



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ  
ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΔΡΑΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΑΜΑΡΤΖΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ι. ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2014



## Περίληψη

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η ανάλυση της διφασικής ροής δέσμης νερού η οποία εξέρχεται στον αέρα από ακροφύσιο υδροστροβίλου δράσης και η μετέπειτα βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του ακροφυσίου αυτού. Για τον σκοπό αυτόν μελετήθηκε η γεωμετρία του ακροφυσίου πειραματικού μοντέλου υδροστροβίλου Pelton, ισχύος 70 kW, ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η γεωμετρία κατασκευάστηκε στο λογισμικό Solidworks, το οποίο είναι ένα πρόγραμμα σχεδιασμού CAD. Η μοντελοποίηση και η υπολογιστική προσομοίωση της διφασικής, τυρβώδους ροής πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) FLUENT, της εταιρείας ANSYS. Αρχικά, κατασκευάστηκαν υπολογιστικά πλέγματα διαφόρων πυκνοτήτων για τη διακριτοποίηση του πεδίου ροής και στη συνέχεια, αφού προσομοιώθηκε η ροή, προέκυψε το μικρότερο σε αριθμό κελιών πλέγμα το οποίο έδινε λύση ανεξάρτητη της ανάλυσής του. Έπειτα, αφού ορίστηκαν οι τελικές ρυθμίσεις του υπολογιστικού μοντέλου, πραγματοποιήθηκε η αριθμητική προσομοίωση της διφασικής ροής και παρουσιάστηκαν σε κατάλληλα γραφήματα τα αποτελέσματά της.

Βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης αυτής, πραγματοποιήθηκε η παραμετροποίηση της γεωμετρίας του ακροφυσίου. Εν συνεχεία, διερευνήθηκε η επίδραση των κύριων παραμέτρων και συγκεκριμένα των γωνιών του ακροφυσίου και της βελόνης, καθώς και του ανοίγματος της βελόνης, εκφρασμένο ως διερχόμενη παροχή μάζας, στις υδραυλικές απώλειες του ακροφυσίου, για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας του. Στόχος της μελέτης βελτιστοποίησης ήταν η εύρεση των τιμών των γεωμετρικών παραμέτρων οι οποίες ελαχιστοποιούν τις απώλειες στο ακροφύσιο. Για τον σκοπό αυτόν, πραγματοποιήθηκε μία μελέτη σχεδιασμού πειραμάτων (Design of Experiments - DOE), η οποία εφαρμόστηκε με τη χρήση του λογισμικού Design-Expert και προέκυψαν οι συνδυασμοί παραμέτρων για την προσομοίωση της ροής.

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση δύο διαφορετικών μοντέλων τύρβης, συγκεκριμένα του SST και του k-ε realizable, ώστε να προκύψουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη στατιστική ανάλυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων και την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας ονομάζεται μεθοδολογία επιφανειών απόκρισης (Response Surface Methodology-RSM). Τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν ότι με τη χρήση μεγαλύτερων γωνιών ακροφυσίου και βελόνης σε σχέση με τις προτεινόμενες από τη βιβλιογραφία, ήταν δυνατή η ελάττωση των απωλειών κατά ένα ποσοστό της τάξης του 30 %. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με σκοπό τη σύγκριση της αρχικής και της βελτιωμένης γεωμετρίας, και την επικύρωση των αποτελεσμάτων της μελέτης βελτιστοποίησης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων αυτών έδειξε ότι η βελτιωμένη γεωμετρία παρουσίαζε πιο συμπαγή δέσμη νερού, με πιο ομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων και χαμηλότερες απώλειες ακροφυσίου.

Τέλος, διερευνήθηκε η επίδραση λοιπών παραμέτρων του ακροφυσίου, γεωμετρικών και λειτουργικών, στις απώλειες υδραυλικής ισχύος της δέσμης. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση του πάχους της βελόνης, της καμπυλότητας και της τραχύτητας των τοιχωμάτων του ακροφυσίου και της βελόνης, της ολικής πίεσης εισόδου, και της μορφής του στομίου εξόδου του ακροφυσίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, από τις προαναφερθείσες παραμέτρους, η

επιφανειακή τραχύτητα των τοιχωμάτων του ακροφυσίου και της βελόνης έχει τη σημαντικότερη επίδραση στις υδραυλικές απώλειες του ακροφυσίου, οι οποίες σε περίπτωση εκτεταμένης φθοράς μπορεί να αυξηθούν έως και κατά 40 %.

# Abstract

## “Numerical Simulation and Parametric Optimization of the Geometry of an Impulse Hydro Turbine Injector”

The purpose of this thesis was to analyze the two-phase flow of a water jet exiting in the air from the nozzle of an impulse hydro-turbine and the subsequent optimization of the geometry of this nozzle. To that end, the geometry of the nozzle of a model Pelton turbine with a nominal output of 70 kW was used. This turbine is installed in the Laboratory of Hydraulic Machines, of the School of Mechanical Engineering of National Technical University of Athens, and is mainly used for experimental purposes. The geometry was constructed in Solidworks, which is a solid modeling CAD software. The modeling and the numerical simulation of the two-phase, turbulent flow field was performed using the commercial Computational Fluid Dynamics ANSYS-FLUENT software. Initially, the flow field was discretized using a number of computational grids of varying densities and then a mesh sensitivity study was performed, resulting in the identification of the grid that accurately resolved the flow field. Consequently, the final set up of the computational model and the results of the numerical simulations of the two-phase flow were presented.

Based on the results of this simulation, the geometry of the nozzle was parameterized. Subsequently, the effect of key design parameters on the hydraulic losses of the injector was investigated over a wide range of operating conditions. These design parameters were the angles of the nozzle and the spear, and the mass flow rate. The aim of the study was to find the optimum injector design, which minimizes the losses of the flow in the injector. For this purpose, a Design of Experiments (DOE) study was employed, using the Design-Expert software. CFD simulations were performed using two different models of turbulence, the SST and the k- $\epsilon$  realizable. The results from the two models were very similar, enhancing their reliability.

The statistical analysis of the results of the simulations and the generation of the optimum was performed using the Response Surface Methodology (RSM). The results of the study suggest that steeper injector nozzle and spear angles than those recommended by the current literature lead to the reduction of the losses approximately by 30 %, depending on the mass flow rate. In addition, CFD simulations were performed in order to compare the original and the improved geometry and validate the results of the optimization study. According to the comparison of the results, the improved geometry displayed a more compact water jet, with a more uniform velocity distribution and lower nozzle losses.

Finally, additional CFD simulations were performed in order to investigate the effect of other geometrical and operational parameters on the injector losses. Specifically, the effect of the spear width, the curvature and roughness of the walls of the nozzle and the spear, the total inlet pressure, and the shape of the orifice of the nozzle were explored. The results revealed that, of the aforementioned parameters, the surface roughness of the nozzle and the needle has the greatest impact on the hydraulic losses of the injector. The deterioration of the condition of the walls leads to an increase of the injector losses, which in the case of extensive damages can reach up to 40%.



## Πρόλογος

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους εκείνους που συντέλεσαν, ο καθένας με τον δικό του τρόπο, στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής και με βοήθησαν να κάνω ένα ακόμα βήμα προς την προσωπική μου ολοκλήρωση. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου, κ. Ιωάννη Αναγνωστόπουλο, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, την εξαιρετική καθοδήγηση, την ενθάρρυνση και την κατανόηση που έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Υποψήφιο Διδάκτορα Αλέξανδρο Παναγιωτόπουλο για την απεριόριστη καθοδήγηση, τη βοήθεια και τον χρόνο που μου αφιέρωσε. Οι υποδείξεις και οι συμβουλές του υπήρξαν απαραίτητες για την περαίωση της εργασίας, ενώ η επικοινωνία μας ήταν άριστη και ευχάριστη. Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Θανάση Νεσιάδη για την καθοδήγησή του και τη βοήθεια, ιδιαίτερα κατά τα αρχικά στάδια της παρούσης εργασίας. Ακόμα, ευχαριστώ πολύ τους φίλους και συναδέλφους Ελένη Ασημακοπούλου και Χρήστο Αμπάτη για τις ουσιαστικές τους συμβουλές και την εμπύχωση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους που με στήριξαν σε αυτή την προσπάθεια.





# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	i
Abstract .....	iii
Πρόλογος.....	v
Περιεχόμενα.....	vii
Κατάλογος Σχημάτων .....	xi
Κατάλογος Πινάκων .....	xix
Κατάλογος Συντημήσεων .....	xxi
Εισαγωγή.....	1
I. Υδροηλεκτρική Ενέργεια.....	1
II. Διάκριση των Υδροστροβίλων.....	1
Υδροστρόβιλοι Ολικής Προσβολής.....	2
Υδροστρόβιλοι Μερικής Προσβολής (Υδροστρόβιλοι Δράσης) .....	3
III. Γενική Περιγραφή Υδροστροβίλων Μερικής Προσβολής.....	5
Υδροστρόβιλος Pelton.....	5
Υδροστρόβιλος Turgo.....	10
Απώλειες Ενέργειας στον Υδροστρόβιλο.....	11
IV. Σκοπός και Δομή της Εργασίας .....	13
Κεφάλαιο 1. Ανάλυση της Ροής σε Ακροφύσιο Υδροστροβίλου Δράσης.....	15
1.1 Εξίσωση Euler.....	15
1.2 Υπολογισμός της Παραγόμενης Ισχύος σε Υδροστρόβιλο Δράσης .....	16
1.3 Τοποθέτηση του Προβλήματος .....	20
1.3.1 Παράγοντες οι οποίοι Επιδρούν στη Ποιότητα της Δέσμης.....	20
1.3.2 Διασπορά της Δέσμης .....	21
1.3.3 Η Δυσκολία της Μελέτης και της Σχεδίασης των Υδροστροβίλων Pelton.....	23
1.4 Βιβλιογραφική Επισκόπηση.....	26
1.4.1 Εισαγωγή.....	26
1.4.2 Παρουσίαση Βιβλιογραφίας .....	27
Κεφάλαιο 2. Ανάλυση της Αριθμητικής Μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε .....	61
2.1 Εισαγωγή.....	61
2.1.1 Γενική Μεθοδολογία Υπολογιστικής Επίλυσης των Προβλημάτων Ροής .....	62
2.2 Θεμελιώδεις Εξισώσεις Ρευστομηχανικής .....	63
2.2.1 Εξισώσεις Navier Stokes.....	63
2.2.2 Αδιάστατες Παράμετροι .....	64

2.3 Το Υπολογιστικό Πακέτο ANSYS-FLUENT .....	66
2.4 Κατασκευή της Γεωμετρίας και του Υπολογιστικού Πλέγματος .....	69
2.4.1 Γεωμετρία .....	69
2.4.2 Δημιουργία του Πλέγματος .....	69
2.4.3 Διαχωρισμός των Πλεγμάτων με Βάση τη Συνδεσιμότητά τους .....	72
2.4.4 Ποιότητα του Πλέγματος .....	72
2.5 Γενικές Εξισώσεις Διατήρησης Ρευστού .....	74
2.5.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Όγκων.....	74
2.5.2 Η Έννοια του Όγκου Ελέγχου .....	75
2.5.3 Διακριτοποίηση των Διαφορικών Εξισώσεων .....	75
2.5.4 Χωρική Διακριτοποίηση-Ανάντι Σχήμα Δεύτερης Τάξης .....	76
2.5.5 Υπολογισμός των Βαθμίδων και Παραγώγων .....	77
2.5.6 Γραμμικοποίηση των Εξισώσεων-Επίλυση του Γραμμικού Συστήματος .....	78
2.5.7 Σχήματα Παρεμβολής της Πίεσης.....	78
2.5.8 Αλγόριθμοι Σύζευξης Πίεσης-Ταχύτητας.....	79
2.5.9 Υποχαλάρωση των Μεταβλητών και των Εξισώσεων .....	83
2.6 Οριακές Συνθήκες .....	84
2.7 Μοντέλα Τύρβης.....	86
2.7.1 Εισαγωγή.....	86
2.7.2 Μοντέλα Τύρβης Βασισμένα στη Μεσοποίηση Κατά Reynolds (RANS) .....	86
2.7.3 Μεσοποιημένες Κατά Reynolds Εξισώσεις Navier-Stokes .....	87
2.7.4 Η Γενική Υπόθεση Τυρβώδους Συνεκτικότητας.....	88
2.7.5 Μοντέλο standard k-ε .....	89
2.7.6 Μοντέλο k-ε RNG .....	90
2.7.7 Μοντέλο k-ε Realizable .....	90
2.7.8 Μοντελοποίηση της Τυρβώδους Παραγωγής Ενέργειας στα Μοντέλα k-ε.....	91
2.7.9 Μοντέλο k-ω .....	91
2.7.10 Μοντέλο SST (Shear-Stress Transport) .....	92
2.7.11 Μοντελοποίηση της Περιοχής των Τοιχωμάτων .....	93
2.7.12 Δημιουργία του Πλέγματος Κοντά στα Τοιχώματα και Μοντέλα Τύρβης .....	95
2.7.13 Καθορισμός Οριακών Συνθηκών Τύρβης .....	98
2.7.14 Σύγκριση Διαθέσιμων Μοντέλων Τύρβης .....	99
2.8 Μοντέλα Διφασικής Ροής .....	101
2.8.1 Μέθοδος VOF.....	101
2.8.2 Εξισώσεις Μοντέλου VOF .....	102
2.8.3 Επιφανειακή Τάση .....	103

Κεφάλαιο 3. Αριθμητική Επίλυση της Ροής σε Ακροφύσιο .....	105
3.1 Παρουσίαση του Πραγματικού Ακροφυσίου Υδροστροβίλου Δράσης.....	105
3.2 Κατασκευή της Γεωμετρίας.....	108
3.3 Κατασκευή του Πλέγματος .....	111
3.3.1 Εισαγωγή.....	111
3.1.2 Κατασκευή του Τελικού Πλέγματος.....	111
3.3.3 Έλεγχος της Ποιότητας του Πλέγματος.....	115
3.4 Υπολογισμός Απωλειών Ισχύος Ακροφυσίου .....	116
3.5 Μελέτη Ανεξαρτησίας Πλέγματος .....	117
3.5.1 Εισαγωγή.....	117
3.5.2 Εναλλακτικά Πλέγματα .....	117
3.5.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Μελέτης Ανεξαρτησίας Πλέγματος.....	120
3.5.4 Διερεύνηση της Επίδρασης των Μοντέλων Τύρβης στη Λύση.....	123
3.6 Παρουσίαση του Τελικού Υπολογιστικού Μοντέλου .....	124
3.6.1 Συνθήκες Ροής.....	124
3.6.2 Οριακές Συνθήκες .....	124
3.6.3 Σύγκλιση .....	127
3.6.4 Ρυθμίσεις Επιλύτη.....	129
3.6.5 Διερεύνηση της Επίδρασης της Βαρύτητας και της Επιφανειακής Τάσης.....	130
3.7 Ανάλυση της Ροής στο Ακροφύσιο Υδροστροβίλου Pelton - Αποτελέσματα.....	132
3.7.1 Αποτελέσματα.....	132
3.7.2 Η επίδραση της Τοπικής Πύκνωσης.....	135
Κεφάλαιο 4. Βελτιστοποίηση της Γεωμετρίας Ακροφυσίου Υδροστροβίλου Δράσης .....	139
4.1 Εισαγωγή.....	139
4.2 Διαδικασία Βελτιστοποίησης.....	139
4.2.1 Εισαγωγή.....	139
4.2.2 Παραμετροποίηση της Γεωμετρίας του Ακροφυσίου .....	141
4.2.3 Καθορισμός των Παραμέτρων Σχεδιασμού και Μεθόδου Βελτιστοποίησης .....	147
4.3 Αποτελέσματα Μελέτης DOE.....	150
4.3.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων SST.....	152
4.3.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων k-ε realizable .....	171
4.3.3 Σύγκριση Απωλειών Βελτιωμένου και Αρχικού Ακροφυσίου.....	174
4.3.4 Σύγκριση Κατανομών Ταχυτήτων Ροής.....	177
4.4 Διερεύνηση της Επίδρασης Λοιπών Παραμέτρων στις Απώλειες.....	181
4.4.1 Πάχος της Βελόνης .....	181
4.4.2 Καμπυλότητα των Τοιχωμάτων .....	182

4.4.3 Ύψος Πτώσης .....	183
4.4.4 Τραχύτητα των Τοιχωμάτων .....	184
4.4.5 Μορφή του Στομίου.....	186
4.4.6 Διεύρυνση των Ορίων του Χώρου Σχεδιασμού της Μελέτης Βελτιστοποίησης.....	189
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	193
5.1 Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα.....	193
5.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Διερεύνηση .....	195
Βιβλιογραφία .....	197

# Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα II.1:</b> Διατάξεις Υδροστροβίλων Δράσης .....	4
<b>Σχήμα II.2:</b> Διάγραμμα επιλογής του τύπου υδροστροβίλου συναρτήσει της υδραυλικής πτώσης στο κανονικό σημείο λειτουργίας .....	5
<b>Σχήμα III.3:</b> Αυθεντικό σχέδιο του L. Pelton για την κατοχύρωση της πατέντας του [50] .....	6
<b>Σχήμα III.4:</b> Σύγχρονη σχεδίαση σκαφιδίων υδροστροβίλου Pelton [31] .....	6
<b>Σχήμα III.5:</b> Σκαρίφημα υδροστροβίλου Pelton κατακόρυφου άξονα με έξι ακροφύσια.....	8
<b>Σχήμα III.6:</b> Λειτουργικό διάγραμμα υδροστροβίλου Pelton [9] .....	9
<b>Σχήμα III.7:</b> Ακροφύσιο υδροστροβίλου Turgo .....	10
<b>Σχήμα 1.1:</b> Τρίγωνα ταχυτήτων μεταξύ εισόδου (1) και εξόδου (2) σκαφιδίου Pelton [9] .....	16
<b>Σχήμα 1.2:</b> Σχηματική απεικόνιση του ακροφυσίου και της δέσμης [41] .....	18
<b>Σχήμα 1.3:</b> Παλαιότερη και σύγχρονη σχεδίαση βελόνης [41] .....	19
<b>Σχήμα 1.4:</b> Ορισμός της διασποράς και της απόκλισης της δέσμης [37] .....	21
<b>Σχήμα 1.5:</b> Κατανομή ταχυτήτων αποκλίνουσας δέσμης [41] .....	22
<b>Σχήμα 1.6:</b> Οπτικοποίηση της επιφάνειας της δέσμης για πειραματικό μοντέλο (αριστερά) και πραγματικό υδροστρόβιλο (δεξιά) [30] .....	25
<b>Σχήμα 1.7:</b> (α)Οπτικοποίηση της ροής με τη βοήθεια στροβοσκοπίου [31] και (β) οπτικοποίηση της ροής με χρήση CFD [27].....	27
<b>Σχήμα 1.8:</b> Δέσμη στην έξοδο του ακροφυσίου για άνοιγμα βελόνης 5%, 10%, 40%, 70% και 100% [38] .....	28
<b>Σχήμα 1.9:</b> Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της διαμέτρου της δέσμης [38].....	29
<b>Σχήμα 1.10:</b> Μέτρηση διαμέτρου της δέσμης σε απόσταση 1.62 διαμέτρους κατάντι του ακροφυσίου [37] .....	30
<b>Σχήμα 1.11:</b> Εκτροπή της δέσμης στο κάτω ακροφύσιο οπτικοποιημένη μέσω αποστάσεων της επιφάνειας της δέσμης από τον διαχωριστή του σκαφιδίου [36].....	31
<b>Σχήμα 1.12:</b> Υπολογιστική προσομοίωση των δευτερευουσών ροών της δέσμης [36] .....	31
<b>Σχήμα 1.13:</b> Σύγκριση πραγματικής διαμέτρου της δέσμης πριν και μετά από την τροποποίηση [30] .....	33
<b>Σχήμα 1.14:</b> Σύγκριση βαθμού απόδοσης πριν και μετά την τροποποίηση [30].....	33
<b>Σχήμα 1.15:</b> Μετατροπή γωνιών ακροφυσίου και βελόνης [15] .....	34
<b>Σχήμα 1.16:</b> Σύγκριση βαθμού απόδοσης υδροστροβίλων [39].....	35

<b>Σχήμα 1.17:</b> Οπτικοποίηση της δέσμης μετά (αριστερά, για $z/D_o=1.61$ ) και πριν (δεξιά, για $z/D_o=1.68$ ) από την τροποποίηση του υδροστροβίλου [39] .....	35
<b>Σχήμα 1.18:</b> Μέτρηση της διασποράς της ελεύθερης δέσμης πριν και μετά την τροποποίηση [39].....	36
<b>Σχήμα 1.19:</b> Σύγκριση προφίλ ταχυτήτων σε τρεις διατομές της δέσμης μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών τιμών [28] .....	37
<b>Σχήμα 1.20:</b> Πειραματική διάταξη συστήματος LDA μέτρησης της ελεύθερης δέσμης [45] .....	38
<b>Σχήμα 1.21:</b> Κατανομή αξονικών ταχυτήτων της δέσμης για ακροφύσιο συνδεδεμένο με ευθύ σωλήνα (H=30m) [45].....	39
<b>Σχήμα 1.22:</b> Εφαπτομενικές ταχύτητες της δέσμης για ακροφύσιο συνδεδεμένο με γωνία 90° και διαταραχή στην επιφάνεια της δέσμης (H=30m) [45].....	39
<b>Σχήμα 1.23:</b> Κατανομή αξονικής ταχύτητας της δέσμης στη θέση 0.8 $D_o$ για αγωγό κλίσης 90° .	40
<b>Σχήμα 1.24:</b> Ελεύθερη δέσμη εξερχόμενη από ακροφύσιο συνδεδεμένο με ευθύ αγωγό (αριστερά) και γωνία 90° (δεξιά) ανάντι [27] .....	41
<b>Σχήμα 1.25:</b> Κλάσμα όγκου νερού-αέρα και πεδία δευτερευουσών ροών στην ελεύθερη δέσμη για διάταξη με κλίση 90° ανάντι [27].....	42
<b>Σχήμα 1.26:</b> Αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα αξονικών και εφαπτομενικών ταχυτήτων σε διατομή $2D_o$ από τη μύτη της βελόνης για διάταξη με κλίση 90° .....	42
<b>Σχήμα 1.27:</b> Οπτικοποίηση της ροής στη δέσμη και θέσεις μετρήσεων LDA [24] .....	43
<b>Σχήμα 1.28:</b> Κατανομές ταχυτήτων δέσμης (FLOW-3D) για 30m ΣΥ και $S/S_{max} = 70\%$ [24] .....	43
<b>Σχήμα 1.29:</b> Κατανομές ταχυτήτων δέσμης (CFX-4) για 30m ΣΥ και $S/S_{max} = 70\%$ [24] .....	44
<b>Σχήμα 1.30:</b> Λεπτομέρειες της εξερχόμενης από το ακροφύσιο δέσμης [24].....	44
<b>Σχήμα 1.31:</b> Κάτοψη πεδιακών γραμμών στροβιλότητας διανομέα υδροστροβίλου Pelton [33].	45
<b>Σχήμα 1.32:</b> Λεπτομέρειες των υπολογιστικών πλεγμάτων ( $\alpha$ ) ιδεατής και ( $\beta$ ) πραγματικής διάταξης δέσμης [34] .....	46
<b>Σχήμα 1.33:</b> Σύγκριση κατανομών αξονικών ταχυτήτων σε πέντε διατομές κάθετες στον άξονα ιδεατής δέσμης [34] .....	46
<b>Σχήμα 1.34:</b> Ροπή ασκούμενη από πραγματική δέσμη (RJ) και ιδανική δέσμη (IJ) στον δρομέα συναρτήσει της γωνιακής θέσης [34] .....	47
<b>Σχήμα 1.35:</b> Γράφημα διανυσμάτων ταχυτήτων στο επίπεδο $\gamma=0$ και πάχος και μορφή δεσμών για διαφορετικά ανοίγματα σε πυκνωμένο πλέγμα [18] .....	48
<b>Σχήμα 1.36:</b> Επίδραση της πύκνωσης του πλέγματος στην εγκάρσια μορφή (άνω) και στο πάχος της δέσμης (κάτω), $A_o/A_{o,BEP} = 0.5$ [18] .....	49
<b>Σχήμα 1.37:</b> Βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου, πειραματικές και αριθμητικές τιμές [18].....	49

<b>Σχήμα 1.38:</b> Σύγκριση αποτελεσμάτων κάθετης δύναμης στην πλάκα για πειραματικούς, αριθμητικούς και αναλυτικούς υπολογισμούς [20].....	51
<b>Σχήμα 1.39:</b> Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών κατανομών πίεσης στην επίπεδη πλάκα [20].....	51
<b>Σχήμα 1.40:</b> Πειραματική (αριστερή εικόνα) και υπολογιστική (δεξιά εικόνα) μορφή της δέσμης για ευθύ αγωγό ανάντι του ακροφυσίου [14] .....	52
<b>Σχήμα 1.41:</b> Πειραματική (αριστερή εικόνα) και υπολογιστική (δεξιά εικόνα) μορφή της δέσμης για γωνία 90° ανάντι του ακροφυσίου [14] .....	53
<b>Σχήμα 1.42:</b> Λεπτομέρεια της αποκόλλησης της δέσμης από το ακροφύσιο με το αντίστοιχο υπολογιστικό πλέγμα [14].....	53
<b>Σχήμα 1.43:</b> Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων στατικής πίεσης στις διακλαδώσεις του διανομέα [29].....	54
<b>Σχήμα 1.44:</b> Σύγκριση πειραματικών (μωβ καμπύλη) και αριθμητικών (πορτοκαλί καμπύλη) κατανομών κανονικοποιημένης ολικής πίεσης για δέσμη ευθεία (α) και με απόκλιση (β) [29].....	55
<b>Σχήμα 1.45:</b> Οπτικοποίηση και σχηματική απεικόνιση της ροής σε διάφορες θέσεις του σκαφιδίου [31] .....	56
<b>Σχήμα 1.46:</b> Σύγκριση αποτελεσμάτων της ογκομετρικής παροχής [26] .....	57
<b>Σχήμα 1.47:</b> Επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας του σκαφιδίου στην απόδοση του υδροστροβίλου [43] .....	58
<b>Σχήμα 1.48:</b> Εκτεταμένες φθορές στην επιφάνεια της βελόνης υδροστροβίλου Pelton [63].....	59
<b>Σχήμα 2.1:</b> Λογικό διάγραμμα χρήσης μεθόδων CFD για την επίλυση προβλημάτων ροής .....	66
<b>Σχήμα 2.2:</b> Στοιχεία τριδιάστατου και διδιάστατου πλέγματος [56] .....	70
<b>Σχήμα 2.3:</b> Προσεγγίσεις δημιουργίας πλέγματος σε διδιάστατη γεωμετρία [6] .....	71
<b>Σχήμα 2.4:</b> Παράδειγμα δημιουργίας αυτόματου πλέγματος για την ανάλυση του οριακού στρώματος σε διδιάστατη γεωμετρία [6] .....	71
<b>Σχήμα 2.5:</b> Παραδείγματα υπολογισμού αναλογίας διαστάσεων για διάφορα διδιάστατα στοιχεία [56] .....	73
<b>Σχήμα 2.6:</b> Λογικό διάγραμμα προσομοίωσης CFD .....	74
<b>Σχήμα 2.7:</b> Σχηματική αναπαράσταση πλέγματος για την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων όγκων [48].....	75
<b>Σχήμα 2.8:</b> Όγκος ελέγχου στον οποίο διακριτοποιείται η βαθμωτή εξίσωση μεταφοράς .....	76
<b>Σχήμα 2.9:</b> Απεικόνιση του σχήματος παρεμβολής δεύτερης τάξης [56] .....	77
<b>Σχήμα 2.10:</b> Λογικό διάγραμμα ροής του αλγορίθμου SIMPLE .....	81

<b>Σχήμα 2.11:</b> Λογικό διάγραμμα αλγορίθμων διαχωρισμένης επίλυσης (segregated solver) .....	81
<b>Σχήμα 2.12:</b> Λογικό διάγραμμα αλγορίθμων συζευγμένης επίλυσης (coupled solver) .....	82
<b>Σχήμα 2.13:</b> Αποσύνθεση της ταχύτητας σε μέση τιμή και μικροδιακύμανση [3] .....	87
<b>Σχήμα 2.14:</b> Το τυρβώδες οριακό στρώμα [56] .....	94
<b>Σχήμα 2.15:</b> Υποδιαίρεσεις των περιοχών του οριακού στρώματος κοντά στο τοίχωμα [3] .....	95
<b>Σχήμα 2.16:</b> Προσεγγίσεις για την επίλυση της ροής κοντά στα τοιχώματα [3] .....	96
<b>Σχήμα 2.17:</b> Κλάσματα όγκου σε πλέγμα το οποίο περιλαμβάνει διεπιφάνεια .....	101
<b>Σχήμα 3.1:</b> Υδροστροβίλος Pelton του εργαστηρίου Υδροδυναμικών Μηχανών.....	105
<b>Σχήμα 3.2:</b> Ακροφύσιο Υδροστροβίλου Pelton σε λειτουργία .....	106
<b>Σχήμα 3.3:</b> Διδιάστατο σκαρίφημα της γεωμετρίας του ακροφυσίου .....	107
<b>Σχήμα 3.4:</b> Τμήμα της γεωμετρίας του ακροφυσίου του υδροστροβίλου .....	108
<b>Σχήμα 3.5:</b> Γεωμετρία του πεδίου ροής του υδροστροβίλου .....	109
<b>Σχήμα 3.6:</b> Ισομετρική άποψη της τριδιάστατης γεωμετρίας του πεδίου ροής του υδροστροβίλου σε τομή ως προς τον άξονα z .....	110
<b>Σχήμα 3.7:</b> Δομημένο υπολογιστικό πλέγμα του πεδίου ροής (~200 χιλιάδες στοιχεία) .....	112
<b>Σχήμα 3.8:</b> Λεπτομέρεια υπολογιστικού πλέγματος του πεδίου ροής (περιοχή A) .....	112
<b>Σχήμα 3.9:</b> Λεπτομέρεια υπολογιστικού πλέγματος του πεδίου ροής (περιοχή B) .....	113
<b>Σχήμα 3.10:</b> Λεπτομέρεια υπολογιστικού πλέγματος του πεδίου ροής (περιοχή C) .....	113
<b>Σχήμα 3.11:</b> Λεπτομέρεια υπολογιστικού πλέγματος του πεδίου ροής (περιοχή D) .....	114
<b>Σχήμα 3.12:</b> Λεπτομέρεια Εναλλακτικού Πλέγματος IV (Περιοχή B) .....	118
<b>Σχήμα 3.13:</b> Λεπτομέρεια Εναλλακτικού Πλέγματος VI (Περιοχή B) .....	119
<b>Σχήμα 3.14:</b> Λεπτομέρεια πλέγματος με αυτόματη πύκνωση στο οριακό στρώμα (περιοχή B) .	120
<b>Σχήμα 3.15:</b> Μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος (μέτρηση απωλειών ισχύος) .....	121
<b>Σχήμα 3.16:</b> Μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος (μέτρηση παροχής μάζας) .....	122
<b>Σχήμα 3.17:</b> Διερεύνηση μοντέλων τύρβης .....	123
<b>Σχήμα 3.18:</b> Σύνορα του πεδίου ροής .....	125
<b>Σχήμα 3.19:</b> Σύγκριση μεθόδων προσδιορισμού ποσοτήτων τύρβης για την είσοδο.....	126
<b>Σχήμα 3.20:</b> Γράφημα παρακολούθησης σύγκλισης προσομοίωσης μόνιμης επίλυσης .....	128
<b>Σχήμα 3.21:</b> Διερεύνηση της επίδρασης της βαρύτητας και της επιφανειακής τάσης .....	131
<b>Σχήμα 3.22:</b> Ισοϋψείς καμπύλες του μέτρου της ταχύτητας .....	132
<b>Σχήμα 3.23:</b> Κατανομές ταχυτήτων δέσμης ρευστού σε πέντε διατομές .....	133
<b>Σχήμα 3.24:</b> Ισοϋψείς καμπύλες στατικής πίεσης .....	134
<b>Σχήμα 3.25:</b> Ισοϋψείς καμπύλες κλάσματος όγκου νερού-αέρα .....	135
<b>Σχήμα 3.26:</b> Πύκνωση του πλέγματος βάσει του κλάσματος όγκου νερού-αέρα.....	136



<b>Σχήμα 3.27:</b> Πύκνωση του πλέγματος βάσει της απόστασης από το τοίχωμα.....	136
<b>Σχήμα 3.28:</b> Ισοϋψείς καμπύλες κλάσματος όγκου νερού-αέρα (λεπτομέρεια) πριν (α) και μετά (β) από την τοπική πύκνωση .....	137
<b>Σχήμα 3.29:</b> Σύγκριση του πάχους της διεπιφάνειας αέρα και νερού μεταξύ του αρχικού πλέγματος και του πλέγματος έπειτα από την τοπική πύκνωση.....	138
<b>Σχήμα 4.1:</b> Σύγκριση της παροχής μάζας η οποία προκύπτει για διαφορετικά ανοίγματα της βελόνης.....	143
<b>Σχήμα 4.2:</b> Διδιάστατο σκαρίφημα της γεωμετρίας του ακροφυσίου [41] .....	144
<b>Σχήμα 4.3:</b> Λεπτομέρεια της γεωμετρίας του ακροφυσίου και διαστάσεις κόλουρου κώνου ..	144
<b>Σχήμα 4.4:</b> Μελέτη της επίδρασης της ακτίνας καμπυλότητας του ακροφυσίου .....	146
<b>Σχήμα 4.5:</b> Μελέτη της επίδρασης της ακτίνας καμπυλότητας της βελόνης.....	146
<b>Σχήμα 4.6:</b> Σχεδιασμός 3 <sup>3</sup> πλήρους παραγοντικού (α) και κεντρικού σύνθετου σχεδίου (β) για 3 μεταβλητές σχεδιασμού ( $x_1, x_2, x_3$ ) [23].....	149
<b>Σχήμα 4.7:</b> Γράφημα κανονικής πιθανότητας των υπολοίπων του μοντέλου .....	155
<b>Σχήμα 4.8:</b> Γράφημα κανονικοποιημένων υπολοίπων του μοντέλου ως προς τις προβλεπόμενες τιμές .....	156
<b>Σχήμα 4.9:</b> Γράφημα ελέγχου ακραίων τιμών .....	157
<b>Σχήμα 4.10:</b> Σύγκριση τιμών που προέκυψαν από την προσομοίωση και των αντίστοιχων προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών.....	157
<b>Σχήμα 4.11:</b> Διάγραμμα απωλειών ισχύος συναρτήσει της παροχής μάζας.....	159
<b>Σχήμα 4.12:</b> Διάγραμμα διαταραχών του μοντέλου .....	160
<b>Σχήμα 4.13:</b> Τριδιάστατη επιφάνεια της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της παροχής μάζας στις απώλειες ισχύος (γωνία βελόνης σταθερή στις 70°) .....	162
<b>Σχήμα 4.14:</b> Ισοϋψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της παροχής μάζας στις απώλειες ισχύος (γωνία βελόνης σταθερή στις 70°) .....	162
<b>Σχήμα 4.15:</b> Τριδιάστατη επιφάνεια της αλληλεπίδρασης της γωνίας βελόνης και της παροχής μάζας στις απώλειες ισχύος (γωνία ακροφυσίου σταθερή στις 130°) .....	163
<b>Σχήμα 4.16:</b> Ισοϋψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας βελόνης και της παροχής μάζας στις απώλειες ισχύος (γωνία βελόνης σταθερή στις 130°) .....	163
<b>Σχήμα 4.17:</b> Τριδιάστατη επιφάνεια της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 25 kg/s) .....	164
<b>Σχήμα 4.18:</b> Τριδιάστατη επιφάνεια της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος [παροχή μάζας σταθερή στα α)10 kg/s και β)40 kg/s] .....	165

<b>Σχήμα 4.19:</b> Ισοϋψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 10kg/s) .....	166
<b>Σχήμα 4.20:</b> Ισοϋψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 20kg/s) .....	167
<b>Σχήμα 4.21:</b> Ισοϋψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 30kg/s) .....	167
<b>Σχήμα 4.22:</b> Ισοϋψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 40kg/s) .....	168
<b>Σχήμα 4.23:</b> Συνδυαστική αναπαράσταση της επίδρασης των τριών παραμέτρων σχεδίασης στις απώλειες ισχύος (διάγραμμα κύβου).....	169
<b>Σχήμα 4.24:</b> Ισοϋψής καμπύλη συνάρτησης επιθυμίας βέλτιστης γεωμετρίας.....	170
<b>Σχήμα 4.25:</b> Διάγραμμα απωλειών ισχύος συναρτήσει της παροχής μάζας [μοντέλο k-ε realizable] .....	172
<b>Σχήμα 4.26:</b> Ισοϋψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 40kg/s) [Μοντέλο k-ε realizable].....	173
<b>Σχήμα 4.27:</b> Συνδυαστική αναπαράσταση της επίδρασης των τριών παραμέτρων σχεδίασης στις απώλειες ισχύος (διάγραμμα κύβου) [Μοντέλο k-ε realizable].....	174
<b>Σχήμα 4.28:</b> Σύγκριση των απωλειών ισχύος μεταξύ της αρχικής και των βελτιωμένων γεωμετριών ακροφυσίου σε πέντε διαφορετικά ανοίγματα βελόνης .....	175
<b>Σχήμα 4.29:</b> Διάγραμμα του ανοίγματος της βελόνης συναρτήσει της διερχόμενης παροχής μάζας για τα τρία ακροφύσια υπό εξέταση .....	176
<b>Σχήμα 4.30:</b> Σύγκριση των απωλειών ισχύος μεταξύ της αρχικής και των βελτιωμένων γεωμετριών ακροφυσίου υπολογισμένα στην ίδια παροχή μάζας.....	176
<b>Σχήμα 4.31:</b> Κατανομή ταχυτήτων του αρχικού ακροφυσίου (90°, 50°) σε πέντε διαφορετικά ανοίγματα βελόνης .....	177
<b>Σχήμα 4.32:</b> Κατανομή ταχυτήτων του βελτιωμένου ακροφυσίου (110°, 70°) σε πέντε διαφορετικά ανοίγματα βελόνης.....	178
<b>Σχήμα 4.33:</b> Κατανομή ταχυτήτων του βελτιωμένου ακροφυσίου (160°, 90°) σε πέντε διαφορετικά ανοίγματα βελόνης.....	178
<b>Σχήμα 4.34:</b> Σύγκριση ισοϋψών καμπυλών ταχύτητας μεταξύ των γεωμετριών με συνδυασμό γωνιών: α) (90°, 50°) και β) (160°, 90°) [ $\dot{m}= 25 \text{ kg/s}$ , $H= 150 \text{ mΣΥ}$ ].....	180
<b>Σχήμα 4.35:</b> Επίδραση του πάχους της βελόνης στις απώλειες ισχύος του ακροφυσίου.....	182
<b>Σχήμα 4.36:</b> Επίδραση του ύψους πτώσης στις απώλειες ισχύος του ακροφυσίου .....	184

<b>Σχήμα 4.37:</b> Επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας των τοιχωμάτων του ακροφυσίου και της βελόνης στις απώλειες ισχύος (υψηλές τιμές παροχής μάζας).....	185
<b>Σχήμα 4.38:</b> Επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας των τοιχωμάτων του ακροφυσίου και της βελόνης στις απώλειες ισχύος (χαμηλές τιμές παροχής μάζας) .....	186
<b>Σχήμα 4.39:</b> Διαφορετικές μορφές του χείλους του ακροφυσίου: (α) απότομη και (β) πεπλατυσμένη απόληξη [41].....	187
<b>Σχήμα 4.40:</b> Επίδραση της μορφής του στομίου του ακροφυσίου στις απώλειες ισχύος .....	187
<b>Σχήμα 4.41:</b> Λεπτομέρεια των ισοϋψών καμπυλών του κλάσματος όγκου νερού-αέρα και μορφή της εξερχόμενης δέσμης ρευστού.....	189
<b>Σχήμα 4.42:</b> Σχεδιασμός πειραμάτων Box-Behnken για 3 μεταβλητές σχεδιασμού ( $x_1, x_2, x_3$ ) .	189
<b>Σχήμα 4.43:</b> Ισοϋψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 25 kg/s) [σχεδιασμός πειράματος Box- Behnken] .....	191
<b>Σχήμα 4.44:</b> Ισοϋψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 35 kg/s) [σχεδιασμός πειράματος Box- Behnken] .....	191



## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 1.1:</b> Χαρακτηριστικά μεγέθη της ροής σε υδροστρόβιλο Pelton [31] .....	24
<b>Πίνακας 2.1:</b> Συσχετισμός βαθμωτής ποσότητας $\varphi$ με την αντίστοιχη εξίσωση μεταφοράς.....	76
<b>Πίνακας 2.2:</b> Διαθέσιμα χωρία πεδίου και είδη οριακών συνθηκών για ασυμπιεστη ροή.....	84
<b>Πίνακας 2.3:</b> Λίστα διαθέσιμων μοντέλων τύρβης RANS.....	88
<b>Πίνακας 2.4:</b> Σύνοψη των χαρακτηριστικών των διαθέσιμων μοντέλων τύρβης.....	99
<b>Πίνακας 3.1:</b> Παράμετροι γεωμετρίας ακροφυσίου .....	107
<b>Πίνακας 3.2:</b> Ποιοτικά χαρακτηριστικά του κατασκευασμένου πλέγματος.....	115
<b>Πίνακας 3.3:</b> Σύνοψη χαρακτηριστικών πλεγμάτων .....	118
<b>Πίνακας 3.4:</b> Σύνοψη χαρακτηριστικών πλεγμάτων με αυτόματη πύκνωση για το οριακό στρώμα .....	119
<b>Πίνακας 3.5:</b> Βασικά χαρακτηριστικά επιλύτη για την μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος.....	120
<b>Πίνακας 3.6:</b> Ιδιότητες ροής των προσομοιώσεων CFD .....	124
<b>Πίνακας 3.7:</b> Καθορισμός οριακών συνθηκών προβλήματος.....	124
<b>Πίνακας 3.8:</b> Βασικά χαρακτηριστικά επιλύτη για τις προσομοιώσεις της μελέτης βελτιστοποίησης .....	130
<b>Πίνακας 3.9:</b> Σύγκριση του πάχους της δέσμης προσομοίωσης CFD με θεωρητικές εξισώσεις	135
<b>Πίνακας 3.10:</b> Μεταβολή αριθμού κελιών του πλέγματος κατά την τοπική πύκνωση .....	137
<b>Πίνακας 4.1:</b> Καθορισμός ακτίνων καμπυλότητας ακροφυσίου και βελόνης .....	147
<b>Πίνακας 4.2:</b> Εύρος τιμών των παραμέτρων σχεδίασης .....	148
<b>Πίνακας 4.3:</b> Εύρος τιμών των παραμέτρων σχεδίασης βάσει του σύνθετου κεντρικού σχεδίου (CCD).....	150
<b>Πίνακας 4.4:</b> Σημεία διεξαγωγής προσομοιώσεων βάσει του σύνθετου κεντρικού σχεδίου (CCD).....	151
<b>Πίνακας 4.5:</b> Αποτελέσματα προσομοιώσεων CFD βάσει του σχεδιασμού πειραμάτων CCD και με τη χρήση των μοντέλων τύρβης SST και k-ε realizable .....	151
<b>Πίνακας 4.6:</b> Στατιστικά των διαθέσιμων μοντέλων προσέγγισης .....	153
<b>Πίνακας 4.7:</b> Στατιστική ανάλυση της διακύμανσης του μοντέλου τετραγωνικής παλινδρόμησης για τις απώλειες ισχύος (SST) .....	154
<b>Πίνακας 4.8:</b> Σύνοψη των στατιστικών του μοντέλου τετραγωνικής παλινδρόμησης.....	155
<b>Πίνακας 4.9:</b> Σύνοψη των στατιστικών του μοντέλου τετραγωνικής παλινδρόμησης [μοντέλο k-ε realizable].....	171
<b>Πίνακας 4.10:</b> Εύρος τιμών των παραμέτρων σχεδίασης .....	190

<b>Πίνακας 4.11:</b> Σύνοψη των στατιστικών του μοντέλου τετραγωνικής παλινδρόμησης [σχεδιασμός πειράματος Box- Behnken] .....	190
---	-----

## Κατάλογος Συντμήσεων

AMG	Algebraic Multigrid
AR	Aspect Ratio
CAD	Computer-Aided Design
CCD	Central Composite Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CSFM	Continuum Surface Force Model
CSSM	Continuum Surface Stress Model
DE	Design Expert
DM	Design Modeler
DNS	Direct Numerical Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
DOE	Design Of Experiments
EWT	Enhanced Wall Treatment
FSM	Fractional Step
FVM	Finite Volume Method
LDA	Laser Doppler Anemometry
LES	Large Eddy Simulation
NITA	Non-Iterative Time Advancement
NS	Navier Stokes
OQ	Orthogonal Quality
PISO	Pressure-Implicit with Splitting Operators
PRESTO!	Pressure Staggering Option
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
RKE	k- $\epsilon$ realizable
RNG	Renormalization Group
RSM	Response Surface Methodology
SIMPLE	Semi-Implicit method for Pressure Linked Equations
SIMPLEC	SIMPLE-Consistent
SKE	k- $\epsilon$ standard
SST	Shear-Stress Transport
SW	Solidworks
VC	Vena Contracta
VOF	Volume of Fluid





## Εισαγωγή

Τα θεωρητικά στοιχεία σε αυτό το κεφάλαιο προέρχονται ως επί το πλείστον από το [53], εκτός και αν αναφέρεται διαφορετικά.

### I. Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Κάθε χρόνο υπολογίζεται ότι παράγονται γύρω στις 20,300 TWh ηλεκτρικής ενέργειας, εκ των οποίων τα 3,300 TWh (περίπου 17% δηλαδή) προέρχεται από υδροηλεκτρικά έργα (στοιχεία για το 2008 από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας-IEA) [60]. Η ενέργεια από τα υδροηλεκτρικά έργα αντιπροσωπεύει το 20% περίπου της εκμεταλλεύσιμης υδραυλικής ενέργειας σε ολόκληρο τον πλανήτη, και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι υδατοπτώσεις είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, υπάρχει σημαντικό περιθώριο ανάπτυξης της στο προσεχές μέλλον. Σε αυτό συντείνει και το γεγονός ότι οι υπόλοιπες κύριες μορφές παραγωγής ενέργειας όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας και το φυσικό αέριο όντας μη ανανεώσιμοι πόροι εμφανίζουν το ενδεχόμενο εξάντλησής τους στο μέλλον, ενώ επίσης εκπέμπουν απόβλητα ή κατάλοιπα, μολύνοντας το περιβάλλον.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο ηλεκτρισμός είναι από τις λίγες μορφές ενέργειας που μεταφέρονται εύκολα από το σημείο παραγωγής στο σημείο κατανάλωσης. Τα υδροηλεκτρικά έργα έχουν το πρόσθετο πλεονέκτημα να παραλαμβάνουν και να απορρίπτουν φορτίο με μεγάλη ταχύτητα. Χάρη σε αυτή τους την ιδιότητα, είναι δυνατή η παρακολούθηση της μεταβολής της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια ώστε να καλύπτονται οι αιχμές ζήτησης του δικτύου στο οποίο είναι διασυνδεδεμένα.

Κατά την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας η υδραυλική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια του υγρού (φυσικό νερό στην πλειοψηφία των περιπτώσεων) μετατρέπεται αρχικά σε μηχανική και έπειτα σε ηλεκτρική. Οι υδροστροβίλοι είναι οι μηχανές που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της ενέργειας του υγρού σε μηχανική. Για να είναι δυνατή η αποτελεσματική μετατροπή, απαιτείται συνεχής ροή του διερχόμενου υγρού ενώ γίνεται ρύθμιση ώστε η παροχή στον υδροστροβίλο να είναι σταθερή. Το τμήμα του υδροστροβίλου στο οποίο συμβαίνει η μετατροπή ονομάζεται δρομέας. Ο δρομέας είναι το στρεφόμενο τμήμα της μηχανής και καθώς αναπτύσσεται κινητήρια ροπή σε αυτό, μετατρέπεται η ενέργεια του υγρού σε μηχανική.

Έπειτα, λαμβάνει χώρα η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας που παράχθηκε σε ηλεκτρική. Για να συμβεί αυτό, η άτρακτος του δρομέα βρίσκεται σε σύζευξη με άτρακτο ηλεκτρικής γεννήτριας. Δια μέσου της κοινής άτρακτος η γεννήτρια παραλαμβάνει το μηχανικό φορτίο του υδροστροβίλου και το μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια [52].

### II. Διάκριση των Υδροστροβίλων

Οι υδροστροβίλοι διακρίνονται αρχικά με κριτήριο τον βαθμό αντιδράσεως: οι υδροστροβίλοι αντιδράσεως είναι ολικής προσβολής, δηλαδή όλος ο δρομέας λειτουργεί αξονοσυμμετρικά, ενώ οι υδροστροβίλοι δράσεως (βαθμός αντίδρασης  $r_e = 0$ ) είναι μερικής προσβολής και σε κάθε χρονική στιγμή τμήμα μόνο του δρομέα συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή.

Ως βαθμός αντίδρασης σε μια βαθμίδα ορίζεται ο λόγος της μεταβολής της δυναμικής ενέργειας του ρευστού διαμέσου του δρομέα προς την μεταβολή της δυναμικής ενέργειας μεταξύ

εισόδου και εξόδου της βαθμίδας. Στην περίπτωση ασυμπίεστου ρευστού η δυναμική ενέργεια ή ενέργεια εντατικής καταστάσεως εκφράζεται από την στατική πίεση  $p$  του ρευστού. Συνεπώς, στους υδροστροβίλους δράσης η ισχύς παράγεται αποκλειστικά από την ορμή του νερού.

### Υδροστρόβιλοι Ολικής Προσβολής

Το βασικότερο χαρακτηριστικό των υδροστροβίλων αντιδράσεως είναι η πλήρης βύθιση του δρομέα στο ρέον υγρό. Η λειτουργία του δρομέα είναι αξονοσυμμετρική, συνεπώς είναι απαραίτητο το τμήμα εισόδου να περιβάλλει τον δρομέα, ώστε να εξασφαλίζονται 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 άλλωστε οι υδροστρόβιλοι ολικής προσβολής ονομάζονται και υδροστρόβιλοι αντιδράσεως.

Οι υδροστρόβιλοι ολικής προσβολής γενικά περιστρέφονται σε μεγάλες ταχύτητες, ακόμα και για μικρό υδραυλικό ύψος ροής. 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.

Ένας δεύτερος τρόπος διάκρισης των υδροστροβίλων, από κατασκευαστικής πλευράς μπορεί να γίνει βάσει της κύριας κατεύθυνσης του ρευστού στον ρότορα. Έτσι σε μία μηχανή ακτινικής ροής, το ρευστό εισέρχεται παράλληλα με τον άξονα της περιστρεφόμενης ατράκτου, ενώ σε μία μηχανή αξονικής ροής το ρευστό κινείται συνεχώς παράλληλα με τον άξονα περιστροφής της μηχανής. Ένας τρίτος τύπος μηχανής, ο στρόβιλος μεικτής ροής, αποτελεί ενδιάμεση περίπτωση των δύο πρώτων, όπου το ρευστό εισέρχεται αξονικά και εξέρχεται σε κάποια γωνία μεταξύ αξονικής και ακτινικής κατεύθυνσης.

Αξίζει να σημειωθεί τέλος ότι οι υδροστρόβιλοι διακρίνονται σε δύο ακόμα κατηγορίες, συγκεκριμένα σε οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα, ανάλογα με το αν ο άξονας της μηχανής είναι παράλληλος με το έδαφος ή κάθετος σε αυτό αντίστοιχα.

Έτσι, με βάση τις προαναφερθείσες κατηγορίες υπάρχουν οι εξής τύποι υδροστροβίλων ολικής προσβολής:

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

Από τους άνωθεν τύπους υδροστροβίλων, οι Francis (James Francis, 1848) συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση μέσων τιμών υδραυλικών πτώσεων της τάξεως των 50 έως 500 mΣΥ. Αντίθετα, οι μηχανές αξονικής ροής, με κυριότερο εκπρόσωπο τους Kaplan (Viktor

Karlan, 1913), προτιμούνται για χρήση σε μικρές τιμές υδραυλικής πτώσης και συγκεκριμένα σε πτώσεις μικρότερες των 50 mΣΥ.

### Υδροστρόβιλοι Μερικής Προσβολής (Υδροστρόβιλοι Δράσης)

#### *Πεδίο Εφαρμογής των Υδροστροβίλων Μερικής Προσβολής-Πλεονεκτήματα*

Για μεγάλες τιμές της υδραυλικής πτώσης (Η μεγαλύτερο των 500 mΣΥ  $\approx$  50 bar, έως και 1000 mΣΥ) είναι προτιμότερη η κατασκευή και χρήση υδροστροβίλων μερικής προσβολής. Σε αυτές τις περιπτώσεις, δηλαδή όταν είναι διαθέσιμη πολύ υψηλή ενέργεια ανά μονάδα μάζας και σε συνδυασμό με σχετικά μικρές παροχές, είναι προτιμότεροι οι υδροστρόβιλοι μερικής προσβολής για τους εξής λόγους:

- Η ταχύτητα της ροής είναι πολύ υψηλή, το οποίο σε συνδυασμό με τις μικρές παροχές, άρα και τις μικρές διατομές, έχει ως αποτέλεσμα την υπερβολική αύξηση των απωλειών λόγω τριβής στο εσωτερικό της μηχανής, άρα και τη μείωση του βαθμού απόδοσης.
- Η τιμή της στατικής πίεσης είναι πολύ υψηλή με αποτέλεσμα να γίνεται προβληματική η μηχανική αντοχή του τμήματος εισόδου αν αυτό έχει τη μορφή σπειροειδούς κελύφους (περίπτωση υδροστροβίλου Francis), ενώ στην περίπτωση του υδροστροβίλου Pelton, μόνο το τμήμα του ακροφυσίου τροφοδοσίας υπόκειται σε σημαντική τιμή στατικής πίεσης.
- Η σημαντική διαφορά της στατικής πίεσης ανάντι και κατάντι του δρομέα θα είχε ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση των ογκομετρικών απωλειών στο εσωτερικό της μηχανής εάν αυτός ήταν ολικής προσβολής ή αντίθετα την κατασκευή πολύπλοκων και δαπανηρών λαβυρίνθων για τη διατήρηση των ογκομετρικών απωλειών σε αποδεκτό επίπεδο.

Η κυριότερη διαφορά των υδροστροβίλων μερικής προσβολής σε σχέση με τους υδροστροβίλους ολικής προσβολής έγκειται στο ότι η ροή δεν είναι αξονοσυμμετρική και κάθε χρονική στιγμή τροφοδοτείται τμήμα μόνο του δρομέα, δηλαδή ένα, δύο ή τρία σκαφίδια ανά ελεύθερη δέσμη. Συνεπώς, κάθε χρονική στιγμή μόνο το τμήμα που τροφοδοτείται συμβάλλει ουσιαστικά στην μετατροπή ενέργειας για την οποία είναι υπεύθυνος ο δρομέας. Λόγω του ότι ολόκληρος ο δρομέας λειτουργεί σε χώρο όπου επικρατεί ομοιομορφία στις συνθήκες στατικής πίεσης, ο βαθμός αντιδράσεως τους είναι μηδενικός. Για τον λόγο αυτό ονομάζονται και στρόβιλοι δράσης.

Ένα πλεονέκτημα των υδροστροβίλων μερικής προσβολής και ιδιαίτερα του Pelton είναι ότι η καμπύλη του ολικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει του φορτίου είναι σχεδόν επίπεδη. Ανάλογα και με τον αριθμό των ακροφυσίων η περιοχή λειτουργίας είναι πολύ εκτεταμένη, περίπου 10-100% της μέγιστης ισχύος και μάλιστα με βαθμό απόδοσης πολύ κοντά στον μέγιστο. Έτσι, επιτρέπεται η λειτουργία της μηχανής για ένα μεγάλο εύρος της τιμής της παροχής με πολύ καλό βαθμό απόδοσης, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα που δουλεύουν χωρίς ανάντι ταμιευτήρα. Άλλωστε, οι υδροστρόβιλοι μερικής προσβολής έχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία λειτουργίας σε σχέση με τους υδροστροβίλους ολικής προσβολής. Ο υδροηλεκτρικός σταθμός δεν κινδυνεύει να πλημμυρίσει και οι υπερπιέσεις στον αγωγό προσαγωγής είναι μικρότερης έντασης και ελεγχόμενες λόγω της δυνατότητας εκτροπής του

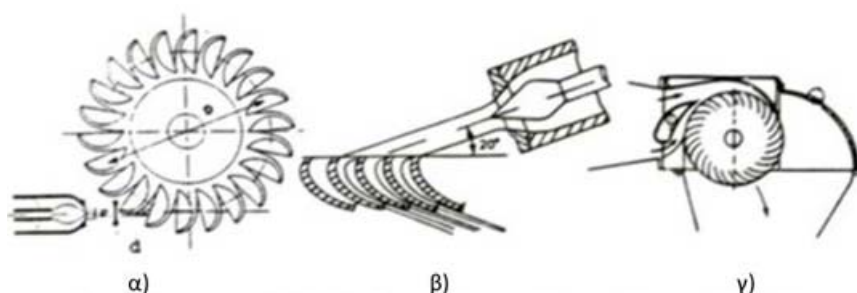
νερού.

Πρόσθετα πλεονεκτήματα των υδροστροβίλων δράσης σε σχέση με τους αντιδράσεως είναι η μεγαλύτερη αντοχή σε άμμο, χώμα και γενικά σωματίδια τα οποία μπορεί να μεταφέρονται από το νερό και τα οποία ενδέχεται να προκαλέσουν φθορά στη μηχανή. Επίσης, έχουν γενικότερα μικρότερο κόστος κατασκευής αλλά και συντήρησης, καθώς είναι ευκολότερη η πρόσβαση στα περισσότερα τμήματα της μηχανής.

Ωστόσο, το κυριότερο μειονέκτημα των υδροστροβίλων μερικής προσβολής είναι η ακαταλληλότητα τους για χρήση σε μικρές διαθέσιμες υδραυλικές πτώσεις. Οι χαμηλές ειδικές ταχύτητες που θα παρουσίαζαν σε τέτοιες περιπτώσεις, θα απαιτούσαν ειδικό σύστημα που θα αύξανε σε μεγάλο βαθμό τις στροφές ώστε να είναι δυνατή η σύζευξη της ατράκτου του δρομέα με τη γεννήτρια. Ακόμα, ο βαθμός απόδοσής τους είναι αρκετά υψηλός, εφόσον φτάνει το 90%, όχι όμως τόσο υψηλός όσο του Francis ο οποίος σε σημεία λειτουργίας κοντά στο κανονικό πετυχαίνει ακόμα καλύτερο βαθμό απόδοσης.

Οι κυριότεροι τύποι υδροστροβίλων δράσης είναι οι ακόλουθοι:

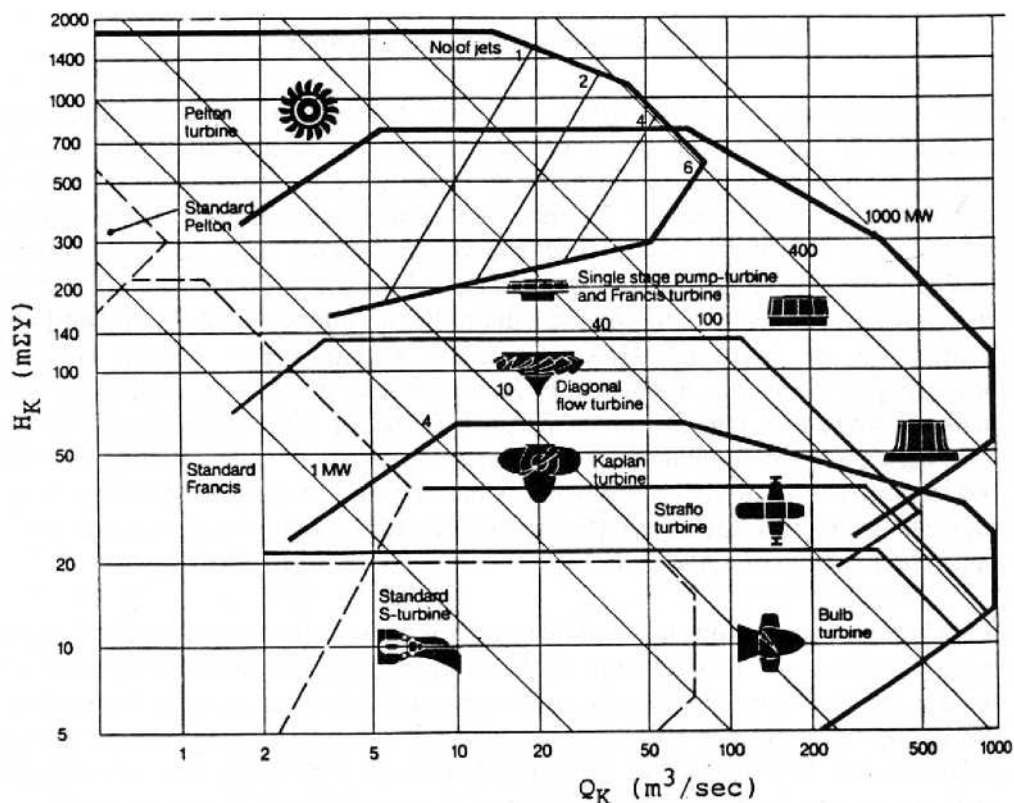
- Pelton (Σχήμα II.1-α)
- Turgo (Σχήμα II.1-β)
- Cross-Flow (Σχήμα II.1-γ)



**Σχήμα II.1:** Διατάξεις Υδροστροβίλων Δράσης

Οι υδροστροβίλοι τύπου Pelton κατασκευάζονται για μεγάλο εύρος τιμών ισχύος, από μερικά KW έως εκατοντάδες MW. Είναι κατάλληλοι για μεγάλες τιμές της υδραυλικής πτώσης και σχετικά μικρές παροχές. Οι υδροστροβίλοι τύπου Cross-Flow εμφανίζουν σχεδόν μηδενικό βαθμό αντίδρασης στο κανονικό σημείο λειτουργίας και προτιμούνται σε περιπτώσεις τιμής ισχύος μικρότερης των 2 MW και τιμές υδραυλικής πτώσης μικρότερης των 100m. Οι υδροστροβίλοι τύπου Turgo τέλος, αν και συναντώνται σπανίως πλέον, προτιμούνται για τιμές υδραυλικής πτώσης μεταξύ 15 και 300 m. Ουσιαστικά οι δύο τελευταίοι χρησιμοποιούνται για εύρη υψών μεταξύ των υδροστροβίλων ολικής προσβολής και του Pelton. Αξίζει να σημειωθεί πως ο στροβίλος Cross-Flow θεωρείται υδροστροβίλος δράσης, λόγω των συνθηκών ομοιόμορφης στατικής πίεσης στο δρομέα του. Η τροφοδοσία του νερού στο τμήμα εισόδου του, ωστόσο, δεν πραγματοποιείται με ακροφύσιο ίδιας μορφής με τους υδροστροβίλους Pelton και Turgo. Για το λόγο αυτό δεν θα παρουσιαστεί η γενική περιγραφή λειτουργίας του συγκεκριμένου υδροστροβίλου στην υποενότητα III.

Στο Σχήμα II.2 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα όπου απεικονίζονται οι συνθήκες κάτω από τις οποίες προτιμάται ο κάθε υδροστροβίλος.



**Σχήμα II.2:** Διάγραμμα επιλογής του τύπου υδροστροβίλου συναρτήσει της υδραυλικής πτώσης στο κανονικό σημείο λειτουργίας (σύμφωνα με Sulzer-Escher Wyss)

### III. Γενική Περιγραφή Υδροστροβίλων Μερικής Προσβολής

Τα κύρια μέρη των υδροστροβίλων μερικής προσβολής είναι - όπως και στους στροβίλους μερικής προσβολής - τα εξής:

- Τμήμα Εισόδου
- Δρομέας
- Τμήμα Εξόδου

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελούνται οι υδροστροβίλοι μερικής προσβολής, με ιδιαίτερη έμφαση στον Pelton μιας και έχει επικρατήσει των υπολοίπων, και οι όποιες διαφορές μεταξύ τους, μαζί με μία σύντομη ιστορική αναδρομή στο ιστορικό κατασκευής τους.

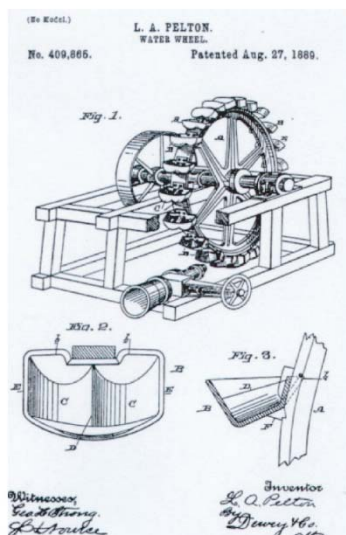
#### Υδροστροβίλος Pelton

Ο υδροστροβίλος Pelton αποτελεί ουσιαστικά εξέλιξη του παραδοσιακού υδρόμυλου και στηρίζεται στην εμπειρική γνώση ότι για να αποδώσει το νερό την μέγιστη μηχανική ενέργεια θα πρέπει να εισέρχεται με ώθηση και να εξέρχεται με μηδενική ταχύτητα. Αυτή είναι η βασικότερη αρχή των υδροστροβίλων Pelton μέχρι σήμερα.

Το 1880 ο Lester Pelton (1829-1908) επινόησε το σκαφίδιο το οποίο διαχώριζε τη δέσμη στα δύο. Αυτή η γεωμετρία έχει επικρατήσει ως σήμερα και προς τιμήν του στον συγκεκριμένο τύπο υδροστροβίλου δόθηκε το όνομα του. Στο Σχήμα III.3 παρουσιάζεται το αυθεντικό σχέδιο το οποίο

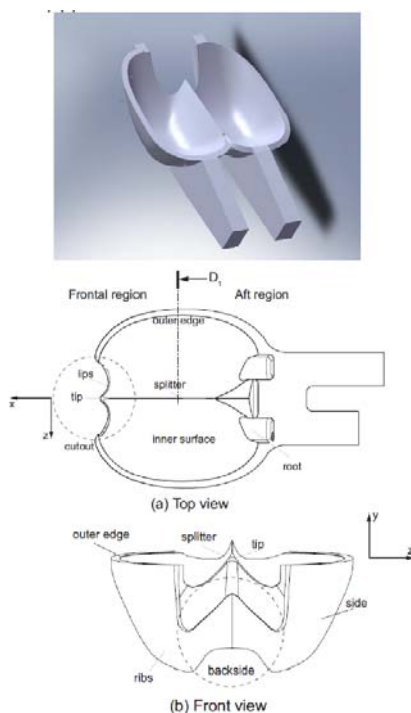
χρησιμοποίησε ο Pelton για να κατοχυρώσει την πατέντα του. Το μοντέλο άρχισε να χρησιμοποιείται πρώτα στην Αμερική και μετά στην Ευρώπη και από το 1900 ως το 1910 είχε αντικαταστήσει τις διάφορες γεωμετρίες που είχαν αναπτυχθεί [63].

Η γεωμετρία αυτή βέβαια είναι απλοϊκή, αν και ο βαθμός απόδοσής της έφτανε ως το 82%, τιμή αρκετά υψηλή ακόμα και για τα σημερινά δεδομένα.



**Σχήμα III.3:** Αυθεντικό σχέδιο του L. Pelton για την κατοχύρωση της πατέντας του [50]

Το 1899 εισήχθει η μοντέρνα μορφή του σκαφιδίου με το ελλειψοειδές σχήμα, τα λεία τοιχώματα και την εγκοπή ώστε η εισαγωγή της δέσμης να γίνεται πιο ομαλά. Στο Σχήμα III.4 παρουσιάζεται το σχέδιο ενός σύγχρονου σκαφιδίου με τα βασικά του μέρη.



**Σχήμα III.4:** Σύγχρονη σχεδίαση σκαφιδίων υδροστροβίλου Pelton [31]

Η εξέλιξη των υδροστροβίλων Pelton είναι τέτοια, που πλέον η απόδοσή τους για μεγάλα υδροηλεκτρικά φτάνει το 90% και σε πολύ ειδικές συνθήκες ως το 94%. Για μικρότερες και για πιο απλές γεωμετρικές, συνηθισμένοι βαθμοί απόδοσης είναι από 80 ως 85%. Το μέγεθός τους έχει αυξηθεί εντυπωσιακά, με τον μεγαλύτερο εξ' αυτών να βρίσκεται τοποθετημένος στην Ελβετία, στο υδροηλεκτρικό εργοστάσιο του Bieudron, όπου βρίσκονται εγκατεστημένοι τρεις υδροστρόβιλοι κατακόρυφου άξονα με 5 ακροφύσια ο καθένας. Συνολικά, η εγκατάσταση παράγει 1269 MW ισχύος (423 MW ο καθένας), το ολικό ύψος είναι 1869 m, η ολική παροχή είναι  $75 \text{ m}^3/\text{s}$ , ενώ ο βαθμός απόδοσής του πάνω από 92% (έχει μετρηθεί στα 92.37%) [63].

Όπως προαναφέρθηκε, τα κύρια μέρη του υδροστροβίλου Pelton είναι - όπως και στους υδροστροβίλους μερικής προσβολής - τα εξής:

- Τμήμα Εισόδου
- Δρομέας, ο οποίος αποτελείται από σκαφίδια
- Τμήμα Εξόδου

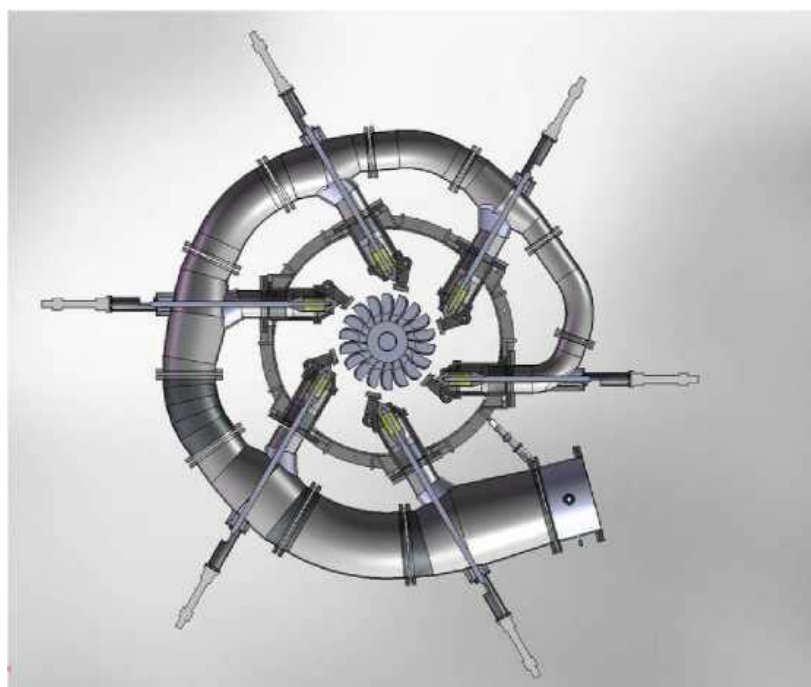
**α) Τμήμα εισόδου:** Το τμήμα εισόδου του υδροστροβίλου Pelton αρχίζει από την σφαιρική βάνα, στα άκρο του αγωγού προσαγωγής, και καταλήγει στα ακροφύσια τροφοδοσίας, σκοπός των οποίων είναι η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του υγρού σε κινητική, σχηματίζοντας το κάθε ένα μια δέσμη κυκλικής διατομής. Η ρύθμιση της παροχής επιτυγχάνεται μέσω βελόνας, η οποία μετακινείται κατά τον άξονα του ακροφυσίου μέσω, υδραυλικού συνήθως, συστήματος. Με την μετακίνηση της βελόνας μεταβάλλεται η διατομή διέλευσης της παροχής, συνεπώς η διάμετρος της δέσμης και άρα μεταβάλλεται η παροχή.

Όπως προαναφέρθηκε, ένας υδροστρόβιλος Pelton μπορεί να έχει δύο μορφές ανάλογα με το επίπεδο στο οποίο βρίσκεται ο άξονάς του. Έτσι, αν βρίσκεται στο παράλληλο προς το έδαφος επίπεδο ονομάζεται οριζοντίου άξονα, αλλιώς αν ο άξονας βρίσκεται κάθετα στο έδαφος ονομάζεται κατακόρυφου άξονα. Οι υδροστρόβιλοι οριζοντίου άξονα έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι ευκολότερο να συντηρηθούν, όμως έχουν μεγαλύτερο μέγεθος εγκατάστασης, ενώ το αντίστροφο συμβαίνει με τους κατακόρυφους υδροστροβίλους. Ένας οριζόντιος υδροστρόβιλος Pelton έχει συνήθως ένα ή δύο ακροφύσια ενώ ένας κατακόρυφος μπορεί να έχει περισσότερα, δηλαδή έως 6 ακροφύσια. Σε γενικές γραμμές, όσα περισσότερα ακροφύσια έχει ένα υδροστρόβιλος, τόσο μεγαλύτερη ισχύ παράγει. Ο λόγος που υπάρχουν αυτά τα όρια στον αριθμό των ακροφυσίων που διαθέτει ένας στρόβιλος είναι η ελαχιστοποίηση της επίδρασης της δέσμης που εξέρχεται από κάθε ακροφύσιο στις δέσμες των υπολοίπων.

Το ακροφύσιο υπόκειται σε μεγάλες καταπονήσεις λόγω των υψηλών τιμών τόσο της στατικής πίεσης, όσο και των μεγάλων ταχυτήτων που αναπτύσσονται στην περιοχή. Για τον λόγο αυτό απαιτείται στιβαρή κατασκευή. Συνήθως, για την κατασκευή του σώματος του ακροφυσίου χρησιμοποιείται χυτοχάλυβας. Το άκρο της βελόνης κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα και αντικαθίσταται από καινούριο ανά κάποιες ώρες λειτουργίας, καθώς υφίσταται διάβρωση λόγω της υψηλής ταχύτητας της ροής και των σωματιδίων που αυτή μεταφέρει. Σε περίπτωση ανάγκης γρήγορης απόρριψης του φορτίου, κατασκευάζεται όνυχας εκτροπής της δέσμης, αμέσως μετά τη διατομή του ακροφυσίου, εκτρέποντας τη δέσμη ώστε να μηδενιστεί η αναπτυσσόμενη ροπή στον δρομέα. Ταυτόχρονα η παροχή της δέσμης μειώνεται μέσω κλεισίματος της βελόνης, ώστε η υπερπίεση λόγω του φαινομένου του υδραυλικού πλήγματος να μην ξεπερνά τις επιτρεπόμενες τιμές.

**β) Δρομέας:** Ο άξονας του δρομέα μπορεί να είναι οριζόντιος ή κατακόρυφος. Στην κατακόρυφη διάταξη, το βάρος της γεννήτριας και του στροφείου της παραλαμβάνεται από ωστικό έδρανο. Στους υδροστροβίλους Pelton με περισσότερα ακροφύσια, είναι προτιμότερη η κατακόρυφη διάταξη του άξονα, ώστε όλα να βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο και να μην παρενοχλείται σημαντικά η λειτουργία τους από τα απόνερα των σκαφιδίων. Το νερό μοιράζεται στα ακροφύσια με τη βοήθεια του συστήματος διανομής, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα III.5, όπου απεικονίζεται υδροστροβίλος κατακόρυφου άξονα με έξι ακροφύσια. Ο δρομέας φέρει στην περιφέρεια σκαφίδια. Το πλήθος των σκαφιδίων κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 20-22. Ο δρομέας κατασκευάζεται είτε ολόσωμος, είτε τα σκαφίδια είναι ανεξάρτητα και προσαρμόζονται στον δρομέα μέσω κοχλίωσης και κωνικής ασφάλειας.

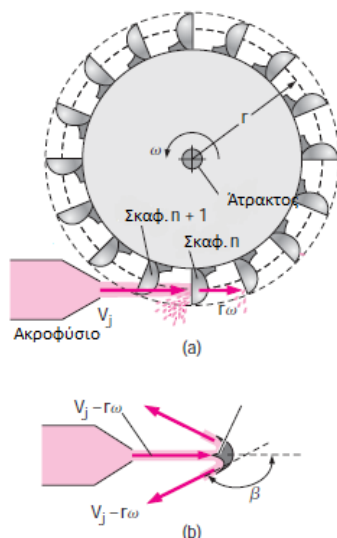
Σε αντίθεση με τους υδροστροβίλους ολικής προσβολής, όπου το φορτίο που δέχονται τα πτερύγια παραμένει σταθερό, τα σκαφίδια του υδροστροβίλου Pelton υπόκεινται σε μέγιστη ώθηση από την πίεση του ρευστού, μόνο όταν αυτά βρίσκονται στην πορεία της δέσμης. Το φορτίο έπειτα παύει, καθιστώντας την καταπόνηση που δέχεται το μέταλλο από αυτή την ξαφνική εναλλαγή φορτίων ιδιαίτερα επιβαρυντική. Λόγω των πολύ ισχυρών δυνάμεων που δέχονται τα σκαφίδια και της διάβρωσης που υφίστανται από την ροή, αυτά κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα.



**Σχήμα III.5:** Σκαρίφημα υδροστροβίλου Pelton κατακόρυφου άξονα με έξι ακροφύσια

**γ) Σκαφίδια:** Στο Σχήμα III.4 απεικονίζεται η τυπική μορφή ενός σύγχρονου σκαφιδίου [31]. Το κάθε σκαφίδιο μοιάζει σαν να είναι χωρισμένο στη μέση από μία μυτερή ακμή (splitter) και να αποτελείται από δύο κοιλώματα τα οποία είναι συμμετρικά ως προς το κάθετο στο μέσο του σκαφιδίου επίπεδο. Η διαμόρφωση αυτή είναι απαραίτητη ώστε το μέσο του σκαφιδίου - στο οποίο προσκρούει και η δέσμη του υγρού - να μην αποτελεί νεκρό σημείο. Στην άκρη του σχηματίζει γωνία (tip) η οποία αποτελεί το πρώτο σημείο του σκαφιδίου που έρχεται σε επαφή με τη δέσμη.





**Σχήμα III.6:** Λειτουργικό διάγραμμα υδροστροβίλου Pelton [9]

Ένα τμήμα του εξωτερικού άκρου του σκαφιδίου φέρει εγκοπή, όπως είναι ορατό και στο Σχήμα III.4. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους: αφενός για να καταφέρει η μεγαλύτερη ποσότητα της δέσμης να διέρχεται από το σκαφίδιο που δεν είναι ευθυγραμμισμένο με αυτή (σκαφίδιο  $n+1$  στο Σχήμα III.6) και να προσπίπτει στο πλήρως ευθυγραμμισμένο με αυτή σκαφίδιο (σκαφίδιο  $n$  στο Σχήμα III.6) [9]. Με αυτό τον τρόπο είναι εφικτή η εκμετάλλευση της μέγιστης δυνατής ποσότητας ορμής της δέσμης για την παραγωγή ισχύος από την άτρακτο της μηχανής. Επιπροσθέτως, η τομή αυτή στα σκαφίδια αποτρέπει την εκτροπή του ρευστού προς το κέντρο του δρομέα όταν η δέσμη προσκρούει αρχικά στο σκαφίδιο.

Ο σχεδιασμός των σκαφιδίων πραγματοποιείται εμπειρικά, αλλά και βάσει της δυνατότητας ανάλυσης της ιδιαίτερα περίπλοκης τυρβώδους, διφασικής ροής στον δρομέα με τη χρήση υπολογιστικής ρευστομηχανικής, αλλά και πειραμάτων.

**δ) Τμήμα εξόδου:** Το τμήμα εξόδου οδηγεί το νερό που πέφτει λόγω βαρυτικής έλξης από τον δρομέα στην διώρυγα απαγωγής και στην συνέχεια στον κατάντι ταμιευτήρα. Στο τμήμα εξόδου, συνδέεται το περίβλημα του υδροστροβίλου που συγκεντρώνει τα νερά που εκτοξεύονται από τον δρομέα προς διάφορες διευθύνσεις, ανάλογα με το σημείο λειτουργίας (κυρίως σε παροχές διάφορες της κανονικής). Η σχεδίαση του περιβλήματος έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς θα πρέπει να είναι στεγανό και να έχει την κατάλληλη γεωμετρία ώστε να μειώνονται όσο το δυνατόν περισσότερο οι απώλειες που οφείλονται στην αλληλεπίδραση των απόνευρων με τις ελεύθερες δέσμες και τον δρομέα, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις περισσότερων του ενός ακροφυσίων.

Ανακεφαλαιώνοντας, η αρχή λειτουργίας του υδροστροβίλου Pelton είναι πολύ απλή. Αρχικά το νερό φτάνει στο ακροφύσιο μέσω του αγωγού προσαγωγής. Έπειτα, καθώς εξέρχεται, η πίεσή του μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια και η σχηματιζόμενη δέσμη προσκρούει στον δρομέα υπό ατμοσφαιρική πίεση. Έτσι, η υδραυλική ενέργεια του διερχόμενου υγρού (δηλαδή η υδραυλική ισχύς) μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ στην στρεφόμενη άτρακτο της μηχανής. Στη συνέχεια το νερό απομακρύνεται από τον δρομέα με μικρή σχετικά ταχύτητα, προσδίδοντάς του σχεδόν ολόκληρη την κινητική του ενέργεια. Τέλος πέφτει λόγω της βαρύτητας στον αγωγό προσαγωγής και από εκεί με ελεύθερη ροή απομακρύνεται από τον υδροηλεκτρικό σταθμό.

## Υδροστροβίλος Turgo

Ο υδροστροβίλος Turgo, ο οποίος αποτελεί ουσιαστικά παραλλαγή του υδροστροβίλου Pelton, σχεδιάστηκε το 1919 από τον Gilbert Gilkes [63]. Πρόκειται για υδροστροβίλους μεικτής προσβολής, με την ίδια βασική αρχή λειτουργίας με τους υδροστροβίλους Pelton. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι ο Turgo μπορεί να χειριστεί μεγαλύτερη παροχή λόγω του ότι δεν υπάρχει αλληλεπίδραση της δέσμης που εξέρχεται από ένα σκαφίδιο με τα γειτονικά του. Αυτό συμβαίνει επειδή ο δρομέας του υδροστροβίλου αποτελείται από σειρά μονών σκαφιδίων σε αντίθεση με τον Pelton στον οποίο τον δρομέα είναι προσαρμοσμένα διπλά σκαφίδια. Η δέσμη του ρευστού εξέρχεται του ακροφυσίου και προσπίπτει στα σκαφίδια έχοντας κάποια γωνία, συνήθως γύρω στις 20 °. Στο Σχήμα III.7 παρουσιάζεται ένας υδροστροβίλος Turgo κατά τη λειτουργία του, στον οποίο, όπως είναι φανερό και από τη φωτογραφία, η δέσμη του ρευστού προσπίπτει στα σκαφίδια υπό γωνία [62].



**Σχήμα III.7:** Ακροφύσιο υδροστροβίλου Turgo

Πρόσθετα πλεονεκτήματα των υδροστροβίλων Turgo αποτελούν το ότι ο δρομέας είναι φθηνότερος στην κατασκευή σε σχέση με τον αντίστοιχο του Pelton, ενώ δεν χρειάζεται αεροστεγές περίβλημα όπως ο Francis. Επιπροσθέτως, σε σχέση με τον υδροστροβίλο Pelton η μηχανή έχει υψηλότερη ειδική ταχύτητα και γι' αυτό τον λόγο δύναται να διαχειριστεί μεγαλύτερη παροχή στην ίδια διάμετρο και άρα χρειάζεται μικρότερη γεννήτρια και χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης. Είναι δυνατόν να υπάρχουν περισσότερα του ενός ακροφύσια, αυξάνοντας περαιτέρω την ειδική ταχύτητα.

Συγκεντρωτικά, οι υδροστροβίλοι Turgo αποτελούν ενδιάμεσο μεταξύ των υδροστροβίλων Francis και Pelton και ενδείκνυνται για περιπτώσεις χαμηλού κόστους υδροηλεκτρικών έργων σε σχετικά χαμηλές διαθέσιμες υδραυλικές πτώσεις (15 έως 300 mΣΥ). Να σημειωθεί εδώ ότι ο βαθμός απόδοσης των υδροστροβίλων Turgo φτάνει το 87% και το 90% σε περιπτώσεις εργαστηριακών δοκιμών.

### Απώλειες Ενέργειας στον Υδροστρόβιλο

Στόχος της ερευνάς στα διάφορα υποσυστήματα του υδροστροβίλου είναι η βελτιστοποίηση του και κυρίως η βελτίωση του βαθμού απόδοσης του, συνεπώς και η μείωση των απωλειών. Επομένως, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία σύντομη αναφορά στα είδη των απωλειών αυτών, καταγράφοντας τις απώλειες των υδροστροβίλων δράσης [54].

#### **Απώλειες υδροστροβίλου Pelton**

- **Μηχανικές απώλειες** χαρακτηρίζονται οι απώλειες υπό μορφή μηχανικής ισχύος, η οποία αποδίδεται στην άτρακτο του δρομέα. Στον υδροστρόβιλο Pelton αυτές οφείλονται στα έδρανα, ενώ επίσης στις μηχανικές απώλειες περιλαμβάνονται και οι απώλειες ανεμισμού. Οι απώλειες αυτές οφείλονται στην κίνηση του περιβάλλοντα αέρα η οποία προκαλείται λόγω της περιστροφής του δρομέα.
- **Υδραυλικές απώλειες τριβής** χαρακτηρίζονται οι απώλειες που οφείλονται στην συνεκτικότητα του ρευστού. Δηλαδή οφείλονται κατά βάση στην αλληλεπίδραση του ρευστού με τα τοιχώματα. Οι απώλειες τριβής λαμβάνουν χώρα καθ' όλο το μήκος των γραμμών ροής, από τη διατομή εισόδου μέχρι την διατομή εξόδου. Συμβολίζονται με  $\delta h_\tau$  και υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση:  $\delta h_\tau = \zeta_\tau * Q^2$ . Ο συντελεστής  $\zeta_\tau$  έχει σταθερή τιμή στην περιοχή της πλήρως τυρβώδους ροής. Στις περιοχές της μεταβατικής και της στρωτής ροής είναι αντιστρόφως ανάλογος του αριθμού Reynolds. Κατ' αυτόν τον τρόπο, όσο μεγαλύτερο το μέγεθος του υδροηλεκτρικού έργου, δηλαδή για μεγάλες υδραυλικές διαμέτρους και πλήρως τυρβώδη ροή, οι υδραυλικές απώλειες μειώνονται. Οι υδραυλικές απώλειες διακρίνονται σε γραμμικές και εντοπισμένες.
- **Απώλειες λόγω της δέσμης και της αλληλεπίδρασης της με τα σκαφίδια** οι οποίες οφείλονται σε διάφορους λόγους. Αρχικά στην κακή ποιότητα της δέσμης λόγω της επίδρασης με τον αέρα (ελεύθερη επιφάνεια δέσμης) αλλά και στην πρόσκρουση της δέσμης στα σκαφίδια με ανομοιόμορφη ταχύτητα. Επίσης υπάρχουν δευτερεύουσες ροές λόγω των διαμορφώσεων στο σύστημα έγχυσης του υδροστροβίλου. Ο μηχανισμός δεν έχει διερευνηθεί πλήρως και είναι ένα από τα αντικείμενα έρευνας σήμερα, τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά μέσω του CFD. Τα φαινόμενα της τυρβώδους ροής στην δέσμη και στην ροή πάνω στα σκαφίδια είναι ιδιαίτερα σύνθετα και μόλις τα τελευταία χρόνια έχει καταστεί τεχνολογικά εφικτή η υπολογιστική προσομοίωση και πειραματική μελέτη τους.

Η δέσμη όταν εξέρχεται από το ακροφύσιο στον αέρα, αλληλοεπιδρά με αυτόν και σε συνδυασμό με τις όποιες εφαπτομενικές ταχύτητες έχουν αποκτήσει από πριν τα στοιχεία της, αλλοιώνεται το σχήμα της και η θέση της με αποτέλεσμα τα σκαφίδια τελικά να μην μπορούν να απορροφήσουν την ενέργεια που θα απορροφούσαν αν η δέσμη ήταν ιδανική. Αυτή είναι μια απλουστευμένη θεώρηση. Στην συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα γίνει μια πιο λεπτομερής θεώρηση της ροής στη δέσμη και στα σκαφίδια καθώς και αναφορά σε επιστημονικά άρθρα και δημοσιεύσεις που ασχολούνται με το αντικείμενο, είτε πειραματικά, είτε αριθμητικά.

Ο ολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου Pelton προκύπτει ίσος προς το γινόμενο του μηχανικού,  $\eta_m$ , του υδραυλικού,  $\eta_h$ , και της δέσμης,  $\eta_{jet}$ :

$$\eta = \eta_m \eta_h \eta_{jet} \quad (III.1)$$

Στις σύγχρονες κατασκευαστικές μελέτες υδροστροβίλων μεγάλης ισχύος ο υπολογισμός των απωλειών δεν γίνεται με χρήση εμπειρικών τύπων αλλά με προσομοίωση της λειτουργίας (ολόκληρου ή τμηματικά) του υδροστροβίλου. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι βοηθάει στην πρόβλεψη με ακρίβεια των μεγεθών του υδροστροβίλου (απώλειες, βαθμός απόδοσης, χαρακτηριστική) ενώ παράλληλα δίνει πολλές δυνατότητες βελτιστοποίησης στα επιμέρους τμήματα χωρίς την ανάγκη κατασκευής μοντέλων και διεξαγωγή πειραμάτων.

## IV. Σκοπός και Δομή της Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσης εργασίας αποτελεί η ανάλυση της διφασικής ροής δέσμης νερού η οποία εξέρχεται στον αέρα από ακροφύσιο υδροστροβίλου δράσης και η μετέπειτα βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του ακροφυσίου αυτού. Για τον σκοπό αυτόν, μελετήθηκε η γεωμετρία του ακροφυσίου πειραματικού μοντέλου υδροστροβίλου Pelton, ισχύος 70 kW, ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Τα αποτελέσματα ωστόσο μπορούν εύκολα να γενικευθούν για τη μελέτη υδροστροβίλων δράσης (Pelton-Turgo) μικρής ισχύος. Το κριτήριο για την σύγκριση μεταξύ των υπό εξέταση γεωμετριών είναι ο βαθμός απόδοσης του ακροφυσίου. Ουσιαστικά δηλαδή, των υδραυλικών απωλειών που προκύπτουν λόγω της δέσμης ελεύθερης επιφάνειας, οι οποίες και είναι συνάρτηση της ποιότητάς της [38]. Οι απώλειες αυτές αποτελούν το 1.5-2 % των ολικών απωλειών της μηχανής. Πρόσφατες ερευνητικές μελέτες που παρατίθενται στην βιβλιογραφία φανερώνουν ότι η βελτίωση στην ποιότητα της δέσμης δύναται να οδηγήσει σε αύξηση του ολικού βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου κατά 0.5-1 % [15, 30, 37, 38], ενώ μάλιστα σε μία περίπτωση, η αντικατάσταση των ακροφυσίων καθώς και του περιβλήματος του υδροστροβίλου οδήγησε σε αύξηση 1.4 % [39].

Η αριθμητική προσομοίωση της ροής στην αρχική γεωμετρία του υδροστροβίλου Pelton χρησιμοποιήθηκε για την κατανόηση των πολύπλοκων φαινομένων τα οποία παρουσιάζονται στη ροή αυτή. Βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκε η παραμετροποίηση της γεωμετρίας του ακροφυσίου. Στη συνέχεια, διερευνήθηκε η επίδραση των κύριων παραμέτρων και συγκεκριμένα των γωνιών του ακροφυσίου και της βελόνης, καθώς και του ανοίγματος της βελόνης, εκφρασμένο ως διερχόμενη παροχή μάζας, στις υδραυλικές απώλειες του ακροφυσίου, για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας του. Στόχος της μελέτης βελτιστοποίησης ήταν η εύρεση των τιμών των γεωμετρικών παραμέτρων οι οποίες βελτιώνουν την ποιότητα της δέσμης ελεύθερης επιφάνειας και κατά συνέπεια, ελαχιστοποιούν τις απώλειες στο ακροφύσιο. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων της ροής στην αρχική και τη βελτιωμένη γεωμετρία του ακροφυσίου, εξήχθησαν πολύτιμα συμπεράσματα για τον τρόπο με τον οποίο οι παράμετροι σχεδιασμού που μελετήθηκαν επιδρούν στις απώλειες του ακροφυσίου και συνεπώς στην γενικότερη απόδοση του στροβίλου.

Τα βασικά βήματα στα οποία βασίστηκε η μελέτη αυτή ήταν η μοντελοποίηση του προβλήματος, η αριθμητική επίλυση της ροής στην αρχική γεωμετρία του ακροφυσίου, η παραμετροποίηση της γεωμετρίας του ακροφυσίου, η διεξαγωγή των προσομοιώσεων της μελέτης βελτιστοποίησης και η ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από αυτή με την επακόλουθη εξαγωγή συμπερασμάτων. Ακολουθεί η δομή με την οποία είναι διαρθρωμένη η εργασία.

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται εισαγωγικά και βιβλιογραφικά οι κατηγορίες, τα βασικά τμήματα και η λειτουργία των υδροστροβίλων δράσης. Επίσης παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα, το πεδίο εφαρμογής αλλά και οι απώλειες ενέργειας των συγκεκριμένων υδροστροβίλων.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην περίπλοκη ροή στη δέσμη των υδροστροβίλων δράσης, η οποία και είναι το αντικείμενο της παρούσης μελέτης. Για τον σκοπό αυτόν, αναλύεται η ροή στο ακροφύσιο του υδροστροβίλου Pelton ο οποίος μελετήθηκε, με τις εξισώσεις οι οποίες προέκυψαν να γενικεύονται για την ανάλυση οποιουδήποτε

υδροστρόβιλου δράσης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την ποιότητα της δέσμης του ακροφυσίου και συνεπώς τις υδραυλικές απώλειες της ροής. Τέλος, παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένα πρόσφατα επιστημονικά άρθρα και ερευνητικές εργασίες σχετικές με το αντικείμενο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η αριθμητική μεθοδολογία η οποία χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της ροής στο ακροφύσιο. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται στοιχεία θεωρίας για την κατασκευή της γεωμετρίας και του υπολογιστικού πλέγματος, τον επιλύτη ο οποίος χρησιμοποιήθηκε, όπως επίσης και τα μοντέλα τύρβης και διφασικής ροής τα οποία διατίθενται για την προσομοίωση του συγκεκριμένου προβλήματος ροής.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης της ροής στο αρχικό ακροφύσιο του υδροστρόβιλου. Αρχικά, παρουσιάζεται η κατασκευή της υπόψιν γεωμετρίας, του αντίστοιχου υπολογιστικού πλέγματος (και οι εναλλακτικές του που απορρίφθηκαν) καθώς και του τελικού αριθμητικού μοντέλου, με την αναφορά των ρυθμίσεων του επιλύτη, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του πεδίου ροής. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η διαδικασία της εξακρίβωσης (verification) του αριθμητικού μοντέλου μέσω της μελέτης ανεξαρτησίας του πλέγματος. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης, με τη μορφή κατάλληλων γραφημάτων καθώς και τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από τη μελέτη τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του ακροφυσίου η οποία πραγματοποιήθηκε. Αρχικά, καταγράφεται η παραμετροποίηση της γεωμετρίας και ο καθορισμός του πειραματικού σχεδιασμού που εφαρμόστηκε. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης βελτιστοποίησης, καθώς και η σύγκριση των υδραυλικών απωλειών μεταξύ της αρχικής και της βελτιωμένης γεωμετρίας του ακροφυσίου. Τέλος, παρουσιάζεται η διερεύνηση της επίδρασης λυπών παραμέτρων σχεδιασμού, γεωμετρικών και λειτουργικών, στις απώλειες ισχύος του ακροφυσίου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο καταγράφονται τα συνολικά συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από την αριθμητική επίλυση της ροής, καθώς και τη μελέτη βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του ακροφυσίου. Τέλος, παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

# Κεφάλαιο 1. Ανάλυση της Ροής σε Ακροφύσιο Υδροστροβίλου Δράσης

## 1.1 Εξίσωση Euler

Ένας υδροστρόβιλος μετατρέπει την ενέργεια του ρευστού σε μηχανική, δηλαδή σε κινητήρια ροπή στην στρεφόμενη άτρακτο του δρομέα. Ο υδροστρόβιλος Pelton είναι ένας στρόβιλος δράσης, κάτι που σημαίνει ότι η δυναμική ενέργεια λόγω του μεγάλου διαθέσιμου ύψους πτώσης μετατρέπεται, μέσω της μεταφοράς της από έναν αγωγό, σε ενέργεια εντατικής κατάστασης, δηλαδή σε ενέργεια της ροής. Στη συνέχεια, καθώς διέρχεται από το συγκλίνον ακροφύσιο, η ροή μεταπίπτει από μία κατάσταση υψηλής πίεσης και χαμηλής ταχύτητας στην ατμοσφαιρική πίεση και σε υψηλή ταχύτητα κατά την έξοδο από αυτό. Με αυτό τον τρόπο, όλη σχεδόν η κινητική ενέργεια του ρευστού μετατρέπεται σε μηχανική περιστροφική ενέργεια στην άτρακτο., αν εξαιρεθεί το ποσοστό της το οποίο μετατρέπεται σε θερμότητα μέσω τύρβης και στροβιλισμών της ροής. Άμεση συνέπεια της μετατροπής ολόκληρης της ενέργειας εντατικής κατάστασης σε κινητική πριν αυτή φτάσει στον δρομέα, είναι ότι δεν υπάρχει διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου του δρομέα. Η μηχανική ενέργεια μεταφέρεται στην άτρακτο μέσω δυνάμεων ώθησης και μόνο, οι οποίες εμφανίζονται όταν το σκαφίδιο εκτρέπει τα διανύσματα ροής από την πορεία τους [52]. Εφαρμόζοντας το θεώρημα της ροπής της ορμής σε υδροστρόβιλο, υπολογίζεται η ροπή που αναπτύσσεται στον δρομέα του στροβίλου ως προς τον άξονα περιστροφής και συμμετρίας του και η οποία αν πολλαπλασιαστεί με τη γωνιακή ταχύτητα δίνει την περιφερειακή ισχύ που παράγει η μηχανή [9]:

$$N_u = M_u \omega = \dot{m}_u (r_1 c_{u1} - r_2 c_{u2}) \omega = \rho Q (u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}) \quad (1.1)$$

όπου  $N_u$  [J/s] και  $M_u$  [Nm], η περιφερειακή ισχύς και η κινητήρια ροπή της μηχανής αντίστοιχα,  $c_{ui}$  η περιφερειακή συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας της ροής για την είσοδο ( $i=1$ ) και την έξοδο ( $i=2$ ) του υδροστροβίλου,  $\omega$  [rad/s] η γωνιακή ταχύτητα,  $\dot{m}_u$  και  $Q$  η παροχή μάζας και όγκου αντίστοιχα,  $r_i$  και  $u_i$  η ακτίνα και η περιφερειακή ταχύτητα της μηχανής.

Η αναφερθείσα σχέση ισχύει υπό την προϋπόθεση ομοιόμορφων συνθηκών ροής και σταθερής παροχής μάζας και κατά συνέπεια όγκου. Παρατηρείται ότι μόνο η περιφερειακή (εφαπτομενική) συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας συνεισφέρει στην περιστροφή της άτρακτου. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η περιφερειακή ισχύς  $N_u$  δρομέα, συναρτήσει του ειδικού βάρους,  $\gamma$ , της διερχόμενης παροχής όγκου και του θεωρητικού ύψους,  $H_u$  [mΣΥ], προκύπτει:

$$N_u = \gamma Q_u H_u \quad (1.2)$$

Κατά παράδοση στις στροβιλομηχανές ασυμπίεστου ρευστού, όπως στους υδροστροβίλους, η ολική ενέργεια και πίεση εκφράζονται μέσω της αντίστοιχης τιμής σε μέτρα στήλης του υγρού:

$$H = \frac{p}{\rho g} = \frac{p}{\gamma} \quad (1.3)$$

Οπότε, από τις Εξισώσεις (1.1) και (1.2), προκύπτει:

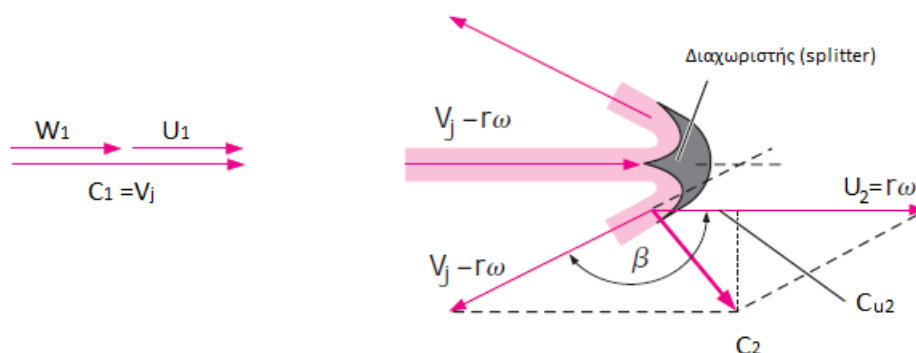
$$H_u = \frac{1}{g} (u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}) \quad (1.4)$$

Η εξίσωση αυτή ονομάζεται εξίσωση Euler προς τιμήν του Leonhard Euler που πρώτος την

διατύπωσε και αποτελεί τη θεμελιώδη εξίσωση των στροβιλομηχανών.

## 1.2 Υπολογισμός της Παραγόμενης Ισχύος σε Υδροστρόβιλο Δράσης

Εφαρμόζοντας την Εξίσωση (1.4) στα τρίγωνα ταχυτήτων του Σχήματος 1.1, θα υπολογιστεί η παραγόμενη ισχύς σε έναν υδροστρόβιλο Pelton [9], με τα αποτελέσματα να γενικεύονται εύκολα για οποιοδήποτε υδροστρόβιλο δράσης..



**Σχήμα 1.1:** Τρίγωνα ταχυτήτων μεταξύ εισόδου (1) και εξόδου (2) σκαφιδίου Pelton [9]

Στην είσοδο (1) ισχύει από την διανυσματική εξίσωση ταχυτήτων:

$$\vec{c} = \vec{u} + \vec{w} \quad (1.5)$$

όπου  $\vec{c}$ ,  $\vec{u}$  και  $\vec{w}$  η απόλυτη, η περιστροφική και η σχετική ταχύτητα αντίστοιχα. Ισχύει ότι  $v_j = c_1$ , όπου  $v_j$ , η ταχύτητα της δέσμης της ελεύθερης επιφάνειας. Άρα προκύπτει:

$$w_1 = c_1 - u_1 = v_j - u_1 \quad (1.6)$$

Προσεγγιστικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι ολόκληρη η δέσμη προσκρούει στο σκαφίδιο που βρίσκεται στο κάτω μέρος του δρομέα την υπόψιν χρονική στιγμή και ότι το μέγεθος του σκαφιδίου και η διάμετρος της δέσμης είναι αμελητέες συγκριτικά με τη διάμετρο του δρομέα. Προσεγγιστικά δηλαδή:  $r_1 = r_2 = r$ , με άμεση συνέπεια ίσες περιφερειακές ταχύτητες για την είσοδο και την έξοδο:  $u_1 = u_2 = u$ .

Με την υπόθεση εμφάνισης τριβής του ρευστού με την επιφάνεια του σκαφιδίου, προκύπτει:  $w_2 = kw_1$ , όπου  $k$  ο βαθμός απόδοσης της ροής καθώς διέρχεται από το σκαφίδιο, της τάξης του 0.98-0.99.

Για να εφαρμοστεί η σχέση του Euler, πρέπει να υπολογιστούν οι περιφερειακές συνιστώσες των απόλυτων ταχυτήτων εισόδου και εξόδου,  $c_{u1}$  και  $c_{u2}$  αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι για την είσοδο η περιφερειακή συνιστώσα είναι η μόνη η οποία υπάρχει, οπότε  $c_{u1} = c_1$ , ενώ για την έξοδο, με χρήση τριγωνομετρίας και της σχέσης  $\sin(\beta - 90^\circ) = -\cos\beta$ , προκύπτει:

$$c_{u2} = u + (c_1 - u)k\cos\beta \quad (1.7)$$

Αντικαθιστώντας στην Εξίσωση (1.1), προκύπτει η περιφερειακή ισχύς την οποία παράγει η



μηχανή:

$$N_u = \rho u Q (c_1 - u)(1 - k \cos \beta) = \rho u Q w_1 (1 - k \cos \beta) \quad (1.8)$$

Εναλλακτικά, αντικαθιστώντας στην Εξίσωση (1.4), προκύπτει η ισοδύναμη έκφραση:

$$H_u = \frac{u}{g} (c_1 - u)(1 - k \cos \beta) \quad (1.9)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις συνάγονται διάφορα ενδιαφέροντα συμπεράσματα για τη λειτουργία του υδροστρόβιλου Pelton. Για ευκολία θα θεωρηθεί περίπτωση ροής στην οποία δεν παρουσιάζεται τριβή του ρευστού με τα σκαφίδια, δηλαδή  $k=1$ , με τα αποτελέσματα να γενικεύονται εύκολα [12].

Αρχικά, είναι φανερό ότι η μέγιστη ισχύς προκύπτει θεωρητικά για γωνία  $\beta=180^\circ$ . Στην περίπτωση αυτή όμως, το νερό που εξέρχεται από κάποιο σκαφίδιο θα προσκρούσει στην εξωτερική πλευρά του επερχόμενου σκαφιδίου, ελαττώνοντας την παραγόμενη ροπή και συνεπώς την ισχύ. Στην πράξη, η βέλτιστη τιμή της γωνίας εξόδου του νερού από το σκαφίδιο είναι μεταξύ  $160^\circ$  και  $165^\circ$ . Ο βαθμός απόδοσης λόγω του γεγονότος ότι το  $\beta$  είναι χαμηλότερο από  $180^\circ$ , είναι:

$$\eta_\beta = \frac{N_{u,πραγμ}}{N_{u,θεωρ}} = \frac{1 - \cos \beta}{1 - \cos 180^\circ} = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (1.10)$$

Αντικαθιστώντας για παράδειγμα την γωνία  $\beta=165^\circ$ , προκύπτει ο βαθμός απόδοσης 98.2%, δηλαδή απώλειες της τάξης του 1.8%.

Αν η Εξίσωση (1.8) μηδενιστεί, προκύπτουν τα σημεία για τα οποία η παραγόμενη ροπή είναι μηδενική. Αφενός αυτό συμβαίνει αν ο δρομέας είναι ακίνητος, δηλαδή αν  $u=0$  και αφετέρου, αν κινείται με την ταχύτητα της δέσμης, δηλαδή αν  $u=c_1$ , μιας και στην περίπτωση αυτή, το ρευστό δεν θα προσκρούει ποτέ στα σκαφίδια.

Υπάρχει μία ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, ανάμεσα στις δύο προαναφερθείσες ακραίες τιμές, στην οποία παράγεται η θεωρητικά μέγιστη μηχανική ισχύς. Θέτοντας την παράγωγο της Εξίσωσης (1.1), ως προς την περιφερειακή ταχύτητα  $u$ , ίση με το μηδέν προκύπτει η τιμή αυτή:

$$\frac{\partial N_u}{\partial u} = \rho Q (1 - \cos \beta)(c_1 - 2u) \quad (1.11)$$

Άρα το μέγιστο της ισχύος  $N_u$  αντιστοιχεί στην τιμή:  $u = c_1/2$ , όταν ο δρομέας κινείται με την μισή ταχύτητα της δέσμης και είναι ίσο προς:

$$N_{u,max} = \frac{1}{4} (\rho Q c_1^2) (1 - \cos \beta) \quad (1.12)$$

Η υδραυλική ισχύς της δέσμης που αντιστοιχεί στην κινητική της ενέργεια  $c_1^2/2$ , είναι ίση προς:

$$N_\delta = \frac{1}{2} (\rho Q c_1^2) \quad (1.13)$$

Διαιρώντας την Εξίσωση (1.12) με την (1.13) προκύπτει η ήδη αναφερθείσα Εξίσωση (1.10).

Η μέση τιμή της πραγματικής δέσμης είναι:

$$v_{jet} = C_v \sqrt{2gH} \quad (1.14)$$

όπου  $v_{jet}$ , η μέση ταχύτητα της δέσμης σε m/s και  $C_v$ , ο συντελεστής απωλειών ακροφυσίου.

Η συνολική παροχή από όλα τα ακροφύσια προκύπτει:

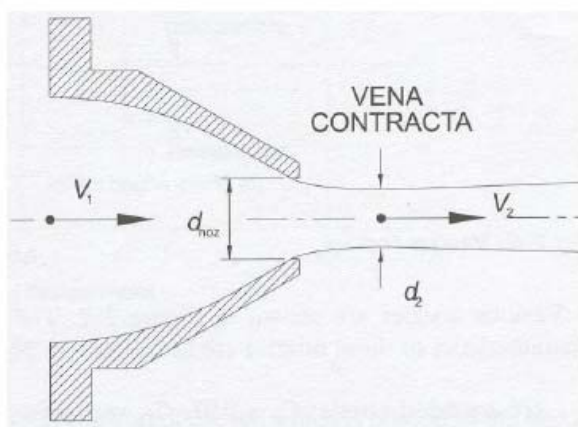
$$Q = \frac{\pi d_{jet}^2}{4} v_{jet} n_{jet} \quad (1.15)$$

όπου  $d_{jet}$ , η διάμετρος της δέσμης και  $n_{jet}$ , ο αριθμός των ακροφυσίων.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω, προκύπτει:

$$d_{jet} = \sqrt{\frac{4}{\pi C_v \sqrt{2g}} \cdot \frac{1}{H^{\frac{1}{4}}} \cdot \sqrt{\frac{Q}{n_{jet}}}} \quad (1.16)$$

Η μορφή της πραγματικής δέσμης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2, η οποία μπορεί να αντιπαραβληθεί για εποπτικούς λόγους με το Σχήμα 1.27 της υποενότητας 1.4.



**Σχήμα 1.2:** Σχηματική απεικόνιση του ακροφυσίου και της δέσμης [41]

Ο βαθμός απόδοσης του ακροφυσίου όπως εύκολα προκύπτει από την Εξίσωση (1.14) είναι ανάλογος του  $C_v^2$ . Ο συντελεστής απωλειών μπορεί να είναι από 95 % ως 99 %, αλλά γενικά ένα καλοσηματισμένο ακροφύσιο πετυχαίνει συντελεστή 97-98% [41].

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2, αρχικά, η διατομή της δέσμης ελαττώνεται λόγω της μορφής του ακροφυσίου και της ύπαρξης της βελόνας. Η διατομή γίνεται ελάχιστη στο σημείο vena contracta (VC), το οποίο βρίσκεται σε απόσταση περίπου μιας διαμέτρου κατάντι της εξόδου του ακροφυσίου [41]. Αξίζει να σημειωθεί πως στα πειράματα οπτικοποίησης της ροής τα οποία περιγράφηκαν στην [24], το σημείο VC παρατηρήθηκε σε απόσταση ίση με  $0.82 D_o$  από την έξοδο του ακροφυσίου, όπου  $D_o$ , η διάμετρος εξόδου του ακροφυσίου. Από εκείνο το σημείο και μετά η διατομή αυξάνεται συνεχώς και η ομοιομορφία της δέσμης καταστρέφεται λόγω της επαφής της με τα μόρια του αέρα. Η ελάχιστη διατομή της δέσμης είναι:

$$A_2 = C_c \cdot A_{noz} \quad (1.17)$$

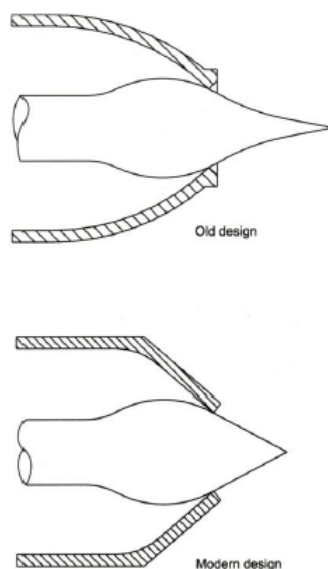
Όπου  $A_2$ , η ελάχιστη διατομή της δέσμης,  $A_{noz}$ , η διατομή του στομίου του ακροφυσίου και  $C_c$ , ένας συντελεστής που εξαρτάται από τη γεωμετρία του ακροφυσίου.

Προκύπτει ότι η διερχόμενη παροχή είναι:

$$Q = C_v \cdot C_c \cdot A_{noz} \sqrt{2gH} \quad (1.18)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στα ακροφύσια των υδροστροβίλων Pelton είναι προσαρμοσμένη

μία βελόνα για τη ρύθμιση της παροχής, αλλά και ώστε να οδηγήσει τη ροή στον ατμοσφαιρικό αέρα με συμπαγές σχήμα. Ο μηχανισμός πετυχαίνει πολύ καλούς συντελεστές  $C_v$  και  $C_c$ . Στο κέντρο της δέσμης όμως, λόγω των πολύ υψηλών ταχυτήτων, υπάρχει η πιθανότητα δημιουργίας περιοχών χαμηλής πίεσης, με αποτέλεσμα να παρατηρείται σπηλαιώση στη βελόνα. Η κατάσταση βελτιώθηκε με το νέο σχεδιασμό των βελόνων, οι οποίες είναι κωνικές, με πιο αμβλείες γωνίες στις άκρες τους. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζονται η παλαιότερη και η πιο σύγχρονη μέθοδος σχεδίασης βελόνης [41].



**Σχήμα 1.3:** Παλαιότερη και σύγχρονη σχεδίαση βελόνης [41]

Η παροχή ρυθμίζεται με την κίνηση της βελόνης αξονικά σε σχέση με το ακροφύσιο, μεταβάλλοντας την ελεύθερη διατομή εξόδου. Όταν η βελόνα ακουμπά στα χείλη του ακροφυσίου η παροχή είναι μηδενική, ενώ όταν τραβιέται προς τα πίσω η παροχή αυξάνει μέχρι κάποιο σημείο, που επιλέγεται από τον κατασκευαστή, όπου έχει την μέγιστη παροχή.

Να σημειωθεί ότι εκτός από τη θεωρητική σχέση 1.16, για την εύρεση της διαμέτρου της δέσμης, υπάρχουν και άλλες, θεωρητικές και πρακτικές, όπως για παράδειγμα η εξής [41]:

$$d_{jet} = \sqrt{2s \sin \frac{\alpha}{2} (2sD_o - s^2 \sin \alpha)} \quad (1.19)$$

όπου

- $\alpha$ : η γωνία της βελόνης (παραδείγματος χάριν  $50^\circ$ )
- $s$ : η μετατόπιση της βελόνης

## 1.3 Τοποθέτηση του Προβλήματος

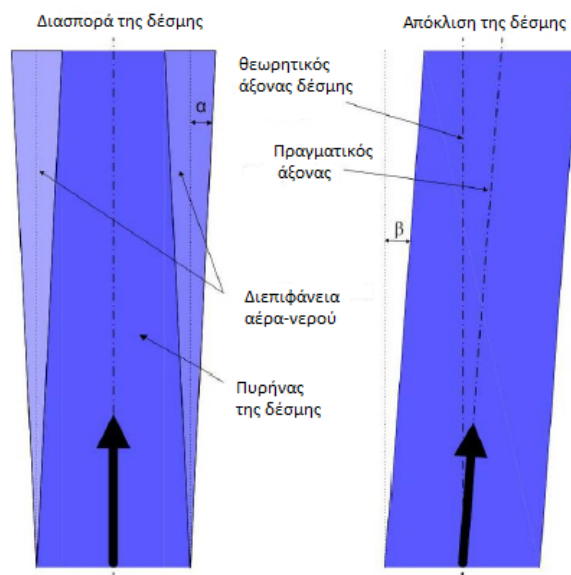
### 1.3.1 Παράγοντες οι οποίοι Επιδρούν στη Ποιότητα της Δέσμης

Η ποιότητα της δέσμης και η ομοιομορφία της κατανομής ταχυτήτων της χαρακτηρίζεται από τις εξής ιδιότητές της [37]:

- Διασπορά της δέσμης (jet dispersion), η οποία ορίζεται ως η πλάτυνση της δέσμης σε απόσταση από την έξοδο του ακροφυσίου και περιλαμβάνει το μίγμα αέρα και νερού στην επιφάνειά της (Σχήμα 1.4, αριστερά εικόνα).
- Απόκλιση της δέσμης (jet deviation), η οποία ορίζεται ως η απόκλιση του άξονα της δέσμης από τον θεωρητικό άξονά της (Σχήμα 1.4, δεξιά εικόνα)
- Παραμόρφωση της μορφής της δέσμης (jet deformation), η οποία ορίζεται ως η απόκλιση της μορφής της διατομής της από το κυκλικό σχήμα.
- Στροβιλότητα της δέσμης (jet rotation)
- Τα επίπεδα της τύρβης της δέσμης (turbulence level)
- Τις δευτερεύουσες ροές (secondary flows), σχετικά αμελητέες ροές δηλαδή, σε διαφορετική κατεύθυνση της κύριας, οι οποίες υπερτίθενται σε αυτή.
- Παγιδευμένες φυσαλίδες αέρα υψηλής πίεσης (entrapped air bubbles), οι οποίες προκαλούν απότομη διαστολή της επιφάνειας της δέσμης.
- Σταγονίδια νερού (droplets of water), τα οποία επιστρέφοντας από την πρόσκρουση στο περίβλημα του στροβίλου, επιδρούν στην δέσμη.

Τα άνωθι χαρακτηρίζουν την ποιότητα της δέσμης και προκαλούνται από διάφορους παράγοντες, οι οποίοι θα αναφερθούν εκτενέστερα στη συνέχεια, όμως γενικά μπορούν να συνοψιστούν στους εξής: Στην ανομοιόμορφη ροή στην είσοδο του ακροφυσίου, στην ίδια τη γεωμετρία του ακροφυσίου και τέλος στην τυρβώδη μεταφορά ορμής της δέσμης ελεύθερης επιφάνειας με τον περιβάλλοντα αέρα.

Ως ιδεατή δέσμη μπορεί να θεωρηθεί αυτή η οποία είναι ευθεία, με σταθερό εμβαδόν και κατευθύνεται κατά μήκος του ακροφυσίου. Η δέσμη αυτή, θα είχε στη θεωρία ομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων και δεν θα παρουσίαζε εγκάρσια συνιστώσα ταχύτητας και δευτερεύουσες ροές, ενώ θα ήταν συμπαγής. Η πραγματική δέσμη όμως παρουσιάζει πάντα πιο πολύπλοκα φαινόμενα ροής. Η τελική μορφή της δέσμης στην πραγματικότητα εξαρτάται πάντα από την ποιότητά της όταν αυτή εξέρχεται από το ακροφύσιο [45].

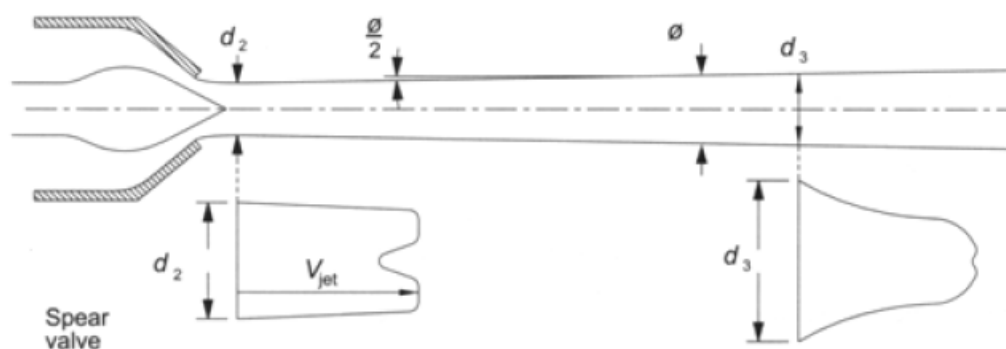


**Σχήμα 1.4:** Ορισμός της διασποράς και της απόκλισης της δέσμης [37]

### 1.3.2 Διασπορά της Δέσμης

Το σημείο της ελάχιστης διαμέτρου της δέσμης (*vena contracta*), απέχει από το ακροφύσιο απόσταση περίπου μίας διαμέτρου. Η διασπορά της δέσμης αρχίζει να συμβαίνει περίπου μισή διάμετρο μετά από αυτό. Η διάμετρος της δέσμης είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ακριβώς, λόγω των πολλών και γρήγορα εξελισσόμενων φαινομένων που συμβαίνουν. Με τη χρήση φωτογραφιών υψηλής ταχύτητας, παρατηρήθηκε ότι η επιφάνεια της δέσμης συνεχώς σπάει και μετασχηματίζεται, με αποτέλεσμα την δυσκολία προσδιορισμού της ακριβούς διαμέτρου της. Ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς της δέσμης είναι αντικείμενο έρευνας, τόσο πειραματικά, όσο και με μεθόδους CFD.

Η δέσμη διασπείρεται λόγω της έντονης στροβιλότητας μέσα της και της τριβής της επιφάνειας της με τον αέρα. Στο Σχήμα 1.5 δίνεται μια γενική απεικόνιση της κατανομής της ταχύτητας σε διάφορες θέσεις της αποκλίνουσας δέσμης η οποία εξέρχεται από πραγματικό ακροφύσιο [41]. Είναι φανερό ότι στο σημείο *vena contracta* η κατανομή της ταχύτητας είναι ομοιόμορφη. Παρατηρείται μια μικρή επιβράδυνση της ροής στην εξωτερική επιφάνεια της δέσμης, λόγω της τριβής με τα τοιχώματα του ακροφυσίου, ενώ είναι ορατή στο κέντρο της μια περιοχή με έλλειμμα ταχύτητας, λόγω της τριβής με την βελόνη. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην ύπαρξη της κλίσης των τοιχωμάτων του ακροφυσίου: συγκεκριμένα, η στατική πίεση αυξάνεται κατά μήκος τους και δεδομένου ότι η ολική πίεση παραμένει σταθερή, η ταχύτητα μειώνεται. Στο σημείο  $d/3$  η τριβή με τον αέρα έχει επιβραδύνει πλέον σημαντικά την εξωτερική περιοχή της δέσμης.



**Σχήμα 1.5:** Κατανομή ταχυτήτων αποκλίνουσας δέσμης (σημειώνεται ότι  $\theta/2 = 1^\circ$ ) [41]

Η γωνία διασποράς της δέσμης,  $\theta$ , εξαρτάται από διάφορους παράγοντες.

- I. Αρχικά, εξαρτάται από την ταχύτητα της δέσμης, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την διαθέσιμη υδραυλική πτώση στο ακροφύσιο, μιας και σε αυτή την περίπτωση αυξάνει το εξωτερικό πάχος της. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη η διαθέσιμη πτώση, τόσο μεγαλύτερη η διασπορά της δέσμης (Σχήμα 1.6)
- II. Από την γεωμετρία του ακροφυσίου και της βελόνης. Συγκεκριμένα, ακροφύσια τα οποία συγκλίνουν απότομα, προκαλούν ταχύτερη διασπορά της δέσμης. Στη βιβλιογραφία η οποία παρατίθεται στην παρούσα εργασία, υπάρχουν δύο μελέτες οι οποίες αφορούν περιπτώσεις μεταβολής των γωνιών του ακροφυσίου, η οποία οδήγησε σε αύξηση του βαθμού απόδοσης του στροβίλου [15,38].
- III. Από την σχετική θέση της βελόνης. Σε μικρότερα ανοίγματα της βελόνης η διασπορά της δέσμης είναι μεγαλύτερη από ότι στο άνοιγμα της κανονικής παροχής.
- IV. Την επιφανειακή τραχύτητα της βελόνης και του ακροφυσίου και ειδικά την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σημείο από το οποίο εξέρχεται η δέσμη στην ατμόσφαιρα. Είναι προφανές ότι φθαρμένες επιφάνειες εμφανίζουν μεγαλύτερη τραχύτητα, κατά συνέπεια προκαλούν αυξημένη τριβή μεταξύ τοιχωμάτων και ρευστού και άρα ελαττώνουν τον βαθμό απόδοσης του ακροφυσίου. Το χείλος του ακροφυσίου, από το οποίο εξέρχεται η δέσμη επιδρά πολύ στην ποιότητα της δέσμης και ιδίως τη διασπορά της. Συγκεκριμένα, αν παρουσιάζει φθορά, η γωνία με την οποία εξέρχεται η δέσμη ενδέχεται να μεταβληθεί πολύ, παρουσιάζοντας από αρχικό στάδιο αυξημένη διάμετρο δέσμης.
- V. Ενδεχόμενη αλληλεπίδραση με γειτονικές δέσμες. Ακόμα και μικρά σταγονίδια που μπορεί να προσκρούσουν στην δέσμη από τις γειτονικές της ή έπειτα από πρόσκρουση στο περίβλημα της μηχανής, μπορεί να την εκτρέψουν και να της δημιουργήσουν έντονες τοπικές διαταραχές.
- VI. Την τυρβώδη μεταφορά ορμής μεταξύ νερού και αέρα, η οποία συμβαίνει όταν η ελεύθερη δέσμη εξέλθει στην ατμόσφαιρα.

- VII. Την ροή ανάντι της δέσμης. Αν αυτή είναι ομαλή και χωρίς έντονες δευτερεύουσες ροές, η δέσμη διασπείρεται ελάχιστα, ενώ αν είναι έντονα τυρβώδης με ισχυρές δίνες, η δέσμη εμφανίζει έντονη διασπορά και σε ακραίες περιπτώσεις διαλύεται και μετατρέπεται σε spray.

Το τελευταίο σημείο είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Οι δευτερεύουσες ροές οφείλονται σε πολλούς παράγοντες, όπως την ύπαρξη διακλαδώσεων, τη γεωμετρία των σωληνώσεων και του διανομέα ανάντι του ακροφυσίου αλλά και την ύπαρξη στοιχείων εντός της ροής όπως σερβοκινητήρες ή βάρτρα για τον χειρισμό της βελόνης. Για παράδειγμα η ύπαρξη κλίσεων  $90^\circ$  στο σύστημα σωλήνωσης θα προκαλέσει τον σχηματισμό δευτερευουσών ροών, οι οποίες με τη σειρά τους μεγεθύνονται στο ακροφύσιο και μειώνουν τον βαθμό απόδοσής του, ενώ προκαλούν και διασπορά της δέσμης [18, 27, 29, 37, 45]. Οι ροές αυτές δεν αποσβένονται σε μεγάλους αριθμούς Reynolds και οδηγούν σε ανομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων της δέσμης, ενεργειακές απώλειες και το σημαντικότερο, επιδρούν δραστικά στη μορφή και την τοπολογία της, προκαλώντας την διασπορά της, την παραμόρφωσή της, την περιστροφή της και την εμφάνιση άλλων φαινομένων, όπως την απόκλιση του άξονά της.

Είναι απαραίτητο το ακροφύσιο να βρίσκεται όσο πιο κοντά στον δρομέα γίνεται, για δύο λόγους. Αρχικά διότι σε αντίθετη περίπτωση, η δέσμη θα συνεχίσει να διασπείρεται και τα σκαφίδια μπορούν να διαχειριστούν αποδοτικά μία μέγιστη διάμετρο. Αν για παράδειγμα δεν είναι αρκετά κοντά στα σκαφίδια η δέσμη, ενδέχεται να έχει παραμορφωθεί τόσο πολύ, ώστε τμήμα της ή και ολόκληρη να τα προσπερνάει ή να μην προσπίπτει στα σωστά σημεία, ελαττώνοντας δραματικά τη ροπή και άρα τον βαθμό απόδοσης της μηχανής. Κατά δεύτερο λόγο, διότι την ίδια στιγμή η ενέργεια της δέσμης ελαττώνεται λόγω της τυρβώδους μεταφοράς ορμής μεταξύ αυτής και του περιβάλλοντος αέρα.

Όπως ειπώθηκε προηγουμένως, σύμφωνα με ερευνητικές μελέτες, υπάρχει ευθεία συσχέτιση μεταξύ αυξημένης διασποράς της δέσμης και ελαττωμένου βαθμού απόδοσης [37]. Κάτι το οποίο δεν είναι τόσο προφανές, είναι η επίδραση που έχει η αυξημένη διασπορά της δέσμης στην εμφάνιση σπηλαιώσης στα σκαφίδια του υδροστροβίλου [30].

Από τα παραπάνω, είναι φανερή η εξαιρετική σημασία του περιορισμού των παραμορφώσεων που εμφανίζονται στη μορφή της δέσμης και εν γένει της βελτίωσης της ποιότητάς της. Η ομαλή ροή, με όσο γίνεται πιο ομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων και δίχως δευτερεύουσες ροές και δίνες ανάντι του ακροφυσίου, μαζί με τον περιορισμό των απωλειών λόγω γεωμετρίας του τελευταίου μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τον βαθμό απόδοσης ενός υδροστροβίλου.

### 1.3.3 Η Δυσκολία της Μελέτης και της Σχεδίασης των Υδροστροβίλων Pelton

Η ραγδαία αύξηση του αριθμού των υπολογιστικών προσομοιώσεων που πραγματοποιούνται τα τελευταία χρόνια για την μελέτη και ανάλυση των πολύπλοκων φαινομένων της ροής σε υδροστροβίλους, επέτρεψε την βελτίωση της κατασκευής τους αλλά και την ελάττωση του χρόνου και του κόστους που απαιτείται στη φάση του σχεδιασμού. Η πρόβλεψη της λειτουργικής συμπεριφοράς των υδροστροβίλων, όπως ο υπολογισμός των απωλειών στα διάφορα υποσυστήματα του στροβίλου και άρα του βαθμού απόδοσης αλλά και η δυναμική συμπεριφορά υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας, παρουσιάζει υψηλό ενδιαφέρον για τους κατασκευαστές. Η σχετική ευκολία της μοντελοποίησης των φαινομένων ροής σε στροβίλους αντίδρασης έχει ήδη

συντείνει στην ευρεία χρήση εργαλείων CFD για τον σχεδιασμό τους και την βελτίωση της λειτουργίας τους.

Η σχεδίαση των στροβίλων Pelton, εντούτοις, είναι πάντα δυσκολότερη από αυτή των στροβίλων αντίδρασης. Η δυσκολία αυτή έγκειται στα ποικίλα όσο και πολύπλοκα ροϊκά φαινόμενα τα οποία χαρακτηρίζουν την ροή στους στροβίλους δράσης. Συγκεκριμένα η ροή σε στροβίλους Pelton είναι ταυτόχρονα τυρβώδης, πολυφασική (νερό, αέρας και ενδεχομένως φυσαλίδες ατμού σε περίπτωση σπηλαιώσης) ενώ παρουσιάζει ελεύθερη επιφάνεια, υψηλές ταχύτητες ροής, μεγάλες κλίσεις πίεσης και ταχύτητας, δυναμικές οριακές συνθήκες και τέλος απαιτεί στρεφόμενο πλέγμα λόγω του κινούμενου δρομέα αλλά και της σχετικής κίνησης της δέσμης του νερού. Λόγω των προαναφερθέντων, ο σχεδιασμός των συγκεκριμένων στροβίλων στηρίζεται κυρίως στην αποκτηθείσα τεχνογνωσία και στην εκτενή πειραματική δοκιμή σε πρότυπα μοντέλα μειωμένης κλίμακας και χρήση των κανόνων ομοιότητας. Η μεταφορά των αποτελεσμάτων από τα μοντέλα στις μηχανές πρωτότυπου μεγέθους, εντούτοις, είναι συχνά αναξιόπιστη [31].

Πράγματι, η ροή σε έναν υδροστρόβιλο Pelton συνδυάζει τέσσερα διαφορετικά στάδια:

- (I) Ροή στον ανάντι σωλήνα και στον διανομέα
- (II) ελεύθερες δέσμες μετά την έξοδο των ακροφυσίων
- (III) ροή στην ελεύθερη επιφάνεια των σκαφιδίων
- (IV) διασκορπισμένες ροές στο περίβλημα.

Κάθε στάδιο χαρακτηρίζεται από ένα διαφορετικό χαρακτηριστικό μήκος, μια διαφορετική κλίμακα ταχύτητας, καθορίζεται από διαφορετικές δυνάμεις, όπως συνοψίζονται στον Πίνακα 1.1 με αποτέλεσμα κάποιοι όροι στις εξισώσεις Navier Stokes να μπορούν να αμεληθούν [31]. Οι αδιάστατοι αριθμοί οι οποίοι περιλαμβάνονται στον πίνακα αυτό αναλύονται περαιτέρω στην υποενότητα 2.2.2.

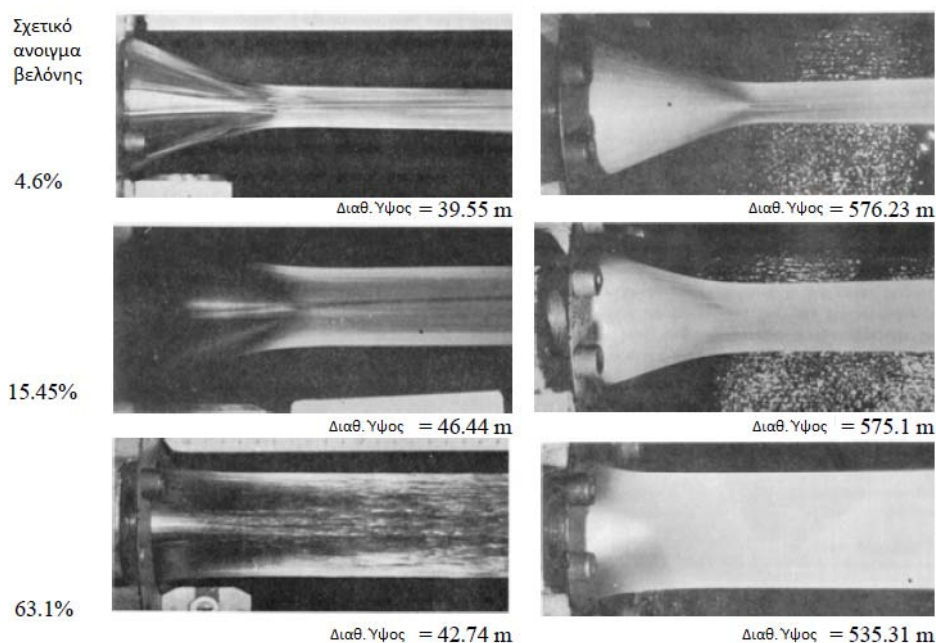
**Πίνακας 1.1:** Χαρακτηριστικά μεγέθη της ροής σε υδροστρόβιλο Pelton [31]

	Length scale	Velocity scale	Reynolds number	Froude number	Weber number
Flow regime	D [mm]	C [m/s]	$Re = \frac{C \cdot D}{\nu}$ [-]	$Fr = \frac{C}{\sqrt{gD}}$ [-]	$We = \frac{\rho C^2 D}{\sigma}$ [-]
Confined flow	200	4.5	$5 \cdot 10^5$	3	—
Water jet	30	40	$6 \cdot 10^5$	80	15
Bucket flow	300	20	$3.2 \cdot 10^6$	12	40
Isolated water droplet	1	5	$3 \cdot 10^3$	100	0.03

Παρατηρώντας τον Πίνακα 1.1, συνάγεται το συμπέρασμα ότι οι νόμοι ομοιότητας για διαφορετικού μεγέθους υδροστροβίλους δεν γίνεται να εφαρμοστούν ταυτόχρονα στα τέσσερα προαναφερθέντα στάδια. Είναι παραδείγματος χάριν αδύνατο να εκπληρωθούν τα κριτήρια ομοιότητας για τις ροές στους σωλήνες και στα σκαφίδια συγχρόνως. Διάφορες εμπειρικές προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια πάνω στην ομοιότητα των μικρού μεγέθους μοντέλων με πραγματικές μηχανές μεγάλου μεγέθους.



Η πραγματοποίηση μετρήσεων σε υδροστροβίλους πραγματικών διαστάσεων είναι ασύμφορη και συνεπώς πρακτικά αδύνατη στη φάση του σχεδιασμού, γεγονός που υπογραμμίζει την ανάγκη χρήσης μεθόδων CFD. Άλλωστε η επίδραση της ταχύτητας της δέσμης και άρα της διαθέσιμης πτώσης στην ποιότητα της δέσμης έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω απόκλιση μεταξύ μοντέλου και πρωτοτύπου, μιας και το μοντέλο διαχειρίζεται μικρότερη παροχή για το ίδιο άνοιγμα βελόνης. Οι δευτερεύουσες ροές που εμφανίζονται προκαλούν μεταβολές στην μορφή της δέσμης και πιο συγκεκριμένα τη διασπορά της, η οποία επίσης επηρεάζεται σημαντικά από την διαθέσιμη πτώση. Στο σχήμα 1.6 επιβεβαιώνονται τα παραπάνω με την αντιπαραβολή των δεσμών που προκύπτουν από μοντέλο και πλήρους μεγέθους υδροστροβίλου για το ίδιο άνοιγμα βελόνης. Είναι φανερό ότι η δέσμη για μεγάλο διαθέσιμο ύψος, στον στρόβιλο πραγματικού μεγέθους δηλαδή, είναι λιγότερο διαφανής, με αυξημένο πάχος της διεπιφάνειας νερού και αέρα.



**Σχήμα 1.6:** Οπτικοποίηση της επιφάνειας της δέσμης για πειραματικό μοντέλο (αριστερά) και πραγματικό υδροστρόβιλο (δεξιά) [30]

## 1.4 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

### 1.4.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούν οι πρόσφατες μελέτες οι οποίες αφορούν στην έρευνα των ροϊκών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε ένα υδροστρόβιλο Pelton. Η έρευνα γενικά μπορεί να χωριστεί σε τρεις βασικούς τομείς, συγκεκριμένα σε πειραματικές, υπολογιστικές και αναλυτικές προσεγγίσεις του προβλήματος.

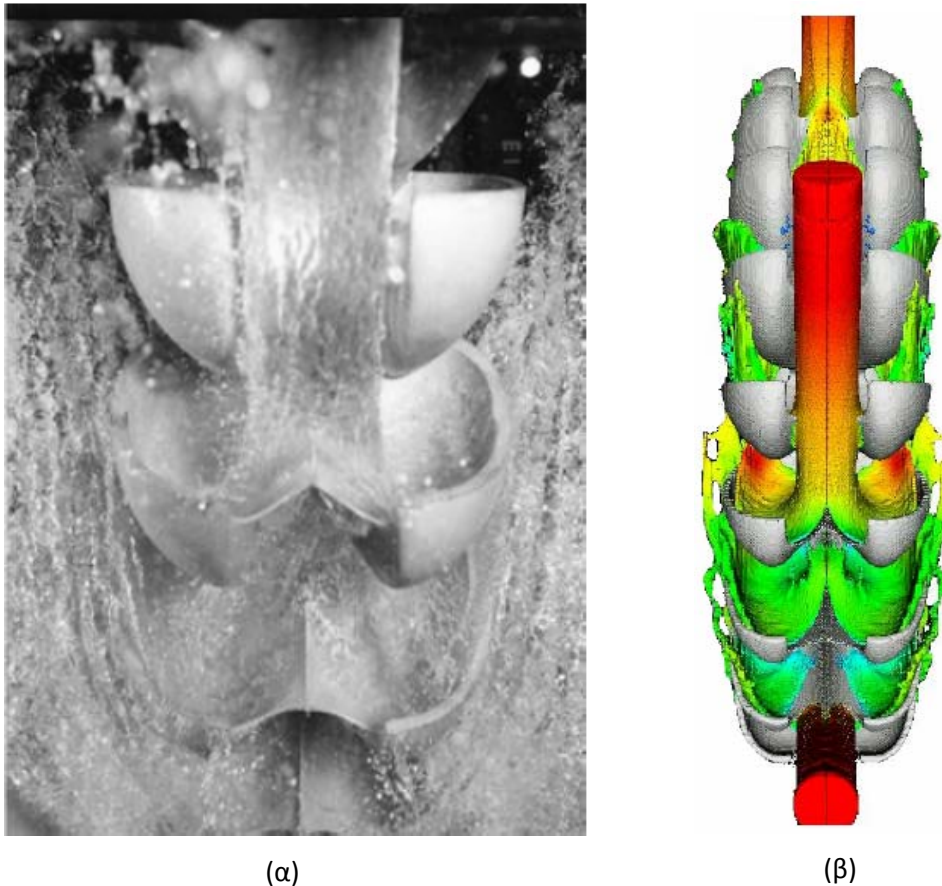
Η πειραματική προσέγγιση περιλαμβάνει κυρίως πειράματα οπτικοποίησης της μορφής της δέσμης αλλά και των παραμορφώσεων που παρουσιάζονται σε αυτή με χρήση διατάξεων που περιλαμβάνουν κάμερες υψηλής ταχύτητας, αισθητήρες, laser και λογισμικό επεξεργασίας. Συγκεκριμένα, η διερεύνηση της ποιότητας της δέσμης και της επίδρασης που αυτή έχει στον βαθμό απόδοσης του στροβίλου πραγματοποιήθηκε με μεθόδους όπως η Laser Doppler Anemometry (LDA) [24, 27, 28, 45, 46] καθώς και με χρήση ειδικών διατάξεων που περιλαμβάνουν camera και στροβοσκόπιο [15, 30, 34, 37, 38, 39]. Παράδειγμα μίας πολύ καλής λήψης της εικόνας της ροής παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.7 [31]. Επίσης πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις του θερμοδυναμικού βαθμού απόδοσης με χρήση θερμομέτρων εξαιρετικής ακρίβειας και ευστάθειας [18, 39] αλλά και μετρήσεις είτε της στατικής [28] είτε της ολικής πίεσης [15, 20, 29], με αισθητήρες πίεσης και σωλήνες pitot.

Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν την πρόβλεψη της ροής με χρήση είτε εμπορικών προγραμμάτων, είτε εξειδικευμένου για το συγκεκριμένο πρόβλημα κώδικα. Χρησιμοποιήθηκε ως επί το πλείστον η μέθοδος πεπερασμένων όγκων καθώς και μοντελοποίηση της διφασικής ροής της δέσμης με χρήση της μεθόδου VOF [8, 14, 18, 26] αλλά και του ομογενούς διφασικού μοντέλου [18, 29, 34], ενώ για τη μοντελοποίηση της τύρβης επιλέχθηκε κυρίως η μέθοδος k- $\omega$  SST [18, 34, 36, 37].

Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με πειραματικά όπου αυτά υπήρχαν με στόχο τον έλεγχο και την βελτίωση του κώδικα επίλυσης [14, 18, 20, 24, 27, 28, 29, 34] ή χρησιμοποιήθηκαν για εξαγωγή συμπερασμάτων σε τμήματα που ήταν δύσκολο (τεχνικά, οικονομικά ή χρονικά) να μετρηθούν πειραματικά [30, 36, 37]. Οι περιπτώσεις υπολογιστικών προσομοιώσεων, οι οποίες επικυρώθηκαν με χρήση πειραματικών δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την παρούσα εργασία, διότι επισημαίνουν την δυνατότητα επιτυχής χρήσης των εργαλείων CFD για την ανάλυση ροών σε υδροστροβίλους Pelton. Περεταίρω ανάλυση των μεθόδων CFD θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.

Είναι ενδιαφέρον ότι πολλές από τις αναφερθείσες ερευνητικές μελέτες χρησιμοποιήθηκαν σε προγράμματα βελτιστοποίησης των υδροστροβίλων. Δηλαδή αφού ελήφθησαν αποτελέσματα από υπολογιστικές προσομοιώσεις και πειράματα, αυτά αξιολογήθηκαν και αποτέλεσαν τη βάση για διάφορες μεταβολές στη γεωμετρία των μηχανών, οι οποίες επέφεραν σημαντικές αυξήσεις στους ολικούς βαθμούς απόδοσης.

Τέλος, πραγματοποιείται έρευνα η οποία στοχεύει στην θεμελίωση θεωρητικών μοντέλων και σχέσεων που να περιγράφουν αναλυτικά τα σύνθετα φαινόμενα της ροής στη δέσμη και τα σκαφίδια και να ποσοτικοποιούν την επίδραση της ποιότητας της δέσμης και της αλληλεπίδρασης της με τα σκαφίδια στον υδραυλικό βαθμό απόδοσης του υδροστροβίλου [44].

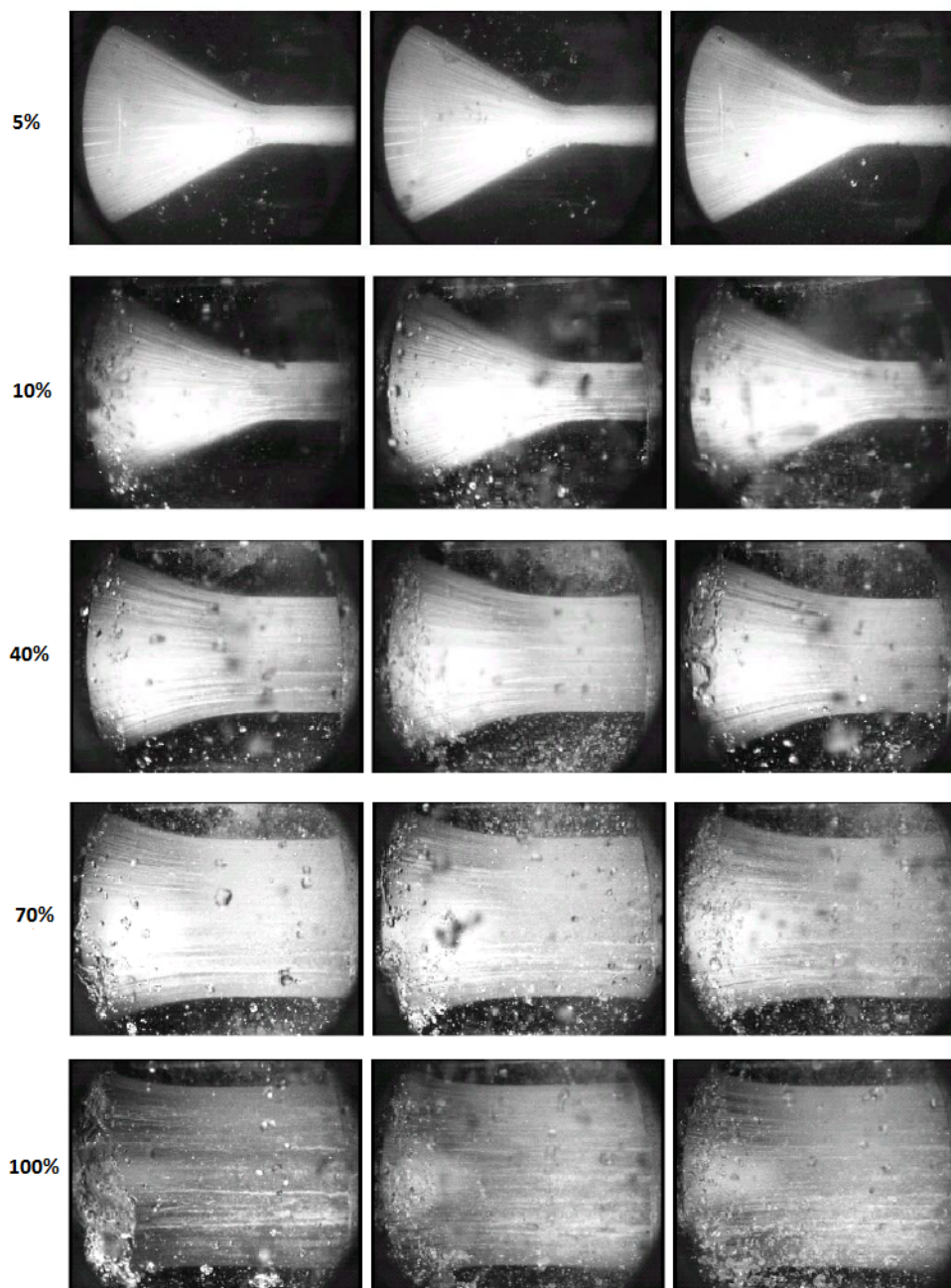


**Σχήμα 1.7:** (α)Οπτικοποίηση της ροής με τη βοήθεια στροβοσκοπίου [31] και (β) οπτικοποίηση της ροής με χρήση CFD [27]

#### 1.4.2 Παρουσίαση Βιβλιογραφίας

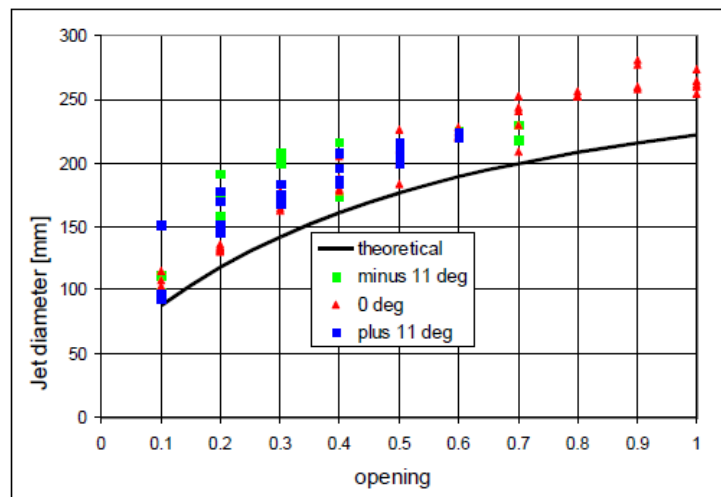
Όπως αναφέρθηκε, η ποιότητα της δέσμης η οποία εξέρχεται από το ακροφύσιο έχει μεγάλη επίδραση στον ολικό βαθμό απόδοσης του υδροστροβίλου. Οι Staubli και Hauser [38] θέλησαν να το επιβεβαιώσουν και για να το πραγματοποιήσουν αυτό, οπτικοποίησαν πειραματικά την ανάπτυξη της ροής στη δέσμη πραγματικού υδροστροβίλου έξι ακροφυσίων και συνολικής ισχύος 57,5 MW. Χρησιμοποιώντας μία ειδική διάταξη κατέγραψαν video σε τρεις γωνίες  $-11^{\circ}, 0^{\circ}, 11^{\circ}$  σε σχέση με την δέσμη. Μάλιστα η καταγραφή πραγματοποιήθηκε σε δύο διαφορετικά ακροφύσια του υδροστροβίλου για μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Αρχικά ανέλυσαν ποιοτικά τα πειραματικά αποτελέσματα και στη συνέχεια τα συνέκριναν με τις θεωρητικές τιμές οι οποίες προκύπτουν βάσει της παροχής και της ταχύτητας εξόδου από το ακροφύσιο. Οι μετρήσεις έγιναν για διάφορα ανοίγματα της βελόνης, από 5% ως 100%. Στο Σχήμα 1.8 παρουσιάζεται η δέσμη, ενδεικτικά σε πέντε διαφορετικές θέσεις της βελόνης. Οι θέσεις αυτές αντιστοιχούν σε άνοιγμα 5%, 10%, 40%, 70% και τέλος 100% (με την ίδια διαθέσιμη πτώση σε κάθε περίπτωση). Σημειώνεται ότι η βέλτιστη ποιότητα εικόνας της δέσμης πραγματοποιήθηκε για άνοιγμα βελόνης 5%. Όσο αυξάνεται το άνοιγμα της βελόνης, συνεπώς και η παροχή, παρατηρείται η ταυτόχρονη αύξηση του μεγέθους των διαταραχών στην επιφάνεια της δέσμης [38].



**Σχήμα 1.8:** Δέσμη στην έξοδο του ακροφυσίου για άνοιγμα βελόνης 5%, 10%, 40%, 70% και 100% [38]

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ύπαρξη διασποράς της δέσμης αμέσως μετά την έξοδο από το ακροφύσιο καθώς και ασταθείς δομές στην επιφάνεια της. Είναι φανερό ότι εξαιτίας αυτών χειροτερεύει η ποιότητα της δέσμης, με συνέπεια την ελάττωση του βαθμού απόδοσης του ακροφυσίου και κατ' επέκταση του υδροστροβίλου. Στο Σχήμα 1.9 παρουσιάζεται η σύγκριση των πειραματικών τιμών της διαμέτρου της δέσμης με τις αντίστοιχες θεωρητικές. Είναι φανερό ότι οι πειραματικές τιμές είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις θεωρητικές, κάτι που επιβεβαιώνει την διασπορά της ελεύθερης επιφάνειας.



**Σχήμα 1.9:** Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της διαμέτρου της δέσμης [38]

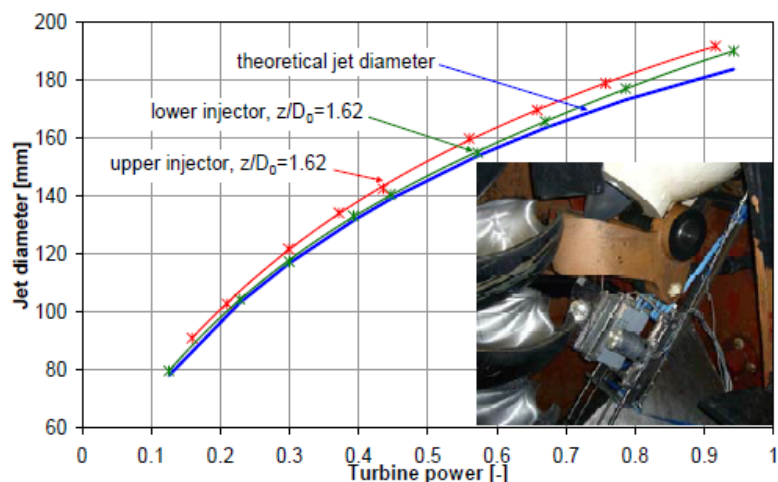
Τέλος, μετέβαλλαν τη γεωμετρία του ακροφυσίου, ελαττώνοντας την γωνία της βελόνης και αυξάνοντας τη γωνία του ακροφυσίου, αλλά και την κατεργασία του ακροφυσίου με σκοπό την βελτίωση της δέσμης. Αν και οι διαταραχές στη δέσμη που οφείλονταν στη ροή ανάντι του ακροφυσίου δεν εξαλείφθηκαν, οι αλλαγές στο ακροφύσιο απέφεραν τελικά βελτίωση 1.2 % στον συνολικό βαθμό απόδοσης σε πλήρες φορτίο, κάτι που υπογραμμίζει την σημασία της ποιότητας της δέσμης στην απόδοση του υδροστροβίλου.

Οι Staubli et al [36, 37] πραγματοποίησαν μία μελέτη για λογαριασμό της Andritz Hydro στην οποία συνδύασαν θερμοδυναμικές μετρήσεις του βαθμού απόδοσης, οπτικοποίηση της ροής, καθώς επίσης και υπολογιστική προσομοίωση της δέσμης υδροστροβίλου Pelton στα πλαίσια ενός προγράμματος βελτιστοποίησης και κατ' επέκτασιν ανακαίνισης των υδροστροβίλων σε τρεις υδροηλεκτρικούς σταθμούς στην Ελβετία.

Κριτήριο σύγκρισης των αποδόσεων αποτέλεσε ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου και η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο η ποιότητα της δέσμης τον επηρεάζει. Τα φαινόμενα της ροής της ελεύθερης επιφάνειας της δέσμης που μελετήθηκαν ήταν η διασπορά της, η εκτροπή από τον θεωρητικό άξονά της, η παραμόρφωση της μορφής της, η στροβιλότητα που παρουσιάζει, τα επίπεδα τύρβης, οι δευτερεύουσες ροές που εμφανίζει, παγιδευμένες φυσαλίδες αέρα οι οποίες προκαλούν απότομη διαστολή της επιφάνειας της δέσμης καθώς επίσης και σταγονίδια νερού που εισέρχονται στη δέσμη έπειτα από πρόσκρουση στο περίβλημα και στα σκαφίδια του υδροστροβίλου. Άλλωστε η οπτικοποίηση της ροής της δέσμης με χρήση κάμερας και οργάνων φωτισμού βοήθησε στην ποσοτική αποτίμηση της διαμέτρου της και κατά συνέπεια της διασποράς και της εκτροπής από τον θεωρητικό της άξονα. Τα αποτελέσματα της έρευνας κατέδειξαν σαφή συσχέτιση του βαθμού απόδοσης του στροβίλου και της ποιότητας της δέσμης.

Ο πρώτος υδροστρόβιλος που μελετήθηκε είναι εγκατεστημένος στον υδροηλεκτρικό σταθμό Sedrun. Πρόκειται για στρόβιλο οριζοντίου άξονα με δύο ακροφύσια. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν θερμοδυναμικές μετρήσεις του βαθμού απόδοσης κατά τη λειτουργία κάθε ακροφυσίου ξεχωριστά. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι ο υδροστρόβιλος παρουσιάζει μειωμένο κατά

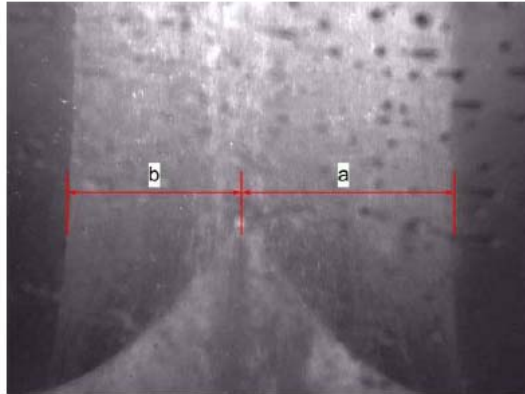
0.5% βαθμό απόδοσης όταν λειτουργεί το άνω ακροφύσιο, σε σχέση με την αντίστοιχη λειτουργία του κάτω ακροφυσίου.



**Σχήμα 1.10:** Μέτρηση διαμέτρου της δέσμης σε απόσταση 1.62 διαμέτρους κατάντι του ακροφυσίου [37]

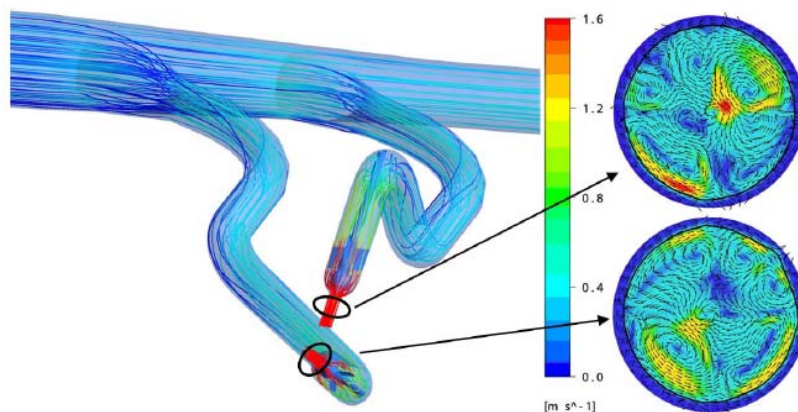
Στο Σχήμα 1.10 παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές της διαμέτρου της δέσμης για κάθε ακροφύσιο σε σχέση με την θεωρητική (μπλε καμπύλη), που προέκυψε από την Εξίσωση (1.16). Παρατηρείται σημαντική απόκλιση στις τιμές της διαμέτρου τόσο μεταξύ των δύο ακροφυσίων όσο και με την αντίστοιχη θεωρητική. Συγκεκριμένα, το άνω ακροφύσιο (κόκκινη καμπύλη) εμφανίζει τη μεγαλύτερη διαφορά από τη θεωρητική διάμετρο, άρα παρουσιάζει και μεγαλύτερη διασπορά της δέσμης. Όπως προαναφέρθηκε, ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου με το άνω ακροφύσιο μόνο του σε λειτουργία είναι χαμηλότερος κατά 0.5% και άρα συνάγεται το συμπέρασμα ότι η αυξημένη διασπορά της δέσμης συσχετίζεται άμεσα με μειωμένο βαθμό απόδοσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαφορά που παρουσιάζει η διασπορά των δύο δεσμών οφείλεται στις πιο απότομες καμπύλες του συστήματος τροφοδοσίας του άνω ακροφυσίου.

Ο δεύτερος υδροστροβίλος που μελετήθηκε είναι εγκατεστημένος στον υδροηλεκτρικό σταθμό Rabiusa-Realta. Είναι και αυτός οριζοντίου άξονα με δύο ακροφύσια, στον οποίο όμως η γωνία μεταξύ των δύο ακροφυσίων είναι 45°, κάτι που προκαλεί μεγαλύτερη αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο δεσμών. Οι θερμοδυναμικές μετρήσεις έδειξαν ότι όταν ο υδροστροβίλος λειτουργεί μόνο με το κάτω ακροφύσιο, ο βαθμός απόδοσης είναι κατά 1.5 % αυξημένος σε σχέση με λειτουργία μόνο του άνω. Μάλιστα είναι μεγαλύτερος και από την περίπτωση στην οποία λειτουργούν και τα δύο ακροφύσια ταυτόχρονα. Παρουσιάζεται για ακόμα μια φορά ο συσχετισμός μεταξύ του χαμηλού βαθμού απόδοσης και της αυξημένης διασποράς της δέσμης. Στο Σχήμα 1.11 παρουσιάζεται η δέσμη του άνω ακροφυσίου τη στιγμή που προσκρούει στον διαχωριστή του σκαφιδίου. Παρατηρείται έντονη απόκλιση της δέσμης από τον θεωρητικό άξονα της όπως είναι φανερό από τον λόγο των αποστάσεων  $a/b$  που είναι 1.18. Η εκτροπή της δέσμης οφείλεται στις αλλαγές κλίσεως του αγωγού τροφοδοσίας ανάντι του ακροφυσίου.



**Σχήμα 1.11:** Εκτροπή της δέσμης στο κάτω ακροφύσιο οπτικοποιημένη μέσω αποστάσεων της επιφάνειας της δέσμης από τον διαχωριστή του σκαφιδίου [36]

Οι δευτερεύουσες ροές στην έξοδο του ακροφυσίου αναλύθηκαν περαιτέρω με χρήση του λογισμικού CFX της ANSYS και του μοντέλου τύρβης SST. Στο Σχήμα 1.12 παρουσιάζονται τα διανύσματα των ταχυτήτων των δεσμών σε τομή κάθετη στην κατεύθυνση της ροής.



**Σχήμα 1.12:** Υπολογιστική προσομοίωση των δευτερευουσών ροών της δέσμης [36]

Παρατηρείται η ασυνήθιστη κατανομή των δευτερευουσών ροών, το μέγιστο μέτρο των οποίων αντιστοιχεί στο 3 % της αξονικής ταχύτητας, καθώς επίσης και η παραμόρφωση του σχήματος της δέσμης, η οποία παύει να είναι κυκλική.

Στον τρίτο υδροηλεκτρικό σταθμό Soazza εφαρμόστηκε η τεχνογνωσία από τις προαναφερθείσες μελέτες για την αντικατάσταση του δρομέα του στροβίλου και την βελτίωση του περιβλήματος. Οι θερμοδυναμικές μετρήσεις πριν την αντικατάσταση παρουσίασαν, όπως και στον πρώτο στρόβιλο, διαφορά στον βαθμό απόδοσης μεταξύ του άνω και του κάτω ακροφυσίου της τάξης του 0.8 %. Έπειτα από την αντικατάσταση παρατηρήθηκε αύξηση του βαθμού απόδοσης κατά 2.5 %, ενώ και η διαφορά στην απόδοση μεταξύ των δύο ακροφυσίων εξαφανίστηκε σχεδόν τελείως.

Συμπερασματικά, η ανωτέρω μελέτη χρησιμοποίησε μεθόδους οπτικοποίησης της ροής ώστε να ποσοτικοποιηθούν μεγέθη όπως η διάμετρος, η διασπορά και η εκτροπή της δέσμης. Στη συνέχεια μέσω πειραματικών αλλά και υπολογιστικών μεθόδων έγινε φανερός ο συσχετισμός της διασποράς της δέσμης με το μειωμένο βαθμό απόδοσης αλλά και των κλίσεων στον αγωγό ανάντι του ακροφυσίου, με την εκτροπή της δέσμης από τον θεωρητικό άξονά της.

Αντίστοιχα έργα βελτίωσης σε δύο μεγάλους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, με βάση τη μελέτη των απωλειών στους υδροστροβίλους Pelton λόγω της ποιότητας της ελεύθερης δέσμης πραγματοποιήθηκαν από τους Peron et al [30]. Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκε η επίδραση της ποιότητας της δέσμης που εξαρτάται από παράγοντες όπως το σχήμα της, η κατανομή ταχυτήτων της καθώς και η διασπορά της στην απόδοση αλλά και τη σπηλαιώση των υδροστροβίλων Pelton.

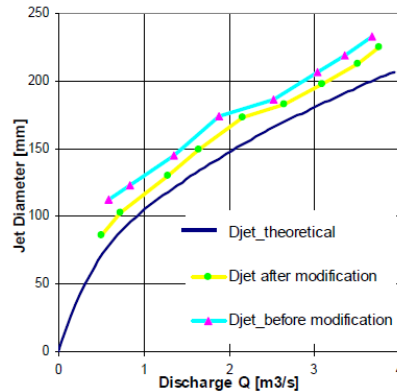
Αρχικά μελετήθηκε ένας υδροστροβίλος μονού ακροφυσίου ο οποίος μέσα σε τρεις μήνες λειτουργίας παρουσίαζε ασύμμετρες φθορές λόγω σπηλαιώσης στην επιφάνεια των σκαφιδίων και σε σημείο εκτός της επιφάνειας που καλύπτει η θεωρητική διάμετρος της δέσμης. Θεωρήθηκε ότι ευθύνη για τη φθορά αυτή έχει η διασπορά της δέσμης η οποία με τη σειρά της δημιουργείται λόγω των δυνάμεων που προκύπτουν από τις αλλαγές κλίσεως του συστήματος διανομής του υδροστροβίλου. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση CFD, η οποία επιβεβαίωσε την επίδραση της παραμόρφωσης της δέσμης λόγω δευτερευουσών ροών ανάντι της δέσμης στην εμφάνιση των φθορών.

Αποφασίστηκε η προσθήκη οδηγών πτερυγίων εντός του τελικού συστήματος έγχυσης ώστε να εξαλειφθούν οι δευτερεύουσες ροές και να βελτιωθεί η ποιότητα της δέσμης. Πράγματι, όταν πραγματοποιήθηκε νέα υπολογιστική προσομοίωση παρατηρήθηκε βελτίωση στην ποιότητα της δέσμης, γεγονός που οδήγησε στην εξαφάνιση της σπηλαιώσης στα σκαφίδια. Τα ανωτέρω καταδεικνύουν την σημασία που έχει ο περιορισμός της παραμόρφωσης και της διασποράς της δέσμης και κατά συνέπεια η βελτίωση της ποιότητάς της, τόσο στην αύξηση του βαθμού απόδοσης, όσο και στον περιορισμό των φθορών λόγω σπηλαιώσης.

Στον δεύτερο υδροστροβίλο που εξετάστηκε, ο οποίος ήταν οριζοντίου άξονα και μονού ακροφυσίου, πραγματοποιήθηκαν αλλαγές στη γεωμετρία του προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα της δέσμης και να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης του. Στη συνέχεια οπτικοποιήθηκε η ροή με χρήση πρότυπης διάταξης και η οποία έδειξε ότι η μεταβολή στη γεωμετρία του ακροφυσίου οδήγησαν στην ελάττωση της γωνίας διασποράς της ελεύθερης δέσμης.

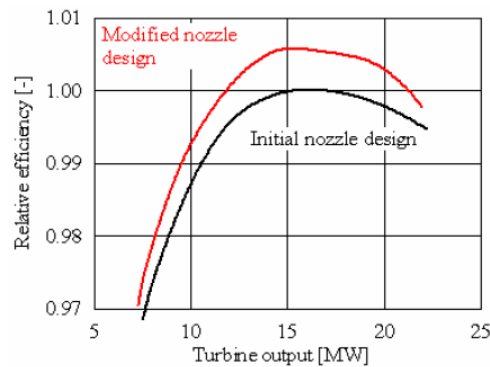
Στο Σχήμα 1.13 παρουσιάζεται η σύγκριση της πραγματικής διαμέτρου της δέσμης, όπως προέκυψε από την οπτικοποίηση της ροής πριν και μετά την τροποποίηση στη γεωμετρία του ακροφυσίου, με την αντίστοιχη θεωρητική τιμή. Συγκεκριμένα, η διάμετρος της δέσμης που προέκυψε έπειτα από την τροποποίηση του ακροφυσίου (κίτρινη καμπύλη) προκύπτει χαμηλότερη από την προηγούμενη (γαλάζια καμπύλη) και πλησιάζει την αντίστοιχη θεωρητική τιμή (μπλε καμπύλη). Η ελάττωση της διαμέτρου οφείλεται στην μείωση της διασποράς της δέσμης.





**Σχήμα 1.13:** Σύγκριση πραγματικής διαμέτρου της δέσμης πριν και μετά την τροποποίηση [30]

Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώθηκαν εκ των υστέρων με υπολογιστική προσομοίωση, η οποία κατέδειξε ότι η μεταβολές στη γεωμετρία του ακροφυσίου οδήγησαν σε μείωση της έντασης της διασποράς. Κατά συνέπεια, το πεδίο πίεσης κατανεμήθηκε σε μικρότερη περιοχή του σκαφιδίου και έτσι πλησίασε το υδροδυναμικό βέλτιστο, αυξάνοντας τον βαθμό απόδοσης του δρομέα. Συνοψίζοντας, η αντικατάσταση που πραγματοποιήθηκε στο ακροφύσιο, οδήγησε σε αύξηση του βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου σε όλο το εύρος λειτουργίας του, λόγω της μείωσης της διασποράς της ελεύθερης δέσμης, η οποία αγγίζει το 0.6 % όπως είναι φανερό και από το Σχήμα 1.14.

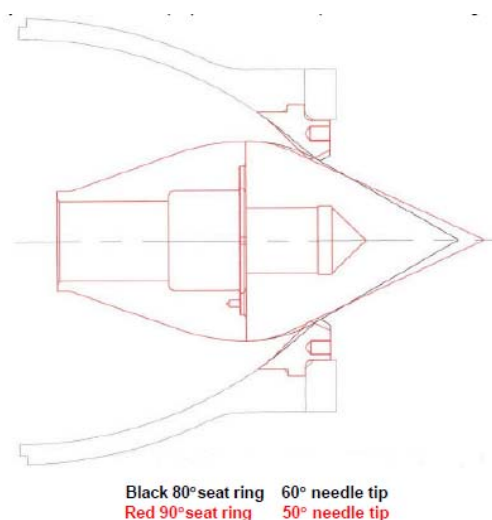


**Σχήμα 1.14:** Σύγκριση βαθμού απόδοσης πριν και μετά την τροποποίηση [30]

Η δημοσίευση του Gass [15] αποτελεί την περιγραφή ενός προγράμματος βελτίωσης των υδροστροβίλων Pelton ενός υδροηλεκτρικού σταθμού, το οποίο προέκυψε έπειτα από τα αποτελέσματα που πραγματοποιήθηκαν από τον Staubli στο [30]. Συγκεκριμένα, αρχικά αντικαταστάθηκαν τα σκαφίδια του υδροστροβίλου με μικρότερου μεγέθους, δηλαδή αυξήθηκε ο λόγος μεταξύ ονομαστικής διαμέτρου δρομέα PCD και πλάτους σκαφιδίου  $D_1/B_2$ , όμως ο βαθμός απόδοσης αυξήθηκε μόλις κατά 0.3 %. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με μετατροπείς πίεσης υψηλής ακρίβειας και ακουστικά παροχόμετρα.

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της μελέτης που ο ίδιος είχε πραγματοποιήσει [30], ο Staubli πρότεινε αλλαγή στη γεωμετρία της βελόνης. Συγκεκριμένα, πρότεινε σχεδίαση συμβατή με πιο σύγχρονα πρότυπα, όπου οι γωνίες μεταβλήθηκαν από 80° σε 90° για το ακροφύσιο και

από  $60^\circ$  σε  $50^\circ$  για τη γωνία της βελόνης όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.15 (με μαύρο περίγραμμα η παλιά γεωμετρία και με κόκκινο η νέα).



**Σχήμα 1.15:** Μετατροπή γωνιών ακροφυσίου και βελόνης [15]

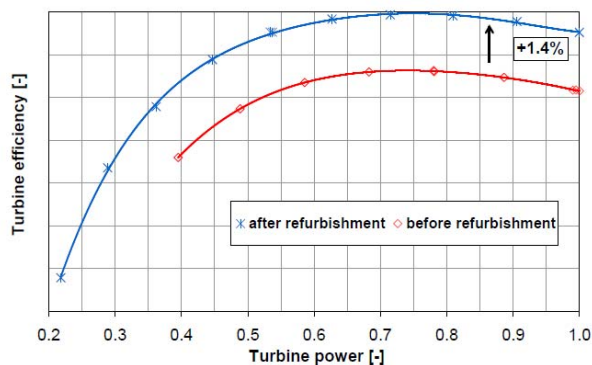
Η αντικατάσταση αυτή βελτίωσε την ποιότητα της δέσμης, επειδή η αύξηση της γωνίας εξόδου της επέφερε ελάττωση της διασποράς και της απόκλισής της. Οι πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν έπειτα από τις αλλαγές στη γεωμετρία στον βελτιωμένο υδροστρόβιλο, έδειξαν αύξηση του βαθμού απόδοσης κατά 0.5 % στο 60 % του φορτίου και κατά 0.9 % όταν λειτουργούσε σε πλήρες φορτίο.

Στη δημοσίευση την οποία εξέδωσαν οι Staubli et al. καταγράφηκε μία παρόμοια μελέτη ανακαίνισης των τριών υδροστροβίλων Pelton του υδροηλεκτρικού σταθμού HPP Rothenbrunnen στην Ελβετία, οι οποίοι είναι οριζοντίου άξονα και με δύο ακροφύσια ο καθένας [39]. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν θερμοδυναμικές μετρήσεις του βαθμού απόδοσης καθώς επίσης και οπτικοποίηση της ροής με τις ίδιες μεθόδους που περιγράφηκαν στο [30]. Οι μελέτες αυτές επικεντρώθηκαν στη βελτίωση της ποιότητας της δέσμης, με σκοπό την αύξηση του βαθμού απόδοσης των στροβίλων.

Από τα προγράμματα ανακαίνισης που προτάθηκαν, επιλέχθηκε η αντικατάσταση των ακροφυσίων καθώς και η βελτίωση του ήδη υπάρχοντος περιβλήματος του στροβίλου έναντι πιο δραστηκών και άρα κοστοβόρων μεθόδων. Οι αλλαγές αυτές θεωρήθηκε ότι θα είχαν ως αποτέλεσμα αφενός την βελτίωση της ποιότητας της δέσμης λόγω ελάττωσης των απωλειών και αύξησης της επιτάχυνσης της, και αφετέρου την εξάλειψη των σημείων του περιβλήματος που προκαλούσαν διαταραχές στη δέσμη, λόγω επιστροφής σε αυτή δεσμίδων προσκρούοντος ρευστού.

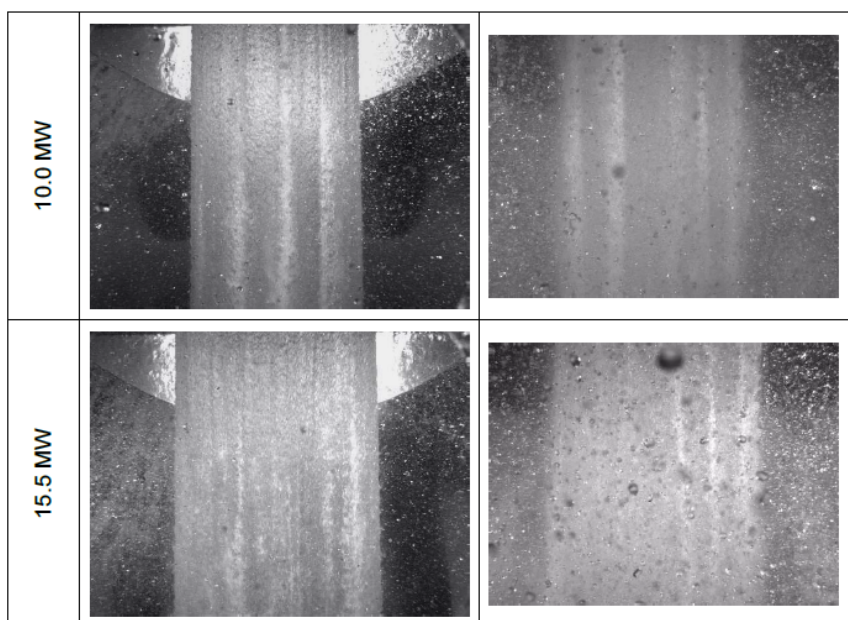
Οι θερμοδυναμικές μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με χρήση θερμομέτρων μεγάλης ακρίβειας και ευστάθειας, μετά την αντικατάσταση έδειξαν, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.16, αύξηση του βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου σε όλο το εύρος λειτουργίας του και η οποία έφτασε το 1.4 % καθώς και αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος κατά 10%.

Άλλωστε, η οπτικοποίηση της ροής έδειξε σαφή βελτίωση της ποιότητας της ελεύθερης δέσμης, η οποία οφείλεται στην ελάττωση των διαταραχών της επιφάνειάς της, στην μείωση της διασποράς της καθώς επίσης και στην ελάττωση των ποσοτήτων σταγονιδίων ρευστού που επιστρέφουν στη δέσμη έπειτα από πρόσκρουση με το περίβλημα του υδροστροβίλου.



**Σχήμα 1.16:** Σύγκριση βαθμού απόδοσης υδροστροβίλων [39]

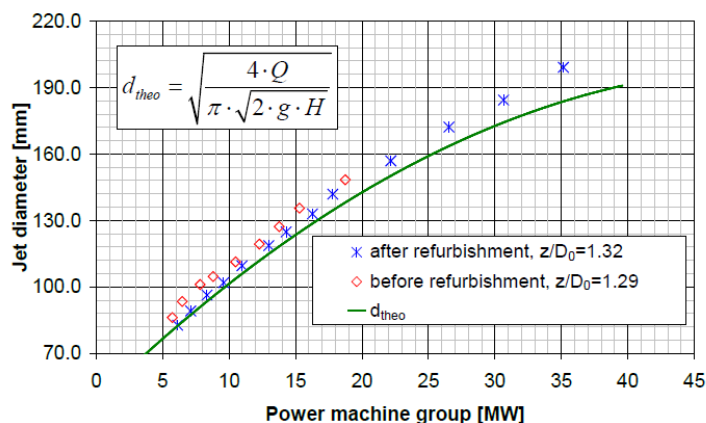
Στο Σχήμα 1.17 παρουσιάζεται ενδεικτικά, για δύο διαφορετικά φορτία λειτουργίας του υδροστροβίλου, η οπτικοποίηση της ελεύθερης δέσμης, όπου είναι φανερή η βελτίωση της ποιότητας της μετά την τροποποίηση. Να σημειωθεί ότι οι εικόνες τραβήχτηκαν σε αδιαστατοποιημένη απόσταση από την έξοδο του ακροφυσίου  $z/D_o$ , όπου  $D_o$ , η διάμετρος εξόδου του ακροφυσίου.



**Σχήμα 1.17:** Οπτικοποίηση της δέσμης μετά (αριστερά, για  $z/D_o=1.61$ ) και πριν (δεξιά, για  $z/D_o=1.68$ ) από την τροποποίηση του υδροστροβίλου [39]

Τέλος, στο Σχήμα 1.18 συγκρίνονται η θεωρητική τιμή της διαμέτρου της δέσμης για διάφορες τιμές του φορτίου, με τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές που προέκυψαν από την οπτικοποίηση

της ροής πριν και μετά την ανακαίνιση του υδροστροβίλου. Η διάμετρος της δέσμης μετά την τροποποίηση παρουσιάζει μικρότερη απόκλιση από την θεωρητική τιμή, κάτι που οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε, στην ελάττωση της διασποράς της.



**Σχήμα 1.18:** Μέτρηση της διασποράς της ελεύθερης δέσμης πριν και μετά την τροποποίηση [39]

Στην μελέτη των Parkinson et al. [28], καταγράφηκε η διαδικασία βελτίωσης των υδροστροβίλων του υδροηλεκτρικού σταθμού Bieudron, που όπως προαναφέρθηκε, αποτελούν τους μεγαλύτερους σε λειτουργία στροβίλους Pelton στον κόσμο. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε υδραυλική ανάλυση της ροής τους με χρήση εμπορικών προγραμμάτων CFD, των οποίων τα αποτελέσματα επικυρώθηκαν με πειραματικές μετρήσεις.

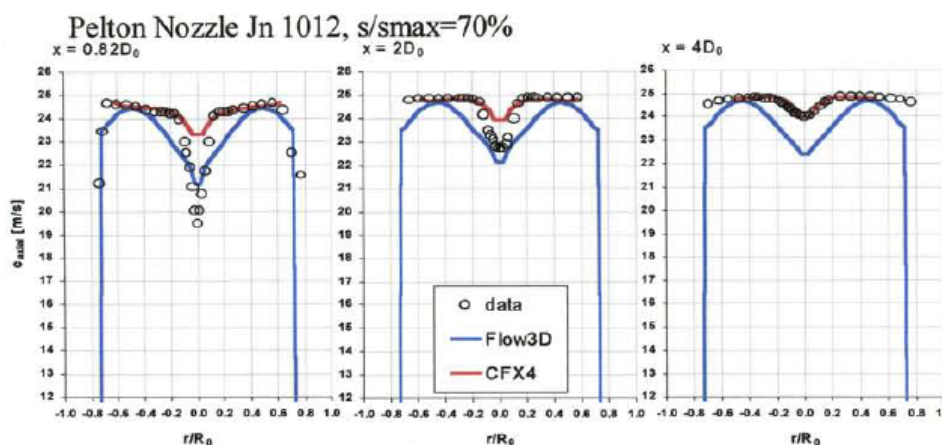
Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε τρεις διαφορετικές βαθμίδες του υδροστροβίλου. Αρχικά προσομοιώθηκε η ροή στον διανομέα με χρήση του CFX-TASCflow και μοντέλο τύρβης k-ε. Τα αποτελέσματα έδειξαν καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά (μετρήσεις πίεσης και οπτικοποίηση της ροής), όμως θεωρήθηκε ότι οι απώλειες στο σύστημα διανομής έχουν μικρότερη επίδραση στον βαθμό απόδοσης του στροβίλου σε σχέση με τις αντίστοιχες στο ακροφύσιο.

Σε δεύτερη φάση, προσομοιώθηκε η ροή στο ακροφύσιο με χρήση δύο κωδίκων: αρχικά ένας κώδικας μονοφασικής ροής που περιλάμβανε και τη ροή στον διανομέα, τα αποτελέσματα του οποίου στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν ως συνθήκες εισόδου ενός πολυφασικού μοντέλου για τον υπολογισμό της ροής στο ακροφύσιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ροή στο ακροφύσιο παρουσίαζε ανομοιομορφία ταχυτήτων, υψηλή στροβιλότητα και υψηλή παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας.

Μάλιστα παρατηρήθηκε ότι όταν ο στροβίλος λειτουργούσε με ανοιχτό το δεύτερο κατά σειρά ακροφύσιο, από τα πέντε συνολικά που διέθετε, ο βαθμός απόδοσης παρουσιαζόταν κατά 0.5% ελαττωμένος σε σχέση με την περίπτωση που λειτουργούσε μόνο του το πέμπτο και τελευταίο ακροφύσιο. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη καμπυλότητα του διανομέα καθώς και την αποκόλληση της ροής που συμβαίνει στη διακλάδωση, τα οποία προκαλούν ανομοιομορφίες στη ροή.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της ροής στην ελεύθερη επιφάνεια της δέσμης ρευστού με χρήση του μοντέλου volume of fluid (VOF), λόγω της διφασικής ροής νερού

και αέρα. Χρησιμοποιήθηκαν δύο εμπορικοί κώδικες, οι Flow 3-D και CFX-4, τα αποτελέσματα των οποίων επικυρώθηκαν με πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο LDA καθώς και μετρήσεις στατικής πίεσης. Η σύγκριση των μετρήσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.19, όπου παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών τιμών των ταχυτήτων.



**Σχήμα 1.19:** Σύγκριση προφίλ ταχυτήτων σε τρεις διατομές της δέσμης μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών τιμών [28]

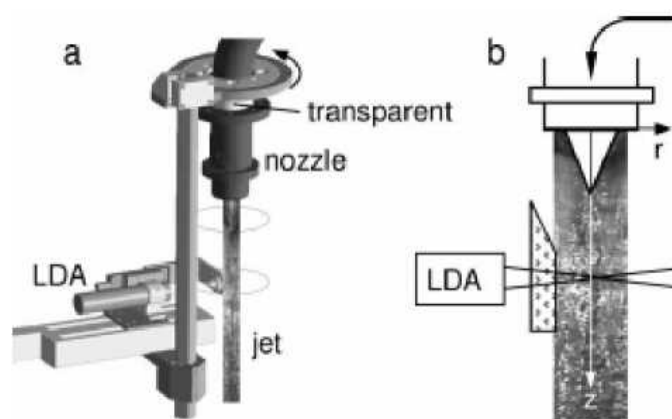
Τέλος, προσομοιώθηκε η ιδιαίτερως πολύπλοκη ροή του ρευστού στα σκαφίδια του στροβίλου, η δυσκολία της οποίας έγκειται στη μη μονιμότητά της, στην ύπαρξη ελεύθερης επιφάνειας αλλά και κινούμενου συστήματος αναφοράς. Χρησιμοποιήθηκε το διαφασικό μοντέλο VOF, ενώ η τύρβη μοντελοποιήθηκε με Large Eddy Simulation (LES). Οι οριακές συνθήκες εισόδου του ρευστού στα σκαφίδια ήταν οι κατανομές ταχυτήτων από τους υπολογισμούς στη δέσμη που πραγματοποιήθηκαν στην προηγούμενη φάση της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα επικυρώθηκαν με πειραματικές μετρήσεις σε πρότυπο υδροστρόβιλο και έδωσαν ικανοποιητική σύγκλιση, αν και παρατηρήθηκαν κάποιες διαφορές στην κατανομή της πίεσης, κάτι που οφείλεται στη δυσκολία τοποθέτησης μετατροπέων πίεσης στα άκρα του σκαφιδίου.

Συμπερασματικά, η μελέτη κατέδειξε την ολοένα και πιο επιτυχημένη χρήση κωδίκων CFD, σε συνδυασμό με πειραματικά αποτελέσματα αλλά και εμπειρική γνώση, για τη φυσική κατανόηση των πολύπλοκων φαινομένων ροής σε υδροστρόβιλο Pelton και κατά συνέπεια τον σχεδιασμό τους, αλλά και την ανάγκη περισσότερων επικυρωμένων υπολογιστικών προσομοιώσεων.

Οι Zhang και Casey [45] πραγματοποίησαν τρία πειράματα με σκοπό την ανάλυση της ελεύθερης δέσμης σε ακροφύσιο ενός υδροστροβίλου Pelton, που όπως ειπώθηκε παρουσιάζει πληθώρα φαινομένων που την καθιστούν ιδιαίτερα περίπλοκη. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν τη μέθοδο LDA έτσι ώστε να αναγνωρίσουν τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την διαμόρφωση της δέσμης και της ελεύθερης επιφάνειάς της. Εξέτασαν λοιπόν την επίδραση που έχουν στην τελική μορφή της δέσμης, δηλαδή στο σχήμα της, την τοπολογία και τον προσανατολισμό της, οι δευτερεύουσες ροές που αναπτύσσονται λόγω γωνιών στον διανομέα, η ανομοιόμορφη και με στροβιλότητα ροή στην είσοδο του ακροφυσίου καθώς και η τυρβώδης μεταφορά ορμής μεταξύ της δέσμης και του περιβάλλοντος αέρα.

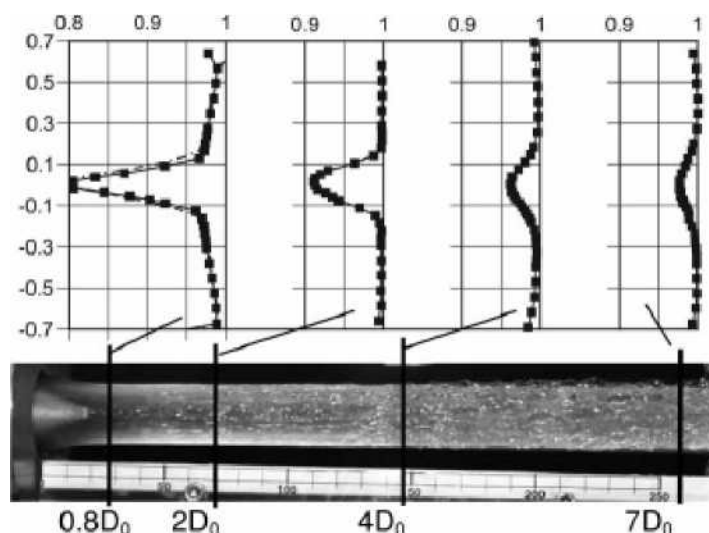
Στο πρώτο πείραμα, το ακροφύσιο συνδέθηκε με ευθύγραμμο σωλήνα τεσσάρων μέτρων έτσι ώστε η ροή εισόδου σε αυτό να είναι ομοιόμορφη, ενώ το ύψος πίεσης κυμαινόταν από 10 ως 30 μέτρα. Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου πειράματος χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρο σύγκρισης για τις επόμενες μετρήσεις, μιας και δεν παρουσιάζουν φαινόμενα στροβιλότητας. Στο δεύτερο πείραμα το ακροφύσιο συνδέθηκε με γωνία  $90^\circ$  και το ύψος πίεσης ήταν σταθερό στα 30 mSY. Με αυτή τη διάταξη επιτεύχθηκε η ροή εισόδου στο ακροφύσιο να είναι τριδιάστατη και να περιλαμβάνει δευτερεύουσες ροές, με στροβιλότητα. Στο τρίτο μετρήθηκε η δέσμη που προκύπτει από έναν πραγματικό διανομέα έξι ακροφυσίων με ύψος πίεσης 90 mSY, κάτι που είχε ως αποτέλεσμα την ύπαρξη ανομοιόμορφης ροής στην είσοδο του ακροφυσίου και ροϊκές διαταραχές.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ενός συστήματος LDA (Laser Doppler Anemometry), που μετρά την ταχύτητα της δέσμης με χρήση ακτίνων laser. Το σύστημα περιστρέφεται γύρω από τη δέσμη, ενώ ένα γυαλί που εφάπτεται στη δέσμη επιτρέπει στις ακτίνες να την διαπερνούν. Στο Σχήμα 1.20 παρουσιάζεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.



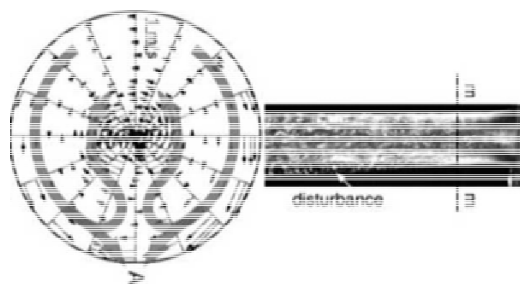
**Σχήμα 1.20:** Πειραματική διάταξη συστήματος LDA μέτρησης της ελεύθερης δέσμης [45]

Στο Σχήμα 1.21 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του πρώτου πειράματος, όπου η αξονική ταχύτητα των σωματιδίων της δέσμης έχει αδιαστατοποιηθεί με την ταχύτητα  $u_o = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$ . Αρχικά, παρατηρείται το έλλειμα της ταχύτητας στον πυρήνα της δέσμης, κάτι που οφείλεται στην τριβή του ρευστού με την επιφάνεια του βελόνης. Μετρήσεις σε διαφορετικά ύψη πίεσης κατέδειξαν ότι ο πυρήνας αυτός γίνεται στενότερος όσο μεγαλώνει το ύψος. Επίσης, αξίζει να επισημανθεί ότι στην θέση  $0.8 D_o$  κατόπιν του ακροφυσίου η κατανομή των ταχυτήτων της δέσμης δεν είναι ομοιόμορφη εκτός του πυρήνα. Το παραπάνω οφείλεται στην τριβή του ρευστού με τα τοιχώματα του ακροφυσίου, διότι λόγω της κλίσης των τοιχωμάτων του ακροφυσίου η στατική πίεση αυξάνεται κατά μήκος τους και δεδομένου ότι η ολική πίεση παραμένει σταθερή, η ταχύτητα μειώνεται.



**Σχήμα 1.21:** Κατανομή αξονικών ταχυτήτων της δέσμης για ακροφύσιο συνδεδεμένο με ευθύ σωλήνα ( $H=30m$ ) [45]

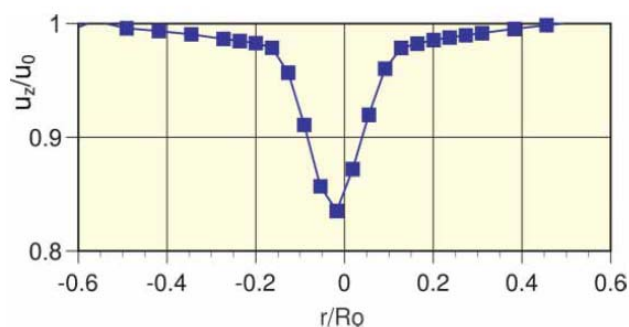
Το δεύτερο πείραμα επισήμανε την σημαντική επίδραση της γωνίας πριν το ακροφύσιο στην διαμόρφωση της ροής της δέσμης. Συγκεκριμένα, παρατηρείται στο Σχήμα 1.22 ότι η δέσμη μετά από μικρή απόσταση, εμφανίζει διαταραχή και αποκλίνει της ευθείας πορείας. Στο ίδιο σήμα παρουσιάζεται επίσης και η κατανομή εφαπτομενικών ταχυτήτων, όπου είναι φανερή η ύπαρξη δύο σχεδόν συμμετρικών δινών οι οποίες συναντώνται στο σημείο A, δημιουργώντας μία περιοχή πολύ υψηλής αστάθειας. Αυτές οι δευτερεύουσες ροές στη δέσμη είναι συνέχεια των δευτερευουσών ροών που υπάρχουν στην είσοδο του ακροφυσίου, κατάντι της αλλαγής κλίσης του αγωγού όπως έδειξε η ίδια δημοσίευση. Σε αυτή της περίπτωση η επιφάνεια της δέσμης παραμορφώνεται και χάνει το κυκλικό της σχήμα, γεγονός που σε συνδυασμό με την επίδραση του αέρα επηρεάζει την ποιότητα της δέσμης.



**Σχήμα 1.22:** Εφαπτομενικές ταχύτητες της δέσμης για ακροφύσιο συνδεδεμένο με γωνία  $90^\circ$  και διαταραχή στην επιφάνεια της δέσμης ( $H=30m$ ) [45]

Το Σχήμα 1.23 αποτελεί το προφίλ των αξονικών ταχυτήτων στη θέση  $0.8 D_0$ , για το δεύτερο πείραμα. Παρατηρείται η μετατόπιση του κέντρου της δέσμης, η οποία οφείλεται στις δευτερεύουσες ροές που προκύπτουν από την γωνία του αγωγού. Αξίζει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση πολλαπλών ακροφυσίων, η δέσμη κάθε ακροφυσίου διαφέρει από τις άλλες. Αυτό

προκύπτει από την διαφορετική ροή ανάντι κάθε ακροφυσίου λόγω διαφορών στη γεωμετρία τους αλλά και σε άλλους παράγοντες (πχ φθορά).



**Σχήμα 1.23:** Κατανομή αξονικής ταχύτητας της δέσμης στη θέση  $0.8 D_o$  για αγωγό κλίσης  $90^\circ$  [45]

Συγκεντρωτικά, τα συμπεράσματα από τις μετρήσεις και την επεξεργασία τους έδειξαν την πολύ μεγάλη επίδραση που έχει στον σχηματισμό της δέσμης ο διανομέας (για τον Pelton έξι ακροφυσίων), οι γωνίες πριν το ακροφύσιο και η διαμόρφωση του ακροφυσίου. Οι μικρές δευτερεύουσες ροές που δημιουργούνται από τις αλλαγές κλίσεων και την εσωτερική διαμόρφωση του αγωγού εισόδου συνεχίζουν να υπάρχουν και μέσα στη δέσμη, επηρεάζοντας την ποιότητά της. Παρατηρήθηκε επίσης ότι τα πτερύγια στήριξης της βελόνης δεν επηρεάζουν σημαντικά την δέσμη.

Όταν η δέσμη εξέλθει του ακροφυσίου, η απουσία τοιχωμάτων και η ύπαρξη δευτερευουσών ροών την παραμορφώνουν και την εκτρέπουν από την πορεία της. Έτσι οι δευτερεύουσες ροές στην ελεύθερη δέσμη προκαλούν: α) τη διασπορά της, β) την εκτροπή σωματιδίων από τη βασική δέσμη περίπου κατά  $0.8^\circ$  και γ) την απόκλιση ολόκληρης της δέσμης από τον άξονα της κατά περίπου  $1\text{mm}$  ή  $0.4^\circ$  μετά από απόσταση  $4 D_o$ .

Από τα προηγηθέντα είναι φανερό ότι η ροή στη δέσμη παύει να είναι αξονοσυμμετρική ενώ εμφανίζει και συστροφή. Την κατάσταση επιδεινώνει η τυρβώδης μεταφορά ορμής μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας της δέσμης και του περιβάλλοντος αέρα. Τα παραπάνω οδηγούν σε υδραυλικές απώλειες στον δρομέα, αφού αλλοιώνεται η γωνία πρόσπτωσης στα σκαφίδια, ενώ το ρευστό έχει ήδη απωλέσει ένα τμήμα της ορμής του με αποτέλεσμα την πτώση του βαθμού απόδοσης του στροβίλου. Υπολογίζεται ότι οι απώλειες λόγω της ποιότητας της δέσμης αγγίζουν το 1%, κάτι που καθιστά την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης των υπόψιν φαινομένων επιτακτική.

Οι Zhang et al. δημοσίευσαν μία μελέτη στην οποία χρησιμοποίησαν την μέθοδο LDA για να πραγματοποιήσουν μετρήσεις κατανομών ροϊκών μεγεθών σε δύο διαφορετικές διατομές της ίδιας διάταξης. Συγκεκριμένα, αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε αγωγό κατάντι μιας γωνίας  $90^\circ$ , όσο και στη δέσμη ελεύθερης επιφάνειας που εξέρχεται από ένα πρότυπο ακροφύσιο [46]. Η επιτυχία των μετρήσεων βασίστηκε, στην πρώτη περίπτωση στην ελαχιστοποίηση του φαινομένου αστιγματισμού, ενώ στην περίπτωση της δέσμης εισήχθη μία μέθοδος δυικής μέτρησης (dual measurement method), η οποία επιλύει ακριβώς, ακόμα και τις μικρότερες



ταχύτητες δευτερευουσών ροών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, τα οποία αφορούν τις κατανομές αξονικών και εφαπτομενικών ταχυτήτων στις διατομές που προαναφέρθηκαν, ανέδειξαν τα ιδιαίτερα ροϊκά φαινόμενα των συγκεκριμένων ροών, τα οποία αφορούν την ποιότητα της δέσμης και την ευστάθεια της ροής. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν και για την επικύρωση υπολογιστικών προσομοιώσεων.

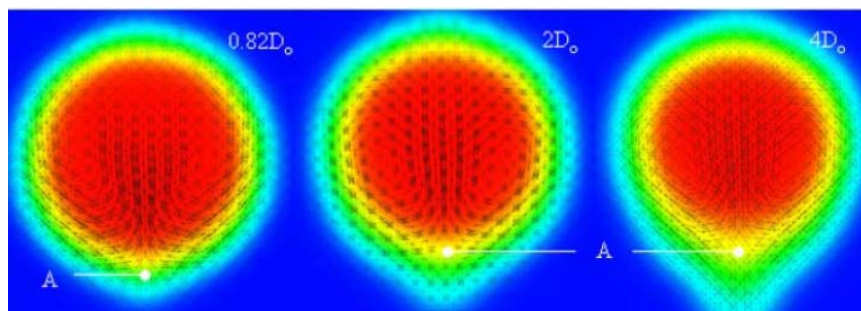
Οι Parkinson et al το 2002 δημοσίευσαν μία μελέτη στην οποία συνδέουν πειραματικά με υπολογιστικά αποτελέσματα της ροής ελεύθερης δέσμης υδροστροβίλου Pelton [27]. Συγκεκριμένα χρησιμοποίησαν τα πειραματικά αποτελέσματα του [46] τα οποία αφορούσαν τη ροή σε ακροφύσιο κατάντι μίας γωνίας  $90^\circ$ , και οι οποίες είχαν πραγματοποιηθεί με χρήση του LDA. Όπως προαναφέρθηκε, τα αποτελέσματα αυτά αφορούσαν τις αξονικές και εφαπτομενικές κατανομές ταχυτήτων στην ελεύθερη επιφάνεια της δέσμης καθώς και την ακριβή επίλυση των δευτερευουσών ροών. Να σημειωθεί ότι οι δευτερεύουσες ροές προέκυψαν πολύ ασθενέστερες της κύριας, μιας και τα μέτρα τους αντιστοιχούν στο 1-2 % της αξονικής ταχύτητας.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε υπολογιστική προσομοίωση σε CFX-5 με τη χρήση ενός μοντέλου ελεύθερης επιφάνειας, τα αποτελέσματα της οποίας επικυρώθηκαν με τις κατανομές που προέκυψαν από τη χρήση LDA [46] και με τις οποίες ήταν σε πλήρη συμφωνία. Στο Σχήμα 1.24 παρουσιάζεται η εξερχόμενη από το ακροφύσιο ροή για περίπτωση ευθύ αγωγού (αριστερά) και αγωγού που έχει γωνία  $90^\circ$  ανάντι του (δεξιά).



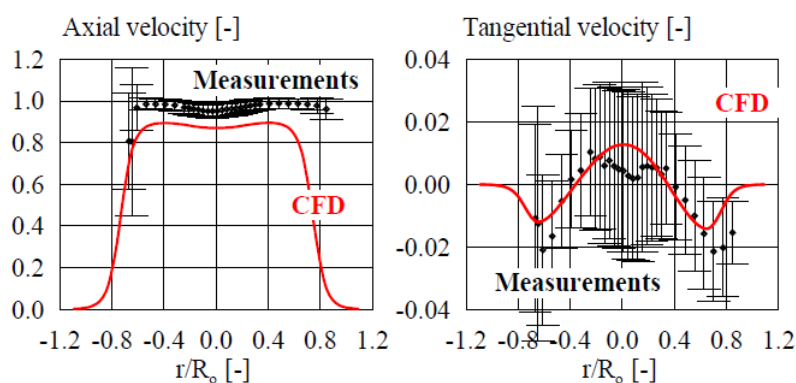
**Σχήμα 1.24:** Ελεύθερη δέσμη εξερχόμενη από ακροφύσιο συνδεδεμένο με ευθύ αγωγό (αριστερά) και γωνία  $90^\circ$  (δεξιά) ανάντι [27]

Είναι φανερό η διαφορά μεταξύ των δύο δεσμών, μιας και στη δεύτερη περίπτωση παρατηρείται η διαταραχή της κυλινδρικής μορφής της έπειτα από τη vena contracta. Υπεύθυνα για τη διαταραχή αυτή είναι τα πεδία δευτερευουσών ταχυτήτων, τα οποία προκαλούνται από τη γωνία  $90^\circ$  και στη συνέχεια μεταφέρονται στην ελεύθερη δέσμη, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 1.25, όπου απεικονίζεται η κατανομή του κλάσματος όγκου νερού-αέρα της ροής, για διατομές σε αποστάσεις  $0.82 D_o$ ,  $2D_o$  και  $4D_o$  από τη μύτη της βελόνης. Η διαταραχή στη μορφή της δέσμης (σημείο A στο Σχήμα 1.25) εμφανίζεται να αναπτύσσεται κατά μήκος του άξονα της δέσμης, ακριβώς όπως παρατηρείται και πειραματικά. Η πλήρης συμφωνία μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών μετρήσεων ως προς την τοπολογία των δευτερευουσών ροών συντείνει για την ορθότητά της.



**Σχήμα 1.25:** Κλάσμα όγκου νερού-αέρα και πεδία δευτερευουσών ροών στην ελεύθερη δέσμη για διάταξη με κλίση  $90^\circ$  ανάντι [27]

Στο Σχήμα 1.26 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των αριθμητικών και πειραματικών κατανομών αξονικών (αριστερή εικόνα) και εφαπτομενικών ταχυτήτων (δεξιά εικόνα) σε διατομή  $2D_o$  από τη μύτη της βελόνης. Το προφίλ των εφαπτομενικών ταχυτήτων παρουσιάζει εξαιρετική συμφωνία, ενώ η σύγκριση των αξονικών ταχυτήτων εμφανίζει υποεκτίμηση των αριθμητικών τιμών, δεδομένου ότι οι απώλειες στο υψηλά επιταχυνόμενο ακροφύσιο υπερεκτιμήθηκαν.

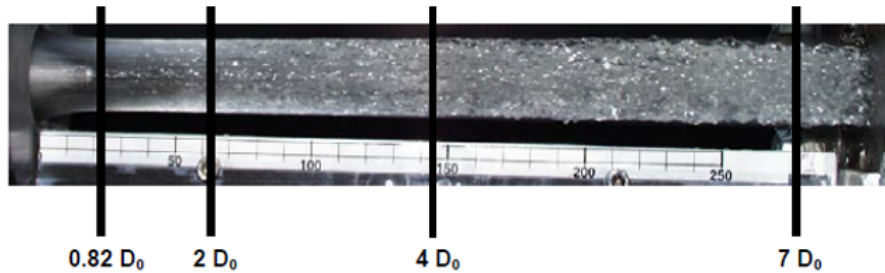


**Σχήμα 1.26:** Αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα αξονικών και εφαπτομενικών ταχυτήτων σε διατομή  $2D_o$  από τη μύτη της βελόνης για διάταξη με κλίση  $90^\circ$  [27]

Οι Muggli και Zhang παρουσίασαν μία μελέτη [24] στην οποία συνδύασαν πειραματικά αποτελέσματα, με υπολογιστική προσομοίωση της ροής της δέσμης ελεύθερης επιφάνειας κατάντι υδροστροβίλου Pelton. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των κατανομών ταχυτήτων της δέσμης σε τέσσερις διαφορετικές διατομές (σε αποστάσεις από την έξοδο του ακροφυσίου  $0.82D_o$ ,  $2D_o$ ,  $4D_o$  και  $7D_o$ ) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο LDA [27, 45, 46]. Η ανάλυση των φωτογραφιών που προέκυψαν από την οπτικοποίηση αυτή έδωσαν πολύτιμες πληροφορίες για τη μορφή, την επιφάνεια της δέσμης καθώς επίσης και τις παραμορφώσεις που υφίσταται όπως η διασπορά, η απόκλιση από τον άξονά της κ.α. Τα αποτελέσματα αυτά άλλωστε χρησιμοποιήθηκαν και για τη επικύρωση των αριθμητικών προσομοιώσεων.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικά σημεία λειτουργίας, με τη θέση της βελόνης να χαρακτηρίζεται από τη σχετική της τιμή  $S/S_{max}$  όπου το  $S_{max}$  αντιστοιχεί στην τελείως ανοιχτή θέση. Στο σχήμα 1.27 παρουσιάζεται στιγμιότυπο της ροής για ύψος πτώσης 30mΣΥ και

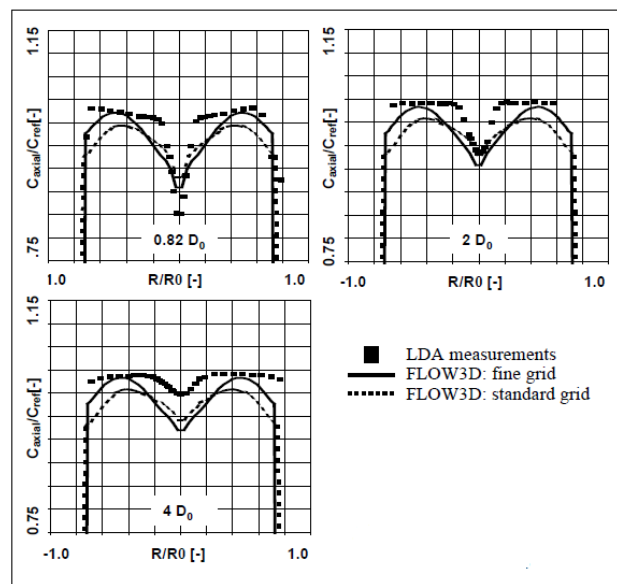
σχετικό άνοιγμα βελόνης  $S/S_{max}=70\%$ , μαζί με τα τέσσερα σημεία στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις με τη μέθοδο LDA.



**Σχήμα 1.27:** Οπτικοποίηση της ροής στη δέσμη και θέσεις μετρήσεων LDA [24]

Μελετήθηκε η επίδραση ενός σχετικά μικρού εύρους αριθμών Reynolds στη μορφή της δέσμης λόγω του ότι το διαθέσιμο ύψος πτώσης ήταν περιορισμένο ως τα 30 mΣΥ. Τα προφίλ ταχυτήτων που προέκυψαν ήταν συμμετρικά λόγω της ομοιόμορφης κατανομής ταχυτήτων ανάντι του ακροφυσίου, ενώ διαπιστώθηκε ότι τα στηρικτικά πτερύγια δεν έχουν επίδραση στη δέσμη που εξέρχεται.

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με χρήση δύο διαφορετικών εμπορικών λογισμικών, στα οποία χρησιμοποιήθηκε η ίδια γεωμετρία για αραιά και πυκνά διδιάστατα πλέγματα καθώς και ίδιες ή παρόμοιες οριακές συνθήκες. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό FLOW-3D και το πλέγμα δημιουργήθηκε με σταθερά ορθογώνια στοιχεία, ενώ το μοντέλο τύρβης που επιλέχθηκε είναι το k-ε RNG, ενώ η ελεύθερη επιφάνεια υπολογίστηκε βάσει του VOF. Η δεύτερη προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με χρήση του CFX-4 και χρήση του μοντέλου k-ε standard για την τύρβη και του ομογενούς για την διφασική ροή.

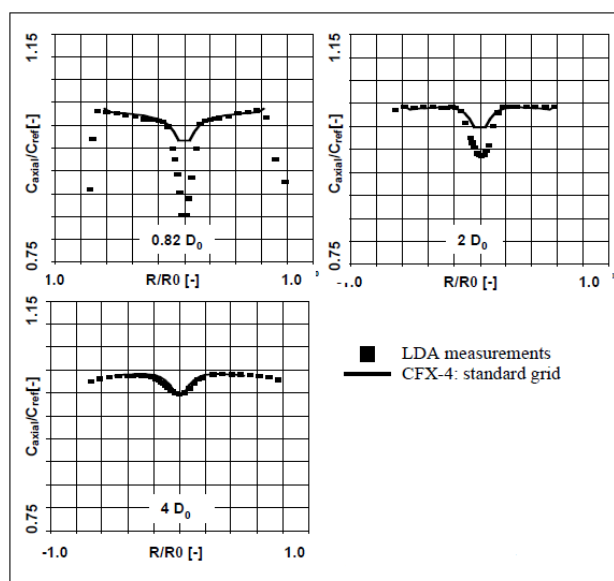


**Σχήμα 1.28:** Κατανομές ταχυτήτων στη δέσμη (FLOW-3D) για 30m ΣΥ και  $S/S_{max} = 70\%$  [24]

Τα αριθμητικά αποτελέσματα του FLOW-3D έχουν αρκετά καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.28, όπου απεικονίζονται οι κατανομές αξονικών

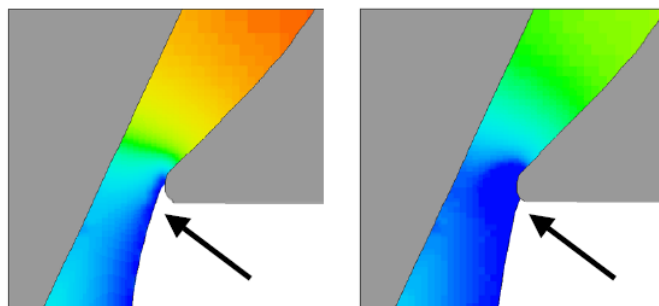
ταχυτήτων για διατομές σε απόσταση  $0.82D_o$ ,  $2D_o$  και  $4D_o$  από την έξοδο του ακροφυσίου και για ύψος  $30m\Sigma Y$  και  $S/S_{max} = 70\%$ . Αν και η μορφή των κατανομών δεν ταυτίζεται ακριβώς με τις πειραματικές τιμές, το πεδίο ροής έχει προβλεφθεί πολύ καλά ενώ και η διεπιφάνεια των δύο φάσεων είναι αρκετά οξεία.

Στην δεύτερη προσομοίωση οι κατανομές αξονικών ταχυτήτων που προέκυψαν από το CFX-4 παρουσιάζουν καλύτερη συμφωνία με τις πειραματικές, όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 1.29 για τις διατομές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη περίπτωση. Η διεπιφάνεια των δύο φάσεων απεικονίζεται με μικρότερη ακρίβεια από την προσομοίωση με το FLOW-3D. Αξίζει να σημειωθεί πως ο όγκος λόγω της βελόνης, σε απόσταση  $0.82D_o$  από την έξοδο του ακροφυσίου υποεκτιμήθηκε και από τους δύο κώδικες.



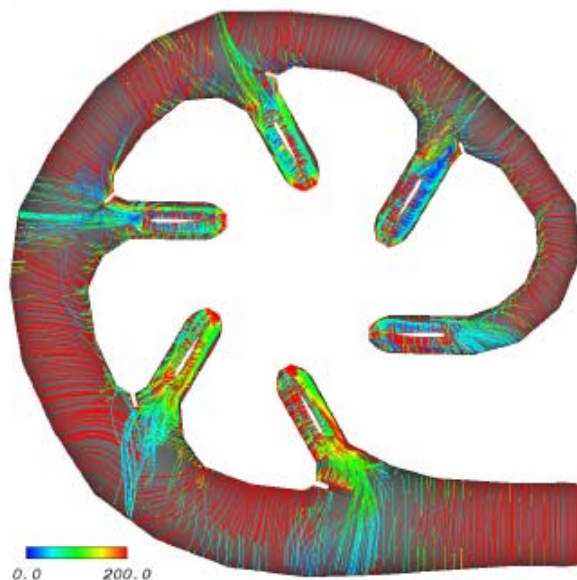
**Σχήμα 1.29:** Κατανομές ταχυτήτων στη δέσμη (CFX-4) για  $30m\Sigma Y$  και  $S/S_{max} = 70\%$  [24]

Τέλος, να σημειωθεί ότι είναι ιδιαίτερα σημαντικός ο υπολογισμός του σημείου από το οποίο η δέσμη εξέρχεται από το στόμιο του ακροφυσίου, έτσι ώστε να επιτευχθεί ακριβής πρόβλεψη της μορφής και της ταχύτητας της δέσμης. Έτσι, αν το σημείο αυτό δεν υπολογιστεί σωστά, η διάμετρος της δέσμης θα υπερεκτιμηθεί, με αποτέλεσμα τον υπολογισμό αξονικών ταχυτήτων πολύ μικρότερων των πραγματικών. Στο Σχήμα 1.30 παρουσιάζεται η σωστή πρόβλεψη (αριστερή εικόνα) του σημείου αυτού, κάτι το οποίο πέτυχαν και οι δύο προαναφερθέντες κώδικες.



**Σχήμα 1.30:** Λεπτομέρειες της εξερχόμενης από το ακροφύσιο δέσμης (ισοϋψείς πίεσης) [24]

Οι Sadlo et al ανέλυσαν τη ροή σε διανομέα υδροστροβίλου Pelton, μελετώντας κυρίως την κατανομή του στροβιλισμού και τον ρόλο που έχει στον σχηματισμό των δινών που παράγονται, αλλά και την οπτικοποίηση των δινών αυτών [33]. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τεχνικές για την οπτικοποίηση της στροβιλότητας, όπως οι δυναμικές γραμμές και οι τροποποιημένες ισοποσοτικές επιφάνειες. Αν και η μελέτη αυτή ξεφεύγει από τα όρια της παρούσης εργασίας, ενδεικτικά στο Σχήμα 1.31 παρουσιάζονται οι πεδιακές γραμμές στροβιλότητας χρωματισμένες ανάλογα με το αντίστοιχο μέτρο τους.

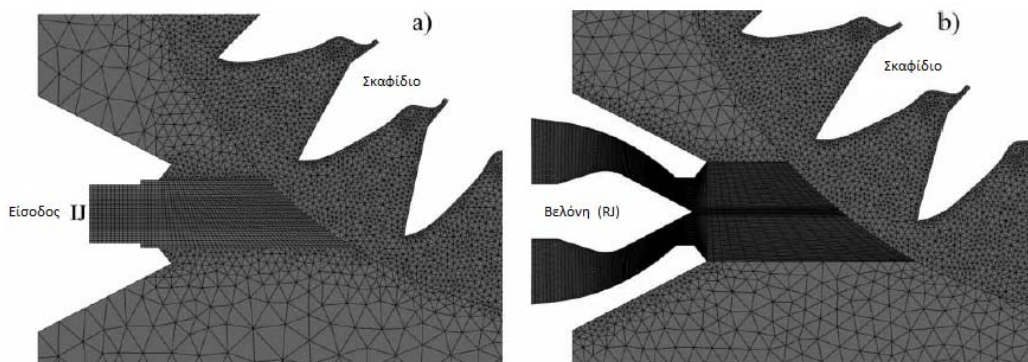


**Σχήμα 1.31:** Κάτοψη πεδιακών γραμμών στροβιλότητας διανομέα υδροστροβίλου Pelton [33]

Οι Santolin et al. το 2009 πραγματοποίησαν υπολογιστική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ δέσμης ρευστού και σκαφιδίων σε υδροστρόβιλο Pelton μονού ακροφυσίου εγκατεστημένο σε υδροηλεκτρικό σταθμό στη βόρεια Ιταλία [34]. Πραγματοποιήθηκε λεπτομερής ανάλυση της παραγόμενης ροπής, η οποία επεσήμανε την επίδραση της μορφής της ελεύθερης δέσμης στις απώλειες του στροβίλου και συνεπώς στον βαθμό απόδοσής του. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν επικυρώθηκαν με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα από την εγκατάσταση του υδροστροβίλου.

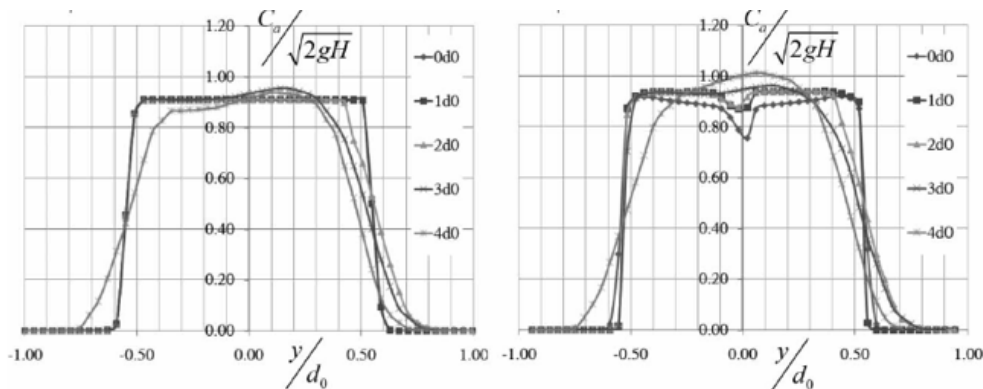
Αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν μεταξύ τους δύο διαφορετικές διατάξεις της δέσμης, συγκεκριμένα αφενός η αλληλεπίδραση που έχει με τα σκαφίδια η ιδεατή δέσμη (IJ), δηλαδή δέσμη η οποία προκύπτει από απλό ακροφύσιο, δίχως βελόνη και αφετέρου η πραγματική δέσμη (RJ), δηλαδή διάταξη η οποία περιλαμβάνει και τις σωληνώσεις ανάντι του ακροφυσίου. Κάθε διάταξη είχε διαφορετικά χαρακτηριστικά, αφού η ιδεατή δέσμη είχε αξονοσυμμετρική κατανομή ταχυτήτων, η οποία εμπόδιζε την εμφάνιση δευτερευουσών ροών και άρα πρακτικά η μόνη διαταραχή που εμφανίζονταν στη δέσμη αφορούσε την τριβή με τον αέρα και τη βαρύτητα. Αντίθετα, στην πραγματική δέσμη επιδρούσαν τόσο οι δευτερεύουσες ροές, όσο και ο όγκος που προέκυπτε από τη βελόνη.

Πραγματοποιήθηκε μη μόνιμη υπολογιστική προσομοίωση με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού CFX-11 και προτιμήθηκε το μη ομογενές διφασικό μοντέλο λόγω μεγαλύτερης ευστάθειας. Το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το k- $\omega$  SST με αυτόματες συναρτήσεις τοιχώματος, ενώ ως οριακή συνθήκη εισόδου εφαρμόστηκε ο ρυθμός παροχής μάζας του διερχόμενου ρευστού. Στο Σχήμα 1.32 παρουσιάζεται λεπτομέρεια των υπολογιστικών πλεγμάτων των δύο διατάξεων. Συγκεκριμένα, στην αριστερή εικόνα απεικονίζεται η διάταξη ιδεατής δέσμης, ενώ στη δεξιά, η πραγματική δέσμη με τη βελόνη. Να σημειωθεί ότι η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε πλήρες φορτίο, διότι θεωρήθηκε ότι τα υπό εξέταση ρευστοδυναμικά φαινόμενα θα παρουσιάζονταν μεγεθυμένα.



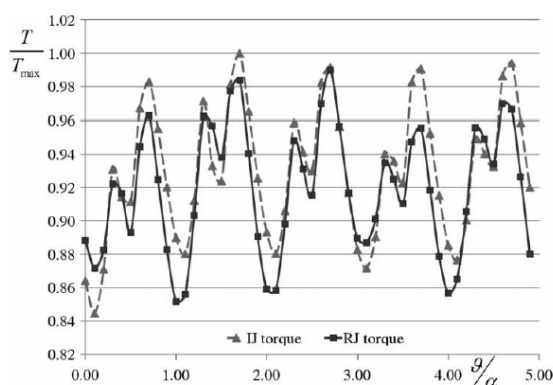
**Σχήμα 1.32:** Λεπτομέρειες των υπολογιστικών πλεγμάτων (α) ιδεατής και (β) πραγματικής διάταξης δέσμης [34]

Στο Σχήμα 1.33 παρουσιάζεται η εξέλιξη των αξονικών κατανομών ταχυτήτων σε πέντε διαφορετικές διατομές από την έξοδο του ακροφυσίου. Η αξονική ταχύτητα  $c_a$  και η απόσταση  $y$  από τον άξονα της δέσμης αδιαστατοποιήθηκαν με την θεωρητική ταχύτητα  $\sqrt{2gH}$  και την θεωρητική διάμετρο  $d_o$  αντίστοιχα. Στις τρεις πρώτες διαδοχικές διατομές ( $0d_o$ ,  $1d_o$  και  $2d_o$ ), οι κατανομές ταχυτήτων είναι παρόμοιες, με εξαίρεση το έλλειμμα ταχύτητας που παρουσιάζεται στον πυρήνα της πραγματικής δέσμης λόγω της παρουσίας της βελόνης. Στις δύο τελευταίες θέσεις ( $3d_o$  και  $4d_o$ ), παρόλο που και οι δύο κατανομές παρουσιάζουν μέγιστο στην άνω πλευρά της δέσμης ( $0 < y/d_o < 0.4$ ), η κατανομή της πραγματικής δέσμης παρουσιάζει αστάθεια προς τα θετικά του άξονα και χαρακτηρίζεται από μία στενότερη μορφή.



**Σχήμα 1.33:** Σύγκριση κατανομών αξονικών ταχυτήτων σε πέντε διατομές κάθετες στον άξονα ιδεατής δέσμης [34]

Οι διαφορές οι οποίες προκύπτουν στις κατανομές μεταξύ της πραγματικής και της ιδεατής δέσμης, οφείλονται τόσο στην τριβή του ρευστού με τη βελόνη στην περίπτωση της πραγματικής δέσμης, όσο και στις δευτερεύουσες ροές που εμφανίζονται σε αυτή. Δεδομένου μάλιστα ότι δεν υπάρχουν στην ιδεατή δέσμη δίνες, οι οποίες χαρακτηρίζουν τις δευτερεύουσες ροές, είναι προφανές ότι παρουσιάζονται στις σωληνώσεις ανάντι του ακροφυσίου της πραγματικής διάταξης. Κατά τη μελέτη της επίδρασης των χαρακτηριστικών της δέσμης στην απόδοση του υδροστροβίλου, διερευνήθηκε η μεταφορά ενέργειας στις δύο διατάξεις. Υπολογίστηκε η παραγόμενη ροπή, αδιαστατοποιημένη με τη μέγιστη ροπή που μετρήθηκε, συναρτήσει της γωνίας του δρομέα σε χρονικό διάστημα πέντε γωνιακών βημάτων,  $\alpha$ , και προέκυψε το διάγραμμα του Σχήματος 1.34.



**Σχήμα 1.34:** Ροπή ασκούμενη από πραγματική δέσμη (RJ) και ιδανική δέσμη (IJ) στον δρομέα συναρτήσει της γωνιακής θέσης [34]

Η παραγόμενη από την πραγματική διάταξη ροπή εμφανίζεται σε όλες τις γωνίες μικρότερη της αντίστοιχης ιδεατής, κάτι που συνεπάγεται μικρότερη μεταφορά ενέργειας από τη δέσμη ρευστού στα σκαφίδια και άρα χαμηλότερο βαθμό απόδοσης υδροστροβίλου από τον ιδεατό. Το διαταραγμένο πεδίο ροής της πραγματικής δέσμης και η παραμορφωμένη δέσμη επηρεάζουν τις συνθήκες αλληλεπίδρασης δέσμης-σκαφιδίων, οδηγώντας σε μεταφορά ενέργειας συγκεντρωμένης κυρίως στην φάση φόρτισης των σκαφιδίων, με ταυτόχρονη απότομη ελάττωση στην φάση αποφόρτισης. Αποτέλεσμα των παραπάνω ήταν ο βαθμός απόδοσης της ιδεατής διάταξης να υπολογιστεί κατά 2 % περίπου υψηλότερος από τον αντίστοιχο της πραγματικής δέσμης.

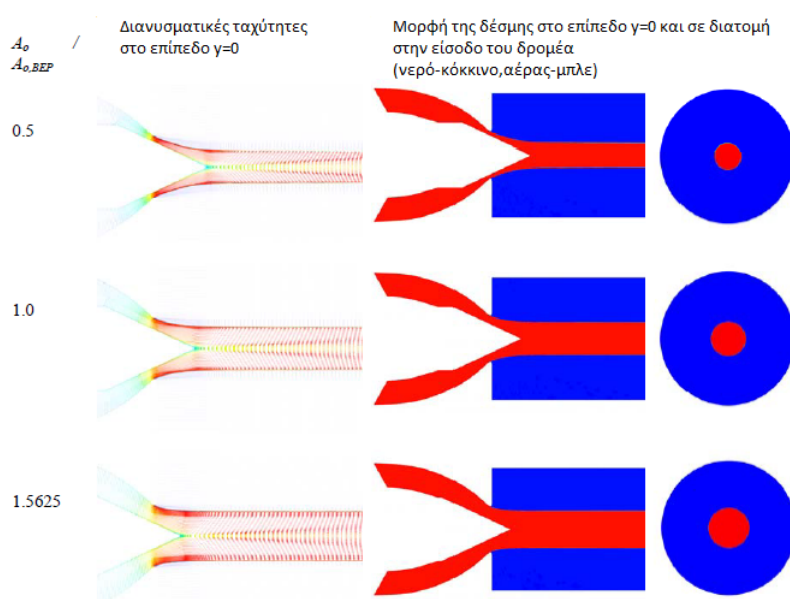
Οι Jost et al πραγματοποίησαν υπολογιστική διερεύνηση του βαθμού απόδοσης για έναν υδροστροβίλο Pelton οριζόντιου άξονα με δύο ακροφύσια και σε διάφορα σημεία λειτουργίας, τα αποτελέσματα της οποίας συνέκριναν με πειραματικές μετρήσεις [18]. Η προσομοίωση αυτή πραγματοποιήθηκε στον εμπορικό κώδικα CFX-12.1 και χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο τύρβης  $k-\omega$  SST, ενώ η ροή ελεύθερης επιφάνειας στη δέσμη αναλύθηκε με διφασικό ομογενές μοντέλο. Αρχικά αναλύθηκε η ροή στον διανομέα με τα δύο ακροφύσια σε λειτουργία και μόνιμες συνθήκες για διάφορα ανοίγματα της βελόνης, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μη μόνιμη ανάλυση της διφασικής ροής της δέσμης στον δρομέα.

Η μόνιμη ανάλυση της ροής στο διανομέα πραγματοποιήθηκε σε τρία διαφορετικά ανοίγματα

της βελόνης με σκοπό την διερεύνηση της ποιότητας του. Η γωνία μεταξύ των δύο ακροφυσίων ήταν  $75^\circ$ , ενώ το πλέγμα υφίστατο τοπική πύκνωση ανάλογα με το πάχος της δέσμης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι δευτερεύουσες ροές που προκύπτουν από τη ροή στον διανομέα μεταξύ άλλων, προκαλούν παραμόρφωση στη δέσμη αλλά και ανομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων, επιδρώντας δραστικά στον βαθμό απόδοσης του ακροφυσίου και του στροβίλου κατ' επέκτασιν.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ροής στον διανομέα συγκρίθηκαν με θεωρητικές τιμές της ταχύτητας και του πάχους της δέσμης και παρουσίασαν ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, τα πάχη της δέσμης προέκυψαν 1.4-2 % λεπτότερα των αντίστοιχων θεωρητικών τιμών. Οι μέσες και ανώτατες ταχύτητες (πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία των ταχυτήτων λόγω της ανομοιόμορφης κατανομής τους) που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση παρουσίαζαν μία υπερεκτίμηση των θεωρητικών τιμών, της τάξης του 0.35 % και 1.7 % αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 1.35 παρουσιάζεται το γράφημα των διανυσματικών ταχυτήτων στο επίπεδο  $\gamma=0$  και του πάχους της δέσμης για τρία διαφορετικά ανοίγματα βελόνης  $A_o/A_{o,BEP}$ , όπου  $A_{o,BEP}$  το άνοιγμα στο κανονικό σημείο λειτουργίας. Παρατηρείται ότι λόγω του καλού σχεδιασμού του διανομέα δεν παρουσιάζεται διασπορά και απόκλιση της ελεύθερης δέσμης. Ο ακριβής υπολογισμός των παραπάνω μεγεθών είναι σημαντικός για την πρόβλεψη του βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου και για τον λόγο αυτό δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην τοπική πύκνωση των πλεγμάτων.

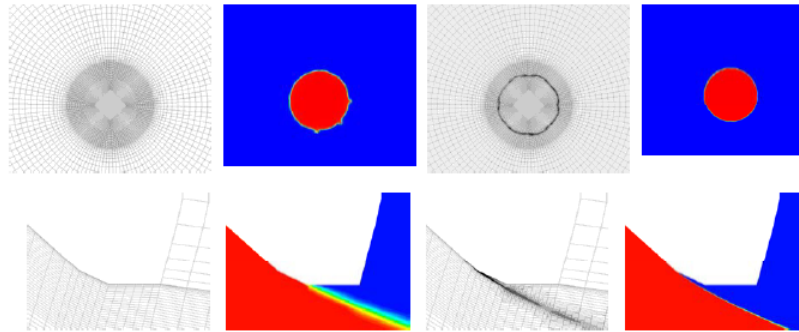


**Σχήμα 1.35:** Γράφημα διανυσμάτων ταχυτήτων στο επίπεδο  $\gamma=0$  και πάχος και μορφή δεσμών για διαφορετικά ανοίγματα σε πυκνωμένο πλέγμα [18]

Στο Σχήμα 1.36 παρουσιάζεται η επίδραση της τοπικής πύκνωσης του πλέγματος στον υπολογισμό της μορφής στη διατομή (άνω εικόνα) και του πάχους της δέσμης (κάτω εικόνα), για άνοιγμα της βελόνης ίσο με το μισό του κανονικού σημείου λειτουργίας. Παρατηρείται ότι έπειτα



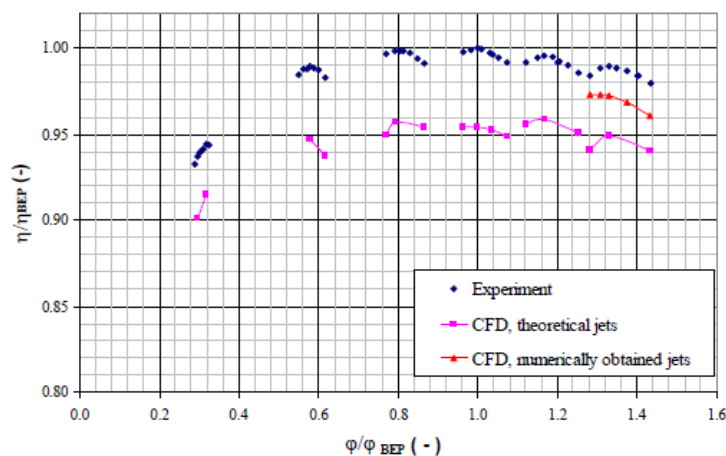
από την πύκνωση του πλέγματος εξαφανίζεται η παραμόρφωση της δέσμης, συνεπώς συνάγεται το συμπέρασμα ότι αυτή οφειλόταν εξαρχής στην ανάλυση του πλέγματος και όχι στη γεωμετρία του διανομέα. Άλλωστε, η πύκνωση του πλέγματος έχει ακόμα πιο σημαντική επίδραση στο σημείο όπου η δέσμη εξέρχεται από το ακροφύσιο. Στην κάτω εικόνα του Σχήματος 1.36, η γωνία και το πάχος της δέσμης παρατηρείται ότι μεταβάλλονται έπειτα από την πύκνωση.



**Σχήμα 1.36:** Επίδραση της πύκνωσης του πλέγματος στην εγκάρσια μορφή (άνω) και στο πάχος της δέσμης (κάτω),  $A_o/A_{o,BEP} = 0.5$  [18]

Κατά τη δεύτερη προσομοίωση, χρησιμοποιήθηκε ένα πλέγμα το οποίο περιελάμβανε τον δρομέα καθώς και ένα λεπτό δακτύλιο γύρω του έτσι ώστε να αναλυθεί λεπτομερώς η ροή στα σκαφίδια. Πραγματοποιήθηκαν μη μόνιμες προσομοιώσεις, οι οποίες είχαν ως οριακές συνθήκες εισόδου τις κατανομές ταχυτήτων και το κλάσμα όγκου νερού-αέρα για τη δέσμη που προέκυψαν από τις προηγούμενες προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα όμως θεωρήθηκαν ανακριβή και για τον λόγο αυτό επαναλήφθηκαν οι προσομοιώσεις, με οριακές συνθήκες αυτή τη φορά τις θεωρητικές τιμές για τα παραπάνω μεγέθη.

Στο Σχήμα 1.37 παρουσιάζονται οι τιμές του βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου τόσο από την αριθμητική προσομοίωση, σε έξι διαφορετικά ανοίγματα της βελόνης, όσο και από πειράματα, ανηγμένα ως προς τον βαθμό απόδοσης στο κανονικό σημείο λειτουργίας.



**Σχήμα 1.37:** Βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου, πειραματικές και αριθμητικές τιμές [18]

Παρατηρείται μία υποεκτίμηση της τάξεως του 4% στις αριθμητικές τιμές σε όλα τα ανοίγματα που υπολογίστηκαν, αν και η μορφή των καμπυλών βαθμού απόδοσης έχουν προσεγγιστεί με καλή ακρίβεια. Ευθύνη για τη διαφορά αυτή, σύμφωνα με τους συγγραφείς, φέρει το υπολογιστικό πλέγμα, το οποίο δεν ήταν αρκετά πυκνό, έχοντας επίδραση στη μορφή και το πάχος της ελεύθερης δέσμης. Άλλωστε, θεωρήθηκε ότι η πύκνωση του πλέγματος στα περιστρεφόμενα σκαφίδια δεν ήταν ικανοποιητική σε αντίθεση με τη ροή στο ακροφύσιο με αποτέλεσμα η διαφορά στην υπολογισμένη κινητική ενέργεια μεταξύ των ορίων των δύο περιοχών να είναι μεταξύ 2.5-3 %.

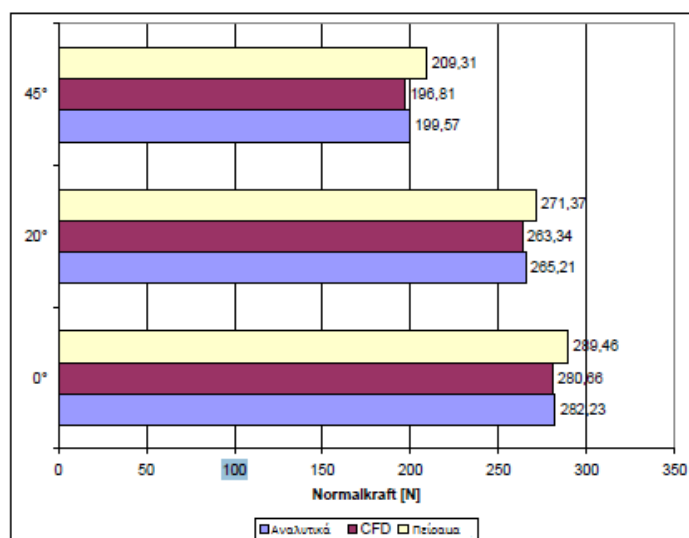
Συμπερασματικά, στη μελέτη αυτή διαπιστώθηκε η σημασία του πυκνού πλέγματος στην ακριβή προσομοίωση των τιμών μεγεθών, όπως το πάχος της δέσμης και η ταχύτητά της και άρα στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου. Άλλωστε οι συγγραφείς εντόπισαν την περιορισμένη χρήση υπολογιστικών προσομοιώσεων για τον σχεδιασμό υδροστροβίλων Pelton στην εξαιρετικά απαιτητική από πλευράς υπολογιστικών πόρων προσομοίωση της τυρβώδους, διφασικής και μη μόνιμης ροής σε αυτόν.

Οι Matthias και Promper το 2004 διερεύνησαν αριθμητικά τη ροή ελεύθερης δέσμης σε σκαφίδια του υδροστροβίλου Pelton [20]. Η μελέτη χωρίστηκε σε δύο φάσεις: αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της κατανομής πίεσης και της συνισταμένης δύναμης που ασκείται σε επίπεδη πλάκα, οι οποίες έπειτα συγκρίθηκαν τόσο με τις αντίστοιχες υπολογιστικές προσομοιώσεις με ίδιες οριακές συνθήκες όσο και με την αναλυτική λύση του ίδιου προβλήματος. Έπειτα, έχοντας ουσιαστικά επικυρώσει το υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποίησαν, προσομοιώθηκε η ροή σε περιστρεφόμενες πλάκες τόσο σε διδιάστατο όσο και τριδιάστατο σύστημα.

Αρχικά τοποθετήθηκαν σε επίπεδη πλάκα από ακρυλικό υλικό δεκατρείς αισθητήρες πίεσης προτού αυτή τοποθετηθεί στην εγκατάσταση υδροστροβίλου Pelton στη θέση του δρομέα του. Να σημειωθεί ότι η πλάκα είχε τη δυνατότητα περιστροφής γύρω από τον άξονα που διερχόταν από το κέντρο της. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί τόσο της υφιστάμενης στην πλάκα κάθετης δύναμης για γωνίες 0°, 20°, 40° όσο και της κατανομής πίεσης σε αυτή.

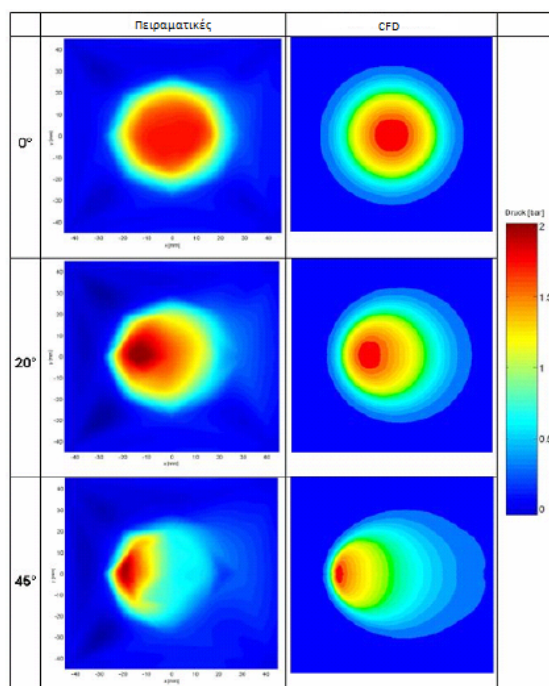
Ακολούθησε η αριθμητική προσομοίωση της ροής, η οποία πραγματοποιήθηκε στο εμπορικό λογισμικό FLUENT 6.1.18, ενώ το δομημένο πλέγμα δημιουργήθηκε στο GAMBIT 2.0 και αποτελείτο από κυβοειδή στοιχεία. Για τη διφασική ροή χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο VOF, ενώ για την τύρβη το k-ε standard με wall functions. Η σύζευξη πίεσης-ταχύτητας πραγματοποιήθηκε με τον αλγόριθμο PISO, ενώ η ανάλυση ήταν μη μόνιμη.

Στο Σχήμα 1.38 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων για την κάθετη δύναμη στην πλάκα της αριθμητικής προσομοίωσης, των πειραματικών μετρήσεων και της αναλυτικής λύσης η οποία προέκυψε από εφαρμογή του θεωρήματος της ορμής, για τις τρεις γωνίες πρόσπτωσης που προαναφέρθηκαν. Παρατηρείται ότι η τιμές των πειραματικών μετρήσεων, και στις τρεις περιπτώσεις, είναι υψηλότερες των αριθμητικών και των αναλυτικών τιμών, κάτι που οφείλεται στο ρευστό, το οποίο αφού προσκρούσει στην επιφάνεια της πλάκας, προσκρούει στο στήριγμα της διάταξης και παραποιεί λίγο τα δεδομένα.



**Σχήμα 1.38:** Σύγκριση αποτελεσμάτων κάθετης δύναμης στην πλάκα για πειραματικούς, αριθμητικούς και αναλυτικούς υπολογισμούς [20]

Στο Σχήμα 1.39 παρουσιάζεται η αντίστοιχη σύγκριση για την κατανομή πίεσης μεταξύ των πειραματικών και των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Να σημειωθεί ότι πραγματοποιήθηκε παρεμβολή μεταξύ των σημείων πειραματικών μετρήσεων, ώστε να διευκολύνεται η σύγκριση. Η συμφωνία των αποτελεσμάτων είναι πολύ καλή, με την εξαίρεση του σημείου ανακοπής, όπου οι πειραματικές τιμές είναι αρκετά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες αριθμητικές.

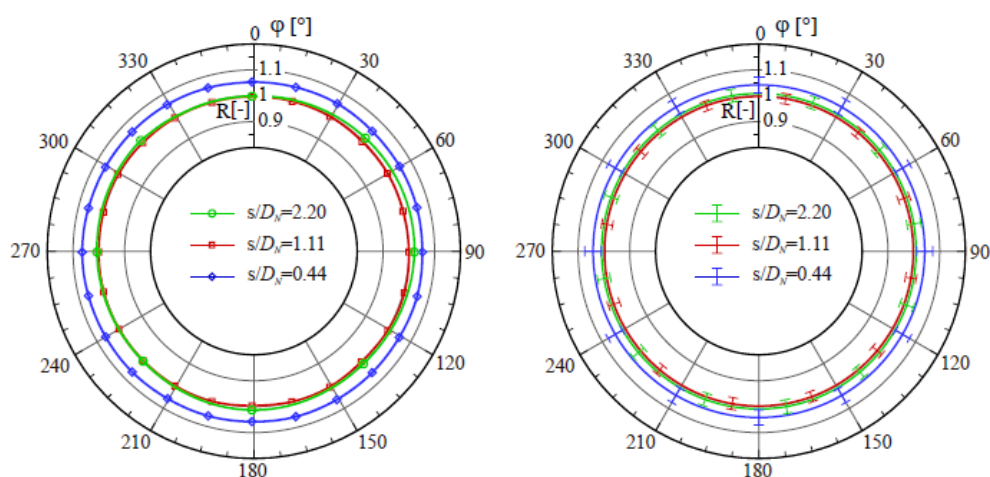


**Σχήμα 1.39:** Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών κατανομών πίεσης στην επίπεδη πλάκα [20]

Στη δεύτερη φάση της μελέτης, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της ροής στην οποία η δέσμη προσέκρουε σε στρεφόμενο σύστημα πλακών, οι οποίες αναπαριστούσαν απλοποιημένα σκαφίδια υδροστροβίλου Pelton. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις τόσο σε διδιάστατο όσο και τριδιάστατο μοντέλο κατά τις οποίες το στρεφόμενο σύστημα περιστρεφόταν κατά μία καθορισμένη γωνία έπειτα από κάθε χρονικό βήμα, προσομοιώνοντας έτσι μία πραγματική μη μόνιμη ροή. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της ροής σε περιστρεφόμενο σύστημα δεν επαληθεύτηκαν με πειραματικές μετρήσεις, όμως παρουσίασαν τη δυνατότητα προσομοίωσης της ροής ελεύθερων δεσμών σε στρεφόμενο σύστημα με χρήση υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

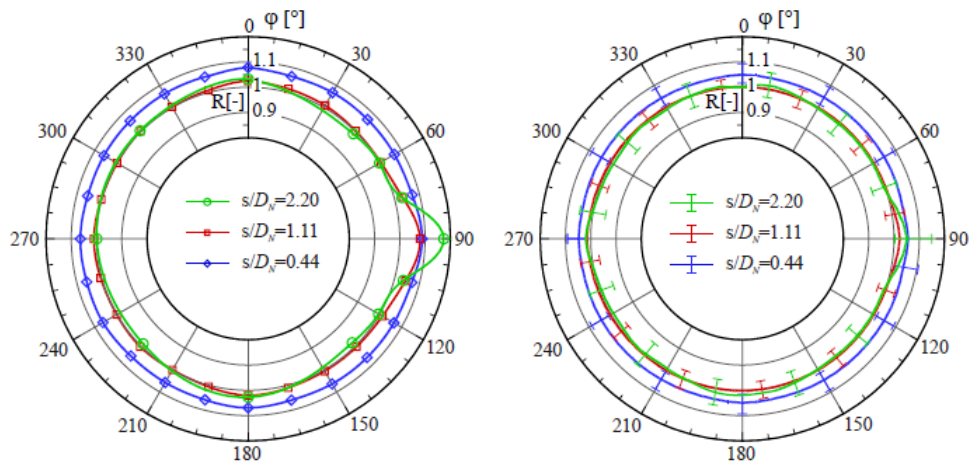
Οι Fiederer et al ανέλυσαν αριθμητικά και πειραματικά την τριδιάστατη ροή ελεύθερης επιφάνειας σε υδροστρόβιλο Pelton χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές διατάξεις ανάντι του ακροφυσίου [14]. Συγκεκριμένα, η πρώτη αφορούσε μια διάταξη με ευθύ αγωγό, ενώ η δεύτερη την ύπαρξη γωνίας  $90^\circ$  ανάντι του ακροφυσίου, με σκοπό την μελέτη της επίδρασης των δευτερευουσών ροών λόγω της γωνίας στα χαρακτηριστικά της δέσμης. Η αριθμητική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στον κώδικα solver3d, με τη μέθοδο VOF για την ανάλυση της διφασικής ροής, ενώ για τη σύζευξη πίεσης και ταχύτητας χρησιμοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι SIMPLE και PISO. Στην είσοδο εφαρμόστηκε μία κατανομή πλήρους τυρβώδους ροής σε αγωγό ως οριακή συνθήκη, ενώ για τη μοντελοποίηση της τύρβης έγινε χρήση του μοντέλου LCL k-ε.

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης επικυρώθηκαν με πειραματικές μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση μιας ειδικής οπτικής διάταξης που κατέγραφε τη μορφή της δέσμης του ρευστού και συγκεκριμένα σταγονίδια ρευστού που διέφευγαν από την κύρια δέσμη. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έδειξε καλή συμφωνία και επικύρωσε τη χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου για την αριθμητική διερεύνηση της ροής της δέσμης σε υδροστροβίλους Pelton. Δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στην ακριβή πρόβλεψη της τριδιάστατης γεωμετρίας της δέσμης καθώς επίσης και στην εύρεση του σημείου από όπου η δέσμη αποκολλάται από τα άκρα του ακροφυσίου.



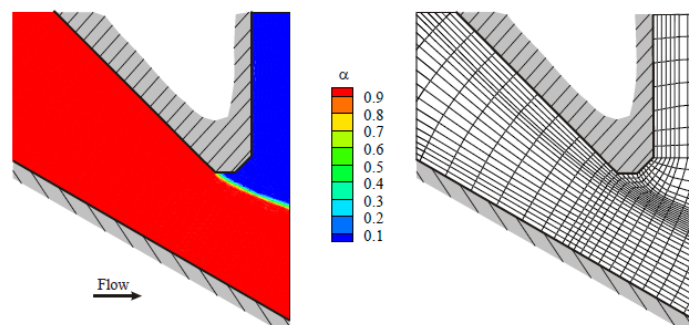
**Σχήμα 1.40:** Πειραματική (αριστερή εικόνα) και υπολογιστική (δεξιά εικόνα) μορφή της δέσμης για ευθύ αγωγό ανάντι του ακροφυσίου [14]

Στο Σχήμα 1.40 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την πρόβλεψη της μορφής της δέσμης σε τρεις διαφορετικές αποστάσεις από την έξοδο του ακροφυσίου στην περίπτωση σύνδεσης με ευθύ αγωγό. Στην εικόνα αριστερά παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα, όπου παρατηρείται ότι η σχεδόν πλήρως κυκλική δέσμη συστέλλεται αμέσως μετά την έξοδο από το ακροφύσιο, λαμβάνοντας ελάχιστη τιμή διαμέτρου για λόγο θέσης ως προς τη διάμετρο ακροφυσίου  $S/D_n \sim 1.11$ , προτού αυξηθεί εκ νέου λόγω διασποράς της. Στην δεξιά εικόνα παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα, στα οποία η δέσμη θεωρείται για κλάσμα όγκου ίσο με 0.5. Στο σχήμα 1.41 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα της περιβάλλουσας της δέσμης για τη διάταξη η οποία έχει συνδεθεί με γωνία  $90^\circ$  ανάντι του ακροφυσίου. Είναι εμφανές ένα εξόγκωμα στη δέσμη στις  $90^\circ$ , το οποίο οφείλεται στις δευτερεύουσες ροές που έχουν σχηματιστεί στη δέσμη λόγω της γωνίας στον αγωγό ανάντι του ακροφυσίου. Οι ροές αυτές προκαλούν ασυμμετρία στο προφίλ της δέσμης, η οποία μετατρέπεται σε διακριτό εξόγκωμα σε μεγάλη απόσταση από το ακροφύσιο.



**Σχήμα 1.41:** Πειραματική (αριστερή εικόνα) και υπολογιστική (δεξιά εικόνα) μορφή της δέσμης για γωνία  $90^\circ$  ανάντι του ακροφυσίου [14]

Τέλος, στο Σχήμα 1.42 παρουσιάζεται λεπτομέρεια του σημείου στο οποίο η δέσμη εξέρχεται από το στόμιο του ακροφυσίου μαζί με το αντίστοιχο υπολογιστικό πλέγμα.

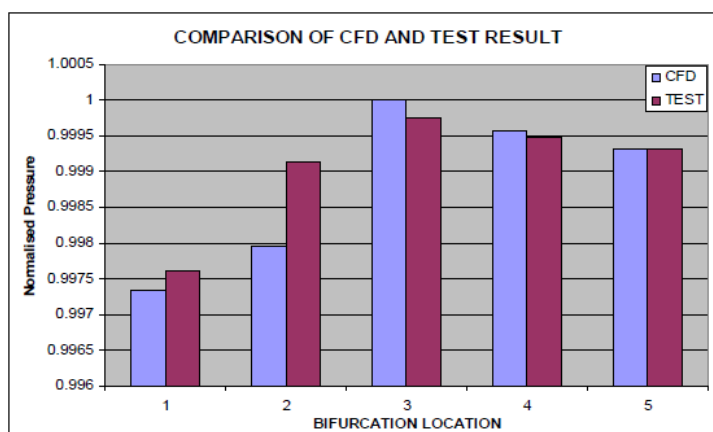


**Σχήμα 1.42:** Λεπτομέρεια της αποκόλλησης της δέσμης από το ακροφύσιο με το αντίστοιχο υπολογιστικό πλέγμα [14]

Η ροή έχει χρωματιστεί βάσει του κλάσματος όγκου και είναι φανερό η ακριβής πρόβλεψη του σημείου αποκόλλησης της δέσμης, κάτι που έχει ιδιαίτερη επίδραση στην κατανομή ακτινικής ταχύτητας της δέσμης. Συμπερασματικά, η σύγκριση ανάμεσα σε αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα για την πρόβλεψη της γεωμετρίας της δέσμης παρουσιάζει πολύ καλή συμφωνία.

Οι Patel et al πραγματοποίησαν μία μελέτη βελτιστοποίησης ενός υδροστροβίλου Pelton η οποία αφορούσε τον σχεδιασμό του διανομέα, του ακροφυσίου και τέλος των σκαφιδίων της μηχανής, με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσής της [29]. Αρχικά, τα συγκεκριμένα εξαρτήματα σχεδιάστηκαν με βάση υδροδυναμικούς υπολογισμούς, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε τριδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της ροής σε αυτά. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν αξιολογήθηκαν ποσοτικά και ποιοτικά βάσει των ροϊκών τους χαρακτηριστικών, όπως των απωλειών ύψους, την κατανομή δευτερευουσών ροών, την ενδεχόμενη αποκόλληση της ροής και την παραγόμενη ροπή. Αν κρίνονται ικανοποιητικά, πραγματοποιούνται πρότυπα πειράματα έτσι ώστε να υπολογιστεί η απόδοση του τελικού σχεδιασμού της μηχανής.

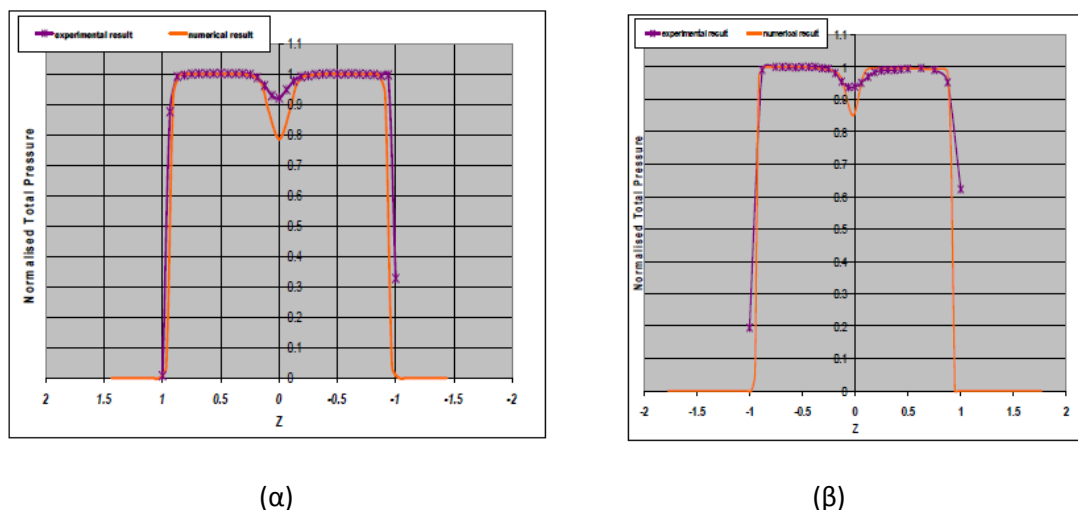
Ο διανομέας βελτιστοποιήθηκε γεωμετρικά με κριτήριο την ελάττωση των απωλειών που παρουσιάζονται και την βελτίωση της ποιότητας της δέσμης του ρευστού. Πράγματι, η κατανομή ταχυτήτων προέκυψε πιο ομοιόμορφη, ενώ τα επίπεδα δευτερευουσών δομών ελαττώθηκαν σημαντικά, οδηγώντας σε βελτίωση της ποιότητας της δέσμης εισαγωγής στο ακροφύσιο. Στο Σχήμα 1.43 παρουσιάζεται η επικύρωση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με τις πειραματικές μετρήσεις της ροής στον διανομέα, όπου φαίνεται η ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ τους. Για την επικύρωση αυτή χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις της τιμής της στατικής πίεσης σε κάθε διακλάδωση του διανομέα.



**Σχήμα 1.43:** Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων στατικής πίεσης στις διακλαδώσεις του διανομέα [29]

Στο ακροφύσιο πραγματοποιήθηκε πειραματική μέτρηση της διαμέτρου και της ολικής πίεσης της ελεύθερης δέσμης σε διατομή 100mm κατάντι της μύτης της βελόνης. Η πίεση μετρήθηκε με σωλήνες pitot, ενώ το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις: αρχικά το ακροφύσιο συνδέθηκε με ευθύ αγωγό και έπειτα με τον διανομέα, όπου η δέσμη παρουσίαζε απόκλιση από τον θεωρητικό άξονά της. Στη συνέχεια η ροή στο ακροφύσιο προσομοιώθηκε με χρήση εμπορικού κώδικα και μοντέλο διφασικής ροής.

Στο Σχήμα 1.44 παρουσιάζεται η πολύ καλή συμφωνία μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών τιμών της ολικής πίεσης. Είναι φανερό η απόκλιση της δέσμης από τον άξονά της στο δεξί γράφημα, κάτι που οφείλεται στις δευτερεύουσες ροές οι οποίες προκύπτουν από τις διακλαδώσεις του διανομέα. Επίσης παρατηρείται ελάττωση του πλάτους του όγκου στον πυρήνα της δέσμης, ενώ επίσης ομαλοποιείται η κατανομή ταχυτήτων όσο αυξάνεται η απόσταση από την έξοδο του ακροφυσίου.

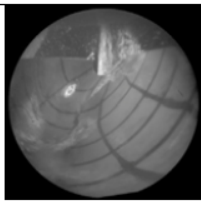
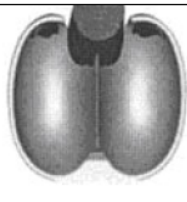
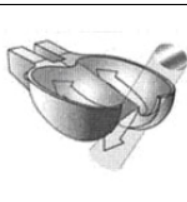
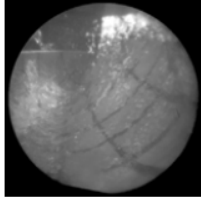


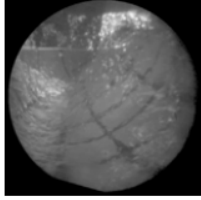

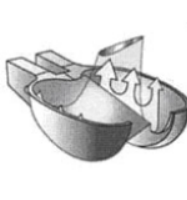
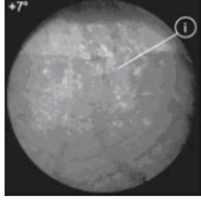

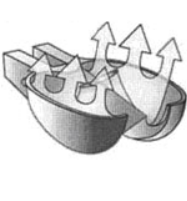
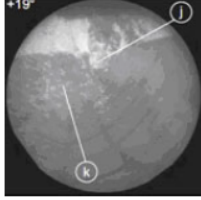

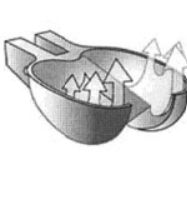


**Σχήμα 1.44:** Σύγκριση πειραματικών (μωβ καμπύλη) και αριθμητικών (πορτοκαλί καμπύλη) κατανομών κανονικοποιημένης ολικής πίεσης για δέσμη ευθεία (α) και με απόκλιση (β) [29]

Η μη μόνιμη ροή στα σκαφίδια προσομοιώθηκε αριθμητικά με τη χρήση ομογενούς μοντέλου διφασικής ροής και στη συνέχεια τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με πειραματικές τιμές και παρουσιάστηκε καλή συμφωνία, οδηγώντας σε βελτίωση της γεωμετρίας των σκαφιδίων και σημαντική αύξηση του βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου.

Η διδακτορική διατριβή του Alexandre Perrig, η οποία δημοσιεύτηκε το 2007, αποτελεί μια εκτενή όσο και διαφωτιστική μελέτη της μεταβατικής ροής ελεύθερης επιφάνειας σε στρεφόμενα σκαφίδια υδροστροβίλου Pelton [31, 32]. Συγκεκριμένα, μελέτησε τα φαινόμενα της ροής στα σκαφίδια, πραγματοποιώντας έναν αριθμό πειραματικών μετρήσεων, τις οποίες στη συνέχεια συνέκρινε με τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από υπολογιστικές προσομοιώσεις. Η μελέτη της ροής στα σκαφίδια την οποία πραγματοποίησε ο Perrig ξεφεύγει από τα στενά όρια της παρούσης εργασίας. Ωστόσο, ενδεικτικά και για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται κάποια αποτελέσματα από την εργασία αυτή. Αρχικά, μέτρησε την ασκούμενη από το νερό πίεση στα τοιχώματα των σκαφιδίων τοποθετώντας πάνω στην επιφάνειά τους 43 ειδικούς πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες. Οι αισθητήρες αυτοί τοποθετήθηκαν τόσο στο εσωτερικό της κοιλότητας όσο και στην πίσω μεριά του σκαφιδίου, και ο σκοπός τους ήταν η μελέτη της αλληλεπίδρασης της δέσμης με το σκαφίδιο. Στη συνέχεια, οπτικοποίησε τη ροή στα περιστρεφόμενα σκαφίδια τοποθετώντας ενδοσκοπία τόσο πάνω στον κινούμενο στροφέα, ώστε να φανεί η σχετική κίνηση της ροής, όσο και στο εξωτερικό περίβλημα του στροβίλου. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι το κενό μεταξύ του δρομέα Pelton και του περιβλήματος δημιουργεί πολλά προβλήματα, κάνοντας τις απεικονίσεις της ροής πολύ δύσκολα πραγματοποιήσιμες. Άλλωστε, η αρχική αλληλεπίδραση της ελεύθερης δέσμης με τα σκαφίδια δεν έχει παρατηρηθεί ποτέ.

Κατά την ανάλυση της ροής στα σκαφίδια που πραγματοποίησε ο Perrig, παρατηρήθηκαν και άλλα φυσικά φαινόμενα τα οποία θεωρήθηκαν ότι ευθύνονται τόσο για απώλειες ενέργειας όσο και για τη διάβρωση στην επιφάνεια των σκαφιδίων. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκαν λεπτομέρειες της ροής στην εσωτερική επιφάνεια του σκαφιδίου που υποδεικνύουν ότι η βίαιη κρούση του νερού με το σκαφίδιο, σε συνδυασμό με τον αέρα του περιβάλλοντος, προκαλούν στιγμιαίες υψηλές πιέσεις. Στο Σχήμα 1.45 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της οπτικοποίησης η οποία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του τοποθετημένου πάνω στον δρομέα ενδοσκοπίου, σε συνδυασμό με τη σχηματική απεικόνιση της ροής όπως αυτή προέκυψε από την υπολογιστική προσομοίωση.

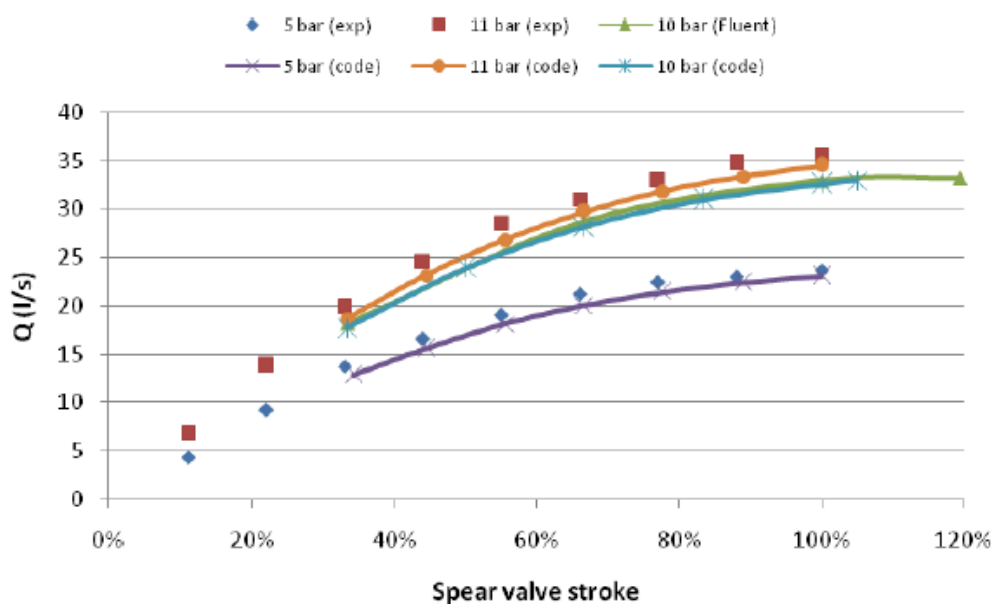
Γωνιακή θέση	Οπτικοποίηση	Υπολογιστική Προσομοίωση	Ερμηνεία
-40°			
-20°			
-10°			
5°			
20°			

**Σχήμα 1.45:** Οπτικοποίηση και σχηματική απεικόνιση της ροής σε διάφορες θέσεις του σκαφιδίου [31]

Στην εργασία την οποία δημοσίευσε το 2011, ο Νεσιάδης μελέτησε την ροή της δέσμης που εξέρχεται από το ακροφύσιο υδροστροβίλου Pelton [26]. Για το σκοπό αυτόν, αναπτύχθηκε ένας υπολογιστικός αλγόριθμος στο Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ο οποίος επέλυε μόνο τη ροή του νερού βάσει της υπόθεσης αξονοσυμμετρικής ροής. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης επικυρώθηκαν μέσω της σύγκρισης τόσο



με πειραματικές μετρήσεις, όσο και με τα αποτελέσματα προσομοιώσεων οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση εμπορικού κώδικα CFD, και συγκεκριμένα του ANSYS-FLUENT. Το πλέγμα κατασκευάστηκε πυκνότερο στις περιοχές κοντά στα στερεά τοιχώματα του ακροφυσίου και της βελόνης, ώστε να επιλυθεί το οριακό στρώμα. Το μοντέλο τύρβης το οποίο χρησιμοποιήθηκε ήταν το k-ε standard, με την εφαρμογή συναρτήσεων τοιχωμάτων. Στο Σχήμα 1.46 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων για την ογκομετρική παροχή από τις προσομοιώσεις με τη χρήση του κώδικα ο οποίος αναπτύχθηκε στο ΕΜΠ, με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές, καθώς και με αυτές που προήλθαν από τη χρήση του εμπορικού λογισμικού FLUENT, με το ίδιο μοντέλο τύρβης.



**Σχήμα 1.46:** Σύγκριση αποτελεσμάτων της ογκομετρικής παροχής [26]

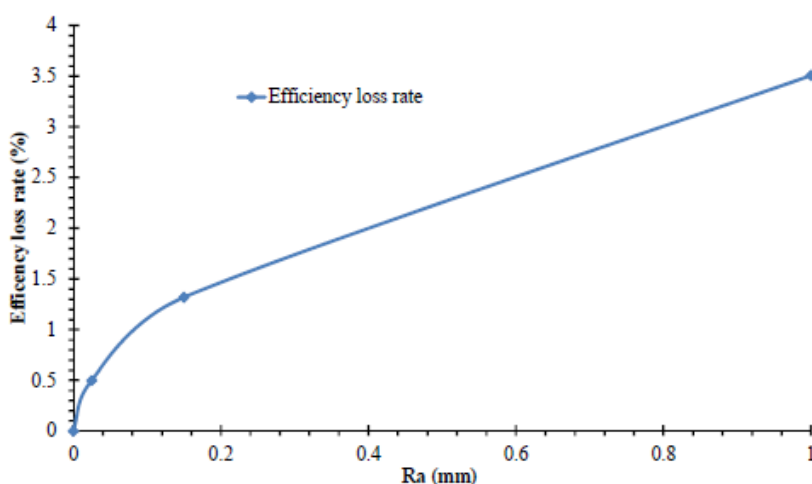
Από τη μελέτη του Σχήματος 1.46, είναι φανερό πως τα αποτελέσματα από τον αναπτυχθέντα κώδικα, είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα που υπολογίστηκαν από το FLUENT. Όσον αφορά τη σύγκριση τους με τα πειραματικά δεδομένα, αυτά εμφανίζουν υψηλότερες παροχές σε ολόκληρο το εύρος τιμών της διαδρομής της βελόνης, ειδικά στην περίπτωση υψηλότερων πιέσεων εισόδου. Δεδομένου ότι οι δύο κώδικες οι οποίοι εφαρμόστηκαν, δίνουν τα ίδια αποτελέσματα, θα μπορούσε να υποθεθεί ότι οι διαφορές με τα πειραματικά δεδομένα οφείλονται στην πειραματική αβεβαιότητα ή στην αριθμητική διάχυση. Επιπροσθέτως, η επιφάνεια της δέσμης προβλέφθηκε με ακρίβεια, και η κατανομή ταχυτήτων συνέπιπτε με τις βιβλιογραφικές αναφορές. Τέλος, διερευνήθηκε η επίδραση της γεωμετρίας του ακροφυσίου στα χαρακτηριστικά της δέσμης. Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρήθηκε σαφής συσχέτιση ανάμεσα στην τιμή της γωνίας της βελόνης και τη διάμετρο της δέσμης, καθώς και την παροχή. Η ελάττωση της γωνίας προκαλεί μείωση των εν λόγω ποσοτήτων. Η επιλογή του πλέον κατάλληλου συνδυασμού γωνιών ακροφυσίου και βελόνης αποδείχτηκε πως επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το εύρος του φορτίου λειτουργίας του στροβίλου, τη μορφή των σκαφιδίων και τη γεωμετρία του διανομέα.

Η ροή στο ακροφύσιο υδροστροβίλου Pelton και η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του είναι το αντικείμενο μελέτης και της υπό δημοσίευσης εργασίας [8]. Η εργασία αυτή αποτελεί συνεργασία ερευνητικών ομάδων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και του Πανεπιστημίου

του Lancaster. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις της διφασικής ροής της ελεύθερης δέσμης με τη χρήση δύο εμπορικών κωδίκων, των ANSYS-CFX και ANSYS-FLUENT. Σκοπός τους, ήταν η μελέτη της επίδρασης των γεωμετρικών παραμέτρων του ακροφυσίου στις προκύπτουσες υδραυλικές απώλειες. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε η μεθοδολογία σχεδιασμού πειραμάτων (DOE), για την διερεύνηση της επίδρασης τεσσάρων κύριων γεωμετρικών και λειτουργικών παραμέτρων στις απώλειες ακροφυσίου, σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας.

Στη συνέχεια, βάσει των αποτελεσμάτων, προτάθηκε η βέλτιστη γεωμετρία και πραγματοποιήθηκαν συγκριτικές προσομοιώσεις με την αρχική. Τα αποτελέσματα από τα δύο λογισμικά CFD κατέδειξαν ότι σε γωνίες ακροφυσίου και βελόνης μεγαλύτερες από τις προτεινόμενες από την τρέχουσα βιβλιογραφία, οι απώλειες ελαττώνονται έως και 0.6%. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν πρόσθετες προσομοιώσεις με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης λοιπών παραμέτρων της γεωμετρίας στις απώλειες ακροφυσίου, οι οποίες έδειξαν ότι η προσθήκη καμπυλότητας στην άκρη της βελόνης μπορεί να μειώσει τις απώλειες αυτές. Ωστόσο, επισημάνθηκε ότι η γωνία του ακροφυσίου έχει τη μεγαλύτερη επίδραση, σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες γεωμετρικές παραμέτρους που διερευνήθηκαν, στις υδραυλικές απώλειες.

Ολοκληρώνοντας τη βιβλιογραφική επισκόπηση, αναφέρεται πως στη μελέτη [43], η οποία δημοσιεύτηκε το 2013, πραγματοποιήθηκε μία μελέτη της επίδρασης της επιφανειακής τραχύτητας του σκαφιδίου υδροστροβίλου Pelton στην απόδοσή του. Η ροή προσομοιώθηκε με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού CFX, και με τα μοντέλα VOF και SST για την ανάλυση της διεπιφάνειας νερού-αέρα και την τύρβη αντίστοιχα. Οι απώλειες υπολογίστηκαν από την μέση παραγόμενη ροπή, ενώ η επιφανειακή τραχύτητα των σκαφιδίων έλαβε τις τιμές 0, 0.025 mm, 0.15 mm και 1 mm (όπου 0 θεωρείται η λεία επιφάνεια). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.48, όπου στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται η επιφανειακή τραχύτητα, ενώ στον κατακόρυφο απεικονίζεται ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνονται οι απώλειες.



**Σχήμα 1.47:** Επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας του σκαφιδίου στην απόδοση του υδροστροβίλου [43]

Τα αριθμητικά αποτελέσματα, όπως περιγράφονται στο Σχήμα 1.48, κατέδειξαν ότι η επιφάνεια του σκαφιδίου επιδρά άμεσα στις απώλειες ενέργειας. Όταν η κατάσταση της επιφάνειας του σκαφιδίου χειροτερεύει, η τιμή της επιφανειακής τραχύτητας αυξάνεται. Στην

περίπτωση αυτή, η παραγόμενη ροπή στο σκαφίδιο ελαττώνεται, ενώ οι υδραυλικές απώλειες εμφανίζουν σημαντική αύξηση. Συνεπώς, η διατήρηση της επιφάνειας του σκαφιδίου σε καλή κατάσταση, μπορεί να εξασφαλίσει την ομαλή και αποδοτική λειτουργία του στροβίλου. Το Σχήμα 1.48 αφορά την επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας των σκαφιδίων στις απώλειες. Ωστόσο, αντίστοιχα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν για την επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας των τοιχωμάτων του ακροφυσίου και της βελόνης στις υδραυλικές απώλειες του ακροφυσίου. Η επιφάνειες αυτές ενδέχεται να εμφανίσουν σημαντική φθορά με την πάροδο του χρόνου. Η φθορά αυτή οφείλεται στην ταχέως επιταχυνόμενη ροή του νερού στο ακροφύσιο και την επακόλουθη τύρβη η οποία εμφανίζεται. Τα σωματίδια του ρευστού προσκρούουν στα στερεά τοιχώματα, με το ενδεχόμενο παρουσίασης σοβαρών προβλημάτων διάβρωσης. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται εντονότερο στην επιφάνεια της βελόνης. Συνεπώς, λόγω του προαναφερθέντος, σε συνδυασμό με την πιθανότητα ανάπτυξης σπηλαιώσης λόγω των περιοχών χαμηλής πίεσης, η επιφάνεια της βελόνης παρουσιάζει μεγάλη πιθανότητα φθοράς, αύξησης δηλαδή της επιφανειακής τραχύτητάς της. Στο Σχήμα 1.49 παρουσιάζεται η βελόνη ενός υδροστροβίλου Pelton, η οποία έχει υποστεί εκτεταμένες φθορές στην επιφάνειά της.



**Σχήμα 1.48:** Εκτεταμένες φθορές στην επιφάνεια της βελόνης υδροστροβίλου Pelton [63]



## Κεφάλαιο 2. Ανάλυση της Αριθμητικής Μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε

### 2.1 Εισαγωγή

Η υπολογιστική ρευστομηχανική (CFD) είναι η επιστήμη η οποία χρησιμοποιεί ως επί το πλείστον αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν φαινόμενα ροής ρευστού, μεταφοράς μάζας και θερμότητας και χημικών αντιδράσεων μεταξύ άλλων. Η εξέλιξη της έχει εξαπλωθεί τα τελευταία χρόνια λόγω της ανάπτυξης ταχύτερων υπολογιστών, με δυνατότητες μεγαλύτερης μνήμης και έχει συντελέσει στην επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων στη μηχανική των ρευστών. Οι εξισώσεις κίνησης της ρευστομηχανικής, γνωστές συλλογικά ως εξισώσεις Navier-Stokes (NS), επιδέχονται αναλυτικής λύσης για περιπτώσεις πολύ απλών ροών, σε συνθήκες κοντά στις ιδανικές. Στην περίπτωση πραγματικών ροών, είναι αναγκαία η χρήση μεθόδων CFD σύμφωνα με την οποία οι εξισώσεις αντικαθίστανται από αλγεβρικές προσεγγίσεις οι οποίες και μπορούν να επιλυθούν αριθμητικά.

Ένα βασικό όφελος της χρήσης CFD για την επίλυση προβλημάτων ρευστομηχανικής αποτελεί το γεγονός ότι πρόκειται για μια φθηνή, γρήγορη και κυρίως αξιόπιστη εναλλακτική στις πειραματικές μεθόδους. Ένας προγραμματιστής εξοπλισμένος με έναν υπολογιστή, μπορεί να αντικαταστήσει τον σχεδιασμό πειραμάτων, το κόστος των υλικών και του εξοπλισμού μετρήσεων κλπ. Ένα πρόσθετο όφελος είναι η δυνατότητα διεξοδικής διερεύνησης των ιδιοτήτων της ροής για διάφορες περιπτώσεις και συνθήκες, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την βελτιστοποίηση [49]. Ο σκοπός του CFD είναι να λειτουργεί σε σύζευξη με τα πειράματα και την εμπειρία. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης CFD είναι απαραίτητο να αναλύονται και να επικυρώνονται πριν το μοντέλο της ροής γίνει αποδεκτό. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να κατανοηθεί ότι η προκύπτουσα υπολογιστική λύση αποτελεί μια προσέγγιση της πραγματικής, λόγω της διακριτοποίησης των συνεχών εξισώσεων και πεδίων ροής και ότι έχει την ακρίβεια του αντίστοιχου μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε. Σε κάθε περίπτωση, το σφάλμα είναι αναπόφευκτο δεδομένου ότι χρησιμοποιείται αριθμητική μέθοδος επίλυσης και μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης των φυσικών φαινομένων. Αυτό που ουσιαστικά επιδιώκεται είναι η κατά το δυνατόν μικρότερη τάξη του αριθμητικού σφάλματος και η μικρότερη απόκλιση από τα πειραματικά αποτελέσματα, όταν αυτά υπάρχουν. Συνεπώς, κάθε μέθοδος αριθμητικής ανάλυσης, άρα και του CFD, έχει ως στόχο την εύρεση λύσης η οποία θα έχει ελεγχόμενο αριθμητικό σφάλμα, ικανοποιητικό ρυθμό σύγκλισης ώστε να ελαχιστοποιείται το υπολογιστικό της κόστος, γενικότητα και ευστάθεια [47].

### 2.1.1 Γενική Μεθοδολογία Υπολογιστικής Επίλυσης των Προβλημάτων Ροής

Η κεντρική ιδέα της χρήσης των εργαλείων CFD για την επίλυση προβλημάτων ροής ρευστών είναι η μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων οι οποίες τα διέπουν σε αλγεβρικά συστήματα εξισώσεων. Στη συνέχεια τα συστήματα επιλύονται υπολογιστικά με επαναληπτικές μεθόδους, από τις οποίες προκύπτουν οι τιμές των ροϊκών μεγεθών σε διακριτές θέσεις του πεδίου ροής. Σε γενικές γραμμές η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος με χρήση CFD είναι η εξής:

- **Μαθηματική θεμελίωση** του προβλήματος, μέσω της μοντελοποίησης των ροϊκών φαινομένων τα οποία λαμβάνουν χώρα καθώς και την εισαγωγή αδιάστατων παραμέτρων, ώστε η λύση να αποκτήσει γενικότητα.
- **Διακριτοποίηση (discretization) του χώρου**, με την δημιουργία κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος (computational grid) στο φυσικό πεδίο ροής, αποτελούμενο από ορισμένα προεπιλεγμένα σημεία, τα οποία ονομάζονται κόμβοι (nodes). Οι κόμβοι στην περίπτωση της μεθόδου πεπερασμένων όγκων σχηματίζουν μικρούς όγκους ελέγχου, τα κελιά (cells).
- **Διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων** οι οποίες διέπουν τη ροή, μέσω της μετατροπή τους σε σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων σε κάθε εσωτερικό κόμβο ή κελί του υπολογιστικού πλέγματος. Επίσης μετατρέπονται οι οριακές και αρχικές συνθήκες του προβλήματος σε αλγεβρικές εκφράσεις στους κόμβους που βρίσκονται στο όριο του πλέγματος
- **Επίλυση του συστήματος** διακριτών εξισώσεων με τη χρήση του υπολογιστικού αλγορίθμου του εκάστοτε κώδικα. [49]

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται στοιχεία θεωρίας της ρευστομηχανικής, καθώς επίσης και το θεωρητικό υπόβαθρο του κώδικα ANSYS-FLUENT, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, ενώ τέλος ορίζονται οι μαθηματικές εξισώσεις του υπολογιστικού πακέτου FLUENT. Τα θεωρητικά τμήματα του κεφαλαίου αυτού προέρχονται από τα [3, 4, 5, 13, 16, 42, 49, 56], εκτός και αν αναφέρεται διαφορετικά.

## 2.2 Θεμελιώδεις Εξισώσεις Ρευστομηχανικής

Οι εξισώσεις της ροής του ρευστού είναι μαθηματικές δηλώσεις των νόμων της διατήρησης της φυσικής:

- Η μάζα ενός ρευστού διατηρείται.
- Ο ρυθμός μεταβολής της ορμής ισούται με το άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται πάνω σε ένα σωματίδιο ρευστού (δεύτερος νόμος Νεύτωνα)
- Ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας είναι ίσος με το άθροισμα του ποσοστού της θερμότητας που προστίθεται σε ένα σωματίδιο ρευστού συν το έργο που ασκήθηκε σε αυτό (πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής).

Όταν εφαρμοστούν οι ανωτέρω νόμοι διατήρησης σε ένα μικρό στοιχείο ρευστού, το οποίο ονομάζεται όγκος ελέγχου, προκύπτουν οι εξισώσεις Navier-Stokes (NS).

### 2.2.1 Εξισώσεις Navier Stokes

$$\text{Εξίσωση Συνέχειας} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{Εξίσωση ορμής} \quad \frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \rho(\vec{U} \cdot \nabla)\vec{U} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau'_{ij} + \rho \vec{g} \quad (2.2)$$

όπου ο όρος  $\tau'_{ij}$  είναι ο τανυστής ιξωδών τάσεων, ο οποίος για Νευτώνειο ρευστό, είναι ίσος προς:

$$\tau'_{ij} = \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \lambda (\nabla \cdot \vec{U}) \quad (2.3)$$

όπου  $\lambda = -(2\mu)/3$  και οι δείκτες  $i, j$  και  $k$  αναπαριστούν τις τρεις διαστάσεις του χώρου.

Όλες οι ροές που αφορούν υδροστροβίλους μπορούν να θεωρηθούν ασυμπίεστες, δηλαδή η πυκνότητα είναι σταθερή. Επίσης, η επίδραση της θερμοκρασίας αμελείται. Για τον λόγο αυτό, δεν έχει προστεθεί η διατήρηση της εσωτερικής ενέργειας στο ανωτέρω σύστημα εξισώσεων. Με τη χρήση της υπόθεσης μη συμπίεστότητας, η Εξίσωση (2.1) μετατρέπεται στην:

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (2.4)$$

Ενώ και οι όροι συνεκτικότητας στην Εξίσωση (2.2) απλοποιούνται σημαντικά, με την εξίσωση ορμής να μετατρέπεται στην

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \rho(\vec{U} \cdot \nabla)\vec{U} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{U} + \rho \vec{g} \quad (2.5)$$

Επιπροσθέτως, αν η ροή θεωρηθεί ότι βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση, ο πρώτος όρος της ανωτέρω εξίσωσης μηδενίζεται. Το σύστημα των εξισώσεων ασυμπίεστου ρευστού (Navier-Stokes) αποτελείται από τις Εξισώσεις (2.4) και (2.5). Περιλαμβάνει τέσσερις μεταβλητές και τέσσερις εξισώσεις· οι τρεις αφορούν το ισοζύγιο ορμής και μία προκύπτει από την εξίσωση συνέχειας, με τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας και την πίεση άγνωστες μεταβλητές.

### 2.2.2 Αδιάστατες Παράμετροι

Η ροή επηρεάζεται σε κάποιο βαθμό από διαφορετικές δυνάμεις, όπως η βαρύτητα, η συνεκτικότητα και η επιφανειακή τάση. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η βαρύτητα κάθε φαινομένου, χρησιμοποιείται η διαστατική ανάλυση. Στην περίπτωση ροής στο ακροφύσιο υδροστροβίλου Pelton υπάρχουν τρεις αδιάστατοι αριθμοί που μπορούν να βοηθήσουν την εύρεση των εξαρτήσεων της ροής από τις προαναφερθείσες δυνάμεις. Οι παράμετροι αυτές είναι ο αριθμός Froude, ο αριθμός Reynolds και ο αριθμός Weber.

#### 2.2.2.1 Αριθμός Froude

Ο αριθμός Froude είναι ένας αδιάστατος αριθμός, ο οποίος χρησιμοποιείται αποκλειστικά στην περίπτωση ροών ελεύθερης επιφάνειας. Συγκρίνει την επίδραση των αδρανειακών δυνάμεων με τις δυνάμεις της βαρύτητας. Ορίζεται από τη Εξίσωση (2.6):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} = \frac{\text{δυνάμεις αδράνειας}}{\text{δυνάμεις βαρύτητας}} \quad (2.6)$$

όπου  $V$ , είναι η χαρακτηριστική ταχύτητα και  $y$ , είναι το χαρακτηριστικό βάθος της ροής.

Ο αριθμός Froude μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί η σχετική σημασία της βαρύτητας και τη τάση της ροής να προκαλέσει τη δημιουργία υδραυλικού άλματος. Όταν βρίσκεται κοντά στην κρίσιμη τιμή του 1, ο τοπικός αριθμός Froude μπορεί να υποδείξει την παρουσία ενός υδραυλικού άλματος. Στο διάστημα  $0 < Fr < 10$ , η επίδραση της βαρύτητας έχει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ροής. Για υψηλότερους αριθμούς Froude, το φαινόμενο της βαρύτητας μπορεί να αγνοηθεί.

#### 2.2.2.2 Αριθμός Reynolds

Ο αριθμός Reynolds αποτελεί ένα μέτρο της σχετικής σημασίας των δυνάμεων της αδράνειας ως προς τις δυνάμεις συνεκτικότητας, και ορίζεται από την Εξίσωση (2.7):

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\text{δυνάμεις αδράνειας}}{\text{δυνάμεις συνεκτικότητας}} \quad (2.7)$$

όπου, στην περίπτωση της ροής σε ακροφύσιο υδροστροβίλου Pelton,  $V$ , είναι η ταχύτητα της ελεύθερης δέσμης, το χαρακτηριστικό μήκος,  $D$ , είναι η διάμετρος της δέσμης ή και το πλάτος των σκαφιδίων, ανάλογα με την περιοχή μελέτης της ροής, και  $\nu$ , είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού.

#### 2.2.2.3 Αριθμός Weber

Ο αριθμός Weber υποδεικνύει τη σημασία των φαινομένων επιφανειακής τάσης και ορίζεται ως η αδρανειακή δύναμη ως προς τη δύναμη επιφανειακής τάσης, σύμφωνα με την Εξίσωση (2.8):

$$We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma} = \frac{\text{δυνάμεις αδράνειας}}{\text{δύναμη επιφανειακής τάσης}} \quad (2.8)$$

όπου  $L$ , είναι το χαρακτηριστικό μήκος της ροής, όπου στην περίπτωση σχηματισμού σταγονιδίων, θα είναι η διάμετρός τους και  $\sigma$ , είναι ο συντελεστής της επιφανειακής τάσης.



Στην περίπτωση ροών όπου ο αριθμός Weber είναι κοντά στην μονάδα, η επιφανειακή τάση έχει σημαντική επίδραση στην εξέλιξη της ροής.

Οι αδιάστατοι αριθμοί στην περίπτωση της ροής της ελεύθερης δέσμης, όπως είναι καταγεγραμμένοι στον Πίνακα 1.1 υποδηλώνουν ότι το ιξώδες και η επιφανειακή τάση έχουν μικρή επίδραση στη ροή σε σχέση με τις δυνάμεις της αδρανείας. Συνεπώς, θεωρητικά, οι επιπτώσεις τους μπορούν να αγνοηθούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα ροής. Η εγκυρότητα των συγκεκριμένων απλουστεύσεων πρόκειται να ελεγχθεί με τα αποτελέσματα των υπολογιστικών προσομοιώσεων.

## 2.3 Το Υπολογιστικό Πακέτο ANSYS-FLUENT

Το ANSYS-FLUENT, είναι ένα υπολογιστικό πακέτο λογισμικού βασισμένο στη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων για την επίλυση γραμμικών και μη γραμμικών συστημάτων, διδιάστατων ή τριδιάστατων προβλημάτων μηχανικής ρευστών. Πρόκειται για μία εφαρμογή η οποία δύναται να παρέχει αξιόπιστες λύσεις με οικονομία χρόνου, μέσω ενός φιλικού και αποδοτικού περιβάλλοντος εργασίας στον Η/Υ.

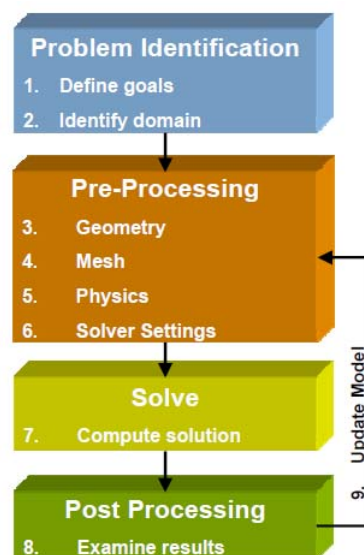
Το πρόγραμμα αποτελείται από τρία επιμέρους τμήματα, στα οποία πραγματοποιείται κατά σειρά η εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος (pre-processor), η επίλυση του (solver) και η μετέπειτα επεξεργασία των αποτελεσμάτων (post-processing). Βασικό βήμα πριν την έναρξη χρήσης του προγράμματος, αποτελεί η εξέταση του προβλήματος και η απάντηση σε βασικά ερωτήματα όπως το τι είδους αποτελέσματα αναζητούνται, ποια η χρήση τους και ποιος είναι ο επιθυμητός βαθμός ακρίβειας. Αφού απαντηθούν τα ερωτήματα αυτά και καθοριστεί το πεδίο που θα εξεταστεί, αρχίζει η εφαρμογή των δυνατοτήτων του προγράμματος. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα της διαδικασίας μοντελοποίησης με τη χρήση CFD.

### Προ-επεξεργαστής

Ο προ-επεξεργαστής του ANSYS- FLUENT χρησιμοποιείται για τον ορισμό του προς επίλυση προβλήματος και την εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος σε μορφή κατάλληλη για επεξεργασία από τον επιλύτη. Οι προκαθορισμένοι οδηγοί του προγράμματος βοηθούν τον χρήστη να ορίσει το πρόβλημα ρευστομηχανικής που θέλει να επιλύσει, παρέχοντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα προσαρμογής σε πολυάριθμα και περίπλοκα προβλήματα. Ο προ-επεξεργαστής περιλαμβάνει τη γεωμετρία του προβλήματος, την δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος στη γεωμετρία, τον καθορισμό των φυσικών φαινομένων προς επίλυση και τη μοντελοποίησή τους.

**Γεωμετρία:** Πρόκειται για ένα παραμετρικό περιβάλλον, με άμεσες και αμφίδρομες συνδέσεις με πακέτα CAD, το οποίο λειτουργεί ως πύλη για την εισαγωγή της γεωμετρίας της υπό επίλυσης περιοχής για όλα τα προϊόντα της ANSYS, παρέχοντας μια συνεπή πηγή γεωμετρίας για όλες τις προσομοιώσεις. Ταυτόχρονα, υπάρχει η δυνατότητα απλοποίησης της γεωμετρίας, απαλείφοντας περιττές λεπτομέρειες του πεδίου.

**Δημιουργία πλέγματος (grid generation):** Το στάδιο αυτό αφορά την υποδιαίρεση του πεδίου ροής σε έναν αριθμό μικρότερων, μη αλληλεπικαλυπτόμενων πεδίων, δηλαδή ένα πλέγμα αποτελούμενο από κελιά (cells) τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κόμβους (knots). Η πυκνότητα του πλέγματος εξαρτάται από το επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας, μιας και οι πιο πολύπλοκες ροές, για παράδειγμα η επίλυση οριακού στρώματος, απαιτούν πολύ πυκνό πλέγμα.



**Σχήμα 2.1:** Λογικό διάγραμμα χρήσης μεθόδων CFD για την επίλυση προβλημάτων ροής [5]

Επίσης παρέχεται μεγάλη ποικιλία στον τρόπο δημιουργίας του πλέγματος, δίνοντας στον χρήστη τη δυνατότητα παραμετροποίησης.

**Καθορισμός παραμέτρων προβλήματος:** Στο συγκεκριμένο στάδιο καθορίζεται από τον χρήστη η φυσική διατύπωση του προβλήματος, επιλέγοντας τις ιδιότητες του ρευστού, τα φυσικά μοντέλα για τα διάφορα φαινόμενα που εξετάζει όπως την τύρβη, την καύση κ.α., την εφαρμογή των οριακών και αρχικών συνθηκών και τέλος τον καθορισμό των ρυθμίσεων του επιλύτη και της απαιτούμενης ακρίβειας. Το στάδιο αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό, δεδομένου ότι η ακρίβεια της προσομοίωσης συνδέεται άμεσα με την επιλογή του διαθέσιμου φυσικού μοντέλου.

### Επιλύτης

Ο επιλύτης χρησιμοποιεί διάφορες μεθόδους για να εξασφαλίσει την ευσταθή και με ακρίβεια επίλυση και έχει τη δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας σε πολλαπλούς πυρήνες. Σε αυτό το τμήμα, οι διακριτοποιημένες εξισώσεις επιλύονται επαναληπτικά (iterative solution) έως ότου η λύση συγκλίνει σε μία τιμή. Ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί την πορεία της σύγκλισης, αλλά και επιλεγμένες ποσότητες της αριθμητικής και φυσικής επίλυσης.

Σε γενικές γραμμές ο αριθμητικός αλγόριθμος της μεθόδου περιλαμβάνει τα εξής βήματα [16]:

- Ολοκλήρωση των εξισώσεων που διέπουν τη ροή σε όλους τους όγκους ελέγχου του πλέγματος.
- Διακριτοποίηση των ολοκληρωματικών εξισώσεων σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων.
- Επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων με χρήση επαναληπτικών μεθόδων.

Η σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν οι μεταβολές στις μεταβλητές της ροής από τη μία επανάληψη στην επόμενη είναι αμελητέες, με τα υπόλοιπα (residuals) να αποτελούν ένα μηχανισμό εύκολης παρακολούθησης αυτής της τάσης. Κατόπιν της σύγκλισης πρέπει να ελεγχθεί η διατήρηση των ιδιοτήτων του ρευστού, για παράδειγμα να πραγματοποιηθεί ισολογισμός μάζας.

Υπάρχει πιθανότητα η λύση να έχει συγκλίνει αλλά σε λάθος τιμή. Η ακρίβεια της λύσης λοιπόν, εξαρτάται από την επιτυχή επιλογή της μοντελοποίησης των φυσικών φαινομένων, την πυκνότητα του πλέγματος και τον έλεγχο των αριθμητικών σφαλμάτων.

### Μετα-επεξεργαστής

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Για τον σκοπό αυτόν παρέχεται η δυνατότητα γραφικής αλλά και ποσοτικής ανάλυσης, με χρήση διδιάστατων και τριδιάστατων απεικονίσεων της κατανομής διαφόρων μεγεθών της ροής, ισοϋψών καμπυλών και διανυσμάτων μεταξύ άλλων.

Ο μετα-επεξεργαστής αυτός προσαρμόζεται με εξαιρετική ευκολία στις ανάγκες του χρήστη και κυρίως μπορεί να έχει απευθείας πρόσβαση σε όλα τα δεδομένα και τις παραμέτρους της εφαρμογής, για την ακριβή ποσοτική επεξεργασία των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα προγραμματισμού, ώστε να αυτοματοποιηθούν επαναλαμβανόμενες διαδικασίες ελέγχου και βελτιστοποίησης, συνήθεις σε περιβάλλοντα σχεδιασμού [5, 6, 16].

### **Παράλληλη επεξεργασία**

Το πακέτο ANSYS-FLUENT παρέχει τη δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας σε πολλαπλούς πυρήνες, γεγονός που επιταχύνει ραγδαία τον χρόνο προσομοίωσης. Στην περίπτωση επιλογής της παράλληλης επεξεργασίας, το πλέγμα διαχωρίζεται σε μικρότερα κομμάτια (blocks) η επίλυση των οποίων ανατίθεται σε διαφορετικούς υπολογιστικούς κόμβους.

## 2.4 Κατασκευή της Γεωμετρίας και του Υπολογιστικού Πλέγματος

### 2.4.1 Γεωμετρία

Αρχικό στάδιο της προ-επεξεργασίας του προβλήματος ροής που πρόκειται να επιλυθεί με τη χρήση των εργαλείων CFD αποτελεί ο ορισμός του πεδίου το οποίο θα αναλυθεί με την κατασκευή της υπό εξέταση γεωμετρίας. Το πεδίο δύναται να κατασκευαστεί στο ενσωματωμένο στο πακέτο ANSYS εργαλείο το οποίο ονομάζεται Design Modeler (DM) και το οποίο προσφέρει πολλές δυνατότητες παραμετροποίησης και απλούστευσης της γεωμετρίας.

Η γεωμετρία συντίθεται μέσω της δημιουργίας σημείων (vertices), καμπυλών (edges), επιφανειών (faces) και όγκων (volumes) στον τριδιάστατο χώρο βήμα προς βήμα, ξεκινώντας από το σημείο και καταλήγοντας στον όγκο. Εναλλακτικά, είναι δυνατόν να κατασκευαστεί η γεωμετρία από τα μεγαλύτερα τμήματα στα μικρότερα (top to bottom approach) με την δημιουργία πρότυπων σχημάτων όπως σφαίρες και κύβους και την τροποποίηση τους με χρήση των πράξεων της άλγεβρας Boole (Boolean operations), κατασκευάζοντας, δίχως δυσκολία, εξαιρετικά πολύπλοκες γεωμετρίες.

Εναλλακτικά, η γεωμετρία δύναται να εισαχθεί από προγράμματα σχεδιασμού CAD, όπως για παράδειγμα τα Solidworks, Inventor, CATIA, τα οποία όντας εξειδικευμένα στον σχεδιασμό διδιάστατων και τριδιάστατων γεωμετριών, προσφέρουν ακόμα μεγαλύτερες δυνατότητες παραμετροποίησης σε σχέση με το DM.

### 2.4.2 Δημιουργία του Πλέγματος

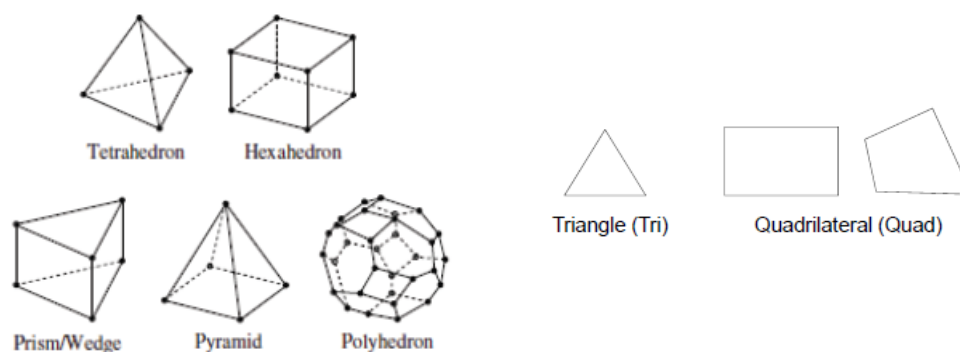
Όπως προαναφέρθηκε, οι εξισώσεις NS δεν μπορούν να επιλυθούν αναλυτικά για τις περισσότερες ροές και πρέπει να επιλυθούν αριθμητικά σε ορισμένα διακριτά σημεία ή κόμβους στο πεδίο ροής. Η χωρική διακριτοποίηση του πεδίου ροής αποτελεί αυτό που σε ορολογία CFD ονομάζεται κατασκευή υπολογιστικού πλέγματος. Η δομή και οι ιδιότητες του πλέγματος έχουν καθοριστική επίδραση στα εξής:

- Την ολική ακρίβεια της υπολογιστικής προσομοίωσης
- Τον ρυθμό σύγκλισης
- Τους υπολογιστικούς πόρους που απαιτούνται (μνήμη, χρόνος)

Η κατασκευή ενός ποιοτικού υπολογιστικού πλέγματος είναι απαραίτητη για την ακριβή προσομοίωση της υπό εξέταση ροής, μιας και η χρήση ενός αραιού πλέγματος ενδέχεται όχι μόνο να μην συγκλίνει στον επιλύτη, αλλά και να οδηγήσει σε λάθος λύση. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την πραγματοποίηση ελέγχου ανεξαρτησίας πλέγματος (grid independence). Κατά την διενέργεια της ανεξαρτησίας πλέγματος, η πυκνότητα του πλέγματος διπλασιάζεται σε όλες τις διευθύνσεις και επαναλαμβάνεται η προσομοίωση. Στόχος είναι η εύρεση του πλέγματος, το οποίο όταν πυκνωθεί δεν θα παρουσιάζει πλέον αξιοσημείωτες μεταβολές στην λύση του [9].

Στο πακέτο ANSYS-FLUENT η κατασκευή του πλέγματος πραγματοποιείται στην ενσωματωμένη εφαρμογή ANSYS-ICEM Meshing. Με τη χρήση του προγράμματος αυτού, μπορεί να κατασκευαστεί πλέγμα σε ακμές, επιφάνειες ή και απευθείας στους όγκους της γεωμετρίας γεγονός που δίνει μεγάλη ευελιξία στον χρήστη. Στην περίπτωση τριδιάστατης γεωμετρίας το πλέγμα στον όγκο μπορεί να δημιουργηθεί απευθείας, βάσει εργαλείων που παρέχονται.

Εναλλακτικά, μπορεί να δημιουργηθεί διαδοχικά, ξεκινώντας από την τοποθέτηση των κόμβων στις ακμές, κατόπιν στο πλέγμα των επιφανειών που αυτές ορίζουν και τέλος στον όγκο που ορίζεται από τις επιφάνειες. Τα στοιχεία του τριδιάστατου πλέγματος μπορεί να είναι εξαεδρικά (Hex), συνδυασμός εξαεδρικών (κυρίως) και σφηνοειδών στοιχείων (Hex/Wedge), συνδυασμός τετραεδρικών και πολυεδρικών στοιχείων (Tet/Hybrid), πυραμοειδή (pyramid) και τέλος πολυεδρικά (polyhedron). Αντίστοιχα στην περίπτωση διδιάστατου πλέγματος, τα στοιχεία του μπορεί να είναι τετράπλευρα (Quad) ή τριγωνικά (Tri), όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2.



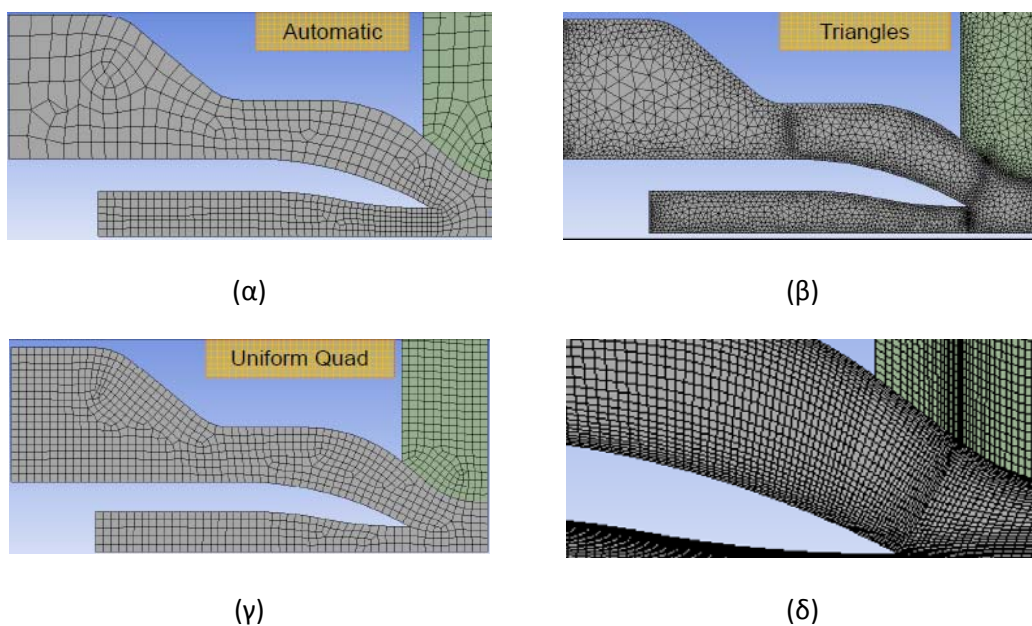
**Σχήμα 2.2:** Στοιχεία τριδιάστατου και διδιάστατου πλέγματος [56]

Το πώς θα δομηθεί το πλέγμα εξαρτάται από τον τύπο της ροής, την μοντελοποίηση και τον επιθυμητό βαθμό ακρίβειας. Η ανάλυση, ωστόσο, περιορίζεται από τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ και τον απαιτούμενο χρόνο. Η δημιουργία του πλέγματος είναι λοιπόν θέμα εμπειρίας και διαίσθησης. Η ANSYS παρέχει στους χρήστες έγγραφα με οδηγίες και κατευθυντήριες γραμμές βέλτιστης πρακτικής, οι οποίες γενικά πρέπει να ακολουθούνται.

Γενικά, σε περίπτωση τριδιάστατων πλεγμάτων προτιμούνται τα εξαεδρικά στοιχεία, γιατί προσφέρουν καλύτερη ποιότητα πλέγματος. Αντίστοιχα στα διδιάστατα πλέγματα, η χρήση τετραπλεύρων συνίσταται για τον ίδιο λόγο. Σε αυτές τις περιπτώσεις το πλέγμα που προκύπτει ονομάζεται δομημένο (structured). Σε κάποιες πολύπλοκες γεωμετρίες εντούτοις, τα τετράεδρα και τα τριγωνικά στοιχεία είναι απαραίτητα, διότι παρέχουν πιο αποτελεσματική δόμηση των κελιών σε περιοχές της ροής. Στην περίπτωση αυτή όμως το πλέγμα πλέον είναι μη δομημένο (unstructured).

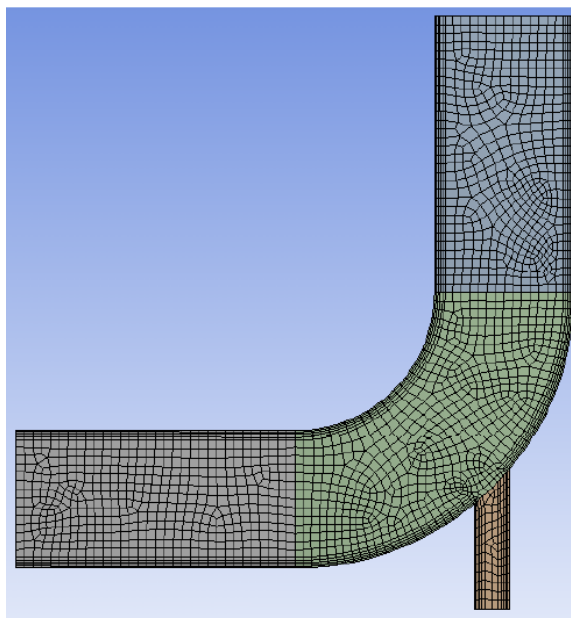
Στο Σχήμα 2.3 Παρουσιάζονται τέσσερις διαφορετικές προσεγγίσεις για την δημιουργία πλέγματος στη ίδια γεωμετρία. Στην εικόνα (α) απεικονίζεται η χρήση αυτόματης δημιουργίας πλέγματος, με την οποία χρησιμοποιούνται τόσο τριγωνικά όσο και τετράπλευρα στοιχεία, με τα δεύτερα να επικρατούν σε αριθμό. Στις εικόνες (β) και (γ) χρησιμοποιούνται αμιγώς τριγωνικά και τετράπλευρα στοιχεία αντίστοιχα, ενώ στην εικόνα (δ), η οποία αποτελεί λεπτομέρεια της ίδιας

γεωμετρίας, χρησιμοποιήθηκε η επιλογή mapped face meshing η οποία δημιουργεί ομοιόμορφο δομημένο πλέγμα με χρήση αυστηρά τετράπλευρων στοιχείων.



**Σχήμα 2.3:** Προσεγγίσεις δημιουργίας πλέγματος σε διδιάστατη γεωμετρία [6]

Στο ANSYS ICEM-Meshing παρέχεται και η δυνατότητα αυτόματης τοπικής πύκνωσης του πλέγματος στα στερεά όρια, ώστε να επιτευχθεί η ακριβής ανάλυση του τυρβώδους οριακού στρώματος. Η επιλογή αυτή πραγματοποιείται μέσω της εντολής inflation, ενώ παράδειγμα της λειτουργίας της παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4.



**Σχήμα 2.4:** Παράδειγμα δημιουργίας αυτόματου πλέγματος για την ανάλυση του οριακού στρώματος σε διδιάστατη γεωμετρία [6]

Στο ANSYS ICEM meshing επίσης καθορίζονται οι ζώνες του πεδίου που αντιστοιχούν σε ρευστό και σε στερεά όρια, ενώ επίσης ομαδοποιούνται και τα στοιχεία της γεωμετρίας, δηλαδή οι επιφάνειες και οι καμπύλες, τα οποία αντιστοιχούν σε κάποια οριακή συνθήκη. Η επιλογή αυτή πραγματοποιείται με την εντολή named selections, και σκοπός της είναι να διευκολύνει την μετέπειτα ανάθεση οριακών συνθηκών από το FLUENT.

#### 2.4.3 Διαχωρισμός των Πλεγμάτων με Βάση τη Συνδεσιμότητά τους

Τα πλέγματα διαχωρίζονται μεταξύ τους με βάση τη συνδεσιμότητά τους (connectivity), δηλαδή τον προσδιορισμό των γειτονικών τους στοιχείων, σε δομημένα, μη δομημένα και υβριδικά. Τα δομημένα πλέγματα αποτελούνται από επίπεδα στοιχεία με τέσσερις πλευρές (διδιάστατα) ή στοιχεία στον χώρο με έξι επιφάνειες (τριδιάστατα). Συμπερασματικά, επιβάλλεται να χρησιμοποιηθούν μόνο τετράπλευρα και εξαεδρικά στοιχεία αντίστοιχα. Έτσι χαρακτηρίζονται από την απλή συνδεσιμότητα των υπολογιστικών στοιχείων, η οποία εκφράζεται σαν ένας πίνακας δύο ή τριών διαστάσεων που αποθηκεύεται στη μνήμη του υπολογιστή.

Τα μη δομημένα πλέγματα αποτελούνται από στοιχεία διαφόρων μορφών, συνήθως με τον συνδυασμό τριγώνων και τετραπλεύρων στα διδιάστατα και τετραεδρικών με εξαεδρικά στα τριδιάστατα προβλήματα. Μειονέκτημα των μη δομημένων πλεγμάτων είναι η χαμηλότερη ακρίβεια και ποιότητα του πλέγματος, η δυσκολία σύγκλισης και οι αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις. Λόγω των παραπάνω, η χρήση τους συνίσταται μόνο στην περίπτωση πολύπλοκων γεωμετριών όπου δεν είναι δυνατή η χρήση δομημένων πλεγμάτων.

Τέλος, υβριδικά πλέγματα είναι τα πλέγματα τα οποία συνδυάζουν περιοχές του πεδίου όπου έχει δημιουργηθεί δομημένο πλέγμα, με άλλες περιοχές του στις οποίες ήταν απαραίτητη η χρήση μη δομημένου πλέγματος. Για παράδειγμα, είναι δυνατή η χρήση δομημένου πλέγματος στην περιοχή του οριακού στρώματος, το οποίο θα είναι πιο ακριβές στην επίλυσή του, σε συνδυασμό με μη δομημένο πλέγμα στην ελεύθερη ροή.

Τα πλεονεκτήματα των δομημένων πλεγμάτων είναι πολλά. Σε γενικές γραμμές, είναι πιο αποτελεσματικά όσον αφορά την ακρίβεια, τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο και την μνήμη. Ως εκ τούτου, τα πλέγματα τα οποία θα δημιουργηθούν στο δεδομένο ροϊκό πρόβλημα θα είναι δομημένα.

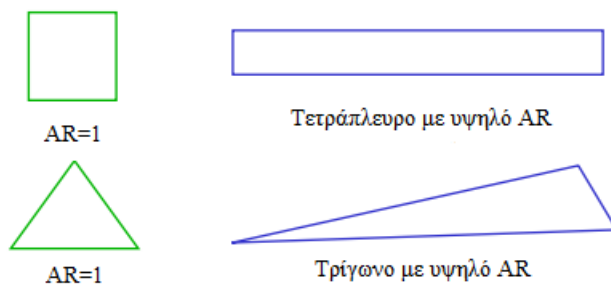
#### 2.4.4 Ποιότητα του Πλέγματος

Η ποιότητα του υπολογιστικού πλέγματος σχετίζεται με την ομαλότητα, την ασυμμετρία του (skewness) και την κατανομή των κόμβων σε αυτό. Όλα τα παραπάνω μπορούν εύκολα να αξιολογηθούν. Επισημαίνεται ότι η καλή ποιότητα του πλέγματος είναι σημαντικότερη για την εξαγωγή αποτελεσμάτων με ακρίβεια, απ' ό,τι το είδος του πλέγματος το οποίο χρησιμοποιήθηκε [9].

Για να εξασφαλιστεί καλή ομαλότητα, είναι σημαντικό να αποφευχθούν οι απότομες αλλαγές στους όγκους μεταξύ γειτονικών κελιών. Αν δεν πραγματοποιηθεί αυτό, θα δημιουργηθούν μεγάλα σφάλματα αποκοπής, δηλαδή σφάλματα μεταξύ των διαφορικών εξισώσεων και τη διακριτή μορφή τους, τα οποία θα τείνουν να μεγεθυνθούν κατά την προσομοίωση. Το μέτρο με το οποίο καθορίζεται η ομαλότητα του πλέγματος είναι η αναλογία διαστάσεων (aspect ratio - AR).



Με τον όρο αναλογία διαστάσεων ορίζεται ο λόγος του μήκους της μακρύτερης πλευράς προς την κοντύτερη. Στην περίπτωση τετραγώνων και ισόπλευρων τριγώνων (για διδιάστατο πρόβλημα) η αναλογία διαστάσεων ισούται με 1, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 2.5. Σημειώνεται ότι δεν προτείνεται η χρήση στοιχείων με αναλογία διαστάσεων μεγαλύτερη του 40, ενώ συνήθως είναι προτιμότερη μία τιμή μικρότερη του 20 [6].



**Σχήμα 2.5:** Παραδείγματα υπολογισμού αναλογίας διαστάσεων για διάφορα διδιάστατα στοιχεία [56]

Επιπλέον, μεγάλη επίδραση έχει και το γεωμετρικό σχήμα των κελιών. Η ασυμμετρία του κελιού καθορίζει τη γωνιακή απόκλιση του από το αρχικό του σχήμα, καθορίζει δηλαδή την παραμόρφωση του κελιού. Ορίζεται ως εξής:

$$\max\left[\frac{\theta_{max}-\theta_e}{180^\circ-\theta_e}, \frac{\theta_e-\theta_{min}}{\theta_e}\right] \quad (2.9)$$

όπου  $\theta_{max}$  και  $\theta_{min}$ , η μέγιστη και η ελάχιστη γωνία του κελιού αντίστοιχα, ενώ  $\theta_e$ , η γωνία την οποία θα έπρεπε να έχει ιδανικά το κελί, δηλαδή  $60^\circ$  και  $90^\circ$  για τρίγωνο και τετράγωνο αντίστοιχα. Η ασυμμετρία λαμβάνει τιμές από 0 έως 1, με 0 την καλύτερη δυνατή, δηλαδή στην περίπτωση ορθογωνίου παραλληλογράμμου. Σε γενικές γραμμές, η ασυμμετρία των πιο στρεβλών κελιών δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.95, ενώ η μέση τιμή θα πρέπει να είναι κάτω από το 0.30 [6, 7].

Αντίστοιχα με τη ασυμμετρία δύναται να μετρηθεί και η ορθογώνια ποιότητα (orthogonal quality-OQ) του κελιού, η οποία λαμβάνει επίσης τιμές μεταξύ 0 και 1. Στην περίπτωση της μέτρησης της ορθογώνιας ποιότητας όμως, θεωρείται η τιμή 1 η βέλτιστη δυνατή. Γενικά συνιστάται η ορθογώνια ποιότητα των στοιχείων του πλέγματος να είναι μεγαλύτερη από 0.3, αν και η τιμή αυτή μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με τη φυσική του εκάστοτε προβλήματος και τη θέση του κελιού [6].

Τέλος, η πυκνότητα των κόμβων, δηλαδή η ανάλυση του πλέγματος, διαδραματίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια της λύσης που προκύπτει από τη χρήση εργαλείων CFD. Το παραπάνω ισχύει ιδιαίτερα σε περιοχές υψηλής πίεσης ή απότομων βαθμίδων ταχυτήτων, όπου απαιτείται πολύ πυκνό πλέγμα για την ακριβή επίλυση της ροής. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη προσοχή όταν στο υπό εξέταση πρόβλημα υπάρχει οριακό στρώμα κοντά σε τοίχωμα.

Η ποιότητα του πλέγματος είναι εξαιρετικά σημαντική για την επιτυχή προσομοίωση της ροής με τη χρήση CFD. Για τον λόγο αυτό θα εξεταστεί στο κεφάλαιο 3 της παρούσης εργασίας.

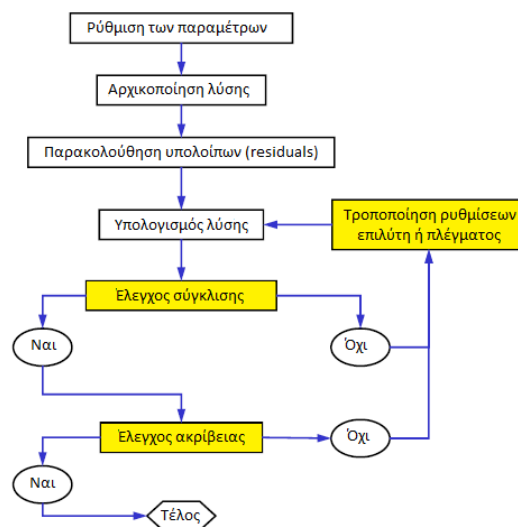
## 2.5 Γενικές Εξισώσεις Διατήρησης Ρευστού

### 2.5.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Όγκων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, με τη χρήση των εργαλείων CFD γίνεται δυνατή η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων NS, οι οποίες διέπουν το πεδίο ροής πολύπλοκων προβλημάτων ρευστομηχανικής. Το ANSYS-FLUENT αφού πρώτα διακριτοποιήσει τις εξισώσεις αυτές, τις επιλύει. Η μέθοδος διακριτοποίησης την οποία χρησιμοποιεί ο συγκεκριμένος κώδικας είναι η μέθοδος πεπερασμένων όγκων (finite volume method). Πρόκειται για μία μέθοδο η οποία στηρίζεται στην οϊλεριανή (Eulerian) περιγραφή της ροής των ρευστών, στην οποία δεν ακολουθείται κάποιο συγκεκριμένο σωματίδιο ρευστού, όπως γίνεται στην λεγόμενη λαγκρατζιανή περιγραφή (Lagrangian), αλλά το πώς οι ιδιότητες της ροής μεταβάλλονται σε μία περιοχή του πεδίου, σταθερή στο χώρο και το χρόνο, η οποία ονομάζεται όγκος ελέγχου.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι η εξίσωση διατήρησης ικανοποιείται σε κάθε όγκο ελέγχου, όσο αραιό και αν είναι το πλέγμα, η αποδοτικότητα της και η ύπαρξη αναπτυγμένων αλγορίθμων επαναληπτικής επίλυσης. Μειονέκτημά της αποτελεί η εμφάνιση αριθμητικής διάχυσης, η οποία αλλοιώνει τη λύση, όταν χρησιμοποιούνται σχήματα διακριτοποίησης χαμηλής τάξης ακρίβειας. Η αριθμητική διάχυση αντιμετωπίζεται με τη χρήση σχημάτων μεγάλης τάξης ακρίβειας και με την πύκνωση του πλέγματος.

Στο FLUENT παρέχονται δύο είδη επιλυτών, συγκεκριμένα αυτός ο οποίος βασίζεται στην πίεση (pressure based) και αυτός ο οποίος βασίζεται στην πυκνότητα (density based). Στην περίπτωση ασυμπίεστης ροής είναι σαφώς προτιμότερη η χρήση του επιλύτη που βασίζεται στην πίεση. Στην περίπτωση χρήση του επιλύτη πίεσης, η ορμή και η πίεση λογίζονται ως οι κύριες μεταβλητές. Ο επιλύτης αυτός αρχικά υπολογίζει το πεδίο ταχύτητας επιλύοντας τις εξισώσεις ορμής. Στη συνέχεια υπολογίζει το πεδίο πίεσης με την επίλυση μίας εξίσωσης πίεσης ή διόρθωσης πίεσης (ανάλογα με τη μέθοδο), η οποία προκύπτει με τον κατάλληλο χειρισμό των εξισώσεων ορμής και συνέχειας. Τέλος, λύνει τις ολοκληρωματικές εξισώσεις για την ενέργεια (στην ασυμπίεστη ροή παραλείπεται) και άλλων βαθμωτών μεγεθών, όπως της τύρβης.

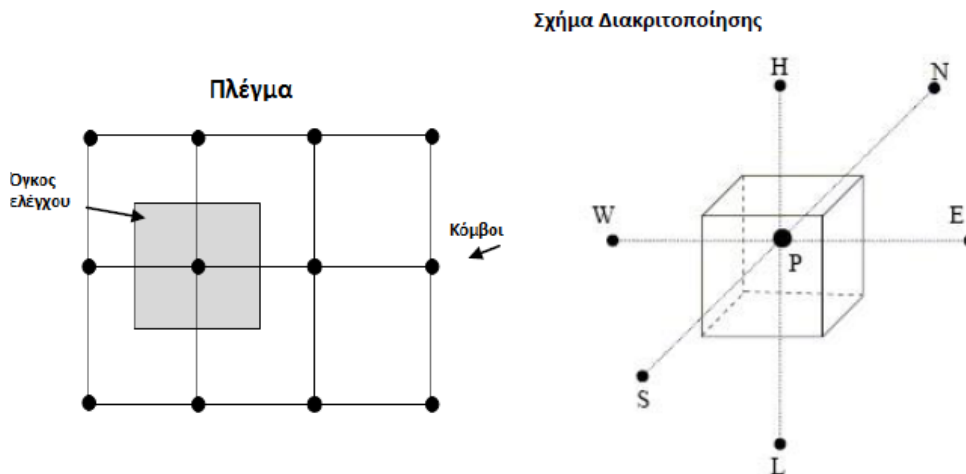


Σχήμα 2.6: Λογικό διάγραμμα προσομοίωσης CFD

Στο Σχήμα 2.6 Παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα επίλυσης το οποίο ακολουθείται σε κάθε προσομοίωση CFD. Η τροποποίηση των ρυθμίσεων του επιλύτη δύναται να βελτιώσει τόσο τον ρυθμό σύγκλισης της προσομοίωσης, όσο και την ακρίβεια της υπολογισμένης λύσης.

### 2.5.2 Η Έννοια του Όγκου Ελέγχου

Με τη μέθοδο πεπερασμένων όγκων, το υπολογιστικό πλέγμα υποδιαιρείται σε πεπερασμένο αριθμό μικρών όγκων ελέγχου όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7. Κάθε όγκος ελέγχου έχει έναν κόμβο στο κέντρο του, στον οποίο υπολογίζονται τα μεγέθη της ροής, όπως η ταχύτητα, η πίεση κ.α. Το πλέγμα στην περίπτωση αυτή διευθετείται ομόθετα (co-located), σε αντίθεση με την μετατοπισμένη μέθοδο (staggered) στην οποία οι ταχύτητες υπολογίζονται στο κέντρο των συνοριακών επιφανειών του κελιού και η πίεση στο κέντρο του. Στο FLUENT οι τιμές των μεγεθών υπολογίζονται πάντα στο κέντρο του κελιού, και για τα υπόλοιπα σημεία πραγματοποιούνται παρεμβολές.



**Σχήμα 2.7:** Σχηματική αναπαράσταση πλέγματος για την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων όγκων [48]

### 2.5.3 Διακριτοποίηση των Διαφορικών Εξισώσεων

Στη συνέχεια, διακριτοποιούνται οι διαφορικές εξισώσεις της ροής. Η διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων ροής γίνεται πιο κατανοητή αν εξεταστεί η μη μόνιμη εξίσωση διατήρησης βαθμωτής ποσότητας  $\varphi$ , η ολοκληρωματική μορφή της οποίας για αυθαίρετο όγκο ελέγχου  $V$  είναι:

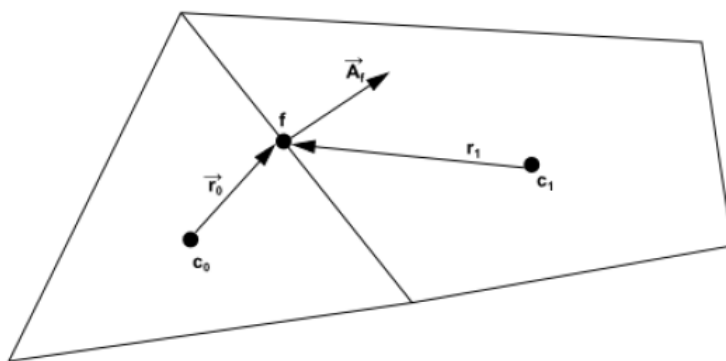
$$\int_V \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} dV + \oint \rho \varphi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\varphi \nabla \varphi_f \cdot d\vec{A}_f + \int_V S_\varphi V \quad (2.10)$$

όπου ο συντελεστής  $\Gamma_\varphi$ , είναι ο συντελεστής μεταφοράς της ποσότητας  $\varphi$ , ενώ ο τελευταίος όρος αφορά την παραγωγή της ποσότητας  $\varphi$  λόγω πηγών στον όγκο ελέγχου. Τέλος, με  $f$ , συμβολίζεται η επιφάνεια του όγκου ελέγχου. Ανάλογα με την τιμή της ποσότητας  $\varphi$ , διαμορφώνεται και η αντίστοιχη διαφορική εξίσωση, σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1.

**Πίνακας 2.1:** Συσχετισμός βαθμωτής ποσότητας  $\varphi$  με την αντίστοιχη εξίσωση μεταφοράς

Εξίσωση	$\varphi$
Συνέχειας	$\varphi = 1$
Ορμής κατά $x$	$\varphi = u$
Ορμής κατά $y$	$\varphi = v$
Ενέργειας	$\varphi = h$

Με τον τρόπο αυτό, η γενική βαθμωτή εξίσωση μεταφοράς, Εξίσωση (2.10), μετατρέπεται σε μια αλγεβρική εξίσωση, η οποία και μπορεί να λυθεί αριθμητικά. Η εξίσωση μεταφοράς στη συνέχεια εφαρμόζεται σε κάθε όγκο ελέγχου, όπως ο τριγωνικός όγκος ελέγχου ο οποίος απεικονίζεται στο Σχήμα 2.8, αποδίδοντας του μια διακριτή εξίσωση που εκφράζει το νόμο για τη διατήρηση στο επίπεδο των όγκων ελέγχου. Το πλέγμα μπορεί να είναι δομημένο ή μη δομημένο ανάλογα με τη μορφή των στοιχείων που το αποτελούν.

**Σχήμα 2.8:** Όγκος ελέγχου στον οποίο διακριτοποιείται η βαθμωτή εξίσωση μεταφοράς

Η διακριτή μορφή της Εξίσωσης (2.10), έχει τη μορφή της Εξίσωσης (2.11), στην οποία ο όρος,  $\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} V$ , αφορά την διακριτοποίηση του χρόνου και αμελείται σε περίπτωση μόνιμων ροών:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \varphi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\varphi \nabla \varphi_f \cdot \vec{A}_f + S_\varphi V \quad (2.11)$$

Οι εξισώσεις οι οποίες επιλύονται στο ANSYS-FLUENT έχουν την γενική μορφή των άνωθι εξισώσεων και εύκολα εφαρμόζονται στην περίπτωση πολυδιάστατων, μη δομημένων πλεγμάτων αποτελούμενα από οποιαδήποτε μορφής πολύεδρα.

#### 2.5.4 Χωρική Διακριτοποίηση-Ανάτι Σχήμα Δεύτερης Τάξης

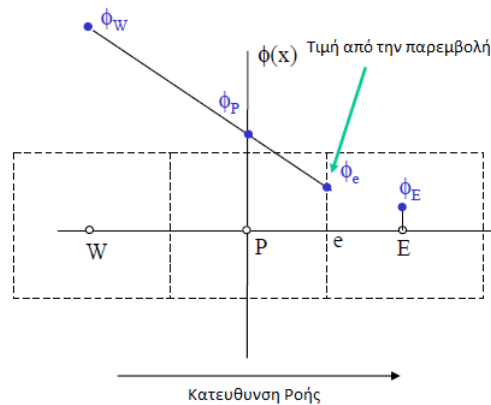
Η διακριτοποίηση των εξισώσεων χρειάζεται πληροφορίες τόσο από το κέντρο του κελιού, όσο και από τις έδρες των διπλανών κελιών. Οι τιμές των δεδομένων πεδίου όπως η ταχύτητα και οι ιδιότητες του ρευστού αποθηκεύονται στο κέντρο βάρους των όγκων ελέγχου. Όμως για τον υπολογισμό των όρων λόγω μεταφοράς στην Εξίσωση (2.11), χρειάζονται οι τιμές των μεγεθών στις επιφάνειες των όγκων ελέγχου,  $\varphi_f$ . Αυτές θα υπολογιστούν με τη χρήση σχημάτων παρεμβολής μεταξύ των τιμών του συγκεκριμένου και των γειτονικών κελιών.

Υπάρχουν διάφορα σχήματα για τον υπολογισμό των τιμών αυτών και η ακρίβεια της διακριτοποίησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από αυτά. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί το ανάντι σχήμα δεύτερης τάξης (second order upwind), το οποίο αναπτύσσοντας τη σειρά Taylor της υπολογισθείσας τιμής στο κέντρο του κελιού, προσφέρει ακρίβεια δεύτερης τάξης. Το σχήμα αυτό έχει τη μορφή της Εξίσωσης (2.12):

$$\varphi_{f,sou} = \varphi + \nabla\varphi \cdot \vec{r} \quad (2.12)$$

όπου,  $\varphi$ , και  $\nabla\varphi$ , είναι οι τιμές στο κέντρο του ανάντι κελιού για την ποσότητα  $\varphi$  και τη βαθμίδα της και  $\vec{r}$  είναι το διάνυσμα θέσης από το κέντρο του ανάντι κελιού ως το κέντρο της έδρας.

Η χρήση του ανάντι σχήματος δεύτερης τάξης προσφέρει ακριβή αποτελέσματα, σε συνδυασμό με αυξημένη ευστάθεια σε σχέση με άλλα σχήματα παρεμβολής, όντας ωστόσο σχετικά αργό υπολογιστικά. Άλλωστε, σε περιπτώσεις όπου η ροή δεν είναι ευθυγραμμισμένη με το πλέγμα η χρήση του είναι επιβεβλημένη. Στο Σχήμα 2.9 απεικονίζεται η διαδικασία παρεμβολής με χρήση σχήματος ανάντι δεύτερης τάξης. Συγκεκριμένα, η τιμή της ποσότητας  $\varphi_e$  στην επιφάνεια μεταξύ των όγκων ελέγχου P και E, θα υπολογιστεί με παρεμβολή των τιμών στο κέντρο των δύο όγκων ελέγχων ανάντι, δηλαδή των τιμών  $\varphi_W$  και  $\varphi_P$ .



**Σχήμα 2.9:** Απεικόνιση του σχήματος παρεμβολής δεύτερης τάξης [56]

### 2.5.5 Υπολογισμός των Βαθμίδων και Παραγώγων

Αντίστοιχα, η βαθμίδα της βαθμωτής ποσότητας,  $\nabla\varphi$ , η οποία απαιτείται για την επίλυση της διακριτοποιημένης εξίσωσης μεταφοράς υπολογίστηκε με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (least squares cell-based gradient) λόγω της ακρίβειας και της οικονομικότητάς της σε υπολογιστικούς πόρους. Στη μέθοδο αυτή, η βαθμίδα υπολογίζεται λύνοντας ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, για τον πίνακα συντελεστών,  $[J]$ , που προκύπτει από τις εξισώσεις:

$$(\nabla\varphi)_{c0} \cdot \Delta r_i = (\varphi_{ci} - \varphi_{c0}) \quad (2.13)$$

$$[J](\nabla\varphi)_{c0} = \Delta\varphi \quad (2.14)$$

### 2.5.6 Γραμμικοποίηση των Εξισώσεων-Επίλυση του Γραμμικού Συστήματος

Η διακριτοποιημένη εξίσωση μεταφοράς, Εξίσωση (2.11), περιέχει την άγνωστη βαθμωτή μεταβλητή  $\varphi$  στο κέντρο των κελιών, καθώς και τις αντίστοιχες άγνωστες τιμές στα γειτονικά κελιά. Αυτή η εξίσωση είναι γενικά μη-γραμμική ως προς τις μεταβλητές αυτές. Η Εξίσωση (2.11) μπορεί να γραμμικοποιηθεί και να αποκτήσει την μορφή της Εξίσωσης (2.15):

$$a_p \varphi = \sum_{nb} a_{nb} \varphi_{nb} + b \quad (2.15)$$

όπου ο δείκτης  $nb$  αναφέρεται στα γειτονικά κελιά, ενώ τα  $a_p$  και  $a_{nb}$  είναι οι συντελεστές των  $\varphi$  και  $\varphi_{nb}$  αντίστοιχα, αφού έχουν γραμμικοποιηθεί.

Ο αριθμός των γειτονικών κελιών εξαρτάται από την τοπολογία του πλέγματος, αλλά συνήθως είναι ίσος με τον αριθμό των εδρών που εσωκλείουν το συγκεκριμένο κελί. Αν στην Εξίσωση (2.15) αντικατασταθεί όπου  $\varphi$  το  $u$ , προκύπτει η γραμμικοποιημένη εξίσωση της ορμής κατά τη διεύθυνση  $x$ :

$$a_p u = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p_f A \cdot \hat{i} + S \quad (2.16)$$

Παρόμοιες εξισώσεις προκύπτουν για κάθε κελί στο πλέγμα, το οποίο οδηγεί σε ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων με αραιό πίνακα συντελεστών. Το ANSYS-FLUENT λύνει αυτό το γραμμικό σύστημα χρησιμοποιώντας έναν επιλύτη γραμμικών συστημάτων βασισμένο στη μέθοδο Gauss-Seidel, σε συνδυασμό με μία αλγεβρική πολυπλεγματική μέθοδο (Algebraic Multigrid-AMG), η οποία ουσιαστικά ανανεώνει τις τιμές των μεταβλητών ροής αρχικά σε αραιότερα πλέγματα του πεδίου ροής, ώστε να προκύπτουν τα γενικά χαρακτηριστικά της ροής γρήγορα. Οι υπολογισμοί οι οποίοι πραγματοποιούνται στα αραιότερα πλέγματα, χρησιμοποιούνται ως αρχικές προβλέψεις, οι οποίες στη συνέχεια διορθώνονται στα πυκνότερα. Πρέπει να τονιστεί ότι η διαδικασία αυτή επιταχύνει την επίτευξη σύγκλισης, δίχως να επιδρά στην τελική λύση.

### 2.5.7 Σχήματα Παρεμβολής της Πίεσης

Εάν οι ροές μάζας διαμέσου των εδρών και το πεδίο πίεσης είναι γνωστά, η διακριτοποιημένη εξίσωση της ορμής, η οποία θα έχει τη μορφή της Εξίσωσης (2.16) μπορεί να λυθεί επαναληπτικά με τον επιλύτη γραμμικών συστημάτων και να ληφθεί ένα πεδίο ταχυτήτων. Ωστόσο, οι ροές μάζας και το πεδίο πίεσης δεν είναι γνωστά εκ των προτέρων και θα πρέπει να λαμβάνονται ως ένα μέρος της λύσης.

Το ομόθετο σχήμα το οποίο χρησιμοποιεί το FLUENT αποθηκεύει την ταχύτητα και την πίεση στο κέντρο των υπολογιστικών κελιών. Η επίλυση του συστήματος εξισώσεων ορμής προϋποθέτει την τιμή των βαθμίδων πίεσης στην επιφάνεια του ορίου μεταξύ γειτονικών κελιών. Αυτό πραγματοποιείται με τη χρήση κάποιου σχήματος παρεμβολής. Στην περίπτωση χρήσης του πολυφασικού μοντέλου VOF τα διαθέσιμα σχήματα παρεμβολής για την εύρεση των τιμών πίεσης στα όρια των κελιών είναι το PRESTO! και το body force weighted. Το πρώτο προτιμάται για χρήση σε ροές με υψηλή στροβιλότητα, απότομες κλίσεις πίεσης και καμπυλωμένα πλέγματα. Αντίθετα, το δεύτερο σχήμα προτιμάται όταν οι ογκικές δυνάμεις είναι μεγάλες, όπως στην περίπτωση ροής σε κανάλι και στην ελεύθερη μεταφορά θερμότητας.

### 2.5.8 Αλγόριθμοι Σύζευξης Πίεσης-Ταχύτητας

Η επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς, Εξίσωση (2.10) με τη χρήση υπολογιστικής προσομοίωσης αποτελεί οδηγό για την επίλυση και των εξισώσεων ροής. Παρόμοιες εξισώσεις διατυπώνονται για όλα τα ροϊκά μεγέθη, εκτός της πίεσης. Στην περίπτωση ασυμπίεστης ροής, η πυκνότητα είναι σταθερή και δεν συσχετίζεται με κάποιον τρόπο με την πίεση. Λόγω του γεγονότος ότι η τελευταία περιλαμβάνεται στις τρεις εξισώσεις ορμής όμως, το σύστημα των εξισώσεων είναι κλειστό μιας και για τους τέσσερις αγνώστους υπάρχουν τέσσερις εξισώσεις.

Με τη χρήση αλγορίθμων σύζευξης της πίεσης και της ταχύτητας (pressure velocity coupling), εξάγεται μία εξίσωση για την πίεση ή τη διόρθωση πίεσης (pressure correction) από αυτές της συνέχειας και της ορμής. Όταν η εξίσωση συνέχειας ολοκληρωθεί σε έναν όγκο ελέγχου, προκύπτει η διακριτοποιημένη μορφή της, Εξίσωση (2.17):

$$\sum_f^{N_{faces}} J_f A_f = 0 \quad (2.17)$$

όπου,  $J_f$ , είναι η ροή μάζας διαμέσου της επιφάνειας  $f$ .

Συσχετίζοντας τις τιμές της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας,  $\vec{v}_n$ , στην επιφάνεια, με τις αποθηκευμένες τιμές της ταχύτητας στα κέντρα των κελιών, προκύπτει η εξής μορφή για τον υπολογισμό των ροών μάζας  $J_f$ :

$$J_f = \hat{J}_f + d_f(p_{c_0} - p_{c_1}) \quad (2.18)$$

Όπου,  $p_{c_0}$  και  $p_{c_1}$ , είναι οι πιέσεις εντός των δύο κελιών σε κάθε πλευρά μιας επιφάνειας, ενώ ο όρος  $\hat{J}_f$ , περιλαμβάνει την επίδραση των ταχυτήτων στα κελιά αυτά. Ο όρος  $d_f$ , τέλος είναι συνάρτηση της μέσης τιμής των συντελεστών,  $a_p$ , της εξίσωσης ορμής για τα γειτονικά κελιά.

Η Εξίσωση (2.18) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της επιπλέον σχέσης για την πίεση, η οποία είναι αναγκαία για την επίλυση των εξισώσεων. Στην περίπτωση αυτή θα έχει επιτευχθεί η σύζευξη της ταχύτητας με την πίεση.

Στο λογισμικό FLUENT παρέχονται πέντε διαφορετικές μέθοδοι για την σύζευξη της πίεσης με την ταχύτητα, οι εξής:

- I. **SIMPLE**
- II. **SIMPLEC**
- III. **PISO**
- IV. **FSM**
- V. **Coupled**

#### 2.5.8.1 Αλγόριθμος SIMPLE και Παραλλαγές του

Ο αλγόριθμος SIMPLE αποτελεί την προεπιλογή στο FLUENT και πρόκειται για μία μέθοδο εύρωστη και με ακρίβεια, αν και συγκλίνει με καθυστέρηση. Η λογική πίσω από τη μέθοδο αυτή είναι απλή. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί το γεγονός ότι το ρευστό ρέει από μία περιοχή υψηλής πίεσης σε μία με χαμηλή. Αρχικά, χρησιμοποιώντας ένα εκτιμώμενο πεδίο πίεσης, ελέγχει την διατήρηση της συνέχειας στους όγκους ελέγχου. Αν αυτή δεν ικανοποιείται, και συμβαίνει η εισροή μάζας να είναι μεγαλύτερη από την εκροή, η πίεση στους όγκους ελέγχου σε σχέση με τους γειτονικούς έχει θεωρηθεί πολύ μικρή. Συνεπώς, πρέπει να αυξηθεί η πίεση στον όγκο

ελέγχου αυτό σε σχέση με τους γύρω του. Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει αν η εκροή είναι μεγαλύτερη της εισροής. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου η λύση συγκλίνει.

Με τη μορφή εξισώσεων, ο αλγόριθμος δουλεύει ως εξής: Η εξίσωση ορμής επιλύεται με τη χρήση ενός εκτιμώμενου πεδίου πίεσης,  $p^*$ . Από την Εξίσωση (2.18) προκύπτει η πρώτη προσέγγιση της ροής μάζας διαμέσου της επιφάνειας,  $J_f^*$ :

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f(p_{c0}^* - p_{c1}^*) \quad (2.19)$$

Η εκτιμώμενη ροή μάζας,  $J_f^*$ , δεν θα ικανοποιεί την εξίσωσης συνέχειας. Συνεπώς, προστίθεται ένας διορθωτικός όρος,  $J_f'$ , στην υπάρχουσα τιμή,  $J_f^*$ , και προκύπτει η διορθωμένη ροή μάζας:

$$J_f = J_f^* + J_f' \quad (2.20)$$

ο διορθωτικός όρος προστίθεται έτσι ώστε η νέα τιμή της ροής μάζας να ικανοποιεί την εξίσωση συνέχειας. Από τον αλγόριθμο SIMPLE ο όρος  $J_f'$ , ισούται προς:

$$J_f' = d_f(p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (2.21)$$

Στην άνωθεν εξίσωση ο όρος,  $p'$ , αποτελεί την διόρθωση της πίεσης του όγκου ελέγχου. Ο αλγόριθμος SIMPLE στη συνέχεια αντικαθιστά την διορθωμένη εξίσωση ροής μάζας, δηλαδή τις Εξισώσεις (2.20) και (2.21) στην διακριτοποιημένη εξίσωση συνέχειας, Εξίσωση (2.17) ώστε να προκύψει η διακριτή μορφή της εξίσωσης διόρθωσης πίεσης  $p'$  στον όγκο ελέγχου:

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b \quad (2.22)$$

όπου ο όρος πηγής,  $b$ , αφορά τον ρυθμό καθαρής εισροής μάζας στον όγκο ελέγχου και ισούται προς:

$$b = \sum_f^{N_{faces}} J_f^* A_f \quad (2.23)$$

Η εξίσωση διόρθωσης πίεσης, Εξίσωση (2.22), επιλύεται με τη χρήση της αλγεβρικής πολυπλεγματικής μεθόδου AMG. Αφού υπολογιστεί η λύση, δηλαδή βρεθεί η διόρθωση της πίεσης,  $p'$ , προκύπτουν οι τιμές της πίεσης και της ροής διαμέσου της επιφάνειας, Εξισώσεις (2.24) και (2.25) αντίστοιχα:

$$p = p^* + \omega_p p' \quad (2.24)$$

$$J_f = J_f^* + d_f(p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (2.25)$$

Ο όρος  $\omega$  είναι ο συντελεστής υποχαλάρωσης (under-relaxation factor). Η διορθωμένη ροή μάζας διαμέσου της επιφάνειας των όγκων ελέγχων, ικανοποιεί την διακριτή εξίσωση συνέχειας ταυτοτικά με κάθε επανάληψη.

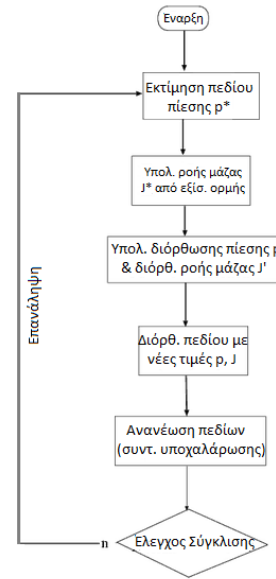
Ο αλγόριθμος SIMPLE είναι αποδοτικός, ωστόσο παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα όσον αφορά τον απαιτούμενο αριθμό επαναλήψεων, μιας και παρουσιάζει χαμηλό ρυθμό σύγκλισης. Το λογικό διάγραμμα επίλυσης του αλγορίθμου SIMPLE παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10.

Ο αλγόριθμος SIMPLEC έχει παρόμοια δομή με τον SIMPLE, ωστόσο συγκλίνει ταχύτερα στην περίπτωση απλών ροών. Σε πολύπλοκα προβλήματα δεν παρουσιάζει διαφορά από τον αλγόριθμο SIMPLE.



Ο αλγόριθμος σύζευξης πίεσης- ταχύτητας PISO, αποτελεί παραλλαγή του SIMPLE, στον οποίο όμως οι επαναληπτικοί υπολογισμοί που απαιτούνται έχουν μεταφερθεί μέσα στο υπολογιστικό στάδιο της επίλυσης της εξίσωσης διόρθωσης της πίεσης. Έτσι, κάθε επαναληπτικό βήμα απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο, αλλά τα συνολικά βήματα τα οποία απαιτούνται για την επίτευξη σύγκλισης είναι πολύ λιγότερα, ειδικά στην περίπτωση μη μόνιμης ροής. Στην περίπτωση μόνιμων ροών εντούτοις, δεν υπερέρχει του αλγορίθμου SIMPLE.

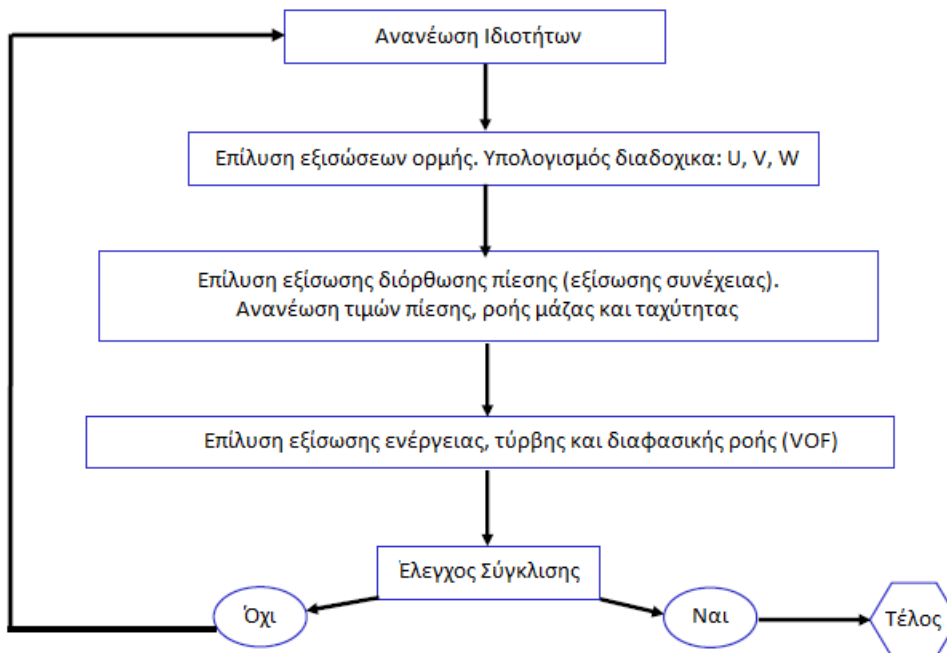
Η μέθοδος FSM χρησιμοποιείται στην περίπτωση μη μόνιμων ροών, σε συνδυασμό με την μέθοδο NITA (non-iterative time advancement), ενώ εμφανίζει παρόμοια χαρακτηριστικά με τον PISO.



**Σχήμα 2.10:** Λογικό διάγραμμα ροής του αλγορίθμου SIMPLE

2.5.8.2 Μέθοδος Διαχωρισμένης Επίλυσης

Οι προαναφερθέντες αλγόριθμοι αποτελούν μέρος της γενικότερης αντιμετώπισης της λύσης των εξισώσεων η οποία ονομάζεται διαχωρισμένη επίλυση (segregated solver), όπου οι εξισώσεις ορμής και συνέχειας επιλύονται σε διαφορετικά στάδια και όχι ταυτόχρονα. Έτσι κάθε εξίσωση για κάποια ροϊκή μεταβλητή επιλύεται για όλους τους όγκους ελέγχου και στη συνέχεια επιλύεται η εξίσωση για την επόμενη ροϊκή μεταβλητή για όλους τους όγκους ελέγχου κ.ο.κ. Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα με τα βήματα τα οποία ακολουθούνται όταν χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι διαχωρισμένης επίλυσης σε συνδυασμό με μία εξίσωση σύζευξης μεταξύ της πίεσης και της ταχύτητας.



**Σχήμα 2.11:** Λογικό διάγραμμα αλγορίθμων διαχωρισμένης επίλυσης (segregated solver)

## 2.5.8.3 Συζευγμένος Αλγόριθμος (Coupled Solver)

Η εναλλακτική μέθοδος επίλυσης των εξισώσεων είναι ο ταυτόχρονος υπολογισμός των ροϊκών μεταβλητών σε έναν όγκο ελέγχου, προτού επαναληφθεί η διαδικασία για τους υπόλοιπους όγκους. Ο αλγόριθμος αυτός ονομάζεται συζευγμένος (pressure-based coupled). Αρχικά, επιλύει ταυτόχρονα τις εξισώσεις ορμής και συνέχειας για κάθε όγκο ελέγχου. Στη συνέχεια επιλύονται οι υπόλοιπες εξισώσεις δηλαδή της ενέργειας και της τύρβης, όπως και στους αλγορίθμους διαχωρισμένης λύσης. Ο ρυθμός σύγκλισης της λύσης αυξάνεται σε σχέση με την περίπτωση διαχωρισμένης επίλυσης, λόγω της ταυτόχρονης επίλυσης των εξισώσεων, ενώ είναι ταυτόχρονα αποδοτικός και εύρωστος. Ωστόσο απαιτεί 1.5-2 φορές περισσότερη μνήμη από τους άλλους αλγορίθμους.

Οι διακριτοποιημένες εξισώσεις ορμής και συνέχειας, Εξισώσεις (2.11) και (2.17) αντίστοιχα, με τις ροές μάζας αντικατεστημένες από την Εξίσωση (2.19), μετασχηματίζονται στην δέλτα διατύπωση, όπου στο δεξί μέλος βρίσκονται τα υπόλοιπα των εξισώσεων για την παρακολούθηση της σύγκλισης κατά την επαναληπτική διαδικασία. Έτσι προκύπτει το τελικό σύστημα γραμμικών εξισώσεων το οποίο έχει τη μορφή:

$$\sum_j [A]_{ij} \vec{X}_j = \vec{B}_j \quad (2.26)$$

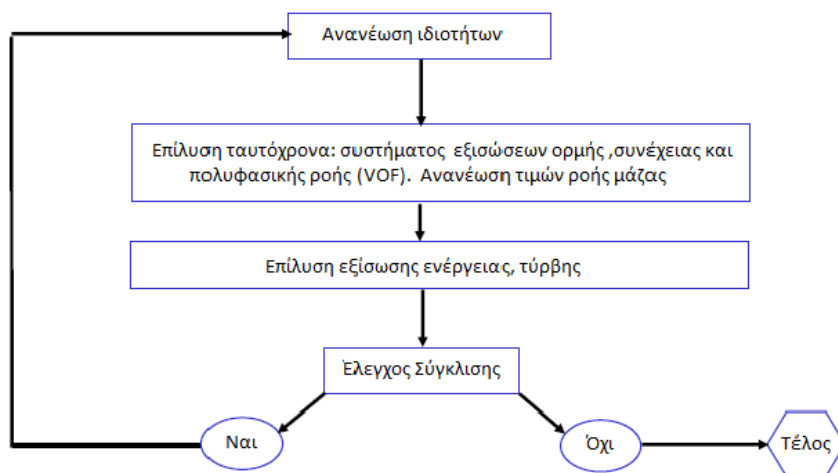
όπου ο τετραγωνικός πίνακας,  $[A]_{ij}$ , περιλαμβάνει τους συντελεστές που υποδηλώνουν την επίδραση του κελιού  $i$  στο  $j$ .

Επίσης, τα διανύσματα στήλης,  $\vec{X}_j$ , και  $\vec{B}_j$ , είναι τα διανύσματα αγνώστων και υπολοίπων και έχουν τη μορφή:

$$\vec{X}_j = [p'_i \quad u'_i \quad v'_i \quad w'_i]^T \quad (2.27)$$

$$\vec{B}_i = [-r_i^p \quad -r_i^u \quad -r_i^v \quad -r_i^w]^T \quad (2.28)$$

Το γραμμικό σύστημα (2.26) επιλύεται με την αλγεβρική πολυπλεγματική μέθοδο (AMG solver). Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα λειτουργίας του αλγορίθμου συζευγμένης επίλυσης.



Σχήμα 2.12: Λογικό διάγραμμα αλγορίθμων συζευγμένης επίλυσης (coupled solver)

## 2.5.9 Υποχαλάρωση των Μεταβλητών και των Εξισώσεων

Η μη γραμμικότητα των εξισώσεων τις οποίες επιλύει το FLUENT απαιτεί τον έλεγχο της τιμής της μεταβολής της  $\varphi$ . Αυτό πραγματοποιείται με την υποχαλάρωση των μεταβλητών, κάτι το οποίο ελαττώνει την μεταβολή του  $\varphi$  σε κάθε επανάληψη [13]. Η απλοποιημένη μορφή της συσχέτισης της νέας τιμής της μεταβλητής  $\varphi$  σε ένα κελί, εξαρτάται από την παλαιότερη τιμή της,  $\varphi_{old}$ , την υπολογισθείσα μεταβολή,  $\Delta\varphi$ , και τον συντελεστή υποχαλάρωσης,  $\omega$ , είναι:

$$\varphi = \varphi_{old} + \omega\Delta\varphi \quad (2.29)$$

Αντίστοιχα, η υποχαλάρωση των εξισώσεων χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση της σύγκλισης των μη γραμμικών επαναλήψεων με την εισαγωγή επιλεκτικής ποσότητας της  $\varphi$  στο σύστημα διακριτοποιημένων εξισώσεων, ως εξής:

$$\frac{a_p}{\omega}\varphi = \sum_{nb} a_{nb}\varphi_{nb} + \frac{1-\omega}{\omega}a_p\varphi_{old} \quad (2.30)$$

Πριν την επίλυση των εξισώσεων, θα πρέπει να δοθούν κάποιες αρχικές τιμές των μεταβλητών που εξετάζονται και θα πρέπει να οριστούν τα πεδία ροής ώστε να εφαρμοστούν οι απαραίτητες οριακές συνθήκες.

## 2.6 Οριακές Συνθήκες

Όλα τα προβλήματα ρευστομηχανικής ορίζονται μέσω των οριακών (boundary conditions) και αρχικών συνθηκών (initial conditions) που τα διέπουν. Οι εξισώσεις NS στη γενική τους μορφή ισχύουν για όλα τα δυνατά προβλήματα ροής, οπότε είναι προφανές ότι οι οριακές και αρχικές συνθήκες είναι αυτές οι οποίες καθορίζουν τη μορφή και τη μοναδικότητα της λύσης τους. Ο κώδικας ANSYS-FLUENT για να μπορέσει να επιλύσει τις εξισώσεις που ορίστηκαν παραπάνω απαιτεί να οριστεί το πεδίο και να τεθούν οι απαραίτητες οριακές συνθήκες στον επιλύτη. Οι οριακές συνθήκες καθορίζουν την κατεύθυνση της ροής καθώς και την ροή μάζας, ορμής και ενέργειας εντός του υπολογιστικού πλέγματος. Αυτές περιλαμβάνουν τον καθορισμό των χωρίων του πεδίου (cell zones), όπως δίνεται στον Πίνακα 2.2, όπου παρουσιάζονται και οι διαθέσιμες οριακές συνθήκες για την περίπτωση ασυμπίεστη ροής.

**Πίνακας 2.2:** Διαθέσιμα χωρία πεδίου και είδη οριακών συνθηκών για ασυμπίεστη ροή

<b>Χωρίο ρευστού (Cell zones-fluid)</b>	Πρόκειται για τα χωρία του πεδίου στα οποία θα επιλυθούν οι εξισώσεις της ροής. Είναι απαραίτητο να καθοριστεί ένα υλικό το οποίο θα περιέχεται σε κάθε χωρίο, ενώ είναι δυνατόν να προστεθούν όροι πηγών ενέργειας, μάζας κλπ.	
	<b>Είσοδος (inlet)</b>	στην οποία κυριαρχεί η είσοδος του ρευστού στο χωρίο και όπου διατηρούνται συνέχεια οι τιμές των μεγεθών (πίεση ή ταχύτητα) που ορίστηκαν στις αρχικές συνθήκες στα όρια του πεδίου.
	<b>Εξοδος (outlet)</b>	στην οποία κυριαρχεί η έξοδος του ρευστού από το χωρίο και ορίζονται οι κλίσεις των μεταβλητών κατά τη διεύθυνση της ροής ίσες με μηδέν.
	<b>Τοίχωμα (wall)</b>	το οποίο είναι αδιαπερατό από το χωρίο ρευστού και οι κάθετες ταχύτητες είναι ίσες με μηδέν, ενώ υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού της τραχύτητας του για τυρβώδη ροή
	<b>Συμμετρικό Επίπεδο (symmetry)</b>	το οποίο εκφράζει τη γεωμετρική και ροϊκή συμμετρικότητα, και θέτει τις ταχύτητες και τις κλίσεις των μεταβλητών της ροής κάθετα στο συμμετρικό επίπεδο ίσες με μηδέν.
	<b>Αξονοσυμμετρικό Επίπεδο (axis)</b>	το οποίο χρησιμοποιείται στον άξονα συμμετρίας ενός διδιάστατου υπολογιστικού πλέγματος, και ο οποίος είναι απαραίτητο να συμπίπτει με τον άξονα $y=0$ .
	<b>Περιοδικό (Periodic)</b>	το οποίο χρησιμοποιείται στην περίπτωση περιστροφικής ή μεταφορικής περιοδικότητας.
<b>Χωρίο στερεού (Cell zones-solid)</b>	Δηλώνει τις εξωτερικές επιφάνειες του στερεού χωρίου στις οποίες δεν επιλύονται οι εξισώσεις ροής παρά μόνο η μετάδοση θερμότητας. Επίσης καθορίζεται το υλικό του και η πιθανή σχετική κίνησή του	
	<b>Τοίχωμα,</b>	ο οποίο είναι αδιαπερατό από το χωρίο ρευστού και οι κάθετες ταχύτητες είναι ίσες με το μηδέν.
	<b>Συμμετρικό επίπεδο,</b>	όπου εκφράζει τη γεωμετρική και ροϊκή συμμετρικότητα δύο χωρίων

Στην παρούσα εργασία θα εφαρμοστούν οι εξής οριακές συνθήκες εισόδου και εξόδου της ροής στο υπολογιστικό πλέγμα [3, 5]:

- **Πίεση εισόδου** (pressure inlet) στην είσοδο του υπολογιστικού πλέγματος. Συγκεκριμένα καθορίζεται η ολική υπερπίεση εισόδου σε κατεύθυνση κάθετη στο όριο, δηλαδή η πίεση στην είσοδο του ακροφυσίου άνω της ατμοσφαιρικής η οποία καθορίζεται στο FLUENT ως λειτουργική πίεση (operating pressure). Η ολική πίεση στη συνέχεια χρησιμοποιείται από τον επιλύτη για την εύρεση της στατικής πίεσης και της ταχύτητας στην είσοδο με την εφαρμογή της παρακάτω εξίσωσης:

$$p_{total} = p_{static} + \frac{\rho v^2}{2} \quad (2.31)$$

Επίσης εφαρμόζονται οι οριακές συνθήκες της τύρβης, εφόσον η ροή είναι τυρβώδης, το οποίο θα αναλυθεί στην υποενότητα 2.7.13.

- **Πίεση εξόδου** (pressure outlet) στην έξοδο του πλέγματος. Η επιλογή αυτή είναι επιβεβλημένη στην περίπτωση χρήσης της πίεσης εισόδου. Συγκεκριμένα καθορίζεται η ομοιόμορφη στατική πίεση εξόδου του ρευστού, η οποία είναι ίση με την στατική πίεση του περιβάλλοντος στο οποίο εξέρχεται η δέσμη του ρευστού, δηλαδή την ατμοσφαιρική πίεση η οποία όπως αναφέρθηκε, έχει οριστεί ως η λειτουργική πίεση της προσομοίωσης. Ορίζονται επίσης οι οριακές συνθήκες σε περίπτωση αντιστροφής της ροής (backflow), και οι οποίες χρησιμοποιούνται ως συνθήκες εισόδου σε κατεύθυνση κάθετη στο όριο. Καθορίζονται επίσης και οι συνθήκες τύρβης σε περίπτωση τυρβώδους ροής.

Η επιλογή των ορίων του υπολογιστικού πλέγματος και της μορφής τους πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να καθορίζεται συγκεκριμένη κατεύθυνση της ροής. Αν και δεν είναι απαραίτητο για την επίλυση, επιταχύνει σημαντικά τη σύγκλιση. Επίσης είναι σημαντικό να μην παρατηρούνται απότομες κλίσεις των μεταβλητών της ροής στα όρια εισόδου και εξόδου, διότι στην περίπτωση αυτή έχει πραγματοποιηθεί λάθος διατύπωση του προβλήματος. Οι κλίσεις των μεταβλητών της ροής στην περιοχή κοντά στα στερεά όρια είναι εξαιρετικά απότομες και συνεπώς, υπάρχει η ανάγκη χρήσης πυκνού πλέγματος για την ακριβή ανάλυση των απότομων βαθμίδων των μεταβλητών, το οποίο όμως απαιτεί πολύ χρόνο και υπολογιστική μνήμη.

Αφού καθοριστούν οι οριακές συνθήκες του πεδίου, σε κάθε επιφάνεια και χωρίο, είναι απαραίτητο να καθοριστούν και οι ιδιότητες του καθενός, περιλαμβάνοντας όλες τις φυσικές παραμέτρους που το διέπουν, όπως αν πρόκειται για μονοφασικό ή διφασικό πεδίο ροής, το πεδίο της βαρύτητας, το μοντέλο ακτινοβολίας, το μοντέλο τύρβης, και τις ιδιότητες του ρευστού που καταλαμβάνει το πεδίο (πυκνότητα, συνεκτικότητα, μοριακό βάρος κα.). Τέλος, ο επιλύτης είναι έτοιμος προς χρήση, αφού εισαχθούν και οι αρχικές συνθήκες των χωρίων, οι οποίες περιλαμβάνουν τις αρχικές τιμές όλων των παραμέτρων που αναφέρθηκαν στη συγκεκριμένη υποενότητα.

## 2.7 Μοντέλα Τύρβης

### 2.7.1 Εισαγωγή

Οι περισσότερες ροές σε μηχανολογικές εφαρμογές γίνονται ασταθείς πάνω από έναν ορισμένο αριθμό Reynolds, και τελικά γίνονται τυρβώδεις. Στην περίπτωση στρωτής ροής, όπου ο αριθμός Reynolds κυμαίνεται κάτω από το όριο  $Re < 1000$ , η μεταφορά ενέργειας στο ρευστό πραγματοποιείται με μοριακή διάχυση. Εντούτοις, σε πραγματικές συνθήκες τέτοιες περιπτώσεις δεν βρίσκουν εφαρμογή. Αντίθετα, στην περίπτωση της τυρβώδους ροής παρατηρείται σημαντική αύξηση των εσωτερικών τάσεων που οφείλεται στην ανταλλαγή ποσότητας κίνησης μεταξύ γειτονικών στρώσεων. Η τύρβη εισάγει τριδιάστατες δίνες (eddies), ακόμα και σε ροές όπου οι κύριες ταχύτητες έχουν μόνο μία ή δύο διαστάσεις στο χώρο, οι οποίες έχουν ένα ευρύ φάσμα μεγέθους και κλιμάκων χρόνου. Ρευστά σωματίδια που μεταφέρονται λόγω της τύρβης από μια περιοχή σε μια άλλη με διαφορετική μέση ταχύτητα κερδίζουν ή χάνουν ποσότητα κίνησης και ασκούν αντίστοιχα επιβραδυντική ή επιταχυντική δύναμη στη περιοχή μετάβασης τους [51, 55].

Ο γενικός μηχανισμός λειτουργίας της τύρβης έχει ως εξής: οι μεγαλύτερες σε μέγεθος δίνες αποσπούν ενέργεια από τη μέση ροή, η οποία ενέργεια στη συνέχεια αποσπάται από τις μικρότερες σε μέγεθος δίνες. Οι δίνες αυτές με τη σειρά τους μετατρέπουν την άλλοτε χρήσιμη ενέργεια σε θερμική, δηλαδή σε απώλειες. Λόγω της τυρβώδους διακύμανσης σωματίδια ρευστού μεταφέρονται από τη μια στρώση σε άλλη, η οποία έχει διαφορετική ταχύτητα. Η τύρβη είναι ένα εν πολλοίς άγνωστο ακόμα από πολλές πλευρές φαινόμενο, το οποίο όντας αυτοσυντηρούμενο και καταστροφικό ενεργειακά καθίσταται ανεπιθύμητο στις περισσότερες ροές.

Η τυρβώδης ροή (turbulent flow) λοιπόν αποτελεί μία χαοτική και τυχαία κατάσταση κίνησης, στην οποία η ταχύτητα, η πίεση και γενικά όλες οι ροϊκές ιδιότητες μεταβάλλονται συνεχώς με το χρόνο. Για να επιλυθούν οι εξισώσεις Navier-Stokes αριθμητικά, πρέπει να αναλυθούν όλες οι διαθέσιμες κλίμακες, ακόμη και οι μικρότερες, κάτι που σημαίνει ότι το υπολογιστικό πλέγμα πρέπει να είναι τόσο πυκνό, ώστε τα μικρότερα σε μέγεθος κελιά του πλέγματος να μπορούν να αναλύσουν ακόμα και τις ειδικές μικρό-κλίμακες της ροής. Η επίλυση των εξισώσεων NS με τέτοιο τρόπο ονομάζεται άμεση αριθμητική προσομοίωση (Direct Numerical Simulation-DNS). Εντούτοις, ακόμη και για την απλούστερη των ροών, οι υπολογιστικοί πόροι που απαιτούνται, σε χρόνο και μνήμη είναι απαγορευτικοί. Ως εκ τούτου, καθίσταται απαραίτητη η προσομοίωση της τυρβώδους ροής με χρήση προσεγγίσεων [19].

### 2.7.2 Μοντέλα Τύρβης Βασισμένα στη Μεσοποίηση Κατά Reynolds (RANS)

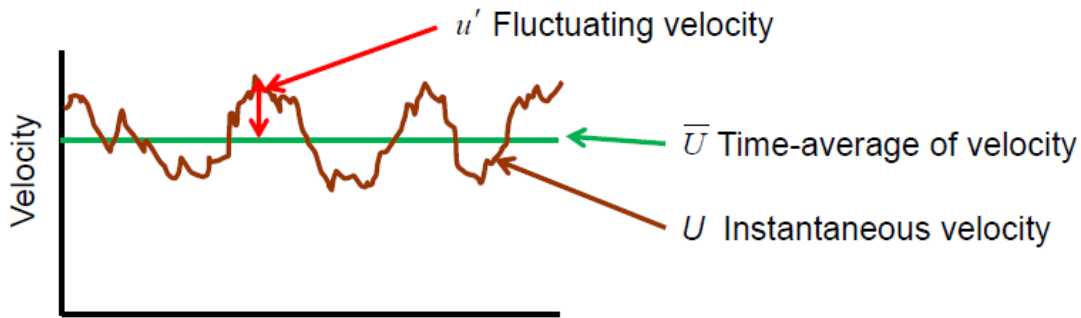
Για τον σκοπό της μοντελοποίησης της ροής στο ακροφύσιο υδροστροβίλου Pelton, όπως και για τις περισσότερες μηχανολογικές εφαρμογές, η μοντελοποίηση με τη χρήση μεσοποιημένων κατά Reynolds εξισώσεων Navier Stokes (Reynolds Averaged Navier Stokes-RANS) καθίσταται η πιο ενδεδειγμένη λύση, βάσει της ακρίβειας που προσφέρουν, αλλά και του σχετικά φθηνού υπολογιστικού κόστους που απαιτούν. Επιπροσθέτως, τις περισσότερες φορές είναι περιττό να επιλυθούν οι λεπτομέρειες των τυρβωδών διακυμάνσεων.

## 2.7.3 Μεσοποιημένες Κατά Reynolds Εξισώσεις Navier-Stokes

Κατά την μεσοποίηση Reynolds, οι μεταβλητές ροής των εξισώσεων NS αποσυντίθεται σε δύο μέρη, συγκεκριμένα σε μία συνιστώσα της μέσης τιμής και σε μικροδιακυμάνσεις γύρω από τη μέση, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.13. Ο συμβολισμός για την ταχύτητα είναι ο εξής:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (2.32)$$

Όπου,  $\bar{u}_i$ , και  $u'_i$ , είναι οι συνιστώσες ( $i = 1, 2, 3$ ) της μέσης τιμής και της διακύμανσης της ταχύτητας αντίστοιχα.



Σχήμα 2.13: Αποσύνθεση της ταχύτητας σε μέση τιμή και μικροδιακύμανση [3]

Με παρόμοιο τρόπο για οποιαδήποτε άλλη βαθμωτή ποσότητα:

$$\varphi = \bar{\varphi} + \varphi' \quad (2.33)$$

όπου,  $\varphi$ , μία βαθμωτή ποσότητα, όπως για παράδειγμα η πίεση, η ενέργεια κλπ.

Τέλος, η μέση τιμή μίας ποσότητας, για παράδειγμα της ταχύτητας ορίζεται ως:

$$\bar{u}_i = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u_i dt \quad (2.34)$$

Αντικαθιστώντας τις εκφράσεις αυτές στις εξισώσεις NS και μεσοποιώντας τις τελευταίες, προκύπτουν οι μεσοποιημένες κατά Reynolds εξισώσεις NS (RANS equations), οι οποίες γράφονται σε καρτεσιανή μορφή ως εξής:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = 0 \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2.36)$$

Οι εξισώσεις αυτές έχουν την ίδια γενική μορφή με τις (στιγμιαίες) Εξισώσεις NS (2.4) και (2.5) αντίστοιχα, με τις ταχύτητες και τις υπόλοιπες μεταβλητές της ροής να αναπαριστούν μέσες τιμές. Ο επιπρόσθετος όρος,  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ , που προκύπτει στην Εξίσωση (2.36) αφορά τις τάσεις οι οποίες προκαλούνται από τις διακυμάνσεις της τύρβης στη μέση ροή και ονομάζονται τυρβώδεις τάσεις ή τάσεις Reynolds (Reynolds stresses). Επισημαίνεται ότι ο όρος  $\delta_{ij}$  ονομάζεται δέλτα του Kronecker ( $\delta_{ij} = 1$ , αν  $i=j$ , ενώ  $\delta_{ij} = 0$ , αν  $i \neq j$ ).

Ο τανυστής τυρβωδών τάσεων,  $\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$ , είναι συμμετρικός και άρα εισάγει έξι νέους αγνώστους, σχετικούς με την τύρβη. Συγκεκριμένα τρεις ορθές τάσεις,  $(\overline{u_1^2}, \overline{u_2^2}, \overline{u_3^2})$ , καθώς και τρεις διαμητικές τάσεις, τις  $(\overline{u_1 u_2}, \overline{u_1 u_3}, \overline{u_2 u_3})$ . Τα πιο διαδεδομένα μοντέλα τύρβης RANS κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον αριθμό των επιπλέον εξισώσεων μεταφοράς οι οποίες χρειάζονται για να κλείσουν το σύστημα των εξισώσεων τυρβώδους ροής. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται τα διαθέσιμα μοντέλα τύρβης με βάση την εξίσωση RANS.

**Πίνακας 2.3:** Λίστα διαθέσιμων μοντέλων τύρβης RANS

Αριθμός επιπλέον εξισώσεων	Ονομασία
Μηδέν	Μοντέλο μήκους ανάμιξης
Μία	Μοντέλο Spalart-Allmaras
Δύο	Μοντέλο k-ε
	Μοντέλο k-ω
	Μοντέλο SST
Επτά	Μοντέλο τάσεων Reynolds (RSM)

Το καθένα από τα αναφερθέντα μοντέλα έχει τα δικά του χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες του. Επισημαίνεται ότι δεν υπάρχει κάποιο μοντέλο το οποίο να πλεονεκτεί έναντι των υπολοίπων για κάθε πρόβλημα ρευστομηχανικής. Το θέμα της μοντελοποίησης της τύρβης είναι τόσο πολύπλοκο και εξελίξιμο, ώστε η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου για το κάθε πρόβλημα να αποτελεί περισσότερο θέμα εμπειρίας παρά κανόνων. Στην παρούσα εργασία και το συγκεκριμένο πρόβλημα, θα εξεταστούν μόνο τα μοντέλα δύο εξισώσεων ως πιο κατάλληλα για την επίλυσή του.

#### 2.7.4 Η Γενική Υπόθεση Τυρβώδους Συνεκτικότητας

Μία μέθοδος κλεισίματος του συστήματος εξισώσεων τύρβης RANS, δηλαδή εύρεσης ενός συσχετισμού των τυρβωδών τάσεων με τα χαρακτηριστικά της μέσης ροής, αποτελεί η εισαγωγή του  $\mu_t$ , ενός όρου ο οποίος εκφράζει την τυρβώδη συνεκτικότητα (eddy viscosity). Εισήχθει πρώτη φορά από τον Boussinesq (για τον λόγο αυτό, ονομάζεται και υπόθεση Boussinesq) το 1877, ο οποίος διατύπωσε ότι οι τάσεις Reynolds είναι ανάλογες των κλίσεων της μέσης ταχύτητας:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2.37)$$

όπου  $k$  είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας, η οποία είναι ίση προς:

$$k = \frac{1}{2} \overline{(u'^2 + v'^2 + w'^2)} \quad (2.38)$$

Σύμφωνα με τη θεωρία του Boussinesq λοιπόν, οι τυρβώδεις τάσεις μπορούν να εκφραστούν με τρόπο ανάλογο, όπως οι τάσεις λόγω μοριακής συνεκτικότητας συναρτήσει των κλίσεων της μέσης ταχύτητας. Επισημαίνεται ότι στις τυρβώδεις ροές, οι τάσεις Reynolds είναι συνήθως τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες των ιξωδών τάσεων, ενώ δεν αποτελεί ιδιότητα του ρευστού, αλλά της τυρβώδους ροής. Το πλεονέκτημα της θεωρίας είναι το σχετικά χαμηλό υπολογιστικό κόστος της εύρεσης του  $\mu_t$ . Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται στα μοντέλα k-ε, k-ω και SST. Όμως το μειονέκτημα της θεωρίας είναι ότι υποθέτει ισότροπη τυρβώδη συνεκτικότητα, κάτι που σημαίνει



ότι λειτουργεί σε απλές σχετικά τυρβώδεις ροές όπως οριακά στρώματα, στρώματα ανάμιξης, κυκλικές δέσμες κλπ.

Με την υπόθεση αυτή, οι όροι των τυρβωδών τάσεων στις εξισώσεις Reynolds εκφράζονται συναρτήσει γνωστών χαρακτηριστικών της μέσης ροής και επομένως το σύστημα είναι επιλύσιμο. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται μερικά από τα πιο διαδεδομένα μοντέλα τύρβης δύο εξισώσεων, τα οποία και χρησιμοποιήθηκαν στην παραμετρική μελέτη της παρούσης εργασίας.

### 2.7.5 Μοντέλο standard k-ε

Το μοντέλο standard k-ε (SKE), είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο μοντέλο στις περισσότερες εφαρμογές τυρβώδους ροής, επειδή είναι αριθμητικά εύρωστο, δηλαδή είναι υπολογιστικά ευσταθές ακόμα και στην περίπτωση πολύπλοκων ροϊκών φαινομένων, αλλά και οικονομικό, όντας ήδη δοκιμασμένο σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Η τυρβώδης συνεκτικότητα για αυτό το μοντέλο καθορίζεται ως εξής:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.39)$$

Όπου,  $\varepsilon$ , είναι ο ρυθμός απόσβεσης της τυρβώδους ενέργειας, η οποία προκαλείται από τις μικρότερες δίνες που αντιτίθενται στις μοριακές τάσεις. Κατά την επίλυση του μοντέλου k-ε προστίθενται δύο εξισώσεις μεταφοράς στις ήδη υπάρχουσες προς επίλυση, μία με άγνωστο το k και μία ως προς το  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + (G_k + G_b) - \rho \varepsilon + S_k \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.41)$$

Η φυσική σημασία των όρων των ανωτέρω εξισώσεων είναι η εξής:

Ρυθμός μεταβολής του k / ε	+	Μεταφορά του k/ε λόγω κίνησης	=	Μεταφορά του k/ε με διάχυση	+	Ρυθμός παραγωγής του k/ε	-	Ρυθμός καταστροφής του k/ε
----------------------------	---	-------------------------------	---	-----------------------------	---	--------------------------	---	----------------------------

Ο όρος  $G_k$  αφορά την μοντελοποίηση της παραγωγής τύρβης και αποτελεί το σημαντικότερο όρο των άνωθεν εξισώσεων. Ουσιαστικά ο όρος αυτός αναφέρεται στον ρυθμό με τον οποίο η κινητική ενέργεια της μέσης ροής μετατρέπεται σε τυρβώδεις διακυμάνσεις. Η μοντελοποίηση της παραγωγής τύρβης πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο για όλα τα μοντέλα k-ε και για το λόγο αυτό θα παρουσιαστεί εκτενώς στην υποενότητα 2.7.4. Αντίθετα, ο όρος  $G_b$  αφορά την παραγωγή τύρβης λόγω θερμικής διάχυσης και είναι κάτι που δεν παρουσιάζεται στη ροή του ρευστού στο ακροφύσιο. Τέλος, οι όροι  $S_k$  και  $S_\varepsilon$  αφορούν την εισαγωγή από τον χρήστη CFD όρων πηγής.

Οι εξισώσεις περιέχουν πέντε ρυθμιζόμενες σταθερές:  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$  και  $\sigma_\varepsilon$ . Οι σταθερές αυτές είναι ρυθμιζόμενες από το χρήστη CFD ανάλογα με τη φύση του προβλήματος, ενώ η προεπιλογή τους έχει πραγματοποιηθεί κατόπιν πειραμάτων για να καλύπτει ένα μεγάλο εύρος τυρβωδών ροών. Οι τιμές αυτές είναι οι εξής:

$C_{1\varepsilon} = 0.09$	$C_{2\varepsilon} = 1.92$	$C_\mu = 0.09$	$\sigma_k = 1.0$	$\sigma_\varepsilon = 1.3$
---------------------------	---------------------------	----------------	------------------	----------------------------

Κατά την εφαρμογή του μοντέλου k-ε αλλά και γενικά των υπολοίπων μοντέλων δύο εξισώσεων, αρχικά, επιλύονται οι δύο Εξισώσεις (2.40) και (2.41). Οι λύσεις από τις εξισώσεις χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό της τυρβώδους συνεκτικότητας  $\mu_t$  σε κάθε σημείο του πεδίου, μέσω της Εξίσωσης (2.39). Από τις λύσεις του  $\mu_t$  και μέσω της υπόθεσης Boussinesq, υπολογίζονται οι τάσεις Reynolds, οι οποίες με τη σειρά τους αντικαθίστανται στις εξισώσεις Navier-Stokes. Οι νέες πλέον συνιστώσες της ταχύτητας που υπολογίστηκαν, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του  $G_k$  και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Οι εξισώσεις του μοντέλου k-ε, όπως και όλων των υπολοίπων μοντέλων τύρβης, απαιτούν την εισαγωγή νέων οριακών συνθηκών, οι οποίες αφορούν την κατανομή των k και ε στα όρια του πεδίου. Οι εφαρμογή των οριακών συνθηκών τύρβης θα περιγραφούν στην υποενότητα 2.7.13, αφού παρουσιαστούν και τα υπόλοιπα μοντέλα τύρβης.

### 2.7.6 Μοντέλο k-ε RNG

Το μοντέλο k-ε RNG αποτελεί μία τροποποίηση του μοντέλου standard k-ε, στο οποίο οι εξισώσεις αναπτύσσονται αναλυτικά με την εφαρμογή μίας στατιστικής τεχνικής η οποία ονομάζεται RNG (Renormalization Group Method). Βασίζεται κυρίως στη παρατήρηση της συμπεριφοράς του ρευστού και σε μικρότερες κλίμακες μήκους τύρβης ενώ το μοντέλο k-ε υπολογίζει την απόσβεση σε μια συγκεκριμένη, υψηλή κλίμακα μήκους τύρβης με αποτέλεσμα η υπολογιζόμενη τυρβώδης διάχυση να περιλαμβάνει μόνο αυτή που λαμβάνει χώρα στη συγκεκριμένη κλίμακα.

Το συγκεκριμένο μοντέλο παράγει βελτιωμένα αποτελέσματα για ροές με στροβιλισμούς, για υψηλές και ιδιαίτερα για χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds καθώς και για περιπτώσεις όπου έχει συμβεί αποκόλληση της ροής. Συνολικά, είναι πιο ακριβές και εφαρμόσιμο σε μεγαλύτερο εύρος ροών σε σχέση με το standard k-ε. Μειονέκτημα του χαρακτηρίζεται το ότι δεν είναι τόσο ευσταθές όσο το μοντέλο k-ε [3].

Οι εξισώσεις που το χαρακτηρίζουν είναι παρόμοιες, με την εξαίρεση ενός επιπλέον όρου στην εξίσωση για το ε, για να συμπεριλάβει την αλληλεπίδραση μεταξύ της απόσβεσης της τύρβης και της μέσης διάτμησης της ροής. Να σημειωθεί ότι οι σταθερές πλέον δεν προέρχονται από πρότυπα πειράματα, αλλά προκύπτουν αναλυτικά με τη χρήση της τεχνικής RNG, και έχουν τις τιμές:

$$C_{1\varepsilon} = 1.42 \quad C_{2\varepsilon} = 1.68 \quad C_\mu = 0.0845 \quad \beta = 0.012 \quad \sigma_k = 0.7179 \quad \sigma_\varepsilon = 0.7179$$

Η τυρβώδης συνεκτικότητα υπολογίζεται μέσω της επίλυσης μίας διαφορικής εξίσωσης, η οποία σε περιπτώσεις ροής υψηλού αριθμού Reynolds δίνει την Εξίσωση (2.39).

### 2.7.7 Μοντέλο k-ε Realizable

Το μοντέλο k-ε realizable διαφέρει από το standard k-ε σε δύο σημαντικά σημεία. Συγκεκριμένα, αφενός περιέχει μία εναλλακτική διατύπωση για την τυρβώδη συνεκτικότητα και αφετέρου διατυπώνεται μία τροποποιημένη εξίσωση για τον ρυθμό απόσβεσης της τυρβώδους ενέργειας, ε. Το μοντέλο ικανοποιεί ορισμένους μαθηματικούς περιορισμούς για τις τυρβώδεις τάσεις, οι οποίοι είναι συνεπείς με τη φυσική των τυρβωδών ροών. Η εξίσωση για την τυρβώδη

κινητική ενέργεια είναι η Εξίσωση (2.40) ενώ αυτή για τον ρυθμό απόσβεσης είναι η:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_{3\varepsilon} G_b \quad (2.42)$$

Η τυρβώδης συνεκτικότητα υπολογίζεται με τη χρήση της Εξίσωσης (2.39), με τη διαφορά ότι ο όρος  $C_\mu$ , δεν είναι πλέον σταθερός, αλλά είναι συνάρτηση μεγεθών της μέσης ροής [3, 5]. Οι μαθηματικοί περιορισμοί που επιβάλλονται στο μοντέλο επιτρέπουν την βελτίωση της απόδοσής του σε σχέση με τα δύο προαναφερθέντα μοντέλα.

Γενικά θεωρείται ότι προσφέρει τα ίδια πλεονεκτήματα με το μοντέλο k-ε RNG, όντας όμως περισσότερο ακριβές και ευκολότερο στη σύγκλιση. Παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα στην πρόβλεψη του ρυθμού ανάπτυξης επίπεδων και κυκλικών δεσμών ρευστού καθώς και στην αντιμετώπιση ροών που περιλαμβάνουν στροβιλότητα, οριακά στρώματα με έντονα ανασχετικές κλίσεις πίεσης, αποκόλληση της ροής και επανακυκλοφορία. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι είναι λιγότερο απαιτητικό υπολογιστικά από το μοντέλο SST, το οποίο θα περιγραφεί σε επόμενη ενότητα [42].

### 2.7.8 Μοντελοποίηση της Τυρβώδους Παραγωγής Ενέργειας στα Μοντέλα k-ε

Ο όρος  $G_k$ , που αναπαριστά την παραγωγή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, μοντελοποιείται με τον ίδιο τρόπο για τα προαναφερθέντα μοντέλα k-ε. Από την ακριβή εξίσωση μεταφοράς του k, ο όρος  $G_k$ , ορίζεται ως:

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.43)$$

Για τον υπολογισμό του  $G_k$ , κατά τρόπο σύμφωνο με την υπόθεση Boussinesq ισχύει:

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (2.44)$$

Όπου,  $S$ , είναι το μέτρο του τανυστή του μέσου ρυθμού παραμόρφωσης:

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (2.45)$$

### 2.7.9 Μοντέλο k-ω

Τα μοντέλα k-ω και SST έχουν παρόμοια μορφή, με την προσθήκη στο ήδη υπάρχον σύστημα δύο εξισώσεων μεταφοράς, μια για τον υπολογισμό της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, k, καθώς και μία για τον υπολογισμό του ειδικού ρυθμού απόσβεσης (ρυθμός απόσβεσης ανά μονάδα τυρβώδους κινητικής ενέργειας, γνωστό και ως τυρβώδης συχνότητα), ω, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως ο λόγος του ε προς το k.

Το μοντέλο Standard k-ω στο FLUENT, το οποίο αναπτύχθηκε από τον Wilcox, παρουσιάζει πολύ καλά αποτελέσματα για τον υπολογισμό της τύρβης κοντά στα τοιχώματα, όπου ο αριθμός Reynolds είναι σχετικά μικρός. Ουσιαστικά υποθέτει ότι ο συντελεστής συνεκτικότητας είναι συνάρτηση της κινητικής ενέργειας της τύρβης και της συχνότητας και ορίζεται από την εξίσωση:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (2.46)$$

Οι εξισώσεις μεταφοράς που διέπουν το μοντέλο είναι οι εξής:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \beta' \rho k \omega \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha_1 \frac{\omega}{k} G_k - \beta_1 \rho \omega^2 \quad (2.48)$$

Στις προαναφερθείσες εξισώσεις, ο όρος  $G_k$ , αφορά την παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω των κλίσεων των μέσων ταχυτήτων, ενώ οι όροι  $\Gamma_k$  και  $\Gamma_\omega$ , αναπαριστούν την ενεργή διάχυση (effective diffusivity) των  $k$  και  $\omega$ , αντίστοιχα και δίνονται από τις εξισώσεις:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (2.49)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (2.50)$$

Όπου,  $\sigma_k$ , και  $\sigma_\omega$ , οι τυρβώδεις αριθμοί Prandtl για τα μεγέθη,  $k$  και  $\omega$ , αντίστοιχα. Οι σταθερές του μοντέλου είναι οι εξής:

$\beta' = 0.09$	$\beta_1 = 0.075$	$\alpha_1 = 5/9$	$\sigma_k = 0.5$	$\sigma_\omega = 0.5$	$\varepsilon = \beta' \omega k$
-----------------	-------------------	------------------	------------------	-----------------------	---------------------------------

Το μοντέλο standard  $k$ - $\omega$  αποτελεί μια ευσταθή διατύπωση για επίλυση ροών χαμηλών αριθμών Reynolds, που παρουσιάζει βελτιωμένη συμπεριφορά για ροές με έντονα ανασχετικές κλίσεις πίεσης καθώς και ροές κοντά σε τοιχώματα. Είναι ιδιαίτερα δημοφιλές σε εφαρμογές αεροδυναμικής και στροβιλομηχανών.

### 2.7.10 Μοντέλο SST (Shear-Stress Transport)

Το μοντέλο standard  $k$ - $\omega$  έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα, ότι οι λύσεις του παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στην τιμή του  $\omega$  στις περιοχές ελεύθερης ροής. Το μοντέλο διατμητικών τάσεων (SST) που αναπτύχθηκε από τον Menter [22] αποτελεί, ουσιαστικά, ένα υβριδικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιεί το μοντέλο  $k$ - $\omega$  για τον υπολογισμό της τύρβης στο εσωτερικό του πεδίου που εξετάζεται μέχρι τα όρια των τοιχωμάτων, ενώ σταδιακά χρησιμοποιεί μία τροποποιημένη μορφή του μοντέλου  $k$ - $\varepsilon$  για να περιγράψει τη συμπεριφορά των τυρβωδών τάσεων στις περιοχές της ελεύθερης ροής. Οι εξισώσεις επίλυσης του μοντέλου SST προκύπτουν:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \beta^* \rho k \omega \quad (2.51)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha_1 \frac{\omega}{k} G_k - \beta_1 \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \frac{1}{\omega \sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (2.52)$$

Οι συντελεστές του μοντέλου είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των αντίστοιχων συντελεστών των μοντέλων  $k$ - $\omega$  και  $k$ - $\varepsilon$ , δηλαδή ισχύει  $\Phi = F_1 \Phi_{k\omega} + (1 - F_1) \Phi_{k\varepsilon}$ . Ο όρος  $F_1$  αποτελεί μία συνάρτηση η οποία είναι υπεύθυνη για την ομαλή μετάβαση από το ένα μοντέλο στο άλλο. Συνεπώς, το μοντέλο SST συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των μοντέλων  $k$ - $\varepsilon$  και  $k$ - $\omega$ , με τη χρήση της συνάρτησης αυτής. Η  $F_1$  είναι ίση με τη μονάδα πάνω σε στερεά τοιχώματα, οπότε και ενεργοποιείται το μοντέλο  $k$ - $\omega$ , ενώ είναι μηδενική στην ελεύθερη ροή, όπου η χρήση του  $k$ - $\varepsilon$

είναι πιο αποτελεσματική. Ενδιάμεσα, η τιμή της εξαρτάται από τις τοπικές βαθμίδες των μεταβλητών. Επιπλέον, οι όροι της ενεργής διάχυσης προκύπτουν από τις προαναφερθείσες Εξισώσεις (2.51) και (2.52), ενώ ο περιοριστικός όρος στην εξίσωση τυρβώδους συνεκτικότητας, τη μετατρέπει στην εξής:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{a^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right]} \quad (2.53)$$

Οι σταθερές του μοντέλου είναι οι εξής:

$$\beta^* = 0.09 \quad a_1 = 5/9 \quad \sigma_k = 0.85 \quad \sigma_{\omega 2} = 1.168$$

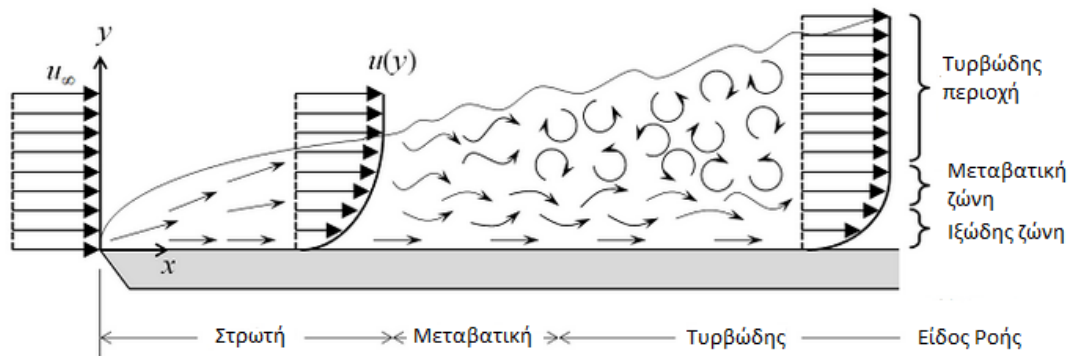
Το μεγάλο πλεονέκτημα του μοντέλου SST σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ροές με χαμηλό αριθμό Reynolds και ότι δίνει πολύ ακριβή αποτελέσματα για τον υπολογισμό της τύρβης στις περιοχές αποκόλλησης της ροής, όπου επικρατούν ανασχετικές κλίσεις πίεσης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το μοντέλο SST είναι ιδανικό για την ανάλυση οριακών στρωμάτων με υψηλή ακρίβεια, σε αντίθεση με το μοντέλο standard k-ε, το οποίο δεν αποδίδει σωστά αποτελέσματα σε περιπτώσεις οριακών στρωμάτων με καμπύλο πλέγμα [42,57, 58]

### 2.7.11 Μοντελοποίηση της Περιοχής των Τοιχωμάτων

Οι τυρβώδεις ροές επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία τοιχωμάτων. Το πεδίο μέσης ταχύτητας και κατά συνέπεια η τύρβη επηρεάζονται δραστικά εξαιτίας της συνθήκης μη ολίσθησης στο τοίχωμα. Άλλωστε η ιξώδης απόσβεση (viscous damping) πολύ κοντά στον τοίχο, μειώνει τις διακυμάνσεις της εφαπτομενικής ταχύτητας, ενώ προς το εξωτερικό μέρος της περιοχής κοντά στο τοίχωμα, οι μεγάλες κλίσεις της μέσης ταχύτητας προκαλούν μεγάλη παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας και άρα ταχεία αύξηση της τύρβης. Συνεπώς, η ακριβής μοντελοποίηση κοντά στο τοίχωμα είναι ιδιαίτερως σημαντική για την εγκυρότητα της υπολογιστικής προσομοίωσης και την λήψη σωστών αποτελεσμάτων.

Η μοντελοποίηση κοντά στο τοίχωμα επιδρά σημαντικά στην πιστότητα των υπολογιστικών αποτελεσμάτων, στο μέτρο που οι τοίχοι είναι η κύρια πηγή της μέσης στροβιλότητας και της τύρβης. Άλλωστε, στην περιοχή κοντά στο τοίχωμα οι ροϊκές μεταβλητές έχουν τις μεγάλες κλίσεις, και συνεπώς η ορμή και οι άλλες μεταφορές βαθμωτών μεγεθών λαμβάνουν χώρα εντονότερα.

Ως οριακό στρώμα, στην τυρβώδη ροή, ορίζεται η λεπτή εκείνη περιοχή στην οποία τα φαινόμενα συνεκτικότητας είναι σημαντικά. Το οριακό στρώμα επιτρέπει στο ρευστό να μεταβεί ομαλά, από την ταχύτητα στην περιοχή ελεύθερης ροής, στη μηδενική ταχύτητα στο τοίχωμα, λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης. Οι κλίσεις πίεσης σε διεύθυνση κάθετη στη ροή είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες κατά μήκος της, γεγονός που οδηγεί στην απαίτηση πολύ πυκνού πλέγματος για την ακριβή επίλυσή του. Στο Σχήμα 2.14 παρουσιάζεται η μορφή του τυρβώδους οριακού στρώματος σε επίπεδη πλάκα όπου φαίνονται καθαρά οι διάφορες περιοχές που το αποτελούν και οι οποίες θα περιγραφούν αναλυτικά στη συνέχεια. Να σημειωθεί ότι το σχήμα δεν είναι σε κλίμακα.



**Σχήμα 2.14:** Το τυρβώδες οριακό στρώμα [56]

Μεγάλος αριθμός πειραμάτων έχουν δείξει ότι η περιοχή κοντά στο τοίχωμα δύναται να υποδιαιρεθεί γενικά σε τρεις ζώνες ή στρώματα, σε κάθε μια εκ των οποίων πρέπει να εφαρμοστούν διαφορετικοί κανόνες μοντελοποίησης:

- Αρχικά, στην εσωτερική περιοχή, η οποία ονομάζεται ιξώδης ζώνη (viscous sublayer), η ροή είναι σχεδόν στρωτή, και το μοριακό ιξώδες διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στη μεταφορά ορμής και θερμότητας ή μάζας. Στην περιοχή αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι οι διατμητικές τάσεις είναι σταθερές και ίσες με την διατμητική τάση στο τοίχωμα  $\tau_w$ . Επίσης, διατυπώνεται μία γραμμική σχέση η οποία συνδέει την μέση ταχύτητα  $U$  και την απόσταση από το τοίχωμα  $y$ , μέσω της ολοκλήρωσης της  $\tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$  ως προς  $y$ :

$$U = \frac{\tau_w y}{\mu} \quad (2.54)$$

- Στην εξωτερική περιοχή, η οποία ονομάζεται πλήρως τυρβώδης ζώνη (fully turbulent region ή log-law region), όπου η τύρβη παίζει το σημαντικότερο ρόλο. Η έκτασή της εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds. Έπειτα από τη διεξαγωγή πειραμάτων και την εφαρμογή διαστατικής ανάλυσης, η γενική μορφή της σχέσης μεταξύ της απόστασης από το τοίχωμα και τη μέση ροή ορίζεται ως:

$$U/U_\tau = 2.5 \ln(U_\tau y/\nu) + 5 \quad (2.55)$$

Όπου,  $U_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ , η διατμητική ταχύτητα (shear velocity).

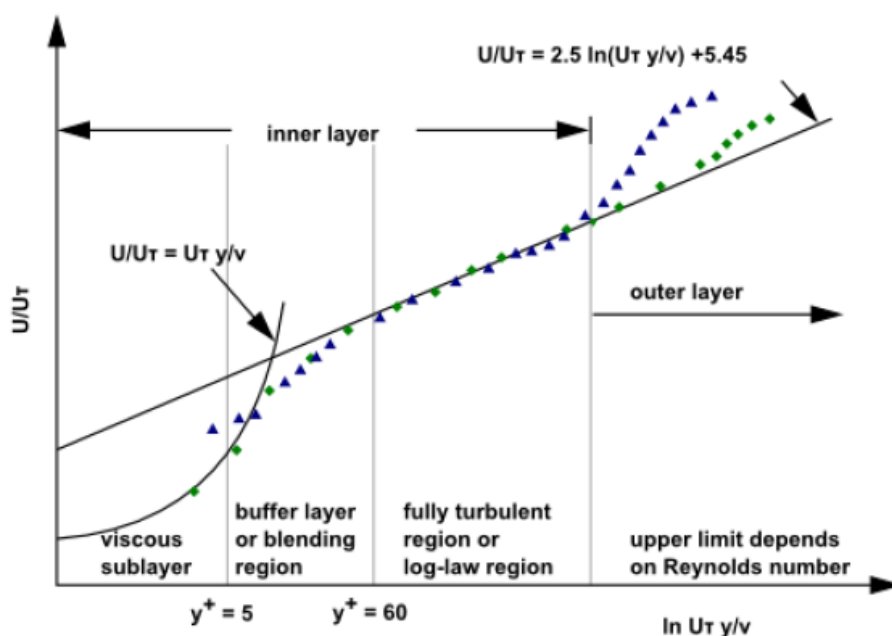
- Τέλος, υπάρχει μια ενδιάμεση περιοχή μεταξύ της ιξώδης ζώνης και του πλήρως τυρβώδους στρώματος, όπου οι επιπτώσεις του μοριακού ιξώδους και της τύρβης είναι εξίσου σημαντικές. Δεν υπάρχει κάποιος γενικός νόμος για την περιοχή αυτή, η οποία ονομάζεται μεταβατική ζώνη (buffer layer), και τα μοντέλα τύρβης είναι πιο ακριβή όταν εφαρμόζονται σε κόμβους έξω από αυτή.

Οι Εξισώσεις (2.54) και (2.55) συνήθως παρίστανται σε αδιαστατοποιημένη μορφή, κάνοντας χρήση της αδιάστατης ταχύτητας,  $u^+ = U/U_\tau$ , και της αδιάστατης απόστασης από το τοίχωμα,  $y^+ = yU_\tau/\nu$ :

$$u^+ = y^+ \quad (2.56)$$

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C \quad (2.57)$$

Όπου,  $C$ , είναι μία σταθερά και  $\kappa$ , είναι η σταθερά von Karman. Από πειραματικές μετρήσεις προκύπτουν:  $\kappa \approx 0.41$  και  $C \approx 5$ . Η σταθερά  $C$  εξαρτάται από την τραχύτητα των τοιχωμάτων. Οι υποδιαιρέσεις της περιοχής κοντά στο τοίχωμα απεικονίζονται στο Σχήμα 2.15, στο οποίο φανερώνεται η συμφωνία μεταξύ των θεωρητικών Εξισώσεων (2.56) και (2.57) με πειραματικές μετρήσεις στο τυρβώδες οριακό στρώμα.



**Σχήμα 2.15:** Υποδιαιρέσεις των περιοχών του οριακού στρώματος κοντά στο τοίχωμα [3]

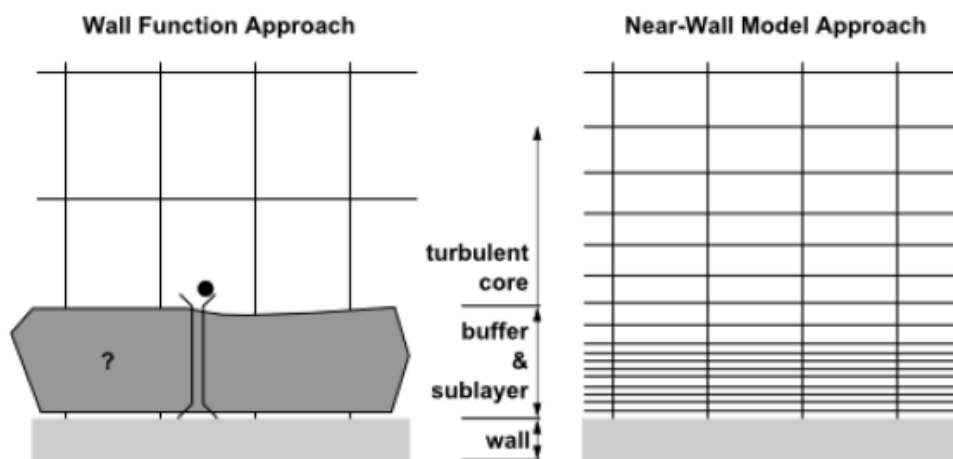
### 2.7.12 Δημιουργία του Πλέγματος Κοντά στα Τοιχώματα και Μοντέλα Τύρβης

Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση της περιοχής κοντά στα τοιχώματα:

- I. Χρήση κάποιου μοντέλου τύρβης το οποίο δύναται να επιλύσει τη ροή σε όλο το πεδίο έως και το τοίχωμα, συμπεριλαμβανομένης της ιξώδους ζώνης.
- II. Χρήση ημιεμπειρικών σχέσεων που ονομάζονται συναρτήσεις τοιχωμάτων (wall functions) οι οποίες και αναπαριστούν την ιξώδη παρουσία του τοίχου.

Στην πρώτη περίπτωση, η οποία ονομάζεται μοντελοποίηση κοντά σε τοίχωμα (near wall treatment) επιλύεται τόσο η ιξώδης όσο και η μεταβατική, οπότε απαιτείται η δημιουργία εξαιρετικά πυκνού πλέγματος στην περιοχή αυτή. Η προσέγγιση αυτή είναι συνεπώς πιο ακριβή

από την άποψη των υπολογιστικών πόρων σε σχέση με την χρήση των συναρτήσεων τοιχωμάτων, και χρησιμοποιείται συνήθως για την προσομοίωση των ροών σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds, όπου και ο τοίχος, λόγω της συνεκτικότητας θα έχει μεγαλύτερη επιρροή. Οι δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.16



Σχήμα 2.16: Προσεγγίσεις για την επίλυση της ροής κοντά στα τοιχώματα [3]

Στο υπολογιστικό πακέτο ANSYS-FLUENT προσφέρονται και οι δύο προσεγγίσεις για την επίλυση του οριακού στρώματος κοντά στα τοιχώματα. Το κύριο μειονέκτημα των συναρτήσεων τοιχωμάτων είναι ότι τα υπολογιστικά αποτελέσματα επιδεινώνονται όσο το πλέγμα υφίσταται πυκνωση σε κατεύθυνση κάθετη στο τοίχωμα. Έτσι για τιμές του  $y^+$  χαμηλότερες του 15, προκύπτουν σταδιακά αποτελέσματα με μη φραγμένα σφάλματα. Επίσης, οι συναρτήσεις τοιχωμάτων όντας σχέσεις οι οποίες προήλθαν από εμπειρικά δεδομένα, είναι λιγότερο αξιόπιστες όταν εφαρμόζονται σε ροές οι οποίες διαφέρουν σημαντικά από αυτά. Έτσι ενδέχεται να παρουσιάσουν λανθασμένα αποτελέσματα σε περιπτώσεις ροών με απότομες κλίσεις πίεσης, ροές σε χαμηλό αριθμό Reynolds καθώς και τριδιάστατες ροές ή ροές υπό την επίδραση μεγάλων σωματικών δυνάμεων, όπως οι ροές σε ανοιχτά κανάλια.

Αντίθετα, στην περίπτωση επίλυσης του οριακού στρώματος, το FLUENT χρησιμοποιεί μία μέθοδο η οποία ονομάζεται enhanced wall treatment (EWT) και η οποία είναι η προεπιλεγμένη μέθοδος για τα μοντέλα k- $\omega$ , τα οποία όπως αναφέρθηκε είναι ιδανικά για ροές σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds. Ουσιαστικά πρόκειται για μία διζωνική μέθοδο (two-layer zonal method) στην οποία υπολογίζοντας τον τοπικό αριθμό Reynolds, οι περιοχές του πεδίου διακρίνονται σε αυτές στις οποίες επικρατούν τα τυρβώδη φαινόμενα και σε αυτές κοντά στα τοιχώματα, στις οποίες επικρατούν οι δυνάμεις συνεκτικότητας. Στην περίπτωση χρήσης των μοντέλων k- $\epsilon$  με EWT, όταν η ροή βρίσκεται στην περιοχή όπου επικρατούν τα τυρβώδη φαινόμενα, χρησιμοποιείται το μοντέλο k- $\epsilon$ , ενώ στην περιοχή όπου επικρατούν τα ιξώδη φαινόμενα, επιλύεται το μοντέλο Wolfstein, το οποίο χρησιμοποιεί την ίδια εξίσωση για την τυρβώδη κινητική ενέργεια  $\epsilon$ , ενώ η τυρβώδης συνεκτικότητα υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.58):

$$\mu_{t,enh} = \lambda_{\epsilon} \mu_t + (1 - \lambda) \rho C_{\mu} l_{\mu} \sqrt{k} \quad (2.58)$$

Το μοντέλο EWT δεν παρουσιάζει ευαισθησία στην τιμή του  $y^+$ . Η συνθήκη η οποία πρέπει να ικανοποιηθεί για την επιτυχή χρήση του EWT είναι ότι ο ελάχιστος αριθμός των κελιών που



βρίσκονται εντός του οριακού στρώματος να είναι οπωσδήποτε μεγαλύτερος του 10 ώστε να αναλυθεί επακριβώς.

Το υπολογιστικό πλέγμα λοιπόν πρέπει να δημιουργείται ανάλογα με την προσέγγιση που χρησιμοποιείται. Η αδιάστατη απόσταση  $y^+$  από το τοίχωμα είναι η κρίσιμη παράμετρος στην περίπτωση αυτή. Σύμφωνα με τις οδηγίες του ANSYS-FLUENT, η τοποθέτηση των κόμβων πρέπει να πραγματοποιείται βάσει των παρακάτω οδηγιών [3, 57]:

- Στην περίπτωση χρήσης των συναρτήσεων τοιχωμάτων (standard ή non-equilibrium) το κέντρο κάθε κελιού που βρίσκεται δίπλα σε τοίχωμα πρέπει να βρίσκεται εντός της πλήρους τυρβώδης ζώνης, δηλαδή:  $30 < y^+ < 300$ , και προτιμότερα:  $y^+ \approx 30$ .
- Η τοποθέτηση των γειτονικών στο τοίχωμα κόμβων στη μεταβατική ζώνη, δηλαδή  $5 < y^+ < 30$ , πρέπει να αποφεύγεται για όλα τα μοντέλα.
- Στην περίπτωση χρήσης του μοντέλου EWT έτσι ώστε να επιλυθεί το οριακό στρώμα, οι γειτονικοί στο τοίχωμα κόμβοι ιδανικά θα πρέπει να τοποθετηθούν στην ιξώδη ζώνη, δηλαδή, πρέπει  $y^+ < 5$ . Μάλιστα, κατά προτίμηση θα πρέπει  $y^+ \approx 1$ , αν και όπως ήδη αναφέρθηκε, η μέθοδος αυτή δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία στην τιμή του  $y^+$ . Επιπλέον και ίσως πιο σημαντικά, θα πρέπει να τοποθετηθούν τουλάχιστον δέκα κελιά εντός του εσωτερικού στρώματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τις οδηγίες του FLUENT [5], η χρήση του EWT πρέπει να προτιμάται είτε πρόκειται για μοντέλα k-ε, είτε για τα μοντέλα k-ω. Αντίθετα, αν προτιμηθεί η χρήση των συναρτήσεων λόγω της ευρωστίας και της οικονομίας που προσφέρουν, πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι επεκτάσιμες συναρτήσεις τοιχώματος (scalable wall functions). Όπως έγινε σαφές από τα προαναφερθέντα, το μέγεθος του γειτονικού στο τοίχωμα κελιού, δηλαδή η τιμή του  $y^+$ , είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος, η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στη διαδικασία κατασκευής του πλέγματος, ανάλογα με το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιείται. Το ύψος του πρώτου κελιού του πλέγματος μπορεί να υπολογιστεί εκ των προτέρων, ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του μοντέλου τύρβης.

Αρχικά, και για την περίπτωση ρών σε αγωγούς, υπολογίζεται ο συντελεστής αντίστασης τριβής από την εμπειρική σχέση, Εξίσωση (2.59):

$$C_f = 0.079Re^{-0.25} \quad (2.59)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η τιμή της διατμητικής τάσης στο τοίχωμα με τη χρήση της Εξίσωσης (2.60):

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U^2 \quad (2.60)$$

Το αποτέλεσμα αντικαθίσταται στην εξίσωση ορισμού της διατμητικής ταχύτητας, Εξίσωση (2.61):

$$U_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad (2.61)$$

Τέλος, χρησιμοποιώντας την εξίσωση ορισμού της αδιάστατης απόστασης από το τοίχωμα,  $y^+$ , προκύπτει η τιμή του ύψους πρώτου κελιού του πλέγματος στην περιοχή του τοιχώματος:

$$y = (y^+ \mu) / (U_\tau \rho) \quad (2.62)$$

Βάσει αυτής της τιμής, κατασκευάζεται το πλέγμα το οποίο είναι απαραίτητο για το εκάστοτε μοντέλο τύρβης.

### 2.7.13 Καθορισμός Οριακών Συνθηκών Τύρβης

Όταν η ροή εισέρχεται στο πεδίο σε μία είσοδο ή την έξοδο απαιτείται ο καθορισμός των μεταφερόμενων ποσοτήτων τύρβης με τη μορφή οριακών συνθηκών. Συγκεκριμένα, απαιτούνται οριακές συνθήκες για τα  $k$ ,  $\varepsilon$  και/ή  $\omega$ , ανάλογα με το μοντέλο που χρησιμοποιείται. Υπάρχουν τέσσερις τρόποι για τον άμεσο ή έμμεσο καθορισμό των συγκεκριμένων ποσοτήτων:

- I. Αρχικά υπάρχει η επιλογή ρητής εισόδου των ποσοτήτων αυτών, είτε με τη μορφή μίας κατανομής τους, αν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα, είτε καθορίζοντας μία ομοιόμορφη τιμή τους στο όριο. Η ακριβής επίλυση του οριακού στρώματος ή μίας πλήρως διαμορφωμένης ροής επιταχύνεται με την πρώτη μέθοδο. [3]
- II. Εναλλακτικά, μπορούν να καθοριστούν η ένταση της τύρβης (turbulence intensity) και μια κλίμακα μήκους της τύρβης.
- III. Στην τρίτη μέθοδο καθορίζονται η ένταση της τύρβης και ο λόγος της τυρβώδους συνεκτικότητας (turbulent viscosity ratio), ο οποίος είναι ίσος προς  $\mu_t/\mu$ , ενώ η προεπιλεγμένη στο FLUENT τιμή του είναι 10. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως στην περίπτωση εξωτερικών ροών.
- IV. Τέλος δύναται να καθοριστούν η ένταση της τύρβης και η υδραυλική διάμετρος, μέθοδος η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση ροών σε σωληνώσεις.

Η ένταση της τύρβης ισούται, για ροή σε αγωγό, προς τον λόγο:

$$I = \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16(Re_{Dh})^{-0.125} \quad (2.63)$$

όπου  $Re_{Dh}$  είναι ο αριθμός Reynolds για την υδραυλική διάμετρο,  $Dh = \frac{4A}{P_{wet}}$ , του αγωγού. Τυπική τιμή της έντασης τύρβης για την περίπτωση ροής σε σωληνώσεις είναι το 5%, ενώ η κλίμακα μήκους της τύρβης,  $l$ , είναι μία ποσότητα σχετιζόμενη με το μέγεθος των μεγάλων δινών οι οποίες και περιέχουν την ενέργεια στην τυρβώδη ροή και ισούται προς,  $l = 0.07L$ , όπου  $L$  η σχετική διάσταση του αγωγού.

Στην περίπτωση της ροής στο ακροφύσιο Pelton, η πλέον λογική επιλογή είναι η τέταρτη μέθοδος εισαγωγής οριακών συνθηκών. Αφού καθοριστούν η ένταση της τύρβης και η υδραυλική διάμετρος, το FLUENT υπολογίζει τα  $k$ ,  $\varepsilon$  και/ή  $\omega$ , χρησιμοποιώντας τις κάτωθι εμπειρικές σχέσεις:

$$k = 1.5(u_{avg} I)^2 \quad (2.64)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{0.75} \frac{k^{1.5}}{l} \quad (2.65)$$

$$\omega = \frac{k^{0.5}}{C_\mu^{0.25} l} \quad (2.66)$$

Αξίζει να αναφερθεί ότι στις περισσότερες τυρβώδεις ροές η μεγαλύτερη ποσότητα τύρβης

παράγεται λόγω των διατμητικών στρωμάτων εντός της ροής, καθιστώντας το αποτέλεσμα του υπολογισμού σχετικά ανεξάρτητο των τυρβωδών οριακών τιμών εισόδου. Ωστόσο, πρέπει να διασφαλιστεί ότι οι οριακές τιμές έχουν φυσική σημασία, γιατί εναλλακτικά ενδέχεται να επηρεάσουν την πρόβλεψη της ροής κατάντι ή να εμποδίσουν τη σύγκλιση.

#### 2.7.14 Σύγκριση Διαθέσιμων Μοντέλων Τύρβης

Συνοψίζοντας, η ακριβής επίλυση των τυρβωδών ροών απαιτεί την δημιουργία ενός κατάλληλου πλέγματος, τοπικά πυκνωμένο στην περιοχή κοντά στα στερεά όρια, την χρήση του κατάλληλου μοντέλου τύρβης βάσει της υπό εξέταση ροής και την χρήση σχημάτων διακριτοποίησης υψηλής τάξης. Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται εν συντομία τα χαρακτηριστικά των μοντέλων τύρβης τα οποία περιγράφηκαν, τα είδη ροών στις οποίες ενδείκνυται η χρήση τους καθώς και η συνιστώμενη μοντελοποίηση της περιοχής των τοιχωμάτων. Τα μοντέλα τύρβης τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση της συγκεκριμένης ροής, επιλέχθηκαν βάσει των φαινομένων τα οποία εμφανίζονται στην υπόψιν ροή. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [3, 5, 8, 56], τα μοντέλα τύρβης τα οποία ενδείκνυται για την αριθμητική διερεύνηση φαινομένων διφασικής ροής ελεύθερης επιφάνειας είναι το k-ε realizable και το k-ω SST. Ειδικά το πρώτο, θεωρείται ιδανικό και για την πρόβλεψη της εξέλιξης επίπεδων και κυκλικών δεσμών. Αυτό εξακριβώθηκε με την πραγματοποίηση της διερεύνησης της επίδρασης των μοντέλων τύρβης στην τελική λύση, η οποία παρουσιάζεται στην υποενότητα 3.5.4. Να σημειωθεί τέλος, πως, η επιλογή του μοντέλου τύρβης και ειδικά στην περίπτωση του k-ε realizable, της εφαρμοζόμενης συνάρτησης τοιχωμάτων, βασίστηκε στην πυκνότητα του υπολογιστικού πλέγματος το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά την προσομοίωση της ροής. Λόγω του ότι προτιμήθηκε η χρήση πυκνού πλέγματος, ώστε να αναλυθεί επακριβώς το οριακό στρώμα που εμφανίζεται στα τοιχώματα, επιλέχθηκε η χρήση των προαναφερθέντων μοντέλων τύρβης.

**Πίνακας 2.4:** Σύνοψη των χαρακτηριστικών των διαθέσιμων μοντέλων τύρβης

Μοντέλο		
<b>Standard k-ε</b>	<i>Χαρακτηριστικά</i>	Ευσταθές, απλό και ακριβές για απλές ροές
	<i>Χρήση</i>	Σε απλές ροές ή για αρχική προσέγγιση ενός προβλήματος. Δεν συνίσταται για ροές με μεγάλες κλίσεις πίεσης, αποκόλληση, καμπυλότητα και στροβιλότητα. Ανακριβής πρόβλεψη εξέλιξης δεσμών ρευστού.
	<i>Μοντελοποίηση Τοιχωμάτων</i>	Με χρήση EWT ή scalable wall functions, οποιαδήποτε τιμή του $y^+$ . Αλλιώς, $y^+ > 30$ .
<b>RNG k-ε</b>	<i>Χαρακτηριστικά</i>	Παραλλαγή του SKE. Οι σταθερές του προκύπτουν αναλυτικά, όχι πειραματικά. Πιο ακριβές.
	<i>Χρήση</i>	Βελτιωμένα αποτελέσματα για ροές με στροβιλισμούς, αποκόλλησης και υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης
	<i>Μοντελοποίηση Τοιχωμάτων</i>	Με χρήση EWT ή scalable wall functions, οποιαδήποτε τιμή του $y^+$ . Αλλιώς, $y^+ > 30$ .

<b>Realizable k-ε</b>	<i>Χαρακτηριστικά</i>	Παραλλαγή του SKE. Πιο ακριβές.
	<i>Χρήση</i>	Ακριβής πρόβλεψη εξέλιξης δεσμών ρευστού. Αποτελεσματικότερο του Standard k-ε για ροές με στροβιλότητα, οριακά στρώματα με μεγάλες ανασχετικές κλίσεις πίεσης, αποκόλληση και επανακυκλοφορία.
	<i>Μοντελοποίηση Τοιχωμάτων</i>	Με χρήση EWT ή scalable wall functions, οποιαδήποτε τιμή του $y^+$ . Αλλιώς, $y^+ > 30$ .
<b>Standard k-ω</b>	<i>Χαρακτηριστικά</i>	Εύρωστο μοντέλο χαμηλών αριθμών Reynolds. Επιλύει το ιξώδες στρώμα. Ευαίσθητο στις συνθήκες ελεύθερης ροής.
	<i>Χρήση</i>	Καλύτερη απόδοση από τα k-ε σε ροές με οριακό στρώμα, ελεύθερης διάτμησης, χαμηλών αριθμών Reynolds. Επίσης για ροές με ανασχετικές κλίσεις πίεσης, και αποκόλληση.
	<i>Μοντελοποίηση Τοιχωμάτων</i>	Πρέπει $y^+ \sim 1$
<b>SST k-ω</b>	<i>Χαρακτηριστικά</i>	Συνδυάζει τη λειτουργία του Standard k-ω κοντά στα τοιχώματα και του k-ε στην ελεύθερη ροή.
	<i>Χρήση</i>	Ίδια πλεονεκτήματα με το Standard k-ω, δίχως να είναι απαραίτητη η χρήση εξαιρετικά πυκνού πλέγματος
	<i>Μοντελοποίηση Τοιχωμάτων</i>	Για οποιαδήποτε τιμή του $y^+$ . Για βέλτιστα αποτελέσματα, $y^+ \sim 1$ .

## 2.8 Μοντέλα Διφασικής Ροής

Μία από τις ιδιαιτερότητες της ροής της ελεύθερης δέσμης η οποία εξέρχεται ακροφυσίου Pelton αποτελεί το γεγονός ότι είναι διφασική (two-phase flow). Στην περίπτωση αυτή συνυπάρχουν δύο διαφορετικά υλικά στο πεδίο ροής και τα υλικά αυτά βρίσκονται σε διαφορετικές καταστάσεις της ύλης. Στη διφασική ροή, μία φάση μπορεί να οριστεί ως μια αναγνωρίσιμη κατηγορία υλικού η οποία εμφανίζει μία συγκεκριμένη αδρανειακή απόκριση και αλληλεπίδραση με τη ροή και το δυναμικό πεδίο στο οποίο βρίσκεται [3].

Συγκεκριμένα, η δέσμη η οποία αποτελείται από νερό, το οποίο είναι το λειτουργικό μέσο του υδροστροβίλου, όταν εξέρχεται από το ακροφύσιο έρχεται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η περίπτωση αυτή είναι μία υποκατηγορία διφασικής ροής, η οποία ονομάζεται ροή ελεύθερης επιφάνειας (free-surface flow) στην οποία δύο ρευστά που δεν αναμιγνύονται, χωρίζονται από μία σαφώς καθορισμένη διεπιφάνεια (interphase). Η μία από τις φάσεις χαρακτηρίζεται ως συνεχής (ή πρωτεύουσα) και η άλλη ως δευτερεύουσα, η οποία θεωρείται ως διασκορπισμένη εντός της συνεχούς [56].

### 2.8.1 Μέθοδος VOF

Η επιτυχής μοντελοποίηση της διφασικής ροής είναι καθοριστική για την ακριβή υπολογιστική προσομοίωση της ροής της δέσμης στο ακροφύσιο υδροστροβίλου Pelton. Η μοντελοποίηση ροής ελεύθερης επιφάνειας στο υπολογιστικό πακέτο ANSYS-FLUENT πραγματοποιείται με το μοντέλο volume of fluid (VOF) το οποίο προτάθηκε από τους Hirt και Nichols το 1981 [17]. Πρόκειται για μία μέθοδο παρακολούθησης και εντοπισμού της ελεύθερης επιφάνειας η οποία στηρίζεται στη θεώρηση ότι τα δύο ρευστά (ή οι δύο φάσεις) δεν διεισδύουν το ένα στο άλλο. Για τον λόγο αυτό εισάγεται μία νέα παράμετρος σε κάθε υπολογιστικό κελί του πεδίου, η οποία ονομάζεται κλάσμα όγκου (volume fraction),  $\alpha_i$ :

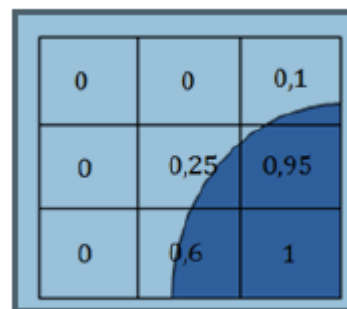
$$\alpha_i = \frac{\text{όγκος της φάσης } i \text{ στο κελί/πεδίο}}{\text{όγκος του κελιού/πεδίου}} \quad (2.67)$$

Τα κλάσματα όγκου είναι συνεχείς συναρτήσεις του χώρου και χρόνου και το άθροισμα τους εντός κάθε όγκου ελέγχου είναι ίσο με τη μονάδα. Η μέθοδος στη συνέχεια επιλύει ένα ενιαίο σύνολο εξισώσεων ορμής και εντοπίζει το κλάσμα όγκου καθενός από τα ρευστά στο πεδίο ροής. Έτσι αν παραδείγματος χάριν θεωρηθεί το κλάσμα όγκου του νερού,  $\alpha_w$ :

$\alpha_w = 1$       το κελί περιέχει μόνο νερό

$\alpha_w = 0$       το κελί δεν περιέχει καθόλου νερό

$0 < \alpha_w < 1$       το κελί περιέχει και τις δύο φάσεις  
(δηλαδή τη διεπιφάνεια)



**Σχήμα 2.17:** Κλάσματα όγκου σε πλέγμα το οποίο περιλαμβάνει διεπιφάνεια

Συμπερασματικά, τα πεδία για όλες τις μεταβλητές και τις ιδιότητες μοιράζονται ανάμεσα στις δύο φάσεις και αντιπροσωπεύουν μέσες ογκικές τιμές, αρκεί το κλάσμα όγκου της κάθε μία από τις φάσεις να είναι γνωστό σε κάθε θέση. Επισημαίνεται ότι στη μέθοδο VOF δεν επιτρέπεται να υπάρχουν κενοί όγκοι ελέγχου, δηλαδή όγκοι στους οποίους δεν περιέχεται κάποια φάση. Με βάση την τοπική τιμή του κλάσματος όγκου  $\alpha_i$ , ανατίθενται οι κατάλληλες ιδιότητες και μεταβλητές σε κάθε όγκο ελέγχου.

## 2.8.2 Εξισώσεις Μοντέλου VOF

Ο εντοπισμός της διεπιφάνειας των δύο φάσεων επιτυγχάνεται με τη λύση της εξίσωσης συνέχειας για το κλάσμα όγκου της δευτερεύουσας φάσης, η οποία για την φάση  $q$  λαμβάνει τη μορφή:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (a_q \rho_q) + \nabla \cdot (a_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{a_q} + \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) \quad (2.68)$$

όπου  $m_{ij}$  είναι η μεταφορά μάζας από τη φάση  $i$  στη φάση  $j$ . Εξ' ορισμού ο όρος πηγής  $S_{a_q}$  είναι μηδενικός, εκτός και αν οριστεί κάποια πηγή μάζας σε κάθε φάση από τον χρήστη. Η εξίσωση αυτή ονομάζεται εξίσωση κλάσματος όγκου (volume fraction equation) και θα επιλυθεί μόνο για τη δευτερεύουσα φάση, ενώ το κλάσμα όγκου της πρωτεύουσας φάσης θα βρεθεί από τον ακόλουθο περιορισμό:

$$\sum_{q=1}^n a_q = 1 \quad (2.69)$$

Η εξίσωση κλάσματος όγκου μπορεί να επιλυθεί με δύο τρόπους, συγκεκριμένα με ρητή ή πεπλεγμένη χρονική διακριτοποίηση. Όταν επιλέγεται η πεπλεγμένη διακριτοποίηση του χρόνου (implicit scheme), η Εξίσωση (2.68) επιλύεται με τον κάτωθι τρόπο:

$$\frac{a_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - a_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} a_{q,f}^{n+1}) = [S_{a_q} + \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp})] V \quad (2.70)$$

όπου,

- $n + 1$ : δείκτης για το τρέχον χρονικό βήμα
- $n$ : δείκτης για το προηγούμενο χρονικό βήμα
- $a_{q,f}$ : τιμή του κλάσματος όγκου της φάσης  $q$  στην επιφάνεια του κελιού
- $V$ : όγκος του υπολογιστικού κελιού
- $U_f$ : ροή διαμέσου της επιφάνειας του κελιού, βάσει της κάθετης ταχύτητας

Δεδομένου ότι αυτή η εξίσωση απαιτεί τις τιμές του κλάσματος όγκου της υπόψιν φάσης κατά το τρέχον βήμα του χρόνου ( $n + 1$ ), σε κάθε χρονικό βήμα επιλύεται επαναληπτικά μια βαθμωτή εξίσωση μεταφοράς για καθένα από τα κλάσματα όγκου δευτερεύουσας φάσης. Επισημαίνεται ότι το πεπλεγμένο σχήμα διακριτοποίησης δύναται να χρησιμοποιηθεί κατά την επίλυση τόσο μόνιμων όσο και μεταβατικών ροών.

Αντίθετα, όταν επιλέγεται η ρητή διακριτοποίηση του χρόνου (explicit scheme), η Εξίσωση (2.68) επιλύεται με την κάτωθι μορφή:

$$\frac{a_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - a_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q U_f^n a_{q,f}^n) = [S_{a_q} + \sum_{p=1}^n (m_{pq}^n - m_{qp}^n)] V \quad (2.71)$$

Το σχήμα αυτό δεν απαιτεί επαναληπτική λύση της εξίσωσης μεταφοράς σε κάθε χρονικό βήμα, όπως το πεπλεγμένο, ενώ είναι εφαρμόσιμο μόνο στην περίπτωση μη μόνιμης επίλυσης.

Η χρήση της μεθόδου πεπερασμένων όγκων στο ANSYS-FLUENT απαιτεί τον υπολογισμό των ρών μεταφοράς και διάχυσης διαμέσου των επιφανειών των όγκων ελέγχου και την εξίσωση τους με τους όρους πηγής εντός του. Η ακριβής πρόβλεψη της ροής του κλάσματος όγκου κάθε φάσης μεταξύ των κελιών είναι δύσκολο να επιτευχθεί, και για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι παρεμβολής για τα κελιά που βρίσκονται κοντά στη διεπιφάνεια, εκτός των κλασικών μεθόδων οι οποίες αναφέρθηκαν στην υποενότητα 2.5.4. Οι μέθοδοι αυτοί, όπως το σχήμα γεωμετρικής ανοικοδόμησης (geometric reconstruction scheme) και το σχήμα δότη-δέκτη (donor-acceptor scheme) είναι διαθέσιμα στο FLUENT για χρήση κατά την επίλυση μη μόνιμων ρών.

Όταν επιλύεται ένα πρόβλημα διφασικής ροής με την ρητή μέθοδο, ενδείκνυται η χρήση του σχήματος γεωμετρικής ανοικοδόμησης για μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ ειδικά για πλέγματα με υψηλή ασυμμετρία προτείνεται το σχήμα δότη-δέκτη. Αντίθετα στην περίπτωση χρήσης της πεπλεγμένης μεθόδου προτείνεται η χρήση του ανάντι σχήματος δεύτερης τάξης ως ο ακριβέστερος και με μεγαλύτερη ευστάθεια τρόπος εύρεσης της διεπιφάνειας μεταξύ των φάσεων [56].

Η διακριτή μορφή της εξίσωσης κλάσματος όγκου έχει την εξής μορφή:

$$\sum_k \sum_j a_{ij}^{uk} u_{kj} + \sum_j a_{ij}^{ap} p_j + \sum_j a_{ij}^{aa} a_j = b_i^a \quad (2.72)$$

Η Εξίσωση (2.72) μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση διαχωρισμένου αλγορίθμου, στην οποία περίπτωση θα λυθεί μαζί με τις εξισώσεις τύρβης αφού πρώτα έχει προηγηθεί ο υπολογισμός της εξίσωσης διόρθωσης πίεσης. Επίσης προσφέρεται η δυνατότητα να επιλυθεί με τη συζευγμένη μέθοδο, στην οποία η Εξίσωση (2.72) θα προστεθεί στο γραμμικό σύστημα (2.26), αυξάνοντας τόσο τον αριθμό των αγνώστων όσο και των εξισώσεων κατά ένα. Το σύστημα επιλύεται με την πολυπλεγματική μέθοδο. Στην περίπτωση επίλυσης μόνιμης κατάστασης συνίσταται η χρήση διφασικής συζευγμένης μεθόδου, ως αποδοτικότερη και ευσταθέστερη [3].

Οι ιδιότητες των ρευστών οι οποίες εμφανίζονται στις εξισώσεις μεταφοράς καθορίζονται από την παρουσία των συνιστωσών φάσεων σε κάθε όγκο ελέγχου. Σε ένα σύστημα δύο φάσεων, όπως στην παρούσα μελέτη, αν οι φάσεις αναπαρασταθούν από τους δείκτες 1 και 2, και αν έχει βρεθεί το κλάσμα όγκου της δεύτερης φάσης  $\alpha_2$ , τότε για παράδειγμα η πυκνότητα υπολογίζεται ως εξής:

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (2.73)$$

### 2.8.3 Επιφανειακή Τάση

Κατά την επίλυση διφασικών ρών με τη χρήση της μεθόδου VOF υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μοντελοποίησης της επιφανειακής τάσης. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση που υπάρχουν σταγονίδια ρευστού, μικρής διαμέτρου, στα οποία η επιφανειακή τάση πρέπει να ληφθεί υπόψιν, διότι επηρεάζει τη ροή. Υπάρχουν δύο διαφορετικά μοντέλα για την επιφανειακή τάση στο FLUENT, συγκεκριμένα το Continuum Surface Force Model (CSFM) και το Continuum

Surface Stress Model (CSSM) τα οποία μπορούν να ενεργοποιηθούν [3]. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να οριστεί ο συντελεστής επιφανειακής τάσης μεταξύ των δύο ρευστών κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό.

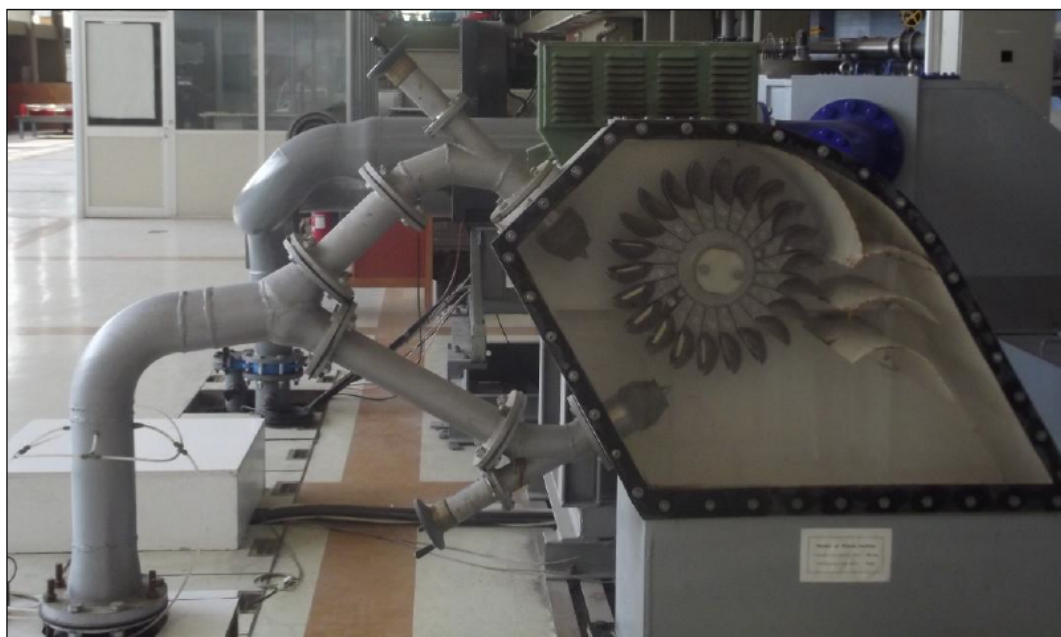
Το φαινόμενο της επιφανειακής τάσης μπορεί να θεωρηθεί αν επιδρά στην εξέλιξη της ροής μέσω της εξέτασης του αδιάστατου αριθμού Weber,  $We$ , όπως έχει ήδη αναφερθεί στην υποενότητα 2.2.2. Συγκεκριμένα στην περίπτωση ροών σε μεγάλο αριθμό Reynolds, όπως συμβαίνει στην υπό εξέταση ροή, τα φαινόμενα επιφανειακής τάσης μπορούν να αμεληθούν, εάν ισχύει ότι  $We \gg 1$ . Σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα 1.1, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επιφανειακή τάση δύναται να αμεληθεί στην συγκεκριμένη περίπτωση, υπόθεση η οποία θα εξεταστεί στο κεφάλαιο 3.



## Κεφάλαιο 3. Αριθμητική Επίλυση της Ροής σε Ακροφύσιο

### 3.1 Παρουσίαση του Πραγματικού Ακροφυσίου Υδροστροβίλου Δράσης

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την αριθμητική διερεύνηση της ροής στα ακροφύσια υδροστροβίλων δράσης και την βελτιστοποίηση της γεωμετρίας τους. Επομένως, αρχικά απαιτείται η μοντελοποίηση της γεωμετρίας του ακροφυσίου προτού καθοριστούν οι παράμετροι της ροής. Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης αυτής μελετήθηκε ένας υδροστρόβιλος Pelton ο οποίος βρίσκεται στο εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τα αποτελέσματα είναι δυνατόν να γενικευθούν εύκολα, για την ανάλυση της ροής στο ακροφύσιο οποιουδήποτε υδροστροβίλου δράσης. Ο υδροστρόβιλος αυτός χρησιμοποιείται για την διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων, όμως η λειτουργία του είναι ίδια με τους αντίστοιχους στροβίλους οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η κύρια διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η παροχή δεν προέρχεται από φυσικό υδατόρευμα, αλλά από μία δεξαμενή ύδατος η οποία βρίσκεται στο εργαστήριο.



**Σχήμα 3.1:** Υδροστρόβιλος Pelton του εργαστηρίου Υδροδυναμικών Μηχανών

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ο υδροστρόβιλος Pelton του εργαστηρίου Υδροδυναμικών Μηχανών, ονομαστικής ισχύος 70 kW [65]. Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει δύο ακροφύσια τα οποία βρίσκονται σε γωνία  $75^\circ$ . Η ρύθμιση του ανοίγματος της βελόνης πραγματοποιείται με μηχανικό τρόπο, χειροκίνητα από τον μοχλό που φαίνεται στην αρχή των δύο βάκτρων. Είναι επίσης ορατός ο αγωγός  $90^\circ$  ανάντι της διακλάδωσης, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την μεταφορά του ρευστού, με την βοήθεια της αντλίας, από τη δεξαμενή στον στρόβιλο.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την διερεύνηση της διφασικής ροής που εξέρχεται από το ακροφύσιο του προαναφερθέντος υδροστροβίλου. Το ακροφύσιο αυτό παρουσιάζεται κατά τη λειτουργία του σε χαμηλή παροχή στο Σχήμα 3.2. Στην φωτογραφία αυτή είναι ορατή η ελάττωση

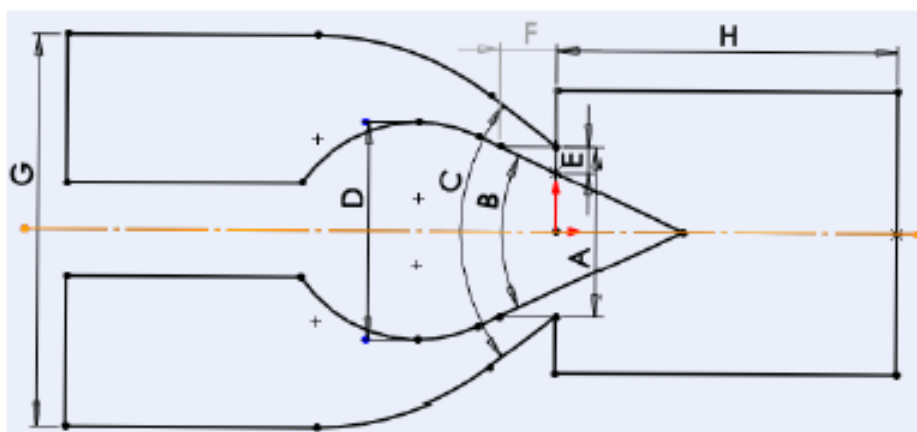
της διαμέτρου της δέσμης στο σημείο Vena Contracta, η οποία όπως προαναφέρθηκε πραγματοποιείται σε απόσταση περίπου μίας διαμέτρου κατάντι της εξόδου του ακροφυσίου. Είναι επίσης ορατή η διασπορά την οποία υφίσταται η δέσμη του ύδατος κατά την έξοδό της από το ακροφύσιο, όπως παρατηρήθηκε και σε αντίστοιχες οπτικοποιήσεις οι οποίες καταγράφηκαν στο κεφάλαιο 1 [24, 27, 45].



**Σχήμα 3.2:** Ακροφύσιο Υδροστροβίλου Pelton σε λειτουργία

Οι γωνίες στο υπάρχον ακροφύσιο ακολουθούν τα παλαιότερα κατασκευαστικά πρότυπα, τα οποία πρότειναν γωνίες ακροφυσίου και βελόνης  $90^\circ$  και  $50^\circ$  αντίστοιχα. Αντίθετα, τα νεότερα πρότυπα σχεδίασης συνιστούν την κατασκευή ακροφυσίων με μεγαλύτερες γωνίες από τις προαναφερθείσες [15, 38, 41]. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση της ορθότητας της τάσης αυτής στον σύγχρονο σχεδιασμό των ακροφυσίων των υδροστροβίλων δράσης μέσω της πραγματοποίησης μίας μελέτης βελτιστοποίησης της γεωμετρίας τους.

Για να μελετηθεί η επίδραση των γεωμετρικών παραμέτρων του ακροφυσίου του στροβίλου στη διαμόρφωση της ροής και κατά συνέπεια στην απόδοση της μηχανής, χρησιμοποιήθηκε μία διάταξη η οποία περιελάμβανε έναν ευθύ αγωγό ανάντι του ακροφυσίου, δίχως την ύπαρξη συστήματος διανομής και διακλαδώσεων. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η υπό μελέτη γεωμετρία, για την περίπτωση του αρχικού ακροφυσίου. Στο ίδιο σχήμα, με γράμματα του λατινικού αλφαβήτου απεικονίζονται και οι κυριότερες γεωμετρικές παράμετροι που επηρεάζουν τη συγκεκριμένη ροή. Επιπροσθέτως, στον Πίνακα 3.1 καταγράφονται οι συγκεκριμένες παράμετροι και σε ποιο γράμμα αντιστοιχούν.



**Σχήμα 3.3:** Διδιάστατο σκαρίφημα της γεωμετρίας του ακροφυσίου

**Πίνακας 3.1:** Παράμετροι γεωμετρίας ακροφυσίου

Γράμμα	Παράμετρος
A	Διάμετρος ανοίγματος ακροφυσίου
B	Γωνία βελόνης
C	Γωνία Στομίου Ακροφυσίου
D	Πάχος βελόνης
E	Σχετικό άνοιγμα βελόνης
F	Άνοιγμα βελόνης
G	Διάμετρος αγωγού
H	Απόσταση από το άνοιγμα του ακροφυσίου

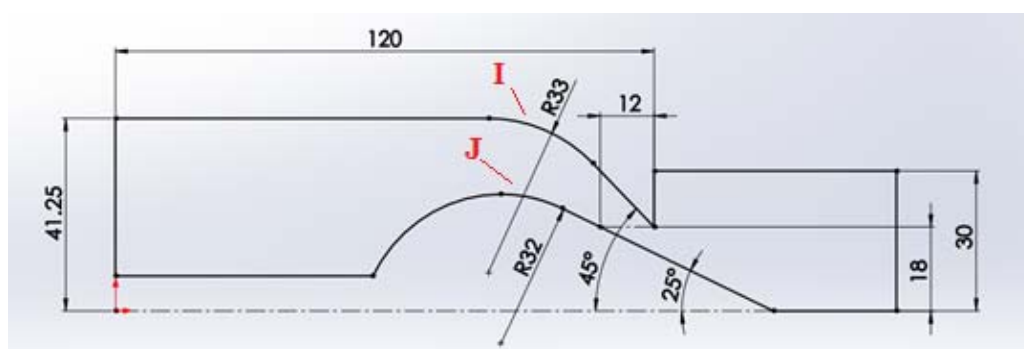
Οι διαστάσεις του υπάρχοντος ακροφυσίου προήλθαν από τη χρήση διαθέσιμων μηχανολογικών σχεδίων. Συγκεκριμένα, η διάμετρος ανοίγματος του ακροφυσίου, A, καθώς και η διάμετρος του αγωγού, G, σύμφωνα με το Σχήμα 3.3, είχαν διάσταση 82.5 και 36 mm αντίστοιχα. Τα συγκεκριμένα μεγέθη ήταν φυσικά σταθερά στο συγκεκριμένο ακροφύσιο, όμως για λόγους απλούστευσης χρησιμοποιήθηκαν για όλες τις υπολογιστικές προσομοιώσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης της γεωμετρίας.

### 3.2 Κατασκευή της Γεωμετρίας

Για την κατασκευή της γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Solidworks της Dassault Systèmes, το οποίο πρόκειται για ένα πρόγραμμα σχεδιασμού CAD. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα προτιμήθηκε έναντι του ενσωματωμένου στο ANSYS εργαλείου σχεδίασης, το οποίο ονομάζεται Design Modeler (DM), λόγω των μεγαλύτερων δυνατοτήτων παραμετροποίησης που προσφέρει, αλλά και του ότι διαθέτει ένα εν γένει εξαιρετικά φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον εργασίας. Προτού περιγραφεί η διαδικασία κατασκευής της γεωμετρίας, αξίζει να αναφερθεί ότι προτιμήθηκε η διδιάστατη μοντελοποίηση της ροής στο ακροφύσιο του υδροστροβίλου έναντι της πληρέστερης προσέγγισης, με χρήση τριδιάστατης γεωμετρίας για έναν αριθμό από λόγους. Αρχικά, η ροή στο ακροφύσιο του υδροστροβίλου είναι αξονοσυμμετρική ως προς τον άξονα της βελόνης. Η χρήση της συμμετρίας ως προς τον άξονα αυτό απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό το πρόβλημα και καθιστά την αποδοτική χρήση των διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων εφικτή.

Άλλωστε, ο ευθύς αγωγός ο οποίος υπάρχει ανάντι του ακροφυσίου επιτρέπει την υπόθεση ότι δεν παρατηρούνται δευτερεύουσες ροές λόγω ταχυτήτων στην εφαπτομενική κατεύθυνση, φαινόμενο το οποίο εμφανίζει στροβιλότητα στη ροή, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Παρόλο λοιπόν το γεγονός ότι η τύρβη είναι εν γένει ένα τριδιάστατο φαινόμενο, οι διακυμάνσεις της ταχύτητας σε κατεύθυνση διαφορετική της κύριας ροής μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες στην υπό εξέταση περίπτωση. Τέλος, ένας ακόμα λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε διδιάστατη γεωμετρία στην συγκεκριμένη ροή, είναι οι διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι. Η μελέτη βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε απαιτούσε την προσομοίωση της ροής σε πολλές διαφορετικές γεωμετρίες. Το υπολογιστικό κόστος σε χρόνο και μνήμη για την κατασκευή τριδιάστατων πλεγμάτων και στη συνέχεια για την προσομοίωση καθίσταται απαγορευτικό.

Η γεωμετρία κατασκευάστηκε με τη δημιουργία πρότυπων σχημάτων όπως ορθογώνια παραλληλεπίπεδα και την τροποποίηση τους στη συνέχεια ώστε να απεικονιστεί το πεδίο ροής του δεδομένου προβλήματος. Η γεωμετρία χωρίστηκε σε 4 επιφάνειες, έτσι ώστε να επιτευχθεί καλύτερος έλεγχος στην δημιουργία του πλέγματος. Η πρώτη κατά σειρά επιφάνεια περιλαμβάνει το ακροφύσιο και όλες τις υπό εξέταση γεωμετρικές παραμέτρους του προβλήματος, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



**Σχήμα 3.4:** Τμήμα της γεωμετρίας του ακροφυσίου του υδροστροβίλου

Ο αγωγός ανάντι του ακροφυσίου κατασκευάστηκε με μήκος 120 mm, έτσι ώστε να βεβαιωθεί ότι οι τυρβώδεις οριακές συνθήκες εισόδου δεν θα επιδρούν στην τελική λύση του προβλήματος.

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται και άλλα 3 μεγέθη του ακροφυσίου τα οποία εξετάστηκαν στη συνέχεια, κατά τη μελέτη βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, το πάχος της βελόνης,  $D$ , το οποίο στην περίπτωση του ακροφυσίου αυτού είναι 50 mm, καθώς επίσης και οι ακτίνες καμπυλότητας του στομίου του ακροφυσίου,  $I$ , και της βελόνης,  $J$ , οι οποίες είναι 33 και 32 mm αντίστοιχα. Το άνοιγμα της βελόνης,  $F$ , είναι μία μεταβλητή γεωμετρική παράμετρος και στην περίπτωση του Σχήματος 3.4 έχει ρυθμιστεί στο  $1/3$  του μέγιστου ανοίγματος, δηλαδή στα 12 mm. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η διάσταση η οποία απεικονίζεται με μπλε είναι εξαρτημένη από κάποια άλλη διάσταση, συγκεκριμένα το άνοιγμα της βελόνης,  $F$ , και δεν απαιτείται για τον καθορισμό της γεωμετρίας.

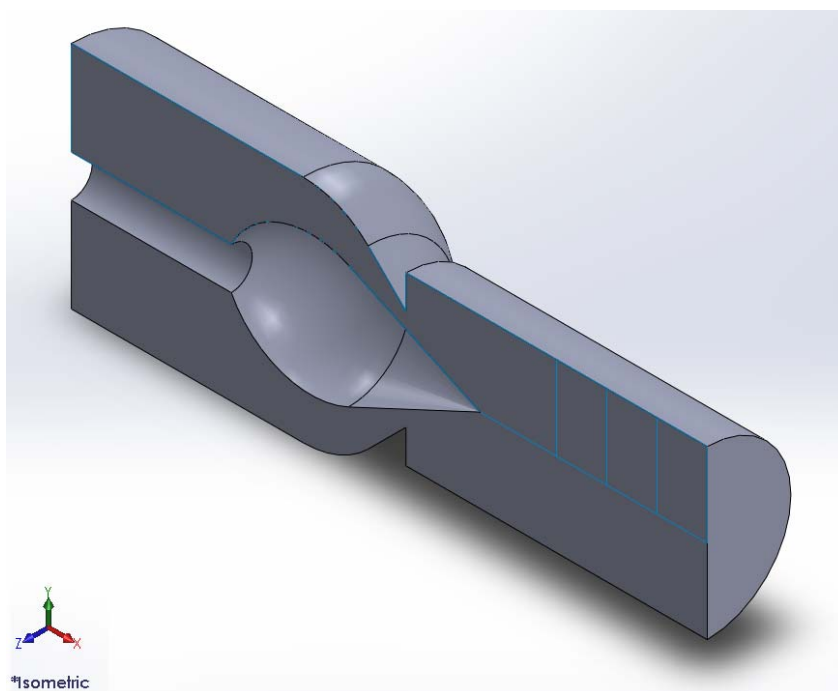
Κατάντι του ακροφυσίου δημιουργήθηκαν 3 επιφάνειες, οι οποίες σε συνδυασμό με το τμήμα της πρώτης επιφάνειας το οποίο βρίσκεται μετά το ακροφύσιο, έχουν μήκος τριών διαμέτρων ακροφυσίου, δηλαδή 108 mm, και στο οποίο μετρήθηκαν οι τιμές των ροϊκών μεταβλητών που προέκυψαν από την προσομοίωση. Οι επιφάνειες δημιουργήθηκαν με σκοπό την παρακολούθηση της εξέλιξης της ροής σε μεγαλύτερο μήκος κατάντι της εξόδου του ακροφυσίου. Ένας ακόμη λόγος για τον οποίο κατασκευάστηκαν αυτές οι επιφάνειες είναι η αποφυγή επιβολής ατμοσφαιρικής πίεσης στη ροή πολύ νωρίς. Η διάσταση αυτή αντιστοιχεί στην παράμετρο  $H$  του Πίνακα 3.1. Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η συνολική γεωμετρία η οποία κατασκευάστηκε, δίχως να εμφανίζονται οι διαστάσεις. Είναι ορατές οι 4 επιφάνειες οι οποίες αποτελούν το πεδίο ροής το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση.



**Σχήμα 3.5:** Γεωμετρία του πεδίου ροής του υδροστροβίλου

Αφού κατασκευάστηκε η γεωμετρία, εισήχθη στο ANSYS έτσι ώστε να δημιουργηθεί το πλέγμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση CFD. Κατά την εισαγωγή της στο Design Modeler (DM), δόθηκε προσοχή στον σωστό καθορισμό των μονάδων μέτρησης του προβλήματος, ώστε να υπάρχει συμφωνία με τις αντίστοιχες τις οποίες χρησιμοποιεί το FLUENT. Τέλος, στο DM καθορίστηκε και το τμήμα του πεδίου στο οποίο θα διακινήθει ρευστό, ώστε να δημιουργηθεί το αντίστοιχο πλέγμα στη συνέχεια. Στην υπό εξέταση περίπτωση, όλο το πεδίο ροής το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 3.5 διαρρέεται από ρευστό.

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η ισομετρική απεικόνιση της τριδιάστατης γεωμετρίας του ακροφυσίου, η οποία επίσης σχεδιάστηκε στο Solidworks. Για οπτική διευκόλυνση απεικονίζεται η γεωμετρία σε τομή ως προς τον άξονα  $z$ . Είναι ορατές οι τρεις επιφάνειες κατάντι του ακροφυσίου για την μελέτη της διφασικής ροής της ελεύθερης δέσμης.



**Σχήμα 3.6:** Ισομετρική άποψη της τριδιάστατης γεωμετρίας του πεδίου ροής του υδροστροβίλου σε τομή ως προς τον άξονα z

### 3.3 Κατασκευή του Πλέγματος

#### 3.3.1 Εισαγωγή

Η κατασκευή ενός ποιοτικού πλέγματος είναι συνήθως μια διαδικασία χρονοβόρα, η οποία σε περιπτώσεις πολύπλοκων γεωμετριών ενδέχεται να απαιτήσει μεγαλύτερο χρόνο συμμετοχής από τον χρήστη CFD απ' ό,τι η ίδια η επίλυση της ροής. Ωστόσο, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τη χρήση CFD αλλά και ο ρυθμός σύγκλισης σε αυτά εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του πλέγματος. Η χρήση ενός πλέγματος το οποίο είτε είναι κακής ποιότητας, είτε ανεπαρκώς πυκνό ενδέχεται να οδηγήσει σε λάθος αποτελέσματα. Συμπερασματικά, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη διαδικασία κατασκευής ενός πλέγματος [9].

Κατά τη διαδικασία διακριτοποίησης του πεδίου ροής γίνεται προσπάθεια για την επίτευξη δύο κυρίως στόχων. Το πλέγμα είναι απαραίτητο να είναι αρκούντως πυκνό για να αναλύσει επακριβώς τόσο τις γεωμετρικές ιδιαιτερότητες του πεδίου ροής, όπως για παράδειγμα την καμπυλότητα της γεωμετρίας, όσο και τα ροϊκά φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα. Ταυτόχρονα όμως είναι σημαντικό να μην σπαταλούνται πόροι, όπως υπολογιστική μνήμη και χρόνος με την προσομοίωση ροών σε πλέγματα με μεγαλύτερη πυκνότητα απ' ό,τι είναι απαραίτητη για την επακριβή ανάλυση της ροής. Το προαναφερθέν θα αναλυθεί εκτενώς στην υποενότητα 3.4, στην οποία θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος ανεξαρτησίας του πλέγματος.

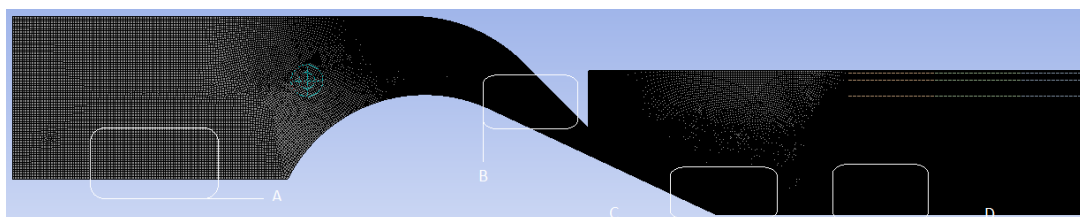
Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του FLUENT, η αριθμητική διάχυση ελαχιστοποιείται όταν η ροή είναι ευθυγραμμισμένη με το πλέγμα και ειδικά για την περίπτωση διφασικής ροής, το πάχος της διεπιφάνειας νερού-αέρα επηρεάζεται δραστικά από τον προσανατολισμό του πλέγματος [46]. Στην περίπτωση διδιάστατου πλέγματος, η χρήση τριγωνικών στοιχείων δεν συνιστάται διότι δεν μπορούν ποτέ να ευθυγραμμιστούν με τη ροή. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί δημιουργώντας ένα δομημένο πλέγμα, με τη χρήση τετράπλευρων στοιχείων και μόνο. Επίσης, στην περιοχή των στερεών τοιχωμάτων, δηλαδή εκεί όπου το ρευστό έρχεται σε επαφή με τις επιφάνειες του ακροφυσίου και της βελόνης, οι μεταβλητές της ροής μεταβάλλονται πολύ γρήγορα σε κατεύθυνση κάθετη στο τοίχωμα, αναπτύσσονται δηλαδή μεγάλες κλίσεις. Σε αυτή την περίπτωση, η χρήση δομημένων πλεγμάτων επιτρέπει λεπτομερέστερη ανάλυση από ό,τι μη δομημένα πλέγματα ίδιου μεγέθους.

Συνεπώς, η κατασκευή δομημένου πλέγματος καθίσταται η πλέον σωστή επιλογή για το συγκεκριμένο πρόβλημα ροής και η πιο αποτελεσματική όσον αφορά την ακρίβεια, τον υπολογιστικό χρόνο και τη διαθέσιμη μνήμη. Για τον απλή διδιάστατη γεωμετρία του ακροφυσίου του υδροστροβίλου Pelton η οποία μελετάται, είναι εφικτή η κατασκευή ενός δομημένου πλέγματος. Για τον λόγο αυτό, όλα τα πλέγματα τα οποία κατασκευάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας είναι δομημένα. Να σημειωθεί ότι τα πλέγματα κατασκευάστηκαν στην ενσωματωμένη στο ANSYS εφαρμογή ICEM-Meshing.

#### 3.1.2 Κατασκευή του Τελικού Πλέγματος

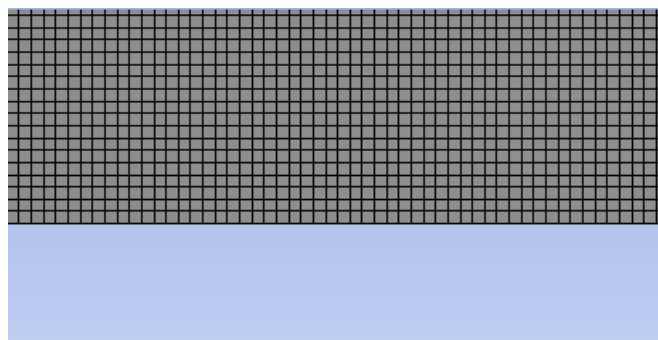
Μετά από τη μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος, το πλέγμα το οποίο προέκυψε ως η καλύτερη επιλογή το οποία συνδύαζε ακρίβεια αποτελεσμάτων και οικονομική χρήση υπολογιστικών πόρων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7, και το οποίο αποτελείται από περίπου 220,000 στοιχεία. Οι

περιοχές του πλέγματος οι οποίες είναι τοποθετημένες σε πλαίσιο αποτελούν σημεία του πεδίου ροής τα οποία παρουσίαζαν μεγαλύτερο ενδιαφέρον κατά την κατασκευή του πλέγματος και αναλύονται περαιτέρω στη συνέχεια.



**Σχήμα 3.7:** Δομημένο υπολογιστικό πλέγμα του πεδίου ροής (~200 χιλιάδες στοιχεία)

Στην περιοχή κοντά στην είσοδο του πεδίου ροής, A, αποτελεί το κομμάτι του πεδίου στο οποίο εμφανίζονται οι μικρότερες ταχύτητες ροής. Για τον λόγο αυτό, δεν είναι απαραίτητη η χρήση πυκνού πλέγματος στην περιοχή αυτή, μιας και οι κλίσεις των ροϊκών μεταβλητών αναμένονται μικρές. Συνεπώς, προτιμήθηκε η χρήση σχετικά αραιού πλέγματος, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8.



**Σχήμα 3.8:** Λεπτομέρεια υπολογιστικού πλέγματος του πεδίου ροής (περιοχή A)

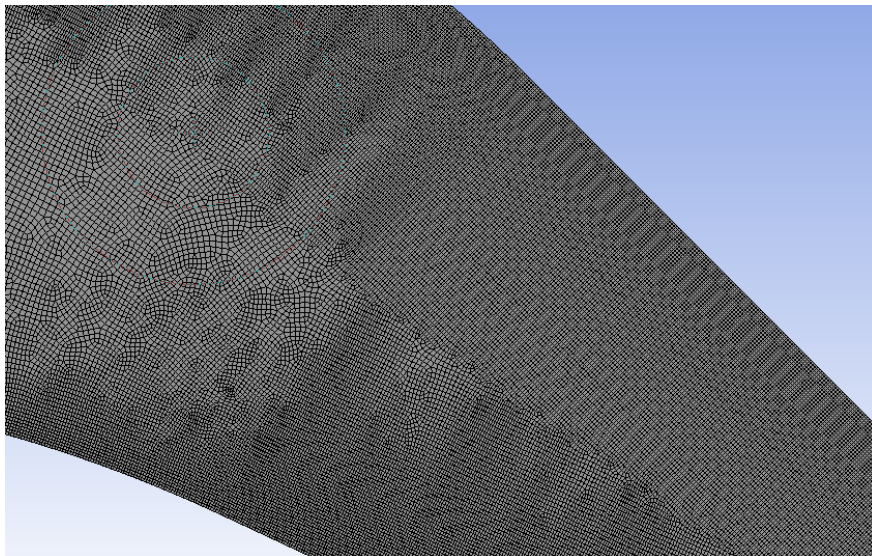
Η χρήση πυκνότερου πλέγματος είναι επιβεβλημένη σε περιοχές όπου αναμένεται εκ των προτέρων να υπάρχουν μεγάλες κλίσεις στις βασικές ροϊκές μεταβλητές, όπως για παράδειγμα μη γραμμικές μεταβολές στην ταχύτητα της ροής στο οριακό στρώμα κοντά σε τοιχώματα, ή ταχείες αλλαγές στην πίεση. Ως εκ τούτου, για τις περιοχές όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες μεταβολές κλίσεων, η χρήση πυκνού πλέγματος είναι απαραίτητη προκειμένου να αναλυθεί σωστά η συμπεριφορά της ροής, χωρίς να αλλοιωθούν τα αποτελέσματα.

Για τον λόγο αυτό, εκτός από την τοπική πύκνωση συγκεκριμένων περιοχών της ροής με την χρήση επιλογών τοπικού ελέγχου μεγέθους (local size control) στις πλευρές του πεδίου (face sizing) και τις επιφάνειές του (face sizing), επιλέχθηκε και η χρήση της μεθόδου συναρτήσεων μεγέθους (advanced sizing functions). Η συγκεκριμένη επιλογή χρησιμοποιείται έτσι ώστε το πλέγμα να βελτιωθεί αυτόματα (χωρίς να απαιτείται η παρέμβαση του χρήστη), χρησιμοποιώντας κριτήρια που βασίζονται στην τοπική εγγύτητα (proximity) ανάμεσα σε δύο ή περισσότερες επιφάνειες και την τοπική καμπυλότητα (curvature) της αρχικής γεωμετρίας.

Στο πλέγμα το οποίο κατασκευάστηκε επιλέχθηκε η χρήση μεθόδων συναρτήσεων μεγέθους βασισμένες στην τοπική καμπυλότητα της διαθέσιμης γεωμετρίας, η οποία επέτρεπε την

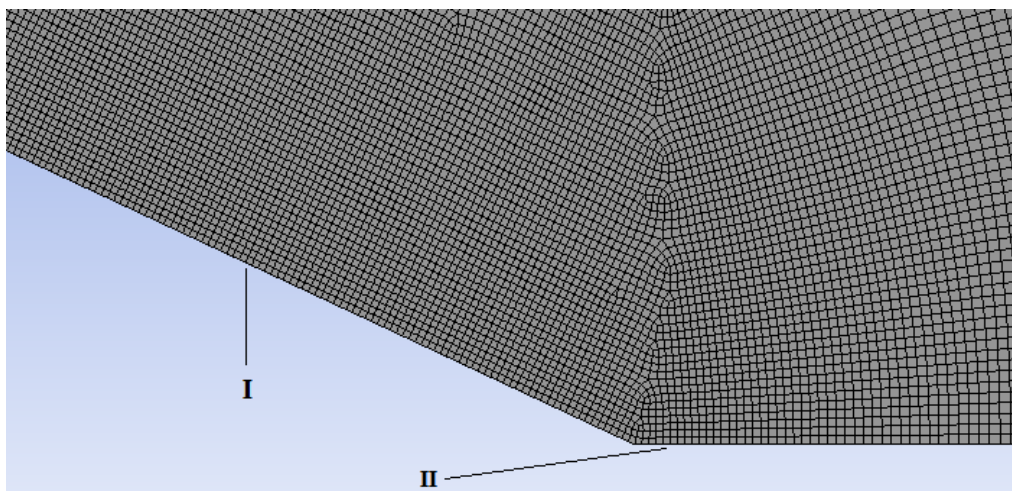


αυτόματη τοπική πυκνωση των περιοχών του πεδίου ροής όπου εμφανιζόταν μεγαλύτερη καμπυλότητα, όπως για παράδειγμα η περιοχή Β του Σχήματος 3.7, ανεξάρτητα από την επιλογή μεγέθους πλέγματος στις καμπύλες που την περιβάλλουν. Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται η διάταξη του πλέγματος στην περιοχή Β. Το πλέγμα στην περιοχή αυτή κατασκευάστηκε εξαιρετικά πυκνό, διότι εκεί αναμένεται η εμφάνιση των μεγαλύτερων κλίσεων πίεσης και ταχύτητας σε κατεύθυνση κάθετη στα τοιχώματα, λόγω της μεγάλης επιτάχυνσης της ροής στο σημείο αυτό του ακροφυσίου.



**Σχήμα 3.9:** Λεπτομέρεια υπολογιστικού πλέγματος του πεδίου ροής (περιοχή Β)

Στην περιοχή C του πεδίου ροής, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10, το πλέγμα κατασκευάστηκε τοπικά πυκνωμένο στην πλευρά I, η οποία αποτελεί το τελευταίο τμήμα της βελόνης με το οποίο έρχεται σε επαφή το νερό καθώς εξέρχεται από το ακροφύσιο, διότι στην περιοχή αυτή εμφανίζεται οριακό στρώμα, η ακριβής ανάλυση του οποίου απαιτεί εξαιρετικά πυκνό πλέγμα.

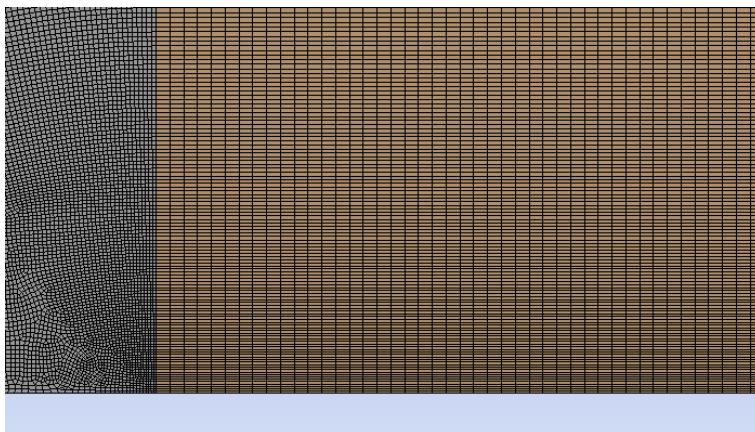


**Σχήμα 3.10:** Λεπτομέρεια υπολογιστικού πλέγματος του πεδίου ροής (περιοχή C)

Άλλωστε, η πλευρά II, η οποία αποτελεί το αξονοσυμμετρικό όριο του πεδίου επίσης απαιτεί τοπική πύκνωση, έτσι ώστε να αναλυθεί ακριβώς η ανάπτυξη της δέσμης ελεύθερης επιφάνειας.

Με σκοπό την εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων, στις τρεις επιφάνειες κατάντι του ακροφυσίου, η οποίες δημιουργήθηκαν για τη μελέτη της ροής της ελεύθερης δέσμης, το πλέγμα το οποίο κατασκευάστηκε είναι ομοιόμορφο (mapped face meshing). Η ύπαρξη ορθογωνίων παραλληλογράμμων στην περιοχή αυτή ευνοεί την κατασκευή ομοιόμορφου πλέγματος, στο οποίο το μέγεθος των κελιών κατά μήκος του άξονα  $x$  είναι μεγαλύτερο του αντίστοιχου μεγέθους κατά μήκος του  $y$ . Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι οι μεγαλύτερες κλίσεις πίεσης και ταχύτητας αναμένονται στην κατεύθυνση κάθετα στη ροής, ενώ αντίθετα στην κατεύθυνση της ροής οι μεταβολές είναι μικρές. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι το πλέγμα το οποίο κατασκευάστηκε είναι πυκνότερο προς την πλευρά του άξονα συμμετρίας με τη χρήση παράγοντα πύκνωσης (bias factor), διότι στην περιοχή αυτή θα αναπτυχθεί η ελεύθερη δέσμη, η μελέτη της οποίας είναι και το αντικείμενο της εργασίας.

Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται το πλέγμα στην περιοχή D του πεδίου ροής, όπου είναι ορατό στα δεξιά, με διαφορετικό χρώμα, το ομοιόμορφο πλέγμα της πρώτης από τις τρεις προαναφερθέντες επιφάνειες. Η αρμονική σύνδεση των πλεγμάτων των δύο επιφανειών είναι απαραίτητη για την διεξαγωγή προσομοιώσεων με ακρίβεια, και πραγματοποιείται αυτόματα από το λογισμικό. Η ποιότητα του πλέγματος θα μελετηθεί στην υποενότητα 3.3.4.



**Σχήμα 3.11:** Λεπτομέρεια υπολογιστικού πλέγματος του πεδίου ροής (περιοχή D)

Το τελικό υπολογιστικό πλέγμα το οποίο παρουσιάστηκε, προήλθε από την μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος στην οποία εξετάστηκε η ευαισθησία της λύσης στον βαθμό ανάλυσης (πύκνωσης) του πλέγματος και η οποία θα περιγραφεί στην υποενότητα 3.4.

Στη συνέχεια, στο πρόγραμμα ANSYS ICEM-Meshing καθορίστηκαν οι ζώνες του πεδίου που αντιστοιχούν σε ρευστό και σε στερεά όρια, ενώ επίσης ομαδοποιήθηκαν τα στοιχεία της γεωμετρίας, δηλαδή οι επιφάνειες και οι καμπύλες, τα οποία αντιστοιχούν σε κάποια οριακή συνθήκη. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε με την εντολή named selections, και σκοπός της ήταν η διευκόλυνση της μετέπειτα ανάθεσης οριακών συνθηκών από το FLUENT.

## 3.3.3 Έλεγχος της Ποιότητας του Πλέγματος

Το πλέγμα το οποίο κατασκευάστηκε, εξετάστηκε στη συνέχεια στο ICEM-Meshing ως προς την ποιότητά του, με τη χρήση των ενσωματωμένων εργαλείων μέτρησης ποιότητας. Προέκυψαν τα αποτελέσματα τα οποία περιγράφονται στον Πίνακα 3.2:

**Πίνακας 3.2:** Ποιοτικά χαρακτηριστικά του κατασκευασμένου πλέγματος

Μέτρηση	Τιμή χειρότερου στοιχείου	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
Ασυμμετρία (Skewness)	0.78	0.037	0.0733
Αναλογία Διαστάσεων (AR)	12.42	1.59	0.91
Ορθογώνια Ποιότητα (OQ)	0.47	0.995	0.0185

Στην υποενότητα 2.2.4 παρουσιάστηκαν οι επιτρεπτές τιμές για τις μετρήσεις ποιότητας των στοιχείων του πλέγματος τις οποίες πραγματοποιεί το ICEM-Meshing αυτόματα, κατά την κατασκευή του. Μελετώντας τα στατιστικά τα οποία προέκυψαν από την μέτρηση της ποιότητας του πλέγματος που κατασκευάστηκε, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το πλέγμα είναι πολύ καλής ποιότητας και προσφέρεται για την εξαγωγή αποτελεσμάτων υψηλής ακρίβειας, δίχως τον κίνδυνο αλλοίωσης του ρυθμού σύγκλισης της λύσης ή της ίδιας της λύσης.

### 3.4 Υπολογισμός Απωλειών Ισχύος Ακροφυσίου

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του ακροφυσίου ενός υδροστροβίλου δράσης. Οι διαφορετικές γεωμετρίες οι οποίες εξετάζονται συγκρίθηκαν μεταξύ τους βάσει των απωλειών ισχύος οι οποίες καταγράφηκαν κατά την διέλευση του νερού διαμέσου του ακροφυσίου. Για τον υπολογισμό τους, συγκρίθηκε η ισχύς στην είσοδο του πεδίου ροής με την ισχύ η οποία μετρήθηκε σε απόσταση 2.5 διαμέτρων κατάντι του ακροφυσίου, στη θέση η οποία παρουσιάζεται με τη διάσταση Η στο Σχήμα 3.3. Η ισχύς σε μία διατομή της ροής υπολογίζεται από την Εξίσωση (3.1):

$$N = \int_A \left( p + \frac{\rho \cdot u^2}{2} \right) \cdot u \cdot dA \quad (3.1)$$

Όπου,  $N$ , είναι η ισχύς [J/s],  $p$ , είναι η στατική πίεση [Pa],  $\rho$ , είναι η πυκνότητα του ρευστού [kg/s],  $u$ , είναι η ταχύτητα του ρευστού [m/s] και  $A$ , είναι το εμβαδόν της διατομής όπου μετρώνται τα μεγέθη [ $m^2$ ].

Στην περίπτωση διακριτοποίησης του πεδίου και προσομοίωσης της ροής με μέθοδο CFD όμως, οι τιμές των ροϊκών μεταβλητών είναι υπολογισμένες στα κελιά του πλέγματος, οπότε το ολοκλήρωμα της Εξίσωσης (3.1) μετατρέπεται σε άθροισμα και προκύπτει η Εξίσωση (3.2):

$$N = \sum_1^n \left( p_i + \frac{\rho_i \cdot u_i^2}{2} \right) \cdot u_i \cdot A_i \quad (3.2)$$

όπου  $i$  είναι τα κελιά στα οποία μετρώνται τα μεγέθη και  $n$  είναι ο ολικός αριθμός των κελιών στη διατομή. Να σημειωθεί εδώ πως σε κελιά του πλέγματος στα οποία συνυπάρχουν τα δύο ρευστά, η ταχύτητα και η πίεση μετρώνται συναρτήσει της τιμής του κλάσματος όγκου νερού-αέρα.

Ο υπολογισμός των απωλειών πραγματοποιήθηκε στο ενσωματωμένο στο ANSYS πρόγραμμα μετα-επεξεργασίας CFD-Post [2]. Εκτός των απωλειών ισχύος, αξιολογήθηκαν και άλλες ποσότητες οι οποίες προέκυψαν από κάθε προσομοίωση, όπως η στατική πίεση, η ταχύτητα, οι ποσότητες της τύρβης και τα κλάσματα όγκου.

## 3.5 Μελέτη Ανεξαρτησίας Πλέγματος

### 3.5.1 Εισαγωγή

Η ακρίβεια κάθε λύσης που προκύπτει από μία προσομοίωση με μεθόδους CFD εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητα του πλέγματος, δηλαδή από τον αριθμό των κελιών σε αυτό. Συνεπώς, για να θεωρηθεί μία λύση ακριβής, πρέπει να εξετάζεται για να διαπιστωθεί αν είναι ανεξάρτητη της ανάλυσης του πλέγματος. Σκοπός της μελέτης ανεξαρτησίας πλέγματος είναι να διαπιστωθεί αν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που προκύπτουν, οφείλονται στις οριακές συνθήκες και τα φαινόμενα ροής στο συγκεκριμένο πρόβλημα και όχι στην ανάλυση του πλέγματος.

Η συνήθης διαδικασία για την πραγματοποίηση μίας μελέτης ανεξαρτησίας πλέγματος είναι η εξής: Αρχικά δημιουργείται ένα πλέγμα για το πεδίο ροής, και πραγματοποιείται η προσομοίωση, έως ότου η λύση συγκλίνει. Η ανάλυση του πότε μία λύση θεωρείται ότι έχει συγκλίνει, θα παρουσιαστεί σε επόμενη υποενότητα. Στη συνέχεια δημιουργείται ένα πυκνότερο πλέγμα, το οποίο πρέπει να έχει τουλάχιστον 1.5 φορά περισσότερα κελιά από το αρχικό. Η πυκνωση πρέπει να πραγματοποιηθεί με δημιουργία νέου πλέγματος, έτσι ώστε να υπάρχουν μικρότερα κελιά σε όλο το πεδίο ροής. Για τον λόγο αυτό δεν συνιστάται η χρήση τοπικής πυκνωσης για την μελέτη της ανεξαρτησίας πλέγματος.

Αφού πραγματοποιηθεί εκ νέου η προσομοίωση, με τις ίδιες ρυθμίσεις του επιλύτη, και επιτευχθεί σύγκλιση της λύσης, συγκρίνονται οι ποσότητες που ενδιαφέρουν (για παράδειγμα η ταχύτητα ή η πίεση σε κάποιο σημείο του πεδίου). Αν διαπιστωθεί ότι οι δύο λύσεις είναι οι ίδιες (εντός κάποιας επιτρεπόμενης ανοχής), τότε το αρχικό πλέγμα είναι επαρκές για την εξαγωγή αποτελεσμάτων με ακρίβεια. Αλλιώς, το πλέγμα πυκνώνεται περαιτέρω, έως ότου εξαχθεί λύση ανεξάρτητη του πλέγματος. Σε κάθε περίπτωση, χρησιμοποιείται το μικρότερο σε αριθμό κελιών πλέγμα που δίνει λύση ανεξάρτητη του πλέγματος, για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικών πόρων.

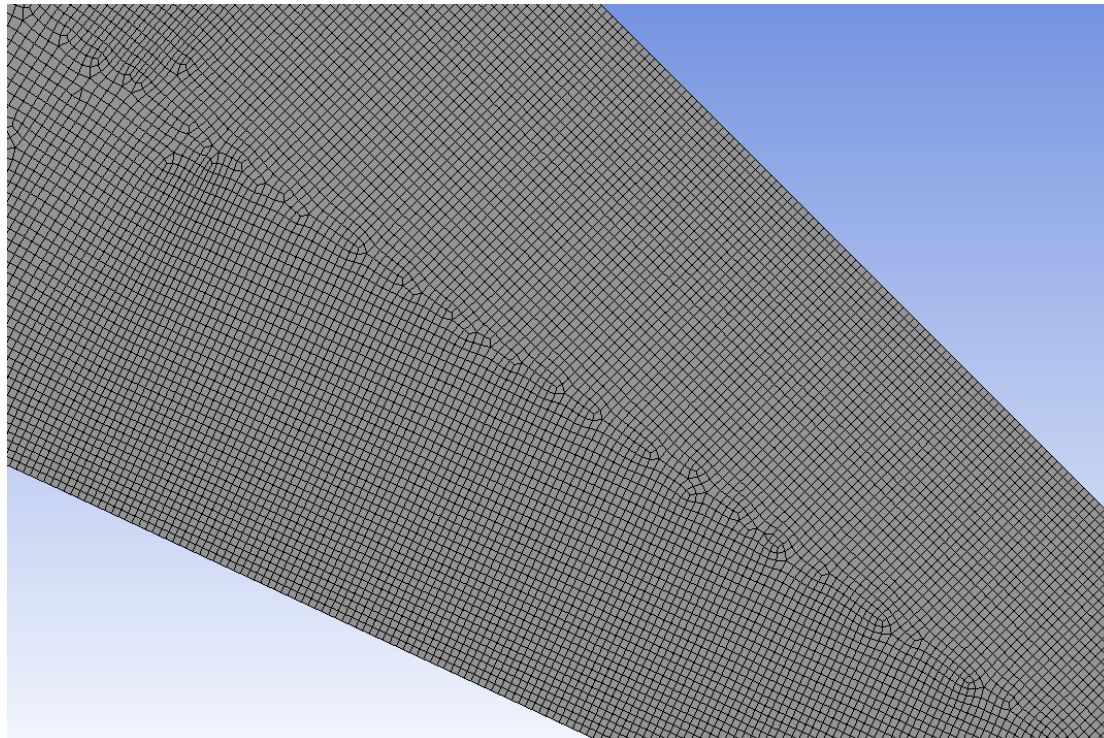
### 3.5.2 Εναλλακτικά Πλέγματα

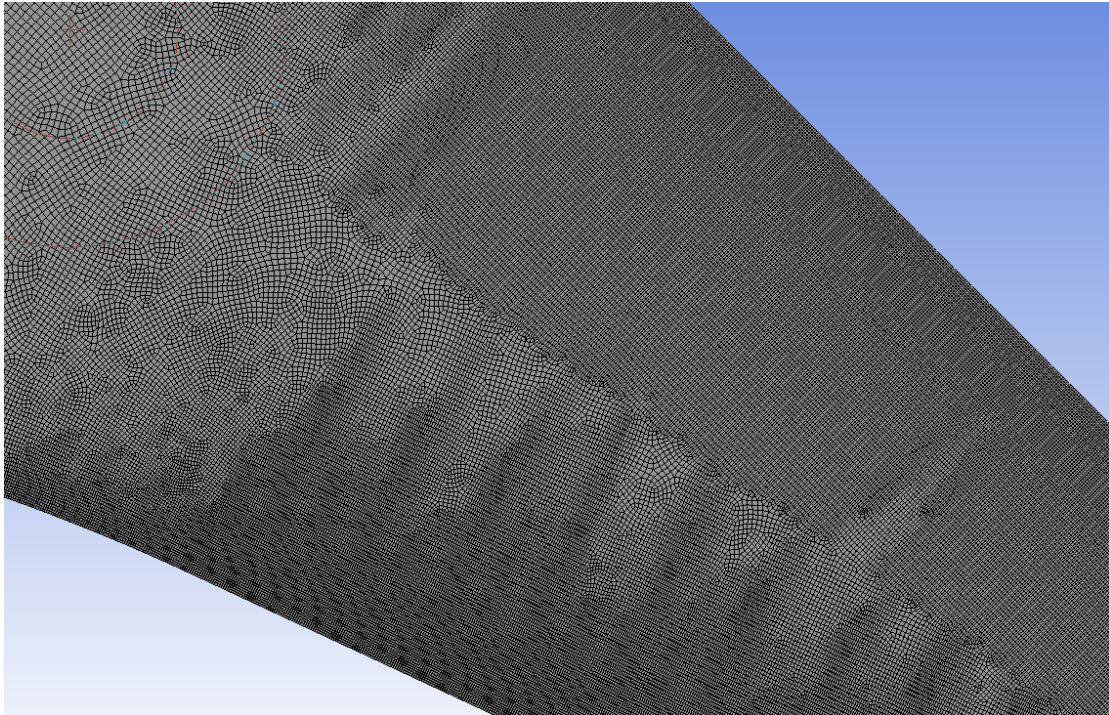
Τα πλέγματα τα οποία συγκρίθηκαν, κατασκευάστηκαν με τον ίδιο τρόπο που κατασκευάστηκε το πλέγμα το οποίο περιγράφηκε στην υποενότητα 3.1.2, και το οποίο διαπιστώθηκε ότι έδινε λύση ανεξάρτητη του πλέγματος. Κατασκευάστηκαν συνολικά 8 διαφορετικά πλέγματα, το καθένα με διπλάσιο αριθμό στοιχείων του αμέσως προηγούμενου. Όλα τα πλέγματα τα οποία κατασκευάστηκαν, είναι δομημένα, χρησιμοποιούν δηλαδή μόνο τετράπλευρα. Επίσης δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην επίτευξη των στόχων ποιότητας, δηλαδή το να βρίσκονται τα στατιστικά ποιότητας του πλέγματος εντός των ορίων τα οποία έχουν θεσπιστεί. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά του κάθε πλέγματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.

**Πίνακας 3.3:** Σύνοψη χαρακτηριστικών πλεγμάτων

A.A.	Αριθμός Κελιών (σε χιλιάδες)	Μέγιστη Ασυμμετρία	Μέγιστη Αναλογία Διαστάσεων	Ελάχιστη Ορθογώνια Ποιότητα
I	11k	0.65	3.97	0.61
II	24k	0.74	6.23	0.63
III	52k	0.67	8.36	0.58
IV	101k	0.78	10.63	0.52
V	219k	0.78	12.42	0.47
VI	482k	0.81	19.91	0.41
VII	1,093k	0.88	31.48	0.32
VIII	2,245k	0.93	46.3	0.29

Στα Σχήματα 3.12 και 3.13 παρουσιάζονται λεπτομέρειες από τα πλέγματα IV και VI αντίστοιχα, τα πλεγμάτων δηλαδή τα οποία είναι το αμέσως αραιότερο και το αμέσως πυκνότερο αντίστοιχα του τελικού. Η λεπτομέρεια αναπαριστά την περιοχή Β του πεδίου ροής, στην οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί αναμένεται η εμφάνιση των μεγαλύτερων κλίσεων πίεσης και ταχύτητας σε κατεύθυνση κάθετη στα τοιχώματα. Τα πλέγματα αυτά μπορούν να συγκριθούν με το αντίστοιχο του Σχήματος 3.9 για εποπτικούς λόγους.

**Σχήμα 3.12:** Λεπτομέρεια Εναλλακτικού Πλέγματος IV (Περιοχή Β)



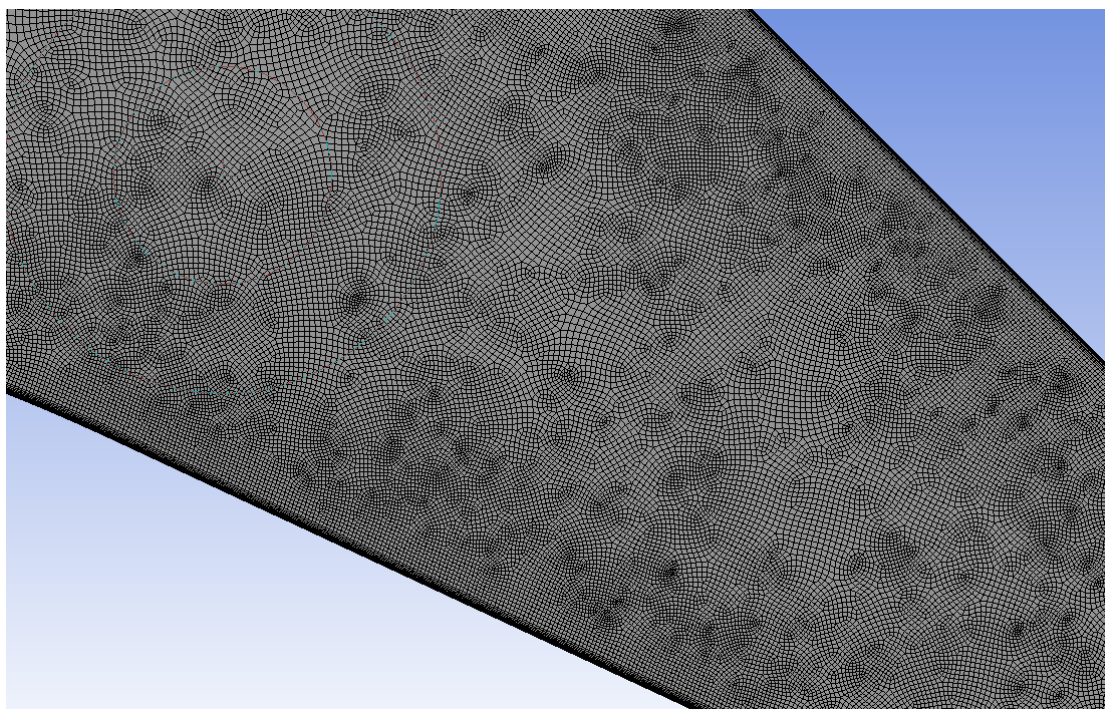
**Σχήμα 3.13:** Λεπτομέρεια Εναλλακτικού Πλέγματος VI (Περιοχή Β)

Τέλος, για λόγους σύγκρισης κατασκευάστηκε και ένα πλέγμα το οποίο είχε περίπου τον ίδιο αριθμό κελιών με το τελικό πλέγμα, αλλά στο οποίο ενσωματώθηκε αυτόματα πλέγμα κοντά στα τοιχώματα για την ανάλυση του οριακού στρώματος. Η κατασκευή του πραγματοποιήθηκε με την εντολή inflation στο ICEM-Meshing. Το ύψος πρώτου κελιού υπολογίστηκε βάσει της αδιάστατης απόστασης από τα τοιχώματα,  $y^+$ , μέσω της Εξίσωσης (2.62), με τη μέθοδο η οποία περιγράφηκε στην υποενότητα 2.7.12. Τα κύρια χαρακτηριστικά του πλέγματος αυτού παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.

**Πίνακας 3.4:** Σύνοψη χαρακτηριστικών πλεγμάτων με αυτόματη πύκνωση για το οριακό στρώμα

A.A.	Αριθμός Κελιών	Ύψος 1 <sup>ου</sup> Κελιού (mm)	Αριθμός Κελιών στο ΟΣ	Growth Rate	Μέγιστη Ασυμμετρία	Μέγιστη Αναλογία Διαστάσεων	Ελάχιστη Ορθογώνια Ποιότητα
IX	239k	0.005	8	1.15	0.88	43	0.29
X	402k	0.005	12	1.15	0.93	61	0.23

Ο όρος growth rate αφορά την διαδοχική αύξηση των κελιών κατά μήκος του οριακού στρώματος. Για παράδειγμα, στο πλέγμα IX, όπου το πρώτο κελί έχει ύψος 0.005mm, το δεύτερο κατά σειρά θα έχει ύψος 0.0055mm. Είναι φανερό από την τιμή στα χαρακτηριστικά της ποιότητας του πλέγματος, ότι βρίσκεται στο όριο των προδιαγραφών οι οποίες έχουν τεθεί ως αποδεκτές. Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζεται η ίδια λεπτομέρεια του πλέγματος IX στην περιοχή Β του πεδίου ροής η οποία παρουσιάστηκε και στα πλέγματα IV, V και VI. Παρατηρείται η έντονη τοπική πύκνωση στα στερεά όρια του πεδίου ροής, η οποία σε αντίθεση με τα προαναφερθέντα πλέγματα πραγματοποιήθηκε αυτόματα από το ICEM-Meshing.



**Σχήμα 3.14:** Λεπτομέρεια πλέγματος με αυτόματη πύκνωση στο οριακό στρώμα (περ. Β)

### 3.5.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Μελέτης Ανεξαρτησίας Πλέγματος

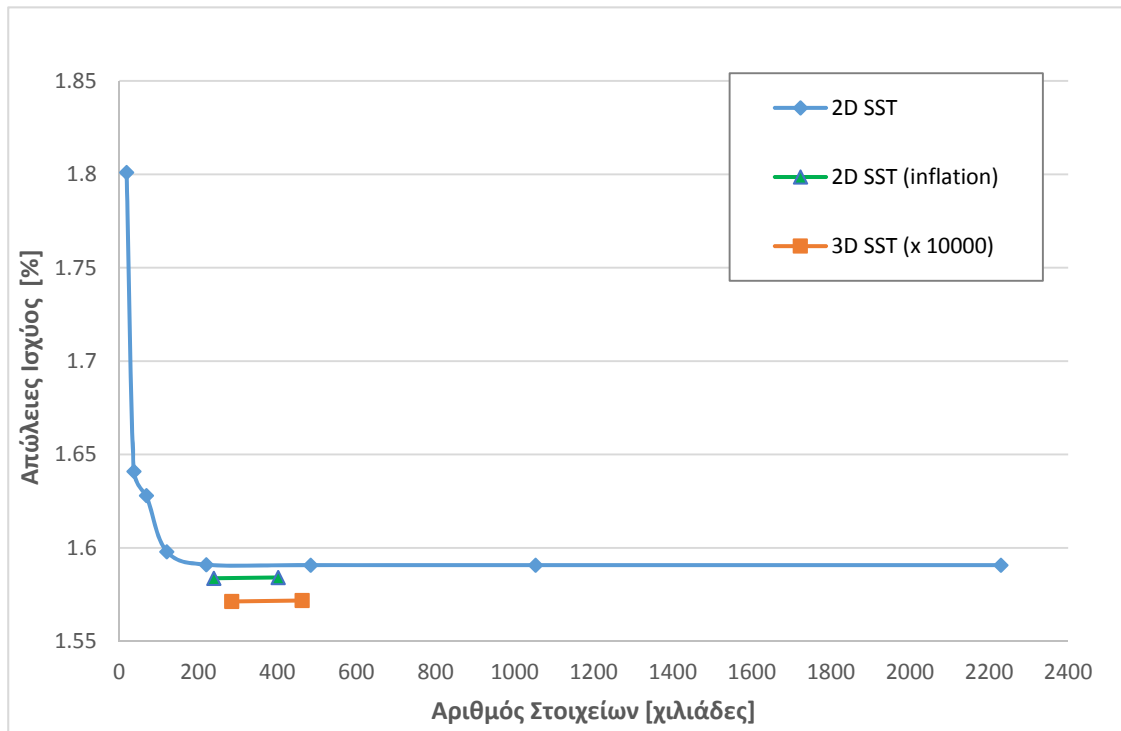
Αφού πραγματοποιήθηκαν κάποιες αρχικές προσομοιώσεις της συγκεκριμένης ροής, οι τιμές των υπολοίπων (residuals) ορίστηκαν για πραγματοποίηση επίλυσης διπλής ακρίβειας (double precision) στα  $10^{-7}$ . Διαπιστώθηκε ότι η λύση συνέκλινε, εντός κάποιων ορίων ανοχής, στις συγκεκριμένες τιμές ανεξάρτητα της πυκνότητας του πλέγματος ή του μοντέλου τύρβης το οποίο χρησιμοποιήθηκε. Οι βασικές ρυθμίσεις του επιλύτη οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5.

**Πίνακας 3.5:** Βασικά χαρακτηριστικά επιλύτη για την μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος

Επιλύτης:	FLUENT (2d με double precision)
Χρονική Επίλυση:	Μόνιμη (Steady State)
Κριτήρια Σύγκλισης-Υπόλοιπα:	1e-7
Μοντέλο Τύρβης:	SST
Μοντέλο Διφασικής Ροής:	VOF, πεπλεγμένο (Implicit)
Σύζευξη Πίεσης-Ταχύτητας:	Coupled (με το VOF)
Χωρική Διακριτοποίηση:	Σχήμα ανάντι δεύτερης τάξης (2 <sup>nd</sup> Upwind)
Πίεση Εισόδου:	150m ΣΥ
Άνοιγμα Βελόνης:	12mm



Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις CFD με τις άνωθι ρυθμίσεις του επιλύτη, για τα δέκα διαφορετικά πλέγματα τα οποία αναφέρθηκαν. Έπειτα μετρήθηκαν οι απώλειες ισχύος σε απόσταση 2.5 διαμέτρων από την έξοδο του ακροφυσίου και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.15. Η ακρίβεια της θεώρησης του προβλήματος ως διδιάστατο αξονοσυμμετρικό, διαπιστώθηκε με τη σύγκριση με την προσομοίωση της ροής σε τριδιάστατο πλέγμα. Για τον σκοπό αυτόν κατασκευάστηκαν δύο τριδιάστατα πλέγματα, μεγέθους περίπου 2.8 και 4.6 εκατομμυρίων κελιών το καθένα. Για την κατασκευή τους ακολουθήθηκαν οι κανόνες οι οποίοι περιγράφηκαν στην ενότητα 2.4.



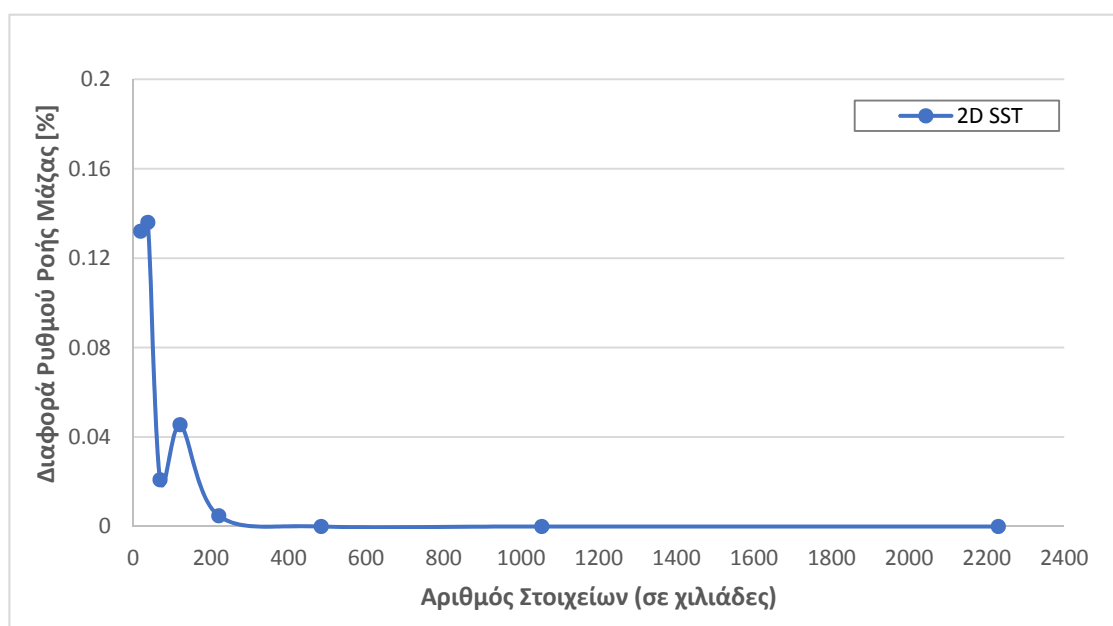
**Σχήμα 3.15:** Μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος (μέτρηση απωλειών ισχύος)

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της μελέτης ανεξαρτησίας πλέγματος, η οποία παρουσιάζεται με τη μορφή διαγράμματος στο Σχήμα 3.15, συνάγεται το συμπέρασμα ότι με το πλέγμα V, το οποίο αριθμεί περίπου 200,000 κελιά, είναι δυνατή η εξαγωγή αποτελεσμάτων με ακρίβεια, εξασφαλίζοντας τη πραγματοποίηση προσομοιώσεων με συνέπεια και επαναληψιμότητα. Τα αποτελέσματα των πλεγμάτων με αριθμό κελιών μεγαλύτερο απ' ό,τι του πλέγματος V, δεν παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακρίβεια, επομένως η χρήση τους καθίσταται ασύμφορη λόγω του μεγάλου υπολογιστικού κόστους που συνεπάγονται.

Άλλωστε συγκρίνοντας την πρόβλεψη των απωλειών ισχύος του πλέγματος V με τις αντίστοιχες του πλέγματος με αυτόματη πύκνωση στο οριακό στρώμα, IX, συμπεραίνεται ότι δεν είναι απαραίτητη η χρήση του αυτοματοποιημένου αυτού εργαλείου. Αντίθετα η τοποθέτηση του απαιτούμενου πλέγματος από τον χρήστη είναι επαρκής και σαφώς οικονομικότερη σε υπολογιστικούς πόρους. Τέλος, η σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των τριδιάστατων πλεγμάτων έδειξε ότι η προσομοίωση με την παραδοχή διδιάστατης αξονοσυμμετρικής ροής παρουσίασε αποτελέσματα σχεδόν ταυτόσημα. Η διαφορά η οποία προέκυψε οφείλεται στην διαφορετική πυκνότητα των δύο πλεγμάτων. Ωστόσο, το τριδιάστατο πλέγμα, για να μπορέσει να αναλύσει επακριβώς τη ροή, με πυκνότητα πλέγματος αντίστοιχη του

διδιάστατου, απαιτεί πολύ μεγαλύτερο αριθμό κελιών, καθιστώντας την κατασκευή του και την επακόλουθη προσομοίωση, ανέφικτη λόγω εξαιρετικά αυξημένου υπολογιστικού κόστους. Άλλωστε, οι απώλειες προκύπτουν μικρότερες στην τριδιάστατη προσομοίωση ενδεχομένως λόγω της αδυναμίας ακριβούς καταγραφής της συστολής της διαμέτρου της δέσμης με τη διδιάστατη προσομοίωση. Συμπερασματικά, επιβεβαιώθηκε η δυνατότητα χρήσης της διδιάστατης αξονοσυμμετρικής ροής δίχως τον κίνδυνο μειωμένης ακρίβειας του αποτελέσματος της επίλυσης.

Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζεται η διαφορά στον ρυθμό ροής της μάζας διαμέσου του ακροφυσίου, με βάση την αναφορά του ισολογισμού της μάζας, η οποία προκύπτει από το FLUENT στο τέλος κάθε προσομοίωσης. Η τιμή του ρυθμού ροής της μάζας (ή παροχή μάζας) είναι ιδιαίτερα σημαντική στην παρούσα μελέτη, μιας και είναι μία από τις παραμέτρους οι οποίες επηρεάζουν την διαδικασία βελτιστοποίησης.



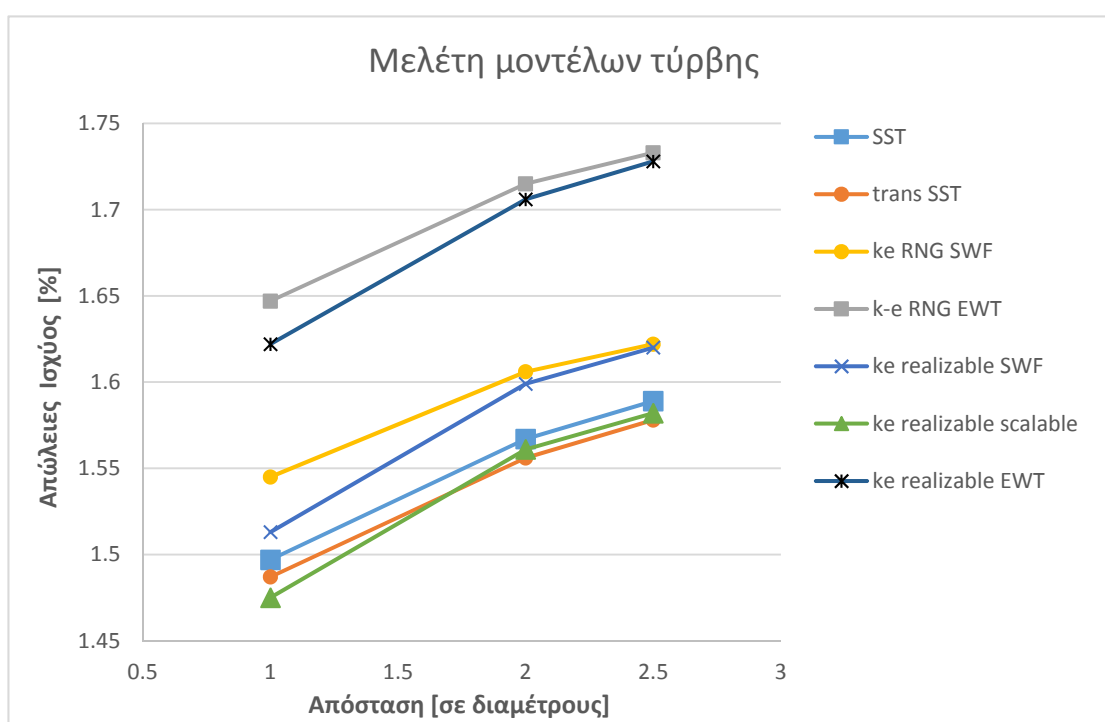
**Σχήμα 3.16:** Μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος (μέτρηση παροχής μάζας)

Παρατηρήθηκαν ιδιαίτερα ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά την παράμετρο αυτή, ακόμα και στην περίπτωση πολύ αραιών πλεγμάτων, κάτι το οποίο είναι λογικό μιας και η τιμή αυτή προκύπτει από το άνοιγμα της βελόνης και άρα τη γεωμετρία του ακροφυσίου και όχι την ίδια τη ροή. Να σημειωθεί ότι για την ευκολότερη ανάγνωση του διαγράμματος, οι τιμές της παροχής που προκύπτουν από κάθε πλέγμα έχουν αναχθεί στην σχετική διαφορά με την παροχή του πυκνότερου πλέγματος, VIII. Παρατηρείται ότι ήδη από το πλέγμα V, το αποτέλεσμα για την παροχή μάζας είναι πρακτικά ίδιο με τα πυκνότερα πλέγματα.

Συμπερασματικά, η χρήση του πλέγματος V, το οποίο περιέχει περίπου 200,000 κελιά, ενδείκνυται για τον υπολογισμό των απωλειών ισχύος του ακροφυσίου του υδροτροβίλου Pelton. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το συγκεκριμένο πλέγμα, τόσο με πυκνότερα δομημένα πλέγματα με αυτόματη πύκνωση για την ανάλυση του οριακού στρώματος, όσο και με τριδιάστατα πλέγματα για την ίδια γεωμετρία, κατέδειξαν την δυνατότητα του να προβλέπει ακριβή αποτελέσματα, σε συνδυασμό με την εξοικονόμηση πολύτιμων υπολογιστικών πόρων.

## 3.5.4 Διερεύνηση της Επίδρασης των Μοντέλων Τύρβης στη Λύση

Αφού ολοκληρώθηκε η μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος με την εύρεση του τελικού πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε στις μετέπειτα προσομοιώσεις, πραγματοποιήθηκε μία διερεύνηση της επίδρασης που έχει το εφαρμοζόμενο μοντέλο τύρβης στη λύση. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [3, 56], τα μοντέλα τύρβης τα οποία ενδείκνυνται για την αριθμητική διερεύνηση φαινομένων διφασικής ροής ελεύθερης επιφάνειας είναι το k-ε realizable και το k-ω SST. Ειδικά το πρώτο, θεωρείται ιδανικό και για την πρόβλεψη της εξέλιξης επίπεδων και κυκλικών δεσμών. Αυτό εξακριβώθηκε με την πραγματοποίηση της διερεύνησης της επίδρασης την οποία έχει η επιλογή του μοντέλου τύρβης στην λύση. Στο Σχήμα 3.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού των απωλειών ισχύος σε διατομή απόστασης 2.5 διαμέτρων κατάντι της εξόδου του ακροφυσίου.



Σχήμα 3.17: Διερεύνηση μοντέλων τύρβης

Από τα αποτελέσματα συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα μοντέλα k-ε realizable και το SST, όντως παρέχουν συνέπεια και ακρίβεια στη λύση. Οι τιμές των υδραυλικών απωλειών, οι οποίες προήλθαν από τις προσομοιώσεις με τα δύο αυτά μοντέλα έχουν μικρή διαφορά μεταξύ τους. Συνεπώς, αποδείχτηκε πως αποτελούν τις ενδεδειγμένες επιλογές για την προσομοίωση με ακρίβεια των διφασικών ροών δεσμών ελεύθερης επιφάνειας, όπως προτείνει και η βιβλιογραφία. Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε η χρήση και των δύο μοντέλων στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Ουσιαστικά δηλαδή θα πραγματοποιηθούν δύο σύνολα προσομοιώσεων, ένα για το κάθε μοντέλο. Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί αν τα δύο μοντέλα θα δώσουν την ίδια βέλτιστη λύση. Παρατηρείται ότι ενώ τα δύο αυτά μοντέλα τύρβης δεν είχαν τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα στην μελέτη η οποία παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.17, εντούτοις, λόγω του γεγονότος ότι φαίνεται να έχουν την ίδια τάση στον υπολογισμό των απωλειών, αναμένεται να προκύψουν οι ίδιες βέλτιστες λύσεις.

### 3.6 Παρουσίαση του Τελικού Υπολογιστικού Μοντέλου

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί το τελικό υπολογιστικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων της διφασικής ροής στο ακροφύσιο. Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις είναι το ANSYS-FLUENT, το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων για την επίλυση των εξισώσεων ροής. Περαιτέρω θεωρητικό υπόβαθρο αναφορικά με τον επιλύτη, αλλά και την εφαρμογή των μεθόδων επίλυσης μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία [3, 4, 5, 59].

#### 3.6.1 Συνθήκες Ροής

Οι συνθήκες ροής οι οποίες εφαρμόστηκαν στις προσομοιώσεις οι οποίες ακολουθούν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6:

**Πίνακας 3.6:** Ιδιότητες ροής των προσομοιώσεων CFD

Πυκνότητα νερού:	998.2 [ $kg/m^3$ ]
Συνεκτικότητα νερού:	0.001003 [ $Ns/m^2$ ]
Πυκνότητα αέρα:	1.225 [ $kg/m^3$ ]
Συνεκτικότητα αέρα:	1.7894E-5 [ $Ns/m^2$ ]
Ατμοσφαιρική πίεση:	101.325 [ $MPa$ ]

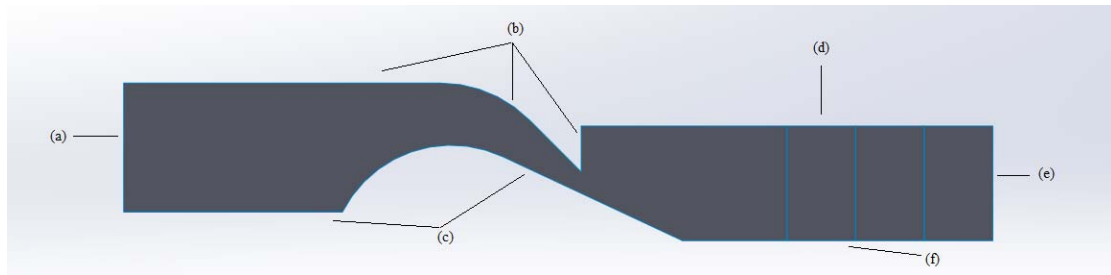
Να σημειωθεί εδώ ότι η ατμοσφαιρική πίεση καθορίζεται στο FLUENT ως πίεση λειτουργίας (operating pressure), το οποίο σημαίνει ότι οποιαδήποτε πίεση εφαρμοστεί στα όρια, προκύπτει ως υπερπίεση ή υποπίεση, ανάλογα με το αν είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη της ατμοσφαιρικής αντίστοιχα. Η προαναφερθείσα σύμβαση εφαρμόζεται στο FLUENT έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα αριθμητικά σφάλματα κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης.

#### 3.6.2 Οριακές Συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες οι οποίες εφαρμόστηκαν στο πεδίο ροής παρουσιάζονται με τη μορφή του Πίνακα 3.7. Επίσης, στο Σχήμα 3.18 απεικονίζεται το πεδίο ροής καθώς και οι πλευρές του στις οποίες εφαρμόστηκαν οι οριακές συνθήκες.

**Πίνακας 3.7:** Καθορισμός οριακών συνθηκών προβλήματος

Σύνορο	Οριακή Συνθήκη	Φυσική Σημασία
(a)	Είσοδος πίεσης (pressure inlet)	Δέσμη Νερού
(b)	Τοίχωμα-βελόνη (wall)	Τοίχωμα-μη ολίσθηση
(c)	Τοίχωμα-ακροφύσιο (nozzle)	Τοίχωμα-μη ολίσθηση
(d)	Έξοδος πίεσης (pressure outlet)	Ατμόσφαιρα
(e)	Έξοδος πίεσης (pressure outlet)	Νερό εξέρχεται στην ατμόσφαιρα
(f)	Άξονας συμμετρίας (axis)	Συμμετρία



**Σχήμα 3.18:** Σύνορα του πεδίου ροής

### 3.6.2.1 Τοιχώματα

Στο πεδίο ροής υπάρχουν δύο στερεά όρια, συγκεκριμένα το ακροφύσιο και η βελόνη, τα οποία συμβολίζονται με (b) και (c) αντίστοιχα στο Σχήμα 3.18. Με τη θεώρηση αδιαπερατότητας και συνθηκών μη ολίσθησης στα τοιχώματα, τόσο η μέση ροή, όσο και οι διακυμάνσεις της ταχύτητας αποκτούν μηδενική ταχύτητα στα τοιχώματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης ώστε να συνυπολογιστεί η τραχύτητα των τοιχωμάτων στον υπολογισμό, κάτι το οποίο προϋποθέτει επίλυση του οριακού στρώματος, δηλαδή κατά βάση την χρήση του μοντέλου τύρβης SST και τη κατασκευή εξαιρετικά πυκνού πλέγματος κοντά στα στερεά όρια.

### 3.6.2.2 Συνθήκες Εισόδου

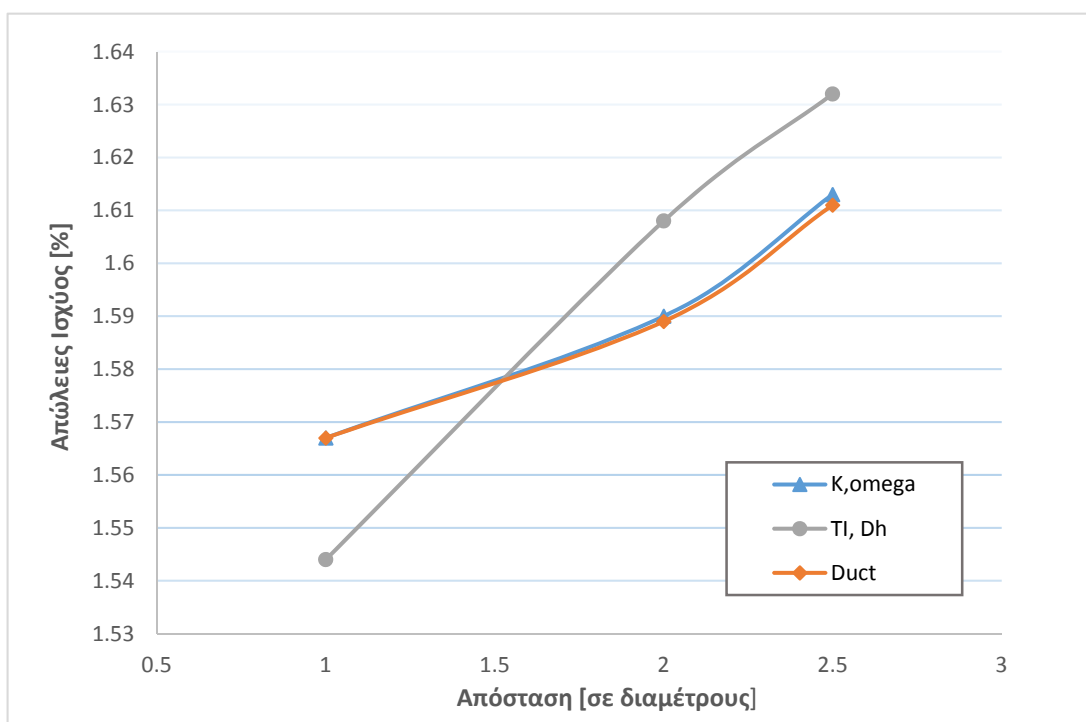
Στην είσοδο εφαρμόστηκε η οριακή συνθήκη ολικής πίεσης, η οποία σε περίπτωση υδροστροβίλου δράσης είναι ίση με το διαθέσιμο ύψος πτώσης. Διαθέτει δηλαδή ιδιαίτερη φυσική σημασία στην υπό εξέταση ροή. Η ολική πίεση η οποία εφαρμόζεται σε κάθε προσομοίωση αφορά την πίεση άνω της ατμοσφαιρικής, όπως αναλύθηκε στις υποενότητες 2.6 και 3.6.1, ενώ ορίζεται σε κατεύθυνση κάθετη στο σύνορο. Κατά τον καθορισμό των οριακών συνθηκών εισόδου, λόγω της χρήσης του μοντέλου τύρβης, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των ποσοτήτων τύρβης. Στην υποενότητα 2.7.13 περιγράφηκαν οι διαφορετικοί μέθοδοι με τους οποίους δύναται να πραγματοποιηθεί αυτό.

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με τις τρεις πρώτες μεθόδους οι οποίες παρουσιάζονται στην υποενότητα 2.7.13. Συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση επιλέχθηκε η ρητή είσοδος των ποσοτήτων αυτών, καθορίζοντας μία ομοιόμορφη τιμή τους στο όριο. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, προηγήθηκε μία γρήγορη προσομοίωση σε ένα πλέγμα μεγέθους 10,000 κελιών, στην ίδια γεωμετρία. Όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 3.4.3, τα πλέγματα τα οποία συγκρίθηκαν, παρουσίασαν μεγάλη ακρίβεια στον υπολογισμό της παροχής μάζας. Συγκεκριμένα, το αραιότερο πλέγμα, I, υπερεκτίμησε τη συγκεκριμένη τιμή μόλις κατά 0.12% σε σχέση με το κατά 200% πυκνότερό του, VIII. Συνεπώς, με την προσομοίωση της ροής στο αραιό πλέγμα, η οποία συνέκλινε σε ελάχιστες επαναλήψεις, βρέθηκε η ροή μάζας διαμέσου του ακροφυσίου, με πολύ μικρή απόκλιση. Έπειτα, ήταν δυνατόν να υπολογιστεί ο αριθμός Reynolds, και στη συνέχεια από τις Εξισώσεις (2.63) με (2.66) οι ενδιαφερόμενες ποσότητες, δηλαδή το  $k$ , το  $\epsilon$  και το  $\omega$ , κατά περίπτωση. Οι τιμές αυτές τροφοδοτήθηκαν στην είσοδο του ακροφυσίου και πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση. Τα αποτελέσματα για την προσομοίωση στο πλέγμα V της μελέτης ανεξαρτησίας πλέγματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.19, με την μπλε καμπύλη.

Είναι φανερό ότι λόγω των παραπάνω εξισώσεων, η μέθοδοι προσδιορισμού της τυρβώδους έντασης και του χαρακτηριστικού μήκους ή της υδραυλικής διαμέτρου, μέθοδοι II και IV

αντίστοιχα της υποενότητας 2.7.13, ταυτίζονται στην περίπτωση ακριβούς εύρεσης της παροχής μάζας. Πραγματοποιήθηκε επίσης προσομοίωση όπου η εφαρμογή των οριακών συνθηκών τύρβης έγινε με την μέθοδο IV, δηλαδή με τον προσδιορισμό της τυρβώδους έντασης και της υδραυλικής διαμέτρου. Στην περίπτωση αυτή όμως χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική σχέση ότι η τυρβώδης ένταση στις ροές σε αγωγούς είναι ίση με 5% [3, 13], ενώ η υδραυλική διάμετρος βρέθηκε βάσει των διαστάσεων του ακροφυσίου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπερτίθενται στο Σχήμα 3.19 με γκρι χρώμα.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε μία ακόμα προσομοίωση, στην οποία οι ποσότητες της τύρβης προσδιορίστηκαν ρητά, μέσω μίας κατανομής. Η κατανομή αυτή προήλθε από την προσομοίωση ενός ευθύ αγωγού ανάντι του ακροφυσίου, διαμέτρου ίδιας με αυτό και μήκους 300mm. Η κατασκευή ομοιόμορφου πλέγματος καθώς και η προσομοίωση σε μία τόσο απλή γεωμετρία ήταν ιδιαίτερα εύκολη και μη απαιτητική από υπολογιστική άποψη. Στον αγωγό εφαρμόστηκε η ίδια ολική πίεση εισόδου με το ακροφύσιο, ενώ οι τυρβώδεις ποσότητες προσδιορίστηκαν από την παραπάνω εμπειρική μέθοδο. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής παρουσιάζονται επίσης στο Σχήμα 3.19, με πορτοκαλί χρώμα.



**Σχήμα 3.19:** Σύγκριση μεθόδων προσδιορισμού ποσοτήτων τύρβης για την είσοδο

Από την μελέτη του Σχήματος 3.19, προκύπτουν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η χρήση της εμπειρικής μεθόδου προσδιορισμού των ποσοτήτων τύρβης δεν ήταν ακριβής. Αυτό συμβαίνει λόγω του μικρού μήκους του ακροφυσίου, εξαιτίας του οποίου, οι μη ακριβείς οριακές συνθήκες εισόδου της τύρβης, οι οποίες κανονικά δεν επηρεάζουν πολύ την λύση, δεν αποσβένονται πλήρως, οδηγώντας σε σφάλμα της τάξης του 0.045%. Αντίθετα, στην περίπτωση της χρήσης του αγωγού ανάντι του ακροφυσίου, λόγω του μεγάλου μήκους του, οι ίδιες (μη ακριβείς) οριακές συνθήκες εισόδου, έχουν στο τέλος του αγωγού αποσβεστεί πλήρως, με συνέπεια η κατανομή στην είσοδο

του ακροφυσίου να είναι ακριβής. Τέλος, από την προαναφερθείσα σύγκριση, συνάγεται το συμπέρασμα, ότι η χρήση του αραιότερου πλέγματος για έναν πρώτο προσδιορισμό της παροχής μάζας, της οποίας η τιμή θα διορθωθεί στην προσομοίωση του πυκνού πλέγματος, και των τυρβωδών ποσοτήτων εγγυάται ακριβή αποτελέσματα, με ελάχιστο υπολογιστικό κόστος.

### 3.6.2.3 Συνθήκες Εξόδου

Στις πλευρές (d) και (e) του πεδίου ροής βρίσκονται τα όρια εξόδου του. Λόγω της εφαρμογής συνθήκης πίεσης στην είσοδο, ήταν υποχρεωτική η εφαρμογή συνθήκης πίεσης εξόδου σε αυτές. Έτσι ορίστηκε η στατική πίεση εξόδου, η οποία είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Επίσης, ορίστηκαν ποσότητες τύρβης, για να εφαρμοστούν σε περίπτωση αντιστροφής της ροής (backflow), και οι οποίες χρησιμοποιούνται ως συνθήκες εισόδου σε κατεύθυνση κάθετη στο όριο.

### 3.6.2.4 Άξονας Συμμετρίας

Το όριο το οποίο βρίσκεται στην πλευρά (f) του πεδίου ροής ορίστηκε ως άξονας συμμετρίας του προβλήματος, λόγω της ειδικής μορφής του προβλήματος. Ο άξονας αυτός είναι απαραίτητο να συμπίπτει με τον άξονα  $y=0$ . Να σημειωθεί εδώ, ότι η εγκυρότητα της υιοθέτησης της επιλογής αξονοσυμμετρικής ροής για την επίλυση του προβλήματος διαπιστώθηκε κατά τη μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος.

### 3.6.2.5 Αρχικοποίηση

Για την αρχικοποίηση της προσομοίωσης ροής, επιλέχθηκε η μέθοδος υβριδικής αρχικοποίησης (hybrid initialization), στην οποία ο επιλύτης λύνει την εξίσωση Laplace για την παραγωγή ενός πεδίου ταχύτητας το οποίο συμμορφώνεται με την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας, και ένα πεδίο πίεσης το οποίο συνδέει ομαλά τις υψηλές και χαμηλές τιμές πίεσης στο υπολογιστικό πεδίο ροής. Οι υπόλοιπες μεταβλητές, δηλαδή της τύρβης και του κλάσματος όγκου νερού-αέρα, θα υπολογιστούν με βάση μέσες τιμές του πεδίου.

Να σημειωθεί επίσης ότι όλο το πεδίο ροής αρχικοποιείται με αέρα εντός του, με το νερό να εισέρχεται μέσω της εισόδου (a) κατά την έναρξη των επαναλήψεων. Με τη μέθοδο αυτή, επιτυγχάνεται αυξημένη ευστάθεια, με κόστος μία μικρή αύξηση του χρόνου που απαιτείται για τη σύγκλιση.

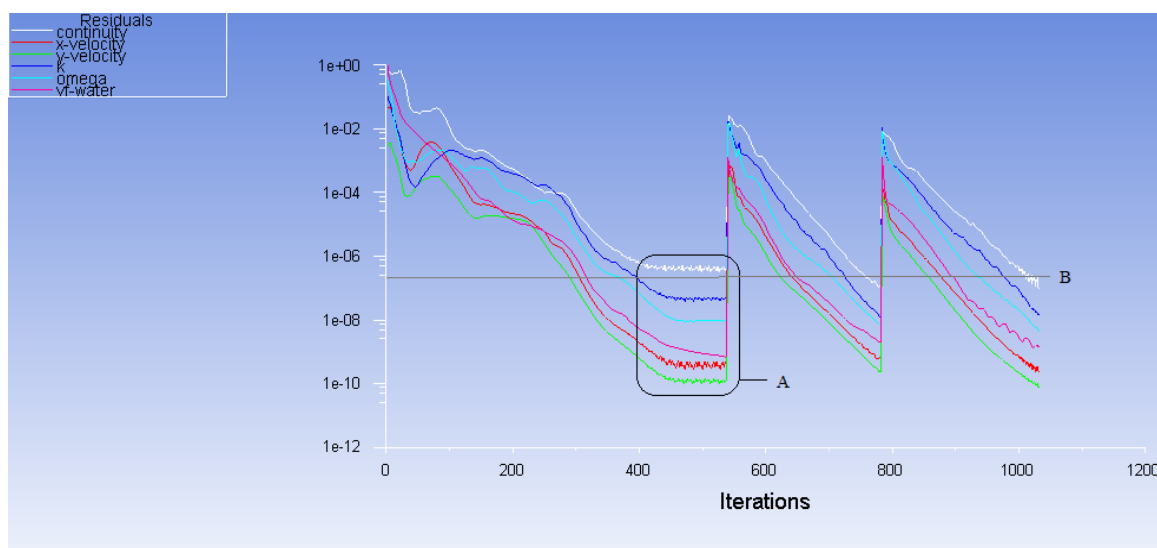
## 3.6.3 Σύγκλιση

Μετά την εφαρμογή των οριακών συνθηκών, ο επιλύτης μπορεί να ξεκινήσει την επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού των εξισώσεων που διέπουν τη ροή σε κάθε κόμβο στο εσωτερικό του πλέγματος. Σκοπός της επαναληπτικής διαδικασίας είναι η προοδευτική ελάττωση των υπολοίπων (residuals) των εξισώσεων έως ότου το αποτέλεσμα συγκλίνει (convergence) στη λύση. Η διαδικασία προοδευτικής σύγκλισης μπορεί να παρακολουθηθεί με την εξέταση των τιμών των υπολοίπων. Μεταξύ δύο επαναλήψεων, τα υπόλοιπα εκφράζουν την σχετική αλλαγή στις παραμέτρους της ροής, οι οποίες προστίθενται στη λύση μέσω των εξισώσεων ροής και οι οποίες για το υπόψιν πρόβλημα είναι οι εξής:

- I. Διατήρηση της μάζας
- II. Διατήρηση της ορμής στις τρεις διαστάσεις

- III. Τυρβώδης κινητική ενέργεια,  $k$
- IV. Ρυθμός απόσβεσης της τυρβώδους ενέργειας,  $\epsilon$  και τυρβώδης συχνότητα,  $\omega$
- V. Διατήρηση του κλάσματος όγκου νερού-αέρα

Σε γενικές γραμμές, και για μία επίλυση μόνιμης ροής, η λύση θεωρείται ότι έχει συγκλίνει όταν: α) τα υπόλοιπα έχουν ικανοποιήσει κάποιο συγκεκριμένο όριο ανοχής, το οποίο συνήθως είναι της τάξης του  $10^{-7}$ , β) οι εξεταζόμενες παράμετροι δεν μεταβάλλονται πια και έχουν φτάσει σε μία κατάσταση ισορροπίας και γ) το πεδίο ροής παρουσιάζει ανισορροπία στις εξισώσεις διατήρησης, όπως για παράδειγμα της ορμής ή της ροής μάζας, μικρότερη του 1%. Στην υπόψιν περίπτωση, έπειτα από κάθε προσομοίωση εξετάστηκε η ικανοποίηση ενός ορίου ανοχής της τάξης του  $10^{-7}$  για τα υπόλοιπα των μεταβλητών, όπως επίσης και η ικανοποίηση της διατήρησης παροχής μάζας, με την απαίτηση η διαφορά στη ροή μάζας μεταξύ εισόδου και εξόδου να μην ξεπερνά το 1% της μικρότερης ροής διαμέσου του πεδίου, η οποία συμβαίνει στο σύνορο (d) του Σχήματος 3.18. Τέλος, παρακολουθούνταν ο σταθμισμένος μέσος όρος της ολικής πίεσης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για την έγκαιρη αναγνώριση τυχόν προβλημάτων σε περίπτωση που δεν έφτανε σε μία μόνιμη κατάσταση. Στο Σχήμα 3.20 παρουσιάζεται ενδεικτικά το γράφημα σύγκλισης μόνιμης επίλυσης της προσομοίωσης του πλέγματος V της μελέτης ανεξαρτησίας πλέγματος.



**Σχήμα 3.20:** Γράφημα παρακολούθησης σύγκλισης προσομοίωσης μόνιμης επίλυσης

Από την εξέταση του Σχήματος 3.20 προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά, στην επισημασμένη περιοχή (A) παρατηρείται ότι η λύση έχει συγκλίνει, αλλά δεν έχει ικανοποιήσει το όριο ανοχής του  $10^{-7}$ , παρουσιασμένο με την γκρι γραμμή (B), και δείχνει να ταλαντώνεται με ένα πολύ μικρό εύρος ταλάντωσης. Στην περίπτωση αυτή, η λύση έχει όντως συγκλίνει και θεωρητικά δεν απαιτούνταν άλλες επαναλήψεις, έχοντας ικανοποιήσει ανοχή τόσο κοντινή στο θεσπισμένο όριο. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν δύο τοπικές πυκνώσεις του πλέγματος, μέχρι η λύση να συγκλίνει στο σημείο (B). Στην πραγματικότητα, όταν ικανοποιούνται τα κριτήρια σύγκλισης, αλλά τα υπόλοιπα συνεχίζουν να μειώνονται, ενδέχεται η λύση να μην έχει συγκλίνει ακόμα. Το γεγονός όμως ότι στη συνέχεια ελέγχθηκε ο ισολογισμός μάζας καθώς και ότι η παράμετρος παρακολούθησης, δηλαδή ο σταθμισμένος μέσος όρος της ολικής πίεσης, έχει πλέον σταθεροποιηθεί, εγγυώνται την σύγκλιση της λύσης του προβλήματος. Αντίθετα, κατά την μη



μόνιμη επίλυση ενός προβλήματος, εξ ορισμού δεν επιτυγχάνεται σύγκλιση, αλλά τα υπόλοιπα ελαττώνονται προοδευτικά για κάθε χρονικό βήμα. Στοιχεία του επεξεργαστή ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική προσομοίωση, καθώς και τον απαιτούμενο χρόνο που απαιτήθηκε για την επίτευξη σύγκλισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.8.

### 3.6.4 Ρυθμίσεις Επιλύτη

Έπειτα από τη διενέργεια πολλών δοκιμαστικών προσομοιώσεων και την επακόλουθη σύγκριση των διαφόρων επιλογών του FLUENT, προέκυψε το τελικό υπολογιστικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις υπόλοιπες προσομοιώσεις της μελέτης βελτιστοποίησης. Αρχικά, να αναφερθεί ότι πραγματοποιήθηκε η παραδοχή εξέτασης της ροής ως μόνιμης. Τα φαινόμενα τα οποία απαρτίζουν τη συγκεκριμένη ροή, όπως η τύρβη και η εξέλιξη της διφασικής δέσμης, είναι από τη φύση τους μη μόνιμα. Εντούτοις, είναι δυνατή η αντιμετώπιση του προβλήματος ως μόνιμου στην περίπτωση ροών όπου ενδιαφέρει η λύση μόνιμης κατάστασης. Το μοντέλο VOF στο ANSYS-FLUENT γενικά χρησιμοποιείται για την επίλυση μη μόνιμων προβλημάτων ροής, όπου η λύση εξαρτάται από τον χρόνο. Στην περίπτωση προβλημάτων ροής όπου ενδιαφέρει μόνο η λύση μόνιμης κατάστασης, είναι δυνατό να εκτελεστεί υπολογισμός μόνιμης κατάστασης. Στην περίπτωση αυτή αμελούνται οι μη μόνιμοι όροι στις εξισώσεις, οι οποίες και απλοποιούνται. Ο υπολογισμός VOF μόνιμης κατάστασης όμως έχει νόημα, μόνο εάν η λύση είναι ανεξάρτητη από τις αρχικές συνθήκες καθώς και αν οι επιμέρους φάσεις εισέρχονται στο πεδίο από σαφώς διαχωρισμένα όρια. Στην υπό εξέταση περίπτωση οι δύο αυτές προϋποθέσεις ικανοποιούνται, ενώ επίσης δεν υπάρχουν κινητά μέρη στη διάταξη, δικαιολογώντας την επιλογή υπολογισμού μόνιμης κατάστασης, η οποία θα εξοικονομήσει πολύτιμους υπολογιστικούς πόρους κατά τον μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων οι οποίες απαιτούνται για την μελέτη βελτιστοποίησης. Κατά την μη μόνιμη επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος απαιτούνται πολλαπλάσιοι πόροι τόσο σε χρόνο όσο και σε υπολογιστική μνήμη. Άλλωστε, αυτό το οποίο έχει σημασία στη συγκεκριμένη μελέτη είναι η σύγκριση μεταξύ των μεγεθών των διαφορετικών γεωμετριών, δηλαδή η γενικότερη τάση, και όχι τα απόλυτα μεγέθη.

Αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση υπολογισμών μόνιμης κατάστασης, κατά τη χρήση πεπλεγμένου αλγορίθμου βασισμένου στην πίεση, όπως στην υπόψιν ροή, υπάρχει η δυνατότητα επίλυσης της ροής με μία μέθοδο ψευδο-μεταβατική (pseudo-transient). Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται μία μέθοδος πεπλεγμένης υπο-χαλάρωσης, η οποία ελέγχεται μέσω ενός ψευδο-χρονικού βήματος. Έτσι, συνδυάζονται τα πλεονεκτήματα των μόνιμων και μη μόνιμων μεθόδων επίλυσης.

Όσον αφορά τον αλγόριθμο σύζευξης πίεσης-ταχύτητας, επιλέχθηκε ο συζευγμένος, με ταυτόχρονη σύζευξη του κλάσματος όγκου νερού-αέρα (coupled with VOF). Συγκρινόμενος με τον SIMPLE, παρουσίασαν ταυτόσημα αποτελέσματα, με τη διαφορά ότι ο συζευγμένος αλγόριθμος ήταν πολύ ταχύτερος και πιο ευσταθής, ενώ προτείνεται και στη βιβλιογραφία για την περίπτωση μόνιμης επίλυσης της ροής με πεπλεγμένη διατύπωση του VOF [3]. Επίσης να σημειωθεί ότι πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις τόσο με τη χρήση του μοντέλου SST, όσο και του k-ε Realizable για λόγους συγκριτικούς. Οι βασικές τελικές ρυθμίσεις του επιλύτη οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις της μελέτης βελτιστοποίησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.8. Οι ρυθμίσεις αυτές επιλέχθηκαν βάσει της βιβλιογραφίας αλλά και πληθώρας προσομοιώσεων οι οποίες πραγματοποιήθηκαν και συγκρίθηκαν [3, 13, 57, 58]. Περισσότερες

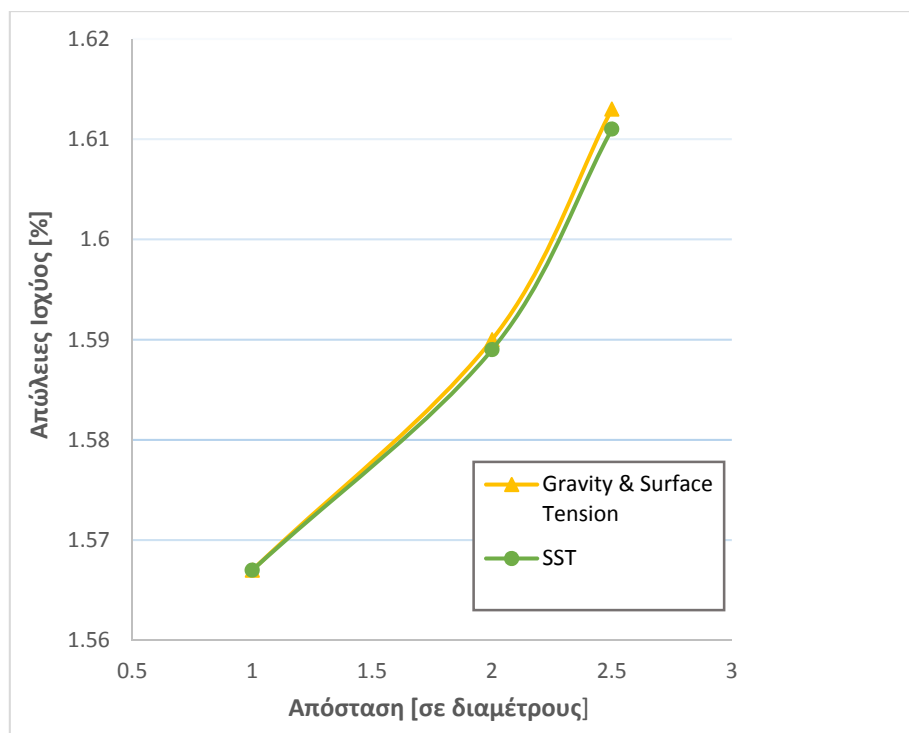
θεωρητικές πληροφορίες για αυτές αλλά και τις διαθέσιμες εναλλακτικές, παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 2.

**Πίνακας 3.8:** Βασικά χαρακτηριστικά επιλύτη για τις προσομοιώσεις της μελέτης βελτιστοποίησης

Επιλύτης:	FLUENT (2d με double precision)
Χρονική επίλυση:	Μόνιμη (Steady State)
Κριτήρια σύγκλισης-υπόλοιπα:	1e-7
Μοντέλο τύρβης 1:	SST
Μοντέλο τύρβης 2:	k-ε realizable με scalable wall functions
Μοντέλο διφασικής ροής:	VOF, πεπλεγμένη διατύπωση (Implicit)
Σύζευξη πίεσης-ταχύτητας:	Coupled (με το VOF)
Μέθοδος παρεμβολής πίεσης:	PRESTO!
Χωρική διακριτοποίηση:	Σχήμα ανάντι δεύτερης τάξης (2 <sup>nd</sup> Upwind)
CPU:	Intel- Core i7- 2670 QM @ 2.20 Ghz (8 cores). Memory: 8 GB
Απαιτούμενος χρόνος σύγκλισης:	~ 90 min

### 3.6.5 Διερεύνηση της Επίδρασης της Βαρύτητας και της Επιφανειακής Τάσης

Στην περίπτωση ροών ελεύθερης επιφάνειας, όπως στην υπό εξέταση ροή στο ακροφύσιο του υδροστροβίλου, ενδέχεται η βαρύτητα και της επιφανειακή τάση να επιδρούν στο αποτέλεσμα. Σύμφωνα με τον Πίνακα 1.1 και τα αναφερθέντα στη υποενότητα 2.2.2, στην υπό εξέταση περίπτωση ροής, οι αδιάστατοι αριθμοί Froude και Weber υποδεικνύουν ότι η βαρύτητα και οι επιφανειακή τάση αντίστοιχα μπορούν να αμεληθούν, δίχως να υπάρχει επίδραση στην λύση που προκύπτει. Η υπόθεση αυτή ελέγχθηκε με τη διενέργεια μίας προσομοίωσης στην οποία συμπεριλήφθηκαν τα παραπάνω φαινόμενα. Έτσι συμπεριλήφθηκε τόσο η βαρύτητα, με κατεύθυνση στον αρνητικό άξονα του  $y$ , όσο και η επιφανειακή τάση, με τον καθορισμό του συντελεστή της στα  $0.0728 \text{ N/m}$  σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [10]. Να σημειωθεί ότι η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με τον αλγόριθμο σύζευξης πίεσης και ταχύτητας SIMPLE, και με την μέθοδο παρεμβολής της πίεσης body force weighted, ρυθμίσεις οι οποίες είναι απαραίτητες στην περίπτωση προσομοίωσης ροής με μεγάλες σωματικές δυνάμεις. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται με την κίτρινη καμπύλη στο Σχήμα 3.21, και συγκρίνονται με την προσομοίωση του πλέγματος  $V$  της μελέτης ανεξαρτησίας πλέγματος, απεικονισμένα με πράσινη καμπύλη.



**Σχήμα 3.21:** Διερεύνηση της επίδρασης της βαρύτητας και της επιφανειακής τάσης

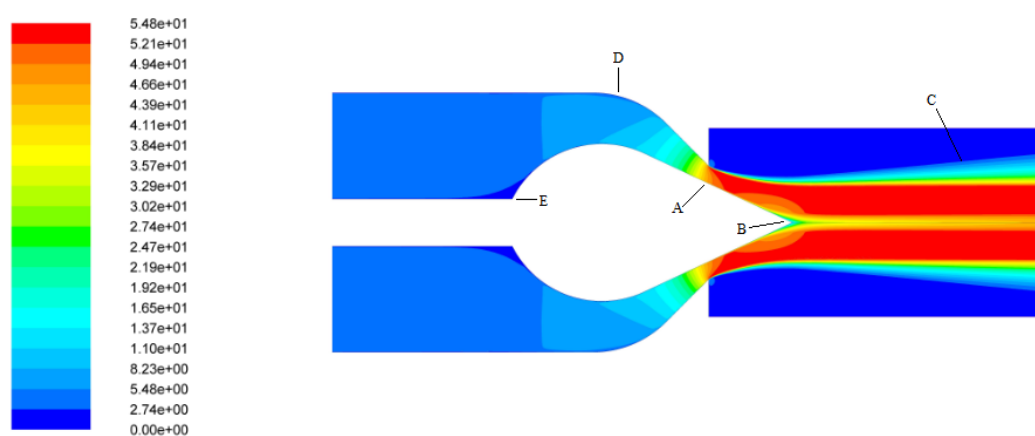
Εξετάζοντας τα αποτελέσματα του Σχήματος 3.20, παρατηρείται ότι ενώ σε απόσταση ενός και δύο ακροφυσίων τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων είναι ταυτόσημα, σε απόσταση 2.5 διαμέτρων, οι απώλειες ισχύος της προσομοίωσης με τις σωματικές δυνάμεις ενεργοποιημένες παρουσιάζει υπερεκτίμηση της τάξεως του 0.07%. Η διαφορά αυτή είναι πολύ μικρή για να ληφθεί υπόψη, οπότε επιβεβαιώθηκε η υπόθεση ότι οι σωματικές δυνάμεις μπορούν να αμεληθούν, δίχως επίδραση στην ακρίβεια του αποτελέσματος. Είναι ενδιαφέρον όμως να σχολιαστεί ότι η διαφορά αυτή παρατηρείται σε απόσταση 2.5 διαμέτρων ανάντι του ακροφυσίου. Αυτό σημαίνει ότι η επιφανειακή τάση παρουσιάζει μεγαλύτερη επίδραση εκεί, λόγω του ότι η διφασική δέσμη έχει ήδη διανύσει μεγάλη απόσταση και άρα η δύναμη καθ' όλη τη διάρκεια της ροής αποσβένει ενέργεια. Συνεπώς, αν μετρηθούν οι απώλειες ισχύος σε μεγαλύτερη από 2.5 διαμέτρους απόσταση από το ακροφύσιο, η επιφανειακή τάση θα έχει ακόμα μεγαλύτερη επίδραση.

### 3.7 Ανάλυση της Ροής στο Ακροφύσιο Υδροστροβίλου Pelton - Αποτελέσματα

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της διφασικής ροής στο ακροφύσιο υδροστροβίλου Pelton. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η λύση η οποία προέκυψε από τη μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος, η οποία και θα χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς για την μελέτη των υπολοίπων προσομοιώσεων, οι οποίες θα προκύψουν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Υπενθυμίζεται ότι η πίεση εισόδου είχε διαμορφωθεί στα 150 mSY, ενώ το άνοιγμα της βελόνης ήταν 12mm, δηλαδή στο 1/3 του πλήρους.

#### 3.7.1 Αποτελέσματα

Στο Σχήμα 3.22 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες (contours) του μέτρου της ταχύτητας στο πεδίο ροής. Στο συγκεκριμένο σχήμα, η χρωματική κλίμακα παρουσιάζει το μέτρο της ταχύτητας στην αντίστοιχη περιοχή του πεδίου ροής, ενώ κάποιες περιοχές του πεδίου ροής οι οποίες εμφανίζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον έχουν επισημανθεί. Αρχικά, παρατηρείται η ξαφνική επιτάχυνση της ροής τη στιγμή που εξέρχεται από το ακροφύσιο, στην περιοχή A, όταν και όλη σχεδόν η ενέργεια της ροής, μετατρέπεται σε κινητική, δηλαδή ουσιαστικά ταχύτητα της δέσμης νερού. Είναι εμφανής επίσης η επίδραση της καμπυλότητας του ακροφυσίου, δεδομένου ότι παρατηρείται κατά την έξοδο της δέσμης ελαττωμένη ταχύτητα στην πλευρά του ακροφυσίου σε σχέση με αυτή της βελόνης. Στην περιοχή B, παρατηρείται ένα έλλειμα ταχύτητας στη δέσμη, το οποίο οφείλεται στο οριακό στρώμα το οποίο έχει αναπτυχθεί λόγω της τριβής του ρευστού με την επιφάνεια της βελόνης. Στην ίδια περιοχή παρατηρείται ότι το μέτρο της ταχύτητας εμφανίζει σταδιακή αύξηση έως ότου αποκτήσει την ταχύτητα της κύριας δέσμης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η στατική πίεση στη μύτη της βελόνης αυξάνεται, ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του επιταχυνόμενου ρευστού με το τοίχωμα της βελόνης,. Για να διατηρηθεί η ολική πίεση σταθερή, όπως προκύπτει και από την εξίσωση Bernoulli, η ταχύτητα της δέσμης ελαττώνεται, εμφανίζοντας αυτή την ανομοιομορφία της κατανομής της, σε μικρή απόσταση από την έξοδο του ακροφυσίου. Στη συνέχεια, η κατανομή αυτή εξομαλύνεται και προκύπτει πιο ομοιόμορφη. Στην περιοχή C, οι ταχύτητες αντιστοιχούν στο μίγμα αέρα και νερού, και για τον λόγο αυτό, δεν παρουσιάζεται σαφής απεικόνιση του μέτρου τους.

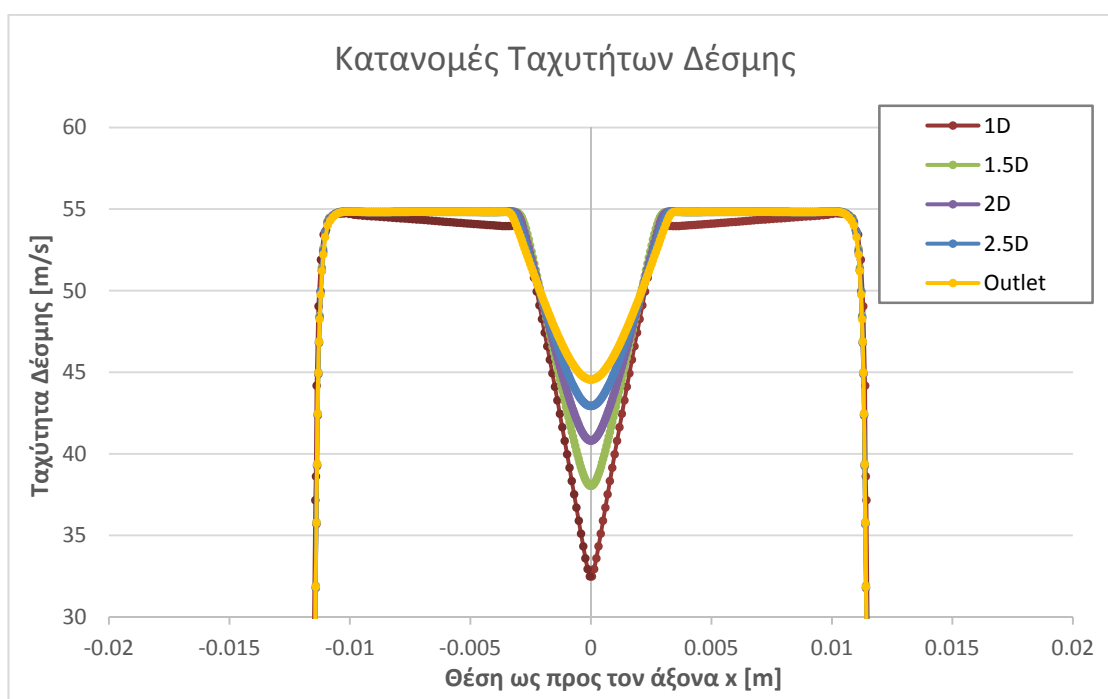


**Σχήμα 3.22:** Ισοϋψείς καμπύλες του μέτρου της ταχύτητας

Επίσης, παρατηρείται μία περιοχή στο ακροφύσιο, όπου λόγω της γεωμετρίας και της τριβής

του ρευστού με το τοίχωμα, αναπτύσσονται εξαιρετικά μικρές ταχύτητες (περιοχή D), σχεδόν μηδενικές. Ενδεχομένως, στη μελέτη βελτιστοποίησης, όπου και θα μελετηθούν διαφορετικές γεωμετρίες, και όπου το μήκος των τοιχωμάτων και άρα της αλληλεπίδρασης τους με το ρευστό να μεταβάλλεται σημαντικά, να επηρεαστούν και οι απώλειες ισχύος. Τέλος, παρατηρείται μία περιοχή, ακριβώς πριν το ρευστό αρχίσει να αλληλοεπιδρά με το τοίχωμα της βελόνης, περιοχή E, όπου οι ταχύτητες είναι πολύ μικρές.

Στο Σχήμα 3.23 παρουσιάζονται οι κατανομές ταχυτήτων της δέσμης του ρευστού, υπολογισμένες σε πέντε διαφορετικές διατομές του πεδίου ροής, συγκεκριμένα σε αποστάσεις  $1D_o$ ,  $1.5D_o$ ,  $2D_o$ ,  $2.5D_o$  και τέλος στην έξοδο του πεδίου ροής, σε απόσταση  $3D_o$  κατάντι της εξόδου του ακροφυσίου. Υπενθυμίζεται ότι με  $D_o$  συμβολίζεται η διάμετρος της εξόδου του ακροφυσίου, η οποία είναι ίση προς 36mm.

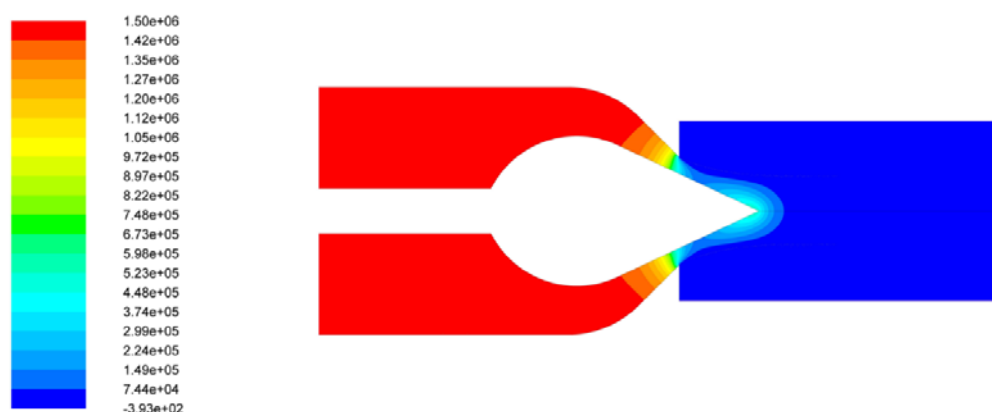


**Σχήμα 3.23:** Κατανομές ταχυτήτων δέσμης ρευστού σε πέντε διατομές

Μελετώντας το Σχήμα 3.23 εξάγονται διάφορα χρήσιμα συμπεράσματα για την εξέλιξη της δέσμης νερού κατά την έξοδό της από το ακροφύσιο. Αρχικά, παρατηρείται το έλλειμα ταχύτητας στον πυρήνα της δέσμης και στις πέντε διατομές, το οποίο παρατηρήθηκε και στα πειράματα οπτικοποίησης με τη μέθοδο LDA [27, 28, 34, 45, 46]. Η μειωμένη αυτή ταχύτητα οφείλεται στον όγκο ο οποίος προκύπτει από το οριακό στρώμα που αναπτύσσεται στη βελόνη λόγω της τριβής του ρευστού με το στερεό τοίχωμα. Το έλλειμα ταχύτητας παρατηρείται να ελαττώνεται όσο μεγαλώνει η απόσταση από το ακροφύσιο, κάτι που σημαίνει ότι η επίδραση του οριακού στρώματος λόγω της βελόνης μειώνεται. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση της κατανομής σε απόσταση  $1.5 D_o$  κατάντι του ακροφυσίου, η κατανομή ταχύτητας της δέσμης παρουσιάζει μία ανομοιομορφία, με τις υψηλότερες ταχύτητες στο άκρο της δέσμης. Η κατανομή αυτή προκύπτει υπό την επίδραση της ροής εντός του ακροφυσίου, και συγκεκριμένα λόγω της καμπυλότητας των τοιχωμάτων του. Η τριβή δηλαδή του ρευστού με τα τοιχώματα του ακροφυσίου προκαλεί την ελάττωση αυτή της ταχύτητας. Λόγω της κλίσης των τοιχωμάτων του ακροφυσίου, η στατική πίεση αυξάνεται κατά μήκος τους και δεδομένου ότι η ολική πίεση

παραμένει σταθερή, η ταχύτητα ελαττώνεται. Συνεπώς, η ταχύτητα της δέσμης στη διατομή αυτή συνεχίζει να επιταχύνεται και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της σε μεταγενέστερο σημείο, όπως είναι φανερό και από το Σχήμα 3.23. Απόρροια αυτού είναι η μικρότερη μέση τιμή της ταχύτητας στην διατομή  $1.5 D_0$  σε σχέση με τις υπόλοιπες διατομές. Τέλος, η ύπαρξη ευθέως αγωγού ανάντι του ακροφυσίου, έχει ως αποτέλεσμα την συμμετρία της δέσμης ως προς τον άξονα  $y=0$ . Εναλλακτικά, στην περίπτωση σύνδεσης με αγωγό με κλίση  $90^\circ$ , ο άξονας συμμετρίας θα προέκυπτε μετατοπισμένος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μορφή των κατανομών ταχύτητας προέκυψε ίδια με τις αντίστοιχες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με υπολογιστικές προσομοιώσεις και περιγράφηκαν στις εργασίες [24, 28, 29] στις οποίες τα υπολογιστικά μοντέλα είχαν επικυρωθεί με διαθέσιμα πειράματα οπτικοποίησης της ροής της δέσμης.

Στο Σχήμα 3.24 παρουσιάζεται η καμπύλη ισοψών της στατικής πίεσης του πεδίου ροής. Εξετάζοντας το σχήμα, είναι φανερό το πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίζουν οι υδροστρόβιλοι δράσης. Συγκεκριμένα, κατά τη ροή διαμέσου του ακροφυσίου, οι τιμές στατικής πίεσης είναι πολύ μεγάλες, με αποτέλεσμα την απαίτηση στιβαρής κατασκευής του ακροφυσίου ώστε να ανταπεξέλθει.

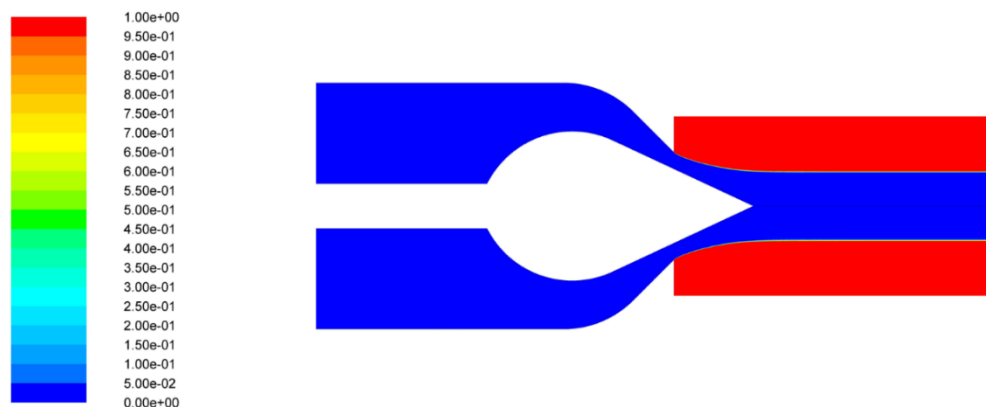


Σχήμα 3.24: Ισοψείς καμπύλες στατικής πίεσης

Στο Σχήμα 3.25 παρουσιάζονται οι ισοψείς καμπύλες του κλάσματος όγκου νερού-αέρα του πεδίου ροής, όπου απεικονίζεται η μορφή και το πάχος της δέσμης του ρευστού. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα κλάσματα όγκου του αέρα, οπότε με μπλε χρώμα απεικονίζεται η δέσμη του νερού. Αρχικά, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η ελάττωση της διαμέτρου της δέσμης μετά από την έξοδό της από το ακροφύσιο, σημείο το οποίο είναι γνωστό ως Vena Contracta, δεν παρατηρήθηκε σε κανένα αποτέλεσμα της υπολογιστικής προσομοίωσης, αντίθετα από τα πειράματα οπτικοποίησης της δέσμης [46]. Ένας πιθανός λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό, είναι ότι η δέσμη του ρευστού, και ειδικά η συστολή της διαμέτρου της αποτελεί ένα τριδιάστατο φαινόμενο, το οποίο δεν γίνεται να καταγραφεί με μία διδιάστατη προσομοίωση, κάτι το οποίο δυσχεραίνει με τη χρήση του μοντέλου VOF για τη διφασική ροή.

Άλλωστε, η διασπορά της δέσμης, η αύξηση δηλαδή της διαμέτρου της, η οποία σε πειραματικές μετρήσεις παρατηρείται έπειτα από το σημείο VC, δεν καταγράφηκε στα αποτελέσματα CFD. Ένας από τους πιθανούς λόγους για τον οποίο συμβαίνει αυτό, είναι ότι φαινόμενα που προκαλούνται λόγω της επίδρασης του αέρα στη δέσμη, όπως ο σχηματισμός σταγονιδίων τα οποία προσκρούουν πάνω της και που προκαλούν τη διασπορά της, δεν ήταν

δυνατόν να καταγραφούν με ακρίβεια με τα συγκεκριμένα εργαλεία CFD τα οποία χρησιμοποιήθηκαν. Λόγω του γεγονότος όμως ότι οι δρομείς των υδροστροβίλων δράσης είναι τοποθετημένοι πολύ κοντά στην έξοδο του ακροφυσίου, αυτή η ανακρίβεια δεν αναμένεται να έχει καμία επίδραση στα αποτελέσματα.



**Σχήμα 3.25:** Ισοϋψείς καμπύλες κλάσματος όγκου νερού-αέρα

Από την μελέτη των αποτελεσμάτων του κλάσματος όγκου νερού-αέρα της προσομοίωσης, γίνεται να υπολογιστεί το πάχος της δέσμης του ρευστού. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι το πάχος αυτό εκτείνεται ως το σημείο στο οποίο το κλάσμα όγκου του νερού είναι ίσο με 0.5 %, δηλαδή ως το κελί το οποίο είναι εξ ημισείας κατειλημμένο από τα δύο ρευστά. Αφού υπολογιστεί λοιπόν η διάμετρος της δέσμης η οποία προέκυψε από την υπολογιστική προσομοίωση, συγκρίνεται με την αντίστοιχη τιμή, η οποία προκύπτει από την θεωρητική εξίσωση για την εύρεση της διαμέτρου, Εξίσωση (1.17), για  $n_{jet} = 1$ , και με την Εξίσωση (1.20), η οποία προέκυψε με τη χρήση τριγωνομετρίας. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.9.

**Πίνακας 3.9:** Σύγκριση του πάχους της δέσμης προσομοίωσης CFD με θεωρητικές εξισώσεις

Μέθοδος	Πάχος δέσμης	Διαφορά %
Αποτελέσματα CFD	22.902	-
Θεωρητική Εξίσωση (1.17)	22.919	-0.07 %
Εξίσωση (1.20)	25.24	-9.26 %

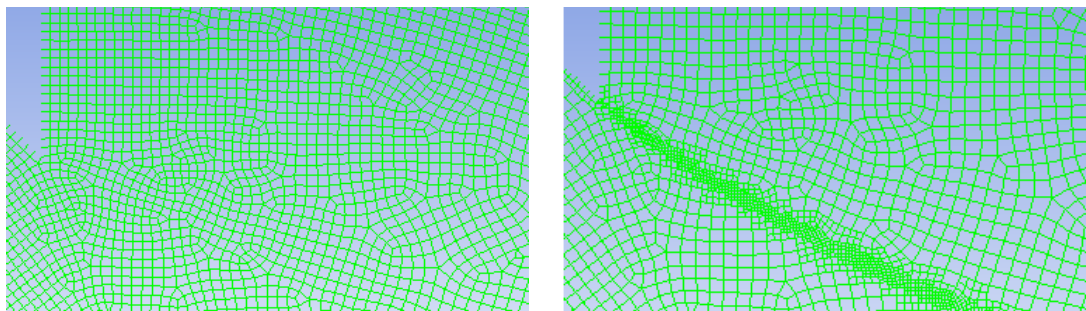
Συγκρίνοντας τις τιμές του Πίνακα 3.9, προκύπτει ότι η προσομοίωση με CFD δίνει σχεδόν ταυτόσημο αποτέλεσμα του πάχους της δέσμης με την θεωρητική σχέση, ενώ η Εξίσωση (1.20) υπερεκτιμά το πάχος της κατά περίπου 9 %. Η εξίσωση αυτή προέκυψε από το βιβλίο του Thake αναφορικά με του υδροστροβίλους Pelton [41], στην διατύπωση της οποίας πραγματοποιήθηκε η υπόθεση ότι η δέσμη εξέρχεται του ακροφυσίου με κατεύθυνση παράλληλη με την γωνία της βελόνης, κάτι το οποίο δεν προκύπτει από τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν.

### 3.7.2 Η επίδραση της Τοπικής Πύκνωσης

Με τη τοπική πύκνωση του πλέγματος (mesh adaption), είναι δυνατή η προσθήκη κελιών σε περιοχές του πλέγματος όπου απαιτούνται, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την καλύτερη

ανάλυση των χαρακτηριστικών του πεδίου ροής. Όταν χρησιμοποιείται η τοπική πύκνωση, το πλέγμα το οποίο προκύπτει είναι το βέλτιστο για την επίλυση της ροής, λόγω του ότι το η λύση καθορίζει το που πρέπει να προστεθούν νέα κελιά. Συνεπώς, είναι δυνατή η ακριβέστερη ανάλυση των χαρακτηριστικών της ροής, δίχως να είναι απαραίτητη η εκ νέου κατασκευή πλέγματος το οποίο θα απαιτούσε περαιτέρω υπολογιστικούς πόρους.

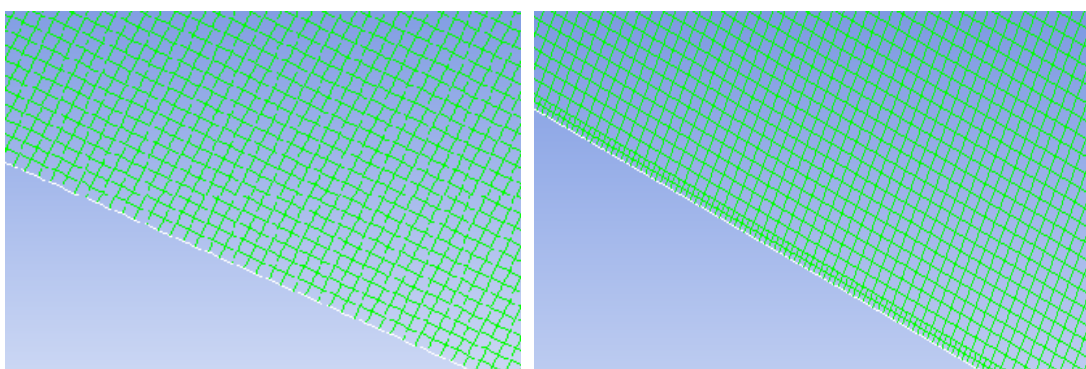
Κατά την πραγματοποίηση της προσομοίωσης, εφαρμόστηκε δύο φορές τοπική πύκνωση του πλέγματος. Στην κάθε μία, το πλέγμα πυκνώθηκε βάσει αφενός της επιθυμητής τιμής του αριθμού κλάσματος όγκου νερού-αέρα (iso-value adaption) ώστε να απεικονιστεί σαφέστερα η διεπιφάνεια νερού-αέρα και αφετέρου της επιθυμητής τιμής της αδιάστατης απόστασης από το τοίχωμα,  $y +$  ( $y$ -star adaption), ώστε να λειτουργήσει καλύτερα η μοντελοποίηση της περιοχής κοντά στα τοιχώματα. Η σαφής απεικόνιση της διεπιφάνειας περιορίζεται από την αρχική ανάλυση του πλέγματος, εκτός και αν έχει κατασκευαστεί εξαιρετικά πυκνό εξ αρχής. Σύμφωνα με τον Perrig, η ανάγκη πύκνωσης του πλέγματος προκειμένου να αναλυθεί η δέσμη του νερού, είναι ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της χρήσης μεθόδων CFD στις ροές στροβίλου Pelton. Στην συγκεκριμένη ροή, όπου η θέση της διεπιφάνειας παραμένει σταθερή με το χρόνο, η διαδικασία τοπικής πύκνωσης μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην περαιτέρω ανάλυση του πλέγματος. Να σημειωθεί πως η τοπική πύκνωση εφαρμόζεται σε σημεία του πεδίου ροής όπου εμφανίζονται απότομες κλίσεις.



(α)

(β)

**Σχήμα 3.26:** Πύκνωση του πλέγματος βάσει του κλάσματος όγκου νερού αέρα



(α)

(β)

**Σχήμα 3.27:** Πύκνωση του πλέγματος βάσει της απόστασης από το τοίχωμα

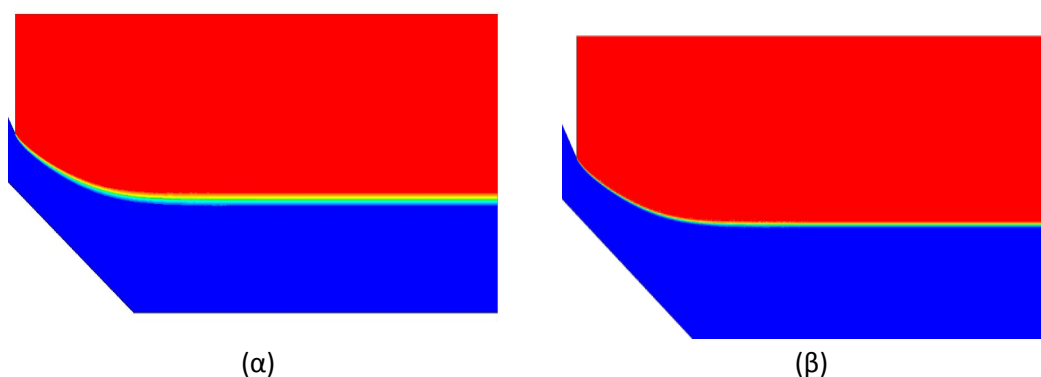


Στα Σχήματα 3.26 και 3.27 παρουσιάζονται λεπτομέρειες του πλέγματος πριν και μετά την τοπική πύκνωση. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.26 (α) παρουσιάζεται λεπτομέρεια του αρχικού πλέγματος, ενώ στο (β) η ίδια λεπτομέρεια έχει υποστεί δύο τοπικές πυκνώσεις βάσει της τιμής του κλάσματος όγκου νερού-αέρα. Αντίστοιχη σύγκριση πραγματοποιείται και στο Σχήμα 3.27, με τη διαφορά ότι η τοπική πύκνωση πραγματοποιείται βάσει της αδιάστατης απόστασης από το τοίχωμα,  $y^+$ . Παρατηρείται ότι το πλέγμα το οποίο προκύπτει και στις δύο περιπτώσεις είναι δομημένο, όπως ακριβώς και το αρχικό. Στον Πίνακα 3.10 παρουσιάζεται ο αρχικός αριθμός των κελιών του πλέγματος και πως αυτός μεταβάλλεται έπειτα από κάθε μία από τις δύο πυκνώσεις. Πρέπει να τονιστεί εδώ, πως έπειτα από κάθε τοπική πύκνωση η οποία εφαρμόζεται στο διδιάστατο δομημένο υπολογιστικό πλέγμα του συγκεκριμένου πεδίου ροής, κάθε κελί στις περιοχές όπου εφαρμόζεται η τοπική πύκνωση, χωρίζεται στα 4. Κατά συνέπεια, η ποιότητα του πλέγματος παραμένει η ίδια, αφού τα κελιά είναι όμοια με τα αρχικά, απλά μικρότερα, ενώ το πλέγμα τοπικά γίνεται 4 φορές πυκνότερο. Οπότε, κατόπιν της εφαρμογής δύο πυκνώσεων, το πλέγμα έχει γίνει τοπικά 16 φορές πυκνότερο.

**Πίνακας 3.10:** Μεταβολή αριθμού κελιών του πλέγματος κατά την τοπική πύκνωση

Αριθμός κελιών αρχικού πλέγματος	203,430
Αριθμός κελιών μετά την πρώτη πύκνωση	216,015
Αριθμός κελιών μετά τη δεύτερη πύκνωση	223,926

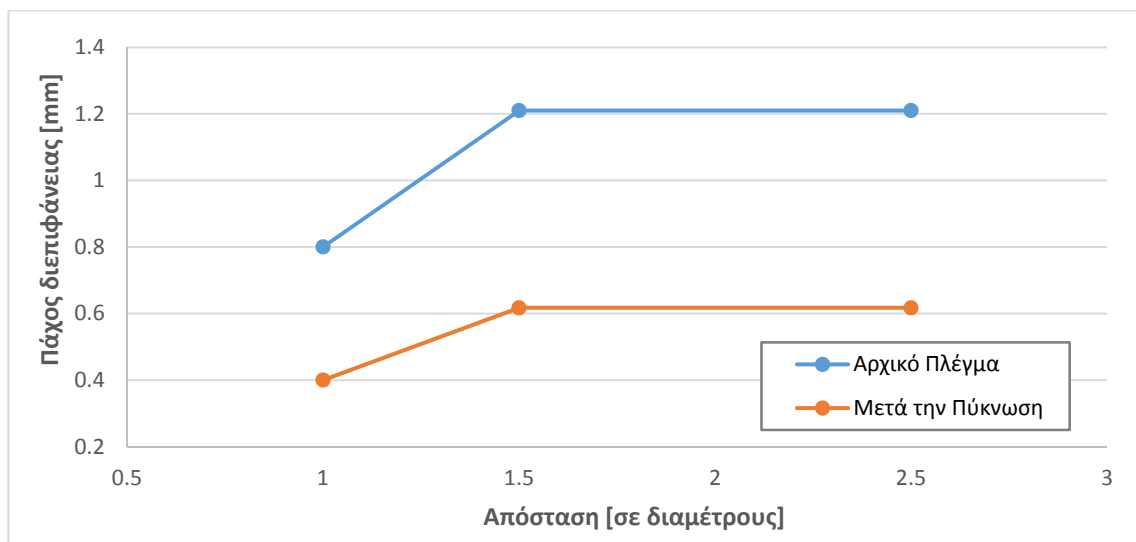
Στο Σχήμα 3.28 παρουσιάζονται λεπτομέρειες των ισοϋψών καμπυλών του κλάσματος όγκου νερού-αέρα πριν (α) και μετά από την τοπική πύκνωση (β), στο σημείο στο οποίο η δέσμη του νερού έρχεται για πρώτη φορά σε επαφή με τον αέρα. Αν συγκριθούν οι μορφές των δύο δεσμών οι οποίες προκύπτουν από την προσομοίωση, είναι φανερό ότι μετά την τοπική πύκνωση, η δέσμη καταγράφεται ακριβέστερα και μάλιστα προκύπτει λεπτότερη απ' ό τι με το αρχικό πλέγμα.



**Σχήμα 3.28:** Ισοϋψείς καμπύλες κλάσματος όγκου νερού-αέρα (λεπτομέρεια) πριν (α) και μετά (β) από την τοπική πύκνωση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 1.6, στα Σχήματα 1.38 και 1.50, ο υπολογισμός του σημείου από το οποίο η δέσμη εξέρχεται από το ακροφύσιο, είναι ιδιαίτερα σημαντικός για να επιτευχθεί ακριβής πρόβλεψη της μορφής και της ταχύτητας της δέσμης, διότι στο σημείο αυτό το νερό έρχεται για πρώτη φορά σε επαφή με τον περιβάλλοντα αέρα. Έτσι, αν το σημείο αυτό δεν προβλεφθεί σωστά, η διάμετρος της δέσμης θα υπερεκτιμηθεί με αποτέλεσμα τον υπολογισμό ταχυτήτων πολύ μικρότερων των πραγματικών. Στο Σχήμα 3.26 (β) τόσο το πάχος όσο

και η γωνία εξόδου της δέσμης από το ακροφύσιο προβλέφθηκαν με ακρίβεια, οδηγώντας σε διαφορά της διαμέτρου της δέσμης που προβλέφθηκε από την προσομοίωση CFD με την αντίστοιχη θεωρητική τιμή της τάξης του 0.07 %. Συνεπώς, έπειτα από την τοπική πύκνωση, η μορφή της δέσμης προέκυψε ακριβέστερη σε σχέση με το αρχικό πλέγμα. Η επιβεβαίωση έρχεται με την παράθεση του Σχήματος 3.29, στο οποίο παρουσιάζεται το πάχος της διεπιφάνειας μεταξύ αέρα και νερού έπειτα από μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές διατομές ανάντι του ακροφυσίου. Παρατηρείται ότι το πάχος της διεπιφάνειας το οποίο προέρχεται από το αρχικό πλέγμα είναι δύο φορές παχύτερο του αντίστοιχου πάχους μετά την τοπική πύκνωση.



**Σχήμα 3.29:** Σύγκριση του πάχους της διεπιφάνειας αέρα και νερού μεταξύ του αρχικού πλέγματος και του πλέγματος έπειτα από την τοπική πύκνωση

Κατά την τοπική πύκνωση, τα κελιά τα οποία βρίσκονται εντός του οριακού πλέγματος πυκνώνονται περαιτέρω βάσει της αδιάστατης απόστασης από το τοίχωμα,  $y^+$ . Η τοπική πύκνωση ώστε να προκύψει  $y^+ < 5$ , αν και δεν είναι προαπαιτούμενο για να λειτουργήσει το μοντέλο τύρβης SST, εγγυώνται ακριβέστερα αποτελέσματα, λόγω της επίλυσης του οριακού στρώματος. Να σημειωθεί ότι το αρχικό πλέγμα δεν κατασκευάστηκε εξ αρχής εξαιρετικά πυκνό τόσο για την εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων, όσο και για να μπορεί να λειτουργήσει και στην περίπτωση χρήσης του μοντέλου τύρβης  $k-\epsilon$  realizable. Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν έπειτα από την τοπική πύκνωση, συντείνουν στον αρχικό ισχυρισμό, ότι η διαδικασία αυτή βελτιώνει περαιτέρω την ανάλυση των χαρακτηριστικών της ροής και ιδιαίτερα της διεπιφάνειας μεταξύ νερού και αέρα, με το κόστος της αύξησης του αριθμού των κελιών (κατά περίπου 10 %). Συμπερασματικά, η χρήση τοπικής πύκνωσης σε συνδυασμό με την χρήση δομημένου πλέγματος ενδείκνυται στην περίπτωση προσπάθειας εντοπισμού ελεύθερης επιφάνειας, ειδικά όταν το πλέγμα είναι ευθυγραμμισμένο με την κατεύθυνση της ροής.

## Κεφάλαιο 4. Βελτιστοποίηση της Γεωμετρίας Ακροφυσίου Υδροστροβίλου Δράσης

### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά, παρουσιάζεται η διαδικασία βελτιστοποίησης η οποία ακολουθήθηκε, δηλαδή η παραμετροποίηση της γεωμετρίας του ακροφυσίου, ο καθορισμός των κύριων παραμέτρων σχεδίασης και ο πειραματικός σχεδιασμός (Design of Experiments-DOE) ο οποίος χρησιμοποιήθηκε. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της γεωμετρίας ακροφυσίου δράσης, όπως αυτά προέκυψαν από τη διεξαγωγή της μεθόδου DOE. Οι γεωμετρίες οι οποίες προέκυψαν από τις προτάσεις του λογισμικού Design-Expert, κατασκευάστηκαν και στη συνέχεια διακριτοποιήθηκαν με χρήση του δομημένου πλέγματος το οποίο περιγράφηκε στην μελέτη ανεξαρτησίας πλέγματος. Έπειτα, χρησιμοποιώντας το ANSYS-FLUENT μοντελοποιήθηκε και στη συνέχεια προσομοιώθηκε η διφασική ροή της ελεύθερης δέσμης στις γεωμετρίες αυτές. Οι ρυθμίσεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις CFD είναι αυτές οι οποίες περιγράφηκαν στην υποενότητα 3.6. Για τον σκοπό της σύγκρισης των μεθόδων, αλλά και της επίτευξης πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκαν δύο σύνολα προσομοιώσεων· στο ένα η τύρβη μοντελοποιήθηκε με το μοντέλο SST και στο δεύτερο σύνολο χρησιμοποιήθηκε το k-ε realizable, με χρήση επεκτάσιμων συναρτήσεων τοιχωμάτων. Ζητούμενο ήταν το κατά πόσον τα δύο μοντέλα θα παρουσίαζαν παρόμοια αποτελέσματα και θα αναδείκνυαν την ίδια γεωμετρία ως τη βέλτιστη στο εύρος των παραμέτρων οι οποίες επελέγησαν.

### 4.2 Διαδικασία Βελτιστοποίησης

#### 4.2.1 Εισαγωγή

Στην υποενότητα 3.7 αναλύθηκε η ροή της διφασικής δέσμης νερού, η οποία εξέρχεται από ακροφύσιο υδροστροβίλου Pelton. Αφού καθορίστηκε το υπολογιστικό μοντέλο για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος ροής, εν συνεχεία, διερευνήθηκε η επίδραση των γεωμετρικών παραμέτρων στον βαθμό απόδοσης της δέσμης, για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Συνεπώς, σκοπός της μελέτης αυτής είναι η εύρεση των γεωμετρικών παραμέτρων οι οποίες θα ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες ισχύος της ροής στο ακροφύσιο, όπως αυτές προκύπτουν από την Εξίσωση (3.2). Για τον σκοπό αυτόν, πραγματοποιήθηκε μία μελέτη σχεδιασμού πειραμάτων (DOE), η οποία εφαρμόστηκε με τη χρήση του λογισμικού Design-Expert [61]. Τα θεωρητικά στοιχεία του κεφαλαίου προέρχονται από τη βιβλιογραφία και συγκεκριμένα τα [1, 11, 23].

Η μέθοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε για την στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας ονομάζεται μεθοδολογία επιφανειών απόκρισης (Response Surface Methodology-RSM). Η μέθοδος αυτή εισήχθη από τους Box και Wilson το 1951, με σκοπό τον σχεδιασμό πειραμάτων και τη μετέπειτα ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων. Πρόκειται για ένα σύνολο μαθηματικών και στατιστικών τεχνικών οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση και την πρόβλεψη της απόκρισης (response) ενός εξεταζόμενου μεγέθους, στην οποία επιδρούν μια σειρά από μεταβλητές εισόδου (input

variables), με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόκρισης αυτής. Συγκεκριμένα, η μέθοδος RSM παρέχει εκτιμήσεις της κύριας επίδρασης (main effect) του κάθε παράγοντα που διερευνάται, εκτιμήσεις των αλληλεπιδράσεων (interactions) μεταξύ των παραγόντων καθώς και εκτιμήσεις της τετραγωνικής επίδρασης (quadratic effect) για κάθε παράγοντα. Ως κύρια επίδραση ορίζεται η μεταβολή της μεταβλητής απόκρισης κατά την αλλαγή του παράγοντα από το χαμηλό στο υψηλό επίπεδο του εύρους του. Αντίστοιχα, ως αλληλεπίδραση ορίζεται η μεταβολή στην απόκριση λόγω της ταυτόχρονης μεταβολής δύο παραγόντων. Τέλος, οι όροι τετραγωνικής επίδρασης ή καμπυλότητας (curvature) αναπαριστούν τη μη-γραμμικότητα του μοντέλου.

Η εφαρμογή των μεθόδων DOE και RSM κατά τη μελέτη βελτιστοποίησης συνίσταται από τα εξής βήματα:

- I. Καθορισμός των παραμέτρων του προβλήματος και του εύρους τιμών στο οποίο κυμαίνεται κάθε παράγοντας (factor).
- II. Σχεδιασμός του συνόλου των πειραμάτων (προσομοιώσεις CFD στο υπό εξέταση πρόβλημα) μέσω του καθορισμού των συνδυασμών τιμών των παραγόντων στο οποίο θα αξιολογηθεί με ακρίβεια και αξιοπιστία η απόκριση.
- III. Εκτέλεση των προσομοιώσεων CFD για το κάθε σύνολο των παραγόντων (Analysis of Variance-ANOVA).
- IV. Στατιστική ανάλυση των διακυμάνσεων της απόκρισης σε σχέση με τους παράγοντες.
- V. Διαμόρφωση ενός μαθηματικού μοντέλου της τετραγωνικής επιφάνειας απόκρισης (quadratic response surface) το οποίο ταιριάζει στις συγκεκριμένες τιμές.
- VI. Μαθηματικός καθορισμός του βέλτιστου συνόλου παραγόντων από την εξίσωση επιφάνειας απόκρισης.
- VII. Αναπαράσταση των επιδράσεων, άμεσων και αλληλεπίδρασης, των παραμέτρων στην απόκριση με τη χρησιμοποίηση διδιάστατων και τριδιάστατων γραφημάτων.

Εάν όλες οι μεταβλητές υποτεθούν μετρήσιμες, η επιφάνεια απόκρισης μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$y(x) = f(x_1, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (4.1)$$

όπου,  $y$ , είναι η απόκριση του συστήματος,  $x_i$ , οι μεταβλητές σχεδιασμού ή παράμετροι του προβλήματος, οι οποίες σε ορολογία DOE ονομάζονται παράγοντες σχεδιασμού. Τέλος, ο όρος  $\varepsilon$ , αναπαριστά το σφάλμα του μοντέλου και περιλαμβάνει ενδεχόμενα σφάλματα ή θόρυβο (noise) τα οποία επιδρούν στην απόκριση.

Κατά την πρακτική εφαρμογή της μεθοδολογίας επιφάνειας απόκρισης, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί ένα μοντέλο προσέγγισης της πραγματικής επιφάνειας απόκρισης,  $f$ . Το προσεγγιστικό μοντέλο βασίζεται στην ανάλυση των δεδομένων του συστήματος και είναι εμπειρικό. Η ανάλυση πολλαπλής παλινδρόμησης είναι μια συλλογή στατιστικών μεθόδων, χρήσιμες για την κατασκευή εξισώσεων των εμπειρικών μοντέλων που απαιτούνται στην RSM. Συνήθως, στην μεθοδολογία επιφάνειας απόκρισης χρησιμοποιείται μία εξίσωση πολυωνύμου δεύτερης τάξης, Εξίσωση (4.2):

$$y^p = c_0 + \sum_{i=1}^k c_i x_i + \sum_{i=1}^k c_{ii} x_i^2 + \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{i=j+1}^k c_{ij} x_j x_i, P = 1, \dots, n \quad (4.2)$$

όπου,

$y^p$	:	η απόκριση (εξαρτημένη μεταβλητή)
$c_o$	:	σταθερός συντελεστής
$c_i, c_{ii}, c_{ij}$	:	συντελεστές της γραμμικής, τετραγωνικής επίδρασης και αλληλεπίδρασης αντίστοιχα
$x_i, x_j$	:	παράγοντες (ανεξάρτητες μεταβλητές)

Ο προσδιορισμός των συντελεστών επίδρασης,  $c_i$ ,  $c_{ii}$  και  $c_{ij}$  πραγματοποιείται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Στη συνέχεια, αναλύεται η προκύπτουσα επιφάνεια απόκρισης, αφού ελεγχθεί με στατιστικές μεθόδους ότι αποτελεί επαρκή προσέγγιση της πραγματικής επιφάνειας απόκρισης. Ο υπολογισμός των παραμέτρων του μοντέλου,  $c$ , διευκολύνεται σημαντικά, εάν επιλεγθεί ο κατάλληλος για την περίπτωση σχεδιασμός πειράματος. Μία από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους σχεδιασμού πειραμάτων αποτελεί το σύνθετο κεντρικό σχέδιο (central composite design-CCD), το οποίο θα περιγραφεί στην υποενότητα 4.2.3.

Οι συντελεστές προσδιορισμού  $R^2$  μέσω της Εξίσωσης (4.3) καθορίζουν την ποιότητα της προσαρμογής του πολυωνύμου:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{residual}}{SS_{model} + SS_{residual}} \quad (4.3)$$

όπου  $SS$  είναι το άθροισμα των τετραγώνων, το οποίο αποτελεί μέτρο της επίδρασης των όρων αυξανόμενης πολυπλοκότητας στο μοντέλο. Εκτός από τον συντελεστή αυτό, εφαρμόζονται διάφορες στατιστικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό του μεγέθους του σφάλματος του μοντέλου, διαδικασία η οποία είναι γνωστή ως ανάλυση της διακύμανσης (Analysis of variance-ANOVA).

Η διαδικασία βελτιστοποίησης η οποία ακολουθεί, πραγματοποιείται από το λογισμικό Design-Expert με σκοπό την εύρεση του συνόλου των παραμέτρων οι οποίες μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν την απόκριση η οποία ερευνάται. Κατά τη διαδικασία αυτή, το πρόβλημα μορφοποιείται και λύνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς (constrained optimization problem), με τη χρήση μη γραμμικών μεθόδων. Μια εναλλακτική προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση πολλαπλών αποκρίσεων είναι η εφαρμογή της ταυτόχρονης μεθόδου βελτιστοποίησης (simultaneous optimization technique), στην οποία εισάγεται η έννοια της συνάρτησης επιθυμίας (desirability function). Η γενική προσέγγιση αφορά την μετατροπή κάθε απόκρισης,  $y_i$ , στην αντίστοιχη συνάρτηση επιθυμίας,  $d_i$  και η οποία κυμαίνεται στο διάστημα  $[0,1]$ . Έτσι, όταν η απόκριση βρίσκεται εντός των επιθυμητών στόχων, τότε  $d_i = 1$ , ενώ αντίθετα, όταν βρίσκεται εκτός του επιτρεπτού εύρους, ισχύει  $d_i = 0$ . Στη συνέχεια, οι μεταβλητές σχεδιασμού επιλέγονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μεγιστοποιηθεί η ολική συνάρτηση επιθυμίας,  $D = (d_1 \cdot d_2 \cdots d_m)^{1/m}$ , η οποία περιλαμβάνει  $m$  αποκρίσεις. Η ολική συνάρτηση επιθυμίας θα είναι μηδενική, εάν οποιαδήποτε από τις μεμονωμένες αποκρίσεις είναι ανεπιθύμητη.

#### 4.2.2 Παραμετροποίηση της Γεωμετρίας του Ακροφυσίου

Στη συνέχεια καθορίστηκαν οι κύριες παράμετροι του προβλήματος βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του ακροφυσίου, η ανάλυση των οποίων θα οδηγήσει στον συνδυασμό τους που παρουσιάζει τις μικρότερες απώλειες ισχύος. Ως μεταβλητή απόκρισης, συνεπώς, ορίστηκαν οι απώλειες ισχύος μετρούμενες σε απόσταση 2.5 διαμέτρων κατάντι της εξόδου του ακροφυσίου. Αφού τέθηκε ο στόχος της βελτιστοποίησης, επιλέχθηκαν οι μεταβλητές σχεδίασης, δηλαδή οι παράμετροι, της μελέτης. Για τον καθορισμό των γεωμετρικών παραμέτρων μελετήθηκε η

ανάλυση της ροής στο ακροφύσιο και αποφασίστηκε ότι η γωνία της βελόνης (spear angle), η γωνία του στομίου του ακροφυσίου (nozzle angle) και το πάχος της βελόνης (spear width), παρουσιασμένα με B, C και D αντίστοιχα στο Σχήμα 3.3, είναι υποψήφιες παράμετροι σχεδιασμού για τη μελέτη βελτιστοποίησης. Οι παράμετροι αυτοί θεωρήθηκαν οι κυριότερες για τη μελέτη βελτιστοποίησης, λόγω του ότι έχουν προσδιοριστεί ως τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού του ακροφυσίου στη βιβλιογραφία [15, 25]. Επίσης, θεωρήθηκε ότι πρέπει να μελετηθεί και η επίδραση στις απώλειες ακροφυσίου της καμπυλότητας (curvature) του ακροφυσίου και της βελόνης, μεγέθη τα οποία συμβολίζονται με I και J στο Σχήμα 3.4 αντίστοιχα. Η επίδραση αυτή θα παρουσιαστεί στην υποενότητα 4.2.2.3. Το εύρος τιμών το οποίο θα μελετηθεί για τις δύο γωνίες αποφασίστηκε να είναι το εξής:

Γωνία στομίου ακροφυσίου	100°-160°
Γωνία βελόνης	50°-90°

Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκαν οι γωνίες αυτές είναι η σύγχρονη τάση της κατασκευής υδροστροβίλων Pelton, η οποία συνιστά τη χρήση μεγαλύτερων από το παρελθόν γωνιών για τα μεγέθη αυτά ώστε να βελτιωθεί ο βαθμός απόδοσης του ακροφυσίου [15, 25, 41].

Η παροχή μάζας καθώς και η ολική πίεση εισόδου του ρευστού επιλέχθηκαν ως οι λειτουργικές παράμετροι της μελέτης, λόγω του ότι επιδρούν άμεσα στην τιμή του ύψους πτώσης. Στην περίπτωση της παροχής μάζας του διερχόμενου ρευστού, δεν ήταν δυνατό εκ των προτέρων να καθοριστεί το εύρος τιμών της, μιας και αυτό εξαρτάται από το άνοιγμα της βελόνης, F, σύμφωνα με το Σχήμα 3.3. Για τον σκοπό αυτόν, η χρήση του ανοίγματος βελόνης ως σχεδιαστική παράμετρος, αντικαταστάθηκε από μία γεωμετρική παράμετρο η οποία και καθορίζει την παροχή αυτή ανάλογα με το ακροφύσιο και η οποία είναι ο λόγος εμβαδού του ανοίγματος. Η επιλογή αυτή έγινε για τους λόγους που θα εξηγηθούν ευθύς αμέσως.

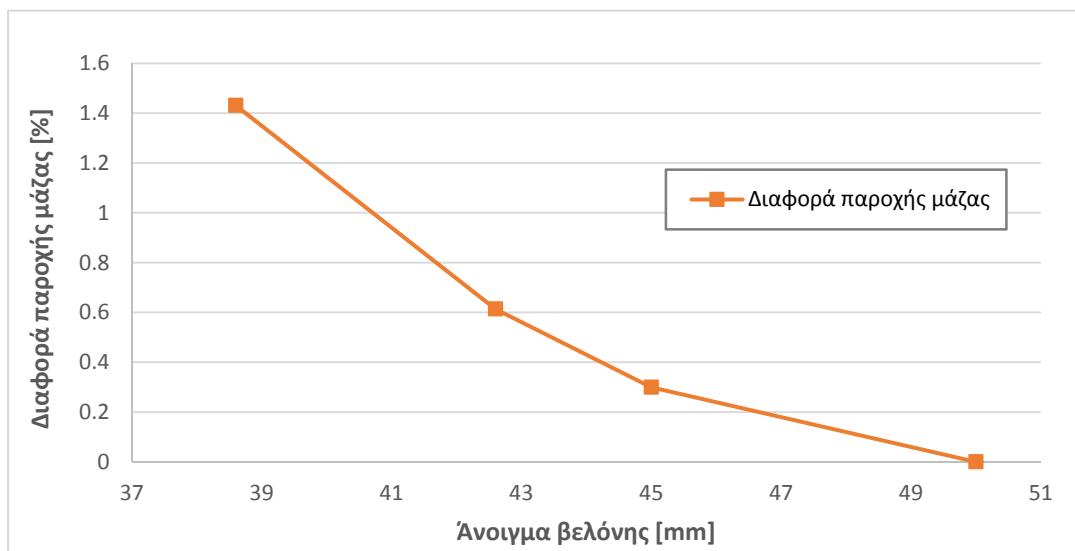
#### 4.2.2.1 Καθορισμός του Μέγιστου Ανοίγματος Βελόνης της Μελέτης

Η βελόνη του ακροφυσίου το οποίο μελετήθηκε είχε τη δυνατότητα ανοίγματος βελόνης στο εύρος 3.3-18 mm, λόγω γεωμετρικών περιορισμών. Για λόγους γενικότητας της μελέτης, επιλέχθηκε η εξέταση ανοιγμάτων βελόνης σε μεγαλύτερο εύρος. Το εύρος των μεγεθών καθορίστηκε βάσει της αρχικής γεωμετρίας του ακροφυσίου.

Αρχικά, εξετάστηκε το ενδεχόμενο να καθοριστεί ως άνω όριο το άνοιγμα το οποίο αντιστοιχεί στην θέση όπου το άκρο του στομίου του ακροφυσίου είναι συνευθειακό με τη μύτη της βελόνης, ήτοι στα 38.6 mm. Πραγματοποιήθηκε ωστόσο μία μελέτη, στην οποία εξετάστηκαν ανοίγματα ακόμα μεγαλύτερα, για να διαπιστωθεί εάν η παροχή μάζας αυξανόταν περαιτέρω. Ξεκινώντας με ελάχιστη τιμή για το άνοιγμα βελόνης τα 38.6 mm, για τον λόγο που αναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκαν τρεις ακόμα προσομοιώσεις, σε ανοίγματα 42.6, 45 και τέλος 50 mm. Το δεύτερο άνοιγμα επιλέχθηκε γιατί στην περίπτωση αυτή, η κάθετη απόσταση από την άκρη του στομίου του ακροφυσίου προς τη βελόνη είναι ίση προς το άνοιγμα του στομίου του ακροφυσίου, δηλαδή 18 mm. Τα υπόλοιπα δύο ανοίγματα επιλέχθηκαν για λόγους πληρότητας της μελέτης, αποτελώντας λογικές τιμές.

Αφού προσομοιώθηκε η ροή σε αυτά, με τις ρυθμίσεις του επιλύτη ίδιες με αυτές του Πίνακα 3.5, τα αποτελέσματα της παροχής μάζας η οποία προέκυψε από το κάθε ακροφύσιο,

παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1. Να σημειωθεί ότι επιλέχθηκε για λόγους εποπτικούς να αναχθούν τα μεγέθη στη σχετική διαφορά με την παροχή του μεγαλύτερου ανοίγματος βελόνης, δηλαδή στα 50 mm.



**Σχήμα 4.1:** Σύγκριση της παροχής μάζας η οποία προκύπτει για διαφορετικά ανοίγματα της βελόνης

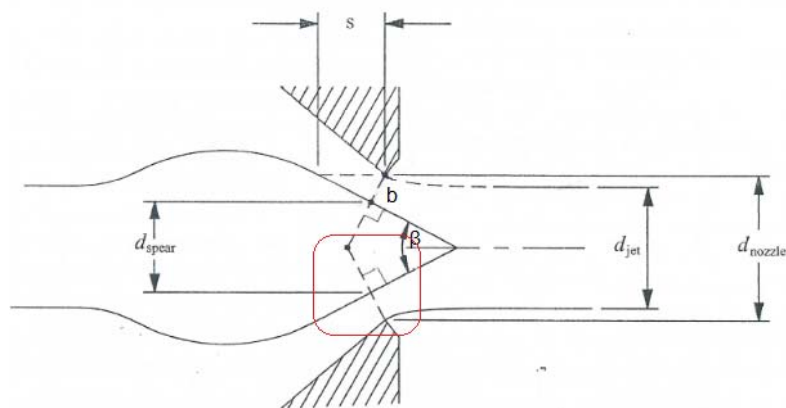
Εξετάζοντας το Σχήμα 4.1, προκύπτει το συμπέρασμα, ότι όσο μεγαλώνει το άνοιγμα της βελόνης, μεγαλώνει και η διερχόμενη παροχή. Ωστόσο, φαίνεται να υπάρχει ένα όριο στην αύξηση αυτή, διότι, μετά το άνοιγμα στα 45 mm ο ρυθμός της αύξησης της παροχής μειώνεται σημαντικά. Ωστόσο, η διαφορά στην παροχή μάζας μεταξύ του ανοίγματος στα 38.6 και αυτού στα 42.6, δικαιολογεί τον καθορισμό του τελευταίου ως το άνω όριο του ανοίγματος της βελόνης.

#### 4.2.2.2 Καθορισμός του Λόγου Εμβαδού ως Γεωμετρική Παράμετρο της Μελέτης

Για τον σκοπό του καθορισμού της κρίσιμης λειτουργικής παραμέτρου της διερχόμενης παροχής μάζας από το ακροφύσιο, καθορίστηκε μία επιπλέον γεωμετρική παράμετρος, ο λόγος εμβαδού (area ratio) του ανοίγματος. Η χρήση του ανοίγματος της βελόνης ως παραμέτρου δεν προτιμήθηκε, λόγω του γεγονότος ότι στις διαφορετικές γεωμετρίες οι οποίες εξετάστηκαν, περιπτώσεις με παρόμοιο άνοιγμα παρουσίαζαν μεγάλη διαφορά ως προς την παροχή μάζας την οποία διαχειρίζονταν.

Αυτό οφείλεται στο μεγάλο εύρος γωνιών οι οποίες εξετάστηκαν, και οι οποίες προκαλούν ανάλογα μεγάλες αποκλίσεις στην παροχή. Συγκεκριμένα, αντί της άμεσης θεώρησης του ανοίγματος βελόνης,  $F$ , του ακροφυσίου, επιλέχθηκε ο λόγος του εμβαδού της διατομής ανοίγματος της εκάστοτε προσομοίωσης, ανηγμένο στο εμβαδόν της διατομής ανοίγματος του στομίου του ακροφυσίου, δηλαδή του εμβαδού του κύκλου, που αντιστοιχεί στη διάμετρο του στομίου του ακροφυσίου, 18mm.

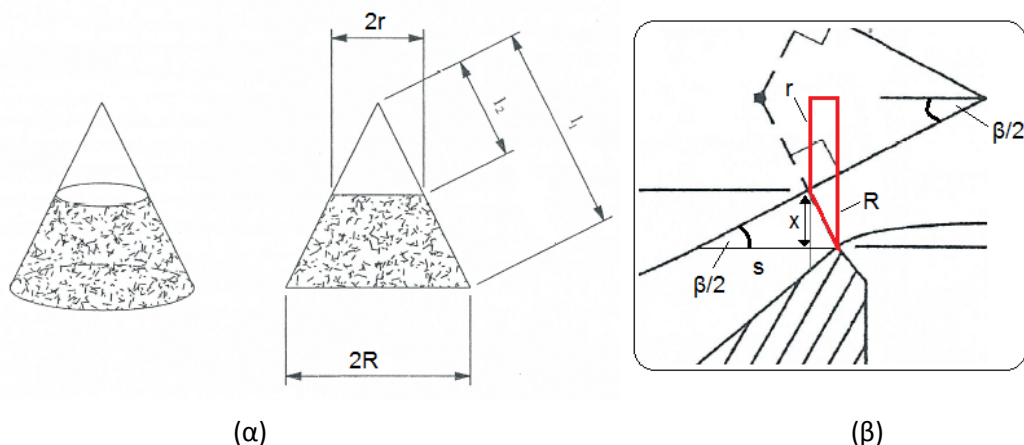
Η διατομή από την οποία διέρχεται το ρευστό και η οποία προκύπτει από το εκάστοτε άνοιγμα της βελόνης αντιστοιχεί σε κόλουρο κώνο, σύμφωνα με τα Σχήματα 4.2 και 4.3.



**Σχήμα 4.2:** Διδιάστατο σκαρίφημα της γεωμετρίας του ακροφυσίου [41]

Αν θεωρηθεί η αδιάστατη ποσότητα του λόγου του εμβαδού του ανοίγματος, τότε το εμβαδόν του κόλουρου κώνου, από το οποίο διέρχεται κάθετα το ρευστό, για κάθε διαφορετική γεωμετρία θα είναι ένα ποσοστό του εμβαδού του στομίου του ακροφυσίου. Η ποσότητα αυτή, σε αντίθεση με το άνοιγμα της βελόνης, έχει μεγάλη φυσική σημασία, διότι συνδέει τη γεωμετρία του ακροφυσίου με την διερχόμενη παροχή, και έτσι πλέον ακόμα και γεωμετρίες με πολύ διαφορετικές γωνίες, αν έχουν ίσους λόγους εμβαδού, θα έχουν παρόμοια παροχή μάζας. Στο Σχήμα 4.3 (α) και (β) παρουσιάζεται η γεωμετρία του ακροφυσίου, όπου ο υπόψιν κόλουρος κώνος είναι επισημασμένος με κόκκινη γραμμή, και όπου:

- $s$ , το άνοιγμα της βελόνης
- $\beta$ , η γωνία της βελόνης
- $b$ , η κάθετη απόσταση από την άκρη του στομίου του ακροφυσίου προς τη βελόνη
- $R$  και  $r$ , οι ακτίνες των βάσεων



**Σχήμα 4.3:** Λεπτομέρεια της γεωμετρίας του ακροφυσίου και διαστάσεις κόλουρου κώνου

Από την τριγωνομετρία, η οποία εφαρμόζεται στη λεπτομέρεια του Σχήματος 4.3 (β), προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$M = \pi \cdot b \cdot (R + r) \tag{4.4}$$

$$x = b \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \tag{4.5}$$



$$b = s \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (4.6)$$

$$x + r = R \quad (4.7)$$

όπου  $M$ , το εμβαδόν παράπλευρης επιφάνειας του κόλουρου κώνου. Συνεπώς, ο λόγος εμβαδού του ανοίγματος μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\Lambda = \frac{M}{A_0} \quad (4.8)$$

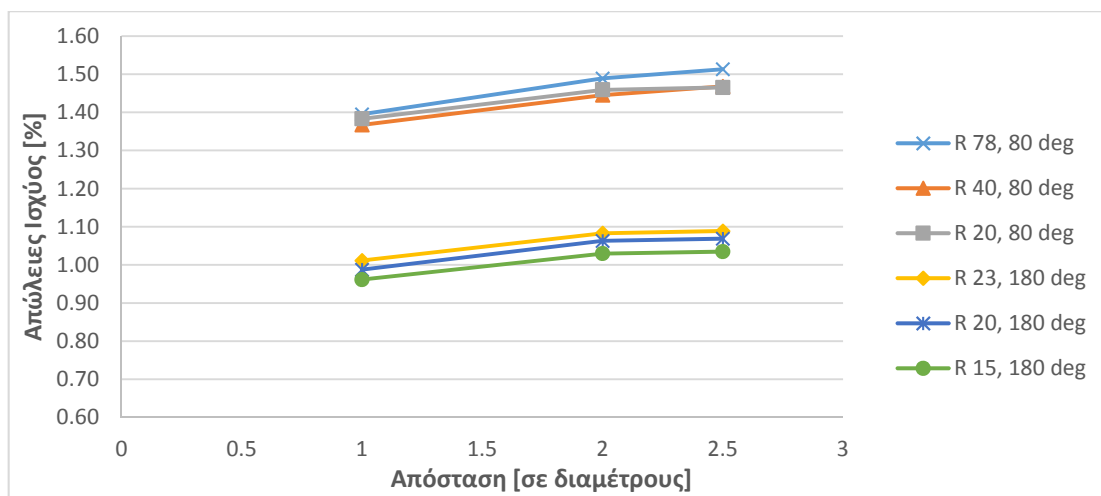
όπου,  $A_0$ , το εμβαδόν του κύκλου που αντιστοιχεί στη διάμετρο του στομίου του ακροφυσίου  $D_0$ .

Στη συνέχεια, και με τη βοήθεια του σκαριφήματος που προέκυψε στο Solidworks, υπολογίστηκε, για την αρχική γεωμετρία του ακροφυσίου του υδροστροβίλου το εμβαδόν του μέγιστου και του ελάχιστου κόλουρου κώνου, όταν η γωνία της βελόνης είναι  $50^\circ$ . Επιλέχθηκε ως μέγιστος κώνος, αυτός ο οποίος αντιστοιχεί σε άνοιγμα βελόνης ίσο προς 38.6mm. Σ αυτή την περίπτωση ισχύει ότι  $R = b = 18mm$  και για τον λόγο αυτό, όπως αναφέρθηκε ήδη, επιλέχθηκε αυτή η θέση ως άνω όριο στη μεταβλητή. Αντίστοιχα, ως κάτω όριο του λόγου του εμβαδού ανοίγματος επιλέχθηκε η θέση όπου το άνοιγμα βελόνης είναι ίσο προς 4 mm, στην οποία η κάθετη απόσταση  $b$  είναι ίση προς 1.7mm, τιμή η οποία είναι περίπου ίση με το 1/10 της μέγιστης δυνατής. Αφού βρέθηκαν τα υπόλοιπα μεγέθη, υπολογίστηκαν το μέγιστο και το ελάχιστο εμβαδό κόλουρου κώνου, και στη συνέχεια στρογγυλοποιήθηκαν στο κοντινότερο δεκαδικό. Με τον τρόπο αυτό προέκυψε το εύρος τιμών του λόγου του εμβαδού ανοίγματος, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 0.2 και 1.1. Έτσι, για παράδειγμα στην περίπτωση που ισχύει ότι  $\Lambda=1$ , οποιαδήποτε και αν είναι η γωνία του στομίου και της βελόνης στη συγκεκριμένη θέση, η παροχή η οποία θα διέρχεται διαμέσου του ακροφυσίου θα είναι ίδια με την παροχή του ακροφυσίου του αρχικού υδροστροβίλου στο μέγιστο άνοιγμά του. Με τον τρόπο αυτό, διευκολύνεται η σύγκριση μεταξύ των μεγεθών που θα προκύψουν από τις προσομοιώσεις της μελέτης βελτιστοποίησης. Στο παραπάνω σύστημα τεσσάρων εξισώσεων, Εξισώσεις (4.4) έως (4.7), υπάρχουν έξι άγνωστοι. Ωστόσο, τα  $\beta$  και  $M$  θα είναι γνωστά, όντας παράμετροι σχεδίασης. Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα επιλύεται, και προκύπτει μία δευτεροβάθμια εξίσωση ως προς το άνοιγμα της βελόνης,  $s$ . Από τις δύο πιθανές λύσεις, η μία προκύπτει πάντα αρνητική, οπότε δεν έχει φυσική σημασία. Συνεπώς, σε κάθε περίπτωση όπου είναι γνωστές οι παράμετροι σχεδίασης, προκύπτουν και τα υπόλοιπα γεωμετρικά μεγέθη του ακροφυσίου.

#### 4.2.2.3 Επίδραση της Καμπυλότητας του Ακροφυσίου και της Βελόνης

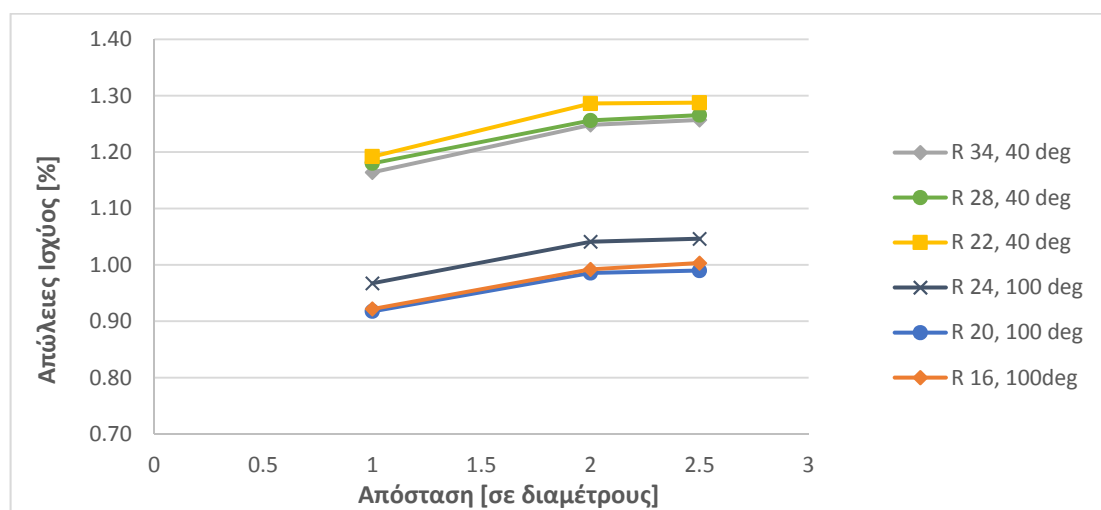
Εκτός των ήδη αναφερθέντων, μελετήθηκαν ακόμη δύο γεωμετρικές παράμετροι ως προς την επίδρασή τους στις απώλειες ισχύος του ακροφυσίου. Συγκεκριμένα, οι ακτίνες καμπυλότητας του ακροφυσίου και της βελόνης,  $I$  και  $J$  αντίστοιχα (Σχήμα 3.4). Αποφασίστηκε η διατήρηση της μορφής της καμπυλότητας των τοιχωμάτων αυτών σε τόξο κύκλου, λόγω της απλότητάς τους. Για τον σκοπό της μελέτης αυτής, κατασκευάστηκαν συνολικά 12 γεωμετρίες, όπου ανά τριάδα διέφερε η ακτίνα καμπυλότητας του ακροφυσίου ή της βελόνης, ενώ όλα υπόλοιπα γεωμετρικά μεγέθη παρέμεναν σταθερά. Δοκιμάστηκαν γεωμετρίες στα άκρα του εύρους τιμών των γωνιών του ακροφυσίου αλλά και της βελόνης. Από τα αποτελέσματα, βρέθηκαν οι ακτίνες καμπυλότητας για τις συγκεκριμένες γωνίες, οι οποίες απέδιδαν ελαττωμένες απώλειες. Στη συνέχεια, για τις υπόλοιπες γεωμετρίες και γωνίες, οι ακτίνες καμπυλότητας επελέγησαν με χρήση γραμμικής παρεμβολής.

Αρχικά, για την περίπτωση της ακτίνας καμπυλότητας του ακροφυσίου,  $I$ , πραγματοποιήθηκαν 6 προσομοιώσεις. Οι τρεις πρώτες αφορούσαν την μικρότερη γωνία του στομίου η οποία θα κατασκευάζονταν, δηλαδή οι  $80^\circ$ , και οι ακτίνες καμπυλότητας οι οποίες δοκιμάστηκαν είχαν μέγεθος R78, R40 και R20 mm αντίστοιχα. Να σημειωθεί εδώ ότι στην περίπτωση αυτή, όπως και στις υπόλοιπες, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις στις γωνίες οι οποίες προέκυψαν από το λογισμικό Design-Expert για την μελέτη βελτιστοποίησης. Έτσι, ενώ το κάτω όριο της γωνίας του ακροφυσίου στη μελέτη βελτιστοποίησης είναι οι  $100^\circ$ , το λογισμικό με σκοπό τη διενέργεια αξιόπιστων μετρήσεων, επέλεξε να πραγματοποιηθούν αυτές και σε ακόμα χαμηλότερες γωνίες. Τα υπόλοιπα γεωμετρικά μεγέθη παρέμειναν σταθερά για τις προσομοιώσεις αυτές. Αντίστοιχα, για το άνω όριο των γωνιών ακροφυσίου, δηλαδή τις  $180^\circ$ , μελετήθηκαν οι ακτίνες R23, R20 και R15 mm αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Μελέτη της επίδρασης της ακτίνας καμπυλότητας του ακροφυσίου

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η αντίστοιχη μελέτη για την ακτίνα καμπυλότητας της βελόνης. Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με σκοπό την εύρεση της ακτίνας καμπυλότητας της βελόνης.



Σχήμα 4.5: Μελέτη της επίδρασης της ακτίνας καμπυλότητας της βελόνης

Το εύρος τιμών στο οποίο θα κυμαίνονταν η ακτίνα στην περίπτωση αυτή ήταν μικρότερο, λόγω της ιδιαιτερότητας της μορφής της βελόνης. Συγκεκριμένα, αν η βελόνη είχε μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας, θα επιδρούσε αρνητικά στη ροή. Για τον λόγο αυτό, στο κάτω όριο της γωνίας της βελόνης, δηλαδή τις 40°, εξετάστηκαν οι ακτίνες καμπυλότητας R34, R28 και R22 mm. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις και για το άνω όριο της γωνίας της βελόνης, τα 100°, όπου και οι ακτίνες οι οποίες εξετάστηκαν ήταν οι εξής: R24, R20 και R16 αντίστοιχα. Κατά τις προσομοιώσεις αυτές, τα υπόλοιπα γεωμετρικά μεγέθη διατηρήθηκαν σταθερά.

Μελετώντας τα αποτελέσματα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ακτίνα καμπυλότητας επιδρά στις απώλειες ισχύος. Συγκεκριμένα, στον αρχικό υδροστρόβιλο που μελετήθηκε, του οποίου η ακτίνα καμπυλότητας του ακροφυσίου του είναι 78 mm, θα υπήρχε η δυνατότητα να ελαττωθούν οι απώλειές του κατά ένα ποσοστό της τάξης του 0.05%, αν μεταβαλλόταν η καμπυλότητα στα 20 mm. Εντούτοις, η διαφορά αυτή κρίνεται μικρή σε σχέση με αυτήν η οποία προκύπτει από τη μεταβολή άλλων παραμέτρων της διάταξης. Συμπερασματικά, επιλέχθηκε η χρήση των ακούθων ακτίνων καμπυλότητας για τη μελέτη βελτιστοποίησης, με τις υπόλοιπες να προκύπτουν με τη χρήση γραμμικής παρεμβολής, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

**Πίνακας 4.1:** Καθορισμός ακτίνων καμπυλότητας ακροφυσίου και βελόνης

Γωνία ακροφυσίου	Ακτίνα καμπυλότητας
40°	R33 mm
180°	R15 mm
Γωνία βελόνης	Ακτίνα καμπυλότητας
40	R34 mm
100	R20 mm

#### 4.2.3 Καθορισμός των Παραμέτρων Σχεδιασμού και Μεθόδου Βελτιστοποίησης

Έπειτα από τις προκαταρκτικές μελέτες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν και περιγράφηκαν προηγουμένως και σε συνδυασμό με την εμπειρία που αποκτήθηκε από τις προσομοιώσεις με τη χρήση μεθόδων CFD, από τις υποψήφιες παραμέτρους σχεδιασμού, επιλέχθηκαν οι τρεις οι οποίες κρίθηκε ότι έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στην εξέλιξη της ροής στο ακροφύσιο. Το πάχος της βελόνης και η ολική πίεση εισόδου θεωρήθηκαν ότι έχουν τη μικρότερη επίδραση στη ροή και στην απόδοση του ακροφυσίου. Οπότε, οι παράμετροι οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν ως παράγοντες στη μελέτη βελτιστοποίησης ήταν η γωνία του στομίου του ακροφυσίου, C, η γωνία της βελόνης, B και ο λόγος του εμβαδού ανοίγματος, Λ. Το επόμενο βήμα ήταν να καθοριστούν τα όρια για το χώρο του σχεδιασμού (design space) που έπρεπε να μελετηθεί. Ο καθορισμός των ορίων των μεταβλητών παρουσιάζει δυσκολίες, διότι τα βέλτιστα σημεία ενδέχεται να βρίσκονται εκτός του χώρου σχεδιασμού. Για τον λόγο αυτό, συνιστάται ο χώρος σχεδιασμού, σε αρχικό τουλάχιστον επίπεδο να είναι όσο μεγαλύτερος γίνεται. Εάν στο τέλος του πειράματος, οι στόχοι του σχεδιασμού πληρούνται στην άκρη του χώρου του σχεδιασμού για κάθε μεταβλητή, αυτός μπορεί να προσαρμοστεί περαιτέρω στην κατεύθυνση αυτή, ώστε να προσπαθήσει να φέρει τα

βέλτιστα σημεία εντός του [23]. Η επιλογή του εύρους καθεμίας από τις τρεις αυτές παραμέτρους βασίστηκε στα ανωτέρω, αλλά και στη γνώση η οποία προέκυψε από τις προσομοιώσεις CFD οι οποίες προηγήθηκαν. Το εύρος τιμών προέκυπτε γύρω από τις κεντρικές τιμές του κάθε παράγοντα. Τέλος, αποφασίστηκε η επιλογή ενός μοντέλου τετραγωνικής επιφάνειας απόκρισης, το οποίο απαιτούσε τρία επίπεδα (levels) για τον κάθε παράγοντα, δηλαδή ένα χαμηλό, ένα κεντρικό και ένα υψηλό επίπεδο τιμών. Στον Πίνακα 4.2 συνοψίζονται οι κεντρικές τιμές του κάθε παράγοντα, με τα ανώτερα και κατώτερα όρια τα οποία ορίζουν το κάθε εύρος τιμών.

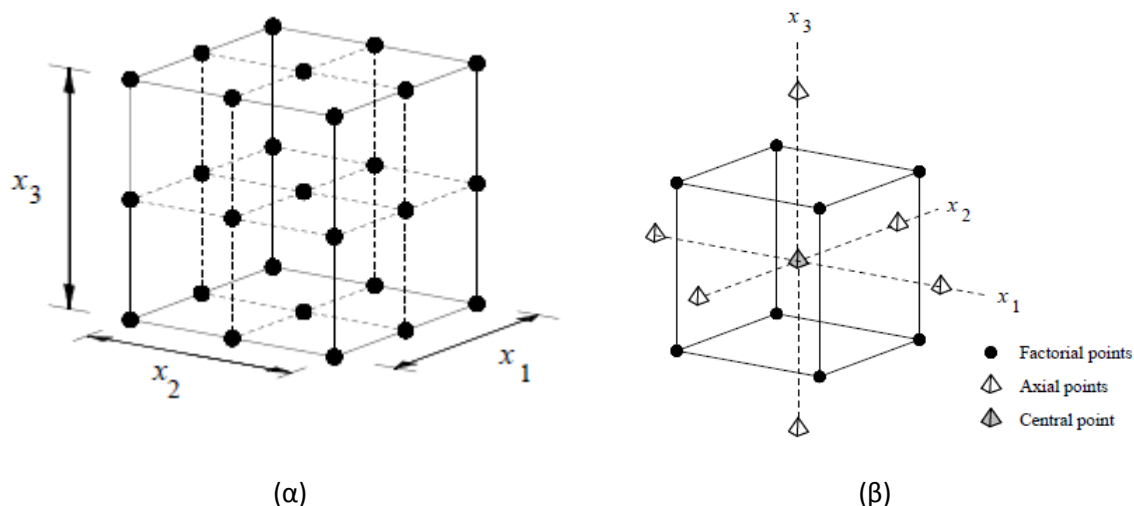
**Πίνακας 4.2:** Εύρος τιμών των παραμέτρων σχεδίασης

Παράγοντας	Ελάχιστο	Κεντρική τιμή	Μέγιστο
Γωνία ακροφυσίου (°)	100	130	160
Γωνία βελόνης (°)	50	70	90
Λόγος εμβαδού (-)	0.35	0.65	0.95

Επόμενο στάδιο της διαδικασίας προετοιμασίας της μελέτης βελτιστοποίησης ήταν ο καθορισμός των πειραμάτων τα οποία έπρεπε να πραγματοποιηθούν. Με την ύπαρξη τριών παραγόντων και τριών επιπέδων, αποφασίστηκε η χρήση του κεντρικού σύνθετου σχεδίου ως του στατιστικού εργαλείου, το οποίο θα παράγει την επιφάνεια απόκρισης με τις λιγότερες δυνατές προσομοιώσεις, δίχως να εμφανίζει προβλήματα ανακρίβειας. Το συγκεκριμένο μοντέλο απαιτεί 15 προσομοιώσεις CFD, σύμφωνα με την εξίσωση  $n = 2^m + 2m + 1$ , όπου  $m$  και  $n$ , ο αριθμός των παραμέτρων σχεδίασης και των απαιτούμενων πειραμάτων αντίστοιχα. Στην εξίσωση αυτή, ο πρώτος όρος αφορά τον αριθμό των παραγοντικών σημείων (factorial points), ο δεύτερος τα αξονικά σημεία (axial points) και τέλος ο τρίτος όρος αφορά την παρουσία ενός κεντρικού σημείου αντίστοιχα, σύμφωνα και με το Σχήμα 4.6 (β). Να σημειωθεί πως για την πραγματοποίηση των στατιστικών υπολογισμών, το λογισμικό Design-Expert κωδικοποιεί τις μεταβλητές εισόδου,  $X_i$ , οι οποίες αντιστοιχούν στην πραγματική τιμή της συγκεκριμένης ανεξάρτητης μεταβλητής, στην μορφή  $x_i$ , η οποία πρόκειται για την αδιάστατη τιμή της αντίστοιχης μεταβλητής, σύμφωνα με την Εξίσωση (4.9):

$$x_i = \frac{(X_i - X_o)}{\delta X} \quad (4.9)$$

όπου  $X_o$ , η τιμή της μεταβλητής στο κεντρικό σημείο και  $\delta X$ , η μεταβολή σε κάθε βήμα. Οι χαμηλές και υψηλές τιμές των παραμέτρων (παραγοντικά σημεία) κωδικοποιούνται ως -1 και +1 αντίστοιχα, το κεντρικό σημείο κωδικοποιείται ως 0 και τέλος, το πεδίο σχεδιασμού επεκτάθηκε έως το + $\alpha$  και - $\alpha$  ( $\alpha = 1.682$ ). Η τιμή του άλφα αντιπροσωπεύει την απόσταση από το κέντρο του χώρου σχεδιασμού ως τα αξονικά σημεία. Αντίθετα, ένας σχεδιασμός πειράματος πλήρους παραγοντικού ( $3^m$  full factorial design), θα απαιτούσε 27 προσομοιώσεις. Η μέθοδος CCD απαιτεί λιγότερα πειράματα για να καθορίσει τον σχεδιαστικό χώρο, λόγω της αρχής αραιότητας των επιδράσεων (sparsity of effects), η οποία αναφέρει ότι η απόκριση του συστήματος συνήθως καθορίζεται από τις κύριες επιδράσεις και τις αλληλεπιδράσεις κατώτερης τάξης μεταξύ των παραγόντων σχεδίασης [23]. Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η μορφή των δύο προαναφερθέντων σχεδιασμών πειράματος για την περίπτωση 3 ανεξάρτητων μεταβλητών. Με κουκίδες και πυραμίδες συμβολίζονται οι θέσεις στις οποίες απαιτείται η διεξαγωγή πειράματος.



**Σχήμα 4.6:** Σχεδιασμός  $3^3$  πλήρους παραγοντικού (α) και κεντρικού σύνθετου σχεδίου (β) για 3 μεταβλητές σχεδιασμού ( $x_1, x_2, x_3$ ) [23]

Οι παράγοντες, δηλαδή οι ανεξάρτητες μεταβλητές του σχεδιασμού συνδυάστηκαν μεταξύ τους με τον τρόπο που πρότεινε η μέθοδος σχεδιασμού πειραμάτων που επιλέχθηκε και προέκυψαν οι αποκρίσεις, ή εξαρτημένες μεταβλητές, οι οποίες στην περίπτωση αυτή είναι οι απώλειες ισχύος και η παροχή μάζας σε κάθε πεδίο ροής. Στη συνέχεια, και με την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων, ο λόγος εμβαδού εκφράστηκε ως παροχή μάζας, διότι εξ αρχής αυτή η παράμετρος ενδιέφερε στη συγκεκριμένη ροή και αναλύθηκαν τα αποτελέσματα, με τη μία πλέον απόκριση που πραγματικά ενδιαφέρει, τις απώλειες ισχύος.

### 4.3 Αποτελέσματα Μελέτης DOE

Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.2, ο σχεδιασμός του πειράματος πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο CCD. Αξίζει να σημειωθεί πως η χρήση των μεθόδων DOE και RSM τυπικά χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό και τη διεξαγωγή πειραμάτων, ωστόσο είναι εφικτή η χρήση τους για τον σχεδιασμό και την ανάλυση μελέτης βελτιστοποίησης η οποία πραγματοποιείται με προσομοιώσεις CFD [21, 35, 40]. Έτσι, λόγω της ύπαρξης τριών παραμέτρων σχεδιασμού, απαιτήθηκαν 15 προσομοιώσεις CFD για τη διεξαγωγή της μελέτης, σύμφωνα με την εξίσωση  $n = 2^m + 2m + 1$ . Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζεται το εύρος τιμών των παραμέτρων, βάσει των επιπέδων των παραγόντων. Σημειώνεται πως παρά το γεγονός ότι πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε όλο το εύρος τιμών το οποίο παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.3, η ανάλυση των αποτελεσμάτων και της απόκρισης δεν ενδείκνυται να πραγματοποιείται πέρα από τα παραγοντικά σημεία του CCD, δηλαδή τα σημεία με την κωδικοποίηση  $\pm\alpha$ .

**Πίνακας 4.3:** Εύρος τιμών των παραμέτρων σχεδίασης βάσει του σύνθετου κεντρικού σχεδίου (CCD)

Παράμετρος	Επίπεδο των παραγόντων				
	- $\alpha$	-1	0	1	+ $\alpha$
Γωνία Ακροφυσίου ( $X_1$ , °)	80	100	130	160	180
Γωνία Βελόνης ( $X_2$ , °)	40	50	70	90	100
Λόγος Εμβαδού ( $X_3$ )	0.2	0.35	0.65	0.95	1.1

Με βάση τα παραπάνω, ο σχεδιασμός CCD πρότεινε τα 15 σημεία, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4, στα οποία τελικά πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της ροής, ώστε να προκύψει η επιφάνεια απόκρισης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο μοναδικός περιορισμός ο οποίος τέθηκε, ήταν να μην προκύψουν γεωμετρίες στις οποίες η γωνία της βελόνης να ξεπερνά σε μέτρο την αντίστοιχη του ακροφυσίου, πρακτική η οποία δεν συνίσταται από τους κατασκευαστές των υδροστροβίλων δράσης, διότι σε αυτή την περίπτωση η δέσμη του νερού δεν συγκλίνει, αλλά διασπείρεται κατά την έξοδο της από το ακροφύσιο, οδηγώντας σε διάβρωση και δημιουργία σημαδιών στο μέταλλο [41]. Να σημειωθεί ότι στις προσομοιώσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν, η ολική πίεση εισόδου ρυθμίστηκε στα 1.5 MPa, δηλαδή περίπου 150 mSY, ενώ το πάχος της βελόνης τέθηκε σε κάθε γεωμετρία ίσο προς 25mm (το μισό του ολικού πάχους).

Στη συνέχεια, κατασκευάστηκαν οι προτεινόμενες γεωμετρίες, δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα πλέγματα, τα οποία είχαν την ίδια πυκνότητα, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων και πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις, με τη χρήση των ρυθμίσεων επιλύτη οι οποίες περιγράφηκαν στην ενότητα 3.6. Άλλωστε, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με χρήση τόσο του μοντέλου τύρβης SST, όσο και του k-ε realizable με χρήση επεκτάσιμων συναρτήσεων τοιχώματος, για μεγαλύτερη αξιοπιστία, αλλά και για τη δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της ροής με τη χρήση των μοντέλων τύρβης SST και k-ε realizable.

**Πίνακας 4.4:** Σημεία διεξαγωγής προσομοιώσεων βάσει του σύνθετου κεντρικού σχεδίου (CCD)

A/A	Παράμετρος 1	Παράμετρος 2	Παράμετρος 3
	Γωνία Ακροφυσίου ( $X_1, ^\circ$ )	Γωνία Βελόνης ( $X_2, ^\circ$ )	Λόγος Εμβαδού ( $X_3$ )
1	160	50	0.95
2	130	70	1.1
3	100	50	0.35
4	100	50	0.95
5	130	100	0.65
6	160	50	0.35
7	130	70	0.2
8	130	70	0.65
9	160	90	0.95
10	130	40	0.65
11	100	90	0.35
12	180	70	0.65
13	80	70	0.65
14	100	90	0.95
15	160	90	0.35

**Πίνακας 4.5:** Αποτελέσματα προσομοιώσεων CFD βάσει του σχεδιασμού πειραμάτων CCD και με τη χρήση των μοντέλων τύρβης SST και k-ε realizable

A/A	Μοντέλο SST		Μοντέλο k-ε realizable	
	Απόκριση 1	Απόκριση 2	Απόκριση 1	Απόκριση 2
	Απώλειες Ισχύος (%)	Παροχή Μάζας (kg/s)	Απώλειες Ισχύος (%)	Παροχή Μάζας (kg/s)
1	0.428	32.68	0.563	32.67
2	0.379	35.42	0.491	35.42
3	2.391	15.77	2.395	15.77
4	0.508	36.67	0.585	36.66
5	0.793	26.38	0.902	26.39
6	2.373	13.98	2.446	13.86
7	3.770	8.86	3.752	8.84
8	0.790	26.06	0.845	26.05
9	0.424	31.18	0.535	31.12
10	1.011	25.42	1.097	25.43
11	2.313	17.33	2.306	17.34
12	0.710	23.35	0.832	23.37
13	1.247	29.95	1.264	29.97
14	0.616	35.21	0.693	35.20
15	1.666	15.05	1.745	14.98

### 4.3.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων SST

Στην περίπτωση των προσομοιώσεων της ροής με τη χρήση του μοντέλου SST για την τύρβη, προέκυψαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.5. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4.2, στη συνέχεια, η παράμετρος του λόγου εμβαδού του ανοίγματος αντικαταστάθηκε από την παροχή μάζας, η οποία προέκυψε από τις προσομοιώσεις. Άλλωστε, ο αρχικός λόγος ορισμού του λόγου εμβαδού ήταν η έκφραση εμμέσως της παροχής μάζας, ώστε γεωμετρίες με τελείως διαφορετικά χαρακτηριστικά, να εμφανίζουν περίπου ίδιες παροχές όταν είχαν τον ίδιο λόγο εμβαδού ανοίγματος.

#### 4.2.1.1 Στατιστική Ανάλυση (ANOVA)

Προτού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της μεθόδου RSM για τη βελτιστοποίηση του συστήματος, πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση του μοντέλου τετραγωνικής προσέγγισης, μέσω της διαδικασίας η οποία ονομάζεται ανάλυση των διακύμανσης (ANOVA). Τα αποτελέσματα των απωλειών ισχύος τα οποία προέκυψαν από τις προσομοιώσεις και καταγράφονται με τη μορφή της απόκρισης 1 του Πίνακα 4.5, συσχετίστηκαν με τις τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές (παραμέτρους σχεδίασης) για την διαμόρφωση της πολυωνυμικής εξίσωσης, Εξίσωση (4.1). Συγκεκριμένα, για τον σκοπό του ταιριάσματος των δεδομένων στη μορφή της Εξίσωσης (4.1) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων στις αποκρίσεις των αντίστοιχων κωδικοποιημένων τιμών των παραμέτρων σχεδίασης. Το τελικό μοντέλο, δηλαδή η προβλεπόμενη απόκριση,  $y^p$ , για τις απώλειες ισχύος, σε όρους πραγματικών μεταβλητών σχεδίασης, εκφράζεται από την εξής τετραγωνική εξίσωση:

$$F = \frac{1}{\sqrt{y^p}} = 0.1154 + (2.74e - 3)X_1 + (3.90e - 3)X_2 - 0.018X_3 + (5.49e - 5)X_1X_2 + (2.59e - 4)X_1X_3 - (6.59e - 6)X_2X_3 - (3.16e - 5)X_1^2 - (7.16e - 5)X_2^2 + (5.39e - 4)X_3^2$$

Να σημειωθεί ότι η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση των αποτελεσμάτων των συγκεκριμένων προσομοιώσεων, δεν γίνεται όμως να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση μελλοντικών αποκρίσεων, δηλαδή των υδραυλικών απωλειών, εκτός και αν πρόκειται για γεωμετρικά όμοιο ακροφύσιο. Στην προαναφερθείσα εξίσωση, παρατηρείται ότι έχει πραγματοποιηθεί μετασχηματισμός της απόκρισης. Συγκεκριμένα, με την εφαρμογή του μετασχηματισμού αντίστροφης τετραγωνικής ρίζας (inverse square root), η απόκριση  $y^p$  έχει μετασχηματιστεί στην  $\frac{1}{\sqrt{y^p}}$ . Ο μετασχηματισμός συνηθίζεται στην περίπτωση κατά την οποία ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη απόκριση ξεπερνά το 10 και ο σκοπός του είναι η βελτίωση των στατιστικών ιδιοτήτων της. Το λογισμικό Design-Expert πραγματοποιεί έναν διαγνωστικό έλεγχο, συγκεκριμένα το διάγραμμα Box-Cox (Box-Cox plot), το οποίο συνιστά, αν είναι απαραίτητος, τον κατάλληλο μετασχηματισμό της απόκρισης.

Στη συνέχεια, το λογισμικό πραγματοποιεί υπολογισμούς παλινδρόμησης για την προσέγγιση των διαθέσιμων πολυωνυμικών μοντέλων στην υπό μελέτη απόκριση. Συγκεκριμένα, υπολογίζει τις επιδράσεις όλων των όρων του κάθε μοντέλου και επιλέγει αυτό το οποίο παρέχει την ακριβέστερη αναπαράσταση της πραγματικής απόκρισης. Για τον σκοπό αυτόν, τη σύγκριση δηλαδή των μοντέλων, υπολογίζονται στατιστικά στοιχεία, όπως το παρατηρηθέν επίπεδο σημαντικότητας (p-value), ο συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης (R-squared), ο οποίος ορίζεται από την Εξίσωση (4.3) και η τυπική απόκλιση (standard deviation). Αν εντοπιστεί ένα στατιστικά



σημαντικό μοντέλο, το λογισμικό θα το επιλέξει για χρήση. Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου στηρίζεται σε δύο κυρίως παράγοντες. Αρχικά, πρέπει να είναι το μεγαλύτερης τάξης μοντέλο το οποίο είναι στατιστικά σημαντικό, δηλαδή να έχει χαμηλή τιμή-p. Επιπλέον, το μοντέλο πρέπει να παρουσιάζει απόκλιση μικρότερη από 0.2 μεταξύ των τιμών του προσαρμοσμένου συντελεστή πολλαπλής συσχέτισης (adjusted R-squared) και του αντίστοιχου προβλεπόμενου (predicted R-squared). Σημειώνεται ότι η χρήση του κυβικού μοντέλου προσέγγισης απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό προσομοιώσεων για να δώσει ακριβή αποτελέσματα, σε σχέση με τον αριθμό που περιλαμβάνονται στον σχεδιασμό CCD, οπότε δεν ενδείκνυται για χρήση στην περίπτωση αυτή. Στον πίνακα 4.6 παρουσιάζονται τα στατιστικά των διαθέσιμων μοντέλων προσέγγισης και το πόσο όροι αυξημένης πολυπλοκότητας επιδρούν στην ακρίβεια του μοντέλου.

**Πίνακας 4.6:** Στατιστικά των διαθέσιμων μοντέλων προσέγγισης

Μοντέλο	Τυπική Απόκλιση	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	Τιμή-p
Γραμμικό	0.090	0.9519	0.9388	0.9098	0.17	<0.0001
2FI	0.075	0.9760	0.9580	0.9432	0.11	0.1187
Τετραγωνικό	<u>0.037</u>	<u>0.9964</u>	<u>0.9900</u>	<u>0.9663</u>	<u>0.063</u>	<u>0.0165</u>

Το λογισμικό πρότεινε το τετραγωνικό μοντέλο για την προσέγγιση της επιφάνειας. Τα στατιστικά του συγκεκριμένου μοντέλου δικαιολογούν την επιλογή αυτή, μιας και παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή-p, όντας ταυτόχρονα δεύτερης τάξης. Αυτή η τιμή καθορίζει την πιθανότητα οι όροι του μοντέλου να μοντελοποιούν σφάλματα και θόρυβο αντί να εξηγούν την τάση της απόκρισης. Επίσης, το τετραγωνικό μοντέλο παρουσιάζει τη χαμηλότερη τυπική απόκλιση του σφάλματος από τα υπόλοιπα, ενώ επίσης έχει τις υψηλότερες τιμές για τους τρεις συντελεστές συσχέτισης. Οι συντελεστές αυτοί έχουν τιμή κοντά στο 1, και φανερώνουν υψηλή συσχέτιση μεταξύ των υπολογισμένων από τις προσομοιώσεις τιμών και των αντίστοιχων προβλεπόμενων. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης, R-squared, αποτελεί μέτρο της διακύμανσης των πραγματικών αποκρίσεων οι οποίες μπορούν να εξηγηθούν από τους παράγοντες του πειράματος και τις μεταξύ τους σχέσεις. Η τιμή του, η οποία ισούται προς 0.9964, υποδεικνύει πως μόλις το 0.36% των συνολικών διακυμάνσεων δεν γίνεται να εξηγηθεί από το συγκεκριμένο μοντέλο.

Οι τιμές των συγκεκριμένων συντελεστών δείχνουν ότι το επιλεγμένο μοντέλο παλινδρόμησης παρέχει μια εξαιρετική επεξήγηση της σχέσης μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών και της απόκρισης. Τέλος, το τετραγωνικό μοντέλο παρουσιάζει χαμηλή τιμή για το προβλεπόμενο άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων (PRESS), το οποίο είναι ένα μέτρο του πόσο καλά το μοντέλο ταιριάζει σε κάθε σημείο του σχεδιασμού. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του PRESS, τόσο πιο ακριβές είναι το μοντέλο για την πρόβλεψη μελλοντικών αποτελεσμάτων.

Οι τιμές οι οποίες προέκυψαν από τη στατιστική ανάλυση της διακύμανσης του μοντέλου τετραγωνικής παλινδρόμησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7.

**Πίνακας 4.7:** Στατιστική ανάλυση της διακύμανσης του μοντέλου τετραγωνικής παλινδρόμησης για τις απώλειες ισχύος (SST)

Πηγή	Άθροισμα των Τετραγώνων	Βαθμοί Ελευθερίας	Απόκλιση Μέσου Τετραγώνου	Τιμή-F	Τιμή-p Prob > F
Μοντέλο	1.86	9	0.21	154.78	< 0.0001
$X_1$ -Γωνία Ακροφυσίου	0.24	1	0.24	176.72	< 0.0001
$X_2$ -Γωνία Βελόνης	3.589E-003	1	3.589E-003	2.69	0.1617
$X_3$ -Παροχή Μάζας	1.73	1	1.73	1297.85	< 0.0001
$X_1X_2$	8.462E-003	1	8.462E-003	6.35	0.0532
$X_1X_3$	0.036	1	0.036	26.75	0.0035
$X_2X_3$	1.173E-005	1	1.173E-005	8.806E-003	0.9289
$X_1^2$	5.780E-003	1	5.780E-003	4.34	0.0917
$X_2^2$	4.378E-003	1	4.378E-003	3.29	0.1296
$X_3^2$	0.011	1	0.011	8.22	0.0351
Υπόλοιπο	6.662E-003	5	1.332E-003		
Ολικό Διορθωμένο Άθροισμα Τετραγώνων	1.86	14			

Στη βάση των τιμών που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, πραγματοποιήθηκε στατιστικός έλεγχος χρησιμοποιώντας το τεστ Fisher για την ανάλυση της διακύμανσης. Ο έλεγχος της εξίσωσης δεύτερης τάξης αποκάλυψε ότι η παλινδρόμηση είναι στατιστικά σημαντική ( $p < 0.0001$ ). Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η εξίσωση απόκρισης αποδεικνύεται κατάλληλη για την περιγραφή των προσομοιώσεων του πειράματος CCD. Η τιμή-F ορίζεται ως ο λόγος του μέσου αθροίσματος των τετραγώνων λόγω διακύμανσης του μοντέλου προς το αντίστοιχο άθροισμα λόγω θορύβου. Η τιμή-F του μοντέλου, η οποία είναι 154.78, υπονοεί ότι το συγκεκριμένο μοντέλο είναι στατιστικά σημαντικό για την μέτρηση των απωλειών του ακροφυσίου του υδροστροβίλου. Έτσι, υπάρχει μόνο 0.01% πιθανότητα πως μία τόσο αυξημένη τιμή-F οφείλεται σε σφάλμα και θόρυβο. Επίσης, κάθε όρος του μοντέλου εξετάστηκε για τη σημαντικότητά του. Συγκεκριμένα, τιμές-p μικρότερες του 0.05, λόγω του διαστήματος εμπιστοσύνης το οποίο έχει επιλεγεί, χαρακτηρίζουν όρους του μοντέλου οι οποίοι είναι σημαντικοί στατιστικά. Αντίθετα, οι όροι οι οποίοι έχουν τιμές-p μεγαλύτερη του 0.1, έχουν μικρή επίδραση στις απώλειες. Συνεπώς, παρατηρείται πως οι γραμμικοί όροι της γωνίας του ακροφυσίου ( $X_1$ ) και της παροχής μάζας ( $X_3$ ) έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στις απώλειες ισχύος. Άλλωστε, ο τετραγωνικός όρος της παροχής μάζας ( $X_3^2$ ) εμφανίζεται επίσης να έχει μεγάλη επίδραση στο μοντέλο. Αντίθετα, ο τετραγωνικός όρος της γωνίας της βελόνης ( $X_2^2$ ) έχει μεγαλύτερη επίδραση σε σχέση με τον αντίστοιχο γραμμικό.

Συμπερασματικά, η επίδραση της γωνίας της βελόνης στις απώλειες ισχύος μοντελοποιείται καλύτερα με τον τετραγωνικό όρο. Αξίζει να σημειωθεί πως ο μοναδικός όρος αλληλεπίδρασης ο οποίος φαίνεται να ασκεί επίδραση στις απώλειες ισχύος είναι αυτός μεταξύ της γωνίας του ακροφυσίου και της παροχής μάζας ( $X_1X_3$ ), υποδεικνύοντας συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Οι όροι οι οποίοι δεν είναι σημαντικοί στατιστικά μπορούν να απαλειφθούν από την

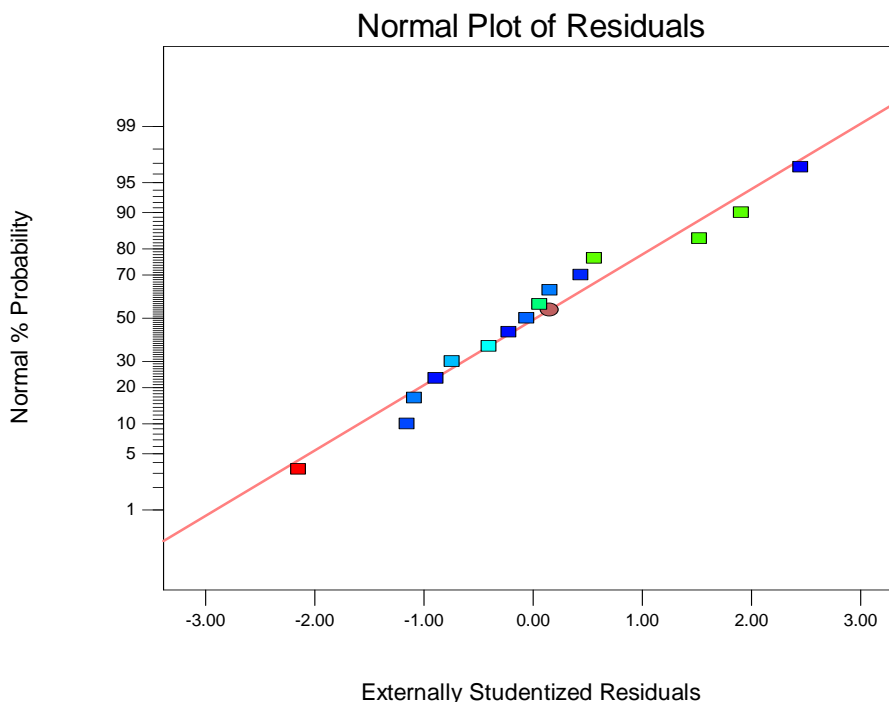
εξίσωση του μοντέλου, κάτι το οποίο θα οδηγήσει στη βελτίωσή του. Τέλος, στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζεται η σύνοψη των στατιστικών του τετραγωνικού μοντέλου.

**Πίνακας 4.8:** Σύνοψη των στατιστικών του μοντέλου τετραγωνικής παλινδρόμησης

<b>Τυπική απόκλιση</b>	0.037	<b>R-Squared</b>	0.9964
<b>Μέση τιμή</b>	1.06	<b>Adjusted R-Squared</b>	0.9900
<b>Συντελεστής μεταβλητότητας %</b>	3.44	<b>Predicted R-Squared</b>	0.9663
<b>PRESS</b>	0.063	<b>Επαρκής ακρίβεια</b>	35.205

Η επαρκής ακρίβεια αποτελεί ένα μέτρο του λόγου του σήματος προς τον θόρυβο και μία τιμή του μεγέθους αυτού μεγαλύτερη του 4 είναι επιθυμητή. Παρατηρείται ότι η τιμή της επαρκούς ακρίβειας του μοντέλου είναι ιδιαίτερα υψηλή, συγκεκριμένα 35.205, κάτι το οποίο υποδεικνύει επαρκές σήμα. Συνεπώς, το μοντέλο αυτό δύναται να χρησιμοποιηθεί για την διερεύνηση του χώρου σχεδιασμού. Οι διαγνωστικές λεπτομέρειες του συγκεκριμένου μοντέλου μπορούν να γίνουν ευκολότερα κατανοητές με τη χρήση των ειδικών γραφημάτων τα οποία παρέχει το λογισμικό και τα οποία βοηθούν σημαντικά στην εξέταση των στατιστικών ιδιοτήτων του μοντέλου και κατά συνέπεια στη διαπίστωση της ακρίβειάς του.

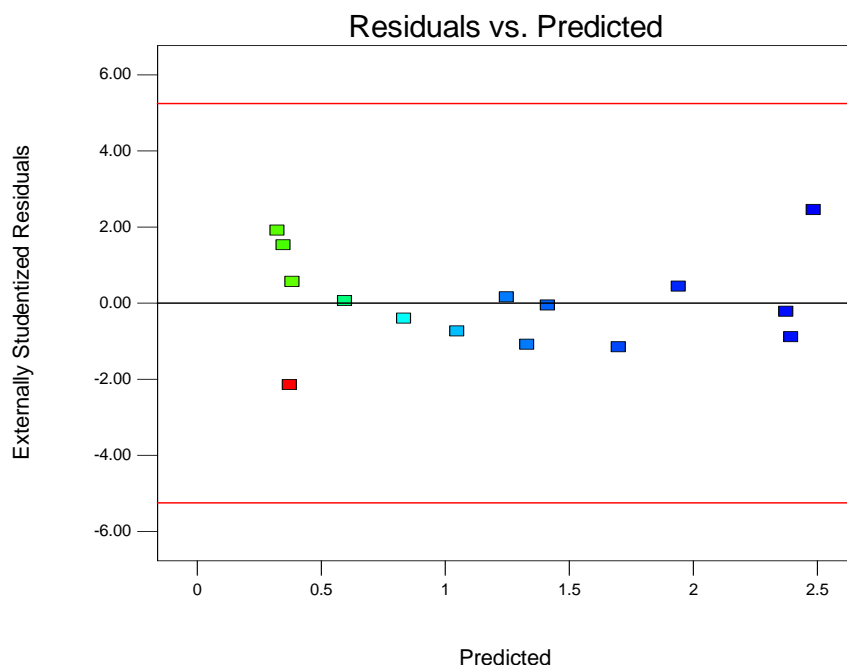
Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται το γράφημα κανονικής πιθανότητας (normal probability plot) των υπολοίπων (residuals). Το γράφημα αυτό ελέγχει την κανονικότητα των υπολοίπων. Αν αυτά ακολουθούν μια κανονική κατανομή, τα σημεία θα βρίσκονται περίπου σε ευθεία γραμμή. Είναι αναμενόμενη κάποια μικρή διασπορά των υπολοίπων, όμως σε περίπτωση κατά την οποία αυτά έχουν τελείως ακανόνιστη μορφή, όπως για παράδειγμα μία καμπύλη μορφής S, πρέπει να μετασχηματιστεί η απόκριση.



**Σχήμα 4.7:** Γράφημα κανονικής πιθανότητας των υπολοίπων του μοντέλου

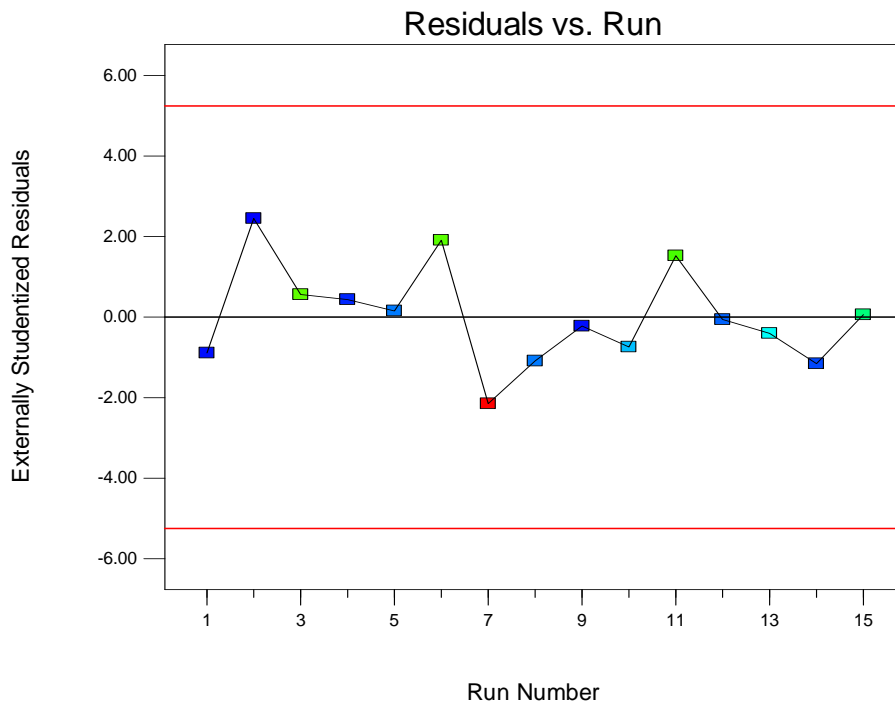
Να σημειωθεί πως τα υπόλοιπα παρουσιάζονται κανονικοποιημένα, όπου οι πραγματικές τιμές τους έχουν μετατραπεί σε αδιάστατους αριθμούς βάσει των τυπικών αποκλίσεων, διαδικασία η οποία ενισχύει τις στατιστικές ιδιότητές τους. Εξετάζοντας το Σχήμα 4.7, δεν παρατηρείται κάποιο πρόβλημα στην κανονικότητα των υπολοίπων, ιδιαίτερα αφού έχει ήδη πραγματοποιηθεί μετασχηματισμός της απόκρισης. Να σημειωθεί ότι ο χρωματισμός των σημείων αντιστοιχεί στην τιμή της απόκρισης την οποία εμφανίζουν, από το κόκκινο για τις μεγαλύτερες σε μέγεθος απώλειες, έως το σκούρο μπλε.

Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται το γράφημα των κανονικοποιημένων υπολοίπων συναρτήσει των προβλεπόμενων τιμών από το μοντέλο απόκρισης (residuals vs. predicted plot), οι οποίες είναι τοποθετημένες σε αύξουσα σειρά. Το γράφημα αυτό ελέγχει την υπόθεση της σταθερής διακύμανσης των υπολοίπων, στην οποία περίπτωση πρέπει να εμφανίζει τυχαία διασπορά, δηλαδή σταθερό εύρος των υπολοίπων κατά μήκος του γραφήματος. Εξετάζοντας τη μορφή του Σχήματος 4.8 προκύπτει η τυχαία κατανομή των κανονικοποιημένων υπολοίπων, επιβεβαιώνοντας την υπόθεση σταθερής διακύμανσης τους.



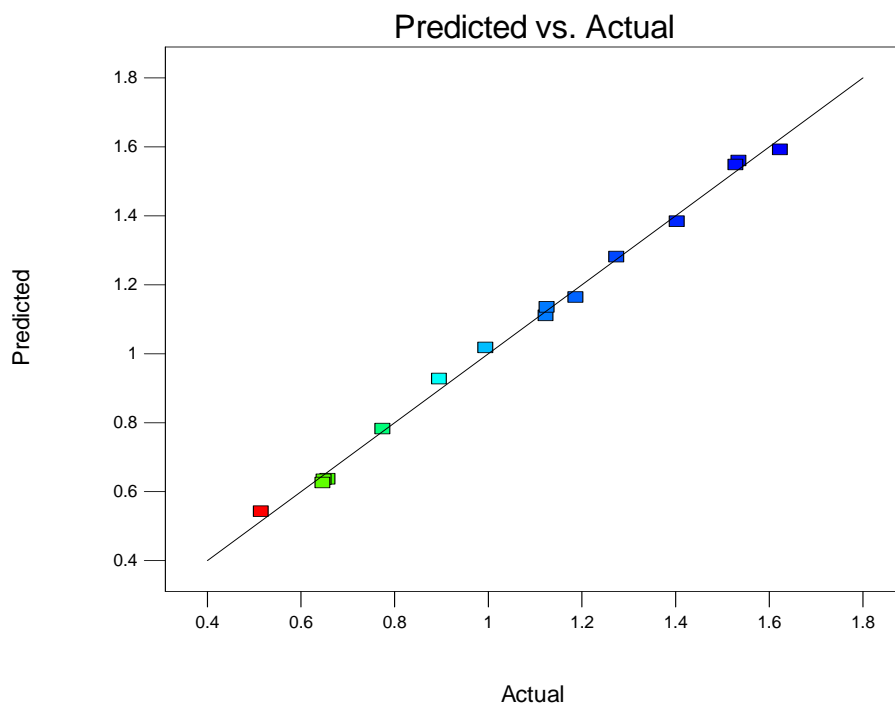
**Σχήμα 4.8:** Γράφημα κανονικοποιημένων υπολοίπων του μοντέλου ως προς τις προβλεπόμενες τιμές

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε το γράφημα του ελέγχου ακραίων τιμών (outlier t-test) στο οποίο παρουσιάζει τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα συναρτήσει της σειράς με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις. Το γράφημα αυτό ελέγχει εάν μία προσομοίωση είναι συνεπής με τις υπόλοιπες. Έτσι, πραγματοποιείται πρόβλεψη της απόκρισης για κάθε προσομοίωση και το υπόλοιπο υπολογίζεται με το στατιστικό τεστ t. Αν η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από το  $\pm 3.5$  (υπολογισμένο για διάστημα εμπιστοσύνης 95%), τότε η συγκεκριμένη προσομοίωση θεωρείται ότι επιδρά πολύ στο μοντέλο και πρέπει να επαναληφθεί. Εξετάζοντας το Σχήμα 4.9, όπου παρουσιάζεται το γράφημα του ελέγχου ακραίων τιμών, παρατηρείται ότι δεν υπάρχει κάποια προσομοίωση η οποία να λαμβάνει ακραία τιμή και η οποία πρέπει να αντικατασταθεί. Συνεπώς, ο πειραματικός σχεδιασμός θεωρείται ότι παρουσιάζει συνέπεια σε όλες τις προσομοιώσεις του.



**Σχήμα 4.9:** Γράφημα ελέγχου ακραίων τιμών

Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται το γράφημα των πραγματικών τιμών της απόκρισης όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, στον οριζόντιο άξονα, σε σχέση με τις προβλεπόμενες από το μοντέλο αντίστοιχες τιμές, στον κατακόρυφο άξονα.



**Σχήμα 4.10:** Σύγκριση τιμών που προέκυψαν από την προσομοίωση και των αντίστοιχων προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών

Με το γράφημα του Σχήματος 4.10 πραγματοποιείται ο γρήγορος εντοπισμός των τιμών οι οποίες δεν προβλέπονται επακριβώς από το μοντέλο. Τα σημεία των δεδομένων πρέπει να είναι μοιρασμένα από τη γραμμή των 45 μοιρών με τον ίδιο τρόπο. Είναι φανερό ότι το μοντέλο περιγράφει επαρκώς το σύνολο του εύρους τιμών, με πολύ μικρές αποκλίσεις, στο όριο του σφάλματος προσομοίωσης.

#### 4.2.1.2 Αποτελέσματα

Ο υπολογισμός των απωλειών ισχύος από τις προσομοιώσεις CFD οι οποίες πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή με στατιστικές μεθόδους μιας τετραγωνικής επιφάνειας απόκρισης, ως προς τις τρεις μεταβλητές σχεδιασμού. Η ανάλυση της διακύμανσης του μοντέλου καθώς και τα διαγνωστικά γραφήματα τα οποία παρουσιάστηκαν, υποδεικνύουν ότι το συγκεκριμένο μοντέλο το οποίο επιλέχθηκε είναι αξιόπιστο και μπορεί να προσεγγίσει με αυξημένη ακρίβεια την πραγματική επιφάνεια απόκρισης. Το τελικό τετραγωνικό μοντέλο, έπειτα από την απαλοιφή των μη σημαντικών όρων σύμφωνα με τα πορίσματα της μελέτης του Πίνακα 4.7 περιγράφεται από τις Εξισώσεις (4.10) και (4.11), σε όρους κωδικοποιημένων και πραγματικών μεταβλητών αντίστοιχα:

$$F = \frac{1}{\sqrt{y^p}} = 0.98 + 0.14x_1 + 0.019x_2 + 0.66x_3 + 0.033x_1x_2 + 0.14x_1x_3 - 0.2x_3^2 \quad (4.10)$$

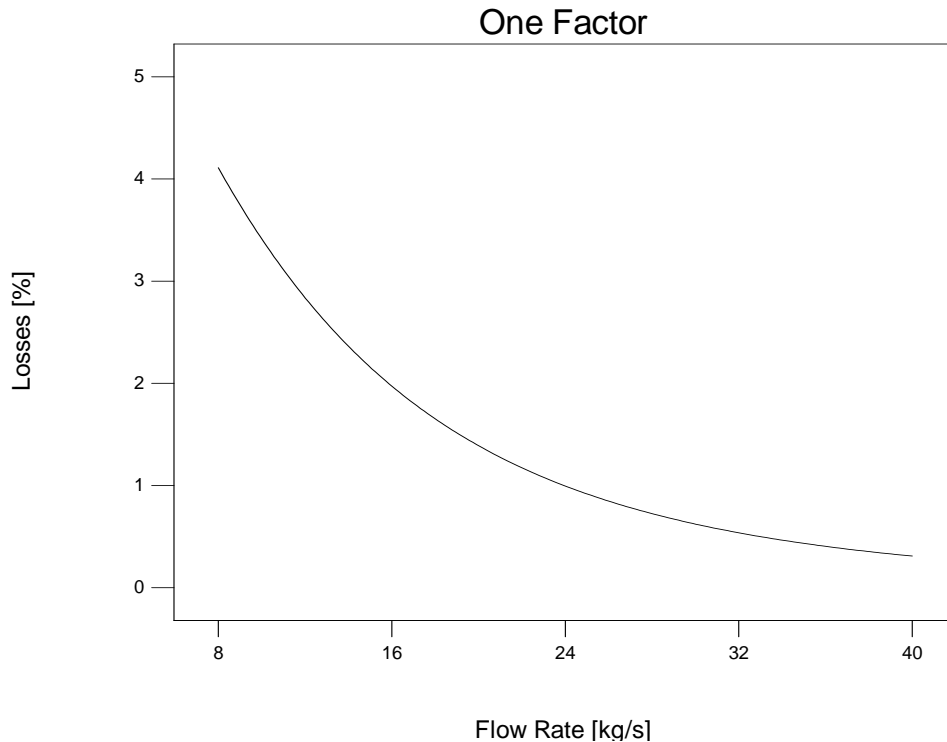
$$F = \frac{1}{\sqrt{y^p}} = 1.1788 - (6.29e - 3)X_1 - (6.17e - 3)X_2 - 0.034X_3 + (5.47e - 5)X_1X_2 + (2.95e - 4)X_1X_3 + (7.68e - 4)X_3^2 \quad (4.11)$$

όπου,  $x_i$  και  $X_i$  είναι η κωδικοποιημένη και η πραγματική (αυτή που έχει προκύψει από τις προσομοιώσεις) τιμή της εκάστοτε μεταβλητής σχεδίασης, σύμφωνα με τα λεχθέντα στην υποενότητα 4.2.3. Από την εξίσωση κωδικοποιημένων μεταβλητών, Εξίσωση (4.10) παρατηρείται ότι με την εξαίρεση του όρου του τετραγώνου της παροχής μάζας, όλοι οι υπόλοιποι όροι επιδρούν στις απώλειες ισχύος με τον ίδιο τρόπο. Συγκεκριμένα, από το θετικό πρόσημο κάθε όρου, συνάγεται το συμπέρασμα, ότι όταν ο όρος αυξάνεται, οι απώλειες ισχύος, όντας στον παρονομαστή του πρώτου μέλους της Εξίσωσης (4.10), ελαττώνονται. Επίσης, το μέγεθος του συντελεστή του εκάστοτε όρου, αποτελεί μέτρο της επίδρασης του στην απόκριση.

Επομένως, παρατηρείται ότι για παράδειγμα η παροχή μάζας ( $x_3$ ) έχει πολύ μεγαλύτερη επίδραση στην απόκριση, δηλαδή τις απώλειες ισχύος, σε σχέση με τη γωνία της βελόνης ( $x_2$ ), ενώ η επίδραση της γωνίας του ακροφυσίου βρίσκεται κάπου ενδιάμεσα. Πρέπει εδώ να σημειωθεί πως η μελέτη και η σύγκριση της επίδρασης των παραγόντων στην απόκριση μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο από τις κωδικοποιημένες μεταβλητές, δηλαδή την Εξίσωση (4.10) και όχι από τις αντίστοιχες πραγματικές της Εξίσωσης (4.11). Άλλωστε, η επίδραση των παραγόντων στην προκύπτουσα απόκριση, δηλαδή στις απώλειες ισχύος, εκτός από την μελέτη της Εξίσωσης (4.10) μπορεί να διερευνηθεί και μέσω των τριδιάστατων απεικονίσεων και των ισοϋψών καμπυλών, οι οποίες προκύπτουν από το μοντέλο.

Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται το διάγραμμα της καμπύλης απόκρισης (one factor plot) για την παροχή μάζας. Η συγκεκριμένη παράμετρος προέκυψε ανεξάρτητη, παρουσιάζοντας περίπου τις ίδιες απώλειες ισχύος για οποιοδήποτε συνδυασμό των άλλων δύο παραμέτρων. Το συγκεκριμένο διάγραμμα παρουσιάζει την επίδραση της αλλαγής του επιπέδου της παροχής μάζας στις απώλειες. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται η παροχή μάζας, ενώ στον κατακόρυφο

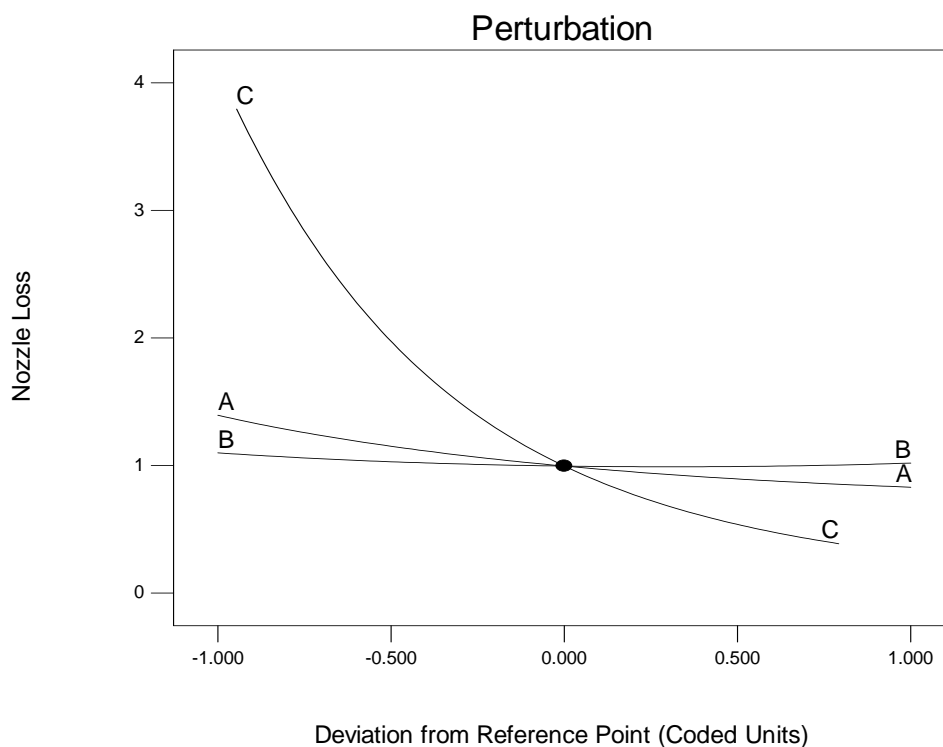
οι απώλειες ισχύος, ενώ οι γωνίες ακροφυσίου και βελόνης είναι σταθερές στο μέσο του εύρους τους, στις  $130^\circ$  και  $70^\circ$  αντίστοιχα.



**Σχήμα 4.11:** Διάγραμμα απωλειών ισχύος συναρτήσει της παροχής μάζας

Εξετάζοντας το διάγραμμα το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11 συνάγεται το συμπέρασμα ότι οι απώλειες ισχύος εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη διερχόμενη παροχή μάζας διαμέσου του ακροφυσίου. Όταν η διερχόμενη παροχή είναι μικρή, το εμβαδόν της διατομής είναι ελαττωμένο, ο συντελεστής τριβών αυξάνεται, ενώ επίσης το οριακό στρώμα το οποίο αναπτύσσεται στην επιφάνεια της βελόνης και του ακροφυσίου επιδρά πολύ περισσότερο στη ροή, άρα οι δυνάμεις ιξώδους είναι μεγάλες και κατά συνέπεια, οι απώλειες ισχύος αυξάνονται.

Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται το διάγραμμα διαταραχών (perturbation plot), το οποίο απεικονίζει τις καμπύλες οι οποίες προκύπτουν από την τομή των επιφανειών απόκρισης. Το συγκεκριμένο διάγραμμα απεικονίζει το πώς μεταβάλλεται η απόκριση, καθώς ο κάθε παράγοντας μετακινείται γύρω από το σημείο αναφοράς, με όλους τους άλλους παράγοντες διατηρημένους σταθερούς. Με αυτό τον τρόπο, πραγματοποιείται η σύγκριση της επίδρασης όλων των παραγόντων σε ένα συγκεκριμένο σημείο στον χώρο του σχεδιασμού. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα το σημείο αναφοράς τοποθετήθηκε στις μέσες τιμές του εύρους των τριών παραγόντων. Συγκεκριμένα, οι γωνίες ακροφυσίου και βελόνης είναι  $130^\circ$  και  $70^\circ$  αντίστοιχα, ενώ η παροχή μάζας είναι τοποθετημένη στα 24 kg/s, στο μέσο (κωδικοποιημένη τιμή 0) όλων των παραγόντων. Το διάγραμμα λοιπόν ξεκινά από το σημείο αυτό και μετρά την απόκριση σε καθέναν από τους τρεις άξονες διαστάσεων.



**Σχήμα 4.12:** Διάγραμμα διαταραχών του μοντέλου

Η ύπαρξη απότομης κλίσης ή καμπυλότητας σε έναν παράγοντα φανερώνει ότι η απόκριση είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στον παράγοντα αυτό. Αντίθετα, μια σχετικά επίπεδη γραμμή δείχνει ελαττωμένη ευαισθησία της απόκρισης στη μεταβολή του συγκεκριμένου παράγοντα. Παρατηρείται ότι η παροχή μάζας (παράμετρος  $x_i$ ) επιδρά πολύ περισσότερο στην εξεταζόμενη απόκριση σε σχέση με τις γωνίες ακροφυσίου και βελόνης. Μάλιστα, στην Εξίσωση (4.10) παρατηρείται ότι στο μοντέλο για τη μέση απόκριση, δεν συμπεριλαμβάνονται οι τετραγωνικοί όροι των γωνιών ακροφυσίου και βελόνης, οπότε συμπεραίνεται ότι η επιφάνεια απόκρισης θα παρουσιάζει μικρή καμπυλότητα κατά μήκος των διαστάσεων  $X_1$  και  $X_2$ . Το διάγραμμα διαταραχών επιβεβαιώνει το παραπάνω με την ύπαρξη σχετικά ευθείων γραμμών για συγκεκριμένες παραμέτρους, αντίθετα με τη μορφή της καμπύλης της παροχής μάζας,  $X_3$ . Συμπερασματικά, οποιαδήποτε μεταβολή των παραγόντων  $X_1$  και  $X_2$  από το σημείο αναφοράς, επιφέρει σχετικά μικρή επίδραση στην απόκριση του συστήματος, δηλαδή τις απώλειες ισχύος, εν αντιθέσει με την ενδεχόμενη μεταβολή της παροχής μάζας.

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι το διάγραμμα διαταραχών παρουσιάζει την επίδραση της μεταβολής ενός παράγοντα κάθε φορά στην απόκριση και δεν συμπεριλαμβάνει ενδεχόμενες αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Για τον λόγο αυτό και επειδή το μοντέλο περιλαμβάνει όρους αλληλεπίδρασης αλλά και καμπυλότητας, είναι απαραίτητη η περαιτέρω εξέταση του συστήματος, με τη μελέτη των ισοϋψών καμπυλών του. Ωστόσο, από τη μελέτη του Σχήματος 4.12, καθώς και των προσήμων της Εξίσωσης (4.10), αναμένεται η ελάττωση των απωλειών ισχύος με την αύξηση των γωνιών του ακροφυσίου και της βελόνης.

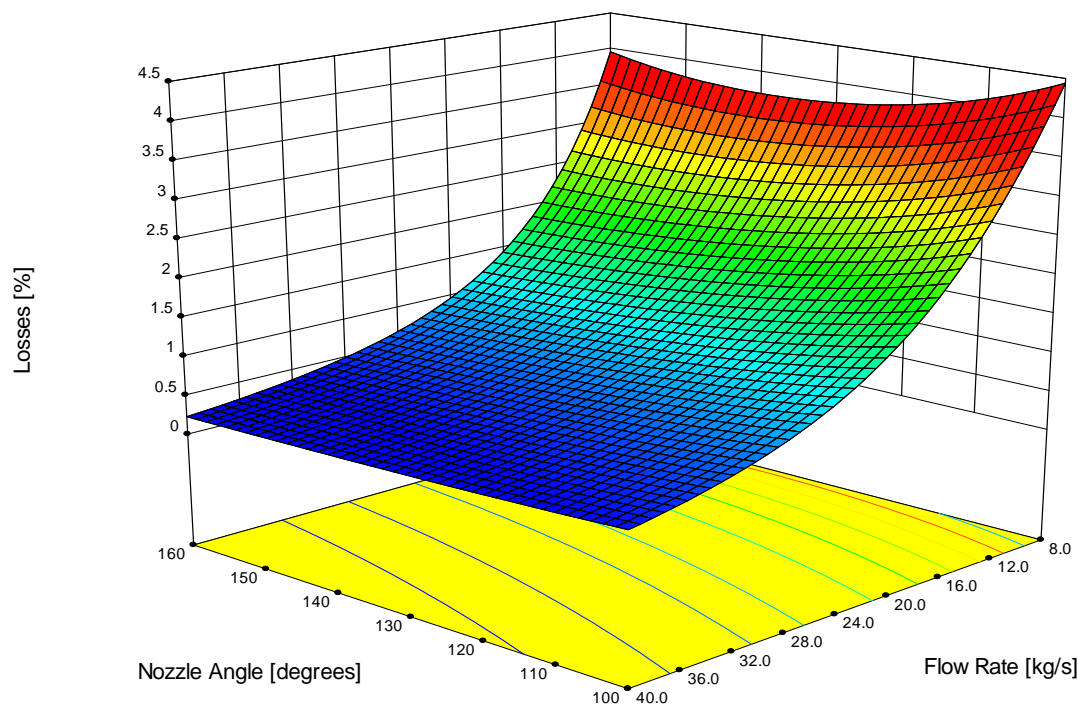


### Μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραμέτρων σχεδίασης

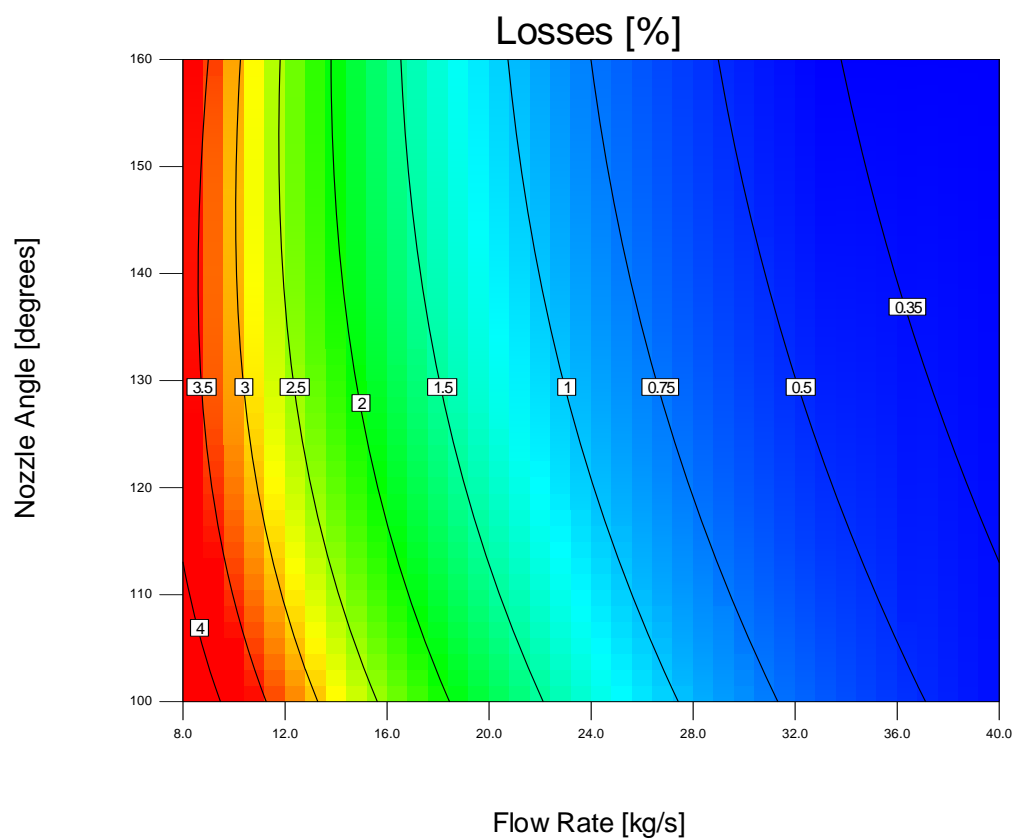
Για να γίνει αντιληπτή η επίδραση της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής, πραγματοποιήθηκαν τριδιάστατες και διδιάστατες απεικονίσεις για την εκτιμώμενη απόκριση, όπως οι τριδιάστατες επιφάνειες (3D surface) των μεγεθών, και οι ισοϋψείς καμπύλες (contour plot). Οι τελευταίες αποτελούν μια διδιάστατη αναπαράσταση της απόκρισης σε όλο το εύρος των επιλεγμένων παραγόντων. Συγκεκριμένα, μπορεί να περιγραφεί το πλήρες εύρος δύο παραγόντων σε μια καμπύλη. Εάν υπάρχουν περισσότεροι από δύο παράγοντες, όπως στην υπόψιν περίπτωση, η ισοϋψής καμπύλη μπορεί να θεωρηθεί ως μία φέτα διαμέσου του χώρου σχεδιασμού. Η τριδιάστατη επιφάνεια αποτελεί ουσιαστικά μία προβολή της ισοϋψούς καμπύλης στο χώρο.

### Μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ της γωνίας του ακροφυσίου και της παροχής μάζας

Αρχικά, στα Σχήματα 4.13 και 4.14 παρουσιάζονται η τριδιάστατη επιφάνεια και η ισοϋψής καμπύλη αντίστοιχα της συνδυασμένης επίδρασης της γωνίας του ακροφυσίου ( $X_1$ ) και της παροχής μάζας ( $X_3$ ) στην εκτιμώμενη απόκριση. Η γωνία της βελόνης διατηρήθηκε σταθερή στο μέσο του εύρους της, δηλαδή στις  $70^\circ$ , ενώ τα σχήματα μετατοπίζονται ελαφρώς προς τα κάτω, δηλαδή προς μικρότερες απώλειες ισχύος, όταν η γωνία της βελόνης μετατοπίζεται προς υψηλότερες τιμές. Αυτό συμβαίνει στις περιοχές που η παροχή μάζας είναι χαμηλή, ενώ στις περιοχές με υψηλές τιμές παροχής, η μετατόπιση της γωνίας της βελόνης δεν επιδρά καθόλου στις απώλειες. Η κλίμακα χρώματος αναπαριστά κάποια τιμή της απόκρισης, με το κόκκινο χρώμα να αφορά σημεία με μεγάλες απώλειες ισχύος και το σκούρο μπλε τις χαμηλότερες απώλειες. Είναι φανερό εξετάζοντας τα σχήματα ότι, όπως προαναφέρθηκε, οι απώλειες ισχύος εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη διερχόμενη παροχή μάζας. Συγκεκριμένα, διατηρώντας τη γωνία του ακροφυσίου σταθερή, όταν η παροχή μάζας αυξάνεται, οι απώλειες ελαττώνονται δραματικά· για παράδειγμα στο ζεύγος γωνιών ακροφυσίου και βελόνης ( $160^\circ$ ,  $70^\circ$ ), όταν η παροχή μάζας μεταβάλλεται από τα 8 kg/s στα 40 kg/s, οι απώλειες ελαττώνονται από περίπου 4% σε μόλις 0.35%. Αντίθετα, κατά τη μεταβολή της γωνίας ακροφυσίου σε σταθερή παροχή μάζας (και σταθερή γωνία βελόνης), οι απώλειες παρουσιάζουν μικρή μεταβολή. Παρατηρείται ωστόσο μία τάση οι μεγαλύτερες γωνίες ακροφυσίου να παρουσιάζουν ελαττωμένες απώλειες, κάτι το οποίο είναι περισσότερο ευδιάκριτο στην ισοϋψή καμπύλη, Σχήμα 4.14.



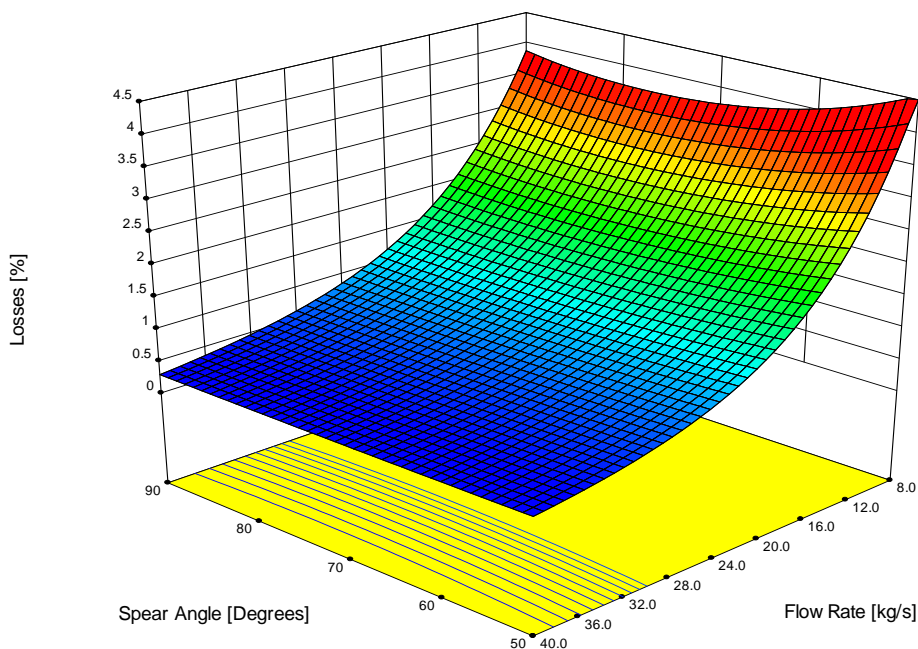
**Σχήμα 4.13:** Τριδιάστατη επιφάνεια της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της παροχής μάζας στις απώλειες ισχύος (γωνία βελόνης σταθερή στις 70°)



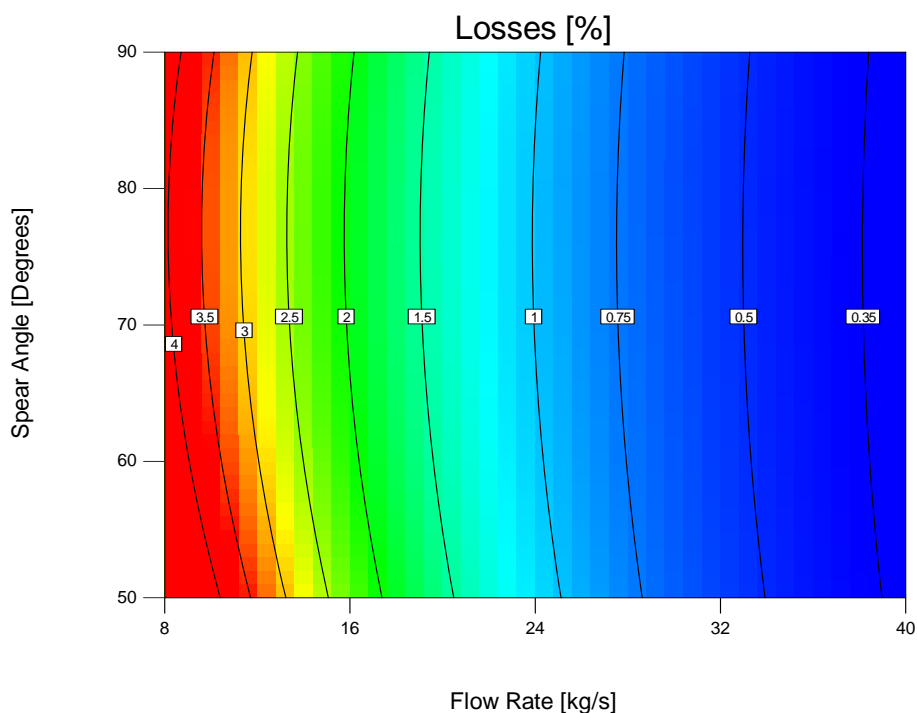
**Σχήμα 4.14:** Ισοψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της παροχής μάζας στις απώλειες ισχύος (γωνία βελόνης σταθερή στις 70°)

### Μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ της γωνίας της βελόνης και της παροχής μάζας

Στα Σχήματα 4.15 και 4.16 παρουσιάζονται η τριδιάστατη επιφάνεια και η ισοψής καμπύλη αντίστοιχα της συνδυασμένης επίδρασης της γωνίας της βελόνης ( $X_2$ ) και της παροχής μάζας ( $X_3$ ) στην εκτιμώμενη απόκριση. Η γωνία του ακροφυσίου διατηρήθηκε σταθερή στο μέσο του εύρους της, δηλαδή στις  $130^\circ$ .



**Σχήμα 4.15:** Τριδιάστατη επιφάνεια της αλληλεπίδρασης της γωνίας βελόνης και της παροχής μάζας στις απώλειες ισχύος (γωνία ακροφυσίου σταθερή στις  $130^\circ$ )

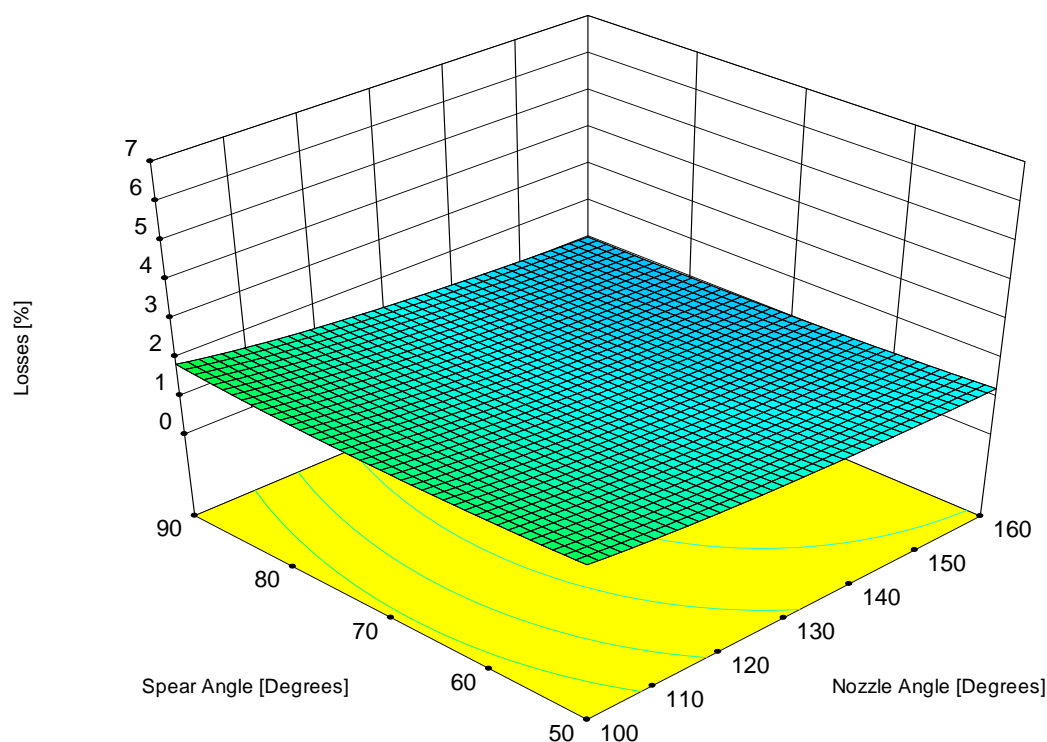


**Σχήμα 4.16:** Ισοψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας βελόνης και της παροχής μάζας στις απώλειες ισχύος (γωνία ακροφυσίου σταθερή στις  $130^\circ$ )

Για άλλη μία φορά παρατηρείται ότι η επίδραση της διερχόμενης παροχής στην απόκριση, δηλαδή στις απώλειες ισχύος, είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της γωνίας του ακροφυσίου. Ισχύουν τα ίδια τα οποία αναφέρθηκαν και κατά τη μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ της γωνίας του ακροφυσίου και της παροχής μάζας με μία διαφορά. Συγκεκριμένα, παρατηρείται πως η μεταβολή της γωνίας της βελόνης διατηρώντας την παροχή μάζας σταθερή, δεν μεταβάλλει σχεδόν καθόλου τις απώλειες ισχύος. Άλλωστε, η μεταβολή της γωνίας του ακροφυσίου προς υψηλότερες τιμές απ' ό,τι οι 130° που έχει στα σχήματα αυτά, προκαλεί μία λίγο πιο αισθητή, σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, μετατόπιση της απόκρισης προς χαμηλότερες τιμές, στις περιοχές μικρής παροχής μάζας. Αυτό υποδηλώνει πως η γωνία του ακροφυσίου επιδρά περισσότερο στην απόκριση σε σχέση με τη γωνία της βελόνης, κάτι το οποίο έχει ήδη εντοπιστεί από την εξέταση των συντελεστών της Εξίσωσης (4.10).

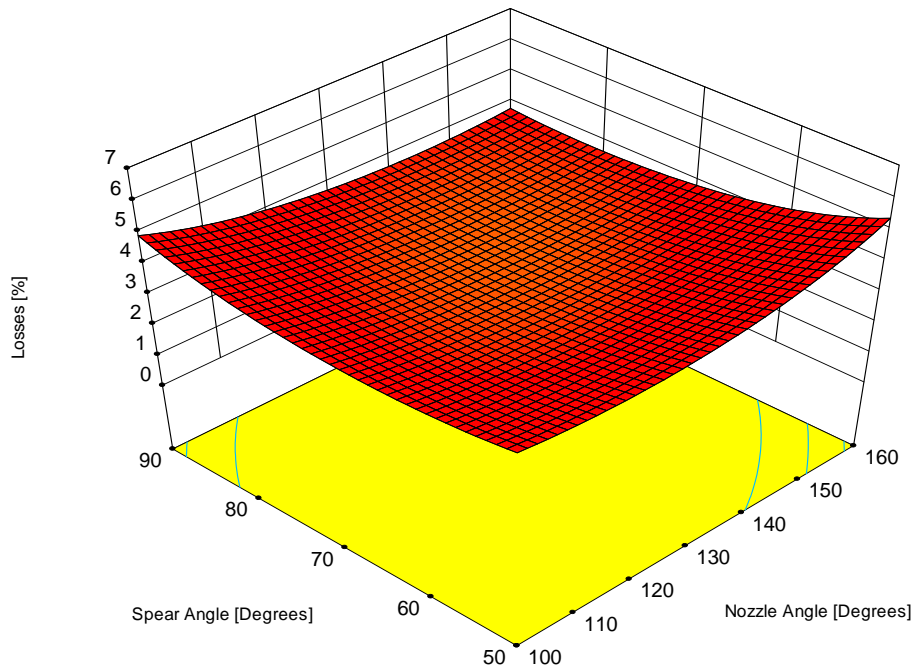
### Μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ των γωνιών του ακροφυσίου και της βελόνης

Η γωνία του ακροφυσίου και η γωνία της βελόνης, σε αντίθεση με την παροχή μάζας, αποδείχτηκε ότι είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους και πρέπει να αναλυθούν μαζί. Ο συνδυασμός αυτός των γωνιών αναλύθηκε σε όλο το διαθέσιμο εύρος της παροχής μάζας. Στο Σχήμα 4.17 παρουσιάζεται η τριδιάστατη επιφάνεια της αλληλεπίδρασης της γωνίας του ακροφυσίου και της γωνίας της βελόνης στις απώλειες ισχύος, με την παροχή μάζας τοποθετημένη στο μέσο του εύρους της, δηλαδή στα 25 kg/s. Να σημειωθεί πως, όπως έχει αναφερθεί ήδη, σε όλες τις προσομοιώσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν, η ολική πίεση εισόδου ρυθμίστηκε στα 1.5 MPa, δηλαδή περίπου 150 mΣΥ, ενώ το πάχος βελόνης ήταν σε κάθε γεωμετρία ίσο προς 25mm.

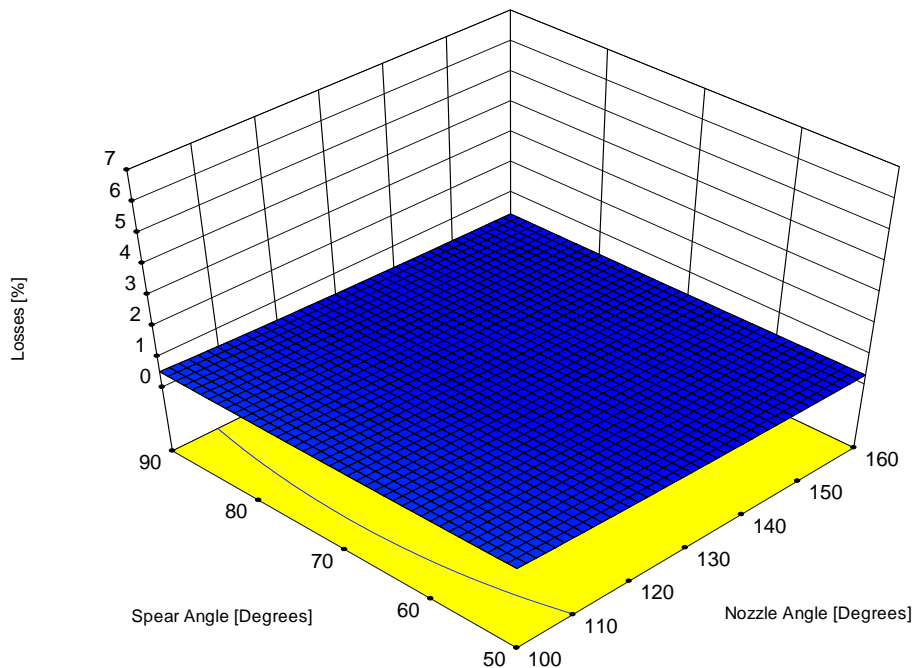


**Σχήμα 4.17:** Τριδιάστατη επιφάνεια της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 25 kg/s)

Στο Σχήμα 4.17 παρατηρείται η σχεδόν επίπεδη μορφή της επιφάνειας, η οποία φαίνεται να παρουσιάζει ελάχιστο στην περιοχή όπου οι γωνίες του ακροφυσίου και της βελόνης είναι οι μέγιστες οι οποίες εξετάστηκαν, δηλαδή στις  $160^\circ$  και  $90^\circ$  αντίστοιχα. Το παραπάνω ενισχύει τον ισχυρισμό ότι η παροχή μάζας αποτελεί πολύ σημαντικότερη επίδραση στις απώλειες ισχύος. Στο Σχήμα 4.18 παρουσιάζονται τα ίδια διαγράμματα για την περίπτωση σταθερής παροχής ίσης προς (α)  $10\text{kg/s}$  και (β)  $40\text{kg/s}$  αντίστοιχα.



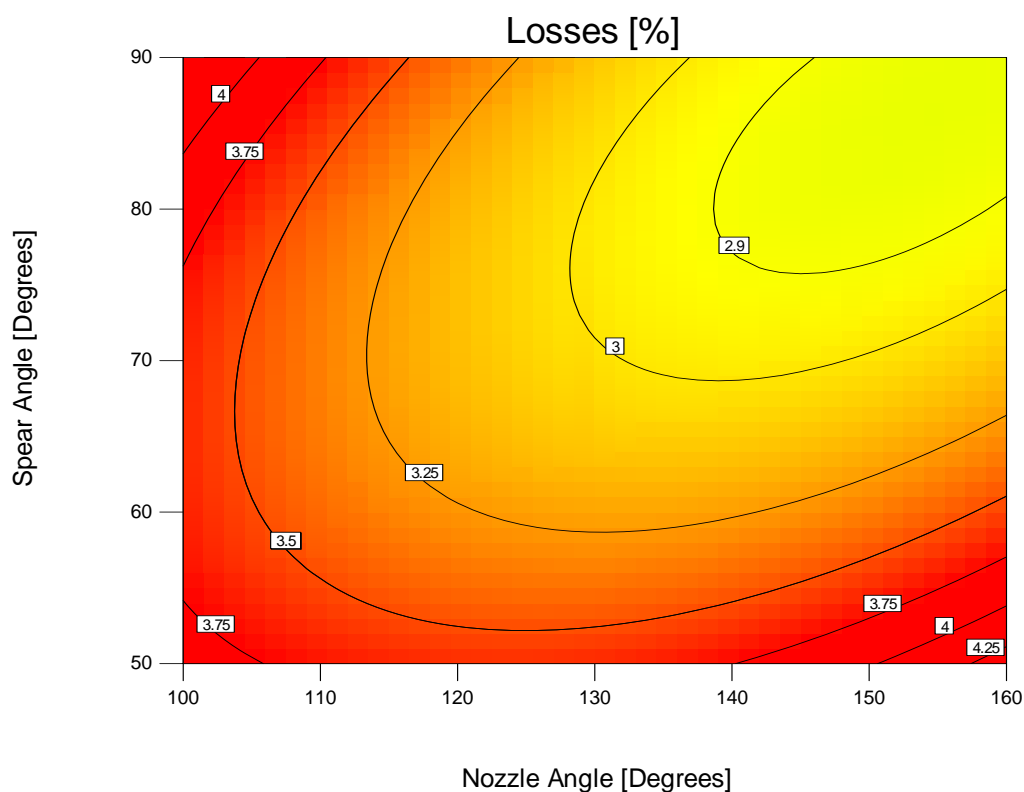
(α)



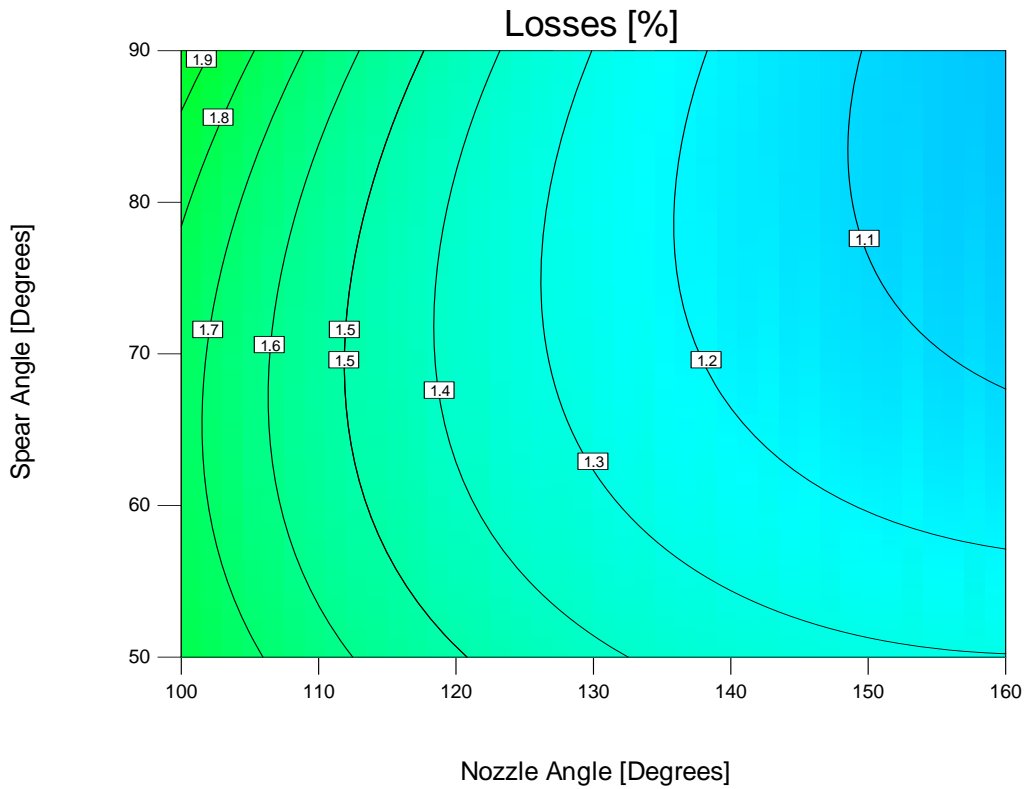
(β)

**Σχήμα 4.18:** Τριδιάστατη επιφάνεια της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα α)  $10\text{ kg/s}$  και β)  $40\text{ kg/s}$ )

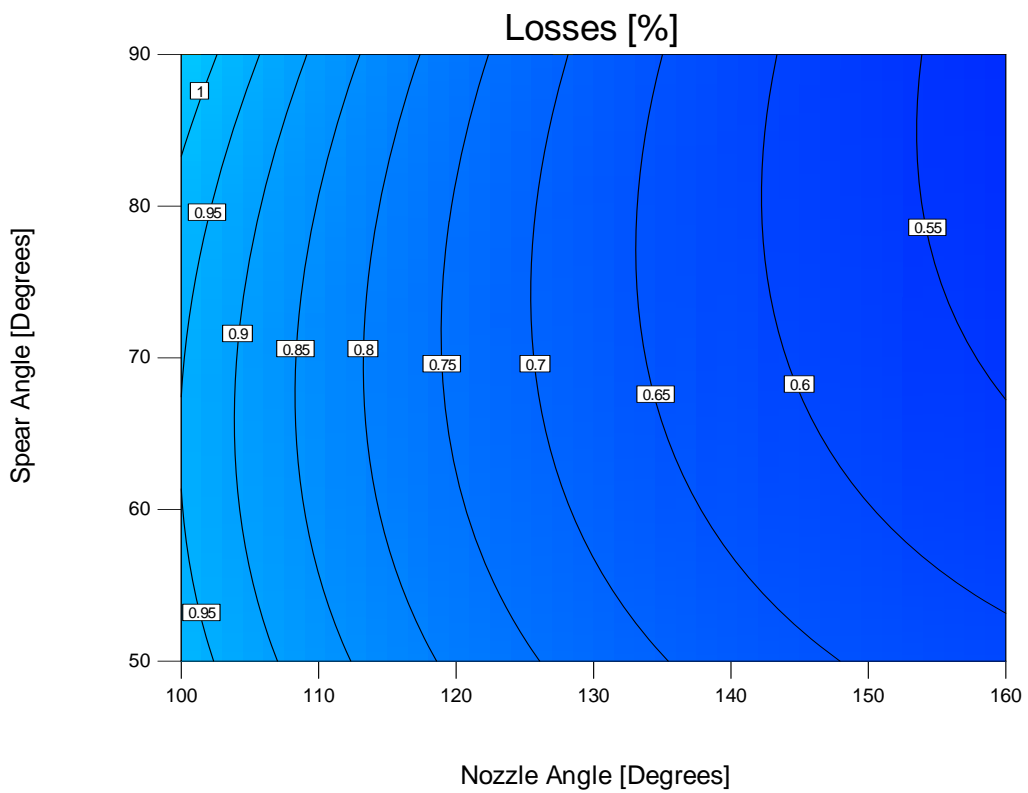
Παρατηρείται η μεγάλη διαφορά στη μορφή των τριών διαγραμμάτων των Σχημάτων 4.17 και 4.18. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της επιφάνειας για παροχή μάζας ίση προς 10 kg/s, Σχήμα 4.18 (α), η επιφάνεια εμφανίζει μεγάλη καμπυλότητα, κάτι που σημαίνει ότι στην παροχή αυτή παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές στις απώλειες ισχύος μεταξύ των διαφόρων συνδυασμών των δύο γωνιών. Αντίθετα, στην περίπτωση της επιφάνειας του Σχήματος 4.18 (β), όπου η παροχή είναι ίση προς 40 kg/s, η επιφάνεια εμφανίζεται σχεδόν επίπεδη, οπότε οι διαφορές στις απώλειες ισχύος μεταξύ των συνδυασμών των γωνιών είναι μικρότερες. Η μέγιστη παροχή μάζας η οποία μελετήθηκε ήταν τα 40 kg/s, και για την ευκολότερη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των γωνιών στις απώλειες ισχύος, στα Σχήματα 4.19-4.22 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες σε ένα εύρος τεσσάρων διαφορετικών παροχών μάζας· συγκεκριμένα στα 10, 20, 30 και 40 kg/s αντίστοιχα.



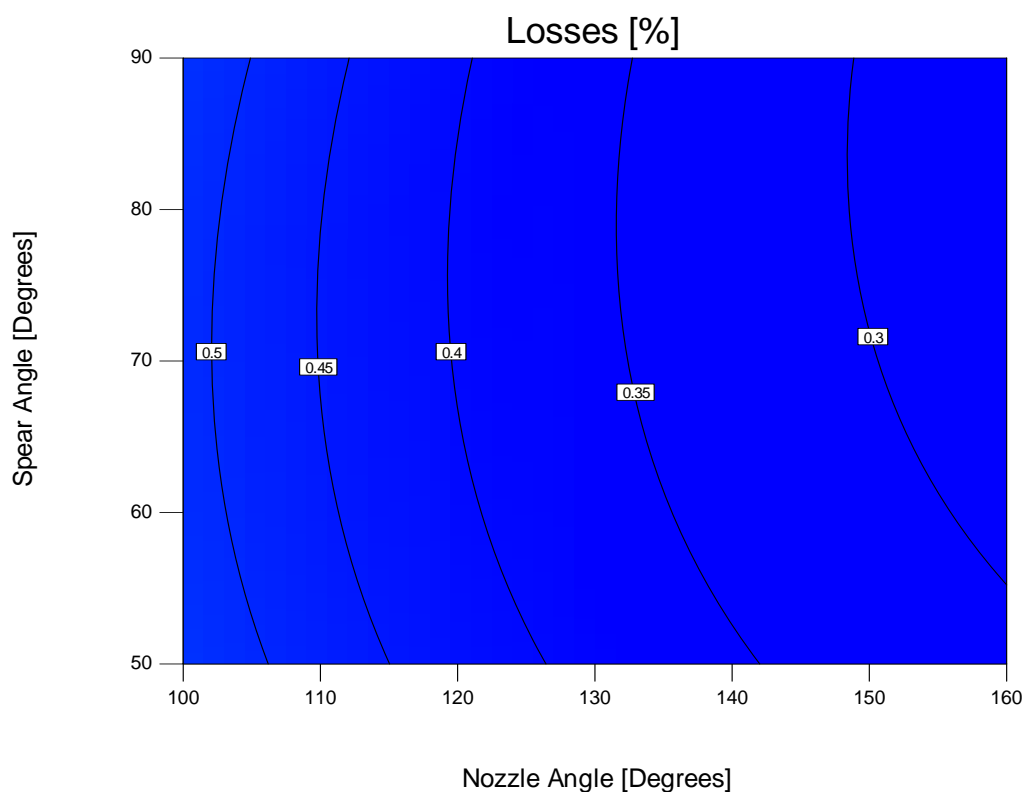
**Σχήμα 4.19:** Ισοϋψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 10kg/s)



**Σχήμα 4.20:** Ισοψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 20kg/s)



**Σχήμα 4.21:** Ισοψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 30kg/s)



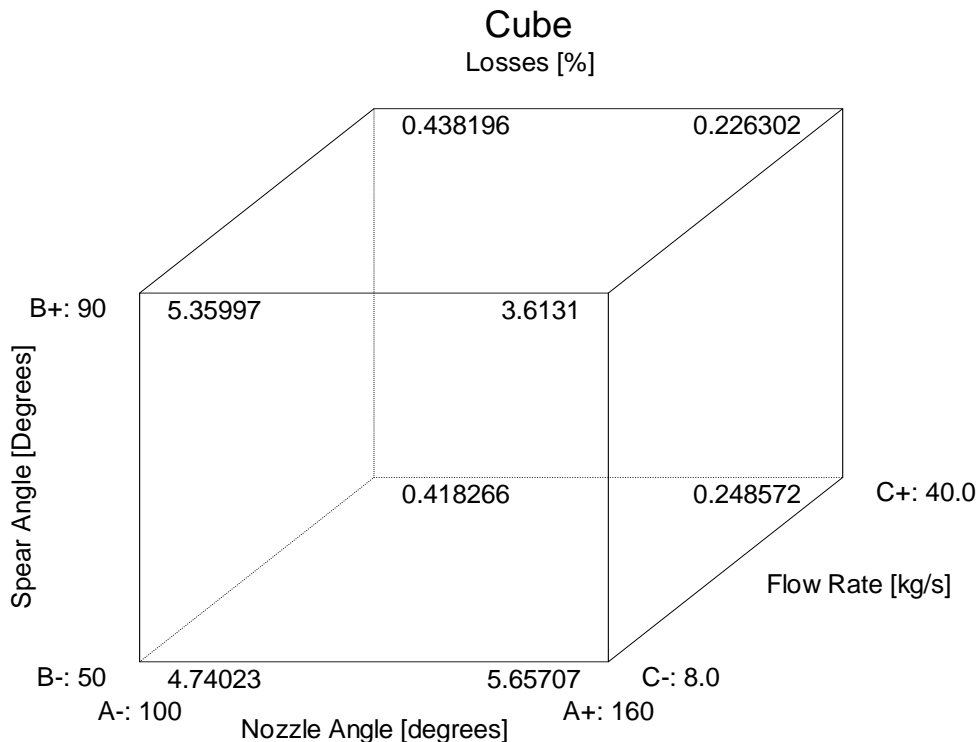
**Σχήμα 4.22:** Ισοϋψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 40kg/s)

Εξετάζοντας τις ισοϋψείς καμπύλες της αλληλεπίδρασης της γωνίας του ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης, Σχήματα 4.19-4.22, συνάγονται διάφορα ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Αρχικά, παρατηρείται ότι η επίδραση που έχουν στις απώλειες ισχύος οι γωνίες του ακροφυσίου και της βελόνης ελαττώνεται όσο η παροχή μάζας αυξάνεται. Συγκεκριμένα, σε χαμηλές παροχές μάζας, όπως στα 10 kg/s, Σχήμα 4.19, η διαφορά στις απώλειες ισχύος μεταξύ του συνδυασμού των γωνιών στο χαμηλότερο επίπεδό τους, 100° για το ακροφύσιο και 50° για τη βελόνη, και του υψηλότερου, 160° και 90° αντίστοιχα, αγγίζει το 1.1%. Σε τόσο χαμηλές παροχές μάζας παρατηρείται μία σαφής τάση ελάττωσης των απωλειών σε μεγάλες γωνίες του ακροφυσίου και της βελόνης. Αντίθετα, όσο μεγαλώνει η διερχόμενη παροχή, η τάση αυτή εξομαλύνεται, με συνέπεια στα 40 kg/s, τη μεγαλύτερη παροχή που μελετήθηκε, η διαφορά στις απώλειες την οποία εμφανίζουν οι προαναφερθέντες συνδυασμοί να είναι μόλις 0.2% και κατά συνέπεια η επιλογή γωνιών να έχει μικρότερη επίδραση. Ο υδροστροβίλος είναι κατασκευασμένος για να διαχειρίζεται μεγάλες παροχές μάζας, συνεπώς οι περιπτώσεις ροής σε πολύ χαμηλές παροχές είναι λογικό να παρουσιάζονται πιο σπάνια. Επίσης, ο συνδυασμός των μικρότερων γωνιών που μελετήθηκαν (100°, 50°), αν και παρουσιάζει χαμηλότερες απώλειες από αυτές του υπάρχοντος ακροφυσίου (90°, 50°), αποδεικνύεται πολύ λιγότερο αποδοτικός στο σύνολο του εύρους παροχών που μελετήθηκε, απ' ότι ο συνδυασμός με τις μεγαλύτερες δυνατές γωνίες (160°, 90°). Συμπερασματικά, οι ισοϋψείς καμπύλες αποδεικνύουν ότι ο συνδυασμός γωνιών του ακροφυσίου και της βελόνης, 160° και 90° αντίστοιχα, είναι πολύ αποδοτικότερος, ειδικά κατά τις ροές χαμηλής και μέσης παροχής.

Το συμπέρασμα αυτό συνάγεται και από τη μελέτη του Σχήματος 4.23, στο οποίο παρουσιάζεται το διάγραμμα κύβου (cube plot) του πειράματος, στο οποίο περιγράφονται οι επιδράσεις και των τριών παραγόντων σχεδίασης ταυτόχρονα. Συγκεκριμένα, παρουσιάζει τις



προβλεπόμενες τιμές από το κωδικοποιημένο μοντέλο για τους συνδυασμούς στο  $\pm 1$  επίπεδο καθενός από τους τρεις παράγοντες και οι οποίοι αναπαρίστανται στις γωνίες του συγκεκριμένου κύβου.

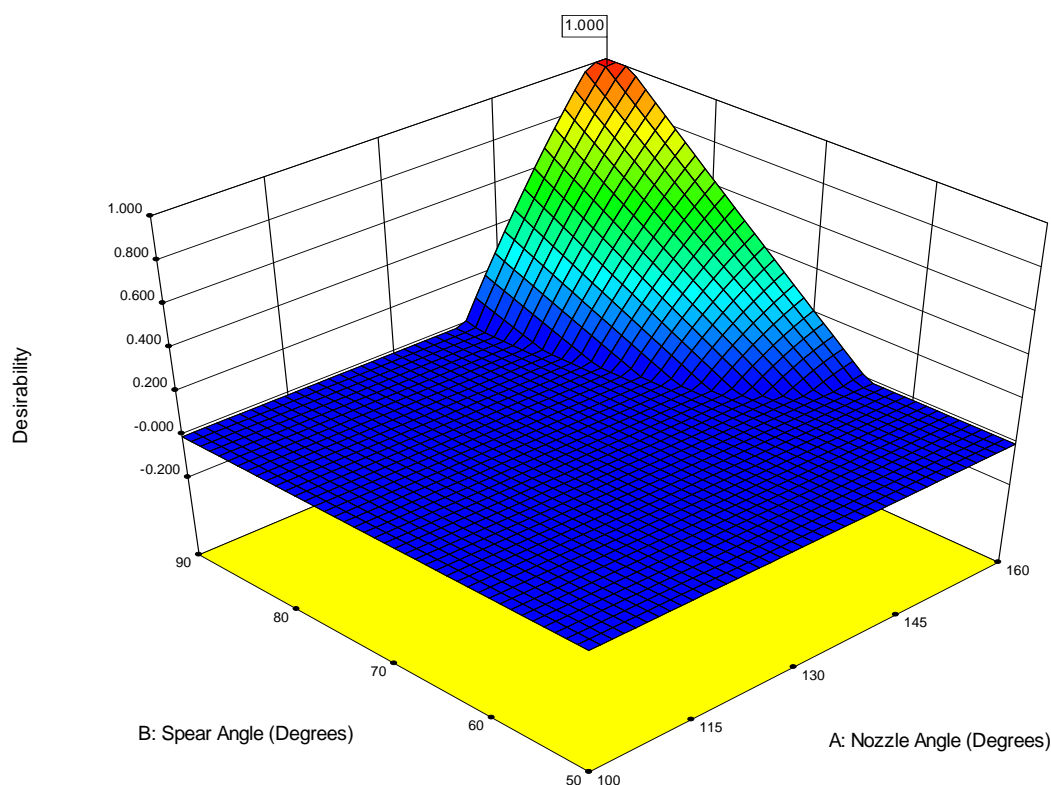


**Σχήμα 4.23:** Συνδυαστική αναπαράσταση της επίδρασης των τριών παραμέτρων σχεδίασης στις απώλειες ισχύος (διάγραμμα κύβου)

Όπως παρατηρείται από την εξέταση του Σχήματος 4.23, στην γωνία στην οποία συνδυάζονται οι τιμές στο επίπεδο +1 των τριών κωδικοποιημένων μεταβλητών (δηλαδή  $160^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $40 \text{ kg/s}$ ), η προβλεπόμενη απόκριση του μοντέλου, δηλαδή οι απώλειες ισχύος υπολογίζονται σε  $0.23\%$ , αριθμός εξαιρετικά χαμηλός. Στο άλλο άκρο, οι μεγαλύτερες απώλειες εντοπίζονται για τον συνδυασμό των γωνιών ακροφυσίου και βελόνης  $160^\circ$  και  $50^\circ$  αντίστοιχα, και παροχής  $8 \text{ kg/s}$ , όπου οι απώλειες μετρώνται σε  $5.66\%$ . Το διάγραμμα του Σχήματος 4.23 σε συνδυασμό με τη μορφή της ισοϋψούς καμπύλης του Σχήματος 4.22, εγγυώνται πως οι μικρότερες απώλειες εντοπίζονται στον προαναφερθέντα συνδυασμό στα όρια του χώρου σχεδιασμού και όχι σε κάποιο συνδυασμό στο μέσο του εύρους τιμών των γωνιών.

Η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του ακροφυσίου, δηλαδή η εύρεση του συνδυασμού των παραμέτρων οι οποίες δίνουν τις μικρότερες απώλειες ισχύος, εκτός από τη μέθοδο που ήδη περιγράφηκε, δηλαδή τη μελέτη των ισοϋψών καμπυλών, πραγματοποιήθηκε και με την αριθμητική μέθοδο την οποία εφαρμόζει το λογισμικό. Συγκεκριμένα, ορίστηκε η αντικειμενική συνάρτηση η οποία ζητήθηκε να ελαχιστοποιηθεί και η οποία είχε τη μορφή της συνάρτησης επιθυμίας,  $D = (d_1 \cdot d_2 \cdots d_m)^{1/m}$ , όπως είχε αναφερθεί στην υποενότητα 4.2. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ζητήθηκε η ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος, δίχως την επιπρόσθετη απαίτηση περιορισμού του εύρους των παραμέτρων σχεδίασης, οπότε η προαναφερθείσα σχέση μετατρέπεται σε μία απλή συνάρτηση επιθυμίας,  $d_1$ . Συνεπώς, όταν προέκυπτε σημείο του χώρου σχεδιασμού με απώλειες ισχύος εντός του εύρους το οποίο

ορίστηκε, δηλαδή από την ελάχιστη απόκριση η οποία μετρήθηκε 0.37, έως απώλειες ίσες προς 0.4, δινόταν στο σημείο αυτό μία τιμή στο διάστημα [0,1]. Όταν η συνάρτηση επιθυμίας λάμβανε τον αριθμό 1, τότε είχαν πλήρως εκπληρωθεί οι απαιτήσεις βελτιστοποίησης, ενώ κάθε σημείο εκτός του προαναφερθέντος ορίου απωλειών, λάμβανε 0. Το λογισμικό στη συνέχεια, ξεκίνησε από τυχαία σημεία του χώρου σχεδίασης και πραγματοποίησε εξερεύνηση του πεδίου σχεδιασμού, με χρήση του αλγορίθμου αναρρίχησης λόφων (simplex hill-climbing algorithm) και συναρτήσεων ποινής (penalty function). Τα σημεία του χώρου σχεδίασης τα οποία προέκυψαν είχαν όλα γωνία ακροφυσίου  $160^\circ$  και γωνία βελόνης  $90^\circ$ , ενώ η παροχή βρισκόταν σε ένα εύρος κοντά στη μέγιστη δυνατή. Στο Σχήμα 4.24 παρουσιάζεται η ισοϋψής καμπύλη για τη συνάρτηση επιθυμίας ενός εκ των προτεινόμενων σημείων. Παρατηρείται ότι στο σημείο αυτό, είναι σημειωμένη η τιμή της συνάρτησης επιθυμίας, 1.0, η οποία και ελαττώνεται κατά την απομάκρυνση από το σημείο αυτό. Στις περιοχές όπου η απώλειες προέκυψαν πάνω από 0.4 %, έχει δοθεί η τιμή 0 για τη συνάρτηση επιθυμίας και παρίστανται με σκούρο μπλε χρώμα. Ενδιάμεσα σημεία, με απώλειες κάτω του 0.4 %, αλλά όχι τις ελάχιστες δυνατές, έχουν τιμή στο διάστημα (0,1) και απεικονίζονται με την ανάλογη χρωματική κλίμακα.



**Σχήμα 4.24:** Ισοϋψής καμπύλη συνάρτησης επιθυμίας βέλτιστης γεωμετρίας

## 4.3.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων k-ε realizable

Τα αποτελέσματα της μελέτης βελτιστοποίησης για τις προσομοιώσεις CFD με τη χρήση του μοντέλου τύρβης SST συγκρίθηκαν στη συνέχεια με τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τις προσομοιώσεις CFD με τη χρήση του μοντέλου τύρβης k-ε realizable και την εφαρμογή επεκτάσιμων συναρτήσεων τοιχωμάτων. Σύμφωνα με τα λεχθέντα στην ενότητα 3.5, τα δύο μοντέλα αναμένεται να δώσουν την ίδια βέλτιστη γεωμετρία ακροφυσίου, παρόλο που τα δύο αυτά μοντέλα τύρβης δεν είχαν τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι είχαν την ίδια τάση στην ανάλυση των απωλειών ισχύος, σύμφωνα και με τα αποτελέσματα του Σχήματος 3.17, και στη συγκεκριμένη μελέτη αυτό το οποίο έχει σημασία είναι η σύγκριση μεταξύ των μεγεθών των διαφορετικών γεωμετριών, δηλαδή ακριβώς αυτή η γενικότερη τάση, και όχι τα απόλυτα μεγέθη. Τα βήματα τα οποία ακολουθήθηκαν κατά τον σχεδιασμό του πειράματος των συγκεκριμένων προσομοιώσεων αλλά και την μετέπειτα ανάλυση των αποτελεσμάτων, ήταν τα ίδια με αυτά της προσομοίωσης με τη χρήση του μοντέλου SST. Συνεπώς, στη συνέχεια θα αναφερθούν συνοπτικά κάποια στατιστικά στοιχεία του συγκεκριμένου μοντέλου καθώς και οι επιφάνειες απόκρισης οι οποίες προέκυψαν. Ζητούμενο είναι η σύγκριση των δύο συνόλων προσομοιώσεων ως προς το μοντέλο τύρβης το οποίο χρησιμοποιούν και το κατά πόσο προτείνουν την ίδια βέλτιστη γεωμετρία ακροφυσίου και μόνο.

Αρχικά, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τη χρήση του μοντέλου k-ε realizable παρουσιάζονται στις δύο τελευταίες στήλες του Πίνακα 4.5. Ήδη, συγκρίνοντας με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από το μοντέλο SST, στις δύο πρώτες στήλες του ίδιου πίνακα, παρατηρείται ότι ενώ οι παροχή μάζας προέκυψε ταυτόσημη, οι απώλειες ισχύος είχαν μία μικρή διαφορά, με το μοντέλο k-ε στις περισσότερες περιπτώσεις να τις υπερεκτιμά σε σχέση με το SST. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση του μοντέλου τετραγωνικής προσέγγισης το οποίο επιλέχθηκε. Η σύνοψη των στατιστικών του τετραγωνικού μοντέλου το οποίο επιλέχθηκε παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.9.

**Πίνακας 4.9:** Σύνοψη των στατιστικών του μοντέλου τετραγωνικής παλινδρόμησης [μοντέλο k-ε realizable]

<b>Τυπική απόκλιση</b>	0.032	<b>R-Squared</b>	0.9960
<b>Μέση τιμή</b>	1.01	<b>Adjusted R-Squared</b>	0.9889
<b>Συντελεστής μεταβλητότητας %</b>	3.18	<b>Predicted R-Squared</b>	0.9586
<b>PRESS</b>	0.052	<b>Επαρκής ακρίβεια</b>	34.530

Εξετάζοντας τα στατιστικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, παρατηρείται η χαμηλή τυπική απόκλιση, η χαμηλή τιμή του PRESS, οπότε το μοντέλο ταιριάζει σε κάθε σημείο του χώρου ενώ οι συντελεστές συσχέτισης είναι κοντά στη μονάδα, με την απόκλιση του προσαρμοσμένου και του προβλεπόμενου να είναι πολύ λιγότερο από την οριακή τιμή 0.2. Συνεπώς, υπάρχει υψηλή συσχέτιση μεταξύ των υπολογισμένων από τις προσομοιώσεις τιμών και των αντίστοιχων προβλεπόμενων. Η τιμή-F, η οποία προέκυψε από το τεστ Fisher, του μοντέλου είναι 139.91, υπονοώντας ότι το συγκεκριμένο μοντέλο είναι στατιστικά σημαντικό για τη μέτρηση των απωλειών ισχύος. Οπότε βάσει των προαναφερθέντων, και του γεγονότος ότι η επαρκής ακρίβεια έχει αρκετά μεγάλη τιμή, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση του χώρου σχεδιασμού.

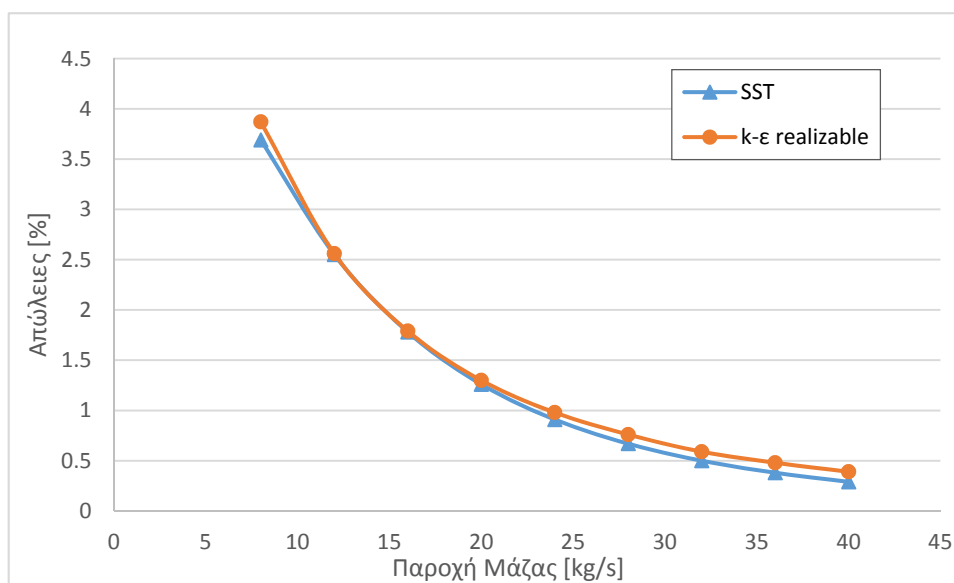
Το τελικό τετραγωνικό μοντέλο, έπειτα από την απαλοιφή των μη σημαντικών όρων σύμφωνα με τα πορίσματα της μελέτης του Πίνακα 4.7 περιγράφεται από την Εξίσωση (4.12) σε όρους κωδικοποιημένων μεταβλητών:

$$F = \frac{1}{\sqrt{y^p}} = 1.01 + 0.10x_1 + 0.015x_2 + 0.55x_3 + 0.033x_1x_2 + 0.064x_1x_3 + 0.048x_3^2 \quad (4.12)$$

Στην προαναφερθείσα εξίσωση, παρατηρείται ότι έχει εφαρμοστεί εκ νέου ο μετασχηματισμός αντίστροφης τετραγωνικής ρίζας στην απόκριση, η οποία έχει λάβει τη μορφή  $\frac{1}{\sqrt{y^p}}$ . Τα διαγνωστικά γραφήματα τα οποία δημιουργήθηκαν για το συγκεκριμένο μοντέλο, δεν παρουσίασαν κάποιο πρόβλημα, οπότε στη συνέχεια αναλύθηκαν τα διαγράμματα της απόκρισης τα οποία προκύπτουν από το μοντέλο.

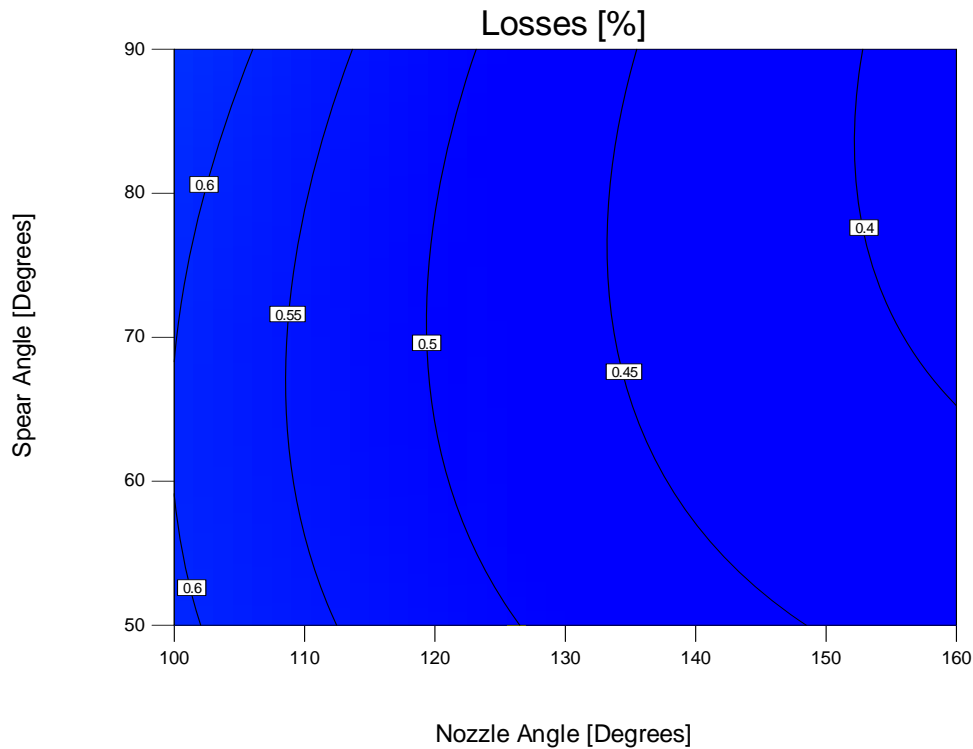
Η επίδραση των παραγόντων στην απόκριση, δηλαδή τις απώλειες ισχύος, διερευνήθηκε μέσω των τριδιάστατων απεικονίσεων και των ισοϋψών καμπυλών οι οποίες προκύπτουν από το μοντέλο, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Τα διαγράμματα αυτά είχαν παρόμοια μορφή με τα αντίστοιχα της ανάλυσης η οποία πραγματοποιήθηκε με το μοντέλο SST, Σχήματα 4.11-4.24 και για τον λόγο αυτό στη συνέχεια θα παρουσιαστούν ενδεικτικά τρία διαγράμματα από την αντίστοιχη μελέτη με τη χρήση του μοντέλου k-ε realizable.

Στο Σχήμα 4.25 παρουσιάζεται η σύγκριση του διαγράμματος της καμπύλης απόκρισης (one factor plot) για την παροχή μάζας μεταξύ των προσομοιώσεων με τη χρήση του μοντέλου τύρβης SST (Σχήμα 4.11) και του k-ε realizable. Παρατηρείται πως τα δύο διαγράμματα προέκυψαν πανομοιότυπα, με το k-ε realizable να υπερεκτιμά κάπως τις τιμές των απωλειών, όπως αναμενόταν. Είναι φανερό πως και τα δύο μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζουν την ίδια τάση στον υπολογισμό των απωλειών, κάτι που έχει ως συνέπεια το να προκύψει η ίδια βέλτιστη γεωμετρία του ακροφυσίου. Η συγκεκριμένη παράμετρος προέκυψε ανεξάρτητη, παρουσιάζοντας περίπου τις ίδιες απώλειες ισχύος για οποιαδήποτε συνδυασμό των άλλων δύο παραμέτρων. Για άλλη μία φορά παρατηρείται η έντονη επίδραση της παροχής μάζας στις απώλειες ισχύος, με τις τελευταίες να ελαττώνονται με την αύξηση της παροχής.



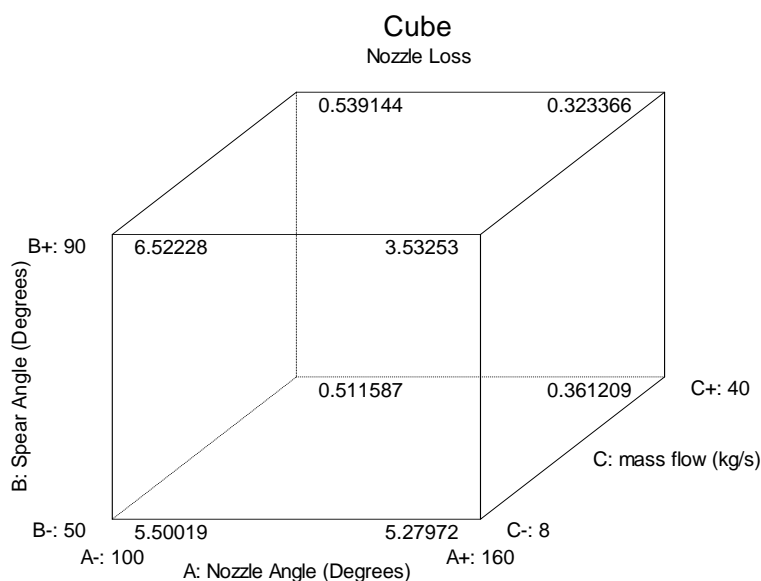
**Σχήμα 4.25:** Διάγραμμα απωλειών ισχύος συναρτήσει της παροχής μάζας [μοντέλο k-ε realizable]

Στο Σχήμα 4.26 παρουσιάζεται η ισοϋψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης των γωνιών ακροφυσίου και βελόνης στις απώλειες ισχύος, με την παροχή μάζας σταθερή στα 40 kg/s.



**Σχήμα 4.26:** Ισοϋψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 40kg/s) [Μοντέλο k-ε realizable]

Το Σχήμα 4.26 έχει παρόμοια μορφή με το αντίστοιχο των προσομοιώσεων SST, Σχήμα 4.22, ενώ και πάλι οι ελάχιστες απώλειες, αν και έχουν μεγαλύτερη τιμή από αυτές που προέκυψαν από το SST, εντοπίζονται για γωνίες ακροφυσίου και βελόνης 160° και 90° αντίστοιχα, όπως αναμενόταν. Επίσης, οι απώλειες αυτές υπολογίζονται στη μέγιστη παροχή η οποία μετρήθηκε, στα 40 kg/s. Οπότε, συμπεραίνεται πως ο συγκεκριμένος συνδυασμός αποτελεί το βέλτιστο δυνατό για την επίτευξη ελαττωμένων απωλειών ισχύος στο ακροφύσιο του υδροστροβίλου, αποτέλεσμα το οποίο προέκυψε και από τη μελέτη βελτιστοποίησης των προσομοιώσεων CFD με τη χρήση του μοντέλου SST. Τέλος, στο Σχήμα 4.27 παρουσιάζεται το διάγραμμα κύβου του πειράματος, στο οποίο περιγράφονται οι επιδράσεις και των τριών παραγόντων σχεδίασης ταυτόχρονα. Όπως παρατηρείται από την εξέταση του Σχήματος 4.27, στην γωνία στην οποία συνδυάζονται οι τιμές στο επίπεδο +1 των τριών κωδικοποιημένων μεταβλητών, η προβλεπόμενη απόκριση του μοντέλου, δηλαδή οι απώλειες ισχύος υπολογίζονται σε 0.32% είναι οι μικρότερες οι οποίες παρατηρούνται, έχοντας ωστόσο τιμή λίγο μεγαλύτερη της αντίστοιχης του μοντέλου SST.



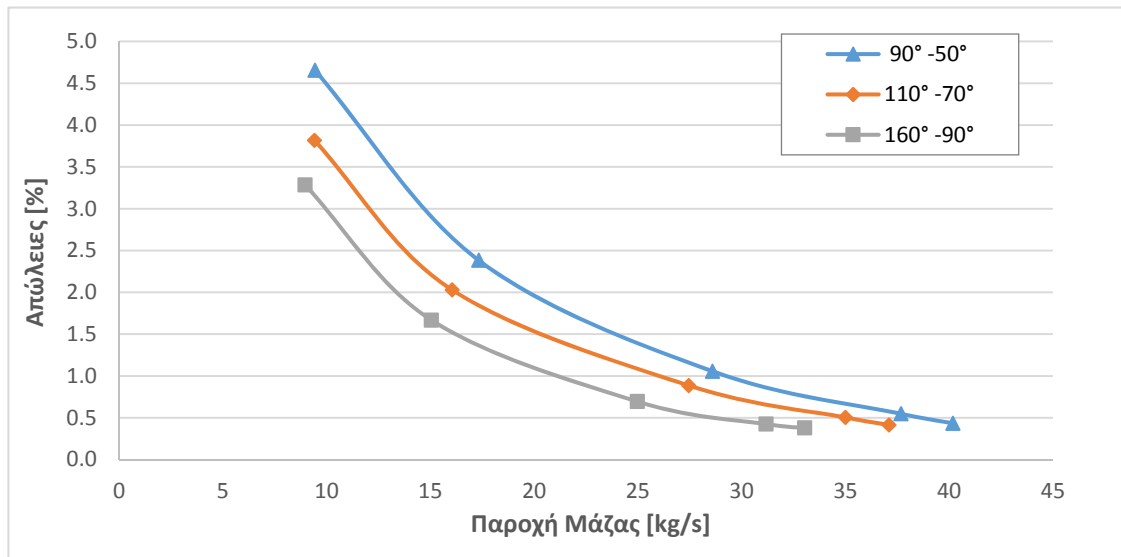
**Σχήμα 4.27:** Συνδυαστική αναπαράσταση της επίδρασης των τριών παραμέτρων σχεδίασης στις απώλειες ισχύος (διάγραμμα κύβου) [Μοντέλο k-ε realizable]

#### 4.3.3 Σύγκριση Απωλειών Βελτιωμένου και Αρχικού Ακροφυσίου

Συμπερασματικά, έπειτα από τη μελέτη των αποτελεσμάτων των δύο συνόλων προσομοιώσεων, προέκυψε ο συνδυασμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, δηλαδή των γωνιών του ακροφυσίου και της βελόνης, ο οποίος ελαχιστοποιεί τις απώλειες ισχύος κατά τη ροή. Συγκεκριμένα, οι επιφάνειες απόκρισης οι οποίες ταίριαξαν στα δεδομένα από τις προσομοιώσεις CFD, προέβλεψαν ότι οι ελάχιστες απώλειες στο σύνολο του εύρους παροχής παρατηρούνται στον συνδυασμό όπου οι γωνιές του ακροφυσίου και της βελόνης, είναι 160° και 90° αντίστοιχα. Συνεπώς, είναι πλέον εφικτή η άμεση σύγκριση της νέας, βελτιωμένης γεωμετρίας με την ήδη υπάρχουσα, η οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί αποτελείται από τον συνδυασμό γωνιών (90°, 50°) για το ακροφύσιο και τη βελόνη αντίστοιχα. Στην μελέτη η οποία ακολουθεί, διερευνήθηκε και η απόδοση του ακροφυσίου σε ένα ενδιάμεσο συνδυασμό γωνιών, συγκεκριμένα τις (110°, 70°) για το ακροφύσιο και τη βελόνη αντίστοιχα. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της μεθόδου RSM, συνάγεται το συμπέρασμα ότι ο συνδυασμός αυτός προκύπτει αποδοτικότερος του ήδη υπάρχοντος σε όλο το εύρος παροχής, με το πρόσθετο πλεονέκτημα ότι, όντας πιο συντηρητική επιλογή από τον συνδυασμό (160°, 90°), δεν αντιμετωπίζει τα μειονεκτήματα του τελευταίου και τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια.

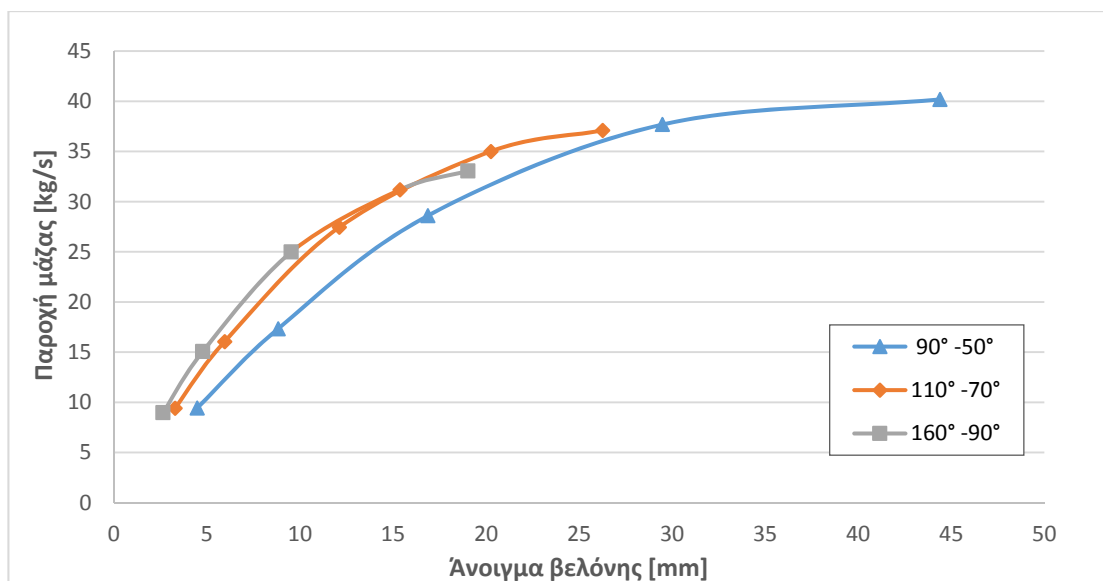
Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε με περαιτέρω προσομοιώσεις CFD, σε πέντε διαφορετικά ανοίγματα βελόνης, ώστε να επικυρωθούν τα αποτελέσματα της μελέτης βελτιστοποίησης. Ακολουθώντας την παραμετροποίηση η οποία αναφέρθηκε στην υποενότητα 4.2.2, χρησιμοποιήθηκε ο λόγος εμβαδού αντί του ανοίγματος βελόνης, ώστε να προκύπτουν άμεσα συγκρίσιμες παροχές μάζας σε κάθε προσομοίωση, δίχως να επιδρά σε αυτό η μεγάλη διαφορά στις γωνίες μεταξύ των ακροφυσίων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν πέντε προσομοιώσεις για κάθε γεωμετρία, σε παροχές οι οποίες προέκυψαν από τους εξής λόγους εμβαδού: 0.2, 0.35, 0.65, 0.95 και 1.1. Υπενθυμίζεται πως όταν ο λόγος εμβαδού είναι ίσος με ένα, οποιαδήποτε και αν είναι η γωνία του στομίου και της βελόνης στη συγκεκριμένη θέση, η παροχή η οποία θα

διέρχεται διαμέσου του ακροφυσίου θα είναι περίπου ίδια με την παροχή του ακροφυσίου του αρχικού υδροστροβίλου στο μέγιστο άνοιγμά του. Στο Σχήμα 4.28 παρουσιάζεται η σύγκριση των απωλειών, υπολογισμένες σε απόσταση 2.5 διαμέτρων κατάντι του ακροφυσίου, μεταξύ της αρχικής γεωμετρίας, με συνδυασμό γωνιών ( $90^\circ$ ,  $50^\circ$ ), και των δύο βελτιωμένων με συνδυασμούς γωνιών ( $110^\circ$ ,  $70^\circ$ ) και ( $160^\circ$ ,  $90^\circ$ ) στα πέντε διαφορετικά ανοίγματα που προαναφέρθηκαν. Να σημειωθεί πως η ολική πίεση εισόδου ρυθμίστηκε στα 1.5 MPa (ίση περίπου με 150 mSY).



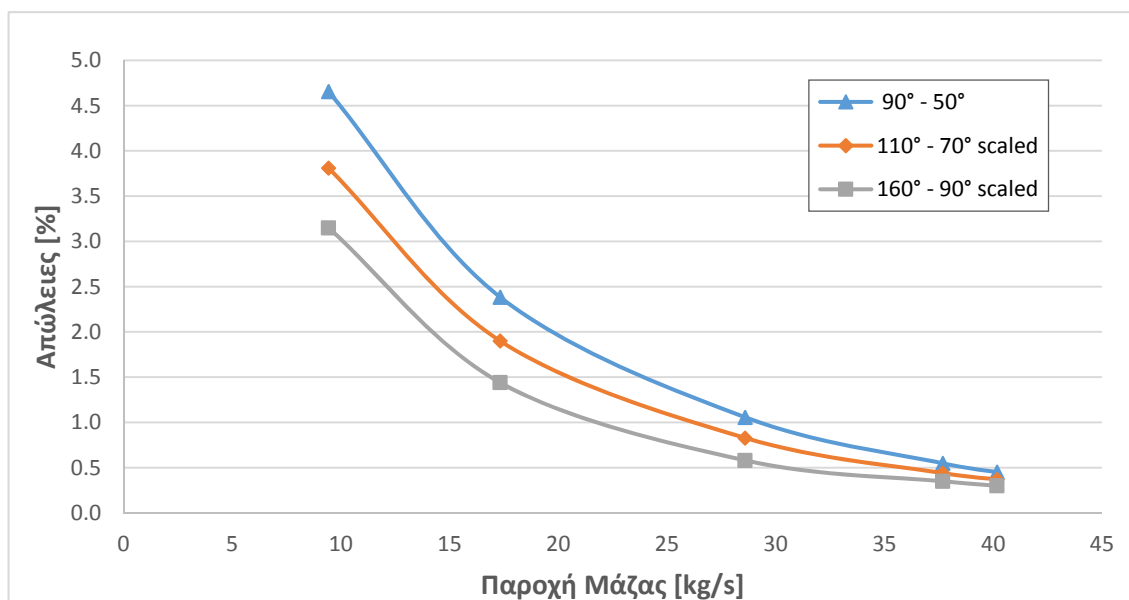
**Σχήμα 4.28:** Σύγκριση των απωλειών ισχύος μεταξύ της αρχικής και των βελτιωμένων γεωμετριών ακροφυσίου σε πέντε διαφορετικά ανοίγματα βελόνης

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων CFD για τις απώλειες ισχύος, παρατηρείται πως και οι δύο βελτιωμένες γεωμετρίες παρουσιάζουν ελαττωμένες απώλειες ισχύος σε όλο το εύρος παροχών που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα, παρατηρείται πως ο συνδυασμός γωνιών ( $110^\circ$ ,  $70^\circ$ ) παρουσιάζει ελάττωση των απωλειών σε σχέση με την αρχική γεωμετρία, κατά περίπου 0.3% στις μέσες παροχές, δηλαδή στα 15-30 kg/s, ενώ σε χαμηλότερες παροχές, η διαφορά αυτή αγγίζει το 0.7%. Άλλωστε, το ακροφύσιο με συνδυασμό γωνιών ( $160^\circ$ ,  $90^\circ$ ) παρουσιάζει ακόμα μεγαλύτερη ελάττωση των απωλειών, μειώνοντάς τις κατά σχεδόν 0.5% σε μέσες παροχές, ενώ η ελάττωση σε χαμηλότερες παροχές η διαφορά αυτή αγγίζει το 1.4% σε σχέση με την αρχική γεωμετρία. Τέλος, να σημειωθεί ότι και οι τρεις γεωμετρίες εμφανίζουν περίπου ταυτόσημες απώλειες σε μεγάλες παροχές, δηλαδή κοντά στο μέγιστο άνοιγμα της βελόνης του ακροφυσίου. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στην περίπτωση ακροφυσίων με μεγάλες διαφορές στη γεωμετρία τους και ειδικά μεταξύ των γωνιών τους, παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση μεταξύ της διερχόμενης παροχής ρευστού για το ίδιο άνοιγμα βελόνης. Συγκεκριμένα, ακροφύσια με μεγάλες γωνίες στομίου και βελόνης μπορούν να διαχειριστούν χαμηλότερη μέγιστη παροχή σε σχέση με αυτά με μικρότερες γωνίες. Επίσης, τα ακροφύσια με μεγάλες γωνίες παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευαισθησία στη ρύθμιση της παροχής μάζας· για παράδειγμα στο ακροφύσιο με συνδυασμό γωνιών ( $160^\circ$ ,  $90^\circ$ ), η μέγιστη παροχή λαμβάνεται σε άνοιγμα βελόνης ίσο με 19 mm, ενώ στο αρχικό ακροφύσιο η ίδια παροχή προκύπτει σε άνοιγμα βελόνης ίσο με 40 mm. Στο Σχήμα 4.29 παρουσιάζεται το διάγραμμα του ανοίγματος της βελόνης συναρτήσει της διερχόμενης παροχής μάζας για τα τρία ακροφύσια που εξετάζονται.



**Σχήμα 4.29:** Διάγραμμα του ανοίγματος της βελόνης συναρτήσει της διερχόμενης παροχής μάζας για τα τρία ακροφύσια υπό εξέταση

Εξετάζοντας το Σχήμα 4.29 προκύπτει το λειτουργικό μειονέκτημα των ακροφυσίων με μεγάλες γωνίες στομίου και βελόνης, δηλαδή η ιδιαίτερη ευαισθησία στη ρύθμιση της παροχής μάζας και το μειωμένο εύρος λειτουργίας του ανοίγματος βελόνης. Λόγω των προαναφερθέντων, τα αποτελέσματα των απωλειών ισχύος για τα τρία ακροφύσια τα οποία εξετάζονται, έπρεπε να μελετηθούν περαιτέρω, μέσω του ελέγχου τους σε λειτουργία με ίδια παροχή μάζας. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν εκ νέου προσομοιώσεις στα βελτιωμένα ακροφύσια, με τη βελόνη ρυθμισμένη σε τέτοιο άνοιγμα, ώστε να προκύψει η ίδια παροχή μάζας με το αρχικό ακροφύσιο, γωνιών (90°, 50°). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.30.



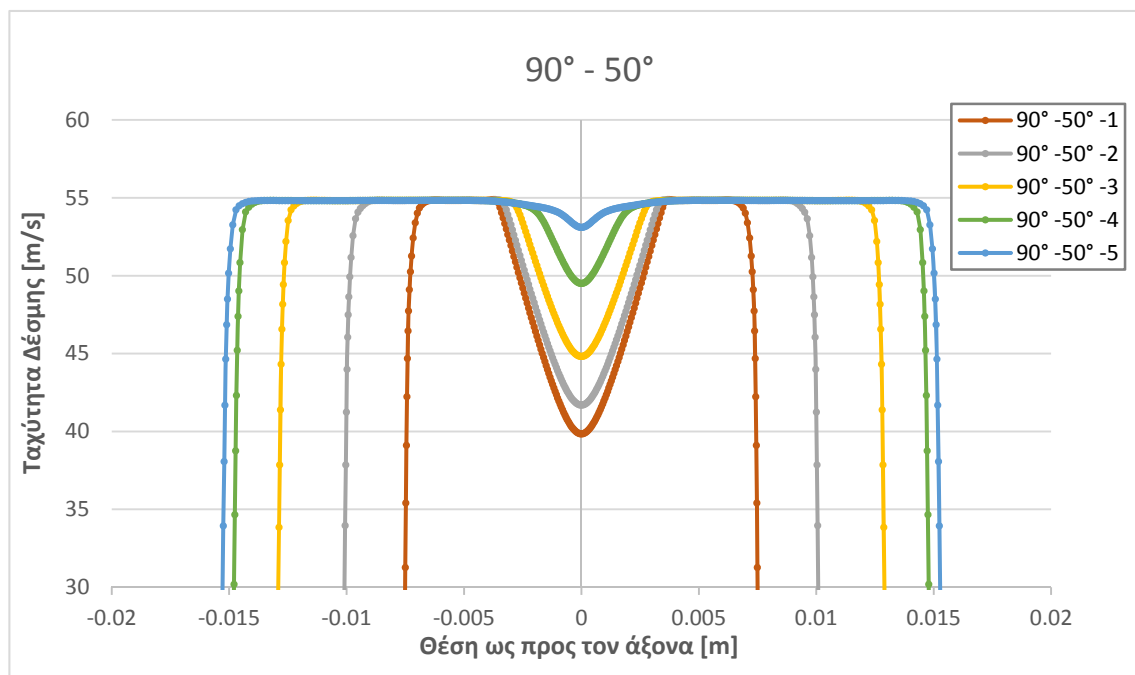
**Σχήμα 4.30:** Σύγκριση των απωλειών ισχύος μεταξύ της αρχικής και των βελτιωμένων γεωμετριών ακροφυσίου υπολογισμένα στην ίδια παροχή μάζας



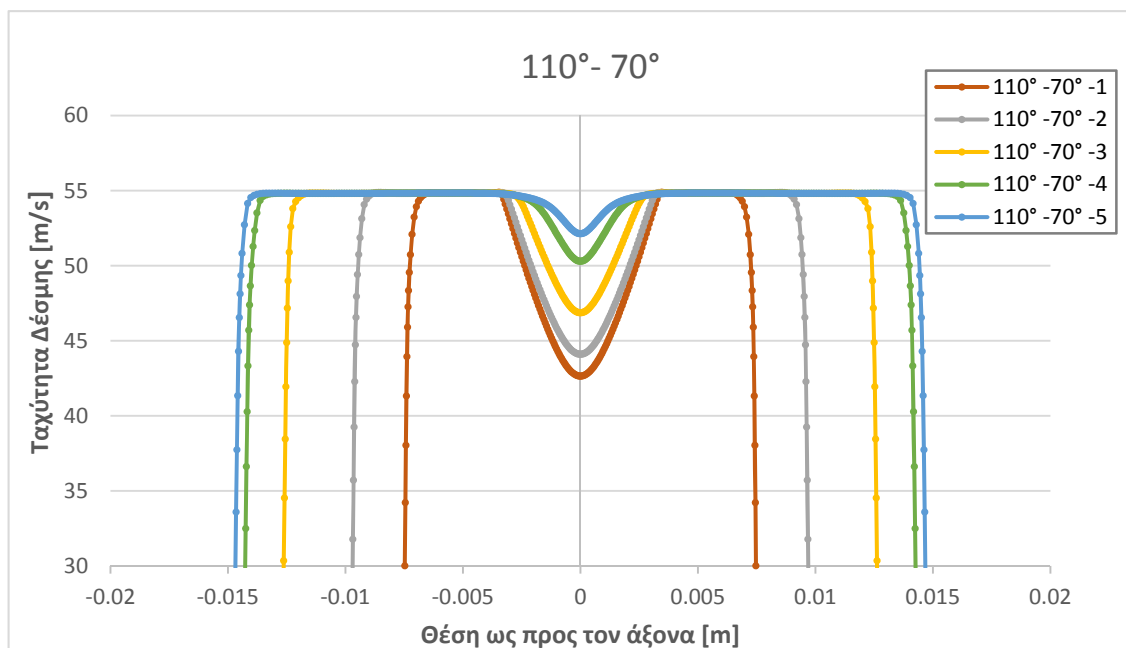
Παρατηρείται πως η μεταβολή αυτή προκαλεί μικρή αύξηση στη διαφορά των απωλειών μεταξύ των βελτιωμένων ακροφυσίων και του αρχικού. Αυτή οφείλεται στην περαιτέρω ελάττωση των απωλειών των βελτιωμένων ακροφυσίων, λόγω του γεγονότος ότι για να πετύχουν ίδια παροχή με το αρχικό, το άνοιγμα της βελόνης τους έπρεπε να αυξηθεί εκ νέου. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται πως στις περιοχές υψηλής παροχής, οι απώλειες μεταξύ των τριών γεωμετριών που μελετήθηκαν έχουν αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ τους, το οποίο αποτελεί άλλη μία απόδειξη πως η παροχή μάζας έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στις απώλειες ισχύος από τις τρεις παραμέτρους σχεδιασμού.

#### 4.3.4 Σύγκριση Κατανομών Ταχυτήτων Ροής

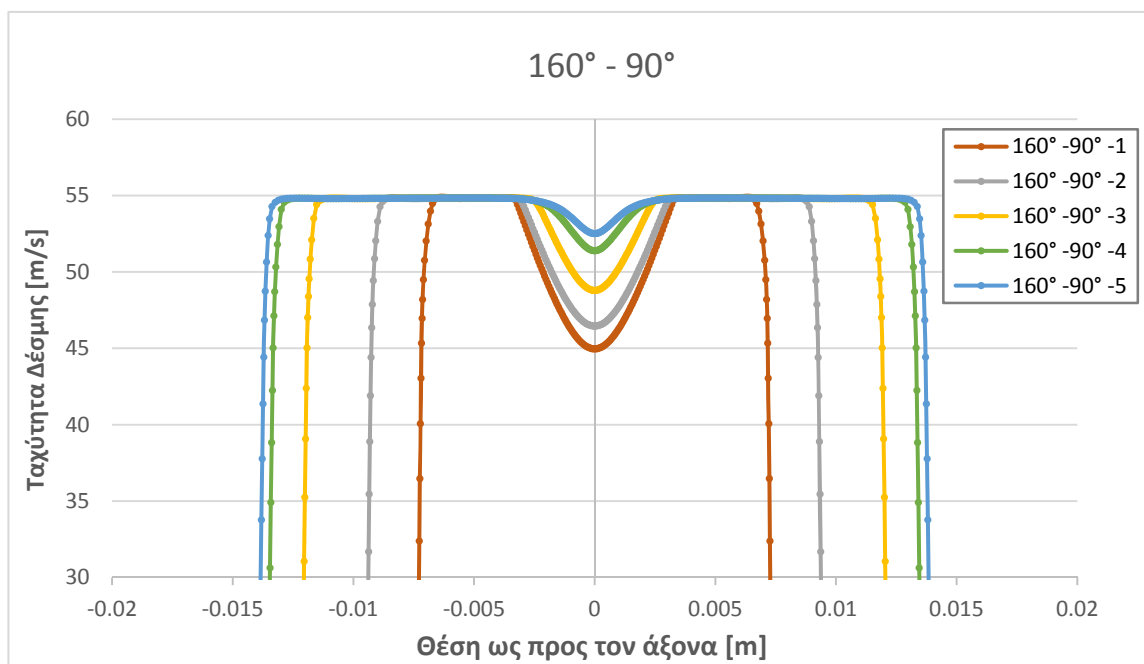
Έπειτα από τη μελέτη βελτιστοποίησης η οποία πραγματοποιήθηκε στη γεωμετρία του ακροφυσίου, διαπιστώθηκε ο συνδυασμός των γωνιών οι οποίες ελαττώνουν τις απώλειές του. Στη συνέχεια μέσω των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων CFD, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των κατανομών ταχυτήτων της δέσμης του ρευστού στα πέντε ανοίγματα βελόνης τα οποία αναφέρθηκαν προηγουμένως. Σκοπός της σύγκρισης αυτής είναι η μελέτη της επίδρασης της βελτιωμένης γεωμετρίας των ακροφυσίων στην ταχύτητα της δέσμης. Στα Σχήματα 4.31- 4.33 παρουσιάζονται οι κατανομές ταχυτήτων της δέσμης ως προς τον άξονα συμμετρίας για τα πέντε ανοίγματα βελόνης και για τα ακροφύσια κατά σειρά με συνδυασμούς γωνιών ( $90^\circ$ ,  $50^\circ$ ), ( $110^\circ$ ,  $70^\circ$ ) και ( $160^\circ$ ,  $90^\circ$ ).



**Σχήμα 4.31:** Κατανομή ταχυτήτων του αρχικού ακροφυσίου ( $90^\circ$ ,  $50^\circ$ ) σε πέντε διαφορετικά ανοίγματα βελόνης



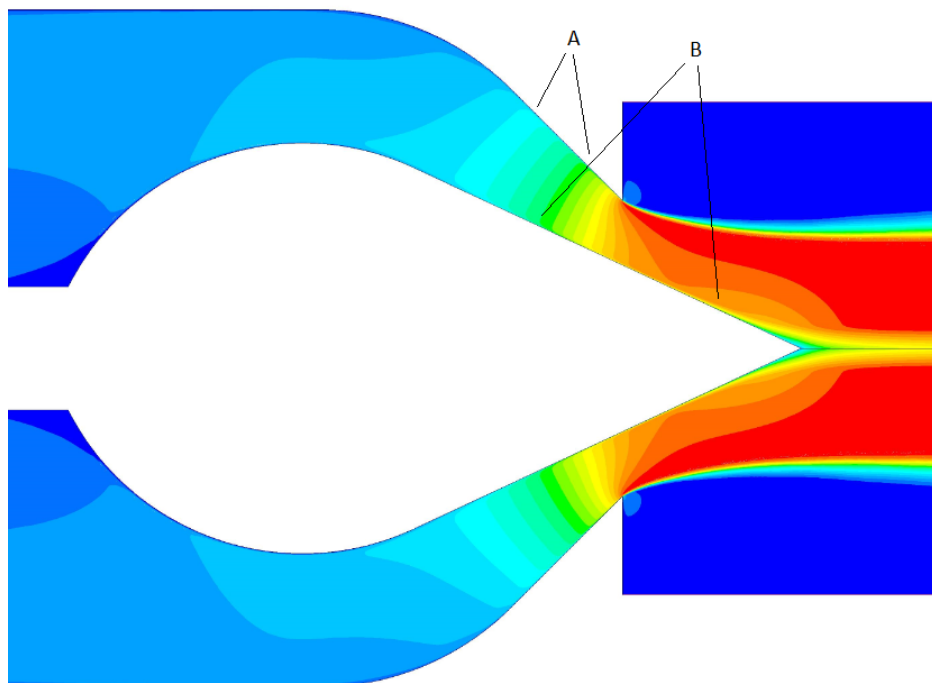
Σχήμα 4.32: Κατανομή ταχυτήτων του βελτιωμένου ακροφυσίου (110°, 70°) σε πέντε διαφορετικά ανοίγματα βελόνης



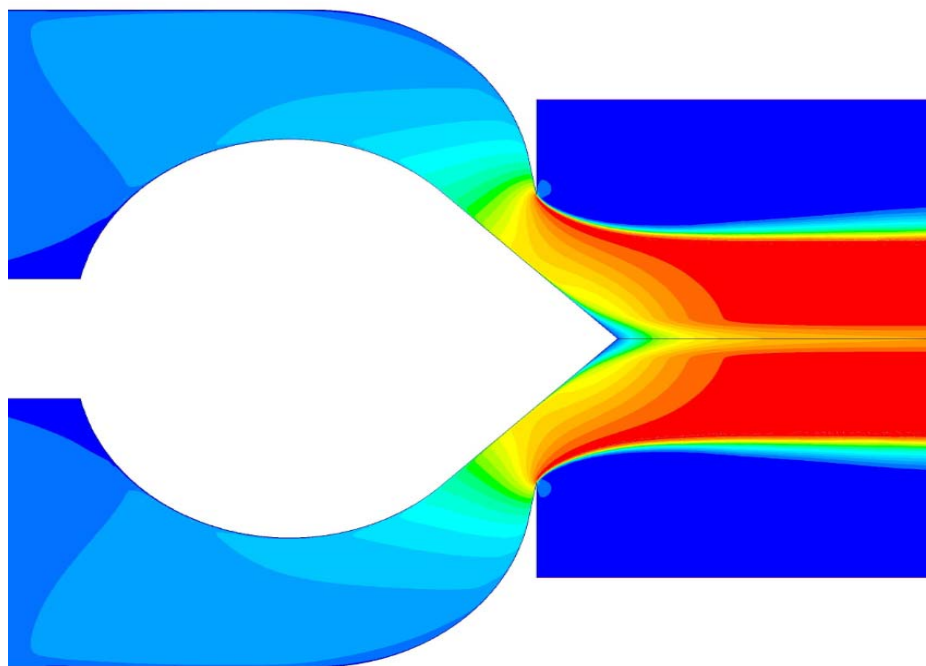
Σχήμα 4.33: Κατανομή ταχυτήτων του βελτιωμένου ακροφυσίου (160°, 90°) σε πέντε διαφορετικά ανοίγματα βελόνης

Εξετάζοντας τα διαγράμματα της κατανομής ταχυτήτων των υπό μελέτη ακροφυσίων, Σχήματα 4.31- 4.33, παρατηρείται πως οι ταχύτητες στον πυρήνα της δέσμης της αρχικής γεωμετρίας, (90°, 50°), παρουσιάζονται μικρότερες από τις αντίστοιχες των βελτιωμένων γεωμετριών, (110°, 70°) και (160°, 90°). Η διαφορά αυτή είναι μεγαλύτερη στις προσομοιώσεις σε χαμηλότερες παροχές

μάζας, ειδικότερα στο άνοιγμα 1, όπου η ελάχιστη ταχύτητα των τριών γεωμετριών υπολογίζεται στα 39 m/s, 42 m/s και 45 m/s, για τους συνδυασμούς γωνιών (90°, 50°), (110°, 70°) και (160°, 90°) αντίστοιχα. Το έλλειμα αυτό της ταχύτητας προκύπτει από την αλληλεπίδραση του ρευστού με το τοίχωμα της βελόνης και την επακόλουθη ανάπτυξη του οριακού στρώματος. Επίσης, παρατηρείται πως οι βελτιωμένες γεωμετρίες των ακροφυσίων παρουσιάζουν ελαττωμένες απώλειες σε όλο το εύρος λειτουργίας και ιδιαίτερα σε χαμηλές παροχές. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη βελτιωμένη μορφή των γεωμετριών αυτών, η οποία με τη σειρά της βελτιώνει την ποιότητα της δέσμης και συνεπώς ελαττώνει τις απώλειες ισχύος. Συγκεκριμένα, στις βελτιωμένες γεωμετρίες, η ύπαρξη μεγαλύτερων γωνιών ακροφυσίου και βελόνης, ελαττώνουν το μήκος των περιοχών αλληλεπίδρασης μεταξύ του επιταχυνόμενου ρευστού και των τοιχωμάτων, όπου αναπτύσσεται το οριακό στρώμα και το οποίο προκαλεί αυξημένες απώλειες ισχύος λόγω τριβής [45]. Στο Σχήμα 4.34 (α) και (β) παρουσιάζονται οι ισοϋψείς καμπύλες ταχύτητας των γεωμετριών (90°, 50°) και (160°, 90°) αντίστοιχα, για την ίδια παροχή μάζας και ύψος πτώσης εισόδου. Τα μήκη των περιοχών αλληλεπίδρασης του ρευστού και του τοιχώματος του ακροφυσίου και της βελόνης, Α και Β αντίστοιχα, στη βελτιωμένη γεωμετρία (β) παρουσιάζονται ελαττωμένα σε σχέση με την αρχική (α), οπότε και η επίδραση του οριακού στρώματος στη ροή είναι μειωμένη. Ειδικά η μορφή της βελόνης στη βελτιωμένη γεωμετρία (β), βοηθά τη δέσμη του ρευστού να συγκλίνει ταχύτερα, ενώ η διαταραχή από τη μύτη της εμφανίζεται μειωμένη [41]. Να σημειωθεί πως στη συγκεκριμένη παροχή οι απώλειες της βελτιωμένης γεωμετρίας προέκυψαν 0.4 % ελαττωμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες της αρχικής.



(α)



(β)

**Σχήμα 4.34:** Σύγκριση ισοϋψών καμπυλών ταχύτητας μεταξύ των γεωμετριών με συνδυασμό γωνιών: α) (90°, 50°) και β) (160°, 90°) [ $\dot{m}= 25 \text{ kg/s}$ ,  $H= 150 \text{ mSY}$ ]

Η βελτίωση της ποιότητας της δέσμης επιτυγχάνεται με δύο τρόπους. Αρχικά, στην περίπτωση της γεωμετρίας με συνδυασμό γωνιών (160°, 90°) η μορφή της δέσμης προκύπτει πιο συμπαγής, έχοντας πάχος κατά 2.5-6 % ελαττωμένο, για χαμηλές έως υψηλές παροχές αντίστοιχα, σε σχέση με το πάχος της δέσμης που προκύπτει από τη γεωμετρία (110°, 70°). Η αντίστοιχη διαφορά του πάχους της δέσμης σε σχέση με την αρχική γεωμετρία (90°, 50°) είναι 3-9.5 %. Επιπροσθέτως, με τις βελτιωμένες γεωμετρίες προκύπτει πιο ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας της δέσμης, με την παρουσίαση μικρότερου ελλείματος ταχύτητας στον πυρήνα της σε όλο το εύρος παροχών, όπως προαναφέρθηκε. Με τους τρόπους αυτούς επιτυγχάνεται η βελτίωση της ποιότητας της δέσμης, συνέπεια της οποίας είναι η ελάττωση των απωλειών ισχύος [29].

Πρέπει επίσης να σημειωθεί πως οι μορφές των κατανομών ταχυτήτων των εξεταζόμενων γεωμετριών συμφωνούν με τις κατανομές ταχυτήτων οι οποίες προέκυψαν από πειράματα οπτικοποίησης της ροής σε ακροφύσιο το οποίο έχει συνδεδεμένο ανάντι του ευθύ αγωγό και τα οποία παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία [27, 28, 34, 45, 46].

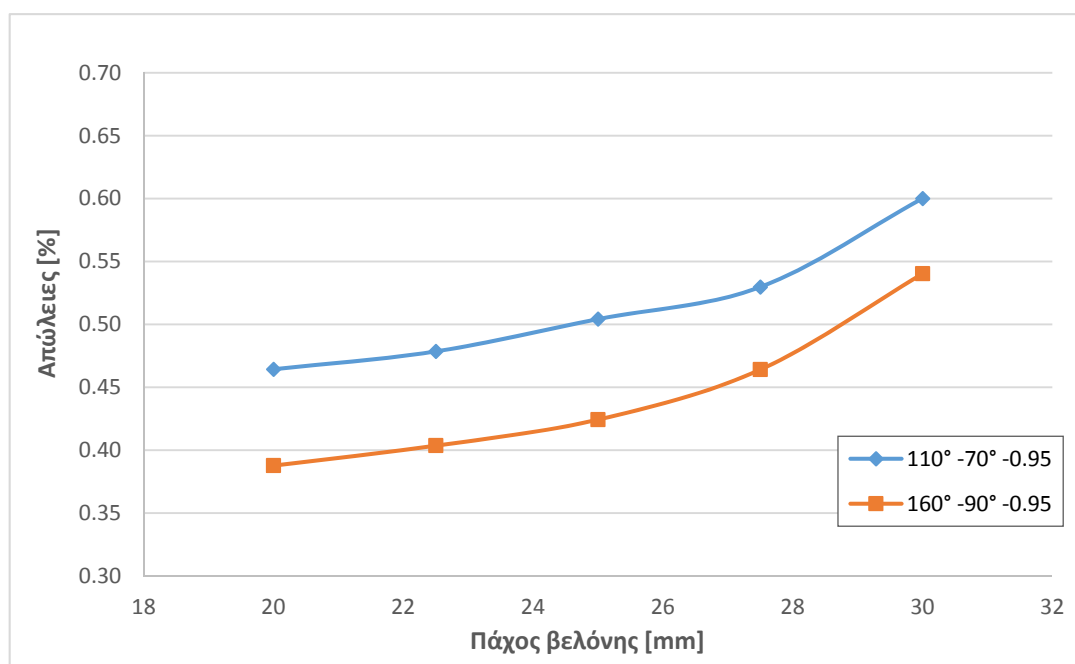
#### 4.4 Διερεύνηση της Επίδρασης Λοιπών Παραμέτρων στις Απώλειες

Στην ενότητα αυτή διερευνήθηκε η επίδραση στις απώλειες ισχύος της ροής σε ακροφύσιο υδροστροβίλου δράσης λοιπών παραμέτρων, γεωμετρικών και λειτουργικών. Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση του πάχους της βελόνης, της καμπυλότητας και της τραχύτητας των τοιχωμάτων του ακροφυσίου και της βελόνης, της ολικής πίεσης εισόδου και της μορφής του στομίου εξόδου του ακροφυσίου. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μία ακόμα μελέτη βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του ακροφυσίου, ώστε να ελεγχθούν οι απώλειες στα όρια του προηγούμενου χώρου σχεδίασης. Να σημειωθεί πως όλες οι προσομοιώσεις CFD οι οποίες πραγματοποιήθηκαν και περιγράφονται σε αυτή την ενότητα, πραγματοποιήθηκαν με τις ρυθμίσεις επιλύτη οι οποίες περιγράφονται στον Πίνακα 3.8 και με τη χρήση του μοντέλου SST για την τύρβη.

##### 4.4.1 Πάχος της Βελόνης

Στο Σχήμα 3.3 της ενότητας 3.1, συμβολίστηκε με  $D$  μία σημαντική παράμετρος σχεδίασης του ακροφυσίου, το πάχος της βελόνης. Έπειτα από τη διενέργεια διερευνητικών προσομοιώσεων CFD, αποφασίστηκε πως η συγκεκριμένη παράμετρος δεν επιδρά πολύ στις απώλειες ισχύος, και συνεπώς θα εξεταζόταν μόνη της και όχι συνδυαστικά με τις γωνίες ακροφυσίου και βελόνης και την παροχή μάζας, ώστε να μην αυξηθεί πολύ ο αριθμός των προσομοιώσεων κατά τον σχεδιασμό πειραμάτων. Στις προσομοιώσεις που προηγήθηκαν, το πάχος της βελόνης θεωρήθηκε ίσο με αυτό του αρχικού ακροφυσίου, δηλαδή 25 mm, το μισό δηλαδή του ολικού πάχους λόγω της διδιάστατης γεωμετρίας.

Κατά τη μελέτη της επίδρασης του πάχους της βελόνης πραγματοποιήθηκαν από πέντε προσομοιώσεις στις βελτιωμένες γεωμετρίες οι οποίες βρέθηκαν από τη μελέτη βελτιστοποίησης. Η βελόνη, όντας ένα στερεό τοίχωμα στο πεδίο ροής, αποτελεί ουσιαστικά εμπόδιο στη ροή και συνεπώς, το ρευστό λόγω της επαφής του με αυτή υφίσταται περαιτέρω απώλειες ισχύος. Συνεπώς, είναι λογικό να υποτεθεί πως όσο ελαττώνεται το πάχος της βελόνης, τόσο θα ελαττώνονται και οι απώλειες ισχύος. Για τον λόγο αυτό, το άνω όριο του πάχους τέθηκε στα 30 mm, ενώ το κάτω όριο τέθηκε στα 20 mm. Το όριο αυτό τέθηκε λόγω της ακτίνας εξόδου του ακροφυσίου· όντας 18 mm, εάν η βελόνη έχει το ίδιο ή μικρότερο πάχος, δεν θα κλείνει η παροχή του και θα προκύπτουν προβλήματα στη λειτουργία του. Σε κάθε γεωμετρία πραγματοποιήθηκαν από πέντε προσομοιώσεις, με πάχη βελόνης ίσα προς 20, 22.5, 25, 27.5 και 30 mm. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με λόγο εμβαδού ανοίγματος ίσο με 0.95, οπότε σε παροχή μάζας κοντά στη μέγιστη δυνατή. Διαπιστώθηκε πως το πάχος της βελόνης παρουσιάζει αποτελέσματα ανεξάρτητα των υπόλοιπων παραμέτρων, οπότε τα ίδια ισχύουν και για μεγαλύτερες παροχές. Αξίζει να σημειωθεί πως η καμπυλότητα της βελόνης ήταν και στις δύο γεωμετρίες ίση με 22.4 mm, όπως προέκυψε από την παραμετροποίηση η οποία περιγράφεται στην υποενότητα 3.8.2.3. Η ολική πίεση εισόδου τέλος, ρυθμίστηκε ίση με 1.5 MPa ή περίπου 150 mSY. Τα αποτελέσματα της μελέτης της επίδρασης του πάχους της βελόνης για τις δύο βελτιστοποιημένες γεωμετρίες, με συνδυασμό γωνιών (110°, 70°) και (160°, 90°), παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.35.



**Σχήμα 4.35:** Επίδραση του πάχους της βελόνης στις απώλειες ισχύος του ακροφυσίου

Εξετάζοντας το Σχήμα 4.35, παρατηρείται ότι το πάχος της βελόνης έχει μικρή επίδραση στις απώλειες ισχύος. Όπως αναμενόταν, όταν το πάχος της βελόνης μικραίνει, ελαττώνονται και οι απώλειες. Συγκεκριμένα, οι μικρότερες απώλειες προέκυψαν για πάχος βελόνης ίσο με 40 mm (ή 20 mm για το διδιάστατο πεδίο ροής) και στις δύο γεωμετρίες. Η διαφορά ωστόσο των απωλειών μεταξύ της περίπτωσης χρήσης βελόνης πάχους 20 mm σε σχέση με την ήδη υπάρχουσα, ίση με 25 mm είναι μικρότερη από 0.04 %. Συνεπώς, προκύπτει το συμπέρασμα πως η επίδραση του πάχους της βελόνης είναι πολύ μικρή στις απώλειες ισχύος. Άλλωστε μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στις ίδιες γεωμετρίες, αλλά σε διαφορετικές παροχές έδειξαν πως η συγκεκριμένη παράμετρος σχεδιασμού είναι ανεξάρτητη των υπολοίπων οι οποίες εξετάστηκαν στη μελέτη βελτιστοποίησης. Η ελάττωση των απωλειών κατά 0.04% δε δικαιολογεί την επιλογή αντικατάστασης της βελόνης με νέα, ελαττωμένου πάχους, ειδικά από τη στιγμή που η μείωση αυτή ενδέχεται να προκαλέσει λειτουργικά προβλήματα στο ακροφύσιο κατά την διακοπή της ροής. Συνεπώς, η μεταβολή του πάχους της βελόνης δεν επιλέχθηκε κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.

#### 4.4.2 Καμπυλότητα των Τοιχωμάτων

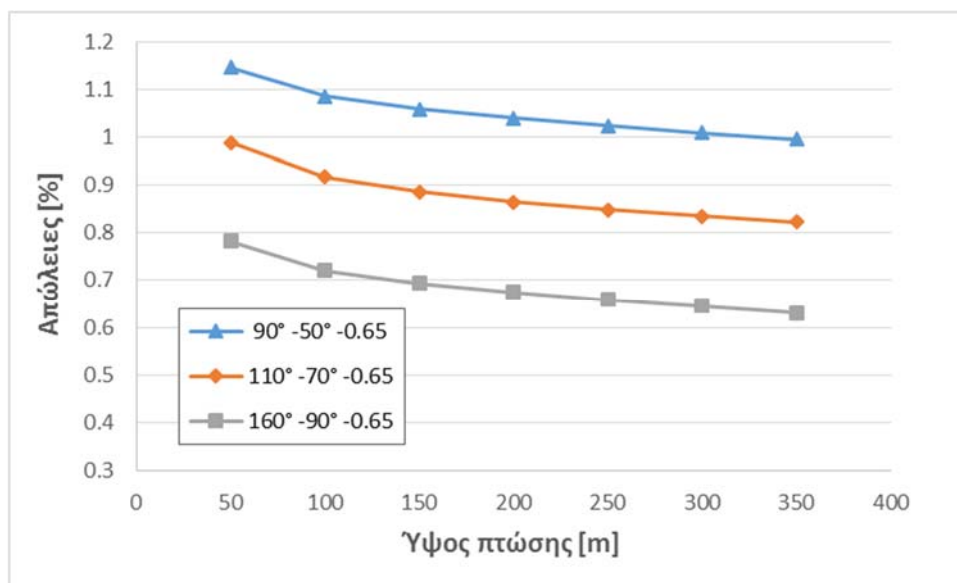
Κατά τη διαδικασία παραμετροποίησης της γεωμετρίας του ακροφυσίου, στα πλαίσια της προετοιμασίας της διαδικασίας βελτιστοποίησης, μελετήθηκαν δύο ακόμα γεωμετρικές παράμετροι ως προς την επίδραση τους στις απώλειες ισχύος του ακροφυσίου. Οι παράμετροι αυτές είναι οι ακτίνες καμπυλότητας του ακροφυσίου και της βελόνης, συμβολισμένες με I και J αντίστοιχα στο Σχήμα 3.4. Στη μελέτη αυτή, διατηρήθηκε η μορφή των καμπυλών αυτών σε τόξο κύκλου λόγω της απλότητάς τους. Μελετήθηκαν διάφορες ακτίνες καμπυλότητας για τις γεωμετρίες στα άκρα του εύρους τιμών των γωνιών του ακροφυσίου αλλά και της βελόνης και πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις CFD, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάστηκαν στα Σχήματα 3.32 και 3.33. Συνοπτικά, διαπιστώθηκε πως η ακτίνα καμπυλότητας είχε μικρή επίδραση

στις απώλειες ισχύος, της τάξεως του 0.05% περίπου, διαφορά η οποία δεν κρίθηκε σημαντική, ώστε να συμπεριληφθούν οι παράμετροι αυτές στη μελέτη βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης αυτής χρησιμοποιήθηκαν ωστόσο στην κύρια μελέτη βελτιστοποίησης. Αφού βρέθηκαν οι κατάλληλες τιμές των ακτίνων καμπυλότητας για τις συγκεκριμένες γωνίες (Πίνακας 3.11), οι οποίες και απέδιδαν ελαττωμένες απώλειες, στη συνέχεια, για τις υπόλοιπες γεωμετρίες και γωνίες, οι ακτίνες καμπυλότητας επελέγησαν με χρήση γραμμικής παρεμβολής.

Έπειτα από την ολοκλήρωση της μελέτης βελτιστοποίησης, και αφού προέκυψε η βελτιωμένη γεωμετρία του ακροφυσίου, επαναλήφθηκε η μελέτη της συνδυασμένης επίδρασης των ακτίνων καμπυλότητας στις απώλειες. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν δύο σύνολα προσομοιώσεων, σχεδιασμένα βάσει της μεθόδου DOE, ένα για τη βέλτιστη γεωμετρία (160°, 90°), καθώς επίσης και ένα για τη γεωμετρία (110°, 70°). Κάθε σύνολο αποτελούνταν από εννιά προσομοιώσεις, όπου το εύρος των ακτίνων καμπυλότητας του ακροφυσίου και της βελόνης επιλέχθηκε, βάσει των αποτελεσμάτων της υποενότητας 3.8.2.3, στα 5-30 mm και 10-30 mm αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα τροφοδοτήθηκαν στη συνέχεια στο λογισμικό Design-Expert ώστε με τη χρήση των μεθόδων RSM να προσδιοριστεί η επιφάνεια απόκρισης και κατά συνέπεια οι βέλτιστες τιμές των ακτίνων καμπυλότητας. Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων ωστόσο, έδειξε πως οι διαφορές στις αποκρίσεις, δηλαδή στις απώλειες ισχύος και στις δύο μελέτες ήταν τόσο μικρές, της τάξης του 0.01%, ώστε το μοντέλο θεωρήθηκε στατιστικά μη σημαντικό. Συνεπώς, ουσιαστικά οι διαφορές στις απώλειες θεωρήθηκε ότι ήταν στα όρια του σφάλματος προσομοίωσης, οπότε κρίθηκε πως οι ακτίνες καμπυλότητας του ακροφυσίου και της βελόνης δεν επιδέχονται περαιτέρω βελτίωση.

#### 4.4.3 Ύψος Πτώσης

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η επίδραση της ολικής πίεσης εισόδου (ή ύψους πτώσης όπως συνηθίζεται να λέγεται στους υδροτροβίλους) στις απώλειες ισχύος του ακροφυσίου. Από τις αρχικές προσομοιώσεις διαπιστώθηκε πως παρουσιάζει μικρή επίδραση στις απώλειες της ροής. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε να εξεταστεί ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες παραμέτρους σχεδιασμού. Για τον σκοπό αυτόν, πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω προσομοιώσεις CFD στις βελτιωμένες γεωμετρίες ακροφυσίου. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν η αρχική γεωμετρία (90°, 50°), η ενδιάμεση με συνδυασμό γωνιών (110°, 70°), καθώς και η βελτιωμένη, με συνδυασμό γωνιών (160°, 90°) και λόγο εμβαδού ανοίγματος ίσο με 0.65, δηλαδή σε λειτουργία μέσης παροχής. Πραγματοποιήθηκαν από επτά προσομοιώσεις σε κάθε γεωμετρία, στο εύρος ύψους πτώσης 50-350 mΣΥ (ή ισοδύναμα 0.5 έως 3.5 MPa σε μονάδες πίεσης), ανά 50 mΣΥ. Στο Σχήμα 4.36 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων CFD για τις προαναφερθείσες γεωμετρίες. Παρατηρείται πως οι βελτιωμένες γεωμετρίες είναι καλύτερες σε όλο το εύρος πιέσεων.



**Σχήμα 4.36:** Επίδραση του ύψους πτώσης στις απώλειες ισχύος του ακροφυσίου

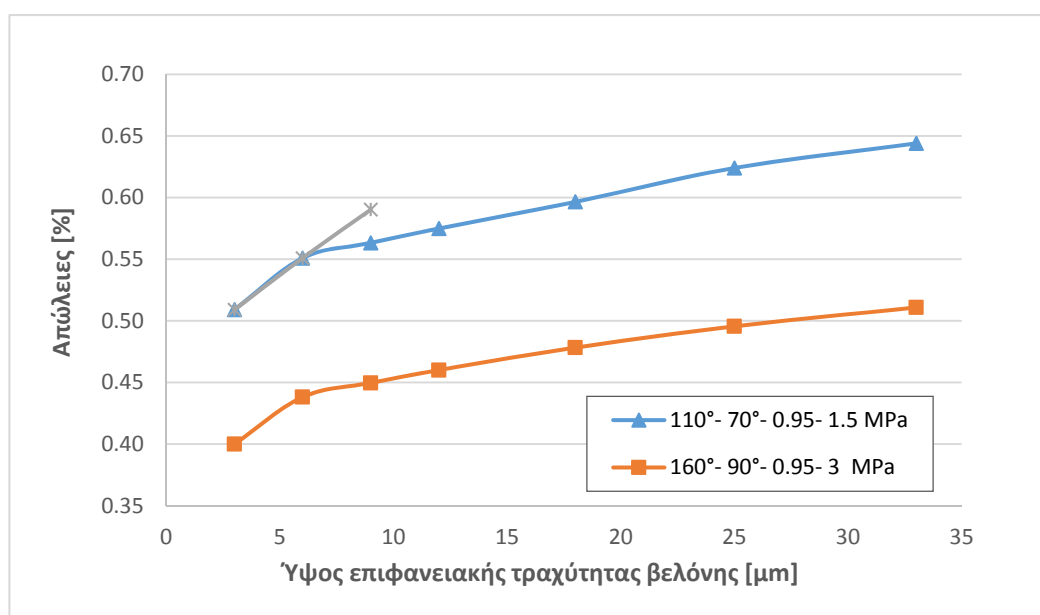
Παρατηρείται πως η ελάττωση του ύψους πτώσης επιδρά στις απώλειες ισχύος ενισχυτικά, δηλαδή τις αυξάνει. Συγκεκριμένα, η διαφορά των απωλειών μεταξύ της προσομοίωσης στο χαμηλότερο ύψος πτώσης το οποίο μελετήθηκε, δηλαδή τα 50 m, και του ύψους πτώσης στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις της μελέτης βελτιστοποίησης ήταν η ίδια και στις δύο γεωμετρίες και ίση με 0.1 % περίπου. Συμπερασματικά, προκύπτει πως το ύψος πτώσης επιδρά ανεξάρτητα των υπόλοιπων παραμέτρων σχεδιασμού, παρουσιάζοντας τις ίδιες απώλειες για οποιαδήποτε συνδυασμό των υπολοίπων παραμέτρων. Να σημειωθεί επίσης πως το ύψος πτώσης επιδρά και στην ταχύτητα της δέσμης· συγκεκριμένα από την Εξίσωση (1.14) προκύπτει πως η μέση ταχύτητα της δέσμης είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του ύψους πτώσης, συνεπώς, προκύπτει το συμπέρασμα πως όσο αυξάνεται το ύψος πτώσης, η ταχύτητα της δέσμης αυξάνει.

#### 4.4.4 Τραχύτητα των Τοιχωμάτων

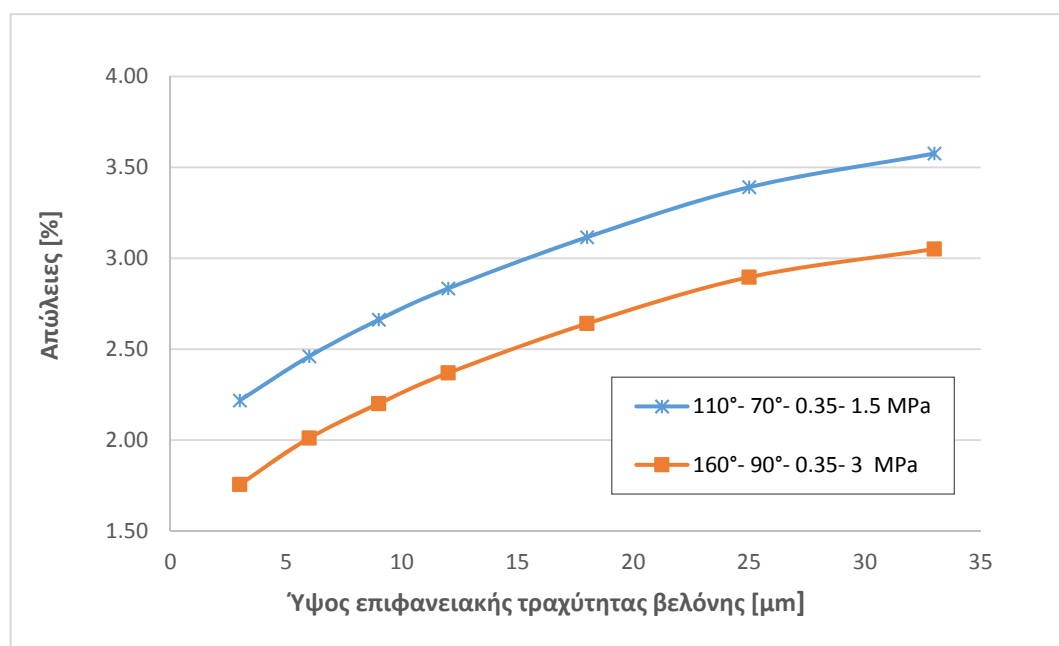
Η επιφανειακή τραχύτητα των τοιχωμάτων του ακροφυσίου και της βελόνης επιδρά στις απώλειες ισχύος με ενισχυτικό τρόπο. Συγκεκριμένα, όταν ο στρόβιλος είναι καινούργιος και δεν έχει πολλές ώρες λειτουργίας η επίδραση της τραχύτητας είναι τόσο μικρή που μπορεί να αμεληθεί. Ωστόσο, με την αύξηση των ωρών λειτουργίας του, τα τοιχώματα του ακροφυσίου και ειδικά της βελόνης φθείρονται με συνέπεια την αύξηση των απωλειών ισχύος. Το πρόβλημα εμφανίζεται εντονότερο στην επιφάνεια της βελόνης, λόγω της υψηλής ταχύτητας του ρευστού κατά την έξοδό του από το ακροφύσιο. Συγκεκριμένα, λόγω της υψηλής ταχύτητας, σχηματίζεται μία περιοχή χαμηλής πίεσης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα σε κάποιες περιπτώσεις την εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαίωσης και κατά συνέπεια τη διάβρωση της επιφάνειας [30]. Αποτέλεσμα αυτού είναι η πρόκληση αυξημένων απωλειών, τόσο άμεσων δηλαδή λόγω τριβής και τύρβης, όσο και άμεσων, λόγω επιδείνωσης της ποιότητας της δέσμης, σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν στην ενότητα 1.3. Συνεπώς, είναι συχνό φαινόμενο η αντικατάσταση της βελόνης του υδροστροβίλου λόγω φθοράς του.



Η επιφανειακή τραχύτητα των τοιχωμάτων δύναται να μοντελοποιηθεί στο ANSYS-FLUENT, με τον καθορισμό του ύψους της τραχύτητας των τοιχωμάτων (wall roughness). Με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης της τραχύτητας των τοιχωμάτων στις απώλειες ισχύος πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της ροής στις βελτιωμένες γεωμετρίες του ακροφυσίου. Στις προσομοιώσεις αυτές, το εύρος της τραχύτητας της επιφάνειας της βελόνης ήταν από 3  $\mu\text{m}$ , η οποία ουσιαστικά αντιστοιχεί σε ομαλό αγωγό, και σταδιακά έφτασε έως τα 33  $\mu\text{m}$ , μια τιμή αρκετά μεγάλη ώστε να θεωρηθεί πιθανό να συμβεί. Δεν μελετήθηκαν μεγαλύτερες τιμές, μιας και η μελέτη είναι ενδεικτική, ενώ επίσης οι επιφάνειες σε περίπτωση μεγάλης φθοράς θα αντικατασταθούν. Αντίθετα, η επιφανειακή τραχύτητα του ακροφυσίου τέθηκε ίση με την τραχύτητα της βελόνης, όταν αυτή είχε τιμή μικρότερη από 6  $\mu\text{m}$  και ίση με 6  $\mu\text{m}$  για τις υπόλοιπες προσομοιώσεις. Αυτό πραγματοποιήθηκε λόγω της μεγαλύτερης φθοράς η οποία εμφανίζεται στην επιφάνεια της βελόνης συγκριτικά με του ακροφυσίου. Οι γεωμετρίες οι οποίες προσομοιώθηκαν ήταν αυτές οι οποίες προέκυψαν από τη μελέτη βελτιστοποίησης, δηλαδή με συνδυασμό γωνιών ( $110^\circ$ ,  $70^\circ$ ) και ( $160^\circ$ ,  $90^\circ$ ). Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε δύο διαφορετικά ανοίγματα βελόνης, τα οποία αντιστοιχούσαν σε χαμηλή και υψηλή παροχή, με λόγο εμβαδού ανοίγματος 0.35 και 0.95 αντίστοιχα. Τέλος, το ύψος πτώσης τέθηκε ίσο με 150 mΣΥ για την γεωμετρία ( $110^\circ$ ,  $70^\circ$ ) και 300 mΣΥ για τη γεωμετρία ( $160^\circ$ ,  $90^\circ$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.37 και 4.38 για υψηλές και χαμηλές αντίστοιχα τιμές της παροχής μάζας. Αξίζει να σημειωθεί πως η διερεύνηση της παραμέτρου αυτής, πραγματοποιήθηκε στις συγκεκριμένες τιμές, ώστε να παρουσιαστεί η γενικότερη τάση της μεταβολής των απωλειών με την μεταβολή της κατάστασης των τοιχωμάτων.



**Σχήμα 4.37:** Επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας των τοιχωμάτων του ακροφυσίου και της βελόνης στις απώλειες ισχύος (υψηλές τιμές παροχής μάζας)



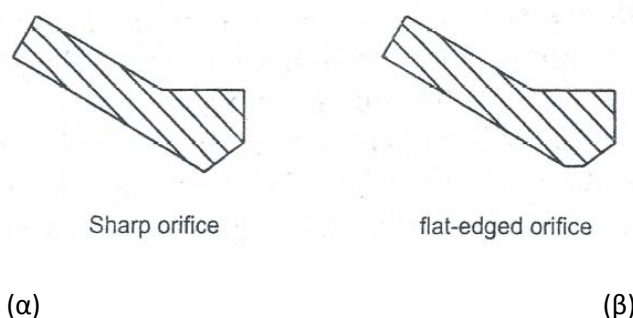
**Σχήμα 4.38:** Επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας των τοιχωμάτων του ακροφυσίου και της βελόνης στις απώλειες ισχύος (χαμηλές τιμές παροχής μάζας)

Εξετάζοντας τα Σχήματα 4.37 και 4.38 συνάγεται το συμπέρασμα πως η επιφανειακή τραχύτητα των τοιχωμάτων του ακροφυσίου και της βελόνης έχει σημαντική επίδραση στις απώλειες ισχύος. Παρατηρείται πως όσο το ύψος της επιφανειακής τραχύτητας αυξάνεται, οι απώλειες ισχύος αυξάνουν ταυτόχρονα, σε σημαντικό βαθμό. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση κατά την οποία η επιφάνεια της βελόνης έχει διαβρωθεί σημαντικά με τη χρόνια χρήση του υδροστροβίλου, οι απώλειες ισχύος μπορεί να αυξηθούν κατά περίπου 20 % σε περιπτώσεις μέτριας φθοράς, ενώ έως και 40 % σε περιπτώσεις σοβαρής φθοράς, για τις τιμές της τραχύτητας που μελετήθηκαν. Στο Σχήμα 4.37, στην προσομοίωση της ροής για τον υδροστρόβιλο με συνδυασμό γωνιών (110°, 70°), με γκρι καμπύλη παρουσιάζεται η τάση της αύξησης των απωλειών σε περίπτωση κατά την οποία η τραχύτητα της επιφάνειας του ακροφυσίου τεθεί σε κάθε προσομοίωση ίση με αυτή της βελόνης, όταν δηλαδή οι φθορές των δύο επιφανειών θεωρηθεί πως έχουν την ίδια έκταση. Η μεγάλη επίδραση της επιφανειακής τραχύτητας στις απώλειες ισχύος, οφείλεται στον αυξημένο συντελεστή τριβής ο οποίος παρατηρείται σε τυρβώδεις ροές διαμέσου τοιχωμάτων με μεγάλη τραχύτητα, σε αντίθεση με αντίστοιχα τυρβώδεις ροές σε αγωγούς με ομαλή επιφάνεια. Συνεπώς, η επιφανειακή τραχύτητα προκαλεί πολύ μεγαλύτερη πτώση πίεσης στη ροή διαμέσου του ακροφυσίου, και άρα αυξημένες απώλειες.

#### 4.4.5 Μορφή του Στομίου

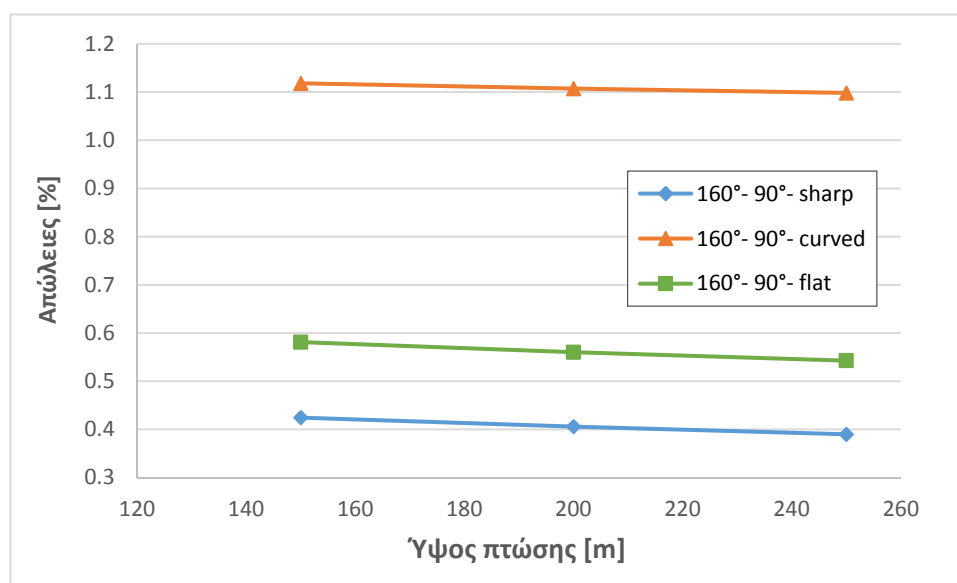
Τα χείλη του ακροφυσίου του υδροστροβίλου Pelton μπορούν να διαμορφωθούν με απότομη απόληξη ή να έχουν πεπλατυσμένη μορφή, σύμφωνα με το Σχήμα 4.39. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η μορφή του στομίου του ακροφυσίου επιδρά στην ποιότητα της δέσμης η οποία εξέρχεται του ακροφυσίου, και κατά συνέπεια επιδρά έμμεσα και στις απώλειες ισχύος. Συγκεκριμένα, η μορφή του στομίου με απότομη απόληξη (Σχήμα 4.39 (α)) παρουσιάζει

μικρότερες απώλειες ισχύος, αλλά είναι πιο επιρρεπές στη φθορά λόγω διάβρωσης υπό την επίδραση του νερού. Αντίθετα, η ύπαρξη πεπλατυσμένης απόληξης στο άκρο του ακροφυσίου (Σχήμα 4.39 (β)), αν και παρουσιάζει μεγαλύτερες απώλειες, είναι πιο ανθεκτικό στη φθορά. Σε κάθε περίπτωση, το χείλος του ακροφυσίου πρέπει να έχει καταργαστεί προσεκτικά, ώστε η επιφάνεια να είναι όσο πιο ομαλή γίνεται για να μην διαταράσσει τη ροή [41, 25].



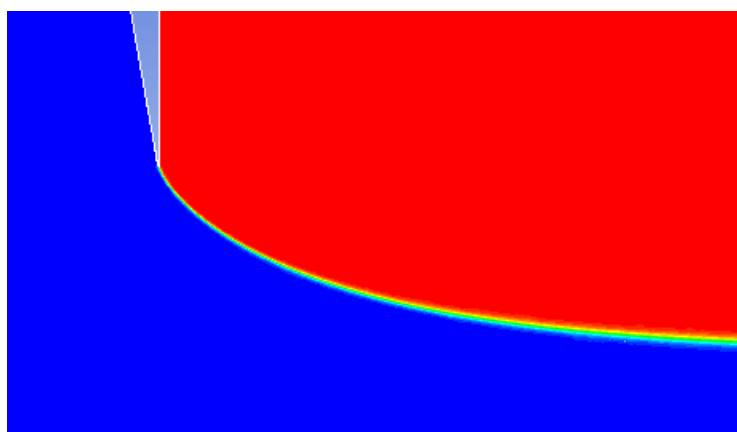
**Σχήμα 4.39:** Διαφορετικές μορφές του χείλους του ακροφυσίου: (α) απότομη και (β) πεπλατυσμένη απόληξη [41]

Για τον σκοπό της διερεύνησης της επίδρασης της μορφής του στομίου του ακροφυσίου στις απώλειες ισχύος, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις CFD στη βελτιωμένη γεωμετρία με συνδυασμό γωνιών ( $160^\circ$ ,  $90^\circ$ ). Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν από τρεις προσομοιώσεις σε διαφορετικά ύψη πτώσεως, στα 150, 200 και 250 mΣΥ αντίστοιχα και μεγάλη παροχή μάζας (για λόγο εμβαδού ανοίγματος ίσο με 0.95). Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν τόσο μεταξύ τους, όσο και με αυτά τα οποία προέκυψαν από μία διαφορετική μορφή του στομίου του ακροφυσίου η οποία κατασκευάστηκε, και η οποία αντί για πεπλατυσμένη απόληξη, είχε ένα καμπύλο τμήμα, με ακτίνα καμπυλότητας ίση με 1 mm. Έτσι οι μορφές του στομίου οι οποίες διερευνήθηκαν ήταν με απότομη (sharp), πεπλατυσμένη (flat) και καμπυλωτή (curved) απόληξη (Σχήμα 4.40 (α), (β) και (γ) αντίστοιχα). Στο Σχήμα 4.40 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων CFD για την επίδραση της μορφής του στομίου του ακροφυσίου στις απώλειες ισχύος.

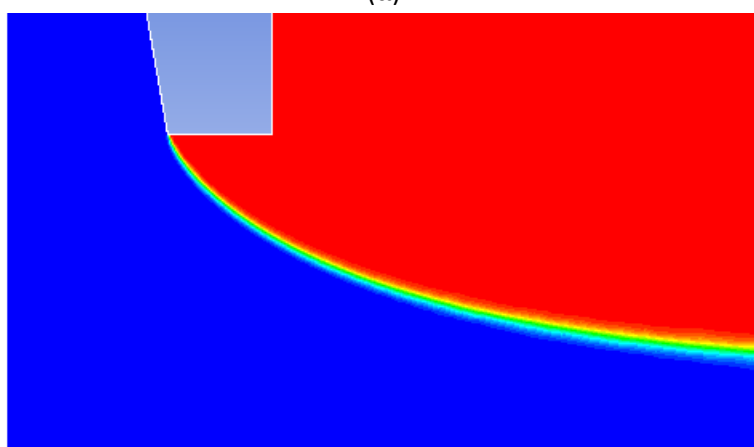


**Σχήμα 4.40:** Επίδραση της μορφής του στομίου του ακροφυσίου στις απώλειες ισχύος

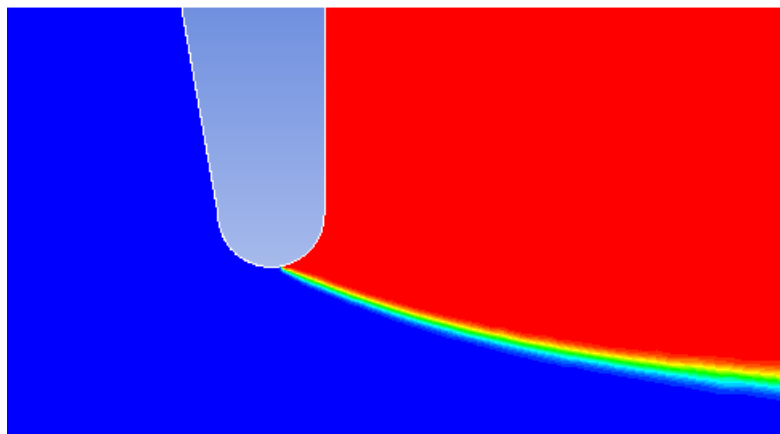
Εξετάζοντας τα αποτελέσματα του Σχήματος 4.40, παρατηρείται πως η μορφή του στομίου του ακροφυσίου έχει σημαντική επίδραση στις απώλειες ισχύος της ροής. Συγκεκριμένα, το ήδη υπάρχον ακροφύσιο, με την απότομη απόληξη εμφανίζει τις μικρότερες απώλειες, οι οποίες είναι περίπου 0.15 % ελαττωμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες απώλειες στο πεπλατυσμένο στόμιο. Αντίθετα, το ακροφύσιο με το καμπύλο στόμιο εμφανίζει πολύ αυξημένες απώλειες, περίπου 0.7 % μεγαλύτερες από το ακροφύσιο με την απότομη απόληξη του στομίου. Η διαφορά αυτή οφείλεται στη μορφή του στομίου, η οποία δεν επιτρέπει στη δέσμη να συγκλίνει το ίδιο γρήγορα και να προκύψει το ίδιο συμπαγής, επιδεινώνοντας την ποιότητά της. Στο Σχήμα 4.41 παρουσιάζεται λεπτομέρεια των ισοϋψών καμπυλών του κλάσματος όγκου νερού-αέρα· συγκεκριμένα παρουσιάζεται η περιοχή εξόδου της δέσμης από το στόμιο του ακροφυσίου, όπου το νερό έρχεται σε επαφή με τον περιβάλλοντα αέρα για πρώτη φορά. Παρατηρείται πως και στις τρεις περιπτώσεις, το σημείο εξόδου της δέσμης από το ακροφύσιο προβλέφθηκε με επιτυχία (Σχήμα 4.41). Όπως αναφέρεται και στην υποενότητα 1.4, η ακριβής πρόβλεψη του σημείου από το οποίο εξέρχεται η δέσμη από το ακροφύσιο είναι απαραίτητη, έτσι ώστε να μην υπερεκτιμηθεί η ταχύτητά και το πάχος της. Συμπερασματικά, το ήδη υπάρχον ακροφύσιο με την απότομη απόληξη του στομίου του, εμφανίζει τις χαμηλότερες απώλειες ισχύος, ωστόσο η διαφορά τους από αυτές του πεπλατυσμένου στομίου δεν είναι τόσο σημαντική, το οποίο σε συνδυασμό με την αυξημένη αντοχή του τελευταίου στη φθορά λόγω διάβρωσης ίσως να δικαιολογούν τη χρήση του.



(α)



(β)



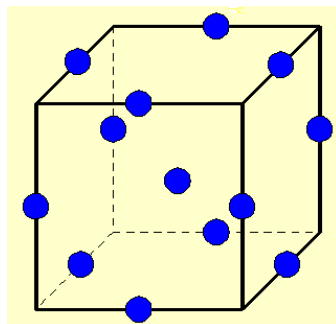
(γ)

**Σχήμα 4.41:** Λεπτομέρεια των ισοϋψών καμπυλών του κλάσματος όγκου νερού-αέρα και μορφή της εξερχόμενης δέσμης ρευστού

#### 4.4.6 Διεύρυνση των Ορίων του Χώρου Σχεδιασμού της Μελέτης Βελτιστοποίησης

Κατά τη μελέτη βελτιστοποίησης, η οποία περιγράφηκε στην ενότητα 4.2, τα όρια του χώρου σχεδιασμού είχαν τεθεί σύμφωνα με την παραμετροποίηση της γεωμετρίας και καταγράφονται στον Πίνακα 4.2. Έτσι, για παράδειγμα τα άνω όρια μελέτης των γωνιών του ακροφυσίου και της βελόνης τέθηκαν ίσα με  $160^\circ$  και  $90^\circ$  αντίστοιχα. Ωστόσο, η βέλτιστη γεωμετρία του ακροφυσίου ως προς τις απώλειες ισχύος προέκυψαν σε αυτές ακριβώς τις γωνίες. Οπότε, στη συνέχεια τίθεται το ερώτημα: αφενός, αν μία ενδεχόμενη διεύρυνση των ορίων του χώρου σχεδιασμού θα μετέβαλε τη βέλτιστη γεωμετρία σε ακόμα μεγαλύτερη γωνία ακροφυσίου, δηλαδή στις  $180^\circ$ . Επιπλέον, όταν οι στόχοι του σχεδιασμού πληρούνται στην άκρη του χώρου του σχεδιασμού για κάθε μεταβλητή, αυτός οφείλει να προσαρμοστεί περαιτέρω στην κατεύθυνση αυτή, ώστε να προσπαθήσει να φέρει τα βέλτιστα σημεία εντός του, ώστε να εξακριβωθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων [23].

Ο πειραματικός σχεδιασμός που επιλέχθηκε για την πρόσθετη μελέτη βελτιστοποίησης είναι η μέθοδος Box-Behnken. Το μοντέλο αυτό απαιτεί τον καθορισμό τριών παραμέτρων σχεδίασης, με τρία επίπεδα ο καθένας, όπως και το σύνθετο κεντρικό. Το συγκεκριμένο μοντέλο απαιτεί 13 προσομοιώσεις CFD και είναι ειδικό για την διερεύνηση των ορίων του χώρου σχεδιασμού. Τα 13 αυτά σημεία τα οποία προέκυψαν από τον σχεδιασμό αυτό παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.42 [23].



**Σχήμα 4.42:** Σχεδιασμός πειραμάτων Box-Behnken για 3 μεταβλητές σχεδιασμού ( $x_1, x_2, x_3$ )

Η επιλογή του εύρους καθεμίας από τις τρεις παραμέτρους καθορίστηκε βάσει των ανώτατων ορίων τα οποία ήταν δυνατό να μελετηθούν. Να σημειωθεί εδώ πως η τρίτη παράμετρος, δηλαδή ο λόγος εμβαδού ανοίγματος αντικαταστάθηκε με την παροχή μάζας, σύμφωνα με τη διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε στην προηγούμενη μελέτη βελτιστοποίησης. Στον Πίνακα 4.10 συνοψίζεται το εύρος τιμών των τριών παραμέτρων σχεδίασης.

**Πίνακας 4.10:** Εύρος τιμών των παραμέτρων σχεδίασης

Παράγοντας	Ελάχιστο	Κεντρική τιμή	Μέγιστο
Γωνία ακροφυσίου (°)	80	130	180
Γωνία βελόνης (°)	40	70	100
Παροχή μάζας (kg/s)	15	25	35

Αφού πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις στα συγκεκριμένα σημεία του χώρου σχεδιασμού, στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση του μοντέλου τετραγωνικής προσέγγισης το οποίο επιλέχθηκε. Η σύνοψη των στατιστικών του τετραγωνικού μοντέλου το οποίο επιλέχθηκε παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.11.

**Πίνακας 4.11:** Σύνοψη των στατιστικών του μοντέλου τετραγωνικής παλινδρόμησης [σχεδιασμός πειράματος Box- Behnken]

<b>Τυπική απόκλιση</b>	0.031	<b>R-Squared</b>	0.9997
<b>Μέση τιμή</b>	1.20	<b>Adjusted R-Squared</b>	0.9986
<b>Συντελεστής μεταβλητότητας %</b>	2.55	<b>Predicted R-Squared</b>	0.9863
<b>PRESS</b>	0.11	<b>Επαρκής ακρίβεια</b>	86.546

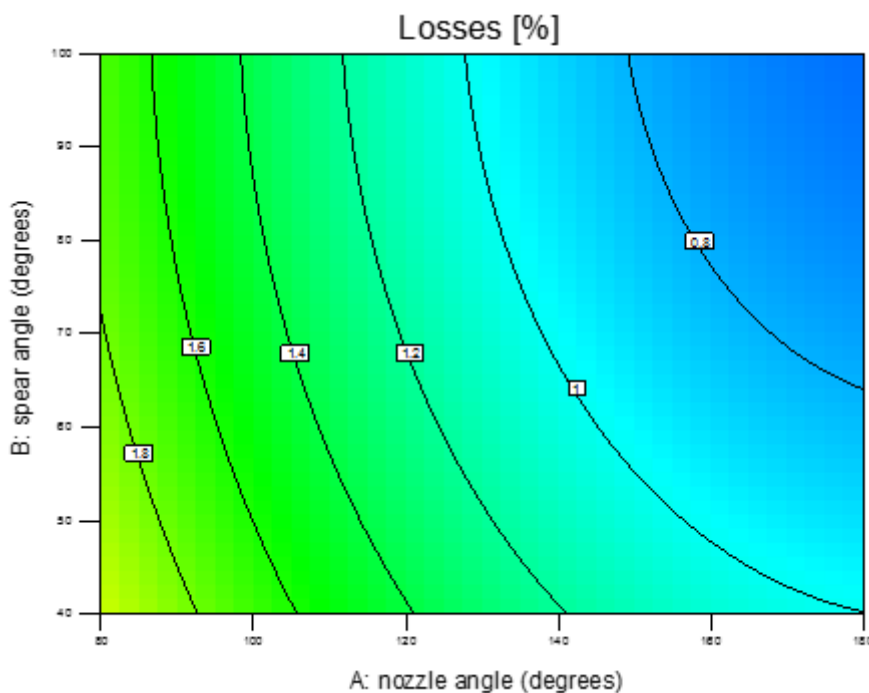
Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του μοντέλου προέκυψαν πολύ καλά, με χαμηλές τιμές τυπικής απόκλισης, PRESS, τους συντελεστές συσχέτισης κοντά στη μονάδα. Η τιμή-F, η οποία προέκυψε από το τεστ Fisher, του μοντέλου είναι 953.65, υπονοώντας ότι το συγκεκριμένο μοντέλο είναι στατιστικά σημαντικό για τη μέτρηση των απωλειών ισχύος. Οπότε βάσει των προαναφερθέντων, και του γεγονότος ότι η επαρκής ακρίβεια έχει μεγάλη τιμή, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση του χώρου σχεδιασμού.

Το τελικό τετραγωνικό μοντέλο, έπειτα από την απαλοιφή των μη σημαντικών όρων σύμφωνα με τα πορίσματα της μελέτης του Πίνακα 4.11 περιγράφεται από την Εξίσωση (4.13) σε όρους κωδικοποιημένων μεταβλητών:

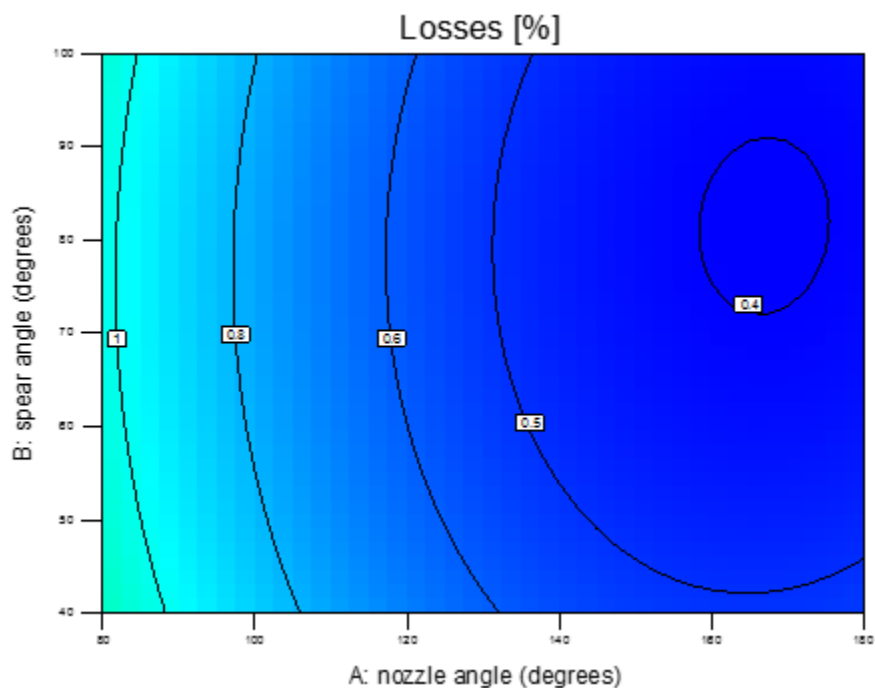
$$F = 0.86 - 0.46x_1 - 0.13x_2 - 1.07x_3 + 0.36x_1x_3 + 0.23x_2x_3 + 0.21x_1^2 + 0.06x_2^2 + 0.6x_3^2 \quad (4.13)$$

Μελετώντας την εξίσωση αυτή, παρατηρείται πως, δεδομένου ότι δεν έχει εφαρμοστεί κάποιος μετασχηματισμός της απόκρισης, εμφανίζονται τα πρόσημα τα οποία αναμένονται για να περιγράψουν την επίδραση των παραμέτρων στην απόκριση. Παρατηρείται λοιπόν πως η αύξηση της τιμής οποιασδήποτε από τις τρεις παραμέτρους οδηγεί σε ελάττωση των απωλειών ισχύος, όπως παρατηρήθηκε και από την κύρια μελέτη βελτιστοποίησης. Άλλωστε, στο μοντέλο περιλαμβάνονται και οι τετραγωνικοί όροι των τριών παραμέτρων, οπότε αναμένεται η επιφάνεια

απόκρισης να παρουσιάζει μεγάλη καμπυλότητα. Τα διαγνωστικά γραφήματα τα οποία δημιουργήθηκαν για το συγκεκριμένο μοντέλο, δεν παρουσίασαν κάποιο πρόβλημα, οπότε στη συνέχεια αναλύθηκαν τα διαγράμματα της απόκρισης τα οποία προκύπτουν από το μοντέλο. Η επίδραση των παραγόντων στην απόκριση, δηλαδή τις απώλειες ισχύος, διερευνήθηκε μέσω των τριδιάστατων απεικονίσεων και των ισοψών καμπυλών οι οποίες προκύπτουν από το μοντέλο. Τα διαγράμματα αυτά είχαν παρόμοια μορφή με τα αντίστοιχα της κύριας μελέτης βελτιστοποίησης, Σχήματα 4.11-4.24, και για τον λόγο αυτό στη συνέχεια θα παρουσιαστούν ενδεικτικά δύο ισοψείς καμπύλες της αλληλεπίδρασης των γωνιών ακροφυσίου και βελόνης στις απώλειες ισχύος, με την παροχή μάζας σταθερή στα 25 kg/s και 35 kg/s, Σχήματα 4.43 και 4.44 αντίστοιχα.



**Σχήμα 4.43:** Ισοψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 25 kg/s) [σχεδιασμός πειράματος Box- Behnken]



**Σχήμα 4.44:** Ισοϋψής καμπύλη της αλληλεπίδρασης της γωνίας ακροφυσίου και της γωνίας βελόνης στις απώλειες ισχύος (παροχή μάζας σταθερή στα 35 kg/s) [σχεδιασμός πειράματος Box- Behnken]

Εξετάζοντας τα Σχήματα 4.43 και 4.44, παρατηρείται πως η παροχή μάζας επιδρά περισσότερο στις απώλειες ισχύος, όπως και στην κύρια μελέτη βελτιστοποίησης. Επίσης παρατηρείται πως η βέλτιστη γεωμετρία και σε αυτή τη μελέτη βελτιστοποίησης προκύπτει σε μία ευρεία περιοχή, της οποίας το κέντρο είναι ο συνδυασμός γωνιών (160°, 80°). Στη συνέχεια, διενεργήθηκε αριθμητική βελτιστοποίηση στην επιφάνεια απόκρισης με το λογισμικό Design-Expert, με στόχο την εύρεση του συνδυασμού γωνιών που ελαχιστοποιούν τις απώλειες ισχύος. Από τη μελέτη αυτή, προέκυψε η γεωμετρία με συνδυασμό γωνιών (162°, 85°) για όλο το εύρος παροχής μάζας που μελετήθηκε. Τα αποτελέσματα αυτά, επικυρώνουν αυτά τα οποία προήλθαν από την κύρια μελέτη βελτιστοποίησης και τα οποία παρατέθηκαν στην ενότητα 4.3.



## Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα και Προτάσεις

### 5.1 Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η ανάλυση της διφασικής ροής δέσμης νερού, η οποία εξέρχεται στον αέρα από ακροφύσιο υδροστροβίλου δράσης, καθώς και η μετέπειτα βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του ακροφυσίου αυτού, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των υδραυλικών απωλειών. Η εργασία κατέδειξε πως η συνδυασμένη χρήση εργαλείων υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) και μεθοδολογιών διεξαγωγής πειραμάτων (DOE) δύναται να χρησιμοποιηθεί για την πληρέστερη κατανόηση των πολύπλοκων φαινομένων τα οποία παρουσιάζονται στη ροή αυτή. Για τον σκοπό αυτόν μελετήθηκε η ροή στο ακροφύσιο πειραματικού υδροστροβίλου Pelton, ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών. Η μελέτη ανεξαρτησίας υπολογιστικού πλέγματος έδειξε πως η μοντελοποίηση της συγκεκριμένης ροής ως διδιάστατης αξονοσυμμετρικής παρέχει τη δυνατότητα λήψης αποτελεσμάτων μεγάλης ακρίβειας, σε συνδυασμό με την εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων. Η αριθμητική επίλυση της ροής με τη χρήση του μοντέλου τύρβης SST, και με τις απαιτήσεις πλέγματος που αυτό συνεπάγεται, προέβλεψε την ανάπτυξη της δέσμης ελεύθερης επιφάνειας. Οι κατανομές ταχυτήτων της δέσμης οι οποίες προέκυψαν, ήταν σε συμφωνία με τις αντίστοιχες κατανομές που προέκυψαν από πειράματα οπτικοποίησης της ροής από τη βιβλιογραφία. Μία αποτελεσματική πρακτική για τη βελτίωση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων ήταν η εφαρμογή τοπικής πύκνωσης του πλέγματος. Με την πύκνωση του πλέγματος στη διεπιφάνεια αέρα-νερού, η μορφή της δέσμης προέκυψε ακριβέστερη. Συγκεκριμένα, η διαφορά μεταξύ του υπολογιστικού αποτελέσματος της διαμέτρου της δέσμης με την αντίστοιχη θεωρητική τιμή ήταν 0.07%. Να σημειωθεί επίσης πως διαπιστώθηκε ότι η επίδραση της βαρύτητας και της επιφανειακής τάσης μπορούν να αμεληθούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα ροής, το οποίο κυριαρχείται από τις αδρανειακές δυνάμεις.

Στη συνέχεια, παραμετροποιήθηκε η γεωμετρία του ακροφυσίου ώστε να πραγματοποιηθεί η μελέτη βελτιστοποίησης, της οποίας σκοπός ήταν η εύρεση των γεωμετρικών παραμέτρων που ελαχιστοποιούν τις απώλειες ισχύος της ροής στο ακροφύσιο. Η διερεύνηση της επίδρασης των κύριων παραμέτρων, δηλαδή των γωνιών του ακροφυσίου και της βελόνης, και του ανοίγματος της βελόνης, εκφρασμένου ως παροχή μάζας, στον βαθμό απόδοσης της δέσμης πραγματοποιήθηκε για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Η μελέτη σχεδιασμού πειραμάτων (DOE) χρησιμοποιήθηκε για την ανάδειξη των σημείων του χώρου σχεδιασμού όπου θα πραγματοποιούνταν προσομοιώσεις CFD. Για τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία επιφανειών απόκρισης (RSM). Με τη μέθοδο αυτή, καθορίστηκε το τετραγωνικό μοντέλο για την προσέγγιση της επιφάνειας απόκρισης, εξερευνήθηκε ο χώρος σχεδιασμού και προέκυψε η γεωμετρία ακροφυσίου η οποία παρουσίαζε τις ελάχιστες απώλειες ισχύος.

Η στατιστική ανάλυση αλλά και η μελέτη των διαγραμμάτων τα οποία προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου RSM, υπέδειξε μία πλευρά του συγκεκριμένου προβλήματος ροής, το οποίο ενδεχομένως να παραλειπόταν με τη χρήση συμβατικών μεθόδων ανάλυσης. Συγκεκριμένα, οι γωνίες του ακροφυσίου και της βελόνης, καθώς και η παροχή μάζας προέκυψε ότι ενέχονται σε αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Η παροχή μάζας αποδείχτηκε πως έχει μεγαλύτερη επίδραση από τις άλλες δύο παραμέτρους σχεδίασης, κάτι το οποίο εξηγείται από δύο κυρίως

λόγους. Αρχικά, στην περίπτωση που η διερχόμενη παροχή είναι μικρή, το εμβαδόν της διατομής είναι ελαττωμένο, ενώ επίσης το οριακό στρώμα το οποίο αναπτύσσεται στην επιφάνεια της βελόνης και του ακροφυσίου επιδρά περισσότερο στη ροή, άρα οι δυνάμεις τριβής λόγω του ιξώδους είναι μεγάλες και κατά συνέπεια, οι απώλειες ισχύος αυξάνονται [45]. Δευτερευόντως, σε αυξημένες παροχές μάζας, η δέσμη του ρευστού προκύπτει πιο συμπαγής και ομοιόμορφη και συνεπώς οι απώλειες είναι ελαττωμένες [28, 29]. Αποδείχτηκε επίσης πως η γωνία του ακροφυσίου επιδρά περισσότερο στις απώλειες σε σχέση με τη γωνία της βελόνης, ειδικά σε ροές μεγάλης παροχής μάζας.

Από την εξέταση των ισοϋψών καμπυλών της αλληλεπίδρασης της γωνίας του ακροφυσίου και της γωνίας της βελόνης αλλά και από τα αποτελέσματα της αριθμητικής βελτιστοποίησης η οποία πραγματοποιήθηκε με τον αλγόριθμο «αναρρίχησης λόφων» προέκυψε πως η χρήση μεγαλύτερων γωνιών ακροφυσίου και βελόνης σε σχέση με τις προτεινόμενες από τη βιβλιογραφία [15, 25, 38, 41], ελαττώνουν τις απώλειες έως και κατά 30 %. Η μέγιστη αυτή βελτίωση προκύπτει στην περίπτωση ροών σε χαμηλή παροχή μάζας (μικρό άνοιγμα βελόνης), αν και η βελτιωμένη γεωμετρία, με συνδυασμό γωνιών ( $160^\circ$ ,  $90^\circ$ ) παρουσιάζει ελαττωμένες απώλειες σε όλο το εύρος παροχών μάζας. Συμπερασματικά, προέκυψε ότι ο συνδυασμός γωνιών του ακροφυσίου και της βελόνης,  $160^\circ$  και  $90^\circ$  αντίστοιχα, είναι πολύ αποδοτικότερος, ειδικά κατά τις ροές χαμηλής και μέσης παροχής. Η γεωμετρία αυτή προέκυψε ως η βέλτιστη και στην επιπλέον μελέτη βελτιστοποίησης, η οποία πραγματοποιήθηκε για λόγους σύγκρισης, με τη χρήση ενός διαφορετικού μοντέλου τύρβης. Τα αποτελέσματα αυτά επικυρώθηκαν με την πραγματοποίηση προσομοιώσεων της ροής στη βελτιωμένη και την αρχική γεωμετρία σε πέντε διαφορετικές παροχές μάζας και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν. Συγκεκριμένα, η βελτιωμένη γεωμετρία παρουσίασε πιο ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας της δέσμης λόγω ελάττωσης του ελλείματος ταχύτητας στον πυρήνα της. Άλλωστε, στη βελτιωμένη γεωμετρία η μορφή της δέσμης προέκυψε πιο συμπαγής, έχοντας μικρότερη διάμετρο, ενώ, το μήκος αλληλεπίδρασης μεταξύ του επιταχυνόμενου ρευστού και των τοιχωμάτων είναι μικρότερο σε σχέση με το αντίστοιχο της αρχικής γεωμετρίας. Συνεπώς, το οριακό στρώμα το οποίο αναπτύσσεται στην περιοχή αυτή έχει ελαττωμένη επίδραση στη ροή και άρα προκαλούνται μικρότερες απώλειες λόγω τριβής. Αποτέλεσμα των προαναφερθέντων είναι η βελτίωση της ποιότητας της δέσμης και η επακόλουθη ελάττωση των υδραυλικών απωλειών. Ωστόσο, ένα λειτουργικό μειονέκτημα της κατασκευής ακροφυσίου με μεγάλες γωνίες αποδείχτηκε πως είναι η μειωμένη ακρίβειά του στη ρύθμιση της παροχής μάζας. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, εξετάστηκε η περίπτωση ενδιάμεσων γωνιών, όπως ο συνδυασμός ( $110^\circ$ ,  $70^\circ$ ), και οι οποίες εμφάνιζαν ελαττωμένες απώλειες έως και 0.7 % σε σχέση με τις αρχικές, χωρίς το παραπάνω μειονέκτημα.

Στη συνέχεια, για λόγους πληρότητας, διερευνήθηκε η επίδραση επιπλέον παραμέτρων, γεωμετρικών και λειτουργικών στις απώλειες ισχύος. Με τη μελέτη αυτή διαπιστώθηκε πως ενδεχόμενη μεταβολή στο πάχος της βελόνης και την καμπυλότητα των τοιχωμάτων του ακροφυσίου και της βελόνης έχει πολύ μικρή επίδραση στις απώλειες, στα όρια του σφάλματος προσομοίωσης, και συνεπώς δεν κρίνεται απαραίτητη. Η ολική πίεση εισόδου διαπιστώθηκε ότι επιδρά ανεξάρτητα των υπολοίπων παραμέτρων σχεδίασης και συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται, ελαττώνονται οι απώλειες. Επιπροσθέτως, διαπιστώθηκε πως η μορφή του στομίου του ακροφυσίου επιδρά σημαντικά στις απώλειες. Το ήδη υπάρχον ακροφύσιο, με την απότομη απόληξη του στομίου του, διαπιστώθηκε πως παρουσιάζει τις χαμηλότερες απώλειες από αυτές

που μετρήθηκαν. Ωστόσο, το γεγονός ότι είναι επιρρεπές στη φθορά λόγω διάβρωσης, ίσως να δικαιολογεί την αντικατάστασή του με ένα του οποίου το στόμιο έχει πεπλατυσμένη μορφή, και το οποίο έχει μεν 0.15 % μεγαλύτερες απώλειες, είναι ωστόσο πολύ ανθεκτικότερο στη φθορά. Η επιφανειακή τραχύτητα των τοιχωμάτων του ακροφυσίου και της βελόνης, της οποίας το ύψος αυξάνεται λόγω φθοράς με την αύξηση των ωρών λειτουργίας, διαπιστώθηκε πως έχει σημαντική επίδραση στις απώλειες ισχύος, οι οποίες σε περίπτωση εκτεταμένης φθοράς μπορεί να αυξηθούν έως και 40 %. Το πρόβλημα διαπιστώθηκε πως εμφανίζεται εντονότερο στην επιφάνεια της βελόνης, στην οποία εμφανίζονται περιοχές με χαμηλές πιέσεις κατά την έξοδο της επιταχυνόμενης δέσμης του ρευστού από το ακροφύσιο. Τέλος, η διεύρυνση του χώρου σχεδιασμού της μελέτης βελτιστοποίησης, με σκοπό τον έλεγχο των απωλειών ισχύος σε συνδυασμούς παραμέτρων οι οποίοι βρίσκονται στα όρια του, οδήγησε σε ταυτόσημα αποτελέσματα με την κύρια μελέτη, επικυρώνοντας τα.

## 5.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Διερεύνηση

Η παρούσα εργασία διερεύνησε τη ροή σε ακροφύσιο υδροστροβίλου δράσης και την επακόλουθη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του. Η μελέτη αυτή μπορεί να επεκταθεί με την ανάλυση γεωμετριών οι οποίες συμπεριλαμβάνουν μέρη του συστήματος διανομής, όπως την ύπαρξη γωνίας 90° ή οδηγητικών πτερυγίων ανάντι του ακροφυσίου. Έτσι, θα διερευνηθεί η επίδραση των δευτερευουσών ροών οι οποίες προκύπτουν από τις συγκεκριμένες διατάξεις στη συμπεριφορά της βελτιωμένης γεωμετρίας αλλά και στις απώλειες ισχύος. Στην περίπτωση ύπαρξης δευτερευουσών ροών, η μοντελοποίηση του προβλήματος ως διδιάστατου αξονοσυμμετρικού δεν επαρκεί, και απαιτείται η πλήρως τριδιάστατη επίλυση, με το μειονέκτημα των αυξημένων απαιτήσεων σε υπολογιστικούς πόρους. Επίσης, η μελέτη της διφασικής ροής μπορεί να επεκταθεί με την μοντελοποίηση της ροής στα σκαφίδια του υδροστροβίλου, όπου θα διαπιστωθεί το ποσοστό στο οποίο βελτιώθηκε η δέσμη του ρευστού καθώς και η επακόλουθη ελάττωση των απωλειών, με τη μέτρηση της ροπής η οποία αποδίδεται στην άτρακτο της μηχανής. Τέλος, είναι σημαντικό να επικυρωθούν τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας με την πραγματοποίηση πειραματικών μετρήσεων. Τα πειράματα αυτά μπορούν να πραγματοποιηθούν σε ένα από τα δύο βελτιωμένα ακροφύσια τα οποία μελετήθηκαν στην εργασία αυτή και να συγκριθούν με αντίστοιχες μετρήσεις του υπάρχοντος ακροφυσίου. Από τη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων θα προκύψουν πολύτιμες πληροφορίες για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της συγκεκριμένης ροής.



## Βιβλιογραφία

- [1] Anderson, M. J. and Whitcomb, P. J. **DOE Simplified: Practical tools for effective experimentation**, 2<sup>nd</sup> edn. Productivity Press, 2007.
- [2] ANSYS®. **CFD-Post User's Guide**. 2012.
- [3] —. **FLUENT Theory Guide**. 2012.
- [4] —. **FLUENT Tutorial Guide**. 2012.
- [5] —. **FLUENT User's Guide**. 2012.
- [6] —. **Meshing User's Guide**. 2012.
- [7] Barstad, L. F. **CFD analysis of a Pelton turbine**. M.Sc. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- [8] Benzon, D., et al. **Impulse turbine injector optimisation using Computational Fluid Dynamics**. Lancaster University and NTUA. (Under publication)
- [9] Cengel, Y. A. and Cimbala, J. M. **Fluid Mechanics: Fundamentals and applications**, 2<sup>nd</sup> edn. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2004.
- [10] CRC. **CRC Handbook of Chemistry and Physics**, 91<sup>st</sup> edn. CRC Press, 2010.
- [11] Design-Expert®. **Design Expert 9 User's Guide**. Stat-Ease Inc., 2014.
- [12] Douglas, J. F, Gasiorek, J. and Swaffield, J. **Fluid Mechanics**, 4<sup>th</sup> edn. Prentice Hall, 2001.
- [13] Ferziger, Joel H and Peric, Milovan. **Computational methods for Fluid Dynamics**, 2<sup>nd</sup> edn. Springer, 2001.
- [14] Fiereder, R., Riemann, S. and Schilling, R. **Numerical and experimental investigation of the 3D free surface flow in a model Pelton turbine**. 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IOP Publishing, 2010.
- [15] Gass, M. **Modification of nozzles for the improvement of efficiency**. Proceedings of the HydroVision Conference, Portland, Oregon, USA.
- [16] Hirsch, Charles. **Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics**, 2<sup>nd</sup> edn. Butterworth-Heinemann, 2007.
- [17] Hirt, C. W. and Nichols, B. D. **Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries**. Journal of Computational Physics 39 (1): 201–225, 1981.
- [18] Jošt, D., Mežnar, P. and Lipej, A. **Numerical prediction of Pelton turbine efficiency**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 12, nr 1, 2010.
- [19] Klemetsen, Lars E. **An experimental and numerical study of the free surface Pelton bucket flow**. M.Sc. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2010.

- [20] Matthias H. and Promper, O. **Numerical simulation of the free surface flow in Pelton turbines.** Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics, Timisoara, Romania, 2004.
- [21] Meng, F., et al. **Numerical optimization of impeller for backward-curved centrifugal fan by Response Surface Methodology (RSM).** Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 6(13): 2436-2442, 2013.
- [22] Menter, F. R. **Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications.** AIAA Journal, Vol. 32, Is.8, pp. 1598-1605, August 1994.
- [23] Montgomery, D. C. **Design and Analysis of Experiments**, 6<sup>th</sup> edn. New York: John Wiley and Sons, Inc., 2004.
- [24] Muggli, F. A. and Zhang, Zh. **Numerical and experimental analysis of Pelton turbine flow. Part 2: The free surface flow.** 20th IAHR Symposium, Charlotte, North Carolina, USA.
- [25] Nechleba, M. **Hydraulic turbines: their design and equipment.** Prague: Artia, 1957.
- [26] Nesiadis, A., et al. **Numerical study of the effect of spear valve design on the free jet flow characteristics in impulse hydroturbines.** 7<sup>th</sup> GRASM International Congress on Computational Mechanics, Athens, 2011.
- [27] Parkinson, E., et al. **Experimental and numerical investigations of the free surface jet flow at a model nozzle of a Pelton turbine.** Proceedings of the XXIst IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Lausanne, 2002.
- [28] Parkinson, E., et al. **New challenges in Pelton research.** Proceedings of Hydro 2000 Conference, Bern, Switzerland, 2010.
- [29] Patel, K., et al. **Development of Pelton turbine using numerical simulation.** 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2010.
- [30] Perron, M., et al. **Importance of jet quality on Pelton efficiency and cavitation.** International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements, Milano, 2008.
- [31] Perrig, A. **Hydrodynamics of the free surface flow in Pelton Turbine.** PhD Thesis, University of Lausanne, 2007.
- [32] Perrig, A., et al. **Flow in a Pelton turbine bucket: Numerical and experimental investigations.** Journal of Fluids Engineering, Vol: 128(2): 350-358, 2006.
- [33] Sadlo, F., Peikert, R. and Parkinson, E. **Vorticity based flow analysis and visualization for Pelton turbine design optimization.** IEEE Visualization 2004. Austin, Texas, 2004.
- [34] Santolin, A., et al. **Numerical investigation of the interaction between jet and bucket in a Pelton turbine.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy 223: 721, 2009.
- [35] Slater, J. W., et al. **Role of CFD in the Aerodynamic Design and Analysis of the Parametric Inlet.** ISABE-2005-1168, September 2005.
- [36] Staubli, T., et al. **Die Auswirkung der Strahlqualität auf den Wirkungsgrad von Pelton-turbinen.** Wasser Energie Luft, vol. 101, pp. 181-187, 2009.

- [37] Staubli, T., et al. **Jet quality and Pelton efficiency**. Proceedings of Hydro 2009 Progress – Potential – Plans, Lyon, France, 2009.
- [38] Staubli, T. and Hauser, H. P. **Flow visualization - a diagnosis tool for Pelton turbines**. IGHEM2004. Lucerne, Switzerland, 2004.
- [39] Staubli, T., et al. **Efficiency increase by jet quality improvement and reduction of splashing water in the casings of Pelton turbines**. 16th International Seminar on Hydropower Plants, Vienna, Austria.
- [40] Steffen, Ch. J. **Fuel injector design optimization for an annular scramjet geometry**. NASA/TM-2003-212094, 2003.
- [41] Thake, J. **The micro-hydro Pelton turbine manual**. London: ITDG Publishing, 2000.
- [42] Versteeg, H. and Malalasekera, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**, 2<sup>nd</sup> edn. Prentice Hall, 2007.
- [43] Xiao, Y.X., et al **Numerical analysis of the bucket surface roughness effects in Pelton Turbine**. 6<sup>th</sup> International Conference on Pumps and Fans with Compressors and Wind Turbines, IOP Publishing, 2013.
- [44] Zhang, Zh. **Flow interactions in Pelton turbines and the hydraulic efficiency of the turbine system**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, pp. 343-357, 2007.
- [45] Zhang, Zh. and Casey, M. **Experimental studies of the jet of a Pelton turbine**, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, pp. 1181-1192, 2007.
- [46] Zhang, Zh. and Parkinson, E., **LDA application and the dual-measurement-method in experimental investigations of the free surface jet at a model nozzle of a Pelton turbine**. 11th International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2002.
- [47] Γιαννάκογλου, Κ., Μπεργελές, Γ., Αναγνωστόπουλος Ι., **Αριθμητική ανάλυση για μηχανικούς**. Αθήνα : 2003.
- [48] Γκίκα, Α. **Υπολογιστική διερεύνηση συμπεριφοράς υλικών ατράκτου αεροσκάφους σε συνθήκες φωτιάς**. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα : 2011.
- [49] Μπεργελές, Γ. **Υπολογιστική Ρευστομηχανική**. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα : 2006.
- [50] Παναγιωτόπουλος, Α. **Αριθμητική βελτιστοποίηση σχεδιασμού της εσωτερικής επιφάνειας σκαφιδίων δρομέα υδροστροβίλου Pelton, με κατάλληλη προσαρμογή και εφαρμογή σωματιδιακής αριθμητικής μεθοδολογίας**. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα : 2010.
- [51] Παπαϊωάννου, Α. **Μηχανική των ρευστών**. Εκδόσεις Κοράλι, Αθήνα : 1999.
- [52] Παπαντώνης, Δ. **Μικρά υδροηλεκτρικά έργα**. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα : 2008.
- [53] —. **Υδροδυναμικές μηχανές, αντλίες - υδροστροβίλοι, υδροδυναμικές μεταδόσεις**. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα : 2009.

- [54] Πέττας, Β. **Αριθμητική διερεύνηση της επίδρασης στη ροή της εσωτερικής διαμόρφωσης συστήματος έγχυσης υδροστροβίλου Pelton**. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα : 2012.
- [55] Τσαγγάρης, Σ. **Μηχανική Ρευστών**. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα : 2005.
- [56] Bakker, A. Computational Fluid Dynamics. [Online] [Accessed: February 10, 2014.] <<http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/>>.
- [57] CFD-online. Computational Fluid Dynamics blog. [Online] [Accessed: February 10, 2014.] <[www.cfd-online.com](http://www.cfd-online.com)>.
- [58] Leap Australia Computational Fluid Dynamics blog. [Online] [Accessed: March 15, 2014.] <<http://www.computationalfluidynamics.com.au/>>.
- [59] Cornell University FLUENT learning modules. [Online] [Accessed: January 15, 2014.] <<https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+Learning+Modules>>.
- [60] International Energy Agency. [Online] [Accessed: May 15, 2014.] <[www.iea.org](http://www.iea.org)>.
- [61] Stat-Ease. Design-Expert 9 software. [Online] 2013. [Accessed: March 13, 2014.] <<http://www.stat-ease.com/dx-9.html>>.
- [62] Varspeed-Hydro Ltd. [Online] [Accessed: May 15, 2014.] <<http://www.varspeedhydro.com/>>.
- [63] Wikipedia. [Online] [Accessed: May 10, 2014.] <<http://en.wikipedia.org/>>.
- [64] NTUA Laboratory of hydraulic machines. [Online] [Accessed: May 18, 2014.] <[http://www.fluid.mech.ntua.gr/lht/instrumentation\\_gr.html](http://www.fluid.mech.ntua.gr/lht/instrumentation_gr.html)>