



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Ε.Μ.Π**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Παραμετρικός σχεδιασμός του σπειροειδούς κελύφους  
υδροτροβίλων αντίδρασης και διερεύνηση των  
χαρακτηριστικών της ροής σε αυτό με λογισμικό  
υπολογιστικής ρευστομηχανικής**



**Σταύρος Σταθάκης του Ιωάννη**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Αναγνωστόπουλος**

Αθήνα  
Ιούνιος, 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Ε.Μ.Π  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Παραμετρικός σχεδιασμός του σπειροειδούς κελύφους  
υδροτροβίλων αντίδρασης και διερεύνηση των  
χαρακτηριστικών της ροής σε αυτό με λογισμικό  
υπολογιστικής ρευστομηχανικής

του  
Σταύρου Σταθάκη

Αθήνα  
Ιούνιος, 2014



## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Αναγνωστόπουλο Ιωάννη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο. Επίσης ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Κασάνο Ιωάννη για τη συνεργασία και την καθοδήγηση σε όλα τα στάδια της εργασίας που με προσέφερε. Τέλος ευχαριστώ του γονείς μου Γιάννη και Χριστιάνα για την υποστήριξή τους σε ολόκληρη την διάρκεια των σπουδών μου.



## Περίληψη

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και έχει ως στόχο να συμβάλει στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του σπειροειδούς κελύφους υδροστροβίλων αντίδρασης. Για τη σχεδίαση των μοντέλων του σπειροειδούς κελύφους αναπτύχθηκε αλγόριθμος σε κώδικα Fortran ο οποίος για δεδομένο σημείο λειτουργίας (παροχή και ύψος) του υδροστροβίλου, δημιουργεί τον γεωμετρικό τόπο των σημείων που αποτελούν το σκελετό του. Η μοντελοποίηση της γεωμετρίας του σπειροειδούς κελύφους έγινε με γνώμονα να παραμετροποιηθούν πλήρως τα τριδιάστατα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά έτσι ώστε να μπορεί να προκύψει κάθε δυνατή γεωμετρία μεταβάλλοντας συγκεκριμένες μεταβλητές σχεδιασμού. Η τελική διαμόρφωση του μοντέλου του σπειροειδούς κελύφους προκύπτει από το σχεδιαστικό πρόγραμμα ANSYS Design Modeler του πακέτου εφαρμογών του εμπορικού λογισμικού ANSYS Workbench. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε αριθμητική επίλυση της ροής η οποία αναπτύσσεται σε σπειροειδές κέλυφος με βάση τις κύριες διαστάσεις του κελύφους του εργαστηριακού υδροστροβίλου Francis που είναι εγκατεστημένος στο εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών της Σχολής. Επιλέχθηκαν τρία διαφορετικά μοντέλα σπειροειδούς κελύφους που μπορούν να εφαρμοστούν στον εργαστηριακό υδροστροβίλο τα οποία προέκυψαν μεταβάλλοντας για κάθε ένα από αυτά κάποιες από τις γεωμετρικές τους παραμέτρους. Η αριθμητική επίλυση της ροής στις γεωμετρίες αυτές πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού ANSYS Fluent. Έτσι, έγινε δυνατή η ανάλυση και μελέτη των χαρακτηριστικών της ροής στο εσωτερικό του σπειροειδούς κελύφους, καθώς και η επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού του. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης αξιολογήθηκαν με κριτήριο την μείωση των υδραυλικών απωλειών αλλά και την ομαλοποίηση της κατανομής των ταχυτήτων και των πιέσεων στο σπειροειδές κέλυφος και ειδικότερα στο τμήμα εξόδου της στεφάνης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στο σπειροειδές κέλυφος με ελαφρώς μεγαλύτερες διαστάσεις και διαμόρφωση ομαλοποιημένων άκρων (Flaired Rims) στη στεφάνη, παρουσιάζει μια μικρή μείωση των ολικών απωλειών σε σχέση με αυτό που έχει ελαφρώς μικρότερες διαστάσεις και δεν διαθέτει στεφάνη με ομαλοποιημένα άκρα. Παρατηρείται επίσης ότι η διαμόρφωση της στεφάνης με ομαλοποιημένα άκρα είναι σημαντική για την εξομάλυνση της ροής κατά μήκος της διάταξης του σπειροειδούς κελύφους και τη δημιουργία ομοιόμορφης κατανομής της ταχύτητας εξόδου προς τα οδηγητικά και τα ρυθμιστικά πτερύγια.



## **Abstract**

The present diploma thesis was developed at the School of Mechanical Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) and aims to contribute to the optimization of the design of the spiral casing in reaction hydroturbines. For the design of the spiral casing models, an algorithm written in FORTRAN code was developed that creates the points which form the frame of the spiral casing in three-dimensional (Euclidean) space. In order to develop the geometry of the spiral casing with customizable characteristics all geometrical variables were imported in a designing model. In order to create various geometries by modifying certain geometry variables, the modeling of the spiral casing was developed so that every three dimensional geometrical characteristic is customizable. The final configuration of every spiral casing model is performed using the designing software ANSYS Design Modeler which is part of the commercial software package ANSYS Workbench. A numerical solution was conducted for the flow that is created in the spiral casing, with geometrical characteristic that match those of a Francis hydroturbine. The hydroturbine is located in the Laboratory of Hydraulics Turbomachines (LHT) of NTUA. Three different spiral casing models were formed by modifying some of their geometrical characteristics in order to fit the dimensions of the laboratory hydroturbine. The numerical solution of the flow in the specified geometries of the spiral casing models was conducted using the commercial software ANSYS Fluent. Thus it was made possible to analyze and study the flow characteristics in the spiral casing and the impact of its design parameters. The results from the numerical solution were evaluated in respect of the reduction of hydraulic losses and the smoothness of the velocity and pressure profiles within the spiral casing. Also emphasis of the flow characteristics is given at the outlet of the stay vanes. According to the results it is shown that the spiral casing that has significantly larger stay vanes with flared rim layout and overall size also has smaller total hydraulic losses compared to that without stay vanes with flared rim layout and smaller overall size. It is also pointed out that the development of stay vanes with flared rim layout contributes to the overall smoothing of the flow within the spiral casing. Furthermore, the rim layout also contributes to the more uniform profile of the flow velocity and pressure at the outlet of the stay and the guide vanes.





## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	v
Κατάλογος πινάκων .....	xii
Κατάλογος εικόνων.....	xiii
Κατάλογος μεταβλητών.....	xxii
1 Εισαγωγή.....	1
2 Τύποι και λειτουργία υδροστροβίλων.....	5
2.1 Κατάταξη των υδροστροβίλων .....	5
2.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως .....	5
2.2.1 Τμήμα εισόδου.....	8
2.2.2 Δρομέας.....	10
2.2.3 Τμήμα εξόδου .....	11
3 Υδραυλική σχεδίαση του σπειροειδούς κελύφους υδροστροβίλου αντίδρασης .....	13
3.1.1 Ανάλυση της ροής στο σπειροειδές κέλυφος.....	18
3.1.2 Ανάπτυξη της μεθόδου διατήρησης της συστροφής .....	24
3.1.3 Προσδιορισμός της μέσης ταχύτητας στο τμήμα εισόδου.....	27
3.2 Υπολογισμός των διαστάσεων του σπειροειδούς κελύφους.....	29
3.2.1 Υπολογιστικές σχέσεις της γαωμετρίας ομαλοποιημένων άκρων.....	30
4 Ανάπτυξη αλγορίθμου σε κώδικα Fortran .....	37
5 Διαμόρφωση της γλωττίδας στο σπειροειδές κέλυφος .....	47
6 Αριθμητική Μοντελοποίηση.....	49
6.1 Εισαγωγή Γενικά Χαρακτηριστικά.....	49
6.2 Εξισώσεις Navier– Stokes.....	50
6.3 Μοντέλο $k-\epsilon$ .....	51



6.4	Συναρτήσεις τοιχώματος .....	52
6.5	Λογισμικό αριθμητικής επίλυσης και προσομοίωσης (Fluent).....	54
7	Σχεδιασμός του μοντέλου με χρήση του ANSYS DM.....	56
8	Διαμόρφωση του υπολογιστικού μοντέλου με χρήση του ANSYS MESH.....	62
9	Διαδικασία επίλυσης.....	66
10	Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης .....	70
10.1	Επιλογή υπολογιστικού πλέγματος.....	72
10.2	Αποτελέσματα των μοντέλων σπειροειδούς κελύφους .....	78
10.2.1	Μοντέλο Κελύφους Α1.....	80
10.2.2	Μοντέλο Κελύφους Β2.....	94
10.2.3	Μοντέλο Κελύφους Γ2.....	107
10.3	Σύγκριση των αποτελεσμάτων.....	118
11	Συμπεράσματα και Προτάσεις .....	127
	Βιβλιογραφία.....	129
	Παράρτημα Α.....	131
	Παράρτημα Β.....	140

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 4.1 Δεδομένα εισόδου το αλγόριθμου.....	37
Πίνακας 10.1 Αποτελέσματα μεταβολής της ολικής πίεσης για διάφορα υπολογιστικά πλέγματα.....	72
Πίνακας 10.2 Δεδομένα που εισάγονται στον αλγόριθμο για τα μοντέλα A1, B2 και Γ2.....	78
Πίνακας 10.3 Γενικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μοντέλων A1, B2 και Γ2.....	79
Πίνακας 10.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής εισόδου των μοντέλων A1, B2 και Γ2.....	79
Πίνακας 10.5 Τελικά αποτελέσματα μεταβολής της ολικής και στατικής πίεσης για το μοντέλο A1.....	81
Πίνακας 10.6 Τελικά αποτελέσματα μεταβολής της ολικής και στατικής πίεσης για το μοντέλο B1.....	95
Πίνακας 10.7 Τελικά αποτελέσματα μεταβολής της ολικής και στατικής πίεσης για το μοντέλο Γ2.....	108
Πίνακας 10.8 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου Π συνάρτηση της γωνίας περιέλιξης.....	122

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1 Τυπική διαμόρφωση υδροστροβίλου Francis (Παπαντώνης, Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες - Υδροστρόβιλοι Υδροδυναμικές Μεταδόσεις, 2008).....	6
Εικόνα 2.2 Σχηματική διαμόρφωση υδροστροβίλου α) Francis ,β) Kaplan και γ) Deriaz (Παπαντώνης, Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες - Υδροστρόβιλοι Υδροδυναμικές Μεταδόσεις, 2008) .....	7
Εικόνα 2.3 Στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων ακτινικής ροής (Παπαντώνης, Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες - Υδροστρόβιλοι Υδροδυναμικές Μεταδόσεις, 2008).....	10
Εικόνα 2.4 Δρομέας τύπου α) Francis και β) Kaplan (Παπαντώνης, Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες - Υδροστρόβιλοι Υδροδυναμικές Μεταδόσεις, 2008) .....	11
Εικόνα 2.5 Σχηματική Απεικόνιση Αγωγού Απαγωγής Υδροστροβίλου Αντιδράσεως Οριζοντίου Άξονα (Παπαντώνης, Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες - Υδροστρόβιλοι Υδροδυναμικές Μεταδόσεις, 2008).....	12
Εικόνα 3.1 Συγκολλητό σπειροειδές κέλυφος.....	14
Εικόνα 3.2 Χυτευτό σπειροειδές κέλυφος.....	14
Εικόνα 3.3 Διαμόρφωση τμημάτων τομής σπειροειδούς κελύφους από σκυρόδεμα μορφής T και μορφής b (Krishna, 1997).....	15
Εικόνα 3.4 Διαφορετικές μορφές του σπειροειδούς κελύφους (Krishna, 1997).....	16
Εικόνα 3.5 Ολική και μερική διαμόρφωση του σπειροειδούς κελύφους (Krishna, 1997) .....	16
Εικόνα 3.6 Η διανομή της ταχύτητας κατά μήκος της περιφέρειας της στεφάνης σε μερικό σπειροειδές κέλυφος γωνίας περιέλιξης 180° (Krishna, 1997) .....	17
Εικόνα 3.7 Η γωνία περιέλιξης συναρτήσει της μέγιστης υδραυλικής πτώσης (Krishna, 1997) .....	17
Εικόνα 3.8 Μεσημβρινή τομή του υδροστροβίλου.....	19
Εικόνα 3.9 Γραμμές ροής σε αξονοσυμμετρικό χώρο κατάντι του δρομέα.....	20
Εικόνα 3.10 Κύρια γεωμετρικά μεγέθη μεσημβρινής τομής του σπειροειδούς κελύφους.....	22
Εικόνα 3.11 Αδιάστατη μέση ταχύτητα συνάρτηση του ειδικού αριθμού στροφών.....	23

Εικόνα 3.12 Η κατανομή της ταχύτητας και η διαμόρφωση δευτερεύουσας ροής στο σπειροειδές κέλυφος.....	24
Εικόνα 3.13 Μεσημβρινή τομή σπειροειδούς κελύφους ακτινικού στροβίλου.....	25
Εικόνα 3.14 Μεσημβρινή τομή σπειροειδούς κελύφους.....	26
Εικόνα 3.15 Μέση ταχύτητα στο τμήμα εισόδου του κελύφους συναρτήσει της υδραυλικής πτώσης (Krishna, 1997).....	28
Εικόνα 3.16 Συντελεστής συσχέτισης της μέσης ταχύτητας στο τμήμα εισόδου (Krishna, 1997) .....	28
Εικόνα 3.17 Ομαλοποιημένα άκρα (flared rims covers) και άκρα παράλληλων πλακών (parallel covers).....	29
Εικόνα 3.18 Βασικά μεγέθη διαστάσεων κυκλικής γεωμετρίας.....	30
Εικόνα 3.19 Μεταβολή της κυκλικής γεωμετρίας σε ελλειπτική.....	32
Εικόνα 3.20 Βασικά μεγέθη διαστάσεων ελλειπτικής γεωμετρίας.....	33
Εικόνα 3.21 Υπολογισμός επιφάνειας ελλειπτικής γεωμετρίας A1.....	33
Εικόνα 3.22 Υπολογισμός επιφάνειας ελλειπτικής γεωμετρίας A2.....	34
Εικόνα 3.23 Υπολογισμός επιφάνειας ελλειπτικής γεωμετρίας A3.....	35
Εικόνα 4.1 Βασικές γεωμετρικές παράμετροι κατά την αξονική τομή του σπειροειδούς κελύφους.....	38
Εικόνα 4.2 Βασικές γεωμετρικές παράμετροι κατά την μεσημβρινή τομή του σπειροειδούς κελύφους.....	38
Εικόνα 4.3.....	39
Εικόνα 4.4 Διαμόρφωσης προσαρμοσμένης γεωμετρίας A κατά την μεσημβρινή τομή.....	40
Εικόνα 4.5 Διαμόρφωσης προσαρμοσμένης γεωμετρίας B κατά την μεσημβρινή τομή.....	41
Εικόνα 4.6 Διάγραμμα πολυωνυμικής παρεμβολής από αλγόριθμο υπολογισμών.....	42
Εικόνα 4.7 Αξονική τομή σπειροειδούς κελύφους από αλγόριθμο υπολογισμών.....	42
Εικόνα 4.8 Μεσημβρινές τομές σπειροειδούς κελύφους από αλγόριθμο υπολογισμών.....	43

Εικόνα 4.9 Τρισδιάστατη απεικόνιση των μεσημβρινών τομών του σπειροειδούς κελύφους από αλγόριθμο υπολογισμών.....	43
Εικόνα 4.10 Μοντέλα χωρίς σταράνη (κατηγορία Α).....	44
Εικόνα 4.11 Μοντέλα με μεσαίο μέγεθος σταράνης (κατηγορία Β).....	45
Εικόνα 4.12 Μοντέλα με μεγάλο μέγεθος σταράνης (Κατηγορία Γ).....	46
Εικόνα 5.1 Διαμόρφωση της γλωττίδας στο σπειροειδές κέλυφος με Α) βέλτιστη μορφή (optimum tongue) Β) μη βέλτιστη μορφή (non optimum tongue) (Misa, 1993) .....	47
Εικόνα 5.2 Κατανομή της κλίσης της ταχύτητας κατά την έξοδο από το σπειροειδές κέλυφος για βέλτιστη και μη βέλτιστη σχεδίαση της γλωττίδας (Misa, 1993).....	48
Εικόνα 7.1 Στάδιο 1 κατασκευή του σκελετού του σπειροειδούς κελύφους .....	57
Εικόνα 7.2 Στάδιο 2 κατασκευή του αγωγού εισόδου του σπειροειδούς κελύφους.....	57
Εικόνα 7.3 Στάδιο 3 κατασκευή του πρώτου τμήματος του σπειροειδούς κελύφους .....	58
Εικόνα 7.4 Στάδιο 4 κατασκευή του δεύτερου τμήματος του σπειροειδούς κελύφους.....	59
Εικόνα 7.5 Στάδιο 5 κατασκευή της γλωττίδας (περύγιο σταράνης).....	60
Εικόνα 7.6 Στάδιο 6 ορισμός των παραμέτρων της ροής .....	61
Εικόνα 8.1 ) Ζώνη ελέγχου για τοπική πύκνωση.....	62
Εικόνα 8.2 Τελικό Υπολογιστικό Πλέγμα.....	63
Εικόνα 8.3 Διάγραμμα κατανομής της κυρτότητας των κελιών .....	65
Εικόνα 9.1 Διάγραμμα σύγκλισης των συντελεστών για το σπειροειδές κέλυφος.....	68
Εικόνα 9.2 Διάγραμμα σύγκλισης της ολικής πίεσης στην έξοδο του σπειροειδούς κελύφους .....	69
Εικόνα 10.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση των επιφανειών ελέγχου.....	70
Εικόνα 10.2 Γραμμές ελέγχου του κελύφους κατά την μεσημβρινή τομή.....	71
Εικόνα 10.3 Τρισδιάστατη απεικόνιση των γραμμών ελέγχου.....	71
Εικόνα 10.4 Αρχικό υπολογιστικό πλέγμα (πλέγμα 1) του σπειροειδούς κελύφους.....	73
Εικόνα 10.5 Τελικό υπολογιστικό πλέγμα (πλέγμα 2) του σπειροειδούς κελύφους.....	74

Εικόνα 10.6 Αρχική διαμόρφωση κελιών της στεφάνης.....	75
Εικόνα 10.7 Τελική διαμόρφωση κελιών της στεφάνης.....	75
Εικόνα 10.8 Τομή κατά x και y για A) και B) αντίστοιχα για το μοντέλο κελύφους A1 .....	80
Εικόνα 10.9 Περίγραμμα στατικής πίεσης κατά την τομή $z=0$ για το μοντέλο A1.....	84
Εικόνα 10.10 Περιγράμματα στατικής πίεσης για γωνία περιέλιξης $90^\circ$ και $270^\circ$ για το μοντέλο A1 .....	84
Εικόνα 10.11 Περίγραμμα ολικής ταχύτητας κατά την τομή $z=0$ για το μοντέλο A1 .....	87
Εικόνα 10.12 Περίγραμμα ολικής ταχύτητας κατά την μεσημβρινή τομή $yy'$ για γωνία περιέλιξης $90^\circ$ και $270^\circ$ για το μοντέλο A1.....	87
Εικόνα 10.13 Διανύσματα ολικής ταχύτητας κοντά στην διατομή εξόδου του κελύφους για γωνία περιέλιξης $90^\circ$ και $270^\circ$ για το μοντέλο A1.....	88
Εικόνα 10.14 Διανύσματα ακτινικής ταχύτητας κατά μήκος ακτινικών γραμμών ελέγχου κοντά στην διατομή εξόδου του κελύφους για γωνία περιέλιξης $90^\circ$ και $270^\circ$ για το μοντέλο A1.....	88
Εικόνα 10.15 Περίγραμμα και διανύσματα ταχύτητας στη διατομή εξόδου του κελύφους για το μοντέλο A1 .....	92
Εικόνα 10.16 Τομή κατά x και y για A) και B) αντίστοιχα για το μοντέλο κελύφους B2.....	94
Εικόνα 10.17 Περίγραμμα στατικής πίεσης κατά την τομή $z=0$ για το μοντέλο B1.....	98
Εικόνα 10.18 Περιγράμματα στατικής πίεσης για γωνία περιέλιξης $90^\circ$ και $270^\circ$ για το μοντέλο B1 .....	98
Εικόνα 10.19 Περίγραμμα ολικής ταχύτητας κατά την τομή $z=0$ για το μοντέλο B1 .....	100
Εικόνα 10.20 Περίγραμμα ολικής ταχύτητας για γωνία περιέλιξης $90^\circ$ και $270^\circ$ για το μοντέλο B1 .....	100
Εικόνα 10.21 Διανύσματα ολικής ταχύτητας κοντά στην διατομή εξόδου του κελύφους για γωνία περιέλιξης $90^\circ$ και $270^\circ$ για το μοντέλο B1 .....	101
Εικόνα 10.22 Διανύσματα ακτινικής ταχύτητας κατά μήκος ακτινικών γραμμών ελέγχου κοντά στην διατομή εξόδου του κελύφους για γωνία περιέλιξης $90^\circ$ και $270^\circ$ για το μοντέλο B1 .....	101

Εικόνα 10.23 Περίγραμμα και διανύσματα ταχύτητας στη διατομή εξόδου του κελύφους για το μοντέλο B1.....	105
Εικόνα 10.24 Τομή κατά x και y για A) και B) αντίστοιχα για το μοντέλο κελύφους Γ2.....	107
Εικόνα 10.25 Περίγραμμα στατικής πίεσης κατά την τομή z=0 για το μοντέλο Γ2.....	110
Εικόνα 10.26 Περιγράμματα στατικής πίεσης για γωνία περιέλιξης 90° και 270° για το μοντέλο.....	110
Εικόνα 10.27 Περίγραμμα ολικής ταχύτητας κατά την τομή z=0 για το μοντέλο Γ2.....	112
Εικόνα 10.28 Περίγραμμα ολικής ταχύτητας για γωνία περιέλιξης 90° και 270° για το μοντέλο Γ2.....	112
Εικόνα 10.29 Διανύσματα ολικής ταχύτητας κοντά στην διατομή εξόδου του κελύφους για γωνία περιέλιξης 90° και 270° για το μοντέλο Γ2.....	113
Εικόνα 10.30 Διανύσματα ακτινικής ταχύτητας κατά μήκος ακτινικών γραμμών ελέγχου κοντά στην διατομή εξόδου του κελύφους για γωνία περιέλιξης 90° και 270° για το μοντέλο Γ2.....	113
Εικόνα 10.31 Περίγραμμα και διανύσματα ταχύτητας στη διατομή εξόδου του κελύφους για το μοντέλο Γ2.....	116

## Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 10.1 Μεταβολή της ολικής πίεσης συναρτήσει του αριθμού των στοιχείων των πλεγμάτων.....	72
Διάγραμμα 10.2 Ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ελέγχου ΔΔ για γωνία περιέλιξης $180^\circ$ .....	76
Διάγραμμα 10.3 Ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ελέγχου ΕΕ για γωνία περιέλιξης $180^\circ$ .....	77
Διάγραμμα 10.4 Καμπύλη μεταβολής της ολικής πίεσης του σπειροειδούς κελύφους συναρτήσει της παροχής όγκου του ρευστού για το μοντέλο Α1.....	81
Διάγραμμα 10.5 Κατανομή ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ για το μοντέλο Α1.....	82
Διάγραμμα 10.6 Κατανομή στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ για το μοντέλο Α1.....	82
Διάγραμμα 10.7 Κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ για το μοντέλο Α1.....	85
Διάγραμμα 10.8 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ για το μοντέλο Α1.....	85
Διάγραμμα 10.9 Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ για το μοντέλο Α1.....	89
Διάγραμμα 10.10 Κατανομή της στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ για το μοντέλο Α1.....	89
Διάγραμμα 10.11 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ για το μοντέλο Α1.....	91
Διάγραμμα 10.12 Κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ για το μοντέλο Α1.....	91
Διάγραμμα 10.13 Κατανομή της περιφερειακής ολικής και στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου Π για το μοντέλο Α1.....	93



Διάγραμμα 10.14 Κατανομή της περιφερειακής εφαπτομενικής και ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου Π για το μοντέλο Α1.....	93
Διάγραμμα 10.15 Καμπύλη μεταβολής της ολικής πίεσης του σπειροειδούς κελύφους συναρτήσει της παροχής όγκου του ρευστού για το μοντέλο Β1.....	96
Διάγραμμα 10.16 Κατανομή ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης 0°, 90°, 180°, 270° για το μοντέλο Β1 .....	97
Διάγραμμα 10.17 Κατανομή στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης 0°, 90°, 180°, 270° για το μοντέλο Β1 .....	97
Διάγραμμα 10.18 Κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης 0°, 90°, 180°, 270° για το μοντέλο Β1 .....	99
Διάγραμμα 10.19 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης 0°, 90°, 180°, 270° για το μοντέλο Β1 .....	99
Διάγραμμα 10.20 Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης 0°, 90°, 180°, 270° για το μοντέλο Β1.....	102
Διάγραμμα 10.21 Κατανομή της στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης 0°, 90°, 180°, 270° για το μοντέλο Β1.....	102
Διάγραμμα 10.22 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης 0°, 90°, 180°, 270° για το μοντέλο Β1.....	104
Διάγραμμα 10.23 Κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης 0°, 90°, 180°, 270° για το μοντέλο Β1.....	104
Διάγραμμα 10.24 Κατανομή της περιφερειακής ολικής και στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου Π συνάρτηση της γωνίας περιέλιξης για το μοντέλο Β1 .....	106
Διάγραμμα 10.25 Κατανομή της περιφερειακής εφαπτομενικής και ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου Π συνάρτηση της γωνίας περιέλιξης για το μοντέλο Β1 .....	106
Διάγραμμα 10.26 Καμπύλη μεταβολής της ολικής πίεσης του σπειροειδούς κελύφους συναρτήσει της παροχής όγκου του ρευστού για το μοντέλο Γ2.....	108
Διάγραμμα 10.27 Κατανομή ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης 0°, 90°, 180°, 270° για το μοντέλο Γ2.....	109

Διάγραμμα 10.28 Κατανομή στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ για το μοντέλο Γ2.....	109
Διάγραμμα 10.29 Κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ για το μοντέλο Γ2.....	111
Διάγραμμα 10.30 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ για το μοντέλο Γ2.....	111
Διάγραμμα 10.31 Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ για το μοντέλο Γ2.....	114
Διάγραμμα 10.32 Κατανομή της στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ για το μοντέλο Γ2.....	114
Διάγραμμα 10.33 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ για το μοντέλο Γ2.....	115
Διάγραμμα 10.34 Κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ για το μοντέλο Γ2.....	115
Διάγραμμα 10.35 Κατανομή της περιφερειακής ολικής και στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου Π συνάρτηση της γωνίας περιέλιξης για το μοντέλο Γ2.....	117
Διάγραμμα 10.36 Κατανομή της περιφερειακής εφαπτομενικής και ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου Π συνάρτηση της γωνίας περιέλιξης για το μοντέλο Γ2.....	117
Διάγραμμα 10.37 Καμπύλη μεταβολής της ολικής πίεσης του σπειροειδούς κελύφους συναρτήσει της παροχής όγκου του ρευστού.....	118
Διάγραμμα 10.38 Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνία περιέλιξης $90^\circ$ .....	119
Διάγραμμα 10.39 Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνία περιέλιξης $270^\circ$ .....	119
Διάγραμμα 10.40 Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου Π συνάρτηση της γωνίας περιέλιξης.....	121
Διάγραμμα 10.41 Κατανομή της περιφερειακής στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου Π συνάρτηση της γωνίας περιέλιξης.....	121

Διάγραμμα 10.42 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης $90^\circ$ .....	123
Διάγραμμα 10.43 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης $270^\circ$ .....	123
Διάγραμμα 10.44 Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνία περιέλιξης $90^\circ$ .....	124
Διάγραμμα 10.45 Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνία περιέλιξης $270^\circ$ .....	125
Διάγραμμα 10.46 Κατανομή της στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνία περιέλιξης $270^\circ$ .....	126
Διάγραμμα 10.47 Κατανομή της στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνία περιέλιξης $270^\circ$ .....	126
Διάγραμμα 11.1 Διάγραμμα ροής βασικού προγράμματος main.....	131
Διάγραμμα 11.2 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας bio (αρχή-A).....	132
Διάγραμμα 11.3 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας bio (Α-τέλος).....	133
Διάγραμμα 11.4 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας calc (αρχή-A).....	134
Διάγραμμα 11.5 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας calc (Α-B).....	135
Διάγραμμα 11.6 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας calc (Β-Γ).....	136
Διάγραμμα 11.7 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας calc (Γ-Δ) .....	137
Διάγραμμα 11.8 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας calc (Δ-τέλος).....	138

## Συντομογραφίες

ΥΣ Υδροστρόβιλος

ΣΚ Σπειροειδές κέλυφος

ΜΤ Μεσημβρινή τομή

## Δείκτες

$u$  Εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού

$r$  Ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού

$o$  Διατομή εισόδου του ΣΚ

$i$  Διατομή ενδιάμεσων ΜΤ του ΣΚ

## Κατάλογος μεταβλητών

$N$	Η μηχανική ισχύς	$W$
$M$	Ροπή	$Nm$
$\omega$	Γωνιακή ταχύτητα	$rad / s$
$c$	Η απόλυτη ταχύτητα του ρευστού	$m / s$
$Q$	Η παροχή όγκου του ρευστού	$m^3 / s$
$H$	Η υδραυλική πτώση του ρευστού	$m^3 / s$
$q$	σημειακή πηγή	$m / s$
$\Gamma$	σημειακή δίνη (κυκλοφορία)	$m / s$
$\delta$	Γωνία κλίσης γραμμής ροής	deg
$a$	Γωνία διαμόρφωσης της στεφάνης κατά την ΜΤ του ΣΚ	$m$
$\rho$	Ακτίνα κυκλικού τμήματος κατά την ΜΤ του ΣΚ	$m$
$\theta$	Γωνία διαμόρφωσης του κύκλου κατά την ΜΤ του ΣΚ	deg
$A$	Επιφάνεια διαμόρφωσης του κύκλου κατά την ΜΤ του ΣΚ	$m^2$





# 1 Εισαγωγή

Στροβιλομηχανές γενικά ορίζονται οι μηχανές οι οποίες μέσω σταθερής περιστροφικής κίνησης και συνεχούς ροής του ρευστού επιτυγχάνουν εναλλαγή της μηχανικής ενέργειας σε ενέργεια του ρευστού ή αντίστροφα.

Με βάση τον παραπάνω ορισμό των στροβιλομηχανών τα χαρακτηριστικά τους μπορούν να συνασπιστούν στα εξής σημεία:

- Η διατήρηση σταθερής μάζας του ρευστού στη ροή του ρευστού που αναπτύσσεται για ένα μόνιμο σημείο λειτουργίας. Το διακινούμενο ρευστό μπορεί να είναι είτε συμπιεστό όπως ο αέρας και τα καυσαέρια (για υψηλές τιμές του αριθμού Mach  $>0.3$  θεωρούνται συμπιεστά) είτε ασυμπιεστο όπως το νερό.
- Η σταθερή περιστροφική κίνηση μέσα από την οποία πραγματοποιείτε η εναλλαγή της ενέργειας από ή προς το ρευστό με αποτέλεσμα την ανάπτυξη στρεπτικής ροπής  $M$  σε άτρακτο που στρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  (rad/s) Έτσι προκύπτει η αντίστοιχη μηχανική ισχύς που προσδίδεται ή απορροφάται από το ρευστό.

$$M = N \cdot \omega \quad (0.1)$$

Το τμήμα της μηχανής το οποίο μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ενέργεια του ρευστού ή αντίστροφα είναι ένα στρεφόμενο τμήμα το οποίο ονομάζεται πτερωτή στην περίπτωση της αντλίας και δρομέας στην περίπτωση στροβίλου.

Κύριο γνώρισμα των στροβιλομηχανών είναι ότι κατά την εναλλαγή της ενέργειας από η προς το ρευστό η κινητική ενέργεια που αναπτύσσεται σε αυτό παίζει σημαντικό ρόλο. Εξαιτίας αυτού στις περιπτώσεις διακίνησης ασυμπιεστού ρευστού οι στροβιλομηχανές χαρακτηρίζονται ως υδροδυναμικές μηχανές με το πρώτο συνθετικό της λέξης να χαρακτηρίζει το συνηθέστερο διακινούμενο ρευστό που είναι το νερό και το δεύτερο συνθετικό της λέξης να χαρακτηρίζει το ρόλο της κινητικής ενέργειας που διαμορφώνεται στη μέσα στη μηχανή.

Οι κατηγορίες των στροβιλομηχανών με βάση την κατεύθυνση της προδιδόμενης ενέργειας είναι οι εξής:

- Οι εργοστροβιλομηχανές όπου η εναλλαγή της ενέργειας γίνεται από τη στρεφόμενη άτρακτο και μέσω της πτερωτής προς το ρευστό. Αυτό προϋποθέτει την πρόσδοση ενέργειας από ένα κινητήρα προκειμένου να γίνει η περιστροφή της άτρακτου στην οποία βρίσκεται η πτερωτή. Έτσι προκύπτει το συμπέρασμα ότι στις εργοστροβιλομηχανές η ροπή που αναπτύσσεται στη στρεφόμενη άτρακτο της μηχανής και τελικά στην πτερωτή είναι ανθιστάμενη. Η διατήρηση της γωνιακής ταχύτητας  $\omega$  προϋποθέτει ότι η ανθιστάμενη ροπή που αναπτύσσεται πρέπει να είναι ίση με την ροπή που εφαρμόζεται από τον κινητήρα που είναι συνδεδεμένος στην περιστρεφόμενη άτρακτο. Στις εργοστροβιλομηχανές συγκαταλέγονται οι αντλίες, οι ανεμιστήρες, οι φυσητήρες, οι στροβιλοσυμπιεστές κ.α.
- Οι κινητήριες μηχανές ή στρόβιλοι όπου η εναλλαγή της ενέργειας γίνεται από το διερχόμενο ρευστό προς τη στρεφόμενη άτρακτο επιτυγχάνοντας την αφαίρεση ενέργειας από το ρευστό και μετατρέποντάς την σε μηχανική ενέργεια. Έτσι εφαρμόζεται κινητήρια ροπή στον δρομέα η οποία μεταφέρεται στη στρεφόμενη άτρακτο. Η διατήρηση της γωνιακής ταχύτητας  $\omega$  προϋποθέτει ότι η κινητήρια ροπή που αναπτύσσεται και μεταφέρεται στην άτρακτο πρέπει να απορροφάται από μηχανή που ασκεί ροπή ανθιστάσεως όπως είναι η ηλεκτρική γεννήτρια.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι αρχικά ο παραμετρικός σχεδιασμός του σπειροειδούς κελύφους υδροστροβίλων αντίδρασης. Με την εισαγωγή των σχεδιαστικών παραμέτρων/μεταβλητών για τη μοντελοποίηση της γεωμετρίας του σπειροειδούς κελύφους καθίσταται δυνατή η διαμόρφωση μεγάλου εύρους γεωμετριών. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη σχεδίαση του σπειροειδούς κελύφους βασίζεται στην αρχή διατήρησης της συστροφής. Η μέθοδος αυτή θεωρείται πιο ακριβής σε σχέση με άλλες μεθόδους σχεδιασμού όπως η μέθοδος διατήρησης σταθερής ταχύτητας. Αναπτύχθηκε ειδικός αλγόριθμος ο οποίος για δεδομένο σημείο λειτουργίας (παροχή και ύψος) του υδροστροβίλου, δημιουργεί τον γεωμετρικό τόπο των σημείων που αποτελούν το σκελετό του σπειροειδούς κελύφους και συντελεί στην αυτοματοποίηση της σχεδιαστικής διαδικασίας. Συνδυάζοντας τον αλγόριθμο αυτόν με το σχεδιαστικό πρόγραμμα ANSYS



Design Modeler, μέσα από το οποίο γίνεται η τελική διαμόρφωση, η όλη διαδικασία απλοποιείται κατά πολύ. Αυτό παρέχει τη δυνατότητα διερεύνησης της ροής σε πολλές διαφορετικές γεωμετρίες σπειροειδούς κελύφους, με στόχο την εξεύρεση αυτής με τα ιδανικότερα υδραυλικά χαρακτηριστικά.

## **Διάρθρωση της εργασίας**

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια θεωρητική επισκόπηση με βάση τη βιβλιογραφία για τους διάφορους τύπους υδροστροβίλων αντίδρασης και τα μέρη που τους αποτελούν

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στις μεθόδους σχεδίασης των σπειροειδών κελυφών των υδροστροβίλων αντίδρασης με αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου διατήρησης της συστροφής.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται η ανάπτυξη της βασικής δομής του αλγορίθμου σχεδίασης του σπειροειδούς κελύφους, με βάση τη μέθοδο διατήρησης της συστροφής. Επίσης, παρουσιάζονται διάφορες διαμορφώσεις της γεωμετρίας του σπειροειδούς κελύφους που μπορούν να προκύψουν από τον αλγόριθμο.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται μια περιγραφή της διαμόρφωσης της γλωττίδας του σπειροειδούς κελύφους με βάση τη θεωρία από βιβλιογραφικές αναφορές.

Στο κεφάλαιο 6 παρατίθενται πληροφορίες σχετικά με τις μεθόδους υπολογιστικής ρευστομηχανικής που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα τελικής διαμόρφωσης του σπειροειδούς κελύφους μέσα από το σχεδιαστικό πρόγραμμα Ansys Design Modeler.

Στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα διαμόρφωσης του υπολογιστικού πλέγματος του σπειροειδούς κελύφους μέσα από το πρόγραμμα διαμόρφωσης υπολογιστών πλεγμάτων Ansys Mesh.

Στο κεφάλαιο 9 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα προσομοίωσης της ροής μέσα από το υπολογιστικό πρόγραμμα Ansys Fluent καθώς και οι παράμετροι και συνθήκες που ορίζονται για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης.

Στο κεφάλαιο 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης με βάση τα οποία έγινε η επιλογή του τελικού υπολογιστικού πλέγματος, τα τελικά αποτελέσματα των μοντέλων που επιλέχθηκαν και η σύγκρισή μεταξύ τους.

Στο κεφάλαιο 11 γίνεται αναφορά στα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε καθώς και σε προτάσεις που θα συμβάλουν στη βελτίωση της διαμόρφωσης του σπειροειδούς κελύφους αλλά και στη διερεύνηση της ροής σε αυτό.

## 2 Τύποι και λειτουργία υδροστροβίλων

### 2.1 Κατάταξη των υδροστροβίλων

Οι υδροστρόβιλοι διακρίνονται κατ' αρχή με κριτήριο τον βαθμό αντιδράσεως. Οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως είναι ολικής προσβολής, δηλ. ολόκληρος ο δρομέας λειτουργεί αξονοσυμμετρικά, ενώ οι υδροστρόβιλοι δράσεως είναι μερικής προσβολής και σε κάθε χρονική στιγμή τμήμα μόνο του δρομέα συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή. Ο μόνος τύπος υδροστροβίλου δράσεως που έχει επικρατήσει είναι ο υδροστρόβιλος Pelton, ενώ η παραλλαγή του, δηλ. ο υδροστρόβιλος Turgo αποτελεί σήμερα μία πολύ σπάνια επιλογή. Οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως που έχουν επικρατήσει είναι ο τύπος Francis, για μεσαίες τιμές της υδραυλικής πτώσης ( $H=50-500$  m περίπου), ο υδροστρόβιλος τύπου Deiaz διαγώνιας ροής, και διάφορες διαμορφώσεις υδροστροβίλων αξονικής ροής, κατάλληλοι για μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης ( $H<50$  m περίπου), όπως: Kaplan, βολβοειδής (bulb), σωληνωτός (tube), δακτυλίου (Straflo) κλπ.

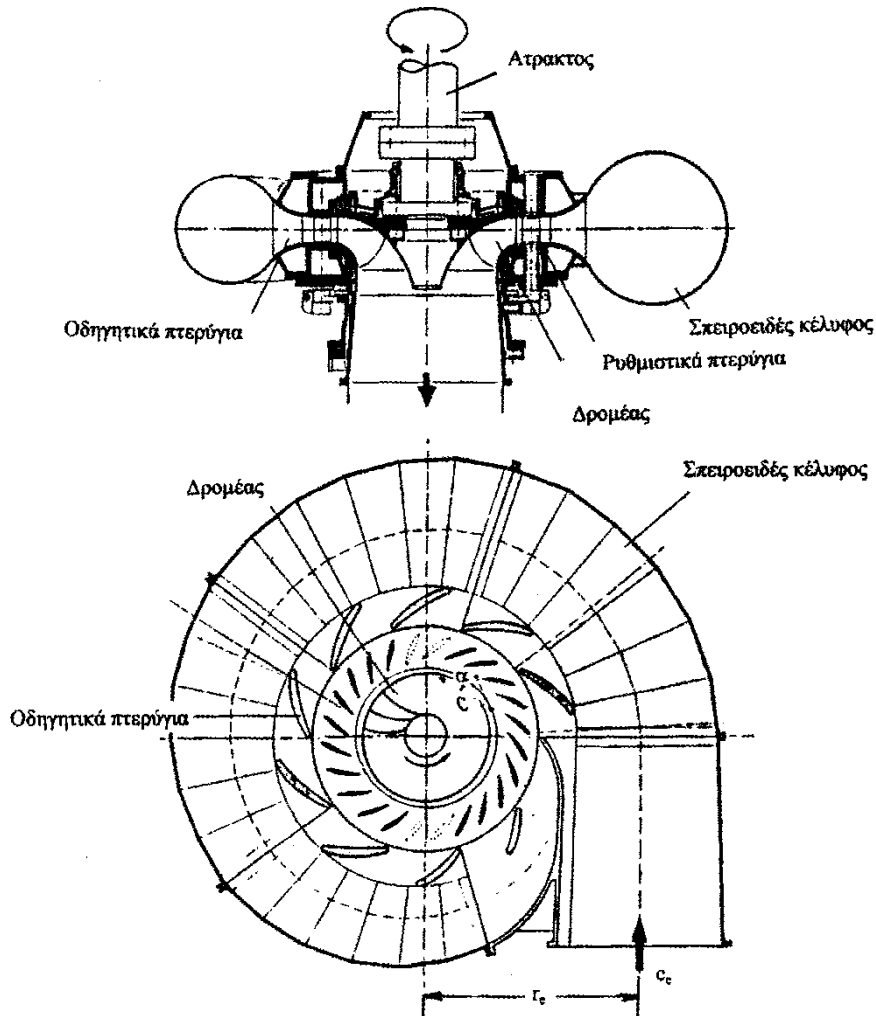
### 2.2 Υδροστρόβιλοι αντιδράσεως

Στην συνέχεια δίνεται σύντομη περιγραφή της διαμόρφωσης των σύγχρονων τύπων υδροστροβίλων αντιδράσεως και των κυρίων τμημάτων που τους απαρτίζουν.

Όλοι οι τύποι αυτών των υδροστροβίλων έχουν βαθμό αντιδράσεως διαφορετικό του μηδενός, δηλαδή η ροή διά μέσου του δρομέα γίνεται με παράλληλη μεταβολή της στατικής πίεσης και για αυτό οι δρομείς τους είναι ολικής προσβολής, δηλαδή λειτουργούν ομοιόμορφα κατά την περιφερειακή διεύθυνση.

Σε αυτή την κατηγορία υδροστροβίλων με συνηθέστερο τον τύπο Francis (Εικόνα 2.1) το εμφανέστερο χαρακτηριστικό είναι η πλήρης βύθιση του δρομέα στο ρέον υγρό. Η λειτουργία του δρομέα είναι αξονοσυμμετρική, συνεπώς είναι απαραίτητο το τμήμα εισόδου να περιβάλλει το δρομέα, ώστε να εξασφαλίζει στην διατομή εισόδου του δρομέα αξονοσυμμετρικές συνθήκες της ροής. Τα πτερύγια του δρομέα είναι τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο, ώστε η διαφορά της στατικής πίεσης μεταξύ τους να επιβάλει σε αυτά δυνάμεις

άνωσης, παρόμοιες με αυτές που ασκούνται στα πτερύγια των αεροσκαφών, γεγονός το οποίο προκαλεί την περιστροφή του δρομέα. Δηλαδή, η ροή μέσω του δρομέα γίνεται με παράλληλη μεταβολή της στατικής πίεσης του υγρού. Για τον λόγο αυτό οι υδροστρόβιλοι ολικής προσβολής ονομάζονται και υδροστρόβιλοι αντιδράσεως.



Εικόνα 2.1 Τυπική διαμόρφωση υδροστρόβιλου Francis (Παπαντώνης, Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες - Υδροστρόβιλοι Υδροδυναμικές Μεταδόσεις, 2008)

Οι υδροστρόβιλοι ολικής προσβολής γενικά περιστρέφονται σε μεγάλες ταχύτητες, ακόμα και για μικρό υδραυλικό ύψος και συγκριτικά σε μεγαλύτερες ταχύτητες από τους υδροστρόβιλους μερικής προσβολής. Αυτή τους η ιδιότητα καθιστά δυνατή την απευθείας

σύζευξη της ατράκτου τους με την άτρακτο της γεννήτριας χωρίς να είναι απαραίτητη η παρεμβολή ειδικού πολλαπλασιαστή στροφών. Προφανώς, αυτό μειώνει το κόστος κατασκευής του έργου ενώ καθιστά και απλούστερη την συντήρησή του.

Οι συνηθέστεροι τύποι υδροστροβίλων ολικής προσβολής είναι οι ακόλουθοι:

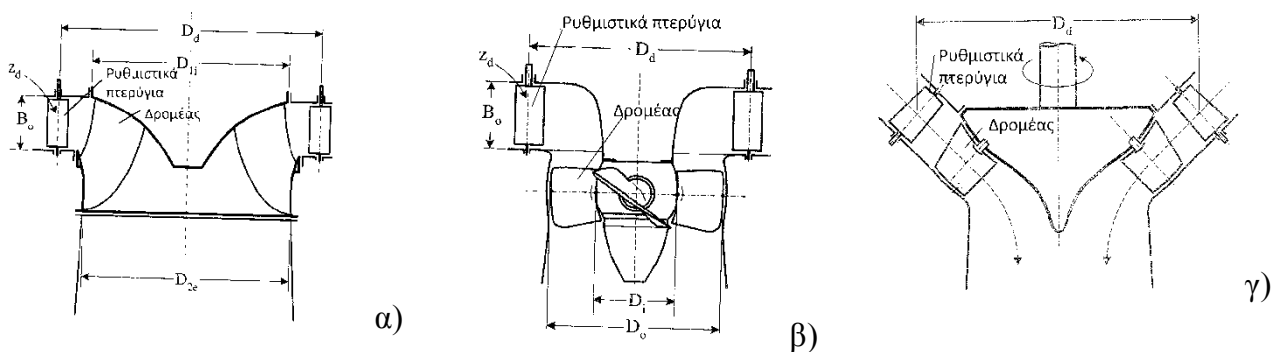
- Francis (ακτινικής και μυκτής ροής)
- Deriaz (διαγώνιας ροής)
- Kaplan (αξονικής ροής)
- Βολβοειδής ή Bulb (αξονικής ροής)
- Σωληνωτός ή Tube (αξονικής ροής)
- Δακτυλίου ή Straflo (αξονικής ροής)

Οι υδροστρόβιλοι Francis χρησιμοποιούνται για εκμετάλλευση μέσω των τιμών υδραυλικών πτώσεων της τάξεως των 50 έως 500 mΣΥ. Οι υδροστρόβιλοι αξονικής ροής προτιμούνται για χρήση σε μικρές τιμές υδραυλικής πτώσης και συγκεκριμένα μικρότερες των 50 mΣΥ

Τα κύρια μέρη των υδροστροβίλων ολικής προσβολής είναι τα εξής:

- Τμήμα Εισόδου
- Δρομέας
- Τμήμα Εξόδου

Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή της διαμόρφωσης και της λειτουργίας των ανωτέρω τμημάτων



Εικόνα 2.2 Σχηματική διαμόρφωση υδροστροβίλου α) Francis ,β) Kaplan και γ) Deriaz (Παπαντώνης, Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες - Υδροστρόβιλοι Υδροδυναμικές Μεταδόσεις, 2008)

### 2.2.1 Τμήμα εισόδου

Το τμήμα εισόδου ενός υδροστροβίλου ολικής προσβολής έχει συνηθέστερα τη μορφή σπειροειδούς κελύφους (Εικόνα 2.1) και όπως αναφέρεται και ανωτέρω περιβάλλει το δρομέα ώστε να επιτυγχάνεται ομοιομορφία τόσο στην τροφοδοσία όσο και στη λειτουργία του. Το σπειροειδές κέλυφος αποτελεί το τμήμα του υδροστροβίλου που καταλαμβάνει τον μεγαλύτερο όγκο και υπόκειται στη μεγαλύτερη στατική πίεση. Επίσης, είναι συνδεδεμένο στην διατομή εισόδου του με τον κυκλικής διατομής αγωγό προσαγωγής.

Σε κάθε τομή του σπειροειδούς κελύφους μεσημβρινού προσανατολισμού παρατηρείται διατομή, σχεδόν κυκλικού σχήματος, η οποία ελαττώνεται σταδιακά κατά την περιφερειακή διεύθυνση. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται η απαιτούμενη ομοιομορφία στην ροή και την τροφοδοσία του δρομέα, ενώ παράλληλα το υγρό διερχόμενο από το σπειροειδές κέλυφος αποκτά μια αρχική τιμή της περιφερειακής συνιστώσας της απόλυτης ταχύτητας που καλείται συστροφή.

Περιμετρικά του τμήματος τροφοδοσίας του δρομέα τοποθετείται στεφάνη με σταθερά οδηγητικά πτερύγια (Εικόνα 2.1). Πιο συγκεκριμένα, είναι τοποθετημένη σε περιοχή όπου η ροή συγκλίνει ώστε να μειώνεται σημαντικά η πιθανότητα αποκόλλησης. Η στεφάνη οδηγητικών πτερυγίων έχει διάφορες ιδιότητες, μία εκ των οποίων είναι η ενίσχυση της μηχανικής αντοχής και της στιβαρότητας του σπειροειδούς κελύφους. Ακόμη, τα οδηγητικά πτερύγια συνεισφέρουν στην μείωση των απαιτούμενων διαστάσεων του σπειροειδούς κελύφους. Αυτό συμβαίνει διότι το κέλυφος σχεδιάζεται με τη μεγαλύτερη γωνία σπείρας ώστε να δύναται να προσδώσει στο υγρό τιμή συστροφής μεγαλύτερη από την απαιτούμενη.

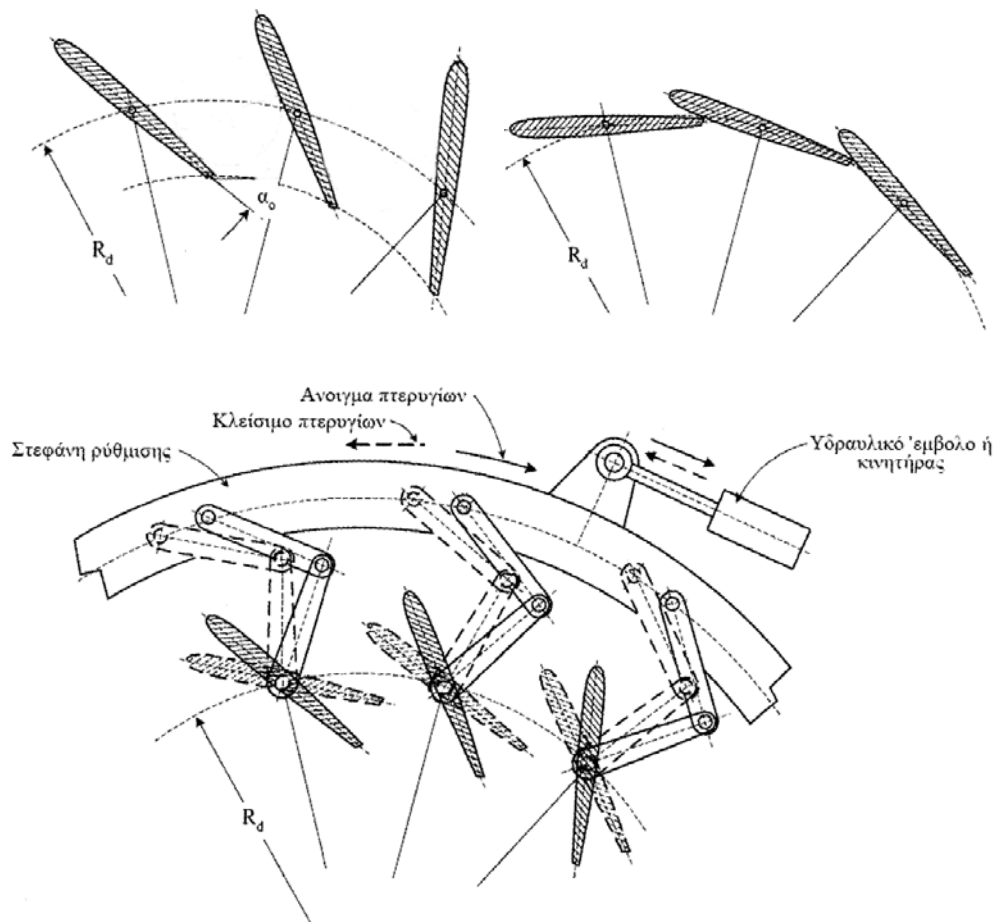
Ανάμεσα στη στεφάνη οδηγητικών πτερυγίων και στη διατομή εισόδου του δρομέα, παρεμβάλλεται περιμετρικά η στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων (Εικόνα 2.3). Τα πτερύγια αυτά είναι κυλινδρικές επιφάνειες των οποίων οι γενέτειρες βρίσκονται σε παραλληλία με τον άξονα του δρομέα. Η ίδια διαμόρφωση της στεφάνης των ρυθμιστικών πτερυγίων ακολουθείται και στους υδροστροβίλους τύπου Kaplan (Εικόνα 2.2β). Επιπρόσθετα, έχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης και ομοιόμορφης περιστροφής προκαλούμενης από εξωτερικό μηχανισμό γύρω από άξονα επίσης παράλληλο στον άξονα του δρομέα.

Ο κύριος σκοπός που εξυπηρετούν τα ρυθμιστικά πτερύγια είναι η διαμόρφωση στην είσοδο του δρομέα της τελικής τιμής συστροφής, ομοιόμορφης για όλα τα στοιχεία του υγρού.

Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η απαιτούμενη ομοιομορφία, η στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων τοποθετείται σε επίπεδο κάθετο στον άξονα περιστροφής του δρομέα γεγονός που καθιστά τη ροή στα ρυθμιστικά πτερύγια καθαρά ακτινική.

Μία ακόμη ιδιότητα των ρυθμιστικών πτερυγίων είναι η ρύθμιση του σημείου λειτουργίας του υδροστροβίλου. Αυτό συμβαίνει διότι τα ρυθμιστικά πτερύγια δύνανται να προκαλέσουν μεταβολή του διακένου, δηλαδή της διατομής μεταξύ δύο διαδοχικά τοποθετημένων πτερυγίων. Συνεπώς για σταθερή ταχύτητα περιστροφής και διαθέσιμη υδραυλική πτώση μπορούν να μεταβάλλουν την διερχόμενη παροχή και άρα την ισχύ στην έξοδο του στροβίλου. Κατά συνέπεια η στεφάνη αποτελεί και το εξάρτημα με το οποίο γίνεται η ρύθμιση του σημείου λειτουργίας του υδροστροβίλου. Τα ρυθμιστικά πτερύγια συναντώνται πάντα σε ζυγό πλήθος ώστε η στεφάνη και ο μηχανισμός περιστροφής να έχουν άξονα συμμετρίας κατά ένα μεσημβρινό επίπεδο. Καθώς αυξάνει το πλήθος τους, μειώνεται το μήκος της χορδής τους με αποτέλεσμα την μείωση του μεγέθους των δυνάμεων και των ροπών που ασκούνται πάνω σε αυτά. Τα ρυθμιστικά πτερύγια σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε όταν επιθυμείται να εφάπτεται το ένα πτερύγιο με το επόμενο κατά μία γενέτειρα (θέση κλειστή) και έτσι να προκαλείται κατά το δυνατόν μηδενισμός της διατομής από την οποία διέρχεται το υγρό, ώστε να επιτυγχάνεται η κράτηση της μονάδας.

Στην περίπτωση που η διαθέσιμη υδραυλική πτώση είναι μικρότερη της τάξης των 10mΣΥ χρησιμοποιούνται ο βολβοειδής και ο σωληνωτός υδροστροβίλος. Σε αυτούς, η ροή στο τμήμα εισόδου δεν γίνεται κατά την ακτινική, ως συνηθίζεται, διεύθυνση αλλά κατά την αξονική. Αυτή η αλλαγή βοήθα στην μείωση του όγκου, των υδραυλικών απωλειών και του συνολικού κόστους του έργου. Μία ακόμη ιδιαιτερότητα αυτών των δύο υδροστροβίλων, που αποτελούν παραλλαγή του Kaplan, είναι η απουσία του σπειροειδούς κελύφους. Επίσης η στεφάνη με τα οδηγητικά πτερύγια τοποθετείται είτε αξονικά είτε κωνικά με αποτέλεσμα τα πτερύγια να μην αποτελούν κυλινδρικές επιφάνειες.



Εικόνα 2.3 Στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων ακτινικής ροής (Παπαντώνης, Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες - Υδροστρόβιλοι Υδροδυναμικές Μεταδόσεις, 2008)

## 2.2.2 Δρομέας

Ο δρομέας όπως έχει περιγραφεί και ανωτέρω είναι το τμήμα της μηχανής το οποίο περιστρέφεται μετατρέποντας την υδραυλική ενέργεια του υγρού σε μηχανική.

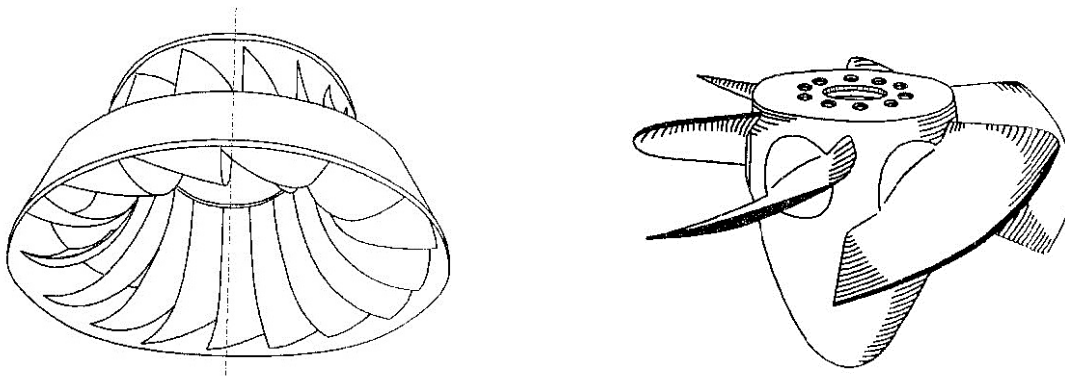
### Δρομέας Francis

Στον δρομέα των υδροστροβίλων Francis τα πτερύγια είναι πακτωμένα στην στεφάνη και εκτείνονται μέχρι την πλήμνη. Η στεφάνη αναλαμβάνει το ρόλο της ενίσχυσης της μηχανικής στιβαρότητας του δρομέα γενικότερα και κυρίως των πτερυγίων, στα οποία αναπτύσσονται δυνάμεις όχι μόνο λόγω της ροής που διέρχεται από αυτά αλλά και φυγόκεντρες δυνάμεις τις οποίες προκαλεί η περιστροφή. Προς αποφυγή συντονισμού και ταλαντώσεων, το πλήθος



των πτερυγίων δρομέα Francis συνήθως εκλέγεται περιττό δεδομένου ότι τα ρυθμιστικά πτερύγια είναι άρτια στον αριθμό. Συνήθεις αριθμοί πτερυγίων είναι 11, 13 και 15 με ελαφρά συνηθέστερο το 13.

Όταν το πλήθος των πτερυγίων είναι σταθερό, ο δρομέας γίνεται σταδιακά περισσότερο μεικτής ροής καθώς μειώνεται η διαθέσιμη υδραυλική πτώση. Επίσης, μειώνεται το μεσημβρινό μήκος των πτερυγίων αφού οι φέρουσες επιφάνειες που είναι απαραίτητες για την ενεργειακή μετατροπή είναι μικρότερες σε μέγεθος.



α)

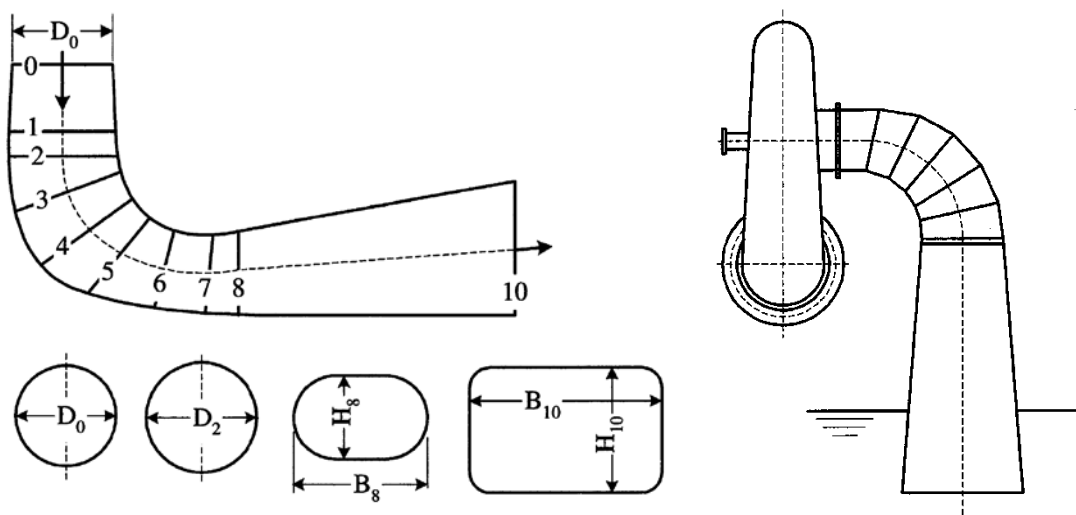
β)

Εικόνα 2.4 Δρομέας τύπου α) Francis και β) Karlan (Παπαντώνης, Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες - Υδροστρόβιλοι Υδροδυναμικές Μεταδόσεις, 2008)

### 2.2.3 Τμήμα εξόδου

Το τμήμα εξόδου ενός υδροστροβίλου αντιδράσεως ονομάζεται και αγωγός απαγωγής ή φυγής και σαν στόχο έχει την επιβράδυνση της απόλυτης ταχύτητας του υγρού καθώς το οδηγεί προς την δώρυγα απαγωγής ή τον κάτω ταμιευτήρα. Αυτό συμβαίνει διότι το υγρό κατά την έξοδό του από τον δρομέα έχει υψηλή ταχύτητα της τάξης των 6 έως 10 m/sec και η επιθυμητή ταχύτητα για την έξοδο στην δώρυγα απαγωγής ή τον κάτω ταμιευτήρα είναι της τάξεως του 1 έως 2,5 m/sec ώστε η απορριπτόμενη ενέργεια να είναι η μικρότερη δυνατή. Εκτός από ανάκτηση της απορριπτόμενης ενέργειας ο αγωγός επιτρέπει την τοποθέτηση του υδροστροβίλου σε στάθμη ανεξάρτητα από την κατάντι στάθμη χωρίς την απώλεια ύψους (η στάθμη αυτή εξαρτάται βεβαίως από τις συνθήκες σπηλαιώσης δηλ από τον αριθμό Thoma)

Στους περισσότερους υδροστροβίλους ολικής προσβολής υπάρχει διαμόρφωση ευθύγραμμου κωνικού αποκλίνοντος τμήματος η οποία τοποθετείται κάταντι της διατομής εξόδου του δρομέα και αποτελεί την αφετηρία του αγωγού απαγωγής. Η γωνία κώνου του τμήματος αυτού του αγωγού φυγής δεν ξεπερνά τις 7 μοίρες καθώς είναι επιθυμητό να αποφευχθεί αποκόλληση της ροής. Το τμήμα του αγωγού απαγωγής που βρίσκεται στη συνέχεια του προαναφερθέντος τμήματος ποικίλει από υδροστρόβιλο σε υδροστρόβιλο. Συγκεκριμένα, στους υδροστρόβιλους κατακόρυφου άξονα το τμήμα που ακολουθεί καμπυλώνεται κατά 90 μοίρες ώστε να οριζοντιώνεται η διατομή εξόδου. Στη συνέχεια η διατομή πλαταίνει σταδιακά και γίνεται σχεδόν ορθογωνική διατηρώντας την μεγάλη διάσταση οριζόντια. Αυτή η διαμόρφωση λαμβάνει χώρα ώστε να μειώνεται τόσο το κατακόρυφο μήκος του αγωγού απαγωγής όσο και το μέγεθος των απαιτούμενων εκσκαφών.



Εικόνα 2.5 Σχηματική Απεικόνιση Αγωγού Απαγωγής Υδροστροβίλου Αντιδράσεως Οριζοντίου Άξονα (Παπαντώνης, Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες - Υδροστρόβιλοι Υδροδυναμικές Μεταδόσεις, 2008)

Όταν πρόκειται για υδροστροβίλους αξονικής ροής, οριζόντιου ή κεκλιμένου άξονα, (π.χ. Tube, Bulb) ο αγωγός απαγωγής είναι εξολοκλήρου ευθύγραμμος, κωνικός και κυκλικής διατομής από την αρχή μέχρι το σημείο εξόδου του. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι ο αγωγός απαγωγής επιδρά στην λειτουργία και στον βαθμό απόδοσης του υδροστροβίλου και για αυτό το λόγο ως διατομή εξόδου του συστήματος λαμβάνεται η διατομή εξόδου του αγωγού αυτού.

### **3 Υδραυλική σχεδίαση του σπειροειδούς κελύφους υδροστροβίλου αντίδρασης**

Όπως ήδη έχει αναφερθεί το σπειροειδές κέλυφος αποτελεί ένα από τα βασικά εξαρτήματα των υδροστροβίλων αντίδρασης. Το σπειροειδές κέλυφος διαμορφώνει το τμήμα του υδροστροβίλου μεταξύ του αγωγού εισόδου και των οδηγητικών πτερυγίων της στεφάνης. Η σχεδίαση του πρέπει να πληροί την προϋπόθεση της καλύτερης δυνατής απόδοσης προκειμένου να επιτύχει το καλύτερο δυνατό οικονομικό όφελος στις μονάδες υδροηλεκτρικής ενέργειας. Οι βασικότερες παράμετροι οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την σχεδίαση του σπειροειδούς κελύφους, συμπεριλαμβάνονται στην παρακάτω λίστα.

➤ Η υδραυλική παράμετρος

Οι υδραυλικές απώλειες εντός του σπειροειδούς κελύφους και οι απώλειες στα οδηγητικά πτερύγια πρέπει να είναι οι ελάχιστες δυνατές. Επίσης θα πρέπει να διαμορφώνεται σταθερή συμμετρική ροή σε όλη την περιφέρεια των ακμών των οδηγητικών πτερυγίων. Το ρευστό θα πρέπει να εξέρχεται από το σπειροειδές κέλυφος υπό σταθερή ταχύτητα και γωνία διεύθυνσης σε ολόκληρη την διατομή εξόδου.

➤ Η παράμετρος της μορφής

Το σχήμα και το μέγεθος του σπειροειδούς κελύφους θα πρέπει να είναι συμβατό με τη διάταξη της εγκατάστασης του υδροηλεκτρικού σταθμού.

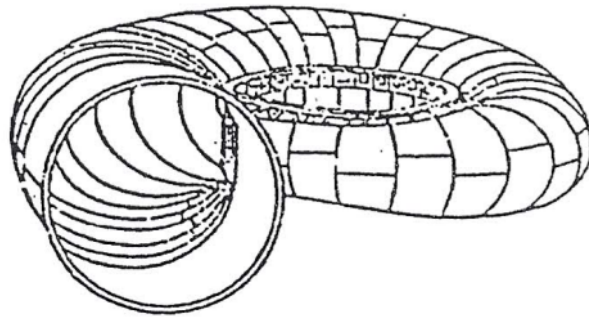
➤ Η κατασκευαστική παράμετρος

Το σπειροειδές κέλυφος θα πρέπει να παρουσιάζει αντοχή στις καταπονήσεις λόγω της ανάπτυξης δυνάμεων κατά την ροή του ρευστού αλλά παράλληλα να είναι και εύκολη η διαμόρφωση και κατασκευή του.

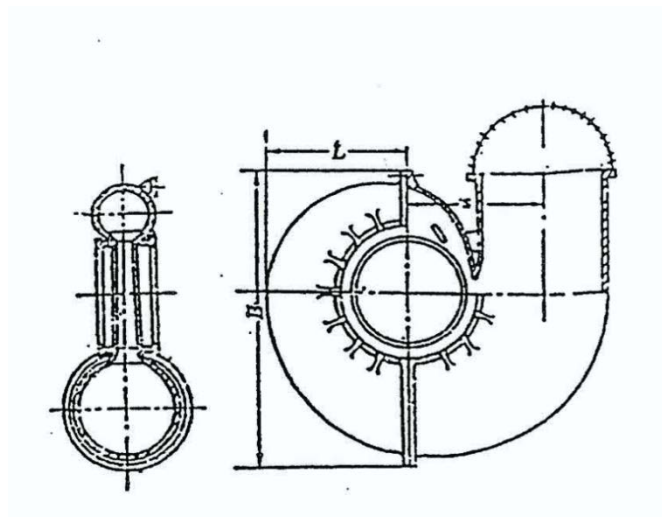
Θα πρέπει να επισημανθεί ότι είναι δύσκολη η επίτευξη των καλύτερων δυνατών αποτελεσμάτων για το κάθε παραπάνω χαρακτηριστικό γνώρισμα. Η σχεδίαση των υδροστροβίλων θα πρέπει να συνδυάζει την καλή απόδοση με το χαμηλό κατασκευαστικό κόστος. Τα πιο διαδεδομένα είδη σπειροειδούς κελύφους από την άποψη του υλικού

κατασκευής είναι αυτά που κατασκευάζονται από μέταλλο και αυτά που κατασκευάζονται από σκυρόδεμα.

Το μεταλλικό σπειροειδές κέλυφος, εξαιτίας της υψηλής αντοχής του σε καταπονήσεις, χρησιμοποιείται κυρίως για υψηλές τιμές υδραυλικών πτώσεων. Τα κελύφη που κατασκευάζονται με συγκόλληση των τμημάτων του χρησιμοποιούνται για υδραυλικές πτώσεις από 40m έως 200m, ενώ τα χυτευτά για υδραυλικές πτώσεις άνω των 200m.



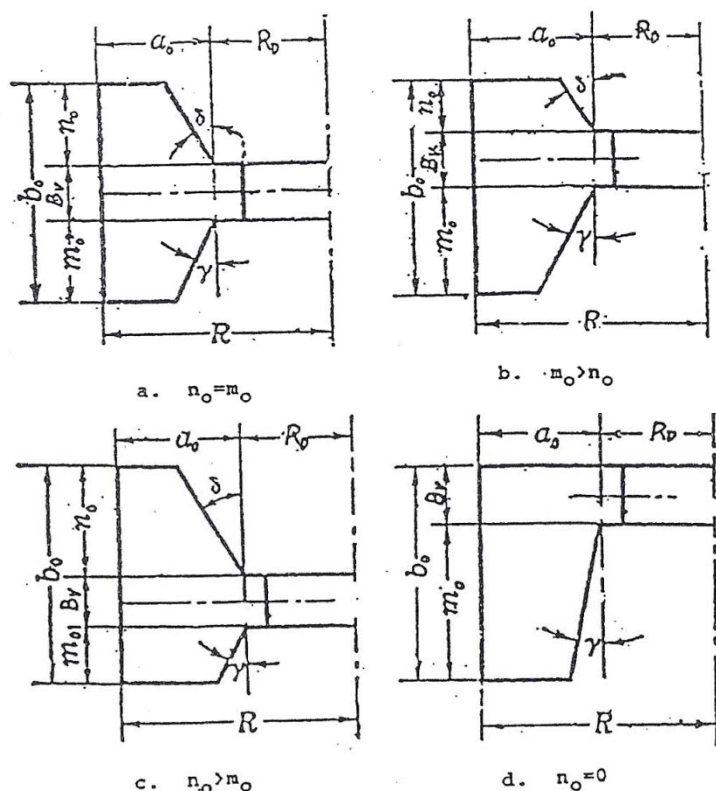
Εικόνα 3.1 Συγκολλητό σπειροειδές κέλυφος



Εικόνα 3.2 Χυτευτό σπειροειδές κέλυφος

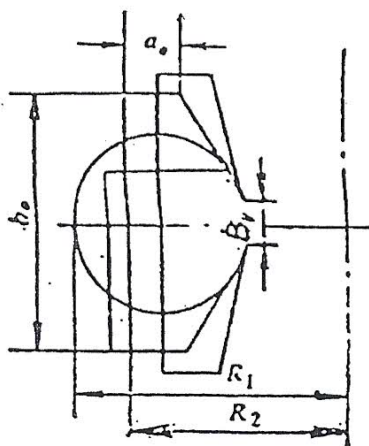
Για την μείωση του πάχους του κελύφους έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι παραγωγής μετάλλων υψηλών αντοχών από τις βιομηχανίες μετάλλων, για την κατασκευή εξαρτημάτων υψηλών απαιτήσεων ως προς την αντοχή.

Τα σπειροειδή κελύφη από σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται για χαμηλές υδραυλικές πτώσεις που κυμαίνονται από 4m μέχρι 40m. Όταν ένας υδροστρόβιλος λειτουργεί σε μικρές υδραυλικές πτώσεις η υδραυλική ροή είναι αρκετά μεγάλη και τότε με βάση τις σχεδιαστικές ανάγκες οι διαστάσεις του μεγαλώνουν. Για λόγους μείωσης του κόστους κατασκευής προτείνεται η χρήση πολυγωνικής γεωμετρίας, με προτιμώμενες εκείνες της μορφής-T και μορφής-b (Εικόνα 3.3). Αυτό βέβαια έχει το αρνητικό ότι η πολυγωνική γεωμετρία παρουσιάζει τις μικρότερες ανοχές σε πιέσεις και για αυτό προτείνεται μόνο σε περιπτώσεις που οι υδραυλικές πτώσεις είναι χαμηλές.

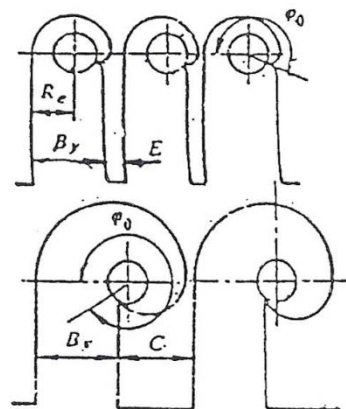


Εικόνα 3.3 Διαμόρφωση τμημάτων τομής σπειροειδούς κελύφους από σκυρόδεμα μορφής T και μορφής b (Krishna, 1997)

Στόχος της διαμόρφωσης σπειροειδούς κελύφους αυτής της μορφής είναι η ελαχιστοποίηση της μέγιστης απόστασης από το κέντρο του στροβίλου διατηρώντας παράλληλα το εμβαδόν της επιφάνειας για κάθε τμήμα της τομής του ίδιο με αυτό ενός με κυκλική μορφή.



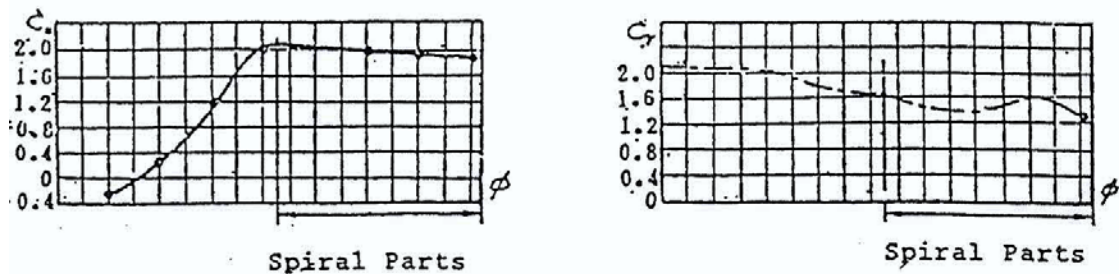
Εικόνα 3.4 Διαφορετικές μορφές του σπειροειδούς κελύφους (Krishna, 1997)



Εικόνα 3.5 Ολική και μερική διαμόρφωση του σπειροειδούς κελύφους (Krishna, 1997)

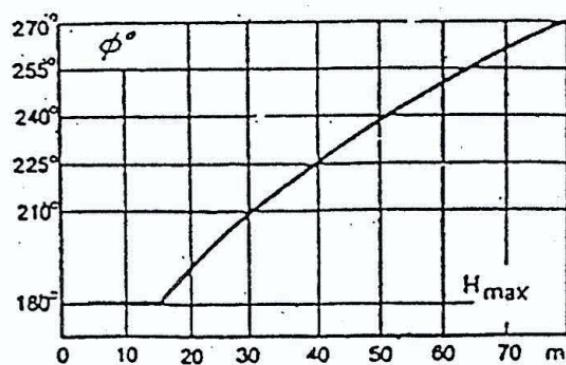
Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά για την μείωση του κόστους κατασκευής του σπειροειδούς κελύφους και κατά επέκταση ολόκληρου του υδροστροβίλου είναι ο μεγαλύτερος δυνατός περιορισμός των διαστάσεων του. Για τη μείωση των διαστάσεων του σπειροειδούς κελύφους γίνεται μείωση της περιφέρειάς του κατά ένα μικρό ή και μεγάλο τμήμα ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης. Έτσι έχουμε τα μερικά και τα ολικά σπειροειδή κελύφη αντίστοιχα (Εικόνα 3.5) Τα περισσότερα σπειροειδή κελύφη από σκυρόδεμα είναι “μερικά” σπειροειδή κελύφη αφού αποτελούνται μόνο από ένα μέρος της περιφέρειας του κελύφους. Στα μερικά σπειροειδή κελύφη είναι επόμενο ότι ο βαθμός απόδοσης θα είναι μικρότερος από ότι στα ολικά. Για μερικό σπειροειδές κελύφος με γωνία περιέλιξης  $180^\circ$  υπολογίζεται η διανομή των ακτινικών και των περιφερειακών ταχυτήτων γύρω από την περιφέρεια των οδηγητικών πτερυγίων της στεφάνης. Από την Εικόνα 3.6 μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό ότι η διανομή των ακτινικών και των περιφερειακών ταχυτήτων κατά το σπειροειδές τμήμα είναι σχεδόν ομοιόμορφη ενώ κατά το υπόλοιπο μη σπειροειδές τμήμα του κελύφους οι τιμές των περιφερειακών ταχυτήτων έχουν έντονες διακυμάνσεις και οι ακτινικές ταχύτητες

αυξάνονται κατά 10%. Ως συνέπεια του φαινομένου αυτού αυξάνονται οι υδραυλικές απώλειες στα οδηγητικά πτερύγια και το ασύμμετρο φορτίο που διαμορφώνεται επιδρά αρνητικά στον δρομέα με αποτέλεσμα την αύξηση των καταπονήσεων.



Εικόνα 3.6 Η διανομή της ταχύτητας κατά μήκος της περιφέρειας της στεφάνης σε μερικό σπειροειδές κέλυφος γωνίας περιέλιξης  $180^\circ$  (Krishna, 1997)

Η γωνία περιέλιξης υπολογίζεται από την διατομή εισόδου του σπειροειδούς κελύφους έως τη διατομή εισόδου του πτερυγίου της στεφάνης το οποίο διαμορφώνει και τη γλωττίδα. Οι γωνίες περιέλιξης των μεταλλικών σπειροειδών κελυφών κυμαίνονται από  $340^\circ$  έως  $360^\circ$ , με πιο συνηθισμένη αυτή των  $345^\circ$ , ενώ στα σπειροειδή κελύφη από σκυρόδεμα κυμαίνονται από  $180^\circ$  έως  $275^\circ$ . Από στατιστικά δεδομένα γίνεται μια συσχέτιση μεταξύ της γωνίας περιέλιξης και της μέγιστης υδραυλικής πτώσης  $H_{max}$  (Εικόνα 3.7) προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη τιμή. Η χρήση της γωνίας περιέλιξης των  $135^\circ$  γίνεται για πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές σε υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις



Εικόνα 3.7 Η γωνία περιέλιξης συναρτήσεται της μέγιστης υδραυλικής πτώσης (Krishna, 1997)

Ο υδραυλικός σχεδιασμός του σπειροειδούς κελύφους, βασίζεται στην ανάλυση της ροής του ρευστού ενώ συνδυαστικά με στατιστικά δεδομένα και συσχετίσεις προκύπτουν μονογραμμικά διαγράμματα τα οποία μας δίνουν τη γεωμετρία των διαφόρων τμημάτων που το απαρτίζουν. Από τα διαγράμματα που προκύπτουν γίνεται η κατασκευή του σπειροειδούς κελύφους

### **3.1.1 Ανάλυση της ροής στο σπειροειδές κέλυφος**

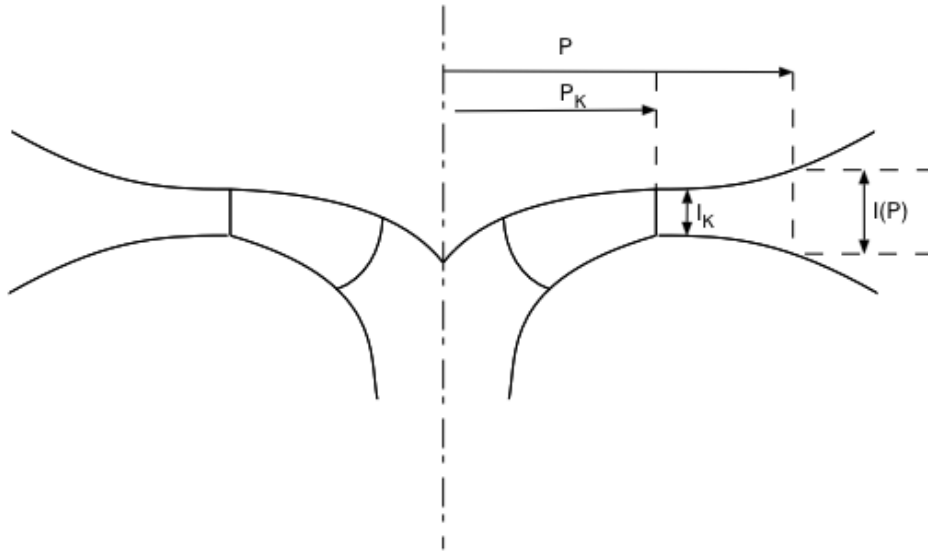
Στόχος της ανάλυσης της ροής στο σπειροειδές κέλυφος είναι για να μελετηθούν τα λεπτομερή χαρακτηριστικά της ενώ η σχεδίαση των σπειροειδών κελυφών μπορεί να διαμορφωθεί με βάση τα πρότυπα της ροής σε αυτά. Η ροή του ρευστού κατά την είσοδο του από τον αγωγό εισόδου μετατρέπεται από ευθύγραμμη σε στροβιλοειδή ροή που έχει τη μορφή λογαριθμικής σπείρας. Η πραγματική ροή που προκύπτει εντός του σπειροειδούς κελύφους είναι αρκετά πολύπλοκη αφού λόγω της συνεκτικότητας του ρευστού στην διαμόρφωση της ροής προστίθενται παράμετροι που αφορούν τις οριακές συνθήκες του ρευστού. Όπως γίνεται αντιληπτό η περιγραφή της ροής σε ένα τόσο πολύπλοκο σύστημα καθιστά δύσκολη την μοντελοποίηση του με μαθηματικές παραμέτρους.

Άρα για να μπορέσει να γίνει μελέτη των χαρακτηριστικών μιας συνεκτικής και τυρβώδους ροής θα πρέπει να γίνει με χρήση υπολογιστικών μεθόδων μηχανικής των ρευστών.

Επειδή η μοντελοποίηση μιας ροής τριών διαστάσεων δεν μπορεί να αποδώσει αναλυτικά πρότυπα ροής και για λόγους απλούστευσης των μαθηματικών σχέσεων πραγματοποιείται ανάλυση της ροής σε δύο διαστάσεις. Η δισδιάστατη θεώρηση της ροής είναι αυτή που εφαρμόζεται τελικά για τον σχεδιασμό σπειροειδών κελυφών.

Με βάση τα παραπάνω το πεδίο ροής μοντελοποιείτε μαθηματικά εφαρμόζοντας επαλληλία πεδίου ροής που αποτελείτε από μια σημειακή πηγή και μια σημειακή δίνη (Εικόνα 3.9). Πιο αναλυτικά από τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη διαμόρφωσης της στεφάνης και της μεσημβρινής τομής θα ισχύουν τα εξής:





Εικόνα 3.8 Μεσημβρινή τομή του υδροστροβίλου

- Επειδή η ακτινική και η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας είναι πρέπει να είναι ομοιόμορφες και συμμετρικές γύρω από τη στεφάνη

$$C_{K,r} = -\frac{Q_I}{2 \cdot \pi \cdot P_K \cdot I_K} = -\frac{q}{2 \cdot \pi \cdot P_K} \quad (2.1)$$

- Στη ροή διαμορφώνεται μια κυκλοφορία (σημειακή δίνη) έντασης  $\Gamma$  άρα:

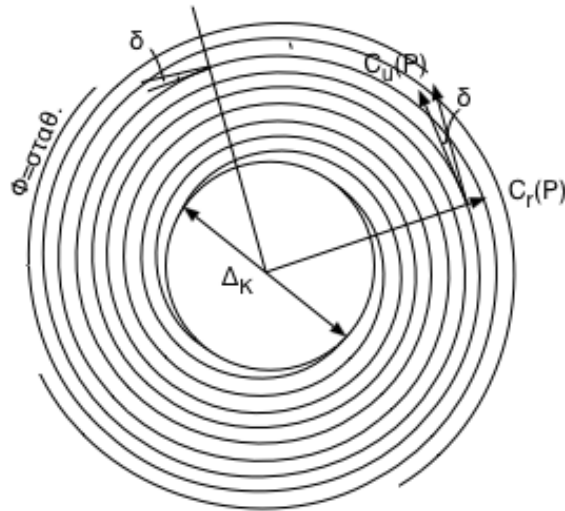
$$C_{K,u} = \frac{\Gamma}{2 \cdot \pi \cdot P_K} \quad (2.2)$$

- Αφού η ροή είναι δύο διαστάσεων θα ισχύει ότι:

$$C_Z = 0 \quad \& \quad \Gamma = \text{σταθ.} \quad (2.3)$$

Όπου

- $P_K$ : η ακτίνα εξόδου της στεφάνης
- $q$ : η παροχή ανά επιφάνεια (σημειακή πηγή) που διέρχεται από τη στεφάνη
- $I_K$ : το πλάτος της στεφάνης
- $Q_I$ : η παροχή όγκου που εισέρχεται στο στρόβιλο
- $\Gamma$ : η κυκλοφορία (σημειακή δίνη) που αναπτύσσεται περιφερειακά του άξονα του στροβίλου



Εικόνα 3.9 Γραμμές ροής σε αξονοσυμμετρικό χώρο κατάντι του δρομέα

Για την επαλληλία της ροής που προκύπτει θα ισχύουν τα εξής

$$W(P, \Theta) = -\frac{q+i \cdot \Gamma}{2 \cdot \pi} = (\ln P + i \cdot \Theta) \quad (2.4)$$

Από την επίλυση προκύπτει το δυναμικό  $\phi$  και η ροική συνάρτηση  $\Phi$  ως εξής

$$\phi(P, \Theta) = -\frac{1}{2 \cdot \pi} (q \cdot \ln P - \Gamma \cdot \Theta) \quad (2.5)$$

$$\Phi(P, \Theta) = -\frac{1}{2 \cdot \pi} (q \cdot \Theta + \Gamma \cdot \ln P) \quad (2.6)$$

Ακολούθως κατανομή της ταχύτητας είναι

$$C_r = -\frac{q}{2 \cdot \pi \cdot P} \quad (2.7)$$

$$C_u = -\frac{\Gamma}{2 \cdot \pi \cdot P} \quad (2.8)$$

Ενώ για  $\Phi = k/2$  τότε προκύπτει η γενική εξίσωση της γραμμής ροής:

$$P = k \cdot e^{(-q \cdot \Theta / P)} \quad (2.9)$$

Έτσι για μια ορισμένη πηγή  $q$  και κυκλοφορία  $\Gamma$  η σχέση (3.9) εκφράζει το σύνολο των σπειρών οι οποίες έχουν τη μορφή λογαριθμικών γραμμών (Εικόνα 3.9). Η γωνία της κλίση των γραμμών αυτών είναι επίσης σταθερή και προκύπτει:

$$\tan\delta = \frac{C_r}{C_u} = -\frac{q}{\Gamma} = \text{σταθ.} \quad (2.10)$$

Έτσι προκύπτει ότι η καλύτερη δυνατή καμπύλη διαμόρφωσης του σπειροειδούς κελύφους με την προϋπόθεση της διδιάστατης ροής είναι η καμπύλη σπειροειδούς μορφής. Αυτή η καμπύλη καθορίζει τη διαμόρφωση του κελύφους και πληροί τις συνθήκες που προαναφέρθηκαν. Για μια δοσμένη τιμή της πηγή  $q$  η οποία επιλέγεται με βάση το κανονικό σημείο λειτουργίας του στροβίλου τότε μπορούμε να μεταβάλουμε την κυκλοφορία  $\Gamma$  ρυθμίζοντας την παροχή όγκου που διέρχεται από το στρόβιλο.

Οι εξισώσεις (3.7) και (3.8) αποτελούν τις βασικές εξισώσεις με βάση τις οποίες διαμορφώνεται η γεωμετρία του σπειροειδούς κελύφους. Για τα μεγέθη της παροχής όγκου  $QI$  και της κυκλοφορία  $\Gamma$  μπορούν να προσδιοριστούν από την εξίσωση ενέργειας του στροβίλου και έτσι η σχέση (3.8) μπορεί να γραφτεί ως:

$$C_u \cdot P = \text{σταθ.} \quad (2.11)$$

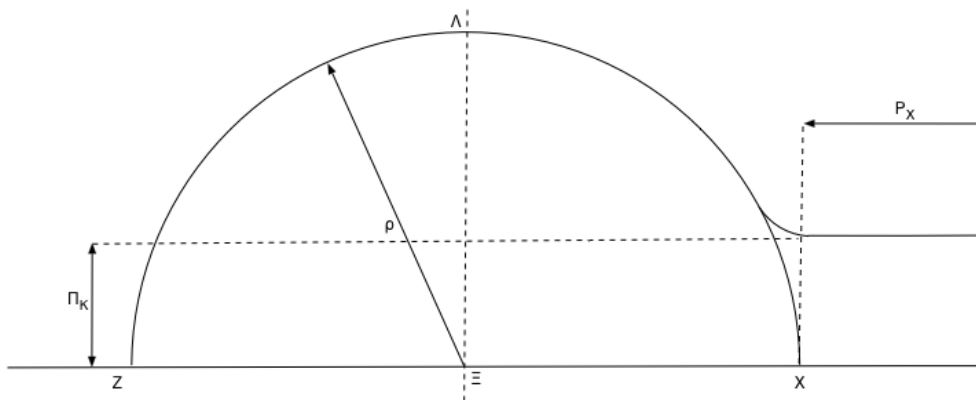
Η σχέση (3.11) εκφράζει την αρχή διατήρησης της συστροφής και αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο κατασκευής των σπειροειδών κελυφών και ιδιαίτερα για κελύφη μεγάλων σε διαστάσεις υδροστροβίλων.

Στον υπολογισμό του σπειροειδούς κελύφους με τη μέθοδο της αρχής της διατήρησης της συστροφής δεν λαμβάνεται υπόψη η συνεκτικότητα του ρευστού στην οποία οφείλεται η ανάπτυξη οριακών στρωμάτων στα τοιχώματα του κελύφους που έχουν ως συνέπεια την ελάττωση της μέσης ταχύτητας σε κάθε διατομή. Για να εξασφαλισθεί η διέλευση της δεδομένης παροχής θα πρέπει οι διατομές να γίνουν μεγαλύτερες από αυτές που αρχικά προέκυψαν. Η διόρθωση αυτή γίνεται εμπειρικά, σύμφωνα με αποτελέσματα μετρήσεων, είτε

θεωρούνται οι διάφορες διατομές του κελύφους ως κυκλικές, ισοδύναμης ακτίνας R.O.Pfeiderer προτείνει την ακόλουθη διόρθωση  $\Delta P$  της ισοδύναμης ακτίνας  $P$  που αντιστοιχεί στη γωνία  $\varphi$  (σε μοίρες):

$$\Delta P = \frac{\pi}{6} \cdot \lambda \cdot P_x \cdot \frac{\varphi}{360} \quad (2.12)$$

Η αντιστοιχία των μεγεθών  $P_x$  και  $\rho$  φαίνονται στο σχήμα. Η τιμή του συντελεστή  $\lambda$  των υδραυλικών απωλειών λαμβάνεται της τάξης του  $\lambda=0.0475$ . Η μικρότερη διάμετρος  $P$  λαμβάνεται ίση προς  $\rho_{\min}=\Pi_K$ , όπου  $\Pi_K$  είναι το πλάτος του σπειροειδούς κελύφους στην έξοδο της περωτής. Εάν από τον υπολογισμό προκύπτει  $\rho < \rho_{\min}=\Pi_K$  τότε η κυκλική διατομή θα πρέπει να αντικατασταθεί με μια τραπεζοειδή ή ορθογωνική μέχρι τη γωνία  $\varphi$  για την οποία:  $\rho=\Pi_K$ .



Εικόνα 3.10 Κύρια γεωμετρικά μεγέθη μεσημβρινής τομής του σπειροειδούς κελύφους

Υπάρχει μια ακόμη μέθοδος κατασκευής των σπειροειδών κελυφών που βασίζεται στην διατήρηση σταθερής μέσης ταχύτητας. Η σημαντική απόκλιση μεταξύ της διαμονής της ταχύτητας που προκύπτει από την εφαρμογή της αρχής διατήρησης της συστροφής με αυτή που μετρήθηκε σε διάφορα πειράματα και η σημαντική ανακρίβεια στη διόρθωση της διατομής ώστε να ληφθεί υπόψη η συνεκτικότητα του ρευστού, οδήγησαν στην εισαγωγή μια νέας μεθόδου η οποία βασίζεται στην αρχή σταθερής μέσης ταχύτητας της ροής στις διάφορες διατομές. Η διαφορά στον ολικό βαθμό απόδοσης για την ίδια αντλία και σπειροειδές κέλυφος σχεδιασμένο με την αρχή διατήρησης της συστροφής είναι πολύ μικρή

δίνοντας μικρό πλεονέκτημα στην πρώτη μέθοδο. Αντίθετα με τη δεύτερη μέθοδο η διανομή της στατικής πίεσης στο κέλυφος είναι περισσότερο ομοιόμορφη.

Η μέση ταχύτητα στις διάφορες μεσημβρινές τομές του σπειροειδούς κελύφους λαμβάνεται από τη σχέση:

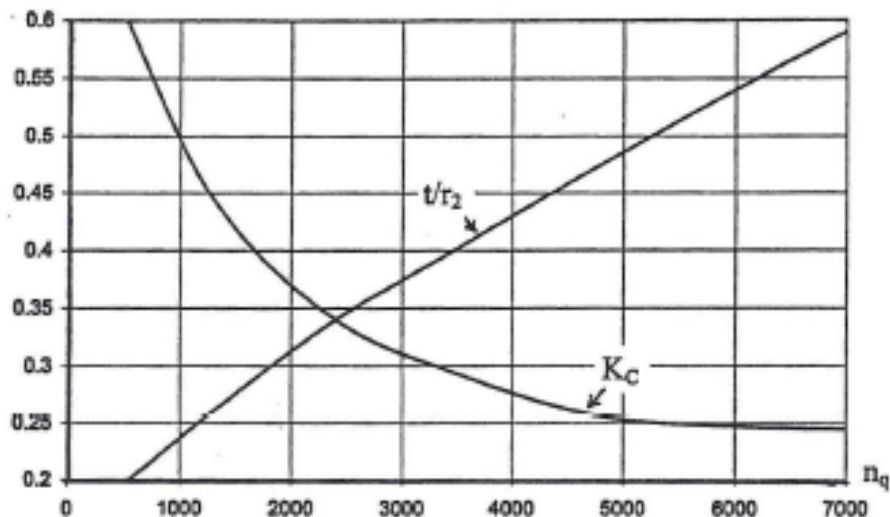
$$C_u = K_c \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (2.13)$$

στην οποία η τιμή του εμπειρικού συντελεστή  $K_c$  λαμβάνεται από το διάγραμμα Εικόνα 3.11 συναρτήσει του ειδικού αριθμού στροφών.

Στην τιμή αυτή του  $K_c$  έχει ληφθεί υπόψη η ανομοιομορφία της διανομής της ταχύτητας στη διατομή και η επίδραση της συνεκτικότητας του ρευστού (ανάπτυξη οριακών στρωμάτων). Η διατομή του σπειροειδούς κελύφους σε γωνία  $\varphi$  θα πρέπει να είναι ίση προς:  $A = Q/c_u$ , όπου:

$$Q = \frac{\varphi}{2 \cdot \pi} \cdot Q_1 = \frac{\varphi}{2 \cdot \pi} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot I_K \cdot C_{K,r} \quad (2.14)$$

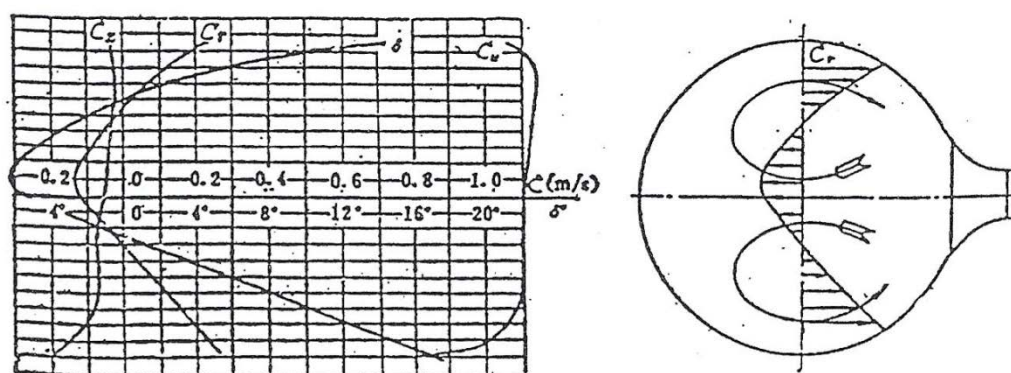
Σύμφωνα με τις τιμές του συντελεστή  $K_c$  από το διάγραμμα Εικόνα 3.11, η τιμή της μέσης ταχύτητας  $C_u$  είναι της τάξης του 0.55-0.82 της  $c_{Ku}$  (οι μικρότερες τιμές αντιστοιχούν σε υψηλές τιμές του ειδικού αριθμού στροφών). Όλες οι διατομές ανήκουν σε ίδια οικογένεια (π.χ. κυκλικές ή ελλειπτικές διατομές) και αποφεύγονται οι οξείες γωνίες.



Εικόνα 3.11 Αδιάστατη μέση ταχύτητα συνάρτηση του ειδικού αριθμού στροφών

Στη συνέχεια αναπτύσσεται η πρώτη μέθοδος καθώς είναι αυτή η οποία χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

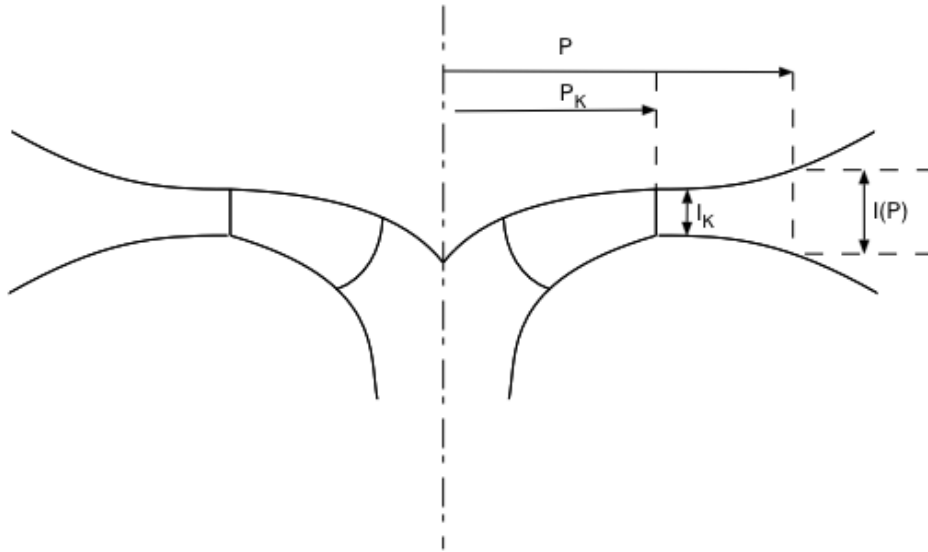
Για την καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών της ροής στο σπειροειδές κέλυφος παρουσιάζεται η κατανομή της ακτινικής και περιφερικής συνιστώσας της ταχύτητας στη διατομή εισόδου της στεφάνης (Εικόνα 3.12). Παρατηρείται ότι τόσο η ακτινική όσο και περιφερική ταχύτητα είναι σταθερή κατά το σπειροειδές τμήμα του κελύφους ενώ κατά το μη σπειροειδές τμήμα η ακτινική ταχύτητα αυξάνεται και η περιφερική ταχύτητα μεταβάλλεται έντονα. Επίσης προκύπτει δευτερεύουσα ροή εντός του σπειροειδούς κελύφους το μέγεθος της οποίας διαφοροποιείται στα κατά μήκος των διαφόρων τμημάτων. Η πραγματική ροή στο σπειροειδές κέλυφος περιγράφεται από μοντέλο τρισδιάστατης ροής.



Εικόνα 3.12 Η κατανομή της ταχύτητας και η διαμόρφωση δευτερεύουσας ροής στο σπειροειδές κέλυφος

### 3.1.2 Ανάπτυξη της μεθόδου διατήρησης της συστροφής

Αρχικά παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη τα οποία χαρακτηρίζουν τη γεωμετρία του σπειροειδούς κελύφους. Για τη σχεδίαση των μεσημβρινών τομών με βάση το κριτήριο σταθερής συστροφής κάθε γωνία  $\phi$  θα αντιστοιχεί σε μια μεσημβρινή τομή η γεωμετρία της οποίας πρέπει να πληροί το κριτήριο αυτό (Εικόνα 3.13).



Εικόνα 3.13 Μεσημβρινή τομή σπειροειδούς κελύφους ακτινικού στρόβιλου

Από την αρχή διατήρησης της συνέχειας προκύπτει ότι:

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot P_K \cdot I_K \cdot C_{r,K} = 2 \cdot \pi \cdot P \cdot I(P) \cdot C_r(P) \rightarrow P_K \cdot I_K \cdot C_{r,K} = P \cdot I(P) \cdot C_r(P) \quad (2.15)$$

Από την αρχή διατήρησης της συστροφής προκύπτει ότι:

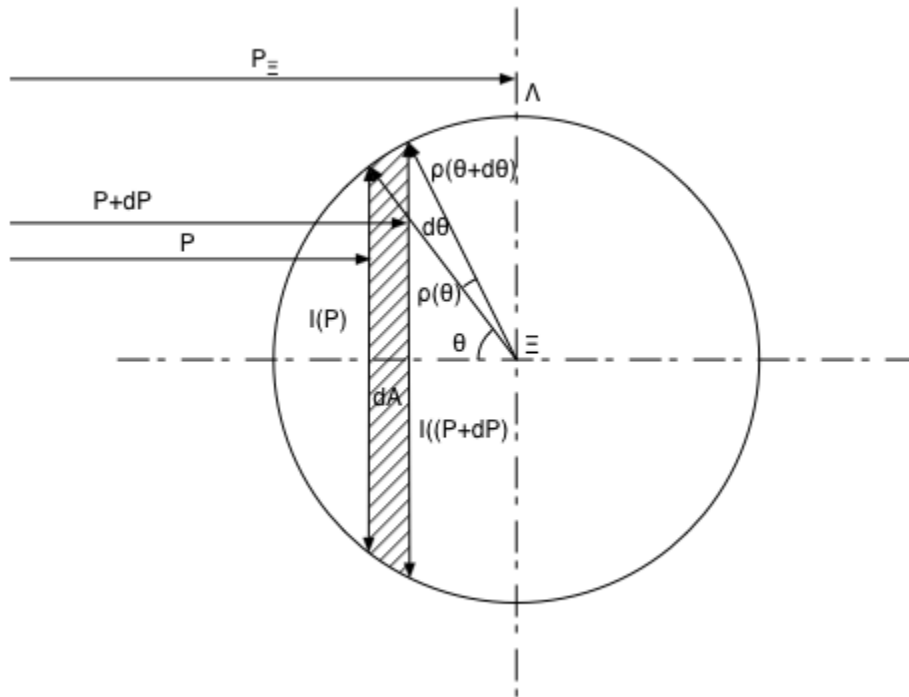
$$C_{u,K} \cdot P_K = C_u(P) \cdot P = K = \text{σταθ.} \quad (2.16)$$

Η παροχή όγκου που διέρχεται από τη διατομή του σπειροειδούς κελύφους και χαρακτηρίζεται από τη γωνία  $\varphi$  (οι γωνίες  $\varphi$  μετρώνται από το σημείο εκκίνησης της σπείρας που στερεοποιήθηκε) όπως φαίνεται λόγω της αξονικής συμμετρίας στην έξοδο της πτερωτής, θα είναι:

$$Q = \frac{\varphi}{2 \cdot \pi} \cdot Q_I \quad (2.17)$$

Όπου  $Q_I$  η συνολική παροχή που παρέχεται στο στρόβιλο. Η παροχή  $Q$  για κάθε γωνία  $\varphi$  θα είναι ίση προς το ολοκλήρωμα του  $dQ = c_u dA$ , ορισμένο από την ακτίνα  $-r$  έως  $r$  (Εικόνα 3.14) δηλαδή:

$$Q = \int_{-r}^r c_u(P) \cdot dA \quad (2.18)$$



Εικόνα 3.14 Μεσημβρινή τομή σφαιροειδούς κελύφους

ενώ

$$I(P) = 2 \cdot \rho \cdot \sin(\theta) \quad (2.19)$$

$$P = P_{\Xi} + \rho \cdot \cos(\theta) \quad (2.20)$$

$$dP = \rho \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \quad (2.21)$$

Άρα η σχέση (3.18) με τη βοήθεια των σχέσεων (3.19) (3.20) και (3.21) γίνεται:

$$Q = 2 \cdot \rho^2 \cdot K \cdot \int_0^{\pi} \frac{\sin^2(\theta)}{P_{\Xi} + \rho \cdot \cos(\theta)} d\theta \quad (2.22)$$

Θέτοντας

$$J = \frac{Q}{K} = 2 \cdot \rho^2 \cdot \int_0^{\pi} \frac{\sin^2(\theta)}{P_{\Xi} + \rho \cdot \cos(\theta)} d\theta \quad (2.23)$$



Η σχέση (3.23) με τη βοήθεια της σχέσης (3.17)

$$J = \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot K} \cdot Q_1 = \frac{\Phi}{2 \cdot \pi} \cdot J_o \quad (2.24)$$

### 3.13 Προσδιορισμός της μέσης ταχύτητας στο τμήμα εισόδου

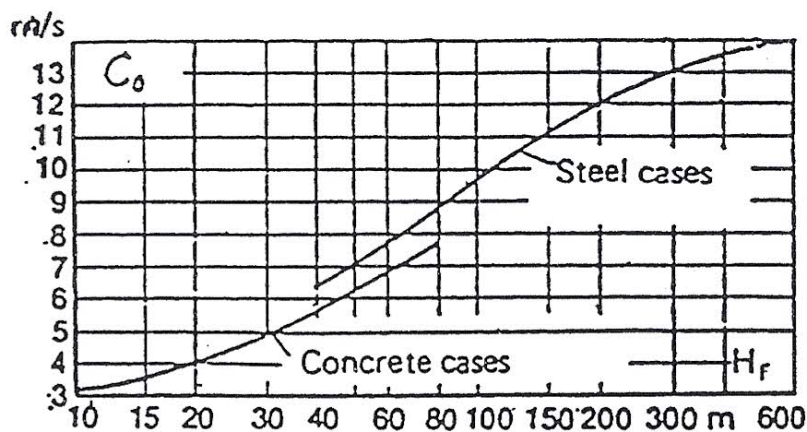
Θεωρείται ότι η ροή εισέρχεται από το τμήμα εισόδου του υδροστροβίλου ομοιόμορφα. Η μέση ταχύτητα στη διατομή εισόδου θα είναι:

$$C_o = \frac{Q_o}{A_o} \quad (2.25)$$

Όπου  $A_o$  είναι η διατομή του τμήματος εισόδου και  $Q_o$  είναι η παροχή όγκου που διέρχεται από τη διατομή  $A_o$ . Γίνεται λοιπόν φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της  $C_o$ , τόσο μικρότερη γίνεται η διατομή εισόδου του κελύφους. Άρα οι ολικές διαστάσεις του σπειροειδούς κελύφους μπορούν να μειωθούν εάν αυξηθεί η ταχύτητα  $C_o$ . Αντιθέτως όμως οι υδραυλικές απώλειες αυξάνουν αισθητά εάν αυξηθεί κατά πολύ η ταχύτητα στο τμήμα εισόδου του κελύφους. Η μέση ταχύτητα προσδιορίζεται από πρακτική εμπειρία και στατιστικά δεδομένα. Μία συσχέτιση που προσδιορίζει την ταχύτητα στη διατομή εισόδου του σπειροειδούς κελύφους είναι η εξής

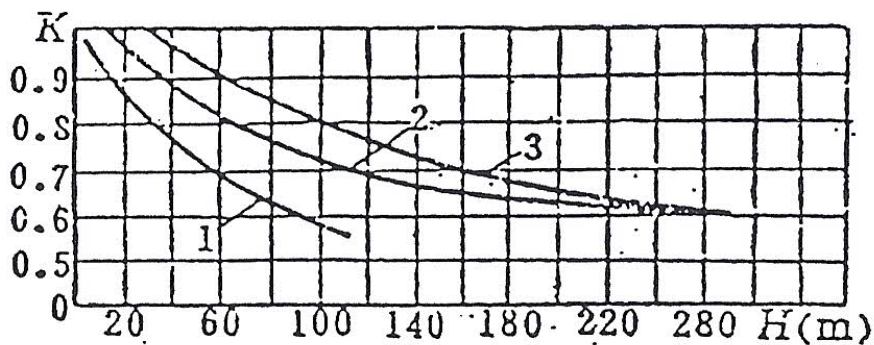
$$C_o = K_c \cdot \sqrt{H_r} \quad (2.26)$$

Όπου  $H_r$  είναι η υπολογισμένη υδραυλική πτώση του υδροστροβίλου και  $K_c$  είναι ο συντελεστής συσχέτισης της ταχύτητας στο τμήμα εισόδου του κελύφους. Τιμές του  $K_c$  για κελύφη από σκυρόδεμα κυμαίνονται από 0.8 έως 1.0 και για μεταλλικά κελύφη από 0.7 έως 0.8.



Εικόνα 3.15 Μέση ταχύτητα στο τμήμα εισόδου του κελύφους συναρτήσει της υδραυλικής πτώσης (Krishna, 1997)

Η Εικόνα 3.15 παρουσιάζει τις καμπύλες της μέσης ταχύτητας συναρτήσει της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης για σπειροειδή κελύφη από σκυρόδεμα και από μέταλλο. Είναι επιθυμητό να υπάρχει μεγαλύτερη μέση ταχύτητα στο τμήμα εισόδου. Τα στατιστικά δεδομένα που παρουσιάζονται στο διάγραμμα (Εικόνα 3.16) δείχνουν γιατί είναι επιθυμητό ο συντελεστής  $K_c$  να έχει μεγαλύτερες τιμές. Η καμπύλη 1 παρουσιάζει τον συντελεστή  $K_c$  που χρησιμοποιήθηκε πριν το έτος 1960, η καμπύλη 2 το 1960 και η καμπύλη 3 την σημερινή τιμή.

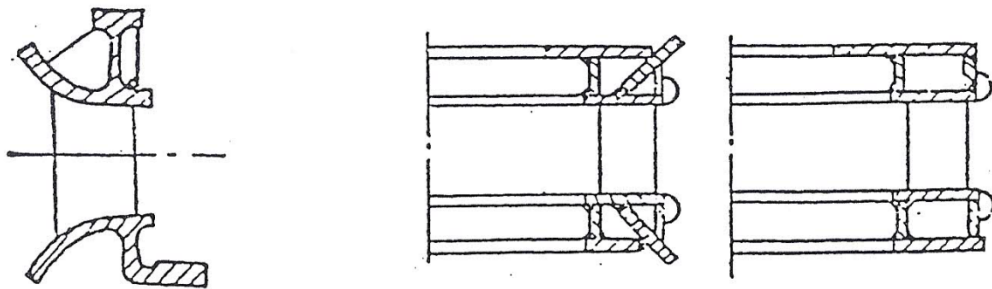


Εικόνα 3.16 Συντελεστής συσχέτισης της μέσης ταχύτητας στο τμήμα εισόδου (Krishna, 1997)

Από μελέτες έχει βρεθεί ότι η επιλογή του συντελεστή συσχέτισης  $K_c$  από την καμπύλη 3 προκειμένου να γίνει μείωση των διαστάσεων του κελύφους κατά 5 ή 10%, δεν επιφέρει σημαντική μείωση στην απόδοση του υδροστροβίλου.

### 3.2 Υπολογισμός των διαστάσεων του σπειροειδούς κελύφους

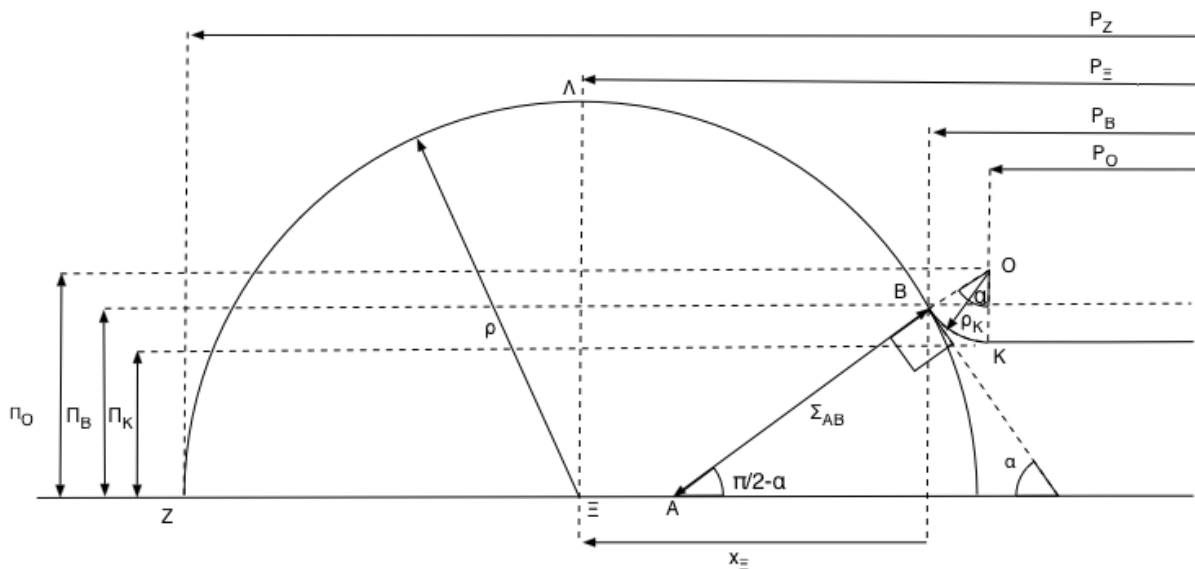
Οι διαστάσεις των μεσημβρινών τομών του σπειροειδούς κελύφους καθορίζονται από τη σχέση (3.23). Οι σχέσεις υπολογισμού των διαστάσεων του σπειροειδούς κελύφους διαφοροποιούνται όταν πρόκειται για μεταλλικό κέλυφος ή για κέλυφος από σκυρόδεμα. Η υπολογιζόμενη επιφάνεια για μεταλλικά κελύφη εξαρτάται από το είδος και τη μορφή των οδηγητικών περυγίων. Οι σημαντικότερες μορφές στεφάνης οδηγητικών περυγίων είναι εκείνες με παράλληλες πλάκες (parallel covers) και εκείνες με ομαλοποιημένα άκρα (flared rims covers) (Εικόνα 3.17). Η μορφή στεφάνης με οδηγητικά περυγία παράλληλων πλακών, εξαιτίας της ευκολίας στην κατασκευή είναι η πιο διαδεδομένη, ειδικότερα για την κατασκευή μεγάλων υδροστροβίλων.



Εικόνα 3.17 Ομαλοποιημένα άκρα (flared rims covers) και άκρα παράλληλων πλακών (parallel covers)

### 3.2.1 Υπολογιστικές σχέσεις της γεωμετρίας ομαλοποιημένων άκρων

Τα οδηγητικά πτερύγια με ομαλοποιημένες άκρες (flaired rims) εξομαλύνουν την σύνδεση με το σπειροειδές κέλυφος. Η γωνία  $\alpha$  της επαπτόμενης γραμμής στο τμήμα εξόδου της στεφάνης που αποτελείται από τα οδηγητικά πτερύγια είναι σταθερή σε όλη την διατομή του κελύφους. Η συνήθης τιμή της γωνίας αυτής είναι  $55^\circ$ . Λόγω γεωμετρικού περιορισμού η κυκλική γεωμετρία μετατρέπεται σε ελλειπτική προς στο τελείωμα του σπειροειδούς κελύφους πλησίον της γλωπτίδας προκειμένου να ισχύουν σε αυτό το τμήμα η υποθέσεις της σταθερής συστροφής και της συνέχειας. Τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη του κυκλικού όπως και του ελλειπτικού τμήματος παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 3.18 Βασικά μεγέθη διαστάσεων κυκλικής γεωμετρίας

Το κυκλικό τμήμα του κελύφους διαμορφώνει επιφάνεια μέσα από την οποία περνά ολόκληρη η ροή και η οποία επηρεάζεται ελαφρώς από τη στεφάνη. Ενώ η περιοχή της ροής η οποία επηρεάζεται περισσότερο από τη στεφάνη είναι αυτή στην οποία διαμορφώνεται η ελλειπτική διατομή. Οι εξισώσεις υπολογισμού παρουσιάζονται παρακάτω.

Το τμήμα εισόδου είναι το τμήμα από το οποίο εισέρχεται το ρευστό στο σπειροειδές κέλυφος και περιγράφεται από τις εξής σχέσεις

$$Q_o = \frac{Q \cdot \varphi_o}{360^\circ} \quad (2.27)$$

$$A_o = \frac{Q_o}{C_o} = \pi \cdot \rho_o^2 \quad (2.28)$$

$$x_{\Xi,o} = \sqrt{\rho_o^2 - \Pi_{B,o}^2} \quad (2.29)$$

$$P_{\Xi,o} = P_{B,o} + x_{\Xi,o} \quad (2.30)$$

$$P_{Z,o} = P_{\Xi,o} + \rho_o \quad (2.31)$$

$$J_o = 2 \cdot \pi \cdot \left( P_{\Xi,o} - \sqrt{P_{\Xi,o}^2 - \rho_o^2} \right) \quad (2.32)$$

➤ Το ενδιάμεσο τμήμα είναι εκείνο που συνδέει το τμήμα εισόδου με το ελλειπτικό τμήμα του σπειροειδούς κελύφους και περιγράφεται από τις εξής σχέσεις

➤ **Κυκλική γεωμετρία**

$$A_i = \pi \cdot \rho_i^2 \quad (2.33)$$

$$x_{\Xi,i} = \sqrt{\rho_i^2 - \Pi_{B,i}^2} \quad (2.34)$$

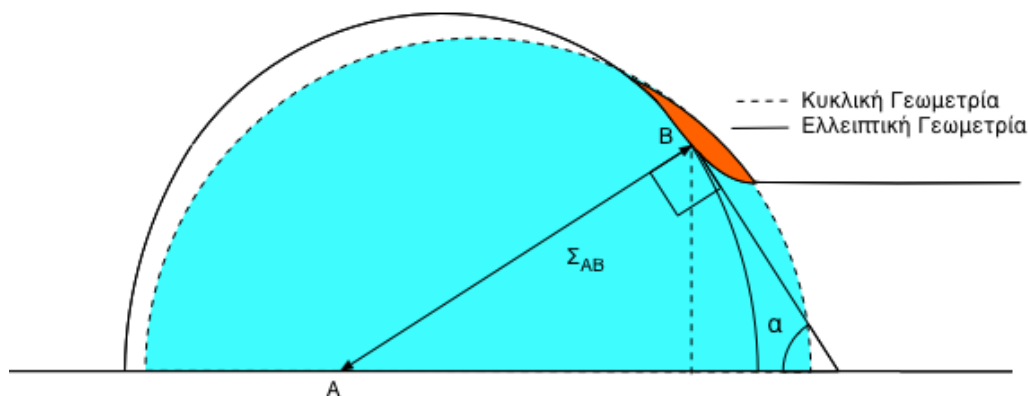
$$P_{\Xi,i} = P_{B,i} + x_{\Xi,i} \quad (2.35)$$

$$P_{Z,i} = P_{\Xi,i} + \rho_i \quad (2.36)$$

$$J_i = 2 \cdot \pi \cdot \left( P_{\Xi,i} - \sqrt{P_{\Xi,i}^2 - \rho_i^2} \right) \quad (2.37)$$

➤ **Ελλειπτική γεωμετρία**

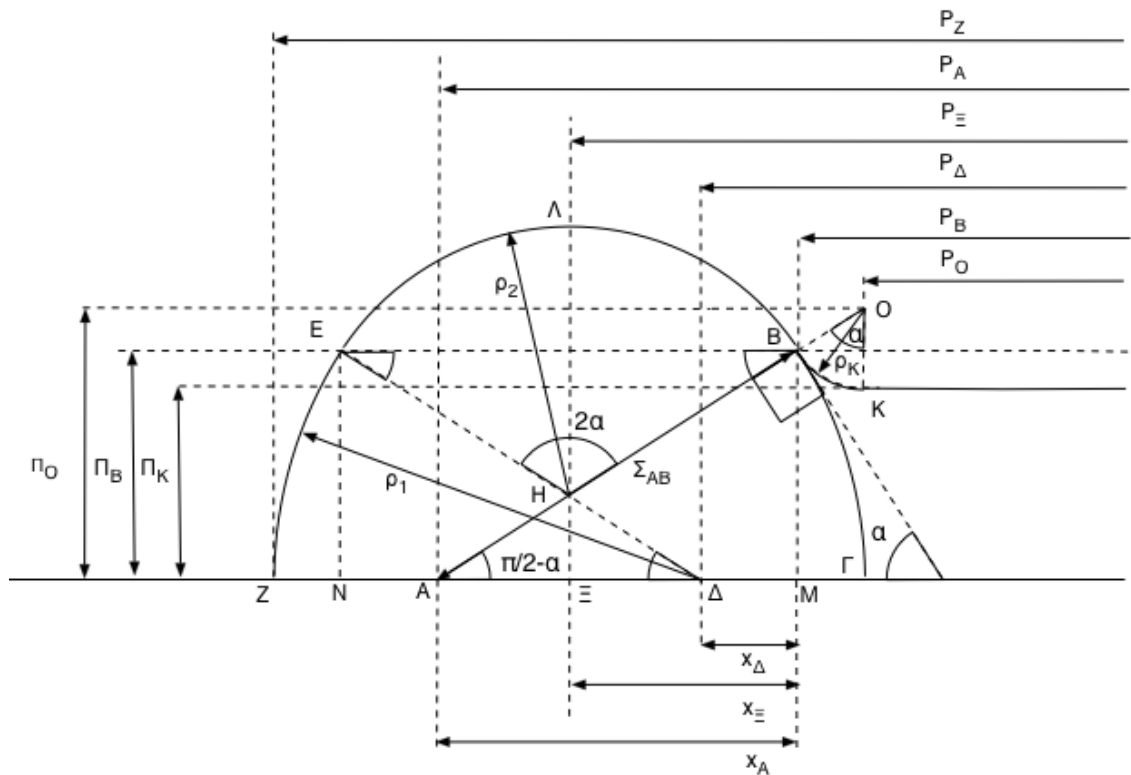
Όταν  $\rho_i \leq \Sigma_{AB} = \Pi_B / \cos \alpha$  τότε μέρος της κυκλικής επιφάνειας δεν αποτελεί τμήμα του κελύφους (Εικόνα 3.19) και άρα δεν μπορεί να ισχύει η διατήρηση της συστροφής που είναι προϋπόθεση για τον σχεδιασμό.



Εικόνα 3.19 Μεταβολή της κυκλικής γεωμετρίας σε ελλειπτική

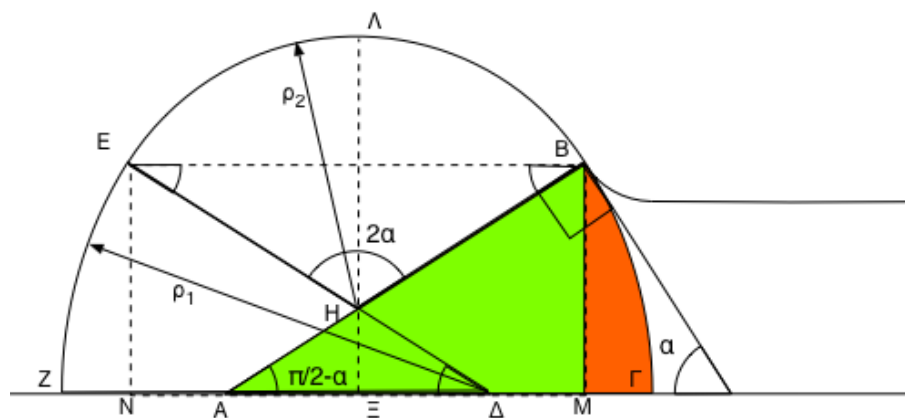
Για την ισχύει η προϋπόθεση διατήρησης της συστροφής και της συνέχειας αυτή η επιφάνεια της διατομής που διαμορφώνεται από το ελλειπτικό τμήμα θα πρέπει να είναι ίση με την κυκλική επιφάνεια που υπολογίζεται με βάση τις σχέσεις (3.33) και (3.37) για το κάθε τμήμα.

Αναλυτικά η ελλειπτική γεωμετρία (Εικόνα 3.20) διαμορφώνεται από τους δύο κυκλικούς τομείς ABΓ και ΔΕΖ με κέντρα Α και Δ αντίστοιχα οι οποίοι έχουν την ίδια ακτίνα  $\rho_1$ . Η ακτίνα  $\rho_1$  είναι σταθερή και ίση με τη διάσταση  $\Sigma_{AB}$ . Κρατώντας τον κυκλικό τομέα ABΓ σταθερό και μετακινώντας τον κυκλικό τομέα ΔΕΖ κατά τον άξονα x, στην τομή τους διαμορφώνεται το κέντρο κυκλικού τομέα ΗΕΛΒ με ακτίνα  $\rho_2$ .



Εικόνα 3.20 Βασικά μεγέθη διαστάσεων ελλειπτικής γεωμετρίας

Η επιφάνεια της ελλειπτικής γεωμετρίας προκύπτει υπολογίζοντας τις επιμέρους επιφάνειες που σχηματίζονται από τους κυκλικούς τομείς που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Πιο αναλυτικά υπολογίζεται η επιφάνεια του τμήματος MBΓM (Εικόνα 3.21) ως εξής



Εικόνα 3.21 Υπολογισμός επιφάνειας ελλειπτικής γεωμετρίας A1

$$A_1 = [E_{AB\Gamma A} - E_{ABMA}] - [E_{\Delta EZ\Delta} - E_{\Delta EN\Delta}] \quad (2.38)$$

$$E_{AB\Gamma A} = E_{\Delta EZ\Delta} \quad (2.39)$$

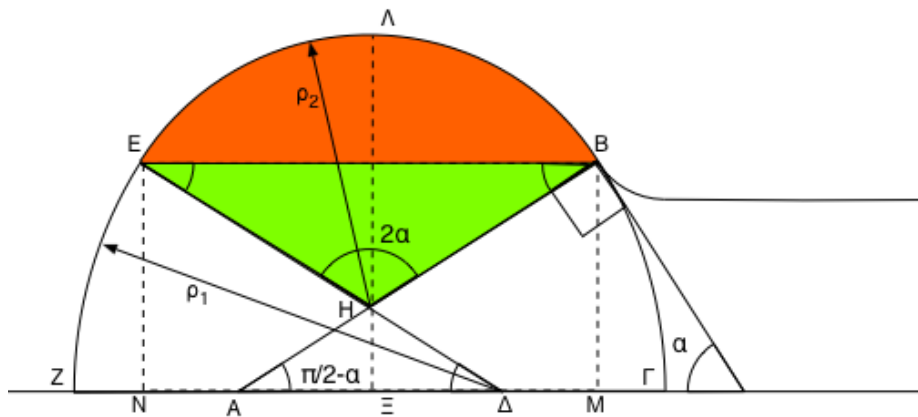
$$E_{ABMA} = E_{\Delta EN\Delta} \quad (2.40)$$

$$E_{AB\Gamma A} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) \cdot \rho_1^2 \quad (2.41)$$

$$E_{ABMA} = \rho_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \rho_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \quad (2.42)$$

Άρα από τις σχέσεις

$$A_1 = \rho_1^2 \cdot \left[ (\pi - 2 \cdot \alpha) - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \right] \quad (2.43)$$



Εικόνα 3.22 Υπολογισμός επιφάνειας ελλειπτικής γεωμετρίας A2

Η επιφάνεια του τμήματος EΛΒΕ (Εικόνα 3.22) ως εξής

$$A_2 = [E_{HE\Lambda BH} - E_{HEB\Lambda H}] \quad (2.44)$$

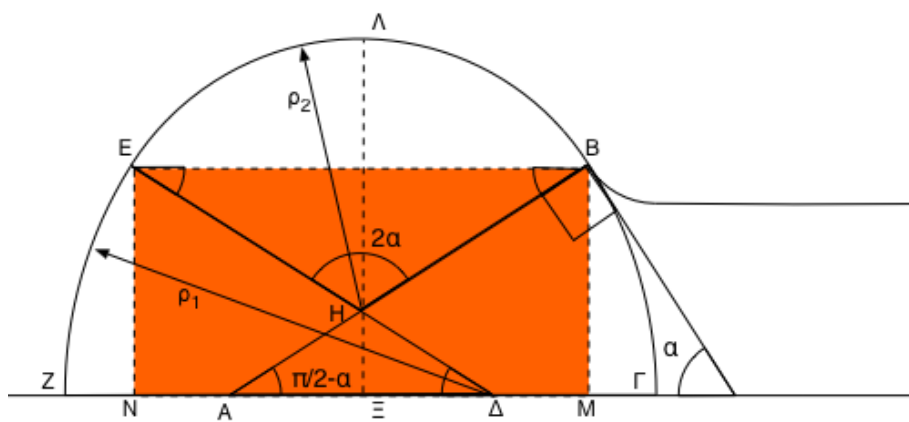
$$E_{HE\Lambda BH} = \alpha \cdot \rho_2^2 \quad (2.45)$$



$$E_{\text{HEBH}} = \rho_2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \rho_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \quad (2.46)$$

Άρα από τις σχέσεις

$$A_2 = \rho_2^2 \cdot \left[ \alpha - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \right] \quad (2.47)$$



Εικόνα 3.23 Υπολογισμός επιφάνειας ελλειπτικής γεωμετρίας A3

Η επιφάνεια του τμήματος ΕΛΒΕ (Εικόνα 3.22) ως εξής

$$A_3 = E_{\text{MNEBM}} \quad (2.48)$$

$$E_{\text{MNEBM}} = 2 \cdot \rho_2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \rho_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \quad (2.49)$$

Άρα από τις σχέσεις

$$A_3 = 2 \cdot \rho_2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \rho_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \quad (2.50)$$

Άρα η συνολική επιφάνεια της ελλειπτικής γεωμετρίας στο σπειροειδές κέλυφος θα είναι η εξής:

$$A = 2 \cdot (A_1 + A_2 + A_3) \quad (2.51)$$

Άρα από τις σχέσεις

$$\boxed{A = 2 \cdot \rho_2^2 \cdot \left[ \alpha - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \right] + 4 \cdot \rho_2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \rho_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) + 2 \cdot \rho_1^2 \cdot \left[ (\pi - 2 \cdot \alpha) - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \right]} \quad (2.52)$$

Ενώ τα υπόλοιπα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ελλειπτικής διατομής παρουσιάζονται ακολούθως:

$$x_{A,i} = \Sigma_{AB} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \quad (2.53)$$

$$x_{\Xi,i} = \rho_{2,i} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \quad (2.54)$$

$$x_{\Delta,i} = 2 \cdot x_{\Xi,i} - x_{A,i} \quad (2.55)$$

$$P_{A,i} = P_{B,i} + x_{A,i} \quad (2.56)$$

$$P_{\Xi,i} = P_{B,i} + x_{\Xi,i} \quad (2.57)$$

$$P_{\Delta,i} = P_{B,i} + x_{\Delta,i} \quad (2.58)$$

$$P_{Z,i} = P_{\Delta,i} - \Sigma_{AB} \quad (2.59)$$

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να υπολογίσουμε την γεωμετρία των διατομών για κάθε γωνία  $\varphi$  και να σχεδιάσουμε το σπειροειδές κέλυφος με χρήση αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για τους υπολογισμούς της γεωμετρίας των μεσημβρινών τομών του σπειροειδούς κελύφους παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

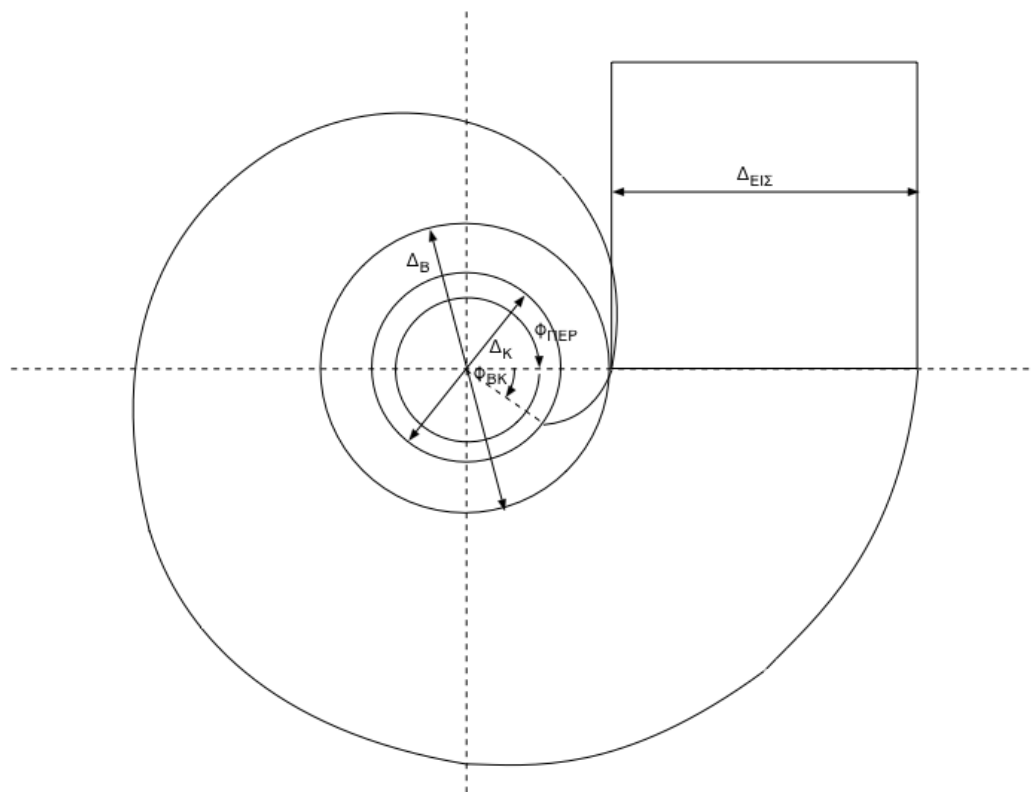
## 4 Ανάπτυξη αλγορίθμου σε κώδικα Fortran

Για την διαμόρφωση της γεωμετρίας των κελυφών αναπτύχθηκε αλγόριθμος σε κώδικα Fortran 99. Επίσης για τη γραφική απεικόνιση του σπειροειδούς κελύφους απαιτείται το ανοιχτό λογισμικό gnuplot. Ο αλγόριθμος με βάση τα δεδομένα εισόδου παρουσιάζει τη γραφική απεικόνιση του σπειροειδούς κελύφους με χρήση εντολών συστήματος του gnuplot. Τα δεδομένα εισόδου του αλγορίθμου παρουσιάζονται παρακάτω

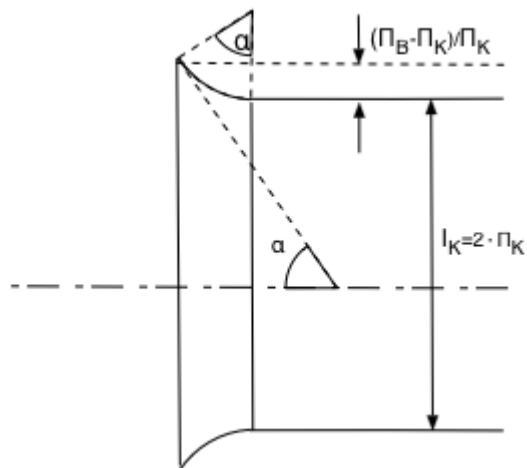
<i>Δεδομένα Εισόδου του Αλγορίθμου</i>	
<i>Διάμετρος Διατομής Εισόδου του Κελύφους</i>	$\Delta_{ΕΙΣ}$ (m)
<i>Παροχή Όγκου του Κελύφους</i>	$Q$ (m <sup>3</sup> /h)
<i>Πλάτος Εξόδου Στεφάνης</i>	$I_K$ (m)
<i>Διάμετρος Εξόδου Στεφάνης</i>	$\Delta_K$ (m)
<i>Γωνία Περιέλιξης</i>	$\Phi_{ΠΕΡ}$ (deg)
<i>Γωνία Άκρων Στεφάνης</i>	$\alpha$ (deg)
<i>Πάχος Εισόδου Στεφάνης ως ποσοστό του πάχους εξόδου της στεφάνης</i>	$\frac{\Pi_B - \Pi_K}{\Pi_K}$
<i>Γωνία Γλωττίδας</i>	$\Phi_{BK}$ (deg)

Πίνακας 4.1 Δεδομένα εισόδου το αλγορίθμου

Επίσης για τους υπολογισμούς θα πρέπει να προσδιοριστούν οι τιμές της γωνίας περιέλιξης  $\varphi$  για τις οποίες θα υπολογιστούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Έτσι διαμορφώνονται οι μεσημβρινές τομές του σπειροειδούς κελύφους.



Εικόνα 4.1 Βασικές γεωμετρικές παράμετροι κατά την αξονική τομή του σπειροειδούς κελύφους



Εικόνα 4.2 Βασικές γεωμετρικές παράμετροι κατά την μεσημβρινή τομή του σπειροειδούς κελύφους

Τα δεδομένα εξόδου του αλγορίθμου είναι τα αρχεία που αναφέρουν τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου που διαμορφώθηκε καθώς και τα αρχεία που περιέχουν τις συντεταγμένες των σημείων που αποτελούν τις μεσημβρινές τομές.

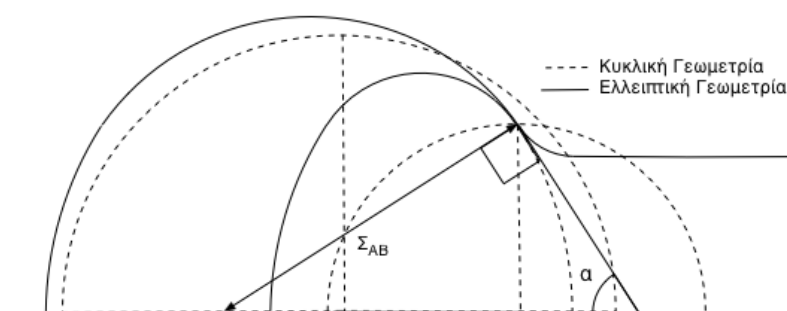
Προκειμένου να γίνει η κατασκευή του μοντέλου του κελύφους που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση τα αρχεία αυτά περιέχουν σε κωδικοποιημένη μορφή τα δεδομένα ώστε να μπορούν να αναγνωστούν από το σχεδιαστικό πρόγραμμα Design Modeler της σουίτας του Ansys Workbench

Παρακάτω γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των διαφόρων παραμέτρων του κώδικα.

1. Υπολογίζονται τα μεγέθη από τις σχέσεις (3.27) έως (3.32)
2. Με δεδομένη τη γωνία περιέλιξης  $\varphi_0$  για κάθε γωνία  $\varphi$  υπολογίζεται το  $J_i$  από σχέση

$$J = J_0 \cdot \frac{\varphi}{\varphi_0} \quad (3.1)$$

3. Δίνοντας τιμές στο  $\rho$  υπολογίζεται το  $J$  από τη σχέση (3.37) με τη βοήθεια των σχέσεων (3.33) έως (3.37) το οποίο θα ισούται με αυτό της σχέσης (4.1).
4. Στην περίπτωση που  $\rho \leq \Sigma_{AB} = \Pi_K / \cos \alpha$  τότε θα έχουμε ελλειπτική γεωμετρία. Δίνοντας τιμές στο  $\rho_2$  υπολογίζεται από τη σχέση (3.52) η επιφάνεια  $A$  η οποία θα ισούται με αυτή της σχέσης (3.33). Ακολούθως υπολογίζονται τα μεγέθη των σχέσεων (3.53) έως (3.59).



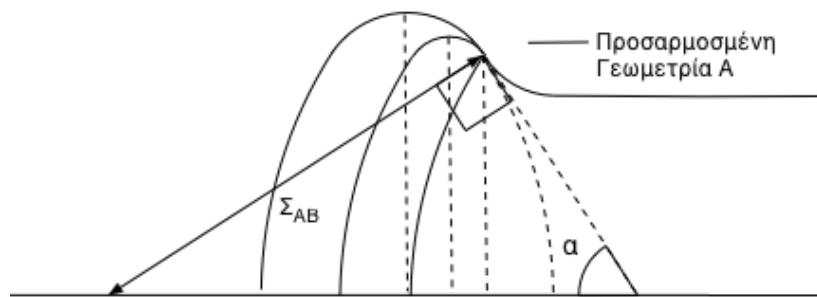
Εικόνα 4.3

5. Για την περίπτωση όπου  $\rho < \Pi_K$  τότε επειδή δεν ορίζεται το μέγεθος  $x$  από τη σχέση (3.34) και ακολούθως το  $J$  από τη σχέση (3.37) εφαρμόζεται μέθοδος πολυωνυμικής παρεμβολής για τον προσδιορισμό των υπολοίπων μεγεθών των τομών. Με βάση τα σημεία που ορίζονται από τη γωνία περιέλιξης και την μέγιστη ακτίνα της κάθε τομής καθώς και τα σημεία όπου κλείνει το κέλυφος

(διαμόρφωση της γλωττίδας), κατασκευάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα. Ακολούθως γίνεται η προσαρμογή πολυωνύμου με τον βέλτιστο βαθμό (ελάχιστη τυπική απόκλιση) ο οποίος μπορεί να είναι μέχρι δέκατος (Εικόνα 4.6).

6. Τέλος προσδιορίζονται οι τιμές της μέγιστης ακτίνας  $P_Z$  και της διατομής  $A$  για τις αντίστοιχες γωνίες περιέλιξης  $\varphi$  και ακολούθως τα λοιπά μεγέθη της γεωμετρίας των προσαρμοσμένων τομών δίνοντας τιμές στο  $\rho_2$ , και με τη βοήθεια των σχέσεων (3.53) έως (3.59) υπολογίζεται η τιμή της ακτίνας  $R_1$  η οποία θα ισούται με την τιμή που βρέθηκε από την πολυωνυμική προσαρμογή.

- Εάν  $\rho_2 > 0$  διαμορφώνεται η προσαρμοσμένη γεωμετρία  $A$  (Εικόνα 4.4) από τις σχέσεις των ελλειπτικών τομών (3.53) έως (3.59).



Εικόνα 4.4 Διαμόρφωσης προσαρμοσμένης γεωμετρίας  $A$  κατά την μεσημβρινή τομή

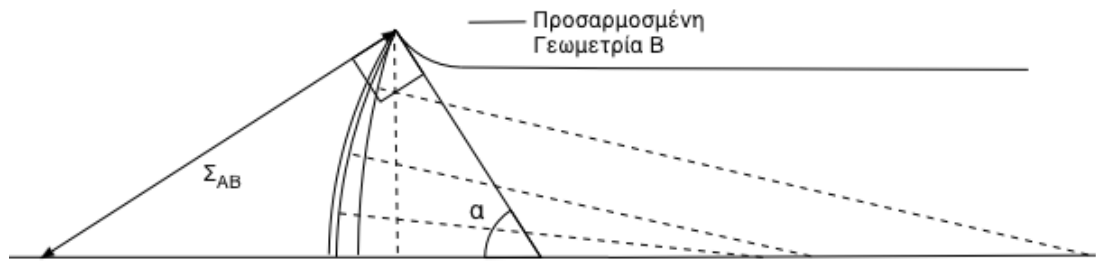
- Εάν  $\rho_2 < 0$  τότε διαμορφώνεται η προσαρμοσμένη γεωμετρία  $B$  (Εικόνα 4.5) Η προσαρμοσμένη γεωμετρία  $B$  είναι κυκλικής μορφής η οποία προκύπτει δίνοντας τιμές στο  $x_\Delta$ . Έτσι διαμορφώνεται κυκλικό τόξο με τα εξής χαρακτηριστικά.

$$P_\Delta = P_B - x_\Delta \quad (3.2)$$

$$a_i = \arctan \frac{\Pi_B}{x_{\Delta,i}} \quad (3.3)$$

$$\Sigma_{AB} = \frac{x_\Delta}{\cos a_i} \quad (3.4)$$

$$P_{Z,i} = P_{\Delta,i} + \Sigma_{AB} \quad (3.5)$$



Εικόνα 4.5 Διαμόρφωσης προσαρμοσμένης γεωμετρίας Β κατά την μεσημβρινή τομή

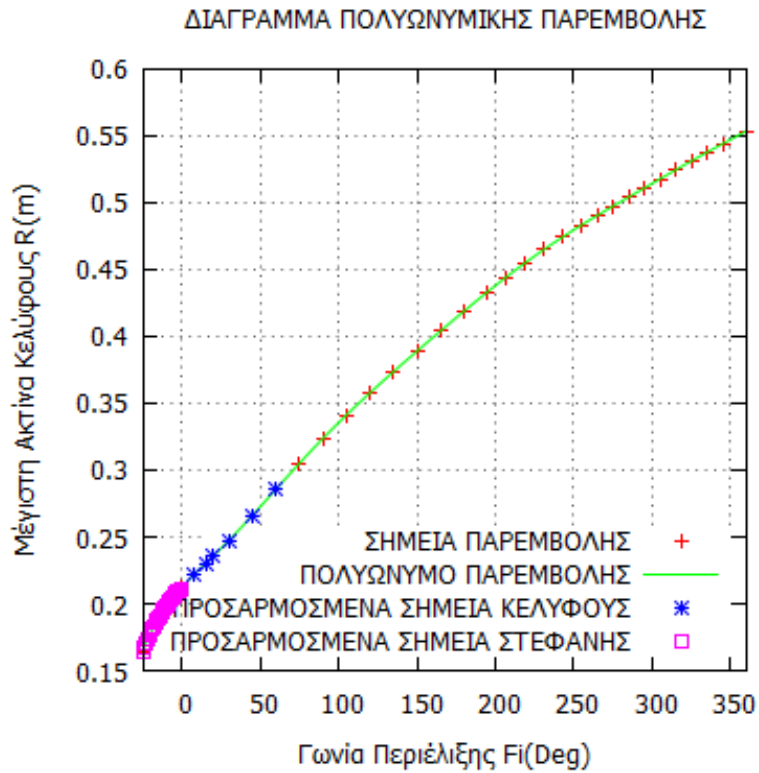
Το βήμα 6 της αλγοριθμική προσέγγισης πραγματοποιείται προκειμένου να ομαλοποιηθεί η διαμόρφωση της γλωττίδας του σπειροειδούς κελύφους. Πιο αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου παρέχεται από τα λογικά διαγράμματα ή διαγράμματα ροής στο Παράρτημα Α. Με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν γίνεται η γραφική αποτύπωση του σπειροειδούς κελύφους κατά την αξονική τομή (Εικόνα 4.7) που περνά από την αρχή των αξόνων του στροβίλου, τις μεσημβρινές τομές (Εικόνα 4.8) καθώς και σε τριδιάστατη απεικόνιση (Εικόνα 4.9).

Ενδεικτικά παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξάγονται από τον κώδικα για μια γκάμα κελυφών με βάση το μέγεθος της στεφάνης που διαθέτουν και χρησιμοποιώντας ως δεδομένα κυρίων διαστάσεων αυτά του εργαστηριακού υδροστροβίλου Francis. Για κάθε κατηγορία με βάση το μέγεθος της στεφάνης παρουσιάζονται τα εξής σπειροειδή κελύφη

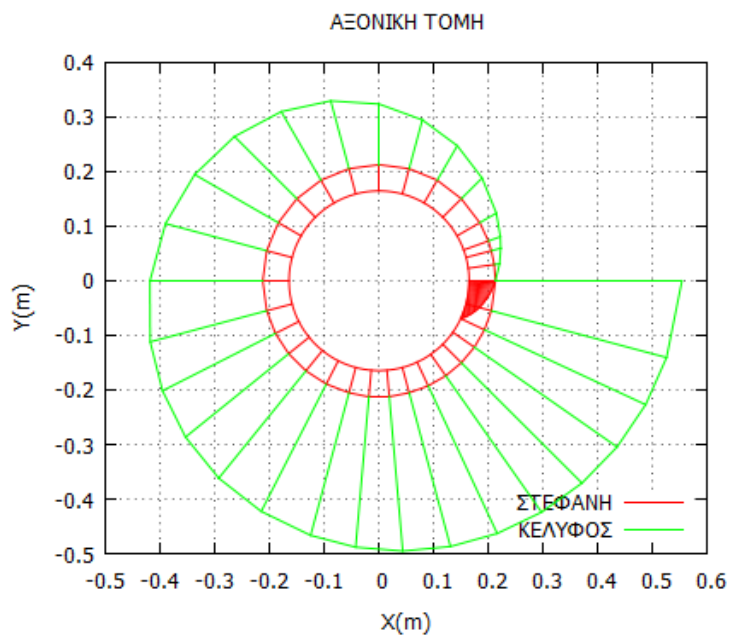
- Χωρίς στεφάνη (κατηγορία Α)
- Με μεσαίο μέγεθος στεφάνης (κατηγορία Β)
- Με μεγάλο μέγεθος στεφάνης (κατηγορία Γ)

Για κάθε κατηγορία διαμορφώνεται ένα παράδειγμα με βάση τα εξής χαρακτηριστικά

1. Μόνο κυκλική γεωμετρία τομών
2. Μικτή γεωμετρία τομών (δηλαδή συνδυασμός κυκλικής και ελλειπτικής)
3. Μόνο ελλειπτική γεωμετρία τομών
4. Μικτή γεωμετρία τομών με γωνία περιέλιξης μικρότερη των  $360^\circ$

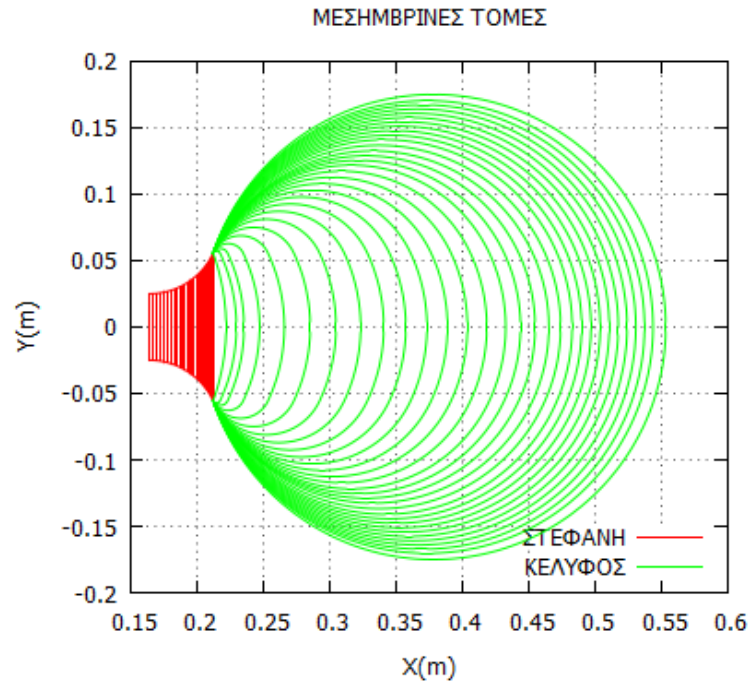


Εικόνα 4.6 Διάγραμμα πολυωνυμικής παρεμβολής από αλγόριθμο υπολογισμών

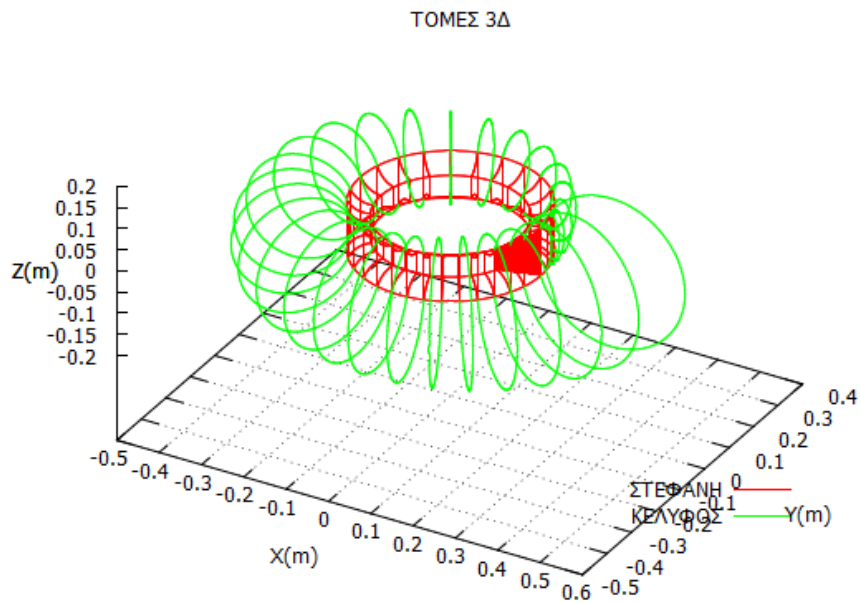


Εικόνα 4.7 Αξονική τομή σπειροειδούς κελύφους από αλγόριθμο υπολογισμών

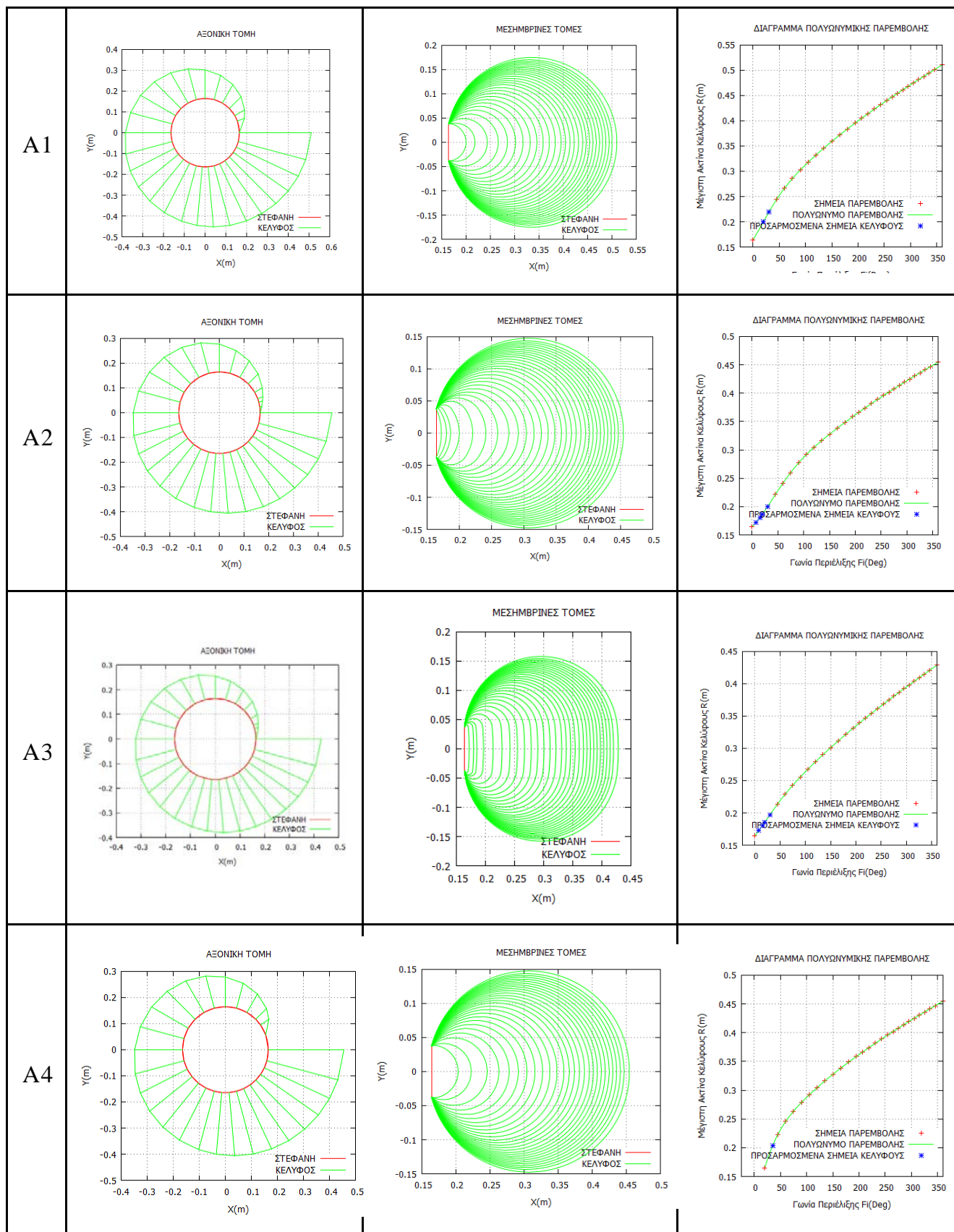




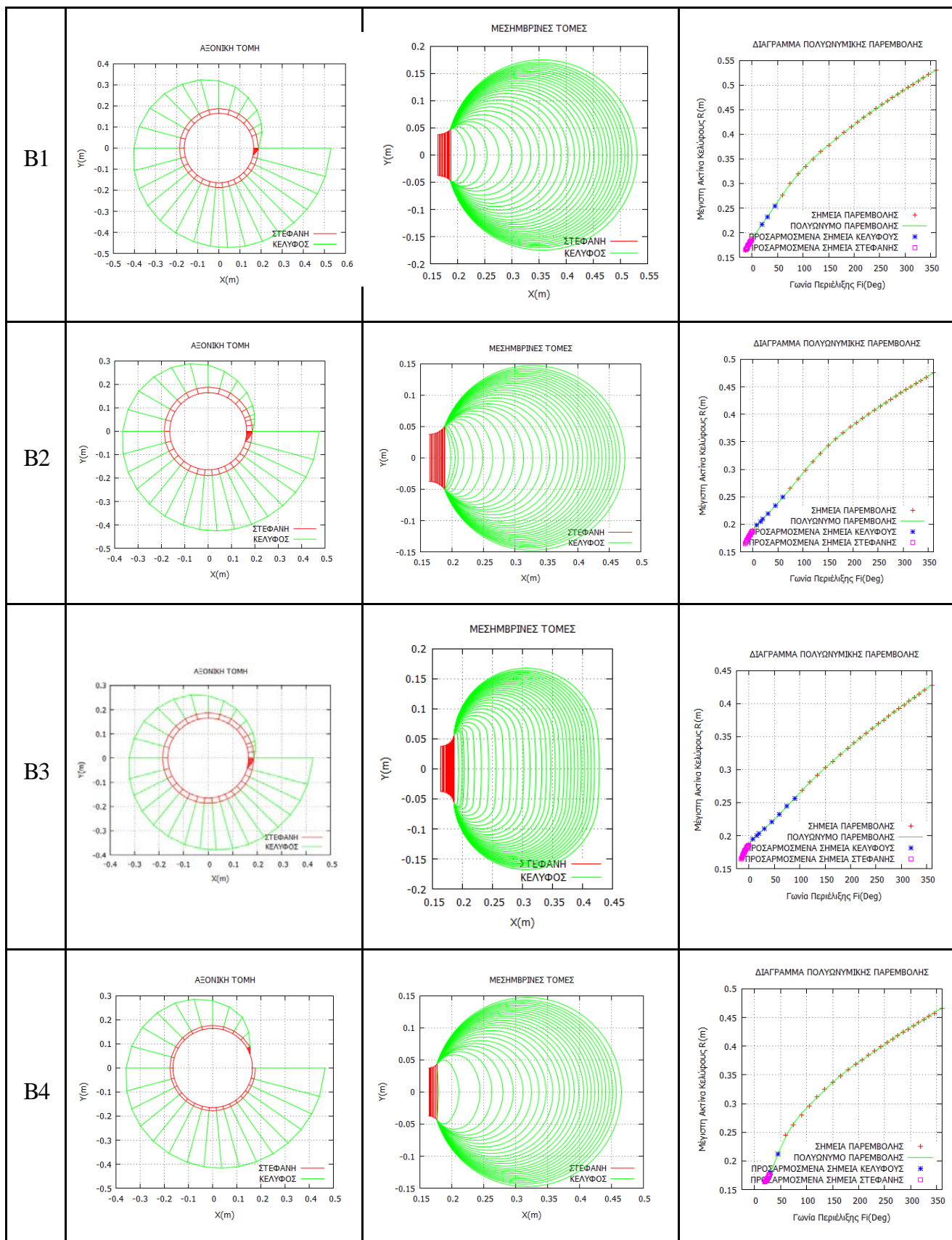
Εικόνα 4.8 Μεσημβρινές τομές σπειροειδούς κελύφους από αλγόριθμο υπολογισμών



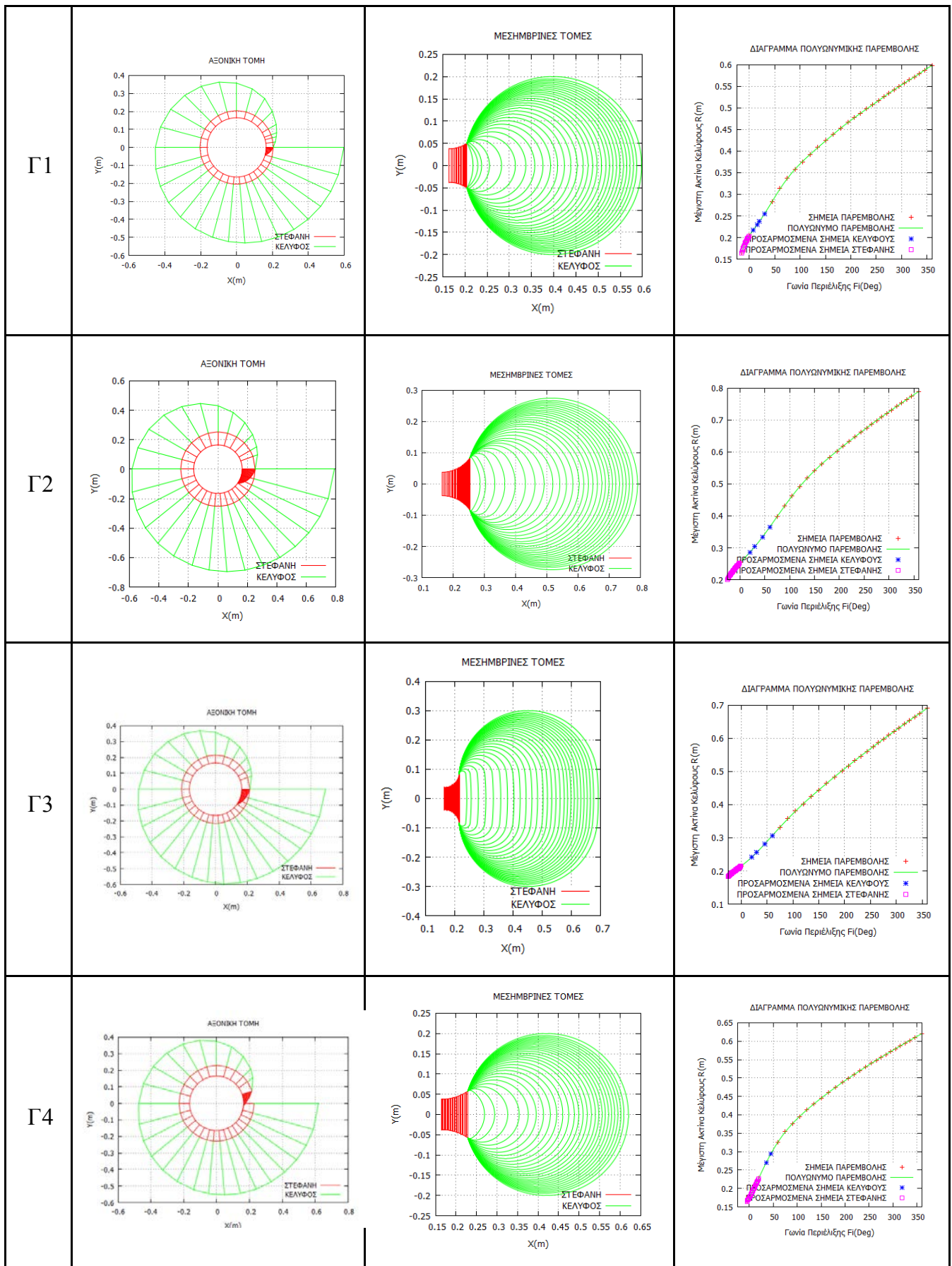
Εικόνα 4.9 Τρισδιάστατη απεικόνιση των μεσημβρινών τομών του σπειροειδούς κελύφους από αλγόριθμο υπολογισμών



Εικόνα 4.10 Μοντέλα χωρίς στεφάνη (κατηγορία Α)



Εικόνα 4.11 Μοντέλα με μεσαίο μέγεθος στεφάνης (κατηγορία Β)

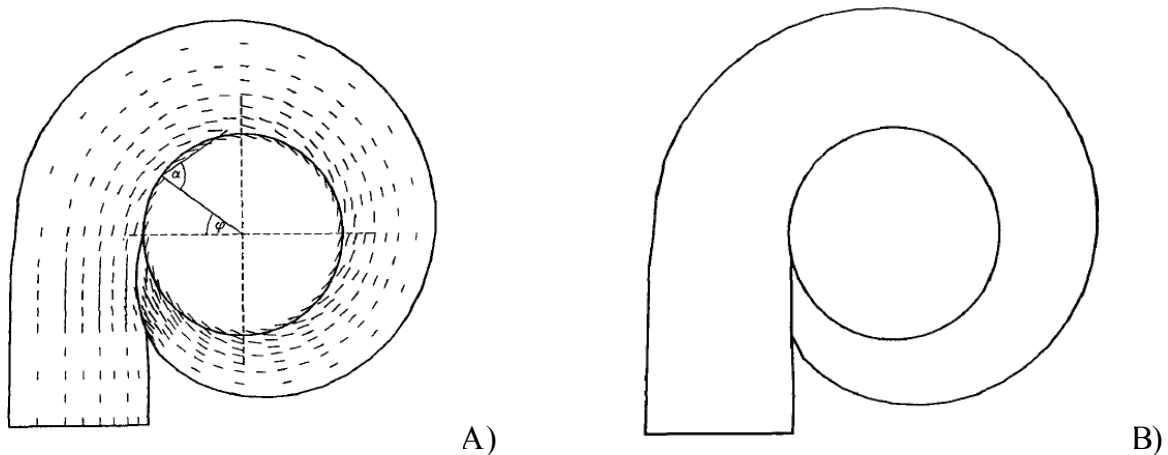


Εικόνα 4.12 Μοντέλα με μεγάλο μέγεθος στεφάνης (Κατηγορία Γ)

## 5 Διαμόρφωση της γλωττίδας στο σπειροειδές κέλυφος

Η διαμόρφωση της γλωττίδας στο σπειροειδές κέλυφος ανάλογα με τις γωνίες περιέλιξης γίνεται με δύο τρόπους.

- Είτε με τη γλωττίδα να εισχωρεί εντός του αγωγού εισόδου του σπειροειδούς κελύφους διατηρώντας έτσι σταθερή τη γωνία της κλίσης  $\delta$  (Εικόνα 5.1 A) με βάση τη σχέση (3.10) που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3. Αυτή η διαμόρφωση θεωρείται και η βέλτιστη βάση της βιβλιογραφίας (optimum tongue) για το σπειροειδές κέλυφος.
- Είτε γίνεται με τη γλωττίδα να κλείνει απότομα στο σημείο στο οποίο συναντά τον αγωγό εισόδου διαμορφώνοντας έτσι το τελικό πτερύγιο της στεφάνης (Εικόνα 5.1 B). Η διαμόρφωση αυτή θεωρείται με βάση τη βιβλιογραφία μη-βέλτιστη (non optimum tongue).

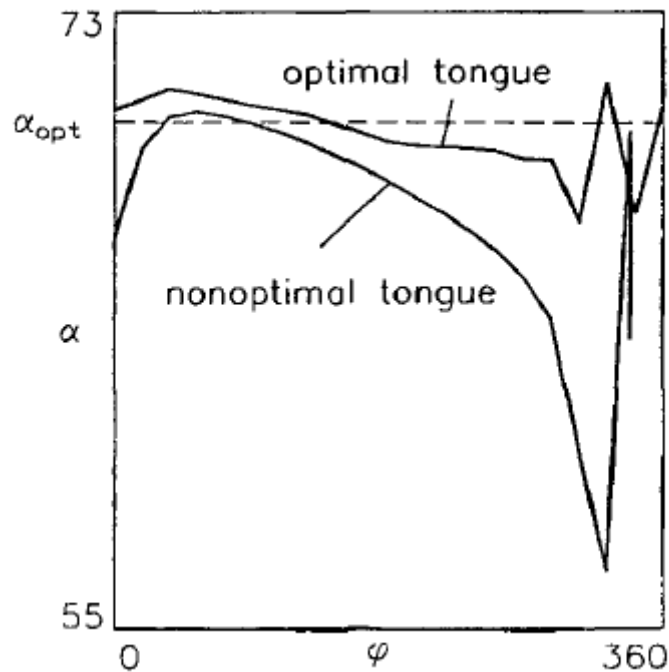


Εικόνα 5.1 Διαμόρφωση της γλωττίδας στο σπειροειδές κέλυφος με A) βέλτιστη μορφή (optimum tongue) B) μη βέλτιστη μορφή (non optimum tongue) (Mrsa, 1993)

Γενικά προτιμάται η διαμόρφωση της γλωττίδας με τη μη-βέλτιστη μορφή καθώς είναι πολύ ευκολότερη η κατασκευή της σε σχέση με αυτή της βέλτιστης μορφής.

Από πειραματικές μελέτες έχει παρατηρηθεί ότι στο σπειροειδές κέλυφος με διαμόρφωση της γλωττίδας με τη μη-βέλτιστη μορφή τα προφίλ των συνιστωσών της ταχύτητας του ρευστού

παρουσιάζουν έντονη ανομοιομορφία. Αποτέλεσμα είναι η κλίση της ταχύτητας με την οποία εισέρχεται το ρευστό στη στεφάνη και εξέρχεται από αυτή να μεταβάλλεται έντονα.



Εικόνα 5.2 Κατανομή της κλίσης της ταχύτητας κατά την έξοδο από το σπειροειδές κέλυφος για βέλτιστη και μη βέλτιστη σχεδίαση της γλωττίδας (Mrsa, 1993)

Κατά την παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε η διαμόρφωση της γλωττίδας με τη βέλτιστη μορφή για την αριθμητική επίλυση. Αναφορά για τον τρόπο μοντελοποίησης του σπειροειδούς κελύφους παρουσιάζεται και για την περίπτωση της βέλτιστης αλλά και της μη-βέλτιστης μορφής διαμόρφωσης της γλωττίδας στο κεφάλαιο (7).



## 6 Αριθμητική Μοντελοποίηση

### 6.1 Εισαγωγή Γενικά Χαρακτηριστικά

Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική ή CFD (Computational Fluid Dynamics) είναι η επιστήμη που σαν αντικείμενο μελέτης έχει την πρόβλεψη πλήθους ιδιοτήτων των ρευστών και της ροής χωρίς να είναι απαραίτητη η διενέργεια πειράματος. Για την μελέτη των ιδιοτήτων της ροής γίνεται επίλυση μαθηματικών σχέσεων που διέπουν τις διεργασίες αυτές κάνοντας χρήση αριθμητικής μεθόδου με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Με αυτόν τον τρόπο, με μικρό κόστος και σε μικρό χρονικό διάστημα, παρέχονται στοιχεία που αφορούν όλο το πεδίο της ροής και όχι μεμονωμένα στοιχεία του χώρου, όπως συμβαίνει με τα περισσότερα πειράματα. Ακόμη, είναι δυνατή η διεξοδική διερεύνηση των ιδιοτήτων της ροής για διάφορες περιπτώσεις και συνθήκες, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την βελτιστοποίηση.

Για να είναι δυνατή η εφαρμογή μιας μεθόδου υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι απαραίτητο ένα μαθηματικό μοντέλο με βάση το οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί. Το μαθηματικό μοντέλο είναι υπεύθυνο για την αριθμητική μοντελοποίηση των φυσικών φαινομένων και αρχών που αφορούν το εκάστοτε αντικείμενο της μελέτης. Στην περίπτωση της ροής σε σπειροειδή κελύφη που αποτελεί και αντικείμενο της μελέτης της παρούσας διπλωματικής είναι οπωσδήποτε επιτακτικό να ικανοποιούνται οι αρχές διατήρησης της μάζας και της ορμής.

Από το χρήστη της μεθόδου καθορίζονται οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες ανάλογα με το πρόβλημα. Αυτό το στάδιο είναι πολύ σημαντικό καθώς επηρεάζει άμεσα την ποιότητα της λύσης. Κάνοντας χρήση των μεθόδων διακριτοποίησης οι οποίες εξετάζουν τμηματικά τον συνολικό χώρο λαμβάνοντας πάντα υπ' όψιν και τα τμήματα που περιβάλλουν το εκάστοτε εξεταζόμενο τμήμα γίνεται μια προσέγγιση των φυσικών εξισώσεων της ρευστομηχανικής με αποτέλεσμα οι πολύπλοκες διαφορικές εξισώσεις να μετατρέπονται σε αλγεβρικές. Ο χώρος ο οποίος εξετάζεται χωρίζεται σε στοιχειώδη κελιά ή στοιχεία τα οποία έχουν διατομές διαφόρων σχημάτων όπως π.χ. ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου ή εξαγώνου. Όπως γίνεται αντιληπτό, με τη χρήση μιας τέτοιας μεθόδου, σε συνδυασμό με κάποια πειράματα, είναι συνήθως δυνατή η πλήρης περιγραφή του εξεταζόμενου φαινομένου. Ωστόσο, δεν πρέπει να παραλειφθεί ότι η όποια λύση προκύπτει, έχει την ακρίβεια του αντίστοιχου μαθηματικού

μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε. Σε κάθε περίπτωση το σφάλμα είναι αναπόφευκτο δεδομένου ότι χρησιμοποιείται αριθμητική μέθοδος επίλυσης. Αυτό που ουσιαστικά επιδιώκεται είναι η κατά το δυνατόν μικρότερη τάξη του αριθμητικού σφάλματος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το λογισμικό υπολογιστικής ρευστομηχανικής που χρησιμοποιείται είναι το Ansys Workbench 14 της εταιρίας ANSYS. Το FLUENT είναι ένα από τα προγράμματα τα σουίτας του Ansys Workbench το οποίο είναι ένα δημοφιλές λογισμικό που χρησιμοποιείται συχνά στη βιομηχανία για την εξυπηρέτηση των σκοπών που περιγράφηκαν ανωτέρω. Η προς εξέταση γεωμετρία και το υπολογιστικό πλέγμα κατασκευάζονται σε συνοδευτικό λογισμικό της σουίτας αυτής. Στην προκειμένη εργασία το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του μοντέλου είναι το Ansys Design Modeler και το λογισμικό για την διαμόρφωση του πλέγματος είναι το Ansys Mesh.

## 6.2 Εξισώσεις Navier – Stokes

Οι εξισώσεις Navier – Stokes είναι μη γραμμικές μερικές διαφορικές εξισώσεις δεύτερης τάξης και ισχύουν για όλα τα ρευστά (συμπιεστά και ασυμπιεστά). Υποθέτοντας ότι το ρευστό είναι ασυμπιεστό ( $\rho = \text{const}$ ), και το ιξώδες σταθερό ( $\mu = \text{const}$ ) οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν την αρχή διατήρησης της ορμής και το νόμο του Νεύτωνα για κάθε στοιχείο της εξεταζόμενης ροής στον τρισδιάστατο χώρο δηλαδή σε καρτεσιανό σύστημα (x,y,z).

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5.1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$



όπου

- $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού
- $u, v, w$  η ταχύτητα του ρευστού στους άξονες  $x, y, z$ , αντίστοιχα
- $P$  η στατική πίεση του ρευστού
- $\mu$  η δυναμική συνεκτικότητα
- $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας

Οι εξισώσεις Navier-Stokes αποτελούν μαζί με την εξίσωση της συνέχειας

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.2)$$

πλήρες σύστημα τεσσάρων εξισώσεων με τέσσερις αγνώστους ( $u, v, w, p$ ). Επομένως το πεδίο ροής σε αυτή την περίπτωση μπορεί να προσδιοριστεί ανεξάρτητα από την επίλυση της ενεργειακής εξίσωσης.

### 6.3 Μοντέλο $k - \epsilon$

Εξίσου σημαντική είναι και η μοντελοποίηση της τύρβης που παρουσιάζει η ροή. Η τύρβη είναι η ιδιότητα των ρευστών λόγω της οποίας μεταβάλλονται χαοτικά τα χαρακτηριστικά της ροής σε κάθε χρονική στιγμή. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα που εξετάζουν την τύρβη σε μια ροή. Στην παρούσα διπλωματική γίνεται χρήση του μοντέλου  $k - \epsilon$ . Στο μοντέλο  $k - \epsilon$  γίνεται η παραδοχή ότι η τύρβη είναι ισότροπη. Επιπρόσθετα, υιοθετείται η υπόθεση Boussinesq σύμφωνα με την οποία οι τυρβώδεις τάσεις συνδέονται με τις μέσες τιμές των ταχυτήτων μέσω της τυρβώδους συνεκτικότητας  $\mu_t$  (6.3), αντιστοίχως προς την τυχαία μοριακή κίνηση, η οποία εκφράζεται με την δυναμική συνεκτικότητα  $\mu$ .

Η τυρβώδης συνεκτικότητα δίνεται από τη σχέση:

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5.3)$$

όπου

- $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού
- $C_\mu$  η σταθερά που δίνεται στη βιβλιογραφία ίση με 0.09
- $k$  η τυρβώδης κινητική ενέργεια που ορίζεται ως

$$k = \frac{1}{2} \cdot (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) \quad (5.4)$$

- $\varepsilon$  ο ρυθμός καταστροφής της κινητικής ενέργειας που ορίζεται ως

$$\varepsilon = \nu \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} - 2\delta_{ij} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \cdot \frac{\partial u''}{\partial y} \quad (5.5)$$

Τα  $k$  και  $\varepsilon$  υπολογίζονται επιλύοντας δύο διαφορετικές εξισώσεις για τη μεταφορά τους. Η εξίσωση μεταφοράς του  $k$  προκύπτει από τις εξισώσεις Navier - Stokes πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη με τις διαταραχές ταχύτητας  $u''$ , ολοκληρώνοντας χρονικά και μετά αφαιρώντας την εξίσωση μέσης κινητικής ενέργειας του πεδίου. Η τελευταία διατυπώνεται πολλαπλασιάζοντας τις ολοκληρωμένες χρονικά εξισώσεις ορμής με τις μέσες τιμές των ταχυτήτων  $\bar{u}_i$ . Παρόμοια διαδικασία ακολουθείται και για το  $\varepsilon$ .

Το μοντέλο  $k$ - $\varepsilon$  παρουσιάζει ικανοποιητική συμπεριφορά, ωστόσο έχει και αδυναμίες κυρίως λόγω των υποθέσεων στις οποίες βασίζεται η ανάπτυξή του. Έχει διαπιστωθεί ότι σε περιοχές ανακυκλοφορίας της ροής η ανομοιογένεια μπορεί να γίνει σημαντική. Ακόμη, σημειώνεται ότι λόγω της υπόθεσης Boussinesq οι τάσεις Reynolds είναι πάντα θετικές, γεγονός που αποκλείει την ανάστροφη μετάδοση ενέργειας από τις μικρές στις μεγάλες δίνες (back - scatter), η οποία εμφανίζεται σε σημεία ανακοπής ή ανακυκλοφορίας (Βαρόνος, 1999).

## 6.4 Συναρτήσεις τοιχώματος

Το τυρβώδες οριακό στρώμα εμφανίζεται στο στερεό τοίχωμα του αγωγού και έχει σημαντική επίδραση στο πεδίο ροής. Το ρευστό δέχεται μακροσκοπικά μεγαλύτερη

διατμητική τάση λόγω των τυρβωδών διαταραχών η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη στις εξισώσεις ορμής. Πειραματικά έχει διαπιστωθεί ότι στην περίπτωση τυρβώδους οριακού στρώματος η ταχύτητα της ροής παρουσιάζει δύο κλίσεις. Συγκεκριμένα } πολύ κοντά στο τοίχωμα η ταχύτητα εμφανίζει γραμμική κλίση και πιο μακριά από αυτό λογαριθμική κλίση. Για να είναι δυνατή η εξέταση των δύο κλίσεων με το μοντέλο k-ε απαιτείται πλέγμα μεγάλης πυκνότητας κοντά στα τοιχώματα. Για την απλοποίηση των υπολογισμών χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις τοιχώματος (wall functions). Για την χρήση αυτών των συναρτήσεων γίνεται αφ' ενός η παραδοχή ότι η ροή πολύ κοντά στο τοίχωμα συμπεριφέρεται σαν μονοδιάστατη ροή Couette και αφ' εταίρου η παραδοχή ότι στο οριακό στρώμα η παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας ισούται με το ρυθμό καταστροφής της. Η μορφή του οριακού στρώματος προδιαγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$V_{II}^+ = \begin{cases} y^+ & \alpha \nu \quad y^+ \leq 11.63 \\ \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) & \alpha \nu \quad y^+ > 11.63 \end{cases} \quad (5.6)$$

όπου

$$V_{II}^+ = \frac{V_{II}}{\sqrt{\tau_w / \rho}} \quad , \quad y^+ = \frac{\rho \cdot y}{\mu} \cdot \sqrt{\tau_w / \rho} \quad (5.7)$$

Στις ανωτέρω εξισώσεις με  $V_{II}$  συμβολίζεται η παράλληλη στο τοίχωμα συνισταμένη της ταχύτητας και με  $\tau_w$  η συνισταμένη διατμητική τάση. Με  $y$  συμβολίζεται η κάθετη απόσταση από το τοίχωμα } με  $\kappa$  η σταθερά Von Karman  $\kappa$  ( $\kappa = 0.4187$ ) και με  $E$  η λογαριθμική σταθερά ( $E = 9.793$ ). Ο εκθέτης “+” συμβολίζει την αδιάστατη (για το οριακό στρώμα) ταχύτητα και κάθετη απόσταση από το τοίχωμα αντιστοίχως. Εφαρμόζοντας την προηγούμενη εξίσωση στις διακριτοποιημένες εξισώσεις των κελιών που συνορεύουν με το τοίχωμα στην ουσία προδιαγράφεται το προφίλ του οριακού στρώματος και η διατμητική τάση που εξασκείται λόγω της ύπαρξης του στο ρευστό. Στην πράξη απαιτείται να υπολογιστεί πρώτα η αδιάστατη απόσταση από το τοίχωμα ( $y^+$ ) η οποία από την

προηγούμενη εξίσωση και με την παραδοχή ότι η παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας ισούται με τον ρυθμό καταστροφής της, δίνεται από τη σχέση:

$$y_P^+ = \left[ \frac{\rho \cdot C_\mu^{1/4} \cdot k^{1/2}}{\mu} \right]_P \cdot y_P \quad (5.8)$$

όπου το P αντιστοιχεί στο κέντρο του κελιού που συνορεύει με το τοίχωμα. Επομένως με βάση την τιμή του  $y_P^+$  μπορεί να υπολογιστεί η συνιστώσα της διατμητικής τάσης  $\tau_w$ , η οποία εισάγεται στους όρους πηγής των διακριτοποιημένων εξισώσεων Navier - Stokes (Βαρόνος, 1999).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται οι Enhanced Wall Functions που περιλαμβάνονται στο υπολογιστικό πακέτο Fluent. Το  $y^+$  έχει, συνεπώς, επιτρεπόμενες τιμές  $10 < y^+ < 30$  για τα κελιά που συνορεύουν με τον τοίχο των οποίων η απαίτηση για ικανοποίηση έπαιξε σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση του τελικού πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε εδώ για την μοντελοποίηση

## 6.5 Λογισμικό αριθμητικής επίλυσης και προσομοίωσης (Fluent)

Οι επιλογές που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές προσομοιώσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία περιλαμβάνουν τα εξής:

- Παρά το γεγονός ότι τα φαινόμενα που εξετάζονται δεν είναι μόνιμα από τη φύση τους θεωρήθηκε αρκετά καλή η προσέγγιση της μόνιμης κατάστασης ως προς το χρόνο (Steady time) τόσο για την εξαγωγή των συμπερασμάτων όσο και την εξοικονόμηση χρόνου και υπολογιστικής ισχύος.
- Η σύζευξη πίεσης-ταχυτήτων έγινε με βάση την πίεση χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο SIMPLE που τις λύνει ξεχωριστά και τον αλγόριθμο COUPLED που βασίζεται και αυτός στην πίεση υπολογίζοντας όμως ταυτόχρονα τις μεταβλητές.

- Στα μοντέλα τύρβης υπάρχει μεγάλη δυνατότητα επιλογής μεταξύ των οποίων τα k-ε, k-ω, Reynolds Stress Model, Large Eddy Simulation (LES). Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο k-ε που χρησιμοποιεί δύο εξισώσεις και βασίζεται στην παραδοχή ότι η τύρβη είναι ισότροπη καθώς και στην υπόθεση Boussinesq. Οι σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν για αυτό το μοντέλο είναι αυτές που πρότεινε ως προεπιλεγμένες το λογισμικό Fluent. Για την επίλυση κοντά στο τοίχωμα παρέχονται τρία διαφορετικά μοντέλα (Standard Wall Functions, Non-equilibrium Wall Functions, Enhanced Wall Treatment) καθώς και η δυνατότητα ορισμού συνάρτησης από τον χρήστη. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις τοιχώματος Enhanced Wall Functions.
- Η εξίσωση της ενέργειας παραλείφθηκε με την θεώρηση σταθερής θερμοκρασίας σε όλο το ασυμπύεστο ρευστό.
- Η διακριτοποίηση των εξισώσεων έγινε με σχήματα δευτέρας τάξης για όλες τις εξισώσεις.
- Οι συντελεστές υποχαλάρωσης των μεθόδων μπορούν επίσης να μεταβληθούν από το χρήστη σε περίπτωση που αυτό κριθεί σκόπιμο. Αυτό δεν χρειάστηκε να γίνει στην παρούσα μελέτη.
- Τα κριτήρια σύγκλισης μπορούν να ρυθμιστούν με βάση την σχετική διαφορά μεταξύ των τιμών διαδοχικών επαναλήψεων για τις μεταβλητές της ροής ( $p, u, v, w, k, \epsilon$  στην περίπτωση μας) αλλά και βάσει της σύγκλισης της τιμής συγκεκριμένων μεγεθών όπως ο συντελεστής αντίστασης ( $C_D$ ).

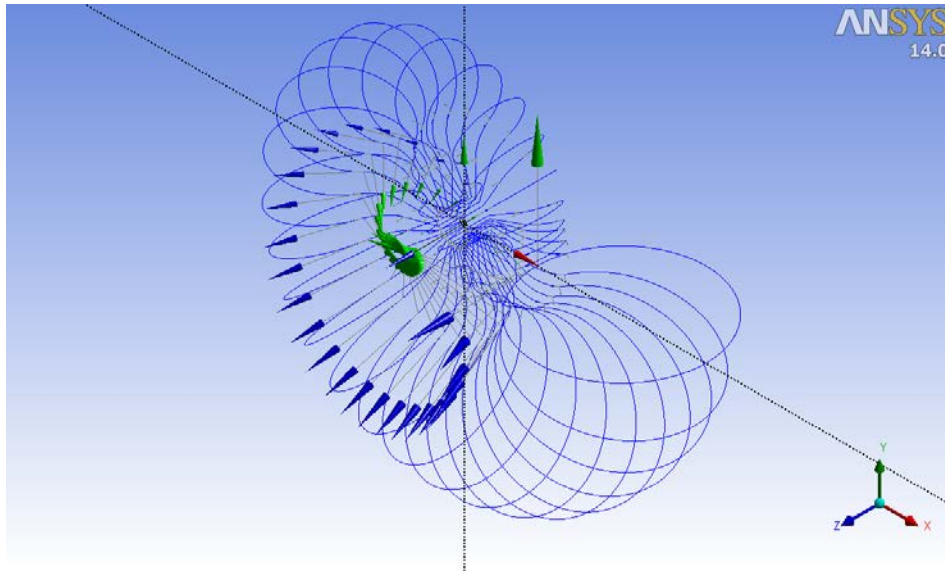
Οι παραπάνω είναι κάποιες από τις βασικές επιλογές που διατίθενται από το Fluent. Γενικά, υπάρχουν πολλές διαθέσιμες επιλογές στο τρόπο και στα μοντέλα επίλυσης και ο συνδυασμός των κατάλληλων για κάθε περίπτωση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Έτσι η τελική επιλογή των παραμέτρων που θα εφαρμοστούν γίνεται ύστερα από δοκιμές.

## 7 Σχεδιασμός του μοντέλου με χρήση του ANSYS DM

Στην παρακάτω ενότητα παρουσιάζεται συνοπτικά ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάστηκαν τα μοντέλα σπειροειδούς κελύφους και προσαρμογής υπολογιστικού πλέγματος μέσα από την τα υπο-προγράμματα του Ansys Workbench. Όπως προαναφέρθηκε τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι το Design Modeler και το Mesh για τον σχεδιασμό του μοντέλου και την προσαρμογή πλέγματος αντίστοιχα. Στις ρυθμίσεις των παραμέτρων γίνεται αναφορά μόνο σε αυτές που τροποποιούνται ενώ οι υπόλοιπες μένουν ως έχουν (default). Το πρόγραμμα Design Modeler δίνει τη δυνατότητα σχεδίασης πάσης φύσεως αντικειμένων με τη χρήση κάποιων συγκεκριμένων εργαλείων. Επίσης δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει δεδομένα με συντεταγμένες από αρχεία σχεδιάζοντας καμπύλες και σημεία στο χώρο. Από τον κώδικα που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο εισάγονται τα δεδομένα τα οποία παράγει και έτσι κατασκευάζονται οι καμπύλες που αποτελούν και το σκελετό του σπειροειδούς κελύφους. Σε αυτό το σκελετό διαμορφώνονται οι διάφοροι όγκοι που θα αποτελέσουν το ρευστό που εισέρχεται και εξέρχεται από το κέλυφος. Ακολουθούν τα στάδια σχεδιασμού του μοντέλου:

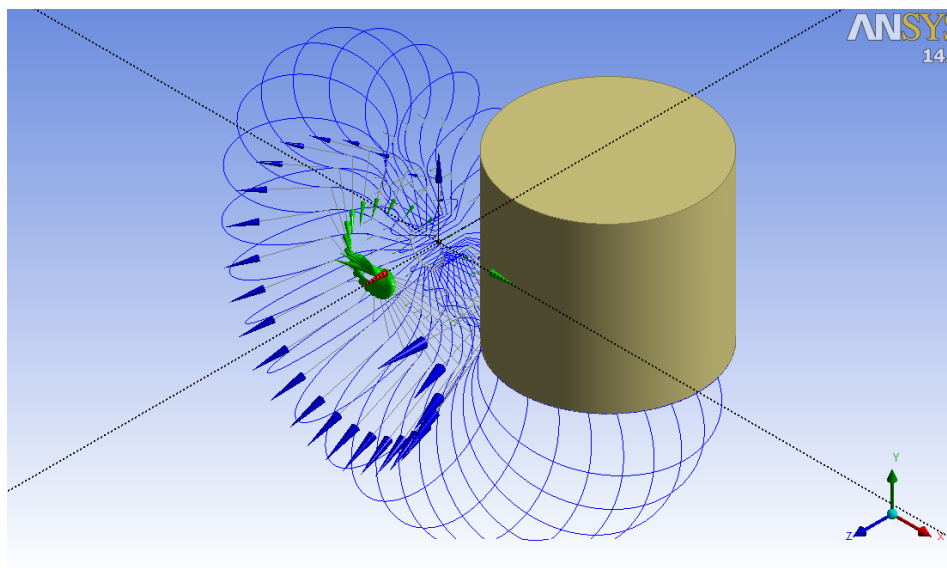
- **Στάδιο 1 κατασκευή του σκελετού.** Αρχικά γίνεται η προσθήκη των συντεταγμένων των σημείων που αποτελούν το σκελετό του κελύφους από τα αρχεία του κώδικα. Έτσι εισάγονται ως καμπύλες τα δεδομένα των αρχείων (concept → curve, Definition → From Coordinates File, Coordinates File → Selection, Operation → Add Frozen → Generate). Τα αρχεία που εξάγονται από τον κώδικα και εισάγονται στο Design Modeler είναι
  - Τομές 3Δ κελύφους ANSYS DM (curve1)
  - Τομές 3Δ στεφάνης ANSYS DM (curve2)
  - Τομές 3Δ γλωττίδας βοηθητικές ANSYS DM (curve3)
  - Τομές 3Δ γλωττίδας ANSYS DM (curve4)
  - Βοηθητικές γραμμές 4 ANSYS DM.dat (curve5)
  - Βοηθητικές γραμμές 3 ANSYS DM.dat (curve6)
  - Βοηθητικές γραμμές 2 ANSYS DM.dat (curve7)
  - Βοηθητικές γραμμές 1 ANSYS DM.dat (curve8)

- ο Είσοδος (curve9)



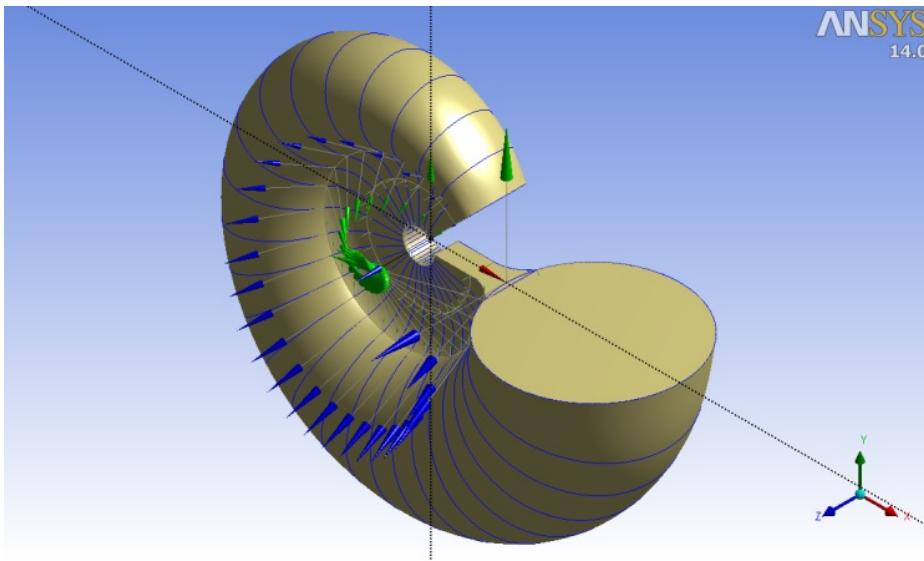
Εικόνα 7.1 Στάδιο 1 κατασκευή του σκελετού του σπειροειδούς κελύφους

- **Στάδιο 2 κατασκευή του αγωγού εισόδου.** Η καμπύλη που προκύπτει από το αρχείο Έξοδος.dat χρησιμοποιείται για την εξώθηση όγκου που θα διαμορφώσει τον αγωγό εισόδου (Extrude, Geometry → Curve 9, Direction Vendor → y axis → Generate)



Εικόνα 7.2 Στάδιο 2 κατασκευή του αγωγού εισόδου του σπειροειδούς κελύφους

- **Στάδιο 3 κατασκευή του πρώτου τμήματος του σπειροειδούς κελύφους** Γίνεται απόκρυψη των καμπυλών που τέμνουν τον αγωγό εισόδου (edge selection → Hide Body). Επίσης γίνεται καταστολή (suppress) των καμπυλών curve3, curve4, curve7, curve8, curve9. Ακολούθως επιλέγεται το εργαλείο Skin/Loft για την δημιουργία του όγκου ενώ επιλέγονται όλες οι διαθέσιμες καμπύλες (Profile selection → Select All → Apply → Generate)

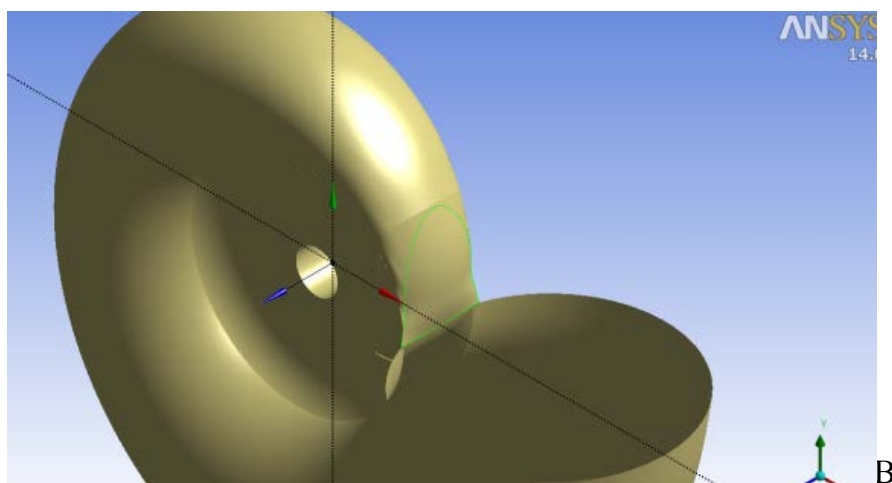
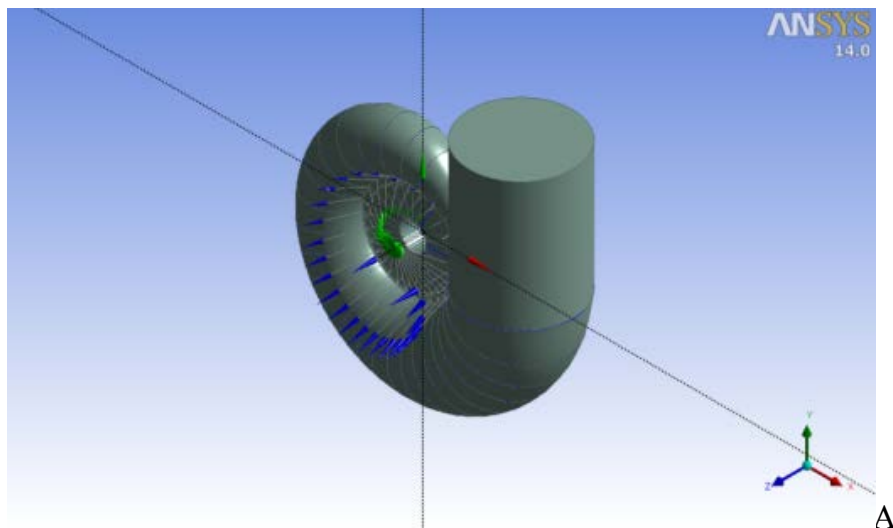


Εικόνα 7.3 Στάδιο 3 κατασκευή του πρώτου τμήματος του σπειροειδούς κελύφους

- **Στάδιο 4 κατασκευή του δεύτερου τμήματος του σπειροειδούς κελύφους** Γίνεται παύση της καταστολής (unsuppresse) του αγωγού εισόδου καθώς και της καμπύλης curve 8 και εμφάνιση όλων των στοιχείων που αποκρύφτηκαν (Show All). Γίνεται απόκρυψη του όγκου που έχει δημιουργηθεί μέχρι στιγμής (Solid Selection → Hide Body) και των καμπυλών που δεν τέμνουν τον αγωγό εισόδου. Αυτό γίνεται εύκολα επιλέγοντας τις καμπύλες που τέμνουν τον αγωγό εισόδου και αποκρύπτοντας όλες τις άλλες καμπύλες (edge selection → Hide All Other Bodies). Επιλέγουμε επίσης τμηματικά της καμπύλες από τη διατομή εξόδου του σταδίου 3 μέχρι τη διατομή εισόδου του σπειροειδούς κελύφους. Ακολούθως χρησιμοποιείται το εργαλείο Skin/Loft για την αφαίρεση του όγκου ενώ επιλέγονται όλες οι διαθέσιμες καμπύλες (Profile selection → Select All → Apply → Operation → Cut Material, → Generate).

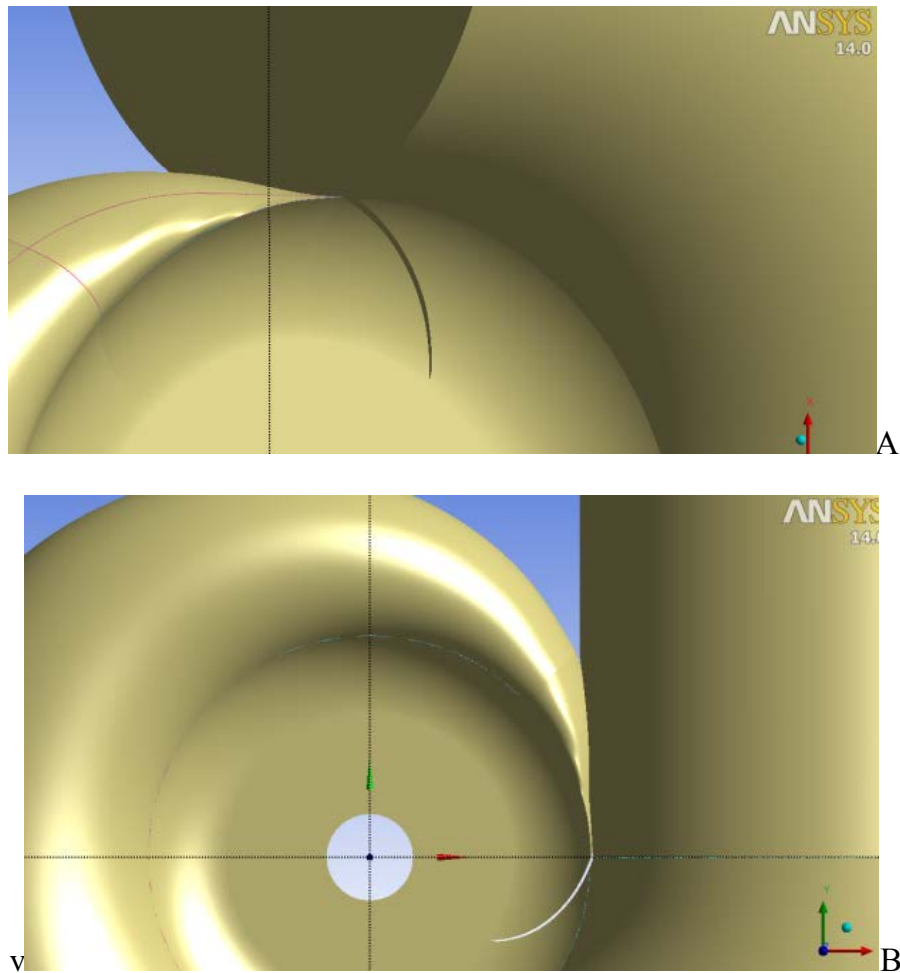


Ομοίως επαναλαμβάνεται η διαδικασία αλλά για την αφαίρεση του όγκου με πάχος αυτή τη φορά που θα είναι 3mm (Profile selection → Select All → Apply → Operation → Cut Material → Ass Thin/Surface → Inward Thickness 0m → Outward Thickness 0.003m → Generate). Τέλος με χρήση του εργαλείου Skin/Loft γίνεται προσθήκη του όγκου που θα αποτελέσει το κομμάτι της γλωττίδας ενώ επιλέγονται όλες οι διαθέσιμες καμπύλες (Profile selection → Select All → Apply → Operation → Add Material, → Generate). Με αυτόν τον τρόπο έχουμε διαμορφώσει το τελικό τμήμα της γλωττίδας. Κάνοντας παύση της καταστολής όλων των αντικειμένων (unsuppresse all) και εμφάνιση όλων (show all bodies) παρουσιάζεται το σπειροειδές κέλυφος.



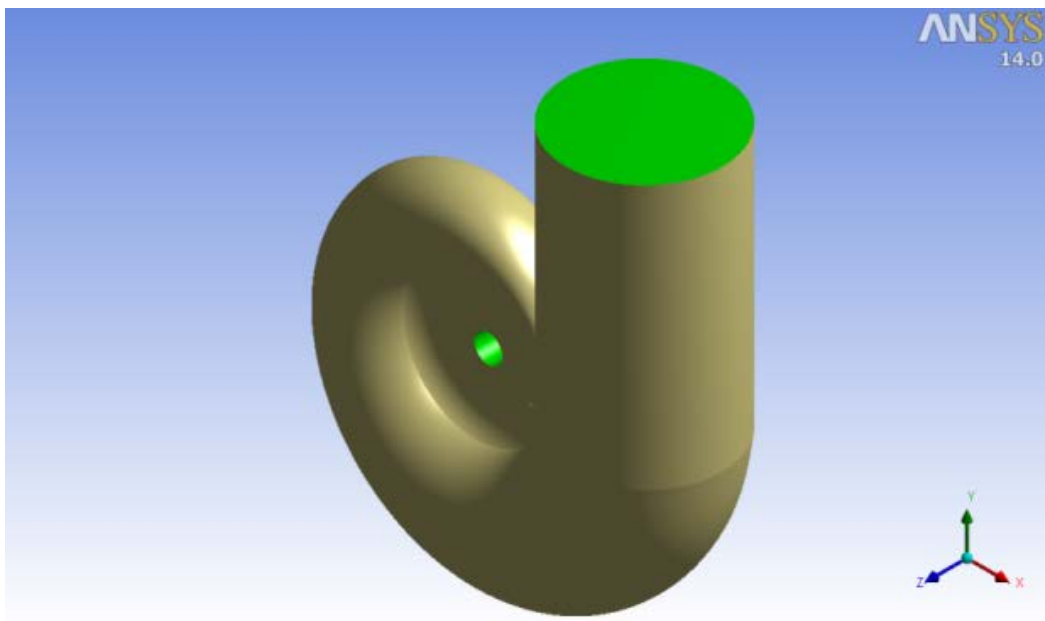
Εικόνα 7.4 Στάδιο 4 κατασκευή του δεύτερου τμήματος του σπειροειδούς κελύφους

**Στάδιο 5 κατασκευή του πτερυγίου της γλωττίδας.** Γίνεται επιλογή της προβολής μόνο των σημείων (Hide Free, Hide Single, Hide Double) και χρησιμοποιούνται τα σημεία ως οδηγοί για την κατασκευή της γλωττίδας. Επιλέγεται η επιφάνεια XY plane και γίνεται χρήση εργαλείου spline που θα συνδέει τα σημεία που περιλαμβάνουν τη γλωττίδα.(XY Plane → Sketching → Spline → Generate) Αφού φτιαχτεί η καμπύλη spline (Sketch1) αφαιρείται ο όγκος που ορίζεται από αυτήν (Extrude → Geometry → Skech1 → Direction → Both Symmetric → Generate).



Εικόνα 7.5 Στάδιο 5 κατασκευή της γλωττίδας (πτερόγιο στεφάνης)

**Στάδιο 6 ορισμός των παραμέτρων της ροής** Ορίζεται διατομή εισόδου του ρευστού επιλέγοντας την επιφάνεια και εισάγοντας την ονομασία της (Face Selection → Named Selection → velocity-inlet → Generate). Ομοίως και για την διατομή εξόδου (Face Selection → Named Selection → pressure-outlet → Generate). Επίσης σε όλους τους όγκους που διαμορφώθηκαν θέτουμε merge topology για να ενωθούν οι διάφορες επιφάνειες που τους απαρτίζουν. Τέλος ορίζουμε τον όγκο που διαμορφώθηκε ως ρευστό. Επιλέγουμε τον όγκο αρχικά (Tree outline → Solid ) και τον ορίζουμε ως ρευστό (Body → Fluid → Generate).



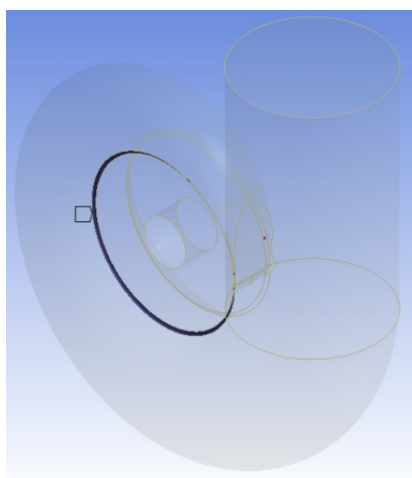
Εικόνα 7.6 Στάδιο 6 ορισμός των παραμέτρων της ροής

(Mrsa, 1993)

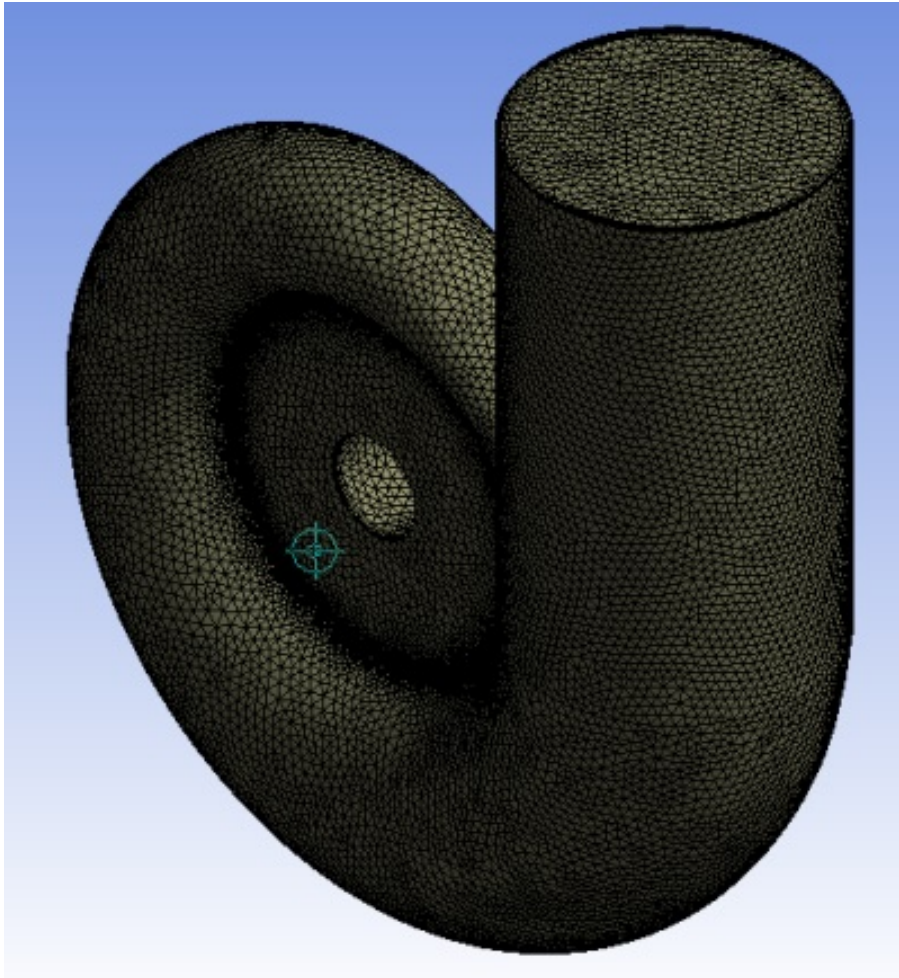
## 8 Διαμόρφωση του υπολογιστικού πλέγματος με χρήση του ANSYS MESH

Το πλέγμα μιας γεωμετρίας εκτός από την κατάλληλη ποιότητα στα κελιά του, οφείλει να έχει και την κατάλληλη πυκνότητα. Ένα πλέγμα που δεν είναι αρκετά πυκνό, μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή αποτελέσματα ή ακόμα και στην αδυναμία σύγκλισης της μεθόδου. Εν αντιθέσει, ένα πλέγμα υπερβολικά πυκνό, θα οδηγήσει στην απαίτηση ασύμφορα μεγάλου υπολογιστικού χρόνου. Για τον λόγο αυτό, έγινε ο λεγόμενος έλεγχος ανεξαρτησίας των αριθμητικών αποτελεσμάτων από το υπολογιστικό πλέγμα.

Κατά τον έλεγχο αυτό, έγιναν διαδοχικές πυκνώσεις στο πλέγμα, μεταβάλλοντας μόνο το μήκος των κελιών, και έπειτα συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα του πεδίου ροής που εξάγει το Fluent σε διάφορες ενδεικτικές θέσεις. Στόχος είναι να βρεθεί το πλέγμα εκείνο που παράγει ικανοποιητική ακρίβεια αποτελεσμάτων, η οποία δεν μεταβάλλεται σημαντικά με περαιτέρω πύκνωση. Επίσης συνίσταται η χρήση ζωνών ελέγχου στις οποίες επιβάλλεται τοπική πύκνωση για καλύτερη ακρίβεια σε κάποιο τμήμα που παρατηρείται απότομη μεταβολή της γεωμετρίας. Οι τελικές ρυθμίσεις των παραμέτρων γίνονται ανάλογα με το είδος της γεωμετρίας του σπειροειδούς κελύφους ενώ τοπική πύκνωση πραγματοποιείται κυρίως στο κομμάτι της στεφάνης όπου έχουμε μια πιο απότομη μεταβολή της γεωμετρίας. Η πύκνωση γίνεται με την εφαρμογή επιφάνειας ελέγχου (η γραμμής ελέγχου την περίπτωση που το κέλυφος δεν περιλαμβάνει στεφάνη με ομαλοποιημένα άκρα)



Εικόνα 8.1 ) Ζώνη ελέγχου για τοπική πύκνωση



Εικόνα 8.2 Τελικό υπολογιστικό πλέγμα

Για όλες τις πυκνώσεις χρησιμοποιήθηκε το οριακό στρώμα που έχει περιγραφεί ανωτέρω. Υπενθυμίζεται, ότι χρησιμοποιείται ίδια πυκνωση τόσο στην εντολή mesh faces όσο και στην εντολή mesh volumes.

Επιλέγονται οι εξής συνθήκες δημιουργίας υπολογιστικού πλέγματος (Details of “Mesh”)

Defaults

- Physics Preference → CFD
- Solver → Fluent
- Relevance → 0

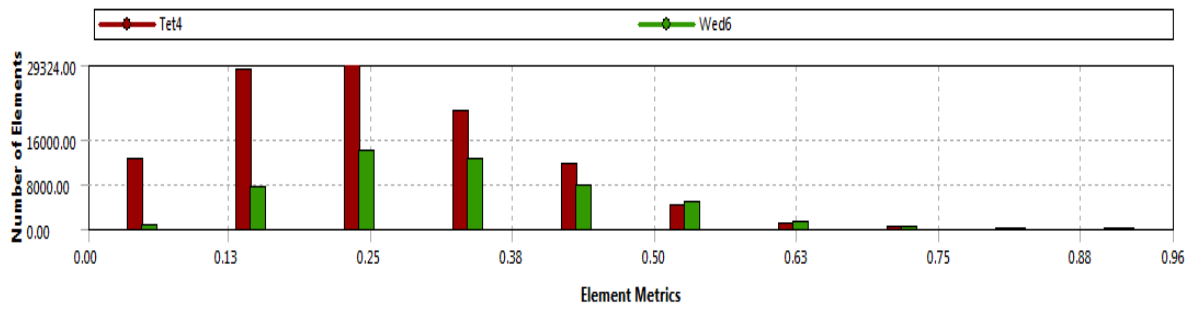
## Sizing

- Use Advanced Size Function → On: Curvature
- Relevance Centre → Fine
- Initial Size Seed → Active Assembly
- Smoothing → High
- Transition → Slow
- Span Angle Center → Fine
- Curvature Normal Angle → Default (18°)
- Min Size → Default (3.2159e-004m)
- Max Face Size → 1.e-002m
- Max Size → Default (6.4318e-002m)
- Growth Rate → Default (1.20)
- Minimum Edge Length → 2.8695e-004m

## Inflation

- Use Automatic Inflation → Program Controlled
- Inflation Option → Smooth Transition
- Transition Ratio → 0.272
- Maximum Layers → 5
- Growth Rate → 1.2
- Inflation Algorithm → Pre

Επίσης μετά την δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος γίνεται έλεγχος της κατανομής της κυρτότητας (Skewness) των κελιών από το μενού Statistics → Mesh Metrics → Skewness (Εικόνα 8.3). Για να έχουμε σίγουρη σύγκλιση στους υπολογισμούς θα πρέπει οι τιμές της κυρτότητας να μην ξεπερνούν το 0.97 σε μεγάλο αριθμό κελιών. Από την διαμόρφωση του πλέγματος στα διάφορα μοντέλα παρατηρούμε ότι τα στοιχεία του υπολογιστικού πλέγματος παρουσιάζουν κατανομή κυρτότητας εντός των προδιαγραφών για σίγουρη σύγκλιση.



Εικόνα 8.3 Διάγραμμα κατανομής της κυρτότητας των κελιών

## 9 Διαδικασία επίλυσης

Στην αρχή, μέσω των επιλογών του Fluent «διαβάζουμε» αρχεία τύπου "Case Files" τα οποία δημιουργήσαμε στο Design Modeler (DM) και περιλαμβάνουν όλα τα απαραίτητα σχεδιαστικά και κατασκευαστικά δεδομένα που χρειαζόμαστε, ώστε να προχωρήσουμε στη διαδικασία της αριθμητικής επίλυσης της ροής στη γεωμετρική διάταξη. Ακολουθώντας, μέσω της επιλογής: Grid → Check, κάνουμε έλεγχο ορθότητας και κατασκευαστικής αρτιότητας του πλέγματος που έχουμε δημιουργήσει μέσω του DM. Από την επιλογή: Grid → Info → Size, ενημερωνόμαστε για το συνολικό πλήθος των κελιών (cells), επιφανειών (faces) και σημείων (nodes) του πλέγματος. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, όσο πυκνότερο είναι το υπολογιστικό πλέγμα τόσο μεγαλύτερο είναι και το μέγεθος αυτού. Στη συνέχεια, από τις επιλογές του "Define" καθορίζουμε το μοντέλο του επιλύτη, το μοντέλο της τύρβης, το υλικό που ρέει στη γεωμετρική διάταξη, τις συνθήκες λειτουργίας και τις οριακές συνθήκες.

### Models

- Model → k-epsilon
- K-epsilon Model → Realizable
- Near Wall Treatment → Enhanced Wall Treatment

### Materials

- Create/Edit → Fluent Fluid Materials → water → liquid (h<sub>2</sub>o<|>) → Create

### Cell Zone Conditions

- Edit → Zone Name → fluid → Material Name → water – liquid

### Boundary Conditions

- Velocity – inlet → Edit
  - Momentum
    - Velocity Specification Method → Magnitude Normal to Boundary
    - Velocity Magnitude → Velocity at inlet
    - Turbulence
      - Specification Method → Intensity and Hydraulic Diameter



- Turbulent Intensity → 3%
- Hydraulic Diameter → Diameter of inlet
- Pressure-outlet
  - Type → Outflow

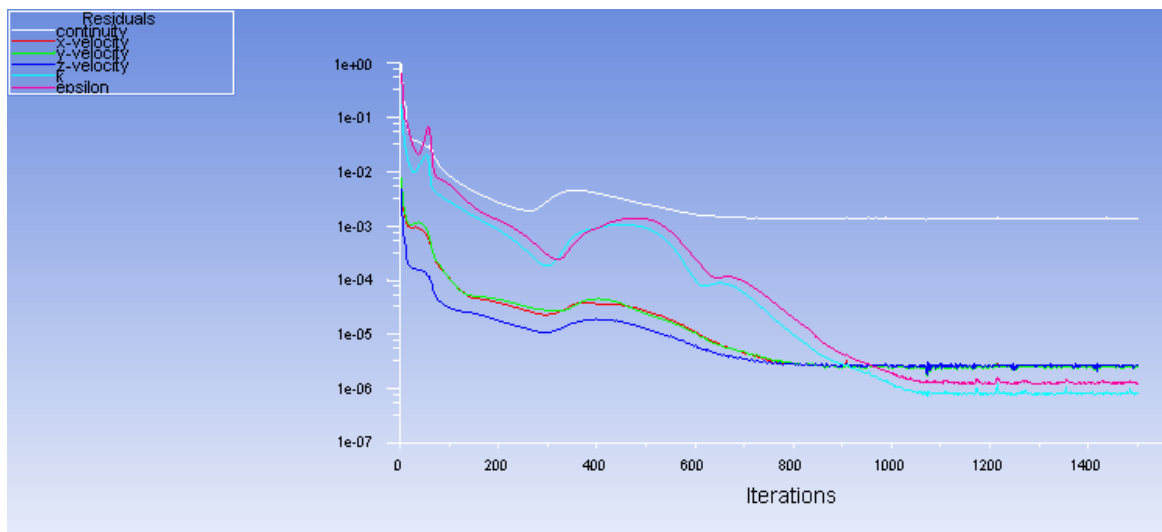
### Solution Methods

- Pressure – Velocity Coupling → SIMPLE
- Gradient → Spatial Squares Cell Based
- Pressure → Second Order
- Momentum → Second Order Upwind
- Turbulent Kinetic Energy → Second Order Upwind
- Turbulent Dissipation Rate → Second Order Upwind

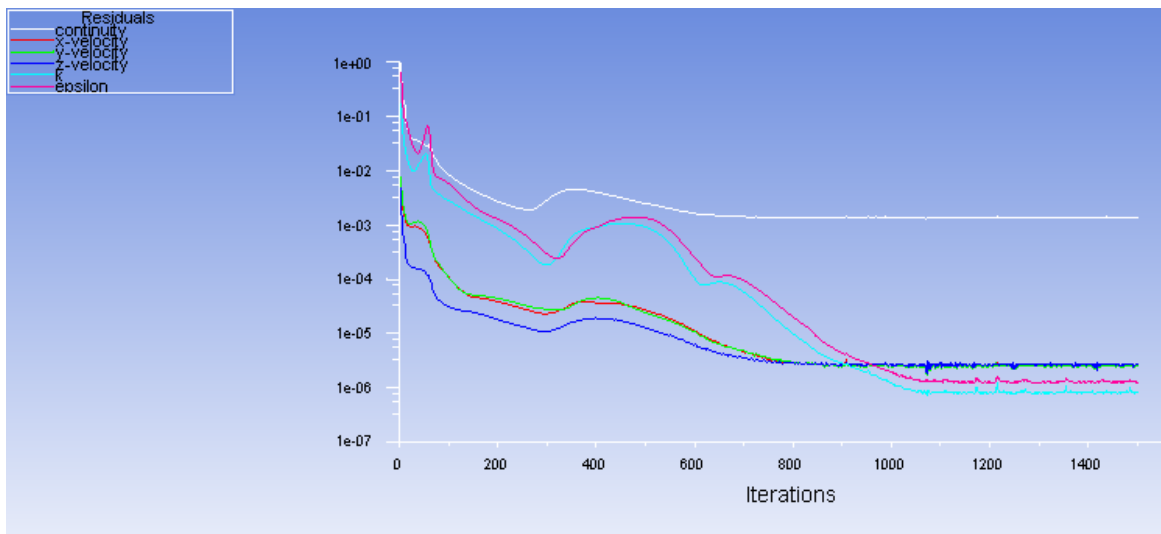
### Monitors

- Residuals → Edit
  - Continuity Absolut Criteria →  $1e-05$
  - x-velocity Absolut Criteria →  $1e-05$
  - y-velocity Absolut Criteria →  $1e-05$
  - z-velocity Absolut Criteria →  $1e-05$

Παρατηρείται ότι σύγκλιση πραγματοποιείται περίπου μετά από 1200 με 1300 επαναλήψεις (



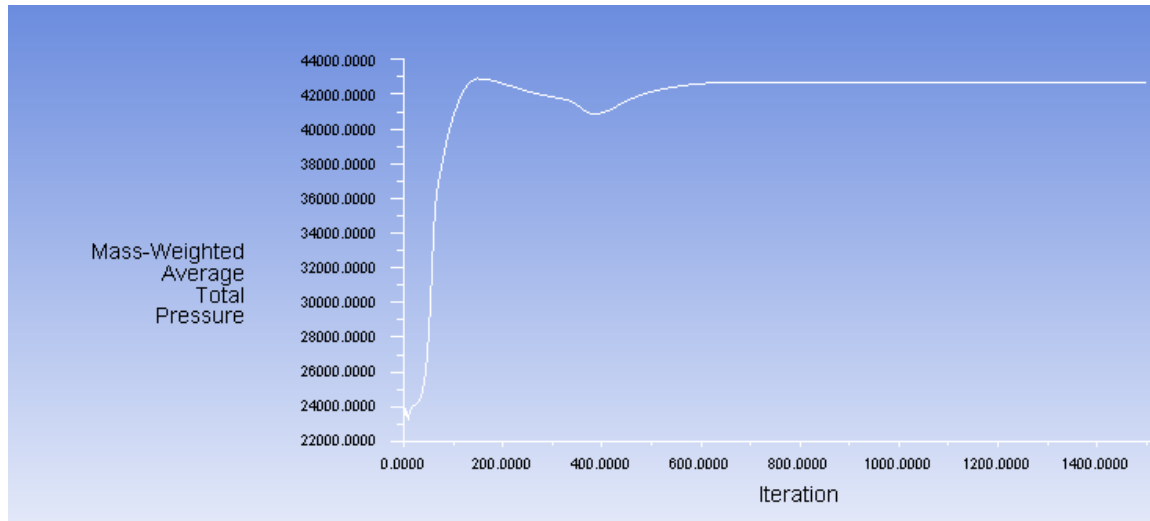
Εικόνα 9.1) και χωρίς την μεταβολή των συντελεστών υποχαλάρωσης. Αυτό οφείλεται κυρίως στην σχετικά απλή γεωμετρία του σπειροειδούς κελύφους αλλά και στη συγκλίνουσα ροή, που δεν προκαλεί αποκολλήσεις και ανακυκλοφορίες. Επίσης παρατηρείται ότι θέτοντας ως δείκτη παρατήρησης (surface monitor) την μέση ολική πίεση στην διατομή εξόδου αυτή αποκτά μια οριακή τιμή, κάτι το οποίο αποτελεί και κριτήριο για την επίτευξη σύγκλισης.



Εικόνα 9.1 Διάγραμμα σύγκλισης των συντελεστών για το σπειροειδές κέλυφος

## Surface Monitors

- Create → surf-mon-1
  - Report Type → Mass Weighted Average
  - Field Variable → Pressure
  - Surfaces → pressure-outlet



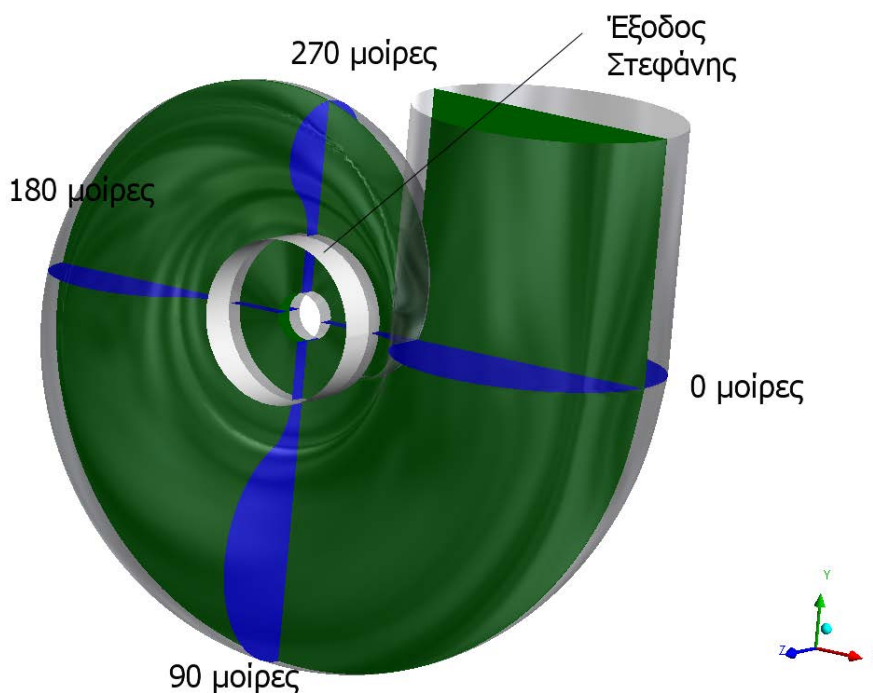
Εικόνα 9.2 Διάγραμμα σύγκλισης της ολικής πίεσης στην έξοδο του σπειροειδούς κελύφους

#### Run Calculation

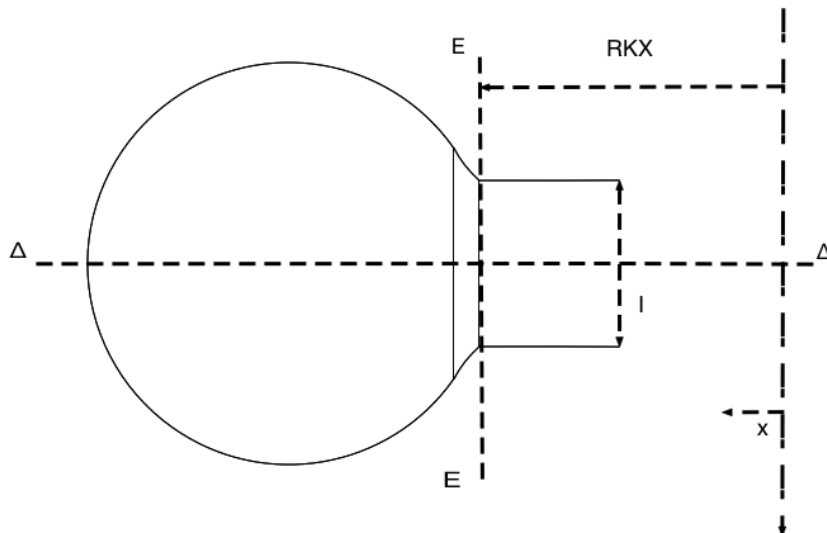
- Check Case
- Number of Iterations → 1500
- Profile Update interval → 1
- Reporting interval → 1

## 10 Αποτελέσματα αριθμητικής επίλυσης

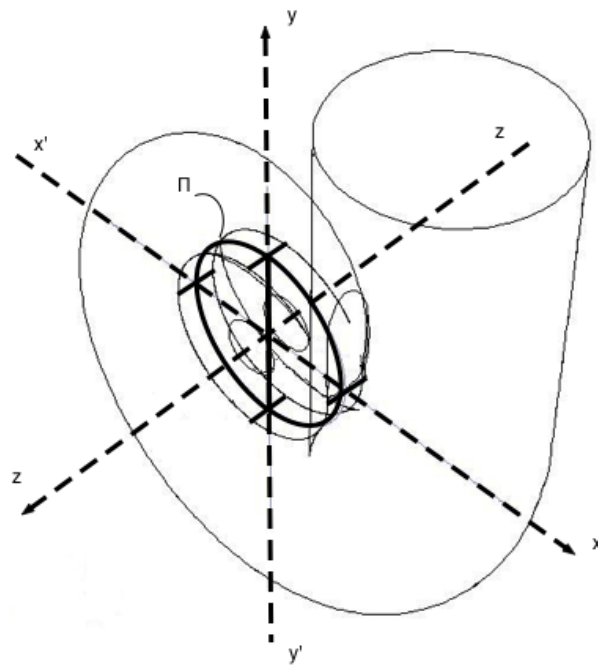
Για την καλύτερη δυνατή καταγραφή και μελέτη της ροής στο σπειροειδές κέλυφος ορίζονται σε αυτό κάποιες επιφάνειες και γραμμές οι οποίες λέγονται επιφάνειες και γραμμές ελέγχου. Με βάση αυτές τις επιφάνειες και γραμμές θα γίνει η λήψη των δεδομένων της ροής. Από τομές που πραγματοποιούνται στο κέλυφος με βάση τη γωνία περιέλιξης ορίζονται οι επιφάνειες ελέγχου. Οι γραμμές ελέγχου ορίζονται με τη σειρά τους με βάση τους άξονες  $x$  και  $y$  πάνω στις επιφάνειες ελέγχου. Αρχικά πραγματοποιούνται τομές κατά τους άξονες  $x$  και  $y$  (Εικόνα 10.1). Σε κάθε μία από αυτές τις τομές ορίζεται η γραμμή έλεγχου  $\Delta\Delta$  και  $ΕΕ$  (Εικόνα 10.2) παράλληλα στον άξονα  $x$  και  $z$  αντίστοιχα. Επίσης ορίζεται μια κυλινδρική επιφάνεια ελέγχου με άξονα περιστροφής τον άξονα  $z$  και ακτίνα ίση με το μήκος της ακτίνας εξόδου της στεφάνης (RKX). Κατά την τομή της κυλινδρικής αυτής επιφάνειας και του επιπέδου  $xy$  ορίζεται η κυκλική γραμμή ελέγχου  $\Pi$  (Εικόνα 10.3).



Εικόνα 10.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση των επιφανειών ελέγχου



Εικόνα 10.2 Γραμμές ελέγχου του κελύφους κατά την μεσημβρινή τομή



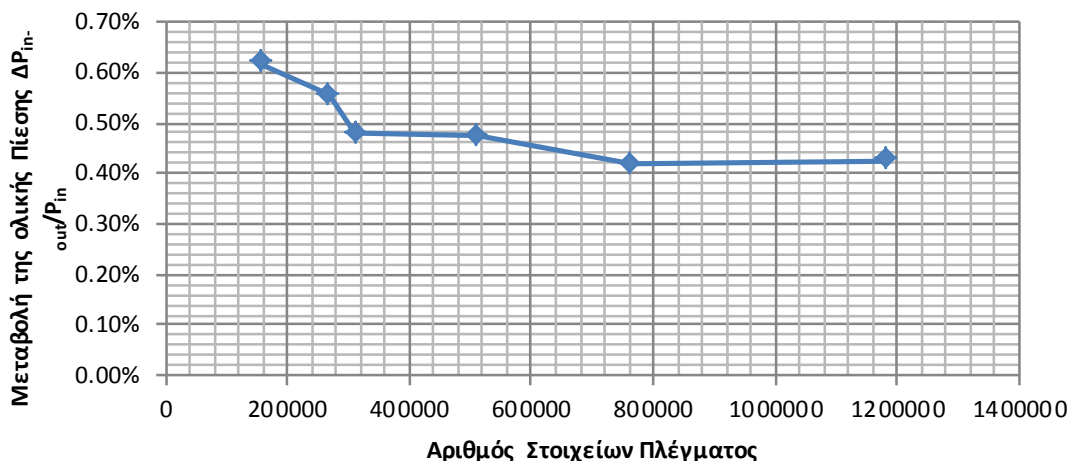
Εικόνα 10.3 Τρισδιάστατη απεικόνιση των γραμμών ελέγχου

## 10.1 Επιλογή υπολογιστικού πλέγματος

Για τη διερεύνηση της ανεξαρτησίας του πλέγματος (Πίνακας 10.1) διαμορφώθηκαν 6 διαφορετικά πλέγματα. Η τελική διαμόρφωση των πλεγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την διερεύνηση της ανεξαρτησίας των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με διαδοχικές πυκνώσεις των κελιών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων από το πλέγμα επιτυγχάνεται για αριθμό υπολογιστικών κελιών μεγαλύτερο από 1.100.000.

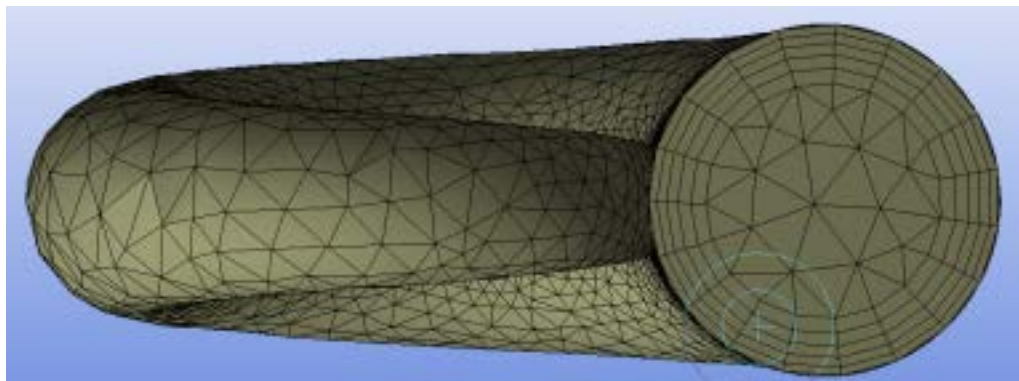
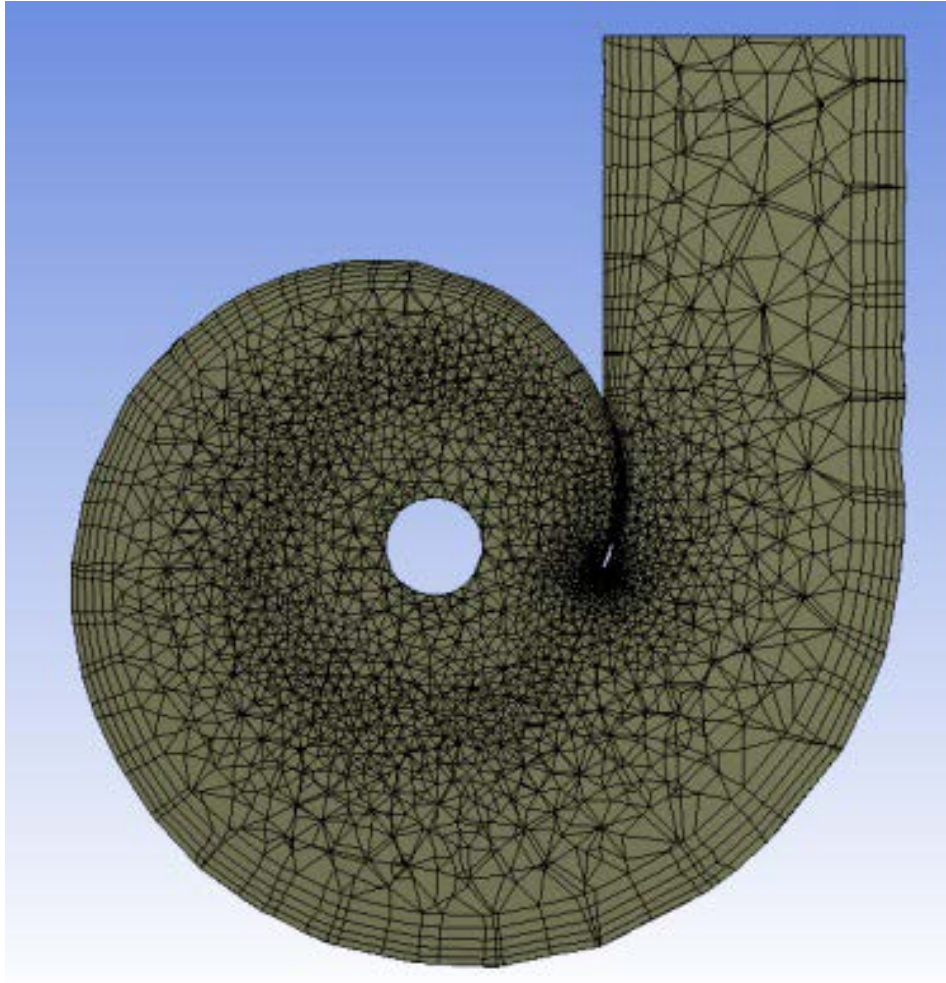
A/A	Αριθμός Στοιχείων Πλέγματος	Ολική Πίεση Εισόδου ( $P_a$ )	Ολική Πίεση Εξόδου ( $P_a$ )	Μεταβολή της ολικής Πίεσης $\Delta P_{in-out}/P_{in}$
1	156098	131188.98	130377.2	0.62%
2	267196	137485.03	136723.41	0.55%
3	312150	142601.69	141920.8	0.48%
4	510211	136327.2	135679.92	0.47%
5	763305	154561.45	153916.84	0.42%
6	1183923	142679.31	142072.47	0.43%

Πίνακας 10.1 Αποτελέσματα μεταβολής της ολικής πίεσης για διάφορα υπολογιστικά πλέγματα



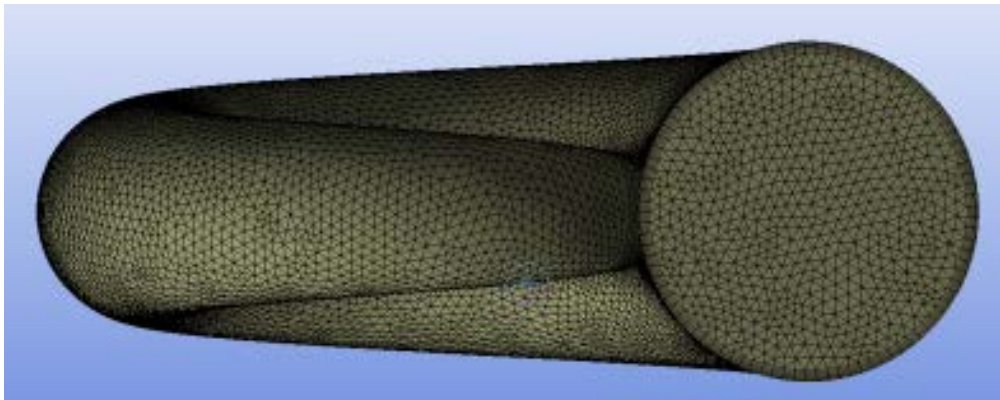
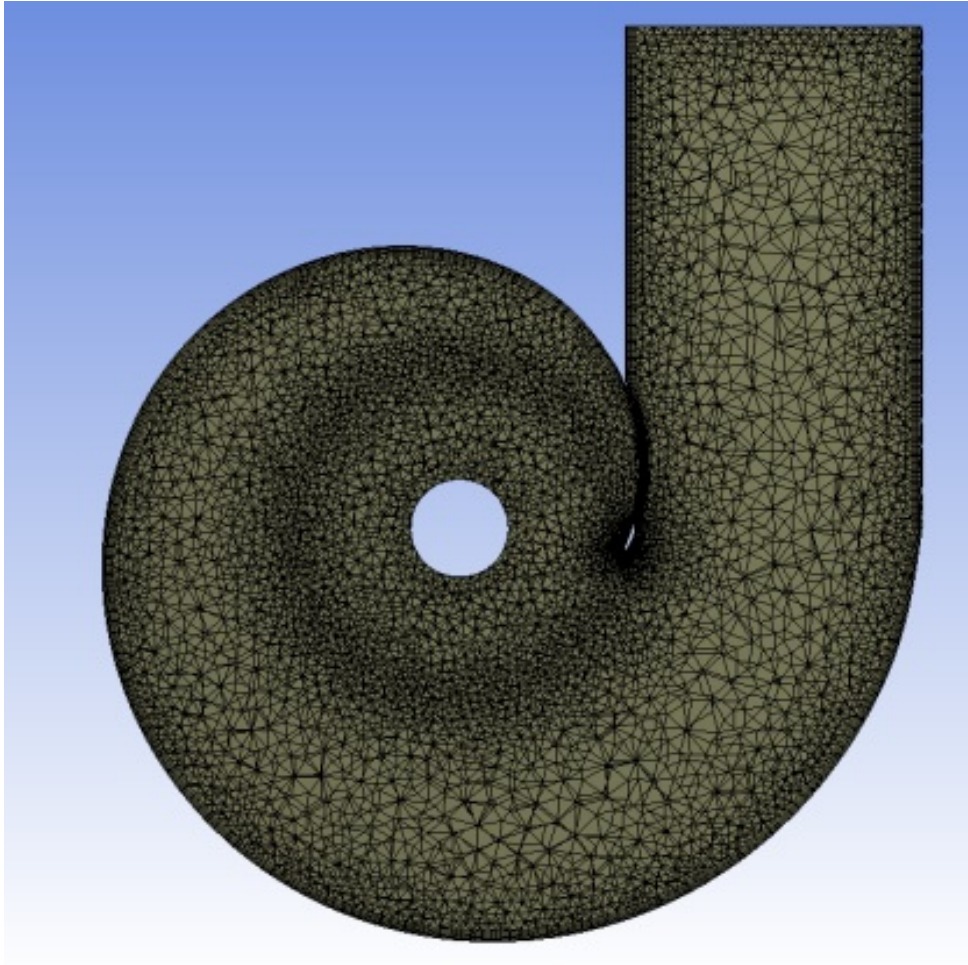
Διάγραμμα 10.1 Μεταβολή της ολικής πίεσης συναρτήσει του αριθμού των στοιχείων των πλεγμάτων

Ενδεικτικά της μορφής του υπολογιστικού πλέγματος που διαμορφώνεται κατά τις σταδιακές πυκνώσεις παρακάτω απουσιάζονται τα πλέγματα 1 (Εικόνα 10.4) και 6 (Εικόνα 10.5).



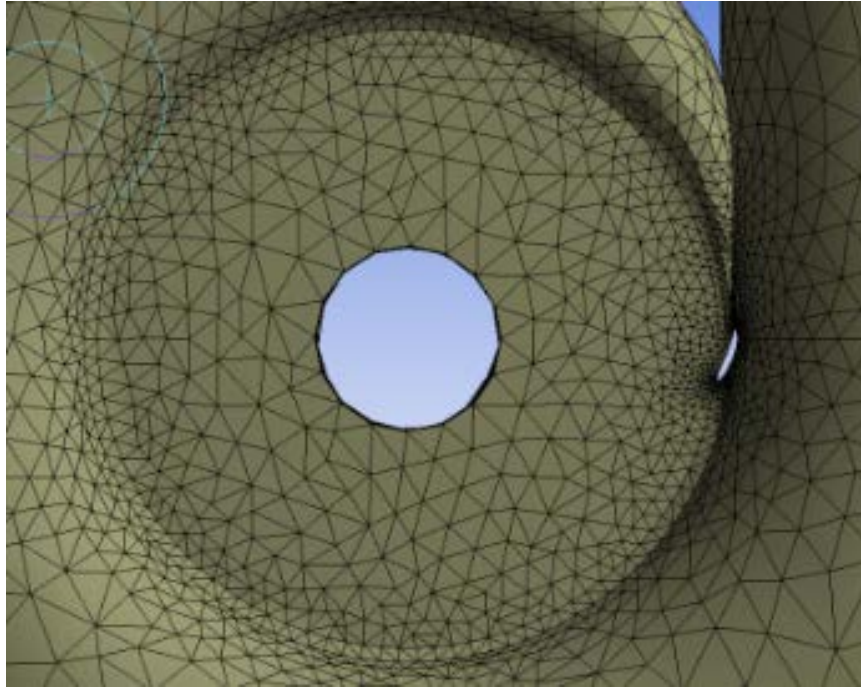
Εικόνα 10.4 Αρχικό υπολογιστικό πλέγμα (πλέγμα 1) του σπειροειδούς κελύφους



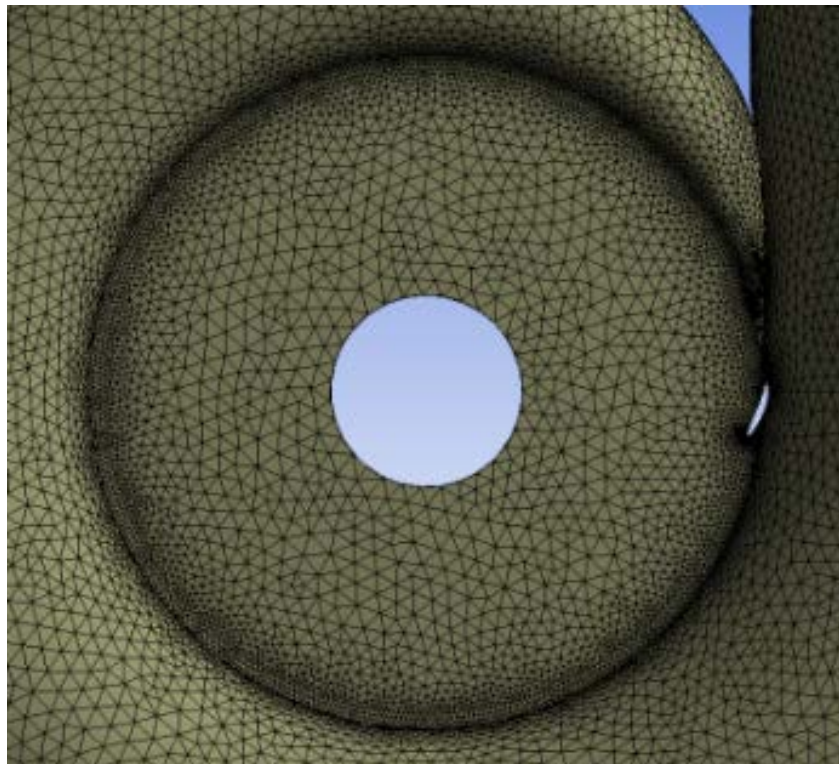


Εικόνα 10.5 Τελικό υπολογιστικό πλέγμα (πλέγμα 2) του σπειροειδούς κελύφους



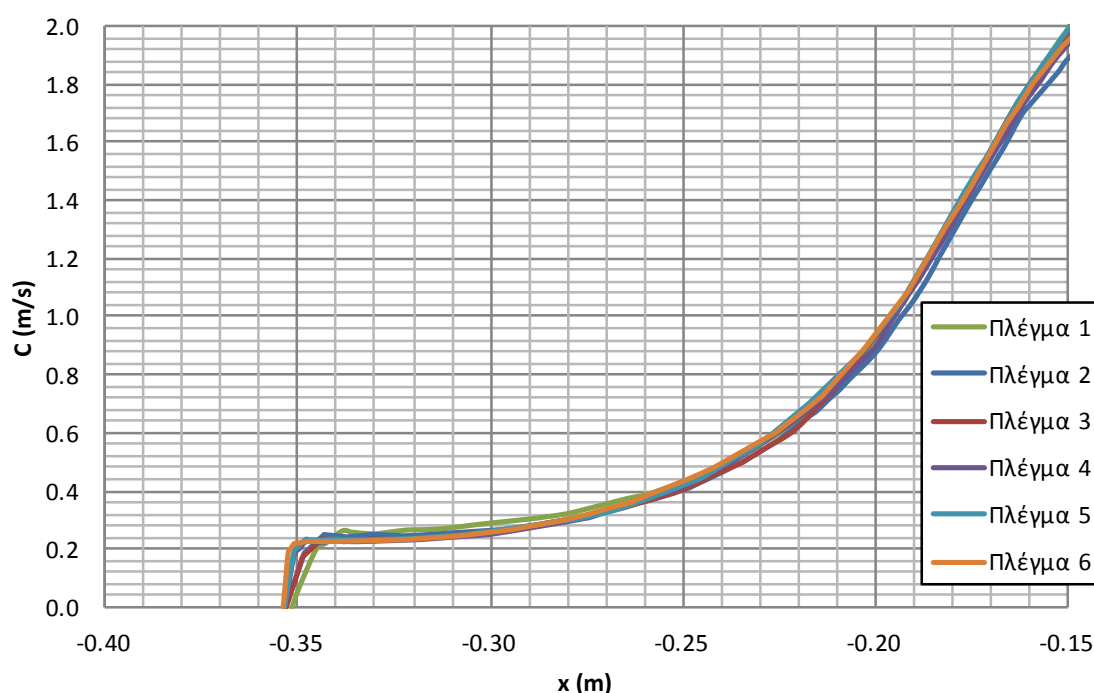


**Εικόνα 10.6 Αρχική διαμόρφωση κελιών της στεφάνης**

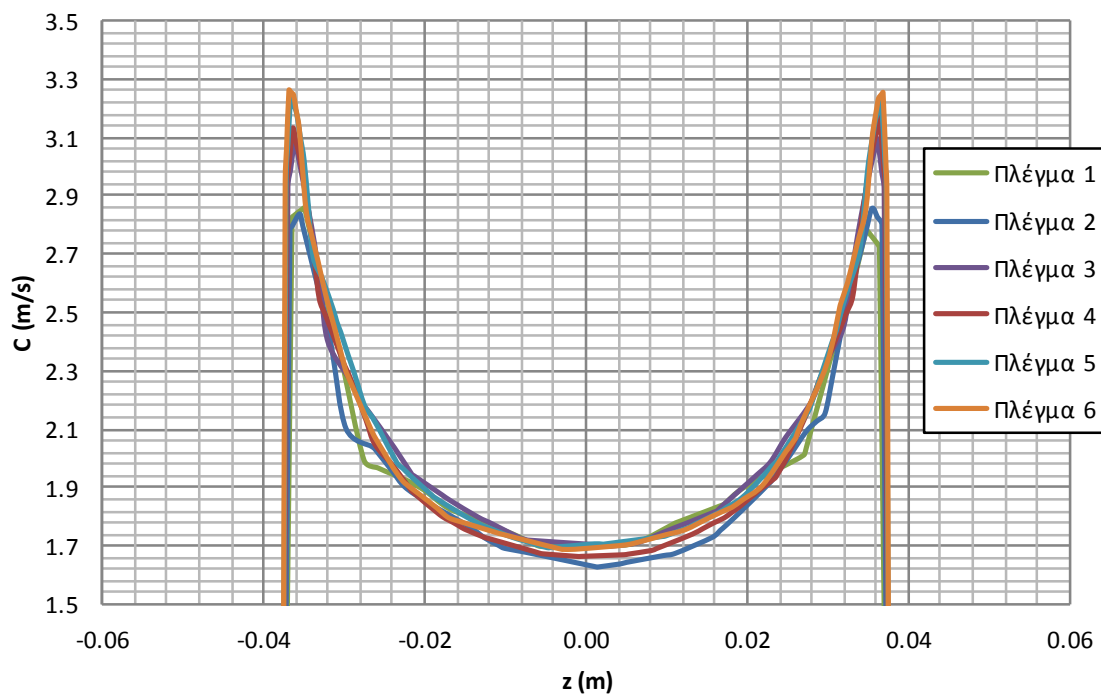


**Εικόνα 10.7 Τελική διαμόρφωση κελιών της στεφάνης**

Ακολουθούν τα διαγράμματα της ακτινικής συνιστώσας της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ελέγχου ΔΔ (Διάγραμμα 10.2) και ΕΕ (Διάγραμμα 10.3) για τα διάφορα πλέγματα. Παρατηρείται ότι η μεταβολή της ακτινικής ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής έλεγχου ΔΔ είναι μικρές σε σχέση αυτή στη γραμμή ελέγχου ΕΕ. Παρατηρούμε ότι τα οι κατανομή της ακτινικής ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ελέγχου ΕΕ συμπίπτει αρκετά στα πλέγματα 5 και 6. Παρατηρείται επίσης ότι το σημείο με την πιο αισθητή απόκλιση των καμπυλών κατά τη γραμμή ελέγχου ΔΔ είναι κοντά στα τοιχώματα του σπειροειδούς κελύφους (εκεί όπου μηδενίζεται και η ταχύτητα του ρευστού). Η απόκλιση αυτή από το πιο αραιό στο πιο πυκνό πλέγμα τόσο κατά την γραμμή ελέγχου ΔΔ όσο και κατά την γραμμή ελέγχου ΕΕ οφείλεται στη διαμόρφωση του οριακού στρώματος με λιγότερη ακρίβεια στο πιο αραιό και μεγαλύτερη στο πιο πυκνό πλέγμα. Επίσης το γεγονός ότι η μεγαλύτερη απόκλιση στο υπολογιστικά πλέγματα παρατηρείται στην γραμμή έλεγχου ΕΕ αποτελεί και το λόγο που εφαρμόζεται ζώνη τοπικής πύκνωσης στην περιοχή την επιφάνεια της περιοχής της στεφάνης.



**Διάγραμμα 10.2** Ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ελέγχου ΔΔ για γωνία περιέλιξης  $180^\circ$



Διάγραμμα 10.3 Ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ελέγχου ΕΕ για γωνία περιέλιξης  $180^\circ$

## 10.2 Αποτελέσματα των μοντέλων σπειροειδούς κελύφους

Για την μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας της στεφάνης με ομαλοποιημένα άκρα επιλέχθηκαν τα μοντέλα σπειροειδούς κελύφους από τις τρεις κατηγορίες που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4. Έτσι επιλέχθηκαν τα μοντέλα A1, B2 και Γ2 από το για τον προσδιορισμό των υδραυλικών και ρεολογικών χαρακτηριστικών τους. Η επιλογή έγινε με γνώμονα να μελετηθεί ένα μοντέλο χωρίς στεφάνη οδηγητικών περύγιων του οποίου η γεωμετρία των μεσημβρινών τομών να είναι εξολοκλήρου κυκλική (μοντέλο A1) αφού αυτό προσομοιώνει καλύτερα το σπειροειδές κέλυφος του εργαστηριακού μοντέλου. Η επιλογή των άλλων δύο μοντέλων έγινε με βάση την διαμόρφωση της στεφάνης από μεσαίο μέγεθος (μοντέλο B2) σε μεγάλο (μοντέλο Γ2) με διαμόρφωση των μεσημβρινών τομών που περιλαμβάνει κυκλική αλλά και ελλειπτική γεωμετρία. Τα βασικά χαρακτηριστικά όλων των μοντέλων που επιλέχθηκαν (Πίνακας 10.2) παρουσιάζονται παρακάτω.

<b>Μέγεθος</b>	<b>Σύμβολο Μεγέθους</b>	<b>Μοντέλο A1</b>	<b>Μοντέλο B2</b>	<b>Μοντέλο Γ2</b>
<b>Παροχή όγκου του ρευστού ΚΣΛ</b>	$Q$ (m <sup>3</sup> /h)	500	500	500
<b>Διάμετρος του αγωγού εισόδου</b>	$\Delta_{ΕΙΣ}$ (m)	0.3500	0.3540	0.5500
<b>Πλάτος εξόδου της στεφάνης</b>	$\Pi_{Κ}$ (m)	0.0754	0.0754	0.0754
<b>Διάμετρος εξόδου της στεφάνης</b>	$\Delta_{Κ}$ (m)	0.3292	0.3292	0.3292
<b>Γωνία Περιέλιξης</b>	$\Phi_{ΠΕΡ}$ (°)	360	360	360
<b>Πλάτος εισόδου της στεφάνης</b>	$1-\Pi_{Β}/\Pi_{Κ}$	0.00	0.20	0.55
<b>Γωνία Γλωττίδας</b>	$\Phi_{ΒΚ}$ (°)	0.00	12	35

Πίνακας 10.2 Δεδομένα που εισάγονται στον αλγόριθμο για τα μοντέλα A1, B2 και Γ2

Επίσης παρουσιάζονται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κελύφους για τα μοντέλα A1, B2 και Γ2 (Πίνακας 10.3). καθώς επίσης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής εισόδου στο κέλυφος. Τα μεγέθη που παρουσιάζονται περιγράφονται σχηματικά από τις εικόνες ()

<b>Μέγεθος</b>	<b>Σύμβολο Μεγέθους</b>	<b>Μοντέλο A1</b>	<b>Μοντέλο B2</b>	<b>Μοντέλο Γ2</b>
<b>Ακτίνα εισόδου της στεφάνης</b>	$R_M(m)$	0.164600	0.187354	0.253115
<b>Πλάτος εισόδου της στεφάνης</b>	$\Pi_B(m)$	0.037700	0.047125	0.083778
<b>Ακτίνα τελευταίας κυκλικής διατομής</b>	$\Sigma_{AB}(m)$	0.039030	0.066645	0.146062
<b>Ακτίνα κύκλου διαμόρφωσης της στεφάνης</b>	$\rho_K(m)$	0	0.032179	0.108056
<b>Ακτίνα εξόδου της στεφάνης</b>	$R_O(m)$	0.164600	0.164600	0.164600
<b>Πλάτος εξόδου της στεφάνης</b>	$\Pi_O(m)$	0.037700	0.069879	0.145756

Πίνακας 10.3 Γενικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μοντέλων A1, B2 και Γ2

<b>Μέγεθος</b>	<b>Σύμβολο Μεγέθους</b>	<b>Μοντέλο A1</b>	<b>Μοντέλο B2</b>	<b>Μοντέλο Γ2</b>
<b>Παροχή όγκου του ρευστού</b>	$Q_o(m^3/s)$	0.155600	0.155600	0.155600
<b>Ταχύτητα του ρευστού</b>	$C_o(m/s)$	1.617274	1.580932	0.654929
<b>Επιφάνεια διατομής</b>	$A_o(m)$	0.096211	0.098423	0.237583
<b>Ακτίνα κυκλικής κυκλικής γεωμετρίας</b>	$\rho_o$	0.175000	0.177000	0.275000

Πίνακας 10.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής εισόδου των μοντέλων A1, B2 και Γ2

Για τους υπολογισμούς ορίστηκε μια αρχική παροχή όγκου η οποία επιλέχθηκε με βάση την παροχή όγκου που δέχεται ο εργαστηριακός υδροστρόβιλος τύπου Francis στο κανονικό σημείο λειτουργίας του. Υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν επίσης για παροχή όγκου 30% μεγαλύτερη και 40% μικρότερη της αρχικής.

Στα διαγράμματα που προκύπτουν με βάση την γραμμή ελέγχου ΔΔ παρουσιάζουν κατά τον άξονα x το μήκος της διάστασης x προς μήκος της ακτίνας εξόδου της στεφάνης ( $x/RKX$ ). Τα διαγράμματα που προκύπτουν με βάση την γραμμή ελέγχου ΕΕ παρουσιάζουν κατά τον άξονα x το μήκος της διάστασης z προς το πλάτος της εξόδου της στεφάνης ( $z/I$ ). Τέλος στα

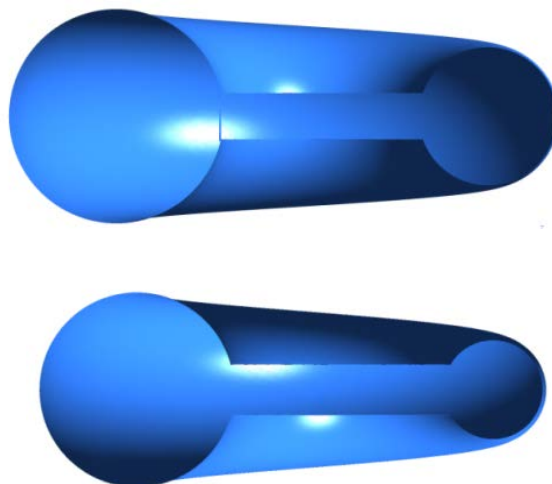
διαγράμματα που προκύπτουν με βάση την γραμμή ελέγχου  $\Pi$  παρουσιάζουν στον άξονα  $x$  τη γωνία περιέλιξης ( $\theta$ ).

Επειδή επιλέχθηκε η συνθήκη outflow στη διατομή εξόδου του κελύφους κατά τις προσομοιώσεις, για την καλύτερη δυνατή αποτύπωση και συσχέτιση των δεδομένων οι άξονες στα διαγράμματα πίεσεων αδιαστατοποιήθηκαν ως προς τα μεγέθη της στατικής και ολικής πίεσης στην είσοδο του κελύφους. Συγκεκριμένα σε όλα τα διαγράμματα πίεσης αποτυπώνεται κατά τον άξονα  $y$  η ολική και η στατική πίεση προς την ολική και την στατική πίεση εισόδου ( $P/P_{in}$ ) του ρευστού αντίστοιχα.

Σε κάθε μοντέλο κελύφους παρουσιάζονται τα περιγράμματα (contours) της στατικής πίεσης και της συνολικής ταχύτητας κατά την τομή  $yy'$  (μεσημβρινές τομές με γωνία περιέλιξης 90 και 270 μοίρες) καθώς και κατά την τομή  $xx'$  (αξονική τομή). Στην κυλινδρική επιφάνεια ελέγχου που ορίστηκε αποτυπώνεται το περίγραμμα της ταχύτητας με το διάνυσμα της ακτινικής και εφαπτομενικής της συνιστώσας. Όλα τα περιγράμματα έχουν διαμορφωθεί με βάση την ίδια χρωματική κλίμακα για ευκολότερη ανάγνωση και σύγκριση.

### 10.2.1 Μοντέλο Κελύφους A1

Αρχικά παρουσιάζεται η ανάλυση της ροής στο μοντέλο κελύφους A1 του με κυκλική διαμόρφωση της γεωμετρίας των μεσημβρινών τομών (Εικόνα 10.8).

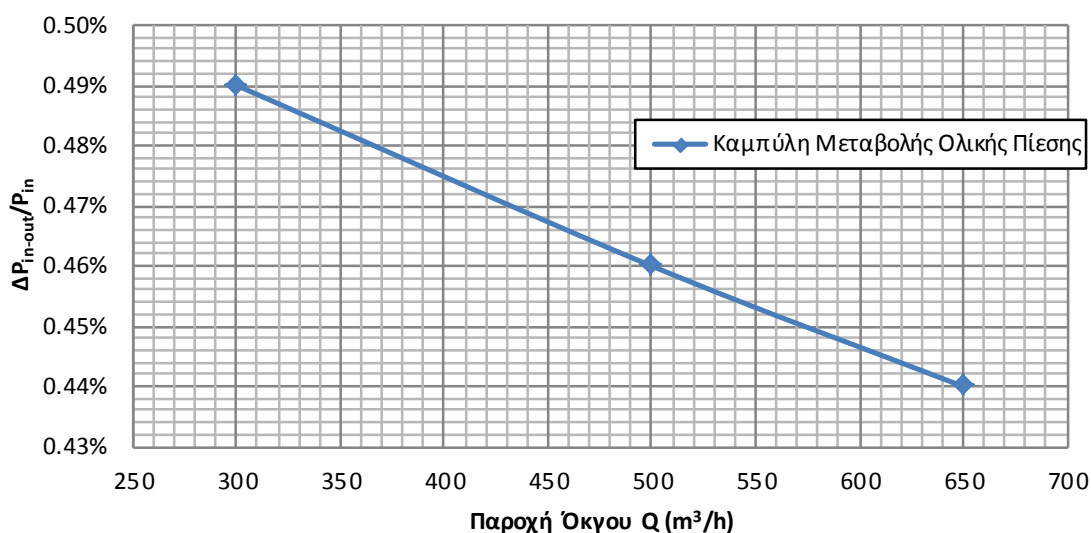


Εικόνα 10.8 Τομή κατά  $x$  και  $y$  για A) και B) αντίστοιχα για το μοντέλο κελύφους A1

Ακολουθώντας τα τελικά αποτελέσματα της μεταβολής της ολικής και στατικής πίεσης (Διάγραμμα 10.4) για κάθε τιμή της παροχής όγκου παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 10.5). Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι μικρότερες απώλειες ολικής πίεσης παρουσιάζονται για παροχή 650 m<sup>3</sup>/h.

<b>Σημεία λειτουργίας Μοντέλου A1</b>			
<b><math>Q(m_3/h)=Q_A=500</math></b>			
<b>Πίεση</b>	<b><math>P_{in}</math> (Pa)</b>	<b><math>P_{out}</math> (Pa)</b>	<b><math>\Delta P_{in-out}/P_{in}</math></b>
<b>Ολική</b>	74564.05	74223.08	0.46%
<b>Στατική</b>	73257.58	66767.84	8.86%
<b><math>Q(m_3/h)=1.3 \times Q_A=650</math></b>			
<b>Πίεση</b>	<b><math>P_{in}</math> (Pa)</b>	<b><math>P_{out}</math> (Pa)</b>	<b><math>\Delta P_{in-out}/P_{in}</math></b>
<b>Ολική</b>	126071.27	125512.08	0.44%
<b>Στατική</b>	123863.67	112906.68	8.85%
<b><math>Q(m_3/h)=0.6 \times Q_A=300</math></b>			
<b>Πίεση</b>	<b><math>P_{in}</math> (Pa)</b>	<b><math>P_{out}</math> (Pa)</b>	<b><math>\Delta P_{in-out}/P_{in}</math></b>
<b>Ολική</b>	26880.01	26748.78	0.49%
<b>Στατική</b>	26409.30	24064.79	8.88%

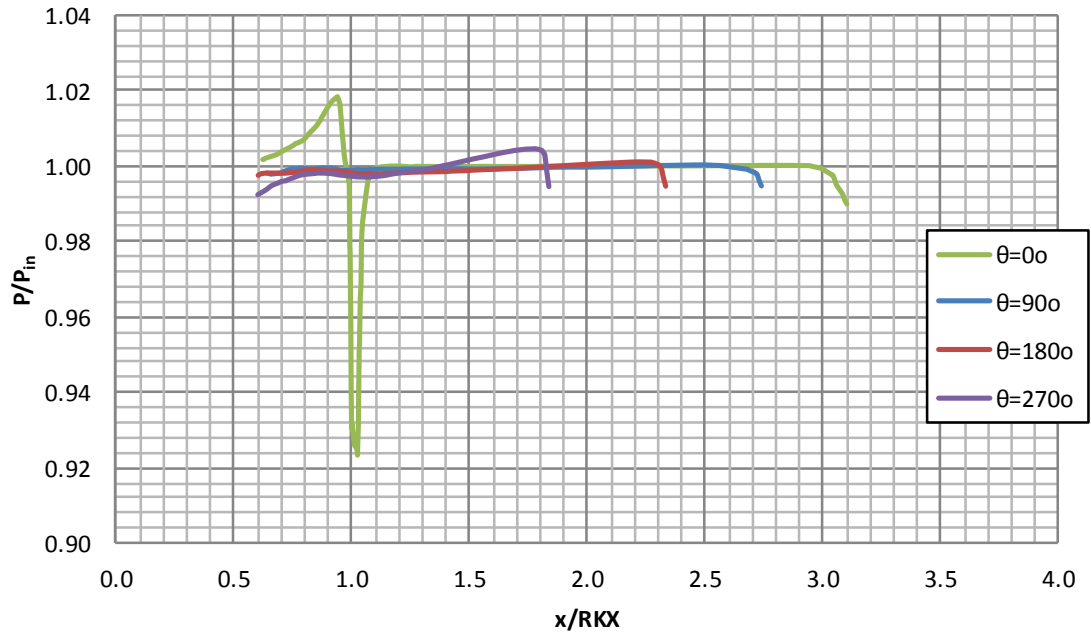
Πίνακας 10.5 Τελικά αποτελέσματα μεταβολής της ολικής και στατικής πίεσης για το μοντέλο A1



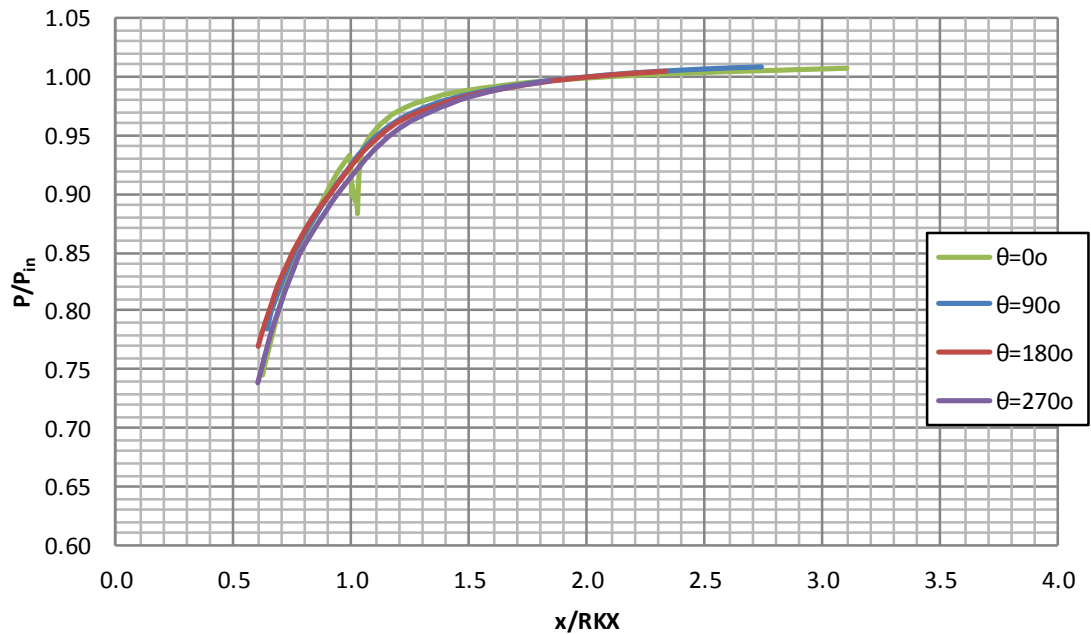
Διάγραμμα 10.4 Καμπύλη μεταβολής της ολικής πίεσης του σπειροειδούς κελύφους συναρτήσει της παροχής όγκου του ρευστού για το μοντέλο A1



Ακολουθούν τα διαγράμματα κατανομής της ολικής και της στατικής πίεσης με βάση τη γραμμή ελέγχου ΔΔ.



Διάγραμμα 10.5 Κατανομή ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο A1

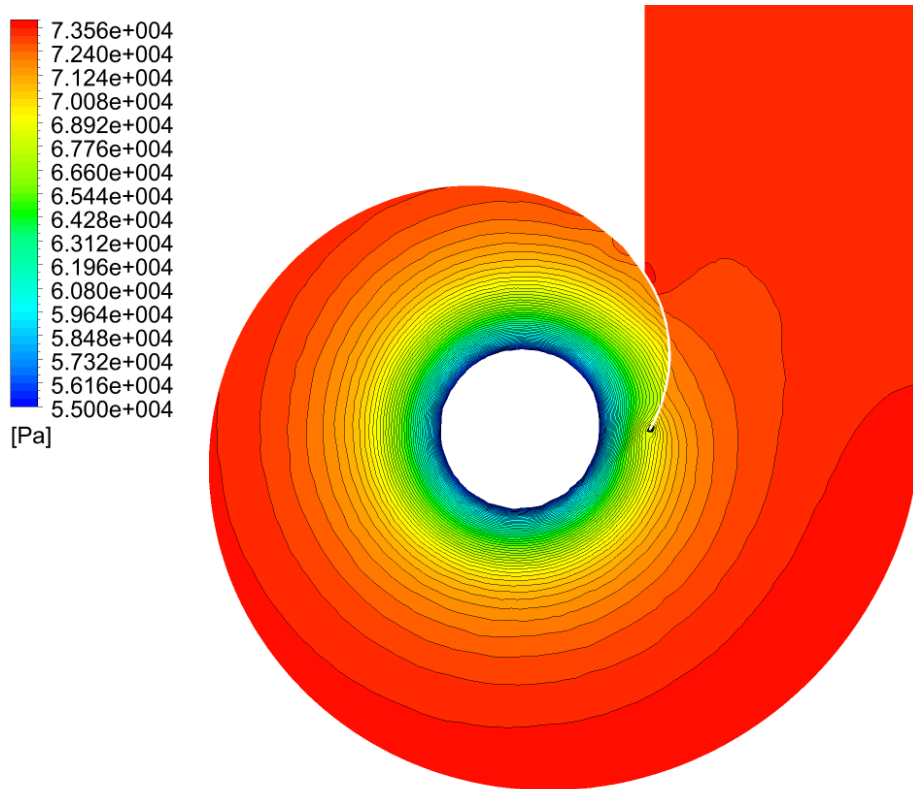


Διάγραμμα 10.6 Κατανομή στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο A1

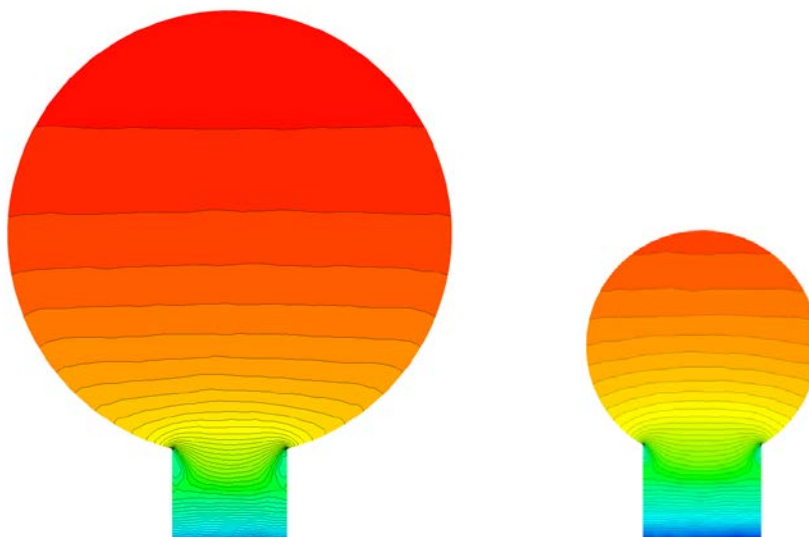


Αρχικά προκύπτει ότι κατανομή της ολικής πίεσης (Διάγραμμα 10.5) είναι αρκετά σταθερή κατά το μήκος της γραμμής ελέγχου  $\Delta\Delta$  και για όλες τις γωνίες περιέλιξης. Πτώση της πίεσης παρουσιάζεται κοντά στα τοιχώματα λόγω τριβών αφού για τους υπολογισμούς εφαρμόστηκε μοντέλο συνεκτικής ροής. Η καμπύλη κατανομής της ολικής αλλά και στατικής πίεσης κατά τη γραμμή ελέγχου  $\Delta\Delta$  για γωνία περιέλιξης  $0^\circ$  παρουσιάζει μια μεγάλη και απότομη ακμή για τιμή του  $x/RKX$  λίγο μεγαλύτερη από τη μονάδα. Αυτό παρατηρείται επειδή στο σημείο αυτό η γραμμή ελέγχου  $\Delta\Delta$  για τη γωνία περιέλιξης  $0^\circ$  τέμνεται με την έξοδο της γλωττίδας όπου παρουσιάζεται σημείο ανακοπής. Αντιθέτως η κατανομή της στατικής πίεσης (Διάγραμμα 10.6) μειώνεται αρκετά γραμμικά από το τοίχωμα του κελύφους προς τη στεφάνη ενώ ο ρυθμός μείωσης αυξάνει απότομα για τιμές της παραμέτρου  $x/RKX$  μικρότερης από 1.5. Αυτό προκύπτει επειδή η διατομή του σπειροειδούς κελύφους για τιμές  $x/RKX$  μικρότερης από 1.5 μικραίνει απότομα διαμορφώνοντας τη γεωμετρία της στεφάνης με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της ροής σε αυτό το τμήμα και άρα την μείωση της στατικής πίεσης. Ωστόσο είναι σαφές ότι η κατανομή της στατικής πίεσης κατά μήκος της γραμμής ελέγχου  $\Delta\Delta$  δεν μεταβάλλεται πολύ για κάθε μεσημβρινή τομή. Από το περίγραμμα της στατικής πίεσης κατά την τομή  $xx'$  (Εικόνα 10.9) παρατηρείται ότι ενώ η κατανομή της στατικής πίεσης είναι αρκετά σταθερή κατά την περιφέρεια του κελύφους παρουσιάζεται έντονη ανομοιομορφία στην περιοχή κοντά στη γλωττίδα.

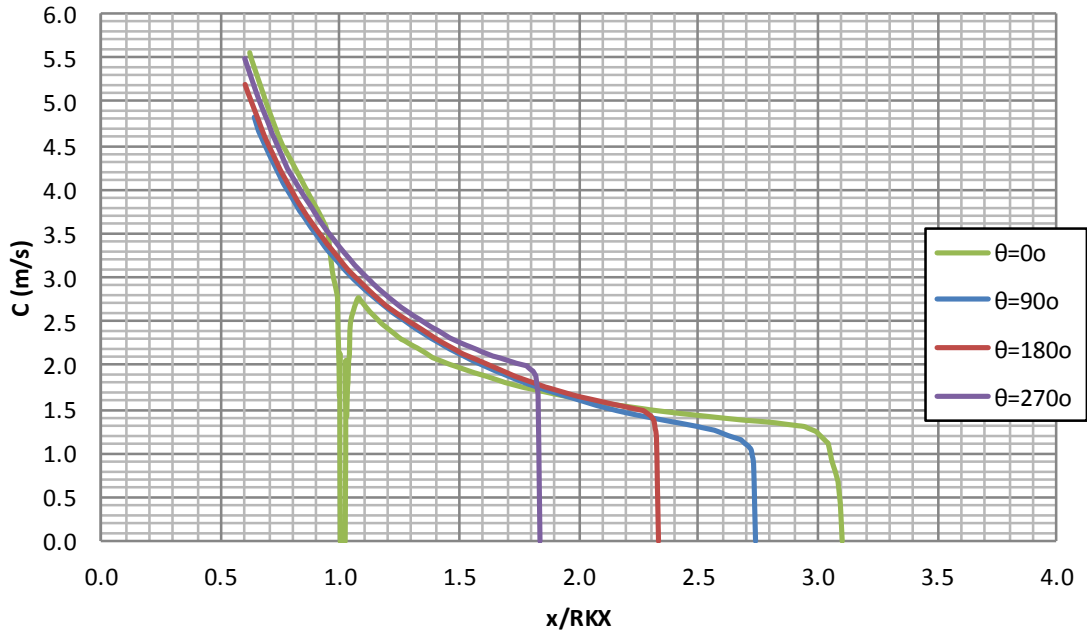
Από το περίγραμμα της στατικής πίεσης κατά τις μεσημβρινές τομές με γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  και  $270^\circ$  μοίρες (Εικόνα 10.10) φαίνεται ότι η στατική πίεση μακριά από τη στεφάνη είναι σχεδόν σταθερή σε όλο πλάτος του κελύφους και μεταβάλλεται απότομα με μεγάλη πτώση στα πλευρικά τοιχώματα του τμήματος της στεφάνης. Η απότομη μεταβολή της γεωμετρίας σε αυτό το τμήμα του σπειροειδούς κελύφους προκαλεί απότομη επιτάχυνση της ροής που επιφέρει την πτώση της στατικής πίεσης στο τμήμα εισόδου της στεφάνης και ειδικότερα κοντά στα τοιχώματα.



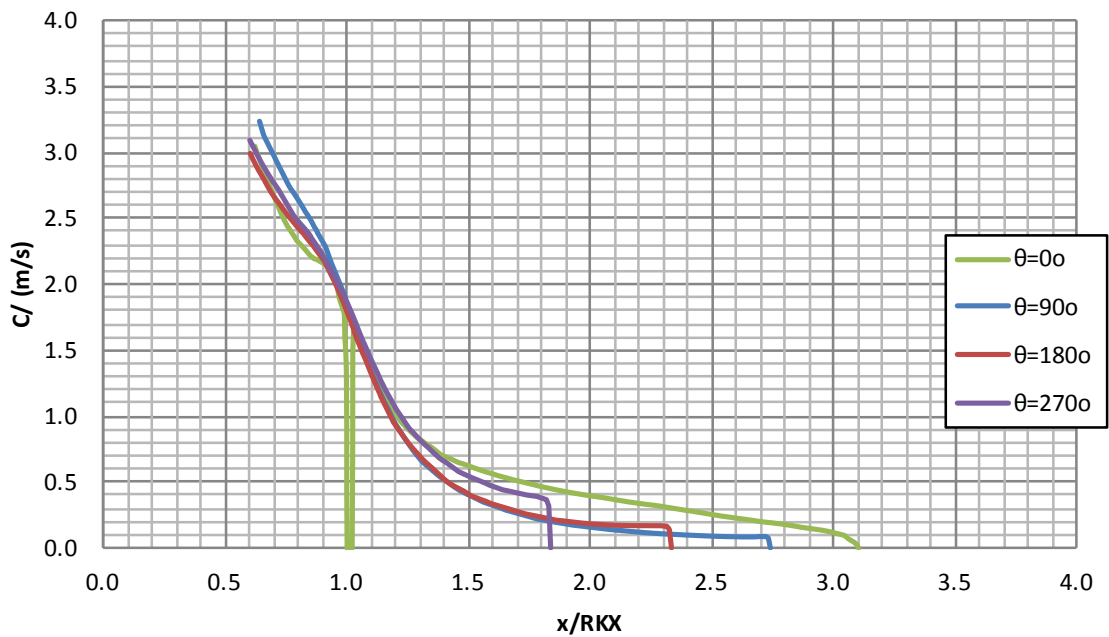
Εικόνα 10.9 Περίγραμμα στατικής πίεσης κατά την τομή  $z=0$  για το μοντέλο A1



Εικόνα 10.10 Περιγράμματα στατικής πίεσης για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  και  $270^\circ$  για το μοντέλο A1



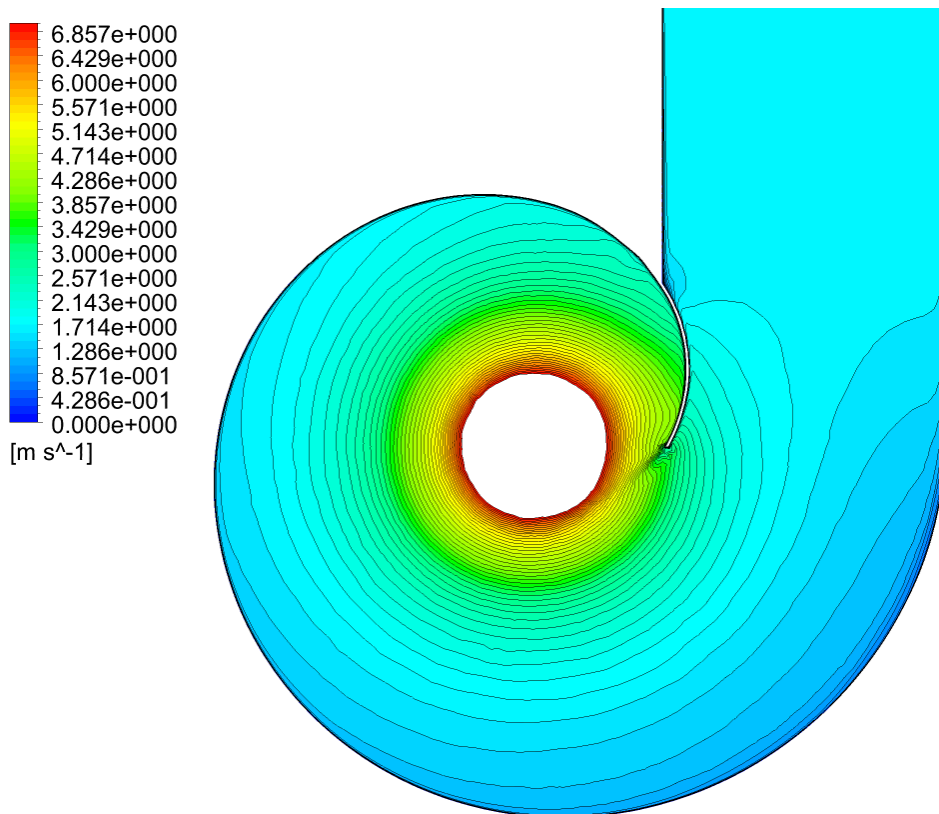
Διάγραμμα 10.7 Κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου  
 ΔΔ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο A1



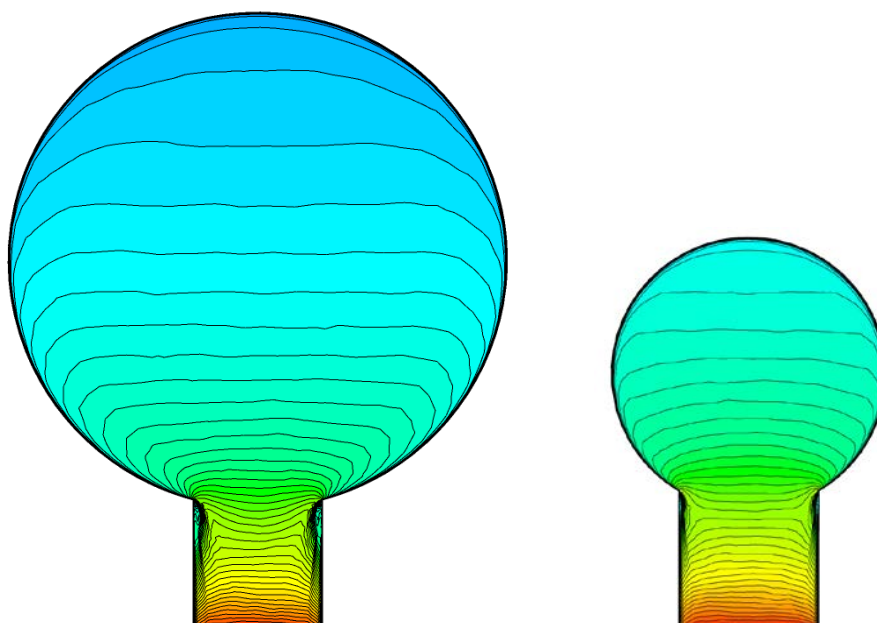
Διάγραμμα 10.8 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου  
 ΔΔ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο A1

Η κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας (Διάγραμμα 10.7) μεταβάλλεται εκθετικά σε όλο το μήκος της γραμμής ελέγχου  $\Delta\Delta$  και για κάθε μεσημβρινή τομή. Επίσης παρατηρείται ότι μικρές αποκλίσεις μεταξύ των καμπυλών που αντιστοιχούν στις διάφορες γωνίες περιέλιξης είναι αισθητές ενώ μηδενισμός της ταχύτητας παρουσιάζεται κοντά στο τοίχωμα αφού ισχύει η συνθήκη μη ολίσθησης των συνεκτικών ρευστών.

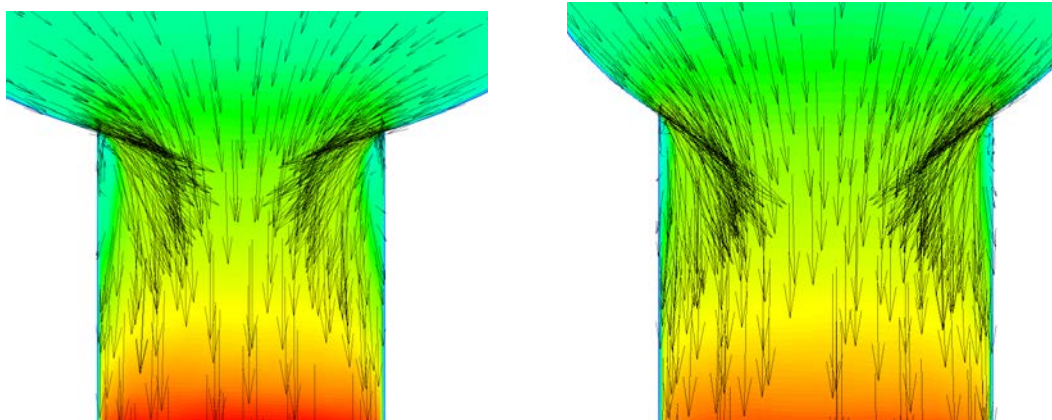
Ομοίως με την καμπύλη κατανομής της ολικής αλλά και στατικής οι καμπύλες ακτινικής και εφαπτομενικής ταχύτητας γωνία περιέλιξης  $0^\circ$  παρουσιάζουν μια μεγάλη και απότομη ακμή για τιμή του  $x/RKX$  λίγο μεγαλύτερη από τη μονάδα. Όπως προαναφέρθηκε αυτό παρατηρείται επειδή στο σημείο αυτό η γραμμή ελέγχου  $\Delta\Delta$  για τη γωνία περιέλιξης  $0^\circ$  τέμνεται με την έξοδο της γλωττίδας όπου παρουσιάζεται σημείο ανακοπής. Η κατανομή της ακτινικής συνιστώσας της ταχύτητας (Διάγραμμα 10.8) αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από το τοίχωμα προς τη στεφάνη από ότι η κατανομή της εφαπτομενικής συνιστώσας. Επίσης είναι σαφές ότι η μεταβολή της ακτινικής ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ελέγχου  $\Delta\Delta$  είναι σημαντική για κάθε μεσημβρινή τομή. Από το περίγραμμα της ολικής ταχύτητας κατά την τομή  $xx'$  (Εικόνα 10.11) παρατηρείται ομοίως με το περίγραμμα της στατικής πίεσης ότι ενώ η κατανομή της ολικής ταχύτητας είναι αρκετά σταθερή κατά την περιφέρεια του κελύφους παρουσιάζεται έντονη ανομοιομορφία κοντά στη περιοχή της γλωττίδας. Από το περίγραμμα της ολικής ταχύτητας κατά την τομή  $yy'$  (Εικόνα 10.12) ομοίως με το περίγραμμα της στατικής πίεσης φαίνεται ότι η κατανομή της ολικής ταχύτητας μακριά από τη στεφάνη είναι σταθερή σε όλο πλάτος του κελύφους και μεταβάλλεται απότομα με μεγάλη μείωση της ολικής ταχύτητας στα πλευρικά τοιχώματα. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι κατά την απότομη μεταβολή της γεωμετρίας στο τμήμα εισόδου της στεφάνης παρουσιάζεται αποκόλληση της ροής στα πλευρικά τοιχώματα. Από τα διανύσματα της ταχύτητας (Εικόνα 10.13) φαίνεται ότι η ροή επηρεάζεται σημαντικά από την απότομη μεταβολή της γεωμετρίας προκαλώντας επιβράδυνση του ρευστού στα πλευρικά τοιχώματα της στεφάνης που ξεκινά από τη διατομή εισόδου και για ένα αρκετά μεγάλο τμήμα της κατά μήκος του άξονα  $x$ . Επίσης από τα διανύσματα της ακτινικής ταχύτητας στο μεσημβρινό επίπεδο και κατά μήκος γραμμών παράλληλων στον άξονα  $z$  (Εικόνα 10.14) προκύπτει ότι δημιουργείται έντονη ανομοιομορφία στο τμήμα της στεφάνης.



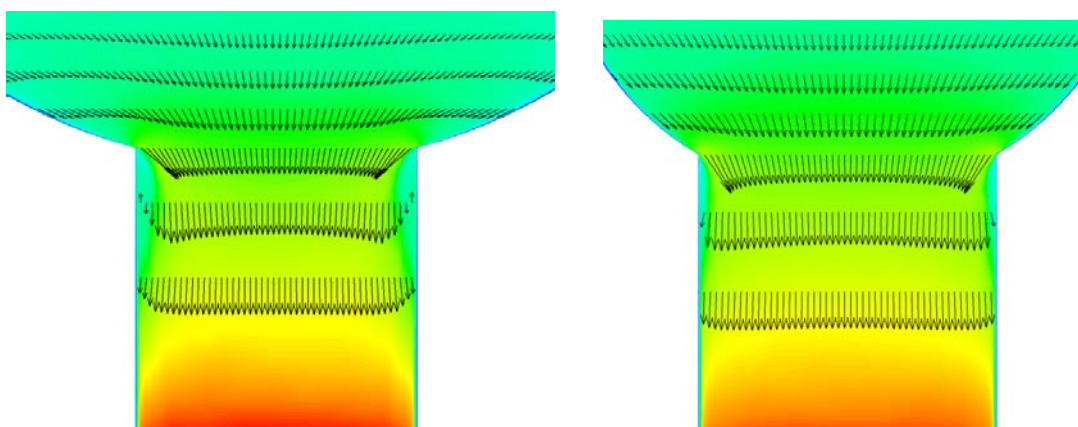
Εικόνα 10.11 Περίγραμμα ολικής ταχύτητας κατά την τομή  $z=0$  για το μοντέλο A1



Εικόνα 10.12 Περίγραμμα ολικής ταχύτητας κατά την μεσημβρινή τομή  $yy'$  για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  και  $270^\circ$  για το μοντέλο A1

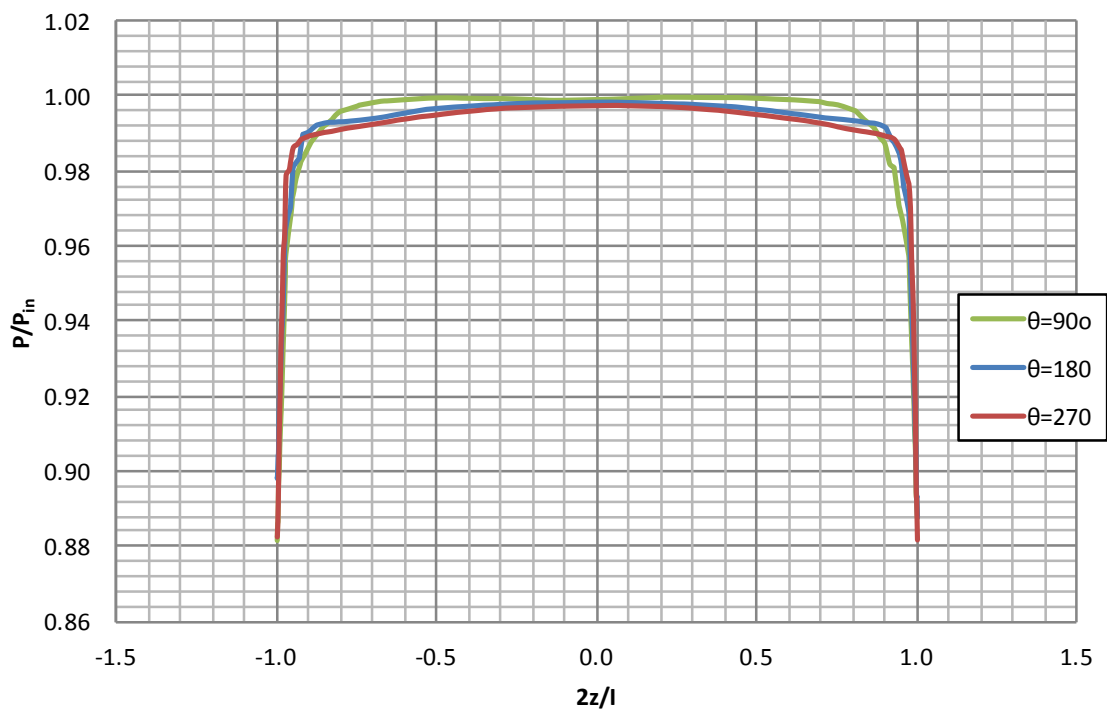


**Εικόνα 10.13** Διανύσματα ολικής ταχύτητας κοντά στην διατομή εξόδου του κελύφους για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  και  $270^\circ$  για το μοντέλο A1

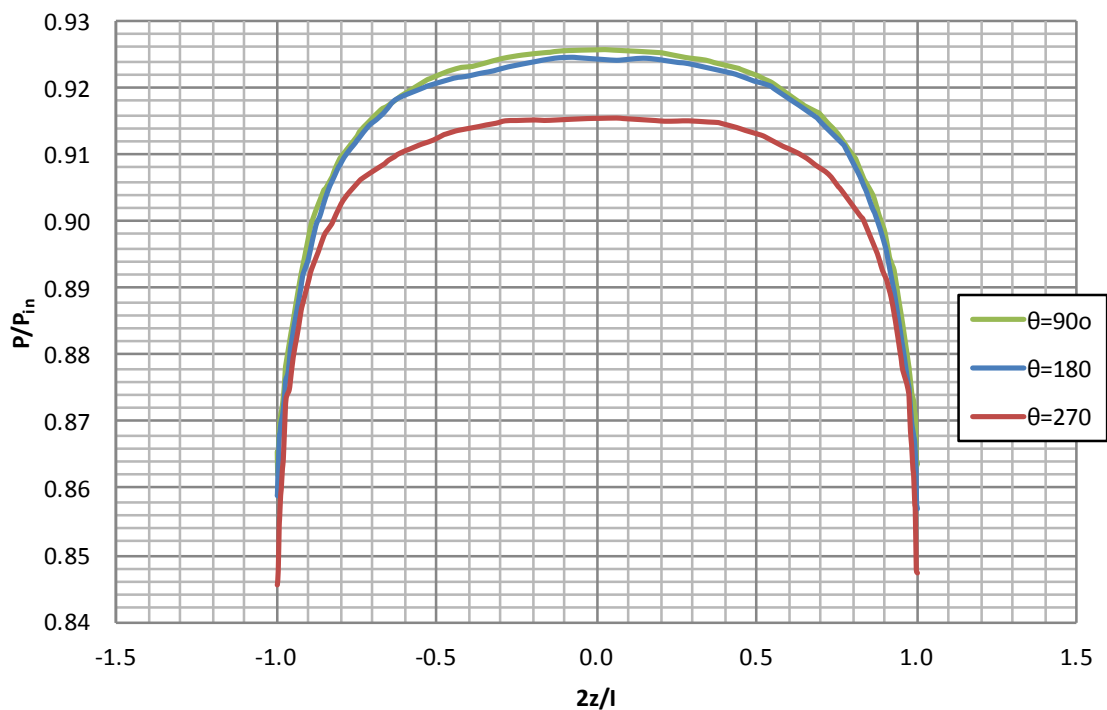


**Εικόνα 10.14** Διανύσματα ακτινικής ταχύτητας κατά μήκος ακτινικών γραμμών ελέγχου κοντά στην διατομή εξόδου του κελύφους για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  και  $270^\circ$  για το μοντέλο A1

Η διαμόρφωση του κελύφους στο τμήμα εισόδου του ρευστού στη στεφάνη δημιουργεί απότομη μεταβολή της γεωμετρίας με αποτέλεσμα να σημειώνονται μεγάλες διακυμάνσεις της πίεσης και της ταχύτητας. Για την καλύτερη δυνατή αποτύπωση των μεταβολών αυτών διαμορφώνονται τα διαγράμματα τιμών με βάση τη γραμμή ελέγχου EE (Εικόνα 10.2) αντίστοιχα με αυτά που διαμορφώθηκαν για την γραμμή ελέγχου ΔΔ. Επίσης σημειώνεται ότι δεν παρουσιάζεται καμπύλη κατανομής της πίεσης και της ταχύτητας για τομή του μεσημβρινού επιπέδου με γωνία περιέλιξης 0 μοίρες αφού αυτή η γραμμή για την συγκεκριμένη γεωμετρία του κελύφους εφάπτεται με τη γλωττίδα και κατά συνέπεια θα έχει μηδενικές τιμές για τα αντίστοιχα μεγέθη.



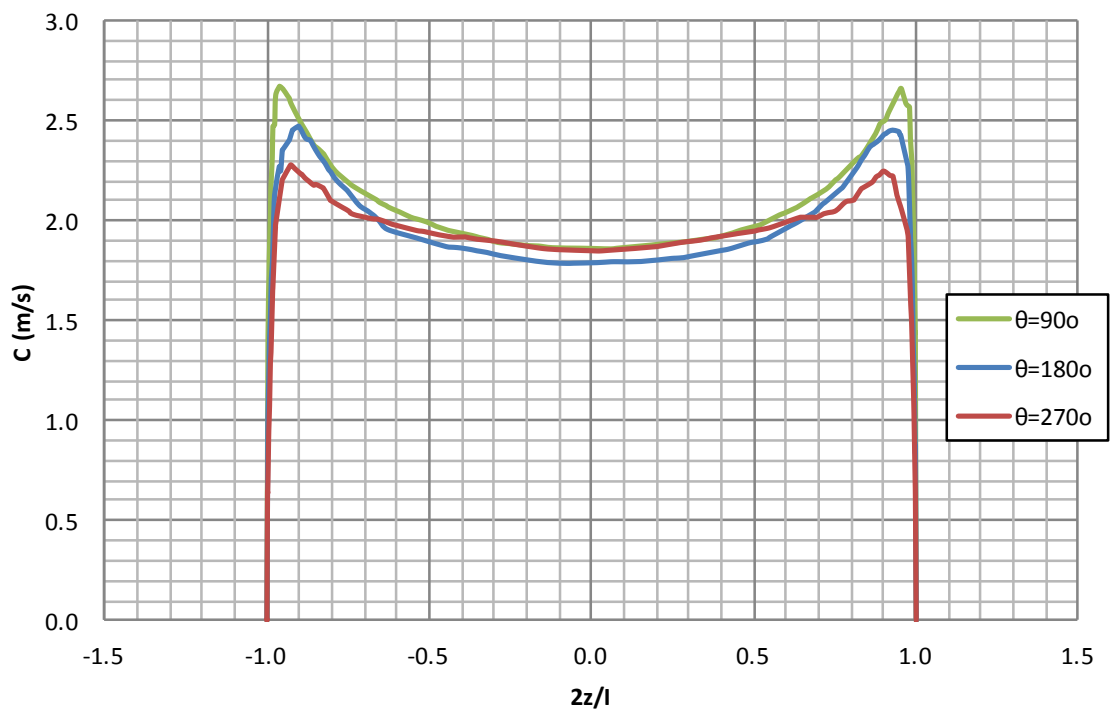
**Διάγραμμα 10.9** Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  για το μοντέλο Α1



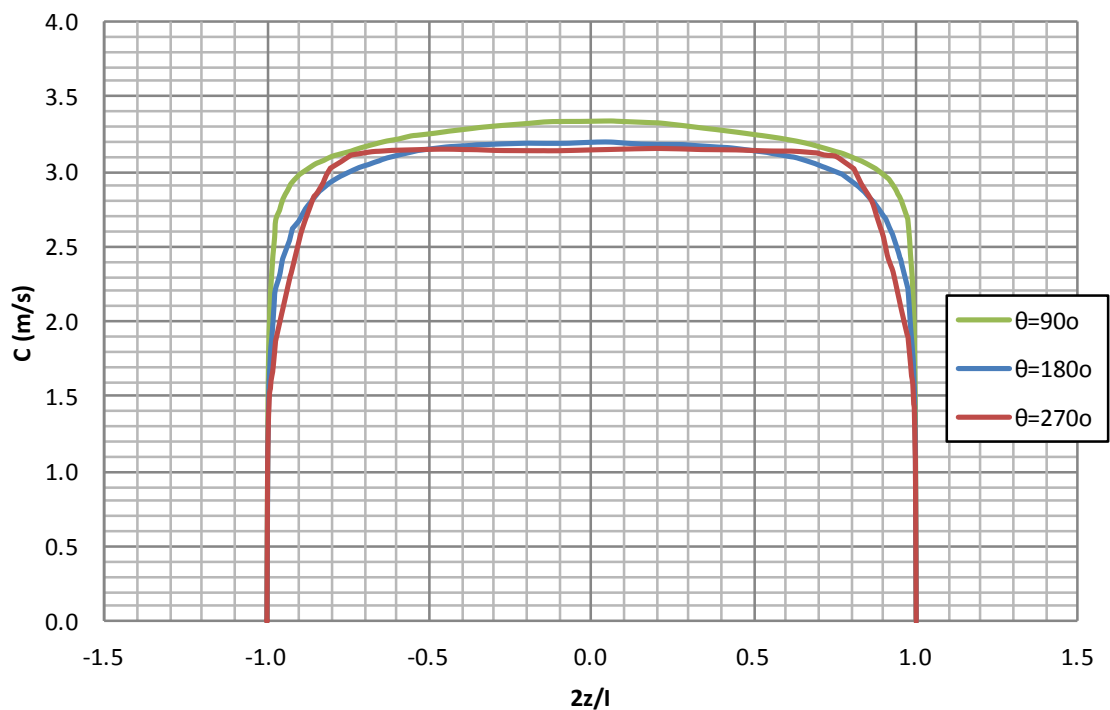
**Διάγραμμα 10.10** Κατανομή της στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  για το μοντέλο Α1

Η κατανομή της ολικής πίεσης κατά μήκος της γραμμής ελέγχου ΕΕ (Διάγραμμα 10.9) μεταβάλλεται σημαντικά σε όλο το μήκος της. Έντονη διακύμανση από τομή σε τομή για όλες τις γωνίες περιέλιξης παρουσιάζεται κοντά στα πλευρικά τοιχώματα της στεφάνης. Η μέση τιμή της ολικής πίεσης είναι πτωτική από την τομή με γωνία περιέλιξης 90 έως 270 μοίρες. Επίσης είναι πολύ ομοιόμορφο το προφίλ της πίεσης για γωνία περιέλιξης 270 μοιρών. Πιο έντονες διαφορές για τις αντίστοιχες τομές παρουσιάζονται στο διάγραμμα κατανομής της στατικής πίεσης (Διάγραμμα 10.10). Η κατανομή της μέσης τιμής της στατικής πίεσης μειώνεται περισσότερο για την τομή με γωνία περιέλιξης 270 μοιρών σε σχέση με τις άλλες τομές. Έντονη πτώση της στατικής πίεσης παρουσιάζεται προς τα τοιχώματα της στεφάνης αφού λόγω απότομης αλλαγής της γεωμετρίας στα άκρα της γραμμής ελέγχου ΕΕ η ροή παρουσιάζει τοπική επιτάχυνση. Αντίστοιχα με τα διαγράμματα των πιέσεων διαμορφώνονται και αυτά της εφαπτομενικής και ακτινικής συνιστώσας της ταχύτητας. Η κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας (Διάγραμμα 10.11) για κάθε τομή με βάση τη γωνία περιέλιξης παρουσιάζει πτωτική πορεία μέχρι το μέσον της στεφάνης ενώ η μέση τιμή της παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις από καμπύλη σε καμπύλη. Αντίστοιχες μεταβολές παρουσιάζονται και στο διάγραμμα ακτινικής ταχύτητας (Διάγραμμα 8) με πιο έντονη διαφορά μεταξύ των καμπύλων για γωνία περιέλιξης 90 και 270 μοιρών. Ενδεικτικό της ανομοιομορφίας της ροής κατά μήκος της γραμμής ελέγχου ΕΕ είναι το περίγραμμα της ταχύτητας κατά την κυλινδρική επιφάνεια ελέγχου (Εικόνα 10.15) στην είσοδο της στεφάνης. Από τα διανύσματα της ταχύτητας φαίνεται ότι σε όλη την περιφέρεια της στεφάνης προκύπτει η κατανομή της εφαπτομενικής και ακτινικής συνιστώσας της ταχύτητας να μεταβάλλεται έντονα κατά την αξονική διεύθυνση.

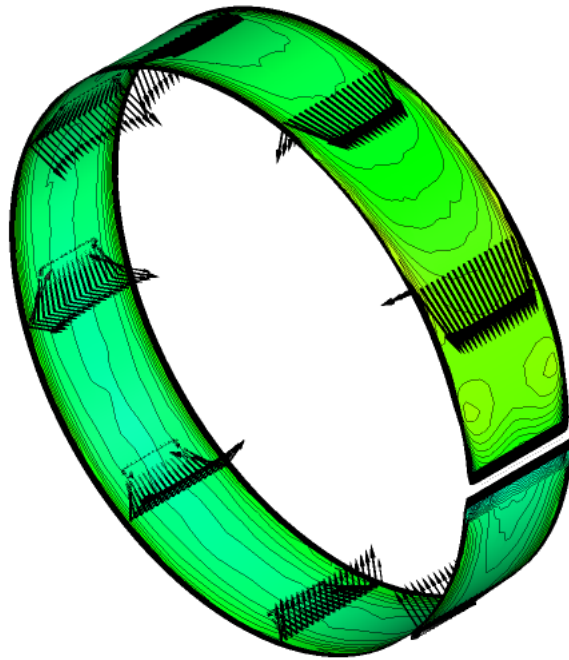




**Διάγραμμα 10.11** Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  για το μοντέλο Α1



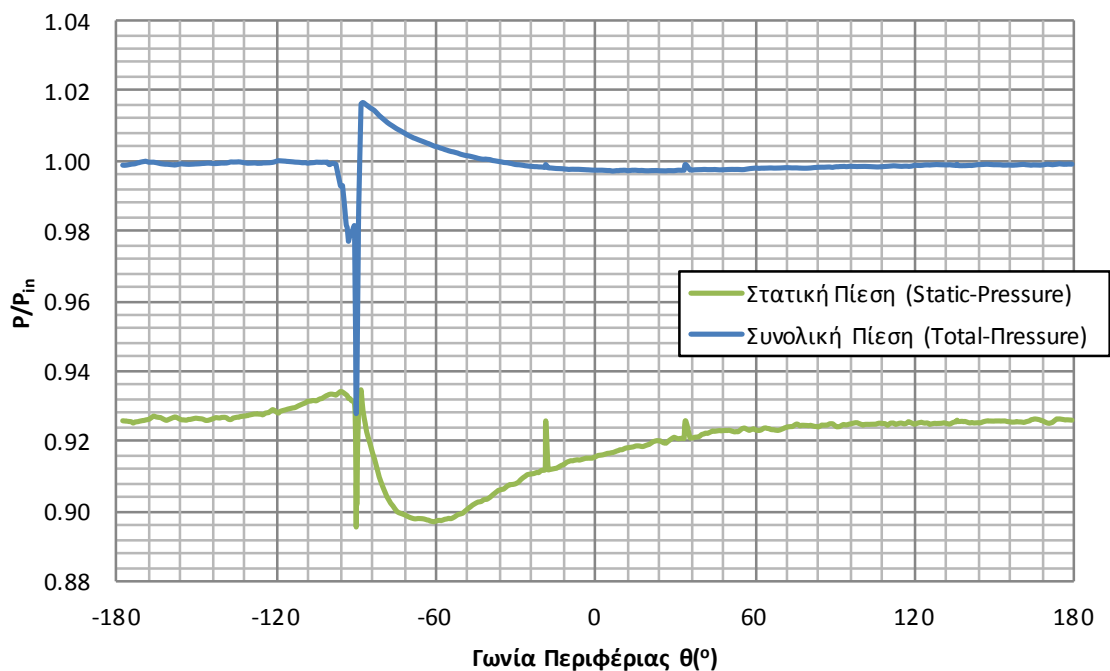
**Διάγραμμα 10.12** Κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  για το μοντέλο Α1



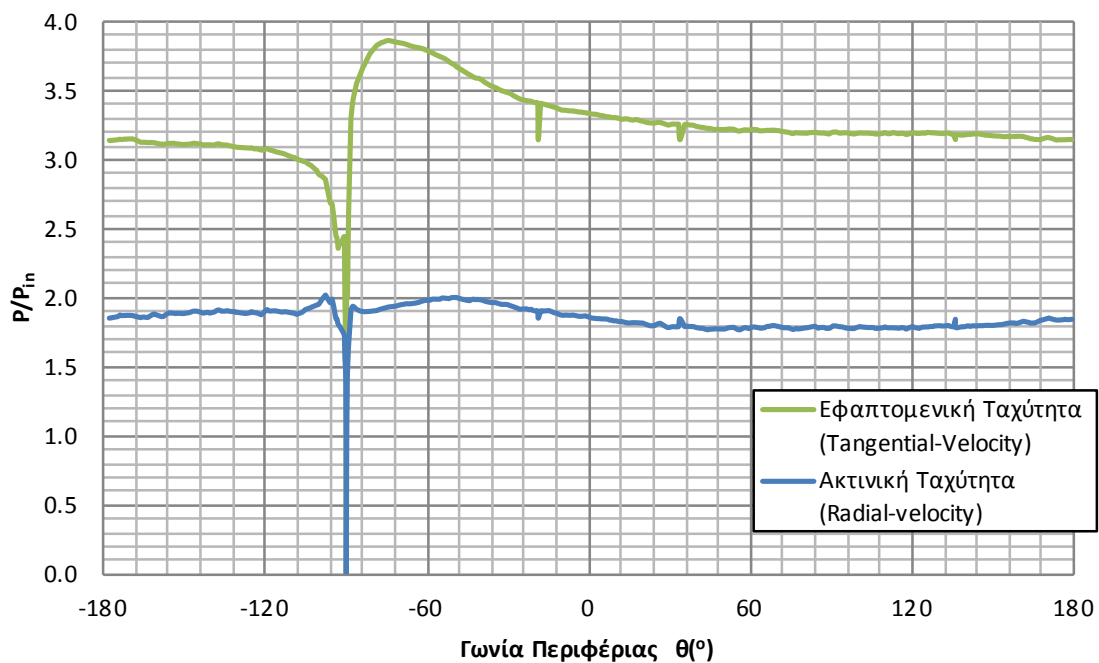
Εικόνα 10.15 Περίγραμμα και διανύσματα ταχύτητας στη διατομή εξόδου του κελύφους για το μοντέλο

A1

Τελευταία παρουσιάζονται τα διαγράμματα κατανομής ολικής και στατικής πίεσης (Διάγραμμα 10.13) καθώς και εφαπτομενικής και ακτινικής ταχύτητας (Διάγραμμα 10.14) κατά μήκος της κυκλικής γραμμής ελέγχου Π. Η κατανομή ολικής αλλά και στατικής πίεσης είναι αρκετά σταθερή με μικρές αποκλίσεις σε όλο το μήκος της περιφέρειας ενώ η απότομη αιχμή για γωνία περιέλιξης  $-85$  μοίρες στις καμπύλες των μεγεθών οφείλεται στο γεγονός ότι η γραμμή Π στο σημείο αυτό τέμνει κάθετα τη διατομή εξόδου της γλωττίδας. Η διακύμανση των καμπυλών κατά το διάστημα για γωνία περιέλιξης  $-100$  μέχρι  $60$  μοίρες προκύπτει από τη διαταραχή της ροής που προκαλεί η γλωττίδα του κελύφους.



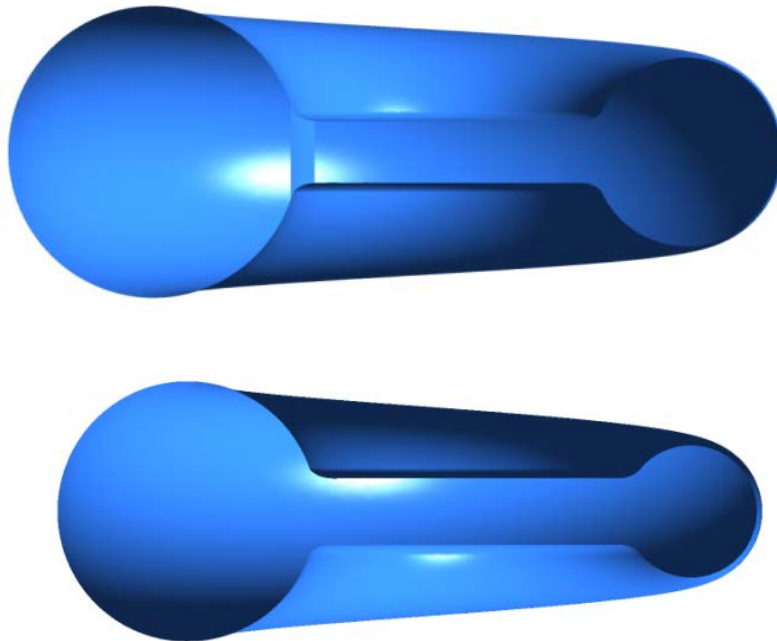
**Διάγραμμα 10.13 Κατανομή της περιφερειακής ολικής και στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου Π για το μοντέλο A1**



**Διάγραμμα 10.14 Κατανομή της περιφερειακής εφαπτομενικής και ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου Π για το μοντέλο A1**

### 10.2.2 Μοντέλο Κελύφους B2

Ακολουθεί ανάλυση της ροής στο μοντέλο κελύφους B2 του με συνδυασμό κυκλικής και ελλειπτικής διαμόρφωση της γεωμετρίας των μεσημβρινών τομών (Εικόνα 10.8).

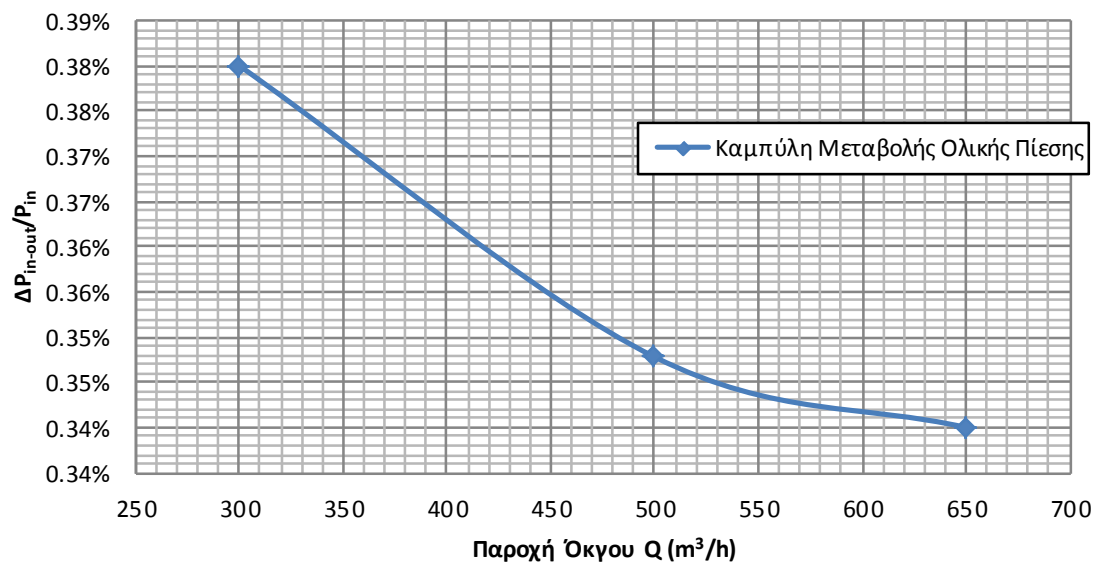


Εικόνα 10.16 Τομή κατά x και y για A) και B) αντίστοιχα για το μοντέλο κελύφους B2

Ακολούθως τα τελικά αποτελέσματα της μεταβολής της ολικής και στατικής πίεσης για κάθε τιμή της παροχής όγκου παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 10.6).

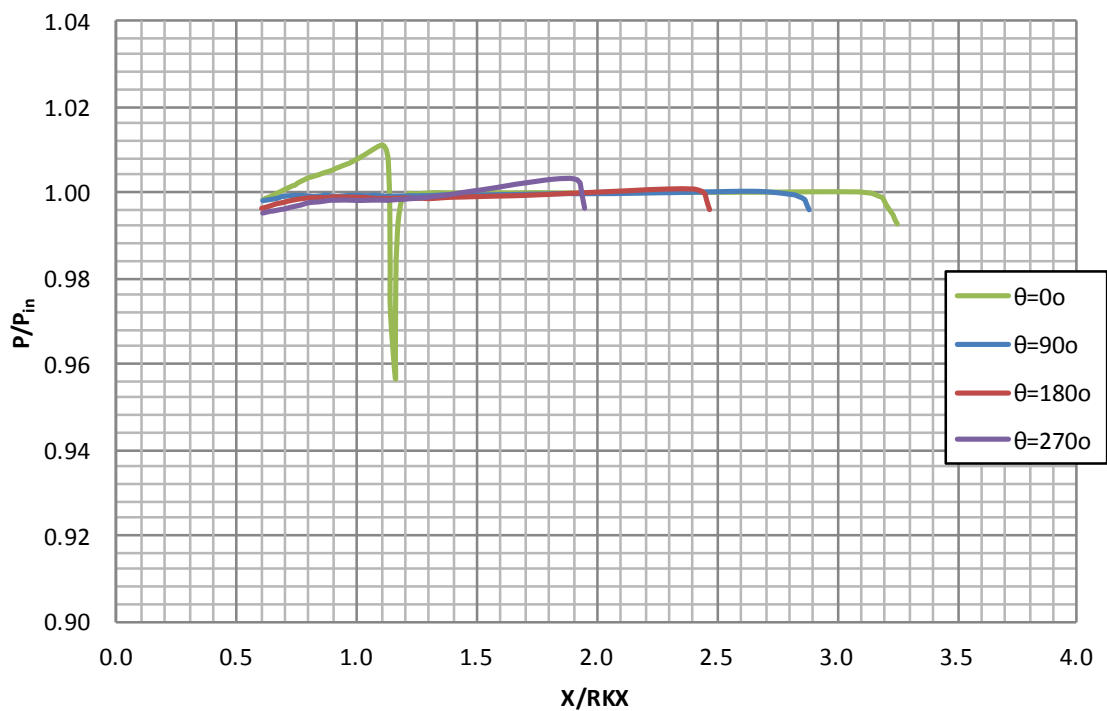
<b>Μοντέλο Β1</b>			
<b><math>Q(m_3/h)=Q_A=500</math></b>			
<b>Πίεση</b>	$P_{in}$ (Pa)	$P_{out}$ (Pa)	$\Delta P_{in-out}/P_{in}$
<b>Ολική</b>	95767.33	95434.25	0.35%
<b>Στατική</b>	94521.07	88488.15	6.38%
<b><math>Q(m_3/h)=1.3xQ_A=650</math></b>			
<b>Πίεση</b>	$P_{in}$ (Pa)	$P_{out}$ (Pa)	$\Delta P_{in-out}/P_{in}$
<b>Ολική</b>	161979.02	161434.25	0.34%
<b>Στατική</b>	159872.8	149691.59	6.37%
<b><math>Q(m_3/h)=0.6xQ_A=300</math></b>			
<b>Πίεση</b>	$P_{in}$ (Pa)	$P_{out}$ (Pa)	$\Delta P_{in-out}/P_{in}$
<b>Ολική</b>	34478.086	34348.488	0.38%
<b>Στατική</b>	34029.457	31846.354	6.42%

Πίνακας 10.6 Τελικά αποτελέσματα μεταβολής της ολικής και στατικής πίεσης για το μοντέλο Β1

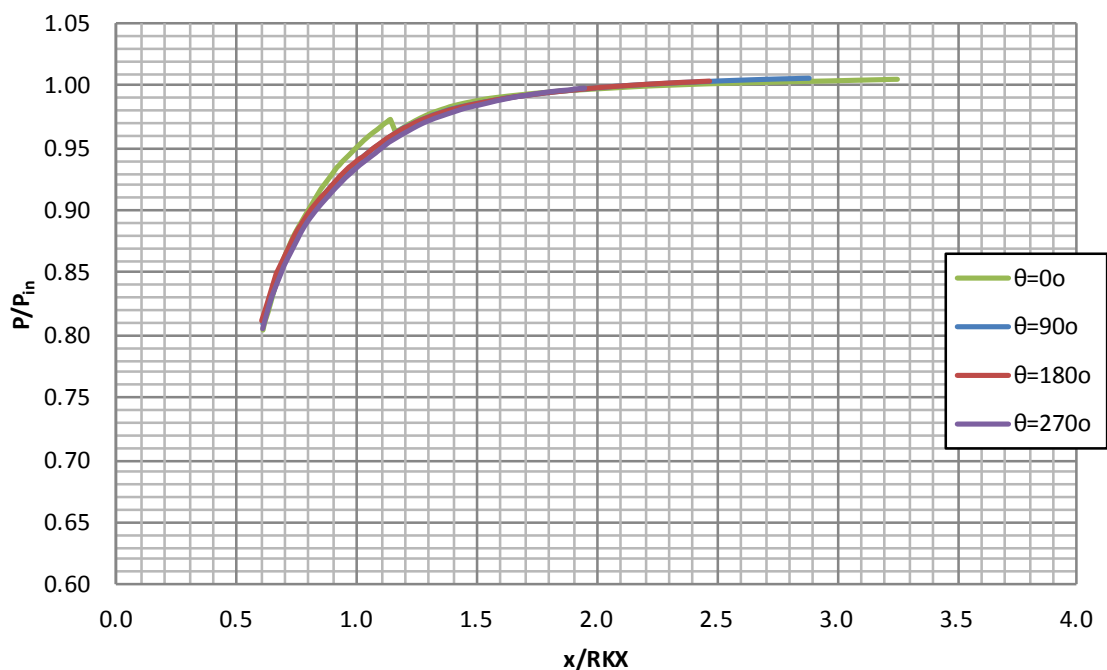


**Διάγραμμα 10.15** Καμπύλη μεταβολής της ολικής πίεσης του σπειροειδούς κελύφους συναρτήσει της παροχής όγκου του ρευστού για το μοντέλο B1

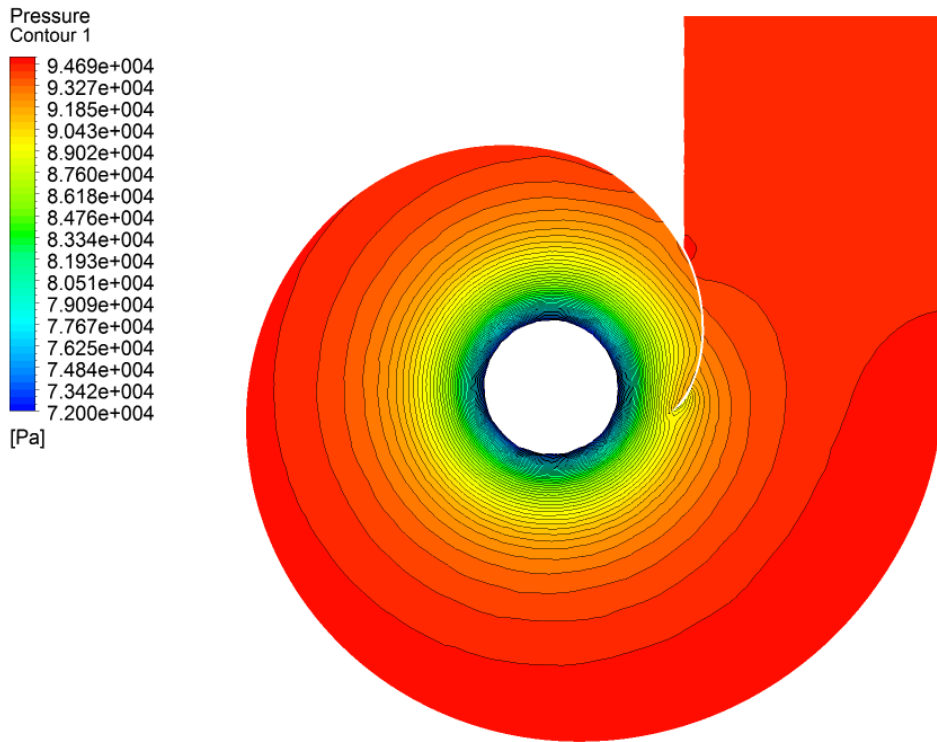
Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι μικρότερες απώλειες ολικής πίεσης παρουσιάζονται για παροχή 650 m<sup>3</sup>/h. Ακολουθούν τα διαγράμματα κατανομής της ολικής (Διάγραμμα 10.16) και της στατικής πίεσης (Διάγραμμα 10.17) καθώς και εφαπτομενικής (Διάγραμμα 10.18) και ακτινικής ταχύτητας (Διάγραμμα 10.19) με βάση τη γραμμή ελέγχου ΔΔ. Παρατηρείται ότι οι κατανομές τόσο των πιέσεων όσο και των ταχυτήτων κατά την γραμμή ελέγχου ΔΔ παρουσιάζονται πιο σταθερές σε σχέση με αυτές του μοντέλου A1. Επίσης από το περίγραμμα της στατικής πίεσης (Εικόνα 10.17) κατά την τομή yy' παρατηρείται ότι η στατική πίεση είναι πιο σταθερή κατά την περιφέρεια του κελύφους από ότι στο μοντέλο A1. Επίσης από το περίγραμμα της στατικής πίεσης (Εικόνα 10.18) φαίνεται ότι η στατική πίεση είναι πιο σταθερή σε όλο πλάτος του κελύφους από ότι στο μοντέλο A1.



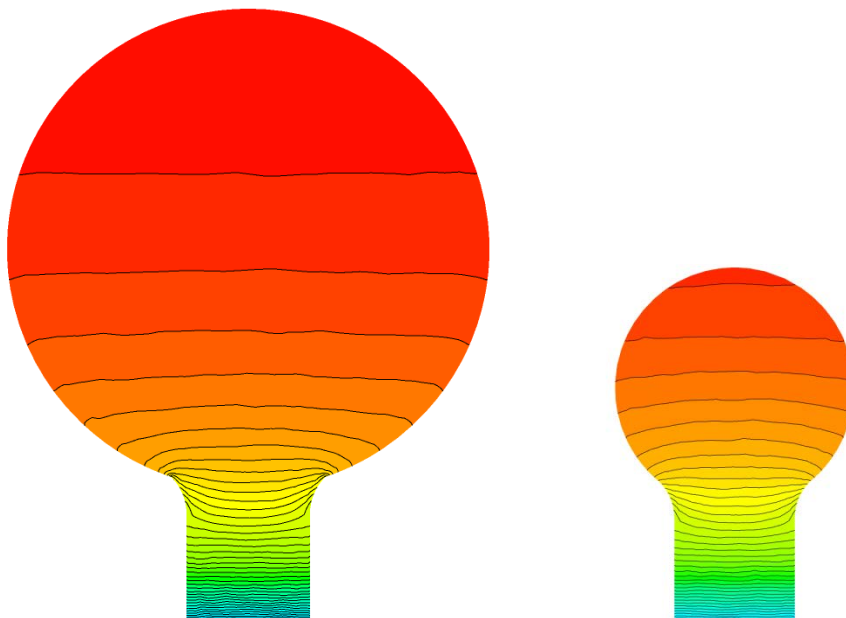
Διάγραμμα 10.16 Κατανομή ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο B1



Διάγραμμα 10.17 Κατανομή στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο B1

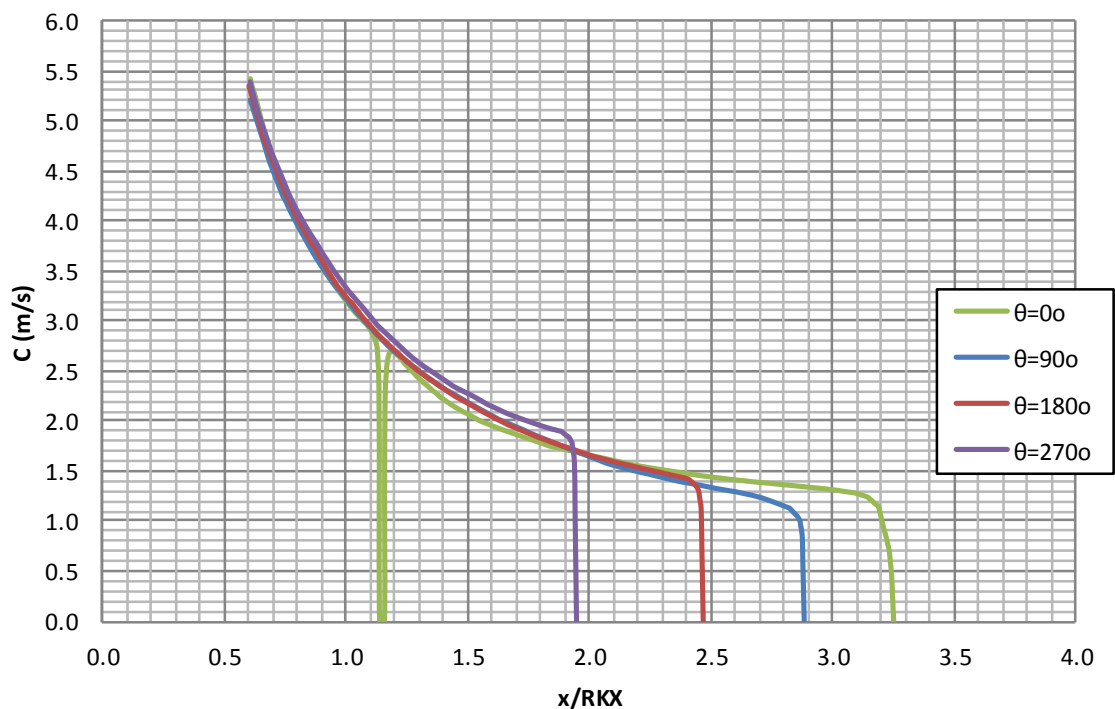


Εικόνα 10.17 Περίγραμμα στατικής πίεσης κατά την τομή  $z=0$  για το μοντέλο B1

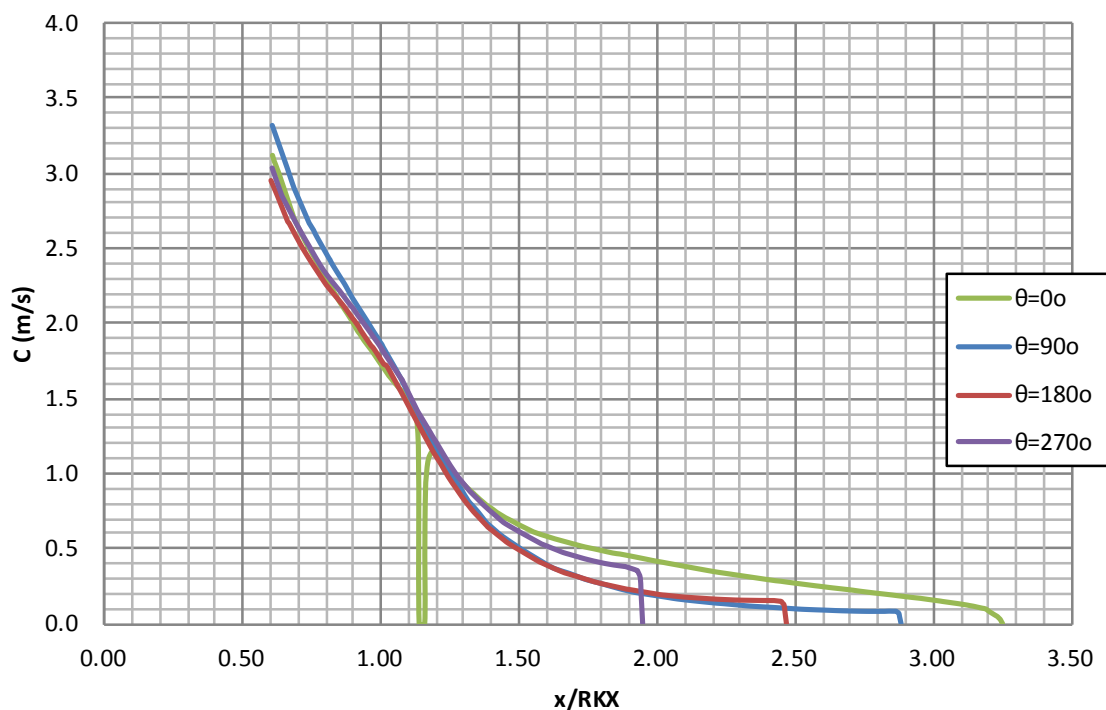


Εικόνα 10.18 Περιγράμματα στατικής πίεσης για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  και  $270^\circ$  για το μοντέλο B1

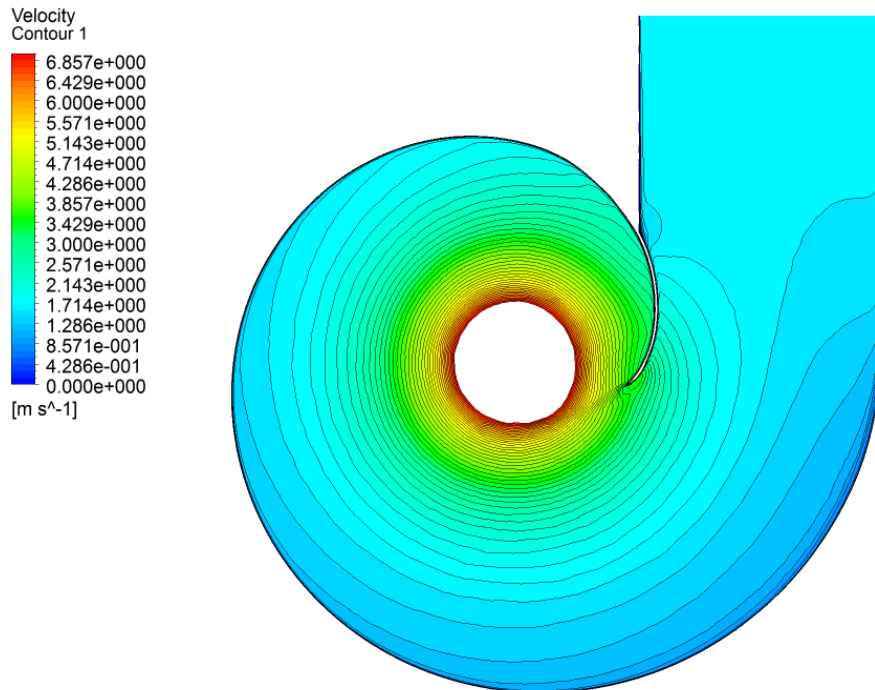




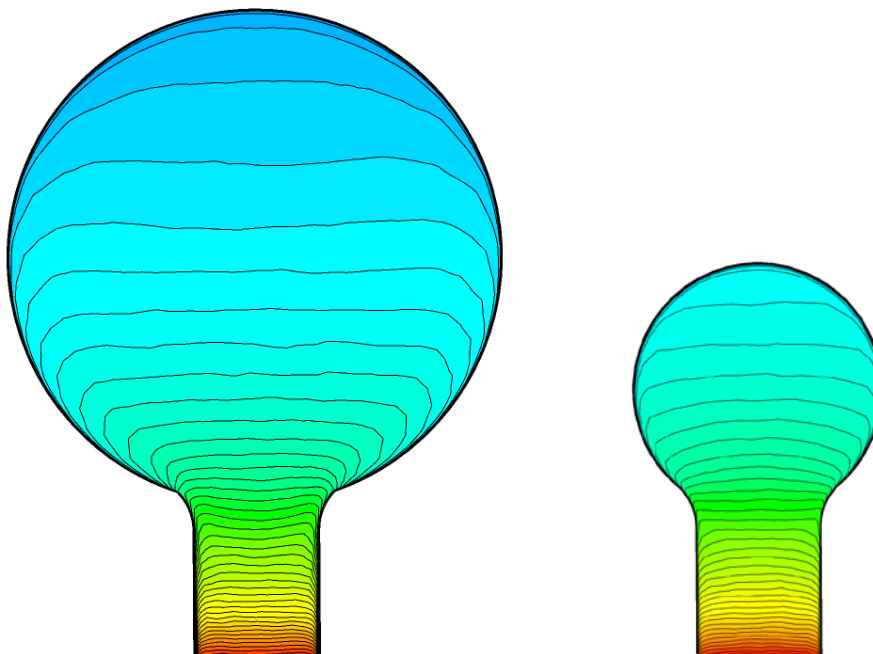
Διάγραμμα 10.18 Κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου  $\Delta\Delta$  για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο B1



Διάγραμμα 10.19 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου  $\Delta\Delta$  για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο B1

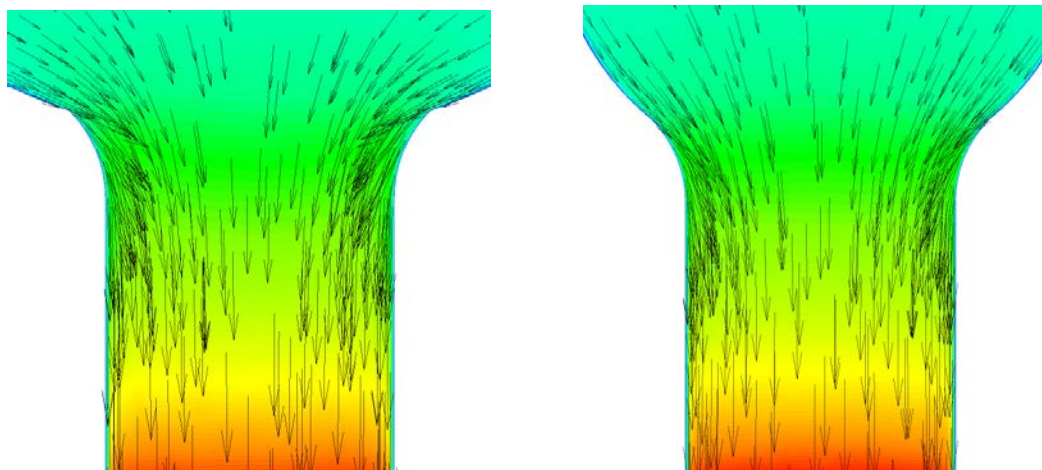


Εικόνα 10.19 Περίγραμμα ολικής ταχύτητας κατά την τομή  $z=0$  για το μοντέλο B1

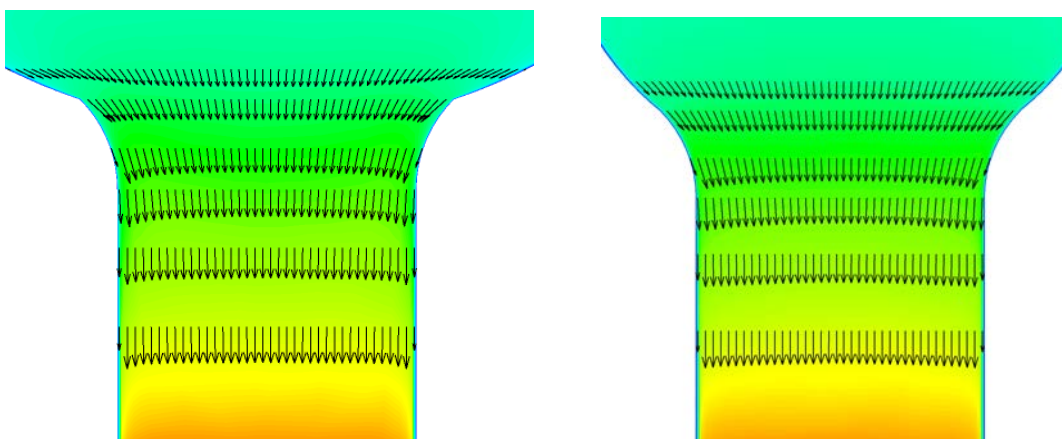


Εικόνα 10.20 Περίγραμμα ολικής ταχύτητας για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  και  $270^\circ$  για το μοντέλο B1

Από τα διανύσματα της ταχύτητας κοντά στη διατομή εισόδου της στεφάνης (Εικόνα 10.21) φαίνεται ότι η ροή παρουσιάζει μικρότερη αποκόλληση σε σχέση με το μοντέλο A1. Επίσης από τα διανύσματα της ακτινικής ταχύτητας στο μεσημβρινό επίπεδο και κατά μήκος των οριζόντιων γραμμών (Εικόνα 10.22) παρουσιάζεται λιγότερο έντονη ανομοιομορφία στην ταχύτητα.

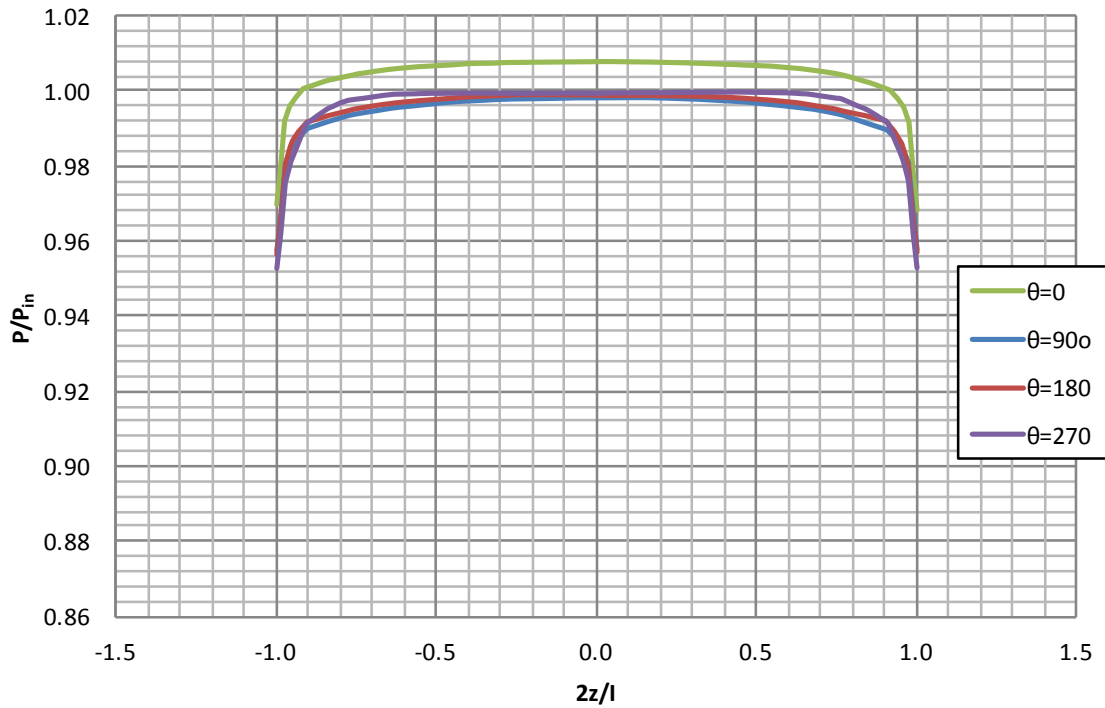


**Εικόνα 10.21** Διανύσματα ολικής ταχύτητας κοντά στην διατομή εξόδου του κελύφους για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  και  $270^\circ$  για το μοντέλο B1

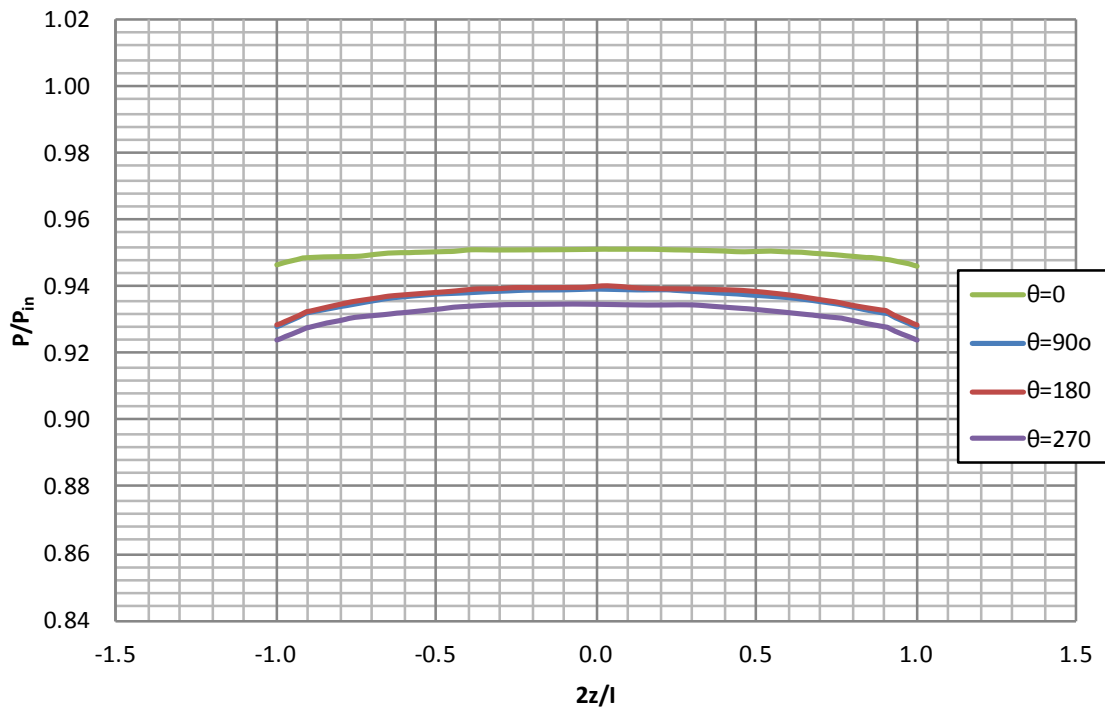


**Εικόνα 10.22** Διανύσματα ακτινικής ταχύτητας κατά μήκος ακτινικών γραμμών ελέγχου κοντά στην διατομή εξόδου του κελύφους για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  και  $270^\circ$  για το μοντέλο B1

Παρατηρείται ότι στα διαγράμματα βάση των γραμμών ελέγχου ΕΕ παρουσιάζονται αισθητές διαφορές στις κατανομές τόσο των πιέσεων όσο και των ταχυτήτων.

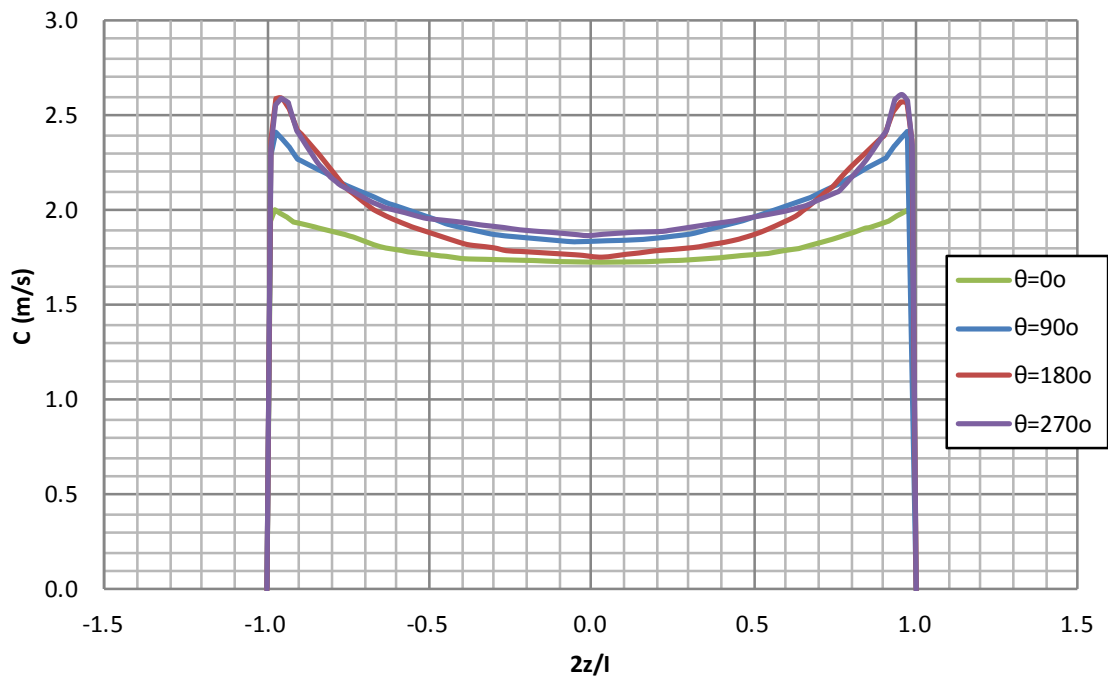


Διάγραμμα 10.20 Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης 0°, 90°, 180°, 270° για το μοντέλο Β1

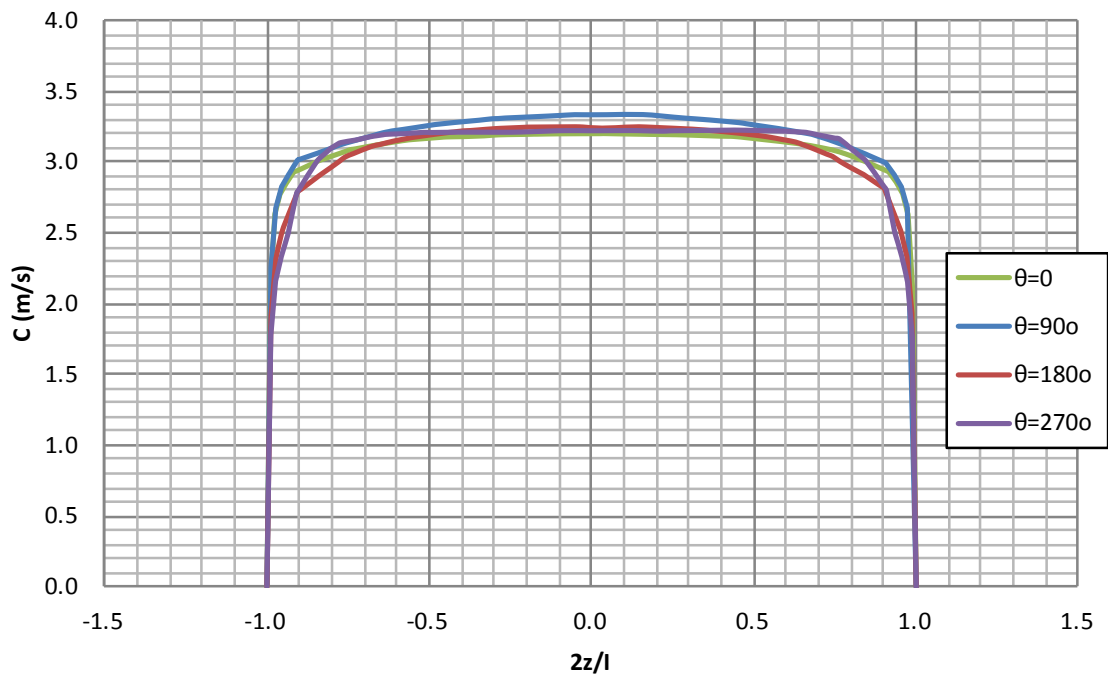


Διάγραμμα 10.21 Κατανομή της στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης 0°, 90°, 180°, 270° για το μοντέλο Β1

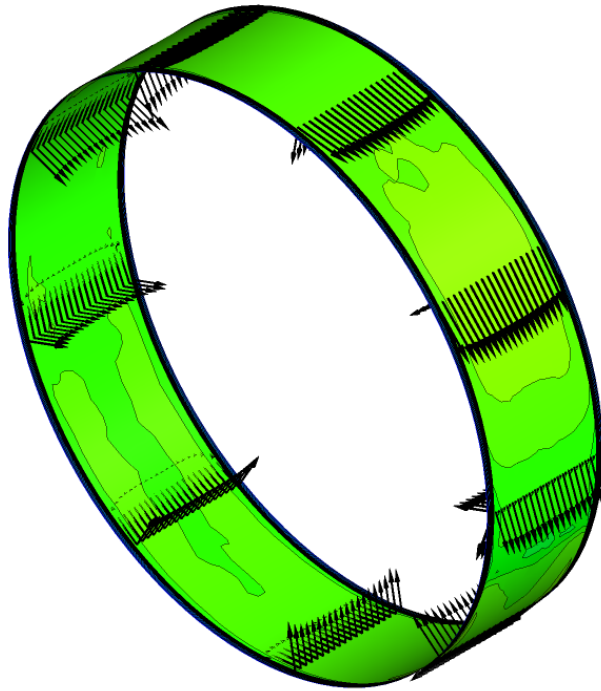
Αρχικά παρατηρείται ότι κατά τα διαγράμματα κατανομών των πιέσεων παρουσιάζεται έντονη μείωση της ολικής πίεσης από την τομή με γωνία περιέλιξης 0 μοίρες σε αυτή για γωνία 90 μοίρες. Παρατηρείται επίσης ότι η ολική πίεση είναι αρκετά πιο σταθερή για τις τομές με γωνία περιέλιξης 90 180 και 270 μοίρες. σε σχέση με αυτές του μοντέλου A1 (Διάγραμμα 10.20) Επίσης σημαντική είναι η μείωση της μεταβολής της πίεσης σε όλες τις τομές σε σχέση με αυτές του μοντέλου A1. Παρουσιάζεται δε μικρή διακύμανση από τομή σε τομή για όλες τις γωνίες περιέλιξης κοντά στα πλευρικά τοιχώματα της στεφάνης πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει με το μοντέλο A1. Αντίστοιχα τα ίδια ισχύουν και για το διάγραμμα κατανομής της στατικής πίεσης (Διάγραμμα 10.21). Επίσης παρατηρείται ότι η καμπύλη κατανομής της ακτινικής ταχύτητας κατά τη γραμμή ελέγχου ΕΕ για την τομή σε γωνία περιέλιξης 0 μοίρες παρουσιάζει μεγάλη μεταβολή σε σχέση με τις υπόλοιπες καμπύλες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ρευστό εισέρχεται με εφαπτομενική ταχύτητα στη διατομή εισόδου του κελύφους και δεν έχει προλάβει να αναπτύξει πλήρως ακτινική συνιστώσα. Από το περίγραμμα της ταχύτητας κατά την κυλινδρική επιφάνεια ελέγχου (Εικόνα 10.23) στην είσοδο της στεφάνης παρατηρείται από τα διανύσματα της ταχύτητας η κατανομή της εφαπτομενικής και ακτινικής συνιστώσας της ταχύτητας να μεταβάλλεται λιγότερο έντονα από ότι στο μοντέλο A1 κατά την αξονική διεύθυνση.



**Διάγραμμα 10.22 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο B1**

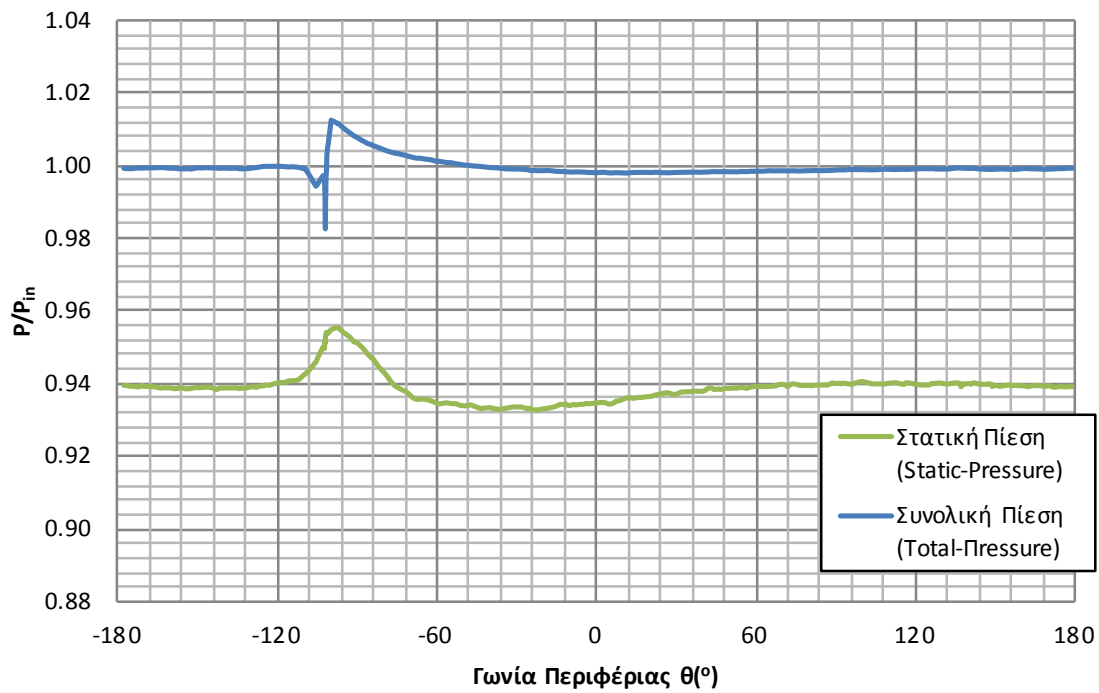


**Διάγραμμα 10.23 Κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο B1**

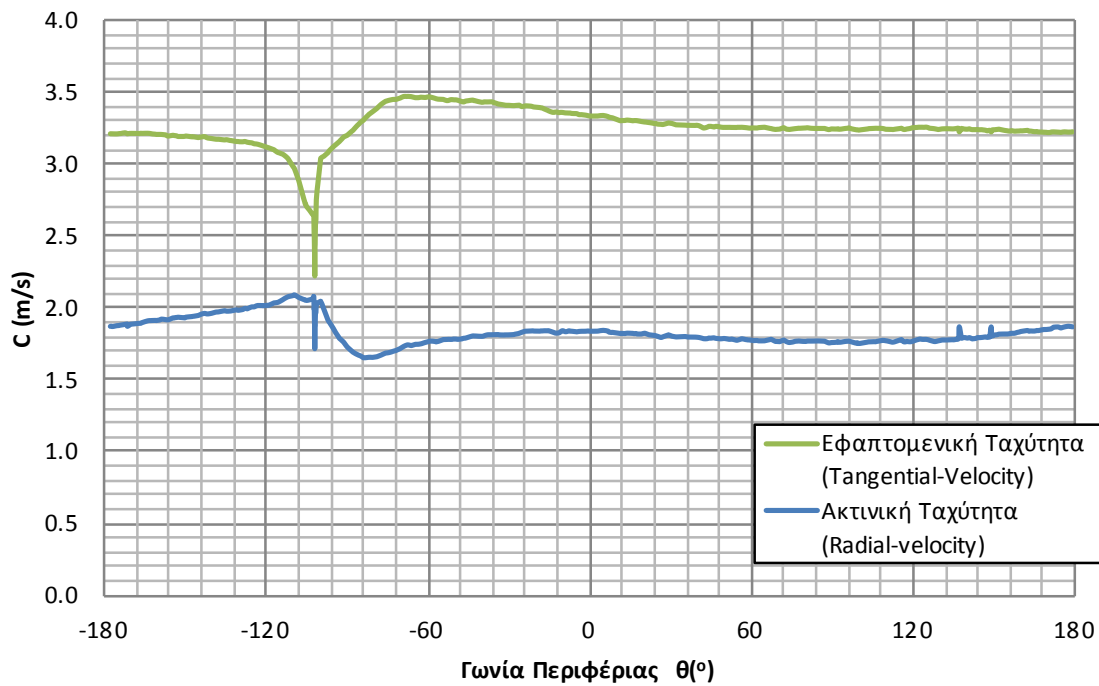


**Εικόνα 10.23** Περίγραμμα και διανύσματα ταχύτητας στη διατομή εξόδου του κελύφους για το μοντέλο **B1**

Τελευταία παρουσιάζονται τα διαγράμματα κατανομής ολικής και στατικής πίεσης (Διάγραμμα 10.24) καθώς και εραπτομενικής και ακτινικής ταχύτητας (Διάγραμμα 10.25) κατά μήκος της κυκλικής γραμμής ελέγχου Π. Η διακύμανση των καμπυλών κατά το διάστημα για γωνία περιέλιξης -100 μέχρι 60 μοίρες είναι αισθητά μικρότερη από αυτή του κελύφους A1. Επίσης στην κατανομή της ταχύτητας παρουσιάζονται λιγότερο έντονες μεταβολές τόσο στην ακτινική όσο και στην εραπτομενική συνιστώσα από ότι στο μοντέλο κελύφους A1.



Διάγραμμα 10.24 Κατανομή της περιφερειακής ολικής και στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου Π συνάρτηση της γωνίας περιέλιξης για το μοντέλο B1

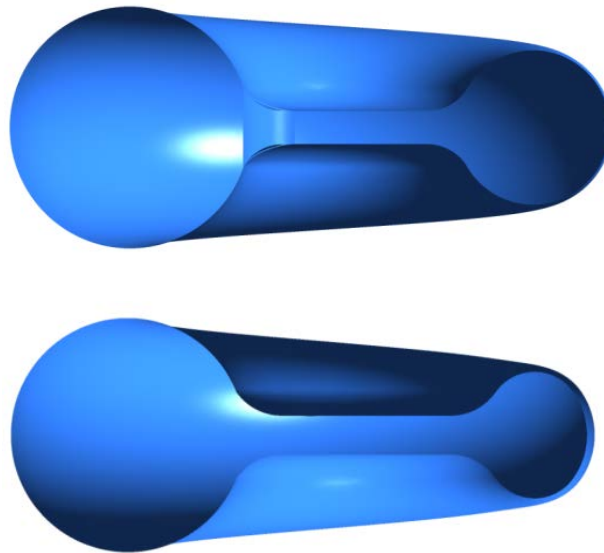


Διάγραμμα 10.25 Κατανομή της περιφερειακής εφαπτομενικής και ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου Π συνάρτηση της γωνίας περιέλιξης για το μοντέλο B1



### 10.2.3 Μοντέλο Κελύφους Γ2

Ακολουθεί η ανάλυση της ροής στο μοντέλο κελύφους Γ2 του με συνδυασμό κυκλικής και ελλειπτικής διαμόρφωση της γεωμετρίας των μεσημβρινών τομών (Εικόνα 10.24).

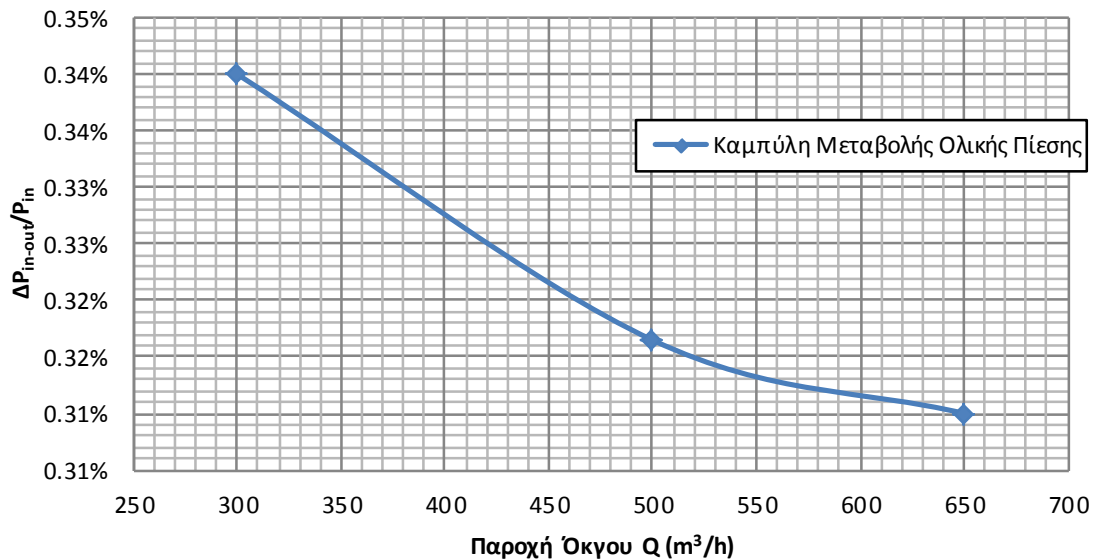


Εικόνα 10.24 Τομή κατά x και y για A) και B) αντίστοιχα για το μοντέλο κελύφους Γ2

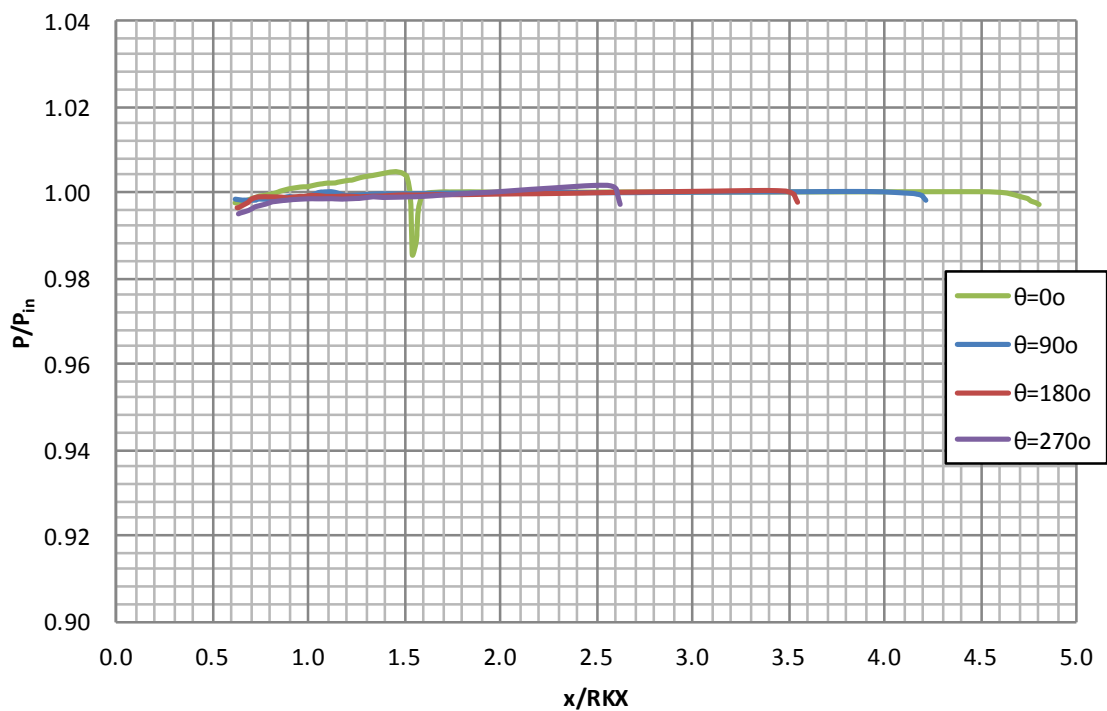
Ακολουθώντας τα τελικά αποτελέσματα της μεταβολής της ολικής και στατικής πίεσης για κάθε τιμή της παροχής όγκου παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 10.7) Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι μικρότερες απώλειες ολικής πίεσης παρουσιάζονται για παροχή  $650 \text{ m}^3/\text{h}$ . Ακολουθούν τα διαγράμματα κατανομής της ολικής (Διάγραμμα 10.27) και της στατικής πίεσης (Διάγραμμα 10.28) καθώς και εφαπτομενικής (Διάγραμμα 10.29) και ακτινικής ταχύτητας (Διάγραμμα 10.30) με βάση τη γραμμή ελέγχου ΔΔ. Παρατηρείται ότι οι κατανομές τόσο των πιέσεων όσο και των ταχυτήτων κατά την γραμμή ελέγχου ΔΔ παρουσιάζονται πιο σταθερές από αυτές του μοντέλου Β. Το ίδιο προκύπτει και από το περίγραμμα της στατικής πίεσης κατά την τομή της  $yy'$  (Εικόνα 10.25). και κατά τις μεσημβρινές τομές με γωνία περιέλιξης 90 και 270 μοίρες (Εικόνα 10.26) όπου φαίνεται ότι η στατική πίεση είναι πιο σταθερή σε όλο πλάτος του κελύφους από ότι στο μοντέλο Α.

<b>Μοντέλο Γ2</b>			
<b><math>Q(m_3/h)=Q_A=500</math></b>			
<b>Πίεση</b>	<b>P<sub>in</sub> (Pa)</b>	<b>P<sub>out</sub> (Pa)</b>	<b><math>\Delta P_{in-out}/P_{in}</math></b>
<b>Ολική</b>	43532.23	43394.46	0.32%
<b>Στατική</b>	43316.58	39532.98	8.73%
<b><math>Q(m_3/h)=1.3xQ_A=650</math></b>			
<b>Πίεση</b>	<b>P<sub>in</sub> (Pa)</b>	<b>P<sub>out</sub> (Pa)</b>	<b><math>\Delta P_{in-out}/P_{in}</math></b>
<b>Ολική</b>	73574.828	73348.484	0.31%
<b>Στατική</b>	73210.516	66822.781	8.73%
<b><math>Q(m_3/h)=0.6xQ_A=300</math></b>			
<b>Πίεση</b>	<b>P<sub>in</sub> (Pa)</b>	<b>P<sub>out</sub> (Pa)</b>	<b><math>\Delta P_{in-out}/P_{in}</math></b>
<b>Ολική</b>	15692.121	15638.909	0.34%
<b>Στατική</b>	15614.383	14247.852	8.75%

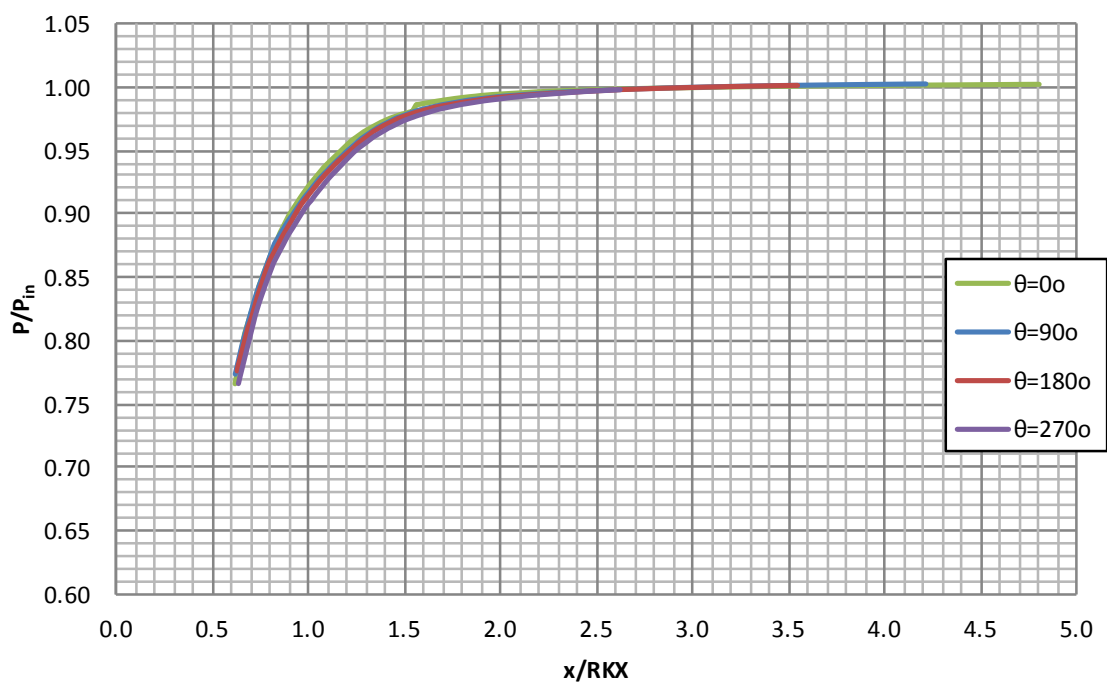
Πίνακας 10.7 Τελικά αποτελέσματα μεταβολής της ολικής και στατικής πίεσης για το μοντέλο Γ2



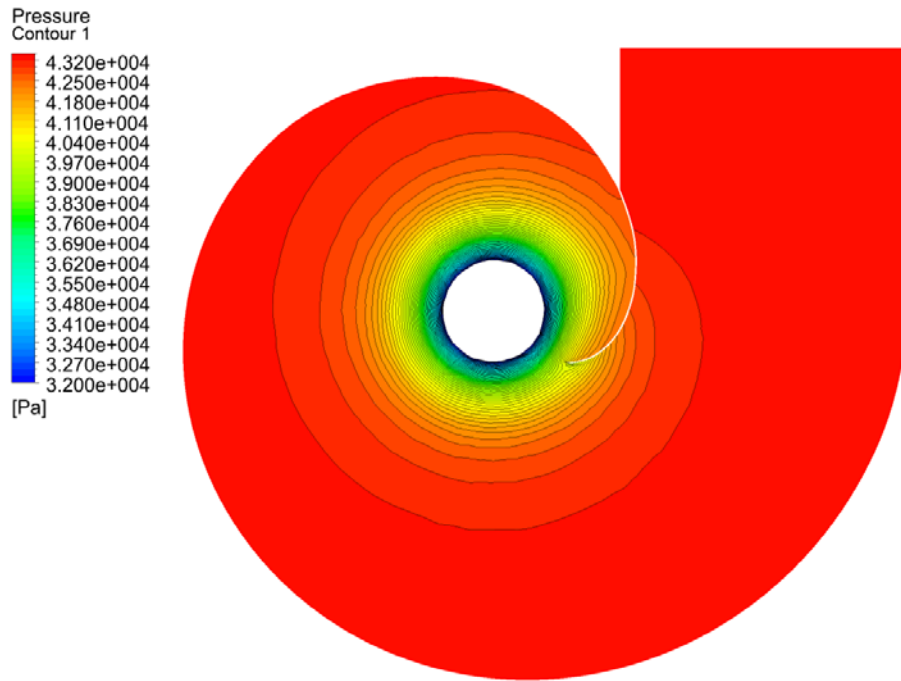
Διάγραμμα 10.26 Καμπύλη μεταβολής της ολικής πίεσης του σπειροειδούς κελύφους συναρτήσει της παροχής όγκου του ρευστού για το μοντέλο Γ2



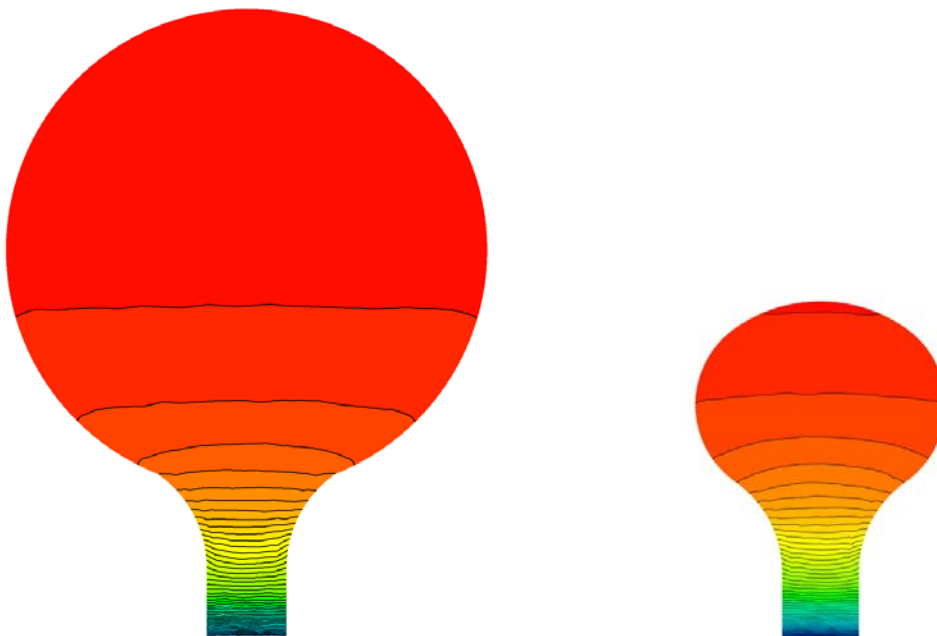
Διάγραμμα 10.27 Κατανομή ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο Γ2



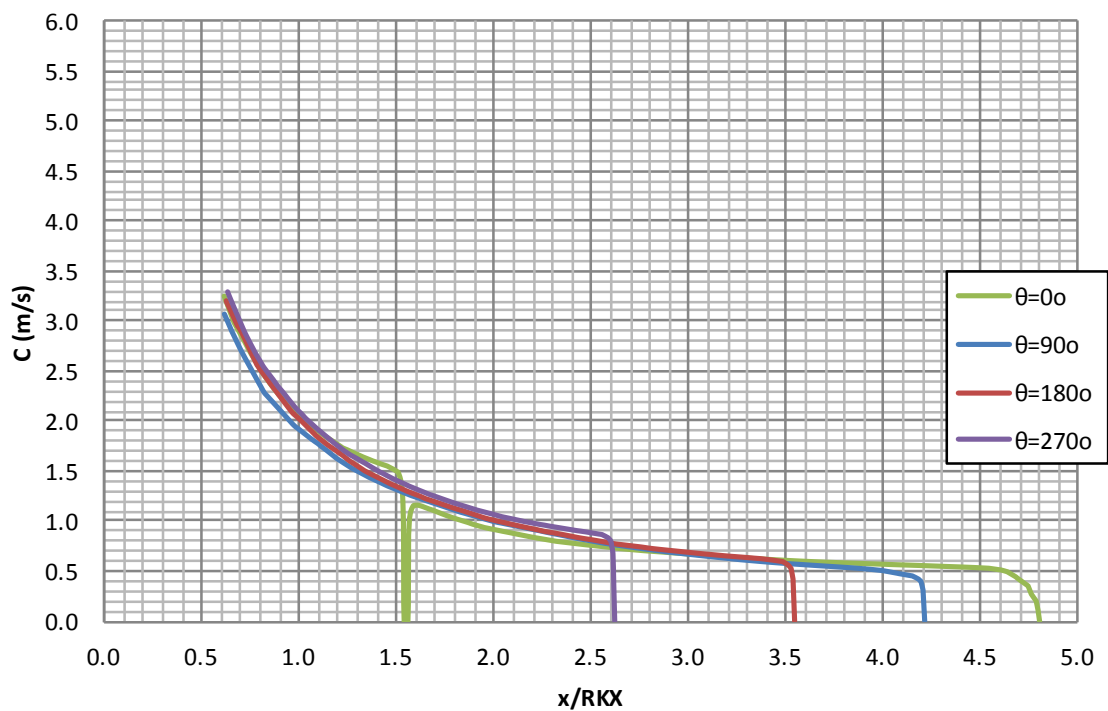
Διάγραμμα 10.28 Κατανομή στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο Γ2



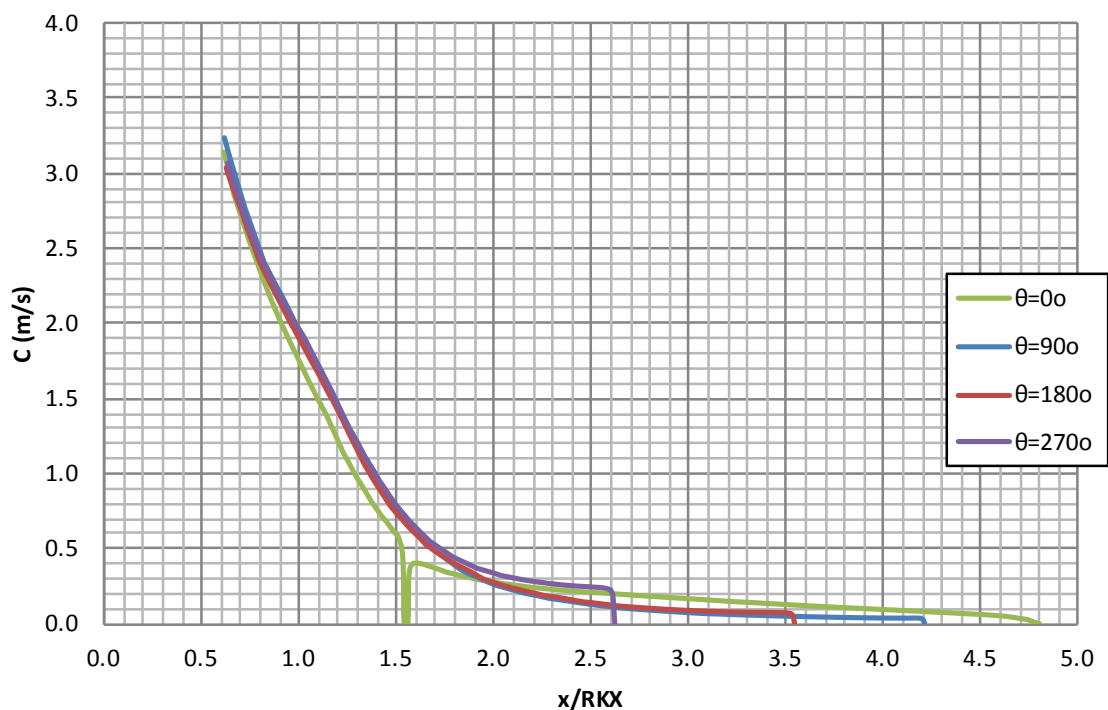
Εικόνα 10.25 Περίγραμμα στατικής πίεσης κατά την τομή  $z=0$  για το μοντέλο Γ2



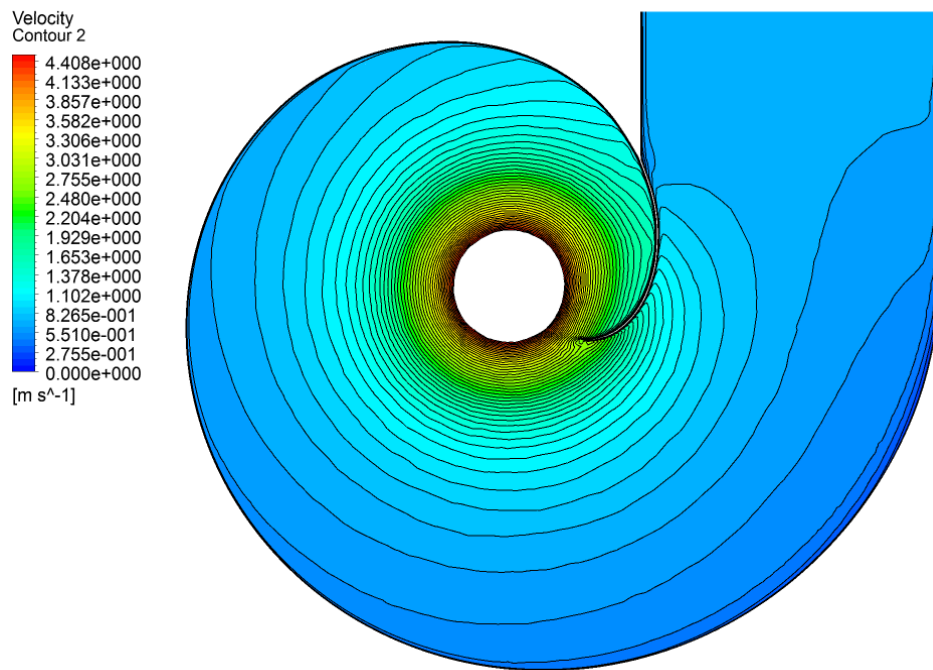
Εικόνα 10.26 Περιγράμματα στατικής πίεσης για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  και  $270^\circ$  για το μοντέλο



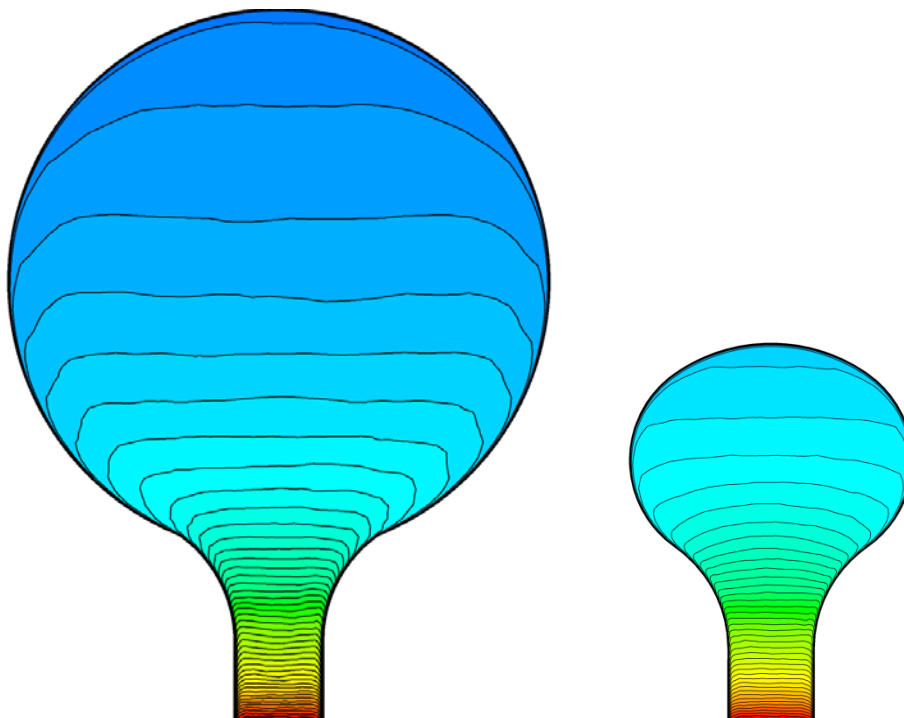
Διάγραμμα 10.29 Κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο Γ2



Διάγραμμα 10.30 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο Γ2

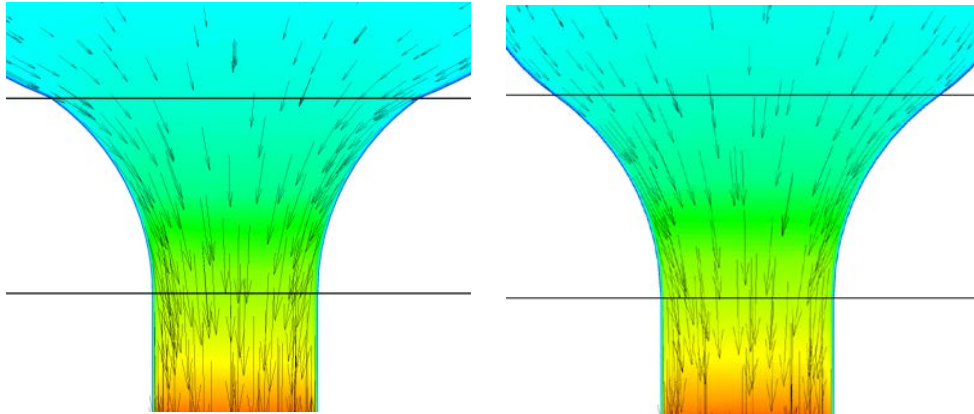


Εικόνα 10.27 Περίγραμμα ολικής ταχύτητας κατά την τομή  $z=0$  για το μοντέλο Γ2

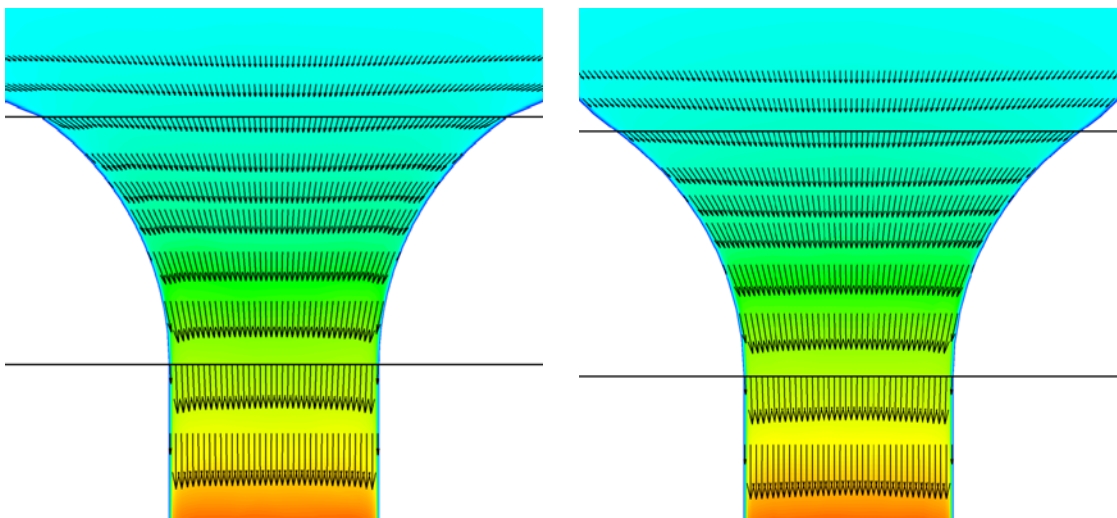


Εικόνα 10.28 Περίγραμμα ολικής ταχύτητας για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  και  $270^\circ$  για το μοντέλο Γ2

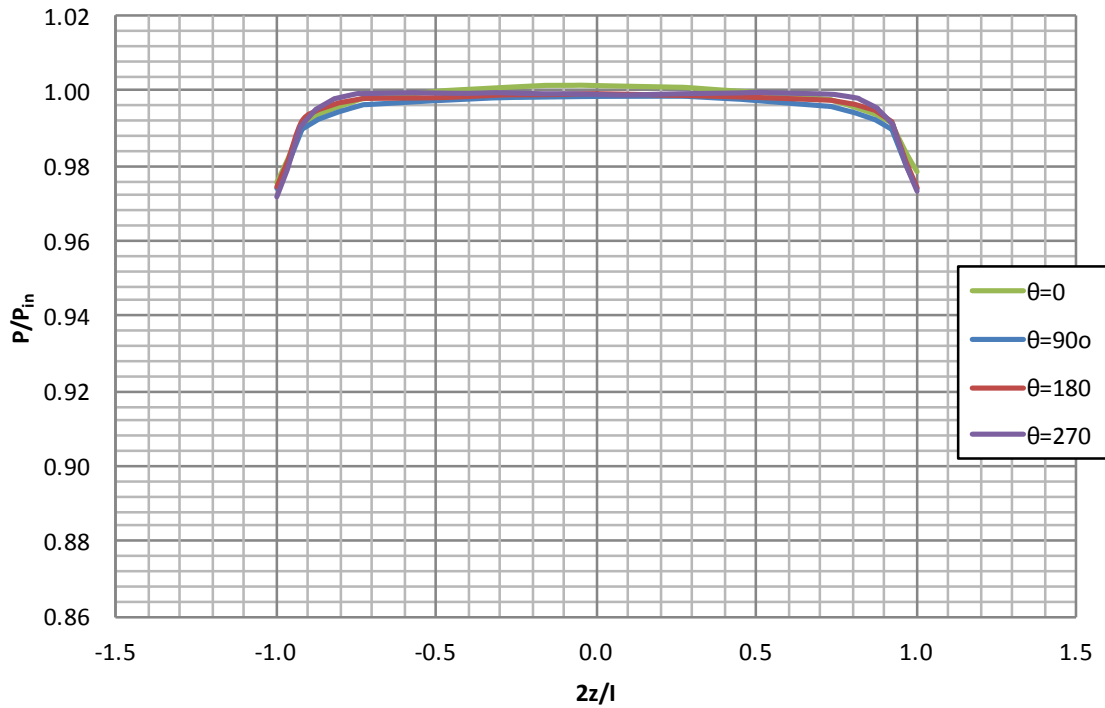
Από τα διανύσματα της ταχύτητας κοντά στη διατομή εισόδου της στεφάνης (Εικόνα 10.29) φαίνεται ότι η ροή δεν παρουσιάζει αποκόλληση σε αντίθεση με τα μοντέλα Α και Β. Επίσης από τα διανύσματα της ακτινικής ταχύτητας στο μεσημβρινό επίπεδο και κατά μήκος των ακτινικών γραμμών (Εικόνα 10.29) παρουσιάζεται σχεδόν σταθερή ταχύτητα.



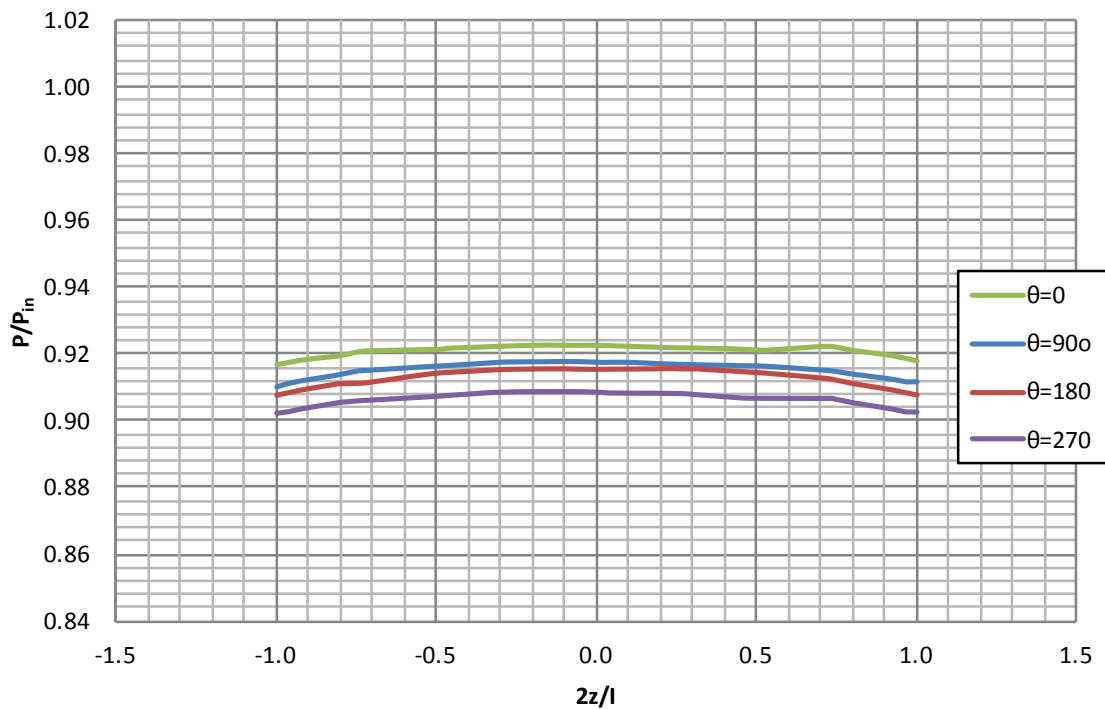
**Εικόνα 10.29** Διανύσματα ολικής ταχύτητας κοντά στην διατομή εξόδου του κελύφους για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  και  $270^\circ$  για το μοντέλο Γ2



**Εικόνα 10.30** Διανύσματα ακτινικής ταχύτητας κατά μήκος ακτινικών γραμμών ελέγχου κοντά στην διατομή εξόδου του κελύφους για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  και  $270^\circ$  για το μοντέλο Γ2

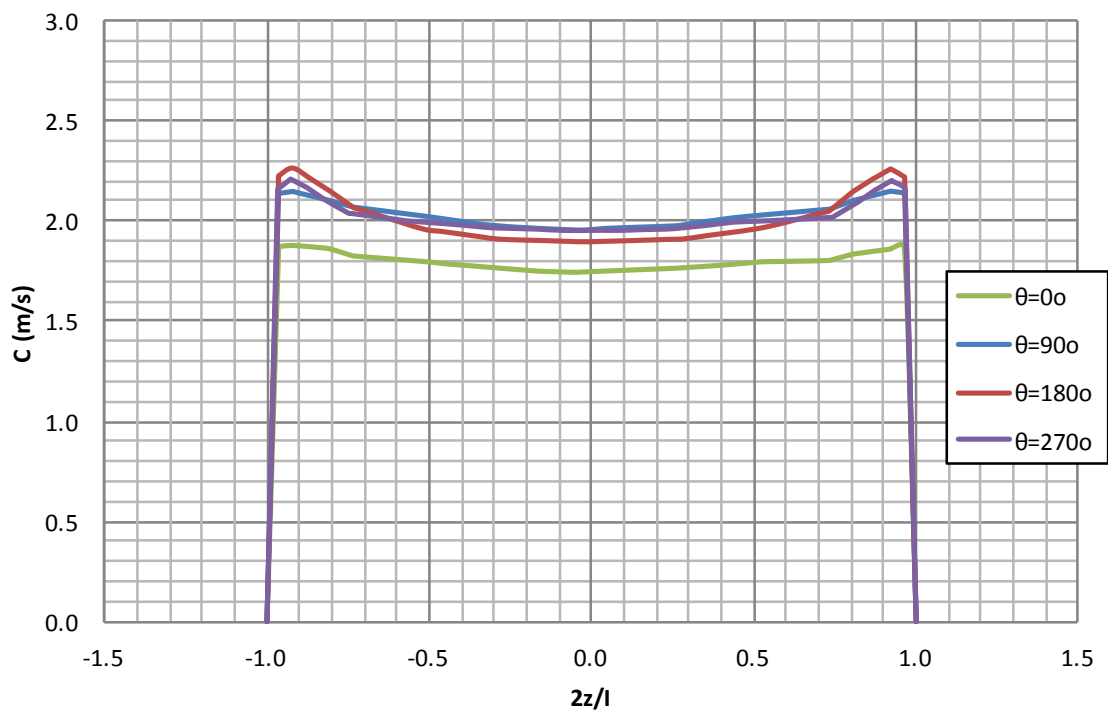


Διάγραμμα 10.31 Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο Γ2

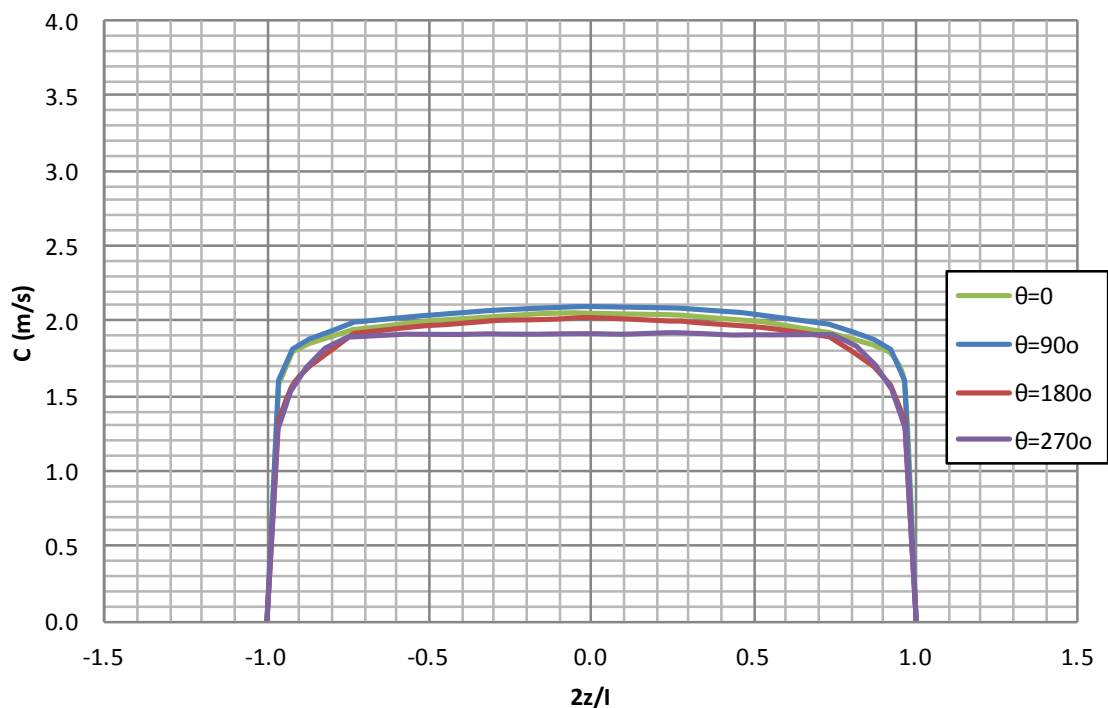


Διάγραμμα 10.32 Κατανομή της στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο Γ2



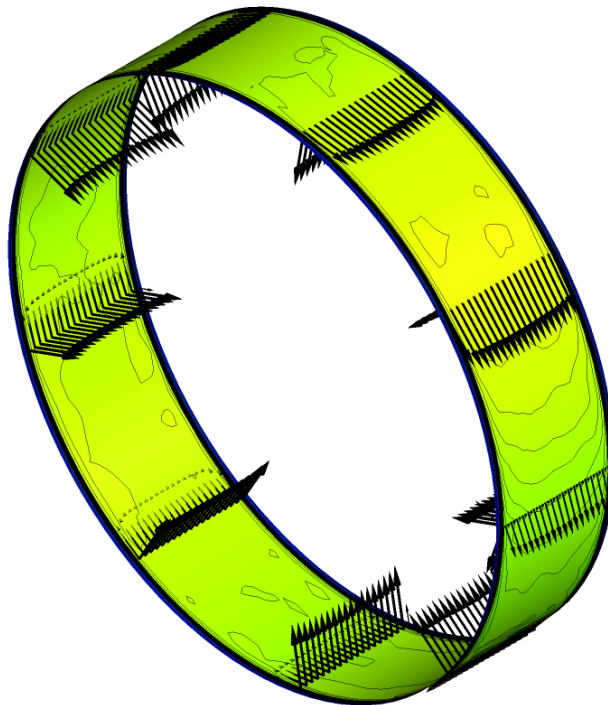


Διάγραμμα 10.33 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο Γ2



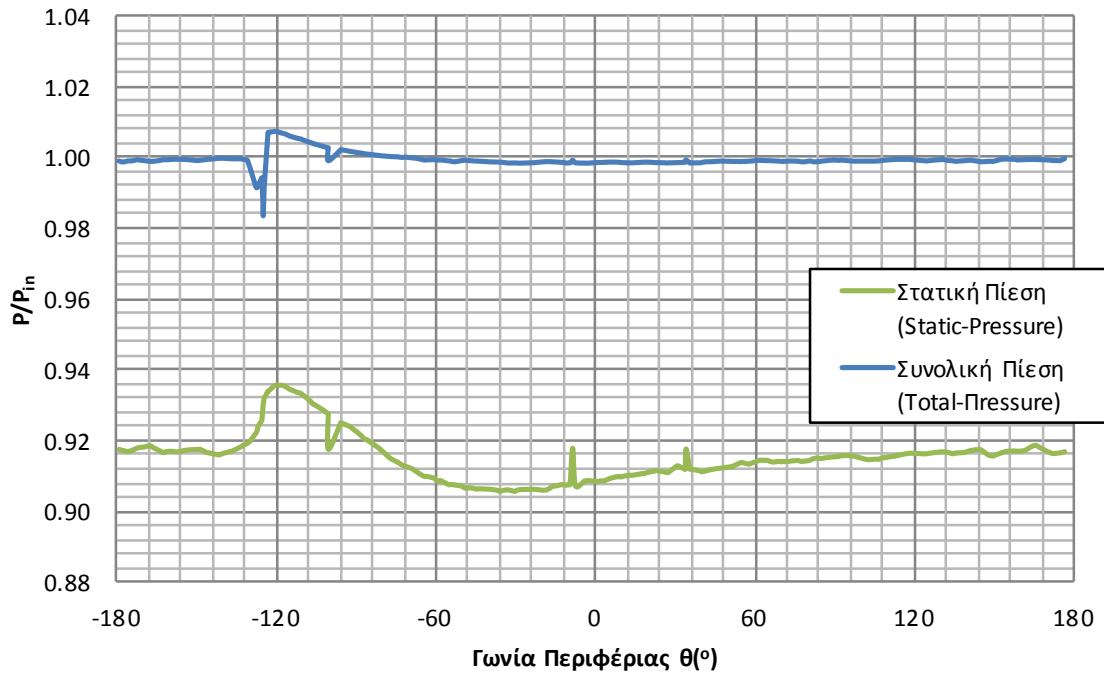
Διάγραμμα 10.34 Κατανομή της εφαπτομενικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  για το μοντέλο Γ2

Παρατηρείται ακόμη ότι στα διαγράμματα βάση των γραμμών ελέγχου ΕΕ παρουσιάζονται αισθητές διαφορές στις κατανομές τόσο των πιέσεων (Διάγραμμα 10.31 και Διάγραμμα 10.32) όσο και των ταχυτήτων (Διάγραμμα 10.33 και Διάγραμμα 10.34) σε σχέση με τα μοντέλα Α και Β με εμφανή εξομάλυνση της ροής και σταθεροποίηση των κατανομών εντός της στεφάνης καθώς και κατά την έξοδο από αυτή. Επίσης από το περίγραμμα της ταχύτητας κατά την κυλινδρική επιφάνεια ελέγχου (Εικόνα 10.31) στην είσοδο της στεφάνης παρατηρείται από τα διανύσματα της ταχύτητας η κατανομή της εφαπτομενικής και ακτινικής συνιστώσας της ταχύτητας να είναι αρκετά σταθερή.

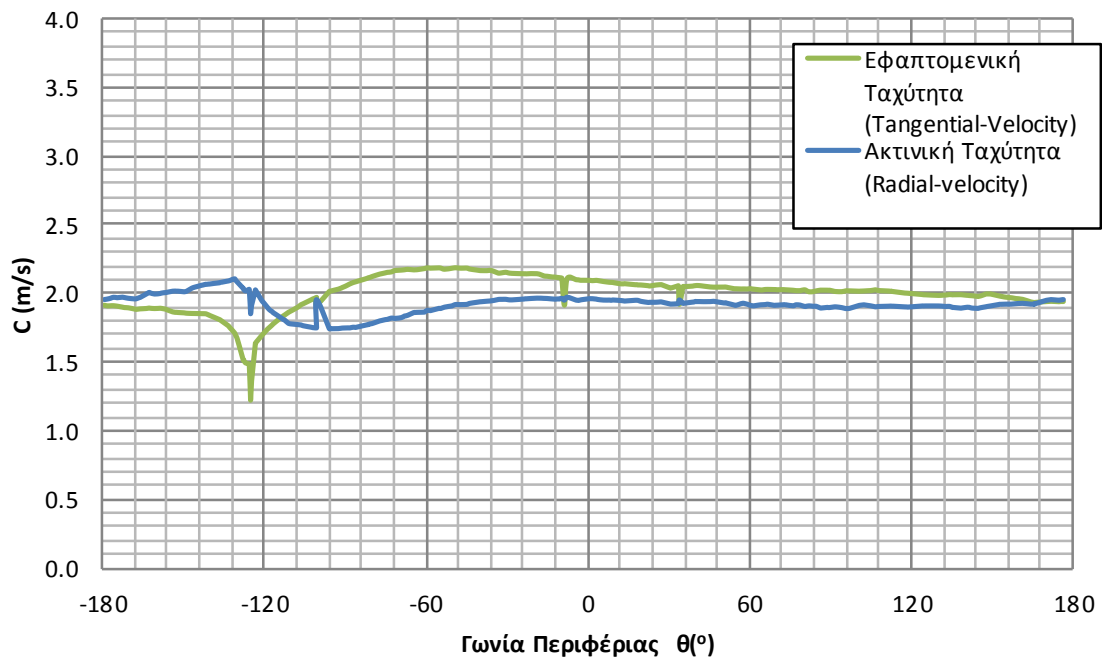


Εικόνα 10.31 Περίγραμμα και διανύσματα ταχύτητας στη διατομή εξόδου του κελύφους για το μοντέλο Γ2

Τα περιφερικά μεγέθη της πίεσης (Διάγραμμα 10.35) και της ταχύτητας (Διάγραμμα 10.36) παρουσιάζονται επίσης πιο σταθερά σε σχέση με αυτά των μοντέλων Α1 και Β2.



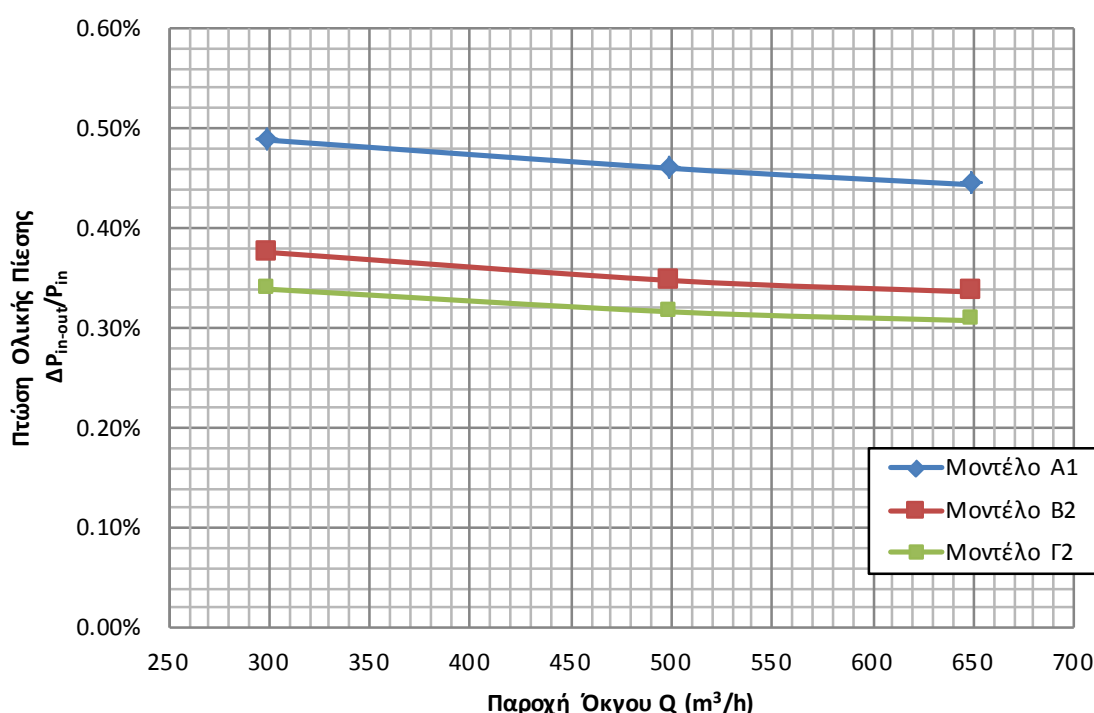
Διάγραμμα 10.35 Κατανομή της περιφερειακής ολικής και στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου Π συνάρτηση της γωνίας περιέλιξης για το μοντέλο Γ2



Διάγραμμα 10.36 Κατανομή της περιφερειακής εφαπτομενικής και ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου Π συνάρτηση της γωνίας περιέλιξης για το μοντέλο Γ2

### 10.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων

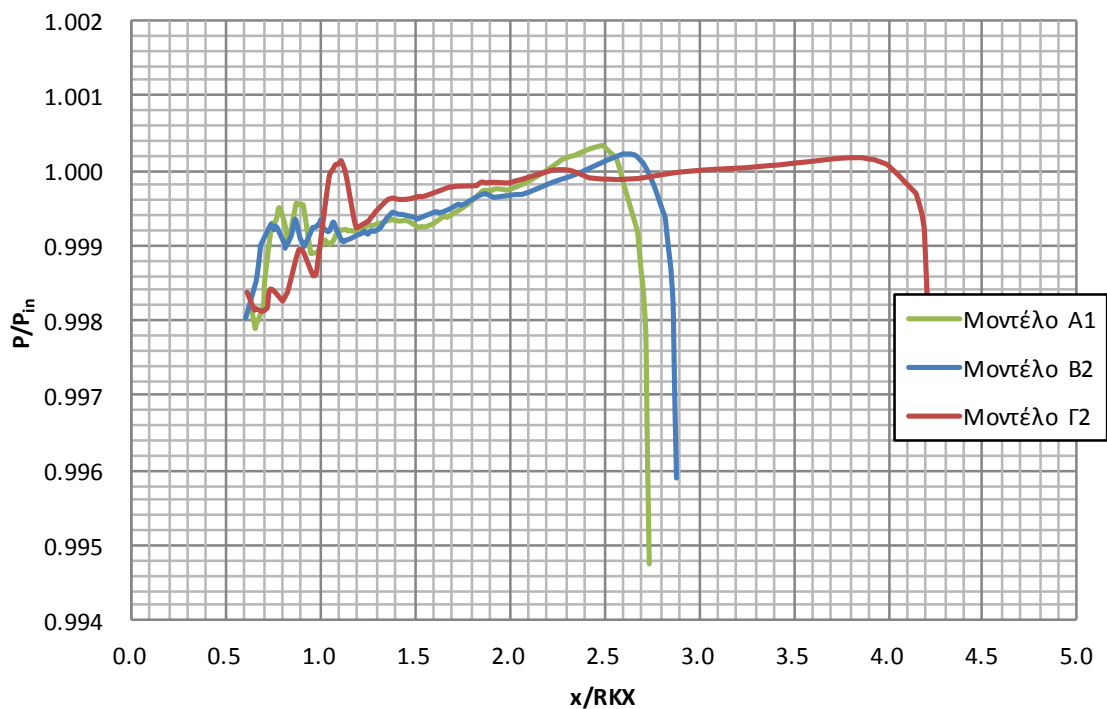
Για την καλύτερη δυνατή σύγκριση των διαφόρων μοντέλων κελυφών που υπολογίστηκαν επιλέγονται τα διαγράμματα με τα μεγέθη που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες διαφορές. Αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα μεταβολής της ολικής πίεσης δηλαδή των ολικών απωλειών στο σπειροειδές κέλυφος για τα διάφορα σημεία λειτουργίας (Διάγραμμα 10.37).



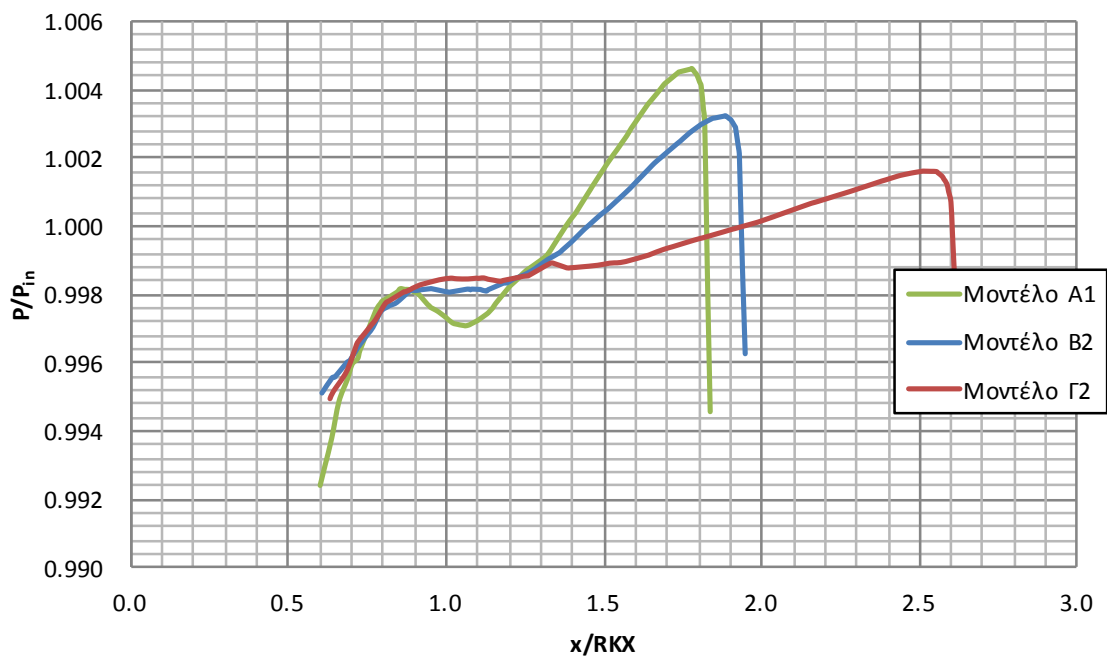
Διάγραμμα 10.37 Καμπύλη μεταβολής της ολικής πίεσης του σπειροειδούς κελύφους συναρτήσει της παροχής όγκου του ρευστού

Με βάση το διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι και στα τρία μοντέλα σπειροειδούς κελύφους το σημείο λειτουργίας με τη μικρότερη πτώση της ολικής πίεσης είναι αυτό για παροχή 650 m<sup>3</sup>/h. Επίσης φαίνεται ότι το μοντέλο με τις μικρότερες υδραυλικές απώλειες είναι αυτό με τη μεγαλύτερη στεφάνη και διατομή εισόδου δηλαδή το μοντέλο Γ2.

Ακολουθούν τα διαγράμματα κατανομής της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου  $\Delta\Delta$  για γωνία περιέλιξης 90° (Διάγραμμα 10.38) και 270° (Διάγραμμα 10.39).



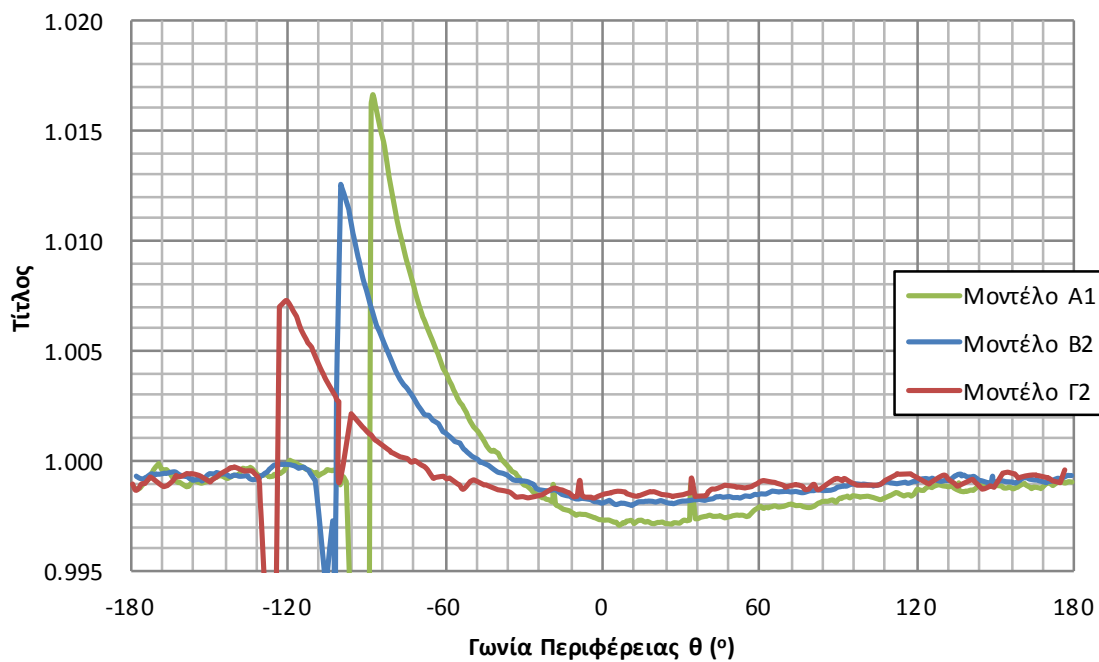
Διάγραμμα 10.38 Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου  $\Delta\Delta$  για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$



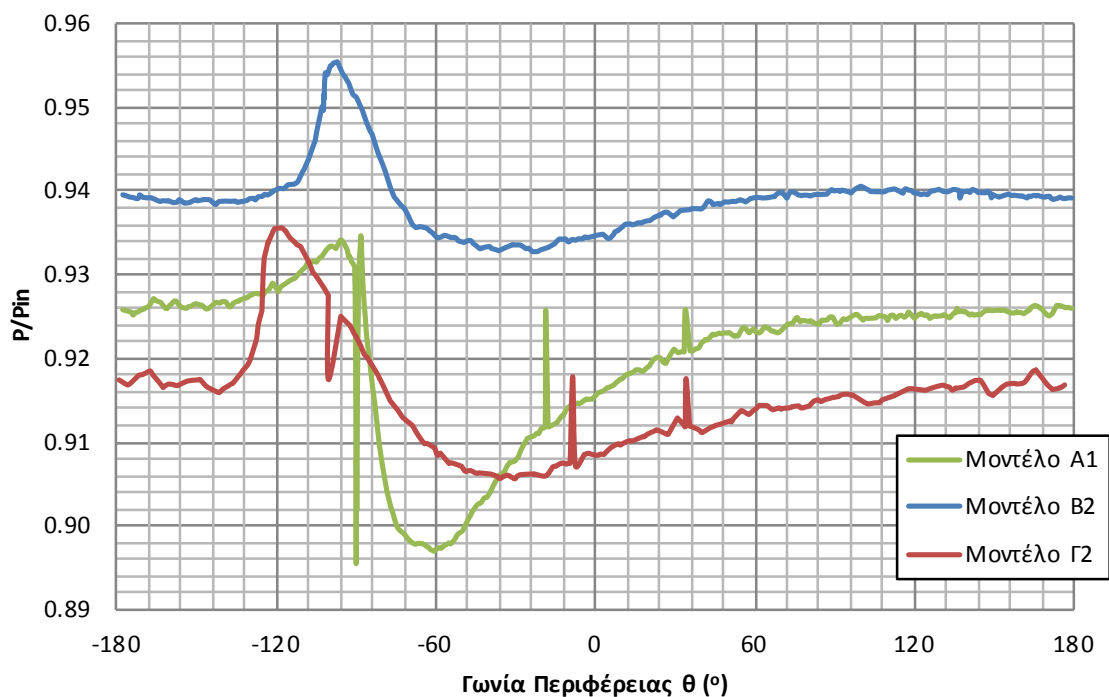
Διάγραμμα 10.39 Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου  $\Delta\Delta$  για γωνία περιέλιξης  $270^\circ$

Με βάση το πρώτο διάγραμμα (Διάγραμμα 10.38) παρατηρείται ότι η κατανομή της ολικής πίεσης κατά μήκος της γραμμής ελέγχου ΔΔ είναι περισσότερο σταθερή στο μοντέλο Γ2 από ότι στα άλλα δυο μοντέλα αλλά μεγαλύτερη κατά μέγεθος. Με βάση το δεύτερο διάγραμμα (Διάγραμμα 10.39) παρατηρείται ότι πάλι το μοντέλο με τη πιο σταθερή κατανομή είναι το Γ2 με τη διαφορά ότι έχει τώρα τις μικρότερες ολικές απώλειες πίεσης από ότι τα άλλα δυο μοντέλα. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι σημαντικότερες ολικές απώλειες πίεσης λαμβάνουν χώρα στο ενδιάμεσο τμήμα του σπειροειδούς κελύφους είναι σημαντικότερες στα μοντέλα Α1 και Β2 από ότι στο μοντέλο Γ3. Πιο συγκεκριμένα με βάση το διάγραμμα ως προς την γραμμή ελέγχου ΔΔ για γωνία περιέλιξης  $270^\circ$  η πίεση στο μοντέλο Α1 αυξάνει σημαντικά κοντά στα τοιχώματα του σπειροειδούς κελύφους σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα. Αντιθέτως κοντά στη έξοδο της στεφάνης η ολική πίεση είναι σχεδόν ίδια στα τρία μοντέλα.

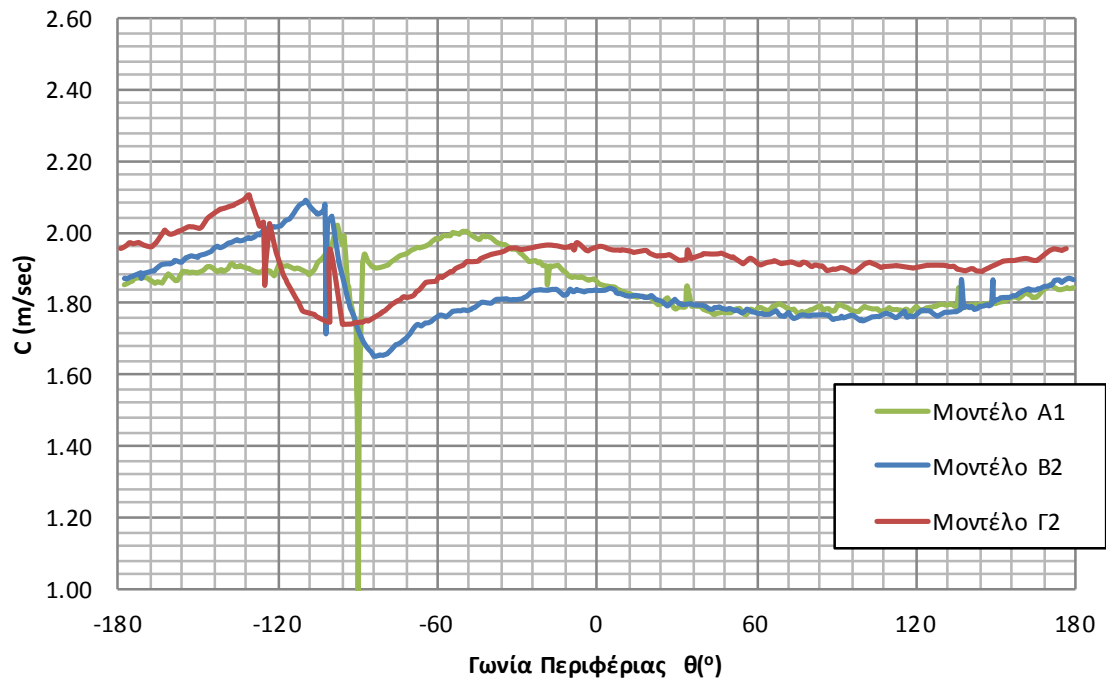
Ακολουθούν τα διαγράμματα κατανομής της ολικής πίεσης (Διάγραμμα 10.40) της στατικής πίεσης (Διάγραμμα 10.41) και της ακτινικής ταχύτητας (Διάγραμμα 10.40) κατά μήκος της περιφερειακής γραμμής Π. Με βάση το διάγραμμα της ολικής πίεσης κατά μήκος της γραμμής ελέγχου Π παρατηρείται ότι η μικρότερη διακύμανση σε ολόκληρη τη γραμμή παρουσιάζεται στο μοντέλο Γ2. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι στο μοντέλο Γ2 η διαμόρφωση του πτερυγίου της στεφάνης που αποτελεί κομμάτι της γλωττίδας προκαλεί την μικρότερη διαταραχή στη ροή του ρευστού. Με βάση το διάγραμμα της στατικής πίεσης κατά μήκος της γραμμής ελέγχου Π παρατηρείται ότι πιο σταθερή κατανομή παρουσιάζεται στο μοντέλο Γ2 αλλά και στο μοντέλο Β2 ενώ αντιθέτως το μοντέλο Α1 παρουσιάζει πιο έντονη ανομοιομορφία. Τέλος με βάση το διάγραμμα της ακτινικής ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ελέγχου Π παρατηρείται στο μοντέλο Γ2 είναι πιο σταθερή από ότι στα μοντέλα Α1 και Β2.



Διάγραμμα 10.40 Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου Π συνάρτηση της γωνίας περιέλιξης



Διάγραμμα 10.41 Κατανομή της περιφερειακής στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου Π συνάρτηση της γωνίας περιέλιξης

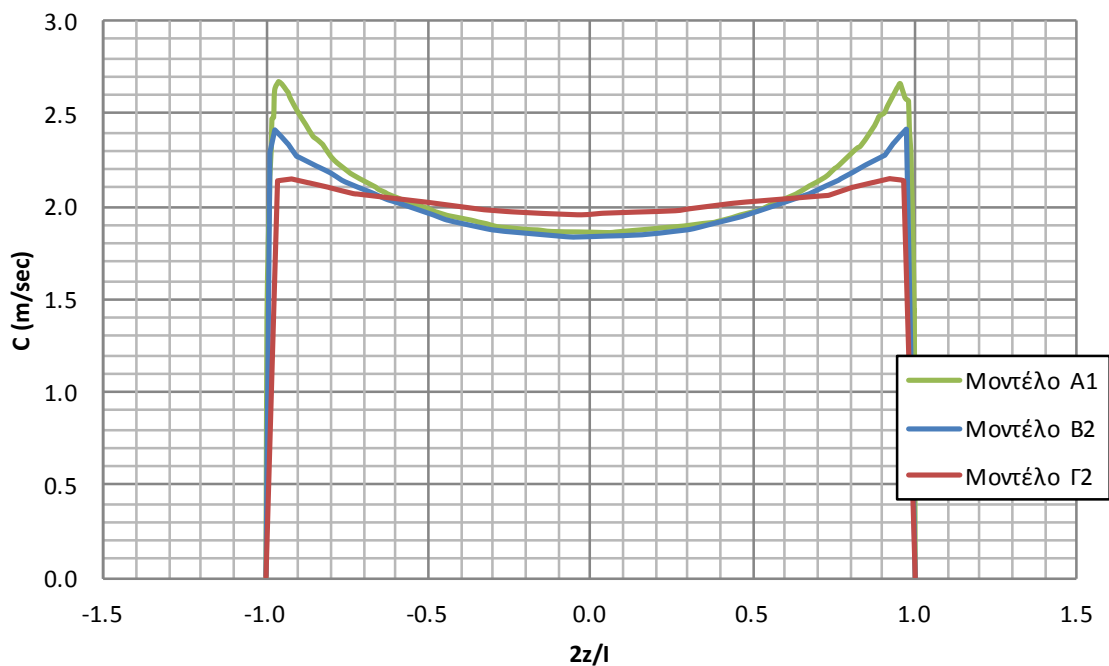


**Πίνακας 10.8 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου  $\Pi$  συνάρτηση της γωνίας περιέλιξης**

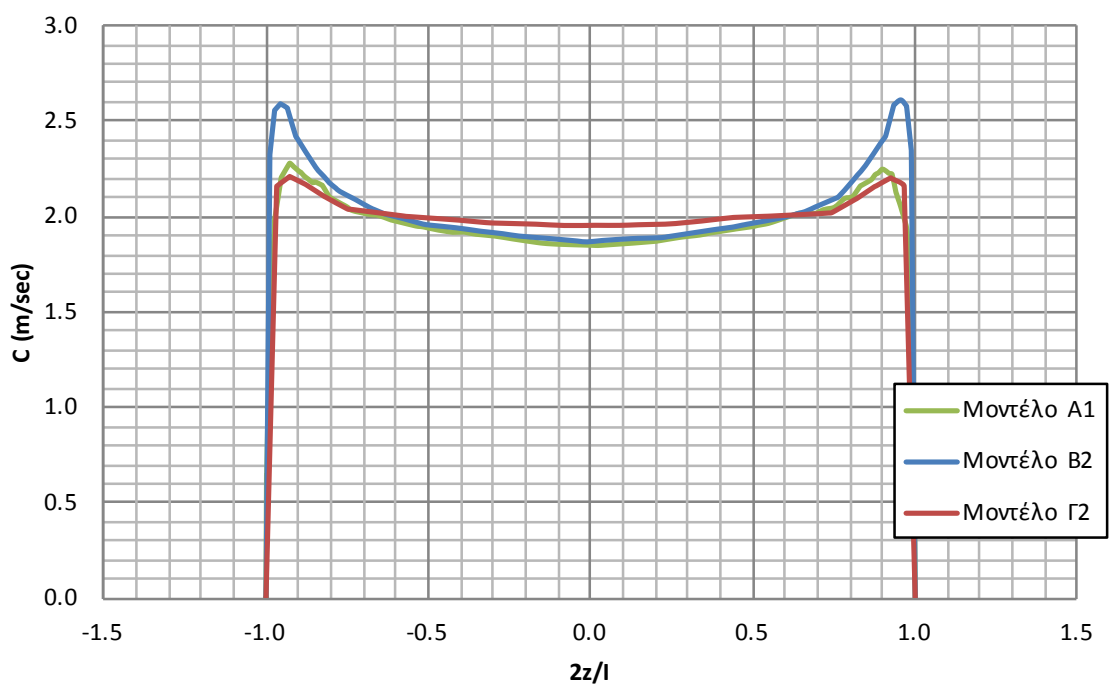
Ακολουθούν τα διαγράμματα κατανομής της ακτινικής ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ΕΕ για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  (Διάγραμμα 10.42) και  $270^\circ$  (Διάγραμμα 10.43).

Με βάση το διάγραμμα κατανομής της ακτινικής ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ΕΕ για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  παρατηρείται ότι μοντέλο A1 παρουσιάζει την πιο έντονη διακύμανση σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα ενώ αυτό με την πιο σταθερή κατανομή σε όλο το μήκος της γραμμής είναι το  $\Gamma$ 2. Επίσης η μεγαλύτερη ταχύτητα παρουσιάζεται κοντά στα πλευρικά τοιχώματα της διατομής εξόδου της στεφάνης σε όλα τα μοντέλα με μεγαλύτερη αυτή του μοντέλου A1 και μικρότερη αυτή του  $\Gamma$ 2. Με βάση το διάγραμμα κατανομής της ακτινικής ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ΕΕ για γωνία περιέλιξης  $270^\circ$  παρατηρείται ότι το μοντέλο  $\Gamma$ 3 εξακολουθεί να είναι αυτό με τη μικρότερη διακύμανση αλλά το μοντέλο B2 παρουσιάζει αρκετά πιο έντονη διακύμανση στη κατανομή από ότι το A1. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για γωνία περιέλιξης  $270^\circ$  μοιρών η ελλειπτική γεωμετρία της μεσημβρινής τομής του μοντέλου B2 προκαλεί αυτήν την ανομοιομορφία σε αντίθεση με την κυκλική διαμόρφωση της γεωμετρίας της μεσημβρινής τομής του μοντέλου A1.



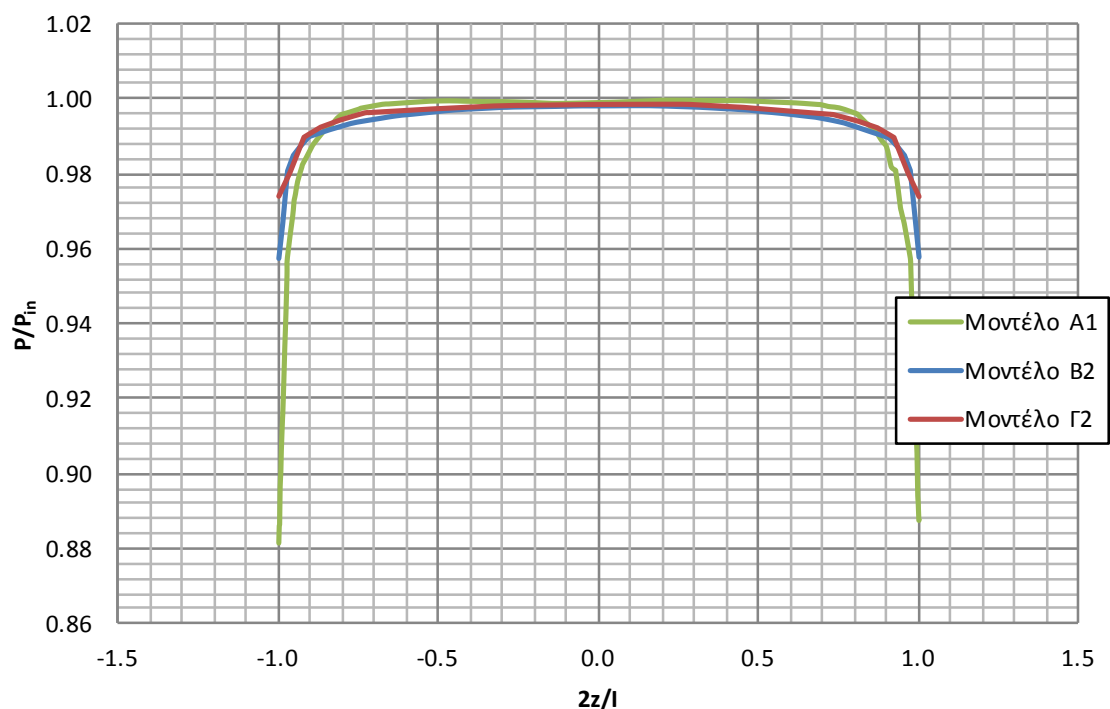


Διάγραμμα 10.42 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης  $90^\circ$

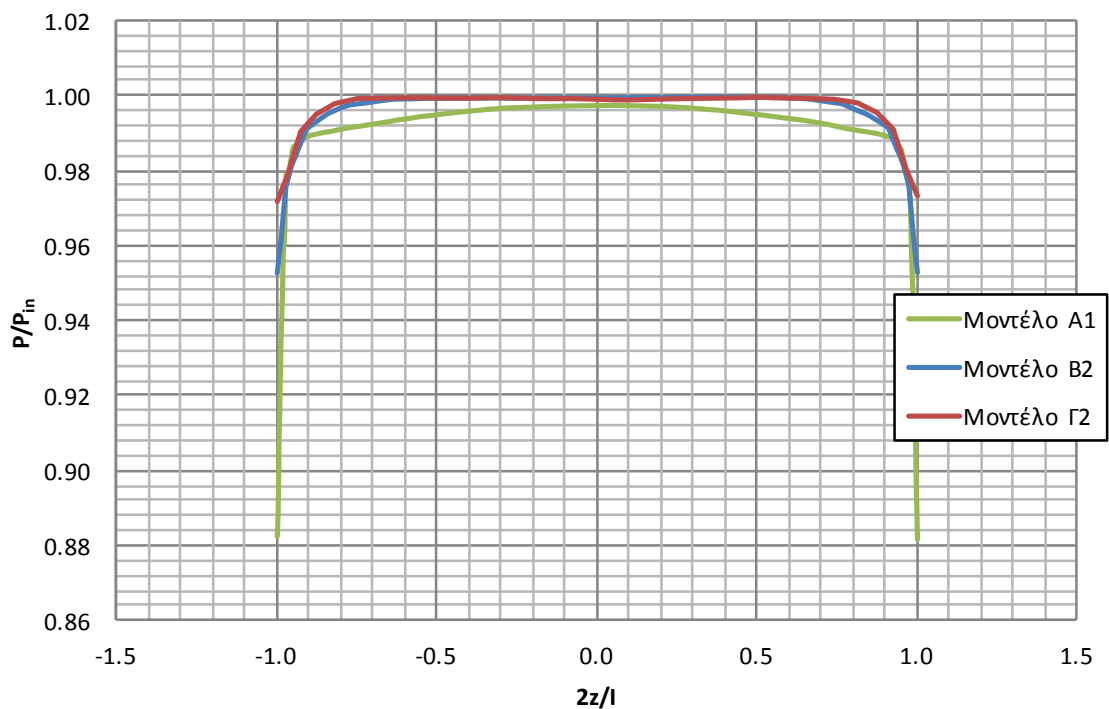


Διάγραμμα 10.43 Κατανομή της ακτινικής ταχύτητας ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνίες περιέλιξης  $270^\circ$

Ακολουθούν τα διαγράμματα κατανομής της ολικής πίεσης κατά μήκος της γραμμής ΕΕ για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  (Διάγραμμα 10.44) και  $270^\circ$  (Διάγραμμα 10.45). Από το διάγραμμα κατανομής της ολικής πίεσης κατά μήκος της γραμμής ΕΕ τόσο για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$  για όσο και γωνία περιέλιξης  $270^\circ$  παρουσιάζεται ότι η πιο σταθερή κατανομή είναι αυτή του μοντέλου Γ2. Επίσης παρατηρείται ότι η πτώση της ολικής πίεσης μεγαλώνει όσο μεγαλώνει η διαμόρφωση της στεφάνης με ομαλοποιημένα άκρα. Αυτό οφείλεται στο ότι η διαμόρφωση της στεφάνης με ομαλοποιημένα άκρα κατευθύνει το ρευστό προς την έξοδο του κελύφους πιο ομαλά και χωρίς φαινόμενα αποκόλλησης που προκαλούν τριβές.

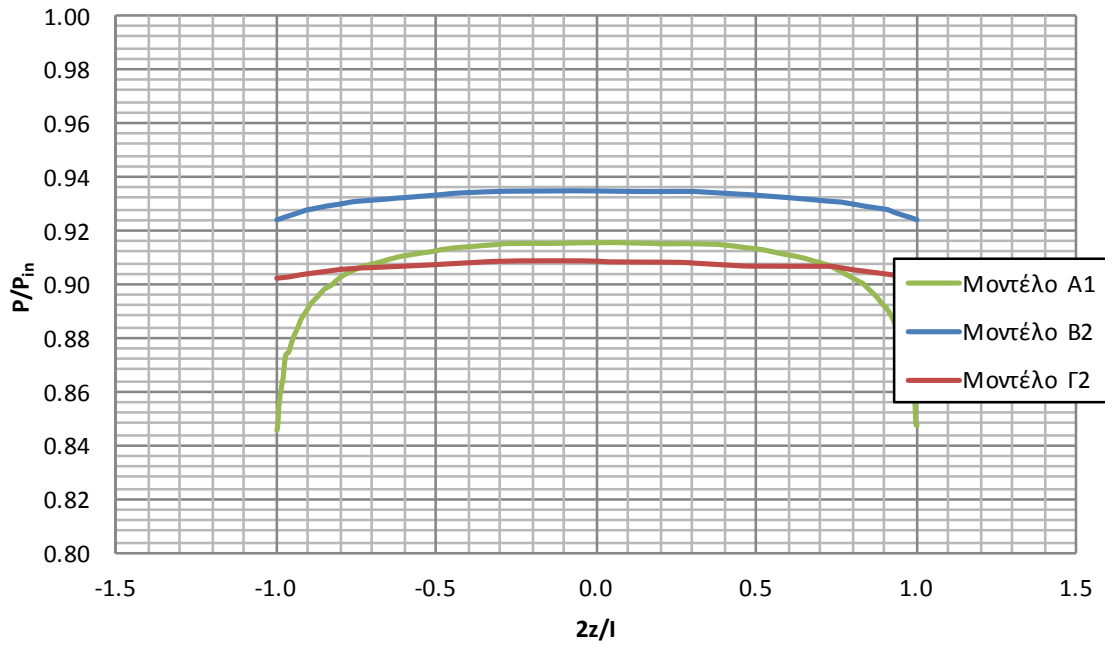


**Διάγραμμα 10.44 Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνία περιέλιξης  $90^\circ$**

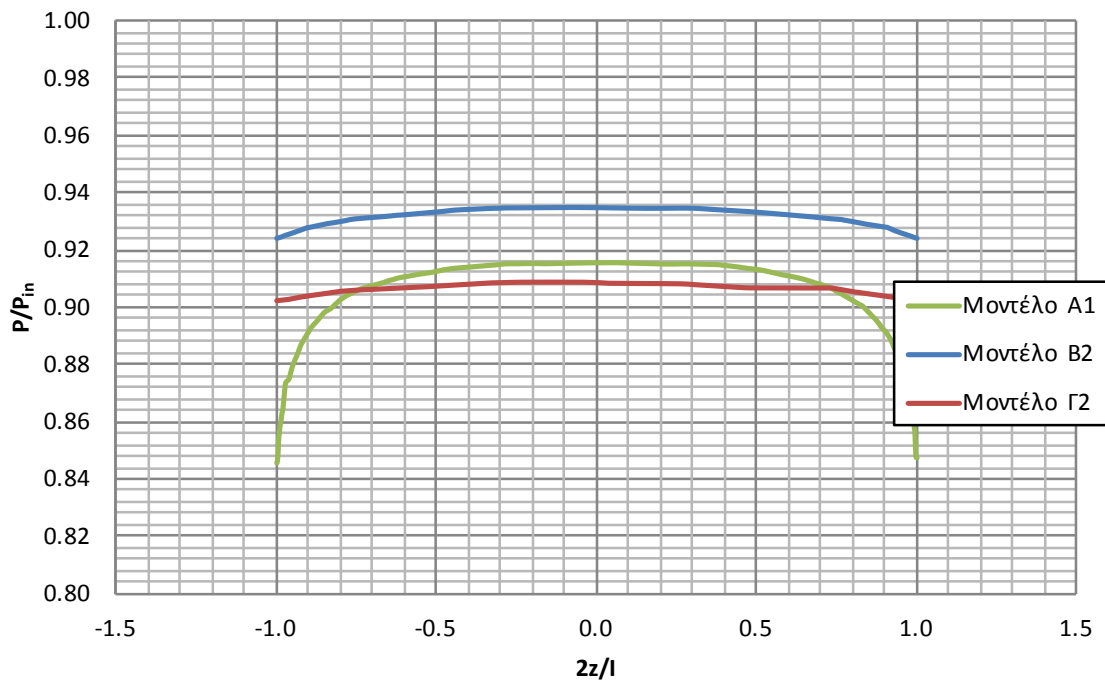


**Διάγραμμα 10.45 Κατανομή της ολικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνία περιέλιξης 270°**

Ακολουθούν τα διαγράμματα κατανομής της στατικής πίεσης κατά μήκος της γραμμής ΕΕ για γωνία περιέλιξης 90° (Διάγραμμα 10.46) και 270° (Διάγραμμα 10.45). Παρατηρείται ότι η στατική πίεση κατά μήκος της γραμμής ΕΕ για γωνία περιέλιξης 90° αλλά και 270° σταθεροποιείται περισσότερο όσο μεγαλύτερη είναι η διαμόρφωση της στεφάνης με ομαλοποιημένα άκρα όπως αυτή στο μοντέλο Γ2. Έντονη πτώση της στατικής πίεσης παρατηρείται στα πλευρικά τοιχώματα της στεφάνης του μοντέλου Α1 αφού η ροή του ρευστού σε αυτά τα σημεία επιταχύνεται.



Διάγραμμα 10.46 Κατανομή της στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνία περιέλιξης 270°



Διάγραμμα 10.47 Κατανομή της στατικής πίεσης ως προς την γραμμή ελέγχου ΕΕ για γωνία περιέλιξης 270°

## 11 Συμπεράσματα και Προτάσεις

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να παραμετροποιηθεί η γεωμετρία του σπειροειδούς κελύφους υδροστροβίλων αντίδρασης. Με την παραμετροποίηση και τη χρήση σχεδιαστικών παραμέτρων/μεταβλητών για τη μοντελοποίηση της γεωμετρίας του σπειροειδούς κελύφους καθίσταται δυνατή η διαμόρφωση και μελέτη ενός μεγάλου εύρους γεωμετριών. Ο ορισμός των παραμέτρων σχεδιασμού για την σχεδίαση του σπειροειδούς κελύφους έγινε με βάση την μέθοδο σταθερής συστροφής. Με την ανάπτυξη αλγόριθμου που βασίζεται στις σχεδιαστικές αυτές παραμέτρους καθίσταται δυνατή η σχεδίαση του σπειροειδούς κελύφους σε τριδιάστατη απεικόνιση. Ακολουθώντας, μπορούν να αξιοποιηθούν τα αποτελέσματα του αλγορίθμου από σχεδιαστικό πρόγραμμα για την τελική διαμόρφωση του σπειροειδούς κελύφους. Έτσι, η διαδικασία σχεδίασης μοντέλων σπειροειδούς κελύφους υδροστροβίλων αντίδρασης διαφορετικών γεωμετριών απλοποιείται με αποτέλεσμα να μπορεί να μελετηθεί η αναπτυσσόμενη τριδιάστατη ροή με κατάλληλο λογισμικό υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Με βάση το σχεδιαστικό κομμάτι που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε κατασκευή τριών διαφορετικών μοντέλων σπειροειδούς κελύφους για τη μελέτη της ροής που αναπτύσσεται σε αυτά. Η επιλογή της γεωμετρίας των τριών μοντέλων έγινε με γνώμονα να μελετηθεί το κατά πόσο και πώς επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά της ροής από τη διαμόρφωση στεφάνης ομαλοποιημένων άκρων. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, συμπεραίνεται ότι η χρήση στεφάνης με στρογγυλοποιημένες ακμές στην έξοδο του σπειροειδούς κελύφους συντελεί:

- Στην εξομάλυνση της κατανομής της ακτινικής και εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας στο τμήμα εξόδου της στεφάνης.
- Στην εξομάλυνση της κατανομής της ολικής και στατικής πίεσης στο τμήμα εξόδου της στεφάνης
- Στη μείωση των υδραυλικών απωλειών στα πλευρικά τοιχώματα της στεφάνης.

Οι ολικές υδραυλικές απώλειες στο κέλυφος σε όλα τα μοντέλα είναι μικρές και κυμαίνονται από 0.46% έως 0.31% της ενέργειας εισόδου του ρευστού. Αυτό οφείλεται στον κατάλληλο σπειροειδή σχηματισμό του σπειροειδούς κελύφους αλλά και στη συγκλίνουσα μορφή του, με αποτέλεσμα να διαμορφώνεται μέσα σε αυτά σχετικά ομαλή ροή χωρίς αποκολλήσεις και ανακυκλοφορίες. Η πτώση της ολικής πίεσης του σπειροειδούς κελύφους για παροχή 500

$\text{m}^3/\text{h}$  από το τμήμα εισόδου μέχρι το τμήμα εξόδου στα μοντέλα που μελετήθηκαν κυμαίνεται από 340.97 έως 137.77 (Pa).

Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι η τελική επιλογή της γεωμετρίας του σπειροειδούς κελύφους αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα που εμπεριέχει και οικονομικές παραμέτρους καθώς ο τρόπος σχεδιασμού του και το τελικό μέγεθος παίζουν καθοριστικό ρόλο στο κόστος κατασκευής του. Έτσι, εκτός από την υδροδυναμική συμπεριφορά, θα πρέπει να εκτιμηθεί το αντίστοιχο κόστος κατασκευής κάθε σχεδιασμού, ώστε να μπορεί να γίνει πλήρης τεχνοοικονομική εκτίμηση και βελτιστοποίηση του σπειροειδούς κελύφους ενός υδροστροβίλου αντίδρασης.

Παρακάτω αναφέρονται κάποιες γενικές προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση της ροής που ανατάσσεται στο σπειροειδές κέλυφος:

- Διερεύνηση της ροής στο σπειροειδές κέλυφος με διαμόρφωση του σχεδιασμού του σύμφωνα με τη μέθοδο σταθερής μέσης ταχύτητας.
- Διερεύνηση της ροής για διάφορες δυνατές γεωμετρίες κυκλικής και ελλειπτικής μορφής μεσημβρινών τομών συνδυαστικά με τη διαμόρφωση στεφάνης ομαλοποιημένων άκρων.
- Διερεύνηση της επίδρασης της γωνίας περιέλιξης.
- Ανάλυση και μελέτη των χαρακτηριστικών της ροής για διαφορετικά σημεία λειτουργίας (κοντά αλλά και μακριά από το κανονικό σημείο λειτουργίας)
- Αριθμητική επίλυση της ροής και στα οδηγητικά και ρυθμιστικά πτερύγια και υπολογισμός συνολικών απωλειών στο τμήμα εισόδου του υδροστροβίλου.
- Διερεύνηση της επίδρασης του σχεδιασμού της γλωττίδας μη-βέλτιστης μορφής (non optimum tongue)
- Διερεύνηση της ροής σε σπειροειδές κέλυφος που κατασκευάζεται με συγκόλληση ανά τμήματα (συγκολλητό σπειροειδές κέλυφος)

## Βιβλιογραφία

Biswas, G., Eswaran, V., Ghai, G., & Gupta, A. (1998). *A numerical study on flow through the spiral casing of a hydraulic turbine*. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur 208 016, India.

Biswas. P, K. M. (1999). *Analysis of flow in the spiral casing using a streamline upwind Petrov Galerkin method*. Department of Mechanical Engineering; Indian Institute of Technology; Kanpur; 208016; India.

Krishna, H. C. (1997). *Hydraulic design of hydraulic machinery*. Ashgate Publishing, Limited.

Mrsa, Z. (1993). *Optimal design of spiral casing tongue and wicket gate angle by decomposing method*. Technical Faculty Rijeka. University of Rijeka, Narodnog ustanka 58. 51000 Rijeka, Croatia.

P.K. Maji, G. B. (1998). *Three-dimensional analysis of flow in the spiral casing of a reaction turbine using a differently weighted Petrov Galerkin method*. Department of Mechanical Engineering. Indian Institute of Technology, Kanpur 208016, India.

Petit, O., Mulu, B., & Cervantes, M. (2010). *Comparison of numerical and experimental results of the flow in the U9 Kaplan turbine model*. Division of Fluid Mechanics, Chalmers University of Technology, Hörsalsvägen 7A, SE-41296 Göteborg, Sweden  
2Division of Fluid Mechanics, Luleå University of Technology, SE-971 87 Luleå, Sweden.

Παπαντώνης, Δ. Ε. (2008). *Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα*. Αθήνα: Συμεών.

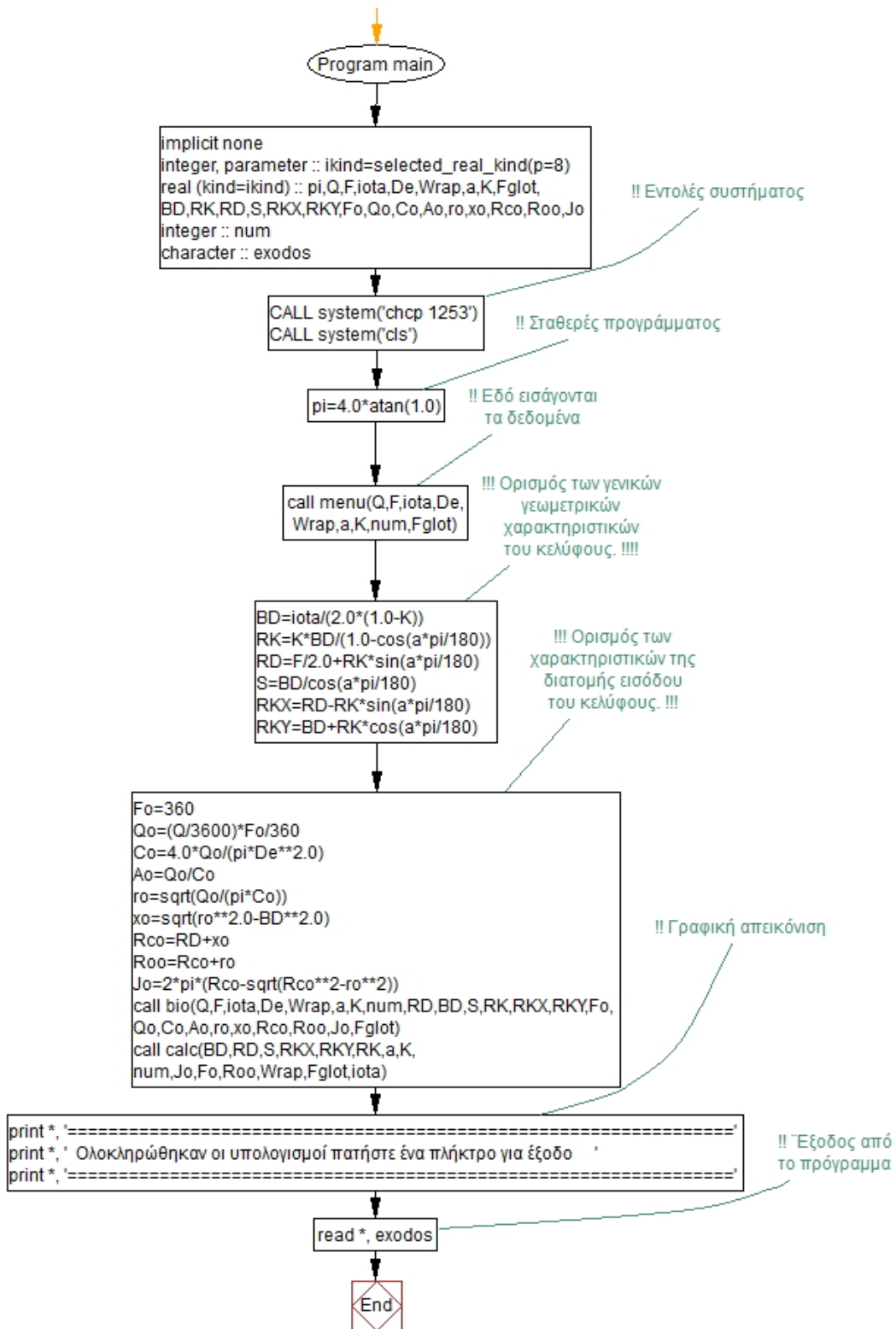
Παπαντώνης, Δ. Ε. (2008). *Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες - Υδροστρόβιλοι Υδροδυναμικές Μεταδόσεις*. Αθήνα: Συμεών.

Τσαγγάρης, Σ. (2005). *Μηχανική των Ρευστών*. Αθήνα: Συμεών.

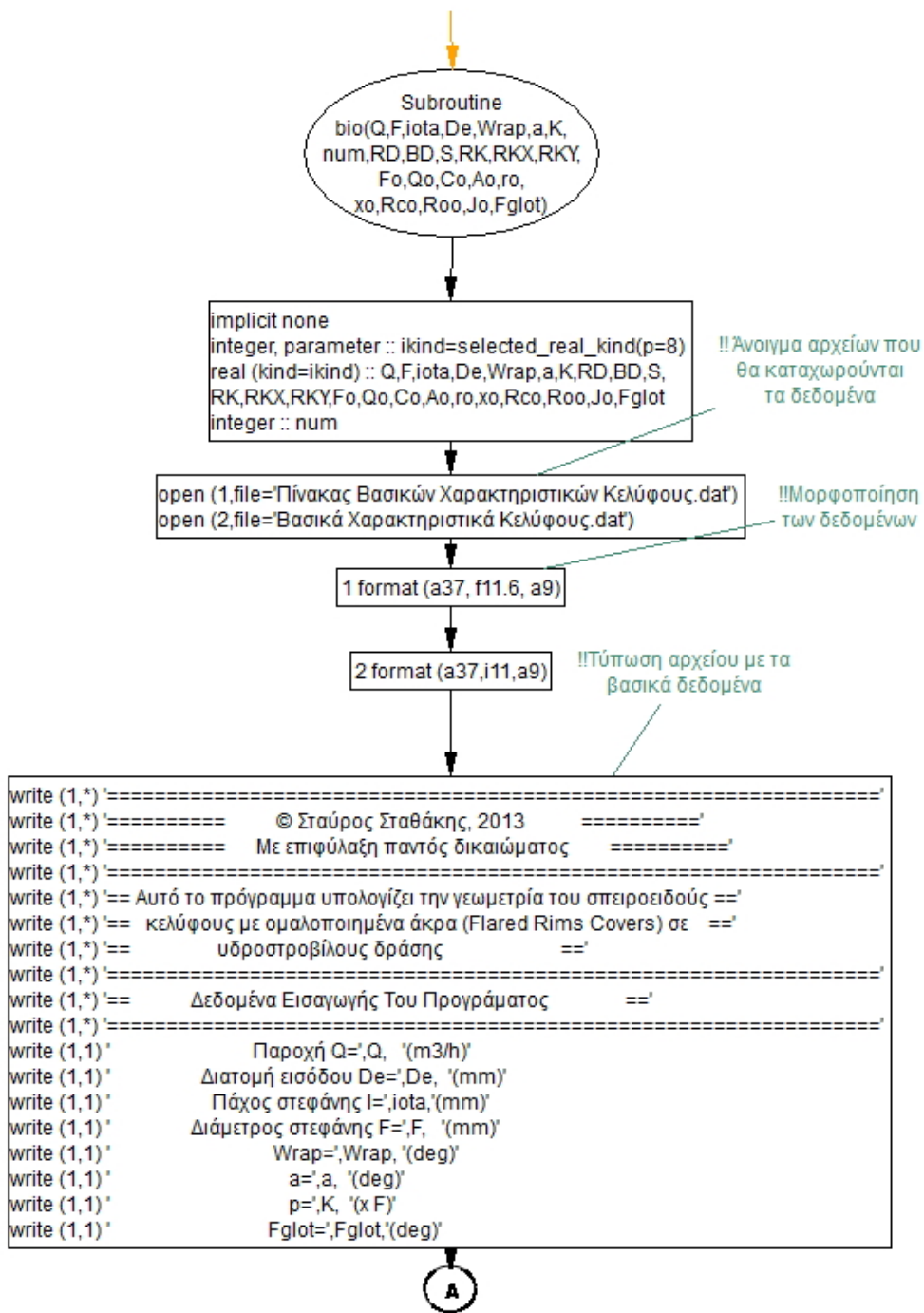




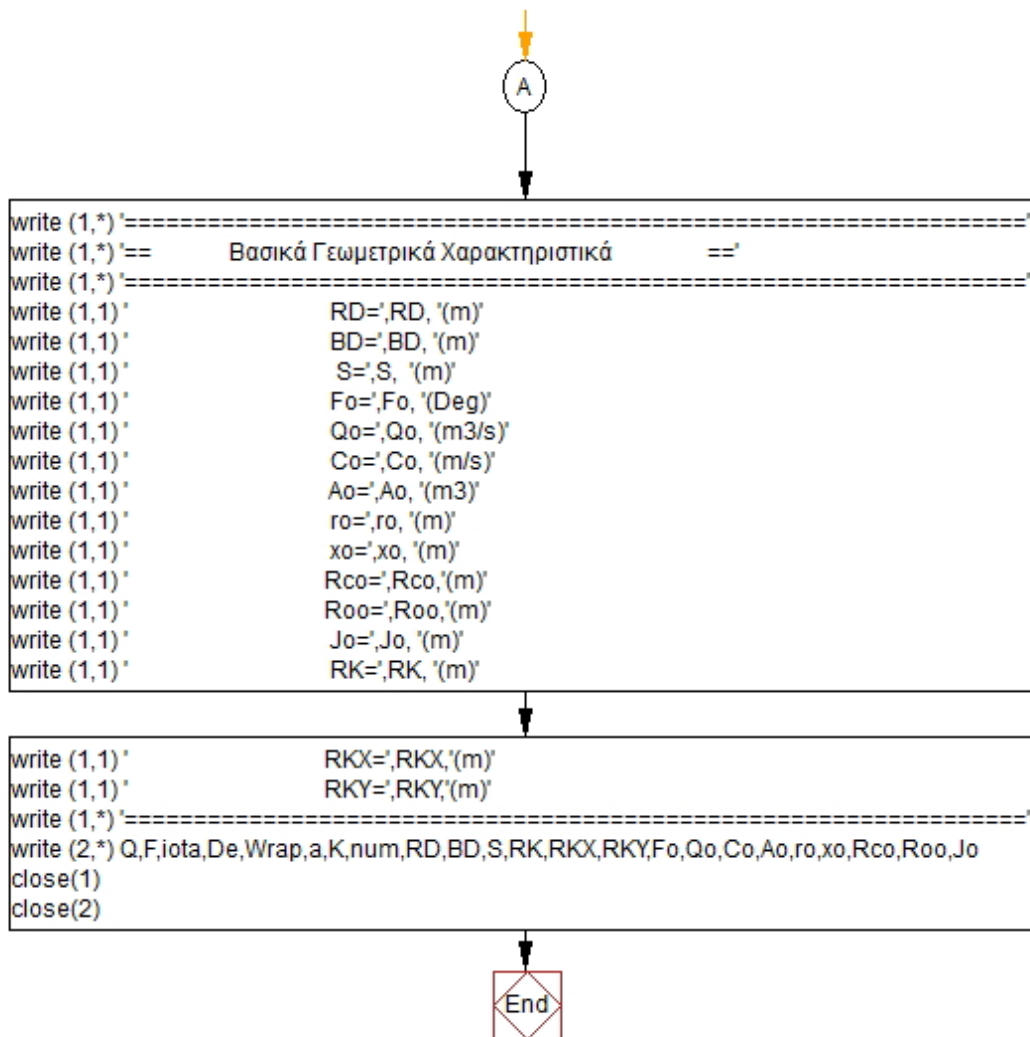
# Παράρτημα Α



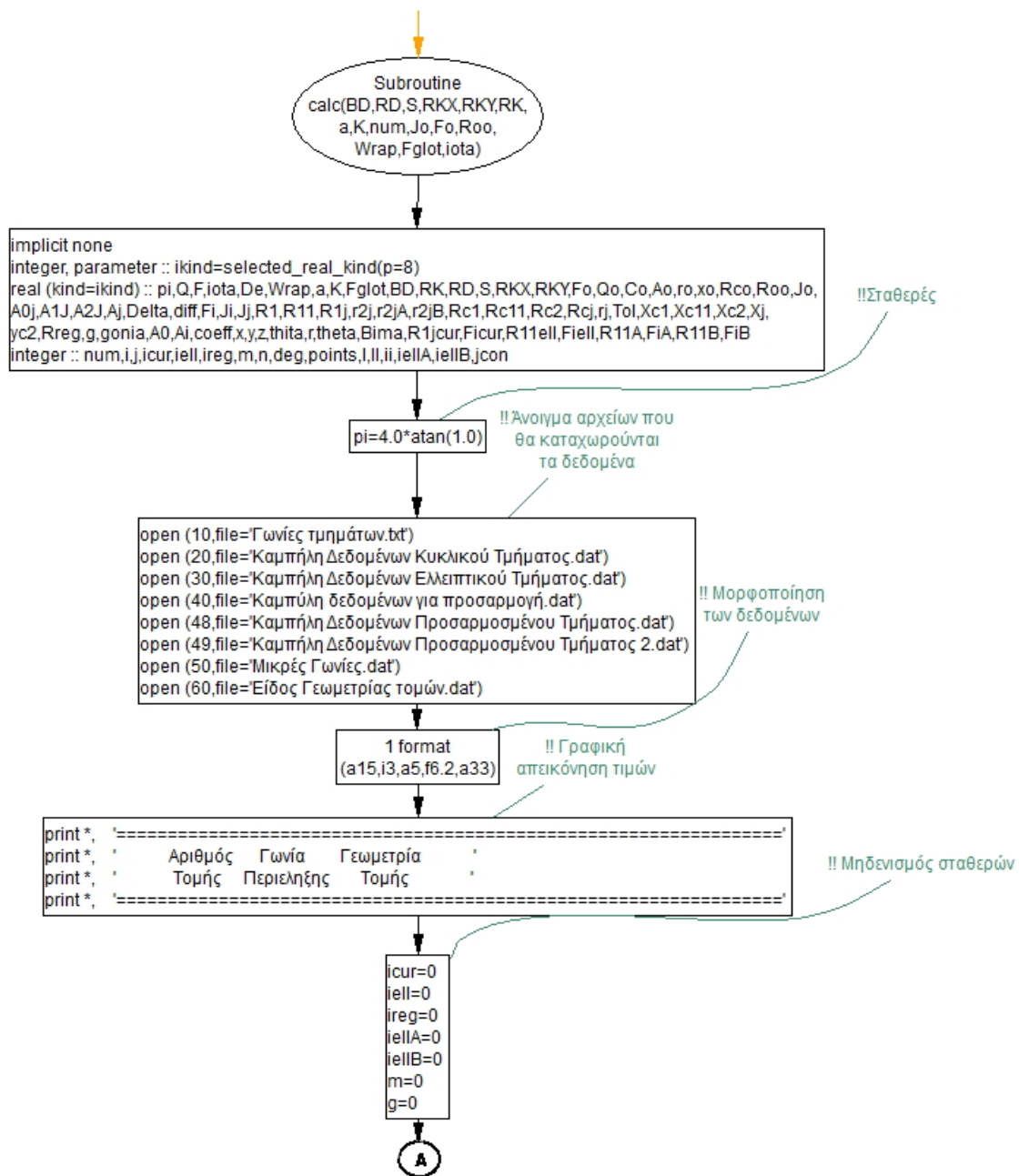
Διάγραμμα 11.1 Διάγραμμα ροής βασικού προγράμματος main



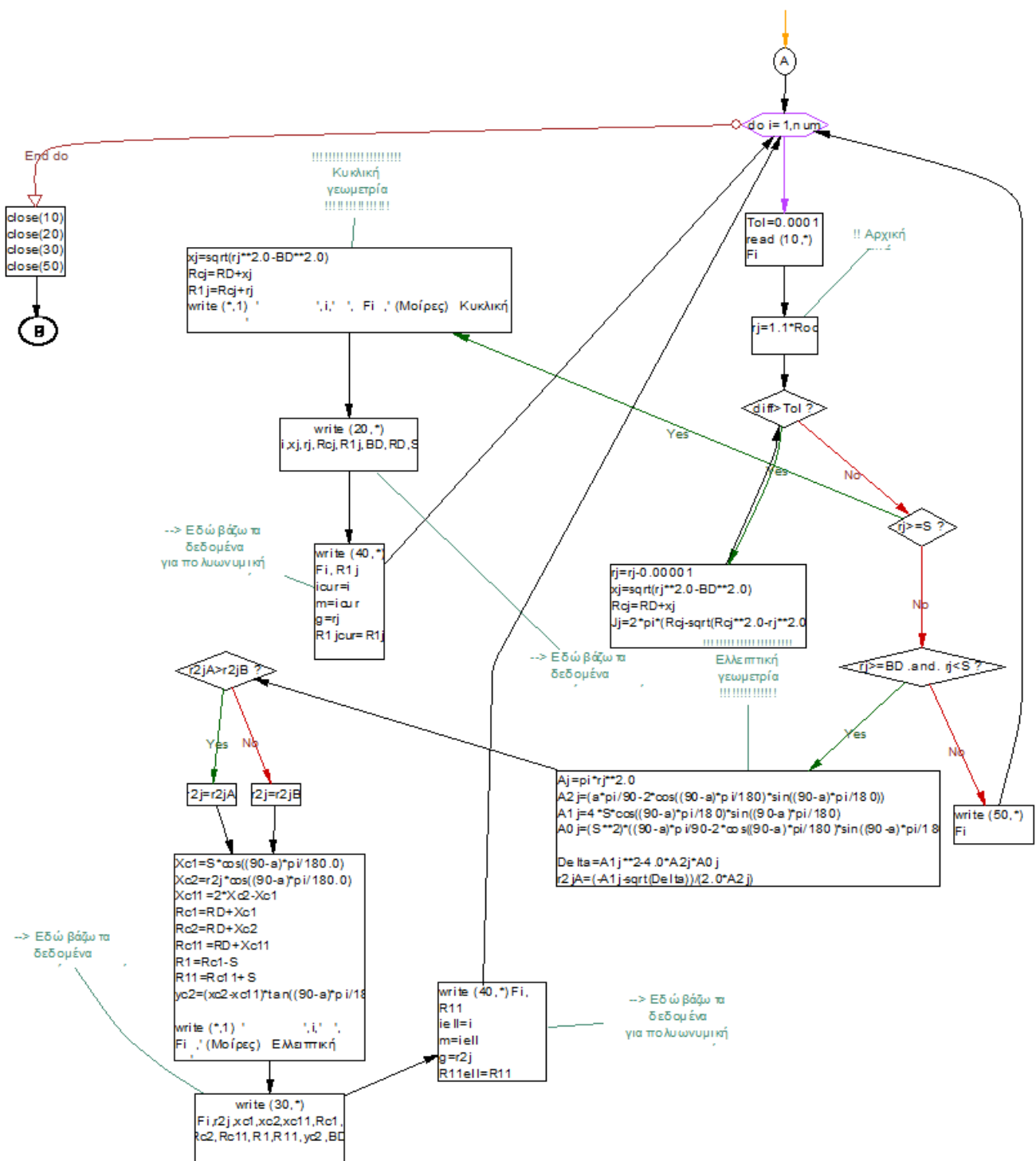
Διάγραμμα 11.2 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας bio (αρχή-A)



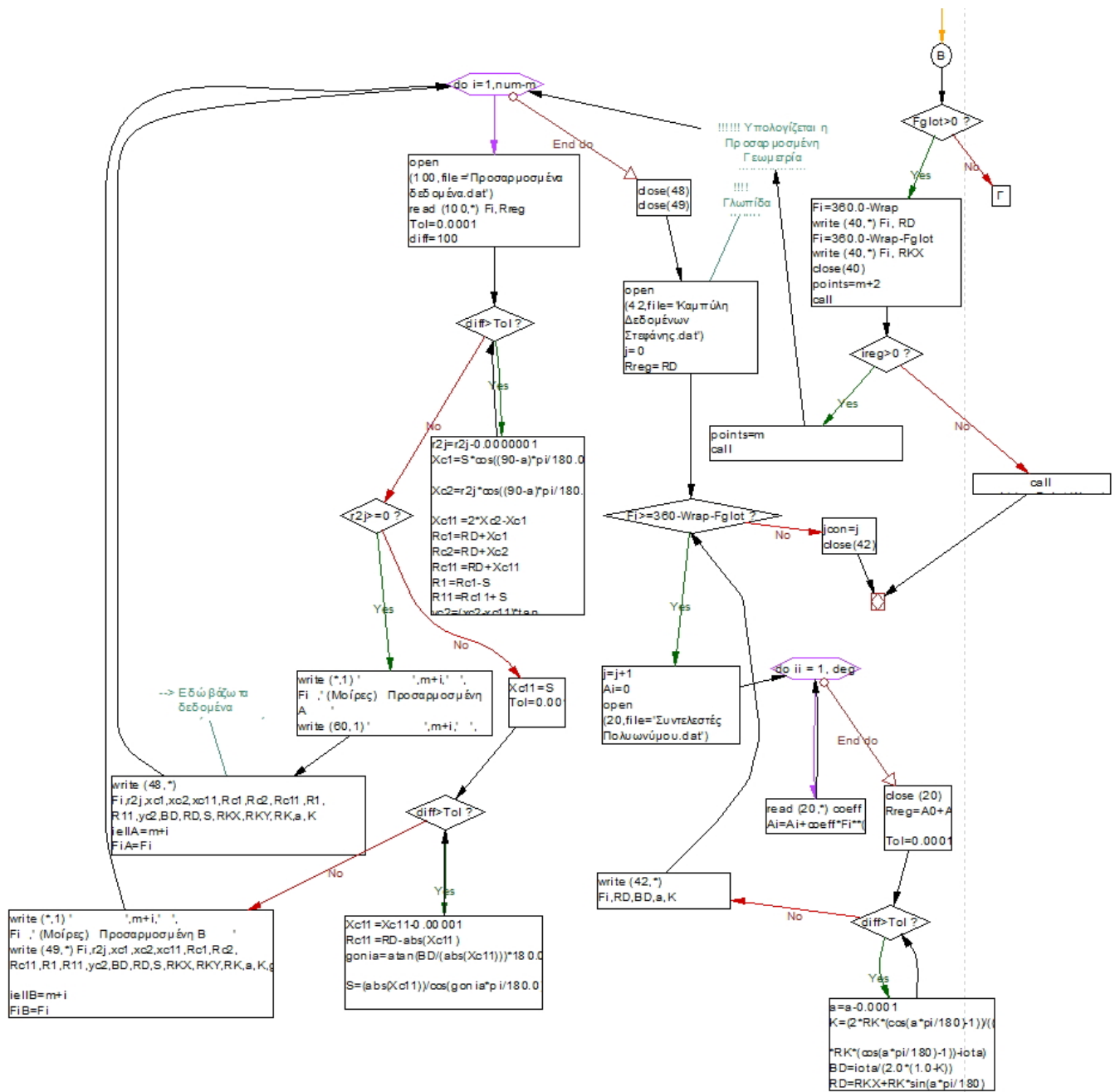
Διάγραμμα 11.3 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας bio (Α-τέλος)



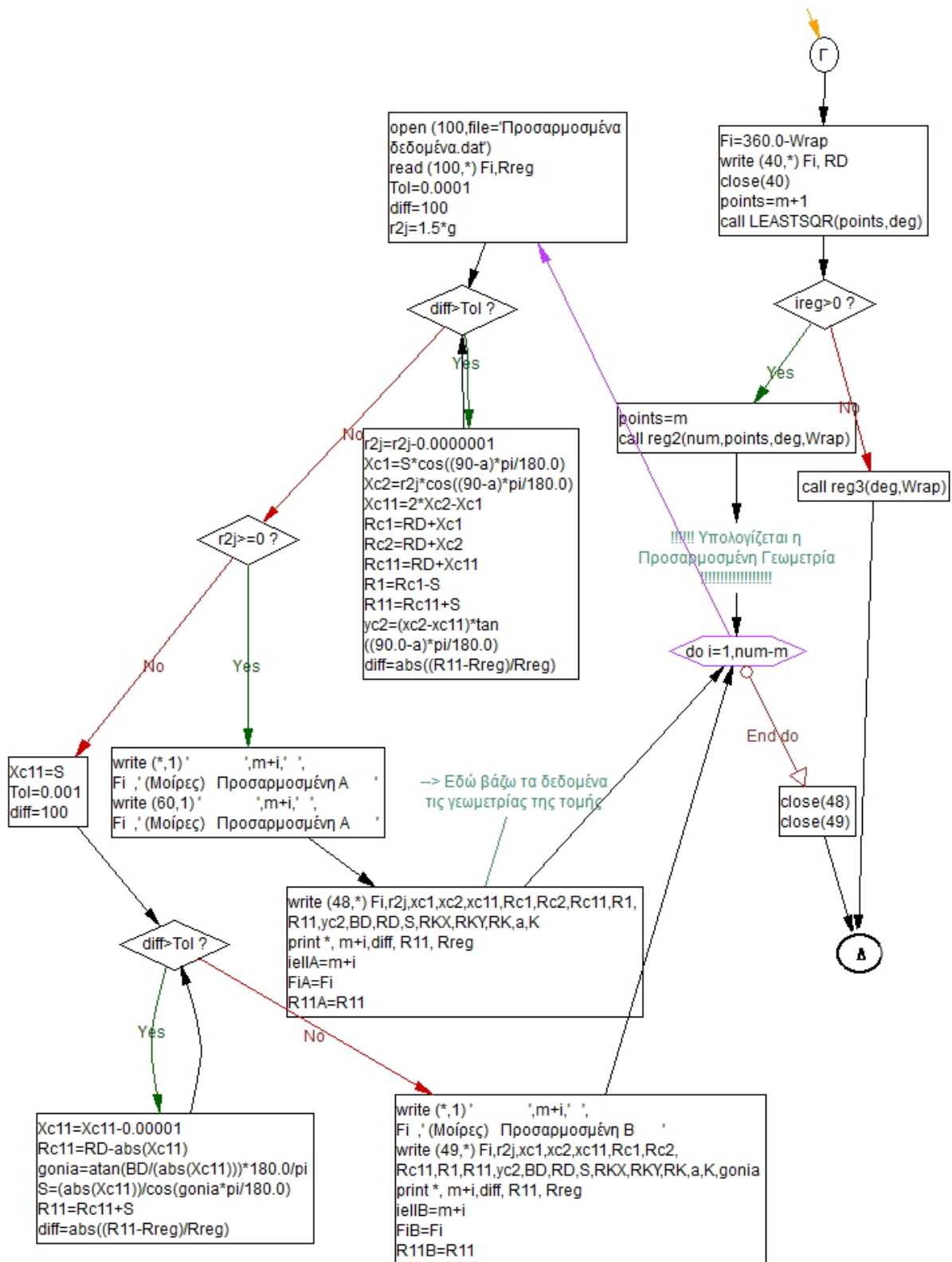
Διάγραμμα 11.4 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας calc (αρχή-A)



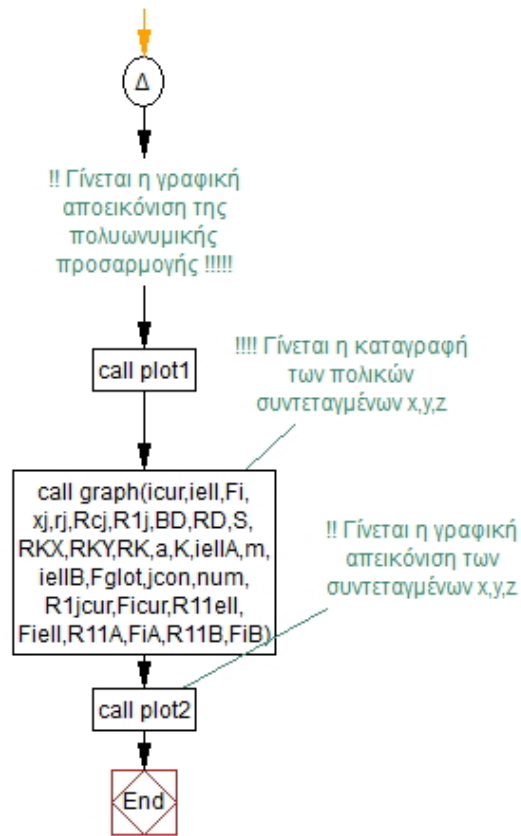
Διάγραμμα 11.5 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας calc (A-B)



Διάγραμμα 11.6 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας calc (B-Γ)



Διάγραμμα 11.7 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας calc (Γ-Δ)



Διάγραμμα 11.8 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας calc (Δ-τέλος)





## Παράρτημα Β

Βασικές Γεωμετρικές Μεταβλητές		
Σύμβολο Κώδικα	Σύμβολο Σχήματος	Αριθμός Σχήματος
iota	$\Pi_K$	Εικόνα 3.18 & Εικόνα 3.20
BD	$\Pi_B$	Εικόνα 3.18 & Εικόνα 3.20
RK	$\rho_K$	Εικόνα 3.18 & Εικόνα 3.20
RD	$P_B$	Εικόνα 3.18 & Εικόνα 3.20
S	$\Sigma_{AB}$	Εικόνα 3.18 & Εικόνα 3.20
RKX	$P_O$	Εικόνα 3.18 & Εικόνα 3.20
RKY	$\Pi_O$	Εικόνα 3.18 & Εικόνα 3.20
ro	$\rho$	Εικόνα 3.18
xo	$X_{\Xi}$	Εικόνα 3.18
Rco	$P_{\Xi}$	Εικόνα 3.18
Roo	$P_Z$	Εικόνα 3.18
rj	$\rho$	Εικόνα 3.18
xj	$X_{\Xi}$	Εικόνα 3.18
Rcj	$P_{\Xi}$	Εικόνα 3.18
R1j	$P_Z$	Εικόνα 3.18
r2j	$\rho_2$	Εικόνα 3.20
Xc1	$X_A$	Εικόνα 3.20
Xc2	$X_{\Xi}$	Εικόνα 3.20
Xc11	$X_{\Delta}$	Εικόνα 3.20
Rc1	$P_A$	Εικόνα 3.20
Rc2	$P_{\Xi}$	Εικόνα 3.20
Rc11	$P_{\Delta}$	Εικόνα 3.20
R1	$P_Z$	Εικόνα 3.20
F	$\Delta_K$	Εικόνα 4.1
De	$\Delta_{Ei\Sigma}$	Εικόνα 4.1
Wrap	$\Phi_{\Pi EP}$	Εικόνα 4.1
a	$\alpha$	Εικόνα 4.1
Fglot	$\Phi_{BK}$	Εικόνα 4.1

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται οι βασικές γεωμετρικές μεταβλητές όπως αυτές χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα και η αντιστοίχισή τους με αυτές που απεικονίζονται στα σχήματα της εργασίας.