



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

**Παραμετρική σχεδίαση πτερυγίων**

**Parametric wing design**

Συγγραφέας:

Όνοματεπώνυμο: Αμπελά Παρασκευή Βιολέττα

A.M.: 18393018

Επιβλέπων: Θεόδωρος Π. Γεροστάθης

Αιγάλεω, 2024





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική εργασία**

**Παραμετρική σχεδίαση πτερυγίων**

**Συγγραφέας**

Αμπελά Παρασκευή Βιολέττα (Α.Μ.: 18393018)

**Επιβλέπων**

Θεόδωρος Π. Γεροστάθης,  
Αναπλ. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

**Ημερομηνία εξέτασης**

20/05/2024

**Εξεταστική Επιτροπή**

Κωνσταντίνος Πολίτης,  
Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Θεόδωρος Γεροστάθης,  
Αναπλ. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Αλέξανδρος Θεοδουλίδης  
Επικ. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.



## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Αμπελά Παρασκευή Βιολέττα του Πέτρου, με αριθμό μητρώου 18393018 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Η Δηλούσα



Αμπελά Παρασκευή Βιολέττα



## **Ευχαριστίες**

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που με βοήθησαν να καταφέρω τον στόχο μου. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Θεόδωρο Γεροστάθη για την συμβουλευτική καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Έπειτα, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την εμπιστοσύνη και την στήριξη της κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ θα ήθελα να το εκφράσω στους φίλους μου που αποτέλεσαν και αποτελούν ανεκτίμητο στήριγμα και η συμπαράσταση και υπομονή τους ήταν πολύτιμη.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύεται ο παραμετρικός σχεδιασμός πτερυγίων με εφαρμογές στα πηδάλια πλοίου, με χρήση υδροτομών τύπου NACA τεσσάρων ψηφίων καθώς και υδροτομών τύπου fishtail. Συγκεκριμένα, έχουν δημιουργηθεί συνολικά τρία παραμετρικά μοντέλα υδροτομών, ένα για κάθε περίπτωση από τις παραπάνω καθώς και μια πιο απλοποιημένη εκδοχή της υδροτομής των τεσσάρων ψηφίων που αφορά τις συμμετρικές υδροτομές. Σκοπός των παραμετρικών μοντέλων είναι η όσο το δυνατόν πιο ακριβής αναπαράσταση των υδροτομών με λιγότερα σημεία ελέγχου. Για τις υδροτομές NACA, η προσπάθεια επαληθεύεται μέσα από τη σύγκριση των μαθηματικών εξισώσεων που αναπαριστούν την γεωμετρία των υδροτομών και των παραμετρικών μοντέλων. Σε συνέχεια τα παραμετρικά μοντέλα των υδροτομών εφαρμόζονται για τη σχεδίαση πηδαλίων. Οι παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί ελέγχουν τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών τύπων πηδαλίων. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται παραμετρικά μοντέλα πηδαλίων τύπου spade, μερικώς ζυγοσταθμισμένων, fishtail, για ιστιοπλοϊκά σκάφη και twisted με και χωρίς βολβό. Τέλος, τα παραμετρικά μοντέλα συγκρίνονται με ήδη υπάρχοντα σχέδια πηδαλίων για τον κάθε τύπο προκειμένου να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας. Οι καμπύλες που έχουν σχεδιαστεί είναι τύπου NURBS ενώ για το απλοποιημένο παραμετρικό μοντέλο της συμμετρικής υδροτομής έχουν χρησιμοποιηθεί οι καμπύλες Bezier. Όλη η διαδικασία της παραμετρικής σχεδίασης έχει πραγματοποιηθεί με την οπτική γλώσσα προγραμματισμού του λογισμικού Grasshopper®, το οποίο αποτελεί μέρος του λογισμικού σχεδίασης Rhinoceros®.

Λέξεις κλειδιά: Παραμετρική σχεδίαση, NACA, Υδροτομές, Πηδάλια, Καμπύλες NURBS, Grasshopper.





## Abstract

In this diploma thesis, the parametric design of wings is analysed with applications in ship rudders using four-digit NACA and fishtail type hydrofoils. In particular, a total of three parametric models have been developed, one for each of the above cases and a more simplified version of the symmetric four-digit hydrofoils. The purpose of the design models is to simulate the hydrofoils as accurately as possible with few control points, using appropriate parameters. For NACA hydrofoils, the effort is verified through a comparison of mathematical equations representing the geometry of hydrofoils and the parametric models. Subsequently the parametric models of hydrofoils are applied in design of rudders. The parameters used, control the characteristics of different types of rudders. Following the parametric models, five different types of rudders have been designed. The selected geometric parameters can affect the characteristics of each type of rudders. Specifically, parametric models of spade, semi-balanced, fishtail, twisted and twisted bulb rudders, as well as special types for sailboats, are presented. Finally, these models are compared with existing rudder designs, for each type, to illustrate the efficiency of the procedure. For the geometric representation, the curves for design are NURBS while for the simplified parametric model of the symmetric hydrofoil the Bezier curves have been employed. The whole process of parametric design had been carried out using the form-generation visual programming editor Grasshopper®, which is an extension of Rhinoceros® computer aided design software.

Keywords: Parametric design, NACA, Hydrofoils, Rudders, NURBS curve, Grasshopper

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	vi
Abstract .....	viii
Πρόλογος.....	xi
Κεφάλαιο 1: Παραμετρική σχεδίαση.....	1
1.1 Παραμετρική σχεδίαση .....	1
1.2 Παραμετρική σχεδίαση στην Ναυπηγική.....	2
1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση για την σχεδίαση παρελκόμενων πλοίου .....	4
Κεφάλαιο 2: Σχεδίαση υδροτομών και πηδαλίων.....	7
2.1 Παραμετρικές καμπύλες.....	7
2.1.1 Καμπυλότητα-Συνέχεια .....	7
2.2 Καμπύλες Bézier .....	8
2.3 Καμπύλες και επιφάνειες NURBS .....	9
2.3.1 Καμπύλες NURBS.....	9
2.3.2 Επιφάνειες NURBS .....	11
2.4 Επιφάνειες με την μέθοδο lofting και sweeping .....	12
2.5 Έλεγχος ομαλότητας επιφανειών .....	13
2.6 Περιγραφή υδροτομών .....	14
2.6.1 Υδροτομές τύπου NACA .....	15
2.6.2 NACA τεσσάρων ψηφίων(4-digit) .....	15
2.7 Υδροτομή τύπου fishtail (schilling).....	15
2.8 Περιγραφή πηδαλίων.....	16
2.9 Τύποι πηδαλίων .....	18
2.9.1 Ζυγοσταθμισμένα πηδάλια .....	18
2.9.2 Spade rudder .....	19
2.9.3 Μερικώς ζυγοσταθμισμένα πηδάλια .....	19
2.9.4 Μη ζυγοσταθμισμένα πηδάλια .....	20
2.9.5 Πηδάλιο Twisted με βολβό .....	21
Κεφάλαιο 3: Παραμετρική σχεδίαση υδροτομών.....	22
3.1 Ανάπτυξη υδροτομής NACA τεσσάρων ψηφίων .....	22
3.2 Συμμετρική NACA.....	26
3.3 Υδροτομή τύπου fishtail .....	27
3.4 Υλοποίηση του παραμετρικού μοντέλου στο περιβάλλον Grasshopper .....	29
3.4.1 NACA τεσσάρων ψηφίων.....	30

3.4.2 Συμμετρικές NACA.....	33
3.5 Αξιολόγηση του παραμετρικού μοντέλου .....	35
3.5.1 NACA τεσσάρων ψηφίων.....	35
3.5.2 Συμμετρικές NACA.....	39
Κεφάλαιο 4: Παραμετρική σχεδίαση πηδαλίων .....	42
4.1 Spade πηδάλια .....	42
4.2 Μερικώς ζυγοσταθμισμένα πηδάλια (semi- balanced) .....	48
4.3 Fishtail (schilling) πηδάλια .....	54
4.4 Πηδάλια ιστιοπλοϊκών σκαφών.....	57
4.5 Πηδάλια Twisted με βολβό.....	62
Κεφάλαιο 5: Εφαρμογές των παραμετρικών μοντέλων.....	71
5.1 Spade πηδάλια .....	71
5.2 Μερικώς ζυγοσταθμισμένα πηδάλια (semi- balanced) .....	72
5.3 Fishtail (schilling) πηδάλια .....	75
5.4 Πηδάλια ιστιοπλοϊκών σκαφών.....	76
5.5 Πηδάλια Twisted με βολβό.....	78
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις.....	80
6.1 Συμπεράσματα.....	80
6.2 Προτάσεις.....	81
Βιβλιογραφία.....	82
Παράρτημα Α .....	85
Παράρτημα Β .....	90

## Πρόλογος

Οι υδροτομές, αποτελούν σημαντικό στοιχείο της υδροδυναμικής σχεδίασης, επηρεάζοντας την υδροδυναμική αντίσταση και ισορροπία. Οι υδροτομές πηδαλίων προσφέρουν ευαισθησία στις αλλαγές της ροής του νερού, βελτιώνοντας τον έλεγχο του σκάφους και μειώνοντας τον κίνδυνο απώλειας ευστάθειας. Η εξέλιξη αυτών των υδροτομών έχει προκύψει από προηγούμενες μελέτες στον τομέα της υδροδυναμικής και της ναυπηγικής, συμβάλλοντας στη συνολική αποτελεσματικότητα και ασφάλεια των ναυτιλιακών μεταφορών.

Τα πηδάλια κατέχουν σημαντική θέση στην ναυπηγική βιομηχανία καθώς επηρεάζουν τις ελκτικές ικανότητες ενός πλοίου. Η παραμετρική σχεδίαση των πηδαλίων εξοικονομεί χρόνο και επιτρέπει την γρήγορη βελτιστοποίηση τους. Κύριο πρόβλημα αποτελεί η ακριβής παραμετρική αναπαράσταση των διαφορετικών τύπων πηδαλίων μέσω κατάλληλων παραμέτρων που διευκολύνουν την γεωμετρική σχεδίαση της εκάστοτε επιφάνειας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τα στάδια διαδικασίας της παραμετρικής σχεδίασης συγκεκριμένων τύπων πηδαλίων. Πιο αναλυτικά, η εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη πέντε παραμετρικών μοντέλων ένα για κάθε τύπο πηδαλίου. Αρχικά, για την σχεδίαση αυτών των μοντέλων έχουν μελετηθεί οι υδροτομές τύπου NACA τεσσάρων ψηφίων καθώς και οι υδροτομές τύπου fishtail δημιουργώντας αντίστοιχες παραμετρικές γεωμετρίες.

Όσο αφορά την παραμετρική σχεδίαση των υδροτομών έχουν χρησιμοποιηθεί σημεία ελέγχου, τα οποία μέσω κατάλληλων σχέσεων και εξισώσεων αναπαριστούν τις υδροτομές. Οι εξισώσεις αυτές συνδέονται με παραμέτρους που παίρνουν τιμές ανάλογα την προς μελέτη υδροτομή.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται το παραμετρικό μοντέλο των συμμετρικών υδροτομών που έχει εξελιχθεί σε πέντε διαφορετικούς τύπους πηδαλίων, οι οποίοι είναι τα πηδάλια spade, semi-skeg, twisted με ή χωρίς βολβό, fishtail και πηδάλια ιστιοπλοϊκών σκαφών. Η διαδικασία έχει ως σκοπό την όσο πιο ακριβής αναπαράσταση των παραπάνω τύπων επιτρέποντας στο σχεδιαστή μέσα από μία σειρά παραμέτρων να ορίζει την επιθυμητή μορφή της επιφάνειας.

Η εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια. Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη και γενική περιγραφή του περιεχομένου κάθε κεφαλαίου.

- Κεφάλαιο 1: Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Αποτελείται από την περιγραφή της παραμετρικής σχεδίασης καθώς ταυτόχρονα γίνεται αναφορά στην επίδραση της παραμετρικής σχεδίασης στην Ναυπηγική βιομηχανία και παράλληλα παρουσιάζονται κάποιες προσπάθειες αναπαράστασης και βελτίωσης των παρελκομένων του πλοίου.
- Κεφάλαιο 2: Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφονται εξισώσεις για τις καμπύλες και επιφάνειες NURBS και Bezier. Επιπρόσθετα, αναλύεται η μέθοδος ελέγχου επιφανειών που έχει χρησιμοποιηθεί σε παρακάτω κεφάλαιο. Περιλαμβάνεται μια περιγραφή των υδροτομών τύπου NACA αλλά γίνεται και μία αναφορά για τις υδροτομές fishtail. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των πηδαλίων και κάποιοι τύποι τους.

- Κεφάλαιο 3: Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται τα παραμετρικά μοντέλα που έχουν χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση των υδροτομών NACA τεσσάρων ψηφίων καθώς και για την υδροτομή τύπου fishtail. Μετά την αναπαράσταση γίνεται η αξιολόγηση των παραμετρικών μοντέλων προκειμένου να επαληθευτεί η όσο το δυνατόν πιο ακριβής σχεδίαση τους.
- Κεφάλαιο 4: Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδίασης των πέντε διαφορετικών παραμετρικών μοντέλων των πηδαλίων.
- Κεφάλαιο 5: Σε αυτό το κεφάλαιο συγκρίνονται συγκεκριμένες γεωμετρίες που παράγονται από τα παραμετρικά μοντέλα με ήδη υπάρχοντα πηδάλια από τη βιβλιογραφία, έτσι ώστε να μελετηθεί η αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα τους.
- Κεφάλαιο 6: Το τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει συμπεράσματα και παρατηρήσεις που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία, αλλά και μελλοντικές προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

# Κεφάλαιο 1: Παραμετρική σχεδίαση

Με την έννοια παραμετρική σχεδίαση εννοούμε την διαδικασία που εφαρμόζεται για τον σχεδιασμό μίας γεωμετρίας κατά την οποία χρησιμοποιείται μια σειρά σαφών και καλά ορισμένων αλγοριθμικών εντολών που ελέγχονται από αρχικές παραμέτρους (Parametricdesign, 2020). Η διαμόρφωση του γεωμετρικού μοντέλου αποτελεί τον σκοπό του παραμετρικού σχεδιασμού, δηλαδή, η μορφολογία του σχεδιαζόμενου αντικειμένου είναι δεδομένη σε αντίθεση με τις ακριβείς διαστάσεις και ανοχές τους. Έτσι, προκύπτει ο τελικός στόχος του παραμετρικού σχεδιασμού που είναι η εύρεση των κατάλληλων τιμών των παραμέτρων, καθώς και κάθε άλλης πληροφορίας που είναι απαραίτητη για την επιθυμητή λειτουργικότητα της κατασκευής. Ωστόσο, για να γίνει εφικτός ο στόχος αυτός πρέπει να έχουν οριστεί οι αρχικές παράμετροι, έτσι ώστε να χειρίζονται με μεγάλη σχεδιαστική ακρίβεια την προς μελέτη γεωμετρία.

## 1.1 Παραμετρική σχεδίαση

Ένα από τα πρώτα παραδείγματα παραμετρικού σχεδιασμού ήταν το ανεστραμμένο μοντέλο εκκλησίας του Antonio Gaudi (Tedeschi, 2014), που δημιουργήθηκε από καμάρες αλυσοειδών με αιωρούμενες χορδές. Κατασκευάστηκε στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα και μπορούσε να τροποποιηθεί παραμετρικά, στο σύνολο του ή και μεμονωμένα, χάρις την μετατόπιση των θέσεων των χορδών του. Σήμερα, η παραμετρική μοντελοποίηση υλοποιείται μέσω λογισμικών υπολογιστή και έχει την δυνατότητα να οπτικοποιηθεί σε κατάλληλα προγράμματα τρισδιάστατης σχεδίασης.

Το κύριο πλεονέκτημα της παραμετρικής σχεδίασης είναι ότι εξαλείφει την ανάγκη επανασχεδίασης του τρισδιάστατου γεωμετρικού μοντέλου κάθε φορά που απαιτούνται αλλαγές, καθώς το σχήμα του μπορεί να αλλάξει μόλις προσαρμοστούν οι παράμετροι. Οι μηχανικοί επωφελούνται σημαντικά, ιδιαίτερα κατά την διάρκεια του σχεδιασμού καθώς παλαιότερα ήταν αρκετά δύσκολο να αλλάξει η γεωμετρία του μοντέλου κατασκευής.

Επιπλέον, βασικά πλεονεκτήματα στην χρήση παραμετρικών μοντέλων αποτελούν τα εξής:

- Καθιστά πιο εύκολη την διαχείριση της πολυπλοκότητας
- Μειώνει το κόστος του σχεδιασμού και της κατασκευής
- Διευκολύνει την διαχείριση της σχεδιαστικής διαδικασίας

Ενώ η παραμετρική σχεδίαση παρέχει ευελιξία, μερικές φορές μικρές αλλαγές στις παραμέτρους μπορεί να έχουν επίπτωση σε ευρύτερη κλίμακα. Αυτό απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και ελέγχους. Η δημιουργία πολύπλοκων παραμετρικών μοντέλων μπορεί να απαιτεί πολύ χρόνο και προσπάθεια. Ορισμένες φορές, η παραμετρική σχεδίαση μπορεί να είναι χρονοβόρα κατά την ανάπτυξη και τη συντήρηση. Οι σχεδιαστές και μηχανικοί πρέπει να είναι εξοικειωμένοι με την παραμετρική σχεδίαση και στα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για να αποκομίσουν τα μέγιστα οφέλη από αυτήν. Αυτή η εκπαίδευση μπορεί να απαιτήσει χρόνο και πόρους.

Η παραμετρική σχεδίαση μπορεί να είναι πολύπλοκη λόγω του μεγάλου αριθμού παραμέτρων που μπορεί να επηρεάζουν το μοντέλο. Η διαχείριση και η βελτιστοποίηση τόσο πολλών παραμέτρων μπορεί να απαιτεί σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους. Η εύρεση βέλτιστων τιμών για τις παραμέτρους ενός παραμετρικού μοντέλου μπορεί να είναι

προβληματική λόγω πολλαπλών περιορισμών ή της πολυπλοκότητας του σχεδιαζόμενου αντικειμένου. Ωστόσο, δεν παύει να αποτελεί ένα εύχρηστο εργαλείο.

Οι γεωμετρίες μπορούν να προκύψουν από αλγορίθμους. Όταν χρησιμοποιείται πρόγραμμα CAD (Computer Aided Design) ή ένα άλλο πρόγραμμα γεωμετρικής μοντελοποίησης, μια τρισδιάστατη γεωμετρία παράγεται με μία σειρά σχεδιαστικών εντολών. Αντί να τροποποιηθεί απευθείας η γεωμετρία του μοντέλου, χρησιμοποιείται μία σειρά εντολών, έτσι ώστε να αλλάζει παραμετρικά η γεωμετρία του αντικειμένου. Αυτές οι εντολές, εκφράζονται σε εξειδικευμένες γλώσσες υπολογιστών, όπως η AutoLisp<sup>®</sup> στο Autocad<sup>®</sup><sup>1</sup>, η RhinoScript<sup>®</sup> στο Rhinoceros<sup>®</sup><sup>2</sup>, OpenSCAD<sup>®</sup><sup>3</sup> ή άλλες γλώσσες για τον σχεδιασμό των αντικειμένων. Για τους σχεδιαστές, αυτή η μέθοδος είναι σχετικά νέα και αλλάζει τη σχέση μεταξύ της ιδέας και του τελικού προϊόντος. Στη γλώσσα προγραμματισμού χρησιμοποιούνται δύο περιβάλλοντα εργασίας, το περιβάλλον συγγραφής του προγράμματος (editor) και το περιβάλλον τρισδιάστατης μοντελοποίησης.

Τα τελευταία χρόνια έχουν δημιουργηθεί οπτικά εργαλεία που επιτρέπουν στους χρήστες την εφαρμογή της παραμετρικής σχεδίασης με την χρήση οπτικών γλωσσών προγραμματισμού. Οι χρήστες έχουν την δυνατότητα να αλληλοεπιδρούν με ψηφιακές εντολές απευθείας χρησιμοποιώντας διαγράμματα βασισμένα σε σχεδιαστικά στοιχεία (components). Ένα από τα προγράμματα που χρησιμοποιεί την διαγραμματική απεικόνιση είναι το Grasshopper<sup>®</sup><sup>4</sup> της Robert McNeel & Associates.

Χάρη την βοήθεια των αλγορίθμων οι σχεδιαστές εξοικονομούν πολύτιμο χρόνο. Επιλέγοντας μία από τις δύο σχεδιαστικές μεθόδους μπορούν να δημιουργήσουν μια σειρά εντολών, η οποία θα ελέγχει παραμετρικά το γεωμετρικό μοντέλο.



Εικόνα 1. Διαδικασία της παραμετρικής σχεδίασης.

## 1.2 Παραμετρική σχεδίαση στην Ναυπηγική

Η παραμετρική σχεδίαση πλοίων και άλλων ναυπηγικών κατασκευών αναφέρεται στη χρήση μαθηματικών μοντέλων και παραμέτρων για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση της μελέτης τους. Χρησιμοποιείται ευρέως στον ναυπηγικό τομέα για τη δημιουργία αποδοτικών, οικονομικών και ασφαλών πλοίων. Ο ρόλος της παραμετρικής σχεδίασης πλοίου είναι να επιτρέπει τη γρήγορη εξέταση διαφόρων παραμέτρων και σχεδιαστικών επιλογών, προτού ακόμα αρχίσει η λεπτομερής σχεδίαση. Χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση του κόστους, των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών, της απόδοσης και της αντοχής του πλοίου. Η παραμετρική σχεδίαση περιλαμβάνει τη χρήση μαθηματικών μοντέλων για τον υπολογισμό των δυνάμεων που ασκούνται στο πλοίο (όπως η αντίσταση του νερού), την μορφολογία του κύτους, τις διαστάσεις και τις υλικές ιδιότητες. Οι μέθοδοι

<sup>1</sup><https://www.autodesk.com/>

<sup>2</sup><https://www.rhino3d.com/>

<sup>3</sup><https://openscad.org/index.html>

<sup>4</sup><https://www.grasshopper3d.com/>



παραμετρικής σχεδίασης επιτρέπουν στους ναυπηγούς να εξερευνήσουν γρήγορα διάφορες σχεδιαστικές προσεγγίσεις για να επιτύχουν τις επιθυμητές επιδόσεις και λειτουργικότητες.

Όσον αφορά την ναυπηγική βιομηχανία, οι σχεδιαστές αντιμετωπίζουν την πρόκληση του γρήγορου προσδιορισμού της γάστρας με βάση διάφορα κριτήρια βελτιστοποίησης όπως η καλύτερη υδροδυναμική συμπεριφορά του πλοίου. Η σχεδίαση της γάστρας απαιτεί πολλά στάδια για την κατασκευή της όπως το σχέδιο του προφίλ, της ισάλου και της γενικότερης μορφής της. Η βελτιστοποίηση της είναι χρονοβόρα και δαπανηρή καθώς χρειάζονται αρκετά κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη έτσι ώστε να αυξηθεί η υδροδυναμική απόδοση του πλοίου. Η βελτιστοποίηση της γάστρας πρέπει να είναι ακριβής για την παραγωγή ενός συνόλου επιφανειών με τρόπο ώστε να επιτρέπει την δημιουργία γεωμετρικών παραλλαγών του πλοίου με ευκολότερο τρόπο. Ένα βασικό χαρακτηριστικό για την επιτάχυνση της διαδικασίας σχεδιασμού είναι η ύπαρξη μιας ευέλικτης παραμετρικής μεθόδου για το σχεδιασμό μιας αρχικής γάστρας που θα επιτρέπει την εύκολη τροποποίηση της.

Από τα πρώτα παραμετρικά σχέδια αναπαράστασης της γάστρας ήταν αυτό του (Harries, 1998). Το μοντέλο αυτό, εισήγαγε την χρήση βασικών καμπυλών για την αναπαράσταση μιας γάστρας, και παρόμοιες μεθοδολογίες έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην ναυπηγική βιομηχανία.

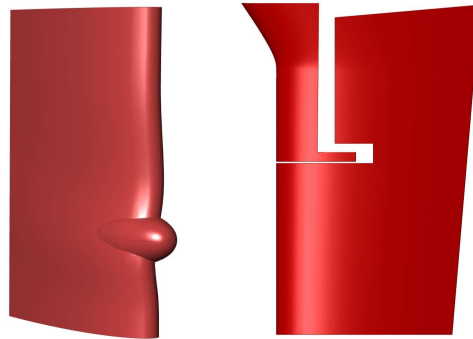
Η παραμετρική σχεδίαση εξελίσσεται και ενσωματώνει νέες τεχνολογίες και μεθόδους. Εκτός από την γεωμετρία της γάστρας μπορεί να περιλαμβάνει και την παραμετροποίηση των παρελκομένων του πλοίου. Η παραμετρική σχεδίαση παρελκομένων πλοίου αναφέρεται στη χρήση παραμετρικών μοντέλων και δεδομένων για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των διαφόρων εξαρτημάτων και εξοπλισμού που συνθέτουν ένα πλοίο. Κατά τη διαδικασία αυτή, λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως οι λειτουργικές ανάγκες, οι απαιτήσεις ασφαλείας, οι υδροδυναμικές επιδόσεις, και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες. Αυτό συμβάλλει στη μείωση του χρόνου και του κόστους ανάπτυξης, εξασφαλίζοντας παράλληλα υψηλή ποιότητα και συμμόρφωση προς τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις του πελάτη.

Η παραμετρική σχεδίαση ελίκων και πηδαλίων αντιπροσωπεύει μια εξελιγμένη προσέγγιση στον τομέα της ναυπηγικής, συνδυάζοντας την τεχνολογία με την επιστημονική έρευνα για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της λειτουργίας των πλοίων. Η χρήση της παραμετρικής σχεδίασης ελίκων και πηδαλίων πλοίων είναι ευρέως διαδεδομένη στον ναυτιλιακό κλάδο και τη ναυπηγική βιομηχανία. Ο ρόλος της παραμετρικής σχεδίασης είναι καθοριστικός στη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών των ελίκων και πηδαλίων. Αντί να βασίζεται σε παραδοσιακές, δοκιμαστικές μεθόδους, η παραμετρική σχεδίαση επιτρέπει τη χρήση αλγορίθμων για την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολλών παραμέτρων, όπως το σχήμα και το υλικό.

Τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων όπως οι έλικες και τα πηδάλια καθορίζουν την καλή λειτουργία των διαφόρων ναυπηγικών κατασκευών. Ο σκοπός της παραμετρικής σχεδίασης είναι η επίτευξη υψηλής απόδοσης, ελαχιστοποίησης της αντίστασης του νερού ή του αέρα, καθώς και η βελτιστοποίηση της ευστάθειας και του χειρισμού του πλοίου. Το κέρδος που προκύπτει από τη χρήση παραμετρικής σχεδίασης περιλαμβάνει τη βελτίωση της αποδοτικότητας των πλοίων, τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων, καθώς και τη μείωση των εκπομπών ρύπων. Η εξέλιξη της τεχνολογίας επιτρέπει την αυξημένη ακρίβεια και τη γρηγορότερη ανάπτυξη σχεδίων, ενισχύοντας την ανταγωνιστικότητα και την καινοτομία. Η παραμετρική σχεδίαση εφαρμόζεται από

ναυπηγεία, ναυτιλιακές εταιρείες και ερευνητικούς φορείς, ενσωματώνοντας συνεχώς νέες επιστημονικές ανακαλύψεις για τη βελτίωση της απόδοσης και της βιωσιμότητας στον τομέα της ναυτιλίας. Σε γενικές γραμμές, ο σχεδιασμός αυτών των διατάξεων έχει μεγάλη επίδραση στην ομαλή λειτουργία του πλοίου, δεδομένου ότι έστω και μικρές αλλαγές είναι ικανές να έχουν μεγάλη επίδραση.

Η παραμετρική σχεδίαση είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τη μείωση του χρόνου και του κόστους σχεδίασης πλοίων, επιτρέποντας τη γρήγορη προσαρμογή των παραμέτρων σε νέες απαιτήσεις ή περιβαλλοντικές προκλήσεις.



Εικόνα 1: Πηδάλια πλοίου.

### 1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση για την σχεδίαση παρελκόμενων πλοίου

Η παραμετρική σχεδίαση παρελκόμενων πλοίου εξελίσσεται τα τελευταία χρόνια. Περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως η γεωμετρική αναπαράσταση πηδαλίων, ελίκων, κ.α. και ταυτόχρονα την παραμετροποίηση οποιουδήποτε παράγοντα επηρεάζει την αποτελεσματικότητα του πλοίου. Σε αυτή την ενότητα, θα γίνουν αναφορές σχετικά με μερικούς τύπους παραμετρικών μοντέλων παρελκόμενων (πηδαλίων και ελίκων) που έχουν υλοποιηθεί τα τελευταία χρόνια.

Όσον αφορά την παραμετρική σχεδίαση πηδαλίων, τα τελευταία και πιο σύγχρονα μοντέλα παρουσιάζουν πηδάλια τύπου twisted rudder με ή χωρίς βολβό. Οι δύο αυτές γεωμετρίες εξελίσσουν αρκετά την σχεδίαση πηδαλίων, καθώς μέσω της ομαλότερης ροής του νερού στο πηδάλιο αποφεύγονται φαινόμενα σπηλαιώσης. Ωστόσο, άλλη μια γεωμετρία που έχει θετικά αποτελέσματα είναι αυτή του πηδαλίου fishtail που αναλύεται παρακάτω.

Πιο συγκεκριμένα, ένα γεωμετρικό πρότυπο twisted πηδαλίου χωρίς βολβό αποτελεί αυτό των (Chen, et al., 2018). Δημιούργησαν αυτό το μοντέλο για την εξοικονόμηση καυσίμου και την καλύτερη κατανομή του ρευστού στο πηδάλιο. Η μελέτη προτείνει έναν σχεδιασμό πηδαλίου τύπου S για την εξοικονόμηση ενέργειας, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις της ανομοιογενούς ροής από την έλικα σε πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Το πηδάλιο τύπου S μοντελοποιείται παραμετρικά με τη χρήση πτερυγίων NACA και μη ομοιόμορφων επιφανειών B-splines (NURBS). Εφαρμόζεται μια διαδικασία βελτιστοποίησης για την επιτάχυνση του βέλτιστου σχεδιασμού. Λογισμικό

υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) χρησιμοποιείται για προσομοιώσεις πρόωσης, που επικυρώνονται με πειραματικές δοκιμές μοντέλων. Ο καινοτόμος μηχανισμός περιστροφής του άξονα του πηδαλίου ελέγχει την μείωση ενέργειας υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και το βελτιστοποιημένο πηδάλιο τύπου S επιτυγχάνει αύξηση της ισχύς πρόωσης από 1% έως 3%. Η μελέτη αναπτύσσει με επιτυχία ένα παραμετρικό μοντέλο σχεδιασμού για πηδάλια τύπου S, εξασφαλίζοντας λείες και βελτιωμένες επιφάνειες. Τα αποτελέσματα της μελέτης κρίνονται σημαντικά για μεγάλα φορτηγά πλοία, προσφέροντας γνώσεις σχεδιασμού εξοικονόμησης ενέργειας.

Το 2016 (Jaramillo, 2016) σχεδίασε παραμετρικά ένα πηδάλιο με βολβό για ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων 14000 TEU, σε συνεργασία με το τμήμα Fluid Engineering του τμήματος Maritime Advisory του DNV GL SE στο Αμβούργο. Το πηδάλιο δεν χρησιμεύει μόνο ως κατευθυντική συσκευή, αλλά κατέχει σημαντικό ρόλο στην μείωση της ενέργειας όταν αλληλοεπιδρά με τα απόνερα της έλικας. Το πηδάλιο τύπου twisted έχει συμμετρικό προφίλ βάσης (NACA 0020) με βολβό που βρίσκεται μεταξύ 20% και 40% του ύψους πηδαλίου, το οποίο βελτιώνει την αποδοτικότητα της γάστρας και αυξάνει την απόδοση της έλικας πάνω από 4%. Τέλος, το πηδάλιο ελέγχεται υδροδυναμικά με σκοπό την βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας του.

Ένα ακόμα πηδάλιο που βελτιστοποιεί τις ελκτικές ικανότητες του πλοίου είναι αυτό των (Nguyen & Yoshiho, 2014), οι οποίοι σύγκριναν παραλλαγές πηδαλίων τύπου fishtail προκειμένου να βρουν το κατάλληλο που θα έχει την βέλτιστη υδροδυναμική συμπεριφορά. Στην εργασία παρουσιάζονται μελέτες σχετικά με την υδροδυναμική απόδοση των πηδαλίων τύπου fishtail για τη δημιουργία υψηλότερων δυνάμεων άωσης λόγω της συγκεκριμένης γεωμετρίας. Πραγματοποιούνται προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών δυνάμεων που δρουν στα πηδάλια τύπου fishtail. Η εργασία εξετάζει την επίδραση του αριθμού Reynolds στις υδροδυναμικές δυνάμεις που δέχεται το πηδάλιο και τα χαρακτηριστικά των τμημάτων του. Τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα αριθμητικά αποτελέσματα περιλαμβάνουν την επίδραση του μεγέθους του χείλους εκφυγής στην άωση και την αντίσταση, με τα μεγαλύτερα χείλη εκφυγής να παράγουν μεγαλύτερη άωση αλλά και να αυξάνουν σημαντικά την αντίσταση. Τα πηδάλια τύπου fishtail με μικρότερα χείλη εκφυγής τείνουν να έχουν καλύτερες υδροδυναμικές επιδόσεις. Η εργασία συμβάλλει στην κατανόηση των πηδαλίων τύπου fishtail, των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών τους και της πιθανής εφαρμογής τους για την ενίσχυση της ευελιξίας των πλοίων και της αποδοτικότητας των καυσίμων.

Σχετικά με την παραμετρική σχεδίαση ελίκων το 2019, οι (Arapakopoulos, et al., 2019) σχεδίασαν μια έλικα με βάση τις επιφάνειες T-splines. Η εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός παραμετρικού μοντέλου για τη δημιουργία ελίκων που αναπαρίσταται από μια επιφάνεια T-spline. Η διαδικασία σχεδιασμού και οι αλγόριθμοι υλοποιούνται εντός του Grasshopper, ενός εργαλείου παραμετρικής μοντελοποίησης και οπτικού προγραμματισμού του Rhinoceros 3D. Το παραμετρικό μοντέλο αποσκοπεί στην αποτελεσματική παραγωγή έγκυρων γεωμετρικών αναπαραστάσεων προπελών με βάση ένα μικρό αριθμό παραμέτρων, οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση του σχήματος. Η χρήση των T-splines στο μοντέλο εξασφαλίζει την παραγωγή ομαλών, κατάλληλων για ανάλυση επιφανειών με σημαντικά μικρότερο αριθμό σημείων ελέγχου, σε σχέση με άλλες αναπαραστάσεις, εξαλείφοντας την απαιτητική διαδικασία σχεδίασης ενός μοντέλου με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD). Η έρευνα περιλαμβάνει επίσης την σχεδίαση ελίκων της σειράς

Wageningen-B<sup>5</sup> τόσο με χρήση του παραμετρικού μοντέλου όσο και με ένα πρωτότυπο τρισδιάστατο μοντέλο έλικας που λαμβάνεται από το λογισμικό OpenProp, και γίνεται συγκριτική του παρουσίαση. Το μοντέλο επιδεικνύει αποτελεσματικότητα στην αυτόματη παραγωγή έγκυρων γεωμετρικών αναπαραστάσεων και στην προσέγγιση υφιστάμενων μοντέλων προπέλας.

Το 2022 οι (Wang, et al., 2022) δημιούργησαν ένα μοντέλο με βάση τις επιφάνειες B-Splines και την σειρά AU-Series<sup>6</sup>. Για ακόμη μια φορά, η γεωμετρία της έλικας ήταν αρκετά πιο αποδοτική από τα συγκρινόμενα μοντέλα. Η εργασία παρουσιάζει ένα νέο παραμετρικό μοντέλο για έλικες που βασίζεται σε καμπύλες NURBS. Το μοντέλο χρησιμοποιεί οκτώ παραμέτρους για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας της υδροτομής. Η ακρίβεια του προτεινόμενου παραμετρικού μοντέλου επικυρώνεται χρησιμοποιώντας 20 υδροτομές και 5 τύπους γνωστών ελίκων. Επιπλέον, η εργασία ασχολείται με ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης έλικας χρησιμοποιώντας μια κοινή έλικα της σειράς AU-Series. Η εργασία αναφέρεται σε προηγούμενες προσπάθειες του (Arapakopoulos, et al., 2019) που πρότεινε παραμετρικά μοντέλα βασισμένα σε πολύπλοκες επιφάνειες T-Splines. Οι συγγραφείς τονίζουν το όφελος ενός λείου παραμετρικού μοντέλου στην έρευνα βελτιστοποίησης της έλικας. Τα συμπεράσματα υπογραμμίζουν την επιτυχία του παρουσιαζόμενου παραμετρικού μοντέλου στη δημιουργία έγκυρων γεωμετρικών αναπαραστάσεων των ελίκων.

Συνοπτικά, παρατηρούμε ότι τα παραμετρικά μοντέλα προσφέρουν ευελιξία σχεδιασμού και δυνατότητες βελτιστοποίησης συμβάλλοντας τελικά στην ανάπτυξη ασφαλέστερων, πιο οικονομικά αποδοτικών διατάξεων.

---

<sup>5</sup> <https://www.wageningen-b-series-propeller.com/>

<sup>6</sup> (Atsuo & Takahashi, 1969)

## Κεφάλαιο 2: Σχεδίαση υδροτομών και πηδαλίων

Η σχεδίαση υδροτομών και πηδαλίων είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της απόδοσης και της ελευθερίας κινήσεων σε ναυτικές εφαρμογές. Οι υδροτομές σχεδιάζονται για να καθορίζουν τη ροή του νερού γύρω από τη γάστρα του πλοίου ή των πηδαλίων. Σκοπός τους είναι να μειώσουν την αντίσταση, να βελτιώσουν την ευστάθεια, και να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες ενέργειας. Ο σχεδιασμός των υδροτομών περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση του σχήματος και της τοποθέτησης τους για τη μείωση της τριβής και των αντιστάσεων.

Τα πηδάλια χρησιμεύουν για τον έλεγχο της κατεύθυνσης των πλοίων. Είναι κρίσιμα για την ευελιξία και την απόδοση του πλοίου σε διάφορες συνθήκες ναυσιπλοΐας. Ο σχεδιασμός των πηδαλίων συμπεριλαμβάνει τον καθορισμό του σχήματος, των διαστάσεων και της θέσης τους στην γάστρα του πλοίου. Στόχος είναι η βελτίωση της ελευθερίας κινήσεων, η εξασφάλιση αποτελεσματικού ελέγχου του πλοίου και η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.

Συνολικά, ο σχεδιασμός αυτών των υδροδυναμικών στοιχείων απαιτεί εξειδικευμένες μεθόδους υπολογιστικής μηχανικής και υδροδυναμικής για την επίτευξη βέλτιστων επιδόσεων και ασφάλειας. Για τον παραμετρικό σχεδιασμό τους σε περιβάλλον υπολογιστή οι σχεδιαστές μηχανικοί θα πρέπει να περιγράψουν την γεωμετρία τους με κατάλληλες μαθηματικές αναπαραστάσεις, μορφές των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω.

### 2.1 Παραμετρικές καμπύλες

Οι παραμετρικές εξισώσεις χρησιμοποιούνται συνήθως για να εκφράσουν τις συντεταγμένες των σημείων που συνθέτουν ένα γεωμετρικό αντικείμενο, όπως μια καμπύλη και ονομάζεται παραμετρική καμπύλη.

Μια καμπύλη  $R^3$  έχει την ακόλουθη παραμετρική μορφή:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(t) = \begin{cases} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{cases}, t \in [a, b] \subset R \quad (2.1)$$

Όπου οι καρτεσιανές συντεταγμένες της  $x, y, z$  είναι διαφορέσιμες συναρτήσεις ως προς την παράμετρο  $t$ .

#### 2.1.1 Καμπυλότητα-Συνέχεια

Έστω  $s = s(t) = \int_a^t \|\dot{\mathbf{x}}\| dt$  μια τέτοια παραμετροποίηση. Επειδή:

$$\dot{\mathbf{x}} dt = \frac{d\mathbf{x}}{dr} \cdot \frac{dr}{dt} dt = \frac{d\mathbf{x}}{dr} dr \quad (2.2)$$

η παραμετροποίηση  $s$  είναι ανεξάρτητη από οποιαδήποτε κανονική παραμετροποίηση και ονομάζεται φυσική ή παραμετροποίηση μήκους τόξου (arc length). Πρόκειται για αναλλοίωτη παράμετρο καμπύλης. Η ποσότητα

$$ds = \|\dot{\mathbf{x}}\| dt \quad (2.3)$$

αντιστοιχεί στο στοιχειώδες μήκος της καμπύλης (arc element). (Κώστας, 2014)

Η καμπυλότητα αναφέρεται στην μεταβολή μιας καμπύλης όταν αλλάζει κατεύθυνση καθώς κινούμαστε κατά μήκος της.

Το μέτρο του ρυθμού μεταβολής της εφαπτομένης  $\mathbf{t}$  ορίζει την καμπυλότητα  $k$  και προκύπτει η εξής σχέση:

$$k = \left\| \frac{d\mathbf{t}}{ds} \right\| \quad (2.4)$$

Η γεωμετρική συνέχεια μιας καμπύλης αναφέρεται στο πόσο συνεχής είναι η καμπύλη όσο αφορά την μορφή της. Διακρίνεται σε τάξεις που αφορούν τόσο την συνέχεια των τμημάτων της όσο και τα σημεία ένωσης της με άλλες καμπύλες. Παρακάτω αναλύονται οι τρεις βασικές μορφές γεωμετρικής συνέχειας μίας καμπύλης:

- Συνέχεια θέσης ή  $G^0$ : προκύπτει όταν τα άκρα από δύο καμπύλες ενώνονται και συμπίπτουν μεταξύ τους ακόμα και αν δημιουργούν ακμές.
- Συνέχεια εφαπτομένης ή  $G^1$ : προκύπτει όταν η εφαπτόμενη στο σημείο ένωσης τους είναι ίδια ή τα εφαπτόμενα διανύσματα στα άκρα των καμπυλών είναι παράλληλα και έχουν την ίδια φορά. Αυτό σημαίνει ότι η καμπύλη δεν έχει απότομες αλλαγές κατεύθυνσης.
- Συνέχεια καμπυλότητας ή  $G^2$ : προκύπτει όταν οι δύο καμπύλες έχουν την ίδια καμπυλότητα και επαληθεύεται ταυτόχρονα η συνέχεια πρώτης τάξης.

## 2.2 Καμπύλες Bézier

Οι καμπύλες Bezier έχουν προέλθει από τις ιδιότητες της γραμμικής παρεμβολής και την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή της. Η καμπύλη Bézier είναι μια παραμετρική καμπύλη που χρησιμοποιείται στα γραφικά υπολογιστών και σε συναφείς τομείς. Ένα σύνολο διακριτών «σημείων ελέγχου» ορίζει μια ομαλή και συνεχή καμπύλη. Μια καμπύλη Bézier ορίζεται από ένα σύνολο σημείων ελέγχου  $P_0$  έως  $P_n$ , όπου το  $n$  ονομάζεται τάξη της καμπύλης ( $n = 1$  για γραμμική,  $2$  για τετραγωνική,  $3$  για κυβική κ.λπ.). Το πρώτο και το τελευταίο σημείο ελέγχου είναι πάντα τα τελικά σημεία της καμπύλης, ωστόσο, τα ενδιάμεσα σημεία ελέγχου δεν βρίσκονται πάνω στην καμπύλη όπως το πρώτο και το τελευταίο.

Είναι γνωστό από τη σχετική βιβλιογραφία, μια καμπύλη Bezier δημιουργείται από τα σημεία ελέγχου. Όταν τα σημεία ελέγχου είναι δεδομένα, με τη χρήση του πολυωνύμου Bernstein και του αλγορίθμου De Casteljau μπορούμε να γράψουμε την καμπύλη Bezier.

Η εξίσωση της καμπύλης Bezier γράφεται ως εξής:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n \mathbf{b}_i B_i^n(t) \quad t \in [0,1] \quad (2.5)$$

όπου

$P(t)$  οποιοδήποτε σημείο πάνω στη καμπύλη Bezier

$\mathbf{b}_i$  τα σημεία ελέγχου της καμπύλης

$n$  ο βαθμός της καμπύλης

$B_i^n(t) = \binom{n}{i} \cdot t^i (1-t)^{n-i}$  είναι τα πολυώνυμα Bernstein και  $\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$  για  $0 \leq i \leq n$  και αποτελεί τον διωνυμικό συντελεστή

Στην γενική περίπτωση, ορίζουμε μια καμπύλη Bézier τρίτου βαθμού ως εξής:

$$P(t) = \mathbf{b}_0(1-t)^3 + 3(1-t)^2t \cdot \mathbf{b}_1 + 3(1-t) \cdot t^2 \cdot \mathbf{b}_2 + t^3 \cdot \mathbf{b}_3 \quad (2.6)$$

όπου τα 2D ή 3D σημεία  $\mathbf{b}_i$ , ονομάζονται Bézier control points και δημιουργούν το Bézier πολύγωνο της καμπύλης.

Συνήθως η παραπάνω εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$x(t) = B_0^3(t)\mathbf{b}_0 + B_1^3(t)\mathbf{b}_1 + B_2^3(t)\mathbf{b}_2 + B_3^3(t)\mathbf{b}_3 \quad (2.7)$$

όπου  $B_i^3$  αποτελούν τα πολυώνυμα της σχέσης και είναι γνωστά με την ονομασία (κυβικά) πολυώνυμα Bernstein.

## 2.3 Καμπύλες και επιφάνειες NURBS

Οι NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) αντιπροσωπεύουν ένα σύστημα μαθηματικών εξισώσεων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή γεωμετρικών αντικειμένων στον χώρο. Αυτά τα μαθηματικά μοντέλα είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα στον χώρο των συστημάτων CAD. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται λόγος για την χρήση των καμπυλών NURBS για την αναπαράσταση των καμπυλών και των επιφανειών των γεωμετρικών μοντέλων.

### 2.3.1 Καμπύλες NURBS

Η ονομασία NURBS προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Non-Uniform Rational B-splines. Οι καμπύλες και οι επιφάνειες B-Splines αποτελούν μια ειδική περίπτωση των NURBS. Έτσι, ένα σύστημα που χρησιμοποιεί για την εσωτερική αναπαράσταση καμπυλών και επιφανειών την αναπαράσταση NURBS μπορεί να αναπαριστά ταυτοχρόνως και οποιοδήποτε γεωμετρικό αντικείμενο B-Spline. Το πρόγραμμα Grasshopper χρησιμοποιεί τις καμπύλες και επιφάνειες NURBS οπότε μπορεί να αναπαραστήσει οποιοδήποτε γεωμετρία NURBS άρα και B-Splines. (Κώστας, 2014)

Έστω ότι οι καμπύλες NURBS είναι καμπύλες στον  $\mathbb{E}^4$  μπορούμε να τις αντιμετωπίσουμε ως καμπύλες B-Spline με ομογενείς συντεταγμένες. Οι συναρτήσεις βάσεις θα είναι ίδιες με αυτές των καμπυλών B-Spline που παρουσιάζονται παρακάτω και τα σημεία ελέγχου θα είναι  $\mathbf{b}_i = (x_i \cdot w_i, y_i \cdot w_i, z_i \cdot w_i, w_i)^T$  με  $i = 0, \dots, n$  και  $(x_i, y_i, z_i)^T$  το αντίστοιχο σημείο ελέγχου μιας καμπύλης B-Spline.

Επομένως, οι συντεταγμένες ενός σημείου μιας καμπύλης NURBS και τάξης  $k$  στον χώρο των ομογενών συντεταγμένων δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$x \cdot w = \sum_{i=0}^n (w_i \cdot x_i) N_{i,k}(u) \quad (2.8)$$

$$y \cdot w = \sum_{i=0}^n (w_i \cdot y_i) N_{i,k}(u) \quad (2.9)$$

$$z \cdot w = \sum_{i=0}^n (w_i \cdot z) N_{i,k}(u) \quad (2.10)$$

$$w = \sum_{i=0}^n w_i N_{i,k}(u) \quad (2.11)$$

Έτσι, προκύπτει το σημείο  $\mathbf{b}(u) = (xw, yw, zw, w)^T$  και μπορεί να προβληθεί στο χώρο  $\mathbb{E}^3$  διαιρώντας την κάθε συντεταγμένη του με  $w$ . Άρα, οι καμπύλες NURBS περιγράφονται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{b}(u) = \frac{\sum_{i=0}^n (\mathbf{b}_i w_i) N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n (\mathbf{b}_i) N_{i,k}(u)}, \quad u_{k-1} \leq u \leq u_{n+1} \quad (2.12)$$

όπου:

- $\mathbf{b}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$  με  $i = 0, 1, 2, \dots, n$  είναι τα σημεία ελέγχου της καμπύλης.
- $w_i, i = 0, 1, 2, \dots, n$  είναι τα βάρη των σημείων ελέγχου της καμπύλης.
- $N_{i,k}(u)$  είναι οι συναρτήσεις βάσης της B-Spline.

Η καμπύλη μπορεί να οριστεί πιο απλοϊκά μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$\mathbf{b}(u) = \sum_{i=0}^n \mathbf{b}_i R_{i,k}(u), \quad u_{k-1} \leq u \leq u_{n+1} \quad (2.13)$$

όπου:

$$R_{i,k}(u) = \frac{N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,k}(u)} \quad (2.14)$$

Οι ρητές συναρτήσεις βάσης των καμπυλών NURBS.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των καμπυλών NURBS:

- Σημεία Ελέγχου: είναι τα σημεία που καθορίζουν τη μορφή της καμπύλης. Η τοποθεσία, η σειρά και τα βάρη των σημείων επηρεάζουν το αποτέλεσμα.
- Κομβοδιάνυσμα: είναι μια διατεταγμένη ακολουθία αριθμητικών τιμών που ονομάζονται κόμβοι. Αυτοί οι κόμβοι καθορίζουν την παραμετροποίηση της καμπύλης. Το διάνυσμα κόμβων παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις θέσεις όπου



η καμπύλη μεταβαίνει μεταξύ διαφορετικών σημείων ελέγχου και τον τρόπο με τον οποίο συμβαίνουν αυτές οι μεταβάσεις.

- Βάρη: Τα βάρη ελέγχουν πόσο επηρεάζει κάθε σημείο ελέγχου το σχήμα της καμπύλης. Ένα βάρος με μεγάλη αριθμητική τιμή σημαίνει ότι το σημείο ελέγχου έχει πλήρη επιρροή, ενώ ένα βάρος με μικρή αριθμητική τιμή σημαίνει ότι δεν έχει καθόλου επιρροή. Κατά τον υπολογισμό της θέσης ενός σημείου στην καμπύλη, τα σημεία ελέγχου πολλαπλασιάζονται με τα αντίστοιχα βάρη τους. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στη διαμόρφωση των καμπυλών.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι συναρτήσεις βάσεις B-Splines που προέκυψαν από τους Boor-Cox.

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_i - k + u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_i + k - u_i}{u_i + k - u_i + 1} N_{i+1,k-1}(u) \quad (2.15\alpha)$$

όπου:

$$N_{i,1} = \begin{cases} 1 & u_i < u < u_{i+1} \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad i = 0 \dots k \quad (2.15\beta)$$

- $k$  είναι η τάξη.

Η καμπύλη B-Spline που ορίζεται με αυτές τις συναρτήσεις βάσεις γράφεται ως εξής:

$$\mathbf{b}(u) = \sum_{i=0}^n \mathbf{b}_i N_{i,k}(u) \quad u_{k-1} < u < u_{n+1} \quad (2.16)$$

όπου:

- $n + 1$  αναπαριστά των αριθμό σημείων ελέγχου της καμπύλης.
- $k$  η τάξη της καμπύλης που υπολογίζεται από την σχέση  $k=d+1$  με  $d$  τον βαθμό της καμπύλης.

### 2.3.2 Επιφάνειες NURBS

Οι επιφάνειες NURBS προκύπτουν ως τανυστικό γινόμενο δύο καμπυλών NURBS.

Για τον υπολογισμό και ορισμό μιας επιφάνειας NURBS  $\mathbf{s}(u, v)$  χρειάζονται:

- Ένα διδιάστατο πίνακα σημείων ελέγχου  $\{\mathbf{b}_{ij}\}$  με  $n + 1$  και  $m + 1$  στοιχεία στις δύο διαστάσεις με  $i = 0, \dots, n$  και  $j = 0 \dots m$ .
- Ένα διδιάστατο πίνακα βαρών  $\{w_{ij}\}$  με  $n + 1$  και  $m + 1$  στοιχεία στις δύο διαστάσεις που αντιστοιχούν στα σημεία ελέγχου.
- Το βαθμό  $d_1$  της επιφάνειας στην  $u$  διεύθυνση και η τάξη της  $k_1$ , όπου  $k_1 = d_1 + 1$
- Το βαθμό  $d_2$  της επιφάνειας στην  $v$  διεύθυνση και η τάξη της  $k_2$ , όπου  $k_2 = d_2 + 1$
- Ένα κομβοδιάγραμμα στην διεύθυνση  $u$  με  $\mathbf{u} = \{u_0, u_1, \dots, u_n + k_1\}$
- Ένα κομβοδιάγραμμα στην διεύθυνση  $v$  με  $\mathbf{v} = \{v_0, v_1, \dots, v_m + k_1\}$

Παρακάτω παρουσιάζεται ο τύπος υπολογισμού:

$$\mathbf{s}(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \mathbf{b}_{i,j} R_{i,j}^{k_1, k_2}(u, v) \quad (2.17)$$

όπου:

$$\bullet \quad R_{i,j}(u, v) = \frac{w_{i,j} N_{i,k_1}(u) N_{j,k_2}(v)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{i,j} N_{i,k_1}(u) N_{j,k_2}(v)} \quad (2.18)$$

ρητές συναρτήσεις που ορίζονται συναρτήσει των κομβοδιανυσμάτων και των βαρών.

- $u_i, v_i \quad i = 0, 1, 2, \dots, n + k$  είναι οι τιμές των κομβοδιανυσμάτων στη κατεύθυνση  $u$  και  $v$  αντίστοιχα
- $n + 1$  και  $m + 1$  τα σημεία ελέγχου στη κατεύθυνση  $u$  και  $v$  αντίστοιχα
- $k_1$  και  $k_2$  είναι οι τάξεις της επιφάνειας στη κατεύθυνση  $u$  και  $v$  αντίστοιχα

## 2.4 Επιφάνειες με την μέθοδο lofting και sweeping

Μια επιφάνεια με την μέθοδο lofting δημιουργείται μέσω της παρεμβολής δύο ή περισσότερων καμπυλών. Αυτές οι καμπύλες βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις κατά μήκος. Η μέθοδος αυτή, δημιουργεί ομαλές και συνεχείς επιφάνειες.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε  $Q$  σε αριθμό καμπύλες B-Splines  $c_d$  με ( $q = 0, \dots, Q - 1$ ) με τον ίδιο βαθμό και αριθμό κόμβων. Ας υποθέσουμε ότι η επιφάνεια  $\mathbf{s}$  με βαθμό  $d_1 \cdot d_2$  και σημεία ελέγχου  $(n + 1)$  και  $(m + 1)$  και κομβοδιάνυσμα  $\{u_{-1}, \dots, u_{N+n}\}$  και  $\{v_{-1}, \dots, v_{M+m}\}$ , τότε η επιφάνεια  $\mathbf{s}$  που παρεμβάλλει μέσω  $Q$  διαφορετικών B-splines  $c_d$  ( $q = 0, \dots, Q - 1$ )  $n$ -οστού βαθμού με  $(n + 1)$  σημεία ελέγχου γράφεται ως εξής: (Pérez-Arribas, 2014), Sec. 3.8.

$$\mathbf{s}(u, v) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M \mathbf{W}_{ij} B_i^n(u) B_j^m(v) \quad (2.19)$$

$$c_d = \sum_{i=0}^N \mathbf{V}_{id} B_i^n(u) \quad \mu\epsilon \quad (q = 0, \dots, Q - 1) \quad (2.20)$$

όπου

- $\mathbf{V}_{id}$  είναι τα σημεία ελέγχου των διαφορετικών καμπυλών.
- Οι  $(m + 1)$  επί  $(n + 1)$  λύσεις είναι τα σημεία ελέγχου  $\mathbf{W}_{ij}$  της επιφάνειας  $\mathbf{s}$

Επομένως με την βοήθεια των παραπάνω, η παρεμβολή επιφάνειας σε δεδομένες καμπύλες γράφεται ως εξής:

$$\mathbf{s}(u, v) = \sum_{i=0}^N \left( \sum_{j=0}^M \mathbf{W}_{ij} B_j^m(v_d) \right) B_i^n(u) = \sum_{i=0}^N \mathbf{V}_{id} B_i^n(u) = c_d(u) \quad \text{με} \quad (2.21)$$

$$(d = 0, \dots, q - 1)$$

Όπως αναφέρεται από τους (Choi & Lee, 1990) με την χρήση της μεθόδου sweeping μια επιφάνεια  $\mathbf{s}(u, v)$  αναπαρίσταται ως μια σειρά απλών μετασχηματισμών μιας ή περισσοτέρων καμπύλων «οδηγού» και των καμπυλών προφίλ. Κατά την διαδικασία της μεθόδου χρειάζεται τουλάχιστον μία καμπύλη «οδηγός» και μια άλλη καμπύλη, της οποίας το σχήμα αναπαρίσταται κατά το μήκος της καμπύλης «οδηγού».

Οι μετασχηματισμοί που προκύπτουν προκειμένου να αναπαραχθεί αυτή η μέθοδος αναλύονται στην έρευνα των (Choi & Lee, 1990), καθώς και η μαθηματική αναπαράσταση της.

## 2.5 Έλεγχος ομαλότητας επιφανειών

Στην συνέχεια της ανάλυσης έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμές σε σχέση με την ομαλότητα και την συνέχεια των επιφανειών. Η ανάλυση έχει εφαρμοστεί στο πρόγραμμα Rhinoceros και αφορά την ανάλυση μέσω Zebra καθώς και την γκαουσιανή (Gauss) καμπυλότητα επιφανείας. Η ανάλυση Zebra αποτελεί ένα εργαλείο απεικόνισης στο Rhinoceros 3D που βοηθά στην αξιολόγηση της συνέχειας και της ομαλότητας μιας επιφάνειας ή ενός συνόλου ενωμένων επιφανειών. Εμφανίζει μια σειρά από εναλλασσόμενες μαύρες και λευκές λωρίδες στην επιφάνεια, οι οποίες δείχνουν τον τρόπο που η επιφάνεια καμπυλώνεται προς διάφορες κατευθύνσεις.

Η γκαουσιανή καμπυλότητα μιας επιφάνειας σε ένα σημείο είναι το γινόμενο των κύριων καμπυλοτήτων στο σημείο αυτό. Η καμπυλότητα Gauss είναι ένα μέτρο του πόσο αποκλίνει μια επιφάνεια από το να είναι επίπεδη σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Το εφαπτόμενο επίπεδο οποιουδήποτε σημείου με θετική καμπυλότητα Gauss εμφανίζεται με θερμό χρώμα και προσδιορίζει μια κυρτή επιφάνεια, ενώ το εφαπτόμενο επίπεδο οποιουδήποτε σημείου με αρνητική καμπυλότητα Gauss εμφανίζεται με ψυχρό χρώμα και προσδιορίζει μια κοίλη επιφάνεια. Η θετική καμπυλότητα Gauss υποδηλώνει ότι η επιφάνεια είναι τοπικά κυρτή (όπως μια σφαίρα), η αρνητική καμπυλότητα υποδηλώνει ότι υπάρχει ένα σαγματικό σημείο και η μηδενική καμπυλότητα υποδηλώνει ότι είναι τοπικά επίπεδη (όπως ένα επίπεδο). Η σχέση υπολογισμού προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$G(P) = K_1(P) \cdot K_2(P) \quad (2.22)$$

όπου  $K_1, K_2$  είναι οι κύριες καμπυλότητες στο σημείο μελέτης  $P$

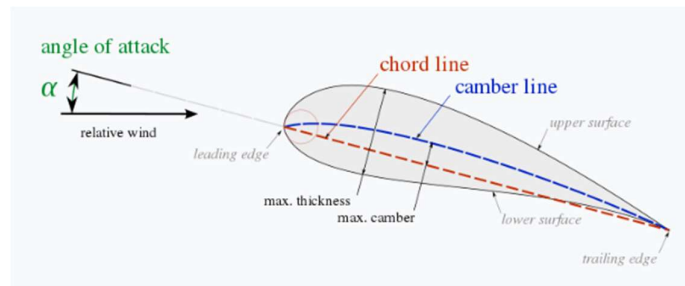
Η μέση καμπυλότητα μιας επιφάνειας είναι το μισό του αθροίσματος των κύριων καμπυλοτήτων σε ένα σημείο. Η μέση καμπυλότητα παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη μέση καμπυλότητα μιας επιφάνειας σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Κάθε σημείο με μηδενική μέση καμπυλότητα έχει αρνητική ή μηδενική καμπυλότητα Gauss. Οι επιφάνειες με αρνητική μέση καμπυλότητα είναι κοίλες επιφάνειες και με θετική μέση καμπυλότητα είναι κυρτές. Η σχέση υπολογισμού προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$M(P) = \frac{K_1(P) \cdot K_2(P)}{2} \quad (2.23)$$

όπου  $K_1, K_2$  είναι οι κύριες καμπυλότητες στο σημείο μελέτης  $P$ .

## 2.6 Περιγραφή υδροτομών

Οι επιφάνειες ελεύθερης μορφής έχουν περίπλοκες γεωμετρίες, με αποτέλεσμα προσεγγίσεις μοντελοποίησης, όπως η παραμετρική μοντελοποίηση να είναι απαραίτητες για την αποτελεσματικότερη περιγραφή τους. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί η κατηγορία των υδροτομών. Μια υδροτομή αναπτύσσει μεγάλη δυναμική άνοση έναντι μικρής αντίστασης. Οι υδροτομές παρουσιάζουν μεγάλο εύρος χρήσης όπως έλικες, πηδάλια, πτερύγια σταθεροποίησης, κ.α..



Εικόνα 2: Σχήμα υδροτομής και βασικά χαρακτηριστικά της. (Airfoil, 2011)

Στην Εικόνα 2: Σχήμα υδροτομής και βασικά χαρακτηριστικά της. Εικόνα 2, απεικονίζεται μια υδροτομή με τα βασικά χαρακτηριστικά της. Στο αριστερό άκρο της υδροτομής από το οποίο έρχεται η ροή ονομάζεται χείλος πρόσπτωσης (leading edge) το οποίο έχει την μεγαλύτερη καμπυλότητα. Το δεξί άκρο ονομάζεται χείλος εκφυγής (trailing edge). Το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει τα δύο άκρα λέγεται χορδή (chord line) της υδροτομής. Η οξεία γωνία που σχηματίζει η χορδή με την εξωτερική ταχύτητα λέγεται γωνία πρόσπτωσης (angle of attack) και συμβολίζεται με  $(\alpha)$ . Η άνω και η κάτω επιφάνεια της υδροτομής περιγράφονται, αντίστοιχα, από εξισώσεις της μορφής  $y = y_u(x)$  και  $y = y_l(x)$  όπου  $y_u(x)$  και  $y_l(x)$  γνωστές συναρτήσεις. Η νοητή γραμμή που περιγράφεται από την εξίσωση  $y = y_m(x)$ , όπου  $y_m(x) = \frac{y_u(x) + y_l(x)}{2}$ , λέγεται μέση γραμμή κυρτότητας (mean camber line). Η μέγιστη κατακόρυφη απόσταση  $m$  ανάμεσα στη χορδή και στη μέση γραμμή κυρτότητας λέγεται μέγιστο βέλος κυρτότητας (maximum camber). Η καμπύλη χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της κυρτότητας που υπάρχει. Μέσω της γραμμής κυρτότητας η υδροτομή έχει χωριστεί σε δύο επιφάνειες την άνω (upper surface) και την κάτω (lower surface). Η συνάρτηση  $y_u(x) - y_l(x)$  λέγεται συνάρτηση πάχους και συμβολίζεται με  $t$  (thickness). (Τριανταφύλλου, 2022).

Όπως αναφέρεται από (Τριανταφύλλου, 2022) η καλή υδροδυναμική λειτουργία της υδροτομής απαιτεί να είναι λεπτή και να έχει μικρή κυρτότητα. Επίσης, η γωνία πρόσπτωσης της ροής πρέπει να είναι μικρή προς αποφυγή αποκόλλησης της. Η δυναμική άνοση οφείλεται εν μέρει στην κυρτότητα της υδροτομής και εν μέρει στη γωνία πρόσπτωσης της ροής. Μία σημαντική υποκατηγορία υδροτομών είναι οι συμμετρικές ως προς τον άξονα  $x$ . Οι υδροτομές αυτές λέγονται συμμετρικές, καθώς η δυναμική άνοση που αναπτύσσουν οφείλεται αποκλειστικά στη γωνία πρόσπτωσης. Λόγω της συμμετρίας τους, οι συμμετρικές υδροτομές έχουν μηδενική άνοση σε μηδενική γωνία πρόσπτωσης. Η τομή του πηδαλίου του πλοίου είναι ένα κλασικό παράδειγμα συμμετρικής υδροτομής.

## 2.6.1 Υδροτομές τύπου NACA

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα μελετηθούν υδροτομές τύπου NACA και πιο συγκεκριμένα η σειρά τεσσάρων ψηφίων εξετάζοντας τα χαρακτηριστικά τους και τις μαθηματικές σχέσεις από τις οποίες δημιουργήθηκαν. Η NACA (National Advisory Committee for Aeronautics - Εθνική Συμβουλευτική Επιτροπή Αεροναυπηγικής) ιδρύθηκε το 1915 στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (NACAairfoil, 2024) και διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στην δημιουργία της NASA. Η πρόοδος της αεροδυναμικής στις αρχές και στα μέσα του 20ου αιώνα βοήθηθηκε σημαντικά από την NACA. Η σειρά αεροτομών/υδροτομών της NACA, η οποία εξέλιξε το σχεδιασμό υδροτομών εξακολουθεί να έχει αντίκτυπο στην αεροδυναμική και υδροδυναμική έρευνα.

## 2.6.2 NACA τεσσάρων ψηφίων(4-digit)

Η πρώτη σειρά NACA που δημιουργήθηκε είναι αυτή των τεσσάρων ψηφίων. Τα τέσσερα ψηφία συνοψίζουν τα χαρακτηριστικά της υδροτομής. Η μέγιστη κυρτότητα ( $m$ ) εμφανίζεται με το πρώτο ψηφίο, η θέση της μέγιστης κυρτότητας ( $p$ ) εμφανίζεται με το δεύτερο ψηφίο και τέλος το πάχος ( $t$ ) της υδροτομής υποδεικνύεται από τα δύο τελευταία ψηφία. Όλες οι τιμές των ψηφίων υπολογίζονται επί τοις εκατό της χορδής. Για παράδειγμα, η υδροτομή NACA 6410 έχει μέγιστη κυρτότητα 6% σε μήκος χορδής 40% και πάχος 10%. Όταν τα δύο πρώτα ψηφία είναι μηδενικά τότε έχουμε μια συμμετρική υδροτομή χωρίς καμπυλότητα. Το πάχος, η θέση και το πλάτος της καμπύλης, επηρεάζουν χαρακτηριστικά επιδόσεων, όπως η σταθερότητα, ο λόγος δυναμικής άνωσης προς αντίσταση.

Για την NACA τεσσάρων ψηφίων έχουμε την εξής εξίσωση για τον υπολογισμό της καμπυλότητας:

$$y_c(x) = \begin{cases} \frac{m}{p^2}(2px - x^2) & \{ 0 \leq x \leq p \\ \frac{m}{(1-p)^2}((1-2p) + 2px - x^2) & \{ p \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (2.24)$$

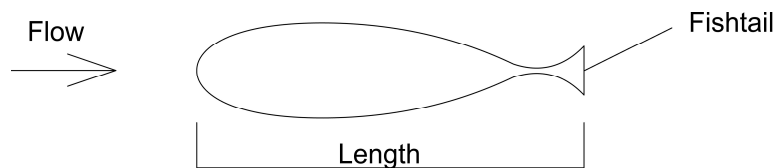
όπου:

$m$  είναι η μέγιστη κυρτότητα

$p$  είναι η θέση της μέγιστης κυρτότητας

## 2.7 Υδροτομή τύπου fishtail (schilling)

Επιπρόσθετα στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζεται παράλληλα ένα σχήμα υδροτομής τύπου fishtail. Η υδροτομή τύπου fishtail έχει σχήμα ουράς ψαριού, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3: Υδροτομή τύπου fishtail.

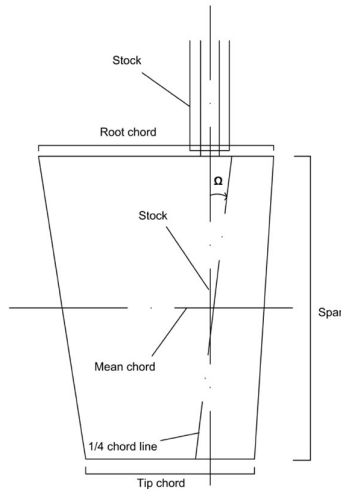
Το υδροδυναμικό προφίλ επιτρέπει τον χειρισμό του πηδαλίου σε ακραίες γωνίες μέχρι και  $75^\circ$  χωρίς να υπάρχουν φαινόμενα απώλειας στήριξης (stall) (Mackey & Bingham, 1987). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, (Molland & Turnock, 2007), αυτός ο τύπος αυξάνει τη μέγιστη δυναμική άνοση (lift) κατά περίπου 20-30% σε σχέση με κάποια προφίλ της NACA. Το χαρακτηριστικό σχήμα της υδροτομής διευκολύνει την κάθετη κίνηση του πλοίου κόντρα στους θαλάσσιους κυματισμούς. Το σύστημα αυτό, δεν επηρεάζεται από τα ρηγά νερά ούτε από την χαμηλή ταχύτητα ροής του ρευστού. Η εξαιρετική του συμπεριφορά σε ελκτικές ικανότητες δίνει την δυνατότητα στο πλοίο να μην χρειάζεται πρωραία έλικα για τον απαιτητικό χειρισμό ορισμένων καταστάσεων. Έτσι, χάρις την υψηλότερη δυναμική άνοση σε συνδυασμό με την χαμηλή ταχύτητα ροής του νερού, αποτελεί έναν εξαιρετικά χρήσιμο τύπο υδροτομής που υπάρχει σε πλοία ειδικών αποστολών, όπως εργασίες διάσωσης. Επιπλέον, είναι ιδανικό για πλοία που κινούνται σε ρηγά νερά και χρειάζονται μεγάλη ακρίβεια στις κινήσεις τους. Παρέχει ένα καλό συμβιβασμό μεταξύ κόστους και απόδοσης.

Σύμφωνα με την έρευνα (Nguyen & Yoshiho, 2014) σε υψηλό αριθμό Reynolds, η δυναμική άνοση και η αντίσταση της υδροτομής δεν επηρεάζεται σημαντικά από τον αριθμό Reynolds. Επιπλέον, αυξάνεται η δυναμική άνοση καθώς το μεγαλύτερο χείλος εκφυγής παράγει υψηλότερη δυναμική άνοσης αλλά και αντίστασης. Επιπρόσθετα, η υψηλή δυναμική άνοση παράγεται από την υψηλή πίεση που δημιουργείται στην κυρτή πλευρά της όψης της. Τα στάσιμα νερά που δημιουργούνται στις κυρτές πλευρές του χείλους εκφυγής μειώνουν την αντίσταση σε μηδενική ή πολύ μικρή γωνία προσβολής της ροής. Συμπερασματικά, η μορφή πτερυγίου με μικρή ακμή ουράς και μεσαίο μέγιστο πάχος δίνει την καλύτερη υδροδυναμική συμπεριφορά.

## 2.8 Περιγραφή πηδαλίων

Το πηδάλιο, ζωτικό στοιχείο της ναυπηγικής, βρίσκεται στην πρύμνη του πλοίου και καθορίζει την κατεύθυνση και την ικανότητα ελιγμών του. Είναι υπεύθυνο για την αλλαγή πορείας μέσω της ανακατεύθυνσης της ροής του νερού. Επιπλέον, επηρεάζει άμεσα την απόδοση της έλικας και την συνολική αντίσταση του πλοίου. Έτσι, το πηδάλιο πρέπει να κατασκευάζεται υδροδυναμικά προκειμένου να υπάρχει αποτελεσματικότητα στην χρήση του και ασφάλεια στις θαλάσσιες μεταφορές.

Σκοπός του πηδαλίου είναι να παράγει μια δύναμη ελέγχου, μέσω της αλλαγής της γωνίας πρόσπτωσης της ροής του νερού πάνω σε αυτό, η οποία δημιουργεί μια ροπή ως προς τον κατακόρυφο άξονα του πλοίου, έτσι ώστε το πλοίο να μπορεί να αλλάξει κατεύθυνση. Οι ελκτικές ικανότητες του πλοίου καθορίζονται από την δράση αυτών των δυνάμεων και ροπών. Το πηδάλιο ως επί το πλείστον είναι συμμετρικής μορφής, έτσι ώστε να αναπτύσσει ίδια δυναμική άνοση και στις δύο πλευρές του. Η μέγιστη μετατόπιση που μπορεί να πάρει το πηδάλιο από τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας είναι οι  $35^\circ$ .



Εικόνα 4: Χαρακτηριστικά πηδαλίου

Στην παραπάνω εικόνα, απεικονίζεται ένα πηδάλιο με τα βασικά χαρακτηριστικά του. Η μορφή της επιφάνειας του αποτελείται από την χορδή στην βάση του πηδαλίου (tip chord), η οποία είναι πιθανό να είναι διαφορετική από την χορδή στην άνω επιφάνεια του πηδαλίου (root chord). Από το ύψος (span), δηλαδή, την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της άνω και της κάτω επιφάνειας του πηδαλίου. Επιπλέον, αποτελείται από την θέση του άξονα του πηδαλίου αλλά και από την γωνία υποχώρησης άξονα (sweep) ( $\Omega$ ), η οποία αντιστοιχεί στην γωνία κλίσης του άξονα και μετριέται από την θέση του ως προς το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει το ένα τέταρτο της άνω και της κάτω χορδής. Η γωνία αυτή επηρεάζει την κατανομή της δυναμικής άνωσης και την διαμόρφωση της γωνίας απώλειας στήριξης, (δηλαδή την μέγιστη γωνία πρόσπτωσης που παράγει τον μέγιστο συντελεστή δυναμικής άνωσης).

Όπως αναφέρεται από (Jialun & Robert, 2017), η επιφάνεια του πηδαλίου επηρεάζει το ποσοστό της δυναμικής άνωσης και της αντίστασης που προκύπτει από το πηδάλιο. Είναι απαραίτητο να υπάρχει επαρκής επιφάνεια πηδαλίου, προκειμένου να δημιουργηθούν οι απαιτούμενες δυνάμεις και ροπές. Οι (Clarke, et al., 1983) ανέφεραν ότι, όταν αυξάνεται ο συντελεστής γάστρας ( $C_B$ ), η επιφάνεια του πηδαλίου θα πρέπει να αυξάνεται ελαφρώς. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται ο λόγος του πλάτους του πλοίου ( $B$ ) προς το μήκος του ( $L_{pp}$ ), η επιφάνεια του πηδαλίου θα πρέπει να αυξάνεται αρκετά, ιδίως όταν το  $B/T$  (όπου  $T$  είναι το βύθισμα του πλοίου) είναι μεγαλύτερο από 3,0. Για αυτό το λόγο, η επιλογή της κατάλληλης επιφάνειας αποτελεί σημαντικό κριτήριο στην επιλογή ενός πηδαλίου.

Η παρακάτω εξίσωση υπολογίζει την συνολική επιφάνεια ενός πηδαλίου με βάση τον Νορβηγικό Νηογνώμονα (Veritas Det Norske, 2023) Μέρος 4<sup>ο</sup>, Κεφάλαιο 14<sup>ο</sup>:

$$\frac{A}{(L_{pp} \cdot T)} = 0,01 + [50C_{b^2} \frac{B}{(L_{pp})^2}] \quad (2.25)$$

Συνεχίζοντας οι (Molland & Turnock, 2007) ανέφεραν ότι το πάχος του πηδαλίου επηρεάζει τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του πηδαλίου, όπως την γωνία απώλειας στήριξης, την ελάχιστη αντίσταση και τον μέγιστο συντελεστή δυναμικής άνωσης. Οι λεπτές υδροτομές, τις περισσότερες φορές, έχουν μεγαλύτερη απόδοση. Οι (Liu J, 2015) εξέτασαν μερικά προφίλ τύπου NACA παρουσιάζοντας ότι οι λεπτότερες υδροτομές είναι πιο αποδοτικές.

Το ύψος του πηδαλίου είναι συνήθως όσο η διάμετρος της έλικας. Αυτό εξασφαλίζει μεγάλο γεωμετρικό λόγο επιμηκούς (geometric aspect ratio) για υψηλότερη αποδοτικότητα. Ο λόγος αυτός, δηλαδή ο γεωμετρικός λόγος επιμηκούς (geometric aspect ratio) υπολογίζεται από την σχέση  $AR = \frac{span}{chord^2} = \frac{A}{c^2}$  όπου  $span$  είναι το ύψος του πηδαλίου,  $c$  είναι η μέση χορδή του και  $A$  είναι το εμβαδόν του πηδαλίου. Ωστόσο, το ύψος ενός πηδαλίου επηρεάζεται και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου και τις συνθήκες λειτουργίας του.

Ο λόγος επιμηκούς έχει την μεγαλύτερη επίδραση στο πηδάλιο. Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο λόγος τόσο μεγαλύτερη δυναμική άνωση αναπτύσσεται. Ωστόσο, ένας μικρός λόγος επιμηκούς μπορεί να βελτιώσει την ευελιξία ενός πλοίου με μεγαλύτερη γωνία απώλειας στήριξης (Molland & Turnock, 2007). Επιπλέον, όταν υπάρχουν πλάκες που προεξέχουν στην άνω και κάτω επιφάνεια του πηδαλίου αυξάνεται ο λόγος με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αντίσταση του πηδαλίου, καθώς λειτουργεί πολύ κοντά στην γάστρα και δεν υπάρχει εγκάρσια ροή λόγω της επίπεδης ανάκλασης (mirroring) (Molland & Turnock, 2007).

## 2.9 Τύποι πηδαλίων

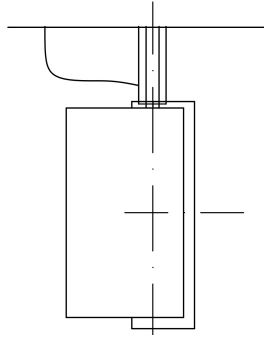
Υπάρχουν πολλά διαφορετικά σχήματα διατομής πηδαλίων. Τα περισσότερα προφίλ πηδαλίων τύπου NACA σχεδιάστηκαν για αεροτομές και χρησιμοποιήθηκαν και σε υδροτομές. Κάθε προφίλ έχει και διαφορετικά υδροδυναμικά χαρακτηριστικά που οδηγούν σε διαφορετικές επιδόσεις στην ελικτική ικανότητα του πλοίου. Η πιο απλή μορφή πηδαλίου είναι αυτή της επίπεδης πλάκας, η οποία συναντάται σπάνια ή σε πολύ μικρά σκάφη. Στην εν λόγω διπλωματική θα γίνει αναφορά μόνο για τις υδροτομές NACA και fishtail οι οποίες και έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη των προφίλ.

Τα πηδάλια χωρίζονται ανάλογα με την κατανομή της επιφάνειας του πτερυγίου πύμα και πλώρα του άξονα περιστροφής. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι πηδαλίων που επηρεάζονται από την θέση του άξονα περιστροφής. Αυτοί είναι τα πλήρως ζυγοσταθμισμένα, τα μερικώς ζυγοσταθμισμένα και τα μη ζυγοσταθμισμένα πηδάλια (Δαγκίνη & Γλύκα, 2015). Παρακάτω αναλύονται οι τρεις τύποι πηδαλίων καθώς και μερικοί άλλοι που αποτελούν προέκταση τους.

### 2.9.1 Ζυγοσταθμισμένα πηδάλια

Στα ζυγοσταθμισμένα πηδάλια η επιφάνεια τους διαμορφώνεται μπροστά και πίσω από τον άξονα περιστροφής και καθ' όλο το ύψος τους. Ο άξονας στροφής του πηδαλίου συνήθως τοποθετείται στο 20%-40% του μήκους της χορδής. Με αυτή την γεωμετρία το πηδάλιο χρειάζεται μικρότερη ροπή στρέψης. Η δύναμη που ασκείται στο μπροστινό τμήμα του πηδαλίου αντισταθμίζεται μερικώς ή πλήρως από την δύναμη του νερού που ασκείται στο πίσω μέρος του σε ορισμένες γωνίες πηδαλίου. Η ισορροπία διατηρείται σε όλο το εύρος των γωνιών του πηδαλίου, καθώς το σημείο δράσης της δύναμης μεταβάλλεται ανάλογα με την εφαρμοζόμενη γωνία του πηδαλίου. Έτσι, σε σύγκριση με ένα μη ζυγοσταθμισμένο πηδάλιο (που θα δοθεί εξήγηση στην συνέχεια) χρειάζεται σημαντικά μικρότερη ροπή στρέψης για τις ελικτικές ικανότητες του πλοίου. Αυτή η διαμόρφωση χρησιμοποιείται σε μεγάλα επιβατηγά και ταχύπλοα πλοία καθώς και σε τριπλέλικα και τετραπλέλικα πολεμικά σκάφη.

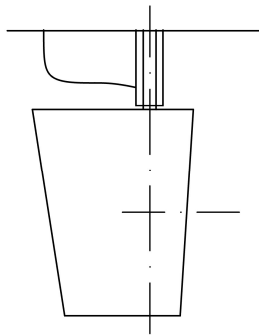




Εικόνα 5: Πλήρως ζυγοσταθμισμένο ηδάλιο.

### 2.9.2 Spade rudder

Αυτό το είδος ηδαλίου αποτελεί υποκατηγορία των ζυγοσταθμισμένων ηδαλίων καθώς αλλάζει ο λόγος σύγκλισης ( $\frac{rootchord}{tipchord}$ ) που υπολογίζεται από τον λόγο των χορδών της άνω και της κάτω επιφάνειας του ηδαλίου. Στηρίζεται μόνο από τον άξονα του ηδαλίου που εκτείνεται μέχρι ένα σημείο του ύψους του ηδαλίου. Τα ηδάλια με μεγαλύτερο λόγο σύγκλισης έχουν την δυνατότητα να παρέχουν μεγαλύτερη ώθηση και μερικές φορές να μειώνουν την αντίσταση του ηδαλίου. Αυτός ο τύπος ηδαλίου χρειάζεται συχνά μεγάλη διάμετρο άξονα και σημαντικό πάχος ηδαλίου λόγω της ισχυρής ροπής κάμψης που δέχεται. Ωστόσο, ο (Bertram, 2012) αναφέρει ότι τα ηδάλια με διάμετρο άξονα μεγαλύτερο του ενός μέτρου δεν είναι πρακτικά. Τα spade ηδάλια έχουν καλύτερη υδροδυναμική συμπεριφορά και απαιτούν μικρότερη συντήρηση λόγω σπηλαιώσης σε σχέση με τα μερικώς και πλήρως ζυγοσταθμισμένα ηδάλια. Τέλος, τα πλοία που τα χρησιμοποιούν χρειάζονται μικρότερη ποσότητα καυσίμου από ότι όταν χρησιμοποιούν τα μη ζυγοσταθμισμένα ηδάλια (Jialun & Robert, 2017). Ωστόσο, τα spade ηδάλια είναι πιο επιρρεπή σε πρόσκρουση αντικείμενων στο νερό, τα οποία μπορεί να χτυπήσουν το ηδάλιο και να ασκήσουν καταστροφική δύναμη στον άξονα του. Ακόμα και η δύναμη του νερού όταν το σκάφος (αποκολλάται) από ένα κύμα μπορεί να ασκήσει καταστροφική πίεση. Σήμερα, τα ηδάλια αυτής της μορφής χρησιμοποιούνται εκτενώς σε όλα τα είδη πλοίων.

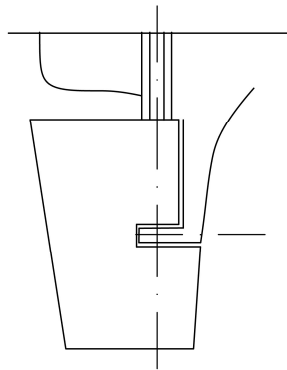


Εικόνα 6: Spade ηδάλιο.

### 2.9.3 Μερικώς ζυγοσταθμισμένα ηδάλια

Τα μερικώς ζυγοσταθμισμένα ηδάλια είναι εκείνα που η επιφάνεια τους στο πίσω μέρος του άξονα περιστροφής είναι μεγαλύτερη από αυτή του μπροστινού τμήματος. Σε αυτή την

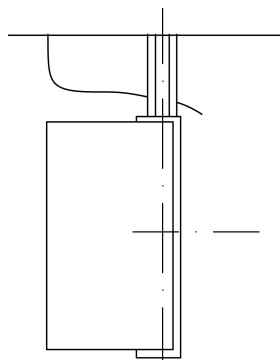
περίπτωση, μειώνεται η ροπή στρέψης από τον μηχανισμό του πηδαλιού αλλά και της καμπτικής ροπής λόγω του ποδοστήματος. Η τοποθέτηση του άξονα βρίσκεται στο κέντρο πίεσης του πηδαλιού. Η δυναμική άνοψη και η συνολική αντίσταση του πηδαλιού επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το ποδόστημα του πηδαλιού, ακόμη και αν δεν έχει κλίση. Επιπλέον, έχει μικρότερη ροπή κάμψης και μικρότερη ροπή στρέψης από το spade πηδάλιο και το μη ζυγοσταθμισμένο πηδάλιο (δείτε παρακάτω), άρα απαιτείται περισσότερη δύναμη για την στρέψη του πλοίου. Παρά τα υδροδυναμικά πλεονεκτήματα του spade πηδαλιού τα μεγάλα καινούργια πλοία, όπως τα πολύ μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (VLCS), φαίνεται να επωφελούνται περισσότερο από αυτό τον τύπο πηδαλιού. Πηδάλια τέτοιου τύπου χρησιμοποιούνται σε διπλέλικα επιβατηγά και πολεμικά πλοία.



Εικόνα 7: Μερικός ζυγοσταθμισμένο πηδάλιο.

#### 2.9.4 Μη ζυγοσταθμισμένα πηδάλια

Τα μη ζυγοσταθμισμένα πηδάλια αποτελούν τον αρχαιότερο τύπο πηδαλιών. Όλη η επιφάνεια του πηδαλιού βρίσκεται πρὸ μνηθεν του άξονα περιστροφής. Ο άξονας περιστροφής βρίσκεται στο χείλος πρόσπτωσης (leading edge). Για αυτό τον λόγο ο μηχανισμός πηδαλιού πρέπει να παρέχει όλη την ροπή στρέψης με αποτέλεσμα το πηδάλιο να υπόκειται σε μεγάλες ροπές κάμψης. Αυτός ο τύπος πηδαλιού χρησιμοποιείται σε μικρά και αλιευτικά σκάφη επειδή είναι οικονομικός και απλούστερος να κατασκευαστεί.



Εικόνα 8: Μη ζυγοσταθμισμένο πηδάλιο.

### 2.9.5 Πηδάλιο Twisted με βολβό

Ένα twisted πηδάλιο είναι στρεβλωμένο κατά τον κατακόρυφο άξονα, δημιουργώντας μια ελικοειδή μορφή. Η μορφή αυτή, χρησιμεύει στο να ελαχιστοποιεί την δύναμη αντίστασης και να βελτιώνει τις ελκτικές ικανότητες του πλοίου. Μέσω αυτού του σχήματος, το πηδάλιο έχει καλύτερη κατανομή της ροής του νερού. Σύμφωνα με έρευνες, αυτός ο τύπος πηδαλίου σε συνδυασμό με την ύπαρξη βολβού μπορεί να εξοικονομήσει μέχρι και 4% της απόδοσης της έλικας (Jaramillo, 2016). Ο σχεδιασμός συμβάλλει στην μείωση του βαθμού σπηλαιώσης, η οποία συμβαίνει όταν πέφτει η πίεση του νερού και σχηματίζονται φυσαλίδες ατμού πάνω στην επιφάνεια του πηδαλίου. Η σπηλαιώση μειώνει την απόδοση του πηδαλίου και μέσω των φυσαλίδων που δημιουργούνται το καταστρέφει. Συνολικά, το twisted πηδάλιο με βολβό αντιπροσωπεύει μια εξελεγχόμενη λύση για την βελτίωση των ελκτικών ικανοτήτων του πλοίου αλλά και της γενικότερης απόδοσης του.



Εικόνα 9: Twisted πηδάλιο με βολβό. (Ferry-rudder-and-propeller, 2007)

## Κεφάλαιο 3: Παραμετρική σχεδίαση υδροτομών

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα αναλύσουμε την παραμετρική σχεδίαση υδροτομής τύπου NACA. Θα παρουσιαστούν οι παράμετροι που επηρεάζουν την γεωμετρία αλλά και τα βήματα που οδήγησαν στην δημιουργία της. Πιο συγκεκριμένα έχουν σχεδιαστεί τρία μοντέλα, ένα για την αναπαράσταση υδροτομών NACA τεσσάρων ψηφίων, ένα απλοποιημένο για συμμετρικές υδροτομές NACA που βασίζεται στο μοντέλο των τεσσάρων ψηφίων και ένα που αναπαριστά τις υδροτομές τύπου fishtail. Τα μοντέλα έχουν ως βάση αναφοράς τα παραμετρικά μοντέλα που παρουσιάζονται στην εργασία (Kostas, et al., 2020).

Τα διαφορετικά παραμετρικά μοντέλα των υδροτομών που παρουσιάζονται, αποτελούν επέκταση αυτών της εργασίας (Kostas, et al., 2020). Σε αυτήν την εργασία, αναλύεται ένα γενικευμένο παραμετρικό μοντέλο που αναπαριστά τόσο υδροτομές NACA όσο και άλλους γνωστούς τύπους υδροτομών. Οι σημαντικότερες διαφορές σε σχέση στην παρούσα διπλωματική εργασία αφορούν σε μικρές αλλαγές στον υπολογισμό των σημείων ελέγχου, στη προσθήκη βαρών στα σημεία ελέγχου των καμπυλών καθώς και στη προσθήκη νέων παραμέτρων και σημείων ελέγχου με σκοπό την βελτίωση της ακρίβειας προσαρμογής του μοντέλου.

### 3.1 Ανάπτυξη υδροτομής NACA τεσσάρων ψηφίων

Πιο συγκεκριμένα, όσο αφορά το συγκεκριμένο παραμετρικό μοντέλο, έχουν σχεδιαστεί τέσσερις καμπύλες NURBS που αναπαριστούν την άνω και κάτω επιφάνεια της υδροτομής. Έχουν χρησιμοποιηθεί έξι επιπλέον παράμετροι που ορίζουν την γεωμετρία της υδροτομής, σε σχέση με το πρώτο από τα δύο παραμετρικά μοντέλα που παρουσιάζονται στην (Kostas, et al., 2020). Λόγω της μεγαλύτερης πολυπλοκότητας των υδροτομών κυρίως στο κάτω μέρος τους, θεωρήθηκε αναγκαία η προσθήκη δύο ίδιων παραμέτρων χωρίς όμως να υιοθετείται η ίδια επιλογή για το πάνω μέρος, όπως γίνεται στο δεύτερο παραμετρικό μοντέλο της (Kostas, et al., 2020). Οι υπόλοιποι τέσσερις παράμετροι που έχουν προστεθεί είναι διαφορετικοί από το παραμετρικό μοντέλο της (Kostas, et al., 2020) και αφορούν, δύο το πάνω μέρος της υδροτομής και δύο το κάτω μέρος της υδροτομής. Στην συνέχεια της επεξήγησης θα γίνει αναλυτική αναφορά για τις επιλεγμένες παραμέτρους.

Όσο αφορά τα σημεία ελέγχου έχουν γίνει τροποποιήσεις καθώς και προσθήκες στο παραμετρικό μοντέλο των υδροτομών NACA τεσσάρων ψηφίων. Πιο συγκεκριμένα έχουν προστεθεί δύο σημεία ελέγχου που επηρεάζουν το χείλος πρόσπτωσης της άνω και κάτω επιφάνειας της υδροτομής.

Τέλος, στην δημιουργία του παραμετρικού μοντέλου τεσσάρων ψηφίων έχουν προστεθεί βάρη στα σημεία ελέγχου των καμπυλών που αναπαριστούν την υδροτομή. Τα βάρη έχουν ως σκοπό την ακριβέστερη αναπαράσταση της υδροτομής. Ο βαθμός που έχει χρησιμοποιηθεί είναι τρίτου και για τις τέσσερις καμπύλες που αποτυπώνουν την υδροτομή.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου αναλύονται οι παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία των υδροτομών.

Πίνακας 1: Ορισμός παραμέτρων

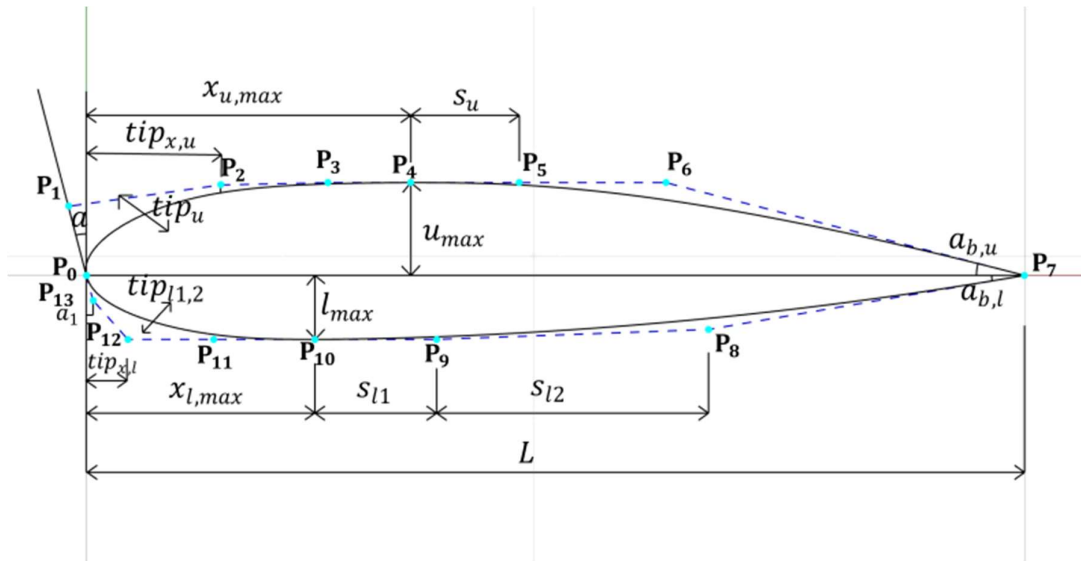
A/A	Παράμετροι	Σύμβολο	Περιγραφή	Εύρος τιμών
1	Length	$L$	Μήκος χορδής υδροτομής	-
2	Max width for upper side	$u_{max}$	Μέγιστο πλάτος για την άνω πλευρά	$[\frac{L}{500}, \frac{L}{5}]$
3	Longitudinal max width for upper side	$x_{u,max}$	Διάμηκες μέγιστο πλάτος για την άνω πλευρά	$[\frac{L}{10}, \frac{7L}{10}]$
4	Tip for upper side	$tip_u$	Ελέγχει την μορφή της μπροστινής ακμής στην άνω πλευρά	[0.05,1]
5	Aft-part for upper side	$s_u$	Ελέγχει την μορφή της πίσω ακμής της άνω πλευράς	[0.05,1]( $L - x_{u,max}$ )
6	Angle for upper side at trailing edge	$a_{b,u}$	Ελέγχει την γωνία της πίσω ακμής της άνω πλευράς	[0,90° ]
7	Tangent angle at leading edge	$a$	Η γωνία μεταξύ του κατακόρυφου άξονα και της εφαπτόμενης διεύθυνσης της υδροτομής στο άκρο πρόσπτωσης	[-20° , 20° ]
8	Max width for lower side	$l_{max}$	Μέγιστο πλάτος για την κάτω πλευρά	$[\frac{L}{500}, \frac{L}{5}]$
9	Longitudinal position of max width for lower side	$x_{l,max}$	Διαμήκης θέση του μέγιστου πλάτους για την κάτω πλευρά	$[\frac{L}{10}, \frac{7L}{10}]$
10	Tip for lower side	$tip_{l1}$	Ελέγχει τη μορφή της μπροστινής ακμής στην κάτω πλευρά	[0.05,1]
11	Tip for lower side	$tip_{l2}$	Ελέγχει τη μορφή της μπροστινής ακμής στην κάτω πλευρά	[0.05,1]
12	Aft-part for lower side	$s_{l1}$	Ελέγχει τη μορφή της πίσω ακμής της κάτω πλευράς	[0.05,1]( $L - x_{l,max}$ )
13	Aft-part for lower side	$s_{l2}$	Ελέγχει τη μορφή της πίσω ακμής της κάτω πλευράς	[0.05,1]( $L - x_{l,max}$ )
14	Angle for lower side at trailing edge	$a_{b,l}$	Ελέγχει την γωνία της πίσω ακμής της κάτω πλευράς	[-20° , 20° ]
15	Scale factor of tangent angle at leading edge	$a_1$	Ελέγχει το ποσοστό μετατόπισης του σημείου $P_{13}$ στην $x$ διεύθυνση προκειμένου να είναι αντιδιαμετρικό με το σημείο $P_1$	[0,30]
16	Percentage of longitudinal position of max width for upper side	$tip_{x,u}$	Ελέγχει την επί της εκατό διαμήκης θέση του μέγιστου πλάτους του σημείο $P_2$ για την πάνω πλευρά	[0,1]
17	Percentage of longitudinal position of max width for lower side	$tip_{x,l}$	Ελέγχει την επί της εκατό διαμήκης θέση του μέγιστου πλάτους του σημείο $P_{12}$ για την κάτω πλευρά	[0,1]
18	Percentage of max width for upper side	$tip_{u,u}$	Ελέγχει την επί της εκατό κατακόρυφη θέση του μέγιστου πλάτους του σημείο $P_2$ για την πάνω πλευρά	[0,1]

Οι παράμετροι που περιγράφονται παραπάνω χρησιμοποιούνται σε κατάλληλες μαθηματικές εκφράσεις για να περιγράψουν τις εκάστοτε καμπύλες των παραμετρικών μοντέλων. Αρχικά, το μήκος  $L$  είναι μια ανεξάρτητη μεταβλητή που ορίζει το μέγεθος της υδροτομής και δεν έχει περιορισμό στην τιμή του, σε σχέση με τις υπόλοιπες παραμέτρους που έχουν προκαθορισμένα όρια. Όλες οι παράμετροι έχουν αδιάστατες τιμές ανάμεσα στο [0,1] ωστόσο οι τιμές αυτές υπολογίζονται μέσα σε ένα εύρος τιμών που τα κατάλληλα όρια παρουσιάζονται στο παραπάνω πίνακα.

Οι παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί για να περιγράψουν την άνω πλευρά του πτερυγίου είναι οι  $(u_{max}, x_{u,max}, tip_u, a, s_u, a_{b,u}, tip_{x,u}, tip_{u,u})$ . Οι δύο πρώτες παράμετροι ελέγχουν την μέγιστη τιμή και θέση της καμπυλότητας της άνω επιφάνειας του πτερυγίου. Η παράμετρος  $tip_u$  σε συνεργασία με την παράμετρο  $a$  βοηθούν στην καλύτερη ευελιξία της καμπύλης στο χείλος πρόσπτωσης. Πιο συγκεκριμένα η παράμετρος  $a$  διευκολύνει τον σχεδιασμό της υδροτομής στο χείλος πρόσπτωσης καθώς αποτελεί την γωνία που σχηματίζει ο κατακόρυφος άξονας με την εφαπτομένη του χείλους πρόσπτωσης. Οι επόμενες δύο παράμετροι ελέγχουν την καμπύλη στο χείλος εκφυγής με την παράμετρο  $a_{b,u}$  να ελέγχει την γωνία κλίσης του χείλους εκφυγής. Οι τελευταίες δύο παράμετροι ορίζουν την διαμήκης και κατακόρυφη θέση του σημείου  $P_2$  που ελέγχει το χείλος πρόσπτωσης της άνω επιφάνειας.

Για την κάτω πλευρά του πτερυγίου οι παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι οι  $(l_{max}, x_{l,max}, tip_{l1}, tip_{l2}, a, s_{l1}, s_{l2}, a_{b,l}, tip_{x,l}, a_1)$ . Οι δύο πρώτοι παράμετροι χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την τιμή και την θέση της μέγιστης καμπυλότητας της υδροτομής. Οι επόμενες τρεις παράμετροι ελέγχουν το χείλος πρόσπτωσης της κάτω επιφάνειας του πτερυγίου. Τέλος, οι τρεις παράμετροι  $(s_{l1}, s_{l2}, a_{b,l})$  ελέγχουν το χείλος εκφυγής. Όπως και για την άνω πλευρά η παράμετρος  $a_{b,l}$ , περιγράφει την γωνία κλίσης στο χείλος εκφυγής της κάτω πλευράς της υδροτομής. Τέλος, οι τελευταίοι δύο παράμετροι έχουν προστεθεί προκειμένου να βελτιώσουν την ευελιξία του χείλους πρόσπτωσης της κάτω επιφάνειας. Πιο αναλυτικά, η παράμετρος  $tip_{x,l}$  ελέγχει την διαμήκης θέση του σημείου  $P_{12}$  ενώ η παράμετρος  $a_1$  συμβάλει στην μετατόπιση του σημείου  $P_{13}$  κατά την  $x$  διεύθυνση έτσι ώστε τα σημεία  $P_1, P_{13}$  να είναι αντιδιαμετρικά μεταξύ τους βοηθώντας την καμπυλότητα της υδροτομής. Το γεγονός αυτό θα διευκολύνει έτσι ώστε η τελική καμπύλη να προσεγγίσει την συνέχεια δεύτερης τάξης στο χείλος πρόσπτωσης.

Για τον σχεδιασμό των δύο παραμετρικών μοντέλων η κάτω πλευρά του πτερυγίου είναι πιο πολύπλοκη σχεδιαστικά σε σχέση με την άνω. Για τον λόγο αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί περισσότερα σημεία ελέγχου, τα οποία αναφέρονται πιο αναλυτικά στην συνέχεια του κεφαλαίου. Το γεγονός αυτό, δημιουργεί την ανάγκη για περισσότερες παραμέτρους που θα αναπαριστούν το κάτω άκρος της καμπύλης. Έτσι, οι παράμετροι  $tip_l$  και  $s_l$  έχουν χρησιμοποιηθεί διπλοί  $(tip_{l1}, tip_{l2}, s_{l1}, s_{l2})$  προκειμένου να υπάρχει μία καλύτερη αποτελεσματικότητα στην αναπαράσταση της καμπύλης. Στην Εικόνα 10 απεικονίζονται οι διάφορες παράμετροι.



Εικόνα 10: Μοντέλο υδροτομής

Όσο αναφορά την NACA τεσσάρων ψηφίων έχουν δημιουργηθεί τέσσερις καμπύλες NURBS που αναπαριστούν την άνω και την κάτω πλευρά του πτερυγίου. Οι καμπύλες χωρίζονται στο σημείο που έχει την μέγιστη διαμήκης και κατακόρυφη θέση της υδροτομής. Οι παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι δεκαοκτώ και αποτελούν ένα συνδυασμό των παραμέτρων που έχουν χρησιμοποιηθεί στα δύο παραμετρικά μοντέλα των (Kostas, et al., 2020) καθώς και νέων παραμέτρων που έχουν προστεθεί για την ευελιξία της υδροτομής. Τα σημεία ελέγχου που απεικονίζουν όλη την γεωμετρία είναι δεκατέσσερα. Πιο αναλυτικά, έχουν χρησιμοποιηθεί οκτώ σημεία για την άνω επιφάνεια και οκτώ σημεία για την κάτω επιφάνεια (δύο σημεία είναι κοινά και έχουν μετρηθεί δύο φορές). Οι τέσσερις καμπύλες NURBS που έχουν δημιουργηθεί είναι τρίτου βαθμού.

Αρχικά έχουν χρησιμοποιηθεί τρία σημεία ( $P_1, P_2, P_3$ ) που κινούνται κατά τον  $x$  και  $z$  άξονα και ελέγχουν το χείλος πρόσπτωσης της άνω πλευράς. Η κύρια παράμετρος που μεταβάλλει το χείλος πρόσπτωσης και τα σημεία αυτά είναι η  $tip_u$  αλλά και η  $\alpha$  που ελέγχει το άκρο της καμπύλης. Το σημείο  $P_4$  ελέγχει την θέση και την τιμή της μέγιστης καμπυλότητας της υδροτομής. Όσο αφορά το σημείο  $P_6$  έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να κινείται κατακόρυφα, οριζόντια και διαγώνια ανάλογα την τιμή των παραμέτρων. Πιο αναλυτικά η παράμετρος  $\alpha_{b,u}$  ελέγχει το σημείο κατακόρυφα ή οριζόντια. Για τον υπολογισμό του σημείου  $P_6$  έχουν οριστεί δύο κλάδοι. Οι δύο κλάδοι χρησιμοποιούνται έτσι ώστε το σημείο αυτό να μην ξεπεράσει στον κατακόρυφο ποτέ την τιμή της παραμέτρου  $u_{max}$ . Έτσι, μέσω της παρακάτω ανισότητας ( $\text{αν } (L - s_u) \tan \alpha_{b,u} < u_{max}$ ) έχει δημιουργηθεί η σχέση για τον άνω και για τον κάτω κλάδο προκειμένου το σημείο να έχει κατακόρυφη θέση μικρότερη ή το πολύ ίση με την τιμή  $u_{max}$ . Ομοίως με παρόμοια λογική έχει κατασκευαστεί και το σημείο  $P_8$  για την αναπαράσταση της κάτω καμπύλης. Τα σημεία  $P_6$  και  $P_8$  έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, καθώς είναι τα πιο σημαντικά σημεία που ελέγχουν το χείλος εκφυγής της υδροτομής. Για την αναπαράσταση της κάτω επιφάνειας γίνεται χρήση της ίδιας μεθοδολογίας για την αποτύπωση της με την άνω πλευρά του πτερυγίου, δηλαδή υπάρχει ένα σημείο που αποτυπώνει την θέση και την τιμή της μέγιστης καμπυλότητας και τρία διαφορετικά σημεία ελέγχου για την κάτω επιφάνεια του χείλους πρόσπτωσης.

Πιο αναλυτικά όσο αφορά την άνω επιφάνεια, τα σημεία ελέγχου δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\mathbf{P}_0 = (0,0,0) \quad (3.1)$$

$$\mathbf{P}_1 = (-\tan(\alpha) \cdot u_{max} \cdot tip_u, tip_u \cdot u_{max}, 0) \quad (3.2)$$

$$\mathbf{P}_2 = (tip_{x,u} \cdot x_{u,max}, u_{max} \cdot tip_{u,u}, 0) \quad (3.3)$$

$$\mathbf{P}_3 = (tip_u \cdot x_{u,max}, u_{max}, 0) \quad (3.4)$$

$$\mathbf{P}_4 = (x_{u,max}, u_{max}, 0) \quad (3.5)$$

$$\mathbf{P}_5 = (s_u, u_{max}, 0) \quad (3.6)$$

$$\mathbf{P}_6 = \begin{cases} (s_u, (L - s_u) \cdot \tan a_{b,u}, 0) & \text{αν } (L - s_u) \tan a_{b,u} < u_{max} \\ \left( L - \frac{u_{max}}{\tan a_{b,u}}, u_{max}, 0 \right) & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{P}_7 = (L, 0, 0) \quad (3.8)$$

Όσο αφορά την κάτω επιφάνεια έχουν δημιουργηθεί τα εξής επτά σημεία ελέγχου:

$$\mathbf{P}_7 = (L, 0, 0) \quad (3.9)$$

$$\text{αν } a_{b,l} < 0$$

$$a_{b,l} = |a_{b,l}|$$

$$\mathbf{P}_8 = \begin{cases} (s_{l1}, - (L - s_{l1}) \cdot \tan(a_{b,l}), 0) & \text{αν } (L - s_{l1}) \cdot \tan(a_{b,l}) < l_{max} \\ \left( L - \frac{l_{max}}{\tan(a_{b,l})}, -l_{max}, 0 \right) & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.10)$$

αλλιώς

$$\mathbf{P}_8 = \begin{cases} (s_{l1}, (L - s_{l1}) \cdot \tan(a_{b,l}), 0) & \text{αν } (L - s_{l1}) \cdot \tan(a_{b,l}) < u_{max} \\ \left( L - \frac{u_{max}}{\tan(a_{b,l})}, -l_{max}, 0 \right) & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{P}_9 = (s_{l2}, -l_{max}, 0) \quad (3.13)$$

$$\mathbf{P}_{10} = (x_{l,max}, -l_{max}, 0) \quad (3.14)$$

$$\mathbf{P}_{11} = (tip_{x,l} \cdot x_{l,max}, -l_{max}, 0) \quad (3.15)$$

$$\mathbf{P}_{12} = (x_{l,max} \cdot (1 - tip_{l1}), -l_{max}, 0) \quad (3.16)$$

$$\mathbf{P}_{13} = (\tan(\alpha) \cdot l_{max} \cdot tip_{l1} \cdot a_1, -tip_{l2}, 0) \quad (3.17)$$

$$\mathbf{P}_{14} = (0,0,0)$$

Τα παραπάνω σημεία ελέγχουν την γεωμετρία των υδροτομών για τις NACA τεσσάρων ψηφίων. Έτσι, ενώνοντας τις τέσσερις καμπύλες σε μια ενιαία καμπύλη NURBS προκύπτει το προς μελέτη πτερύγιο χωρίς να αλλάζει η γεωμετρία των καμπυλών.

## 3.2 Συμμετρική NACA

Όσο αναφορά την συμμετρική NACA έχουν χρησιμοποιηθεί δώδεκα σημεία ελέγχου με έξι παραμέτρους. Πιο αναλυτικά, για την συμμετρική υδροτομή έχουμε τις ακόλουθες έξι παραμέτρους ( $s_u, u_{max}, x_{u,max}, tip_u, a_{b,u}, \alpha$ ) που αναπαριστούν την άνω και κάτω επιφάνεια του πτερυγίου. Η γωνία  $\alpha$  που έχει χρησιμοποιηθεί στο μη συμμετρικό παραμετρικό μοντέλο είναι μηδέν σε όλες τις περιπτώσεις. Γνωρίζουμε ότι, στις συμμετρικές υδροτομές η θέση του μέγιστου πάχους είναι πάντα στο 30% του μήκους της υδροτομής και η τιμή είναι όσο το μισό του μέγιστου πάχους. Για αυτό τον λόγο οι παράμετροι ( $u_{max}, x_{u,max}$ ) παίρνουν δεδομένες τιμές ανάλογα την προς μελέτη υδροτομή. Οι παράμετροι ( $tip_u, s_u, a_{b,u}$ ) παίρνουν τιμές από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται. Οι υπόλοιποι τέσσερις παράμετροι της NACA τεσσάρων ψηφίων της κάτω επιφάνειας ( $s_l, l_{max}, x_{l,max}, tip_l$ ) παίρνουν τις ίδιες τιμές με τις τέσσερις παραμέτρους της άνω επιφάνειας καθώς έχουμε συμμετρία ως προς τον άξονα x. Τέλος, οι παράμετροι ( $tip_{l2}, s_{l2}, a_1, tip_{x,u}, tip_{x,l}, tip_{u,u}$ ) δεν χρησιμοποιούνται για την αποτύπωση της συμμετρικής υδροτομής.



Ο βαθμός των καμπυλών Bezier που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση είναι τρίτου βαθμού και το σύνολο των καμπυλών είναι τέσσερις. Για την αναπαράσταση της άνω καμπύλης το σημείο που διαχωρίζει την καμπύλη σε δύο είναι το  $P_3$  που ορίζει την θέση και τιμή του μέγιστου πάχους καμπυλότητας της άνω επιφάνειας της υδροτομής. Ομοίως και για την κάτω καμπύλη το σημείο  $P_9$ . Επιπρόσθετα, τα σημεία  $P_2, P_{11}$  έχουν αφαιρεθεί από το παραμετρικό μοντέλο της συμμετρικής υδροτομής. Τα σημεία  $P_6, P_8$  (που έχουν γίνει τα σημεία  $P_5, P_7$  για τις συμμετρικές υδροτομές) έχουν απλοποιηθεί επειδή δεν χρησιμοποιείται καθόλου η παράμετρος  $a_{b,l}$  καθώς τόσο η άνω γωνία όσο και η κάτω γωνία του άκρου εκφυγής έχουν τις ίδιες τιμές λόγω συμμετρίας της υδροτομής.

Παρακάτω απεικονίζονται τα σημεία ελέγχου της υδροτομής για την άνω επιφάνεια:

$$P_0 = (0,0,0) \quad (3.18)$$

$$P_1 = (-\tan(a) \cdot u_{max} \cdot tip_u \cdot L, tip_u \cdot u_{max} \cdot L, 0) \quad (3.19)$$

$$P_2 = ((1 - tip_u)x_{u,max}) \cdot L, u_{max} \cdot L, 0) \quad (3.20)$$

$$P_3 = (x_{u,max} \cdot L, L \cdot u_{max}, 0) \quad (3.21)$$

$$P_4 = (s_u \cdot L, u_{max} \cdot L, 0) \quad (3.22)$$

$$P_5 = (L - s_u \cdot \tan(a_{b,u}), u_{max} \cdot L, 0) \quad (3.23)$$

$$P_6 = (L, 0, 0) \quad (3.24)$$

Όσο αφορά την κάτω επιφάνεια έχουν δημιουργηθεί τα ίδια έξι σημεία ελέγχου καθώς έχουμε την ίδια καμπύλη.

### 3.3 Υδροτομή τύπου fishtail

Στον συγκεκριμένο τύπο έχουν προστεθεί κάποιοι παράμετροι που αλλάζουν την γεωμετρία της υδροτομής, καθώς δεν αποτελεί υδροτομή τύπου NACA αλλά μια παραλλαγή της. Οι παράμετροι που υπολογίζουν την συμμετρική NACA έχουν κρατηθεί ίδιοι όπως και τα σημεία ελέγχου, καθώς το πτερύγιο στο χείλος πρόσπτωσης είναι ακριβώς το ίδιο γεωμετρικά, όπως και το μέγιστο πάχος της υδροτομής και η θέση που αυτά παρουσιάζονται. Σκοπός των παραμέτρων που έχουν προστεθεί είναι να επηρεάσουν την γεωμετρία του χείλους εκφυγής ώστε να έχει την μορφή ‘ουράς ψαριού’.

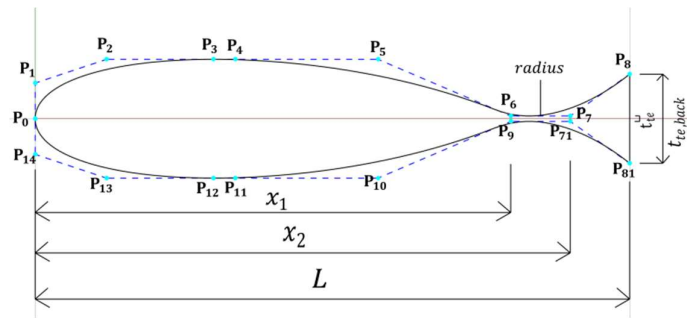
Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τις επιπλέον παραμέτρους που έχουν χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση της υδροτομής.

Πίνακας 2: Επιπλέον παράμετροι fishtail

Αριθμός	Όνομα	Σύμβολο	Περιγραφή	Εύρος τιμών
1	Max width before trailing edge	$t_{te}$	Μέγιστο πλάτος λίγο πριν το χείλος εκφυγής	[0.005,0.02]
2	Max width for trailing edge	$t_{te,back}$	Μέγιστο πλάτος στο χείλος εκφυγής	[0.025,0.15]
3	Longitudinal max position of points $P_7, P_{71}$	$x_1$	Μέγιστη διαμήκης θέση για τα σημεία $P_6, P_9$	[0.8,0.9]
4	Longitudinal max position of points $P_8, P_{81}$	$x_2$	Μέγιστη διαμήκης θέση για τα σημεία $P_7, P_{71}$	[0.9,1.0]
5	Max radius	$radius$	Μέγιστη ακτίνα καμπυλότητας που εφαρμόζεται στα σημεία $P_6, P_9$ και $P_8, P_{81}$ της ‘ουράς ψαριού’	[0,1]

Επομένως εκτός από το πάχος στο χείλος εκφυγής παράμετρος  $t_{te}$  της NACA (που θα δοθεί επεξήγηση στο επόμενο κεφάλαιο) έχουν προστεθεί άλλοι τέσσερις παράμετροι που ελέγχουν την καμπύλη που δημιουργείται στο χείλος εκφυγής. Οι παράμετροι  $x_1, x_2$  έχουν σκοπό να μεταβάλουν κατά τον άξονα  $x$  την γεωμετρία της καμπύλης, ελέγχοντας έτσι την θέση της ελάχιστης καμπυλότητας μέσω των σημείων ( $P_6, P_9$  και  $P_{71}, P_7$ ). Η παράμετρος  $t_{te,back}$  ελέγχει το μέγιστο πάχος στο χείλος εκφυγής. Η παράμετρος radius ελέγχει την ακτίνα της εντολής fillet ανάμεσα στα σημεία ( $P_6, P_9$  και  $P_{71}, P_7$ ). Όλοι οι παράμετροι έχουν την μορφή sliders για τον προσδιορισμό των τιμών και οι τιμές τους έχουν οριστεί με βάση την έρευνα των (Nguyen & Ikeda, 2014). Η παράμετρος  $t_{te}$  ελέγχει το πάχος της υδροτομής στο σημείο λίγο πριν δημιουργηθεί η ‘ουρά ψαριού’.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται οι παραπάνω παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση της υδροτομής.



Εικόνα 11: Επιπλέον παράμετροι αναπαράστασης fishtail υδροτομής

Παρακάτω απεικονίζονται τα σημεία ελέγχου της υδροτομής τύπου fishtail:

$$P_0 = (0,0,0) \quad (3.25)$$

$$P_1 = (-\tan(a) \cdot u_{max} \cdot tip_u \cdot L, tip_u \cdot u_{max} \cdot L, 0) \quad (3.26)$$

$$P_2 = \left( (1 - tip_u) x_{u,max} \right) \cdot L, u_{max} \cdot L, 0) \quad (3.27)$$

$$P_3 = (x_{u,max} \cdot L, L \cdot u_{max}, 0) \quad (3.28)$$

$$P_4 = (s_u \cdot L, u_{max} \cdot L, 0) \quad (3.29)$$

$$P_5 = (L - s_u \cdot \tan(a_{b,u}), u_{max} \cdot L, 0) \quad (3.30)$$

$$P_6 = (L \cdot x_2, t_{te}/2, 0) \quad (3.32)$$

$$P_7 = (L \cdot x_1, t_{te}/2, 0) \quad (3.33)$$

$$P_8 = (L, t_{te,back}/2, 0) \quad (3.34)$$

$$P_{81} = (L, -t_{te,back}/2, 0) \quad (3.35)$$

$$P_{71} = (L \cdot x_1, -t_{te}/2, 0) \quad (3.36)$$

$$P_9 = ((L \cdot x_2, -t_{te}/2, 0)) \quad (3.37)$$

$$P_{10} = (L - s_u \cdot \tan(a_{b,u}), -u_{max} \cdot L, 0) \quad (3.38)$$

$$P_{11} = (s_u \cdot L, -u_{max} \cdot L, 0) \quad (3.39)$$

$$P_{12} = (x_{u,max} \cdot L, -L \cdot u_{max}, 0) \quad (3.40)$$

$$P_{13} = \left( (1 - tip_u) x_{u,max} \right) \cdot L, -u_{max} \cdot L, 0) \quad (3.42)$$

$$P_{14} = ((\tan(a) \cdot u_{max} \cdot tip_u \cdot L, -tip_u \cdot u_{max} \cdot L, 0)) \quad (3.43)$$

$$P_{15} = (0,0,0) \quad (3.44)$$

Για την άνω και κάτω επιφάνεια έχουν χρησιμοποιηθεί οι ίδιες σχέσεις υπολογισμού καθώς τα σημεία ελέγχου είναι αντιδιαμετρικά μεταξύ τους ως προς τον άξονα  $x$ . Οι σχέσεις που έχουν τροποποιηθεί σε σχέση με την συμμετρική υδροτομή τεσσάρων ψηφίων είναι για τα σημεία ( $P_6, P_7, P_8, P_9, P_{71}, P_{81}$ ). Σε αυτή την περίπτωση η υδροτομή αποτελείται από έξι

καμπύλες (τρεις καμπύλες που αναπαριστούν την άνω επιφάνεια και τρεις για την κάτω) καθώς και μία ευθεία που αναπαριστά το μέγιστο πάχος εκφυγής και ενώνονται σε μια γεωμετρία. Οι δύο καινούργιες καμπύλες που έχουν δημιουργηθεί από τα σημεία ελέγχου  $(P_6, P_7, P_8)$  και  $(P_9, P_{71}, P_{81})$  και αναπαριστούν την μορφή του χείλους εκφυγής της άνω και κάτω επιφάνειας αντίστοιχα. Τα σημεία ελέγχου που αναπαριστούν την ευθεία στο χείλος εκφυγής είναι τα  $(P_6, P_9)$ . Οι δύο νέες καμπύλες δημιουργούν το χείλος εκφυγής της άνω και κάτω επιφάνειας αντίστοιχα ενώ η ευθεία αποτελεί το μέγιστο πάχος στο άκρο εκφυγής.

### 3.4 Υλοποίηση του παραμετρικού μοντέλου στο περιβάλλον Grasshopper

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι αδιάστατοι αριθμοί από το  $[0,1]$  και μέσω κατάλληλων σχέσεων οι παράμετροι αυτοί έχουν υπολογιστεί ώστε να εκφράζονται μέσα σε ένα λογικό εύρος τιμών. Το μήκος  $L$  της χορδής είναι μια ελεύθερη παράμετρος που επηρεάζει την κλίμακα της υδροτομής. Σε όλα τα παραμετρικά μοντέλα οι αριθμητικές τιμές των κύριων παραμέτρων προκύπτουν από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Αποτελούνται από τέσσερις καμπύλες οι οποίες αναπαριστούν την άνω και την κάτω πλευρά του πτερυγίου και καταλήγουν στην δημιουργία μιας ενιαίας καμπύλης.

Για το μοντέλο επαλήθευσης των υδροτομών (που αποτελεί το κάτω μοβ πλαίσιο στην Εικόνα 20 αναπαράστασης του οπτικού κώδικα) έχει χρησιμοποιηθεί η ιδέα που έχει προέλθει από την εταιρεία Plus Plastic (NACA 4 airfoil generator, 2023), η οποία έχει φτιάξει ένα μοντέλο που αναπαριστά τα πτερύγια NACA τεσσάρων ψηφίων μέσω μαθηματικών εξισώσεων που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Το μοντέλο αυτό έχει τροποποιηθεί για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας και μέσα από μια σειρά παραμέτρων ελέγχει τα ψηφία της NACA.

Η σύγκριση της προς μελέτης γεωμετρίας με την υδροτομή NACA γίνεται μέσα από μια σειρά οπτικών εντολών που επαληθεύουν την αξιοπιστία του παραμετρικού μοντέλου. Πιο αναλυτικά, το παραμετρικό μοντέλο που μας δίνει την NACA τεσσάρων ψηφίων αποτελείται από ένα κώδικα που υπολογίζει μέσω μαθηματικών τύπων την μέγιστη καμπυλότητα, το μέγιστο πάχος αλλά και την θέση εμφάνισης των παραπάνω. Ο χρήστης μέσω τεσσάρων sliders μπορεί να μεταβάλλει τα τέσσερα σημαντικά ψηφία της NACA και να καθορίσει την μορφή της. Επιπρόσθετα, μπορεί να μεταβάλει και το μήκος της υδροτομής. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από 202 σημεία ελέγχου. Έπειτα τα δύο μοντέλα, το προς μελέτη και αυτό της NACA συγκρίνονται μέσω του αλγόριθμου βελτιστοποίησης Galapagos που αναλύεται στο Παράρτημα Α. Πιο αναλυτικά, για να επαληθευτεί το παραμετρικό μοντέλο δημιουργούνται 202 σημεία πάνω στην προς μελέτη καμπύλη τα οποία στην συνέχεια συγκρίνονται με τα σημεία που βρίσκονται στην καμπύλη της NACA. Ουσιαστικά, το Galapagos μεταβάλλοντας την τιμή των παραμέτρων ελέγχει και αλλάζει την κατακόρυφη απόσταση των 202 σημείων της NACA με τα 202 σημεία του παραμετρικού μοντέλου μέχρι να ταυτιστούν. Το παρακάτω εκφράζεται ως εξής:

$$opt = \min \sum l_i \quad (3.45)$$

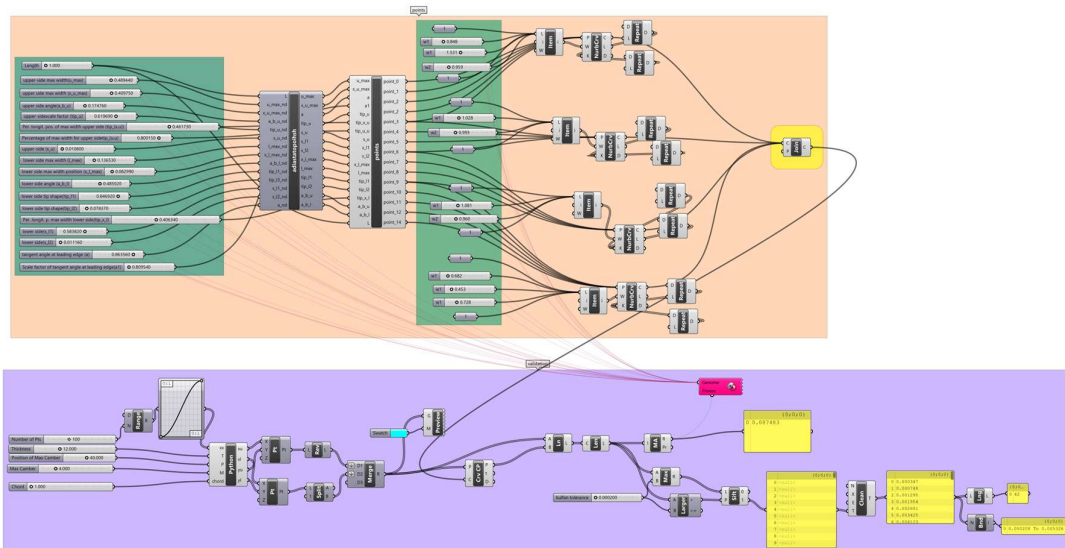
όπου  $l_i$  η κατακόρυφη απόσταση των σημείων

Τέλος, μέσα από κάποιες λίστες σε μορφή πίνακα που έχουν προστεθεί, τα παραμετρικά μοντέλα μπορούν να ελέγξουν που εμφανίστηκε η μέγιστη απόσταση και ποια η τιμή της στα

σημεία των συγκρινόμενων μοντέλων, αλλά και να ορίσουν ποια θα είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση τους μέσω slider. Έτσι, ελέγχεται με μεγάλη αποτελεσματικότητα η αξιοπιστία του μοντέλου.

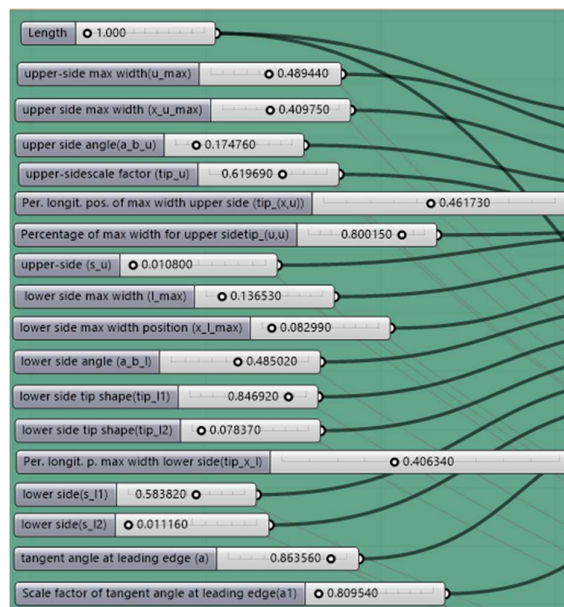
### 3.4.1 NACA τεσσάρων ψηφίων

Σε αυτή την υποενότητα θα αναλυθεί ο οπτικός κώδικας που έχει χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση των υδροτομών τεσσάρων ψηφίων.



Εικόνα 12: NACA τεσσάρων ψηφίων

Αρχικά έχουμε στο αριστερά πάνω μέρος τις παραμέτρους που έχουν αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα που απεικονίζονται στην Εικόνα 13: Παράμετροι για αναπαράσταση NACA τεσσάρων ψηφίων.



Εικόνα 13: Παράμετροι για αναπαράσταση NACA τεσσάρων ψηφίων.

Παρακάτω μέσω κατάλληλης χρήσης κώδικα python έχουν κατασκευαστεί τα όρια των παραμετρικών τιμών καθώς και τα σημεία ελέγχου. Παρακάτω απεικονίζονται οι σχέσεις υπολογισμού για τις διαστατές τιμές.

```

1. import math
2. u_max = u_max_nd*(0.99 * L/5 ) + 0.01 * L/5
3. x_u_max = x_u_max_nd* 0.6 * L + 0.1 * L
4. a_b_u = a_b_u_nd*90*math.pi/180
5. tip_u = tip_u_nd*(0.9 - 0.1) + 0.1
6. s_u = x_u_max + (L-x_u_max)*(s_u_nd* 0.9 + 0.05)
7. l_max = l_max_nd*(0.99 * L/5 ) + 0.01 * L/5
8. x_l_max = x_l_max_nd*0.6 * L+ 0.1 * L;
9. a_b_l = a_b_u * (2 * a_b_l_nd - 1)
10. tip_l1 = tip_l1_nd* (0.95 - 0.05) + 0.05
11. tip_l3 = tip_l3_nd* (0.99 * L/5 ) + 0.01 * L/5
12. s_l1 = x_l_max + (L - x_l_max) * (s_l1_nd * 0.9 + 0.05)
13. s_l2 = x_l_max + (L - x_l_max) * (s_l2_nd * 0.9 + 0.05)
14. a = (a_nd*(20+20)-20)*math.pi/180

```

Τα σημεία ελέγχου των δύο καμπυλών παρουσιάζονται παρακάτω.

```

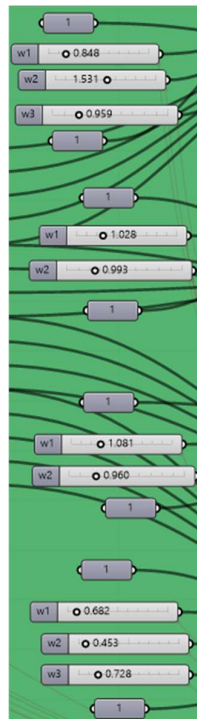
1. import rhinoscriptsyntax as rs
2. import math

3. point_0 = rs.CreatePoint(0,0, 0)
4. point_1 = rs.CreatePoint(-math.tan(a)*u_max*tip_u, tip_u * u_max, 0)
5. point_2 = rs.CreatePoint(tip_1*x_u_max, tip_2*u_max, 0)
6. point_3 = rs.CreatePoint(x_u_max*tip_u, u_max, 0)
7. point_4 = rs.CreatePoint(x_u_max, u_max, 0)
8. point_5 = rs.CreatePoint( s_u, u_max, 0)
9. if (L - s_u) * math.tan(a_b_u) < u_max:
10. point_6 = rs.CreatePoint(s_u,(L - s_u) *math. tan(a_b_u), 0)
11. else:
12. point_6 = rs.CreatePoint(L - u_max / math.tan(a_b_u),u_max, 0)

13. point_7 = rs.CreatePoint(L, 0, 0)
14. if a_b_l <0:
15. a_b_l=math.fabs(a_b_l)
16. if (L - s_l1)*math.tan(a_b_l) < l_max:
17. point_8 = rs.CreatePoint( s_l1, -((L - s_l1)*math.tan(a_b_l)), 0)
18. else:
19. point_8 = rs.CreatePoint( L - l_max / math.tan(a_b_l), -l_max, 0)
20. else:
21. if (L - s_l1) *math. tan(a_b_l)< u_max:
22. point_8 = rs.CreatePoint( s_l1,(L - s_l1) *math. tan(a_b_l), 0)
23. else:
24. point_8 = rs.CreatePoint( L - u_max /math. tan(a_b_l), u_max, 0)
25. point_9 = rs.CreatePoint(s_l2, -l_max, 0)
26. point_10 = rs.CreatePoint(x_l_max, -l_max, 0)
27. point_11 = rs.CreatePoint(tip_3* x_l_max, -l_max, 0)
28. point_12 = rs.CreatePoint(x_l_max*(1-tip_l1), -l_max, 0)
29. point_13= rs.CreatePoint(math.tan(a)*l_max*tip_l1*a1, -tip_l3, 0)
30. point_14 = rs.CreatePoint(0,0, 0)

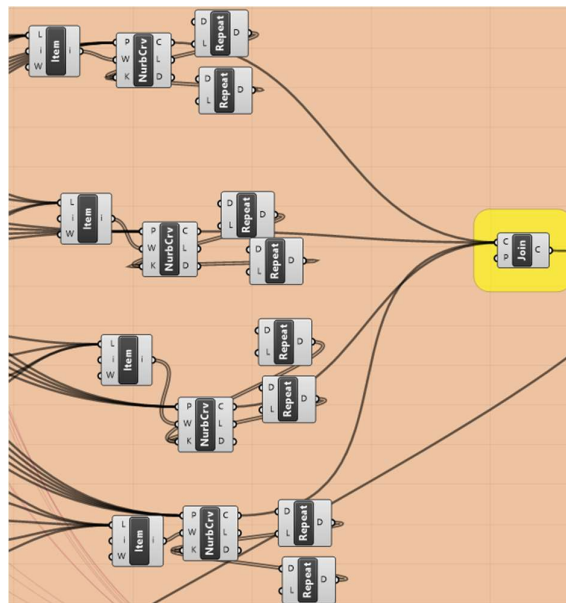
```

Στην Εικόνα 14 απεικονίζονται τα βάρη που έχουν χρησιμοποιηθεί για την σχεδίαση των τεσσάρων καμπυλών. Τα βάρη παίρνουν τιμές στο  $[0.3-2.0]$  και οι τιμές τους επιλέγονται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται.



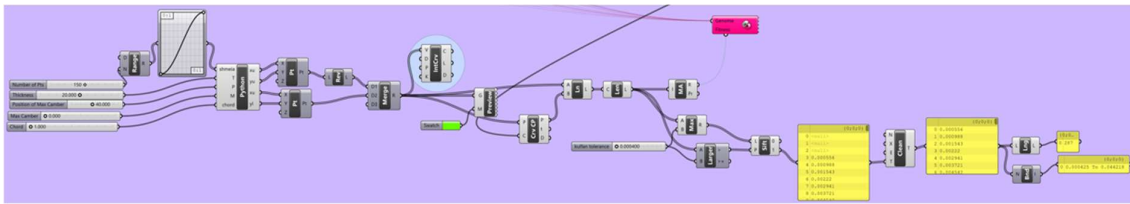
Εικόνα 14: Βάρη καμπυλών

Τα σημεία ελέγχου μέσω της εντολής «nurbs curve» σχεδιάζουν τέσσερις καμπύλες NURBS τρίτου βαθμού. Έπειτα οι καμπύλες που έχουν σχεδιαστεί ενώνονται σε μία ενιαία με την εντολή «join».



Εικόνα 15: Σχεδιασμός καμπυλών

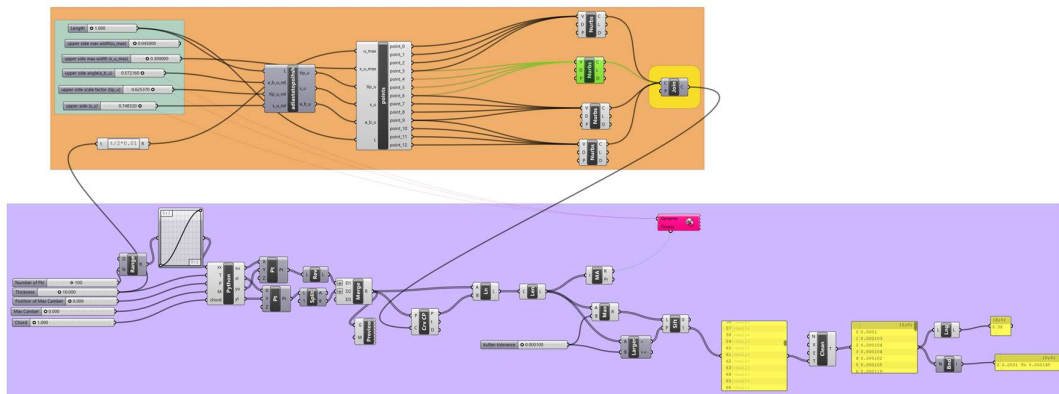
Στη συνέχεια με την βοήθεια του Galaragos ελέγχεται η ακρίβεια της αναπαράστασης της ζητούμενης NACA.



Εικόνα 16: Κώδικας επαλήθευσης υδροτομής NACA τεσσάρων ψηφίων

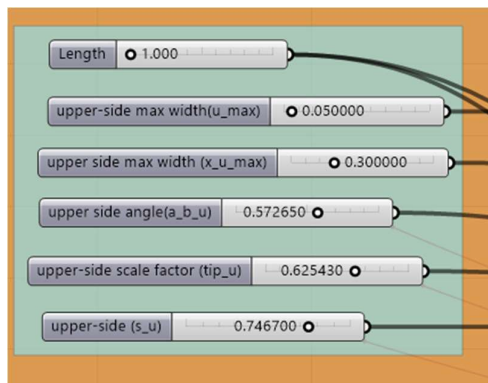
### 3.4.2 Συμμετρικές NACA

Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδίασης της συμμετρικής NACA στο Grasshopper.



Εικόνα 17: Παρουσίαση γεωμετρικού μοντέλου για συμμετρική NACA.

Παρακάτω απεικονίζονται οι έξι παράμετροι που αναπαριστούν την συμμετρική NACA.



Εικόνα 18: Παράμετροι γεωμετρικού μοντέλου για συμμετρική NACA.

Επιπλέον, μέσω κατάλληλων σχέσεων και υπολογισμών οι αδιάστατες τιμές μπορούν να γίνουν διαστατές με τις ίδιες σχέσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί και στην NACA τεσσάρων ψηφίων για τις παραμέτρους ( $tip_w$ ,  $s_w$ ,  $a_{b,u}$ ).

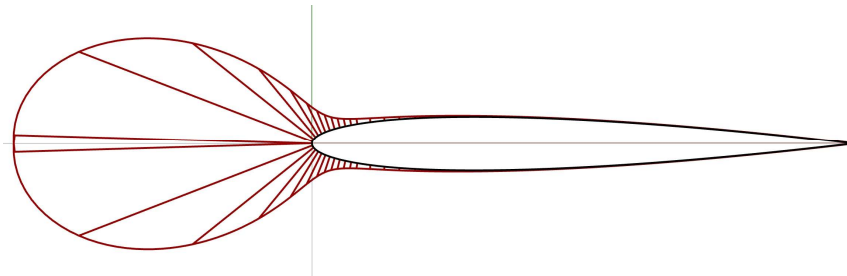
Οι εξισώσεις των σημείων ελέγχου που επηρεάζουν την καμπύλη της προς μελέτη υδροτομής φαίνονται παρακάτω.

```
1. import rhinoscriptsyntax as rs
2. import math

3. point_1=rs.CreatePoint(0,0,0)
4. point_2=rs.CreatePoint(-math.tan(a)*u_max*tip_u*L, tip_u * u_max*L, 0)
5. point_3=rs.CreatePoint((1 - tip_u) * x_u_max)*L ,u_max*L, 0)
6. point_4=rs.CreatePoint(x_u_max*L, u_max*L, 0)
7. point_5=rs.CreatePoint(s_u*L, u_max*L,0)
8. point_6=rs.CreatePoint (L -s_u* math.tan (a_b_u,u_max*L,0)
9. point_7=rs.CreatePoint(L, 0,0)
10. point_8=rs.CreatePoint (L -s_u* math.tan (a_b_u,-u_max*L,0)
11. point_9=rs.CreatePoint(s_u*L,- u_max*L,0)
12. point_10=rs.CreatePoint(x_u_max*L, -u_max*L, 0)
13. point_11=rs.CreatePoint((1 - tip_u) * x_u_max)*L ,-u_max*L, 0)
14. point_12=rs.CreatePoint(-math.tan(a)*u_max*tip_u*L, -tip_u * u_max*L, 0)
15. point_13=rs.CreatePoint(0,0, 0)
```

Από τα παραπάνω σημεία ελέγχου προκύπτουν τέσσερις Bezier καμπύλες τρίτου βαθμού που αποτελούν την άνω και την κάτω επιφάνεια του πτερυγίου. Για να επαληθευθεί η ακρίβεια του μοντέλου χρησιμοποιείται η επέκταση του προγράμματος Galapagos η οποία βρίσκει τις καλύτερες δυνατές τιμές για τις παραμέτρους. Με αυτό τον τρόπο γίνεται προσπάθεια για να επιτευχθεί η όσο πιο ακριβής αναπαράσταση της καμπύλης.

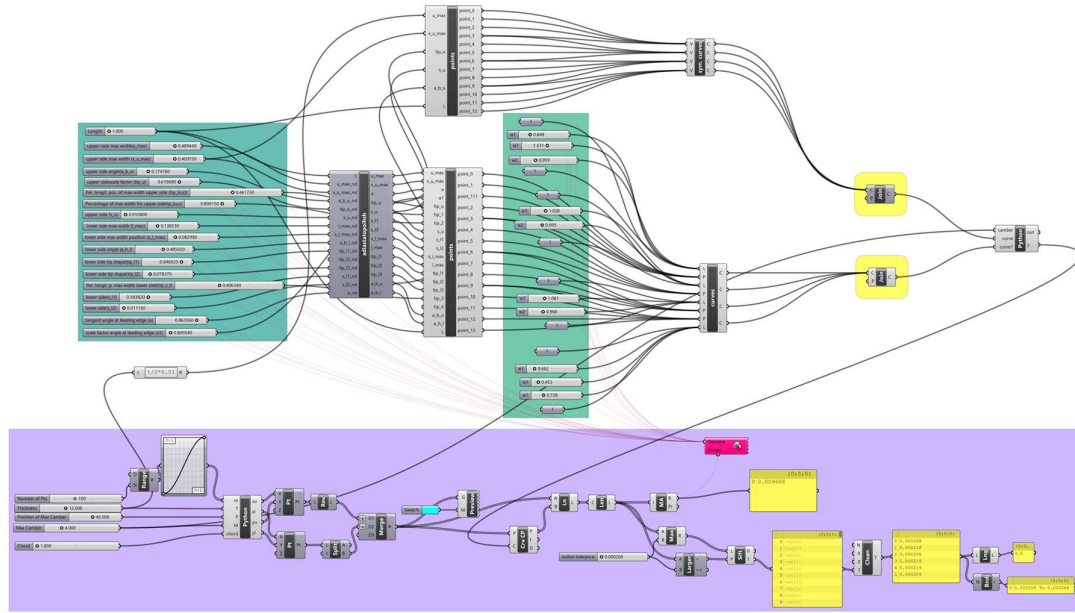
Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα καμπυλότητας για την NACA 0010.



Εικόνα 19: Ανάλυση καμπυλότητας για την NACA0010

Όπως φαίνεται παραπάνω υπάρχει μια ομοιόμορφη κατανομή της καμπυλότητας σε όλο το μήκος του πτερυγίου. Στην περιοχή του χείλους πρόσπτωσης η καμπυλότητα αυξάνεται απότομα λόγω της αυξημένης κυρτότητας του πτερυγίου. Επομένως παρατηρείται ότι έχει σχεδιαστεί μια αρκετά ομαλή καμπύλη και έχουμε συνέχεια δεύτερης τάξης.





Εικόνα 20: Παραμετρικό μοντέλο για NACA τεσσάρων ψηφίων

Οι συμμετρικές και μη συμμετρικές NACA έχουν συγχωνευτεί σε ένα αρχείο όπως φαίνεται στην Εικόνα 20. Ο χρήστης όταν επιλέγει να σχεδιάσει μία υδροτομή τεσσάρων ψηφίων μπορεί να το πραγματοποιήσει ανοίγοντας το παραπάνω αρχείο. Μέσω μιας μεταβλητής Boolean (True ή False) το πρόγραμμα αναγνωρίζει αν θα είναι συμμετρική ή όχι η υδροτομή και επιλέγει τα κατάλληλα σημεία από τους δύο παραπάνω κώδικες για να την αναπαράσταση της. Ουσιαστικά, η μεταβλητή ελέγχει αν υπάρχει καμπυλότητα στην υδροτομή προκειμένου να χρησιμοποιήσει τον κατάλληλο κώδικα για να σχεδιάσει την εκάστοτε υδροτομή.

### 3.5 Αξιολόγηση του παραμετρικού μοντέλου

Στο παρόν υπό-κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες υδροτομές που έχουν αναπαρασταθεί από το παραμετρικό μοντέλο. Οι υπόλοιπες υδροτομές παρουσιάζονται στο παράρτημα (Παράρτημα Β) μαζί με τις τιμές των παραμέτρων τους. Στο σύνολο οι υδροτομές που έχουν αποτυπωθεί είναι 10.

#### 3.5.1 NACA τεσσάρων ψηφίων

Όσο αφορά τις μη συμμετρικές υδροτομές τεσσάρων ψηφίων έχουν παραχθεί τέσσερις διαφορετικές υδροτομές. Παρακάτω απεικονίζονται οι NACA 4412 και 6410 μαζί με τις παραμέτρους τους. Όλες οι τιμές έχουν αδιάστατη μορφή.

Παρακάτω παρουσιάζεται η NACA 4412 που υπάρχει και στην έρευνα των (Kostas, et al., 2020). Στην συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχει ελαφρώς καλύτερη σχεδιαστική ακρίβεια που υπάρχει στο βελτιωμένο μοντέλο της έρευνας και σαφώς καλύτερη από αυτή του πρώτου μοντέλου των (Kostas, et al., 2020).

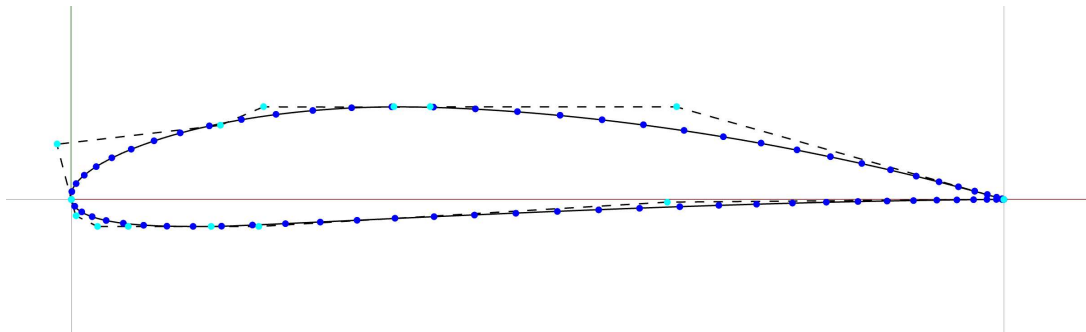
Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων της NACA 4412.

Πίνακας 3: Παραμετρικές τιμές NACA4412

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
Upper-side max width( $u_{max}$ )	0.489440
Upper-side scale factor ( $tip_u$ )	0.619690
Upper-side long. max width ( $x_{u,max}$ )	0.409750
Upper-side ( $s_u$ )	0.010800
Upper-side angle( $a_{b,u}$ )	0.174760 <i>rad</i>
Tangent angle at leading edge ( $a$ )	0.863560 <i>rad</i>
Lower-side max width( $l_{max}$ )	0.136530
Lower-side scale factor( $tip_{l1}$ )	0.846920
Lower-side scale factor( $tip_{l2}$ )	0.078370
Lower-side long. max width( $x_{l,max}$ )	0.082990
Lower-side( $s_{l1}$ )	0.583820
Lower-side( $s_{l2}$ )	0.011160
Lower-side angle ( $a_{b,l}$ )	0.485020 <i>rad</i>
Length( $L$ )	1.00000 <i>m</i>
Scale factor of tangent angle ( $a_1$ )	0.809540
Percentage of long. max width upper side ( $tip_{x,u}$ )	0.461730
Percentage of max width lower side ( $tip_{x,l}$ )	0.406340
Percentage of max width for upper side ( $tip_{u,u}$ )	0.800150

Πίνακας 4: Τιμές Βαρών καμπυλών για την NACA 4412

Βάρη	Τιμές Βαρών
1 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	0.848
$W_3$	1.531
$W_4$	0.959
$W_5$	1.000
2 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	1.028
$W_3$	0.993
$W_4$	1.000
3 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	1.081
$W_3$	0.960
$W_4$	1.000
4 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	0.682
$W_3$	0.453
$W_4$	0.728
$W_5$	1.000



Εικόνα 21: NACA4412

Τα εξωτερικά (γαλάζια) σημεία απεικονίζουν τα σημεία ελέγχου της καμπύλης. Τα σημεία πάνω στην καμπύλη (μπλε) παρουσιάζουν την NACA 4412 αναπαριστώντας μια καμπύλη που δεν φαίνεται καθώς συμπίπτει με την καμπύλη που έχει σχηματιστεί και αποτελεί την απεικόνιση του παραμετρικού μοντέλου. Με διακεκομμένες γραμμές αποτυπώνεται το πολύγωνο ελέγχου.

Όπως παρατηρείται υπάρχει μια πολύ καλή απεικόνιση της υδροτομής. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ των δύο καμπυλών είναι μικρότερη από 0.26 mm και ακόμα μικρότερη σε ορισμένα

σημεία. Η απόσταση αυτή μετριέται ως η κατακόρυφη απόσταση των δύο καμπυλών στα σημεία που έχουν αναφερθεί παραπάνω.

$$opt = \min \sum l_i = 0.26mm \quad (3.46)$$

Τα συγκρινόμενα μοντέλα έχουν 202 σημεία από τα οποία υπολογίζεται η κατακόρυφη απόσταση, ωστόσο για λόγους καλύτερης απεικόνισης της εικόνας τα σημεία στην παρακάτω εικόνα και σε όλα τα απεικονιζόμενα μοντέλα της εργασίας είναι 72. Έτσι ώστε τα σημεία να μπορούν να απεικονιστούν με μεγαλύτερη ευκρίνεια στις εικόνες.

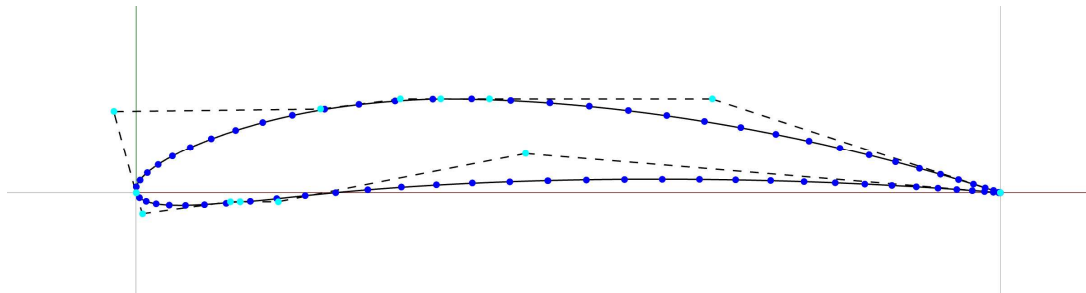
Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων της NACA 6410.

Πίνακας 5: Παραμετρικές τιμές NACA6410

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
Upper-side max width( $u_{max}$ )	0.539440
Upper-side scale factor ( $tip_u$ )	0.959030
Upper-side long. max width ( $x_{u,max}$ )	0.420760
Upper-side ( $s_u$ )	0.041260
Upper-side angle( $a_{b,u}$ )	0.200810rad
Tangent angle at leading edge ( $a$ )	0.880620 rad
Lower-side max width( $l_{max}$ )	0.042200
Lower-side scale factor( $tip_{l1}$ )	0.050340
Lower-side scale factor( $tip_{l2}$ )	0.111900
Lower-side long. max width( $x_{l,max}$ )	0.034000
Lower-side( $s_{l1}$ )	0.361630
Lower-side( $s_{l2}$ )	0.000000
Lower-side angle ( $a_{b,l}$ )	0.630990 rad
Length( $L$ )	1.000000 m
Scale factor of tangent angle ( $a_1$ )	27.723300
Percentage of long. max width upper side ( $tip_{x,u}$ )	0.605820
Percentage of max width lower side ( $tip_{x,l}$ )	0.999910
Percentage of max width for upper side ( $tip_{u,u}$ )	0.894100

Πίνακας 6: Τιμές Βαρών καμπυλών για την NACA 6410

Βάρη	Τιμές Βαρών
1 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	0.500
$W_3$	1.317
$W_4$	1.400
$W_5$	1.000
2 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	1.006
$W_3$	0.981
$W_4$	1.000
3 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	0.950
$W_3$	1.357
$W_4$	1.000
4 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	1.479
$W_3$	1.808
$W_4$	1.518
$W_5$	1.000



Εικόνα 22: NACA6410

Η μέγιστη κατακόρυφη απόσταση όλων των σημείων των δύο καμπυλών είναι 0.3 mm και μικρότερη σε ορισμένα σημεία.

$$opt = \min \sum l_i = 0.3mm \quad (3.47)$$

### 3.5.2 Συμμετρικές NACA

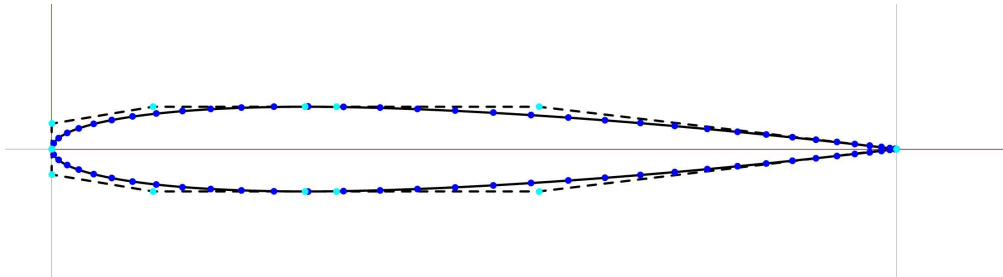
Όσο αφορά τις συμμετρικές υδροτομές έχουν παραχθεί έξι συμμετρικές υδροτομές τύπου NACA. Στον πίνακα αναφέρονται οι παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση της NACA 0010 και έπειτα της NACA 0024. Οι παρακάτω τιμές έχουν αδιάστατη μορφή.

Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων της NACA0010.

Πίνακας 7: Παράμετροι για NACA0010

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
Upper-side max width ( $u_{max}$ )	0.05
Upper-side scale factor ( $tip_u$ )	0.625370
Upper-side max width ( $x_{u,max}$ )	0.30
Upper-side ( $s_u$ )	0.748320
Length( $L$ )	1.0000 m
Upper side angle ( $a_{b,u}$ )	0.572160 rad

Παρακάτω απεικονίζεται η NACA 0010 που έχει αναπαρασταθεί από το παραμετρικό μοντέλο.



Εικόνα 23: NACA0010

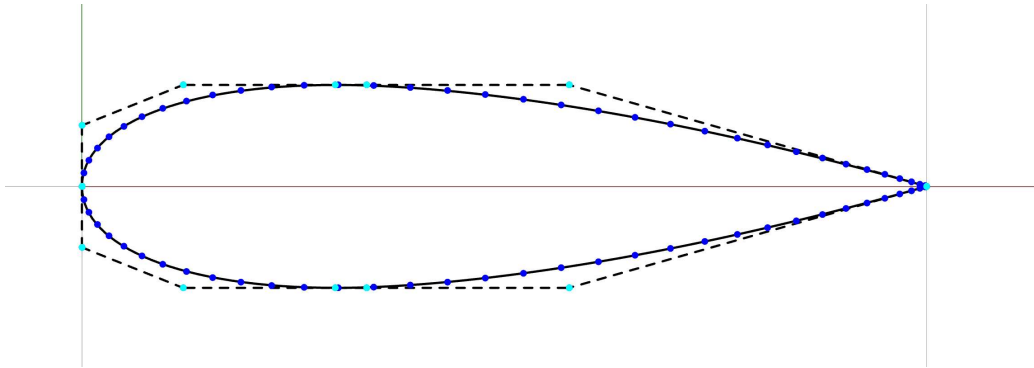
Η μέγιστη κατακόρυφη απόσταση όλων των σημείων των δύο καμπυλών είναι 0.1 mm και μικρότερη σε ορισμένα σημεία.

$$opt = \min \sum l_i = 0.1 \text{ mm} \quad (3.48)$$

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων της NACA0024.

Πίνακας 8: Παράμετροι για NACA0024

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
Upper-side max width ( $u_{max}$ )	0.120000
Upper-side scale factor ( $tip_u$ )	0.626150
Upper-side max width ( $x_{u,max}$ )	0.300000
Upper-side ( $s_u$ )	0.749250
Length( $L$ )	1.0000 m
Upper side angle ( $a_{b,u}$ )	0.571840 rad



Εικόνα. 24:NACA0024

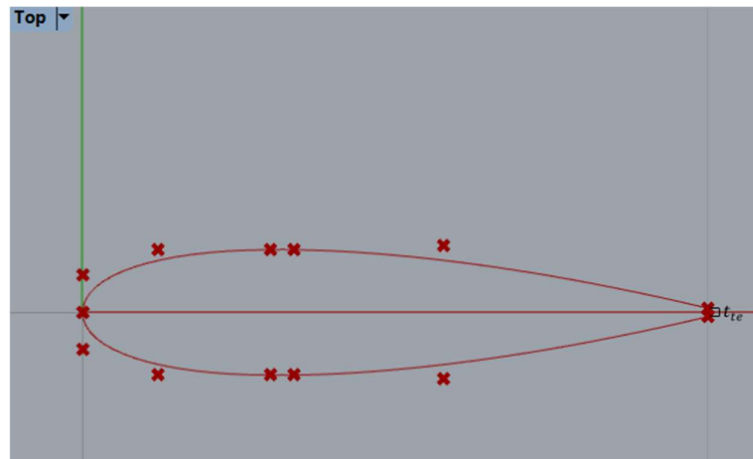
Στην συγκεκριμένη περίπτωση η μέγιστη διαφορά των δύο καμπυλών είναι τα  $0.2 \text{ mm}$  και μικρότερη σε ορισμένα σημεία. Επομένως, παρατηρούμε άλλη μια καλή απεικόνιση της υδροτομής.

$$opt = \min \sum l_i = 0.2 \text{ mm} \quad (3.49)$$

## Κεφάλαιο 4: Παραμετρική σχεδίαση πηδαλίων

Το παραμετρικό μοντέλο για την σχεδίαση πηδαλίων αποτελεί προέκταση του μοντέλου της συμμετρικής NACA καθώς τα περισσότερα πηδάλια κατασκευάζονται μέσω συμμετρικών υδροτομών. Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετηθούν πέντε διαφορετικοί τύποι πηδαλίων όπου μετέπειτα θα συγκριθούν με υπάρχοντα παραδείγματα. Οι τύποι που έχουν μελετηθεί είναι πηδάλια τύπου spade, μερικώς ζυγοσταθμισμένα (semi-balanced), τύπου fishtail, πηδάλια ιστιοπλοϊκών σκαφών και twisted με βολβό.

Όσον αφορά το σχήμα των υδροτομών έχει προστεθεί στο πίσω άκρο μία παράμετρος  $t_{te}$  που ελέγχει το πάχος της υδροτομής στο χείλος εκφυγής για την απεικόνιση του πηδαλίου. Στα σημεία ελέγχου έχει προστεθεί ένα σημείο (που βρίσκεται στον αρνητικό άξονα  $z$ ) στο χείλος εκφυγής προκειμένου να είναι δυνατή η απεικόνιση του πάχους της εκεί. Τα σημεία που έχουν τροποποιηθεί είναι τα σημεία  $P_6, P_6'$ . Στην Εικόνα 25: Παράμετρος  $t_{te}$  στο χείλος εκφυγής απεικονίζεται η παράμετρος  $t_{te}$  της συμμετρικής NACA 0020.



Εικόνα 25: Παράμετρος  $t_{te}$  στο χείλος εκφυγής

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα σημεία ελέγχου που έχουν τροποποιηθεί.

$$P_6 = (L, t_{te}, 0) \quad (4.1)$$

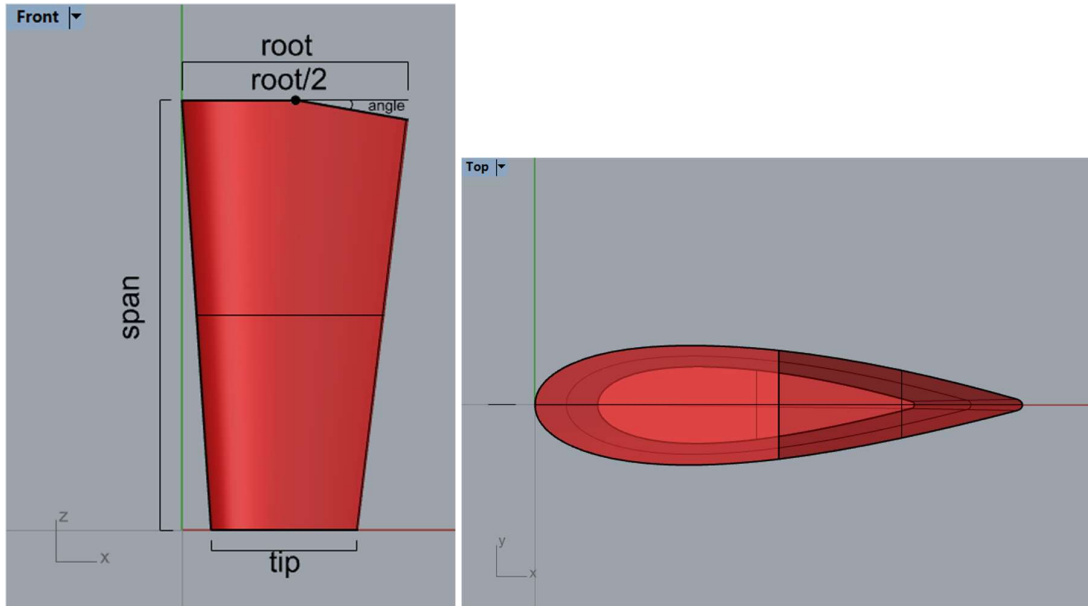
$$P_6' = (L, -t_{te}, 0) \quad (4.2)$$

### 4.1 Spade πηδάλια

Τα πηδάλια τύπου spade έχουν δημιουργηθεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μπορεί να μεταβληθεί η άνω και η κάτω επιφάνεια του πηδαλίου. Ο χρήστης με την παράμετρο *root* μπορεί να επηρεάσει το μήκος της υδροτομής της άνω επιφάνειας του πηδαλίου, ενώ με την παράμετρο *tip* μπορεί να ορίσει το μήκος της κάτω επιφάνειας. Με την παράμετρο *span* ελέγχεται το ύψος του πηδαλίου. Επιπρόσθετα, έχει προστεθεί μια παράμετρος *angle* που επηρεάζει το χείλος εκφυγής της άνω επιφάνειας σε όποια πηδάλια θεωρείται αναγκαίο (που επεξηγείται παρακάτω). Τέλος, υπάρχει μια μεταβλητή Boolean (True ή False), η οποία ορίζει την μορφή του χείλους εκφυγής. Η μεταβλητή αυτή *filletedge* επιτρέπει στο χρήστη να ελέγξει την μορφή του χείλους εκφυγής είτε ως προς στον άξονα  $x - z$  (fillet edge) είτε στον άξονα  $x - y$  (blend curve). Αν η μεταβλητή είναι αληθής τότε για να πραγματοποιηθεί fillet

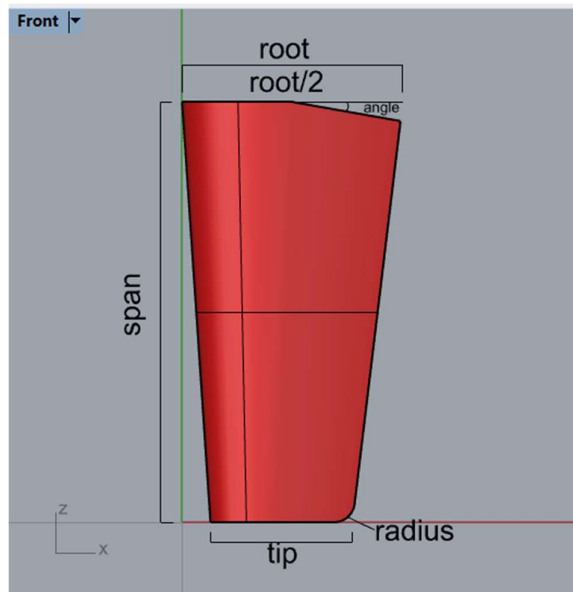


στο χείλος εκφυγής έχει χρησιμοποιηθεί άλλη μια παράμετρος radius που μεταβάλλει την ακτίνα καμπυλότητας του πηδαλίου στο σημείο εκείνο. Αν η μεταβλητή Boolean είναι ψευδής τότε έχουν χρησιμοποιηθεί δύο μεταβλητές  $f_a, f_b$  που ελέγχουν την καμπυλότητα του χείλους εκφυγής. Στην Εικόνα 26 απεικονίζονται οι βασικές παράμετροι ένας πηδαλίου χωρίς fillet στο χείλος εκφυγής.



Εικόνα 26: Παράμετροι spade πηδαλίου με την χρήση blend curve

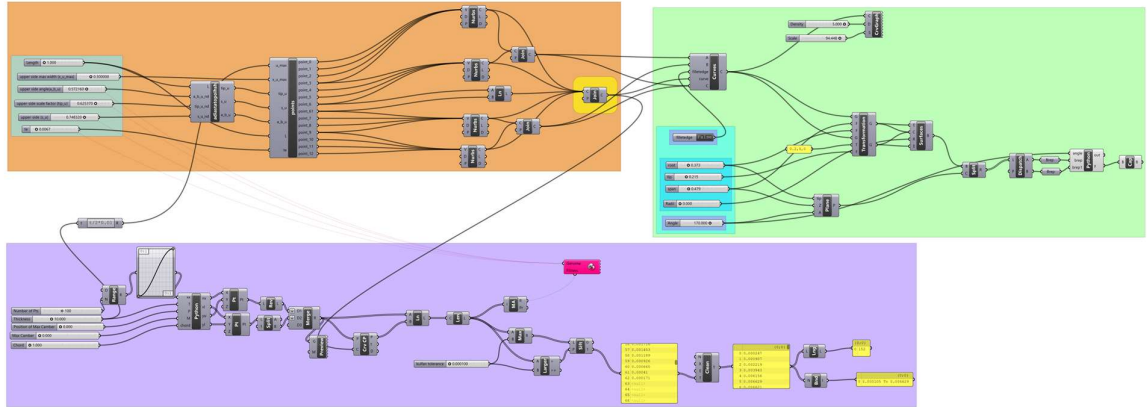
Στην Εικόνα 27 παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι ενός πηδαλίου με filletedge.



Εικόνα 27: Παράμετροι spade πηδαλίου με την χρήση filletedge

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο διαγραμματικός κώδικας απεικόνισης των πηδαλίων spade. Πολλές από τις εντολές έχουν ομαδοποιηθεί σε κατάλληλα clusters

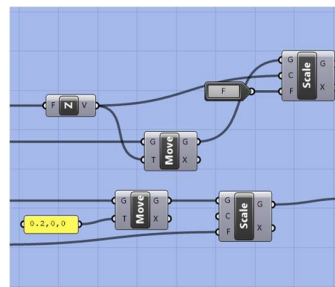
(πακέτα) για την διευκόλυνση του χρήστη. Στην συνέχεια της περιγραφής αναλύονται τα clusters και ο διαγραμματικός κώδικας.



Εικόνα 28: Παραμετρική σχεδίαση saddle πηδαλίου

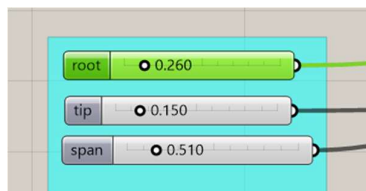
Στον παραπάνω διαγραμματικό κώδικα απεικονίζονται τα στοιχεία που υπολογίζουν και επαληθεύουν την συμμετρική υδροτομή (μοβ πλαίσιο) όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο βλ. 3.4.

Αρχικά, για την επίτευξη αυτού του είδους πηδαλίων στην υδροτομή έχει πραγματοποιηθεί μετατόπιση μέσω της εντολής «move» στον κατακόρυφο άξονα με παράμετρο το επιθυμητό ύψος. Έπειτα αλλάζει η κλίμακα με την εντολή «scale» μεταβάλλεται η κλίμακα των υδροτομών.



Εικόνα 29: Move και scale υδροτομών

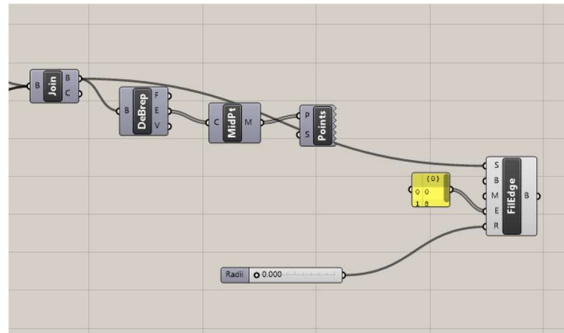
Η αλλαγή κλίμακας γίνεται για την υδροτομή της άνω και της κάτω επιφάνειας μέσω slider. Παρακάτω απεικονίζονται τα sliders, δηλαδή, οι παράμετροι που έχουν περιγραφεί παραπάνω και έχουν χρησιμοποιηθεί για την αλλαγή κλίμακας.



Εικόνα 30: Παράμετροι κύριων διαστάσεων πηδαλίου

Έπειτα με την εντολή «loft» και «boundary surfaces» (βλ.2.4) κατασκευάζεται το πηδάλιο και οι επιφάνειες των χορδών της άνω και κάτω επιφάνειας αντίστοιχα. Με την εντολή «boundary surfaces» κατασκευάζονται επίπεδες επιφάνειες (planar surfaces).

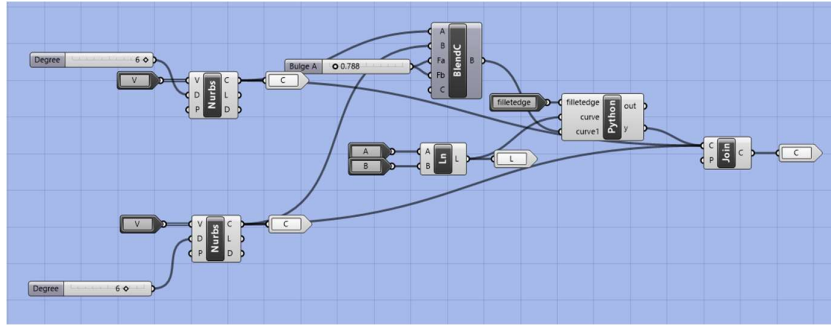
Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις που ο χρήστης χρειάζεται να εφαρμόσει fillet στα άκρα εκφυγής του πηδαλίου είναι δυνατό να το πραγματοποιήσει μέσω της εντολής «fillet edge». Επιπρόσθετα, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να μεταβάλλει την ακτίνα καμπυλότητας μέσω κατάλληλου slider *radius* που ελέγχει την ακτίνα.



Εικόνα 31: Fillet edge επιφάνειας πηδαλίου

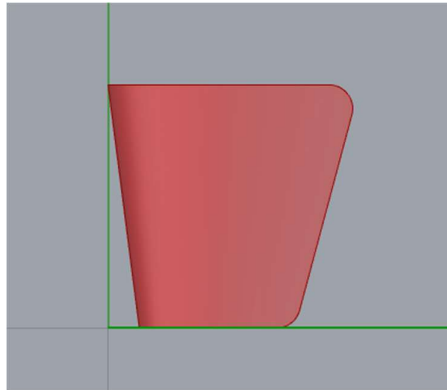
Ωστόσο, ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει την γεωμετρία του χείλους εκφυγής μέσω της εντολής «blend curve» που δημιουργεί μια συμπληρωματική καμπύλη ενώνοντας τα άκρα του χείλους εκφυγής. Η συνέχεια καμπυλότητας επιλέγεται ως συνέχεια καμπυλότητας (ή  $G^2$ ) και ελέγχεται από δύο παραμέτρους  $f_a, f_b$ . Οι παράμετροι  $f_a, f_b$  μπορούν να καθορίσουν το σχήμα και τα χαρακτηριστικά της καμπύλης, όπως η θέση και η ακτίνα καμπυλότητας στα ακραία σημεία της καμπύλης. Οι παράμετροι  $f_a, f_b$  καθορίζουν ουσιαστικά τη "διόγκωση" ή το κυρτό/κοίλο σχήμα της καμπύλης μείξης μεταξύ των τελικών σημείων των καμπυλών εισόδου. Ρυθμίζοντας τις παραμέτρους, ελέγχεται αν η καμπύλη που δημιουργείται μεταβαίνει ομαλά από τη μία καμπύλη εισόδου στην άλλη ή αν παρουσιάζει πιο έντονη καμπυλότητα στη μέση. Θέτοντας θετική τιμή για  $f_a, f_b$  θα προκληθεί διόγκωση της καμπύλης προς τα έξω, δημιουργώντας ένα κυρτό σχήμα. Θέτοντας μια αρνητική τιμή για  $f_a, f_b$  θα προκληθεί διόγκωση της καμπύλης προς τα μέσα, δημιουργώντας κοίλο σχήμα. Οι παράμετροι έχουν τις ίδιες τιμές έπειτα από μια σειρά δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν και μέσω αυτών επιλέχθηκαν οι πιο κατάλληλες τιμές. Ωστόσο, ο χρήστης αν επιθυμεί μπορεί να τις μεταβάλλει μέσα από ένα λογικό εύρος που έχει οριστεί.

Στο σημείο που κατασκευάζεται η υδροτομή με βάση τις δύο καμπύλες που έχουν αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, μέσω της Boolean μεταβλητής ο χρήστης μπορεί να αλλάξει την μορφή του χείλους εκφυγής όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω οπτικό κώδικα.



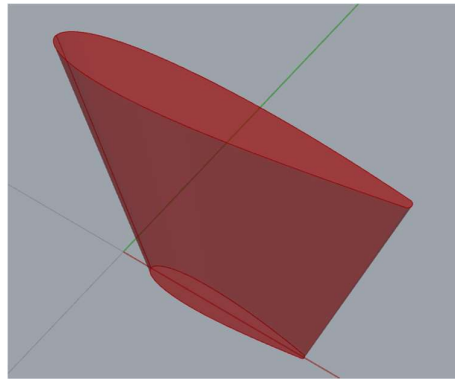
Εικόνα 32: Απεικόνιση καμπυλών υδροτομής

Παρακάτω απεικονίζεται ένα πηδάλιο με fillet edge στα άκρα εκφυγής.



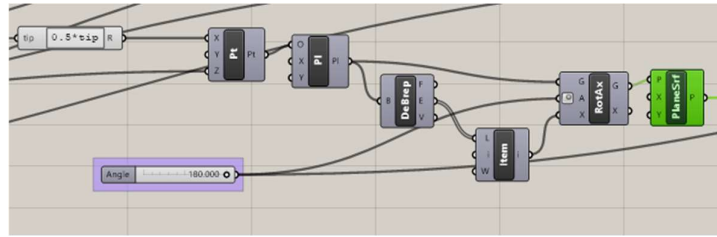
Εικόνα 33: Πηδάλιο με fillet edge

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ένα πηδάλιο με blend curve.



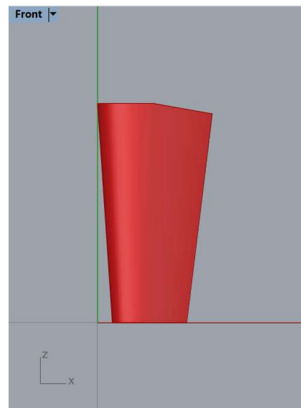
Εικόνα 34: Πηδάλιο με blend curve

Τέλος, μέσω της μεταβλητής *angle* επηρεάζεται η γωνία διαχωρισμού της άνω επιφάνειας του πηδαλίου. Ο διαχωρισμός πραγματοποιείται από το μέσο της επιφάνειας της άνω χορδής που αποτελεί και το σημείο του άξονα του πηδαλίου στην περίπτωση που μελετήθηκε. Το πηδάλιο διαχωρίζεται σε δύο μέρη μέσω κατάλληλου επιπέδου (plane) όπως φαίνεται παρακάτω.



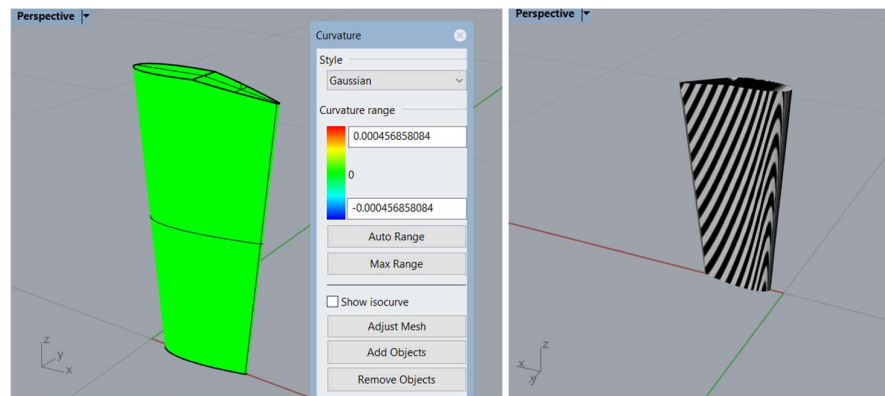
Εικόνα 35: Διαγραμματικός κώδικας για την κατασκευή plane διαχωρισμού πηδάλιου

Παρακάτω απεικονίζεται ένα πηδάλιο που έχει διαχωριστεί μέσω της παραπάνω μεταβλητής και έχει χρησιμοποιηθεί το blend curve για την αναπαράσταση του χείλους εκφυγής.



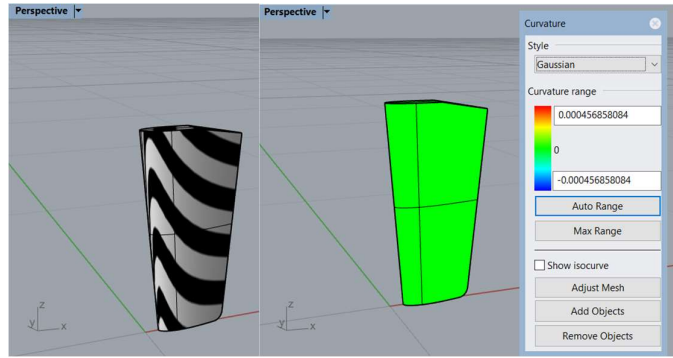
Εικόνα 36: Spade πηδάλιο

Παρακάτω απεικονίζεται η ανάλυση Zebra και Gauss για το συγκεκριμένο παράδειγμα.



Εικόνα 37: Ανάλυση καμπυλότητας και Zebra

Παρατηρείται ότι υπάρχει μια ομαλή επιφάνεια με μηδενική καμπυλότητα, ακόμα και στο χείλος εκφυγής όπου υπάρχει απότομη αλλαγή της καμπυλότητας.

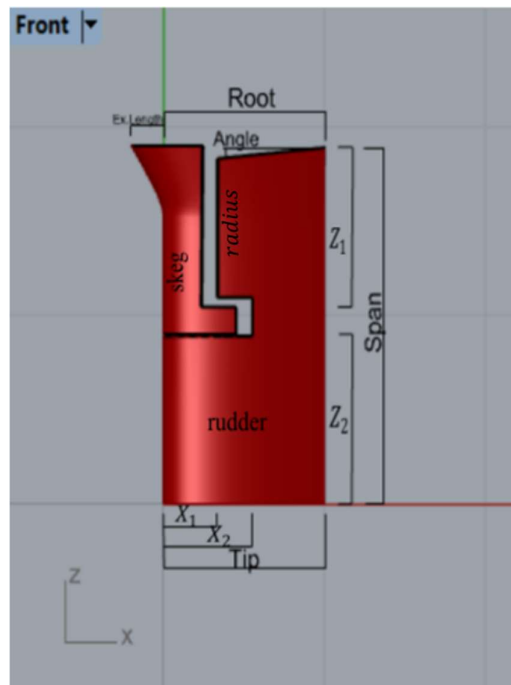


Εικόνα 38: Ανάλυση Zebra και καμπυλότητας Gauss για το πηδάλιο με fillet

## 4.2 Μερικώς ζυγοσταθμισμένα πηδάλια (semi-balanced)

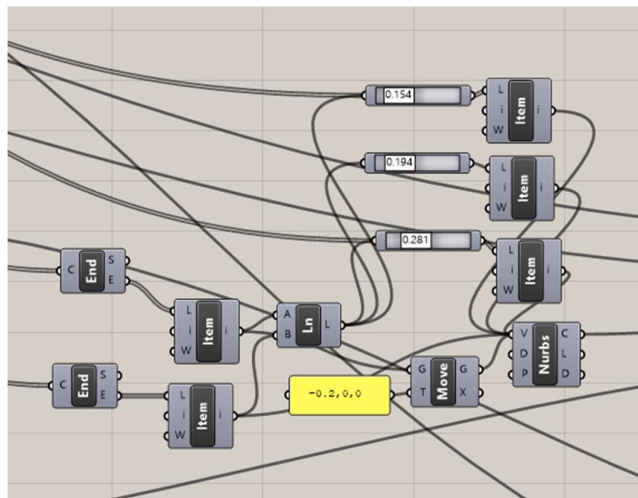
Υπάρχουν αρκετά στάδια για την σχεδίαση ενός μερικώς ζυγοσταθμισμένου πηδαλίου που επηρεάζουν την λειτουργικότητά του. Για αυτό το λόγο, οι παράμετροι έχουν χωριστεί σε ομάδες για την καλύτερη διευκόλυνση του χρήστη.

Αρχικά, οι παράμετροι που μεταβάλλουν το ύψος, την άνω και την κάτω επιφάνεια του πηδαλίου ακολουθούν το ίδιο σκεπτικό με την προηγούμενη υποενότητα. Ο χρήστης με τις παραμέτρους ( $X_1, X_2, Z_1, Z_2$ ) μπορεί να ορίσει το μέγεθος του skeg όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Οι μεταβλητές ( $X_1, X_2$ ) επηρεάζουν την προς μελέτη επιφάνεια κατά των  $x$  άξονα ενώ οι παράμετροι ( $Z_1, Z_2$ ) επηρεάζουν κατά τον  $z$  άξονα. Επιπρόσθετα, μέσω της μεταβλητής  $radius$  ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει την καμπυλότητα του χείλους πρόσπτωσης του πηδαλίου.



Εικόνα 39: Παράμετροι semi-skeg πηδαλίου

Αφού έχει πραγματοποιηθεί η απαραίτητη αλλαγή κλίμακας μέσω των παραμέτρων ο χρήστης έχει την δυνατότητα να κατασκευάσει μια πρώτη επιφάνεια ίδιας λογικής με αυτή του spade πηδαλίου. Έπειτα η επιφάνεια διαχωρίζεται στις ακμές της από όπου χρησιμοποιείτε το σημείο της πάνω επιφάνειας και το σημείο της κάτω επιφάνειας του χείλους πρόσπτωσης του πηδαλίου για να σχεδιαστεί μια κατακόρυφη γραμμή. Το σημείο που βρίσκεται στην άνω επιφάνεια έχει την δυνατότητα να μεταβάλλεται κατά τον άξονα  $x$ , προκειμένου να δημιουργηθεί μια κατακόρυφη καμπύλη. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιείται η εντολή «point on curve», η οποία κατασκευάζει σημεία σε συγκεκριμένη θέση της καμπύλης και παρέχει την δυνατότητα τα σημεία που έχουν δημιουργηθεί να μετακινούνται κατά μήκος της καμπύλης ως σημεία ελέγχου. Μέσω αυτής της εντολής έχουν κατασκευαστεί τρία σημεία ελέγχου. Έτσι, δημιουργείται μια καμπύλη της οποίας η μορφή μεταβάλλεται μέσω των σημείων. Στην Εικόνα 40: Σημεία ελέγχου καμπύλης skeg και πιο συγκεκριμένα στο κίτρινο «panel» που απεικονίζεται υπάρχει το σημείο της άνω επιφάνειας της καμπύλης που έχει την δυνατότητα να μετακινείται στον άξονα  $x$  μεταβάλλοντας κάθε φορά την πρώτη συντεταγμένη του.



Εικόνα 40: Σημεία ελέγχου καμπύλης skeg

Η σχεδίαση της καμπύλης παρέχει την δυνατότητα της μεταβολής της κυρτότητας του skeg στο χείλος πρόσπτωσης του πηδαλίου.

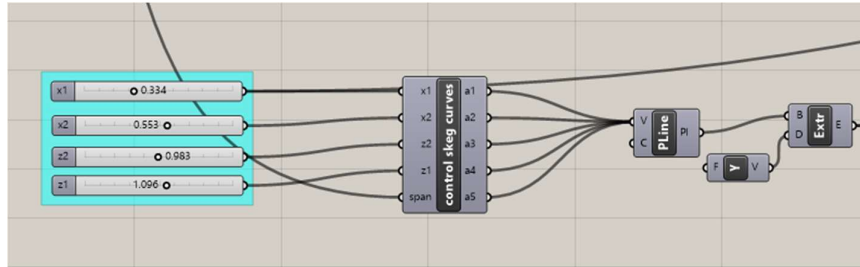
Στην συνέχεια δημιουργείται μια δεύτερη επιφάνεια με την εντολή «sweep2» (βλ.2.4). Προκειμένου να σχηματιστεί η επιφάνεια χρησιμοποιούμε σαν οδηγούς την καμπύλη που κατασκευάστηκε παραπάνω αλλά και την κατακόρυφη ευθεία γραμμή που ενώνει τα άκρα της πάνω και της κάτω επιφάνειας του χείλους εκφυγής. Σαν καμπύλη χρησιμοποιείται η υδροτομή της κάτω επιφάνειας αφού έχει υποστεί την κατάλληλη αλλαγή κλίμακας μέσω των sliders (tip).

Η επιφάνεια που έχει δημιουργηθεί θα διαχωριστεί με την εντολή «split» έτσι ώστε να ξεχωρίσει το skeg από το υπόλοιπο πηδάλιο. Το επίπεδο που θα χρησιμοποιηθεί για να διαχωρίσει την επιφάνεια κατασκευάζεται στην συνέχεια μέσω σημείων που έχουν σχεδιαστεί με την βοήθεια της python.

Στην συνέχεια ο χρήστης μέσω από την εντολή «fillet edge» έχει την δυνατότητα να μεταβάλει την γεωμετρία και πιο συγκεκριμένα την καμπυλότητα του χείλους πρόσπτωσης

του πηδαλιού. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της μεταβλητής *radius* που επηρεάζει την καμπυλότητα στο σημείο αυτό.

Παρακάτω απεικονίζονται οι παράμετροι  $x_1, x_2, z_1, z_2$  που αναφέρθηκαν παραπάνω και ορίζουν το μέγεθος του skeg μαζί με τον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε:

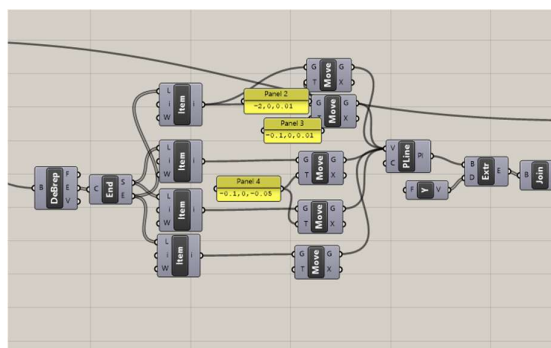


Εικόνα 41: Σημεία ελέγχου επιφάνειας διαχωρισμού skeg με το υπόλοιπο πηδαλίο

1. `Import rhinoscriptsyntax as rs`
2. `if x2>x1 and z1>z2 and span>z1+0.3:`
3. `a1 = rs.CreatePoint(x1,0.5,2)`
4. `a2 = rs.CreatePoint(x1,0.5,z1)`
5. `a3 = rs.CreatePoint(x2,0.5,z1)`
6. `a4 = rs.CreatePoint(x2,0.5,z2)`
7. `a5 = rs.CreatePoint(-1,0.5,z2)`
8. `else:`
9. `a1=false`
10. `a2=false`
11. `a3=false`
12. `a4=false`
13. `a5=false`

Ενώνοντας όλα τα σημεία κατασκευάζεται μια γραμμή μέσω της εντολής «polyline» η οποία γίνεται extrude στον άξονα *y* προκειμένου να δημιουργηθεί το επίπεδο διαχωρισμού.

Ο χρήστης μέσω κατάλληλων πινάκων (panel) της Εικόνα 42: Σημεία ελέγχου διάκενου μεταξύ των επιφανειών skeg και πηδαλιού έχει την δυνατότητα να μεταβάλει τις συντεταγμένες της παραπάνω επιφάνειας και να ορίσει το κενό ανάμεσα στην επιφάνεια του skeg και στην επιφάνεια του πηδαλιού.

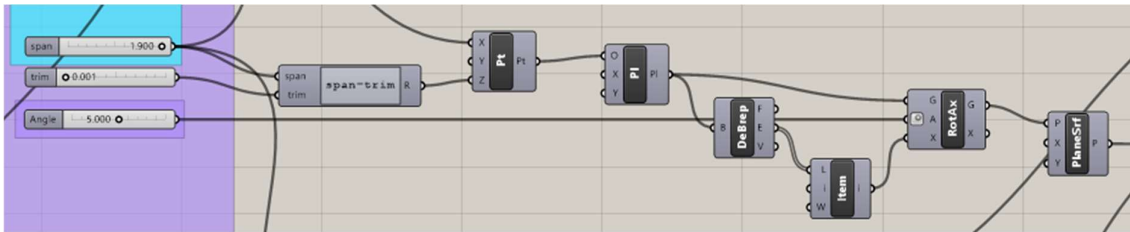


Εικόνα 42: Σημεία ελέγχου διάκενου μεταξύ των επιφανειών skeg και πηδαλιού

Στην παρακάτω εικόνα έχει δημιουργηθεί το επίπεδο που διαχωρίζει την άνω επιφάνεια του πηδαλιού ανάλογα με την κλίση που υπάρχει στην επιφάνεια αυτή. Η κλίση ελέγχεται από κατάλληλο slider μέσω της εντολής «rotate axis» που περιστρέφει το επίπεδο διαχωρισμού

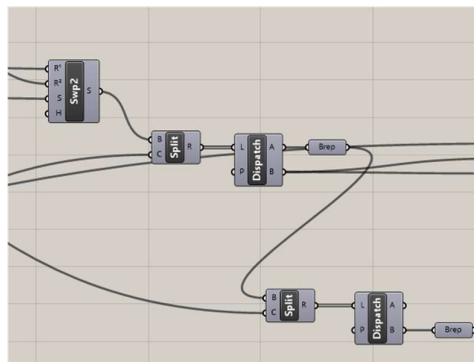


στον άξονα z. Το σημείο περιστροφής του άξονα είναι στο χείλος πρόσπτωσης της άνω επιφάνειας του πηδαλίου. Η επιφάνεια αυτή βρίσκεται δέκα εκατοστά πιο χαμηλά από το skeg στην συγκεκριμένη περίπτωση, ωστόσο η απόσταση αυτή μπορεί να μεταβληθεί μέσω της μεταβλητής *trim* για λειτουργικούς λόγους κατά την σχεδίαση του πηδαλίου.



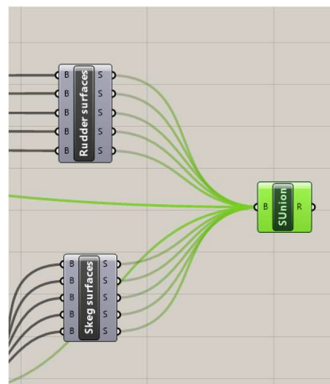
Εικόνα 43: Επιφάνεια που διαχωρίζει το πηδάλιο σε κατάλληλη γωνία

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η επιφάνεια που έχει διαχωριστεί από το παραπάνω επίπεδο σε δύο επιφάνειες αυτή του skeg και αυτή του πηδαλίου. Με την σειρά της η επιφάνεια του πηδαλίου έχει διαχωριστεί και αυτή ανάλογα με την κλίση της άνω επιφάνειας που αναφέρεται παραπάνω (κάτω split).



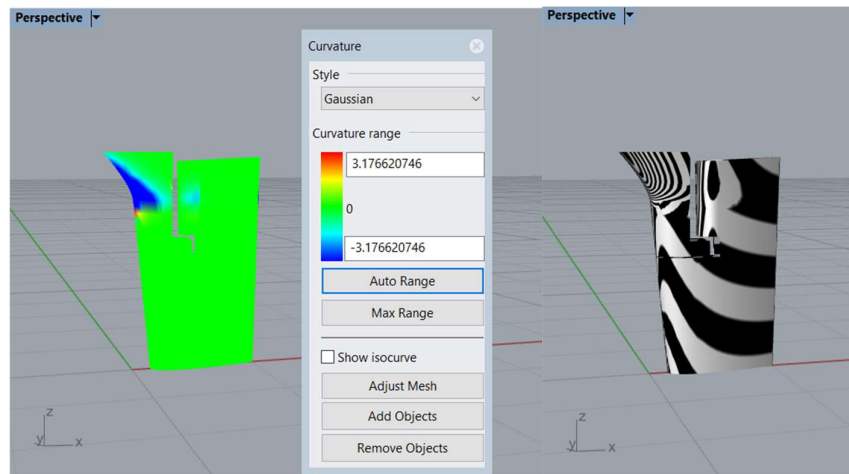
Εικόνα 44: Διαχωρισμός επιφανειών

Έπειτα κλείνουν όλες οι ελεύθερες επιφάνειες προκειμένου να δημιουργεί η τελική επιφάνεια μέσω της εντολής «SUnion».

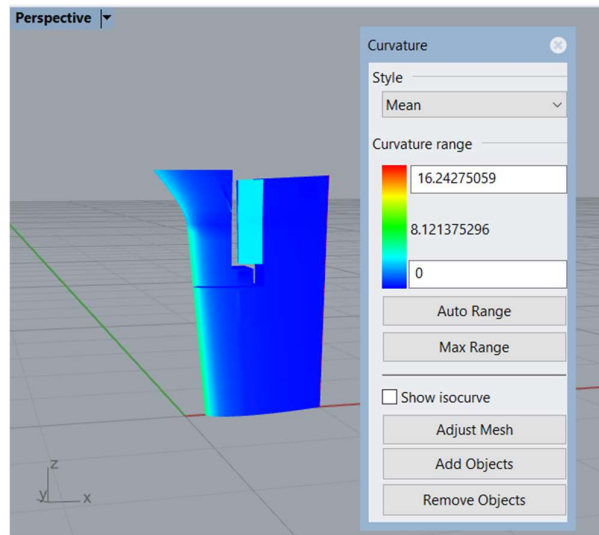


Εικόνα 45: Ένωση επιφανειών και δημιουργία τελικής επιφάνειας

Παρακάτω αναπαρίσταται η ανάλυση Gauss και Zebra ενός μερικώς ζυγοσταθμισμένου πηδαλίου.



Εικόνα 46: Ανάλυση Gauss καμπυλότητας και Zebra

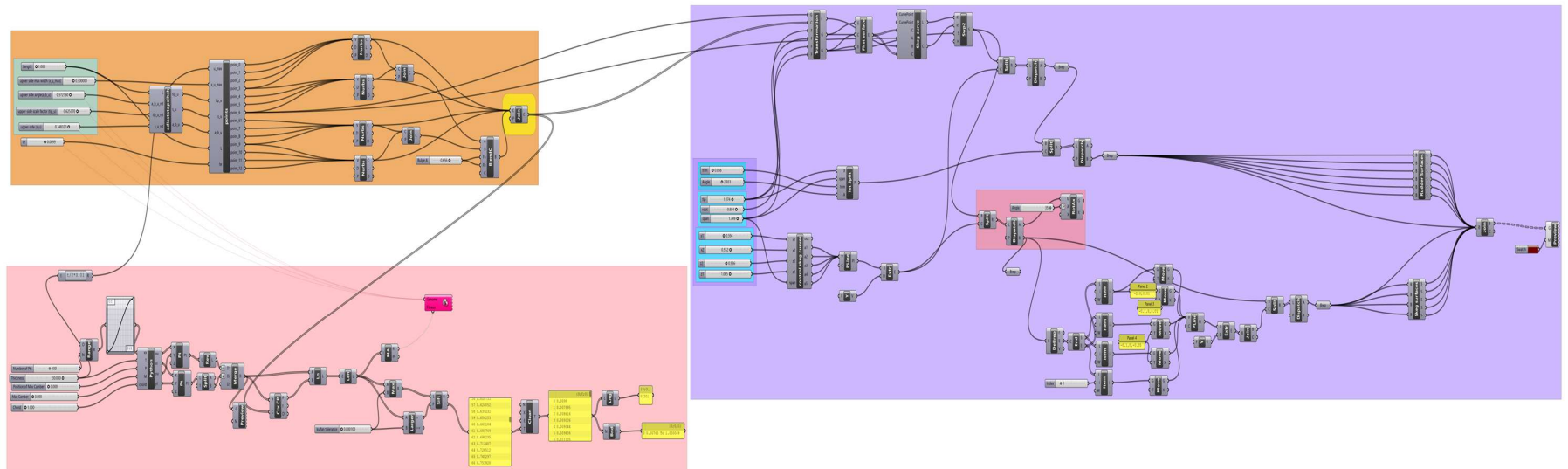


Εικόνα 47: Ανάλυση Μέσης καμπυλότητας

Όσο αφορά την ανάλυση Zebra και καμπυλότητας Gauss στο σημείο που αλλάζει η μορφή του skeg στο χείλος πρόσπτωσης καμπλώνει καθώς υπάρχει απότομη κλίση. Η μείωση της τιμής της καμπυλότητας Gauss συμβαίνει καθώς στο σημείο εκείνο έχουμε ένα σαγματικό σημείο. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η μία καμπύλη έχει θετικό πρόσημο ενώ η άλλη καμπύλη που εφάπτεται έχει αρνητικό. Το γινόμενο των δύο που αποτελεί και την καμπυλότητα Gauss ισούται με αρνητικό πρόσημο.

Παρατηρείται ότι υπάρχει μια ομαλή επιφάνεια που αναπαριστά το πηδάλιο ωστόσο στην περιοχή του χείλους εκφυγής η τιμή της καμπυλότητας αυξάνεται απότομα λόγω της απότομης μεταβολής της κλίσης της επιφάνειας στα σημεία εκείνα. Υπάρχει μια κοίλη επιφάνεια στο χείλος εκφυγής, για αυτό το λόγο εμφανίζεται με θερμό χρώμα. Ωστόσο, το πηδάλιο αν και παρουσιάζεται με ψυχρό χρώμα δεν αποτελεί μια επιφάνεια που είναι κυρτή καθώς η τιμή της καμπυλότητας είναι μηδέν.

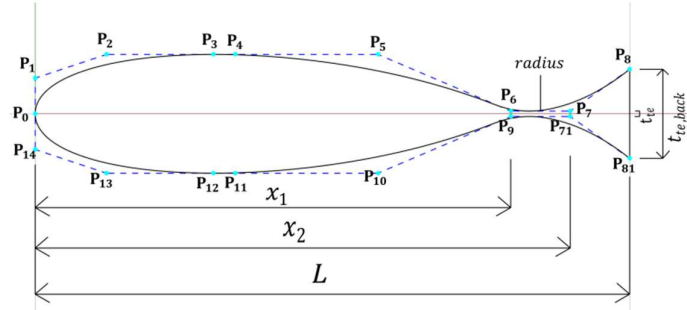
Στο τέλος της ενότητας απεικονίζεται ο διαγραμματικός κώδικας που έχει χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση του μερικώς ζυγοσταθμισμένου πηδαλίου.



Εικόνα 48: Διαγραμματικός κώδικας σχεδίασης μερικώς ζυγισταθμισμένου περυγίου

### 4.3 Fishtail (schilling) πηδάλια

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα πηδάλιο τύπου fishtail. Η παρακάτω εικόνα αποτελεί τομή του πηδαλιού και απεικονίζει την υδροτομή του. Η σχεδίαση της υδροτομής τύπου fishtail έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 49: Παράμετροι πηδαλιού τύπου fishtail

Αφού έχει γίνει η σχεδίαση της υδροτομής, απεικονίζεται ο κώδικας που έχει κατασκευαστεί για να σχεδιάζει τα σημεία ελέγχου της υδροτομής.

```

1. import rhinoscriptsyntax as rs
2. import math

3. point_0 = rs.CreatePoint(0,0,0)
4. point_1 = rs.CreatePoint(-math.tan(a)*u_max*tip_u*L, tip_u * u_max*L, 0)
5. point_2 = rs.CreatePoint((1- tip_u) * x_u_max*L, u_max*L, 0)
6. point_3 = rs.CreatePoint(x_u_max*L, u_max*L, 0)
7. point_4 = rs.CreatePoint(s_u*L, u_max*L, 0)
8. point_5 = rs.CreatePoint(L-s_u*math.tan(a_b_u), u_max*L, 0)
9. point_6 = rs.CreatePoint(L*x2, te/2, 0)
10. point_9 = rs.CreatePoint(L*x2, -te/2, 0)
11. point_7 = rs.CreatePoint(L*x1, te/2, 0)
12. point_71 = rs.CreatePoint(L*x1, -te/2, 0)
13. point_8 = rs.CreatePoint(L, t_back/2, 0)
14. point_81 = rs.CreatePoint(L, -t_back/2, 0)
15. point_10 = rs.CreatePoint(L-s_u*math.tan(a_b_u), -u_max*L, 0)
16. point_11 = rs.CreatePoint(s_u*L, -u_max*L, 0)
17. point_12 = rs.CreatePoint(x_u_max, -u_max*L, 0)
18. point_13 = rs.CreatePoint(x_u_max*(1-tip_u)*L, -u_max*L, 0)
19. point_14 = rs.CreatePoint(math.tan(a)*u_max*tip_u, -tip_u * u_max*L, 0)
20. point_15 = rs.CreatePoint(0,0,0)

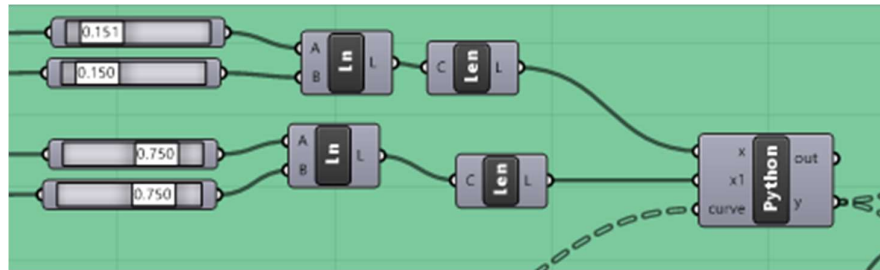
```

Έτσι με την βοήθεια των παραπάνω σημείων δημιουργούνται οι τελικές καμπύλες αναπαράστασης της γεωμετρίας. Έπειτα ακολουθεί η ίδια διαδικασία με αυτή του πηδαλιού τύπου spade για τη δημιουργία των επιφανειών. Ωστόσο, στο συγκεκριμένο τύπο πηδαλιού οι τιμές για την άνω και την κάτω επιφάνεια είναι ίδιες επομένως υπάρχει μόνο μία παράμετρος *length* που επηρεάζει το μήκος των επιφανειών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για να μην υπάρχουν τιμές που αλληλεπικαλύπτουν τις καμπύλες ή δίνουν ένα λανθασμένο αποτέλεσμα όσο αφορά τη μορφή της υδροτομής, έχουν δημιουργηθεί δύο κάθετες γραμμές που ελέγχουν την ελάχιστη απόσταση της υδροτομής έτσι ώστε να μην είναι ποτέ μικρότερη των 0,005 m που αναφέρεται ως η ελάχιστη επιτρεπόμενη

απόσταση στο παράδειγμα των (Nguyen & Van, 2014). Επιπλέον, έχουν προστεθεί και τα κατάλληλα όρια στις καινούργιες παραμέτρους σύμφωνα με (Nguyen & Van, 2014).

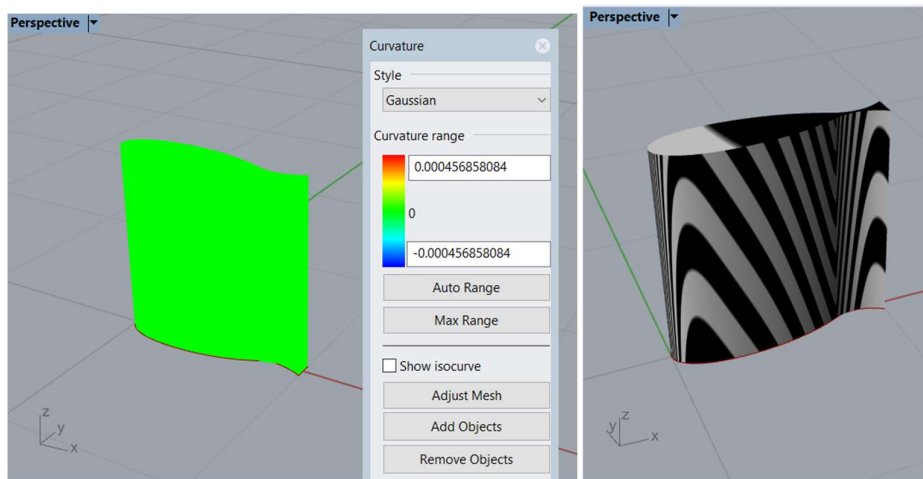
Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα σημεία που μετρούν τις δύο κάθετες αποστάσεις.



Εικόνα 50: Έλεγχος μέγιστης απόστασης στην 'ουρά' του πηδάλιου

Μέσω των εντολών «extrude» και «boundary surfaces» κατασκευάζεται το πηδάλιο και οι επιφάνειες των χορδών τις άνω και κάτω επιφάνειας αντίστοιχα.

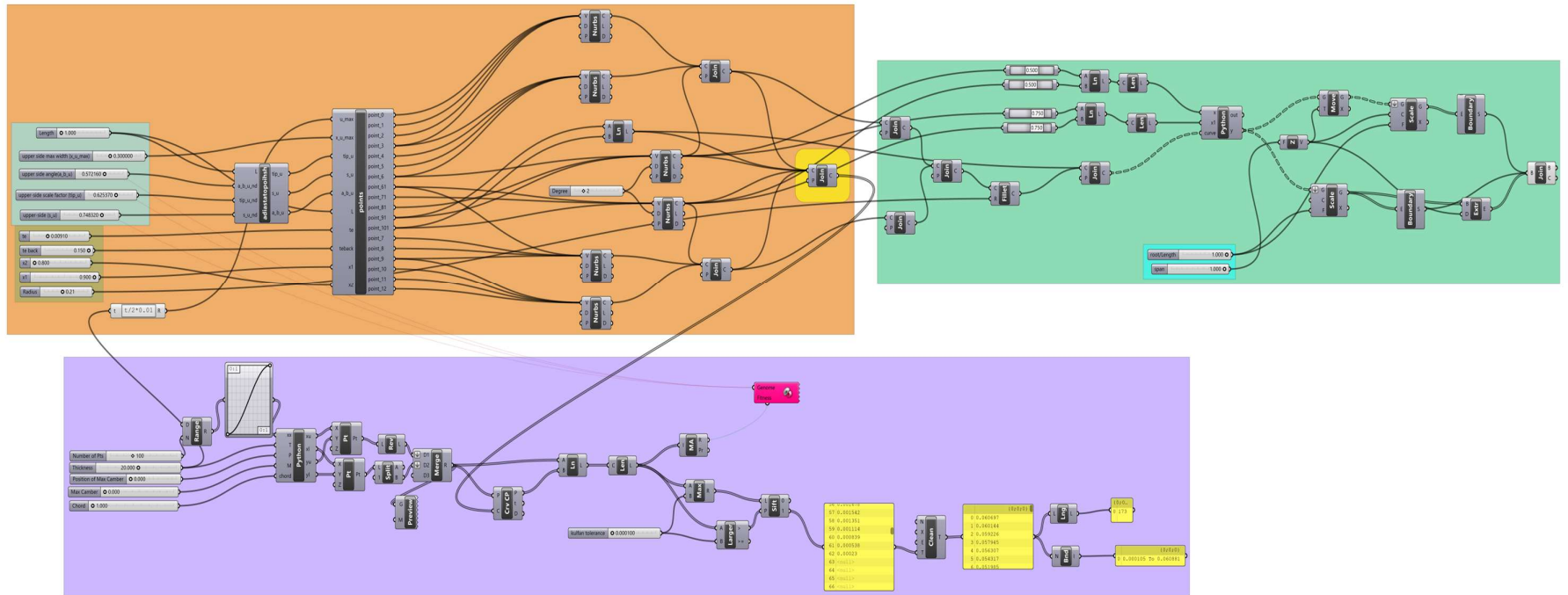
Παρακάτω απεικονίζεται η καμπυλότητα Gauss και Zebra του πηδαλιού.



Εικόνα 51: Ανάλυση καμπυλότητας Gauss και Zebra

Παρουσιάζεται μια ομαλή επιφάνεια που αναπαριστά τον πηδάλιο. Στην περιοχή του χείλους εκφυγής υπάρχει μικρή αλλαγή της καμπυλότητας λόγω αλλαγής της κλίσης της επιφάνειας και λόγω της κυρτότητας της.

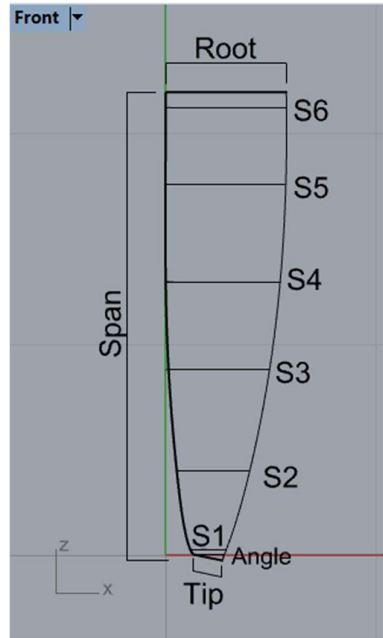
Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται ο διαγραμματικός κώδικας αναπαράστασης ενός πηδαλιού τύπου fishtail.



Εικόνα 52: Διαγραμματικός κώδικας αναπαράστασης πηδαλιού τύπου fish tail

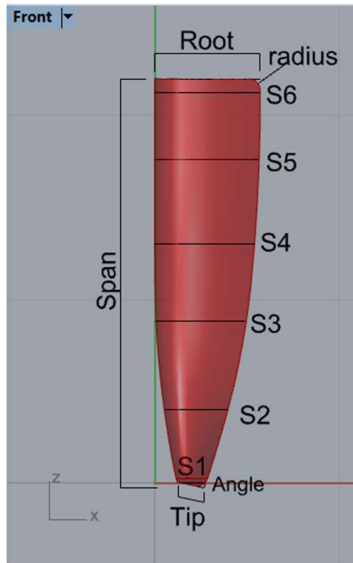
## 4.4 Πηδάλια ιστιοπλοϊκών σκάφων

Τα πηδάλια για ιστιοπλοϊκά σκάφη και κυρίως αγωνιστικά αποτελούν έναν ιδιαίτερο τύπο καθώς δεν μοιάζει με τους παραπάνω. Τα πηδάλια αυτά έχουν μια μοναδική γεωμετρία ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε σκάφους.

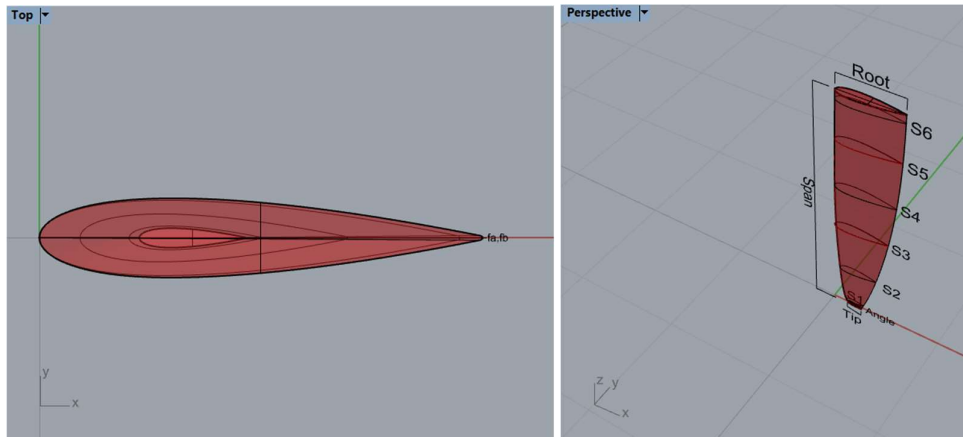


Εικόνα 53: Παράμετροι πηδαλίου ιστιοπλοϊκού σκάφους

Πιο αναλυτικά, για την αναπαράσταση του πηδαλίου έχουν χρησιμοποιηθεί οκτώ υδροτομές *root*, *tip*  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$ , όπου η κάθε μία έχει υποστεί διαφορετική αλλαγή κλίμακας και βρίσκεται σε διαφορετική θέση στον κατακόρυφο άξονα. Δύο από τις οκτώ υδροτομές βρίσκονται πολύ κοντά στην πάνω και στην κάτω επιφάνεια αντίστοιχα, μη έχοντας τις ίδιες ισαπόστασεις στον κατακόρυφο άξονα με τις υπόλοιπες υδροτομές. Αυτό συμβαίνει για να μπορούν με μεγαλύτερη ακρίβεια να αποτυπώσουν την επιφάνεια στα σημεία αυτά. Επιπλέον, η γωνία της κάτω επιφάνειας της υδροτομής μπορεί να μεταβληθεί κατά μία γωνία μέσω της παραμέτρου (*angle*). Τέλος, έχει εφαρμοστεί η ίδια λογική όπως και στο πηδάλιο τύπου *spade* για το χείλος εκφυγής. Ο χρήστης μέσω μίας μεταβλητής Boolean έχει την δυνατότητα να μεταβάλει το χείλος εκφυγής είτε ως προς τον άξονα  $x - z$  (*fillet*) είτε ως προς τον άξονα  $x - y$  (*blend curve*). Παρομοίως, για να γίνει η καμπύλη *fillet* έχει χρησιμοποιηθεί μια παράμετρος *radius* που ελέγχει την ακτίνα καμπυλότητας και για να πραγματοποιηθεί *blend curve* έχουν χρησιμοποιηθεί δύο παράμετροι  $f_a, f_b$  (που έχουν αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα). Παρακάτω απεικονίζεται η μορφή του πηδαλίου με την εφαρμογή *fillet* και *blend curve* αντίστοιχα.



Εικόνα 54: Πηδάλιο ιστιοπλοϊκού σκάφους με την χρήση fillet στο χείλος εκφυγής

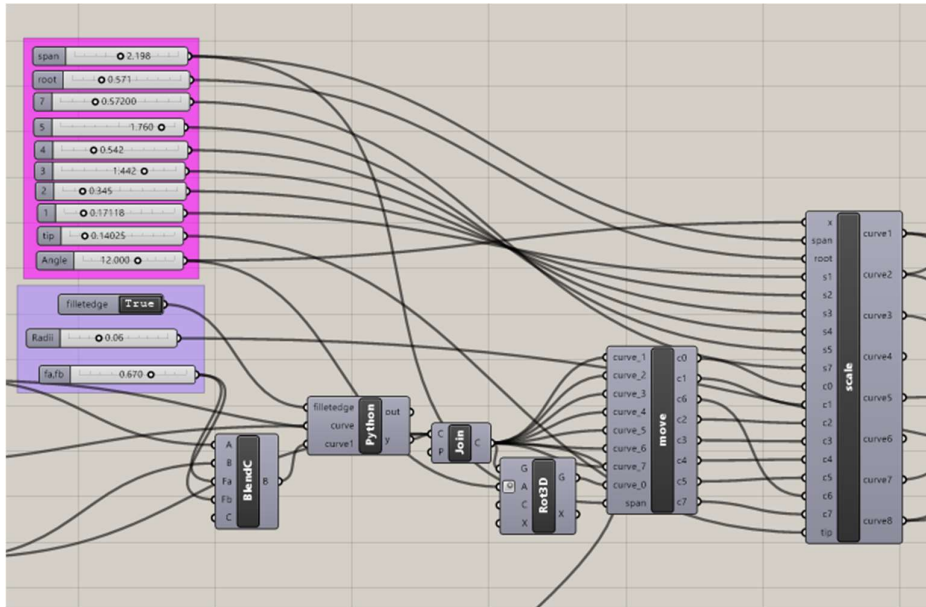


Εικόνα 55: Πηδάλιο ιστιοπλοϊκού σκάφους με την χρήση blend curve στο χείλος εκφυγής

Παρακάτω απεικονίζονται όλοι οι παράμετροι με την μορφή sliders. Η υδροτομή που αποτυπώνει την κάτω επιφάνεια *tip* όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα αφού πραγματοποιηθεί η απαραίτητη αλλαγή κλίμακας ελέγχεται από την εντολή «rotate 3D». Η εντολή αυτή επιτρέπει στην κάτω επιφάνεια του πτερυγίου να περιστρέφεται κατά τον κατακόρυφο άξονα έτσι ώστε να δίνει μία μικρή κλίση σε όποια πηδάλια χρειάζεται.

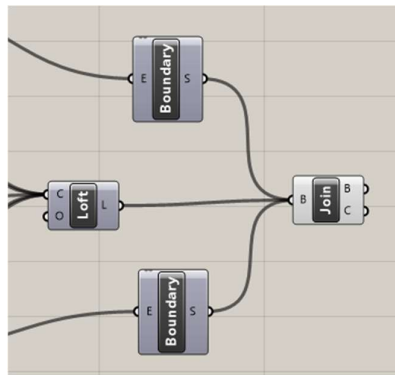
Η κλίμακα της κάθε υδροτομής ελέγχεται από κατάλληλους sliders όπως και η γωνία περιστροφής.





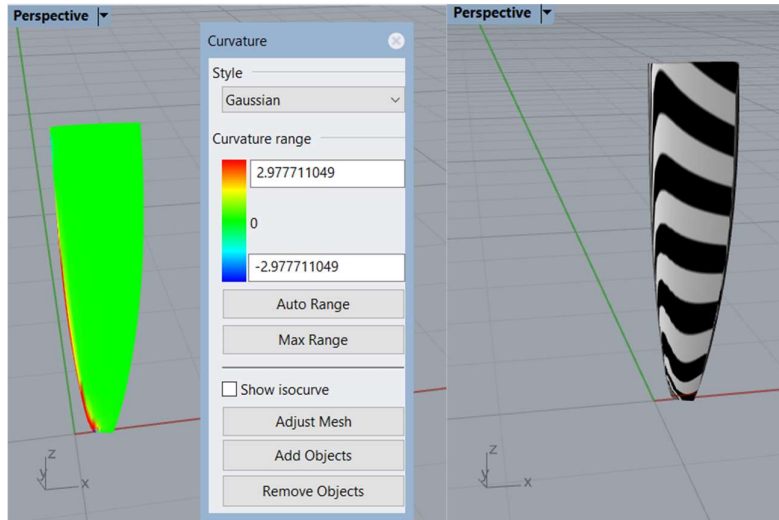
Εικόνα 56: Παράμετροι που επηρεάζουν την μορφή του πηδαλίου

Έπειτα με την εντολή «loft» και «boundary surfaces» (βλέπε 2.4) κατασκευάζονται οι επιφάνειες του τελικού πηδαλίου.

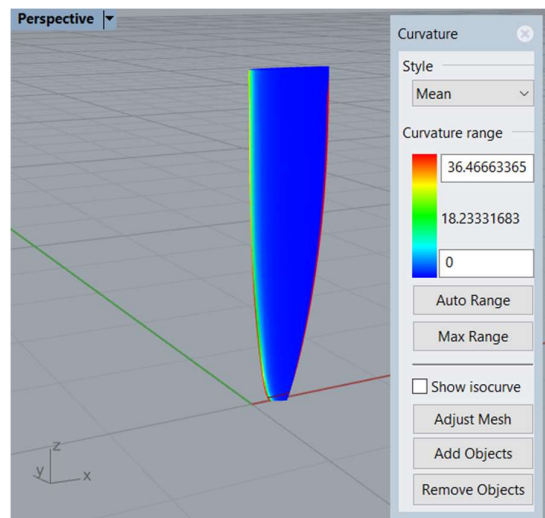


Εικόνα 57: Δημιουργία τελικής επιφάνειας

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα καμπυλότητας για αυτό τον τύπο πηδαλίου.



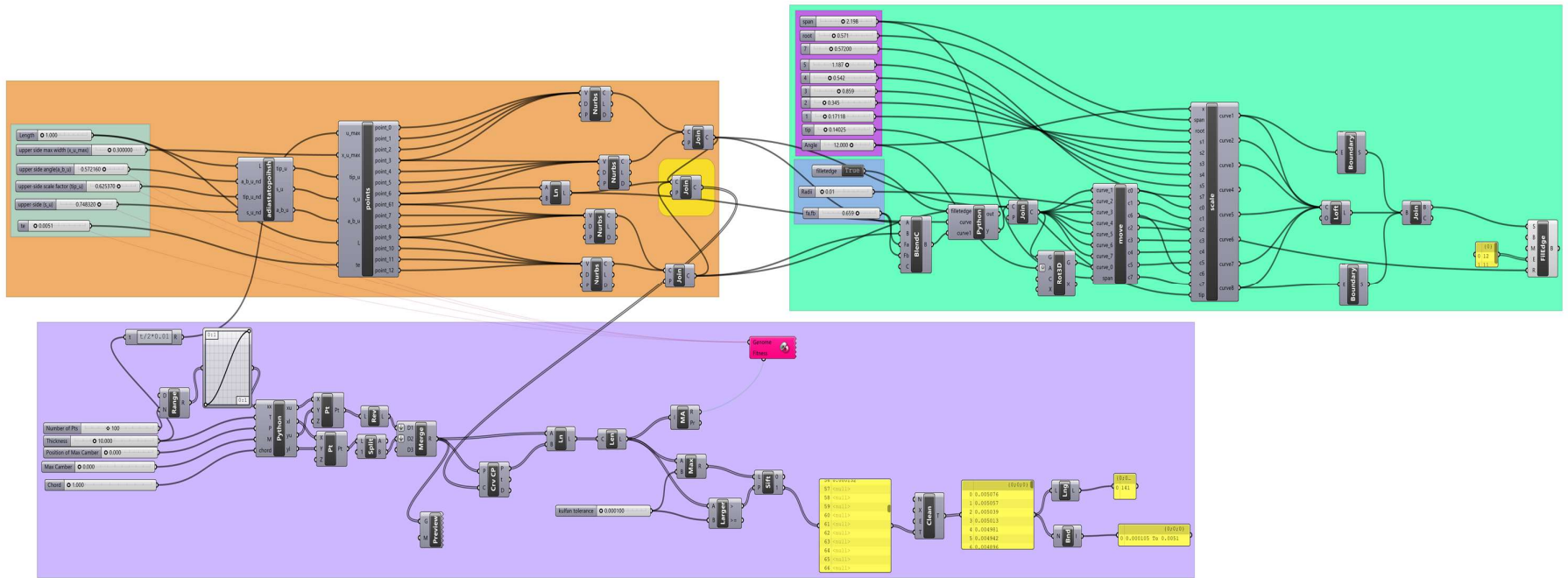
Εικόνα 58: Ανάλυση καμπυλότητας Gauss και Zebra



Εικόνα 59: Ανάλυση μέσης καμπυλότητας

Στην Εικόνα 58, Εικόνα 59 απεικονίζεται η ανάλυση καμπυλότητας Gauss, Zebra και η μέση καμπυλότητα. Όπως φαίνεται υπάρχει αλλαγή στην καμπυλότητα στα σημεία του χείλους εκφυγής και πρόσπτωσης. Αυτό συμβαίνει καθώς υπάρχει μία σχετικά λεπτή σε πάχος υδροτομή όποτε η αλλαγή καμπυλότητας στα σημεία αυτά είναι αρκετά απότομη. Επιπλέον, παρατηρείται από την μέση ανάλυση καμπυλότητας ότι η περιοχή του χείλους πρόσπτωσης απεικονίζεται με ψυχρό χρώμα όποτε υποδηλώνει μια κυρτή επιφάνεια, ωστόσο στην περίπτωση αυτή υπάρχει μια κοίλη επιφάνεια αλλά μικρότερης θετικής κυρτότητας από αυτή του χείλους εκφυγής.

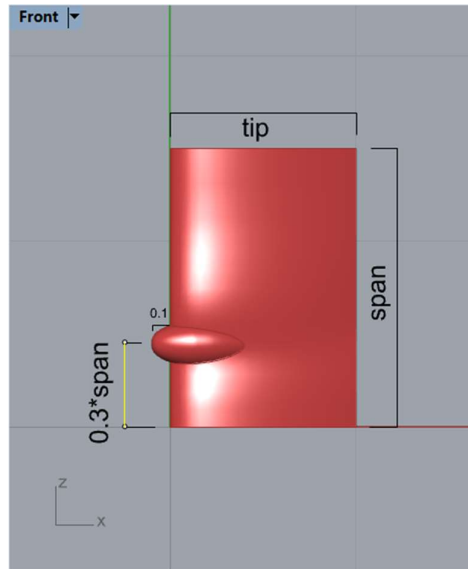
Παρακάτω παρουσιάζεται ο διαγραμματικός κώδικας αναπαράστασης των πηδαλίων για ιστιοπλοϊκά σκάφη.



Εικόνα 60: Διαγραμματικός κώδικας αναπαράστασης πηδαλίων για ιστιοπλοϊκά σκάφη

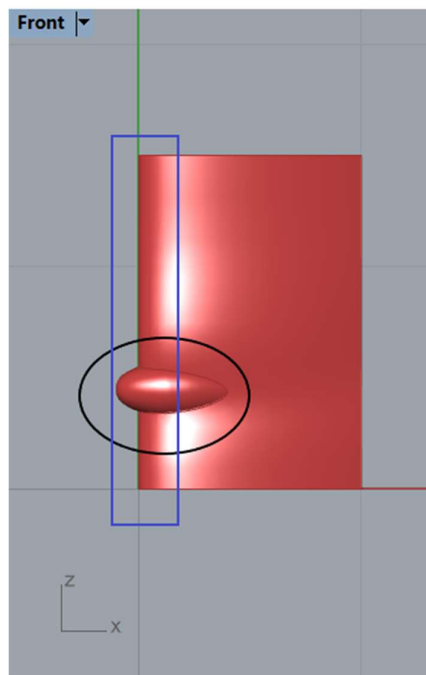
## 4.5 Πηδάλια Twisted με βολβό

Αυτή η υπό-ενότητα αναφέρεται στην παραμετρική σχεδίαση των πιο τεχνολογικά και υδροδυναμικά καινούργιων πηδαλίων. Οι παράμετροι χωρίζονται σε αυτούς που ελέγχουν την καμπύλη την στρέβλωση του χείλους πρόπτωσης, σε αυτούς που καθορίζουν το βολβό και τέλος σε αυτούς που ορίζουν τις κύριες διαστάσεις του πηδαλίου.



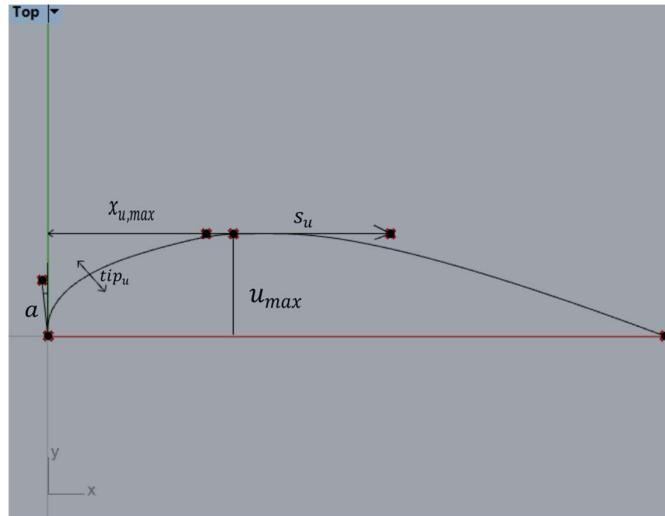
Εικόνα 61: Κύριες διαστάσεις πηδαλίου

Παρακάτω θα παρουσιαστούν πιο αναλυτικά τα σημεία που έχουν επισημανθεί προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια καλύτερη απεικόνιση των παραμέτρων που έχουν χρησιμοποιηθεί.



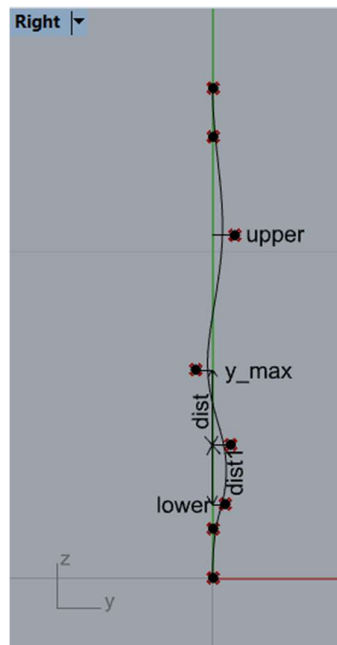
Εικόνα 62: Επισήμανση βολβού και χείλους πρόπτωσης του πηδαλίου

Όσο αφορά τον βολβό έχει αποτυπωθεί μια συμμετρική NACA. Στην Εικόνα 63 απεικονίζεται μόνο η καμπύλη στο άνω μέρος του βολβού καθώς δεν χρειάζεται σχεδιαστεί όλος ο βολβός όπως αναλύεται στην συνέχεια. Παρακάτω παρουσιάζονται οι παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί.



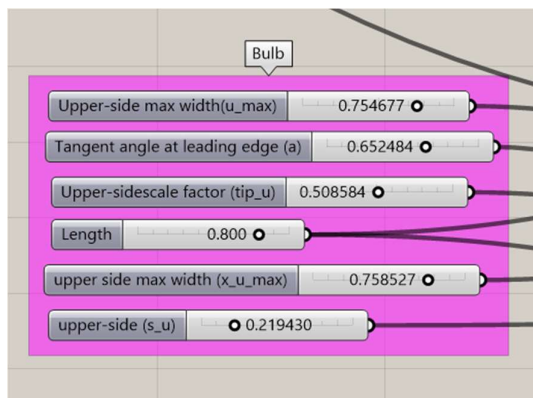
Εικόνα 63: Παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του βολβού

Στην Εικόνα 64 απεικονίζονται οι παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την σχεδίαση του χείλους πρόσπτωσης. Έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στο σημείο που βρίσκεται ο βολβός καθώς δεν έχει μια απόλυτη θέση αλλά κινείται σε ένα εύρος ανάμεσα ( $0.2 - 0.4 \cdot span$ ). Για αυτό τον λόγο έχουν προστεθεί και οι παράμετροι  $dist$ ,  $dist1$  προκειμένου να επιτευχθεί μια ομαλή προσαρμογή του βολβού με την μορφή twisted του πηδαλίου.



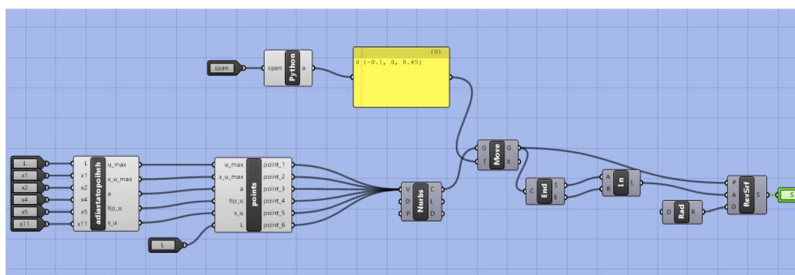
Εικόνα 64: Παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του χείλους εκφυγής

Παρακάτω απεικονίζονται οι παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την σχεδίαση του βολβού με την μορφή sliders.



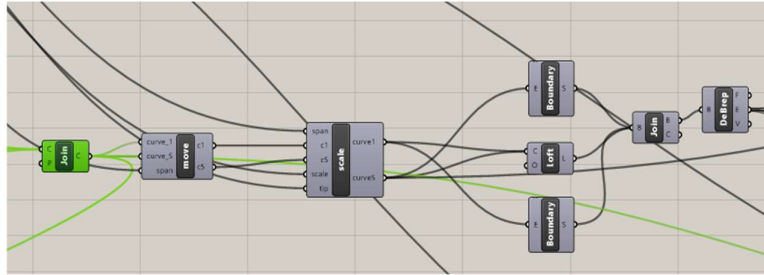
Εικόνα 65: Παράμετροι που επηρεάζουν την μορφή του βολβού

Πιο αναλυτικά, όσο αφορά την σχεδίαση του βολβού οι παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι ίδιοι με την άνω επιφάνεια της συμμετρικής υδροτομής NACA όπως αναφέρεται (Jaramillo, 2016). Έτσι, έχουμε την ίδια διαδικασία σχεδίασης των σημείων του βολβού. Αφού έχει σχεδιαστεί η άνω επιφάνεια επιλέγουμε ως αρχικό σημείο σχεδιασμού το  $(-0.1, 0, 0.3 \cdot span)$ . Έπειτα με την εντολή «revolution» περιστρέφουμε την καμπύλη κατά 360 μοίρες δημιουργώντας την επιφάνεια του βολβού. Με τις επιλεγμένους παραμέτρους ο χρήστης μπορεί να αλλάξει το μέγιστο πάχος και μήκος του βολβού αλλά ακόμα και να επηρεάσει και όλη την μορφή του. Παρακάτω απεικονίζεται ο διαγραμματικός κώδικας παραμετρικής σχεδίασης του βολβού.



Εικόνα 66: Δημιουργία βολβού

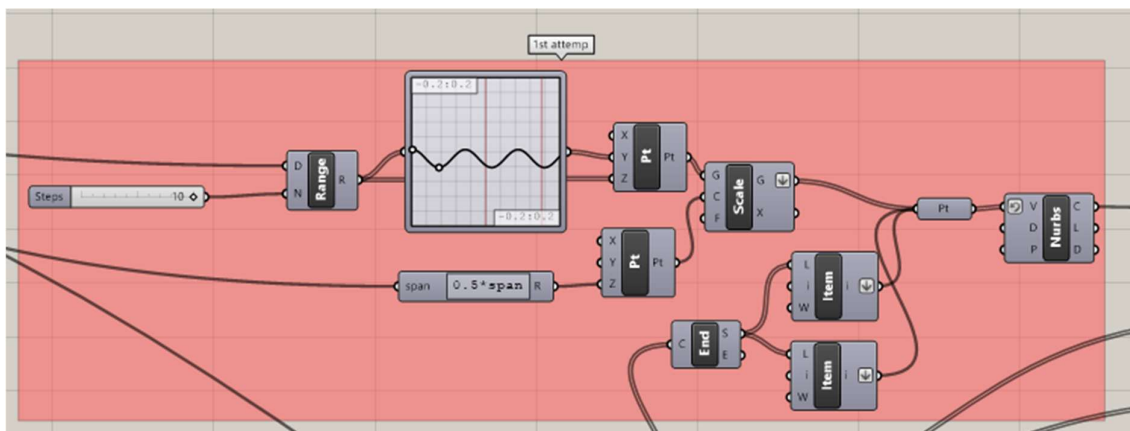
Όσο αφορά την σχεδίαση του twisted πηδαλίου, αρχικά έχουν δημιουργηθεί δύο υδροτομές που ελέγχουν την άνω και κάτω επιφάνεια του πηδαλίου. Οι υδροτομές έχουν κατασκευαστεί με τον ίδιο τρόπο που έχουν σχεδιαστεί τα πηδάλια τύπου spade (move, scale). Έπειτα, με την εντολή «loft» και «boundary surfaces» κατασκευάζεται η επιφάνεια του πηδαλίου. Στην συνέχεια η επιφάνεια διασπάτε στις ακμές της προκειμένου να κατασκευαστεί μια κατακόρυφη γραμμή που θα ενώνει τα δυο άκρα εκφυγής. Παρακάτω απεικονίζεται ο κώδικας σχεδίασης που αναφέρθηκε παραπάνω.



Εικόνα 67: Δημιουργία αρχικής επιφάνειας πηδαλίου

Για την αναπαράσταση της καμπύλης που δημιουργεί το χείλος πρόσπτωσης έχουν γίνει δύο διαφορετικές προσπάθειες αναπαράστασης της.

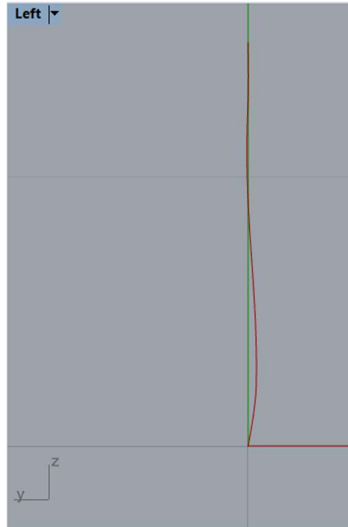
- 1<sup>η</sup> απεικόνιση του χείλους πρόσπτωσης



Εικόνα 68: Πρώτη προσπάθεια αναπαράστασης της καμπύλης του χείλους πρόσπτωσης

Για τη δημιουργία της καμπύλης έχουν κατασκευαστεί δώδεκα σημεία ελέγχου. Τα δυο σημεία αποτελούν το αρχικό και τελικό σημείο της καμπύλης και έχουν προέλθει από τα δύο άκρα πρόσπτωσης των δύο υδροτομών που έχουν κατασκευαστεί παραπάνω (άνω και κάτω επιφάνεια). Τα υπόλοιπα δέκα σημεία έχουν δημιουργηθεί με την βοήθεια ενός «graph mapper» και ελέγχονται μέσω μίας ημιτονοειδούς καμπύλης. Επιπλέον, τα σημεία αυτά έχουν ως ύψος το ύψος του πηδαλίου, ωστόσο για να μην συμπίπτει το αρχικό και το τελικό σημείο με τα δύο παραπάνω σημεία έχει γίνει αλλαγή κλίμακας των σημείων με κέντρο την μέση του ύψους του πηδαλίου. Τα σημεία καταλήγουν σε μία καμπύλη B-spline 3<sup>ου</sup> βαθμού.

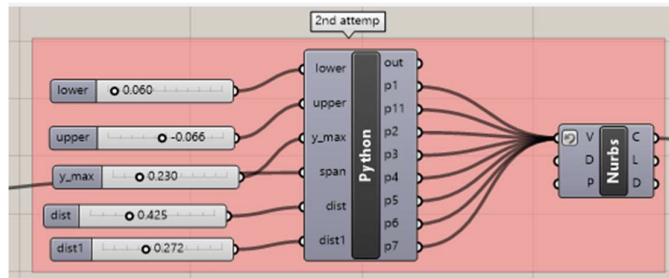
Παρακάτω απεικονίζεται η μορφή της καμπύλης.



Εικόνα 69: Απεικόνιση της καμπύλης

Οι διαστάσεις της παραπάνω προσπάθειας είναι δύσκολο να απεικονιστούν με ακρίβεια μέσω του graph mapper επομένως και η σχεδίαση μιας ακριβής καμπύλης. Εκτός και αν δημιουργηθεί κάποιος κατάλληλος κώδικας που με την βοήθεια του Galapagos θα βρίσκει την βέλτιστη μορφή της καμπύλης.

- 2<sup>η</sup> απεικόνιση του χείλους πρόσπτωσης



Εικόνα 70: Δεύτερη προσπάθεια αναπαράστασης της καμπύλης του χείλους πρόσπτωσης

Στη δεύτερη προσπάθεια δημιουργίας της καμπύλης έχει κατασκευαστεί ένας κώδικας που ελέγχει τα σημεία με βάση έξι παραμέτρους όπως απεικονίζεται στην παραπάνω εικόνα. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο χρήστης να μπορεί να ελέγξει την καμπύλη πιο εύκολα ή ακόμα και μέσω κάποιας προέκτασης να βρει την βέλτιστη καμπύλη για το πηδάλιο που θέλει να κατασκευάσει. Ο κώδικας αυτός επιτρέπει στη καμπύλη να έχει μόνο δύο σημεία καμπυλότητας καθώς στη πλειονότητα των πηδαλίων τύπου twisted έχει βρεθεί ότι οι περισσότερες καμπύλες έχουν δύο ακρότατα. Αν το προς μελέτη πηδάλιο έχει παραπάνω από δύο ακρότατα πρέπει να τροποποιηθεί ανάλογα ο κώδικας. Τα σημεία αυτά ενώνονται σε μία καμπύλη B-Spline 3<sup>ου</sup> βαθμού. Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας για την δημιουργία των σημείων ελέγχου.

1. `import rhinoscriptsyntax as rs`
2. `import math`
3. `p1= rs.CreatePoint(0,0,0)`
4. `p2= rs.CreatePoint(0,0,0.1*span)`
5. `p3= rs.CreatePoint(0,lower*y_max,span*0.2)`

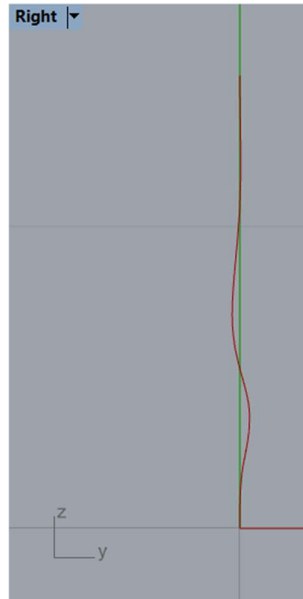


```

6. p4= rs.CreatePoint(0,math.pow((y_max),2),span*dmax1)
7. p5= rs.CreatePoint(0,-math.pow((y_max),2),span*dmax)
8. p6= rs.CreatePoint(0,-y_max*upper,span*0.7)
9. p7= rs.CreatePoint(0,0,span*0.9)
10. p8= rs.CreatePoint(0,0,span)

```

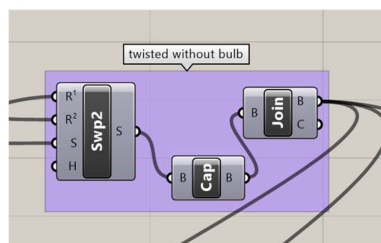
Παρακάτω παρουσιάζεται η απεικόνιση της καμπύλης με την χρήση της δεύτερης μεθόδου.



Εικόνα 71: Απεικόνιση καμπύλης

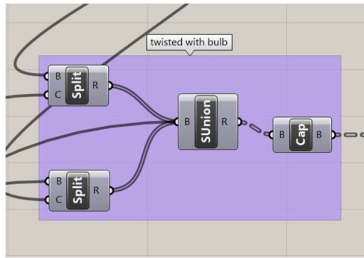
Για τη συνέχεια της σχεδίασης του πηδαλίου έχουμε υποθέσει ότι το προς μελέτη πηδάλιο έχει την δυνατότητα να κατασκευαστεί με την πρώτη προσπάθεια απεικόνισης της καμπύλης του χείλους πρόσπτωσης καθώς δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο παράδειγμα με ακριβείς διαστάσεις για αναπαράσταση. Όποτε η σχεδίαση του πηδαλίου είναι πιο πολύ απεικονιστική.

Για να πάρει την τελική μορφή του το πηδάλιο χρησιμοποιείται η εντολή «sweep2» (βλέπε 2.44) με καμπύλες οδηγούς την ευθεία γραμμή του χείλους εκφυγής και την καμπύλη που δημιουργήθηκε παραπάνω από τα σημεία. Τέλος, η υδροτομή που χρησιμοποιείται σαν επιφάνεια είναι η κάτω αφού πρώτα έχει υποστεί τη κατάλληλη αλλαγή κλίμακας.



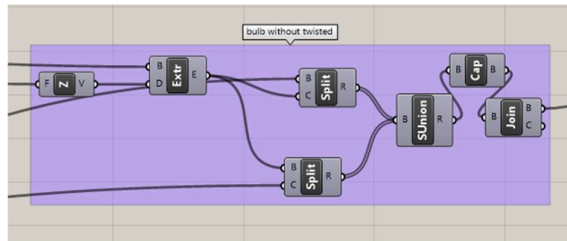
Εικόνα 72: Δημιουργία πηδαλίου twisted χωρίς βολβό

Έτσι έχουμε την επιφάνεια του twisted πηδαλίου αλλά χωρίς την προσθήκη βολβού. Για τον συνδυασμό και των δύο πρέπει η παραπάνω επιφάνεια να γίνει «split» με την επιφάνεια του βολβού και στην συνέχεια «solid union» προκειμένου να έχουμε την τελική επιφάνεια του πηδαλίου.



Εικόνα 73: Δημιουργία πηδαλίου twisted με βολβό

Επιπρόσθετα, ο χρήστης μπορεί να κατασκευάσει ένα πηδάλιο χωρίς twisted, κάνοντας «extrude» την επιφάνεια της κάτω υδροτομής και σε συνδυασμό με τον βολβό να έχει την τελική επιφάνεια.

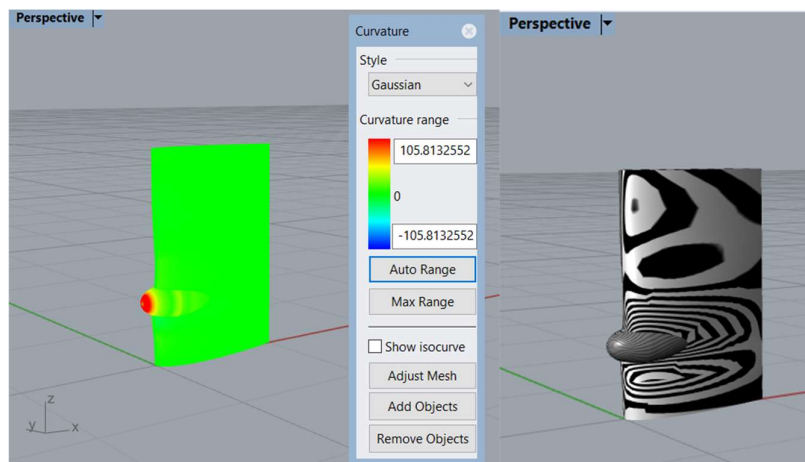


Εικόνα 74: Δημιουργία πηδαλίου με βολβό χωρίς twisted

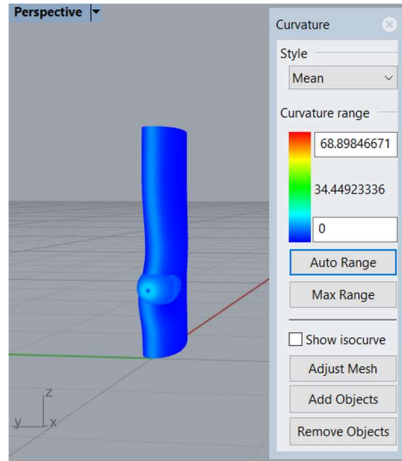
Τέλος, ο χρήστης έχει την δυνατότητα μέσω δύο μεταβλητών Boolean (*bulb*, *twisted*) να ορίσει την γεωμετρία του τελικού πηδαλίου, κάνοντας τον κατάλληλο συνδυασμό. Στο παρών αρχείο, μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε τρεις επιλογές :

- A) twisted με βολβό ( $bulb = True, twisted = True$ )
- B) χωρίς twisted με βολβό ( $bulb = True, twisted = False$ )
- Γ) twisted χωρίς βολβό ( $bulb = False, twisted = True$ )

Παρακάτω απεικονίζεται η ανάλυση καμπυλότητας του πηδαλίου twisted με βολβό.



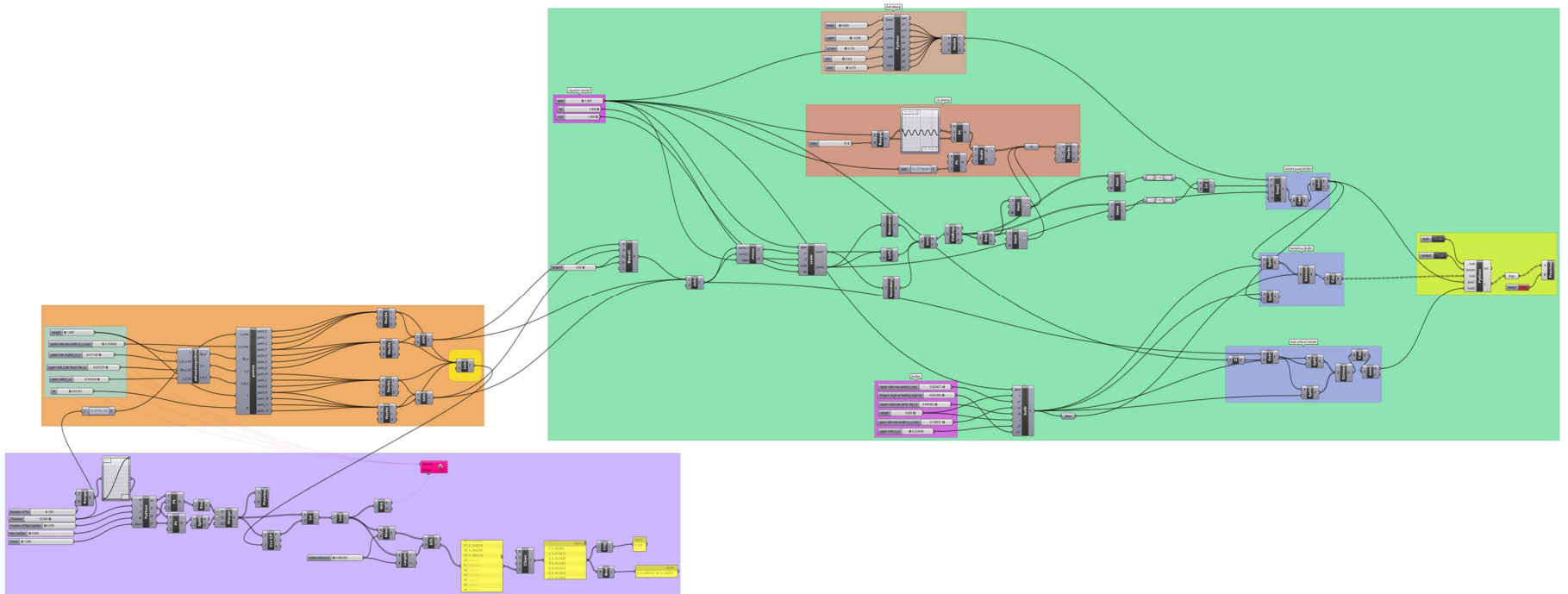
Εικόνα 75: Ανάλυση καμπυλότητας Gauss και Zebra



Εικόνα 76: Ανάλυση μέσης καμπυλότητας

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες υπάρχει αλλαγή καμπυλότητας στην περιοχή του βολβού. Επιπλέον, από την ανάλυση Zebra παρατηρείται μεταβολή στην επιφάνεια του πηδαλίου λόγω της εναλλασσόμενης μορφής του.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο διαγραμματικός κώδικας για την αναπαράσταση του πηδαλίου twisted με βολβό.



Εικόνα 77: Διαγραμματικός κώδικας αναπαράστασης twisted πηδαλίου με βολβό

## Κεφάλαιο 5: Εφαρμογές των παραμετρικών μοντέλων

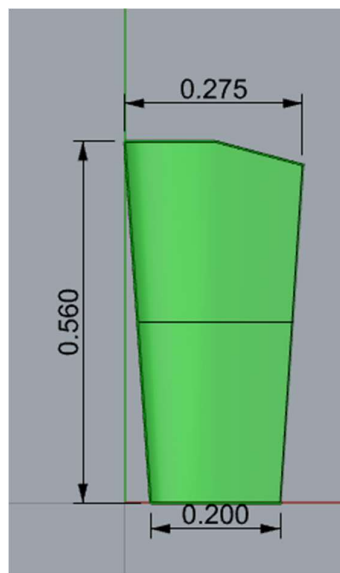
Σε αυτό το κεφάλαιο θα συγκριθούν ορισμένα πηδάλια με ήδη υπάρχοντα ώστε να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα των παραμετρικών μοντέλων.

### 5.1 Spade πηδάλια

Παρακάτω με την βοήθεια του παραμετρικού μοντέλου έχουν δημιουργηθεί δύο spade πηδάλια που συγκρίνονται με δύο πηδάλια από την εταιρεία Eliche Radice (Radice, 2024). Η υδροτομή σχεδίασης του πηδαλίου είναι η NACA 0015. Τα πηδάλια που έχουν επιλεγεί είναι για σκάφη 8 με 12 μέτρων. Επιπρόσθετα, παρακάτω παρουσιάζονται και οι παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί για να αποτυπώσουν την γεωμετρία του πηδαλίου.

Πίνακας 9: Τιμές πρώτου παραμετρικού μοντέλου για spade πηδάλιο

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
<i>Fillet edge</i>	<i>False</i>
<i>Root</i>	0.278 m
<i>Tip</i>	0.200 m
<i>Span</i>	0.560 m
<i>Radius</i>	0.000°
<i>Angle</i>	165°

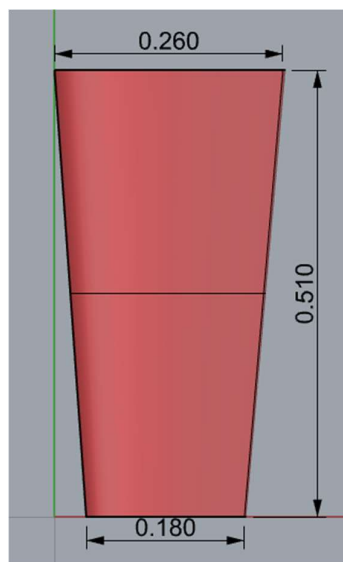


Εικόνα 78: Πηδάλιο spade με trimmed στην άνω επιφάνεια

Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την αναπαράσταση του δεύτερου πηδαλίου.

Πίνακας 10: Τιμές δεύτερου παραμετρικού μοντέλου για *spade* πηδάλιο

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
<i>Fillet edge</i>	<i>False</i>
<i>Root</i>	0.260 m
<i>Tip</i>	0.180 m
<i>Span</i>	0.510 m
<i>Radius</i>	0.000°
<i>Angle</i>	180°



Εικόνα 79: Πηδάλιο *spade*

Τα δύο πηδάλια που έχουν αναπαρασταθεί στις δύο παραπάνω εικόνες αποτελούν μια πιστή αντιγραφή των περυγίων της εταιρείας Eliche Radice (Radice, 2024), (δείτε ενότητα 8-12 μέτρα) ,(συγκεκριμένοι τύποι πηδαλίων Τίρο 16/13-P και Τίρο 16/13-S), για τις διαστάσεις οι οποίες είναι γνωστές.

## 5.2 Μερικώς ζυγοσταθμισμένα πηδάλια (*semi-balanced*)

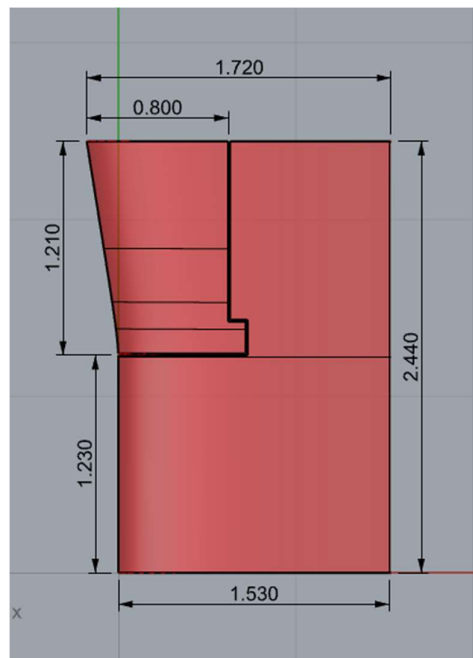
Στην συγκεκριμένη περίπτωση το πηδάλιο που θέλουμε να αναπαραστήσουμε έχει δημιουργηθεί από (Nguyen & Ikeda, 2014) σε μία έρευνα που δημοσίευσε. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η υδροτομή που έχει επιλεγεί είναι η NACA 0015 καθώς δεν έχουμε περαιτέρω στοιχεία για την διάσταση της υδροτομής.

Οι παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 11: Τιμές παραμετρικού μοντέλου για *semi-balanced* πηδάλιο

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
<i>Fillet edge</i>	<i>False</i>

<i>Root</i>	1.530 m
<i>Tip</i>	1.530 m
<i>Span</i>	2.440 m
<i>Radius</i>	0.130
<i>Trim</i>	0.000
<i>Angle</i>	0.000
$X_1$	0.630 m
$X_2$	0.730 m
$Z_1$	0.1430 m
$Z_2$	0.1230 m
<i>Panel 1</i>	-0.18, 0, 0
<i>Panel 2</i>	-2, 0, 0.01
<i>Panel 3</i>	-0.01, 0, 0.01
<i>Panel 4</i>	-0.01, 0, -0.01



Εικόνα 80: Πηδάλιο semi-balanced

Για ακόμη μια φορά υπάρχει μια πιστή αντιγραφή του πηδαλίου για τις διαστάσεις οι οποίες είναι γνωστές.

Ωστόσο παρακάτω γίνεται μια μετατροπή του παραπάνω σχεδίου έτσι ώστε να μην αλληλοκαλύπτονται τα δύο κομμάτια, αυτό του πηδαλίου και αυτό του skeg μεταξύ τους

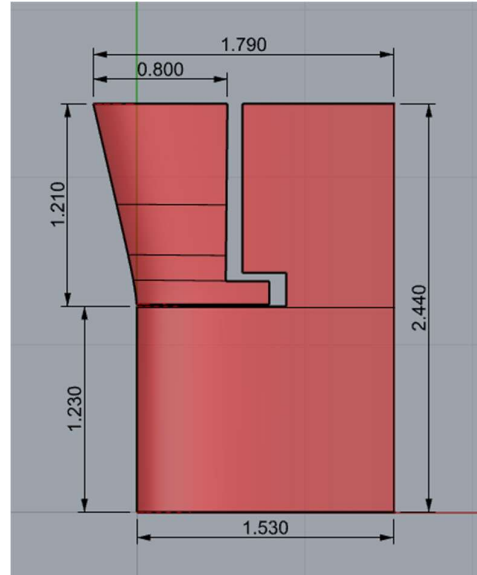
όταν το πηδάλιο περιστρέφεται. Με αυτό τον τρόπο έχει τροποποιηθεί κατάλληλα το κενό μεταξύ των δύο επιφανειών υπολογίζοντας την μέγιστη περιστροφή του πηδαλίου.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι παράμετροι που έχουν μεταβληθεί προκειμένου να έχουμε παρόμοιο αποτέλεσμα στις διαστάσεις του πηδαλίου με το παραπάνω πηδάλιο.

Πίνακας 12: Αλλαγή μεταβλητών για τον έλεγχο του διάκενου μεταξύ των δύο επιφανειών

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
$X_2$	0.890 m
Panel 1	-0.26, 0, 0
Panel 2	-2, 0, 0.01
Panel 3	-0.08, 0, 0.01
Panel 4	-0.08, 0, -0.05

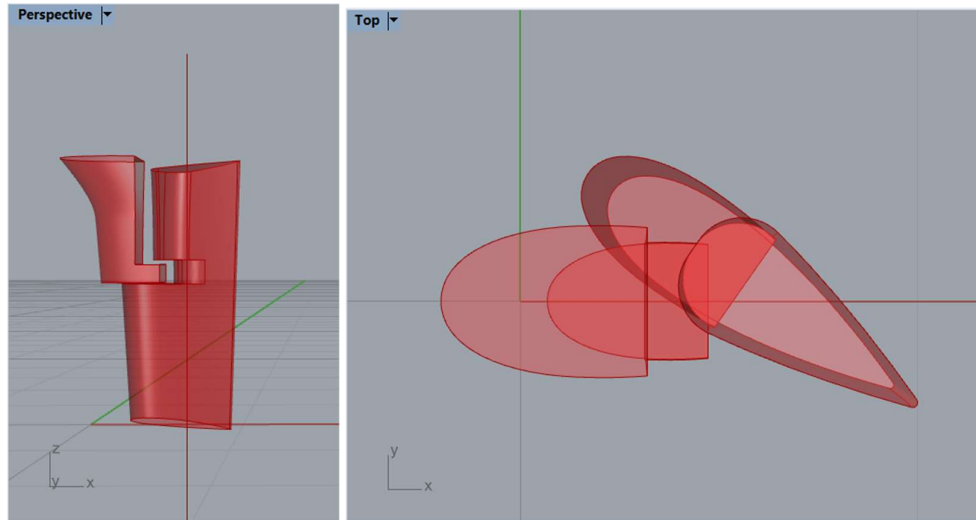
Η μοναδική διάσταση που έχει αλλάξει είναι αυτή του *root* καθώς έχουμε αυξήσει το κενό μεταξύ των δύο κομματιών. Αν δεν αλλάζαμε αυτή την διάσταση θα έπρεπε να μικρύνει η οριζόντια απόσταση της άνω επιφάνειας του skeg. Επιπλέον, έχει μεταβληθεί, εκτός από τις διαστάσεις που ορίζουν το κενό μεταξύ των δύο κομματιών, η διάσταση  $X_2$  που ορίζει την οριζόντια απόσταση της κάτω επιφάνειας του skeg προκειμένου να μπορεί να ενωθεί ο άξονας με το πηδάλιο.



Εικόνα 81: Μερικώς ζυγασταθμισμένο πηδάλιο με διάκενο

Παρακάτω απεικονίζεται το πηδάλιο με την μέγιστη τιμή περιστροφής του (+35°).





Εικόνα 82: Μερικώς ζυγοσταθμισμένο πηδάλιο με στροφή 35 μοιρών

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα δεν αλληλοκαλύπτονται οι δύο επιφάνειες.

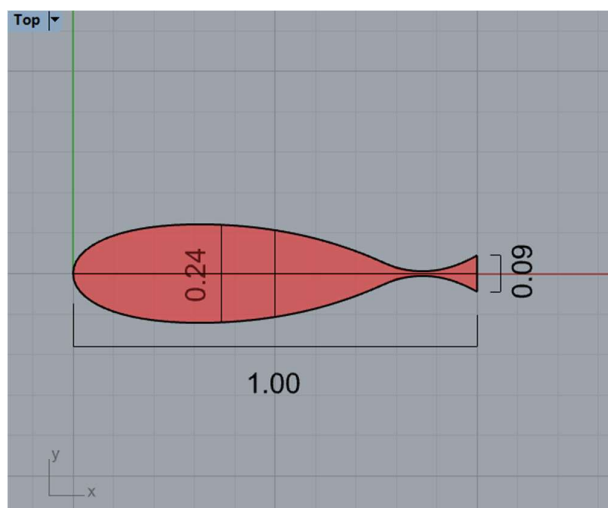
### 5.3 Fishtail (schilling) πηδάλια

Η αναπαράσταση του παρακάτω πηδαλίου έχει προέλθει από την εργασία (Nguyen & Yoshiho, 2014) στην οποία έχει δημοσιευθεί μελέτη για πτερύγια τύπου fishtail. Συγκεκριμένα, έχει γίνει αναπαράσταση του πηδαλίου για υδροτομή NACA 0024 με μέγιστο πάχος στο χείλος εκφυγής 0.09 του μήκους της χορδής. Επιπλέον, στην παραπάνω έρευνα δεν έχει γίνει αναφορά για plates στην άνω και κάτω επιφάνεια του πηδαλίου επομένως θεωρούμε πως είναι συμπαγής η επιφάνεια καθ' όλο το ύψος της.

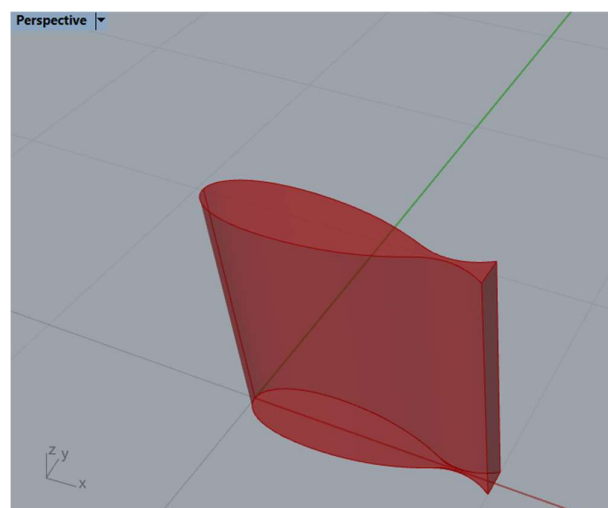
Οι παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 13: Παράμετροι πηδαλίου τύπου fishtail

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
$t_{te}$	0.012 m
$t_{te,back}$	0.090 m
$X_2$	0.900 m
$X_1$	0.800 m
Radius	0.230 rad
Span	1.000 m
Root/Length	1.000 m



Εικόνα 83: Πηδάλιο τύπου fishtail(schilling)



Εικόνα 84: Τρισδιάστατη αναπαράσταση πηδαλίου τύπου fishtail

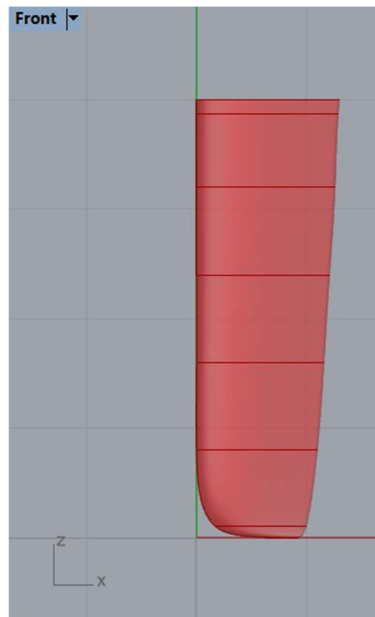
## 5.4 Πηδάλια ιστιοπλοϊκών σκαφών

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο πηδάλια για ιστιοπλοϊκά σκάφη που έχουν απεικονιστεί σε σύγκριση με όμοια τους. Επειδή για αυτό τον τύπο πηδαλίου δεν έχουμε επακριβώς δεδομένα και διαστάσεις τα πηδάλια έχουν αναπαρασταθεί προσεγγιστικά. Στην πρώτη περίπτωση, έχει γίνει προσπάθεια αναπαράστασης του πηδαλίου από την εταιρεία Dotan (Dotan, 2024). Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση του συγκεκριμένου πηδαλίου.

Πίνακας 14: Παράμετροι για την δημιουργία πηδαλίου ιστιοπλοϊκού σκάφους

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
<i>Span</i>	4.000 m

<i>Root</i>	1.300 m
<i>S</i> <sub>6</sub>	1.289 m
<i>S</i> <sub>5</sub>	1.261 m
<i>S</i> <sub>4</sub>	1.211 m
<i>S</i> <sub>3</sub>	1.160 m
<i>S</i> <sub>2</sub>	1.100 m
<i>S</i> <sub>1</sub>	0.825 m
<i>Tip</i>	0.289 m
<i>Angle</i>	0.000°

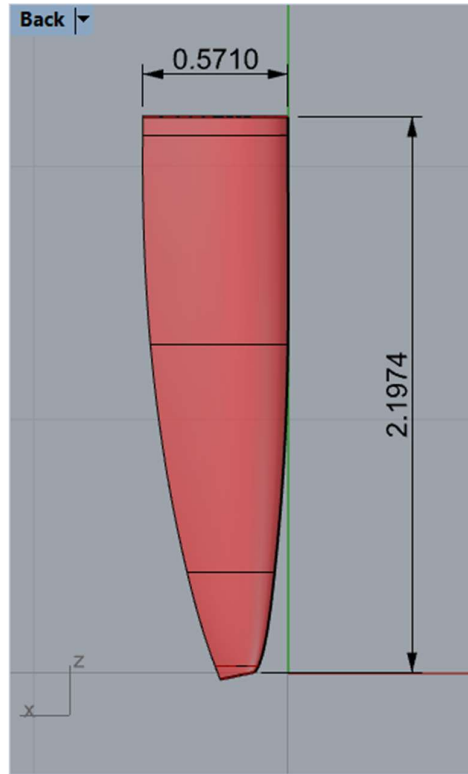


Εικόνα 85: Πηδάλιο ιστιοπλοϊκού σκάφους

Όσο αναφορά την σχεδίαση του δεύτερου πηδαλίου έχει πραγματοποιηθεί προσπάθεια αναπαράστασης του από την εταιρεία Jefa Rudders (Jefa, 2024). Πιο συγκεκριμένα έχει γίνει απεικόνιση του πηδαλίου 45R. Παρακάτω απεικονίζονται οι παράμετροι αναπαράστασης του δεύτερου πηδαλίου.

Πίνακας 15: Παράμετροι για την δημιουργία πηδαλίου ιστιοπλοϊκού σκάφους

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
<i>Span</i>	2.198 m
<i>Root</i>	0.571 m
<i>S</i> <sub>6</sub>	0.572 m
<i>S</i> <sub>5</sub>	–
<i>S</i> <sub>4</sub>	0.542 m
<i>S</i> <sub>3</sub>	–
<i>S</i> <sub>2</sub>	0.345 m
<i>S</i> <sub>1</sub>	0.172 m
<i>Tip</i>	0.140 m
<i>Angle</i>	12.000°



Εικόνα 86: Πηδάλιο ιστιοπλοϊκού σκάφους

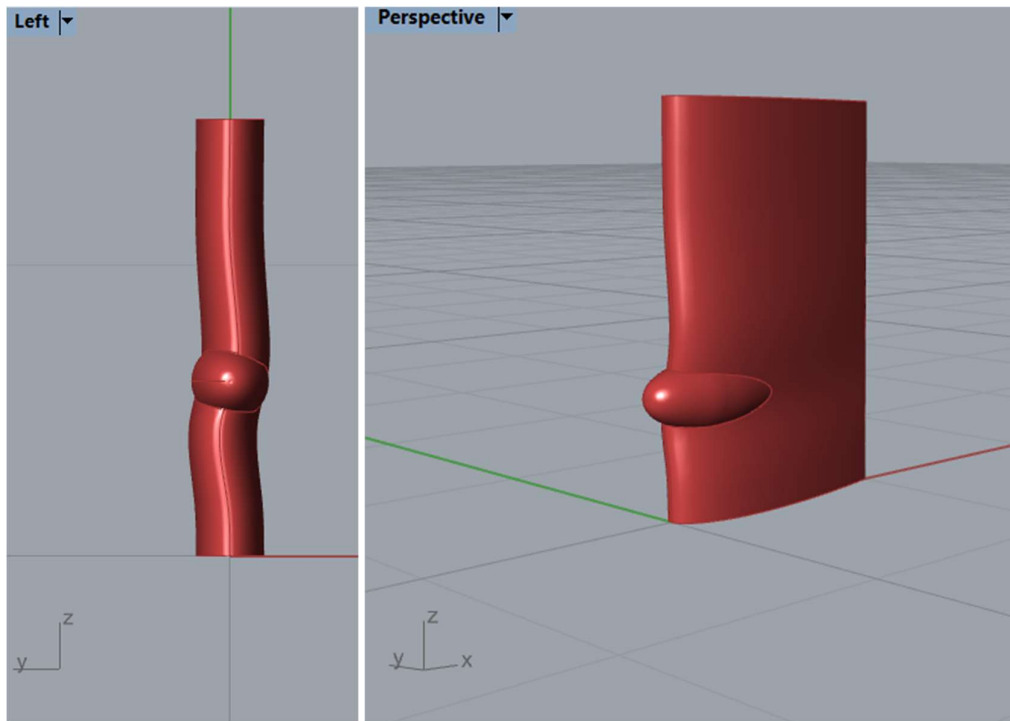
## 5.5 Πηδάλια Twisted με βολβό

Παρακάτω απεικονίζεται ένα πηδάλιο twisted με βολβό. Το συγκρινόμενο πηδάλιο έχει προέλθει από (Jaramillo, 2016), ωστόσο επειδή δεν υπάρχουν επακριβή δεδομένα για την αναπαράσταση του πηδαλίου έχει σχεδιαστεί προσεγγιστικά. Για την επιλογή της υδροτομής έχει χρησιμοποιηθεί η NACA 0020.

Πίνακας 16: Παράμετροι για την δημιουργία πηδαλίου twisted με βολβό

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
<i>Span</i>	1.500 m
<i>Tip</i>	1.000 m
<i>Scale</i>	1.000
$u_{max}$ (βολβός)	0.8295
$a$ (βολβός)	0.6425
$tip_u$ (βολβός)	0.5494
Length( <i>L</i> )(βολβός)	0.8000 m
$x_{u,max}$ (βολβός)	0.7585
$s_u$ (βολβός)	0.2194
$tip_u$	0.060
$s_u$	-0.066
$y_{max}$	0.230

$d_{max}$	0.425
$d_{max1}$	0.272



Εικόνα 87: Πηδάλιο twisted με βολβό

Το παραπάνω σχήμα πηδαλίου μοιάζει να προσεγγίζει αρκετά το πηδάλιο της (Jaramillo, 2016).

## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις

### 6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έχουν μελετηθεί οι υδροτομές NACA τεσσάρων ψηφίων και ταυτόχρονα έχει σχεδιαστεί μια υδροτομή τύπου fishtail. Με βάση αυτές τις υδροτομές και πιο συγκεκριμένα τις συμμετρικές έχουν παρουσιαστεί πέντε παραμετρικά μοντέλα πηδαλίων. Η διαδικασία σχεδίασης των παραπάνω είναι μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία, ωστόσο εξοικονομεί χρόνο στο χρήστη μετά το πέρας της σχεδίασης του παραμετρικού μοντέλου, δηλαδή, στην εφαρμογή του. Ωστόσο, οι παραμετρικές προσεγγίσεις που παρουσιάζονται στην εργασία επιτρέπουν τη γρήγορη δημιουργία και παραλλαγή πολλών τύπων πηδαλίων, εξοικονομώντας πολύτιμο χρόνο κατά τη διαδικασία σχεδίασης.

Για την αναπαράσταση των υδροτομών έχουν χρησιμοποιηθεί δεκαοκτώ παράμετροι, οι οποίοι αποτελούν συνδυασμό των παραμέτρων που έχουν χρησιμοποιηθεί στην εργασία των (Kostas, et al., 2020) αλλά έχουν προστεθεί και καινούργιοι. Τα αποτελέσματα από τις παραμετρικές γεωμετρίες είναι αρκετά ενθαρρυντικά καθώς αναπαριστούν με μεγάλη ακρίβεια τις προς μελέτη υδροτομές. Όσο αναφορά την εργασία των (Kostas, et al., 2020) έχει συγκριθεί η υδροτομή NACA 4412 που έχει καλύτερη σχεδιαστική ακρίβεια με την παραπάνω εργασία.

Τα πτερύγια NACA αν και έχουν δημιουργηθεί αρκετά παλιά έχουν ακόμα μεγάλη επίδραση στην ναυπηγική βιομηχανία. Ειδικά οι συμμετρικές υδροτομές χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή πηδαλίων. Τα παραμετρικά μοντέλα που παρουσιάζονται αντιπροσωπεύουν μια αξιόπιστη μέθοδο για τον σχεδιασμό τους. Η ομαλότητα και η συνέχεια στις επιφάνειες των παραμετρικών μοντέλων συμβάλλουν στη δημιουργία λειτουργικά αποτελεσματικών πηδαλίων. Έτσι, επαληθεύοντας την αξιοπιστία του παραμετρικού μοντέλου δίνεται η ικανότητα να χρησιμοποιηθεί σε μια πληθώρα σχεδίων.

Κατά την παραμετρική σχεδίαση οι παράμετροι και οι γεωμετρικοί περιορισμοί πρέπει να ορίζονται πολύ προσεκτικά για να διευκολύνουν την διαδικασία της σχεδίασης αλλά και ταυτόχρονα να μπορούν να μεταβάλλουν γρήγορα και αξιόπιστα την μορφή του προς μελέτη αντικειμένου. Επιπλέον, σημαντικό είναι να λαμβάνεται υπόψη η ιδιαιτερότητα του κάθε σχεδιαστικού προγράμματος κατά τη διαδικασία σχεδίασης.

Τα παραπάνω πέντε πηδάλια που έχουν αποτυπωθεί παραμετρικά συγκρίνονται με ήδη υπάρχοντα πηδάλια προκειμένου να δειχθεί η αξιοπιστία τους. Έτσι, μέσω των συγκρίσεων με υπάρχοντα πηδάλια επιβεβαιώνεται η αξιοπιστία και η αποτελεσματικότητα των παραμετρικών μοντέλων. Η ομαλότητα και η συνέχεια στις επιφάνειες των παραμετρικών μοντέλων επιβεβαιώνουν την ακρίβεια τους στον αναπαραστατικό χώρο.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, έχουν δημιουργηθεί παραμετρικά μοντέλα που αποτυπώνουν με αξιοπιστία τις υδροτομές τύπου fishtail και NACA τεσσάρων ψηφίων, μέσω των συμμετρικών πτερυγίων έχουν δημιουργηθεί πέντε διαφορετικά παραμετρικά μοντέλα που αναπαριστούν με μεγάλη εγκυρότητα και ακρίβεια τον κάθε τύπο πηδαλίου.

## 6.2 Προτάσεις

Τα παραμετρικά μοντέλα που έχουν σχεδιαστεί έχουν μια καλή αξιοπιστία ωστόσο παραμένουν ανοιχτά ως προς την διεύρυνση των δυνατοτήτων τους.

- Αρχικά, θα μπορούσε να γίνει προσπάθεια αναπαράστασης των γεωμετρικών μοντέλων με την ίδια ή καλύτερη σχεδιαστική ακρίβεια χρησιμοποιώντας λιγότερες παραμέτρους.
- Όσο αφορά το πηδάλιο twisted με βολβό θα μπορούσε να συγκριθεί με ήδη υπάρχοντα πηδάλια και να τροποποιηθεί κατάλληλα.
- Επιπλέον, τα παραγόμενα πηδάλια θα μπορούσαν μέσω κάποιας προέκτασης να ενωθούν και αυτά σε ένα ενιαία παραμετρικό μοντέλο που θα αναπαριστά με ακρίβεια την προς μελέτη γεωμετρία του κάθε τύπου.
- Τέλος, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί διαδικασία βελτιστοποίησης για τα παραγόμενα μοντέλα.

## Βιβλιογραφία

Airfoil, 2011. *Wikipedia*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wing\\_profile\\_nomenclature.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wing_profile_nomenclature.svg)  
[Πρόσβαση 13 Ιανουαρίου 2024].

Arapakopoulos, A. και συν., 2019. Parametric Design of a Marine Propellers. *Ocean Engineering*.

Atsuo, Y. & Takahashi, M., 1969. *Propeller Design Charts of AU-Type Propeller Series of Large Area Ratio*. Tokyo: Japan Shipbuilding & Marine Engineering,.

Benson, F., 1940. Mathematical Ships' Lines. *Trans R.I.N.A.* 82.

Bertram, V., 2012. Practical ship hydrodynamics. *2nd ed. Oxford: ElsevierButterworth-Heinemann*.

Chen, C.-W., Lin, T.-Y., Chen, B.-Y. & Jen-Shia, 2018. Parametric Design and Optimazation of a Pivoting S-type Rudder for Containerships. *Journal of Marine Science and Technology*, pp. 749-763.

Choi, B. K. & Lee, C. S., 1990. Sweep surfaces modelling via coordinate transformations and blending. *Computer-Aided Design*, 22(2), pp. 87-96.

Clarke, D., Gedling, P. & Hine, G., 1983. *Application of manoeuvring criteria in hull design using linear theory*. s.l.:Trans Roal Inst Naval Arch..

Dotan, 2024. *Rudders for all dinghies and catamarans*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.dotan.com/en/shop/rudders-for-all-dinghies-and-catamarans/rudder-20/51-rudder-20-blade-1>  
[Πρόσβαση 13 Φλεβάρη 2024].

Ferry-rudder-and-propeller, 2007. *Wikipedia*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Ferry-rudder-and-propeller.jpg>  
[Πρόσβαση 10 Φεβρουαρίου 2024].

Frye, D., 2024. *Building a Faster Rudder*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.practical-sailor.com/boat-maintenance/building-a-faster-rudder>  
[Πρόσβαση 13 Φλεβάρη 2024].

Guides, R., 2023. *RhinoDeveloper*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://developer.rhino3d.com/api/RhinoScriptSyntax/#curve-AddNurbsCurve>  
[Πρόσβαση 10 Νοεμβρίου 2023].

Harries, S., 1998. *Parametric design and hydrodynamic optimization of ship hull forms*. Berlin, Germany: Technische Universitat.

Jaramillo, S. E., 2016. *Optimization of Twisted Rudder*, Rostock: University of Rostock.

Jefa, R., 2024. *Jefa GRP rudder blades*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://jefa.dk/products/rudder-blades/>  
[Πρόσβαση 10 Ιανουαρίου 2024].



Jialun, H. & Robert, L., 2017. Sixty years of research on ship rudders: effects of design choices on rudderperformance. *Taylor&Francis*, pp. 495-512.

Kostas, K. και συν., 2020. Parametric model for the reconstruction and representation of hydrofoils. *Ocean Engineering*, Τόμος 199.

Kostas, K. V., Ginnis, A. I., Politis, C. G. & Kaklis, P., 2015. Ship-Hull Shape Optimization with a T- spline based BEM - Isogeometric Solver. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 284, pp. 611-622.

Liu J, Q. F. H. R., 2015. *Impacts of rudder profiles on shipmanoeuvrability*, Newcastle upon Tyne, UK: International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability (MARSIM '15).

Mackey & Bingham, V. P., 1987. High Performance Rudders with Particular Reference to the Schilling Rudder. Στο: *Marine Technology*. s.l.:Mar Technol SNAME , pp. 312-320.

McNeel, R. & others, 2010. Rhinoceros 3D, Version 6.0. *Robert McNeel & Associates, Seattle, WA*.

Molland, S. & Turnock, A., 2007. *Marine Rudder and Control Surfaces*. Southampton: Elsevier Science.

NACA 4 airfoil generator, (., 2023. *PlusPlastic*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://blog.naver.com/plusplastic/221848442739> [Πρόσβαση 08 Νοεμβρίου 2023].

NACAairfoil, 2024. *Wikipedia*. [Ηλεκτρονικό] Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/NACA\\_airfoil](https://en.wikipedia.org/wiki/NACA_airfoil) [Πρόσβαση 09 Φεβρουαρίου 2024].

Nguyen, I. & Van, Y. T., 2014. *Development of Fishtail Rudder Sections with Higher Maximum Lift Coefficients*. Busan, Korea, ResearchGate.

Nguyen, T. V. & Ikeda, Y., 2014. A Study on High Lift Rudders with Wedge Tail and End Plates. *ResearchGate*.

Nguyen, T. V. & Ikeda, Y., 2014. A Study on High Lift Rudders with Wedge Tail and End Plates. *Researchgate*.

Nguyen & Yoshiho, T. V. I., 2014. *Development of Fishtail Rudder Sections with Higher Maximum Lift Coefficients*. Busan, Korea, International Society of Offshore and Polar Engineers.

Optimization, G., 2021. *TU Delft*. [Ηλεκτρονικό] Available at: [http://wiki.bk.tudelft.nl/toi-pedia/Galapagos\\_Optimization](http://wiki.bk.tudelft.nl/toi-pedia/Galapagos_Optimization) [Πρόσβαση 08 Ιανουάριος 2024].

Papanikolaou, A., Harries, S., Wilken, M. & Zaraphonitis, G., 2011. *Integrated design and multiobjective optimization approach*. Trieste, Italy, 15th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding.

Parametric design, 2020. In *Wikipedia*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Parametric\\_design](https://en.wikipedia.org/wiki/Parametric_design)  
[Πρόσβαση 2023 Δεκεμβρίου 15].

Pérez-Arribas, F., 2014. Parametric generation of planing hulls. *OceanEngineering*, pp. 89-104.

Radice, E., 2024. *Rudders*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.elicheradice.com/product-line/rudders/>  
[Πρόσβαση 08 Ιανουαρίου 2024].

Schillingrudder, 2023. *Wikipedia*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Schilling\\_rudder](https://en.wikipedia.org/wiki/Schilling_rudder)  
[Πρόσβαση 08 Ιανουαρίου 2024].

Schllingshape, 2012. *Wikipedia*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Schllingshape.gif>  
[Πρόσβαση 03 Ιανουαρίου 2024].

Tedeschi, A., 2014. *AAD\_Algorithms-Aided Design*. 1st επιμ. Italy: Le Penseur Publisher.

Teguh Putranto, A. S., 2017. Lift-drag coefficient and form factor analyses of hydrofoil due to the shape and angle of attack. *International Journal of Applied Engineering Research*, Ιανουάριος, pp. 11152-11156 .

Veritas Det Norske, 2023. *DNV*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://rules.dnv.com/servicedocuments/dnvpdm/>  
[Πρόσβαση 15 Μάρτιος 2024].

Wang, H., Zheng, L. & Chen, S., 2022. Marine Propeller Optimization Based on a Novel Parametric Model. *Hindawi*, 30 Μάρτιος.

Wang, W., Fan, Q. & Zhao, G., 2018. New Algorithm for Local Shape Preservation T-Spline Surface Skinning. *Journal of Computer and Communications*, 6(12), pp. 80-90.

Δαγκίνη, Κ. Ι. & Γλύκα, Ι., 2015. *Βοηθήματα Μηχανήματα Πλοίων*. 1η επιμ. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.

Κώστας, Κ., 2014. *3D σχεδίαση & υπολογισμοί με το Rhino 3D*. Αθήνα: DaVinci.

Τριανταφύλλου, Γ. Σ., 2022. *Εισαγωγή στη θαλάσσια υδροδυναμική*. 1η επιμ. Αθήνα: Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

Χατζικωνσταντής, Γ. Κ., 2015. *Πηδαλιουχία, Πηδάλια*. Αθήνα: -.

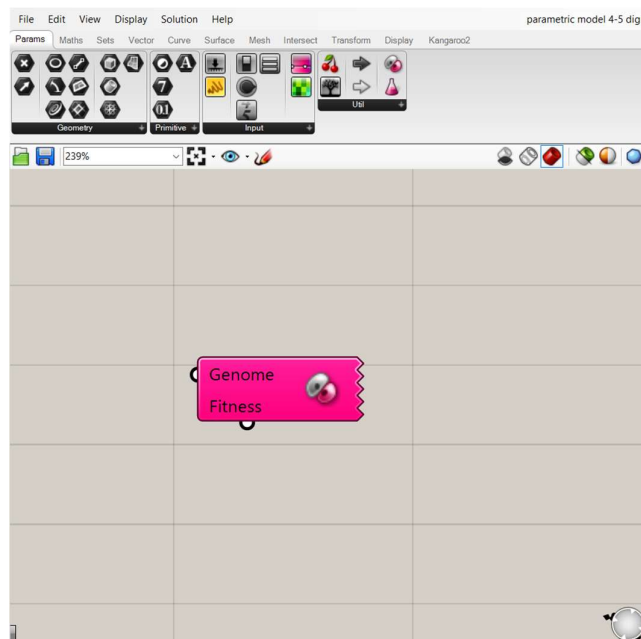
## Παράρτημα Α

### Grasshopper/Galapagos

Το πρόγραμμα Grasshopper αποτελεί πρόγραμμα οπτικού σχεδιασμού ενσωματωμένο στο Rhinoceros. Χρησιμοποιείται για την παραμετρική σχεδίαση απλών και πολύπλοκων γεωμετριών και λειτουργεί παράλληλα με το σχεδιαστικό περιβάλλον του Rhinoceros. Μέσω παραμέτρων και αλγορίθμων ο χρήστης έχει την ικανότητα να ορίσει μία διαφορετική γεωμετρία κάθε φορά, ευνοώντας το δυναμικό σχεδιασμό. Αποτελεί μια οπτική γλώσσα προγραμματισμού μέσω της οποίας, συνδέοντας κατάλληλα γραφικά αντικείμενα, μπορεί ο χρήστης να κατασκευάσει ένα παραμετρικό μοντέλο. Επιπλέον, το Grasshopper δίνει την δυνατότητα στο σχεδιαστή να χρησιμοποιήσει, μεταξύ άλλων, και γλώσσα προγραμματισμού Python για σύνθετους υπολογισμούς και αλγορίθμους.

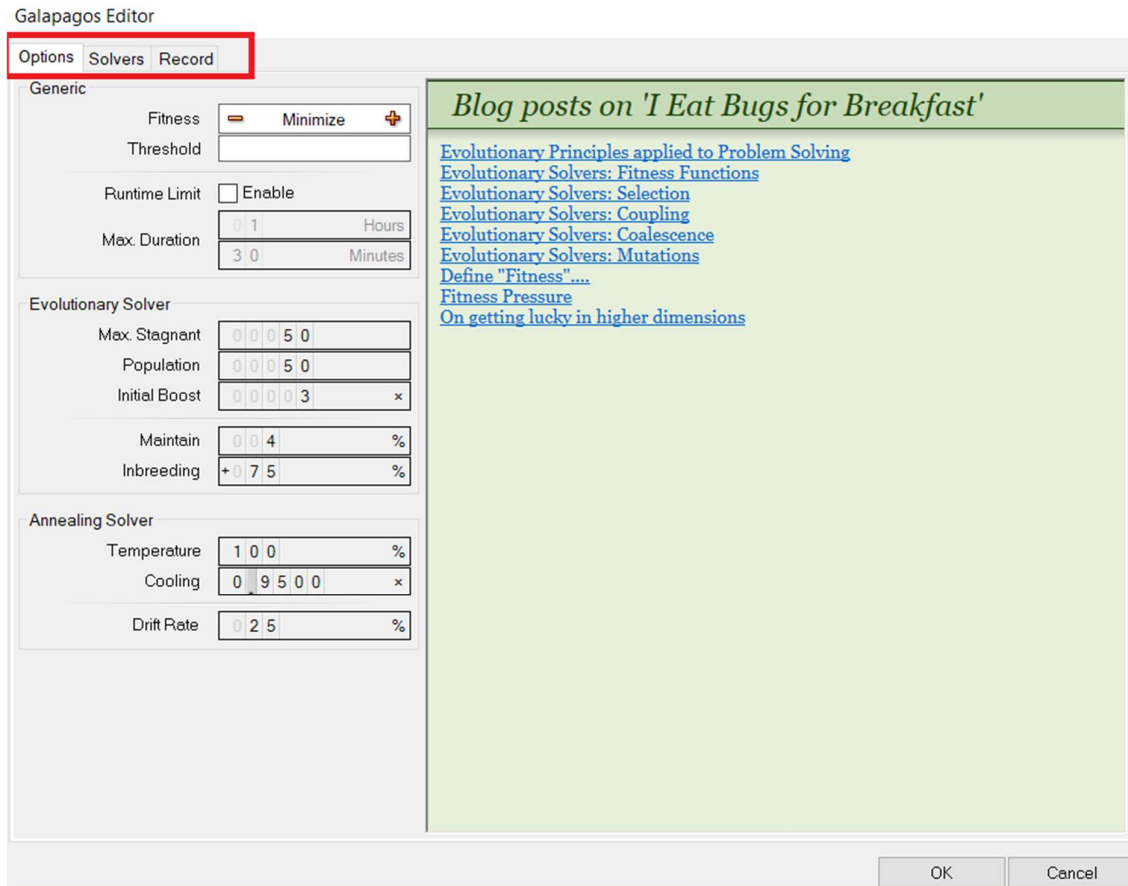
Το Galapagos αποτελεί ένα εργαλείο βελτιστοποίησης του Grasshopper και βασίζεται σε γενετικούς αλγόριθμους και αλγορίθμους ανόπτησης. Επιτρέπει στους σχεδιαστές να βελτιστοποιούν και να εξελίσσουν λύσεις για σύνθετα προβλήματα. Κύριος στόχος του Galapagos είναι αναζητά συνδυασμούς των παραμέτρων, που έχουν οριστεί για την σχεδίαση. Μέσω επαναλήψεων, βελτιώνει το σχεδιασμό επιλέγοντας και συνδυάζοντας τις πιο επιτυχημένες λύσεις με βάση κάποια συνάρτηση ικανότητας (fitness function). Έτσι, αξιολογεί την καταλληλότητα τους με βάση προκαθορισμένους στόχους. Αυτό το καινοτόμο εργαλείο βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές μηχανικών για την εξερεύνηση καινοτόμων και αποτελεσματικών λύσεων οι οποίες ικανοποιούν συγκεκριμένα κριτήρια ή περιορισμούς.

Πιο αναλυτικά παρακάτω απεικονίζεται το γραφικό περιβάλλον του Grasshopper στο οποίο απεικονίζεται το Galapagos.



Εικόνα 88: Στοιχείο Galapagos

Οι παράμετροι εισάγονται στην παραγωγή γωνιδιωμάτων. Στην συνάρτηση ικανότητας (fitness function) αξιολογείται η ποιότητα των λύσεων. Στο genome συνδέονται οι παράμετροι που πρέπει να πάρουν μία κατάλληλη τιμή για την αναπαράσταση της επιθυμητής γεωμετρίας. Έτσι, πρέπει ο χρήστης να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός στην επιλογή των παραμέτρων καθώς αυτές θα επηρεάσουν την τιμή της συνάρτησης ικανότητας.



Εικόνα 89: Γραφικό περιβάλλον Galapagos

Το γραφικό περιβάλλον αποτελείται από τρεις καρτέλες όπως φαίνεται στην Εικόνα 89 (options, solvers, record). Ο χρήστης αρχικά ανοίγει την πρώτη καρτέλα που έχει τις επιλογές που φαίνονται στην εικόνα. Μέσω αυτής της καρτέλας μπορεί να ελέγξει τις αρχικές ρυθμίσεις πριν την εκκίνηση του επιλυτή.

Στην παρακάτω εικόνα ο χρήστης μπορεί να ελέγξει την συνάρτηση ικανότητας αν επιθυμεί να ελαχιστοποιήσει ή να μεγιστοποιήσει την τιμή. Εάν ο αλγόριθμος βρει μια λύση για το κατώφλι θα σταματήσει. Επιπρόσθετα, μπορεί να ορίσει ένα ανώτατο χρονικό όριο που θα σταματήσει ο αλγόριθμος να παράγει λύσεις.

Generic	
Fitness	<input type="checkbox"/> Minimize <input type="checkbox"/>
Threshold	<input type="text"/>
Runtime Limit	<input type="checkbox"/> Enable
Max. Duration	<input type="text" value="01"/> Hours
	<input type="text" value="30"/> Minutes

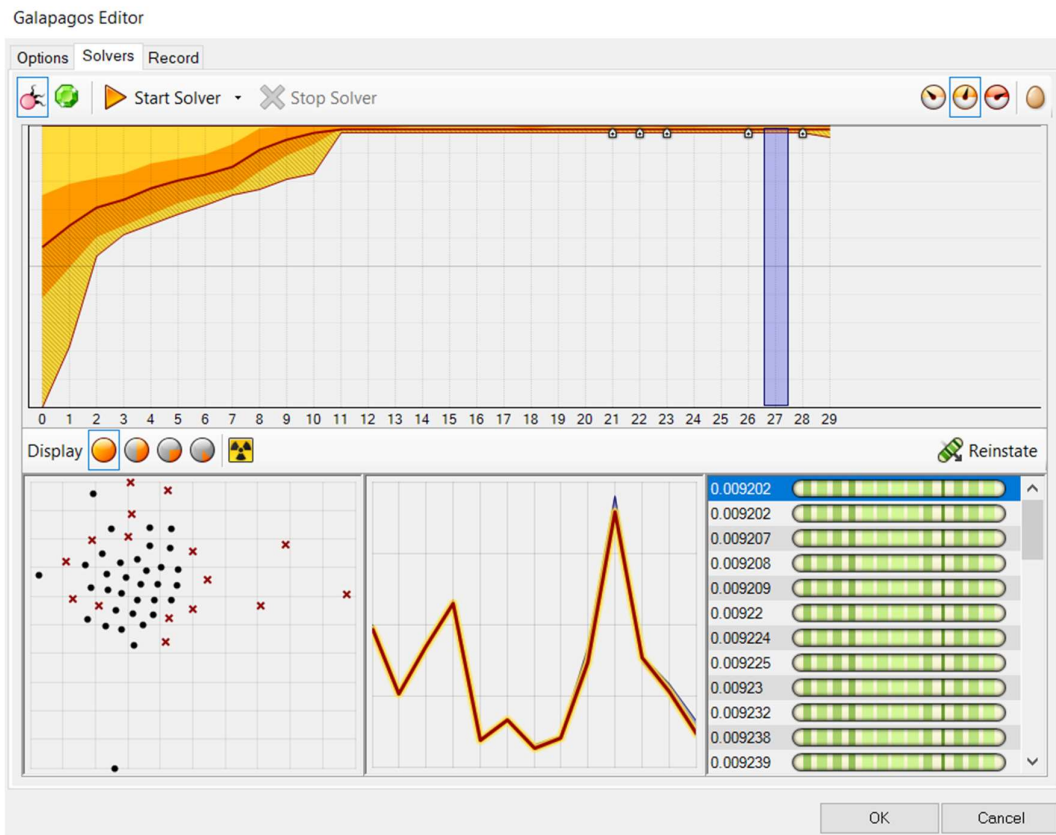
Εικόνα 90: Γενικές μεταβλητές Galapagos

Το Galapagos διαθέτει δύο τύπους αλγορίθμων βελτιστοποίησης, τον εξελικτικό και τον ανόπτησης. Ο εξελικτικός επιλυτής αναζητά ένα καλό αποτέλεσμα και στην συνέχεια αλλάζοντας τις παραμέτρους προσεγγίζει αυτό το αποτέλεσμα. Εάν είχαμε πολλούς βαθμούς ελευθερίας τότε για να μην υπάρχουν λανθασμένα αποτελέσματα επιλέγεται ο αλγόριθμος ανόπτησης. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα μπορεί ο χρήστης να αλλάξει κάποια βασικά χαρακτηριστικά των δύο αλγορίθμων.

Evolutionary Solver	
Max. Stagnant	<input type="text" value="00050"/>
Population	<input type="text" value="00050"/>
Initial Boost	<input type="text" value="00003"/> ×
Maintain	<input type="text" value="004"/> %
Inbreeding	<input type="text" value="+075"/> %
Annealing Solver	
Temperature	<input type="text" value="100"/> %
Cooling	<input type="text" value="09500"/> ×
Drift Rate	<input type="text" value="025"/> %

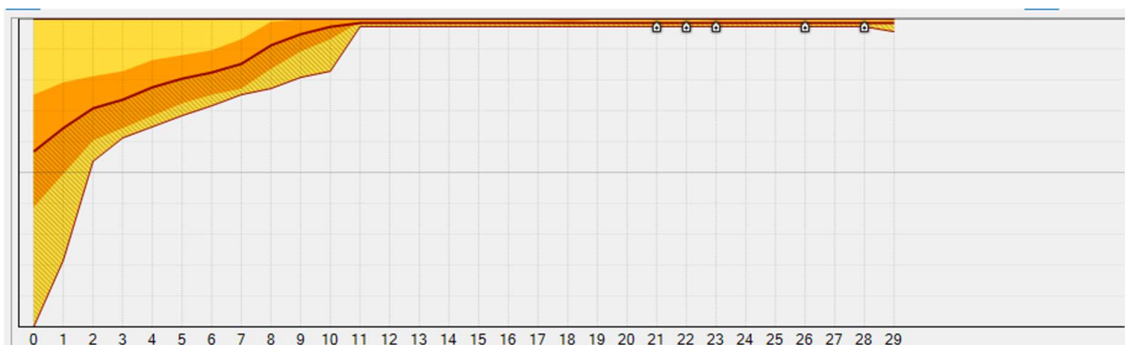
Εικόνα 91: Μεταβλητές δύο αλγορίθμων

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η επόμενη καρτέλα του Galapagos για τον εξελικτικό τύπο επίλυσης.



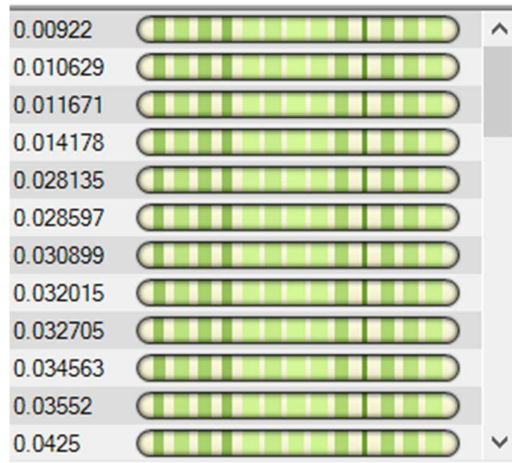
Εικόνα 92: Γραφικό περιβάλλον αποτελεσμάτων Galapagos

Μέσω αυτής της καρτέλας στην Εικόνα 92 μπορεί να εκκινήσει τον επιλυτή που εμφανίζει τα αποτελέσματα των συνδυασμών των διαφόρων παραμέτρων.



Εικόνα 93: Σύγκλιση αποτελεσμάτων αλγορίθμου για την εύρεση βέλτιστης λύσης

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζονται οι προσπάθειες που έχει κάνει ο αλγόριθμος για να προσεγγίσει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα ο αλγόριθμος συγκλίνει ψάχνοντας το βέλτιστο αποτέλεσμα. Τα σημάδια που εμφανίζονται είναι οι βέλτιστες τιμές κάθε φορά που έχει βρει ο αλγόριθμος. Οι τιμές αυτές εμφανίζονται στην παρακάτω εικόνα.



*Εικόνα 94: Βέλτιστες τιμές Galapagos*

Μόλις ξεκινήσει το Galapagos να επιλύει το πρόβλημα ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες που έχουν δοθεί, το πρόγραμμα μέσω των μεταβλητών (population, initial boost) αναλύει 50 προσπάθειες στο πρώτο βήμα. Η πρώτη τιμή στην παραπάνω εικόνα είναι η βέλτιστη μέχρι εκείνη την στιγμή που έχει βρει ο επιλυτής. Έπειτα μέσω των επαναλήψεων η τιμή αυτή μικραίνει μέχρι ο χρήστης να έχει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ο αλγόριθμος κρατά κάποιες βέλτιστες τιμές που θα τις συγκρίνει με την επόμενη προσπάθεια μέχρι να βρει το βέλτιστο αποτέλεσμα.

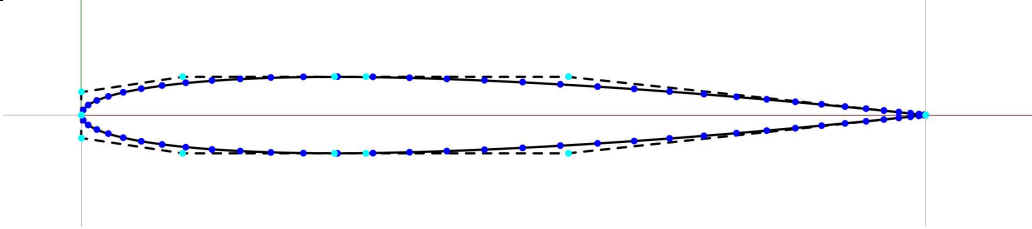
Στην τελευταία καρτέλα ο χρήστης έχει την δυνατότητα να αποθηκεύσει όλες τις επαναλήψεις που έχει κάνει το Galapagos.

## Παράρτημα Β

### Αξιολόγηση Υδροτομών NACA

Πίνακας 17: Παράμετροι για NACA0009

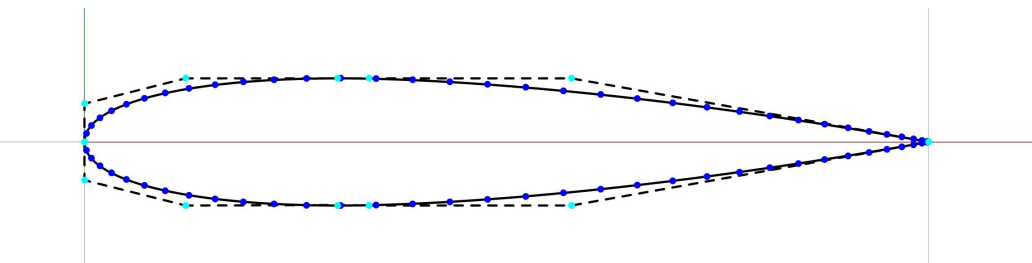
Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
Upper-side max width( $u_{max}$ )	0.045000
Upper-side scale factor ( $tip_u$ )	0.626150
Upper-side max width ( $x_{u,max}$ )	0.300000
Upper-side ( $s_u$ )	0.749250
Length( $L$ )	1.0000 $m$
Upper side angle ( $a_{b,u}$ )	0.571840 $rad$



Εικόνα 95: NACA0009

Πίνακας 18: Παράμετροι για NACA0015

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
Upper-side max width( $u_{max}$ )	0.075000
Upper-side scale factor ( $tip_u$ )	0.626150
Upper-side max width ( $x_{u,max}$ )	0.300000
Upper-side ( $s_u$ )	0.749250
Length( $L$ )	1.0000 $m$
Upper side angle ( $a_{b,u}$ )	0.571840 $rad$

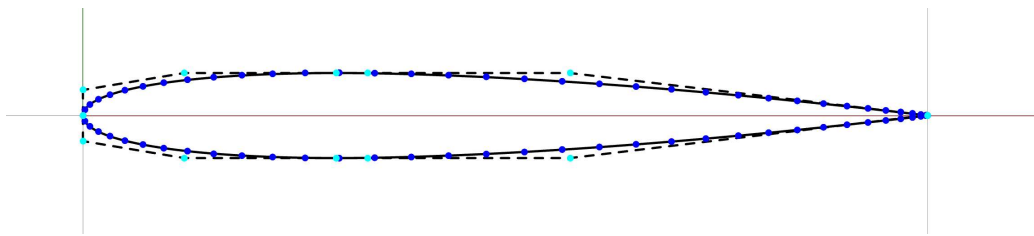


Εικόνα 96: NACA0015



Πίνακας 19: Παράμετροι για NACA0012

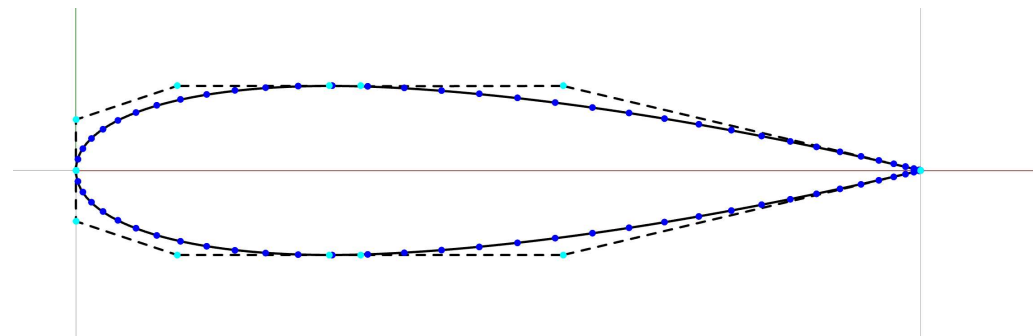
Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
Upper-side max width ( $u_{max}$ )	0.060000
Upper-side scale factor ( $tip_u$ )	0.626150
Upper-side max width ( $x_{u,max}$ )	0.300000
Upper-side ( $s_u$ )	0.749250
Length( $L$ )	1.0000 m
Upper side angle ( $a_{b,u}$ )	0.571840rad



Εικόνα 97:NACA0012

Πίνακας 20: Παράμετροι για NACA0020

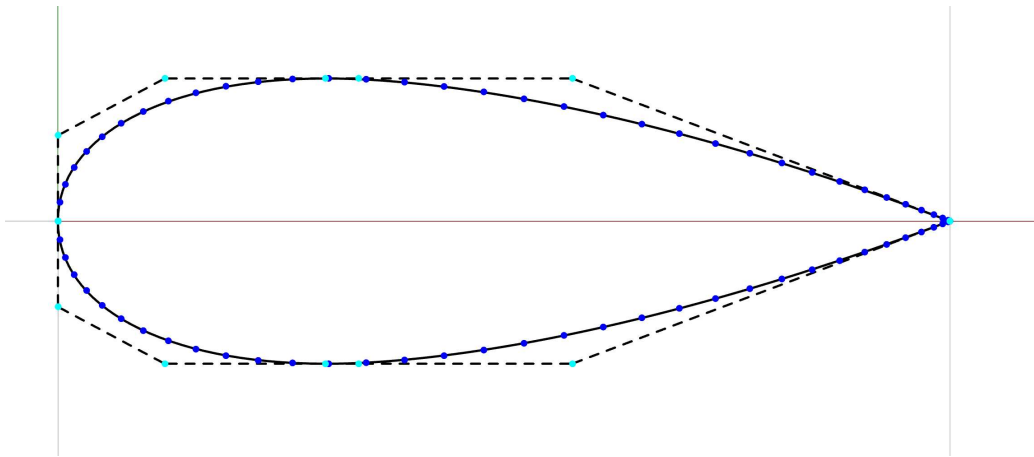
Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
Upper-side max width ( $u_{max}$ )	0.100000
Upper-side scale factor ( $tip_u$ )	0.626150
Upper-side max width ( $x_{u,max}$ )	0.300000
Upper-side ( $s_u$ )	0.749250
Length( $L$ )	1.0000 m
Upper side angle ( $a_{b,u}$ )	0.571840rad



Εικόνα 98:NACA0020

Πίνακας 21: Παράμετροι για NACA0032

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
Upper-side max width( $u_{max}$ )	0.160000
Upper-side scale factor ( $tip_u$ )	0.626150
Upper-side max width ( $x_{u,max}$ )	0.300000
Upper-side ( $s_u$ )	0.749250
Length( $L$ )	1.0000 m
Upper side angle ( $a_{b,u}$ )	0.571840rad



Εικόνα 99:NACA0032

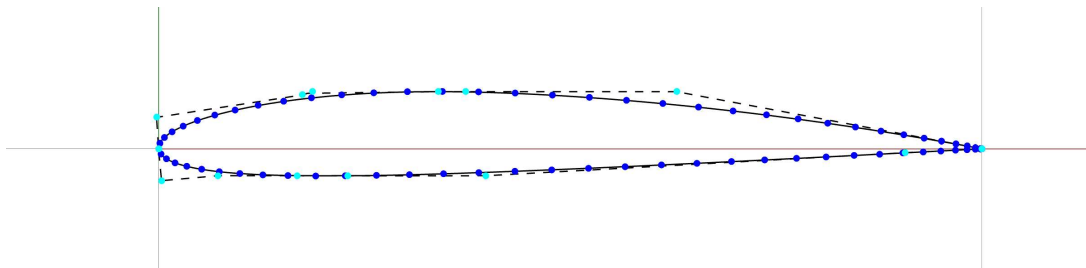
Πίνακας 22: Παραμετρικές τιμές NACA2410

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
Upper-side max width( $u_{max}$ )	0.339160
Upper-side scale factor ( $tip_u$ )	0.563380
Upper-side long. max width ( $x_{u,max}$ )	0.399750
Upper-side ( $s_u$ )	0.000000
Upper-side angle( $a_{b,u}$ )	0.117340 rad
Tangent angle at leading edge ( $a$ )	0.591000 rad
Lower-side max width( $l_{max}$ )	0.154150
Lower-side scale factor( $tip_{l1}$ )	0.708650

Lower-side scale factor( $tip_{l2}$ )	0.184380
Lower-side long. max width( $x_{l,max}$ )	0.216440
Lower-side( $s_{l1}$ )	0.920820
Lower-side( $s_{l2}$ )	0.186210
Lower-side angle ( $a_{b,l}$ )	0.363860 <i>rad</i>
Length( $L$ )	1.000000 <i>m</i>
Scale factor of tangent angle ( $a_1$ )	2.553680
Percentage of long. max width upper side ( $tip_{x,u}$ )	0.513920
Percentage of max width lower side ( $tip_{x,l}$ )	0.732480
Percentage of max width for upper side ( $tip_{u,u}$ )	0.943260

Πίνακας 23: Τιμές Βαρών καμπυλών για την NACA 2410

Βάρη	Τιμές Βαρών
1 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	0.905
$W_3$	0.753
$W_4$	0.500
$W_5$	1.000
2 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	1.000
$W_3$	1.000
$W_4$	1.000
3 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	0.950
$W_3$	1.357
$W_4$	1.000
4 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	0.500
$W_3$	0.388
$W_4$	0.384
$W_5$	1.000



Εικόνα 100:NACA2410

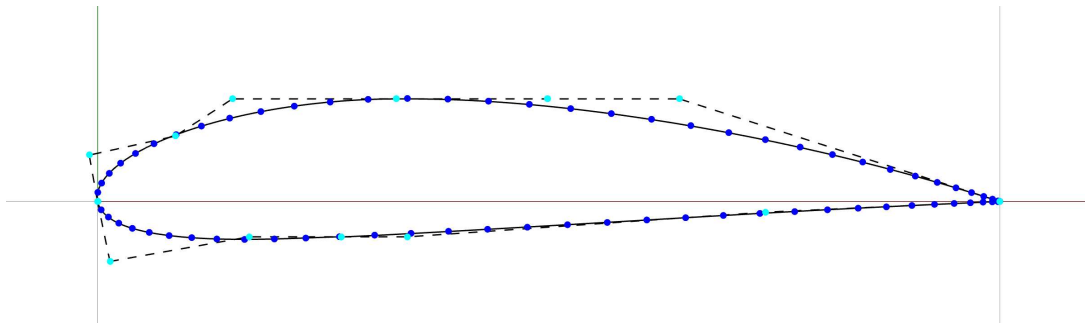
Πίνακας 24: Παραμετρικές τιμές NACA4415

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
Upper-side max width ( $u_{max}$ )	0.562820
Upper-side scale factor ( $tip_u$ )	0.439510
Upper-side long. max width ( $x_{u,max}$ )	0.385290
Upper-side ( $s_u$ )	0.222850
Upper-side angle ( $a_{b,u}$ )	0.196850 rad

Tangent angle at leading edge ( $a$ )	0.754100 <i>rad</i>
Lower-side max width( $l_{max}$ )	0.187760
Lower-side scale factor( $tip_{l1}$ )	0.364980
Lower-side scale factor( $tip_{l2}$ )	0.325060
Lower-side long. max width( $x_{l,max}$ )	0.283700
Lower-side( $s_{l1}$ )	0.660160
Lower-side( $s_{l2}$ )	0.056080
Lower-side angle ( $a_{b,l}$ )	0.426070 <i>rad</i>
Length( $L$ )	1.000000 <i>m</i>
Scale factor of tangent angle ( $a_1$ )	5.177640
Percentage of long. max width upper side ( $tip_{x,u}$ )	0.259890
Percentage of max width lower side ( $tip_{x,l}$ )	1.000000
Percentage of max width for upper side ( $tip_{u,u}$ )	0.637050

Πίνακας 25: Τιμές Βαρών καμπυλών για την NACA 4415

Βάρη	Τιμές Βαρών
1 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	0.831
$W_3$	1.071
$W_4$	0.852
$W_5$	1.000
2 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	0.500
$W_3$	0.534
$W_4$	1.000
3 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	2.000
$W_3$	0.552
$W_4$	1.000
4 <sup>η</sup> καμπύλη	-
$W_1$	1.000
$W_2$	1.719
$W_3$	0.995
$W_4$	0.806
$W_5$	1.000



Εικόνα 101:NACA4415