

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΟΝΑΔΑΣ
ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ ΤΥΠΟΥ PELTON

STUDY OF OPERATING CHARACTERISTICS IN A WATER
POWER PLANT WITH PELTON HYDRO TURBINES



Επιβλέπων καθηγητής: Σταματέλλος Αναστάσιος

Επιμέλεια: Σδρόλιας Δημήτριος (AM 2126)

ΒΟΛΟΣ 2021

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΟΝΑΔΑΣ
ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ ΤΥΠΟΥ PELTON

STUDY OF OPERATING CHARACTERISTICS IN A WATER
POWER PLANT WITH PELTON HYDRO TURBINES



Επιβλέπων καθηγητής: Σταματέλλος Αναστάσιος

Επιμέλεια: Σδρόλιας Δημήτριος (AM 2126)

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού.

ΒΟΛΟΣ 2021

Βεβαιώνω ότι είμαι ο αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια που είχα για την περάτωσή της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται σε αυτή.

Βεβαιώνω, επίσης, ότι έχω σαφώς και επακριβώς αναφέρει όλες τις πηγές συλλογής δεδομένων τις οποίες χρησιμοποίησα για την συγγραφή της. Το όλο κείμενό της είναι γραμμένο με δικά μου λόγια και δεν αποτελεί προϊόν λογοκλοπής από άλλες πηγές. Σε περίπτωση αυτούσιας αντιγραφής λέξεων-κλειδιά ή προτάσεων από άλλες πηγές έχω χρησιμοποιήσει εισαγωγικά.

Δημήτριος Σδρόλιας,

Υπογραφή:

Ημερομηνία:

© 2021 Σδρόλιας Δημήτριος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Σταματέλλος Αναστάσιος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Πελεκάσης Νικόλαος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Παπαθανασίου Αθανάσιος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας θεωρώ ηθική μου υποχρέωση να ευχαριστήσω όλους όσοι συνέβαλαν με το δικό τους τρόπο στην επιτυχή περάτωσή της.

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Σταματέλλο Αναστάσιο, καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, ο οποίος μου προσέφερε τη δυνατότητα να ασχοληθώ και να μελετήσω ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον επιστημονικό αντικείμενο, καθώς επίσης και για την πολύτιμη συνεισφορά και καθοδήγησή του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Στη συνέχεια θα ήθελα να αποδώσω ιδιαίτερες ευχαριστίες στους κυρίους Πελεκάση Νικόλαο και Παπαθανασίου Αθανάσιο, καθηγητές του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, οι οποίοι μου έκαναν την τιμή να αποτελέσουν μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής και προσέφεραν ανεκτίμητη βοήθεια στην ολοκλήρωση της εργασίας με τις χρησιμότερες προτάσεις και υποδείξεις τους.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον πολύ καλό μου φίλο και Ηλεκτρολόγο Μηχανικό του Υδροηλεκτρικού Σταθμού (ΥΗΣ) Πλαστήρα, κύριο Τσιακανίκα Ευάγγελο, αλλά και την Τομεάρχη Συντήρησης της ΔΕΗ στο παράρτημα Καρδίτσας, κυρία Σταφυλά Αμαλία για την πρόθυμη και έγκαιρη ανταπόκρισή τους στην παροχή των απαιτούμενων δεδομένων για τον ΥΗΣ Πλαστήρα, καθώς χωρίς αυτές τις πληροφορίες η εργασία θα ήταν αδύνατο να ολοκληρωθεί.

Παράλληλα επιθυμώ να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στους κυρίους Τρακατέλη Νικόλαο και Κανελλόπουλο Στυλιανό, μηχανικούς της εταιρίας BETA CAE Systems για την εξαιρετική οργάνωση και διδασκαλία τους κατά τη διεξαγωγή των σεμιναρίων που διοργάνωσε η εταιρία με σκοπό την εξοικείωση με το λογισμικό ANSA, το οποίο αποτελεί βασικό πυλώνα της παρούσας εργασίας.

Επιπρόσθετα θεωρώ παράλειψή μου να μην ευχαριστήσω τον κύριο Τσιαντή Ανδρέα, Διδάκτορα του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την άριστη καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εκμάθησης του λογισμικού Openfoam, το οποίο αποτελεί ένα από τα βασικότερα υπολογιστικά εργαλεία στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Τέλος οφείλω ένα τεράστιο «ευχαριστώ» στην οικογένειά μου για την πολύτιμη στήριξη και την αμέριστη συμπαράστασή της σε κάθε δύσκολη στιγμή, καθώς και στους φίλους μου για τις υπέροχες εμπειρίες που βιώσαμε μαζί σε όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μας χρόνων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	4
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	8
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	17
ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΩΝ.....	18
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	18
ΜΕΓΕΘΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ.....	18
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	20
ABSTRACT	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	22
1.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	22
1.1.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	23
1.2. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	24
1.2.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	24
1.2.2.ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	25
1.2.3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.....	25
1.2.4. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ & ΚΙΝΗΤΡΑ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ.....	27
1.3. ΤΥΠΟΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΣΤΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑ	31
1.3.1. ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ PELTON.....	31
1.3.2. ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ FRANCIS	34
1.3.3. ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΚΑΡΛΑΝ.....	37
1.3.4. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΤΥΠΩΝ.....	40
1.4. ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΤΗΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ - ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ	44
1.4.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	44
1.4.2. ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	46
1.4.3. ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΛΑΣΤΗΡΑ	52
1.4.3.1. ΦΡΑΓΜΑ ΚΑΙ ΛΙΜΝΗ.....	55
1.4.3.2. ΑΓΩΓΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΟΥ (ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ ΚΑΙ ΠΥΡΓΟΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ, ΣΗΡΑΓΓΑ ΚΑΙ ΑΓΩΓΟΣ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ).....	59
1.4.3.3. ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΤΥΠΟΥ PELTON.....	64
2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	64
2.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΤΥΠΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ	65
2.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ (Ω) ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ (Ω_{sp}).....	65
2.4 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΚΑΦΙΔΙΟΥ	66
2.4.1 ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΚΥΚΛΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΠΙΔΑΚΑ (ΔΕΣΜΗΣ) ΝΕΡΟΥ	67
2.4.2 ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΔΕΣΜΗΣ ΚΑΙ ΠΛΗΘΟΣ ΣΚΑΦΙΔΙΩΝ	69
2.4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΣΚΑΦΙΔΙΟΥ.....	69
2.5 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ	72
2.5.1 ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ.....	72
2.5.2 ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ ΚΑΙ ΒΕΛΟΝΑΣ	74
2.6 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΚΡΟΗΣ (DISCHARGE COEFFICIENT)	74
2.7 ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΠΛΗΓΜΑ ΚΑΙ CLOSING LAW ΒΕΛΟΝΑΣ	76

2.8 ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΣΤΕΡΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΔΕΣΜΗΣ ΝΕΡΟΥ (ΠΙΔΑΚΑ).....	79
2.9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ	82
2.10 ΣΥΝΟΨΗ.....	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ PELTON...84	
3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΡΙΓΩΝΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ	84
3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΡΙΓΩΝΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΕΞΟΔΟΥ	85
3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΡΙΓΩΝΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ	87
3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΡΙΓΩΝΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΕΞΟΔΟΥ	89
3.5 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΔΕΙΞΗ	89
3.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΚΡΟΦΥΣΙΩΝ ΤΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ PELTON – ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SOLIDWORKS	91
4.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΓΩΓΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ.....	91
4.1.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΡΙΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΑΓΩΓΟΥ	91
4.1.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΠΟΛΗΞΗΣ ΑΓΩΓΟΥ.....	95
4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΒΕΛΟΝΑΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ	97
4.2.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΡΙΩΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΟΝΑΣ.....	97
4.2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΠΟΛΗΞΗΣ ΒΕΛΟΝΑΣ.....	98
4.3 ΤΕΛΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ (ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ-ΒΕΛΟΝΑΣ).....	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ PELTON – ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ANSA (PRE-PROCESSING)	107
5.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕΣΑ ΣΤΟ ANSA	108
5.1.1 ΕΞΟΙΚΕΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ANSA ΚΑΙ ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ.....	108
5.1.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ PID	110
5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ BATCH MESH MANAGER-ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (SURFACE MESH).....	112
5.2.1 ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	112
5.2.2 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	115
5.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΟΓΚΟΥ	117
5.3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	117
5.3.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΟΓΚΟΥ.....	121
5.3.3 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΟΓΚΟΥ	123
5.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ - Η ΒΑΣΗ ΤΟΥ ANSA	127
5.5 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΝΟΣ CASE ΤΟΥ ANSA ΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗ	128
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ PELTON – ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ OPENFOAM	130
6.1 ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟ OPENFOAM ΚΑΙ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗ.....	130
6.1.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΑΚΕΛΟΥ 0	132
6.1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΑΚΕΛΟΥ CONSTANT	135
6.1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΑΚΕΛΟΥ SYSTEM.....	136
6.1.4 ΛΟΙΠΑ ΑΡΧΕΙΑ, ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	139
6.1.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....	141

6.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	142
6.3 MESH INDEPENDENCE STUDY ΚΑΙ MESH CONVERGENCE.....	145
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ PELTON – POST PROCESSING ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΕΤΑ	148
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	148
7.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	150
7.2.1 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΙΕΣΗΣ	152
7.2.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΡΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	153
7.2.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΥΡΙΑΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	158
7.2.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	163
7.2.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	168
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS-FLUENT.173	173
8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ.....	173
8.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (PRE PROCESSING).....	176
8.3 ΡΥΘΜΙΣΗ ΚΥΡΙΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ (SOLVING).....	178
8.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ (POST PROCESSING).....	183
8.4.1 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΙΕΣΗΣ	185
8.4.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΡΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	188
8.4.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΥΡΙΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	192
8.4.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	196
8.4.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	201
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΟΜΑΛΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	205
9.1 ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	206
9.2 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ.....	208
9.3 ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΟΝΑΔΑΣ.....	211
9.3.1 ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ ΜΟΝΑΔΑΣ	211
9.3.2 ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ.....	212
9.3.3 ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΚΥΡΙΑΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ	214
9.3.4 ΛΟΙΠΟΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	215
9.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΛΙΜΝΗΣ	217
9.5 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΙΣΧΥΟΣ-ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	220
9.6 ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΥΞΗΣ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	222
9.7 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΔΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΡΟΠΕΑ ΔΕΣΜΗΣ	223
9.8 ΘΕΜΑΤΑ ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΒΡΩΣΕΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ	226
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ	230
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	232
ΕΛΛΗΝΙΚΗ	232
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ	234
ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ	240

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ισχύς σε εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής με χρήση διαφορετικών μορφών ενέργειας.	27
Εικόνα 2: Παραγωγή ενέργειας (σε GWH) σε εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής με χρήση διαφορετικών μορφών ενέργειας.	27
Εικόνα 3: Παραγωγή σε GWH για τις διαφορετικές μορφές ενέργειας κατά την περίοδο 2002-2008..	28
Εικόνα 4: Ποσοστό συμμετοχής (στην ηλεκτροπαραγωγή) των διαφορετικών μορφών ενέργειας κατά την περίοδο 2002-2008.....	28
Εικόνα 5: Παραγωγή υδροηλεκτρικής ισχύος σε παγκόσμια κλίμακα.	29
Εικόνα 6: Παραγωγή υδροηλεκτρικής ισχύος σε παγκόσμια κλίμακα (χώρες).	29
Εικόνα 7: Σκαρίφημα Pelton. Διακρίνονται τα σκαφίδια (buckets) και το ακροφύσιο (nozzle) μεταξύ άλλων..	32
Εικόνα 8: Πρόσοψη και πλάγια όψη στροβίλου Pelton. Διακρίνεται η ιδιαίτερη γεωμετρία των σκαφιδίων.	32
Εικόνα 9: Σκαρίφημα Pelton όπου διακρίνονται η βελόνα του ακροφυσίου και ο εκτροπέας δέσμης..	33
Εικόνα 10: Σκαρίφημα υδροστροβίλου Francis. Διακρίνεται η ιδιαίτερη γεωμετρία του συστήματος και ο μηχανισμός καθοδήγησης του νερού.....	34
Εικόνα 11: Ο μηχανισμός των οδηγητικών πτερυγίων για τη διέλευση του νερού.	35
Εικόνα 12: Στροφείο του Francis.....	35
Εικόνα 13: Κέλυφος οριζόντιου Francis.....	36
Εικόνα 14: Όψη ενός κατακόρυφου Francis.....	36
Εικόνα 15: Σκαρίφημα του στροβίλου Kaplan. Διακρίνεται η γεωμετρία του συστήματος και η διαφοροποιημένη σε σχέση με το Francis πτερωτή.....	37
Εικόνα 16: Στρόβιλος Kaplan.....	38
Εικόνα 17: Σκαρίφημα στροβίλου Kaplan σε τομή.	38
Εικόνα 18: Πτερύγια πτερωτής στροβίλου Kaplan.....	39
Εικόνα 19: Σωληνωτός στρόβιλος Kaplan.....	39
Εικόνα 20: Διάγραμμα συσχέτισης ύψους, παροχής και ισχύος για τους τρεις τύπους. Οι turgo και crossflow είναι παραλλαγές των Pelton και Francis, Kaplan αντίστοιχα.	40
Εικόνα 21: Πληρέστερο διάγραμμα μανομετρικού ύψους-ογκομετρικής παροχής νερού.	41
Εικόνα 22: Διάγραμμα μανομετρικού ύψους-ισχύος για τους δημοφιλέστερους τύπους υδροστροβίλων.....	41
Εικόνα 23: Συγκεντρωτικός πίνακας λειτουργίας υδροστροβίλων.....	42
Εικόνα 24: Διάγραμμα μανομετρικού ύψους- αριθμού ειδικών στροφών.....	43
Εικόνα 25: Διάγραμμα απόδοσης στροβίλου- ειδικής ταχύτητας.....	43
Εικόνα 26: Παραγωγή υδροηλεκτρικών σταθμών (GWH).....	47
Εικόνα 27: Μέση ετήσια παροχή ποταμών (m^3/s).	48
Εικόνα 28: Ετήσια υδροηλεκτρική παραγωγή (GWH) ανά ποταμό για την περίοδο 2002-2008.....	48
Εικόνα 29: Ποσοστό συμμετοχής ποταμού επί της συνολικής παραγωγής κατά την περίοδο 2002-2008.....	49
Εικόνα 30: Οι τοποθεσίες των μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών.	50
Εικόνα 31: Ετήσια παραγωγή ενέργειας (GWH) κατά την περίοδο 1962-2000.....	53
Εικόνα 32: Ετήσια παραγωγή ενέργειας (GWH) κατά την περίοδο 1990-2007.....	54
Εικόνα 33: Χωροταξία φράγματος, υδροληψίας, σταθμού και Καρδίτσας στο χάρτη.	55
Εικόνα 34: Η διάταξη της εγκατάστασης του ΥΗΣ Πλαστήρα. Το νερό ξεκινά από το φράγμα και μέσω του αγωγού προσαγωγής καταλήγει στο σταθμό.....	55
Εικόνα 35: Σκαρίφημα τομής του φράγματος (αριστερά) και το φράγμα υπό κατασκευή (δεξιά).	56
Εικόνα 36: Οι υπερχειλιστές του φράγματος Πλαστήρα σε λειτουργία.	58
Εικόνα 37: Οι βαλβίδες εκτόνωσης (ζε-κρε) στο φράγμα του ΥΗΣ Πλαστήρα.	58
Εικόνα 38: Το σημείο της υδροληψίας. Φαίνεται ο πύργος υδροληψίας (αριστερά) και ο πύργος με τα υποθαλάσσια θυροφράγματα (δεξιά).....	59
Εικόνα 39: Άποψη του σταθμού όπως φαίνεται από ένα ενδιάμεσο ύψος του αγωγού προσαγωγής... ..	60

Εικόνα 40: Ο πύργος εκτόνωσης (ή ισορροπήσεως), μια σημαντική ασφαλιστική δικλείδα στην εγκατάσταση του συστήματος προσαγωγής.....	60
Εικόνα 41: Άποψη του εσωτερικού του σταθμού. Διακρίνονται οι μονάδες της ηλεκτροπαραγωγής..	61
Εικόνα 42: Άποψη από το εσωτερικό του σταθμού όπου απεικονίζεται η διάταξη μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής.....	62
Εικόνα 43: Σκαρίφημα της διάταξης μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής σε τομή. Διακρίνονται οι στρόβιλοι Pelton, τα έδρανα και η γεννήτρια.....	62
Εικόνα 44: Σκαρίφημα της διάταξης των ακροφυσίων και του τροχού Pelton. Διακρίνεται και το σύστημα πέδησης του τροχού, καθώς και οι βελόνες (πράσινο χρώμα) των ακροφυσίων.	63
Εικόνα 45: Προσδιορισμός κατάλληλου τύπου στροβίλου.	65
Εικόνα 46: Η δέσμη του νερού (με μπλε χρώμα) καθώς εξέρχεται από το ακροφύσιο.	68
Εικόνα 47: Σκαρίφημα του τροχού Pelton όπου φαίνεται ο ορισμός της διαμέτρου κύκλου βήματος και της συνολικής διαμέτρου.....	68
Εικόνα 48: Σκαρίφημα με τις γεωμετρικές μεταβλητές του προβλήματος.	70
Εικόνα 49: Οι βασικές διαστάσεις των σκαφιδίων.	71
Εικόνα 50: Προσεγγιστική αναπαράσταση βασικών μεγεθών της γεωμετρίας του ακροφυσίου.	73
Εικόνα 51: Βασικές διαστάσεις του ακροφυσίου. Η διάμετρος εξόδου είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο δέσμης. Η γωνία α είναι μεταβαλλόμενη.	73
Εικόνα 52: Επιπρόσθετες διαστάσεις για ακροφύσιο και βελόνα..	74
Εικόνα 53: Η γεωμετρία στην έξοδο του ακροφυσίου.	75
Εικόνα 54: Ο συντελεστής εκροής ως συνάρτηση της γωνίας και της διαδρομής της βελόνας.	76
Εικόνα 55: Διάγραμμα φραγής του ακροφυσίου για γραμμική μετατόπιση της βελόνας.	77
Εικόνα 56: Διάγραμμα κατανομής πίεσης-χρόνου για μη γραμμική μετατόπιση της βελόνας.	78
Εικόνα 57: Διάγραμμα κατανομής πίεσης-χρόνου για γραμμική μετατόπιση της βελόνας.....	78
Εικόνα 58: Διάγραμμα παραβολικών εξισώσεων για το βέλτιστο closing law του ακροφυσίου.	78
Εικόνα 59: Σκαρίφημα της μεθόδου LDA (laser doppler anemometry).....	79
Εικόνα 60: Πειραματική διάταξη μετρήσεων κατανομών ταχυτήτων κατά την έξοδο της ροής από το ακροφύσιο.	80
Εικόνα 61: Το φαινόμενο της διεύρυνσης της διατομής της δέσμης (jet expansion).	81
Εικόνα 62: Ο στροβιλισμός της δέσμης και ο σχηματισμός σταγονιδίων στην επιφάνειά της.....	82
Εικόνα 63: Τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου υδροστροβίλου Pelton.....	84
Εικόνα 64: Τρίγωνο ταχυτήτων εξόδου υδροστροβίλου Pelton.	86
Εικόνα 65: Σχηματικά αποτελέσματα του τριγώνου ταχυτήτων εισόδου.....	87
Εικόνα 66: Η εξίσωση της συνέχειας σε ένα ακροφύσιο.....	88
Εικόνα 67: Σχηματικά αποτελέσματα του τριγώνου ταχυτήτων εξόδου.	89
Εικόνα 68: Επιλογή των εντολών front plane και sketch στο Solidworks.....	92
Εικόνα 69: Γραμμή εργαλείων για 2D σχεδίαση.....	92
Εικόνα 70: Το αρχικό στάδιο της 2D σχεδίασης του αγωγού του ακροφυσίου.....	93
Εικόνα 71: Επόμενο στάδιο στη 2D σχεδίαση του αγωγού του ακροφυσίου.	93
Εικόνα 72: Η καρτέλα features με τις χρήσιμες εφαρμογές της 3D απεικόνισης.	93
Εικόνα 73: Παραγωγή 3D γεωμετρίας του αγωγού του ακροφυσίου εκ περιστροφής.	94
Εικόνα 74: Η τελική μορφή του αγωγού του ακροφυσίου.	94
Εικόνα 75: Κατασκευή του μικρού κύκλου.....	95
Εικόνα 76: Κατασκευή του μεγάλου κύκλου.	95
Εικόνα 77: Χρήση της εντολής revolved boss/base για κατασκευή της απόληξης του ακροφυσίου. ...	96
Εικόνα 78: Η τελική μορφή της απόληξης του ακροφυσίου.	96
Εικόνα 79: Ολοκληρωμένη η γεωμετρία του ακροφυσίου.	96
Εικόνα 80: Βασικό 2D σχέδιο για τον κύριο άξονα της βελόνας.	97
Εικόνα 81: 3D σχέδιο με τη βοήθεια της εντολής revolved boss/base.	97
Εικόνα 82: Η τελική μορφή του κυρίως τμήματος της βελόνας.	98
Εικόνα 83: Αρχικό διαστασιολογημένο 2D σχέδιο της απόληξης της βελόνας.	98
Εικόνα 84: Χρήση της εντολής revolved boss/base για το 3D σχέδιο.....	99

Εικόνα 85: Τελική μορφή απόληξης βελόνας.....	99
Εικόνα 86: Τελική μορφή ολόκληρης της βελόνας του ακροφυσίου.	99
Εικόνα 87: Συνολική απεικόνιση της γεωμετρίας του ακροφυσίου.	100
Εικόνα 88: Χρήση της εντολής mate-concentric για ένωση ακροφυσίου-βελόνας.	102
Εικόνα 89: Χρήση παράλληλων planes (top ή front), ώστε η βελόνα να μετατοπίζεται χωρίς να περιστρέφεται.	102
Εικόνα 90: Χρήση της εντολής mate-distance για την καθορισμένη κίνηση της βελόνας.	102
Εικόνα 91: Η βελόνα που εξέρχεται από τον αγωγό του ακροφυσίου.	103
Εικόνα 92: Επιλογή γεωμετρίας ως trim tool στην εντολή split.	104
Εικόνα 93: Τα τρία τμήματα της γεωμετρίας μετά την εφαρμογή της εντολής cut bodies.....	104
Εικόνα 94: Επιλογή της γεωμετρίας που θα παραμείνει ή θα διαγραφεί με τη χρήση της εντολής delete/keep body.....	105
Εικόνα 95: Εφαρμογή της εντολής delete/keep body.	105
Εικόνα 96: Η νέα βελόνα με τη χαρακτηριστική γεωμετρία στο πίσω μέρος.....	105
Εικόνα 97: Δημιουργία ελάχιστου κενού μεταξύ βελόνας και κελύφους.	106
Εικόνα 98: Η τελική μορφή της γεωμετρίας.	106
Εικόνα 99: Το αρχικό μενού έναρξης του ANSA.....	107
Εικόνα 100: Η ενεργοποίηση της χρησιμότητας εντολής show labels.	108
Εικόνα 101: Το γραφικό περιβάλλον του ANSA με όλες τις εντολές.	109
Εικόνα 102: Ο έλεγχος της γεωμετρίας με τη βοήθεια του checks manager.	109
Εικόνα 103: Τα αρχικά PID (πριν από την επεξεργασία).	111
Εικόνα 104: Τα τελικά PID (μετά από την επεξεργασία).	111
Εικόνα 105: Επιλογή όλων των PID στο meshing scenario.	113
Εικόνα 106: Αντιστοίχιση των PID στα κατάλληλα sessions.....	113
Εικόνα 107: Επόμενο στάδιο στην αντιστοίχιση των PID.....	113
Εικόνα 108: Οι ρυθμίσεις στον batch mesh manager μέχρι στιγμής.	114
Εικόνα 109: Οι πρώτες ρυθμίσεις στο μενού mesh.	115
Εικόνα 110: Το σωστά εκτελεσμένο επιφανειακό πλέγμα στον batch mesh manager.	116
Εικόνα 111: Η χρήση της εντολής improve για τη διόρθωση των γεωμετρικών σφαλμάτων.	116
Εικόνα 112: Ο έλεγχος του επιφανειακού πλέγματος με τη βοήθεια του checks manager.	117
Εικόνα 113: Επιλογή των κατάλληλων PID για τη δημιουργία των layers.	118
Εικόνα 114: Αντίστοιχη επιλογή PID για το layers area.	118
Εικόνα 115: Το πεδίο layers meshing στον batch mesh manager.....	119
Εικόνα 116: Η χρήσιμη αριθμομηχανή στον υπολογισμό των layers.....	119
Εικόνα 117: Οι ρυθμίσεις στα CFD parameters των layers.....	120
Εικόνα 118: Χρήση της αριθμομηχανής στο layers area.	121
Εικόνα 119: Καθορισμός των CFD parameters στο layers area.	121
Εικόνα 120: Η τελική μορφή του batch mesh manager λίγο πριν την τελική εκτέλεση..	122
Εικόνα 121: Οι ρυθμίσεις των όγκων που θα ανιχνευθούν στο volume meshing.	122
Εικόνα 122: Η εισαγωγή της εντολής Nth largest equals 1.	123
Εικόνα 123: Οι ρυθμίσεις των CFD parameters στο volume meshing.	123
Εικόνα 124: Η εικόνα του batch mesh manager μετά την εκτέλεση του πλέγματος όγκου.....	123
Εικόνα 125: Ο συνολικός αριθμός των PID πριν την επεξεργασία.	124
Εικόνα 126: Ο συνολικός αριθμός των PID μετά την επεξεργασία.....	125
Εικόνα 127: Η κάρτα εντολών list που έχει καταχωρημένους τους ογκους που ανιχνεύει το ANSA.	125
Εικόνα 128: Ο έλεγχος του πλέγματος όγκου με τη βοήθεια του checks manager.	125
Εικόνα 129: Ο αλγόριθμος improve για τη βελτίωση των off elements.....	127
Εικόνα 130: Η τομή μέσω της οποίας διακρίνεται το εσωτερικό της γεωμετρίας.	127
Εικόνα 131: Οι ρυθμίσεις του solver settings στο μενού setup of case.	128
Εικόνα 132: Οι ρυθμίσεις του auto run case στο μενού setup of case.	129
Εικόνα 133: Τα αρχεία της επίλυσης σε περιβάλλον Windows και Linux στον κοινό φάκελο.....	131
Εικόνα 134: Οι συντομογραφίες των συνθηκών στα αρχεία k και omega.	133

Εικόνα 135: Οι συνοριακές συνθήκες στο αρχείο nut.	134
Εικόνα 136: Οι συνοριακές συνθήκες στα αρχεία p και U.	135
Εικόνα 137: Το περιεχόμενο των αρχείων turbulence και transport properties.	136
Εικόνα 138: Οι κυριότεροι αλγόριθμοι επίλυσης στο Openfoam.	138
Εικόνα 139: Οι βασικές πληροφορίες των αρχείων control dict και decompose par dict.	138
Εικόνα 140: Οι βασικές πληροφορίες στο αρχείο fv solution.	138
Εικόνα 141: Τα δεδομένα του Excel και το διάγραμμα για το mesh independence study.	147
Εικόνα 142: Το γραφικό περιβάλλον του META.	149
Εικόνα 143: Η επιλογή του κατάλληλου φακέλου polymesh για την ανάγνωση των αποτελεσμάτων.	149
Εικόνα 144: Η εισαγωγή της υπό μελέτη γεωμετρίας.	149
Εικόνα 145: Η διαδικασία επαναφόρτωσης του μοντέλου σε περίπτωση δυσλειτουργίας του λογισμικού.	150
Εικόνα 146: Η ανάγνωση των αποτελεσμάτων στο META και η εντολή fringe κάτω δεξιά.	151
Εικόνα 147: Οι εντολές range limits και recalculate στο META.	151
Εικόνα 148: Οι τρεις γεωμετρίες που αντιστοιχούν στις τρεις περιπτώσεις που εξετάζονται.	151
Εικόνα 149: Διάγραμμα κατανομής πίεσης κατά μήκος του αγωγού για την πρώτη περίπτωση.	152
Εικόνα 150: Διάγραμμα κατανομής πίεσης κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση.	152
Εικόνα 151: Διάγραμμα κατανομής πίεσης κατά μήκος του αγωγού για την τρίτη περίπτωση.	152
Εικόνα 152: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την πρώτη περίπτωση.	153
Εικόνα 153: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση.	153
Εικόνα 154: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την τρίτη περίπτωση.	153
Εικόνα 155: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την πρώτη περίπτωση.	154
Εικόνα 156: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για τη δεύτερη περίπτωση.	154
Εικόνα 157: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την τρίτη περίπτωση.	154
Εικόνα 158: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στην είσοδο με βάση την αλλαγμένη κλίμακα (πρώτη περίπτωση).	155
Εικόνα 159: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στην είσοδο με βάση την αλλαγμένη κλίμακα (δεύτερη περίπτωση).	155
Εικόνα 160: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στην είσοδο με βάση την αλλαγμένη κλίμακα (τρίτη περίπτωση).	155
Εικόνα 161: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση.	156
Εικόνα 162: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση.	156
Εικόνα 163: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση.	156
Εικόνα 164: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στο σημείο στένωσης του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση.	157
Εικόνα 165: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στο σημείο στένωσης του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση.	157
Εικόνα 166: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στο σημείο στένωσης του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση.	157
Εικόνα 167: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την πρώτη περίπτωση.	158
Εικόνα 168: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση.	158
Εικόνα 169: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την τρίτη περίπτωση.	158

Εικόνα 196: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στο σημείο στένωσης της γεωμετρίας του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση.....	167
Εικόνα 197: Διάγραμμα στροβιλισμού κατά μήκος του αγωγού, με αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση.....	168
Εικόνα 198: Διάγραμμα στροβιλισμού κατά μήκος του αγωγού, με αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση.....	168
Εικόνα 199: Διάγραμμα στροβιλισμού κατά μήκος του αγωγού, με αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση.....	168
Εικόνα 200: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην είσοδο, με αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση.....	169
Εικόνα 201: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην είσοδο, με αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση.....	169
Εικόνα 202: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην είσοδο, με αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση.....	169
Εικόνα 203: Διάγραμμα στροβιλισμού στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση.....	170
Εικόνα 204: Διάγραμμα στροβιλισμού στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση.....	170
Εικόνα 205: Διάγραμμα στροβιλισμού στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση.....	170
Εικόνα 206: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού, με αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση.....	171
Εικόνα 207: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού, με αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση.....	171
Εικόνα 208: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού, με αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση.....	171
Εικόνα 209: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην έξοδο, με αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση.....	172
Εικόνα 210: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην έξοδο, με αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση.....	172
Εικόνα 211: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην έξοδο, με αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση.....	172
Εικόνα 212: Το περιβάλλον Workbench του ANSYS.....	174
Εικόνα 213: Η ενοποίηση των δύο πινάκων.....	174
Εικόνα 214: Η κατασκευή του τμήματος για το Fluid με τη βοήθεια της εντολής Fill από τη γραμμή εργαλείων Tools.....	175
Εικόνα 215: Η τελική μορφή της γεωμετρίας.....	175
Εικόνα 216: Η δημιουργία του πλέγματος στο ANSYS Meshing.....	176
Εικόνα 217: Η δημιουργία των περιοχών της γεωμετρίας.....	177
Εικόνα 218: Ο έλεγχος για την ορθότητα των περιοχών που διαιρούν τη γεωμετρία.....	178
Εικόνα 219: Ο ορισμός του μοντέλου τύρβης kOmega SST.....	179
Εικόνα 220: Η επιλογή του water liquid ως material για το fluid.....	179
Εικόνα 221: Η επιλογή του steel ως material για το solid.....	179
Εικόνα 222: Οι ρυθμίσεις για το material του fluid στο cell zone conditions.....	180
Εικόνα 223: Οι ρυθμίσεις για το material του solid στο cell zone conditions. Ό,τι ισχύει για το needle ισχύει και για το wall.....	180
Εικόνα 224: Η συνοριακή συνθήκη για την είσοδο (velocity inlet).....	181
Εικόνα 225: Η συνοριακή συνθήκη για την έξοδο (pressure outlet).....	181
Εικόνα 226: Επιλογή αλγορίθμου επίλυσης (επιλύτη).....	182
Εικόνα 227: Οι παράγοντες χαλάρωσης των βασικών μεταβλητών.....	182
Εικόνα 228: Τα κριτήρια σύγκλισης της επίλυσης.....	182
Εικόνα 229: Η καρτέλα της αρχικοποίησης.....	183

Εικόνα 230: Η ολοκλήρωση της επίλυσης με τη σύγκλιση του κώδικα.....	183
Εικόνα 231: Διάγραμμα κατανομής πίεσης εισόδου για την πρώτη περίπτωση.....	185
Εικόνα 232: Διάγραμμα κατανομής πίεσης εισόδου για τη δεύτερη περίπτωση.....	185
Εικόνα 233: Διάγραμμα κατανομής πίεσης εισόδου για την τρίτη περίπτωση.....	185
Εικόνα 234: Διάγραμμα κατανομής πίεσης στο σημείο που αρχίζει η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την πρώτη περίπτωση.....	186
Εικόνα 235: Διάγραμμα κατανομής πίεσης στο σημείο που αρχίζει η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση.....	186
Εικόνα 236: Διάγραμμα κατανομής πίεσης στο σημείο που αρχίζει η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την τρίτη περίπτωση.....	186
Εικόνα 237: Διάγραμμα κατανομής πίεσης κατά μήκος του εσωτερικού του αγωγού (πρώτη περίπτωση).....	187
Εικόνα 238: Διάγραμμα κατανομής πίεσης κατά μήκος του εσωτερικού του αγωγού (δεύτερη περίπτωση).....	187
Εικόνα 239: Διάγραμμα κατανομής πίεσης κατά μήκος του εσωτερικού του αγωγού (δεύτερη περίπτωση).....	187
Εικόνα 240: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας εξόδου για την πρώτη περίπτωση.....	188
Εικόνα 241: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας εξόδου για τη δεύτερη περίπτωση.....	188
Εικόνα 242: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας εξόδου για την τρίτη περίπτωση.....	188
Εικόνα 243: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας στο σημείο που αρχίζει η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την πρώτη περίπτωση.....	189
Εικόνα 244: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας στο σημείο που αρχίζει η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση.....	189
Εικόνα 245: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας στο σημείο που αρχίζει η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την τρίτη περίπτωση.....	189
Εικόνα 246: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την πρώτη περίπτωση.....	190
Εικόνα 247: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση.....	190
Εικόνα 248: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση.....	190
Εικόνα 249: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την πρώτη περίπτωση.....	191
Εικόνα 250: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για τη δεύτερη περίπτωση.....	191
Εικόνα 251: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την τρίτη περίπτωση.....	191
Εικόνα 252: Διάγραμμα της συνιστώσας u της ταχύτητας εξόδου για την πρώτη περίπτωση.....	192
Εικόνα 253: Διάγραμμα της συνιστώσας u της ταχύτητας εξόδου για τη δεύτερη περίπτωση.....	192
Εικόνα 254: Διάγραμμα της συνιστώσας u της ταχύτητας εξόδου για την τρίτη περίπτωση.....	192
Εικόνα 255: Διάγραμμα της συνιστώσας u της ταχύτητας εξόδου στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την πρώτη περίπτωση.....	193
Εικόνα 256: Διάγραμμα της συνιστώσας u της ταχύτητας εξόδου στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση.....	193
Εικόνα 257: Διάγραμμα της συνιστώσας u της ταχύτητας εξόδου στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την τρίτη περίπτωση.....	193
Εικόνα 258: Διάγραμμα κατανομής της συνιστώσας w της ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την πρώτη περίπτωση.....	194
Εικόνα 259: Διάγραμμα κατανομής της συνιστώσας w της ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση.....	194
Εικόνα 260: Διάγραμμα κατανομής της συνιστώσας w της ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την τρίτη περίπτωση.....	194

Εικόνα 261: Διάγραμμα κατανομής συνιστώσας w της ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την πρώτη περίπτωση.....	195
Εικόνα 262: Διάγραμμα κατανομής συνιστώσας w της ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για τη δεύτερη περίπτωση.	195
Εικόνα 263: Διάγραμμα κατανομής συνιστώσας w της ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την τρίτη περίπτωση.	195
Εικόνα 264: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην είσοδο για την πρώτη περίπτωση.....	196
Εικόνα 265: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην είσοδο για τη δεύτερη περίπτωση.....	196
Εικόνα 266: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην είσοδο για την τρίτη περίπτωση.....	196
Εικόνα 267: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την πρώτη περίπτωση..	197
Εικόνα 268: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση.....	197
Εικόνα 269: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την τρίτη περίπτωση.	197
Εικόνα 270: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην έξοδο για την πρώτη περίπτωση.	198
Εικόνα 271: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην έξοδο για τη δεύτερη περίπτωση.	198
Εικόνα 272: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην έξοδο για την τρίτη περίπτωση.....	198
Εικόνα 273: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την πρώτη περίπτωση.	199
Εικόνα 274: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση.	199
Εικόνα 275: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση.	199
Εικόνα 276: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την πρώτη περίπτωση.	200
Εικόνα 277: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για τη δεύτερη περίπτωση.....	200
Εικόνα 278: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την τρίτη περίπτωση.	200
Εικόνα 279: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την πρώτη περίπτωση..	201
Εικόνα 280: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση.....	201
Εικόνα 281: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την τρίτη περίπτωση..	201
Εικόνα 282: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας εξόδου για την πρώτη περίπτωση.	202
Εικόνα 283: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας εξόδου για τη δεύτερη περίπτωση.....	202
Εικόνα 284: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας εξόδου για την τρίτη περίπτωση.	202
Εικόνα 285: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την πρώτη περίπτωση.	203
Εικόνα 286: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση.	203
Εικόνα 287: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την τρίτη περίπτωση.	203
Εικόνα 288: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, (πρώτη περίπτωση).	204
Εικόνα 289: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, (δεύτερη περίπτωση).	204
Εικόνα 290: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, (τρίτη περίπτωση).	204
Εικόνα 291: Ο στάτης της γεννήτριας ηλεκτροπαραγωγής στον ΥΗΣ Πλαστήρα.	207
Εικόνα 292: Ο δρομέας της γεννήτριας ηλεκτροπαραγωγής στον ΥΗΣ Πλαστήρα.....	207

Εικόνα 293: Οι μετασχηματιστές ανυψώσεως του ΥΗΣ Πλαστήρα.	210
Εικόνα 294: Ένα τυπικό διάγραμμα ρυθμιστή στροφών σε παλαιότερους σταθμούς.	212
Εικόνα 295: Ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου με έλεγχο πρόσδρασης.....	213
Εικόνα 296: Ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου με έλεγχο ανάδρασης.....	213
Εικόνα 297: Μια δικλείδα τύπου πεταλούδας και μια σφαιρική δικλείδα.....	215
Εικόνα 298: Το σύστημα πυρόσβεσης ενός υδροηλεκτρικού σταθμού.....	217
Εικόνα 299: Το σύστημα των εφεδρικών συσσωρευτών σε έναν υδροηλεκτρικό σταθμό.....	217
Εικόνα 300: Δεδομένα εισροών-εκροών και στάθμης λίμνης κατά τα υδρολογικά έτη 1968-2007....	219
Εικόνα 301: Διάγραμμα μέσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ως συνάρτηση της μέγιστης στάθμης της λίμνης.....	220
Εικόνα 302: Τυπικό διάγραμμα κύριου και εφεδρικού συστήματος ψύξης, καθώς και συστήματος πυρόσβεσης.....	222
Εικόνα 303: Αξονικό έδρανο ολίσθησης (thrust bearing) σε μονάδα ηλεκτροπαραγωγής ενός υδροηλεκτρικού σταθμού.....	225
Εικόνα 304: Ο εκτροπέας δέσμης ενός ακροφυσίου.....	226
Εικόνα 305: Το αποτέλεσμα του φαινομένου της σπηλαιώσης.....	227
Εικόνα 306: Η υψομετρική διαφορά z που υπεισέρχεται στον υπολογισμό του συντελεστή Thoma.	228
Εικόνα 307: Διάγραμμα καθορισμού συνθηκών παρουσίας ή απουσίας σπηλαιώσης.....	228

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Οι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της Ελλάδας.....	49
Πίνακας 2: Θεμελιώδη μεγέθη των μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών της Ελλάδας.	51
Πίνακας 3: Θεμελιώδη μεγέθη των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών της Ελλάδας.	52
Πίνακας 4: Μεγέθη υπολογισμού βαθμού απόδοσης.	64
Πίνακας 5: Δεδομένα για την ταχύτητα περιστροφής Ω ως συνάρτηση των συχνοτήτων και του αριθμού των πόλων της γεννήτριας.....	66
Πίνακας 6: Συσχέτιση της αναλογίας δέσμης με τον αριθμό των σκαφιδίων..	69
Πίνακας 7: Βασικά μεγέθη υπολογισμού διαστάσεων σκαφιδίου.....	70
Πίνακας 8: Οι βασικές διαστάσεις των σκαφιδίων και τα εύρη τιμών τους.....	71
Πίνακας 9: Εναλλακτικός υπολογισμός διαστάσεων σκαφιδίου.....	72
Πίνακας 10: Οι διαστάσεις του ακροφυσίου και της βελόνας ως συνάρτηση της διαμέτρου εξόδου του ακροφυσίου.....	74
Πίνακας 11: Συγκεντωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για μεγέθη του υδροστροβίλου Pelton.	83
Πίνακας 12: Πίνακας αποτελεσμάτων για τα μεγέθη που απαρτίζουν το σκαφίδιο του τροχού Pelton.	83
Πίνακας 13: Τα διανυσματικά μεγέθη που συμμετέχουν στο τρίγωνο ταχυτήτων για την είσοδο.	85
Πίνακας 14: Τα διανυσματικά μεγέθη που συμμετέχουν στο τρίγωνο ταχυτήτων για την έξοδο.....	85
Πίνακας 15: Αποτελέσματα για το τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου.....	87
Πίνακας 16: Τα αποτελέσματα για το τρίγωνο ταχυτήτων εξόδου.	89
Πίνακας 17: Οι ρυθμίσεις των CFD parameters για το surface mesh..	114
Πίνακας 18: Τα κυριότερα αρχεία που απαρτίζουν τους 3 βασικούς φακέλους του Openfoam.....	132
Πίνακας 19: Οι βασικές παράμετροι του μοντέλου kOmegaSST.	145
Πίνακας 20: Ορισμένα βασικά μεγέθη για τους υπολογισμούς που αφορούν την ισχύ και την ενέργεια.	221

ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΩΝ

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

- HPP: Hydropower Plant
- RES: Renewable Energy Sources
- PPC: Public Power Corporation
- ΑΔΜΗΕ: Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
- ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
- ΔΕΔΔΗΕ: Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
- ΔΕΗ: Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
- Η/Μ: Ηλεκτρομηχανολογικός
- ΛΑΓΗΕ: Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
- Μ/Τ: Μέση Τάση
- ΜΥΗΕ: Μικρό Υδροηλεκτρικό Έργο
- ΜΥΗΣ: Μικρός Υδροηλεκτρικός Σταθμός
- ΡΑΕ: Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας
- Υ/Τ: Υψηλή Τάση
- ΥΗΕ: Υδροηλεκτρικό Έργο
- ΥΗΣ: Υδροηλεκτρικός Σταθμός
- Χ/Τ: Χαμηλή Τάση

ΜΕΓΕΘΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

- A_{in} ή A_{out} : διατομή εισόδου ή εξόδου
- A : ένταση ρεύματος
- C_v : αδιάστατος συντελεστής
- D : διάμετρος κύκλου βήματος
- d_o : διάμετρος δέσμης
- d_1 : διάμετρος εξόδου του ακροφυσίου
- E : ηλεκτρική ενέργεια
- f : συχνότητα
- g : επιτάχυνση της βαρύτητας
- h_v : πτώση πίεσης στο εσωτερικό του ακροφυσίου
- H ή H_e : μανομετρικό ύψος
- H_s : το κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης
- K : συντελεστής τριβής σκαφιδίου
- m : αναλογία δέσμης
- N_p : ο αριθμός των περιελίξεων του σύρματος στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή
- N_s : ο αριθμός των περιελίξεων του σύρματος στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή

- n : αριθμός στροφών
- n : βαθμός απόδοσης μονάδας
- n_y : ειδικός αριθμός στροφών
- P : ισχύς
- P_o : αριθμός πόλων γεννήτριας
- p_a : η ατμοσφαιρική πίεση
- p_v : τάση ατμών του υγρού
- Q : ογκομετρική παροχή
- s : διαδρομή ή μετατόπιση (stroke) βελόνας ακροφυσίου
- S : φαινόμενη ισχύς
- t : χρόνος
- u : εφαπτομενική ταχύτητα
- u_* : ταχύτητα διάτμησης
- V : τάση ρεύματος
- V_1 : απόλυτη ταχύτητα δέσμης νερού
- V_f : ταχύτητα εξόδου
- V_p : η τάση του πρωτεύοντος (primary) τυλίγματος μετασχηματιστή
- V_r : σχετική ταχύτητα
- V_s : η τάση του δευτερεύοντος (secondary) τυλίγματος μετασχηματιστή
- V_w : ταχύτητα δίνης
- v : κινηματικό ιξώδες
- y_+ : αδιάστατη απόσταση από τοίχωμα
- y : πραγματική απόσταση από τοίχωμα
- Z : πλήθος σκαφιδίων
- Z_o : αριθμός ακροφυσίων
- z : υψομετρική διαφορά
- α_N : γωνία απόληξης βελόνας
- β : γωνία απόλυτης ταχύτητας
- μ : συντελεστής τριβής
- ρ : πυκνότητα
- σ : συντελεστής Thoma
- φ : γωνία σχετικής ταχύτητας
- $180^\circ - \varphi$: γωνία εκτροπής
- φ_{d_1} : συντελεστής εκροής
- Ω : ταχύτητα περιστροφής
- Ω_{sp} : ειδική ταχύτητα περιστροφής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών λειτουργίας μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με υδροστροβίλους τύπου Pelton. Οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις υπάγονται μεταξύ άλλων στα έργα που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη διανομή της στο δίκτυο της ΔΕΗ. Παράλληλα βέβαια εξυπηρετούν και άλλες πολύ σημαντικές ανάγκες που σχετίζονται με την ύδρευση πόλεων, αλλά και την άρδευση καλλιεργήσιμων εκτάσεων, συνεπώς γίνεται κατανοητή η καθοριστική τους συμβολή, ιδίως σε πεδινές περιοχές κατά τους θερινούς μήνες.

Μια υδροηλεκτρική εγκατάσταση αξιοποιεί τη συσσώρευση νερού με τη βοήθεια ενός φράγματος σε μια τεχνητή λίμνη, αλλά και την κινητική ενέργεια που αποκτά ο υδάτινος αυτός όγκος, καθώς πέφτει από μεγάλο ύψος για να οδηγηθεί στο σταθμό της ηλεκτροπαραγωγής, ο οποίος τοποθετείται σε αρκετά χαμηλότερο υψόμετρο.

Σε γενικές γραμμές ένα υδροηλεκτρικό συγκρότημα αποτελείται από το φράγμα, τον αγωγό υδροληψίας, τη σήραγγα και τον αγωγό προσαγωγής, το σταθμό παραγωγής αλλά και τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό του σταθμού, δηλαδή τα ακροφύσια, τους στροβίλους και τις γεννήτριες, στις οποίες αποθηκεύεται η ηλεκτρική ενέργεια. Η παρούσα εργασία βασίζεται στο παράδειγμα του υδροηλεκτρικού σταθμού (ΥΗΣ) Πλαστήρα, ο οποίος βρίσκεται στο νομό Καρδίτσας και ξεκίνησε τη λειτουργία του το 1962.

Στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής εργασίας παρουσιάζεται αρχικά μια εισαγωγική ενότητα για ορισμένα χαρακτηριστικά της υδροηλεκτρικής ενέργειας, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί μια πιο εξειδικευμένη ανάλυση σχετικά με τις παραμέτρους λειτουργίας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής του σταθμού Πλαστήρα.

Το κύριο αντικείμενο της εργασίας ωστόσο αφορά την τρισδιάστατη μοντελοποίηση των ακροφυσίων, ειδικών αγωγών εντός του σταθμού, που μεταφέρουν το νερό και το ωθούν με κατάλληλο τρόπο, ώστε να προκαλέσει την περιστροφή των στροβίλων και ταυτόχρονα και της γεννήτριας. Για το σκοπό αυτό κατασκευάζεται η γεωμετρία των ακροφυσίων, δημιουργείται κατάλληλο πλέγμα, χρησιμοποιείται κατάλληλος κώδικας επίλυσης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Ακόμα, γίνεται εκτενέστερη αναφορά στον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό της μονάδας, ενώ συμπεριλαμβάνονται και τα τελικά συμπεράσματα, συνοδευόμενα από μεθόδους βελτίωσης της λειτουργικότητας ενός υδροηλεκτρικού συστήματος. Τέλος, η εργασία περατώνεται με την παράθεση προτάσεων για περαιτέρω έρευνα και εμπάθυνση στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Λέξεις κλειδιά: Φράγμα, Υδροηλεκτρικός Σταθμός Πλαστήρα, Υδροηλεκτρική Εγκατάσταση, Υδροηλεκτρική Παραγωγή, Υδροστροβίλος Τύπου Pelton.

ABSTRACT

Present thesis deals with the modeling of the operating characteristics of a power plant with Pelton type turbines. Hydroelectric installations belong to the category of the projects that use Renewable Energy Sources (RES), in order to produce electricity and distribute it to the PPC (Public Power Corporation) network. Simultaneously, they support other important needs related to the water supply of cities, but also the irrigation of arable land. Therefore, their decisive contribution is understood, especially in lowland areas during the summer months.

A hydroelectric plant utilizes the accumulation of water via a built dam in an artificial lake, but also the kinetic energy that this water volume acquires, as it falls from a great height to be led to the power station, which is placed at a much lower altitude.

Generally, a hydroelectric unit consists of the dam, the water intake pipeline, the power tunnel and the penstock, the production station and the electromechanical equipment of the station. The latter consists of the nozzles, turbines and generators, in which the electricity is stored. The present work is based on the example of the Plastira hydroelectric power plant (HPP), located in the prefecture of Karditsa and operating since 1962.

In present thesis context, an introductory section on some characteristics of hydroelectric energy is presented, followed by a more elaborate analysis on the Plastira station power plants operating parameters.

The objective of the work, however, is to develop a three-dimensional model of the nozzles, which are special pipes inside the station that channel the water and direct it in a suitable way, in order to generate and sustain the rotation of the turbines and thus the rotation of the generator. For such a purpose, the geometry of the nozzles is constructed, a suitable grid is created, an appropriate solution code is used and the results obtained are presented. Meanwhile, a more extensive report on the electromechanical equipment of the unit is presented, along with final conclusions and suggestions for improving the functionality of such a hydroelectric system. Finally, the thesis comes to an end with the submission of proposals for further research and analysis in this particular subject.

Key words: Dam, Plastira's Hydroelectric Power Plant, Hydroelectric Facilities, Hydropower Production, Pelton Water Turbine.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα μεγαλύτερα και σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα εδώ και αρκετές δεκαετίες σχετίζεται με την περιβαλλοντική επιβάρυνση που υφίσταται ο πλανήτης γη, λόγω των διαφόρων μορφών ρύπανσης που υπάρχουν (ρύπανση της ατμόσφαιρας, των υδάτων, αλλά και του εδάφους) και που οφείλονται κυρίως στην ανθρώπινη δραστηριότητα. Οι επιπτώσεις των δραστηριοτήτων αυτών γίνονται πλέον όλο και πιο αισθητές σε παγκόσμια κλίμακα και έκταση (Briggs, 2003:1-2; Prieur, 2020).

Η αλόγιστη διαχείριση των ενεργειακών αποθεμάτων, ιδιαίτερα τα προηγούμενα χρόνια, έχει οδηγήσει σε σημαντικές φυσικές και οικολογικές καταστροφές, ενώ παράλληλα η ευρύτατη χρήση των μη ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων έχει επιδράσει αρνητικά και στην ανθρώπινη υγεία (Briggs, 2003:1-2; Prieur, 2020).

Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε τις τελευταίες δεκαετίες μια τάση αναζήτησης εναλλακτικών μορφών ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Ορισμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μεν γνωστές εδώ και πολλά χρόνια, ωστόσο η ανάγκη αξιοποίησής τους έχει καταστεί επιτακτική περισσότερο στη σημερινή εποχή (Michaelidis, 2012; Shahzad, 2012; Aydın, 2014).

Μια από τις πιο θεμελιώδεις ανανεώσιμες μορφές είναι η υδροηλεκτρική ενέργεια, για την οποία πραγματεύεται ένα σημαντικό κομμάτι της παρούσας εργασίας. Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι μια καθαρή, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία παράγεται μέσω της αξιοποίησης της μηχανικής ενέργειας του ρέοντος νερού σε ειδικές εγκαταστάσεις, τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, με κύριο σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατασκευή τέτοιων σταθμών δημιουργεί σε κάποιες περιπτώσεις ορισμένα περιβαλλοντικά προβλήματα, επειδή διαταράσσει σημαντικά οικοσυστήματα, όπως οι κοίτες των ποταμών. Ωστόσο, γενικά είναι αντιμετωπίσιμα και σίγουρα ελάχιστα σε σύγκριση με αυτά που προκαλούνται από την εκτενή χρήση των ορυκτών αποθεμάτων (Michaelidis, 2012: 319-320; Bagher, et al., 2015:18; Vučetić, 2018).

1.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η αναλυτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών λειτουργίας του υδροηλεκτρικού σταθμού (ΥΗΣ) Πλαστήρα, ο οποίος είναι εγκατεστημένος στην ομώνυμη τεχνητή λίμνη (αλλιώς γνωστή και ως λίμνη Μέγδοβα ή Ταυρωπού) και ανήκει γεωγραφικά στο Νομό Καρδίτσας. Ειδικότερα μελετάται ο υδροστρόβιλος τύπου Pelton, ο οποίος χρησιμοποιείται στο σταθμό αυτό, με σκοπό την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, ύδρευση και άρδευση για την εξυπηρέτηση των ενεργειακών και οικονομικών αναγκών του νομού Καρδίτσας, αλλά και των όμορων περιοχών. Η αρχή λειτουργίας του σταθμού αυτού βασίζεται στην αξιοποίηση της ενέργειας των μεγάλων υδάτινων μαζών με στόχο την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο σκοπός της εργασίας σχετίζεται με την κατανόηση θεμάτων που αφορούν στα χαρακτηριστικά λειτουργίας των υδροστροβίλων τύπου Pelton, αλλά και στα χαρακτηριστικά του υδροηλεκτρικού σταθμού Πλαστήρα. Παράλληλα, με την ευκαιρία αυτή γίνεται μια ανάδειξη της σημασίας της υδροηλεκτρικής ενέργειας στο γενικότερο πλαίσιο της αξιοποίησης εναλλακτικών μορφών ενέργειας για την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών.

Επομένως, πριν την ανάλυση των χαρακτηριστικών που αφορούν στον υδροστρόβιλο, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν ορισμένα εισαγωγικά στοιχεία σχετικά με την υδροηλεκτρική ενέργεια ως ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, την κατηγοριοποίηση και τα διαφορετικά είδη υδροστροβίλων που υπάρχουν, καθώς επίσης και μερικές πληροφορίες για τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, αλλά και την παρουσία και σημασία της υδροηλεκτρικής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα τόσο μεμονωμένα, όσο και σε σύγκριση με άλλες, πιο διαδεδομένες (και κυρίως μη ανανεώσιμες) μορφές ενέργειας.

1.1.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σε αυτή τη σύντομη υποενότητα περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσεται σε ποιοτικό και ποσοτικό επίπεδο η παρούσα εργασία. Δηλαδή εξηγείται η μέθοδος που ακολουθείται για την τεκμηρίωση των επιστημονικών θεμάτων που πραγματεύεται η εργασία (ποιοτική περιγραφή), ενώ παράλληλα αναλύεται περιληπτικά η δομή και το περιεχόμενό της ανά κεφάλαιο (ποσοτική περιγραφή). Συγκεκριμένα, σχετικά με την ποιοτική περιγραφή της εργασίας, οι πληροφορίες που παρέχονται σε όλη την έκταση του παρόντος κειμένου βασίζονται σε εμπειριστατώμενα δεδομένα, προερχόμενα είτε από το αρχείο του Υδροηλεκτρικού Σταθμού (ΥΗΣ) Πλαστήρα, είτε από μια πληθώρα ερευνητικών εργασιών, τόσο σε βιβλιογραφικό, όσο και σε υπολογιστικό, αλλά και πειραματικό επίπεδο.

Επιπρόσθετα, σημαντικό μέρος των στοιχείων της εργασίας βασίζεται σε μαθηματικούς υπολογισμούς που εκτελούνται στο πλαίσιο της, αλλά και στη σύγκριση με αριθμητικά δεδομένα και μετρήσεις μεγεθών από συναφείς ερευνητικές μελέτες. Τέλος, ένας βασικός πυρήνας της εργασίας έχει αναπτυχθεί με τη βοήθεια εξειδικευμένων υπολογιστικών προγραμμάτων, τα αποτελέσματα των οποίων έχουν επαληθευθεί, με σκοπό την κατά το δυνατό βέλτιστη προσομοίωση της υπό μελέτη υδροηλεκτρικής διάταξης.

Αναφορικά με την ανά κεφάλαιο διάρθρωση της εργασίας, αυτή απαρτίζεται από 10 κεφάλαια. Το **πρώτο** κεφάλαιο αποτελεί έναν πρόλογο αναφορικά με το θέμα και τον τρόπο οργάνωσης της εργασίας, ενώ παράλληλα επιχειρείται μια εισαγωγή στις έννοιες που αποτελούν την υδροηλεκτρική ενέργεια, στους κυριότερους τύπους υδροστροβίλων, αλλά και στην παρουσία της τελευταίας στην Ελλάδα, με ιδιαίτερη μνεία στον ΥΗΣ Πλαστήρα. Στο **δεύτερο** κεφάλαιο περιγράφονται τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά των κυριότερων τμημάτων του υδροστροβίλου Pelton με τη βοήθεια μαθηματικών υπολογισμών. Στο **τρίτο** κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού των τριγώνων ταχυτήτων εισόδου και εξόδου των υδροστροβίλων, ένα

σύμπλεγμα βασικότατων γεωμετρικών υπολογισμών που παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τους στροβίλους.

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο ξεκινά η ανάλυση της υπολογιστικής διαδικασίας με πρώτο στάδιο την εισαγωγή της γεωμετρίας του ακροφυσίου σε κατάλληλο λογισμικό σχεδιασμού (Solidworks), με βάση το οποίο θα κατασκευαστεί το υπολογιστικό πλέγμα. Στο **πέμπτο** κεφάλαιο η σχεδιασμένη γεωμετρία εισάγεται σε νέο λογισμικό (ANSA), όπου κατασκευάζεται το πλέγμα, δηλαδή μια απεικόνιση των μαθηματικών εξισώσεων Navier Stokes, το οποίο είναι απαραίτητο για την προσομοίωση της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) που διέπει την κίνηση του νερού εντός του αγωγού, αλλά και του ακροφυσίου που βρίσκεται στην απόληξη του αγωγού. Στο **έκτο** κεφάλαιο λαμβάνει χώρα η επίλυση του πλέγματος και η εξαγωγή αριθμητικών δεδομένων και αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της υπολογιστικής διαδικασίας (λογισμικό Openfoam).

Στο **έβδομο** κεφάλαιο η υπολογιστική διαδικασία φτάνει στο τελικό στάδιο της με την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την επίλυση και σκοπό έχουν την παραστατική απεικόνιση των συνθηκών λειτουργίας του υπό εξέταση αντικειμένου (λογισμικό META). Στο **όγδοο** κεφάλαιο επιχειρείται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων του προηγούμενου κεφαλαίου με ένα επιπρόσθετο λογισμικό, το ANSYS-Fluent, προκειμένου να επαληθευτεί η ισχύς των ήδη υπάρχοντων αποτελεσμάτων. Στο **ένατο** κεφάλαιο παρέχονται ορισμένες γενικές πληροφορίες που αφορούν στον εξοπλισμό μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης.

Στο **δέκατο** κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τα προηγούμενα κεφάλαια και παρατίθενται ορισμένες προτάσεις βελτίωσης που αποσκοπούν στην εξομάλυνση πιθανών προβλημάτων, αλλά και στην αποδοτικότερη λειτουργία των υπάρχουσών διατάξεων. Τα συμπεράσματα συνοδεύονται από ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα, αλλά και από τις βιβλιογραφικές αναφορές.

1.2. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.2.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ως υδροηλεκτρική ενέργεια ορίζεται η ανανεώσιμη πηγή ενέργειας η οποία αξιοποιεί τη μηχανική ενέργεια του ρέοντος νερού με κύριο σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε κινητική, ενώ στη συνέχεια η κινητική ενέργεια αξιοποιείται για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας (Balmer & Spreng, 2008:194; Anuar, et al., 2021:6). Θεωρείται ανανεώσιμη, επειδή ο κύκλος του νερού ανανεώνεται συνεχώς από τον ήλιο (Michaelidis, 2012). Αν και η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι γνωστή με τη σημερινή της μορφή τα τελευταία εκατό χρόνια περίπου, οι αναφορές για την προσπάθεια αξιοποίησης της ενέργειας του νερού σε διάφορες εφαρμογές είναι πάρα πολλές και χρονολογούνται ακόμα και σε περιόδους προ Χριστού.

Ενδεικτικά, αναφέρεται η χρήση τροχών και νερόμυλων από τους αγρότες της αρχαίας Ελλάδας για το άλεσμα του σίτου (Bagher, et al., 2015:17), αλλά και από

περιοχές της Εγγύς και Άπω Ανατολής και της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας περί τον 4ο αιώνα π.Χ. Αρκετούς αιώνες αργότερα, σημείο αναφοράς αποτελεί η αξιοποίηση της παλιρροϊκής ενέργειας από τους Άραβες κατά τον 12ο αιώνα μ.Χ. (Λαμπρίδης κ.α., 2006). Φυσικά, η μεγαλύτερη εξέλιξη και πρόοδος πραγματοποιήθηκε κατά τη βιομηχανική επανάσταση, η οποία ξεκίνησε στο δεύτερο μισό του 18^{ου} αιώνα και κορυφώθηκε κατά τον 19^ο αιώνα στο σύνολο της Δυτικής Ευρώπης, στην οποία αναπτύχθηκαν οι υψηλής απόδοσης στρόβιλοι Francis και Pelton, για τους οποίους γίνεται ειδική αναφορά στη συνέχεια (Λαμπρίδης, κ.α., 2006).

Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, ενώ το 2019 αντιπροσώπευε περισσότερο από το 18% της συνολικής παραγωγής ενέργειας παγκοσμίως (Balmer & Spreng, 2008).

1.2.2. ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ενέργεια που σχετίζεται με το νερό εκδηλώνεται με τρεις τρόπους, δηλαδή ως δυναμική ενέργεια, ως ενέργεια υπό πίεση και ως κινητική ενέργεια. Σε ένα σύνηθες υδροηλεκτρικό σύστημα το νερό βρίσκεται αρχικά σε ένα αρκετά μεγαλύτερο υψόμετρο σε σχέση με το σταθμό της ηλεκτροπαραγωγής και κατέρχεται προς αυτόν, άρα κατά την κάθοδο αξιοποιείται η δυναμική ενέργεια του νερού. Κατά τη διάρκεια της καθόδου το νερό βρίσκεται υπό πίεση στο εσωτερικό του αγωγού που το μεταφέρει, ενώ μόλις απελευθερωθεί αυτή η υδάτινη ποσότητα, παράγεται ενέργεια λόγω της πίεσης αυτής. Τέλος σε όλη αυτή την πορεία του ρέοντος ρευστού υπάρχει μια κινούμενη μάζα, άρα πρόκειται για μια μορφή κινητικής ενέργειας (Masters, 2004). Η κινητική αυτή ενέργεια προκαλεί την περιστροφή της γεννήτριας και κατ' επέκταση την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας (Bagher, et al., 2015:17; Anuar, et al., 2021).

1.2.3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Η υδροηλεκτρική ενέργεια θεωρείται μια καθαρή μορφή ενέργειας (αγγίζει βαθμούς απόδοσης της τάξης του 95%) και για το λόγο αυτό εμφανίζει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μορφές ενέργειας, ανανεώσιμες και μη. Ωστόσο εμφανίζει και ορισμένα μειονεκτήματα που αφορούν κατά βάση περιβαλλοντολογικά ζητήματα. Συγκεκριμένα, και αρχής γενομένης από τα πλεονεκτήματα, πρέπει να αναφερθεί ότι (Λαμπρίδης, κ.α., 2006; Λέρης, 2007; Bagher, et al., 2015:18; Anuar, et al., 2021):

- Από όλες τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η υδροηλεκτρική ενέργεια κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ο κύκλος του νερού (εξάερωση, σύννεφα, βροχή) είναι μια απόλυτα φυσική διαδικασία, που οφείλεται στον ήλιο. Έτσι η παροχή νερού στα υδροηλεκτρικά εργοστάσια είναι ανανεώσιμη και ανεξάντλητη.
- Η υδροηλεκτρική είναι ανταγωνιστική ως προς το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, παρόλο που το αρχικό κόστος κατασκευής μπορεί να είναι υψηλό.

- Είναι αρκετά αξιόπιστη σε σύγκριση με άλλες ανανεώσιμες πηγές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό και με άλλες πηγές ενέργειας.
- Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι δεξαμενές των φραγμάτων μπορούν επίσης να προσφέρουν κρίσιμη βοήθεια στον έλεγχο των πλημμυρών και να αποτελούν αξιόπιστη παροχή νερού για τις πόλεις (ύδρευση), αλλά και για τις γεωργικές εκτάσεις (άρδευση), καθώς και για λοιπές βιομηχανικές ή αστικές χρήσεις.
- Το νερό που συλλέγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις εκτεταμένης ανομβρίας.
- Ενισχύεται η δημιουργία σημαντικών υποδομών και θέσεων εργασίας στις γύρω περιοχές.
- Με τη δημιουργία της λίμνης και του περιβάλλοντος που αναπτύσσεται γύρω της, ενισχύεται ο τουρισμός (θαλάσσια σπορ, ψάρεμα, κυνήγι, πεζοπορία, δραστηριότητες αναψυχής, ξενοδοχειακές μονάδες), ενώ τα μεγάλα φράγματα αποτελούν τουριστικά αξιοθέατα.
- Στα μικρότερα σε έκταση υδροηλεκτρικά έργα (κυρίως εγχώρια), οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί προστατεύουν το περιβάλλον εξασφαλίζοντας οικολογική παροχή στις κοίτες των ποταμών. Οι ταμιευτήρες, δηλαδή εκεί που συλλέγεται το νερό, αποτελούν ιδανικό περιβάλλον επιβίωσης και ανάπτυξης πολλών ειδών χλωρίδας και πανίδας, αναβαθμίζουν αισθητικά το τοπίο και σε πολλές περιπτώσεις εξελίσσονται σε μοναδικής ομορφιάς υγροβιότοπους.

Υπάρχουν όμως και ορισμένες ανησυχίες σχετικά με την υδροηλεκτρική ενέργεια και την περιβαλλοντική επίδρασή της, ειδικά όταν προϋποτίθεται η κατασκευή μεγάλων φραγμάτων. Συγκεκριμένα (Λαμπρίδης, κ.α., 2006; Λέρης, 2007; Michaelidis, 2012: 319-320; Bagher, et al., 2015:18-19):

- Η φραγή ενός ποταμού, για τη δημιουργία του υδροηλεκτρικού φράγματος, έχει σημαντικό αντίκτυπο στο τοπικό περιβάλλον καθώς μεταβάλλει τους βιότοπους της άγριας ζωής, επηρεάζει το οικοσύστημα, εμποδίζει τη διέλευση των ψαριών, ενώ παράλληλα τα αποθέματα νερού δεν είναι πάντα σε αφθονία και δεν είναι εφικτή παντού η κατασκευή φραγμάτων.
- Οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι εξαιρετικά δαπανηρές στην κατασκευή τους, επομένως θα πρέπει να κατασκευαστούν με πολύ υψηλό επίπεδο προδιαγραφών, ώστε να λειτουργούν για πολλές δεκαετίες.
- Οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις δεν είναι εντελώς απαλλαγμένες από εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της πολύχρονης, συνήθως, κατασκευής τους, κυρίως λόγω των μεγάλων ποσοτήτων σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται.
- Σε ορισμένες περιπτώσεις, η κατασκευή μεγάλων υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων έχει επηρεάσει οικονομίες και διεθνείς σχέσεις κρατών, καθώς αποτέλεσε αιτία και αφορμή για αριθμό συγκρούσεων, όπως για παράδειγμα σε περιοχές της Ασίας και της Μέσης Ανατολής.

- Τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα καλύπτουν σημαντικές εκτάσεις γης και τροπικών δασών, ενώ μερικές φορές απαιτούν τον εκτοπισμό των κατοίκων μικρών κοινοτήτων για την κατασκευή δεξαμενών. Έτσι, υπάρχει σοβαρός αντίκτυπος στην υπερθέρμανση του πλανήτη.
- Σε περίπτωση καταστροφής ενός φράγματος, οι επιπτώσεις σε κοινωνικό, πολιτικό και οικονομικό επίπεδο στην ευρύτερη περιοχή είναι ιδιαίτερα επιβλαβείς.

1.2.4. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ & ΚΙΝΗΤΡΑ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται ορισμένα διαγράμματα αναφορικά με τη συμμετοχή της υδροηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και άλλων μορφών ενέργειας (ανανεώσιμων και μη) στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς επίσης και δεδομένα που αφορούν την παραγωγική δυνατότητα των υδροηλεκτρικών μονάδων παγκοσμίως (Αργυράκης, 2009).



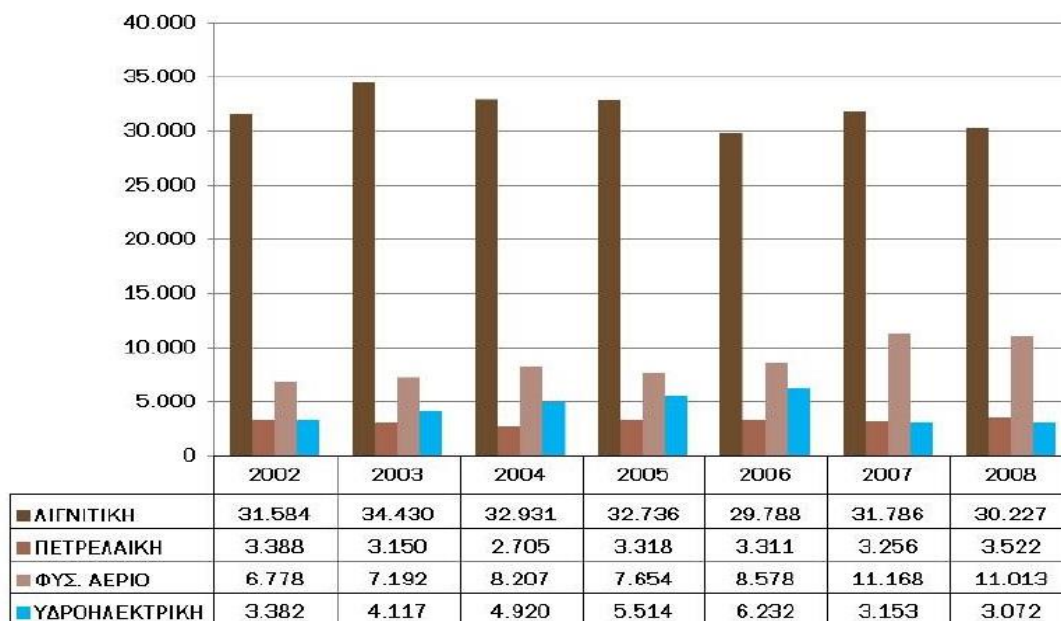
Εικόνα 1: Ισχύς σε εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής με χρήση διαφορετικών μορφών ενέργειας. Ανάκτηση από: Αργυράκης Ι., Η υδροηλεκτρική παραγωγή της ΔΕΗ Α.Ε, ΤΕΕ, 2009.



Εικόνα 2: Παραγωγή ενέργειας (σε GWH) σε εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής με χρήση διαφορετικών μορφών ενέργειας. Ανάκτηση από: Αργυράκης Ι., Η υδροηλεκτρική παραγωγή της ΔΕΗ Α.Ε, ΤΕΕ, 2009.

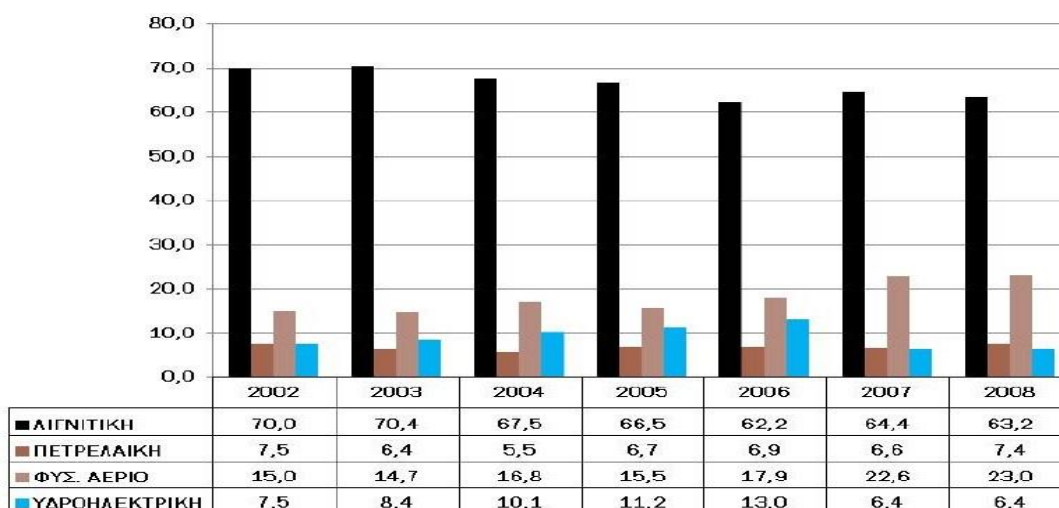
Από τις εικόνες 1 και 2, γίνεται αντιληπτό ότι τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας έχουν οι σταθμοί καύσης λιγνίτη. Ωστόσο και οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί κατέχουν υψηλά ποσοστά παραγωγής ενέργειας, κάτι που δηλώνει ότι γίνονται προσπάθειες για εντατικότερη συμμετοχή των μη ανανεώσιμων μορφών ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή. Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα των εικόνων 3 και 4 που παρέχουν δεδομένα για το χρονικό διάστημα 2002 έως 2008 (Αργυράκης, 2008).

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΝΑ ΚΑΥΣΙΜΟ (GWH) χωρίς Εισαγωγές



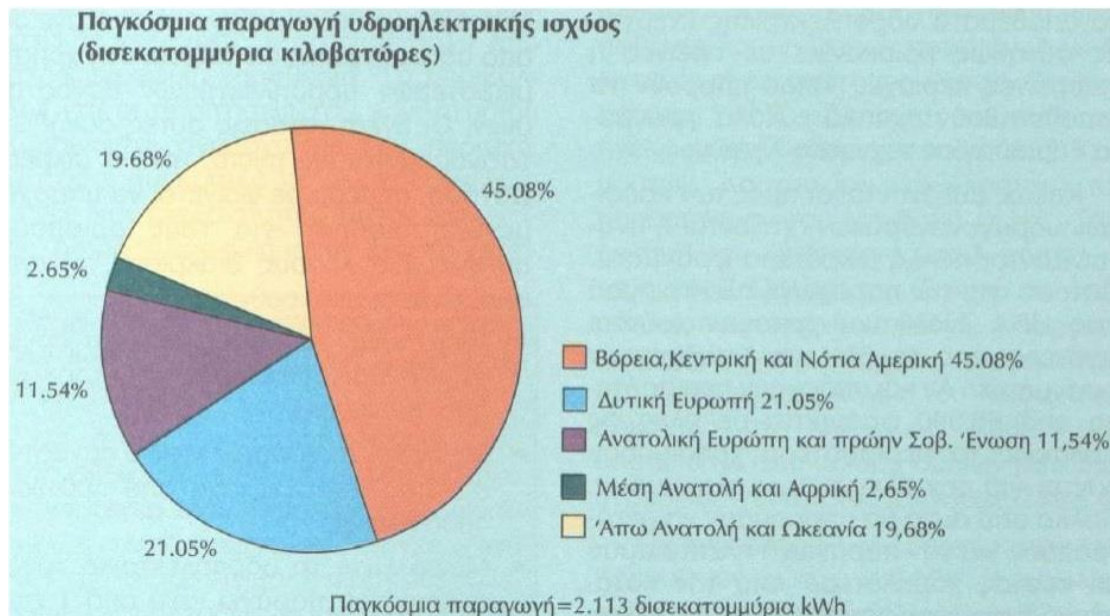
Εικόνα 3: Παραγωγή σε GWH για τις διαφορετικές μορφές ενέργειας κατά την περίοδο 2002-2008. Ανάκτηση από: Αργυράκης Ι., Εκμετάλλευση των υδροηλεκτρικών σταθμών ως έργων πολλαπλού σκοπού, ΤΕΕ, 2009.

ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ (%) χωρίς εισαγωγές

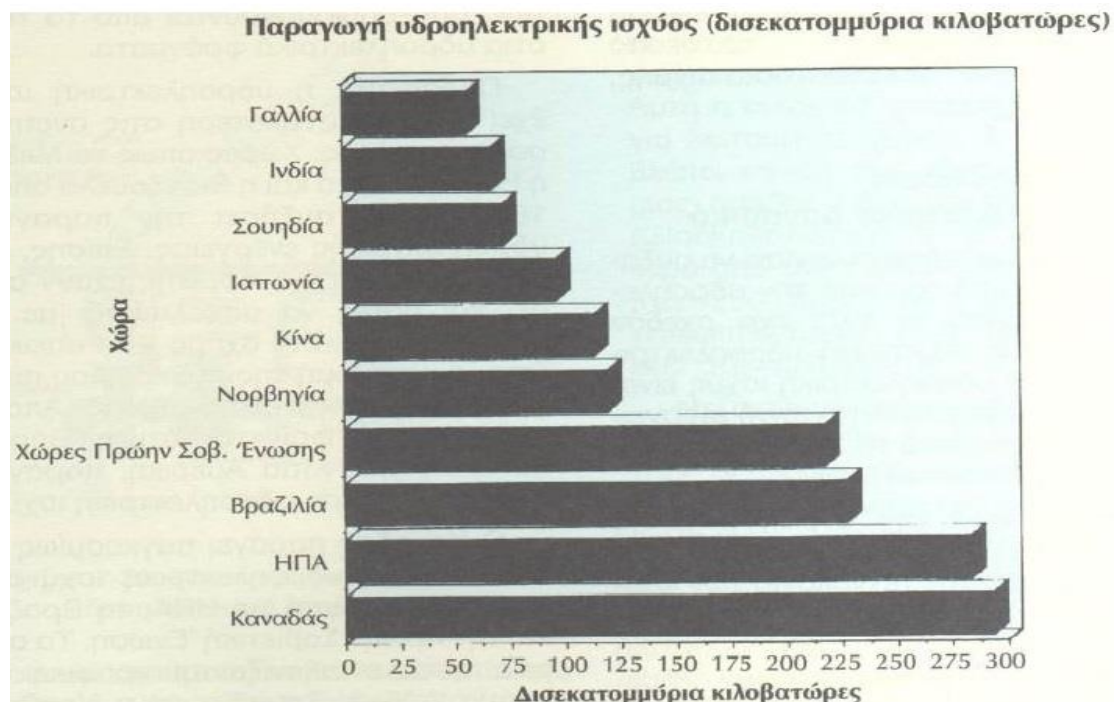


Εικόνα 4: Ποσοστό συμμετοχής (στην ηλεκτροπαραγωγή) των διαφορετικών μορφών ενέργειας κατά την περίοδο 2002-2008. Ανάκτηση από: Αργυράκης Ι., Εκμετάλλευση των υδροηλεκτρικών σταθμών ως έργων πολλαπλού σκοπού, ΤΕΕ, 2009.

Τα διαγράμματα που αναφέρονται στην περίοδο 2002-2008 βρίσκονται σε συμφωνία με τα αντίστοιχα για το 2009, συνεπώς παρατηρείται μια ομαλή κατανομή των πηγών ενέργειας που εξετάζονται στη διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγής. Μέχρι τώρα, τα δεδομένα αφορούν στην ισχύουσα κατάσταση στην Ελλάδα, συνεπώς κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση διαγραμμάτων με δεδομένα σε παγκόσμια κλίμακα (Σκόδρας, 2015).



Εικόνα 5: Παραγωγή υδροηλεκτρικής ισχύος σε παγκόσμια κλίμακα. Ανάκτηση από: Σκόδρας Γ., Ήπιες και νέες μορφές ενέργειας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 2015.



Εικόνα 6: Παραγωγή υδροηλεκτρικής ισχύος σε παγκόσμια κλίμακα (χώρες). Ανάκτηση από: Σκόδρας Γ., Ήπιες και νέες μορφές ενέργειας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 2015.

Από τα διαγράμματα των εικόνων 5 και 6 γίνεται αντιληπτό ότι τη μεγαλύτερη παραγωγή υδροηλεκτρικής ισχύος διαθέτουν χώρες της βόρειας, κεντρικής, αλλά και νότιας Αμερικής, όπως ο Καναδάς, οι ΗΠΑ και η Βραζιλία, ενώ αντίθετα, η μικρότερη υδροηλεκτρική παραγωγή συναντάται σε χώρες της Μέσης Ανατολής και της Αφρικής.

Ως κατακλείδα της ενότητας αυτής, πρέπει να επισημανθεί ότι παραμένει αναπάντητο το ερώτημα για το κατά πόσο μπορεί η υδροηλεκτρική ενέργεια, αλλά και οι υπόλοιπες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας να καλύψουν επαρκώς τις ενεργειακές ανάγκες μιας περιοχής ή μιας ολόκληρης χώρας. Η γενικότερη αντίληψη είναι πως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δε μπορούν να αποτελέσουν τον ακρογωνιαίο λίθο του ενεργειακού πυρήνα μιας χώρας, αφού εξαρτώνται από φαινόμενα (ήλιος → ηλιακή ενέργεια, άνεμος → αιολική ενέργεια, νερό → υδραυλική ή υδροηλεκτρική ενέργεια) τα οποία είναι μεν διαθέσιμα και σε αφθονία, ιδίως σε χώρες όπως η Ελλάδα, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις αδυνατούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες σε μια δεδομένη στιγμή.

Για το λόγο αυτό, ενώ γίνονται προσπάθειες εδώ και πολλά χρόνια για την ευρύτερη καθιέρωσή τους, οι μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούν καύση ορυκτών πόρων (πχ φυσικό αέριο, πετρέλαιο) παραμένουν κυρίαρχες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι ενεργειακές ανάγκες ποικίλλουν από περιοχή σε περιοχή, αφού συνδέονται άρρηκτα με την ανθρώπινη δραστηριότητα της κάθε περιοχής. Για παράδειγμα, γίνεται αντιληπτό ότι μια βιομηχανική περιοχή διαθέτει μεγαλύτερες ενεργειακές ανάγκες από μια καθαρά αγροτική περιοχή.

Ωστόσο το πεδίο της υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι εξελισσόμενο και προοδεύει συνεχώς, καθώς τα τελευταία πενήντα χρόνια η υδροηλεκτρική παραγωγή έχει διπλασιαστεί, ενώ η αξιοποίηση αυτής της μορφής ενέργειας έχει συμβάλει στην ικανοποίηση του 27% της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης.

Παράλληλα υπάρχει η δυνατότητα πολλά φράγματα που έχουν κατασκευαστεί για άλλες ενεργειακές χρήσεις (εξόρυξη υδρογονανθράκων) να χρησιμοποιηθούν ως φράγματα σε εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής με πολύ χαμηλότερο κόστος, ενώ γίνονται προσπάθειες από πλευράς Ευρωπαϊκής Ένωσης να ακολουθήσει το παράδειγμα της Κίνας κατασκευάζοντας πολλά μικρά υδροηλεκτρικά εργοστάσια (Hui & Li, 2008; Huang & Yan, 2009; Σκόδρας, 2015).

Τέλος γίνονται σημαντικές προσπάθειες αξιοποίησης της υδάτινης ενέργειας των ρευμάτων της θάλασσας, καθώς και του διπόλου πλημμυρίδας/άμπωτης, δηλαδή ενός φυσικού φαινομένου που σχετίζεται με την εναλλασσόμενη κίνηση των κυμάτων της θάλασσας σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα, το οποίο εντοπίζεται σε πολλά σημεία στις ακτές του Ατλαντικού ωκεανού (Καναδάς, Γαλλία), αλλά και σε μικρότερη κλίμακα στην Ελλάδα, στα στενά του Ευρίπου στη Χαλκίδα. Σταθμοί αξιοποίησης της παλιρροϊκής ενέργειας εντοπίζονται στη Γαλλία, στη Ρωσία και στη Σκωτία (Κόγια κ.α., 2008). Όμως, τα υψηλά κόστη συντήρησης των εγκαταστάσεων, λόγω της διαβρωτικής συμπεριφοράς του θαλασσινού νερού δυσχεραίνουν την ευρύτερη εξέλιξη τέτοιων έργων, ωστόσο ωθούν τους μηχανικούς στην αναζήτηση προηγμένων υλικών για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

1.3. ΤΥΠΟΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΣΤΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑ

Μια βασική διάκριση που λαμβάνει χώρα στον τομέα της υδροηλεκτρικής ενέργειας σχετίζεται με τον τύπο των στροβιλομηχανών, στην προκειμένη περίπτωση ονομάζονται υδροστρόβιλοι, που χρησιμοποιείται στη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. Οι κυριότερες κατηγορίες είναι τρεις, οι στρόβιλοι Pelton, Francis και Kaplan. Κάθε ένας έχει τις δικές του ιδιότητες και χαρακτηριστικά και η επιλογή τους για το ποιος είναι κατάλληλος σε κάθε περίπτωση αποτελεί ένα συνδυασμό αρκετών παραγόντων οι οποίοι θα αναφερθούν παρακάτω (Gatte & Kadhim, 2012; Nasir, 2014). Στον υδροηλεκτρικό σταθμό Πλαστήρα χρησιμοποιείται ο τύπος Pelton, συνεπώς σε αυτόν δίνεται περισσότερη έμφαση, ωστόσο λαμβάνει χώρα και η παρουσίαση των χαρακτηριστικών των άλλων δύο, αλλά και η γενικότερη σύγκριση των τριών τύπων.

1.3.1. ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ PELTON

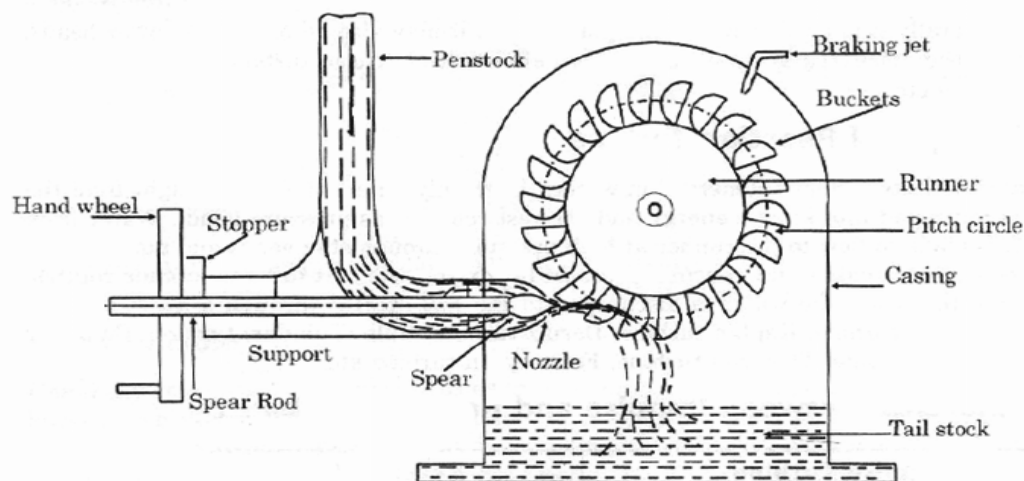
Η πρώτη κατηγορία υδροστρόβιλων που εξετάζεται είναι ο υδροστρόβιλος Pelton, ένας υψηλής απόδοσης (περίπου 90% με 95%) κυκλικός τροχός με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (Zhang, 2016:2). Εφευρέθηκε από τον Lester A. Pelton το 1880 (Petley, et al., 2019) και ο σχεδιασμός του υπόκειται σε διαρκείς βελτιώσεις και εξελίξεις, ώστε να είναι ακόμη πιο αποδοτικός (Patel, et al., 2010). Χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν μεγάλες υψομετρικές διαφορές (μέχρι και 2000 μέτρα) μεταξύ του σημείου που βρίσκεται το φράγμα και του σημείου που βρίσκεται η μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, καθώς επίσης και όταν η παροχή νερού δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη (Cobb & Sharp, 2013; Σκόδρας, 2015).

Το νερό φτάνει στο στρόβιλο ακολουθώντας τη διαδρομή του αγωγού από το φράγμα μέχρι τον υδροηλεκτρικό σταθμό, ενώ στο τέλος του αγωγού υπάρχει ένα (ή περισσότερα) ειδικά σχεδιασμένο ακροφύσιο από το οποίο εξέρχεται με υψηλή ταχύτητα, πίεση και στροβιλισμό μια ελεύθερη δέσμη νερού. Ο στρόβιλος Pelton διαθέτει περιμετρικά τα σκαφίδια, χαλύβδινους σχηματισμούς ιδιαίτερης γεωμετρίας με διπλό κοίλωμα στα οποία προσκρούει η δέσμη του νερού.

Με αυτό τον τρόπο προκαλείται περιστροφή του τροχού βάσει του θεωρήματος ορμής-στροφορμής, αφού τα σκαφίδια είναι προσαρτημένα στο σώμα του τροχού, ενώ αυτή η κίνηση στη συνέχεια ενεργοποιεί την περιστροφή της γεννήτριας, με την οποία είναι συζευγμένο το όλο σύστημα, ούτως ώστε να παραχθεί η ηλεκτρική ενέργεια. Αντικείμενο εκτενούς συζήτησης μπορεί να αποτελέσει η ιδιαίτερη γεωμετρική μορφή των σκαφιδίων. Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι τροχός και σκαφίδια αποτελούν ένα συμπαγές σώμα, μία ενιαία κατασκευή, δηλαδή τα σκαφίδια δεν έχουν συγκολληθεί ή συνδεθεί με κάποιον άλλο τρόπο. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, διότι κατά την έγχυση του νερού υφίστανται πολύ υψηλές πιέσεις, συνεπώς ο κίνδυνος αστοχίας θα ήταν πολύ μεγάλος.

Το μειονέκτημα όμως εδώ είναι πως όταν συμβαίνει αστοχία στα σκαφίδια (κάποια ρωγμή ή κόπωση από την επαναλαμβανόμενη χρήση) πρέπει να αποσυναρμολογηθεί ο τροχός και να αποσταλεί ολόκληρος για επισκευή ή

αντικατάσταση. Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο είναι πως τα άκρα των σκαφιδίων είναι διαμορφωμένα με τέτοιο τρόπο (εμφανίζουν άνοιγμα), ώστε κατά την περιστροφή του τροχού, η δέσμη του νερού να προσπίπτει κάθε φορά στο κοίλο μέρος κάποιου σκαφιδίου και όχι, για παράδειγμα, στο κυρτό μέρος του προηγούμενου ή του επόμενου (Kjolle, 2001).



Εικόνα 7: Σκαρίφημα Pelton. Διακρίνονται τα σκαφίδια (buckets) και το ακροφύσιο (nozzle) μεταξύ άλλων. Ανάκτηση από:
<https://www.rgpvonline.com/answer/basic-mechanical-engineering/15.html>.

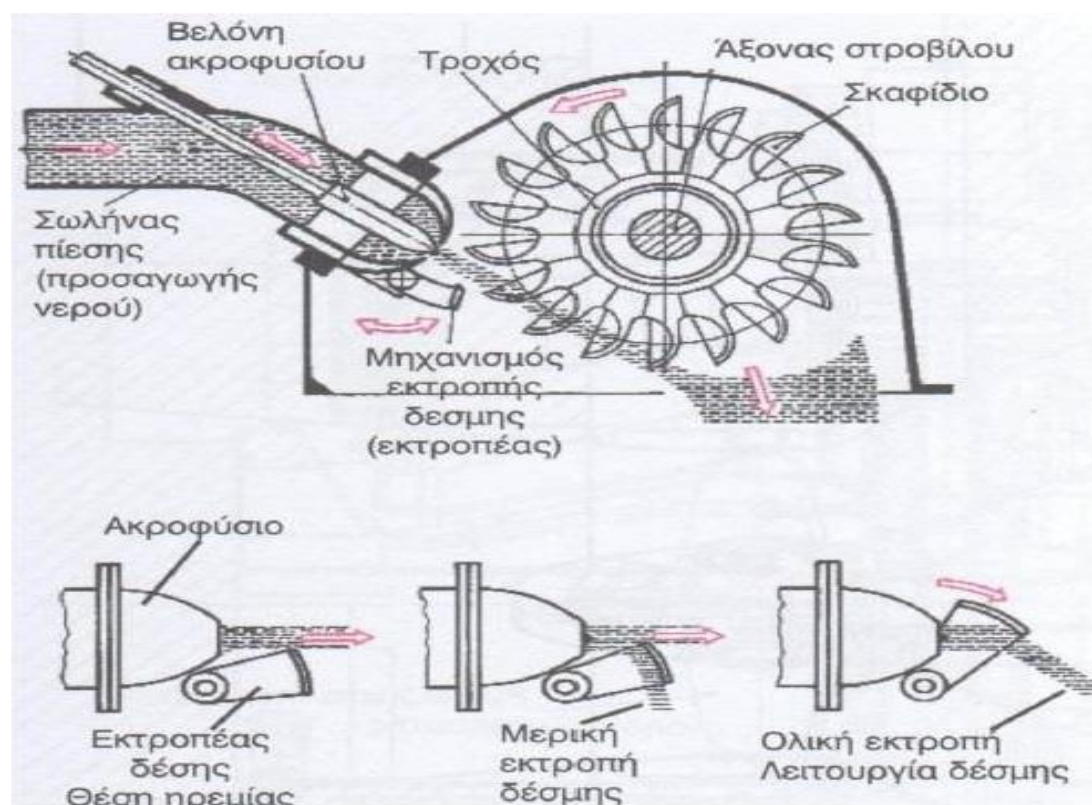


Εικόνα 8: Πρόσωση και πλάγια όψη στροβίλου Pelton. Διακρίνεται η ιδιαίτερη γεωμετρία των σκαφιδίων. Ανάκτηση από:
<https://geo.civ.uth.gr/index.php/el/events-gr/30-ekpaideytikes-ekdromes> και
https://energyeducation.ca/encyclopedia/Pelton_turbine.

Εξηγώντας πιο λεπτομερειακά τον τρόπο με τον οποίο προσπίπτει η ροή του νερού στα σκαφίδια, μπορεί να παρατηρηθεί στις εικόνες 7 και 8 ότι ουσιαστικά πρόκειται για ζεύγη σκαφιδίων, όπου αφού η δέσμη του νερού εκτραπεί στην ακμή διαχωρισμού των κοιλωμάτων, τα δύο μισά της δέσμης οδηγούνται μέσα στα

κοιλώματα των σκαφιδίων. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται η αναγκαία πίεση για την περιστροφή της ογκώδους και βαριάς κατασκευής, ενώ η συμμετρία των δύο ημίσεων οδηγεί σε απαλοιφή των αξονικών δυνάμεων, ώστε να μειώνεται η καταπόνηση των αξονικών εδράνων του ρότορα. Παράλληλα ένα σημείο που χρήζει προσοχής είναι πως η εκτροπή του νερού δεν είναι ακριβώς 180° , διότι μεγάλες γωνίες εκτροπής οδηγούν σε πρόσπτωση πάνω στα επόμενα σκαφίδια και η περιστροφή του τροχού επιβραδύνεται.

Τέλος δύο εξαρτήματα με πολύ σημαντικό λειτουργικό ρόλο είναι η βελόνα του ακροφυσίου και ο εκτροπέας της δέσμης (Σκόδρας, 2015). Η βελόνα του ακροφυσίου μπορεί να κινηθεί από τον ρυθμιστή και έτσι να προσαρμοστεί η ισχύς του στροβίλου ανάλογα με την ζήτηση, δηλαδή με τις ενεργειακές ανάγκες που πρέπει να ικανοποιηθούν και φυσικά με την αντίστοιχη παροχή νερού. Η κίνηση της βελόνας γίνεται σταδιακά, διότι απότομες μεταβολές μπορούν να προκαλέσουν ισχυρά υδραυλικά πλήγματα στο σωλήνα προσαγωγής, που ήδη δέχεται μεγάλες πιέσεις. Σε περίπτωση δυσλειτουργίας ο εκτροπέας δέσμης δρα ως ασφαλιστική δικλείδα, απομακρύνοντας μερικώς ή ολικώς τη δέσμη από τον τροχό, ενώ παράλληλα η βελόνα προσαρμόζεται στη νέα της θέση. Μόλις αποκατασταθεί η ομαλή κατάσταση λειτουργίας, ο εκτροπέας απεμπλέκεται (Canyon Industries, 2013).



Εικόνα 9: Σκαρίφημα Pelton όπου διακρίνονται η βελόνα του ακροφυσίου και ο εκτροπέας δέσμης.

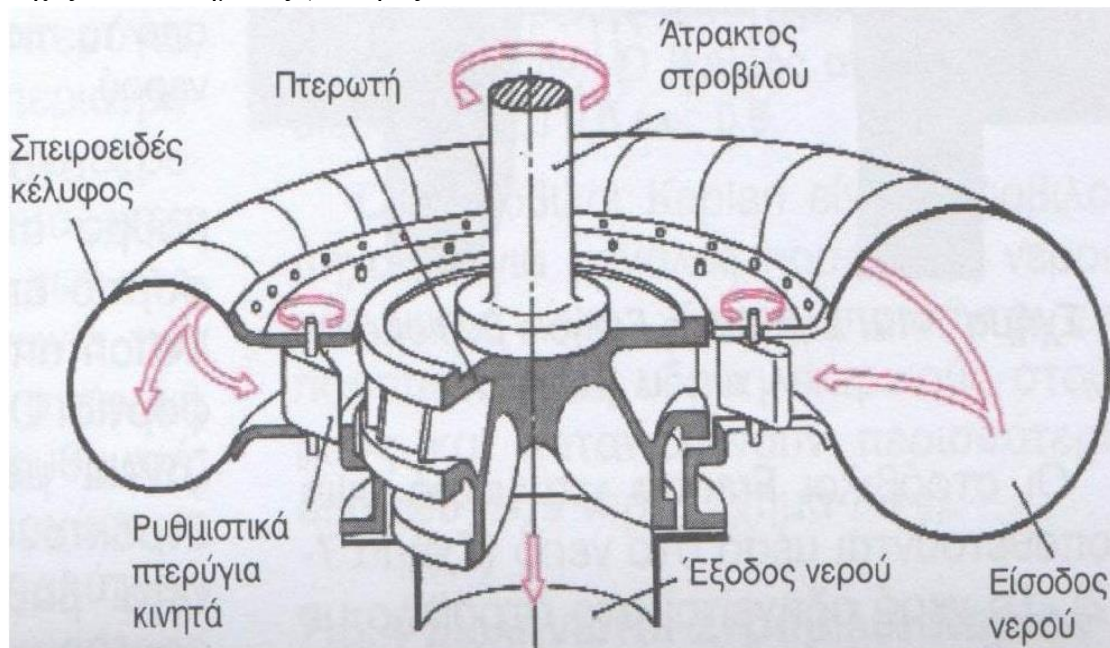
Ανάκτηση από: Σκόδρας Γ., Ήπιες και νέες μορφές ενέργειας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη 2015.

1.3.2. ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ FRANCIS

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο δεύτερος τύπος στροβιλομηχανών που συναντάται σε υδροηλεκτρικές εφαρμογές, ο στρόβιλος Francis. Είναι ένας ιδιαίτερα διαδεδομένος και ευρέως χρησιμοποιούμενος στρόβιλος, ο οποίος έχει τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και διαφοροποιείται αρκετά σε σχέση με τον Pelton (Ευστρατιάδης κ.α., 2018). Γενικότερα ο στρόβιλος Francis χρησιμοποιείται για μικρότερα μανομετρικά ύψη και μεγαλύτερες παροχές νερού σε σχέση με τον Pelton. Το νερό οδηγείται στο στρόβιλο είτε μέσω σωληνώσεων (στην περίπτωση που το ύψος είναι μικρό), είτε μέσω ανοιχτών αγωγών (στην περίπτωση μεγαλύτερου ύψους).

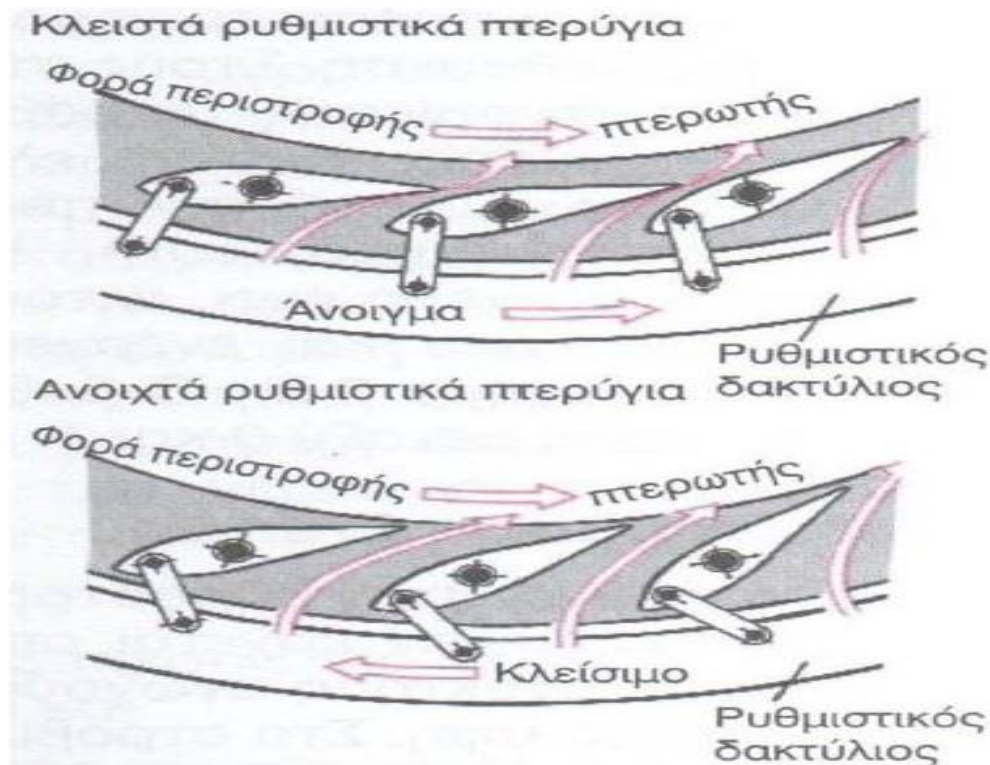
Από εκεί και έπειτα αναλαμβάνει δράση το σπειροειδές κέλυφος που εκτείνεται περιφερειακά σε όλο το μήκος της περωτής, ξεκινά η περιστροφή του υδροστροβίλου και με τον τρόπο αυτό ενεργοποιείται η γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για την επίτευξη της διαδικασίας αυτής, καθώς επίσης και για τη σωστή καθοδήγηση της ποσότητας του νερού μέσα στον υδροστρόβιλο βρίσκεται προσαρτημένη πάνω στο Francis μια σταθερή στεφάνη με ειδικά διαμορφωμένα οδηγητικά πτερύγια, η συντονισμένη κίνηση των οποίων επιτρέπει τη διέλευση του νερού (Dick, 2015).

Καθώς το νερό διέρχεται μέσα από τα οδηγητικά πτερύγια, εκτρέπεται και δημιουργεί μια πίεση προς τα πτερύγια της περωτής, αναγκάζοντας έτσι το στρόβιλο να περιστραφεί. Ενώ εξελίσσεται αυτή η διαδικασία, η ροή του νερού προς τα κάτω δημιουργεί συνθήκες υποπίεσης στο κάτω μέρος της περωτής, οπότε με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η πίεση που δέχονται τα πτερύγια και ως επακόλουθο αυξάνεται η ισχύς του συστήματος (Σκόδρας, 2015).



Εικόνα 10: Σκαρίφημα υδροστροβίλου Francis. Διακρίνεται η ιδιαίτερη γεωμετρία του συστήματος και ο μηχανισμός καθοδήγησης του νερού.

Ανάκτηση από: Σκόδρας Γ., Ήπιες και νέες μορφές ενέργειας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη 2015.



Εικόνα 11: Ο μηχανισμός των οδηγικών πτερυγίων για τη διέλευση του νερού.
 Ανάκτηση από: Σκόδρας Γ., Ήπιες και νέες μορφές ενέργειας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη 2015.



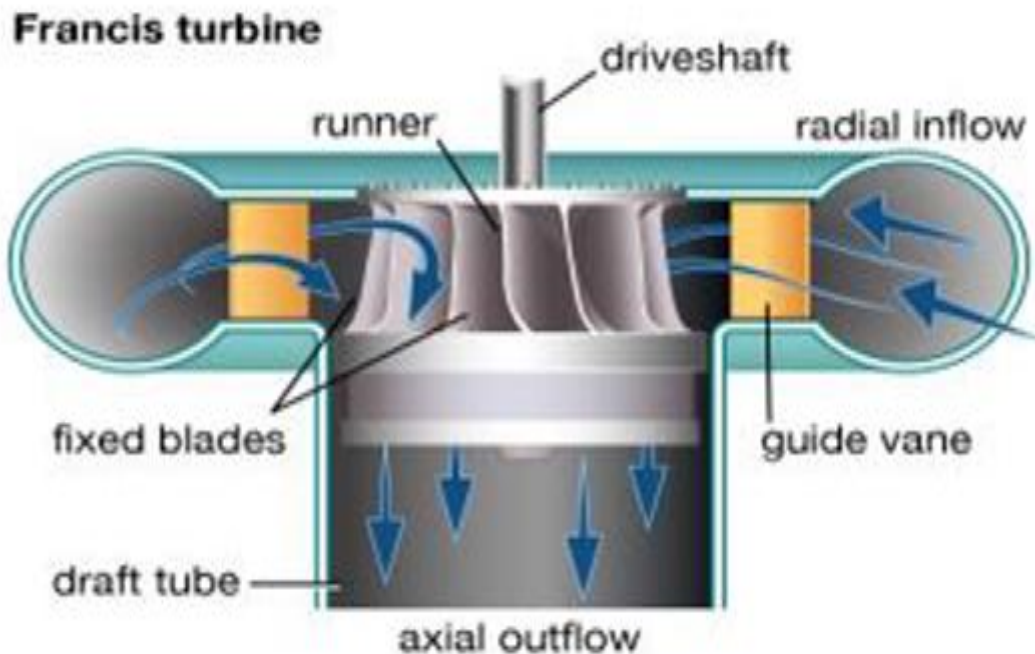
Εικόνα 12: Στροφείο του Francis. Ανάκτηση από: dreamstime.com και Σκόδρας Γ., Ήπιες και νέες μορφές ενέργειας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη 2015.

Ανάλογα με τις εφαρμογές και τις συνθήκες (μικρά μανομετρικά ύψη) στις οποίες χρησιμοποιούνται, οι στρόβιλοι Francis μπορούν να είναι ακόμη και εξ ολοκλήρου βυθισμένοι στο νερό. Συνήθως τοποθετούνται κατακόρυφα (θεωρώντας ως σημείο αναφοράς την άτρακτο), δηλαδή η διατομή από την οποία κατέρχεται το νερό βρίσκεται στην κατεύθυνση y ενός δισδιάστατου καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, ενώ μπορούν να κατασκευαστούν και οριζόντια (άτρακτος στην x κατεύθυνση), με το βαθμό απόδοσης και στις δύο περιπτώσεις να ξεπερνά το 90% σε πλήρες φορτίο. Γενικά ο βαθμός απόδοσής τους κυμαίνεται μεταξύ 80% και 95% και

παρουσιάζουν σε πλήρες φορτίο καλύτερα αποτελέσματα από τον Pelton, ο οποίος όμως αποδίδει καλύτερα σε χαμηλό φορτίο. Τέλος, οι υψηλής ισχύος υδροστρόβιλοι Francis κατασκευάζονται για να αποδίδουν ισχύ 120 MW σε μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, ενώ το μέγιστο μανομετρικό ύψος φτάνει τα 500 μέτρα (Σκόδρας, 2015).



Εικόνα 13: Κέλυφος οριζόντιου Francis. Ανάκτηση από: greek.hydrotu.com.

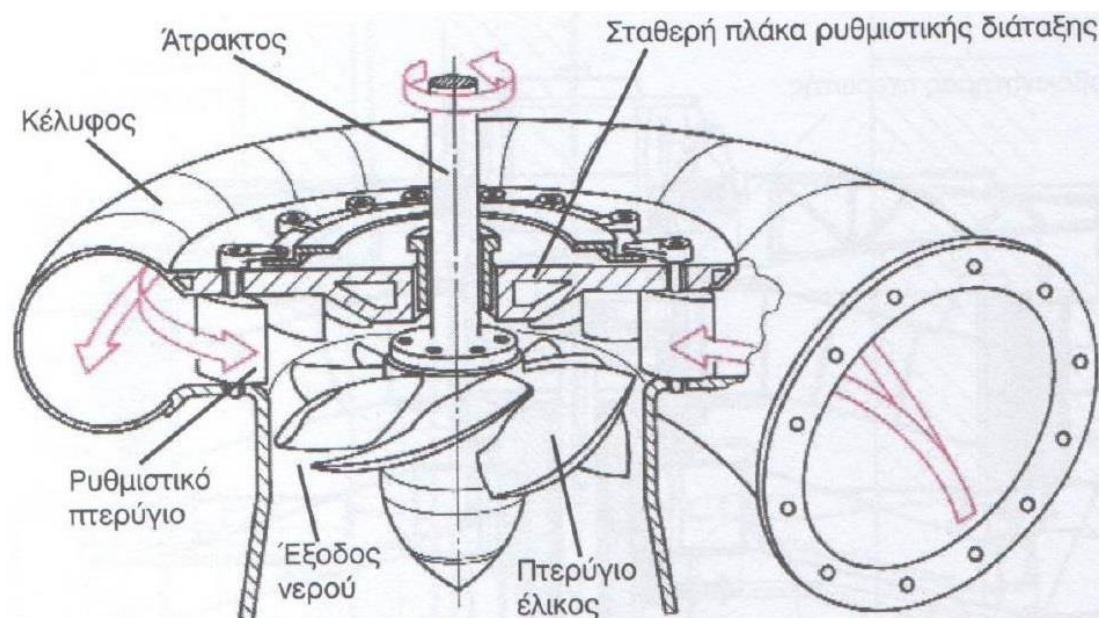


Εικόνα 14: Όψη ενός κατακόρυφου Francis. Ανάκτηση από: Ευστρατιάδης Α., Μαμάσης Ν., Κουτσογιάννης Δ., Αρχές Υδροενεργειακής Τεχνολογίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα 2018.

1.3.3. ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΙΟΣ ΚΑΡΛΑΝ

Η τελευταία κατηγορία που εξετάζεται είναι ο στρόβιλος Kaplan. Ο στρόβιλος αυτός μοιάζει αρκετά με τον Francis τόσο σε μορφολογικά και γεωμετρικά, όσο και σε λειτουργικά χαρακτηριστικά, ωστόσο διαθέτει και αυτός ορισμένα στοιχεία που τον διαφοροποιούν από τους δύο τύπους που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Όπως και στον στρόβιλο Francis, το νερό προσάγεται στην περωτή του στροβίλου Kaplan με τη βοήθεια της σταθερής στεφάνης που φέρει τα ρυθμιστικά κινητά πτερύγια. Η εύκαμπτη κατασκευή των πτερυγίων αυτών επιτυγχάνει την έναρξη περιστροφικής κίνησης του νερού, ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι η περωτή, που συνήθως έχει τρία έως επτά λοξά τοποθετημένα πτερύγια, μοιάζει πολύ με την προπέλα ενός πλοίου (Dick, 2015).

Στη μορφολογία της περωτής συνεπώς έγκειται μια βασική διαφορά μεταξύ των στροβίλων Francis και Kaplan, ενώ κατά τα άλλα ο τρόπος λειτουργίας είναι σχεδόν παρόμοιος και στους δύο αυτούς τύπους στροβίλων. Αναλυτικότερα, το ρεύμα του νερού δέχεται μια περιδίνηση από τα κινητά πτερύγια, οπότε ασκεί μια πίεση στα πτερύγια της περωτής και το αποτέλεσμα είναι η περιστροφή του συστήματος. Πάνω στην άτρακτο του στροβίλου υπάρχει μια σταθερή πλάκα ρυθμιστικής διάταξης, η οποία καθορίζει την κλίση των πτερυγίων της περωτής και τη γωνία των ρυθμιστικών πτερυγίων στην στεφάνη, ενώ για την επίτευξη μεγαλύτερης ισχύος τα πτερύγια ρυθμίζονται σε μεγαλύτερη κλίση ώστε να διέρχεται περισσότερο νερό και να αυξάνεται η πίεση σε αυτά.



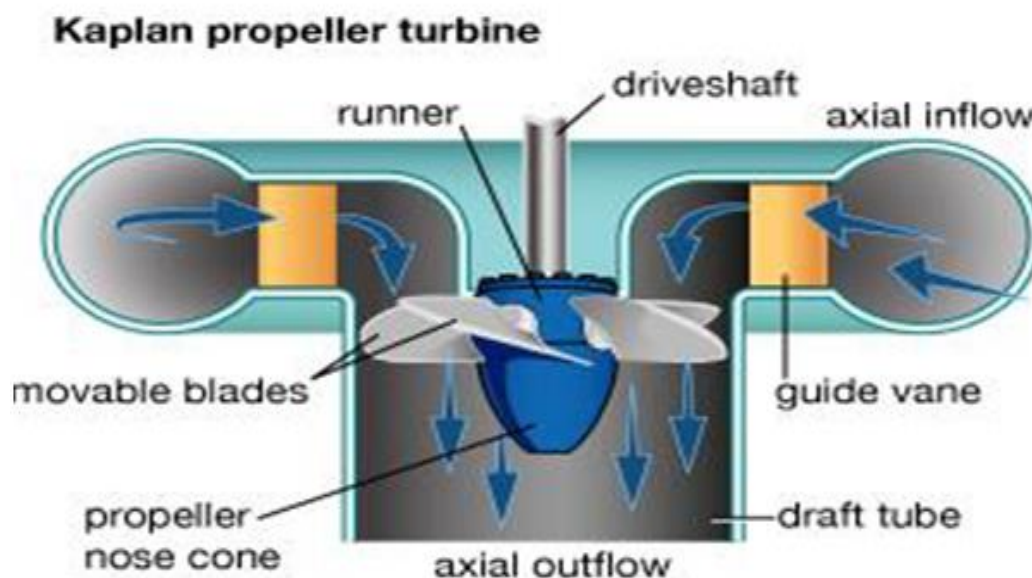
Εικόνα 15: Σκαρίφημα του στροβίλου Kaplan. Διακρίνεται η γεωμετρία του συστήματος και η διαφοροποιημένη σε σχέση με το Francis περωτή. Ανάκτηση από: Σκόδρας Γ., Ήπιες και νέες μορφές ενέργειας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη 2015.

Οι στρόβιλοι αυτού του τύπου κατασκευάζονται ως επί το πλείστον με κατακόρυφο άξονα, ενώ το πολύ σημαντικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν είναι η

μεταβαλλόμενη κλίση των πτερυγίων της περωτής τους, η οποία επιτρέπει στα πτερύγια να προσαρμόζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις του φορτίου, λαμβάνοντας την κατάλληλη κλίση και επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό μια ροή χωρίς ώσεις, που θα μπορούσε να προκαλέσει φθορά ή αστοχία των πτερυγίων. Ο στρόβιλος Kaplan εργάζεται υπό πλήρες φορτίο, διότι σε αυτά τα επίπεδα λειτουργίας αποδίδει ικανοποιητικά. Έχει παρατηρηθεί ότι σε μερικό φορτίο η απόδοση μειώνεται δραστικά, αφού η ακατάλληλη γωνία προσβολής των πτερυγίων οδηγεί σε μια ροή με ωθήσεις και συνεπακόλουθα σημαντικές απώλειες. Σε γενικές γραμμές η απόδοση των στρόβιλων αυτών κυμαίνεται μεταξύ 60% και 90%, ενώ είναι κατάλληλοι για μεγάλες παροχές νερού και χαμηλά μανομετρικά ύψη (Ευστρατιάδης κ.α., 2018).



Εικόνα 16: Στρόβιλος Kaplan. Ανάκτηση από: greek.hydrotu.com.

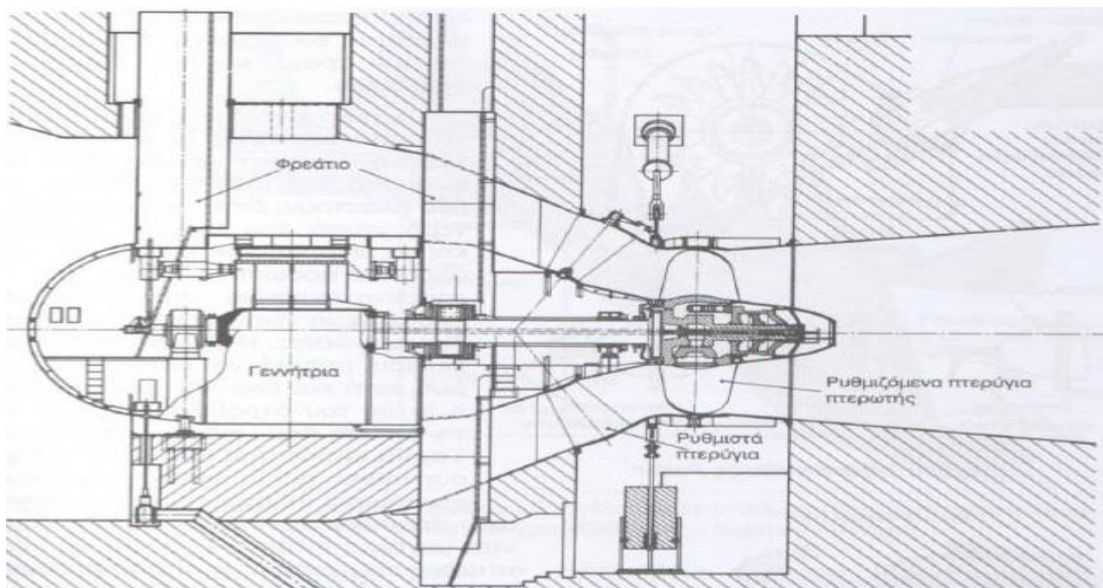


Εικόνα 17: Σκαρίφημα στρόβιλου Kaplan σε τομή. Ανάκτηση από: Ευστρατιάδης Α., Μαμάσης Ν., Κουτσογιάννης Δ., Αρχές Υδροενεργειακής Τεχνολογίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2018.



Εικόνα 18: Πτερύγια πτερωτής στρόβιλου Kaplan. Ανάκτηση από: greek.hydrotu.com.

Τέλος θα γίνει μια σύντομη αναφορά σε μια ιδιαίτερη υποκατηγορία του Kaplan, δηλαδή στο σωληνωτό στρόβιλο Kaplan. Στη σωληνωτή αυτή διάταξη η διεύθυνση της ροής του νερού είναι σύμφωνη με την αξονική διεύθυνση και ο άξονας του στρόβιλου είναι συνήθως οριζόντιος. Επιπρόσθετα, το κόστος εγκατάστασης είναι συνήθως μικρότερο στους σωληνωτούς στρόβιλους σε σχέση με τους στρόβιλους Kaplan με κατακόρυφο άξονα και σπειροειδές κέλυφος. Σχετικά με την πτερωτή, αυτή βρίσκεται πίσω από τη γεννήτρια και διαθέτει πτερύγια μεταβλητής κλίσης, ενώ συναντώνται και περιπτώσεις που η γεννήτρια είναι απευθείας συναρμολογημένη στην εξωτερική στεφάνη της πτερωτής. Όπως και οι μη σωληνωτοί, έτσι και οι σωληνωτοί Kaplan είναι κατάλληλοι για μικρά μανομετρικά ύψη και μεγάλες παροχές νερού (Σκόδρας, 2015).



Εικόνα 19: Σωληνωτός στρόβιλος Kaplan.

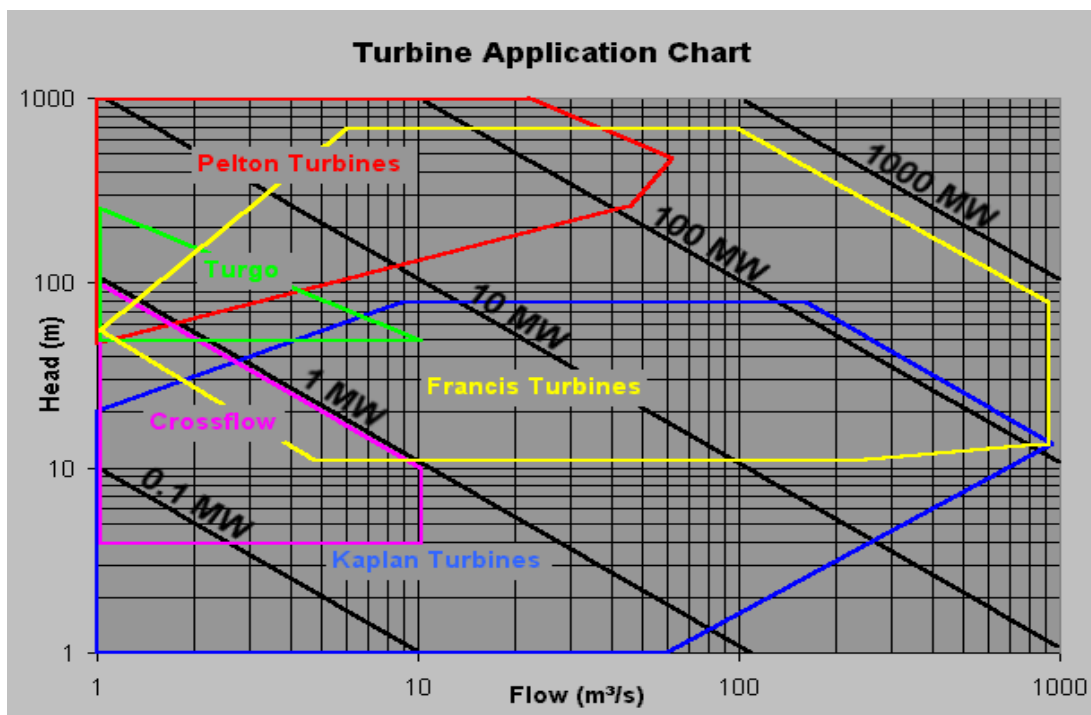
Ανάκτηση από: Σκόδρας Γ., *Ηπες και νέες μορφές ενέργειας*, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη 2015.

1.3.4. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΤΥΠΩΝ

Αφού παρατέθηκαν ξεχωριστά οι τρεις κατηγορίες υδροστροβίλων που συναντώνται συνήθως σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν συνοπτικά σε μια ενότητα τα χαρακτηριστικά τους, να γίνουν ορισμένες συγκρίσεις μεταξύ τους και να καταστεί σαφές το πεδίο εφαρμογής του καθενός, ώστε να επιλέγεται σε κάθε περίπτωση ο κατάλληλος τύπος.

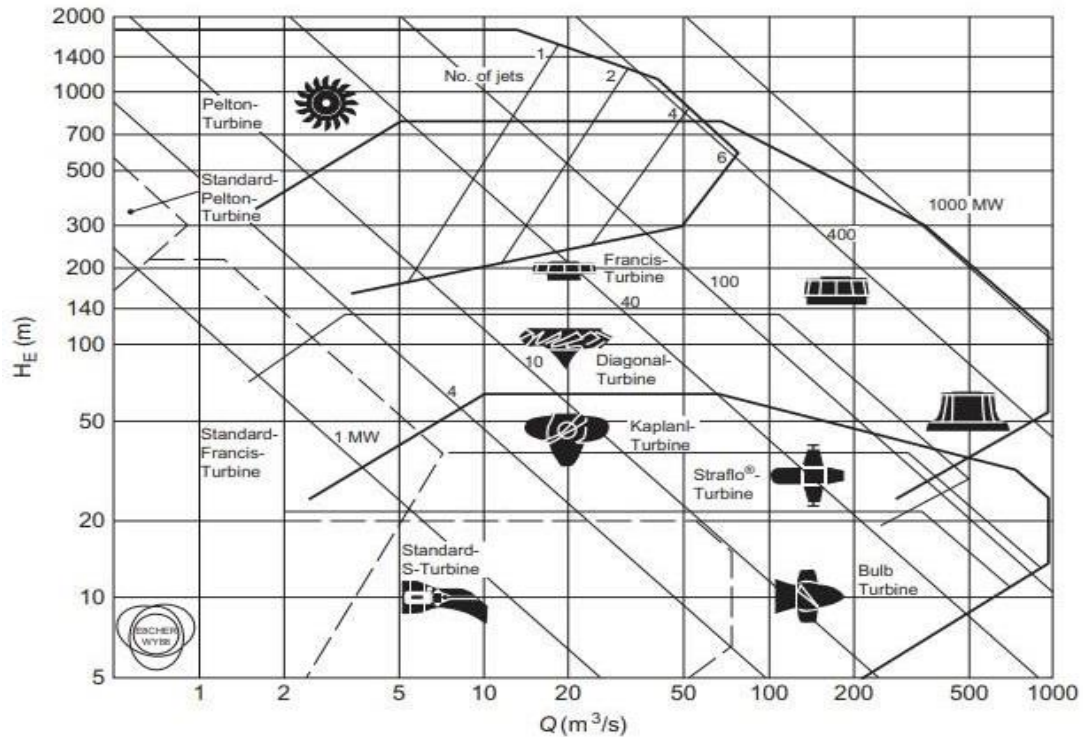
Αρχικά οι υδροστρόβιλοι κατηγοριοποιούνται με βάση την **υψομετρική διαφορά (μανομετρικό ύψος)**, δηλαδή την κατακόρυφη απόσταση από την τοποθεσία του αγωγού προσαγωγής μέχρι την τοποθεσία του υδροηλεκτρικού σταθμού. Συγκεκριμένα, αν και οι συγκεκριμένες τιμές δεν είναι πάγιες, μια προσεγγιστική εκτίμηση ταξινομεί τον υδροστρόβιλο Pelton για μεγάλα ύψη (μέχρι και 1500-2000 μέτρα), τον Francis για μεσαία ύψη (μέχρι και 400-500 μέτρα) και τον Kaplan για μικρές υψομετρικές διαφορές της τάξης των 80-100 μέτρων το μέγιστο.

Αναφορικά με την **παροχή του νερού** και την **παραγόμενη ισχύ** του συστήματος ας αναφερθεί ενδεικτικά ότι ο Pelton είναι κατάλληλος για μεγάλα ύψη και μικρές παροχές, ενώ οι Francis και Kaplan για μικρά ή μεσαία ύψη και μεγαλύτερες παροχές, ενώ για την ισχύ, το φάσμα διακύμανσης είναι αρκετά μεγάλο και για τους τρεις τύπους που εξετάζονται (Μαρνέλλος, 2015; Ευστρατιάδης κ.α., 2018). Το διάγραμμα της εικόνας 20 απεικονίζει τις συσχετίσεις μεταξύ των μεγεθών.

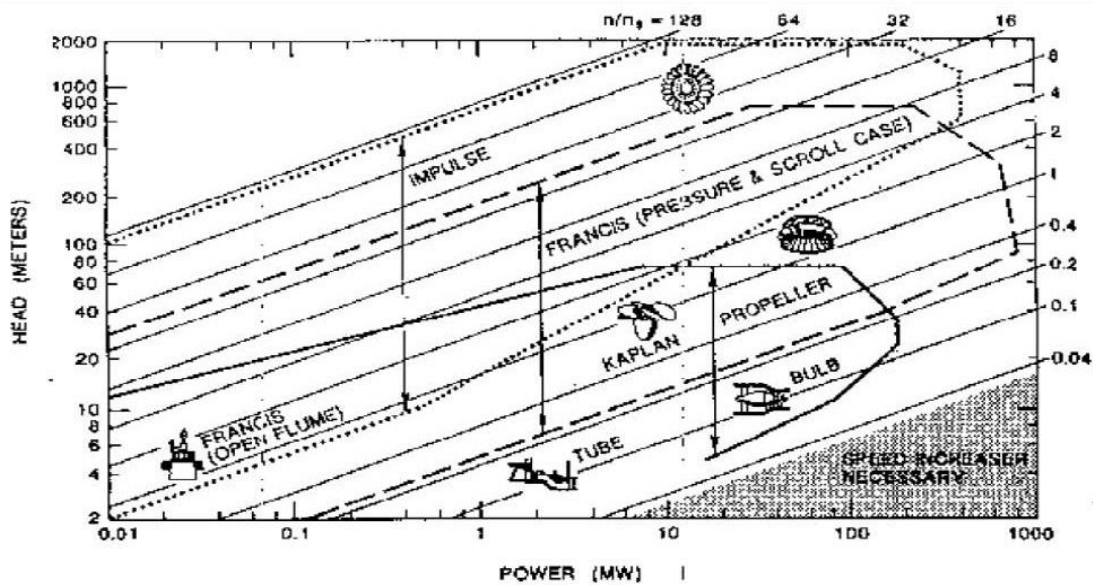


Εικόνα 20: Διάγραμμα συσχέτισης ύψους, παροχής και ισχύος για τους τρεις τύπους. Οι turgo και crossflow είναι παραλλαγές των Pelton και Francis, Kaplan αντίστοιχα. Ανάκτηση από:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Water_Turbine_Chart.png.



Εικόνα 21: Πληρέστερο διάγραμμα μανομετρικού ύψους-ογκομετρικής παροχής νερού. Ανάκτηση από: Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, Dixon S., Hall C., 7th edition, Elsevier, 2014.



Εικόνα 22: Διάγραμμα μανομετρικού ύψους-ισχύος για τους δημοφιλέστερους τύπους υδροστροβίλων. Ανάκτηση από: Σκόδρας Γ., Ήπιες και νέες μορφές ενέργειας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Κοζάνη, 2015.

Η εικόνα 23 παραθέτει συνοπτικά ορισμένες πολύ χρήσιμες πληροφορίες για θεμελιώδη μεγέθη που αφορούν τη λειτουργία των υδροστροβίλων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι συνηθισμένες ταχύτητες με τις οποίες περιστρέφεται μια άτρακτος υδροστροβίλου δεν ξεπερνούν τις 3000 στροφές/min για λόγους που αφορούν στην αποδοτικότερη και ομαλότερη λειτουργία τους (Dixon & Hall, 2014).

	Pelton Turbine	Francis Turbine	Kaplan Turbine
Specific speed (rad)	0.05–0.4	0.4–2.2	1.8–5.0
Head (m)	100–1770	20–900	6–70
Maximum power (MW)	500	800	300
Optimum efficiency (%)	90	95	94
Regulation method	Needle valve and deflector plate	Stagger angle of guide vanes	Stagger angle of rotor blades

Note: Values shown in the table are only a rough guide and are subject to change.

Εικόνα 23: Συγκεντρωτικός πίνακας λειτουργίας υδροστροβίλων. Ανάκτηση από: Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, Dixon S., Hall C., 7th edition, Elsevier, 2014.

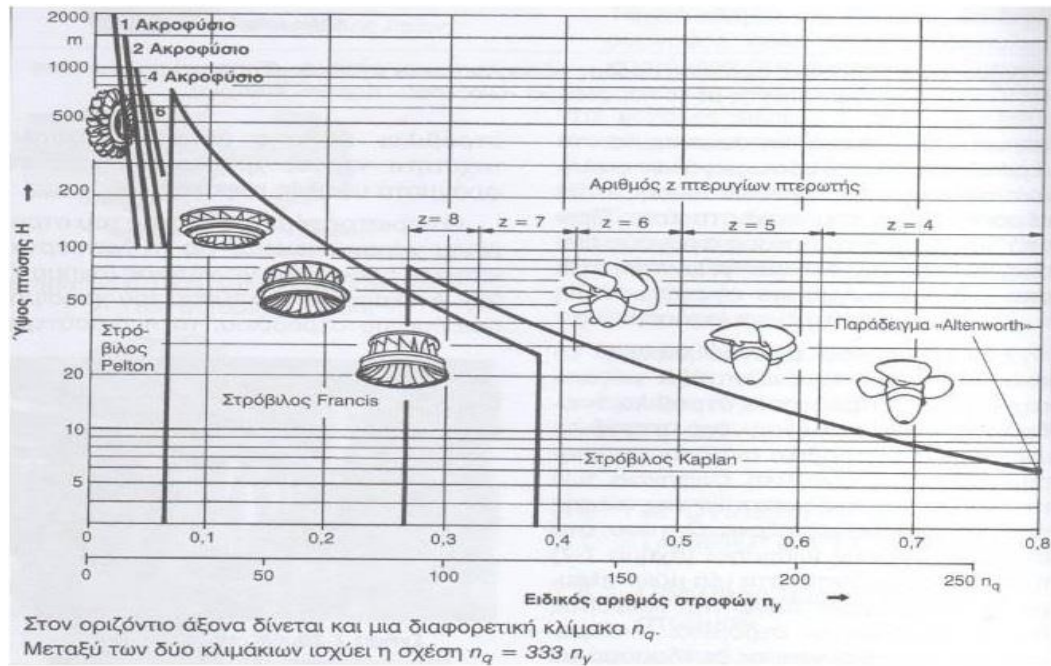
Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα πιο εξειδικευμένα διαγράμματα τα οποία δε διαφοροποιούνται σημαντικά από τα παραπάνω, ωστόσο εμφανίζουν κάποιες καινούριες μεταβλητές, πολύ χρήσιμες στον υπολογισμό μεγεθών κατά τη μελέτη σχεδιασμού ενός υδροστροβίλου. Συγκεκριμένα στα διαγράμματα των εικόνων 24 και 25 εμφανίζονται οι όροι **αριθμός ειδικών στροφών** και **ειδική ταχύτητα**. Ο ειδικός αριθμός στροφών ny δίνεται από τη σχέση:

$$ny = n \times V^{\frac{1}{2}} \times Y^{\frac{3}{4}} \quad (1)$$

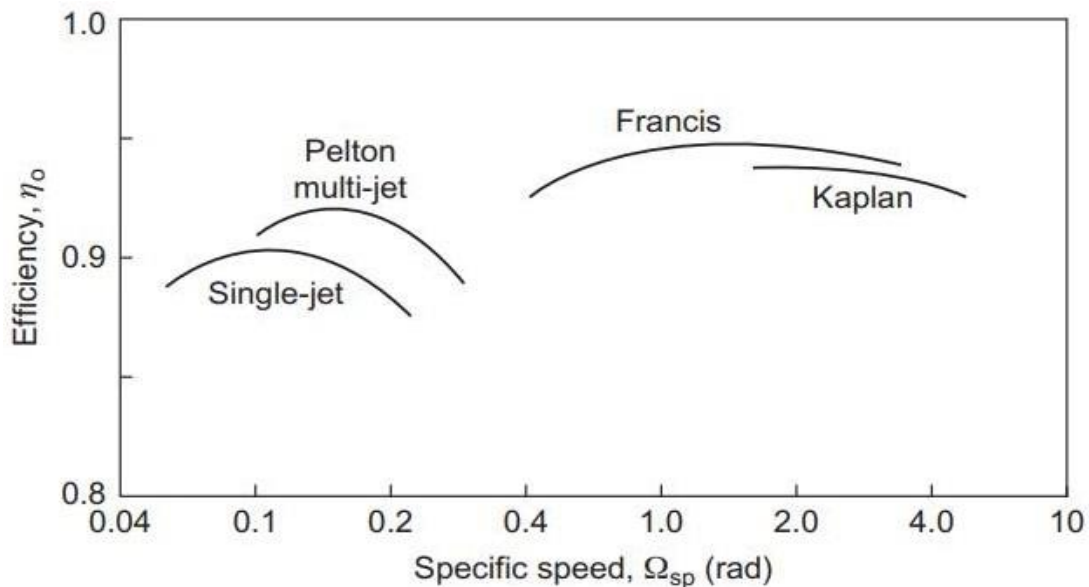
όπου n ο αριθμός στροφών σε sec^{-1} , V η παροχή του νερού σε m^3/s και Y το γινόμενο $g \cdot H$, όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s^2 και H το μανομετρικό ύψος σε m . Παράλληλα η ειδική ταχύτητα Ωsp δίνεται από τη σχέση:

$$\Omega sp = \frac{\Omega \times \left(\frac{P}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}}{(g \times He)^{\frac{5}{4}}} \quad (2)$$

όπου Ω η ταχύτητα περιστροφής σε rad/sec , P η ισχύς στην άτρακτο σε MW , ρ η πυκνότητα του νερού σε kg/m^3 , g η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/s^2 και He το μανομετρικό ύψος σε m (Dixon & Hall, 2014).



Εικόνα 24: Διάγραμμα μανομετρικού ύψους- αριθμού ειδικών στροφών. Ανάκτηση από: Σκόδρας Γ., Ήπιες και νέες μορφές ενέργειας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Κοζάνη, 2015.



Εικόνα 25: Διάγραμμα απόδοσης στροβίλου- ειδικής ταχύτητας. Ανάκτηση από: Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, Dixon S., Hall C., 7th edition, Elsevier, 2014.

Τέλος, ένας ακόμη βασικότατος παράγοντας που διαφοροποιεί τους τύπους των στροβίλων, σχετίζεται με τη γεωμετρία και τον τρόπο κατασκευής των ίδιων των στροβίλων. Συγκεκριμένα γίνεται λόγος για **υδροστροβίλους δράσης** (ισόθλιπτοι) και **αντίδρασης** (υπερπίεσης). Η βασική τους διαφορά έγκειται στο ότι στους στροβίλους δράσης ή μερικής προσβολής, όπως είναι ο Pelton δεν παρατηρείται καμία μεταβολή στην πίεση πριν και μετά την πτερωτή και μάλιστα η πίεση που λαμβάνει χώρα είναι η ατμοσφαιρική.

Αντίθετα στους στροβίλους αντίδρασης ή ολικής προσβολής, όπως είναι ο Francis (ακτινικής ή μεικτού τύπου ροής) και ο Kaplan (αξονικής ροής) η θεμελιώδης διαφορά σχετίζεται με τη μεταβολή της πίεσης στην είσοδο και την έξοδο της πτερωτής (στην είσοδο η πίεση είναι μεγαλύτερη, άρα υπερπίεση), επομένως για το λόγο αυτό οι στροβίλοι αυτοί ονομάζονται και στροβίλοι υπερπίεσης. Γενικότερα οι στροβίλοι ώσης ή δράσης μετατρέπουν τη δυναμική ενέργεια του νερού σε κινητική ενέργεια μιας δέσμης νερού που εκρέει με ορμή από υψηλής πίεσης ακροφύσια νερού επάνω σε σκαφίδια ή σε πτερύγια του δρομέα. Συνεπώς η ταχύτητα του νερού διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην όλη διαδικασία.

Αντίθετα, η ταχύτητα του νερού σε έναν σρόβιλο αντίδρασης παίζει μικρό μόνο ρόλο, και είναι κυρίως η διαφορά πίεσης κατά μήκος του δρομέα (ή των πτερυγίων) αυτών των υδροστροβίλων που δημιουργεί την επιθυμητή ροπή. Συμπερασματικά οι υδροστροβίλοι ώσης ή δράσης είναι πιο κατάλληλοι για εγκαταστάσεις σε συνθήκες μεγάλου ύψους και χαμηλής παροχής, ενώ το αντίθετο είναι η περίπτωση για τους υδροστροβίλους αντίδρασης (Σκόδρας, 2015).

Τέλος πρέπει να επισημανθεί ότι τα συγκεκριμένα μηχανήματα έχουν ως εργαζόμενο μέσο το νερό και για αυτό το λόγο απαιτείται σωστός προκαταρκτικός σχεδιασμός τους, καθώς, όταν οι ταχύτητες του νερού είναι μεγάλες, δημιουργούνται υποπίεσεις στον υδροσρόβιλο, με αποτέλεσμα την εξάτμιση του νερού. Οι ατμοί συμπυκνώνονται στην συνέχεια πάνω στις επιφάνειες των πτερυγίων, με αποτέλεσμα τη διάβρωση των πτερυγίων. Το φαινόμενο αυτό λέγεται σπηλαίωση (cavitation) και μπορεί να καταστρέψει κυρίως τα κινούμενα πτερύγια. Οι βασικοί τρόποι αποφυγής του ανεπιθύμητου αυτού φαινομένου έγκεινται στον ορθά δομημένο σχεδιασμό του στροβίλου, στην κατάλληλη επιλογή υλικών, αλλά και στην τήρηση των προδιαγραφών ποιότητας κατά την κατασκευή και εγκατάστασή του (Kumar & Saini, 2010; Σκουληκάρης, 2016).

1.4. ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΤΗΣ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ - ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

1.4.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η παρουσία της υδροηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα χρονολογείται από τις αρχές της δεκαετίας του 1950, όπου με την ίδρυση της ΔΕΗ ξεκινά μια προσπάθεια ανέγερσης και λειτουργίας υδροηλεκτρικών σταθμών, καθώς επίσης και κατασκευής φραγμάτων. Κατανοώντας από νωρίς τα οφέλη που προκύπτουν από μία καθαρή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, όπως η υδροηλεκτρική, έχουν σημειωθεί πολύ σημαντικές βελτιώσεις στον τομέα της αξιοποίησης του υδροηλεκτρικού δυναμικού και μάλιστα στη σημερινή εποχή η υδροηλεκτρική ενέργεια έχει φτάσει να καλύπτει το 10% των ενεργειακών αναγκών της χώρας στην κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας, ένα ποσοστό που έχει όλες τις προϋποθέσεις να αυξηθεί περαιτέρω (Σκόδρας, 2015).

Συγκρίνοντάς την με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή συγκρίνοντας τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς με άλλους (πχ ατμοηλεκτρικούς) που

χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή μπορούν να προκύψουν πολύ χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τις ιδιότητες της κάθε μορφής. Σε σύγκριση με την πυρηνική ενέργεια, η κατασκευή μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης επιφέρει σημαντικές μεταβολές στο ανάγλυφο μιας περιοχής, κάτι το οποίο δεν συναντάται στην περίπτωση ενός πυρηνικού σταθμού παραγωγής ενέργειας, ενώ παράλληλα οι αποτυχίες των υδροηλεκτρικών σταθμών έχουν προκαλέσει δεκάδες χιλιάδες περισσότερους θανάτους από οποιαδήποτε αποτυχία πυρηνικού σταθμού. Ωστόσο, δεδομένου ότι το κόστος της πυρηνικής ενέργειας επηρεάζεται από το υψηλό κόστος υποδομής, το κόστος ανά μονάδα ενέργειας αυξάνεται σημαντικά με χαμηλή παραγωγή.

Αντίθετα, η υδροηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παρέχει μέγιστη ισχύ με πολύ χαμηλότερο κόστος, ενώ η αποτυχία ενός υδροηλεκτρικού σταθμού είναι ένα πολύ σπάνιο φαινόμενο και σίγουρα με πολύ λιγότερες επιπτώσεις στην υγεία του κοινωνικού συνόλου σε σχέση με ένα πυρηνικό ατύχημα. Σε σύγκριση με την αιολική ενέργεια, η ίδια περνά από προβλέψιμες διακυμάνσεις ανά εποχή, αλλά είναι διακοπτόμενη σε καθημερινή βάση. Η μέγιστη παραγωγή ανέμου είναι μικρή σε σχέση με την μέγιστη ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο άνεμος μπορεί να κορυφωθεί τη νύχτα όταν δεν απαιτείται ενέργεια ή να επικρατήσει άπνοια κατά τη διάρκεια της ημέρας όταν η ηλεκτρική ζήτηση είναι υψηλότερη, ενώ, περιστασιακά, τα καιρικά φαινόμενα μπορεί να οδηγήσουν σε χαμηλής έντασης άνεμο για ημέρες ή εβδομάδες. Μια υδροηλεκτρική δεξαμενή ικανή να αποθηκεύει την παραγωγή εβδομάδων είναι χρήσιμη για την εξισορρόπηση της παραγωγής στο δίκτυο. Η αδιάκοπη παραγωγή της υδροηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση της διακοπτόμενης φύσης της αιολικής ενέργειας.

Αντίθετα, σε ορισμένες περιπτώσεις η αιολική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξοικονομήσει νερό για μελλοντική χρήση σε περιόδους ξηρασίας, κάτι το οποίο μπορεί να επιτευχθεί βέβαια και από την υδροηλεκτρική ενέργεια. Τέλος να αναφερθεί ότι οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί είναι δυνατό να τεθούν σε λειτουργία αμέσως μόλις ζητηθεί επιπρόσθετη ηλεκτρική ενέργεια, σε αντίθεση με τους θερμικούς σταθμούς (γαιανθράκων, πετρελαίου), που απαιτούν χρόνο προετοιμασίας, ενώ το ίδιο ισχύει και για τους μεγάλους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, οι οποίοι έχουν μεγάλους χρόνους εκκίνησης από κατάσταση μη λειτουργίας, αλλά και δύσκολη ρύθμιση φόρτισης (Masters, 2004).

Όπως έχει προαναφερθεί, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, αφού τροφοδοτηθούν με την αναγκαία ποσότητα νερού που προέρχεται από τις συγκεντρωμένες στα φράγματα υδάτινες μάζες, ωθούν το νερό στους στροβίλους και με την περιστροφή τους τίθεται σε κίνηση η ηλεκτρική γεννήτρια για την παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος. Ενδεικτικά το φάσμα λειτουργίας ενός υδροηλεκτρικού σταθμού καλύπτει μανομετρικά ύψη μεταξύ 2m και 2000m, ογκομετρική παροχή νερού μέχρι και $700\text{m}^3/\text{s}$, ενώ η παραγόμενη ισχύς ανά στρόβιλο μπορεί να ανέλθει μέχρι και τα 200 MW. Τέλος οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί χαρακτηρίζονται ως χαμηλής πίεσης αν το μανομετρικό ύψος είναι μικρότερο των 30 μέτρων, μέσης πίεσης για μανομετρικό μέχρι τα 300 μέτρα και υψηλής πίεσης για μανομετρικό μεγαλύτερο των 300 μέτρων.

Οι σταθμοί διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τους σταθμούς ροής ποταμού και τους σταθμούς αποθήκευσης νερού. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί ροής ποταμού δε χρησιμοποιούν σχεδόν καθόλου αποθηκευμένο νερό για τη ροή μέσω των υδροστροβίλων, δηλαδή βασίζονται μόνο στην παροχή των υδάτινων πηγών τους. Για αυτό τέτοιοι σταθμοί χτίζονται κοντά σε ποτάμια με μεγάλη ροή και μικρό βάθος ή σε περιοχές που είναι ακατάλληλες για την ανέγερση φραγμάτων. Αντίθετα οι σταθμοί αποθήκευσης νερού διαθέτουν μέσω μιας λίμνης, συνήθως τεχνητής, ικανή αποθηκευτική χωρητικότητα (ταμιευτήρες) ώστε να αντεπεξέρχονται στις εποχιακές μεταβολές της ροής του νερού και να παρέχουν μια σταθερή παροχή ηλεκτρισμού σε όλη την διάρκεια του έτους, ενώ στα μεγάλα φράγματα υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης νερού για λειτουργία αρκετών ετών (Σκόδρας, 2015).

Υπάρχει ωστόσο και μια ακόμη κατηγορία υδροηλεκτρικών σταθμών που, αν και ασυνήθιστη, μπορεί κατά περιόδους να προσφέρει υψηλά επίπεδα λειτουργίας και ονομάζεται αποθήκευση του νερού με άντληση (αντλησιοταμίευση) (Λέρης, 2006; Στεφανάκος, 2017). Σε αυτό το ιδιαίτερο σύστημα χρησιμοποιούνται δύο ταμιευτήρες (μέρη συγκέντρωσης υδάτινων ποσοτήτων), με τον ένα να βρίσκεται ψηλότερα από τον άλλο, ενώ ανάμεσά τους παρεμβάλλεται ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής με τους στροβίλους. Το νερό φεύγοντας από τον υψηλότερο ταμιευτήρα διέρχεται από τους στροβίλους, πραγματοποιείται η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και καταλήγει στο χαμηλότερο ταμιευτήρα.

Η ιδιαιτερότητα της εγκατάστασης έγκειται στο ότι το όλο σύστημα βασίζεται στην ανακύκλωση του νερού και συγκεκριμένα σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ηλεκτρισμού το νερό αντλείται από το χαμηλότερο ταμιευτήρα στον υψηλότερο, ενώ το ρόλο της αντλίας διαδραματίζουν οι στρόβιλοι, λειτουργώντας αντίστροφα (ως αντλίες). Έτσι μπορεί να επαναληφθεί ο κύκλος ηλεκτρισμού και παρ' όλο που απορροφάται ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο για την άντληση, το σύστημα αυτό θεωρείται ως ένα από τα πιο καινοτόμα και αποδοτικά αναφορικά με την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ασφαλώς για την ομαλή πραγματοποίηση της διαδικασίας είναι απαραίτητο να υπάρχει επαρκής ποσότητα νερού στους ταμιευτήρες, συνυπολογίζοντας ενεργειακές δαπάνες, εποχιακές μεταβολές ροής νερού, αλλά και μη ενεργειακές καταναλώσεις, όπως ανάγκες άρδευσης, έλεγχος πλημμυρών και βιομηχανικές χρήσεις.

1.4.2. ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Όπως και σε άλλες χώρες έτσι και στην Ελλάδα έχουν γίνει εκτεταμένες προσπάθειες για την κατασκευή υδροηλεκτρικών σταθμών. Όπως είναι αντιληπτό, η Ελλάδα πληροί ορισμένες βασικές προϋποθέσεις, δηλαδή πλήθος ποταμών (οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί χτίζονται κοντά σε ποτάμια, το νερό των οποίων αποτελεί την πρώτη ύλη για την ηλεκτροπαραγωγή), ευνοϊκές κλιματολογικές συνθήκες, αλλά και κατάλληλο γεωμορφολογικό ανάγλυφο. Επομένως, όλα τα παραπάνω συντελούν σε ένα πρόσφορο έδαφος για την κατασκευή και αξιοποίηση τόσο μικρότερων, όσο και μεγαλύτερων υδροηλεκτρικών μονάδων. Παρ' όλο που τα όρια διάκρισής τους

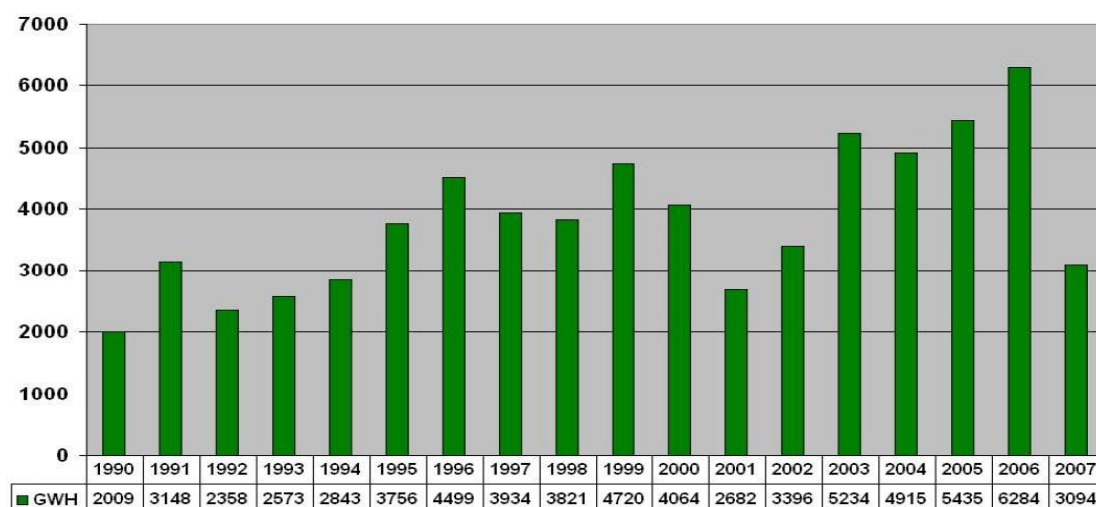
δεν είναι πάγια, ένα υδροηλεκτρικό εργοστάσιο θεωρείται μικρό όταν η ισχύς του δεν ξεπερνά τα 15 MW περίπου, ενώ για μονάδες με παραγωγή ισχύος μεγαλύτερη των 15 MW γίνεται αναφορά σε μεγάλο υδροηλεκτρικό εργοστάσιο (Dick, 2015).

Αν και το κύριο αντικείμενο μελέτης αυτής της εργασίας σχετίζεται με τα μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια, παρουσιάζονται παρακάτω και τα χαρακτηριστικά των μικρότερων μονάδων, οι οποίες, αν και αδυνατούν να φτάσουν τα επίπεδα παραγωγής των μεγάλων μονάδων που βρίσκονται κυρίως υπό την αιγίδα της ΔΕΗ, αποτελούν ωστόσο υπολογίσιμες συνιστώσες στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Αρχικά πρέπει να τονιστεί ότι πέρα από το όριο διάκρισης που αφορά στην ισχύ της παραγωγής και είναι ένα μετρήσιμο μέγεθος, οι βασικές διαφοροποιήσεις μιας μικρής μονάδας σχετίζονται κυρίως με ποιοτικά και όχι με ποσοτικά μεγέθη και ειδικότερα γίνεται λόγος για την επιλογή και εγκατάσταση του τυποποιημένου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, καθώς και για τη διαμόρφωση και αξιοποίηση του υδροηλεκτρικού σταθμού.

Παράλληλα τα μικρά υδροηλεκτρικά υπόκεινται σε ευνοϊκότερο καθεστώς αδειοδότησης, ενώ τα μεγάλα υδροηλεκτρικά, στην Ελλάδα τουλάχιστον, δε μπορούν να κατασκευαστούν παρά μόνο από τη ΔΕΗ ή άλλους μεγάλους οργανισμούς. Ως επακόλουθο των παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος κατά την κατασκευή ενός μικρού υδροηλεκτρικού συγκροτήματος είναι σαφώς μικρότερος, αν συνδυαστεί και με το γεγονός ότι οι μελέτες γεωλογικού, υδρολογικού και γεωτεχνικού περιεχομένου είναι περιορισμένης έκτασης, ενώ σε περίπτωση κατασκευής φράγματος, αυτό θα είναι χωμάτινο, δηλαδή αποφεύγονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από την κατασκευή ενός φράγματος με σκυρόδεμα (Παπαντώνης, 2008; Καρλής, 2011).

Το ακόλουθο διάγραμμα απεικονίζει την παραγωγική δυνατότητα των υδροηλεκτρικών σταθμών. Όπως θα διαπιστωθεί από την εικόνα 26, υφίσταται μια αυξομείωση της παραγωγής κατά την περίοδο 1990-2007 χωρίς να υπάρχει κάποιο μεγάλο διάστημα σταθερής ανόδου ή πτώσεως. Η μεγαλύτερη παραγωγή σημειώθηκε το 2006 και η μικρότερη το 1990.

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ (GWH)



Εικόνα 26: Παραγωγή υδροηλεκτρικών σταθμών (GWH). Ανάκτηση από: Λέρης Γ., Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ, 2007.

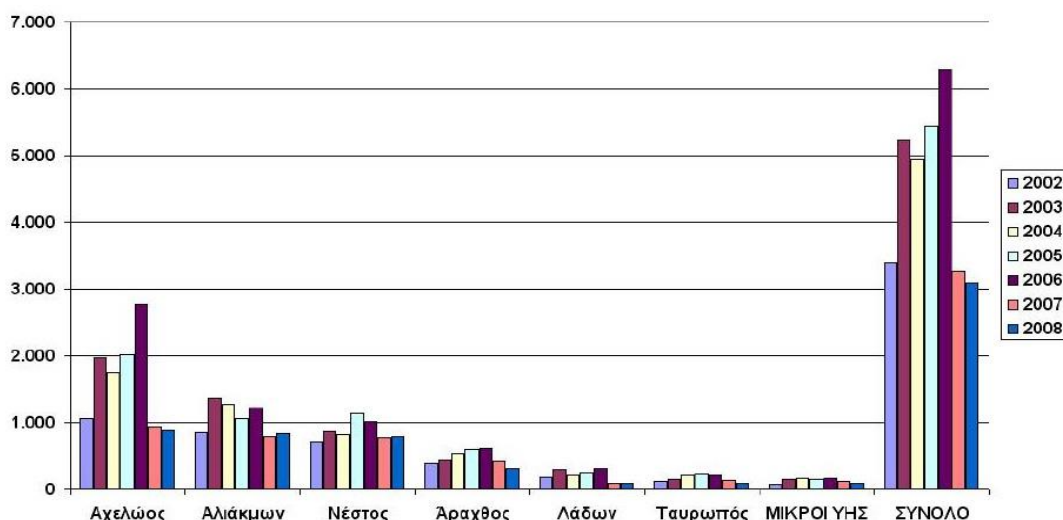
Πριν γίνει αναφορά στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς της Ελλάδας, κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν και ορισμένα υδρολογικά δεδομένα που αφορούν τις παροχές των ποταμών κατά την περίοδο 2002-2007. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν χρήσιμες πληροφορίες, αν αναλογιστεί κάποιος ότι ένα μεγάλο μέρος των υδάτινων μαζών από τα ποτάμια αυτά αξιοποιείται (και μάλιστα αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση) για την ηλεκτροπαραγωγή. Μαζί με τα υπό μορφή πίνακα δεδομένα που προαναφέρθηκαν, παρατίθενται και αντίστοιχα διαγράμματα που αποσκοπούν σε μια συγκριτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, από τα διαγράμματα των εικόνων 27, 28 και 29 γίνεται αντιληπτό ότι ο Αχελώος εμφανίζει σε ετήσια βάση τη μεγαλύτερη μέση παροχή νερού, ενώ ο Αώος τη μικρότερη (Λέρης, 2007; Αργυράκης, 2008).

Μέση ετήσια παροχή ποταμών (m³/sec)

	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Αχελώος	76,8	96,7	122,1	135,3	115,0	70,1
Αλιάκμων	43,5	62,1	53,7	48,0	56,3	27,8
Αραχθός	40,9	49,5	62,3	71,4	58,7	41,0
Αώος	2,6	2,9	3,6	4,2	3,1	2,5
Νέστος	27,7	31,4	31,2	50,5	42,7	24,8
Λάδων	11,4	19,9	12,7	15,8	18,5	6,5
Ταυρωπός	4,7	6,8	4,7	5,1	4,8	2,7

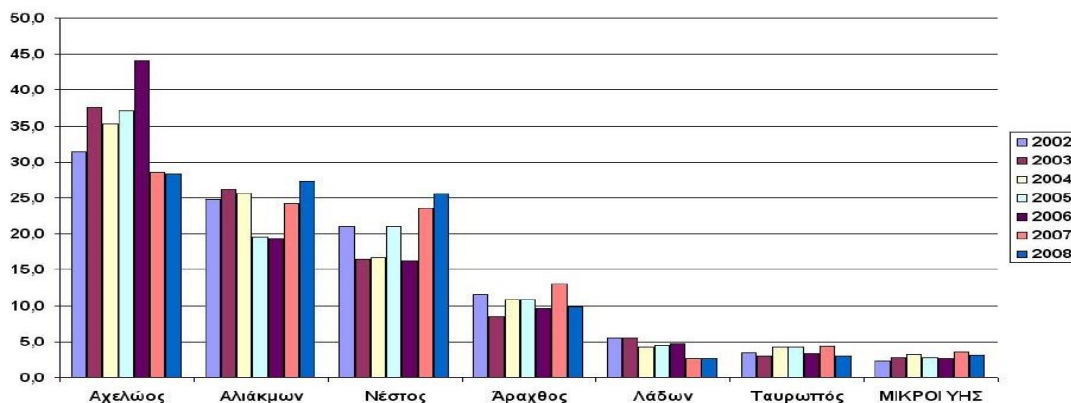
Εικόνα 27: Μέση ετήσια παροχή ποταμών (m³/s). Ανάκτηση από: Λέρης Γ., Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ, 2007.

Ετήσια υδροηλεκτρική παραγωγή ανά ποταμό (GWh)



Εικόνα 28: Ετήσια υδροηλεκτρική παραγωγή (GWh) ανά ποταμό για την περίοδο 2002-2008. Ανάκτηση από: Εκμετάλλευση των υδροηλεκτρικών σταθμών ως έργων πολλαπλού σκοπού, Αργυράκης Ι., Διεύθυνση υδροηλεκτρικής παραγωγής, ΔΕΗ και ΤΕΕ, 2009.

Ποσοστό συμμετοχής ποταμού στο σύνολο της παραγωγής (%)



Εικόνα 29: Ποσοστό συμμετοχής ποταμού επί της συνολικής παραγωγής κατά την περίοδο 2002-2008. Ανάκτηση από: Εκμετάλλευση των υδροηλεκτρικών σταθμών ως έργων πολλαπλού σκοπού, Αργυράκης Ι., Διεύθυνση υδροηλεκτρικής παραγωγής, ΔΕΗ και ΤΕΕ, 2009.

Αν και τα μικρά υδροηλεκτρικά παρουσιάζουν προφανώς μια υπεροχή κυρίως σε ζητήματα ευελιξίας και ευκολότερης διαχείρισης, γίνεται αντιληπτό πως οι ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες σε καθημερινή βάση μπορούν να καλυφθούν πολύ πιο ικανοποιητικά από τις μεγάλες υδροηλεκτρικές μονάδες, συνεπώς για το λόγο αυτό η ΔΕΗ έχει επενδύσει στον τομέα αυτό και σήμερα βρίσκονται σε λειτουργία οι παρακάτω σταθμοί.

ΠΟΤΑΜΟΣ	ΣΤΑΘΜΟΣ	ΥΨΟΣ ΠΤΩΣΗΣ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ
ΑΧΕΛΩΟΣ	ΚΡΕΜΑΣΤΑ	132 ΜΕΤΡΑ	ΣΤΕΡΕΑ ΕΛΛΑΔΑ	925.6 MW
	ΚΑΣΤΡΑΚΙ	75 ΜΕΤΡΑ		
	ΣΤΡΑΤΟΣ Ι	37 ΜΕΤΡΑ		
	ΣΤΡΑΤΟΣ ΙΙ	15 ΜΕΤΡΑ		
	ΓΚΙΩΝΑ	37 ΜΕΤΡΑ		
	ΓΛΑΥΚΟΣ	150 ΜΕΤΡΑ		
ΑΛΙΑΚΜΟΝΑΣ	ΠΟΛΥΦΥΤΟ	146 ΜΕΤΡΑ	ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ	879.3 MW
	ΣΦΗΚΙΑ	60 ΜΕΤΡΑ		
	ΑΣΩΜΑΤΑ	42 ΜΕΤΡΑ		
	ΜΑΚΡΟΧΩΡΙ	17 ΜΕΤΡΑ		
	ΒΕΡΜΙΟ	96 ΜΕΤΡΑ		
	ΑΓΡΑΣ	156 ΜΕΤΡΑ		
	ΕΔΕΣΣΑΙΟΣ	125 ΜΕΤΡΑ		
ΑΡΑΧΘΟΣ, ΛΟΥΡΟΣ	ΠΗΓΕΣ ΑΩΟΥ	675 ΜΕΤΡΑ	ΗΠΕΙΡΟΣ	553.9 MW
	ΠΟΥΡΝΑΡΙ Ι	79 ΜΕΤΡΑ		
	ΠΟΥΡΝΑΡΙ ΙΙ	14 ΜΕΤΡΑ		
	ΛΟΥΡΟΣ	56 ΜΕΤΡΑ		
ΝΕΣΤΟΣ	ΘΗΣΑΥΡΟΣ	154 ΜΕΤΡΑ	ΘΡΑΚΗ	500 MW
	ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	74 ΜΕΤΡΑ		
ΛΑΔΩΝΑΣ	ΥΗΣ ΛΑΔΩΝΑ	239 ΜΕΤΡΑ	ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ	70 MW
ΤΑΥΡΩΠΟΣ	ΥΗΣ ΠΛΑΣΤΗΡΑ	577 ΜΕΤΡΑ	ΘΕΣΣΑΛΙΑ	129.9 MW
	ΜΙΚΡΟΙ ΥΗΣ			1.3 MW
ΣΥΝΟΛΙΚΑ MW				3060

Πίνακας 1: Οι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της Ελλάδας. Ανάκτηση από: Η υδροηλεκτρική παραγωγή της ΔΕΗ Α.Ε και Η εκμετάλλευση των υδροηλεκτρικών σταθμών ως έργων πολλαπλού σκοπού, Αργυράκης Ι., Διεύθυνση υδροηλεκτρικής παραγωγής, ΔΕΗ και ΤΕΕ, 2009 (κατόπιν επεξεργασίας).



Εικόνα 30: Οι τοποθεσίες των μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών. Ανάκτηση από: Ευστρατιάδης Α., Μαμάσης Ν., Κουτσογιάννης Δ., Αρχές Υδροενεργειακής Τεχνολογίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2018.

Η τρίτη στήλη του Πίνακα 1, αποτελεί το μανομετρικό ή αλλιώς ύψος υδατόπτωσης, ενώ η πρώτη στήλη αναφέρει τους ποταμούς που προμηθεύουν με νερό τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς (232). Ο μεγαλύτερος υδροηλεκτρικός σταθμός είναι αυτός των Κρεμαστών με παραγόμενη ισχύ 437 MW, αυτός της Σφηκιάς (αντλητικός) στον Αλιάκμονα παράγει ισχύ 315 MW, ενώ παράλληλα οι σταθμοί Θησαυρού (αντλητικός) και Πλατανόβρυσης στον ποταμό Νέστο παράγουν ισχύ περίπου 400 MW και 100 MW αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται και στον πίνακα 1, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των υδροηλεκτρικών σταθμών ξεπερνά τα 3.000 MW. Τα τελευταία χρόνια παράλληλα με την συνέχιση και εξέλιξη της κατασκευής μεγάλων ΥΗΣ γίνεται προσπάθεια αξιοποίησης του υδροηλεκτρικού δυναμικού με μικρά υδροηλεκτρικά έργα, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν.

Να σημειωθεί εδώ ότι οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της Ελλάδας χρησιμοποιούνται ως σταθμοί αιχμής, δηλαδή εργάζονται κυρίως όταν οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι αυξημένες, καθώς τα διαθέσιμα αποθέματα νερού δεν επαρκούν για συνεχή λειτουργία, ενώ η λειτουργία τους ως σταθμών αιχμής επιβάλλεται, καθώς έχουν το πλεονέκτημα να εκκινούν άμεσα. Βέβαια, υπάρχουν και υδροηλεκτρικοί σταθμοί που λειτουργούν ως αντλητικοί (σταθμοί άντλησης), συμβάλλοντας έτσι στην καλύτερη αξιοποίηση των υδάτινων πόρων. Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι τα παραπάνω δεδομένα ίσχυαν μέχρι το 2007, αφού πλέον έχουν τεθεί σε λειτουργία και ο σταθμός Ιλαρίωνα (Κοζάνη, 140 MW), ενώ προγραμματίζεται από τη ΔΕΗ η έναρξη λειτουργίας του σταθμού Μεσοχώρας (Τρίκαλα, 165 MW, ολοκληρωμένο από το 2001, αλλά ακόμη ανενεργό), καθώς και μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών που θα ενισχύσουν σημαντικά το όλο εγχείρημα (Αργυράκης, 2009).

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΝΟΜΟΣ	ΠΑΡΑΓΩΓΗ	ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ	ΙΣΧΥΣ
ΚΡΕΜΑΣΤΑ	ΑΙΤΩΛΟΑΚΑΡΝΑΝΙΑΣ	848 GWH	4 FRANCIS	437.2 MW
ΚΑΣΤΡΑΚΙ	ΑΙΤΩΛΟΑΚΑΡΝΑΝΙΑΣ	598 GWH	4 FRANCIS	320 MW
ΣΤΡΑΤΟΣ Ι	ΑΙΤΩΛΟΑΚΑΡΝΑΝΙΑΣ	237 GWH	1 FRANCIS	150 MW
ΠΟΛΥΦΥΤΟ	ΚΟΖΑΝΗΣ	420 GWH	3 FRANCIS	375 MW
ΣΦΗΚΙΑ	ΗΜΑΘΙΑΣ	380 GWH	3 FRANCIS	315 MW
ΑΣΩΜΑΤΑ	ΗΜΑΘΙΑΣ	130 GWH	2 FRANCIS	108 MW
ΑΓΡΑΣ	ΠΕΛΛΑΣ	35 GWH	2 FRANCIS	50 MW
ΕΔΕΣΣΑΙΟΣ	ΠΕΛΛΑΣ	25 GWH	1 FRANCIS	19 MW
ΠΗΓΕΣ ΑΩΟΥ	ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ	165 GWH	2 PELTON	210 MW
ΠΟΥΡΝΑΡΙ Ι	ΑΡΤΑΣ	235 GWH	3 FRANCIS	300 MW
ΠΟΥΡΝΑΡΙ ΙΙ	ΑΡΤΑΣ	45 GWH	3 KAPLAN	33.6 MW
ΘΗΣΑΥΡΟΣ	ΔΡΑΜΑΣ	440 GWH	3 FRANCIS	384 MW
ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗ	ΔΡΑΜΑΣ	240 GWH	2 FRANCIS	116 MW
ΥΗΣ ΛΑΔΩΝΑ	ΑΡΚΑΔΙΑΣ	260 GWH	2 FRANCIS	70 MW
ΥΗΣ ΠΛΑΣΤΗΡΑ	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	198 GWH	3 PELTON	129.9 MW
ΙΛΑΡΙΩΝΑΣ	ΚΟΖΑΝΗΣ	366 GWH	2 FRANCIS	140 MW

Πίνακας 2: Θεμελιώδη μεγέθη των μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών της Ελλάδας. Ανάκτηση από: Η υδροηλεκτρική παραγωγή της ΔΕΗ Α.Ε και Εκμετάλλευση των υδροηλεκτρικών σταθμών ως έργων πολλαπλού σκοπού, Αργυράκης Ι., Διεύθυνση υδροηλεκτρικής παραγωγής, ΔΕΗ και Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, 2009 (κατόπιν επεξεργασίας).

Στον πίνακα 2 φαίνονται συγκεντρωτικά ορισμένες βασικές ιδιότητες των μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών της Ελλάδας που τελούν υπό την αιγίδα της ΔΕΗ. Παρουσιάζονται οι σταθμοί, οι πόλεις στις οποίες βρίσκονται, η μέση ετήσια παραγωγή που αποδίδουν, ο τύπος υδροστροβίλων και το πλήθος αυτών σε κάθε μονάδα, καθώς και η συνολική ισχύς κάθε μονάδας. Επισημαίνεται ότι οι σταθμοί Μεσοχώρας και Μετσοβίτικου παραμένουν ανενεργοί, αν και ολοκληρώθηκε η κατασκευή τους, ωστόσο προγραμματίζεται από τη ΔΕΗ η έναρξη της λειτουργίας τους. Παρακάτω υπάρχει αντίστοιχος πίνακας (πίνακας 3) και για τα κυριότερα μικρά υδροηλεκτρικά, τα οποία είτε διαχειρίζεται η ΔΕΗ, είτε άλλοι ιδιωτικοί φορείς, κυρίως μεγάλες κατασκευαστικές εταιρίες, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια.

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΝΟΜΟΣ	ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ	ΙΣΧΥΣ	ΠΑΡΑΓΩΓΗ
ΣΤΡΑΤΟΣ ΙΙ	ΑΙΤΩΛΟΑΚΑΡΝΑΝΙΑΣ	2 KAPLAN	6.3 MW	12 GWH
ΓΚΙΩΝΑ	ΦΩΚΙΔΑΣ	FRANCIS	8.5 MW	40 GWH
ΓΛΑΥΚΟΣ	ΑΧΑΪΑΣ	PELTON, FRANCIS	3.7 MW	10.3 GWH
ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	ΗΜΑΘΙΑΣ	KAPLAN	0.9 MW	4 GWH
ΜΑΚΡΟΧΩΡΙ	ΗΜΑΘΙΑΣ	3 KAPLAN	10.8 MW	30 GWH
ΒΕΡΜΙΟ	ΗΜΑΘΙΑΣ	FRANCIS	1.5 MW	6 GWH
ΛΟΥΡΟΣ	ΠΡΕΒΕΖΑΣ	3 FRANCIS	10.3 MW	50 GWH
ΓΙΤΑΝΗ	ΘΕΣΣΠΡΩΤΙΑΣ	2 KAPLAN	4.2 MW	17.5 GWH
ΕΛΕΟΥΣΑ	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	2 KAPLAN	6.6 MW	30 GWH
ΣΜΟΚΟΒΟΣ	ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ	2 FRANCIS	10.4 MW	10.7 GWH
ΜΙΚΡΟΣ ΙΛΑΡΙΩΝΑΣ	ΚΟΖΑΝΗΣ	FRANCIS	4.2 MW	22 GWH
ΠΑΠΑΔΙΑ	ΦΛΩΡΙΝΑΣ	PELTON	0.5 MW	2.3 GWH
ΑΓ. ΙΩΑΝΝΗΣ	ΣΕΡΡΩΝ	2 FRANCIS	0.6 MW	0.71 GWH

ΑΛΑΤΟΠΕΤΡΑ	ΓΡΕΒΕΝΩΝ	PELTON, FRANCIS	4.95 MW	14.5 GWH
ΑΛΜΥΡΟΣ	ΧΑΝΙΩΝ	FRANCIS	0.3 MW	1.25 GWH
ΒΟΡΕΙΝΟ	ΠΕΛΛΑΣ	PELTON	4.1 MW	20 GWH
ΟΙΝΟΥΣΑ	ΣΕΡΡΩΝ	PELTON	1.2 MW	3.8 GWH

Πίνακας 3: Θεμελιώδη μεγέθη των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών της Ελλάδας. Ανάκτηση από: <https://www.ppcr.gr/el/projects/current-projects> (κατόπιν επεξεργασίας).

Κλείνοντας αυτή την υποενότητα σημειώνεται ότι υπάρχουν και περισσότεροι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί, ωστόσο προτιμήθηκαν οι παραπάνω ως σημεία αναφοράς, ενώ πρέπει να υπογραμμιστεί πως, αν και μικροί, η συμβολή τους στη συνολική υδροηλεκτρική παραγωγή είναι καταλυτική. Σε ορισμένες μονάδες χρησιμοποιούνται στρόβιλοι οριζόντιου, ενώ σε άλλες κατακόρυφου άξονα. Η τελευταία στήλη του πίνακα 3 αναφέρεται, όπως και νωρίτερα, στη μέση ετήσια παραγωγή σε GWh. Ορισμένοι από αυτούς που δεν αναφέρθηκαν στην παρούσα εργασία βρίσκονται υπό κατασκευή, ενώ μελετάται και η δημιουργία νέων σταθμών.

1.4.3. ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΛΑΣΤΗΡΑ

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός Πλαστήρα έχει λάβει τη συγκεκριμένη ονομασία προς τιμήν του στρατηγού Νικολάου Πλαστήρα, μιας σπουδαίας και ηγετικής φυσιογνωμίας με μεγάλη συνεισφορά τόσο σε στρατιωτικό (Βαλκανικοί πόλεμοι, Μικρασιατική εκστρατεία), όσο και σε πολιτικό επίπεδο (διετέλεσε πρωθυπουργός της Ελλάδας τρεις φορές). Ο Πλαστήρας υπήρξε ο εμπνευστής αυτού του έργου, δηλαδή της κατασκευής του φράγματος για τη δημιουργία της τεχνητής λίμνης Ταυρωπού και κατ' επέκταση του υδροηλεκτρικού σταθμού, αφού διαπίστωσε δύο σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετώπιζε η περιοχή. Αρχικά οι περιοχές κατάντη του σημερινού φράγματος πλήττονταν από πλημμύρες λόγω των έντονων βροχοπτώσεων στην ευρύτερη τοποθεσία της λεκάνης απορροής Ταυρωπού, ενώ από την άλλη πλευρά υπήρχε σοβαρή έλλειψη νερού στην τεράστια γεωργική έκταση του Θεσσαλικού κάμπου.

Για το πρώτο πρόβλημα αρκούσε η κατασκευή ενός φράγματος που θα συγκρατούσε τα νερά, όμως για το δεύτερο πρόβλημα έπρεπε να μετακινηθεί το υδάτινο δυναμικό του ποταμού Μέγδοβα (παραπόταμος του Αχελώου) από την δυτική Στερεά Ελλάδα, όπου και πλεόναζε, στην ανατολική Ελλάδα με σκοπό να εμπλουτίσει τον Θεσσαλικό κάμπο. Αν και η αρχική ιδέα του Πλαστήρα χρονολογείται από το 1925, η μετουσίωσή της πραγματοποιείται περίπου 30 χρόνια αργότερα, όταν ξεκινά τελικά η κατασκευή του φράγματος και του σταθμού.

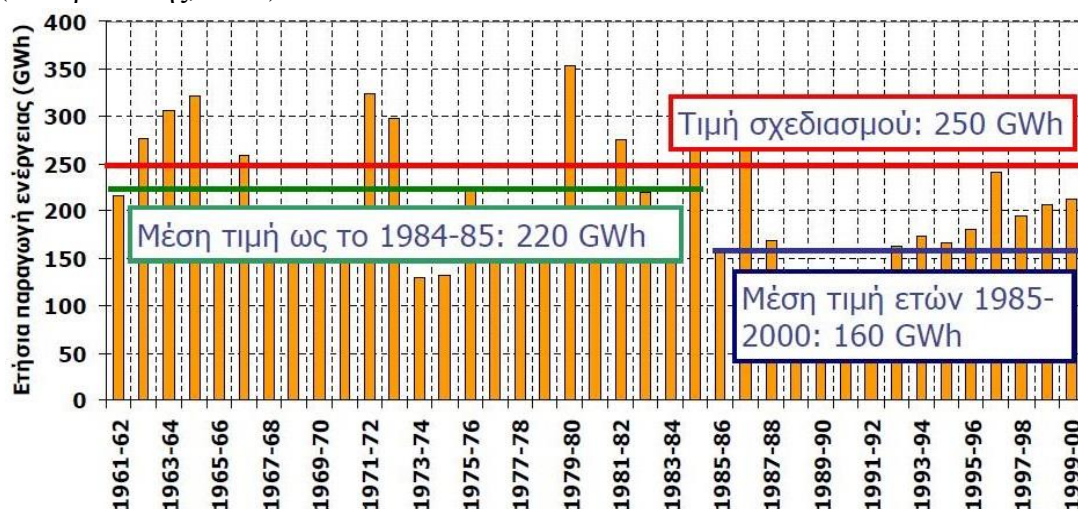
Η έμπνευση αποδείχθηκε μεγαλοφυής, καθώς ένας μεγάλος υδάτινος όγκος που, υπό άλλες συνθήκες, θα εξέβαλλε στο Ιόνιο χωρίς να αξιοποιηθεί ιδιαίτερα, επιδρά πλέον καθοριστικά στην οικονομία και ανάπτυξη του Νομού Καρδίτσας μέσω της εκτροπής των υδάτων του ποταμού Μέγδοβα προς το Θεσσαλικό κάμπο. Ως αποτέλεσμα υδρεύονται περίπου 90.000 νοικοκυριά του νομού και αρδεύονται περίπου 230.000 στρέμματα στο Θεσσαλικό κάμπο.

Η κατασκευή του έργου ξεκίνησε το 1955 και ανατέθηκε στη γαλλική εταιρία Omnium Lyonnais-Coteci, ενώ τον έλεγχο και την επίβλεψη της διαδικασίας ανέλαβε

η ΔΕΗ με τεχνικό σύμβουλο την αμερικάνικη εταιρία Ebasco. Ο σταθμός παραγωγής αποτελείται από τρεις μονάδες οι οποίες τέθηκαν σε λειτουργία τον Οκτώβριο του 1960, τον Ιανουάριο του 1961 και τον Αύγουστο του 1962 αντίστοιχα. Επομένως η επίσημη έναρξη λειτουργίας του σταθμού τοποθετείται χρονικά το έτος 1962, ενώ οι τρεις μονάδες παράγουν συνολική ισχύ 129.9 MW (43.3 MW η καθεμία) και μέση ετήσια παραγωγή 198 GWh, όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα (Αρχείο ΥΗΣ Πλαστήρα, ΔΕΗ, 1955-1962).

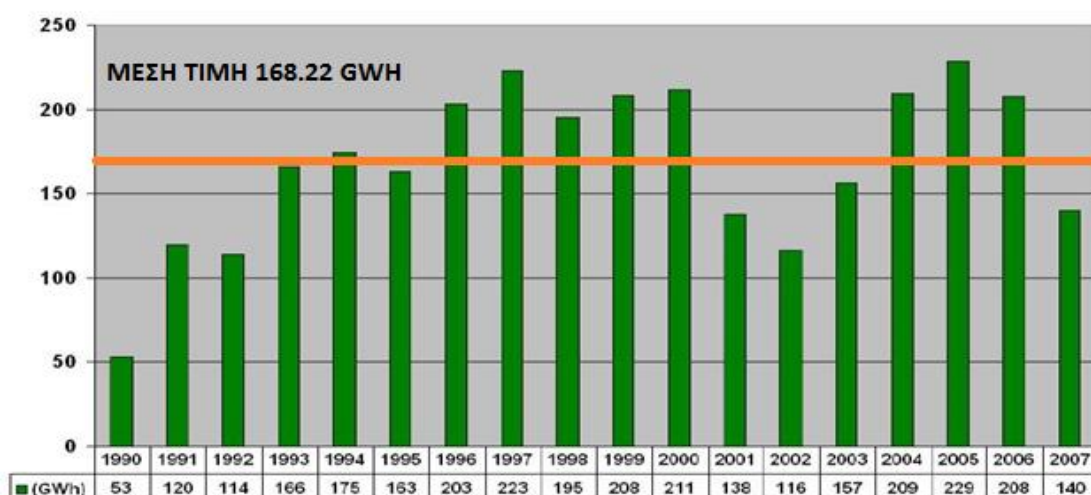
Το ύψος πτώσης του νερού ανέρχεται στα 577 μέτρα, ένα από τα μεγαλύτερα μανομετρικά ύψη σε ελληνικό υδροηλεκτρικό σταθμό, καθώς μόνο το υδροηλεκτρικό εργοστάσιο των Πηγών Αώου στο νομό Ιωαννίνων διαθέτει μεγαλύτερο ύψος υδατόπτωσης (675 μέτρα). Ο σταθμός είναι υπέργειος και υπαίθριος, ενώ σε κάθε μια από τις τρεις μονάδες του περιλαμβάνονται δύο στρόβιλοι τύπου Pelton οριζόντιου άξονα με τέσσερα ακροφύσια (δύο ανά στρόβιλο, όπου το ένα είναι υπέργειο, ενώ το άλλο υπόγειο) και δύο έδρανα στήριξης του άξονα. Τα έδρανα ολίσθησης χρησιμοποιούνται εδώ με σοβαρά πλεονεκτήματα έναντι των εδράνων κύλισης και κάθε μονάδα τροφοδοτείται με ογκομετρική παροχή περίπου $8.8 m^3/s$ (η μέγιστη δεν ξεπερνά τα $9.6 m^3/s$).

Με το πέρασμα των ετών η μέση υδροηλεκτρική παραγωγή υπέστη ορισμένες διακυμάνσεις. Πιο συγκεκριμένα, ενώ η αρχική τιμή σχεδιασμού της μονάδας ανερχόταν στις 250 GWh, παρατηρείται ότι η μέση τιμή μέχρι την περίοδο 1984-85 αγγίζει τις 220 GWh, ενώ κατά την περίοδο 1985-2000 πέφτει στις 160 GWh. Συνεπώς οι 198 GWh που έχουν χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία αποτελούν έναν σταθμισμένο μέσο όρο της υδροηλεκτρικής παραγωγής από τότε που ξεκίνησε η λειτουργία της μονάδας μέχρι και σήμερα. Τα διαγράμματα 31 και 32 απεικονίζουν τις μεταβολές της παραγωγικής δυναμικότητας του σταθμού και συγκεκριμένα με την πάροδο των ετών, διαπιστώνεται μια υποβάθμιση της ποσότητας, αλλά και της οικονομικής αξίας της παραγόμενης ενέργειας, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι ο χαρακτήρας του έργου έχει μετατραπεί από ενεργειακός σε αρδευτικός (Ευστρατιάδης, 2006).



Εικόνα 31: Ετήσια παραγωγή ενέργειας (GWh) κατά την περίοδο 1962-2000.
 Ανάκτηση από: Ευστρατιάδης Α., Υδρολογική διερεύνηση λειτουργίας ταμιευτήρα Πλαστήρα, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2006.

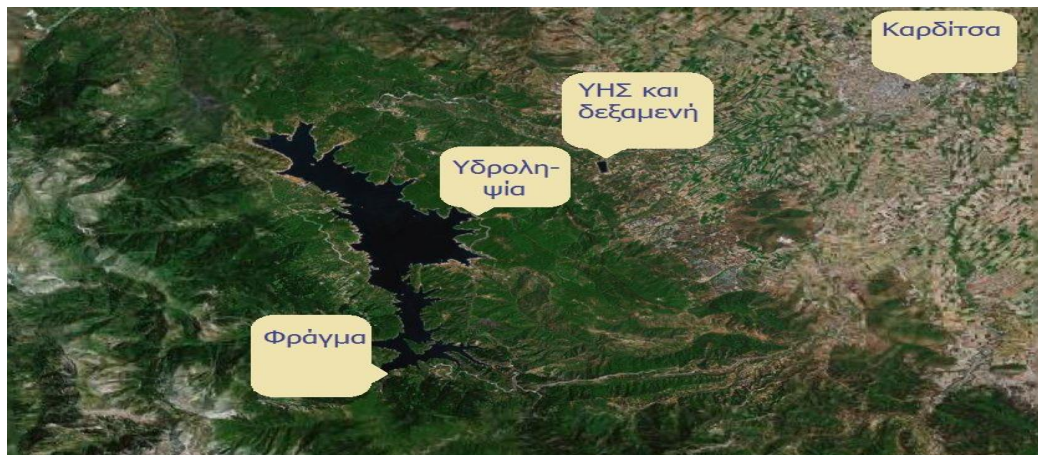
ΥΗΣ Ν. Πλαστήρα: Ετήσια παραγωγή περιόδου 1990-2007 (GWh)



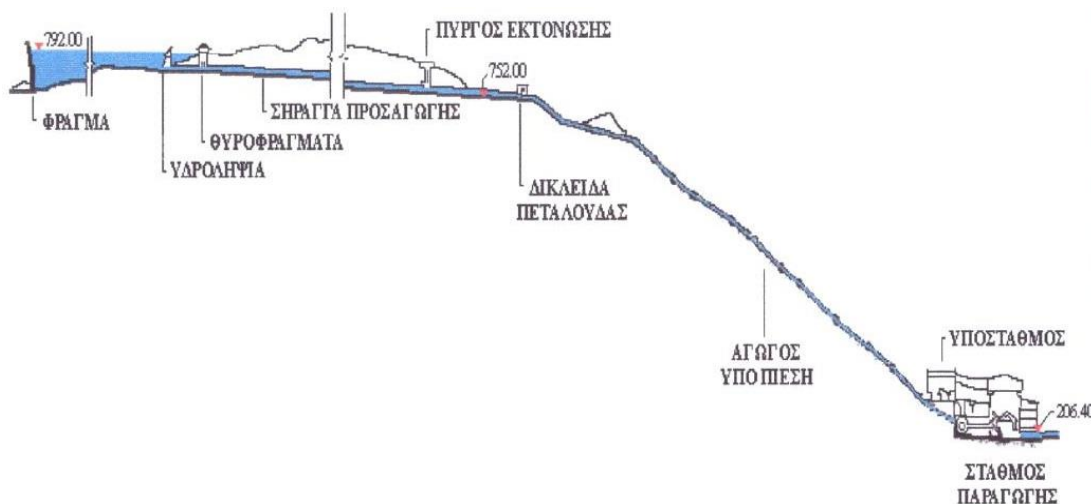
Εικόνα 32: Ετήσια παραγωγή ενέργειας (GWh) κατά την περίοδο 1990-2007.
 Ανάκτηση από: Λέρης Γ., Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ, 2007 (κατόπιν επεξεργασίας).

Τέλος να τονιστεί εδώ πως όλες οι εργασίες που αφορούν όλους τους χειρισμούς στον υδροηλεκτρικό σταθμό καθορίζονται από τον θάλαμο (αίθουσα) ελέγχου. Οτιδήποτε είναι εγκατεστημένο μέσα σε ένα σταθμό και χρήζει άμεσης, επείγουσας επιτήρησης και έλεγχου, διαθέτει αισθητήρες που ενσύρματα μεταφέρουν την πληροφορία στην αίθουσα ελέγχου, είτε υπό τη μορφή σήματος, ενδεικτικού οργάνου ή χειριστηρίου. Η αίθουσα οργανώνεται, με δύο βασικές απαιτήσεις, δηλαδή την απaráβατη ασφάλεια των χειρισμών και την διευκόλυνση της καθημερινότητας του χειριστή. Η αίθουσα πάντα έχει μεγάλο εμβαδό, ώστε να μπορεί να φιλοξενήσει αρκετά άτομα κατά την περίοδο δοκιμών στη φάση εγκατάστασης, παράδοσης (commissioning) και συντήρησης του σταθμού.

Σημαντικό είναι πως για τη διευκόλυνση της εργασίας του χειριστή, όλα τα χειριστήρια και οι ενδείξεις, είναι οργανωμένα κατά ενότητες, με συγκεκριμένους χρωματισμούς, ώστε να ομαδοποιούν με εργονομικό τρόπο κατά το βέλτιστο, τη ροή των χειρισμών εργασιών και να διασφαλίζουν ότι η πιθανότητα λάθους χειρισμού είναι η ελάχιστη δυνατή (Τσιακανίκας, 2017). Παρακάτω γίνεται ειδική αναφορά στα κύρια μέρη που αποτελούν αυτό το υδροηλεκτρικό συγκρότημα, ενώ στις εικόνες 33 και 34 φαίνεται η χωροταξία της περιοχής και η διάταξη των βασικών μερών της εγκατάστασης.



Εικόνα 33: Χωροταξία φράγματος, υδροληψίας, σταθμού και Καρδίτσας στο χάρτη. Ανάκτηση από: Ευστρατιάδης Α., Υδρολογική διερεύνηση λειτουργίας ταμιευτήρα Πλαστήρα, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2006.



Εικόνα 34: Η διάταξη της εγκατάστασης του ΥΗΣ Πλαστήρα. Το νερό ξεκινά από το φράγμα και μέσω του αγωγού προσαγωγής καταλήγει στο σταθμό. Ανάκτηση από: Λέρης Γ., Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ, 2007.

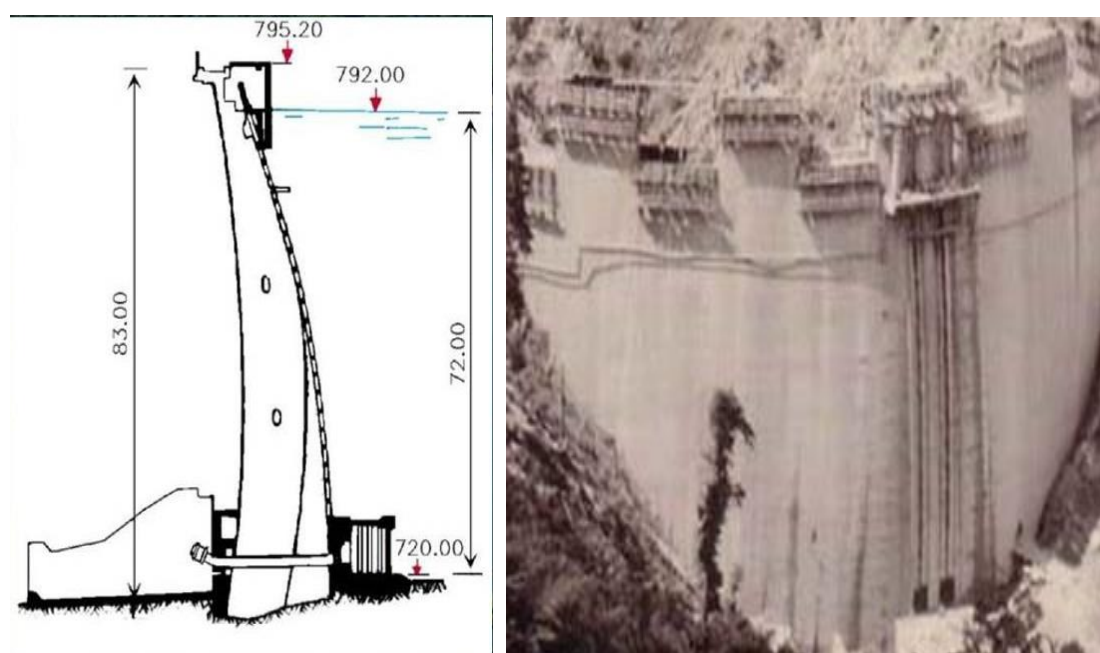
1.4.3.1. ΦΡΑΓΜΑ ΚΑΙ ΛΙΜΝΗ

Το πρώτο τμήμα της διάταξης αυτής είναι το φράγμα, το οποίο κτίστηκε με σκοπό να προστατεύσει τις γύρω περιοχές από τα φαινόμενα πλημμύρας, αλλά παράλληλα να συλλέγει τις υδάτινες μάζες που συσσωρεύονται, δημιουργώντας ουσιαστικά μια τεχνητή λίμνη, η οποία έλαβε και το όνομα του Νικολάου Πλαστήρα. Αποτελεί μια ιδιαίτερη κατασκευή και υπάγεται στην κατηγορία των διπλών τοξωτών φραγμάτων (ή αλλιώς διπλής καμπυλότητας). Πρόκειται για μια κατηγορία ιδιαίτερα απαιτητική κατασκευαστικά, αφού δίνεται πολύ μεγάλη έμφαση στον τρόπο δόμησης και σκυροδέτησης του φράγματος (Chen, 2015), το οποίο μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα (τεχνητή λίμνη) θα δεχθεί εξαιρετικά υψηλή υδροστατική πίεση.

Ο συγκεκριμένος τύπος φράγματος έχει λάβει αυτή την ονομασία επειδή το φράγμα διαθέτει τοξοειδή μορφή τόσο στον οριζόντιο, όσο και στον κατακόρυφο άξονα της κατασκευής του, κάτι το οποίο δεν συναντάται σε άλλο φράγμα στην Ελλάδα. Για την ανέγερσή του χρησιμοποιήθηκε οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ ο τύπος

του διπλού τοξωτού κρίθηκε ως ο καταλληλότερος, λόγω του γεωμορφολογικού αναγλύφου της περιοχής. Παρουσιάζοντας επιπρόσθετα στοιχεία για το φράγμα, αναφέρεται ότι πρόκειται για μια κατασκευή μήκους 220m, πλάτους 4m και ύψους 83m, ενώ η βάση του φράγματος βρίσκεται σε υψόμετρο 720m, η κορυφή του σε ύψος 795.2m και ο όγκος του ανέρχεται στα $100000m^3$.

Τα υψόμετρα αυτά υπολογίζονται ως συνάρτηση της απόστασης από την επιφάνεια της θάλασσας και για το λόγο αυτό περιγράφονται από τον όρο MAS (meter above sea level). Παρακάτω παρατίθεται μια εικόνα του φράγματος και των βασικών διαστάσεών του, καθώς και μια δεύτερη που δείχνει την πορεία των έργων πριν την ολοκλήρωση της κατασκευής (εικόνα 35).



Εικόνα 35: Σκαρίφημα τομής του φράγματος (αριστερά) και το φράγμα υπό κατασκευή (δεξιά). Ανάκτηση από:
<https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira01.pdf>.

Η διαρκής καταπόνηση που υφίσταται το φράγμα λόγω των υψηλών τάσεων, επιβάλλει τον τακτικό έλεγχο βασικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η πίεση και οι στρεβλώσεις, συνεπώς στο εσωτερικό του φράγματος υπάρχει κατάλληλος εξοπλισμός και μετρητικά όργανα που ενημερώνουν τους αρμόδιους για το αν οι τιμές των παραμέτρων κυμαίνονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Οι πληροφορίες αυτές συνδυάζονται αντίστοιχα και με ορισμένα δεδομένα για τη λίμνη, για την οποία είναι γνωστή η μέγιστη (792m), καθώς και η ελάχιστη (776m) στάθμη, ενώ πρέπει να τονιστεί ότι η επιφάνειά της καλύπτει μια έκταση $25.2km^2$ με χωρητικότητα $413 \times 10^6m^3$.

Η μέση ετήσια παροχή της λίμνης ανέρχεται σε $6.4m^3/s$, ενώ το εκμεταλλεύσιμο υδάτινο περιεχόμενο μπορεί να φτάσει και τα $300 \times 10^6m^3$. Αυτές οι ιδιαίτερα υψηλές τιμές του υδατικού δυναμικού αποδεικνύουν ότι η επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής για την κατασκευή του υδροηλεκτρικού συγκροτήματος

ήταν ιδιαίτερα εύστοχη, κάτι το οποίο οφείλεται βέβαια και στο γεγονός ότι η επιφάνεια της λεκάνης απορροής της λίμνης καλύπτει μια σημαντικά μεγάλη έκταση, ίση με 167km^2 . Ουσιαστικά η λεκάνη απορροής αποτελεί μια ηπειρωτική έκταση σε μορφή κοιλάματος μέσω της οποίας διοχετεύονται στον ταμιευτήρα όλες οι υδάτινες μάζες της βροχής ή άλλων παραποτάμιων πηγών (Γκίκας, 2018), δηλαδή γίνεται σαφές ότι μια πληθώρα υδατικών πηγών εκβάλλει στη λίμνη Πλαστήρα, παρέχοντας με τον τρόπο αυτό την πρώτη ύλη, δηλαδή το νερό, στη διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγής.

Παράλληλα κρίνεται απαραίτητο να δοθεί έμφαση και σε ορισμένες ασφαλιστικές διατάξεις που απαρτίζουν την εγκατάσταση του φράγματος και δρουν προστατευτικά σε συνθήκες μη ομαλής λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα που μπορεί να ανακύψουν, και πρέπει να έχει προβλεφθεί κατά το σχεδιασμό του φράγματος, αφορά στην υπερχειλίση του ταμιευτήρα, εξαιτίας των μεγάλων υδάτινων όγκων που ξεπερνούν τις δυνατότητες συγκράτησης αυτής της κατασκευής. Για το σκοπό αυτό, ανάλογα με τον τύπο του κάθε φράγματος, δημιουργούνται ειδικές διατάξεις που εκτονώνουν την περίσσεια του νερού και εξασφαλίζουν την απροβλημάτιστη απόρριψή του, ενώ οι βασικότεροι τύποι αυτών των κατασκευών είναι οι **υπερχειλιστές (spillway)**, οι **εκχειλιστές** και οι **εκκενωτές πυθμένα**.

Οι υπερχειλιστές, που συναντώνται και στο φράγμα Πλαστήρα, αποτελούνται από δύο διπλά ορθογωνικά στόμια διαστάσεων $7\text{m} \times 2.5\text{m}$, τα οποία βρίσκονται ελάχιστα κάτω από το μέγιστο ύψος (ύψος στέψης) του φράγματος (το υψόμετρο στην κορυφή τους ανέρχεται στα 792m), διαθέτουν μέγιστη χωρητικότητα $230\text{m}^3/\text{s}$ και αποσκοπούν στη μείωση της στάθμης της λίμνης, απορρίπτοντας τις ποσότητες του νερού κατάντη του φράγματος. Τονίζεται ότι ο όρος «κατάντη» αναφέρεται στην περιοχή μπροστά από το φράγμα (εκεί όπου δεν συναντώνται ποσότητες νερού), ενώ ο όρος «ανάντη» αναφέρεται στην περιοχή πίσω από το φράγμα (εκεί όπου βρίσκεται ο ταμιευτήρας).

Με παρόμοιο τρόπο δρουν και οι εκχειλιστές (δεν συναντώνται στο φράγμα Πλαστήρα, αλλά σε άλλα φράγματα), ωστόσο διαφοροποιούνται σε σχέση με τους υπερχειλιστές στο ότι κατασκευάζονται σε αρκετά χαμηλότερο υψόμετρο σε σχέση με το ύψος στέψης του φράγματος, ενώ, σε αντίθεση με τους υπερχειλιστές, παρέχουν τη δυνατότητα ρύθμισης των ποσοτήτων νερού που απορρίπτονται, κάτι το οποίο δεν καθίσταται εφικτό στους υπερχειλιστές. Τέλος, οι εκκενωτές πυθμένα βρίσκονται κοντά στη βάση του φράγματος και αποτελούν μια διάταξη που χρησιμοποιείται ως ύστατη λύση σε περιπτώσεις εκκένωσης του ταμιευτήρα.

Απαρτίζονται από έναν αγωγό, ο οποίος στην περίπτωση του ΥΗΣ Πλαστήρα διαπερνά το φράγμα (έχει δηλαδή ένα μήκος ίσο με το πάχος του φράγματος), ενώ διαθέτει στο σημείο έναρξής του (ανάντη του φράγματος) ένα μικρό θυρόφραγμα που αποτρέπει τη διέλευση του νερού όταν δεν απαιτείται εκκένωση. Αντίστοιχα στην απόληξή του (κατάντη του φράγματος) διαθέτει ειδικά σχεδιασμένη βαλβίδα εκτόνωσης (ονομάζεται βαλβίδα διασποράς ή κοίλης φλέβας, ζε-κρε), η οποία απορρίπτει τις ποσότητες του νερού που διαθέτουν υψηλή πίεση με τέτοιο τρόπο,

ώστε να μην επηρεάζεται η ακεραιότητα του φράγματος, καθώς οι υδάτινες μάζες εκτινάσσονται απότομα μόλις εξέλθουν από τη βαλβίδα, λόγω της υψηλής υδροστατικής πίεσης που διαθέτουν (Τσιακανίκας, 2017).



Εικόνα 36: Οι υπερχειλιστές του φράγματος Πλαστήρα σε λειτουργία. Ανάκτηση από: <https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira01.pdf>.



Εικόνα 37: Οι βαλβίδες εκτόνωσης (ζε-κρε) στο φράγμα του ΥΗΣ Πλαστήρα. Ανάκτηση από: <https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira02.pdf>.

1.4.3.2. ΑΓΩΓΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΟΥ (ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ ΚΑΙ ΠΥΡΓΟΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ, ΣΗΡΑΓΓΑ ΚΑΙ ΑΓΩΓΟΣ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ)

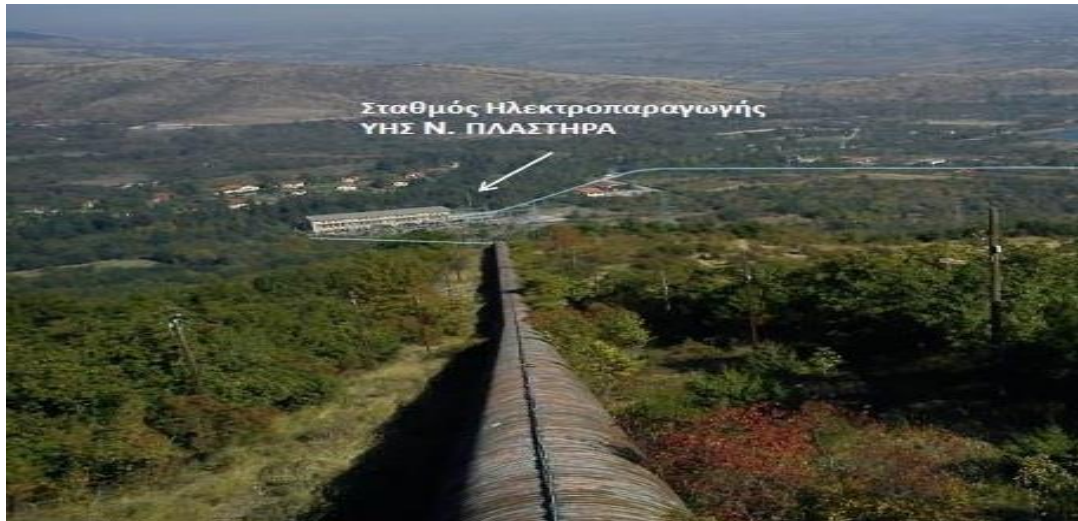
Ορισμένη από την ποσότητα του νερού που έχει συλλεχθεί, διέρχεται μέσω κάποιων ειδικών διατάξεων με σκοπό να φτάσει στο σταθμό και να αξιοποιηθεί για τις ανάγκες της υδροηλεκτρικής παραγωγής. Η υδροληψία είναι το πρώτο στάδιο από το οποίο ξεκινά η πορεία του νερού. Αποτελείται από τις δύο θύρες υδροληψίας διαστάσεων 2.8m x 3.5m τετραγωνικών μέτρων η καθεμία και καταλήγει στον αγωγό υδροληψίας διαμέτρου 3.5m και μήκους 41.55m. Κατόπιν η πορεία του νερού συνεχίζεται μέσα από τη σήραγγα προσαγωγής, έναν μεγάλο τσιμεντένιο αγωγό διαμέτρου 3.5m και μήκους 2622m, που μπορεί να δεχτεί παροχή νερού $35.2m^3/s$ με πτώση πίεσης της τάξης του 2%.

Ο πύργος εκτόνωσης, που συνδέεται με τη σήραγγα προσαγωγής, αποτελεί μια βοηθητική διάταξη και χρησιμεύει στην περίπτωση που η παροχή του νερού είναι υπερβολικά μεγάλη και απαιτείται μια διέξοδος διαφυγής του νερού, παρέχοντας με τον τρόπο αυτό μια ασφαλιστική δικλείδα στην όλη εγκατάσταση (εικόνα 40). Αποτελείται από έναν κατακόρυφο άξονα διαμέτρου 3.5m και ύψους 39.6m και καταλήγει σε έναν θάλαμο διαστολής διαμέτρου 17.4m, στον οποίο εκτονώνεται η περίσσεια της ποσότητας του νερού. Το τελευταίο στάδιο πριν την έλευση του νερού στο σταθμό είναι ο αγωγός προσαγωγής. Ουσιαστικά είναι ένας ογκώδης σωλήνας καταφορικής κλίσης που ωθεί το νερό προς το σταθμό.

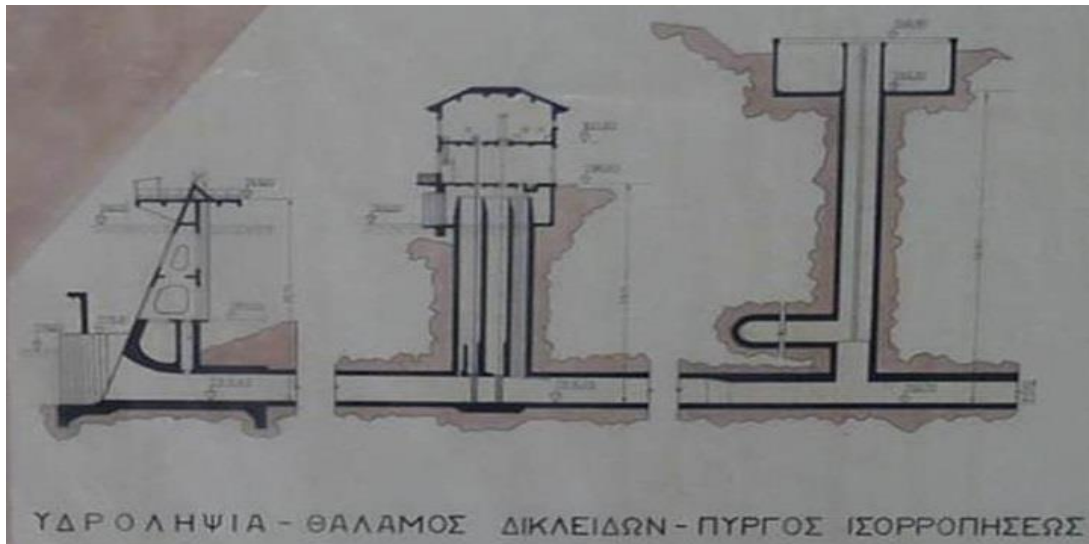
Καθώς μειώνεται το υψόμετρο, η εσωτερική διάμετρος του μειώνεται (δηλαδή αυξάνεται το πάχος των τοιχωμάτων του σωλήνα, με αρχική διάμετρο 3m, έπειτα 2.6m και τέλος 2.4m) και αυτό συμβαίνει επειδή για κάθε 10m καθόδου, η πίεση αυξάνεται κατά 1bar, άρα η πίεση του νερού πριν εισέλθει στο σταθμό είναι περίπου 58bar, διότι η υψομετρική διαφορά μεταξύ φράγματος και σταθμού είναι 577 m. Μια βαλβίδα τύπου πεταλούδας στην κορυφή του αγωγού καθορίζει τη διέλευση του νερού, ενώ η μέγιστη σχεδιασμένη παροχή υπολογίζεται στα $33.5m^3/s$. Το συνολικό του μήκος ανέρχεται στα 2985m, ενώ το συνολικό του βάρος αγγίζει τους 4900tn. Παρακάτω απεικονίζεται το σημείο υδροληψίας (εικόνα 38) , αλλά και μια λήψη από ένα ενδιάμεσο ύψος του αγωγού προσαγωγής (εικόνα 39).



Εικόνα 38: Το σημείο της υδροληψίας. Φαίνεται ο πύργος υδροληψίας (αριστερά) και ο πύργος με τα υποθαλάσσια θυροφράγματα (δεξιά). Ανάκτηση από: <https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira02.pdf>.



Εικόνα 39: Άποψη του σταθμού όπως φαίνεται από ένα ενδιάμεσο ύψος του αγωγού προσαγωγής. Ανάκτηση από: <https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira02.pdf>.



Εικόνα 40: Ο πύργος εκτόνωσης (ή ισορροπήσεως), μια σημαντική ασφαλιστική δικλείδα στην εγκατάσταση του συστήματος προσαγωγής. Ανάκτηση από: <https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira02.pdf>.

1.4.3.3. ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Ο σταθμός παραγωγής είναι ο υπέργειος χώρος στον οποίο καταλήγει τελικά η πορεία του νερού και εκεί πραγματοποιείται η υδροηλεκτρική παραγωγή. Αφού το νερό εγκαταλείψει τον αγωγό προσαγωγής, διέρχεται μέσω υπόγειων αγωγών κάτω από το σταθμό και καταλήγει στις 3 μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Οι μονάδες βρίσκονται στο εσωτερικό του σταθμού και είναι θολωτές κατασκευές, οι οποίες αποτελούνται από 3 βασικά τμήματα, δηλαδή τα ακροφύσια μαζί με τους τροχούς Pelton, τα έδρανα και τη γεννήτρια. Αναφορικά με τις διαστάσεις του σταθμού, πρόκειται για μια αίθουσα μήκους περίπου 72m, πλάτους περίπου 17m και ύψους περίπου 18m.



Εικόνα 41: Άποψη του εσωτερικού του σταθμού. Διακρίνονται οι μονάδες της ηλεκτροπαραγωγής. Ανάκτηση από: Λέρης Γ., Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ, 2007.

Τονίζεται στο σημείο αυτό ότι συνήθως οι όροι «σταθμός» και «μονάδα» συγχέονται και ενίοτε χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την ίδια έννοια. Ουσιαστικά ο όρος «σταθμός» περιγράφει το κτήριο του σταθμού παραγωγής, ενώ ο όρος «μονάδα» περιγράφει μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, ωστόσο ορισμένες φορές χρησιμοποιείται με τη σημασία του σταθμού παραγωγής. Εφεξής, στην παρούσα εργασία τηρείται η διάκριση μεταξύ των δύο όρων, ώστε να αποφευχθούν τυχόν παρερμηνείες.

Στην εικόνα 41 διακρίνεται το εσωτερικό του σταθμού παραγωγής, όπου διακρίνονται οι μονάδες της ηλεκτροπαραγωγής (θολωτές διατάξεις), καθώς επίσης και τα ακροφύσια των μονάδων (αγωγοί που καταλήγουν στο εσωτερικό των θολωτών κατασκευών), ενώ φαίνονται και οι βελόνες των ακροφυσίων (υπό γωνία εξογκώματα που βρίσκονται στην κορυφή των ακροφυσίων), η σημασία των οποίων εξηγείται στη συνέχεια.

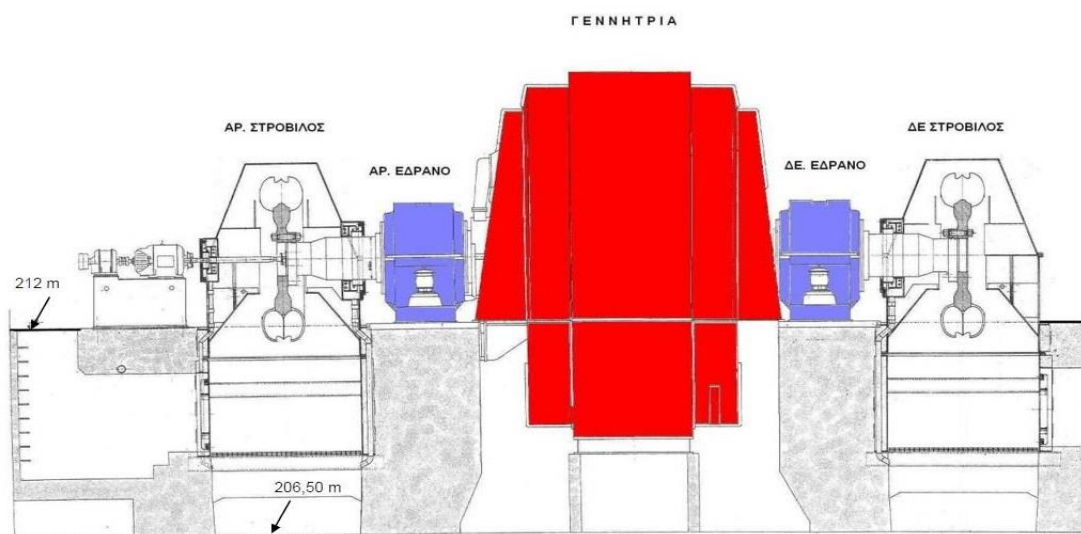
Αναλυτικότερα τα ακροφύσια είναι αγωγοί εντός των οποίων κυκλοφορεί με μεγάλη πίεση το νερό που φθάνει στο σταθμό και στο τέλος τους έχουν μια ειδική απόληξη που μειώνει τη διατομή από την οποία περνά το νερό, αυξάνοντας παράλληλα την ταχύτητά του. Το νερό που εγχύεται από τα ακροφύσια χτυπά τον τροχό Pelton και έτσι η υδάτινη αυτή ποσότητα εκτοξεύεται από τα ακροφύσια στα σκαφίδια του τροχού, αναγκάζοντάς τον να περιστραφεί. Ομοαξονικά με τον υδροστρόβιλο Pelton υπάρχει μαγνητικά συζευγμένη γεννήτρια, η οποία είναι υπεύθυνη για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Όπως έχει προαναφερθεί, κάθε μονάδα αποτελείται από δύο τροχούς Pelton οριζόντιου άξονα, σε καθέναν από τους οποίους αντιστοιχούν 2 ακροφύσια (ένα υπόγειο και ένα υπέργειο) και μια γεννήτρια, ενώ ενδιάμεσα υπάρχουν οι διατάξεις των εδράνων με σκοπό τη λίπανση του άξονα του τροχού και της γεννήτριας, καθώς και των λοιπών βοηθητικών μηχανισμών. Στη συνέχεια παρατίθεται εικόνα μιας από τις μονάδες της ηλεκτροπαραγωγής, όπου απεικονίζεται η διάταξή της.

Η μεγαλύτερη θολωτή κατασκευή φιλοξενεί στο εσωτερικό της τη γεννήτρια που παράγει την ηλεκτρική ενέργεια, ενώ εντός της μικρότερης θολωτής κατασκευής βρίσκεται ο τροχός Pelton (αυτό επιβεβαιώνεται και από την παρουσία του σωλήνα του ακροφυσίου στα αριστερά της εικόνας). Ανάμεσα στους δύο θόλους βρίσκεται το έδρανο λίπανσης, ενώ πίσω από τη γεννήτρια (μη ορατό στην εικόνα 42, αλλά διακρίνεται στο σκαρίφημα της εικόνας 43), βρίσκεται συμμετρικά άλλο ένα έδρανο και ένας τροχός Pelton. Κάτω από το επίπεδο της αίθουσας βρίσκονται (κατ' αντιστοιχία με τα υπέργεια) και τα δύο υπόγεια ακροφύσια, η πρόσβαση των οποίων επιτυγχάνεται μέσω ανοιγμάτων στο έδαφος και κλιμάκων (σκάλες), ώστε να καθίσταται εφικτή η επιθεώρηση και η τακτική συντήρησή τους.



Εικόνα 42: Άποψη από το εσωτερικό του σταθμού όπου απεικονίζεται η διάταξη μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής. Ανάκτηση από: Λέρης Γ., Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ, 2007.

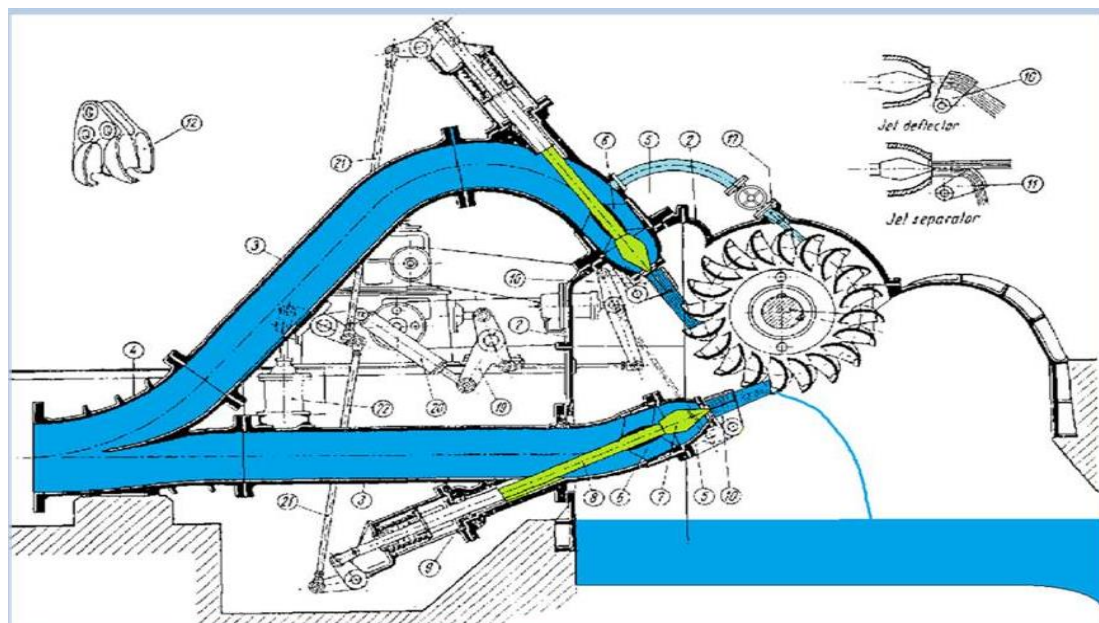


Εικόνα 43: Σκαρίφημα της διάταξης μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής σε τομή. Διακρίνονται οι στρόβιλοι Pelton, τα έδρανα και η γεννήτρια. Ανάκτηση από: <https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira01.pdf>.

Όπως έχει προαναφερθεί, η συνολική παραγόμενη ισχύς είναι 129.9MW και η μέση ογκομετρική παροχή σε κάθε μονάδα είναι $8.8m^3/s$, ενώ η μέγιστη δεν ξεπερνά τα $9.6m^3/s$. Κλείνοντας αυτή την ενότητα, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν και κάποια πιο εξειδικευμένα στοιχεία. Συγκεκριμένα, επισημαίνεται ότι ο τροχός Pelton είναι μια ιδιαίτερα ογκώδης και βαριά κατασκευή καθώς η διάμετρος του φτάνει τα 2498.5mm, το πλάτος του τα 571mm, ωστόσο το χαρακτηριστικό στοιχείο είναι το βάρος του, καθώς, μετά την προσθήκη των 21 σκαφιδίων, ζυγίζει περίπου 4.6tn. Βέβαια η διάταξη αυτή δέχεται πολύ υψηλές πιέσεις κατά την έγχυση του νερού από τα ακροφύσια, συνεπώς γίνεται κατανοητός ο λόγος που επιβάλλεται ένα τέτοιο μέγεθος.

Ο τροχός (αλλιώς ονομάζεται και στροφείο) είναι κατασκευασμένος από ειδικό κράμα ανοξείδωτου χάλυβα (περιεκτικότητα 13% σε χρώμιο) και περιστρέφεται με μια ταχύτητα 500rpm (δηλαδή 52.36rad/s), ενώ σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης υπάρχει σύστημα πέδησης που επενεργεί υδραυλικά και είναι ανάποδα τοποθετημένο σε σχέση με τη φορά περιστροφής του τροχού. Το σύστημα αυτό επιτυγχάνει την πλήρη ακινητοποίηση του τροχού (από τα 500rpm στα 0rpm) μέσα σε 5min.

Τέλος, αναφορικά με το εσωτερικό του ακροφυσίου υπογραμμίζεται πως για διάμετρο 595mm και μέγιστη παροχή ανά ακροφύσιο $2.4m^3/s$ (το 25% της μέγιστης παροχής για μια μονάδα, δηλαδή το $9.6m^3/s$, αφού κάθε μονάδα απαρτίζεται από 4 ακροφύσια) προκύπτει μια μέγιστη ταχύτητα $8.65m/s$, ενώ ένας ειδικός μηχανισμός, η βελόνα του ακροφυσίου κινείται παλινδρομικά εντός του ακροφυσίου και αυξομειώνει την παροχή του νερού, ανάλογα με τις ανάγκες της υδροηλεκτρικής παραγωγής.



Εικόνα 44: Σκαρίφημα της διάταξης των ακροφυσίων και του τροχού Pelton. Διακρίνεται και το σύστημα πέδησης του τροχού, καθώς και οι βελόνες (πράσινο χρώμα) των ακροφυσίων. Ανάκτηση από:

<https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira02.pdf>.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΤΥΠΟΥ PELTON

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται μια αναλυτικότερη περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και συγκεκριμένα παρουσιάζονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια δεδομένα που αφορούν τις σχεδιαστικές και γεωμετρικές μεταβλητές των συστημάτων αυτών. Σκοπός είναι να κατανοηθεί ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάζεται μια τέτοια μονάδα, καθώς επίσης και τα σημεία τα οποία χρήζουν προσοχής όταν τελικά τεθεί σε λειτουργία η διάταξη που μελετάται.

Ωστόσο, η παρούσα εργασία βασίζεται στη μελέτη του υδροηλεκτρικού σταθμού (ΥΗΣ) Πλαστήρα, δηλαδή ενός υπαρκτού έργου με πολλά χρόνια συνεχούς λειτουργίας και ανεπτυγμένη τεχνογνωσία αναφορικά με την αντιμετώπιση λειτουργικών προβλημάτων. Επομένως, στην προκειμένη περίπτωση η ενότητα αυτή επιχειρεί να προβάλλει το απαιτητικό έργο και τις προκλήσεις που αντιμετώπισαν και τελικά έφεραν εις πέρας οι μηχανικοί κατά την περίοδο της κατασκευής του υδροηλεκτρικού συγκροτήματος, ενώ παράλληλα μπορεί να αποτελέσει και μια χρήσιμη πηγή πληροφοριών για παρόμοια μελλοντικά έργα.

2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

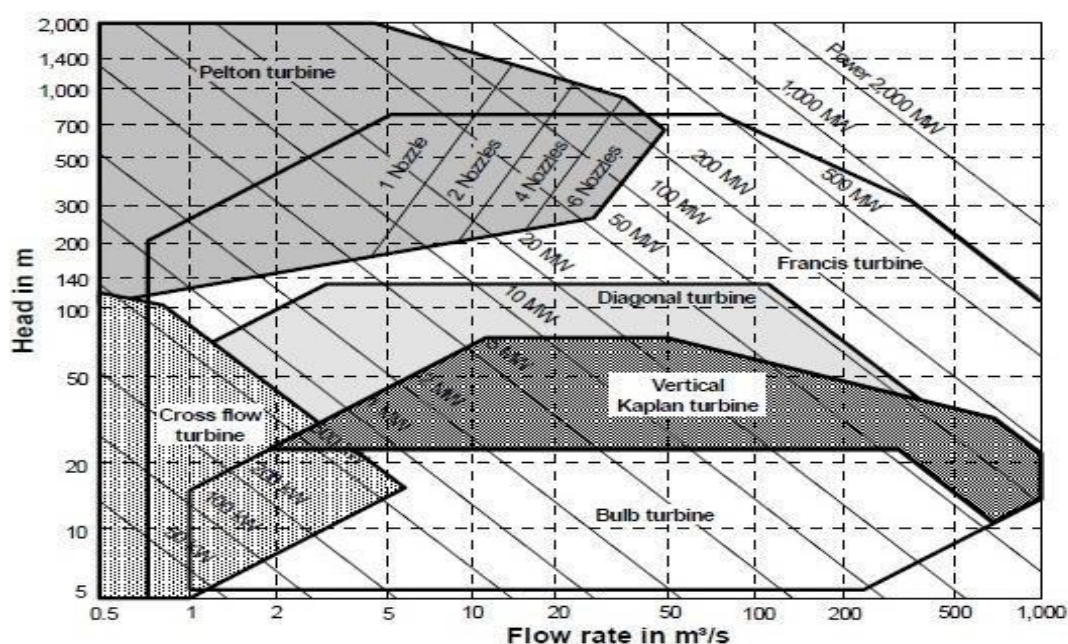
Ο υπολογισμός του συνολικού βαθμού απόδοσης της μονάδας αποτελεί μια από τις βασικότερες παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά το σχεδιασμό. Γνωρίζοντας ότι σε γενικές γραμμές οι υδροστροβίλοι όλων των τύπων αναπτύσσουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης, κρίνεται απαραίτητη η σωστή επιλογή ορισμένων μεταβλητών που συνδυαστικά οδηγούν στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Πιο αναλυτικά ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσης δίνεται από την εξίσωση $P = n \times \rho \times g \times Q \times H$. Ο ακόλουθος πίνακας εξηγεί τη σημασία των παραπάνω μεγεθών. Η μελέτη που γίνεται αφορά και στις τρεις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και τελικά προκύπτει μια απόδοση περίπου ίση με 87% (πίνακας 4 με έντονη γραφή) (Dixon & Hall, 2014; Oo et al., 2019).

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΤΙΜΗ
$P [=]$ MW	Παραγόμενη Ισχύς	3X43.3
$\rho [=]$ kg/m^3	Πυκνότητα	1000
$g [=]$ m/s^2	Επιτάχυνση βαρύτητας	9.81
$Q [=]$ m^3/s	Ογκομετρική Παροχή	3X8.8
$H [=]$ m	Μανομετρικό ύψος	577
n (αδιάστατο)	Βαθμός Απόδοσης	87%

Πίνακας 4: Μεγέθη υπολογισμού βαθμού απόδοσης. Ανάκτηση από: Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, Dixon S., Hall C., 7th edition, Elsevier, 2014 (κατόπιν επεξεργασίας).

2.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΤΥΠΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Η διαδικασία για τον προσδιορισμό του κατάλληλου τύπου στροβίλου ακολουθεί μια τυποποιημένη σειρά ενεργειών, όπου λαμβάνονται υπ' όψιν συγκεκριμένες μεταβλητές και παράμετροι. Αρχικά είναι απαραίτητη η γνώση των μεγεθών της ογκομετρικής παροχής, του μανομετρικού ύψους, αλλά και της συνολικής παραγόμενης ισχύος (McLean & Kearney, 2014; Oo et al., 2019). Έπειτα, η επιλογή της κατάλληλης στροβιλομηχανής γίνεται εύκολα με τη βοήθεια του διαγράμματος της εικόνας 45. Στην εξεταζόμενη περίπτωση σωστή επιλογή αποτελεί ο υδροστρόβιλος Pelton, λόγω του μεγάλου διαθέσιμου μανομετρικού ύψους, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από τη χρήση του στον υδροηλεκτρικό σταθμό Πλαστήρα.



Εικόνα 45: Προσδιορισμός κατάλληλου τύπου στροβίλου. Ανάκτηση από: https://www.researchgate.net/figure/Turbine-Selection-Chart-5_fig3_260043890.

2.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ (Ω) ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ (Ω_{sp})

Ο καθορισμός της ταχύτητας περιστροφής Ω και της ειδικής ταχύτητας περιστροφής Ω_{sp} αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση κατά το σχεδιασμό του υδροστροβίλου, καθώς αυτοί οι υπολογισμοί επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό κινηματικά στοιχεία της διάταξης, όπως την έγχυση του νερού από το ακροφύσιο, αλλά και ηλεκτρομηχανολογικά στοιχεία που σχετίζονται με την απόκριση του συστήματος υπό πλήρες ή μερικό φορτίο σε συνδυασμό με την επιλογή του κατάλληλου τύπου γεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής είναι αυτή με την οποία περιστρέφεται το στροφέιο του Pelton, ενώ η ειδική ταχύτητα περιστροφής είναι συναφές μέγεθος, αλλά έχει ως βάση αναφοράς την ισχύ. Ορισμένα εισαγωγικά στοιχεία για τις έννοιες αυτές έχουν δοθεί και στην παράγραφο 1.3.4, σύμφωνα με την οποία ο στρόβιλος Pelton λειτουργεί αποδοτικά για ένα εύρος της ειδικής ταχύτητας περιστροφής Ω_{sp} που κυμαίνεται μεταξύ 0.05 και 0.4 rad (Dixon & Hall,

2014). Η ταχύτητα περιστροφής (rad/s) συνδέεται με την ειδική ταχύτητα περιστροφής ως εξής:

$$\Omega_{sp} = \frac{\Omega \times \left(\frac{P}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}}{(g \times H)^{\frac{5}{4}}} \quad (3)$$

Γνωρίζοντας όλα τα μεγέθη και θεωρώντας μια ειδική ταχύτητα περιστροφής περίπου 0.2rad προκύπτει ταχύτητα Ω 47.19rad/sec ή 450rpm. Να τονιστεί εδώ ότι στους υπολογισμούς δε βάζουμε τη συνολική ισχύ των 129.9 MW, αλλά αυτή των 43.3MW (ανά μονάδα ηλεκτροπαραγωγής δηλαδή), αφού εξ ορισμού πρέπει να χρησιμοποιηθεί η ισχύς της ατράκτου. Συγκρίνοντας με τα δεδομένα του σταθμού Πλαστήρα, η ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ο τροχός είναι λίγο μεγαλύτερη, δηλαδή $\Omega=500\text{rpm}$, άρα με την αντίστροφη διαδικασία προκύπτει $\Omega_{sp}=0.222$ rad. Τέλος, κρίνεται σκόπιμο να γίνει και μια σύντομη αναφορά στην αλληλεξάρτηση μεταξύ της Ω και του αριθμού των πόλων της γεννήτριας P_o .

Πιο συγκεκριμένα ισχύει η εξίσωση $P_o = \frac{120 \times f}{\Omega}$, όπου f είναι η συχνότητα του δικτύου που μετράται σε Hz και στην Ευρώπη είναι ίση με 50Hz, ενώ στην Αμερική είναι 60Hz. Αν υποθεθεί $\Omega = 450\text{rpm}$, τότε προκύπτει $P_o = 13.33$ (άρα αριθμός πόλων 14), ενώ για $\Omega = 500\text{rpm}$, τότε προκύπτει $P_o = 12$, κάτι το οποίο ισχύει για τη γεννήτρια του σταθμού Πλαστήρα. Ο πίνακας 5 παρέχει ορισμένες πληροφορίες αναφορικά με την ταχύτητα περιστροφής Ω , τις συχνότητες του δικτύου και τον αριθμό των πόλων (Minn et al., 2014; Oo et al., 2019).

Number of poles (P_o)	Frequency		Number of poles (P_o)	Frequency	
	50 Hz	60 Hz		50 Hz	60 Hz
2	3000	3600	16	375	450
4	1500	1800	18	333	400
6	1000	1200	20	300	360
8	750	900	22	272	327
10	600	720	24	250	300
12	500	600	26	231	277
14	428	540	28	214	257

Πίνακας 5: Δεδομένα για την ταχύτητα περιστροφής Ω ως συνάρτηση των συχνοτήτων και του αριθμού των πόλων της γεννήτριας.

Ανάκτηση από:

<http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131>.

2.4 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΣΚΑΦΙΔΙΟΥ

Στις προηγούμενες ενότητες εξετάστηκαν ορισμένες έννοιες που αφορούν γενικότερα χαρακτηριστικά του υδροτροβίλου. Πλέον η μελέτη εξειδικεύεται στους σχεδιαστικούς και γεωμετρικούς υπολογισμούς που αφορούν στα σκαφίδια του στροφείου Pelton, τα οποία αποτελούν βασικότατα μέρη της διάταξης, όχι μόνο για τον καίριο ρόλο που διαδραματίζουν στη διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγής, αλλά

κυρίως για την καταπόνηση που υφίστανται κατά την έγχυση του νερού και η οποία επιβάλλει μια επιπρόσθετη απαίτηση, αυτή της αυξημένης αντοχής στον ήδη περίτεχνο σχεδιασμό τους.

2.4.1 ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΚΥΚΛΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΠΙΔΑΚΑ (ΔΕΣΜΗΣ) ΝΕΡΟΥ

Η διάμετρος κύκλου βήματος του υδροστροβίλου Pelton αποτελεί ένα σημαντικό γεωμετρικό μέγεθος στο οποίο βασίζονται αρκετοί υπολογισμοί που αφορούν την κινηματική της υπό μελέτη διάταξης. Αρχικά ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο αντιδιαμετρικά τοποθετημένων σκαφιδίων ή απλούστερα μπορεί να υπολογιστεί η αντίστοιχη ακτίνα μετρώντας από το κέντρο του άξονα περιστροφής του τροχού Pelton μέχρι το κέντρο οποιουδήποτε σκαφιδίου (Nigussie et al., 2017). Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διαμέτρου είναι της μορφής:

$$u = \frac{\pi \times D \times \Omega}{60} \quad (4),$$

όπου D είναι η διάμετρος κύκλου βήματος των σκαφιδίων (σε m), και u είναι η εφαπτομενική ταχύτητα του τροχού (σε m/s). Η εφαπτομενική ταχύτητα στις περισσότερες εφαρμογές είναι θεωρητικά ίση με $0.5 \times V_1$ ενώ στην πράξη υπάρχει μια διόρθωση και ισούται με $0.46 \times V_1$, όπου V_1 η ταχύτητα της δέσμης του νερού πριν προσκρούσει στα σκαφίδια.

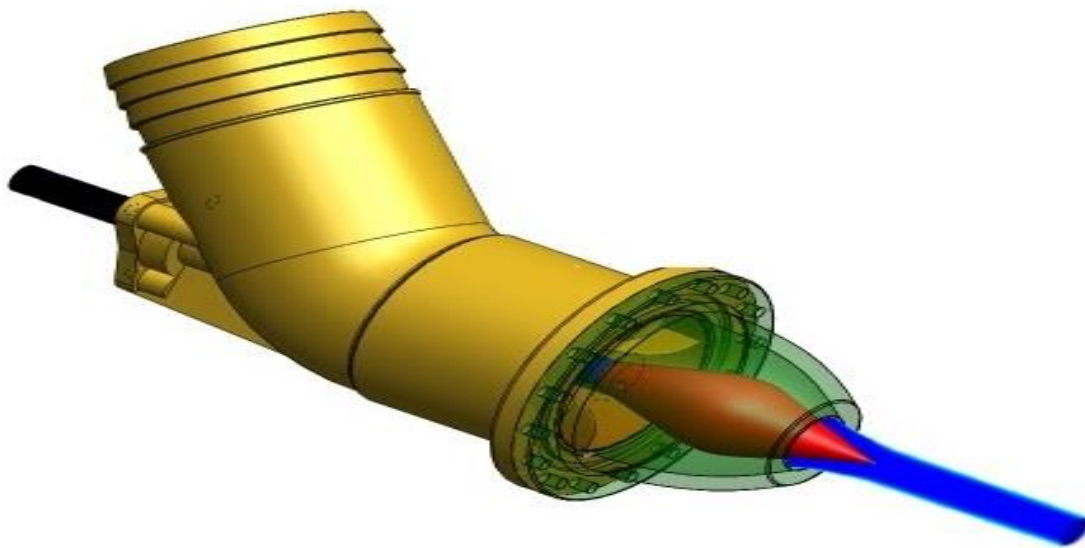
Η V_1 ισούται θεωρητικά με $\sqrt{2 \times g \times H}$, ενώ στην πράξη η σχέση διαφοροποιείται και λαμβάνει τη μορφή $C_v \times \sqrt{2 \times g \times H}$ όπου C_v ένας διορθωτικός συντελεστής ταχύτητας με τιμές μεταξύ 0.97 και 0.99 (στην παρούσα εργασία λαμβάνεται ίσος με 0.985) και H το μανομετρικό ύψος σε m. Πραγματοποιώντας τους μαθηματικούς υπολογισμούς (για $\Omega = 450\text{rpm}$) προκύπτει διάμετρος κύκλου βήματος ίση με 2.046m ή 2046mm. Συγκρίνοντας με τα δεδομένα του σταθμού Πλαστήρα δεν παρατηρείται ιδιαίτερη απόκλιση (η διάμετρος κύκλου βήματος εκεί ισούται με 2040mm), ωστόσο τονίζεται ότι οι γωνιακές ταχύτητες Ω είναι διαφορετικές, ενώ για $\Omega = 500\text{rpm}$ ισχύει $D = 1842\text{mm}$, κάτι που οφείλεται στο ότι οι εξισώσεις υπολογισμού που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία έχουν προσεγγιστικό χαρακτήρα.

Ένα επιπρόσθετο γεωμετρικό μέγεθος που επιδρά στο σχεδιασμό των σκαφιδίων είναι η διάμετρος πίδακα (δέσμης) του νερού, η οποία καθορίζει την ποσότητα του νερού που εγχύεται στα σκαφίδια, επομένως συνδέεται άρρηκτα και με την παροχή του νερού, αλλά και με την πίεση που ασκείται σε αυτά. Η εξίσωση από την οποία λαμβάνεται η διάμετρος δέσμης εξάγεται με τη βοήθεια της εξίσωσης της συνέχειας και είναι της μορφής:

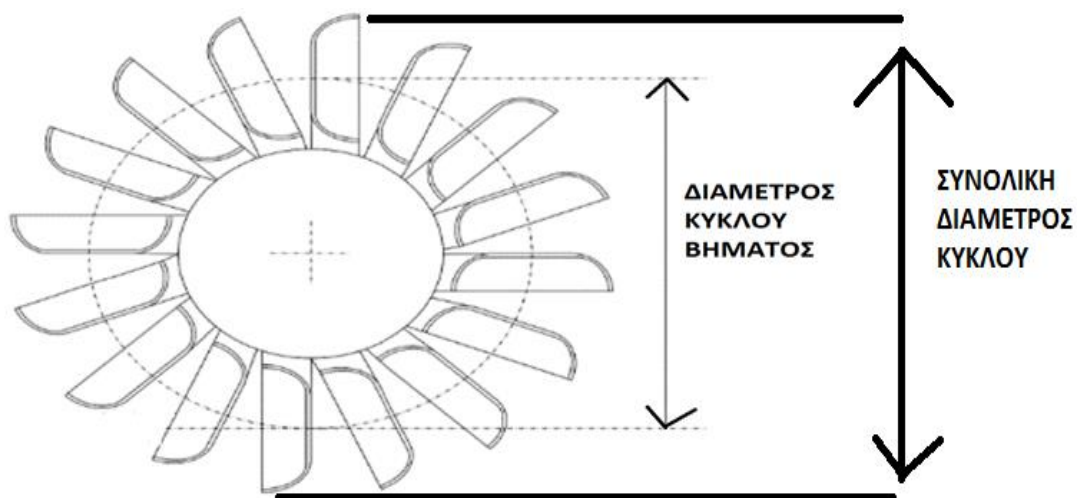
$$Q = \frac{\pi \times d_o^2}{4} \times Z_o \times C_v \times \sqrt{2 \times g \times H} \quad (5),$$

όπου Q η ογκομετρική παροχή (σε m^3/s), Z_o ο αριθμός των ακροφυσίων και d_o η διάμετρος δέσμης (σε mm). Πριν πραγματοποιηθούν οι μαθηματικοί υπολογισμοί υπενθυμίζεται ότι κάθε μονάδα λαμβάνει παροχή νερού $8.8m^3/s$ και επειδή σε κάθε μονάδα αντιστοιχούν δύο υδροστρόβιλοι, στους υπολογισμούς το Q θα ισούται με $4.4 m^3/s$.

Επίσης σε κάθε υδροστρόβιλο αντιστοιχούν δύο ακροφύσια, άρα $Z_o=2$ και μετά την εκτέλεση των πράξεων προκύπτει $d_o=0.163m$ ή $163mm$. Η πραγματική διάμετρος δέσμης σύμφωνα με τα δεδομένα του σταθμού Πλαστήρα ισούται με $152mm$, μια διαφορά που οφείλεται και πάλι στο ότι οι σχέσεις των υπολογισμών είναι προσεγγιστικές και περιέχουν σημαντικές απλοποιητικές παραδοχές. Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες 43 και 44, που είναι επεξηγηματικές σχετικά με τα μεγέθη που αναλύθηκαν σε αυτή την υποενότητα (Minn et al., 2014; Al-Daraje, 2018).



Εικόνα 46: Η δέσμη του νερού (με μπλε χρώμα) καθώς εξέρχεται από το ακροφύσιο. Ανάκτηση από: <http://heidra.co.uk/products.html>.



Εικόνα 47: Σκαρίφημα του τροχού Pelton όπου φαίνεται ο ορισμός της διαμέτρου κύκλου βήματος και της συνολικής διαμέτρου. Ανάκτηση από: <https://doi.org/10.1155/2017/3030217> (κατόπιν επεξεργασίας).

2.4.2 ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΔΕΣΜΗΣ ΚΑΙ ΠΛΗΘΟΣ ΣΚΑΦΙΔΙΩΝ

Συνεχίζοντας την ανάλυση των γεωμετρικών μεγεθών που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό του υδροστροβίλου, κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά σε δύο πολύ χρήσιμες μεταβλητές. Πρόκειται για την αναλογία δέσμης και το πλήθος των σκαφιδίων. Η αναλογία δέσμης ορίζεται ως το πηλίκο m της διαμέτρου κύκλου βήματος προς τη διάμετρο της δέσμης. Απλούστερα, η μαθηματική σχέση που τη διέπει είναι η εξής:

$$m = \frac{D}{d_o} \quad (6)$$

Προσοχή απαιτείται στη διαστατική ομοιογένεια, καθώς η διάμετρος κύκλου βήματος (D) μετράται σε m , ενώ η διάμετρος δέσμης (d_o) σε mm . Πραγματοποιώντας τους υπολογισμούς προκύπτει σύμφωνα με τις εξισώσεις $m=12.55$ (δηλαδή $2046mm/163mm$), ενώ για το σταθμό Πλαστήρα ισχύει $m=11.21$ (δηλαδή $2040mm/182mm$). Άρρηκτα συνδεδεμένο μέγεθος με αυτό της αναλογίας δέσμης είναι το πλήθος των σκαφιδίων Z . Το Z εξαρτάται άμεσα από το m μέσω της προσεγγιστικής σχέσης:

$$Z = 0.5 \times m + 15 \quad (7)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση υπολογίζεται, επομένως, ο αριθμός των σκαφιδίων στο στροφείο Pelton, αρκεί να στρογγυλοποιηθούν τα m στον κοντινότερο ακέραιο. Με βάση τους υπολογισμούς ($m=13$) ισχύει $Z=22$ (το 21.5 γίνεται 22), ενώ στο σταθμό Πλαστήρα για $m=11$ θα είναι $Z=21$ (το 20.5 γίνεται 21), κάτι που ισχύει και στην πραγματικότητα. Ενδεικτικά παρουσιάζεται στη συνέχεια ο πίνακας 6, όπου φαίνεται το εύρος του αριθμού των σκαφιδίων ως συνάρτηση της αναλογίας δέσμης (Oo et al., 2019; Sarkar, 2019).

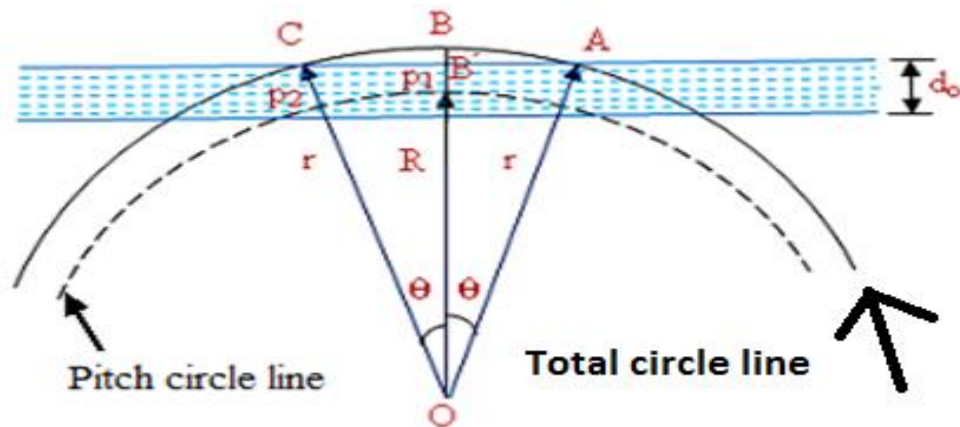
Αναλογία δέσμης	6	8	10	15	20	25
Αριθμός σκαφιδίων	17-21	18-22	19-24	22-27	24-30	26-33

Πίνακας 6: Συσχέτιση της αναλογίας δέσμης με τον αριθμό των σκαφιδίων.

Ανάκτηση από: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131>.

2.4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΣΚΑΦΙΔΙΟΥ

Το τελευταίο μέρος της ενότητας, που αφορά στο σχεδιασμό των σκαφιδίων, εστιάζει στον πλήρη καθορισμό των διαστάσεών τους ξεκινώντας από απλές γεωμετρικές σχέσεις και καταλήγοντας σε έναν τελικό πίνακα που συγκεντρώνει τις απαιτούμενες τιμές για κάθε παράμετρο που εξετάζεται. Αρχικά το σκαρίφημα της εικόνας 48 απεικονίζει τις έννοιες που συζητούνται. Ο πίνακας 7 επιπρόσθετα, εξηγεί τη σημασία των εμπλεκόμενων μεγεθών.



Εικόνα 48: Σκαρίφημα με τις γεωμετρικές μεταβλητές του προβλήματος.
 Ανάκτηση από: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131>.

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΣΗΜΑΣΙΑ
R	Ακτίνα κύκλου βήματος (pitch circle line)
d_o	Διάμετρος δέσμης νερού
$p_1 p_2$	Απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σκαφιδίων στην κυκλική τροχιά
r	Ακτίνα κύκλου (μέχρι το πιο απομακρυσμένο σημείο ενός σκαφιδίου)
A, B, C	Θέσεις τριών διαδοχικών σκαφιδίων
θ	Επίκεντρο γωνία μεταξύ δύο διαδοχικών σκαφιδίων

Πίνακας 7: Βασικά μεγέθη υπολογισμού διαστάσεων σκαφιδίου. Ανάκτηση από:
<http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131> (κατόπιν επεξεργασίας).

Στη συνέχεια είναι απαραίτητη η εισαγωγή ορισμένων απλών γεωμετρικών σχέσεων, με τη βοήθεια των οποίων διευκολύνεται η μελέτη. Συγκεκριμένα η πρώτη σχέση που χρησιμοποιείται σχετίζεται με τον αριθμό των σκαφιδίων Z που εξετάστηκε παραπάνω και έχει τη μορφή:

$$Z = \frac{360}{\theta} \quad (8)$$

Με μια απλή γεωμετρική εφαρμογή στο τρίγωνο AOB' λαμβάνεται για τον υπολογισμό της θ μια έκφραση της μορφής:

$$\cos\theta = \frac{R+0.5 \times d_o}{r} \quad (9)$$

Τέλος για την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σκαφιδίων στην κυκλική τροχιά, δηλαδή το μέγεθος $p_1 p_2$ ισχύει:

$$p_1 p_2 = \frac{2 \times \pi \times R}{Z} \quad (10)$$

Οι εξισώσεις (8),(9) και (10) σχετίζονται κυρίως με τον αριθμό των σκαφιδίων και την απόσταση που πρέπει να υπάρχει μεταξύ τους, ενώ στη συνέχεια λαμβάνει χώρα ο υπολογισμός των διαστάσεων του σκαφιδίου. Τονίζεται με ιδιαίτερη έμφαση ότι στο σχεδιασμό των σκαφιδίων καταλυτικό ρόλο διαδραματίζουν δύο μεταβλητές, ο λόγος του πλάτους του σκαφιδίου προς τη διάμετρο δέσμης και η συνολική

διάμετρος του στροβίλου Pelton προς τη διάμετρο της δέσμης. Για μικρές τιμές του πρώτου πηλίκου, το νερό δεν εκτρέπεται ομαλά αφότου προσκρούσει στο σκαφίδιο, με αποτέλεσμα να υπάρχει σημαντική απώλεια ενέργειας λόγω τυρβώδους διάχυσης (μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε θερμότητα).

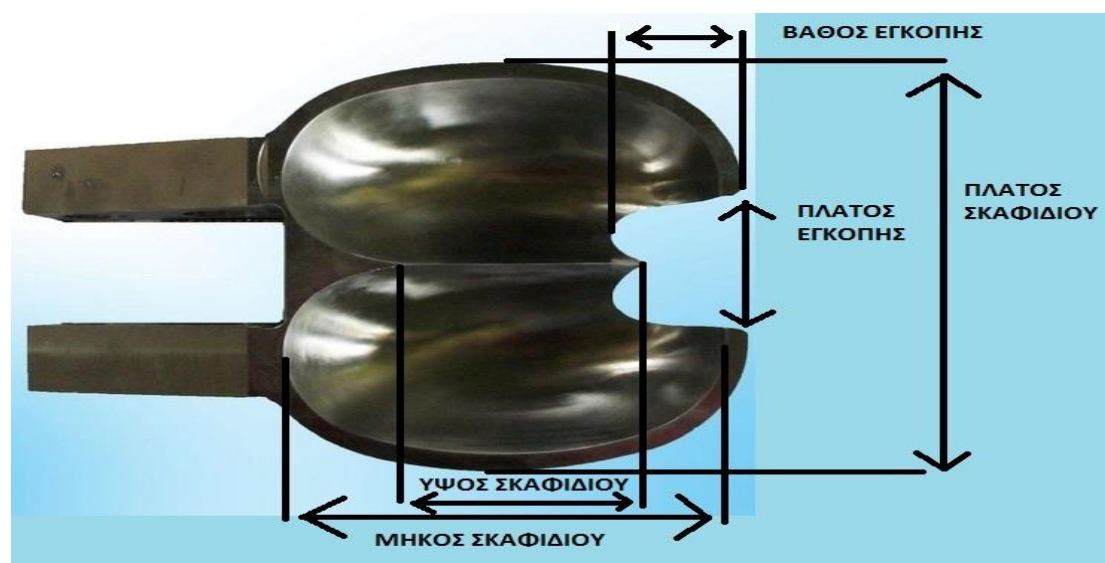
Παράλληλα για μεγάλες τιμές του πρώτου πηλίκου αυξάνεται παραπάνω από το επιτρεπόμενο η τριβή στις επιφάνειες. Συνεπώς οι βέλτιστες τιμές αυτού του λόγου έχουν βρεθεί πειραματικά ότι κυμαίνονται μεταξύ 2.8 και 4. Παρακάτω επεξηγούνται οι βασικές διαστάσεις ενός σκαφιδίου, καθώς και τα εύρη τιμών που κυμαίνονται. Επισημαίνεται ότι όλα τα μεγέθη του πίνακα 8 υπολογίζονται ως συνάρτηση της διαμέτρου δέσμης d_o .

ΔΙΑΣΤΑΣΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ
Μήκος σκαφιδίου	$2.28 d_o$	$3.3 d_o$
Πλάτος σκαφιδίου	$2.8 d_o$	$4 d_o$
Βάθος εγκοπής	$0.44 d_o$	$0.625 d_o$
Πλάτος εγκοπής	$1.12 d_o$	$1.6 d_o$
Βάθος σκαφιδίου	$0.8 d_o$	$1.2 d_o$
Ύψος σκαφιδίου	$1.75 d_o$	$2.5 d_o$

Πίνακας 8: Οι βασικές διαστάσεις των σκαφιδίων και τα εύρη τιμών τους.

Ανάκτηση από: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131>.

Στην εικόνα 49 παρουσιάζονται επεξηγηματικά αποτυπωμένες οι διαστάσεις που ποσοτικοποιούνται στον πίνακα. Υπογραμμίζεται ότι το βάθος του σκαφιδίου δεν απεικονίζεται, καθώς βρίσκεται στην τρίτη διάσταση, δηλαδή στην κατεύθυνση του άξονα z και εκτείνεται κατακόρυφα από το ανώτερο έως το κατώτερο σημείο της κοιλότητας του σκαφιδίου. Παράλληλα άξιο αναφοράς είναι ότι και η ελάχιστη διάσταση του πλάτους εγκοπής είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο δέσμης (Minn et al., 2014; Nigussie et al., 2017; Al-Daraje, 2018).



Εικόνα 49: Οι βασικές διαστάσεις των σκαφιδίων. Ανάκτηση από:

<https://www.indiamart.com/proddetail/pelton-wheel-bucket-6173452997.html>
(κατόπιν επεξεργασίας).

Στην παρούσα εργασία οι διαστάσεις του σκαφιδίου εξάγονται σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, ωστόσο υπάρχουν και εναλλακτικοί μαθηματικοί υπολογισμοί που βασίζονται στο πλάτος του σκαφιδίου και μέσω αυτού υπολογίζουν τη διάσταση των υπολοίπων μεγεθών. Επομένως θεωρώντας μια τιμή για το πλάτος του σκαφιδίου, η οποία ικανοποιεί κάποιες σχεδιαστικές προϋποθέσεις, υπολογίζονται αναλογικά και τα υπόλοιπα μεγέθη. Ενδεικτικά ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τα αντίστοιχα δεδομένα (πίνακας 9) (Οο et al., 2019).

ΔΙΑΣΤΑΣΗ	ΤΙΜΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ
Μήκος σκαφιδίου	$0.82 \times B$
Πλάτος σκαφιδίου	B
Βάθος εγκοπής	$0.16 \times B$
Πλάτος εγκοπής	$0.36 \times B$
Βάθος σκαφιδίου	$0.36 \times B$
Ύψος σκαφιδίου	$0.64 \times B$

Πίνακας 9: Εναλλακτικός υπολογισμός διαστάσεων σκαφιδίου. Ανάκτηση από: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131> (κατόπιν επεξεργασίας).

2.5 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ

Μετά τους υπολογισμούς που αφορούν στα σκαφίδια, η ανάλυση συνεχίζεται για τις παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά το σχεδιασμό του ακροφυσίου. Οι σωστές αναλογίες μεταξύ του ακροφυσίου και της βελόνας εξασφαλίζουν την ομαλά επιταχυνόμενη ροή του νερού κατά την έγχυση και την απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος κατά την αυξομείωση της παροχής του νερού. Με αυτό τον τρόπο περιορίζονται σημαντικά και τα προβλήματα που σχετίζονται με υδραυλικά πλήγματα, ιδιαίτερα σε έκτακτες περιπτώσεις που απαιτείται ακινητοποίηση του τροχού Pelton, συνεπώς άμεση διακοπή της παροχής του νερού σε συνδυασμό με την επίδραση των μηχανισμών πέδησης που υπάρχουν (εκτροπέας δέσμης και σύστημα ανάποδα τοποθετημένο σε σχέση με τη φορά περιστροφής του τροχού).

2.5.1 ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ

Πριν πραγματοποιηθεί εκτενέστερη ανάλυση για τις διαστάσεις, γίνεται αναφορά σε ορισμένες ενδεικτικές επισημάνσεις, οι οποίες συστήνεται να τηρούνται, καθώς παρ' όλο που η σημασία τους δεν αναδεικνύεται σε επίπεδο σχεδιασμού, είναι καθοριστικές κατά τη λειτουργία του σταθμού, αφού μπορούν να επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής των μηχανικών (και ιδιαίτερα των κινούμενων) μερών. Συγκεκριμένα στο τελευταίο κομμάτι της βελόνας (με τη χαρακτηριστική αιχμηρή ακμή) υπάρχει ένα ιδιαίτερο ανάγλυφο, όπου γίνεται μετάβαση από μια κυρτή σε μια κοίλη καμπύλη και ενδιάμεσα υπάρχει ένα σημείο καμπής.

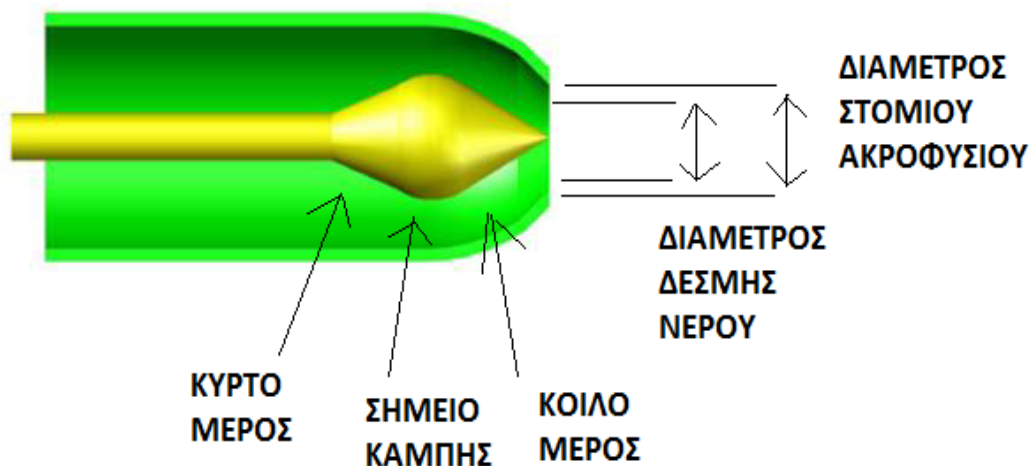
Η διάμετρος του σημείου καμπής πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο του άκρου του ακροφυσίου, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα διάβρωσης της βελόνας, λόγω μη ομαλής διαφυγής του νερού. Τέλος η διάμετρος του στομίου του ακροφυσίου (διάμετρος εξόδου) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο

δέσμης του νερού, λόγω της συστολής που υφίσταται η ροή του νερού κατά την έξοδό της από το ακροφύσιο (Minn et al., 2014).

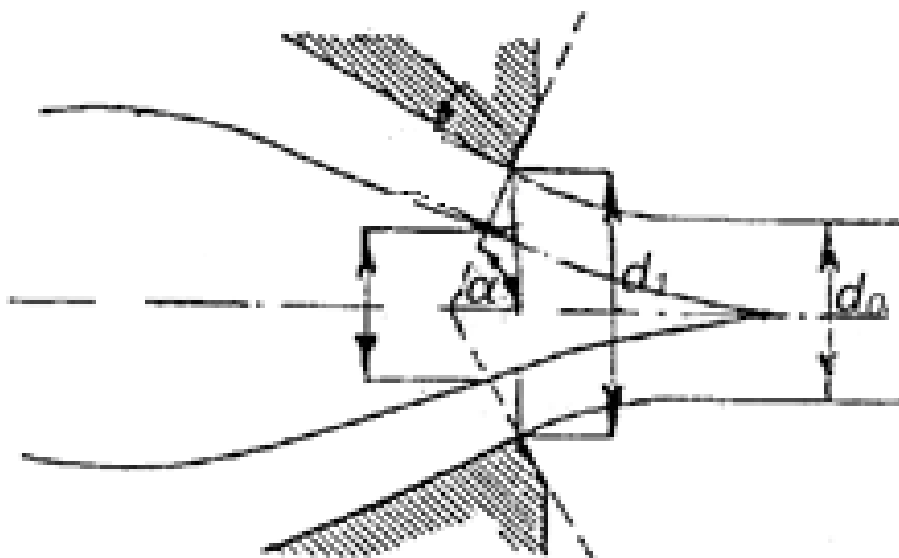
Περνώντας στη μελέτη της διαμέτρου εξόδου του ακροφυσίου, επισημαίνεται ότι η εξίσωση που τη διέπει είναι της μορφής:

$$d_1 = \sqrt{\frac{Q \times \sin \alpha}{2.66 \times \mu \times C_v \times \sqrt{H}}} \quad (11),$$

όπου d_1 η διάμετρος εξόδου του ακροφυσίου (σε m), μ ο συντελεστής τριβής που κυμαίνεται μεταξύ 0.8 και 0.88 (έστω $\mu=0.84$) και $\alpha=80^\circ$. Επίσης $Q = 2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ (ένα ακροφύσιο) και $C_v=0.985$. Το σχήμα που ακολουθεί παρέχει μια καλύτερη εποπτεία των μεγεθών της εξίσωσης (εικόνα 51).



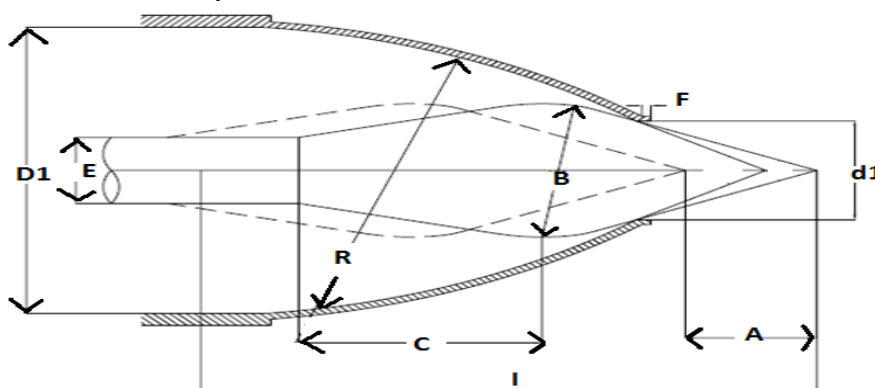
Εικόνα 50: Προσεγγιστική αναπαράσταση βασικών μεγεθών της γεωμετρίας του ακροφυσίου. Ανάκτηση από: Aung Kyaw Minn, Htay Htay Win, Nyein Aye San, Design of 225kw Pelton Turbine, Mandalay Technological University, Myanmar, 2014 (κατόπιν επεξεργασίας).



Εικόνα 51: Βασικές διαστάσεις του ακροφυσίου. Η διάμετρος εξόδου είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο δέσμης. Η γωνία α είναι μεταβαλλόμενη. Ανάκτηση από: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131>.

2.5.2 ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ ΚΑΙ ΒΕΛΟΝΑΣ

Η εικόνα 52 και ο πίνακας 10 αποτελούν μια συγκεντρωτική πηγή πληροφοριών αναφορικά με τις διαστάσεις ακροφυσίου και βελόνας. Οι τιμές του πίνακα υπολογίζονται ως συνάρτηση της τιμής της διαμέτρου εξόδου του ακροφυσίου d_1 (Oo et al., 2019; Petley et al., 2019).



Εικόνα 52: Επιπρόσθετες διαστάσεις για ακροφύσιο και βελόνα. Ανάκτηση από: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131> (κατόπιν επεξεργασίας).

ΔΙΑΣΤΑΣΗ	ΤΙΜΗ
A	$0.88 d_1$
B	$1.35 d_1$
C	$1.63 d_1$
R	$5.02 d_1$
D_1	$2.9 d_1$
E	$0.67 d_1$
F	$0.06 d_1$
I	$4.12 d_1$

Πίνακας 10: Οι διαστάσεις του ακροφυσίου και της βελόνας ως συνάρτηση της διαμέτρου εξόδου του ακροφυσίου. Ανάκτηση από: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131> (κατόπιν επεξεργασίας).

2.6 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΚΡΟΗΣ (DISCHARGE COEFFICIENT)

Η συνεργασία μεταξύ ακροφυσίου και βελόνας στον υδροστρόβιλο Pelton επιτυγχάνει όχι μόνο την αύξηση της ταχύτητας κατά την έγχυση του νερού στα σκαφίδια, αλλά παράλληλα και την ορθή ρύθμιση της παροχής του νερού (με τη βοήθεια της μετατόπισης της βελόνας) που απαιτείται (Zhang, 2016), ανάλογα με τις ανάγκες της ηλεκτροπαραγωγής. Για την λεπτομερέστερη μελέτη του φαινομένου αυτού, χρησιμοποιείται ο συντελεστής εκροής (discharge coefficient), ένα μέγεθος, το οποίο συνδυάζει την παροχή του νερού ως συνάρτηση της μετατόπισης της βελόνας. Στο πλαίσιο της εργασίας αναγνωρίζεται με το σύμβολο φ_{d_1} και ορίζεται ως εξής:

$$\varphi_{d_1} = \frac{4 \times \dot{Q}_{jet}}{\pi \times d_1^2 \times \sqrt{2 \times g \times H}} \quad (12),$$

όπου ως d_1 ορίζεται η διάμετρος εξόδου του ακροφυσίου και ως H το μανομετρικό ύψος, όπως φαίνεται και από τις προηγούμενες ενότητες.

Εμβαθύνοντας τη μελετή αναφορικά με το συντελεστή εκροής, επισημαίνεται ότι το στενότερο σημείο της διατομής του αγωγού βρίσκεται στην απόληξη του ακροφυσίου, ένα σημείο στο οποίο οι ροϊκές γραμμές είναι παράλληλες και συνεπώς βρίσκονται υπό σταθερή πίεση (Zhang, 2016). Η παροχή νερού στο σημείο αυτό δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\dot{Q}_{jet} = \frac{1}{4} \times \pi \times d_o^2 \times \sqrt{2 \times g \times (H - h_v)} \quad (13),$$

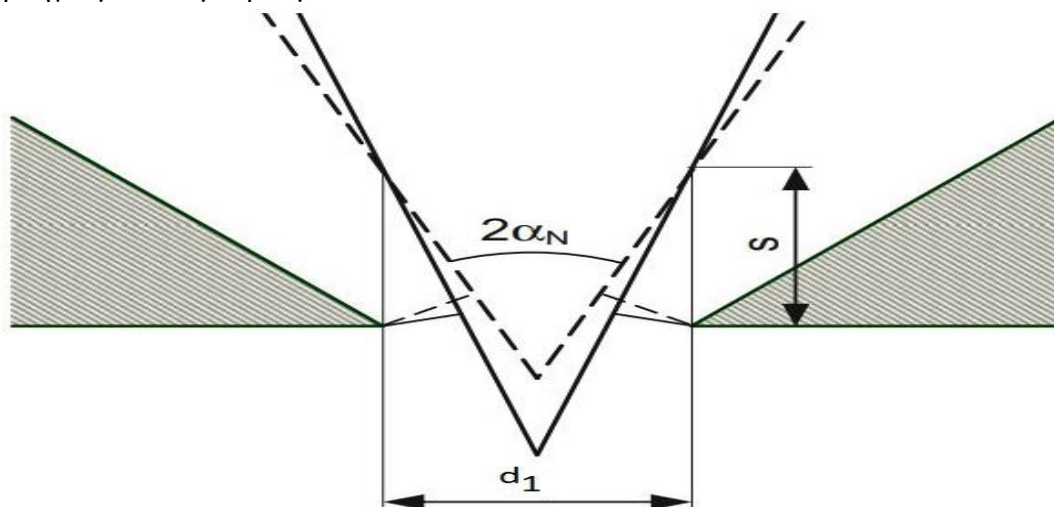
όπου ως d_o ορίζεται η διάμετρος της δέσμης του νερού στο σημείο απόληξης του ακροφυσίου και ως h_v η πτώση πίεσης στο εσωτερικό του ακροφυσίου.

Τονίζεται ωστόσο ότι, επειδή το h_v είναι αμελητέο σε σχέση με το H , ο όρος αυτός παραλείπεται. Επομένως, χωρίς την παρουσία του h_v , η εξίσωση 12 με τη βοήθεια της εξίσωσης 13 λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

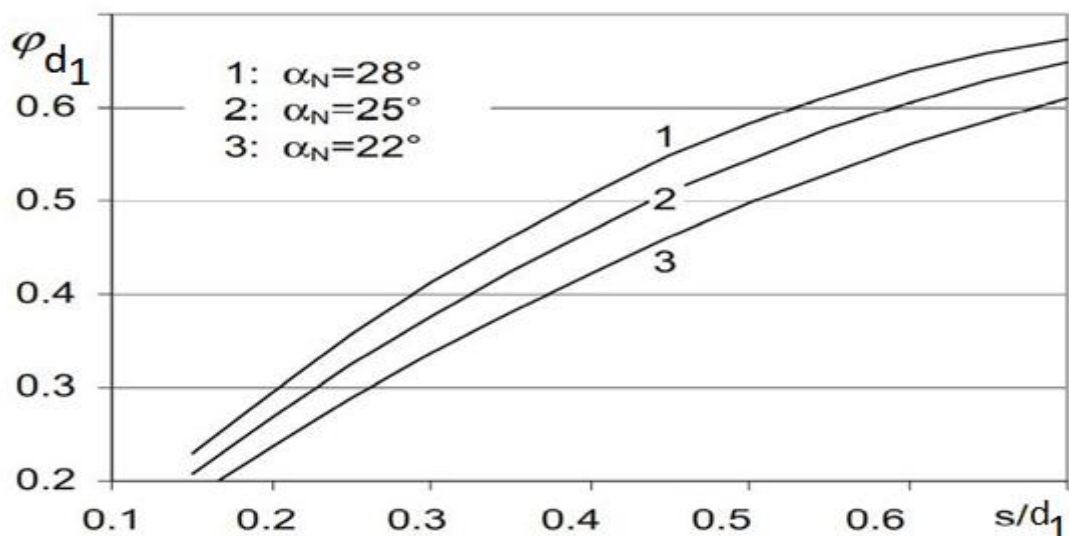
$$\varphi_{d_1} = \left(\frac{d_o}{d_1}\right)^2 \quad (14),$$

δηλαδή ο συντελεστής εκροής εκφράζεται ως το τετράγωνο του λόγου της διαμέτρου δέσμης του νερού προς τη διάμετρο εξόδου του ακροφυσίου (Zhang, 2016).

Γενικότερα, ο συντελεστής εκροής εξαρτάται από τη μετατόπιση της βελόνας, αλλά και από τη γεωμετρία του ακροφυσίου. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια πειραματικών μελετών, έχει διαπιστωθεί ότι, για δεδομένη τιμή μετατόπισης της βελόνας (needle stroke) που συμβολίζεται με s , η χρήση μιας βελόνας με πιο αμβλεία γεωμετρία (γωνία α_N), επιτρέπει τη διέλευση μεγαλύτερης ποσότητας νερού. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, για ίδια μετατόπιση της βελόνας, όσο πιο αμβλεία είναι η γεωμετρία της βελόνας, τόσο μεγαλύτερο γίνεται το άνοιγμα για τη διέλευση του νερού στην απόληξη του ακροφυσίου (Zhang, 2003). Τα ακόλουθα σχήματα περιγράφουν τα εμπλεκόμενα γεωμετρικά μεγέθη και επιβεβαιώνουν το προηγούμενο συμπέρασμα.



Εικόνα 53: Η γεωμετρία στην έξοδο του ακροφυσίου. Ανάκτηση από: Zhang Zh., Pelton Turbines, Springer, 2016 (κατόπιν επεξεργασίας).



Εικόνα 54: Ο συντελεστής εκροής ως συνάρτηση της γωνίας και της διαδρομής της βελόνας. Ανάκτηση από: Zhang Zh., Pelton Turbines, Springer, 2016 (κατόπιν επεξεργασίας).

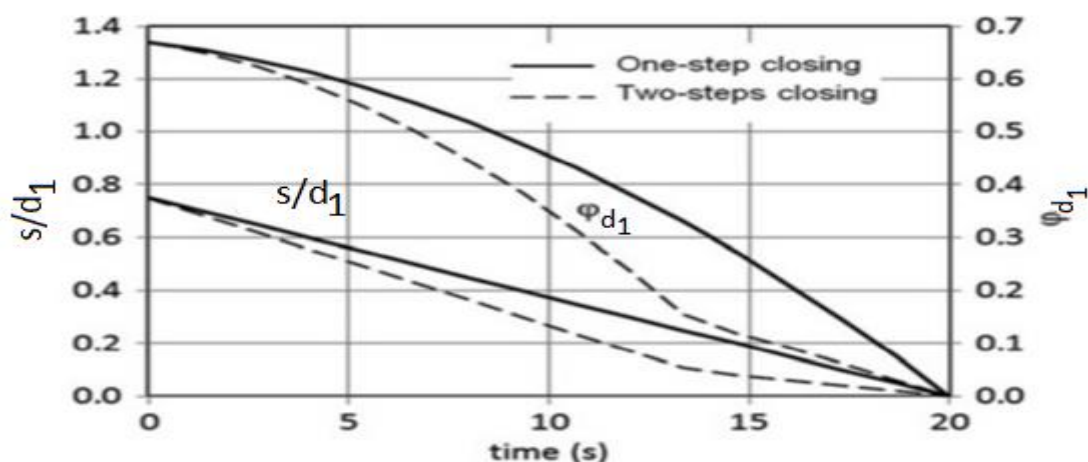
Κλείνοντας αυτή την ενότητα, να επισημανθεί ότι στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ο συντελεστής εκροής μπορεί να υπολογιστεί με δύο τρόπους. Αρχικά με βάση το διάγραμμα της εικόνας 54, αν οριστούν η μετατόπιση της βελόνας s και η γωνία α_N , υπολογίζεται κατευθείαν το φ_{d_1} . Ωστόσο υπάρχει και ένας απλούστερος τρόπος υπολογισμού με τη βοήθεια του τετραγώνου του λόγου των διαμέτρων, σύμφωνα με την εξίσωση 14. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι παρατίθενται δύο κατηγορίες αποτελεσμάτων, από τις οποίες η μια βασίζεται στους υπολογισμούς των μαθηματικών εξισώσεων και η δεύτερη στα πειραματικά δεδομένα του ΥΗΣ Πλαστήρα. Στην πρώτη περίπτωση προκύπτει $d_o = 163$ mm και $d_1 = 202$ mm, οπότε ο συντελεστής εκροής ισούται με 0.65, ενώ στη δεύτερη ισχύει $d_o = 152$ mm και $d_1 = 190$ mm, οπότε ο συντελεστής εκροής ισούται με 0.64. Συγκρίνοντας με το αντίστοιχο διάγραμμα της εικόνας 54, διαπιστώνεται ότι οι τιμές που βρέθηκαν για το συντελεστή εκροής βρίσκονται στο εύρος τιμών του διαγράμματος και προσεγγίζουν κάποιες από τις πιο υψηλές τιμές που λαμβάνει το διάγραμμα αυτό.

2.7 ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΠΛΗΓΜΑ ΚΑΙ CLOSING LAW ΒΕΛΟΝΑΣ

Όπως έχει προαναφερθεί, ο διττός ρόλος του ακροφυσίου σε έναν στρόβιλο Pelton έγκειται στη μετατροπή της ενέργειας υπό μορφή πίεσης του νερού σε κινητική ενέργεια (δηλαδή στην υψηλή ταχύτητα της δέσμης του νερού), αλλά παράλληλα και στη ρύθμιση της παροχής του νερού που διέρχεται από τη διατομή εξόδου του ακροφυσίου (στένωση). Λόγω της ιδιαίτερης ευελιξίας τους στη διαχείριση του φορτίου από το ηλεκτρικό δίκτυο, οι υδροστρόβιλοι Pelton παρέχουν τη δυνατότητα συχνής παύσης και επανεκκίνησης της λειτουργίας τους, ακόμα και σε χρονικό διάστημα μερικών ωρών (Zhang, 2016). Κατά την παύση της λειτουργίας του υδροστρόβιλου απαιτείται και το κλείσιμο (φραγή) του ακροφυσίου, το οποίο επιτυγχάνεται με κατάλληλη μετατόπιση της βελόνας, έτσι ώστε να φράσσεται η έξοδος του ακροφυσίου και να μην επιτρέπεται η διέλευση του νερού.

Ωστόσο δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο εκτέλεσης της συγκεκριμένης διαδικασίας, διότι ενδεχόμενο κλείσιμο του ακροφυσίου με ρυθμούς γρηγορότερους από τους επιτρεπόμενους, μπορεί να οδηγήσει σε ραγδαία αύξηση της πίεσης εσωτερικά, με κίνδυνο την πρόκληση βλάβης στην υδροηλεκτρική εγκατάσταση. Επομένως ο όρος closing law συνίσταται στα προκαθορισμένα βήματα της διαδικασίας που ακολουθείται για την ασφαλή φραγή του ακροφυσίου (Zhang, 2016).

Σύμφωνα με πειραματικές μελέτες έχει διαπιστωθεί ότι, αν η φραγή του ακροφυσίου γίνει με τέτοιο τρόπο που μαθηματικά περιγράφεται από μια γραμμική εξίσωση μετατόπισης της βελόνας, τότε προκύπτει μια μη γραμμική μεταβολή της παροχής του νερού, κάτι το οποίο είναι ανεπιθύμητο, αφού θα προκαλέσει αύξηση της πίεσης. Στο ακόλουθο διάγραμμα διακρίνεται η γραμμική μετατόπιση της βελόνας (s/d_1) και η αντίστοιχη μη γραμμική μεταβολή της παροχής του νερού, εκφρασμένη μέσω του συντελεστή εκροής φ_{d_1} . Η διαφορά της συνεχούς με τη διακεκομμένη καμπύλη έγκειται στο ότι η συνεχής γραμμή περιγράφει τη διαδικασία φραγής σε ένα στάδιο, ενώ στην περίπτωση της διακεκομμένης γραμμής η διαδικασία πραγματοποιείται σε δύο στάδια, μια μέθοδος που θεωρείται πιο αποδοτική σε σχέση με αυτή του ενός σταδίου.

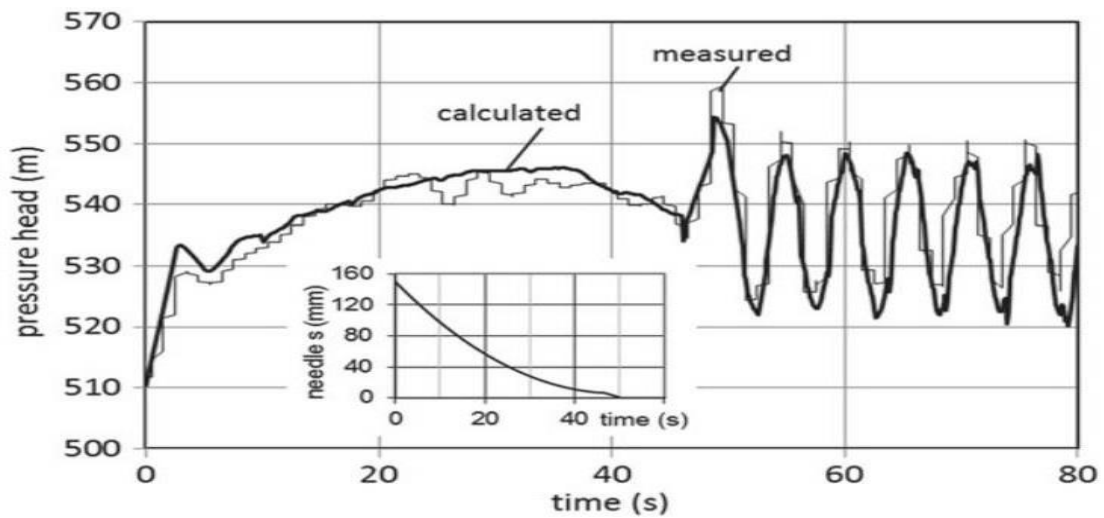


Εικόνα 55: Διάγραμμα φραγής του ακροφυσίου για γραμμική μετατόπιση της βελόνας. Ανάκτηση από: Zhang Zh., Pelton Turbines, Springer, 2016 (κατόπιν επεξεργασίας).

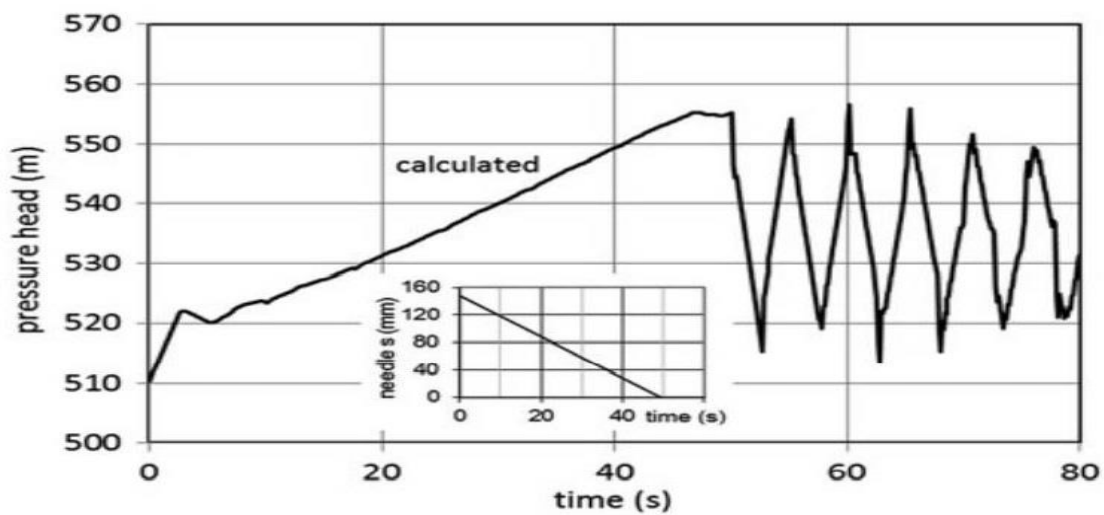
Σε πρακτικές εφαρμογές, ωστόσο, επιλέγεται μια μη γραμμική μέθοδος φραγής του ακροφυσίου, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι σε αυτή την περίπτωση η διαχείριση της υφιστάμενης πίεσης γίνεται με πιο αποτελεσματικό τρόπο. Ουσιαστικά αυτό σημαίνει ότι επιτυγχάνεται απόσβεση της πίεσης σε συντομότερο χρονικό διάστημα. Στο διάγραμμα που ακολουθεί, διακρίνεται η κατανομή της πίεσης με την πάροδο του χρόνου σύμφωνα με τη μη γραμμική μέθοδο, καθώς η βελόνα τείνει να φράξει την έξοδο του ακροφυσίου. Για λόγους σύγκρισης, παρατίθεται το αντίστοιχο διάγραμμα που βασίζεται στη γραμμική μέθοδο φραγής (Zhang, 2016).

Με βάση την εκτενή ανάλυση και τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα που έχουν προκύψει από τις μελέτες, έχει διαπιστωθεί ότι ο βέλτιστος τρόπος κλεισίματος του ακροφυσίου προσεγγίζεται από εξισώσεις παραβολικής μορφής. Στο διάγραμμα της

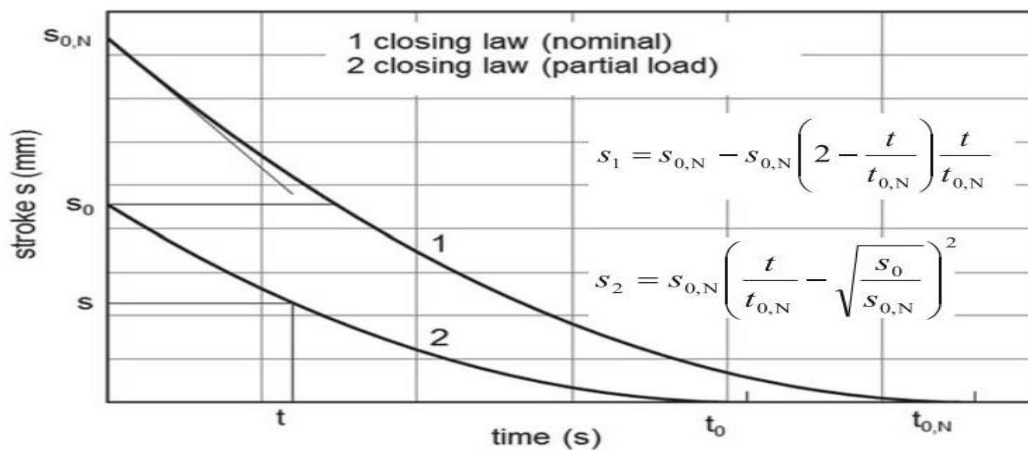
εικόνας 58 διακρίνεται η μορφή των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται, ώστε να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα.



Εικόνα 56: Διάγραμμα κατανομής πίεσης-χρόνου για μη γραμμική μετατόπιση της βελόνας. Ανάκτηση από: Zhang Zh., Pelton Turbines, Springer, 2016.



Εικόνα 57: Διάγραμμα κατανομής πίεσης-χρόνου για γραμμική μετατόπιση της βελόνας. Ανάκτηση από: Zhang Zh., Pelton Turbines, Springer, 2016.



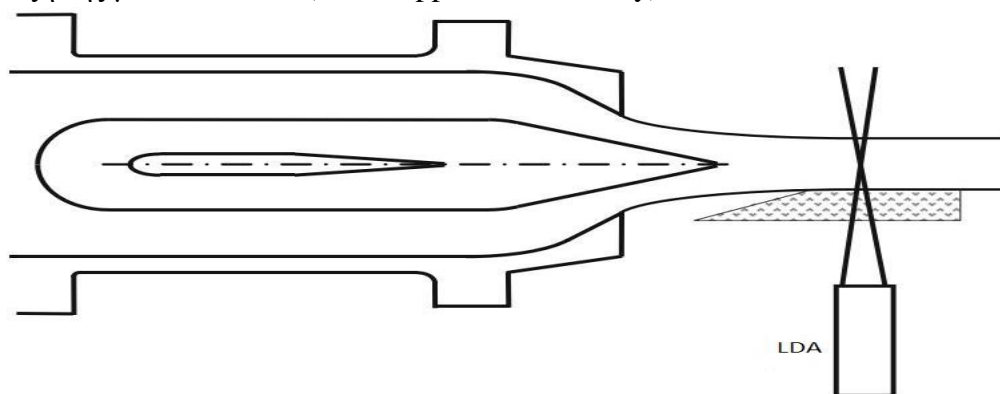
Εικόνα 58: Διάγραμμα παραβολικών εξισώσεων για το βέλτιστο closing law του ακροφυσίου. Ανάκτηση από: Zhang Zh., Pelton Turbines, Springer, 2016.

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι παραβολικές εξισώσεις που κρίνονται ως οι καταλληλότερες για την ασφαλή φραγή του ακροφυσίου. Η πρώτη εξίσωση χρησιμοποιείται για το ονομαστικό φορτίο (nominal), ενώ η δεύτερη για μερικό φορτίο (partial). Αντίστοιχα τα μεγέθη $s_{0,N}$ και $t_{0,N}$ αναφέρονται στην ονομαστική (μέγιστη) διαδρομή που πρέπει να καλύψει η βελόνα έως το κλείσιμο, η οποία πραγματοποιείται στον ανάλογο ονομαστικό (συνολικό) χρόνο. Με παρόμοιο τρόπο σε συνθήκες μερικού φορτίου τα μεγέθη s_0 και t_0 αναφέρονται σε μερικό άνοιγμα της βελόνας (μικρότερο του ονομαστικού), το οποίο καλύπτεται αντίστοιχα σε χρόνο μικρότερο του ονομαστικού.

2.8 ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΣΤΕΡΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΔΕΣΜΗΣ ΝΕΡΟΥ (ΠΙΔΑΚΑ)

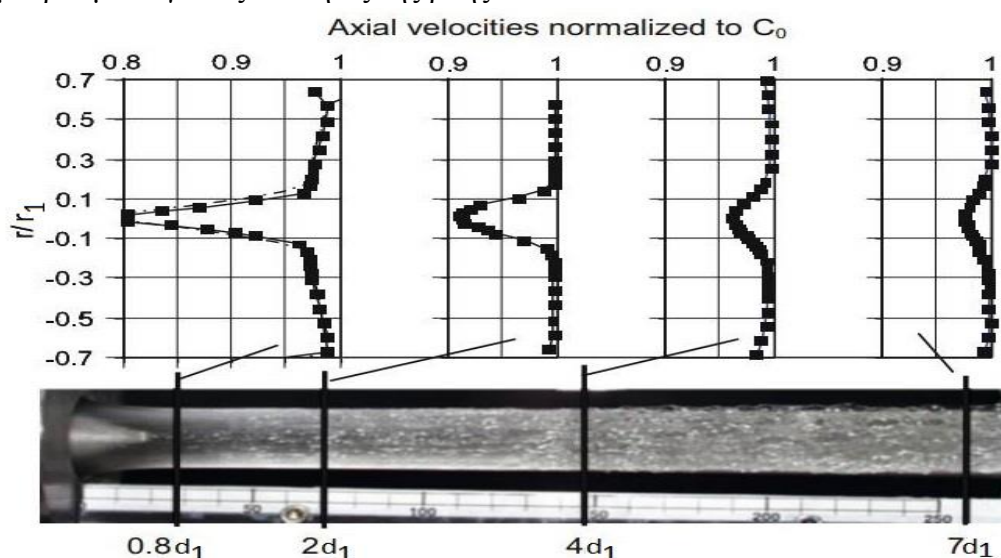
Η παρατήρηση και κατανόηση των χαρακτηριστικών μιας ροής, όπως αυτής που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, είναι ιδιαίτερα σημαντική, ώστε να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρά η ροή αυτή, τόσο με τον εξοπλισμό του συστήματος (ακροφύσιο, βελόνα), όσο και με τον αέρα του περιβάλλοντος, μετά την έξοδο από το ακροφύσιο. Τα πιο επικαιροποιημένα δεδομένα έχουν προκύψει κατά βάση με τη βοήθεια πειραματικών μετρήσεων και φωτογραφικών αποτυπώσεων της μορφής της δέσμης ή της κατανομής της ταχύτητας στην αξονική συνιστώσα. Οι πειραματικές μετρήσεις διεξάγονται κυρίως με τη χρήση σωλήνων Pitot, ειδικών μικρών διατάξεων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ταχύτητας ροής σε ένα ρευστό (Berntsen et al., 2001; Brekke, 2005). Ωστόσο, οι προαναφερθείσες τεχνικές θεωρούνται γενικά ανεπαρκείς, καθώς αδυνατούν να προσδιορίσουν όλο το φάσμα των χαρακτηριστικών της υπό εξέταση ροής.

Μια σημαντική εξέλιξη στις πειραματικές μετρήσεις επετεύχθη με την εισαγωγή των μεθόδων μέτρησης με laser, όπως το laser doppler anemometry, που συνέβαλε καθοριστικά στην κατανόηση των μηχανισμών της ροής (Zhang et al., 2000; Zhang et al., 2003; Zhang & Parkinson, 2001). Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και αποδοτική, κυρίως σε ροές υψηλών ταχυτήτων, όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση, ακόμα και στις περιοχές της δέσμης (του πίδακα) όπου οι ροϊκές γραμμές είναι καμπυλωμένες. Στο ακόλουθο σκαρίφημα διακρίνεται η διάταξη της μεθόδου LDA (laser doppler anemometry).



Εικόνα 59: Σκαρίφημα της μεθόδου LDA (laser doppler anemometry). Ανάκτηση από: Zhang Zh., Pelton Turbines, Springer, 2016.

Με βάση ορισμένες μετρήσεις που διεξήχθησαν σύμφωνα με τη μέθοδο LDA, περιγράφονται στη συνέχεια ορισμένα βασικά ροϊκά χαρακτηριστικά της δέσμης. Αρχικά γίνεται αναφορά σε πειραματικές μετρήσεις στις οποίες η δέσμη θεωρείται αξονικά συμμετρική και μελετώνται οι κατανομές ταχυτήτων σε διαφορετικές αποστάσεις μετά την έξοδο της ροής από το ακροφύσιο. Η αξονική συμμετρία αποτελεί σε γενικές γραμμές μια ορθή θεώρηση, καθώς προσομοιώνει ικανοποιητικά το πεδίο ταχυτήτων του ρευστού σε έναν κυκλικό αγωγό, λίγο πριν εισέλθει στο ακροφύσιο. Στο ακόλουθο διάγραμμα, όπου διακρίνεται η πειραματική διάταξη, ισχύει $C_o = \sqrt{2 \times g \times H}$, ενώ με τη βοήθεια του διαγράμματος εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τις ιδιότητες της ροής.



Εικόνα 60: Πειραματική διάταξη μετρήσεων κατανομών ταχυτήτων κατά την έξοδο της ροής από το ακροφύσιο. Ανάκτηση από: Zhang Zh., Pelton Turbines, Springer, 2016.

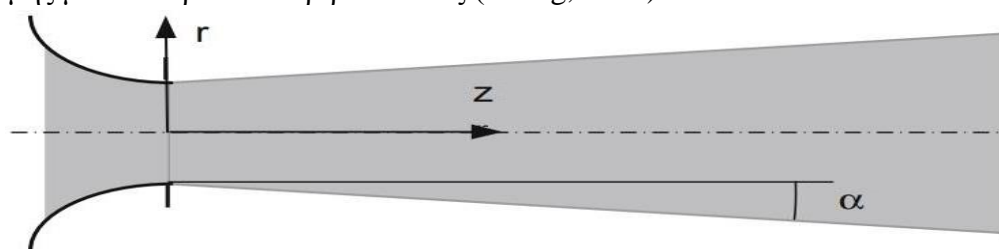
Πιο συγκεκριμένα, για την περιοχή γύρω από το $0.8 \times d_1$ παρατηρείται μια μειωμένη ταχύτητα στο κέντρο της δέσμης, η οποία οφείλεται στην ανάπτυξη του οριακού στρώματος στην επιφάνεια της βελόνας. Η ροή ομαλοποιείται στην περιοχή $2 \times d_1$, όπου οι ροϊκές γραμμές είναι ευθύγραμμες και παράλληλες. Στα σημεία αυτά η πτώση πίεσης υπολογίζεται να είναι της τάξης του 0.3%. Επιστρέφοντας στην περιοχή του $0.8 \times d_1$ επισημαίνεται ότι η αξονική ταχύτητα αυξάνεται, καθώς γίνεται μετάβαση από το κέντρο της ροής στα τοιχώματα (στην κατακόρυφη συνιστώσα). Αυτό οφείλεται και πάλι στην επίδραση της γεωμετρίας της βελόνας, ωστόσο οδηγεί σε αύξηση της πίεσης τοπικά, λόγω της παρουσίας καμπυλωμένων ροϊκών γραμμών, η οποία συνοδεύεται από μείωση της ταχύτητας της ροής. Παράλληλα στο σημείο αυτό διακρίνεται και ο απαραίτητος ρόλος της μεθόδου LDA, καθώς η χρήση των σωλήνων Pitot μπορεί να γίνει μόνο σε ευθύγραμμες και παράλληλες ροϊκές γραμμές (Zhang, 2016).

Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι για το πρώτο σκέλος μετρήσεων (δηλαδή στην περιοχή $0.8 \times d_1$), η ροή είναι επιταχυνόμενη, λόγω του μη ομαλού πεδίου ταχυτήτων, το οποίο οφείλεται στην παρουσία των καμπυλωμένων ροϊκών γραμμών. Ωστόσο, στη συνέχεια η ροή ομαλοποιείται και τελικά διατηρεί σταθερή κατανομή

ταχύτητας μέχρι την περιοχή $7 \times d_1$, ενώ το σημείο που χρήζει προσοχής είναι πως, σύμφωνα με τους υπολογισμούς, και η διάμετρος της δέσμης παραμένει σταθερή μέχρι την προαναφερθείσα περιοχή.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι, σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις, η ταχύτητα και η διάμετρος δέσμης διατηρούνται εν γένει σταθερές για μια αρκετά μεγάλη απόσταση από την έξοδο του ακροφυσίου, όπως έχει προαναφερθεί. Αυτή η ιδιότητα είναι ενδεικτικό στοιχείο αυτής της ιδιαίτερα αποδοτικής ροής, στην οποία οι ενεργειακές απώλειες είναι αμελητέες. Ωστόσο, μια πιο προσεκτική εξέταση των πειραματικών αποτελεσμάτων έχει δείξει ότι η διάμετρος της δέσμης υφίσταται μια διεύρυνση που κυμαίνεται μεταξύ 0.2° και 0.5° .

Αν και στην πράξη μια τόσο μεγάλη διεύρυνση είναι ανέφικτη, πραγματοποιήθηκαν εκτενέστερες μελέτες αναφορικά με το φαινόμενο αυτό. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια μαθηματικών υπολογισμών υπό μορφή δοκιμής και σφάλματος, διαπιστώθηκε ότι για διεύρυνση 0.2° προέκυψαν απώλειες ενέργειας της τάξης του 11%, ένα μέγεθος υπερβολικά μεγάλο, ενώ για διεύρυνση 0.02° προέκυψαν απώλειες γύρω στο 1%, ένα μέγεθος σαφώς πιο λογικό. Συμπερασματικά, αναφέρεται ότι η διεύρυνση της διαμέτρου δέσμης είναι γενικά ένα αμελητέο μέγεθος στις ενεργειακές απώλειες και προκύπτει, κυρίως, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης της δέσμης με τον αέρα του περιβάλλοντος (Zhang, 2016).



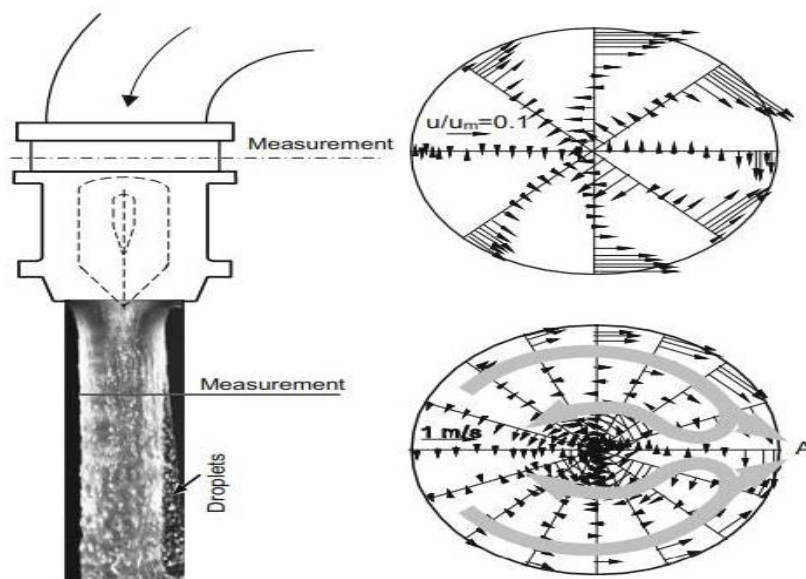
Εικόνα 61: Το φαινόμενο της διεύρυνσης της διατομής της δέσμης (jet expansion). Ανάκτηση από: Zhang Zh., Pelton Turbines, Springer, 2016.

Στο τελευταίο τμήμα της ενότητας αυτής γίνεται αναφορά στις μορφολογικές μεταβολές που υφίσταται η ροή, καθώς μεταβαίνει από την πλήρως ανεπτυγμένη, τυρβώδη, αξονοσυμμετρική ροή του αγωγού σε μια ροή μη αξονοσυμμετρική εντός του ακροφυσίου. Παράλληλα εξετάζεται η ευστάθεια της ροής, καθώς υφίσταται τις μεταβολές αυτές. Η απουσία της αξονοσυμμετρικής ροής οφείλεται στο σχεδιασμό της γεωμετρίας του ακροφυσίου, συνεπώς στην περιοχή αυτή χρησιμοποιείται ο όρος δευτερεύουσα ροή (secondary flow) για να περιγραφεί το ροϊκό πεδίο της δέσμης (Zhang et al., 2000). Επισημαίνεται ότι σε γενικές γραμμές οι διαταραχές που υφίσταται η ροή εντός του ακροφυσίου και λόγω της στένωσης της διατομής, αλλά και λόγω της παρουσίας της βελόνας μπορούν να εξαλειφθούν, με την προϋπόθεση η ροή να είναι επιταχυνόμενη, καθώς διέρχεται από την περιοχή αυτή. Ωστόσο, ο στροβιλισμός της ροής συνεχίζει να υπάρχει, προκαλώντας δίνες, περιστροφές και γενικότερα καθεστώς ανακυκλοφορίας στη δέσμη (Zhang & Casey, 2007).

Επισημαίνεται ότι, αν και η δευτερεύουσα ροή εντοπίζεται σε μια πολύ πιο περιορισμένη περιοχή σε σχέση με αυτή στην οποία επικρατεί η αξονοσυμμετρική ροή, εντούτοις η δευτερεύουσα ροή επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες της δέσμης.

Συγκεκριμένα, λόγω των ανακυκλοφοριών της ροής, τα ρεύματα νερού που απαρτίζουν τη δέσμη συμπλέκονται μεταξύ τους και κατά την έξοδο του νερού από το ακροφύσιο παρατηρείται ο σχηματισμός σταγονιδίων στην επιφάνεια της δέσμης.

Τα σταγονίδια αυτά μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές φθορές στα εξαρτήματα της εγκατάστασης (σκαφίδια) και για το λόγο αυτό γίνονται προσπάθειες για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού. Για το λόγο αυτό έχουν πραγματοποιηθεί ορισμένες μελέτες, ώστε να εξέρχεται η ροή με τρόπο που να μη σχηματίζονται τα σταγονίδια ή να εγκατασταθεί ειδικό πλέγμα στην έξοδο του ακροφυσίου για να περιορίζονται οι ανακυκλοφορίες, ωστόσο προκαλούνται άλλα προβλήματα, που σχετίζονται με ενεργειακές απώλειες και παρουσία επικαθίσεων στην έξοδο του ακροφυσίου (Zhang, 2016). Επομένως αποτελεί ένα ζήτημα το οποίο χρήζει περαιτέρω ερευνητικής μελέτης.



Εικόνα 62: Ο στροβιλισμός της δέσμης και ο σχηματισμός σταγονιδίων στην επιφάνειά της. Ανάκτηση από: Zhang Zh., Pelton Turbines, Springer, 2016.

2.9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται σε συγκεντρωτικούς πίνακες οι τιμές όλων των μεγεθών που αναλύθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο. Παράλληλα πραγματοποιείται μια σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα των πειραματικών εξισώσεων που παρουσιάστηκαν εδώ και στα αντίστοιχα δεδομένα που ισχύουν για την περίπτωση του υδροηλεκτρικού σταθμού Πλαστήρα. Ακολουθούν οι πίνακες 11 και 12 με τις τελικές διαστάσεις των μεγεθών της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης.

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΗΣ ΠΛΑΣΤΗΡΑ
ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ			
Απόδοση μονάδας	η (αδιάστατο)	0.87	0.87
Ταχύτητα περιστροφής	Ω (rpm)	450	500
Ειδική ταχύτητα περιστροφής	Ωsp (rad)	0.2	0.222
Αριθμός πόλων γεννήτριας	P_o (αδιάστατο)	12	12

Διάμετρος κύκλου βήματος	D (mm)	2046	2040
Διάμετρος δέσμης νερού	d_o (mm)	163	152
Διάμετρος εξόδου ακροφυσίου	d_1 (mm)	202	190
Αναλογία δέσμης	m (αδιάστατο)	13	11
Αριθμός σκαφιδίων	Z (αδιάστατο)	22	21
Συντελεστής εκροής	φ_{a_1} (αδιάστατο)	0.65	0.64
ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ			
A	(mm)	178	239
B	(mm)	273	225
C	(mm)	329	309
R	(mm)	1014	950
D_1	(mm)	586	595
E	(mm)	135	142
F	(mm)	12	10
I	(mm)	832	723

Πίνακας 11: Συγκεντωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για μεγέθη του υδροτροβίλου Pelton. Ανάκτηση από:
<http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131> και Αρχείο ΥΗΣ Πλαστήρα, ΔΕΗ.

ΔΙΑΣΤΑΣΗ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΗΣ ΠΛΑΣΤΗΡΑ
Μήκος σκαφιδίου	372 mm	538 mm	455 mm	450 mm
Πλάτος σκαφιδίου	456 mm	652 mm	554 mm	531 mm
Βάθος εγκοπής	72 mm	102 mm	87 mm	80 mm
Πλάτος εγκοπής	183 mm	261 mm	222 mm	180 mm
Βάθος σκαφιδίου	130 mm	196 mm	163 mm	155 mm
Ύψος σκαφιδίου	285 mm	408 mm	347 mm	305 mm

Πίνακας 12: Πίνακας αποτελεσμάτων για τα μεγέθη που απαρτίζουν το σκαφίδιο του τροχού Pelton. Ανάκτηση από:
<http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131> και Αρχείο ΥΗΣ Πλαστήρα, ΔΕΗ.

2.10 ΣΥΝΟΨΗ

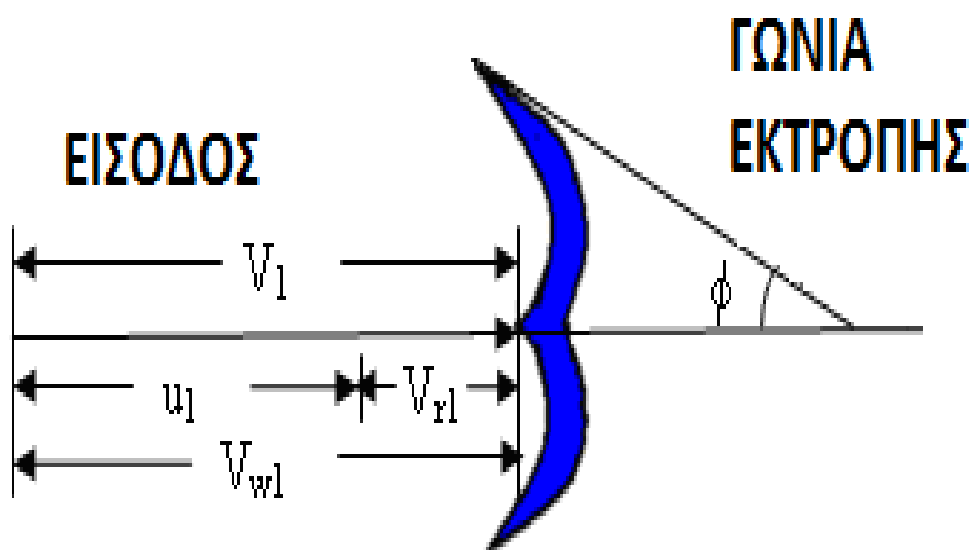
Συνοψίζοντας, στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκαν πολλά θεμελιώδη μεγέθη που είναι απαραίτητα για τον σωστό σχεδιασμό ενός υδροηλεκτρικού συγκροτήματος. Σύμφωνα με ευρέως παραδεκτές επιστημονικά πειραματικές σχέσεις, εξήχθησαν αποτελέσματα σχετικά με τις διαστάσεις των βασικών μερών, δηλαδή των ακροφυσίων, των σκαφιδίων, αλλά και γενικότερα χαρακτηριστικά της μονάδας ηλεκτροπαραγωγής. Αφού καταγράφηκαν τα αποτελέσματα αυτά, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τα αντίστοιχα δεδομένα που υπήρχαν διαθέσιμα από τον υδροηλεκτρικό σταθμό Πλαστήρα, με στόχο να εντοπιστούν ομοιότητες και διαφορές, αλλά και να αναδειχθεί η δυσκολία του εγχειρήματος από τη σκοπιά των μηχανικών που εκπόνησαν το έργο. Σε γενικές γραμμές διαπιστώθηκε ότι τα μεγέθη από τις πειραματικές εξισώσεις δεν είχαν μεγάλες αποκλίσεις από τα αντίστοιχα μεγέθη του ΥΗΣ Πλαστήρα, ενώ και αυτές οι αποκλίσεις οφείλονται στον προσεγγιστικό χαρακτήρα των εξισώσεων αυτών. Τέλος, αξιωματικά επισημανθεί ότι το παρόν κεφάλαιο αποτελεί έναν απαραίτητο οδηγό για τις ενότητες που έπονται, ιδιαίτερα για τον προκταρτικό σχεδιασμό, αλλά και το λεπτομερή σχεδιασμό της γεωμετρίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ PELTON

Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός (preliminary design) μιας στροβιλομηχανής, όπως ο υδροστρόβιλος Pelton αποτελεί μια βασικότερη διαδικασία κατά την οποία δίνεται έμφαση στον προσδιορισμό των διανυσμάτων ταχυτήτων και δυνάμεων που καθορίζουν τη λειτουργία του. Για να γίνει αυτό εφικτό, δίνεται μεγάλη προσοχή στην κατασκευή των τριγώνων ταχυτήτων, στα οποία απεικονίζονται διανυσματικές ποσότητες ταχυτήτων πριν και μετά την επαφή με τον υδροστρόβιλο Pelton. Συνεπώς γίνεται διαχωρισμός στα τρίγωνα ταχυτήτων εισόδου και εξόδου. Στις παρακάτω ενότητες εξετάζονται ξεχωριστά τα τρίγωνα για την είσοδο και την έξοδο, ενώ, τέλος, παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΡΙΓΩΝΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ

Η μελέτη του τριγώνου ταχυτήτων εισόδου ξεκινά με την καταγραφή και τον υπολογισμό των εμπλεκόμενων διανυσματικών ποσοτήτων. Επισημαίνεται ότι τα υπό συζήτηση διανυσματικά μεγέθη εκφράζουν την ταχύτητα που έχει η δέσμη του νερού, όταν πρόκειται να προσκρούσει στα περιστρεφόμενα σκαφίδια. Από αυτή την περιγραφή γίνεται κατανοητό ότι μελετώνται και απόλυτες και σχετικές κινήσεις, επομένως ορισμένα διανύσματα εκφράζουν απόλυτες, ενώ άλλα διανύσματα σχετικές ταχύτητες και αυτό εξαρτάται από το σύστημα συντεταγμένων αναφοράς που λαμβάνεται σε κάθε περίπτωση. Εδώ λαμβάνεται το ακίνητο σύστημα αναφοράς με κέντρο το άκρο του ακροφυσίου και το κινούμενο σύστημα αναφοράς που ακολουθεί την περιστροφή του στροβίλου. Στην εικόνα 63 παρουσιάζονται τα μεγέθη που είναι απαραίτητα στο τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου, ενώ ο πίνακας 13 που ακολουθεί, αποσκοπεί στην επεξήγηση των μεγεθών που παρουσιάζονται.



Εικόνα 63: Τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου υδροστροβίλου Pelton. Ανάκτηση από:
<http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131>.

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΣΗΜΑΣΙΑ
V_1 [=] m/s	Απόλυτη ταχύτητα νερού στην είσοδο (ακίνητο σύστημα αναφοράς)
V_{r1} [=] m/s	Σχετική ταχύτητα νερού στην είσοδο (κινούμενο σύστημα αναφοράς)
V_{w1} [=] m/s	Ταχύτητα της δίνης στην είσοδο (ίση με τη V_1)
u_1 [=] m/s	Εφαπτομενική ταχύτητα στροβίλου στην είσοδο

Πίνακας 13: Τα διανυσματικά μεγέθη που συμμετέχουν στο τρίγωνο ταχυτήτων για την είσοδο. Ανάκτηση από: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131>.

Στη συνέχεια περιγράφονται και οι διανυσματικές σχέσεις που διέπουν τα μεγέθη αυτά. Από την παραπάνω εικόνα γίνεται αντιληπτό ότι ισχύουν οι εξής εξισώσεις:

$$V_1 = V_{w1} = V_{r1} + u_1 \quad (15),$$

ενώ, όπως έχει δειχθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ισχύει:

$$u_1 = 0.46 \times V_1 \quad \text{και} \quad V_1 = C_v \times \sqrt{2 \times g \times H} \quad (16)$$

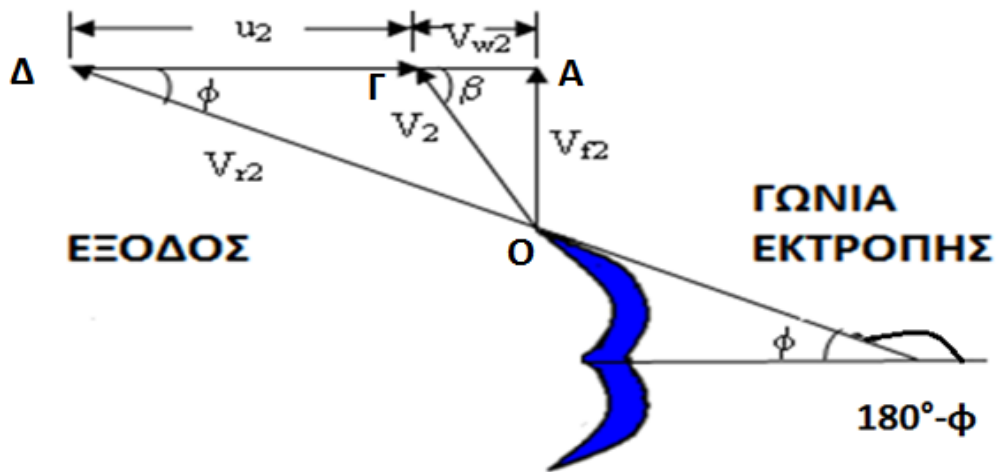
Επομένως με τη βοήθεια των παραπάνω σχέσεων είναι εφικτή η εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων για τα εμπλεκόμενα μεγέθη, κάτι το οποίο πραγματοποιείται σε επόμενη ενότητα (Al-Daraje, 2018; Sarkar, 2019).

3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΡΙΓΩΝΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΕΞΟΔΟΥ

Η ανάλυση συνεχίζεται με τον υπολογισμό των διανυσματικών μεγεθών που εμπλέκονται στο τρίγωνο ταχυτήτων της εξόδου. Όπως γίνεται αντιληπτό από την παρακάτω εικόνα, τα διανύσματα των ταχυτήτων εδώ είναι περισσότερα σε σχέση με αυτά της εισόδου και αυτό οφείλεται στο ότι η ροή εγκαταλείπει το σκαφίδιο υπό γωνία και όχι σε ευθεία, όπως ήταν η ροή πριν προσκρούσει στο σκαφίδιο. Ακριβώς αυτό το μέγεθος εκφράζει η γωνία εκτροπής φ . Και σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν και απόλυτα και σχετικά μεγέθη, άρα αντίστοιχα λαμβάνονται και τα συστήματα συντεταγμένων, ένα ακίνητο και ένα κινούμενο. Ομοίως με την ενότητα για το τρίγωνο εισόδου, παρουσιάζεται ο πίνακας 14 με τα αντίστοιχα διανύσματα για την έξοδο.

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΣΗΜΑΣΙΑ
V_2 [=] m/s	Απόλυτη ταχύτητα νερού στην έξοδο (ακίνητο σύστημα αναφοράς)
V_{r2} [=] m/s	Σχετική ταχύτητα νερού στην έξοδο (κινούμενο σύστημα αναφοράς)
V_{w2} [=] m/s	Ταχύτητα της δίνης στην έξοδο (ίση με τη V_2)
u_2 [=] m/s	Εφαπτομενική ταχύτητα στροβίλου στην έξοδο
V_{f2} [=] m/s	Ταχύτητα της ροής στην έξοδο
β	Γωνία της απόλυτης ταχύτητας με την κατεύθυνση της κίνησης των σκαφιδίων
φ	Γωνία της σχετικής ταχύτητας με την κατεύθυνση της κίνησης των σκαφιδίων
$180^\circ - \varphi$	Γωνία εκτροπής του νερού κατά την πρόσκρουση με το σκαφίδιο

Πίνακας 14: Τα διανυσματικά μεγέθη που συμμετέχουν στο τρίγωνο ταχυτήτων για την έξοδο. Ανάκτηση από: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131>.



Εικόνα 64: Τρίγωνο ταχυτήτων εξόδου υδροστροβίλου Pelton. Ανάκτηση από: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131>.

Στην εικόνα 64 παρουσιάζονται υπό μορφή σχήματος τα μεγέθη που αναλύθηκαν στον πίνακα 14. Για να καταστεί εφικτός ο προσδιορισμός των μεγεθών αυτών με αριθμητικές τιμές είναι απαραίτητη η παρουσία ορισμένων εξισώσεων, κάποιες από τις οποίες είναι πειραματικές, ενώ άλλες εξάγονται από τη γεωμετρία. Τονίζεται ότι συνήθως η γωνία εκτροπής θεωρείται ίση περίπου με 165° (κυμαίνεται μεταξύ 165° και 170° , όμως στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας λαμβάνεται ίση με 165°), συνεπώς η γωνία ϕ ισούται με 15° . Μια από τις σημαντικότερες σχέσεις ορίζει ότι:

$$V_{r2} = K \times V_{r1} \quad (17),$$

όπου το K ο συντελεστής τριβής σκαφιδίου που λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1, αλλά συνήθως στους υπολογισμούς οι τιμές του είναι κοντά στη μονάδα. Συγκεκριμένα, η τιμή του εξαρτάται από το πόσο λεία είναι η επιφάνεια των σκαφιδίων και το πόση ενέργεια χάνεται κατά το διαχωρισμό της δέσμης του νερού στην κοιλότητα του σκαφιδίου. Σε ιδανικές συνθήκες η τιμή του είναι μονάδα. Για τους υπολογισμούς στην παρούσα εργασία λαμβάνει την τιμή 0.99. Στη συνέχεια εξάγονται οι υπόλοιπες σχέσεις από τη γεωμετρία του σχήματος, άρα:

$$V_{f2} = V_{r2} \times \sin\phi \quad (18),$$

αφού το τρίγωνο $O\Delta A$ είναι ορθογώνιο. Αντίστοιχα, με την ίδια λογική ισχύει:

$$u_2 + V_{w2} = V_{r2} \times \cos\phi \quad (19),$$

όπου από το τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου ισχύει $u = u_1 = u_2$. Επομένως η μοναδική άγνωστη ποσότητα είναι το V_{w2} . Παρατηρώντας το μικρό ορθογώνιο τρίγωνο $O\Delta\Gamma$ ισχύει ανάλογα:

$$\tan\beta = \frac{V_{f2}}{V_{w2}} \quad (20),$$

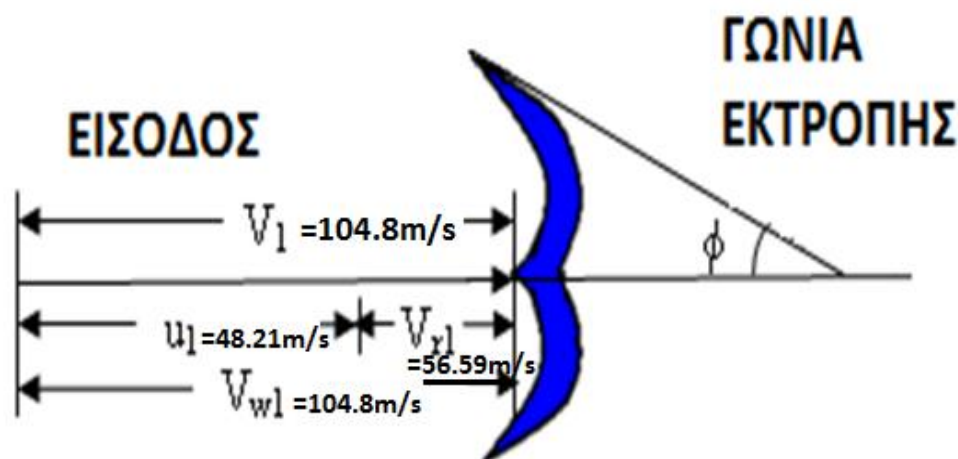
δηλαδή από αυτή τη σχέση μπορεί να εξαχθεί η γωνία β , η οποία πρέπει να είναι οξεία, όπως φαίνεται και από την εικόνα 64. Τέλος για τον προσδιορισμό της V_2 χρησιμοποιείται μία από τις δύο ακόλουθες εξισώσεις:

$$V_{f2} = V_2 \times \sin\beta \quad \text{ή} \quad V_{w2} = V_2 \times \cos\beta \quad (21)$$

Επομένως με τη βοήθεια των παραπάνω σχέσεων είναι εφικτή η εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων για τα εμπλεκόμενα μεγέθη, κάτι το οποίο πραγματοποιείται σε επόμενη ενότητα (Minn et al., 2014; Oo et al., 2019).

3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΡΙΓΩΝΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν μετά τους αντίστοιχους υπολογισμούς για τα μεγέθη του τριγώνου ταχυτήτων εισόδου, με τη βοήθεια του πίνακα 15 και της εικόνας 65.



Εικόνα 65: Σχηματικά αποτελέσματα του τριγώνου ταχυτήτων εισόδου. Ανάκτηση από: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131> (κατόπιν επεξεργασίας).

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΣΗΜΑΣΙΑ	ΤΙΜΗ
V_1 [=] m/s	Απόλυτη ταχύτητα νερού στην είσοδο (ακίνητο σύστημα αναφοράς)	104.8 m/s
V_{r1} [=] m/s	Σχετική ταχύτητα νερού στην είσοδο (κινούμενο σύστημα αναφοράς)	56.59 m/s
V_{w1} [=] m/s	Ταχύτητα της δίνης στην είσοδο (ίση με τη V_1)	104.8 m/s
u_1 [=] m/s	Εφαπτομενική ταχύτητα στροβίλου στην είσοδο	48.21 m/s

Πίνακας 15: Αποτελέσματα για το τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου. Ανάκτηση από: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131> (κατόπιν επεξεργασίας).

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη μια επαλήθευση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν, καθώς, επειδή πρόκειται για τις συνθήκες εισόδου, υπάρχει η δυνατότητα επιβεβαίωσης ορισμένων μεγεθών. Πιο συγκεκριμένα τα μεγέθη που μπορούν να επαληθευτούν είναι η εφαπτομενική ταχύτητα του στροβίλου στην είσοδο u_1 με τη βοήθεια της εξίσωσης $u = \frac{\pi \times D \times \Omega}{60}$, αλλά και η απόλυτη ταχύτητα V_1 μέσω της

εξίσωσης συνέχειας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των εξισώσεων του πίνακα 11 προκύπτει με αντικατάσταση των ποσοτήτων το εξής:

$$u = \frac{\pi \times D \times \Omega}{60} = \frac{\pi \times 2046 \times 10^{-3} \text{ m} \times 450 \text{ rpm}}{60} = 48.21 \text{ m/s} \quad (22)$$

Όπως γίνεται αντιληπτό χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα των εξισώσεων, αφού επαληθεύονται οι μαθηματικοί υπολογισμοί, και όχι τα δεδομένα από τα αρχεία του υδροηλεκτρικού σταθμού Πλαστήρα. Πράγματι οι εφαπτομενικές ταχύτητες βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία. Στη συνέχεια γίνεται χρήση της εξίσωσης της συνέχειας όπου ισχύει $V_1 = V_{out}$, επομένως:

$$Q = A_{in} \times V_{in} = A_{out} \times V_{out} \rightarrow \frac{\pi \times d_{in}^2}{4} \times V_{in} = \frac{\pi \times d_{out}^2}{4} \times V_{out} \rightarrow$$

$$V_{out} = V_{in} \times \left(\frac{d_{in}}{d_{out}} \right)^2 \quad (23)$$

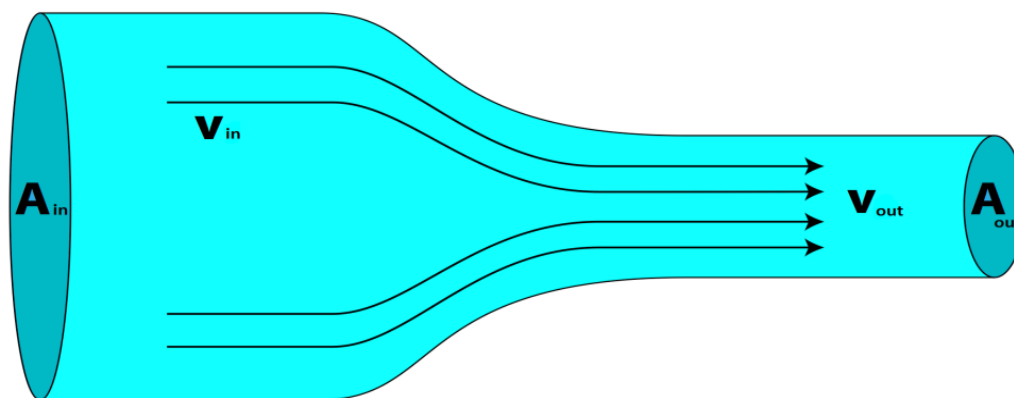
Προηγείται ο υπολογισμός της ταχύτητας V_{in} για την οποία ισχύει:

$$V_{in} = Q \times \frac{4}{\pi \times d_{in}^2} = 2.2 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \frac{4}{\pi \times (595 \times 10^{-3} \text{ m})^2} = 7.91 \text{ m/s} \quad (24)$$

Στους συγκεκριμένους υπολογισμούς θεωρείται μια μέση παροχή $8.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ανά μονάδα ηλεκτροπαραγωγής και επειδή κάθε μονάδα διαθέτει 4 ακροφύσια, έτσι προκύπτει το $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ως παροχή στο ακροφύσιο. Θα μπορούσαν βέβαια να γίνουν οι υπολογισμοί με βάση τη μέγιστη παροχή ($9.6 \text{ m}^3/\text{s}$, άρα $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$), ωστόσο προτιμήθηκε η προσέγγιση με βάση τη μέση παροχή. Τέλος τα 595mm είναι η διατομή στην είσοδο του ακροφυσίου. Αντικαθιστώντας και πάλι με βάση τον Πίνακα 11 προκύπτει τελικά για τη V_{out} το ακόλουθο αποτέλεσμα:

$$V_1 = V_{out} = V_{in} \times \left(\frac{d_{in}}{d_{out}} \right)^2 = 7.91 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \left(\frac{595 \text{ mm}}{163 \text{ mm}} \right)^2 = 105.4 \text{ m/s} \quad (25)$$

Συγκρίνοντας την τιμή αυτή με την αντίστοιχη του πίνακα 15 παρατηρείται διαφορά 0.6m/s, δηλαδή ποσοστιαία διαφορά μικρότερη του 1%.



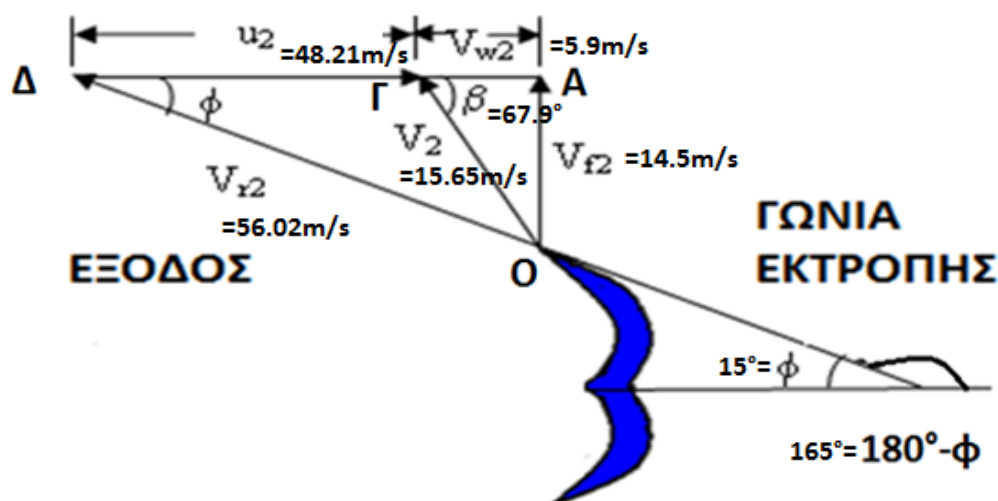
Εικόνα 66: Η εξίσωση της συνέχειας σε ένα ακροφύσιο. Ανάκτηση από: <https://www.aplusphysics.com/courses/honors/fluids/continuity.html>.

3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΡΙΓΩΝΟ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΕΞΟΔΟΥ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν μετά τους αντίστοιχους υπολογισμούς για τα μεγέθη του τριγώνου ταχυτήτων εξόδου, με τη βοήθεια του πίνακα 16. Αντίθετα με την ενότητα του τριγώνου ταχυτήτων εισόδου, δεν γίνεται εδώ κάποια επαλήθευση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν. Στη συνέχεια παρουσιάζεται και η εικόνα 67 με τις τιμές των μεγεθών σε σχηματική απεικόνιση, αντίστοιχα με το τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου.

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΣΗΜΑΣΙΑ	ΤΙΜΗ
V_2 [=] m/s	Απόλυτη ταχύτητα νερού στην έξοδο (ακίνητο σύστημα αναφοράς)	15.65m/s
V_{r2} [=] m/s	Σχετική ταχύτητα νερού στην έξοδο (κινούμενο σύστημα αναφοράς)	56.02m/s
V_{w2} [=] m/s	Ταχύτητα της δίνης στην έξοδο (ίση με τη V_2)	5.9m/s
u_2 [=] m/s	Εφαπτομενική ταχύτητα στροβίλου στην έξοδο	48.21m/s
V_{f2} [=] m/s	Ταχύτητα της ροής στην έξοδο	14.5m/s
β	Γωνία της απόλυτης ταχύτητας με την κατεύθυνση της κίνησης των σκαφιδίων	67.9°
ϕ	Γωνία της σχετικής ταχύτητας με την κατεύθυνση της κίνησης των σκαφιδίων	15°
$180^\circ - \phi$	Γωνία εκτροπής του νερού κατά την πρόσκρουση με το σκαφίδιο	165°

Πίνακας 16: Τα αποτελέσματα για το τρίγωνο ταχυτήτων εξόδου. Ανάκτηση από: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131> (κατόπιν επεξεργασίας).



Εικόνα 67: Σχηματικά αποτελέσματα του τριγώνου ταχυτήτων εξόδου. Ανάκτηση από: <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131> (κατόπιν επεξεργασίας).

3.5 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΔΕΙΞΗ

Στην ενότητα αυτή ακολουθεί μια χρήσιμη μαθηματική απόδειξη, το αποτέλεσμα της οποίας έχει επαληθευτεί μέσω μαθηματικών, αλλά και πειραματικών διαδικασιών και στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έχει αποτελέσει τον ακρογωνιαίο λίθο για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων προηγουμένως. Συγκεκριμένα πρόκειται για την εξίσωση $u = 0.5 \times V_1$, όπου αντί του 0.5 υιοθετείται ο συντελεστής 0.46, επειδή ο μειωμένος συντελεστής έχει βρεθεί ότι ανταποκρίνεται

καλύτερα στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (Oo et al., 2019). Η απόδειξη ξεκινά με την απόδοση, η οποία ισούται με το λόγο της ωφέλιμης ενέργειας του στροβίλου προς τη συνολική διαθέσιμη ενέργεια, δηλαδή:

$$\begin{aligned} n &= \frac{P_{\text{στροβίλου}}}{P_{\text{διαθέσιμη}}} = \frac{\rho \times Q \times (V_{w1} \times u_1 + V_{w2} \times u_2)}{\frac{1}{2} \times \rho \times Q \times V_1^2} = \frac{\rho \times Q \times (V_{w1} \times u + V_{w2} \times u)}{\frac{1}{2} \times \rho \times Q \times V_1^2} = \\ &= \frac{2 \times (V_{w1} + V_{w2}) \times u}{V_1^2} = \frac{2 \times [V_1 + (V_{r2} \times \cos\varphi - u)] \times u}{V_1^2} = \frac{2 \times (V_1 + K \times V_{r1} \times \cos\varphi - u) \times u}{V_1^2} = \\ &= \frac{2 \times [V_1 + K(V_1 - u) \times \cos\varphi - u] u}{V_1^2} = \frac{2 \times [K \times \cos\varphi \times (V_1 - u) + (V_1 - u)] u}{V_1^2} = \\ &= \frac{2 \times (1 + K \times \cos\varphi) \times (V_1 - u) u}{V_1^2} \end{aligned}$$

Άρα ισχύει: $n = 2 \times (1 + K \times \cos\varphi) \times \left(\frac{V_1 \times u}{V_1^2} - \frac{u^2}{V_1^2} \right)$ και θεωρώντας ότι ο λόγος ταχυτήτων λ θα είναι: $\lambda = \frac{u}{V_1}$ τότε η εξίσωση εκφράζεται ως:

$$n = 2 \times (1 + K \times \cos\varphi) \times (\lambda - \lambda^2)$$

Η μεγιστοποίηση της απόδοσης επιτυγχάνεται όταν η πρώτη παράγωγος της παραπάνω έκφρασης μηδενίζεται. Επομένως:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{d\lambda} &= 0 \rightarrow 2 \times (1 + K \times \cos\varphi)(1 - 2 \times \lambda) = 0 \rightarrow (1 - 2 \times \lambda) = 0 \rightarrow \\ \lambda &= \frac{1}{2} \rightarrow \frac{u}{V_1} = \frac{1}{2} \rightarrow \mathbf{u = 0.5 \times V_1} \quad (26) \end{aligned}$$

Επομένως η εξίσωση που έπρεπε να αποδειχθεί αρχικά συμφωνεί με το τελικό αποτέλεσμα, συνεπώς η απόδειξη έχει ολοκληρωθεί.

3.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Σε αυτό το τρίτο κεφάλαιο της εργασίας επιχειρήθηκε (όπως και στο δεύτερο) μια λεπτομερής καταγραφή ορισμένων θεμελιωδών χαρακτηριστικών του υδροστροβίλου Pelton. Κύριο αντικείμενο εδώ ήταν η κατασκευή των τριγώνων ταχυτήτων εισόδου και εξόδου, μια διαδικασία που συμβάλλει στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο κινείται και εκτρέπεται η ροή του νερού όταν προσκρούει σε ένα σκαφίδιο. Επιπλέον τα αποτελέσματα παρέχουν και μια πληροφόρηση σχετικά με την τάξη μεγέθους των ταχυτήτων (απόλυτων, σχετικών, εφαπτομενικών), οι οποίες, ανάλογα με το ποιο διάνυσμα ταχύτητας εξετάζεται σε κάθε περίπτωση, κυμαίνονται από 10m/s μέχρι και 100m/s περίπου. Τέλος, πολύ σημαντική και η παρουσία της επαλήθευσης με τη βοήθεια της εξίσωσης συνέχειας, μια διαδικασία που διασταυρώνει τα αποτελέσματα που εξήχθησαν και ενισχύει την εγκυρότητά τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΚΡΟΦΥΣΙΩΝ ΤΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ PELTON – ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SOLIDWORKS

Στο κεφάλαιο αυτό αρχίζει το κυριότερο μέρος της παρούσας εργασίας, που αναφέρεται στην υπολογιστική ανάλυση του υδροτροβίλου Pelton. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται διεξοδικά με μεθόδους υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ένα από τα βασικότερα τμήματα της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης, δηλαδή το ακροφύσιο του Pelton, το οποίο εγχύει το νερό με μεγάλη πίεση στα σκαφίδια. Σκοπός είναι η μοντελοποίηση του ακροφυσίου με τη βοήθεια εξειδικευμένου εμπορικού λογισμικού, συνεπώς ακολουθείται μια τυποποιημένη διαδικασία που αποτελείται από συγκεκριμένα στάδια.

Αρχικά κατασκευάζεται η γεωμετρία του ακροφυσίου, έπειτα γίνεται η εισαγωγή πλέγματος που αποσκοπεί στη διευκόλυνση της επίλυσης, στη συνέχεια πραγματοποιείται η επίλυση και τέλος ακολουθεί η εξαγωγή ορισμένων δεδομένων που οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με την ομαλή λειτουργία του ακροφυσίου. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο μελετά το πρώτο σκέλος της διαδικασίας αυτής, που αφορά την κατασκευή της γεωμετρίας του ακροφυσίου. Για την πραγματοποίηση της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε το δημοφιλές και εύχρηστο λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης Solidworks και περιγράφεται εκτενώς ο τρόπος με τον οποίο αναπτύχθηκε η γεωμετρία, καθώς και ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του.

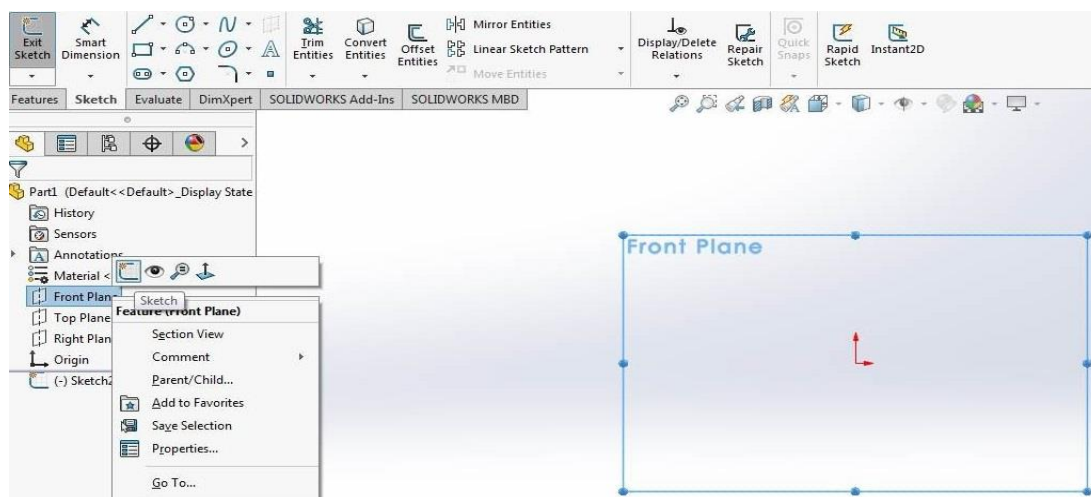
Το Solidworks παρέχει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ δύο βασικών δυνατοτήτων, όπου στην πρώτη μπορεί να σχεδιαστεί ένα απλό κομμάτι ή εξάρτημα (part), ενώ στη δεύτερη μπορεί να γίνει η συναρμολόγηση (assembly), δηλαδή η ενοποίηση πολλών διαφορετικών τμημάτων (parts). Κατά το σχεδιασμό του ακροφυσίου, λόγω ορισμένων ιδιομορφιών του σχεδίου, έγιναν τμηματικά ορισμένα κομμάτια, δηλαδή πρώτα ο αγωγός του ακροφυσίου και ξεχωριστά η βελόνα, ενώ στο τέλος χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή της συναρμολόγησης για τη συνένωση των μεμονωμένων κομματιών. Επισημαίνεται ότι οι διαστάσεις για την κατασκευή της γεωμετρίας βασίζονται στα σχέδια του υδροηλεκτρικού σταθμού Πλαστήρα.

4.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΓΩΓΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ

4.1.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΡΙΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΑΓΩΓΟΥ

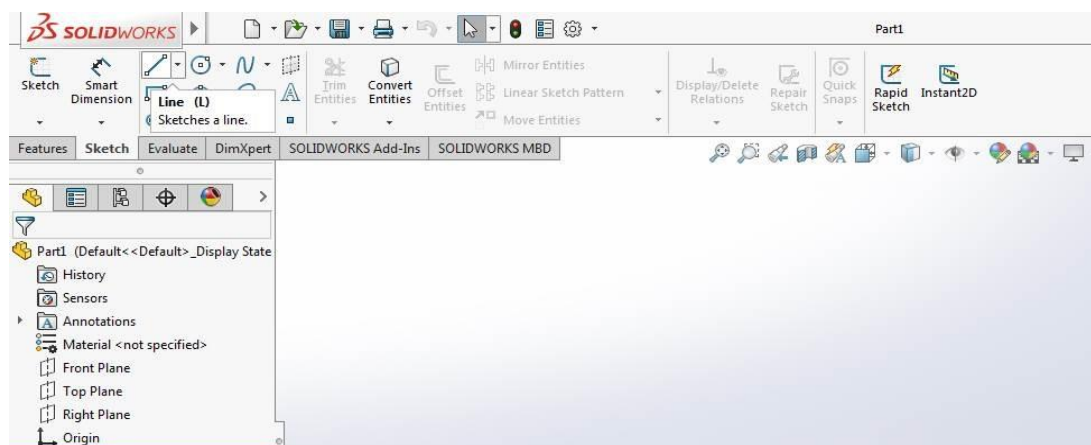
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του πρώτου τμήματος του ακροφυσίου. Πρόκειται για τον αγωγό μέσω του οποίου διέρχεται το νερό λίγο πριν φτάσει στη στένωση της διατομής, ενώ ειδική αναφορά γίνεται και στην απόληξη του ακροφυσίου, καθώς λόγω της μείωσης της διατομής, απαιτούνται κάπως πιο ιδιαίτεροι σχεδιαστικοί χειρισμοί. Λόγω του ότι χρησιμοποιείται κυρίως για τρισδιάστατη σχεδίαση, το Solidworks προσφέρει τη δυνατότητα απεικόνισης της

γεωμετρίας είτε μέσω της κάτωσης (top plane), είτε μέσω της μπροστινής όψης (front plane), είτε μέσω της δεξιάς πλάγιας όψης (right plane). Συνήθως κατά την έναρξη του σχεδίου, επιλέγεται η μπροστινή όψη, ενώ με την εντολή sketch τοποθετείται αυτόματα στο κέντρο του front plane ένα μικρό δισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων, από το οποίο μπορεί να ξεκινήσει η χάραξη του σχεδίου.



Εικόνα 68: Επιλογή των εντολών front plane και sketch στο Solidworks.
Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

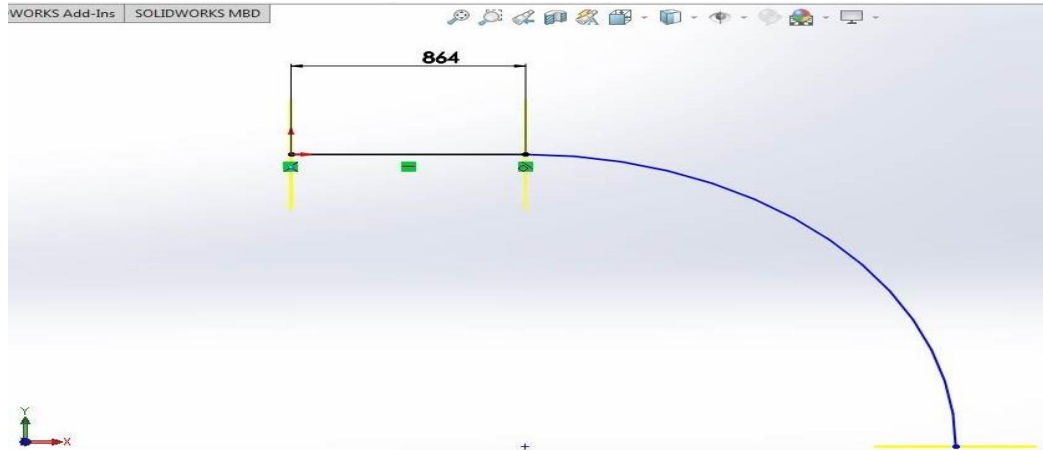
Στη συνέχεια, εντός του πλαισίου front plane υπάρχει η δυνατότητα σχεδιασμού απλών, αλλά και πιο περίπλοκων γεωμετρικών σχηματισμών σε δύο διαστάσεις. Η γραμμή εργαλείων που απεικονίζεται στην εικόνα 69 διευκολύνει τις διαδικασίες του σχεδιασμού. Οι βασικότερες εντολές που χρησιμοποιούνται είναι οι line (χάραξη ευθύγραμμων τμημάτων), circle (χάραξη κύκλων) και smart dimension (τοποθέτηση διαστάσεων στο σχέδιο).



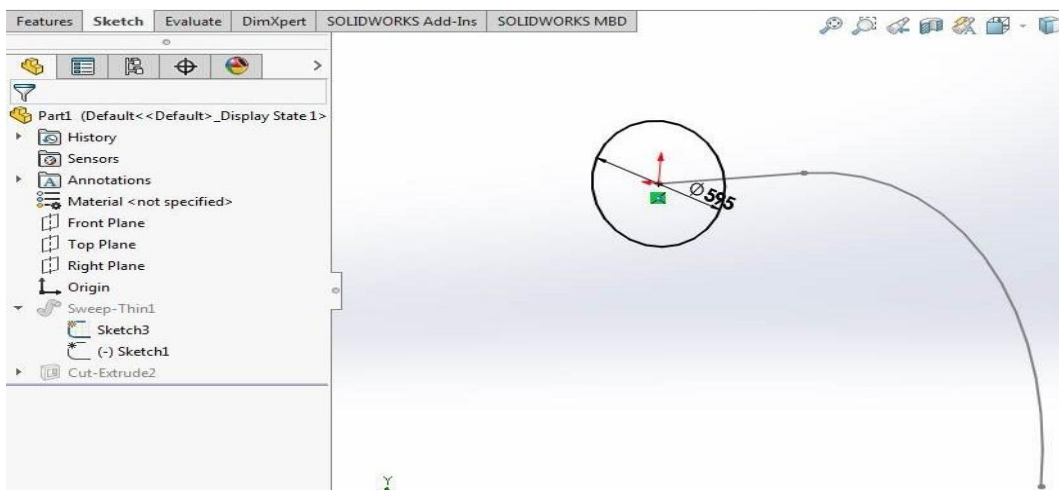
Εικόνα 69: Γραμμή εργαλείων για 2D σχεδίαση. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

Στη διάρκεια της κατασκευής της γεωμετρίας του ακροφυσίου, έγινε ένας αρχικός δισδιάστατος σχεδιασμός σύμφωνα με τις διαστάσεις των σχεδίων του σταθμού Πλαστήρα, ωστόσο το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του Solidworks, που αποτελεί και το μεγαλύτερο πλεονέκτημά του, είναι η πληθώρα των δυνατοτήτων που παρέχει στη μετατροπή των δισδιάστατων στοιχείων σε τρισδιάστατα, είτε μέσω της

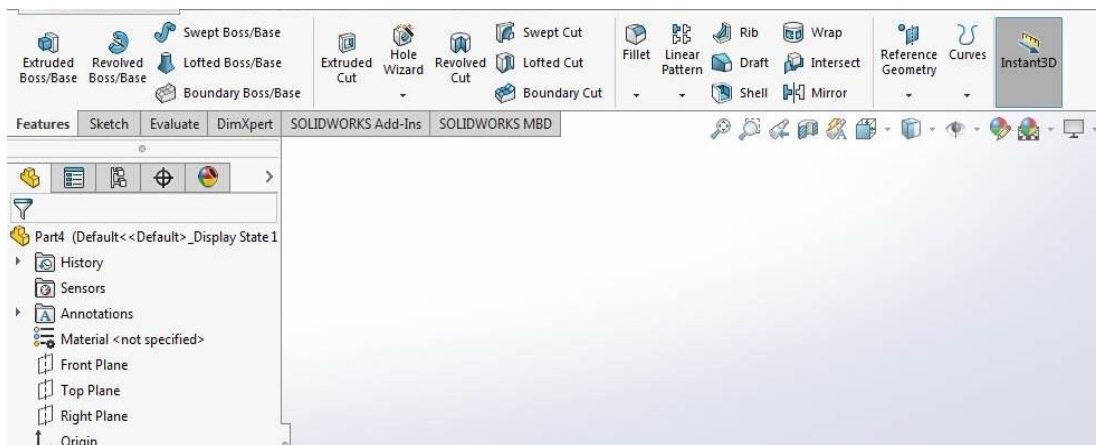
προσθήκης πάχους στη z κατεύθυνση (εντολή extrude), είτε με την παραγωγή στερεού εκ περιστροφής. Οι δυνατότητες αυτές περιέχονται στην καρτέλα features, αριστερά από τη βασική καρτέλα sketch. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο 2D σχεδιασμός του ακροφυσίου και η εξέλιξή του, αλλά και η καρτέλα features με τις χρήσιμες εφαρμογές της 3D σχεδίασης.



Εικόνα 70: Το αρχικό στάδιο της 2D σχεδίασης του αγωγού του ακροφυσίου.
Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

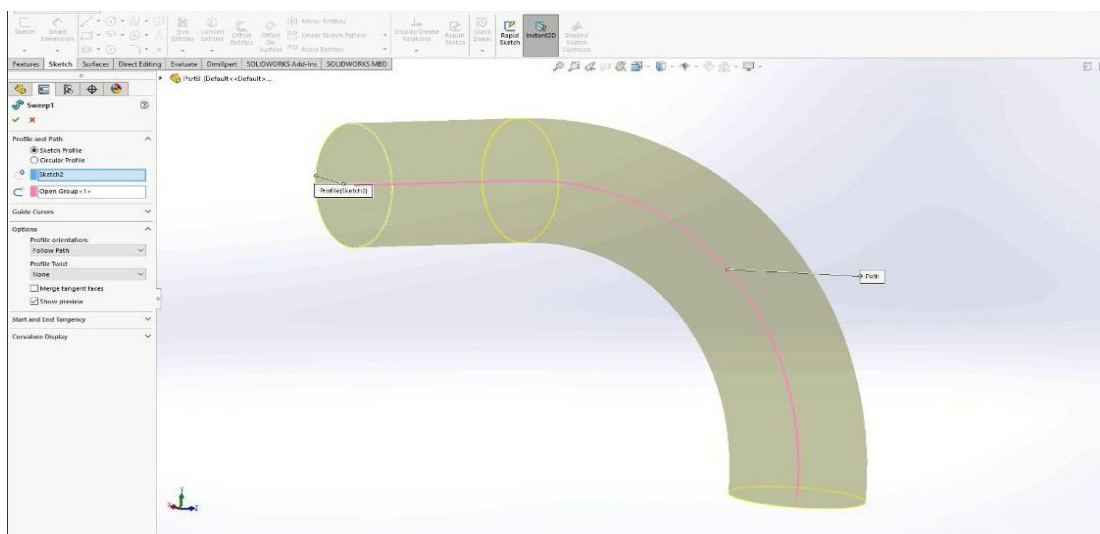


Εικόνα 71: Επόμενο στάδιο στη 2D σχεδίαση του αγωγού του ακροφυσίου.
Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

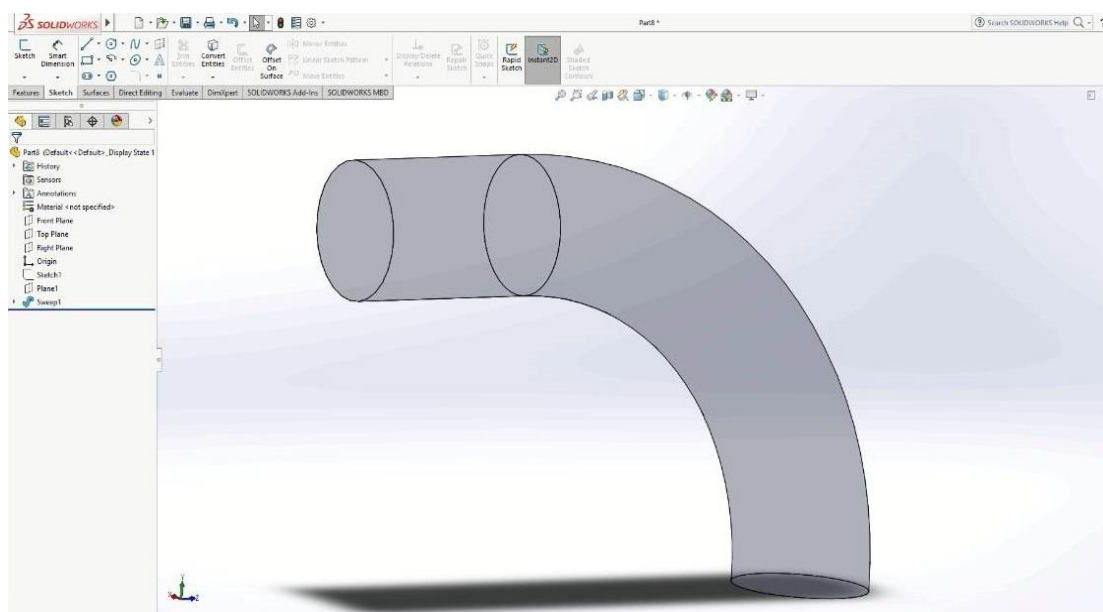


Εικόνα 72: Η καρτέλα features με τις χρήσιμες εφαρμογές της 3D απεικόνισης.
Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες εντολές για παραγωγή 3D γεωμετρίας είναι η extruded boss/base (προσθήκη πάχους στη z κατεύθυνση συνήθως για μη κυκλικές γεωμετρίες), η revolved boss/base (παραγωγή κυκλικής γεωμετρίας εκ περιστροφής) και η swept boss/base (παραγωγή κυκλικής γεωμετρίας εκ περιστροφής, αλλά και κυκλικής γεωμετρίας με ακμώνες, δηλαδή συνήθως γωνίες 90°). Στην περίπτωση της γεωμετρίας του ακροφυσίου, αφού ολοκληρώθηκε η 2D σχεδίαση (εικόνα 70 και 71), χρησιμοποιήθηκε η εντολή swept boss/base (διακρίνεται στην εικόνα 72), λόγω και της ύπαρξης της καμπύλης που έχει ο αγωγός του ακροφυσίου. Για την παραγωγή της τρισδιάστατης γεωμετρίας η εντολή αυτή χρειάζεται έναν άξονα γύρω από τον οποίο θα γίνει η περιστροφή, καθώς και έναν κύκλο, ώστε να δοθεί η επιθυμητή γεωμετρική μορφή. Η εικόνα 73 απεικονίζει την τρισδιάστατη γεωμετρία του αγωγού. Στην εικόνα 74 παρουσιάζεται η τελική μορφή του αγωγού του ακροφυσίου.



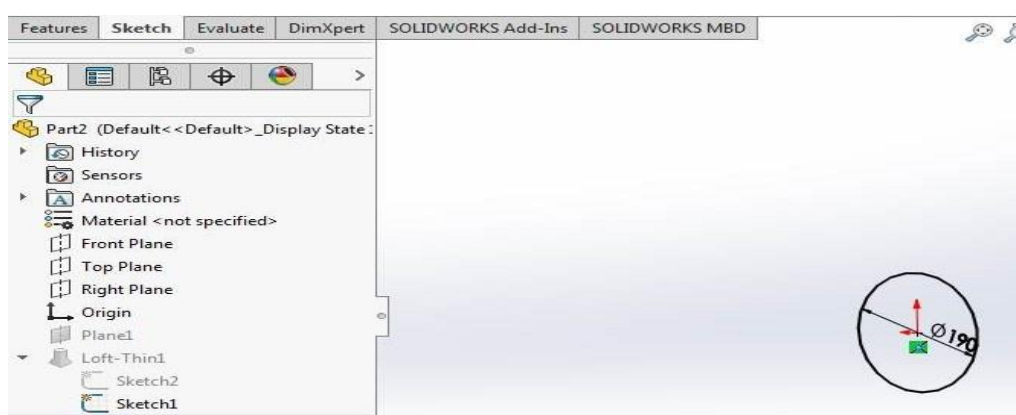
Εικόνα 73: Παραγωγή 3D γεωμετρίας του αγωγού του ακροφυσίου εκ περιστροφής. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.



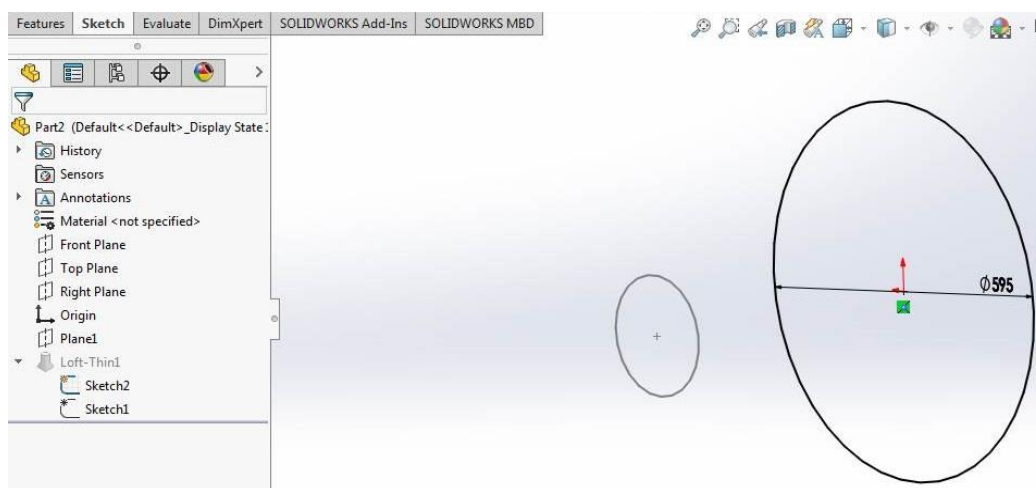
Εικόνα 74: Η τελική μορφή του αγωγού του ακροφυσίου. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

4.1.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΠΟΛΗΞΗΣ ΑΓΩΓΟΥ

Για την ολοκλήρωση της γεωμετρίας του αγωγού απαιτείται η προσθήκη ενός θεμελιώδους τμήματος, της απόληξης του ακροφυσίου. Χάρη σε αυτή επιτυγχάνεται η μείωση της διατομής του ακροφυσίου και κατά συνέπεια η αύξηση της ταχύτητας του νερού κατά τη διέλευσή του. Το λογισμικό Solidworks ακολουθεί μια αυτοματοποιημένη διαδικασία για την παραγωγή της χαρακτηριστικής γεωμετρίας ακροφυσίων (nozzles). Η μέθοδος συνίσταται στην δημιουργία δύο ομόκεντρων αντικρυστών κύκλων (σε δύο διαφορετικά επίπεδα δηλαδή) και η ένωσή τους με κατάλληλο τρόπο. Επομένως είναι απαραίτητη αρχικά η κατασκευή των κύκλων, με τον μικρό να έχει διάμετρο 190mm και τον μεγάλο 595mm, όπως και ο κυρίως αγωγός.

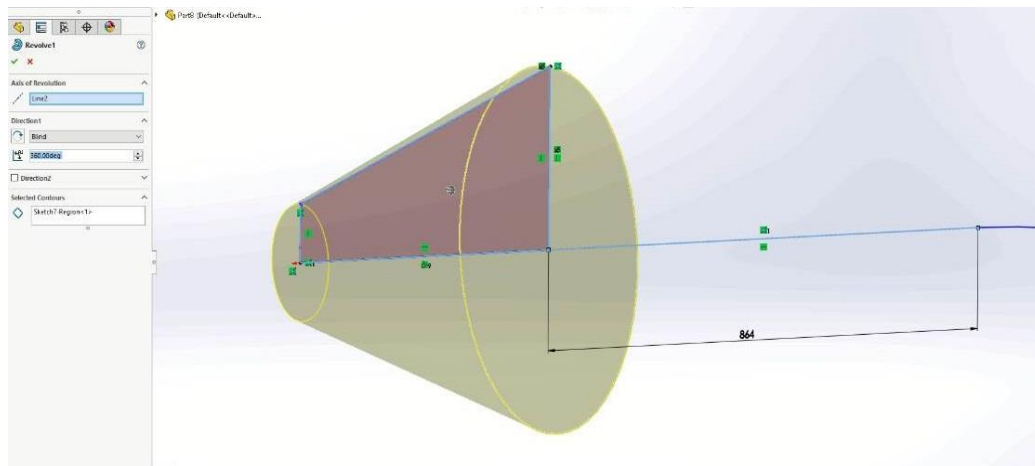


Εικόνα 75: Κατασκευή του μικρού κύκλου. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

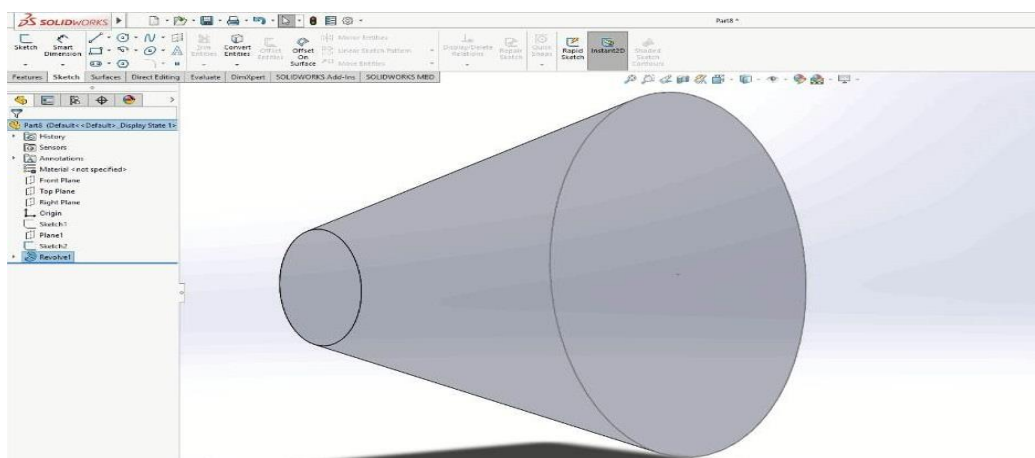


Εικόνα 76: Κατασκευή του μεγάλου κύκλου. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

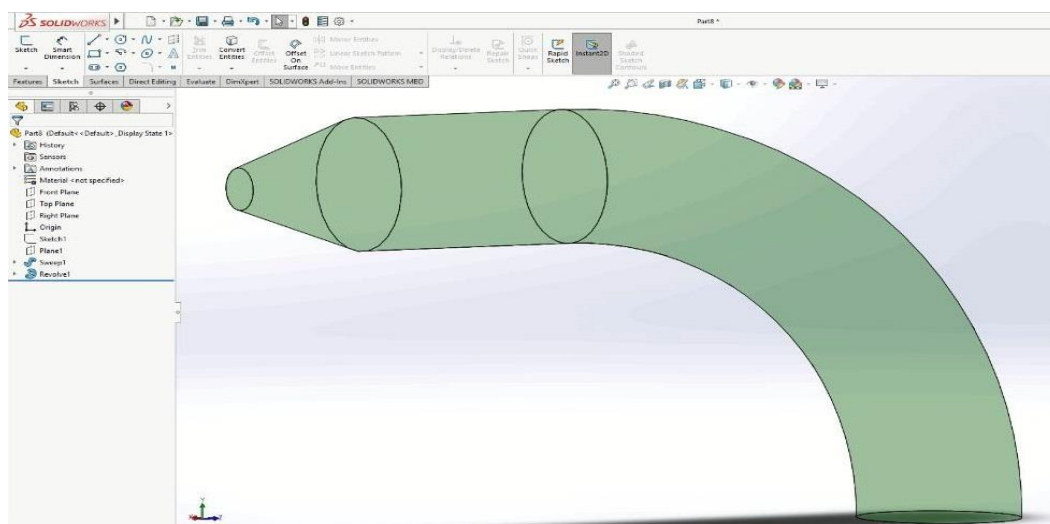
Μετά τη χάραξη των κύκλων πραγματοποιείται η συνένωσή τους με τέτοιο τρόπο, ώστε να σχηματιστεί η χαρακτηριστική μορφή του ακροφυσίου, ενώ παράλληλα ενώνονται και με το υπόλοιπο τμήμα του αγωγού. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η εντολή revolved boss/base από την καρτέλα των features, επομένως η τελική μορφή που λαμβάνει η απόληξη του ακροφυσίου παρουσιάζεται στις εικόνες 77 και 78.



Εικόνα 77: Χρήση της εντολής revolved boss/base για κατασκευή της απόληξης του ακροφυσίου. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.



Εικόνα 78: Η τελική μορφή της απόληξης του ακροφυσίου. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.



Εικόνα 79: Ολοκληρωμένη η γεωμετρία του ακροφυσίου. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

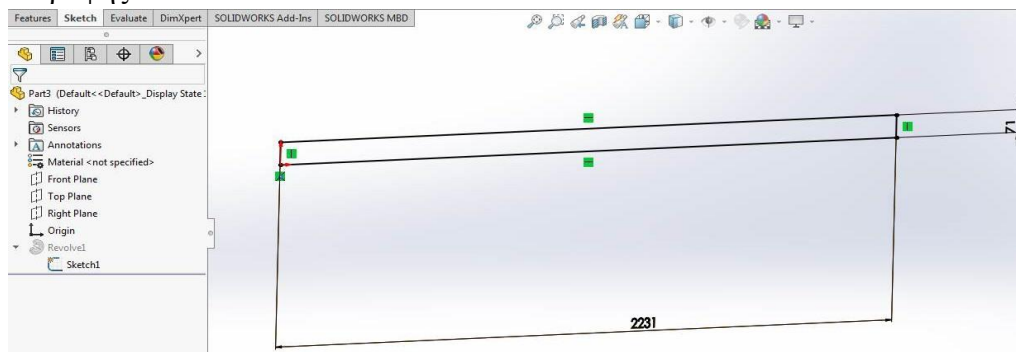
Τα μέρη της γεωμετρίας που μελετήθηκαν στις υποενότητες 4.1.1 και 4.1.2 αποτελούν δύο ξεχωριστά εξαρτήματα, ωστόσο, επειδή η μεγάλη διάμετρος της απόληξης του ακροφυσίου ταυτίζεται με τη διάμετρο του κυρίως αγωγού, είναι

δυνατή η ενοποίησή τους, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό ολόκληρο τον αγωγό του ακροφυσίου. Στην εικόνα 79 διακρίνονται μεταξύ άλλων η ιδιαίτερη γεωμετρία της απόληξης του ακροφυσίου, αλλά και μια συνολική απεικόνιση της υπό εξέταση γεωμετρίας, ενώ το Solidworks παρέχει τη δυνατότητα χρωματισμού των σχεδίων, συνεπώς επιλέγεται μια απόχρωση παρόμοια με αυτή των μονάδων του ΥΗΣ Πλαστήρα.

4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΒΕΛΟΝΑΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ

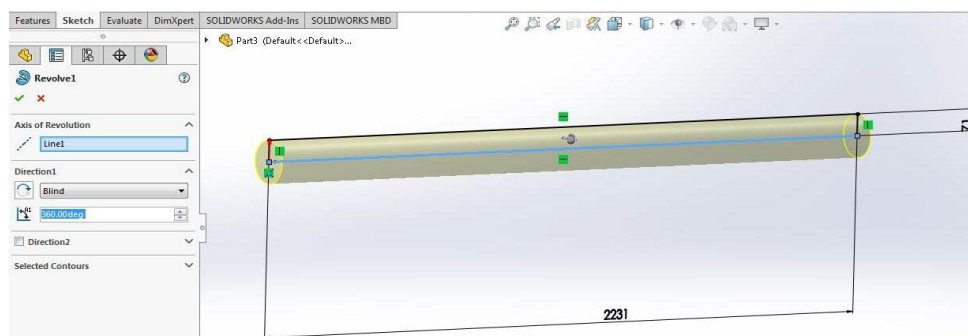
4.2.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΡΙΩΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΟΝΑΣ

Μετά την κατασκευή του ακροφυσίου είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός της βελόνας, ο οποίος έχει επίσης ορισμένες ιδιομορφίες, κυρίως στην απόληξή της, συνεπώς μελετάται σε μεμονωμένα κομμάτια, τα οποία τελικά συνενώνονται σε ένα. Στην υποενότητα αυτή σχεδιάζεται το κύριο κομμάτι της βελόνας, κυκλικού σχήματος και συμπαγές. Αρχικά είναι αναγκαία η χάραξη ενός βασικού δισδιάστατου σχεδίου και κατόπιν η τρισδιάστατη μορφή αποκτάται με παραγωγή στερεού εκ περιστροφής.

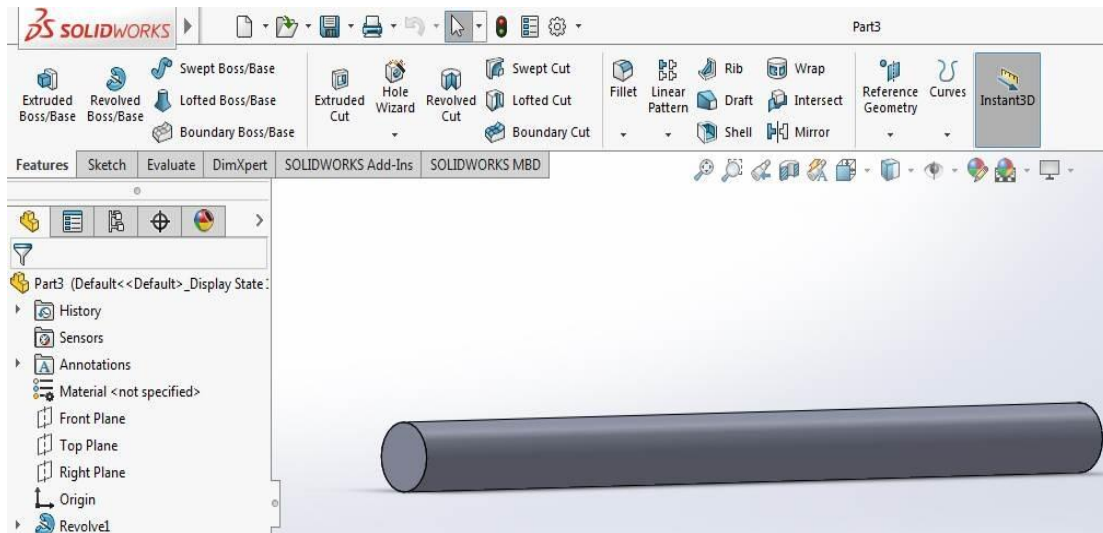


Εικόνα 80: Βασικό 2D σχέδιο για τον κύριο άξονα της βελόνας. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

Στη συνέχεια αυτό το δισδιάστατο επίπεδο που έχει σχεδιαστεί μπορεί να περιστραφεί γύρω από τον άξονα (το κάτω ευθύγραμμο τμήμα μήκους 2231mm) και έτσι να παραχθεί ένα τρισδιάστατο σχέδιο κυκλικής διατομής. Για την επίτευξη του στόχου αυτού χρησιμοποιείται η εντολή revolved boss/base από την καρτέλα των features (εικόνα 72), επιλέγεται περιστροφή 360°, δηλαδή ένας ολόκληρος κύκλος και με αυτό τον τρόπο προκύπτει η επιθυμητή γεωμετρία, όπως φαίνεται στην εικόνα 82.



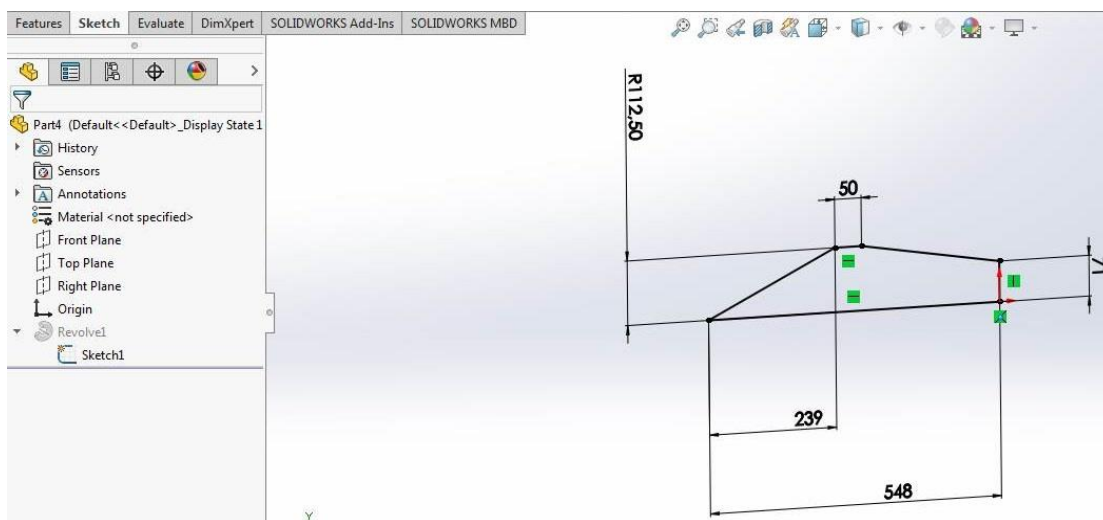
Εικόνα 81: 3D σχέδιο με τη βοήθεια της εντολής revolved boss/base. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.



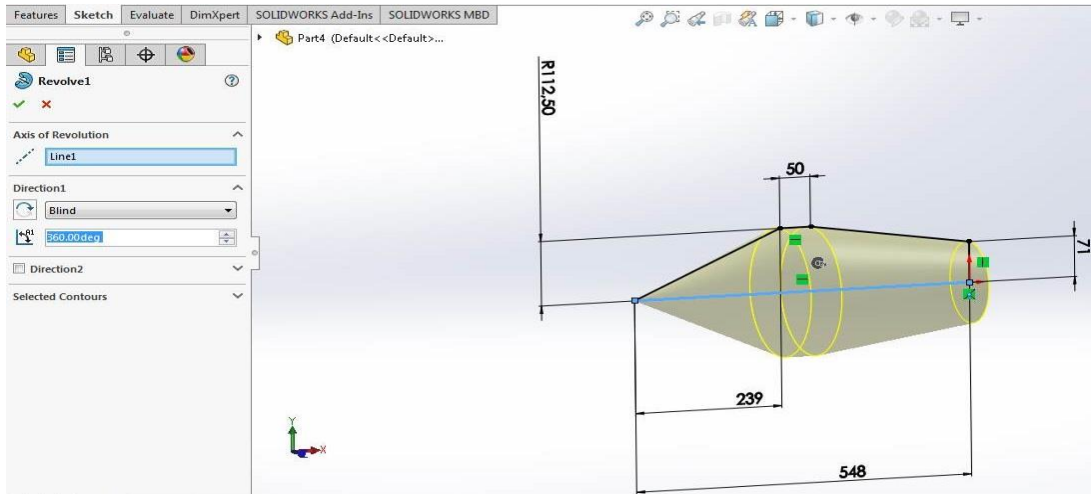
Εικόνα 82: Η τελική μορφή του κυρίου τμήματος της βελόνας. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

4.2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΠΟΛΗΞΗΣ ΒΕΛΟΝΑΣ

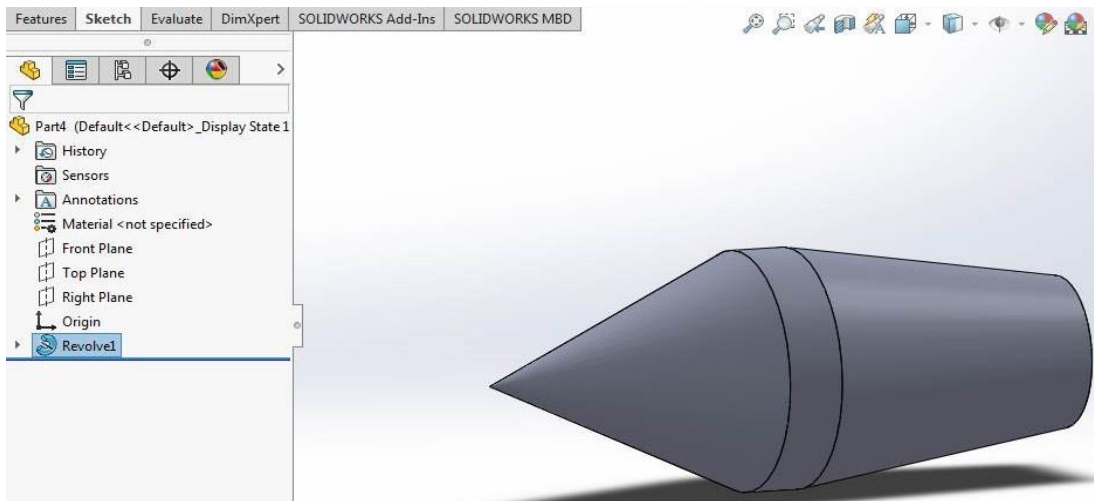
Μετά τη σχεδίαση του βασικού κορμού της βελόνας δημιουργείται το άκρο της, δηλαδή η απόληξή της με το χαρακτηριστικό αιχμηρό πέρας, που διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγής, αφού καθορίζει τη διέλευση της παροχής του νερού που θα εκτονωθεί στα σκαφίδια. Αποτελεί ένα θεμελιώδες κομμάτι του συνόλου της γεωμετρίας και χάρη στην πληθώρα των επιλογών του λογισμικού Solidworks, προβάλλονται επιτυχώς τα ιδιόμορφα χαρακτηριστικά του. Αρχικά είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός κυρίου διασδιάστατου σχεδίου, το οποίο θα συγκροτήσει ένα επίπεδο που θα περιστραφεί για να δημιουργήσει έναν όγκο στερεού. Η διαδικασία αυτή καθίσταται εφικτή με τη βοήθεια της εντολής revolved boss/base. Η τελική μορφή απόληξης της βελόνας διακρίνεται στην εικόνα 85.



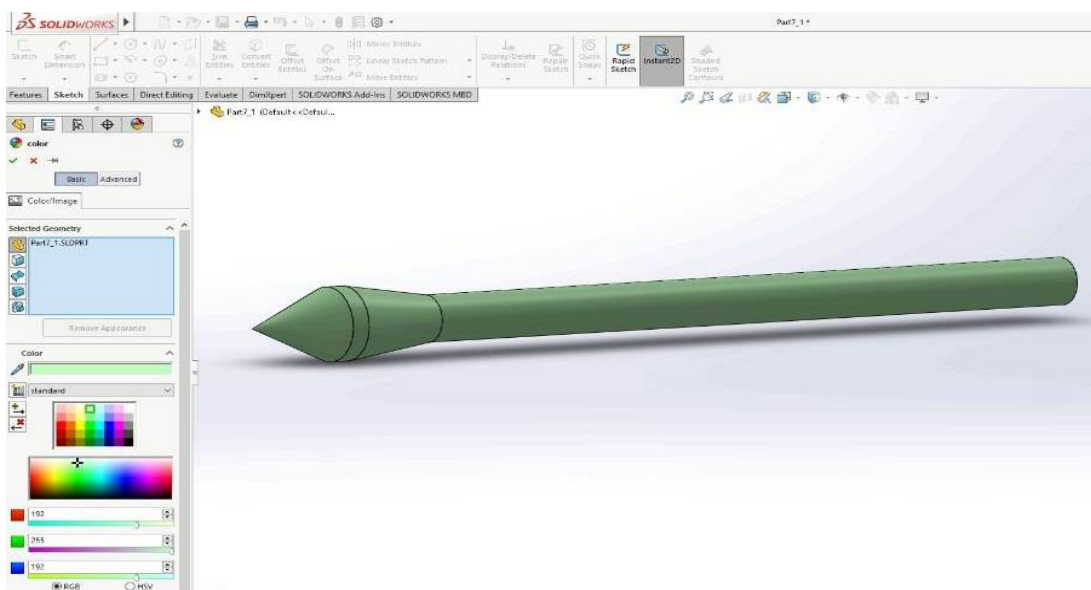
Εικόνα 83: Αρχικό διαστασιολογημένο 2D σχέδιο της απόληξης της βελόνας. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.



Εικόνα 84: Χρήση της εντολής revolved boss/base για το 3D σχέδιο. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.



Εικόνα 85: Τελική μορφή απόληξης βελόνας. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.



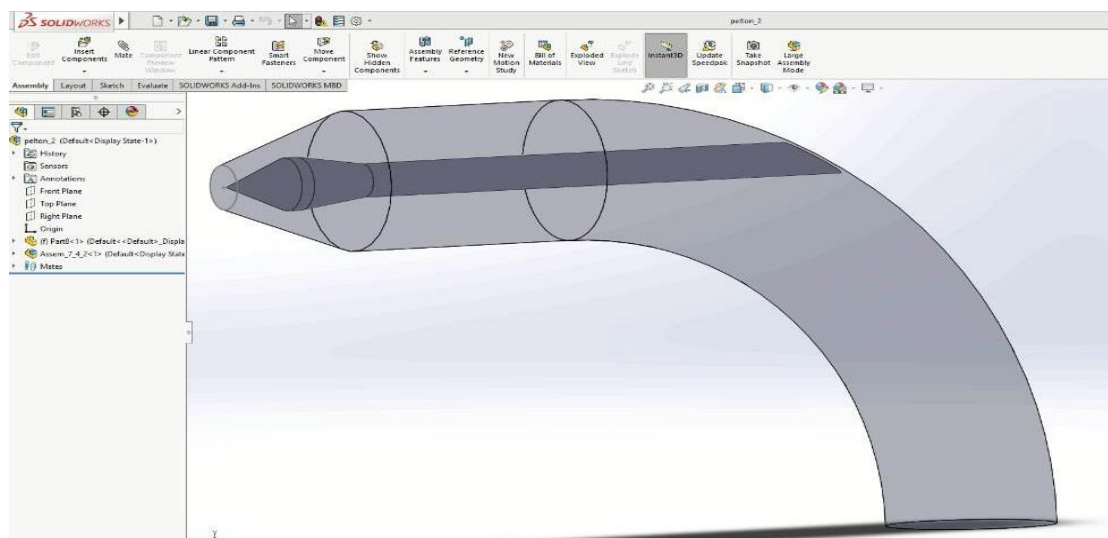
Εικόνα 86: Τελική μορφή ολόκληρης της βελόνας του ακροφυσίου. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

Αφού παρουσιάστηκε ο τρόπος σχεδιασμού των επιμέρους τμημάτων της βελόνας στις υποενότητες 4.2.1 και 4.2.2, πλέον γίνεται η συνένωσή τους σε ένα ενιαίο εξάρτημα. Όπως και για τα μέρη του ακροφυσίου, η ένωση γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να ταιριάζουν οι διάμετροι των κομματιών που έρχονται σε επαφή. Συνεπώς η ολοκληρωμένη συναρμολόγηση της βελόνας παρουσιάζεται στην εικόνα 86, ενώ επιλέχθηκε η ίδια απόχρωση με αυτή του ακροφυσίου.

4.3 ΤΕΛΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ (ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ-ΒΕΛΟΝΑΣ)

Η τελευταία ενότητα αυτού του κεφαλαίου αναφέρεται στη σύσταση του τελικού γεωμετρικού σχήματος μέσω της συναρμολόγησης των δύο βασικών τμημάτων που αναλύθηκαν στις ενότητες 91 και 97. Σε αυτό το τελικό αντικείμενο επομένως ενώνονται σε ένα όλα τα κομμάτια του ακροφυσίου και της βελόνας που μελετήθηκαν. Ωστόσο έλαβαν χώρα και κάποιες ρυθμίσεις, ώστε να αντικατοπτρίζεται καλύτερα η λειτουργία του ακροφυσίου σύμφωνα με τις πραγματικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, το λογισμικό Solidworks παρέχει τη δυνατότητα στη βελόνα να βρίσκεται στο εσωτερικό του ακροφυσίου, να μετακινείται μόνο στον οριζόντιο άξονα και να μην υπερβαίνει τα όρια του ακροφυσίου, όπως ισχύει στην πραγματικότητα.

Παράλληλα η αναπαράσταση της γεωμετρίας γίνεται πιο ρεαλιστική, αφού το ακροφύσιο μπορεί να γίνει διαφανές (transparent) και έτσι να φαίνεται η βελόνα στο εσωτερικό του. Για να καταστούν βέβαια εφικτές όλες οι παραπάνω δυνατότητες πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα αρχείο assembly και όχι part, όπως συνέβαινε μέχρι τώρα. Μέσα στο αρχείο assembly και συγκεκριμένα στην ομώνυμη καρτέλα υπάρχει η εντολή insert components, μέσω της οποίας πραγματοποιείται η εισαγωγή των επιθυμητών parts με σκοπό την ενοποίησή τους. Όπως προαναφέρθηκε, ορισμένες απλές συνδέσεις εξαρτημάτων μπορούν να γίνουν και σε part αρχεία, ωστόσο το assembly απαιτείται στο σημείο αυτό, καθώς είναι κατάλληλο για πιο περίπλοκες συνδεσμολογίες τμημάτων.



Εικόνα 87: Συνολική απεικόνιση της γεωμετρίας του ακροφυσίου. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

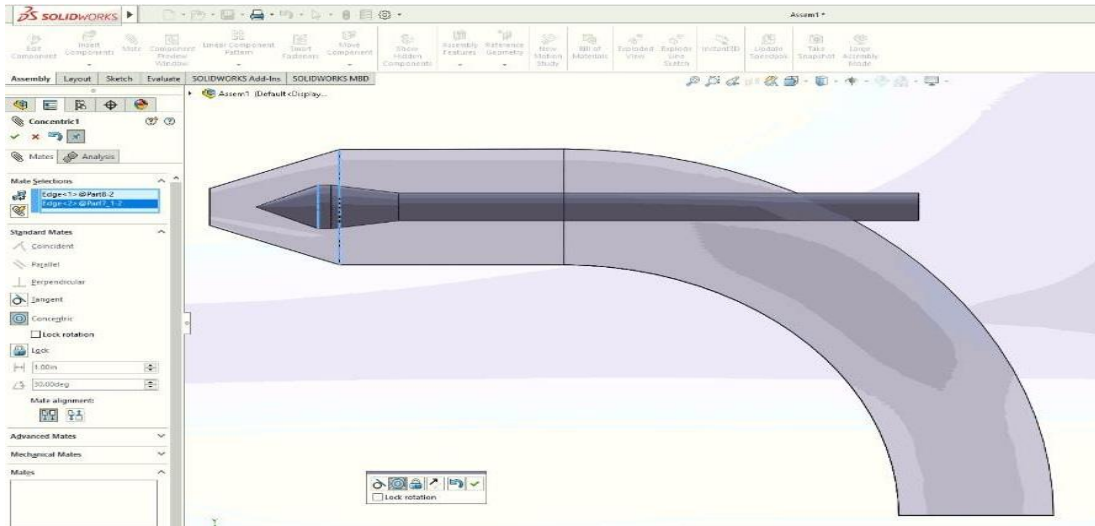
Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν δύο πολύ σημαντικές παρατηρήσεις. Αρχικά η βελόνα βρίσκεται ολόκληρη (και όχι ένα μέρος της) εντός του αγωγού του ακροφυσίου, κάτι το οποίο δεν ισχύει στην πραγματικότητα, αφού πρέπει να μετακινείται στον οριζόντιο άξονα, αυξομειώνοντας αναλόγως την παροχή του νερού. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε ορισμένους υπολογιστικούς περιορισμούς που επιβάλλουν τα λογισμικά που αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια. Συνεπώς για να προσομοιωθεί αυτή η μετατόπιση της βελόνας με δεδομένο τον παραπάνω περιορισμό κρίθηκε σκόπιμη η δημιουργία τριών διαφορετικών περιπτώσεων (cases) που αντιπροσωπεύουν 3 διαφορετικές θέσεις της βελόνας.

Η μοναδική διαφορά των cases έγκειται στο μήκος της βελόνας (διαφορετικό σε κάθε περίπτωση, ανάλογα με το πόση παροχή διέρχεται), ωστόσο στην παρούσα ενότητα αναλύονται τα χαρακτηριστικά μιας από τις 3 περιπτώσεις, αφού σε γενικές γραμμές η κατασκευή των 3 γεωμετριών δεν διαφοροποιείται σημαντικά. Η δεύτερη παρατήρηση αποτελεί απόρροια της πρώτης και σχετίζεται με το ιδιαίτερο σχήμα της γεωμετρίας στο πίσω μέρος της βελόνας, το οποίο είναι κατάλληλα προσαρμοσμένο στην καμπύλη του αγωγού του ακροφυσίου, ώστε να επιτυγχάνεται η κατά το δυνατό βέλτιστη στεγανότητα μεταξύ ακροφυσίου-βελόνας στο σημείο αυτό.

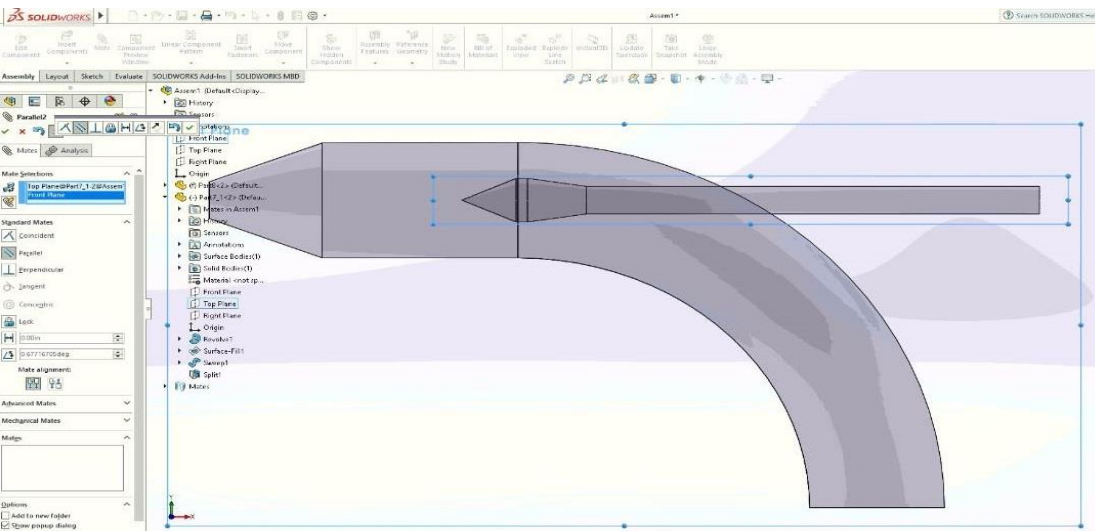
Αναλύοντας το τεχνικό κομμάτι, δηλαδή τις εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για να προκύψει το τελικό αποτέλεσμα, υπογραμμίζεται ότι η εντολή mate (στην καρτέλα assembly όπως φαίνεται στην εικόνα 87) διδραματίζει καίριο ρόλο, καθώς προσφέρει μια ποικιλία επιλογών για συναρμολογήσεις τμημάτων και εξαρτημάτων. Συγκεκριμένα επιλέγοντας την εντολή mate και από τις επιλογές το concentric, γίνεται εφικτή η ένωση του ακροφυσίου με τη βελόνα με τρόπο ώστε να υπάρχει μετατόπιση μόνο στον οριζόντιο άξονα x, όπως φαίνεται στην εικόνα 88. Αυτή η δυνατότητα της ελεγχόμενης μετατόπισης αποτελεί ένα χρησιμότερο εργαλείο κατά την πλεγματοποίηση της γεωμετρίας, όπου επιλέγονται διαφορετικές θέσεις ανοίγματος της βελόνας (λιγότερο-περισσότερο ανοιχτή), με σκοπό τη μελέτη της λειτουργίας του ακροφυσίου.

Βέβαια δεν αρκεί μόνο η παρουσία της εντολής concentric, αφού ναί μεν εξασφαλίζει την κίνηση στον οριζόντιο άξονα, ωστόσο επιτρέπει μια ελάχιστη περιστροφή της βελόνας γύρω από το συγκεκριμένο άξονα, κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό. Για να αντιμετωπιστεί το ζήτημα αυτό χρησιμοποιείται η επιλογή των κατάλληλων planes (μπορεί να είναι front, αλλά σε κάποιες περιπτώσεις και top ή right) της βελόνας, αλλά και ολόκληρης της κατασκευής, επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό κίνηση χωρίς την περιστροφή (εικόνα 89). Στη συγκεκριμένη περίπτωση η περιστροφή δεν είναι ιδιαίτερα ορατή, λόγω της συμμετρικής γεωμετρίας της βελόνας, ωστόσο σε πιο ασύμμετρες γεωμετρίες εντοπίζεται ξεκάθαρα.

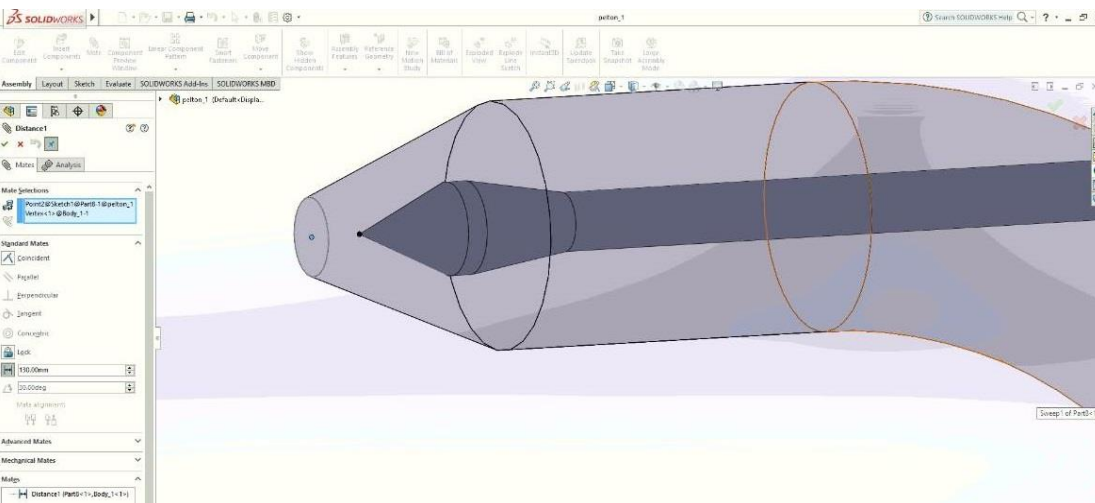
Τέλος, όπως περιγράφηκε πριν, η κίνηση της βελόνας περιορίζεται εντός των ορίων του ακροφυσίου, δηλαδή έχει κάποιες ακραίες θέσεις πέρα από τις οποίες καθίσταται ανέφικτη η μετατόπισή της. Το εύρος των θέσεων αυτών καθορίζεται και πάλι από την εντολή mate, επιλέγοντας advanced mates και το σύμβολο distance, το οποίο βρίσκεται ακριβώς κάτω από την επιλογή linear/linear coupler, όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από την εικόνα 90.



Εικόνα 88: Χρήση της εντολής mate-concentric για ένωση ακροφυσίου-βελόνας. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

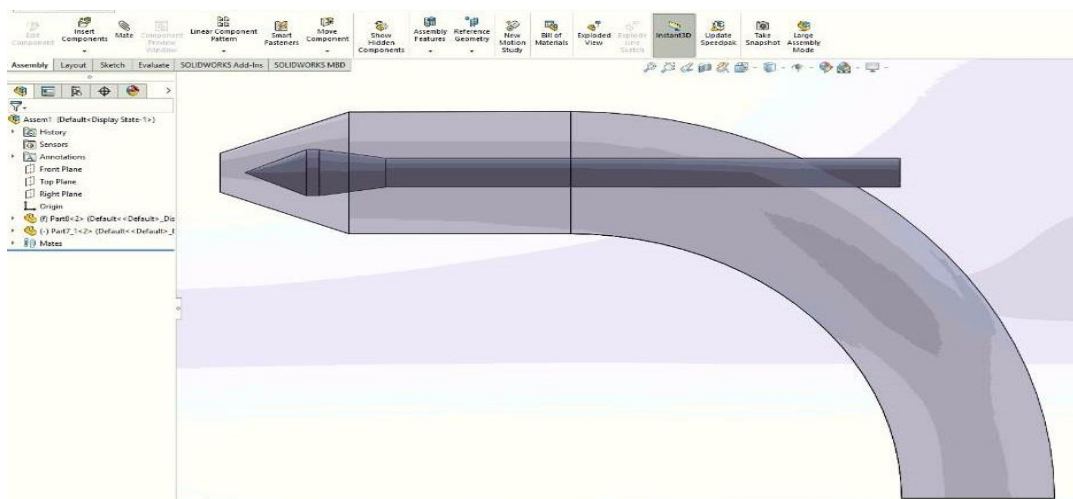


Εικόνα 89: Χρήση παράλληλων planes (top ή front), ώστε η βελόνα να μετατοπίζεται χωρίς να περιστρέφεται. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.



Εικόνα 90: Χρήση της εντολής mate-distance για την καθορισμένη κίνηση της βελόνας. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

Συνεπώς μετά την ολοκλήρωση των συνδεσμολογιών, η γεωμετρία έχει την τελική μορφή που απεικονίζεται παρακάτω. Ωστόσο, όπως γίνεται αντιληπτό, ένα μικρό μέρος της βελόνας εξέρχει από το κέλυφος του ακροφυσίου και για το λόγο αυτό ακολουθείται μια σειρά ενεργειών με σκοπό την τοποθέτηση ολόκληρης της βελόνας μέσα στον αγωγό. Φυσικά δίνεται μεγάλη έμφαση στο σημείο τομής βελόνας-ακροφυσίου στο πίσω μέρος.



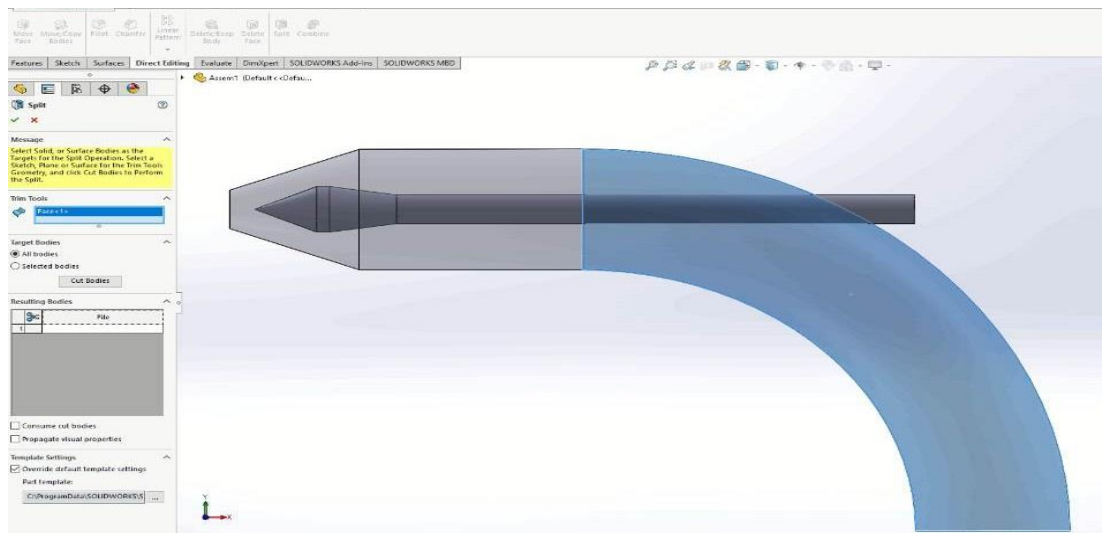
Εικόνα 91: Η βελόνα που εξέρχει από τον αγωγό του ακροφυσίου. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

Οι παραπάνω χειρισμοί απαιτούν τη μετατροπή του υπό εξέταση αρχείου από assembly σε part μέσω της εντολής save as (αποθήκευση ως) και την επιλογή του αρχείου part. Πλέον ολόκληρη η γεωμετρία αντιμετωπίζεται ως ενιαίο σώμα, επομένως μπορεί να λάβει χώρα η επιθυμητή επεξεργασία. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η εντολή split από την καρτέλα direct editing (αν δεν εμφανίζεται η συγκεκριμένη καρτέλα, αρκεί ένα δεξί κλικ του ποντικιού πάνω σε μια άλλη καρτέλα (πχ sketch) που θα εμφανίσει ποιες καρτέλες είναι ορατές και ποιες όχι, δίνοντας τη δυνατότητα στο μελετητή να επιλέξει τις καρτέλες που χρειάζεται).

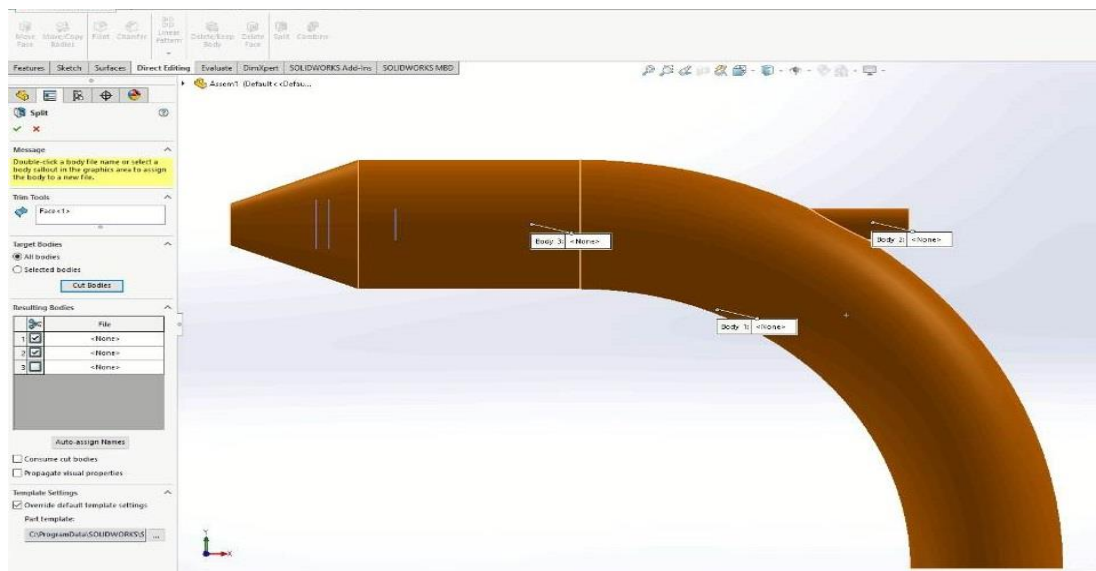
Η λειτουργία της εντολής έγκειται στην υποδιαίρεση της αρχικής γεωμετρίας σε επιμέρους τμήματα της επιλογής του μελετητή, ενώ στη συνέχεια ο ίδιος μπορεί να διαλέξει ποια τμήματα θα διατηρηθούν και ποια θα διαγραφούν. Στην προκειμένη περίπτωση η γεωμετρία διαιρείται σε 3 βασικά τμήματα, δηλαδή στο κέλυφος του ακροφυσίου, στη βελόνα εντός του κελύφους και στη βελόνα εκτός του κελύφους. Στο περιβάλλον της εντολής split, επιλέγοντας ως trim tool το τμήμα του κελύφους που βρίσκεται πιο κοντά στο τμήμα της βελόνας που εξέρχει, επιλέγεται το all bodies και εκτελείται η εντολή cut bodies (εικόνα 92). Στη συνέχεια επιλέγονται τα επιμέρους τμήματα (εμφανίζονται με καφέ ή μωβ χρώμα) (εικόνα 93) και η εντολή ολοκληρώνεται με το πράσινο κουμπί «τικ» (OK).

Έπειτα, από την εντολή solid bodies και με δεξί κλικ σε κάποιο από τα υφιστάμενα τμήματα (πχ split1), με τη βοήθεια της εντολής delete/keep body μπορεί να διατηρηθεί ή να διαγραφεί οποιοδήποτε από τα υπό εξέταση τμήματα (εικόνες 94 και 95). Στη συγκεκριμένη περίπτωση το λογικό θα ήταν να διαγραφεί μόνο το τμήμα που εξέρχει από το κέλυφος, δηλαδή να διατηρηθούν μόνο το κέλυφος και η νέα

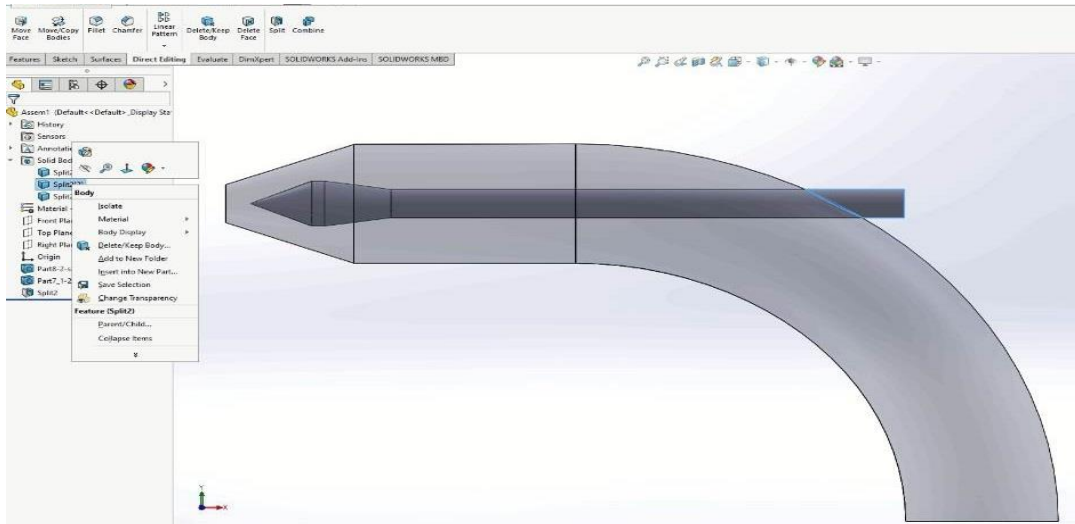
κομμένη βελόνα. Ωστόσο και πάλι λόγω ορισμένων υπολογιστικών περιορισμών από τα λογισμικά που αναλύονται αργότερα, κρίνεται σκόπιμο να διατηρηθεί μόνο το κομμάτι της βελόνας που βρίσκεται στο κέλυφος, χωρίς όμως την παρουσία του κελύφους (εικόνα 96). Πλέον το τελικό στάδιο συνίσταται στη δημιουργία ενός assembly αρχείου, το οποίο αποτελείται και πάλι από το κέλυφος (αγωγό) του ακροφυσίου και τη βελόνα, αλλά αυτή τη φορά η βελόνα είναι κομμένη και προσαρμοσμένη στην καμπυλώδη γεωμετρία του αγωγού.



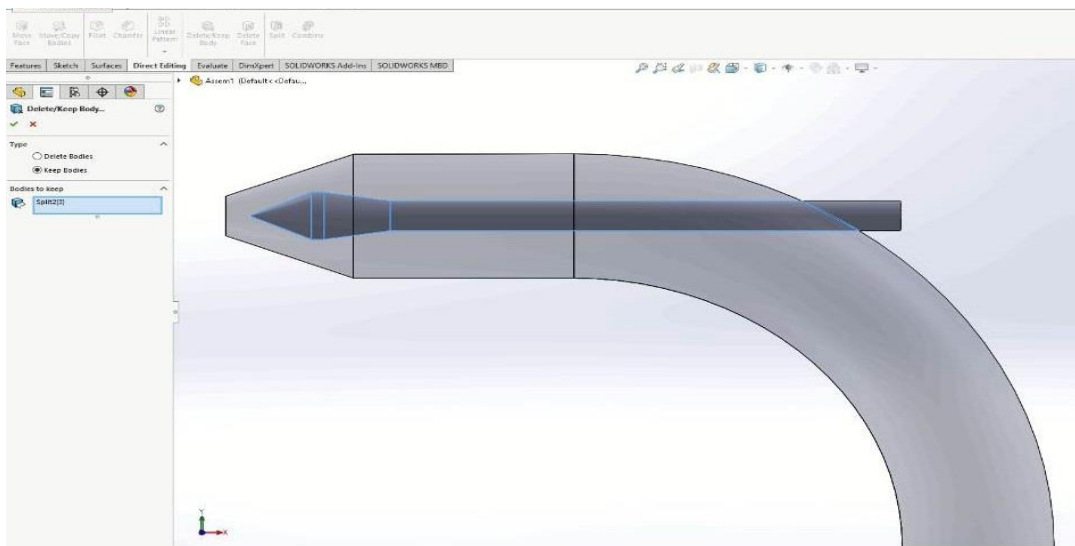
Εικόνα 92: Επιλογή γεωμετρίας ως trim tool στην εντολή split. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.



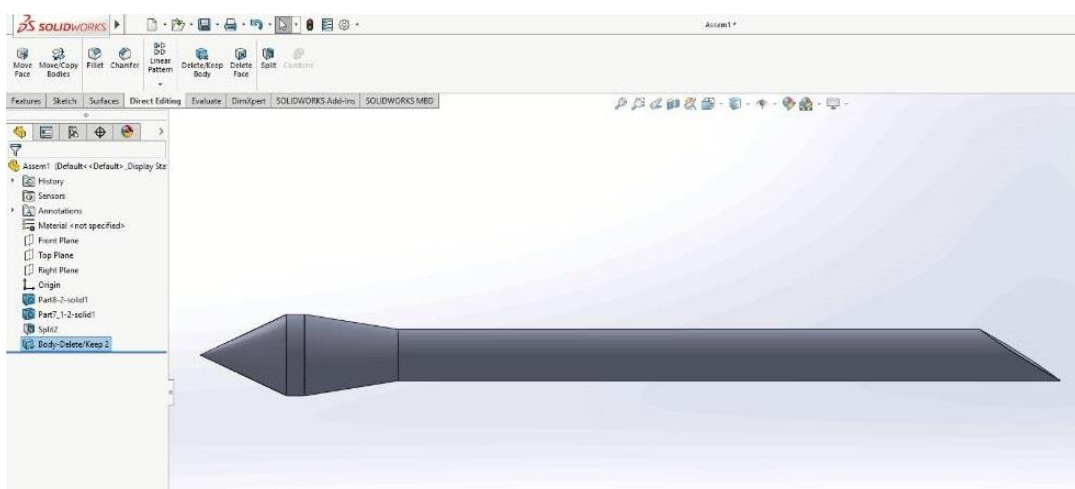
Εικόνα 93: Τα τρία τμήματα της γεωμετρίας μετά την εφαρμογή της εντολής cut bodies. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.



Εικόνα 94: Επιλογή της γεωμετρίας που θα παραμείνει ή θα διαγραφεί με τη χρήση της εντολής delete/keep body. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

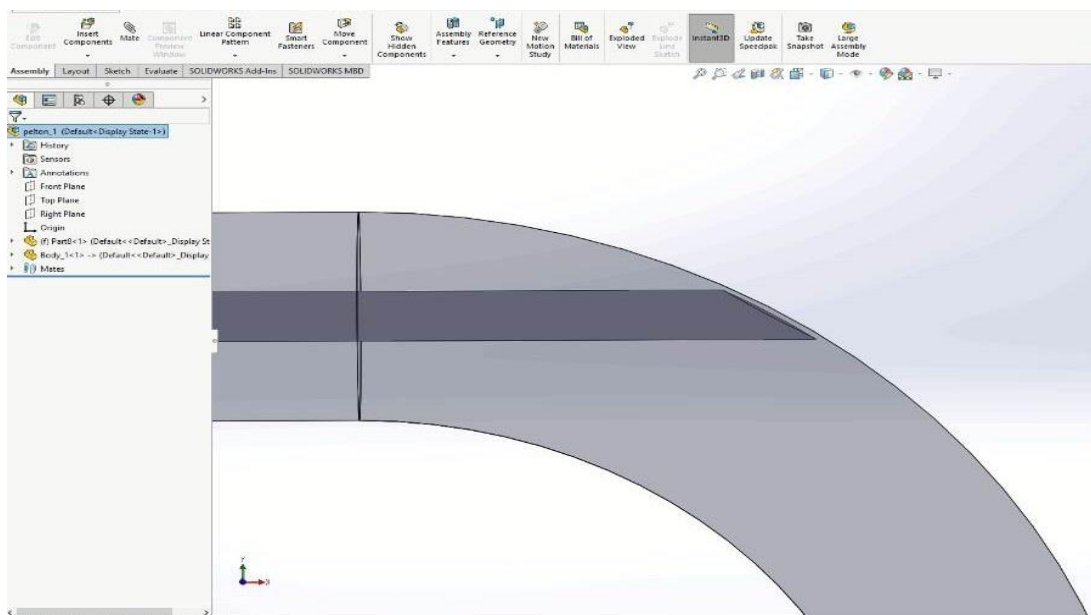


Εικόνα 95: Εφαρμογή της εντολής delete/keep body. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

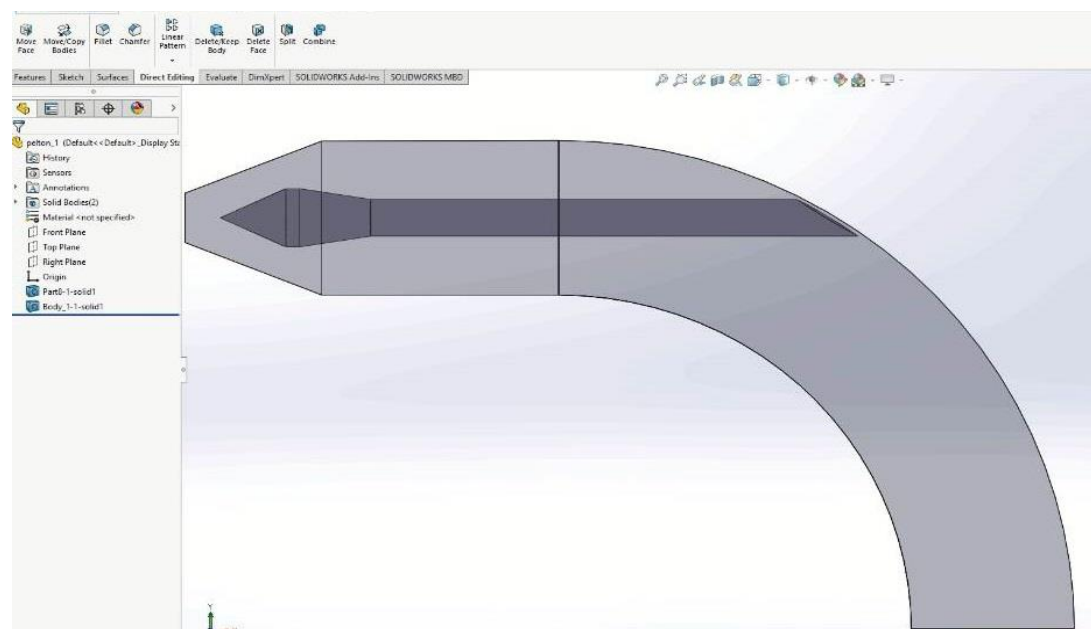


Εικόνα 96: Η νέα βελόνα με τη χαρακτηριστική γεωμετρία στο πίσω μέρος. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

Με τις τρεις βασικές συνδεσμολογίες που περιγράφηκαν παραπάνω να εφαρμόζονται σε αυτό το νέο assembly αρχείο, καθώς επιπροσθέτως και μια μικρή μετατόπιση της βελόνας, ώστε να υπάρχει ένα μικρό κενό στο σημείο τομής της με το κέλυφος (εικόνα 97), ολοκληρώνεται η μακροσκελής κατασκευή της γεωμετρίας. Πλέον το αρχείο μπορεί να εισαχθεί (είτε αυτούσιο είτε αφού μετατραπεί και πάλι σε ένα νέο part αρχείο) στο λογισμικό που θα δημιουργήσει το πλέγμα και αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο. Η τελική του μορφή απεικονίζεται στην εικόνα 98.



Εικόνα 97: Δημιουργία ελάχιστου κενού μεταξύ βελόνας και κελύφους. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.



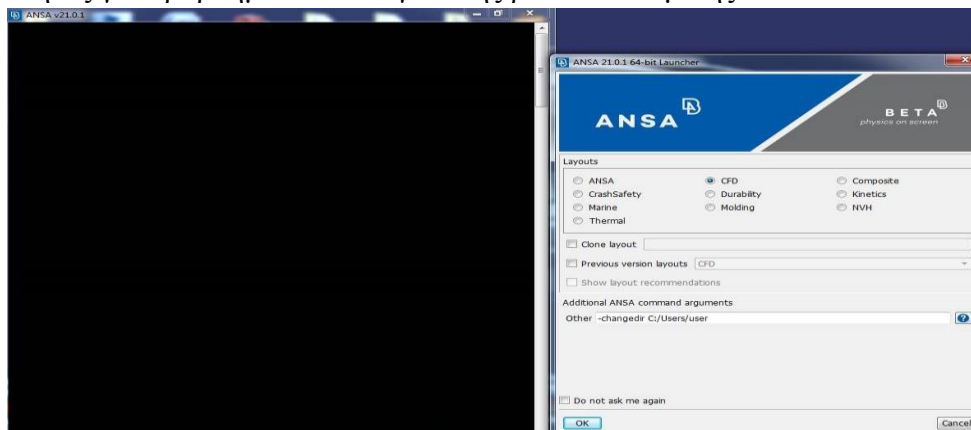
Εικόνα 98: Η τελική μορφή της γεωμετρίας. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ PELTON – ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ANSA (PRE-PROCESSING)

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί το δεύτερο μέρος της υπολογιστικής διαδικασίας προσομοίωσης του ακροφυσίου και συγκεκριμένα, μετά την κατασκευή της γεωμετρίας, ακολουθεί η εισαγωγή της σε κατάλληλο λογισμικό για τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος. Η σημασία του πλέγματος σε προβλήματα όπως αυτά της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είναι ιδιαίτερα καθοριστική. Πιο συγκεκριμένα το πλέγμα (ή αλλιώς η διαδικασία πλεγματοποίησης) αποτελείται ουσιαστικά από ένα πλήθος μικρών στοιχείων (elements) τα οποία υποδιαιρούν τη γεωμετρία σε πολλά μικρά τμήματα, με σκοπό την ευκολότερη εφαρμογή των μαθηματικών εξισώσεων που θα χρησιμοποιηθούν για να προσομοιώσουν και να επιλύσουν τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας αυτής.

Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διακριτοποίηση (discretization) και μέσω αυτής ενοείται η χρήση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που θα εφαρμοστούν στη γεωμετρία. Για την κατασκευή του πλέγματος επιλέχθηκε το υψηλών προδιαγραφών λογισμικό ANSA της ελληνικής εταιρείας BETA CAE Systems. Στη συνέχεια επεξηγούνται αναλυτικά οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την πλεγματοποίηση μέσα στο γραφικό περιβάλλον του ANSA, ενώ γίνεται επίσης αναφορά στις μεθόδους που χρησιμοποιούν παρασκηνακά (στο background) τα λογισμικά αυτά κατά την παραγωγή του πλέγματος.

Αρχικά τονίζεται στο συγκεκριμένο σημείο ότι είναι απαραίτητη η εισαγωγή του αρχείου από το λογισμικό Solidworks στο ANSA. Επομένως από το περιβάλλον του Solidworks και την εντολή save as, το αρχείο τύπου part ή assembly της γεωμετρίας πρέπει να αποθηκευτεί με κατάληξη .igs (IGES file). Μεταφερόμενοι πλέον στο περιβάλλον του ANSA, μόλις εμφανιστεί η αρχική καρτέλα του λογισμικού, επιλέγεται το πεδίο CFD, όπως φαίνεται στην εικόνα 99, καθώς διαθέτει ορισμένες πιο εξειδικευμένες ρυθμίσεις σε σχέση με τα άλλα πεδία, οι οποίες είναι κατάλληλες για προβλήματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.



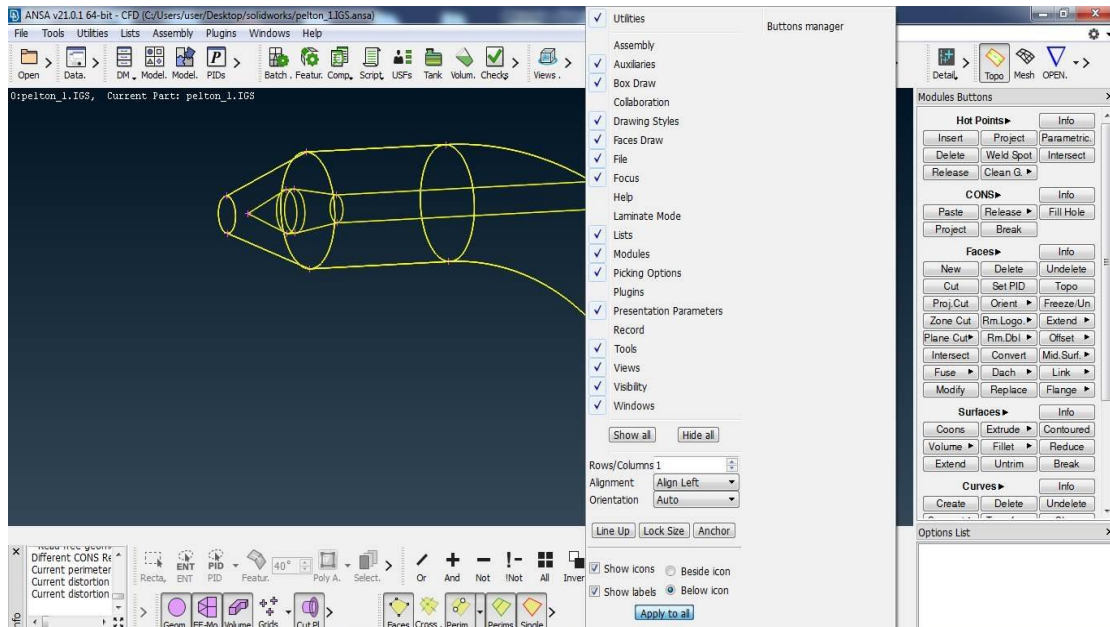
Εικόνα 99: Το αρχικό μενού έναρξης του ANSA. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

5.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕΣΑ ΣΤΟ ANSA

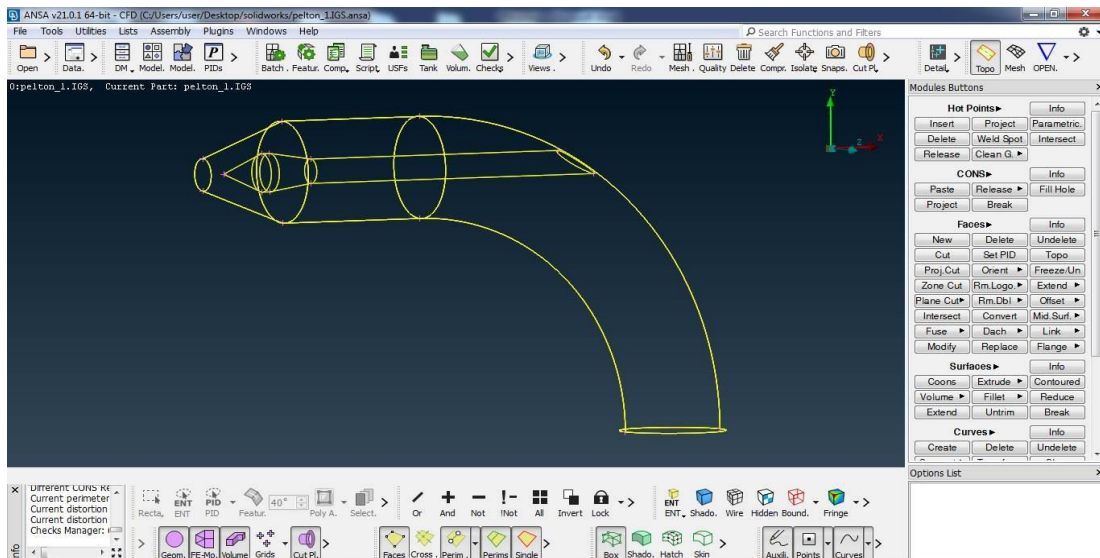
5.1.1 ΕΞΟΙΚΕΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ANSA ΚΑΙ ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Αφότου επιλεγεί το πεδίο CFD και υπάρχει το αρχείο .igs, από την καρτέλα file επιλέγεται το open και πρέπει να εντοπιστεί η διαδρομή του αρχείου (δηλαδή σε ποιο φάκελο βρίσκεται, ώστε να ανοιχτεί). Μόλις δοθεί η εντολή για το άνοιγμα, και αφού μείνουν αμετάβλητες κάποιες αρχικές προεπιλεγμένες ρυθμίσεις, το αρχείο είναι πλέον έτοιμο για το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας του. Για την εξοικείωση του μελετητή με το περιβάλλον του ANSA υπάρχουν αρκετά βοηθητικά εργαλεία, οπότε αρχικά με ένα δεξί κλικ οπουδήποτε μέσα στην πάνω γκρι γραμμή εντολών εμφανίζεται ένα παράθυρο με μια πληθώρα λειτουργικών χαρακτηριστικών. Εκεί ο μελετητής μπορεί να επιλέξει το show labels και αυτόματα κάτω από όλες τις εντολές του ANSA θα εμφανιστούν σύντομοι τίτλοι που υποδηλώνουν τη λειτουργία κάθε εντολής, όπως φαίνεται στην εικόνα 100.

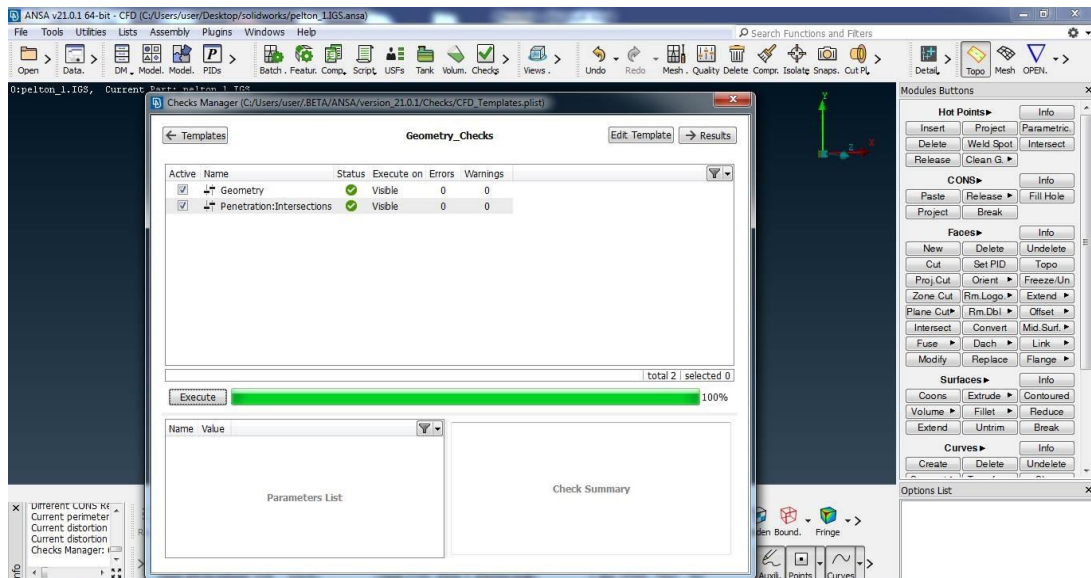
Παράλληλα επισημαίνεται ότι για οποιαδήποτε κίνηση της γεωμετρίας (πχ μεταφορά, περιστροφή, μεγέθυνση) απαιτείται η χρήση του ctrl (control) από το πληκτρολόγιο και αντίστοιχα αριστερό, δεξί και μεσαίο κλικ, καθώς και ροδέλα (για zoom in/out) του ποντικιού. Επειδή ως προεπιλογή το ANSA εμφανίζει τη γεωμετρία με τη μορφή της ακτινογραφίας (διάφανη δηλαδή), με την εντολή shadow (διακρίνεται στην εικόνα 101), ο μελετητής μπορεί να δει όλο τον όγκο της γεωμετρίας και μάλιστα με την εντολή orient και visible στη δεξιά γραμμή εργαλείων εξασφαλίζεται ενιαίος χρωματισμός της γεωμετρίας.



Εικόνα 100: Η ενεργοποίηση της χρησιμότερης εντολής show labels. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 101: Το γραφικό περιβάλλον του ANSA με όλες τις εντολές. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 102: Ο έλεγχος της γεωμετρίας με τη βοήθεια του checks manager. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

Στη συνέχεια μια βασική διαδικασία που επιτελείται αφορά τον έλεγχο της ορθότητας της γεωμετρίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το εργαλείο checks στην πάνω γραμμή εργαλείων και έπειτα check manager και geometry checks (εικόνα 102). Ο συγκεκριμένος έλεγχος εντοπίζει πιθανά προβλήματα της γεωμετρίας, ώστε να διορθωθούν πριν ξεκινήσει η κατασκευή του πλέγματος. Ανάλογα με το πόσο σημαντικό είναι ένα λάθος, το ANSA τα χωρίζει σε δύο βασικές υποκατηγορίες, τα errors (κόκκινο X) και τα warnings (πορτοκαλί θαυμαστικό). Αρκετά από τα warnings διορθώνονται συνήθως με τη δυνατότητα auto fix που παρέχει το ANSA, ωστόσο κάποιες άλλες περιπτώσεις warnings, όπως επίσης και τα περισσότερα errors απαιτούν χειρισμούς από το μελετητή για να διορθωθούν με τη βοήθεια των εργαλείων στα δεξιά που υπάγονται στο μενού topo.

Όπως έχει γίνει αντληπτό, η συγκεκριμένη γεωμετρία δεν εμφανίζει κάποιο πρόβλημα, ωστόσο κρίνεται σκόπιμη μια σύντομη αναφορά στα συχνότερα σφάλματα της γεωμετρίας, αλλά και στους τρόπους αντιμετώπισής τους. Σε πολλές γεωμετρίες παρατηρείται η ύπαρξη errors, warnings ή και των δύο. Προφανώς, σε προτεραιότητα τίθεται η επίλυση των errors, καθώς αυτά μπορούν να δημιουργήσουν τα μεγαλύτερα προβλήματα στην πορεία. Τα συνηθέστερα errors σχετίζονται με τα intersections, δηλαδή τις διασταυρώσεις ή σημεία τομής δύο διαφορετικών τμημάτων της γεωμετρίας.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος υπάρχουν συνήθως δύο επιλογές, είτε να πραγματοποιηθεί μια επεξεργασία στο ANSA με τη βοήθεια των εντολών new και delete από τη γραμμή εργαλείων faces στα δεξιά της οθόνης στο μενού topo, είτε να γίνει επεξεργασία στην αρχική γεωμετρία στο Solidworks και να εισαχθεί εκ νέου το αλλαγμένο αρχείο στο ANSA.

Η βοήθεια που προσφέρουν οι εντολές new και delete έγκειται στο ότι προσπαθούν να αναπροσαρμόσουν τις προβληματικές περιοχές της γεωμετρίας αποσυναρμολογώντας και επανασυναρμολογώντας αυτές με διαφορετικό τρόπο, ώστε να ικανοποιήσουν τα κριτήρια ελέγχου του ANSA. Ωστόσο η μέθοδος αυτή δεν είναι πάντα εφικτή και έτσι ο μελετητής πρέπει να καταφύγει στην εναλλακτική λύση του Solidworks.

Η άλλη κατηγορία σφαλμάτων που αφορά τα warnings διαθέτει μεγαλύτερα περιθώρια ελαστικότητας, καθώς το πλέγμα μπορεί να δημιουργηθεί ακόμα και αν παραμένουν ορισμένα μη επιλύσιμα warnings. Συνήθως επιλύονται με τη βοήθεια της δυνατότητας auto fix που παρέχει το ANSA, ενώ αυτές που τελικά θα παραμείνουν, δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα το τελικό αποτέλεσμα. Οι πιο συνηθισμένες περιπτώσεις warnings είναι τα triple cons, δηλαδή περιοχές της γεωμετρίας που είναι υπερστατικές (έχουν δηλαδή περισσότερες συνδεσμολογίες από αυτές που απαιτούνται), ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις γεωμετριών που η παρουσία των triple cons είναι αναγκαία. Η παρουσία warnings γενικότερα δεν χρήζει ανησυχίας για τα επόμενα στάδια.

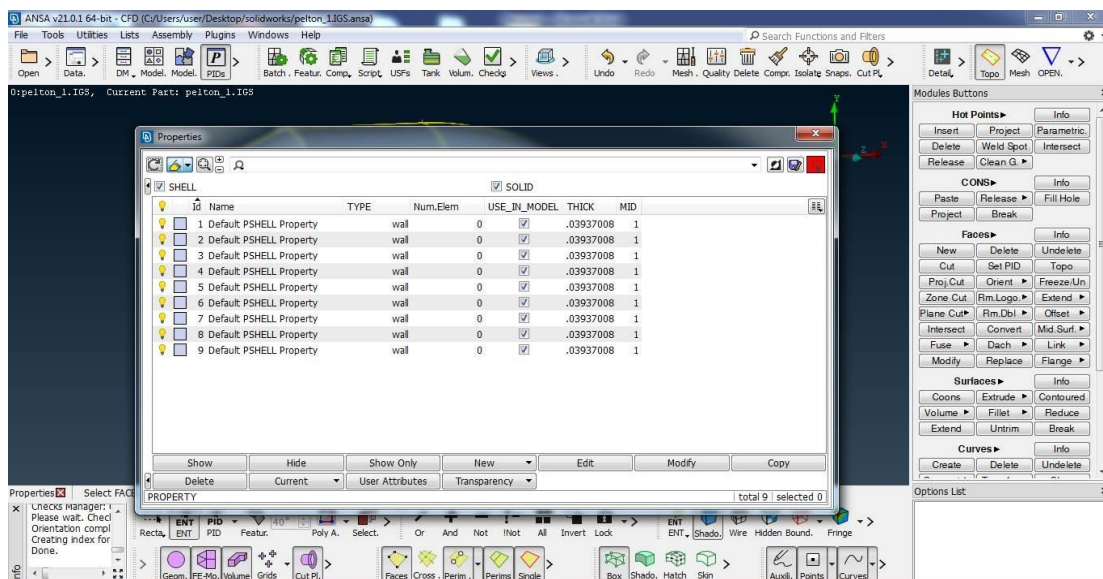
5.1.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ PID

Στην υποενότητα αυτή εξετάζεται η διαδικασία προσδιορισμού των PID, δηλαδή των τμημάτων που απαρτίζουν τη γεωμετρία. Από την καρτέλα PID στην πάνω γραμμή εντολών φαίνονται τα τμήματα αυτά, ενώ ανάλογα με το αν είναι αναμμένο ή σβηστό το χαρακτηριστικό λαμπάκι στα αριστερά, τα τμήματα είναι ορατά ή κρυμμένα.

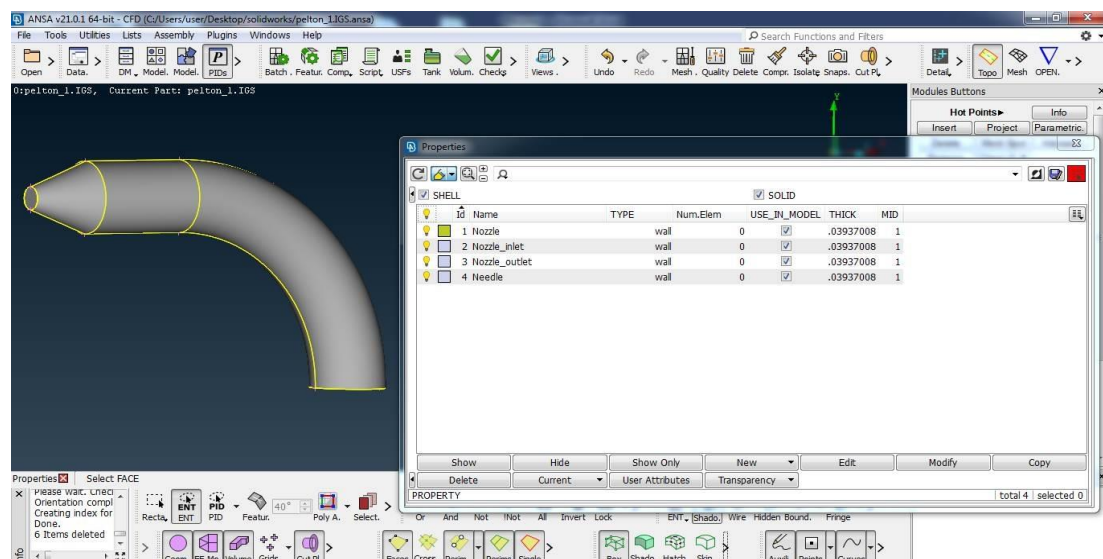
Το ANSA έχει ορίσει από προεπιλογή τα PID, ωστόσο συνήθως είναι πιο βολικό να γίνονται ορισμένες αλλαγές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα PID είναι διαχωρισμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε ένα να αναφέρεται στη βελόνα, ένα στην είσοδο του αγωγού, ένα στην έξοδο του ακροφυσίου και τα υπόλοιπα 6 στο κέλυφος του αγωγού. Επομένως η αλλαγή που μπορεί να γίνει είναι τα 6 PID του κελύφους να γίνουν ένα, αφού δεν υπάρχει λόγος να είναι ξεχωριστά.

Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η εντολή set pid, η οποία βρίσκεται κάτω από την εντολή delete που εξετάστηκε προηγουμένως. Αφού σβηστούν τα λαμπάκια της βελόνας, της εισόδου και της εξόδου (αυτά παραμένουν αμετάβλητα), με την εντολή set pid επιλέγεται η εναπομείνουσα γεωμετρία και με μεσαίο κλικ (της ροδέλας) εμφανίζεται η καρτέλα των pid. Εκεί επιλέγεται το πεδίο new και κατόπιν το OK δύο φορές.

Πλέον τα παλιά pid έχουν εντελώς διάφανο λαμπάκι (που σημαίνει ότι δεν χρησιμοποιούνται πλέον) και συνεπώς μπορούν να διαγραφούν. Τα υπόλοιπα μπορούν να μετονομαστούν και να ταξινομηθούν με τη σειρά, ενώ το τελικό αποτέλεσμα εμφανίζεται στην εικόνα 104. Τέλος, στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη η αποθήκευση του αρχείου από το file και save as. Από τη στιγμή που αποθηκεύεται την πρώτη φορά, τις επόμενες φορές αρκεί μόνο η εντολή save.



Εικόνα 103: Τα αρχικά PID (πριν από την επεξεργασία). Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 104: Τα τελικά PID (μετά από την επεξεργασία). Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

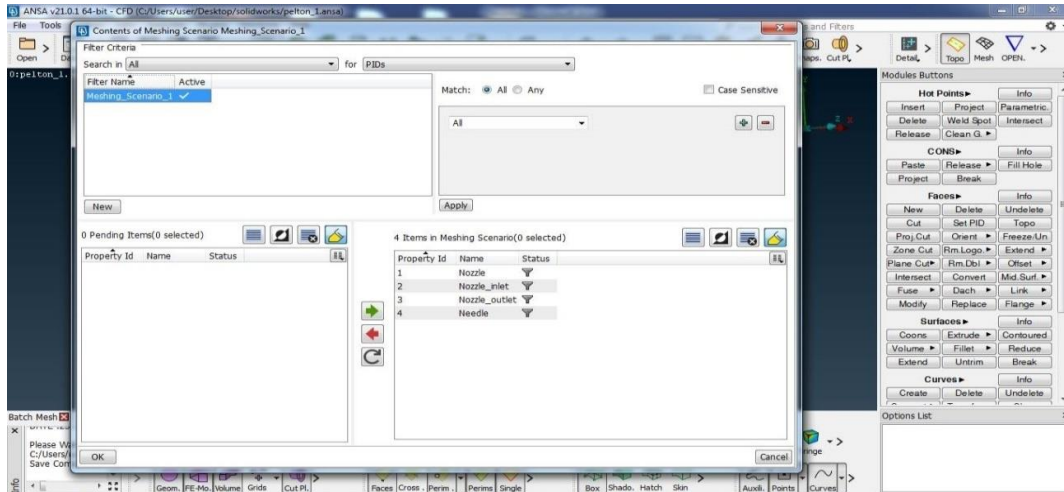
5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ BATCH MESH MANAGER-ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (SURFACE MESH)

5.2.1 ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

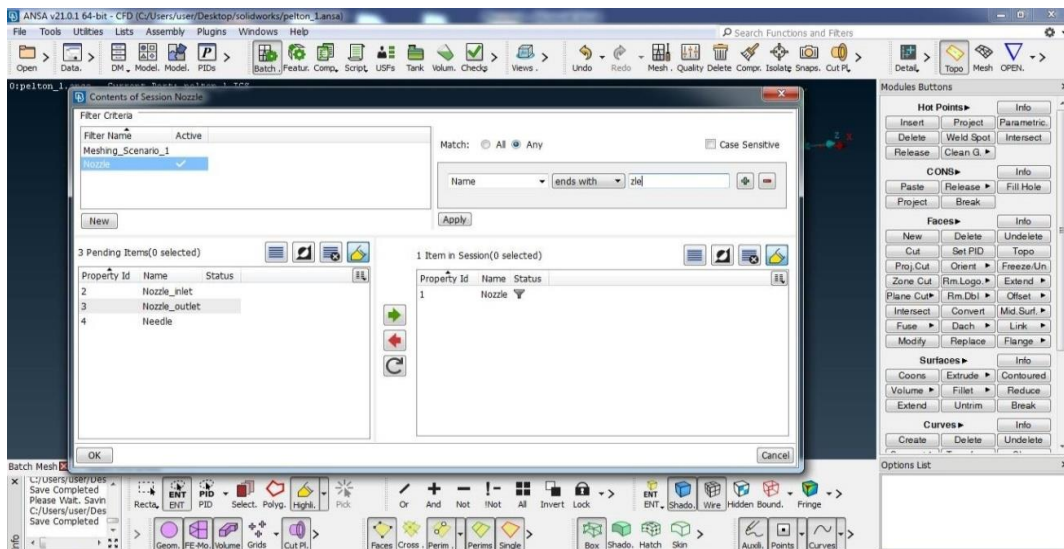
Στο σημείο αυτό ξεκινά η δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος. Αποτελείται αρχικά από το επιφανειακό πλέγμα, το οποίο είναι μια πρωταρχική μορφή διακριτοποίησης της γεωμετρίας, ενώ στις επόμενες ενότητες ακολουθεί η δημιουργία του οριακού στρώματος, αλλά και, τέλος, του πλέγματος όγκου, η σημασία των οποίων εξηγείται στη συνέχεια. Αν και το λογισμικό ANSA παρέχει μια πληθώρα τρόπων και εργαλείων για το σκοπό αυτό, προτείνεται ως η καλύτερη μέθοδος εκείνη που χρησιμοποιεί την εντολή batch mesh manager, η οποία βρίσκεται στην πάνω γραμμή εργαλείων (εικόνα 101). Η μέθοδος αυτή προτιμάται διότι παρέχει καλύτερη εποπτεία των χαρακτηριστικών του επιφανειακού πλέγματος, αλλά και του πλέγματος όγκου, το οποίο πραγματοποιείται στη συνέχεια.

Με την επιλογή της εντολής batch mesh manager ανοίγει ένα νέο πλαίσιο, στο οποίο ο μελετητής επιλέγει new και meshing scenario. Αυτομάτως εμφανίζονται οι γραμμές meshing scenario και default session. Στο meshing scenario υπάρχουν επομένως τα sessions, τα οποία αντιπροσωπεύουν τις διαφορετικές περιοχές της γεωμετρίας (ουσιαστικά τα PID) που θα αποκτήσουν επιφανειακό πλέγμα. Με δεξί κλικ πάνω στο session και επιλογή new session ο μελετητής έχει τη δυνατότητα να επιλέξει όσα sessions απαιτούνται για τη γεωμετρία του. Στην προκειμένη περίπτωση απαιτούνται 3 sessions, ένα για το κέλυφος (nozzle), ένα για την είσοδο και την έξοδο (nozzle inlet και outlet) και ένα για τη βελόνα (needle).

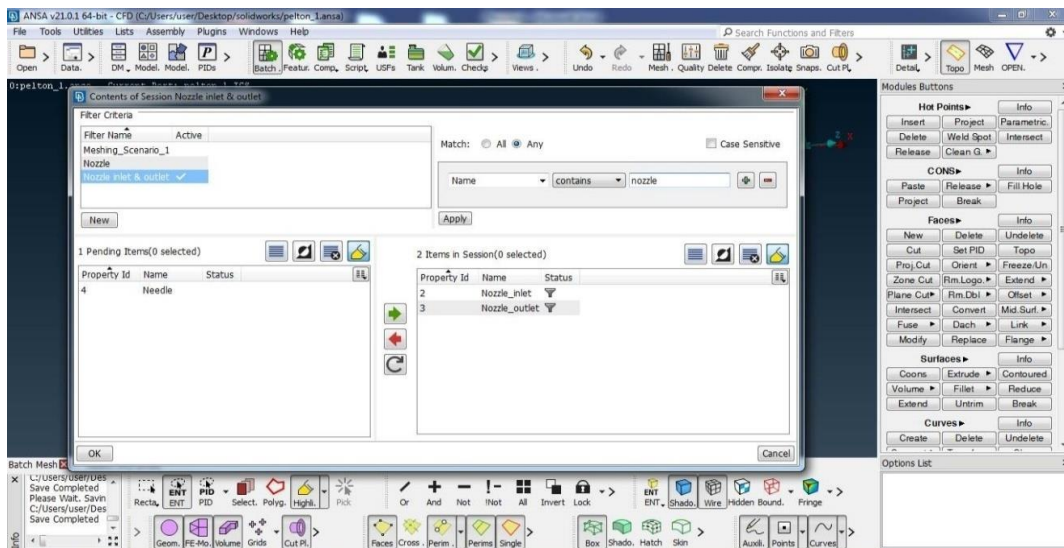
Για να τα ανιχνεύσει όμως το ANSA πρέπει πρώτα να τοποθετηθούν στο meshing scenario. Επομένως στη γραμμή αυτή με διπλό αριστερό κλικ στο 0 που βρίσκεται ακριβώς κάτω από τα contents, επιλέγονται με το new, ύστερα all και apply όλες οι περιοχές (PID) της γεωμετρίας (εικόνα 105). Μόλις επιβεβαιωθεί με το OK η εντολή αυτή το αρχικό 0 είναι πλέον 4 (όσα και τα PID που εισήχθησαν), οπότε πλέον μπορούν να διαμοιραστούν στα υφιστάμενα sessions. Πάλι από τα contents (στις γραμμές των sessions) επιλέγεται για κάθε session το PID που του αντιστοιχεί. Εδώ η μόνη δυσκολία είναι ότι πρέπει να επιλεγθεί μόνο το επιθυμητό PID για κάθε session, επομένως με το new, ύστερα any και apply και μια κατάλληλη συνθήκη (εικόνα 106 και 107) επιλέγεται κάθε φορά το επιθυμητό PID. Η τελική μορφή του batch mesh manager μέχρι στιγμής φαίνεται στην εικόνα 108.



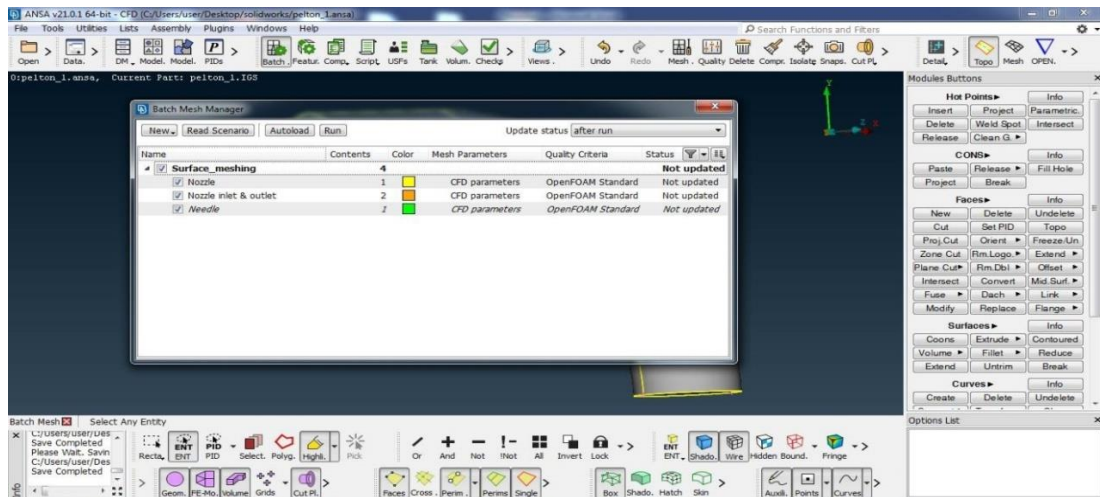
Εικόνα 105: Επιλογή όλων των PID στο meshing scenario. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 106: Αντιστοίχιση των PID στα κατάλληλα sessions. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 107: Επόμενο στάδιο στην αντιστοίχιση των PID. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 108: Οι ρυθμίσεις στον batch mesh manager μέχρι στιγμής. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

Μετά τη διανομή των PID στα αντίστοιχα sessions σειρά έχει ο προσδιορισμός των CFD parameters, μια θεμελιώδης διαδικασία που καθορίζει τη μορφή και τα χαρακτηριστικά του πλέγματος σε κάθε περιοχή. Είναι προφανές ότι σε άλλες περιοχές απαιτείται πυκνότερο, ενώ σε άλλες αραιότερο πλέγμα, συνεπώς τα χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν για κάθε PID εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα. Τονίζεται ότι ο πίνακας περιέχει μόνο τις εντολές που χρειάστηκε να μεταβληθούν, ενώ ό,τι δεν περιλαμβάνεται σε αυτόν, έχει παραμείνει με τις αρχικά προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του ANSA.

BASIC					
Sessions		Min target length	Max target length	PID Proximity	Self proximity
Nozzle	Quad	0.039	0.39	Ναι	Ναι
Nozzle inlet, outlet	Tria	0.039	1.95	Ναι	Ναι
Needle	Quad	0.039	0.39	Ναι	Ναι
FEATURES				FIX QUALITY	
Sessions	Holes 2D treatment	Special perimeters	Trailing treatment	Fix violating	
Nozzle	Όχι	Rule 1,2 Active (όχι)	Active (όχι)	Ναι	
Nozzle inlet, outlet	Ναι	Rule 1,2 Active (ναι)	Active (ναι)	Ναι	
Needle	Όχι	Rule 1,2 Active (ναι)	Active (ναι)	Ναι	

Πίνακας 17: Οι ρυθμίσεις των CFD parameters για το surface mesh. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1) (κατόπιν επεξεργασίας).

Αφότου πραγματοποιηθούν οι ρυθμίσεις αυτές, πλέον από το μενού του batch mesh manager πρέπει να εκτελεστεί η εντολή run, ώστε να δημιουργηθεί το επιφανειακό πλέγμα. Πριν από κάθε εκτέλεση (run) προτείνεται η χρήση της εντολής save, ώστε σε περίπτωση δυσλειτουργίας του προγράμματος (σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτείται συνήθως επανεκκίνησή του) να μη χαθούν οι ρυθμίσεις, απλώς να πρέπει να ξαναγίνει το run από την αρχή.

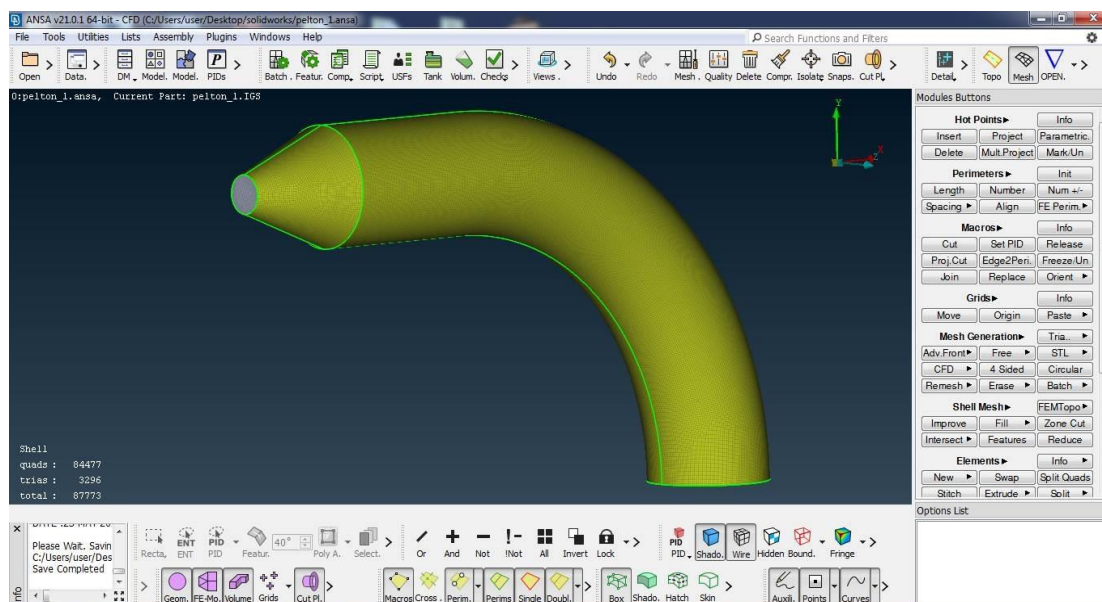
Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί πως ο γενικός κανόνας κατά την κατασκευή των πλεγμάτων είναι ότι για ροές και οριακά στρώματα συστήνεται η χρήση τετραγωνικού (transfinite) πλέγματος, καθώς προσεγγίζει καλύτερα της ιδιαιτερότητες της ροής, ενώ για διατάξεις όπως στοιχεία μηχανών ή γενικότερα χωρίς οριακά στρώματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τριγωνικά κελιά για την κατασκευή του πλέγματος (Zhang & Liang, 2020).

Στην προκειμένη περίπτωση όπου μελετάται ροή μέσω αγωγού (ακροφυσίου) με μεγάλη ταχύτητα, επιλέχθηκε τετραγωνικό πλέγμα και μάλιστα κοντά στο τοίχωμα του ακροφυσίου πυκνότερο σε σχέση με τον κύριο όγκο της ροής, ώστε να προσεγγιστεί πιο εύστοχα το οριακό στρώμα. Η ανάγκη για τετραγωνικό πλέγμα γίνεται ακόμα μεγαλύτερη αν αναλογιστεί κανείς ότι πρόκειται για ένα πρόβλημα υψηλών ταχυτήτων, συνεπώς και υψηλών αριθμών Reynolds (πράγματι σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται στη συνέχεια προκύπτει μια ταχύτητα περίπου ίση με 8.65 m/s και αριθμός Reynolds περίπου 3.9×10^6 , άρα πρόκειται για ένα πρόβλημα πλήρως τυρβώδους ροής).

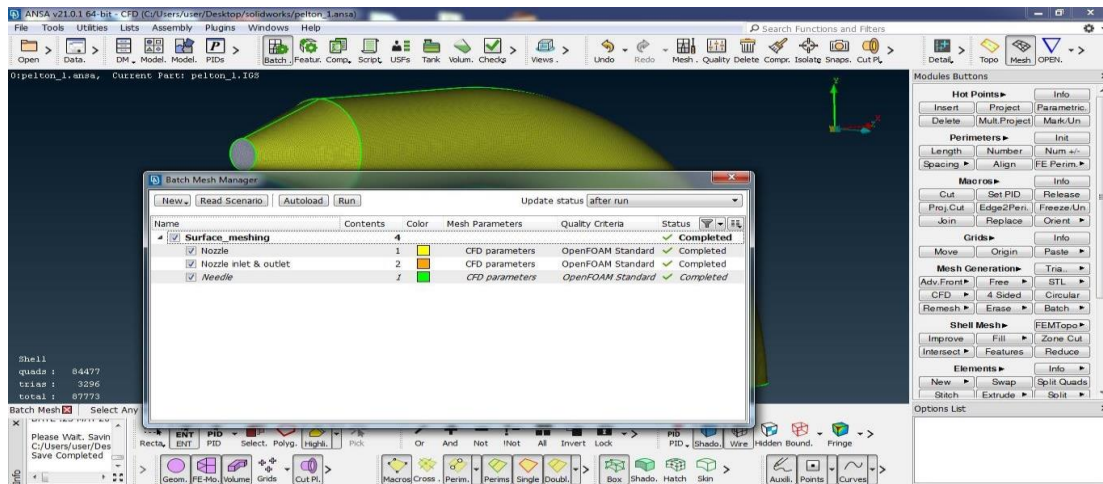
5.2.2 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Μετά την εκτέλεση της εντολής run έχει σχηματιστεί το επιφανειακό πλέγμα, όμως για να γίνει ορατό, πρέπει να γίνει μετάβαση από το μενού topo στο μενού mesh πάνω δεξιά, ενώ στην κάτω γραμμή εργαλείων πρέπει να είναι ενεργοποιημένες οι εντολές wire, shadow, αριστερά από το shadow όχι το κίτρινο κουτάκι entity, αλλά το ροζ κουτάκι pid και τέλος στο δεξί βελάκι δίπλα από το fringe να είναι ενεργοποιημένο το display styles (default).

Όπως φαίνεται και από το batch mesh manager το επιφανειακό πλέγμα έχει κατασκευαστεί χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα (τα πράσινα «τικ» στην εικόνα 110 το επιβεβαιώνουν), ωστόσο κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν ορισμένες τεχνικές και έλεγχοι που διαθέτει το ANSA και μπορούν να εφαρμόζονται είτε υπάρχει κάποιο ελάττωμα στο επιφανειακό πλέγμα, είτε όχι.



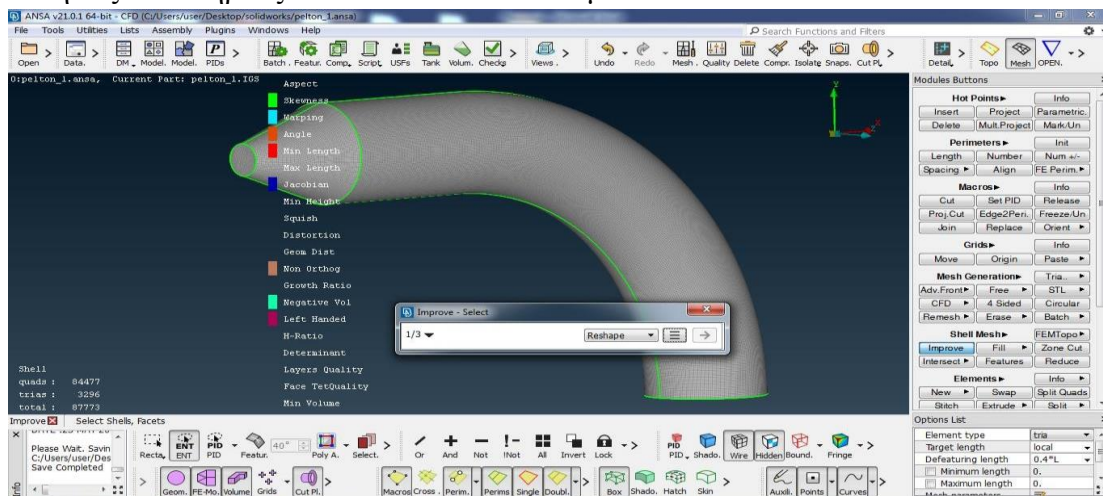
Εικόνα 109: Οι πρώτες ρυθμίσεις στο μενού mesh. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



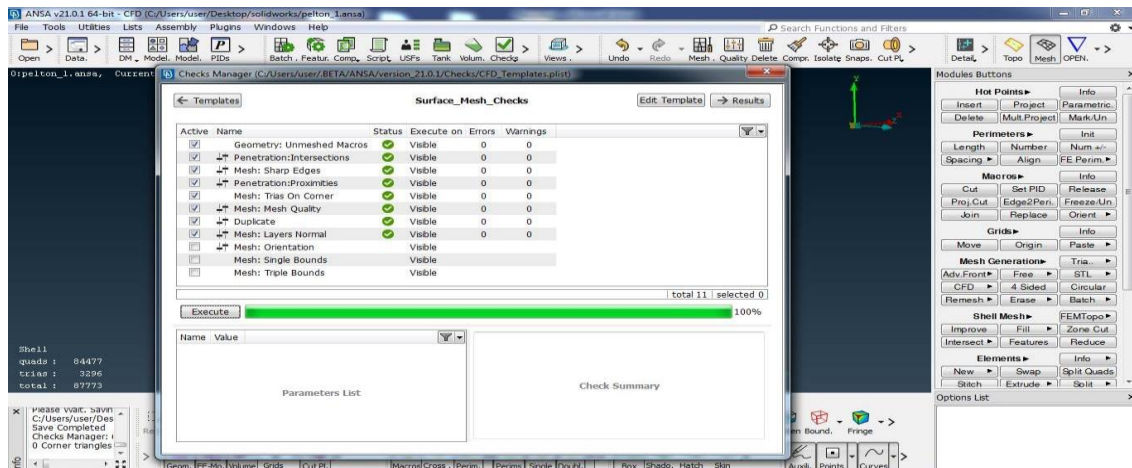
Εικόνα 110: Το σωστά εκτελεσμένο επιφανειακό πλέγμα στον batch mesh manager. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

Αρχικά ένας θεμελιώδης έλεγχος που μπορεί να επιλύσει και αρκετές περιπτώσεις προβληματικών πλεγμάτων βασίζεται στον αλγόριθμο improve (στην ενότητα shell mesh στα δεξιά της οθόνης στο μενού mesh), ο οποίος ανιχνεύει τα στοιχεία που δεν ικανοποιούν ορισμένα μαθηματικά κριτήρια που έχει θέσει εσωτερικά το ANSA ως προεπιλογή και προσπαθεί να τα διορθώσει. Τα κριτήρια αυτά είναι ορατά από την εντολή hidden στην κάτω γραμμή εργαλείων. Όπως φαίνεται και από την εικόνα 111, στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν υπάρχουν προβληματικά στοιχεία, συνεπώς δεν απαιτείται η παρέμβαση του improve.

Στη συνέχεια ένας ακόμη έλεγχος που πρέπει να γίνεται, καθώς παρέχει μια σημαντική ενημέρωση της κατάστασης του πλέγματος, βρίσκεται στην εντολή checks στην πάνω γραμμή εργαλείων. Ο έλεγχος αυτός εκπονείται και σε προηγούμενο στάδιο για τη γεωμετρία, όπως έχει προαναφερθεί, με τη διαφορά όμως ότι πλέον εξετάζεται το surface mesh checks και όχι το geometry checks. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, όπως φαίνεται και από την εικόνα 112, δεν εντοπίζονται ιδιαίτερα προβλήματα, ωστόσο αν προκύψουν (συνήθως με τη μορφή πορτοκαλί warnings) μπορούν είτε να επιλυθούν με το auto fix, είτε να παραμείνουν όπως είναι, αφού συνήθως δεν επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 111: Η χρήση της εντολής improve για τη διόρθωση των γεωμετρικών σφαλμάτων. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 112: Ο έλεγχος του επιφανειακού πλέγματος με τη βοήθεια του checks manager. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

Τέλος, σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει πιθανότητα να χρειαστεί η επέμβαση του χειριστή, καθώς δίνεται η δυνατότητα χειροκίνητης επεξεργασίας των προβληματικών elements, ωστόσο η συγκεκριμένη τακτική μπορεί να οδηγήσει σε χειρότερα σφάλματα, αν δεν εφαρμοστεί σωστά. Στις σπάνιες περιπτώσεις που εμφανίζονται κόκκινα errors, μάλλον πρέπει να πραγματοποιηθεί επανέλεγχος για σφάλματα της γεωμετρίας.

5.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΟΓΚΟΥ

Μετά την κατασκευή του επιφανειακού πλέγματος ξεκινά η διαδικασία κατασκευής του πλέγματος όγκου, η οποία αποτελείται από δύο στάδια, τη δημιουργία των οριακών στρωμάτων και τη δημιουργία του χωρικού πλέγματος (πλέγμα όγκου). Η διαφορά σε σχέση με το επιφανειακό πλέγμα έγκειται στο ότι με το πλέγμα όγκου καλύπτεται όλος ο χώρος στο εσωτερικό του κελύφους (αγωγού), ενώ το επιφανειακό πλέγμα αποτελεί μόνο ένα επίστρωμα για τα PID της γεωμετρίας.

Το πρώτο σκέλος που αναφέρεται στα οριακά στρώματα αποτελεί μια τυποποιημένη, αλλά και απαραίτητη διαδικασία στα προβλήματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, αφού αυτά προσπαθούν να προσομοιώσουν με το βέλτιστο τρόπο τα χαρακτηριστικά της υπό εξέταση ροής. Τέλος η παρουσία του πλέγματος όγκου, εκτός από το ότι αποτελεί το επιστέγασμα μιας σωστά εκτελεσμένης προσομοίωσης, είναι απαραίτητη και για το επόμενο στάδιο της επίλυσης, αφού τα περισσότερα λογισμικά επίλυσης απαιτούν την παρουσία κάποιου όγκου για να εργαστούν αποτελεσματικά.

5.3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

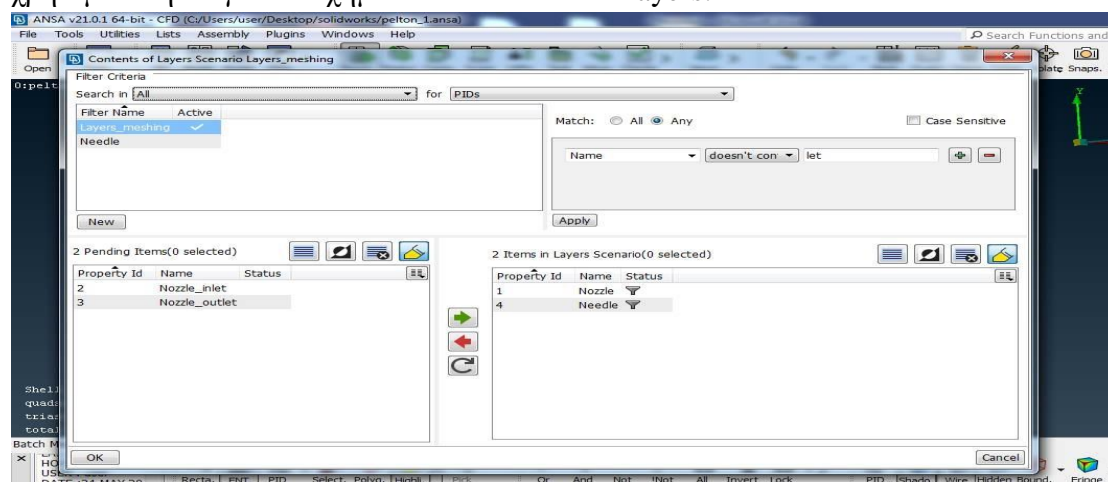
Για την κατασκευή των οριακών στρωμάτων χρησιμοποιείται και πάλι το μενού του batch mesh manager, οπότε από την καρτέλα new επιλέγεται το layers scenario. Αυτό που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής στο σημείο αυτό είναι ότι στα layers πρέπει να υπάρχει μόνο ένα session και όχι περισσότερα, διότι το ANSA, μόλις

ξεκινήσει το run, τα δημιουργεί όλα ταυτόχρονα και αν υπάρχουν περισσότερα του ενός sessions δημιουργούνται επικαλύψεις μεταξύ των layers, ένα φαινόμενο σίγουρα ανεπιθύμητο.

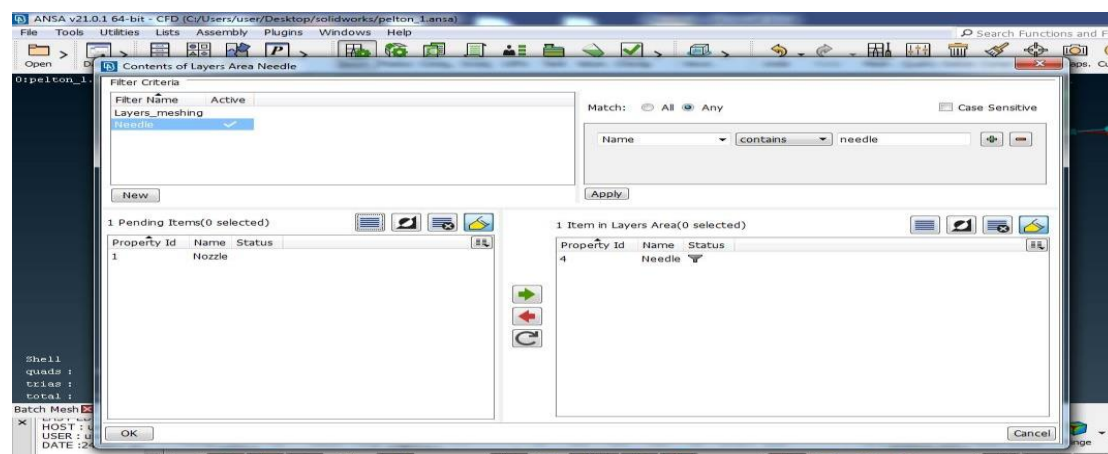
Ωστόσο, επειδή, όπως είναι λογικό, σε πολλές περιπτώσεις πρέπει να γίνουν layers σε περιοχές με διαφορετικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά, η λύση είναι να δημιουργηθεί ένα session και μία ή περισσότερες areas (layers area) που υπάρχουν στο session. Με δεξί κλικ στο session, από το new επιλέγεται το layers area.

Ξανά λοιπόν πρέπει να οριστούν τα contents (περιεχόμενα) στα οποία επιθυμεί ο μελετητής να φτιάξει τα οριακά στρώματα (layers). Με παρόμοιο τρόπο όπως στο επιφανειακό πλέγμα, στην προκειμένη περίπτωση γίνονται layers στις περιοχές nozzle και needle. Επομένως πρέπει να επιλεγούν με κατάλληλο τρόπο, όπως φαίνεται στην εικόνα 113. Αντίστοιχα επιλέγονται για το layers area (εικόνα 114) και το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 115. Πλέον πρέπει να επιλεγούν και τα κατάλληλα CFD parameters.

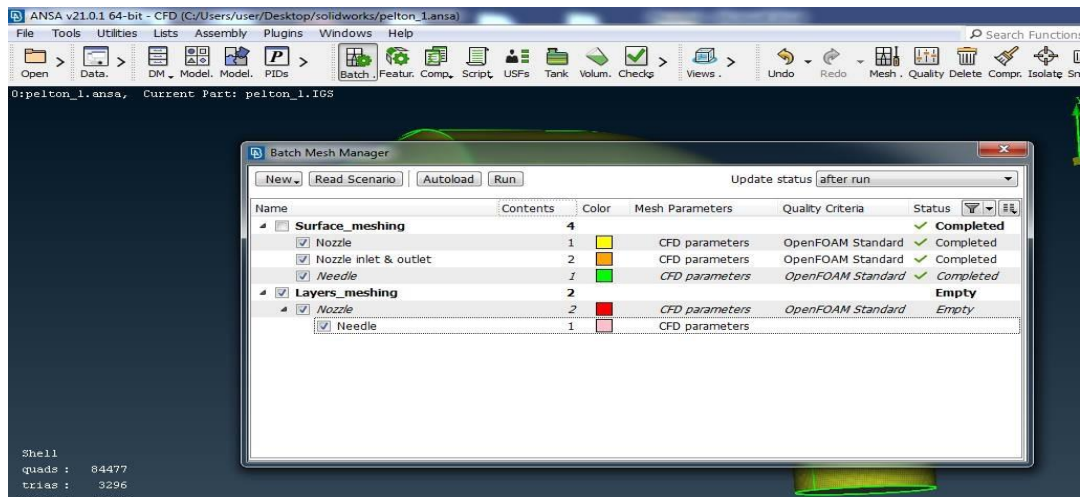
Η χρήση της αριθμομηχανής του ANSA στο μενού αυτό είναι ιδιαίτερα βοηθητική, καθώς ο μελετητής μπορεί να τοποθετήσει τις παραμέτρους για την περίπτωση που μελετά και να λάβει ως αποτέλεσμα κάποια δεδομένα που πρέπει να χρησιμοποιήσει για να σχηματιστούν σωστά τα layers.



Εικόνα 113: Επιλογή των κατάλληλων PID για τη δημιουργία των layers.
Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 114: Αντίστοιχη επιλογή PID για το layers area. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

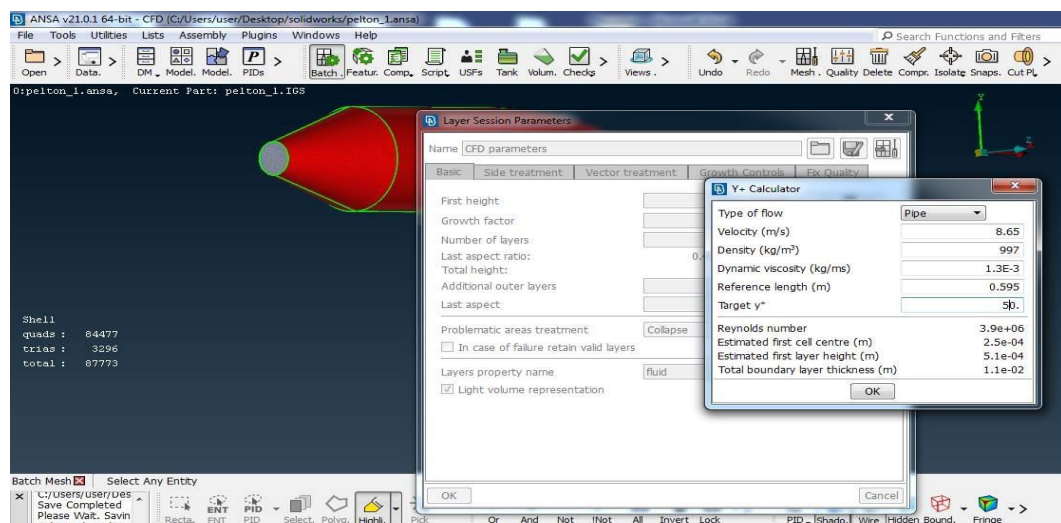


Εικόνα 115: Το πεδίο layers meshing στον batch mesh manager. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 116, η υπό μελέτη περίπτωση διαθέτει ορισμένες χαρακτηριστικές τιμές που αναφέρονται κυρίως στις ιδιότητες της γεωμετρίας, αλλά και του ρευστού που χρησιμοποιείται, το οποίο εδώ είναι το νερό. Ιδιαίτερη μνεία αξίζει στην παράμετρο y^+ (y^+ plus), ένα θεμελιώδες μέγεθος στην ανάλυση των οριακών στρωμάτων, το οποίο ορίζεται ως η αδιάστατη απόσταση από το τοίχωμα και ισούται με:

$$y^+ = \frac{u_* \times y}{\nu} \quad (27),$$

όπου: u_* είναι η ταχύτητα διάτμησης (friction velocity, ορίζεται ως η τετραγωνική ρίζα του πηλίκου της διατμητικής τάσης προς την πυκνότητα του ρευστού), y είναι η πραγματική απόσταση από το τοίχωμα (όχι αδιάστατη) και ν είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού (νερό). Το y^+ ορίζεται από το μελετητή στο ANSA και οι υπολογισμοί της αριθμομηχανής δίνουν ως αποτέλεσμα, μεταξύ άλλων, το estimated first layer height (σε m), που χρησιμοποιείται στο πεδίο first height (αφού μετατραπεί σε mm).



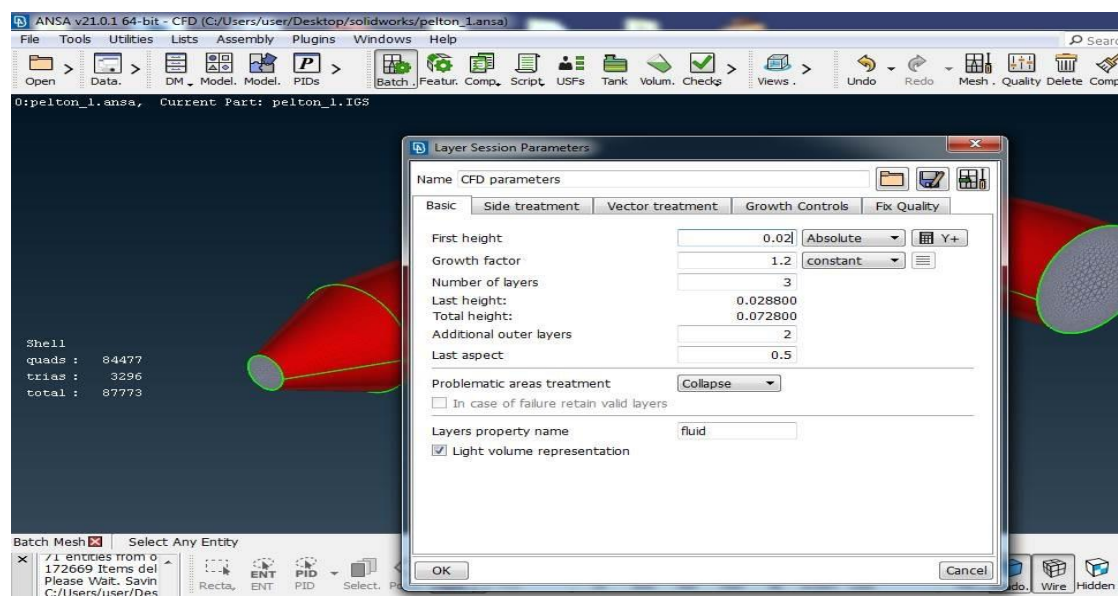
Εικόνα 116: Η χρήσιμη αριθμομηχανή στον υπολογισμό των layers. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

Σημαντική παρατήρηση:

Στις περισσότερες περιπτώσεις (πίνακας 17) το minimum target length ξεκινά από το 1 και αντίστοιχα υπολογίζεται το maximum target length, το οποίο είναι πολλαπλάσιο του minimum (εδώ στο nozzle και needle είναι 10 φορές μεγαλύτερο, ενώ στα inlet και outlet 50 φορές μεγαλύτερο). Ωστόσο, αν για κάποιο λόγο, η γεωμετρία κατασκευαστεί έτσι ώστε να μην ξεκινά από το 1 (εδώ ξεκινά από το 0.039), τότε πρέπει να γίνουν οι αντίστοιχες προσαρμογές και στο surface mesh και στα layers.

Συνεπώς, οι προσαρμογές έχουν γίνει στο surface mesh και πλέον πρέπει να γίνουν και εδώ. Συγκεκριμένα η τιμή που προκύπτει από το estimated first layer height, αφού μετατραπεί σε mm, πρέπει να πολλαπλασιαστεί με την τιμή του minimum target length, ώστε να ισχύσει η αναλογία. Το ίδιο πρέπει να γίνει και στο layers area. Το τελικό αποτέλεσμα διακρίνεται στις ακόλουθες εικόνες (118 και 119). Επισημαίνεται ότι αν το πρόβλημα αυτό δεν υφίσταται (δηλαδή το minimum target length ισούται με 1), δεν απαιτείται τίποτα άλλο, παρά μόνο να μπει η τιμή του estimated first layer height στο first height, αφού βέβαια μετατραπεί σε mm.

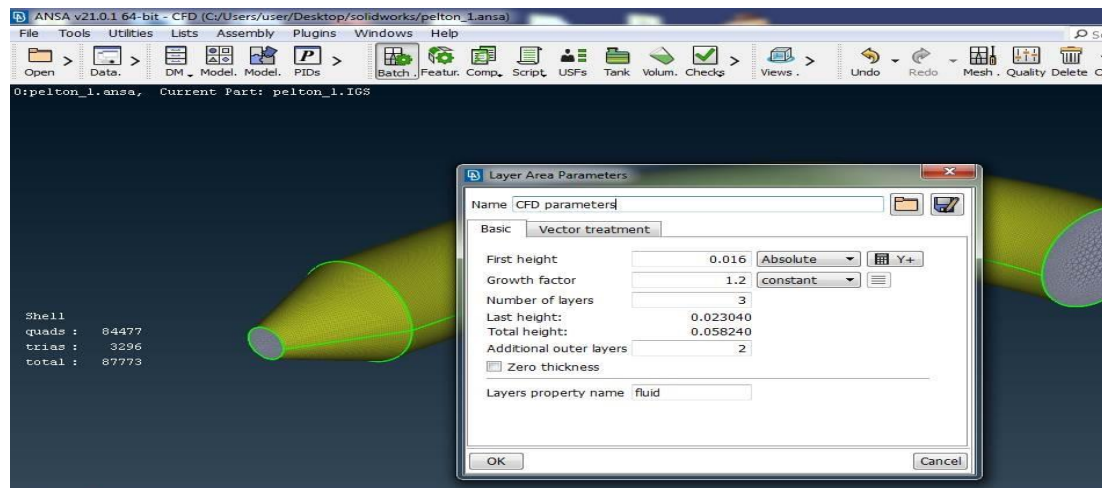
Παράλληλα γίνονται και κάποιες άλλες ρυθμίσεις (εικόνα 117), ενώ τονίζεται ότι στην καρτέλα fix quality το πεδίο fix violating solid elements πρέπει να απενεργοποιηθεί και στο session και στο layers area. Με τον ίδιο τρόπο ακολουθείται και στο layers area η διαδικασία αυτή, συνεπώς η προετοιμασία των οριακών στρωμάτων έχει ολοκληρωθεί. Ωστόσο, δε θα εκτελεστεί το run στο σημείο αυτό, αλλά, αντιθέτως, πρώτα θα γίνει η αντίστοιχη προετοιμασία για το πλέγμα του όγκου και μετά θα εκτελεστούν όλα μαζί.



Εικόνα 117: Οι ρυθμίσεις στα CFD parameters των layers. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 118: Χρήση της αριθμομηχανής στο layers area. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 119: Καθορισμός των CFD parameters στο layers area. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

5.3.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΟΓΚΟΥ

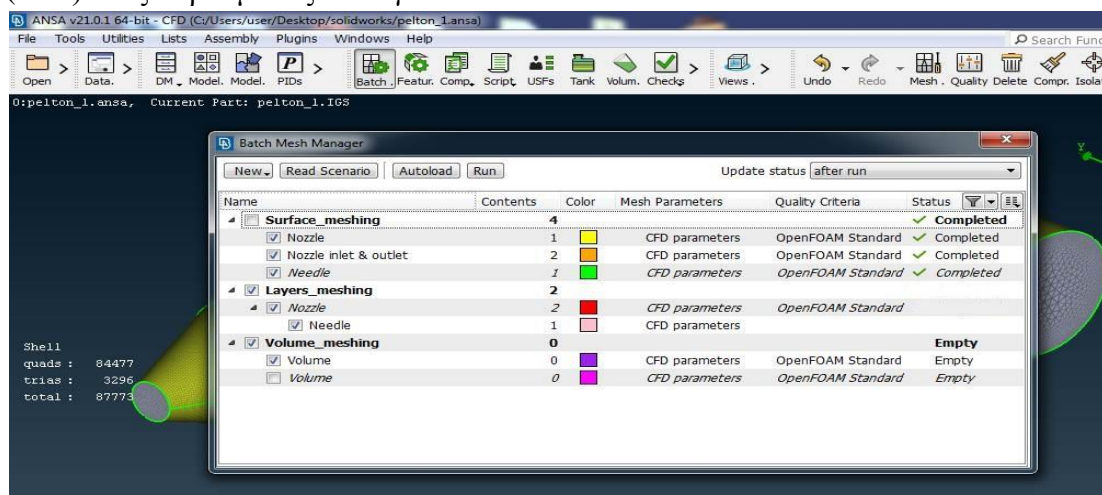
Σε αυτή την υποενότητα περιγράφεται το τελικό στάδιο της πλεγματοποίησης, δηλαδή η παραγωγή του πλέγματος του όγκου. Πάλι από το batch mesh manager επιλέγεται το new και έπειτα volume scenario. Στη συνέχεια ο μελετητής επιλέγει πόσα sessions χρειάζεται, ώστε να αντιστοιχούν στις περιοχές που θα αποκτήσουν πλέγμα όγκου. Σε αντίθεση με τα layers, εδώ μπορούν να δημιουργηθούν περισσότερα του ενός sessions, ωστόσο, στην υπό εξέταση περίπτωση, ένα είναι αρκετό.

Ξεκινώντας από τα contents στη γραμμή του volume scenario (όλοι αυτοί οι τίτλοι μπορούν να μετονομαστούν αν το επιθυμεί ο μελετητής, για παράδειγμα εδώ χρησιμοποιείται ο τίτλος volume meshing), επιλέγονται οι ρυθμίσεις που φαίνονται στην εικόνα 121. Το σημείο που χρήζει προσοχής εδώ είναι ότι δεν υπάρχουν κάποια PID (όπως nozzle ή needle) στο πεδίο αυτό, αντίθετα με τα προηγούμενα στάδια. Αυτό συμβαίνει διότι το ANSA δεν πλεγματοποιεί πλέον σε γεωμετρικές επιφάνειες,

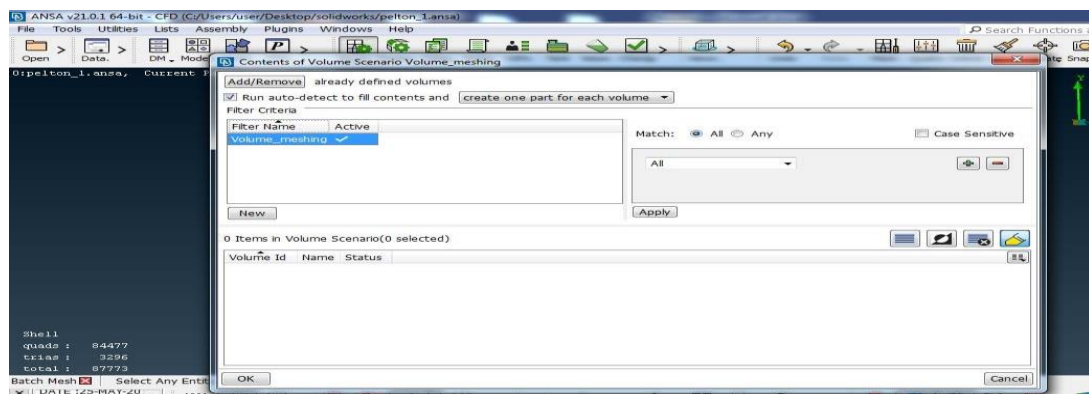
αλλά προσπαθεί να εντοπίσει τους οριοθετημένους όγκους που υποδεικνύει ο μελετητής.

Στη συνέχεια προτείνεται η δημιουργία ενός καινούριου session, διότι απαιτούνται ορισμένες ρυθμίσεις που δεν ικανοποιούνται στο default session. Οι εν λόγω ρυθμίσεις που αφορούν τα contents απεικονίζονται στην εικόνα 122. Η σημασία της εντολής Nth largest equals 1 έγκειται στο ότι ζητείται από το ANSA να εντοπίσει τον μεγαλύτερο όγκο (αναγνωρίζοντας ότι ισούται με 1, δηλαδή μια κατά κάποιο τρόπο αδιαστατοποίηση) και να δημιουργήσει σε αυτόν χωρικό πλέγμα. Στη συνέχεια από τα CFD parameters μπορεί να επιλεγεί ο αλγόριθμος πλεγματοποίησης, στο πεδίο mesh with (εδώ προτιμάται ο tetra rapid), ενώ το σημαντικό στοιχείο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 123, είναι η συμπλήρωση του πεδίου auto detected volumes property name, το οποίο πρέπει να ταυτίζεται με το layers property name στο πεδίο των layers, δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση, το fluid.

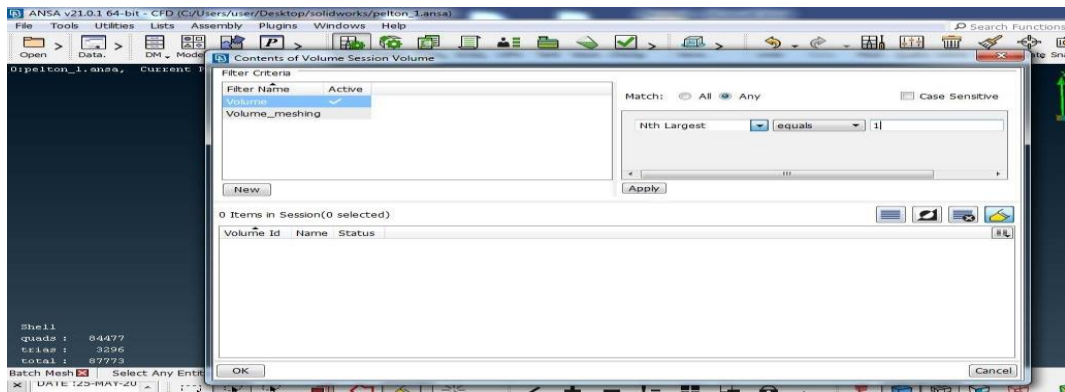
Πλέον μπορεί να ξεκινήσει η εκτέλεση των τμημάτων που αφορούν τα layers και το volume mesh. Αφού απενεργοποιηθούν στο μενού του batch mesh manager το surface mesh και παραμείνουν ενεργοποιημένα τα layers mesh και volume mesh, εκτελείται η εντολή run. Σε περίπτωση που το πρόγραμμα δυσκολεύεται να ανταποκριθεί, συστήνεται η επανεκκίνησή του, αφού προηγουμένως έχουν σωθεί (save) όλες οι ρυθμίσεις που έγιναν.



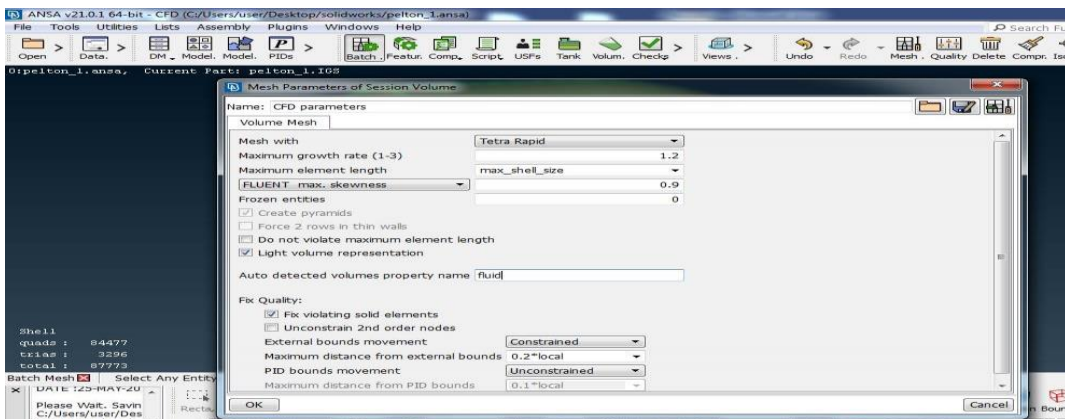
Εικόνα 120: Η τελική μορφή του batch mesh manager λίγο πριν την τελική εκτέλεση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 121: Οι ρυθμίσεις των όγκων που θα ανιχνευθούν στο volume meshing. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



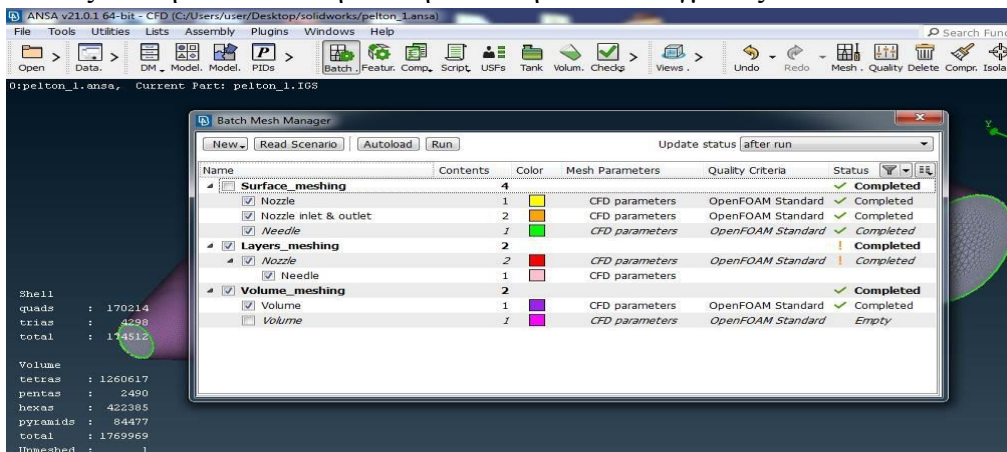
Εικόνα 122: Η εισαγωγή της εντολής Nth largest equals 1. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



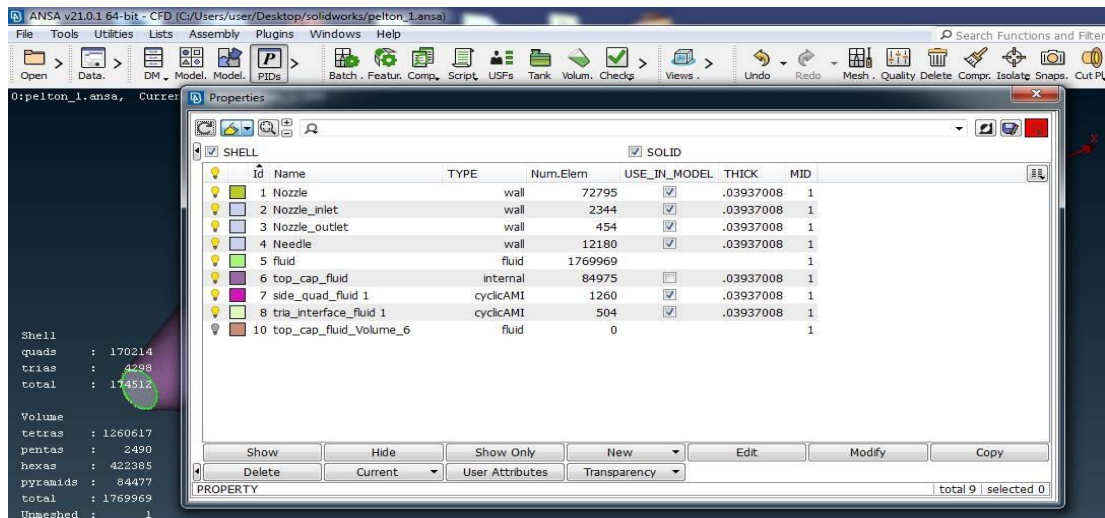
Εικόνα 123: Οι ρυθμίσεις των CFD parameters στο volume meshing. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

5.3.3 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΟΓΚΟΥ

Μετά την κατασκευή του πλέγματος όγκου, ακολουθεί ο έλεγχος των χαρακτηριστικών του μέσω των δυνατοτήτων που παρέχει το ANSA, ακριβώς όπως έγινε και με το επιφανειακό πλέγμα. Ο έλεγχος αποσκοπεί στη βελτίωση του υφιστάμενου πλέγματος, προσπαθώντας να περιορίσει ελαττωματικά στοιχεία (elements) ή ελαττωματικά πλεγματοποιημένες περιοχές. Οι ακόλουθες εικόνες παρουσιάζουν την κατάσταση και την ποιότητα του πλέγματος.



Εικόνα 124: Η εικόνα του batch mesh manager μετά την εκτέλεση του πλέγματος όγκου. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

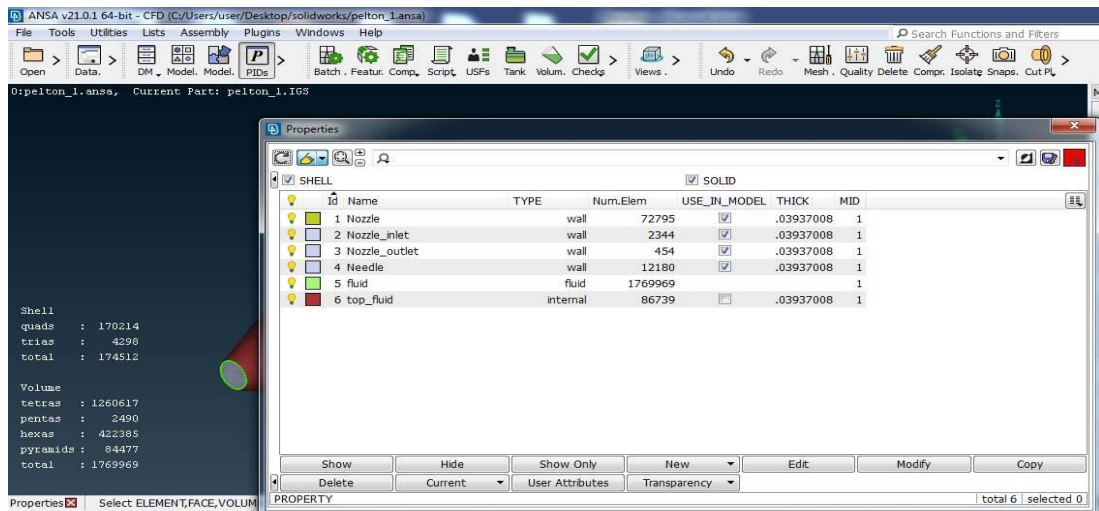


Εικόνα 125: Ο συνολικός αριθμός των PID πριν την επεξεργασία. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

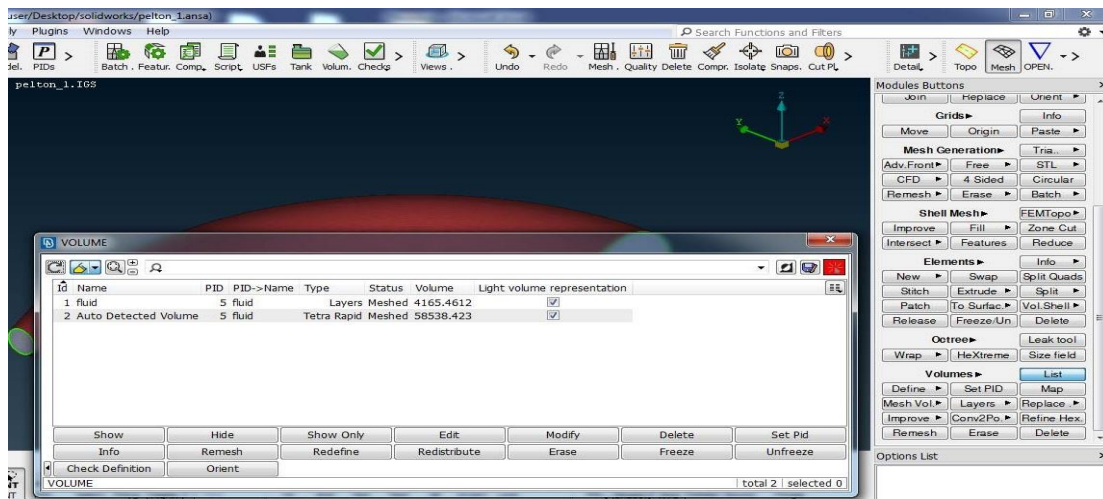
Όπως γίνεται αντιληπτό από την εικόνα 125, μετά τα PID της γεωμετρίας, έχουν σχηματιστεί και μερικά ακόμη, που αντιστοιχούν στους όγκους. Το τελευταίο (με το σβηστό λαμπάκι) εμφανίζεται, διότι το ANSA ανιχνεύει κάποια οριοθετημένη περιοχή που δεν έχει πλέγμα όγκου. Συγκεκριμένα η περιοχή αυτή αναφέρεται στον όγκο εσωτερικά της βελόνας του ακροφυσίου, ο οποίος στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν χρειάζεται να πλεγματοποιηθεί. Επομένως το συγκεκριμένο PID μπορεί να διαγραφεί. Τονίζεται ωστόσο ότι η βελόνα στην εξωτερική επιφάνειά της διαθέτει οριακό στρώμα (layer), αφού έρχεται σε επαφή με το νερό, καθώς αυτό διέρχεται από τον αγωγό. Η επεξήγηση αυτή απεικονίζεται καλύτερα στην εικόνα 130.

Το PID 5 είναι ο βασικός όγκος που ανιχνεύει το ANSA και αντιπροσωπεύει το εσωτερικό του αγωγού (Nth largest equals 1). Τα PID 6,7,8 συνοδεύουν το 5 και στην πραγματικότητα μόνο το 6 απαιτείται, αφού τα 7 και 8 δημιουργήθηκαν επιπροσθέτως λόγω κάποιων απότομων μεταβολών στο ανάγλυφο του πλέγματος στα σημεία εισόδου και εξόδου. Επομένως, χωρίς βλάβη της γενικότητας, τα PID 6,7,8 μπορούν να ενωθούν σε ένα (από το δεξί μενού εργαλείων επιλέγεται το set pid κάτω από το macros και αφού παραμείνουν αναμμένα μόνο τα λαμπάκια των 6,7,8, επιλέγεται το new από το μενού των PID και enter) και το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 126.

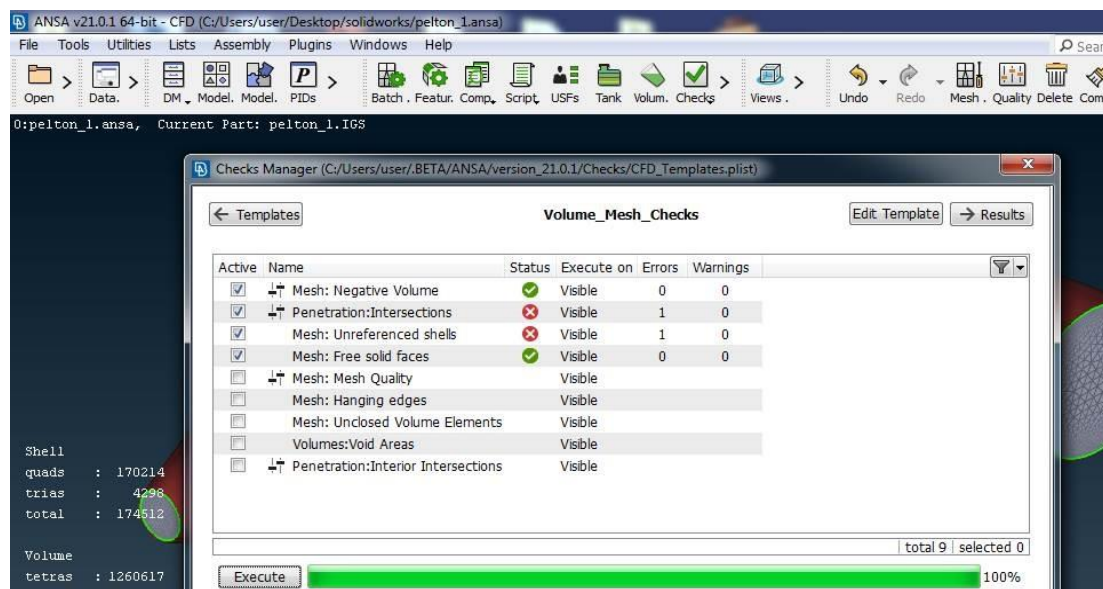
Παράλληλα ο μελετητής μπορεί να έχει μια εποπτεία των περιοχών που διαθέτουν πλέγμα όγκου από το δεξί μενού εργαλείων και συγκεκριμένα από το εργαλείο list, κάτω από την καρτέλα volume. Εκεί φαίνονται ακριβώς ποιοι όγκοι ανιχνεύθηκαν από το ANSA, ενώ, σε περίπτωση που κολλήσει το πρόγραμμα, η εντολή πλεγματοποίησης εκτελείται και από αυτό το πεδίο.



Εικόνα 126: Ο συνολικός αριθμός των PID μετά την επεξεργασία. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 127: Η κάρτα εντολών list που έχει καταχωρημένους τους ογκούς που ανιχνεύει το ANSA. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 128: Ο έλεγχος του πλέγματος όγκου με τη βοήθεια του checks manager. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

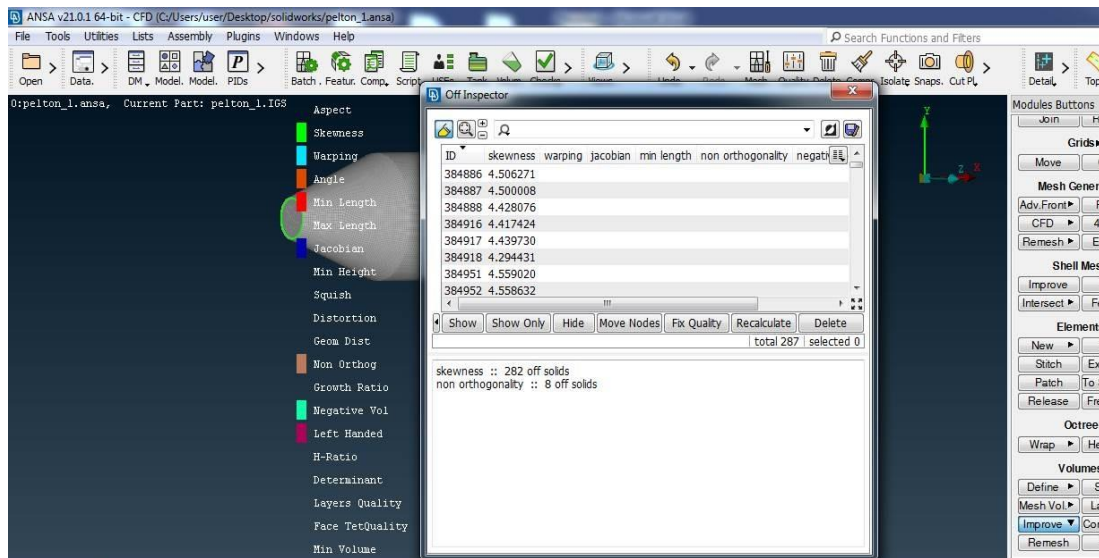
Περνώντας στον έλεγχο των σφαλμάτων του πλέγματος, η πρώτη παρατήρηση που διαπιστώνεται με βάση την εικόνα 124 είναι ότι, ενώ οι όγκοι έχουν δημιουργηθεί κανονικά, στα layers εντοπίζονται ορισμένα warnings. Το φαινόμενο αυτό, σε συνδυασμό με το ότι ο έλεγχος του volume mesh με βάση τα checks (έγινε και για τη γεωμετρία και για το surface mesh) βγάζει τα αποτελέσματα της εικόνας 128, εγείρει ορισμένες αμφιβολίες.

Πράγματι τα δύο errors σε συνδυασμό με τα warnings στα layers προκαλούν προβληματισμό, ωστόσο στα περισσότερα cases του ANSA εντοπίζονται παρόμοια προβλήματα σε αυτό το τελικό στάδιο. Οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι πλεγματοποιούνται περιοχές τομής μεταξύ επιφανειών με αρκετά πολύπλοκες γεωμετρίες, συνεπώς είναι αρκετά δύσκολο και για τα layers, αλλά και για τα volume elements να τοποθετηθούν ευνοϊκά. Επομένως προκύπτουν ορισμένα σφάλματα, τα οποία επιλύονται από το ANSA σε ένα σημαντικό βαθμό (με τον έλεγχο για off elements που παρουσιάζεται στη συνέχεια), χωρίς ωστόσο να εξαλείφονται τελείως. Αναφορικά με τα unreferenced shells, αυτά οφείλονται και πάλι στην έλλειψη πλέγματος όγκου στο εσωτερικό της βελόνας, κάτι το οποίο υπενθυμίζεται ότι έγινε σκόπιμα.

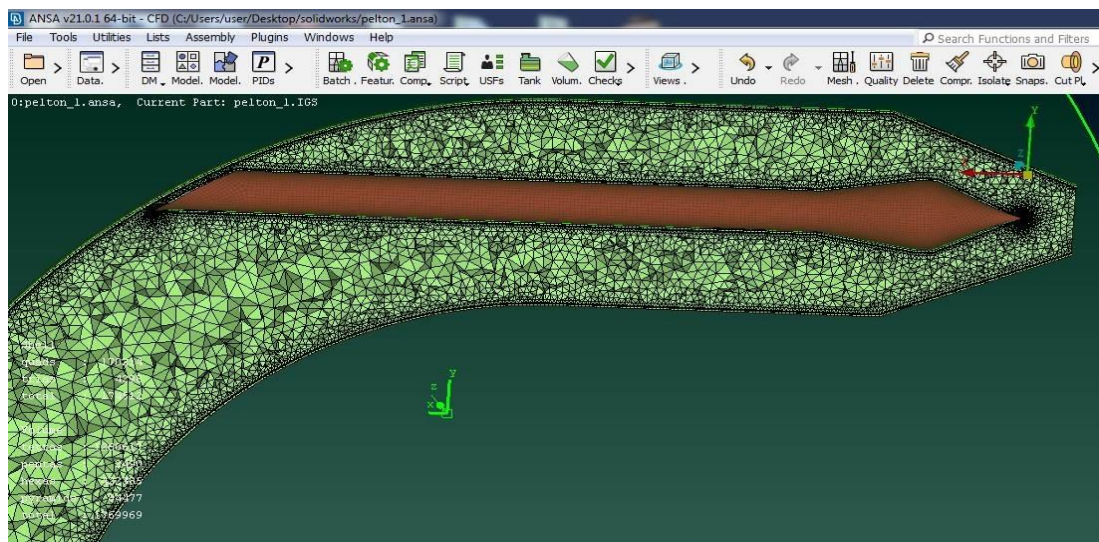
Ο κυριότερος έλεγχος που πραγματοποιείται ως μια προσπάθεια βελτίωσης του πλέγματος όγκου βασίζεται στον ισχυρό αλγόριθμο improve με τη βοήθεια του οποίου επιχειρείται η μείωση των off elements, των στοιχείων δηλαδή που δεν έχουν τοποθετηθεί σωστά και προκαλούν τις ειδοποιήσεις για errors και warnings που παρουσιάζει το ANSA. Επομένως από το improve, επιλέγεται το inspect και έπειτα από λίγο εμφανίζεται μια καρτέλα με τα καταχωρημένα off elements.

Πλέον ο μελετητής πρέπει να ενεργοποιήσει το fix quality και να περιμένει τη μείωση των off elements. Όπως διακρίνεται στην επόμενη εικόνα, τα off elements μειώθηκαν από 390 σε 287, ωστόσο δεν μειώνονται περαιτέρω και για το λόγο αυτό δεν εξαλείφονται και οι ειδοποιήσεις των errors και warnings. Πάντως ακόμα και με την παρουσία αυτών των ελαττωματικών στοιχείων, η επίλυση στη συνέχεια εκτελείται κανονικά.

Τέλος, ιδιαίτερη αναφορά αξίζει σε μια δυνατότητα που παρέχει το ANSA, η οποία διευκολύνει ιδιαίτερα τον μελετητή κατά την παρατήρηση του πλέγματος όγκου. Πρόκειται για τα επίπεδα τομών (cut planes), η ενεργοποίηση των οποίων μπορεί να τμήσει τη γεωμετρία και να δείξει τι υπάρχει στο εσωτερικό της. Από το cut planes πάνω δεξιά στη γραμμή εργαλείων επιλέγεται το new και έπειτα default XY (ή οποιοσδήποτε άλλος συνδυασμός αξόνων). Με μεσαίο κλικ (της ροδέλας) εμφανίζεται μια νέα καρτέλα, όπου επιλέγεται new και part και στη συνέχεια, μόλις σχηματιστεί η τομή, επιλέγεται το OK. Έπειτα η γεωμετρία μπορεί να μετακινηθεί με τρόπο που να φαίνεται το εσωτερικό της, όπως στην ακόλουθη εικόνα. Αν ο μελετητής επιθυμεί να επαναφέρει τη γεωμετρία στην αρχική της κατάσταση (χωρίς να φαίνεται η τομή), αρκεί να επιλέξει τη μωβ εντολή cut planes στην κάτω γραμμή εργαλείων.



Εικόνα 129: Ο αλγόριθμος improve για τη βελτίωση των off elements. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 130: Η τομή μέσω της οποίας διακρίνεται το εσωτερικό της γεωμετρίας. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

5.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ - Η ΒΑΣΗ ΤΟΥ ANSA

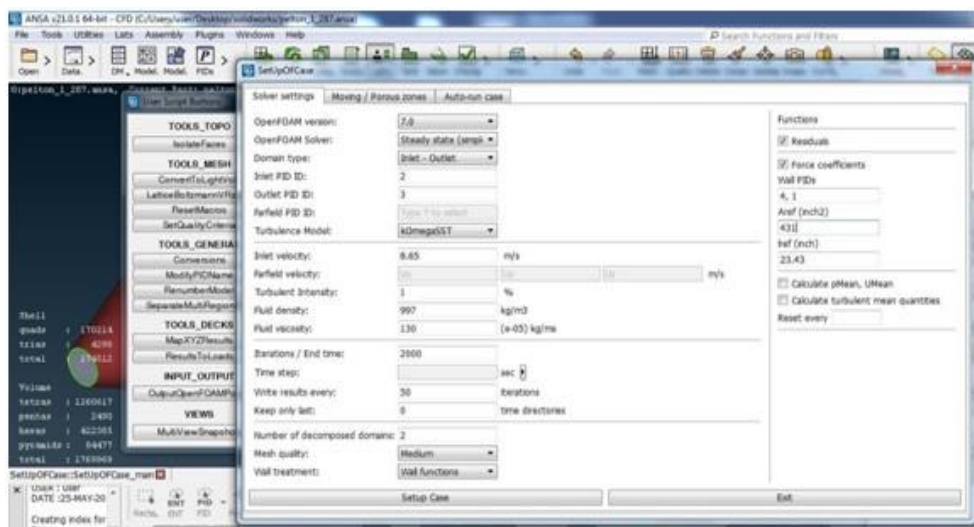
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια από τις ευρύτερα διαδεδομένες μεθόδους αριθμητικής επίλυσης προβλημάτων με βάση τη χρήση μερικών διαφορικών εξισώσεων και χρησιμοποιείται σε μια πληθώρα επιστημονικών πεδίων, όπως, μεταξύ άλλων, η μηχανική και αντοχή των υλικών, η μετάδοση θερμότητας, αλλά και η μηχανική των ρευστών. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην υποδιαίρεση μιας γεωμετρίας σε πολλά μικρότερα κομμάτια, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων η γεωμετρία διακριτοποιείται, δηλαδή μετατρέπεται από μια συνεχής οντότητα σε διακριτά τμήματα και με τον τρόπο αυτό οι μερικές διαφορικές μετατρέπονται σε αλγεβρικές εξισώσεις, που επιλύονται πιο εύκολα υπολογιστικά (Daryl, 2011).

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η υποδιαίρεση της γεωμετρίας σε μικρότερα τμήματα είναι ποικίλα, καθώς εξασφαλίζεται μια πιο ακριβής περιγραφή ειδικά σε περίπλοκες γεωμετρίες, αναπαρίσταται πιο εύστοχα η συνολική λύση, ενώ εντοπίζονται πιο εύκολα και τοπικά φαινόμενα που συμβαίνουν σε μια συγκεκριμένη περιοχή της γεωμετρίας. Το αποτέλεσμα των παραπάνω αναλύσεων οδηγεί σε δύο βασικούς πυλώνες, στη δημιουργία ενός συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων για προβλήματα μόνιμης κατάστασης (εκεί δηλαδή που δεν υπάρχει μεταβολή ως προς το χρόνο) και ενός συστήματος συνήθων διαφορικών εξισώσεων για μεταβατικά προβλήματα (σε αυτά υπάρχει μεταβολή ως προς το χρόνο) (Reddy, 2006).

5.5 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΝΟΣ CASE ΤΟΥ ANSA ΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά το τελευταίο κομμάτι που σχετίζεται με το λογισμικό ANSA και αποτελεί ουσιαστικά μια προεργασία για το στάδιο της επίλυσης που ακολουθεί. Πιο συγκεκριμένα το ANSA παρέχει τη δυνατότητα στο μελετητή να προετοιμάσει με απλό τρόπο το case του, ώστε να εισαχθεί σε έναν επιλύτη. Συνήθως για το απαιτητικό έργο της επίλυσης επιλέγεται ο solver Openfoam, ένα αρκετά ιδιαίτερο λογισμικό, για το οποίο αναφέρονται περισσότερα στη συνέχεια. Στην προκειμένη περίπτωση επομένως γίνεται η προετοιμασία για το Openfoam, ωστόσο γενικά η επιλογή του επιλύτη βρίσκεται στην ευχέρεια του μελετητή.

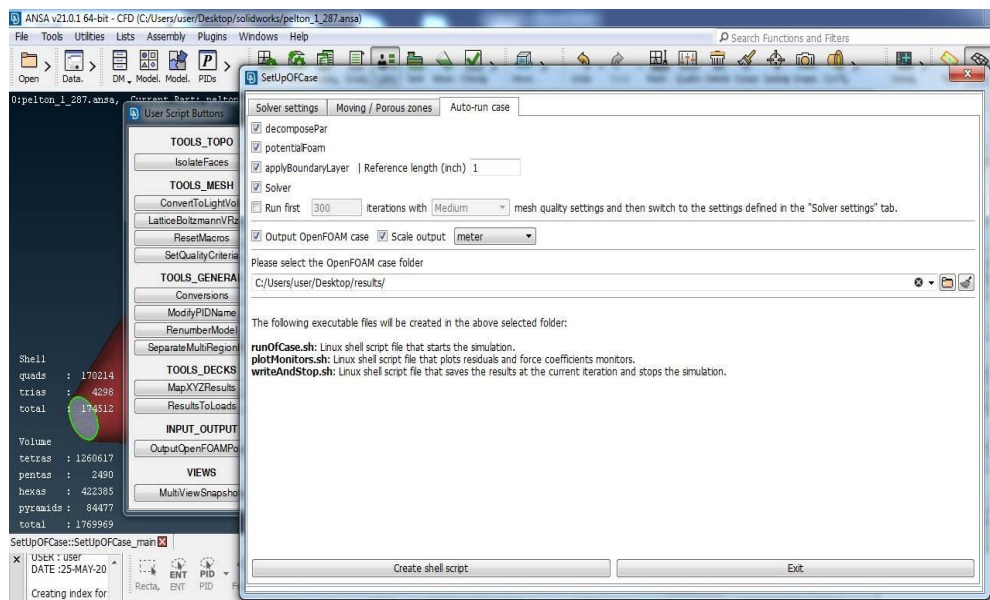
Χρησιμοποιώντας το εργαλείο user script buttons (συντομογραφημένα USFs στην πάνω γραμμή εργαλείων) και επιλέγοντας set quality criteria, παρέχεται η δυνατότητα επιλογής solver, αλλά και των κριτηρίων για την ποιότητα του πλέγματος που επιθυμεί ο μελετητής. Από προεπιλογή, το ANSA έχει καθορίσει το Openfoam standard, το οποίο είναι εμφανές και στο batch mesh manager, δίπλα από τα CFD parameters (εικόνα 108). Συνεχίζοντας με το user script buttons, επιλέγεται το setup of case. Οι ρυθμίσεις που λαμβάνουν χώρα σε αυτή την πρώτη καρτέλα (η πρώτη από τις τρεις στο πάνω μέρος) παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 131: Οι ρυθμίσεις του solver settings στο μενού setup of case. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

Οι εν λόγω ρυθμίσεις αφορούν μια πληθώρα παραμέτρων που λαμβάνεται υπ' όψιν, όπως για παράδειγμα ο αλγόριθμος επίλυσης (περισσότερα στοιχεία για τον simplefoam παρατίθενται στο επόμενο κεφάλαιο), για τα PID που αντιστοιχούν στην είσοδο και στην έξοδο, για την ταχύτητα εισόδου, για το μοντέλο τύρβης και ορισμένα χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής (και για αυτά θα γίνει αναφορά στο επόμενο κεφάλαιο), αλλά και για τις ιδιότητες του ρευστού. Επιπρόσθετα ο μελετητής πρέπει να ορίσει κάποιες παραμέτρους αναφορικά με τους φακέλους στους οποίους καταχωρούνται τα αποτελέσματα της επίλυσης, με την ποιότητα του πλέγματος, με τον αριθμό των επεξεργασιών που διαθέτει ο υπολογιστής που θα πραγματοποιήσει την επίλυση και προφανώς πρέπει να οριστεί και ο αριθμός των επαναλήψεων που θα εκτελέσει ο κώδικας.

Τέλος θα πρέπει να υπολογιστούν και ορισμένες διαστάσεις αναφοράς. Στα περισσότερα cases αυτές υπολογίζονται σε mm, ωστόσο αν για κάποιο λόγο εμφανίζεται μια άλλη μονάδα μέτρησης (όπως εδώ οι ίντσες), αρκεί να γίνει μια μετατροπή των μονάδων από mm σε ίντσες. Αναφορικά με τη δεύτερη καρτέλα, η ίδια δε χρειάζεται να υποστεί κάποια ρύθμιση, ενώ στην τρίτη καρτέλα πρέπει να οριστεί η διαδρομή των φακέλων που θα περιέχουν τα αρχεία της επίλυσης και να επιλεγεί το κουτάκι του output openfoam case, όπως φαίνεται και στην επόμενη εικόνα. Αφού γίνουν οι παραπάνω ρυθμίσεις, ο μελετητής πρέπει να επιστρέψει στην πρώτη καρτέλα και να επιλέξει setup case και έπειτα πάλι στην τρίτη, ώστε να επιλέξει create shell script. Αν ελεγχθεί ο προεπιλεγμένος φάκελος, θα περιέχει τα απαραίτητα αρχεία, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο στάδιο της επίλυσης που ακολουθεί.



Εικόνα 132: Οι ρυθμίσεις του auto run case στο μενού setup of case. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSA (έκδοση v21.0.1).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ PELTON – ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ OPENFOAM

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια από τις πιο θεμελιώδεις πτυχές της παρούσας εργασίας και συγκεκριμένα μετά την κατασκευή της γεωμετρίας και του πλέγματος, λαμβάνει χώρα η διαδικασία της επίλυσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το λογισμικό Openfoam, ένα υπολογιστικό πακέτο με ιδιαίτερη δημοφιλία και εξέλιξη, η λειτουργία του οποίου βασίζεται σε ορισμένες βασικές αρχές που το διαφοροποιούν από τα περισσότερα εμπορικά λογισμικά υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

Οι διαφορές αυτές αφορούν κυρίως τη δομή του προγράμματος, καθώς το Openfoam δεν διαθέτει γραφικό περιβάλλον, αλλά ένα απλό παράθυρο εντολών στο οποίο εκτελείται η επίλυση. Βέβαια υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισης των αποτελεσμάτων μετά την επίλυση μέσω μιας ειδικής εντολής (ονομάζεται paraview), ωστόσο αυτή είναι μια επιπρόσθετη δυνατότητα του λογισμικού και δεν αναλύεται περαιτέρω στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, αφού χρησιμοποιείται διαφορετικό λογισμικό για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τονίζεται ότι το Openfoam είναι κατάλληλο μόνο για τη διαδικασία της επίλυσης και δεν παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής γεωμετρίας ή πλέγματος, όπως για παράδειγμα το ANSYS.

Για την ορθή εκπόνηση της επίλυσης απαιτείται, επιπρόσθετα, η παρουσία ορισμένων ειδικών φακέλων, για τους οποίους γίνεται εκτενέστερη αναφορά στη συνέχεια. Όπως έχει προαναφερθεί, η διαδικασία που ακολουθεί το Openfoam συνίσταται στην επίλυση διαφορικών εξισώσεων στα σημεία του πλέγματος και με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η προσομοίωση της ροής. Ασφαλώς είναι απαραίτητη η ύπαρξη των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών για τη χρονική στιγμή που ξεκινά η επίλυση, ωστόσο όλες οι παραπάνω έννοιες επεξηγούνται λεπτομερειακά στις ενότητες που ακολουθούν.

6.1 ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟ OPENFOAM ΚΑΙ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗ

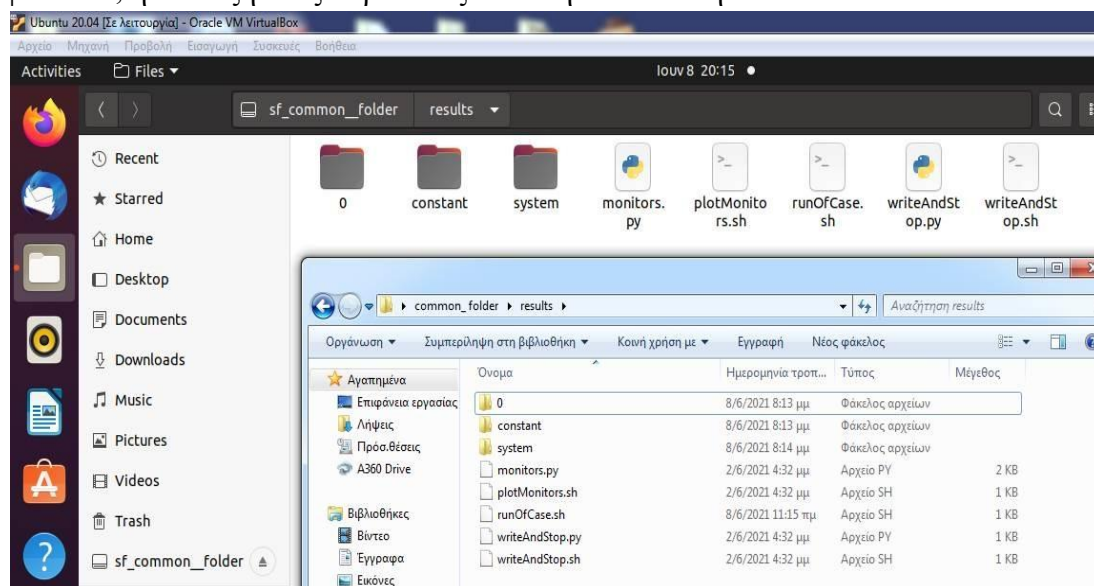
Όπως αναφέρθηκε στις τελευταίες ενότητες του προηγούμενου κεφαλαίου, το λογισμικό ANSA παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας των απαραίτητων φακέλων για την επίλυση. Συγκεκριμένα δημιουργούνται τρεις φάκελοι και πέντε αρχεία. Το σύνολο των δεδομένων αυτών μεταφέρεται στο περιβάλλον του Openfoam, με σκοπό την εκκίνηση της επίλυσης. Στο σημείο αυτό, ωστόσο, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν μερικές ιδιομορφίες του λογισμικού Openfoam, οι οποίες πρέπει απαραίτητως να ληφθούν υπ' όψιν κατά την εγκατάσταση του προγράμματος. Πιο συγκεκριμένα, ένα πρωταρχικό στοιχείο του λογισμικού είναι ότι χρειάζεται λειτουργικό σύστημα Linux, ενώ οι περισσότεροι υπολογιστές διαθέτουν Windows.

Επομένως το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη βοήθεια ενός virtual machine, όπως είναι το virtual box, δηλαδή μιας εικονικής μηχανής, η οποία

επιτρέπει στον μελετητή να εγκαταστήσει ένα νέο λειτουργικό σύστημα, το οποίο εργάζεται παράλληλα με το αρχικό, δηλαδή ουσιαστικά να εγκατασταθεί ένας νέος υπολογιστής μέσα στον ήδη υπάρχοντα υπολογιστή. Το νέο λειτουργικό σύστημα μπορεί να είναι Windows (για παράδειγμα μπορεί κάποιος να χρησιμοποιεί αρχικά Windows 7 και στην εικονική μηχανή να χρησιμοποιεί Windows 10 ή το αντίστροφο), ή οποιοδήποτε άλλο λειτουργικό, ωστόσο εδώ το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην εγκατάσταση ενός συστήματος Linux.

Μετά την εγκατάσταση της εικονικής μηχανής, πρέπει μέσα σε αυτή να εγκατασταθεί η εφαρμογή ubuntu, η οποία αποτελεί το νέο υπολογιστή σε περιβάλλον Linux. Τέλος μέσα στην εφαρμογή ubuntu εγκαθίσταται με τη βοήθεια μιας σειράς εντολών το πρόγραμμα Openfoam (η τρέχουσα έκδοση είναι η 7), ενώ το τελικό στάδιο προβλέπει τη δημιουργία ενός κοινού φακέλου μεταξύ Windows και Linux, ώστε να μεταφέρονται εύκολα τα αρχεία από το ένα λειτουργικό σύστημα στο άλλο.

Σε αυτόν ακριβώς το φάκελο (εδώ ονομάζεται `common_folder`) θα τοποθετηθούν τα αρχεία που δημιουργήθηκαν από το ANSA και πρέπει να επιλυθούν στο Openfoam. Όπως γίνεται αντιληπτό, πρόκειται για μια αρκετά περίπλοκη διαδικασία, ωστόσο είναι απαραίτητη για τη διεξαγωγή της επίλυσης μέσω Openfoam. Αφότου περαστούν τα αρχεία στο Openfoam με τη βοήθεια του κοινού φακέλου, η διάταξή τους παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα.

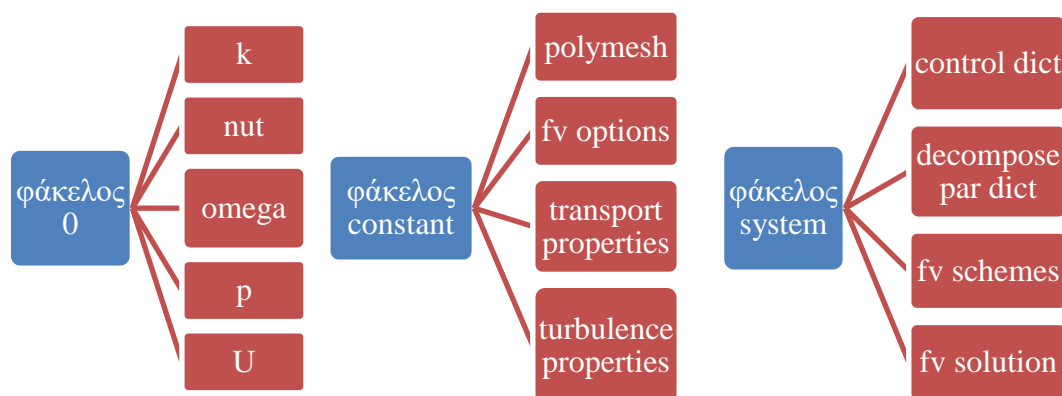


Εικόνα 133: Τα αρχεία της επίλυσης σε περιβάλλον Windows και Linux στον κοινό φάκελο. Ανάκτηση από: Λογισμικό Openfoam (έκδοση 7).

Όπως γίνεται αντιληπτό από την προηγούμενη εικόνα, υπάρχουν οι τρεις φάκελοι, η ύπαρξη των οποίων αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση κατά την επίλυση ενός σεναρίου (case) στο Openfoam, ενώ τα υπόλοιπα πέντε αρχεία δημιουργούνται αυτόματα από το ANSA, ωστόσο αν χρησιμοποιούνταν άλλο λογισμικό για το πλέγμα, στη θέση τους θα υπήρχαν διαφορετικά αρχεία. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι η παραπάνω μέθοδος εγκατάστασης του λογισμικού συνίσταται κυρίως για υπολογιστές που έχουν Windows 7, αφού για τα Windows 10 υπάρχει και ένας πιο απλός τρόπος εγκατάστασης.

Συγκεκριμένα με τη βοήθεια της εφαρμογής Windows Power Shell, η οποία είναι εξ αρχής εγκατεστημένη στους υπολογιστές και με τη χρήση κατάλληλης εντολής, ενεργοποιείται το περιβάλλον Linux. Κατόπιν με τη βοήθεια της εφαρμογής Microsoft Store, η οποία επίσης βρίσκεται εγκατεστημένη εξ αρχής, γίνεται λήψη και εγκατάσταση του Ubuntu, ενώ με τη βοήθεια κατάλληλων εντολών εγκαθίσταται τελικά και το Openfoam, όπως στην εικονική μηχανή. Η διαφορά των δύο μεθόδων έγκειται στο ότι με το δεύτερο τρόπο δεν απαιτείται η εγκατάσταση της εικονικής μηχανής, ενώ παράλληλα η εγκατάσταση του Ubuntu γίνεται πολύ πιο γρήγορα. Τέλος, η διαδικασία της επίλυσης πραγματοποιείται με σαφώς γρηγορότερους ρυθμούς, ενώ δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη του common folder.

Στο σημείο αυτό θεωρείται χρήσιμο να εξεταστούν τα περιεχόμενα των φακέλων της επίλυσης. Συνεπώς με βάση τα ακόλουθα σχήματα, όπου γίνεται ο αρχικός διαχωρισμός και παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά αρχεία, ισχύει:



Πίνακας 18: Τα κυριότερα αρχεία που απαρτίζουν τους 3 βασικούς φακέλους του Openfoam. Ανάκτηση από: Λογισμικό Openfoam (έκδοση 7) (κατόπιν επεξεργασίας)

6.1.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΑΚΕΛΟΥ 0

Ο φάκελος 0 είναι ο πρώτος από τους τρεις βασικούς φακέλους που απαιτούνται για την επίλυση στο Openfoam. Ουσιαστικά εκφράζει τη χρονική στιγμή 0, δηλαδή την κατάσταση ακριβώς πριν την έναρξη της επίλυσης. Όπως φαίνεται και από το προηγούμενο σχήμα, αποτελείται από συγκεκριμένα αρχεία, τα οποία χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία συναντώνται τα αρχεία k, nut και omega, τα οποία εκφράζουν την τυρβώδη κινητική ενέργεια, το κινηματικό ιξώδες της τύρβης και τον ειδικό ρυθμό διάχυσης της τύρβης αντίστοιχα. Όπως υποδηλώνει και η ονομασία τους, σχετίζονται με ροές που διαθέτουν τυρβώδη χαρακτηριστικά (ουσιαστικά όλες οι πραγματικές ροές είναι τυρβώδεις) (turbulent flow), ωστόσο αν ο μελετητής επιθυμεί να προσομοιώσει μια στρωτή ροή (laminar flow), η παρουσία των αρχείων αυτών περιττεύει.

Στη δεύτερη κατηγορία βρίσκονται τα αρχεία p και U, τα οποία εκφράζουν την πίεση και την ταχύτητα αντίστοιχα. Τα αρχεία αυτά υπάρχουν πάντα στο φάκελο 0, ανεξάρτητα από το είδος της ροής που εξετάζεται, συνεπώς όταν επιλύεται μια στρωτή ροή, μόνο τα αρχεία p και U βρίσκονται στο φάκελο 0. Τονίζεται εδώ ότι σε

περιπτώσεις ροών με τύρβη το λογισμικό Openfoam παρέχει μια ποικιλία διαφορετικών μοντέλων τύρβης, επομένως, ανάλογα με το ποιο μοντέλο χρησιμοποιεί ο μελετητής, τα αρχεία της πρώτης κατηγορίας μεταβάλλονται κατάλληλα. Πιο συγκεκριμένα στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το μοντέλο komegaSST, το οποίο απαιτεί τα αρχεία που περιγράφηκαν παραπάνω, ωστόσο υπάρχουν και άλλα μοντέλα, όπως το kEpsilon, το οποίο χρησιμοποιεί στη θέση του omega το epsilon, που δηλώνει τον ρυθμό διάχυσης της κινητικής ενέργειας της τύρβης.

Περνώντας στα περιεχόμενα των αρχείων, υπογραμμίζεται ότι σε αυτά περιέχονται οι συνοριακές συνθήκες που πρέπει να εφαρμοστούν, ώστε να προκύψουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Η προετοιμασία του ANSA διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό το μελετητή, αφού ανάλογα με τα ροϊκά χαρακτηριστικά που έχουν επιλεγεί στο setup of case του ANSA (όπως η παράμετρος turbulent intensity στην εικόνα 131), υπολογίζονται αυτόματα οι τιμές που πρέπει να λάβει το k και το omega και χρησιμοποιούνται στα αντίστοιχα αρχεία. Οι συνοριακές συνθήκες εφαρμόζονται σε κάποια καίρια σημεία της γεωμετρίας που ανιχνεύει το ANSA κατά την κατασκευή του πλέγματος, όπως στην είσοδο, στην έξοδο, αλλά και στο κέλυφος της γεωμετρίας.

Συγκεκριμένα έχουν αναγνωριστεί οι περιοχές nozzle inlet (είσοδος), nozzle outlet (έξοδος) και default exterior, το οποίο εκφράζει την περιοχή περιμετρικά του κελύφους, η οποία δημιουργήθηκε όταν κατασκευάστηκε το πλέγμα όγκου στο εσωτερικό του nozzle. Για το λόγο αυτό δεν αναγνωρίζονται οι περιοχές nozzle και needle, αφού θεωρούνται εσωτερικές μέσα στον όγκο, ενώ το ANSA χρειάζεται αυτές που αναγνωρίζονται ως σύνορα του όγκου. Επομένως και στα πέντε αρχεία του φακέλου 0 υπάρχουν οι περιοχές που περιγράφηκαν παραπάνω, ενώ οι τιμές που χρησιμοποιούνται ως συνοριακές συνθήκες για τα k και omega διακρίνονται στην ακόλουθη εικόνα.

<pre> object k; } /*----- /*----- dimensions [0 2 -2 0 0 0]; internalField uniform 0.011; boundaryField { Nozzle_inlet { type fixedValue; value uniform 0.011; } Nozzle_outlet { type inletOutlet; value uniform 0.011; inletValue uniform 0.011; } default_exterior { type kqRWallFunction; value uniform 0.011; } } </pre>	<pre> object omega; } /*----- /*----- dimensions [0 0 -1 0 0 0]; internalField uniform 860.747; boundaryField { Nozzle_inlet { type fixedValue; value uniform 860.747; } Nozzle_outlet { type inletOutlet; value uniform 860.747; inletValue uniform 860.747; } default_exterior { type omegaWallFunction; value uniform 860.747; } } </pre>
--	--

Εικόνα 134: Οι συνοριακές συνθήκες στα αρχεία k και omega. Ανάκτηση από: Λογισμικό Openfoam (έκδοση 7).

Με παρόμοιο τρόπο κατασκευάζονται και τα αρχεία nut, p και U. Το σημείο που χρήζει προσοχής εδώ είναι ότι, ενώ στα αρχεία k, omega και nut δεν πραγματοποιούνται αλλαγές, δηλαδή παραμένουν οι προεπιλεγμένες τιμές από το ANSA, στα αρχεία p και U λαμβάνουν χώρα ορισμένες αλλαγές που αφορούν αριθμητικές τιμές μεγεθών, οι οποίες, στην προκειμένη περίπτωση, είναι γνωστές από τα δεδομένα του σταθμού Πλαστήρα. Τονίζεται εδώ ότι οι τιμές k, epsilon που διακρίνονται στην ακόλουθη εικόνα δε χρειάζεται να ληφθούν υπ' όψιν σε κανένα σημείο της διαδικασίας που περιγράφεται.

```

object nut;
/*-----
/*-----

dimensions [0 2 -1 0 0 0];

internalField uniform 0.;

boundaryField
{
    Nozzle_inlet
    {
        type calculated;
        value uniform 0.;
    }
}

Nozzle_outlet
{
    type calculated;
    value uniform 0.;
}

default_exterior
{
    type nutkWallFunction;
    Cmu 0.09;
    kappa 0.41;
    epsilon 9.8;
    value uniform 0.;
}

```

Εικόνα 135: Οι συνοριακές συνθήκες στο αρχείο nut. Ανάκτηση από: Λογισμικό Openfoam (έκδοση 7).

Αναφορικά με το αρχείο της πίεσης, άξιο παρατήρησης είναι οι μονάδες μέτρησης, οι οποίες δίνονται σε m^2/s^2 . Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει αν διαιρεθεί η πίεση N/m^2 με την πυκνότητα kg/m^3 . Επομένως για πίεση εισόδου που κυμαίνεται στα 58 bar (ακριβέστερη τιμή είναι τα 57 bar, δηλαδή υπολογισμένη με βάση το μανομετρικό ύψος μεταξύ σταθμού και λίμνης), προκύπτει ως συνοριακή συνθήκη εισόδου μέγεθος πίεσης ίσο με $5700 m^2/s^2$, αφού η πυκνότητα του νερού είναι περίπου $1000 kg/m^3$ και 1bar ισούται με $10^5 Pa$. Αντίστοιχα για την έξοδο, στην οποία η πίεση είναι ατμοσφαιρική (1 bar), η συνοριακή συνθήκη ισούται με $0 m^2/s^2$, αφού οι υπολογισμοί απαιτούν τις τιμές της μανομετρικής (gauge) πίεσης. Γενικότερα ισχύει ότι η απόλυτη πίεση ισούται με το άθροισμα της ατμοσφαιρικής και της μανομετρικής, κάτι που συνεπάγεται απόλυτη πίεση εισόδου ίση με 58 bar (ακριβέστερος υπολογισμός) και εξόδου ίση με μια ατμόσφαιρα.

Αντίστοιχα, στο αρχείο της ταχύτητας η συνοριακή συνθήκη εισόδου έχει οριστεί ήδη από το ANSA, αφού στο setup of case, στο πεδίο inlet velocity καταγράφεται η ταχύτητα εισόδου, η οποία εδώ ισούται με 8.65 m/s. Το μέγεθος αυτό προκύπτει με βάση τις εξής παραδοχές, ότι δηλαδή οι υπολογισμοί γίνονται με βάση τη μέγιστη παροχή ανά ακροφύσιο και η διατομή εισόδου είναι 595mm. Σε αντίθεση με το δεύτερο και το τρίτο κεφάλαιο της εργασίας, κρίνεται σκόπιμη η πραγματοποίηση των υπολογισμών με βάση τη μέγιστη ($2.4 m^3/s$) (και όχι τη συνήθη, δηλαδή $2.2 m^3/s$) παροχή, ώστε να εξεταστούν πιο ακραίες συνθήκες λειτουργίας. Μέσω της εξίσωσης της συνέχειας, είναι εφικτός ο υπολογισμός της ταχύτητας εισόδου, ενώ επισημαίνεται ότι τα διανυσματικά μεγέθη που αφορούν την

είσοδο βρίσκονται στην y συνιστώσα και τα διανυσματικά μεγέθη που αφορούν την έξοδο στην x συνιστώσα.

```

object p;
dimensions [0 2 -2 0 0 0 0];

internalField uniform 5700.;

boundaryField
{
    Nozzle_inlet
    {
        type fixedValue;
        value uniform 5700.;
    }

    Nozzle_outlet
    {
        type fixedValue;
        value uniform 0.;
    }

    default_exterior
    {
        type zeroGradient;
    }
}

object U;
dimensions [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField uniform ( 0. 0. 0. );

boundaryField
{
    Nozzle_inlet
    {
        type surfaceNormalFixedValue;
        refValue uniform -8.65;
    }

    Nozzle_outlet
    {
        type inletOutlet;
        inletValue uniform (0. 8.65 0.);
        value uniform (0. 0. 0.);
    }

    default_exterior
    {
        type fixedValue;
        value uniform (0. 0. 0.);
    }
}

```

Εικόνα 136: Οι συνοριακές συνθήκες στα αρχεία p και U. Ανάκτηση από: Λογισμικό Openfoam (έκδοση 7).

6.1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΑΚΕΛΟΥ CONSTANT

Μετά την περιγραφή του φακέλου 0 ακολουθεί η ανάλυση των χαρακτηριστικών του φακέλου constant. Ο φάκελος αυτός είναι εξίσου σημαντικός, καθώς περιέχει ορισμένες πολύ χρήσιμες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του πλέγματος στο φάκελο polymesh, ενώ περιλαμβάνονται και δεδομένα που σχετίζονται με το μοντέλο τύρβης και την τιμή του κινηματικού ιξώδους που χρησιμοποιούνται στην επίλυση και βρίσκονται στα υπόλοιπα αρχεία.

Αναλυτικότερα, κατά την προετοιμασία του case από το ANSA δημιουργείται αρχικά ο φάκελος polymesh, ο οποίος απαρτίζεται από συγκεκριμένα αρχεία. Τα αρχεία αυτά περιέχουν πληροφορίες με τη μορφή αριθμητικών τιμών για όλες τις περιοχές της γεωμετρίας που έχουν πλέγμα, καθώς και για το πλήθος των κελιών που αντιστοιχούν σε κάθε μια από τις περιοχές που ανιχνεύει το ANSA κατά την εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών (nozzle inlet, nozzle outlet και default exterior). Τονίζεται ότι ο μελετητής δεν πρέπει να μεταβάλλει τις ρυθμίσεις και τις τιμές των αρχείων αυτών, καθώς αυτά ακριβώς τα αρχεία διαβάζονται κατά την επίλυση (ώστε να αναγνωρίσει ο κώδικας σωστά το πλέγμα) και οποιαδήποτε αλλαγή μπορεί να οδηγήσει σε σφάλμα και διακοπή της διαδικασίας επίλυσης.

Στη συνέχεια υπάρχουν στο φάκελο και άλλα τρία αρχεία. Αρχικά το αρχείο fv options έχει δημιουργηθεί, ώστε να διευκολύνει την εκτέλεση του αλγορίθμου και να διορθώνει πιθανές ελαττωματικές περιοχές ή γενικότερα συνθήκες του προβλήματος. Λόγω της ύπαρξης τύρβης στο πρόβλημα που προσομοιώνεται, η

παρουσία του αρχείου αυτού είναι απαραίτητη, καθώς γενικά τα προβλήματα με τύρβη εμφανίζουν υψηλές μεταβολές μεγεθών (όπως η πίεση) στη ροή τους και γι' αυτό απαιτούν και σημαντικό υπολογιστικό χρόνο.

Με βάση την εικόνα 116, όπου διακρίνεται ο αριθμός Reynolds που προκύπτει μετά την εκτέλεση των πράξεων στην αριθμομηχανή, γίνεται σαφές ότι, λόγω του μεγάλου μεγέθους του αριθμού αυτού (3.9×10^6), η περίπτωση που εξετάζεται, υπάγεται σε έντονο καθεστώς τύρβης. Και πάλι οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις αυτού του αρχείου δεν πρέπει να μεταβληθούν.

Τέλος τα αρχεία transport properties και turbulence properties παρέχουν στο μελετητή πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο της τύρβης με βάση το οποίο γίνεται η επίλυση, αλλά και την τιμή του κινηματικού ιξώδους του ρευστού. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι δεν πρέπει να προκληθεί σύγχυση μεταξύ της τιμής του ιξώδους (ν) και του αρχείου nu στο φάκελο 0, καθώς το πρώτο εκφράζει το κινηματικό ιξώδες του ρευστού, ενώ το δεύτερο την κατανομή των συνοριακών συνθηκών στα όρια του όγκου που ανιχνεύει το ANSA. Υπενθυμίζεται ότι το κινηματικό ιξώδες προκύπτει ως διαίρεση του δυναμικού ιξώδους με την πυκνότητα. Επειδή το δυναμικό ιξώδες του νερού είναι περίπου 1.3×10^{-3} στους 10°C , τότε το κινηματικό ιξώδες είναι 1.3×10^{-6} .

```

object      turbulenceProperties;
}
// ***** }
simulationType RAS;
RAS
{
  RASModel      kOmegaSST;
  printCoeffs   on;
  turbulence     on;
}
object transportProperties;
/*.....
/*.....
transportModel Newtonian;
nu              nu [0 2 -1 0 0 0] 0.13039E-005;

```

Εικόνα 137: Το περιεχόμενο των αρχείων turbulence και transport properties.
 Ανάκτηση από: Λογισμικό Openfoam (έκδοση 7).

6.1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΑΚΕΛΟΥ SYSTEM

Ο φάκελος system περιέχει τις πληροφορίες που σχετίζονται με τις ρυθμίσεις που απαιτούνται κατά τη διαδικασία της επίλυσης. Αποτελείται από τέσσερα βασικά αρχεία, το control dict, το decompose par dict, το fv schemes και το fv solution. Στο control dict απεικονίζονται ορισμένες αρχικές ιδιότητες της επίλυσης, δηλαδή πόσες επαναλήψεις θα εκτελεστούν, ανά πόσους φακέλους θα καταγραφούν αποτελέσματα (write interval) ή, αν έχουμε πολλές επαναλήψεις, το πλήθος των τελευταίων φακέλων (purge write), δηλαδή για purge write ίσο με 2, το Openfoam θα κρατήσει τους δύο τελευταίους φακέλους και θα διαγράψει όλους τους προηγούμενους. Στο control dict διακρίνεται επίσης και ο επιλύτης που έχει επιλεγεί από τον μελετητή, ο οποίος στην προκειμένη περίπτωση είναι ο simple foam.

Η σωστή επιλογή επιλύτη είναι θεμελιώδους σημασίας σε προβλήματα ρευστοδυναμικής, αφού ανάλογα με τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του προβλήματος, το λογισμικό Openfoam προσφέρει διαφορετικές επιλογές για κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα ο μελετητής πρέπει να αποφασίσει αν επιθυμεί να επιλύσει το πρόβλημά του σε μόνιμες (steady state) ή χρονομεταβαλλόμενες συνθήκες (transient ή unsteady state). Επίσης πρέπει να λάβει υπ' όψιν του αν το πρόβλημα που επιλύεται ανφέρεται σε μια στρωτή ή μια τυρβώδη ροή. Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζονται οι κυριότεροι επιλύτες που χρησιμοποιούνται, ενώ επισημαίνεται ότι για το πρόβλημα της παρούσας εργασίας επιλέγεται ο αλγόριθμος simple foam με μοντέλο τύρβης RAS model.

Στη συνέχεια, ένα εξίσου σημαντικό αρχείο είναι το decompose par dict, το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε απαιτητικές περιπτώσεις, δηλαδή σε μεγάλα πλέγματα και πολλές επαναλήψεις, καθώς διαμοιράζει το υπολογιστικό έργο σε περισσότερους πυρήνες, ανάλογα με το πόσους διαθέτει ο υπολογιστής του μελετητή. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην εικόνα 131, ο μελετητής μπορεί να συμπληρώσει το πεδίο number of decomposed domains με τον αριθμό των πυρήνων που είναι διαθέσιμοι. Συνήθως οι πυρήνες μπορεί να είναι 2 (σε επεξεργαστές τύπου i3), 4 (σε επεξεργαστές τύπου i5 και i7) ή 6 (σε πιο εξελιγμένους επεξεργαστές τύπου i7).

Αναφορικά με το αρχείο fv schemes, το ίδιο περιλαμβάνει ορισμένα δεδομένα σχετικά με τα αριθμητικά σχήματα και τις αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται κατά την επίλυση. Συγκεκριμένα το Openfoam καλείται να χειριστεί παρασκηνακά (στο background) μια σειρά από πίνακες (matrices), οι οποίοι έχουν προκύψει μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων κατά την κατασκευή του πλέγματος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται στο fv schemes ο αλγόριθμος Gauss και άλλες παραλλαγές του που διευκολύνουν την επίλυση των συστημάτων που προκύπτουν από τους πολλαπλασιασμούς και τις αντιστροφές των πινάκων.

Τέλος, ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στο αρχείο fv solution, το οποίο καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την έκβαση της επίλυσης, αλλά και την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Στο αρχείο αυτό περιέχονται σημαντικές πληροφορίες για τα σχετικά σφάλματα, τα κριτήρια σύγκλισης που ορίζονται από το μελετητή, τους συντελεστές χαλάρωσης (relaxation factors) που χρησιμοποιούνται καθώς επιλύονται μεγέθη, όπως η πίεση και η ταχύτητα, αλλά και τα residuals, που εκφράζουν τη μείωση των σφαλμάτων από επανάληψη σε επανάληψη μέχρι την τελική σύγκλιση.

Τονίζεται στο σημείο αυτό μια σημαντική διαφορά μεταξύ των steady state και των transient solvers. Στους steady state ο μελετητής ορίζει έναν αριθμό επαναλήψεων από το control dict που επιθυμεί να εκτελεστούν από το πρόγραμμα, ωστόσο πρέπει να λάβει υπ' όψιν του ότι, για να είναι σωστή η επίλυση, ο κώδικας πρέπει να συγκλίνει (convergence), δηλαδή να σταματήσει, πριν φτάσει τον αριθμό επαναλήψεων του μελετητή. Αν ο κώδικας συνεχίσει μέχρι τον αριθμό που όρισε ο μελετητής, προφανώς θα σταματήσει εκεί, όμως στην πραγματικότητα η επίλυση δεν είναι ολοκληρωμένη. Για αυτό είναι μια καλή πρακτική να ορίζεται αρχικά ένας μεγάλος αριθμός επαναλήψεων. Σε επόμενη υποενότητα περιγράφονται ορισμένες χρήσιμες τακτικές για γρηγορότερη σύγκλιση.

Αντίθετα στους transient solvers το εμπόδιο αυτό δεν υπάρχει. Ο μελετητής ορίζει και πάλι έναν αρχικό αριθμό επαναλήψεων και πρέπει απλά να περιμένει το πρόγραμμα να εκτελέσει τον προκαθορισμένο αριθμό, δηλαδή δεν υπάρχει απαίτηση για σύγκλιση. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική φύση των solvers, αφού οι steady state εργάζονται σε μόνιμες συνθήκες, ενώ οι transient σε χρονομεταβαλλόμενες, όπως προαναφέρθηκε.

	Laminar	Turbulent
Steady state	simpleFoam (simulationType: laminar)	simpleFoam (simulationType: RASModel)
Unsteady state (time dependent)	icoFoam	pisoFoam pimpleFoam

Εικόνα 138: Οι κυριότεροι αλγόριθμοι επίλυσης στο Openfoam. Ανάκτηση από: Λογισμικό Openfoam (έκδοση 7) (κατόπιν επεξεργασίας).

```

}
object controlDict; FoamFile
/*-----
/*-----
libs
(
);
application simpleFoam;
startFrom startTime;
startTime 0.;
stopAt endTime;
endTime 10000.;
deltaT 1.;
writeControl timeStep;
writeInterval 50.;
purgeWrite 0;
writeFormat ascii;
writePrecision 6;
}
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    location "";
    object decomposeParDict;
}
/*-----
/*-----
numberOfSubdomains 2;
method scotch;

scotchCoeffs
{
    processorWeights
    (
        1
        1
    );
}

```

Εικόνα 139: Οι βασικές πληροφορίες των αρχείων control dict και decompose par dict. Ανάκτηση από: Λογισμικό Openfoam (έκδοση 7).

```

object fvSolution;
/*-----
/*-----
solvers
{
    "p.*"
    {
        solver GAMG;
        tolerance 1e-10;
        relTol 0.05;
        smoother GaussSeidel;
        nPreSweeps 0;
        nPostSweeps 2;
        cacheAgglomeration on;
        agglomerator faceAreaPair;
        nCellsInCoarsestLevel 10;
        mergeLevels 1;
        maxIter 15;
    }
    "U.*"
    {
        solver smoothSolver;
        smoother GaussSeidel;
        tolerance 1e-10;
        relTol 0.1;
        nSweeps 1;
    }
    "(k|epsilon|omega|nuTilda|kFinal|epsilonFinal|omegaFinal)"
    {
        solver smoothSolver;
        smoother GaussSeidel;
        tolerance 1e-10;
        relTol 0.1;
        nSweeps 1;
    }
}
nNonOrthogonalCorrectors 4;
residualControl
{
    p 1e-1;
    U 1e-1;
    k 1e-1;
    omega 1e-1;
    nuTilda 1e-1;
}
potentialFlow
{
    nNonOrthogonalCorrectors 50;
}
relaxationFactors
{
    fields
    {
        p 0.3;
    }
    equations
    {
        U 0.7;
        k 0.7;
        omega 0.7;
        epsilon 0.7;
        nuTilda 0.7;
    }
}

```

Εικόνα 140: Οι βασικές πληροφορίες στο αρχείο fv solution. Ανάκτηση από: Λογισμικό Openfoam (έκδοση 7).

6.1.4 ΛΟΙΠΑ ΑΡΧΕΙΑ, ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μετά την περιγραφή των τριών βασικών φακέλων ακολουθεί σύντομη αναφορά στα υπόλοιπα πέντε αρχεία, τα οποία δημιουργούνται αυτόματα κατά το setup στο ANSA. Το κυριότερο αρχείο ονομάζεται `runOfCase.sh` και αποτελεί το εκτελέσιμο αρχείο της προσομοίωσης. Ο ρόλος του γίνεται πιο εμφανής στις εντολές που δίνει ο μελετητής για να ξεκινήσει η επίλυση, κάτι που αναλύεται με λεπτομέρεια στη συνέχεια. Παράλληλα υπάρχουν και δύο ζεύγη αρχείων (σύνολο τέσσερα αρχεία), τα οποία διαδραματίζουν τον εξής ρόλο. Αρχικά το ζεύγος `monitors` (`monitors.py` και `plotMonitors.sh`) χρησιμεύει στην αποτύπωση των `residuals` και των `force coefficients` (συντελεστές δυνάμεων και ορμών που εμφανίζονται καθώς η ροή του νερού διέρχεται από τον αγωγό), ενώ το ζεύγος `writeAndStop` (`.py` και `.sh`) καταγράφει τα αποτελέσματα σε κάθε επανάληψη και τερματίζει την προσομοίωση όταν πρέπει.

Πλέον πρέπει να δοθούν οι κατάλληλες εντολές, ώστε να ξεκινήσει η εκτέλεση του κώδικα. Επομένως στο περιβάλλον του Ubuntu (Linux) μέσα στο φάκελο με τα οχτώ αρχεία της εικόνας 133, επιλέγοντας δεξί κλικ, εμφανίζεται ένα μικρό παράθυρο εντολών και επιλέγεται το `Open in Terminal`. Αμέσως εμφανίζεται το `terminal`, ένα παράθυρο στο οποίο ο μελετητής δίνει τις εντολές για να ξεκινήσει η επίλυση. Τονίζεται ότι ακόμα και το όνομα του φακέλου στο οποίο υπάρχουν τα αρχεία έχει σημασία και πρέπει να είναι κατάλληλο, δηλαδή να είναι της μορφής `results` ή `results_1` ή `results1`, αλλά όχι `results 1`.

Με το `terminal` ανοιχτό ο μελετητής πρέπει να πληκτρολογήσει αρχικά την εντολή `dos2unix runOfCase.sh` και μετά `enter`, κάτι που είναι απαραίτητο για τη μετατροπή του εκτελέσιμου αρχείου με τρόπο που να αναγνωρίζεται από το Linux. Κατόπιν αρκεί η εντολή `./runOfCase.sh` και μετά πάλι `enter` για να ξεκινήσει η προσομοίωση. Αν για κάποιο λόγο διαπιστωθεί πρόβλημα με την πρώτη εντολή (ορισμένες φορές εμφανίζεται ένα εσφαλμένο αρχείο που πρέπει να απομακρυνθεί), ο μελετητής διαγράφει το αρχείο αυτό και επαναλαμβάνει τη διαδικασία (ξαναγράφει την πρώτη εντολή και ύστερα τη δεύτερη).

Να τονιστεί βέβαια εδώ ότι, ενώ με τη χρήση της εικονικής μηχανής, ο μελετητής μπορεί να ανοίξει απευθείας το παράθυρο εντολών και να εισαγάγει άμεσα τις εντολές της επίλυσης που προαναφέρθηκαν, με την εναλλακτική μέθοδο εγκατάστασης πρέπει πρώτα να εντοπίσει τη διαδρομή των φακέλων και των αρχείων και μετά να εκτελέσει την επίλυση. Για το σκοπό αυτό προτείνεται στους μελετητές που έχουν εγκαταστήσει το `Openfoam` χωρίς εικονική μηχανή να αποθηκεύουν τα αρχεία τους στον τοπικό δίσκο `C`, να εκκινούν το πρόγραμμα με εκτέλεση με δικαιώματα διαχειριστή και όχι με το συμβατικό τρόπο, να πληκτρολογούν αρχικά την εντολή `cd /mnt` και κατόπιν την εντολή `ll` ή `ls` για να ελέγχουν το περιεχόμενο του κάθε φακέλου. Από εκεί οδηγούνται στον τοπικό δίσκο `C`, όπου μπορεί να βρεθεί η διαδρομή των αρχείων (`cd c/` και έπειτα `cd Users/` για παράδειγμα).

Στα περισσότερα προβλήματα με `steady state solvers` είναι σημαντικό να προκύψει άμεσα η σύγκλιση, ώστε ο μελετητής να είναι βέβαιος ότι οι συνοριακές συνθήκες που εισήγαγε είναι ορθές και θα οδηγήσουν στα επιθυμητά αποτελέσματα.

Δηλαδή πρέπει να υπάρχει μια συνεργασία μεταξύ του λογισμικού επίλυσης και αυτού που προβάλλει τα αποτελέσματα, διότι η πιο σημαντική απαίτηση σε προβλήματα ρευστοδυναμικής είναι η εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων. Επομένως στα αρχικά στάδια της επίλυσης, η σύγκλιση πρέπει να επέρχεται γρήγορα, να προβάλλονται τα αποτελέσματα και αν κάτι δεν ανταποκρίνεται σωστά, να διορθώνεται και να επαναλαμβάνεται νέα δοκιμή της επίλυσης.

Αυτή η διαδικασία μπορεί να γίνει αρκετές φορές μέχρι να ληφθούν τα σωστά αποτελέσματα. Άρα πρέπει να γίνουν κατάλληλες ρυθμίσεις, ώστε ο κώδικας να συγκλίνει γρήγορα, ενώ μετά μπορούν να επαναρυθμιστούν, ώστε ο κώδικας να χρειάζεται περισσότερες επαναλήψεις για να συγκλίνει, αφού, όσες περισσότερες επαναλήψεις απαιτούνται, τόσο πιο ακριβής γίνεται η αναπαράσταση των αποτελεσμάτων. Αρχικά όμως αρκεί να επέρχεται γρήγορα η σύγκλιση, οπότε ο μελετητής μπορεί να την επιταχύνει αν στο αρχείο fv solution του system, στο residual control μεταβληθούν οι προεπιλεγμένες τιμές $1e-3$ και $1e-4$ σε $1e-1$. Αυτή η αλλαγή δευκολύνει τη σύγκλιση, αφού επιταχύνει τη μείωση των σφαλμάτων.

Αυτός είναι ο βασικός τρόπος που συστήνεται, ωστόσο υπάρχουν και ορισμένοι δευτερεύοντες που δεν προτείνονται, όπως η αύξηση του κινηματικού ιξώδους στο αρχείο transport properties του φακέλου constant, αφού ενδέχεται να οδηγήσουν σε αλλοίωση των αποτελεσμάτων (με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται μια φυσική ιδιότητα του ρευστού που εξετάζεται). Επισημαίνεται ότι ρευστά με μικρό κινηματικό ιξώδες προκαλούν μια πιο περίπλοκη ροή, ιδίως αν έχουν μεγάλη ταχύτητα, άρα αντίστοιχα απαιτούν περισσότερες επαναλήψεις για να συγκλίνει η προσομοίωσή τους.

Επισημαίνεται ξανά ότι στην παρούσα εργασία εξετάζεται ένα πρόβλημα το οποίο επιλύεται σε μόνιμες συνθήκες λειτουργίας, με παρουσία τυρβώδους ροής σε ένα ασυμπίεστο νευτωνικό ρευστό (νερό), συνεπώς κρίνεται ως καταλληλότερος ο επιλύτης simpleFoam. Αναφέροντας κάποια πιο αναλυτικά στοιχεία, ο επιλύτης αυτός αποτελεί μια ενδεδειγμένη λύση για προβλήματα στα οποία η ροή είναι ασυμπίεστη, τυρβώδης και μη χρονομεταβαλλόμενη, όπως ακριβώς είναι και το case που μελετάται. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι ο simple, δηλαδή Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations ή ο simplec, δηλαδή Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent.

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί ο επιλύτης αυτός είναι κατεξοχήν επαναληπτική, καθώς για τα μεγέθη της πίεσης και της ταχύτητας, αλλά και για τα τυρβώδη μεγέθη, το αποτέλεσμα της προηγούμενης επανάληψης χρησιμοποιείται στην επόμενη (την πρώτη φορά έχουν οριστεί αρχικές συνθήκες). Παράλληλα με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται και η επίλυση των καταστάσεων μη γραμμικότητας που εμφανίζονται στην εξίσωση της ορμής (το πρόβλημα επιλύεται μέσω επαναληπτικών επιλύσεων της ταχύτητας και της πίεσης). Επομένως αρχικά επιλύονται οι εξισώσεις ορμής και συνέχειας, ώστε να δημιουργηθεί ένα διανυσματικό πεδίο πίεσης και κατόπιν ένα διανυσματικό πεδίο ταχύτητας. Η επαναληπτική αυτή διαδικασία συνεχίζεται μέχρι τη σύγκλιση. Και οι δύο αλγόριθμοι simple και simplec είναι πολύ αποδοτικοί, ωστόσο σε αρκετές εφαρμογές προτιμάται ο simplec λόγω των παραγόντων χαλάρωσης που χρησιμοποιεί κατά την επίλυση.

6.1.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Στην υποενότητα αυτή αναλύονται ορισμένα χαρακτηριστικά στοιχεία των αποτελεσμάτων της επίλυσης. Αρχικά να υπενθυμιστεί ότι στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάζονται τρεις διαφορετικές γεωμετρίες ακροφυσίου Pelton, οι οποίες διαφέρουν μόνο ως προς τη θέση της βελόνας στο εσωτερικό του κελύφους. Συγκεκριμένα η διαφορά έγκειται στο πόσο κοντά βρίσκεται η απόληξη της βελόνας στην έξοδο του ακροφυσίου, ενώ περισσότερες λεπτομέρειες παρατίθενται στο επόμενο κεφάλαιο. Μετά το πέρας των υπολογισμών προκύπτει σύγκλιση για την πρώτη περίπτωση με τα εξής κριτήρια από το αρχείο fv solution:

- tolerance 4e-3 για όλα τα μεγέθη
- residual control 1e-2 για την πίεση (p)
- 1720 επαναλήψεις μέχρι τη σύγκλιση
- όλα τα υπόλοιπα μεγέθη με τις προεπιλεγμένες τους τιμές
- number of subdomains: 4 (στο decompose par dict)

Στη δεύτερη περίπτωση ισχύει ό,τι και στην πρώτη, με τη διαφορά ότι απαιτήθηκαν 961 επαναλήψεις, ενώ και η τρίτη περίπτωση ταυτίζεται με την πρώτη, πάλι με τη διαφορά ότι εδώ απαιτήθηκαν 936 επαναλήψεις. Επισημαίνεται ότι η επίλυση έλαβε χώρα σε γεωμετρίες με αρκετά πυκνό πλέγμα, αφού ο αριθμός των κελιών για τις τρεις περιπτώσεις είναι 1769878, 1749974 και 1691353 κελιά αντίστοιχα.

Στη συνέχεια κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι, αναφορικά με τα αποτελέσματα, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στην απεικόνιση των μεγεθών της πίεσης και της ταχύτητας, ενώ παράλληλα προβάλλονται αποτελέσματα της κύριας συνιστώσας και των διανυσμάτων της ταχύτητας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται και στην παρουσίαση του στροβιλισμού, ενός βασικού μεγέθους στο πεδίο της μηχανικής των ρευστών, για το οποίο δίνονται περαιτέρω εξηγήσεις στο έβδομο κεφάλαιο.

Ασφαλώς τονίζεται ότι μεγάλη σημασία δόθηκε στον τρόπο προβολής των αποτελεσμάτων, ο οποίος έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι εμφανή τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ροής σε κάθε περίπτωση. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν τομές και στα τρία επίπεδα (xy, yz και xz) και επιλέχθηκαν κομβικές θέσεις της γεωμετρίας για την προβολή των αποτελεσμάτων, όπως η είσοδος του αγωγού, το σημείο καμπύλωσής του, το σημείο που στενεύει η γεωμετρία του και αρχίζει το χαρακτηριστικό σχήμα του ακροφυσίου, αλλά και η έξοδος του ακροφυσίου.

Τέλος θεωρήθηκε απαραίτητη η προβολή μιας ακόμη κατηγορίας αποτελεσμάτων. Στις απεικονίσεις αυτές το αρχικό εύρος της κλίμακας των αποτελεσμάτων έχει περιοριστεί αρκετά, με σκοπό να γίνουν πιο εμφανείς οι ιδιομορφίες της ροής σε συγκεκριμένα σημεία της γεωμετρίας, που, υπό άλλες συνθήκες, φαίνονται με ενιαίο χρωματισμό, αφού χρησιμοποιείται η αρχική κλίμακα.

Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν κυρίως τις επιδράσεις της ροής στις περιοχές της γεωμετρίας μέχρι πριν την αρχή του ακροφυσίου και λειτουργούν ως μεγεθυντικός φακός για τις περιοχές αυτές, αφού, υπό κανονικές συνθήκες, οι

μεταβολές τους είναι αμελητέες σε σχέση με αυτές που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή του ακροφυσίου. Φυσικά ο καθορισμός του νέου εύρους γίνεται με βάση τα αρχικά αποτελέσματα, δηλαδή αν ένα μέγεθος κυμαίνεται μεταξύ 0 (ελάχιστη) και 50 (μέγιστη τιμή) και το τμήμα της γεωμετρίας που επιθυμεί να εστιάσει ο μελετητής κυμαίνεται μεταξύ 5 και 10, τότε το νέο εύρος θα οριοθετείται από τις τιμές 5 και 10 (νέα ελάχιστη και μέγιστη τιμή).

6.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια προσπάθεια να επεξηγηθούν με απλό και κατανοητό τρόπο οι εξισώσεις που διέπουν αυτή την προσομοίωση, πρόκειται δηλαδή για μια σύντομη παρουσίαση της μαθηματικής προσέγγισης του προβλήματος που εξετάζεται. Η ροή των ρευστών σε αγωγούς αποτελεί ένα ιδιαίτερα περίπλοκο φαινόμενο, τόσο σε επίπεδο φυσικής, όσο και σε επίπεδο μαθηματικής ερμηνείας. Η περιγραφή του προβλήματος επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των εξισώσεων Navier Stokes, ενός συνόλου μερικών διαφορικών εξισώσεων (συγκεκριμένα παραβολικών) που χρησιμοποιούνται κατά την ανάλυση της κίνησης των ρευστών (Anderson, 1991).

Στη γενικότερή τους μορφή εξετάζουν συμπιεστές, τυρβώδεις, χρονομεταβαλλόμενες ροές νευτωνικών ρευστών και αποτελούνται από την εξίσωση συνέχειας (διατήρηση μάζας), τις εξισώσεις διατήρησης της ορμής στις τρεις διαστάσεις και την εξίσωση της ενέργειας. Βασίζονται στο δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, ενώ η βασική τους διαφορά με τις συγγενείς εξισώσεις του Euler έγκειται στο ότι οι Navier Stokes λαμβάνουν υπ' όψιν τους την επίδραση των φαινομένων της τύρβης, ενώ οι Euler αναφέρονται σε μη τυρβώδεις ροές.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, όπου εξετάζεται μια ασυμπίεστη, τυρβώδης και μη χρονομεταβαλλόμενη ροή νευτωνικού ρευστού (επιλέχθηκε ο αλγόριθμος simple foam για την επίλυση), οι εξισώσεις Navier Stokes παρατίθενται στη συνέχεια. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι με x, y, z συμβολίζονται οι τρεις διαστάσεις του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, με u, v, w οι συνιστώσες της ταχύτητας για καθεμιά από τις τρεις διαστάσεις, με p η πίεση, με ρ η πυκνότητα, με μ το δυναμικό ιξώδες, με g η επιτάχυνση της βαρύτητας (εμφανίζονται οι επιμέρους συνιστώσες της), με k η θερμική αγωγιμότητα και με E η ολική ενέργεια.

- $$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{εξίσωση συνέχειας}) \quad (28)$$

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

(εξίσωση ορμής στην x συνιστώσα) (29)

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

(εξίσωση ορμής στην y συνιστώσα) (30)

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

(εξίσωση ορμής στην z συνιστώσα) (31)

- $$\rho E \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) -$$

$$p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{2\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \right.$$

$$\left. 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]$$

(εξίσωση ενέργειας) (32)

Σε γενικές γραμμές οι εξισώσεις Navier Stokes αρκούν για να περιγράψουν την υπό εξέταση ροή, ωστόσο στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας συμμετέχει η υπολογιστική ρευστοδυναμική, άρα εμπλέκονται αριθμητικές μέθοδοι. Συνεπώς, επειδή η εξαγωγή αριθμητικών λύσεων μέσω των Navier Stokes είναι ιδιαίτερα επίπονη υπολογιστικά, χρησιμοποιούνται τα γνωστά από το Openfoam μοντέλα τύρβης (όπως είναι, μεταξύ άλλων, το μοντέλο kEpsilon και το kOmegaSST).

Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται έγκειται στο ότι τα μοντέλα αυτά εισάγουν ορισμένες επιπρόσθετες εξισώσεις στις ήδη υπάρχουσες, με σκοπό να προκύψει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη συσχέτιση με τις εξισώσεις RANS. Οι εξισώσεις RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) αποτελούν μια παραλλαγή των αρχικών Navier Stokes, ενώ το χαρακτηριστικό στοιχείο τους είναι ότι παρέχουν πιο ευσταθείς προσεγγιστικές αριθμητικές λύσεις. Επομένως κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια σύντομη αναφορά και στις εξισώσεις που διέπουν το μοντέλο τύρβης kOmegaSST.

Το μοντέλο τύρβης kOmegaSST (Shear Stress Transport) δημιουργήθηκε από τον Menter και ουσιαστικά αποτελεί έναν συνδυασμό των μοντέλων kEpsilon και kOmega. Στην πραγματικότητα συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο αυτών μοντέλων, καθώς το kEpsilon είναι πιο κατάλληλο για μοντελοποιήσεις στον κύριο όγκο της ροής ενός ρευστού, ενώ το kOmega χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ροής κοντά σε κάποιο τοίχωμα, όπου αναπτύσσονται τα γνωστά οριακά στρώματα (Menter, 1994).

Οι εξισώσεις που αποτελούν το μοντέλο συνοδεύονται και από ορισμένες μαθηματικές συσχετίσεις, αλλά και σταθερές ποσότητες, ενώ το σύνολο των συσχετίσεων αυτών παρουσιάζεται στη συνέχεια. Το πρώτο σύνολο εξισώσεων αναφέρεται στο μέγεθος k, ενώ το δεύτερο στο μέγεθος ω (omega).

- $$\rho k \frac{\partial u}{\partial x} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x} \right)$$

(εξίσωση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k στη x συνιστώσα) (33)

- $$\rho k \frac{\partial v}{\partial y} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial y} \right)$$

(εξίσωση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k στη y συνιστώσα) (34)

- $\rho k \frac{\partial w}{\partial z} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial z} \right)$
(εξίσωση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k στη z συνιστώσα) (35)
- $\rho \omega \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\gamma}{v_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x} \right)$
 $+ 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_\omega \omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x}$ (εξίσωση του ειδικού ρυθμού τυρβώδους
διάχυσης ω στη x συνιστώσα) (36)
- $\rho \omega \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\gamma}{v_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial y} \right)$
 $+ 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_\omega \omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y}$ (εξίσωση του ειδικού ρυθμού τυρβώδους
διάχυσης ω στη y συνιστώσα) (37)
- $\rho \omega \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\gamma}{v_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial z} \right)$
 $+ 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_\omega \omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial z}$ (εξίσωση του ειδικού ρυθμού τυρβώδους
διάχυσης ω στη z συνιστώσα) (38)

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητη η παρουσίαση των επικουρικών σχέσεων και παραμέτρων, ώστε να διευκολυνθεί η κατανόηση των μεγεθών που εμπλέκονται στις παραπάνω κύριες εξισώσεις. Συγκεκριμένα ισχύει:

- $P = \begin{bmatrix} \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} & \tau_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} & \tau_{xz} \frac{\partial u}{\partial z} \\ \tau_{yx} \frac{\partial v}{\partial x} & \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} & \tau_{yz} \frac{\partial v}{\partial z} \\ \tau_{zx} \frac{\partial w}{\partial x} & \tau_{zy} \frac{\partial w}{\partial y} & \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}$ (39)

- $\tau_{ij} =$ (40)

$$\begin{bmatrix} \mu_t \left(2S_{xx} - \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \rho k & 2\mu_t S_{xy} & 2\mu_t S_{xz} \\ 2\mu_t S_{yx} & \mu_t \left(2S_{yy} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \rho k & 2\mu_t S_{yz} \\ 2\mu_t S_{zx} & 2\mu_t S_{zy} & \mu_t \left(2S_{zz} - \frac{2}{3} \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \rho k \end{bmatrix}$$

- $S_{ij} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & 2 \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} & \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} & 2 \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}$ (41)

- $\mu_t = \frac{\rho \alpha_1 k}{\max(a_1 \omega, \phi F_2)}$ (42)

$$\bullet \varphi = F_1\varphi_1 + (1 - F_1)\varphi_2 \quad (43)$$

$$\bullet F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (44)$$

$$\bullet \arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega d}, \frac{500\nu}{d^2\omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}d^2} \right] \quad (45)$$

$$\bullet CD_{k\omega,x} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x}, 10^{-20} \right) \quad (46)$$

$$\bullet CD_{k\omega,y} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y}, 10^{-20} \right) \quad (47)$$

$$\bullet CD_{k\omega,z} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial z}, 10^{-20} \right) \quad (48)$$

$$\bullet F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (49)$$

$$\bullet \arg_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega d}, \frac{500\nu}{d^2\omega} \right) \quad (50)$$

Και οι τιμές των παραμέτρων (σταθερών συντελεστών):

σ_{k1}	σ_{k2}	$\sigma_{\omega 1}$	$\sigma_{\omega 2}$	β_1	β_2	β^*	α_1	φ_1	φ_2	γ_1	γ_2
0.85	1	0.65	0.856	0.075	0.0828	0.09	0.31	0.5	0.5	0.556	0.44

Πίνακας 19: Οι βασικές παράμετροι του μοντέλου kOmegaSST. Ανάκτηση από: Λογισμικό Openfoam (έκδοση 7) (κατόπιν επεξεργασίας).

Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι υπάρχουν και δύο ακόμη εξισώσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αρχικοποίηση (να δώσουν αρχικές τιμές) στις παραμέτρους k και ω , ωστόσο στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας δεν χρησιμοποιήθηκαν, αφού το ANSA αρχικοποιεί αυτόματα τις παραμέτρους αυτές κατά το setup of case.

6.3 MESH INDEPENDENCE STUDY ΚΑΙ MESH CONVERGENCE

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται μια από τις βασικότερες διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στον κλάδο των υπολογιστικών μεθόδων επίλυσης προβλημάτων ρευστοδυναμικής. Πρόκειται για το mesh independence study, το οποίο, όπως δηλώνει και το όνομά του, αποτελεί μια μελέτη που αποσκοπεί στην απεμπλοκή του πλέγματος από τα αποτελέσματα της επίλυσης του υπολογιστικού κώδικα. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη αυτή πραγματοποιείται, ώστε να εξασφαλιστεί ότι, από ένα σημείο και μετά, η λύση δεν εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πλέγματος, δηλαδή δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές που μπορεί να υποστεί το πλέγμα.

Επεξηγώντας αναλυτικότερα τους όρους, το mesh convergence καθορίζει το πλήθος των κελιών που απαιτούνται, ώστε να εξασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται από τις μεταβολές που επιδέχεται το πλέγμα, ενώ το mesh independence λειτουργεί ως προέκταση και χρησιμοποιείται για να δείξει ότι περαιτέρω επεξεργασία του πλέγματος, δεν επιφέρει καμία αλλαγή στα αποτελέσματα (Almohammadi et al., 2013).

Επομένως αυτό που πρέπει να αποδειχθεί είναι ότι μόνο αλλαγές στα χαρακτηριστικά της ροής μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα της επίλυσης,

ανεξάρτητα από το πόσο αραιό ή πυκνό είναι το αντίστοιχο πλέγμα ή αν διαθέτει κελιά τριγωνικής ή τετραγωνικής μορφής ή αν χρησιμοποιείται ένας διαφορετικός αλγόριθμος πλεγματοποίησης. Γενικότερα, το mesh independence study βασίζεται σε ένα σύνολο μαθηματικών σχέσεων και κριτηρίων σύγκλισης και αποτελεί μια σχετικά περίπλοκη διαδικασία, ωστόσο μπορεί να πραγματοποιηθεί πιο εύκολα με τη βοήθεια ορισμένων λογισμικών, όπως το Solidworks και το ANSYS.

Το αποτέλεσμα του mesh independence study απεικονίζεται με τη βοήθεια ενός ειδικού διαγράμματος. Για να κατασκευαστεί το διάγραμμα αυτό ο μελετητής εκτελεί την επίλυση του πλέγματος που έχει δημιουργήσει, αλλάζοντας όμως κάθε φορά τον αριθμό των κελιών του πλέγματος (ουσιαστικά κάθε φορά πυκνώνει το πλέγμα και η διαδικασία αυτή προτείνεται να επαναληφθεί 4-5 φορές). Επομένως στο διάγραμμα αυτό ο οριζόντιος άξονας είναι ο αριθμός των κελιών του πλέγματος (το οποίο πυκνώνεται κάθε φορά), ενώ ο κατακόρυφος άξονας είναι κάποιο άλλο ρευστομηχανικό μέγεθος που μεταβάλλεται στο αντίστοιχο case και το επηρεάζει.

Αυτό το μέγεθος μπορεί να είναι πίεση, ταχύτητα, θερμοκρασία ή οτιδήποτε άλλο, δηλαδή δεν υφίσταται κάποιος περιορισμός, αρκεί να είναι κάτι χρήσιμο και να διαδραματίζει βασικό ρόλο στο πρόβλημα. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε η ταχύτητα, καθώς μεταβάλλεται μέσω της παροχής (η αυξομείωση της παροχής εξαρτάται από τις συνθήκες της ηλεκτροπαραγωγής τη δεδομένη στιγμή) και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ομαλή λειτουργία της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης. Προφανώς οι τιμές της ταχύτητας λαμβάνονται κάθε φορά από την επίλυση που πραγματοποιεί ο μελετητής.

Παρακάτω παρατίθενται τα δεδομένα του αριθμού των κελιών και των αντίστοιχων τιμών της ταχύτητας αλλά και το τελικό διάγραμμα που προκύπτει, όπως ακριβώς κατασκευάστηκε στο excel. Αν και η επίλυση θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί περισσότερες φορές, ώστε να είναι διαθέσιμα περισσότερα δεδομένα, σε γενικές γραμμές το διάγραμμα αυτό δείχνει ότι υπάρχει μια σύγκλιση των τιμών της ταχύτητας, κάτι που υποδηλώνει έλλειψη εξάρτησης από το πλέγμα.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Solidworks και, παρ' όλο που υπάρχει ειδικό κεφάλαιο (το 4^ο) που αναφέρεται στο Solidworks και τα χαρακτηριστικά του, η συγγραφή της ενότητας αυτής κρίθηκε σκόπιμο να γίνει σε αυτό το σημείο, καθώς εμπλέκονται οι έννοιες του πλέγματος και της επίλυσης, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στο 5^ο και στο 6^ο κεφάλαιο. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται συνοπτικά στη συνέχεια. Πιο συγκεκριμένα με τη βοήθεια του Flow Simulation, μιας επιπρόσθετης δυνατότητας που προσφέρει το Solidworks, είναι δυνατή η προσομοίωση των χαρακτηριστικών της υπό εξέταση γεωμετρίας.

Από την καρτέλα Flow Simulation ενεργοποιείται η εντολή Wizard, ένα νέο παράθυρο, στο οποίο ο μελετητής ορίζει τις μονάδες μέτρησης των μεγεθών, το είδος του ρευστού που επιθυμεί να προσομοιώσει, αλλά και κάποιες άλλες ρυθμίσεις (τιμή θερμοκρασίας ή ατμοσφαιρικής πίεσης) που σχετίζονται με το πρόβλημα, οι οποίες μπορούν να αλλάξουν ή να παραμείνουν με τις προεπιλεγμένες τιμές τους. Στη συνέχεια το λογισμικό ζητά από τον μελετητή να κλείσει τις οπές που διαθέτει η γεωμετρία του, η οποία πρέπει απαραίτητως να είναι στεγανή, κάτι το οποίο

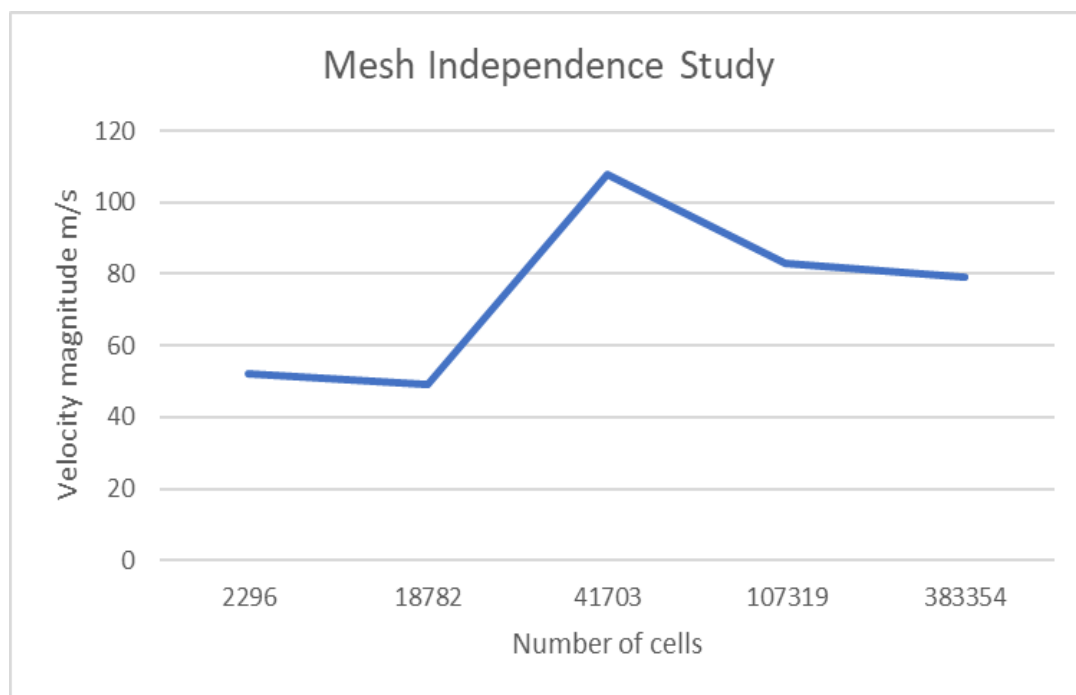
πραγματοποιείται επιτόπου με τη βοήθεια της εφαρμογής lid, που ανοίγει εκείνη τη στιγμή.

Αμέσως μετά ο μελετητής έχει τη δυνατότητα να ορίσει τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματός του, επιλέγοντας τον τύπο συνοριακής που επιθυμεί, εισάγοντας την τιμή της και επιλέγοντας το τμήμα της γεωμετρίας (όπως είσοδος ή έξοδος), στο οποίο θα εφαρμοστεί. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε συνοριακή τύπου velocity inlet για την είσοδο και pressure outlet για την έξοδο, κάτι το οποίο συμφωνεί και με όσα ορίστηκαν στο Openfoam, αλλά και με όσα πρόκειται να οριστούν στο ANSYS, όπως θα φανεί στη συνέχεια.

Έπειτα απομένει η εκτέλεση της επίλυσης με τη βοήθεια της εντολής run. Ανάλογα με το πόσο πυκνό ή αραιό είναι το πλέγμα, απαιτούνται περισσότερες επαναλήψεις και μεγαλύτερος υπολογιστικός χρόνος. Μόλις ολοκληρωθεί η επίλυση, υπάρχει η δυνατότητα προβολής των αποτελεσμάτων, οπότε από εκεί ο μελετητής λαμβάνει τις τιμές της ταχύτητας (συνήθως λαμβάνεται η μέγιστη, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση εντοπίζεται στην έξοδο).

Για να ληφθούν και οι υπόλοιπες τιμές όμως, απαιτείται η πυκνωση του πλέγματος. Επομένως από την εντολή Global Mesh επιλέγεται το Edit Definition, έπειτα το Automatic και στα Settings αρκεί η μετατόπιση του πράσινου κύκλου μεταξύ του 1 και του 7. Μόλις αλλάξει η θέση του κύκλου και εκτελεστεί η επίλυση, φαίνεται αμέσως η αλλαγή του αριθμού στο πεδίο Total Cells. Στη συνέχεια απεικονίζονται τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας.

Number of cells	2296	18782	41703	107319	383354
Velocity magnitude m/s	52	49	108	83	79



Εικόνα 141: Τα δεδομένα του Excel και το διάγραμμα για το mesh independence study. (Κατόπιν επεξεργασίας).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ PELTON – POST PROCESSING ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΕΤΑ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

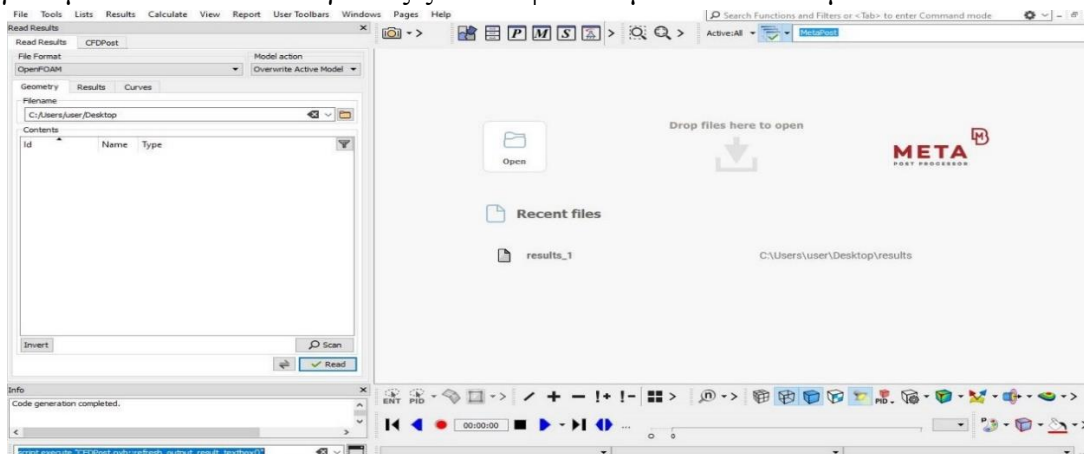
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται με αναλυτικό τρόπο τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση με το λογισμικό Openfoam. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το πρόγραμμα ΜΕΤΑ, το οποίο, όπως και το ANSA, έχει αναπτυχθεί από την εταιρία BETA CAE Systems. Όπως και τα περισσότερα λογισμικά παρουσίασης αποτελεσμάτων, έτσι και το ΜΕΤΑ, είναι ιδιαίτερα εύχρηστο και η βασική λογική του έγκειται στην εισαγωγή των αποτελεσμάτων, τα οποία επεξεργάζεται και κατόπιν παρέχει τη δυνατότητα στον μελετητή να επιλέξει τι ακριβώς επιθυμεί να προβάλλει. Τα λογισμικά αυτά προσφέρουν ποικίλους τρόπους προβολής των αποτελεσμάτων, όπως για παράδειγμα με contour, δηλαδή τις γνωστές ισούψεις καμπύλες, με vectors, δηλαδή κατανομή διανυσμάτων, με ροϊκές γραμμές, αλλά και με τα απλά plots, δηλαδή την κατανομή ενός μεγέθους σε όλο το φάσμα της γεωμετρίας.

Παράλληλα, μετά την ανάγνωση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων, ο μελετητής έχει τη δυνατότητα να παρατηρήσει τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλονται τόσο τα βασικά μεγέθη, όπως η πίεση, το μέτρο και οι συνιστώσες της ταχύτητας, όσο και τα λιγότερο σημαντικά μεγέθη, όπως η διατμητική τάση, ή οι σταθερές του μοντέλου τύρβης (όπως τα k και ω). Αναφορικά με τον τρόπο λειτουργίας του λογισμικού, επισημαίνεται ότι, κατ' αναλογία με το ANSA, επιλέγεται το layout «cfd» μόλις γίνει η εκκίνηση του προγράμματος, καθώς, όπως έχει προαναφερθεί, το cfd ανταποκρίνεται καλύτερα στις απαιτήσεις των εφαρμογών υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

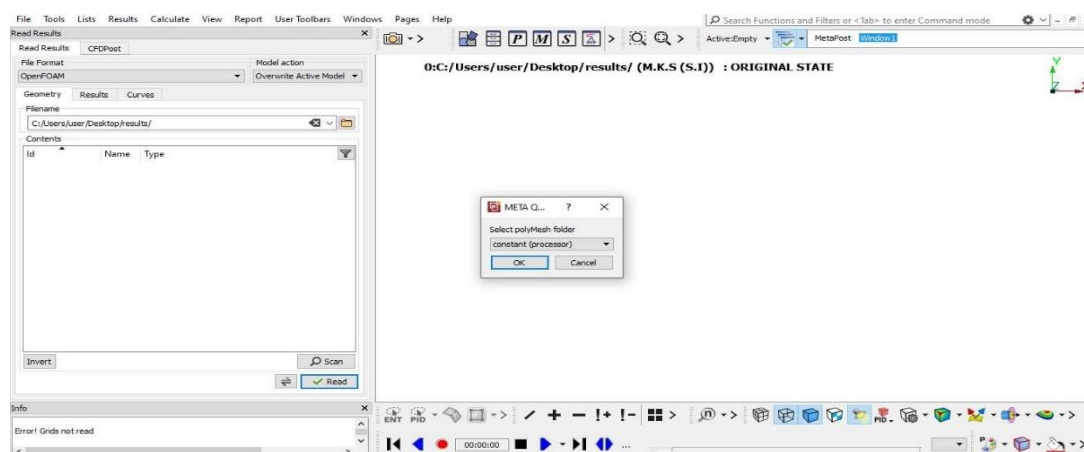
Μόλις το λογισμικό ξεκινήσει τη λειτουργία του, ο μελετητής μπορεί να εισαγάγει τα αποτελέσματα της επίλυσης, ώστε να διαβαστούν και να υποστούν επεξεργασία από το ΜΕΤΑ. Από το πεδίο read results πάνω αριστερά, ο μελετητής αναζητά το φάκελο στον οποίο έχει αποθηκευμένα τα αποτελέσματα και τον επιλέγει. Για να μπορέσει όμως να τον ανοίξει πρέπει στο πεδίο File Format να έχει επιλεγμένο το Openfoam και όχι το Auto Detect, διότι μόνο έτσι θα αναγνωριστεί σωστά ο φάκελος. Αναφορικά με το πεδίο Model Action που βρίσκεται στα δεξιά του File Format, δεν απαιτείται καμία αλλαγή στην προεπιλεγμένη εντολή Overwrite Active Model.

Το γραφικό περιβάλλον του ΜΕΤΑ διαθέτει αρκετές ομοιότητες με το αντίστοιχο του ANSA, ενώ και ο χειρισμός της γεωμετρίας με το συνδυασμό του ποντικιού και του πλήκτρου Ctrl είναι παρόμοιος. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στο σημείο που το λογισμικό ζητά από το μελετητή να επιλέξει ποιο φάκελο polymesh επιθυμεί να ανοίξει. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 142, πρέπει να επιλεγεί ο φάκελος polymesh του constant processor και όχι του απλού constant, διότι εκείνος είναι που διαθέτει τα αποτελέσματα της επίλυσης. Τέλος, ας αναφερθεί ότι σε

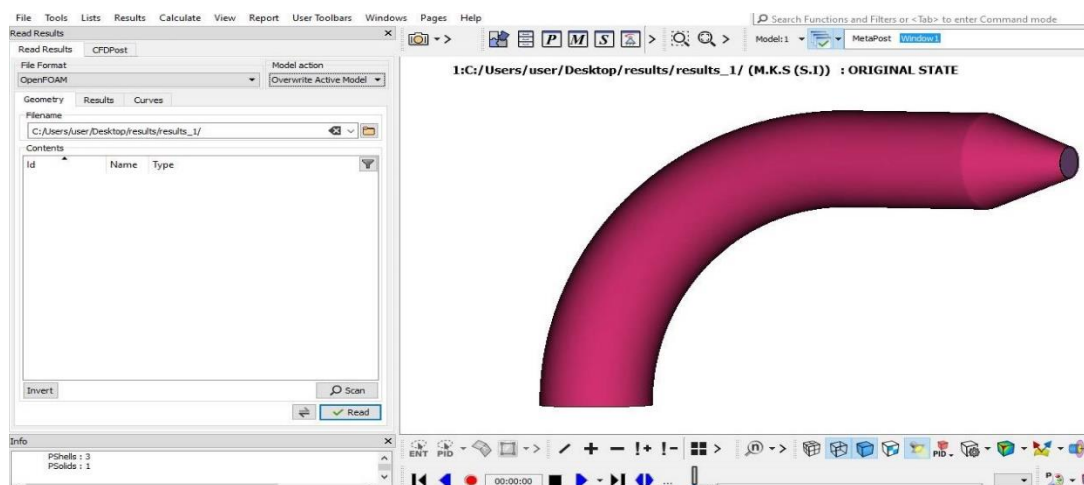
περίπτωση που κολλήσει το λογισμικό ή εμφανίσει μια γενικότερη δυσλειτουργία, από την εντολή File πάνω αριστερά, υπάρχει η δυνατότητα επαναφόρτωσης του μοντέλου (με το Open Model) και μάλιστα προτείνεται να φορτωθεί σε ένα νέο παράθυρο, ακριβώς όπως δείχνει η εικόνα 144, ενώ εναλλακτικά το ίδιο μπορεί να γίνει με το Filename ανοίγοντας ξανά το φάκελο με τα αποτελέσματα.



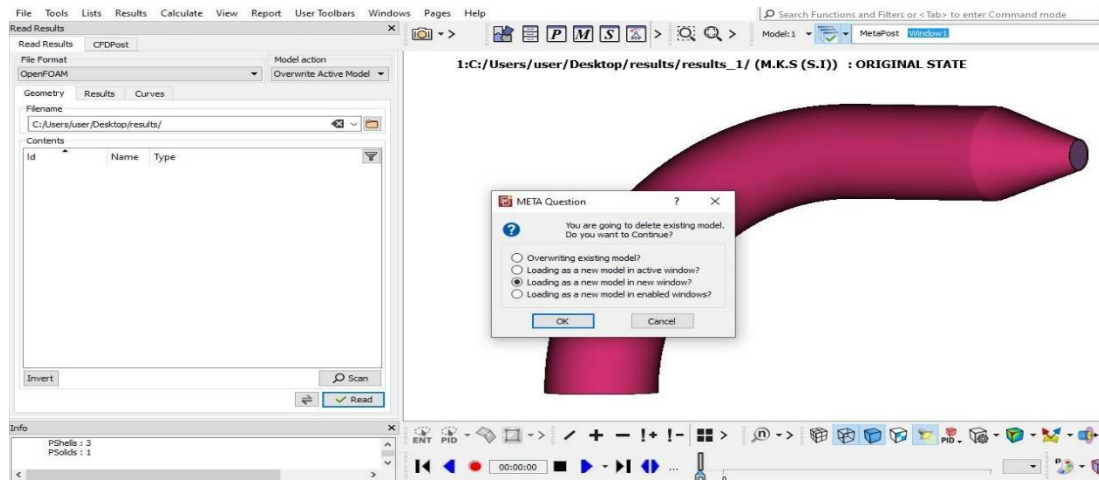
Εικόνα 142: Το γραφικό περιβάλλον του META. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 143: Η επιλογή του κατάλληλου φακέλου polymesh για την ανάγνωση των αποτελεσμάτων. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 144: Η εισαγωγή της υπό μελέτη γεωμετρίας. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 145: Η διαδικασία επαναφόρτωσης του μοντέλου σε περίπτωση δυσλειτουργίας του λογισμικού. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

7.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

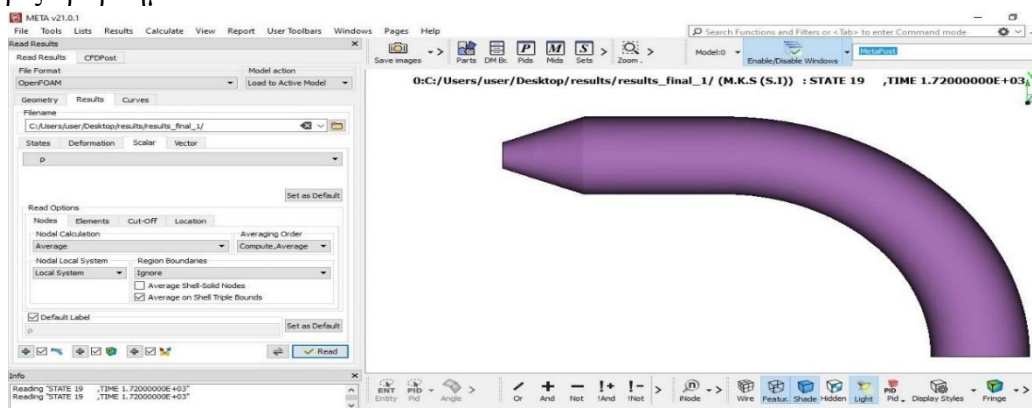
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την επίλυση του λογισμικού Openfoam. Επισημαίνεται ότι με την εμφάνιση της γεωμετρίας, επιλέγεται η καρτέλα results πάνω αριστερά και αμέσως εμφανίζονται οι χρονικές στιγμές της επίλυσης που είναι αποθηκευμένες στους φακέλους. Υπενθυμίζεται ότι τα αποτελέσματα καταγράφηκαν ανά 100 επαναλήψεις, επομένως οι χρονικές στιγμές εμφανίζονται ανά 100, έως την τελική χρονική στιγμή που επήλθε η σύγκλιση. Συνίσταται η επιλογή μόνο της τελικής χρονικής στιγμής για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων και έπειτα από τις επιλογές scalar ή vector, ο μελετητής καθορίζει ποιο μέγεθος επιθυμεί να προβάλλει. Αφότου επιλεγεί ένα μέγεθος, πρέπει να ενεργοποιηθεί η εντολή read για την ανάγνωση των αποτελεσμάτων και τελικά απομένει μόνο η ενεργοποίηση της εντολής fringe, η οποία βρίσκεται στην κάτω γραμμή εργαλείων προς τα δεξιά της οθόνης.

Με τον τρόπο αυτό ενεργοποιείται η κλίμακα των αποτελεσμάτων, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα. Η κλίμακα αυτή είναι επεξεργάσιμη, καθώς ο μελετητής μπορεί να καθορίσει χειροκίνητα το εύρος των αποτελεσμάτων αν το επιθυμεί (με δεξί κλικ και επιλέγοντας το range limit), ενώ με το recalculate, μπορεί να επαναφέρει το αρχικό εύρος αποτελεσμάτων που εξήγαγε το λογισμικό. Παράλληλα υπάρχει αντίστοιχη δυνατότητα επεξεργασίας και για τα διανυσματικά μεγέθη, αλλά και δυνατότητα δημιουργίας επίπεδων τομών και στα τρία επίπεδα xy, yz, xz, με τις αντίστοιχες εντολές να βρίσκονται δίπλα στο fringe, το οποίο παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μονόμετρων μεγεθών.

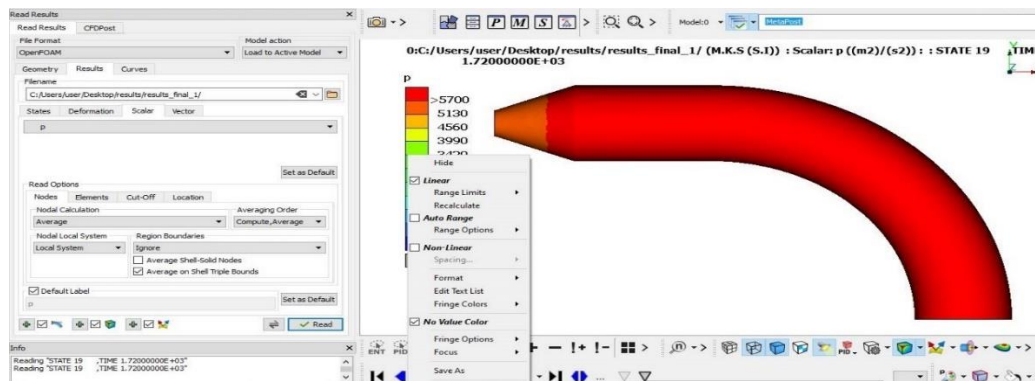
Εκτός από τα μεγέθη της πίεσης, της ταχύτητας και των αντίστοιχων διανυσμάτων τους, παρουσιάζεται και ένα ακόμη θεμελιώδες μέγεθος για ροές σε αγωγούς, ο στροβιλισμός. Ως στροβιλισμός (vorticity ή curl) ορίζεται ένα διανυσματικό πεδίο που περιγράφει την τοπική περιστροφική κίνηση ενός μέσου (εν προκειμένω του νερού) κοντά σε κάποιο σημείο, όπως το αντιλαμβάνεται ένας

παρατηρητής που βρίσκεται σε αυτό το σημείο και κινείται μαζί με τη ροή (Moffatt, 2015).

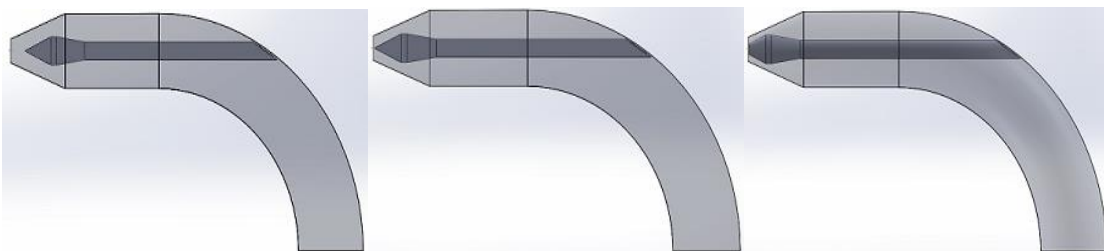
Τέλος, συμπεριλαμβάνονται και τρεις εικόνες που αντιστοιχούν στις τρεις περιπτώσεις που εξετάζονται, με τη διαφορά τους να έγκειται στη θέση της βελόνας και συγκεκριμένα στο πόσο κοντά βρίσκεται η απόληξη της βελόνας στην έξοδο του ακροφυσίου. Όπως έχει προαναφερθεί, κρίθηκε σκόπιμη η ύπαρξη των τριών περιπτώσεων, ώστε να μελετηθούν διαφορετικές συνθήκες παροχής νερού για ηλεκτροπαραγωγή και να εξαχθούν πιο ολοκληρωμένα συμπεράσματα για την υπό εξέταση διάταξη. Σημειώνεται ότι στην τρίτη περίπτωση η βελόνα εξέρχει ελάχιστα από το ακροφύσιο, ωστόσο το τμήμα αυτό αποκόπηκε, για να περικλείεται όλη η βελόνα μέσα στο ακροφύσιο και να γίνει επιτυχώς το πλέγμα στο ANSA. Στο ANSYS που δεν υπάρχει ο περιορισμός αυτός, η βελόνα εξέρχει από το ακροφύσιο χωρίς πρόβλημα.



Εικόνα 146: Η ανάγνωση των αποτελεσμάτων στο META και η εντολή fringe κάτω δεξιά. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

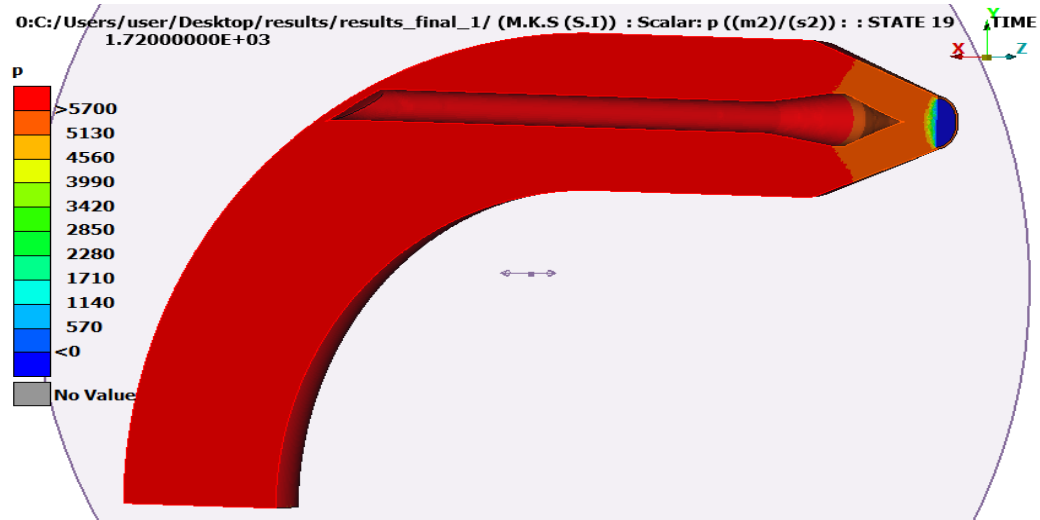


Εικόνα 147: Οι εντολές range limits και recalculate στο META. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

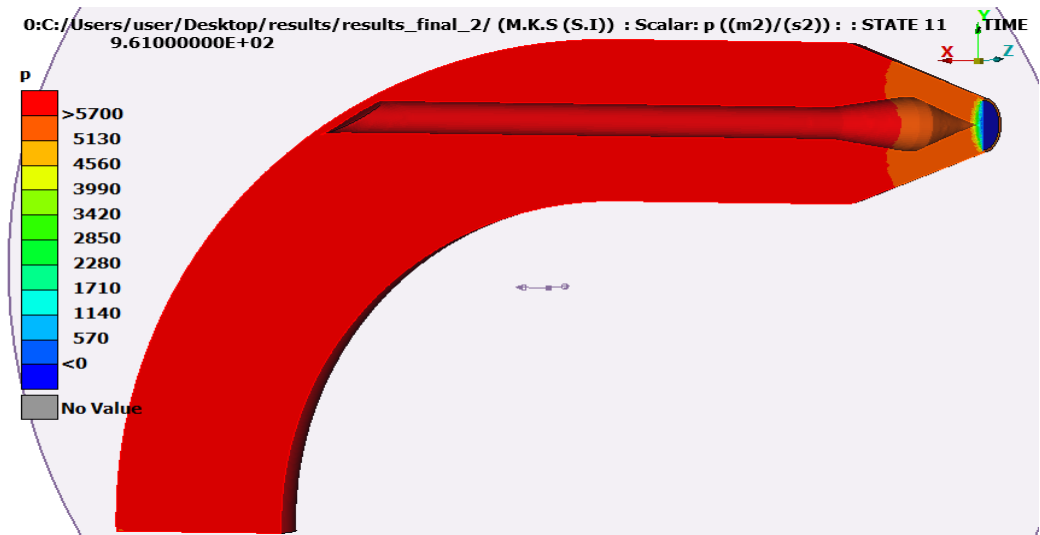


Εικόνα 148: Οι τρεις γεωμετρίες που αντιστοιχούν στις τρεις περιπτώσεις που εξετάζονται. Ανάκτηση από: Λογισμικό Solidworks.

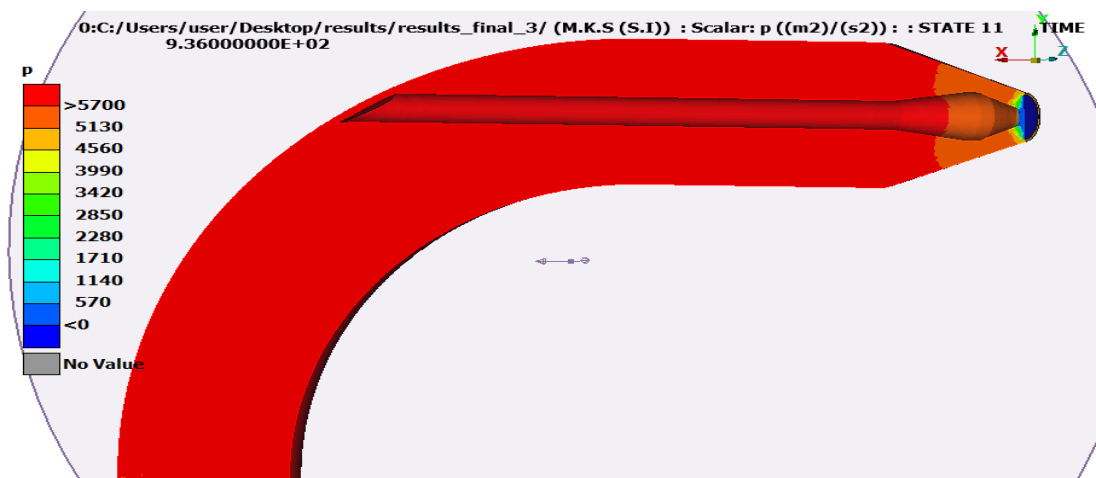
7.2.1 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΙΕΣΗΣ



Εικόνα 149: Διάγραμμα κατανομής πίεσης κατά μήκος του αγωγού για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

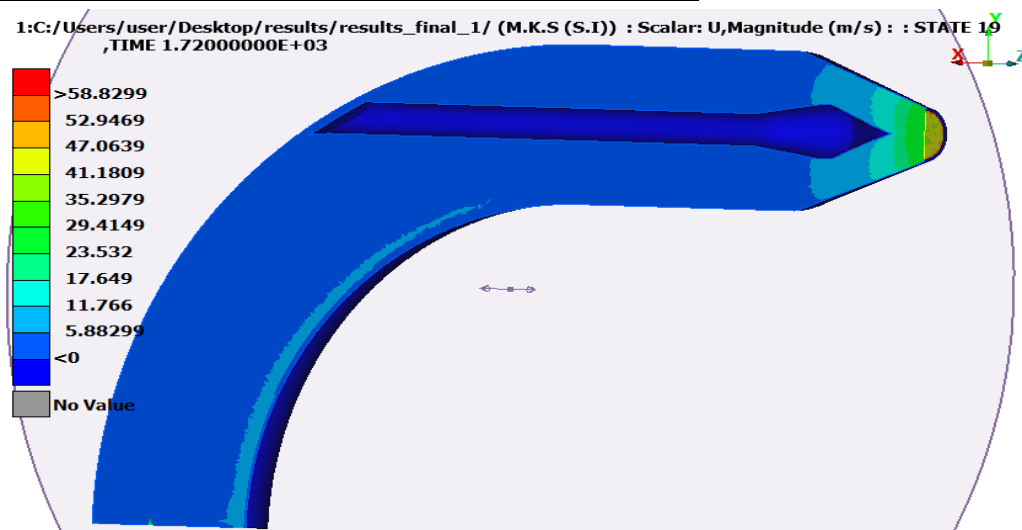


Εικόνα 150: Διάγραμμα κατανομής πίεσης κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

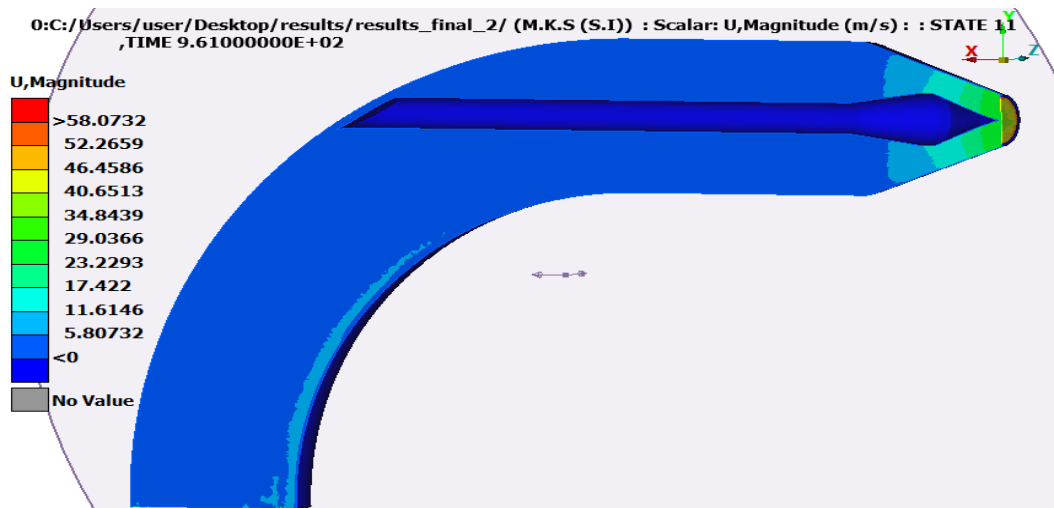


Εικόνα 151: Διάγραμμα κατανομής πίεσης κατά μήκος του αγωγού για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

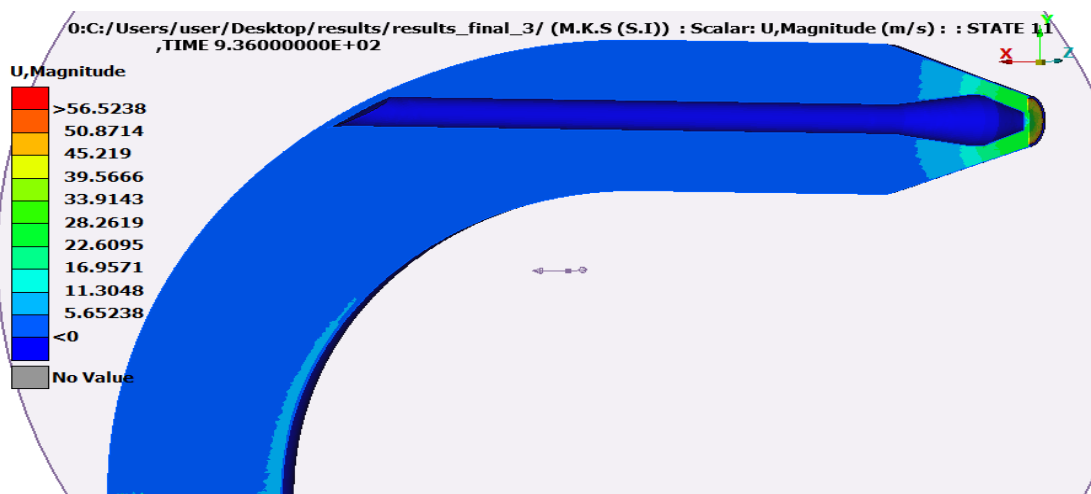
7.2.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΡΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ



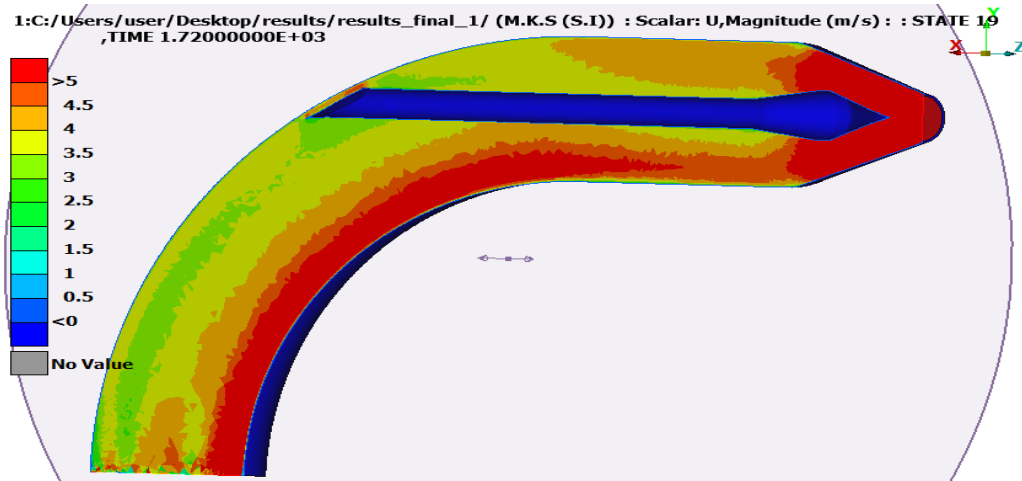
Εικόνα 152: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



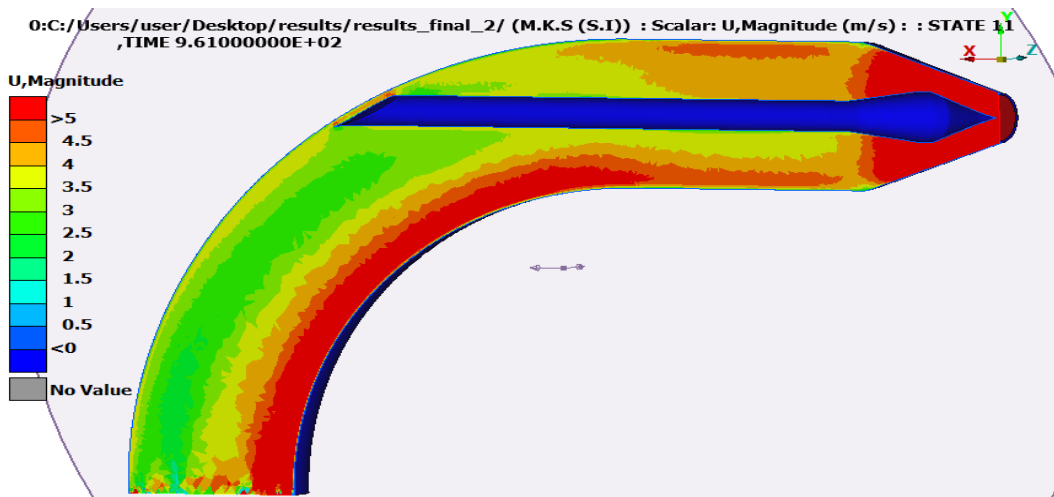
Εικόνα 153: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



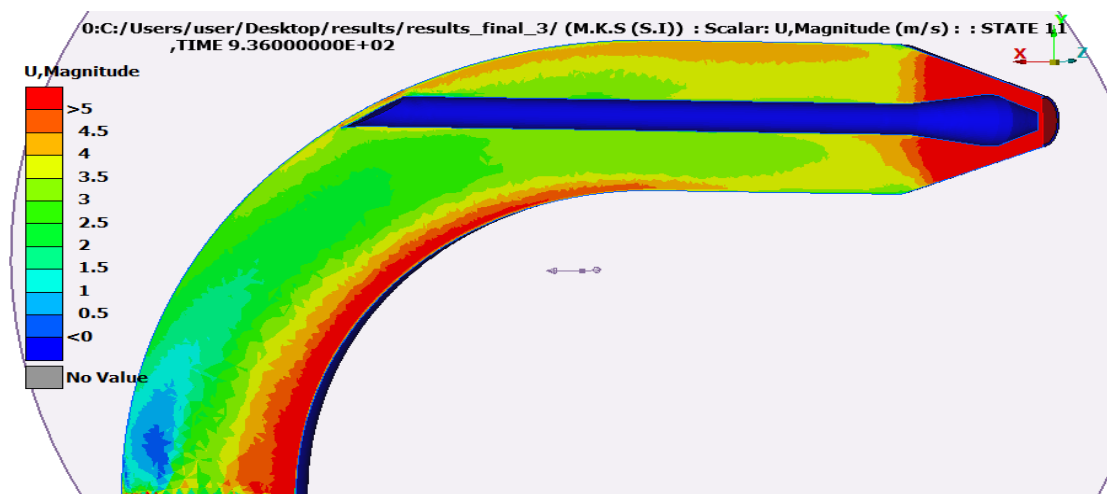
Εικόνα 154: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



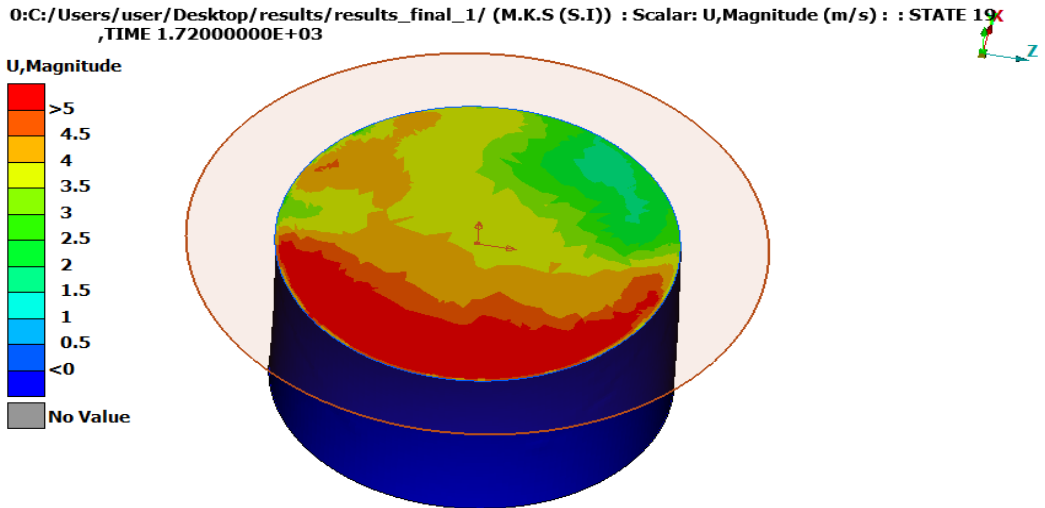
Εικόνα 155: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την πρώτη περίπτωση.
Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



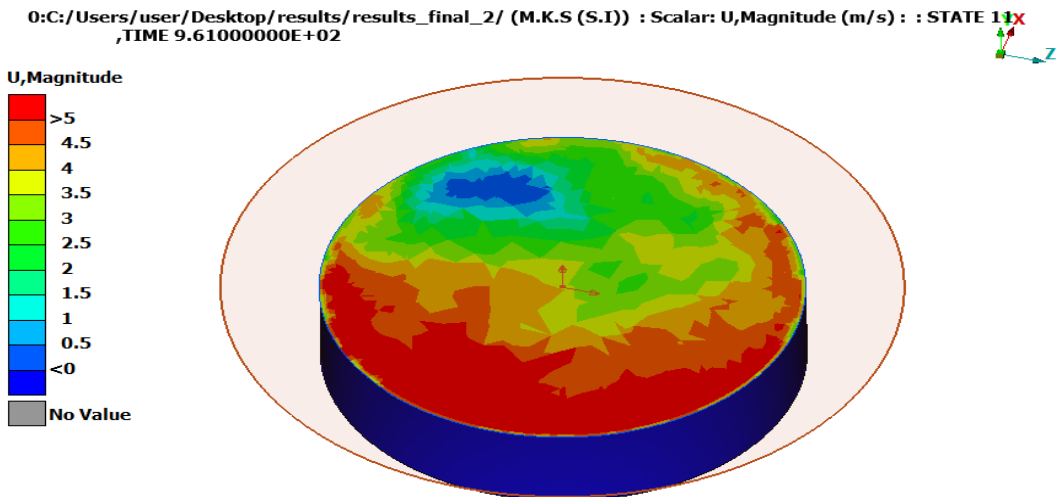
Εικόνα 156: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για τη δεύτερη περίπτωση.
Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



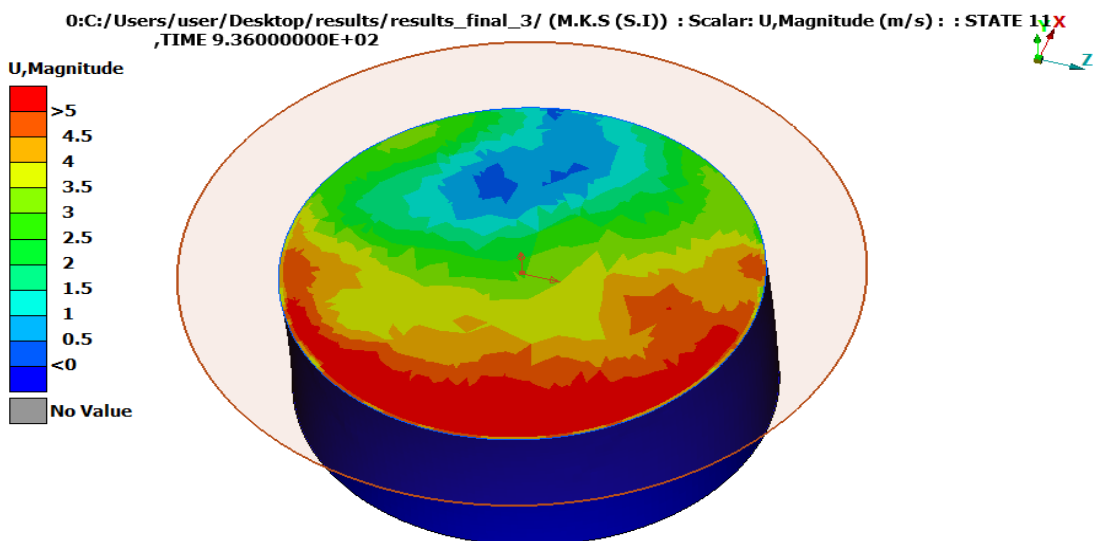
Εικόνα 157: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την τρίτη περίπτωση.
Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



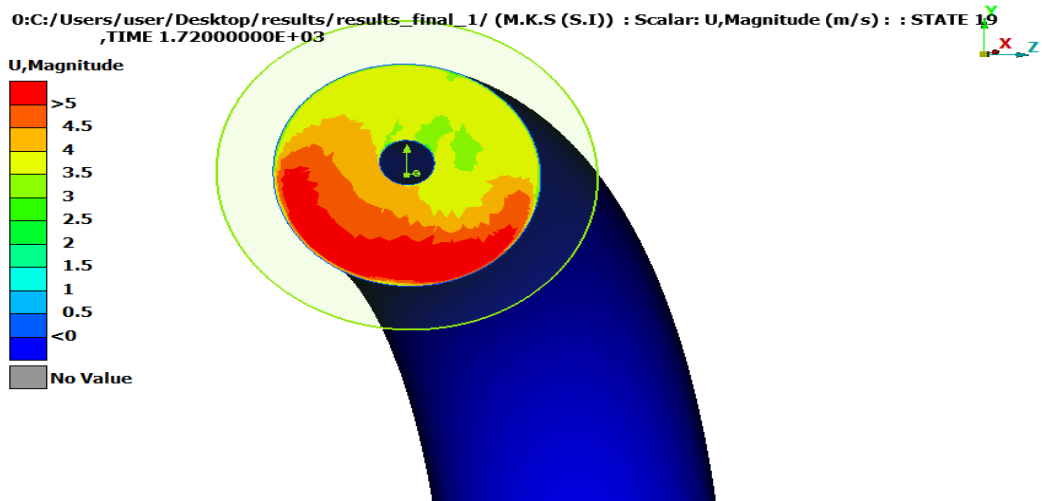
Εικόνα 158: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στην είσοδο με βάση την αλλαγμένη κλίμακα (πρώτη περίπτωση). Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



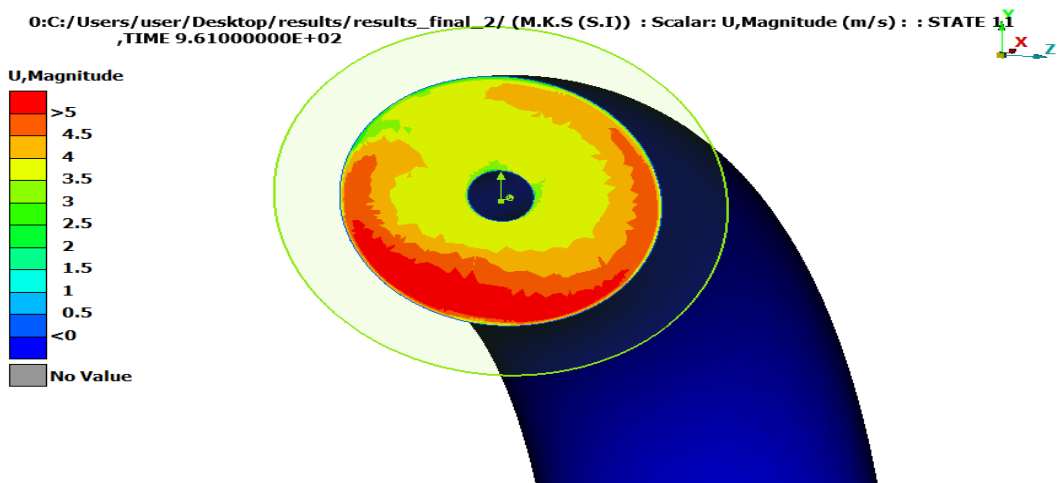
Εικόνα 159: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στην είσοδο με βάση την αλλαγμένη κλίμακα (δεύτερη περίπτωση). Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



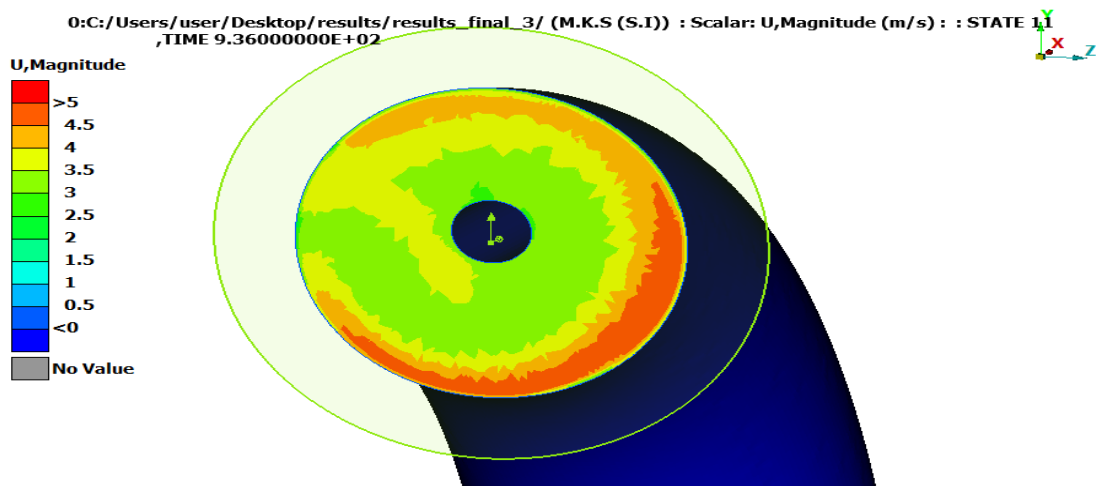
Εικόνα 160: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στην είσοδο με βάση την αλλαγμένη κλίμακα (τρίτη περίπτωση). Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



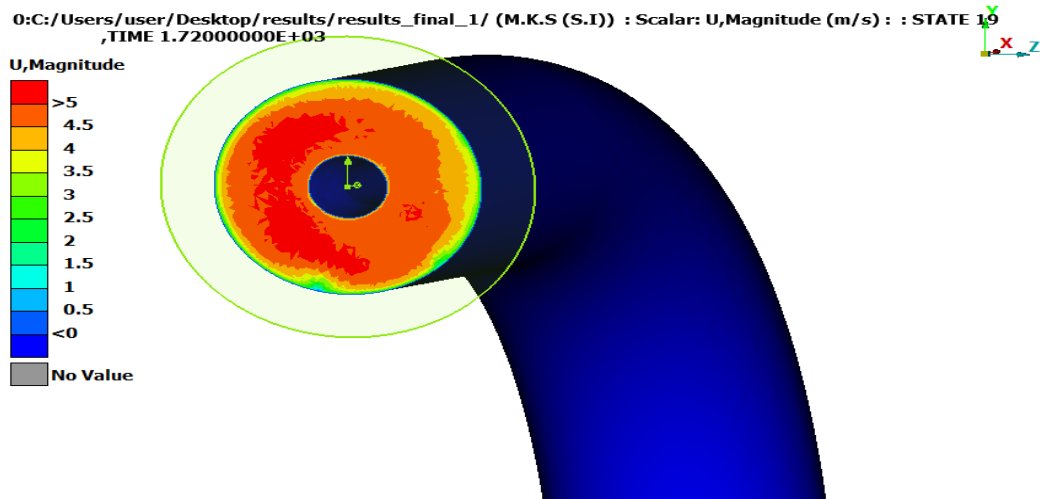
Εικόνα 161: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



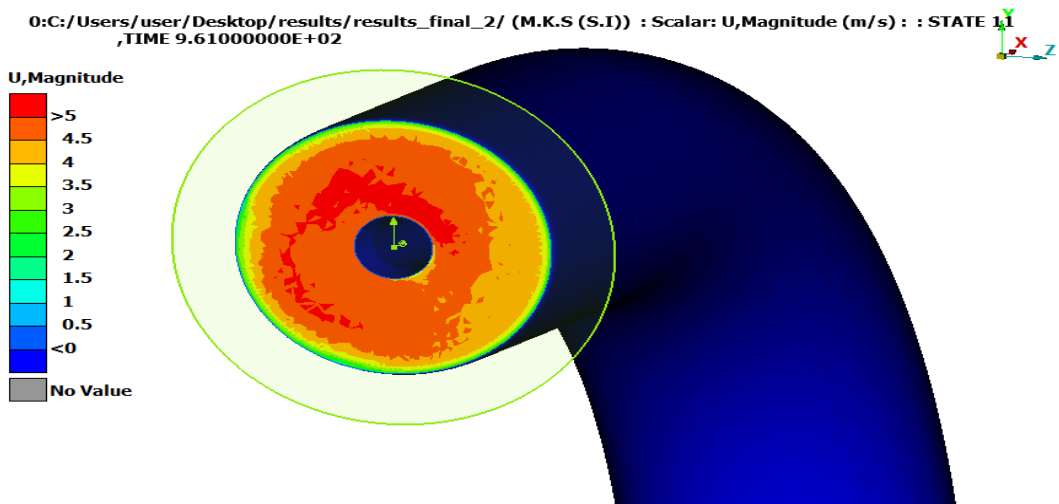
Εικόνα 162: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



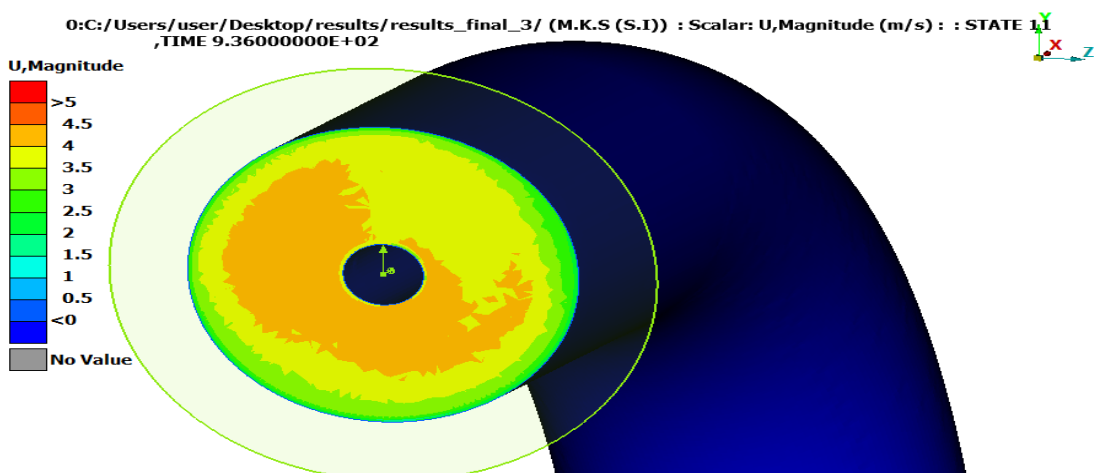
Εικόνα 163: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 164: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στο σημείο στένωσης του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

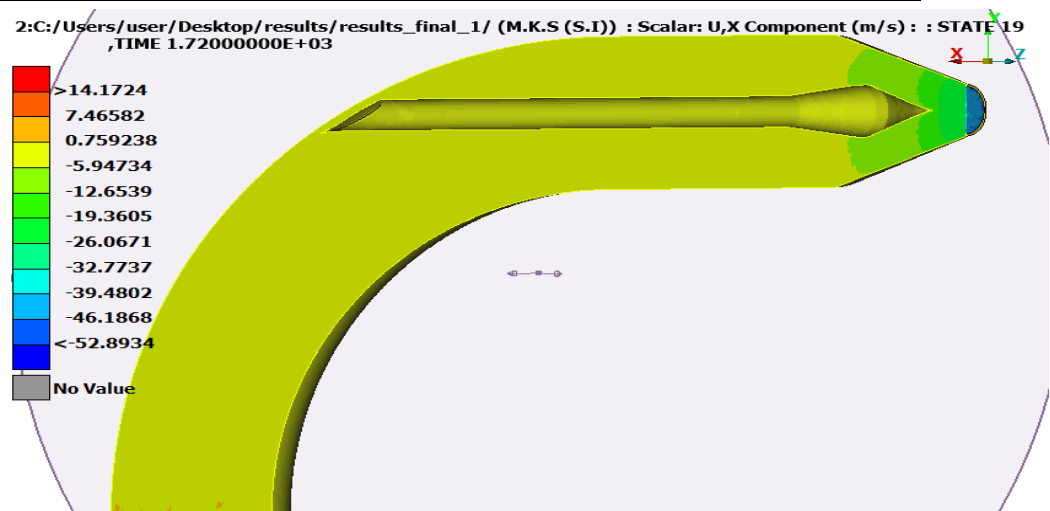


Εικόνα 165: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στο σημείο στένωσης του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

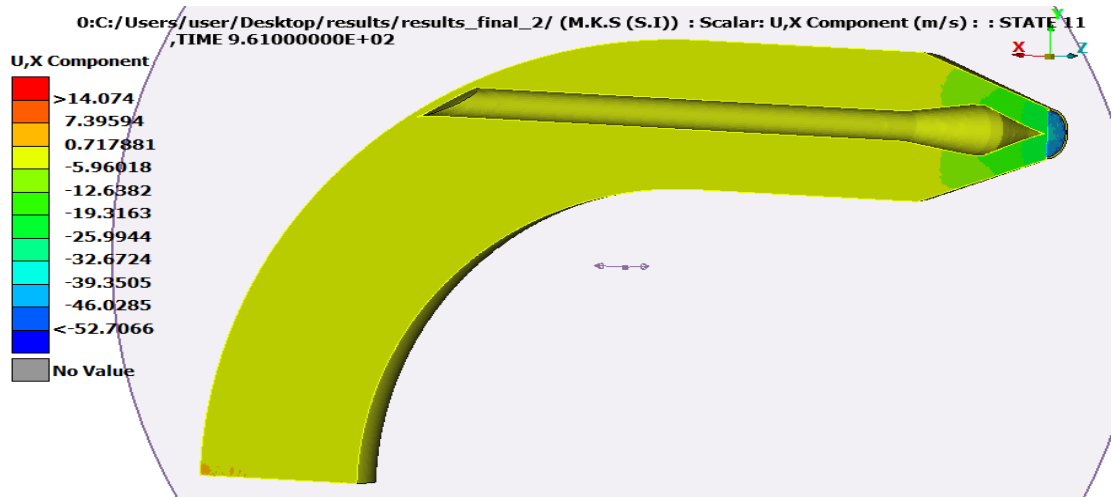


Εικόνα 166: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας στο σημείο στένωσης του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

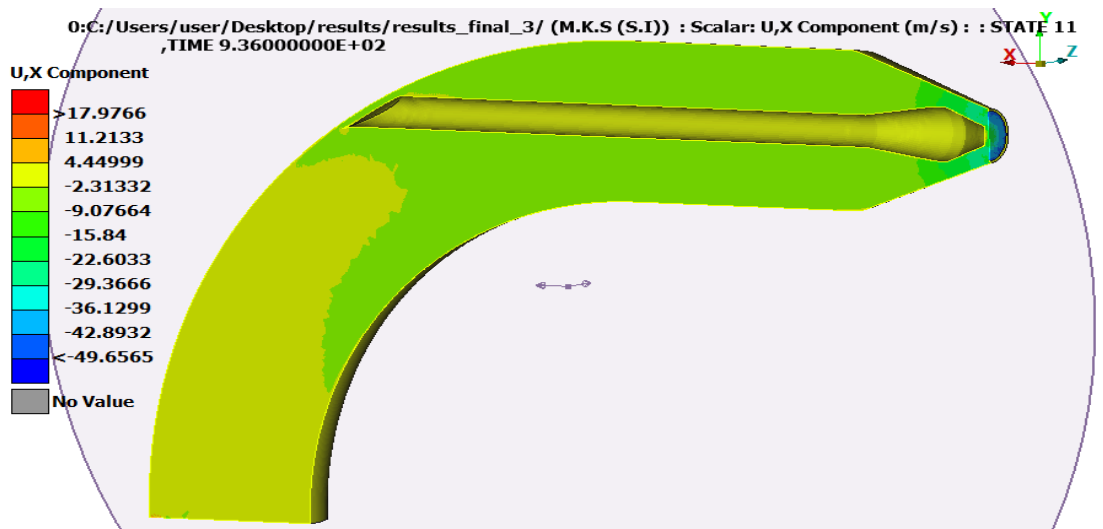
7.2.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΥΡΙΑΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ



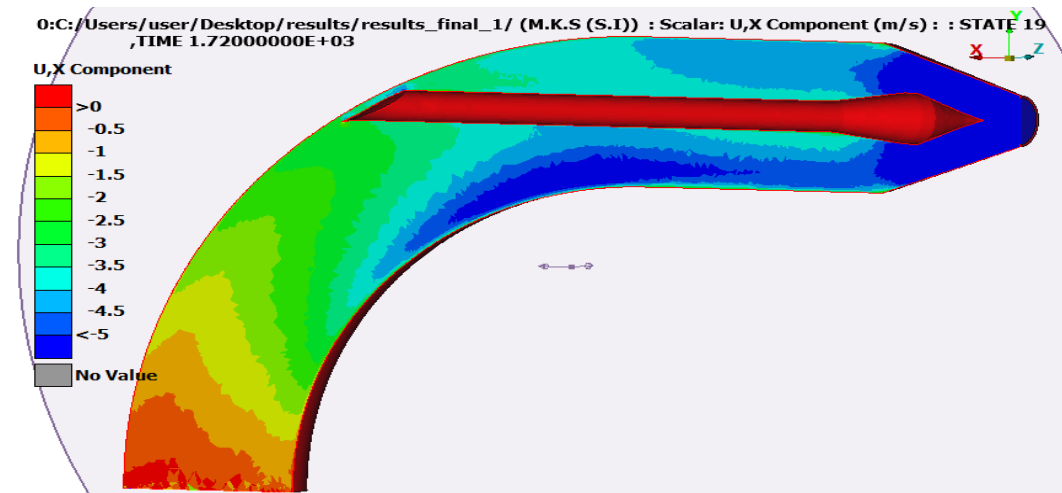
Εικόνα 167: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



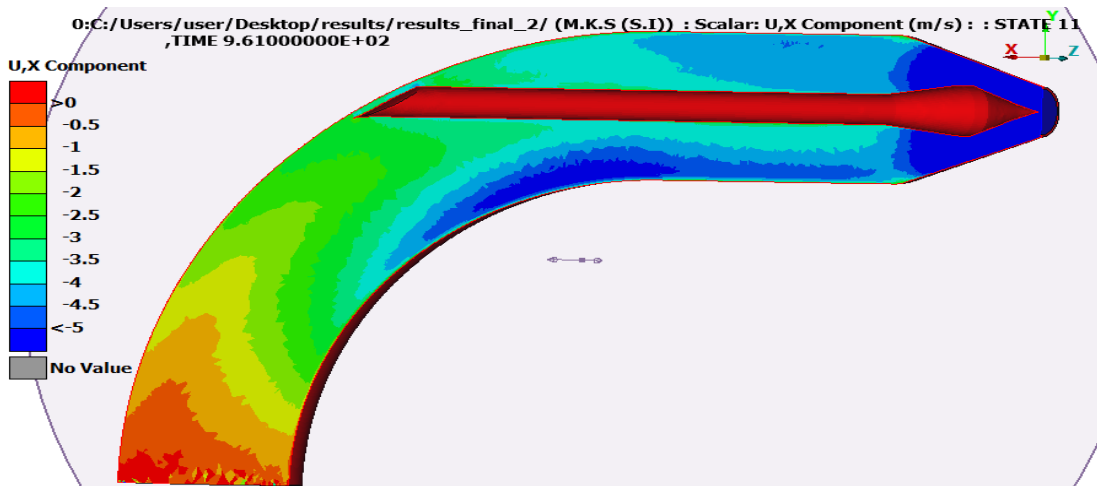
Εικόνα 168: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



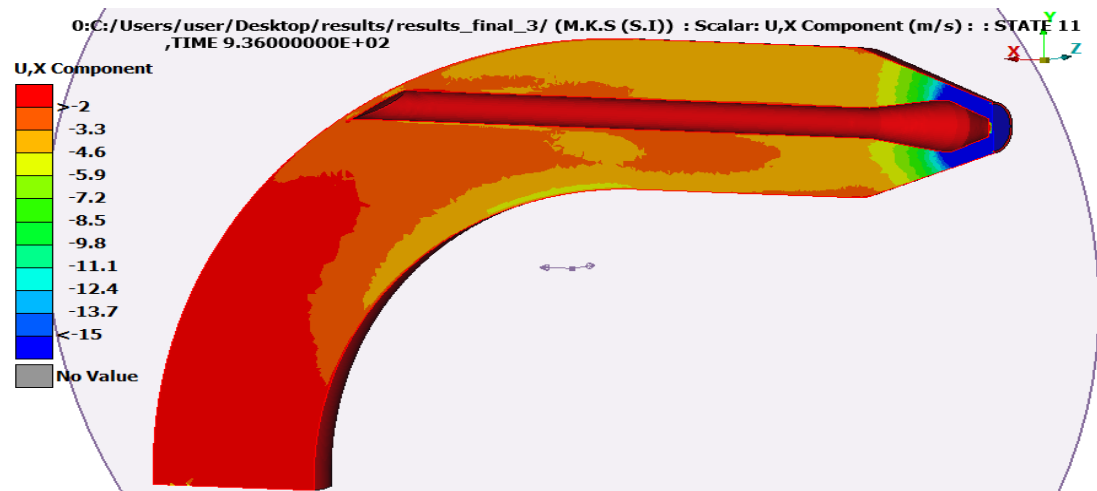
Εικόνα 169: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 170: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



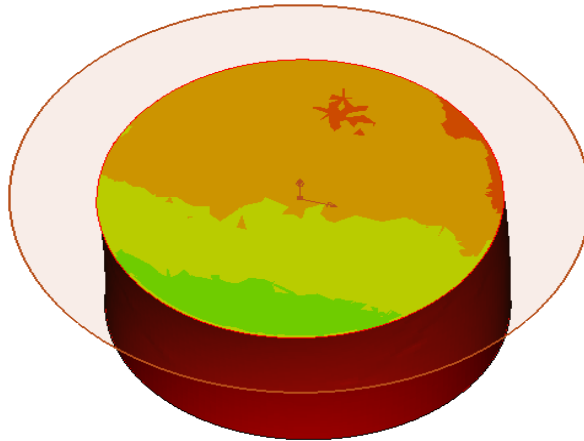
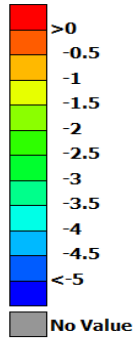
Εικόνα 171: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 172: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

0:C:/Users/user/Desktop/results/results_final_1/ (M.K.S (S.I)) : Scalar: U,X Component (m/s) : : STATE X9
,TIME 1.72000000E+03

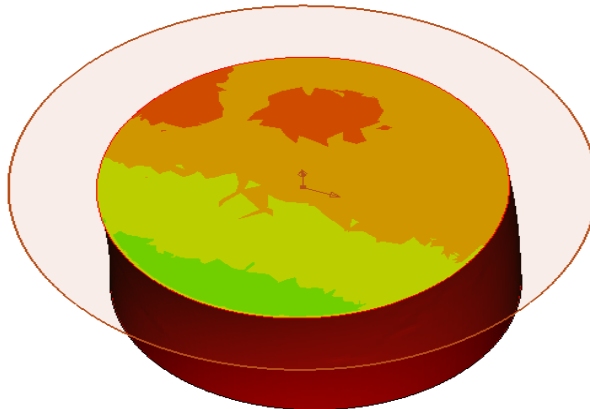
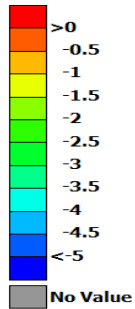
U,X Component



Εικόνα 173: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας στην είσοδο, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

0:C:/Users/user/Desktop/results/results_final_2/ (M.K.S (S.I)) : Scalar: U,X Component (m/s) : : STATE X1
,TIME 9.61000000E+02

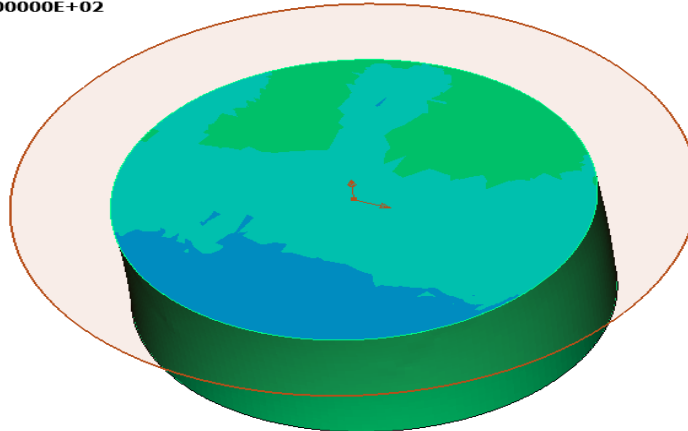
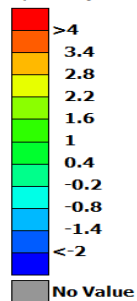
U,X Component



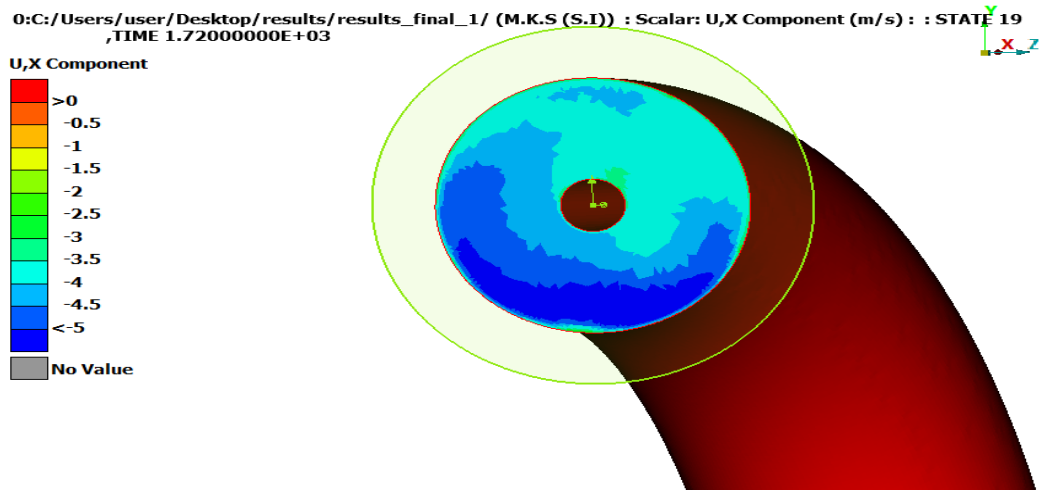
Εικόνα 174: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας στην είσοδο, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

0:C:/Users/user/Desktop/results/results_final_3/ (M.K.S (S.I)) : Scalar: U,X Component (m/s) : : STATE X1
,TIME 9.36000000E+02

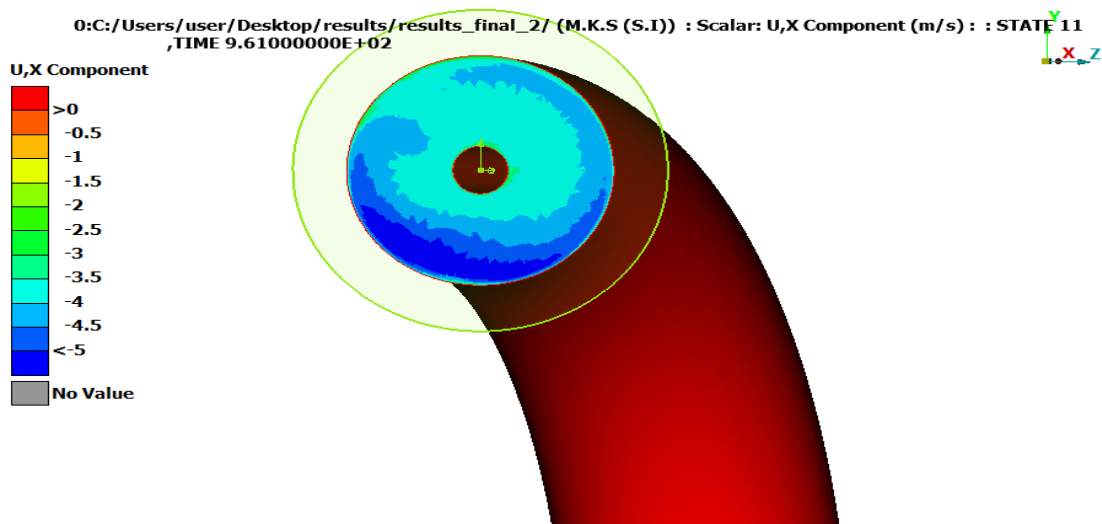
U,X Component



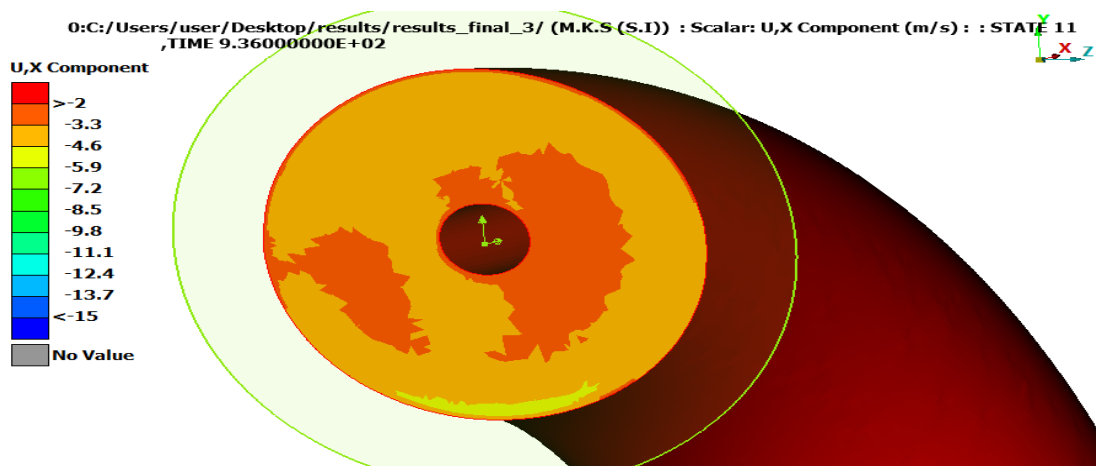
Εικόνα 175: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας στην είσοδο, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



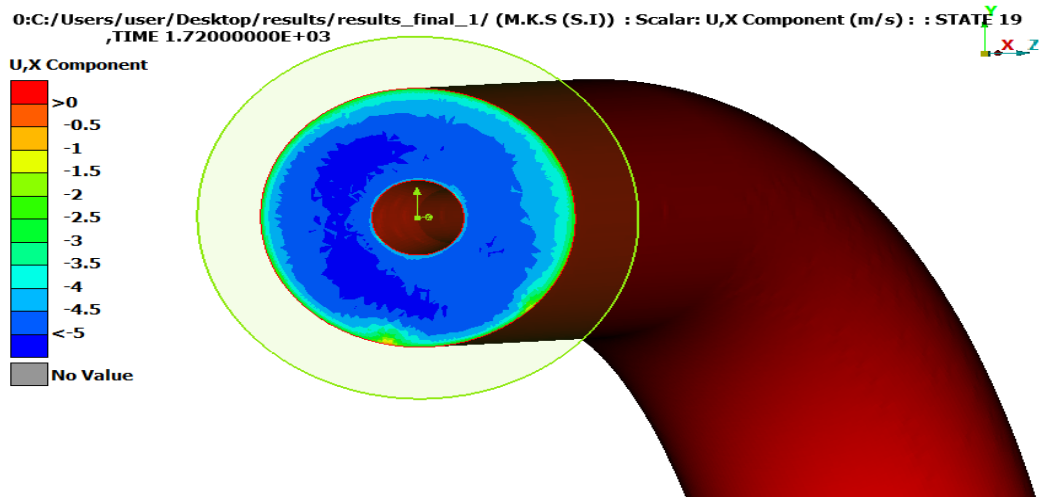
Εικόνα 176: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



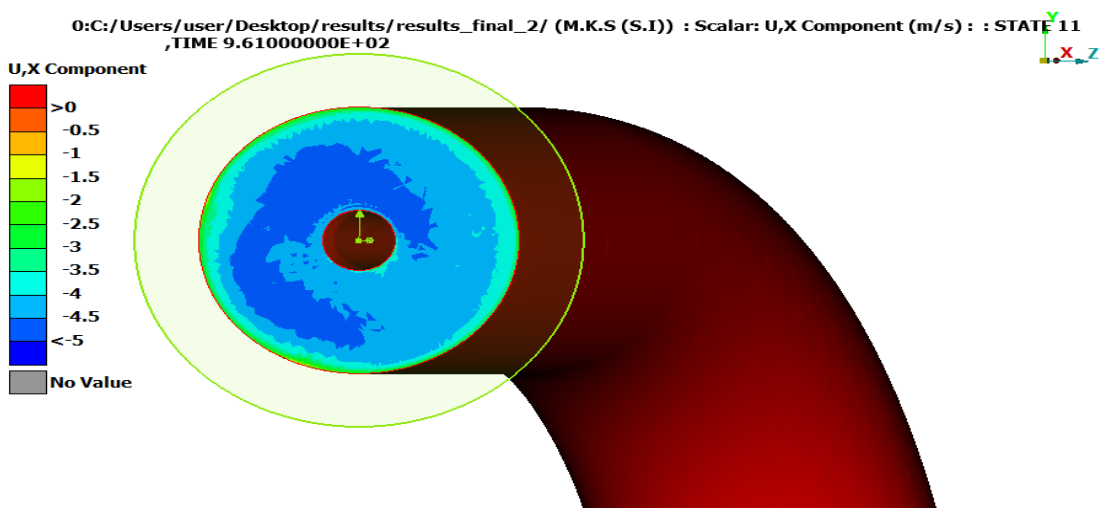
Εικόνα 177: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



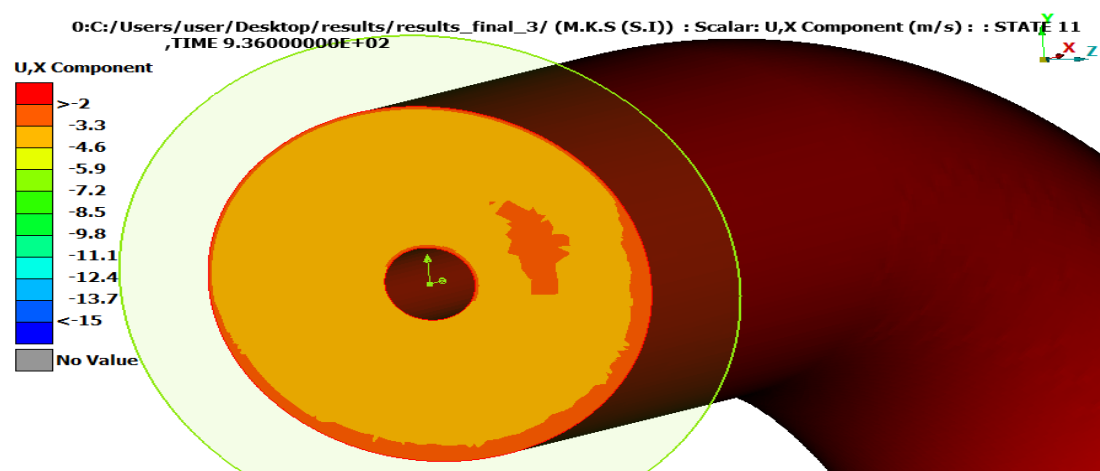
Εικόνα 178: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 179: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας στο σημείο στένωσης του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

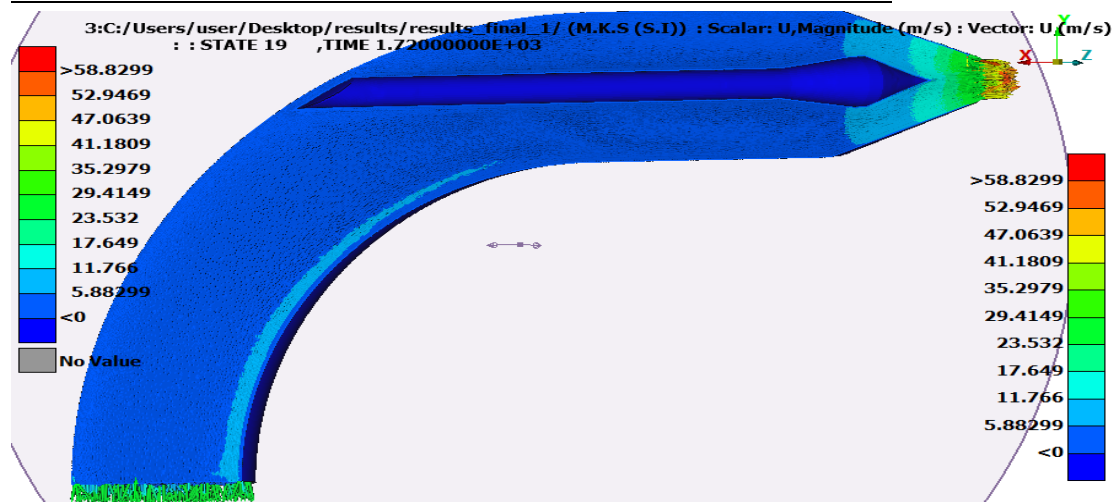


Εικόνα 180: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας στο σημείο στένωσης του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

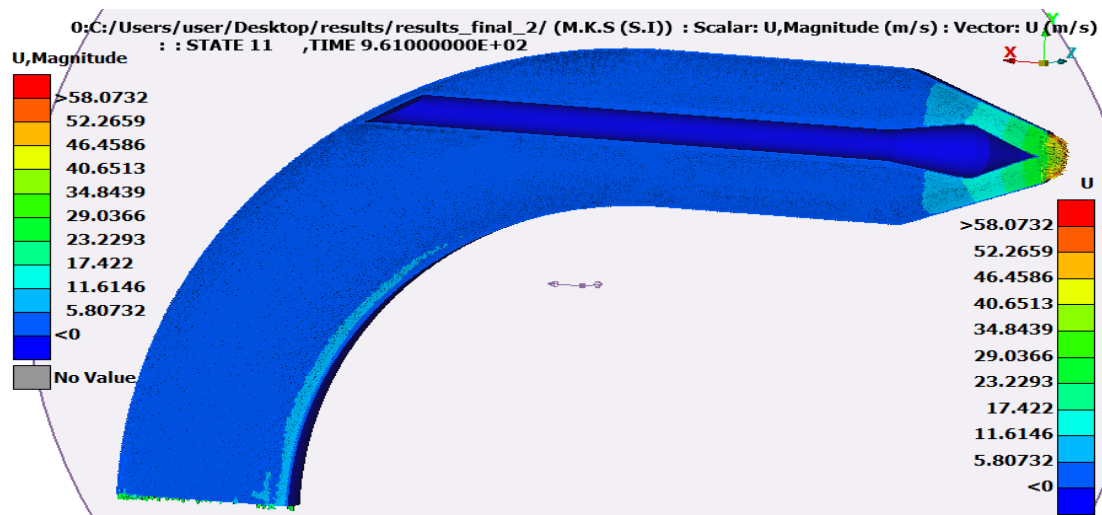


Εικόνα 181: Διάγραμμα x συνιστώσας ταχύτητας στο σημείο στένωσης του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

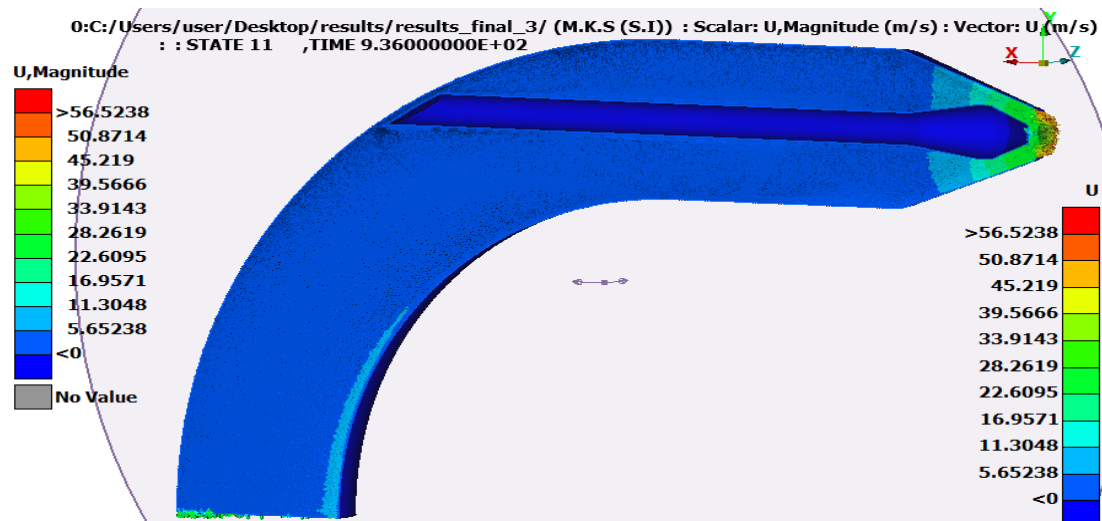
7.2.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ



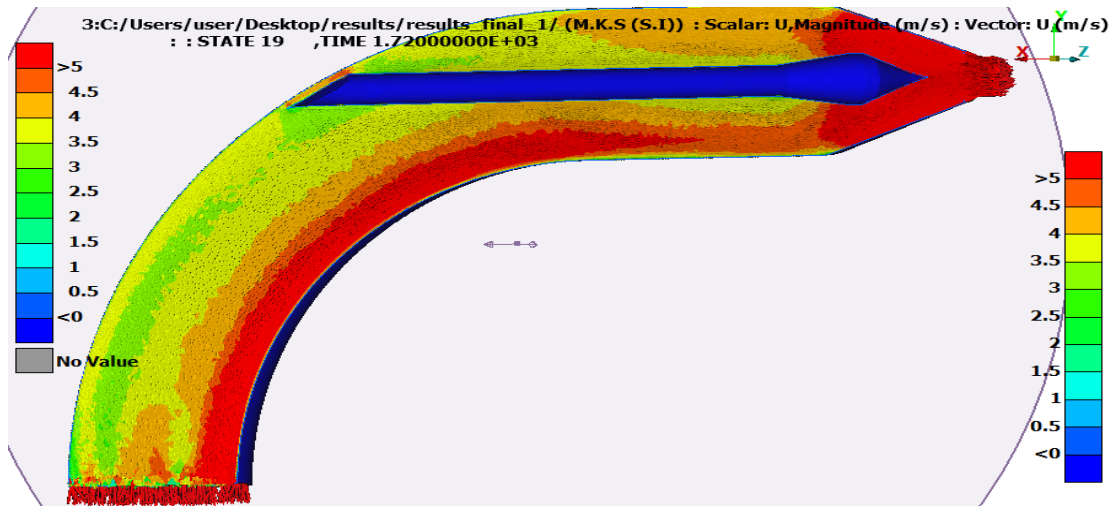
Εικόνα 182: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



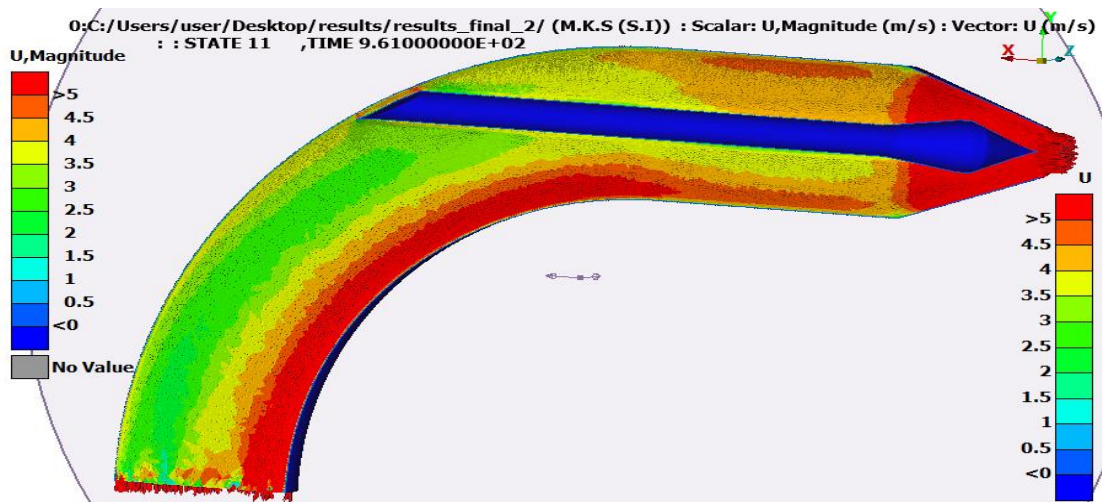
Εικόνα 183: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



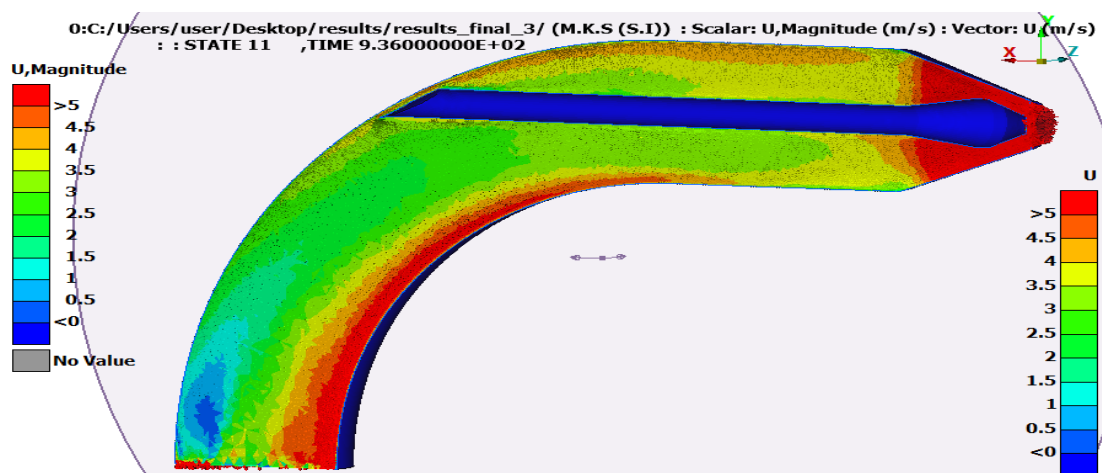
Εικόνα 184: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



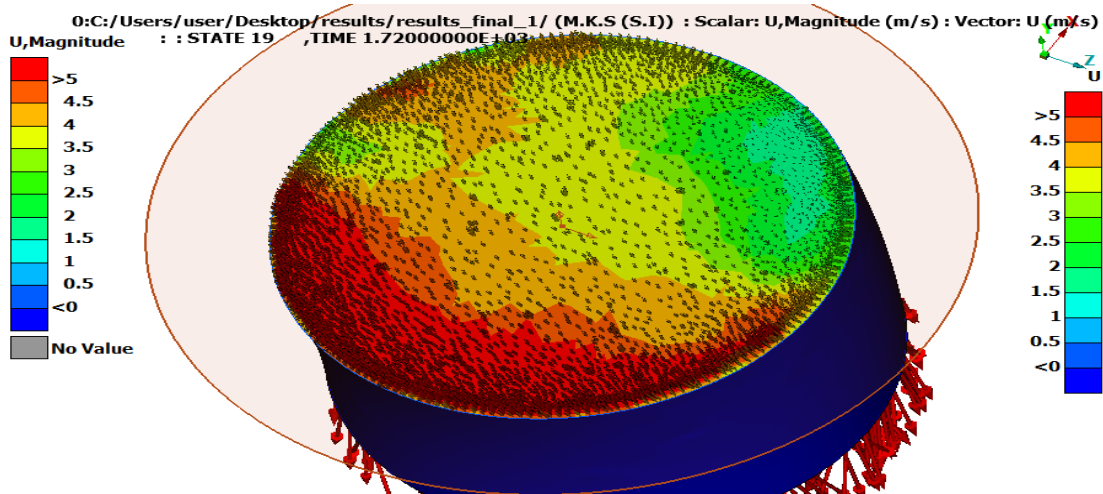
Εικόνα 185: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



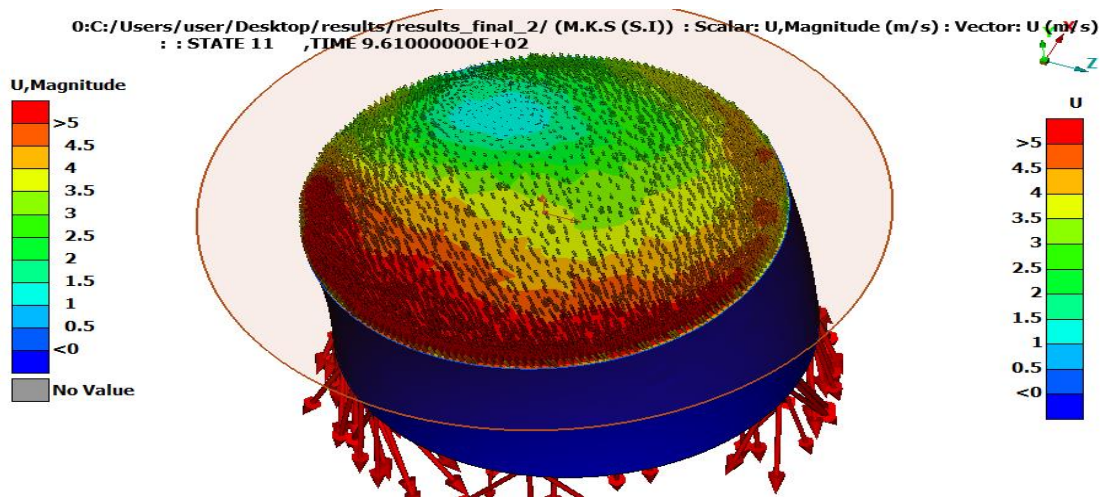
Εικόνα 186: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



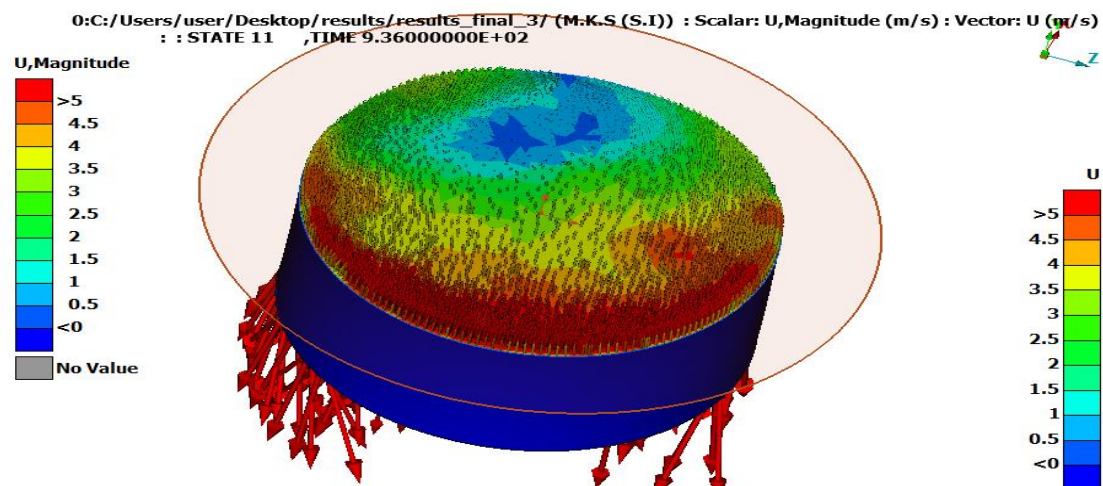
Εικόνα 187: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



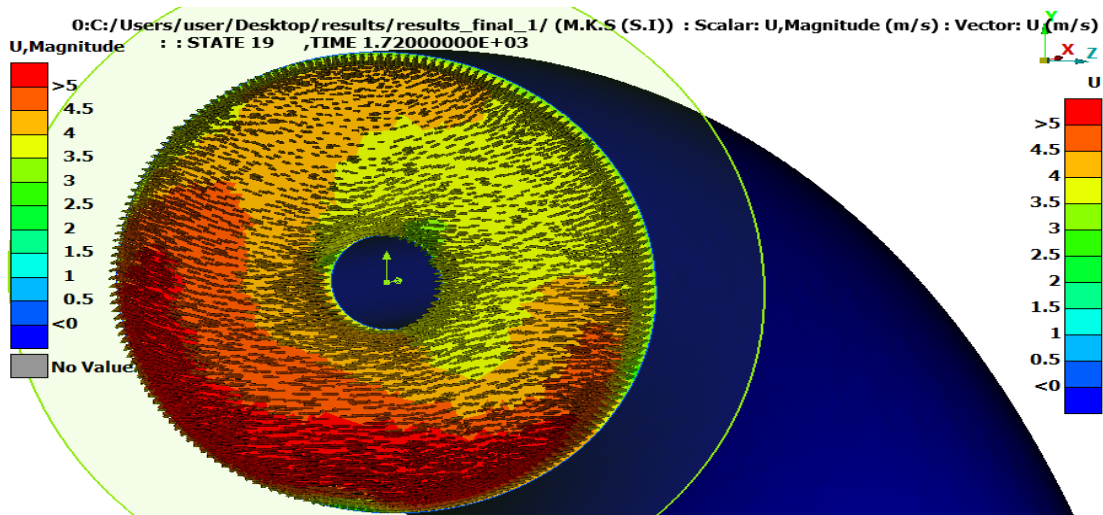
Εικόνα 188: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στην είσοδο, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



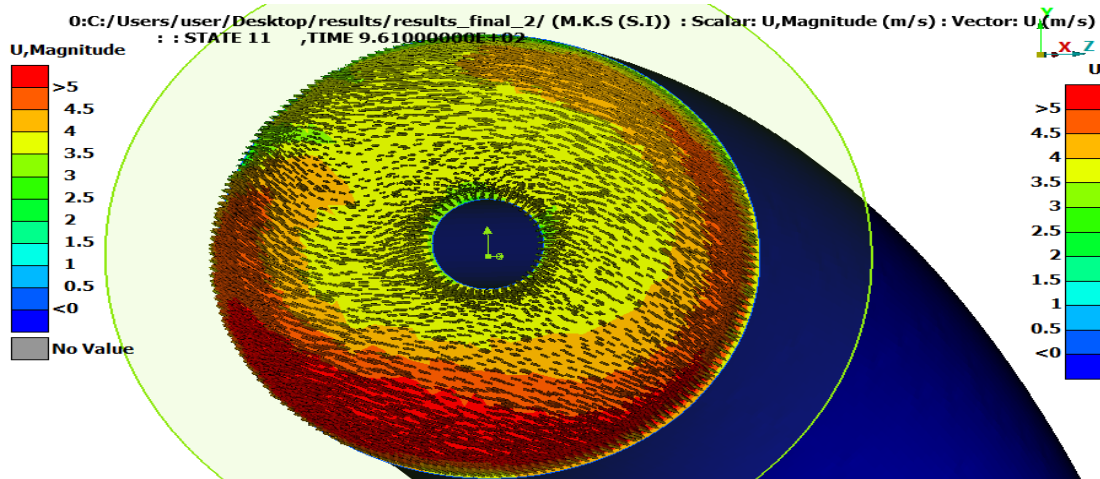
Εικόνα 189: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στην είσοδο, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



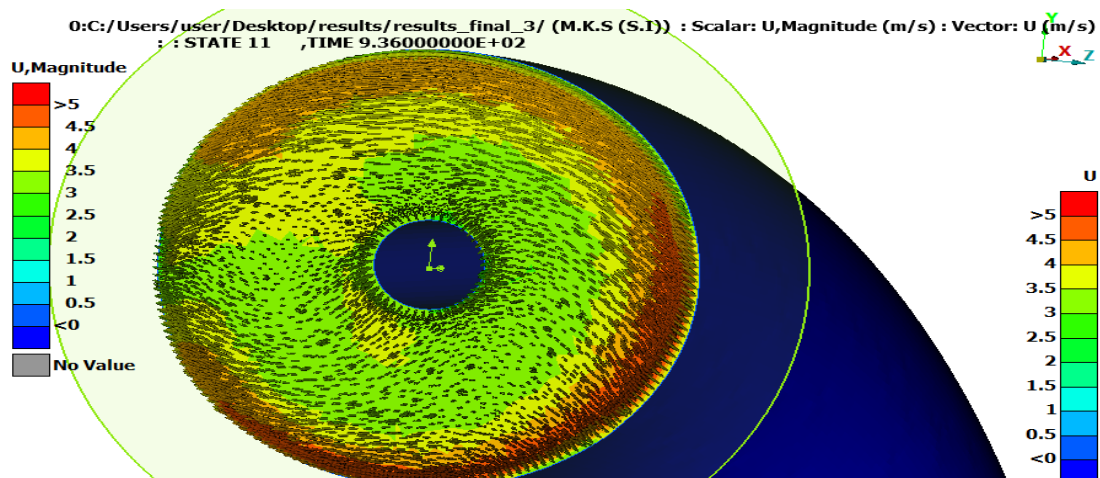
Εικόνα 190: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στην είσοδο, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



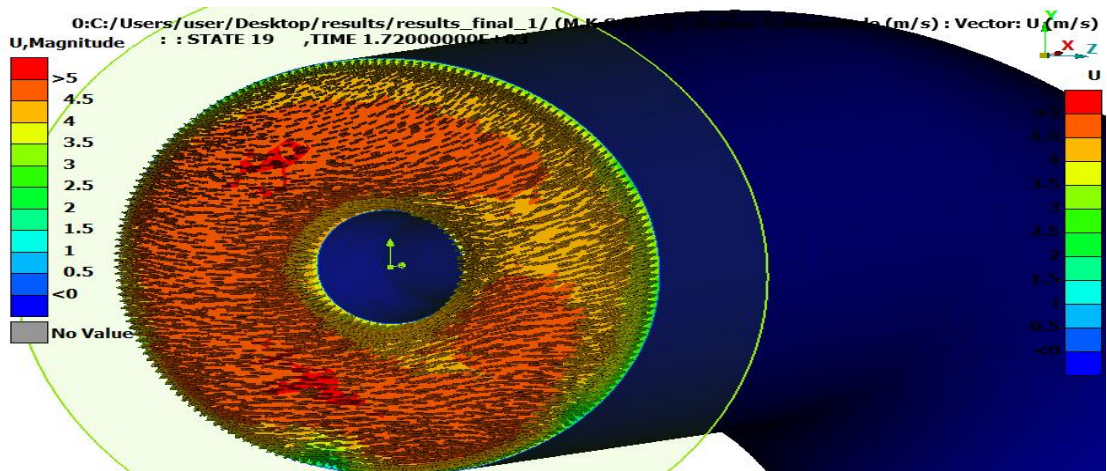
Εικόνα 191: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



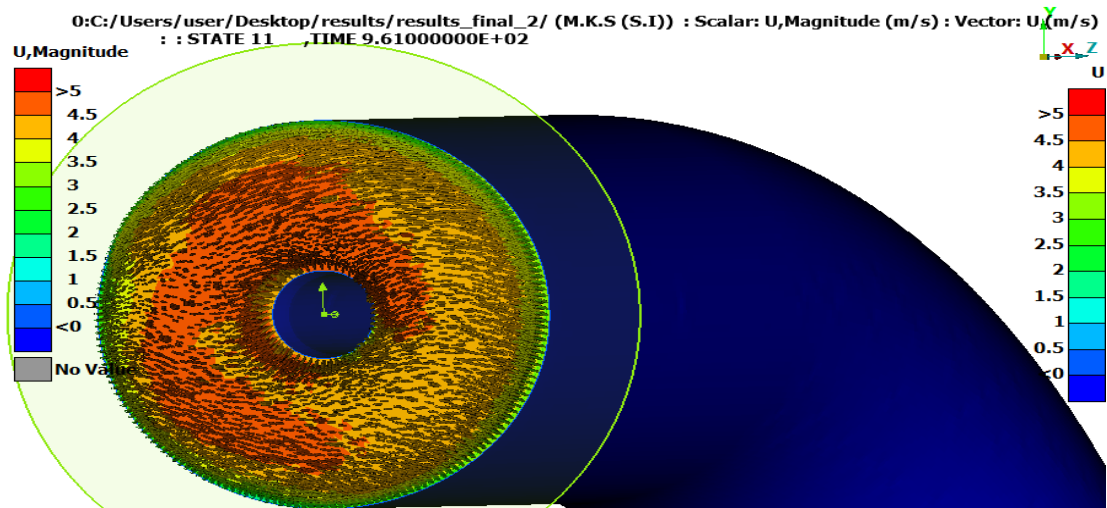
Εικόνα 192: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



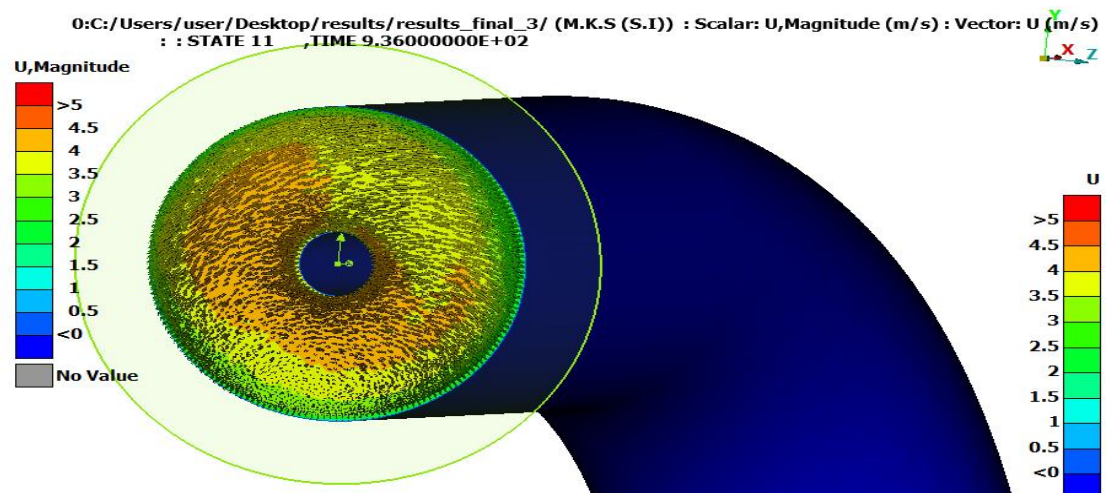
Εικόνα 193: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 194: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στο σημείο στένωσης της γεωμετρίας του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

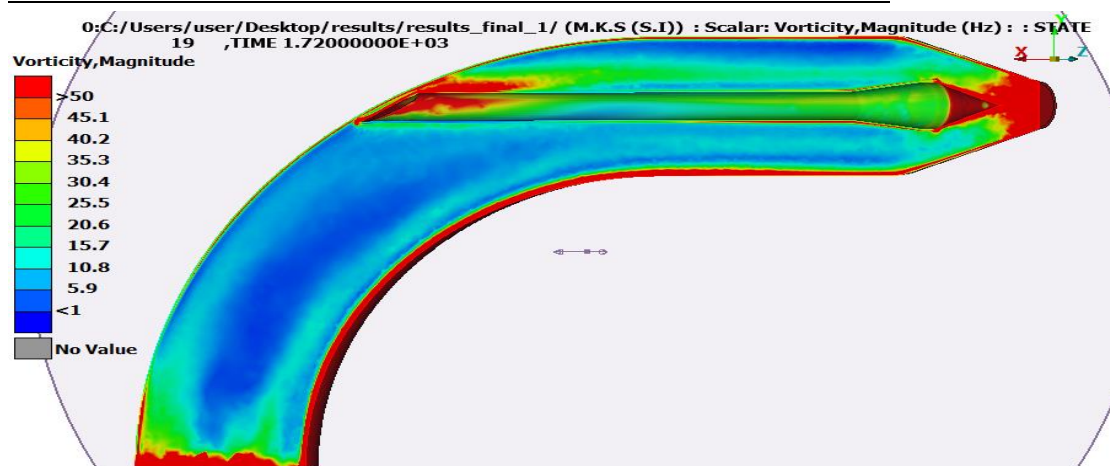


Εικόνα 195: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στο σημείο στένωσης της γεωμετρίας του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

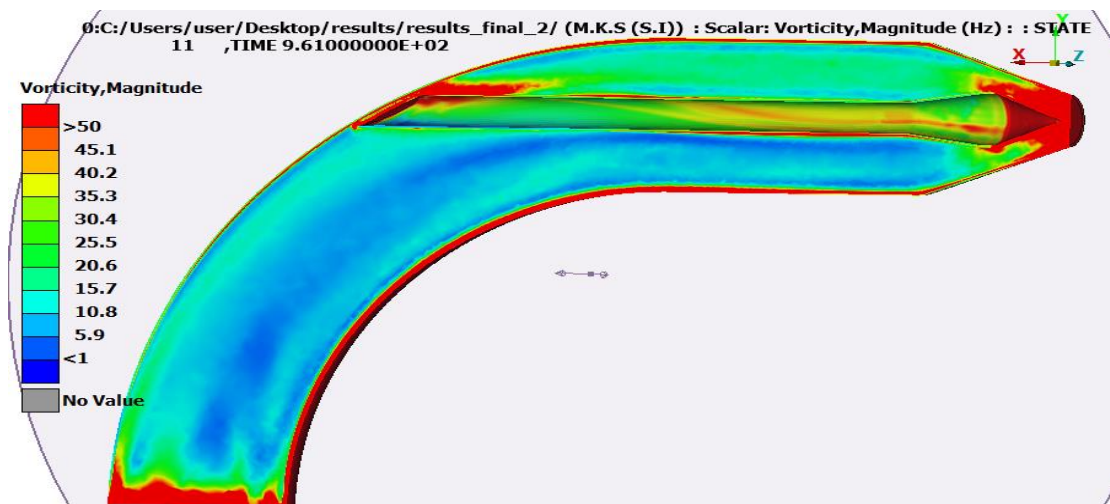


Εικόνα 196: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στο σημείο στένωσης της γεωμετρίας του αγωγού, με βάση την αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

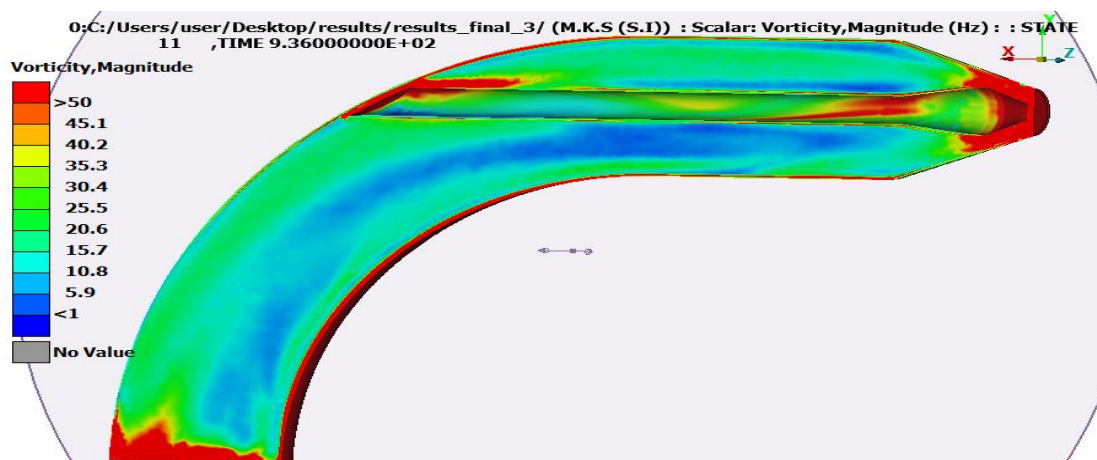
7.2.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ



Εικόνα 197: Διάγραμμα στροβιλισμού κατά μήκος του αγωγού, με αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

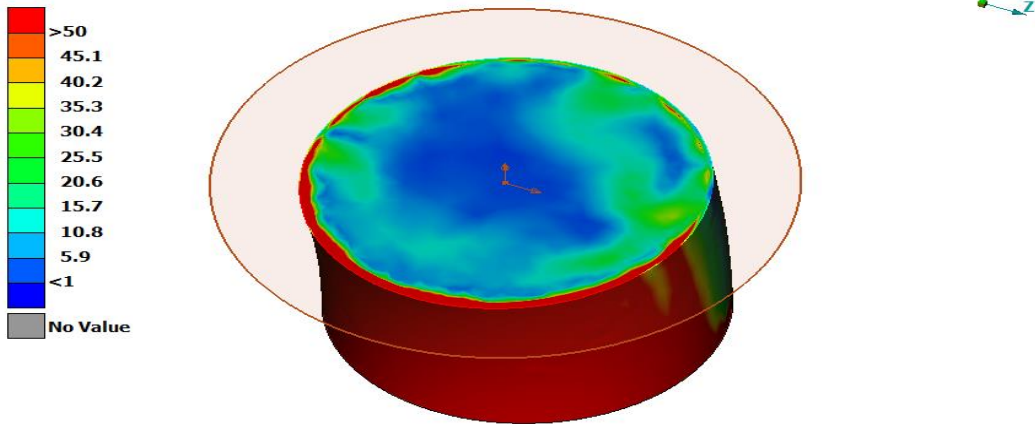


Εικόνα 198: Διάγραμμα στροβιλισμού κατά μήκος του αγωγού, με αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



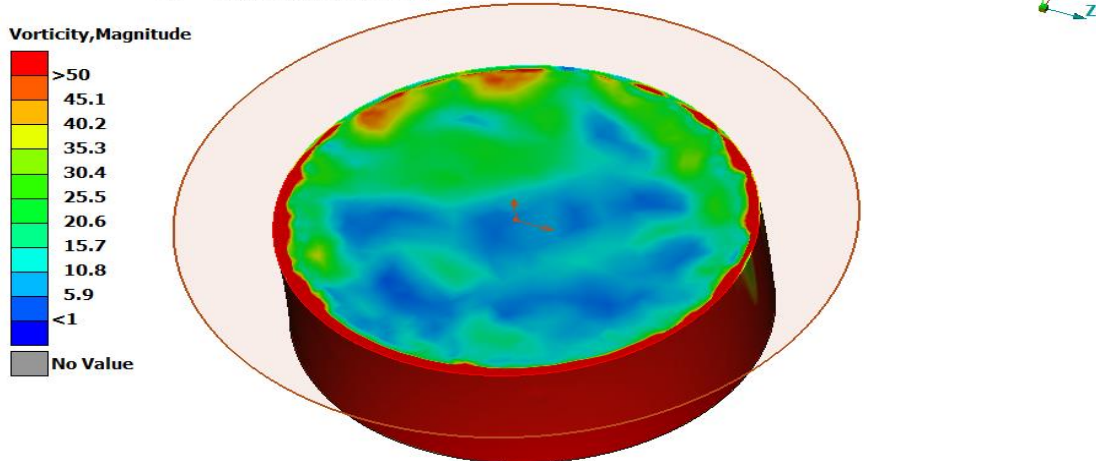
Εικόνα 199: Διάγραμμα στροβιλισμού κατά μήκος του αγωγού, με αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

1:C:/Users/user/Desktop/results/results_final_1/ (M.K.S (S.I)) : Scalar: Vorticity,Magnitude (Hz) : : STATE
19 ,TIME 1.72000000E+03



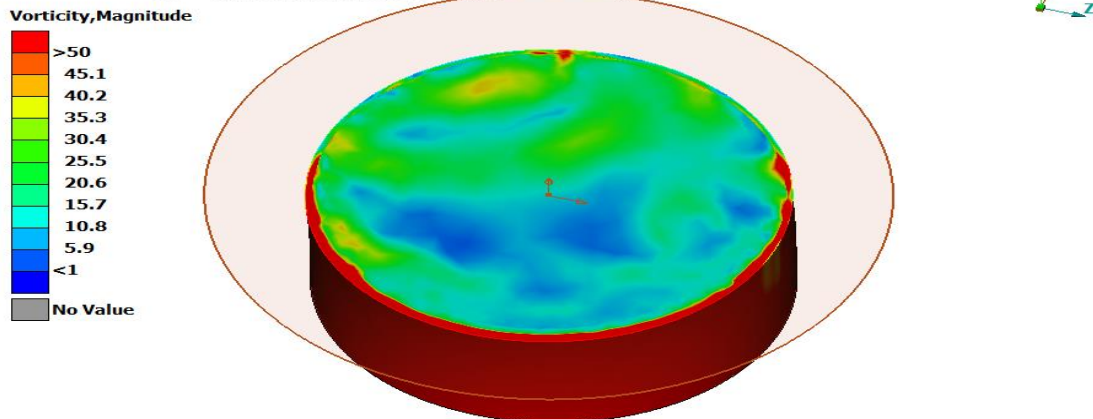
Εικόνα 200: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην είσοδο, με αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

0:C:/Users/user/Desktop/results/results_final_2/ (M.K.S (S.I)) : Scalar: Vorticity,Magnitude (Hz) : : STATE
11 ,TIME 9.61000000E+02

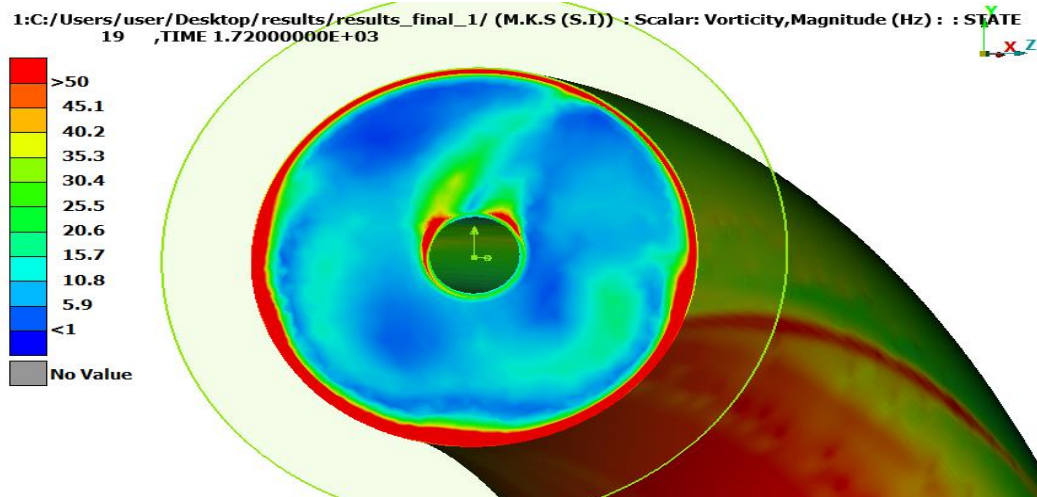


Εικόνα 201: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην είσοδο, με αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

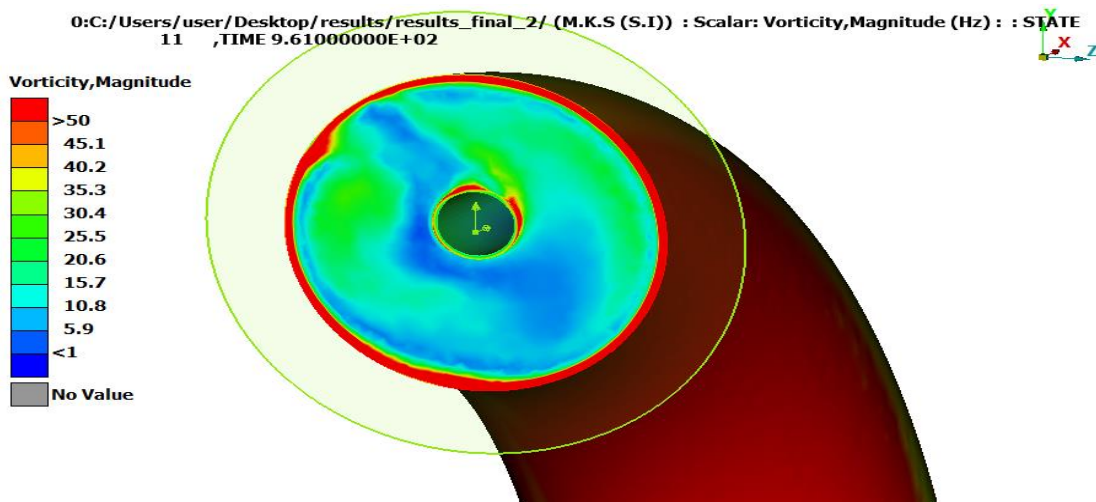
0:C:/Users/user/Desktop/results/results_final_3/ (M.K.S (S.I)) : Scalar: Vorticity,Magnitude (Hz) : : STATE
11 ,TIME 9.36000000E+02



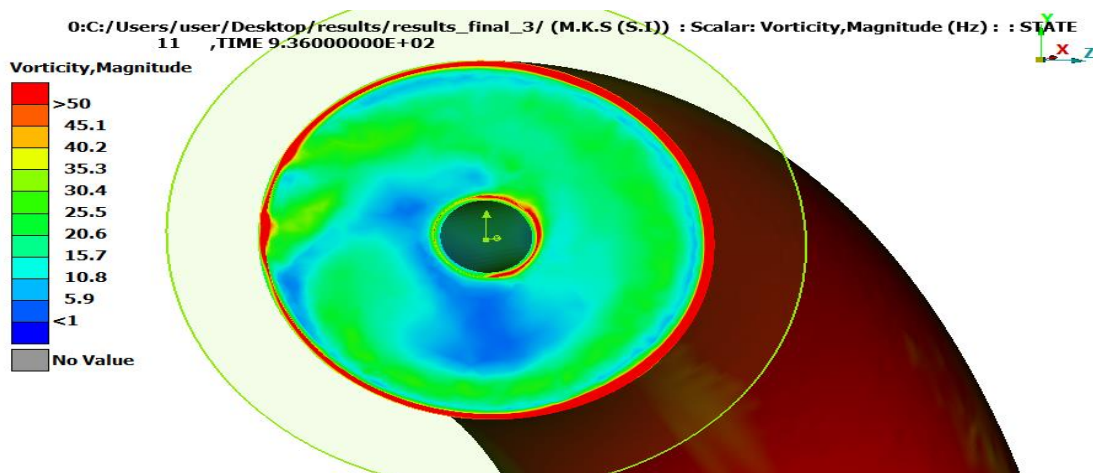
Εικόνα 202: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην είσοδο, με αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



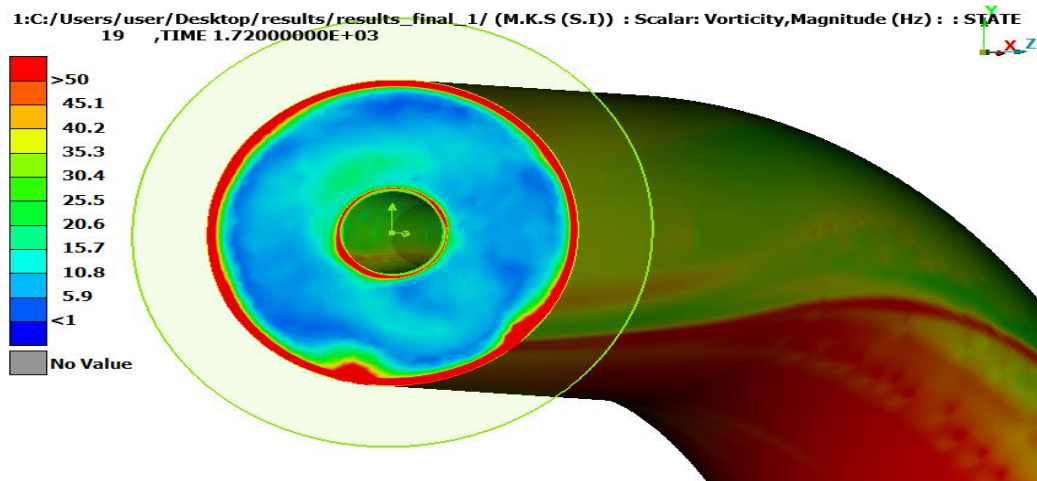
Εικόνα 203: Διάγραμμα στροβιλισμού στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



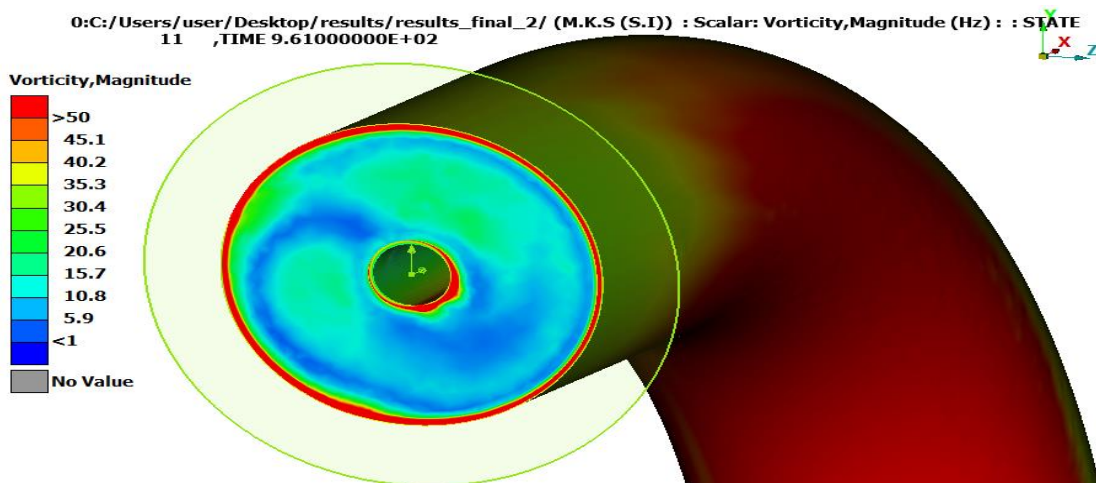
Εικόνα 204: Διάγραμμα στροβιλισμού στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



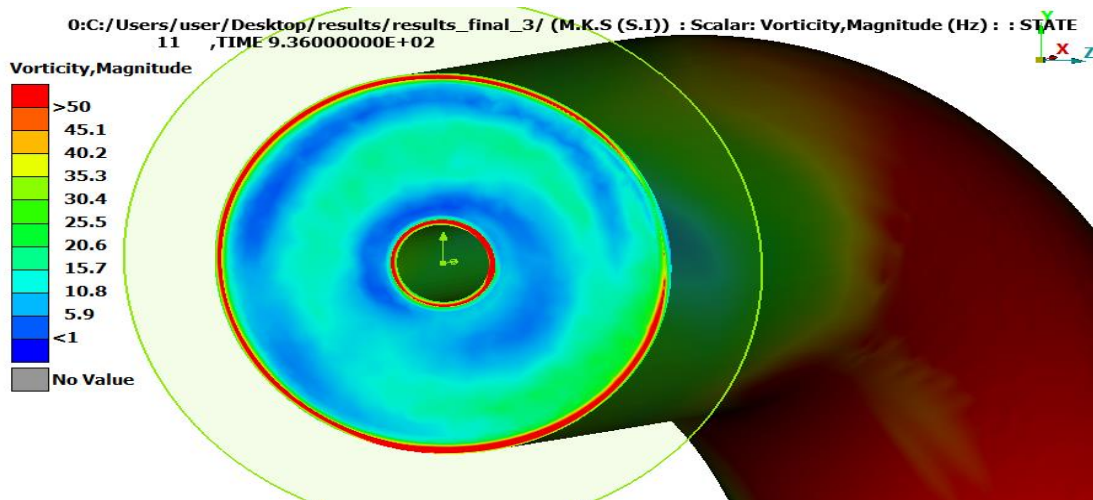
Εικόνα 205: Διάγραμμα στροβιλισμού στο σημείο που καμπυλώνει ο αγωγός, με αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



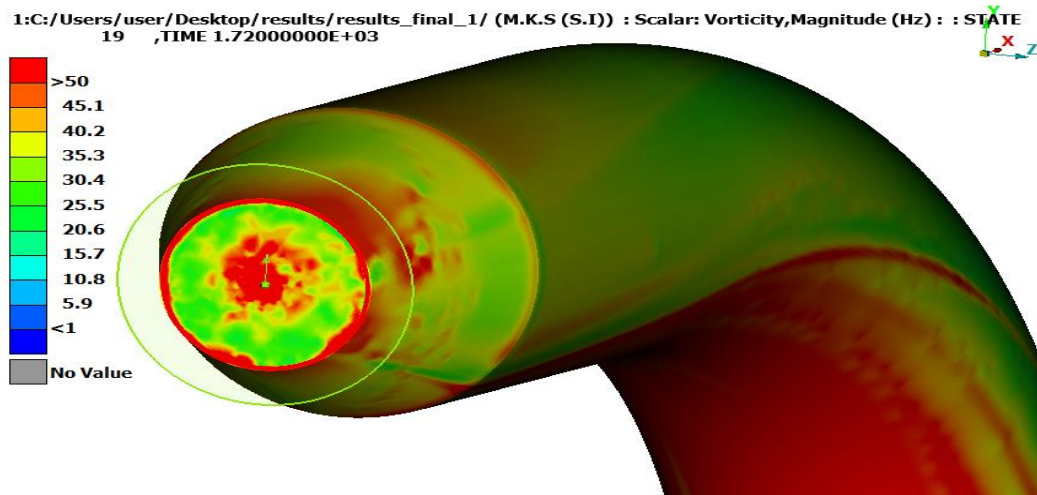
Εικόνα 206: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού, με αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



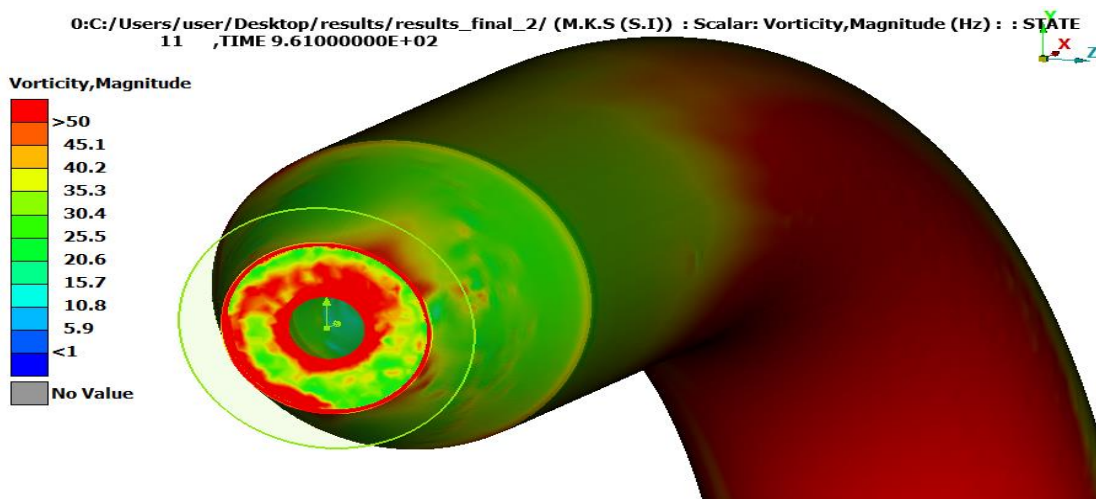
Εικόνα 207: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού, με αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



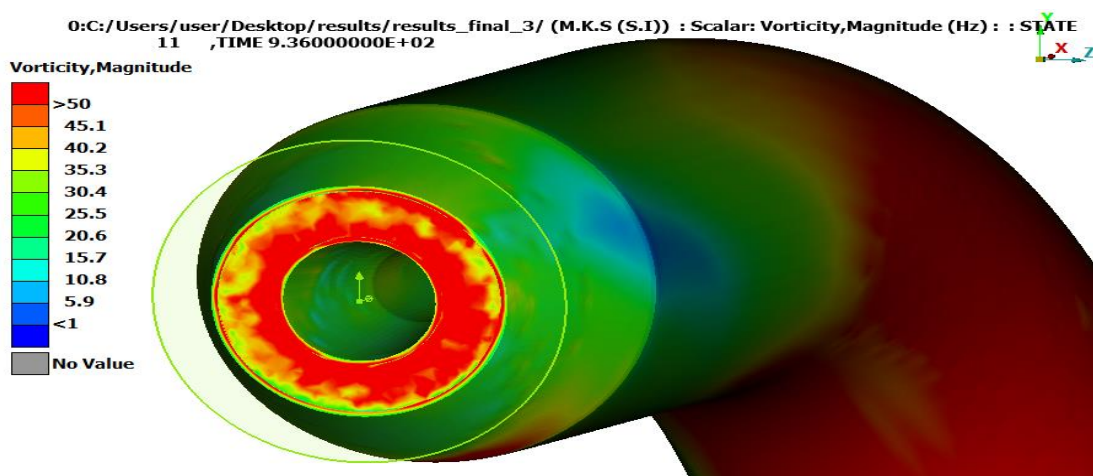
Εικόνα 208: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού, με αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 209: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην έξοδο, με αλλαγμένη κλίμακα, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 210: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην έξοδο, με αλλαγμένη κλίμακα, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).



Εικόνα 211: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην έξοδο, με αλλαγμένη κλίμακα, για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό META (έκδοση v21.0.1).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS-FLUENT

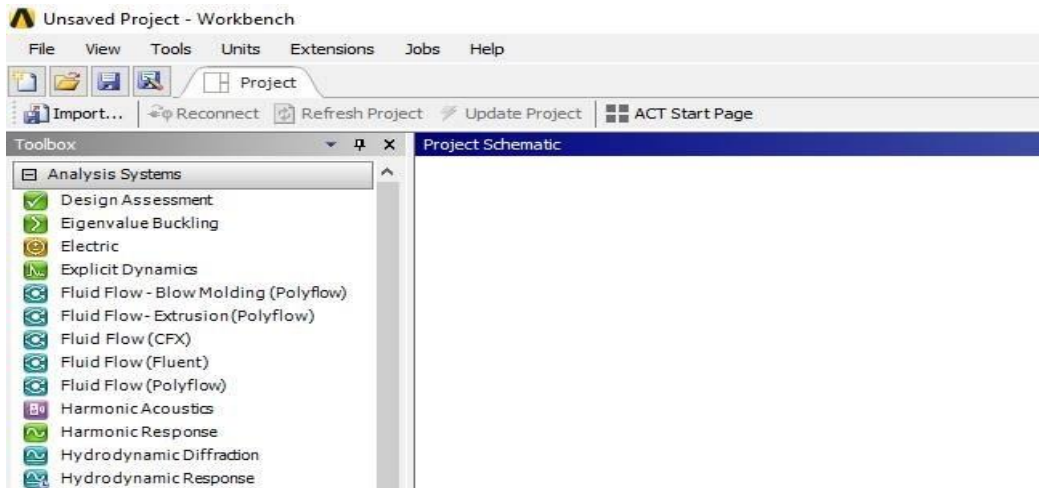
Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το META και παρουσιάστηκαν προηγουμένως με τα αντίστοιχα του λογισμικού ANSYS, ενός εξαιρετικά δημοφιλούς και εύχρηστου λογισμικού, το οποίο χρησιμοποιείται σε μια πληθώρα υπολογιστικών εφαρμογών, όπως στη μηχανική και αντοχή των υλικών (structural mechanics), αλλά και σε προβλήματα μετάδοσης θερμότητας (heat transfer) ή ροής ρευστών (fluid mechanics). Η παρουσία της σύγκρισης κρίθηκε σκόπιμη, ώστε να επιβεβαιώσει την ισχύ των προηγούμενων αποτελεσμάτων, αλλά παράλληλα να αποτελέσει σημείο αναφοράς για τους μελετητές οι οποίοι είναι πιο εξοικειωμένοι με το ANSYS σε σχέση με το Openfoam, αφού το ANSYS είναι ένα αρκετά πιο διαδεδομένο λογισμικό συγκριτικά με το Openfoam.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε επομένως το πρόγραμμα ANSYS σε συνδυασμό με τον επιλύτη Fluent, έναν από τους πολλούς που προσφέρει το λογισμικό για να ικανοποιήσει το εύρος των εφαρμογών που καλύπτει. Η εγκατάστασή του είναι σαφώς λιγότερο περίπλοκη από αυτή του λογισμικού Openfoam, ενώ τονίζεται ότι στο ANSYS μπορεί να δημιουργηθεί η γεωμετρία, το πλέγμα, να γίνει η επίλυση και να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα, δηλαδή όλα τα στάδια της υπολογιστικής διαδικασίας που περιγράφηκαν (Solidworks, ANSA, Openfoam και META) μπορούν να ικανοποιηθούν από ένα μόνο λογισμικό.

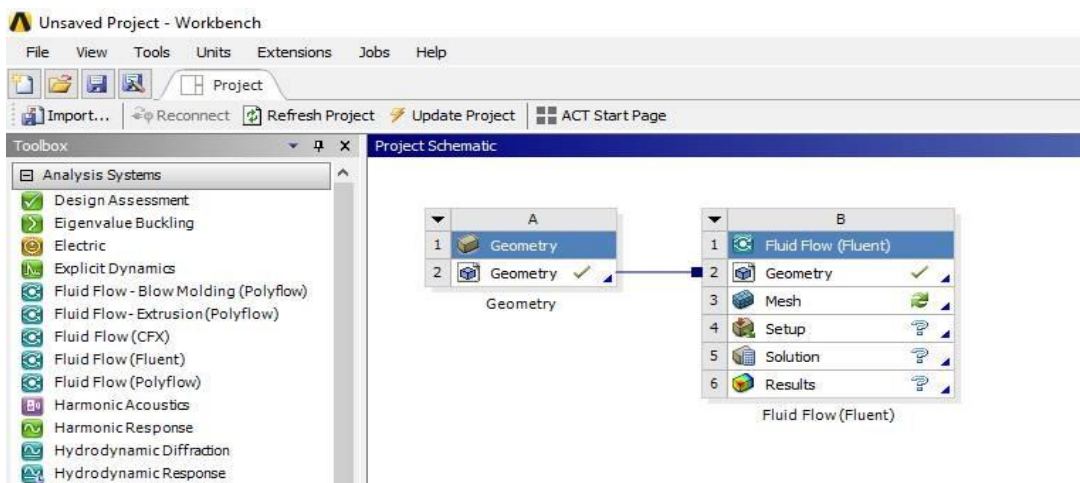
8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ

Αν και το ANSYS παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής της γεωμετρίας από την αρχή, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε η εισαγωγή του αρχείου .igs από το Solidworks, ώστε να διευκολυνθεί η διαδικασία. Στο περιβάλλον του ANSYS (η εκκίνηση γίνεται με την εφαρμογή ANSYS Workbench) όπως γίνεται αντιληπτό, η εισαγωγή της γεωμετρίας επιτυγχάνεται με την εντολή import πάνω αριστερά.

Έπειτα επιλέγεται το κατάλληλο αρχείο .igs και αυτόματα δημιουργείται ένας μικρός πίνακας με το όνομα A. Στη συνέχεια επιλέγεται από την αριστερή στήλη ο επιλύτης Fluent και αυτομάτως δημιουργείται ένας δεύτερος μεγαλύτερος πίνακας με την ονομασία B. Η σύνδεση των δύο πινάκων επιτυγχάνεται αν, πατώντας παρατεταμένα το αριστερό κλικ του ποντικιού, συρθεί το κελί Geometry του πίνακα A μέχρι να συναντήσει το αντίστοιχο κελί Geometry του πίνακα B. Η τελική μορφή στο περιβάλλον Workbench διακρίνεται αμέσως παρακάτω.



Εικόνα 212: Το περιβάλλον Workbench του ANSYS. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



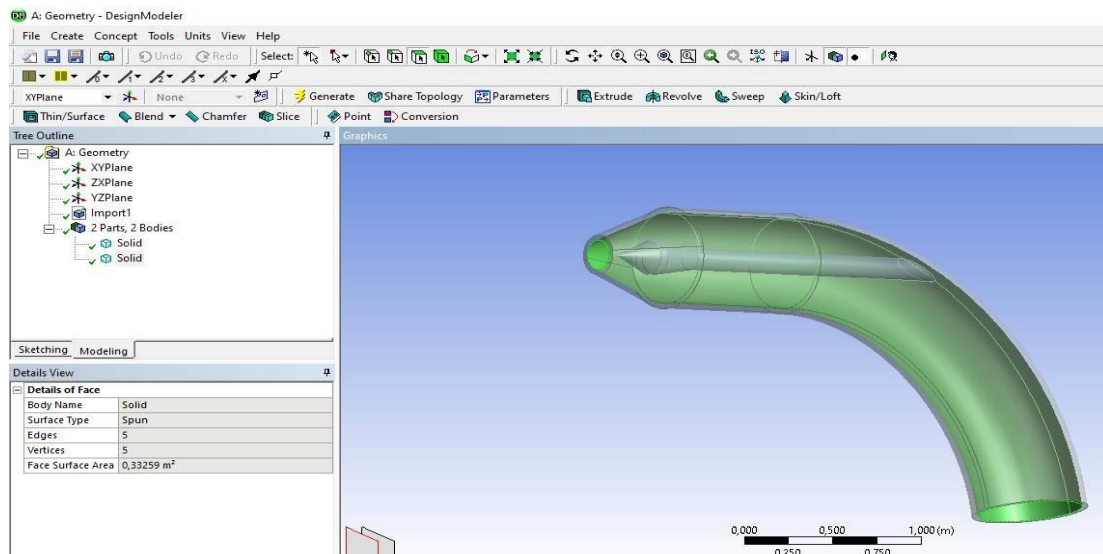
Εικόνα 213: Η ενοποίηση των δύο πινάκων. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

Μετά την εισαγωγή της γεωμετρίας λαμβάνει χώρα μια υποτυπώδης επεξεργασία της, η οποία διευκολύνει τα επόμενα στάδια της διαδικασίας, κυρίως όταν πρέπει να οριστούν οι συνοριακές συνθήκες. Συγκεκριμένα επιλέγοντας με δεξί κλικ το κελί Geometry του πίνακα A και κατόπιν την εντολή Edit Geometry in DesignModeler ανοίγει ένα καινούριο γραφικό περιβάλλον. Εκεί επιλέγοντας την εντολή Generate εμφανίζεται αυτόματα η γεωμετρία που εισήγαγε ο μελετητής. Η μετακίνηση της γεωμετρίας επιτυγχάνεται εύκολα με τη βοήθεια του μεσαίου κλικ (πατώντας δηλαδή τη ροδέλα του ποντικιού).

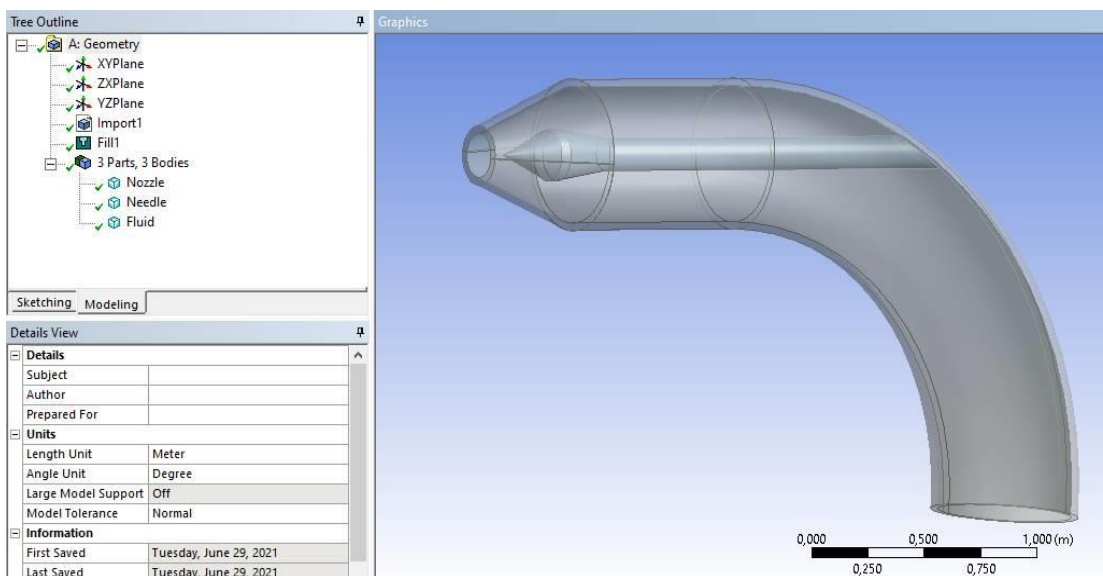
Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί μια σημαντικότερη διαφορά μεταξύ της γεωμετρίας που μελετάται στο Openfoam και αυτής που μελετάται στο ANSYS. Συγκεκριμένα η γεωμετρία στο ANSYS έχει υποστεί μια επιπρόσθετη επεξεργασία στο Solidworks, έτσι ώστε το κέλυφος να έχει μεγαλύτερο πάχος, ενώ αντίθετα στη γεωμετρία που εισήχθη στο Openfoam δεν υπάρχει πάχος στο κέλυφος. Αυτή η αλλαγή, που δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τα τελικά αποτελέσματα, έλαβε χώρα, διότι το ANSYS αναγνωρίζει το εσωτερικό του αγωγού ως ξεχωριστό κομμάτι της γεωμετρίας, κατατάσσοντάς το στην κατηγορία fluid, ενώ η υπόλοιπη γεωμετρία κατατάσσεται στην κατηγορία solid.

Επομένως, αρχικά το Design Modeler αναγνωρίζει δύο τμήματα της γεωμετρίας που αντιστοιχούν ουσιαστικά στο nozzle και το needle. Μετακινώντας κατάλληλα τη γεωμετρία ο μελετητής επιλέγει με αριστερό κλικ και με τη βοήθεια του πλήκτρου Ctrl τα εσωτερικά τοιχώματα του κελύφους και κατόπιν από την εντολή Tools, επιλέγεται το Fill και διαδοχικά τα Apply και Generate.

Αυτομάτως προστίθεται άλλο ένα part, το οποίο, αν και αρχικά έχει την προεπιλεγμένη ονομασία Solid όπως και τα υπόλοιπα (υπάρχει δυνατότητα μετονομασίας), ανήκει στην κατηγορία Fluid και αυτό φαίνεται από τις ιδιότητές του όταν επιλεγεί. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η μετονομασία των τμημάτων (parts), με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνεται εύκολα αντιληπτή η αντιστοιχία μεταξύ parts και τμημάτων της γεωμετρίας. Η τελική μορφή της γεωμετρίας μετά την επεξεργασία αυτή διακρίνεται στη συνέχεια.



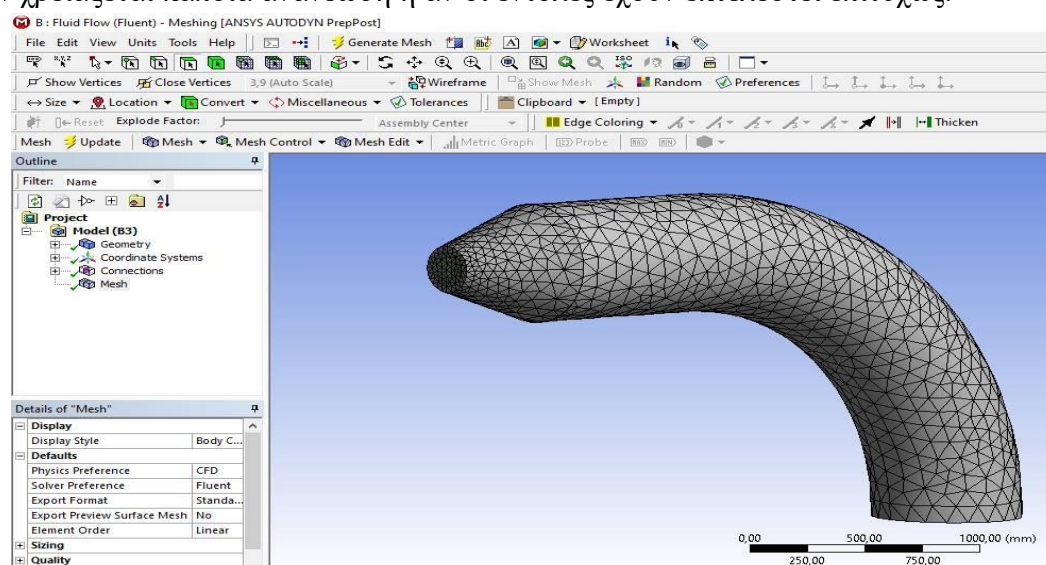
Εικόνα 214: Η κατασκευή του τμήματος για το Fluid με τη βοήθεια της εντολής Fill από τη γραμμή εργαλείων Tools. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



Εικόνα 215: Η τελική μορφή της γεωμετρίας. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

8.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (PRE PROCESSING)

Σε αυτή τη δεύτερη ενότητα περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται το πλέγμα στην ήδη επεξεργασμένη γεωμετρία. Συγκεκριμένα με την εκκίνηση του γραφικού περιβάλλοντος για το Meshing και έπειτα από λίγο, εμφανίζεται η γεωμετρία. Με την εντολή Generate Mesh παράγεται το πλέγμα, ωστόσο για να φανεί και οπτικά το αποτέλεσμα ο μελετητής επιλέγει την εντολή Mesh που βρίσκεται στην αριστερή στήλη. Το αν έχει δημιουργηθεί ή όχι το πλέγμα γίνεται εύκολα αντιληπτό, καθώς μπροστά από τις εντολές της αριστερής στήλης, υπάρχουν ορισμένα μικρά σύμβολα, που υποδεικνύουν αν υπάρχει κάποιο πρόβλημα, αν χρειάζεται κάποια ανανέωση ή αν οι εντολές έχουν εκτελεστεί επιτυχώς.



Εικόνα 216: Η δημιουργία του πλέγματος στο ANSYS Meshing. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

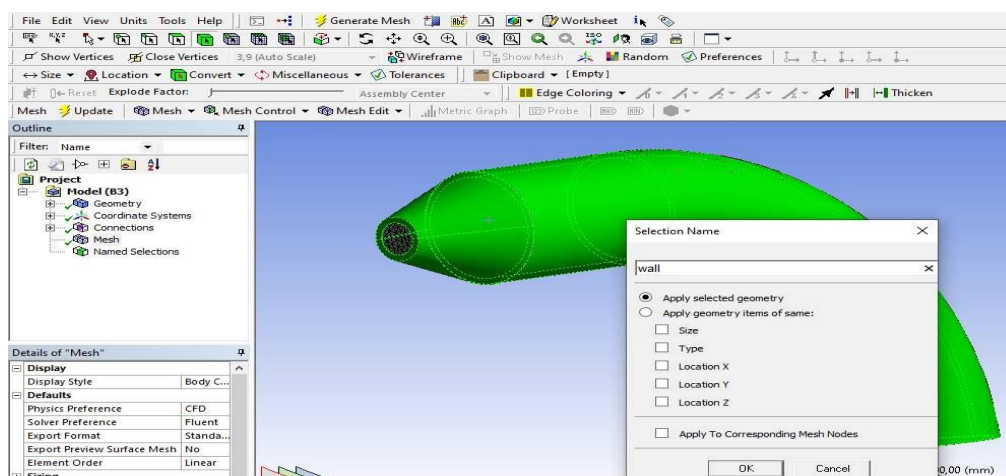
Συγκεκριμένα, δίπλα από το Mesh αρχικά υπάρχει ένα σύμβολο κίτρινου χρώματος στο σχήμα του κεραυνού, κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι ο μελετητής πρέπει να επιλέξει το Generate ή γενικότερα το Update. Μετά τη δημιουργία του πλέγματος, το σύμβολο αποκτά τη μορφή ενός πράσινου νι (τικ), το οποίο υποδηλώνει την επιτυχή περάτωση της διαδικασίας. Σε σπανιότερες περιπτώσεις εμφανίζεται το σύμβολο με ένα μικρό κόκκινο θαυμαστικό, το οποίο ενημερώνει τον μελετητή για κάποιο σφάλμα που εντοπίστηκε κατά τη διαδικασία. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να γίνει επανέλεγχος και να εξεταστούν οι πιθανές αιτίες του προβλήματος.

Επισημαίνεται στο σημείο αυτό πως, αν και το ANSYS διαθέτει μεθόδους για την πυκνωση του πλέγματος, δεν χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα γεωμετρία, καθώς κρίθηκε ότι το πλέγμα είναι ήδη αρκετά πυκνό και σε θέση να αντικατοπτρίσει ικανοποιητικά τις ιδιαιτερότητες της ροής.

Στη συνέχεια είναι απαραίτητο να οριστούν πιο αναλυτικά οι περιοχές της γεωμετρίας. Μετά τον αρχικό διαχωρισμό σε περιοχές solid και fluid στο Design Modeler, πλέον πρέπει να οριστούν οι περιοχές inlet, outlet, αλλά και οι υπόλοιπες κατ' αναλογία με τα PID που ορίστηκαν στο ANSA. Στην προκειμένη περίπτωση, η

γεωμετρία διαχωρίζεται σε 4 βασικά τμήματα, στα inlet, outlet, wall και fluid domain, το οποίο αντιστοιχεί στο fluid που ορίστηκε στο Design Modeler.

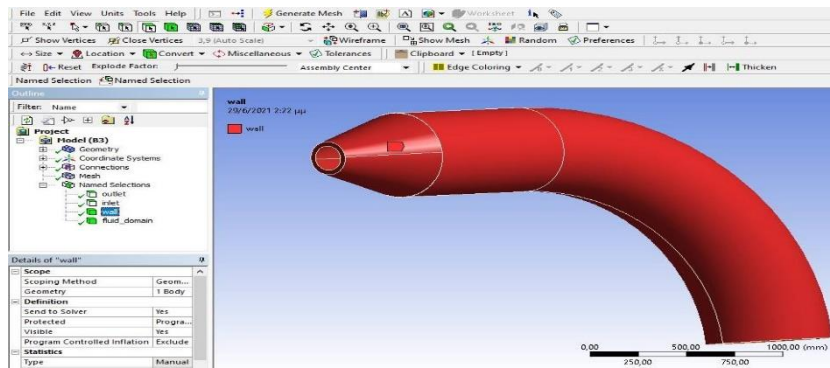
Για να οριστούν οι περιοχές αυτές αρκεί να επιλέξει ο μελετητής την περιοχή που επιθυμεί να ονομάσει και με δεξί κλικ να επιλέξει το Create Named Selection. Η επιλογή γίνεται με ορθό τρόπο μόνο αν γίνει πράσινη η περιοχή που επιλέγει ο μελετητής, όπως φαίνεται και στην εικόνα 217. Μόλις οριστούν όλες οι περιοχές, ο μελετητής μπορεί να ελέγξει αν όντως το πρόγραμμα έφτιαξε σωστά τις περιοχές, όπως διακρίνεται στην εικόνα 218.



Εικόνα 217: Η δημιουργία των περιοχών της γεωμετρίας. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

Ας τονιστεί επιπρόσθετα ότι το ANSYS έχει ακόμη ένα χαρακτηριστικό που διευκολύνει ιδιαίτερα τον μελετητή κατά τον ορισμό των PID της γεωμετρίας. Συγκεκριμένα στη γραμμή εργαλείων ακριβώς κάτω από το Tools υπάρχουν 4 κύβοι, ωστόσο το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στους δύο δεξιότερους, με την ονομασία Face και Body αντίστοιχα. Με το Face επιλέγονται οι περιοχές inlet και outlet, καθώς αποτελούν επιφάνειες, ενώ με το Body επιλέγονται τα wall και fluid domain, που είναι όγκοι και αναφέρονται σε όλη τη γεωμετρία.

Οι ονομασίες των περιοχών διακρίνονται στην ακόλουθη εικόνα, ενώ άξια παρατήρησης είναι η διαφορά στα σύμβολα μπροστά από τις περιοχές, με τον κύβο στο face να έχει μία έδρα πράσινη, ενώ ο κύβος στο body είναι εξ ολοκλήρου πράσινος, ακριβώς όπως και οι κύβοι στη γραμμή εργαλείων κάτω από το Tools. Στο Workbench, μετά την έξοδο από το Meshing και πριν το Setup προτείνεται να γίνει ένα Update στο Meshing, ώστε το σύμβολο του κίτρινου κεραυνού να γίνει πράσινο νι (τικ).



Εικόνα 218: Ο έλεγχος για την ορθότητα των περιοχών που διαιρούν τη γεωμετρία. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

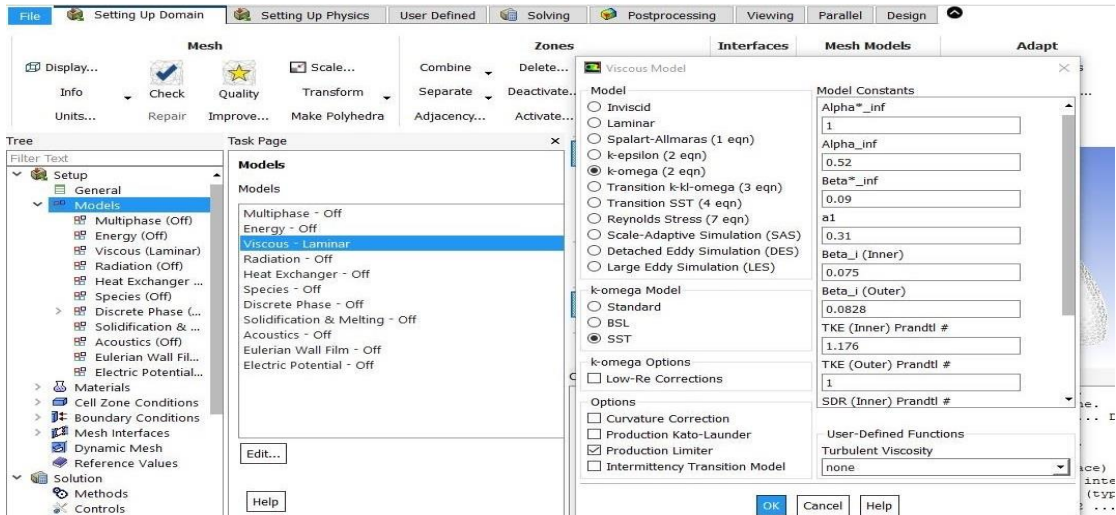
8.3 ΡΥΘΜΙΣΗ ΚΥΡΙΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ (SOLVING)

Σε αυτό το στάδιο ξεκινά η εισαγωγή των βασικών παραμέτρων που είναι απαραίτητες για τη διεξαγωγή της επίλυσης, ενώ τελικά πραγματοποιείται και η ίδια η επίλυση. Ανοίγοντας το κελί Setup στο Workbench, εμφανίζεται το γραφικό περιβάλλον του αλγορίθμου επίλυσης Fluent, με τη βοήθεια του οποίου ορίζονται με εύκολο τρόπο οι συνθήκες της επίλυσης. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά ο αλγόριθμος διαβάζει τη γεωμετρία και το πλέγμα και πλέον είναι σε θέση να δεχτεί τις ρυθμίσεις του μελετητή. Η πρώτη κύρια ρύθμιση συνίσταται στην επιλογή μοντέλου τύρβης, όπου, όπως και στο Openfoam, επιλέγεται το μοντέλο kOmega SST. Με διπλό κλικ στην καρτέλα models και edit στο μοντέλο viscous-laminar, επιλέγεται το μοντέλο kOmega SST και αυτομάτως ορίζονται μερικές σταθερές παράμετροι, όπως φαίνεται και στην εικόνα 219.

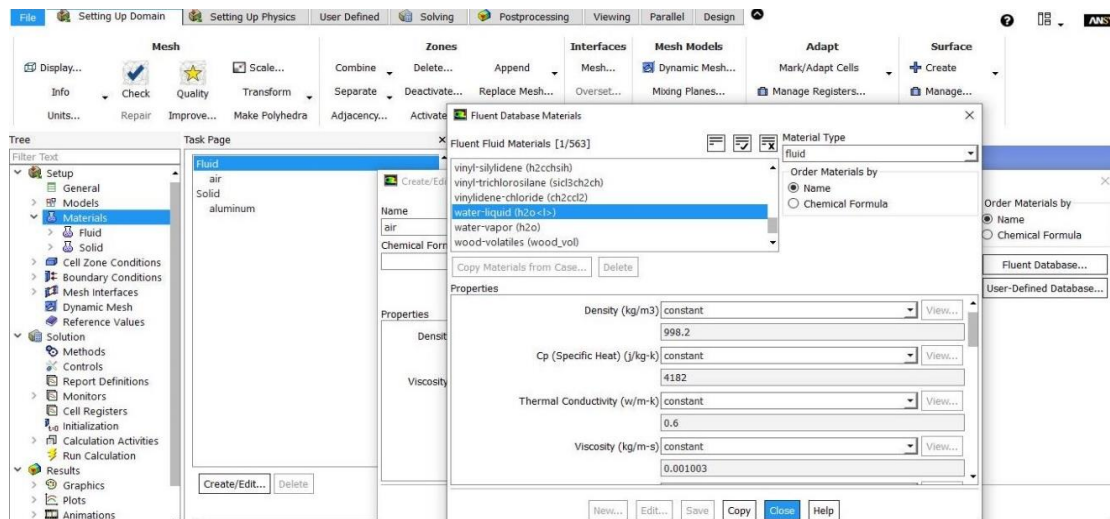
Στη συνέχεια είναι απαραίτητο να οριστούν σωστά οι παράμετροι που αφορούν τα υλικά (materials) που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση αυτή. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αντί των προεπιλεγμένων υλικών αέρας και αλουμίνιο, γίνεται αντικατάσταση με τα υλικά νερό (σε υγρή μορφή) (δηλαδή water liquid) και χάλυβας (steel). Επιλέγοντας Create/Edit στο Fluid και ανοίγοντας το Fluent Database, ο μελετητής επιλέγει το water liquid πατώντας copy και κατόπιν το close 2 φορές, ώστε να κλείσουν τα αναδυόμενα παράθυρα, όπως φαίνεται στην εικόνα 220.

Ομοίως με Create/Edit στο Solid και άνοιγμα του Fluent Database εμφανίζεται και πάλι η επιλογή υλικών για το Fluid. Για να εμφανιστεί όμως η επιλογή υλικών για το Solid, ο μελετητής πρέπει να επιλέξει από το Material Type το Solid και έπειτα μπορεί να διαλέξει το steel, όπως γίνεται αντιληπτό από την εικόνα 221, και να το αντιγράψει στην καρτέλα Materials πατώντας copy και close 2 φορές, για να κλείσουν και πάλι τα αναδυόμενα παράθυρα.

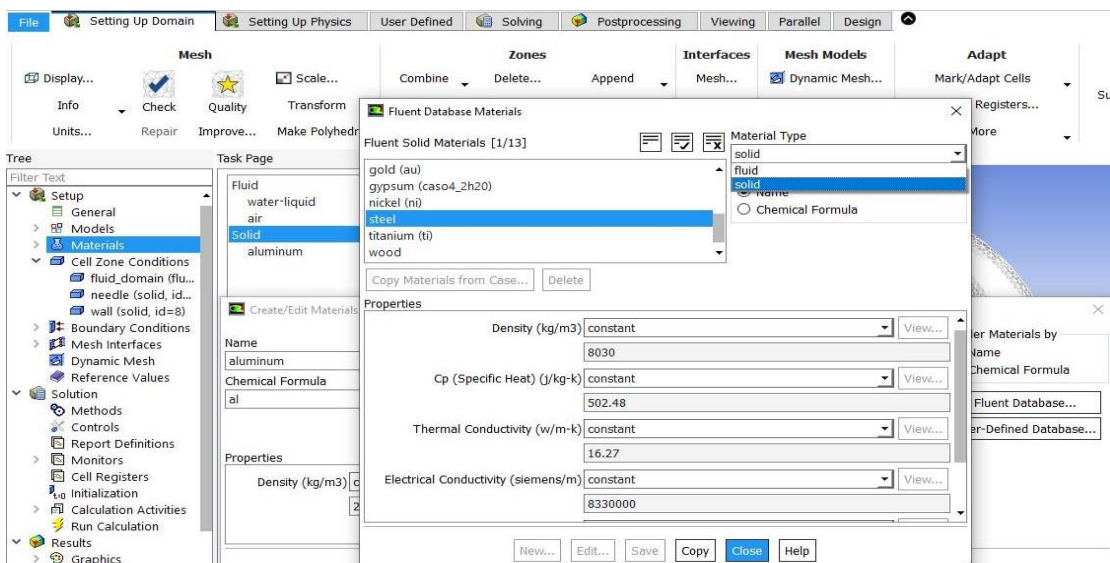
Στη συνέχεια κρίνεται απαραίτητο να οριστούν σωστά οι παράμετροι που αφορούν τα cell zone conditions. Στην καρτέλα αυτή υπάρχουν τα βασικά τμήματα της γεωμετρίας (fluid_domain, needle και wall) τα οποία έχουν τα προεπιλεγμένα υλικά, δηλαδή τον αέρα και το αλουμίνιο. Συνεπώς αυτό πρέπει να αλλάξει και να αντικατασταθούν από το νερό και το χάλυβα αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες ρυθμίσεις στις εικόνες 222 και 223 παραμένουν αμετάβλητες.



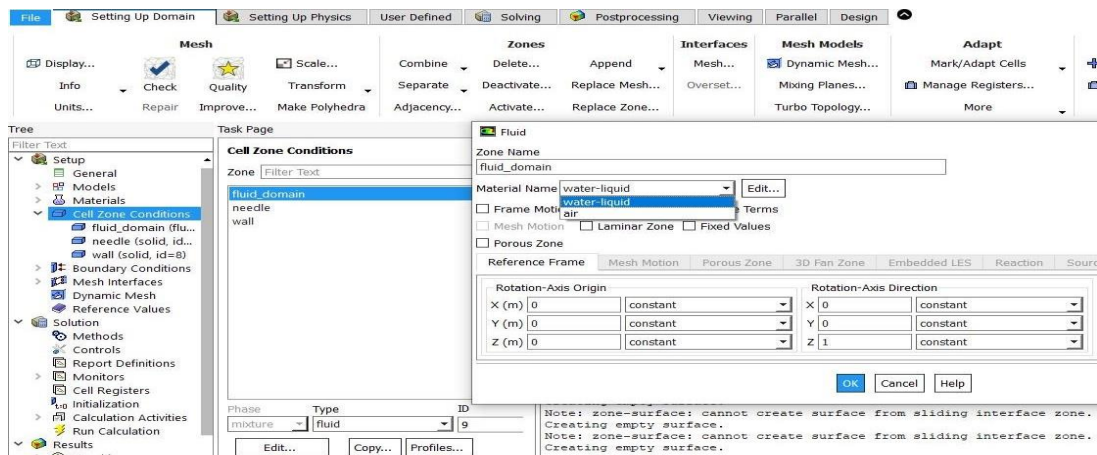
Εικόνα 219: Ο ορισμός του μοντέλου τύρβης kOmega SST. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



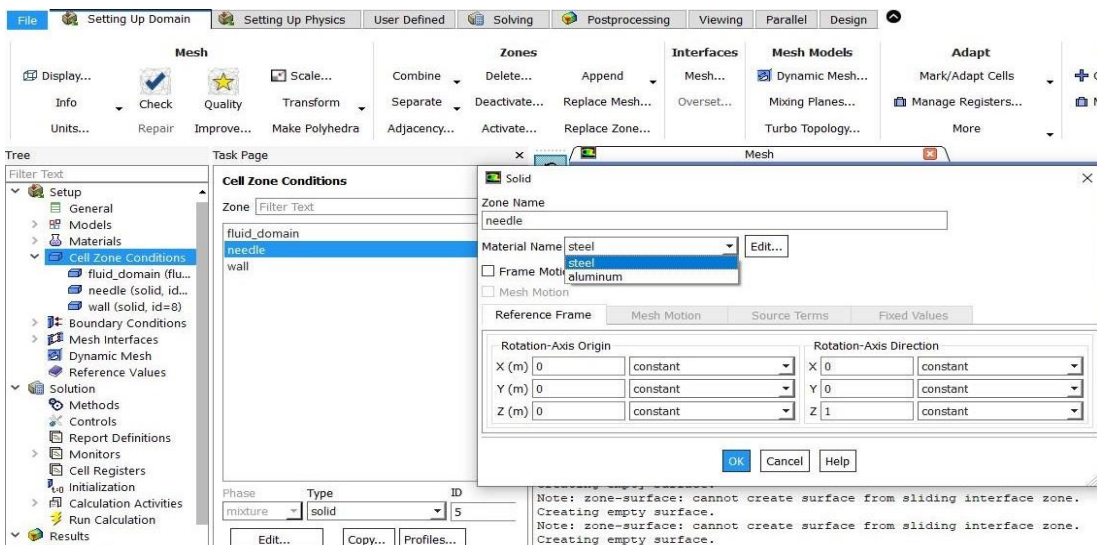
Εικόνα 220: Η επιλογή του water liquid ως material για το fluid. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



Εικόνα 221: Η επιλογή του steel ως material για το solid. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



Εικόνα 222: Οι ρυθμίσεις για το material του fluid στο cell zone conditions.
 Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



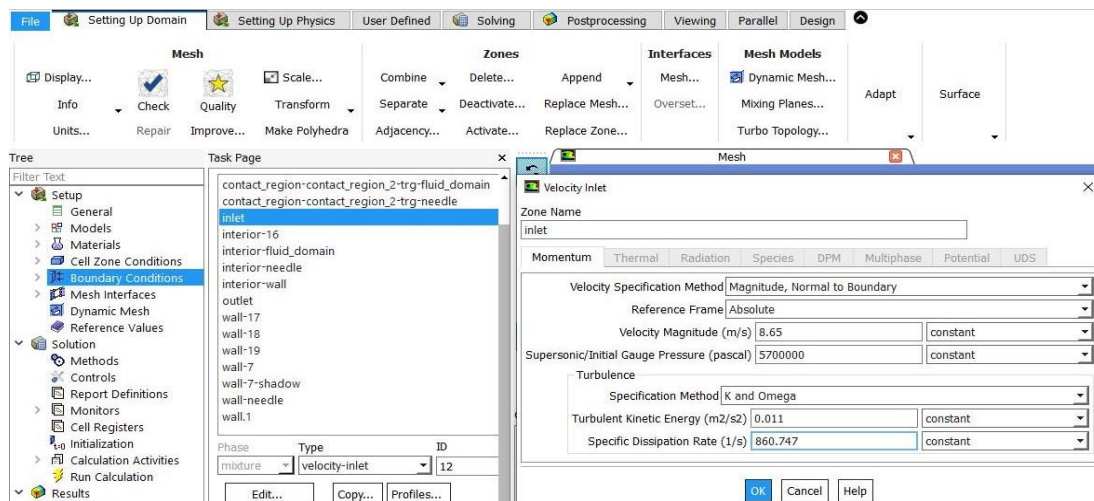
Εικόνα 223: Οι ρυθμίσεις για το material του solid στο cell zone conditions. Ότι ισχύει για το needle ισχύει και για το wall. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να οριστούν και οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος, οι οποίες καλό είναι να συμφωνούν με τις αντίστοιχες στο Openfoam, ώστε η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο λογισμικών να γίνεται υπό τις ίδιες συνθήκες. Οι περισσότερες περιοχές της γεωμετρίας που έχει εντοπίσει το Fluent έχουν λάβει τις σωστές συνοριακές συνθήκες και δεν απαιτούν κάποια παρέμβαση από τον μελετητή. Ωστόσο υπάρχουν και κάποιες άλλες περιοχές που χρειάζονται μια επεξεργασία. Συγκεκριμένα τα inlet και outlet πρέπει να λάβουν τις κατάλληλες τιμές που ανταποκρίνονται στην υπό εξέταση περίπτωση.

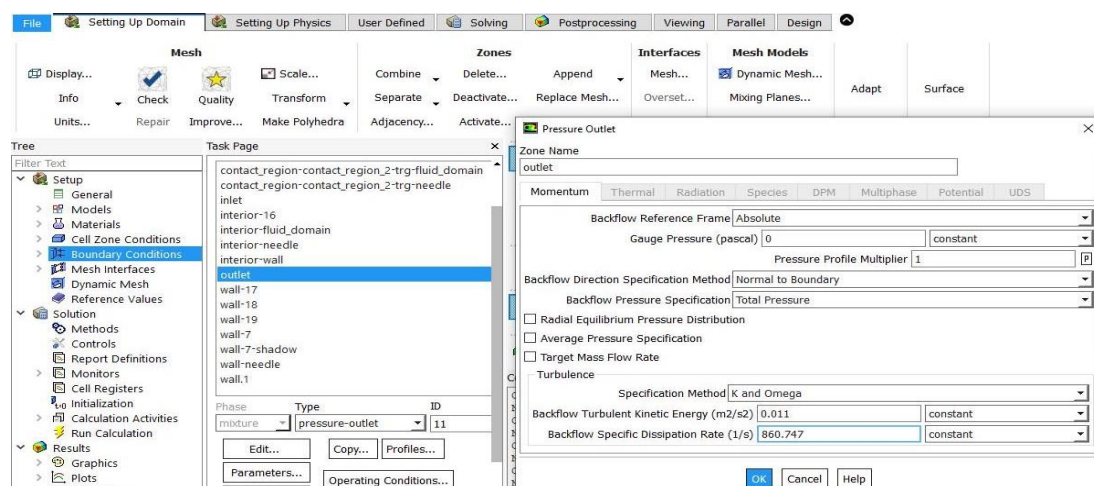
Αρχικά η περιοχή inlet διαθέτει συνοριακή τύπου velocity inlet, κάτι το οποίο είναι επιθυμητό, αρκεί να οριστούν οι κατάλληλες τιμές πίεσης και ταχύτητας. Επιλέγοντας την περιοχή inlet και πατώντας edit, ανοίγει ένα νέο παράθυρο στο οποίο ο μελετητής μπορεί να πραγματοποιήσει τις κατάλληλες ρυθμίσεις, όπως φαίνεται και στην εικόνα 224. Επισημαίνεται και εδώ, όπως και στο κεφάλαιο με τα αποτελέσματα του META, ότι η μανομετρική πίεση (gauge pressure) έχει υπολογιστεί με στρογγυλοποιήσεις γύρω στα 58 bar, ωστόσο αν χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη ακρίβεια, η σωστή τιμή της ανέρχεται περίπου στα 57 bar. Θεωρητικά οι

δύο τιμές δεν απέχουν ιδιαίτερα, ωστόσο στην απεικόνιση των αποτελεσμάτων η διαφορά είναι αισθητή.

Αντίστοιχα στην εικόνα 225 παρουσιάζονται οι αλλαγές που αφορούν τη συνοριακή συνθήκη εξόδου (τύπου pressure outlet). Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι οι υπολογισμοί έγιναν με βάση τις τιμές των k και ω που προέκυψαν από το Openfoam. Αν ο μελετητής δεν διαθέτει αυτά τα δεδομένα (πχ σε περίπτωση που εργαζόταν αποκλειστικά με το ANSYS), θα μπορούσε να αφήσει αμετάβλητη την προεπιλεγμένη μέθοδο υπολογισμού με το intensity και viscosity ratio ή να αλλάξει μόνο τις τιμές της.



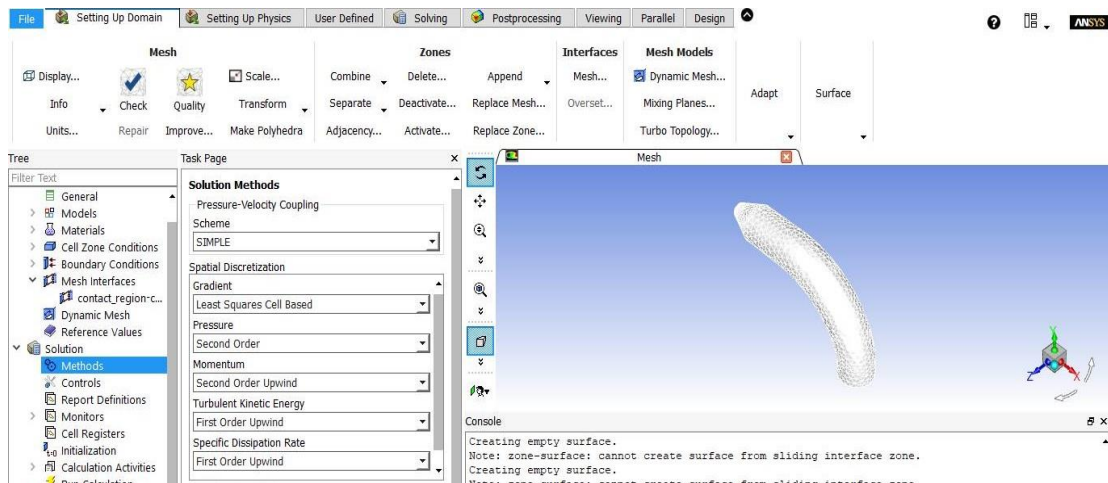
Εικόνα 224: Η συνοριακή συνθήκη για την είσοδο (velocity inlet). Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



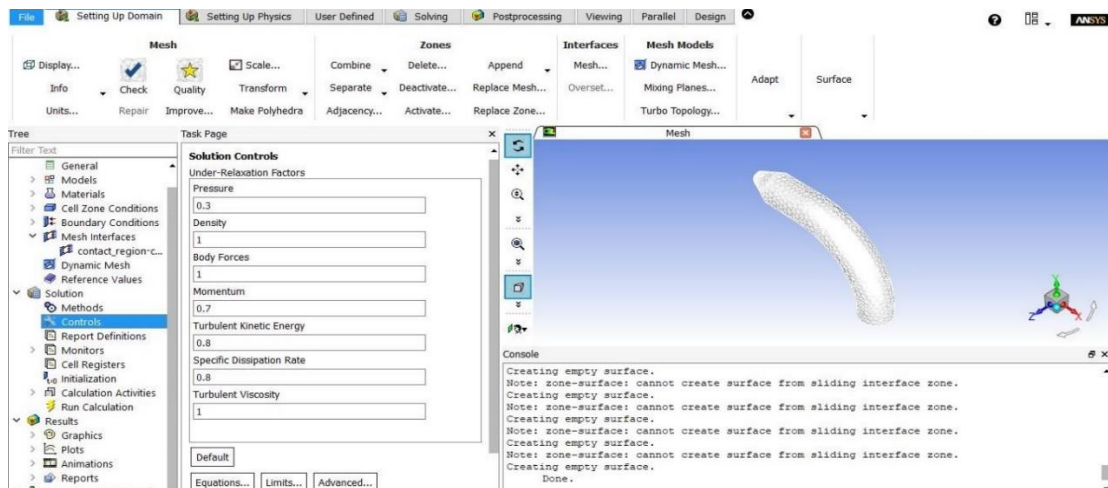
Εικόνα 225: Η συνοριακή συνθήκη για την έξοδο (pressure outlet). Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

Στο σημείο αυτό ξεκινά ουσιαστικά η αντίστροφη μέτρηση για την επίλυση, καθώς πραγματοποιούνται οι ρυθμίσεις για τον αλγόριθμο της επίλυσης και τα κριτήρια της σύγκλισης, ενώ γίνεται και μια αρχικοποίηση, η οποία αποτελεί μια βάση αναφοράς για την έναρξη της επίλυσης. Κατ' αναλογία με το Openfoam επιλέγεται steady state αλγόριθμος (συγκεκριμένα ο Simple), καθορίζονται τα κριτήρια σύγκλισης (είναι στην επιλογή του μελετητή πόσο αυστηρά ή ελαστικά θα

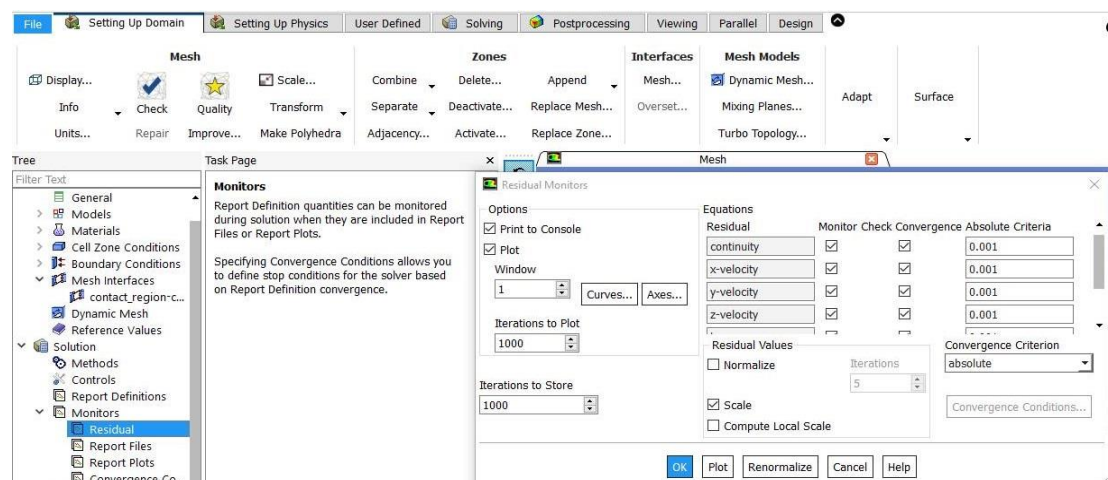
είναι) και τέλος λαμβάνει χώρα και η αρχικοποίηση, η οποία είθισται να γίνεται από την περιοχή inlet (standard initialization), και αρκεί η επιλογή της εντολής initialize.



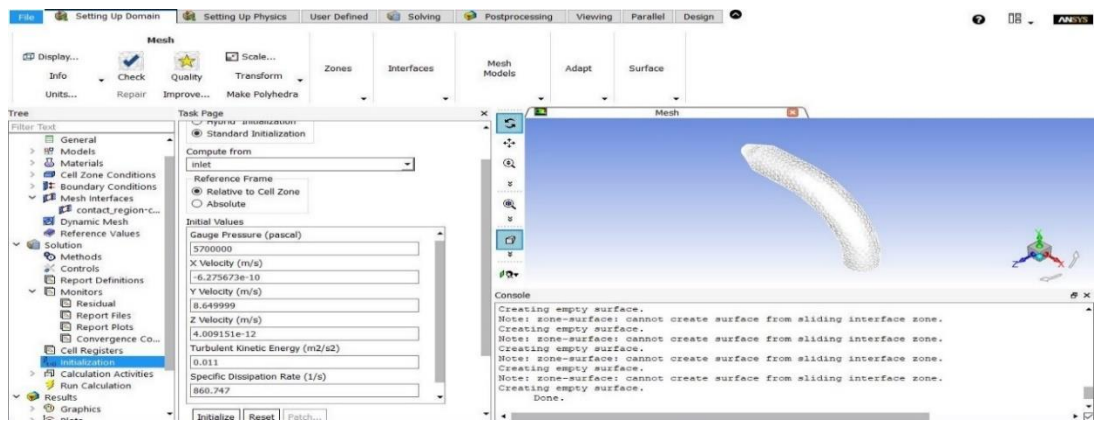
Εικόνα 226: Επιλογή αλγορίθμου επίλυσης (επιλύτη). Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



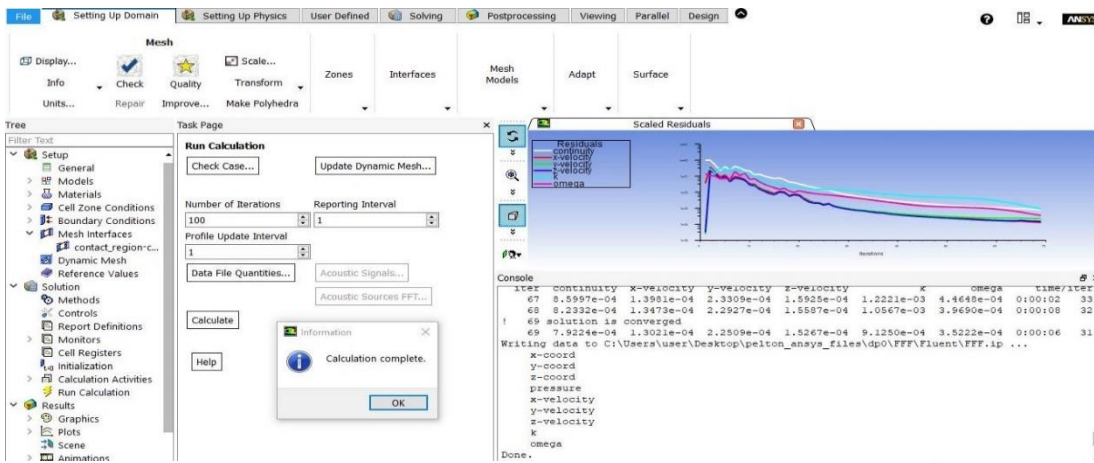
Εικόνα 227: Οι παράγοντες χαλάρωσης των βασικών μεταβλητών. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



Εικόνα 228: Τα κριτήρια σύγκλισης της επίλυσης. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



Εικόνα 229: Η καρτέλα της αρχικοποίησης. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



Εικόνα 230: Η ολοκλήρωση της επίλυσης με τη σύγκλιση του κώδικα. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

Αφού πραγματοποιήθηκαν όλες οι απαιτούμενες ρυθμίσεις, αρκεί να ξεκινήσει η επίλυση. Από την καρτέλα run calculation ορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων που επιθυμεί ο μελετητής και με την εντολή calculate ξεκινά η διαδικασία, ενώ παράλληλα προβάλλεται και διάγραμμα του αριθμού επαναλήψεων με ορισμένα βασικά μεγέθη. Στο διάγραμμα αυτό απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο συγκλίνουν τα μεγέθη αυτά, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των επαναλήψεων. Έπειτα από λίγο, η επίλυση ολοκληρώνεται και ο αλγόριθμος συγκλίνει. Ανάλογα με το πόσο αστηρά είναι τα κριτήρια σύγκλισης, μπορεί να χρειαστεί μεγαλύτερος αριθμός επαναλήψεων, άρα αυτομάτως και μεγαλύτερο χρονικό διάστημα αναμονής έως τη σύγκλιση. Στην εικόνα 230 διακρίνεται το τελικό στάδιο της επίλυσης.

8.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ (POST PROCESSING)

Στις προηγούμενες ενότητες μελετήθηκε αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται και οδηγείται σε επίλυση ένα πρόβλημα στο ANSYS. Οι επιλύσεις πραγματοποιήθηκαν με ενδεικτικά νούμερα, ώστε να γίνει κατανοητός από το μελετητή ο τρόπος με τον οποίο προκύπτει η σύγκλιση. Πλέον παρουσιάζονται οι πραγματικές συνθήκες της επίλυσης και τα αποτελέσματά τους και η διαφοροποίηση έγκειται στο ότι χρησιμοποιήθηκαν αστηρότερα κριτήρια σύγκλισης, συνεπώς και μεγαλύτερος αριθμός επαναλήψεων. Επισημαίνεται παράλληλα ότι, όπως και στο

Openfoam, η επίλυση έλαβε χώρα για τρεις διαφορετικές θέσεις της βελόνας, ώστε να αποτυπωθεί μια πιο σφαιρική εικόνα των χαρακτηριστικών της υπό μελέτη διάταξης.

Τονίζεται επίσης ότι, λόγω ορισμένων ιδιοτήτων του λογισμικού, προέκυψε η ανάγκη να επιλυθούν, εκτός από τα τρία cases που αντιστοιχούν στις τρεις θέσεις της βελόνας, άλλα τρία cases (δηλαδή σύνολο έξι), τα οποία είναι μεν ίδια με τα προηγούμενα, απλώς έχουν τη γεωμετρία με διαφορετικό προσανατολισμό (δηλαδή στις τρεις πρώτες περιπτώσεις η μεγάλη διάσταση βρίσκεται στο επίπεδο xy, ενώ στις άλλες τρεις στο επίπεδο yz). Αυτό συνέβη, ώστε να μπορέσουν να εξαχθούν όλα τα απαραίτητα αποτελέσματα, καθώς διαπιστώθηκαν ορισμένες δυσλειτουργίες κατά την απεικόνιση των επιπέδων τομών που χρησιμοποιήθηκαν στα αποτελέσματα.

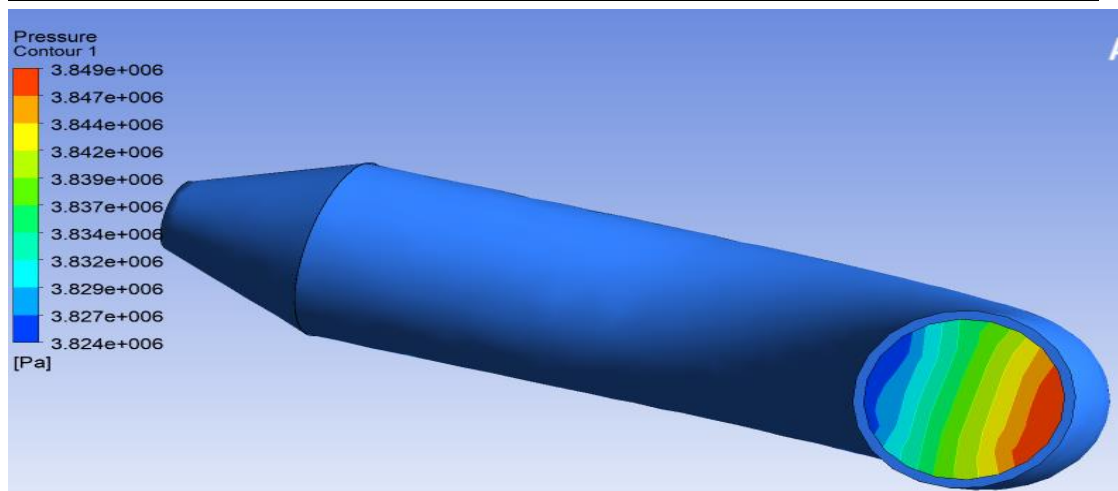
Τέλος να αναφερθεί ότι στο πλαίσιο του ANSYS έλαβε χώρα μια μικρή παραλλαγή στη γεωμετρία του κελύφους (ακροφύσιο και αγωγός), με σκοπό να ανταποκρίνεται καλύτερα στις απαιτήσεις του λογισμικού κατά την προετοιμασία της επίλυσης. Συγκεκριμένα, το κέλυφος απέκτησε πάχος λίγων χιλιοστών, ενώ οι οπές στην είσοδο και στην έξοδο που ήταν κλειστές, έγιναν ανοιχτές, ώστε να προσομοιωθεί πιο εύστοχα ως fluid domain ο χώρος που περικλείεται από το ρευστό.

Περνώντας σε πιο εξειδικευμένα στοιχεία κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι για την πρώτη θέση της βελόνας (την πιο απομακρυσμένη από την έξοδο του ακροφυσίου), ο κώδικας συνέκλινε έπειτα από 1595 επαναλήψεις με κριτήρια σύγκλισης της τάξης του 1.98×10^{-5} , τα οποία ρυθμίζονται στο Setup από το πεδίο Solution→Monitors→Residual→Absolute Criteria. Το αντίστοιχο επικουρικό case για την πρώτη περίπτωση χρειάστηκε 1202 επαναλήψεις με κριτήρια τάξης 5.01×10^{-5} .

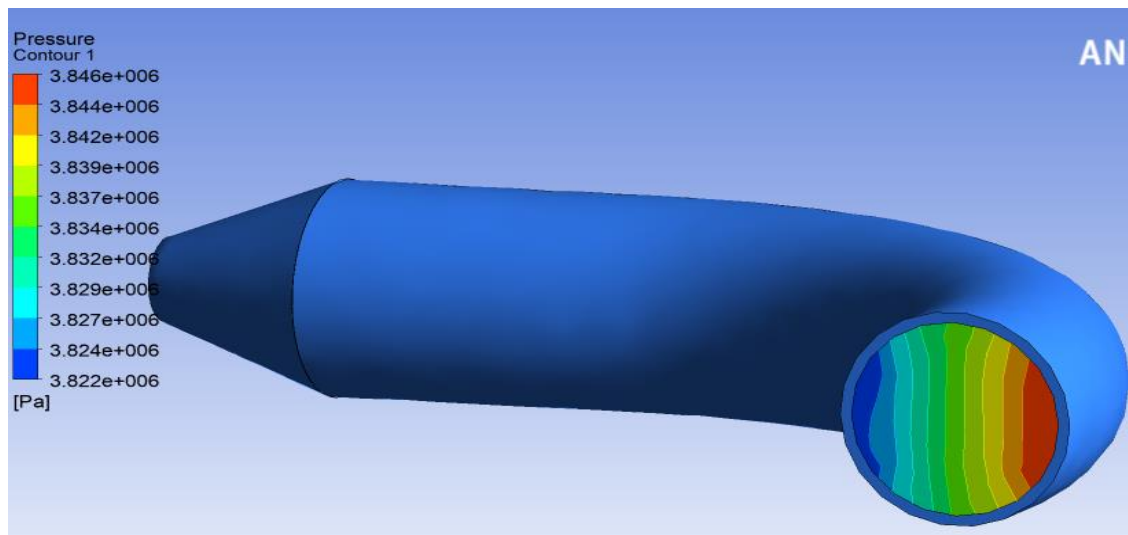
Αναφορικά με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, το πρόβλημα για τη δεύτερη (ενδιάμεση) θέση συγκλίνει έπειτα από 1653 επαναλήψεις και με κριτήρια σύγκλισης 6.42×10^{-5} , ενώ το αντίστοιχο βοηθητικό του απαιτεί 233 επαναλήψεις με κριτήρια τάξης 5.4×10^{-5} . Τέλος για την τρίτη περίπτωση με τη βελόνα να εξέχει ελάχιστα από την έξοδο του ακροφυσίου, η σύγκλιση προκύπτει ύστερα από 961 επαναλήψεις με κριτήρια 6.4×10^{-5} , ενώ το συμπληρωματικό του συγκλίνει μετά από 228 επαναλήψεις με κριτήρια της τάξης 8.02×10^{-5} . Στη συνέχεια ξεκινά η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, ενώ έγινε προσπάθεια να κατηγοριοποιηθούν τέτοιο τρόπο, ώστε να διευκολύνεται η κατανόηση και επεξεργασία τους από τον μελετητή.

Όπως και στα αποτελέσματα του Openfoam, κρίθηκε σκόπιμη η παρουσίαση αποτελεσμάτων με τη βοήθεια διαγραμμάτων για την κατανομή της πίεσης, για το μέτρο και τις κύριες συνιστώσες της ταχύτητας, για τα διανύσματα της ταχύτητας, αλλά και για τον στροβιλισμό. Με παρόμοιο τρόπο, διακρίνονται και διαγράμματα με αλλαγμένες κλίμακες, ώστε να δοθεί έμφαση στην κατανομή της ροής σε συγκεκριμένα σημεία της γεωμετρίας, που, υπό άλλες συνθήκες, φαίνονται με ενιαίο χρωματισμό. Το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα στο μελετητή να μεταβάλλει την κλίμακα από το πεδίο των ρυθμίσεων του contour και συγκεκριμένα από το range. Με την επιλογή του User Specified ο μελετητής καθορίζει τα όρια της κλίμακας, ενώ τα υπόλοιπα αποτελέσματα που βασίζονται στην πραγματική κλίμακα, έχουν εξαχθεί με τη βοήθεια της επιλογής Local.

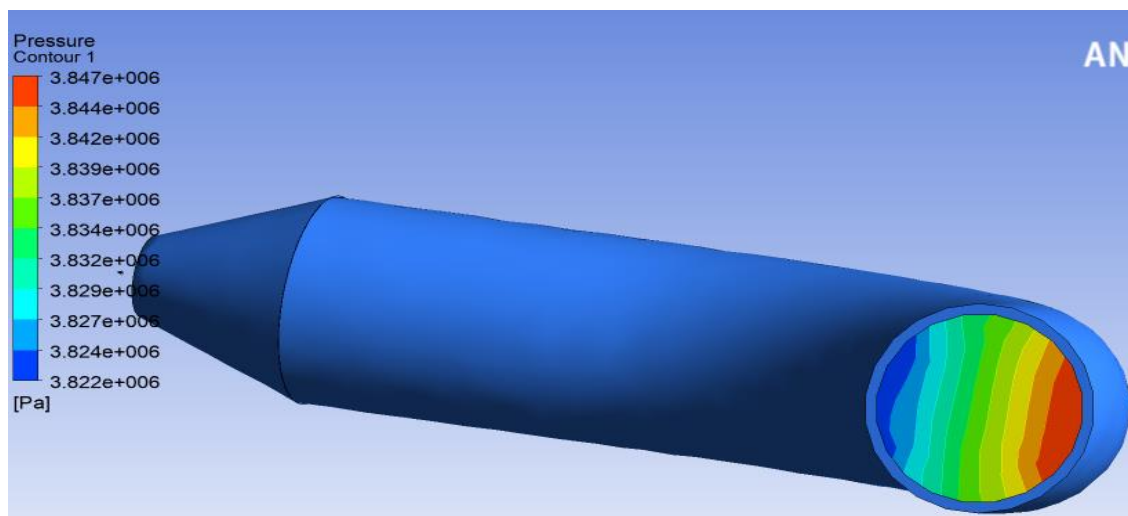
8.4.1 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΙΕΣΗΣ



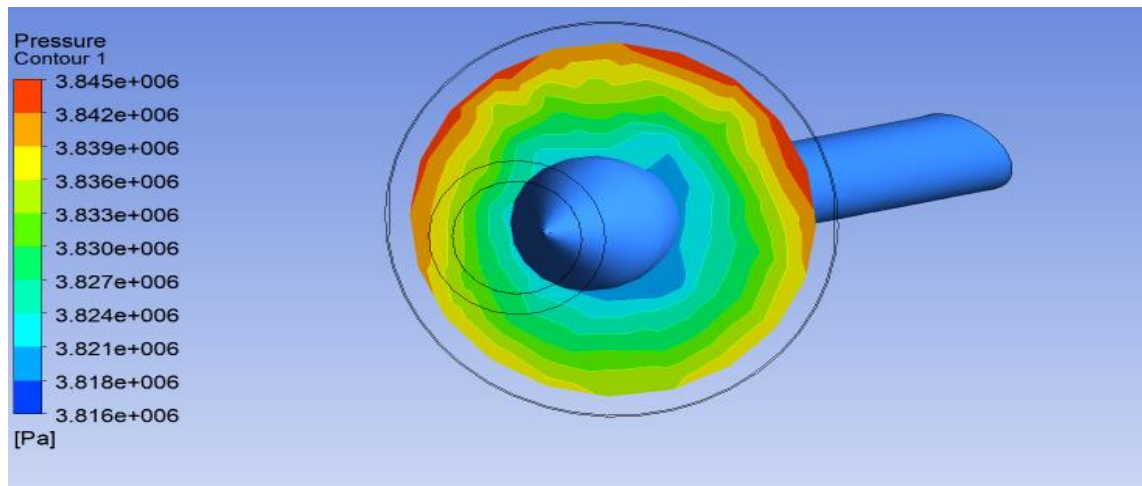
Εικόνα 231: Διάγραμμα κατανομής πίεσης εισόδου για την πρώτη περίπτωση.
Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



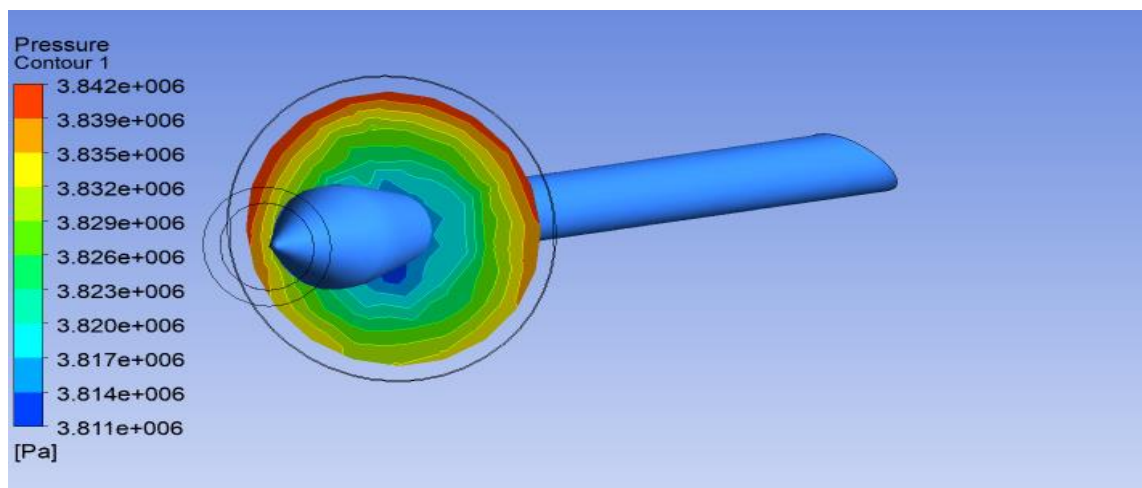
Εικόνα 232: Διάγραμμα κατανομής πίεσης εισόδου για τη δεύτερη περίπτωση.
Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



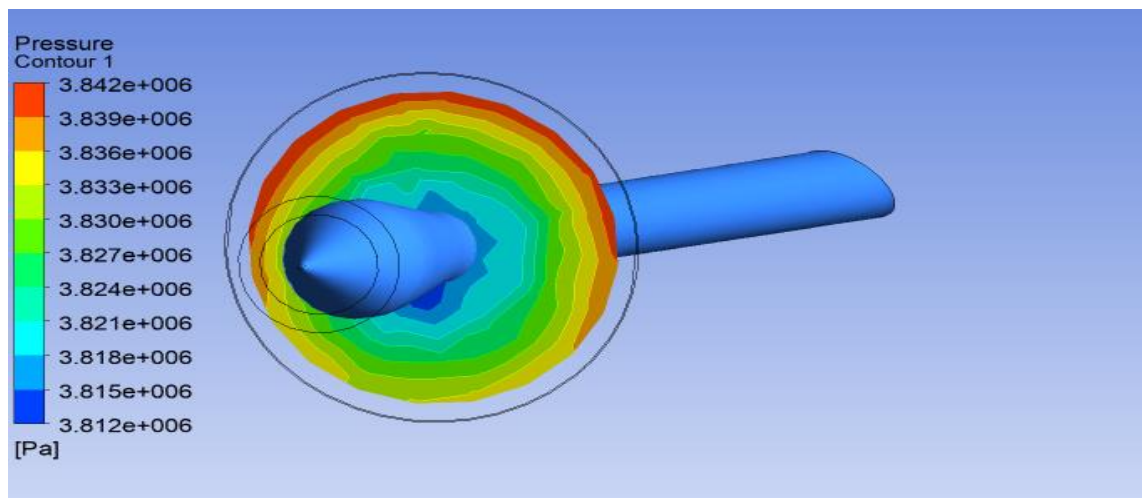
Εικόνα 233: Διάγραμμα κατανομής πίεσης εισόδου για την τρίτη περίπτωση.
Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



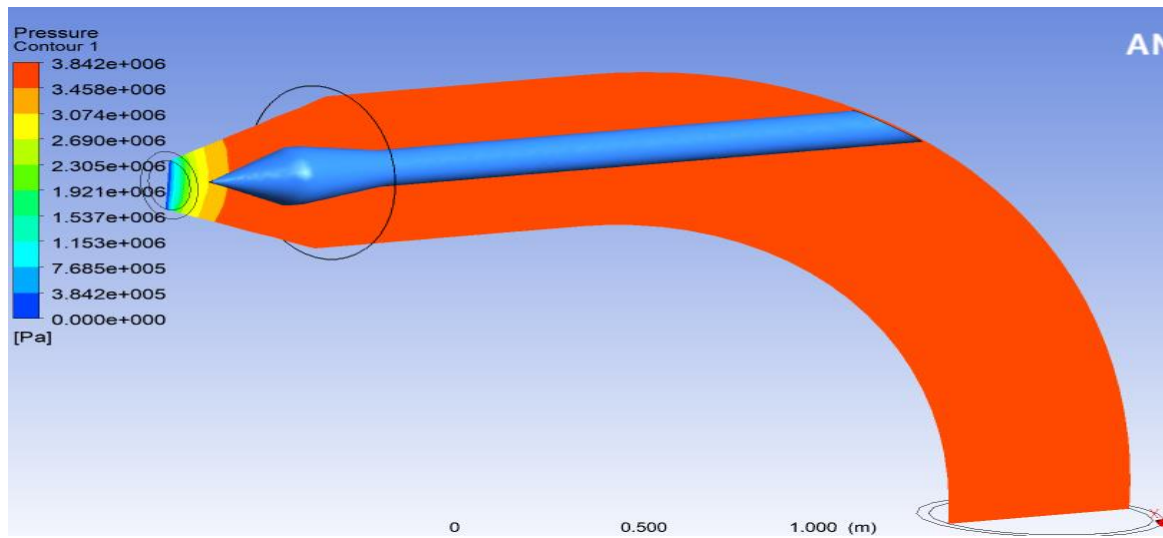
Εικόνα 234: Διάγραμμα κατανομής πίεσης στο σημείο που αρχίζει η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



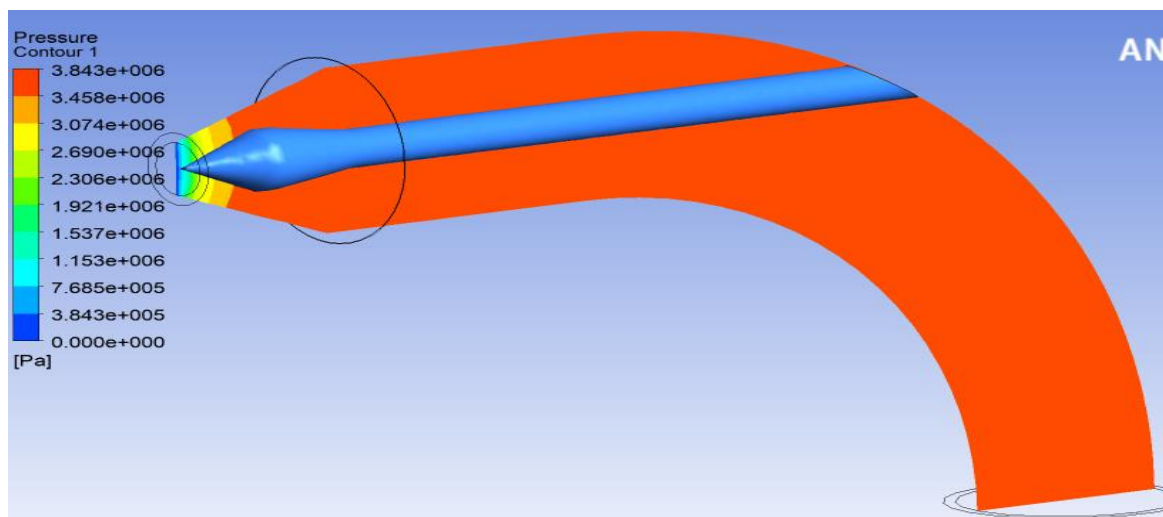
Εικόνα 235: Διάγραμμα κατανομής πίεσης στο σημείο που αρχίζει η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



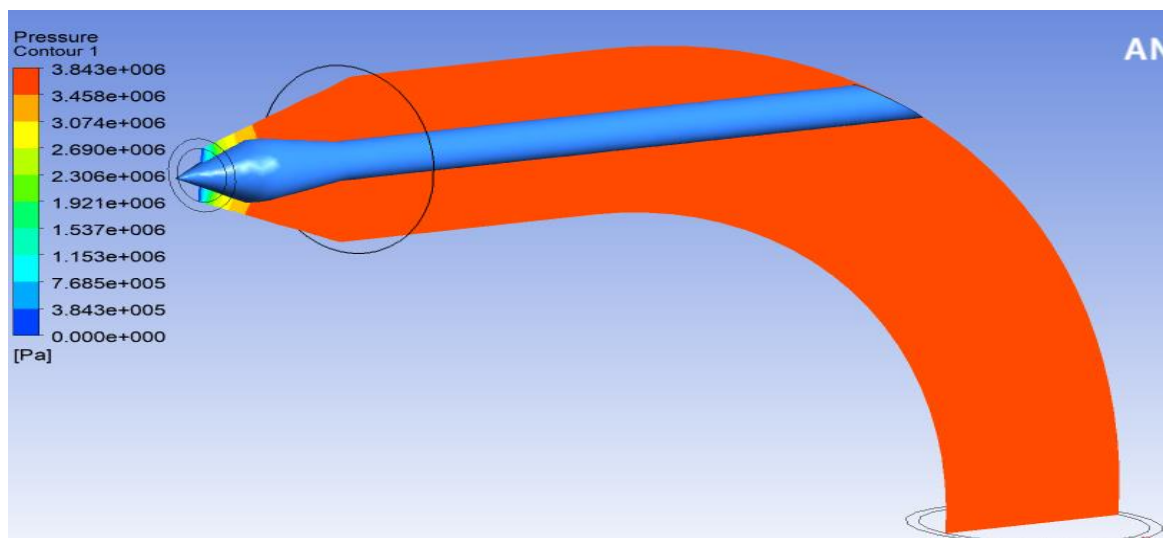
Εικόνα 236: Διάγραμμα κατανομής πίεσης στο σημείο που αρχίζει η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



Εικόνα 237: Διάγραμμα κατανομής πίεσης κατά μήκος του εσωτερικού του αγωγού (πρώτη περίπτωση). Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

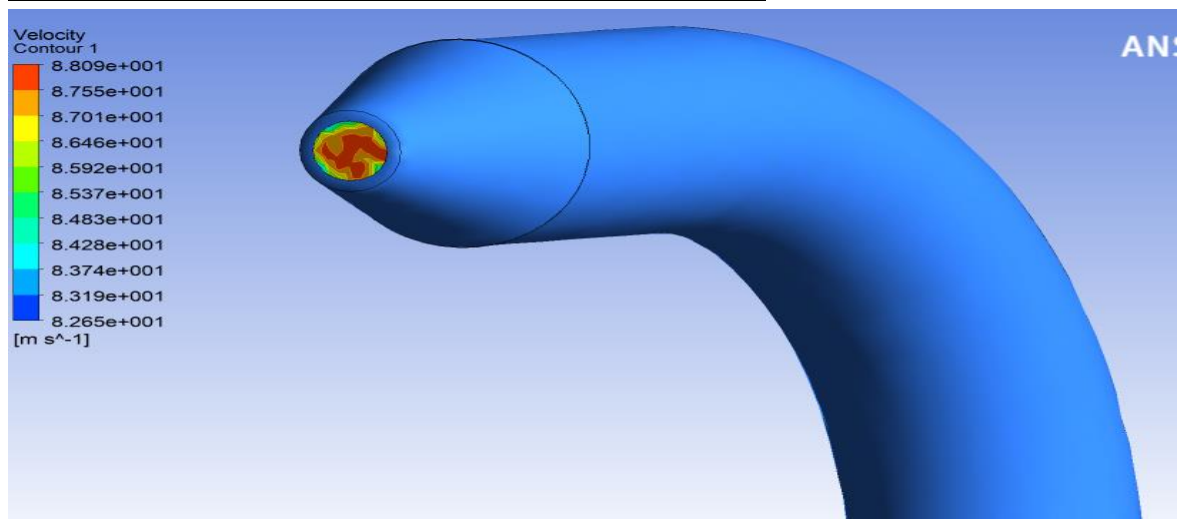


Εικόνα 238: Διάγραμμα κατανομής πίεσης κατά μήκος του εσωτερικού του αγωγού (δεύτερη περίπτωση). Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

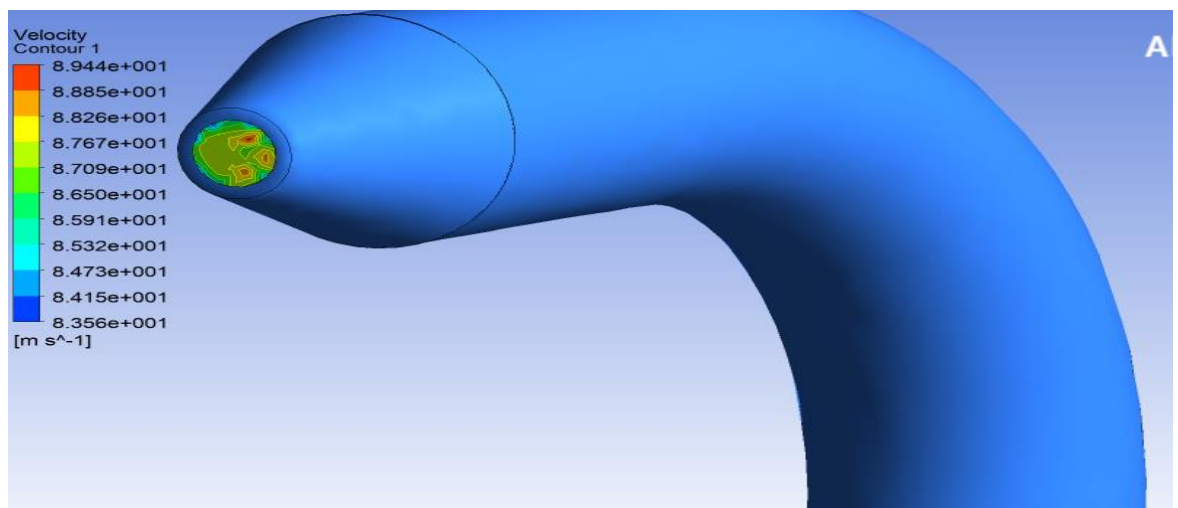


Εικόνα 239: Διάγραμμα κατανομής πίεσης κατά μήκος του εσωτερικού του αγωγού (δεύτερη περίπτωση). Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

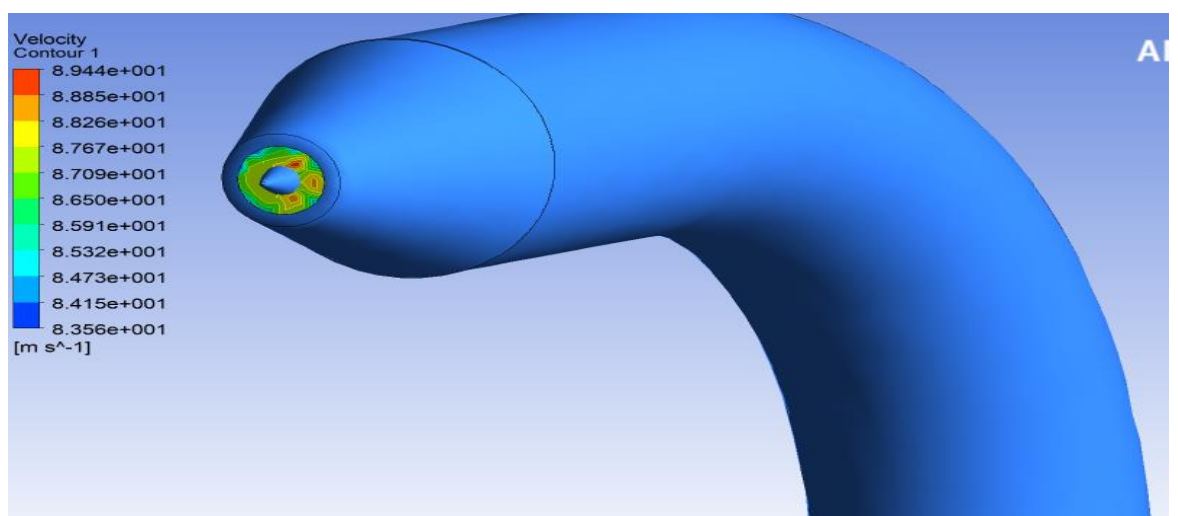
8.4.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΡΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ



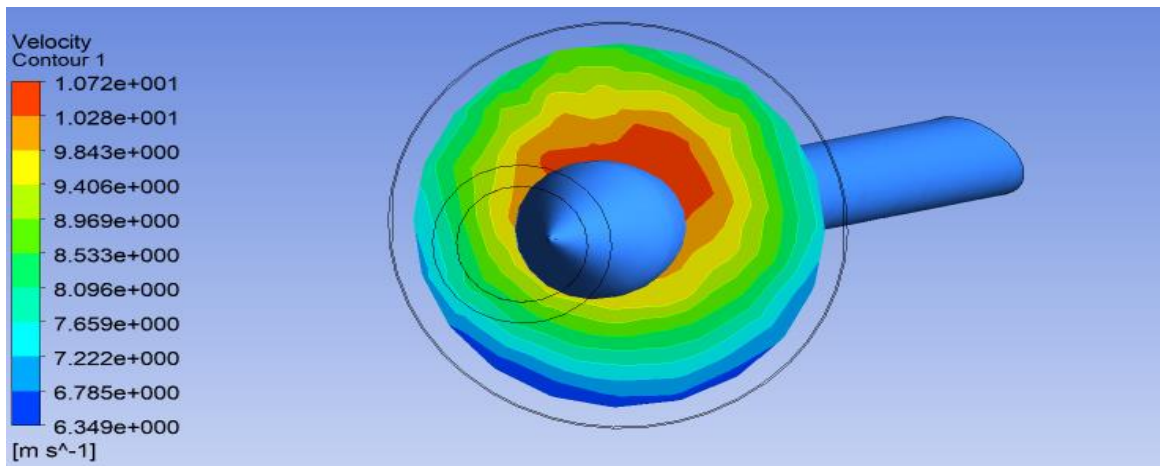
Εικόνα 240: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας εξόδου για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



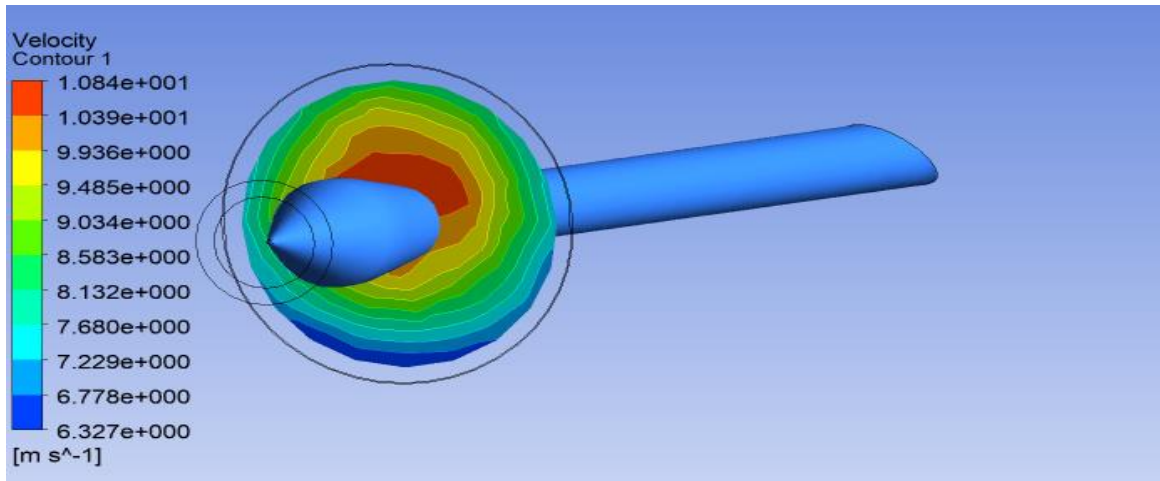
Εικόνα 241: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας εξόδου για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



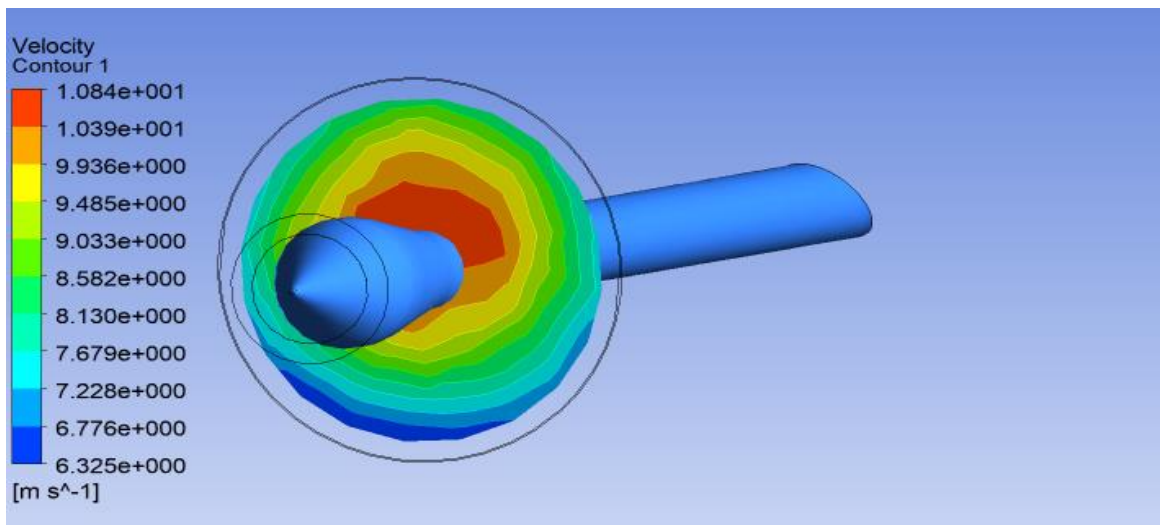
Εικόνα 242: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας εξόδου για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



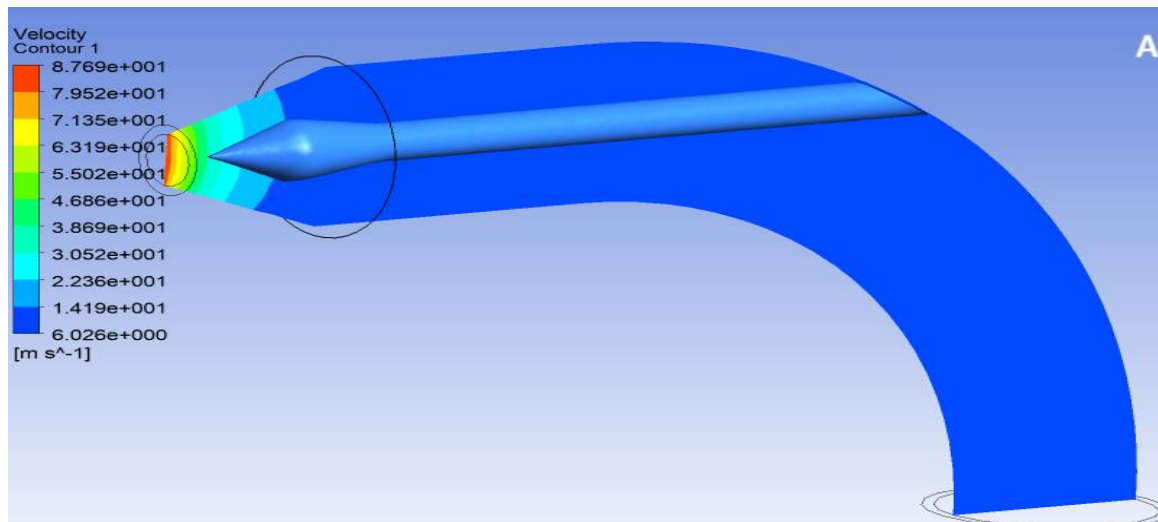
Εικόνα 243: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας στο σημείο που αρχίζει η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



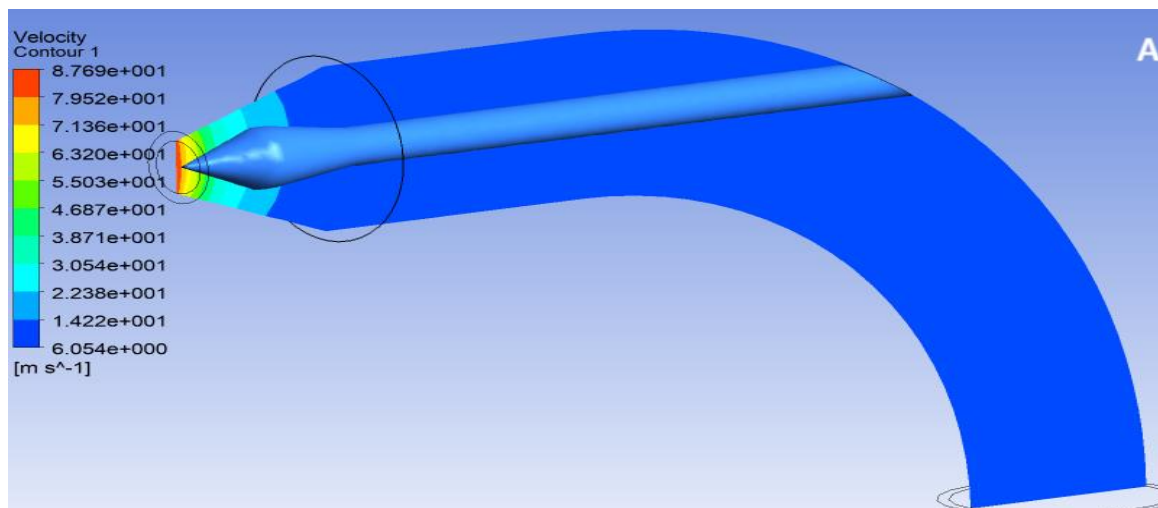
Εικόνα 244: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας στο σημείο που αρχίζει η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



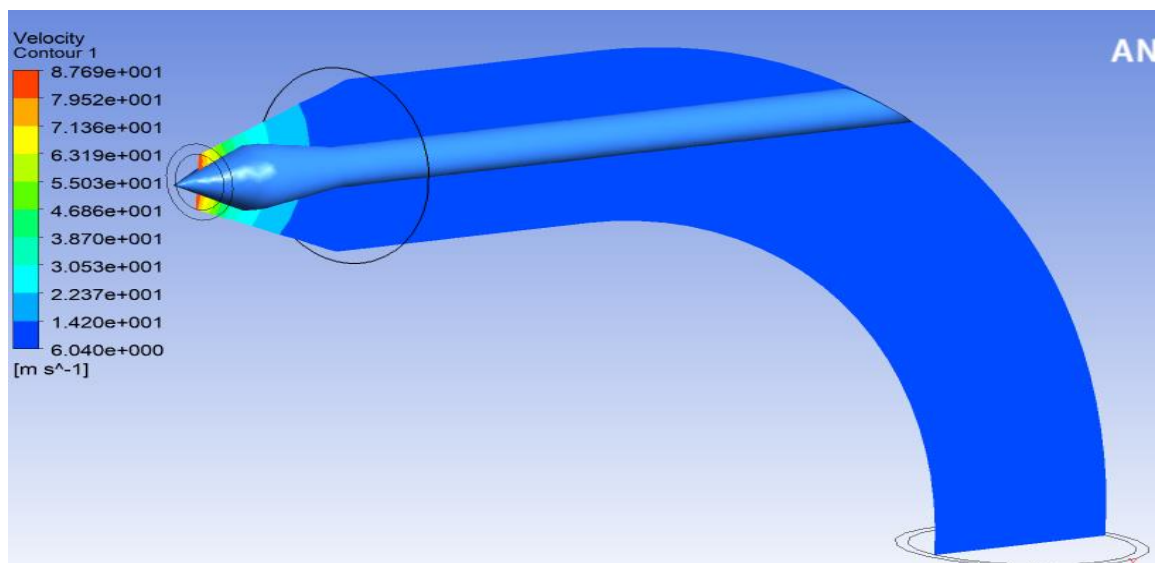
Εικόνα 245: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας στο σημείο που αρχίζει η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



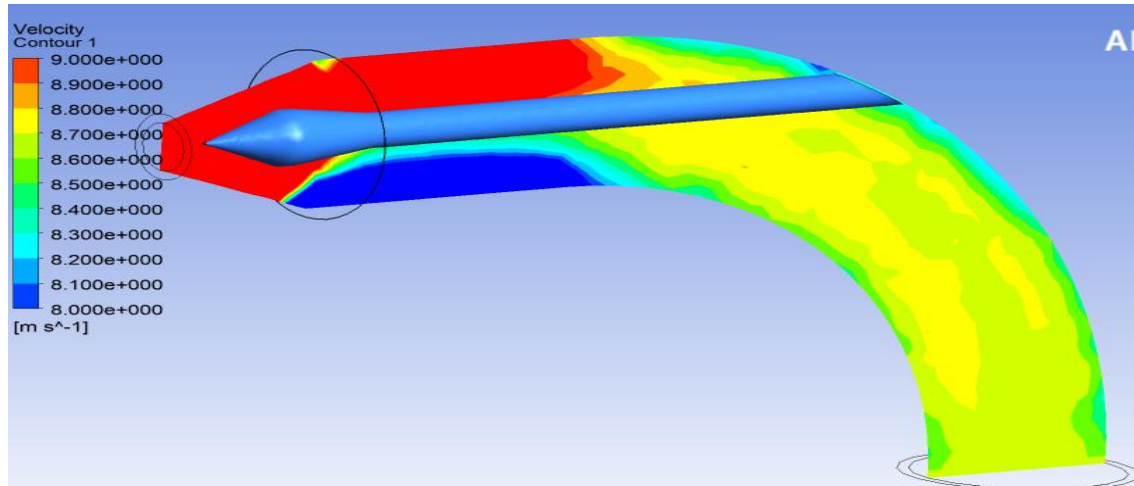
Εικόνα 246: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



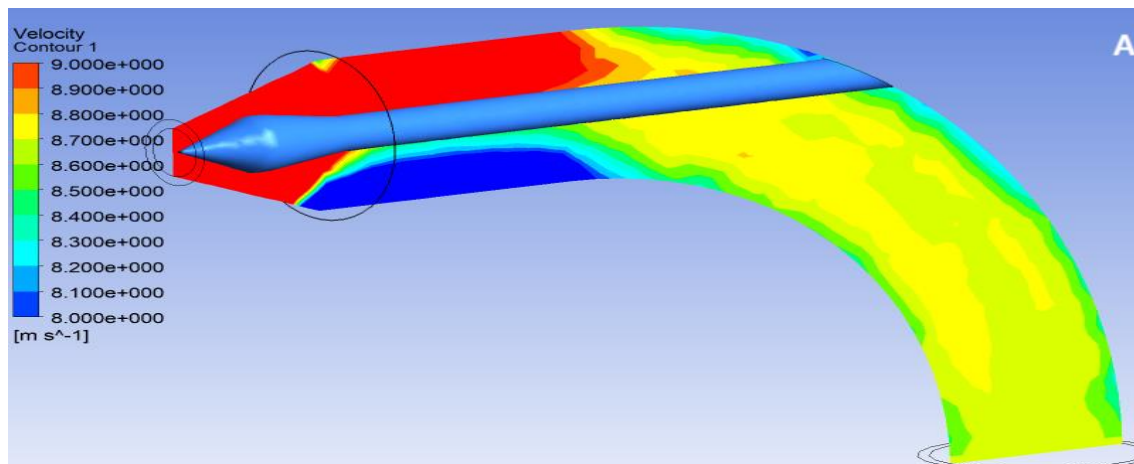
Εικόνα 247: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



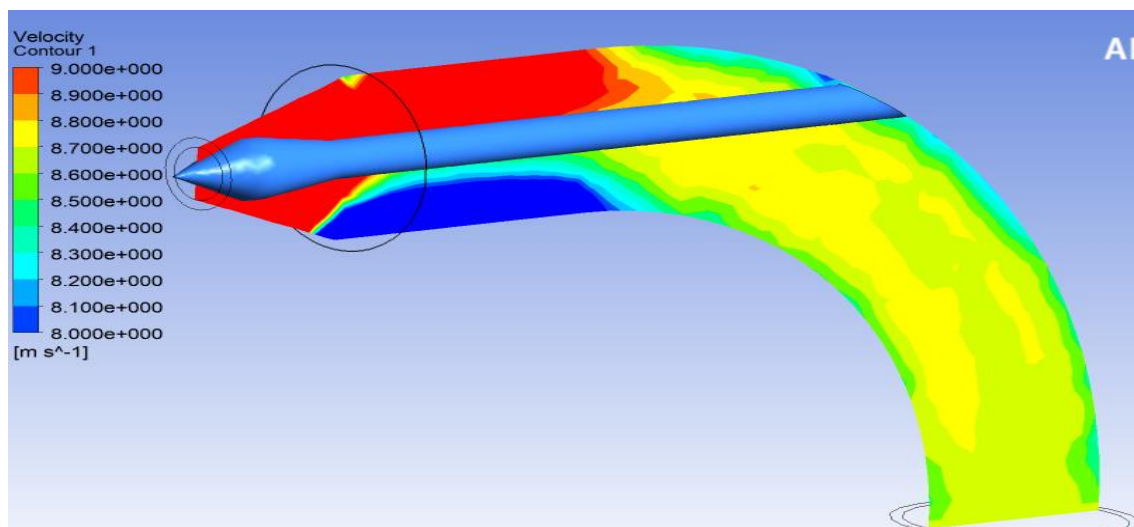
Εικόνα 248: Διάγραμμα κατανομής μέτρου ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



Εικόνα 249: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την πρώτη περίπτωση.
Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

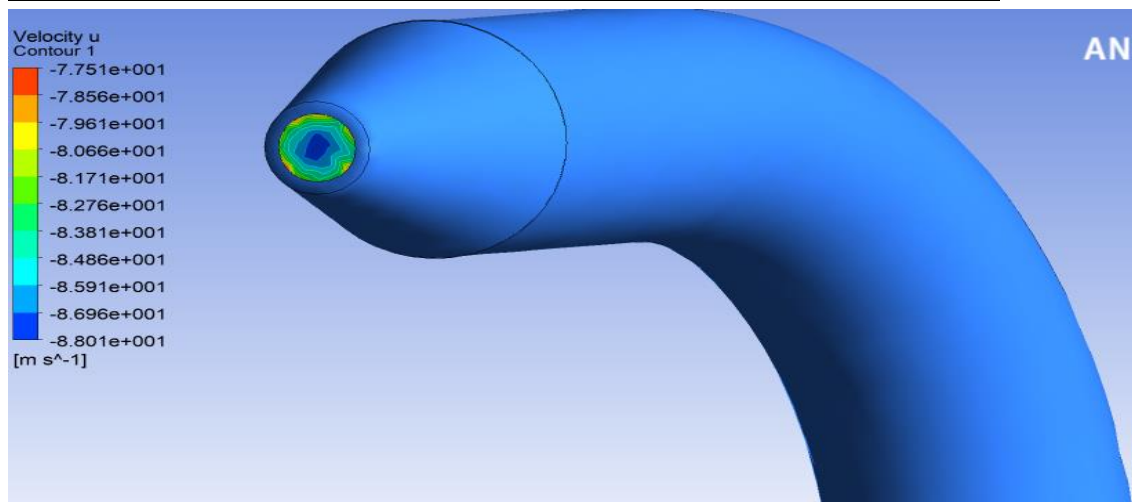


Εικόνα 250: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για τη δεύτερη περίπτωση.
Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

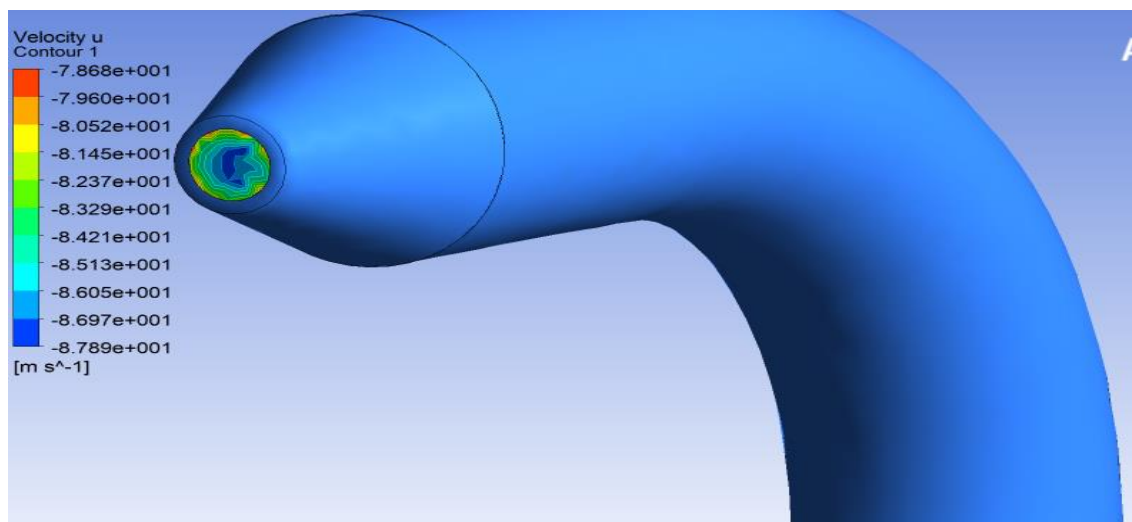


Εικόνα 251: Διάγραμμα μέτρου ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την τρίτη περίπτωση.
Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

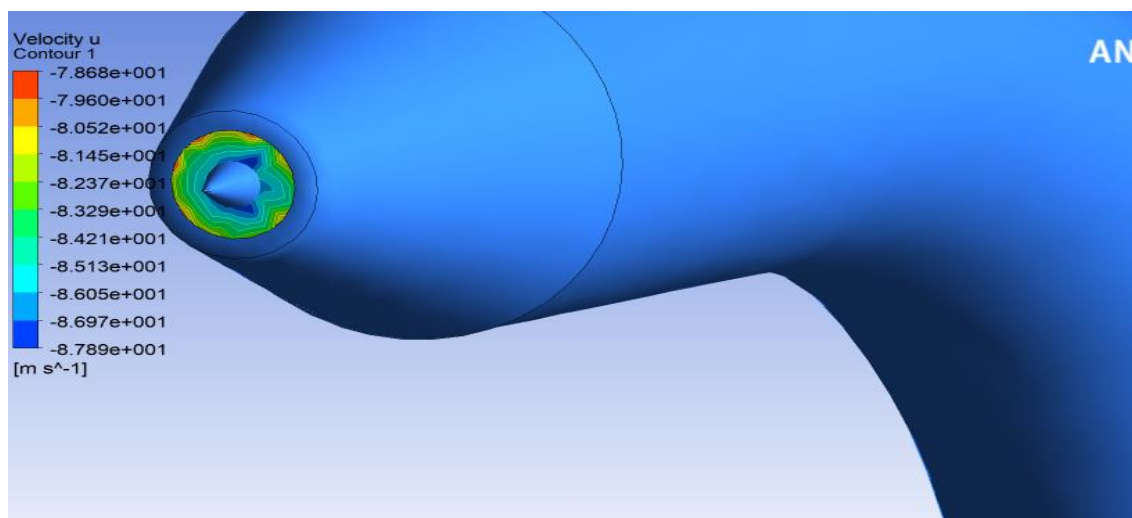
8.4.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΥΡΙΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ



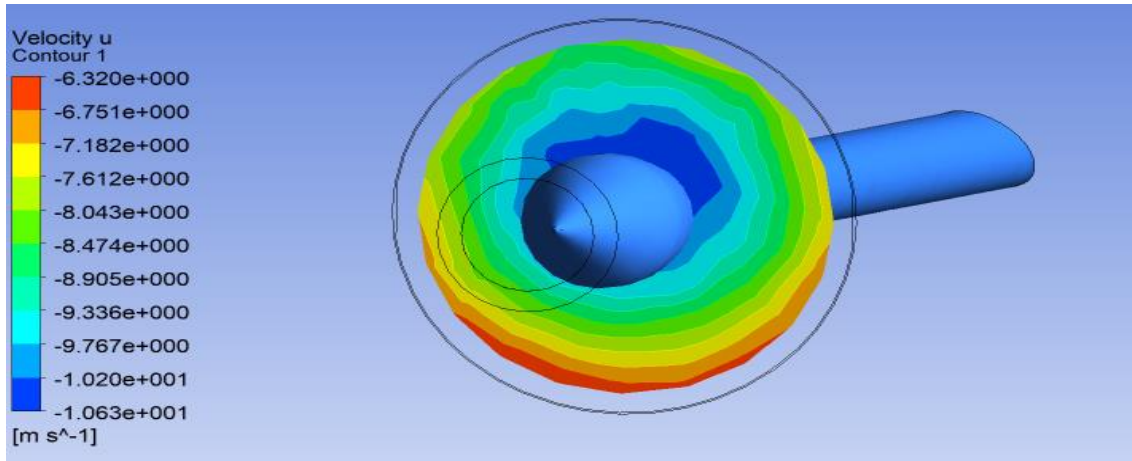
Εικόνα 252: Διάγραμμα της συνιστώσας u της ταχύτητας εξόδου για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



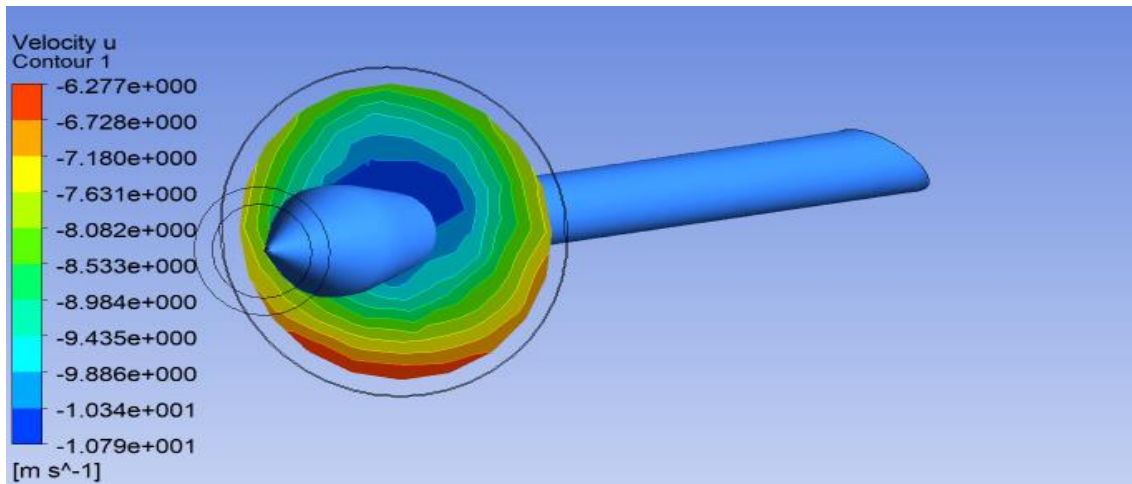
Εικόνα 253: Διάγραμμα της συνιστώσας u της ταχύτητας εξόδου για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



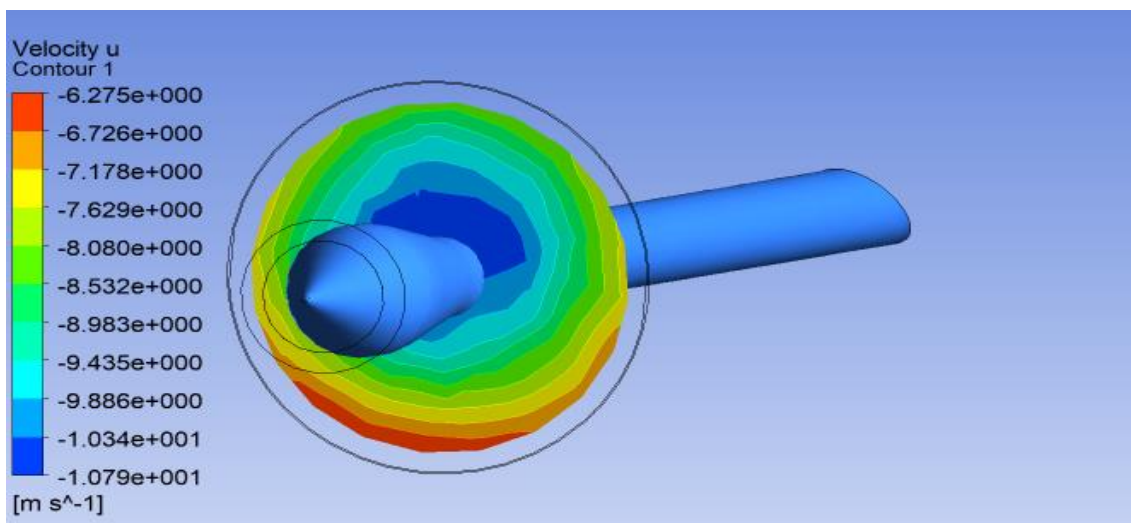
Εικόνα 254: Διάγραμμα της συνιστώσας u της ταχύτητας εξόδου για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



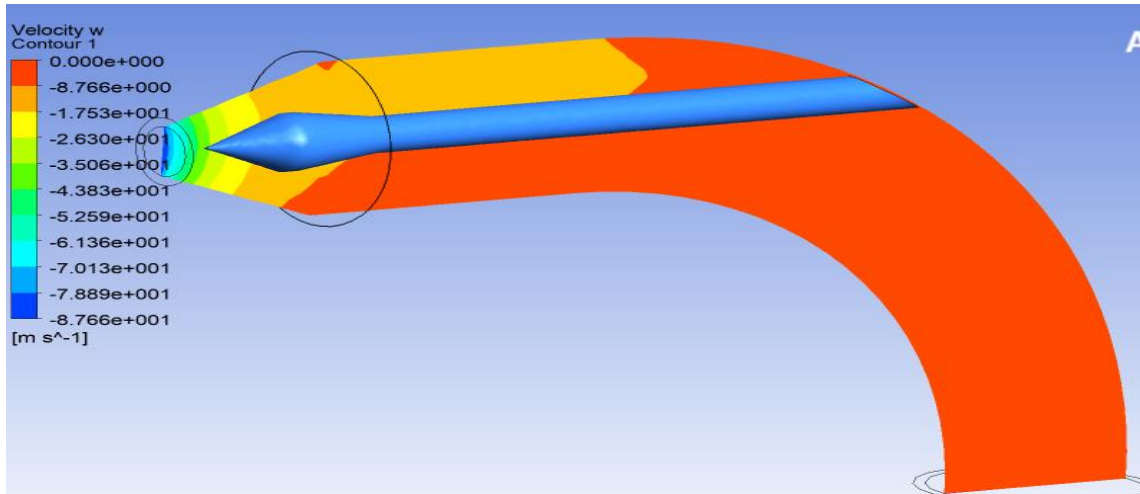
Εικόνα 255: Διάγραμμα της συνιστώσας u της ταχύτητας εξόδου στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την πρώτη περίπτωση.
Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



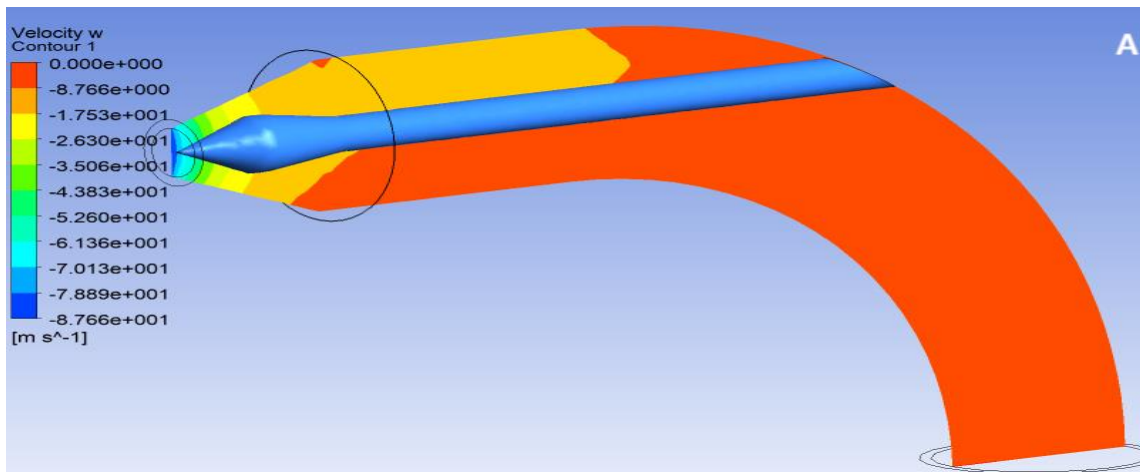
Εικόνα 256: Διάγραμμα της συνιστώσας u της ταχύτητας εξόδου στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση.
Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



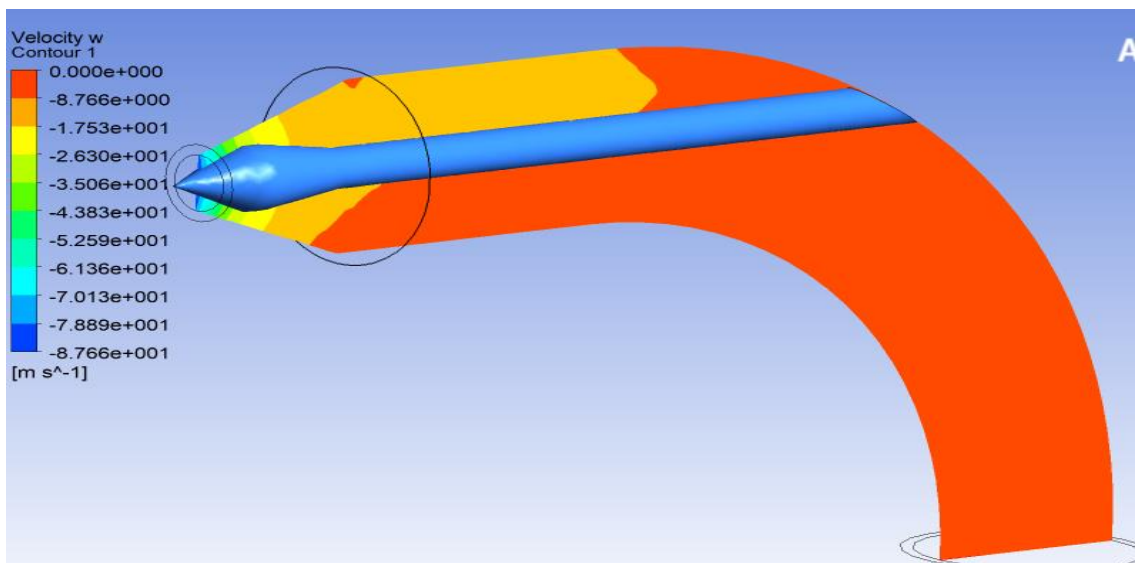
Εικόνα 257: Διάγραμμα της συνιστώσας u της ταχύτητας εξόδου στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την τρίτη περίπτωση.
Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



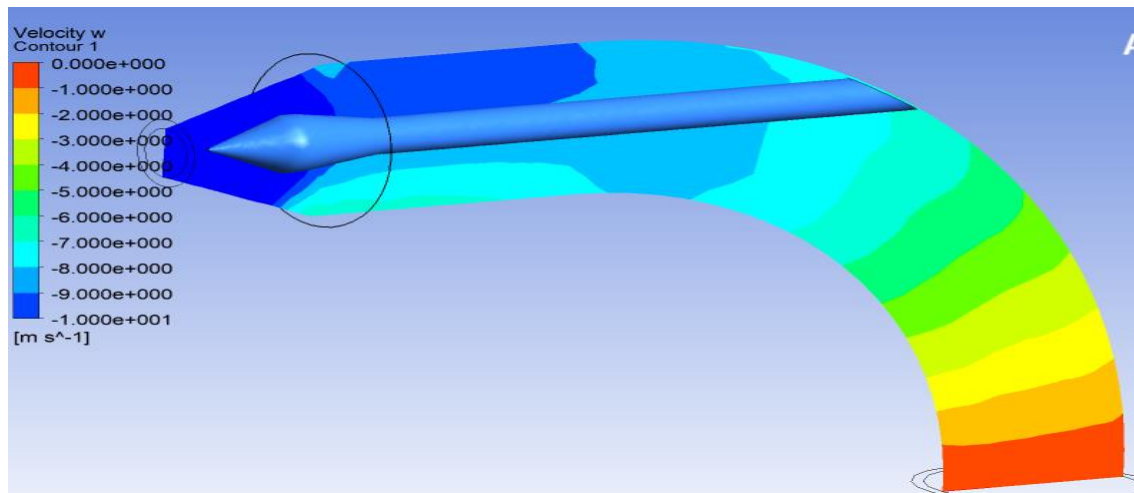
Εικόνα 258: Διάγραμμα κατανομής της συνιστώσας w της ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



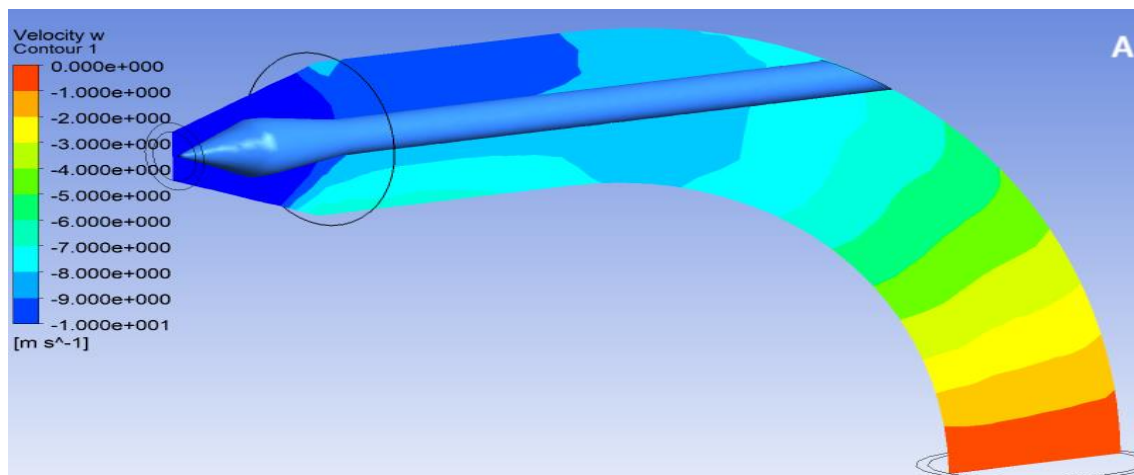
Εικόνα 259: Διάγραμμα κατανομής της συνιστώσας w της ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



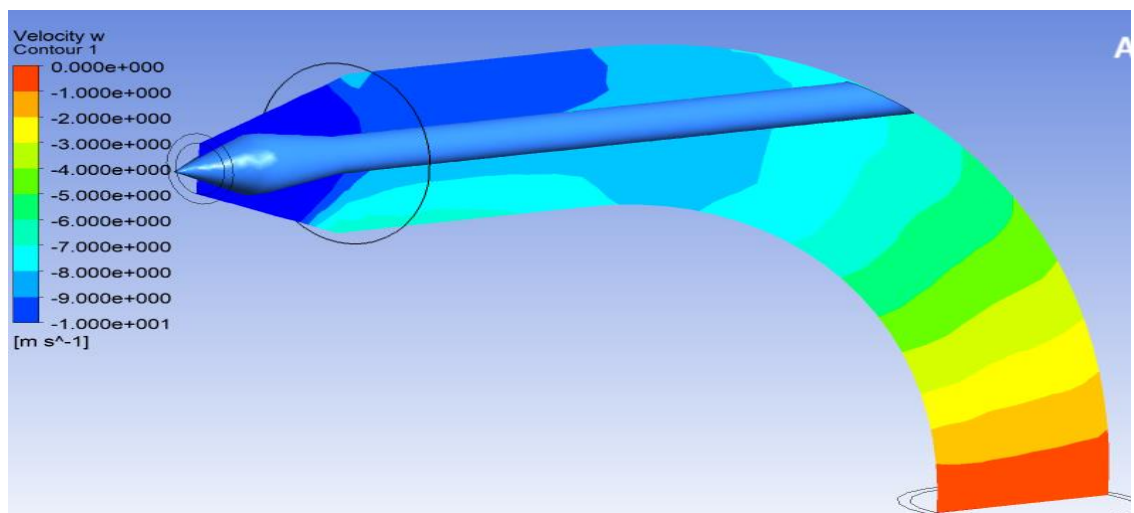
Εικόνα 260: Διάγραμμα κατανομής της συνιστώσας w της ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



Εικόνα 261: Διάγραμμα κατανομής συνιστώσας w της ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

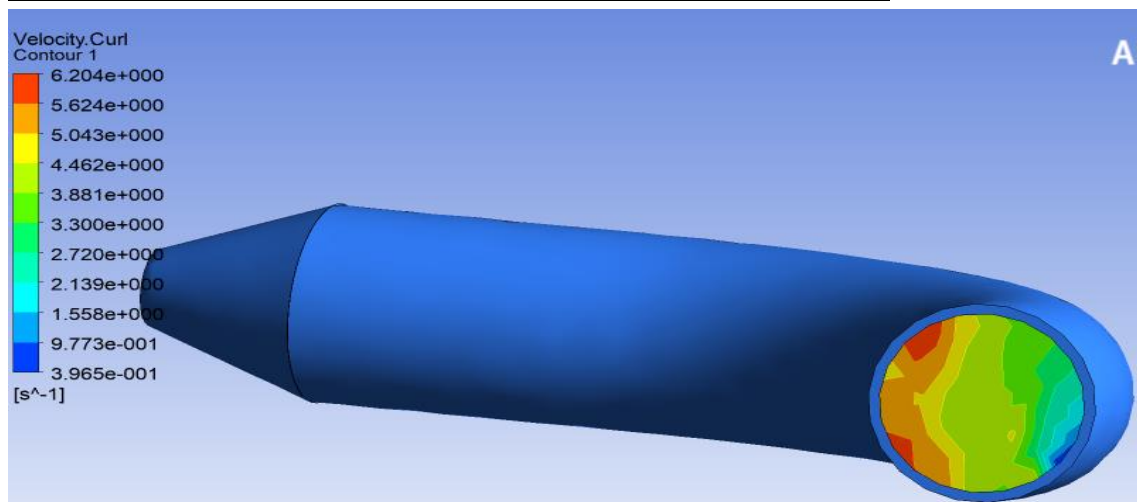


Εικόνα 262: Διάγραμμα κατανομής συνιστώσας w της ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

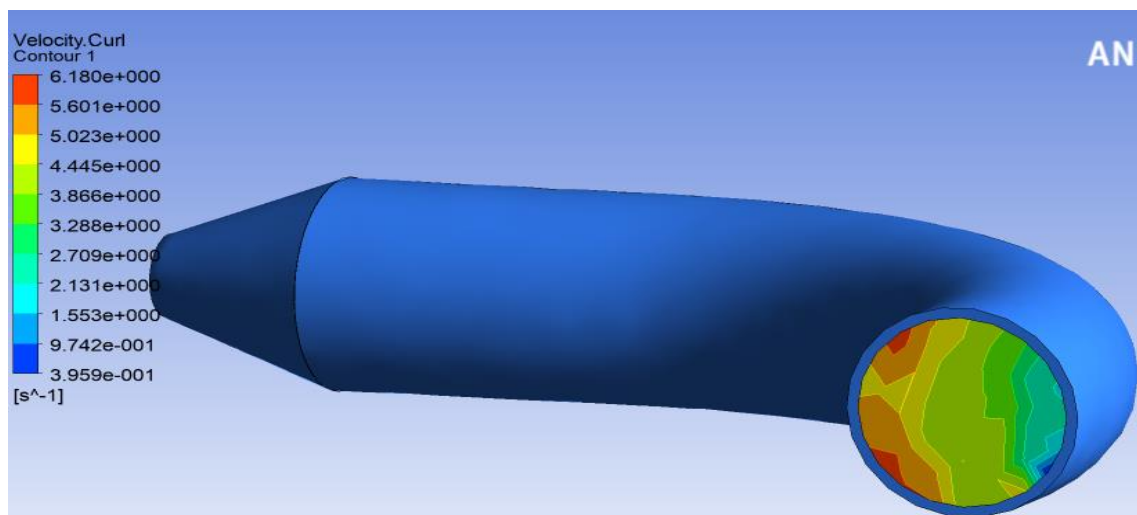


Εικόνα 263: Διάγραμμα κατανομής συνιστώσας w της ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

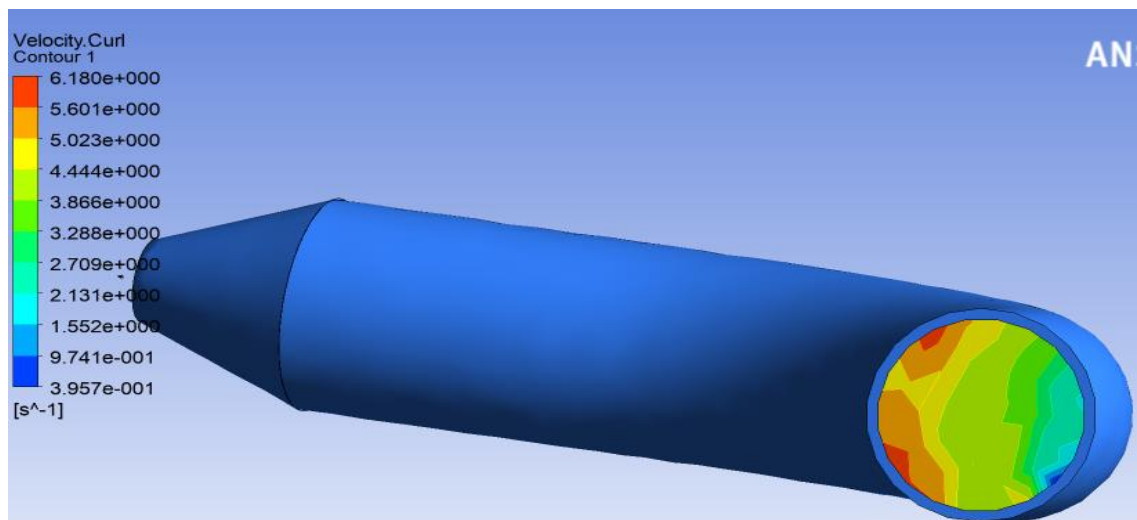
8.4.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ



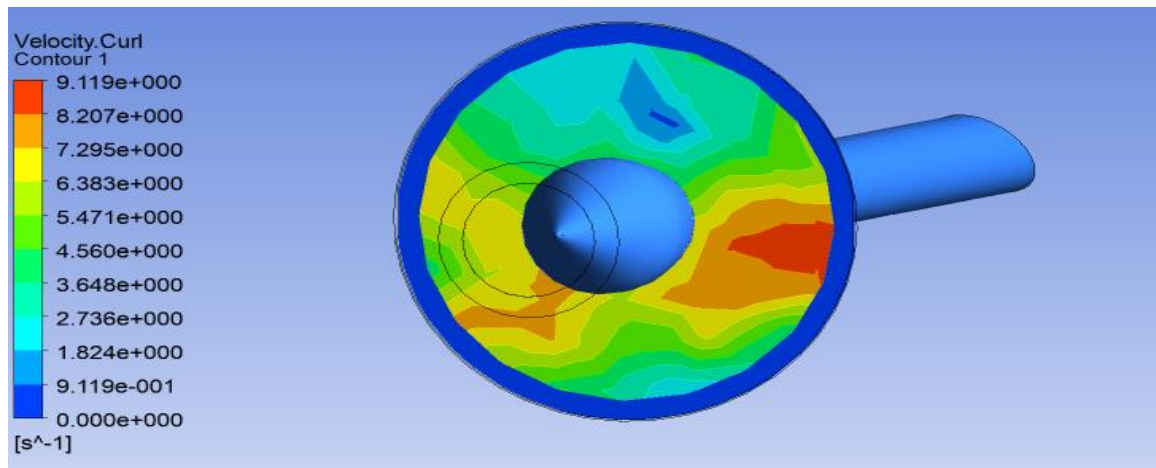
Εικόνα 264: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην είσοδο για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



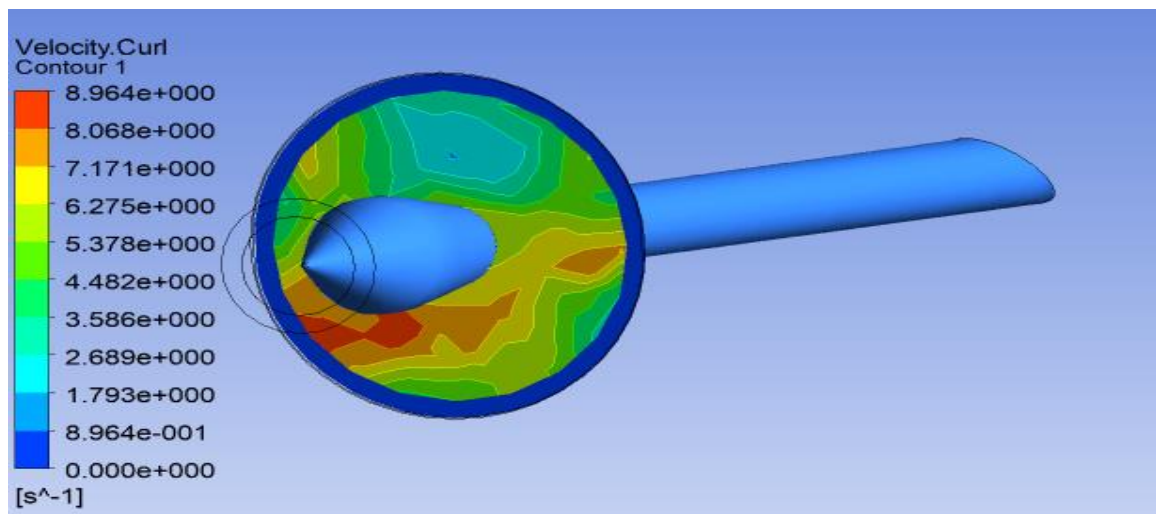
Εικόνα 265: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην είσοδο για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



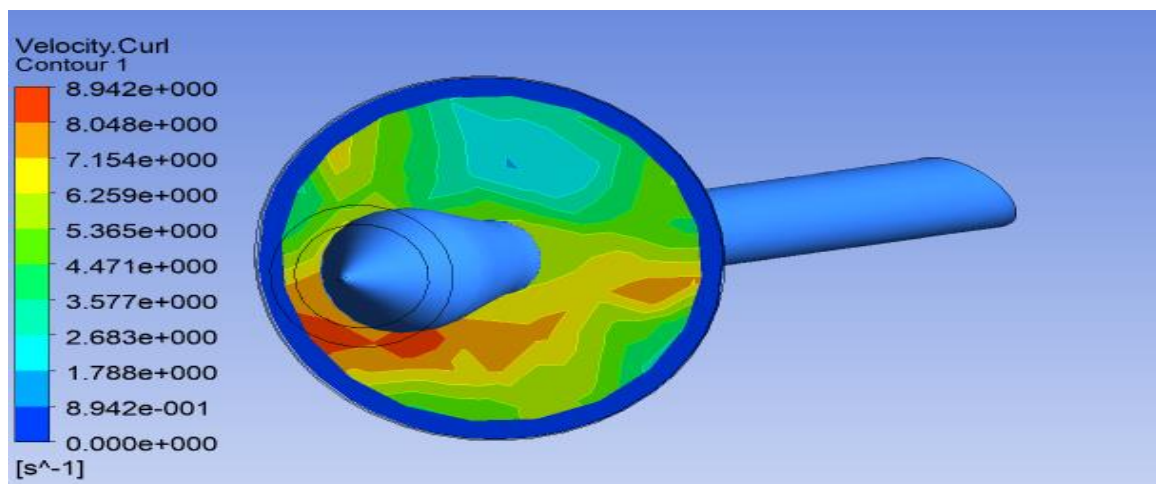
Εικόνα 266: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην είσοδο για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



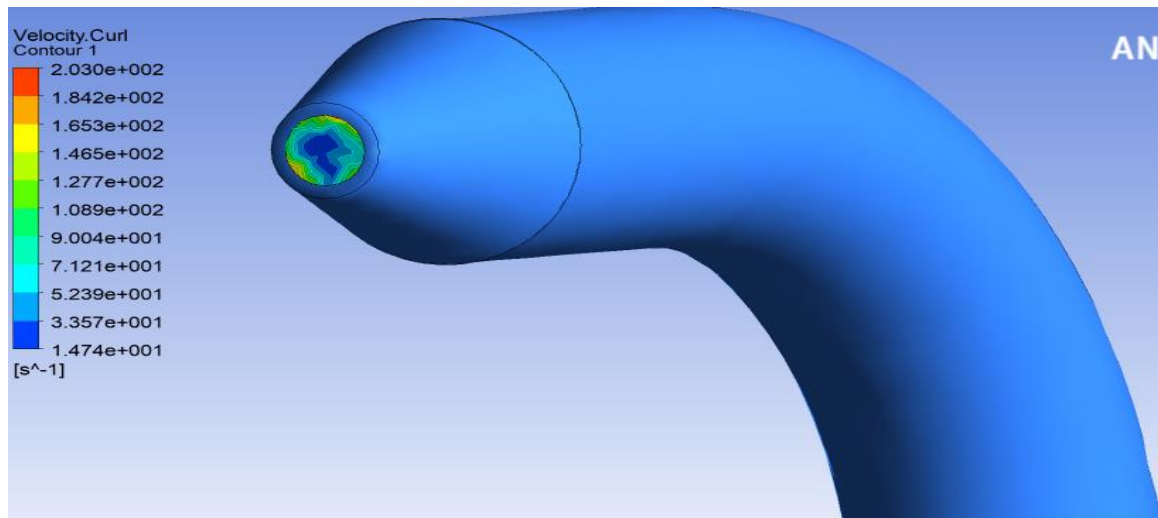
Εικόνα 267: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



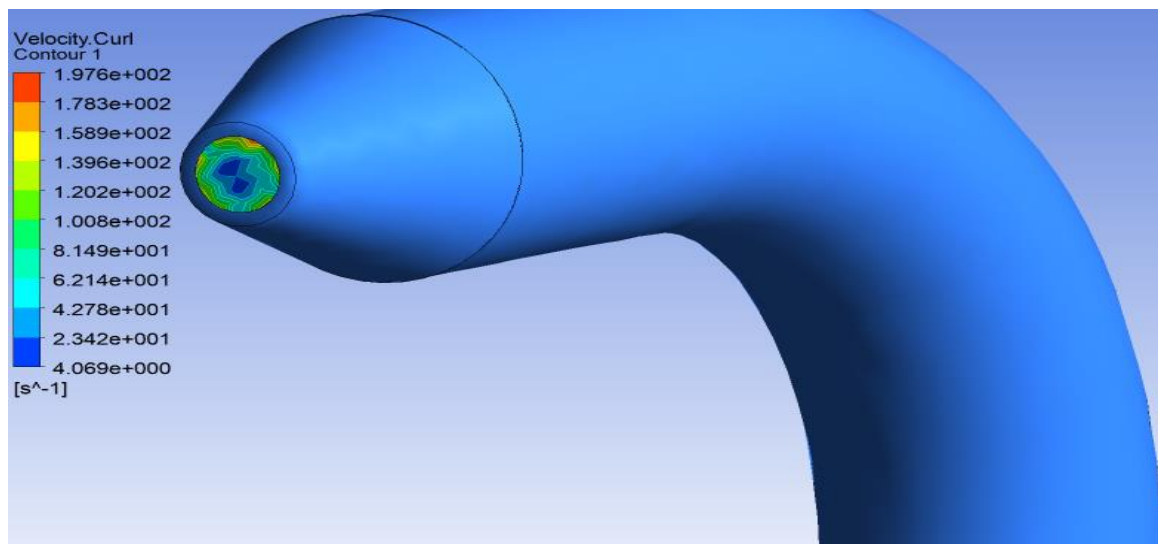
Εικόνα 268: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



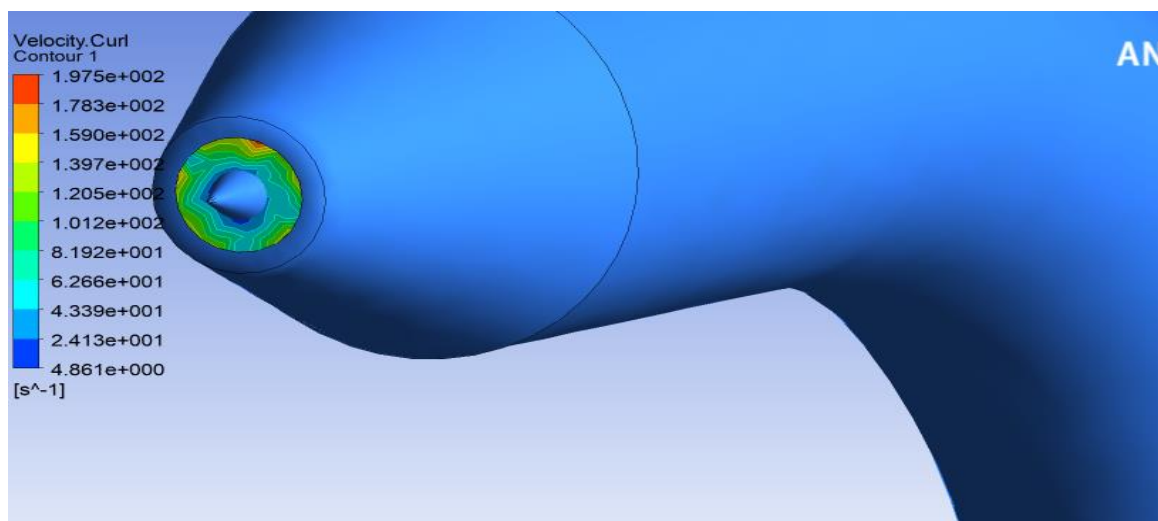
Εικόνα 269: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



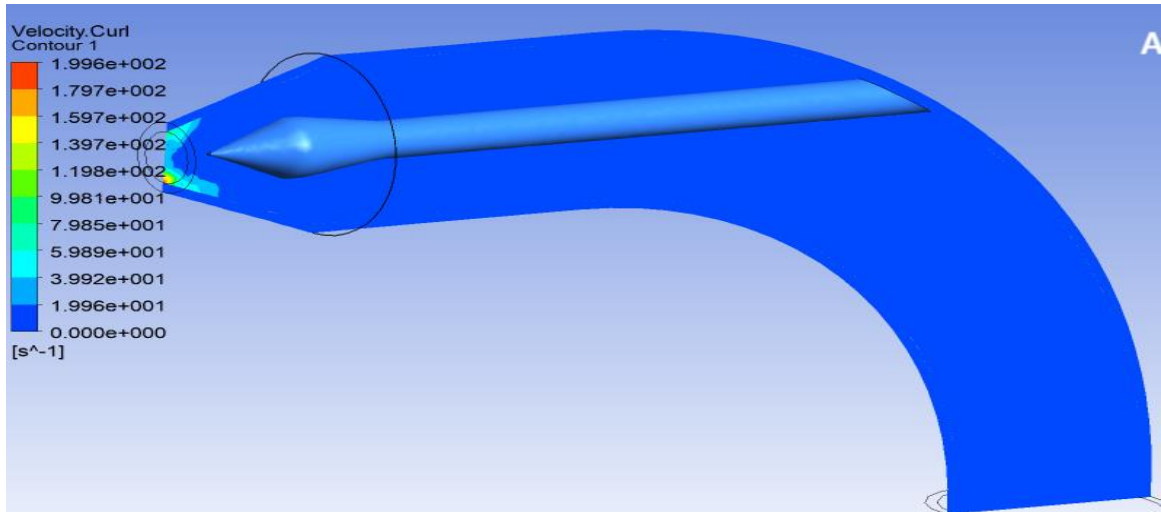
Εικόνα 270: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην έξοδο για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



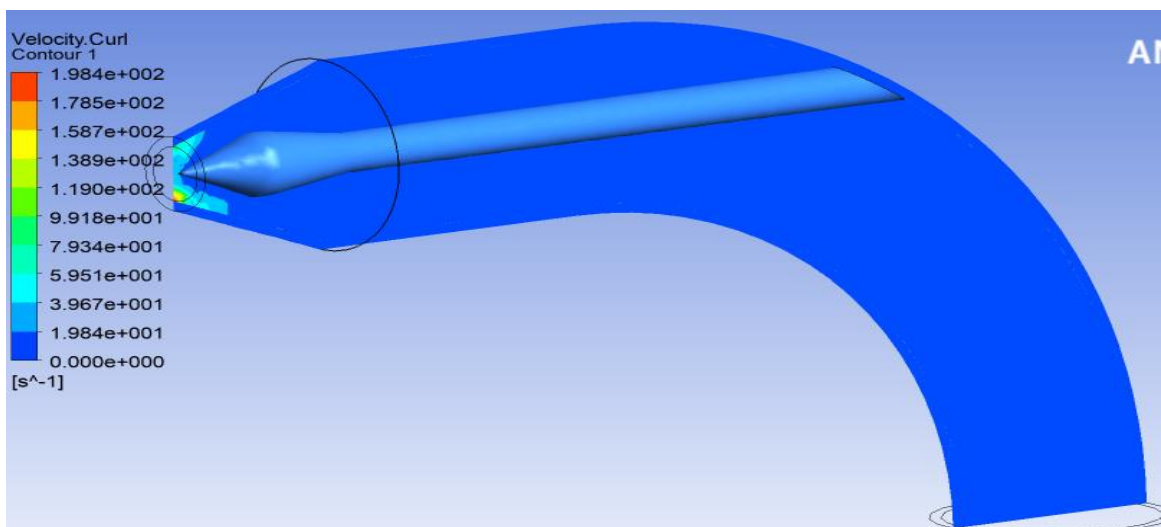
Εικόνα 271: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην έξοδο για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



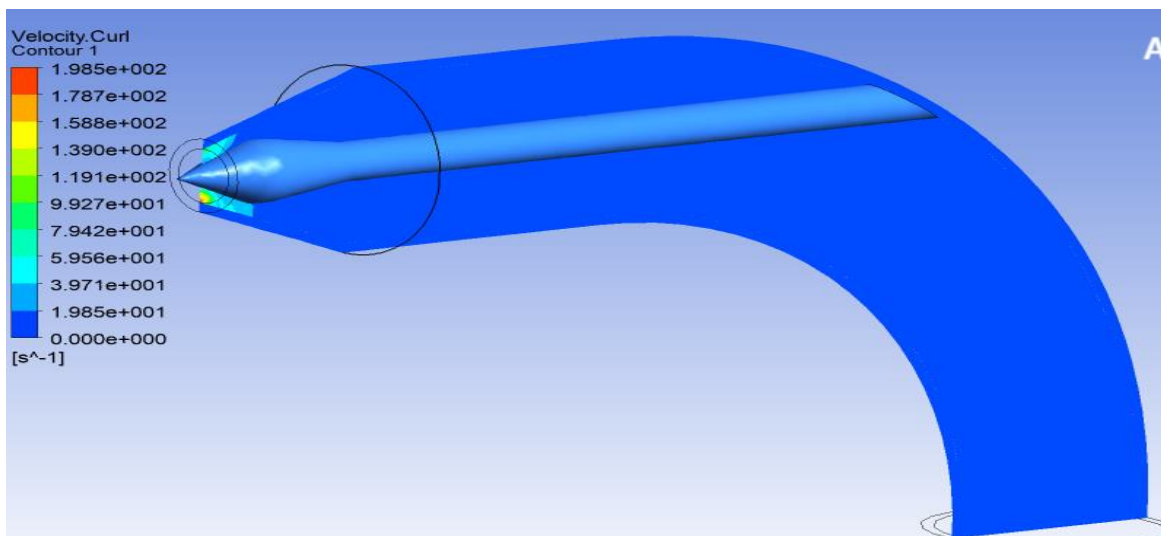
Εικόνα 272: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας στην έξοδο για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



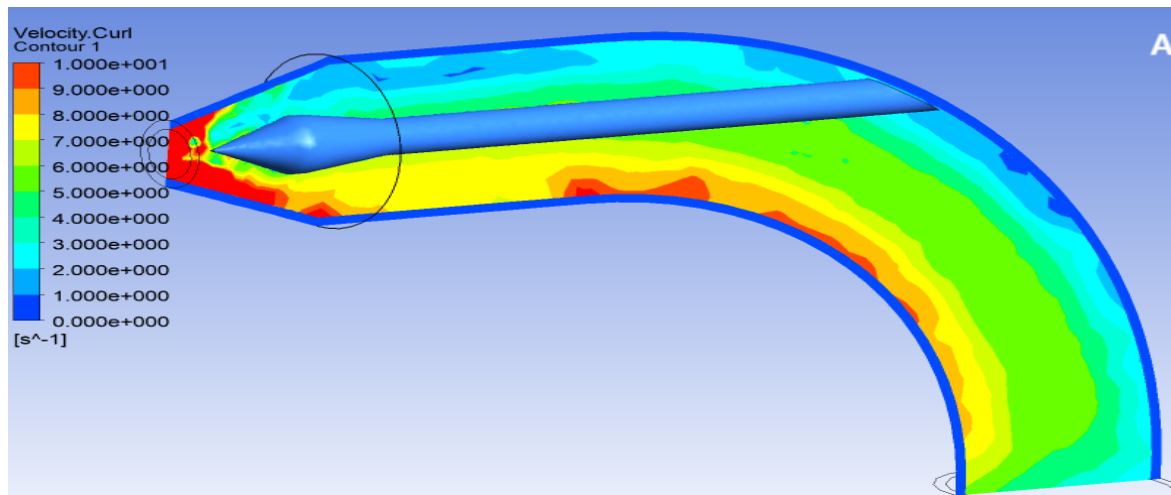
Εικόνα 273: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



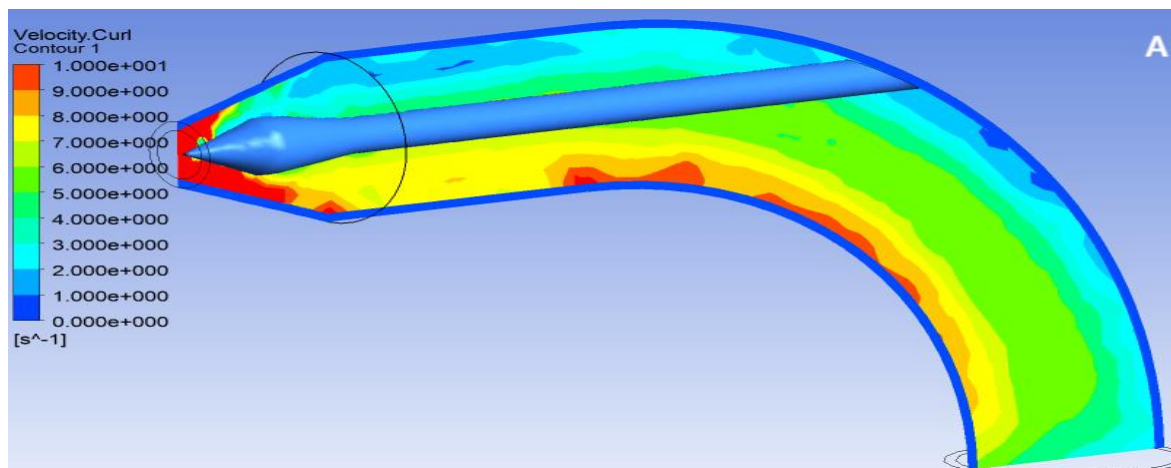
Εικόνα 274: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



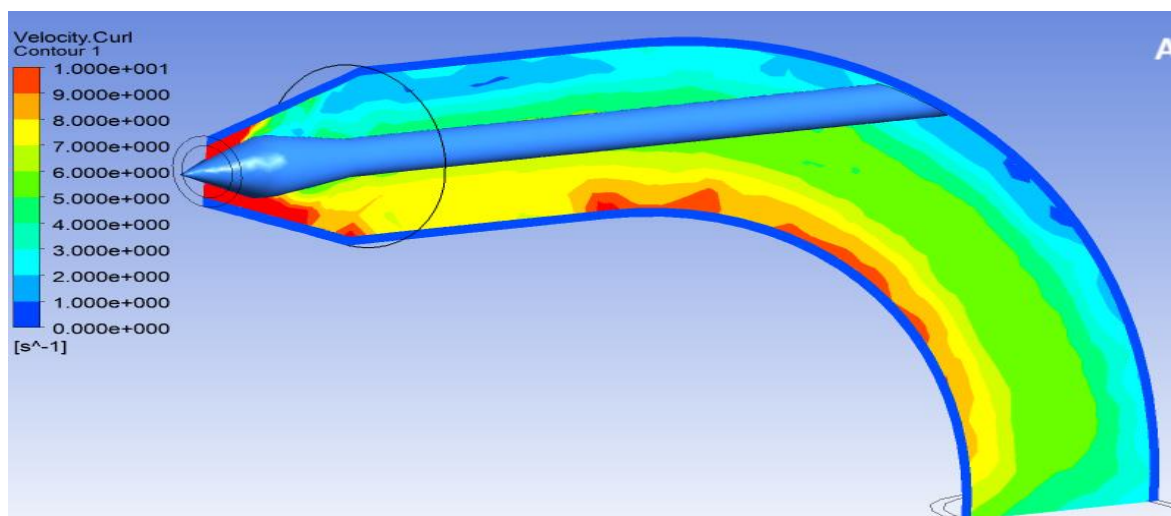
Εικόνα 275: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



Εικόνα 276: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

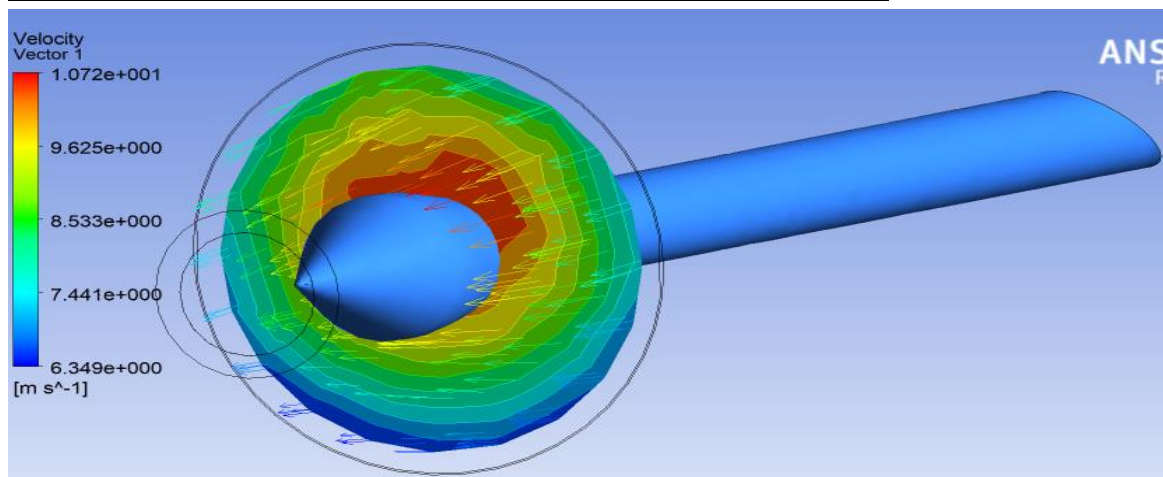


Εικόνα 277: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

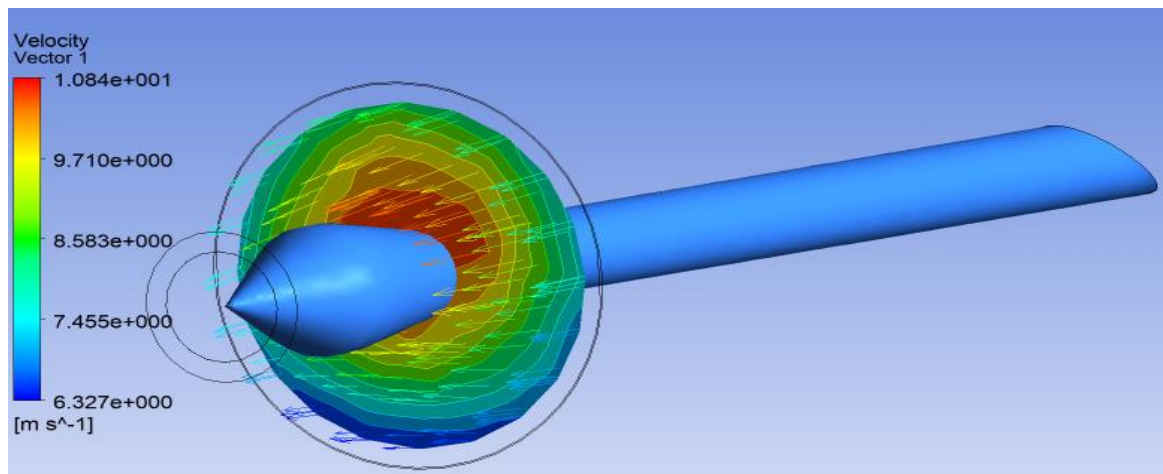


Εικόνα 278: Διάγραμμα στροβιλισμού ταχύτητας με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

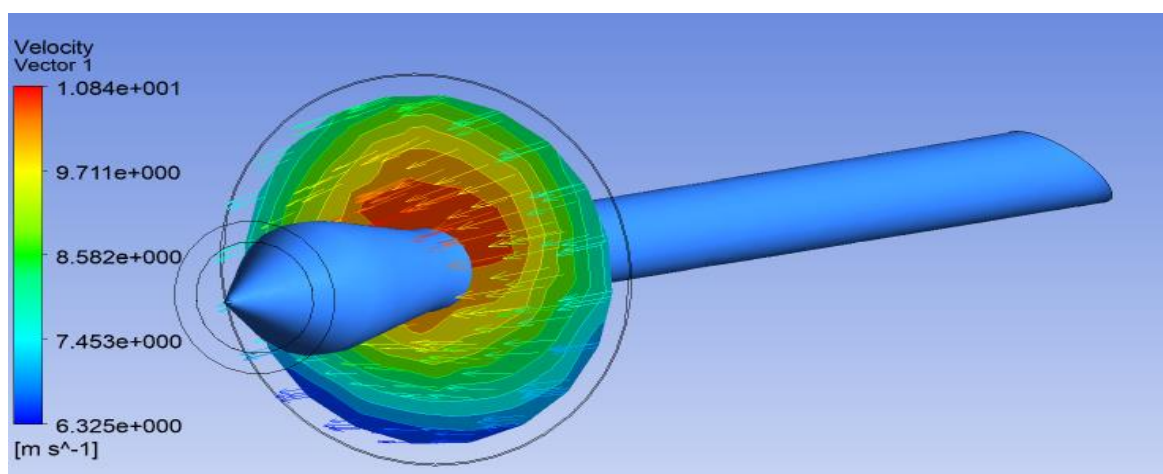
8.4.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ



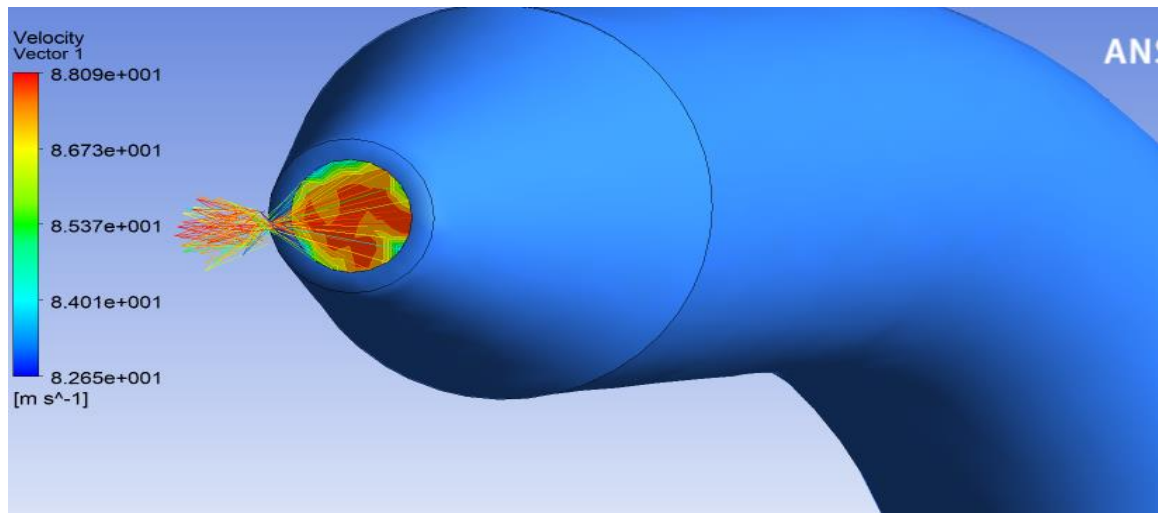
Εικόνα 279: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



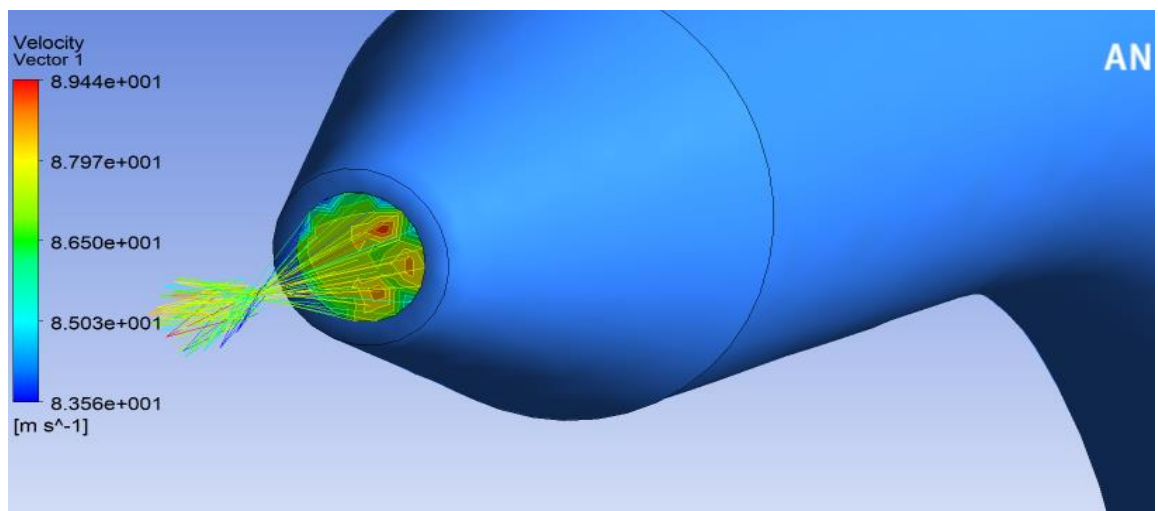
Εικόνα 280: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



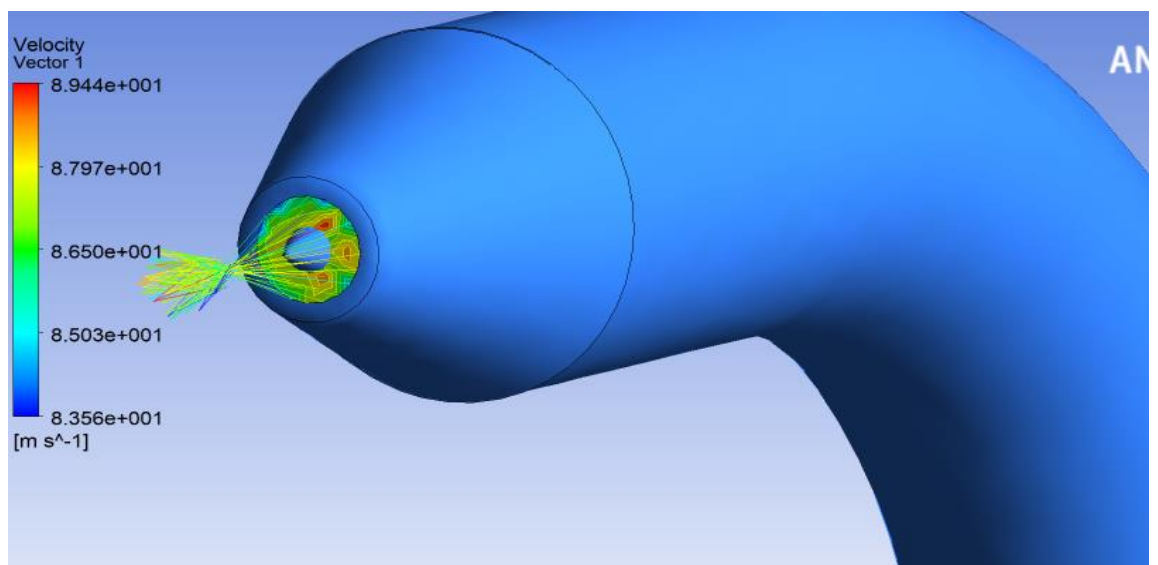
Εικόνα 281: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας στο σημείο που ξεκινά η στένωση της γεωμετρίας του αγωγού για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



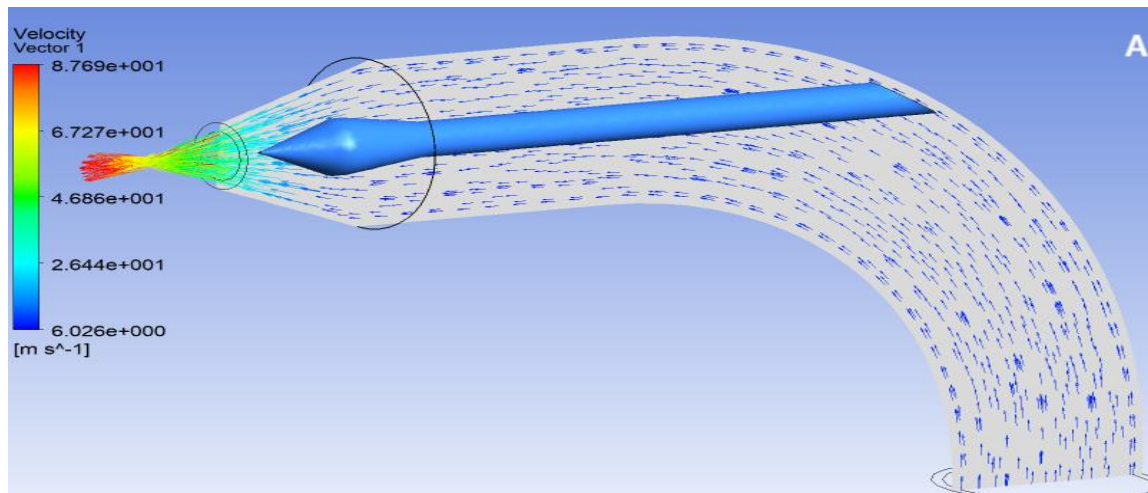
Εικόνα 282: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας εξόδου για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



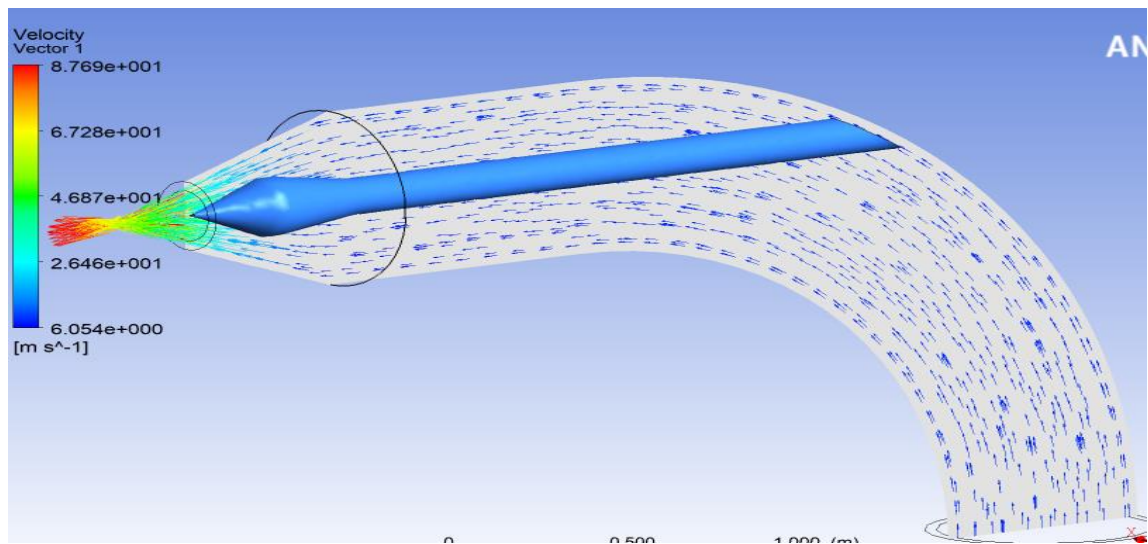
Εικόνα 283: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας εξόδου για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



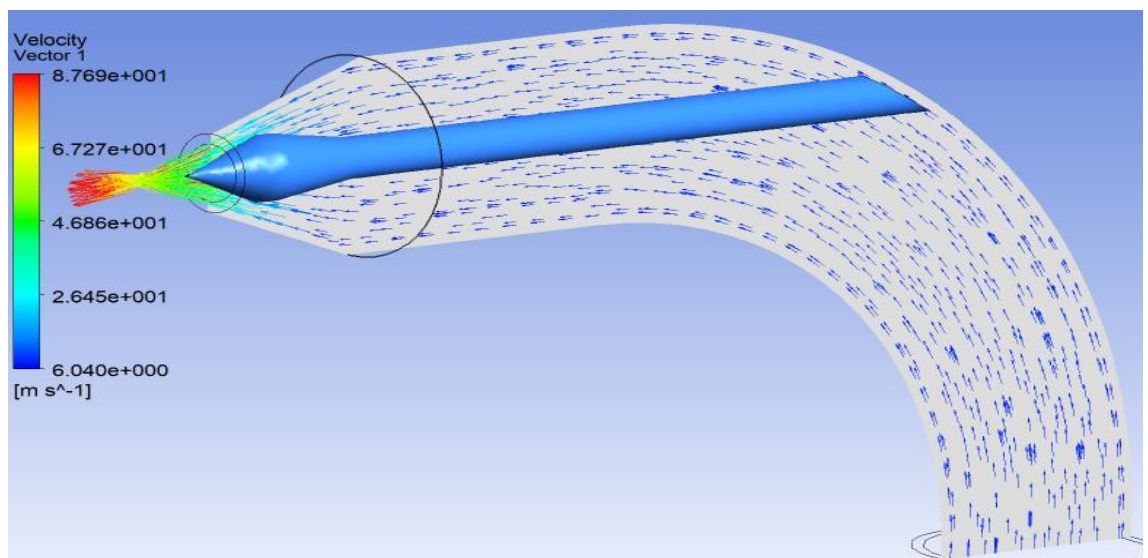
Εικόνα 284: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας εξόδου για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



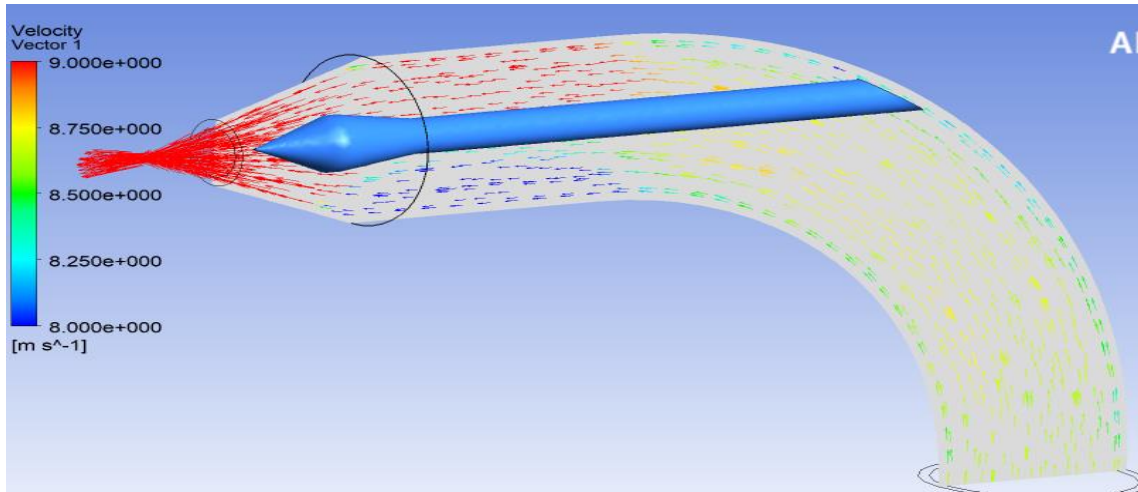
Εικόνα 285: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την πρώτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



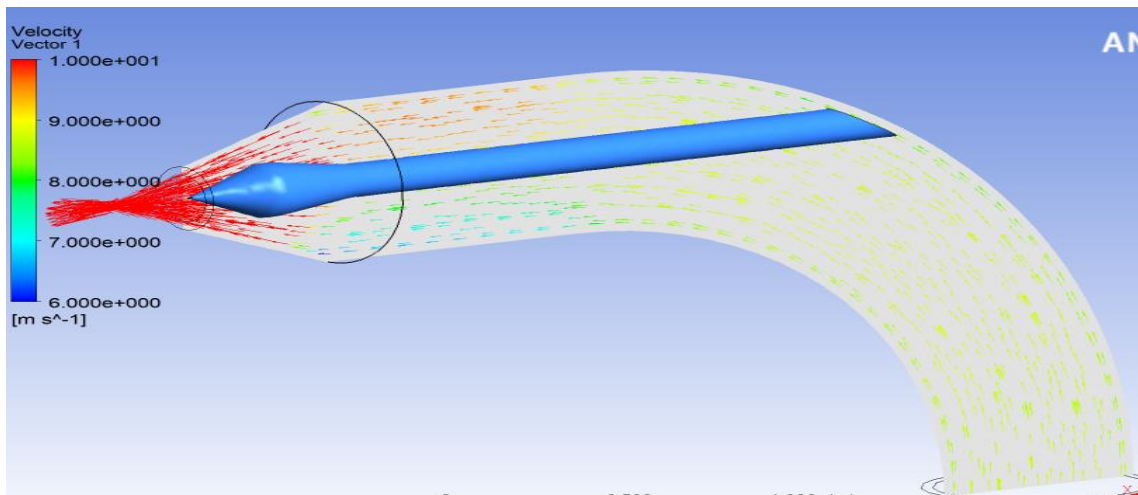
Εικόνα 286: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



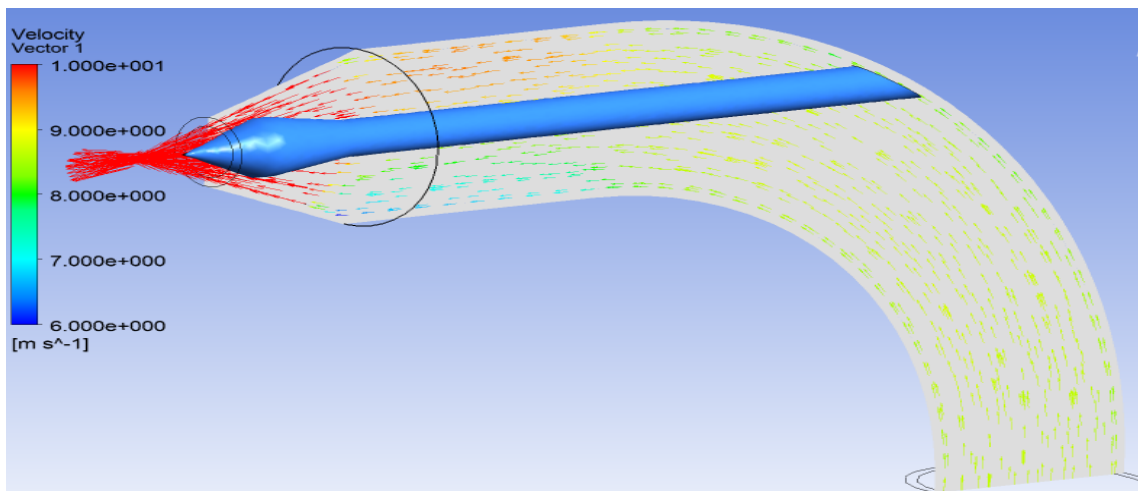
Εικόνα 287: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού για την τρίτη περίπτωση. Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



Εικόνα 288: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, (πρώτη περίπτωση). Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



Εικόνα 289: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, (δεύτερη περίπτωση). Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.



Εικόνα 290: Διάγραμμα διανυσμάτων ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού με αλλαγμένη κλίμακα, ώστε να φαίνονται οι μεταβολές καθώς καμπυλώνει ο αγωγός, (τρίτη περίπτωση). Ανάκτηση από: Λογισμικό ANSYS.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΟΜΑΛΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά στα βασικά μέρη του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που διαθέτει μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, αλλά και σε ορισμένες παραμέτρους που συμβάλλουν στην ομαλή λειτουργία της, καθώς και στην αποτελεσματικότερη διαχείριση και επίλυση πιθανών προβλημάτων και δυσλειτουργιών της. Πιο συγκεκριμένα εξετάζονται περιληπτικά διατάξεις όπως η γεννήτρια, οι μετασχηματιστές, τα ηλεκτρονικά ισχύος, μελετώνται ενεργειακά διαγράμματα ως συνάρτηση υδρολογικών δεδομένων, πραγματοποιούνται ακριβέστεροι υπολογισμοί ισχύος και ενέργειας, αναλύεται η σημασία του συστήματος ψύξης των στροβίλων, αλλά και του εκτροπέα δέσμης στην παραγωγική διαδικασία, ενώ, τέλος, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση σε θέματα σπηλαίωσης και διαβρώσεων στα σκαφίδια.

Επεκτείνοντας την αναφορά στα ηλεκτρονικά ισχύος, ουσιαστικά πρόκειται για ηλεκτρονικά συστήματα τα οποία διαχειρίζονται την ηλεκτρική ισχύ και μετατρέπουν την τάση, την ένταση και την κυματομορφή του ρεύματος με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν από τα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής με σκοπό τη μεταφορά, τη διανομή, την αποθήκευση και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος διαιρούνται στις ακόλουθες κατηγορίες ανάλογα με τις μετατροπές που μπορούν να επιτελέσουν:

- μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε συνεχές ρεύμα, διαφορετικής τάσης και έντασης (μετατροπείς DC-DC ή DC-DC converters)
- μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές ρεύμα (μετατροπείς AC-DC ή ανορθωτικές διατάξεις, δηλαδή AC-DC rectifiers)
- μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα διαφορετικού πλάτους (ρυθμιστές AC-AC ή μετασχηματιστές, αν και πιο εύστοχος είναι ο όρος «ρυθμιστές τάσης», δηλαδή voltage regulators)
- μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα (μετατροπείς DC-AC ή αντιστροφείς, δηλαδή DC-AC inverters)

Ο αντικειμενικός στόχος των ηλεκτρονικών ισχύος είναι να προσαρμόζουν τις δυνατότητες του συστήματος της ηλεκτροπαραγωγής στις απαιτήσεις της κατανάλωσης, εξασφαλίζοντας παράλληλα την ποιότητα και την ποσότητα της ενέργειας κατά τον βέλτιστο δυνατό τρόπο (Hart, 2011). Στα ηλεκτρονικά ισχύος υπάγονται συσκευές που μελετώνται περιληπτικά σε αυτό το κεφάλαιο, όπως οι μετασχηματιστές και ο ρυθμιστής τάσης, ενώ από αυτή τη μεγάλη οικογένεια ηλεκτρονικών εξαρτημάτων δεν απουσιάζουν βοηθητικές διατάξεις, όπως ο ρυθμιστής συχνότητας και ισχύος.

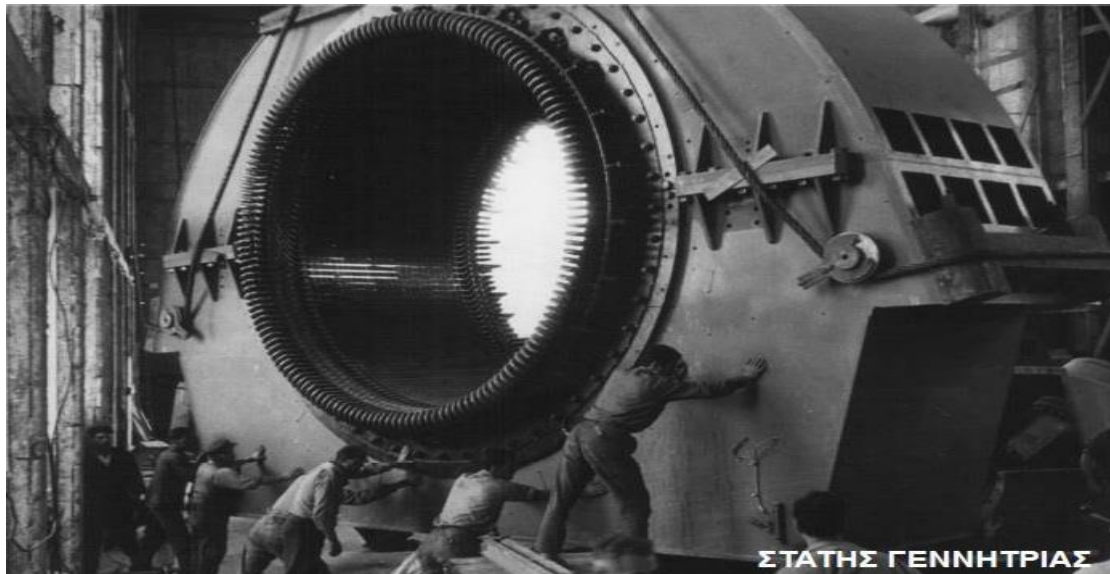
9.1 ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η γεννήτρια της ηλεκτροπαραγωγής είναι μια ηλεκτρική μηχανή η οποία αξιοποιεί τη μηχανική ενέργεια στην είσοδό της που προκαλείται από την περιστροφή του υδροστροβίλου Pelton και την μετατρέπει σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια συγκεκριμένης τάσης και συχνότητας (εναλλασσόμενο ονομάζεται το ηλεκτρικό ρεύμα του οποίου η ένταση και η κατεύθυνση μεταβάλλονται περιοδικά, ενώ αντίθετα στο συνεχές ρεύμα η ένταση παραμένει σταθερή σε συνάρτηση με το χρόνο). Η γεννήτρια (αλλιώς εναλλακτήρας) ανήκει στην κατηγορία των σύγχρονων γεννητριών, δηλαδή αυτών στις οποίες η συχνότητα της τάσης στην έξοδο της γεννήτριας προσδιορίζεται από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας (Chapman, 2013).

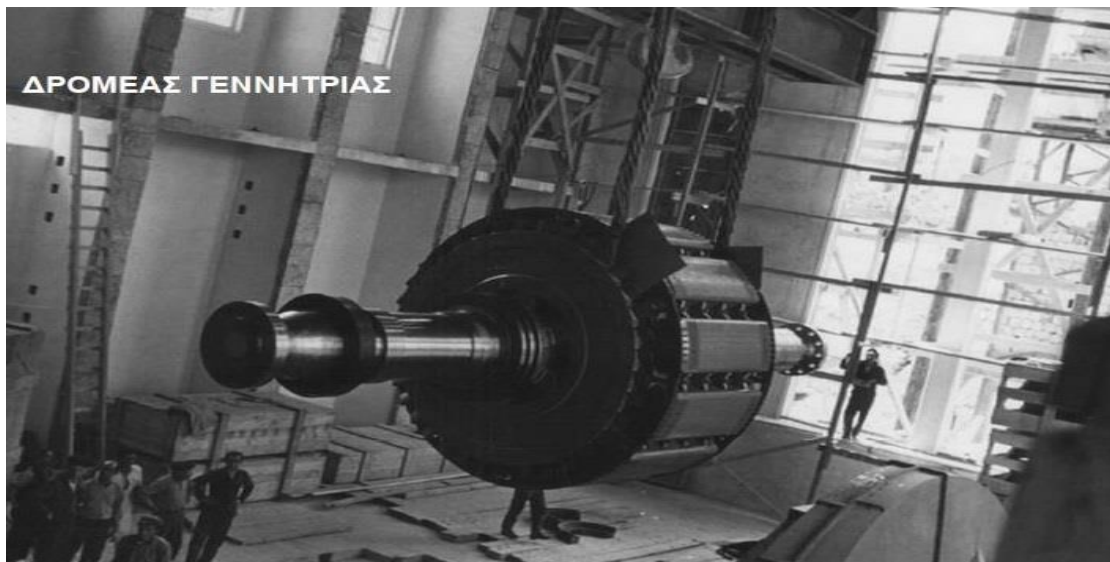
Τονίζεται εδώ ότι οι γεννήτριες αποτελούνται από δύο βασικά μέρη, το ακίνητο, που ονομάζεται στάτης και το κινούμενο, που ονομάζεται δρομέας. Για την επίτευξη ομαλής λειτουργίας της γεννήτριας είναι προαπαιτούμενη η παροχή συνεχούς ρεύματος στο δρομέα της, το οποίο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της. Καθώς ο δρομέας περιστρέφεται λόγω της επίδρασης της κίνησης του υδροστροβίλου Pelton (οι διατάξεις βρίσκονται στον ίδιο άξονα), το μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται επίσης, συνεπώς αυτό το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει μια τριφασική εναλλασσόμενη τάση στο στάτη, η οποία εμφανίζεται στην έξοδο της μηχανής (Penche, 1998). Η τριφασική τάση αποτελείται από τρεις μονοφασικές τάσεις οι οποίες έχουν την ίδια συχνότητα και διαφέρουν μεταξύ τους κατά 120° . Οι εναλλακτήρες υπάγονται σε δύο βασικές κατηγορίες, σε αυτούς που διαθέτουν δρομέα έκτυπων πόλων και σε αυτούς που διαθέτουν κυλινδρικό δρομέα.

Η βασική διαφορά τους έγκειται στο πλήθος των πόλων της γεννήτριας και συγκεκριμένα κυλινδρικό δρομέα έχουν συνήθως οι γεννήτριες δύο ή τεσσάρων πόλων, ενώ ο δρομέας έκτυπων πόλων συναντάται σε γεννήτριες με περισσότερους από τέσσερις πόλους. Εκτός από το πλήθος των πόλων, παρατηρούνται και γεωμετρικές διαφορές, αφού στις γεννήτριες έκτυπων πόλων, οι πόλοι εξέχουν από την επιφάνεια του δρομέα, κάτι το οποίο δε συμβαίνει στις γεννήτριες που διαθέτουν κυλινδρικό δρομέα. Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι, σύμφωνα με την ενότητα 2.3, υπάρχει αλληλεξάρτηση μεταξύ του αριθμού των πόλων, της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα (ταυτίζεται με αυτή του στροβίλου), καθώς και της συχνότητας του δικτύου, όπως φαίνεται και στον πίνακα 5.

Επαναλαμβάνεται επομένως ότι στην περίπτωση του σταθμού Πλαστήρα χρησιμοποιείται ανά μονάδα ηλεκτροπαραγωγής μια γεννήτρια 12 πόλων που περιστρέφεται με ταχύτητα 500rpm στη σταθερή συχνότητα δικτύου των 50Hz. Στη συνέχεια παρατίθενται εικόνες του στάτη και του δρομέα του ΥΗΣ Πλαστήρα, όπως απαθανατίστηκαν κατά την εγκατάστασή τους, την περίοδο έναρξης λειτουργίας του σταθμού. Όπως γίνεται αντιληπτό, πρόκειται για δύο πολύ βαριές και ογκώδεις κατασκευές, με το στάτη να ζυγίζει 85 τόνους και το δρομέα 114.5 τόνους.



Εικόνα 291: Ο στάτης της γεννήτριας ηλεκτροπαραγωγής στον ΥΗΣ Πλαστήρα.
Ανάκτηση από: <https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira01.pdf>



Εικόνα 292: Ο δρομέας της γεννήτριας ηλεκτροπαραγωγής στον ΥΗΣ Πλαστήρα. Ανάκτηση από: <https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira01.pdf>

Περνώντας σε ορισμένα κάπως πιο εξειδικευμένα στοιχεία αναφορικά με τη γεννήτρια, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι στον υδροηλεκτρικό σταθμό Πλαστήρα χρησιμοποιούνται γεννήτριες οριζόντιου άξονα με μέγιστη ισχύ λειτουργίας 46MVA η καθεμιά, ενώ η ονομαστική ισχύς της πινακίδας κυμαίνεται στα 47MVA. Η συγκεκριμένη μονάδα μέτρησης αναφέρεται στην φαινόμενη ισχύ και προκύπτει με βάση το γινόμενο της τάσης με την ένταση. Οι ηλεκτρικές διατάξεις του σταθμού αναπτύσσουν τάση 15750V μεταξύ των τριών φάσεων (η μέγιστη τάση οριοθετείται στα 16500V), ενώ, αναφορικά με την ένταση, το όριό της είναι τα 1800A, ενώ συνήθως κυμαίνεται στα 1725A. Για να επαληθευτούν τα δεδομένα αυτά κρίνεται χρήσιμη η παράθεση ορισμένων μαθηματικών πράξεων που επεξηγούν πώς προκύπτει η φαινόμενη ισχύς. Η εξίσωση από την οποία υπολογίζεται είναι η εξής (Chapman, 2013):

$$S[MVA] = \frac{\sqrt{3} \times V[V] \times I[A]}{10^6}, \quad P[MW] = \cos\varphi \times S[MVA] \quad (51)$$

Μέσα στις αγκύλες βρίσκονται οι μονάδες των μεγεθών των εξισώσεων και συγκεκριμένα το $P[MW]$ είναι η ενεργός (ή πραγματική) ισχύς, ενώ το $S[MVA]$ η φαινόμενη ισχύς. Στον αριθμητή της αριστερής εξίσωσης βρίσκεται η τάση και η ένταση του ρεύματος, ενώ ο παράγοντας $\sqrt{3}$ οφείλεται στο ότι οι υπολογισμοί βασίζονται στα πολικά και όχι στα φασικά μεγέθη (τάση και ένταση), ενώ ισχύει ότι στη γεννήτρια οι τρεις φάσεις του στάτη είναι συνδεδεμένες σε αστέρα. Τέλος ο παράγοντας $\cos\varphi$ ονομάζεται συντελεστής ισχύος και λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1 (εδώ σύμφωνα με τα δεδομένα του ΥΗΣ Πλαστήρα ισούται με 0.85, ενώ γενικά είναι επιθυμητό να προσεγγίζει τη μονάδα όσο το δυνατόν περισσότερο, για λόγους που σχετίζονται με τη βέλτιστη αποδοτικότητα της διάταξης) (Ware, 2006). Όπως γίνεται αντιληπτό, ο συντελεστής ισχύος αποτελεί το συνημίτονο της γωνίας φ που σχηματίζουν τα διανύσματα της τάσης και της έντασης και εκφράζει το ποσοστό της ισχύος που μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο. Αντικαθιστώντας για τη φαινόμενη ισχύ λαμβάνονται τα εξής (Charman, 2013):

$$S = \frac{\sqrt{3} \times 15750 \times 1725}{10^6} = 47.06 \approx 47MVA \quad (52)$$

Επιπρόσθετα αντικαθιστώντας στην εξίσωση της πραγματικής ισχύος:

$$P = 0.85 * S = 39.95 \approx 40MW \quad (53)$$

Τέλος, σχολιάζοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατηρείται ότι τα 40MW απέχουν από τα 43.3MW που ισχύουν ανά μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, ωστόσο αν οι υπολογισμοί πραγματοποιηθούν με έναν πιο βελτιωμένο συντελεστή ισχύος (κοντά στο 0.92), ικανοποιείται η απαίτηση των 43.3MW. Η παρατήρηση αυτή εξηγεί τη σημασία που έχει για τη ΔΕΗ η διατήρηση υψηλού συντελεστή ισχύος στους μεγάλους καταναλωτές της, αφού η μείωση του συντελεστή ισχύος μειώνει την παραγόμενη (και πωλούμενη) ενεργό ισχύ από το σταθμό ηλεκτροπαραγωγής.

9.2 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

Ως μετασχηματιστές ορίζονται οι ηλεκτρικές συσκευές οι οποίες μετατρέπουν εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια συγκεκριμένης τάσης σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια ίδιας συχνότητας, αλλά διαφορετικής τάσης (μικρότερης ή μεγαλύτερης) αξιοποιώντας την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους. Οι πιο απλουστευμένες κατασκευές μετασχηματιστών αποτελούνται από δύο πηνία (Charman, 2013), που τυλίγονται γύρω από έναν κοινό σιδηρομαγνητικό πυρήνα και συνήθως δεν είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Το ένα από τα δύο πηνία (τυλίγματα) ονομάζεται πρωτεύον (ή τύλιγμα εισόδου του μετασχηματιστή) και συνδέεται με μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης, ενώ το άλλο πηνίο ονομάζεται δευτερεύον (ή τύλιγμα εξόδου) και συνδέεται με το φορτίο (Charman, 2013).

Οι μετασχηματιστές συγκαταλέγονται ανάμεσα στις πιο αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές (Flanagan, 1993), (σε ορισμένες μεγάλες μονάδες αποδίδουν έως και το 99,75% της ισχύος εισόδου στην έξοδό τους) (European Commission, 1999), ενώ η βασική μαθηματική σχέση που τους διέπει ορίζει ότι ο λόγος των τάσεων του δευτερεύοντος προς το πρωτεύον τύλιγμα είναι ίσος με το λόγο του αριθμού των περιελίξεων του σύρματος του δευτερεύοντος προς το πρωτεύον τύλιγμα. Δηλαδή ισχύει (Charman, 2013):

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} \quad (54),$$

όπου V_S η τάση του δευτερεύοντος (secondary) τυλίγματος, V_P η τάση του πρωτεύοντος (primary) τυλίγματος, N_S ο αριθμός των περιελίξεων του σύρματος στο δευτερεύον τύλιγμα και N_P ο αριθμός των περιελίξεων του σύρματος στο πρωτεύον τύλιγμα. Συνεπώς γίνεται αντιληπτό ότι όταν $N_S > N_P$ τότε στην έξοδο του μετασχηματιστή η τάση είναι μεγαλύτερη από ότι στην είσοδο (ανύψωση της εναλλασσόμενης τάσης), ενώ όταν $N_S < N_P$ τότε στην έξοδο του μετασχηματιστή η τάση είναι μικρότερη από ότι στην είσοδο (υποβιβασμός της εναλλασσόμενης τάσης).

Στο σταθμό Πλαστήρα χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές ανύψωσης τάσης, οι οποίοι λαμβάνουν τα 15.75kV της γεννήτριας και τα μετατρέπουν σε 150kV, ώστε να οδηγηθούν μέσω των γραμμών του δικτύου μεταφοράς της ΔΕΗ και να καλύψουν την απαιτούμενη ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια. Τονίζεται στο σημείο αυτό ότι η βασικότερη αναγκαιότητα ύπαρξης των μετασχηματιστών έγκειται στο ότι παρέχουν τη δυνατότητα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε πολύ μεγάλες αποστάσεις με σημαντικά μειωμένες απώλειες.

Εξηγώντας τώρα τον τρόπο με τον οποίο εξυπηρετούνται οι οικιακοί καταναλωτές, το ηλεκτρικό ρεύμα διοχετεύεται στους υποσταθμούς, οι οποίοι αποτελούν κόμβους στο δίκτυο της ηλεκτροδότησης και εκεί πραγματοποιείται υποβιβασμός της τάσης στα 20kV. Από τα σημεία αυτά αρχίζουν οι γραμμές διανομής, οι οποίες καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής και εκεί γίνεται υποβιβασμός από τη μέση στη χαμηλή τάση (220V), την οποία χρησιμοποιούν οι περισσότεροι οικιακοί καταναλωτές. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνονται οι μετασχηματιστές ανύψωσης του ΥΗΣ Πλαστήρα.



Εικόνα 293: Οι μετασχηματιστές ανυψώσεως του ΥΗΣ Πλαστήρα. Ανάκτηση από: <https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira01.pdf>

Υπογραμμίζεται στο σημείο αυτό ότι η ζεύξη (σύνδεση) του σταθμού παραγωγής με τα δίκτυα διανομής μέσης (20kV) και υψηλής (150kV) τάσης πραγματοποιείται σε μια υπαίθρια και περιφραγμένη εγκατάσταση που λέγεται υποσταθμός και βρίσκεται στο χώρο του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Είναι απαραίτητο να κατανοηθεί ότι ο υποσταθμός αυτός και ο υποσταθμός διανομής στον οποίο γίνεται ο υποβιβασμός από τη μέση στη χαμηλή τάση (βρίσκεται εκτός του χώρου του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής) είναι δύο εντελώς διαφορετικές διατάξεις.

Στη συνέχεια, αναφέρεται ότι υπάρχουν σε κάθε μονάδα ηλεκτροπαραγωγής και ορισμένοι βοηθητικοί μετασχηματιστές, οι οποίοι υποβιβάζουν την τάση από τα 15.75kV της γεννήτριας στα 400V, με σκοπό να τροφοδοτήσουν ορισμένες βοηθητικές διατάξεις του σταθμού. Παράλληλα, μια κατηγορία βοηθητικών μετασχηματισμών είναι οι μετασχηματιστές διέγερσης (σε αυτούς η τάση υποβιβάζεται από τα 15.75kV της γεννήτριας στα 530V), οι οποίοι δεν συναντώνται σε όλες τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, ενώ η χρησιμότητά τους έγκειται στην τροφοδότηση του δρομέα της γεννήτριας με συνεχές ρεύμα. Ο ΥΗΣ Πλαστήρα δεν διαθέτει μετασχηματιστές διέγερσης, λόγω διαφορετικής αρχιτεκτονικής στο σύστημα της διέγερσης (Τσιακανίκας, 2017).

Τέλος κρίνεται σκόπιμο να ειπωθεί ότι η έννοια των μετασχηματιστών είναι αρκετά οικεία και στα αντικείμενα που χρησιμοποιούνται σε καθημερινή βάση, αφού για παράδειγμα σε έναν φορτιστή φορητού ηλεκτρονικού υπολογιστή παρατηρείται η ύπαρξη ενός μικρού κουτιού, το οποίο είναι μικρός μετασχηματιστής που υποβιβάζει την εναλλασσόμενη τάση των 230V του οικιακού δικτύου στη συνεχή τάση των 19.5V που απαιτούνται για τη φόρτιση της μπαταρίας του υπολογιστή. Αν δεν παρεμβαλλόταν ο μετασχηματιστής, η συσκευή του υπολογιστή θα καταστρεφόταν λόγω της μεγάλης διαφοράς τάσης.

9.3 ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΟΝΑΔΑΣ

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά σε ορισμένες ηλεκτρονικές διατάξεις, η ύπαρξη των οποίων αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την ομαλή λειτουργία μιας μονάδας κατά τη διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγής. Επίσης εξηγείται η σημασία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου σε μια τέτοια εγκατάσταση, ενώ παράλληλα γίνεται μια συνοπτική αναφορά σε θεμελιώδη βοηθητικά συστήματα που προσφέρουν μεγαλύτερη ευχέρεια στον χειρισμό της μονάδας, αλλά και των κρίσιμων καταστάσεων που μπορεί να προκύψουν κατά τη λειτουργία του σταθμού.

9.3.1 ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ ΜΟΝΑΔΑΣ

Ο ρυθμιστής στροφών (governor) αποτελεί ένα από τα βασικότερα συστήματα αυτομάτου ελέγχου στη διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγής, καθώς είναι υπεύθυνος για την εύρυθμη λειτουργία μιας πληθώρας παραμέτρων που αφορούν τον υδροστροβίλο Pelton, αλλά και τα παρεμφερή υποσυστήματά του. Πρόκειται για μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διάταξη που είναι επιφορτισμένη με πολλά καθήκοντα, τα βασικότερα από τα οποία είναι τα εξής (Zhang, 2016; Thapar, 2019):

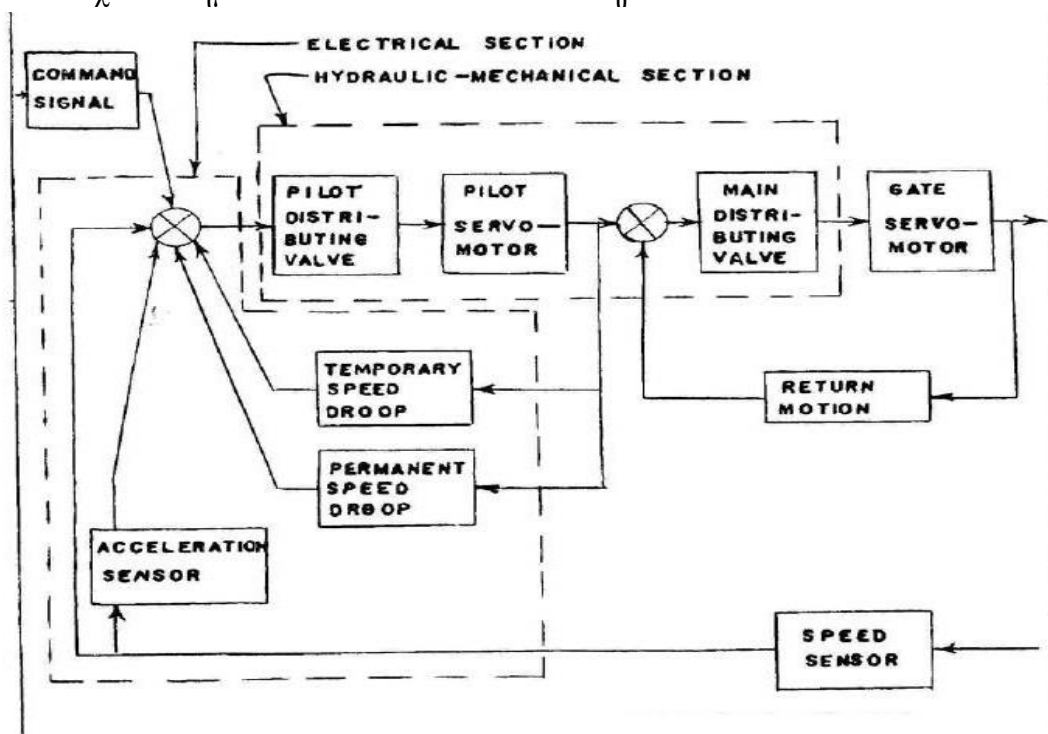
- Αυξομείωση της παροχής του νερού με σκοπό τον έλεγχο της ταχύτητας του υδροστροβίλου ή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Διατήρηση σταθερής περιστροφικής ταχύτητας του υδροστροβίλου ανάλογα με το φορτίο και τις συνθήκες στο ακροφύσιο.
- Διατήρηση της συχνότητας του δικτύου.
- Έλεγχος της αποδοτικής λειτουργίας των σερβομηχανισμών. (Ως σερβομηχανισμοί ορίζονται οι αυτόματες συσκευές που χρησιμοποιούν μεταβλητές θέσης, ταχύτητας ή επιτάχυνσης και συγκρίνουν την τιμή που έχει μια από αυτές τις μεταβλητές σε ένα όργανο μέτρησης με μια επιθυμητή τιμή. Αν υπάρχει κάποιο σφάλμα, προσπαθούν να το μειώσουν ή να το εκμηδενίσουν (Karimi, et al., 2009; Kumari, et al., 2020). Ένα τυπικό παράδειγμα σερβομηχανισμού είναι το υδραυλικό τιμόνι του αυτοκινήτου).
- Σε καταστάσεις έκτακτων συνθηκών ομαλή απενεργοποίηση της λειτουργίας της μονάδας, λαμβάνοντας παράλληλα υπ' όψιν ότι πιθανή αύξηση ταχύτητας περιστροφής του υδροστροβίλου ή αύξηση πίεσης εντός του ακροφυσίου λόγω του κλεισίματος των βελονών πρέπει να βρίσκεται εντός των επιτρεπόμενων ορίων.

Στους παλαιότερους υδροηλεκτρικούς σταθμούς ο ρυθμιστής στροφών αποτελείται από μια αλληλουχία σερβομηχανισμών, υδραυλικών βαλβίδων και ηλεκτρικών ρελέ που συνδυαστικά εργάζονται για την απροβλημάτιστη λειτουργία των συστημάτων της μονάδας (Τσιακανίκας, 2017). Συγκεκριμένα στην περίπτωση του σταθμού Πλαστήρα ο ρυθμιστής στροφών αποτελείται από ένα σύστημα μηχανικών και υδραυλικών εξαρτημάτων που διατηρεί το επίπεδο των στροφών της

γεννήτριας στις 500rpm, ενώ παράλληλα λειτουργεί ως επικουρικό το σύστημα του μηχανισμού υπερταχύνσεως, το οποίο θέτει σε παύση λειτουργίας τον υδροστρόβιλο μόλις ξεπεραστεί το φράγμα των 575 rpm.

Ωστόσο, οι συνθήκες έχουν μεταβληθεί σε μεγάλο βαθμό στους νεότερους σταθμούς, καθώς η έλευση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, αλλά και των καινοτόμων αισθητήρων έχουν οδηγήσει σε μια εντελώς διαφορετική πολιτική επιτήρησης, ελέγχου και χειρισμών. Πιο συγκεκριμένα, πλέον υπάρχουν εγκατεστημένα συστήματα πλήρως ψηφιακά, στα οποία μεταφέρονται ψηφιακά σήματα από όλες τις διατάξεις της μονάδας, με αποτέλεσμα να υπάρχει άμεση ενημέρωση του χειριστή για το καθεστώς λειτουργίας της μονάδας σε πραγματικό χρόνο.

Όπως γίνεται αντιληπτό, με την είσοδο των τεχνολογικών αυτών επιτευγμάτων διευκολύνεται περαιτέρω το έργο των χειριστών, αφού πραγματοποιείται πιο άμεσα η ανίχνευση και η αντιμετώπιση πιθανών δυσλειτουργιών της μονάδας στη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Τέλος παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα λειτουργίας του ρυθμιστή στροφών και μάλιστα επιλέχθηκε το συγκεκριμένο, καθώς χρησιμοποιείται σε παλιούς σταθμούς, κάτι που ανταποκρίνεται πιο εύστοχα στο αντίστοιχο σύστημα που διαθέτει ο ΥΗΣ Πλαστήρα.



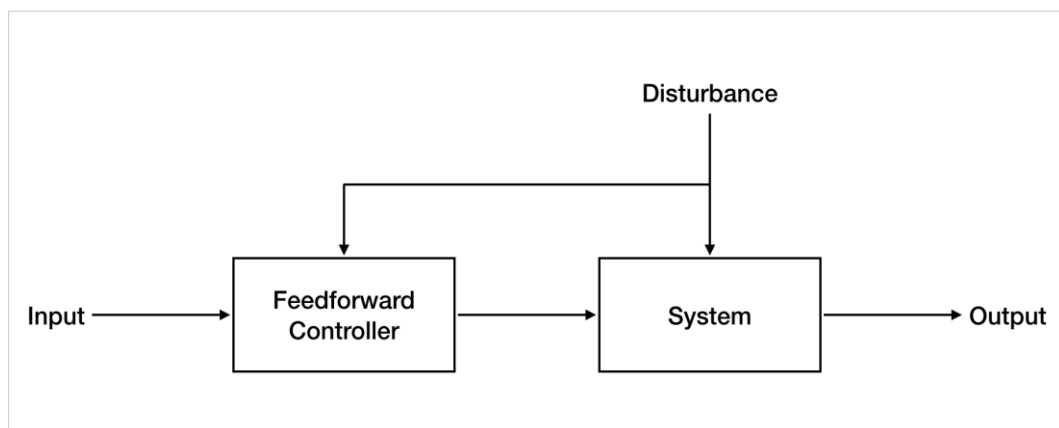
Εικόνα 294: Ένα τυπικό διάγραμμα ρυθμιστή στροφών σε παλαιότερους σταθμούς. Ανάκτηση από: Dr. Thapar R., Hydro Turbine Governing System.

9.3.2 ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

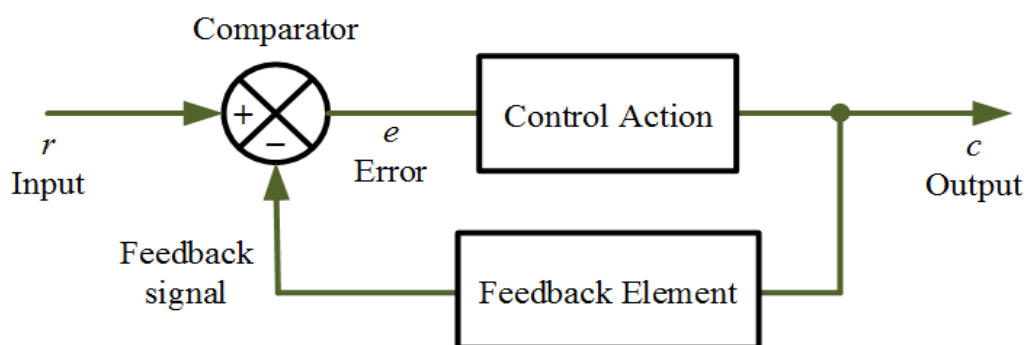
Μια ακόμη καταλυτικής σημασίας ρυθμιστική διάταξη αποτελεί ο ρυθμιστής τάσης, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη διατήρηση σταθερής τάσης κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μονάδας. Η απαίτηση που πρέπει να ικανοποιείται ορίζει ότι η μεταβολή της τάσης δεν είναι απεριόριστη και κυμαίνεται σε μικρά όρια που είναι

ικανοποιητικά. Συνεπώς ο ρυθμιστής τάσης επενεργεί στο κύκλωμα διέγερσης του μετασχηματιστή (εναλλακτήρα) και ανάλογα με τις μεταβολές που υφίσταται το φορτίο, δίνει την εντολή για τροφοδότηση του τυλίγματος του εναλλακτήρα με ρεύμα κατάλληλης τιμής, επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο τη σταθεροποίηση της τάσης. Γενικότερα ο σχεδιασμός του ρυθμιστή μπορεί να βασίζεται σε σχεδιασμό με έλεγχο πρόσδρασης (feedforward control) ή έλεγχο ανάδρασης (feedback control) (Hopgood, 2001).

Η διαφορά των δύο μεθόδων έγκειται στο ότι στον έλεγχο πρόσδρασης μετράται η τιμή μιας ή περισσότερων μεταβλητών εισόδου (input) μιας διαδικασίας, συγκρίνεται με την απαιτούμενη τιμή και προσαρμόζεται καταλλήλως, ενώ στον έλεγχο ανάδρασης μετράται η τιμή της μεταβλητής εξόδου (output), συγκρίνεται με την απαιτούμενη τιμή και υπολογίζεται το σφάλμα της διαδικασίας και έτσι προσαρμόζονται αναλόγως οι τιμές των μεταβλητών εισόδου, ώστε να δώσουν τελικά την τιμή εξόδου που ικανοποιεί την απαίτηση του συστήματος (Fink & Beatty, 1978).



Εικόνα 295: Ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου με έλεγχο πρόσδρασης. Ανάκτηση από: https://www.researchgate.net/figure/Block-flow-diagram-of-A-feedback-control-and-B-feedforward-control_fig1_326615046



www.electricalworkbook.com

Εικόνα 296: Ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου με έλεγχο ανάδρασης. Ανάκτηση από: <https://electricalworkbook.com/closed-loop-or-feedback-control-systems/>

Οι ρυθμιστές τάσης (ή σταθεροποιητές) υπάγονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τους σταθεροποιητές συνεχούς και εναλλασσόμενης τάσης, ενώ για τις κατηγορίες αυτές υπάρχουν αντίστοιχα υποκατηγορίες. Συγκεκριμένα στους σταθεροποιητές εναλλασσόμενης τάσης υπάγονται (Alley & Atwood, 1973):

- οι ρυθμιστές τάσης περιστροφής πηνίου (ο παλαιότερος τύπος)
- οι ηλεκτρομηχανολογικοί ρυθμιστές (με χρήση σερβομηχανισμών)
- ρυθμιστής σταθερής τάσης (με χρήση πυκνωτή)

Στους σταθεροποιητές συνεχούς τάσης υπάγονται (Alley & Atwood, 1973):

- οι γραμμικοί ρυθμιστές σειράς (για συσκευές συνεχούς λειτουργίας)
- ρυθμιστές εναλλαγής (για συσκευές με διατάξεις on/off)
- ρυθμιστές SCR (με χρήση πυριτίου που είναι ημιαγωγός)

Τέλος επισημαίνεται ότι δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει μόνο ένας τύπος σταθεροποιητή σε μια διάταξη, αλλά αντίθετα στις περισσότερες εφαρμογές ο έλεγχος της τάσης πραγματοποιείται με συνδυασμό διαφορετικών τύπων σταθεροποιητών, είτε συνεχούς, είτε εναλλασσόμενης τάσης.

9.3.3 ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΚΥΡΙΑΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ

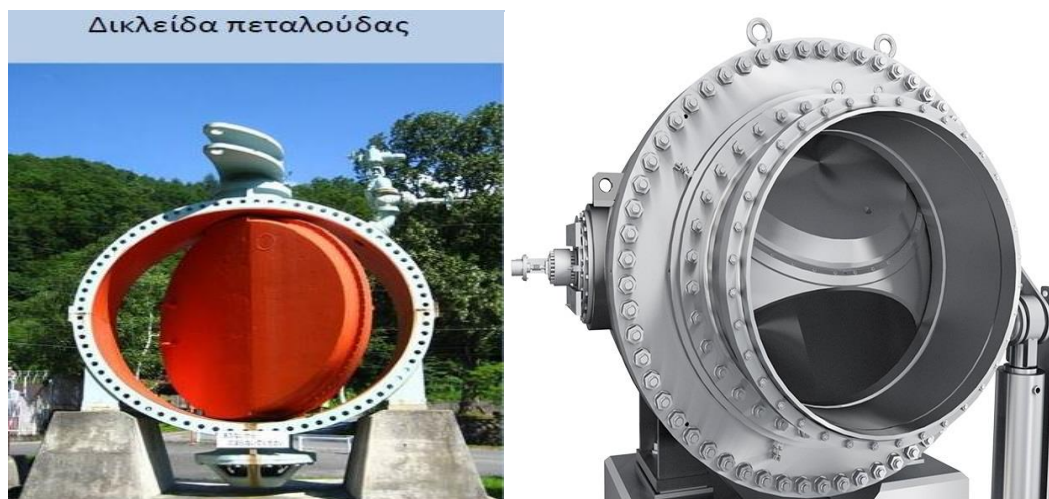
Στην υποενότητα αυτή εξετάζεται η σημασία των βαλβίδων κύριας εισαγωγής, οι οποίες είναι ιδιαίτεροι μηχανισμοί που τοποθετούνται σε κομβικά σημεία της διαδρομής που ακολουθεί το νερό κατά την πορεία του από το σταθμό προς το φράγμα. Η χρησιμότητά τους έγκειται στο ότι προσφέρουν καλύτερη εποπτεία της ροής των μεγάλων υδάτινων μαζών που εισέρχονται στα ακροφύσια και διαθέτουν υψηλές πιέσεις, λόγω του μεγάλου μανομετρικού ύψους μεταξύ φράγματος και σταθμού. Παράλληλα αποτελούν και διατάξεις ασφαλείας σε περίπτωση που η παροχή του νερού στη σήραγγα ή στον αγωγό προσαγωγής ξεπεράσει τα επιτρεπτά όρια, οπότε και η περίσσεια του νερού πρέπει να οδηγηθεί στους πύργους εκτόνωσης για να αποβληθεί.

Οι βαλβίδες κύριας εισαγωγής υπάγονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις δικλείδες πεταλούδας και τις σφαιρικές δικλείδες. Τονίζεται στο σημείο αυτό ότι υπάρχουν και άλλες κατηγορίες, όπως οι βαλβίδες ολίσθησης ή οι βελονοειδείς βαλβίδες, ωστόσο στην παρούσα εργασία προτιμάται η αναφορά στους τύπους που απαντώνται πιο συχνά σε υδροηλεκτρικές μονάδες. Η διαφορά τους σχετίζεται με τα μεγέθη της πίεσης που μπορούν να δεχθούν, με τις σφαιρικές δικλείδες να υπερτερούν στον τομέα αυτό έναντι των δικλείδων πεταλούδας (Brekke, 2001).

Στον υδροηλεκτρικό σταθμό Πλαστήρα χρησιμοποιούνται και οι δύο τύποι βαλβίδων, σε διαφορετικά σημεία της διαδρομής του νερού. Όπως φαίνεται στην εικόνα 34, τοποθετείται μια δικλείδα τύπου πεταλούδας στο σημείο που τελειώνει η σήραγγα προσαγωγής και αρχίζει ο αγωγός προσαγωγής. Μέχρι το σημείο εκείνο η σήραγγα προσαγωγής είναι υπόγεια με το κάτω μέρος της κατασκευασμένο από σκυρόδεμα, ενώ μετά τη δικλείδα ξεκινά ο υπέργειος, μεταλλικός, συγκολλητός αγωγός προσαγωγής, όπως έχει δειχθεί στην εικόνα 39.

Αναφορικά με τη σφαιρική δικλείδα, αυτή τοποθετείται σε ένα εξίσου καταλυτικό σημείο, εκεί όπου το νερό έχει φτάσει στο σταθμό παραγωγής και οδεύει προς τα ακροφύσια. Η επιλογή της σφαιρικής δικλείδας έναντι της δικλείδας πεταλούδας στο σημείο αυτό επιβάλλεται λόγω των περίπου 58atm πίεσης που

δέχεται, τα οποία οφείλονται στο μανομετρικό ύψος των 577m μεταξύ φράγματος και σταθμού (Τσιακανίκας, 2017). Όπως γίνεται αντιληπτό, σε μονάδες με αρκετά μικρότερα μανομετρικά ύψη είτε χρησιμοποιούνται βαλβίδες τύπου πεταλούδας, είτε δε χρησιμοποιούνται καθόλου βαλβίδες κύριας εισαγωγής.



Εικόνα 297: Μια δικλείδα τύπου πεταλούδας και μια σφαιρική δικλείδα.
Ανάκτηση από: <https://geo.civ.uth.gr/images/documents/plastira02.pdf> και <https://adams-armaturen.de/wp/products/spherical-valve/>.

9.3.4 ΛΟΙΠΟΣ ΒΟΗΘΗΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

Σε έναν σταθμό ηλεκτροπαραγωγής υπάρχουν και ορισμένες απαραίτητες βοηθητικές διατάξεις, οι οποίες δεν συμπεριλαμβάνονται άμεσα στο σύστημα του υδροστροβίλου ή των ακροφυσίων, ωστόσο προσφέρουν, με την ιδιότητα των εφεδρικών συστημάτων, καθοριστικής σημασίας αρωγή στους βασικούς λειτουργικούς μηχανισμούς, ιδίως όταν παρίσταται ανάγκη. Αρχικά, μια πολύ χρήσιμη διάταξη είναι οι **γερανογέφυρες** του σταθμού (διακρίνονται με το κίτρινο χρώμα στην εικόνα 41), οι οποίες, αν και δεν χρησιμοποιούνται σε ημερήσια διάταξη, είναι αναγκαίες σε περίπτωση αστοχίας κάποιου υδροστροβίλου.

Πιο συγκεκριμένα, όταν ένας υδροστρόβιλος εμφανίζει φθορά και χρήζει άμεσης επισκευής, είναι απαραίτητη η εξαγωγή του από τον άξονα της μονάδας. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται μόνο με τη βοήθεια των γερανογεφυρών, αφού λόγω του μεγάλου βάρους του υδροστροβίλου, είναι αδύνατη η ανύψωσή του με άλλο τρόπο. Το ίδιο ισχύει αντίστοιχα και για τα συστήματα του στάτη και του δρομέα της γεννήτριας.

Στις περισσότερες μονάδες υπάρχει και πλήρως εξοπλισμένο **μηχανουργείο** (περιλαμβάνει τις βασικές εργαλειομηχανές, μηχανές συγκολλήσεων, καθώς και πληθώρα εργαλείων και εξοπλισμού ατομικής προστασίας), το οποίο μπορεί να καλύψει τις περισσότερες ανάγκες της μονάδας σε παρόμοιες περιπτώσεις, ωστόσο όταν αυτό δεν είναι εφικτό, ο ελαττωματικός εξοπλισμός επισκευάζεται ή αντικαθίσταται εκτός μονάδας ηλεκτροπαραγωγής. Για να γίνουν κατανοητές ποσοτικά οι τάξεις μεγέθους, υπενθυμίζεται ότι ένας υδροστρόβιλος Pelton στον ΥΗΣ

Πλαστήρα ζυγίζει περίπου 5 τόνους, ο στάτης της γεννήτριας 85 τόνους και ο δρομέας 114.5 τόνους.

Η μονάδα διαθέτει 2 γερανογέφυρες συνολικής ανυψωτικής ικανότητας 130 τόνων, επομένως, όπως γίνεται αντιληπτό, έχουν τη δυνατότητα να ανυψώσουν, μεμονωμένα βέβαια, ακόμα και τα πιο βαριά εξαρτήματα του σταθμού, όπως το δρομέα. Επισημαίνεται παράλληλα ότι, όπως και για άλλα τμήματα του εξοπλισμού, έτσι και για τις γερανογέφυρες ακολουθούνται ειδικά πρωτόκολλα ασφαλείας που σχετίζονται κυρίως με την εξασφάλιση της σωματικής ακεραιότητας των εργαζομένων. Συγκεκριμένα, ανά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα (συνήθως μια φορά το χρόνο ή και συχνότερα) πραγματοποιούνται πιστοποιήσεις, μέσω των οποίων ελέγχεται η ανυψωτική ικανότητα των γερανογεφυρών (με την πάροδο των ετών η θεωρητική ικανότητά τους μειώνεται λόγω και των απωλειών του ηλεκτροκινητήρα τους).

Επομένως, όταν συμβαίνει αυτό προτείνεται συνήθως η επισκευή ή η αντικατάστασή τους, αλλά επειδή πρόκειται για μια κοστοβόρα διαδικασία, τελικά οι πιστοποιητές εγκρίνουν τη λειτουργία τους, αλλά για μια τιμή ανυψωτικής ικανότητας χαμηλότερη της θεωρητικής (η οποία προκύπτει με βάση τις δοκιμές που πραγματοποιούν οι πιστοποιητές). Ωστόσο και αυτή η λύση δεν είναι πανάκεια, επομένως αναπόφευκτα, έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα, αλλάζει ο μηχανισμός της γερανογέφυρας. Τέλος, παρατίθεται μια σύντομη αναφορά και σε δύο ακόμη απαραίτητα συστήματα, η ύπαρξη των οποίων κρίνεται υποχρεωτική, ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται υψηλές τάσεις ηλεκτρικού ρεύματος. Πρόκειται για τα συστήματα των **εφεδρικών συσσωρευτών και πυρόσβεσης**, τα οποία διαδραματίζουν καίριο ρόλο σε επείγουσες καταστάσεις.

Συγκεκριμένα το σύστημα των εφεδρικών συσσωρευτών συμβάλλει στην τροφοδότηση του σταθμού, ώστε να μπορεί να τεθεί σε λειτουργία τουλάχιστον μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, σε περιπτώσεις που το δίκτυο της μέσης τάσης (20kV), που τροφοδοτεί υπό κανονικές συνθήκες το σταθμό, υποστεί γενική διακοπή (blackout). Το σύστημα αποτελείται από δύο συστοιχίες συσσωρευτών νικελίου καδμίου που καλύπτουν τις ανάγκες σε συνεχές ρεύμα και προσφέρουν στην έξοδό τους τάση 220V. Αναφορικά με το σύστημα πυρόσβεσης επισημαίνεται η ύπαρξη δύο υποσυστημάτων τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικό μέσο για την κατάσβεση της πυρκαγιάς. Αρχικά το υποσύστημα που έχει ως μέσο κατάσβεσης το νερό, χρησιμοποιείται σε όλους τους χώρους εντός και εκτός του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, αφού όλες οι διατάξεις πληρούν προδιαγραφές υδατοστεγανότητας.

Εξαίρεση αποτελεί η γεννήτρια της ηλεκτροπαραγωγής, για την οποία χρησιμοποιείται ειδικό υποσύστημα πυρόσβεσης με διοξείδιο του άνθρακα ως μέσο κατάσβεσης. Το υποσύστημα αυτό ενδείκνυται σε σχέση με το αντίστοιχο του νερού, ώστε να μη δημιουργηθούν βραχυκυκλώματα στην ήδη λειτουργούσα γεννήτρια, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται εξίσου αποτελεσματικά και η κατάσβεση, αφού το διοξείδιο δεσμεύει το οξυγόνο, περιορίζοντας την έκταση της φωτιάς (Τσιακανίκας, 2017).



Εικόνα 298: Το σύστημα πυρόσβεσης ενός υδροηλεκτρικού σταθμού. Ανάκτηση από: <https://www.indiamart.com/proddetail/fire-suppression-system-21570016191.html>



Εικόνα 299: Το σύστημα των εφεδρικών συσσωρευτών σε έναν υδροηλεκτρικό σταθμό. Ανάκτηση από: <https://mercomindia.com/2015-2018-saw-70-dip/>

9.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΛΙΜΝΗΣ

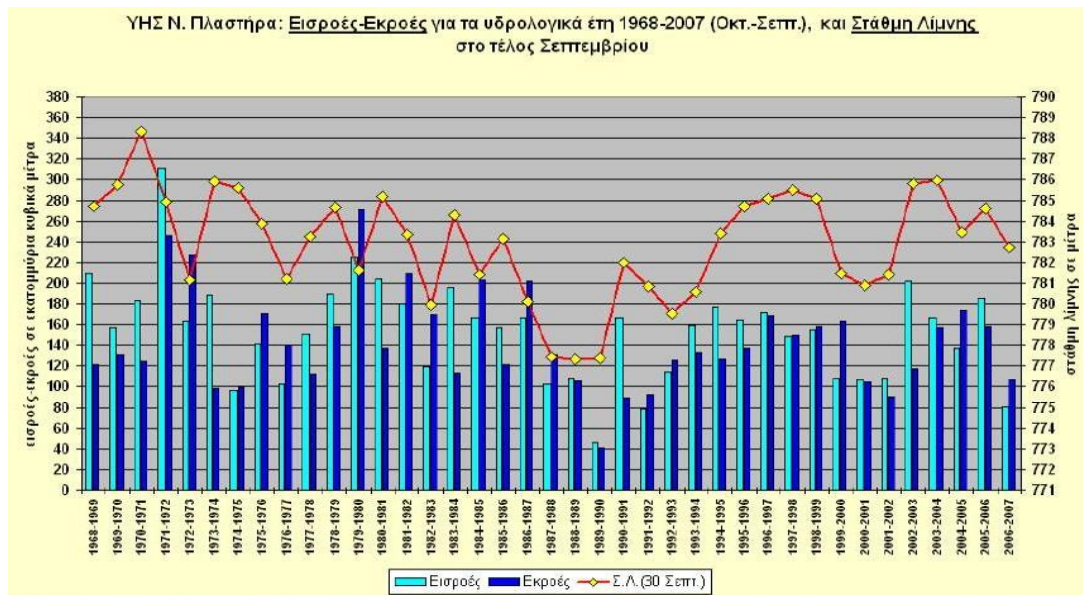
Στην ενότητα αυτή εξετάζονται ορισμένα δεδομένα αναφορικά με τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της λίμνης, όπως για παράδειγμα η διακύμανση της στάθμης της, αλλά και γενικότερα για την αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού της. Τα στοιχεία αυτά εξετάζονται επίσης σε συνδυασμό με την επίδραση που ασκούν στη διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγής, καθώς το νερό, ως πρώτη ύλη, καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την παραγωγικότητα του σταθμού, ενώ παράλληλα διαδραματίζει καίριο ρόλο στη διαθεσιμότητα μέρους των υδάτινων ποσοτήτων για την κάλυψη των αναγκών σε ύδρευση και άρδευση. Επομένως είναι απαραίτητη η γνώση των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων της λίμνης, πάντοτε βέβαια λαμβάνοντας υπ' όψιν και τους παράγοντες που σχετίζονται με την προστασία του περιβάλλοντος και των οικοσυστημάτων που έχουν αναπτυχθεί.

Όπως έχει αναφερθεί στην υποενότητα 1.4.3.1, η στάθμη της λίμνης υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας κυμαίνεται μεταξύ 776m και 792m. Για τη μέγιστη στάθμη το εκμεταλλεύσιμο υδατικό περιεχόμενο ανέρχεται στα 300 hm^3 (όπου $1 hm^3=10^6 m^3$), ενώ για χαμηλότερες τιμές της στάθμης μειώνεται και το αξιοποιήσιμο περιεχόμενο. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για μια μέση στάθμη λειτουργίας στα 784m μπορούν να αξιοποιηθούν 222 hm^3 , ενώ για 780m η τιμή αυτή μειώνεται στα 154 hm^3 . Η στάθμη των 780m θεωρείται η ελάχιστη στάθμη ασφαλούς λειτουργίας για το υδροηλεκτρικό συγκρότημα, ενώ αναφορικά με το κατώτατο όριο των 776m τονίζεται ότι η εκμεταλλεύσιμη ποσότητα αγγίζει τα 101 hm^3 , ενώ το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό στην περίπτωση αυτή είναι πως στη στάθμη αυτή αποκαλύπτεται η είσοδος της υδροληψίας.

Επιπλέον υπογραμμίζεται ότι σε συνθήκες υπερχειλίσης του νερού, η μέγιστη στάθμη πλημμύρας ανέρχεται στα 794.3m, σχεδόν 1m λιγότερο από την κορυφή του φράγματος (795.2m), ενώ η δυνατότητα ελεγχόμενης αποθήκευσης της περίσσειας του νερού (δηλαδή των ποσοτήτων που εκτονώνονται μέσω των υπερχειλιστών και των δικλείδων εκκένωσης του φράγματος προς τη λίμνη) δεν ξεπερνά τα 70 hm^3 . Όπως έχει προαναφερθεί, έχουν προβλεφθεί ο σχεδιασμός ορισμένων ασφαλιστικών διατάξεων για περιπτώσεις που καθίσταται αναγκαία η απόρριψη ποσοτήτων νερού, όταν ξεπερνώνται οι δυνατότητες συγκράτησης του φράγματος.

Συγκεκριμένα οι δύο δικλείδες εκκένωσης (ζε-κρε) που βρίσκονται ανάντη του φράγματος του ΥΗΣ Πλαστήρα υπάγονται στα συστήματα εκκενωτών πυθμένα και καθεμία από αυτές έχει δυνατότητα απόρριψης 111.3 m^3/s νερού για στάθμη λίμνης 792m, 103.8 m^3/s νερού για στάθμη λίμνης 784m και 96.5 m^3/s νερού για στάθμη λίμνης 776m, δηλαδή όσο χαμηλότερη η στάθμη, τόσο μειώνονται και οι απορριπτόμενες ποσότητες νερού.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται διάγραμμα των εισροών και εκροών στον ταμιευτήρα (δηλαδή στην τεχνητή λίμνη Πλαστήρα), καθώς και το εύρος διακύμανσης της στάθμης κατά το τέλος του Σεπτεμβρίου στη διάρκεια της περιόδου 1968-2007. Στο δεξιό άξονα απεικονίζονται οι τιμές για τη στάθμη της λίμνης (σε m), ενώ στον αριστερό οι τιμές για τις εισροές και τις εκροές (σε hm^3). Οι εισροές προκύπτουν προφανώς από τις βροχοπτώσεις και τις χιονοπτώσεις, καθώς και από ποταμούς (μικρότερους και μεγαλύτερους) που εκβάλλουν στην περιοχή, ενώ οι εκροές αφορούν κυρίως τις ποσότητες νερού που διοχετεύονται για ηλεκτροπαραγωγή, ύδρευση, άρδευση ή ακόμα και εκτόνωση κατάντη του φράγματος σε περιπτώσεις υπερχειλίσεώς του (Λέρης, 2007).



Εικόνα 300: Δεδομένα εισροών-εκροών και στάθμης λίμνης κατά τα υδρολογικά έτη 1968-2007. Ανάκτηση από: Λέρης Γεώργιος, Οι Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί της ΔΕΗ, 2007.

Επιπρόσθετα παρουσιάζεται ένα ακόμη διάγραμμα το οποίο συσχετίζει τη στάθμη της λίμνης με το δυναμικό της ηλεκτροπαραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια των δεδομένων του ΥΗΣ Πλαστήρα παρέχονται πληροφορίες για την ειδική κατανάλωση (m^3/kWh) σε σχέση με τις διακυμάνσεις της στάθμης της λίμνης. Ως ειδική κατανάλωση ορίζεται στην περίπτωση των υδροηλεκτρικών μονάδων το πηλίκο του όγκου της υδάτινης μάζας που συγκαταλέγεται στις εκροές προς την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Επομένως αξιοποιώντας αρχικά τις τιμές της ειδικής κατανάλωσης και λαμβάνοντας υπ' όψιν το υδατικό περιεχόμενο που εκρέει από τους στροβίλους, είναι εφικτός ο υπολογισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ως συνάρτηση της τρέχουσας στάθμης της λίμνης (Αρχείο ΥΗΣ Πλαστήρα, ΔΕΗ, 1955-1962).

Στην παρούσα ανάλυση, κάθε στάθμη θεωρείται ως η μέγιστη στάθμη λειτουργίας, επομένως γίνεται αντιληπτό ότι, καθώς η μέγιστη στάθμη αυξάνεται, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια επίσης αυξάνεται, ενώ υπενθυμίζεται παράλληλα ότι $1hm^3=10^6 m^3$ και $1GWh=10^6 kWh$. Για την κατασκευή του διαγράμματος ήταν απαραίτητη η γνώση των τιμών της ειδικής κατανάλωσης για κάθε τιμή της στάθμης, καθώς και η ποσότητα του νερού που εκρέει από τους στροβίλους για κάθε τιμή της στάθμης σε ετήσια βάση (Ευστρατιάδης κ.α., 2002). Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατός ο υπολογισμός των τιμών για τη μέση παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, παρατηρώντας τις τιμές, προκύπτει μια σύγκλιση των τιμών με την μέση ετήσια παραγωγή των 198GWh, που είναι γνωστή από τα αρχεία του σταθμού Πλαστήρα.



Εικόνα 301: Διάγραμμα μέσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ως συνάρτηση της μέγιστης στάθμης της λίμνης. Ανάκτηση από: Αρχείο ΥΗΣ Πλαστήρα (κατόπιν επεξεργασίας).

9.5 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΙΣΧΥΟΣ-ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στην ενότητα 2.1 της παρούσας εργασίας έλαβε χώρα μια σειρά υπολογισμών που αφορούσαν τον καθορισμό του βαθμού απόδοσης της μονάδας. Αν και οι υπολογισμοί για την ισχύ και την ενέργεια θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν εκεί, κρίνεται σκόπιμη η ξεχωριστή αναφορά τους στο σημείο αυτό, με σκοπό να τονιστεί μια σημαντική διαφοροποίηση. Πιο συγκεκριμένα στην παρούσα ενότητα παρατίθεται ο τρόπος υπολογισμού των τιμών της ισχύος (129.9MW) και της ενέργειας (198GWh) που μέχρι τώρα θεωρούνται δεδομένες, ωστόσο η μελέτη αυτή στηρίζεται σε μια γνωστή τιμή βαθμού απόδοσης (85%), όπως παρέχεται από τα δεδομένα του ΥΗΣ Πλαστήρα.

Η απόδοση αυτή διαφοροποιείται ελάχιστα σε σχέση με αυτή της ενότητας 2.1 (87%), στην οποία, αντίθετα, είναι γνωστές οι τιμές ενέργειας και ισχύος και μόνη άγνωστη ποσότητα είναι αυτή του βαθμού απόδοσης. Η απόκλιση των δύο τιμών για το βαθμό απόδοσης οφείλεται στο γεγονός ότι για τα μεγέθη που συμμετείχαν στον υπολογισμό ελήφθησαν προσεγγιστικές (μέσες τιμές), όπως ακριβώς συμβαίνει και με τους ακόλουθους υπολογισμούς. Επομένως είναι αναμενόμενο οι τελικές τιμές για την ενέργεια και την ισχύ με την ολοκλήρωση της ενότητας να είναι ελαφρώς διαφοροποιημένες σε σχέση με τις καταγεγραμμένες στα αρχεία του σταθμού.

Αρχικά είναι απαραίτητη η καταγραφή των μεγεθών που συμμετέχουν στους υπολογισμούς, επομένως είναι απαραίτητος ο ακόλουθος πίνακας. Η τιμή του ετήσιου διατιθέμενου όγκου σχετίζεται την ωφέλιμη ποσότητα του νερού που εκρέει στους στροβίλους (προσεγγιστική τιμή), ενώ και οι ώρες λειτουργίας έχουν επιλεγεί χονδρικά, καθώς ανάλογα με τις ανάγκες της ηλεκτροπαραγωγής υπάρχει πιθανότητα να απαιτείται περισσότερο ή λιγότερο εντατικό καθεστώς λειτουργίας της μονάδας. Τέλος, οι τιμές που διαθέτουν έντονη γραφή έχουν προκύψει κατόπιν υπολογισμών, ενώ οι υπόλοιπες έχουν ληφθεί αυτούσιες με βάση δεδομένα του σταθμού.

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΤΙΜΗ
$V [=] hm^3$	Ετήσιος διατιθέμενος όγκος	150
$\rho [=] kg/m^3$	Πυκνότητα	1000
$g [=] m/s^2$	Επιτάχυνση βαρύτητας	9.81
$H [=] m$	Μανομετρικό ύψος	580
n (αδιάστατο)	Βαθμός Απόδοσης	85%
$t [=] hr$	Ετήσιες ώρες λειτουργίας	1500
$Q [=] m^3/s$	Μέση ετήσια παροχή	27.78
$P [=] MW$	Παραγόμενη Ισχύς	134.35
$E [=] GWh$	Παραγόμενη ενέργεια	201.53

Πίνακας 20: Ορισμένα βασικά μεγέθη για τους υπολογισμούς που αφορούν την ισχύ και την ενέργεια. Ανάκτηση από: Μαμάσης Νικόλαος, Ευστρατιάδης Ανδρέας, Κουτσογιάννης Δημήτριος, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2018 (κατόπιν επεξεργασίας).

Πρωτίστως, εφόσον διατίθενται δεδομένα για τον όγκο νερού και το χρονικό διάστημα λειτουργίας, είναι εφικτός ο υπολογισμός της μέσης ετήσιας παροχής λειτουργίας μέσω της εξίσωσης (Ευστρατιάδης κ.α., 2018):

$$Q \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{V[m^3]}{t[hr] \times 3600 \frac{s}{hr}} \quad (55)$$

Επομένως η παροχή λαμβάνει την τιμή $27.78 m^3/s$. Η ποσότητα αυτή είναι συγκρίσιμη με τις θεωρήσεις της παροχής νερού στους υδροστροβίλους και συγκεκριμένα είναι λίγο μικρότερη από τη μέγιστη παροχή που μπορεί να διέλθει μέσω των ακροφυσίων ($3 \times 9.6 = 28.8 m^3/s$). Επίσης πραγματοποιείται ο υπολογισμός της ισχύος, οπότε για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η γνωστή σχέση (Ευστρατιάδης κ.α., 2018):

$$P[MW] = n \times \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \times g \left[\frac{m}{s^2} \right] \times Q \left[\frac{m^3}{s} \right] \times H[m] \times 10^{-6} \quad (56)$$

Συνεπώς η τιμή της ισχύος προκύπτει ίση με 134.35MW, μια τιμή αρκετά κοντά στα 129.9MW των δεδομένων του σταθμού. Όπως προαναφέρθηκε, η απόκλιση σχετίζεται αποκλειστικά με την επιλογή των παραμέτρων λειτουργίας (όγκος, ώρες λειτουργίας). Τέλος η διαδικασία ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη βοήθεια της απλής εξίσωσης:

$$E[GWh] = P[MW] \times t[hr] \times 10^{-3} \quad (57)$$

Μετά την εκτέλεση των πράξεων το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ίσο με 201.53GWh. Και πάλι η απόκλιση από τα 198GWh οφείλεται στις παραδοχές που επιλέγονται για ορισμένες παραμέτρους λειτουργίας (Ευστρατιάδης κ.α., 2018).

9.6 ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΥΞΗΣ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

Στα συστήματα που είναι καθοριστικά για την εύρυθμη λειτουργία της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης συγκαταλέγονται μεταξύ άλλων και αυτά που είναι υπεύθυνα για τις διαδικασίες θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού της μονάδας. Σε ένα σταθμό παραγωγής πρέπει να εξασφαλίζονται φυσιολογικά θερμοκρασιακά επίπεδα, είτε πρόκειται για κάποιο χώρο στον οποίο βρίσκεται το προσωπικό, είτε για τα υποσυστήματα μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής (Georgescu et al., 2015).

Αναφορικά με την ψύξη των στροβίλων, η οποία πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ως ψυκτικό μέσο το νερό, η διαδικασία προβλέπει την αναρρόφηση ποσότητας νερού με τη βοήθεια ειδικών αντλιών. Πιο συγκεκριμένα, τρεις αντλίες (δύο εναλλασσόμενου και μια συνεχούς ρεύματος) αναρροφούν νερό μέσω φίλτρων από ειδικούς αγωγούς, με την πρώτη αντλία εναλλασσόμενου ρεύματος να εργάζεται και τη δεύτερη να βρίσκεται σε ρόλο εφεδρικής. Η αντλία συνεχούς ρεύματος παρέχει νερό σε όλα τα σημεία εντός της μονάδας με εξαίρεση τη γεννήτρια και τίθεται σε λειτουργία για συνολικό χρόνο τριάντα λεπτών αμέσως μετά την παύση λειτουργίας μιας μονάδας.

Η βασική συνεισφορά των αντλιών αυτών έγκειται στο ότι συμμετέχουν στην ψύξη του λαδιού που βρίσκεται στα έδρανα της μονάδας, καθώς και αυτού που διακινείται στο ψυγείο του ρυθμιστή στροφών, ενώ επιτυγχάνει και την ψύξη του αέρα που βρίσκεται στα ψυγεία της γεννήτριας, επομένως πρόκειται για ένα αποδοτικό σύστημα που ικανοποιεί πολλαπλές ανάγκες. Τέλος, κρίνεται σκόπιμη η αναφορά και σε κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά, δηλαδή ότι οι κινητήρες των αντλιών εναλλασσόμενου ρεύματος αποδίδουν ισχύ 25kW και του συνεχούς ρεύματος 3.7kW, ενώ τονίζεται ότι για την εκκίνηση λειτουργίας της αντλίας του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι απαραίτητη προϋπόθεση η τάση της μονάδας να ανέλθει στα 15.5kV.

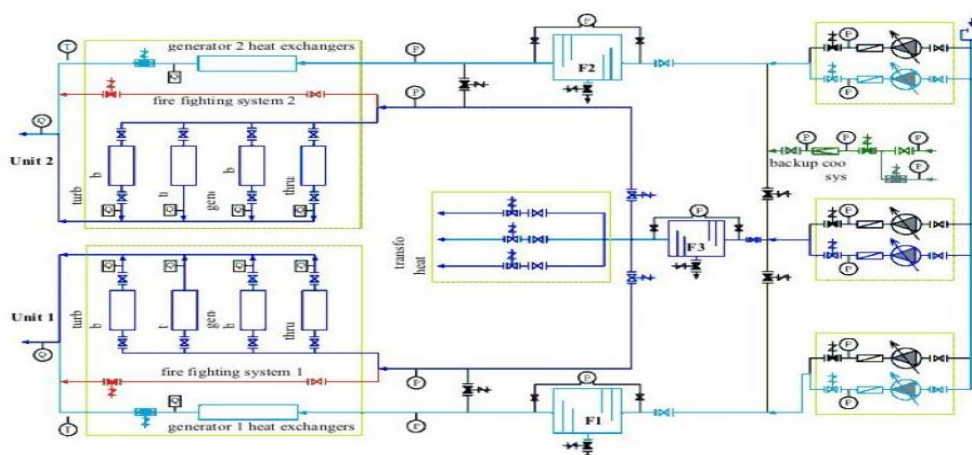


Fig. 1. Main cooling water system, water fire fighting system and backup cooling water system. Legend: PS – pumping station, F – self-cleaning filter, R – reservoir, PP – penstock pipe, P – gauge pressure transducer/ differential pressure transducer, Q – flow control device/ flow meter (at each unit exit), T – temperature transducer (on each cooling equipment).

Εικόνα 302: Τυπικό διάγραμμα κύριου και εφεδρικού συστήματος ψύξης, καθώς και συστήματος πυρόσβεσης. Ανάκτηση από: Georgescu Sandra-Carmen et al., Numerical Simulation of the Cooling Water System of a 115 MW Hydro-Power Plant, Bucharest, 2015.

Αναφορικά με τα συστήματα κλιματισμού της μονάδας είναι απαραίτητο να τονιστεί ότι λόγω της εκτενούς χρήσης του νερού σε όλη την εγκατάσταση, οι ανάγκες για ψύξη δεν είναι ιδιαίτερα απαιτητικές. Όπως προαναφέρθηκε βέβαια, υπάρχουν συστήματα για την ψύξη των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, ωστόσο για τα υπόλοιπα τμήματα το βασικό πρόβλημα έγκειται πρωτίστως στην παρουσία υψηλής υγρασίας, λόγω της ύπαρξης του νερού και δευτερευόντως στην παρουσία παραγόμενης θερμότητας που πρέπει να αποβληθεί. Συνεπώς σε κάθε περίπτωση είναι αναγκαία η παρουσία αποδοτικού συστήματος κλιματισμού, ώστε να εξασφαλίζονται όσο το δυνατόν περισσότερο, ομοιόμορφες θερμοκρασιακές συνθήκες σε όλα τα τμήματα του υδροηλεκτρικού σταθμού.

Ο κύριος ρόλος που πρέπει να διαδραματίσει μια κλιματιστική εγκατάσταση είναι η μείωση των επιπέδων της υγρασίας μέσω της θέρμανσης, κάτι το οποίο συμβάλλει και στην επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού της μονάδας, καθώς με τον τρόπο αυτό περιορίζονται οι καταστρεπτικές επιπτώσεις της υγρασίας. Η αλματώδης εξέλιξη των τεχνολογικών επιτευγμάτων έχει συμβάλλει τα μέγιστα στη μετάβαση από τις παλιές μεθόδους κλιματισμού (που χρησιμοποιούνται σε παλιούς ΥΗΣ) σε καινοτόμες (που χρησιμοποιούνται σε σύγχρονους σταθμούς).

Συγκεκριμένα, πλέον στους σχετικά πρόσφατα κατασκευασμένους σταθμούς συναντώνται δύο είδη κλιματισμού (ένα για τους χώρους που είναι προσβάσιμοι στο προσωπικό και ένα για τους υπόλοιπους χώρους) όπου χρησιμοποιούνται συνδυαστικά διατάξεις με ψυκτικό μέσο είτε το φρέον είτε το νερό, επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο ικανοποιητικά επίπεδα ψύξης, χωρίς να αμελείται φυσικά ο οικολογικός αντίκτυπος και το οικονομικό κόστος. Αντίθετα σε παλαιότερα υδροηλεκτρικά έργα, η απομάκρυνση της υγρασίας πραγματοποιούνταν με τη βοήθεια ενεργοβόρων θερμαντικών σωμάτων, επομένως γίνεται σαφές ότι οι νέες διατάξεις υπερτερούν έναντι των παλαιών από όλες τις απόψεις (Τσιακανίκας, 2017).

9.7 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΔΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΡΟΠΕΑ ΔΕΣΜΗΣ

Η ενότητα αυτή περιγράφει ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά μερικών θεμελιωδών υποσυστημάτων στο εσωτερικό της μονάδας ηλεκτροπαραγωγής, των οποίων η συμβολή μπορεί να μη διακρίνεται με την πρώτη ματιά, ωστόσο διαδραματίζουν καταλυτικό ρόλο σε πολύ απαιτητικές συνθήκες, όπου κυριαρχούν πολλά είδη ασκούμενων δυνάμεων (υψηλές πιέσεις, μηχανικές καταπονήσεις), καθώς και ένα διαβρωτικό περιβάλλον εργασίας (παρουσία νερού και λαδιού). Στην ουσία πρόκειται για τα καθοριστικής σημασίας έδρανα, τα οποία βρίσκονται μεταξύ της γεννήτριας και ενός υδροστροβίλου Pelton, οπότε ο ΥΗΣ Πλαστήρα διαθέτει δύο ανά μονάδα ηλεκτροπαραγωγής.

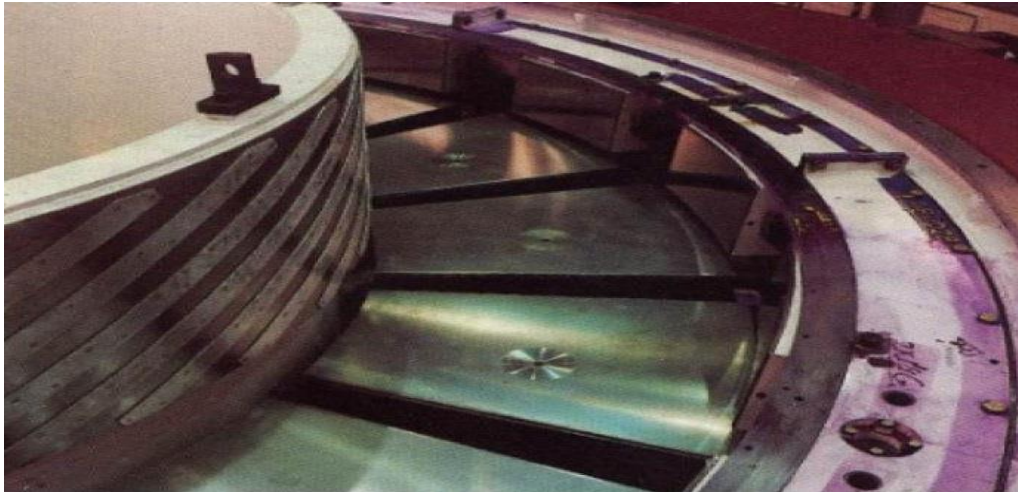
Αναφορικά λοιπόν με τα έδρανα, υπογραμμίζεται ότι συγκαταλέγονται στα βασικά μέρη μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής. Διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα έδρανα κύλισης (ρουλεμάν) και τα έδρανα ολίσθησης (κουζινέτα). Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς προτιμάται η χρήση των εδράνων ολίσθησης, καθώς εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα έδρανα κύλισης (Τσιακανίκας, 2017). Συγκεκριμένα, πρόκειται για κατασκευές πιο ανθεκτικές σε

κρουστικά φορτία, με πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και μεγαλύτερη ευελιξία σε θέματα επισκευών και κόστους. Όπως έχει προαναφερθεί, σε κάθε μονάδα ηλεκτροπαραγωγής υπάρχουν δύο έδρανα εκατέρωθεν της γεννήτριας (το καθένα δηλαδή ανάμεσα στη γεννήτρια και σε έναν από τους στροβίλους) και σε αυτά στηρίζεται ο άξονας περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας, καθώς και του στροφείου.

Ο κύριος ρόλος των εδράνων είναι η παραλαβή των ακτινικών και αξονικών φορτίων της ατράκτου με πολύ χαμηλό συντελεστή τριβής. Η λίπανση των εδράνων γίνεται με λάδι που παρέχεται με πίεση από ένα συγκρότημα δύο αντλιών (μιας συνεχούς και μιας εναλλασσόμενου ρεύματος), οι οποίες τροφοδοτούν τα έδρανα με την απαραίτητη παροχή και πίεση λαδιού. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό πως με παρόμοιο τρόπο εκτελείται και η μεταφορική κίνηση της βελόνας του ακροφυσίου, καθώς ένα άλλο συγκρότημα αντλιών με πίεση λαδιού καθορίζει την κίνηση ή την παραμονή της βελόνας σε μια συγκεκριμένη θέση (μέσω ευθύγραμμου υδραυλικού κινητήρα). Η ανάγκη για λίπανση του άξονα είναι επιτακτική, καθώς ο τελευταίος φθείρεται λόγω των υφιστάμενων τριβών κατά την περιστροφή του, επομένως η λίπανση δρα ως ένα μέτρο περιορισμού στην εξέλιξη της φθοράς.

Στο εσωτερικό του εδράνου υπάρχουν ειδικοί δακτύλιοι, μέσω των οποίων το λάδι προσεγγίζει τον άξονα για να τον λιπάνει. Βέβαια κατά τη διαδικασία αυτή λιπαίνονται και τα ίδια τα έδρανα, κάτι απαραίτητο για τη λειτουργία τους, ενώ ανάλογα με το αν η μονάδα βρίσκεται σε λειτουργία ή όχι, τα έδρανα λιπαίνονται είτε με τη βοήθεια των αντλιών (κατά τις φάσεις εκκίνησης ή παύσης λειτουργίας της μονάδας), είτε, λόγω της ιδιαίτερης κατασκευαστικής τους δομής έχουν τη δυνατότητα να λιπαίνονται μόνα τους (κατά τη λειτουργία της μονάδας). Τονίζεται ότι το πλήθος των εδράνων σε μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής εξαρτάται από το είδος και το πλήθος των στροβίλων, καθώς και το αν ο σταθμός διαθέτει μονάδες οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα (Τσιακανίκας, 2017).

Η τελευταία διάκριση είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μεταβάλλεται σημαντικά ο τρόπος κατασκευής και τοποθέτησης των εδράνων στις δύο αυτές διαφορετικές περιπτώσεις. Αξίζει να σημειωθεί, τέλος, ότι πραγματοποιείται πλήθος ερευνητικών δραστηριοτήτων που αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των εδράνων, ώστε να μπορεί να υφίσταται μεγαλύτερες δυνάμεις ή να αντέχει σε υψηλότερες θερμοκρασίες (Pajaczkowski et al., 2015). Με βάση την προοπτική αυτή, επομένως, εξετάζονται πιο εξελιγμένα υλικά κατασκευής των εδράνων, ενώ σε πολλές περιπτώσεις βελτιώνεται και ο ήδη υπάρχων εξοπλισμός της μονάδας, για μεγαλύτερη αποδοτικότητα κατά τη λειτουργία (Porto et al., 2013).



Εικόνα 303: Αξονικό έδρανο ολίσθησης (thrust bearing) σε μονάδα ηλεκτροπαραγωγής ενός υδροηλεκτρικού σταθμού. Ανάκτηση από: Pajaczkowski Piotr et al., Itaipu Binacional Hydro Power Plant Thrust Bearing Design Optimization for Higher Efficiency, Brazil, 2015.

Ακόμα ένα εξαιρετικά σημαντικό εξάρτημα, το οποίο συναντάται κυρίως σε υδροηλεκτρικές μονάδες που διαθέτουν υδροστρόβιλο Pelton, είναι ο εκτροπέας δέσμης, ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος στην κωνική απόληξη του ακροφυσίου που τροφοδοτεί τον υδροστρόβιλο με νερό. Ακριβώς επειδή η ύπαρξή του προϋποτίθεται από την ύπαρξη του ακροφυσίου, δύσκολα θα εντοπιστεί σε μονάδες με υδροστρόβιλους Francis ή Kaplan. Ο κύριος ρόλος του εκτροπέα δέσμης είναι να δρα ως ασφαλιστική δικλείδα για την υδάτινη ροή σε επείγουσες καταστάσεις, ωθώντας σε μερική ή ολική παρέκκλιση την πορεία του νερού από την πρόσκρουση στα σκαφίδια του τροχού.

Συνήθως οι πιο συνηθισμένες αιτίες που επιτάσσουν τη λειτουργία του εκτροπέα δέσμης σχετίζονται είτε με κάποιον εξωτερικό παράγοντα που οδηγεί στην ανάπτυξη υψηλών περιστροφικών ταχυτήτων της γεννήτριας, με κίνδυνο την καταστροφή της (για παράδειγμα πτώση δέντρου σε μια γραμμή του δικτύου τάσης) (Canyon Industries, 2013), είτε με την απότομη μετακίνηση της βελόνας του ακροφυσίου, που μπορεί να επιφέρει υδραυλικά πλήγματα στον αγωγό του ακροφυσίου. Ο σωστός σχεδιασμός του εκτροπέα δέσμης προϋποθέτει την ικανοποίηση μιας σειράς παραμέτρων που αφορούν κυρίως τη γεωμετρία του εκτροπέα, αλλά και τη θέση τοποθέτησής του, καθώς από αυτά τα στοιχεία εξαρτάται η κατανομή των δυνάμεων στα τοιχώματα του εκτροπέα, αλλά και η αποδοτική ανακοπή της πορείας του νερού.

Τέλος, επισημαίνεται ότι η επιλογή των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών του εκτροπέα εξαρτάται και από εξωγενείς παράγοντες, όπως είναι το μανομετρικό ύψος του σταθμού ή οι διαστάσεις των σκαφιδίων του Pelton, επομένως πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και αυτά τα δεδομένα (Popovski, 2015; Popovski et al., 2019). Ενδεικτικά παρουσιάζεται μια εικόνα του εκτροπέα δέσμης, προσαρτημένου στο κάτω μέρος της απόληξης του ακροφυσίου.



Εικόνα 304: Ο εκτροπέας δέσμης ενός ακροφυσίου. Ανάκτηση από: Canyon Hydro, *An Introduction to Hydropower Projects and Planning*, 2013.

9.8 ΘΕΜΑΤΑ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΒΡΩΣΕΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΩΝ

Με τον όρο σπηλαίωση γίνεται αναφορά σε ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο συναντάται κυρίως σε περιπτώσεις κατά τις οποίες υπάρχει μια σχετική κίνηση μεταξύ ενός ρευστού και ενός μεταλλικού συστήματος το οποίο είτε περικλείει το ρευστό αυτό (όπως σε έναν αγωγό), είτε βρίσκεται εντός του (όπως στην περίπτωση μιας προπέλλας πλοίου βυθισμένης στο νερό) (d' Agostino & Salvetti, 2017). Ο όρος «ρευστό» περιλαμβάνει την έννοια και του υγρού και του αερίου, ωστόσο η σπηλαίωση αφορά ως επί το πλείστον υγρά.

Πιο συγκεκριμένα, ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα στα οποία εντοπίζονται φαινόμενα σπηλαίωσης είναι η κίνηση ενός υγρού, όπως το νερό μέσα σε έναν αγωγό (στην περίπτωση αυτή κινείται το νερό και είναι ακίνητος ο αγωγός) ή η περιστροφική κίνηση της προπέλλας ενός πλοίου (στην περίπτωση αυτή κινείται η προπέλλα, ενώ ο υδάτινος όγκος μπορεί να θεωρηθεί ακίνητος μακροσκοπικά). Ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη της σπηλαίωσης προκαλούνται όταν σε κάποιο στοιχείο υγρού εντοπιστεί τοπικά πολύ υψηλή ταχύτητα. Τότε σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli η πίεση στο στοιχείο αυτό θα μειωθεί σημαντικά.

Αν η μείωση αυτή ξεπεράσει το κατώτατο όριο της τάσης ατμών (η τάση ατμών είναι η ελάχιστη δυνατή απόλυτη πίεση ενός ρευστού, εξαρτάται από το είδος του ρευστού και τη θερμοκρασία του, ενώ κάτω από αυτή το ίδιο αρχίζει να εξατμίζεται), ξεκινά η δημιουργία φυσαλίδων, ως απόρροια της εξάτμισής του.

Στη συνέχεια, καθώς το ρευστό μεταβαίνει εκ νέου σε περιοχές υψηλότερων πιέσεων, οι φυσαλίδες αυτές συμπυκνώνονται απότομα και ουσιαστικά εξαφανίζονται. Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση μιας πολύ υψηλής δυναμικής πίεσης, την οποία υφίστανται τα τοιχώματα ή γενικότερα τα μεταλλικά εξαρτήματα που έρχονται σε επαφή με το υγρό, ενώ σε συνδυασμό με τον επαναλαμβανόμενο χαρακτήρα του φαινομένου, μπορεί να προκληθεί καταστροφή του υλικού, αλλά και άλλες σοβαρές επιπτώσεις στη λειτουργικότητά του, όπως μηχανικές ταλαντώσεις ή γενικότερη μείωση του βαθμού απόδοσής του (Zeng et al., 2015; Ayli, 2019).



Εικόνα 305: Το αποτέλεσμα του φαινομένου της σπηλαιώσης. Ανάκτηση από: https://www.researchgate.net/figure/Cavitation-damage-on-the-blades-at-the-discharge-from-a-Francis-turbine_fig94_36721047

Όπως γίνεται αντιληπτό, σε υδροηλεκτρικές εφαρμογές η σπηλαιώση συναντάται στα τμήματα της εγκατάστασης που έρχονται σε επαφή με το νερό, δηλαδή στους αγωγούς, στο εσωτερικό των ακροφυσίων, αλλά ακόμη και στα σκαφίδια (όταν πρόκειται για στροβίλους δράσης) ή στην έξοδο των πτερυγίων του δρομέα (όταν πρόκειται για υδροστροβίλους αντίδρασης). Για το λόγο αυτό επιβάλλεται η λήψη περιοριστικών μέτρων για την αντιμετώπιση του φαινομένου, καθώς πιθανές αστοχίες λόγω σπηλαιώσης έχουν μεγάλο αντίκτυπο και σε επίπεδο κόστους, αλλά και σε επίπεδο παραγωγικότητας. Αν και το φαινόμενο εντοπίζεται περισσότερο σε υδροστροβίλους αντίδρασης (Francis, Kaplan) παρά σε υδροστροβίλους δράσης (Pelton), η επίδρασή του σε κάθε περίπτωση είναι πολύ έντονη, καθώς μπορεί να προκαλέσει αποβολή υλικού από τις επιφάνειες, ρωγμάτωση λόγω κόπωσης, αλλά και σημαντική φθορά (διάβρωση) στα πτερύγια των στροβίλων.

Ειδικά στις περιπτώσεις που αφορούν τους υδροστροβίλους Pelton, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει ο τρόπος κατασκευής του ακροφυσίου, καθώς συνδέεται άρρηκτα με τα χαρακτηριστικά της ροής που διαθέτει η δέσμη του νερού, καθώς προσκρούει στα σκαφίδια (Peron et al., 2008). Επίσης το μέγεθος της σπηλαιώσης μπορεί να διαφέρει σημαντικά, ανάλογα με το αν ο υδροηλεκτρικός σταθμός διαθέτει μονάδα οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα. Έχει διαπιστωθεί ότι οι μονάδες οριζόντιου άξονα πλήττονται εντονότερα, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μεγάλες διατάξεις, συνεπώς προβλέπεται ο σχεδιασμός των μηχανών σε κατακόρυφους άξονες σε τέτοιες περιπτώσεις, ώστε να μειωθεί η πιθανότητα εμφάνισης της σπηλαιώσης.

Το φαινόμενο που περιγράφεται στην παρούσα ενότητα περιγράφεται με τη βοήθεια της εξίσωσης του συντελεστή Thoma (σ), ενός αδιάστατου αριθμού που ορίζεται ως εξής (234):

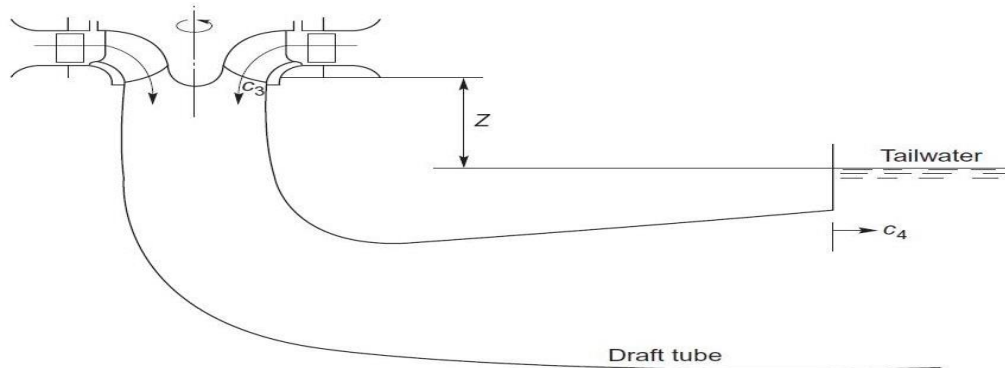
$$\sigma = \frac{H_s}{H_e} = \frac{\frac{p_a - p_v}{\rho \times g} - z}{H_e} \quad (58),$$

όπου H_s το κρίσιμο ύψος σπηλαιώσης (Net Positive Suction Head, NPSH), δηλαδή το απαιτούμενο ύψος για την αποφυγή εμφάνισης σπηλαιώσης, H_e το μανομετρικό ύψος

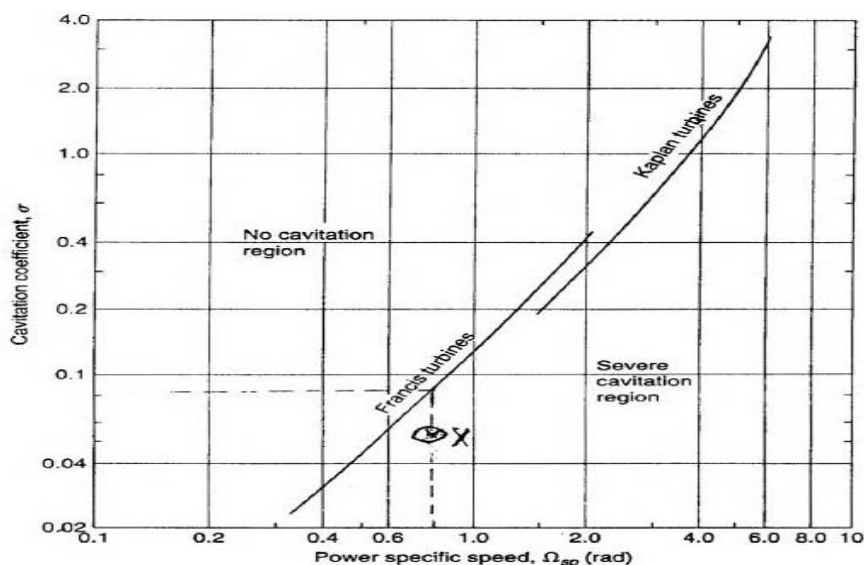
της εγκατάστασης (αλλιώς γνωστό και ως H), p_a η ατμοσφαιρική πίεση, p_v η πίεση ατμοποίησης ή τάση ατμών του υγρού και z μια υψομετρική διαφορά που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

Ουσιαστικά ο συντελεστής σ εκφράζει το ποσοστό του διαθέσιμου μανομετρικού ύψους που δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή έργου, δηλαδή μια μεγάλη τιμή του σ είναι ανεπιθύμητη, αφού αποδεικνύει ότι είναι αξιοποιήσιμο ένα μικρότερο ποσοστό του διαθέσιμου μανομετρικού ύψους. Ακριβώς επειδή η συσχέτιση μεταξύ ύψους και παραγωγικότητας επικυρώνεται στη συγκεκριμένη περίπτωση μόνο για τους στροβίλους, έχει οριστεί ότι ο συντελεστής σ θα χρησιμοποιείται μόνο για τους στροβίλους και όχι για τις αντλίες, αφού για αυτές δεν έχει εντοπιστεί κάποια ανάλογη συσχέτιση (Dixon & Hall, 2014).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα ειδικό διάγραμμα, το οποίο συσχετίζει την ειδική ταχύτητα περιστροφής (έχει επεξηγηθεί αναλυτικά στην ενότητα 2.3 της εργασίας) και το συντελεστή σπηλαιώσης (Thoma) σ . Αν και αναφέρεται μόνο στους υδροστροβίλους αντίδρασης, παρέχει μια πολύ σαφή εικόνα για κάποιες σχεδιαστικές παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν για τον περιορισμό του φαινομένου.



Εικόνα 306: Η υψομετρική διαφορά z που υπεισέρχεται στον υπολογισμό του συντελεστή Thoma. Ανάκτηση από: Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, S. Dixon, C. Hall, 7th edition, Elsevier, 2014.



Εικόνα 307: Διάγραμμα καθορισμού συνθηκών παρουσίας ή απουσίας σπηλαιώσης. Ανάκτηση από: Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, S. Dixon, C. Hall, 7th edition, Elsevier, 2014.

Παράλληλα κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια επιπρόσθετη μνεία αναφορικά με τα θέματα της σπηλαιώσης και συγκεκριμένα να παρουσιαστεί και ένας ακόμη τρόπος προσδιορισμού του συντελεστή σ , μέσω συσχετίσεων με ορισμένες γνωστές ταχύτητες, δηλαδή την ειδική ταχύτητα ως προς την παροχή (Ω_{SS}) και την ειδική ταχύτητα περιστροφής ή, όπως ονομάζεται εναλλακτικά, ειδική ταχύτητα ως προς την ισχύ (Ω_{Sp}). Συγκεκριμένα οι υπό εξέταση ταχύτητες ορίζονται ως εξής (Dixon & Hall, 2014):

$$\Omega_{SS} = \frac{\Omega \times Q^{\frac{1}{2}}}{(g \times H_S)^{\frac{3}{4}}} \quad (59),$$

ενώ αντίστοιχα ισχύει ότι:

$$\Omega_{Sp} = \frac{\Omega \times Q^{\frac{1}{2}}}{(g \times H_E)^{\frac{3}{4}}} \quad (60).$$

Τονίζεται ότι η εξίσωση (60) είναι ισοδύναμη με την εξίσωση (3) (ενότητα 2.3), αν ληφθεί υπ' όψιν και η εξίσωση (56) (ενότητα 9.5), με την παραδοχή ότι η απόδοση ισούται με 1 για τις ανάγκες της μαθηματικής αυτής απόδειξης. Συνεχίζοντας την ανάλυση και διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις (59) και (60) με τη βοήθεια της (58) προκύπτει μια έκφραση της μορφής:

$$\frac{\Omega_{Sp}}{\Omega_{SS}} = \left(\frac{g \times H_S}{g \times H_E} \right)^{\frac{3}{4}} = \sigma^{\frac{3}{4}} \rightarrow \sigma = \left(\frac{\Omega_{Sp}}{\Omega_{SS}} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (61)$$

Άρα ο συντελεστής σ ορίζεται ως συνάρτηση των υπό συζήτηση ταχυτήτων (Dixon & Hall, 2014; d' Agostino & Salvetti, 2017).

Τέλος κρίνεται σκόπιμη μια σύντομη αναφορά σε μερικές απλές πρακτικές (συνήθως κατά τον αρχικό σχεδιασμό του υδροηλεκτρικού έργου) που μπορούν να εφαρμοστούν για την αντιμετώπιση της σπηλαιώσης (Σκουληκάρης, 2016). Αρχικά ο σχεδιασμός των αγωγών που μεταφέρουν το νερό πρέπει να έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποτρέπεται η πτώση της απόλυτης πίεσης κάτω από το όριο της τάσης ατμών.

Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι είναι καθοριστικής σημασίας η αποφυγή απότομων γωνιακών σχηματισμών στους αγωγούς, καθώς σε αυτά τα σημεία ενδέχεται να παρατηρηθεί αύξηση της πίεσης. Στη συνέχεια είναι απαραίτητο να ληφθεί υπ' όψιν η εξίσωση Bernoulli αναφορικά με τη μέγιστη τιμή της ταχύτητας. Όπως γίνεται αντιληπτό, επιβάλλεται η θέσπιση ενός ορίου ταχύτητας, το οποίο δεν πρέπει να ξεπερνάται κατά τη λειτουργία της μονάδας. Κλείνοντας, ένα ακόμη μέτρο που μπορεί να εφαρμοστεί, αφορά την επένδυση των στερεών επιφανειών με υλικά ιδιαίτερος ανθεκτικά στη σπηλαιώση, συνυπολογίζοντας παράλληλα και τον παράγοντα του κόστους (Σκουληκάρης, 2016).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας, η οποία σχετίζεται με τη μελέτη χαρακτηριστικών λειτουργίας μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με υδροστροβίλους τύπου Pelton. Για το σκοπό, αυτό πραγματοποιήθηκε μια εκτενής εισαγωγή στα χαρακτηριστικά της υδροηλεκτρικής ενέργειας και των υδροηλεκτρικών σταθμών. Ιδιαίτερη αναφορά έγινε στον Υδροηλεκτρικό Σταθμό (ΥΗΣ) Πλαστήρα, καθώς παρουσιάστηκαν με λεπτομέρεια τα κυριότερα τμήματα της εγκατάστασής του, δηλαδή το φράγμα, ο αγωγός προσαγωγής και ο σταθμός παραγωγής.

Στη συνέχεια, παρατέθηκαν ορισμένες χρήσιμες και εξειδικευμένες πληροφορίες για τον υδροστρόβιλο Pelton, οι οποίες αφορούσαν τον προκαταρκτικό σχεδιασμό του και τα τρίγωνα ταχύτητας. Ακολούθησαν μαθηματικοί υπολογισμοί διαστασιολόγησης των βασικών εξαρτημάτων μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης, δηλαδή μετρήθηκαν διαστάσεις για το ακροφύσιο, τον τροχό Pelton και τα σκαφίδια του τροχού, ενώ μελετήθηκαν και οι ταχύτητες πριν και μετά την πρόσκρουση του νερού στα σκαφίδια.

Ουσιαστικά έγινε μια προσπάθεια κατανόησης των δυσκολιών που αντιμετώπισαν οι μηχανικοί κατά το σχεδιασμό της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης, ενώ για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του προκαταρκτικού σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκαν εξειδικευμένες εξισώσεις, βασισμένες σε εργασίες τόσο σε υπολογιστικό, όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Αυτά τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα του υδροηλεκτρικού σταθμού Πλαστήρα.

Σε γενικές γραμμές οι αποκλίσεις δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλες, ενώ οι υπάρχουσες διαφορές αποδόθηκαν στον προσεγγιστικό χαρακτήρα των υπολογιστικών και πειραματικών εξισώσεων. Οι αποκλίσεις εντοπίστηκαν κυρίως στα μεγέθη που αφορούν την ταχύτητα εξόδου του νερού από το ακροφύσιο, αλλά και στη διάμετρο δέσμης του ακροφυσίου, η οποία είναι ένα καθαρά γεωμετρικό μέγεθος. Εκτός από τον προσεγγιστικό χαρακτήρα των εξισώσεων, οι διαφορές οφείλονται και στο ότι συμμετέχουν μεγέθη στους υπολογισμούς, τα οποία κυμαίνονται σε ένα εύρος τιμών, συνεπώς η επιλογή της κατάλληλης τιμής έπρεπε να ληφθεί προσεγγιστικά. Αναφορικά με τα υπόλοιπα γεωμετρικά και διανυσματικά μεγέθη, οι αποκλίσεις ήταν ελάχιστες.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε το κύριο μέρος της εργασίας, το οποίο συνίσταται στην μοντελοποίηση και προσομοίωση του ακροφυσίου, που εγχύει το νερό με μεγάλη πίεση και ταχύτητα στα σκαφίδια του στροφείου Pelton. Στόχος ήταν η καλύτερη κατανόηση του ροϊκού πεδίου στην έξοδο της δέσμης και ο υπολογισμός του στροβιλισμού, ο οποίος επηρεάζει την ευστάθεια της δέσμης. Αρχικά κατασκευάστηκε η γεωμετρία στο λογισμικό Solidworks, μια διαδικασία που απαιτήσε αρκετό χρόνο, καθώς εντοπίστηκαν ορισμένα λειτουργικά προβλήματα στο επόμενο στάδιο, που αφορά την κατασκευή του πλέγματος. Για το λόγο αυτό η βελόνα βρίσκεται εξ ολοκλήρου μέσα στον αγωγό, ενώ απαιτήθηκε η κατασκευή

τριών τέτοιων γεωμετριών, ώστε να μελετηθούν τρεις διαφορετικές θέσεις ανοίγματος βελόνας.

Στη συνέχεια έλαβε χώρα η κατασκευή του πλέγματος (pre processing) στο λογισμικό ANSA, ένα εξίσου χρονοβόρο στάδιο, καθώς, όπως διαπιστώθηκε, η βελόνα χρειάστηκε να βρίσκεται ολόκληρη μέσα στον αγωγό, ώστε να δημιουργηθεί ένας κλειστός όγκος για να γίνει σωστά το πλέγμα. Παράλληλα η ανάγκη για την κατασκευή τριών γεωμετριών προέκυψε στο στάδιο αυτό, καθώς κατέστη αδύνατη η παλινδρομική μετακίνηση της βελόνας σε διαφορετικές θέσεις, ενώ ταυτόχρονα ήταν αναγκαία η μελέτη διαφορετικών θέσεων της βελόνας (αφού επηρεάζεται άμεσα η παροχή του νερού και κατ' επέκταση η ηλεκτροπαραγωγή).

Επιπρόσθετα, ακολούθησε το στάδιο της επίλυσης στο λογισμικό Openfoam με χρήση ενός steady state επιλύτη, μετά την εισαγωγή κατάλληλων συνοριακών συνθηκών, ένα στάδιο το οποίο απαιτήσε μικρότερο χρονικό διάστημα, καθώς το κύριο ζήτημα ήταν ο καθορισμός σωστών κριτηρίων σύγκλισης και σχετικών σφαλμάτων, ώστε να επέλθει η σύγκλιση σε έναν εύλογο αριθμό επαναλήψεων. Σαφώς, η επιλογή κατάλληλων συνοριακών συνθηκών ήταν θεμελιώδης προϋπόθεση για την εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων μετά το πέρας της επίλυσης.

Μετά την επίλυση, ακολούθησε η παρουσίαση των αποτελεσμάτων (post processing) στο λογισμικό META, με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται σε μεγέθη που αφορούν την πίεση και την ταχύτητα. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε μια παρουσίαση των χαρακτηριστικών του λογισμικού ANSYS και έλαβε χώρα σύγκριση των αποτελεσμάτων του META με τα αντίστοιχα του ANSYS. Σε γενικές γραμμές εντοπίστηκαν ορισμένες διαφοροποιήσεις, ιδιαίτερα στο μέτρο της πίεσης και της ταχύτητας, παρ' όλο που χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες συνοριακές συνθήκες. Οι διαφορές αυτές φαίνεται να οφείλονται στον διαφορετικό τρόπο με τον οποίο προσεγγίζουν την επίλυση το Openfoam και το ANSYS, δηλαδή είναι κάτι που σχετίζεται με τις παρασκευαστικές μεθόδους επίλυσης που χρησιμοποιούν τα λογισμικά (αν και στο OpenFoam οι μέθοδοι επίλυσης είναι ορατές, αφού είναι ανοικτού κώδικα).

Τέλος, παρουσιάστηκαν βασικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού της μονάδας και εξήχθησαν διαγράμματα για την ηλεκτροπαραγωγή ως συνάρτηση της στάθμης της λίμνης και επαληθεύτηκε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η στάθμη της λίμνης, τόσο μεγαλύτερη είναι και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη η παράθεση ορισμένων προτάσεων για μελλοντική έρευνα και περαιτέρω εμβάθυνση. Αρχικά αντίστοιχη μελέτη μπορεί να γίνει σε χρονομεταβαλλόμενες συνθήκες, με παλινδρομική κίνηση της βελόνας και κατασκευή μίας γεωμετρίας (και όχι τριών), αρκεί να αντιμετωπιστούν και οι περιορισμοί που θέτει το λογισμικό ANSA. Επιπλέον, θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη και ενδιαφέρουσα, σαν συνέχεια της παρούσας μελέτης, η μοντελοποίηση της ροής γύρω από τα σκαφίδια του τροχού Pelton ή ακόμη μια ανάλογη μελέτη σε σταθμό με στροβίλους Francis ή Kaplan. Τέλος, θα ήταν ιδιαίτερα ωφέλιμη μια εμβάθυνση στα λογισμικά Openfoam και ANSYS-Fluent, ώστε να κατανοηθούν καλύτερα οι διαφορές στα μεταξύ τους αποτελέσματα ή να πραγματοποιηθεί στο συγκεκριμένο αντικείμενο και μια πειραματική ανάλυση σε συνδυασμό με την υπολογιστική.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ Α.Ε), (1955-1962). *Αρχείο Υδροηλεκτρικού Σταθμού Πλαστήρα*.
- Αργυράκης, Ι. (2008). Οι Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί της ΔΕΗ Α.Ε και η Συμβολή τους στην Κάλυψη των Ενεργειακών Αναγκών της Ελλάδας. *1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων*. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (Τ.Ε.Ε), Λάρισα, 13-15 Νοεμβρίου, 1-9.
- Αργυράκης, Ι. (2008). *Εκμετάλλευση των Υδροηλεκτρικών Σταθμών ως Έργων Πολλαπλού Σκοπού*. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (Τ.Ε.Ε) & Περιφερειακό Τμήμα Ηπείρου Τ.Ε.Ε, Ιωάννινα, 1-61.
- Αργυράκης, Ι. (2009). "Η Υδροηλεκτρική Παραγωγή της ΔΕΗ Α.Ε."
- Αργυράκης, Ι. (2012). *Η Υδροηλεκτρική Παραγωγή της ΔΕΗ Α.Ε.: Μια Πολυδιάστατη Δραστηριότητα*, ΥΠΕ Μεσοχώρας, Διεύθυνση Υδροηλεκτρικής Παραγωγής, Γενική Διεύθυνση Παραγωγής, Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η) Α.Ε, Αθήνα, 1-13.
- Γεωργιόπουλος, Δ. & Δήμου, Χ. Κ. (2017). Υδροηλεκτρικά Έργα 2015-2040: Ανάπτυξη και Προοπτικές. *Πρακτικά του 3^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου Φραγμάτων και Ταμιευτήρων*. Αίγλη Ζαπείου, Αθήνα, 12-15 Οκτωβρίου, 1-13.
- Γκίκας, Γ. (2018). *Τεχνολογίες που συνδέονται με την διαχείριση υδατικών λεκανών*. Διδακτικές Σημειώσεις από το Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στις Τεχνολογίες Περιβάλλοντος στην Περιβαλλοντική Νομοθεσία, Εργαστήριο Οικολογικής Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης (Δ.Π.Θ), Ξάνθη, 1-76.
- Ευστρατιάδης, Α. (2006). *Υδρολογική Διερεύνηση Λειτουργίας Ταμιευτήρα Πλαστήρα*. Διδακτικές σημειώσεις του Μεταπτυχιακού μαθήματος "Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις από Υδραυλικά Έργα". Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. ΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π), Αθήνα, 1-16.
- Ευστρατιάδης, Α., Κουκουβίνος, Α., Κουτσογιάννης, Δ., & Μαμάσης, Ν. (2002). *Διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης και προστασίας της ποιότητας της Λίμνης Πλαστήρα*, Υδρολογική Μελέτη, Τεύχος 2, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π), Αθήνα, 1-70.

- Ευστρατιάδης, Α., Μάμασης, Ν., Κουτσογιάννης, Δ. (2018). *Αρχές Υδροενεργειακής Τεχνολογίας*. Διδακτικές Σημειώσεις του μαθήματος "Ανανεώσιμη Ενέργεια & Υδροηλεκτρικά Έργα". Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π), Αθήνα, 1-21.
- Καρλής, Α. (2011). *Ανάπτυξη μικρού υδροηλεκτρικού έργου*. Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 1-109.
- Κόγια Φ., Αγγελίδης Γ., Αγγελίδης Π., (2008) *Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των σύγχρονων διατάξεων αξιοποίησης της ενέργειας της θάλασσας*. Πρακτικά του 1^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Περιβαλλοντικής Πολιτικής και Διαχείρισης, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη, Ελλάδα, 20-22 Ιουνίου, 1-246.
- Λαμπρίδης, Δ., Ντοκόπουλος, Π., & Παπαγιάννης, Γ. (2006). *Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Τόμος Α. Θεσσαλονίκη-Αθήνα: Εκδόσεις Ζήτη.
- Λέρης, Γ. (23-26 Νοεμβρίου 2006). *Εκμετάλλευση Υδροηλεκτρικών Σταθμών*. Πρακτικά του 1^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου ENERGYTEC 2006. Εκθεσιακό Κέντρο HELEXPO Palace, Μαρούσι, Αθήνα, 23-26 Νοεμβρίου, 1-11.
- Λέρης, Γ. (2007). *Οι Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί της ΔΕΗ*. Διεύθυνση Εκμεταλλεύσεων Υδροηλεκτρικών Σταθμών, Γενική Διεύθυνση Παραγωγής, Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η) Α.Ε, Αθήνα, 1-34.
- Μαρνέλλος, Γ. (2015). *Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας*. Διδακτικές σημειώσεις του μαθήματος "Υδροηλεκτρική Ενέργεια". Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 1-25.
- Παπαντώνης, Δ. Ε. (2008). *Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα*. Αθήνα, Συμεών.
- Σκόδρας, Γ. (2015). *Ήπιες και Νέες Μορφές Ενέργειας*. Διδακτικές σημειώσεις του μαθήματος "Υδροηλεκτρική Ενέργεια". Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 1-83.
- Σκουληκάρης, Χ. (Δεκέμβριος 2016). *Υδραυλικές Μηχανές και Ενέργεια*. Διδακτικές σημειώσεις του μαθήματος "Σηπλνίωση, Τοποθέτηση υδροστροβίλων αντιδράσεως, Διαδικασία επιλογής υδροστροβίλων αντιδράσεως". Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 1-49.

- Στεφανάκος, Ι., Τσικνάκου, Π., Παπαχατζάκη, Χ. (2013). *Υδροηλεκτρικά Έργα - Προοπτική για Ανάπτυξη με Έργα Μεγάλης Εγχώριας Προστιθέμενης Αξίας*. Υδάτινοι Πόροι και Περιβάλλον Θεσσαλίας (Υ.ΠΕ.ΘΕ), Λάρισα, 1-10.
- Στεφανάκος, Ι. Π. (2014). "Υδροηλεκτρικά Έργα και 'Μικρή' ΔΕΗ." Capital.gr., Διαθέσιμο στο: <https://energypress.gr/news/ip-stefanakos-sirialtis-ektropis-toy-ahelooy-kai-menos-kata-ton-ydroilektrikon>, [Ανάρτηση: Μάρτιος 6, 2014].
- Στεφανάκος, Π. Ι. (Μάιος 2017). "Ο ρόλος των Αντλησιοταμιεύσεων, των Μεγάλων και Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων στο Ενεργειακό Σύστημα της χώρας." Αντλησιοταμιεύσεις ΥΗΕ και ΜΥΗΕ. Προσυνεδριακή Εκδήλωση του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος (Τ.Ε.Ε), Ιωάννινα, 20-21 Μαρτίου, 1-108.
- Τσιακανίκας, Ε. (2017). Διερεύνηση Υδραυλικής και Περιβαλλοντικής Λειτουργίας Φραγμάτων και Υδροηλεκτρική Παραγωγή, *Διπλωματική Εργασία*, Φυσικές Επιστήμες, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο (ΕΑΠ), Πάτρα: 1-117.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

- Al-Daraje, A. (2017-2018). "*Impulse Turbines, Pelton Turbine, Cross Flow and Banki Turbines.*"
- Almohammadi, K. M., Ingham D.B., Ma L., Pourkashan M. (2013). Computational fluid dynamics (CFD) mesh independency techniques for a straight blade vertical axis wind turbine. *Energy, Elsevier*, **58**: 483-493.
- Alley, C. L. & Atwood K. W. (1973). *Electronic Engineering*. New York, John Wiley and Sons.
- Anderson, J. D. (1991). *Fundamentals of Aerodynamics*. 2nd edition, New York, Mc Graw Hill.
- Anuar, N. N., Khan, M. R. B., & Ramli, A. F. (2021). Methods for Hydropower Discharge Prediction: A Review. *Malaysian Journal of Science and Advanced Technology (MJSAT)*, 1(1), 6-14.
- Aydin, B. (2014). SWOT analysis of renewable energy. *Proceedings of the International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE-2014)*, IEEE, Pattaya City, Thailand, 19-21 March, 1-7.
- Ayli, E. (March 2019). Cavitation in Hydraulic Turbines. *International Journal of Heat and Technology* **37**: 334-344.
- Bagher, A. M., Vahid, M., Mohsen, M., & Parvin, D. (2015). Hydroelectric energy advantages and disadvantages. *American Journal of Energy Science*, 2(2), 17-20.

- Balmer, M., & Spreng, D. (2008). Hydroelectric power. *Letcher, T. M. (Eds.). Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet*, Amsterdam: Elsevier Ltd., 193-209.
- Berntsen, G., Brekke, H., Haugen, J., & Risberg, S. (2001). Analysis of the free surface non-stationary flow in a Pelton turbine. Hydro 2001, Riva del Garda, Italy.
- Brekke, H. (2001). *Hydraulic Turbines Design, Erection and Operation*. Norwegian University of Science and Technology (NTNU) Publications: Trondheim, 1-324.
- Brekke, H. (2005). State of the art of small hydro turbines versus large turbines. Hydro 2005, Villach, Austria.
- Briggs, D. (2003). Environmental pollution and the global burden of disease. *British Medical Bulletin*, 68(1), 1-24.
- Canyon Industries. (2013). *Guide to Hydropower*. An Introduction to Hydropower Concepts and Planning. Washington, Canyon Hydro, 1-24.
- Chapman, S. (2013). *Electric Machinery Fundamentals*. New York, The McGraw Hill Companies.
- Chen, S. (2015). *Hydraulic Structures*. Berlin Heidelberg, Springer.
- Cobb, B. R., & Sharp, K. V. (2013). Impulse (Turgo and Pelton) turbine performance characteristics and their impact on pico-hydro installations. *Renewable Energy*, 50, 959-964.
- d' Agostino, L. & Salvetti M. V. (2017). *Cavitation Instabilities and Rotordynamic Effects in Turbopumps and Hydroturbines*. Switzerland, Springer, 1-288.
- Daryl, L. L. (2011). *A first course in the finite element method*, Cengage Learning.
- Dick, E. (2015). *Fundamentals of Turbomachines*. Netherlands, Springer.
- Dixon, S. L. & Hall C. A. (2014). *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*. Oxford, UK, Elsevier.
- European Commission, (1999). *The scope for energy saving in the EU through the use of energy-efficient electricity distribution transformers*. European Copper Institute & European Commission: Directorate-General for Energy, 12, Brussels: Energie, 1-61.

- Flanagan, W. M. (January 1993). *Handbook of Transformer Design and Applications*, 2nd Edition, New York, McGraw-Hill Professional, 10.6-10.9.
- Fink, D. G. & Beatty H. W. (1978). *Standard Handbook for Electrical Engineers*. New York, McGraw Hill.
- Gatte, M. T., & Kadhim, R. A. (2012). Hydro power. Azni Zain, A. (Eds.). *Energy Conservation*, Rijeka: In Tech Publishing, 95-124.
- Georgescu, S. C., Georgescu, A. M., Jumara, A., Piraianu, V. F., & Dunca, G. (2015). *Numerical Simulation of the Cooling Water System of a 115 MW Hydro-Power Plant*. Sustainable Solutions for Energy and Environment EENVIRO - YRC 2015, 18-20 November. Bucharest, Romania, Elsevier. **85**: 228-234.
- Hart, D. W. (2011). *Power Electronics*. New York, The McGraw Hill Companies.
- Hopgood, A. A. (2001). *Intelligent Systems for Engineers and Scientists*. Florida, CRC Press.
- Huang, H., & Yan, Z. (2009). Present situation and future prospect of hydropower in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1652-1656.
- Hui, Y. U., & Li, L. I. U. (2008). Small Hydroelectric Power Plants Influence on Economic Operation of Local Distribution Network. *China Rural Water and Hydropower*, 8, 146-148.
- Karimi, H., Davison, E. J., & Iravani, R. (2009). Multivariable servomechanism controller for autonomous operation of a distributed generation unit: Design and performance evaluation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(2), 853-865.
- Kjolle, A. (December 2001). *Hydropower in Norway*. Mechanical Equipment. Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 1-185.
- Kumar, P., & Saini, R. P. (2010). Study of cavitation in hydro turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 374-383.
- Kumari, R., Prabhakaran, K. K., Desingu, K., Chelliah, T. R., & Sarma, S. A. (2020). Improved Hydroturbine Control and Future Prospects of Variable Speed Hydropower Plant. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(1), 941-952.

- Masters, G. M. (2004). *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. New Jersey, John Wiley and Sons.
- Mc Lean, E. and D. Kearney (2014). *An Evaluation of Seawater Pumped Hydro Storage for Regulating the Export of Renewable Energy to the National Grid*. 8th International Renewable Energy Storage Conference and Exhibition, IRES 2013, Energy Procedia. **46**: 152-160.
- Menter, F. R. (August 1994). "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications." *AIAA Journal* **32**(8): 1598-1605.
- Michaelidis, E. (2012). *Alternative energy sources*. Springer: Berlin & Heidelberg.
- Minn, A. K., Win, H. H., & San, N. A. (2014). *Design of 225kW Pelton Turbine*. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 3(24), 4836-4842.
- Moffatt, H. K. (2015). *The Princeton Companion to Applied Mathematics*. Princeton University Press, pp. 467-476.
- Nasir, B. A. (2014). Suitable selection of components for the micro-hydro-electric power plant. *Advances in Energy and Power*, 2(1), 7-12.
- Nigussie, T., Engeda, A., & Dripssa, E. (2017). Design, Modeling, and CFD Analysis of a Micro Hydro Pelton Turbine Runner: For the Case of Selected Site in Ethiopia. *International Journal of Rotating Machinery*, **2017**: 18.
- Oo, T. Z., Nyi, N., & Khaing, C. C. (2019). Design Calculation of Pelton Turbine for 220 kW. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, **9**(7): 218-224.
- Pajaczkowski, P., Spiridon, M., Schubert, A., Brito, G. C., & Marra, J. M. (2015). *Itaipu Binacional Hydro Power Plant Thrust Bearing Design Optimization for Higher Efficiency*. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, **5**: 95-106.
- Patel, K., Patel, B., Yadav, M., & Foggia, T. (2010). Development of Pelton turbine using numerical simulation. *Proceedings of the 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Timisoara, Romania, 20-24 September, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, *12*(1), New York: IOP Publishing, 1-8.

- Penche, C. (1998). *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*. ESHA. Brussels.
- Peron, M., Parkinson, E., Geppert, L., & Staubli, T. (2008). Importance of Jet Quality on Pelton Efficiency and Cavitation. *Proceedings of the International Conference on Hydraulic Efficiency Measurements (IGHM-2008)*. International Group for Hydraulic Efficiency Measurements (IGHM), Milano, Italy, 3-6 September, 1-9.
- Petley, S., Panagiotopoulos, A., Benzon, D. S., Židonis, A., Aggidis, G. A., Anagnostopoulos, J. S., & Papantonis, D. (2019). Investigating the influence of the jet from three nozzle and spear design configurations on Pelton runner performance by numerical simulation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Orlando, Florida: IOP Publishing, **240** (2): 1-12.
- Petley, S., Židonis, A., Panagiotopoulos, A., Benzon, D., Aggidis, G. A., Anagnostopoulos, J. S., & Papantonis, D. E. (2019). Out With the Old, in With the New: Pelton Hydro Turbine Performance Influence Utilizing Three Different Injector Geometries. *Journal of Fluids Engineering*, *141*(8), 081103.
- Popovski, B. (May 2015). "Prediction of Hydraulic Force and Momentum on Pelton Turbine Jet Deflector based on CFD Simulation." *Mechanical Engineering – Scientific Journal* **33**: 47-52.
- Popovski, B., et al. (2019). *Optimisation of Pelton turbine jet deflector using CFD analysis*. 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Earth and Environmental Science. Orlando, Florida, IOP Publishing. **240**(2): 1-11.
- Porto, M. P., Lipej, A., Markov, Z., & Popovski, P. (2013). *A case study on thrust bearing failures at the SÃO SIMÃO hydroelectric power plant*. Case Studies in Thermal Engineering, Rio de Janeiro: Elsevier, **1**: 1-6.
- Prieur, J. (2020). Critical warning! Preventing the multidimensional apocalypse on planet Earth. *Ecosystem Services*, *45*, 101161.
- Reddy, J. N. (2006). *An Introduction to the Finite Element Method*, 3rd edition, McGraw-Hill.
- Sarkar, S. (2019). *Lecture on Pelton Turbine*. Lectures, Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Technology (ISM), Dhanbad, India, 1-8.
- Shahzad, U. (2012). The need for renewable energy sources. *Energy*, *2*, 16-18.

- Singh, V. K., Chauhan, N. S., & Kushwaha, D. (2015). An Overview of Hydro Electric Power Plant. *Journal of Mechanical Engineering*, 6(1), 59-62.
- Subramanya, K. (2013). *Hydraulic Machines*. New Delhi: Tata McGraw- Hill Education.
- Thapar, R. (2019). "*Hydro Turbine Governing System*."
- Vučetić, I. (2018). The impact of a hydroelectric power station on the development and modernization of the Bajina Bašta settlement during the socialist period. *Spatium*, 39, 47-54.
- Ware, J. (2006). Power Factor Correction (PFC), *IEE Wiring*, 1-3.
- Zeng, C. J., Xiao, Y. X., Zhu, W., Yao, Y. Y., & Wang, Z. W. (2015). Numerical simulation of cavitation flow characteristic on Pelton turbine bucket surface. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Orlando, Florida: IOP Publishing, 72(4), 1-7.
- Zhang, B., Liang, C. (2020). A Conservative High-Order Method Utilizing Dynamic Transfinite Mortar Elements for Flow Simulation on Curved Sliding Meshes. *Department of Mechanical and Aerospace Engineering, The George Washington University, Washington DC, USA*, 1-34.
- Zhang, Zh. (2016). *Pelton Turbines*. Berlin & Heidelberg: Springer International Publishing.
- Zhang, Zh. (2003). Theoretical and experimental investigations on the sources of the head effect in Pelton turbines. Sulzer Innotec report, Nr.: TB03_0160, Winterthur, Switzerland.
- Zhang, Zh., Bissel, C., & Parkinson, E. (2003). LDA-Anwendung zu Freistrahlmessungen bei einem Pelton-Turbine-Modell mit der Fallhoehe von 90 Metern. 11. GALA-Tagung, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Braunschweig, Deutschland, Seite 13.1–13.6.
- Zhang, Zh., & Casey, M. (2007). Experimental studies of the jet of a Pelton turbine. Proceeding of the IMechE Vol. 221, Part A: Journal of Power and Energy, pp. 1181–1192.
- Zhang, Zh., Eisele, K., & Geppert, L. (2000). Untersuchungen am Freistrah aus einer Modell-duese von Pelton-Turbinen mittels LDA. 8. GALA-Tagung,

Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Freising/München, Deutschland, Seite 15.1–15.6.

- Zhang, Zh., Muggli, F., Parkinson, E., & Schaerer, C. (2000). Experimental investigation of a low head jet flow at a model nozzle of a Pelton turbine. 11th International Seminar on Hydropower Plants (pp. 181–188), Vienna, Austria.
- Zhang, Zh., & Parkinson, E. (2001). Strömungsuntersuchungen am Freistrahler der Pelton-Turbine und Anpassen des LDA-Verfahrens. 9. GALA-Tagung, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Winterthur, Schweiz, Seite 43.1–43.7.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

- Adams (2021). *Spherical Valve*. [Online]. Available at: <https://adams-armaturen.de/wp/products/spherical-valve/> [Accessed: April 18, 2021].
- Aplusphysics (2021). *Continuity for fluids*. [Online]. Available at: <https://www.aplusphysics.com/courses/honors/fluids/continuity.html> [Accessed: April 18, 2021].
- Brennen, C. (2011). *Hydrodynamics of Pumps*. [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Cavitation-damage-on-the-blades-at-the-discharge-from-a-Francis-turbine_fig94_36721047 [Accessed: April 19, 2021].
- Britannica (2021). *Cavitation*. [Online]. Available at: <https://www.britannica.com/science/cavitation> [Accessed: April 19, 2021].
- Canyon Hydro (2021). *Emergency System Shutdown*. [Online]. Available at: <https://www.canyonhydro.com/guide/HydroGuide6.html> [Accessed: April 18, 2021].
- Dreamstime (2021). *Francis turbine, the impeller*. [Online]. Available at: <https://www.dreamstime.com/royalty-free-stock-photography-francis-turbine-impeller-hydraulic-especially-rotor-image35867237> [Accessed: April 18, 2021].
- Electrical Workbook (2019). *Closed loop or feedback control systems*. [Online]. Available at: <https://electricalworkbook.com/closed-loop-or-feedback-control-systems/> [Accessed: May 4, 2021].
- Getai Hydropower (2021). *Pelton Wheel Turbine*. [Online]. Available at: <https://www.gthec.cn/pelton-turbine/pelton-wheel-turbine.html> [Accessed: April 19, 2021].
- Heidra (2021). *Heidra*. [Online]. Available at: <http://heidra.co.uk/products.html> [Accessed: April 18, 2021].

- Hydrotu (2021). *Hydrotu*. [Online]. Available at: <http://greek.hydrotu.com/> [Accessed: April 18, 2021].
- Indiamart (2021). *Mild Steel CO2 Based Fire Supression System*. [Online]. Available at: <https://www.indiamart.com/proddetail/fire-suppression-system-21570016191.html> [Accessed: April 18, 2021].
- Indiamart (2021). *Pelton Wheel Bucket*. [Online]. Available at: <https://www.indiamart.com/proddetail/pelton-wheel-bucket-6173452997.html> [Accessed: April 18, 2021].
- J.M.K.C. Donev et al. (2020). *Energy Education - Pelton turbine*. [Online]. Available at: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Pelton_turbine [Accessed: April 18, 2021].
- McLean, E. & Kearney, D. (2014). *An Evaluation of Seawater Pumped Hydro Storage for Regulating the Export of Renewable Energy to the National Grid*. [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Turbine-Selection-Chart-5_fig3_260043890 [Accessed: April 18, 2021].
- Mercomindia (2021). *2015-2018 Saw 70% Dip in the Price of Utility-Scale Battery Storage in the US Market*. [Online]. Available at: <https://mercomindia.com/2015-2018-saw-70-dip/> [Accessed: April 18, 2021].
- ResearchGate (2014). *Turbine Selection Chart*. [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Turbine-Selection-Chart-5_fig3_260043890 [Accessed: April 28, 2021].
- Rgpvonline (2019). *Basic Mechanical Engineering*. [Online]. Available at: <https://www.rgpvonline.com/answer/basic-mechanical-engineering/15.html> [Accessed: April 18, 2021].
- Water Turbine Chart.png. (2020, September 16). *Wikimedia Commons, the free media repository*. [Online]. Available at: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Water_Turbine_Chart.png&oldid=460894978. [Accessed: April 18, 2021].
- ΔΕΔΔΗΕ (2021). *Το Δίκτυο Ηλεκτρισμού*. [Online]. Available at: <https://www.deddie.gr/el/deddie/to-diktuo-ilektrismou/> [Accessed: April 19, 2021].
- ΔΕΗ Ανανεώσιμες (2021). *Υπάρχουσες εγκαταστάσεις*. [Online]. Available at: <https://www.ppcr.gr/el/projects/current-projects> [Accessed: April 18, 2021].
- Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (2019). *Τομέας Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*. [Online]. Available at: <https://geo.civ.uth.gr/index.php/el/events-gr/30-ekpaideytikes-ekdromes> [Accessed: April 18, 2021].
- ΥΠΕΘΕ (2021). *Υδροηλεκτρικά Έργα Αχελώου*. [Online]. Available at: <https://www.ypethe.gr/archive/ydroilektrika-erga-ahelooy> [Accessed: April 19, 2021].