

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

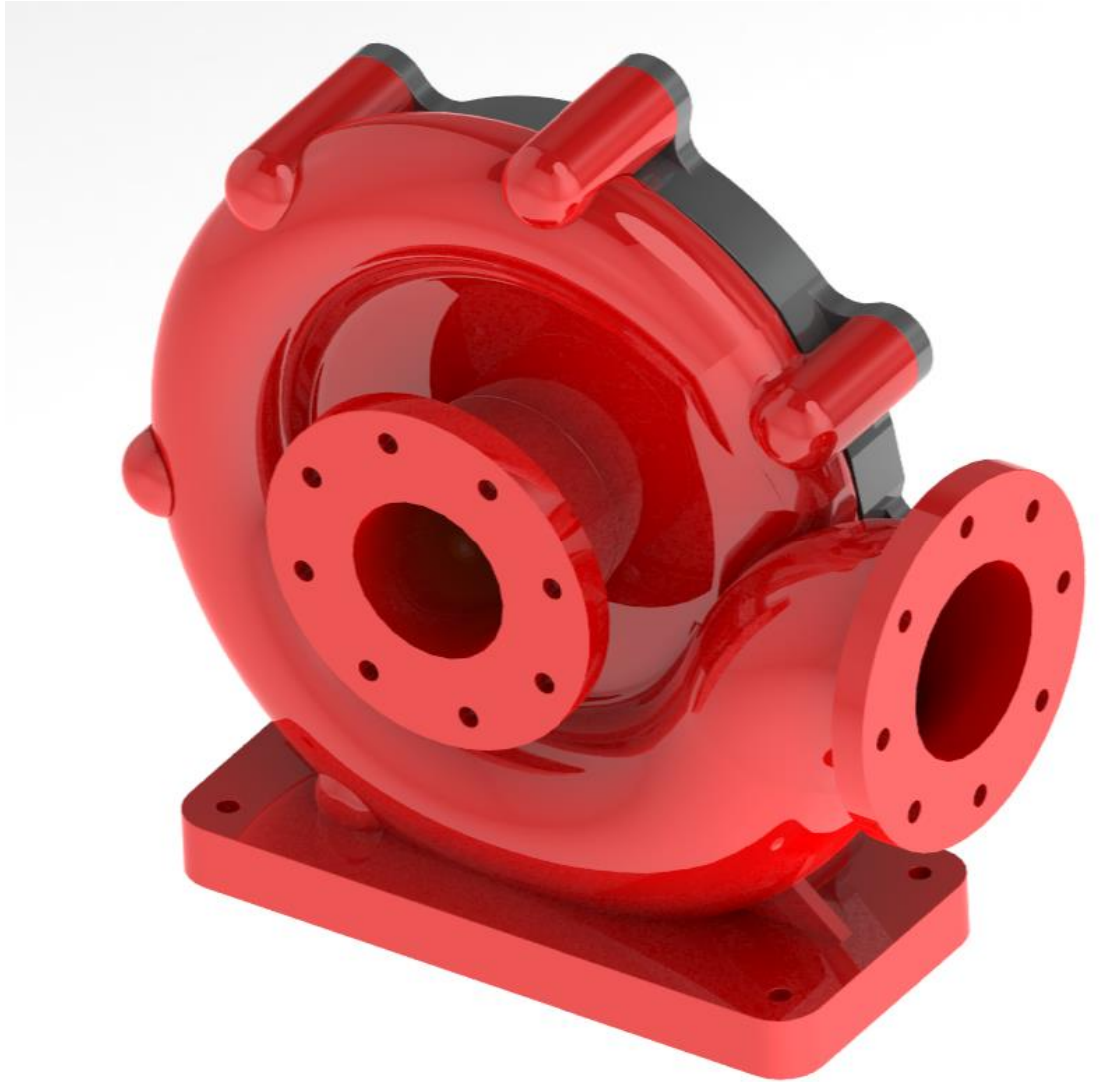
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός, Υπολογιστική Ανάλυση και
Δοκιμαστικός Έλεγχος Συσκευής Κοιλιακής
Υποβοήθησης

Μουσμύλης Γεώργιος ΑΕΜ:938
Πεϊτζίκας Νικόλαος ΑΕΜ:951

Επιβλέπων : Καθηγητής Τουρλιδάκης Αντώνιος

Κοζάνη, Μάρτιος 2013



«Μια φορά υπάρχουμε, δεν υπάρχει τρόπος να υπάρξουμε δυο φορές και μάλλον δεν θα υπάρξουμε ξανά ποτέ. Κι εσύ που δεν εξουσιάζεις το αύριο, αναβάλλεις τη χαρά. Και η ζωή πάει χαμένη με τις αναβολές και ο καθένας πεθαίνει απασχολημένος»

«Δεν είναι τόσο η βοήθεια των φίλων που μας βοηθά, όσο η εμπιστοσύνη που έχουμε στη βοήθειά τους»

«Από όλα αυτά, με τα οποία η σοφία συντελεί στην ευτυχία όλης της ζωής πολύ πιο σημαντικό είναι η απόκτηση της φιλίας»

Επίκουρος

I. Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο 'Σχεδιασμός, Υπολογιστική Ανάλυση και Δοκιμαστικός Έλεγχος Συσκευής Κοιλιακής Υποβοήθησης' εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 από τους Μουσμούλη Γεώργιο και Πείτζικα Νικόλαο.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Βαφειάδη Κυριάκο, υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, για την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη που μας παρείχε σε κάθε είδους δυσκολία που αντιμετωπίσαμε αυτούς του έξι μήνες. Ακόμη ευχαριστούμε θερμά όλους τους φίλους και συμφοιτητές οι οποίοι βοήθησαν στην καταγραφή των δεδομένων κατά τη λειτουργία της πειραματικής διάταξης. Επίσης δε θα μπορούσαμε να ξεχάσουμε την συνεχή υποστήριξη και εμπιστοσύνη των οικογενειών μας, χωρίς αυτή τίποτα δε θα ήταν ίδιο.

Κλείνοντας ευχαριστούμε θερμά τον καθηγητή κ. Τουρλιδάκη για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε και την καθοδήγηση που μας παρείχε μέχρι το πέρας της εργασίας, καθώς χάρη σε αυτή γνωρίσαμε βαθύτερα το κομμάτι των στροβιλομηχανών, της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και του βιομηχανικού σχεδιασμού.

Μουσμούλης Γεώργιος

Πείτζικας Νικόλαος

II. Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την υδροδυναμική βελτιστοποίηση και τη σχεδίαση μιας φυγοκεντρικής αντλίας η οποία χρησιμοποιείται σε σύστημα υποβοήθησης της αριστερής κοιλίας της καρδιάς. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στη γενικότερη λειτουργία της καρδιάς καθώς και στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που οφείλει να έχει μια αντλία σχεδιασμένη για τέτοια χρήση. Τέλος ξεκαθαρίζονται οι στόχοι της εργασίας και οι μέθοδοι με τις οποίες επετεύχθησαν.

Ακολούθως γίνεται εκτενής αναφορά στις μαθηματικές σχέσεις οι οποίες διέπουν τη φυσική των στροβιλομηχανών και χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του κώδικα στη Matlab, ο οποίος υπολογίζει τη βασική γεωμετρία της πτερωτής. Ακόμη παρουσιάζεται η μαθηματική ανάλυση της ροής, μέσω της οποίας μοντελοποιήθηκε στο CFX του ANSYS. Τα μαθηματικά ολοκληρώνονται με τις σχέσεις που μοντελοποιούν την καταστροφή των ερυθρών αιμοσφαιρίων μέσα στην αντλία.

Στο κεφάλαιο της υδροδυναμικής βελτιστοποίησης περιγράφεται η λειτουργία του κώδικα που σε συνδυασμό με το σχεδιαστικό πρόγραμμα του Blade Gen δίνουν μια πρώτη εικόνα για τη γεωμετρία της πτερωτής. Έπεται η επιλογή της πρώτης γεωμετρίας η οποία βελτιστοποιείται σε τέσσερα στάδια. Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η σχεδίαση της πτερωτής, ακολουθεί αυτή του κελύφους, η οποία βελτιστοποιείται σε δύο στάδια. Η βελτιστοποίηση γίνεται μέσω του CFX του ANSYS όπου ανάλογα με τα αποτελέσματα της ροής προτείνονται βελτιώσεις και για την πτερωτή και για το κέλυφος. Έχοντας λοιπόν την τελική γεωμετρία της αντλίας γίνεται η μελέτη της καταστροφής των ερυθρών αιμοσφαιρίων και το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των χαρακτηριστικών καμπυλών της αντλίας.

Ακολουθεί το κεφάλαιο της βιομηχανικής σχεδίασης στο οποίο σχεδιάζονται ξεχωριστά η πτερωτή, το κέλυφος, το καπάκι, ο άξονας και τα υπόλοιπα εξαρτήματα χρησιμοποιώντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα του Solid Works. Η πτερωτή, το κέλυφος και το καπάκι κατασκευάζονται σε τρισδιάστατη μηχανή εκτύπωσης (rapid prototyping), ενώ τα υπόλοιπα εξαρτήματα υφίστανται μηχανουργική κατεργασία πριν πάρουν την τελική τους μορφή.

Η εργασία κλείνει δημιουργώντας την πειραματική διάταξη και κάνοντας ο πείραμα με στόχο την καταγραφή των χαρακτηριστικών της αντλίας. Αφού συγκριθούν τα πειραματικά αποτελέσματα με τα υπολογιστικά βγαίνουν τα κατάλληλα συμπεράσματα και προτείνονται μελλοντικές επεμβάσεις σε άλλους ερευνητές.

III. Abstract

This thesis discusses the hydrodynamic optimization and design of a centrifugal pump which is used to assist the left ventricle of the human heart. The first chapter is an introduction to the overall function of the heart and the special characteristics that a pump should have for such a use. In the end the objectives of the thesis are clarified.

In the second chapter a detailed report is written for the mathematical relations that govern the physics of turbomachinery and are used to generate a Matlab code, that calculate the basic geometry of the impeller of the pump. Subsequently the mathematical analysis of the flow through the pump is presented, which is modeled with the CFX commercial solver of ANSYS. The modeling of the destruction of red blood cells in the pump completes this chapter.

The chapter of the 'hydrodynamic optimization' describes the operation of the Matlab code in combination with the design program of Blade Gen. Both of these give a first insight into the geometry of the impeller. Also the first geometry of the impeller is optimized in four stages. Once the design of the impeller is completed, it is followed by the design of the volute, which is optimized in two stages. The optimization is done through the ANSYS CFX, where the optimized results are applied and the improvement of the impeller and the volute are proposed. In the end the study of the destruction of the red blood cells is shown and the characteristic curves of the pump are presented.

The fourth chapter proposes the industrial design of the centrifugal pump. The impeller, the volute, the cap, the shaft and the other components used, are designed separately in the design program Solid Works. The Impeller, the volute and the cap are printed in a three dimensional printer (with aid rapid prototyping), while the remaining parts are worked in lathe before their final form.

The thesis ends with the creation of an experimental setup and operation in order to validate the simulated characteristics of the pump. After comparing the experimental results with the computational results, the appropriate conclusions are quoted and recommendations to other researchers are proposed.

IV. Πίνακας Συμβόλων

ΔH	ύψος πίεσης [m]
$\Delta H_b/H_b$	καταστροφή ερυθρών αιμοσφαιρίων [%]
Δt	χρονικό διάστημα [sec]
ε	ρυθμός διάχυσης δινών τύρβης [J/(kg·sec)]
μ	δυναμικό ιξώδες [kg/(m·sec)]
μ_t	τυρβώδες ιξώδες [kg/(m·sec)]
ν	κινηματικό ιξώδες [m ² /sec]
ρ	πυκνότητα [kg/m ³]
σ_{ii}	ορθή τάση στον άξονα ii [Pa]
τ	διατμητική τάση [Pa]
τ_e	χρόνος ζωής της δίνης [sec]
Φ	αριθμός ροής Φ
Ψ	αριθμός μανομετρικού ύψους Ψ
ω	γωνιακή ταχύτητα [rad/sec]
b	ύψος πτερυγίου [m]
B	γωνία πτερυγίου [deg]
c	απόλυτη ταχύτητα – ταχύτητα ρευστού [m/sec]
c_r	απόλυτη ταχύτητα στην ακτινική διεύθυνση [m/sec]
c_θ	απόλυτη ταχύτητα στην εφαπτομενική διεύθυνση [m/sec]
D	διάμετρος [m]
F_{all}	συνολική δύναμη [Newton]
F_b	δύναμη αδράνειας [N]
F_D	δύναμη αντίστασης [N]
F_p	δύναμη πίεσης [N]
F_R	δύναμη λόγω περιστροφής [N]
F_{VM}	εικονική δύναμη μάζας [N]

g	επιτάχυνση της βαρύτητας [m/sec ²]
h_s	ειδικό ύψος πίεσης
k	τυρβώδεις κινητική ενέργεια [J/kg]
l_e	χαρακτηριστικό μήκος δίνης [m]
\dot{m}	παροχή μάζας [kg/sec]
n	συχνότητα περιστροφής [rpm]
n'	συχνότητα περιστροφής [rps]
n_q	ειδικός αριθμός στροφών
NIH	ποσότητα αιμόλυσης [g/(100 L αίματος)]
p	πίεση [Pa]
Q	ογκομετρική παροχή [m ³ /sec]
q_s	αριθμός Ειδικής Παροχής
r	ακτίνα [m]
Re	αριθμός Reynolds
SSS	βαθμωτό μέτρο διάτμησης [Pa]
sf	συντελεστής απόκλισης
u	ταχύτητα δρομέα – περιστροφής [m/sec]
U	τρισδιάστατο διάνυσμα της ταχύτητας [m/sec]
w	σχετική ταχύτητα [m/sec]

V. Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1.....	21
Σχήμα 1.5.1.α.....	30
Σχήμα 1.5.1.β.....	30
Σχήμα 1.5.2.α.....	32
Σχήμα 1.5.4.α.....	33
Σχήμα 1.5.4.β.....	34
Σχήμα 1.6.....	35
Σχήμα 2.2.α.....	37
Σχήμα 2.2.β.....	37
Σχήμα 2.3.....	40
Σχήμα 2.6.α.....	43
Σχήμα 2.6.β.....	44
Σχήμα 3.1.α.....	57
Σχήμα 3.1.2.α.....	59
Σχήμα 3.1.2.β.....	59
Σχήμα 3.1.2.γ.....	60
Σχήμα 3.1.2.δ.....	60
Σχήμα 3.1.2.ε.....	61
Σχήμα 3.1.2.στ.....	61
Σχήμα 3.1.3.α.....	62
Σχήμα 3.2.1.α.....	64
Σχήμα 3.2.1.β.....	64
Σχήμα 3.2.γ.....	65
Σχήμα 3.2.1.δ.....	65
Σχήμα 3.2.1.ε.....	66
Σχήμα 3.2.2.α.....	67
Σχήμα 3.2.2.β.....	67
Σχήμα 3.2.2.γ.....	68
Σχήμα 3.2.2.δ.....	69
Σχήμα 3.2.2.ε.....	69
Σχήμα 3.2.2.στ.....	70
Σχήμα 3.2.3.α.....	71
Σχήμα 3.2.3.β.....	71
Σχήμα 3.2.3.γ.....	72
Σχήμα 3.2.3.δ.....	72
Σχήμα 3.2.3.ε.....	73
Σχήμα 3.2.3.στ.....	73
Σχήμα 3.2.3.ζ.....	74
Σχήμα 3.2.4.1.α.....	75
Σχήμα 3.2.4.1.β.....	76
Σχήμα 3.2.4.1.γ.....	76
Σχήμα 3.2.4.1.δ.....	77
Σχήμα 3.2.4.1.ε.....	77
Σχήμα 3.2.4.1.στ.....	78

Σχήμα 3.3.2.1.α.....	80
Σχήμα 3.3.2.1.β.....	81
Σχήμα 3.3.2.1.γ.....	81
Σχήμα 3.3.2.1.δ.....	82
Σχήμα 3.3.2.1.ε.....	82
Σχήμα 3.3.2.1.στ.....	83
Σχήμα 3.4.1.α.....	84
Σχήμα 3.4.1.β.....	85
Σχήμα 3.4.2.α.....	85
Σχήμα 3.4.2.β.....	86
Σχήμα 3.4.2.γ.....	87
Σχήμα 3.4.2.δ.....	87
Σχήμα 3.4.2.ε.....	88
Σχήμα 3.4.2.στ.....	88
Σχήμα 3.4.4.1.α.....	89
Σχήμα 3.4.4.1.β.....	90
Σχήμα 3.4.4.1.γ.....	90
Σχήμα 3.4.4.1.δ.....	91
Σχήμα 3.4.4.1.ε.....	91
Σχήμα 3.4.4.1.στ.....	92
Σχήμα 3.4.4.3.α.....	93
Σχήμα 3.4.4.3.β.....	93
Σχήμα 3.4.4.3.γ.....	94
Σχήμα 3.4.4.3.δ.....	94
Σχήμα 3.5.1.α.....	95
Σχήμα 3.5.2.α.....	96
Σχήμα 3.5.2.β.....	96
Σχήμα 3.5.2.γ.....	97
Σχήμα 3.5.2.δ.....	97
Σχήμα 3.5.2.ε.....	98
Σχήμα 3.5.2.στ.....	98
Σχήμα 3.5.4.1.α.....	99
Σχήμα 3.5.4.1.β.....	100
Σχήμα 3.5.4.1.γ.....	100
Σχήμα 3.5.4.1.δ.....	101
Σχήμα 3.5.4.1.ε.....	101
Σχήμα 3.5.4.1.στ.....	102
Σχήμα 3.5.4.3.α.....	103
Σχήμα 3.5.4.3.β.....	103
Σχήμα 3.5.4.3.γ.....	104
Σχήμα 3.5.4.3.δ.....	104
Σχήμα 3.5.4.3.ε.....	105
Σχήμα 3.6.1.α.....	106
Σχήμα 3.6.1.β.....	106
Σχήμα 3.6.1.γ.....	107
Σχήμα 3.6.2.α.....	108
Σχήμα 3.6.2.β.....	109

Σχήμα 3.6.2.γ.	109
Σχήμα 3.6.2.δ.	110
Σχήμα 3.6.2.ε.	110
Σχήμα 3.6.2.στ.	111
Σχήμα 3.6.3.α.	112
Σχήμα 3.6.3.β.	112
Σχήμα 3.6.4.1.α.	113
Σχήμα 3.6.4.1.β.	114
Σχήμα 3.6.4.1.δ.	114
Σχήμα 3.6.4.2.α.	115
Σχήμα 3.7.1.α.	116
Σχήμα 3.7.2.α.	117
Σχήμα 3.7.2.β.	117
Σχήμα 3.7.2.γ.	118
Σχήμα 3.7.2.α.	119
Σχήμα 3.7.2.β.	119
Σχήμα 3.7.2.γ.	120
Σχήμα 3.7.2.δ.	120
Σχήμα 3.7.2.ε.	121
Σχήμα 3.7.2.στ.	121
Σχήμα 3.7.4.1.α.	122
Σχήμα 3.7.4.1.β.	123
Σχήμα 3.7.4.1.δ.	123
Σχήμα 3.7.4.3.α.	124
Σχήμα 3.7.4.3.β.	125
Σχήμα 3.7.4.3.γ.	126
Σχήμα 3.8.2.α.	127
Σχήμα 3.9.α.	130
Σχήμα 3.9.β.	130
Σχήμα 4.1.α.	131
Σχήμα 4.1.β.	132
Σχήμα 4.1.γ.	132
Σχήμα 4.1.δ.	133
Σχήμα 4.2.α.	134
Σχήμα 4.2.β.	134
Σχήμα 4.2.γ.	135
Σχήμα 4.2.δ.	135
Σχήμα 4.2.ε.	136
Σχήμα 4.2.στ.	137
Σχήμα 4.2.ζ.	137
Σχήμα 4.3.α.	138
Σχήμα 4.3.β.	138
Σχήμα 4.3.γ.	139
Σχήμα 4.3.δ.	139
Σχήμα 4.4.α.	140
Σχήμα 4.4.β.	141
Σχήμα 4.4.γ.	141

Σχήμα 4.4.δ.....	142
Σχήμα 4.5.α.....	143
Σχήμα 4.5.β.....	143
Σχήμα 4.6.α.....	144
Σχήμα 4.6.β.....	144
Σχήμα 4.6.γ.....	145
Σχήμα 4.6.δ.....	145
Σχήμα 4.6.ε.....	145
Σχήμα 4.6.στ.....	146
Σχήμα 5.2.1.α.....	148
Σχήμα 5.2.1.β.....	148
Σχήμα 5.2.1.2.....	149
Σχήμα 5.2.1.3.....	150
Σχήμα 5.2.1.4.....	150
Σχήμα 5.2.1.5.....	151
Σχήμα 5.2.1.6.1.....	151
Σχήμα 5.2.1.6.2.....	152
Σχήμα 5.2.2.....	153
Σχήμα 5.3.1.α.....	154
Σχήμα 5.3.1.β.....	155

VI. Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.4.2.1.α.....	27
Πίνακας 1.4.2.1.β.....	27
Πίνακας 1.5.2.α.....	32
Πίνακας 1.5.2.β.....	32
Πίνακας 3.9.α.....	129
Πίνακας 5.3.1.....	154

Περιεχόμενα

I. Πρόλογος.....	4
II. Περίληψη.....	6
III. Abstract.....	8
IV. Πίνακας Συμβόλων	10
V. Ευρετήριο Σχημάτων	12
VI. Ευρετήριο Πινάκων	15
1. Εισαγωγή.....	20
1.1. Καρδιά	20
1.1.1. Τρόπος Λειτουργίας	21
1.2. Το αίμα	22
1.2.1. Η σύσταση του αίματος	22
1.3. Καρδιακή Ανεπάρκεια	23
1.4. Συστήματα Υποβοήθησης.....	24
1.4.1. Τι είναι & Ιστορική Αναδρομή	24
1.4.2. Τρέχουσες Εξελίξεις.....	26
1.5. Φυγοκεντρικές Αντλίες Υποβοήθησης.....	29
1.5.1. Γενική Περιγραφή Φυγοκεντρικής Αντλίας	29
1.5.2. Ειδικά Χαρακτηριστικά Φυγοκεντρικής Αντλίας Υποβοήθησης Αριστερής Κοιλίας	31
1.5.3. Αιμόλυση και Θρόμβωση	33
1.5.4. Ολοκληρωμένο Σύστημα Υποβοήθησης Αριστερής Κοιλίας	33
1.6. Σκοπός και Μεθοδολογία της Παρούσας Εργασίας.....	34
2. Μαθηματική Διατύπωση	36
2.1. Γενική Θεώρηση	36
2.2. Τρίγωνα Ταχυτήτων.....	36
2.3. Κώδικας MATLAB.....	38
2.4. Αδιάστατοι Αριθμοί.....	40
2.4.1. Αριθμός Reynolds (Re).....	40
2.4.2. Ειδικός Αριθμός Στροφών (nq).....	41
2.4.3. Αριθμός Ειδικής Παροχής (qs)	41
2.4.4. Ειδικό Ύψος Πίεσης (hs)	41
2.5. Αρχές Ομοιότητας.....	41
2.6. Σχεδίαση Κελύφους	42
2.7. Μαθηματικά Μοντέλα Προσομοίωσης.....	44

2.7.1. Οι Εξισώσεις του Πεδίου Ροής.....	44
2.7.2. Μοντελοποίηση της Τύρβης	47
2.7.3. Μοντελοποίηση Αιμόλυσης και Τάσεων.....	50
2.7.4. Παρακολούθηση Σωματιδίων (Particle Tracking).....	51
3. Υδροδυναμική Βελτιστοποίηση και Σχεδιασμός.....	54
3.1. Κώδικας MATLAB.....	54
3.1.1. Επιλογή Εργαζόμενου Μέσου	58
3.1.2. Αποτελέσματα Κώδικα Matlab	58
3.1.3. Επιλογή Αποτελεσμάτων.....	61
3.2. Πρώτο Στάδιο Σχεδίασης	63
3.2.1. Σχεδίαση Πτερωτής στο λογισμικό BladeGen της ANSYS	63
3.2.2. Δημιουργία του Πλέγματος της Πτερωτής στο TurboGrid.....	66
3.2.3. Καθορισμός Δεδομένων για Επίλυση στο CFX.....	70
3.2.4. Εμφάνιση Αποτελεσμάτων	74
3.2.5. Λόγος μη Επίτευξης των Στόχων και Προτάσεις για Βελτιστοποίηση.....	78
3.3. Δεύτερο Στάδιο Σχεδίασης	79
3.3.1. Καθορισμός Δεδομένων για Επίλυση στο CFX.....	79
3.3.2. Εμφάνιση Αποτελεσμάτων	79
3.3.3. Λόγος μη Επίτευξης των Στόχων και Προτάσεις για Βελτιστοποίηση.....	84
3.4. Τρίτο Στάδιο Σχεδίασης	84
3.4.1. Σχεδίαση Πτερωτής στο λογισμικό BladeGen της ANSYS	84
3.4.2. Δημιουργία του Πλέγματος της Πτερωτής στο TurboGrid.....	85
3.4.3. Καθορισμός Δεδομένων για Επίλυση στο CFX.....	89
3.4.4. Εμφάνιση Αποτελεσμάτων	89
3.4.5. Λόγος μη Επίτευξης των Στόχων και Προτάσεις για Βελτιστοποίηση.....	95
3.5. Τέταρτο Στάδιο Σχεδίασης	95
3.5.1. Σχεδίαση Πτερωτής στο λογισμικό BladeGen της ANSYS	95
3.5.2. Δημιουργία του Πλέγματος της Πτερωτής στο TurboGrid.....	96
3.5.3. Καθορισμός Δεδομένων για Επίλυση στο CFX.....	99
3.5.4. Εμφάνιση Αποτελεσμάτων	99
3.6. Πέμπτο Στάδιο Σχεδίασης.....	105
3.6.1. Σχεδίαση Κελύφους στο Solid Works.....	105
3.6.2. Δημιουργία Πλέγματος για την Αντλία.....	107
3.6.3. Καθορισμός Δεδομένων για Επίλυση στο CFX.....	111
3.6.4. Εμφάνιση Αποτελεσμάτων	113

3.6.5. Λόγος μη Επίτευξης των Στόχων και Προτάσεις για Βελτιστοποίηση...	115
3.7. Έκτο Στάδιο Σχεδίασης.....	116
3.7.1. Σχεδίαση Πτερωτής στο λογισμικό BladeGen της ANSYS	116
3.7.2. Σχεδίαση Κελύφους στο Solid Works.....	117
3.7.3. Δημιουργία Πλέγματος για την Αντλία.....	118
3.7.3. Καθορισμός Δεδομένων για Επίλυση στο CFX.....	121
3.7.4. Εμφάνιση Αποτελεσμάτων	122
3.8. Μελέτη Αιμόλυσης με τη μέθοδο Particle Tracking.....	126
3.8.1. Καθορισμός Δεδομένων για Επίλυση στο CFX.....	127
3.8.2. Υπολογισμός Αιμόλυσης	127
3.9. Δημιουργία Χαρακτηριστικών Καμπυλών της Αντλίας.....	128
4. Βιομηχανική Σχεδίαση.....	131
4.1. Πτερωτή.....	131
4.2. Συνδέσεις και Άξονες	133
4.3. Κέλυφος.....	137
4.4. Καπάκι.....	140
4.5. Φυγοκεντρική Αντλία για Υποβοήθηση Αριστερής Κοιλίας	142
4.6. Κατασκευή Αντλίας, Άξονα και Εξαρτημάτων.....	143
5. Πείραμα.....	147
5.1. Σκοπός του πειράματος	147
5.2. Πειραματική Διάταξη	147
5.2.1. Υδραυλικό Κύκλωμα και Εργαλεία.....	147
5.2.2. Προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν.....	152
5.3. Μετρήσεις και Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	153
5.3.1. Μετρήσεις και Πείραμα	153
5.3.2. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	155
Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	157
Παράρτημα.....	158
Βιβλιογραφία	166

1. Εισαγωγή

1.1. Καρδιά

Η καρδιά είναι ένα κοίλο όργανο σχήματος ανεστραμμένης πυραμίδας με την κορυφή προς τα κάτω και αριστερά, και την βάση προς τα επάνω. Είναι το κεντρικό όργανο της κυκλοφορίας και είναι ένα μυώδες όργανο, το οποίο δέχεται το αίμα που προέρχεται από τις φλέβες και το ωθεί προς τις αρτηρίες. Βρίσκεται μέσα στη θωρακική κοιλότητα ανάμεσα στους δύο πνεύμονες. Η κορυφή της αντιστοιχεί στο πέμπτο αριστερό μεσοπλεύριο διάστημα και περιβάλλεται από ένα υμένα από δύο φύλλα, εξωτερικά το περικάρδιο, ενώ οι εσωτερικές της κοιλότητες καλύπτονται από μια λεπτή μεμβράνη, το ενδοκάρδιο. Ανάμεσα στο περικάρδιο και το ενδοκάρδιο βρίσκεται το παχύτερο τοίχωμα της καρδιάς που ονομάζεται μυοκάρδιο και αποτελείται από δυνατές μυϊκές ίνες. Το χρώμα της καρδιάς είναι βαθύ ερυθρό, αλλά η ομοιομορφία του χρώματος διακόπτεται από κίτρινες ραβδώσεις οι οποίες οφείλονται στη συσσώρευση λίπους. Ο όγκος της καρδιάς ποικίλλει στα διάφορα άτομα ενώ το βάρος της φθάνει τα 275 περίπου γραμμάρια. Οι διαστάσεις της στον ενήλικα είναι κατά μέσον όρο οι εξής:

- Μήκος: 98 χιλιοστά.
- Πλάτος: 105 χιλιοστά.
- Περιφέρεια: 230 χιλιοστά.

Η καρδιά της γυναίκας έχει διαστάσεις μικρότερες από του άνδρα κατά 5-10 χιλιοστά και ζυγίζει 5-10 γραμμάρια λιγότερο.

Εσωτερικά η καρδιά διαιρείται σε δύο τμήματα, ένα δεξιό και ένα αριστερό, τα οποία χωρίζονται μεταξύ τους με ένα μυώδες διάφραγμα που ονομάζεται μεσοκοιλιακό διάφραγμα. Καθένα από τα τμήματα αυτά αποτελείται από δύο κοιλότητες: την επάνω, που λέγεται κόλπος και την κάτω, που λέγεται κοιλία. Ο κόλπος και η κοιλία συγκοινωνούν μεταξύ τους με το λεγόμενο κολποκοιλιακό στόμιο. Η καρδιά λοιπόν, χωρίζεται σε τέσσερες κοιλότητες:

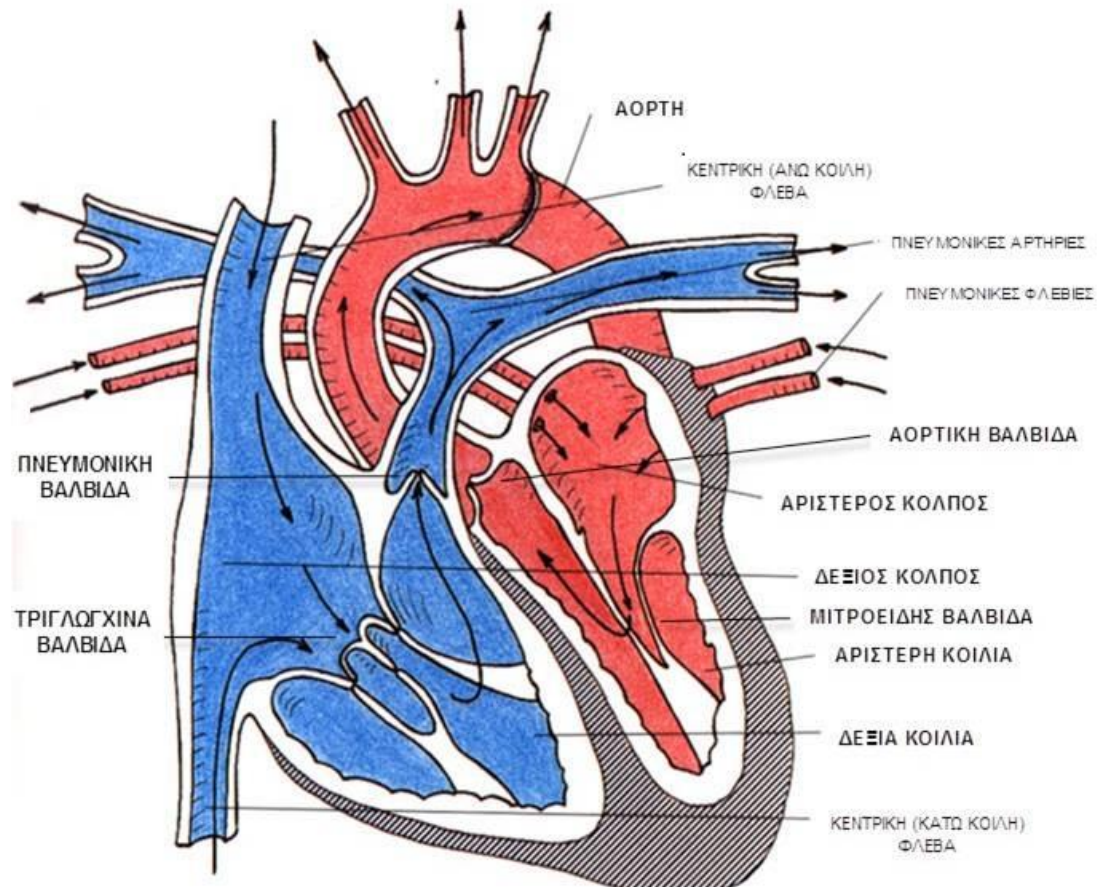
- τον αριστερό κόλπο και την αριστερά κοιλία,
- τον δεξιό κόλπο και τη δεξιά κοιλία.

Ενώ ο κόλπος και η κοιλία της ίδιας πλευράς επικοινωνούν μεταξύ τους, δεν υπάρχει καμιά επικοινωνία με τις κοιλότητες της άλλης πλευράς δηλαδή το αίμα του αριστερού τμήματος της καρδιάς δεν έρχεται σε επαφή ποτέ με το αίμα του δεξιού τμήματος. Παρακάτω αναφέρονται εν συντομία λίγες πληροφορίες για την κάθε μία κοιλότητα της καρδιάς.

Ο *δεξιός κόλπος* δέχεται την κάτω κοίλη φλέβα που μεταφέρει στην καρδιά το αίμα από το κεφάλι και τα άνω άκρα, καθώς και την κάτω κοίλη φλέβα, που μεταφέρει το αίμα από το κάτω τμήμα του σώματος. Ο δεξιός κόλπος συγκοινωνεί με τη δεξιά κοιλία μέσω του δεξιού κολποκοιλιακού στομίου. Εκεί υπάρχει η δεξιά κολποκοιλιακή βαλβίδα που ονομάζεται και τριγλώχινα επειδή αποτελείται από τρία τριγωνικά βαλβιδικά τμήματα (γλωχίνες). Η λειτουργία της βαλβίδας είναι να επιτρέπει τη δίοδο του αίματος από τον κόλπο στην κοιλία και να εμποδίζει την επαναφορά του αίματος από την κοιλία στον κόλπο. Η *δεξιά κοιλία* δέχεται το αίμα

από τον δεξιό κόλπο μέσω της τριγλώχινος βαλβίδας. Από αυτή αρχίζει η πνευμονική αρτηρία η οποία μεταφέρει το αίμα στους πνεύμονες. Η δεξιά κοιλία και η πνευμονική αρτηρία επικοινωνούν μέσω της πνευμονικής βαλβίδας η οποία εμποδίζει το αίμα να επιστρέψει από την πνευμονική αρτηρία στην δεξιά κοιλία.

Ο *αριστερός κόλπος* δέχεται το αίμα από τις τέσσερις πνευμονικές φλέβες και επικοινωνεί με την αριστερά κοιλία μέσω του αριστερού κοιλιοκοιλιακού στομίου. Και στο σημείο αυτό υπάρχει μια βαλβίδα, η μιτροειδής βαλβίδα όπως ονομάζεται, που αποτελείται από δύο μόνο τριγωνικά βαλβιδικά τμήματα. Η βαλβίδα αυτή λέγεται μιτροειδής επειδή έχει σχήμα επισκοπικής ανεστραμμένης μίτρας. Η *αριστερή κοιλία*, είναι αυτή που δέχεται το αίμα από τον αριστερό κόλπο μέσω της μιτροειδούς βαλβίδας. Από την αριστερά κοιλία αρχίζει η μεγαλύτερη αρτηρία του ανθρώπινου οργανισμού, η *αορτή*. Το στόμιο της αορτής κλείνει και αυτό όπως και της πνευμονικής με μια βαλβίδα, που ονομάζεται αορτική βαλβίδα και επιτελεί την ίδια λειτουργία με την βαλβίδα της πνευμονικής αρτηρίας, δηλαδή εμποδίζει την επιστροφή του αίματος από την αορτή στην κοιλία.



Σχήμα 1.1.

1.1.1. Τρόπος Λειτουργίας

Η καρδιά λειτουργεί σαν μια αντλία παίρνοντας οξυγονωμένο αίμα από τους πνεύμονες και εξωθώντας το προς την αορτή για να κυκλοφορήσει σε όλο το σώμα.

Από τις τέσσερις κοιλότητες της καρδιάς σπουδαιότερη είναι αριστερή κοιλία. Εύκολα μπορεί κανείς να ισχυριστεί με κάποια υπερβολή, ότι ουσιαστικά το καρδιακό έργο είναι υπόθεση της αριστερής κοιλίας. Και τούτο διότι η μεγάλη ωστική δύναμη που χρειάζεται για να κυκλοφορήσει το αίμα, στο υψηλών αντιστάσεων περιφερειακό αρτηριακό δίκτυο μέχρι τα τριχοειδή και να επιστρέψει πάλι, μέσω των φλεβών στο δεξιό κόλπο, γίνεται από την αριστερή κοιλία. Το αίμα εξωθείται στην αορτή με σημαντική πίεση, 100-140 *mmHg*, όση δηλαδή είναι η συστολική πίεση της αριστερής κοιλίας και της αορτής. Η αρτηριακή συστολική πίεση του σφυγμικού κύματος είναι μικρότερη όσο τούτο απομακρύνεται από την καρδιά, κατέρχεται στα 25-30 *mmHg* στα τριχοειδή, είναι μικρότερη στο φλεβικό σκέλος της κυκλοφορίας και ελαχιστοποιείται, περίπου μηδενίζεται, στο δεξιό κόλπο. Απ' εκεί το αίμα παραλαμβάνεται από τη δεξιά κοιλία, η οποία συγκριτικά με την αριστερή κοιλία έχει μικρότερο έργο να επιτελέσει. Με σχετικά μικρή συστολική πίεση 15-30 *mmHg*, η δεξιά κοιλία εξωθεί το αίμα προς την πνευμονική αρτηρία και η πίεση αυτή είναι αρκετή για να κυκλοφορήσει τούτο το χαμηλών αντιστάσεων αγγειακό δίκτυο των πνευμόνων και να φθάσει με πολύ χαμηλή πίεση 4-12 *mmHg* στον αριστερό κόλπο.

1.2. Το αίμα

Το αίμα είναι το υγρό που κυκλοφορεί στο αγγειακό σύστημα των ανθρώπων και των ζώων. Η κυκλοφορία του διαμέσου της καρδιάς, των αρτηριών, των φλεβών και των τριχοειδών αγγείων επιτελεί διάφορες λειτουργίες όπως η μεταφορά θρεπτικών ουσιών, ορμονών, βιταμινών, θερμότητας και οξυγόνου στους ιστούς και την απομάκρυνση άχρηστων ουσιών που παράγονται κατά τον μεταβολισμό και του διοξειδίου του άνθρακα. Επιπρόσθετα, παρέχει άμυνα κατά των λοιμώξεων μέσω της δράσης των λευκών αιμοσφαιρίων και των αντισωμάτων. Το αίμα αποτελεί έναν εξαιρετικά εξειδικευμένο κυκλοφορούντα ιστό, ο οποίος αποτελείται από διάφορους τύπους κυττάρων που συγκρατούνται μέσα σε ένα υγρό μέσο που ονομάζεται πλάσμα.

Το αίμα αποτελεί το 7% του βάρους του ανθρώπινου σώματος και, κατά συνέπεια, ο μέσος ενήλικος έχει συνολικό όγκο αίματος γύρω στα 5 λίτρα, από τα οποία τα 2,7 έως 3 λίτρα είναι πλάσμα και το υπόλοιπο της σύστασής του είναι τα έμμορφα κυτταρικά στοιχεία που αιωρούνται σε αυτό. Το αίμα διασχίζει το ανθρώπινο σώμα με μέση ταχύτητα 2 χιλιόμετρα την ώρα, καλύπτοντας όλο το δίκτυο των αιμοφόρων αγγείων, των οποίων η επιφάνεια υπολογίζεται σε 8.000 τετραγωνικά μέτρα. Με κάθε παλμό της η καρδιά διοχετεύει περίπου 70 *ml* αίματος στις αρτηρίες, που ισοδυναμούν περίπου με 5 λίτρα το λεπτό ή με 300 λίτρα την ώρα.

1.2.1. Η σύσταση του αίματος

Το ανθρώπινο αίμα αποτελείται από το πλάσμα (άμορφο συστατικό), μέσα στο οποίο αιωρούνται τα ερυθρά αιμοσφαίρια, τα λευκά αιμοσφαίρια και τα αιμοπετάλια. Το αίμα περιέχει αέρια όπως το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα και το άζωτο και

μεταφέρει επίσης σε μικρές ποσότητες μια μεγάλη ποικιλία διαλυμένων χημικών ουσιών, στις οποίες περιλαμβάνονται υδατάνθρακες (γλυκόζη), πρωτεΐνες (λευκώματα), ορμόνες, λίπη και αζωτούχες ενώσεις. Το αίμα αποτελείται κατά 22 % από στερεά και κατά 78 % από υγρό.

Τα πραγματικά κύτταρα και τα διάφορα τμήματά τους (έμμορφο συστατικό) αποτελούν το 45% του όγκου του κυκλοφορούντος αίματος. Η αναλογία λευκών αιμοσφαιρίων προς ερυθρά αιμοσφαίρια είναι περίπου 1 προς 500. Σε ένα κυβικό εκατοστό αίματος υγιούς ανθρώπου βρίσκονται 4 με 5 εκατομμύρια ερυθρά αιμοσφαίρια, 4.000 με 11.000 λευκά και 150 με 300 αιμοπετάλια. Το πιο σημαντικό από τα λευκώματα που μεταφέρει το αίμα είναι η αιμοσφαιρίνη, η οποία είναι μια μεταλλοπρωτεΐνη με σίδηρο, που περιέχεται στα ερυθρά αιμοσφαίρια. Η λειτουργία που επιτελεί στα περισσότερα θηλαστικά είναι αυτή της μεταφοράς οξυγόνου από τους πνεύμονες στο υπόλοιπο σώμα και διοξειδίου του άνθρακα από το σώμα στους πνεύμονες. Άλλα λευκώματα του αίματος τού προσδίδουν ιδιότητες όπως η πήκτικότητα. Οι διάφορες ιδιότητες των ομάδων αίματος που λαμβάνονται υπόψη στις μεταγγίσεις επίσης εξαρτώνται από λευκώματα του αίματος.

1.3. Καρδιακή Ανεπάρκεια

Όπως παραπέμπει ο όρος, καρδιακή ανεπάρκεια είναι η ανικανότητα της καρδιάς να επιτελέσει την λειτουργία της ως διπλή αντλία. Κατά συνέπεια πρόκειται είτε για την αδυναμία της καρδιάς να εφοδιάσει τους ιστούς του σώματος με την απαραίτητη ποσότητα αίματος λόγω μείωσης της λειτουργικότητας (δύναμης) της αριστερής καρδιάς, είτε για την αδυναμία της καρδιάς να στείλει το αίμα προς τους πνεύμονες προκειμένου να οξυγονωθεί, λόγω της μείωσης της λειτουργικότητας της δεξιάς καρδιάς. Παρατηρούνται συνεπώς δύο μορφές καρδιακής ανεπάρκειας, η *αριστερή* καρδιακή ανεπάρκεια και η *δεξιά* καρδιακή ανεπάρκεια.

Κατά την *αριστερή* καρδιακή ανεπάρκεια η βλάβη βρίσκεται στην αριστερά κοιλία, η οποία αδυνατεί να προωθήσει το αίμα προς την αορτή και ομιλούμε για συστολική αριστερή καρδιακή ανεπάρκεια. Ως εκ τούτου το αίμα “λιμνάζει” προς τα πίσω δηλαδή μέσα στα δύο διαμερίσματα της αριστερής καρδιάς (αριστερό κόλπο και αριστερή κοιλία) και ακόμα πιο πίσω, στους πνεύμονες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η πίεση του “λιμνάζοντος” αίματος και να προκαλείται αφ’ ενός αύξηση των διαστάσεων της αριστερής καρδιάς, αφ’ ετέρου εξίδρωση υγρού στον περιαγγειακό χώρο των πνευμονικών τριχοειδών, ενώ σε σοβαρότερες καταστάσεις το υγρό εμφανίζεται και μέσα στις κυψελίδες των πνευμόνων.

Μια άλλη μορφή αριστερής καρδιακής ανεπάρκειας προέρχεται από την αδυναμία της αριστερής καρδιάς να “χαλαρώνει” ικανοποιητικά προκειμένου να “γεμίσει” με το οξυγονωμένο αίμα από τους πνεύμονες. Στις περιπτώσεις αυτές η συστολική λειτουργία είναι φυσιολογική ή σχεδόν φυσιολογική και πάσχει η διαστολική λειτουργία και γι’ αυτό ομιλούμε για διαστολική καρδιακή ανεπάρκεια.

Κατά τη *δεξιά* καρδιακή ανεπάρκεια υπάρχει μειωμένη λειτουργικότητα της δεξιάς κοιλίας, η οποία αδυνατεί να προωθήσει το αίμα προς τους πνεύμονες προκειμένου να οξυγονωθεί. Ως εκ τούτου το αίμα λιμνάζει προς τα πίσω και η πίεση μέσα στις φλέβες αυξάνεται, με συνέπεια αυτές να διατείνονται. Έτσι υπάρχει διόγκωση των φλεβών του τραχήλου, διόγκωση του ήπατος και της σπλήνας, οιδήματα στα κάτω άκρα και σπανιότερα συλλογή υγρού στην κοιλιά (ασκίτης) ή και σε όλο το σώμα.

Τέλος η καρδιακή ανεπάρκεια μπορεί να εκδηλωθεί άμεσα και οξείως (οξεία καρδιακή ανεπάρκεια, π.χ. πνευμονικό οίδημα μετά από έμφραγμα) ή να εγκατασταθεί χρονίως (χρόνια καρδιακή ανεπάρκεια, ως επί βαλβιδοπάθειας).

1.3.1. Συχνότητα Εμφάνισης Καρδιακής Ανεπάρκειας

Σε αυτό το σημείο θεωρείται σκόπιμο να αναφερθεί η συχνότητα εμφάνισης συμπτωμάτων καρδιακής ανεπάρκειας. Ο αριθμός όλων των περιπτώσεων καρδιακής ανεπάρκειας στο γενικό πληθυσμό (επιπολασμός) υπολογίζεται σε 3-20 ανά 1.000 πρόσωπα. Ο επιπολασμός αυξάνεται με την ηλικία ώστε να υπάρχουν 30-130 ασθενείς ανά 1.000 πρόσωπα ηλικίας άνω των 65 ετών και 80-160 ασθενείς ανά 1.000 ηλικίας άνω των 75 ετών. Υπολογίζεται ότι στην Ελλάδα πιθανότατα υπάρχουν 200.000 ασθενείς με καρδιακή ανεπάρκεια και εμφανίζονται 30.000 περίπου νέες περιπτώσεις κάθε χρόνο.

Παγκοσμίως και πιο συγκεκριμένα για το έτος 2004, περισσότεροι από είκοσι εκατομμύρια άνθρωποι υπέφεραν από καρδιακή ανεπάρκεια, ενώ κάθε χρόνο προστίθενται δύο εκατομμύρια καινούριες διαγνώσεις. Ο αριθμός των ανθρώπων που πλήττονται από καρδιακή ανεπάρκεια είναι σχετικά υψηλός στις ανεπτυγμένες χώρες λόγω του υψηλότερου προσδόκιμου ζωής και του γηραιότερου πληθυσμού. Ο τρόπος διατροφής, ο οποίος συμπεριλαμβάνει μεγάλες ποσότητες κατανάλωσης παχυντικών τροφών οδηγεί σε υπερλιπιδαιμία, η οποία αποτελεί ακόμη ένα παράγοντα ο οποίος συμβάλει σε επιτάχυνση της αθηροσκλήρωσης (δημιουργία πλάκας στα τοιχώματα των αρτηριών, η οποία στενεύει τα αιμοφόρα αγγεία) που οδηγεί σε καρδιακή ανεπάρκεια. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής μόνο, πέντε εκατομμύρια υποθέσεις καρδιακής ανεπάρκειας αναφέρθηκαν για το έτος 2002 και 550.000 νέες υποθέσεις αναφέρονται κάθε νέο έτος. Περίπου το 1% όλων των νεογέννητων παιδιών παρουσιάζουν φαινόμενα αποδυναμωμένης καρδιάς. Κατά μέσο όρο ένα 49% των ανδρών και ένα 32% των γυναικών σε ηλικίες άνω των σαράντα είναι σε κίνδυνο να αναπτύξει καρδιακή ανεπάρκεια, και είναι ο πιο πιθανός λόγος για τον οποίο νοσηλεύονται σε ηλικίες άνω των εξήντα πέντε χρόνων. Περίπου το 20% των ασθενών πεθαίνουν τον πρώτο χρόνο μετά τη διάγνωση, και το 70-80% έχουν διάρκεια ζωής έως και οκτώ χρόνια μετά. Για το έτος 2003, στις Η.Π.Α. 286.700 θάνατοι προκλήθηκαν λόγω καρδιακής ανεπάρκειας, αντιπροσωπεύοντας το ένα σε κάθε πέντε θανάτους.

Η μεταμόσχευση καρδιάς παραμένει η μοναδική μόνιμη θεραπεία για ασθενείς που βρίσκονται στο τελευταίο στάδιο, ωστόσο μόνο 2.500 δότες καρδιάς διατίθενται κάθε χρόνο ενόσω 50.000 ασθενείς περιμένουν. Ο χρόνος αναμονής για ασθενείς με επείγουσα ανάγκη μεταμόσχευση καρδιάς είναι κανονικά πάνω από δύο χρόνια.

1.4. Συστήματα Υποβοήθησης

1.4.1. Τι είναι & Ιστορική Αναδρομή

Μία VAD αποτελείται από μία αντλία αίματος, έναν παροχέα ισχύος και μια μονάδα ελέγχου. Επί του παρόντος, χρησιμοποιείται ως προσωρινό σύστημα για να υποστηρίξει την κυκλοφορία του αίματος μειώνοντας το φόρτο εργασίας της καρδιάς,

διατηρώντας παράλληλα επαρκή πίεση του αίματος μέχρι να πραγματοποιηθεί μεταμόσχευση φυσικής καρδιάς. Ωστόσο, προβλέπεται ότι οι συσκευές αυτές θα αποτελέσουν μόνιμες κλινικές λύσεις.

Όπως προκύπτει από τα στατιστικά στοιχεία της παραγράφου 1.3.1., η μεταμόσχευση καρδιάς σαν μοναδική κλινική λύση δεν επαρκεί για όλους τους ασθενείς καρδιακής ανεπάρκειας. Έτσι ένας ασθενής που πάσχει από καρδιακή ανεπάρκεια κλίνεται να ακολουθήσει μία θεραπευτική αγωγή. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι τα σύγχρονα φάρμακα και οι εμφυτευόμενες συσκευές αμφικοιλιακής βηματοδότησης και απινίδωσης της καρδιάς έχουν συμβάλει σημαντικά στην παράταση και κυρίως στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ασθενών με καρδιακή ανεπάρκεια. Ένα μικρό, όμως, ποσοστό ασθενών με καρδιακή ανεπάρκεια δεν έχει την ανάλογη κλινική ανταπόκριση στην προαναφερθείσα θεραπευτική αγωγή, παρουσιάζοντας συχνά απορρύθμιση με επανειλημμένες νοσηλείες και αυξημένη θνητότητα. Σε αυτή την κατηγορία ασθενών, οι οποίοι δεν ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στις παραπάνω στρατηγικές, στοχεύει η τοποθέτηση των συσκευών υποβοήθησης της αριστερής κοιλίας. Οι συσκευές υποβοήθησης της αριστερής κοιλίας παίζουν σημαντικό ρόλο στην αντιμετώπιση των μη ανταποκρινόμενων στην υπόλοιπη θεραπεία ασθενών, γιατί η μεταμόσχευση καρδιάς, που αναμφισβήτητα αποτελεί την τελική θεραπεία της καρδιακής ανεπάρκειας, δεν είναι πάντα εφικτή λόγω περιορισμένης προσφοράς μοσχευμάτων και αδυναμίας ανεύρεσης σε σύντομο χρονικό διάστημα κατάλληλου συμβατού δότη, όπως αναφέρθηκε ήδη στην προηγούμενη παράγραφο. Επιπλέον, η μεταμόσχευση καρδιάς δεν είναι δυνατή σε άτομα προχωρημένης ηλικίας και σε αυτούς που έχουν σοβαρά συμπαρομαρτούνα προβλήματα υγείας.

Οι συσκευές υποβοήθησης της αριστερής κοιλίας τοποθετούνται είτε μέσα στο θώρακα είτε εξωτερικά. Οι συγκεκριμένες συσκευές παρακάμπτουν την αριστερή κοιλία της καρδιάς και προωθούν το αίμα από την πνευμονική κυκλοφορία κατευθείαν στην αορτή και στα όργανα του σώματος. Οι συσκευές αυτές δέχονται ενέργεια από εξωτερική μπαταρία, την οποία φέρει ο ασθενής σε μια μικρή θήκη που μπορεί να τοποθετήσει γύρω από τη μέση του.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια σημαντική διεθνής κλινική εμπειρία από τη χρήση τέτοιων συσκευών είτε ως θεραπεία-γέφυρα, κατά το στάδιο της αναμονής στη λίστα μεταμόσχευσης, είτε ως θεραπευτική προσέγγιση σε άτομα που δεν μπορούν να υποβληθούν σε μεταμόσχευση καρδιάς.

Το 1966, μία VAD εμφυτεύτηκε επιτυχώς σε έναν ασθενή για πρώτη φορά. Το 1982, η τεχνητή καρδιά εν ονόματι Jarvik-7 εμφυτεύτηκε σε έναν ασθενή ο οποίος επέζησε με αυτή σχεδόν για τέσσερις μήνες. Από το 1990, καθώς νέες τεχνολογίες εξελίσσονταν για πιο αποδοτικές αντλίες καρδιάς, πολλές εταιρίες άρχισαν την ανάπτυξη των VADs. Το 1994, η Αμερικάνικη υπηρεσία τροφίμων και διαχείρισης φαρμάκων (FDA: US Food and Drugs administration) ενέκρινε την συσκευή αριστερής κοιλιακής υποβοήθησης (LVAD: left ventricular assist device), δηλαδή VAD που υποστηρίζει ειδικά το έργο της αριστερής κοιλίας, ως γέφυρα για μεταμόσχευση. Το 2001 μέσω της REMATCH (Randomized Evaluation of Mechanical Assistance for the Treatment of Congestive Heart Failure) εξετάστηκε η θεραπεία με LVAD για τους ασθενείς με καρδιακή ανεπάρκεια τελικού σταδίου. Έτσι μπορούσε πλέον ναδειχθεί ότι η πιθανότητα επιβίωσης των ασθενών θα ήταν διπλάσια αν είχε τοποθετηθεί μία LVAD έναντι τη λήψης απλώς ιατρικής θεραπείας. Το 2002, η FDA ενέκρινε τη χρήση των LVADs για μακροχρόνια θεραπεία σε

ασθενείς με σοβαρή καρδιακή ανεπάρκεια, οι οποίοι δεν μπορούν να είναι υποψήφιοι για μεταμόσχευση καρδιάς.

Ανατομικά, οι VADs εμφυτεύονται είτε εσωτερικά στην κοιλία (βλέπε DeBakey HeartMate και Novacor) είτε στην περικαρδιακή χώρα (βλέπε HeartWare HVAD), ενώ σε άλλες περιπτώσεις, όπως η παλλόμενη Thoratec VAD, η αντλία τοποθετείται εξωσωματικά. Ο Takatani αναφέρεται για περισσότερο από 30 διαφορετικές αντλίες καρδιάς που έχουν ήδη κλινική χρήση ή ήταν υπό ανάπτυξη μέχρι το 2001. Το κόστος ενός μεμονωμένου VAD είναι συνήθως πάνω από 50.000 δολάρια. Ωστόσο, αυτές οι συσκευές έχουν τη δυνατότητα να φέρουν συνολικά οικονομική ανακούφιση για τα εθνικά συστήματα υγείας.

1.4.2. Τρέχουσες Εξελίξεις

1.4.2.1. Σύγχρονες εφαρμογές

Ο πίνακας 1.4.2.1.α. παραθέτει τις διάφορες διατάξεις των VADs που χρησιμοποιούνται καθώς και τις αντίστοιχες λειτουργίες τους. Ανάλογα με το αν οι VADs είναι συνδεδεμένες στην αριστερή ή στην δεξιά κοιλία ή και στις δύο κοιλίες χωρίζεται στις εξής κατηγορίες: συσκευές υποβοήθησης αριστερής κοιλίας (LVADs), συσκευές υποβοήθησης δεξιάς κοιλίας (RVADs), συσκευές αμφικοιλιακής υποβοήθησης (BiVADs). Αυτές οι συσκευές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε μία διάταξη τεχνητής καρδιάς (TAH: total artificial heart) στην οποία η ανεπαρκής καρδιά αντικαθίσταται πλήρως. Ωστόσο, μπορεί μία VAD να αφαιρεθεί εάν η καρδιά του ασθενούς ανακάμψει. Οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας εξαρτώνται από τις φυσιολογικές ιδιότητες του καρδιαγγειακού συστήματος του ασθενούς.

Ανάλογα με τη χρονική περίοδο χρήσης, οι VADs μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο-ημερών, δύο-εβδομάδων, έξι-μηνών, δύο-χρόνων και μονίμων μοντέλων. Ο πίνακας 1.4.2.1.β., παρακάτω, δείχνει τα τρέχοντα μοντέλα αντλιών, τις εφαρμογές των και τις συναφείς προϋποθέσεις.

Οι διαθέσιμες VADs στο εμπόριο βρίσκουν εφαρμογή για βραχυπρόθεσμη στήριξη, π.χ. κατά τη διάρκεια κρίσιμων χειρουργικών επεμβάσεων, σε εξωσωματική οξυγόνωση μεμβράνης (ECMO: extracorporeal membrane oxygenation) και διαδερματική καρδιοπνευμονική υποστήριξη (PCPS: percutaneous cardiopulmonary support), καθώς και για μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη υποστήριξη γεφύρωσης. Μελέτες ασθενών έχουν δείξει ότι μετά από παρατεταμένη υποστήριξη από αντλία καρδιάς, μετά από αρκετούς μήνες, έως ένα έτος, διαγνώστηκαν εμφανή σημάδια ανάκαμψης της καρδιάς. Μετά από δύο χρόνια, η ανάκαμψη λόγω της κοιλιακής υποβοήθησης δεν μπορεί να βελτιωθεί πέραν της βέλτιστης. Το σύστημα υποβοήθησης απαιτεί μία αντοχή που αντιστοιχεί στο χρόνο αναμονής για την εύρεση της καρδιάς-δότη, ο οποίος τις περισσότερες φορές ξεπερνάει τα δύο χρόνια όταν πρόκειται για μεταμόσχευση. Οι μόνιμες εμφυτεύσιμες αντλίες αίματος είναι επί του παρόντος σε εξέλιξη.

Πίνακας 1.4.2.1.α. - Διατάξεις μηχανών υποστήριξης του κυκλοφοριακού και οι λειτουργίες τους

Διάταξη	Λειτουργία	Τυπικές Συνθήκες Λειτουργίας	Φυσική Καρδιά
LVAD	Υποβοηθά ή αντικαθιστά την λειτουργία άντλησης της αριστερής κοιλίας της καρδιάς	$5 \frac{L}{min}$ σε 100 mmHg αορτικής πίεσης	Δεν αφαιρείται
RVAD	Υποβοηθά ή αντικαθιστά την λειτουργία άντλησης της δεξιάς κοιλίας της καρδιάς	$4 \frac{L}{min}$ σε 40 mmHg πνευμονικής πίεσης	Δεν αφαιρείται
BIVAD	Υποβοηθά ή αντικαθιστά την λειτουργία άντλησης και των δύο κοιλιών της καρδιάς	$5 \frac{L}{min}$ σε 100 mmHg αορτικής πίεσης και $4 \frac{L}{min}$ σε 40 mmHg πνευμονικής πίεσης	Δεν αφαιρείται
TAH	Αντικαθιστά την καρδιά	$5 \frac{L}{min}$ σε 100 mmHg αορτικής πίεσης και $4 \frac{L}{min}$ σε 40 mmHg πνευμονικής πίεσης	Αφαιρείται

Πίνακας 1.4.2.1.β. - Μοντέλα αντλιών αίματος, η εφαρμογή τους και οι προϋποθέσεις με τις οποίες σχετίζονται· το X υποδεικνύει υποχρεωτικό χαρακτηρισμό ενώ το (X) προτιμητέο χαρακτηρισμό

Μοντέλο αντλίας καρδιάς	Τυπική εφαρμογή	Διάρκεια ζωής	Υδραυλική απόδοση	Αντιθρομβωτική ικανότητα	Χαμηλή καταστροφή των κυττάρων	Μικρό μέγεθος	Without extra corporeal connection
Βραχυπρόθεσμα: υποστήριξη κατά τη διάρκεια εγχειρήσεων υψηλού κινδύνου	Υποστήριξη κατά τη διάρκεια της εξωσωματικής καρδιοπνευμονικής παράκαμψης (by pass)	2 μέρες	X				
Βραχυπρόθεσμα: υποστήριξη κατά τη διάρκεια της παροδικής καρδιοαναπνευστικής ανεπάρκειας	ECMO, PCPS, postcardiotomy cardiac failure	2 εβδομάδες	X	X			

Μέσης διάρκειας: γέφυρα σε θεραπεία	Θεραπεία της διαστολικής καρδιομυοπάθειας	6 μήνες	X	X	X	(X)	
Μακροπρόθεσμα: γέφυρα για ανάκτηση	Υποστήριξη έως την ανάκτηση της καρδιάς	2 χρόνια	X	X	X	X	(X)
Μακροπρόθεσμα: γέφυρα για μεταμόσχευση	Υποστήριξη έως την μεταμόσχευση της καρδιάς	>2 χρόνια	X	X	X	X	(X)
Μακροπρόθεσμα: με προορισμό τη θεραπεία	Μόνιμη υποστήριξη	>5 χρόνια	X	X	X	X	X

1.4.2.2. Σχεδιαστικές Απαιτήσεις

Η ανάπτυξη μιας αντλίας αίματος πρέπει να πληροί ορισμένες γενικές απαιτήσεις, όπως τη μη τραυματική συμπεριφορά, προσιτή τιμή, δυνατότητα ελέγχου, αξιοπιστία, εύκολη εμφύτευση και εφαρμογή για τις διαφορετικές φυσιολογικές απαιτήσεις όπου ποικίλουν από ασθενή σε ασθενή. Εκτός από αυτές τις γενικές απαιτήσεις, για διαφορετικές εφαρμογές απαιτούνται διαφορετικά σχέδια αντλίας, καθένα από τα οποία δημιουργεί ιδιαίτερες τεχνικές προκλήσεις. Συχνά, οι στόχοι σχεδιασμού αντιτίθενται αμοιβαία και συχνά ένα κριτήριο σχεδιασμού βελτιστοποιείται σε βάρος κάποιου άλλου. Για μακροπρόθεσμη γεφύρωση μοντέλων, η ενσωμάτωση της παροχής ενέργειας και της μονάδας ελέγχου εντός της εμφυτευμένης συσκευής, αποφεύγει τη φλεγμονή του ιστού, μια συχνή επιπλοκή που εμφανίζεται σε ασθενείς που χρησιμοποιούν μία VAD με εξωσωματική σύνδεση.

Σαν συσκευή άντλησης αίματος, η VAD πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να παρέχει:

- επαρκή υδραυλική απόδοση βοηθώντας την φυσιολογική άντληση και
- καλή αιμοσυμβατότητα που συνεπάγεται ελάχιστη βλάβη του αίματος.

Ζημία του αίματος μπορεί να συμβεί είτε με θρόμβωση είτε με αιμόλυση. Αντιθρομβογονικότητα και ελαχιστοποίηση της αιμόλυσης προκύπτουν από υψηλές διατμητικές τάσεις και είναι τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του αιματολογικού σχεδιασμού. Οι δύο βασικοί μηχανισμοί ζημίας εξηγούνται στην παράγραφο 1.5.3..

1.4.2.3. Σύγχρονη έρευνα

Σε μια πρόσφατη μελέτη που συμπεριέλαβε άτομα που δεν επρόκειτο να υποβληθούν σε μεταμόσχευση καρδιάς, διαπιστώθηκε ότι η τα προβλήματα στα δύο χρόνια ήταν σημαντικά λιγότερα στους ασθενείς που είχαν τη συσκευή σε σχέση με

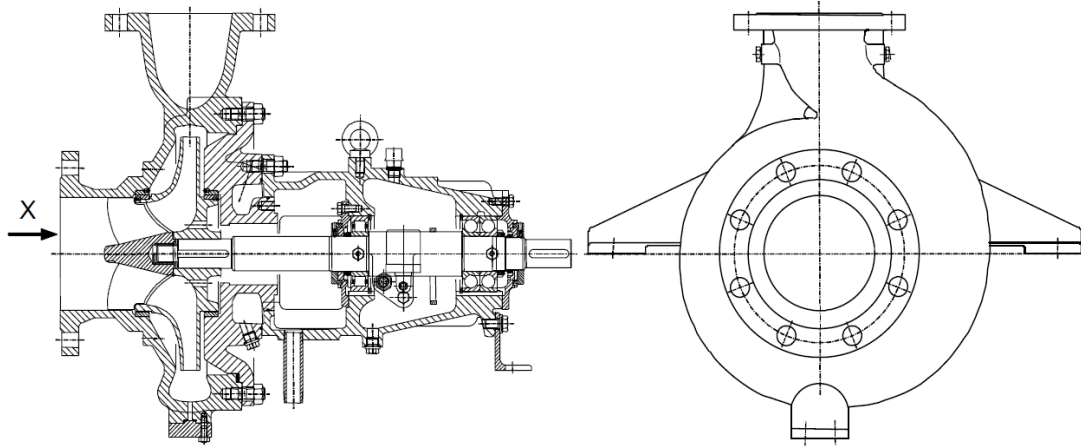
εκείνους που δεν την είχαν. Από την άλλη πλευρά, παρά τη βελτίωση της επιβίωσης, τα άτομα με συσκευή υποβοήθησης της αριστερής κοιλίας παρουσίασαν κάποιες σημαντικές επιπλοκές, όπως αιμορραγία, λοίμωξη, θρομβοεμβολικά επεισόδια και μηχανικό πρόβλημα της συσκευής.

Η βελτίωση και εξέλιξη των συσκευών υποβοήθησης της αριστερής κοιλίας θα προσφέρει στο μέλλον μια μονιμότερη λύση. Γι' αυτό, η σύγχρονη έρευνα στοχεύει στη συνδυαστική αντιμετώπιση με μεταμόσχευση κυττάρων, έγχυση αγγειογενετικών αυξητικών παραγόντων και τοποθέτηση συσκευών υποβοήθησης σε ασθενείς με τελικού σταδίου καρδιακή ανεπάρκεια.

1.5. Φυγοκεντρικές Αντλίες Υποβοήθησης

1.5.1. Γενική Περιγραφή Φυγοκεντρικής Αντλίας

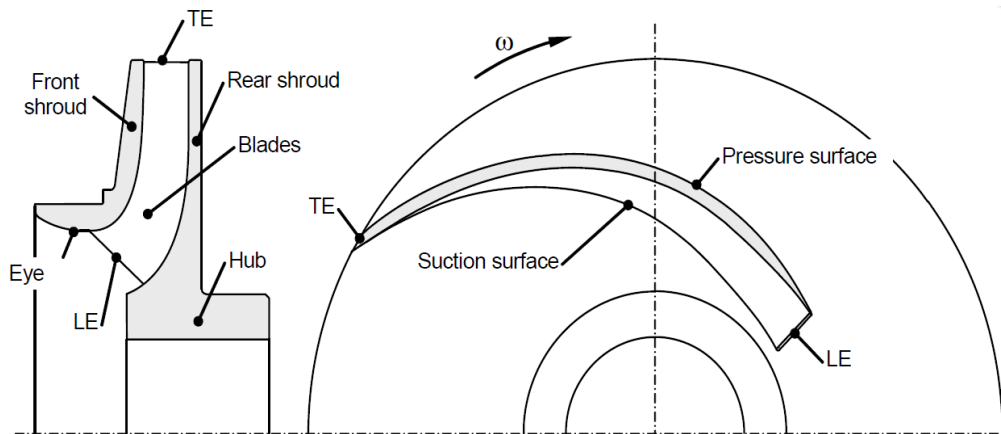
Οι φυγοκεντρικές αντλίες είναι στροβιλομηχανές οι οποίες χρησιμοποιούνται για μεταφορά υγρών, αυξάνοντας μια συγκεκριμένη ογκομετρική παροχή σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο πίεσης. Η μεταφορά ενέργειας στις στροβιλομηχανές είναι βασισμένη στις υδροδυναμικές διαδικασίες στις οποίες όλες οι διαφορές πίεσης και ενέργειας είναι ανάλογες του τετραγώνου της περιφερειακής ταχύτητας του ρότορα. Μια φυγοκεντρική αντλία αποτελείται στη γενική της περίπτωση από ένα περιστρεφόμενο και ένα σταθερό κομμάτι (Σχήμα 1.5.1.α.). Το περιστρεφόμενο μέρος αποτελούν ο άξονας και τα πτερύγια προσαρμοσμένα πάνω στην πτερωτή και το σταθερό μέρος το αποτελούν το κέλυφος και το καπάκι στεγανοποίησης. Το υγρό για να αντληθεί ρέει μέσω του σωλήνα εισόδου, ο οποίος συνήθως έχει συγκλίνοντα μορφή και καταλήγει αξονικά στην πτερωτή. Η πτερωτή είναι τοποθετημένη πάνω στον άξονα ο οποίος περιστρέφεται με τη βοήθεια ενός κινητήρα. Η πτερωτή μεταφέρει στο υγρό, μέσω των πτερυγίων, την ενέργεια που απαιτείται για να το μεταφέρει και να το επιταχύνει στην περιφερειακή κατεύθυνση. Αυτό προκαλεί αύξηση της στατικής πίεσης σύμφωνα με τις αρχές της κινητικής, διότι το ρευστό ρέει σε μια καμπυλόγραμμη διαδρομή. Το ρευστό εξέρχεται της πτερωτής και επιβραδύνεται στο κέλυφος και στο διαχύτη που ακολουθεί, ώστε να αξιοποιήσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό της κινητικής ενέργειας αυξάνοντας την στατική πίεση. Ο διαχύτης έχει τη μορφή αποκλίνοντος ακροφυσίου.



Σχήμα 1.5.1.α.

Στα επιπρόσθετα στοιχεία που αποτελούν κομμάτι της αντλίας είναι όλες οι στεγανοποιήσεις που λαμβάνουν χώρα ώστε να αποφευχθεί τυχόν διαφυγή του υγρού προς το περιβάλλον και όλες οι διαμορφώσεις που μπορεί να προστεθούν ώστε να ομαλοποιήσουν τη ροή.

Κλείνοντας η πτερωτή μια αντλίας αποτελείται από το κομμάτι που συνδέεται με τον άξονα (hub) το πίσω κάλυμμα (rear shroud) και τα πτερύγια τα οποία μεταφέρουν ουσιαστικά την ενέργεια στο ρευστό (Σχήμα 1.5.1.β). Ανάλογα τον τύπο της πτερωτής που επιλέγεται συναντώνται και πτερωτές με εμπρός κάλυμμα (front shroud). Ακόμη στο Σχήμα 1.5.1.β. φαίνεται η κάτοψη μιας πτερωτής όπου διακρίνονται η πλευρά πίεσης και η πλευρά αναρρόφησης. Κοιτάζοντας από το 'μάτι' της πτερωτής βλέπουμε την πλευρά αναρρόφησης. Για αυτό μερικές φορές αποκαλείται και 'κάτω όψη του πτερυγίου' σε αντίθεση με την πλευρά πίεσης που αποκαλείται 'άνω όψη πτερυγίου'.



Σχήμα 1.5.1.β.

1.5.2. Ειδικά Χαρακτηριστικά Φυγοκεντρικής Αντλίας Υποβοήθησης Αριστερής Κοιλίας

Όπως και κάθε εξειδικευμένη κατασκευή, η σχεδίαση και η κατασκευή μιας φυγοκεντρικής αντλίας υποβοήθησης της αριστερής κοιλίας έχει ορισμένα ειδικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις συνήθεις αντλίες. Αυτά είναι τα ακόλουθα :

- Ανακυκλοφορία και Διατμητικές Τάσεις
- Παροχή και αύξηση πίεσης
- Μέγεθος κατασκευής
- Αριθμός πτερυγίων
- Διαμόρφωση Κελύφους

Η βασικότερη διαφορά με τις κοινές φυγοκεντρικές αντλίες έγκειται στην αποφυγή της ανακυκλοφορίας και των υψηλών διατμητικών τάσεων, καθώς είναι οι κυριότεροι παράγοντες καταστροφής των ερυθρών αιμοσφαιρίων. Όσες περισσότερες περιοχές ανακυκλοφορίας συναντά το αίμα τόσο αυξάνεται ο χρόνος διαμονής του σε αυτές τις περιοχές με συνέπεια την αύξηση της αιμόλυσης. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται το μέτρο της διάτμησης σε κάθε σημείο της μηχανής, ακόμη και αν οι χρόνοι είναι αμελητέοι, τόσο η μηχανή μας γίνεται ακατάλληλη για την εφαρμογή μας. Η μαθηματική σχέση που συνδέει το ποσοστό καταστροφής του αίματος σε σχέση με το χρόνο και το μέτρο της διάτμησης (SSS) είναι:

$$\frac{\Delta Hb}{\Delta H} = 3.62 * 10^{-7} * SSS^{2.416} * \Delta t^{0.785}$$

Στο σημείο της αριστερής κοιλίας παρέχονται περίπου πέντε λίτρα αίματος το λεπτό προς την αορτή και εκείνη με τη σειρά της το μοιράζει σε όλο το σώμα. Για τη σχεδίαση της παρακάτω αντλίας η παροχή αυτή μπορεί να θεωρηθεί σταθερή με μικρές διακυμάνσεις. Το ίδιο συμβαίνει με την αύξηση της πίεσης που επιτυγχάνεται η οποία είναι της τάξης των 100~120 mmHg. Σε αυτή την εργασία η σχεδίαση έγινε με βάση τη μέγιστη επιθυμητή διαφορά πίεσης ώστε να διασφαλιστεί η λειτουργία κάτω από όλες τις συνθήκες. Οι βιολογικοί αυτοί περιορισμοί αποτελούν τα δύο βασικά χαρακτηριστικά από την αρχή αυτού του σχεδιασμού. Με βάση αυτούς του περιορισμούς αναπτύχθηκε όλο το υπόλοιπο σύστημα.

Όσο αναφορά το μέγεθος της στροβιλομηχανής, αυτό περιορίζεται για λόγους οικονομίας των υλικών αλλά κυρίως για την πιο εύκολη προσαρμογή του πάνω στον ασθενή. Έτσι μία μηχανή με διαστάσεις μικρότερες των 10 · 10 · 5 cm μπορεί να τοποθετηθεί με ευκολία σε σημείο που δεν θα επιβαρύνει τον ασθενή στις κινήσεις του (Σχήμα 1.5.2.α.).

Ακόμη, ο αριθμός των πτερυγίων παίζει καθοριστικό ρόλο στο βαθμό της σχετικής ανακυκλοφορίας μέσα στην πτερωτή. Για μια αντλία υποβοήθησης επιλέγεται ο ελάχιστος αριθμός πτερυγίων για τον οποίο δεν παρατηρείται ανακυκλοφορία. Είναι γνωστό ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των πτερυγίων τόσο

μικραίνει η ανακυκλοφορία στην πτερωτή, αλλά χρειάζεται προσοχή γιατί ένας μεγάλος αριθμός αυξάνει την πτώση πίεσης και τη διάτμηση, γεγονός που είναι ανεπιθύμητο.

Κλείνοντας, η διαμόρφωση του κελύφους παίζει καθοριστικό ρόλο καθώς οφείλει να συλλέξει και να μεταφέρει το ρευστό στην έξοδο με όσο το δυνατόν λιγότερη εφαρμογή διατμητικών τάσεων, οι οποίες λειτουργούν μέσω αιμόλυσης καταστροφικά πάνω στο αίμα (Σχήμα 1.5.2.α.).

Ακολουθεί πίνακας με τα χαρακτηριστικά του εργαζόμενου μέσου που χρησιμοποιήθηκε και των χαρακτηριστικών λειτουργίας της φυγοκεντρικής αντλίας που σχεδιάστηκε .

Πίνακας 1.5.2.α.- Χαρακτηριστικά εργαζόμενου μέσου

Πίνακας 1.5.2.α-Χαρακτηριστικά Εργαζόμενου Μέσου		
	Νερό	Αίμα
Πυκνότητα [kg/m^3]	1000	1056
Δυναμικό Ιξώδες [$Pa\cdot s$]	$1.15 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Κινηματικό Ιξώδες [m^2/sec]	$1.15 \cdot 10^{-6}$	$3.8 \cdot 10^{-6}$

Πίνακας 1.5.2.β.-Σχεδιαστικές Συνθήκες Αντλίας

Πίνακας 1.5.2.β-Σχεδιαστικές Συνθήκες Αντλίας		
	Νερό	Αίμα
Διαφορά Πίεσης [Pa]	16.043	15.192
Διαφορά Πίεσης [m]	1,635	1,549
Παροχή Όγκου [m^3/sec]	0,0000833	0,0000833
Παροχή Μάζας [kg/sec]	0,0833	0,088
Reynolds Number	162.983	49.323
Specific Speed	0,268	0,28
Specific Capacity	0,0167	0,0167
Specific Head	0,32	0,3036



Σχήμα 1.5.2.α.

1.5.3. Αιμόλυση και Θρόμβωση

1.5.3.1. Θρόμβωση

Η θρόμβωση είναι ο σχηματισμός ενός θρόμβου και αρχίζει με τους αιμοστατικούς μηχανισμούς του οργανισμού για την πρόληψη της περιττής αιμορραγίας. Οι διεργασίες που οδηγούν στην πήξη είναι πολύπλοκες αλλά οι τρεις κύριοι παράγοντες συνοψίζονται στην τριάδα του Virchow:

- μεταβολές στη ροή αίματος
- ανωμαλίες του αγγειακού τοιχώματος
- αλλαγές στη σύσταση του αίματος

Συνεπώς, μέσα στις VADs, περιοχές με υψηλές διατμητικές τάσεις, ανακυκλοφορία ή στασιμότητα και επαφή του αίματος με επιφάνειες με χαμηλή αιμοσυμβατότητα είναι οι κύριες αιτίες που μπορούν να προκαλέσουν θρόμβωση και πρέπει να αποφεύγονται.

1.5.3.2. Αιμόλυση

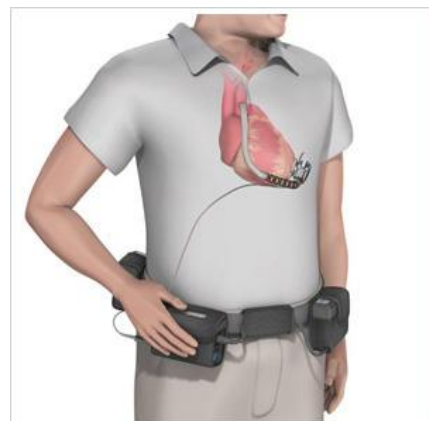
Το φαινόμενο κατά το οποίο γίνεται απελευθέρωση αιμοσφαιρίνης από τα ερυθρά αιμοσφαίρια καλείται αιμόλυση και συνεπάγεται καταστροφή των ερυθρών αιμοσφαιρίων. Σε τεχνητά όργανα, όπως μία VAD, οι μηχανικές βλάβες του ρευστού που προκύπτει από υψηλές διατμητικές τάσεις αλλά και από τους χρόνους έκθεσης σε αυτά τα επίπεδα τάσεων είναι η κύριες αιτίες αιμόλυσης. Άλλες αιτίες για απελευθέρωση αιμοσφαιρίνης, που θεωρούνται αμελητέες, είναι κάποιες χημικές και θερμικές διεργασίες οι οποίες δεν απασχολούν την παρούσα εργασία. Σύγχρονες μέθοδοι σχεδιασμού έχουν σκοπό να μειώσουν τα επίπεδα αιμόλυσης, διότι ακόμα και μικρά επίπεδα απελευθέρωσης της αιμοσφαιρίνης μακροπρόθεσμα αποβαίνουν μοιραία για τον ασθενή.

Τρόποι αντιμετώπισης της απελευθέρωσης αιμοσφαιρίνης είναι ο καλός σχεδιασμός της μηχανής ώστε να αποφευχθούν υψηλές διατμητικές τάσεις και οι υψηλοί χρόνοι έκθεσης των τάσεων αυτών. Είναι δηλαδή ένας συνδυασμός των δύο παραπάνω.

1.5.4. Ολοκληρωμένο Σύστημα Υποβοήθησης Αριστερής Κοιλίας

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα υποβοήθησης της αριστερής κοιλίας αποτελείται από τα εξής:

- Την αντλία καρδιάς
- Δύο εύκαμπτους αγωγούς σύνδεσης της αντλίας με την φυσική καρδιά
- Δύο μπαταρίες, οι οποίες παρέχουν ενέργεια στο σύστημα
- Ένα σύστημα ελέγχου της λειτουργίας



Σχήμα 1.5.4.α.

- Καλώδια τροφοδοσίας συνδεδεμένα με τις δύο μπαταρίες και το σύστημα ελέγχου καθώς και σύνδεση του συστήματος ελέγχου με την αντλία



Είναι σημαντικό επίσης να αναφερθεί ότι ένας καλός σχεδιασμός του συστήματος εμπεριέχει και τα κατάλληλα τσαντάκια των μπαταριών και την ζώνη στήριξης των

εξαρτημάτων για την άνετη και ασφαλή καθημερινότητα του ασθενούς, όπως φαίνεται και στις παρακάτω φωτογραφίες.

1.6. Σκοπός και Μεθοδολογία της Παρούσας Εργασίας

Πρωταρχικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και η σχεδίαση μιας φυγοκεντρικής αντλίας η οποία λειτουργεί ως σύστημα υποβοήθησης για τη μεταφορά του αίματος από την αριστερή κοιλία της καρδιάς στην αορτή. Εφόσον το εργαζόμενο μέσο είναι το αίμα πρέπει να αποφευχθούν απαγορευτικά ποσοστά καταστροφής του αίματος και πρέπει να συναντάται ικανοποιητική αιμοδυναμική λειτουργία. Ακόμη προαπαιτούμενα για τη σωστή λειτουργία της είναι η επίτευξη της αύξησης πίεσης σε συνδυασμό με την κατάλληλη παροχή.

Σε πρώτο χρόνο πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση της γεωμετρίας μέσω κώδικα που δημιουργήθηκε στο Matlab και τη βοήθεια των προγραμμάτων Blade Gen (για την πτερωτή) και Solid Works (για το κέλυφος). Ακολούθησε η χρήση του εμπορικού πακέτου λογισμικού ANSYS (CFX) με στόχο την υδροδυναμική μελέτη και βελτιστοποίηση της αντλίας.

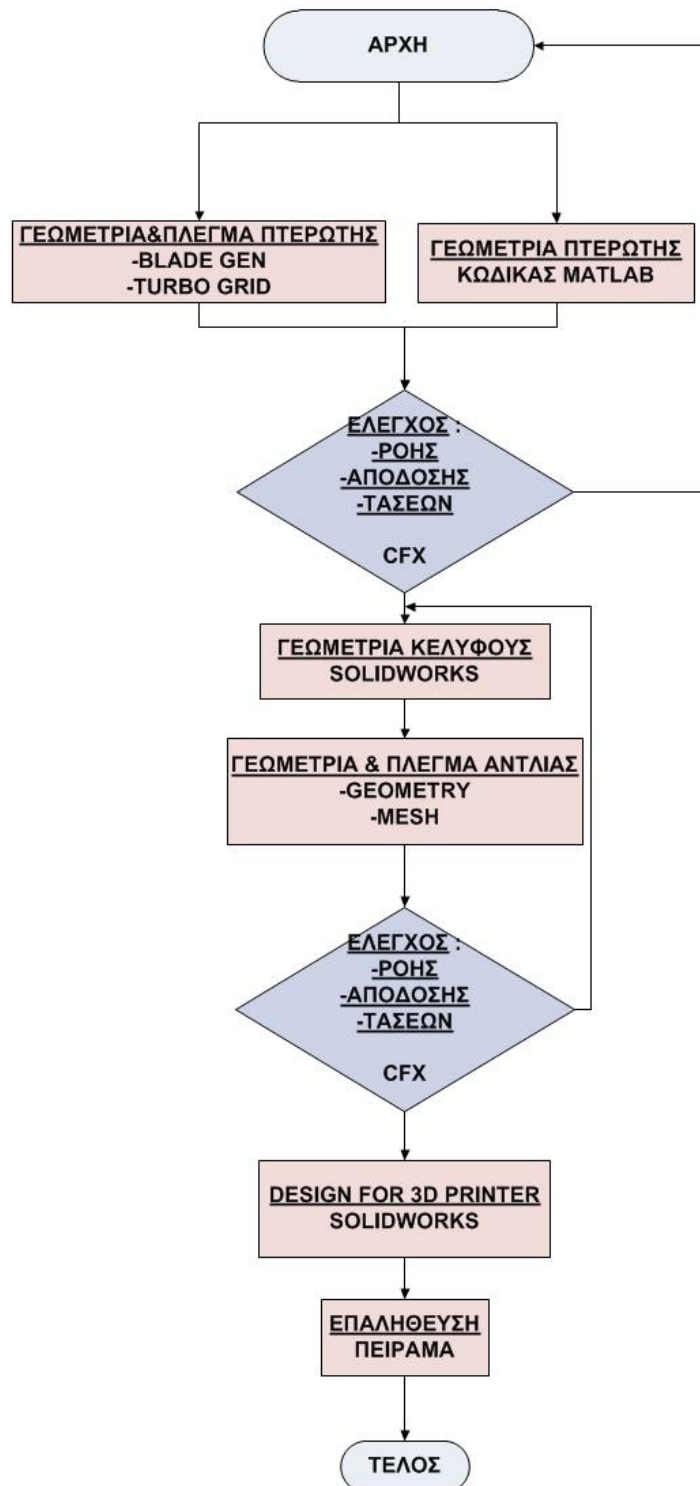
Μόλις επιτευχθεί υπολογιστικά ο πρώτος στόχος της εργασίας ακολουθεί η λεπτομερής σχεδίαση ολόκληρης της μηχανής. Αυτή αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη :

- την πτερωτή με τα πέντε πτερύγια
- το κέλυφος
- το καπάκι στεγανοποίησής
- τον άξονα της μηχανής

τα οποία συμπληρώνονται από τις διάφορες κοχλιοσυνδέσεις και το στεγανοποιητικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την αποφυγή οποιασδήποτε διαρροής ρευστού. Όλα αυτά παρουσιάζονται λεπτομερώς στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.

Στο τέλος της σχεδίασης τα τρία πρώτα μέρη εκτυπώνονται με Rapid Prototyping, ενώ ο άξονας κατασκευάζεται σε μηχανουργείο μέσω τόννευσης. Έπειτα ακολουθεί η δημιουργία της πειραματικής διάταξης η οποία επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της υπολογιστικής μελέτης.

Για την καλύτερη κατανόηση και εισαγωγή στην εργασία ακολουθεί το διάγραμμα ροής της :



Σχήμα 1.6.

2. Μαθηματική Διατύπωση

2.1. Γενική Θεώρηση

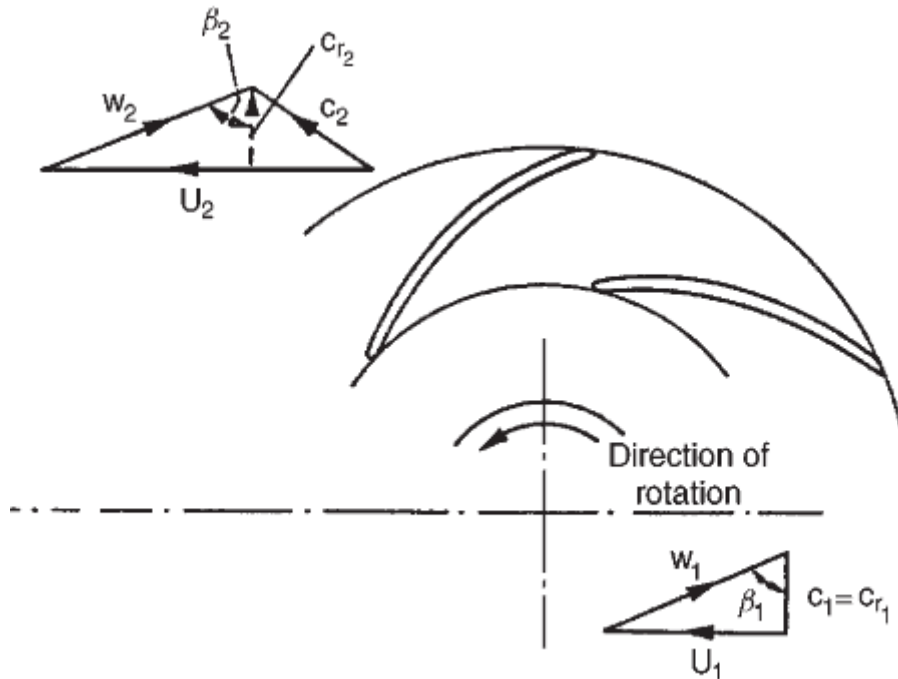
Στο κεφάλαιο αυτό διατυπώνονται όλες οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και οι οποίες επιλύθηκαν είτε αναλυτικά είτε με χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη βοήθεια που προσφέρουν τα υπολογιστικά πακέτα σε μια τέτοια σχεδίαση.

Στην πραγματικότητα οι ροές περιγράφονται από μερικές διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες δεν μπορούν να λυθούν αναλυτικά στη γενική τους περίπτωση. Χωρίζοντας την πολύπλοκη περιοχή της ροής σε μικρά κελιά, αυτές οι εξισώσεις μπορούν να λυθούν κατά προσέγγιση με αριθμητικές μεθόδους. Λόγω της ευρείας εφαρμογής της, η υπολογιστική ρευστοδυναμική έγινε βασικό εργαλείο της μηχανικής ρευστών.

Λόγω των πολύπλοκων ροϊκών φαινομένων εντός των φυγοκεντρικών αντλιών, ο σχεδιασμός της πτερωτής, του διαχύτη και του κελύφους, συχνά βασίζονταν σε εμπειρικά δεδομένα για να προσδιορίσουν τη ροή στην πτερωτή και να υπολογίσουν την απόδοση και τις απώλειες. Συχνά η σχεδίαση των καναλιών της ροής και των πτερυγίων βασίζεται σε δεδομένα δοκιμών όμως η πρόσβασή μας σε σχετικά οικονομικούς υπολογιστές με υψηλή υπολογιστική ισχύ ενίσχυσαν την ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων που επιλύουν τις τρισδιάστατες εξισώσεις Navier Stokes. Γι' αυτό το λόγο οι αριθμητικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία με στόχο τη βελτιστοποίηση των υδραυλικών συνιστωσών, την αύξηση της αξιοπιστίας στην πρόβλεψη της απόδοσης και τη μείωση του κόστους λόγω δοκιμών.

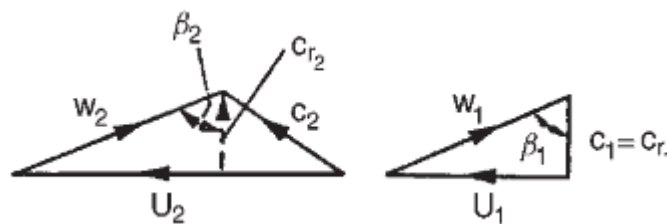
2.2. Τρίγωνα Ταχυτήτων

Το νερό εισέρχεται στην πτερωτή με ταχύτητα \vec{c}_1 , η οποία δίνεται από το διανυσματικό άθροισμα της σχετικής ταχύτητας (ως προς ένα σύστημα συντεταγμένων που περιστρέφεται μαζί με το πτερύγιο) \vec{W}_1 και της ταχύτητας περιστροφής του πτερυγίου \vec{U}_1 . Για να σχεδιαστεί το τρίγωνο ταχυτήτων στην είσοδο ισχύει ότι $U_1 = \omega \cdot r_1$ και ότι η διεύθυνση της W_1 είναι εφαπτομενική στο πτερύγιο στη θέση 1 (είσοδος). Επίσης στην περίπτωση της αντλίας που σχεδιάστηκε στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι η διεύθυνση της \vec{c}_1 έχει μόνο ακτινική συνιστώσα. Αντίστοιχα, το τρίγωνο ταχυτήτων στην έξοδο σχεδιάζεται με βάση τα εξής δεδομένα: την ταχύτητα περιστροφής \vec{U}_2 και τη διεύθυνση της σχετικής ταχύτητας \vec{W}_2 , η οποία είναι εφαπτομενική στο πτερύγιο στην έξοδο.



Σχήμα 2.2.α.

Οι γωνίες α και β σχηματίζονται μεταξύ των ανυσμάτων (\mathbf{C}, \mathbf{U}) και (\mathbf{U}, \mathbf{W}) , αντίστοιχα. Δηλαδή η γωνία β αποτελεί στοιχείο του σχεδιασμού της πτερωτής της φυγοκεντρικής αντλίας, επειδή ορίζεται από την εφαπτομενική διεύθυνση και την καμπύλη του πτερυγίου. Στα δύο τρίγωνα ταχυτήτων (εισόδου και εξόδου), αναλύεται η απόλυτη ταχύτητα στις δύο συνιστώσες τους κατά την ακτινική \mathbf{C}_r και κατά την εφαπτομενική διεύθυνση \mathbf{C}_θ . Όλες οι λεπτομέρειες δίνονται στο Σχήμα 2.2.β. Για ευκολία στην κατασκευή τους και τα δύο τρίγωνα σχεδιάστηκαν με το άνυσμα τους περιστροφικής ταχύτητας σε «οριζόντια» θέση. Η κανονική τους θέση σε σχέση με την πτερωτή φαίνεται στο Σχήμα 2.2.α.



Σχήμα 2.2.β.

Στην επόμενη παράγραφο, όπου γίνεται η μαθηματική διατύπωση των σχέσεων που χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα του Matlab, αναφέρονται διεξοδικά οι αναλυτικές σχέσεις που συνδέουν τις ταχύτητες αλλά και οι σχέσεις Euler.

2.3. Κώδικας MATLAB

Ο κώδικας δημιουργήθηκε με σκοπό τη δημιουργία μιας πρώτης εικόνας όσο αναφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις συνθήκες λειτουργίας της πτερωτής. Για τους υπολογισμούς αυτούς χρησιμοποιήθηκαν οι γνωστές από τις στροβιλομηχανές σχέσεις των τριγώνων ταχυτήτων σε συνδυασμό με τις σχέσεις της μεθόδου Busemann οι οποίες εισάγουν το συντελεστή διόρθωσης (slip factor) για τον υπολογισμό της πραγματικής γωνίας εξόδου των πτερυγίων. Πιο συγκεκριμένα :

Για τον υπολογισμό της περιφερειακής ταχύτητας u ισχύει:

$$u = \omega \cdot r$$

με r την ακτίνα είτε στην είσοδο είτε στην έξοδο της αντλίας και ω την γωνιακή ταχύτητα της πτερωτής, οι οποία θεωρείται σταθερή και ίση με:

$$\omega = (2 \cdot \pi \cdot n)/60$$

με n την ταχύτητα περιστροφής σε rpm .

Ακολουθως για τον υπολογισμό της απόλυτης ταχύτητας του ρευστού στην είσοδο c_1 και στην έξοδο $c_{r,2}$ της πτερωτής ισχύει :

$$c_1 = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot b_1}$$

$$c_{r,2} = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot b_2}$$

με \dot{m} την παροχή μάζας που θεωρείται σταθερή, ρ την πυκνότητα του ρευστού και $b_{1,2}$ τα ύψη του πτερυγίου στην είσοδο και την έξοδο.

Ακόμη για την γωνία του πτερυγίου στην είσοδο της πτερωτής B_1 ισχύει :

$$B_1 = \frac{\text{atan} \left(\frac{u_1}{c_1} \right) \cdot 180}{\pi}$$

Ενώ για την θεωρητική απόλυτη εφαπτομενική ταχύτητα στην έξοδο $c_{u,2t}$ του πτερυγίου ισχύει :

$$c_{u,2t} = \frac{\Delta H g}{u_2}$$

με ΔH το επιθυμητό ύψος πίεσης και g την επιτάχυνση της βαρύτητας.

Κλείνοντας αυτό το πρώτο κομμάτι ο υπολογισμός της θεωρητικής γωνίας του πτερυγίου στην έξοδο B_{2t} έγινε μέσω της σχέσης :

$$B_{2t} = \frac{\text{atan} \left(\frac{u_2 - c_{u,2t}}{c_{r,2}} \right) 180}{\pi}$$

Σε αυτό το σημείο είναι ορθό να οριστεί η έννοια του slip factor η οποία χρησιμοποιείται για τους περαιτέρω υπολογισμούς. Όπως είναι γνωστό από τη θεωρία των στροβιλομηχανών, στην εφαρμογή του θεωρήματος της ορμής συμπεριλαμβάνονται μονάχα οι μέσες ταχύτητες των επιλεγμένων επιφανειών. Στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου οι πολύπλοκες συνθήκες της ροής αγνοούνται, επομένως και η διατήρηση της ορμής αποτυγχάνει να δείξει τον τρόπο με τον οποίο η ροή δημιουργήθηκε σε αυτές τις επιφάνειες ελέγχου. Επομένως οι όποιοι υπολογισμοί γωνιών πτερυγίων με βάση τις θεωρητικές ταχύτητες δεν αντιστοιχούν στις πραγματικές συνθήκες ροής.

Οι περίπλοκες διεργασίες της ροής οι οποίες λαμβάνουν χώρα εντός του όγκου ελέγχου έχουν να κάνουν κυρίως με δύο φαινόμενα. Το πρώτο έχει να κάνει με τις διαφορές της ταχύτητας μεταξύ των πλευρών πίεσης και αναρρόφησης που προκαλούνται από τη μεταφορά του έργου προς το ρευστό. Το δεύτερο έχει να κάνει με τη δευτερεύουσα ροή που δημιουργεί η αντίθετη προς την περιστροφή της πτερωτής, περιστροφή της επιτάχυνσης Coriolis και η οποία μειώνει τη γωνία εξόδου του πτερυγίου B_{2t} .

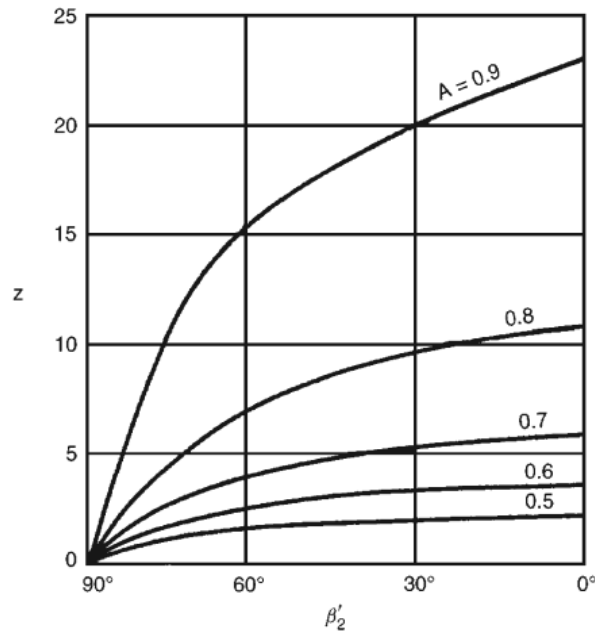
Εφόσον αυτές οι διεργασίες της ροής δεν μπορούν να υπολογιστούν με απλά μέσα χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν εμπειρικές σχέσεις εκεί που απαιτείται υπολογισμός των γωνιών εξόδου των πτερυγίων. Πολλές εμπειρικές σχέσεις έχουν αναπτυχθεί με κυριότερη και βασικότερη αυτή του Busemann η οποία και χρησιμοποιείται στους παρακάτω υπολογισμούς. Μέσω της μεθόδου Busemann υπολογίζεται ο slip factor sf , ο οποίος μειώνει την εφαπτομενική συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας κατά ένα ποσοστό που έχει σχέση με τον αριθμό των πτερυγίων, της θεωρητικής γωνίας εξόδου του πτερυγίου που υπολογίστηκε B_{2t} αλλά και άλλων λειτουργικών και γεωμετρικών παραμέτρων.

Για τον υπολογισμό του slip factor sf ισχύει :

$$sf = \frac{A - \left[B \cdot \left(\frac{Cr_2}{u_2} \right) \cdot \tan B_{2t} \right]}{1 - \left[\left(\frac{Cr_2}{u_2} \right) \cdot \tan B_{2t} \right]}$$

με το συντελεστή A να υπολογίζεται από το σχήμα 2.3. και τον συντελεστή B από την ακόλουθη διαδικασία :

1. Υπολογισμός του $t = \frac{r_2}{r_1}$
2. Υπολογισμός του $tt = \exp \left[\frac{2\pi \cdot \cos B_{2t}}{z} \right]$, με z τον αριθμό των πτερυγίων
3. Εάν το $t > tt$ τότε $B=1$ αλλιώς $B=0$



Σχήμα 2.3.

Επομένως ο υπολογισμός της πραγματικής εφαπτομενικής συνιστώσας της απόλυτης ταχύτητας $c_{u,2r}$ γίνεται μέσω της σχέσης :

$$c_{u,2r} = sf \cdot c_{u,2t}$$

και τέλος ο υπολογισμός της πραγματικής γωνίας εξόδου του πτερυγίου B_2 από :

$$B_2 = \frac{\text{atan} \left(\frac{u_2 - cu_{2r}}{cr_2} \right) \cdot 180}{\pi}$$

2.4. Αδιάστατοι Αριθμοί

Έχοντας υπολογίσει τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά από τον κώδικα, ακολούθησε ο υπολογισμός των σταθερών παραμέτρων της αντλίας. Αυτοί θεωρούνται οι σημαντικότεροι για τη σχεδίαση της αντλίας και χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση της σχετικής απόδοσης όλων των φυγοκεντρικών αντλιών.

2.4.1. Αριθμός Reynolds (Re)

Ο αριθμός Reynolds είναι μια αδιάστατη παράμετρος που χρησιμοποιείται για να συσχετίσει το ιξώδες (ν), τη γωνιακή ταχύτητα (ω) και τη διάμετρο της πτερωτής (D). Ο αριθμός Reynolds χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του είδους της ροής (στρωτή ή τυρβώδης), με την περιοχή της μετάβασης να βρίσκεται περίπου στο 10^5 . Ο τύπος του είναι :

$$Re = \frac{D^2 \omega}{4\nu}$$

2.4.2. Ειδικός Αριθμός Στροφών (n_q)

Ο ειδικός αριθμός στροφών μιας φυγοκεντρικής αντλίας είναι ο αδιάστατος αριθμός που περιγράφει τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής (n'), της παροχής όγκου (Q) και του ύψους πίεσης (H). Ο μαθηματικός τύπος του είναι :

$$n_q = n' \frac{Q^{0.5}}{H^{0.75}}$$

2.4.3. Αριθμός Ειδικής Παροχής (q_s)

Ο αριθμός ειδικής παροχής ορίζεται ως το ποσοστό παροχής όγκου (Q) ανά μονάδα περιστροφικής ταχύτητας (ω) και ακτίνας εξόδου (r). Ο αριθμός αυτός παραμένει σταθερός για όμοιες πτερωτές και είναι ο παρακάτω :

$$q_s = \frac{Q}{\omega r^3}$$

2.4.4. Ειδικό Ύψος Πίεσης (h_s)

Το ειδικό ύψος πίεσης ορίζεται ως το γινόμενο του ύψους πίεσης (H) επί την επιτάχυνση της βαρύτητας προς το γινόμενο των τετραγώνων της ακτίνας εξόδου (r) και της περιστροφικής ταχύτητας (ω). Ο αριθμός αυτός παραμένει σταθερός για όμοιες πτερωτές και είναι ο παρακάτω :

$$h_s = \frac{gH}{\omega^2 r^2}$$

2.5. Αρχές Ομοιότητας

Έχοντας υπολογιστεί μέσω του αλγορίθμου τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη της πτερωτής ακολούθησε το στήσιμο της γεωμετρίας στο Blade Gen, η δημιουργία πλέγματος στο Turbo Grid και επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν το ροϊκό πεδίο στο CFX. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης έδωσαν ένα ύψος πίεσης το οποίο βρισκόταν σε χαμηλότερο επίπεδο από το επιθυμητό. Αυτό θεωρείται λογικό καθώς, παρόλο που στον αλγόριθμό του Matlab εισήχθη μέσω της μεθόδου Busemann ο *slip factor*, η πραγματική ροή μέσα στην περιστρεφόμενη μηχανή δεν αναπαρίσταται πλήρως.

Το πρόβλημα που προκύπτει σε αυτό το σημείο είναι η αλλαγή ορισμένων χαρακτηριστικών της φυγοκεντρικής αντλίας σε τέτοιο βαθμό ώστε να επιτευχθεί η αύξηση πίεσης που επιθυμείται. Εδώ γίνεται χρήση των *αρχών ομοιότητας* που

υπάρχουν στις στροβιλομηχανές. Πολλές φορές στις στροβιλομηχανές είναι σκόπιμο να γνωρίζει κανείς το πόσο μεταβάλλεται το ύψος πίεσεως ή η ισχύς σε σχέση με μια αλλαγή στις στροφές ή στη διάμετρο της πτερωτής. Έτσι χρησιμοποιώντας αδιάστατους αριθμούς όπως ο αριθμός ροής φ ή ο αριθμός μανομετρικού ύψους (ή αριθμός μεταφοράς ενέργειας) ψ μπορεί να υπολογιστεί η μεταβολή αυτή. Παρακάτω εξηγείται η μαθηματική διαδικασία που ακολουθήθηκε :

$$\text{ο αριθμός ροής } \varphi : \quad \varphi = \frac{Q}{nD^3}$$

$$\text{ο αριθμός μανομετρικού ύψους } \psi : \quad \psi = \frac{gH}{n^2 D^2}$$

Αφού αυτό που ενδιαφέρει στην προκειμένη περίπτωση είναι η αλλαγή του ύψους πίεσης, είναι προφανές ότι χρησιμοποιείται ο αδιάστατος αριθμός ψ . Θεωρώντας ότι η 'καινούρια' πτερωτή διατηρεί την ίδια διάμετρο και ίδιο αριθμό μανομετρικού ύψους η σχέση για την επίτευξη του επιθυμητού ύψους διαμορφώνεται ως εξής :

$$\psi_1 = \psi_2 \rightarrow \frac{gH_1}{n_1^2 D^2} = \frac{gH_2}{n_2^2 D^2} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

ακριβώς αντίστοιχα αν θεωρηθεί ότι διατηρούνται οι ίδιες στροφές της πτερωτής τότε ισχύει :

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$$

2.6. Σχεδίαση Κελύφους

Η ροή μέσα σε ένα σπειροειδές κέλυφος είναι τρισδιάστατη και αλλάζει σημαντικά στην περίπτωση λειτουργίας μακριά από το σημείο μέγιστης απόδοσης. Γι' αυτό και η σχεδίαση του σπειροειδούς κελύφους συνήθως γίνεται με βάση την εμπειρία. Η σχεδίαση αφορά κυρίως την επιλογή της διαμέτρου του βασικού κύκλου, την απόσταση μεταξύ του δρομέα και της γλώσσας, τη διανομή των διατομών του κελύφους περιφερειακά καθώς και το πάχος στην είσοδο και τη διατομή στην έξοδο του κελύφους.

Όσον αφορά τη διανομή των διατομών περιφερειακά, η επιλογή ενός από τους παρακάτω τύπους διευκολύνει κατά τη σχεδίαση:

- Κέλυφος με σταθερή διατομή

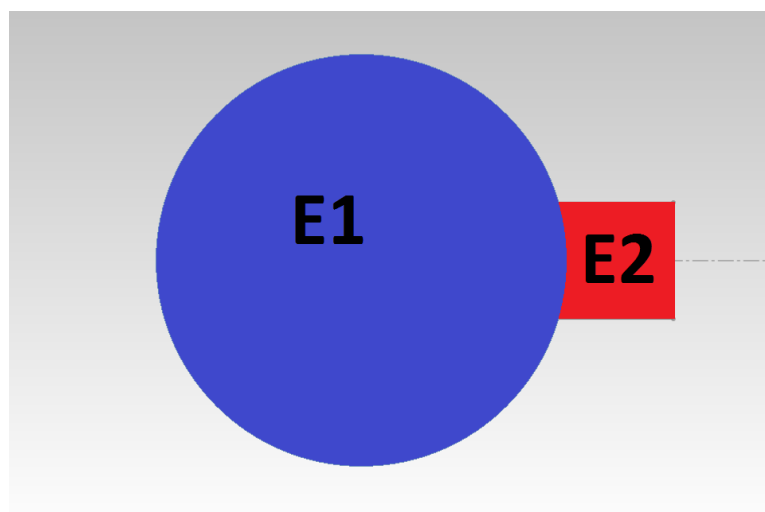
- Κέλυφος με σταθερή ταχύτητα
- Κέλυφος με σταθερή συστροφή

Ο τύπος σχεδίασης του συγκεκριμένου κελύφους ήταν κέλυφος με σταθερή ταχύτητα. Με σημείο εκκίνησης τη γλώσσα και με κατεύθυνση την έξοδο του κελύφους, η παροχή περιφερειακά αυξάνεται. Για τη διατήρηση, περιφερειακά, σταθερής ταχύτητας έπρεπε να γίνει ανάλογη αύξηση της διατομής του κελύφους. Στο σημείο αυτό επιλέχθηκαν 11 σημεία περιφερειακά, με πρώτο σημείο το διάκενο μεταξύ δρομέα και γλώσσας και σαν τελευταίο την έξοδο του κελύφους. Στην αρχή υπολογίστηκαν τα εμβαδά στα δύο ακραία σημεία και έπειτα υπολογίστηκαν τα υπόλοιπα 9 εμβαδά με αναλογικό τρόπο. Γνωρίζοντας πλέον το εμβαδό της διατομής σε κάθε σημείο επιβεβαιώθηκε η σταθερότητα της ταχύτητας και διαστασιολογήθηκε κάθε διατομή.

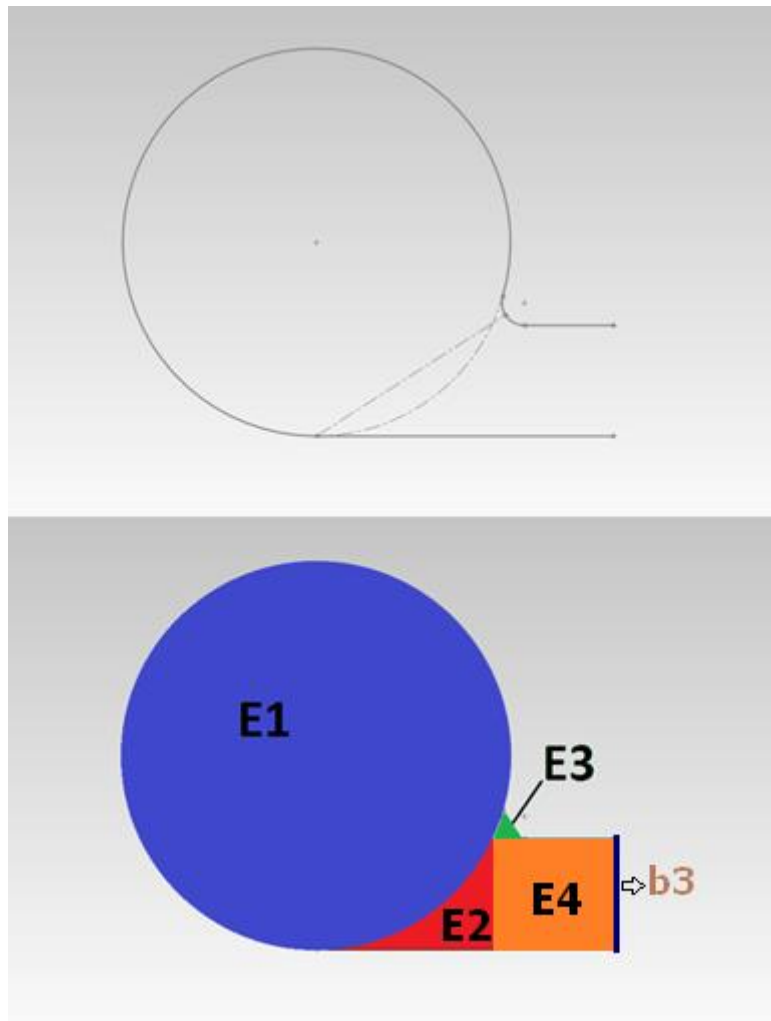
Στην παρούσα μελετήθηκαν δύο κελύφη, το ένα είναι το συμμετρικό (Σχήμα 2.6.α.) και το άλλο εφαπτομενικό (Σχήμα 2.6.β.). Για το συμμετρικό κέλυφος το εμβαδό της διατομής είναι το άθροισμα του E_1 και E_2 , ενώ για το εφαπτομενικό είναι το άθροισμα των E_1 , E_2 , E_3 και E_4 . Για το συμμετρικό το E_2 είναι σταθερό για κάθε διατομή, οπότε αυτό που υπολογίστηκε σε κάθε σημείο είναι η ακτίνα του κύκλου στο E_1 . Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι προσεγγιστικά υπολογίστηκε το E_1 σαν κύκλος ενώ το E_2 σαν ορθογώνιο. Για το εφαπτομενικό το E_4 παρέμενε σταθερό για όλες τις διατομές ενώ άλλαζαν τα υπόλοιπα. Για τα υπόλοιπα τρία δημιουργήθηκε η εξής σχέση :

$$E_{tot} \cong \pi R^2 + \frac{R \cdot b_3}{2} + E_4$$

με R την ακτίνα του κύκλου που περικλείει το E_1 και b_3 το ύψος της περρωτής στην έξοδο. Από αυτή τη σχέση υπολογίζεται η ακτίνα και διαστασιολογείται η διατομή.



Σχήμα 2.6.α.



Σχήμα 2.6.β.

2.7. Μαθηματικά Μοντέλα Προσομοίωσης

2.7.1. Οι Εξισώσεις του Πεδίου Ροής

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το πεδίο ροής συνεκτικού ρευστού είναι οι εξισώσεις Navier-Stokes και η εξίσωση της συνέχειας. Επειδή όλες αυτές οι εξισώσεις μπορεί να βρεθούν με πολλούς διαφορετικούς συμβολισμούς, εδώ χρησιμοποιούνται οι τύποι και οι συμβολισμοί του εγχειριδίου του CFX της ANSYS, του λογισμικού που χρησιμοποιείται και για τη λύση των εξισώσεων στην εργασία αυτή.

Στη γενική της διατύπωση η εξίσωση της ορμής είναι η παρακάτω :

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + S_M$$

με \mathbf{U} το διάνυσμα της ταχύτητας στην κάθε διεύθυνση $\mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix}$

με S_M τους παράγοντες δημιουργίας ορμής,

με $\mathbf{U} \otimes \mathbf{U}$ τον 'Διαδικός Τελεστής' : $\mathbf{U} \otimes \mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_x U_x & U_x U_y & U_x U_z \\ U_y U_x & U_y U_y & U_y U_z \\ U_z U_x & U_z U_y & U_z U_z \end{bmatrix}$

και $\boldsymbol{\tau}$ να είναι ίσο με :

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left[\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \mathbf{U} \right]$$

με μ το δυναμικό ιξώδες του εργαζόμενου μέσου και δ τη συνάρτηση Δέλτα του Kronecker με :

$$\delta_{ij} = 0, \quad \text{εάν } i \neq j$$

$$\delta_{ij} = 1, \quad \text{εάν } i = j$$

Στο σημείο αυτό γίνονται δύο κύριες θεωρήσεις οι οποίες απλοποιούν τις εξισώσεις που τελικώς χρησιμοποιούνται :

- Η πυκνότητα του εργαζόμενου μέσου (αίματος) παραμένει σταθερή και με τη μεταβολή στο χώρο και ως προς το χρόνο λόγω των όχι υψηλών ταχυτήτων και πιέσεων που συναντά η ροή μέσα στην αντλία. Θεωρείται επομένως ασυμπίεστη ροή.
- Το πρόβλημα της παρούσας εργασίας αποτελείται από ένα περιστρεφόμενο μέλος, επομένως και οι εξισώσεις που επιλύονται επηρεάζονται από την περιστροφή. Στην ουσία, στην εξίσωση της ορμής εισάγονται οι περιστρεφόμενες δυνάμεις οι οποίες ασκούνται στο σώμα και δημιουργούν ορμή όταν αυτό περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω . Αυτές είναι οι δυνάμεις Coriolis και οι φυγοκεντρικές δυνάμεις. Να σημειωθεί εδώ ότι επειδή η επιτάχυνση Coriolis και η επιτάχυνση φυγοκέντρισης είναι πολύ μεγαλύτερες από την επιτάχυνση της βαρύτητας, η τελευταία θεωρείται αμελητέα άρα αμελητέα θεωρείται και η ορμή που εισάγει η δύναμη της βαρύτητας. Τελικά ισχύει ότι :

$$S_{M,rot} = S_{Cor} + S_{cfg}$$

όπου

$$S_{Cor} = -2\rho\omega * \mathbf{U}$$

$$S_{cfd} = -\rho\omega * (\omega * r)$$

με r να είναι το διάνυσμα θέσης και U τη σχετική ταχύτητα του πλαισίου, η οποία είναι η ταχύτητα περιστροφής του πλαισίου για ένα περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς.

Μετά τις δύο θεωρήσεις ισχύει ότι :

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho \nabla(U \otimes U) = \nabla\{-p\delta + \mu[\nabla U + (\nabla U)^T]\} - 2\rho\omega * U - \rho\omega * (\omega * r)$$

Εδώ εισάγεται σύμφωνα με τη θεωρία επίλυσης της ANSYS το εναλλακτικό μοντέλο περιστροφής το οποίο αλλάζει τον όρο της συναγωγής έτσι ώστε να περιλαμβάνει την ταχύτητα του απόλυτου συστήματος αναφοράς, U_{abs} , αντί της ταχύτητας του σχετικού συστήματος αναφοράς, U . Η αλλαγή αυτή στον όρο της συναγωγής απαιτεί την τροποποίηση του πραγματικού όρου της Coriolis (S_{Cor}). Η τελική μορφή της εξίσωσης της ορμής είναι η :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho \nabla(U \otimes U_{abs}) \\ = \nabla\{-p\delta + \mu[\nabla U + (\nabla U)^T]\} - \rho\omega * U - \rho\omega * (\omega * r) \end{aligned}$$

και διαιρώντας με την πυκνότητα :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla(U \otimes U_{abs}) = \nabla\left\{-\frac{p}{\rho}\delta + \nu[\nabla U + (\nabla U)^T]\right\} - \omega * U - \omega * (\omega * r)$$

Στο αριστερό μέλος των εξισώσεων αυτών βρίσκονται οι όροι των επιταχύνσεων, ενώ στο δεξί το αποτέλεσμα της πίεσης και οι δυνάμεις του σώματος στο περιστρεφόμενο πλαίσιο μαζί με τους όρους των απωλειών.

Εκτός από τις τρεις εξισώσεις της ορμής (μία για κάθε διεύθυνση) γίνεται χρήση της εξίσωσης της συνέχειας η μορφή της οποία για τρισδιάστατη, ασυμπίεστη ροή είναι η ακόλουθη :

$$\nabla U \rho = 0 \rightarrow$$

$$\nabla U = 0$$

Τέλος να αναφερθεί ότι η ροή εντός της φυγοκεντρικής αντλίας καρδιάς μπορεί να θεωρηθεί πως δεν περιλαμβάνει μετάδοση θερμότητας, επομένως αγνοείται η εξίσωση ενέργειας στις τρεις διευθύνσεις. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση της θερμοκρασίας της ροής εντός της μηχανής θεωρείται στη συγκεκριμένη περίπτωση αμελητέα.

2.7.2. Μοντελοποίηση της Τύρβης

Η τύρβη αποτελείται από διακυμάνσεις του ροϊκού πεδίου στο χώρο και το χρόνο. Είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, κυρίως γιατί είναι τρισδιάστατη, ασταθής και πολυεπίπεδη. Ακόμη μπορεί να έχει πολύ σημαντική επιρροή πάνω στα χαρακτηριστικά της ροής. Η τύρβη προκύπτει όταν οι δυνάμεις αδράνειας του ρευστού γίνονται σημαντικές σε σχέση με τις δυνάμεις ιξώδους, και χαρακτηρίζεται από υψηλούς αριθμούς Reynolds.

Κανονικά οι τρεις εξισώσεις της ορμής (Navier-Stokes) μπορούν να περιγράψουν και στρωτές και τυρβώδεις ροές χωρίς την ανάγκη πρόσθετων εξισώσεων. Ωστόσο, οι τυρβώδεις ροές σε πραγματικούς αριθμούς Reynolds συνδέουν ένα μεγάλο εύρος μηκών και χρονικών κλιμάκων, και γενικά περιέχουν μήκη πολύ μικρότερα του ελαχίστου πεπερασμένου όγκου του πλέγματος που μπορεί πρακτικά να χρησιμοποιηθεί σε μια αριθμητική ανάλυση. Επομένως η άμεση αριθμητική προσομοίωση ('DNS' από *Direct Numerical Simulation*) των τυρβωδών ροών στα στοιχεία της αντλίας απαιτεί δημιουργία άκρως ικανοποιητικών πλεγμάτων και τεράστια υπολογιστική ισχύ, η οποία δε διατίθεται στις μέρες μας.

Για να επιτραπεί η περιγραφή των αποτελεσμάτων της τύρβης, ένα μεγάλο εύρος της έρευνας συγκεντρώθηκε σε μεθόδους που κάνουν χρήση των *μοντέλων τύρβης*. Τα μοντέλα τύρβης αναπτύχθηκαν για να υπολογίσουν τα αποτελέσματα της τύρβης χωρίς την ανάγκη δημιουργίας πολύ καλών πλεγμάτων και χρήσης άμεσης αριθμητικής προσομοίωσης, η οποία απαιτεί όπως συζητήθηκε απαγορευτικά μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Κλείνοντας αυτή τη μικρή εισαγωγή πρέπει να αναφερθεί ότι τα περισσότερα μοντέλα τύρβης είναι στατιστικά μοντέλα όπως περιγράφεται και παρακάτω.

2.7.2.1. Στατιστικά Μοντέλα Τύρβης

Όταν εξετάζονται κλίμακες χρόνου πολύ μεγαλύτερες των κλιμάκων χρόνου των τυρβωδών διακυμάνσεων, η τυρβώδης ροή μπορεί να ειπωθεί ότι εμφανίζει χαρακτηριστικά μέσων όρων, μαζί με ένα χρονικά εξαρτώμενο όρο. Γενικά, τα μοντέλα τύρβης τροποποιούν τις αυθεντικές εξισώσεις Navier-Stokes εισάγοντας τους μέσους και χρονικά εξαρτώμενους όρους, ώστε να δημιουργήσουν τις εξισώσεις Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS). Αυτές οι εξισώσεις απεικονίζουν τις μέσες ποσότητες της ροής, όταν μοντελοποιούνται οι συνέπειες της τύρβης χωρίς να χρειάζεται η επίλυση των διακυμάνσεών της. Όλα τα επίπεδα του τυρβώδους πεδίου μοντελοποιούνται. Τα μοντέλα τύρβης τα οποία είναι βασισμένα στις εξισώσεις RANS είναι γνωστά ως *Στατιστικά Μοντέλα Τύρβης*.

Η προσομοίωση των εξισώσεων RANS μειώνει αισθητά την υπολογιστική ισχύ σε σύγκριση με τις άμεσες αριθμητικές μεθόδους (DNS) και γενικά υιοθετούνται για πρακτικούς υπολογισμούς. Ωστόσο, η διαδικασία δημιουργίας μέσων όρων εισάγει επιπλέον άγνωστους όρους, οι οποίοι δρουν ως πρόσθετες τάσεις πάνω στο ρευστό. Αυτοί οι όροι καλούνται '*Reynolds stresses*' και είναι δύσκολο να προσδιοριστούν άμεσα, γεγονός που εισάγει πρόσθετους άγνωστους όρους.

Οι 'Reynolds stresses' πρέπει να μοντελοποιηθούν μέσω πρόσθετων εξισώσεων από γνωστές ποσότητες ώστε να επιτευχθεί το λεγόμενο 'κλείσιμο' του συστήματος των εξισώσεων. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένας ικανοποιητικός αριθμός εξισώσεων για όλους τους αγνώστους, ακόμη και για τους όρους που εισήχθησαν κατά τη διαδικασία δημιουργίας μέσων όρων. Οι εξισώσεις που επιλέγονται κάθε φορά για το κλείσιμο του συστήματος των εξισώσεων χαρακτηρίζουν τον τύπο του μοντέλου τύρβης που θα χρησιμοποιηθεί.

2.7.2.2. Εξισώσεις Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

Όπως περιγράφηκε πιο πάνω, τα μοντέλα τύρβης εισάγουν στις ποσότητες των ήδη αναλυμένων εξισώσεων ένα μέσο και ένα χρονικά μεταβαλλόμενο όρο. Από εδώ και στο εξής σε ορισμένες εξισώσεις δεν γίνεται αναφορά στο διάνυσμα της ταχύτητας αλλά στις συνιστώσες της (U_i, U_j, U_k) σε κάθε άξονα (x_i, x_j, x_k). Η ταχύτητα λοιπόν στη διεύθυνση x_i μπορεί να χωριστεί σε έναν όρο που δηλώνει το μέσο όρο της ταχύτητας \bar{U}_i και ένα χρονικά εξαρτώμενο u_i . Δηλαδή ισχύει ότι :

$$U_i = \bar{U}_i + u_i$$

με

$$\bar{U}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U_i dt$$

όπου Δt είναι μια χρονική κλίμακα αρκετά μεγάλη σε σχέση με τις διακυμάνσεις της τύρβης, αλλά μικρή σχετικά με τη χρονική κλίμακα στην οποία λύνονται οι εξισώσεις. Από εδώ και πέρα σε όλες τις εξισώσεις οι συνιστώσες της ταχύτητας σε κάθε άξονα είναι αυτής της μορφής.

2.7.2.3. Το Μοντέλο k-epsilon

Τα περισσότερα μοντέλα τύρβης είναι βασισμένα στην έννοια του *eddy viscosity* ν_t το οποίο καθορίζεται αποκλειστικά και μόνο από τα χαρακτηριστικά της ροής. Όπως γράφτηκε και παραπάνω τα μοντέλα τύρβης μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τον αριθμό των εξισώσεων μεταφοράς που περιλαμβάνουν. Στην παρούσα εργασία για την περάτωση των διεπουσών εξισώσεων χρησιμοποιείται το μοντέλο τύρβης δύο εξισώσεων k-epsilon (k-ε), το οποίο είναι το πιο διαδεδομένο μοντέλο τύρβης.

Η εξίσωση k είναι η εξίσωσης μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και ορίζεται από τη διασπορά των διακυμάνσεων της ταχύτητας και η εξίσωση ε είναι η εξίσωση του ρυθμού καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Το μοντέλο k-ε εισάγει δύο νέες μεταβλητές στο σύστημα των εξισώσεων. Στο σημείο αυτό είναι καλό να τονιστεί ότι μπορεί το πρόβλημα που επιλύεται να αφορά ασυμπίεστη ροή

αλλά στο CFX όπου επιλύεται η μορφή των εξισώσεων είναι ίδια με τη συμπιεστή ροή. Εφόσον λοιπόν εδώ παρουσιάζονται οι εξισώσεις οι οποίες λύνονται στο CFX δεν πρέπει να μπερδεύει το γεγονός ότι είναι εξισώσεις συμπιεστή ροής.

Η εξίσωση της ορμής στη διεύθυνση x_j είναι

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho (U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M$$

όπου μ_{eff} είναι το 'effective viscosity' με $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$

όπου μ_t είναι το τυρβώδες ιξώδες (*turbulence viscosity*)

και p' είναι η τροποποιημένη πίεση και είναι ίση με :

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial U_k}{\partial x_k}$$

με τον τελευταίο όρο του δεξιού μέλους να εμπεριέχει την απόκλιση της ταχύτητας. Το μοντέλο k-ε υποθέτει ότι το μ_t (*turbulence viscosity*) συνδέεται με την τυρβώδη κινητική ενέργεια και διασπορά μέσω της σχέσης :

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

με $C_\mu = 0,09$.

Τελικά οι τιμές των k και ε έρχονται κατευθείαν από τις διαφορικές εξισώσεις μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και για ρυθμό διάχυσης της τύρβης :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\mu_t}{\rho \sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{P_k}{\rho} - \varepsilon + \frac{P_{kb}}{\rho}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\mu_t}{\rho \sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k \rho} (C_{\varepsilon 1} P_k \rho - C_{\varepsilon 2} \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b} \rho)$$

με $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_ε , σ_k σταθερές και P_{kb} , $P_{\varepsilon b}$ να αντιπροσωπεύουν την επιρροή των δυνάμεων άνωσης. Με P_k συμβολίζεται η παραγωγή τύρβης λόγω των δυνάμεων ιξώδους, η οποία μοντελοποιείται ως εξής :

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left(3 \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right)$$

Για ασυμπίεστες ροές όπως αυτές του προβλήματός μας, ο όρος $\frac{\partial U_k}{\partial x_k}$ είναι μικρός και ο δεύτερος όρος του δεξιού μέλους της παραπάνω εξίσωσης δεν συμβάλει στην παραγωγή τύρβης. Ακόμη ο όρος $3 \mu_t$ βασίζεται στην υπόθεση των 'frozen stress'. Μέσω αυτής αποκλείεται το γεγονός, οι τιμές των k και ε να πάρουν τιμές τόσο

μεγάλες μέσα σε διάφορες διαταραχές, μια κατάσταση η οποία γίνεται προοδευτικά όλο και δυσκολότερη καθώς το πλέγμα τείνει να βελτιωθεί.

2.7.3. Μοντελοποίηση Αιμόλυσης και Τάσεων

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1.5.2. της εργασίας, υπήρξε η ανάγκη μοντελοποίησης της καταστροφής των ερυθρών αιμοσφαιρίων του αίματος. Για να επιτευχθεί η ποσοτικοποίηση του μεγέθους της αιμόλυσης έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι με επικρατούσα τη *Normalized Index of Hemolysis (NIH)*. Αυτή είναι ανάλογη του ποσοστού καταστροφής της αιμοσφαιρίνης $\left(\frac{\Delta Hb}{\Delta H}\right)$ μέσω της σχέσης :

$$NIH\left(\frac{g}{100L\ blood}\right) = 100 \cdot \frac{\Delta Hb}{\Delta H} (1 - Hct) \cdot \kappa,$$

όπου *Hct* συμβολίζει τον αιματοκρίτη (%) και το κ την ποσότητα αιμοσφαιρίνης ανά λίτρο αίματος.

Το ποσοστό καταστροφής του αίματος σχετίζεται με το χρόνο και το βαθμωτό μέτρο της διάτμησης ως εξής :

$$\frac{\Delta Hb}{\Delta H} = 3,62 \cdot 10^{-7} \cdot SSS^{2,416} \cdot \Delta t^{0,785}$$

Για το βαθμωτό μέτρο της διάτμησης *SSS* πολλοί διαφορετικοί συγγραφείς έχουν χρησιμοποιήσει διαφορετικές εξισώσεις. Στην ακόλουθη, γίνεται χρήση των 'stress based' μεθόδων και πιο συγκεκριμένα αυτή που ο Bludszuweit εξέφρασε βασισμένος στο κριτήριο του von Mises, το οποίο την υπολογίζει από τις έξι συνιστώσες του τανιστή της τάσης. Οι 'stress based' μέθοδοι υποθέτουν ότι η αντίδραση των ερυθρών αιμοσφαιρίων στη φόρτιση είναι άμεση και ανεξάρτητη του ιστορικού των φορτίσεων. Το μοντέλο του Bludszuweit είναι το εξής :

$$SSS = \left\{ \frac{1}{6} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 \right] + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right\}^{0.5}$$

με τις ορθές τάσεις να ισούνται με :

$$\sigma_{xx} = 2\mu \frac{\partial U_x}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) + \rho \overline{U_x'^2}$$

$$\sigma_{yy} = 2\mu \frac{\partial U_y}{\partial y} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) + \rho \overline{U_y'^2}$$

$$\sigma_{zz} = 2\mu \frac{\partial U_z}{\partial z} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) + \rho \overline{U_z'^2}$$

και τα αντίστοιχα *Reynolds stresses* :

$$\overline{\rho U_x'^2} = 2\mu_t \frac{\partial U_x}{\partial x}$$

$$\overline{\rho U_y'^2} = 2\mu_t \frac{\partial U_y}{\partial y}$$

$$\overline{\rho U_z'^2} = 2\mu_t \frac{\partial U_z}{\partial z}$$

επίσης οι διατμητικές τάσεις είναι :

$$\tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \overline{\rho U_x' U_y'}$$

$$\tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) + \overline{\rho U_x' U_z'}$$

$$\tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y} \right) + \overline{\rho U_y' U_z'}$$

και τέλος τα αντίστοιχα *Reynolds stresses* των διατμητικών τάσεων :

$$\overline{\rho U_x' U_y'} = \mu_t \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \rho k$$

$$\overline{\rho U_x' U_z'} = \mu_t \left(\frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \rho k$$

$$\overline{\rho U_y' U_z'} = \mu_t \left(\frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \rho k$$

2.7.4. Παρακολούθηση Σωματιδίων (Particle Tracking)

Στην προηγούμενη ενότητα [2.8.3.] αναπτύχθηκε η μοντελοποίηση της καταστροφής των ερυθρών αιμοσφαιρίων του αίματος. Γίνεται κατανοητό, ότι χρειάζεται να υπολογιστεί ο χρόνος που υφίσταται την κάθε διάτμηση το στοιχείο του ρευστού που μελετάται και στο τέλος ολοκληρώνοντας όλη τη διαδρομή του στοιχείου ρευστού και όλα τα στοιχεία του ρευστού, δημιουργείται μια πιο συγκεκριμένη εικόνα για την καταστροφή του αίματος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της παρακολούθησης σωματιδίων γνωστή και ως *particle tracking*, με στόχο την παρακολούθηση της ροής ενός αριθμού σωματιδίων και τον υπολογισμό της μέσης διάτμησης και μέσου χρόνου παραμονής αυτών μέσα στη μηχανή. Παρακάτω ακολουθεί η μαθηματική μοντελοποίηση της ροής με τη μέθοδο *particle tracking* όπως γίνεται στο υπολογιστικό πακέτο του CFX της ANSYS.

Η μοντελοποίηση της μεταφοράς σωματιδίων είναι ένα πολυφασικό μοντέλο, όπου τα σωματίδια παρακολουθούνται μέσα στη ροή με *Lagrangian* τρόπο αντί να

μοντελοποιούνται ως μια επιπλέον Eulerian φάση. Η παρακολούθηση διεξάγεται σχηματίζοντας ένα σύνολο από συνήθεις διαφορικές εξισώσεις στο χρόνο για κάθε σωματίδιο, συμπεριλαμβανομένων εξισώσεων θέσης, ταχύτητας, θερμοκρασίας και μάζας. Ακολουθώντας αυτές οι εξισώσεις ολοκληρώνονται χρησιμοποιώντας μια απλή μέθοδο ολοκλήρωσης ώστε να υπολογιστεί η συμπεριφορά των σωματιδίων καθώς διασχίζουν τη ροή.

2.7.4.1. Εξίσωση Θέσης και Ταχύτητας-Ορμής

Η μετατόπιση των σωματιδίων υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την προς τα εμπρός ολοκλήρωση κατά Euler, της ταχύτητας του σωματιδίου στο χρονικό διάστημα δt και ισχύει ότι :

$$x_{pi}^n = x_{pi}^o + v_{pi}^o \delta t$$

όπου οι συμβολισμοί o και n αναφέρονται σε παλιές και νέες τιμές του μεγέθους αντίστοιχα. Ακόμη v_{pi}^o είναι η αρχική ταχύτητα του σωματιδίου. Στην προς τα εμπρός ολοκλήρωση, η ταχύτητα του σωματιδίου που υπολογίστηκε στην αρχή του χρονικού διαστήματος θεωρείται ότι υπερσχύει όλου του διαστήματος. Στο τέλος του διαστήματος, η νέα ταχύτητα του σωματιδίου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την αναλυτική επίλυση της εξίσωσης της ορμής για σωματίδιο :

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_{all}$$

με F_{all} το άθροισμα των δυνάμεων που ενεργούν στο σωματίδιο. Στη γενική περίπτωση οι δυνάμεις που ασκούνται στο σωματίδιο είναι οι εξής :

- F_D : δύναμη αντίστασης
- F_B : δύναμη αδράνειας
- F_R : δυνάμεις λόγω περιστροφής του πεδίου
- F_{VM} : εικονική δύναμη μάζας. Αυτή η δύναμη επιταχύνει την εικονική μάζα του ρευστού στον όγκο που καταλαμβάνουν τα σωματίδια
- F_p : δύναμη πίεσης λόγω του ρευστού που περικλείει το σωματίδιο

Τελικά η αναλυτική επίλυση της εξίσωσης της ορμής μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$v_p = v_f + (v_p^o - v_f) \cdot e^{-\frac{\delta t}{\tau}} + \tau \cdot F_{all} \cdot (1 - e^{-\frac{\delta t}{\tau}})$$

2.7.4.2. Εξίσωση Θέσης και Ταχύτητας-Ορμής

Ο υπολογισμός της στιγμιαίας ταχύτητας v_i , εξαρτάται από τις συνθήκες της ροής και τον τύπο της παρακολούθησης σωματιδίου. Για την τυρβώδη παρακολούθηση, η στιγμιαία ταχύτητα του ρευστού αποτελείται από τη μέση \bar{v}_f και την κυμαινόμενη v'_f . Πλέον οι τροχιές των σωματιδίων δεν είναι αυστηρά καθορισμένες αλλά όταν δύο σωματίδια εισάγονται στη ροή από ένα σημείο ακολουθούν διαφορετικές τροχιές

λόγω της στιγμιαίας ταχύτητας. Είναι ο κυμαινόμενος όρος της ταχύτητας ο οποίος προκαλεί τη διασπορά των σωματιδίων στην τυρβώδη ροή.

Το μοντέλο της τυρβώδους διασποράς που χρησιμοποιείται, υποθέτει ότι ένα σωματίδιο βρίσκεται συνεχώς εντός μιας τυρβώδης δίνης. Κάθε δίνη έχει για χαρακτηριστικό της, την κυμαινόμενη ταχύτητα v_f , χρόνο ζωής τ_e και μήκος l_e . Όταν ένα σωματίδιο εισχωρεί εντός της δίνης, η κυμαινόμενη ταχύτητα της δίνης προστίθεται στην τοπική ταχύτητα της ροής. Η τυρβώδης ταχύτητα του ρευστού v_f , υποτίθεται ότι επικρατεί στο πεδίο όσο ο χρόνος αλληλεπίδρασης μεταξύ της δίνης και του σωματιδίου είναι μικρότερος του χρόνου ζωής της δίνης, και όσο η μετατόπιση του στο χώρο είναι μικρότερη του χαρακτηριστικού μήκους της δίνης. Αν κάποια από τις δύο παραπάνω συνθήκες σταματήσει να ισχύει, το σωματίδιο θεωρείται ότι μπαίνει σε μια καινούρια δίνη με νέα χαρακτηριστικά v_f , τ_e και l_e . Η τυρβώδης ταχύτητα, ο χρόνος ζωής και το χαρακτηριστικό μήκος της δίνης υπολογίζονται από της τοπικές ιδιότητες της τύρβης :

$$v_f = \Gamma \left(\frac{2k}{3} \right)^{0,5}$$

$$l_e = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\varepsilon}$$

$$\tau_e = \frac{l_e}{(2k/3)^{0,5}}$$

η μεταβλητή Γ κυμαίνεται μεταξύ αριθμών που αντιπροσωπεύουν την τυχαιότητα της τύρβης γύρω από μια μέση τιμή. Λόγω αυτής της τυχαιότητας, κάθε συνιστώσα της ταχύτητας (u', v', w') έχει διαφορετική ταχύτητα σε διαφορετική δίνη.

3. Υδροδυναμική Βελτιστοποίηση και Σχεδιασμός

Ο υδροδυναμικός σχεδιασμός μιας φυγοκεντρικής αντλίας αποτελείται από τη σχεδίαση των δύο βασικών της τμημάτων. Το πρώτο είναι η πτερωτή, η οποία αποτελεί το κινούμενο μέρος της μηχανής και το δεύτερο είναι το κέλυφος, το οποίο είναι το σταθερό της κομμάτι.

Ως σημείο εκκίνησης για το σχεδιασμό της πτερωτής μιας τέτοιας μηχανής θεωρήθηκε η παροχή και η διαφορά πίεσης που πρέπει να επιτευχθεί για τη μεταφορά του αίματος από την αριστερή κοιλία της καρδιάς στην αορτή. Γι' αυτό γράφτηκε ένας κώδικας στο πρόγραμμα της MATLAB ο οποίος κάνοντας χρήση των μαθηματικών σχέσεων των στροβιλομηχανών υπολογίζει τους διαφορετικούς συνδυασμούς των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και συνθηκών λειτουργίας οι οποίοι έχουν ως αποτέλεσμα την πίεση και την παροχή που επιθυμείται. Έτσι αποκτήθηκε μια πρώτη εικόνα για τα χαρακτηριστικά της πτερωτής της αντλίας.

Παράλληλα κάνοντας χρήση του λογισμικού της ANSYS και πιο συγκεκριμένα των Blade Gen, TurboGrid και CFX δημιουργήθηκε μια εικόνα των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της πτερωτής σε συνδυασμό με της σχέσεις αναλογίας που συνδέουν τα χαρακτηριστικά μιας αντλίας. Στο Blade Gen έγινε η σχεδίαση της πτερωτής, στο TurboGrid δημιουργήθηκε το πλέγμα και στο CFX έγινε το στήσιμο της γεωμετρίας και του πλέγματος όπου μαζί με της οριακές και αρχικές συνθήκες έδωσαν την εικόνα για το πεδίο ροής μέσα στην πτερωτή.

Ακολούθησε η σχεδίαση του κελύφους στο σχεδιαστικό πρόγραμμα του Solid Works με στόχο τη σύνδεσή του με την πτερωτή και μελέτη-βελτιστοποίηση του στο CFX με τον ίδιο τρόπο με πριν. Σε αυτό το σημείο η υπολογιστική μελέτη και βελτιστοποίηση έφτασε στο τέλος της.

Κάνοντας χρήση του Solid Works δημιουργήθηκε το τελικό μοντέλο προς εκτύπωση το οποίο αποτελούνταν από τρία μέρη:

- την πτερωτή με τα πέντε πτερύγια
- το κέλυφος
- το καπάκι στεγανοποίησής

Τέλος για τις ανάγκες της συναρμολόγησης και της κατασκευής της μηχανής ο άξονας και ένα κομμάτι τεφλόν κατεργάστηκαν μηχανουργικά σε τόρνο για την τοποθέτησή τους εντός της αντλίας.

3.1. Κώδικας MATLAB

Ο κώδικας γράφτηκε με σκοπό τη δημιουργία μια πρώτης εικόνας στο που κυμαίνονται οι τιμές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και των συνθηκών λειτουργίας της πτερωτής της αντλίας.

Πιο συγκεκριμένα τα δεδομένα για τον αλγόριθμό είναι :

- η παροχή μάζας στα $0,083 \text{ kg/sec}$,
- το ύψος πίεσης στα $1,63 \text{ m}$,
- το ύψος των πτερυγίων στη έξοδο στα $0,002 \text{ m}$,
- σωλήνα εισόδου με ακτίνα $0,009525 \text{ m}$,
- σωλήνα εξόδου με ακτίνα $0,0113 \text{ m}$ και
- πυκνότητα εργαζόμενου μέσου 1.000 kg/m^3

Ενώ αυτά που καλείται ο αλγόριθμος να υπολογίσει είναι τα εξής :

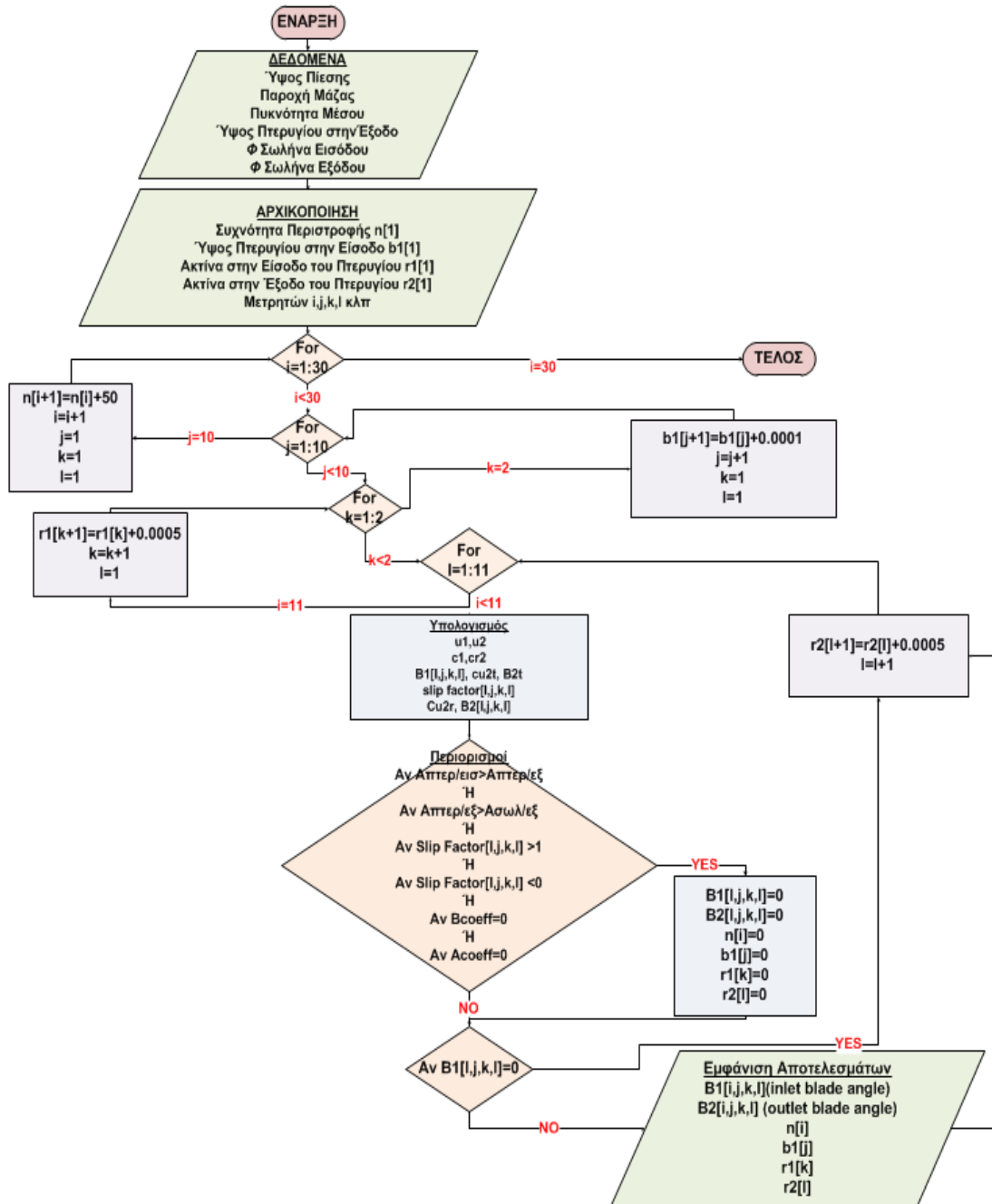
- τη γωνία εισόδου των πτερυγίων B_1 ,
- τη γωνία εξόδου των πτερυγίων B_2 ,
- τη συχνότητα περιστροφής της πτερωτής n ,
- το ύψος του πτερυγίου στην είσοδο b_1 ,
- την ακτίνα στην είσοδο του πτερυγίου r_1 και
- την ακτίνα στην έξοδο του πτερυγίου r_2

Η λογική στην οποία λειτουργεί ο αλγόριθμος αναλύεται στα επόμενα βήματα :

- ορισμός των δεδομένων και αρχικοποίηση των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται
- εκκίνηση τεσσάρων επαναληπτικών διαδικασιών η μία εντός της άλλης. Σε κάθε μία εισάγεται η βηματική αύξηση μία μεταβλητής με την ακόλουθη σειρά: πρώτα η συχνότητα περιστροφής $[n]$ της μηχανής, μετά το ύψος πτερυγίου στην είσοδο $[b_1]$ και τέλος η ακτίνα εισόδου $[r_1]$ και η ακτίνα εξόδου $[r_2]$ του πτερυγίου. Η κάθε μια μεταβλητή αλλάζει με διαφορετικό βήμα σε κάθε επανάληψη και στο τέλος της επαναληπτικής διαδικασίας έχουν δοκιμαστεί όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί. Το βήμα με το οποίο αλλάζει και οι φορές την οποία αλλάζει κάθε φορά ορίζουν το διάστημα μέσα στο οποίο τοποθετείται η κάθε μεταβλητή. Αυτό το διάστημα ορίζεται εξ αρχής έχοντας μια γενική άποψη για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αντλίας. Πιο συγκεκριμένα
 1. για τη συχνότητα περιστροφής η τιμή της μεταβάλλεται από 1.500 rpm έως 3.000 rpm . Ο λόγος είναι ότι οι φυγοκεντρικές αντλίες είναι γενικά χαμηλόστροφες μηχανές γι' αυτό και προβλέπεται αυτό το επίπεδο στροφών
 2. για το ύψος πτερυγίου στην είσοδο η τιμή του μεταβάλλεται από 3 mm έως $3,9 \text{ mm}$. Εφόσον έχει περιοριστεί στη σχεδίαση το ύψος της εξόδου στα 2 mm και επιθυμείται διάχυση της ροής από την είσοδο στην έξοδο, πρέπει η τιμή του ύψους πτερυγίου στην είσοδο να μην αυξηθεί πολύ.
 3. για την ακτίνα εισόδου του πτερυγίου η τιμή της μεταβάλλεται από $12,5 \text{ mm}$ έως 13 mm . Ο λόγος είναι ότι πρέπει το πτερύγιο να εκκινήσει από μικρή ακτίνα έτσι ώστε να μην αυξηθεί το μέγεθος της πτερωτής.
 4. για την ακτίνα εξόδου του πτερυγίου η τιμή της μεταβάλλεται από $18,5 \text{ mm}$ έως $23,5 \text{ mm}$. Ο λόγος είναι ότι πρέπει η πτερωτή να έχει όσο το δυνατό μικρότερο μέγεθος.

- Τελικά σε κάθε μια επανάληψη, δημιουργείται μια διαφορετική τετράδα για την οποία υπολογίζονται οι γωνίες εισόδου [B_1] και εξόδου [B_2] των πτερυγίων μέσω της θεωρίας των τριγώνων ταχυτήτων και της μεθόδου Busemann ακολουθώντας τα εξής βήματα:
 - Υπολογισμός των περιφερειακών ταχυτήτων στην είσοδο u_1 και στην έξοδο u_2
 - Υπολογισμός της απόλυτης ταχύτητας του ρευστού στην είσοδο c_1 και στην έξοδο $c_{r,2}$ της πτερωτής
 - Υπολογισμός της **γωνίας του πτερυγίου στην είσοδο της πτερωτής B_1**
 - Υπολογισμός της θεωρητικής απόλυτης εφαπτομενικής ταχύτητας στην έξοδο $c_{u,2t}$ του πτερυγίου
 - Υπολογισμός της θεωρητικής γωνίας του πτερυγίου στην έξοδο B_{2t}
 - Υπολογισμός του slip factor sf μέσω της εμπειρικής σχέσης που διατυπώθηκε από τον Busemann
 - Υπολογισμός της πραγματικής εφαπτομενικής συνιστώσας της απόλυτης ταχύτητας $c_{u,2r}$
 - Υπολογισμός της **πραγματικής γωνίας εξόδου του πτερυγίου B_2**
- Ακολουθώς εισάγονται οι περιορισμοί :
 - Το εμβαδό της εισόδου στην πτερωτή οφείλει σε κάθε περίπτωση να είναι μικρότερο από αυτό της εξόδου από την πτερωτή ώστε να μην υπάρξει μείωση της πίεσης και να επιτευχθεί διάχυση της ροής. Για τον ίδιο λόγο επιθυμείτε και το εμβαδό της εξόδου από την πτερωτή να είναι πάντα μικρότερο από αυτό στο τέλος του κελύφους. Σε διαφορετική περίπτωση μηδενίζουμε τις γωνίες πτερυγίων και επομένως για τη συγκεκριμένη επανάληψη δεν έχουμε αποτέλεσμα.
 - Στο τέλος της διαδικασίας υπολογισμού του slip factor sf ελέγχεται αν βρίσκεται εντός του πεδίου τιμών μεταξύ του μηδενός και του ένα. Σε διαφορετική περίπτωση μηδενίζουμε τις γωνίες πτερυγίων.
 - Στο τέλος της ίδιας διαδικασίας ελέγχεται εάν ο συντελεστής B ισούται με τη μονάδα και εάν ο συντελεστής A είναι διάφορος του μηδενός. Σε διαφορετική περίπτωση μηδενίζουμε τις γωνίες πτερυγίων.
- Κλείνοντας τον αλγόριθμο και τις επαναληπτικές διαδικασίες αποθηκεύουμε σε πίνακες τα αποτελέσματα.

Ακολουθεί το διάγραμμα ροής του συγκεκριμένου προγράμματος



Σχήμα 3.1.α.

3.1.1. Επιλογή Εργαζόμενου Μέσου

Ενώ στην πραγματικότητα σε αντλίες σαν και αυτή το εργαζόμενο μέσο είναι το αίμα το οποίο είναι μη νευτώνειο ρευστό, μπορεί να δημιουργηθεί το ερωτηματικό γιατί στον κώδικα της MATLAB αλλά και στην μοντελοποίηση που ακολουθεί έγινε χρήση του νερού. Η λογική αυτής της επιλογής είναι η εξής :

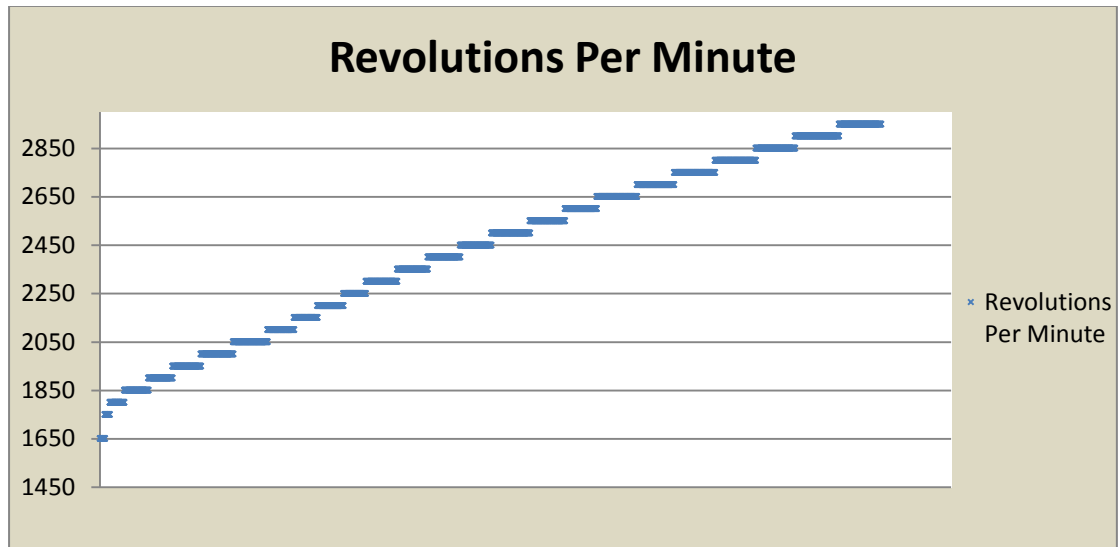
- Η συγκεκριμένη εργασία αποτελεί την πρώτη φάση σχεδίασης μιας τέτοιας μηχανής και συνηθίζεται πρώτα η σχεδίαση να γίνεται με νευτώνεια ρευστά και πιο συχνά με νερό. Η μηχανή που σχεδιάζεται δεν αποτελεί το τελικό προϊόν αλλά μια πρώτη εικόνα αυτού.
- Με βάση τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι το αίμα συμπεριφέρεται ως νευτώνειο ρευστό όταν ο ρυθμός διάτμησης ξεπερνά τα 100 s^{-1} . Στο Σχήμα 3.7.4.3.γ. δείχνεται ότι και στην αντλία η οποία σχεδιάστηκε ο ρυθμός διάτμησης το ξεπερνάει, επομένως δικαιολογείται η χρήση νευτώνειου ρευστού.
- Η χρήση του νερού ως εργαζόμενο μέσο δικαιολογείται διότι δεν υπήρχε η δυνατότητα στο πείραμα που ακολουθεί να χρησιμοποιηθεί αίμα. Επομένως αλλάζοντας το εργαζόμενο μέσο στο πείραμα γίνεται δύσκολη η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη μοντελοποίηση που προηγήθηκε.

Αυτοί λοιπόν είναι οι λόγοι που οδήγησαν στη χρήση του νερού ως εργαζόμενο μέσο και στον κώδικα της MATLAB και στη μοντελοποίηση και στο πείραμα.

3.1.2. Αποτελέσματα Κώδικα Matlab

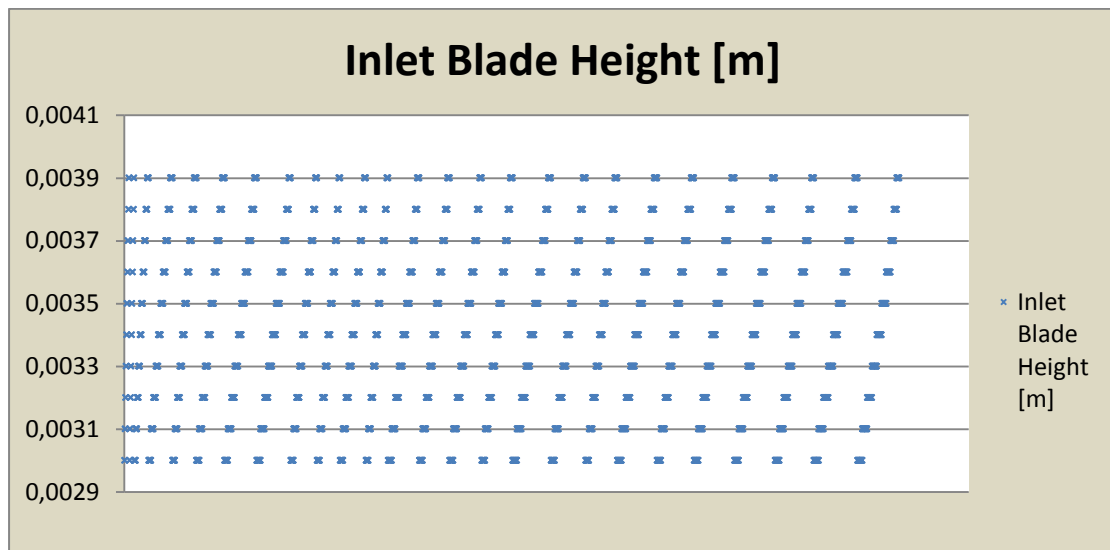
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, κάθε διαφορετική τετράδα αριθμού περιστροφής $[n]$, ύψους πτερυγίου στην είσοδο $[b_1]$, ακτίνα εισόδου $[r_1]$ και εξόδου $[r_2]$ του πτερυγίου, έχει ως αποτέλεσμα τις γωνίες εισόδου $[B_1]$ και εξόδου $[B_2]$ των πτερυγίων. Ο κώδικας έδωσε 3.212 διαφορετικές τετράδες, των οποίων τα αποτελέσματα δείχνουν να είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους. Παρακάτω ακολουθεί η παρουσίαση των ολοκληρωμένων αποτελεσμάτων για κάθε μία μεταβλητή.

- Για τον αριθμό περιστροφής η ελάχιστη τιμή στα 3.212 αποτελέσματα, είναι οι 1.650 στροφές ανά λεπτό ενώ η μέγιστη 2.950. Η μέση τιμή βρίσκεται στις 2.433 στροφές ανά λεπτό.



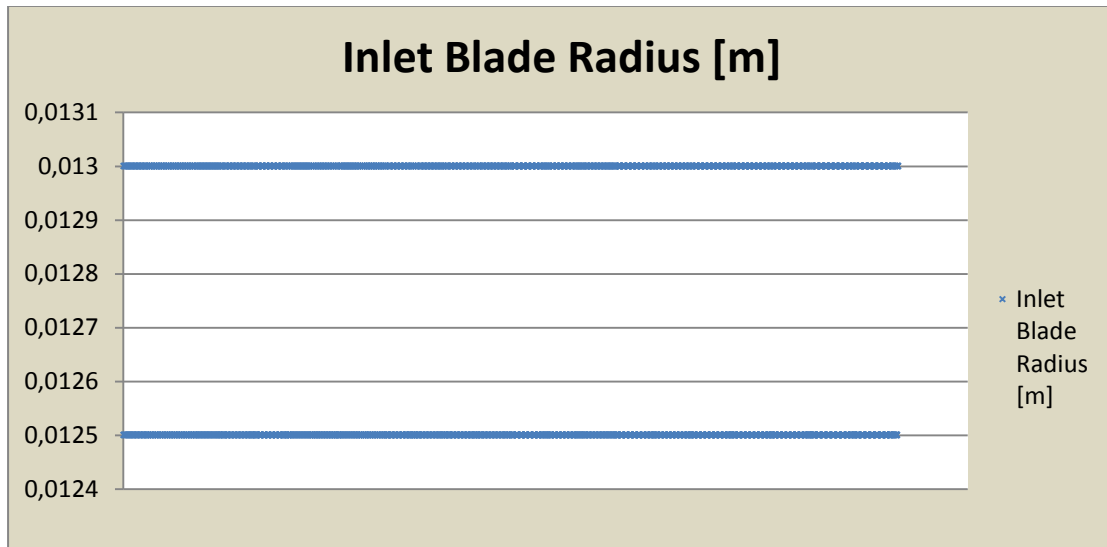
Σχήμα 3.1.2.α.

- Για το ύψους πτερυγίου στην είσοδο η ελάχιστη τιμή είναι τα 3 χιλιοστά ενώ η μέγιστη τα 3,9 χιλιοστά. Η μέση τιμή βρίσκεται στα 3,4 χιλιοστά.



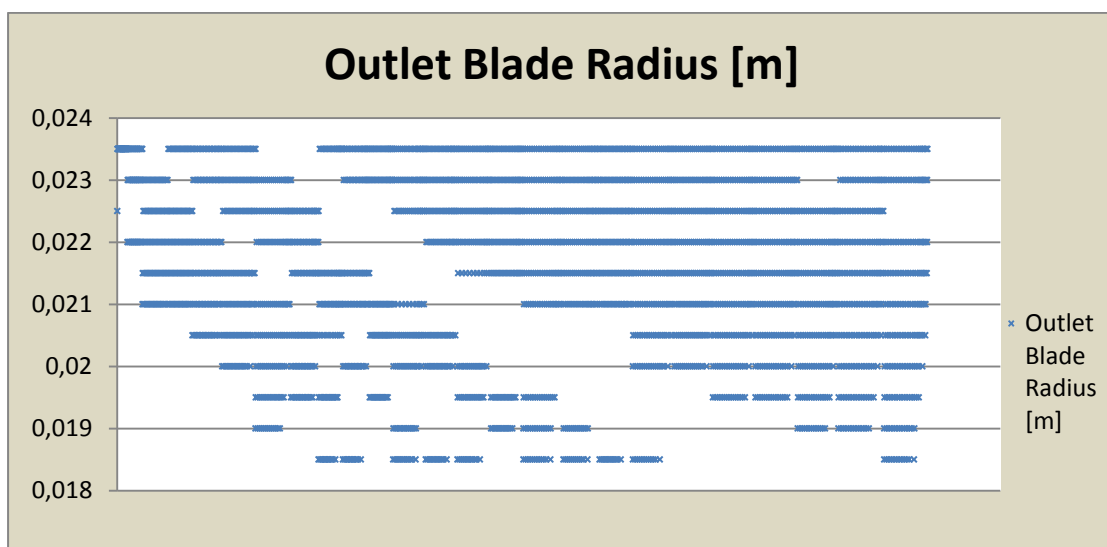
Σχήμα 3.1.2.β.

- Για την ακτίνα εισόδου του πτερυγίου η ελάχιστη τιμή είναι τα 12,5 χιλιοστά ενώ η μέγιστη τα 13 χιλιοστά. Η μέση τιμή βρίσκεται στα 12,7 χιλιοστά.



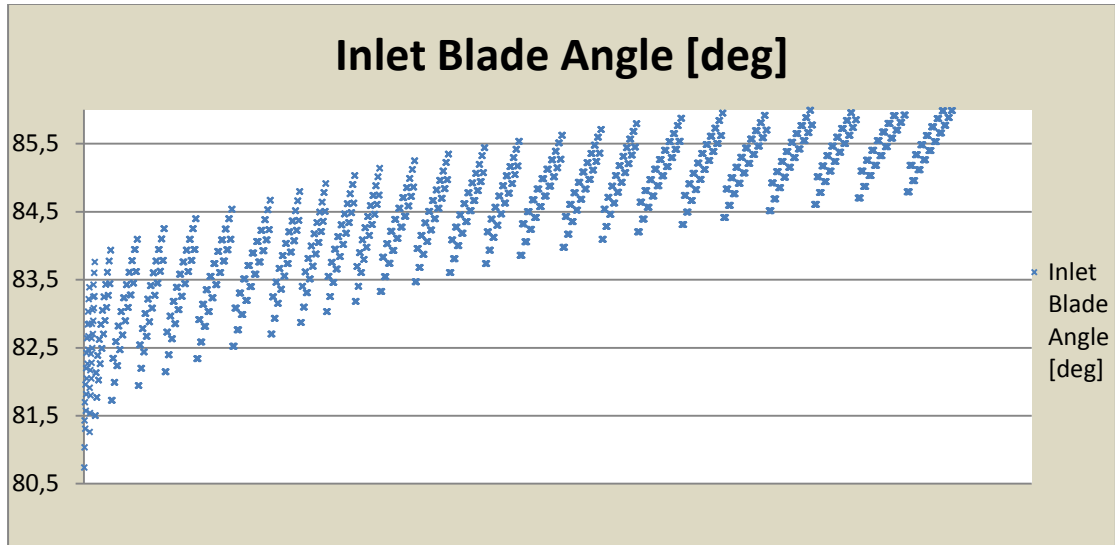
Σχήμα 3.1.2.γ.

- Για την ακτίνα εξόδου του πτερυγίου η ελάχιστη τιμή είναι τα 18,5 χιλιοστά ενώ η μέγιστη τα 23,5 χιλιοστά. Η μέση τιμή βρίσκεται στα 21,6 χιλιοστά.



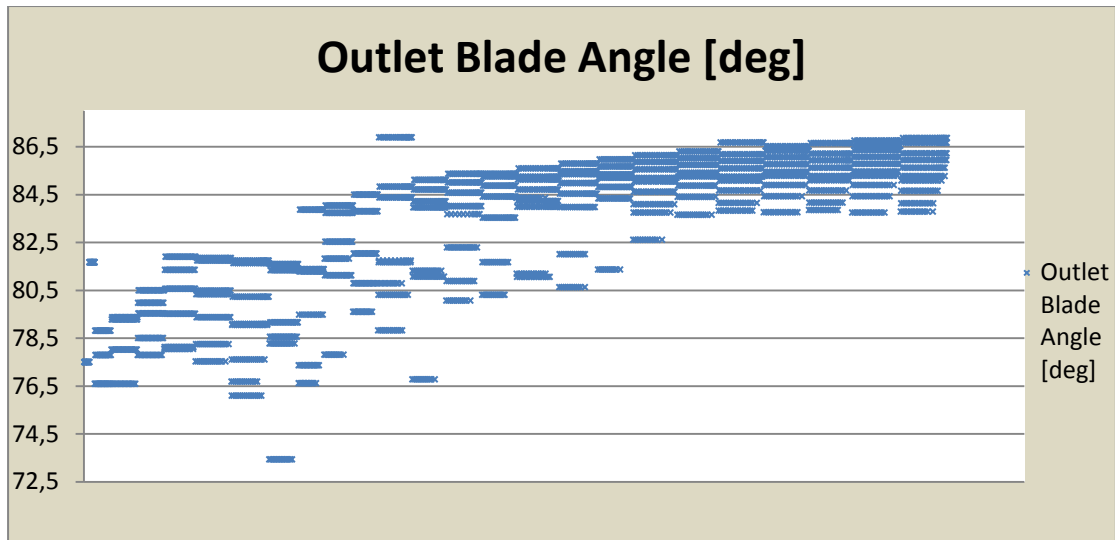
Σχήμα 3.1.2.δ.

- Για την γωνία εισόδου του πτερυγίου η ελάχιστη τιμή είναι οι 80,7 μοίρες ενώ η μέγιστη οι 86,3. Η μέση τιμή βρίσκεται στις 84,5 μοίρες.



Σχήμα 3.1.2.ε.

- Για την γωνία εξόδου του πτερυγίου η ελάχιστη τιμή είναι οι 66 μοίρες ενώ η μέγιστη οι 86,88. Η μέση τιμή βρίσκεται στις 83 μοίρες. Επειδή μόλις το 0,8% των τιμών των αποτελεσμάτων βρέθηκαν να είναι κάτω των 70 μοιρών στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται μονάχα οι τιμές αυτών που βρίσκονται πάνω από τις 70 μοίρες.



Σχήμα 3.1.2.στ.

3.1.3. Επιλογή Αποτελεσμάτων

Το πρώτο κριτήριο για την περαιτέρω επεξεργασία μιας γεωμετρίας είναι μια ροή χωρίς ανακυκλοφορίες. Εδώ να τονιστεί ότι για λόγους οικονομίας χρόνου παράλληλα με τη δημιουργία του κώδικα είχαν ξεκινήσει δοκιμές στο πρόγραμμα του

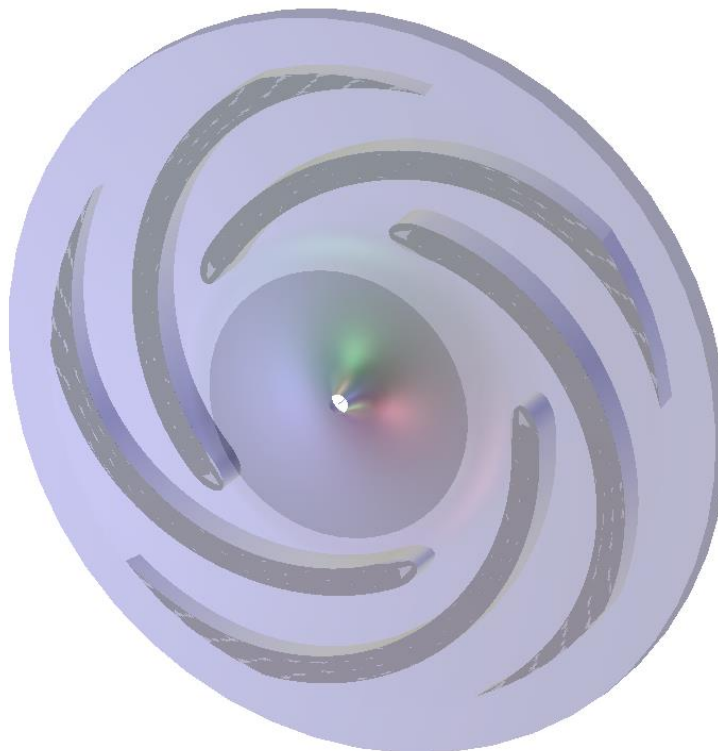
ANSYS και ήδη υπήρχε μια εικόνα για τη γεωμετρία της μηχανής. Γι' αυτό το λόγο τα αποτελέσματα που αποτυπώθηκαν στα παραπάνω διαγράμματα συνδυάστηκαν με την υπάρχουσα μικρή εμπειρία των υπολογιστικών δοκιμών. Ενώ λοιπόν τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της πρώτης εξάδας (21^η που εξάχθηκε ως αποτέλεσμα) που επιλέχθηκε ήταν τα εξής :

- *Ακτίνα Εισόδου Πτερυγίου 12,5 mm*
- *Ακτίνα Εξόδου Πτερυγίου 23,5 mm*
- *Ύψος Εισόδου Πτερυγίου 3 mm*
- *Γωνία Εισόδου Πτερυγίου 81,25 μοίρες*
- *Γωνία Εξόδου Πτερυγίου 81,67 μοίρες*
- *Ταχύτητα Περιστροφής 1.750 στροφές ανά λεπτό*

αυτά συνδυάστηκαν με τη μικρή εμπειρία που υπήρχε στο Blade Gen. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με τα δεδομένα για τον αλγόριθμο :

- *Ύψος Εξόδου Πτερυγίου 2 mm*
- *Σωλήνα Εισόδου Ακτίνας 9.525 mm*
- *Σωλήνα Εξόδου Ακτίνας 11.3 mm*

δίνουν την εικόνα της πρώτης πτερωτής (Σχήμα 3.1.3.α).



Σχήμα 3.1.3.α.

Βλέποντας τα χαρακτηριστικά των πτερυγίων της παραπάνω πτερωτής παρατηρείται ότι η γωνία εξόδου των πτερυγίων είναι αρκετά μεγάλη. Αυτό κάνει το πτερύγιο ιδιαίτερα μεγάλο και άρα πολύ εφασπτομενικό γεγονός που δημιουργεί πρόβλημα και στο υπολογιστικό κομμάτι καθώς είναι αρκετά δύσκολη η κατασκευή του πλέγματος στην περιοχή της εξόδου, αλλά και στο πρακτικό κομμάτι καθώς όσο αυξάνει το μέγεθος του πτερυγίου τόσο αυξάνει η επιφάνεια επαφής με το ρευστό με αποτέλεσμα υψηλότερη διάτμηση, γεγονός ανεπιθύμητο.

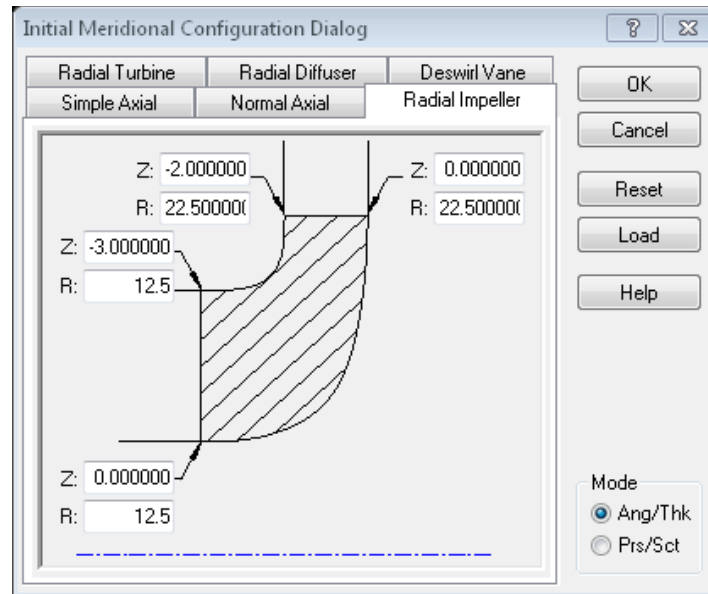
Στο σημείο εδώ λοιπόν αποφασίστηκε η αλλαγή της γωνία εξόδου για τους λόγους τους οποίους εξηγήθηκαν σε 70 μοίρες καθώς και η μείωση του μεγέθους της πτερωτής κατά ένα χιλιοστό. Τελικά τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της πρώτης πτερωτής που επιλέχθηκε υπολογιστική ανάλυση ήταν τα εξής :

- *Ακτίνα Εισόδου Πτερυγίου 12,5 mm*
- *Ακτίνα Εξόδου Πτερυγίου 22,5 mm*
- *Ύψος Εισόδου Πτερυγίου 3 mm*
- *Γωνία Εισόδου Πτερυγίου 83,65 μοίρες*
- *Γωνία Εξόδου Πτερυγίου 70 μοίρες*
- *Ταχύτητα Περιστροφής 1.750 στροφές ανά λεπτό*

3.2. Πρώτο Στάδιο Σχεδίασης

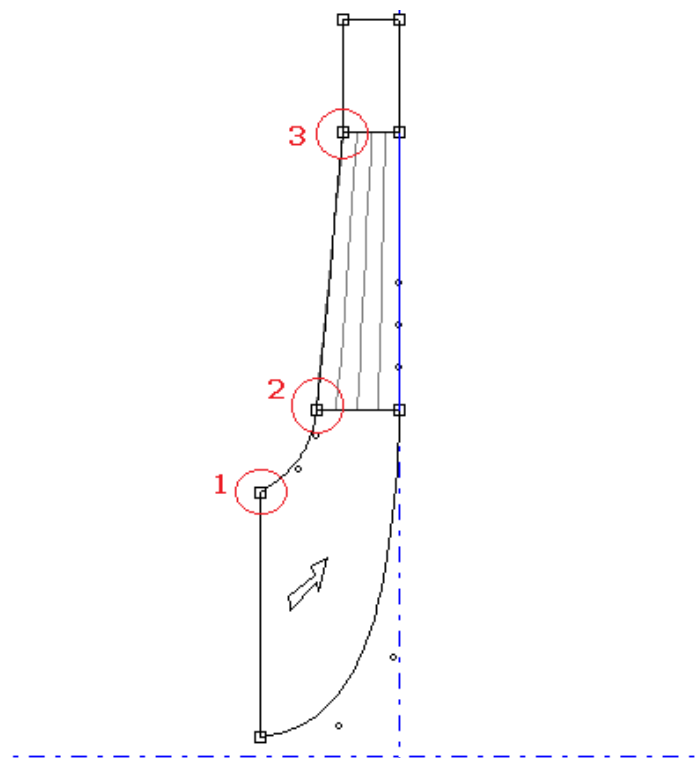
3.2.1. Σχεδίαση Πτερωτής στο λογισμικό BladeGen της ANSYS

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση της σχεδίασης της πρώτης πτερωτής στο σχεδιαστικό πρόγραμμα BladeGen αλλά και δίνεται μια πιο λεπτομερή εικόνα του πως το πρόγραμμα λειτουργεί. Αυτό γίνεται μόνο σε αυτή την παράγραφο και δεν επαναλαμβάνεται για λόγους συντομίας στις επόμενες. Το πρώτο στάδιο της σχεδίασης της πτερωτής αφορά τη γεωμετρία που επιλέχθηκε στο υποκεφάλαιο 3.1.2.. Κατά την έναρξη της διαδικασίας σχεδιασμού στο BladeGen επιλέγεται η σχεδίαση ακτινικής πτερωτής και δίνονται οι γεωμετρικές συντεταγμένες της μεσημβρινής της τομής. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι ακτίνες εισόδου στα 12.5 mm, εξόδου στα 22.5 mm, ύψος πτερυγίου στην είσοδο 3 mm και ύψος πτερυγίου στην έξοδο 2 mm.



Σχήμα 3.2.1.α.

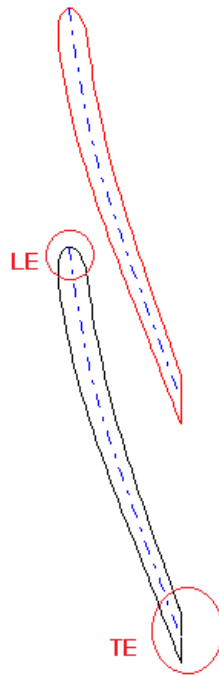
Η μεσημβρινή τομή της ακτινικής πτερωτής (η διαγραμμισμένη περιοχή αφορά το πτερύγιο) που δημιουργείται μαζί με την κατάλληλη διαμόρφωση στην είσοδο είναι η εξής :



Σχήμα 3.2.1.β.

- στο σημείο 1 ορίζεται η ακτίνα του σωλήνα εισόδου
- στο σημείο 2 η ακτίνα εκκίνησης του πτερυγίου καθώς και του ύψους του, ενώ

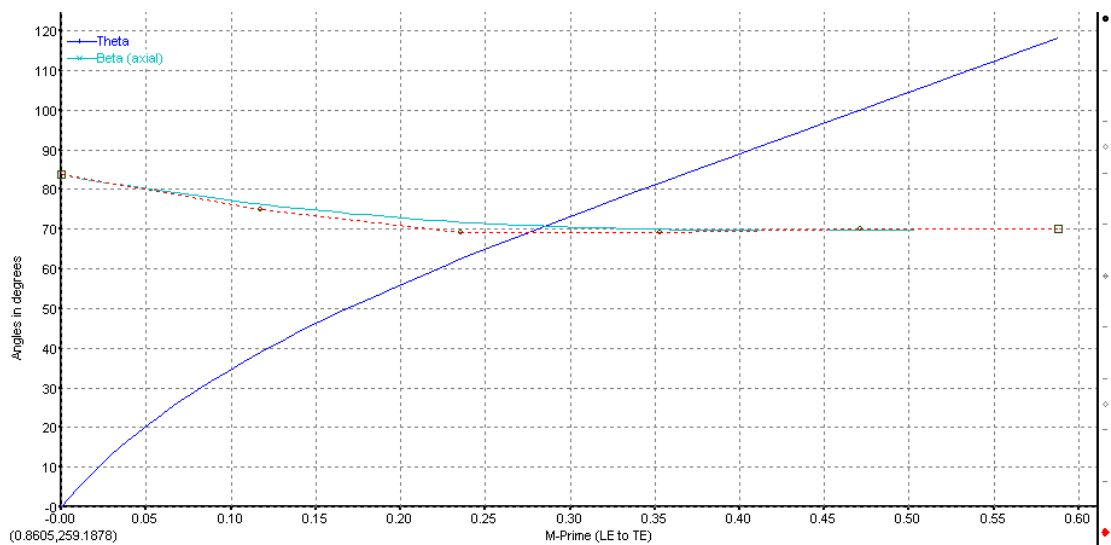
- στο σημείο 3 η ακτίνα στο τέλος του πτερυγίου μαζί με το ύψος του ενώ στην παρακάτω βοηθητική άποψη παρουσιάζεται μόνο το πτερύγιο :



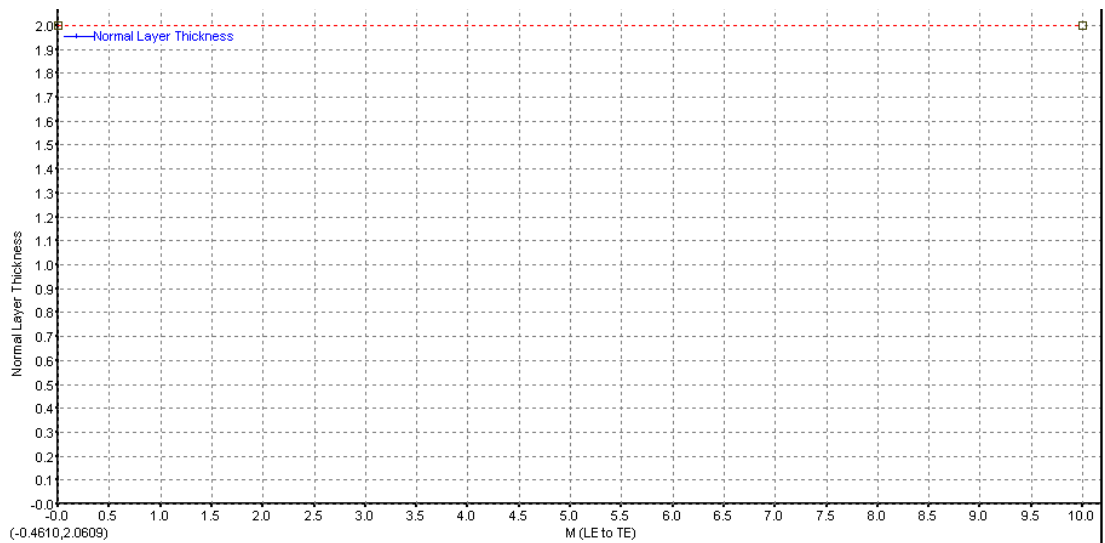
Σχήμα 3.2.γ.

όπου παρατηρείται στη μπροστά άκρη του ($LE = Leading\ Edge$) το σχήμα της έλλειψης ενώ στην πίσω άκρη του ($TE = Trailing\ Edge$) το πτερύγιο είναι κομμένο.

Ακόμη στο τελευταίο σχήμα (Σχήμα 3.2.1.δ.) φαίνονται οι μεταβολές της γωνίας του πτερυγίου (γωνία βήτα), της γωνίας θ καθώς και του πάχους του πτερυγίου κατά μήκος αυτού.



Σχήμα 3.2.1.δ.

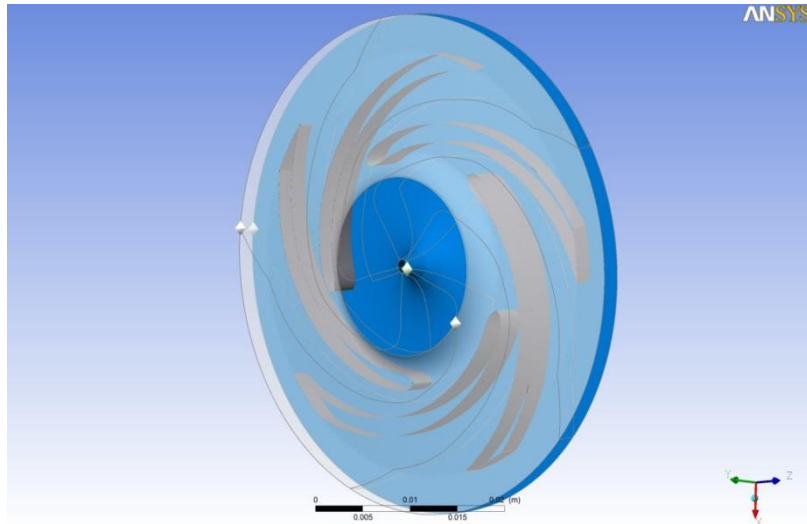


Σχήμα 3.2.1.ε.

Στην παρούσα εργασία το πάχος του πτερυγίου (Σχήμα 3.2.1.ε.) επιλέχθηκε για κατασκευαστικούς λόγους να μένει σταθερό σε όλο το πτερύγιο και ίσο με 2 mm . Ο λόγος είναι ότι ο τρισδιάστατος εκτυπωτής rapid prototyping είχε ελάχιστο μέγεθος εκτυπώσεως τα 2 mm για αποδεκτή ακρίβεια. Τέλος όσο αναφορά το πλήθος των πτερυγίων ο αριθμός είναι τα πέντε καθώς επιδιώκεται να μειωθεί στο ελάχιστο η επιφάνεια επαφής υλικού και αίματος. Σε περίπτωση πολύ ασταθούς ροής αυτός αυξάνεται.

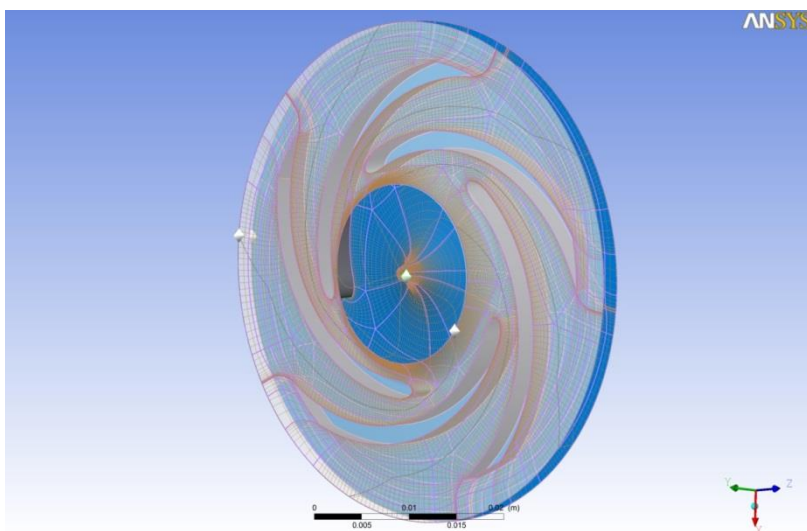
3.2.2. Δημιουργία του Πλέγματος της Πτερωτής στο TurboGrid

Το TurboGrid είναι ένα πρόγραμμα του υπολογιστικού πακέτου της ANSYS το οποίο εξειδικεύεται στη δημιουργία πλεγμάτων σε πτερύγια στροβιλομηχανών. Εφόσον έχει ήδη δημιουργηθεί η τρισδιάστατη γεωμετρία του πτερυγίου, αυτή εισάγεται στο TurboGrid (Σχήμα 3.2.2.α.) όπου και δημιουργείται το υπολογιστικό πλέγμα πάνω στο οποίο λύνονται οι εξισώσεις που αναφέρονται στο κεφάλαιο 2. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση της δημιουργίας του πλέγματος για την πρώτη πτερωτή στο TurboGrid αλλά και δίνεται μια πιο λεπτομερή εικόνα του πως λειτουργεί. Αυτό γίνεται μόνο σε αυτή την παράγραφο και δεν επαναλαμβάνεται για λόγους συντομίας στις επόμενες.



Σχήμα 3.2.2.α.

Η αρχή έγινε με τη δημιουργία της τοπολογίας, η οποία ουσιαστικά αποτελεί το δισδιάστατο χάρτη πάνω στον οποίο δημιουργείται το τρισδιάστατο πλέγμα. Υπάρχουν δύο επιλογές η *'ATM Optimized Topology'* και η *'Traditional Topologies'*. Η πρώτη, η οποία και επιλέγεται τελικά (Σχήμα 3.2.2.β.), δημιουργεί τοπολογία ανάλογα με τη γεωμετρία, πολύ καλής ποιότητας με την ελάχιστη προσπάθεια ενώ η δεύτερη έχει ως υποεπιλογές διάφορες παραδοσιακές μεθόδους δημιουργίας πλέγματος όπως η *H-Grid*, η *J-Grid* και η *H/J/C/L-Grid*. Ουσιαστικά η μέθοδος *'ATM Optimized Topology'* δημιουργεί, ανάλογα το τμήμα της γεωμετρίας, πλέγμα με την ανάλογη μέθοδο. Γι' αυτό το λόγο έχει τη βέλτιστη ποιότητα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους.

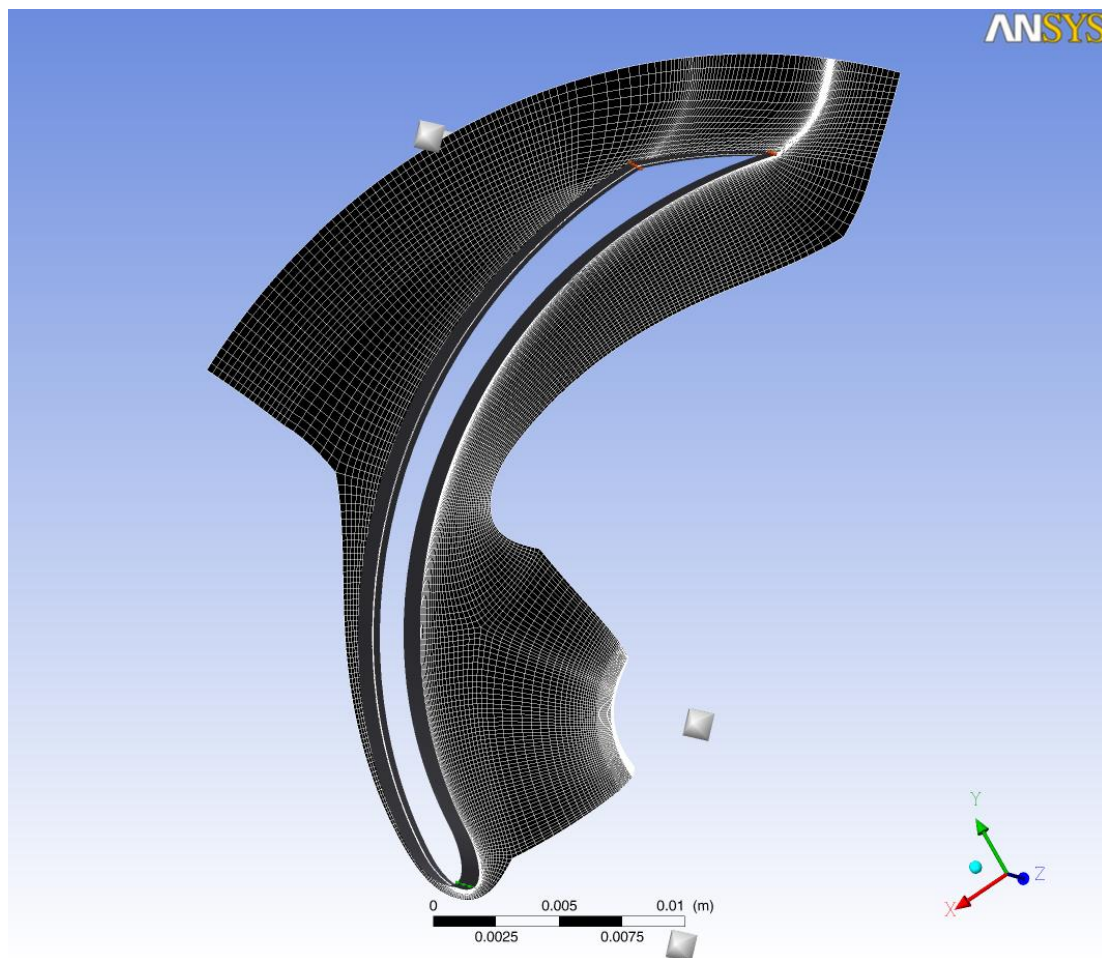


Σχήμα 3.2.2.β.

Σε δεύτερο χρόνο επιλέχθηκε η μέθοδος με την οποία αλλάζει το συνολικό μέγεθος του πλέγματος. Εδώ επιλέχθηκε η μέθοδος *'Node Count'*, η οποία δίνει τη

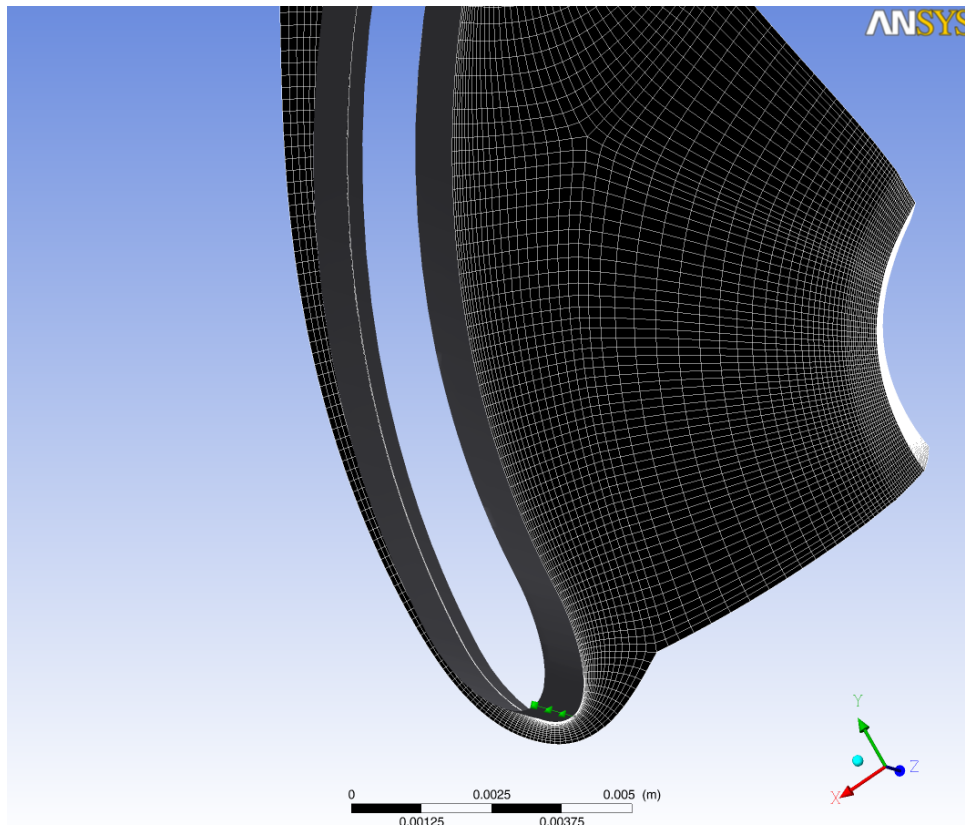
δυνατότητα επιλογής του ακριβούς μεγέθους του πλέγματος μέσω της επιλογής του πλήθους των κόμβων και δημιουργεί το πλέγμα αυτόματα.

- Ορίσθηκε το πλήθος κόμβων στο 1.000.000 όπου και επιτυγχάνεται ανεξαρτησία πλέγματος,
- επιλέχθηκε έλεγχος του οριακού στρώματος με παράγοντα αναλογίας (*Factor Ratio*) το 1,1 μέσω της μεθόδου '*Proportional Refinement Factor*' και η απόσταση του πρώτου κελιού ορίστηκε στα 0,059 mm
- επιλέχθηκε έλεγχος του οριακού στρώματος μονάχα για το τέλος του πτερυγίου (*Cutoff Edge*) με παράγοντα αναλογίας (*Factor Ratio*) το 1,3 και η απόσταση του πρώτου κελιού ορίστηκε στα 0,063 mm
- υπολογίστηκε αριθμός στοιχείων 995.000



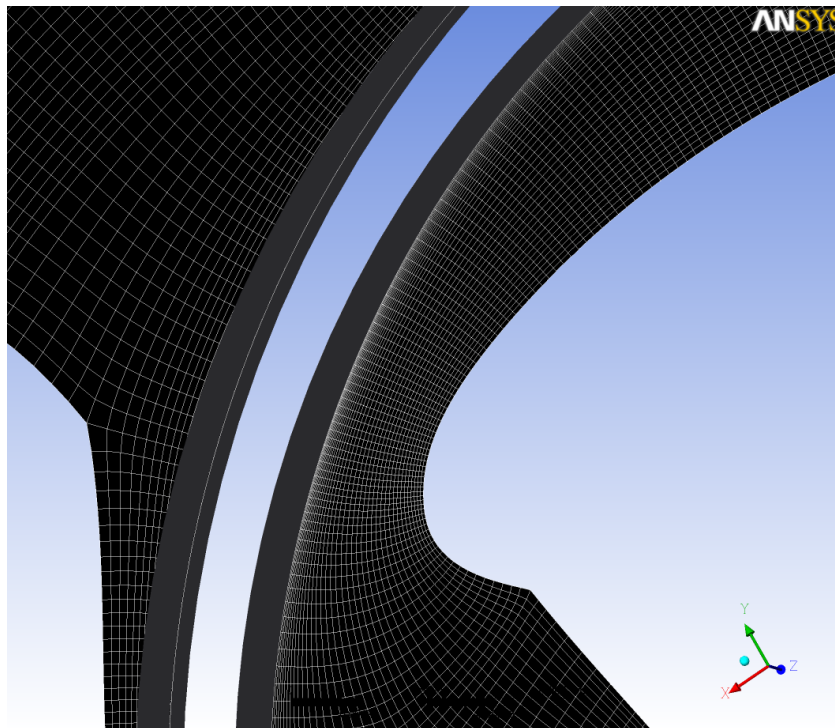
Σχήμα 3.2.2.γ.

Μεγέθυνση για το Leading Edge :



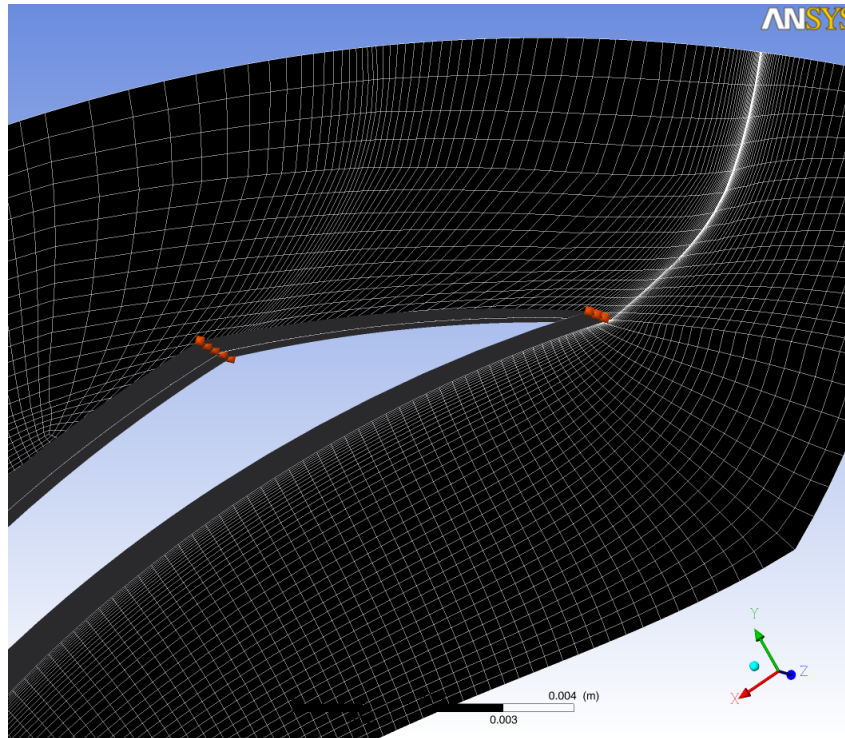
Σχήμα 3.2.2.δ.

Μεγέθυνση για το μέσο κομμάτι του πτερυγίου :



Σχήμα 3.2.2.ε.

Μεγέθυνση για το Trailing Edge :



Σχήμα 3.2.2.στ.

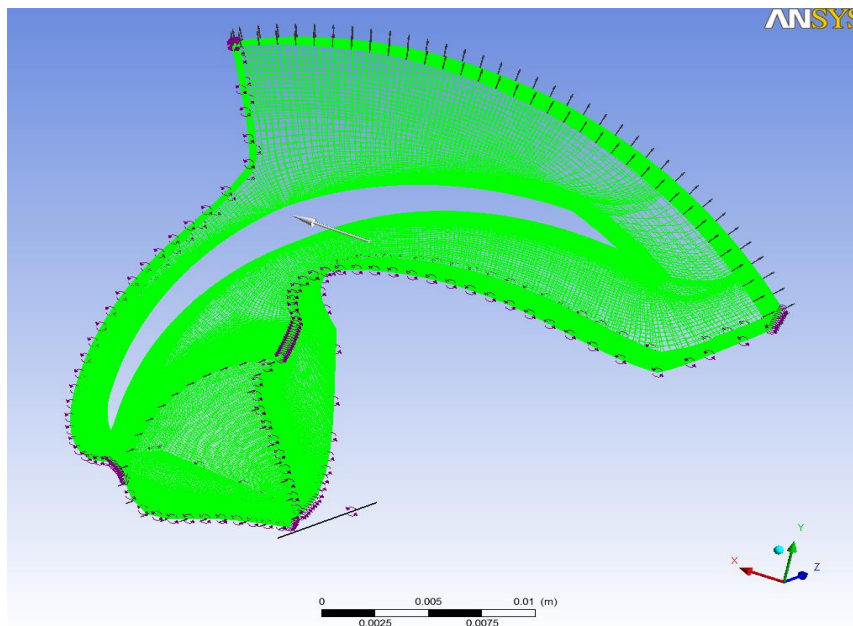
Στο τέλος το TurboGrid αξιολογεί το πλέγμα που δημιούργησε σε σχέση με τα αποτελέσματα τα οποία δίνονται από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων και στο συγκεκριμένο υπάρχει κάποιο μικρό σφάλμα το οποίο όμως δικαιολογείται από τη σύνθετη γεωμετρία στο τέλος του πτερυγίου (Σχήμα 3.2.2.στ.).

3.2.3. Καθορισμός Δεδομένων για Επίλυση στο CFX

Σε αυτό το κομμάτι ορίστηκαν όλα τα δεδομένα τα οποία συνεισφέρουν στην αριθμητική επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το πρόβλημα. Ακόμη ορίστηκαν οι περιοχές που αποτελούν είσοδο, έξοδο, οι επιφάνειες οι οποίες ορίζουν το χώρο που ρέει το ρευστό και το μοντέλο τύρβης που επιλέγεται. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι η όλη διαδικασία γίνεται για το ένα πέμπτο της πτερωτής επομένως δημιουργήθηκαν διεπιφάνειες οι οποίες ορίζονται και αυτές. Τέλος ορίστηκαν οι ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου και το επίπεδο σύγκλισης. Πιο συγκεκριμένα :

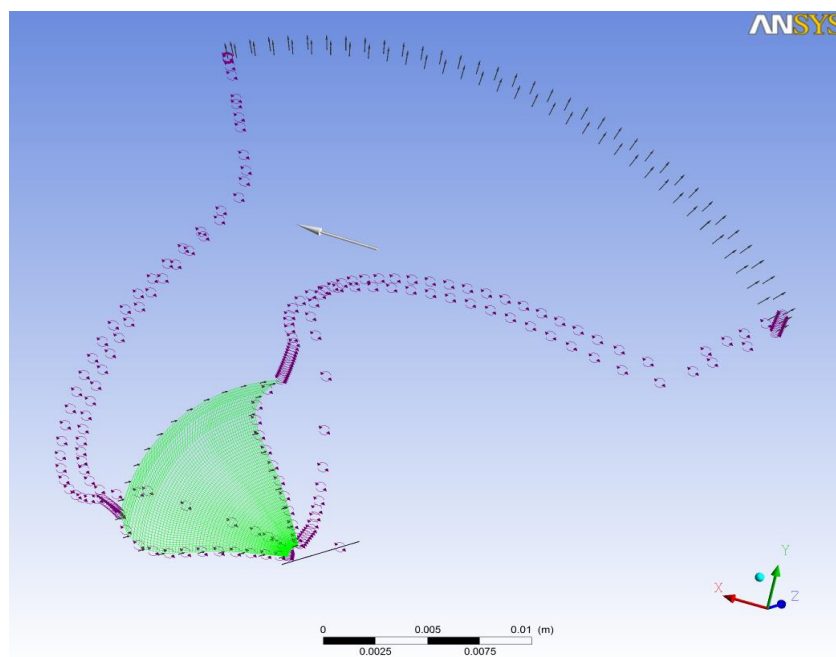
- Ορίστηκε ανάλυση σταθερής κατάστασης
- Ορίστηκε εργαζόμενο μέσο συνεχές ρευστό με τις βασικές ιδιότητες του νερού

- Ορίσθηκε μοντέλο τύρβης το k -Epsilon
- Ορίσθηκε άξονας περιστροφής ο zz' και ταχύτητα περιστροφής τα 1750 rpm (Σχήμα 3.2.3.α.)

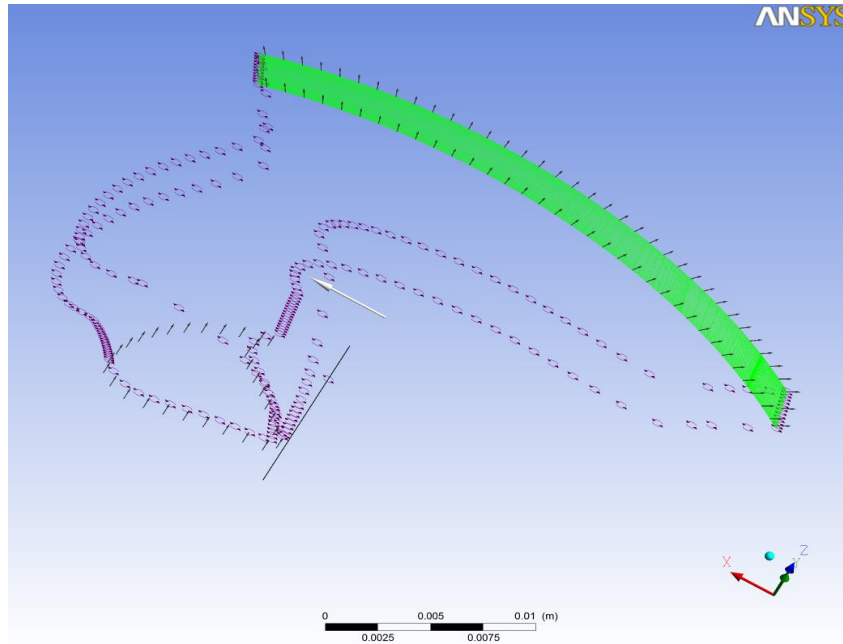


Σχήμα 3.2.3.α.

- Στην είσοδο (Σχήμα 3.2.3.β.) ορίσθηκε οριακή συνθήκη παροχής μάζας στα 83 g/sec ενώ στην έξοδο (Σχήμα 3.2.3.γ.) επίτευξη στατικής πίεσης στα 1,17 bar.

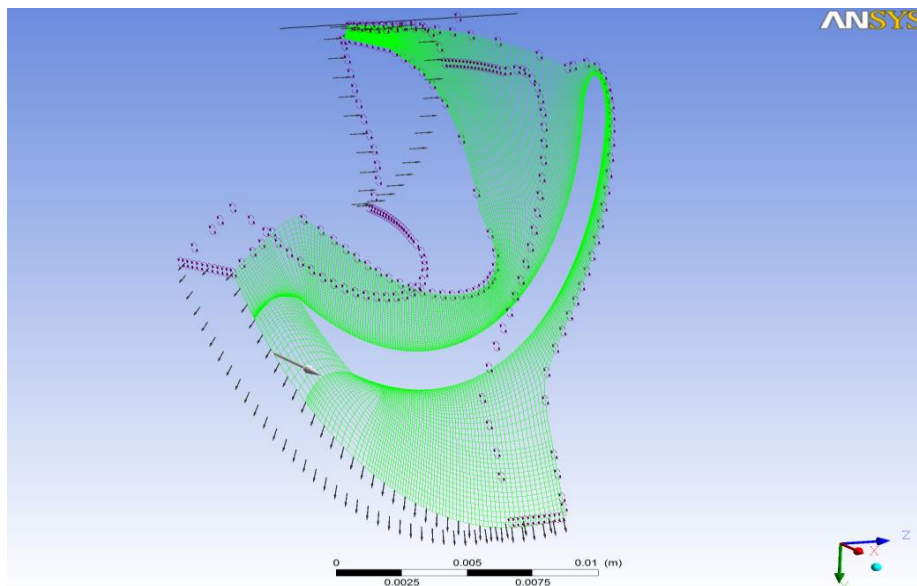


Σχήμα 3.2.3.β.

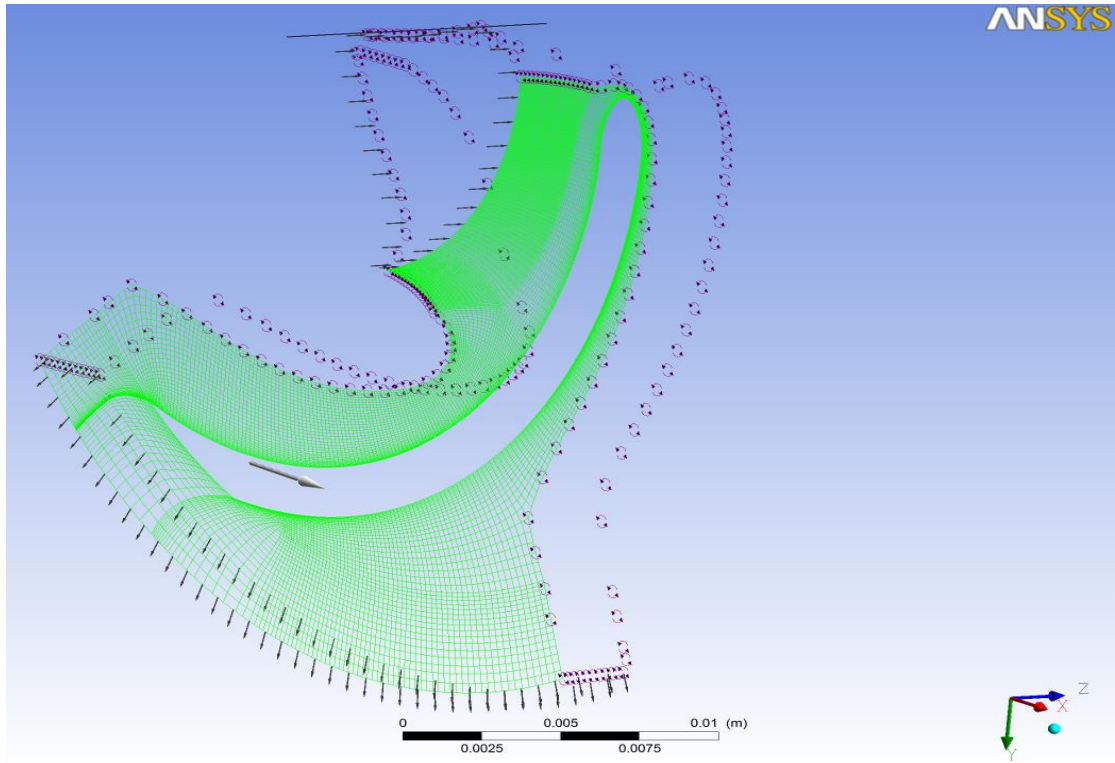


Σχήμα 3.2.3.γ.

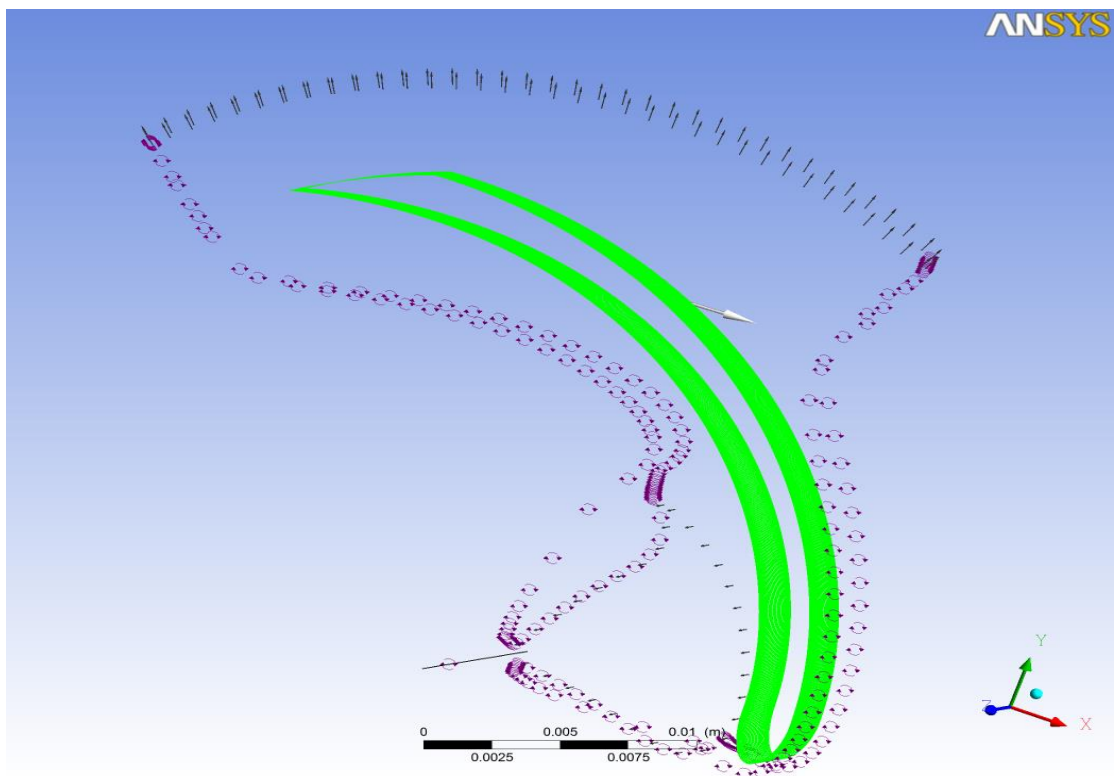
- Οι επιφάνειες του άξονα (Σχήμα 3.2.3.δ.), του καλύμματος (Σχήμα 3.2.3.ε.) και του πτερυγίου (Σχήμα 3.2.3.στ.) ορίσθηκαν ως λείο τοίχωμα (*Smooth Wall*), πάνω στο οποίο η ταχύτητα είναι μηδενική (*No slip wall*). Ακόμη οι επιφάνειες διεπαφής (Σχήμα 3.2.3.ζ.) ορίσθηκαν ως περιστρεφόμενες διεπιφάνειες ρευστού με ρευστό.



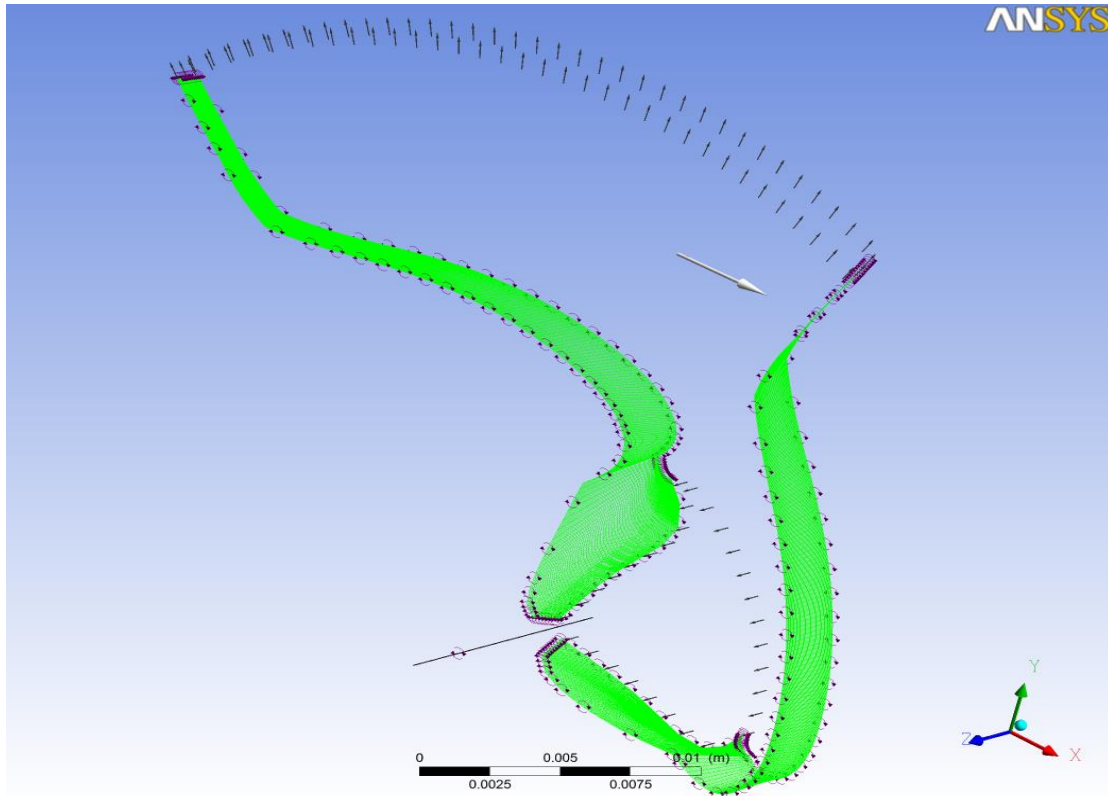
Σχήμα 3.2.3.δ.



Σχήμα 3.2.3.ε.



Σχήμα 3.2.3.στ.



Σχήμα 3.2.3.ζ.

- Ορίσθηκαν οι αρχικές συνθήκες για επίλυση οι οποίες υπολογίζονται αυτόματα από τον επιλυτή του CFX, κάτι που συνίσταται για προβλήματα σταθερής κατάστασης. Ακόμη ορίσθηκαν ως καρτεσιανές οι συνιστώσες της ταχύτητας και ορίσθηκαν αυτόματα. Ο αυτόματος ορισμός των αρχικών συνθηκών γίνεται βάση γραμμικής αξιολόγησης η οποία απαιτεί τις αρχικές συνθήκες σε δύο σημεία του πλαισίου. Αυτά τα σημεία και αυτές οι αρχικές συνθήκες υπολογίζονται με σταθμισμένο μέσο όρο των συνοριακών συνθηκών. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται οι αρχικές συνθήκες της πίεσης. Τέλος, ορίσθηκε ένταση της τύρβης στο 5%.
- Ολοκληρώνοντας ορίσθηκε επίπεδο σύγκλισης το 10^{-6}

3.2.4. Εμφάνιση Αποτελεσμάτων

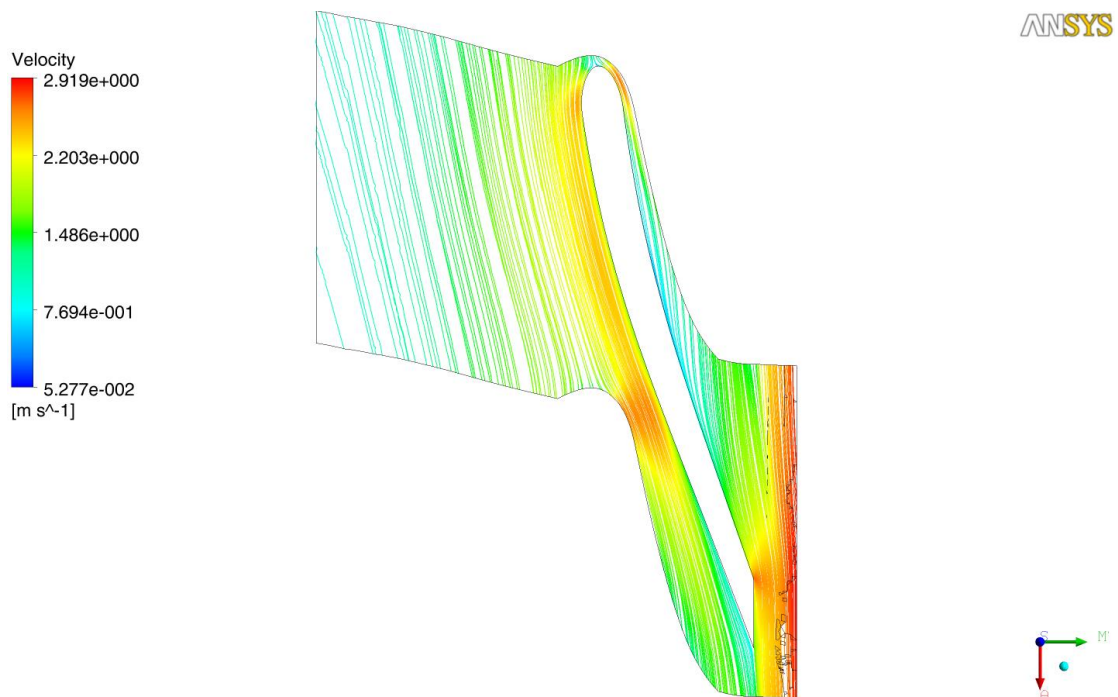
Από τα αποτελέσματα του CFX μπορεί να παρουσιαστεί ένα πλήθος αποτελεσμάτων. Για να γίνει όσο το δυνατό πιο μεστή η παρουσίαση αυτή, εξηγείται παρακάτω τι επιθυμείται να εξαχθεί ως συμπέρασμα. Με σειρά προτεραιότητας η λογική του σχεδιασμού με βάση τα αποτελέσματα είναι :

1. Πρώτο μέλημα είναι η ροή εντός της μηχανής να μην παρουσιάζει ανακυκλοφορίες. Ακόμη και σε περίπτωση όπου επιτυγχάνεται η πίεση που επιθυμείται, εάν η ροή παρουσιάζει ανακυκλοφορίες χρειάζεται σχεδιαστική επέμβαση ώστε να αποφευχθούν. Στην περίπτωση αυτή ελέγχονται τα

- διανύσματα των ταχυτήτων στη μεσημβρινή τομή αλλά και ανάμεσα σε δύο πτερύγια όπως επίσης και τα streamlines της ταχύτητας για ευκολότερη κατανόηση της ροής.
2. Ακολουθεί η επίτευξη αύξησης της πίεσης κατά 100-120 mmHg (14-16,5 kPa). Στην περίπτωση αυτή γίνεται χρήση του ενσωματωμένου στο πρόγραμμα υπολογιστή, που υπολογίζει τη διαφορά πίεσης ανάμεσα στην είσοδο και έξοδο της μηχανής.
 3. Τέλος επιδιώκονται όσο το δυνατό χαμηλές κλίσεις ταχυτήτων οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλή διάτμηση άρα και μικρά ποσοστά αιμόλυσης. Στο κομμάτι αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη μεταβλητή του scalar shear stress, η οποία εισάγεται μέσω αλγορίθμου στα αποτελέσματα του CFX.

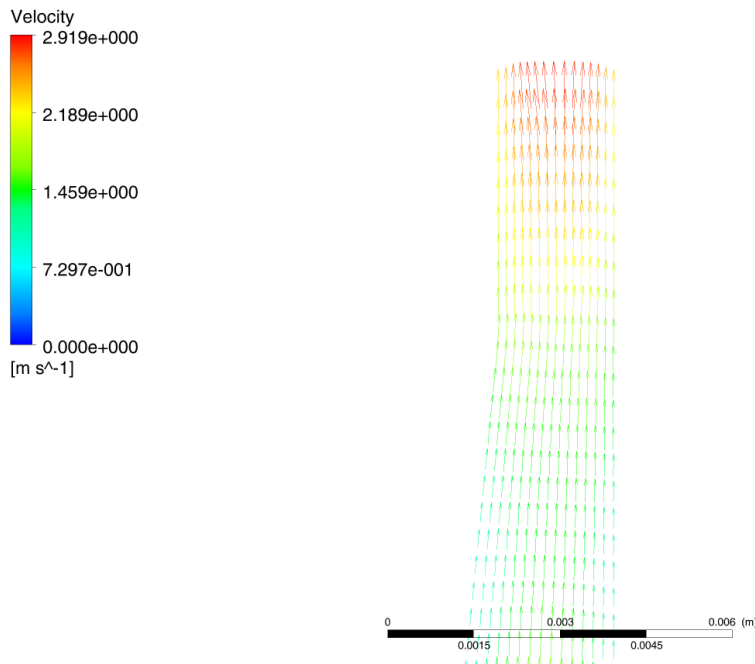
3.2.4.1. Μελέτη Ανακυκλοφορίας

Από την πρώτη ματιά στα streamlines (Σχήμα 3.2.4.1.α.) και στα διανύσματα της ταχύτητας στη μεσημβρινή τομή (Σχήματα 3.2.4.1.β.γ.) αλλά και ανάμεσα στα δύο πτερύγια (Σχήματα 3.2.4.1.δ.ε.στ.) φάνηκε ότι δεν υπάρχουν ανακυκλοφορίες, γεγονός που είναι ικανοποιητικό. Για λόγους καλύτερης ευκρίνειας η μεσημβρινή τομή χωρίσθηκε στα δύο (Σχήματα 3.2.4.1.β.-γ.) ενώ η όψη μεταξύ των δύο πτερυγίων στα τρία (Σχήματα 3.2.4.1.δ.-ε.στ.).



Για το trailing edge της μεσημβρινής τομής :

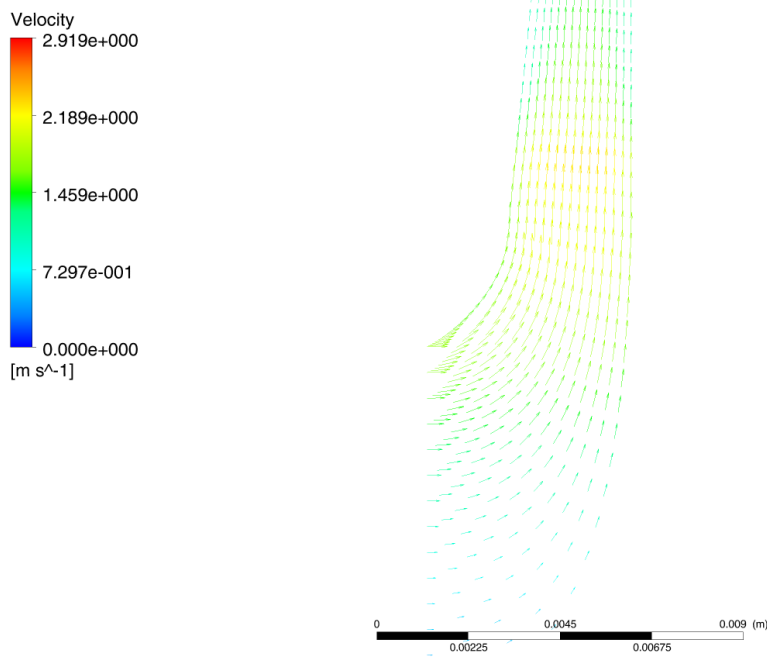
ANSYS



Σχήμα 3.2.4.1.β.

Για το leading edge της μεσημβρινής τομής :

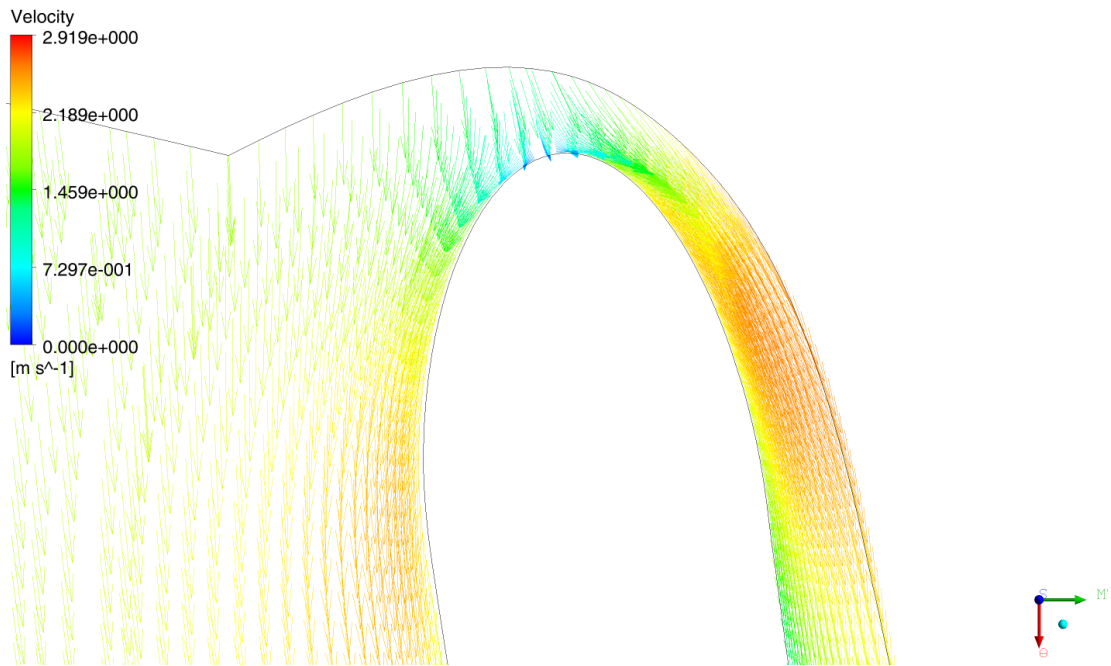
ANSYS



Σχήμα 3.2.4.1.γ.

Για το leading edge της όψης μεταξύ δύο πτερυγίων :

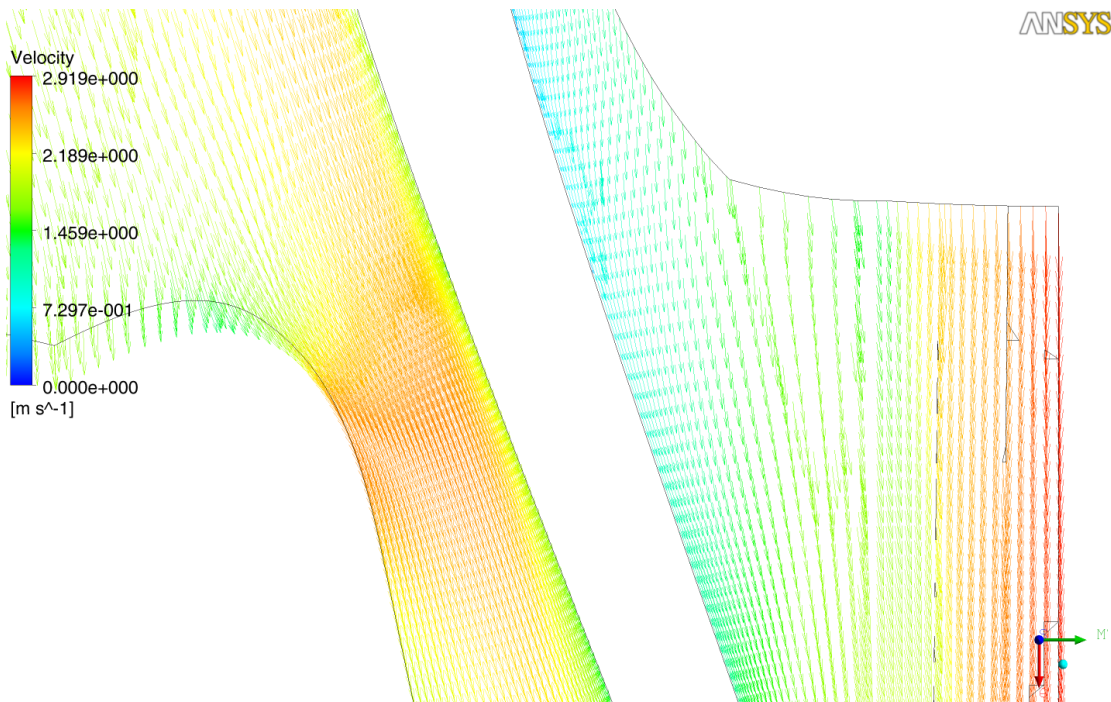
ANSYS



Σχήμα 3.2.4.1.δ.

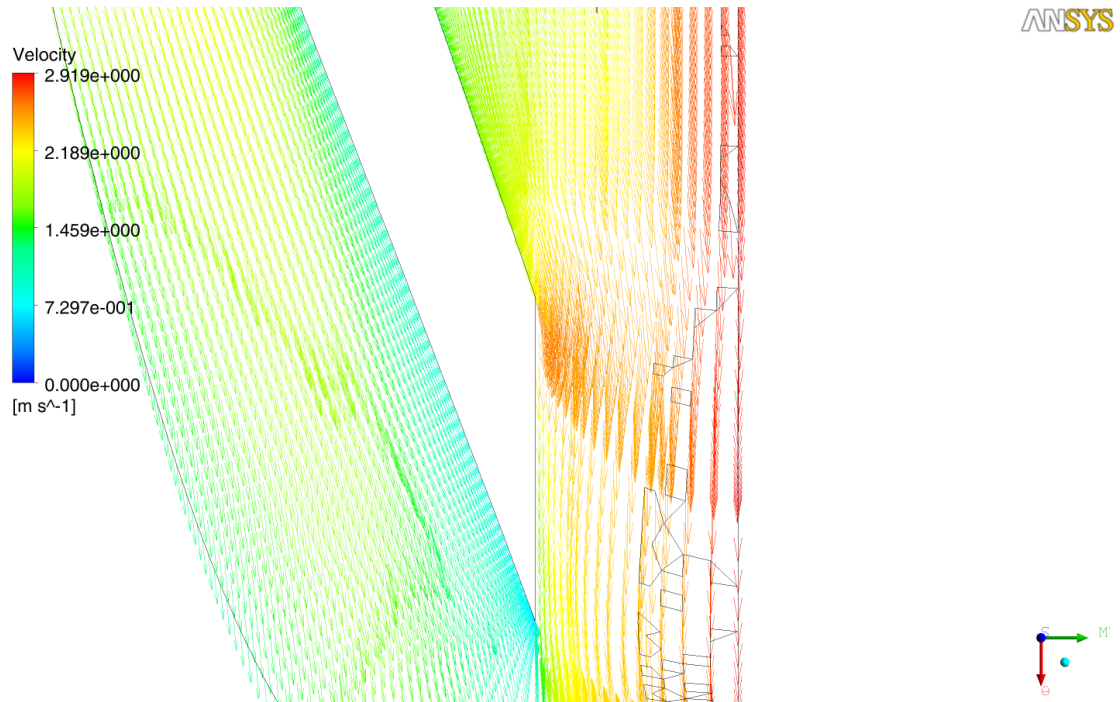
Για το μέσο τους πτερυγίου της όψης μεταξύ δύο πτερυγίων :

ANSYS



Σχήμα 3.2.4.1.ε.

Για το trailing edge της όψης μεταξύ δύο πτερυγίων :



Σχήμα 3.2.4.1.στ.

3.2.4.2. Μελέτη της Πίεσης που Επιτυγχάνεται

Εφόσον δεν υπήρχαν ανακυκλοφορίες ακολουθεί ο υπολογισμός της διαφοράς πίεσης που επιτυγχάνεται. Η επιθυμητή κυμαίνεται περίπου στα 16,3 kPa. Όπως ήδη προαναφέρθηκε γίνεται χρήση του ενσωματωμένου στο πρόγραμμα υπολογιστή, που υπολογίζει τη διαφορά πίεσης ανάμεσα στην είσοδο και έξοδο της μηχανής.

- Στην είσοδο το αποτέλεσμα είναι 110.535 Pa
- Στην έξοδο είναι 116.996 Pa

Επομένως η διαφορά πίεσης βρίσκεται στα 6.461 Pa, νούμερο το οποίο δεν μπορεί να γίνει αποδεκτό. Επομένως εδώ διακόπτεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, αναφέρονται οι πιθανοί λόγοι που προκάλεσαν τη χαμηλή πίεση και προτείνονται τρόποι σχεδιασμού για διατήρηση της καλής ροής και αύξηση της πίεσης.

3.2.5. Λόγος μη Επίτευξης των Στόχων και Προτάσεις για Βελτιστοποίηση

Ο κυριότερος λόγος για τον οποίο δεν επιτεύχθηκε η αύξηση της πίεσης είναι ότι παρά τη χρήση του slip factor sf στον κώδικα της MATLAB, αυτός παραμένει όχι ικανός να περιγράψει τι συμβαίνει στη ροή στην πραγματικότητα. Το πρόβλημα που

προέκυψε σε αυτό το σημείο λύνεται μέσω της αλλαγής ορισμένων χαρακτηριστικών της φυγοκεντρικής αντλίας σε τέτοιο βαθμό ώστε να επιτευχθεί η αύξηση πίεσης που επιθυμείται. Εδώ έγινε χρήση των αρχών ομοιότητας που υπάρχουν στις στροβιλομηχανές και συγκεκριμένα του αδιάστατου αριθμού ψ του οποίου ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι ο εξής :

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

Πιο συγκεκριμένα στο πρώτο τρέξιμο με ταχύτητα περιστροφής 1750 rpm έδωσε 6,5 kPa διαφορά πίεσης. Γνωρίζοντας ότι επιθυμείται διαφορά πίεσης κοντά στα 16 kPa, υπολογίζεται η κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής ως εξής :

$$n_2 = n_1 \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}$$

και επομένως η νέα ταχύτητα περιστροφής υπολογίστηκε στα **2750 rpm**. Κλείνοντας είναι φανερό ότι η επόμενη πτερωτή που μοντελοποιήθηκε είχε τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με την πρώτη, με μοναδική διαφορά την αλλαγή της ταχύτητας περιστροφής.

3.3. Δεύτερο Στάδιο Σχεδίασης

Όπως γράφτηκε και προηγουμένως το δεύτερο στάδιο (και βελτιωτικό του πρώτου) διαφέρει μονάχα στην ταχύτητα περιστροφής. Γι' αυτό κρίνεται σκόπιμο να μην παρουσιαστούν ξανά η σχεδίαση και η δημιουργία του πλέγματος, αφού είναι οι ίδιες. Επομένως σε αυτή την παράγραφο η εκκίνηση γίνεται από το στήσιμο του προβλήματος στο CFX, και στο οποίο οι διαφορές είναι ελάχιστες.

3.3.1. Καθορισμός Δεδομένων για Επίλυση στο CFX

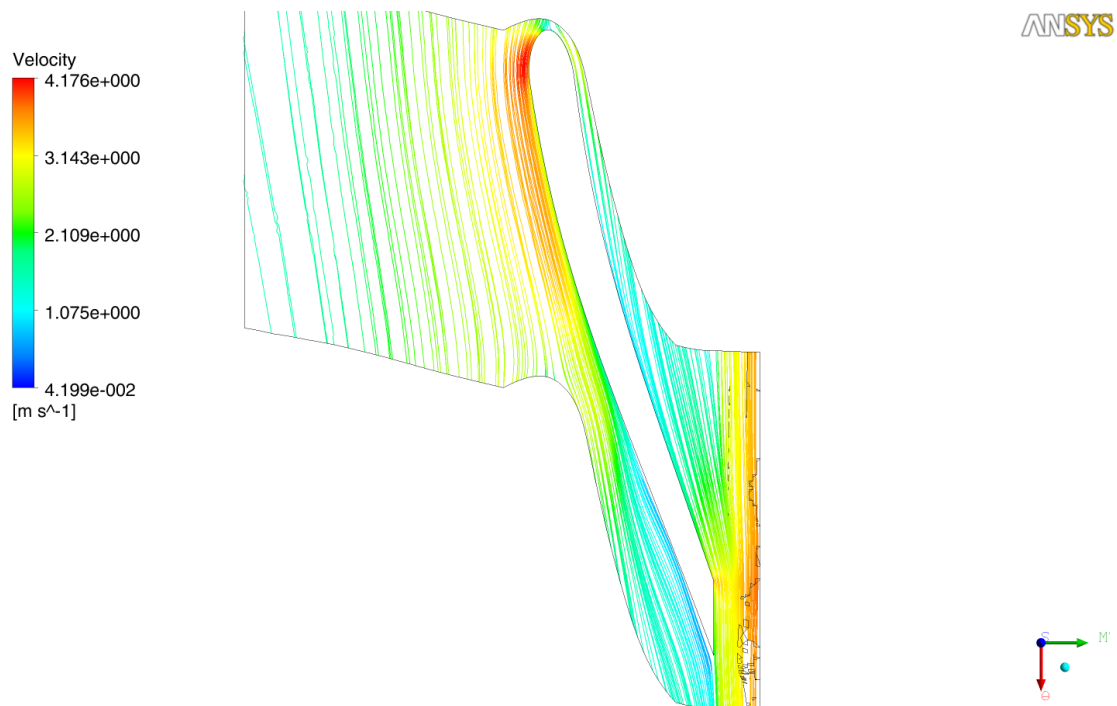
Όλα τα δεδομένα βρίσκονται σε πλήρη ταύτιση με το πρώτο σενάριο (Παράγραφος 3.2.3.) εκτός του ότι η ταχύτητα περιστροφής ορίζεται στα **2750 rpm**.

3.3.2. Εμφάνιση Αποτελεσμάτων

3.3.2.1. Μελέτη Ανακυκλοφορίας

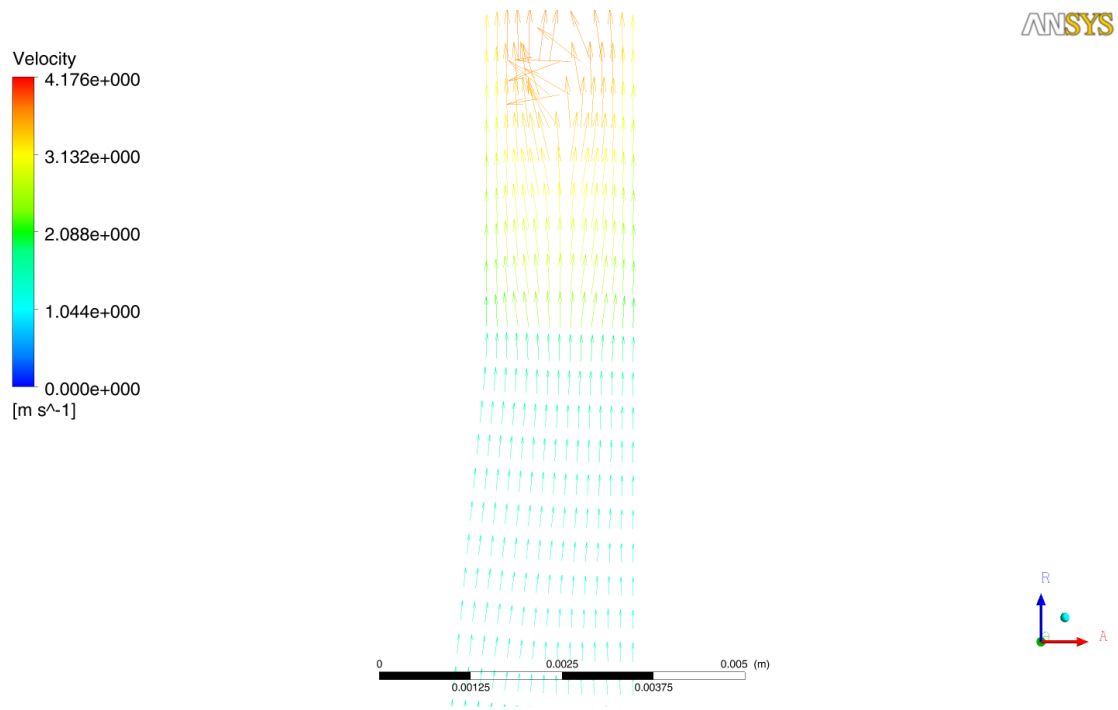
Από την πρώτη ματιά στα streamlines (Σχήμα 3.3.2.1.α.) και στα διανύσματα της ταχύτητας στη μεσημβρινή τομή στην είσοδο (Σχήματα 3.3.2.1.γ.) αλλά και ανάμεσα στα δύο πετερύγια (Σχήματα 3.3.2.1.δ.ε.στ.) φάνηκε ότι δεν υπάρχουν ανακυκλοφορίες, γεγονός που είναι ικανοποιητικό. Όμως στη μεσημβρινή τομή της εξόδου (Σχήμα 3.3.2.1.β) παρατηρήθηκε προς την έξοδο της ροής από την περωπή μία μικρή σύγχυση της ροής η οποία όμως δε συνιστά ανακυκλοφορία. Όπως προηγουμένως, για λόγους καλύτερης ευκρίνειας η μεσημβρινή τομή χωρίσθηκε στα δύο (Σχήματα 3.3.2.1.β.-γ.) ενώ η όψη μεταξύ των δύο πετερυγίων στα τρία (Σχήματα 3.3.2.1.δ.-ε.στ.).

Για την περιοχή μεταξύ δύο πετερυγίων :



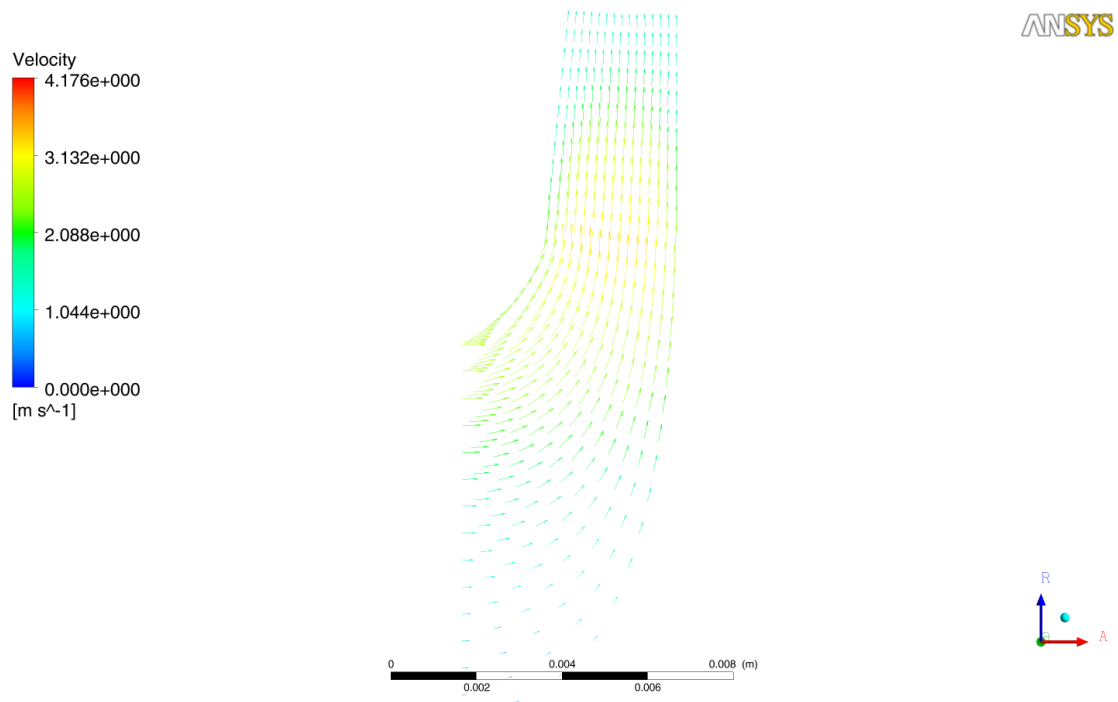
Σχήμα 3.3.2.1.α.

Για το trailing edge της μεσημβρινής τομής :



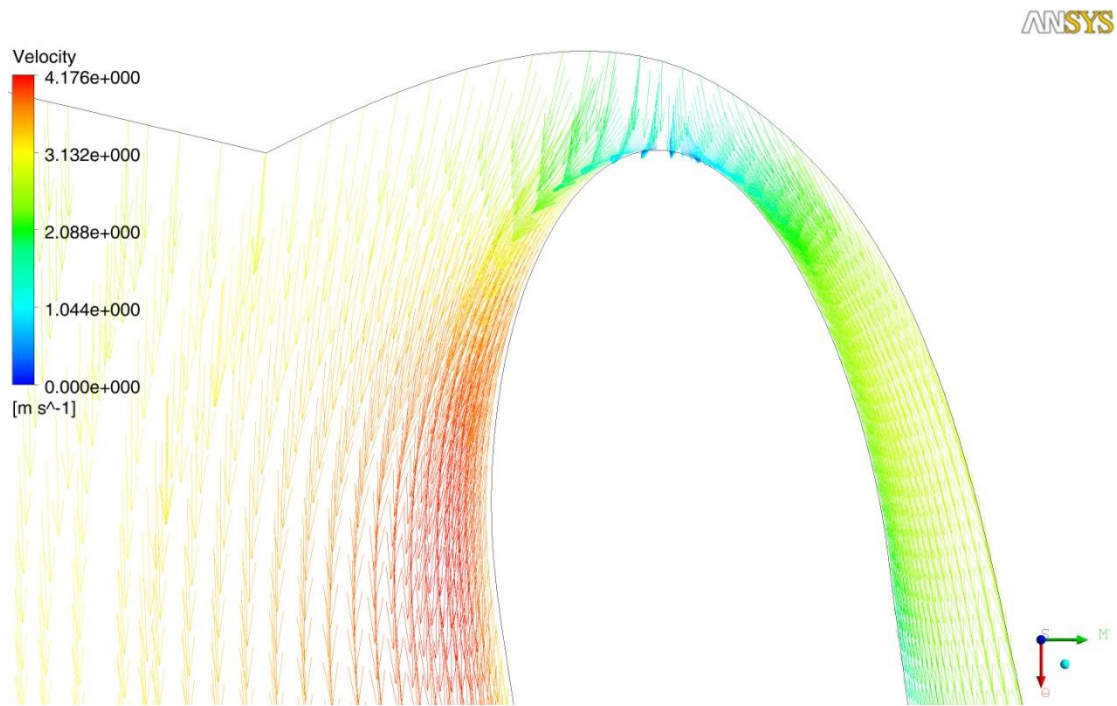
Σχήμα 3.3.2.1.β.

Για το leading edge της μεσημβρινής τομής :



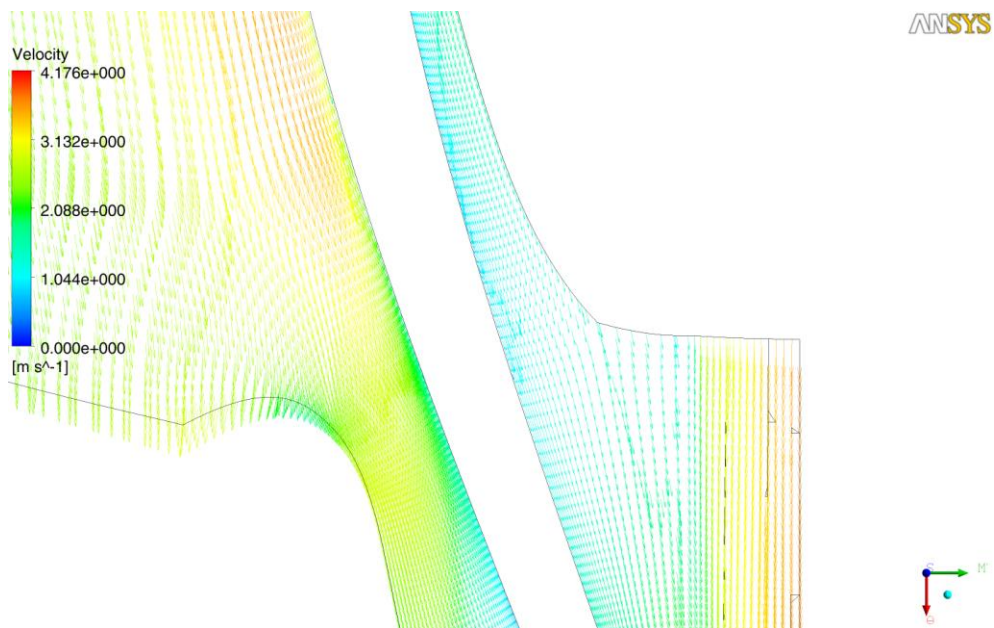
Σχήμα 3.3.2.1.γ.

Για το leading edge της όψης μεταξύ δύο πτερυγίων :



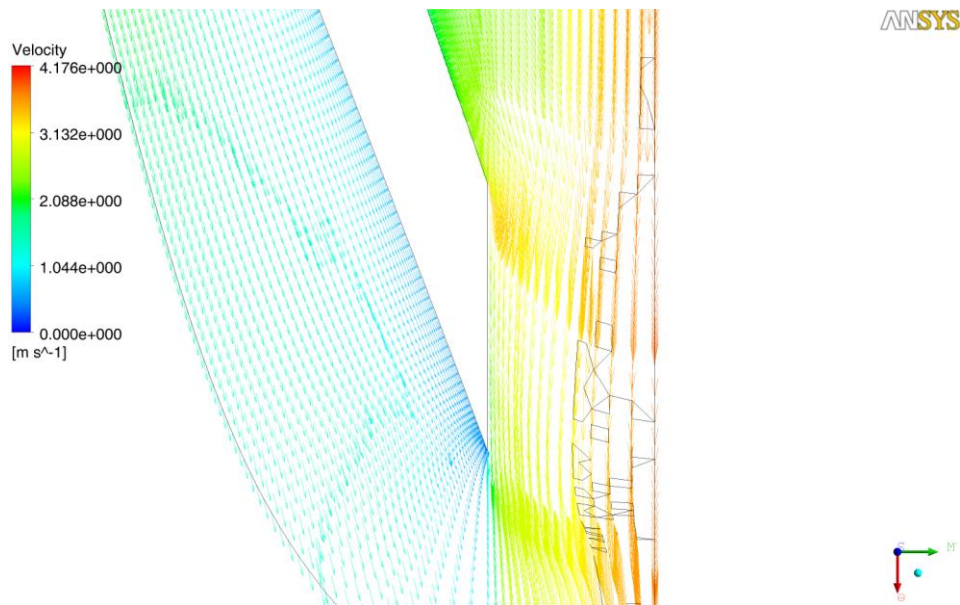
Σχήμα 3.3.2.1.δ.

Για το μέσο τους πτερυγίου της όψης μεταξύ δύο πτερυγίων :



Σχήμα 3.3.2.1.ε.

Για το trailing edge της όψης μεταξύ δύο πτερυγίων :



Σχήμα 3.3.2.1.στ.

Στο σχήμα 3.3.2.1.β παρατηρήθηκε προς την έξοδο της ροής από την πτερωτή μία μικρή σύγχυση της ροής η οποία όμως δε συνιστά ανακυκλοφορία. Μπορεί η ροή στο συγκεκριμένο σημείο να διαταράχθηκε, η εμφάνιση των αποτελεσμάτων για την πίεση όμως, συνεχίσθηκαν.

3.3.2.2. Μελέτη της Πίεσης που Επιτυγχάνεται

Όπως ήδη προαναφέρθηκε γίνεται χρήση του ενσωματωμένου στο πρόγραμμα υπολογιστή, που υπολογίζει τη διαφορά πίεσης ανάμεσα στην είσοδο και έξοδο της μηχανής.

- Στην είσοδο το αποτέλεσμα είναι 97.817 Pa
- Στην έξοδο είναι 117.014 Pa

Επομένως η διαφορά πίεσης βρέθηκε στα 19 kPa, νούμερο το οποίο ξανά δεν μπορεί να γίνει αποδεκτό. Σε αυτή τη φάση διακόπηκε η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, όπως προηγουμένως, αναφέρονται οι πιθανοί λόγοι που προκάλεσαν την υψηλή πίεση και προτείνονται τρόποι σχεδιασμού για διατήρηση της καλής ροής και πτώση της πίεσης.

3.3.3. Λόγος μη Επίτευξης των Στόχων και Προτάσεις για Βελτιστοποίηση

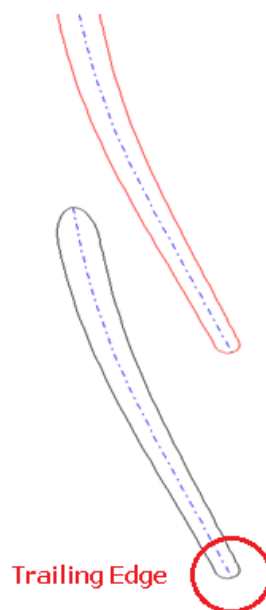
Ο κυριότερος λόγος για τον οποίο δεν επιτεύχθηκε η σωστή αύξηση της πίεσης είναι ότι παρά τη χρήση των σχέσεων αναλογίας, η πραγματική ροή είναι πολύ δύσκολο να αναλυθεί με αναλυτικές μεθόδους. Το πρόβλημα που προέκυψε σε αυτό το σημείο είναι η αλλαγή ορισμένων χαρακτηριστικών της φυγοκεντρικής αντλίας σε τέτοιο βαθμό ώστε να επιτευχθεί η αύξηση πίεσης που επιθυμείται. Αυτό επιτεύχθηκε με τη μέθοδο τυχαίων δοκιμών στροφών περιστροφής και έλεγχο των αποτελεσμάτων έως ότου φθάσουμε στην επιθυμητή αύξηση πίεσης. Η ταχύτητα περιστροφής που έδωσε την επιθυμητή πίεση είναι αυτή των 2.550 rpm.

Μια δεύτερη αλλαγή που προτάθηκε για κατασκευαστικούς λόγους είναι αυτή της αλλαγής της cut off άκρης σε έλλειψη καθώς δημιουργεί μια πολύ οξεία γωνία στην οποία υπάρχει κατά τη χρήση της αντλίας μεγάλη συγκέντρωση τάσεων, η οποία μπορεί να αποβεί καταστροφική για τη συγκεκριμένη κατηγορία υλικού που χρησιμοποιήθηκε.

3.4. Τρίτο Στάδιο Σχεδίασης

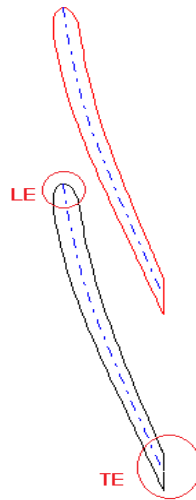
3.4.1. Σχεδίαση Πτερωτής στο λογισμικό BladeGen της ANSYS

Η μοναδική αλλαγή που έγινε σε αυτό το στάδιο, όπως γράφτηκε στο κεφάλαιο 3.3.3., ήταν αυτή της αλλαγής της cut off άκρης σε έλλειψη με λόγο ακτινών τη μονάδα (Σχήμα 3.4.1.α).



Σχήμα 3.4.1.α.

ενώ στην παρακάτω βοηθητική άποψη παρουσιάζεται το πρώτο πτερύγιο :

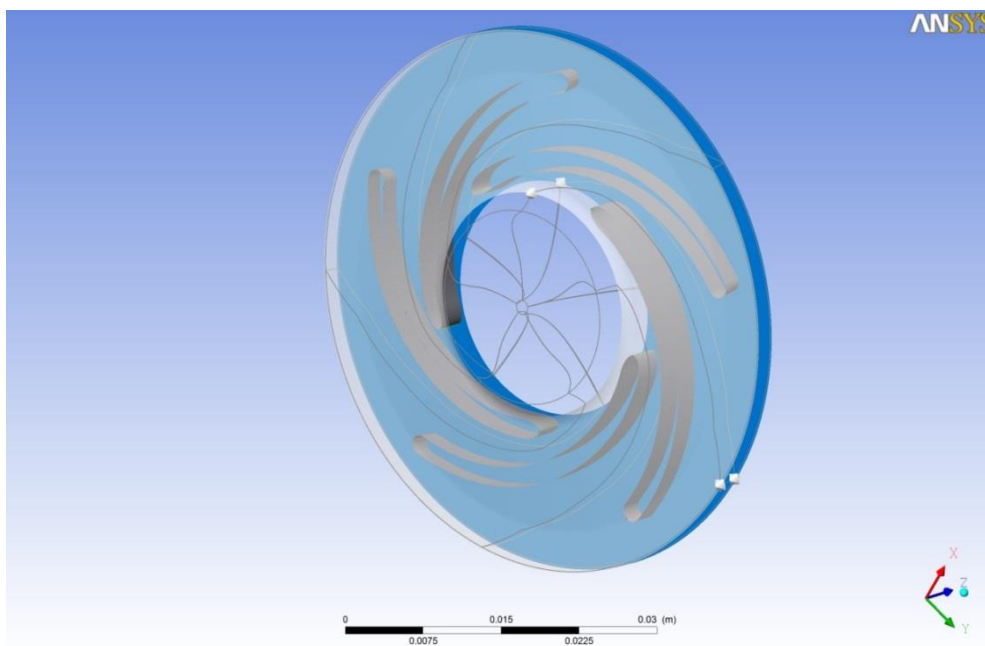


Σχήμα 3.4.1.β.

Ακόμη η μεταβολή των γωνιών βήτα και θήτα κατά μήκος του πτερυγίου (Σχήμα 3.2.1.δ) παραμένει ίδια όπως και το πάχος κατά μήκος του πτερυγίου (Σχήμα 3.2.1.ε.).

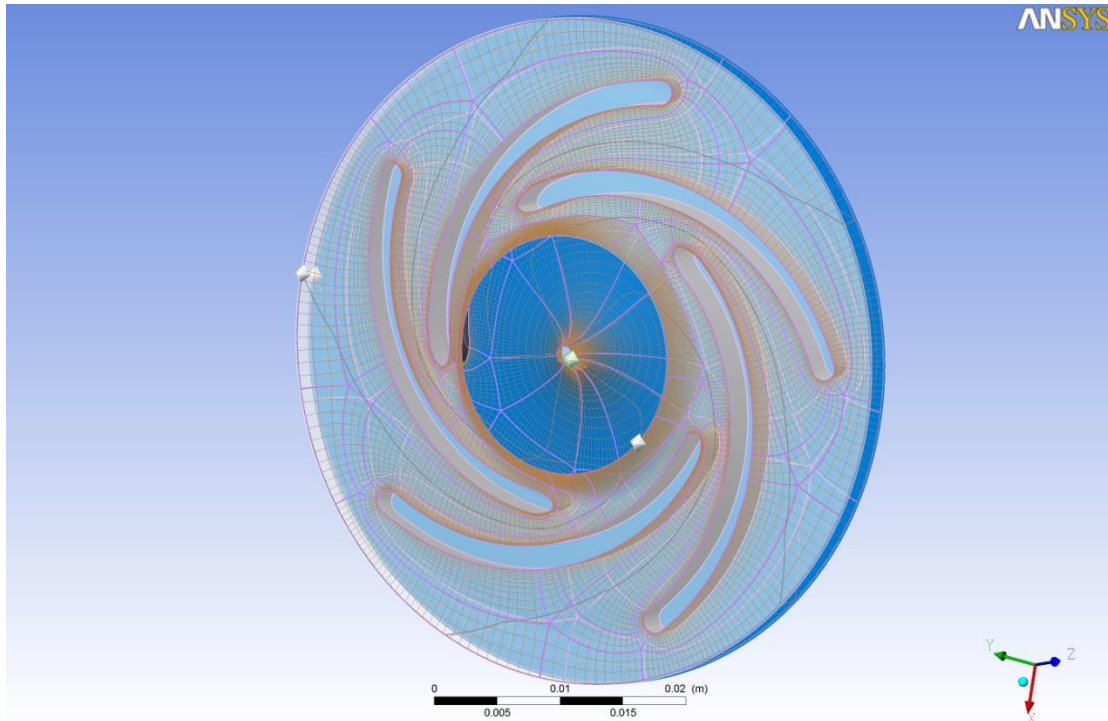
3.4.2. Δημιουργία του Πλέγματος της Πτερωτής στο TurboGrid

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση της δημιουργίας του πλέγματος για την τρίτη πτερωτή (Σχήμα 3.4.2.α.) στο TurboGrid.



Σχήμα 3.4.2.α.

Η αρχή έγινε με τη δημιουργία της τοπολογίας με τη μέθοδο 'ATM Optimized Topology' (Σχήμα 3.4.2.β.).

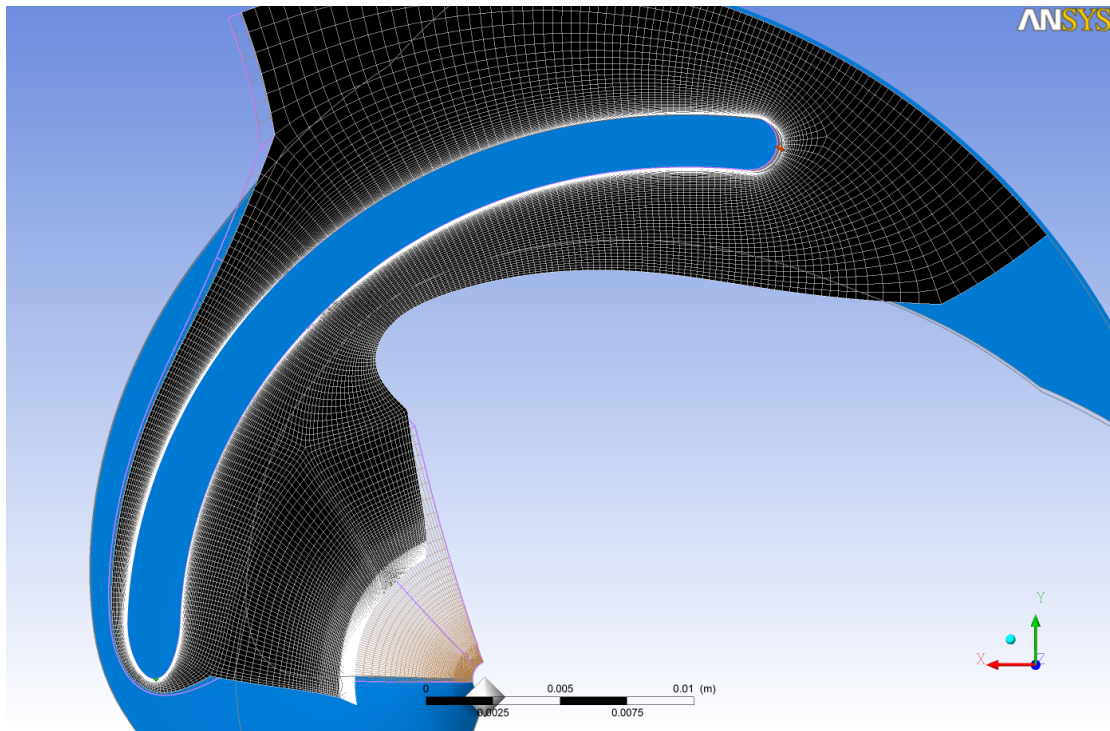


Σχήμα 3.4.2.β.

Σε δεύτερο χρόνο επιλέχθηκε η μέθοδος με την οποία αλλάζει το συνολικό μέγεθος του πλέγματος. Εδώ επιλέχθηκε η μέθοδος 'Node Count', η οποία δίνει τη δυνατότητα επιλογής του ακριβούς μεγέθους του πλέγματος μέσω της επιλογής του πλήθους των κόμβων και δημιουργεί το πλέγμα αυτόματα. Ακόμη :

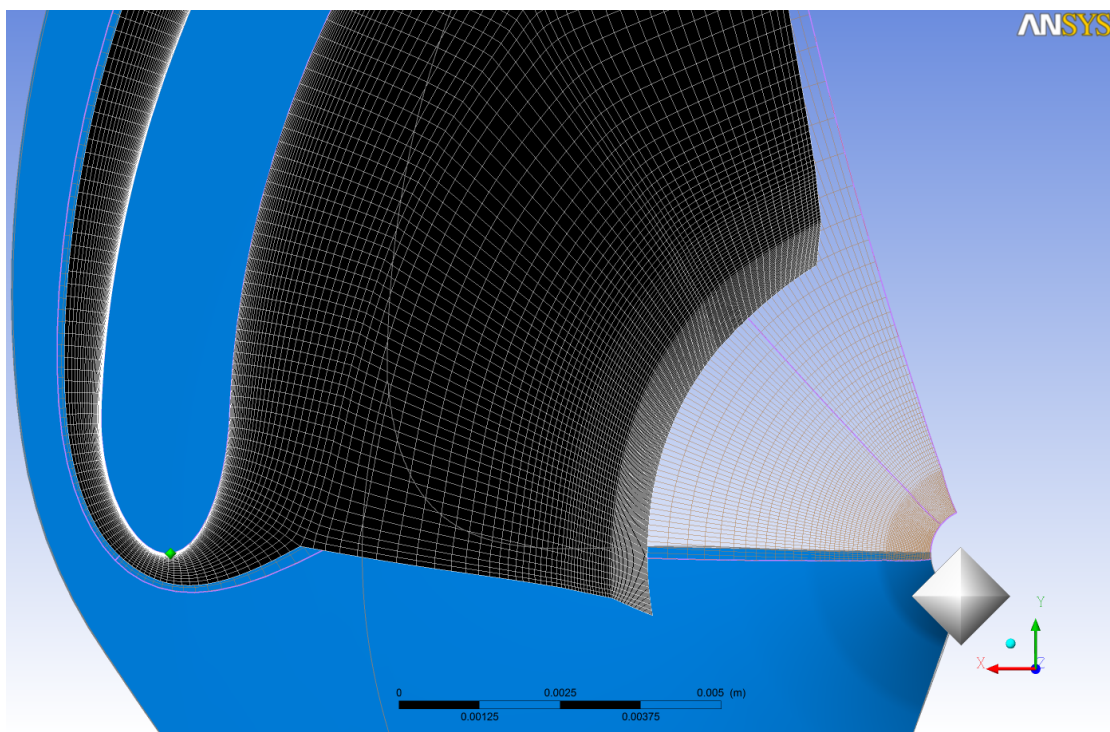
- Ορίσθηκε το πλήθος κόμβων στο 750.000 όπου και επιτυγχάνεται ανεξαρτησία πλέγματος,
- επιλέχθηκε έλεγχος του οριακού στρώματος με παράγοντα αναλογίας (*Factor Ratio*) το 1,5 μέσω της μεθόδου 'Proportional Refinement Factor' και η απόσταση του πρώτου κελιού ορίστηκε στα 0,019 mm
- υπολογίστηκε αριθμός στοιχείων 730.000

Το υπολογιστικό πλέγμα όπου επιτεύχθηκε στο ένα πέμπτο της πτερωτής είναι το εξής :



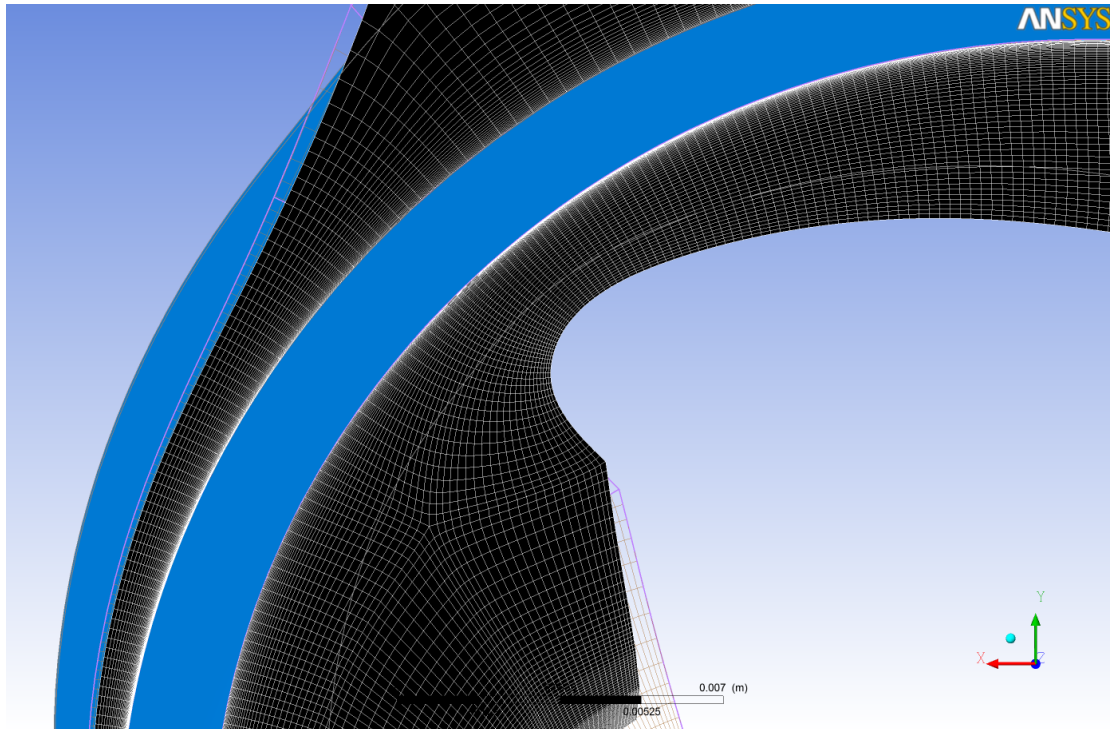
Σχήμα 3.4.2.γ.

Μεγέθυνση για το Leading Edge :



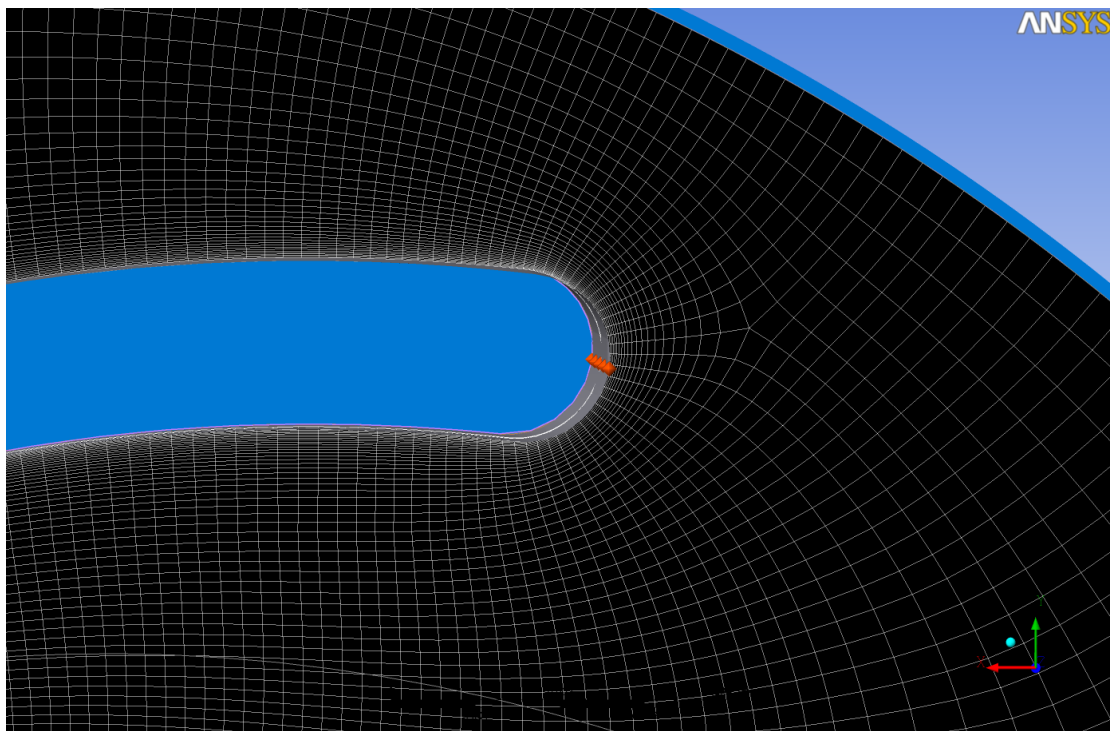
Σχήμα 3.4.2.δ.

Μεγέθυνση για το μέσο κομμάτι του πτερυγίου :



Σχήμα 3.4.2.ε.

Μεγέθυνση για το Trailing Edge :



Σχήμα 3.4.2.στ.

Όπως γράφτηκε και στο τέλος της 3.2.2. παραγράφου το TurboGrid αξιολογεί το πλέγμα που δημιούργησε. Σε αυτή την περίπτωση το σφάλμα είναι ακόμη μικρότερο καθώς η cut off άκρη αντικαταστάθηκε με έλλειψη.

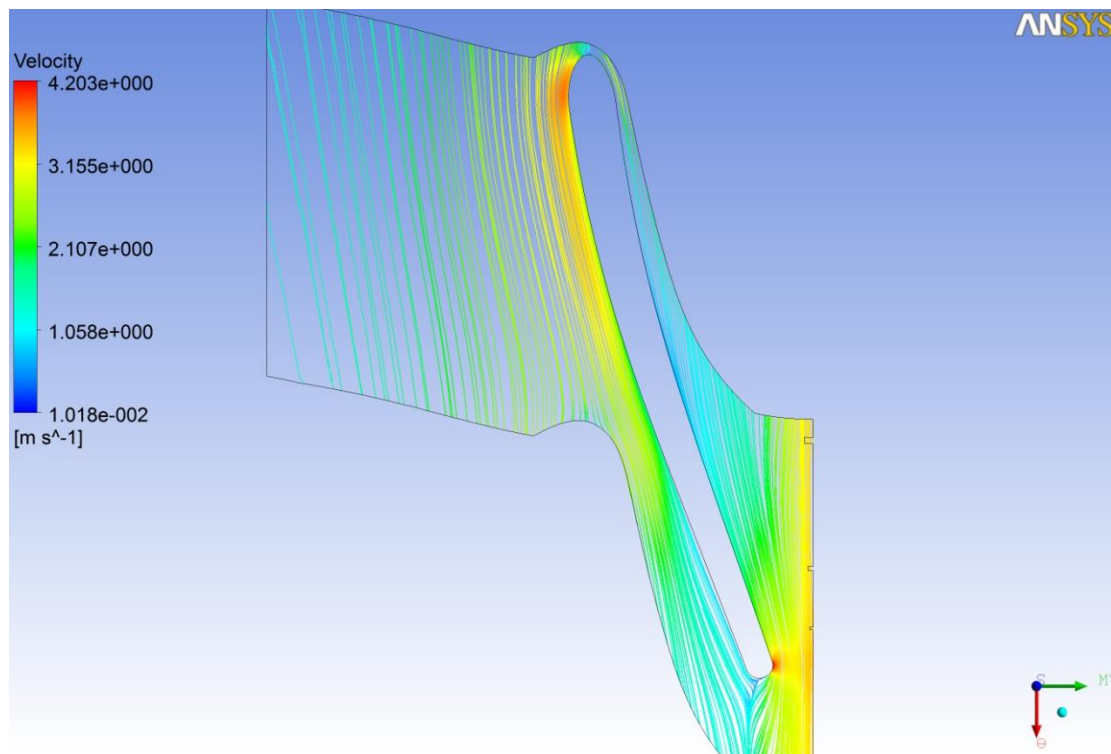
3.4.3. Καθορισμός Δεδομένων για Επίλυση στο CFX

Όλα τα δεδομένα βρίσκονται σε πλήρη ταύτιση με το πρώτο (Παράγραφος 3.2.3.) και δεύτερο σενάριο (Παράγραφος 3.3.1.) εκτός του ότι η ταχύτητα περιστροφής ορίζεται στα **2.550 rpm**.

3.4.4. Εμφάνιση Αποτελεσμάτων

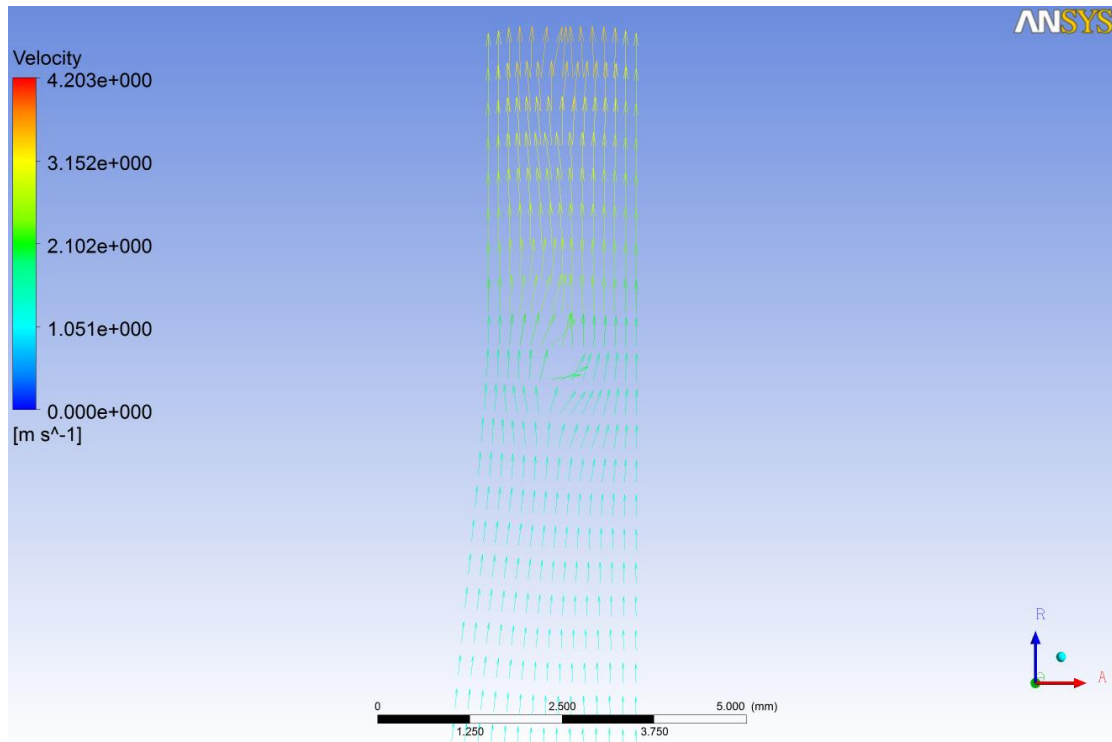
3.4.4.1. Μελέτη Ανακυκλοφορίας

Από την πρώτη ματιά στα streamlines (Σχήμα 3.4.4.1.α.) και στα διανύσματα της ταχύτητας στη μεσημβρινή τομή (Σχήματα 3.4.4.1.β.γ.) αλλά και ανάμεσα στα δύο πτερύγια (Σχήματα 3.4.4.1.δ.ε.στ.) φάνηκε ότι δεν υπάρχουν ανακυκλοφορίες, γεγονός που είναι ικανοποιητικό. Μονάχα προς την έξοδο της μεσημβρινής τομής (Σχήμα 3.4.4.1.β.) υπάρχει μια μικρή ανάδευση της ροής η οποία δε φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τη ροή.



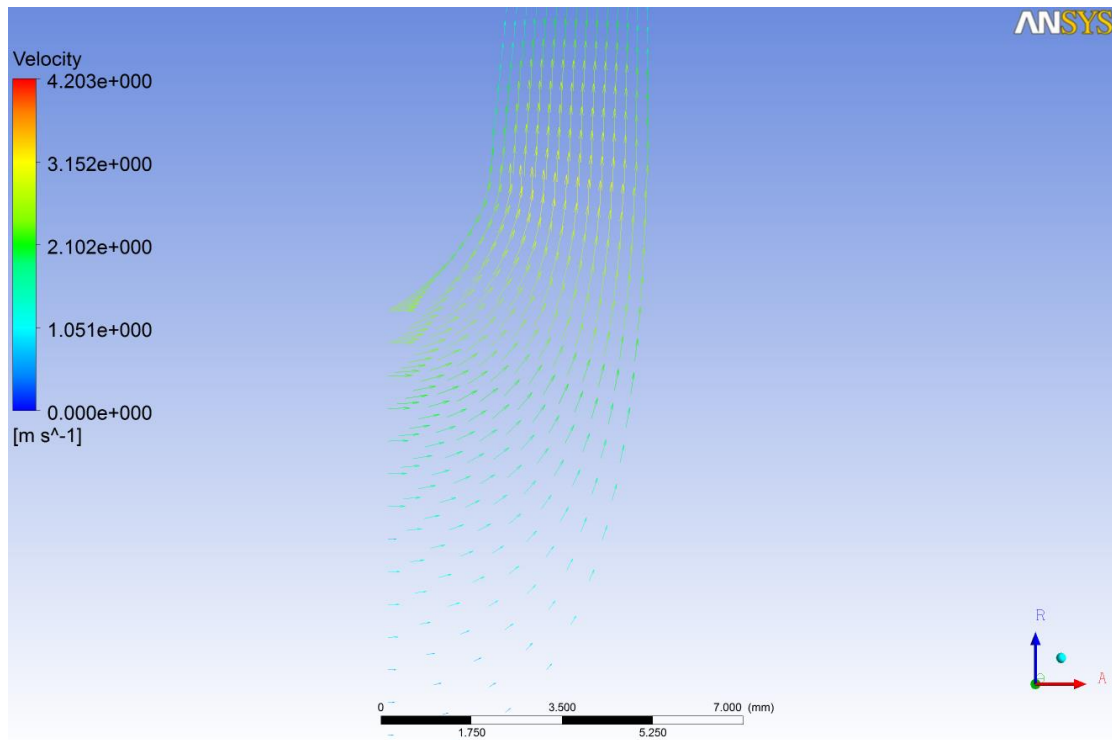
Σχήμα 3.4.4.1.α.

Για το trailing edge της μεσημβρινής τομής :



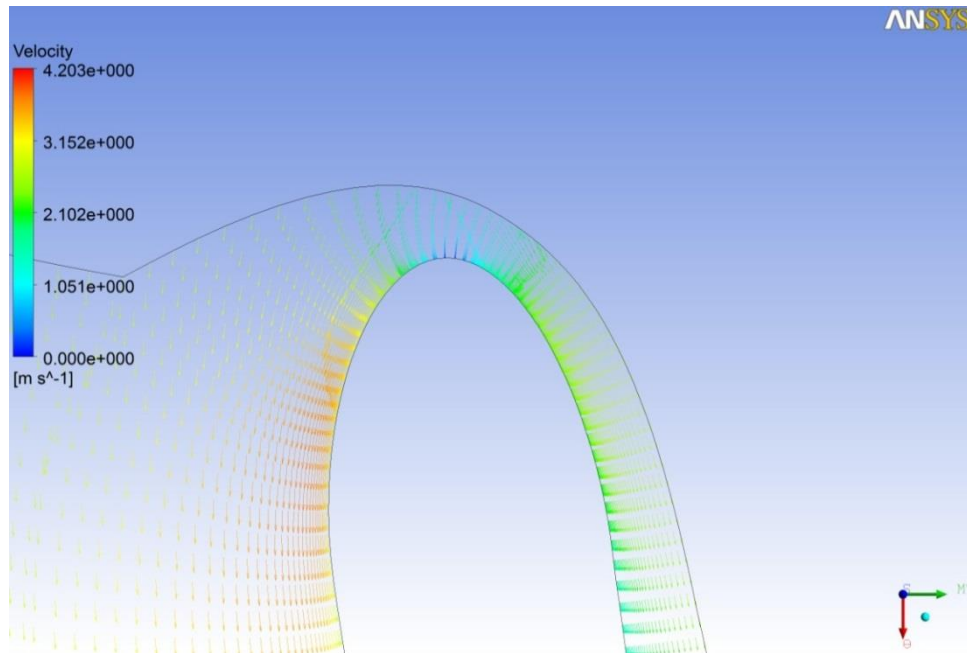
Σχήμα 3.4.4.1.β.

Για το leading edge της μεσημβρινής τομής :



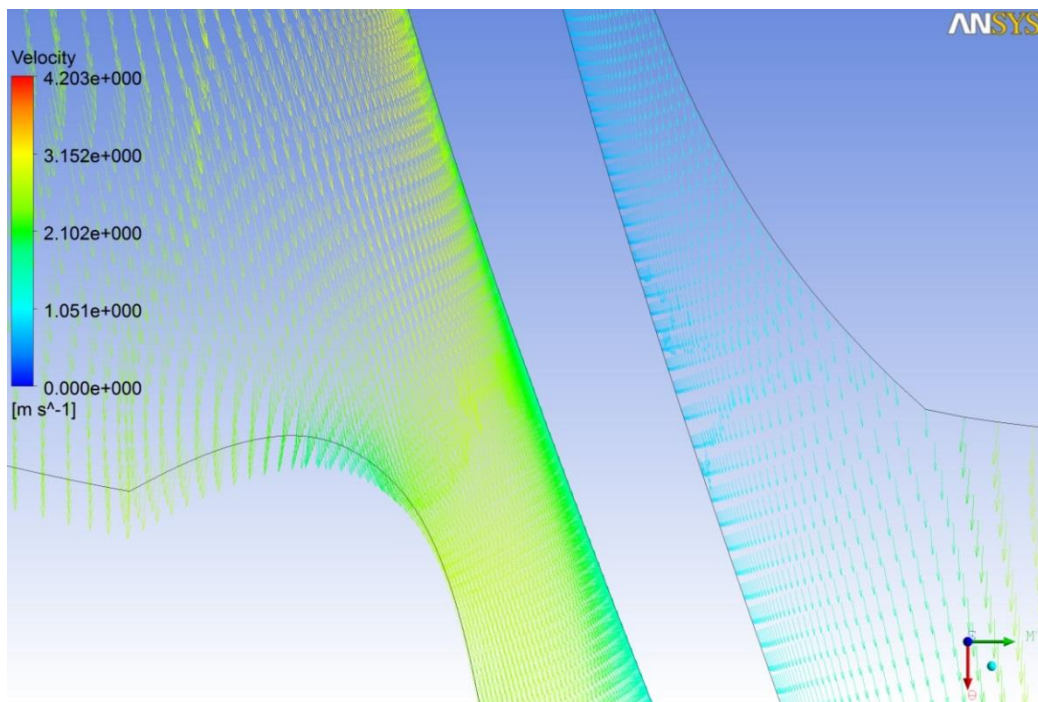
Σχήμα 3.4.4.1.γ.

Για το leading edge της όψης μεταξύ δύο πτερυγίων :



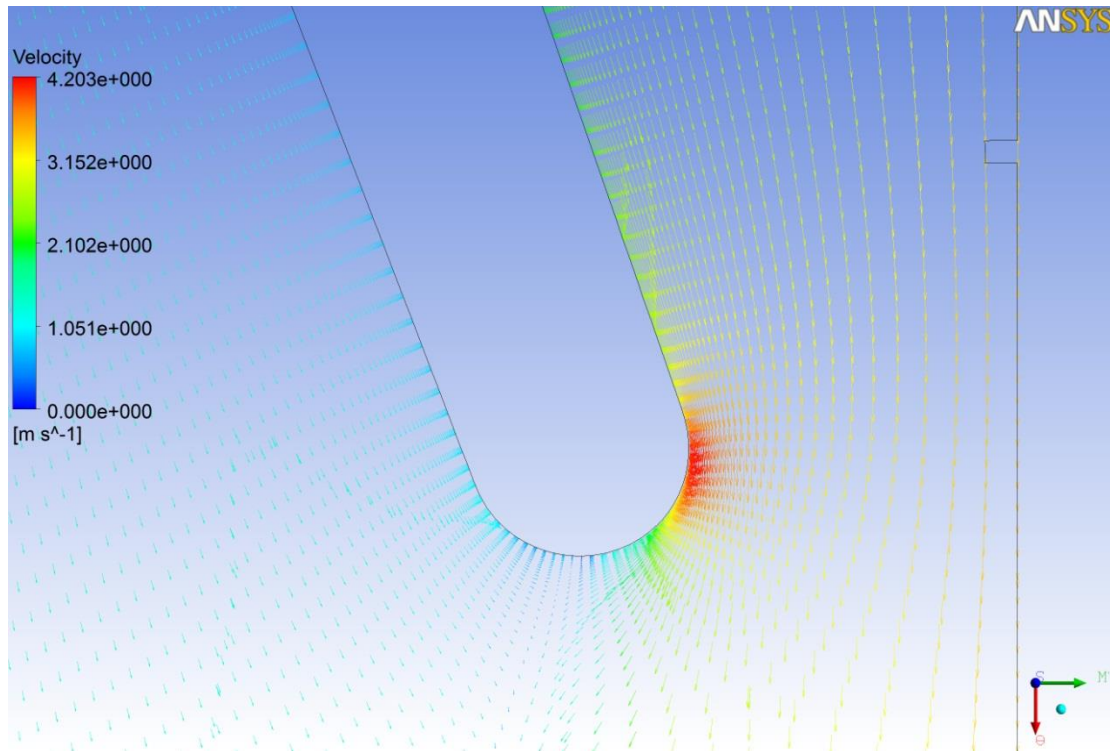
Σχήμα 3.4.4.1.δ.

Για το μέσο τους πτερυγίου της όψης μεταξύ δύο πτερυγίων :



Σχήμα 3.4.4.1.ε.

Για το trailing edge της όψης μεταξύ δύο πτερυγίων :



Σχήμα 3.4.4.1.στ.

3.4.4.2. Μελέτη της Πίεσης που Επιτυγχάνεται

Εφόσον δεν υπήρχαν ανακυκλοφορίες ακολουθεί ο υπολογισμός της διαφοράς πίεσης που επιτυγχάνεται. Η επιθυμητή κυμαίνεται περίπου στα 16,3 kPa. Όπως ήδη προαναφέρθηκε γίνεται χρήση του ενσωματωμένου στο πρόγραμμα υπολογιστή, που υπολογίζει τη διαφορά πίεσης ανάμεσα στην είσοδο και έξοδο της μηχανής.

- Στην είσοδο το αποτέλεσμα είναι 100.663 Pa
- Στην έξοδο είναι 117.002 Pa

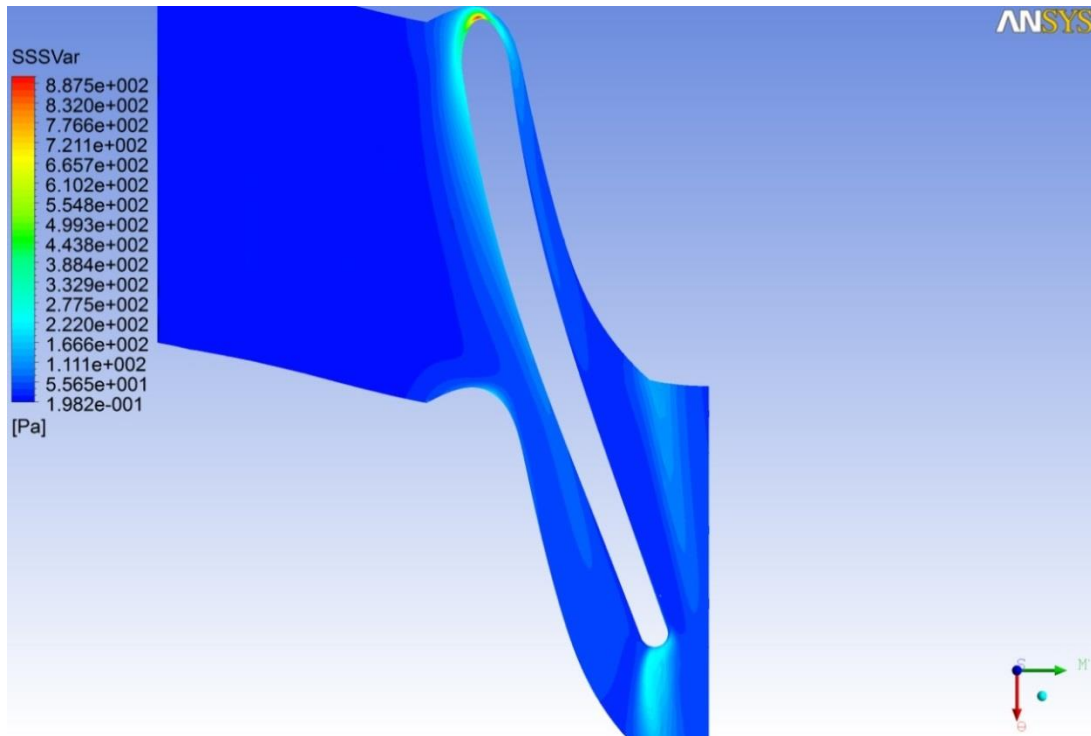
Επομένως η διαφορά πίεσης βρίσκεται στα 16.339 Pa, νούμερο το οποίο φυσικά και έγινε αποδεκτό και ακολούθησε η παρουσίαση του βαθμωτού μέτρου διατμήσεως.

3.4.4.3. Μελέτη του Βαθμωτού Μέτρου Διατμήσεως

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.8.3., το βαθμωτό μέτρο της διάτμησης (*Scalar Shear Stress*) υπολογίζεται μέσω των ορθών και διατμητικών τάσεων οι οποίες για να υπολογιστούν κάνουν χρήση των σχέσεων της τυρβώδους κινητικής ενέργειας αλλά και του Eddy Viscosity. Επομένως είναι πολύ λογικό κοντά στις επιφάνειες του πτερυγίου (Σχήματα 3.4.4.3.α.β.γ.) να συναντώνται υψηλά SSS καθώς στα σημεία αυτά οι κλίσεις της ταχύτητας αυξάνονται πολύ. Και είναι επίσης λογικό πως στα σημεία όπου το ρευστό πρωτοσυναντάει το πτερύγιο (Σχήμα 3.4.4.3.β.), είναι σχεδόν αναπόφευκτη η υψηλή διάτμηση. Το ασυνήθιστο είναι η

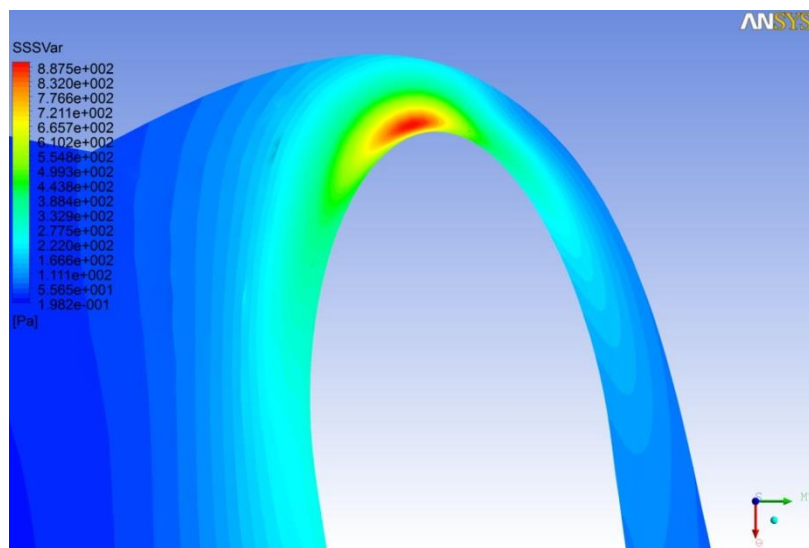
ύπαρξη υψηλών SSS στις περιοχές ανάμεσα στα δύο πτερύγια όπως στο σχήμα 3.4.4.3.δ. γεγονός που προκαλείται από το μέγεθος της έλλειψης στο τέλος του πτερυγίου.

Πιο συγκεκριμένα για την περιοχή μεταξύ δύο πτερυγίων :



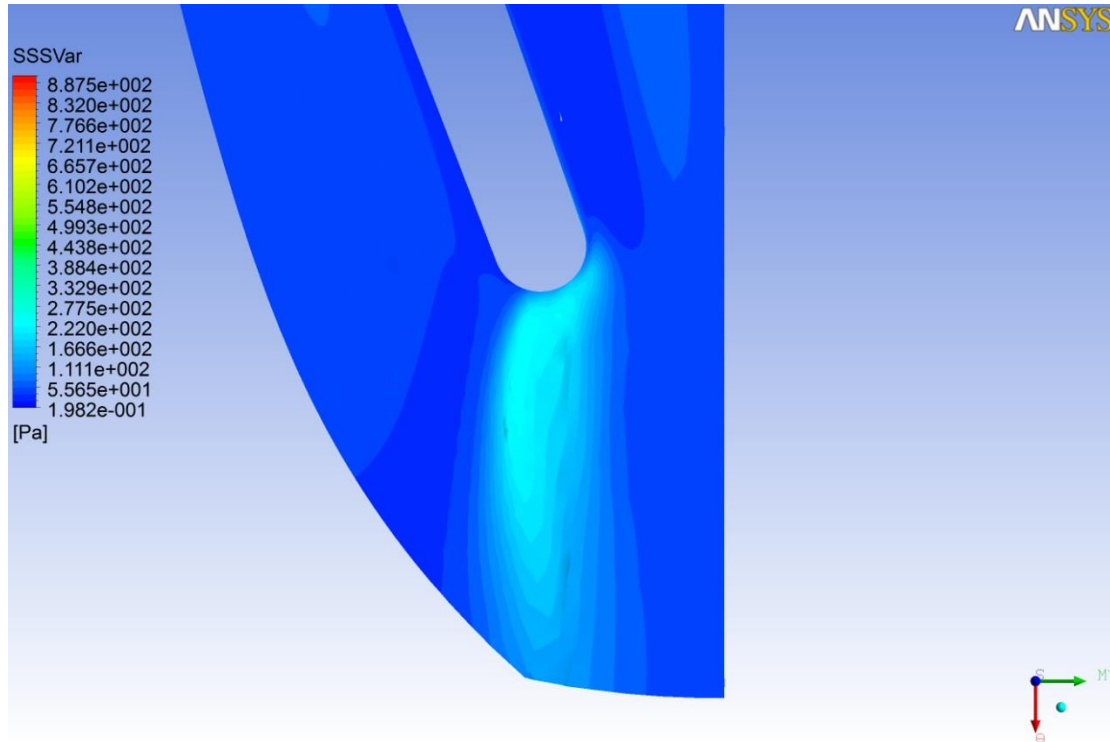
Σχήμα 3.4.4.3.α.

Για το leading edge της όψης μεταξύ δύο πτερυγίων :

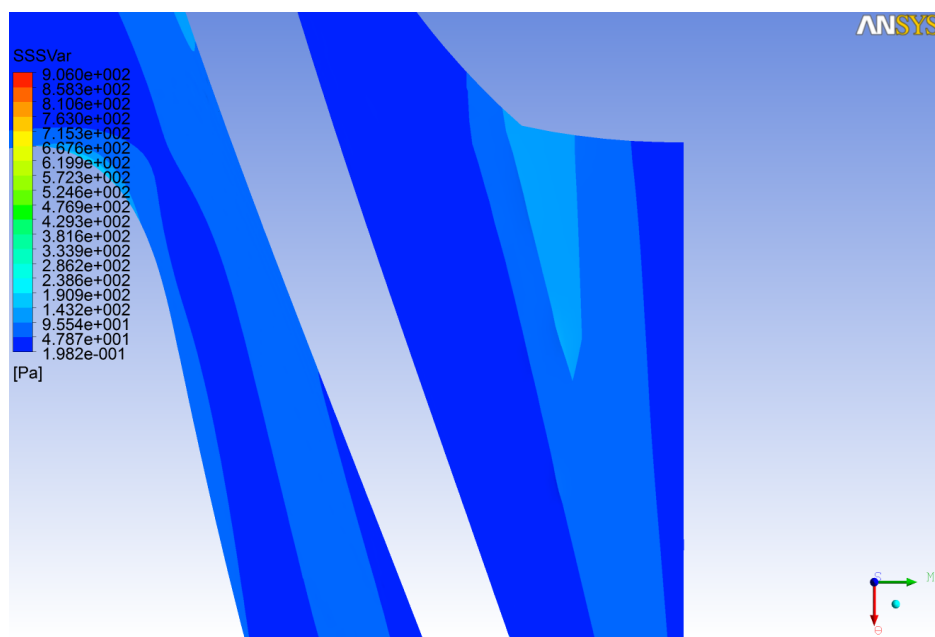


Σχήμα 3.4.4.3.β.

Για το trailing edge της όψης μεταξύ δύο πτερυγίων :



Σχήμα 3.4.4.3.γ.



Σχήμα 3.4.4.3.δ.

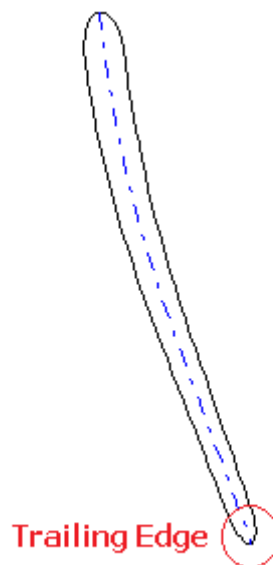
3.4.5. Λόγος μη Επίτευξης των Στόχων και Προτάσεις για Βελτιστοποίηση

Σε αυτή τη γεωμετρία της πτερωτής όλα πήγαν καλύτερα όσο αναφορά τη ροή και την πίεση και ήδη η εξέλιξή της βρίσκεται σε καλό δρόμο. Αυτό που προβλημάτισε αυτή τη φορά είναι τα μεγάλα SSS στο τέλος του πτερυγίου. Γι αυτό προτάθηκε να γίνει αύξηση του λόγου των ακτινών της ελλείψεως στο τέλος του πτερυγίου ώστε η επιφάνειά του να μην μεταβάλλεται τόσο απότομα. Αυτό αναμένεται να μειώσει την κλίση της ταχύτητας άρα και εν τέλει το βαθμωτό μέτρο διατμήσεως.

3.5. Τέταρτο Στάδιο Σχεδίασης

3.5.1. Σχεδίαση Πτερωτής στο λογισμικό BladeGen της ANSYS

Η μοναδική αλλαγή που έγινε σε αυτό το στάδιο ήταν αυτή της αλλαγής στο τέλος του πτερυγίου από έλλειψη με λόγω ακτινών τη μονάδα (Σχήμα 3.5.1.α) σε έλλειψη με λόγω ακτινών το τρία. Αυτό αναμένεται να μειώσει την κλίση της ταχύτητας και να κάνει τη ροή πιο ομαλή.

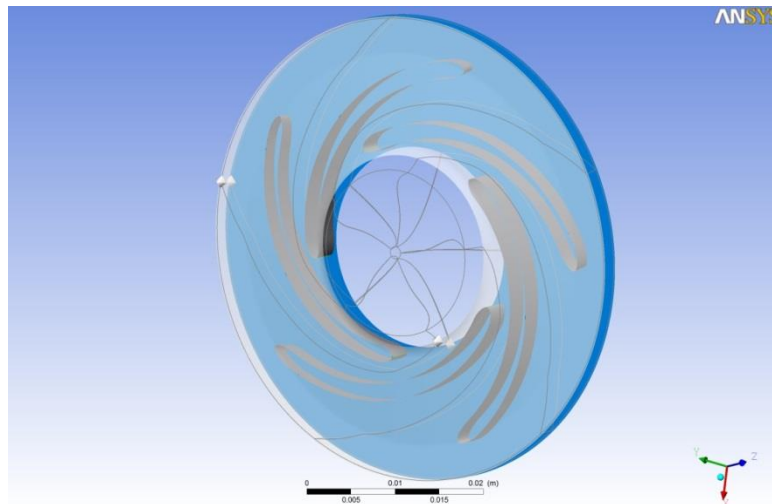


Σχήμα 3.5.1.α.

Τέλος η μεταβολή των γωνιών βήτα και θήτα κατά μήκος του πτερυγίου (Σχήμα 3.2.1.δ) παραμένει ίδια όπως και το πάχος κατά μήκος του πτερυγίου (Σχήμα 3.2.1.ε.).

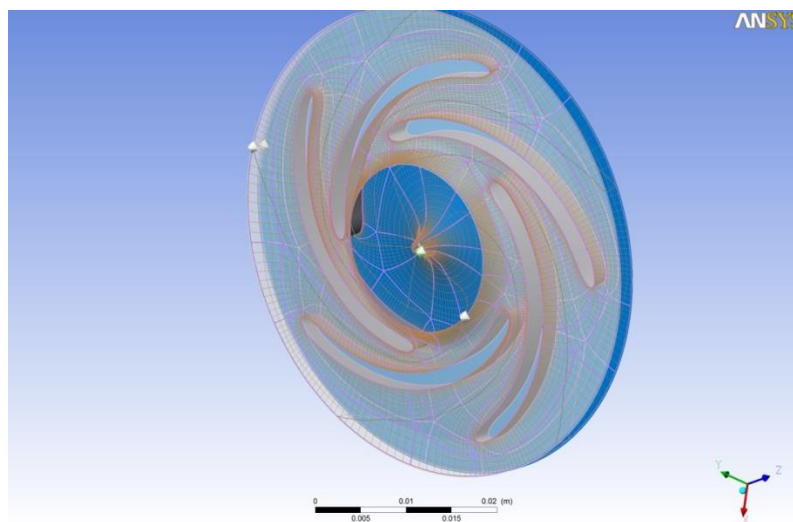
3.5.2. Δημιουργία του Πλέγματος της Πτερωτής στο TurboGrid

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση της δημιουργίας του πλέγματος για την τέταρτη πτερωτή (Σχήμα 3.5.2.α.) στο TurboGrid.



Σχήμα 3.5.2.α.

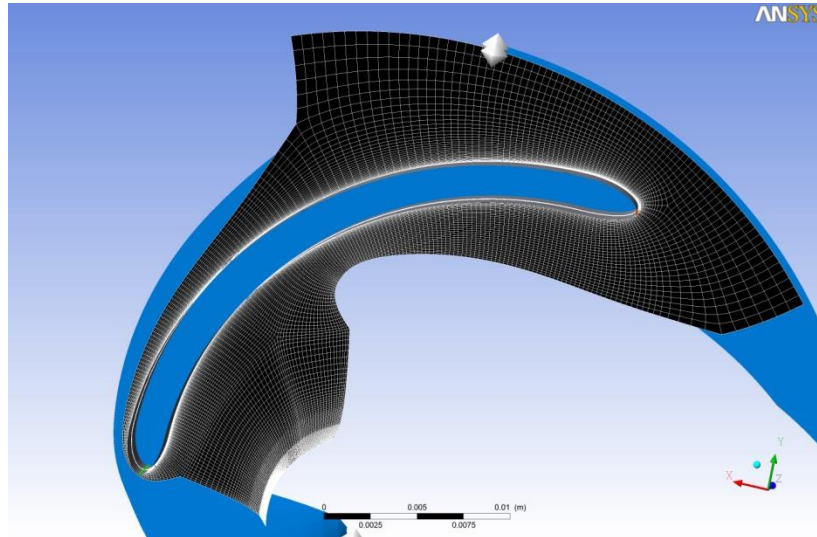
Η αρχή έγινε με τη δημιουργία της τοπολογίας με τη μέθοδο 'ATM Optimized Topology' (Σχήμα 3.5.2.β.).



Σχήμα 3.5.2.β.

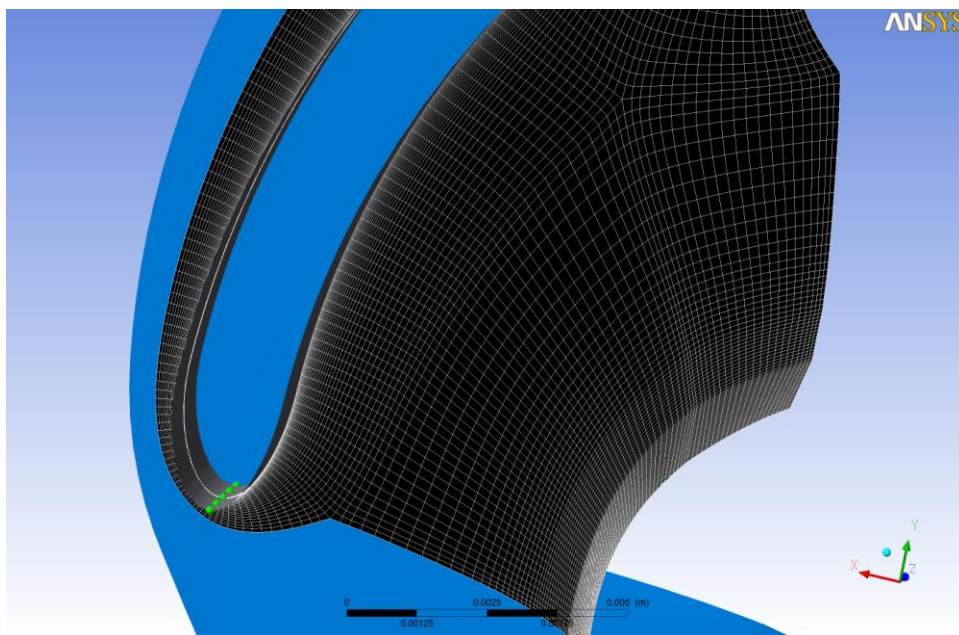
Σε δεύτερο χρόνο επιλέχθηκε η μέθοδος με την οποία αλλάζει το συνολικό μέγεθος του πλέγματος. Εδώ επιλέχθηκε η μέθοδος 'Node Count', η οποία δίνει τη δυνατότητα επιλογής του ακριβούς μεγέθους του πλέγματος μέσω της επιλογής του πλήθους των κόμβων και δημιουργεί το πλέγμα αυτόματα.

- Ορίσθηκε το πλήθος κόμβων στο 750.000 όπου και επιτυγχάνεται ανεξαρτησία πλέγματος,
- επιλέχθηκε έλεγχος του οριακού στρώματος με παράγοντα αναλογίας (*Factor Ratio*) το 1,5 μέσω της μεθόδου '*Proportional Refinement Factor*' και η απόσταση του πρώτου κελιού ορίστηκε στα 0,016 mm
- υπολογίστηκε αριθμός στοιχείων 730.000



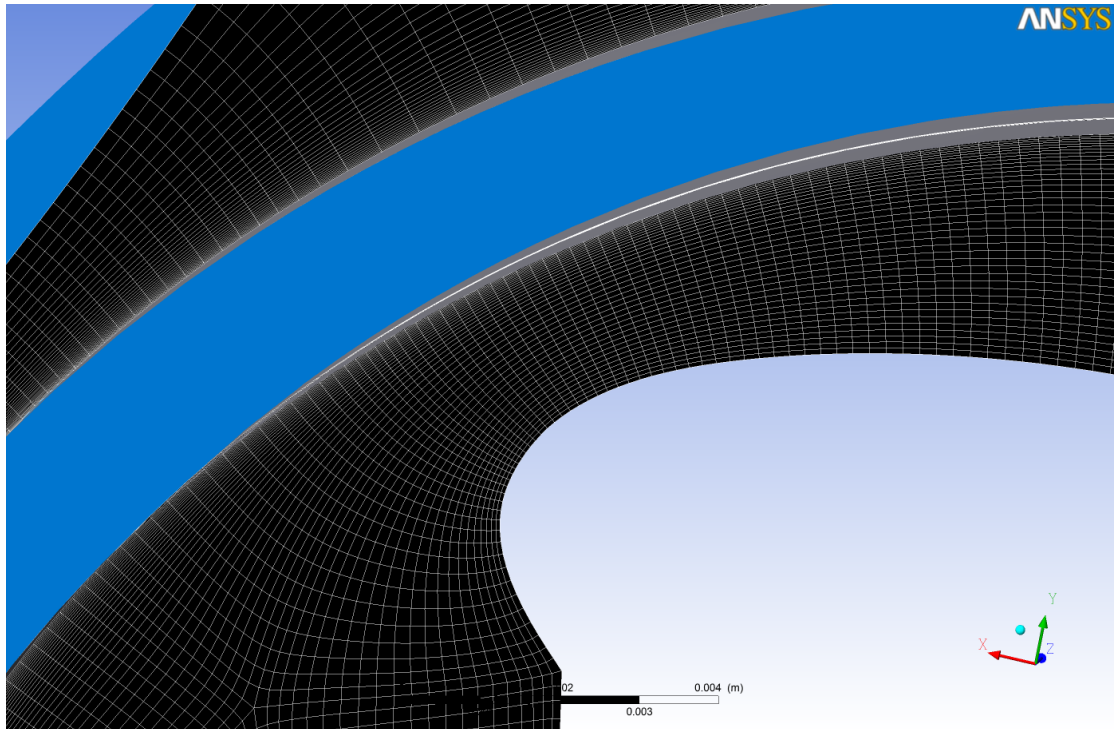
Σχήμα 3.5.2.γ.

Μεγέθυνση για το Leading Edge :



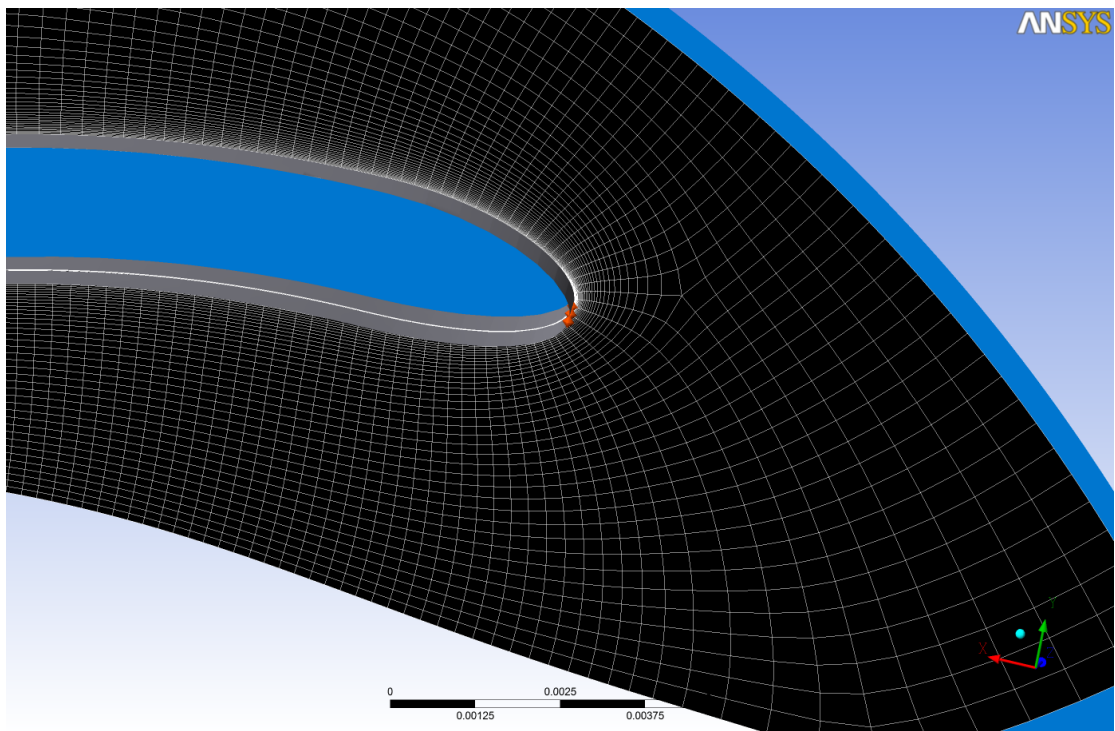
Σχήμα 3.5.2.δ.

Μεγέθυνση για το μέσο κομμάτι του πτερυγίου :



Σχήμα 3.5.2.ε.

Μεγέθυνση για το Trailing Edge :



Σχήμα 3.5.2.στ.

Σε αυτή την περίπτωση το σφάλμα στα αποτελέσματα είναι επίσης ελάχιστο.

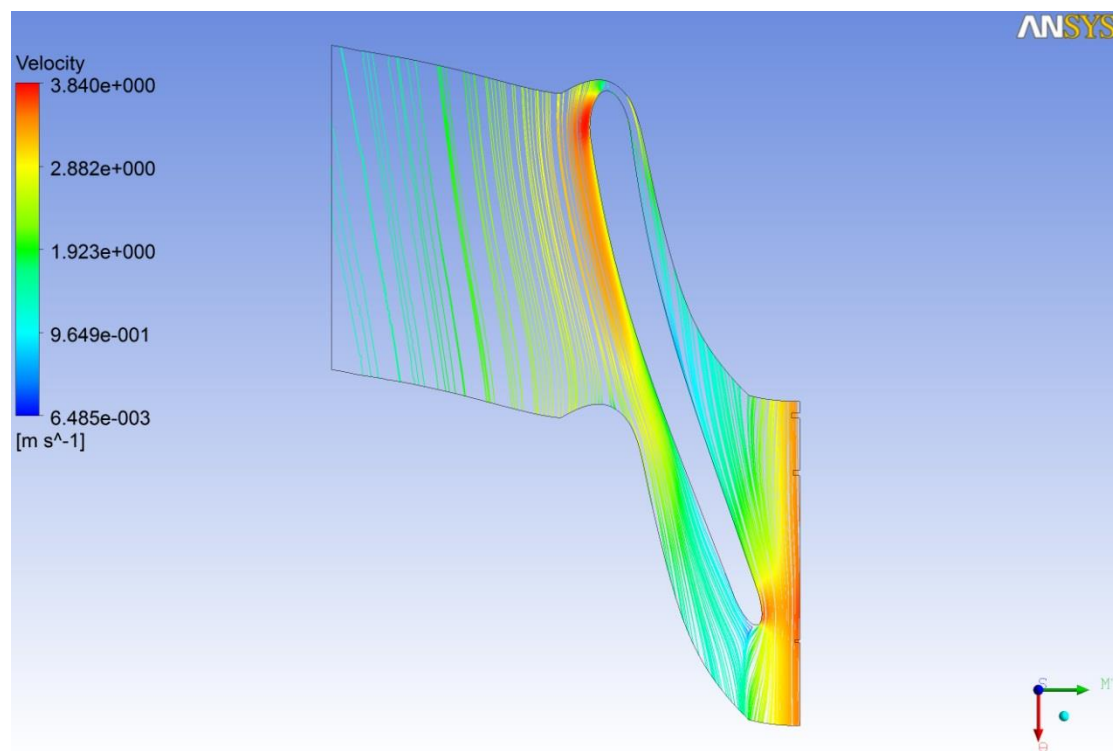
3.5.3. Καθορισμός Δεδομένων για Επίλυση στο CFX

Όλα τα δεδομένα βρίσκονται σε πλήρη ταύτιση με το τρίτο σενάριο (Παράγραφος 3.4.3.).

3.5.4. Εμφάνιση Αποτελεσμάτων

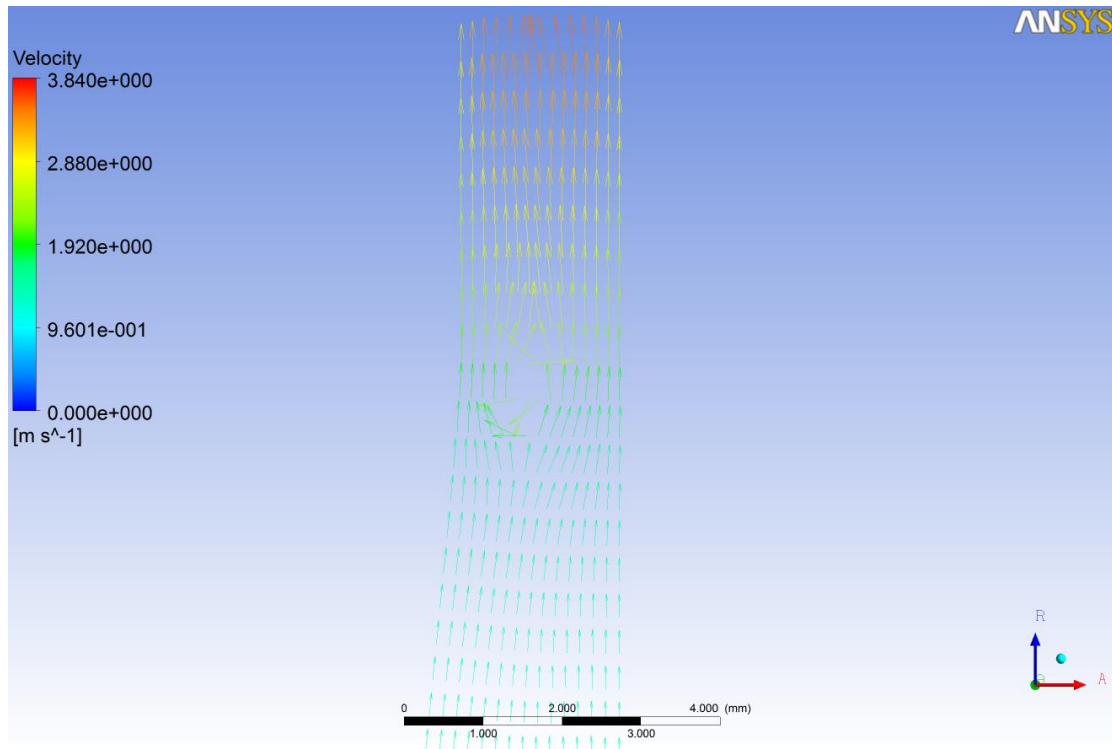
3.5.4.1. Μελέτη Ανακυκλοφορίας

Από την πρώτη ματιά στα streamlines (Σχήμα 3.5.4.1.α.) και στα διανύσματα της ταχύτητας στη μεσημβρινή τομή (Σχήματα 3.5.4.1.β.γ.) αλλά και ανάμεσα στα δύο πτερύγια (Σχήματα 3.5.4.1.δ.ε.στ.) φάνηκε ότι δεν υπάρχουν ανακυκλοφορίες, γεγονός που είναι ικανοποιητικό. Μονάχα προς την έξοδο της μεσημβρινής τομής (Σχήμα 3.5.4.1.β.) υπάρχει , όπως και πριν (Παράγραφος 3.4.4.1.) μια μικρή ανάδευση της ροής η οποία δε φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τη ροή. Για λόγους καλύτερης ευκρίνειας η μεσημβρινή τομή χωρίσθηκε στα δύο (Σχήματα 3.5.4.1.β.-γ.) ενώ η όψη μεταξύ των δύο πτερυγίων στα τρία (Σχήματα 3.5.4.1.δ.-ε.στ.).



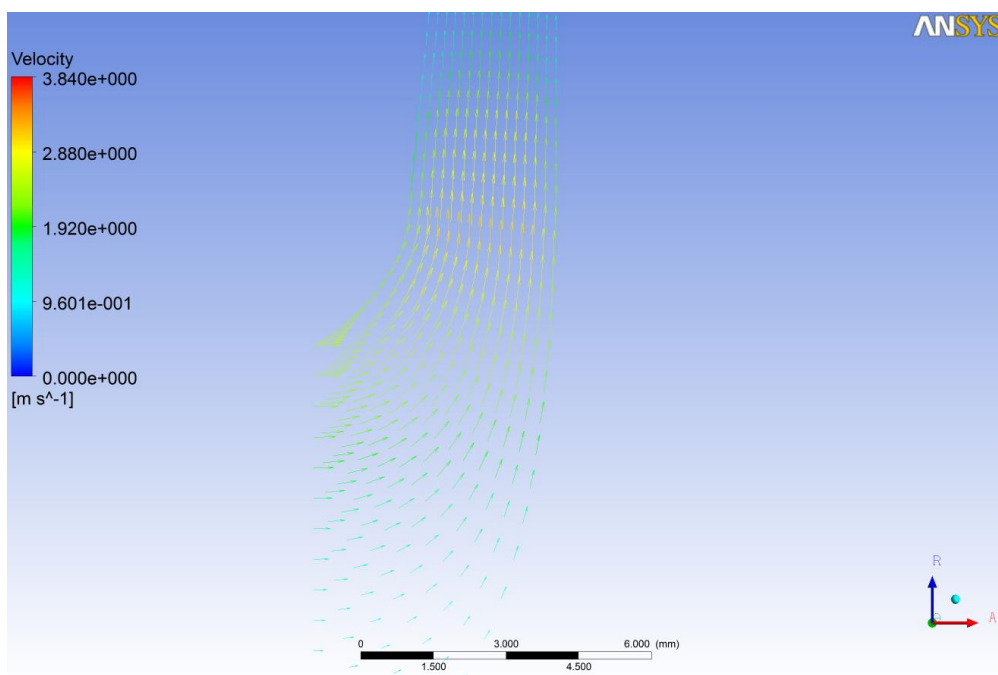
Σχήμα 3.5.4.1.α.

Για το trailing edge της μεσημβρινής τομής :



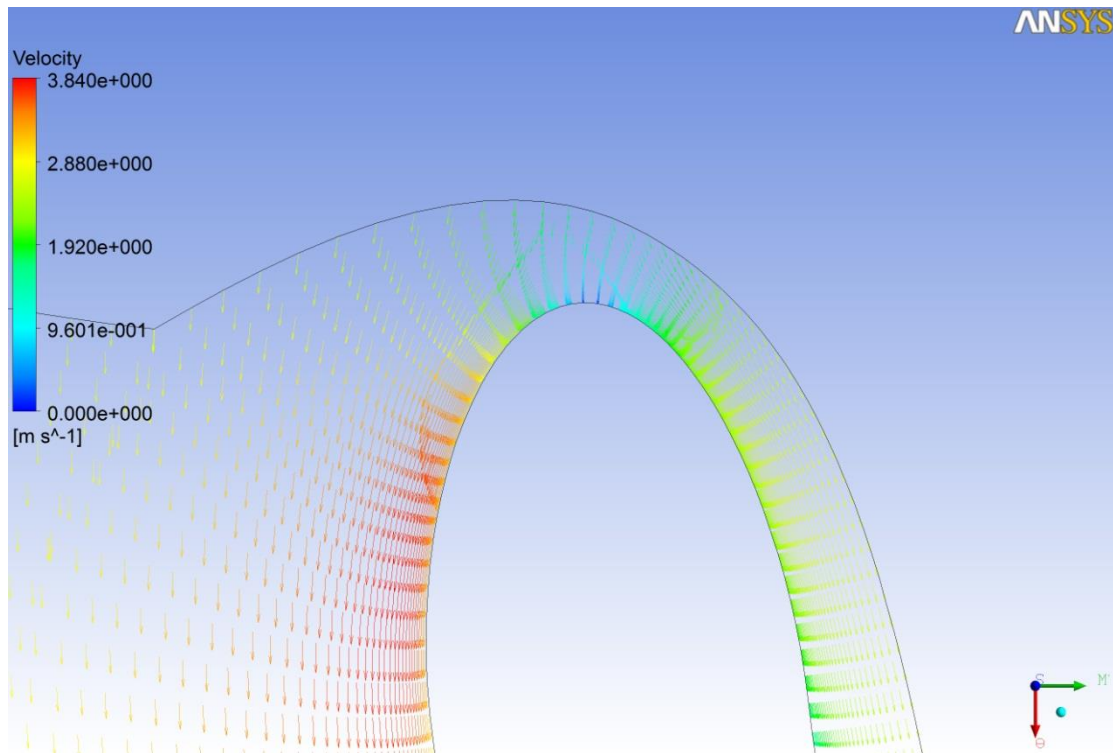
Σχήμα 3.5.4.1.β.

Για το leading edge της μεσημβρινής τομής :



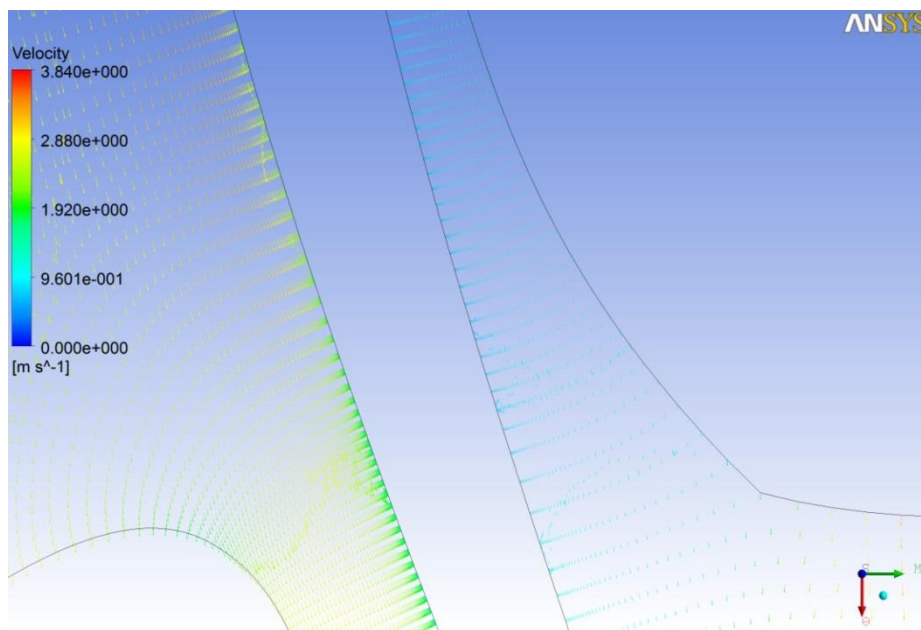
Σχήμα 3.5.4.1.γ.

Για το leading edge της όψης μεταξύ δύο πτερυγίων :



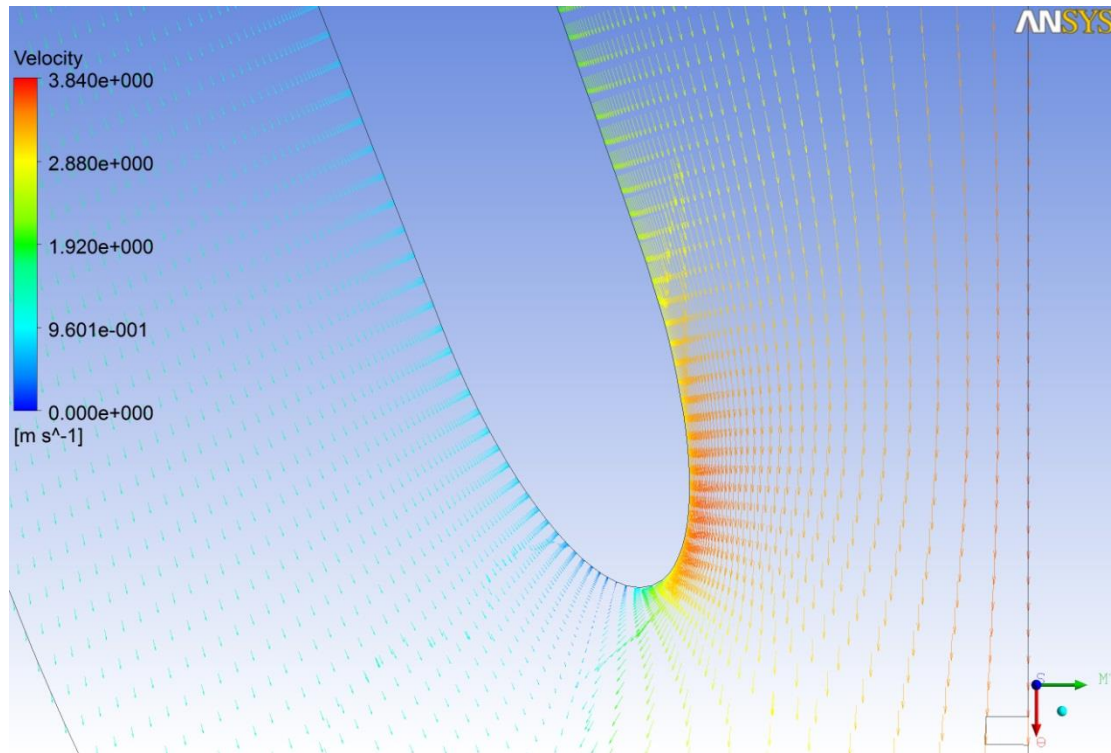
Σχήμα 3.5.4.1.δ.

Για το μέσο τους πτερυγίου της όψης μεταξύ δύο πτερυγίων :



Σχήμα 3.5.4.1.ε.

Για το trailing edge της όψης μεταξύ δύο πτερυγίων :



Σχήμα 3.5.4.1.στ.

3.5.4.2. Μελέτη της Πίεσης που Επιτυγχάνεται

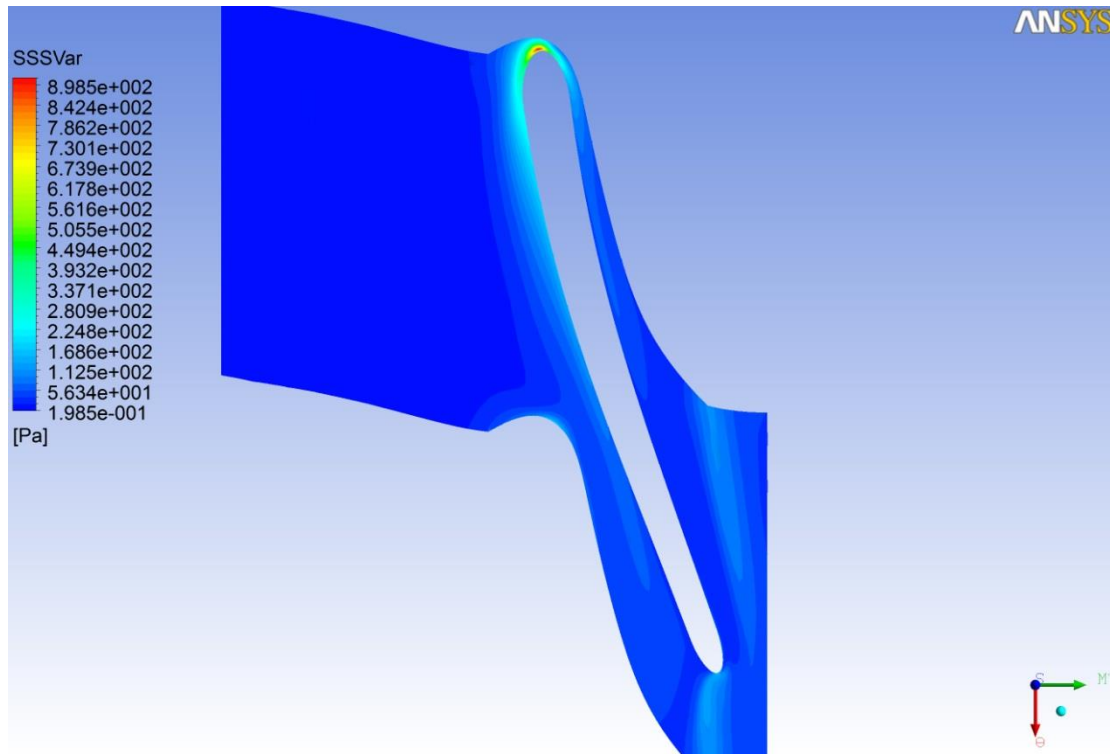
Εφόσον δεν υπήρχαν ανακυκλοφορίες ακολουθεί ο υπολογισμός της διαφοράς πίεσης. Η επιθυμητή κυμαίνεται περίπου στα 16,3 kPa. Όπως ήδη προαναφέρθηκε γίνεται χρήση του ενσωματωμένου στο πρόγραμμα υπολογιστή, που υπολογίζει τη διαφορά πίεσης ανάμεσα στην είσοδο και έξοδο της μηχανής.

- Στην είσοδο το αποτέλεσμα είναι 100.990 Pa
- Στην έξοδο είναι 117. 023 Pa

Επομένως η διαφορά πίεσης βρίσκεται στα 16.033 Pa, νούμερο το οποίο έγινε αποδεκτό παρόλο που είχαμε μια μείωση σε σχέση με πριν (16,3 kPa), και ακολούθησε η παρουσίαση του βαθμωτού μέτρου διατιμήσεως.

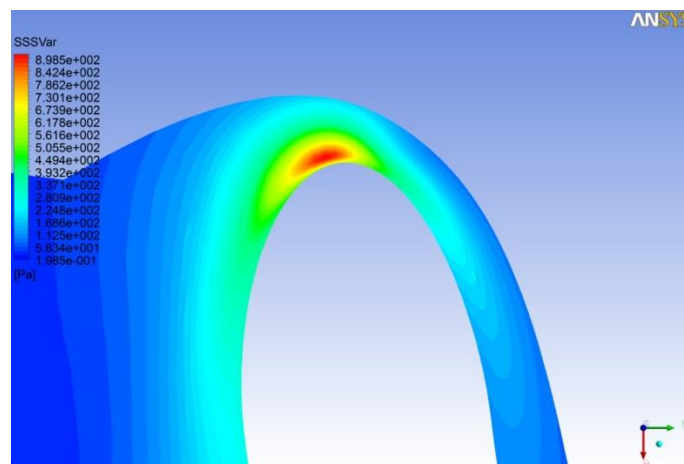
3.5.4.3. Μελέτη του Βαθμωτού Μέτρου Διατμήσεως

Εδώ αναμένεται στο μεγαλύτερο κομμάτι να μην υπάρξει κάποια επιρροή, μονάχα στο τέλος του περυγίου. Πιο συγκεκριμένα στην περιοχή μεταξύ δύο περυγίων :



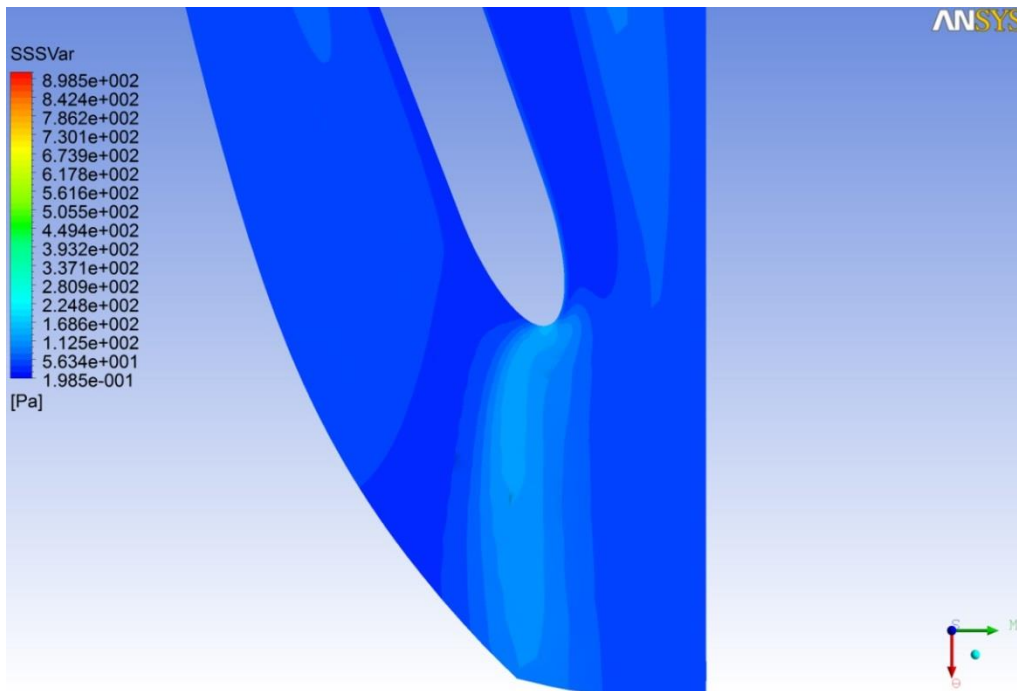
Σχήμα 3.5.4.3.α.

Για το leading edge της όψης μεταξύ δύο περυγίων :

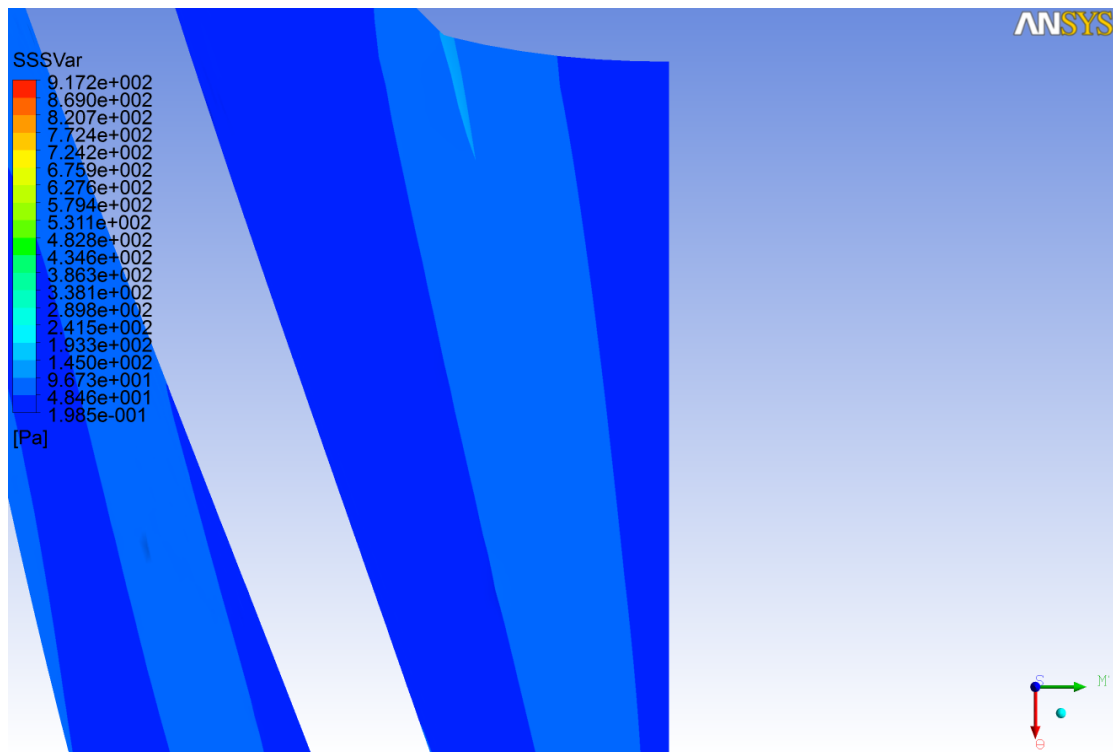


Σχήμα 3.5.4.3.β.

Για το trailing edge της όψης μεταξύ δύο πτερυγίων :

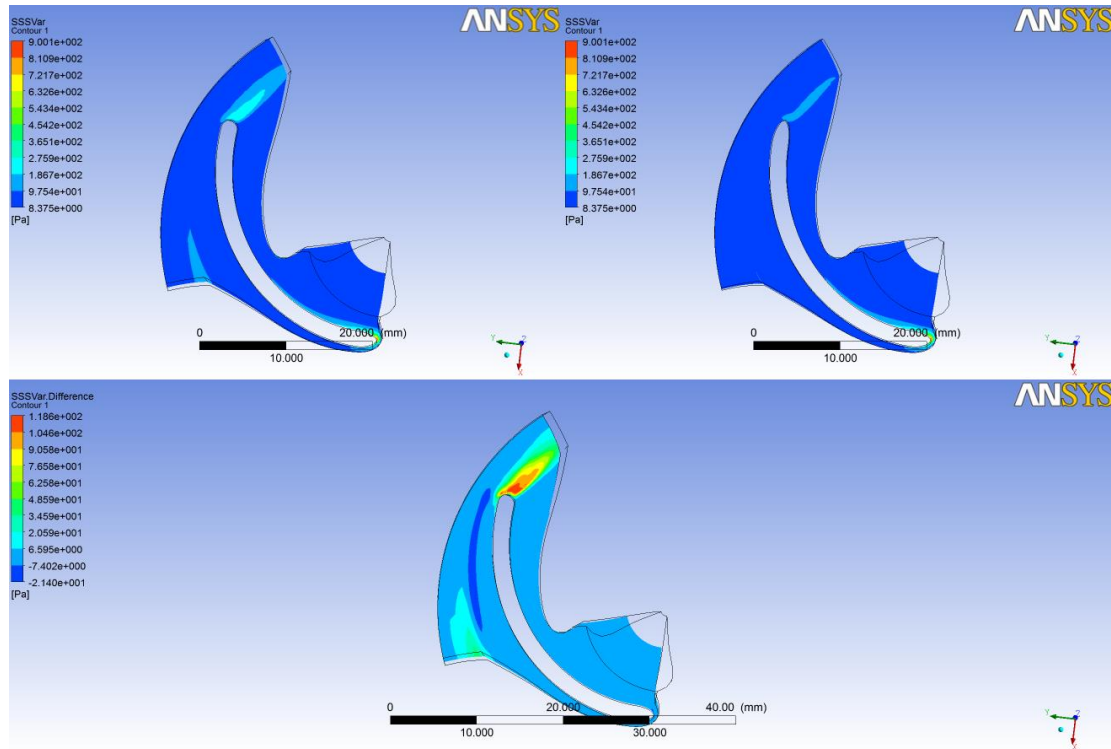


Σχήμα 3.5.4.3.γ.



Σχήμα 3.5.4.3.δ.

Με μια πρώτη ματιά φαίνεται ότι υπήρξε βελτίωση αλλά αυτό φάνηκε καθαρότερα μέσω της ακριβής σύγκρισης των δυο περιπτώσεων (Σχήμα 3.5.4.3.ε.).



Σχήμα 3.5.4.3.ε.

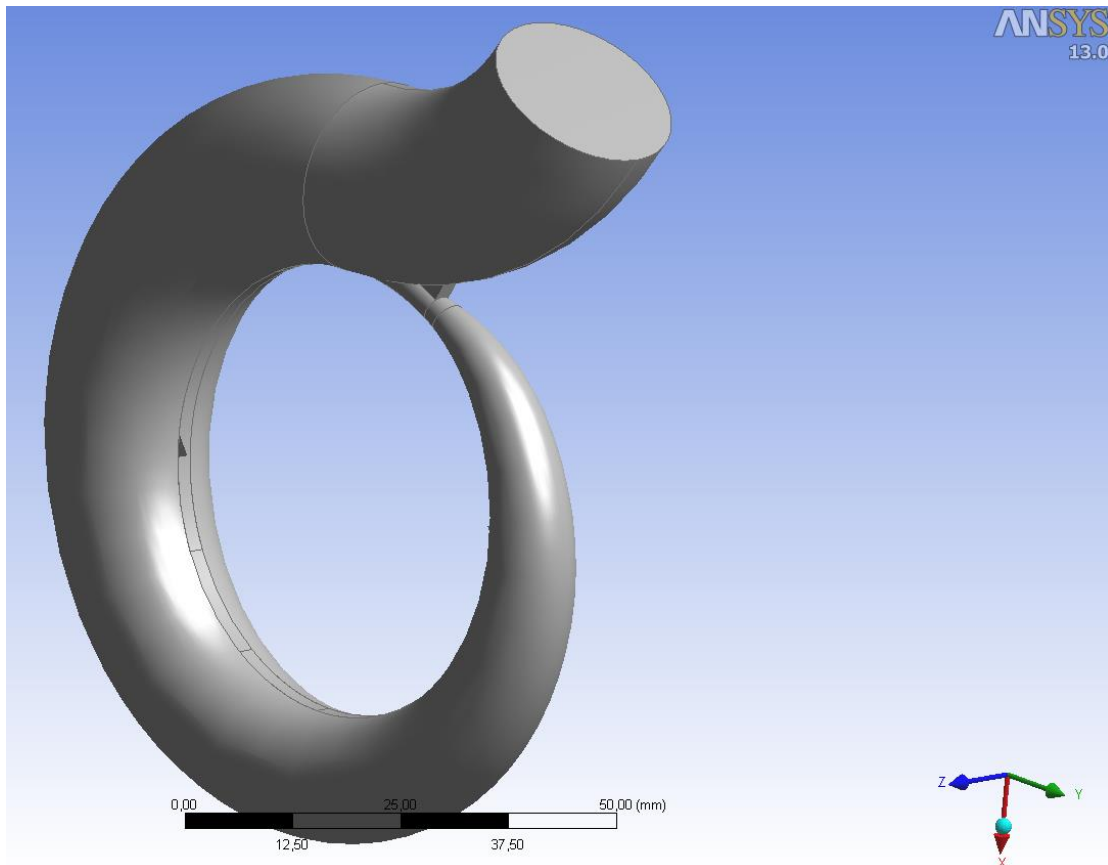
Εδώ φάνηκε ξεκάθαρα ότι στο τέλος του πτερυγίου βελτιώθηκε στο μέγιστο βαθμό η επίδραση της διάτμησης πάνω στο ρευστό. Κάπου εδώ αποφασίστηκε να ξεκινήσει η σχεδίαση και η υδροδυναμική βελτιστοποίηση του κελύφους της αντλίας.

3.6. Πέμπτο Στάδιο Σχεδίασης

3.6.1. Σχεδίαση Κελύφους στο Solid Works

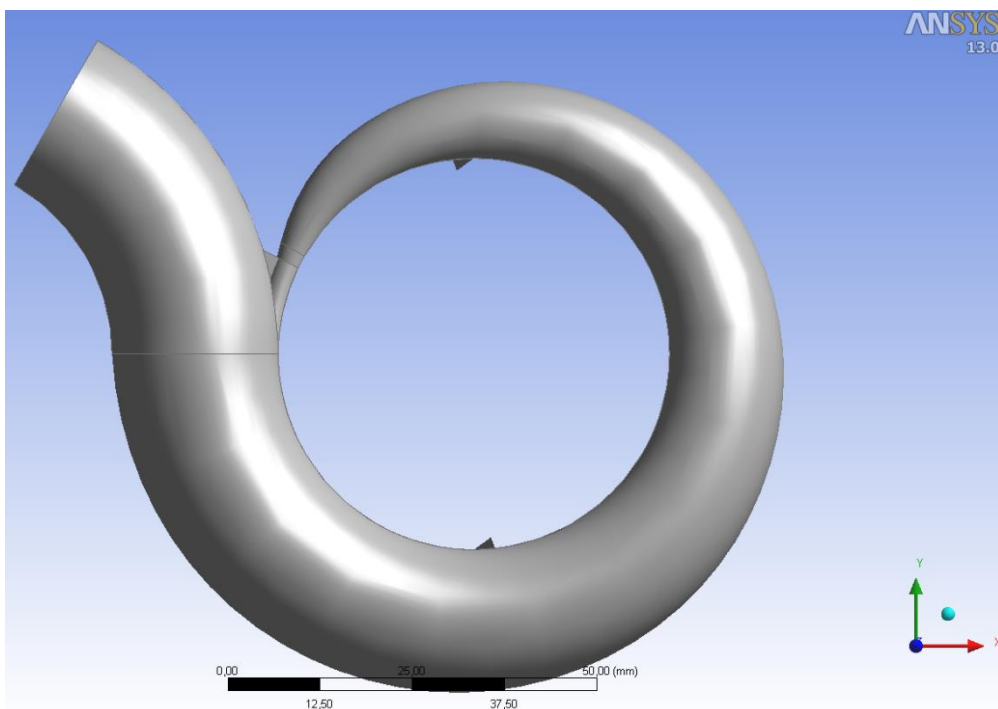
Για τη σχεδίαση του κελύφους χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πρόγραμμα Solid Works. Να τονιστεί εδώ ότι αυτό το κέλυφος σχεδιάστηκε με στόχο τη μοντελοποίηση της ροής οπότε αποτελεί ουσιαστικά το χώρο από τον οποίο περνά το ρευστό. Αυτό το κέλυφος διαφέρει προφανώς με το κέλυφος το οποίο χρησιμοποιείται στην πράξη. Παρακάτω παρουσιάζονται οι όψεις του κελύφους όπως αυτό εισήχθη στο Design Modeler του ANSYS.

Γενική Όψη Κελύφους :



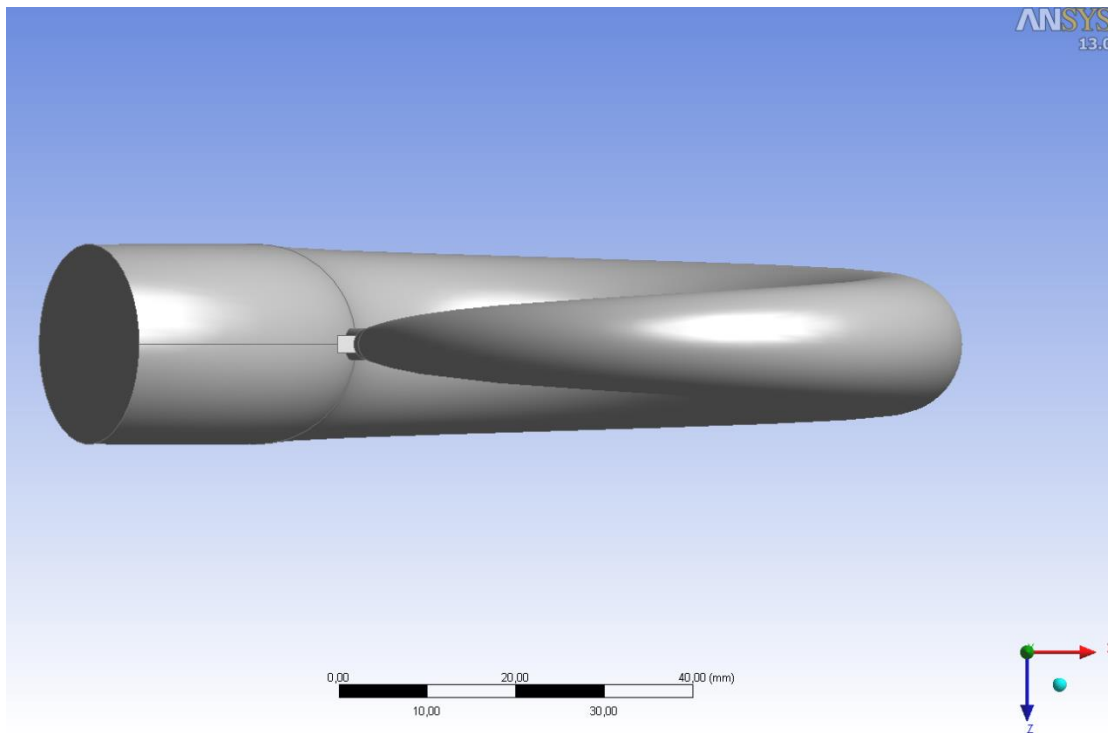
Σχήμα 3.6.1.α.

Πρόοψη Κελύφους :



Σχήμα 3.6.1.β.

Κάτοψη Κελύφους :



Σχήμα 3.6.1.γ.

3.6.2. Δημιουργία Πλέγματος για την Αντλία

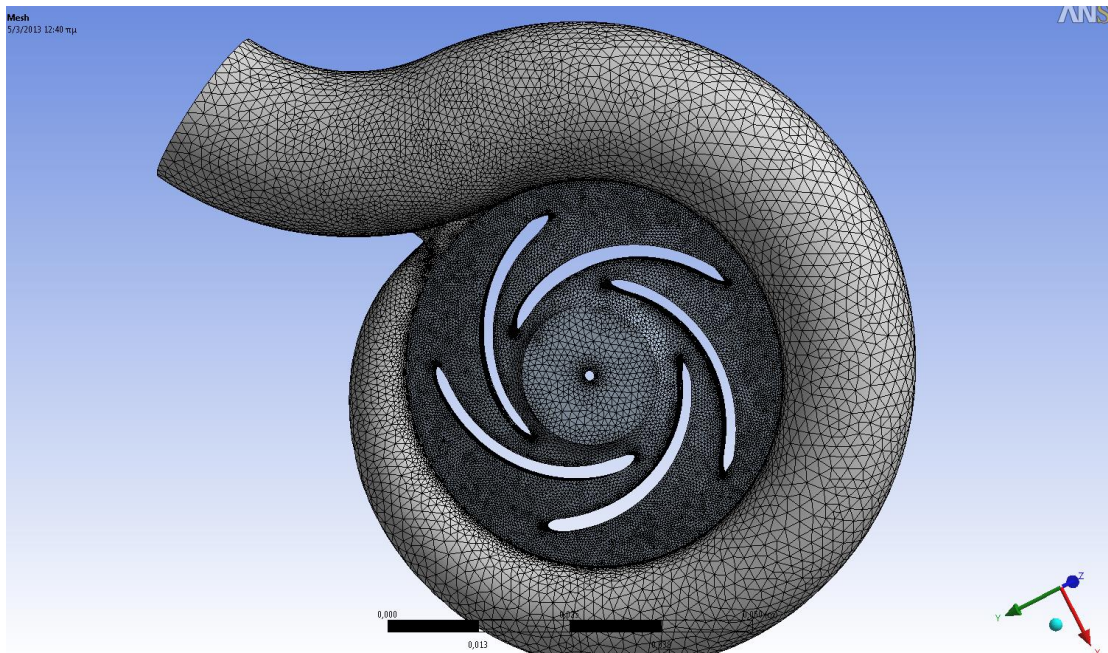
Έχοντας σχεδιάσει το κέλυφος της αντλίας, προστέθηκε στο Design Modeler του ANSYS, η πτερωτή και δημιουργήθηκε πλέγμα για το σύνολο της αντλίας. Το πλέγμα δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα *Meshing* του ANSYS, δημιουργώντας διαφορετικής πυκνότητας πλέγμα στην πτερωτή και στο κέλυφος. Στην πτερωτή επιθυμούνταν πλέγμα κοντά στην ποιότητα αυτού που ήδη είχε μελετηθεί (Κεφάλαιο 3.5.2.) ενώ στο κέλυφος επιθυμείτο πλέγμα με υψηλή πύκνωση στις ιδιαίτερες περιοχές της γλώσσας και της διεπιφάνειας. Πιο συγκεκριμένα για το πλέγμα γενικά επιλέγεται :

1. Χρήση της *Advanced Size Function* με επιλογή της *on: Proximity and Curvature*. Με την επιλογή αυτή γίνεται καλύτερος έλεγχος στη δημιουργία του πλέγματος.
2. Το *Relevance Centre* ορίστηκε ως *Fine*.
3. Ορίστηκε *High Smoothing*.
4. Ορίστηκε *Slow Transition*. Εδώ ορίζεται το ποσοστό αύξησης του μεγέθους των γειτονικών στοιχείων.
5. Ορίστηκε *Span Angle Center Fine*, κάτι που σημαίνει ότι το πλέγμα υποδιαιρέθηκε σε καμπύλες περιοχές με τα επιμέρους στοιχεία να βρίσκονται σε θέση από -36 έως 12 μοίρες.

Για το πλέγμα της *πτερωτής* ορίσθηκε αριθμός κελιών μεταξύ των κενών (στην περίπτωση μας των *πτερυγίων*) το έξι, αριθμός αρκετά καλός για τη δημιουργία ενός καλού πλέγματος στην *πτερωτή*. Κλείνοντας μόνο για το *κέλυφος* επιλέχθηκε ένα ποσοστό αύξησης (*Growth Rate*) στο 1,030.

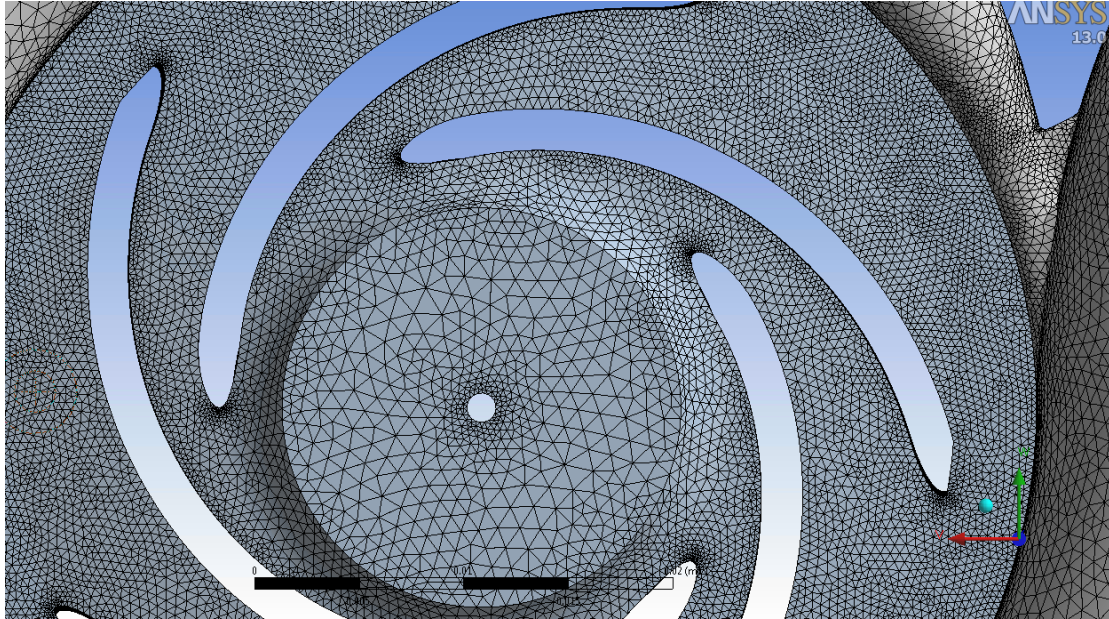
Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία ενός πλέγματος με τα εξής χαρακτηριστικά :

Σε σύνολο 720.000 κόμβων και 4.100.000 στοιχείων, οι 590.000 κόμβοι και τα 3.400.000 στοιχεία ανήκουν στο *κέλυφος* ενώ οι 130.000 κόμβοι και τα 700.000 στοιχεία ανήκουν στην *πτερωτή*. Αποτελεί ένα πολύ ικανοποιητικό πλέγμα καθώς όπως παρατηρείται σε όλα τα παρακάτω σχήματα υπάρχει καλή πύκνωση στη γλώσσα (*Σχήματα 3.6.2.γ.δ.*) και στην περιοχή όπου ενώνεται το *κέλυφος* με την *πτερωτή* (*Σχήματα 3.6.2.ε.στ.*) αλλά και στο εσωτερικό της γεωμετρίας όπως φαίνεται στο τελευταία σχήματα (*Σχήματα 3.6.2.ε.στ.*). Ακολουθεί η παρουσίαση του πλέγματος :



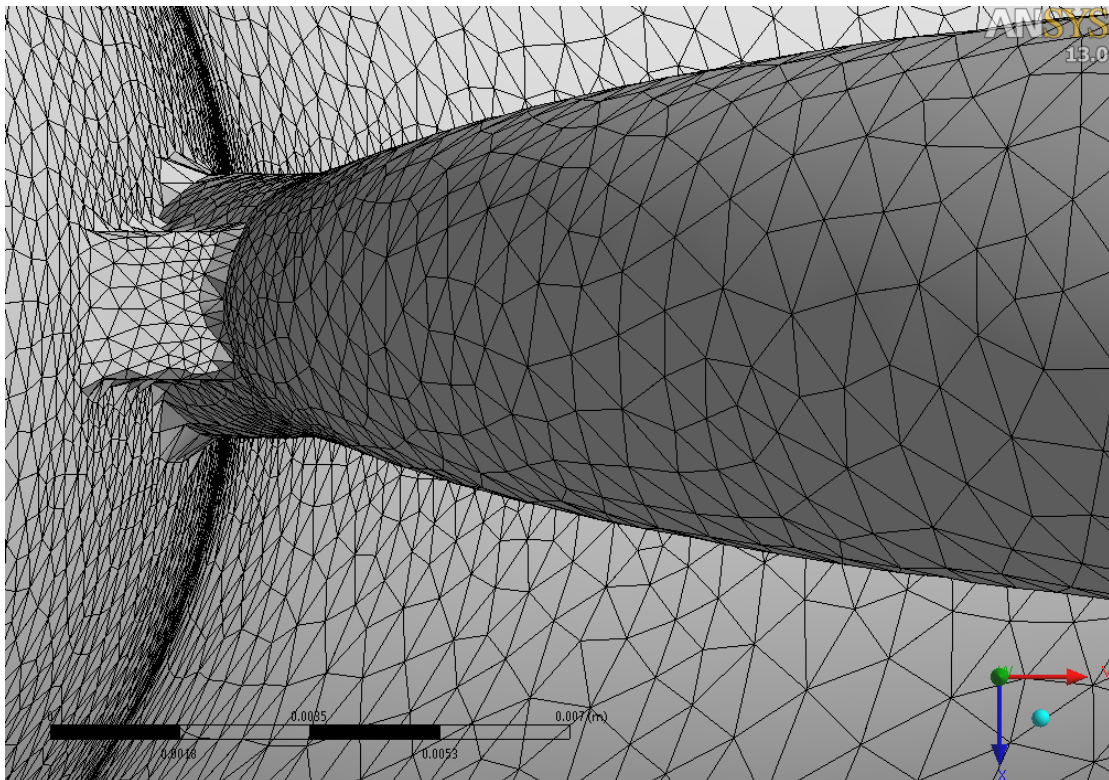
Σχήμα 3.6.2.α.

Για την περρωτή :

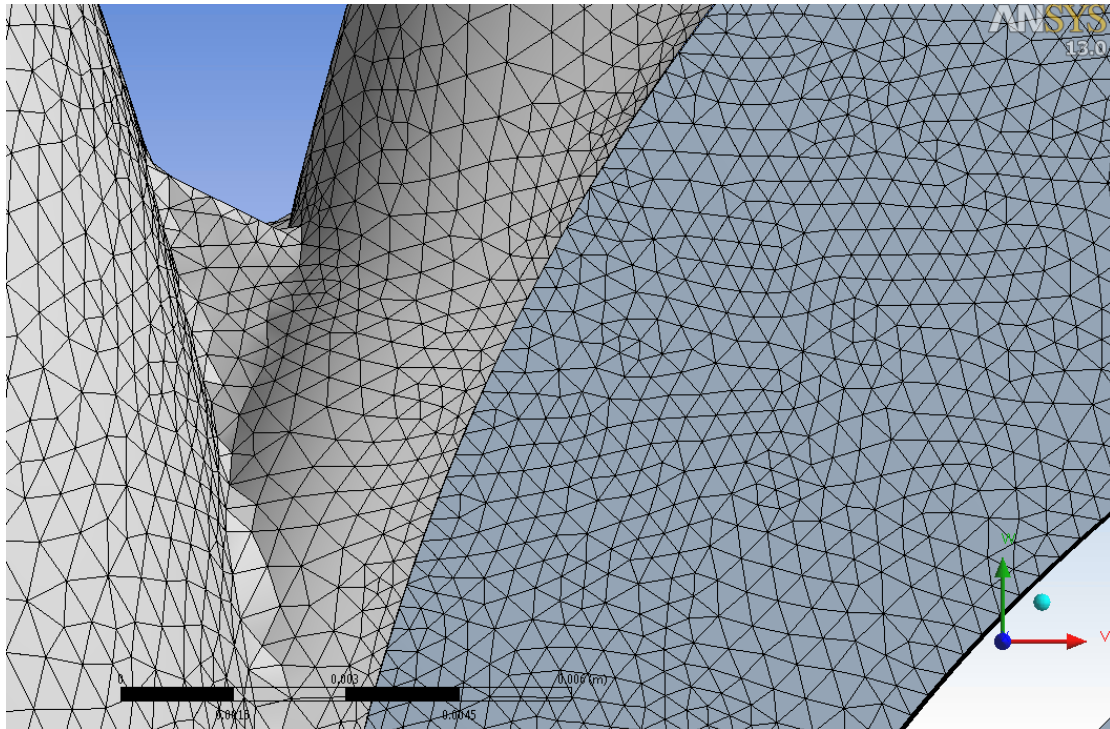


Σχήμα 3.6.2.β.

Για την περιοχή της γλώσσας του κελύφους :

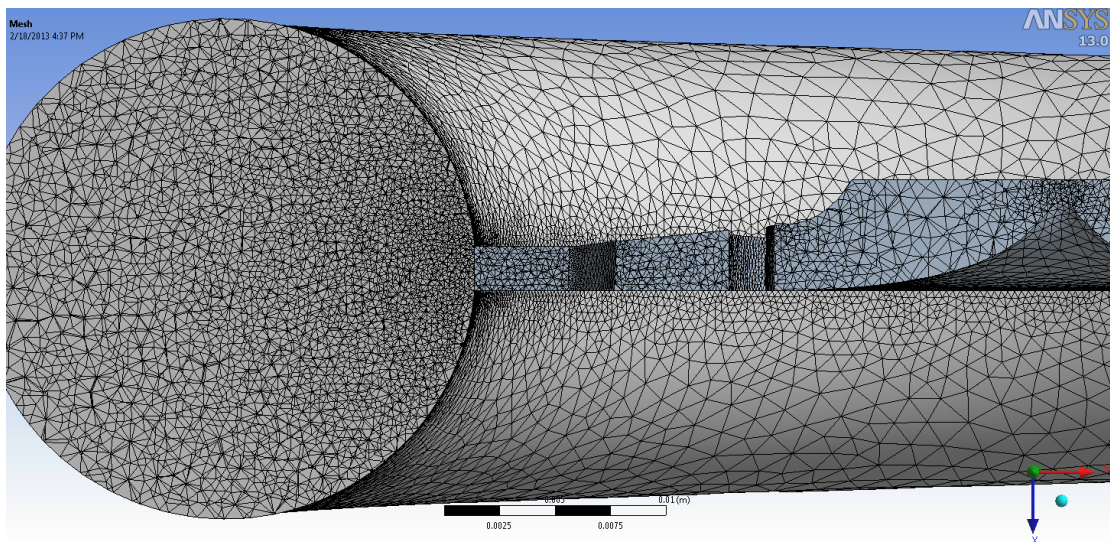


Σχήμα 3.6.2.γ.

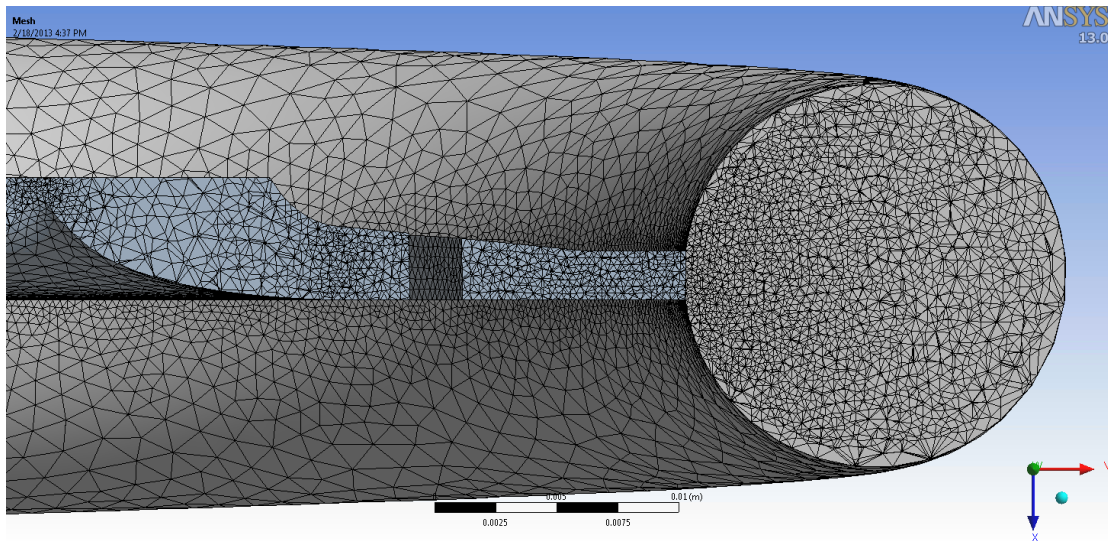


Σχήμα 3.6.2.δ.

Εσωτερικές τομές για καλύτερο έλεγχο της ποιότητας του πλέγματος :



Σχήμα 3.6.2.ε.

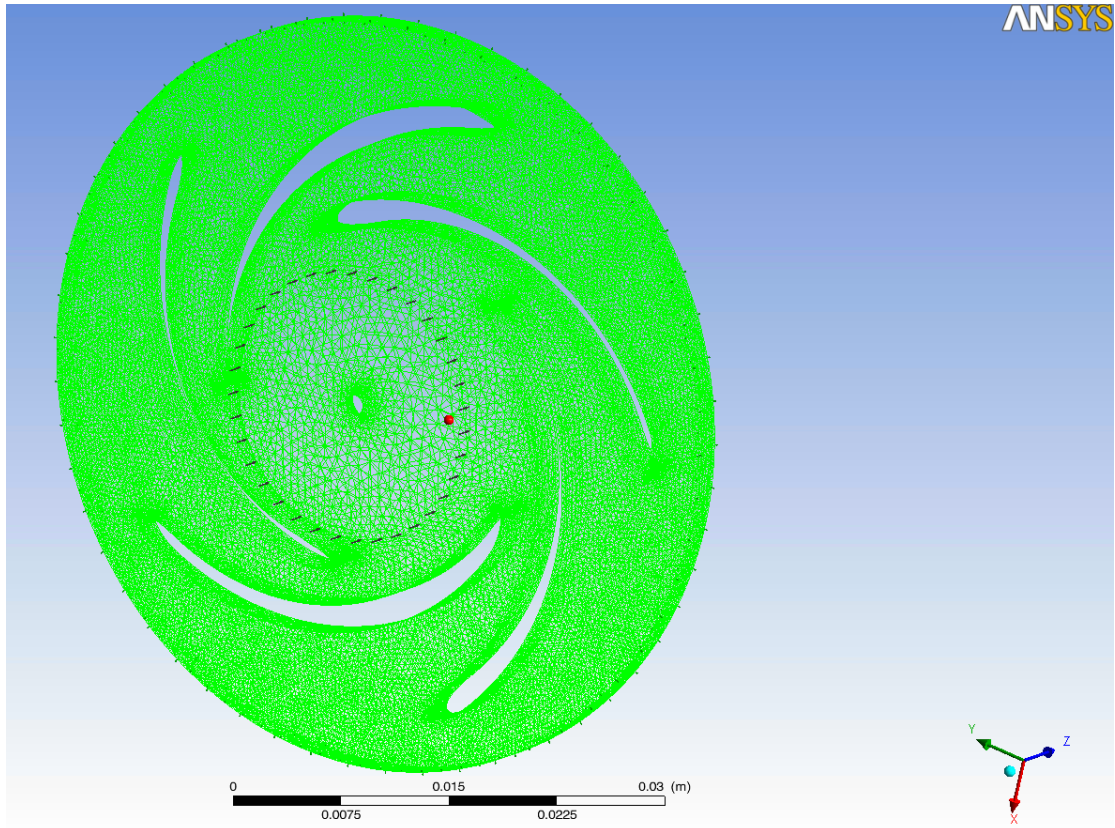


Σχήμα 3.6.2.στ.

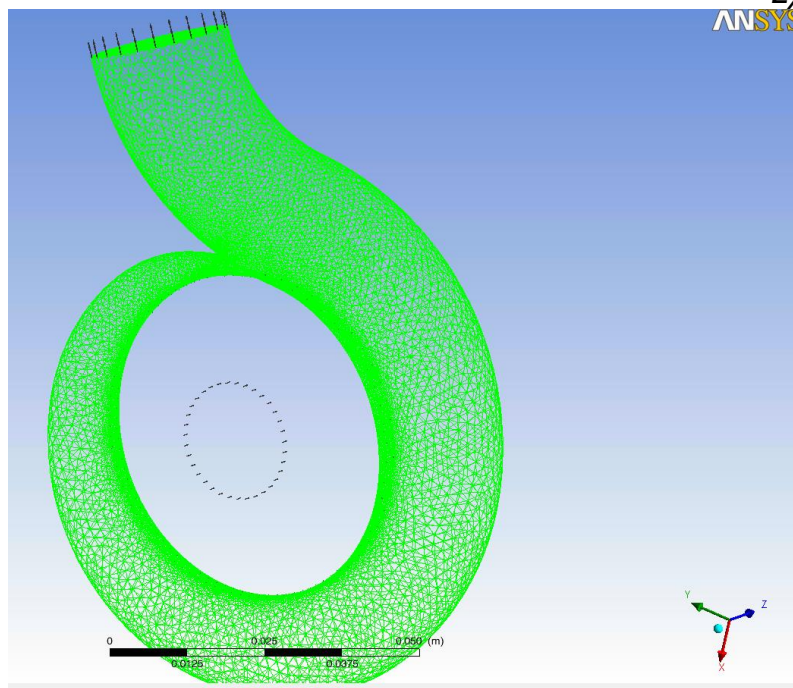
3.6.3. Καθορισμός Δεδομένων για Επίλυση στο CFX

Στο σημείο αυτό ορίστηκαν όπως εξηγήθηκε προηγουμένως τα δεδομένα για την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Στην προκειμένη περίπτωση έπρεπε να ξεκαθαριστεί η ύπαρξη δύο διαφορετικών πλαισίων, ενός ακίνητου και ενός κινούμενου. Από εκεί και πέρα όλα έγιναν με παρόμοιο με πριν τρόπο. Πιο συγκεκριμένα :

- Ορίστηκε το πλαίσιο της πτερωτής στο οποίο υπάρχει ρευστό, πιο συγκεκριμένα νερό και περιστρέφεται με 2550 rpm (Σχήμα 3.6.3.α.).
- Ορίστηκε το πλαίσιο του κελύφους στο οποίο υπάρχει νερό και είναι ακίνητο (Σχήμα 3.6.3.β.).
- Ορίστηκε η οριακή συνθήκη της εισόδου, έχοντας παροχή μάζας 83 g/s στην αξονική συνιστώσα των κυλινδρικών συντεταγμένων (Σχήμα 3.6.3.α.).
- Ορίστηκε η οριακή συνθήκη της εξόδου, έχοντας ως μέση στατική πίεση τα 1,17 bar (Σχήμα 3.6.3.β.)
- Ορίστηκαν οι αρχικές συνθήκες για επίλυση οι οποίες υπολογίζονται αυτόματα από τον επιλυτή του CFX, κάτι που συνιστάται για προβλήματα σταθερής κατάστασης. Ακόμη ορίστηκαν ως καρτεσιανές οι συνιστώσες της ταχύτητας και ορίστηκαν αυτόματα. Ο αυτόματος ορισμός των αρχικών συνθηκών γίνεται βάση γραμμικής αξιολόγησης η οποία απαιτεί τις αρχικές συνθήκες σε δύο σημεία του πλαισίου. Αυτά τα σημεία και αυτές οι αρχικές συνθήκες υπολογίζονται με σταθμισμένο μέσο όρο των συνοριακών συνθηκών. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται οι αρχικές συνθήκες της πίεσης. Τέλος, ορίστηκε ένταση της τύρβης στο 5%.
- Ορίστηκε επίπεδο διεπαφής ανάμεσα στην κινούμενη πτερωτή και το ακίνητο κέλυφος
- Ορίστηκε επίπεδο σύγκλισης το 10^{-9}



Σχήμα 3.6.3.α.



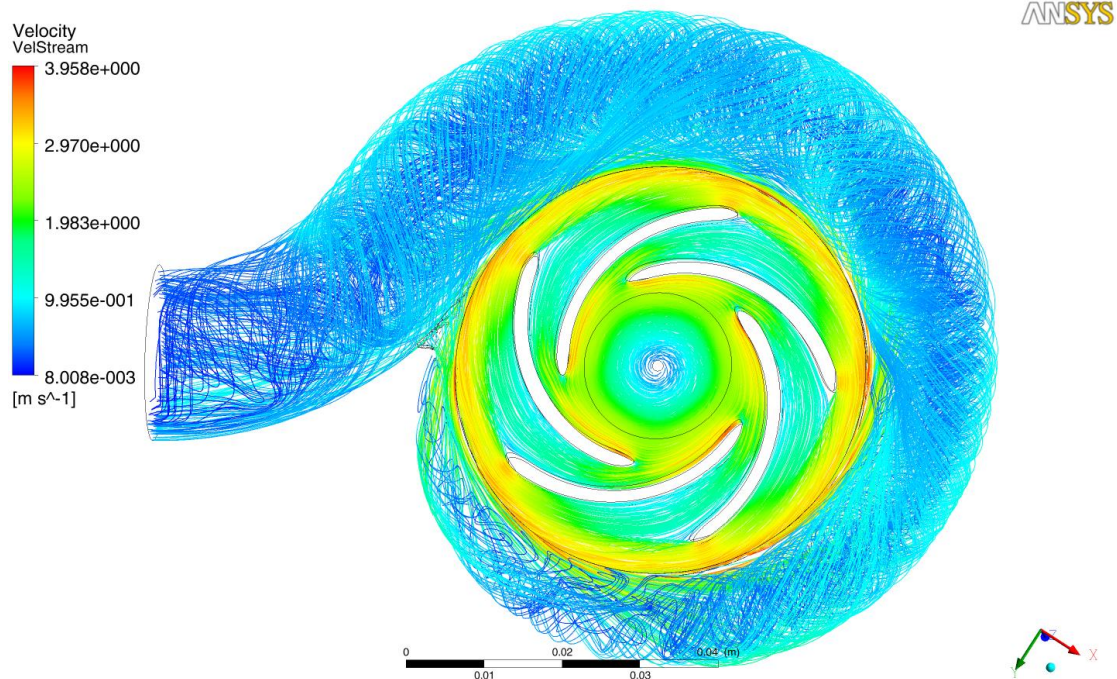
Σχήμα 3.6.3.β.

3.6.4. Εμφάνιση Αποτελεσμάτων

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έγινε όπως όταν εξετάστηκε μόνο η πτερωτή. Δηλαδή, σε πρώτη φάση εξετάστηκε η ομαλή ροή, έπειτα η επίτευξη διαφοράς πίεσης και τέλος η χαμηλή διάτμηση.

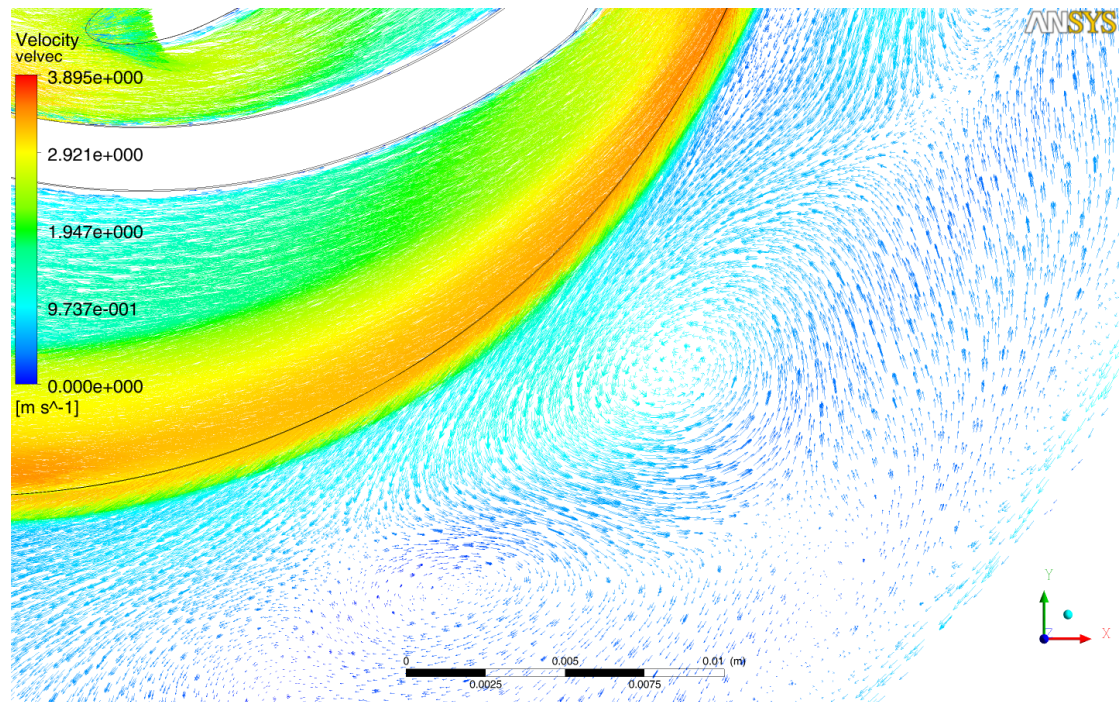
3.6.4.1. Μελέτη Ανακυκλοφορίας

Η μελέτη της ροής μέσα στο κέλυφος είναι δυσκολότερη από ότι μόνο στην πτερωτή. Ο λόγος είναι ότι το κέλυφος παραλαμβάνει τη ροή που εξέρχεται της πτερωτής και την ανακατεύει ταυτοχρόνως με τη ροή που έχει ήδη μπει σε αυτό προηγουμένως. Αναμενόταν λοιπόν μια ανάδευση της ροής και μια περιστροφή της χωρίς αυτό να σημαίνει ότι το ρευστό ανακυκλοφορεί. Όταν η ροή απεικονίζεται σε *streamlines* (Σχήμα 3.6.4.1.α.) φαίνεται κάποια ανακυκλοφορία η οποία αποκαλύπτεται από τα διανύσματα των ταχυτήτων σε διάφορες τομές (Σχήμα 3.6.4.1.β.γ.). Πιο συγκεκριμένα :



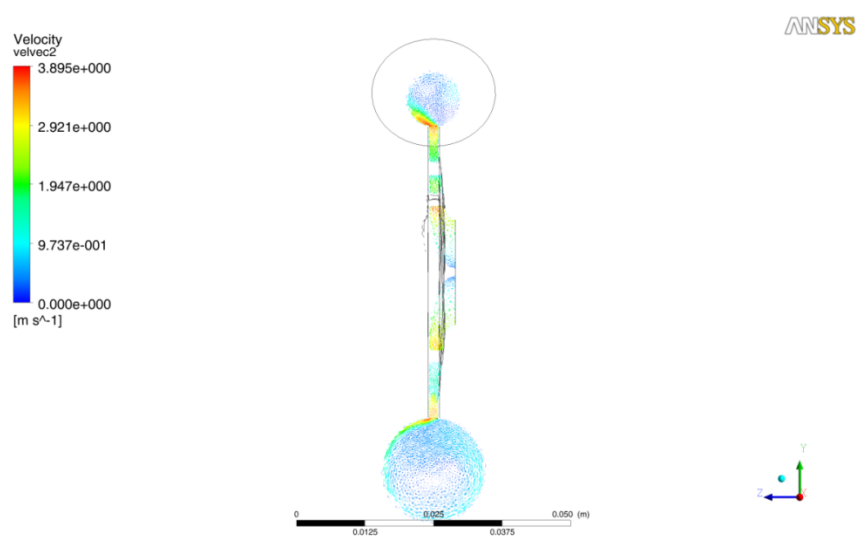
Σχήμα 3.6.4.1.α.

Ενώ το διάνυσμα της ταχύτητας :



Σχήμα 3.6.4.1.β.

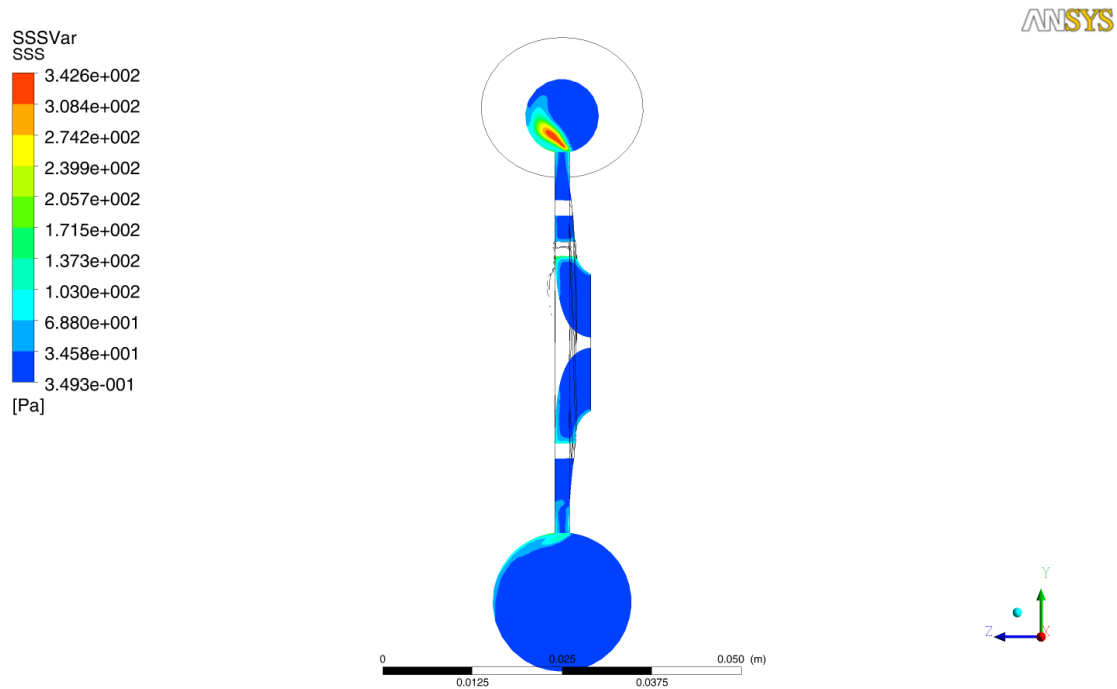
Πέρα από το συμπέρασμα ότι η ροή σε αυτό το κέλυφος ήταν ακατάλληλη, στην επόμενη εικόνα της μεσημβρινής τομής παρατηρήθηκε μια επιτάχυνση της ροής στο τέλος της πτερωτής και προς την πλήμνη της ίδιας (Σχήμα 3.6.4.1.δ.). Αυτή η επιτάχυνση λογικά προκάλεσε και μεγάλο βαθμωτό μέτρο διατμήσεως γεγονός που μελετάτε παρακάτω. Επομένως παρόλο που η ροή δεν ικανοποίησε, η μελέτη των αποτελεσμάτων για το βαθμωτό μέτρο διάτμησης συνεχίσθηκε.



Σχήμα 3.6.4.1.δ.

3.6.4.2. Μελέτη Βαθμωτού Μέτρου Διάτμησης

Όπως και προβλέφτηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο το βαθμωτό μέτρο διάτμησης ήταν στην πλήμνη της πτερωτής πολύ μεγάλο. Αυτός λοιπόν ήταν ένας δεύτερος λόγος απόρριψης αυτής της γεωμετρίας κελύφους.



Σχήμα 3.6.4.2.α.

3.6.5. Λόγος μη Επίτευξης των Στόχων και Προτάσεις για Βελτιστοποίηση

Οι λόγοι της μη επίτευξης των στόχων με αυτή τη σχεδίαση ήταν δύο :

- Έντονη ανακυκλοφορία στο κομμάτι του κελύφους
- Υψηλή διάτμηση λόγω επιτάχυνσης της ροής στην έξοδο της πτερωτής και προς την πλήμνη της ίδιας

Οι προτάσεις για βελτιστοποίηση ήταν δύο :

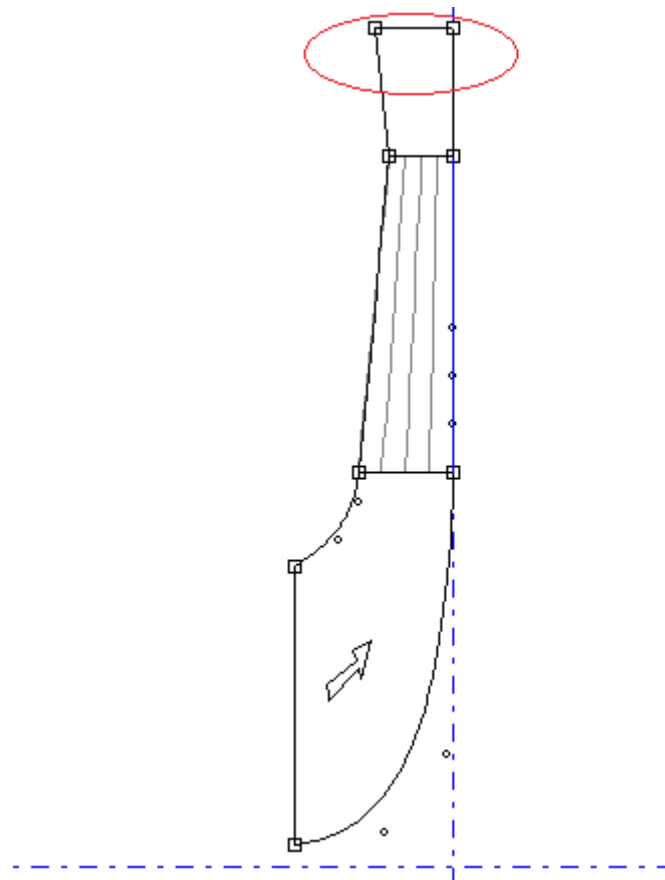
- Αύξηση του ύψους πτερωτής στην έξοδο από 2 mm σε 2,5 mm, ώστε να μειωθεί η ταχύτητα και άρα η διάτμηση
- Αλλαγή του είδους του κελύφους σε εφαπτομενικό με στόχο την παραλαβή αυτών των υψηλών ταχυτήτων στην πλήμνη της πτερωτής

3.7. Έκτο Στάδιο Σχεδίασης

Σε αυτό το στάδιο που αποτέλεσε και το τελευταίο της σχεδίασης, αυξήθηκε το ύψος της πτερωτής και το κέλυφος έγινε εφαπτομενικό.

3.7.1. Σχεδίαση Πτερωτής στο λογισμικό BladeGen της ANSYS

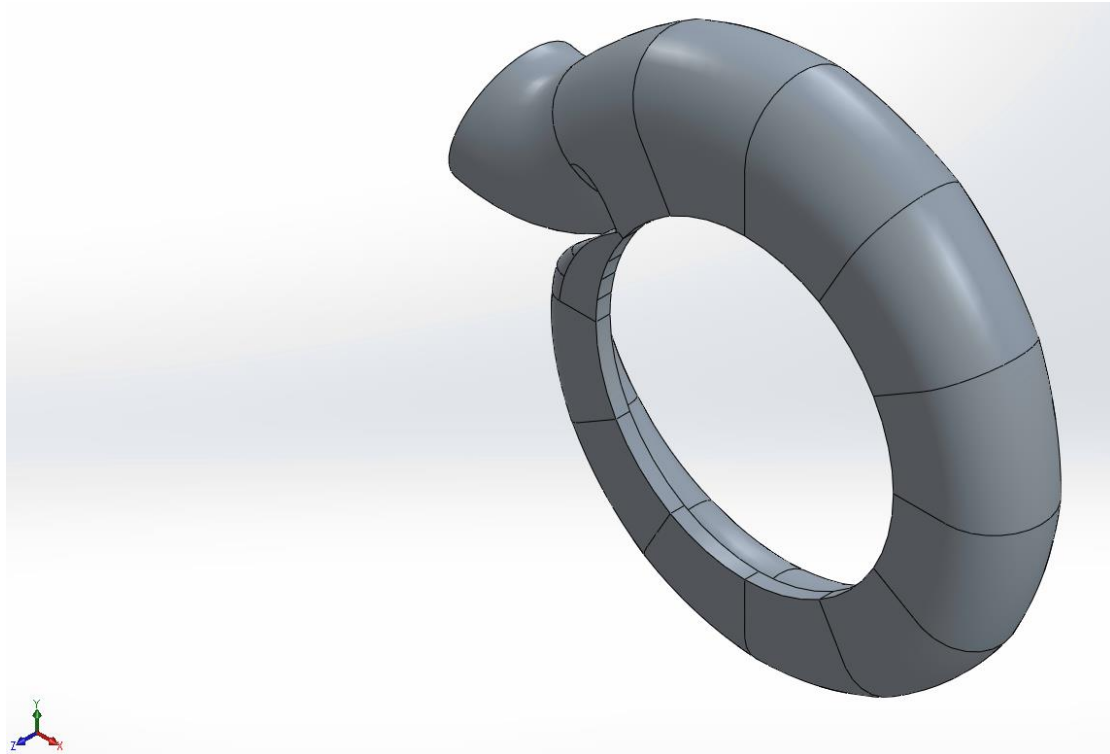
Στο BladeGen κατά τη σχεδίαση της πτερωτής αλλάχτηκε το ύψος της στην έξοδο και όλα τα υπόλοιπα έμειναν σταθερά. Στην παρακάτω μεσημβρινή τομή φαίνεται με ακρίβεια η αλλαγή του ύψους πτερωτής εξόδου :



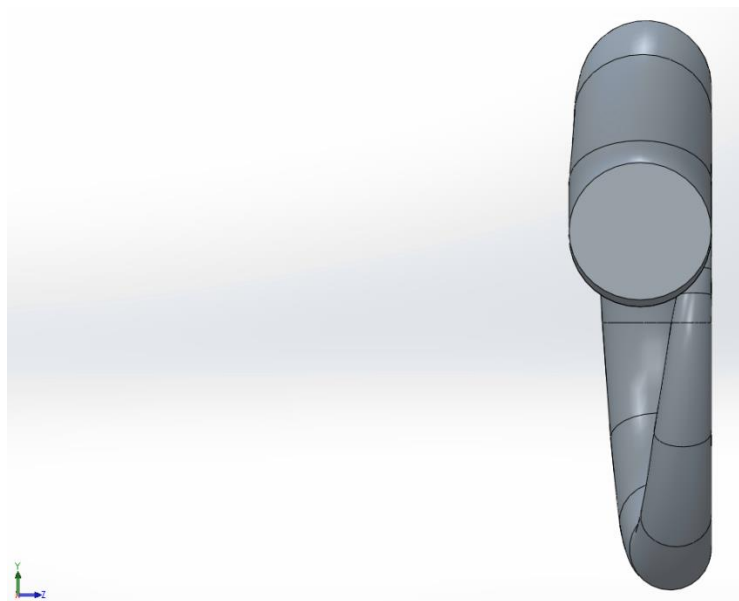
Σχήμα 3.7.1.α.

3.7.2. Σχεδίαση Κελύφους στο Solid Works

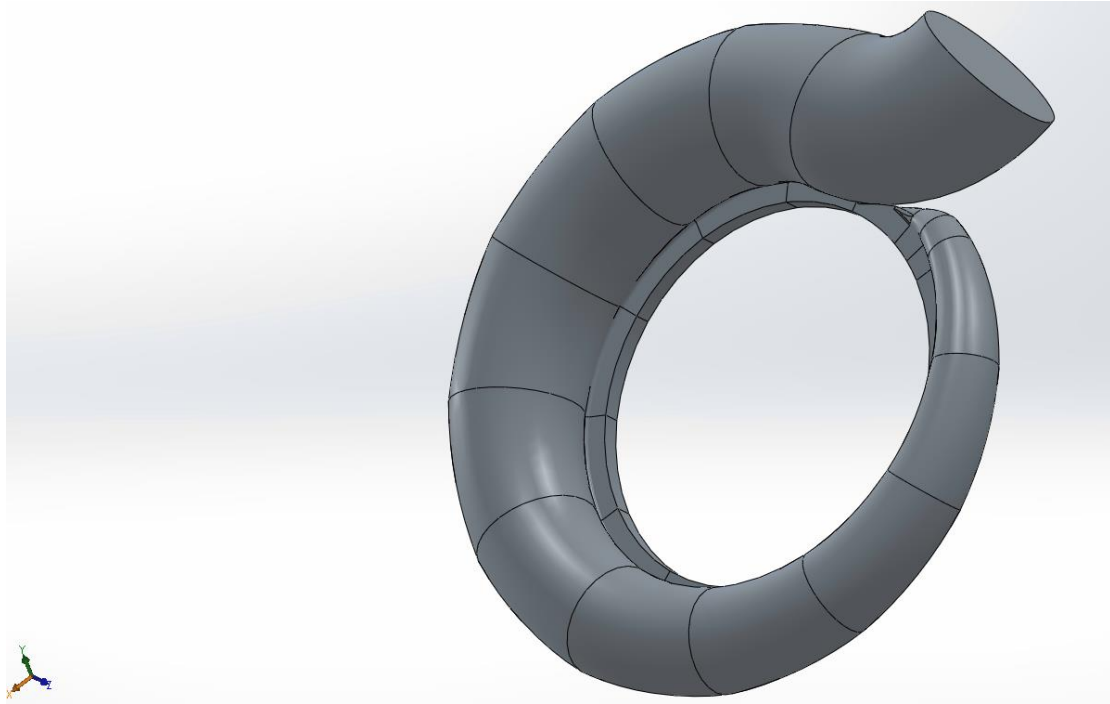
Η θεμελιώδης διαφορά των δύο κελυφών είναι η εφαπτομενικότητα της ροής που χαρακτηρίζει αυτό που σχεδιάστηκε εδώ (Σχήματα 3.7.2.α.β.γ.).



Σχήμα 3.7.2.α.



Σχήμα 3.7.2.β.



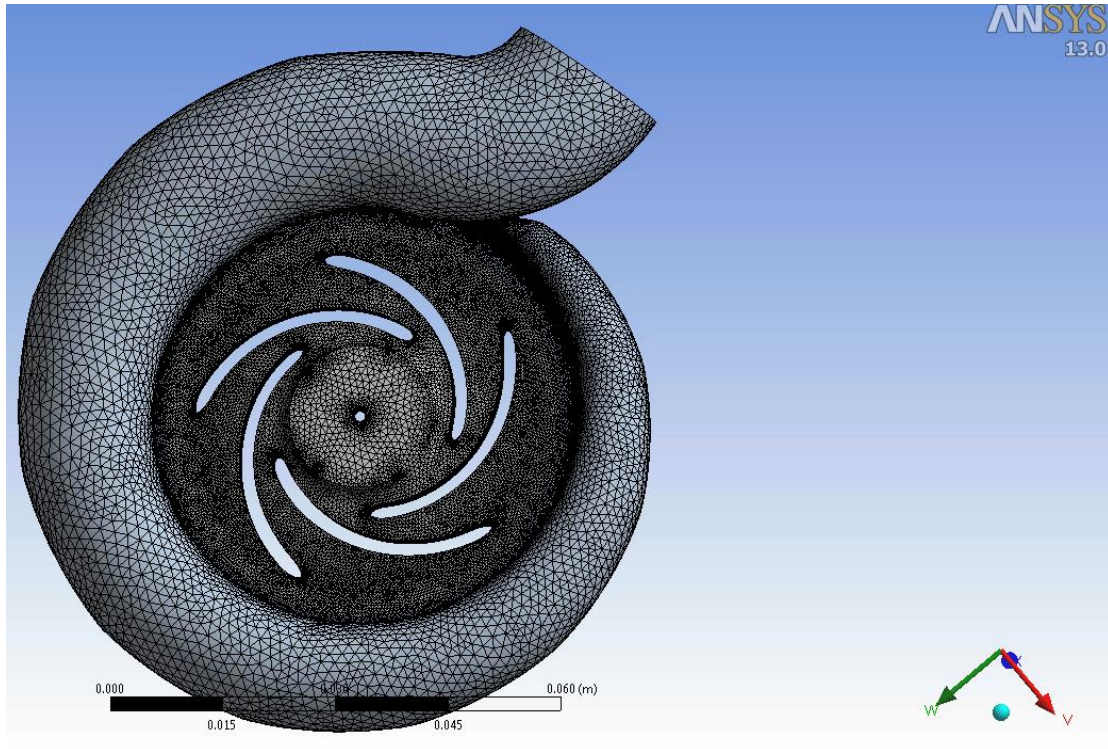
Σχήμα 3.7.2.γ.

3.7.3. Δημιουργία Πλέγματος για την Αντλία

Έχοντας σχεδιάσει το κέλυφος της αντλίας, προστέθηκε στο Design Modeler του ANSYS, η πτερωτή και δημιουργήθηκε πλέγμα για το σύνολο της αντλίας. Το πλέγμα δημιουργήθηκε ξανά στο πρόγραμμα *Meshing* του ANSYS, δημιουργώντας διαφορετικής πυκνότητας πλέγμα στην πτερωτή και στο κέλυφος. Τα δεδομένα για το πλέγμα παραμένουν ίδια εκτός του ότι για το κέλυφος επιλέχθηκε ένα ποσοστό αύξησης (*Growth Rate*) στο 1,095.

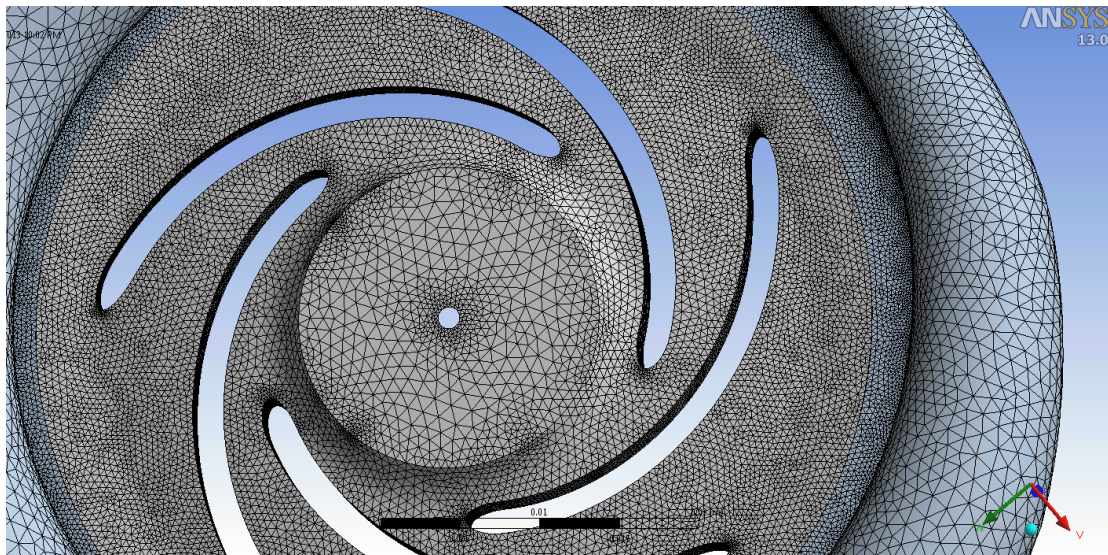
Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία ενός πλέγματος με τα εξής χαρακτηριστικά :

Σε σύνολο 770.000 κόμβων και 4.400.000 στοιχείων, οι 655.000 κόμβοι και τα 3.820.000 στοιχεία ανήκουν στο κέλυφος ενώ οι 115.000 κόμβοι και τα 580.000 στοιχεία ανήκουν στην πτερωτή. Αποτελεί ένα πολύ ικανοποιητικό πλέγμα καθώς όπως παρατηρείται σε όλες τις παρακάτω εικόνες έχουμε καλές πυκνώσεις στη γλώσσα (Σχήματα 3.7.2.γ.δ.) και στην περιοχή όπου ενώνεται το κέλυφος με την πτερωτή (Σχήματα 3.7.2.ε.στ.) αλλά και στο εσωτερικό της γεωμετρίας όπως φαίνεται στην τελευταία εικόνα (Σχήματα 3.7.2.ε.στ.). Ακολουθεί η παρουσίαση του πλέγματος :



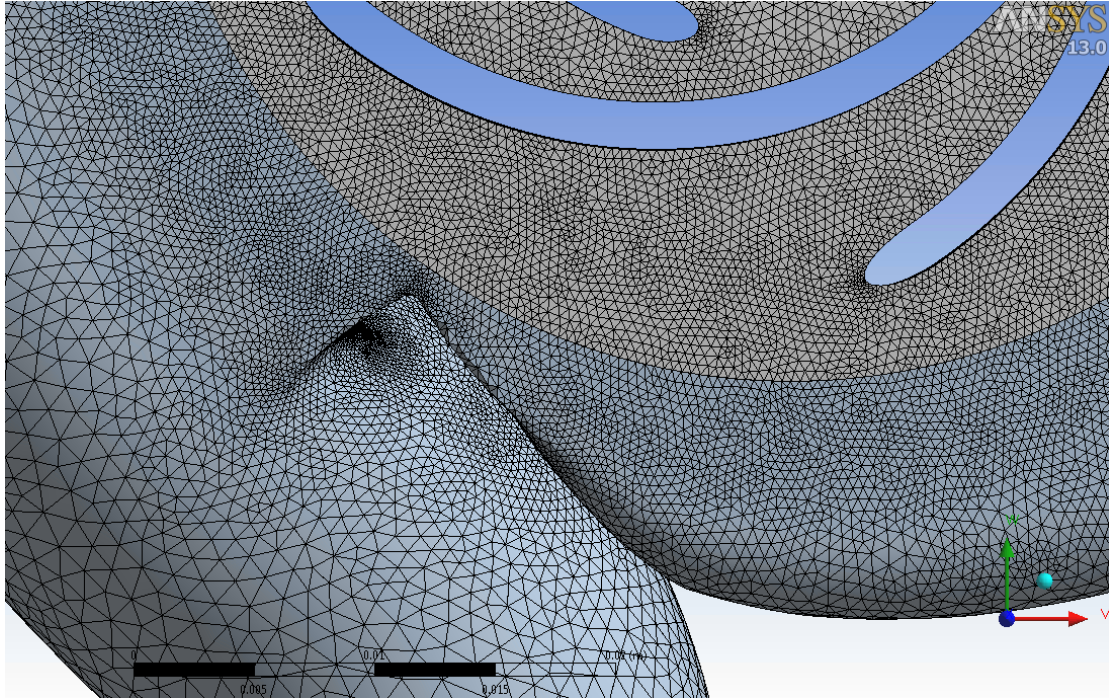
Σχήμα 3.7.2.α.

Για την πτερωτή :

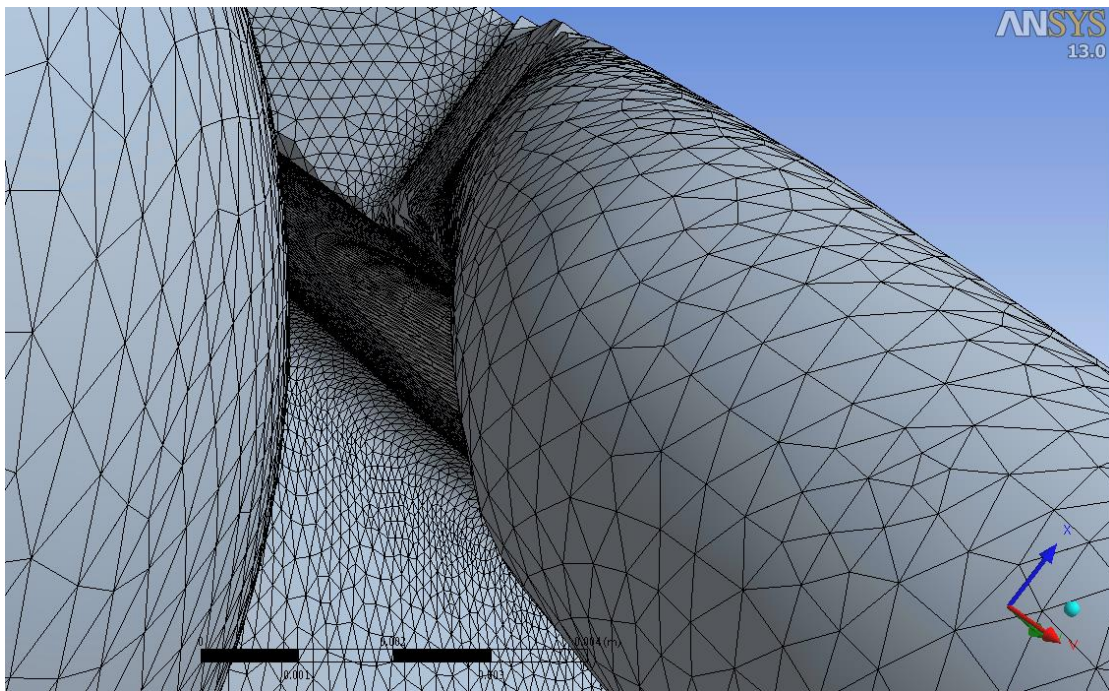


Σχήμα 3.7.2.β.

Για την περιοχή της γλώσσας του κελύφους :

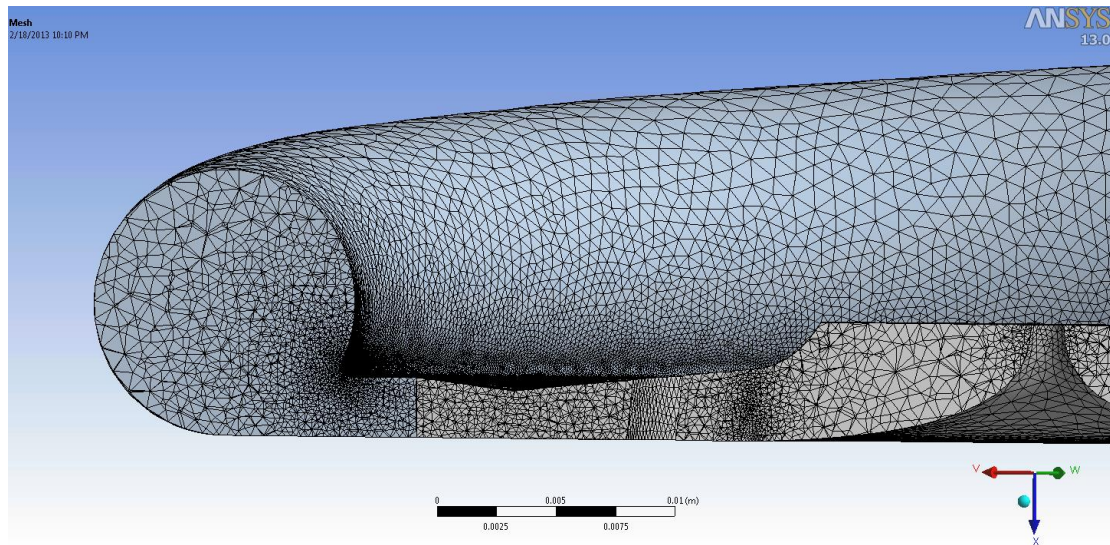


Σχήμα 3.7.2.γ.

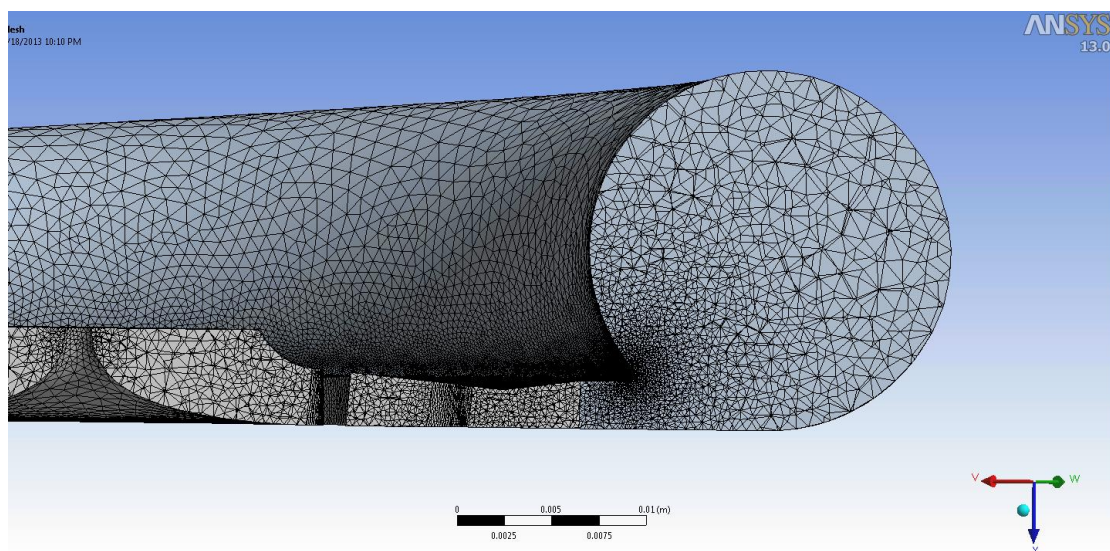


Σχήμα 3.7.2.δ.

Εσωτερικές τομές για καλύτερο έλεγχο της ποιότητας του πλέγματος :



Σχήμα 3.7.2.ε.



Σχήμα 3.7.2.στ.

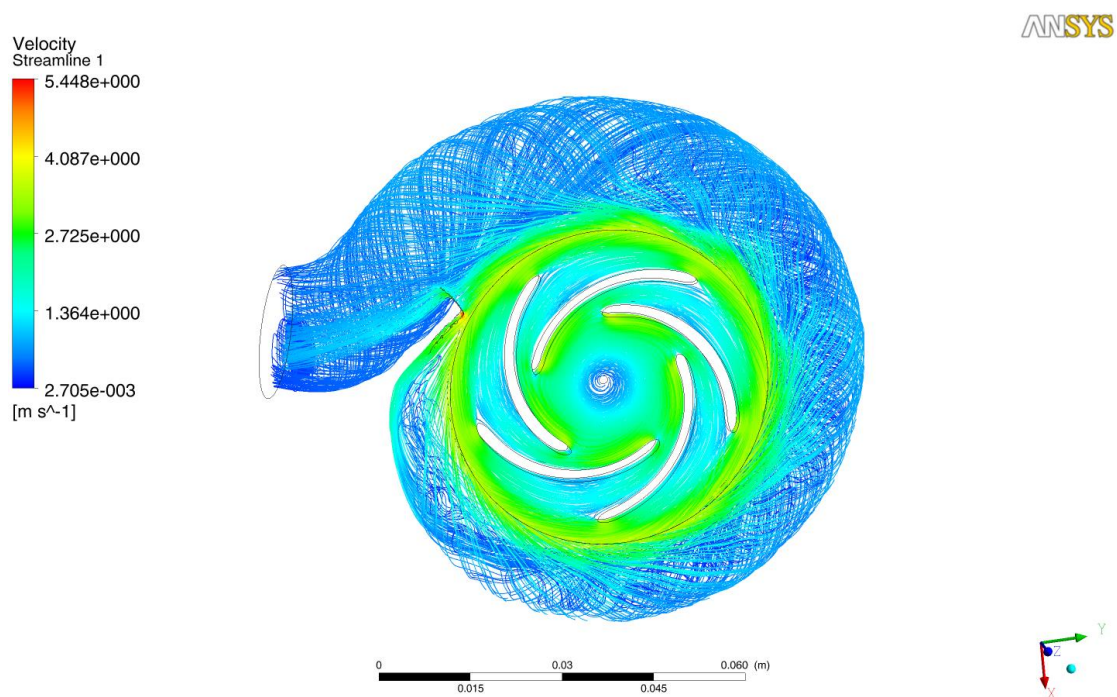
3.7.3. Καθορισμός Δεδομένων για Επίλυση στο CFX

Τα δεδομένα στο σημείο αυτό καθορίστηκαν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο με την υποπαράγραφο 3.6.3.

3.7.4. Εμφάνιση Αποτελεσμάτων

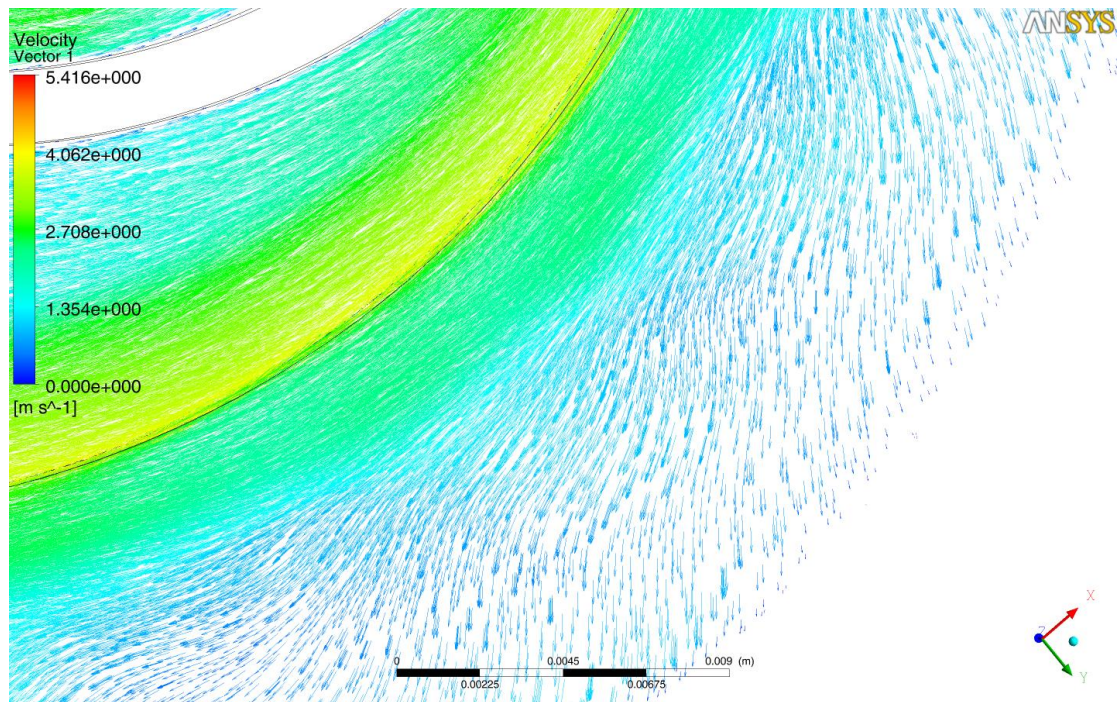
3.7.4.1. Μελέτη Ανακυκλοφορίας

Σε αυτό το σημείο αναμενόταν ξανά να υπάρχει μια ανάδευση της ροής και μια περιστροφή της χωρίς αυτό να σημαίνει ότι το ρευστό ανακυκλοφορεί. Όταν η ροή απεικονίζεται σε *streamlines* (Σχήμα 3.7.4.1.α.) φαίνεται κάποια ανακυκλοφορία η οποία τελικά δεν αποδεικνύεται από τα διανύσματα των ταχυτήτων σε διάφορες τομές (Σχήμα 3.7.4.1.β.γ.). Πιο συγκεκριμένα :



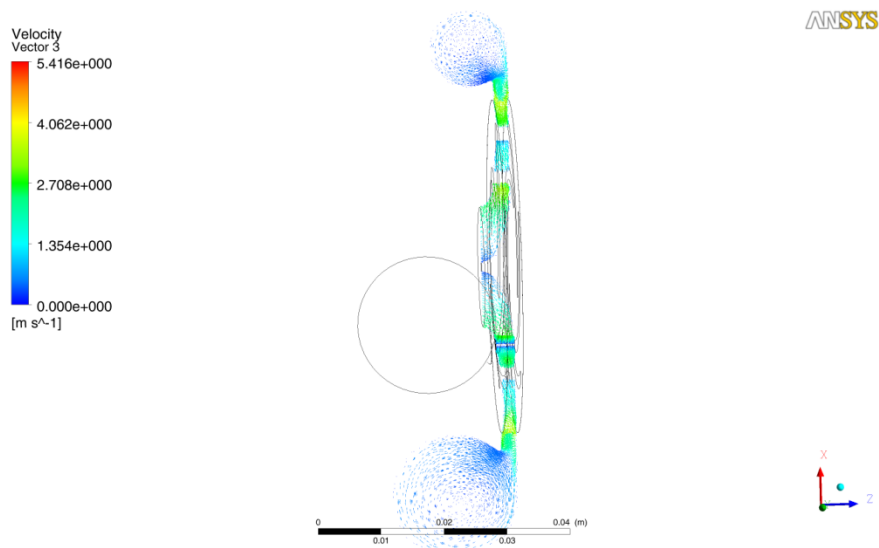
Σχήμα 3.7.4.1.α.

Ενώ το διάνυσμα της ταχύτητας :



Σχήμα 3.7.4.1.β.

Το συμπέρασμα είναι ότι η ροή σε αυτό το κέλυφος ήταν πολύ καλή, ενώ παρατηρήθηκε μια μείωση της επιτάχυνση της ροής στο τέλος της πτερωτής (Σχήμα 3.6.4.1.δ.) γεγονός που αποδεικνύει το πόσο βοήθησε η αύξηση του ύψους της πτερωτής στην έξοδο. Αυτή η μείωση της επιτάχυνσης λογικά προκάλεσε και μείωση του βαθμωτού μέτρου διατμήσεως γεγονός που μελετάτε παρακάτω.



Σχήμα 3.7.4.1.δ.

3.7.4.2. Μελέτη της Πίεσης που Επιτυγχάνεται

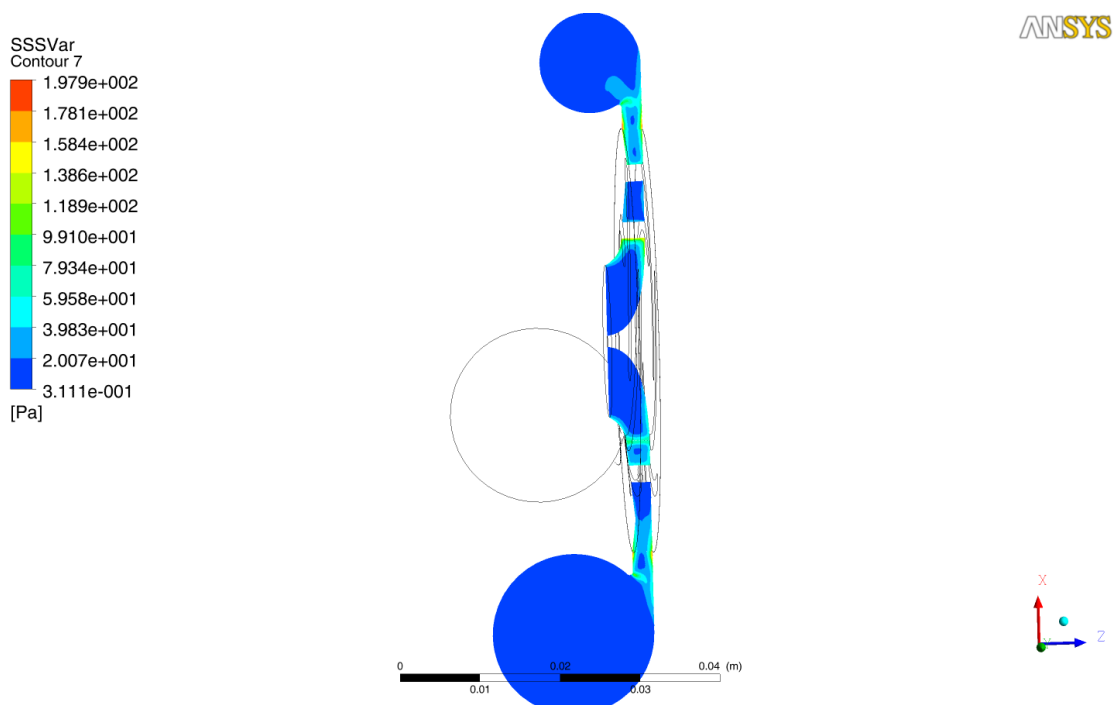
Εφόσον δεν υπήρχαν ανακυκλοφορίες ακολουθεί ο υπολογισμός της διαφοράς πίεσης που επιτυγχάνεται. Η επιθυμητή κυμαίνεται περίπου στα 16,3 kPa. Όπως ήδη προαναφέρθηκε γίνεται χρήση του ενσωματωμένου στο πρόγραμμα υπολογιστή, που υπολογίζει τη διαφορά πίεσης ανάμεσα στην είσοδο και έξοδο της μηχανής.

- Στην είσοδο το αποτέλεσμα είναι 100.292 Pa
- Στην έξοδο είναι 117.011 Pa

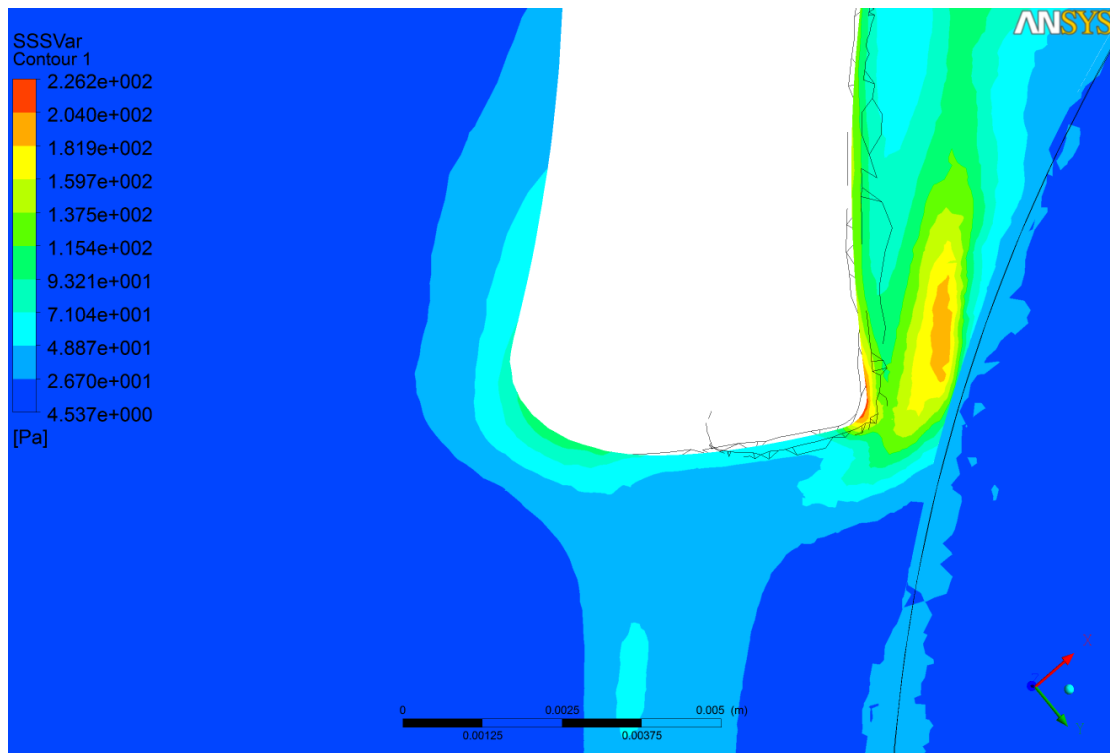
Επομένως η διαφορά πίεσης βρίσκεται στα 16.719 Pa, νούμερο το οποίο έγινε αποδεκτό και ακολούθησε η παρουσίαση του βαθμωτού μέτρου διατήμησης.

3.7.4.3. Μελέτη Βαθμωτού Μέτρου Διάτμησης

Όπως και προβλέφτηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο το βαθμωτό μέτρο διάτμησης ήταν στην πλήρη της πτερωτής μειωμένο, γεγονός που καταδεικνύει πόσο χρήσιμη ήταν η αλλαγή του κελύφους σε επαπτομενικό (Σχήμα 3.7.4.3.α.). Ακόμη φαίνεται στο σχήμα 3.7.4.3.β. ότι στην περιοχή της γλώσσας του κελύφους, η οποία θεωρείται κομβική για τη σχεδίαση, υφίσταται υψηλή αλλά αποδεκτή διάτμηση.



Σχήμα 3.7.4.3.α.



Σχήμα 3.7.4.3.β.

Σε γενικές γραμμές φαίνεται ότι όλα τα προαπαιτούμενα για τη σχεδίαση της αντλίας ικανοποιούνται. Στο τελευταίο σχήμα προβληματίζει το υψηλό βαθμωτό μέτρο διατμήσεως και γι' αυτό το λόγο ακολουθεί η μελέτη της καταστροφής των ερυθρών αιμοσφαιρίων με τη μέθοδο του particle tracking.

Κλείνοντας κρίνεται σε αυτό το σημείο να δειχθεί το αποτύπωμα του ποσοστού διάτμησης στην τελευταία μηχανή ώστε να δικαιολογηθεί πλήρως η χρήση νευτώνειου ρευστού. Εφόσον ισχύει ότι το αίμα συμπεριφέρεται ως νευτώνειο ρευστό όταν ο ρυθμός διάτμησης ξεπερνά τα 100 s^{-1} , κρίνεται με βάση το επόμενο σχήμα (Σχήμα 3.7.4.3.γ.) ορθή η χρήση του στη συγκεκριμένη προσομοίωση καθώς σε όλο σχεδόν το εύρος της τομής το ξεπερνάει.



Σχήμα 3.7.4.3.γ.

3.8. Μελέτη Αιμόλυσης με τη μέθοδο Particle Tracking

Για την ολοκλήρωση της σχεδίασης της μηχανής αποφασίστηκε να γίνει η μελέτη για την καταστροφή των ερυθρών αιμοσφαιρίων (αιμόλυση). Όπως αναλύθηκε και στο υποκεφάλαιο 2.8.3. η αιμόλυση είναι ανάλογη του ποσοστού καταστροφής της αιμοσφαιρίνης $\left(\frac{\Delta Hb}{\Delta H}\right)$ μέσω της σχέσης :

$$NIH \left(\frac{g}{100} L \text{ blood} \right) = 100 * \frac{\Delta Hb}{\Delta H} * (1 - Hct) * \kappa,$$

όπου Hct συμβολίζει τον αιματοκρίτη (%) και το κ την ποσότητα αιμοσφαιρίνης ανά λίτρο αίματος. Σε δεύτερο χρόνο το ποσοστό καταστροφής της αιμοσφαιρίνης σχετίζεται με το χρόνο και το βαθμωτό μέτρο της διάτμησης μέσω της σχέσης :

$$\frac{\Delta Hb}{\Delta H} = 3,62 * 10^{-7} * SSS^{2,416} * \Delta t^{0,785}$$

Η λογική που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της αιμόλυσης ήταν :

1. Προσθήκη εντός της ροής σωματιδίων τα οποία την ακολουθούν
2. Υπολογισμός του μέσου χρόνου που διανύουν μέσα στη μηχανή
3. Υπολογισμός του μέσου βαθμωτού μέτρου διατμήσεως που υφίστανται μέσα στη μηχανή

Παρακάτω ακολουθεί το στήσιμο της επίλυσης αυτού του προβλήματος.

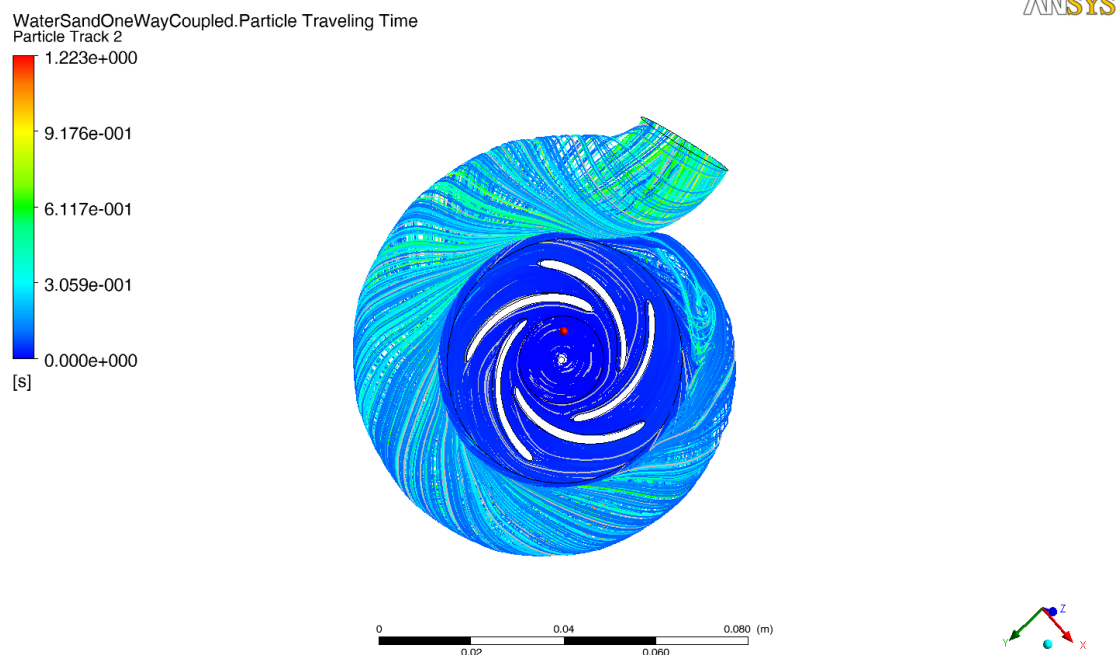
3.8.1. Καθορισμός Δεδομένων για Επίλυση στο CFX

Το πρόβλημα στήθηκε όπως περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.7.3. με τις παρακάτω προσθήκες :

- Στο ρευστό που ρέει εντός της μηχανής προστίθενται 500 στερεά σωματίδια με τις ιδιότητες του νερού και με μέση διάμετρο $7 \cdot 10^{-6}$ m.
- Τα σωματίδια εισάγονται με ταχύτητα 0,29 m/s και με παροχή 6 g/s.
- Γίνεται χρήση της μεθόδου *One Way Coupling*. Με αυτή τη μέθοδο απλά προβλέπεται η διαδρομή που ακολουθούν τα σωματίδια με βάση τα αποτελέσματα της ροής εντός της μηχανής, χωρίς αυτά να την επηρεάζουν.

3.8.2. Υπολογισμός Αιμόλυσης

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το χρόνο παραμονής των σωματιδίων στην αντλία και της διάτμησης που τους ασκούνται. Στο streamline που ακολουθεί φάνηκε η χρονική διάρκεια του κάθε particle στη μηχανή (Σχήμα 3.8.2.α.).



Σχήμα 3.8.2.α.

Από εδώ συμπεραίνεται ότι οι χρόνοι διαμονής των σωματιδίων στη μηχανή είναι αρκετά ικανοποιητικοί. Χρησιμοποιώντας τον υπολογιστή που έχει ενσωματωμένο το CFX υπολογίστηκε ο μέσος χρόνος παραμονής όλων των σωματιδίων μαζί με τη διάτμηση που υφίσταντο. Πιο συγκεκριμένα :

- Ο μέσος χρόνος παραμονής των σωματιδίων μέσα στη μηχανή είναι 0,115 δευτερόλεπτα.
- Το μέσο βαθμωτό μέτρο διατμήσεως για όλα τα σωματίδια είναι 36,52 Pa.

Συνεπώς έγινε πλέον εφικτός ο υπολογισμός της παραγωγής της αιμοσφαιρίνης και άρα της αιμόλυσης. Κάνοντας χρήση των σχέσεων της εισαγωγής του υποκεφαλαίου 3.8 υπολογίστηκε σε πρώτη φάση η μέση καταστροφή της αιμοσφαιρίνης βρίσκεται στο 0,0396% γεγονός που κάνει τη μηχανή που σχεδιάστηκε ιδιαίτερως ικανοποιητική για χρήση από ασθενείς.

Ακολούθως έγινε μια πρόβλεψη με βάση τα χειρότερα σενάρια όπου εξετάστηκε η παραγωγή της αιμοσφαιρίνης όταν στο μέσο ασκείται η μέγιστη διάτμηση και όταν ο χρόνος παραμονής είναι ο μέγιστος. Σε αυτή την περίπτωση :

- Ο μέγιστος χρόνος παραμονής των σωματιδίων μέσα στη μηχανή είναι 0,935 δευτερόλεπτα.
- Το μέσο βαθμωτό μέτρο διατμήσεως για όλα τα σωματίδια είναι 348 Pa.

Υπολογίζεται λοιπόν ότι στο :

- σενάριο όπου στο αιμοσφαίριο ασκείται η μέγιστη διάτμηση η καταστροφή της αιμοσφαιρίνης βρίσκεται στο υψηλό ποσοστό του 9,1%.
- σενάριο όπου το αιμοσφαίριο ανήκει σε ροϊκή γραμμή η οποία υφίσταται συνεχείς ανακυκλοφορίες η καταστροφή της αιμοσφαιρίνης βρίσκεται στο αποδεκτό ποσοστό του 0,2%.
- ακραίο σενάριο όπου στη ροϊκή γραμμή του αιμοσφαιρίου ασκείται και η μέγιστη διάτμηση και ο μέγιστος χρόνος παραμονής η παραγωγή της αιμοσφαιρίνης βρίσκεται στο απαγορευτικά υψηλό ποσοστό του 47,45%. Αυτό σημαίνει πως τα αιμοσφαίρια τα οποία ακολουθούν τη συγκεκριμένη ροϊκή γραμμή έχουν πολύ μεγάλο πρόβλημα.

Βέβαια πρέπει να τονιστεί εδώ ότι ακριβέστερος και πιο αξιόπιστος υπολογισμός γίνεται όταν μελετάται κάθε σωματίδιο ξεχωριστά, γεγονός που εδώ δε συνέβη καθώς δεν έγινε δυνατό να βρεθούν και να αναλυθούν τα αποτελέσματα για κάθε σωματίδιο. Δημιουργείται όμως μια εικόνα μέσω του τρεξίματος αυτού για τη συμπεριφορά των σωματιδίων εντός της αντλίας.

3.9. Δημιουργία Χαρακτηριστικών Καμπυλών της Αντλίας

Έχοντας καταλήξει στην τελική γεωμετρία της μηχανής το τελευταίο που έπρεπε να κατασκευαστεί ήταν οι δύο χαρακτηριστικές καμπύλες (ύψους πίεσης και βαθμού απόδοσης) της φυγοκεντρικής αντλίας. Για να κατασκευαστούν αυτές οι χαρακτηριστικές αποφασίστηκε να γίνουν έξι επιπλέον τρεξίματα (ίδια με τα χαρακτηριστικά του έκτου και τελευταίου σεναρίου σχεδίασης (Υποκεφάλαιο 3.7.)) χρησιμοποιώντας απλά έξι διαφορετικές παροχές και έχοντας την ίδια ταχύτητα περιστροφής. Αυτές οι παροχές δεν ήταν τυχαία επιλεγμένες αλλά αφορούσαν το

50%, 60%, 70%, 80%, 110% και 120% της κανονικής παροχής των 5 L/min. Εδώ δίνεται και η σχέση από την οποία υπολογίσθηκε ο βαθμός απόδοσης της αντλίας :

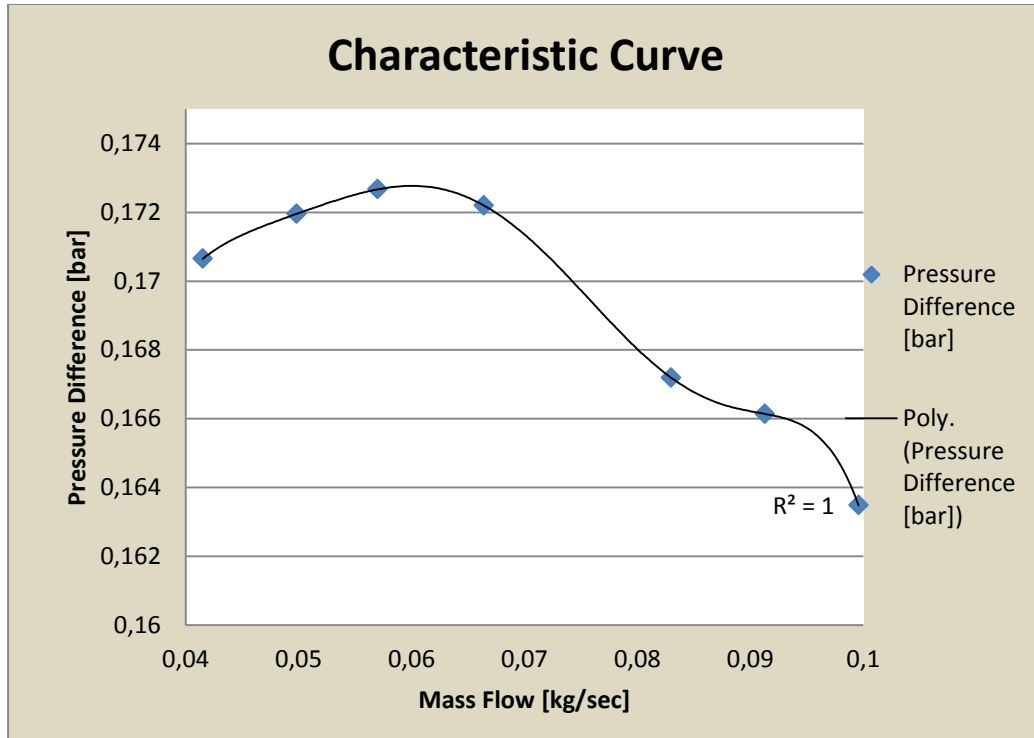
$$\eta_{pump} = \frac{Q}{\rho} \cdot \frac{\Delta P}{Torque \cdot \omega}$$

με Q την παροχή, ρ την πυκνότητα, ΔP τη διαφορά πίεσης και ω τη γωνιακή ταχύτητα. Παρακάτω (Πίνακας 3.9.α.) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του κάθε τρεξίματος μαζί με τις δύο χαρακτηριστικές (Σχήματα 3.9.α.-β.).

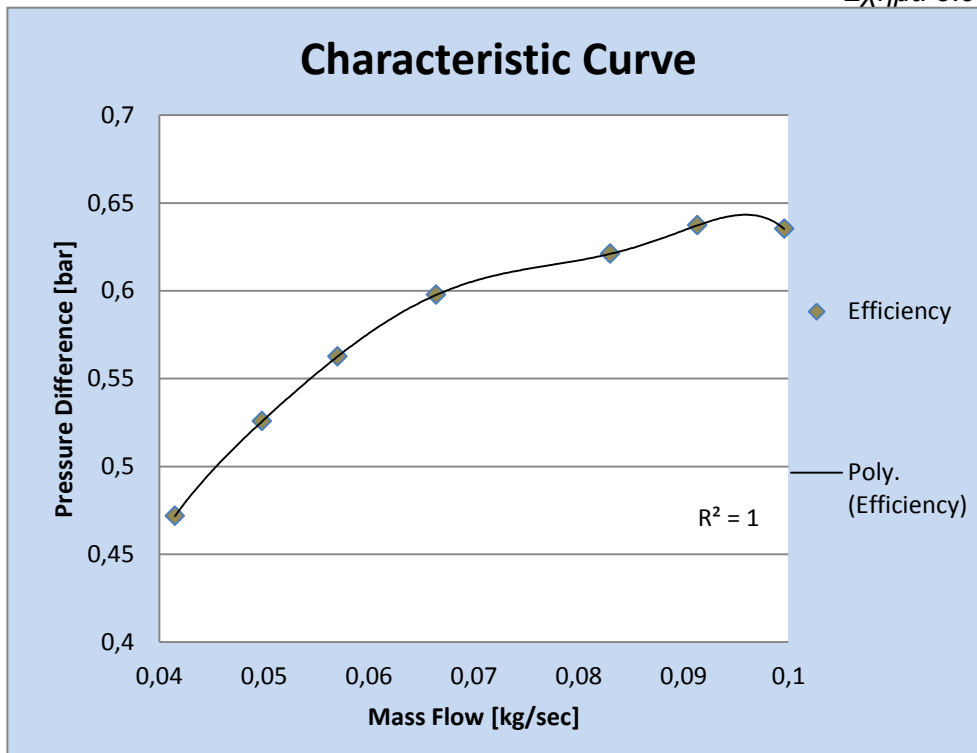
Πίνακας 3.9.α.

Αποτελέσματα για Κατασκευή Χαρακτηριστικών Καμπυλών			
A/A	Παροχή [kg/sec]	Διαφορά Πίεσης [bar]	Βαθμός Απόδοσης
1	0,0415	0,1709	46,5%
2	0,0498	0,1719	52,5%
3	0,057	0,1726	56,2%
4	0,0664	0,1722	59,7%
5	0,083	0,1671	62,1%
6	0,0913	0,1664	63,7%
7	0,0996	0,1634	63,5%

Από μια πρώτη ματιά στη χαρακτηριστική της πίεσης φαίνεται ότι υπάρχει πρόβλημα σε παροχές χαμηλής πίεσης. Στο σημείο εκείνο δεν συνηθίζεται να υπάρχει πτώση πίεσης, αλλά στην συγκεκριμένη εφαρμογή ενδεχομένως να έπαιξε ρόλο ότι βρίσκεται μακριά από το σημείο σχεδιασμού και τέτοια φαινόμενα δεν έχουν προβλεφτεί. Όσον αφορά την χαρακτηριστική του βαθμού απόδοσης όλα είναι φυσιολογικά.



Σχήμα 3.9.α.



Σχήμα 3.9.β.

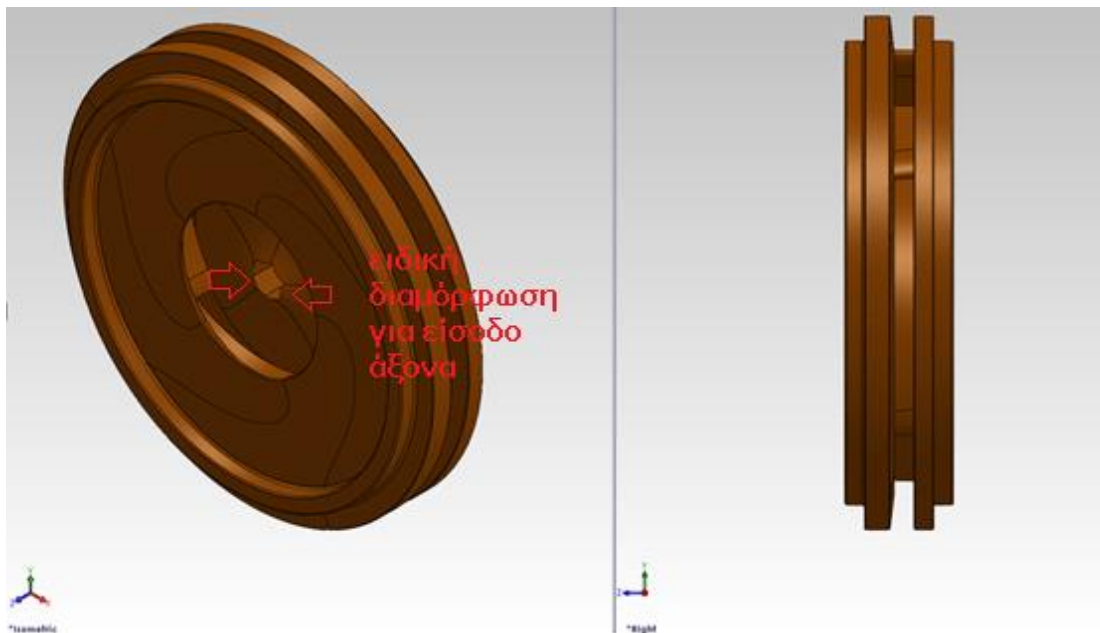
4. Βιομηχανική Σχεδίαση

Ολοκληρώνοντας την υδροδυναμική βελτιστοποίηση και το σχεδιασμό της φυγοκεντρικής αντλίας ακολούθησε η βιομηχανική σχεδίαση της με στόχο την παραγωγή του τρισδιάστατου σχεδίου το οποίο και εκτυπώθηκε σε μηχανή τρισδιάστατης σχεδίασης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα της μηχανής τα οποία ως επί το πλείστον κατασκευάστηκαν σε τόρνο. Η σχεδίαση έγινε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα του Solid Works.

4.1. Πτερωτή

Η πτερωτή σχεδιάστηκε αρχικά στο πρόγραμμα Blade Gen της ANSYS όπου και χρησιμοποιήθηκε για την υδροδυναμική βελτιστοποίηση της μηχανής. Για τη βιομηχανική σχεδίαση της πτερωτής χρησιμοποιήθηκε ως βάση η πτερωτή που σχεδιάστηκε στο Blade Gen και τροποποιήθηκε στο Solid Works όπου της δόθηκε πάχος, διαμορφώθηκε κατάλληλα η είσοδος και δημιουργήθηκαν κανάλια παρεμπόδισης της ανακυκλοφορίας.

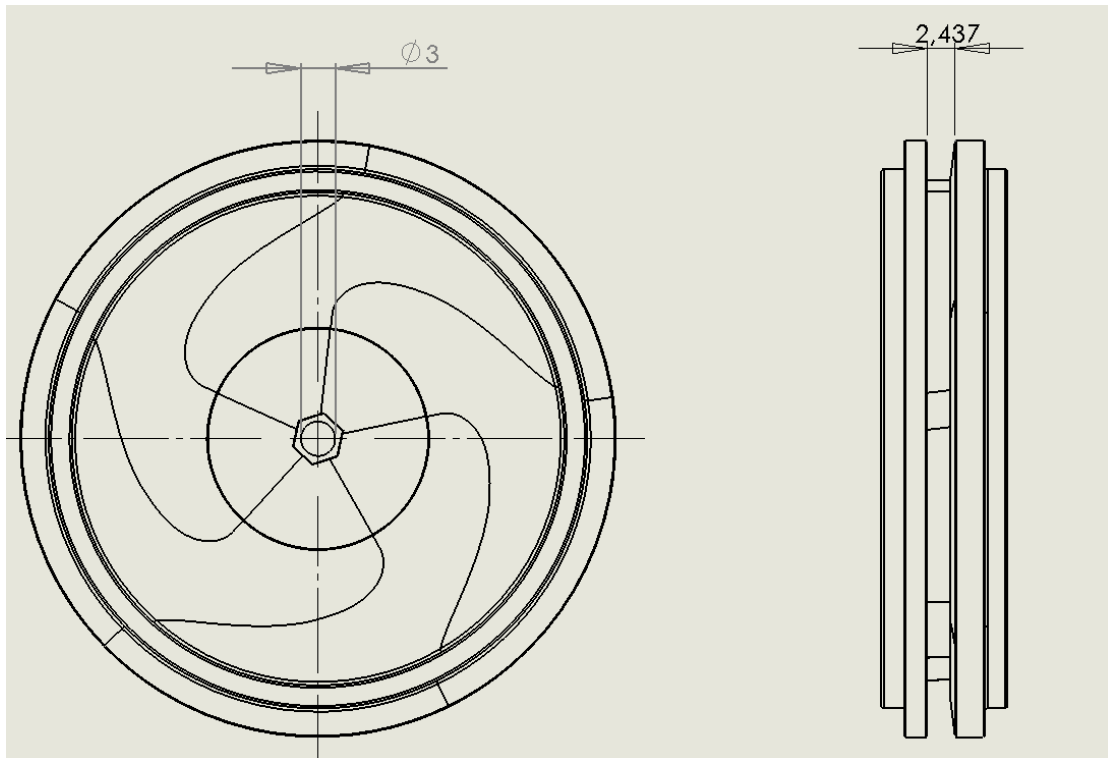
Μια εξωτερική άποψη της πτερωτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.1.α.) μαζί με την ειδική διαμόρφωση για την εισαγωγή του άξονα.



Σχήμα 4.1.α.

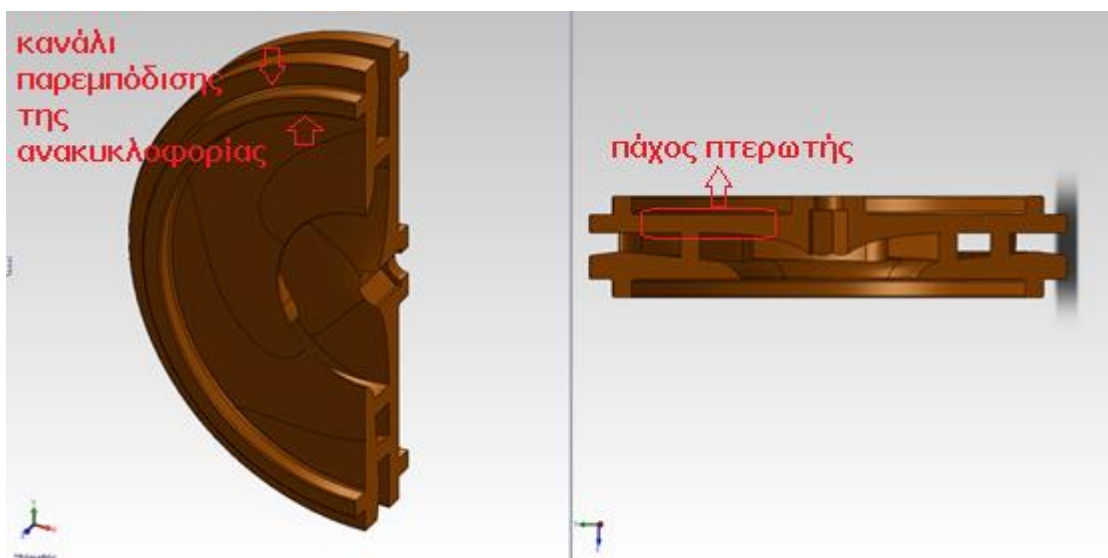
Στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 4.1.β.) δείχνεται στην πρόοψη της πτερωτής η διάμετρος του άξονα που χρησιμοποιήθηκε. Ακόμη στην πλάγια όψη φαίνεται η

διάχυση που αντιλαμβάνεται η ροή από το άνοιγμα τη πτερωτής από 2 mm σε 2,5 mm.

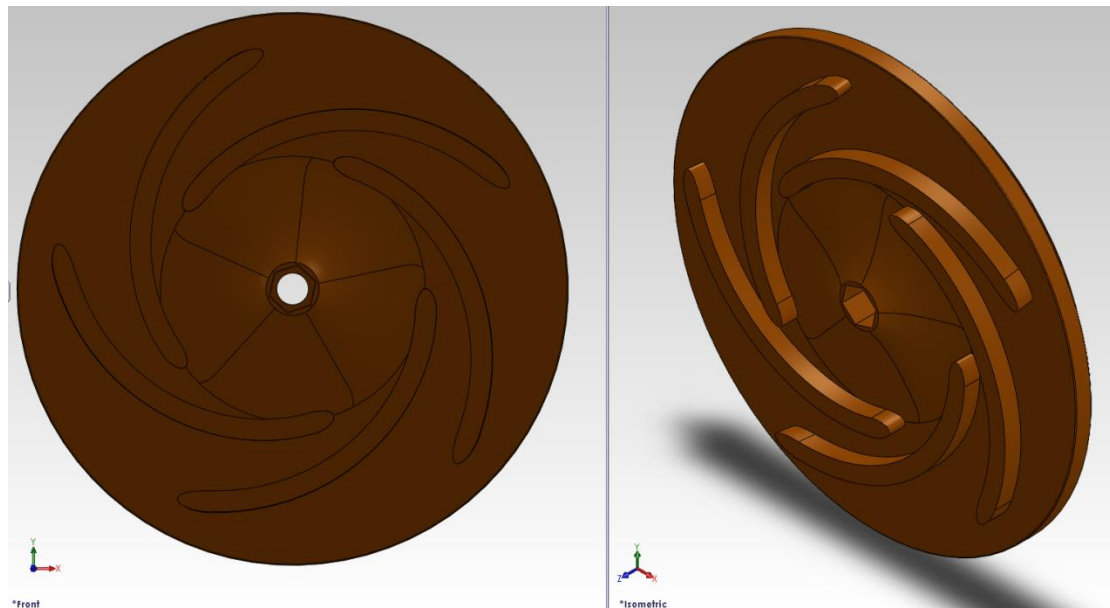


Σχήμα 4.1.β.

Τέλος στις επόμενες εικόνες (Σχήματα 4.1.γ.δ.) φαίνονται μέσω δύο τομών, στη μεν πρώτη το πάχος που δόθηκε στη μηχανή μαζί με το πρώτο κανάλι παρεμπόδισης της ανακυκλοφορίας ενώ στη δεύτερη η εσωτερική διαμόρφωση της πτερωτής με τα πτερύγια.



Σχήμα 4.1.γ.



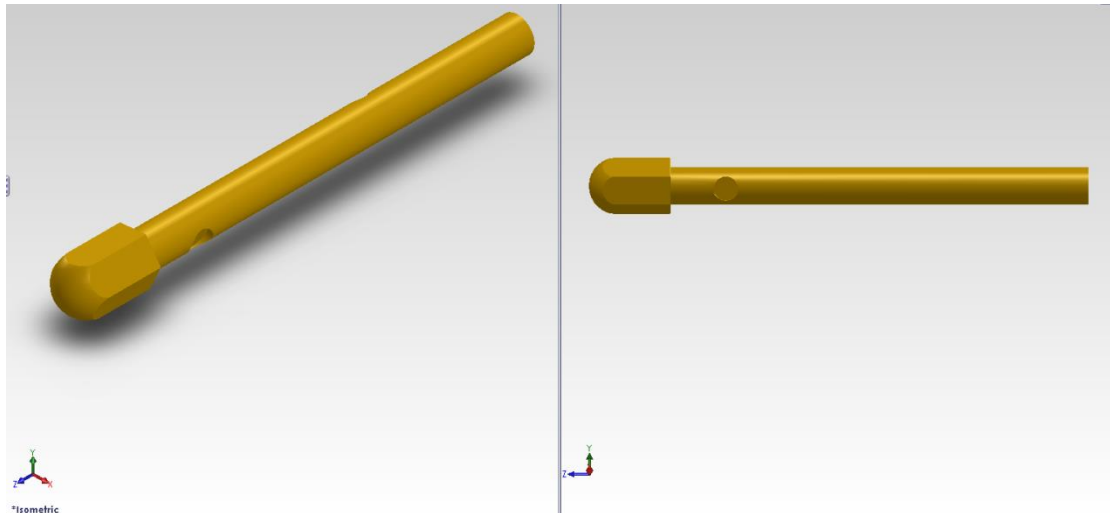
Σχήμα 4.1.δ.

4.2. Συνδέσεις και Άξονες

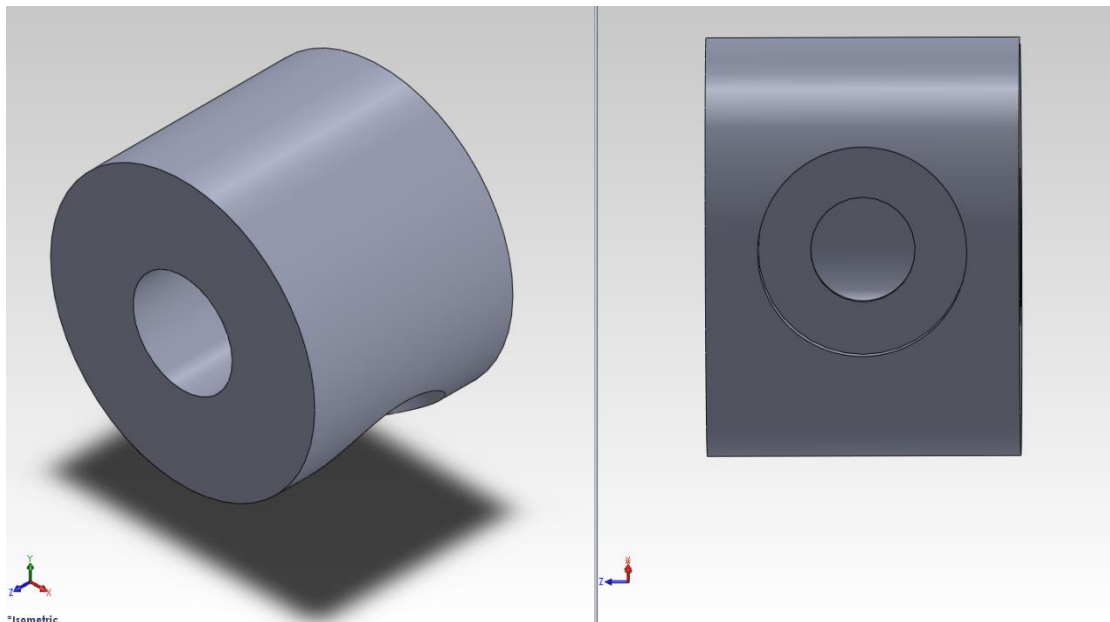
Τα κομμάτια που αποτελούν την αντλία εκτός της πτερωτής, του κελύφους και του καπακιού, είναι τα εξής :

- Το κομμάτι του άξονα με διάμετρο 3 mm (Σχήμα 4.2.α.)
- Το μεταλλικό κομμάτι που χρησιμοποιείται για να μην επιτρέψει τον άξονα να μετακινείται στη διεύθυνση z (Σχήμα 4.2.β.)
- Τα δύο κομμάτια τεφλόν που χρησιμοποιούνται για καλύτερη στεγανότητα και διευκόλυνση της περιστροφής του άξονα (Σχήμα 4.2.γ.)
- Το μεταλλικό κομμάτι που χρησιμοποιείται για την καλύτερη στιβαρότητα της κατασκευής (Σχήμα 4.2.δ.)

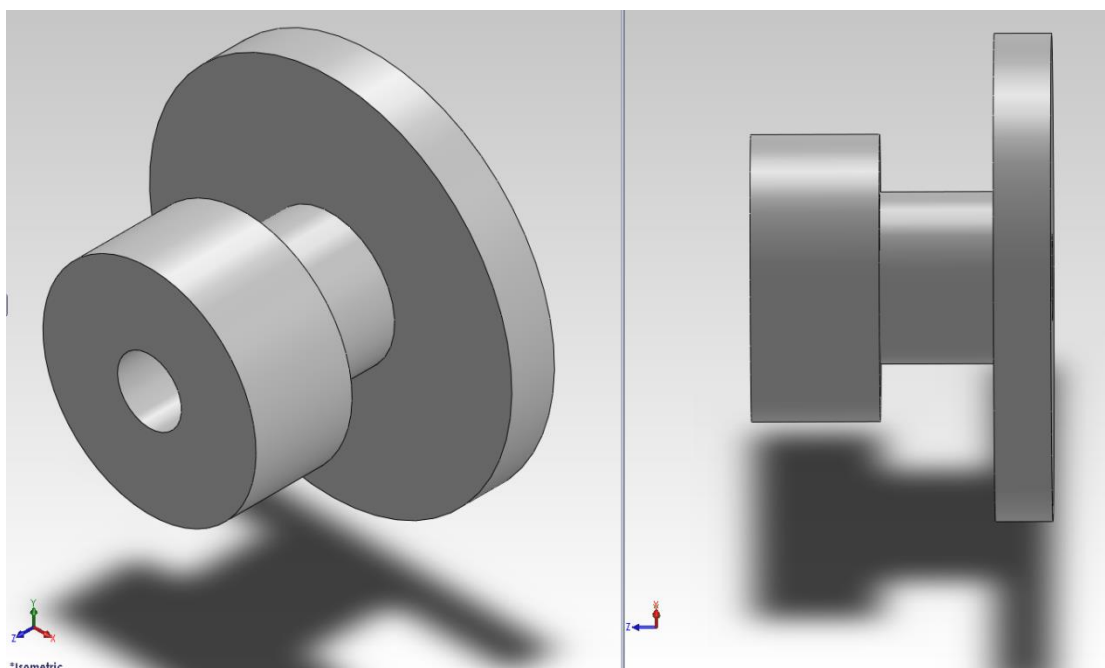
Όλα αυτά αναφέρονται εδώ ώστε να κατανοηθεί καλύτερα η σύνδεση του άξονα με την πτερωτή. Ακολουθούν οι εικόνες των παραπάνω εξαρτημάτων αρχικά μόνο του το κάθε ένα και έπειτα η σύνδεση όλων.



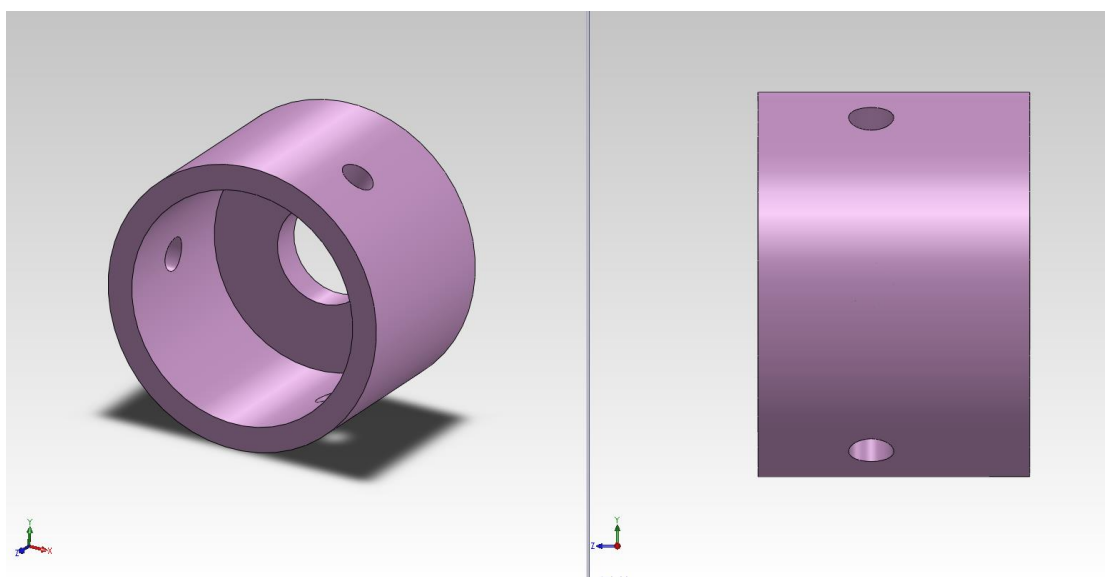
Σχήμα 4.2.α.



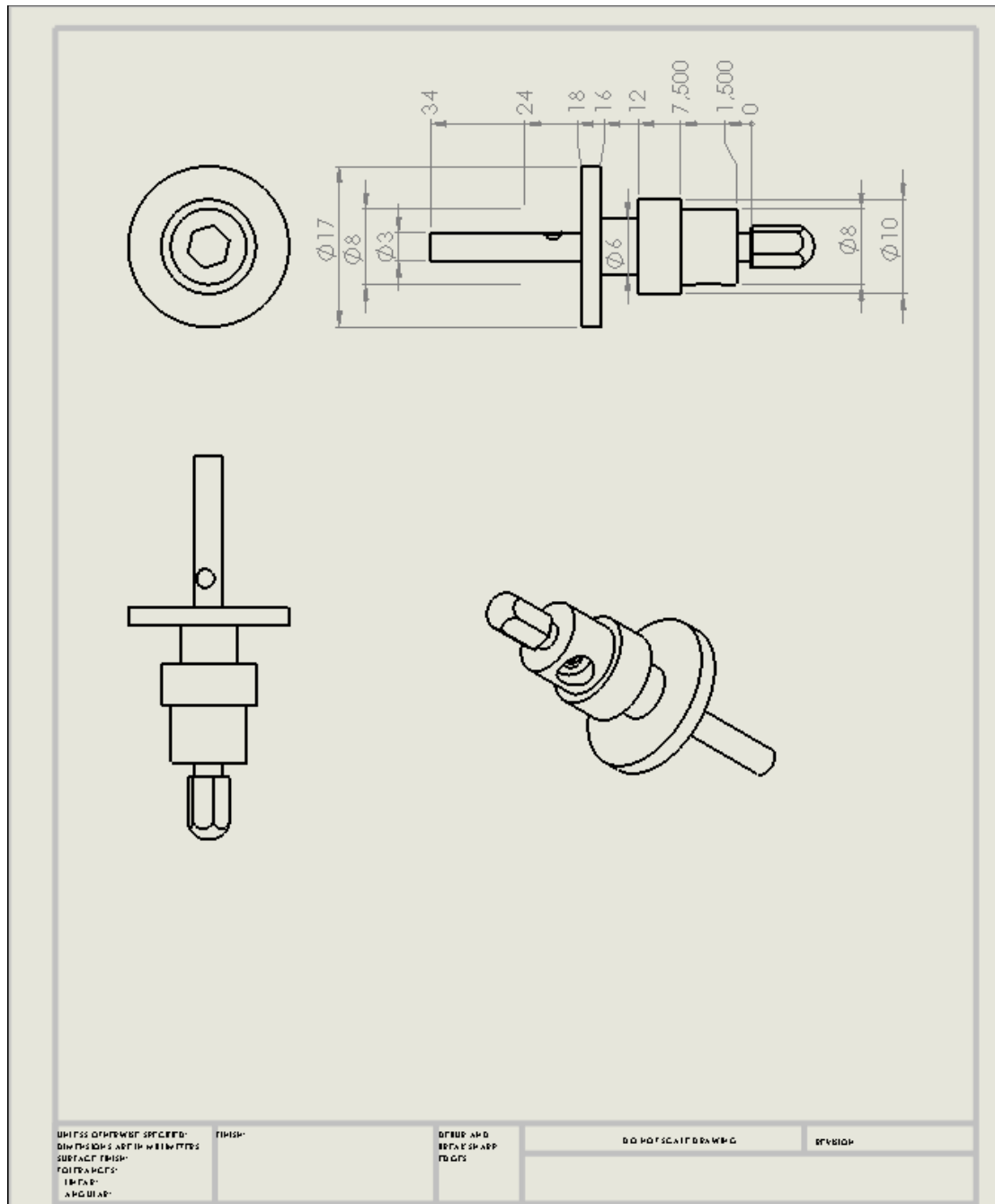
Σχήμα 4.2.β.



Σχήμα 4.2.γ.

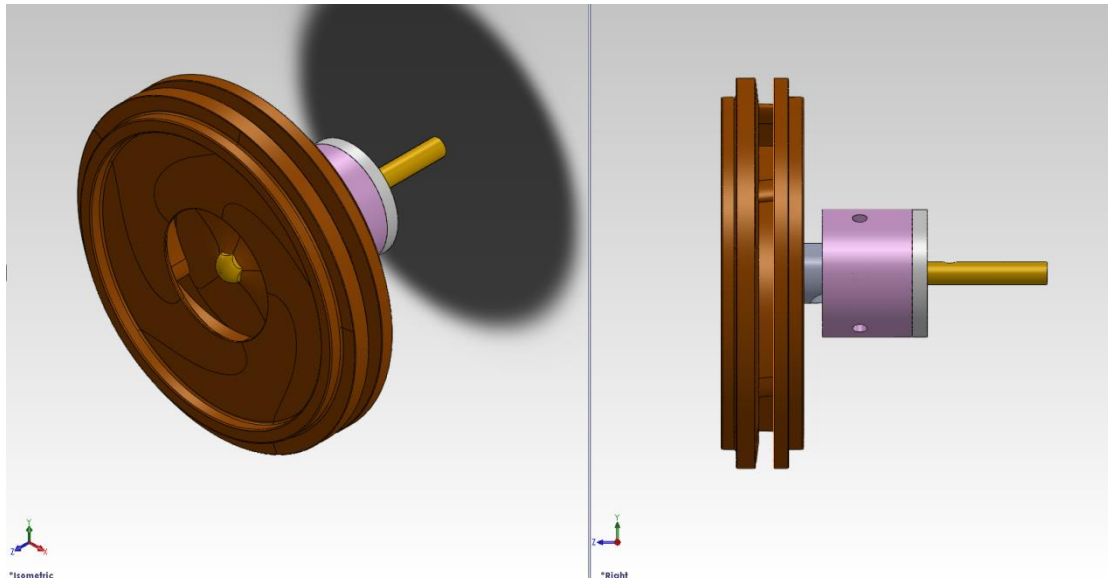


Σχήμα 4.2.δ.

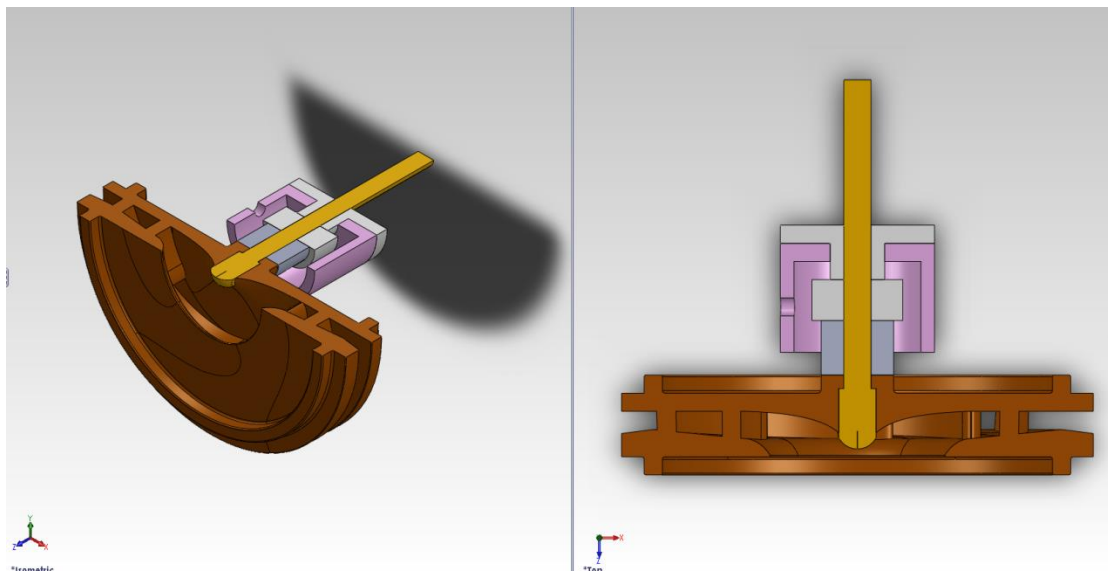


Σχήμα 4.2.ε.

Μαζί με την ππερωτή γίνονται ως εξής :



Σχήμα 4.2.στ.



Σχήμα 4.2.ζ.

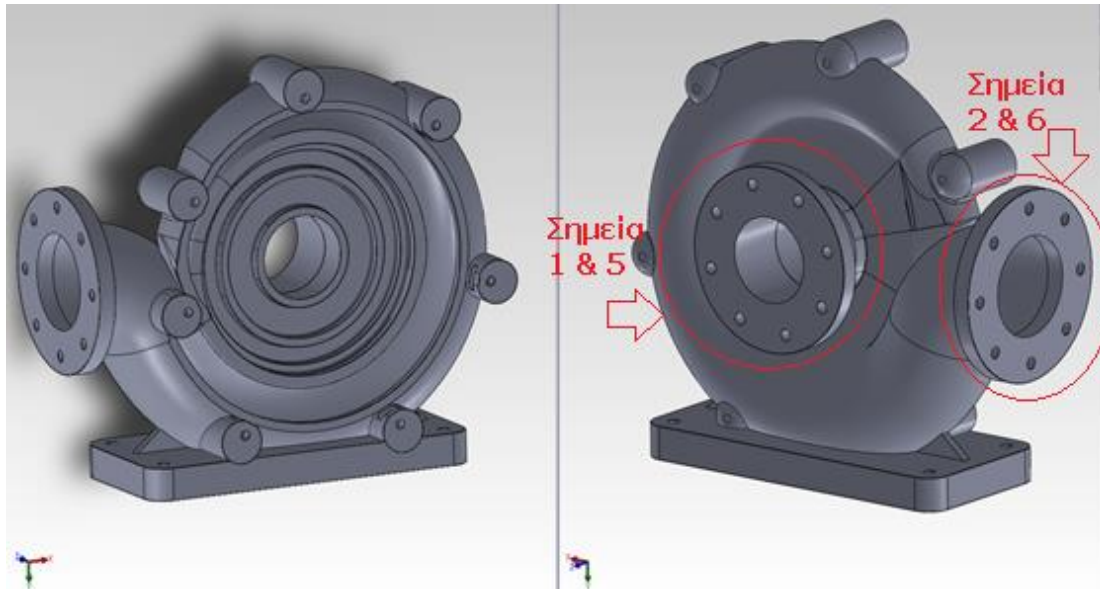
4.3. Κέλυφος

Το κέλυφος σχεδιάστηκε με τις εξής προϋποθέσεις :

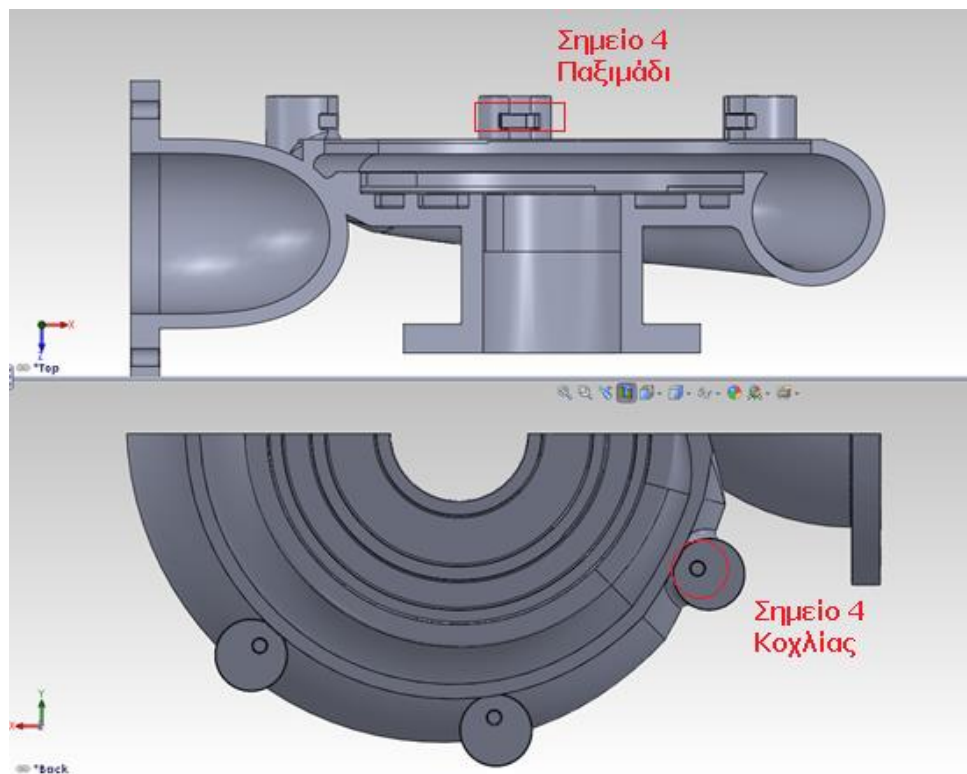
- σωλήνα εισόδου με ακτίνα 0,009525 m (Σημείο 1)
- σωλήνα εξόδου με ακτίνα 0,0113 m (Σημείο 2)
- δημιουργία καναλιού για αποφυγή διαρροής ρευστού (Σημείο 3)
- υποδοχές για τοποθέτηση κοχλιών και παξιμαδιών για το κλείσιμο με το καπάκι (Σημείο 4)

- φλάντζες στα σημεία εισόδου και εξόδου για σύνδεση με σωληνώσεις (Σημεία 5 και 6)

Παρακάτω ακολουθεί η παρουσίαση του κελύφους με ορισμένες τομές του με σημειωμένα πάνω του τα σημεία που αντιστοιχούν στα παραπάνω σημεία.

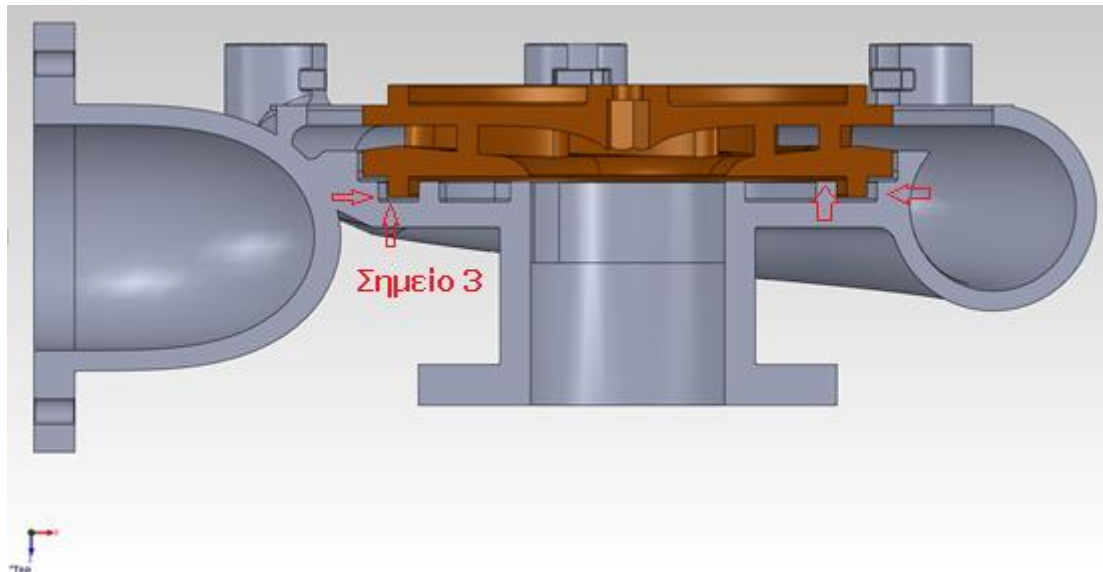


Σχήμα 4.3.α.



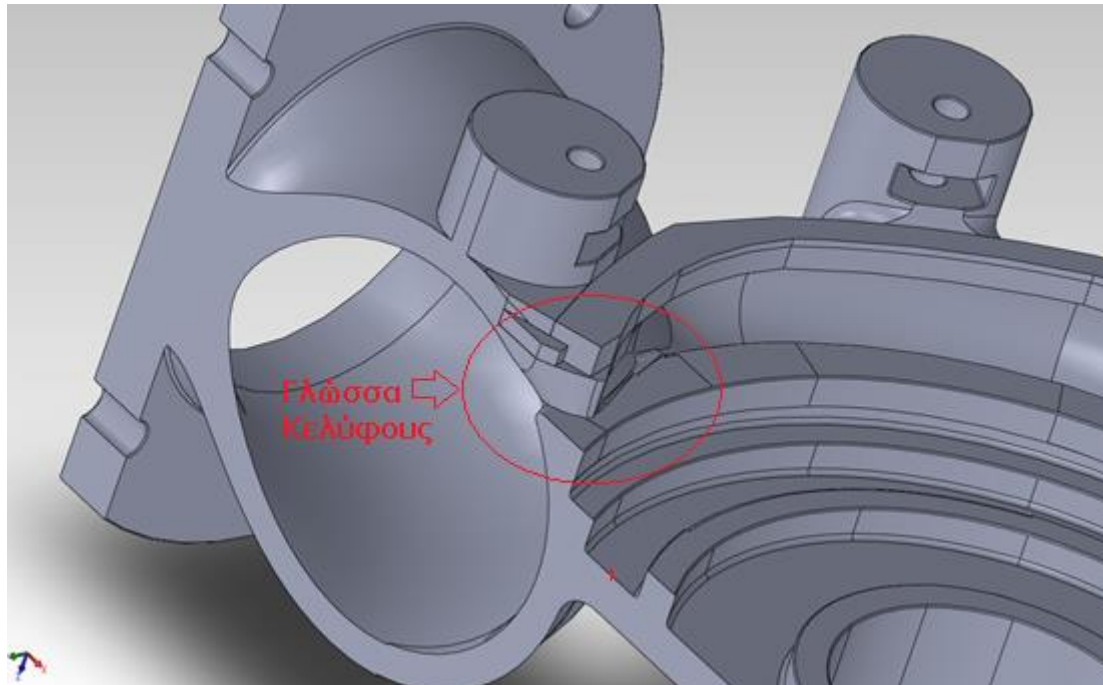
Σχήμα 4.3.β.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται μαζί με την πτερωτή ώστε να κατανοηθεί πως δημιουργείται το κανάλι από το οποίο τελικά το νερό δυσκολεύεται να φύγει.



Σχήμα 4.3.γ.

Κλείνοντας την παρουσίαση του κελύφους δείχνεται σε τομή ένα από τα πιο δύσκολα σημεία στη σχεδίαση του κελύφους το οποίο είναι η γλώσσα του κελύφους.



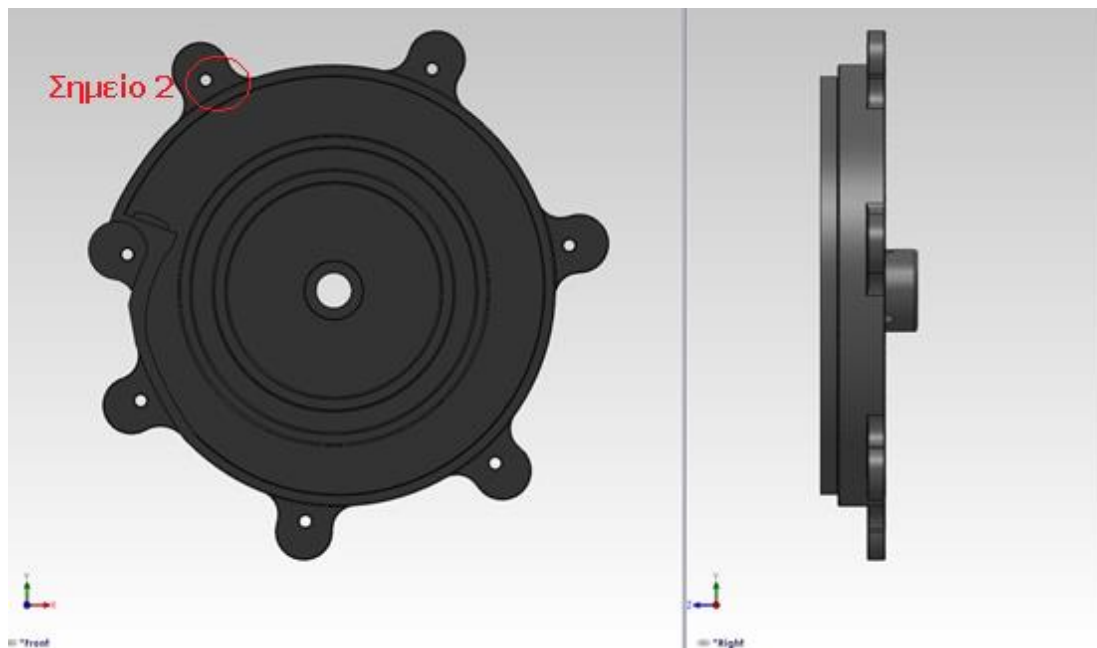
Σχήμα 4.3.δ.

4.4. Καπάκι

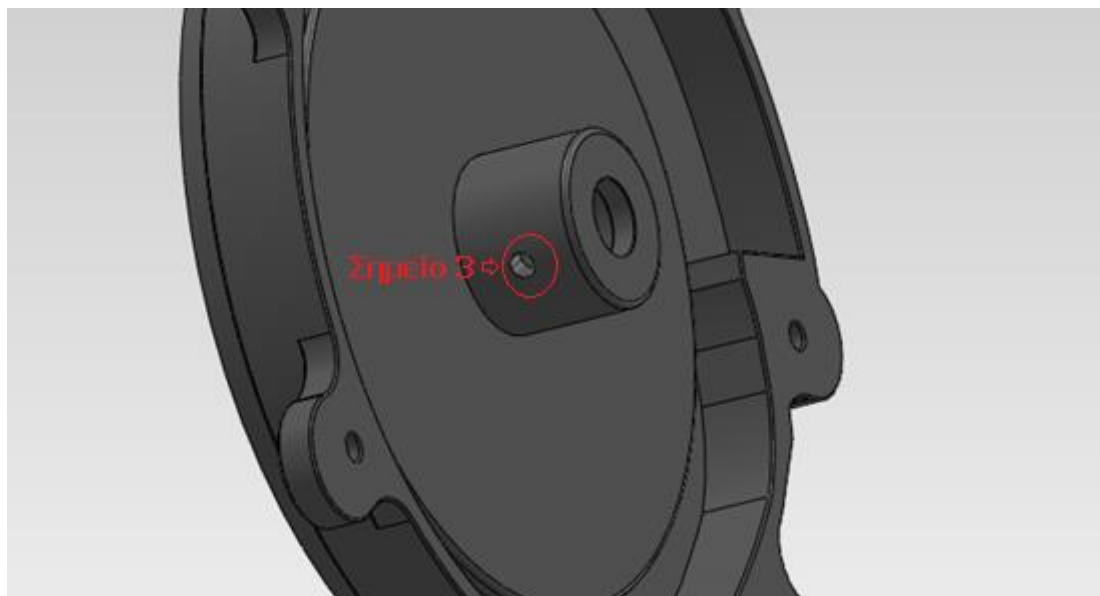
Οι περιορισμοί στη σχεδίασή του καπακιού ήταν :

- το αυτόματα δέσιμο με την τοπολογία του κελύφους (Σημείο 1)
- οι κύκλοι των περασμάτων των κοχλιών να είναι ομόκεντροι με τους αντίστοιχους του κελύφους (Σημείο 2)
- να υπάρχει πέρασμα για ακινητοποίηση του τεφλόν (Σημείο 3)
- να υπάρχει χώρος για τοποθέτηση στεγανοποιητικού υλικού (Σημείο 4)

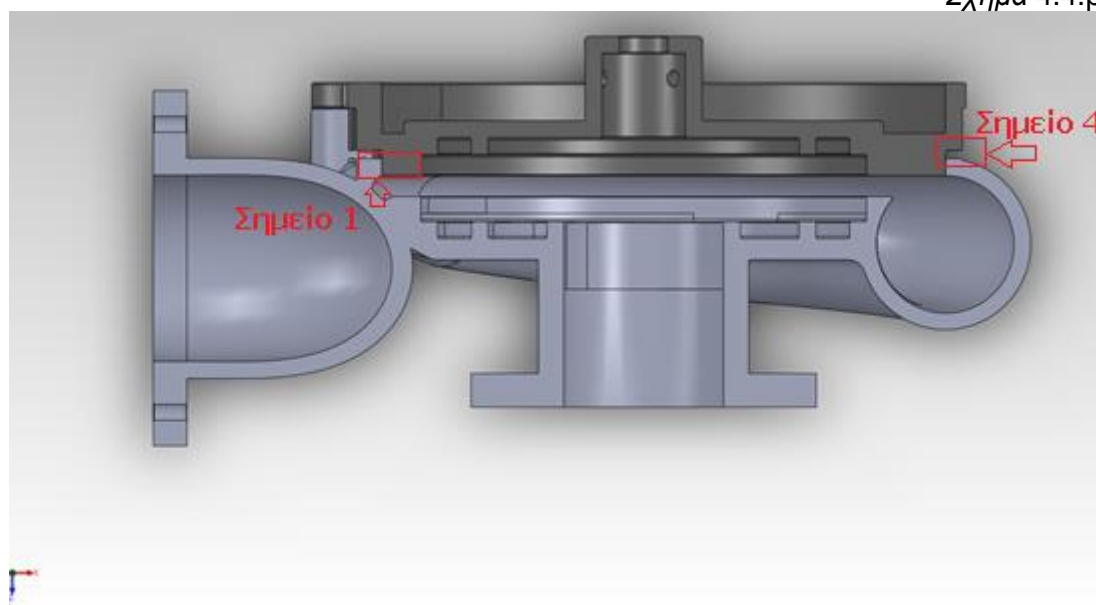
Ακολουθεί η παρουσίαση του κελύφους και τον προαναφερθέντων σημείων και η παρουσίαση κλείνει με το δέσιμο του στο κέλυφος.



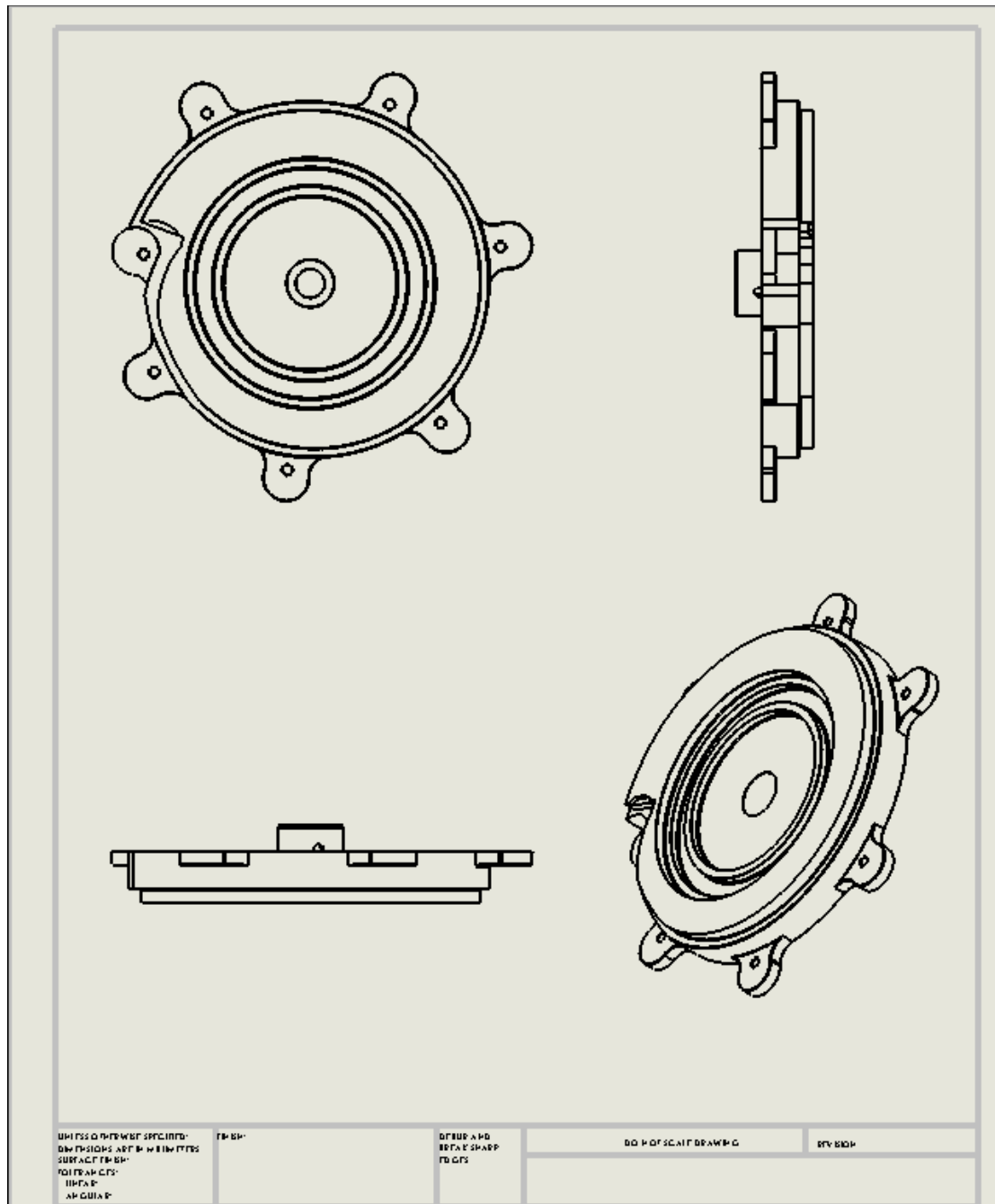
Σχήμα 4.4.α.



Σχήμα 4.4.β.



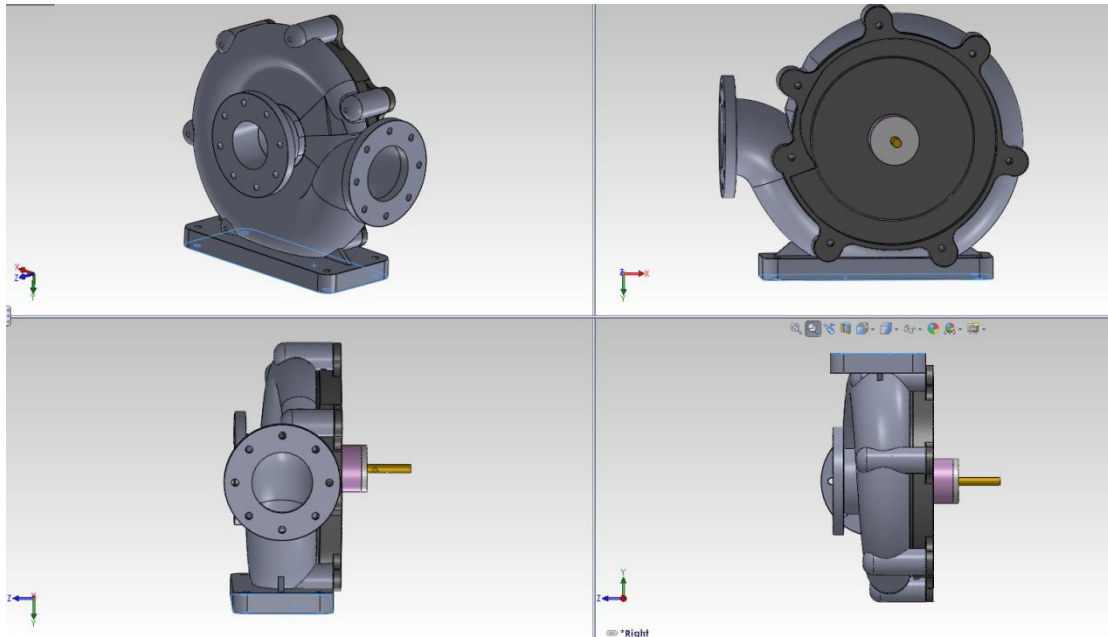
Σχήμα 4.4.γ.



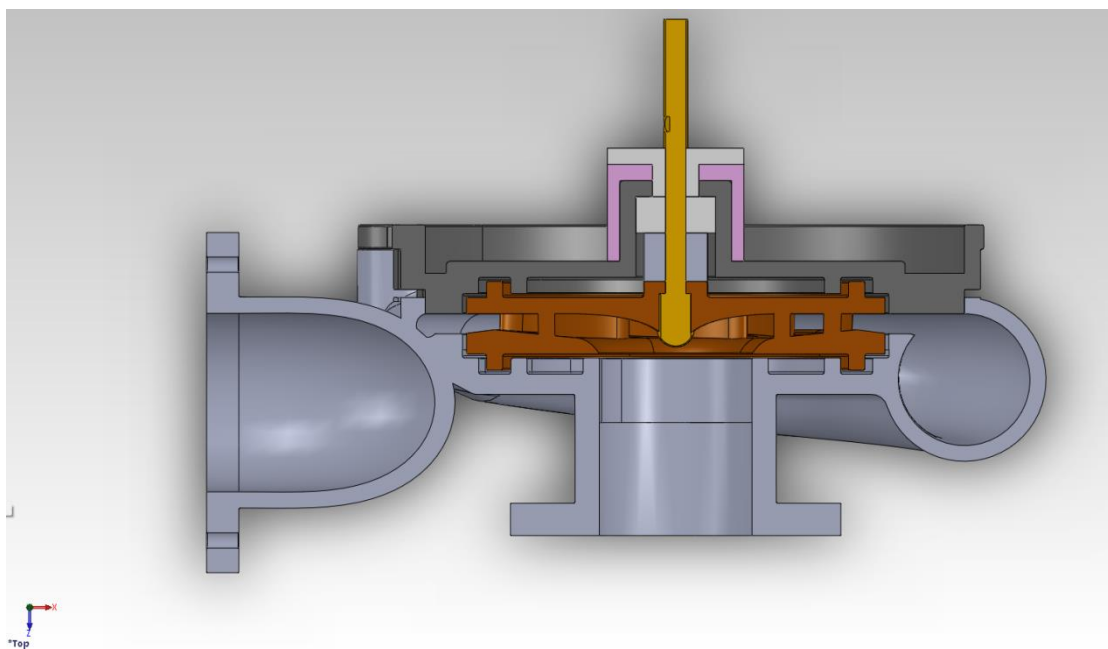
Σχήμα 4.4.δ.

4.5. Φυγοκεντρική Αντλία για Υποβοήθηση Αριστερής Κοιλίας

Το κεφάλαιο της βιομηχανικής σχεδίασης κλείνει με την παρουσίαση ολόκληρης της αντλίας με τις κατάλληλες τομές ώστε να γίνει πλήρως κατανοητή η σχεδίασή της.



Σχήμα 4.5.α.



Σχήμα 4.5.β.

4.6. Κατασκευή Αντλίας, Άξονα και Εξαρτημάτων

Μετά το τέλος της βιομηχανικής σχεδίασης ακολούθησε η κατασκευή των επιμέρους μερών της αντλίας. Η πτερωτή, το κέλυφος και το καπάκι κατασκευάστηκαν σε μηχανή τρισδιάστατης εκτύπωσης (rapid prototyping) από φωτοπολυμερικό υλικό (Objet VeroClear FullCure 810) ενώ ο άξονας από χαλυβα

και οι φλάντζες από αλουμίνιο σε μηχανουργίο. Το φωτοπολυμερικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι άκαμπτο και σχεδόν άχρωμο, με μεγάλη σταθερότητα και ακρίβεια διαστάσεων. Ο τύπος του τρισδιάστατου εκτυπωτή είναι Objet Eden 250, και χρησιμοποιήθηκε 256 γραμμάρια υλικού και 314 γραμμάρια υλικού που υποστηρίζει τη στιβαρότητα της εκτύπωσης (support material). Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η κατασκευασμένη μηχανή.

Ο άξονας, το καπάκι, τα τεφλόν και τα υπόλοιπα εξαρτήματα :



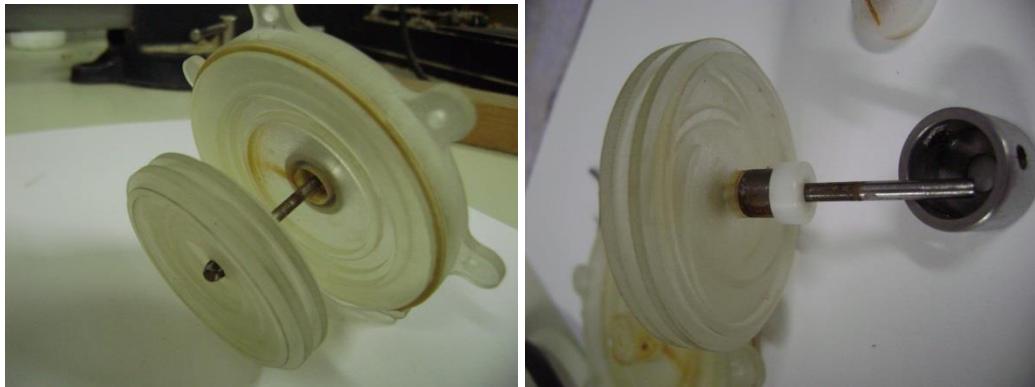
Σχήμα 4.6.α.

Η πτερωτή, το κέλυφος και το καπάκι :



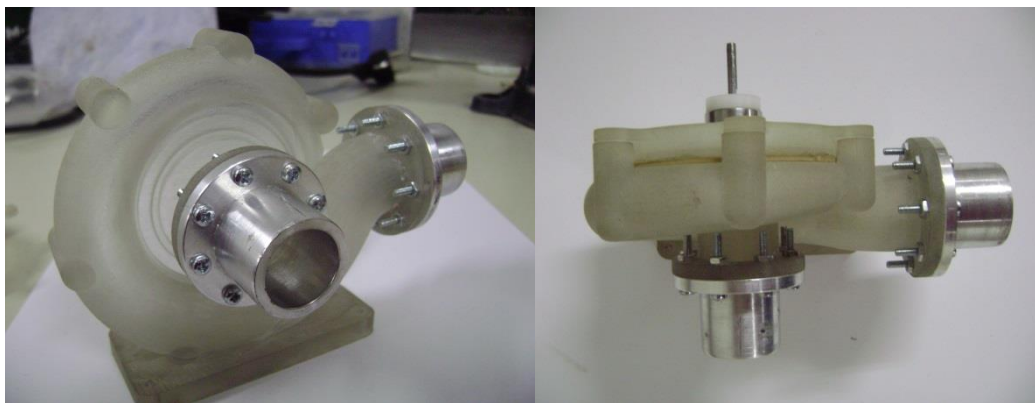
Σχήμα 4.6.β.

Η σύνδεση του άξονα με την πτερωτή και το καπάκι :



Σχήμα 4.6.γ.

Η σύνδεση του κελύφους με τις φλάντζες και η τοποθέτηση του πίσω τεφλόν :



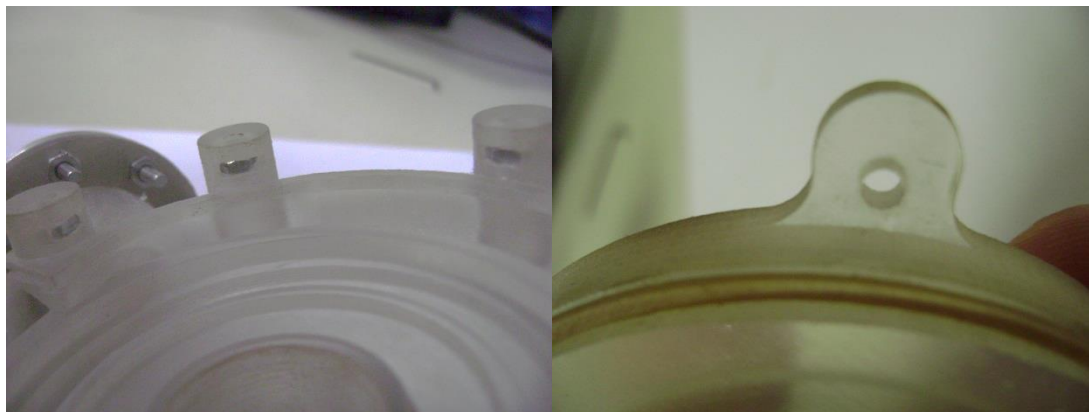
Σχήμα 4.6.δ.

Η σύνδεση του άξονα με την πτερωτή και η εσωτερική διαμόρφωση του κελύφους :



Σχήμα 4.6.ε.

Τέλος η ειδική διαμόρφωση για την κοχλιοσύνδεση κελύφους καπακιού:



Σχήμα 4.6.στ.

5. Πείραμα

5.1. Σκοπός του πειράματος

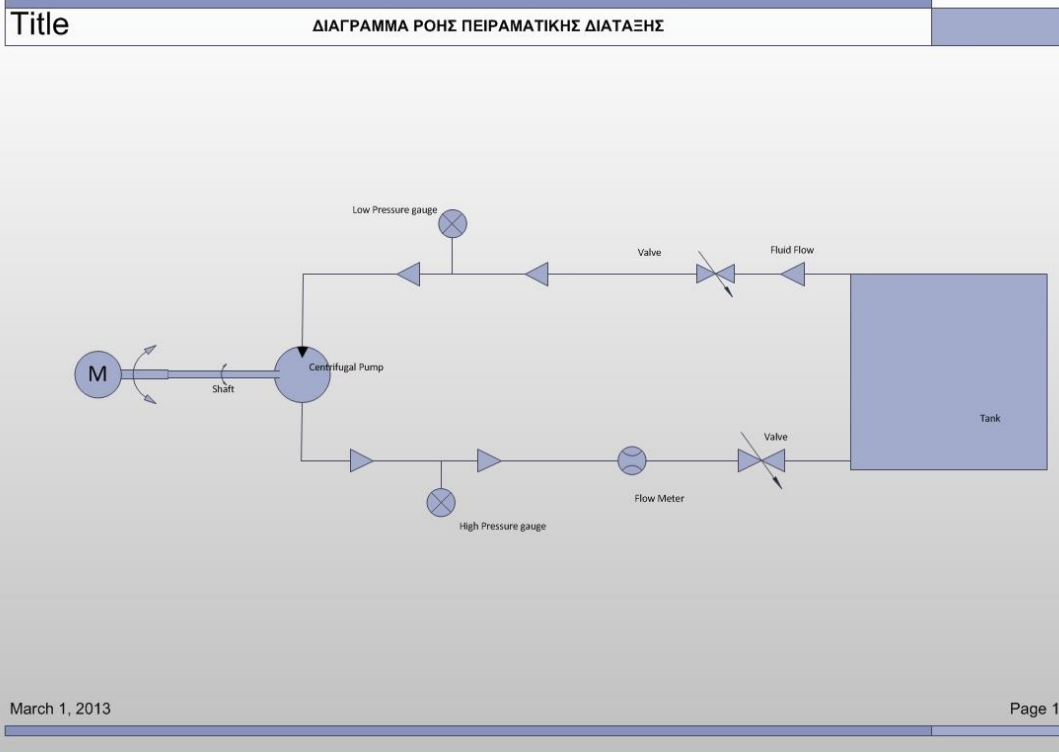
Οι προσομοιώσεις σε ηλεκτρονικό υπολογιστή διατρέχουν κάποιες αμφιβολίες κατά πόσο η μοντελοποίηση αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα, γι αυτό το λόγο θεωρείται σκόπιμη η σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με αποτελέσματα τα οποία έχουν προέλθει από κάποια πραγματική πειραματική διάταξη. Λόγω της ελάχιστης εμπειρίας στη μοντελοποίηση με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή σε συνδυασμό με την πολύπλοκη πραγματικότητα, πολλές φορές δεν λαμβάνονται υπόψη σημαντικοί παράγοντες όπου στο πραγματικό μοντέλο υφίστανται, με αποτέλεσμα αναξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης είναι δόκιμο να τονιστεί ότι, οι διαφορές μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, δεν οφείλονται απαραίτητα στη λάθος προσέγγιση της προσομοίωσης αλλά στο ότι το πείραμα δεν πραγματοποιήθηκε κάτω από όμοιες συνθήκες. Επομένως πρέπει να εξεταστούν τα λάθη και οι παραλήψεις και στο υπολογιστικό μοντέλο αλλά και στην πειραματική διάταξη.

Σκοπός του πειράματος είναι η σύγκριση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς της διάταξης σε σχέση με το υπολογιστικό μοντέλο διότι αυτή είναι που απασχολεί στη πρώτη φάση του σχεδιασμού ενός τέτοιου προϊόντος.

5.2. Πειραματική Διάταξη

5.2.1. Υδραυλικό Κύκλωμα και Εργαλεία

Για την διάταξη ήταν απαραίτητο κάποιο υδραυλικό κύκλωμα, έτσι έγινε χρήση σωληνώσεων, δύο βανών, μίας δεξαμενής, ενός ροόμετρου και ενός ηλεκτροκινητήρα για πρόσδωση μηχανικού έργου, ενώ απαραίτητη ήταν η συμβολή των μετρητικών οργάνων μέτρησης πίεσης και μέτρησης στροφών για κάθε χρονική στιγμή. Λεπτομερέστερα αναλύονται παρακάτω το πλήθος, το υλικό και η συμβολή του κάθε αντικειμένου. Επίσης το διάγραμμα (Σχήμα 5.2.1.α), στο τέλος της ενότητας, βοηθάει στην καλύτερη κατανόηση της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 5.2.1.α.



Σχήμα 5.2.1.β.

5.2.1.1. Σωληνώσεις

Οι σωληνώσεις είναι από πλαστικό εύκαμπτου τύπου, διαφανείς και γυαλιστεροί με μικρό συντελεστή τραχύτητας. Η επιλογή την ευκαμψίας έδωσε μεγαλύτερη ελευθερία στις αποστάσεις ενώ παράλληλα δεν δημιουργήθηκαν απότομες γωνίες οι οποίες προσδίδουν απώλειες πίεσης. Η ιδιότητα της διαφάνειας των σωληνώσεων έπαιξε σημαντικό ρόλο διότι έγινε εύκολα αντιληπτή η παγίδευση αερίων μαζών και φυσαλίδων οι οποίες σε περίπτωση που δεν γίνονται αντιληπτές επηρεάζουν αρνητικά τα αποτελέσματα. Ακόμη η προσεκτική εκκίνηση ήταν απαραίτητη για την αποφυγή ανεπιθύμητων φαινομένων όπως η σπηλαιώση τα οποία μπορούν να καταστρέψουν τη μηχανή. Τέλος, στην είσοδο έγινε χρήση σωλήνα διατομής 19,05 mm ενώ αντίστοιχα στην έξοδο 25,4 mm.

5.2.1.2. Βάνες

Για την απομόνωση του κυκλώματος κατά τη διάρκεια της μη χρήσης του τοποθετήθηκαν δύο βάνες τύπου κρουνού, όπου τοποθετήθηκε μία πριν και μία μετά την αντλία.



Σχήμα 5.2.1.2.

5.2.1.3. Δεξαμενή

Πρόκειται για τη βασική δεξαμενή του πειράματος. Ο όγκος της υπολογίστηκε ως εξής:

- 1) Παροχή εργαζόμενου μέσου 5 L/min=300 L/h
- 2) Για λόγους υπερθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου ,κυκλοφορεί 5 φορές σε μία ώρα
- 3) Επομένως 60 λίτρα εργαζόμενου μέσου ανακυκλοφορούν 5 φορές σε μία ώρα. Τελικά η δεξαμενή που χρησιμοποιήθηκε ήταν INOX, 75 λίτρων.

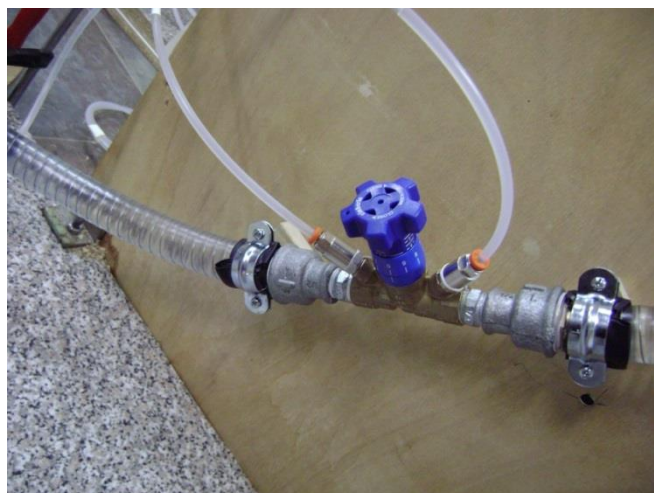


Σχήμα 5.2.1.3.

5.2.1.4. Ροόμετρο

Η ρύθμιση της παροχής έγινε με ροόμετρο τύπου venturi και το οποίο κάνει χρήση δισκοβαλβίδας. Για τη λειτουργία του, αναγκαία ήταν η μέτρηση της διαφοράς πίεσης πριν και μετά του οργάνου. Η εγκατάστασή του στην πειραματική διάταξη έθεσε του εξής δύο περιορισμούς :

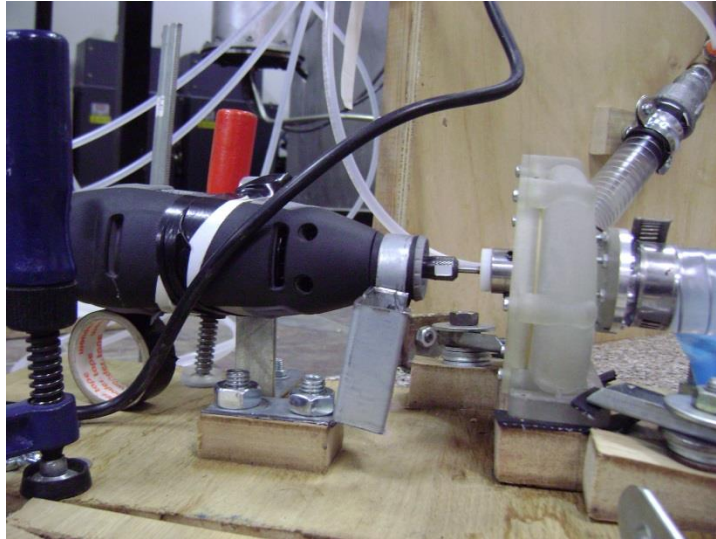
- Το μήκος της σωλήνωσης πριν το ροόμετρο πρέπει να είναι πέντε φορές η διάμετρος της
- Το μήκος της σωλήνωσης μετά το ροόμετρο πρέπει να είναι δύο φορές η διάμετρος της



Σχήμα 5.2.1.4.

5.2.1.5. Ηλεκτροκινητήρας

Ως ηλεκτροκινητήρας χρησιμοποιήθηκε ένα πολυεργαλείο Dremel.



Σχήμα 5.2.1.5.

5.2.1.6. Μετρητικά Όργανα

5.2.1.6.1. Μέτρηση Στροφών

Για τον έλεγχο της διατήρησης των σταθερών στροφών χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω ταχύμετρο. Κολλώντας το αυτοκόλλητο πάνω στο μοτέρ και φωτίζοντάς το έγινε εφικτή η μέτρηση των στροφών.

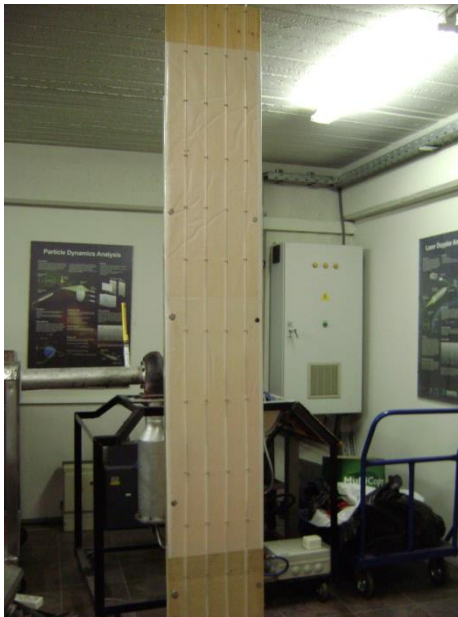


Σχήμα 5.2.1.6.1.

5.2.1.6.2. Μέτρηση Πίεσης

Για τη μέτρηση πίεσης κατασκευάστηκε μανόμετρο στήλης νερού. Η διαφορά πίεσης, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, βρίσκεται περίπου στα 0,15 bar όπου συνεπάγεται κοντά στα 1,5 μέτρα στήλης νερού ($H=\rho \cdot g \cdot h$). Για μεγαλύτερα περιθώρια, το μανόμετρο σχεδιάστηκε στα 2,3 μέτρα. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις στήλες, δύο για τη μέτρηση της διαφοράς πίεσης στην αντλία και δύο για την διαφορά πίεσης του ροόμετρου.

Ένα εύλογο ερώτημα είναι γιατί δεν χρησιμοποιήθηκε ένα μανόμετρο Bourbon (μηχανικό μανόμετρο) ή ένας πιεζοηλεκτρικός μετρητής πίεσης. Το μανόμετρο Bourbon έχει σχετικά καλή ακρίβεια αλλά δεν θεωρήθηκε κατάλληλο για τις απαιτήσεις του συστήματος, ενώ από την άλλη ο πιεζοηλεκτρικός μετρητής πίεσης διακρίνεται όσον αφορά την ακρίβειά του αλλά μία τέτοια λύση κάνει ακριβότερο και πολυπλοκότερο το σύστημα. Έτσι κρίθηκε σκόπιμη η εύρεση νέας λύσης και λόγω του ότι το μανομετρικό ύψος δεν ξεπερνούσε, όπως προαναφέρθηκε, κατά πολύ τα 2 μέτρα και λόγω της καλής ακρίβειας που διαθέτει μία τέτοια κατασκευή, θεωρήθηκε μια απλή, αξιόπιστη και οικονομική λύση.

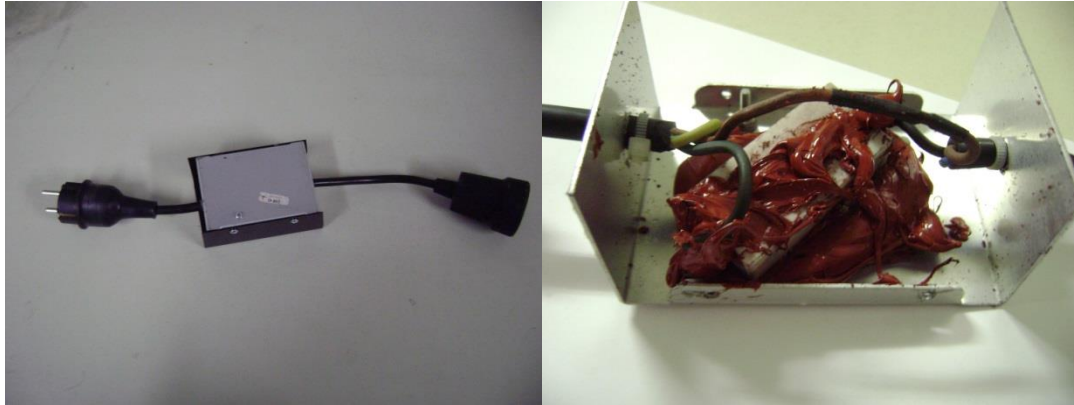


Σχήμα 5.2.1.6.2.

5.2.2. Προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν

Η χρήση του Dremel ως ηλεκτροκινητήρα ήταν μια καλή πρόταση όσον αφορά την εύκολη ρύθμιση των στροφών λόγω του ενσωματωμένου ποτενσιόμετρου που διαθέτει. Παρόλα αυτά η πολύστροφη κίνηση που διαθέτει το καθιστούσε ακατάλληλο διότι το ελάχιστο των στροφών του ήταν οι 10.000 *rpm*. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η περιστροφή που επιθυμείται είναι τα 2.550 *rpm*, έτσι κατασκευάστηκε μία συσκευή (Σχήμα 5.2.2.) μείωση της τάσης με προσθήκη αντιστάσεων εν σειρά, με

αποτέλεσμα τη μείωση στροφών. Αυτή η διάταξη αύξησε την κατανάλωση ισχύος και έτσι διακριτοποιήθηκε η περιστροφή στο εύρος εκείνο που καθιστούσε το Dremel πλέον κατάλληλο για τη συγκεκριμένη χρήση. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας των αντιστάσεων τοποθετήθηκε θερμομονωτική κόλλα (κόκκινου χρώματος).



Σχήμα 5.2.2.

5.3. Μετρήσεις και Σύγκριση Αποτελεσμάτων

5.3.1. Μετρήσεις και Πείραμα

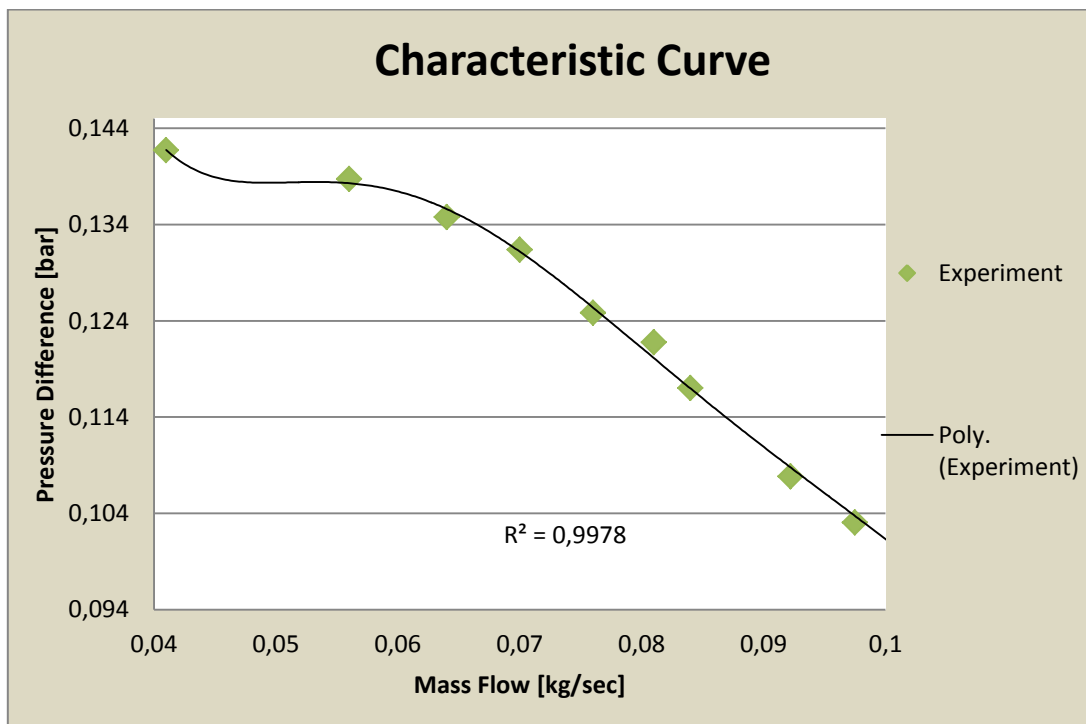
Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της πειραματικής διάταξης πραγματοποιήθηκαν έξι μετρήσεις από τις οποίες οι τρεις τελευταίες λήφθηκαν υπόψη για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, καθώς ήταν αυτές που έγιναν στο ορθότερο περιβάλλον. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ήταν η διαφορά πίεσης της αντλίας και η διαφορά πίεσης του ροόμετρου ενώ οι στροφές ανά λεπτό του ρότορα ελέγχονταν ώστε να είναι σταθερές στις 2550 *rpm*. Οι πιέσεις μετρήθηκαν σε μέτρα στήλης νερού και μετατράπηκαν σε kPa. Έπειτα υπολογίστηκε η παροχή του κυκλώματος από τις χαρακτηριστικές καμπύλες του ροόμετρου, ενώ τέλος έγινε η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και του πειράματος. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί αφορούν τον μέσο όρο των δεδομένων από τις τρεις μετρήσεις.

Στο σημείο αυτό καλό είναι να τονιστεί ότι η συγκεκριμένη μελέτη δεν ασχολήθηκε με τον βαθμό απόδοσης του συστήματος, αν και ένα από τα σημαντικότερα μεγέθη, διότι δεν βελτιστοποιήθηκαν τα μηχανολογικά μέρη του πειράματος και οι μηχανικές απώλειες κατείχαν πολύ υψηλά ποσά. Η μη βελτιστοποίηση των μηχανολογικών μερών έχει να κάνει με την κακή ευθυγράμμιση του άξονα της αντλίας με το μοτέρ. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την κατανάλωση εκ μέρους του μοτέρ υψηλής ηλεκτρικής ισχύος για την επίτευξη των επιθυμητών στροφών.

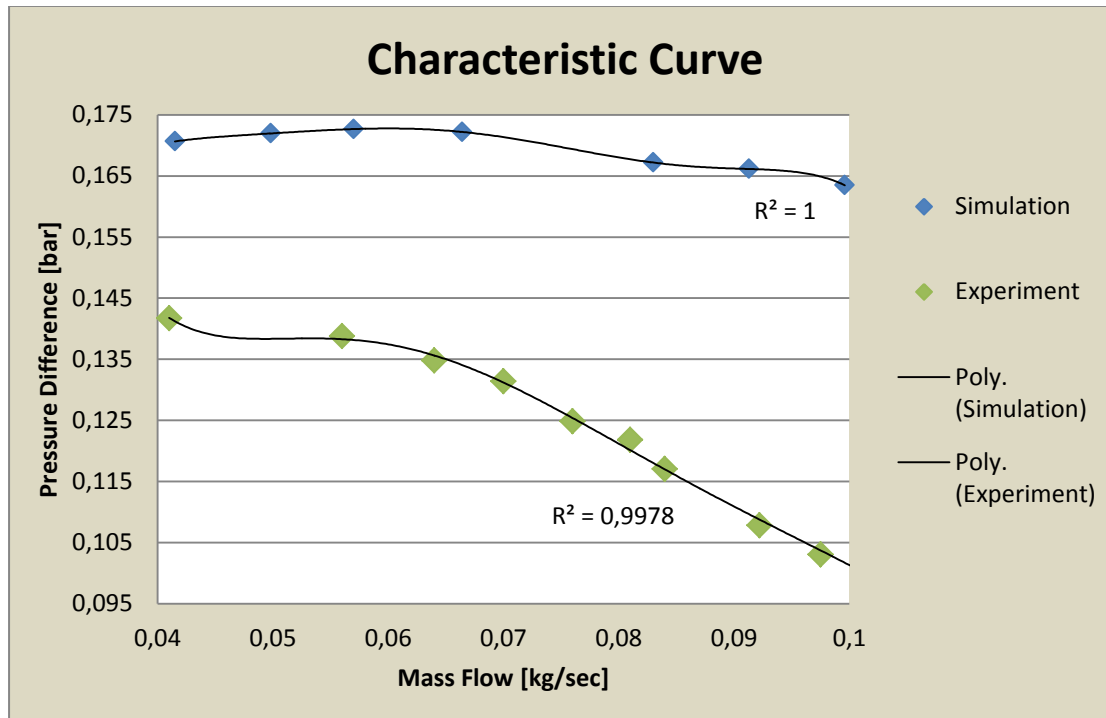
Στον πίνακα 5.3.1. παρουσιάζονται οι 10 παροχές στις οποίες μετρήθηκε η διαφορά πίεσης της αντλίας ώστε να δημιουργηθεί η χαρακτηριστική καμπύλη (Σχήμα 5.3.1.α.). Παρατηρείται ότι για την παροχή των 0,083 kg/sec, που ενδιαφέρει την παρούσα εργασία, η αντίστοιχη διαφορά πίεσης είναι 11,54 kPa. Η διαφορά πίεσης που επιτεύχθηκε στη μοντελοποίηση της παραπάνω εργασίας είναι 16,7 kPa, επομένως το ποσοστό απόκλισης είναι 24 %, γεγονός το οποίο εξηγείται και αξιολογείται στην επόμενη παράγραφο. Τέλος στο σχήμα 5.3.1.β. παρουσιάζονται ολοκληρωμένα, η χαρακτηριστική του πειράματος αλλά και της προσομοίωσης.

Πίνακας 5.3.1.

Q(kg/s)	0,103	0,097	0,093	0,085	0,083	0,077	0,068	0,063	0,056	0,048
ΔP (bar)	0,092	0,095	0,100	0,108	0,115	0,119	0,123	0,128	0,133	0,134



Σχήμα 5.3.1.α.



Σχήμα 5.3.1.β.

5.3.2. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Παρατηρώντας τις δύο χαρακτηριστικές στο σχήμα 5.3.1.β. φαίνεται ότι υπάρχει μια διαφορά μεταξύ τους. Διαφορά που φαίνεται να μεγαλώνει καθώς αυξάνεται η παροχή. Αυτή η απόκλιση με μια πρώτη ματιά μπορεί να χαρακτηριστεί ως υψηλή. Γι αυτό το λόγο εξετάστηκαν περαιτέρω οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκε το πείραμα καθώς και όλοι οι λόγοι οι οποίοι οδήγησαν σε μία απόκλιση αυτής της τάξης μεγέθους. Παρακάτω απαριθμούνται πιθανοί λόγοι και αιτίες που αιτιολογούν αυτή την απόκλιση.

- *Η εκκεντρότητα του ρότορα.* Ένα κομβικό σημείο στη σχεδίαση του πειράματος ήταν το κεντράρισμα του μοτέρ με την αντλία. Σε αυτή τη διαδικασία επιπλέον δυσκολία εισήγαγε η απουσία βάσης για το Dremel (μοτέρ). Έτσι λοιπόν κατασκευάστηκε βάση (Σχήμα 5.2.1.5.) η οποία όμως δεν μπορούσε να είναι της ίδια ποιότητας με την αυθεντική βάση του Dremel. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα ακόμη και μετακινήσεις της τάξης του 0,1 έως 0,5 mm να επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την θέση της πτερωτής ακόμη και το μέγεθός της. Σε περίπτωση αλλαγής της θέσης της πτερωτής τα αποτελέσματα επηρεάζονται αρνητικά σε μεγάλο βαθμό καθώς αλλάζει το εμβαδό εξόδου της ροής προς το κέλυφος. Είναι λοιπόν δυνατό σημαντικό ποσοστό της ροής να φεύγει εκτός κελύφους γεγονός που αυξάνει την πτώση πίεσης.
- *Η τραχύτητα του υλικού της αντλίας.* Είναι γεγονός ότι στην προσομοίωση δεν λήφθηκε υπόψη η ακριβής τραχύτητα του υλικού της αντλίας και σε

συνδυασμό με τις ταχύτητες (τάξης μεγέθους 1,7-4,3 m/s) μέσα στην πτερωτή, είναι πιθανό να υπάρχουν επιπλέον απώλειες οι οποίες δημιουργούν κάποια πτώση πίεσης. Λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος, όπως η γεωμετρία και οι αλλαγές του μέτρου της ταχύτητας σε κάθε σημείο είναι δύσκολο να γίνει μια ακριβή εκτίμηση των απωλειών, παρόλα αυτά η τραχύτητα συνεισφέρει στην πτώση πίεσης.

- *Οι διαρροές του εργαζόμενου μέσου.* Από την εκκίνηση του πειράματος παρατηρήθηκαν μικρές διαρροές νερού κυρίως σε δύο σημεία. Μπορεί να ισχυριστεί κανείς ότι διαρροές είναι σχεδόν αναπόφευκτό να υπάρχουν, αλλά επίσης σίγουρα επηρεάζουν την επίτευξη πίεσης. Η σημαντικότερη διαρροή υπήρχε στον άξονα περιστροφής της αντλίας και αυξανόταν καθώς η ώρα περνούσε. Αυτό μπορεί να συνδεθεί με την πρώτη αιτιολόγηση καθώς η εκκεντρότητα του άξονα μπορεί να επηρεάσει το μέγεθος του τεφλόν (και αυτό με τη σειρά του το μέγεθος και τη θέση της πτερωτής) και επομένως η ροή να διευκολύνεται προς διαφυγή από το πίσω μέρος της πτερωτής.
- *Ανακυκλοφορία εργαζόμενου μέσου προς την είσοδο.* Λόγω της υψηλής διαφοράς πίεσης ενδέχεται να υπήρχε ανακυκλοφορία του νερού από την έξοδο της πτερωτής στην είσοδο. Πολύ πιθανό τα κανάλια που δημιουργήθηκαν εκεί να μην κατάφεραν να ανακόψουν τη ροή.
- *Η ποιότητα του εργαζόμενου μέσου.* Είναι γεγονός πως υπάρχει αμφιβολία για την ποιότητα και την καθαρότητα του νερού που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα. Παρόλο που το εργαζόμενο μέσο φιλτραρίστηκε παρατηρήθηκαν μικρές ακαθαρσίες οι οποίες σε μια τέτοια μηχανή (πολύ μικρού μεγέθους) μπορούν να επηρεάσουν τη ροή.

Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκε εκ του μηδενός μια φυγοκεντρική αντλία κοιλιακής υποβοήθησης. Για τη σχεδιάσή της χρησιμοποιήθηκαν κώδικας, υπολογιστικά και σχεδιαστικά πακέτα. Ο όγκος της εργασίας ήταν ιδιαίτερα μεγάλος και τα προβλήματα που προέκυψαν ήταν αρκετά.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα ήταν η έλλειψη εμπειρίας στη βελτιστοποίηση και στο σχεδιασμό μιας μηχανής, η οποία γίνεται αντιληπτή σε όλο το εύρος της εργασίας. Από το υπολογιστικό κομμάτι μέχρι το βιομηχανικό σχεδιασμό γίνανε λάθη τα οποία με την εμπειρία που αποκτήθηκε στο μέλλον μπορούν να αποφευχθούν. Από την άλλη η εμπειρία της σχεδίαση μιας μηχανής εκ του μηδενός μέχρι τη δοκιμή της είναι ανεκτίμητη. Αυτό σε συνδυασμό με τη γνωριμία μας με όλο το εύρος των υπολογιστικών και σχεδιαστικών προγραμμάτων, τα οποία περνώντας ο χρόνος γίνονταν όλο και πιο εύχρηστα, δίνει σε εμάς μια αξιόπαινη παρακαταθήκη.

Τα συμπεράσματα που βγαίνουν από αυτή την εργασία είναι πολλά. Σίγουρα η μοντελοποίηση που έγινε είχε ελλείψεις οι οποίες φάνηκαν στη σύγκριση των πειραματικών – υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Επιπλέον το κεντράρισμα του άξονα του μοτέρ και της αντλίας ήταν καθοριστικό καθώς πέρα από την αβεβαιότητα που εισήγαγε στα αποτελέσματα, κατέστησε αδύνατο να υπάρξει εικόνα του βαθμού απόδοσης της αντλίας. Ακόμη στο κομμάτι της βιομηχανικής σχεδίασης φάνηκε η ανικανότητα των καναλιών ανακυκλοφορίας που σχεδιάστηκαν, να εμποδίσουν τη ροή να ανακυκλοφορήσει. Τέλος φάνηκε η αδυναμία του κώδικα, ο οποίος αφορά τη μονοδιάστατη ροή, να περιγράψει τα πολύπλοκα φαινόμενα της τρισδιάστατης ροής.

Εν κατακλείδι ως περαιτέρω εργασία προτείνονται τα εξής :

- Μελέτη και μοντελοποίηση του δυναμικού συστήματος.
- Βελτιστοποίηση της πειραματικής διάταξης για ακριβέστερα αποτελέσματα. Αυτό αφορά το καλύτερο κεντράρισμα του άξονα της μηχανής με του μοτέρ, την στεγανοποίηση της μηχανής και όλων των εξαρτημάτων.
- Πειραματική μελέτη της διάτμησης εντός της μηχανής μέσω οπτικοποίηση της ροής με χρήση λείζερ. Αυτό απαιτεί τη διαμόρφωση επιπέδων επιφανειών στο κέλυφος και χρήση διαφανούς υλικού.
- Για ίδιο μέγεθος πτερωτής και κελύφους, αλλαγή των γωνιών των πτερυγίων και μελέτη της νέας γεωμετρίας.
- Αλλαγή του νερού σε εργαζόμενο μέσο με ιδιότητες όμοιες με αυτές του αίματος.
- Δοκιμή σχεδίασης μικρότερης πτερωτής και κελύφους ώστε να είναι πιο κοντά στις σχεδιαστικές απαιτήσεις του συγκεκριμένου προϊόντος.
- Μελέτη για την εύρεση του κατάλληλου υλικού για αποφυγή της καταστροφής του αίματος
- Σχεδίαση συστήματος αυτομάτου ελέγχου το οποίο να ρυθμίζει τη λειτουργία της αντλίας ανάλογα με τις απαιτήσεις της καρδιάς.

Παράρτημα

Κώδικας MATLAB

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA
% DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
% DIPLOMA THESIS
% MOUSMOULIS GIORGOS
% PEITZIKAS NIIKOLAOS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear
close all

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Setting Starting Values
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Basic Data for Blood Flow in Left Ventricle
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Q=0.083; %blood flow [kg/s]
dH=1.63536; %pressure heigh [water meters]
p=1000; %density [kg/m^3]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Basic Data for Centrifugal Blood Pump
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

rpi=0.009525; %inlet pipe radius [m]
rpo=0.0113; %outlet pipe radious [m]
b2=0.002; %outlet blade height value [m]
z=5; %number of blades

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Definition of Variables
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

n(32)=0; %matrix for revolutions per minute [rpm]
b1(100)=0; %matrix for inlet blade height
r1(1)=0; %matrix for inlet blade radius [m]
r2(34)=0; %matrix for outlet blade radius [m]
u1=0; %inlet peripheral velocity
u2=0; %outlet peripheral velocity
c1=0; %inlet fluid velocity
cr2=0; %radial component of the absolute speed
in outlet
cu2t=0; %theoritical tangential component of the
absolute speed in outlet
cu2r=0; %real tangential component of the
absolute speed in outlet

```

```

s(32,100,10,34)=0;           %slip factor of Buseman method
A(32,100,10,34)=0;         %A Coefficient of Buseman method
B=1;                        %B Coefficient of Buseman method
t=0;                        %t=r2/r1
tt=0;                       %tt=exp((2*3.14*cosB_2t)/z))
B_1(32,100,10,34)=0;       %matrix for blade inlet angle
B_2(32,100,10,34)=0;       %matrix for real blade exit angle
B_2t=0;                     %theoretical blade exit angle
y=1;                        %counter i
B_1f(y)=0;                  %final blade inlet angles
B_2f(y)=0;                  %final blade exit angles
nf(y)=0;                   %final revolutions per minute
r1f(y)=0;                  %final blade inlet radius
r2f(y)=0;                  %final blade outlet radius
sf(y)=0;                   %final slip factors
Af(y)=0;                   %final A Coefficient of Buseman method
b1f(y)=0;                  %final inlet blade height
xx=0;                      %counter ii

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Starting Values for the Varying Variables
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

n(1)=1500;                  %starting values of revolutions per
minute
b1(1)=0.003;               %inlet blade height
r1(1)=0.0125;              %starting values of inlet blade radius
r2(1)=0.0185;             %starting values of outlet blade radius

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calculations
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for i=1:30 %for revolutions per minute
    for m=1:10 %for inlet blade height
        for k=1:2 %for inlet blade radius
            for l=1:11 %for outlet blade radius

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                %Calculation of peripheral velocity
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

                u1=(2*pi*n(i)/60)*r1(k);
                u2=(2*pi*n(i)/60)*r2(l);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                %Calculation of fluid velocity
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

                c1=Q/(p*2*pi*r1(k)*b1(m));
                cr2=Q/(p*2*pi*r2(l)*b2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                %Calculation of inlet blade angle
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

                B_1(i,m,k,l)=(atan(u1/c1)*180)/pi;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calculation of theoretical tangential velocity cu_2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

cu2t=dH*9.81/u2;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calculation of theoretical exit blade angle
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

B_2t=(atan((u2-cu2t)/cr2)*180)/pi;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calculation of real exit blade angle with use of
BUSEMAN
%coefficient of variation
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calculation of A coefficient of variation s, from
Buseman
%method
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% vane number (z) : 5

if B_2t>=20 && B_2t<25 && z==5
    A(i,m,k,l)=0.69;
end
if B_2t>=25 && B_2t<30 && z==5
    A(i,m,k,l)=0.695;
end
if B_2t>=30 && B_2t<35 && z==5
    A(i,m,k,l)=0.7;
end
if B_2t>=35 && B_2t<40 && z==5
    A(i,m,k,l)=0.7;
end
if B_2t>=40 && B_2t<45 && z==5
    A(i,m,k,l)=0.705;
end
if B_2t>=45 && B_2t<50 && z==5
    A(i,m,k,l)=0.71;
end
if B_2t>=50 && B_2t<55 && z==5
    A(i,m,k,l)=0.73;
end
if B_2t>=55 && B_2t<60 && z==5
    A(i,m,k,l)=0.74;
end
if B_2t>=60 && B_2t<65 && z==5
    A(i,m,k,l)=0.755;
end
if B_2t>=65 && B_2t<70 && z==5
    A(i,m,k,l)=0.775;
end
if B_2t>=70 && B_2t<75 && z==5
    A(i,m,k,l)=0.8;

```

```
end
if B_2t>=75 && B_2t<80 && z==5
    A(i,m,k,l)=0.85;
end
if B_2t>=80 && B_2t<85 && z==5
    A(i,m,k,l)=0.9;
end
if B_2t>=85 && B_2t<90 && z==5
    A(i,m,k,l)=0.925;
end
    %%%% vane number (z) : 6

if B_2t>=20 && B_2t<25 && z==6
    A(i,m,k,l)=0.71;
end
if B_2t>=25 && B_2t<30 && z==6
    A(i,m,k,l)=0.715;
end
if B_2t>=30 && B_2t<35 && z==6
    A(i,m,k,l)=0.72;
end
if B_2t>=35 && B_2t<40 && z==6
    A(i,m,k,l)=0.73;
end
if B_2t>=40 && B_2t<45 && z==6
    A(i,m,k,l)=0.74;
end
if B_2t>=45 && B_2t<50 && z==6
    A(i,m,k,l)=0.745;
end
if B_2t>=50 && B_2t<55 && z==6
    A(i,m,k,l)=0.75;
end
if B_2t>=55 && B_2t<60 && z==6
    A(i,m,k,l)=0.765;
end
if B_2t>=60 && B_2t<65 && z==6
    A(i,m,k,l)=0.78;
end
if B_2t>=65 && B_2t<70 && z==6
    A(i,m,k,l)=0.8;
end
if B_2t>=70 && B_2t<75 && z==6
    A(i,m,k,l)=0.84;
end
if B_2t>=75 && B_2t<80 && z==6
    A(i,m,k,l)=0.875;
end
if B_2t>=80 && B_2t<85 && z==6
    A(i,m,k,l)=0.91;
end
if B_2t>=85 && B_2t<90 && z==6
    A(i,m,k,l)=0.93;
end

    %%%% vane number (z) : 8

if B_2t>=20 && B_2t<25 && z==8
    A(i,m,k,l)=0.76;
end
```

```
if B_2t>=25 && B_2t<30 && z==8
    A(i,m,k,l)=0.765;
end
if B_2t>=30 && B_2t<35 && z==8
    A(i,m,k,l)=0.77;
end
if B_2t>=35 && B_2t<40 && z==8
    A(i,m,k,l)=0.775;
end
if B_2t>=40 && B_2t<45 && z==8
    A(i,m,k,l)=0.78;
end
if B_2t>=45 && B_2t<50 && z==8
    A(i,m,k,l)=0.79;
end
if B_2t>=50 && B_2t<55 && z==8
    A(i,m,k,l)=0.8;
end
if B_2t>=55 && B_2t<60 && z==8
    A(i,m,k,l)=0.815;
end
if B_2t>=60 && B_2t<65 && z==8
    A(i,m,k,l)=0.825;
end
if B_2t>=65 && B_2t<70 && z==8
    A(i,m,k,l)=0.85;
end
if B_2t>=70 && B_2t<75 && z==8
    A(i,m,k,l)=0.875;
end
if B_2t>=75 && B_2t<80 && z==8
    A(i,m,k,l)=0.9;
end
if B_2t>=80 && B_2t<85 && z==8
    A(i,m,k,l)=0.925;
end
if B_2t>=85 && B_2t<90 && z==8
    A(i,m,k,l)=0.945;
end

%%%% vane number (z) : 10

if B_2t>=20 && B_2t<25 && z==10
    A(i,m,k,l)=0.8;
end
if B_2t>=25 && B_2t<30 && z==10
    A(i,m,k,l)=0.805;
end
if B_2t>=30 && B_2t<35 && z==10
    A(i,m,k,l)=0.81;
end
if B_2t>=35 && B_2t<40 && z==10
    A(i,m,k,l)=0.82;
end
if B_2t>=40 && B_2t<45 && z==10
    A(i,m,k,l)=0.825;
end
if B_2t>=45 && B_2t<50 && z==10
    A(i,m,k,l)=0.83;
end
```

```

if B_2t>=50 && B_2t<55 && z==10
    A(i,m,k,l)=0.84;
end
if B_2t>=55 && B_2t<60 && z==10
    A(i,m,k,l)=0.845;
end
if B_2t>=60 && B_2t<65 && z==10
    A(i,m,k,l)=0.85;
end
if B_2t>=65 && B_2t<70 && z==10
    A(i,m,k,l)=0.875;
end
if B_2t>=70 && B_2t<75 && z==10
    A(i,m,k,l)=0.895;
end
if B_2t>=75 && B_2t<80 && z==10
    A(i,m,k,l)=0.91;
end
if B_2t>=80 && B_2t<85 && z==10
    A(i,m,k,l)=0.93;
end
if B_2t>=85 && B_2t<90 && z==5
    A(i,m,k,l)=0.965;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calculation of B coefficient of variation s, from
Buseman
    %method
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

t=r2(l)/r1(k);
tt=exp((2*pi*cos(B_2t))/z);
if t>tt
    B=1;
end
if t<=tt
    B=0;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calculation of coefficient of variation s
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

s(i,m,k,l)=(A(i,m,k,l)-(B*(cr2/u2)*tan(B_2t)))/(1-
((cr2/u2)*tan(B_2t)));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calculation of real tangential velocity cu_2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

cu2r=cu2t*s(i,m,k,l);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calculation of real exit blade angle
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

B_2(i,m,k,l)=(atan((u2-cu2r)/cr2)*180)/pi;

```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%First Restriction B=1 & s<1
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    if B==0
        B_2(i,m,k,l)=0;
    end
    if A(i,m,k,l)==0
        B_2(i,m,k,l)=0;
    end
    if s(i,m,k,l)>1
        B_2(i,m,k,l)=0;
    end
    if s(i,m,k,l)<0
        B_2(i,m,k,l)=0;
    end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Second Restriction Aimpellerentrance<Aimplellexit
(~2)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    if (2*pi*r1(k)*b1(m))>(2*pi*(r2(l)+0.004)*b2)
        B_1(i,m,k,l)=0;
        B_2(i,m,k,l)=0;
    end
    if ((2*pi*(r2(l)+0.004)*b2)/(2*pi*r1(k)*b1(m)))>2
        B_1(i,m,k,l)=0;
        B_2(i,m,k,l)=0;
    end
    if B_1(i,m,k,l)==0
        B_2(i,m,k,l)=0;
    end
    if B_2(i,m,k,l)==0
        B_1(i,m,k,l)=0;
    end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Third Restriction A(impellerwidth)<A(pipe-outlet)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    if (2*pi*(r2(l)+0.006)*b2)>=(pi*(rpo^2))
        B_1(i,m,k,l)=0;
        B_2(i,m,k,l)=0;
    end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Final Results Presentation
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if B_1(i,m,k,l)~=0 && B_2(i,m,k,l)~=0
    B_1f(y)=B_1(i,m,k,l);
    B_2f(y)=B_2(i,m,k,l);
    nf(y)=n(i);
    b1f(y)=b1(m);
    r1f(y)=r1(k);
    r2f(y)=r2(l);
end

```

```

        sf(y)=s(i,m,k,l);
        Af(y)=A(i,m,k,l);
        y=y+1;
    end
    r2(l+1)=r2(l)+0.0005;
    xx=xx+1
end
    r1(k+1)=r1(k)+0.0005;
end
    b1(m+1)=b1(m)+0.0001;
end
    n(i+1)=n(i)+50;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Closing
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc

```

Βιβλιογραφία

1. **Song, Xinwei (University of Virginia); Wood, Houston G. (University of Virginia).** *Application of CFX to Implantable Rotary Blood Pumps Suspended by Magnetic Bearings.*
2. **Anderson, John D.** *Computational Fluid Dynamics The Basic with Application.* 1995.
3. **Gülich, Johann Friedrich.** *Centrifugal Pumps.* Berlin : Springer, 2008.
4. **Lobanoff, Val S. and Ross, Robert R.** *Centrifugal Pumps Design & Application.* 1992, Second Edition.
5. **Nakamura, Shoichiro and Yano, Keiji.** *Computational Simulation of Flows in an Entire Centrifugal Heart Pump.* s.l. : International Society for Artificial Organs, 1999.
6. **Techet, A. H.** *Hydrodynamics.* 2005.
7. **Wilcox, David C .** *Turbulence Modeling for CFD.* 1993.
8. **Anderson, J.; Degrez, G.; Degroote, J.; Dick, E.; Grundmann, R.; Vierendeels, J.;** *Computational Fluid Dynamics.* s.l. : Springer, Third Edition.
9. **BEHBAHANI, M.; BEHR, M.; HORMES, M. ; STEINSEIFER, U.; ARORA, D.; CORONADO, O. ; PASQUALI, M.** *A Review of Computational Fluid Dynamics Analysis of Blood Pumps.* s.l. : European Journal of Applied Mathematics, 10 July 2009.
10. **Zhang, Juntao ; Gellman, Barry ; Koert, Andrew ; Dasse, Kurt A. ; Gilbert, Richard J. ; Griffith, Bartley P. ; Wu, Zhongjun J. ;.** *Computational and Experimental Evaluation of the Fluid Dynamics and Hemocompatibility of the CentriMag Blood Pump.* s.l. : International Center for Artificial Organs and Transplantation, 2006.
11. **Miyazoe, Yuki; Sawairi, Toshio; Ito , Kazuyuki; Konishi, Yoshiaki; Yamane, Takashi; Nishida, Masahiro; Masuzawa, Toru; Takiura, Koki; Taenaka, Yoshiyuki.** *Computational Fluid Dynamics Analysis to Establish the Design Process of a Centrifugal Blood Pump.* s.l. : International Society for Artificial Organs, 1998.
12. **Tsukamoto, Yuki ; Ito, Kazuyuki ; Sawairi, Toshio ; Konishi, Yoshiaki; Yamane, Takashi ; Nishida, Masahiro ; Masuzawa, Toru ; Tsukiya, Tomonori ; Endo, Seiko ; Taenaka, Yoshiyuki ;.** *Computational Fluid Dynamics Analysis of a Centrifugal Blood Pump with Washout Holes.* s.l. : International Society for Artificial Organs, 2000.
13. **Burgreen, Greg W. ; Loree II, Howard M.; Bourque, Kevin; Dague, Charles ; Poirier, Victor L.; Farrar, David; Hampton, Edward ; Wu, Jon Z.; Gempp, Thomas M.; Schöb, Reto ;.** *Computational Fluid Dynamics Analysis of a Maglev*

- Centrifugal Left Ventricular Assist Device*. s.l. : International Center for Artificial Organs and Transplantation, 2004.
14. **Kido, Kazuyuki; Hoshi, Hideo ; Watanabe, Nobuo ; Kataoka, Hiroyuki ; Ohuchi, Katsuhiko ; Asama, Junichi ; Shinshi, Tadahiko ; Yoshikawa, Masaharu ; Takatani, Setsuo ;**. *Computational Fluid Dynamics Analysis of the Pediatric Tiny Centrifugal Blood Pump (TinyPump)*. s.l. : International Center for Artificial Organs and Transplantation, 2006.
15. **Wu, Jingchun ; Paden, Bradley E. ; Borovetz, Harvey S. ; Antaki, James F.** *Computational Fluid Dynamics Analysis of Blade Tip Clearances on Hemodynamic Performance and Blood Damage in a Centrifugal Ventricular Assist Device*. s.l. : International Center for Artificial Organs and Transplantation and Wiley Periodicals, Inc., 2009.
16. **Legendre, Daniel ; Antunes, Pedro ; Bock, Eduardo ; Andrade, Aron; Biscegli, José F.; Ortiz, Jayme Pinto;** *Computational Fluid Dynamics Investigation of a Centrifugal Blood Pump*. s.l. : International Center for Artificial Organs and Transplantation and Blackwell Publishing, 2008.
17. **Song, Xinwei; Throckmorton, Amy L. ; Wood, Houston G.; Antaki, James F. ; Olsen, Don B.;**. *Computational Fluid Dynamics Prediction of Blood Damage in a Centrifugal Pump*. s.l. : International Society for Artificial Organs, 2003.
18. **Zhou, Weidong ; Zhao, Zhimei ; Lee, T. S.; Winoto, S. H.** *Investigation of Flow Through Centrifugal Pump Impellers Using Computational Fluid Dynamics*. s.l. : International Journal of Rotating Machinery, 2003.
19. **Chan, W. K.; Wong, Y. W.; Ding, Y.; Chua, L. P.; Yu, S. C.M.;**. *Numerical Investigation of the Effect of Blade Geometry on Blood Trauma in a Centrifugal Blood Pump*. s.l. : International Society for Artificial Organs, 2002.
20. **SONG, GUOLIANG ; CHUA, LEOK POH ; LIM, TAU MENG;**. *Numerical Study of a Centrifugal Blood Pump With Different Impeller Profiles*. s.l. : ASAIO Journal, 2010.
21. **Yu, S. C.M. ; Ng, B. T.H. ; Chan, W. K.; Chua, L. P.** *The flow patterns within the impeller passages of a centrifugal blood pump model*. s.l. : Medical Engineering & Physics 22, 2000.
22. **Fraser, Katharine H.; Taskin, M. Ertan ; Griffith, Bartley P.; Wu, Zhongjun J.** ;. *The Use of Computational Fluid Dynamics in the Development of Ventricular Assist Devices*. s.l. : Med Eng Phys., 2011.
23. **Bludszuweit, C.;** *Three-Dimensional Numerical Prediction of Stress Loading of Blood Particles in a Centrifugal Pump*. s.l. : International Society for Artificial Organs, 1995.
24. **Treichler, J. ; Rosenow, S. E.; Damm, G. ; Naito, K. ; Ohara, Y. ; Mizuguchi, K. ; Makinouchi, K. ; Takatani, S. ; Nose, Y. ;**. *A Fluid Dynamic Analysis of a*

Rotary Blood Pump for Design Improvement. s.l. : International Society for Artificial Organs, 1993.

25. **Arvand, Arash; Hahn, Nicole ; Hormes, Marcus ; Akdis, Mustafa; Martin, Michael ; Reul, Helmut ;.** *Comparison of Hydraulic and Hemolytic Properties of Different Impeller Designs of an Implantable Rotary Blood Pump by Computational Fluid Dynamics.* s.l. : International Center for Artificial Organs and Transplantation, 2004.

26. **Demir, Onur ; Biyikli, Emre ; Lazoglu, Ismail ; Kucukaksu, Suha ;.** *Design of a Centrifugal Blood Pump: Heart Turcica Centrifugal.* s.l. : Artif Organs, Vol. 35, No. 7, 2011.

27. **Jahanmir, Said ; Hunsberger, Andrew Z. ; Ren, Zhaohui ; Heshmat, Hooshang; Heshmat, Crystal; Tomaszewski, Michael J.; Walton, James F.;** *Design of a Small Centrifugal Blood Pump With Magnetic Bearings.* s.l. : International Center for Artificial Organs and Transplantation and Wiley Periodicals, Inc., 2009.

28. **Kangvanskol, Kitipong ; Bunyajitradulya, Asi;.** *Preliminary Hydraulic Design and Test of A Centrifugal Blood Pump: Effects of Reynolds Number and Blade Number.* Krabi : The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering, 2011.

29. **Throckmorton, A., et al., et al.** *Design of a continuous flow centrifugal pediatric ventricular assist device.* s.l. : The international Journal of Artificial Organs, Vol 26, no.11, 2003.

30. **Antaki, James F; Ghattas, Omar; Burgreen , Greg W.; He, Beichang;** *Computational Flow Optimization of Rotary Blood Pump Components.* s.l. : International Society for Artificial Organs, 1995.

31. **Masuzawa, Toru; Tsukiya, Tomonori; Endo, Seiko; Tatsumi, Eisuke; Taenaka, Yoshiyuki; Takano, Hisateru; Yamane, Takashi; Nishida, Masahiro; Asztalos, Balazs; Miyazoe, Yuki; Ito , Kazuyuki; Sawairi, Toshio; Konishi, Yoshiaki;** *Development of Design Methods for a Centrifugal Blood Pump with a Fluid Dynamic Approach: Results in Hemolysis Tests.* s.l. : International Society for Artificial Organs, 1999.

32. **S. L. Dixon, B.Eng.,.** *Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery.* 1998.

33. **Ηλίας Κ. Καραμπίνος.** *ΚΑΡΔΙΑΚΗ ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑ: ΑΠΟ ΤΟ Α ΣΤΟ Ω.*

34. **Bludszuweit, C. ;.** *Model for a General Mechanical Blood Damage Prediction.* s.l. : International Society for Artificial Organs, 1995 .

35. **BEHBAHANI, M. ; BEHR, M.; HORMES, M. ; STEINSEIFER, U. ; ARORA, D. ; CORONADO, O. ; PASQUALI, M. ;.** *A Review of Computational Fluid Dynamics Analysis of Blood Pumps.* s.l. : European Journal of Applied Mathematics 20, 2009.

36. **Zhang, Juntao; Gellman, Barry; Koert, Andrew; Dasse, Kurt A.; Gilbert, Richard J. ; Griffith, Bartley P.; Wu, Zhongjun J. ;.** *Computational and Experimental Evaluation of the Fluid Dynamics and Hemocompatibility of the CentriMag Blood Pump.* s.l. : International Center for Artificial Organs and Transplantation, 2006.
37. **Wu, Jingchun ; Paden, Bradley E.; Borovetz, Harvey S.; Antaki, James F. ;.** *Computational Fluid Dynamics Analysis of Blade Tip Clearances on Hemodynamic Performance and Blood Damage in a Centrifugal Ventricular Assist Device.* s.l. : International Center for Artificial Organs and Transplantation and Wiley Periodicals, Inc., 2009.
38. **Song, Xinwei; Throckmorton, Amy L.; Wood, Houston G.; Antaki, James F. ; Olsen, Don B. ;.** *Computational Fluid Dynamics Prediction of Blood Damage in a Centrifugal Pump.* s.l. : International Society for Artificial Organs, 2003.
39. **Pinotti, Marcos ; Rosa, Eugenio S.;** *Computational Prediction of Hemolysis in a Centrifugal Ventricular Assist Device.* s.l. : International Society for Artificial Organs, 1995.
40. **Wu, Jingchun ; Antaki, James F. ; Snyder, Trevor A.; Wagner, William R.; Borovetz, Harvey S.; Paden, Bradley E.;** *Design Optimization of Blood Shearing Instrument by Computational Fluid Dynamics.* s.l. : International Center for Artificial Organs and Transplantation, 2005.
41. **SONG, GUOLIANG; CHUA, LEOK POH ; LIM, TAU MENG;** *Numerical Study of a Centrifugal Blood Pump With Different Impeller Profiles.* s.l. : ASAIO Journal, 2010.
42. **Yu, S. C.M.; Ng, B. T.H.; Chan, W. K. ; Chua, L. P.;** *The flow patterns within the impeller passages of a centrifugal blood pump model.* s.l. : Medical Engineering & Physics 22, 2000.
43. **Naito, Kozo; Mizuguchi, Kazumi; Nose, Yukihiko ;.** *The Need for Standardizing the Index of Hemolysis.* s.l. : International Society for Artificial Organs, 1994.
44. **Wu, Jingchun; Paden, Bradley E.; Borovetz, Harvey S. ; Antaki, James F.;** *Computational Fluid Dynamics Analysis of Blade Tip Clearances on Hemodynamic Performance and Blood Damage in a Centrifugal Ventricular Assist Device.* s.l. : International Center for Artificial Organs and Transplantation and Wiley Periodicals, Inc., 2009.
45. **Song, Xinwei ; Throckmorton, Amy L. ; Wood, Houston G.; Antaki, James F. ; Olsen, Don B.;** *Computational Fluid Dynamics Prediction of Blood Damage in a Centrifugal Pump.* s.l. : International Society for Artificial Organs, 2003.
46. **Wu, Jingchun ; Antaki, James F.; Snyder, Trevor A. ; Wagner, William R. ; Borovetz, Harvey S.; Paden, Bradley E.;** *Design Optimization of Blood Shearing Instrument by Computational Fluid Dynamics.* s.l. : International Center for Artificial Organs and Transplantation, 2005.

47. **TURTON, R. K.** ;. *Principles of Turbomachinery*. 1995 Second edition.
48. **Timms, Daniel** ;. *A review of clinical ventricular assist devices*. Medical Engineering & Physics 33 : s.n., 2011.
49. **Chan, Weng-Kong ; Wong, Yew-Wah** ;. *A Review of Leakage Flow in Centrifugal Blood Pumps*. International Center for Artificial Organs and Transplantation : s.n., 2006.
50. **GREGORY, SHAUN D.** , και συν., και συν. *Biventricular Assist Devices: A Technical Review*. s.l. : Annals of Biomedical Engineering, Vol. 39, No. 9, 2011.
51. **Reul, Helmut M; Akdis, Mustafa** ;. *Blood pumps for circulatory support*. s.l. : Perfusion , 2000.
52. **Curtis, Jack J. ; Walls, Joseph T. ; Wagner-Mann, Colette C.; Schmaltz, Richard A. ; Demmy, Todd L.; McKenney, Charlotte A.; Mann, Fred A.**;. *Centrifugal Pumps: Description of Devices and Surgical Techniques*. s.l. : The Society of Thoracic Surgeons, 1999.
53. **BEHBAHANI, M.; BEHR, M. ; HORMES, M. ; STEINSEIFER, U.; ARORA, D.; CORONADO, O.; PASQUALI, M.**;. *A Survey in Mathematics for Industry A review of computational fluid dynamics analysis of blood pumps*. Cambridge University : Euro. Jnl of Applied Mathematics, 2009.
54. **Norman, John C.**;. *Mechanical Ventricular Assistance: A Review*. s.l. : 1981 , International Society for Artificial Organs.
55. **Yamane, Takashi** ;. *The present and future state of nonpulsatile artificial heart technology*. s.l. : J Artif Organs, 2002.
56. **Zhang, Jiafeng ; Zhang, Pei ; Fraser, Katharine H.; Griffith, Bartley P.; Wu, Zhongjun J.** ;. *Comparison and Experimental Validation of Fluid Dynamic Numerical Models for a Clinical Ventricular Assist Device*. s.l. : International Center for Artificial Organs and Transplantation and Wiley Periodicals, Inc., 2013.
57. **Γούλας, Απόστολος Κ.**;. *Βασικές Αρχές Στροβιλομηχανών*. s.l. : Γιαχούδη.
58. **Παπαντώνης, Δημήτριος**;. *Υδροδυναμικές Εγκαταστάσεις - Σωληνώσεις - Αντλιοστάσια - Υδραυλικό Πλήγμα*. Αθήνα : Εκδόσεις Συμεών, 1998.
59. **Γούλας, Απόστολος Κ.**;. *Μηχανική Ρευστών*.

