της ($0, y_{0\beta}, 0$).

Η παρακάτω ανάλυση εμπλέκει 2 ευθείες και έναν κύκλο για την εύρεση της νέας θέσης των κέντρων των διατομών των δοκών. Πρακτικά, η διαδικασία σχεδίασης των δοκών ακολουθεί ακριβώς τα ίδια βήματα με τη διαδικασία αφαίρεσης υλικού για τη δημιουργία οπών διαμέσου των νευρώσεων που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με μόνη διαφορά ότι εδώ γίνεται προσθήκη υλικού και όχι αφαίρεση (σχήμα 2.10). Πρόσθετες ενέργειες εκτελούνται από το πρόγραμμα για διασφάλιση της σωστής διαστασιολόγησης των δοκών και ότι αυτές περιορίζονται εντός του εσωτερικού της πτέρυγας, σε περίπτωση εισαγωγής λανθασμένων παραμέτρων κατασκευής από τον χρήστη.

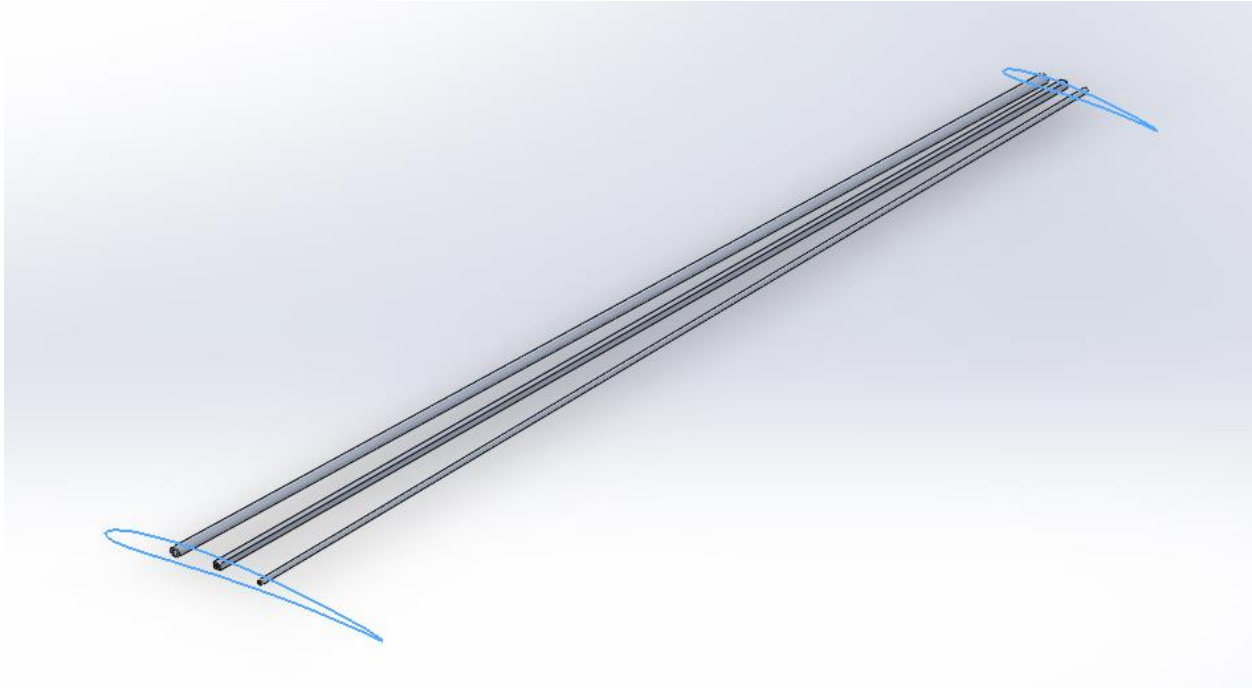


Σχήμα 2.10: Στιγμιότυπο κατασκευής του σώματος της δοκού βάσει των παραμέτρων που έχουν καθοριστεί στο φύλλο εισαγωγής δεδομένων από τον χρήστη.

Παράδειγμα αποτελεσμάτων της διαδικασίας σχεδίασης 3 δοκών πτέρυγας φαίνεται στο σχήμα 2.12. Οι παράμετροι που ορίστηκαν για την κατασκευή των δοκών από τον χρήστη παρουσιάζονται στον πίνακα 2.11 με τρόπο σύνδεσης $[[P]]$ (βλέπε Παράρτημα Α’).

Spars				
No.	Pos.(mm)	Dimensions(mm)	Type(I/O)	Thickness(mm)
1	100	15	O	4
2	180	10x10	I	3
3	260	8	O	3

Πίνακας 2.11: Θέσεις, διαστάσεις, τύπος και πάχος των νευρώσεων εντός της πτέρυγας τύπου NACA 4507.



Σχήμα 2.12: Αποτέλεσμα σχεδίασης 3 δοκών πτέρυγας τύπου NACA 4507, όπου φαίνεται και η τοποθέτησή τους εντός της γεωμετρίας της.

2.3 Εξωτερικό Τοίχωμα

Τελευταίο τμήμα της διαδικασίας σχεδίασης των εξαρτημάτων της πτέρυγας αποτελεί το εξωτερικό της τοίχωμα. Η σχεδίαση όλων των επιμέρους τμημάτων της πτέρυγας γίνεται προφανώς λαμβάνοντας υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά της. Για αυτόν τον λόγο και οι τελικές καμπύλες αεροτομών βάσης και τέλους προστίθενται και χρησιμοποιούνται σε όλα τα μοντέλα σχεδίασής της. Οι τελευταίες παράμετροι που μπορεί να εισάγει ο χρήστης για τη σχεδίαση της πτέρυγας είναι το συνολικό μήκος της πτέρυγας, το πάχος της, την κλίμακα των διαστάσεων αεροτομών βάσης και τέλους, και γωνίες που καθορίζουν την κλίση της πτέρυγας και τη στροφή κατά μήκος της γεωμετρίας της. Όλες οι παραπάνω παράμετροι καθορίζουν το τελικό σώμα της πτέρυγας και είναι απαραίτητες για την σωστή κατασκευή των εσωτερικών μερών της.

Το μήκος και το πάχος της πτέρυγας αποτελούν αυτονόητες παραμέτρους. Σχετικά με την κλίμακα των διαστάσεων των αεροτομών βάσης και τέλους, τα αρχεία που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του σχήματος των αεροτομών δίνονται ως σύνολα σημείων αδιάστατων τιμών, με το συνολικό τους μήκος να κυμαίνεται από το 0 έως το 1. Για την προσαρμογή της αεροτομής στην επιθυμητή εφαρμογή, γίνεται πολλαπλασιασμός των συντεταγμένων αυτών με το συνολικό μήκος αεροτομής που χρειάζεται να ληφθεί για την αεροτομή βάσης και τέλους, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, γίνεται προσαρμογή της δεύτερης στην κατάλληλη θέση με τη χρήση των παραμέτρων γωνίας στροφής και κλίσης, που ορίζονται ως η γωνία που σχηματίζει το μέτωπο προσβολής της ροής με τον άξονα $z'z$ και η γωνία κατά την οποία θα στραφεί η αεροτομή τέλους με κέντρο περιστροφής το σημείο προσβολής της ροής της. Εάν A_i το αρχικό σημείο και B_i το περιστραμμένο, η τυπολογία σύμφωνα με την οποία πραγματοποιείται η εύρεση των τελικών

σημείων της αεροτομής τέλους παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με αυτή του υπολογισμού του κέντρου της διατομής της και είναι:

$$A_i(x_{A,i}, y_{A,i}, z_A) , B_i(x_{B,i}, y_{B,i}, z_B) , i = 1, 2, \dots, p \text{ όπου}$$

$$x_{B,i} = \frac{-b_{1,i} \pm \sqrt{b_{1,i}^2 - 4(1 + a_{l2,i}^2) \cdot (d^2_{\alpha,\tau} + b_{l2,i}^2 - 2b_{l2,i}y_{0\tau} + y_{0\tau}^2 - r_{i2}^2)}}{2(1 + a_{l2,i}^2)}$$

$$y_{B,i} = \frac{-b_{2,i} \pm \sqrt{b_{2,i}^2 - 4\left(1 + \frac{1}{a_{l2,i}^2}\right) \cdot \left(\frac{b_{l2,i}^2}{a_{l2,i}^2} + 2\frac{b_{l2,i}d_{\alpha,\tau}}{a_{l2,i}} + d^2_{\alpha,\tau} - r_{i2}^2\right)}}{2\left(1 + \frac{1}{a_{l2,i}^2}\right)}$$

$$z_A = z_B = l_{\pi\tau\epsilon\rho}^X \cdot \cos\varphi_X \quad (2.17)$$

όπου:

$$r_{i2} = \sqrt{x_{A,i}^2 + y_{A,i}^2} \quad (2.18)$$

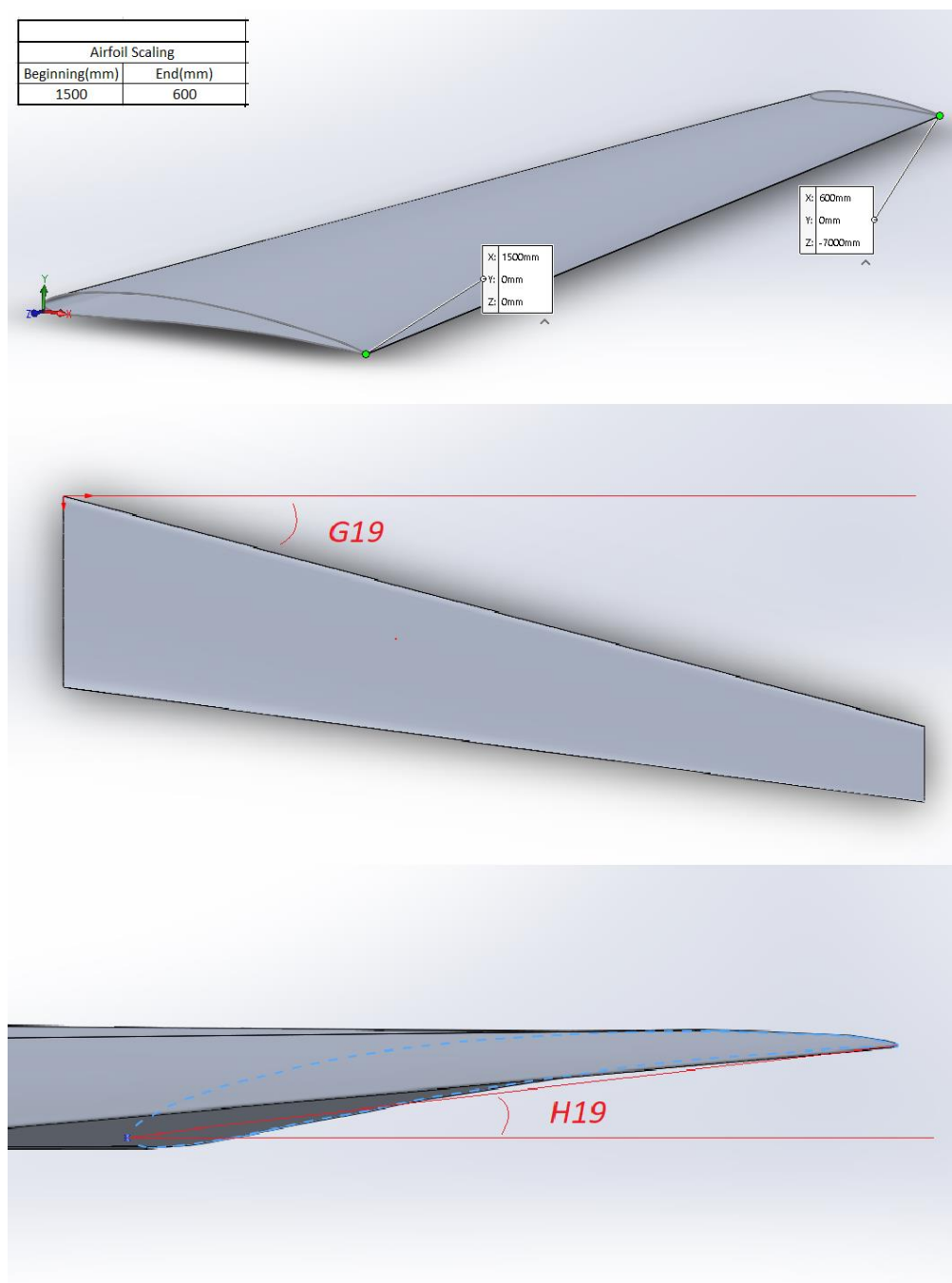
$$y_{l,i}^{\pi 2} = a_{l2,i}x + b_{l2,i} \quad (2.19)$$

$$a_{l2,i} = \tan(\theta_X - \tan^{-1}(a_i)) \quad (2.20) , \quad b_{l2,i} = \frac{y_{0\tau}}{\tan(\theta_X - \tan^{-1}(a_i)) \cdot d_{\alpha,\tau}} \quad (2.21)$$

$$y_i^{\alpha\rho X} = a_i x + b_i \quad (2.22)$$

- $y_i^{\alpha\rho X}$: Η ευθεία που ορίζεται από την ακμή προσβολής της αεροτομής τέλους και το προς περιστροφή σημείο της καμπύλης της
- $y_{l,i}^{\pi 2}$: Η ευθεία που σχηματίζει γωνία θ_X με την ευθεία $y_i^{\alpha\rho X}$ και διέρχεται από την ακμή προσβολής της αεροτομής τέλους
- p : Το σύνολο των σημείων της αεροτομής τέλους

Στο σχήμα 2.13 παρουσιάζονται όλες οι παραπάνω παράμετροι για την πλήρη κατανόηση της σχεδιαστικής τους χρησιμότητας. Η χρήση όλων των παραπάνω παραμέτρων εξασφαλίζει την τελική τοποθέτηση και διαστασιολόγηση των αεροτομών βάσης και τέλους, και κατ' επέκταση του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας. Με την εισαγωγή των καμπύλων αεροτομών βάσης και τέλους στο σχεδιαστικό περιβάλλον, δημιουργείται τοίχωμα σταθερού πάχους με αυτές οδηγό για να επικαλύψει όλα τα εσωτερικά τμήματα της πτέρυγας και να της δώσει την τελική της μορφή. Βάσει του μοντέλου αυτού γίνεται και η παραγωγή των αρχείων που θα χρησιμοποιηθούν στο επόμενο κεφάλαιο για τη γένεση πλέγματος, αφού το εξωτερικό σχήμα της πτέρυγας είναι που επηρεάζει την συμπεριφορά της ροής και όχι τα εσωτερικά της τμήματα.

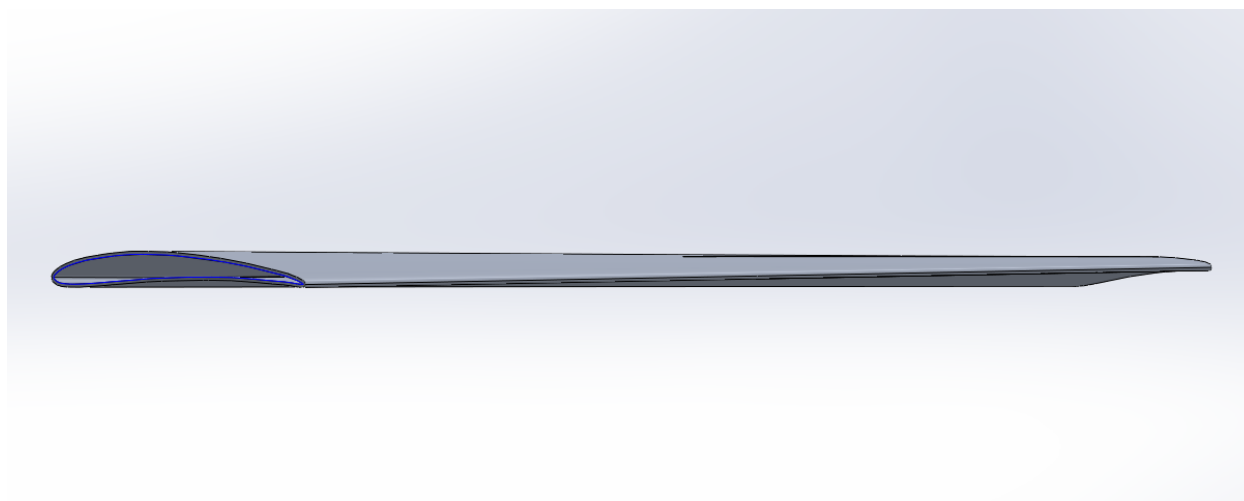


Σχήμα 2.13: Από πάνω προς τα κάτω: (1) Τριδιάστατη όψη του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας με χορδές μήκους 1500mm και 600mm για την αεροτομή βάσης και τέλους αντίστοιχα και η συντεταγμένες των δύο σημείων εκφυγής αυτών υπό μηδενική γωνία κλίσης κατασκευής της πτέρυγας, (2) κάτοψη της πτέρυγας στην οποία ορίζεται η γωνία κλίσης της μεταξύ του κάθετου άξονα z'z και του μετώπου προσβολής της πτέρυγας, (3) πλάγια όψη της πτέρυγας όπου απεικονίζεται η γωνία που στρέφει την αεροτομή τέλους κατά τις επιθυμητές μοίρες για να επιτύχουμε την ζητούμενη γεωμετρία πτέρυγας.

Παράδειγμα αποτελεσμάτων της διαδικασίας σχεδίασης του εξωτερικού τοιχώματος πτέρυγας φαίνεται στο σχήμα 2.14. Οι παράμετροι που ορίστηκαν για την κατασκευή του από τον χρήστη

παρουσιάζονται παρακάτω. Προφανώς τα μεγέθη που καθορίζουν το σχήμα της πτέρυγας όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο σχήμα 2.13 λαμβάνονται υπόψη και στα δύο προηγούμενα στάδια σχεδίασης του λογισμικού, για την σωστή κατασκευή των νευρώσεων και των δοκών της πτέρυγας.

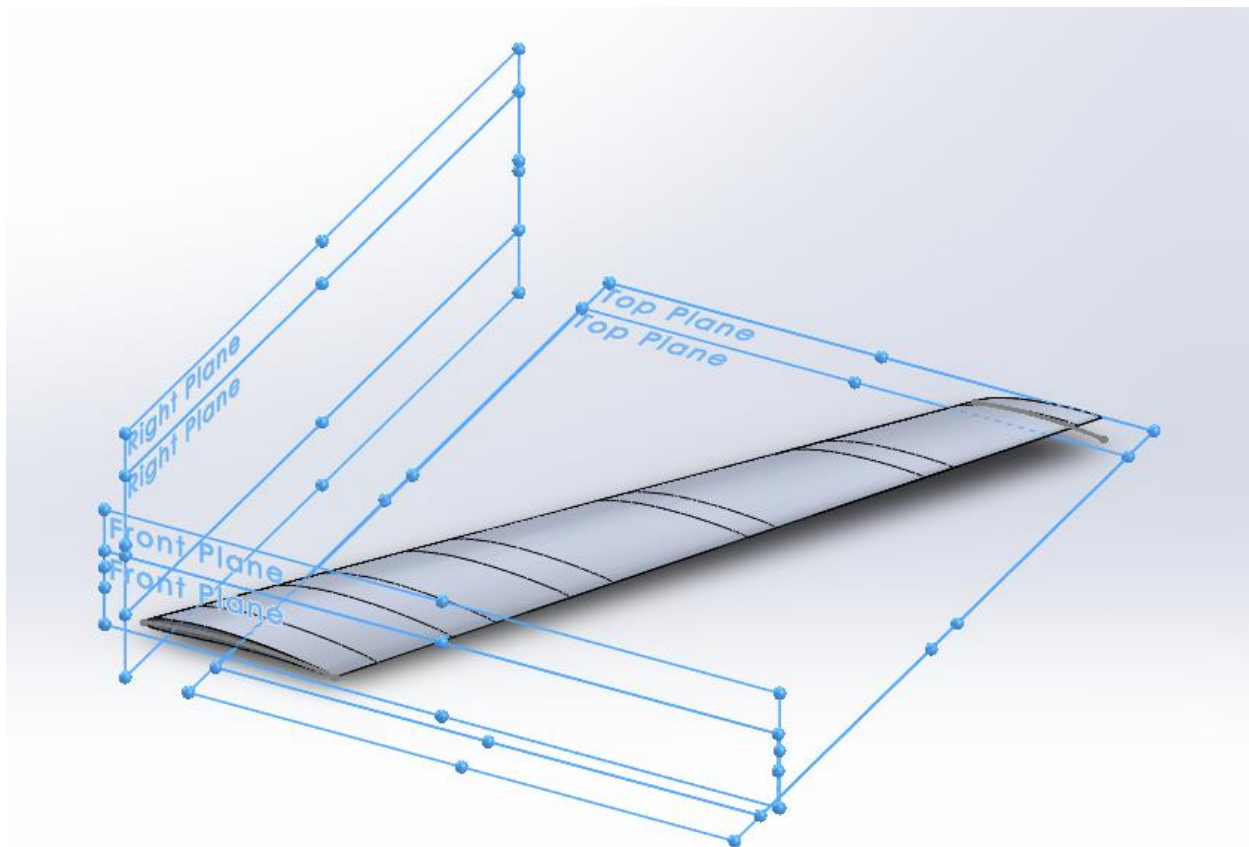
- Μήκος πτέρυγας (l_H^X): 1500mm
- Πάχος πτέρυγας: 4mm
- Μήκος αεροτομής βάσης ($l_{\alpha,\beta}^X$): 450mm
- Μήκος αεροτομής τέλους ($l_{\alpha,\tau}^X$): 250mm
- Γωνία ακμής προσβολής πτέρυγας – επιπέδου xy (φ_X): 15 μοίρες
- Γωνία στροφής αεροτομής τέλους – επιπέδου xz (θ_X): 5 μοίρες



Σχήμα 2.14: Αποτέλεσμα σχεδίασης εξωτερικού τοιχώματος πτέρυγας τύπου NACA 4507.

2.4 Συναρμολόγηση Διάταξης

Η σχεδίαση των τμημάτων που αποτελούν την πτέρυγα έχει ολοκληρωθεί και απομένει η συναρμολόγηση της τελικής διάταξης. Κατά την παρουσίαση της διαδικασίας σχεδίασης όλων των επιμέρους τμημάτων, χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία αναφοράς οι καμπύλες των αεροτομών βάσης και τέλους. Αυτό έγινε τόσο για την ικανοποίηση σχεδιαστικών απαιτήσεων των υπό κατασκευή τμημάτων, όσο όμως και για την αναγωγή του ζητήματος της σωστής τους σχετικής τοποθέτησης στο στάδιο σχεδίασης τους. Για τη συναρμολόγηση της πτέρυγας, πρέπει να δοθούν από το λογισμικό οδηγίες στο SolidWorks σχετικά με το τι περιορισμοί πρέπει να επιβληθούν στους βαθμούς ελευθερίας κίνησης μεταξύ των διαφόρων τμημάτων. Αυτή η διαδικασία γίνεται ιδιαίτερος περίπλοκη όταν για την επιβολή αυτών των περιορισμών πρέπει να χρησιμοποιηθούν συγκεκριμένες επιφάνειες και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε τμήματος, λόγω του μεγάλου πλήθους τους και τις ιδιαίζουσας ονοματολογίας τους.



Σχήμα 2.15: Στιγμιότυπο συναρμολόγησης της διάταξης της πτέρυγας όπου φαίνεται η προσαρμογή των τριών επιπέδων (xy , yz , zx) ενός εκ των τμημάτων της πτέρυγας πάνω στα ανάλογα επίπεδα του περιβάλλοντος σχεδίασης.

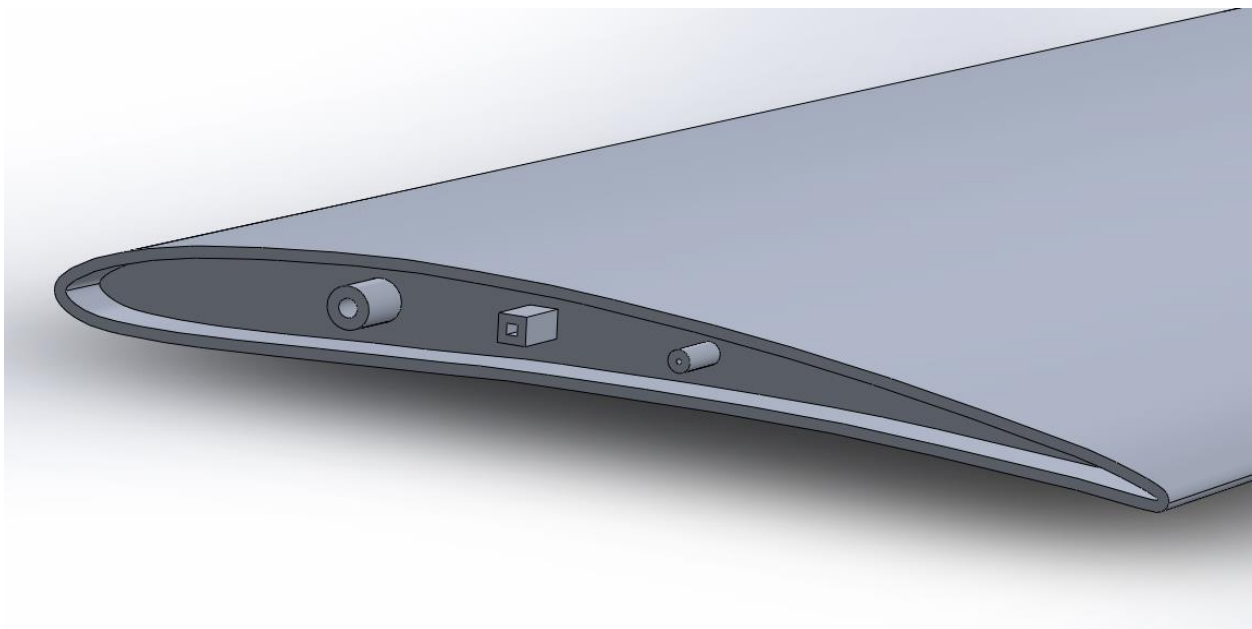
Χρησιμοποιώντας ως θεμέλια της σχεδίασης όλων των τμημάτων τις αεροτομές βάσης και τέλους και τοποθετώντας τα στις σωστές τελικές τους θέσεις βάσει αυτής, επιτυγχάνεται τόσο η σωστή σχεδίασή τους σχετικά με τα υπόλοιπα τμήματα της διάταξης (διάνοιξη οπών διέλευσης δοκών στις νευρώσεις), όσο και η απλούστευση του προβλήματος σωστής τους τοποθέτησης. Κατά τη διαδικασία συναρμολόγησης της πτέρυγας επομένως, το λογισμικό εκμεταλλεύεται την ιδιότητα αυτή και, αντί να γίνει επιβολή σχέσεων μεταξύ γεωμετριών, γίνεται ταύτιση όλων των συστημάτων συντεταγμένων των διαφορετικών τμημάτων της πτέρυγας μεταξύ τους. Η ενέργεια αυτή πραγματοποιείται τμηματικά, με την ταύτιση των τριών επιπέδων xy , yz , zx για κάθε τμήμα της πτέρυγας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.15, και με την ολοκλήρωσή της το λογισμικό έχει όλα τα απαραίτητα αρχεία για να προβεί στην γένεση του απαιτούμενου πλέγματος, αλλά και στα υπόλοιπα στάδια της διαδικασίας της αερο-δομικής ανάλυσης. Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, παρατηρείται ότι το μοντέλο της πτέρυγας σχεδιάζεται πάντα με την χορδή της αεροτομής βάσης οριζόντια με τον άξονα x' . Σε περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί η πτέρυγα να τοποθετηθεί υπό γωνία πάνω στην άτρακτο του αεροπλάνου (γωνία σφήνωσης) δεν γίνεται κάποια σχεδιαστική παρέμβαση, αλλά προσαρμόζεται αναλόγως η γωνία προσβολής της ροής κατά την διαδικασία επίλυσής της από τον PUMA.

Αποτέλεσμα της διαδικασίας συναρμολόγησης των τμημάτων που κατασκευάστηκαν ως παραδείγματα στη σχεδίαση νευρώσεων, δοκών και του εξωτερικού τοιχώματος παρουσιάζεται στο σχήμα 2.17, όπου φαίνεται η σωστή τοποθέτηση των επιμέρους τμημάτων μεταξύ τους ώστε

να προκύψει το στερεό σώμα της πτέρυγας. Όλα τα τμήματα της πτέρυγας αποτελούνται από υλικό τύπου 2024 Aluminum Alloy με τις ιδιότητες που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.16.

Property	Value	Units
Elastic Modulus	7.3e+10	N/m ²
Poisson's Ratio	0.33	N/A
Shear Modulus	2.8e+10	N/m ²
Mass Density	2800	kg/m ³
Tensile Strength	186126000	N/m ²
Compressive Strength		N/m ²
Yield Strength	75829100	N/m ²

Πίνακας 2.16: Μηχανικές ιδιότητες κράματος Αλουμινίου 2024, από το οποίο αποτελείται η πτέρυγα.



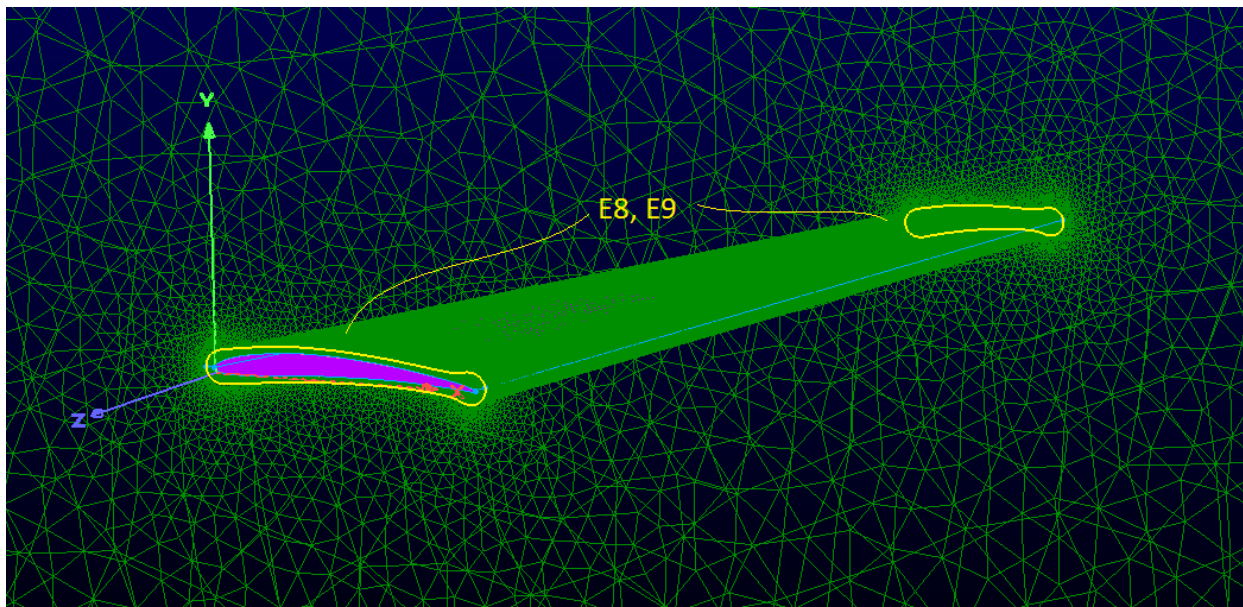
Σχήμα 2.17: Τομή της πτέρυγας τύπου NACA 4507 παράλληλη στο επίπεδο xy όπου φαίνεται η σωστή τοποθέτηση των δοκών εντός των οπών των νευρώσεων στο εσωτερικό του εξωτερικού τοιχώματος.

Κεφάλαιο 3

Γένεση Πλέγματος

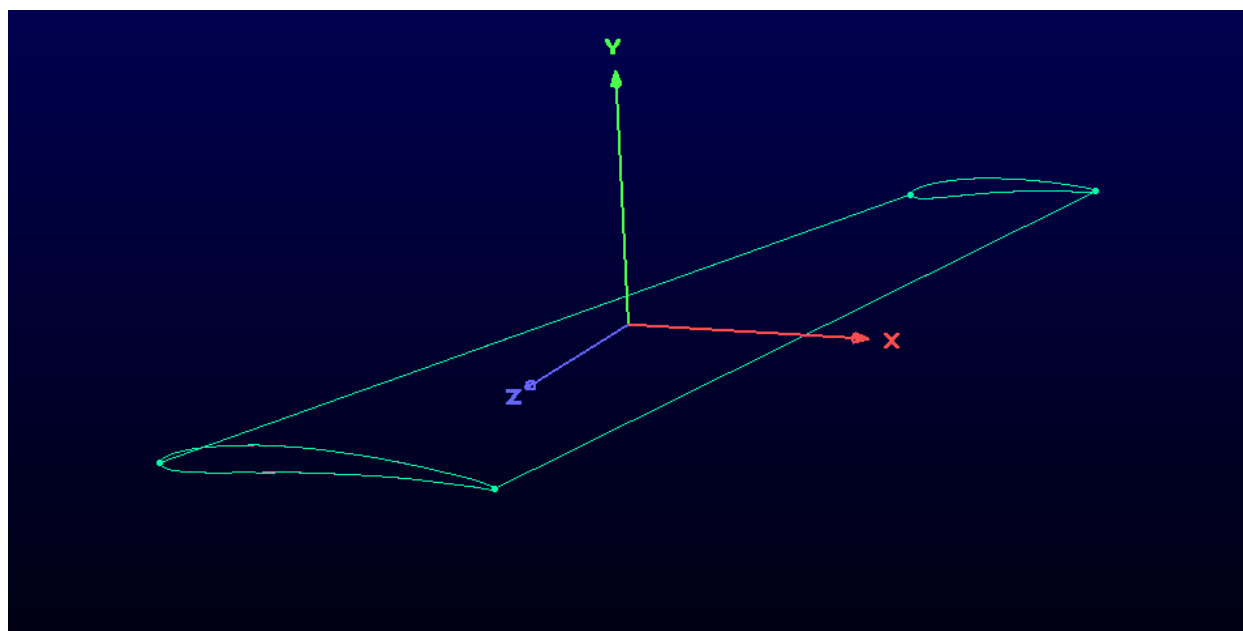
Το δεύτερο στάδιο που ακολουθεί το πρόγραμμα κατά την εκτέλεση της διαδικασίας ρευστοδυναμικής – δομικής ανάλυσης αποτελεί η γένεση του πλέγματος CFD βάσει του μοντέλου της πτέρυγας που σχεδιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το λογισμικό λαμβάνει τις τιμές των παραμέτρων του πλέγματος που έχει ορίσει ο χρήστης και τη γεωμετρία του εξωτερικού τοιχώματος και εκκινεί το PointWise, μέσω της εκτέλεσης πακέτων εντολών γλώσσας TCL. Αρχικά, πραγματοποιείται εισαγωγή του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας στο περιβάλλον εργασίας. Στη συνέχεια, παράγεται πλέγμα επιθυμητών ιδιοτήτων γύρω από την πτέρυγα, για την εξασφάλιση αξιόπιστης CFD προσομοίωσης, πυκνώνοντάς το κοντά στα τοιχώματά της.

Το λογισμικό που έχει αναπτυχθεί περιλαμβάνει παραμέτρους για τον ορισμό χαρακτηριστικών του πλέγματος. Ο χρήστης καθορίζει το πλήθος των σημείων των καμπυλών που ορίζουν τη γεωμετρία του πλέγματος, την κατανομή αυτών, αλλά και τη θέση και το μέγεθος του χωρίου ροής. Επιπλέον, καθορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλέγματος του συνεκτικού στρώματος. Παράδειγμα του τελικού πλέγματος που προέκυψε με τη χρήση του μοντέλου της πτέρυγας και των παραμέτρων του χρήστη παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1. Όλα τα σχήματα του παρόντος κεφαλαίου αφορούν την πτέρυγα τύπου NACA 4507 που σχεδιάστηκε και συναρμολογήθηκε ως παράδειγμα της σχεδιαστικής διαδικασίας στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα του τελικού πλέγματος της πτέρυγας τύπου NACA 4507 που παρήχθη βάσει των ορισμάτων που έχει καθορίσει ο χρήστης.

Η διαδικασία γένεσης του πλέγματος ξεκινά από την περιοχή του συνεκτικού στρώματος της πτέρυγας με την εκκίνηση του PointWise και την εισαγωγή του αρχείου με τη γεωμετρία του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Εργαζόμενο πάνω σε αυτή τη γεωμετρία, το πρόγραμμα ορίζει τις ανωτέρω καμπύλες με το πλήθος των σημείων και την κατανομή την οποία έχει θέσει ο χρήστης. Στο PointWise η κατανομή των σημείων κατά μήκος μια καμπύλης ορίζεται μέσω της απόλυτης απόστασης των δύο πρώτων μεταξύ τους και ενός συντελεστή αύξησης αυτής καθώς το πρόγραμμα προχωράει από το ένα σημείο στο άλλο. Ο τρόπος παραμετροποίησης και προγραμματισμού του λογισμικού οδηγεί πάντα στο να



Σχήμα 3.2: Στιγμιότυπο της διαδικασίας γένεσης πλέγματος από το πρόγραμμα του PointWise όπου γίνεται εισαγωγή του μοντέλου της πτέρυγας βάσει του οποίου θα κατασκευαστεί το πλέγμα της ροής

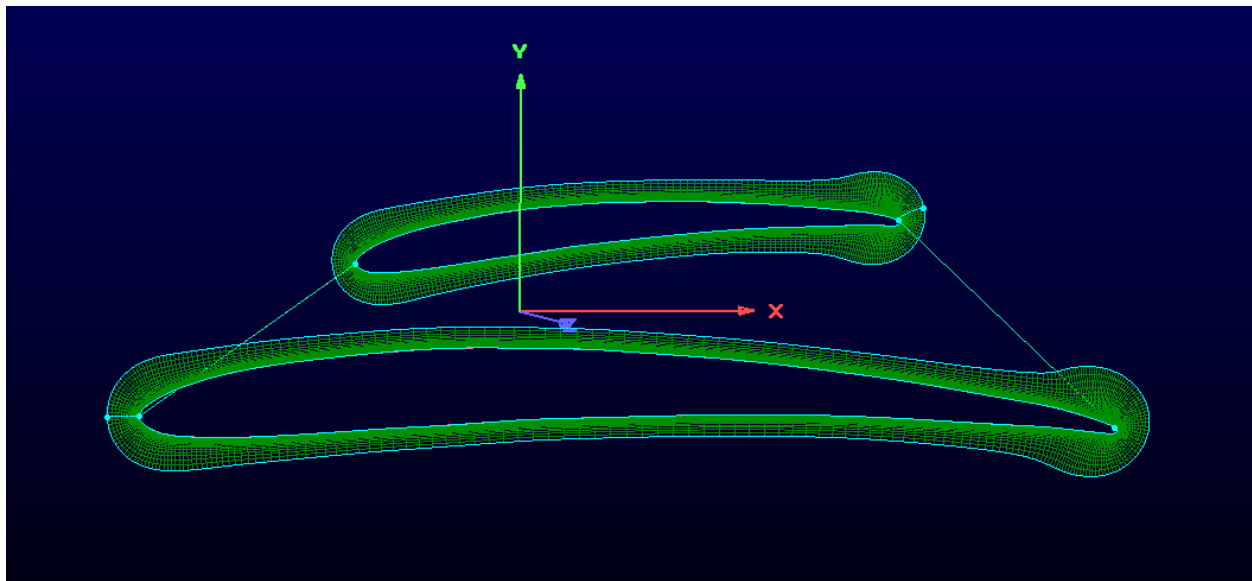
τοποθετούνται τα σημεία με τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτουν structured-like πλέγματα. Έτσι για τη δημιουργία 3D στοιχείων προκύπτει η πλήρωση του χωρίου με εξαεδρικά στοιχεία.

Το πρόγραμμα ξεκινά την κατασκευή των επιφανειακών διαπαραμετρικών πλεγμάτων που θα διαμορφώσουν το 3D CFD πλέγμα. Η διαδικασία ξεκινά από τα στερεά τοιχώματα της πτέρυγας. Για τον προσδιορισμό των διαστάσεων των 3D στοιχείων του πλέγματος κοντά στα στερεά όρια χρησιμοποιείται η μεταβλητή y^+ με την οποία γίνεται εύρεση της τιμής του μεγέθους y_p . Σύμφωνα με το y_p που θα προκύψει, πρέπει να οριστεί αντίστοιχα το ύψος των πρώτων 3D στοιχείων του πλέγματος σε επαφή με τα τοιχώματα της πτέρυγας. Έτσι ο χρήστης έχει μια γενική εικόνα για τον τρόπο με τον οποίο ο επιλύτης θα προσεγγίσει την επίλυση του πλέγματος. Το y^+ προκύπτει κανονικά από τη CFD επίλυση και ορίζεται σε όλους τους κόμβους ή τα βαρύκεντρα που είναι σε επαφή με τα τοιχώματα ως:

$$y^+ = \frac{y u_T}{\nu} = \frac{\rho u_T y_p}{\mu} \quad (3.1)$$

- y_p : Απόλυτη απόσταση από το τοίχωμα
- u_T : Ταχύτητα τριβής
- ρ : Πυκνότητα ρευστού
- μ : Δυναμικό ιξώδες

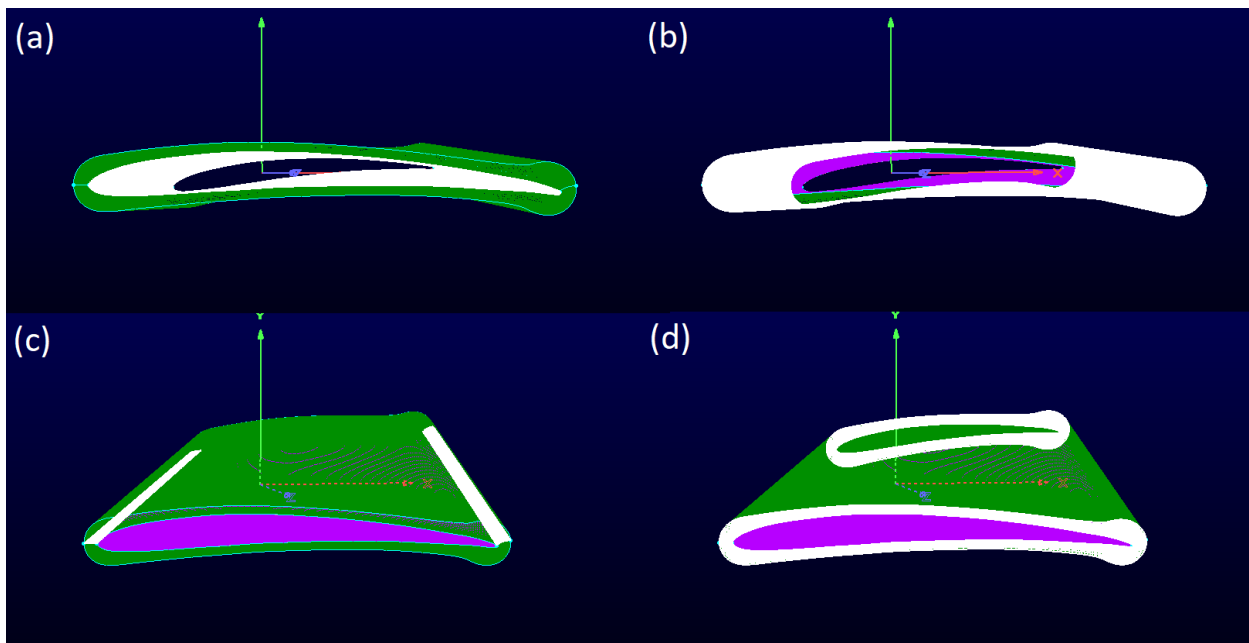
Για τη γένεση του ζητούμενου πλέγματος, το PointWise παράγει αρχικά δύο επιφανειακά διαπαραμετρικά πλέγματα γύρω από τις καμπύλες των αεροτομών βάσης και τέλους όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3, ορίζοντας αναλόγως το ύψος των στοιχείων που τα αποτελούν και τον ρυθμό αύξησης του μεγέθους τους βάσει των παραμέτρων που έχει εισάγει ο χρήστης. Τα πλέγματα αυτά είναι παράλληλα σχεδιασμένα στο επίπεδο xy και με το ύψος των στοιχείων τους καθορίζεται κατ'



Σχήμα 3.3: Στιγμιότυπο της διαδικασίας παραγωγής πλέγματος όπου γίνεται η διαμόρφωση των structured-like πλεγμάτων εξασφάλισης χαμηλού y^+ βάσει των καμπυλών αεροτομής βάσης και τέλους, αλλά και των προδιαγραφών που έχουν οριστεί από τον χρήστη στο φύλλο PointWiseParameters στα κελιά E_8 , E_9 .

επέκταση και το ύψος των 3Δ στοιχείων κοντά στα τοιχώματα της πτέρυγας. Στο παράδειγμα της σχεδιασμένης πτέρυγας, για την επίτευξη τιμών $y^+ < 1$ (με βάση το εμπειρικό βοηθητικό εργαλείο προ-εκτίμησης του PointWise) η κατασκευή των επιφανειακών πλεγμάτων έγινε με αρχική απόσταση $4 \cdot 10^{-5}$ m και ρυθμό αύξησης αυτής 1.2, τιμές που ορίστηκαν στο φύλλο εισαγωγής δεδομένων.

Για τη δημιουργία του χωρίου κατασκευής του πλέγματος, δημιουργούνται τα υπόλοιπα επιφανειακά πλέγματα που απαιτούνται για τη σύνθεση του κλειστού χωρίου που θα εμπεριέχει κατ' εκτίμηση τα συνεκτικά στρώματα της πτέρυγας. Αρχικά, γίνεται σωστός διαχωρισμός των καμπυλών του εξωτερικού συνόρου των πλεγμάτων εξασφάλισης χαμηλού y^+ , ώστε να δημιουργηθούν κατάλληλα σημεία ένωσης μεταξύ τους και να πραγματοποιηθεί η σχεδίαση επιπρόσθετων καμπύλων που βοηθούν στη σύνθεση όλων των απαραίτητων πλεγμάτων. Έτσι το πρόγραμμα μπορεί να προχωρήσει στη δημιουργία των χωρίων γύρω από την πτέρυγα. Η κατασκευή του structured-like πλέγματος απαιτεί τον ορισμό των ορίων όλων των συνόρων των χωρίων του. Για αυτό δημιουργούνται δύο διαφορετικά χωρία στην πλευρά υποπίεσης και υπερπίεσης της πτέρυγας, που συγκροτούν αθροιστικά το 3Δ πλέγμα που συμπεριλαμβάνει το συνεκτικό στρώμα.



Σχήμα 3.4: (a) Πλέγματα επιφάνειας εξωτερικού τοιχώματος πτέρυγας (b) Πλέγματα οριοθέτησης του συνεκτικού στρώματος (c) Πλέγματα διαχωρισμού χωρίων υπερπίεσης και υποπίεσης (d) Πλέγματα εξασφάλισης χαμηλού y^+ . Σε όλα τα στιγμιότυπα τα εκάστοτε πλέγματα έχουν χρωματιστεί με λευκό χρώμα.

Για την περίπτωση της σχεδιασμένης πτέρυγας τύπου NACA 4507, το πλήθος των σημείων και οι κατανομές αυτών για τις διάφορες καμπύλες που ορίζουν το σχήμα της πτέρυγας (βλέπε Παράρτημα Α') παρουσιάζονται στους πίνακες 3.5 και 3.6.

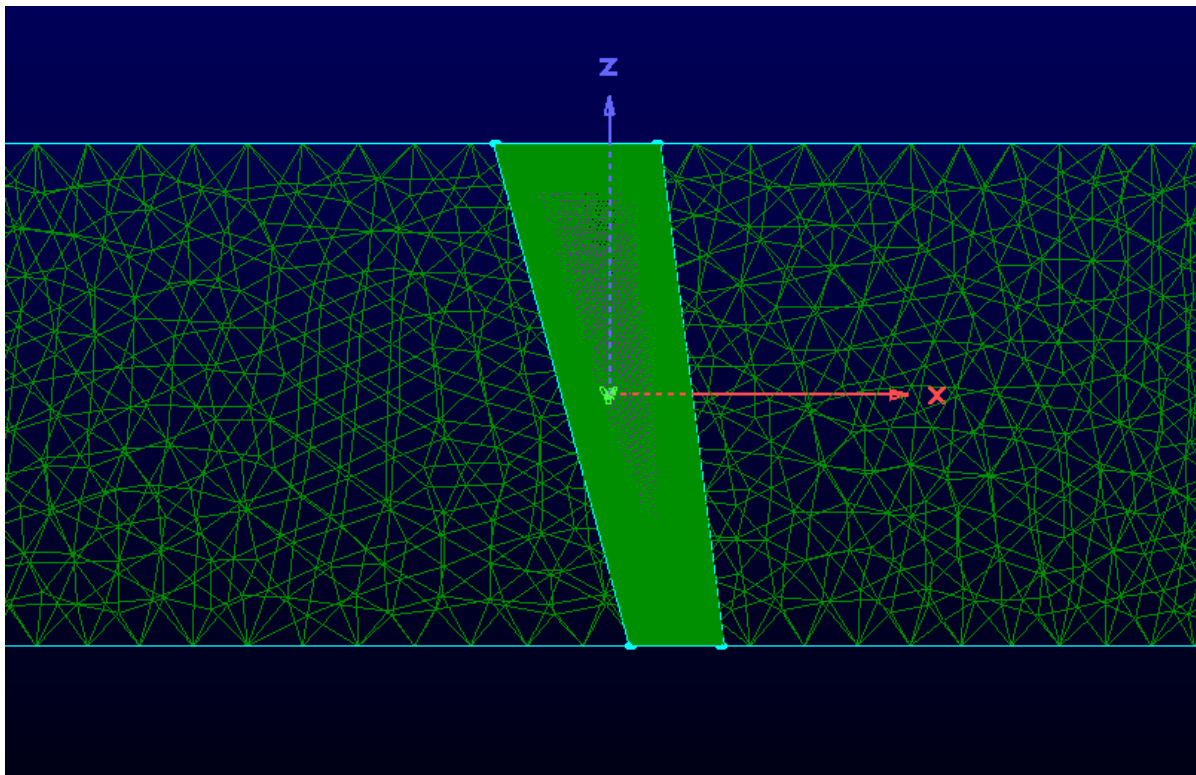
Grid Points	
Wing	300
Airfoils	150
Cylinder Bases	30
Cylinder Connectors	15

Πίνακας 3.5: Πίνακας πλήθους σημείων των καμπυλών της πτέρυγας τύπου NACA 4507

Grid Spacing	
Attack (m)	0.0004
Exit (m)	0.0002
Fuselage (m)	0.0002
Wing Tip (m)	0.0002

Πίνακας 3.6: Πίνακας κατανομής σημείων των καμπυλών της πτέρυγας τύπου NACA 4507

Το πρόγραμμα προχωρά στη δημιουργία των παραπάνω επιφανειακών πλεγμάτων, τα οποία παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4 με λευκό χρώμα. Πρώτα γίνεται η δημιουργία των τεσσάρων πλεγμάτων εξασφάλισης χαμηλού $y+$ στα επίπεδα των αεροτομών βάσης και τέλους, ύστερα των πλεγμάτων οριοθέτησης του συνεκτικού στρώματος της ροής, καθώς και των πλεγμάτων διαχωρισμού αυτών των χωρίων μεταξύ τους, και τέλος των πλεγμάτων που ορίζουν την επιφάνεια της υπό κατασκευή πτέρυγας.



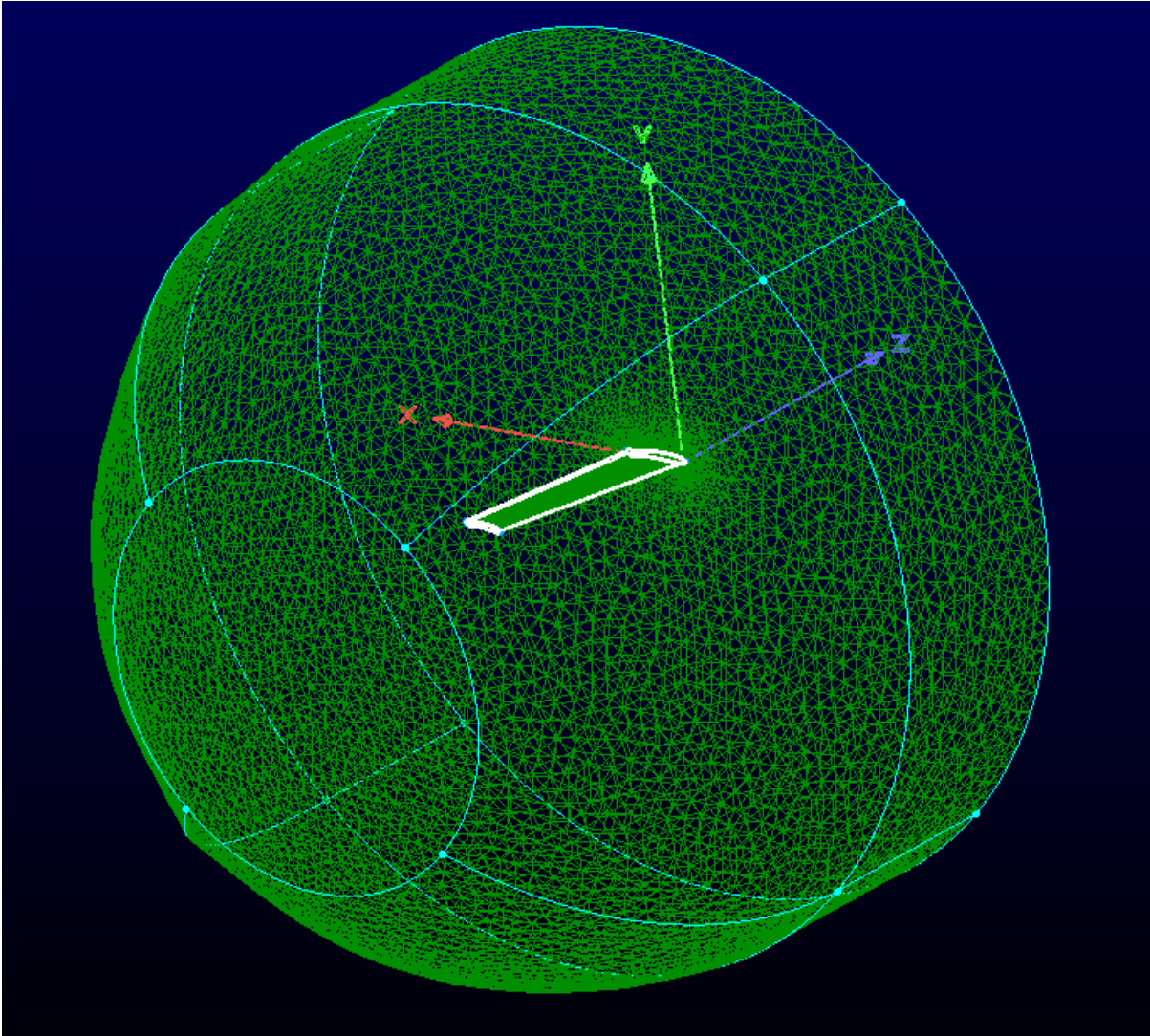
Σχήμα 3.5: Στιγμιότυπο του διαμορφωμένου μοντέλου σε επίπεδο παράλληλο του xz , όπου φαίνεται το πλέγμα του κυλίνδρου και ο τρόπος προσαρμογής των βάσεων του στις καμπύλες των αεροτομών βάσεως και τέλους.

Με την ολοκλήρωση της κατασκευής του πλέγματος που εμπεριέχει το συνεκτικό στρώμα της ροής, το πρόγραμμα συνεχίζει με την πλεγματοποίηση του ευρύτερου χωρίου εξωτερικά της ροής της πτέρυγας. Οι απαιτήσεις ποιότητας των στοιχείων σε αυτό το τμήμα του 3Δ πλέγματος είναι σαφώς μικρότερες, παρόλα αυτά, ο σωστός τρόπος μοντελοποίησης του περιβάλλοντα χώρου είναι απαραίτητος για την παραγωγή 3Δ στοιχείων πλέγματος που να μπορούν να επιλυθούν μέσω της εφαρμογής των εξισώσεων ροής.

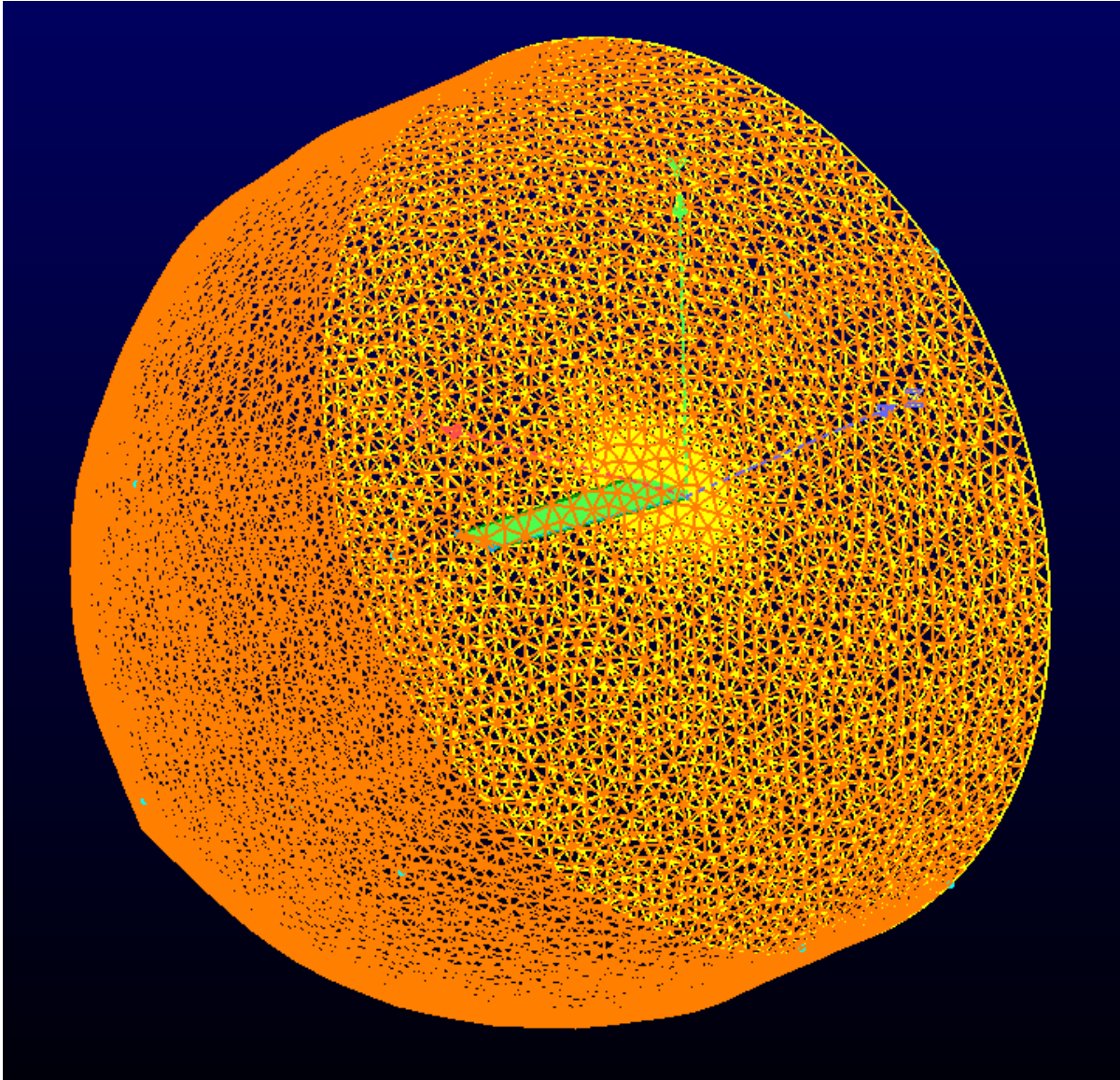
Στο μοντέλο του 3Δ πλέγματος το όριο της ροής αναπαρίσταται με τη χρήση κυλινδρικού και ημισφαιρικού σχήματος. Η πρώτη βάση του κυλίνδρου προσαρμόζεται στο επίπεδο της αεροτομής βάσης, ορίζοντας το όριο της ροής σε σχέση με την άτρακτο του αεροσκάφους, και η δεύτερη προσαρμόζεται στο επίπεδο της αεροτομής τέλους, που το λογισμικό υπολογίζει βάσει του μήκους και της κλίσης της πτέρυγας, για τον περιορισμό του πλέγματος της ροής πριν την γωνία παραγωγής προβληματικών 3Δ στοιχείων. Ο τρόπος μοντελοποίησης του ευρύτερου περιβάλλοντος της ροής παρουσιάζεται σε κάτοψη στο σχήμα 3.5 για παρατήρηση του τρόπου ταύτισης των βάσεων του με τα συγκεκριμένα σχεδιαστικά στοιχεία του πλέγματος. Το πλέγμα του σχήματος 3.5 είναι του εξεταζόμενου παραδείγματος, με κύλινδρο ακτίνας 3m. Το 3Δ πλέγμα είναι μη-δομημένου τύπου. Στη συνέχεια το λογισμικό προσαρμόζει τα επιφανειακά πλέγματα των βάσεων του κυλίνδρου στο υπάρχον χωρίο του συνεκτικού στρώματος για να μην υπάρχει αλληλοεπικάλυψη χωρίων, και ολοκληρώνει την κατασκευή του πλέγματος με την προσαρμογή ημισφαιρίου στην βάση του κυλίνδρου που εφαρμόζει η αεροτομή τέλους, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6.

Το λογισμικό συνεχίζει με τον ορισμό και την πλήρωση του συνολικού χωρίου του πλέγματος. Τα χωρία ορίζονται όπως αυτά παρουσιάστηκαν προηγουμένως, επιλέγοντας τα επιφανειακά πλέγματα τα οποία τα αποτελούν. Στην περίπτωση του structured-like πλέγματος του συνεκτικού στρώματος, με τον ορισμό του προκύπτουν κατευθείαν τα 3Δ στοιχεία που το συνθέτουν, αφού η διαστασιολόγηση και ο προσδιορισμός τους γίνονται εύκολα βάσει των διαστάσεων των εμπλεκόμενων επιφανειακών πλεγμάτων. Στην περίπτωση του υπόλοιπου μη-δομημένου πλέγματος, επειδή ο ορισμός του πλήθους και της κατανομής των καμπύλων που το ορίζουν δεν καθορίζει μονοσήμαντα τον τρόπο κατασκευής των 3Δ στοιχείων του, γίνεται με την εκτέλεση ξεχωριστής εντολής που παράγει 3Δ στοιχεία.

Το μόνο στάδιο που απομένει για τη λήψη του αρχείου του τελικού πλέγματος είναι η επιβολή οριακών συνθηκών στα επιφανειακά πλέγματα στο όριο. Οι κατηγορίες οριακών συνθηκών που πρέπει να επιβληθούν στα επιφανειακά πλέγματα του μοντέλου για την ολοκληρωμένη περιγραφή του είναι τρεις. Αρχικά είναι τα στερεά τοιχώματα της πτέρυγας (Wing), ύστερα είναι το επίπεδο συμμετρίας (Symmetry), και τέλος είναι τα επ' άπειρον όρια του χωρίου (FarField). Με τον χαρακτηρισμό των αντίστοιχων πλεγμάτων που αποτελούν τις παραπάνω γεωμετρίες και επιφάνειες όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7, ολοκληρώνεται η διαδικασία γένεσης πλέγματος και γίνεται η εξαγωγή των απαραίτητων αρχείων για την εκκίνηση της διαδικασίας επίλυσης από τον επιλύτη PUMA της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ.



Σχήμα 3.6: Το τελικό πλέγμα που αποτελείται από το πλέγμα που εμπεριέχει το συνεκτικό στρώμα (λευκό χρώμα) και το πλέγμα της ευρύτερης ροής. Το πλέγμα που εμπεριέχει το συνεκτικό στρώμα αφορά κοντινές αποστάσεις από τα τοιχώματα της πτέρυγας και για αυτό φαίνεται να ταυτίζεται με το εξωτερικό τοίχωμά της, πράγμα που προφανώς δεν ισχύει.



Σχήμα 3.7: Χρωματική απεικόνιση των οριακών συνθηκών που επιβάλλονται. Κίτρινο: Επίπεδο συμμετρίας, Πορτοκαλί: Εξωτερικά απομακρυσμένα σύνορα της ροής, Πράσινο: Τοιχώματα πτέρυγας.

Κεφάλαιο 4

Επίλυση Ροής

Τρίτο στάδιο της διαδικασίας αερο-δομικής ανάλυσης αποτελεί η επίλυση του 3Δ πλέγματος ροής που κατασκευάστηκε από το PointWise όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Με τη χρήση συγκεκριμένου προγράμματος από εξ αποστάσεως σύνδεσης Linux συστημάτων, το MobaXterm, το λογισμικό συνδέεται στον εξυπηρετητή της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ, επικοινωνεί τα απαραίτητα αρχεία, κάνει τις κατάλληλες μετατροπές, και στη συνέχεια εκκινεί τον επιλύτη ροής PUMA [8] [9] της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ για την επίλυση του μοντέλου. Αποτέλεσμα της επίλυσης της ροής αποτελεί ανάμεσα πολλών άλλων, το σύνολο των αεροδυναμικών δυνάμεων που ασκούνται στην επιφάνεια της πτέρυγας.

Σχετικά με το στάδιο επίλυσης της ροής με τη χρήση του PUMA της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ, η εργασία ασχολήθηκε κατά κόρον με την εγκαθίδρυση επικοινωνίας μεταξύ του εξυπηρετητή για τη μεταφορά του 3Δ πλέγματος και τον ορισμό των επιθυμητών συνθηκών επίλυσης της ροής. Επομένως, το μεγαλύτερο κομμάτι της δουλειάς που έγινε στο συγκεκριμένο στάδιο της διαδικασίας έχει κυρίως οργανωτικό χαρακτήρα, αφού η καθ' αυτή επίλυση της ροής πραγματοποιείται με τη χρήση του ήδη αναπτυγμένου επιλύτη PUMA. Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί επιγραμματική παρουσίαση της διαδικασίας, χωρίς εμβάθυνση στον τρόπο υπολογισμού των μεγεθών της ροής από τον PUMA, αφού αυτό ξεφεύγει της συμβολής του γράφοντος.

Ο επιλύτης PUMA ως ένα ήδη αυτοτελές εργαλείο επίλυσης μοντέλων ροής, διαθέτει δική του διεπιφάνεια ορισμού των παραμέτρων των οποίων χρησιμοποιεί για τη περάτωση αυτής της λειτουργίας, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα στάδια της διαδικασίας της αερο-δομικής ανάλυσης. Τα αρχεία που απαιτούνται για την περιγραφή και επίλυση της ροής από τον PUMA είναι τρία αρχεία γενικού τύπου δεδομένων που εμπεριέχουν το κάθε 3Δ στοιχείο, το πλήθος και τις συντεταγμένες

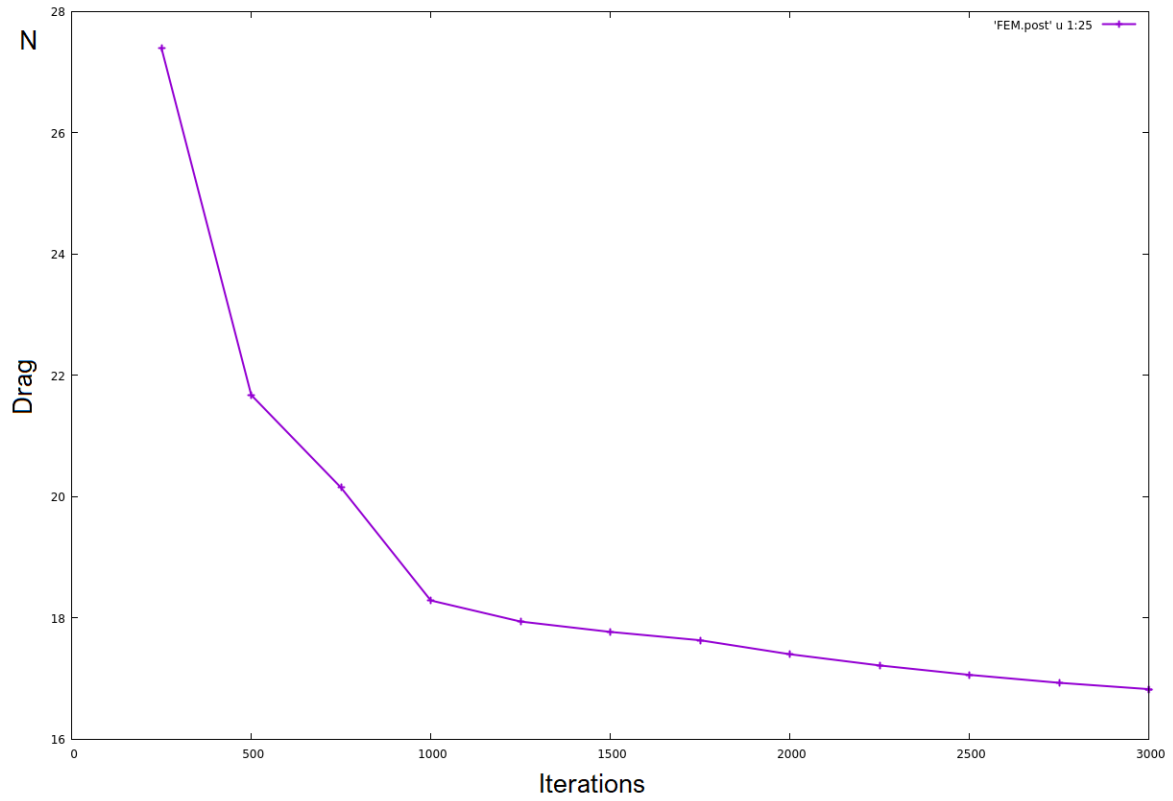
των κόμβων και τις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν όρια της ροής του μοντέλου (hyb,nod,patch) για τα οποία υπάρχουν ήδη αναπτυγμένα εργαλεία για την παραγωγή τους από το πλέγμα που παρήχθη βάσει της μεθοδολογίας του προηγούμενο κεφαλαίου.

Για αυτόν τον λόγο, στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων του ανεπτυγμένου λογισμικού υπάρχουν καρτέλες ορισμού παραμέτρων σχεδίασης, πλέγματος και δομικής ανάλυσης, αλλά όχι στοιχείων ροής του μοντέλου. Αντ' αυτού η εισαγωγή των τιμών των παραμέτρων επίλυσης της ροής γίνεται κατευθείαν με το αρχείο το οποίο που έχει δημιουργηθεί για τη διαδικασία του PUMA. Για περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τα αρχεία εισόδου του επιλύτη PUMA και του τρόπου συμπλήρωσης και δημιουργίας τους μπορεί κανείς να καταφύγει στο εγχειρίδιο χρήσης του για αναλυτική παρουσίασή τους [10].

Επομένως, το λογισμικό λαμβάνει το τελικό αρχείο πλέγματος της πτέρυγας και συνδέεται στον εξυπηρετητή της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ.. Το λογισμικό συνδέεται στον ανάλογο επεξεργαστή κάρτας γραφικών όπως είχε ορίσει ο χρήστης κατά την εκκίνηση της διαδικασίας και ξεκινάει την επίλυση της ροής μέσω του PUMA. Ο προκαθορισμός του επεξεργαστή κάρτας γραφικών στην επίλυση της ροής δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα να ελέγξει με ποια κάρτα θα γίνει η επίλυση.

Ο επιλύτης ροής ξεκινά τη διαδικασία επίλυσης με την χρήση των εξισώσεων Euler. Για τον υπολογισμό της απόστασης των στερεών τοιχωμάτων χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδος Fast Marching και η ολοκλήρωση πραγματοποιείται με μέθοδο Runge – Kutta, τάξεως ρυθμιζόμενης από το χρήστη. Η επίλυση γίνεται σε πεπερασμένους όγκους κεντροκομβικής διατύπωσης. Όλα τα σχήματα που παράγονται είναι 2^{15} τάξης ακρίβειας και η επίλυση πραγματοποιείται σε επεξεργαστές καρτών γραφικών NVIDIA.

Η επίλυση της ροής γύρω από την πτέρυγα αεροτομής NACA 4507 πραγματοποιήθηκε για επ' άπειρον ταχύτητα ροής $u = 40$ m/s, πίεση $p_i = 101325$ Pa και θερμοκρασία $T = 288$ K. Η επίλυση της ροής πραγματοποιήθηκε από τον PUMA σε GPU Tesla K40m μνήμης 11,2GB της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ, με συνολικό αριθμό 3000 επαναλήψεων και 3^{15} τάξεως μέθοδο ολοκλήρωσης Runge – Kutta, όπου η τιμή $y+$ προέκυψε πάντα μικρότερη του 1,3 κατά την επίλυση. Τα αποτελέσματα δεν συνέκλιναν απόλυτα, όμως υπάρχει ένδειξη σταδιακή τους σύγκλισης εάν αυξανόταν ο αριθμός επαναλήψεων, όπως φαίνεται στο διάγραμμα οπισθέλκουσας της πτέρυγας συναρτήσει του αριθμού επαναλήψεων του σχήματος 4.1. Το υπόλοιπο των εξισώσεων μπορούσε να κατέλθει και περαιτέρω, αλλά επειδή η εκτέλεση του λογισμικού έγινε για σκοπούς επίδειξης, επιλέχθηκε μικρότερος αριθμός επαναλήψεων για περιορισμό του υπολογιστικού κόστους.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ρυθμού μεταβολής οπισθέλκουσας συναρτήσει του αριθμού επαναλήψεων επίλυσης της ροής για την πτέρυγα τύπου NACA 4507 όπου φαίνεται ένδειξη σταδιακής σύγκλισης των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 5

Δομική Ανάλυση

Με τον υπολογισμό της ροής γύρω από το μοντέλο της πτέρυγας, το λογισμικό πλέον έχει λάβει τις αεροδυναμικές δυνάμεις που επενεργούν πάνω στην επιφάνεια της πτέρυγας και μπορεί να προχωρήσει στη δομική ανάλυσή της βάσει αυτών. Αντλώντας την πίεση ανά στοιχείο του 3D πλέγματος που έχει επιλυθεί, τις μεταφέρει στο τοπικό μηχάνημα και θέτει σε λειτουργία το SolidWorks για την προετοιμασία συγκεκριμένων τμημάτων για τη δομική ανάλυση και τη σύνθεση της προσομοίωσης μέσω της οποίας αυτή θα διεξαχθεί. Σε πρώτο στάδιο, το πρόγραμμα ανοίγει το μοντέλο του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας και πραγματοποιεί συγκεκριμένες σχεδιαστικές αλλαγές μέσω των οποίων ορίζει τις επιφάνειες εφαρμογής των αεροδυναμικών δυνάμεων για να μπορέσουν να οριστούν πλήρως όλα τα χαρακτηριστικά της στατικής προσομοίωσης. Το λογισμικό κατασκευάζει, στη συνέχεια το περιβάλλον της μη-γραμμικής στατικής προσομοίωσης, ορίζοντας για τα επιμέρους τμήματα της πτέρυγας τους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας κίνησης, ασκούμενες αεροδυναμικές δυνάμεις και ρυθμίσεις που αφορούν το σύνολο της διάταξης και τον τρόπο διεξαγωγής της διαδικασίας. Οι παραπάνω ενέργειες πραγματοποιούνται με την εκτέλεση συγκεκριμένων πακέτων εντολών γλώσσας VBA. Η ανάλυσή της θα χωριστεί σε δύο κεφάλαια: του τρόπου επικοινωνίας των αεροδυναμικών δυνάμεων μεταξύ πλέγματος FEM – CFD, εφόσον τα δύο πλέγματα είναι non-matching, και της διεξαγωγής της μη-γραμμικής στατικής προσομοίωσης.

Όπως στα στάδια σχεδίασης της πτέρυγας και παραγωγής του πλέγματος της ροής, έχει παρομοίως αναπτυχθεί διαδικασία παραμετροποίησης των βασικών ορισμάτων του τρόπου αντιστοίχισης των αεροδυναμικών δυνάμεων στην επιφάνεια της πτέρυγας (και κατ' επέκταση του 3D πλέγματος FEM) και του τρόπου διεξαγωγής της μη-γραμμικής στατικής προσομοίωσης, για τη ρύθμισή τους βάσει των προτιμήσεων του χρήστη. Συγκεκριμένα, είναι εφικτή η αλλαγή του πλήθους των

περιοχών στις οποίες διαμοιράζεται η επιφάνεια της πτέρυγας για την περιγραφή του φαινομένου της ροής, των χαρακτηριστικών του νέου 3D πλέγματος της διάταξης της πτέρυγας, της μη γραμμικής στατικής προσομοίωσης και των κριτηρίων σύγκλισης της. Η παραμετροποίηση της διαδικασίας αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για τη χρησιμότητα και την αποτελεσματικότητα του ανεπτυγμένου λογισμικού. Το πλήθος των περιοχών αντιστοίχισης των αεροδυναμικών δυνάμεων αφορά την επικοινωνία μεταξύ ρευστοδυναμικής (CFD) και δομικής ανάλυσης (FEM), δηλαδή των αεροδυναμικών δυνάμεων στο στατικό μοντέλο. Ουσιαστικά, οι παραπάνω περιοχές λειτουργούν ως ενδιάμεσο στάδιο για την αναγωγή των αεροδυναμικών δυνάμεων των στοιχείων του πλέγματος CFD σε αυτό του FEM, αφού δεν αποτελούνται από τους ίδιους κόμβους.

5.1 Επικοινωνία Αεροδυναμικών Δυνάμεων

Η ολοκλήρωση της ρευστοδυναμικής ανάλυσης της ροής της πτέρυγας ισοδυναμεί με τη λήψη των αεροδυναμικών δυνάμεων στην επιφάνεια της πτέρυγας, στα επιφανειακά στοιχεία δηλαδή των στερεών τοιχωμάτων του 3D πλέγματος της ροής. Για τη διεξαγωγή όμως της διαδικασίας της δομικής ανάλυσης, πρέπει αυτές οι δυνάμεις να μεταφερθούν σωστά στην επιφάνεια της πτέρυγας κατά τη δομική ανάλυση (SolidWorks). Η δομική ανάλυση απαιτεί τη δημιουργία διαφορετικού 3D πλέγματος που αφορά τη δομή της πτέρυγας, το οποίο πρέπει να παραχθεί με τα δικά του χαρακτηριστικά. Επομένως τα δύο πλέγματα είναι non-matching μεταξύ τους και για αυτό το λόγο προκύπτει η ανάγκη ανάπτυξης διαδικασίας ανίχνευσης και αντιστοίχισης των αεροδυναμικών δυνάμεων στην επιφάνεια του πλέγματος της δομικής ανάλυσης. Με τη χρήση της θέσης των 3D στοιχείων, του προσανατολισμού τους, της συνολικής τους επιφάνεια και των αεροδυναμικών δυνάμεων σε καθένα από αυτά, γίνεται αντιστοίχιση των αεροδυναμικών δυνάμεων στις αντίστοιχες περιοχές του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας.

Ο τρόπος απόδοσης των αεροδυναμικών δυνάμεων στην επιφάνεια της πτέρυγας ακολουθεί ειδική διαδικασία, αφού δεν γίνεται να γίνει αντιστοίχισή τους απευθείας μεταξύ των στοιχείων του 3D πλέγματος ροής και πτέρυγας. Το πλέγμα του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας στη δομική ανάλυση διαφέρει από το πλέγμα της αντίστοιχης επιφάνειας στο CFD πλέγμα. Επομένως είναι απαραίτητη η εφαρμογή μιας τεχνικής η οποία μπορεί να λαμβάνει ως είσοδο τις θέσεις και τις αεροδυναμικές δυνάμεις των στοιχείων του 3D CFD πλέγματος, και να δίνει ως έξοδο τις τιμές αυτών σε επαφή πλέγμα της δομικής ανάλυσης.

Η αντιστοίχιση αυτή επιτυγχάνεται με τον επιμερισμό της συνολικής επιφάνειας του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας, και την ένταξη των αεροδυναμικών δυνάμεων στα στοιχεία του πλέγματος FEM που εμπίπτουν στην αντίστοιχη σχεδιαστική περιοχή της πτέρυγας. Ειδικότερα η επίλυση της ροής έχει οδηγήσει στην εύρεση αεροδυναμικών δυνάμεων ανά στοιχείο του πλέγματος CFD στην επιφάνεια της πτέρυγας. Το λογισμικό λαμβάνει το εμβαδό, την θέση και τις ασκούμενες δυνάμεις σε καθένα από αυτά τα στοιχεία. Η αντιστοίχιση των στοιχείων πλεγμάτων FEM – CFD προφανώς δεν είναι 1-1 (non-matching). Η επιφάνεια της πτέρυγας επιμερίζεται σε μικρότερες περιοχές (σχεδιαστικά – δεν δημιουργείται FEM σε αυτό το στάδιο) στις οποίες βάσει απόστασης εντάσσονται αναλόγως οι αεροδυναμικές δυνάμεις του συνόλου των

στοιχείων του CFD πλέγματος. Λαμβάνοντας το μέσο όρο αυτών, προκύπτει η τιμή και κατεύθυνση των ασκούμενων αεροδυναμικών δυνάμεων των στοιχείων του πλέγματος FEM που θα βρίσκονται σε εκείνη την επιμερισμένη περιοχή της πτέρυγας. Η διαδικασία πραγματοποιείται εντός του SolidWorks από κώδικα VBA.

Η πρώτη σχεδιαστική αλλαγή στην επιφάνεια του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας που πραγματοποιείται από το SolidWorks είναι ο διαχωρισμός της επιφάνειας του εξωτερικού τοιχώματος σε δύο διαφορετικές επιφάνειες, της πλευράς υπερπίεσης και υποπίεσης αντίστοιχα, ενέργεια πολύ σημαντική για τον σωστό επιμερισμό της επιφάνειας της πτέρυγας, διότι αυτές ορίζονται με την προβολή 2Δ σχεδίου στο επίπεδο xz στην επιφάνεια του εξωτερικού τοιχώματος. Αφού εφαρμοστεί η ανωτέρω μεθοδολογία για τη σωστή οριοθέτηση των επιμερισμένων περιοχών, το πρόγραμμα δημιουργεί το σχέδιο βάσει του οποίου θα γίνει η αντιστοίχιση των αεροδυναμικών δυνάμεων στην επιφάνεια της πτέρυγας. Αρχικά γίνεται σχεδίαση ανάλογου ορθογωνίου στο επίπεδο xz όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το οποίο πλαισιώνει τη διάταξη της πτέρυγας, και μετά σχεδιάζονται εντός αυτού επιπλέον ευθύγραμμα τμήματα τα οποία το χωρίζουν στις διαφορετικές περιοχές που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο προσομοίωσης. Οι γραμμές του εσωτερικού σχεδίου τύπου πλέγματος που είναι παράλληλες με τον άξονα x'x απέχουν κατά ίση απόσταση μεταξύ τους ανεξαρτήτως κλίσης της πτέρυγας, και οι γραμμές μεταξύ αεροτομής βάσης – τέλους τοποθετούνται έτσι ώστε τα σημεία εκκίνησης και τερματισμού τους να απέχουν ίση απόσταση μεταξύ τους, για τη διαμόρφωση ενός συνολικά ομοιόμορφο επιμερισμό της επιφάνειας της πτέρυγας. Ορίζοντας τα αρχικά και τελικά σημεία των πρώτων ως A_i και B_i , των δεύτερων ως C_j και D_j , αυτά δίνονται από τους παρακάτω τύπους για τους δύο διαφορετικούς τύπους ευθύγραμμων τμημάτων:

$$A_i = (x, y, z_i) = \left(-5t, 0, \frac{i}{n} \cdot \sqrt{l_H^2 \cdot \cos^2 \varphi_X - \varepsilon_T^2} \right) , \quad i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (5.1)$$

$$B_i = (x, y, z_i) = \left(l_{\alpha, \tau}^X + l_H^X \cdot \sin \varphi_X + 5t, 0, \frac{i}{n} \cdot \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4(1 + a_l^2) \cdot c_1}}{2(1 + a_l^2)} \right)$$

$$i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (5.2)$$

$$C_j = (x_j, y, z) = \left(\frac{l_{\alpha, \beta}^X \cdot j}{m}, 0, 0 \right) , \quad j = 0, 1, \dots, m \quad (5.3)$$

$$D_j = (x_j, y, z) = \left(\frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4(1 + a_l^2) \cdot c_1}}{2(1 + a_l^2)} \cdot \frac{j}{m} + l_H^X \cdot \sin \varphi_X, 0, \sqrt{l_H^2 \cdot \cos^2 \varphi_X - \varepsilon_T^2} \right)$$

$$j = 0, 1, \dots, m \quad (5.4)$$

όπου:

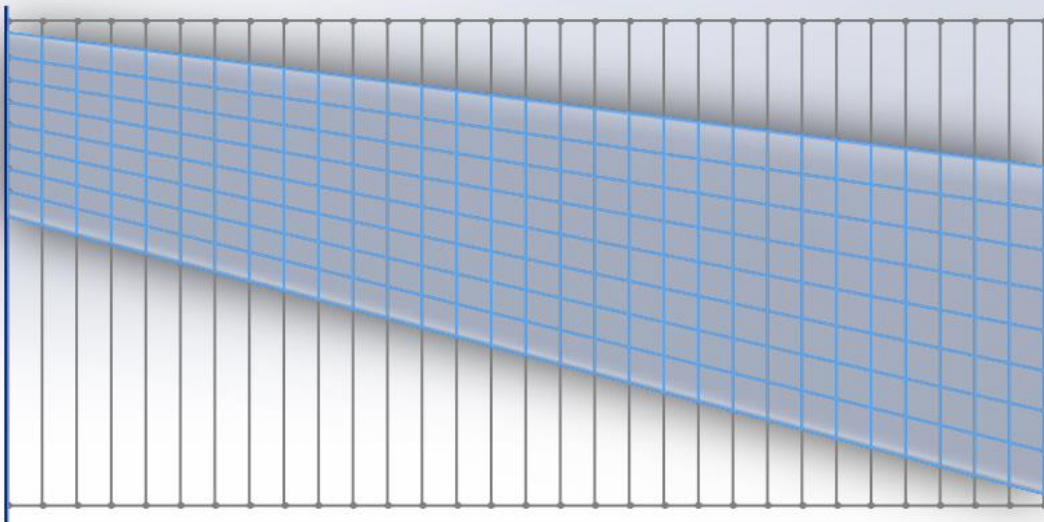
$$b_1 = -2d_{\alpha,\tau} + 2a_{l,i}b_{l,i} - 2a_{l,i}y_{0\tau} \quad (5.5) \quad , \quad c_1 = d_{\alpha,\tau}^2 + b_l^2 - 2b_ly_{0\tau} + y_{0\tau}^2 - l_{\alpha,\tau}^x \quad (5.6)$$

$$y_l = a_l x + b_l \quad (5.7)$$

$$a_l = \tan(\theta_X) \quad (5.8) \quad , \quad b_l = \frac{y_{0\tau}}{\tan(\theta_X) \cdot d_{\alpha,\tau}} \quad (5.9)$$

- t : Πάχος του εξωτερικού τοιχώματος που έχει ορίσει ο χρήστης (m)
- l_H^X : Μήκος πτέρυγας που έχει ορίσει ο χρήστης (m)
- $l_{\alpha,\beta}^X$: Μήκος αεροτομής βάσης που έχει ορίσει ο χρήστης (m)
- $l_{\alpha,\tau}^X$: Μήκος αεροτομής τέλους που έχει ορίσει ο χρήστης (m)
- φ_X : Γωνία ακμών προσβολής πτέρυγας – επιπέδου yz που έχει ορίσει ο χρήστης
- θ_X : Γωνία περιστροφής αεροτομής τέλους – επιπέδου xz που έχει ορίσει ο χρήστης
- n : Πλήθος περιοχών κατανομής πίεσης κατά μήκος ακμής προσβολής
- m : Πλήθος περιοχών κατανομής πίεσης κατά μήκος αεροτομών βάσης – τέλους

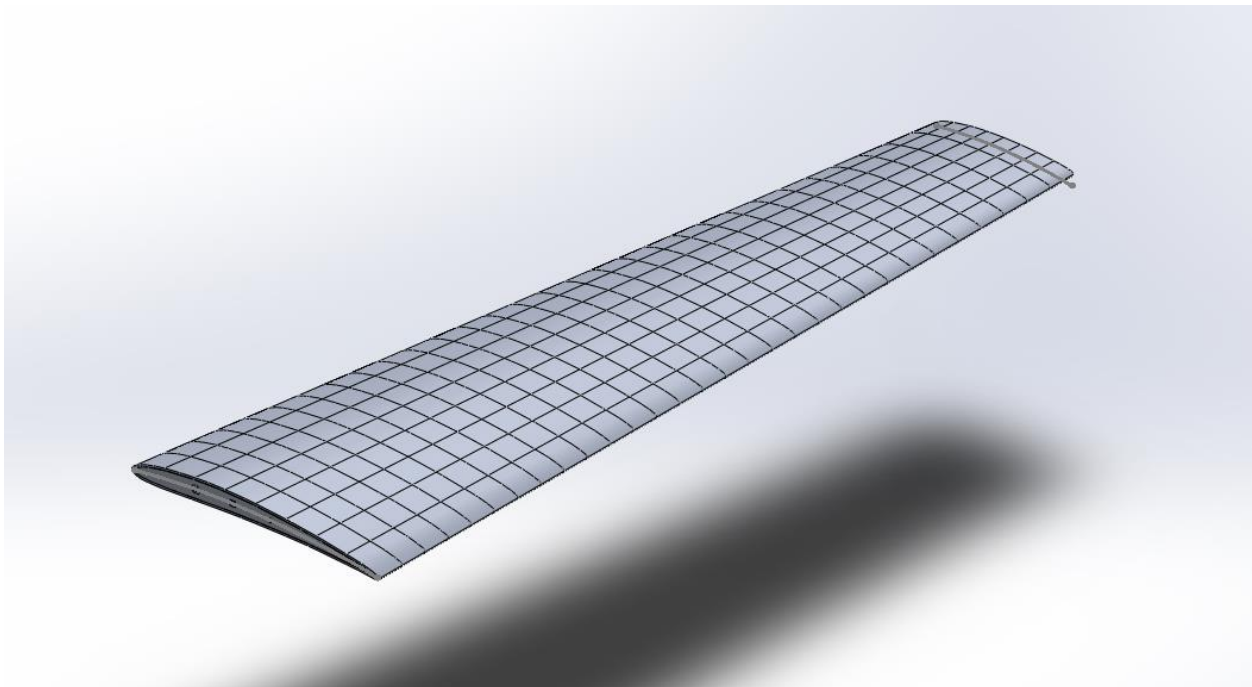
Όπως φαίνεται και από τις μεταβλητές που συμπεριλαμβάνονται στην τυπολογία, η τοποθεσία των σημείων λαμβάνει υπόψη όλες τις παραμέτρους που λαμβάνει ο χρήστης, αλλά και την παραμόρφωση της πτέρυγας, κατά τη διάρκεια της αερο-δομικής σύγκλισης. Αναπαράσταση αποτελέσματος της παραπάνω τυπολογίας παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1 όπου φαίνονται η αναλογίες μεταξύ των σχεδιαστικών οντοτήτων.



Σχήμα 5.1: Κάτοψη σχεδίασης του ορθογωνίου καθορισμού των περιοχών κατανομής πίεσης της ροής που προέκυψαν από την επίλυση του 3D πλέγματος.

Το πλήθος των περιοχών που ορίζονται με το παραπάνω σχέδιο τύπου πλέγματος αποτελεί ένα επίσης παραμετροποιημένο μέγεθος το οποίο μπορεί να καθορίσει ο εκάστοτε χρήστης. Στην

καρτέλα του φύλλου εισαγωγής δεδομένων που βρίσκονται οι παράμετροι της δομικής ανάλυσης, μπορεί να οριστεί το πλήθος των περιοχών κατά μήκος της ακμής προβολής και των αεροτομών βάσης – τέλους αντίστοιχα, το γινόμενο των οποίων προφανώς είναι ο συνολικός αριθμός των επιμερισμένων περιοχών αντιστοίχισης. Μέσω του πλήθους αυτών, καθορίζεται η λεπτομέρεια αντιστοίχισης των αεροδυναμικών δυνάμεων, που διαμορφώνεται αντίστοιχα το υπολογιστικό κόστος, αλλά και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Με τη μείωση του πλήθους ενδέχεται να υπάρξει υπεραπλούστευση του τρόπου αναπαράστασης των αεροδυναμικών δυνάμεων, αλλά μειώνεται το υπολογιστικό κόστος, και αντίστροφα. Το αποτέλεσμα επιμερισμού της επιφάνειας του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας φαίνεται στο σχήμα 5.2 για την μελετώμενη πτέρυγα NACA 4507 με συνολικά 480 επιμερισμένες επιφάνειες, 16 κατά μήκος της αεροτομής βάσης και 30 κατά μήκος της ακμής προβολής της ροής της πτέρυγας.

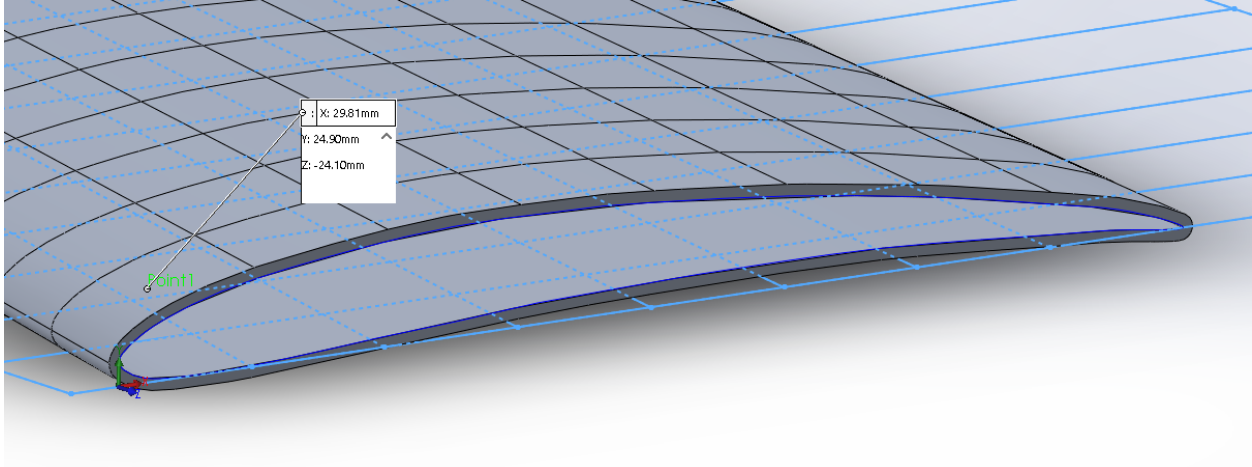


Σχήμα 5.2: Επιμερισμένες περιοχές της επιφάνειας της πτέρυγας τύπου NACA 4507, σύμφωνα με τις οποίες θα γίνει η αντιστοίχιση των αεροδυναμικών δυνάμεων.

Οι επιμερισμένες περιοχές αντιστοίχισης των αεροδυναμικών δυνάμεων έχουν οριστεί πλήρως, αλλά για την αξιοποίησή τους ως μεταβατικού επιπέδου μεταξύ ρευστοδυναμικής – δομικής ανάλυσης απαιτείται η γνώση της θέσης και της επιφάνειας που ορίζουν αυτές όταν προβληθούν στο εξωτερικό τοίχωμα της πτέρυγας. Μέσω της θέσης τους υπολογίζεται σε ποια περιοχή αντιστοιχεί το κάθε επιφανειακό στοιχείο του πλέγματος CFD και επομένως και τα αεροδυναμικά του μεγέθη. Η ανάλυση ακολουθεί τη λογική της απόστασης σημείων, λόγω της ικανοποιητικής της ακρίβειας και της αποφυγής χρήσης των 3D εξισώσεων που ορίζουν τις επιφάνειες των περιοχών της πτέρυγας. Η εύρεση των θέσεων των επιμερισμένων περιοχών γίνεται με τη χρήση εντολών των βιβλιοθηκών του SolidWorks μετά από επιλογή τους στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος. Ύστερα τα απαιτούμενα δεδομένα αντλούνται για το σύνολο των επιμερισμένων επιφανειών προγραμματιστικά, μεταθέτοντας το πρόβλημα υπολογισμού της συντεταγμένης y του κέντρου, αλλά και του εμβαδού, μιας 3D επιφάνειας συνεχούς μεταβαλλόμενης αεροτομής στο

σχεδιαστικό πρόγραμμα. Η διαφορά μεταξύ του σχεδίου επιμερισμού της πτέρυγας και των επιφανειών που ορίζονται πάνω στην πτέρυγα και επικρατούν οι ίδιες αεροδυναμικές δυνάμεις φαίνεται στο σχήμα 5.3.

Η διαδικασία υπολογισμού του ζεύγους συντεταγμένων (x,z) για την επιλογή των επιμερισμένων



Σχήμα 5.3: Κέντρο πρώτης επιμερισμένης επιφάνειας μέσω του σχεδίου επιμερισμού (μπλε) για την κατανόηση χρήσης των συντεταγμένων x,z για την εύρεση της συντεταγμένης y και του εμβαδού A της κάθε επιμερισμένης περιοχής.

περιοχών αποτελεί ουσιαστικά εύρεση του σημείου τομής δύο ευθειών στο 2Δ επίπεδο xz. Γνωρίζοντας τους τύπους τοποθέτησης των σημείων (5.1) - (5.4) για τη διαμόρφωση των ευθύγραμμων τμημάτων του σχεδίου, εκτελείται επαναληπτικός βρόχος ο οποίος υπολογίζει τις παραμέτρους των δύο ευθειών που ορίζουν τη μέση απόσταση μεταξύ των ευθύγραμμων τμημάτων A_iB_i και C_jD_j των εκάστοτε δεικτών. Με την εξίσωση των τύπων των δύο ευθειών, οι τελικές τιμές των συντεταγμένων των κέντρων των επιμερισμένων περιοχών είναι:

$$x_{Mi,j} = \frac{c_i - b_j}{a_j} \quad (5.10) \quad , \quad z_{Mi} = c_i \quad (5.11) \quad , \quad i = 1,2, \dots, n \quad , \quad j = 1,2, \dots, m$$

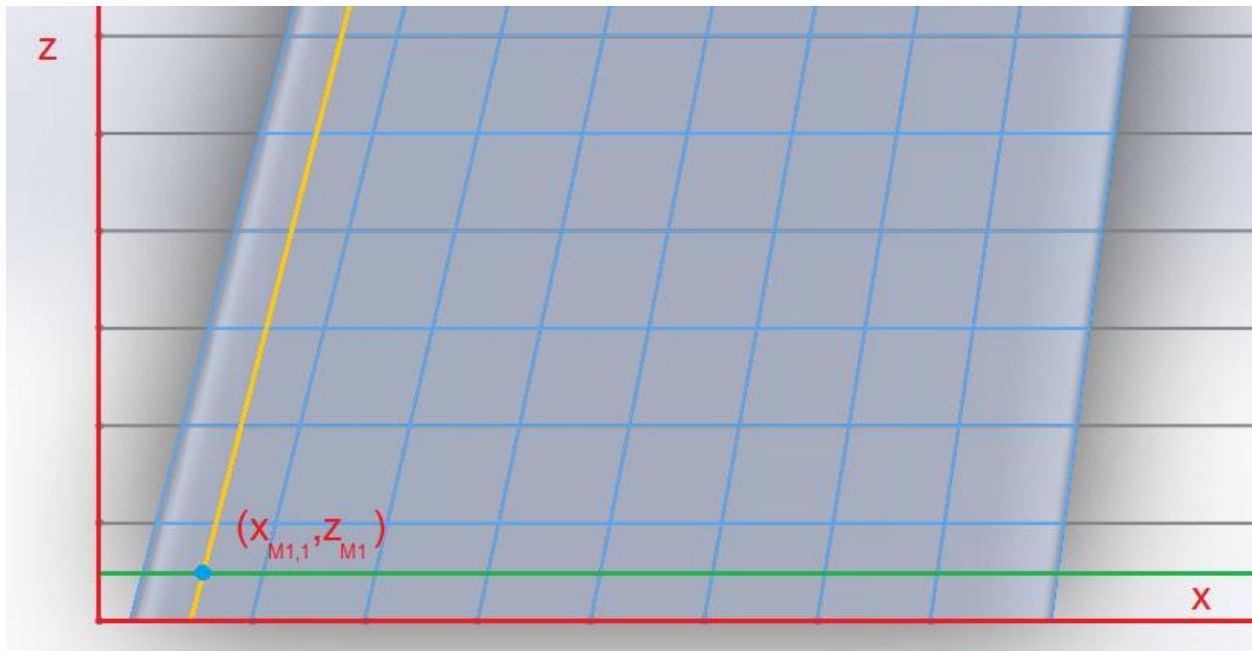
$$a_j = -\frac{\sqrt{l_{\Pi}^2 \cdot \cos^2 \varphi_X - \varepsilon_T^2}}{z_{M2,j} - z_{M1,j}} \quad (5.12) \quad , \quad b_j = \frac{\sqrt{l_{\Pi}^2 \cdot \cos^2 \varphi_X - \varepsilon_T^2}}{z_{M2,j} - z_{M1,j}} \cdot z_{M1,j} \quad (5.13)$$

$$c_i = -\frac{(2i - 1) \sqrt{l_{\Pi}^2 \cdot \cos^2 \varphi_X - \varepsilon_T^2}}{2n} \quad (5.14)$$

$$z_{M1,j} = \frac{(2j - 1) l_{\alpha,\beta}^X}{2m} \quad (5.15)$$

$$z_{M2,j} = \frac{(2j - 1)}{2m} \cdot \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4(1 + a_1^2) \cdot c_1}}{2(1 + a_1^2)} \cdot \frac{j}{m} + l_{\Pi}^X \cdot \sin \varphi_X \quad (5.16)$$

Σχεδιαστική αναπαράσταση των ευθειών που αναλύθηκαν και του αντίστοιχου σημείου τομής τους παρουσιάζεται στο σχήμα 5.4 για τιμές $i=1, j=1$. Στη διαδικασία προσδιορισμού των κέντρων των περιοχών, παρατηρείται ότι στην εξίσωση (5.15) χρησιμοποιείται το μήκος της αεροτομής βάσης, ενώ στην εξίσωση (5.16) ο τύπος εμπλέκει το μήκος της αεροτομής τέλους και την σχεδιαστική γωνία περιστροφής της γύρω από την ακμή προσβολής της ροής, όπως φαίνεται και στην εξίσωση (5.4), λόγω της επιρροής μεγεθών που ορίστηκαν προηγουμένως στις εξισώσεις (5.1) – (5.9) στη θέση και στον προσανατολισμό της αεροτομής τέλους (φ_x, θ_x).

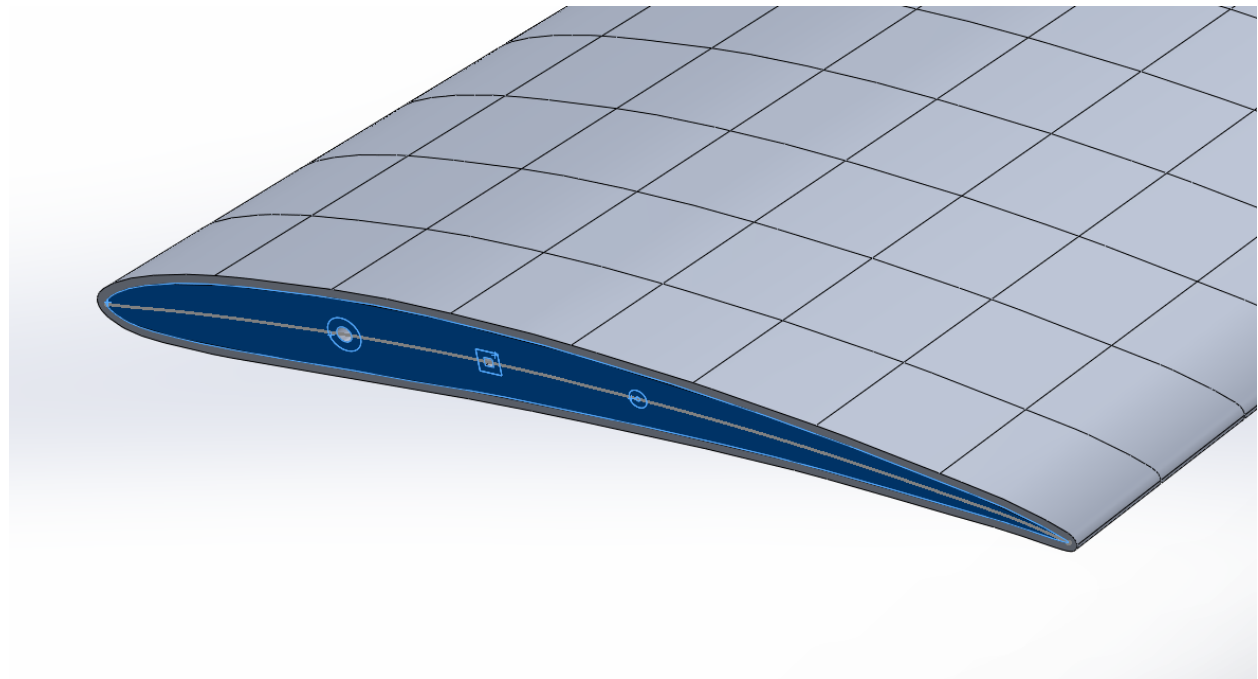


Σχήμα 5.4: Κάτοψη της πτέρυγας όπου παρουσιάζεται το σύστημα αξόνων $x-z$ και οι ευθείες που επιλύει το λογισμικό για την εύρεση του κέντρου της επιμερισμένης περιοχής i,j .

Με την εφαρμογή της παραπάνω ανάλυσης, το λογισμικό μπορεί να αποθηκεύσει όλα τα απαραίτητα μεγέθη για το σύνολο των επιμερισμένων περιοχών και να προχωρήσει στην αντιστοίχιση των επιφανειακών στοιχείων του πλέγματος CFD στις περιοχές που αυτά εμπίπτουν μέσω επαναληπτικού βρόχου, ώστε να βρεθούν και οι αεροδυναμικές δυνάμεις ανά περιοχή. Με τη χρήση των κέντρων των επιμερισμένων περιοχών ως αναφορά (x,z) , το λογισμικό αντλεί τα στοιχεία της θέσης και της επιφάνειά τους (x,y,z,A) , που απαιτούνται για την επικοινωνία των αεροδυναμικών δυνάμεων. Με την ανάγνωση του αρχείου αποτελεσμάτων της επιλυμένης ροής, το λογισμικό ελέγχει σειριακά τις αποστάσεις του κάθε στοιχείου του CFD πλέγματος από όλα τα κέντρα των επιμερισμένων περιοχών, και εντάσσει της αεροδυναμικές δυνάμεις αυτού σε όποια βρίσκεται πιο κοντά. Με τη λήψη μέσου όρου αυτών, προκύπτουν τα τελικά αποτελέσματα μοντελοποίησης των αεροδυναμικών δυνάμεων στην επιφάνεια της πτέρυγας. Τόσο αυτά όσο και το μοντέλο του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας αποθηκεύονται, ώστε να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν κατά τη διαμόρφωση της μη-γραμμικής στατικής προσομοίωσης.

5.2 Μη-Γραμμική Στατική Προσομοίωση

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας αντιστοίχισης των αεροδυναμικών δυνάμεων στην επιφάνεια της πτέρυγας από την πλευρά του πλέγματος FEM, το λογισμικό μπορεί να προχωρήσει στη δομική της ανάλυση. Ο τύπος της προσομοίωσης που επιλέχθηκε είναι μη-γραμμικής μοντελοποίησης και στατικού τύπου. Η μη-γραμμική μοντελοποίηση επιλέχθηκε για την ρεαλιστικότερη συσχέτιση τάσεως – παραμόρφωσης του υλικού της πτέρυγας. Η συσχέτιση τάσεως – παραμόρφωσης ενός υλικού περιγράφεται από μία μη ευθεία καμπύλη. Για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων μικρών παραμορφώσεων, η γραμμική περιγραφή αυτή της συσχέτισης είναι ικανοποιητική. Αυτή όμως δεν είναι μια εξασφαλισμένη συνθήκη κατά τη δομική ανάλυση πτερυγών, όπου οι παραμορφώσεις μπορούν να ποικίλουν αναλόγως των ασκούμενων αεροδυναμικών δυνάμεων και του υλικού της πτέρυγας. Για αυτό το λόγο η μη-γραμμική προσομοίωση προτιμάται έναντι της γραμμικής. Αντίστοιχα, ο στατικός (steady) τύπος ανάλυσης επιλέχθηκε για την ταχύτητά του, και την ανάγκη ασυμπτωτικής σύγκλισης της δομικής ανάλυσης. Οι εξισώσεις ισορροπίας του υλικού της πτέρυγας πρέπει να βρεθούν σε ισορροπία και το σχήμα της να έχει σταθεροποιηθεί για την λήψη της παραμορφωμένης διάταξης και την εκ νέου επίλυση της ροής γύρω από αυτήν στο επόμενο βήμα αερο-δομικής της ανάλυσης.

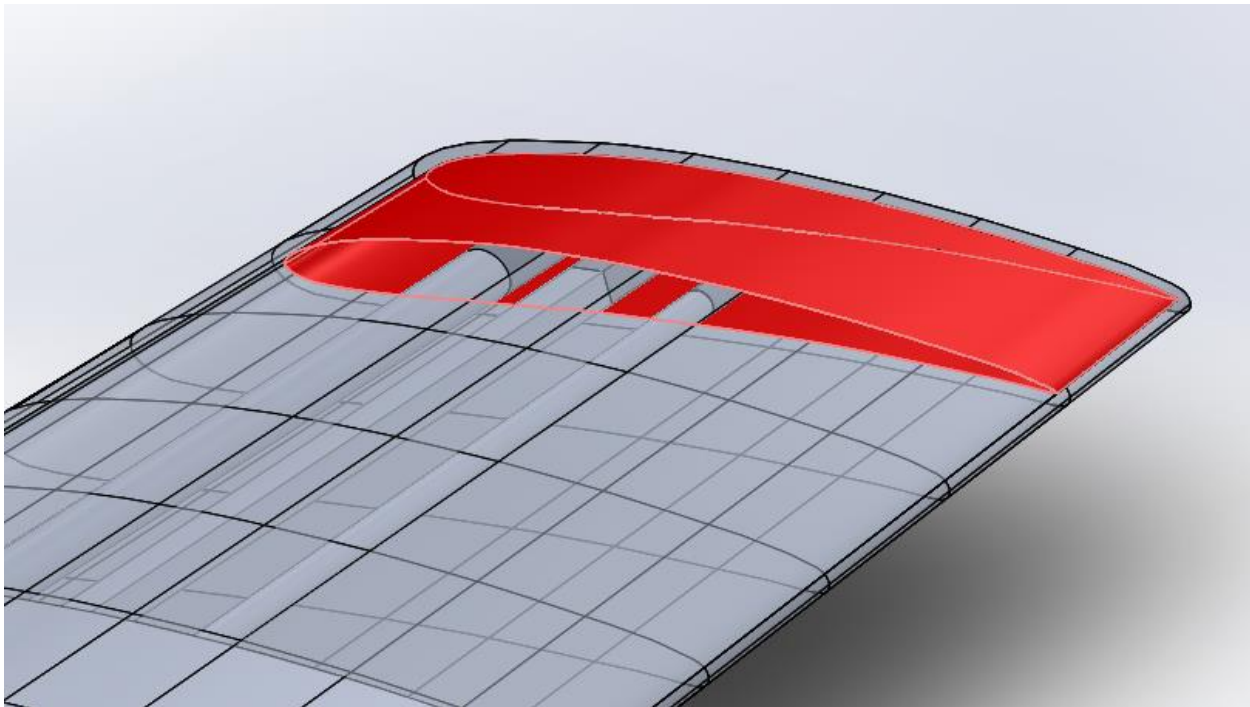


Σχήμα 5.5: Οι επιφάνειες που επιλέγονται να πακτωθούν για να περιοριστεί η μετακίνησή τους κατά τη διεξαγωγή της προσομοίωσης, αναπαριστώντας την επαφή της πτέρυγας με την άτρακτο του αεροσκάφους.

Το πρόγραμμα ανοίγει το αρχείο της διάταξης της πτέρυγας, διαβάζει όλες τις απαραίτητες μεταβλητές για τον πλήρη ορισμό όλων των μεγεθών της προσομοίωσης (διαστάσεις διάταξης, αεροδυναμικές δυνάμεις, θέσεις επιμερισμένων περιοχών κτλ.) και πραγματοποιεί δύο βοηθητικές λειτουργίες πριν περάσει στον πυρήνα της διαδικασίας. Η πρώτη αφορά τον καθορισμό των επιφανειών των τμημάτων της πτέρυγας που πρέπει να δεσμευτούν όλοι βαθμοί ελευθερίας τους,

ώστε να πακτωθούν και να παραμένουν ακίνητες κατά τη διάρκεια της δομικής ανάλυσης, αναπαριστώντας τη σύνδεση της πτέρυγας με την άτρακτο του αεροσκάφους. Οι επιφάνειες αυτές είναι οι διατομές του συνόλου των δοκών που έχει η πτέρυγα, και η επιφάνεια της νεύρωσης που συμπίπτει με την καμπύλη της αεροτομής βάσης όπως φαίνονται στο σχήμα 5.5. Η επιλογή των επιφανειών γίνεται με τη χρήση του προσανατολισμού και των συντεταγμένων αυτών, στοιχεία τα οποία αποθηκεύονται για την ανάκληση τους κατά τη διαδικασία επιβολής πακτώσεων στην προσομοίωση.

Η δεύτερη βοηθητική λειτουργία αφορά τη διασφάλιση παραγωγής 3D πλέγματος της πτέρυγας βάσει των επιμέρους τμημάτων της. Κατά τη διαμόρφωση των στερεών σωμάτων του εξωτερικού τοιχώματος και των νευρώσεων, είναι πιθανό να προκύψουν μικρές εισχωρήσεις μεταξύ τους στο συνολικό συναρμολόγημα όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6. Αυτό το φαινόμενο δημιουργεί μικρές κοινές διπλά ορισμένες περιοχές, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε αποτυχία παραγωγής του 3D πλέγματος της πτέρυγας. Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος, το πρόγραμμα αφαιρεί προληπτικά από τα σώματα των νευρώσεων το χωρίο που ορίζεται από τη γεωμετρία της πτέρυγας, για να αποκλειστούν οι κοινά ορισμένες περιοχές και η πιθανότητα προβλημάτων δημιουργίας του 3D πλέγματος.



Σχήμα 5.6: Παράδειγμα εισχώρησης του στερεού σώματος της τελευταίας νεύρωσης στο σώμα του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας της τάξεως των 60mm² το οποίο πρέπει να αφαιρεθεί για την αποφυγή προβλημάτων κατά τη δημιουργία του 3D πλέγματος.

Μετά την ολοκλήρωση των προηγούμενων λειτουργιών, το λογισμικό δημιουργεί την στατική προσομοίωση. Ο τύπος προσομοίωσης ορίζεται ως στατικός και οι δυνάμεις που ασκούνται από την ροή στην επιφάνεια της πτέρυγας μεταβάλλονται σε κάθε επανάληψη αερο-δομικής σύγκλισης, καθώς η πτέρυγα παραμορφώνεται υπό την επήρεια των ασκούμενων αεροδυναμικών δυνάμεων. Για την εξασφάλιση της σωστής επαφής των επιμέρους τμημάτων μεταξύ τους, οι

επιφάνειες στις οποίες αυτά εφάπτονται ή απέχουν λιγότερο από 2 χιλιοστά θεωρούνται συγκολλημένες, ώστε τυχόν μικρά κενά μεταξύ των δημιουργημένων σωμάτων να μην παραμείνουν αποκολλημένα από την υπόλοιπη διάταξη.

Στη συνέχεια, το λογισμικό ορίζει ως πακτωμένες τις επιφάνειες που καθορίστηκαν από την πρώτη βοηθητική λειτουργία της διαδικασίας (σχήμα 5.6) και ξεκινάει να προσθέτει τις αεροδυναμικές δυνάμεις στις αντίστοιχες επιμερισμένες επιφάνειες της πτέρυγας, όπως και τα δύο υπολογίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι θα ασκούνται οι αντίστοιχες αεροδυναμικές δυνάμεις στα στοιχεία του FEM που εμπίπτουν εντός της κάθε ξεχωριστής περιοχής. Ο τρόπος μοντελοποίησης των ασκούμενων δυνάμεων ποικίλει ανάλογα με τον αριθμό επαναλήψεων της αερο-δομικής σύγκλισης. Συγκεκριμένα, εάν είναι η πρώτη επανάληψη πραγματοποίησης της δομικής ανάλυσης, η καμπύλη δύναμης – ψευδο-χρόνου της εκάστοτε επιμερισμένης περιοχής είναι αμετάβλητη χρονικά και παράλληλη στο άξονα x'x για όλη τη διαδικασία της προσομοίωσης. Ο ψευδο-χρόνος χρησιμοποιείται απλά για ασυμπτωτική σύγκλιση της δομικής ανάλυσης σε κάθε βήμα της αερο-δομικής σύγκλισης. Έτσι η μορφή της πτέρυγας ισορροπεί πριν ασκηθούν σε αυτή οι αεροδυναμικές δυνάμεις της επόμενης επανάληψης. Σε μεταγενέστερα στάδια, η καμπύλη δύναμης – ψευδο-χρόνου της κάθε επιμερισμένης περιοχής εμπλουτίζεται κάθε φορά με τις αεροδυναμικές δυνάμεις που υπολογίστηκαν από την επίλυση της ροής του CFD πλέγματος της παραμορφωμένης διάταξης στο εκάστοτε βήμα της αερο-δομικής σύγκλισης. Έτσι η αλληλεπίδραση ροής – πτέρυγας μοντελοποιείται σε κάθε επιμερισμένη περιοχή ως ένα άθροισμα εξισώσεων βηματικού τύπου:

$$F_{i,j}^c = \sum_{k=1}^c F_{i,j,k} [u(t - (k - 1)) - u(t - k)] \quad , \quad k = 1, 2, \dots, c \quad (5.17)$$

- $u(t)$: μοναδιαία βηματική συνάρτηση
- c : ο αριθμός επανάληψης της διαδικασίας αερο-δομικής σύγκλισης
- $F_{i,j,k}$: Η δύναμη στην επιμερισμένη περιοχή i,j στην επανάληψη k

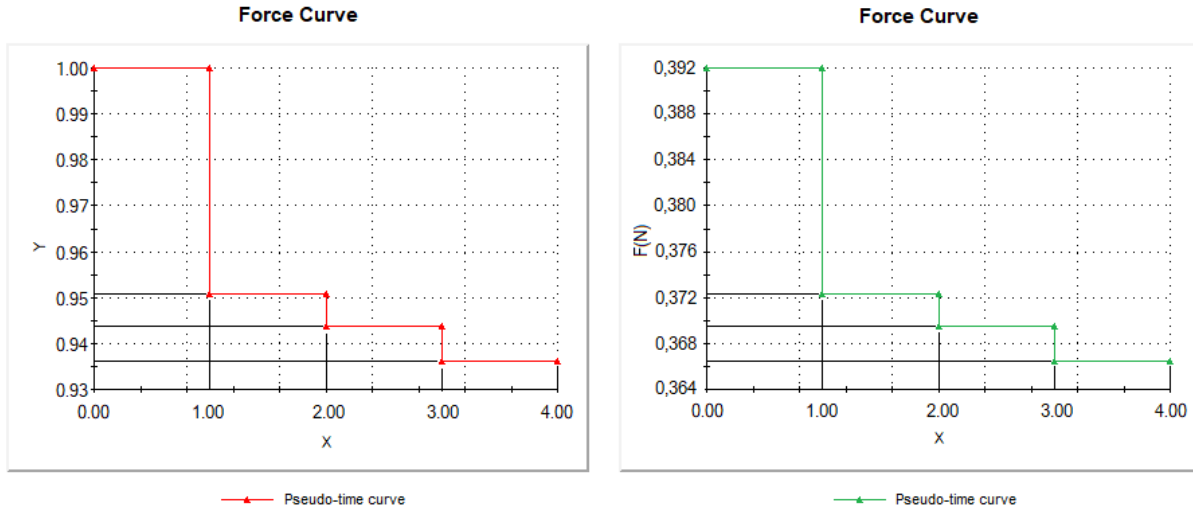
Για κάθε επανάληψη αερο-δομικής σύγκλισης απαιτούνται δύο σημεία συντεταγμένων ($x_{Fk,1}$, $y_{Fi,j,k}$) και ($x_{Fk,2}$, $y_{Fi,j,k}$) για τον ορισμό της γραφικής παράστασης μεταβολής των αεροδυναμικών δυνάμεων συναρτήσει του βήματος επανάληψης ανά επιμερισμένη περιοχή κατανομής της εκάστοτε επανάληψης k , όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7:

$$x_{F1,1} = 0 \quad , \quad x_{F1,2} = 1 \quad , \quad y_{Fi,j,1} = 1$$

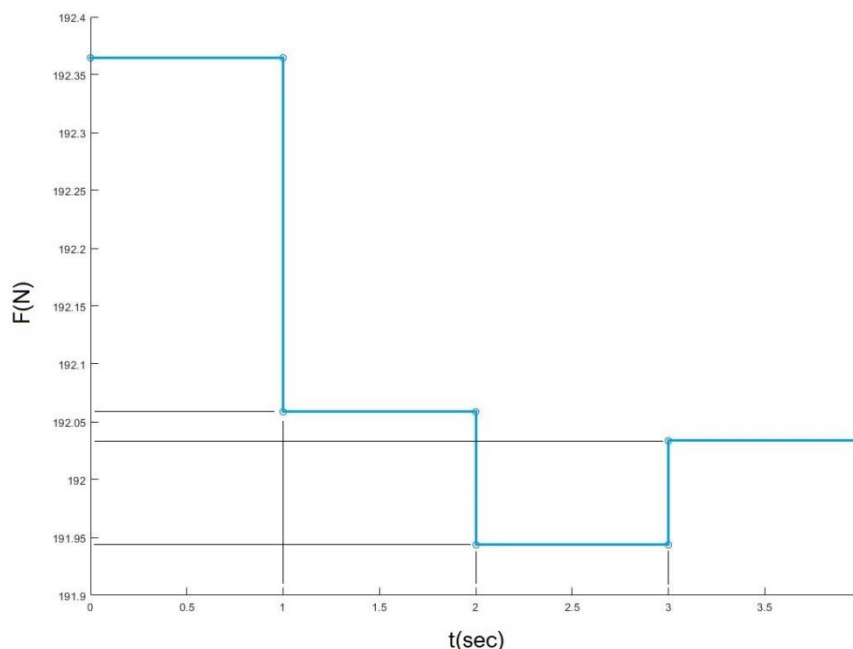
$$x_{Fk,1} = x_{Pk-1,2} \quad (5.19) \quad , \quad x_{Fk,2} = k \quad (5.20) \quad , \quad y_{Fi,j,k} = \frac{F_{i,j,k}}{F_{i,j,1}} \quad (5.21)$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad , \quad j = 1, 2, \dots, m \quad , \quad k = 1, 2, \dots, c$$

Στην εξεταζόμενη περίπτωση της πτέρυγας NACA 4507, το μοντέλο επίλυσης των εξισώσεων ροής ήταν τύπου Euler, επομένως από την επίλυση προέκυψαν μόνο πιέσεις και όχι συνεκτικές δυνάμεις ($F_{i,j}^c = P_{i,j}^c$). Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζεται πως αναπαρίσταται η δύναμη που ασκείται από την ροή σε μία επιμερισμένη περιοχή της πτέρυγας συναρτήσει του ψευδο-χρόνου σε 4 επαναλήψεις. Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η άνωση της πτέρυγας συναρτήσει του χρόνου κατά το ίδιο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα αναπαράστασης της ασυνεχούς συνάρτησης $F_{i,j}^c$ μιας εκ των επιμερισμένων περιοχών της πτέρυγας με οριζόντιο άξονα τον ψευδο-χρόνο και κατακόρυφο άξονα: (α) Κόκκινη συνάρτηση: την Y ανηγμένη μεταβλητή αναγωγής της δύναμης της πρώτης επανάληψης, (β) Πράσινη συνάρτηση: την αεροδυναμική δύναμη F , στην πτέρυγα NACA 4507 δηλαδή την πίεση. Η διαδικασία δυναμικής προσομοίωσης έχει χρονικό βήμα εκτέλεσης ανά επανάληψη αερο-δομικής σύγκλισης 1 sec .



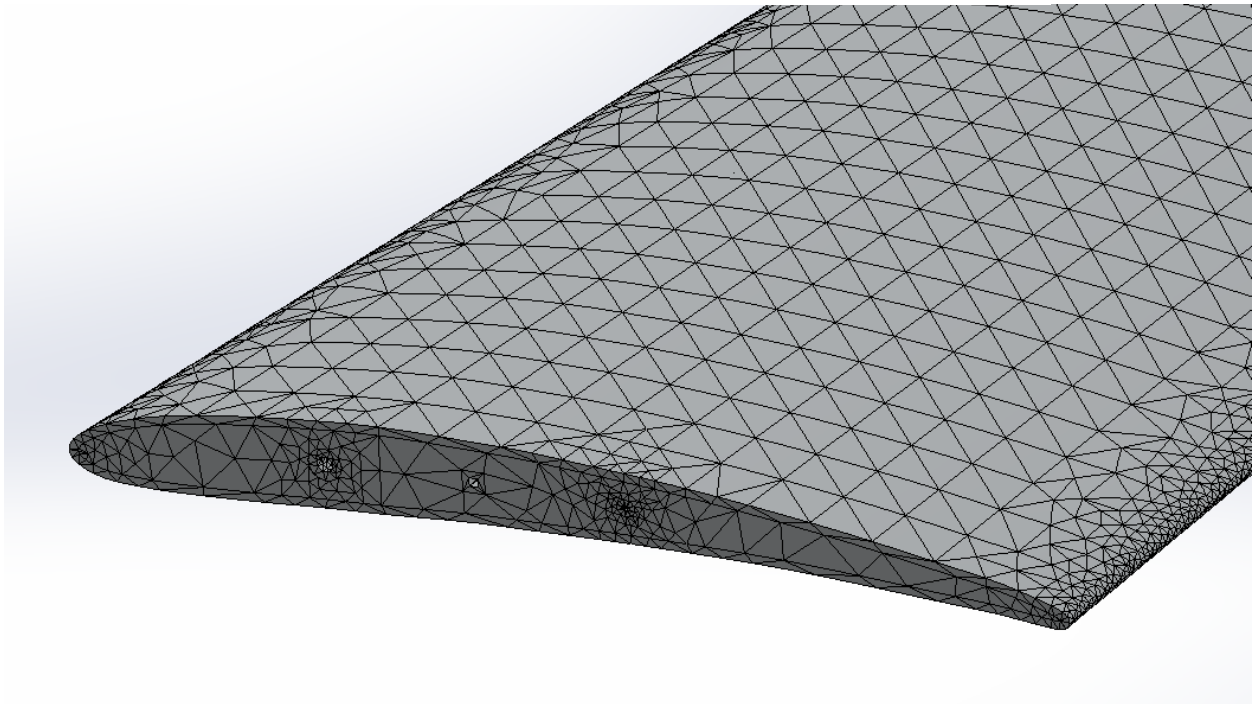
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα δυνάμεως άνωσης της πτέρυγας συναρτήσει του ψευδο-χρόνου, βάσει τις μεταβολές των αεροδυναμικών δυνάμεων στην επιφάνειά της λόγω της παραμόρφωσής της.

Ο τρόπος αναπαράστασης των αεροδυναμικών δυνάμεων μέσω της (5.17) είναι προφανώς ασυνεχής, αλλά αυτές οι ασυνέχειες είναι απαραίτητες για την εξασφάλιση της συσχέτισης μεταξύ παραμόρφωσης της πτέρυγας και της ροής που επιλύθηκε για τον υπολογισμό των νέων αεροδυναμικών δυνάμεων. Με τη μείωση της χρονικής διάρκειας της κάθε προσομοίωσης μπορεί το μήκος των αλμάτων να μειωθεί για τη λήψη πιο ακριβών, αλλά και υπολογιστικά απαιτητικών αποτελεσμάτων. Ο καθορισμός των καμπυλών δύναμης στο SolidWorks είναι αδιάστατης μορφής και, για αυτόν το λόγο, συμπληρώνονται συναρτήσεις της τιμής της πρώτης επανάληψης της διαδικασίας για την κάθε επιμερισμένη περιοχή, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7.

Το πρόγραμμα στη συνέχεια ξεκινά την κατασκευή του 3D πλέγματος της πτέρυγας που αποτελεί το τελευταίο στάδιο πριν την εκκίνηση της δομικής ανάλυσης. Η παραγωγή του 3D πλέγματος είναι τύπου Curvature-Based λόγω της έντονης καμπυλότητας της γεωμετρίας της διάταξης. Μεταβλητές του πλέγματος αποτελούν το ελάχιστο και μέγιστο μέγεθος των παραγόμενων στοιχείων, το πλήθος αυτών σε επιφάνειες κυκλικού τύπου για βελτίωση της ακρίβειας του πλέγματος και τον ρυθμό αύξησης του μεγέθους τους όταν δεν απαιτείται αναλυτική απεικόνιση της εκάστοτε περιοχής της πτέρυγας. Όλες οι ανωτέρω μεταβλητές είναι παραμετροποιημένες και εμπεριέχονται στην αντίστοιχη καρτέλα του φύλλου εισαγωγής δεδομένων όπου ο χρήστης μπορεί να ορίσει τις επιθυμητές τιμές για τη δημιουργία ανάλογου πλέγματος. Οι παράμετροι που ορίστηκαν για τη γένεση του πλέγματος της πτέρυγας NACA 4507 παρουσιάζονται στον πίνακα 5.9, και το πλέγμα που προκύπτει απεικονίζεται στο σχήμα 5.10. Παρατηρείται πως το πλέγμα πυκνώνει σε περιοχές έντονης καμπυλότητας και όπου αναμένεται μεγάλη αύξηση των τάσεων του υλικού.

Meshing Parameters	
Max. Element Size (mm)	30
Min. Element Size (mm)	3
No. of Elements in Circle	8
Growth Ratio	1.5

Πίνακας 5.9: Πίνακας χαρακτηριστικών 3D πλέγματος της πτέρυγας τύπου NACA 4507.



Σχήμα 5.10: Αποτέλεσμα παραγωγής 3D πλέγματος της πτέρυγας τύπου NACA 4507 βάσει των χαρακτηριστικών του πίνακα 5.9, όπου παρατηρούνται οι πυκνότερες περιοχές πλέγματος σε σημεία ενδιαφέροντος.

Τέλος, απομένουν να οριστούν οι παράμετροι εκτέλεσης της δομικής ανάλυσης της πτέρυγας που παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιλυσιμότητα και τη διάρκεια επίλυσης της προσομοίωσης. Οι διαφορετικοί παράμετροι καθορισμού του μεταβαλλόμενου ψευδο-χρονικού βήματος επίλυσης και των κριτηρίων σύγκλισης ποικίλουν ανά εφαρμογή, για αυτό και χαρακτηριστικά του τρόπου διεξαγωγής της προσομοίωσης είναι επίσης παραμετροποιημένα. Ειδικότερα, όσον αφορά το βήμα χρονικής επίλυσης, μπορεί να καθοριστεί η χρονική του διάρκεια, η αρχική τιμή του, το ελάχιστο και μέγιστο όριο διακύμανσής του και ο αριθμός των μέγιστων προσπαθειών προσαρμογής του πριν την αποτυχία σύγκλισης. Όσον αφορά την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας, μπορεί να καθοριστεί ο ρυθμός επίλυσης τους (ανά πόσα χρονικά βήματα επιλύονται), ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για την αριθμητική τους σύγκλιση, το κριτήριο σύγκλισής τους για την βελτίωση της σύγκλισης.

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης το πρόγραμμα επιλέγει αυτόματα τον κατάλληλο τύπου επιλύτη βάσει των δυνατοτήτων του χρησιμοποιούμενου μηχανήματος (μνήμης,

επεξεργαστικής ισχύς κτλ.) και των απαιτήσεων του μοντέλου. Οι βασικοί τύποι επίλυτων δομικής ανάλυσης του SolidWorks είναι:

- Direct Sparse: Η επίλυση του συστήματος εξισώσεων ισορροπίας πραγματοποιείται με την εύρεση των κάτω και άνω τριγωνικών πινάκων L και U (LU decomposition) για τους οποίους ισχύει:

$$Ax = b \rightarrow A = LU$$

και η επίλυση γίνεται, στη συνέχεια μέσω του δύο βημάτων:

$$Ly = b, Ux = y$$

Η συγκεκριμένη μέθοδος επιτυγχάνει ταχύτερη σύγκλιση με τη χρήση αλγορίθμων χρήσης πολλαπλών επεξεργαστών και ενισχυμένης εκμετάλλευσης μνήμης, όμως απαιτεί πολύ μεγάλη χωρητικότητα RAM συναρτήσει των βαθμών ελευθερίας του μοντέλου της προσομοίωσης (200.000DOF \approx 1GB RAM).

- FFEplus: Η επίλυση του συστήματος γίνεται επαναληπτικά με τη χρήση πράξεων μετασχηματισμού πινάκων των εξισώσεων ισορροπίας του μοντέλου, όπου με την υπόθεση αρχικών τιμών και την διεξαγωγή επαναλήψεων λαμβάνεται η λύση όταν το σφάλμα πέσει κάτω από το προκαθορισμένο όριο. Ο επιλύτης απαιτεί σημαντικά λιγότερη μνήμη RAM για να λειτουργήσει έναντι του Direct Sparse (2.000.000DOF \approx 1GB RAM) αλλά δεν διαθέτει πολύ-επεξεργαστικές δυνατότητες κατά την επίλυση του μοντέλου.

Γενικότερα, η διαθέσιμη μνήμη RAM του χρησιμοποιούμενου υπολογιστή και οι συνολικοί βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου δομικής ανάλυσης είναι οι δύο παράμετροι που καθορίζουν ποιος επιλύτης πρέπει να επιλεγεί. Εάν η διαθέσιμη μνήμη RAM μπορεί να υποστηρίξει το υπολογιστικό κόστος λειτουργίας της Direct Sparse, προφανώς είναι προτιμητέα λόγω των πολύ-επεξεργαστικών δυνατοτήτων της. Εάν όμως το 3Δ πλέγμα είναι πολύ σύνθετο, ή η μνήμη δεν επαρκεί, τότε επιλέγεται ο επιλύτης FFEplus.

Η δομική ανάλυση του μοντέλου πραγματοποιείται με μεταβαλλόμενου μήκους ψευδο-χρονικό βήμα, είναι μεθόδου ελέγχου δύναμης λόγω των μεταβαλλόμενων αεροδυναμικών δυνάμεων στην επιφάνεια της πτέρυγας και η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας πραγματοποιείται με τη μέθοδο Newton – Raphson. Σε κάθε βήμα επίλυσης ενημερώνεται η κατεύθυνση των ασκούμενων φορτίων σε σχέση με την παραμόρφωση του φορτίου.

Το λογισμικό ορίζει τις παραμέτρους της διαδικασίας βάσει των εισόδων του χρήστη και ξεκινά τη δομική ανάλυση της πτέρυγας. Σε περίπτωση αποτυχία ικανοποίησης του κριτηρίου σύγκλισης των εξισώσεων ισορροπίας, ο χρήστης μπορεί να επανεκκινήσει τη διαδικασία με χαλαρότερο κριτήριο σύγκλισης, μεγαλύτερο μέγιστο αριθμό επαναλήψεων επίλυσης της Newton – Raphson, ή μικρότερο δυνατό μήκος βήματος ψευδο-χρόνου. Μόλις η δομική ανάλυση ολοκληρωθεί, το SolidWorks παραθέτει τα αποτελέσματα της σε επίπεδο τάσεων και παραμόρφωσης. Στη συνέχεια αποθηκεύει τις παραμορφώσεις της πτέρυγας, τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας βάσει του χρησιμοποιούμενου υλικού, καθώς και κάποια άλλα μεγέθη που αφορούν την ανατροφοδότηση

πληροφοριών στο επόμενο βήμα της επανάληψης της διαδικασίας αερο-δομικής σύγκλισης του μοντέλου.

Για την πτέρυγα τύπου NACA 4507 οι παράμετροι που ορίστηκαν για το ψευδο-χρονικό βήμα και τις παραμέτρους επίλυσης των εξισώσεων ισορροπίας της προσομοίωσης παρουσιάζονται στους πίνακες 5.11 και 5.12. Ο επιλύτης της δομικής ανάλυσης είχε οριστεί να επιλεχθεί αυτόματα σε περίπτωση που υπάρχει περίσσεια μνήμης RAM για τη χρήση της μεθόδου Direct Sparse, αλλά λόγω περιπλοκότητας του μοντέλου πραγματοποιήθηκε επίλυση με τον επιλύτη FFEplus. Οι τάσεις von Mises και η παραμόρφωση της πτέρυγας μετά από 4 επαναλήψεις της διαδικασίας αερο-δομικής σύγκλισης παρουσιάζονται στα σχήματα 5.13 και 5.14. Σημειώνεται ότι η τάση von Mises σύμφωνα με τανυστή πίεσης σ ορίζεται ως:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]} \quad , \quad (5.22)$$

όπου:

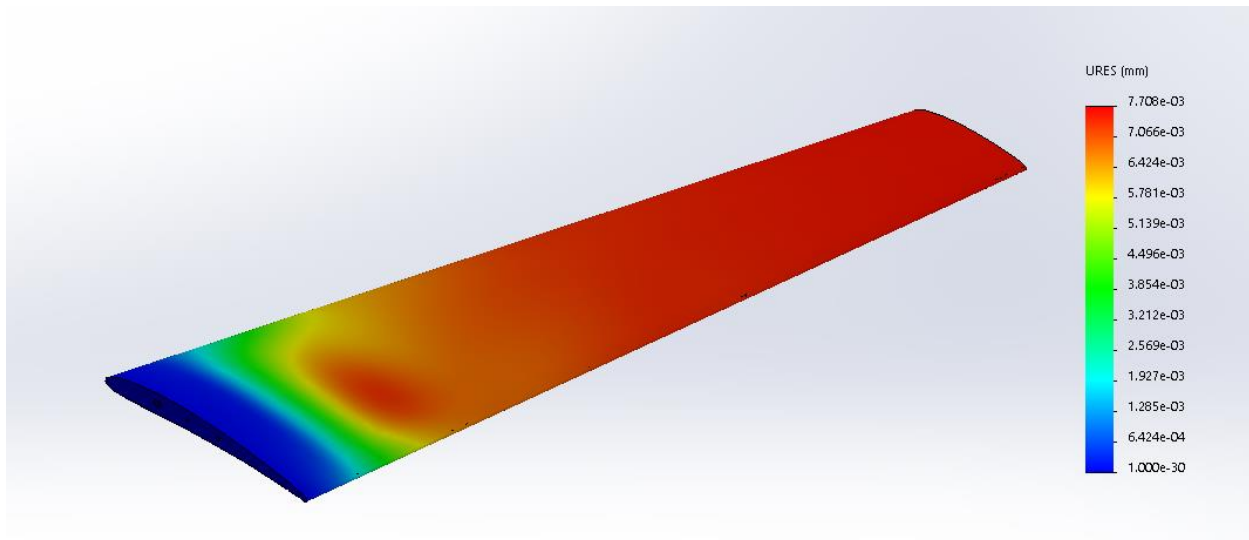
$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

Pseudo-Time Step	
Initial Increment (s)	0.001
Min. Time Step (s)	1E-08
Max. Time Step (s)	0.1
Adjustments No.	5
Step Duration	1

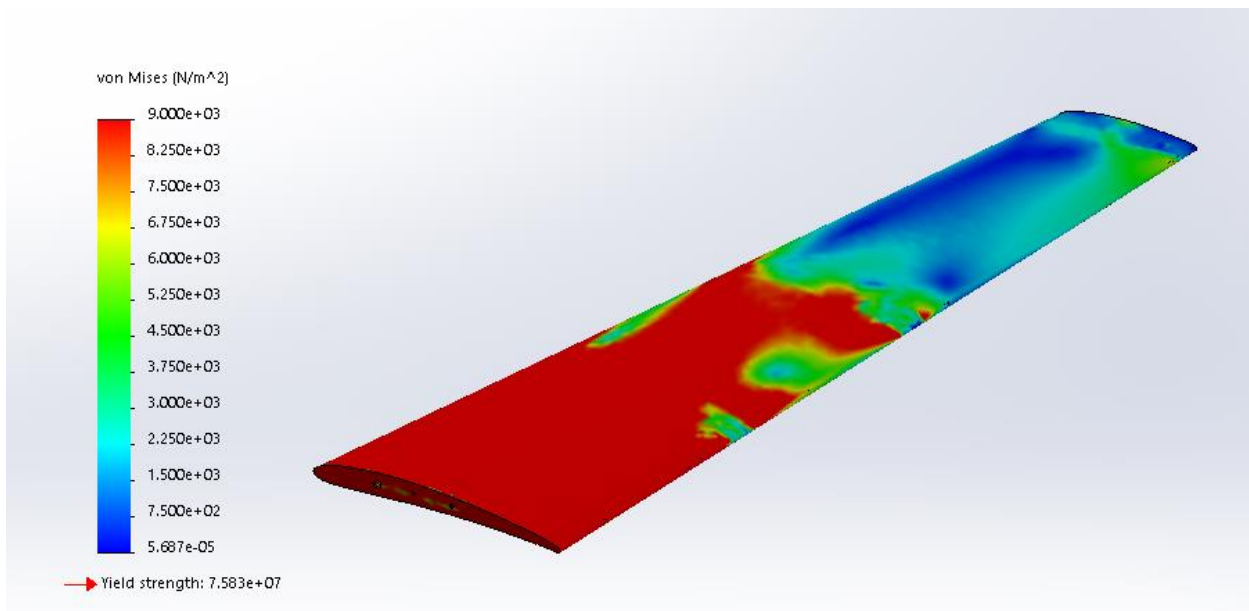
Πίνακας 5.11: Πίνακας χαρακτηριστικών χρονικού ψευδο-βήματος της πτέρυγας τύπου NACA 4507.

Equilibrium Equations	
Equilibrium Frequency	1
Equilibrium Max. Iterations	50
Convergence Tolerance	1.00E-06
Singularity Elimination	1

Πίνακας 5.12: Πίνακας τρόπου επίλυσης εξισώσεων ισορροπίας της πτέρυγας τύπου NACA 4507.



Σχήμα 5.13: Απεικόνιση των παραμορφώσεων στην διάταξη της πτέρυγας τύπου NACA 4507 μετά το πέρας του 4^{ου} βήματος αερο-δομικής σύγκλισης.



Σχήμα 5.14: Διάγραμμα απεικόνισης των αναπτυσσόμενων τάσεων von Mises στην επιφάνεια πτέρυγας τύπου NACA 4507 μετά την ολοκλήρωση του 4^{ου} βήματος της διαδικασίας αερο-δομικής ανάλυσής της.

Κεφάλαιο 6

Αερο-Δομική Σύγκλιση

Με την ολοκλήρωση της δομικής ανάλυσης της πτέρυγας, έχει ολοκληρωθεί το πρώτο στάδιο σχεδίασης, ρευστοδυναμικής και δομικής μελέτης της πτέρυγας από την αρχική της θέση. Όπως έχει αναφερθεί και στην εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας, η ρευστοδυναμική και δομική ανάλυση της συμπεριφοράς μιας πτέρυγας συνιστά περίπλοκο φαινόμενο λόγω της αλληλεπίδρασης της παραμόρφωσης της πτέρυγας με τις αεροδυναμικές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτήν. Η διαδικασία που έχει παρουσιαστεί μέχρι τώρα παρέχει αποτελέσματα μόνο βάσει του μοντέλου της πρώτης ρευστοδυναμικής ανάλυσης, όπου η ροή υπολογίστηκε γύρω από το αρχικά σχεδιασμένο σχήμα της πτέρυγας. Για να προσεγγιστεί η πραγματική συμπεριφορά της βάσει της ροής που επιλύεται, πρέπει η αλληλουχία των ενεργειών της ρευστοδυναμικής – δομικής ανάλυσης να γενικευτεί, και να αποτελέσει βήμα επαναλαμβανόμενης διαδικασίας που λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση της γεωμετρίας της πτέρυγας με τη ροή και αντιστρόφως.

Τα παραπάνω βήματα ακολουθεί το ανεπτυγμένο λογισμικό, χρησιμοποιώντας μια ευρύτερη επαναληπτική διαδικασία η οποία σχεδιάζει την παραμορφωμένη πτέρυγα, παράγει και επιλύει το μοντέλο της ροής γύρω από τη νέα παραμορφωμένη γεωμετρία και προσθέτει με κατάλληλο τρόπο της νέες αεροδυναμικές δυνάμεις που έχουν προκύψει στο μοντέλο της στατικής προσομοίωσης για εκ νέου δομική ανάλυσή της. Η ευρύτερη διαδικασία αερο-δομικής σύγκλισης είναι και αυτή παραμετροποιημένη, με δύο εισόδους οι οποίες βρίσκονται στην καρτέλα της δομικής ανάλυσης του φύλλου εισαγωγής δεδομένων. Η πρώτη αποτελεί το κριτήριο σύγκλισης της επανάληψης, στο οποίο συμπληρώνεται το ποσοστό μεταβολής της μέγιστης παραμόρφωσης της πτέρυγας μεταξύ των δύο διαδοχικών τελευταίων επαναλήψεων ως προς τη μέγιστη παραμόρφωση του προηγούμενου βήματος. Εάν το ποσοστό αυτό πέσει κάτω από την προκαθορισμένη τιμή, το λογισμικό θεωρεί ότι η διαδικασία αερο-δομικής ανάλυσης έχει συγκλίνει και τερματίζει την

επανάληψη. Η δεύτερη είσοδος είναι ο ελάχιστος επιτρεπτός συντελεστής ασφαλείας του υλικού, κάτω από τον οποίο θεωρείται ότι η διάταξη της πτέρυγας αστοχεί και δεν μπορεί να υποστηρίξει τις ασκούμενες αεροδυναμικές δυνάμεις.

Η διαδικασία της αερο-δομικής σύγκλισης εμπλέκει όλο το σύνολο των λειτουργιών του λογισμικού. Η παρουσίασή της διαδικασίας θα συνεχιστεί από τον τερματισμό της δομικής ανάλυσης και τη λήψη των αποτελεσμάτων της, όπως αυτή παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το λογισμικό μετά την περάτωση της δομικής ανάλυσης, αποθηκεύει εκτός της μέγιστης παραμόρφωσης και του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας, τον αριθμός της επανάληψης στον οποίο βρίσκεται η διαδικασία αερο-δομικής σύγκλισης. Βάσει αυτών των μεγεθών, το λογισμικό μπορεί να αξιολογήσει τα αποτελέσματα της δομικής ανάλυσης και να ακολουθήσει ανάλογες ενέργειες. Η αξιολόγηση αυτή επαναλαμβάνεται στο τέλος κάθε επανάληψης της αερο-δομικής επίλυσης και οδηγεί σε 3 πιθανές περιπτώσεις:

- Περίπτωση 1: Η διαδικασία δεν έχει συγκλίνει, αλλά δεν έχει υπάρξει αστοχία της πτέρυγας βάσει των αεροδυναμικών δυνάμεων και του προκαθορισμένου συντελεστή ασφαλείας. Δηλαδή:

$$\frac{|\varepsilon_k - \varepsilon_{k-1}|}{\varepsilon_{k-1}} > \varepsilon\%_{crit} , FOS_{min,k} > FOS_{crit} , k > 2$$

- Περίπτωση 2: Ανεξαρτήτως σύγκλισης της διαδικασίας, έχει υπάρξει αστοχία της πτέρυγας βάσει των αεροδυναμικών δυνάμεων λόγω υπέρβασης του επιτρεπτού συντελεστή ασφαλείας. Δηλαδή:

$$FOS_{min,k} < FOS_{crit}$$

- Περίπτωση 3: Η διαδικασία έχει συγκλίνει και δεν έχει υπάρξει αστοχία της πτέρυγας βάσει των αεροδυναμικών δυνάμεων και του προκαθορισμένου συντελεστή ασφαλείας. Δηλαδή:

$$\frac{|\varepsilon_k - \varepsilon_{k-1}|}{\varepsilon_{k-1}} < \varepsilon\%_{crit} , FOS_{min,k} > FOS_{crit} , k > 2$$

όπου:

$$FoS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{VM}}$$

Με σ_{VM} σύμφωνα με την 5.22 και σ_y την τάση διαρροής του υλικού. Προφανώς, τα παραπάνω κριτήρια των διαφόρων περιπτώσεων έχουν νόημα από τη δεύτερη επανάληψη και ύστερα, αφού ο μόνος λόγος τερματισμού της διαδικασίας αερο-δομικής σύγκλισης πριν τη δεύτερη επανάληψη είναι η αστοχία της πτέρυγας (δεν μπορεί να ελεγχθεί το κριτήριο σύγκλισης στην πρώτη επανάληψη). Στην περίπτωση 1 το λογισμικό δεν τερματίζει τη διαδικασία επανάληψης αφού

κανένα εκ των δύο κριτηρίων τερματισμού της δεν έχει ικανοποιηθεί, που είναι είτε η σύγκλιση της διαδικασίας είτε η αστοχία της πτέρυγας. Στις περιπτώσεις 2 που έχουμε αστοχία της διάταξης και 3 που το κριτήριο σύγκλισης ικανοποιείται χωρίς αστοχία, το λογισμικό τερματίζει τη λειτουργία του, ενημερώνοντας τον χρήστη για τον λόγο τερματισμού και παρέχοντας τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Επομένως, εάν έχει πραγματοποιηθεί η πρώτη επανάληψη ή η διαδικασία δεν έχει συγκλίνει και η πτέρυγα αντέχει τις αεροδυναμικές δυνάμεις της αναπτυσσόμενης ροής (περίπτωση 1) το λογισμικό πρέπει να εκκινήσει το επόμενο επαναληπτικό βήμα, το οποίο ξεκινάει με επανασχεδίαση του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας υπό το καθεστώς των καταγεγραμμένων παραμορφώσεων από το SolidWorks (κεφάλαιο 2). Η επανασχεδίαση των υπόλοιπων τμημάτων της πτέρυγας παραλείπεται, αφού το παραμορφωμένο εξωτερικό τοίχωμα είναι, όπως έχει προαναφερθεί, το μόνο τμήμα της πτέρυγας που έρχεται σε επαφή με την περιβάλλουσα ροή. Επομένως βάσει αυτού μπορεί να δημιουργηθεί 3D πλέγμα ροής που να συμπεριλαμβάνει τη μεταβολή της γεωμετρίας της πτέρυγας λόγω των υφιστάμενων αεροδυναμικών δυνάμεων. Αφού ολοκληρωθεί η σχεδίαση του παραμορφωμένου εξωτερικού τοιχώματος, το λογισμικό καλεί το PointWise για τη δημιουργία νέου προσαρμοσμένου 3D πλέγματος (κεφάλαιο 3), το οποίο αποθηκεύεται και μεταφέρεται στον εξυπηρετητή της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ για εκκίνηση της διαδικασίας επίλυσης της ροής από τον PUMA (κεφάλαιο 4). Τα ρευστοδυναμικά αποτελέσματα της επίλυσης λαμβάνονται από το λογισμικό, και μετά την αντιστοίχιση των νέων αεροδυναμικών δυνάμεων με τις αρχικά επιμερισμένες περιοχές της επιφάνειας της πτέρυγας, εμπλουτίζεται με αυτές το αρχικό μοντέλο της στατικής προσομοίωσης και επαναλαμβάνεται η δομική της ανάλυση (κεφάλαιο 5). Ακολουθεί αξιολόγηση των υπολογισμένων μεγεθών όπως αναλύθηκε στο παρόν κεφάλαιο, βάσει των οποίων το λογισμικό ακολουθεί τις ανάλογες ενέργειες για την ολοκλήρωση της αερο-δομικής μελέτης.

Η διαδικασία υπολογισμού των νέων αεροδυναμικών δυνάμεων λόγω της παραμόρφωσης της πτέρυγας ακολουθεί ακριβώς τα ίδια βήματα και τεχνικές που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, με εξαίρεση μιας επιπρόσθετης μεθόδου που χρησιμεύει στην επιτυχή προσαρμογή των αεροδυναμικών δυνάμεων στην επιφάνεια της πτέρυγας. Προφανώς το μοντέλο της πτέρυγας βάσει του οποίου πραγματοποιείται η δομική ανάλυση δεν αλλάζει κατά την διάρκεια της αερο-δομικής μελέτης. Όμως οι αεροδυναμικές δυνάμεις προκύπτουν στις νέες θέσεις των παραμορφωμένων τοιχωμάτων της πτέρυγας. Το λογισμικό πραγματοποιεί αντιστοίχιση των αρχικών και παραμορφωμένων θέσεων των τοιχωμάτων της πτέρυγας για την σωστή εφαρμογή των αεροδυναμικών δυνάμεων σε κάθε επανάληψη της δομικής ανάλυσης.

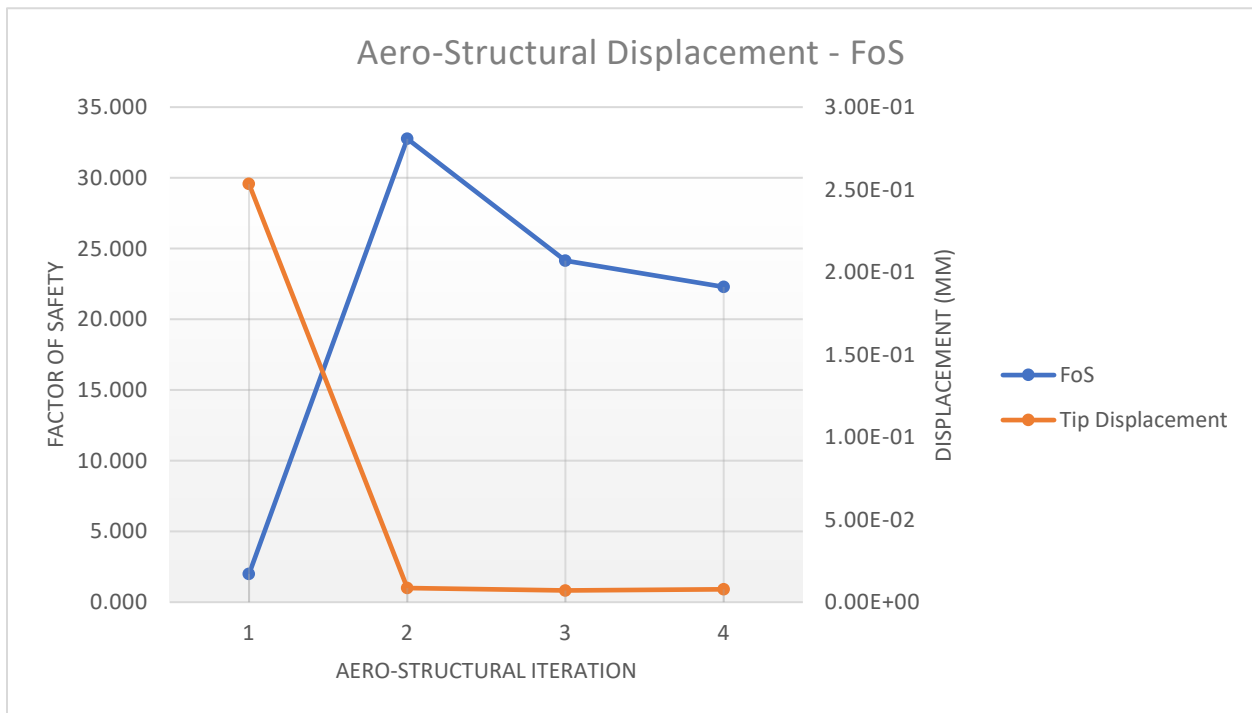
Για την επίδειξη της διαδικασίας της αερο-δομικής σύγκλισης, έγινε εκτέλεση του λογισμικού για την πτέρυγα τύπου NACA 4507, όπου για την διαδικασία ορίστηκαν ελάχιστος συντελεστής φόρτισης 1,3 (για τιμές μεγαλύτερες αυτής, θεωρείται ότι το υλικό της πτέρυγας αστοχεί) και κριτήριο σύγκλισης διαδοχικών επαναλήψεων το 10% της μέγιστης παραμόρφωσης της πτέρυγας. Το κριτήριο σύγκλισης της διαδικασίας ήταν αρκετά υψηλό λόγω του ότι παρουσιάζεται στο πλαίσιο ανάλυσης των λειτουργιών του προγράμματος, εξυπηρετώντας το σκοπό του εκτελώντας το πρόγραμμα μέχρι εκείνο το σημείο. Ο συνολικός χρόνος που λειτούργησε το λογισμικό για την

επίτευξη της αερο-δομικής σύγκλισης ήταν ~26 ώρες, όπου επιτευχθεί σύγκλιση στην 4^η επανάληψη χωρίς αστοχία, όπου:

$$\frac{|\varepsilon_4 - \varepsilon_3|}{\varepsilon_3} \approx 8,75\% < \varepsilon\%_{crit} = 10\%$$

$$FoS_{min,3} \approx 22.97 > 1.3 = FoS_{crit}$$

Τα αποτελέσματα τάσεων και παραμορφώσεων της πτέρυγας παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο στα σχήματα 5.14 και 5.15. Η εξέλιξη των μεγεθών που εμπλέκονται στον έλεγχο αστοχίας της πτέρυγας και σύγκλισης της διαδικασίας κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων παρουσιάζονται στο διάγραμμα 6.1 και στον πίνακα 6.2.



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα απεικόνισης της εξέλιξης του συντελεστή φόρτισης της διάταξης της πτέρυγας τύπου NACA 4507 και μετατόπισης του τμήματος του ακροπτερυγίου συναρτήσει του αριθμού επανάληψης της διαδικασίας αερο-δομικής σύγκλισης.

Data Type / Iteration	1	2	3	4
FoS	1.992	32.764	24.135	22.297
Tip Displacement	2.53E-01	8.60E-03	7.09E-03	7.71E-03
% Difference	-	96.61%	17.57%	8.75%

Πίνακας 6.2: Πίνακας απεικόνισης της εξέλιξης του συντελεστή φόρτισης της διάταξης της πτέρυγας, της μετατόπισης του τμήματος του ακροπτερυγίου και της ποσοστιαίας απόλυτης διαφοράς μεταξύ των μετατοπίσεων του ακροπτερυγίου σε διαδοχικές επαναλήψεις συναρτήσει του αριθμού επανάληψης της διαδικασίας αερο-δομικής σύγκλισης.

Μια ακόμη ένδειξη ότι η διαδικασία συγκλίνει, είναι η σταδιακή σταθεροποίηση των αεροδυναμικών δυνάμεων, κατά μήκος της πτέρυγας. Ορίζοντας τη διαφορά πίεσης μεταξύ της ίδιας επιμερισμένης περιοχής σε δύο διαδοχικά χρονικά βήματα της αερο-δομικής σύγκλισης:

$$\Delta P_{i,j,k} = |P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}| \quad , \quad k = 2,3,4$$

Προκύπτει ότι:

$$\overline{\Delta P_2} = 4,682 \text{ Pa} \quad , \quad s_2^2 = 37,521$$

$$\overline{\Delta P_3} = 3,891 \text{ Pa} \quad , \quad s_3^2 = 30,616$$

$$\overline{\Delta P_4} = 0,6983 \text{ Pa} \quad , \quad s_4^2 = 1,188$$

Όπου παρατηρείται ότι η μέση τιμή και η διακύμανση της διαφοράς πίεσης μεταξύ των επαναλήψεων φθίνουν, και στην τελευταία επανάληψη της αερο-δομικής σύγκλισης έχουν λάβει συγκριτικά πολύ μικρότερες τιμές. Αυτό είναι ένδειξη της σταδιακής σύγκλισης των αεροδυναμικών δυνάμεων και σωστής λειτουργίας της διαδικασίας αντιστοίχισής τους με τις επιμερισμένες περιοχές. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό και μέσω των σχημάτων 5.7 και 5.8.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Προϊόν της διπλωματικής εργασίας αποτελεί ένα λογισμικό παραμετροποίησης των διαδικασιών σχεδίασης, γένεσης πλέγματος και δομικής ανάλυσης πτερύγων, για τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης ροής – πτέρυγας και την επίτευξη αερο-δυναμικής σύγκλισης. Αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας αποτελούν οι τελικές παραμορφώσεις και τάσεις του υλικού της πτέρυγας, αλλά και οι αεροδυναμικές δυνάμεις που δέχεται όταν πλέον βρεθεί σε κατάσταση ισορροπίας με την υπάρχουσα ροή. Για τη δημιουργία του λογισμικού συντάχθηκε κώδικας σε γλώσσες Fortran, VBA και TCL, και χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα SolidWorks και PointWise για την επιτέλεση σχεδιαστικών λειτουργιών – δομικής ανάλυσης και τη δημιουργία πλέγματος αντίστοιχα. Για την επίλυση της ροής του 3D πλέγματος ροής χρησιμοποιήθηκε ο επιλύτης ροής PUMA της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ.

Το αερο-δομικό σύστημα το οποίο επιλύει το ανεπτυγμένο λογισμικό, αποτελείται από τα δύο ξεχωριστά υποσυστήματα της ρευστοδυναμικής και δομικής ανάλυσης. Τα αποτελέσματα εφαρμογής του λογισμικού παρείχαν ενδείξεις ότι η διαδικασία αλληλοτροφοδότησης μεταβλητών που ακολουθεί μεταξύ των δύο υποσυστημάτων οδηγεί σε αερο-δομική σύγκλιση, ελέγχοντας παράλληλα το ενδεχόμενο αστοχίας του υλικού της πτέρυγας. Όλες οι επιμέρους λειτουργίες του λογισμικού εκτελούνται αυτόματα και αποτελεσματικά. Λόγω των επιδόσεων και της αυτοματοποιημένης μορφής του, το λογισμικό είναι θεωρητικά ικανό να συνεργαστεί στο πλαίσιο μιας αερο-δομικής βελτιστοποίησης με λογισμικό εξελικτικών αλγορίθμων, όπως αυτό του EASY της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ. Το σημείο που απαιτείται η περισσότερη προσοχή σε μια τέτοια εφαρμογή είναι τα 3D πλέγματα. Με μία σχετική προμελέτη των τιμών των παραμέτρων παραγωγής των 3D πλεγμάτων ροής και πτέρυγας, το λογισμικό μπορεί να κατασκευάσει ικανοποιητικά πλέγματα FEM και CFD.

Εν κατακλείδι, το ανεπτυγμένο λογισμικό παραμετροποιεί επιτυχώς τις μεταβλητές των διαφόρων σταδίων της αερο-δομικής ανάλυσης, αυτοματοποιημένα και με ικανοποιητική αυτονομία. Τα υποσυστήματα ρευστοδυναμικής και δομικής ανάλυσης επιλύονται και επικοινωνούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα μεταξύ τους, δίνοντας ως αποτέλεσμα τη συμπεριφορά της πτέρυγας σε

μόνιμη κατάσταση κάτω από τις εξεταζόμενες συνθήκες. Η παραμετροποίηση πολλών μεταβλητών των σταδίων σχεδίασης – γένεσης πλέγματος – δομικής ανάλυσης, σε συνδυασμό με τον ορισμό των χαρακτηριστικών της ροής και του τρόπου επίλυσής της από τον PUMA, οδηγεί σε μεγάλη εξοικονόμηση χρόνου και δίνει στο χρήστη σημαντική δημιουργική ευχέρεια στη διερεύνηση τύπων πτερύγων και την άντληση αποτελεσμάτων όσον αφορά την αερο-δομική συμπεριφορά τους.

Παράρτημα Α΄

Φύλλο Εισαγωγής Δεδομένων

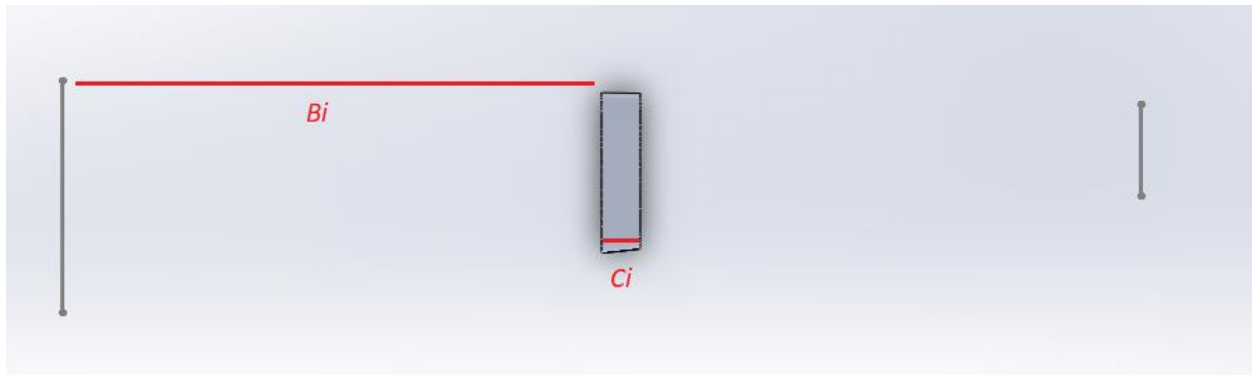
Σε πολλά σημεία της διπλωματικής εργασίας αναφέρθηκε η παραμετροποίηση μεταβλητών ώστε ο χρήστης να μπορεί να θέσει τις επιθυμητές εισόδους. Η παραμετροποίηση αυτή πραγματοποιήθηκε με τη δημιουργία ενός αρχείου Excel, στα πεδία του οποίου συμπληρώνεται οι τιμές των παραμετροποιημένων μεγεθών. Το αρχείο Excel ονομάζεται Data.xlsx και διαθέτει 3 καρτέλες στις οποίες καθορίζονται οι παράμετροι της κάθε διαδικασίας (σχεδίασης – γένεσης πλέγματος – δομικής ανάλυσης και αερο-δομικής σύγκλισης). Ακολουθεί παρουσίαση των παραπάνω φύλλων δεδομένων και των παραμέτρων που καθορίζονται με την συμπλήρωση του κάθε πεδίου.

Α'.1 Παράμετροι Σχεδίασης

Το πρώτο φύλλο του αρχείου Excel είναι το DesignParameters που εμπεριέχει τις παραμέτρους σχεδίασης της πτέρυγας που θα μελετηθεί στην αερο-δομική ανάλυση. Υπάρχουν συνολικά 5 ξεχωριστές περιοχές, που αφορούν τον σχεδιασμό των νευρώσεων, των δοκών, του εξωτερικού τοιχώματος, γενικά χαρακτηριστικά της πτέρυγας και το υλικό των επιμέρους τμημάτων. Η κάθε περιοχή περιλαμβάνει τις παραμέτρους που αφορούν τη διαμόρφωση του εκάστοτε στοιχείου της πτέρυγας. Παρακάτω γίνεται αναλυτική παρουσίασή τους και συσχετίσής τους με την αντίστοιχη παράμετρο στην τυπολογία:

Νευρώσεις (Ribs) → Σχήμα Α'.1

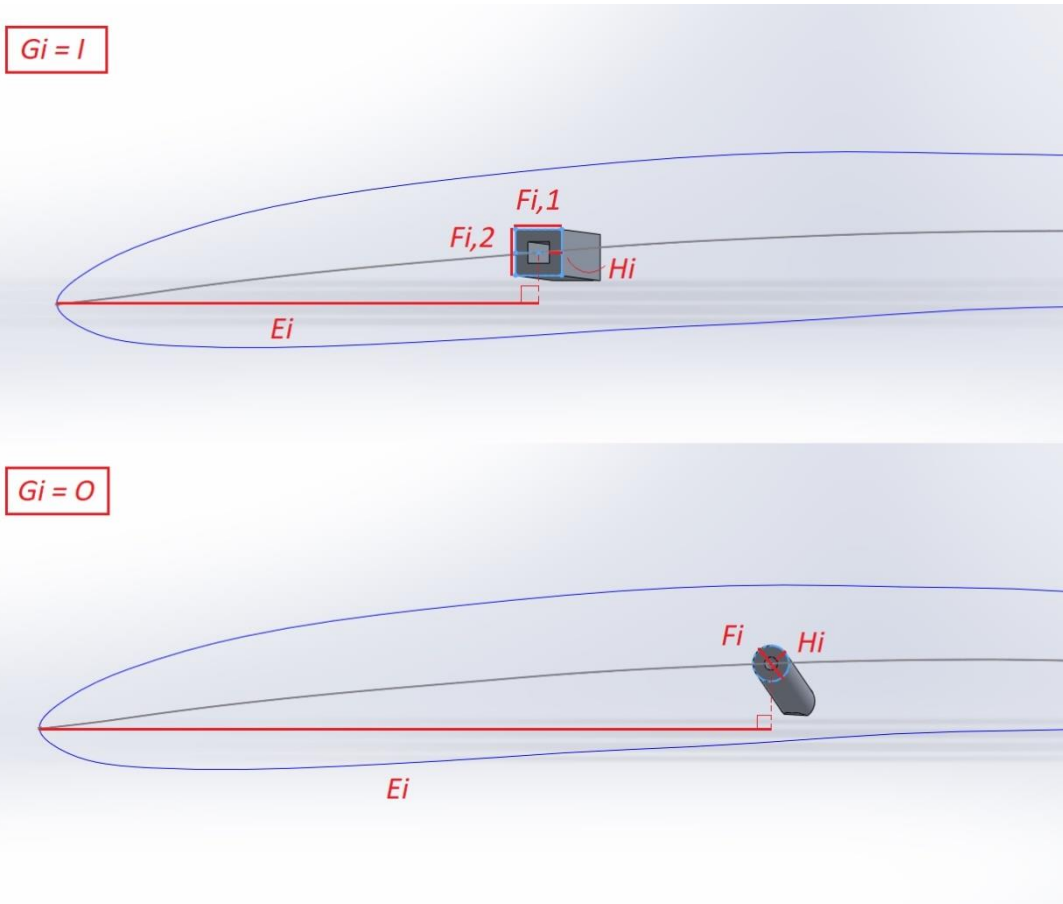
- Στήλη B: Απόσταση της νεύρωσης δείκτη στήλης A από το επίπεδο xy ($d_{v,i}^x$)
- Στήλη C: Πάχος της νεύρωσης δείκτη στήλης A (b_i^X)



Σχήμα Α'.1: Κάτοψη της κατασκευαζόμενης πτέρυγας όπου απεικονίζεται η απόσταση B_i αρχής της αεροτομής από την βάση της πτέρυγας και το πάχος C_i της.

Δοκοί (Spars) → Σχήμα Α'.2

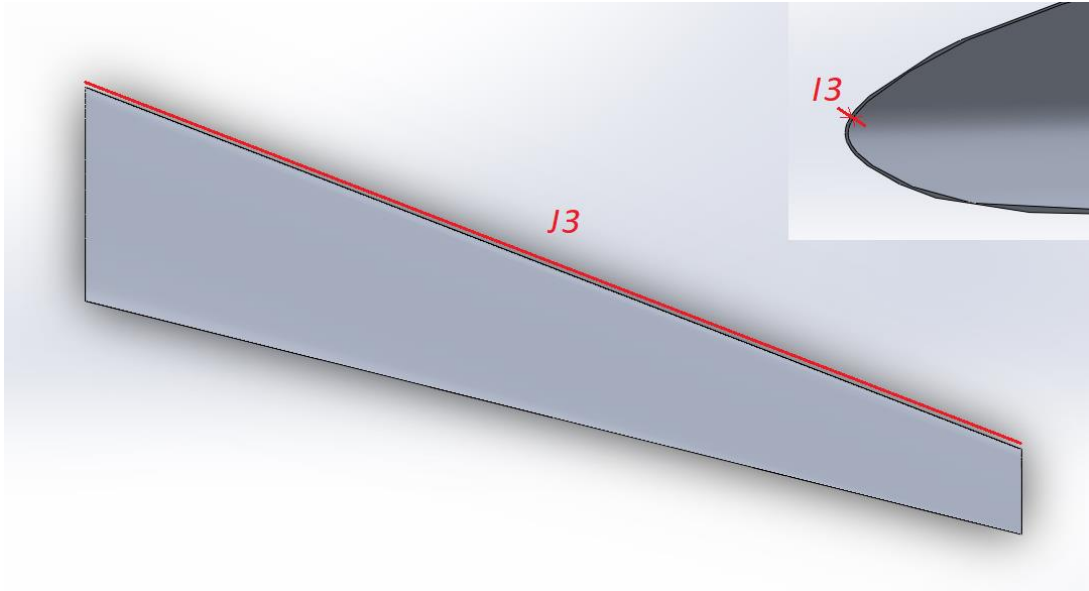
- Στήλη E: Απόσταση της δοκού από την ακμή προσβολής της αεροτομής βάσης ($d_{\delta,i}^X$)
- Στήλη F: Διαστάσεις διατομής δοκού ($[[I]] \rightarrow$ μήκος: l_{δ}^X , $[[O]] \rightarrow$ διάμετρος: l_{δ}^X)
- Στήλη G: Τύπος διατομής δοκού ($[[I]] \rightarrow$ τετραγωνική, $[[O]] \rightarrow$ κυκλική)
- Στήλη H: Πάχος τοιχώματος διατομής



Σχήμα Α'.2: Πλάγια όψη της πτέρυγας όπου φαίνεται η απόσταση E_i ως η προβολή της απόστασης του κέντρο της διατομής από την αρχής της αεροτομής βάσης, οι διαστάσεις F_i των διατομών (για την ορθογωνική διατομή οι διαστάσεις ορίζονται ως $F_{i,1} \times F_{i,2}$) και το πάχος H_i των διατομών και για τις δύο μορφές διατομών αντιστοίχως (I/O).

Εξωτερικό Τοίχωμα (Skin) → Σχήμα Α'.3

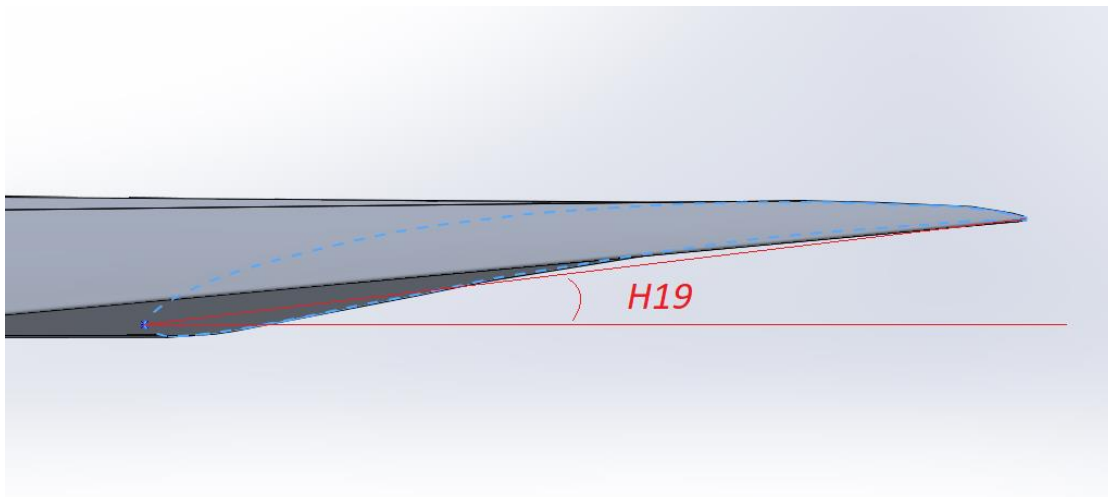
- Κελί I₃: Πάχος εξωτερικού τοιχώματος
- Κελί J₃: Μήκος πτέρυγας (l_{II}^X)

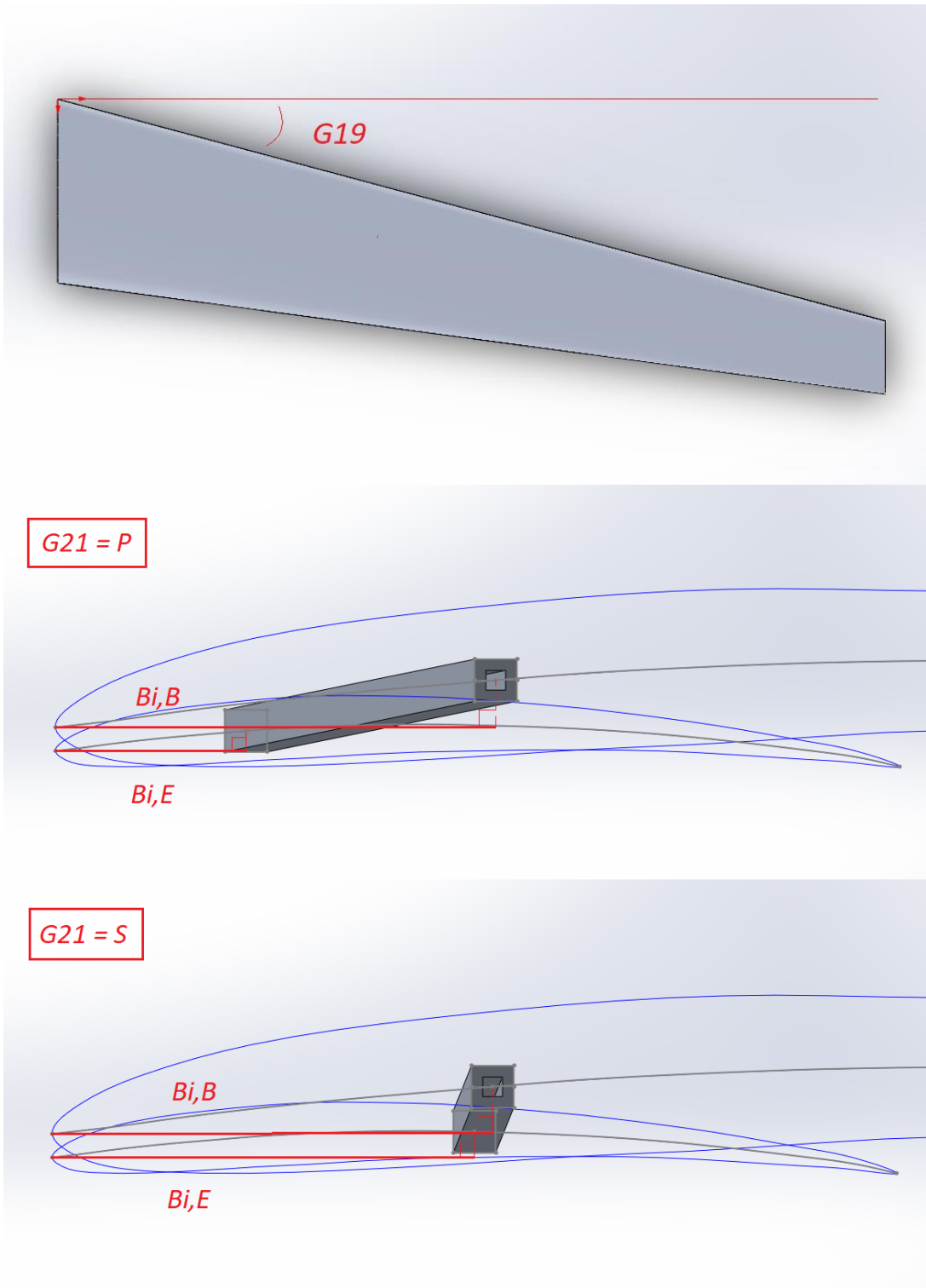


Σχήμα Α'.3: Κάτοψη της πτέρυγας και ορισμός του μήκους της εξωτερικής της επιδερμίδας J₃ (κεντρική εικόνα) και πλάγια όψη υψηλής εστίασης στο σημείο σύνδεσης με το σκελετό του αεροσκάφους για ορισμό του πάχους του εξωτερικού τοιχώματος I₃.

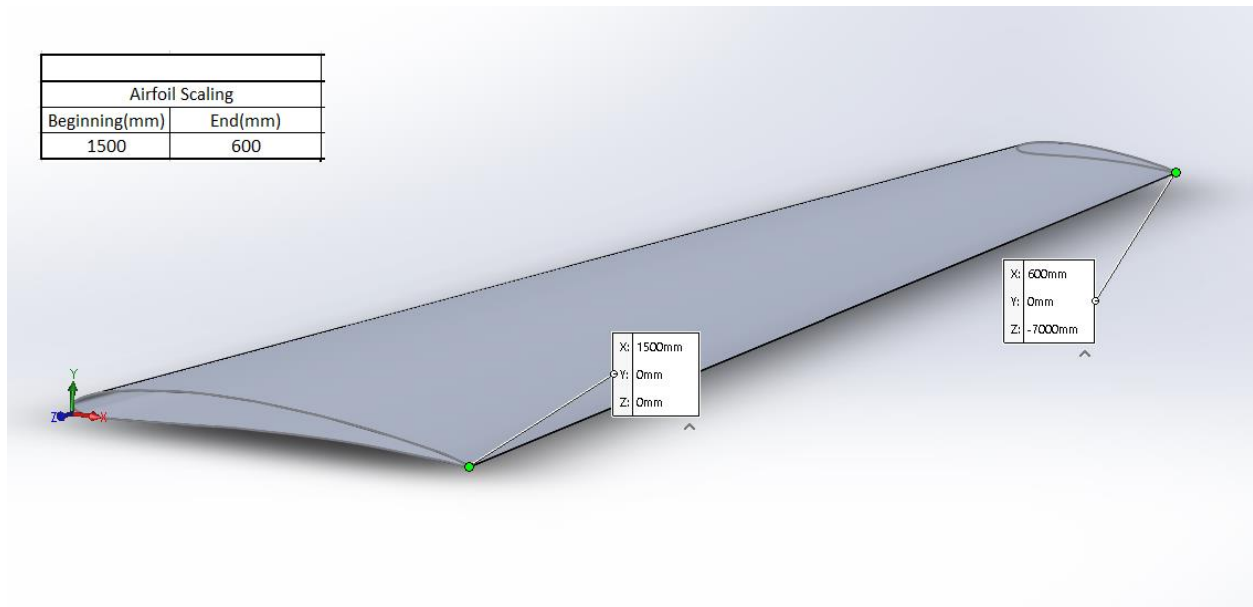
Ιδιότητες Πτέρυγας (Wing Properties) → Σχήματα Α'.4, Α'.5

- Κελί E₁₉: Μήκος αεροτομής βάσης ($l_{\alpha,\beta}^X$)
- Κελί F₁₉: Μήκος αεροτομής τέλους ($l_{\alpha,\tau}^X$)
- Κελί G₁₉: Γωνία ακμής προσβολής πτέρυγας – επιπέδου xy (φ_X)
- Κελί H₁₉: Γωνία στροφής αεροτομής τέλους – επιπέδου xz (θ_X)
- Κελί G₂₁: Τρόπος σύνδεσης δοκών στην αεροτομή τέλους ($[[P]] \rightarrow B_{i,E} = B_{i,B}/l_{\alpha,\beta}^X, [[S]] \rightarrow B_{i,E} = B_{i,B}$)





Σχήμα Α'.4: (α) Γωνία H_{19} μεταξύ αεροτομής τέλους και επιπέδου xz , (β) Γωνία G_{19} ακμής προσβολής της πτέρυγας και επιπέδου yz , (γ) Πλάγια όψη πτέρυγας στην οποία φαίνονται οι αποστάσεις κέντρου διατομής της δοκού από το σημείο προσβολής της αεροτομής βάσης και τέλους και συμβολίζονται ως $B_{i,B}$ και $B_{i,E}$ αντιστοίχως, και για τις δύο περιπτώσεις τρόπου σύνδεσης δοκών.



Σχήμα Α'.5: Τριδιάστατη όψη του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας με τιμές $E_{19} = 1500$ και $F_{19} = 600$ για την αεροτομή βάσης και τέλους αντίστοιχα και η συντεταγμένες των δύο σημείων εκφυγής αυτών υπό μηδενική γωνία κλίσης κατασκευής του φτερού.

Υλικό (Material):

- Κελί J8: Υλικό νευρώσεων πτέρυγας (βάσει βιβλιοθηκών υλικού του SolidWorks)
- Κελί J10: Υλικό δοκών πτέρυγας (βάσει βιβλιοθηκών υλικού του SolidWorks)
- Κελί J12: Υλικό εξωτερικού τοιχώματος πτέρυγας (βάσει βιβλιοθηκών υλικού του SolidWorks)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Ribs			Spars					Skin	
2	No.	Pos.(mm)	Width(mm)	No.	Pos.(mm)	Dimensions(mm)	Type(I/O)	Thickness(mm)	Width(mm)	Length(mm)
3	1			1						
4	2			2						
5	3			3						
6	4			4						
7	5			5						Material
8	6			6						Ribs
9	7			7						Spars
10	8			8						
11	9			9						Skin
12	10			10						
13	11									
14	12									
15	13									
16	14									
17	15									
18	16									
19	17									
20	18									
21	19									
22	20									

Wing Properties			
Airfoil Scaling		Sweepback	Curve
Beginning(mm)	End(mm)	Angle(Deg.)	Angle(Deg.)
		Spar Connection (S/P)	

Σχήμα Α'.6: Καρτέλα DesignParameters φύλλου εισαγωγής δεδομένων: Κίτρινη περιοχή: παράμετροι νευρώσεων, πράσινη περιοχή: παράμετροι δοκών, κόκκινη περιοχή: παράμετροι εξωτερικού τοιχώματος, γκρι περιοχή: υλικά πτέρυγας, πορτοκαλί περιοχή: χαρακτηριστικά πτέρυγας.

A'.2 Παράμετροι Γένεσης Πλέγματος

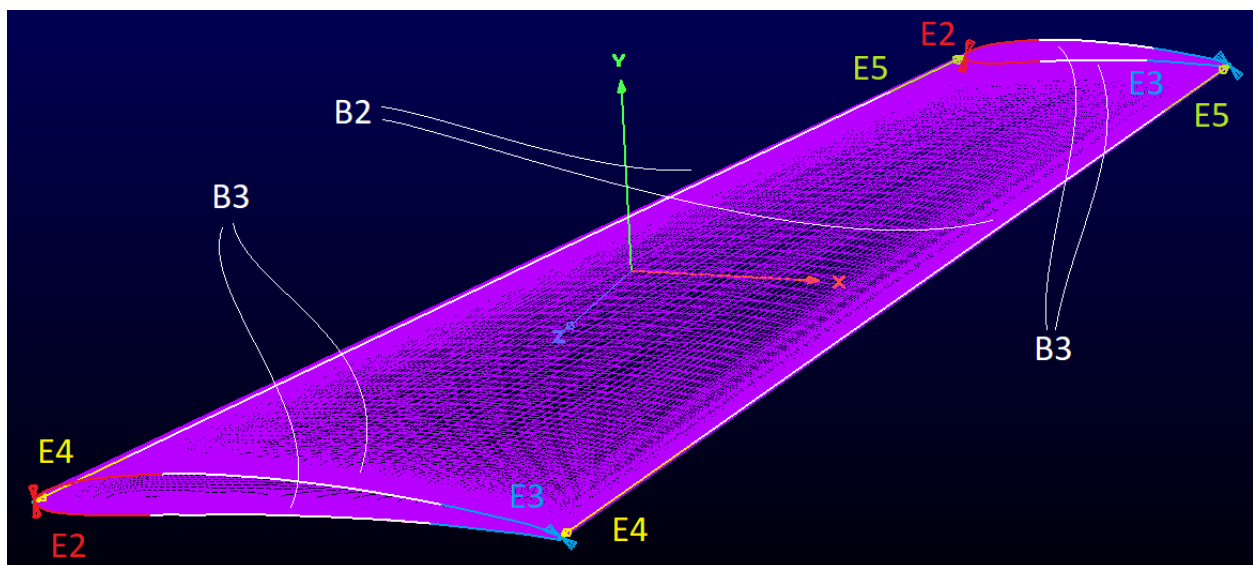
Το δεύτερο φύλλο του αρχείου Excel είναι το GridParameters που εμπεριέχει τις παραμέτρους ορισμού του πλέγματος που θα επιλυθεί από τον εκάστοτε επιλύτη ροής. Υπάρχουν συνολικά 4 ξεχωριστές περιοχές, που αφορούν το πλήθος, την κατανομή, και τη θέση των σημείων των γεωμετρικών στοιχείων του 3Δ πλέγματος ροής, και μία ένδειξη πρόχειρου υπολογισμού των structured-like 3Δ στοιχείων του πλέγματος κοντά στα τοιχώματα της πτέρυγας, όπου μοντελοποιείται το συνεκτικό στρώμα της ροής. Ειδικότερα:

Πλήθος σημείων (Grid Points) → Σχήματα A'.7, A'.8

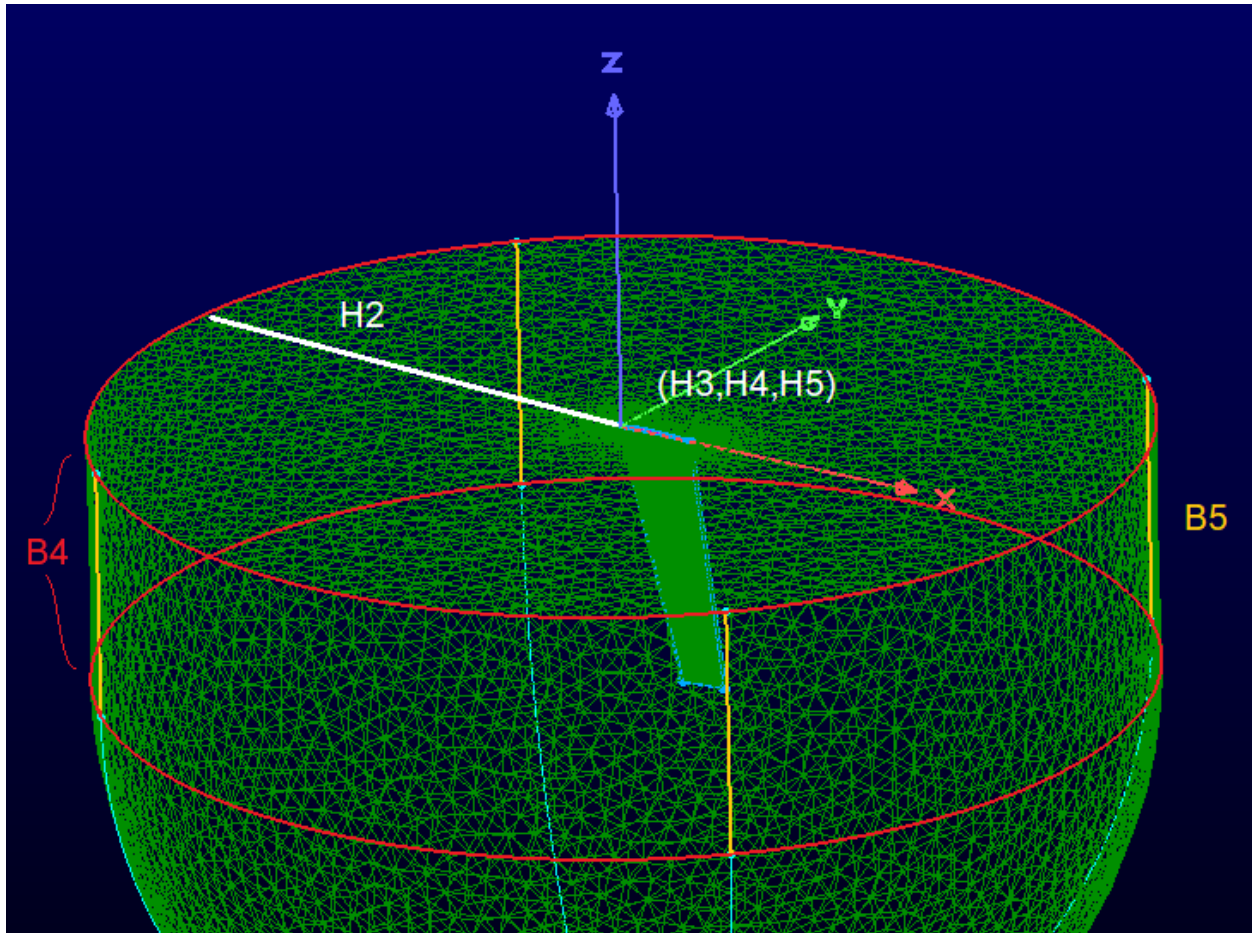
- Κελί B2: Πλήθος σημείων ακμών προσβολής και εκφυγής ροής της πτέρυγας
- Κελί B3: Πλήθος σημείων αεροτομών βάσεως και τέλους της πτέρυγας
- Κελί B4: Πλήθος σημείων βάσεων κυλίνδρου περιβάλλοντος
- Κελί B5: Πλήθος σημείων συνδέσμων κυλίνδρου περιβάλλοντος

Κατανομή σημείων (Grid Spacing): → Σχήμα A'.7

- Κελί E2: Απόσταση των δύο αρχικών σημείων των ακμών προσβολής της ροής στις αεροτομές βάσης και τέλους της πτέρυγας
- Κελί E3: Απόσταση των δύο αρχικών σημείων των ακμών εκφυγής της ροής στις αεροτομές βάσης και τέλους της πτέρυγας
- Κελί E4: Απόσταση των δύο αρχικών σημείων των ακμών προσβολής και εκφυγής κατά μήκος της πτέρυγας στην πλευρά της αεροτομής βάσης
- Κελί E5: Απόσταση των δύο αρχικών σημείων των ακμών προσβολής και εκφυγής κατά μήκος της πτέρυγας στην πλευρά της αεροτομής τέλους



Εικόνα A'.7: Πλέγμα που παρήχθη στην επιφάνεια του μοντέλου της υπό κατασκευής πτέρυγας και οπτικοποίηση των τιμών που αναλύθηκαν ως προς τον καθορισμό του πλήθους και των κατανομών των διαφόρων καμπυλών που ορίζουν τα τοιχώματα της πτέρυγας.



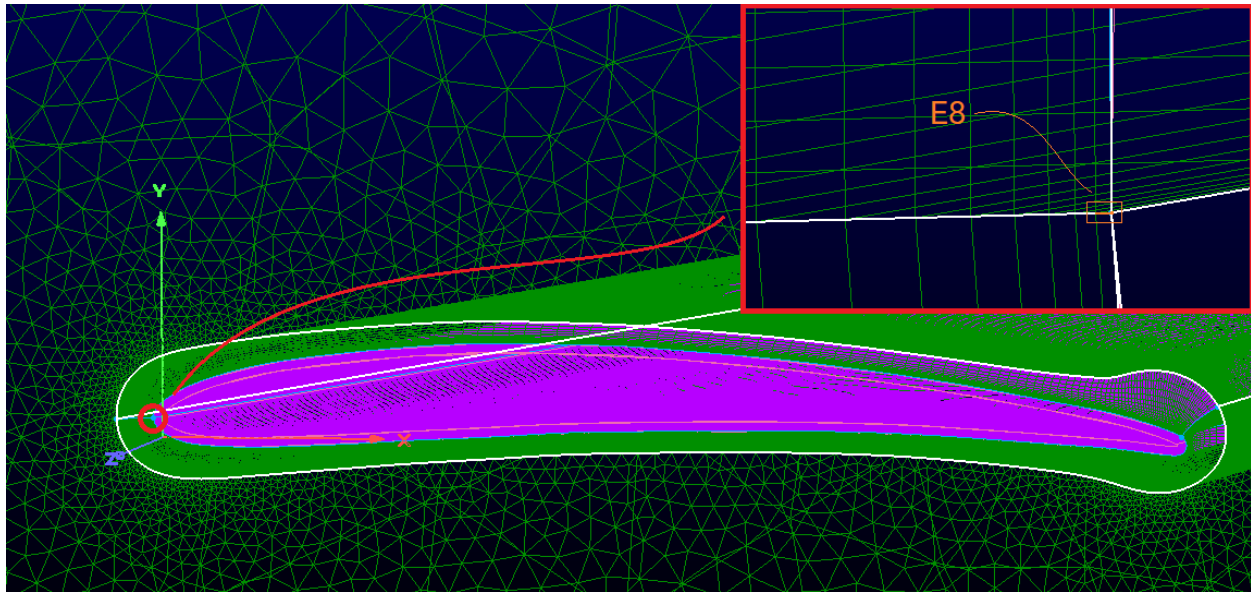
Εικόνα Α'.8: Παράδειγμα του τελικού πλέγματος που καθορίζει τον χώρο επίλυσης της ροής και αναπαρίστανται αναλυτικά τα ορίσματα που αφορούν το περιβάλλον της ροής προς επίλυση.

Μεταβλητές περιβάλλοντος (Environment) → Σχήμα Α'.8

- Κελί H₂: Ακτίνα κύκλου βάσης περιβάλλουσας ροής
- Κελί H₃: Συντεταγμένη x κέντρου κύκλου βάσης περιβάλλουσας ροής
- Κελί H₄: Συντεταγμένη y κέντρου κύκλου βάσης περιβάλλουσας ροής
- Κελί H₅: Συντεταγμένη z κέντρου κύκλου βάσης περιβάλλουσας ροής

Πλέγμα συνεκτικού στρώματος (Boundary Layer) → Σχήμα Α'.9

- Κελί E₈: Απόσταση των δύο αρχικών σημείων ορισμού του ύψους του πρώτου επιφανειακού στοιχείου του συνεκτικού στρώματος κάθετα στην αεροτομή βάσης και τέλους ($2y_p$) (m)
- Κελί E₉: Συντελεστής αύξησης της απόστασης του κελιού E₈ για κάθε επόμενο σημείο ορισμού των επιφανειακών στοιχείων του συνεκτικού στρώματος



Εικόνα Α'.9: Εστίαση στην ακμή προσβολής της αεροτομής βάσης για τον σχεδιαστικό προσδιορισμό της παραμέτρου με την οποία επιτυγχάνεται η λεπτομερής κατασκευή του τμήματος του πλέγματος για την επίλυση των εξισώσεων ροής στο συνεκτικό στρώμα.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Grid Points			Grid Spacing			Environment	
2	Wing			Attack			Radius	
3	Airfoils			Exit			Center X	
4	Cylinder Bases			Fuselage			Center Y	
5	Cylinder Connectors			Wing Tip			Center Z	
6								
7	Estimated Structured Elements			Close to Wing:				
8	0			Spacing				
9				Scale Factor				

Εικόνα Α'.10: Καρτέλα GridParameters φύλλου εισαγωγής δεδομένων: Κίτρινη περιοχή: πλέγμα συνεκτικού στρώματος, πράσινες περιοχές: παράμετροι καθορισμού πλήθους / κατανομής σημείων επιφανειακών πλεγμάτων πτέρυγας, κόκκινη περιοχή: παράμετροι καθορισμού πλήθους / κατανομής σημείων επιφανειακών πλεγμάτων περιβάλλουσας ροής, κίτρινη περιοχή: παράμετροι καθορισμού διαστάσεων / κατανομής σημείων επιφανειακών πλεγμάτων συνεκτικού στρώματος

Α'.3 Παράμετροι Επίλυσης Ροής

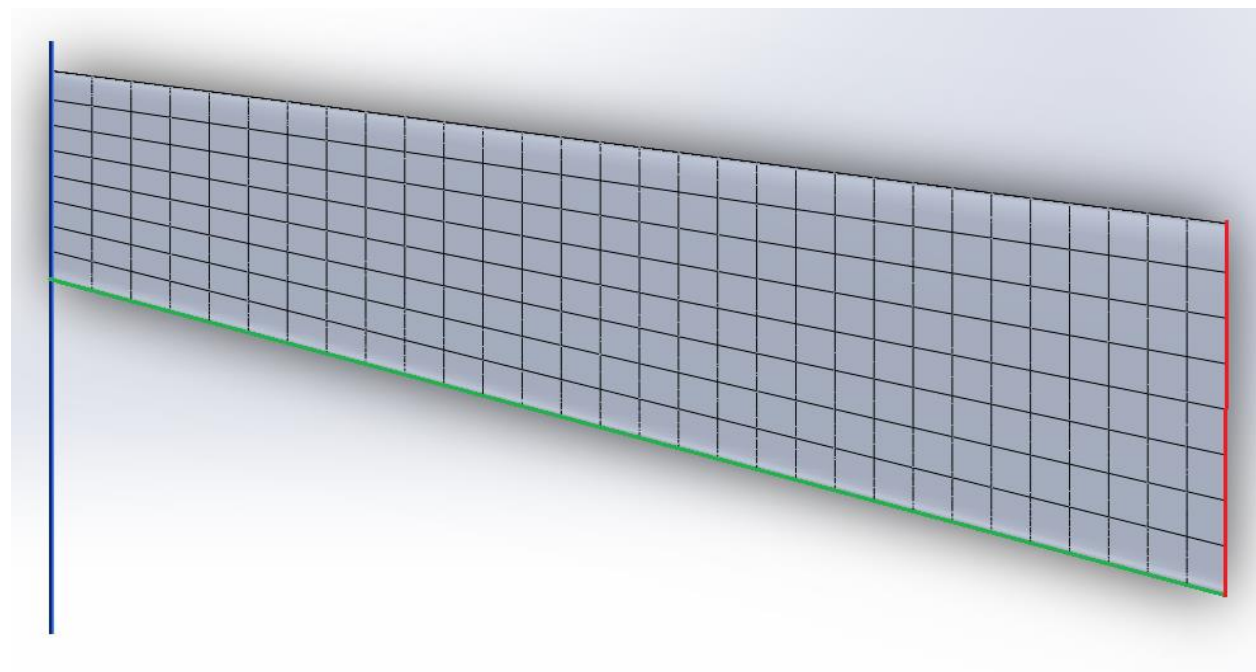
Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, το φύλλο εισαγωγής δεδομένων δεν διαθέτει πεδία εισαγωγής ορισμάτων που αφορούν την επίλυση της ροής, λόγω της προ υπάρχουσας διεπιφάνειας που έχει αναπτυχθεί για τον επιλύτη PUMA. Σε συγκεκριμένη θέση εντός του φακέλου που περιέχει το πακέτο του προγράμματος, βρίσκεται αντίγραφο του αρχείου καθορισμού εισόδων solver.ini του επιλύτη PUMA, όπου μπορούν να οριστούν τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες της ροής, και ο τρόπος και η διάρκεια επίλυσής της. Το λογισμικό μεταφέρει αυτό το αρχείο στον εξυπηρετητή της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ πριν την έναρξη επίλυσης της ροής ώστε να επιλύεται το μοντέλο σύμφωνα με τις συνθήκες και μεθόδους που έχουν οριστεί.

A'.4 Παράμετροι Δομικής Ανάλυσης

Το τρίτο φύλλο του αρχείου Excel είναι το StressTestParameters που περιλαμβάνει τις παραμέτρους που συμβάλουν στην διεξαγωγή της δομικής ανάλυσης της πτέρυγας. Το σύνολο των παραμέτρων που ορίζονται από το χρήστη χωρίζεται σε 4 διαφορετικές περιοχές, που αφορούν τον καθορισμό των επιμερισμένων περιοχών κατανομής της πίεσης, τον τρόπο παραγωγής του 3Δ πλέγματος της πτέρυγας, τα χαρακτηριστικά της μη-γραμμικής στατικής προσομοίωσης (δυναμικό ψευδο-χρονικό βήμα, εξισώσεις ισορροπίας, τύπος επιλύτη) και τα κριτήρια διεξαγωγής της αερο-δομικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα:

Πλήθος επιμερισμένων περιοχών επιφάνειας πτέρυγας (Stress Domain Distribution) → Σχήμα A'.11

- Κελί B₂: Πλήθος περιοχών αντιστοίχισης των αεροδυναμικών δυνάμεων κατά μήκος των αεροτομών τέλους - βάσης
- Κελί B₃: Πλήθος περιοχών αντιστοίχισης των αεροδυναμικών δυνάμεων κατά μήκος των ακμών προσβολής εκφυγής της ροής της πτέρυγας



Εικόνα A'.11: Κάτοψη του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας, όπου η πράσινη πλευρά αντιστοιχεί στην τιμή B₃ ενώ η κόκκινη πλευρά αντιστοιχεί στην τιμή B₂.

Ιδιότητες 3Δ πλέγματος πτέρυγας (Meshing Parameters)

- Κελί B₆: Μέγιστο μήκος 3Δ στοιχείου πλέγματος (S_{max})
- Κελί B₇: Ελάχιστο μήκος 3Δ στοιχείου πλέγματος (S_{min})
- Κελί B₈: Αριθμός 3Δ στοιχείων πλέγματος για περιγραφή κυκλικών επιφανειών (n_{el})
- Κελί B₉: Ρυθμός αύξησης μεγέθους των 3Δ στοιχείων του πλέγματος (GR)

Ιδιότητες αερο-δομικής σύγκλισης (Aero-Structural Convergence Criteria)

- Κελί G₂: Κριτήριο σύγκλισης αερο-δομικής ανάλυσης ($\epsilon\%_{crit}$)
- Κελί G₃: Ελάχιστος αποδεκτός συντελεστής φόρτισης υλικού ($FO S_{crit}$)

Μεταβαλλόμενο ψευδο-χρονικό βήμα (Dynamic Time Step):

- Κελί G₆: Αρχική τιμή ψευδο-χρονικού βήματος επίλυσης (t_{init}^S)
- Κελί G₇: Ελάχιστη πιθανή τιμή ψευδο-χρονικού βήματος (t_{min}^S)
- Κελί G₈: Μέγιστη πιθανή τιμή ψευδο-χρονικού βήματος (t_{max}^S)
- Κελί G₉: Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων επαναπροσδιορισμού της διάρκειας του ψευδο-χρονικού βήματος για την επίτευξη σύγκλισης (n_t)

Εξισώσεις Ισορροπίας (Equilibrium Equations)

- Κελί G₁₂: Συχνότητα επίλυσης εξισώσεων ανά χρονικό βήμα (r_e)
- Κελί G₁₃: Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων για κάθε χρονικό βήμα (n_{max}^e)
- Κελί G₁₄: Κριτήριο σύγκλισης αριθμητικής επίλυσης εξισώσεων ισορροπίας (c_e)
- Κελί G₁₅: Συντελεστής αποφυγής απόκλισης λύσης με την προσαρμογή των πινάκων αντοχής του υλικού

Επιλύτης προσομοίωσης (Simulation Solver)

- Κελί G₁₇: Τύπος επιλύτη (1 → Direct Sparse, 2 → FFEplus, 3 → Auto)

	A	B	C	D	E	F	G
1	Stress Domain Distribution			Total Domains		Aero - Structural Convergence Criteria	
2	Horizontal			0		Deformation ratio (%)	
3	Vertical					Factor of Safety	
4							
5	Meshing Parameters					Dynamic Time Step	
6	Max. Element Size (mm)					Initial Increment (s)	
7	Min. Element Size (mm)					Min. Time Step (s)	
8	No. of Elements in Circle					Max. Time Step (s)	
9	Growth Ratio					Adjustments No.	
10						Step Duration	
11						Equilibrium Equations	
12						Equilibrium Frequency	
13						Equilibrium Max. Iterations	
14						Convergence Tolerance	
15						Singularity Elimination	
16						Simulation Solver	
17						Type	

Εικόνα Α΄.12: Καρτέλα StressTestParameters φύλλου εισαγωγής δεδομένων. Κίτρινη περιοχή: επιμερισμένες περιοχές κατανομής πίεσης, κόκκινη περιοχή: χαρακτηριστικά 3D πλέγματος πτέρυγας, μπλε περιοχή: κριτήρια σύγκλισης αερο-δομικής ανάλυσης, πράσινη περιοχή: χαρακτηριστικά δομικής ανάλυσης

A'.5 Τύπος Αεροτομής

Ο τύπος της αεροτομής της πτέρυγας καθορίζεται από ένα σύνολο σημείων περιγραφής του σχήματος της, αδιάστατων συντεταγμένων (x,y), που βρίσκονται εντός του αρχείου Cords_Full.dat στον φάκελο του πακέτου του λογισμικού. Το αρχείο έχει δύο στήλες, όπου στην πρώτη σημειώνονται οι τετμημένες των σημείων καθορισμού της αεροτομής και στη δεύτερη οι τεταγμένες τους. Μεταξύ των δύο στηλών παρεμβάλλεται μονοδιάστατο κενό (" ") για τον προγραμματιστικό διαχωρισμό τους. Τα σημεία πρέπει να είναι διατεταγμένα εντός τους αρχείου σύμφωνα με την τιμή τετμημένης τους και το πλήθος των σημείων περιγραφής της πλευράς υποπίεσης της αεροτομής να είναι ίσο με αυτό της πλευράς υπερπίεσης. Έτσι διασφαλίζεται η σωστή εφαρμογή της μεθοδολογίας σχεδίασης της αεροτομής και της καμπύλης κυρτότητάς της από το λογισμικό. Σημειώνεται ότι προφανώς οι συντεταγμένες του τελευταίου σημείου της λίστας πρέπει να ταυτίζονται με του πρώτου, ώστε να ορίζεται από αυτά κλειστό σχήδιο.

Παράρτημα Β΄

Λογισμικό Αερο-δομικής Ανάλυσης

Το πακέτο του λογισμικού περιλαμβάνει ένα φάκελο αρχείων που εμπεριέχει όλα τα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιεί και παράγει κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Ο φάκελος ονομάζεται D2F2S (Design To Fluid To Structural) και περιλαμβάνει το κεντρικό κομμάτι του λογισμικού, D2F2S.exe, το αρχείο Excel του φύλλου εισαγωγής δεδομένων του Παραρτήματος Α΄, Data.xlsx, το αρχείο καθορισμού της αεροτομής της υπό διερεύνηση πτέρυγας, Cords_Full.dat και δύο φακέλους που περιέχουν τον κώδικα που συντάχθηκε για τα επιμέρους προγράμματα και αρχεία που παράγονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, Code, και τα αρχεία των σχεδιασμένων μοντέλων της πτέρυγας και της μη-γραμμικής στατικής προσομοίωσης, Parts.

Name	Type	Size
D2F2S	Application	52 KB
Cords_Full	Text Document	1 KB
Data	Microsoft Excel W...	13 KB
Code	File folder	
Parts	File folder	

Σχήμα Β΄.1: Το πακέτο των διαφόρων αρχείων που εμπεριέχεται εντός του φακέλου του τελικού προγράμματος.

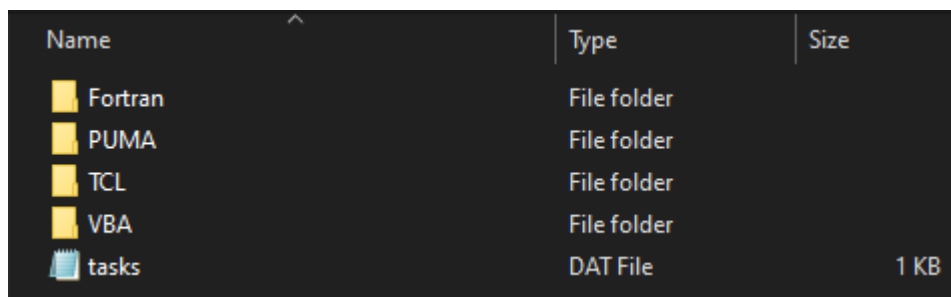
Εντός του φακέλου Code υπάρχουν 4 επιμέρους φάκελοι που περιλαμβάνουν τον κώδικα και τα αρχεία που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια των λειτουργιών του λογισμικού, και το αρχείο tasks.dat, το οποίο εμπεριέχει δείκτες της διαδικασίας αερο-δομικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, το

αρχείο tasks.dat περιέχει δείκτη ένδειξης σύγκλισης ή αστοχίας της ανάλυσης, την καταγεγραμμένη παραμόρφωση της πτέρυγας της πρώτης, προτελευταίας και τελευταίας αερο-δομικής επανάληψης, τον ελάχιστο συντελεστή φόρτισης της διάταξης στην τελευταία επανάληψη και τον δείκτη της τελευταίας επανάληψης της αερο-δομικής ανάλυσης.

Στον φάκελο Fortran εμπεριέχεται το σύνολο του κώδικα γλώσσας Fortran του κεντρικού προγράμματος D2F2S. Στον φάκελο PUMA βρίσκονται αρχεία που αφορούν την επικοινωνία με τον εξυπηρετητή της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ και τις αεροδυναμικές δυνάμεις. Ειδικότερα, υπάρχει το αρχείο solver.ini που μεταφέρεται στον εξυπηρετητή της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ για τον καθορισμό της μεθόδου και των μεγεθών της επίλυσης ροής, αρχεία FEM.patch και FEM_NEW.patch τα οποία αποτελούν στάδιο επεξεργασίας του αρχείου πριν αυτό ανέβει στον εξυπηρετητή, το αρχείο midcords που περιέχει τις συντεταγμένες x,y,z και το εμβαδόν επιφανειών των επιμερισμένων περιοχών της επιφάνειας της πτέρυγας στην εκάστοτε εφαρμογή, και τα αρχεία FEMi.nodalForces, stressi.dat που αποτελούν το αρχείο των αεροδυναμικών δυνάμεων που προέκυψε από τον PUMA και τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν βάσει αυτού και του επιμερισμού της επιφάνειας της πτέρυγας την επανάληψη i της αερο-δομικής ανάλυσης.

Στον φάκελο TCL εμπεριέχονται αρχεία που αφορούν τη γένεση πλέγματος μέσω της χρήσης του PointWise. Συγκεκριμένα, εκεί βρίσκεται το αρχείο pntprmt.txt που εμπεριέχει τις παραμέτρους καθορισμού του πλέγματος που έχει εισάγει ο χρήστης στην εκάστοτε εφαρμογή, το αρχείο WingD2F.txt που αποτελεί το πρότυπο επανεγγραφής του αρχείου οδηγιών ενεργειών εκτέλεσης του PointWise σε συνδυασμό με τα δεδομένα του pntprmt.txt, τα αρχεία WingD2F.glf και WingSU2.glf σύμφωνα με τα οποία πραγματοποιείται η δημιουργία του πλέγματος και η εξαγωγή του τύπου αρχείου FEM.su2, που μεταφέρεται στον εξυπηρετητή της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ για την επίλυσή του.

Στον φάκελο VBA περιλαμβάνεται το σύνολο του κώδικα σχεδίασης – δομικής ανάλυσης της πτέρυγας με τη χρήση του SolidWorks. Τα αρχεία εντός αυτού είναι συνολικά 3, το Design_Full.swp που σχεδιάζει τα επιμέρους τμήματα της πτέρυγας και συναρμολογεί τη διάταξη της πτέρυγας, το Domain_Creation.swp που επιμερίζει την επιφάνεια του εξωτερικού τοιχώματος στις επιθυμητές περιοχές και παράγει τα αρχεία επιφάνειας και θέσεως των κέντρων τους (midcords) και το Stress_Test.swp που συνθέτει και επιλύει το μοντέλο της δομικής ανάλυσης της πτέρυγας.



Name	Type	Size
Fortran	File folder	
PUMA	File folder	
TCL	File folder	
VBA	File folder	
tasks	DAT File	1 KB

Σχήμα Β'.2: Περιεχόμενα αρχείου Code του πακέτου λογισμικού.

Εντός του φακέλου Parts υπάρχουν οι φάκελοι Flow Redesigns και Wing Nonlinear, και τα αρχεία των σχεδιασμένων μοντέλων και του συναρμολογήματος της πτέρυγας που δημιουργούνται από την εκτέλεση του Design_Full.swp. Ο φάκελος Flow Redesigns εμπεριέχει την ανακατασκευή του εξωτερικού τοιχώματος της πτέρυγας του πιο πρόσφατου βήματος αερο-δομικής σύγκλισης σε τύπους αρχείων .sldprt και .igs, όπου το τελευταίο χρησιμοποιείται από το PointWise με την εκτέλεση του WingD2F.glf για τον ορισμό του σχήματος της πτέρυγας στο 3D πλέγμα ροής. Ο φάκελος Wing Nonlinear περιλαμβάνει όλα τα αρχεία ρυθμίσεων και αποτελεσμάτων του μοντέλου της μη-γραμμικής στατικής προσομοίωσης της πιο πρόσφατης αερο-δομικής επανάληψης.

Name	Type	Size	Tags
Flow Redesigns	File folder		
Wing Nonlinear	File folder		
Airfoil1	SLDPRT File	2,570 KB	
Airfoil2	SLDPRT File	1,057 KB	
Airfoil3	SLDPRT File	1,055 KB	
Airfoil4	SLDPRT File	1,055 KB	
Airfoil5	SLDPRT File	1,054 KB	
Airfoil6	SLDPRT File	363 KB	
Airfoil7	SLDPRT File	362 KB	
Airfoil8	SLDPRT File	363 KB	
Skin	SLDPRT File	1,614 KB	
Spar1	SLDPRT File	161 KB	
Spar2	SLDPRT File	159 KB	
Spar3	SLDPRT File	160 KB	
Spar4	SLDPRT File	218 KB	
Wing	SOLIDWORKS Ass...	1,009 KB	

Σχήμα Β'.3: Παράδειγμα περιεχομένων αρχείου Parts σε περίπτωση σχεδίασης πτέρυγας 8 νευρώσεων και 4 δοκών

Η ακολουθία των προγραμματιστικών ενεργειών εκτέλεσης του λογισμικού ξεκινά με την έναρξη του προγράμματος D2F2S, το οποίο απευθύνεται στο χρήστη σχετικά με την εγκατάσταση μακροεντολών επικοινωνίας με τον εξυπηρετητή και τον επεξεργαστή κάρτας γραφικών που θα χρησιμοποιηθεί. Στη συνέχεια, γίνεται εκτέλεση του πακέτου εντολών Design_Full.swp από το SolidWorks και παράγονται τα αρχεία διάταξης της πτέρυγας, το αρχείο pntprmt.txt και Skin.igs. Το D2F2S κάνει παύση εποπτείας του αποτελέσματος, και ύστερα δημιουργεί το αρχείο WingD2F.glf βάσει του pntprmt.txt, το οποίο εκτελείται από το PointWise για τη γένεση του 3D πλέγματος ροής. Μετά από δεύτερη παύση του λογισμικού για τον έλεγχο του πλέγματος, το D2F2S καλεί το PointWise για τη δημιουργία του αρχείου FEM.su2 μέσω εκτέλεσης του WingSU2.glf. Μετά την παραγωγή του αρχείου, το D2F2S συνδέεται μέσω του MobaXterm στον εξυπηρετητή της ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ και εκτελεί 3 μακροεντολές, τις SU2UPLOAD, SU2TOLTT3D

και PUMAx, όπου x η κάρτα γραφικών που ορίστηκε από τον χρήστη για την επίλυση ροής (οι μακροεντολές είναι διατυπωμένες εντός του κώδικα Fortran). Έτσι μεταφέρεται το αρχείο FEM.su2 στον εξυπηρετητή, γίνονται οι ανάλογες μετατροπές και ξεκινάει η διαδικασία επίλυσης της ροής με τη χρήση του PUMA. Όταν η επίλυση ροής ολοκληρωθεί, ύστερα από παύση ελέγχου των αποτελεσμάτων, το αρχείο αεροδυναμικών δυνάμεων FEM.nodalForces μεταφέρεται στο τοπικό μηχάνημα με τη χρήση της μακροεντολής FORCESDOWNLOAD και το D2F2S εκκινεί το SolidWorks για τη δημιουργία των επιμερισμένων περιοχών κατανομής πίεσης με την εκτέλεση του πακέτου εντολών Domain_Creation.swp. Έτσι προκύπτουν τα αρχεία midcords και stressi.dat τα οποία χρησιμοποιούνται στην επόμενη κλήση του D2F2S του SolidWorks μέσω του πακέτου εντολών Stress_Test.swp, όπου δημιουργείται και πραγματοποιείται η δομική ανάλυση. Τα βασικά μεγέθη αυτής που αφορούν την αερο-δομική σύγκλιση καταγράφονται στο αρχείο tasks.dat, όπου μέσω αυτών ελέγχεται η πορεία της διαδικασίας και αναλόγως αυτής επαναλαμβάνονται ή όχι οι ενέργειες σχεδιασμού από το σημείο εκτέλεσης των εντολών του Design_Full.swp και μετέπειτα επανασχεδίαση γίνεται μόνο για το εξωτερικό τοίχωμα της πτέρυγας), χωρίς παύσεις εποπτείας της διαδικασίας μετά την πρώτη αερο-δομική επανάληψη.

Βιβλιογραφία

- [1] Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου, *Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2006
- [2] Χριστόφορος Γ. Προβατίδης, *Πεπερασμένα Στοιχεία στην Ανάλυση Κατασκευών 2^η Έκδοση*, Εκδόσεις Τζιόλα 2016, 2017, ISBN 978-960-418-676-1
- [3] Χριστόφορος Γ. Προβατίδης, *Βελτιστοποίηση & Λογισμικό Κατασκευών: Πεπερασμένα Στοιχεία, Ισογεωμετρικά Στοιχεία, Συνοριακά Στοιχεία*, Εκδόσεις Τζιόλα 2017, ISBN 978-960-418-527-6
- [4] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, *Numerical Methods for Engineers 7th Edition*, Εκδόσεις Τζιόλα 2017, ISBN 978-960-418-542-9
- [5] Behrouz Forouzan, *Foundations of Computer Science*, Εκδόσεις Κλειδάριθμος 2015, ISBN 978-960-461-660-2
- [6] Robert L. Mott, Joseph A. Untener, *Applied Fluid Mechanics 7th Edition*, Εκδόσεις Τζιόλα 2016, ISBN 978-960-418-557-7
- [7] Μάριος Καρακάσης, Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου, *On the use of metamodel-assisted, multi-objective evolutionary algorithms*, Engineering Optimization 2006, 38(8):941-957
- [8] Κωνσταντίνου Κοτσαρίνης, *Διαμόρφωση των Κελυφών της Περιστρεφόμενης Πτερύγωσης NASA Rotor 37, με χρήση του λογισμικού PUMA*, Διπλωματική Εργασία, ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ, Αθήνα 2021
- [9] Πίλιος Ιωάννης Τσοπέλας, *Integration of the GPU-Enabled CFD Solver PUMA into the Workflow of a Turbomachinery Industry. Testing and Validation.*, Διπλωματική Εργασία, ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ, Αθήνα 2018
- [10] ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ, *PCOpt/NTUA GPU-enabled Navier-Stokes Solver*, User Manual, Αθήνα 2021
- [11] Γιώργος Ι. Τσαμασφύρος, *Μηχανική Παραμορφώσιμων Σωμάτων II*, Εκδόσεις Συμμετρία, ISBN 978-960-266-078-2

- [12] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston Jr., David Mazurek, Elliot R. Eisenberg, *Vector Mechanics for Engineers: Statics 9th Edition*, Εκδόσεις Τζιόλα 2016, ISBN 978-960-418-284-8
- [13] John Shelley, *Essentials of FORTRAN 77*, Εκδόσεις Μόσχος Γκιούρδας 2014, ISBN 0471-92378-8
- [14] Ümütlü, Kiral, *Parametric design and analysis of industrial dye mixing machines*, Polish Academy of Sciences 2020, ISSN 00040738
- [15] Bashir, Rajendran, *Static Structural Analysis of a Variable Span Morphing Wing for Unmanned Aerial Vehicle*, 1st International Conference on Aerospace and Mechanical Engineering 2020, ISSN 17578981
- [16] Bourchak, Dobah, *Effect of finite element mesh and load location on the stress and deflection of a light aircraft metal wing structure*, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences 2013, ISSN 05493811
- [17] Ηλίας Σεφερλής, *Διατομεακή Βελτιστοποίηση με Αιτιοκρατικές Μεθόδους. Θεωρία και Εφαρμογές*, Διπλωματική Εργασία, ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ, Αθήνα 2018
- [18] Frank M. White, *Fluid Mechanics, 5th Edition (McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering)*, McGraw-Hill Higher Education 2002, ISBN 978-0072402179
- [19] Ανδρέας Χρυσολούρης, *Ανάπτυξη και Διερεύνηση Μεθόδου Αεροελαστικής Βελτιστοποίησης με Χρήση της Συζυγούς Μεθόδου*, Διπλωματική Εργασία, ΜΠΥΡΒ/ΕΜΠ, Αθήνα 2020
- [20] SolidWorks API Help Page
<https://help.solidworks.com/2020/English/api/sldworksapiproguide/Welcome.htm>
- [21] Glyph Scripting Help Page <https://www.pointwise.com/glyph2/files/Glyph/cxx/GgGlyph-cxx.html>
- [22] Cadence y+ Computing Tool https://www.cadence.com/ko_KR/home/tools/system-analysis/computational-fluid-dynamics/y-plus.html
- [23] NACA Airfoil Generator <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>