



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ**

*Διπλωματική εργασία*

**Μάρκος Ι. Μπονόβας**

**Επιβλέπων καθηγητής : Ι. Σ. Αναγνωστόπουλος**

**Μοντελοποίηση λειτουργίας και βελτιστοποίηση σχεδιασμού  
συστήματος ανάκτησης και αποθήκευσης κυματικής ενέργειας**

**Modeling of operation and optimum design of a  
wave power take-off system with energy storage**

**Αθήνα 2017**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ**

**Διπλωματική εργασία**

**Μάρκος Ι. Μπονόβας**

**Επιβλέπων καθηγητής : Ι. Σ. Αναγνωστόπουλος**

**Μοντελοποίηση λειτουργίας και βελτιστοποίηση σχεδιασμού  
συστήματος ανάκτησης και αποθήκευσης κυματικής ενέργειας**

**Modeling of operation and optimum design of a  
wave power take-off system with energy storage**

**Αθήνα 2017**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ**

**Εξεταστική επιτροπή**

**Ι. Σ. Αναγνωστόπουλος**

**Δ. Σ. Μαθιουλάκης**

**Δ. Ε. Παπαντώνης**

.....

.....

.....

**της διπλωματικής εργασίας του φοιτητή**

**Μάρκου Ι. Μπονόβα**

.....

**Ημερομηνία : ..../..../.....**

**Αθήνα 2017**



*Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται σε όλους όσους πίστεψαν σε εμένα,  
αλλά κυρίως σε αυτούς που ποτέ δεν έπαψαν να πιστεύουν...*





# Πρόλογος

Με την διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ένας από τους σπουδαιότερους κύκλους της νεανικής ζωής, αυτός των σπουδών. Η εισαγωγή, η σπουδή και πλέον η αποφοίτηση από την σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου χρειάστηκε χρόνο μελέτης και χρόνια ωρίμανσης. Η εκπλήρωση των μέχρι τώρα στόχων, οι οποίοι κατά κύριο λόγο συνδέονταν με την απόκτηση επιστημονικών γνώσεων και εφοδίων για την μετέπειτα καταξίωση στον επαγγελματικό τομέα αποτελεί τέλος μιας μακράς περιόδου και αρχή μιας νέας. Μίας νέας εποχής και περιόδου της ζωής, η οποία έχει χαρακτηριστεί ως η πιο παραγωγική στην ζωή του ατόμου και στην οποία η διαρκής ενημέρωση και μόρφωση θα είναι παρούσες και ίσως ακόμη πιο απαιτητικές από ό,τι μέχρι τώρα, αλλά παρούσα θα είναι και η εφαρμογή στην πράξη των όσων έμαθα στους κόλπους του ιδρύματος. Φυσικά εκεί θα είναι και οι συνεργάτες, οι συμφοιτητές, οι σύμβουλοι και οι καθηγητές, οι φίλοι και οι γνωστοί με τους οποίους μοιράστηκα τις εμπειρίες και τις στιγμές των φοιτητικών μου χρόνων.



## Περίληψη

Αντικείμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη πρότασης συστήματος μετατροπής και αποθήκευσης κυματικής ενέργειας. Η διαδικασία αυτή συντελείται με χρήση συσκευής σημειακού απορροφητή της κυματικής ενέργειας, ο οποίος παλινδρομώντας, αντλεί νερό σε υψηλότερη στάθμη στην οποία βρίσκεται ταμιευτήρας. Στην ροή ενέργειας ακολουθεί υδροστρόβιλος και το όλο σύστημα παρουσιάζει ομοιότητες με τα αντιστρεπτά υδροηλεκτρικά έργα.

Σε πρώτο στάδιο έγινε η μοντελοποίηση του συστήματος, βασισμένη σε ρεαλιστικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά. Ο κυματισμός θεωρήθηκε σταθερού πλάτους και περιόδου και μάλιστα αρμονικός βάσει της Θεωρίας Airy. Οι κατασκευαστικές παράμετροι βελτιστοποιήθηκαν με αντικειμενικές συναρτήσεις το ολικό επενδυτικό κόστος και την απόδοση της συσκευής. Ως μέγεθος αξιολόγησης της απόδοσης τέθηκε η ογκομετρική παροχή στον ταμιευτήρα. Η βελτιστοποίηση έγινε με χρήση σχήματος εξελικτικών αλγορίθμων, το οποίο ενσωματώνεται στο λογισμικό EASY.

Έπειτα άρθηκε η ελευθερία μιας εκ των παραμέτρων, αυτής της διαμέτρου του αγωγού και το σύστημα βελτιστοποιήθηκε εκ νέου. Για τα αποτελέσματα που προέκυψαν έγινε δυναμική ανάλυση και ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης. Στα πλαίσια καλύτερης κατανόησης δημιουργήθηκε δυναμικής αναπαράσταση της κίνησης σε περιβάλλον matlab. Ο κώδικας ENALIOS.m που προέκυψε από την όλη διαδικασία ενσωματώνει πληθώρα υπολογισμών σχετικών με την ανάλυση συστημάτων που υπακούν στην ίδια αρχή λειτουργίας. Στο τελευταίο στάδιο έγινε ανάλυση ευαισθησίας του συστήματος σε μεταβολή των παραμέτρων και καθορίστηκαν τα επιτρεπτά όριο διακύμανσής τους βάσει ικανοποίησης ορισμένων κριτηρίων ασφαλούς λειτουργίας.

Στο τελευταίο στάδιο, για την ενεργειακή ανάλυση αναιρέθηκε η παραδοχή σταθερού κυματισμού και μελετήθηκαν ετήσιες χρονοσειρές κυματικών συνθηκών. Βάσει αυτών κατασκευάστηκαν οι αντίστοιχες καμπύλες διάρκειας και το σύστημα οδηγήθηκε προς βελτιστοποίηση της απόδοσης στη διάρκεια του έτους, με παράλληλη ισχύ των προαναφερθέντων κριτηρίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν αρκετά ενθαρρυντικά, και μάλιστα συγκρίσιμα με ανάλογα μεγέθη των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων για την περίπτωση εγκατάστασης συστοιχίας συσκευών, αλλά και κατέδειξαν με εμφαντικό τρόπο τα σαφέστατα περιθώρια σχεδιαστικής βελτίωσης και κατ'έπекταση μεγιστοποίησης του ενεργειακού κέρδους, δίνοντας το ερέθισμα για μετέπειτα έρευνα σε θέματα που περιγράφονται στην παράγραφο των προτάσεων διερεύνησης.



## Abstract

The subject of the present thesis project is the study of a wave energy conversion and storage system proposal. This procedure is accomplished with the use of a point absorber wave energy device, which oscillation leads to pumping water in a higher level where a dam is located. In the energy flow a hydroturbine follows and the whole system presents similarities to reverse hydroelectric plants.

In the first stage the modelization of the system is completed, based on realistic topographic features. The sea wave amplitude and period were set as fixed variables, and also harmonic based on Airy Theory. The construction parameters were optimized with two objective functions: the total investment cost and the flow rate of the device at the dam. The optimization of the system was completed using evolutionary algorithms, which were incorporated in EASY software.

Then another parameter was set as fixed. This parameter is the diameter of the pipe. The system was reoptimized. According to the results that were produced, dynamic and energy analysis was completed. In the attempt of a better understanding a movement animation was created in a Matlab environment. The code ENALIOS.m which developed during the whole study incorporates a wide variety of calculations relevant to the system analysis of similar WECs. The final stage includes the sensitivity tests of the system in the parameters, and their allowed range were determined by safety criteria.

Finally, for the energy analysis, the sea wave amplitude was now supposed to be inconstant and yearly wave conditions time series data were statistically analysed. Based on that the yearly corresponding duration curves were drawn, and the system was led to yearly flow rate optimization, with parallel application of the safety criteria. The results for the installation of a wave farm of same devices appeared encouraging enough and in comparison to similar values of high power hydroelectric plants, but also emphasized the apparent designing flexibility improvements. This improvement leads to maximization of energy and therefore financial profit and it should be subject of additional investigation.

Keywords : Renewable energy, Wave power, Wave energy converter, WEC, point absorber, dynamic analysis, energy analysis, energy storage, hydroelectric plants, Airy Theory, evolutionary algorithms, optimization, EASY software, wave conditions time series.



## Ευχαριστίες

Άνθρωποι που με στήριξαν ποικιλοτρόπως, οι γονείς μου και η αδερφή μου, η οικογένειά μου, με τον τρόπο που το κάνουν τα τελευταία εικοσιπέντε χρόνια και στους οποίους οφείλεται αρκετό από αυτό που είμαι, ο κ. Αναγνωστόπουλος ως επιβλέπων καθηγητής, παρών οποιαδήποτε στιγμή και αν τον χρειάστηκα και οι φίλοι μου με κινήσεις ενίσχυσης της προσπάθειας αλλά και εκτόνωσης όταν η κούραση το απαιτούσε, αποτελούν βασικό συστατικό της επίτευξης των στόχων που υπηρετεί και η παρούσα διπλωματική εργασία, και αξίζουν περισσότερο από τις ευχαριστίες σε αυτό το σημείο. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ασύτη και τον κ. Καψούλη για την παροχή και την βοήθειά τους σε θέματα χρήσης του λογισμικού EASY. Τέλος μαζί με όλους τους καθηγητές που συνετέλεσαν στην απόκτηση της επιστημοσύνης του μηχανολόγου μηχανικού, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον καθηγητή του τομέα ρευστών του ιδρύματος και ειδικά τον αντιπρύτανη κ. Παπαντώνη για την πολύτιμη γνώση και εμπειρία του που μοιράστηκε μαζί μου στην διάρκεια διδασκαλίας τριών μαθημάτων που σχετίζονται άμεσα με το αντικείμενο της παρούσας μελέτης.





## Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή.....	1
<i>Παράγραφος 1<sup>η</sup></i> : Η ενεργειακή πραγματικότητα .....	1
1.1.1) Οικολογική κρίση .....	1
1.1.2) Πράσινη ενέργεια.....	4
1.1.3) Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	9
<i>Παράγραφος 2<sup>η</sup></i> : Η κυματική ενέργεια .....	10
1.2.1) Το κυματικό δυναμικό : Ενεργειακή και οικονομική αξιολόγηση .....	10
1.2.2) Ιστορική αναδρομή .....	16
Κεφάλαιο 2 : Συσκευές κυματικής ενέργειας.....	19
<i>Παράγραφος 1<sup>η</sup></i> : Οι διαθέσιμες τεχνολογίες.....	19
2.1.1) Κατηγοριοποίηση συσκευών βάση απόστασης από την ακτή .....	19
2.1.2) Κατηγοριοποίηση συσκευών βάση τρόπου λειτουργίας.....	20
2.1.3) Κατηγοριοποίηση συσκευών βάση είδους παραγόμενης ενέργειας .....	28
2.1.4) Επικρατέστερες τεχνολογίες .....	29
<i>Παράγραφος 2<sup>η</sup></i> : Περιγραφή επιλεγμένης συσκευής .....	30
2.2.1) Διαδικασία επιλογής .....	30
2.2.2) Περιγραφή συσκευής .....	31
2.2.3) Δυναμική ανάλυση heave plate.....	33
Κεφάλαιο 3 : Μαθηματική ανάλυση.....	39
<i>Παράγραφος 1<sup>η</sup></i> : Κυματική Θεωρία.....	39
3.1.1) Εισαγωγή.....	39
3.1.2) Χαρακτηριστικά Κύματος.....	40
3.1.3) Γραμμική θεωρία κύματος – Airy Theory .....	41
3.1.4) Κυματική ενέργεια .....	45
<i>Παράγραφος 2<sup>η</sup></i> : Ανάλυση δυνάμεων .....	47
3.2.1) Δυνάμεις σε επιπλέοντα σώματα .....	47
3.2.2) Δυνάμεις στον πλωτήρα : Περίπτωση κατακόρυφης κίνησης .....	52
Κεφάλαιο 4 : Μοντελοποίηση συστήματος .....	55
<i>Παράγραφος 1<sup>η</sup></i> : Κατάστροψη συστήματος εξισώσεων κίνησης.....	55
4.1.1) Εισαγωγή.....	55
4.1.2) Γεωμετρικοί υπολογισμοί .....	56
4.1.3) Κοινά φορτία.....	57
4.1.4) Περίπτωση 1 <sup>η</sup> : Ανοδική κίνηση εμβόλου .....	59
4.1.5) Περίπτωση 2 <sup>η</sup> : Καθοδική κίνηση εμβόλου .....	60
4.1.6) Τελικό σύστημα εξισώσεων.....	64
<i>Παράγραφος 2<sup>η</sup></i> : Προσδιορισμός σταθερών μεγεθών.....	65
4.2.1) Υδροδυναμικά χαρακτηριστικά και περιβαλλοντικές συνθήκες .....	65
4.2.2) Κυματικά δεδομένα.....	67

4.2.3) Τοπογραφικά δεδομένα.....	70
4.2.4) Προσδιορισμός κατασκευαστικών και λειτουργικών παραμέτρων .....	71
4.2.5) Υπολογισμός διεγείρουσας δύναμης.....	74
<i>Παράγραφος 3<sup>η</sup> : Ενεργειακός Ισολογισμός.....</i>	<i>76</i>
4.3.1) Ενέργεια δέσμησης.....	76
4.3.2) Ενέργεια αποταμίευσης.....	77
4.3.3) Βαθμός απόδοσης .....	77
4.3.4) Συνθήκες συντονισμού.....	78
4.3.5) Επιλογή μονάδας παραγωγής ισχύος .....	79
4.3.6) Κυματικό πάρκο.....	80
Κεφάλαιο 5 : Αλγόριθμος .....	83
<i>Παράγραφος 1<sup>η</sup> : Πρόγραμμα Enalios.m.....</i>	<i>83</i>
5.1.1) Κώδικας Matlab .....	83
5.1.2) Βήματα διαδικασίας.....	85
<i>Παράγραφος 2<sup>η</sup> : Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης.....</i>	<i>86</i>
5.2.1) Λογισμικό EASY .....	86
5.2.2) Η βελτιστοποίηση της μελέτης .....	88
Κεφάλαιο 6 : Παραδοχή σταθερού κυματισμού : Αποτελέσματα .....	91
<i>Παράγραφος 1<sup>η</sup> : Δεδομένα εισαγωγής .....</i>	<i>91</i>
6.1.1) Χαρακτηριστικά χρονικής μεθόδου .....	91
6.1.2) Χαρακτηριστικά κυματισμού.....	92
6.1.3) Χαρακτηριστικά τοπογραφίας .....	92
6.1.4) Εύρος διακύμανσης παραμέτρων.....	93
<i>Παράγραφος 2<sup>η</sup> : Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.....</i>	<i>93</i>
6.2.1) Διαδικασία βελτιστοποίησης συστήματος.....	93
6.2.2) Διαδικασία βελτιστοποίησης μηχανισμού για σταθερό αγωγό.....	101
<i>Παράγραφος 3<sup>η</sup> : Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης.....</i>	<i>104</i>
6.3.1) Κινηματικά μεγέθη και ογκομετρική παροχή πλήρους απόκρισης.....	104
6.3.2) Κινηματικά μεγέθη και ογκομετρική παροχή μόνιμης απόκρισης .....	107
6.3.3) Αρχικές συνθήκες και μεταβατική απόκριση.....	111
6.3.4) Αναπτυσσόμενες δυνάμεις στη μόνιμη απόκριση .....	112
6.3.5) Δυναμική αναπαράσταση της μετατόπισης του μηχανισμού.....	121
<i>Παράγραφος 4<sup>η</sup> : Αποτελέσματα ενεργειακής ανάλυσης.....</i>	<i>126</i>
6.4.1) Κυματική ενέργεια .....	126
6.4.2) Ενέργεια συστήματος και βαθμός απόδοσης.....	127
6.4.3) Επιλογή υδροστροβίλου.....	128
<i>Παράγραφος 5<sup>η</sup> : Ανάλυση ευαισθησίας .....</i>	<i>130</i>
6.5.1) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την ολική μάζα $m_{tot}$ .....	131
6.5.2) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την διάμετρο του πλωτήρα $d_p$ .....	133
6.5.3) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την διάμετρο του εμβόλου $d_e$ .....	134
6.5.4) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την υψομετρική διαφορά $L_k$ .....	135
6.5.5) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την οριζόντια απόσταση ταμιευτήρα-μηχανισμού $L_s$ ....	136

6.5.6) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την στάθμη του ταμιευτήρα $Z_t$ .....	137
6.5.7) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τον συντελεστή γραμμικών απωλειών $I_f$ .....	138
6.5.8) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς το πλάτος του κύματος $A$ .....	139
6.5.9) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την περίοδο του κύματος $T$ .....	140
6.5.10) Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	141
Κεφάλαιο 7 : Ανάλυση χρονοσειρών .....	143
<i>Παράγραφος 1<sup>η</sup> : Επιλογή θέσης</i> .....	143
7.1.1) Η σημασία της ανάλυσης.....	143
7.1.2) Επιλογή θέσης.....	144
<i>Παράγραφος 2<sup>η</sup> : Επεξεργασία δεδομένων</i> .....	145
7.2.1) Δεδομένα εισαγωγής.....	145
7.2.2) Στατιστική επεξεργασία δεδομένων .....	149
Κεφάλαιο 8 : Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών .....	153
8.1) Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.....	153
8.2) Αποτελέσματα ενεργειακής ανάλυσης.....	154
8.3) Αποτελέσματα ενεργειακής ανάλυσης κυματικού πάρκου.....	155
8.4) Στοιχεία χωροθέτησης .....	157
Κεφάλαιο 9 : Συμπεράσματα και προτάσεις διερεύνησης .....	159
9.1) Συμπεράσματα .....	159
9.2) Προτάσεις διερεύνησης.....	161
Βιβλιογραφία.....	163
Παράρτημα I.....	165
Πίνακας I.1) Εξισώσεις κυματικής θεωρίας.....	165
Πίνακας I.2) Συντελεστής Πρόσθετης Μάζας για 3-d σώματα σε άπειρο ρευστό.....	166
Παράρτημα II .....	167
II.1) Κώδικας matlab «ENALIOS.m».....	167
II.2) Λογικό διάγραμμα κώδικα matlab «ENALIOS.m» .....	195
Παράρτημα III.....	207
III.1) Κώδικας matlab «TIMESERIES.m» για επεξεργασία και ανάλυση των χρονοσειρών. 207	
Παράρτημα IV.....	211
Πίνακας IV.1) Ημερήσιες κυματικές συνθήκες έτους 2015 Monterey Bay Station 185 (Πηγή CDIP)	
.....	211



## Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1: Επίπεδα CO <sub>2</sub> και θερμοκρασία στην Ανταρκτική.....	1
Σχήμα 1.2: Αποθέματα ορυκτών καυσίμων ανά χώρα.....	3
Σχήμα 1.3: Ενεργειακή κατανάλωση (BTU) ανά άτομο (2010) .....	4
Σχήμα 1.4: Παγκόσμια παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε. (2014).....	5
Σχήμα 1.5: Ποσοστιαία παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε. στην Ευρώπη (2014).....	6
Σχήμα 1.6: Σενάρια διείσδυσης Α.Π.Ε. στην Ελλάδα.....	8
Σχήμα 1.7: Επενδύσεις σε Α.Π.Ε. σε παγκόσμιο επίπεδο (2004-2014).....	8
Σχήμα 1.8: Σημαντικό ύψος κύματος (SWH) (m). Στιγμιότυπο 12:00 pm -17-11-2016.....	11
Σχήμα 1.9: Πυκνότητα κυματικής ενέργειας (KJ/m κυματομετώπου) .....	12
Σχήμα 1.10: Θέσεις εγκατάστασης συσκευών κυματικής ενέργειας και σημαντικό ύψος κύματος ανά θέση .....	12
Σχήμα 1.11: Μέση κυματική ισχύς στην Ευρώπη (kW/m κυματομετώπου) .....	13
Σχήμα 1.12: Κατανομή ύψους κύματος ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος (1997-2006).....	13
Σχήμα 1.13: Κόστος ενέργειας (USD/MWh) (Ιούνιος 2015) .....	15
Σχήμα 1.14: Κόστος συσκευών κυματικής ενέργειας και ανθρακικό αποτύπωμα .....	15
Σχήμα 1.15: Η κατοχυρωμένη πατέντα του Girard (1799) .....	16
Σχήμα 1.16: Εξώφυλλο νορβηγικού περιοδικού (1901) που αναφέρει αυτόνομους ηλεκτρικούς πλωτήρες σήμανσης .....	16
Σχήμα 1.17: Η συσκευή οικιακής ηλεκτρικής τροφοδοσίας του Bochaux-Praceique .....	17
Σχήμα 1.18: Εξέλιξη της συσκευής Salter's Duck.....	18
Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση ανάλογα με την απόσταση από την ακτή .....	19
Σχήμα 2.2: Αρχή λειτουργίας OP-devices .....	20
Σχήμα 2.3: OP devices: πλωτή (αριστερά) και στην ακτή (δεξιά).....	20
Σχήμα 2.4: Αρχή λειτουργίας OWC.....	21
Σχήμα 2.5: Παράδειγμα OWC (Limpet 500) .....	21
Σχήμα 2.6: Βαθμοί ελευθερίας πλωτής συσκευής.....	22
Σχήμα 2.7: Point absorber δυο σωμάτων .....	23
Σχήμα 2.8: Αρχή λειτουργίας Point absorbers .....	23
Σχήμα 2.9: Fully submerged point absorber.....	23
Σχήμα 2.10: Αρχή λειτουργίας Wave Surge Converters .....	24
Σχήμα 2.11: Εγκατάσταση Wave Surge Converter.....	24
Σχήμα 2.12: Αρχή λειτουργίας Pitching devices.....	25
Σχήμα 2.13: Συσκευή pitching(Pelamis).....	25
Σχήμα 2.14: Αρχή λειτουργίας Bulge Valve.....	26
Σχήμα 2.15: Αρχή λειτουργίας συστήματος rotating mass .....	26
Σχήμα 2.16: Αρχή λειτουργίας membrane device.....	27
Σχήμα 2.17: Συστήματα πολλαπλών σωμάτων .....	27
Σχήμα 2.18: Ποσοστό ανάπτυξης τεχνολογιών κυματικής ενέργειας.....	28
Σχήμα 2.19: Στάδια ενεργειακής μετατροπής .....	28
Σχήμα 2.20: Πλήθος εφευρέσεων ανά χώρα .....	29
Σχήμα 2.21: Κυρίαρχες τεχνολογίες και project .....	29
Σχήμα 2.22: Διάταξη πλωτήρα-αγωγού-ταμιευτήρα.....	31
Σχήμα 2.23: Fully floating σύστημα .....	32
Σχήμα 2.24: Συστοιχία συσκευών- Πλήρης διάταξη .....	32
Σχήμα 2.25 : Σύστημα με μεγάλου μήκους θεμελίωση (αριστερά) και διωστήρα (δεξιά).....	32
Σχήμα 2.26: Αρχή λειτουργίας παλινδρομικής αντλίας .....	33
Σχήμα 2.27: Δυναμική ανάλυση heave plate ανοδικής κίνησης .....	34

Σχήμα 2.28: Δυναμική ανάλυση heave plate καθοδικής κίνησης .....	35
Σχήμα 2.29: Μέθοδος πλωτής αντιστάθμισης heave plate.....	35
Σχήμα 2.30: Διαφορετική θεμελίωση point absorbers .....	36
Σχήμα 2.31: Διάταξη εγκατάστασης-αγκύρωσης point absorber.....	37
Σχήμα 3.1: Χαρακτηριστικά κύματος .....	41
Σχήμα 3.2: Τροχιές στοιχείων ρευστού ανάλογα με το βάθος.....	44
Σχήμα 3.3: Χωρικοί βαθμοί ελευθερίας.....	47
Σχήμα 3.4: Συντελεστής αντίστασης συναρτήσει Reynolds για κύλινδρο.....	51
Σχήμα 3.5: Δυνάμεις αλληλεπίδρασης συναρτήσει βάθους H και βυθίσματος D .....	51
Σχήμα 3.6: Δυνάμεις σε μερικώς βυθισμένο πλωτήρα .....	52
Σχήμα 4.1: Ρεαλιστική διάταξη συστήματος .....	56
Σχήμα 4.2: Απλοποιημένη διάταξη συστήματος.....	57
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα Moody .....	66
Σχήμα 4.4: Στιγμιότυπο SWH από Windyty (5:25pm 8-12-2016) .....	68
Σχήμα 4.5: Μέσο σημαντικό ύψος κύματος (mean SWH)(m) (1997-2006).....	68
Σχήμα 4.6: Στιγμιότυπα SWH στον ελλαδικό χώρο .....	69
Σχήμα 4.7: Καταστάσεις λειτουργίας point absorber.....	74
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα επιλογής υδροστροβίλου.....	80
Σχήμα 5.1: Σενάριο 2-Βελτιστοποίηση πλήρους συστήματος .....	85
Σχήμα 5.2 : Σενάριο 1-Επιλογή αγωγού και βελτιστοποίηση .....	85
Σχήμα 5.3: Σχεδιάγραμμα εξελικτικού αλγορίθμου.....	87
Σχήμα 6.1: Η επιλογή Run and Time της Matlab.....	91
Σχήμα 6.2: EASY setup: Επιλογή δύο συναρτήσεων στόχων .....	94
Σχήμα 6.3: EASY setup: Καθορισμός design variables .....	95
Σχήμα 6.4: EASY setup : Καθορισμός κριτηρίων σύγκλισης.....	95
Σχήμα 6.5: EASY setup: Καθορισμός χαρακτηριστικών γενεών εξελικτικού αλγορίθμου.....	96
Σχήμα 6.6: EASY setup: Καθορισμός μέγιστου πλήθους επαναλήψεων.....	96
Σχήμα 6.7: Το εκτελέσιμο αρχείο OptimusWEC v 1.0.....	97
Σχήμα 6.8: EASY results: Γράφημα σύγκλισης αλγορίθμου ως προς την παράμετρο ολικής μάζας (mtot).....	98
Σχήμα 6.9: EASY results: Γράφημα εξέλιξης elites αλγορίθμου.....	98
Σχήμα 6.10: Περιοχές μετώπου Pareto .....	99
Σχήμα 6.11: EASY results: Μέτωπο Pareto βελτιστοποίησης συστήματος .....	100
Σχήμα 6.12: EASY results: Δέκα τελικοί elites βελτιστοποίησης συστήματος.....	100
Σχήμα 6.13: Χρωματικός κώδικας ενεργειακής-οικονομικής αξιολόγησης συστήματος.....	101
Σχήμα 6.14: EASY setup: Καθορισμός design variables για σταθερό αγωγό .....	101
Σχήμα 6.15: EASY setup: Καθορισμός μέγιστου πλήθους επαναλήψεων.....	102
Σχήμα 6.16: EASY results: Τελικοί δέκα elites .....	102
Σχήμα 6.17: EASY results: Γράφημα σύγκλισης αλγορίθμου .....	102
Σχήμα 6.18: Μετατόπιση συστήματος-Πλήρης απόκριση .....	104
Σχήμα 6.19: Ταχύτητα συστήματος-Πλήρης απόκριση .....	105
Σχήμα 6.20: Επιτάχυνση συστήματος-Πλήρης απόκριση.....	106
Σχήμα 6.21: Ογκομετρική παροχή συστήματος-Πλήρης απόκριση.....	107
Σχήμα 6.22: Μετατόπιση συστήματος-Μόνιμη απόκριση.....	108
Σχήμα 6.23: Μετατόπιση συστήματος και κύματος-Μόνιμη απόκριση .....	108
Σχήμα 6.24: Μετατόπιση συστήματος-Πλήρης απόκριση-Μηδενικές αρχικές συνθήκες.....	111
Σχήμα 6.25: Μετατόπιση συστήματος-Πλήρης απόκριση-Αρχική συνθήκη θέσης (-A/2) .....	112
Σχήμα 6.26: Δύναμη διέγερσης-Μόνιμη απόκριση .....	113
Σχήμα 6.27: Ταχύτητα συστήματος-Μόνιμη απόκριση .....	113
Σχήμα 6.28: Δύναμη οπισθέλκουσας-Μόνιμη απόκριση.....	114
Σχήμα 6.29: Ταχύτητα συστήματος-Μόνιμη απόκριση .....	114

Σχήμα 6.30: Δύναμη ακτινοβολίας-Μόνιμη απόκριση .....	115
Σχήμα 6.31: Ταχύτητα συστήματος-Μόνιμη απόκριση .....	115
Σχήμα 6.32: Δύναμη αντίστασης στήλης νερού-Μόνιμη απόκριση .....	116
Σχήμα 6.33: Ταχύτητα συστήματος-Μόνιμη απόκριση .....	116
Σχήμα 6.34: Λειτουργία βαλβίδας και εμφάνιση αντίστασης στήλης νερού .....	117
Σχήμα 6.35: Δύναμη αντίστασης απωλειών αγωγού-Μόνιμη απόκριση .....	118
Σχήμα 6.36: Ταχύτητα συστήματος-Μόνιμη απόκριση .....	118
Σχήμα 6.37: Μετατόπιση συστήματος και κύματος-Μόνιμη απόκριση .....	119
Σχήμα 6.38: Βύθισμα πλωτήρα-Μόνιμη απόκριση.....	120
Σχήμα 6.39: Δύναμη (Ανωσης-Βάρος)-Μόνιμη απόκριση.....	120
Σχήμα 6.40: Στιγμιότυπο animation-Αναπαράσταση επιφάνειας κύματος.....	121
Σχήμα 6.41: Στιγμιότυπο animation-Αναπαράσταση κύματος με ισοϋψείς συνημιτονικές καμπύλες .....	121
Σχήμα 6.42: Στιγμιότυπο animation-Απλή αναπαράσταση κύματος με συνημιτονική καμπύλη επιφανείας .....	121
Σχήμα 6.43: Ονομαστικές διαστάσεις πλωτήρα.....	122
Σχήμα 6.44: Στιγμιότυπο animation-Πλωτήρας στην θέση $y_A=y_K$ .....	123
Σχήμα 6.45: Στιγμιότυπο animation-Πλωτήρας στο ANΣ.....	124
Σχήμα 6.46: Στιγμιότυπο animation-Σημείο ελάχιστου βυθίσματος .....	124
Σχήμα 6.47: Στιγμιότυπο animation-Πλωτήρας στο ΚΝΣ.....	125
Σχήμα 6.48: Στιγμιότυπο animation-Εξοδος πλωτήρα από το νερό .....	126
Σχήμα 6.49: Ροή ενέργειας.....	128
Σχήμα 6.50: Διάγραμμα επιλογής υδροτροβίλου.....	129
Σχήμα 6.51: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Μάζα συστήματος) .....	132
Σχήμα 6.52: Ανάλυση ευαισθησίας (Διάμετρος πλωτήρα-Παροχή).....	134
Σχήμα 6.53: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Διάμετρος εμβόλου) .....	135
Σχήμα 6.54: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Υψομετρική διαφορά) .....	136
Σχήμα 6.55: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Οριζόντια απόσταση).....	137
Σχήμα 6.56: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Στάθμη ταμιευτήρα) .....	138
Σχήμα 6.57: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Συντελεστής γραμμικών απωλειών αγωγού).....	139
Σχήμα 6.58: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Πλάτος κύματος) .....	140
Σχήμα 6.59: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Περίοδος κύματος) .....	141
Σχήμα 7.1: Πολιτικός και γεωγραφικός χάρτης επιλεγμένης θέσης- Κόλπος του Μοντερέι.....	144
Σχήμα 7.2: Στατιστική ανάλυση ύψους κύματος .....	145
Σχήμα 7.3: Ροδόγραμμα SWH (αριστερά) και T (δεξιά) , Monterey Bay (2015).....	146
Σχήμα 7.4: Κυματικές συνθήκες (SWH,T) και μοντέλο πρόγνωσης, Monterey Bay (2016) .....	146
Σχήμα 7.5: SWH και στατιστικά μεγέθη, Monterey Bay (2015) .....	147
Σχήμα 7.6: Χρονοσειρά SWH, Monterey Bay, (2015) .....	149
Σχήμα 7.7: Χρονοσειρά T, Monterey Bay, (2015).....	150
Σχήμα 7.8: Καμπύλη διάρκειας SWH και απλοποιημένο μοντέλο προσέγγισης, Monterey Bay (2015) .....	151
Σχήμα 7.9: Καμπύλη διάρκειας ισχύος προσεγγιστικού μοντέλου, Monterey Bay (2015) .....	151
Σχήμα 8.1: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης EASY. Διάγραμμα σύγκλισης .....	153
Σχήμα 8.2: Elites βελτιστοποίησης συστήματος.....	153
Σχήμα 8.3: Καμπύλη διάρκειας ισχύος προσεγγιστικού μοντέλου, Monterey Bay (2015) .....	154
Σχήμα 8.4: Μεταφορά συσκευών στη θέση εγκατάστασης .....	157
Σχήμα 8.5: Εξαγωνικής μορφής χωροθέτηση 80 συσκευών.....	157





## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1: Παγκόσμιο ενεργειακό δυναμικό υδροκινητικής ενέργειας (IEA,OES,Annual Report 2007).....	10
Πίνακας 4.1: Σταθερές παράμετροι προβλήματος .....	70
Πίνακας 6.1: Κυματικά δεδομένα .....	92
Πίνακας 6.2: Τοπογραφικά δεδομένα .....	92
Πίνακας 6.3: Εύρος ελεύθερων παραμέτρων σχεδίασης .....	93
Πίνακας 6.4: Παράμετροι συστήματος και EASY.....	95
Πίνακας 6.5: Βέλτιστο set παραμέτρων.....	103
Πίνακας 6.6: Βέλτιστη τιμή παροχής.....	103
Πίνακας 6.7: Μηδενικές αρχικές συνθήκες .....	111
Πίνακας 6.8: Αρχική συνθήκη θέσης (-A/2).....	112
Πίνακας 6.9: Χαρακτηριστικά πλωτήρα .....	122
Πίνακας 6.10: Set παραμέτρων που οδηγούν σε έξοδο του πλωτήρα .....	125
Πίνακας 6.11: Χαρακτηριστικά υδροστροβίλου.....	130
Πίνακας 6.12: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Μάζα συστήματος).....	131
Πίνακας 6.13: Βέλτιστη μάζα συστήματος και παροχή.....	132
Πίνακας 6.14: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Διάμετρος πλωτήρα).....	133
Πίνακας 6.15: Βέλτιστη διάμετρος πλωτήρα και παροχή (EASY).....	133
Πίνακας 6.16: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Διάμετρος εμβόλου) .....	134
Πίνακας 6.17: Βέλτιστη διάμετρος εμβόλου και παροχή .....	134
Πίνακας 6.18: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Υψομετρική διαφορά) .....	135
Πίνακας 6.19: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Οριζόντια απόσταση) .....	136
Πίνακας 6.20: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Στάθμη ταμιεντήρα) .....	137
Πίνακας 6.21: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Συντελεστής γραμμικών απωλειών αγωγού) .....	138
Πίνακας 6.22: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Πλάτος κύματος) .....	139
Πίνακας 6.23: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Περίοδος κύματος) .....	140
Πίνακας 7.1: Μέσες μηνιαίες κυματικές συνθήκες, Monterey Bay, (2011-2015).....	148
Πίνακας 7.2: Μέσες ετήσιες κυματικές συνθήκες, Monterey Bay, (2011-2015) .....	149
Πίνακας 7.3: Μέσες τιμές πλάτους και περιόδου απλοποιημένου μοντέλου διακριτοποιημένου χρόνου, Monterey Bay (2015).....	150
Πίνακας 8.1: Τιμές μεταβλητών βελτιστοποίησης και μοντέλου .....	154
Πίνακας 8.2: Χαρακτηριστικά υδροστροβίλου.....	156

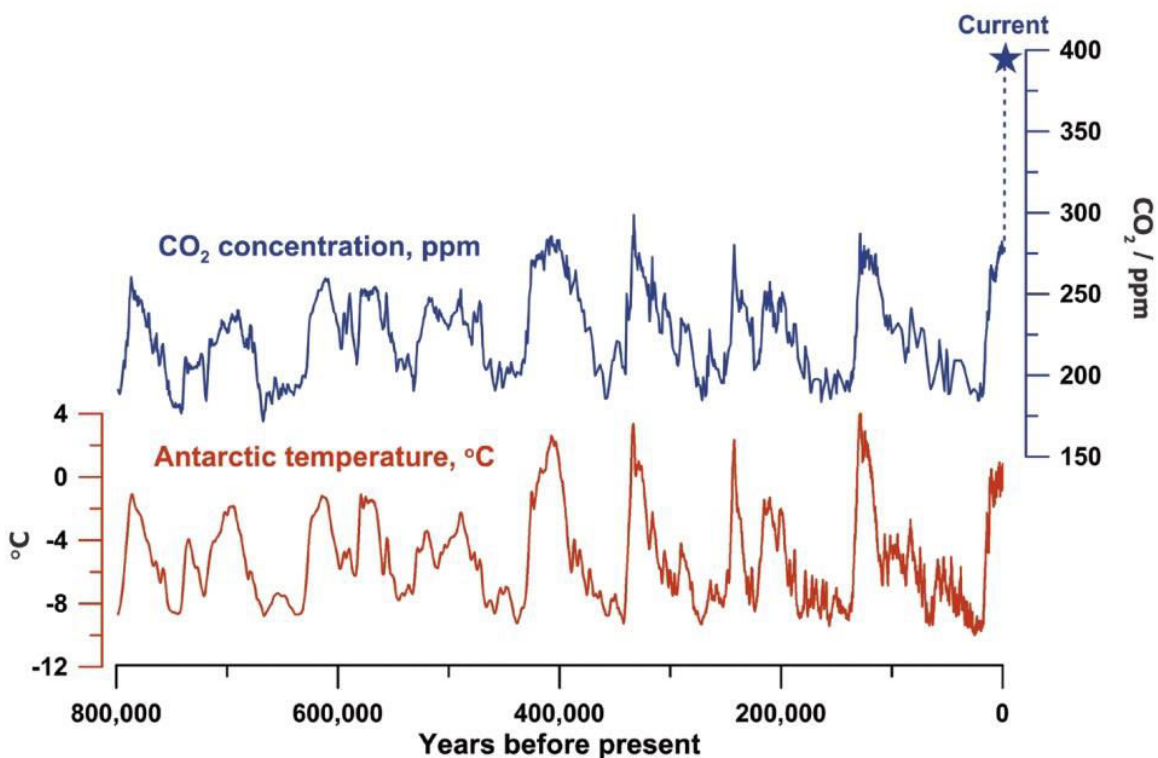


## Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

### Παράγραφος 1<sup>η</sup> : Η ενεργειακή πραγματικότητα

#### 1.1.1) Οικολογική κρίση

Ο Σεπτέμβριος του 2016 ίσως να αποτελέσει κατά πολλούς ερευνητές χρονολογία ορόσημο, καθώς μπορεί να καταγραφεί ως ο μήνας που η ανθρωπότητα αυτοκτόνησε. Μελέτες (REN21, Global Status Report, 2016) δείχνουν ότι η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα σημείωσε ιστορικό υψηλό, ξεπερνώντας όρια ασφαλείας και καθιστώντας κατά πολλούς την πορεία της κλιματικής αλλαγής μη αναστρέψιμη, όπως γίνεται φανερό και από το σχήμα 1.1. Εικόνες τεράστιων όγκων πάγου να αποκολλώνται από παγετώνες, οικείες στην πληθώρα των πολιτών, ίσως γίνουν προάγγελος και της καταστροφής που αντιμετωπίζει πλέον το γένος μας.



Σχήμα 1.1: Επίπεδα CO<sub>2</sub> και θερμοκρασία στην Ανταρκτική (Πηγή: Harvard University, 2012)

Ερευνητές για χρόνια προειδοποιούσαν για το επικίνδυνο «παιχνίδι» μεταξύ κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη στηριζόμενου σε ορυκτά καύσιμα και της απειλούμενης οικολογικής ισορροπίας. Αποτέλεσμα αυτού του ανταγωνιστικού παιχνιδιού ήταν η σημερινή θερμοκρασία να είναι η υψηλότερη των τελευταίων εκατόν είκοσι αιώνων (12.000 χρόνων!) ,

βάσει της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ, και πλέον αυτή η ανοδική πορεία του υδραργύρου να είναι κατά πολλούς μη αναστρέψιμη, με τις προβλέψεις να εκτιμούν ότι μέχρι το 2050 η θερμοκρασία θα έχει αυξηθεί κατά δύο βαθμούς, αν και εφόσον τα επίπεδα του CO<sub>2</sub> συνεχίσουν σε τέτοια μεγέθη.

Ξεπερνώντας λοιπόν ακόμα και τις τότε δυσοίωνες προβλέψεις για την πορεία της κλιματικής αλλαγής κατά την σύνοδο του Παρισιού (Δεκέμβριος 2015) που προέβλεπαν αύξηση κατά 1,5 βαθμών, βαδίζουμε σε «αχαρτογράφητα νερά», μιας και ο πλανήτης ποτέ δεν δοκιμάστηκε σε ανάλογες συνθήκες, συνθήκες απότοκους της βιομηχανικής επανάστασης και της ανθρώπινης αδιαφορίας.

Στηριζόμενοι στον ακόλουθο ορισμό (Wikipedia, 2016) :

*«Οικολογικά προβλήματα ή περιβαλλοντικά προβλήματα ονομάζονται οι διαταραχές στη γήινη βιόσφαιρα και στο φυσικό περιβάλλον οι οποίες συνηθίζεται να αποδίδονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα. Στον βαθμό που τα οικολογικά προβλήματα απειλούν την επιβίωση ενός πληθυσμού, οδηγούν σε μία οικολογική κρίση.»*

και σε έρευνες που αναφέρουν οριστική εξαφάνιση του ενός τετάρτου των ειδών του πλανήτη τις επόμενες τρεις δεκαετίες, είναι πλέον γεγονός ότι η ανθρωπότητα βρίσκεται «προ των πυλών» των ευθυνών της, ενώ ίσως να είναι και ήδη αργά.

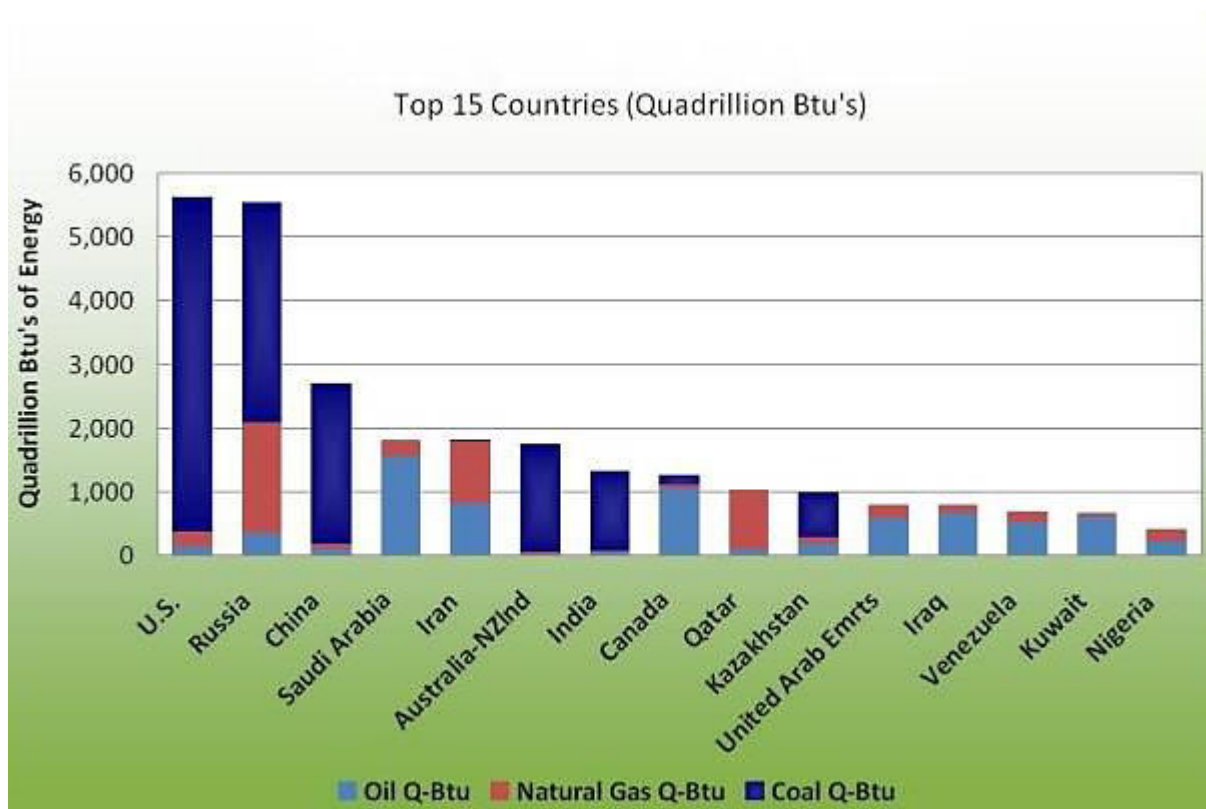
Αν και έγινε εστίαση στο σημαντικότερο από όλα, το πρόβλημα της υπερθέρμανσης του πλανήτη λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου, τα κυριότερα περιβαλλοντικά οικολογικά προβλήματα είναι:

- η τρύπα του όζοντος (Ozone hole)
- το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Greenhouse effect)
- η όξινη βροχή (Acid Rain)
- η καταστροφή των δασών (Deforestation)
- η ατμοσφαιρική ρύπανση (Atmospheric Pollution)
- η ηχορύπανση (Noise Pollution)
- η καταστροφή του εδάφους (Soil destruction)
- τα οικιακά απόβλητα (Household wastes)
- τα ραδιενεργά κατάλοιπα (Radioactive residues)
- η χρήση φυτοφαρμάκων (Pesticides use)
- η μείωση της βιοποικιλότητας (Biodiversity reduce)

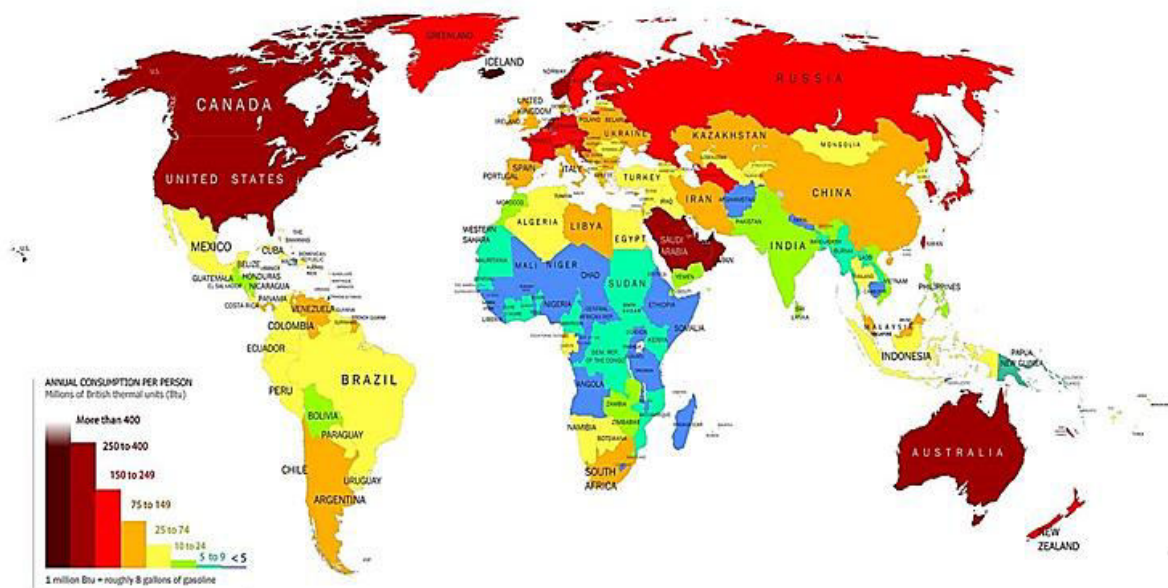
Στις κυριότερες αιτίες των παραπάνω συγκαταλέγονται:

- οι μέθοδοι βιομηχανικής παραγωγής (Industrial production methods)
- ο υπερκαταναλωτισμός (Consumerism)
- η αστικοποίηση (Urbanization)
- η αλόγιστη και βάνουση εκμετάλλευση των φυσικών πόρων (Overexploitation of natural resources)

Τα μεγέθη που αποτυπώνονται στον ακόλουθο ενεργειακό χάρτη και στο γράφημα είναι ενδεικτικά των ενεργειακών απαιτήσεων του πληθυσμού και του αδιέξοδου στο οποίο οδηγείται η παραγωγή ενέργειας στηριζόμενη στα πεπερασμένα αποθέματα ορυκτών καυσίμων.



Σχήμα 1.2: Αποθέματα ορυκτών καυσίμων ανά χώρα (Πηγή: AgMRC, 2009)



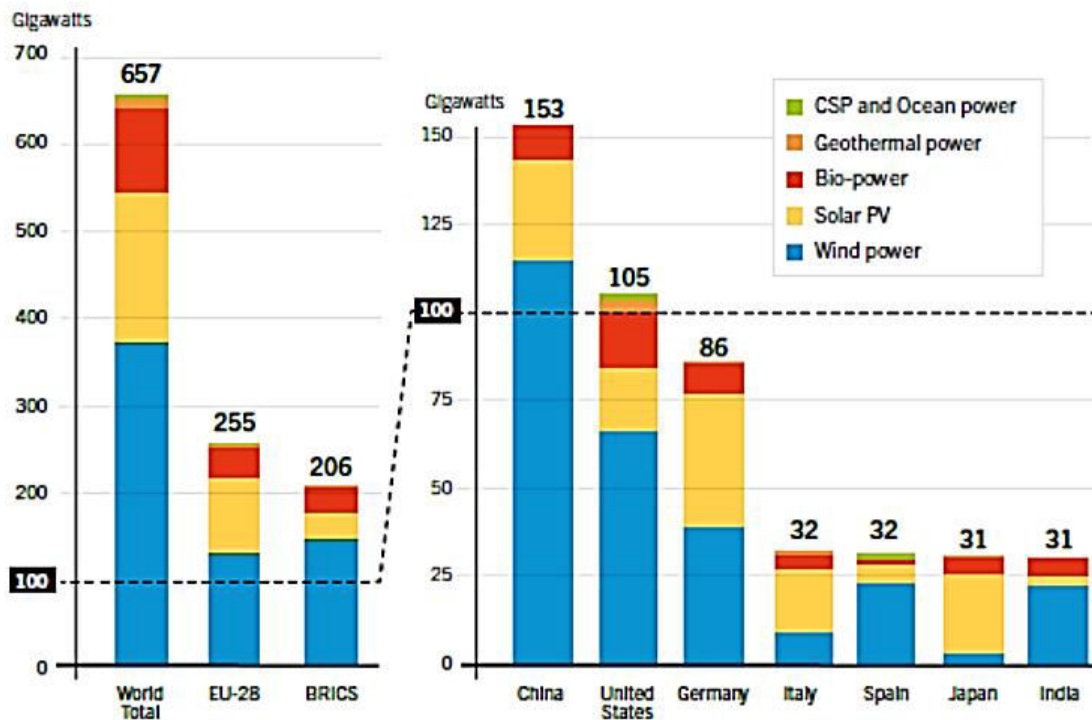
Σχήμα 1.3: Ενεργειακή κατανάλωση (BTU) ανά άτομο (2010) (Πηγή: USEIA,IEA,2010)

### 1.1.2) Πράσινη ενέργεια

Από την συνοπτική παρουσίαση των οικολογικών προβλημάτων καθίσταται πλέον σήμερα πιο αναγκαία από ποτέ η προσπάθεια αλλαγής του ενεργειακού τοπίου. Διέξοδο αποτελεί η «στροφή» στις ανανεώσιμες μορφές, την λεγόμενη «πράσινη ενέργεια». Με την παρούσα κατάσταση να πιέζει για μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και των υπόλοιπων αερίων του θερμοκηπίου κατά 40-70 % μέχρι το 2050, ενεργειακοί κολοσσοί ανά τον κόσμο αλλάζουν την πολιτική τους ενισχύοντας την ανάπτυξη και τις επενδύσεις στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με στόχο την μελλοντική οριστική απεξάρτηση της ενεργειακής παραγωγής από τα ορυκτά καύσιμα και την λεγόμενη «ανθρακική ουδετερότητα».

Ως ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας, ή νέες πηγές ενέργειας, ή πράσινη ενέργεια χαρακτηρίζονται μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες. Σύμφωνα με απόφαση του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου (2009/28/ΕΚ), ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές θεωρείται η αιολική, ηλιακή, αεροθερμική, γεωθερμική, υδροθερμική και ενέργεια των ωκεανών, υδροηλεκτρική, από βιομάζα, από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέρια. Ο χαρακτηρισμός ως ήπιες αναφέρεται πρώτον στο ότι καμία ενεργητική παρέμβαση δεν απαιτείται για την δέσμευσή τους, μιας και οι διαρκώς εξελισσόμενες συσκευές και τεχνολογίες απλώς δεσμεύουν μέρος της ροής ενέργειας στον πλανήτη που προέρχεται από επίγειες, υπόγειες ή υπέργειες πηγές, ενώ τα κατάλοιπα αυτής της ενεργειακής συναλλαγής είναι μηδαμινά και μη επιβλαβή για το περιβάλλον.

Σχετικά με τις όποιες επιπτώσεις των διατάξεων εκμετάλλευσης αυτών των μορφών ενέργειας οι απόψεις δίστανται, καθώς αντικρουόμενα συμφέροντα τίθενται στο τραπέζι της διαπραγματεύσεως. Σε αυτά έρχονται να προστεθούν η έλλειψη ενημέρωσης και οργάνωσης, με αποτέλεσμα πολλές φορές μελέτες και αποφάσεις να «μένουν στα χαρτιά». Είναι πάντως αδιαμφισβήτητο ότι οποιαδήποτε ανθρώπινη παρέμβαση στο φυσικό περιβάλλον προκαλεί διαταραχές της ισορροπίας του. Αυτό που πρέπει να αξιολογηθεί είναι η σπουδαιότητα αυτών των διαταραχών και κυρίως να γίνει η απαραίτητη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών ενεργειακών διαδικασιών.



Σχήμα 1.4: Παγκόσμια παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε. (Πηγή: Ren21,2014)

Στα πλεονεκτήματα των μορφών πράσινης ενέργειας συγκαταλέγονται τα εξής:

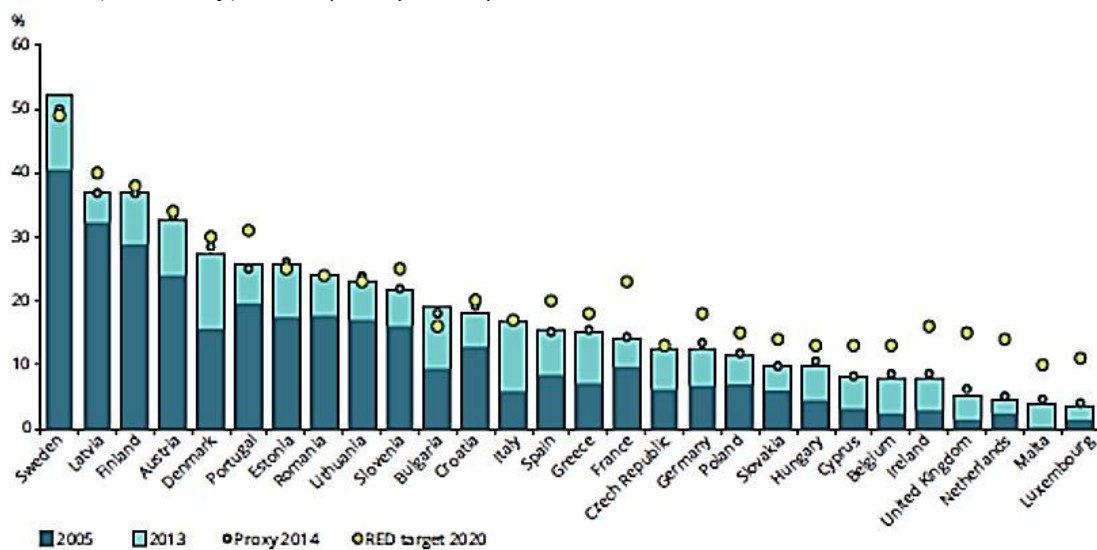
- Φιλικές προς το περιβάλλον, με μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- Ανεξάντλητες πηγές
- Αποτελούν καθοριστικό παράγοντα επίτευξης της ενεργειακής αυτάρκειας πολλών χωρών, συμβάλλοντας έτσι στην οικονομία ορυκτών καυσίμων και κυρίως πετρελαίου.
- Είναι ευέλικτες εφαρμογές, έχοντας χαρακτήρα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά περίπτωση επιθυμητής μορφής ενέργειας προς παραγωγή.
- Παρουσιάζουν πολύ χαμηλό λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης με αποτέλεσμα η αρχική επένδυση να παρουσιάζει πολύ γρήγορη απόσβεση.
- Οι περισσότερες κυβερνήσεις επιδοτούν με διάφορους τρόπους τέτοιας μορφής επιχειρηματική δραστηριότητα
- Δημιουργούν νέες θέσεις εργασίας, μόνιμες και μη.
- Παρουσιάζουν γεωγραφική διασπορά και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος επιτρέποντας την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο.

Σε ό,τι αφορά τα μειονεκτήματά τους, αυτά αναφέρονται κυρίως σε θέματα ενεργειακής απόδοσης και διαθεσιμότητας. Αναφέρονται ενδεικτικά :

- Η γεωγραφική διασπορά τους αποτελεί μειονέκτημα, όταν είναι επιθυμητή μεγάλη ενεργειακή συγκέντρωση σε ορισμένη περιοχή.
- Παρουσιάζουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγάλης κλίμακας ενεργειακά πάρκα.
- Ακολουθώντας την κατανομή και τις διακυμάνσεις των φυσικών φαινομένων που εκμεταλλεύονται, και η παραγόμενη ενέργεια θα παρουσιάζει εποχιακές και γεωγραφικές διακυμάνσεις καθιστώντας αναγκαία την ύπαρξη εναλλακτικών πηγών ή τεχνολογίας αποθήκευσης μεγάλου κόστους.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων παραμένει ακόμη υψηλό.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους επιτρέπει μόνο μικρούς συντελεστές απορρόφησης από το δίκτυο και δύσκολη γεωγραφική κατανομή της παραγόμενης ενέργειας.

Η περαιτέρω ανάπτυξή τους στο εγγύς μέλλον αποτελεί ίσως την πιο υποσχόμενη πρόταση για την διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας και σε αυτό το πλαίσιο προγραμματίζονται τα σχέδια δράσης σχεδόν όλων των κυβερνήσεων. Η πρόοδος της τεχνολογίας στο συγκεκριμένο πεδίο είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντική ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, όταν και η ανάγκη για δραστικές αλλαγές έγινε προφανής. Το ευρωπαϊκό ενεργειακό πλάνο «20-20-20» (European Commission, Climate Action, 2007) αποτελεί στόχο του ενεργειακού σχεδιασμού των χωρών που το έχουν υιοθετήσει και προβλέπει επίτευξη σε ευρωπαϊκό επίπεδο των παρακάτω τριών στόχων μέχρι το 2020, οι οποίοι και αποτυπώνονται στο σχήμα 1.5, :

- 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου με έτος αναφοράς το 1990
- 20% διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών
- 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας. Αφορά την βελτίωση της απόδοσης (efficiency) των υφιστάμενων μεθόδων.



Σχήμα 1.5: Ποσοστιαία παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε. στην Ευρώπη (Πηγή: EEA, 2014)



Οι παραπάνω στόχοι έχουν κατανεμηθεί ανά χώρα (EEA Report, 2016), με την Ελλάδα να υποχρεούται να πετύχει τα παρακάτω :

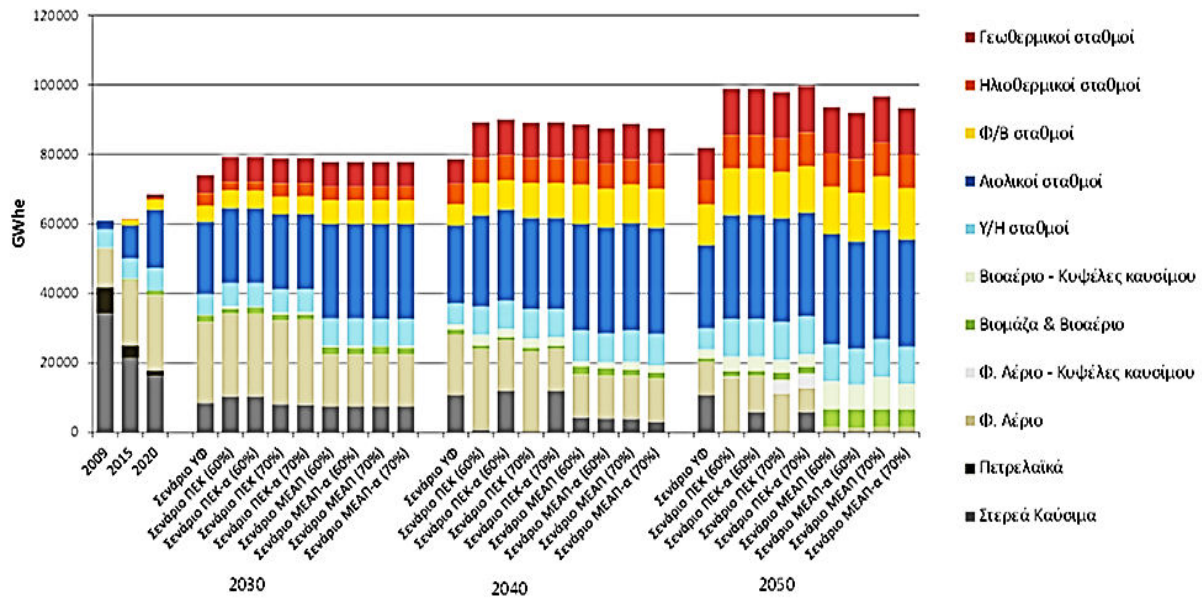
- Μείωση των αέριων ρύπων του θερμοκηπίου κατά 4%
- Διείσδυση των ΑΠΕ κατά 18% στην εγχώρια τελική κατανάλωση με έτος αναφοράς το 2005.

Η ελληνική κυβέρνηση με τον Νόμο 3851/2010 (ΥΠΕΚΑ, 2010) αποφάσισε την αναβάθμιση της συμβολής της Ελλάδας στην επίτευξη των τελικών στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθορίζοντας ως εθνικό στόχο την συμμετοχή των ΑΠΕ σε ποσοστό 20% στην τελική κατανάλωση με την εξής επιμέρους κατανομή:

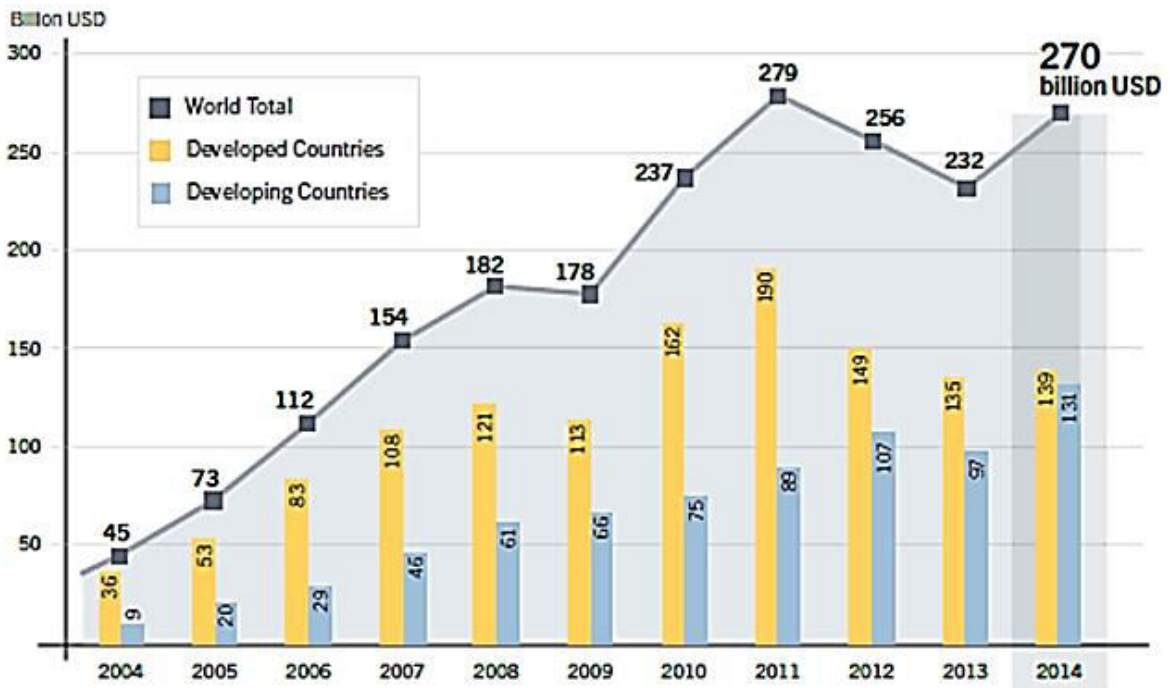
- 40% συμμετοχή ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή
- 20% συμμετοχή ΑΠΕ σε ανάγκες θέρμανσης-ψύξης
- 15% συμμετοχή ΑΠΕ στις μεταφορές

Μεταφράζοντας τους παραπάνω στόχους προκύπτει ότι για το 2020, σύμφωνα και με τα αποτελέσματα των ενεργειακών μοντέλων, αναμένεται να ικανοποιηθούν για το μεν 40% της ηλεκτροπαραγωγής ανάπτυξη περίπου 13300MW από ΑΠΕ (4000MW σήμερα), με συμμετοχή των τεχνολογιών στο σύνολό τους, με προεξέχουσες τα αιολικά πάρκα με 7500MW, τα υδροηλεκτρικά με 3000MW και τα ηλιακά με περίπου 2500MW, ενώ για τη θέρμανση και ψύξη με την ανάπτυξη των αντλιών θερμότητας, των θερμικών ηλιακών συστημάτων, αλλά και των εφαρμογών βιομάζας. Για την επίτευξη του παραπάνω «πράσινου» ενεργειακού μοντέλου είναι αναγκαίος ο συντονισμός και η εύρυθμη λειτουργία όλων των αρμόδιων φορέων.

Τα αποτελέσματα της ανάληψης δράσης είναι αρκετά ευοίωνα αφού η κατανάλωση άνθρακα μειώθηκε στην Ευρωπαϊκή Ένωση περίπου κατά 5%, ενώ μείωση 4% σημειώθηκε στη χρήση άνθρακα για ηλεκτροπαραγωγή κατά την περίοδο 2008-2013( Think Tank, Carbon Tracker). Την ίδια στιγμή η Κίνα, η οποία καταναλώνει περίπου το 50% του άνθρακα παγκοσμίως, κινείται όλο και πιο δραστικά προς την κατεύθυνση ανθρακικής ενεργειακής ανεξαρτησίας. Η κατανάλωση στο πρώτο τετράμηνο του 2015 μειώθηκε κατά 8% σε σχέση με την αντίστοιχη περίοδο του 2014, ενώ την ίδια χρονική περίοδο περιορίστηκαν οι εισαγωγές άνθρακα κατά 38%. Σε ό,τι αφορά τις επενδύσεις στην βιομηχανία του άνθρακα, οικονομικοί αναλυτές τις αξιολογούν ως πλέον ριψοκίνδυνες, σε αντίθεση με τις επενδύσεις στις ανανεώσιμες πηγές, οι οποίες και είναι σε ανοδική πορεία, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.6: Σενάρια διείσδυσης Α.Π.Ε. στην Ελλάδα (Πηγή: opengov.gr,2012)



Σχήμα 1.7: Επενδύσεις σε Α.Π.Ε. σε παγκόσμιο επίπεδο (2004-2014) (Πηγή: Ren21,2014)

### 1.1.3) Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Πρόκειται, όπως τονίστηκε, για μορφές ενέργειας με μεγάλη γεωγραφική διασπορά και μεγάλες εποχιακές διακυμάνσεις. Επομένως τα σχέδια και οι προοπτικές για κάθε χώρα και περιοχή διαφοροποιούνται αισθητά. Στις ήπιες μορφές ενέργειας συγκαταλέγονται:

- *Αιολική ενέργεια.* Ευρεία χρήση στην ηλεκτροπαραγωγή.
- *Ηλιακή ενέργεια.* Χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές (ηλιακοί θερμοσίφωνες και φούρνοι), ενώ η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος με εξελίξεις στον τεχνολογικό τομέα και την πρόοδο στο σχεδιασμό πιο αποδοτικών ηλιακών κυψελών.
- *Υδραυλική ενέργεια.* Και εδώ στόχος είναι η ηλεκτροπαραγωγή με την εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του νερού λόγω υδατικής πτώσης.
- *Βιομάζα.* Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε από το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ως πρώτη ύλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης αστικά απόβλητα και απορρίμματα οδηγώντας στην παραγωγή καυσίμων φιλικών προς το περιβάλλον.
- *Γεωθερμική ενέργεια.* Προέρχεται από τη θερμότητα λόγω της ραδιενεργούς αποσύνθεσης των πετρωμάτων, ενώ είναι εκμεταλλεύσιμη, όταν η θερμότητα αυτή εκτονώνεται κοντά στην επιφάνεια της γης. Χρησιμοποιείται είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η Ισλανδία καλύπτει το 80-90% των θερμικών ενεργειακών αναγκών και το 20% των αναγκών της σε ηλεκτρισμό με γεωθερμική ενέργεια.
- *Ενέργεια από τη θάλασσα*
  - *Ενέργεια από παλίρροιες.* Εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του ήλιου και της σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού, το οποίο στη συνέχεια, έχοντας κινητική ενέργεια λόγω της υψομετρικής διαφοράς, οδηγείται σε υδροστρόβιλο.
  - *Ενέργεια από κύματα.* Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.
  - *Ενέργεια από τους ωκεανούς.* Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων.
- *Ωσμωτική ενέργεια.* Η ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται ωσμωτική ενέργεια (ή γαλάζια ενέργεια) και απελευθερώνεται όταν γλυκό νερό και θαλασσινό νερό διαχωρίζονται μέσω ημιπερατής μεμβράνης. Μπορεί να αξιοποιηθεί σε εκβολές ποταμών.

## Παράγραφος 2<sup>η</sup> : Η κυματική ενέργεια

### 1.2.1) Το κυματικό δυναμικό : Ενεργειακή και οικονομική αξιολόγηση

Η προσπάθεια αξιοποίησης της ενέργειας των ωκεανών, αν και οι απαρχές της χρονολογούνται πριν από περίπου δυο αιώνες, ακόμη και σήμερα αποτελεί τομέα έρευνας και ανάπτυξης . Ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι δεν έχει αποκρυσταλλωθεί ο αποδοτικότερος τρόπος και μέθοδος δέσμευσης μέρους της συγκεκριμένης μορφής ισχύος, ενώ αντίθετα πολλές και διαφορετικές μεταξύ τους, ακόμη και σε δομικές έννοιες, τεχνολογίες υπόσχονται την βέλτιστη λειτουργία και την μεγιστοποίηση της ενεργειακής αυτής συναλλαγής προς όφελος του ανθρώπου. Περισσότερες από χίλιες πατέντες έχουν γίνει δεκτές για την δέσμευση της ενέργειας των κυμάτων.

Σε ό,τι αφορά τις αναπτυσσόμενες τεχνολογίες, με βάση κατηγοριοποίησης το είδος της αποθηκευμένης ενέργειας στους ωκεανούς στην εκμετάλλευση του οποίου στοχεύουν, διακρίνονται οι ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες υδροκινητικής ενέργειας :

- Ενέργεια από παλίρροιες
- Ενέργεια από κύματα
- Ενέργεια λόγω θερμοκρασιακών διαφορών
- Ωσμωτική ενέργεια

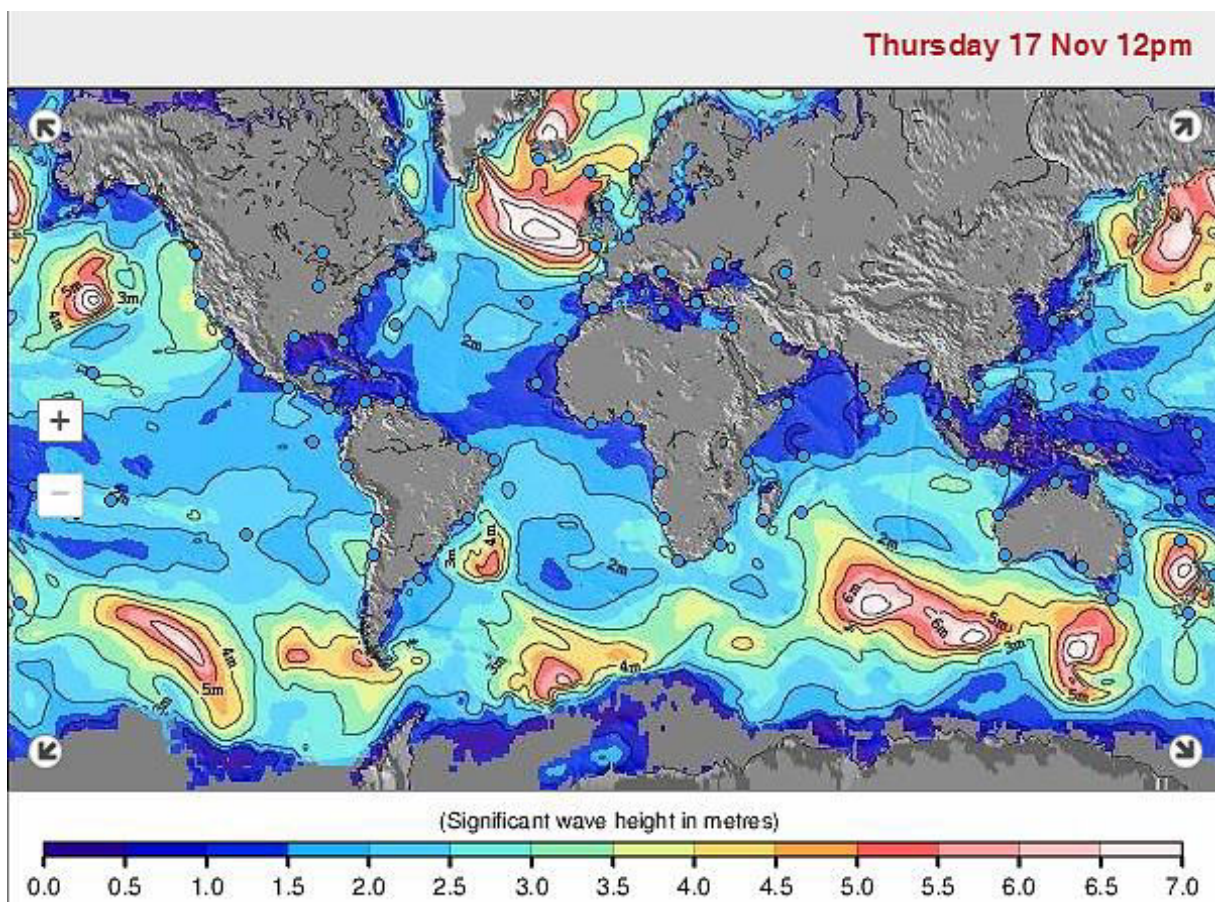
Από τις παραπάνω εναλλακτικές «ενεργειακές πολιτικές» η κυματική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια που δεσμεύεται από συσκευές κοντά η μακριά από την ακτή και προέρχεται από την ενέργεια που μεταφέρει το κύμα, παρουσιάζει τις καλύτερες προοπτικές και το πιο υποσχόμενο δυναμικό.

*Πίνακας 1.1: Παγκόσμιο ενεργειακό δυναμικό υδροκινητικής ενέργειας (IEA,OES,Annual Report 2007)*

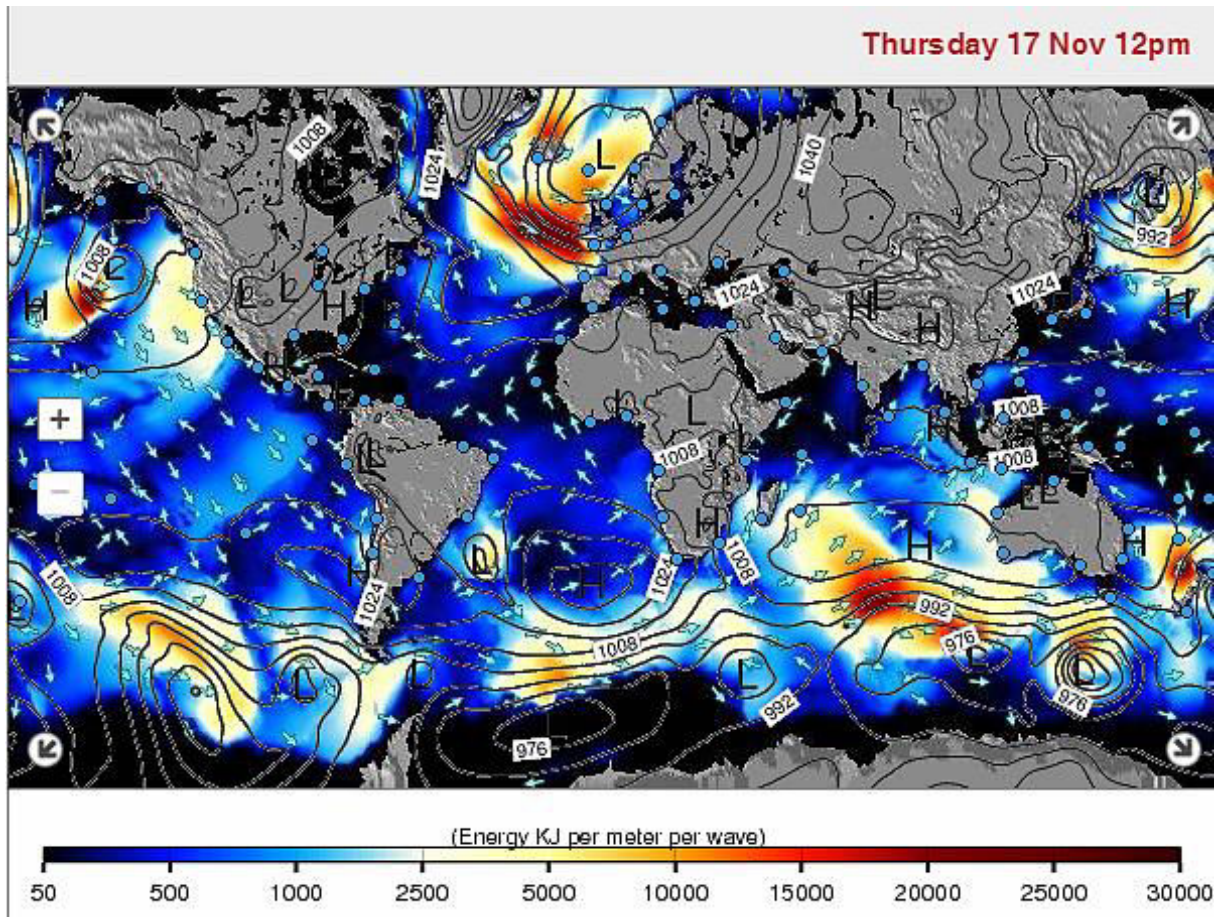
Form	Annual global potential
Tidal energy	>300 TWh
Marine current power	>800 TWh
Osmotic power (salinity gradient)	2,000 TWh
Ocean thermal energy (thermal gradient)	10,000 TWh
Wave energy	8,000–80,000 TWh

Ενδεικτικός είναι ο παραπάνω πίνακας και ικανός να εξηγήσει γιατί οι περισσότερες προσπάθειες εστιάζονται σε αυτόν τον τομέα. Τα κύματα του ωκεανού παρέχουν μια αναξιοποίητη πηγή ενέργειας με υψηλή πυκνότητα, ευρέως διαθέσιμη και προβλέψιμη βάσει

μετεωρολογίας και ωκεάνιας γεωλογίας (BOEM,2016) . Η παγκόσμια εκτίμηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα κύματα είναι περίπου 2 terawatts (TW), ένα σημαντικό δηλαδή μέρος της τρέχουσας εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος στον κόσμο των 3,5 TW . Το 37% του παγκόσμιου πληθυσμού ζει εντός 60 μιλίων ακτογραμμής, πραγματικότητα που εξηγεί την ένταση με την οποία η συγκεκριμένη τεχνολογία εξελίσσεται. Εκτιμάται ότι η αξιοποίηση του 15% της κυματικής ενέργειας στις ακτές των Η.Π.Α. θα παρήγαγε το ίδιο ποσό ενέργειας με όλες τις εγκαταστάσεις των συμβατικών υδροηλεκτρικών σταθμών αθροιστικά σε παγκόσμιο επίπεδο. Αξιόλογο ενεργειακό δυναμικό εντοπίζεται τον ευρωπαϊκό χώρο στην περιοχή του Ηνωμένου Βασιλείου και της Σκωτίας όπου μάλιστα έχουν γίνει και οι περισσότερες ερευνητικές αλλά και παραγωγικές εγκαταστάσεις.



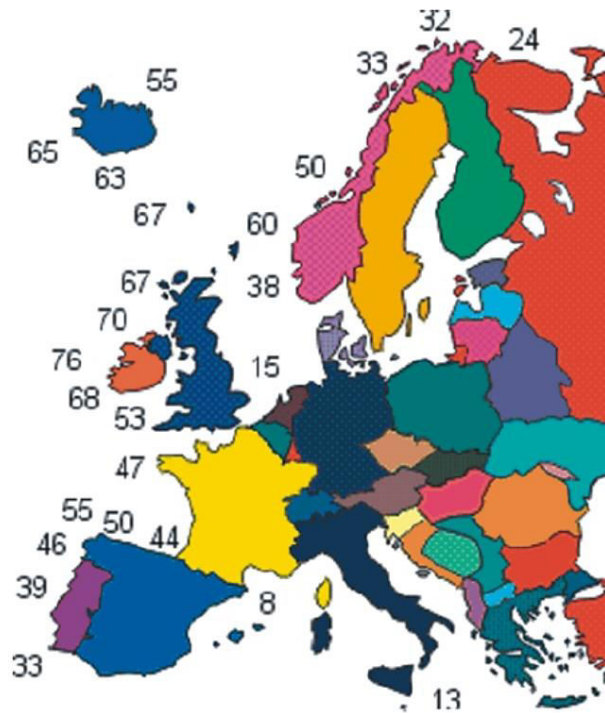
Σχήμα 1.8: Σημαντικό ύψος κύματος (SWH) (m). Στιγμιότυπο 12:00 pm -17-11-2016 (Πηγή: Surf-Forecast)



Σχήμα 1.9: Πυκνότητα κυματικής ενέργειας (KJ/m κυματομετώπου) (Πηγή: Surf-Forecast)

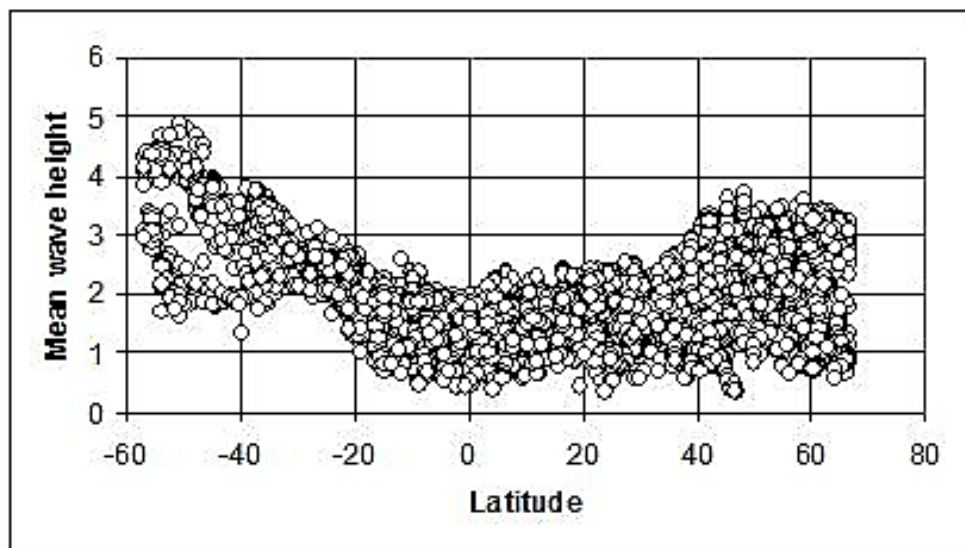


Σχήμα 1.10: Θέσεις εγκατάστασης συσκευών κυματικής ενέργειας και σημαντικό ύψος κύματος ανά θέση (Πηγή: Surf-Forecast)



Σχήμα 1.11: Μέση κυματική ισχύς στην Ευρώπη ( $kW/m$  κυματομετώπου) (Πηγή: CRES)

Το φαινόμενο είναι πιο έντονο μεταξύ  $30^\circ$  και  $60^\circ$  γεωγραφικού πλάτους και στα δύο ημισφαίρια και εντοπίζεται στις δυτικές ακτές λόγω της παγκόσμιας κατεύθυνση του ανέμου, όπως γίνεται αντιληπτό και από το σχήμα 1.12.



Σχήμα 1.12: Κατανομή ύψους κύματος ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος (1997-2006) (Πηγή: Oceanor, 2006)

Ως πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας αναφέρονται :

- Αποτελούν μορφή πράσινης ενέργειας
- Σε ποσοστό 90% το συγκεκριμένο δυναμικό είναι διαθέσιμο προς εκμετάλλευση της στιγμή που αιολικά και ηλιακά συστήματα παρουσιάζουν ποσοστό διαθεσιμότητας 20-30 %
- Πολύ χαμηλό λειτουργικό κόστος
- Μηδενικά υποπροϊόντα και κατάλοιπα
- Υψηλό διαθέσιμο ενεργειακό δυναμικό και ενεργειακή πυκνότητα (περίπου 2-3 KW/m<sup>2</sup> σε σύγκριση με 0,1-0,3 KW/m<sup>2</sup> των ηλιακών εγκαταστάσεων.)
- Διαθεσιμότητα και εύκολη πρόσβαση στην ενεργειακή πηγή, την θάλασσα. Το 75% της επιφάνειας του πλανήτη καλύπτεται από τον υδάτινο πόρο.
- Υψηλές δυνατότητες και προοπτικές τεχνολογικής εξέλιξης
- Μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από ανάλογες τεχνολογίες όπως τα υδατικά φράγματα.
- Δημιουργία προστατευόμενων περιοχών εγκατάστασης και λειτουργίας και κατ' επέκταση καταφυγίων της υδάτινης χλωρίδας και πανίδας.

Στον αντίποδα αυτών συγκαταλέγονται ζητήματα όπως:

- Έντονες χρονικές και επομένως ενεργειακές διακυμάνσεις
- Ανάγκη βελτιστοποίησης σχεδιασμού κατά τόπο εγκατάστασης
- Ανάγκη μηχανολογικού σχεδιασμού κατάλληλου για λειτουργία σε ιδιαίτερα αντίξοες συνθήκες
- Υψηλό κόστος μεταφοράς της παραγόμενης ενέργειας στους on-shore σταθμούς
- Υψηλό κόστος αρχικής επένδυσης
- Περιβαλλοντικά θέματα :
  - Αλλοίωση ωκεάνιων οικοσυστημάτων πυθμένα
  - Ανάμιξη συστατικών θαλασσινού νερού κατά μη επιθυμητό τρόπο
  - Αλλαγή των υδραυλικών και υδρολογικών μοντέλων
  - Πρόκληση προβλημάτων συμπεριφοράς ή τραυματισμού σε άτομα της πανίδας
  - Μεταβολή των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων
  - Θορυβώδης λειτουργία
  - Τοξικότητα βαφών και υλικών

Ωστόσο, τα οφέλη από την ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας σε συνδυασμό με οικολογικές προτάσεις σχεδιασμού και λειτουργίας είναι σαφέστατα πολλά και σημαντικά. Η πρόοδος σε προηγμένα υλικά φιλικά προς το περιβάλλον και ικανά να «επιβιώσουν» σε τόσο δυναμικό και διαβρωτικό περιβάλλον αποτελεί τομέα έρευνας και διαρκούς ανάπτυξης με αποτέλεσμα αφενός μεν το κόστος ενέργειας να ανεβαίνει κατά κάποιες μονάδες, αφετέρου δε οικολογικές και τεχνολογικά προηγμένες προτάσεις να επιτρέπουν την εξασφάλιση της βιωσιμότητας ιδεών και τεχνολογιών σε αυτόν τον ενεργειακό κλάδο με την προοπτική εγκατάστασης και λειτουργίας σε οικονομίες κλίμακας.



Στον τομέα της οικονομικής αξιολόγησης, επί του παρόντος, κάθε πρωτότυπη συσκευή απαιτεί εκατομμύρια δολάρια στην έρευνα, την ανάπτυξη και τη χρηματοδότηση της εγκατάστασης. Ωστόσο, μια σειρά μελετών εκτίμησης του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας για την περίπτωση αξιολόγησης έξι εκ των κορυφαίων προτάσεων έργων κυματικής ενέργειας, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η είσοδος στις αγορές της κυματικής ενέργειας σε επίπεδα των περίπου 11 \$/KWh, συγκρινόμενη με την τιμή εισόδου των αιολικών περίπου το 1980 που ήταν 20 \$/KWh, ενώ έχει διαμορφωθεί πλέον στα 2,3 \$/KWh, είναι στοιχείο υποσχόμενο την οικονομική βιωσιμότητα αυτών και την απόδοση των επενδύσεων, με την προϋπόθεση πάντα ότι τα κατάλληλα βήματα θα γίνουν για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου τομέα.

Plant Type (USD/MWh)	Min	Median	Max	Data Source Year	
Distributed Generation	10	70	130	2014	
Hydropower	Conventional	30	70	100	2011
	Small Hydropower		140		2011
Wind	Onshore	40		80	2014
	Offshore	100		200	2014
Natural Gas	Combined Cycle	50		80	2014
	Combustion Turbine	140		200	2014
Coal	Pulverized, scrubbed	60		150	2014
	Pulverized, unscrubbed		40		2008
	Integrated gasification, combined cycle	100		170	2014
Solar	Photovoltaic	60	110	250	2014
	CSP	100		220	2014
Geothermal	Hydrothermal	50		100	2011
	Blind		100		2011
Enhanced		80		130	2014
	Biopower	90		110	2014
Fuel Cell	100		160	2014	
Nuclear	90		130	2014	
Ocean	230	240	250	2011	

Σχήμα 1.13: Κόστος ενέργειας (USD/MWh) (Ιούνιος 2015)  
(Πηγή: NREL, 2015)

	Source	2010-2012	2020	2030	2050
	IEA	5 650	4 070	3 350	1 750
Capital cost of farms [EUR/kW]	UK	5 000-9 000	3 000-5 000		2 500-3 000
	ETI/UKERC	4 840-9 680	2 723-4 235	2 118-2 723	1 513-2 118
Operation & Maintenance cost [EUR/kW/yr.]	IEA	86 (projected to decrease to 47)			
	ETI/UKERC	48-97	30-73	18-30	12-24
Availability [%]	UK	75-85		90	90-95
	ETI/UKERC	70-80	90	90-95	95-98
Array load factor [%]	ETI/UKERC	25-35	32-40	35-42	37-45
Total electricity production cost [EUR/MWh]	IEA	286	207	172	
	UK	213-500		113-226	88-125
	ETI/UKERC	242-605	121-242	85-121	61-97
Average levelised cost of energy per MWh	E&Y	505	268	148	108
	SI Ocean	330-630 <sup>b</sup>	280-350 <sup>c</sup>	150-180 <sup>d</sup>	
EU Market share, % of global electricity output	JRC	0	<<1	-1-2	> 10
Emissions (direct operation)	JRC	0			
Emissions Indirect (as manufacturing, fabrication, installation, maintenance and commissioning)	JRC	25-50 gram/kWh (wave energy converters of 665 tonnes of steel and production 2.3 gigawatt-hour per year – GWh/yr.)			

Σχήμα 1.14: Κόστος συσκευών κυματικής ενέργειας και ανθρακικό αποτύπωμα (Πηγή: IRENA, 2014)

## 1.2.2) Ιστορική αναδρομή

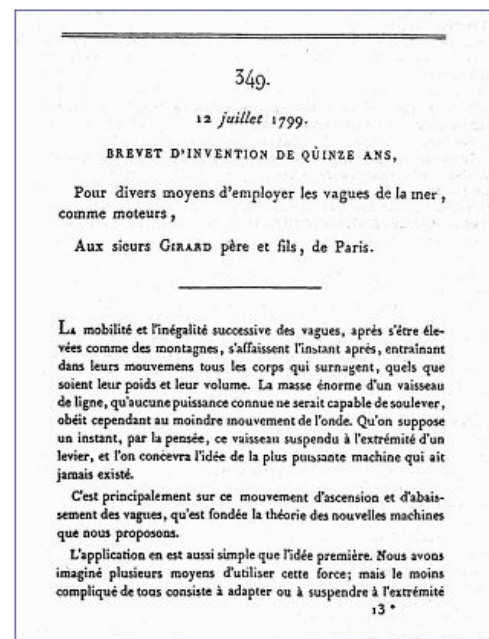
Οι πρώτες προσπάθειες δέσμευσης της ενέργειας που μεταφέρουν τα κύματα χρονολογούνται πριν από περίπου δύο αιώνες, αν και η εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του νερού έχει της απαρχές της πολύ νωρίτερα. Ακολουθεί μια σύντομη ιστορική αναδρομή στους «σταθμούς» της εξέλιξης αυτής της τεχνολογίας:

1855-1793 : Σε αυτό το χρονικό διάστημα περισσότερες από 350 πατέντες έχουν κατοχυρωθεί μόνο στον Ηνωμένο Βασίλειο.

1799 : Η πρώτη γνωστή μέχρι σήμερα πατέντα δέσμευσης κυματικής ενέργειας από τον Girard και τον υιό του στο Royan της Γαλλίας (σχήμα 1.15).

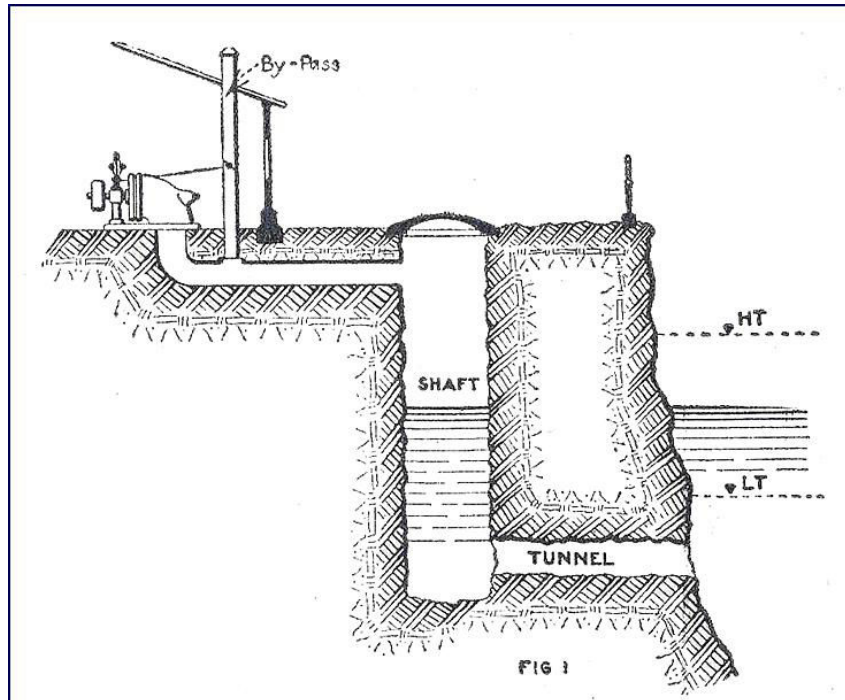


**Σχήμα 1.16:** Εξώφυλλο νορβηγικού περιοδικού (1901) που αναφέρει αυτόνομους ηλεκτρικούς πλωτήρες σήμανσης (Πηγή: WavePowerLab, 2014)



**Σχήμα 1.15:** Η κατοχυρωμένη πατέντα του Girard (1799) (Πηγή: WavePowerLab, 2014)

1910 : Στην προσπάθεια για ηλεκτρική τροφοδοσία της οικείας του ο Bochaux-Praceique χρησιμοποιεί την πρώτη συσκευή ταλαντευόμενης στήλης νερού με απόδοση περίπου 1 kW. Ταλαντωτές στη στάθμη του νερού μέσα σε μια κάθετη οπή κοντά σε γκρεμό κινούν έναν αεριοστρόβιλο (σχήμα 1.17).



Σχήμα 1.17: Η συσκευή οικιακής ηλεκτρικής τροφοδοσίας του Bochaux-Praceique (Πηγή: WavePowerLab,2014)

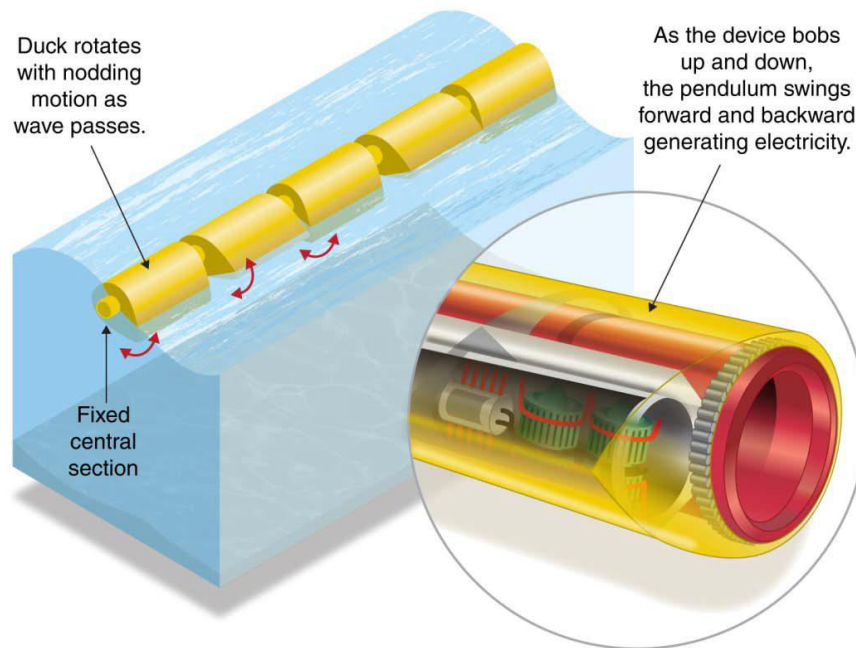
1940 : Πρωτοπόρος στις επιστημονική θεμελίωση των μεθόδων αξιοποίησης της κινητικής ενέργειας των κυμάτων υπήρξε ο Ιάπωνας διοικητής στόλου Yoshio Masuda, ο οποίος μελέτησε πληθώρα διαφορετικών μηχανισμών. Το 1950 πρότεινε την ιδέα μηχανισμού κυματικής ενέργειας με αρθρώσεις για την αξιοποίηση της γωνιακής μετατόπισης λόγω του κύματος.

1973 : Το ενδιαφέρον για την ενέργεια των κυμάτων αναπτρώνεται λόγω της πετρελαϊκής κρίσης. Αρκετοί είναι οι ερευνητές που διακρίνονται ανά τον κόσμο ( Stephen Salter στο University of Edinburgh, Kjell Budal και Johannes Falnes στο Norwegian Institute of Technology , Michael E. McCormick στην U.S. Naval Academy, David Evans στο Bristol University, Michael French στο University of Lancaster, Nick Newman, C. C. Mei στο MIT).

1974: Η εφεύρεση του Stephen Salter γνωστή ως Salter Duck, αν και αναφέρεται επίσημα ως η «Πάπια του Εδιμβούργου» πετυχαίνει σε ελεγχόμενες δοκιμές δέσμευση σε ποσοστό 90% της κίνησης των κυμάτων και από αυτό μετατροπή του 90% σε ηλεκτρική ενέργεια δίνοντας βαθμό απόδοσης 81% (σχήμα 1.18).

1980 : Η τιμή του πετρελαίου φθίνει με αποτέλεσμα η τεχνολογική εξέλιξη στον συγκεκριμένο τομέα να βρίσκεται σε παρακμή.

2003 : Η πρώτη πειραματική ενεργειακή μονάδα (EMEC) εγκαινιάζεται στα νησιά Orkney της Σκωτίας.



Σχήμα 1.18: Εξέλιξη της συσκευής Salter's Duck (Πηγή: NREL, Al Hicks)

2004 : Η πρώτη μεταφορά ενέργειας κυμάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι γεγονός.

2006 : Περίπου 56 διαφορετικές τεχνολογίες έχουν μελετηθεί και έχουν γίνει αποδεκτές.

2008 : Κατά προσέγγιση 100 εταιρείες ανά τον κόσμο δραστηριοποιούνται στον συγκεκριμένο τομέα.

2011 : Η εγκατεστημένη ισχύς εκτιμάται στα 240 GW μέχρι το 2050.

2013 : Η μελέτη για το μεγαλύτερο ενεργειακό κυματικό πάρκο εγκρίνεται στην ακτή Lewis της Σκωτίας με ισχύ 40MW.

2014 : Το πρώτο συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο πάρκο ολοκληρώνεται και τίθεται σε λειτουργία από την εταιρεία CETO στην δυτική Αυστραλία.

Είναι λοιπόν προφανές ότι, αν και αποτελεί νέα τεχνολογία, οι προοπτικές, τα βήματα που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια, καθώς και τα βήματα που αναμένονται να γίνουν λόγω της τεχνολογικής προόδου και των αναγκών του σύγχρονου πολιτισμού, αλλά και των περιορισμών που θέτει η οικολογία, είναι πολλά υποσχόμενα και σίγουρα πολύ ενδιαφέροντα.

## Κεφάλαιο 2 : Συσκευές κυματικής ενέργειας

### Παράγραφος 1<sup>η</sup> : Οι διαθέσιμες τεχνολογίες

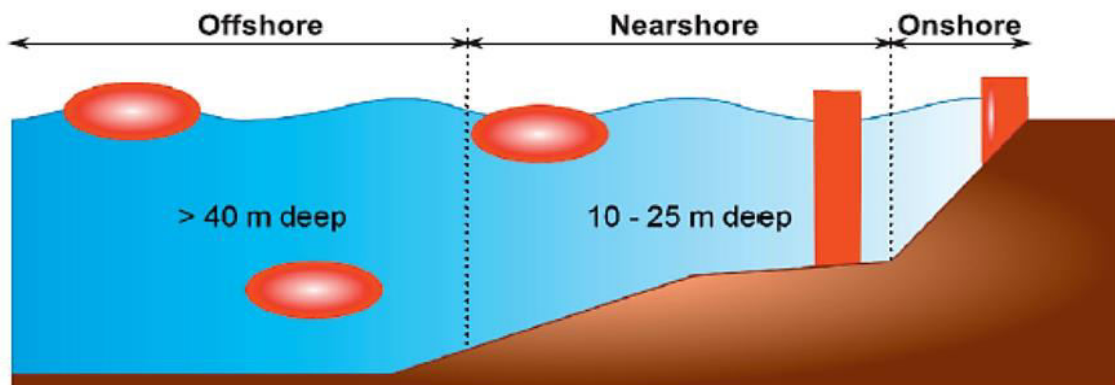
Η μικρή ηλικία της τεχνολογίας εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας και η υφιστάμενη κατάσταση στον ερευνητικό τομέα έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη και εφαρμογή εκατοντάδων πρωτοτύπων που λειτουργούν επιτυχώς, το καθένα με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Η έντονη δυναμική φύση του φαινομένου από την μια πλευρά αφήνει πολλά περιθώρια στους κατασκευαστές-ερευνητές να στοχεύσουν σε διαφορετικές συνιστώσες της, από την άλλη αποτελεί τον πλέον ανασταλτικό παράγοντα ευρείας εφαρμογής τους μέχρι την παρούσα στιγμή. Η απόδοση των πειραματικών μοντέλων σε εργαστηριακές συνθήκες είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντική, καθώς η απόκρισή τους και το μαθηματικό μοντέλο βασίζεται σε θεωρητικές προσεγγίσεις της κίνησης του κύματος, άλλοτε απλοποιημένες και άλλοτε ιδιαίτερα σύνθετες. Η πλήρης περιγραφή του είναι αντικείμενο ιδιαίτερα πολύπλοκο και σε αυτή την προσπάθεια επικεντρώνεται αρκετά το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας. Έτσι λοιπόν μια συσκευή που λειτουργεί ικανοποιητικά σε κλίμακα στο εργαστήριο μπορεί σε εφαρμογή πλήρους κλίμακας να παρουσιάζει απόκριση πολύ διαφορετική και συχνά μη βιώσιμη.

Την τελευταία δεκαετία η πληθώρα νέων πρωτοτύπων πολλά εκ των οποίων τέθηκαν και σε εφαρμογή πλήρους κλίμακας με πραγματική παραγωγή ενέργειας, καθιστά αναγκαία την κατηγοριοποίησή τους ανάλογα με κάποια ευδιάκριτα χαρακτηριστικά της λειτουργίας τους (BOEM,2016),(EMEC,2016),(Dr.John Huckerby, OES, 2012). Κάθε ισχύουσα ή προτεινόμενη τεχνολογία συσκευής μετατροπής της κυματικής ενέργειας εμπίπτει σε μία από τις ακόλουθες κατηγορίες:

#### 2.1.1) Κατηγοριοποίηση συσκευών βάση απόστασης από την ακτή

Διακρίνονται οι εξής τρεις κατηγορίες, όπως στο σχήμα που ακολουθεί,:

- Παραγωγή ισχύος στην ακτή
- Παράκτια παραγωγή ισχύος : Βάθος 10-25 m
- Υπεράκτια παραγωγή ισχύος : Βάθος > 40 m

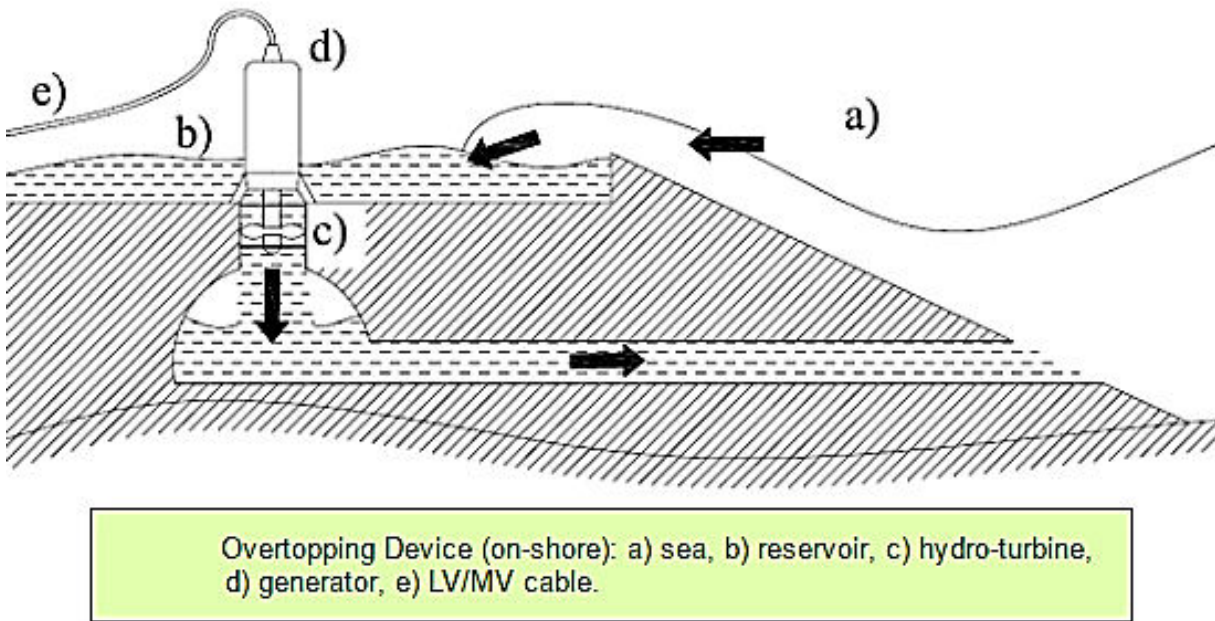


Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση ανάλογα με την απόσταση από την ακτή  
(Πηγή: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2013)

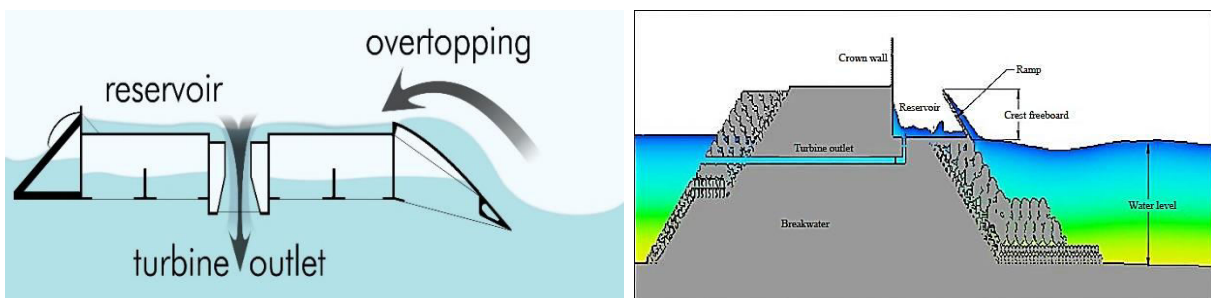
### 2.1.2) Κατηγοριοποίηση συσκευών βάσει τρόπου λειτουργίας

#### Συστήματα υδραυλικής υπερπήδησης (Overtopping Systems-OP)

Πρόκειται ουσιαστικά για εγκαταστάσεις ανάλογες των μικρών υδροηλεκτρικών έργων. Το πλάτος του κύματος αναγκάζει νερό να υπερπηδήσει έναν υπερχειλιστή και να αποταμιευτεί σε πλωτό ταμιευτήρα με την στέψη του στην στάθμη της θάλασσας όταν βρίσκεται σε ηρεμία (SWL). Το νερό οδηγείται σε υδροστρόβιλο συνδεδεμένο με γεννήτρια, κινεί τα περύγιά του και παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Στην συνέχεια επιστρέφει στην θάλασσα μέσω αγωγού εξαγωγής.



Σχήμα 2.2: Αρχή λειτουργίας OP-devices (Πηγή: EIC,2011)

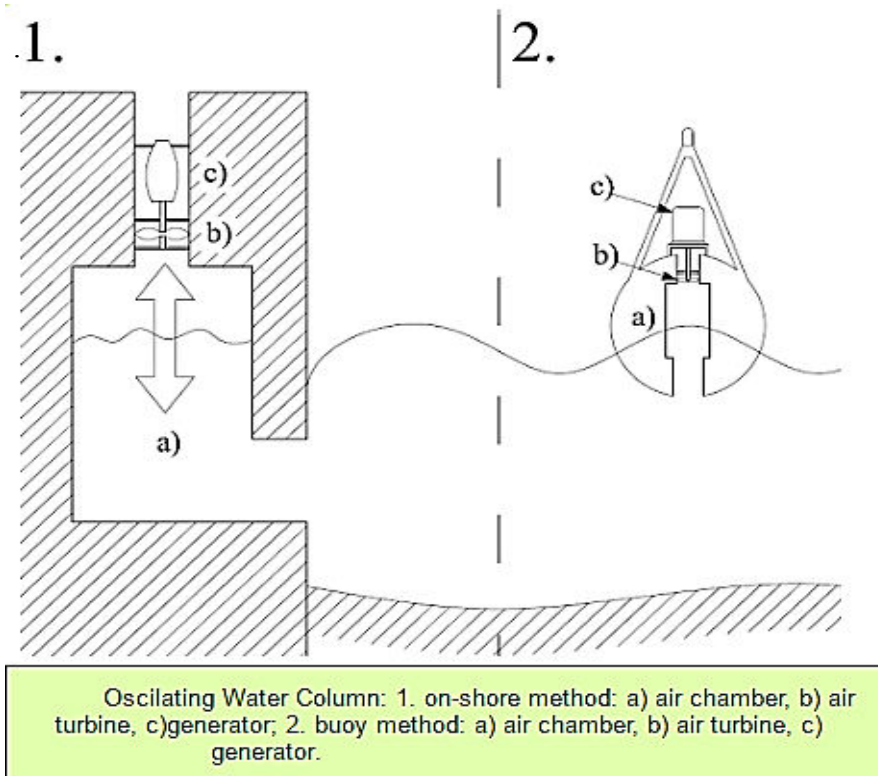


Σχήμα 2.3: OP devices: πλωτή (αριστερά) (Πηγή: UCSUSA,2016) και στην ακτή (δεξιά) (Πηγή: scialert.com)

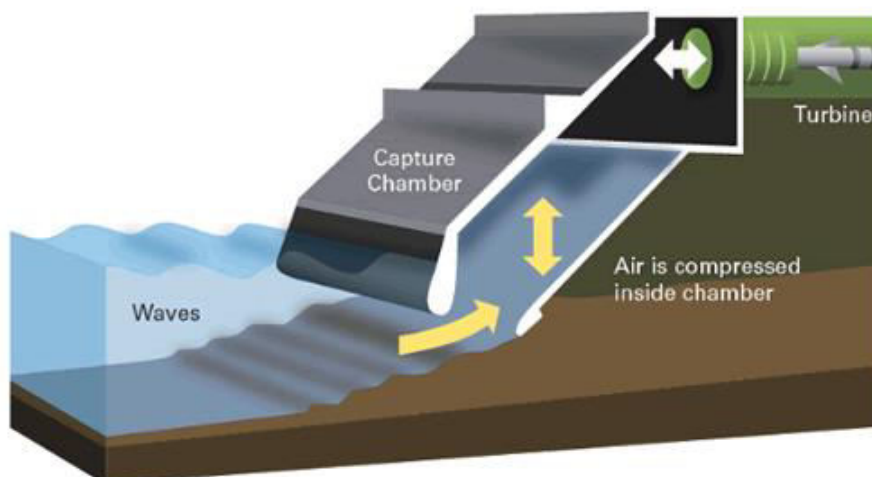
### Ταλαντευόμενη στήλη νερού (Oscillating water columns – OWC)

Νερό οδηγείται σε θάλαμο που περιέχει αέρα. Λόγω της κυματικής κίνησης η στήλη νερού εντός του θαλάμου ταλαντώνεται προκαλώντας με την σειρά της την ταλάντωση της στήλης αέρα. Ο κινούμενος αέρας οδηγείται σε αεριοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Με την σειρά τους και ανάλογα με το αν υφίσταται θεμελίωση, διακρίνονται σε:

- Πλωτές εγκαταστάσεις (floating) : Είναι συνήθως αυτόνομες συσκευές .
- Πλήρους θεμελίωσης (fixed structures) : Συνήθως on-shore εφαρμογές και πιο σπάνια σε εξέδρες



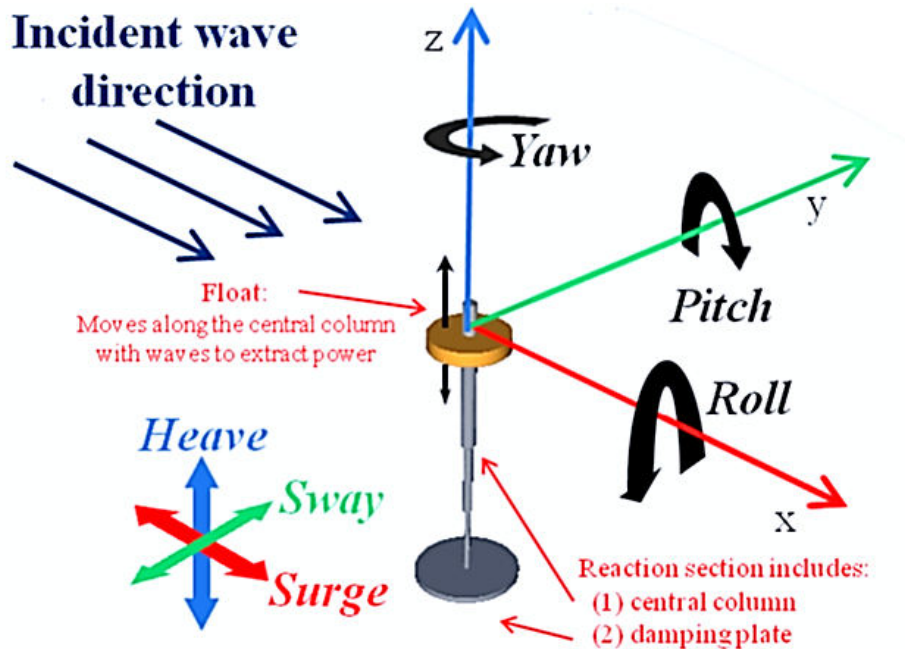
Σχήμα 2.4: Αρχή λειτουργίας OWC (Πηγή: EIC,2011)



Σχήμα 2.5: Παράδειγμα OWC (Limpet 500) (Πηγή: NNMREC,2016)

Μετατροπείς ταλαντευόμενων σωμάτων (Oscillating Body Devices-OBD )

Αποτελεί και την πιο πολυπληθή και ποικιλόμορφη κατηγορία. Η εφαρμογή των αρχών λειτουργίας που διέπουν τα μέλη της έχει δώσει πολύ καλά ενεργειακά αποτελέσματα και βαθμούς απόδοσης για αυτό και η τόσο έντονη «κινητικότητα» σε αυτή την κατηγορία.



Σχήμα 2.6: Βαθμοί ελευθερίας πλωτής συσκευής (Πηγή: NREL)

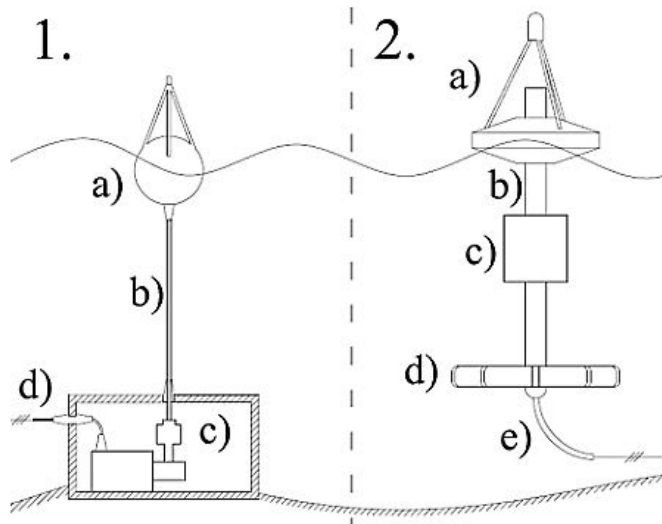
Μπορεί να γίνει λεπτομερέστερη διάκριση στις ακόλουθες κατηγορίες :

- Σημειακοί επιφανειακοί απορροφητές (Point Absorbers)

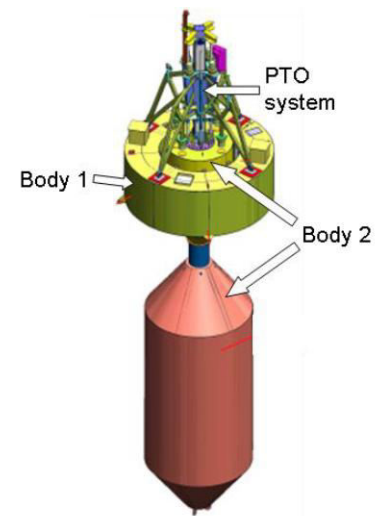
Στηρίζονται στην απλή λογική της δέσμησης μέρους της κατακόρυφης μετατόπισης του κύματος μέσω πλωτήρα. Διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο αγκύρωσής τους απευθείας στον πυθμένα ή της συνεργασίας του με σταθερή συσκευή αγκυρωμένη στον πυθμένα.

Πέρα από τους πιο συνήθεις που αποτελούνται από το σύστημα του επιφανειακού πλωτήρα που παλινδρομεί και που χαρακτηρίζονται ως σημειακοί απορροφητές ενιαίου σώματος, υπάρχει και το ενδεχόμενο συστήματος δύο σωμάτων-πλωτήρων, ενός επιφανειακού και ενός υποβρύχιου, σε σύνδεση μεταξύ τους (σχήμα 2.7). Πρόσφατες μελέτες έδειξαν βελτίωση της απόδοσης και του ποσοστού δέσμησης της κυματικής ενέργειας για τέτοιους μηχανισμούς της τάξεως του 10% συγκρινόμενους με τους single-body, λόγω φαινομένων που σχετίζονται με την αυξημένη αδράνεια του συσσωματώματος .





Point absorbers: 1. example of point absorber: a) the buoy, b) power take-off system, c) driver system and generator, d) LV underwater cable connected to the substation; The Powerbuoy made by OPT: a) the buoy, b) power take of system, c) generator, d) ballast, e) LV underwater cable connected to the Underwater Substation Pod (USP).



Σχήμα 2.8: Αρχή λειτουργίας Point absorbers (Πηγή: EIC,2011)

Σχήμα 2.7: Point absorber δυο σωμάτων (Πηγή : Wavebob Ltd)

- Σημειακοί υποβρύχιοι απορροφητές (Fully Submerged Point Absorbers)

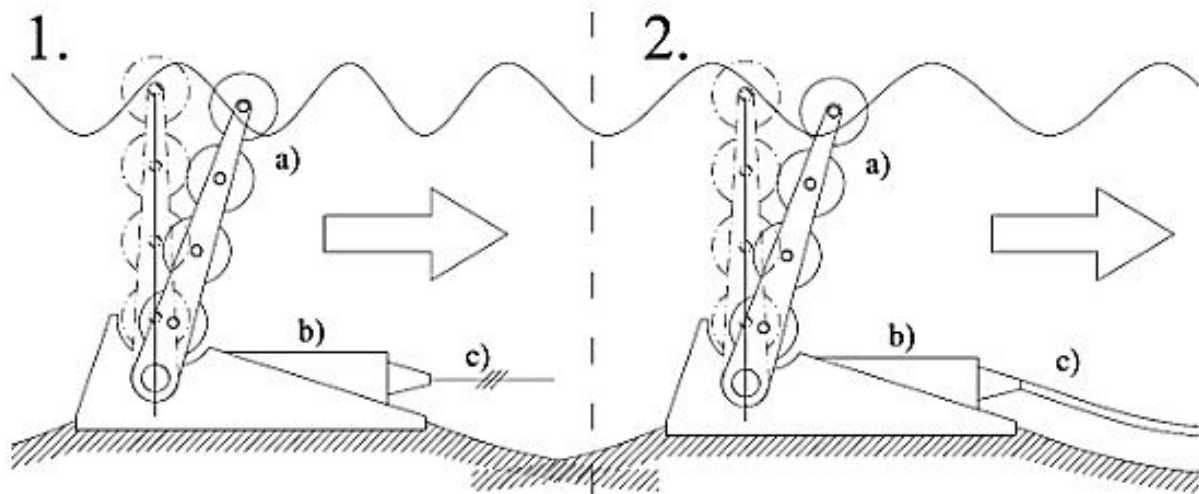
Η αρχή λειτουργίας τους είναι η ίδια με τη διαφορά ότι βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και ότι η κίνησή τους δεν αποδίδεται στην επιφανειακή μετατόπιση στοιχείων του ρευστού αλλά στις εμφανιζόμενες διαφορές πίεσης. Αναφέρονται και ως submerged pressure differential devices.



Σχήμα 2.9: Fully submerged point absorber (Πηγή: Carnegie, CETO design, Australia)

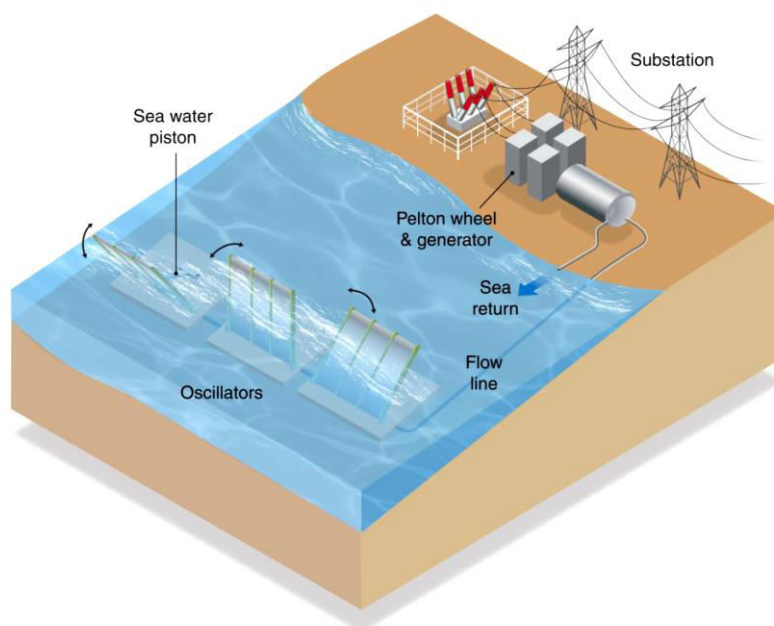
- Απορροφητές οριζόντιας μετατόπισης (Oscillating wave surge converter)

Στην κατηγορία αυτή υπάγονται συσκευές που δεν «στοχεύουν» στην κατακόρυφη (heave) κίνηση λόγω κύματος αλλά στην κίνηση κατά την διεύθυνση διάδοσης του κύματος (surge). Είναι συσκευές που συνήθως τοποθετούνται στον πυθμένα, αυτόνομες, με έξοδο ηλεκτρικό ρεύμα που οδηγείται μέσω καλωδίου στην ακτή.



Oscillating Wave Surge Converter: 1. example of OWSC: a) buoy, b) power take-off system and generator, c) LV cable; 2. Oyster made by Aquamarine Power a) buoy, b) high pressure pump, c) high pressure hosepipe.

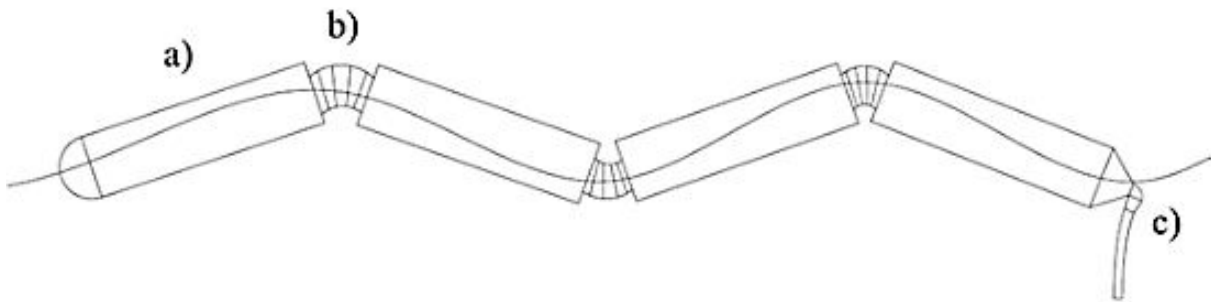
Σχήμα 2.10: Αρχή λειτουργίας Wave Surge Converters (Πηγή: EIC, 2011)



Σχήμα 2.11: Εγκατάσταση Wave Surge Converter (Πηγή: NREL, Al Hicks)

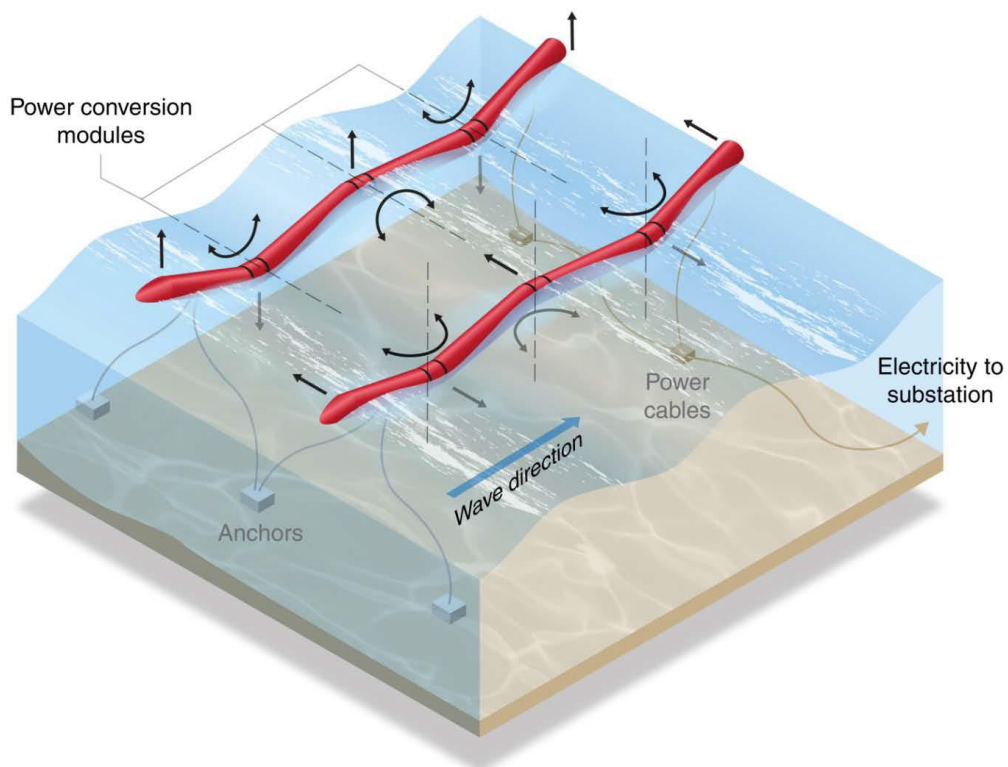
- Συσκευές γωνιακής μετατόπισης (Pitching Devices)

Δεσμεύουν ενέργεια μέσω της γωνιακής μετατόπισης των τμημάτων και της ισχύος που συγκεντρώνεται στις αρθρώσεις τους ή σε υδραυλικά έμβολα. Πρώτος αξιόλογος αντιπρόσωπός τους ήταν η Salter Duck (1974) . Αναφέρονται διεθνώς και ως attenuators .



Wave device: Attenuator, a) single tube section, b) hinged joint, cable output.

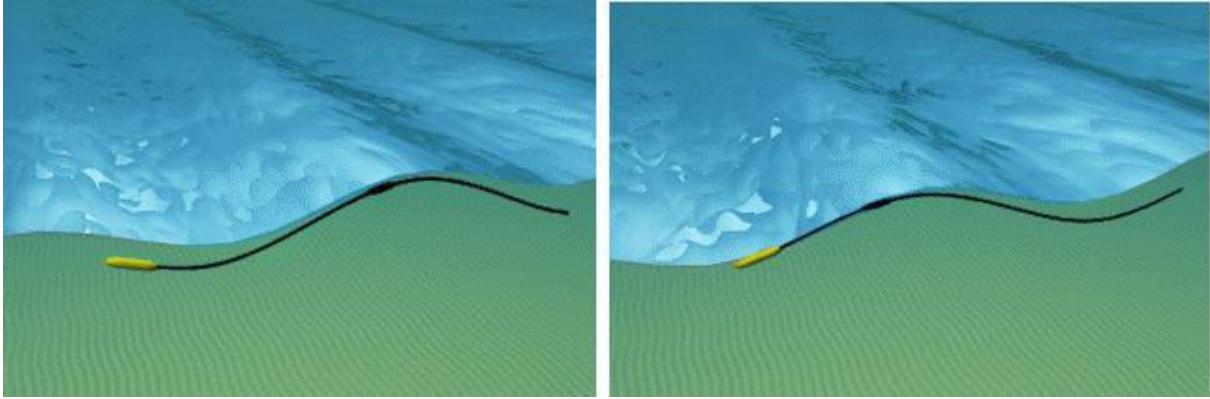
Σχήμα 2.12: Αρχή λειτουργίας Pitching devices (Πηγή: EIC,2011)



Σχήμα 2.13: Συσσκευή pitching (Pelamis) (Πηγή: NREL, Al Hicks)

- Συσκευή βαλβίδας προεξοχής (Bulge Valve)

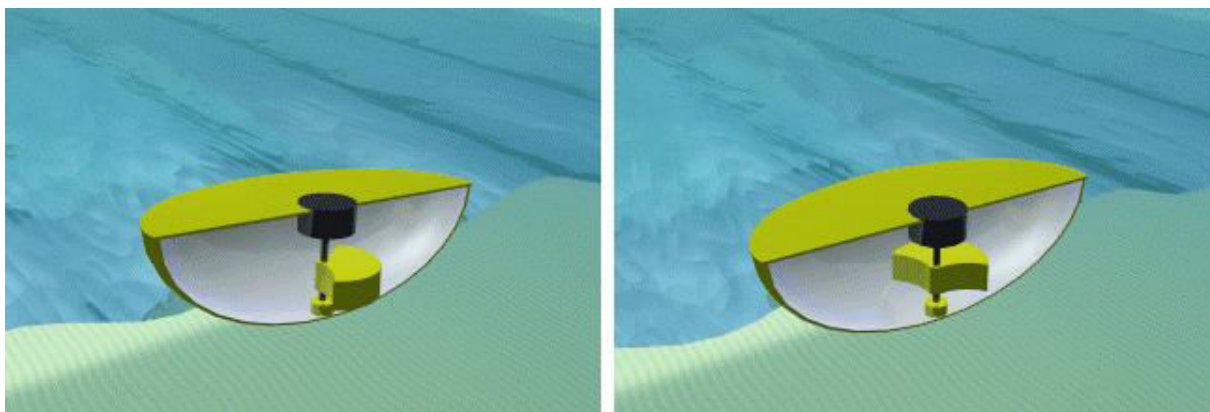
Σε αυτό το πρωτότυπο το νερό εισέρχεται από τη μία άκρη του εύκαμπτου αγωγού που παρακολουθεί την κίνηση του κύματος και λόγω διαφορών πίεσης οδηγείται στην άλλη άκρη του όπου και εκτονώνεται σε μικρό υδροστρόβιλο.



*Σχήμα 2.14: Αρχή λειτουργίας Bulge Valve (Πηγή: EMEC,2016)*

- Συσκευές περιστρεφόμενης μάζας (Rotating Mass Devices)

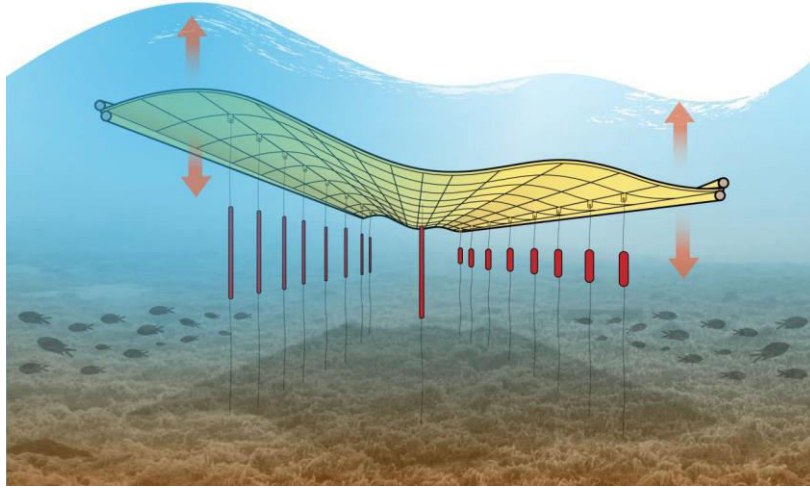
Η σύνθετη κίνηση του κύματος και της πλωτής συσκευής μετατρέπεται σε περιστροφική κίνηση εσώκλειστης μάζας η οποία και αξιοποιείται με κατάλληλο τρόπο, όπως για παράδειγμα με σύστημα ρότορα-στάτορα.



*Σχήμα 2.15: Αρχή λειτουργίας συστήματος rotating mass (Πηγή: EMEC,2016)*

- Συσκευή μεμβράνης ( Membrane device)

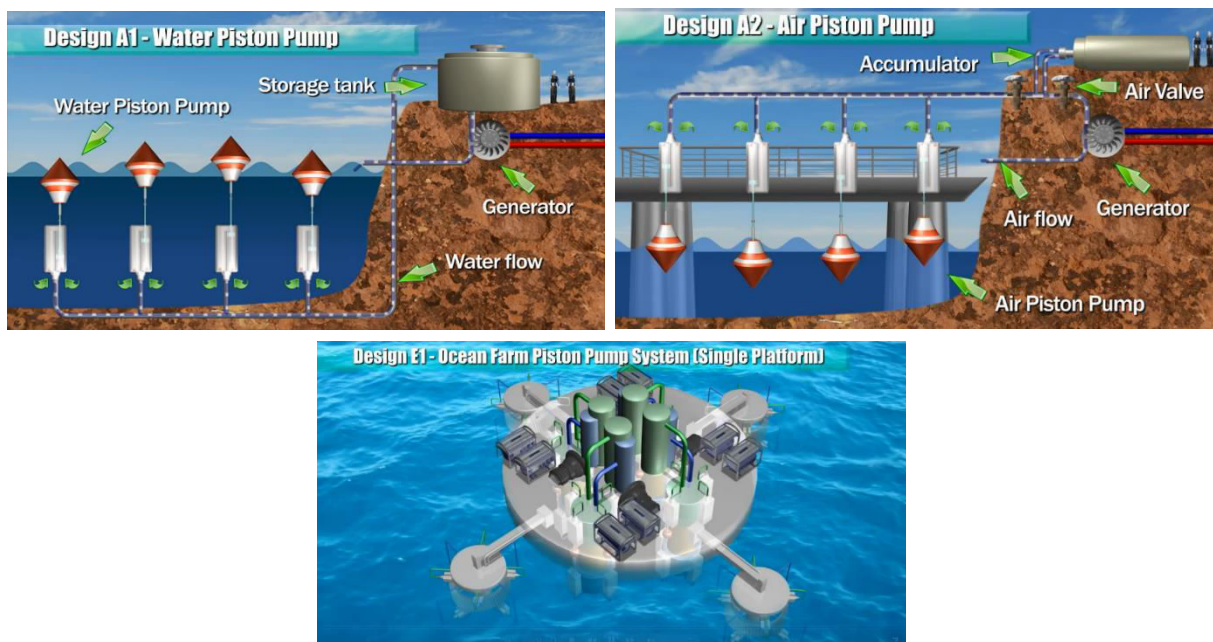
Σε αυτή την εκδοχή μεμβράνη ακολουθεί την κυματική κίνηση και παράγει τάση μέσω πιεζοηλεκτρικών στοιχείων η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.



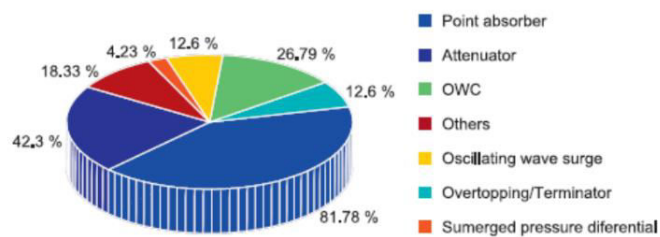
Σχήμα 2.16: Αρχή λειτουργίας membrane device (Πηγή: NREL)

- Σύστημα πολλαπλών σωμάτων

Είναι ουσιαστικά επιφανειακοί πλωτήρες συνδεδεμένοι σε πλωτή εξέδρα ή θεμελίωση που συνδέονται με υδραυλικά έμβολα και αντλούν νερό σε πλωτές ή παράκτιες εγκαταστάσεις για παραγωγή ηλεκτρισμού σε σύστημα υδροστροβίλου ή μπορούν να παράγουν επιτόπου ηλεκτρική ενέργεια μέσω κατάλληλων συστημάτων.



Σχήμα 2.17: Συστήματα πολλαπλών σωμάτων (Πηγή: LamTengChoy,2012)

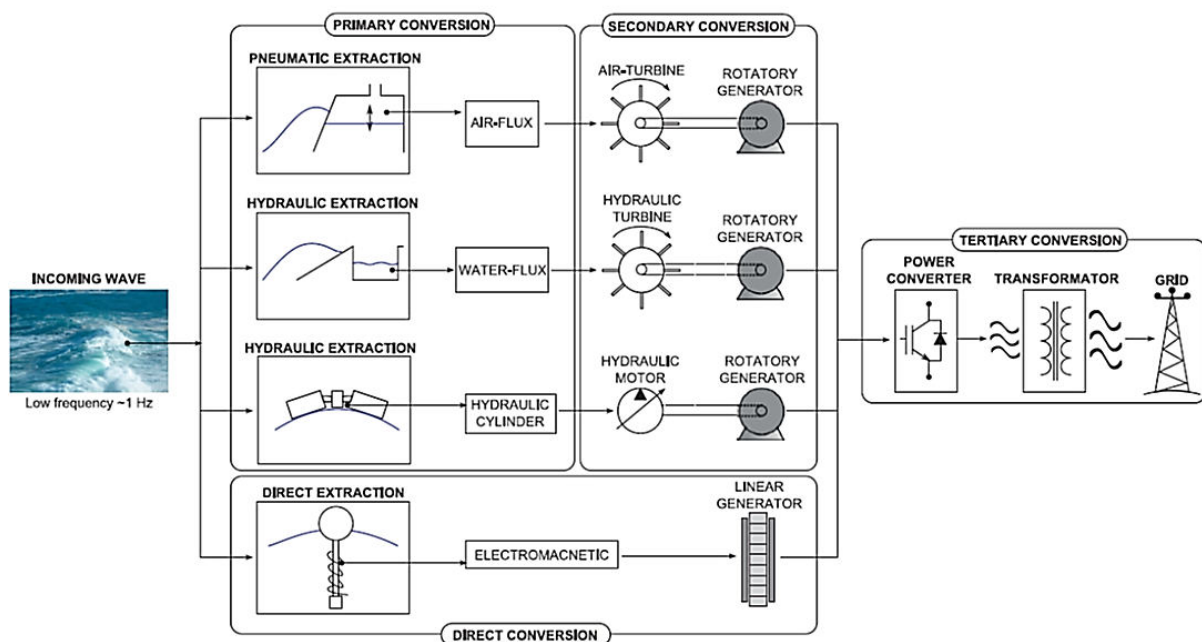


Σχήμα 2.18: Ποσοστό ανάπτυξης τεχνολογιών κυματικής ενέργειας (Πηγή: *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2013*)

### 2.1.3) Κατηγοριοποίηση συσκευών βάσει είδους παραγόμενης ενέργειας

Κάθε συσκευή αποσκοπεί στην παραγωγή ενέργειας. Το είδος της επιτόπου παραγόμενης ενέργειας διαφέρει κατά περίπτωση και αποτελεί κριτήριο για ακόμη μια κατηγοριοποίηση των μηχανισμών, ανάλογη με το σχήμα 2.19. Η τελικώς παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να προέρχεται από μετατροπή της κινητικής ενέργειας του κύματος και του μηχανισμού μέσω :

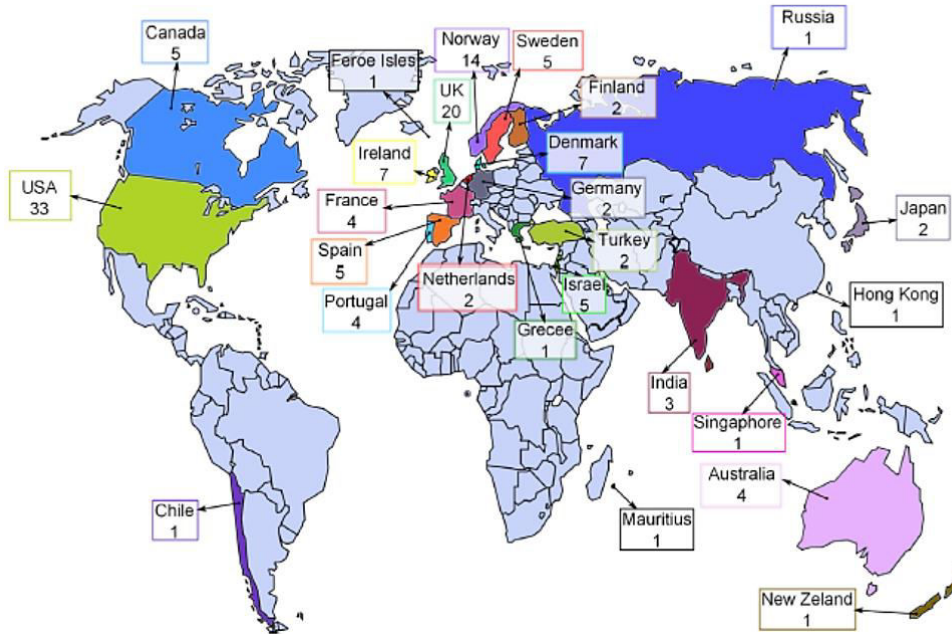
- Πνευματικής μετάδοσης-μετατροπής : Η ροή νερού μετατρέπεται σε ροή αέρα που κινεί αεριοστρόβιλο.
- Υδραυλικής μετάδοσης-μετατροπής : Η ροή νερού κινεί υδροστρόβιλο.
- Υδραυλικής μετάδοσης-μετατροπής με υδραυλικό κινητήρα : Η ροή νερού οδηγείται σε υδραυλικό κινητήρα.
- Επιτόπου παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας : Γίνεται χρήση ηλεκτρομαγνητικών κυκλωμάτων.



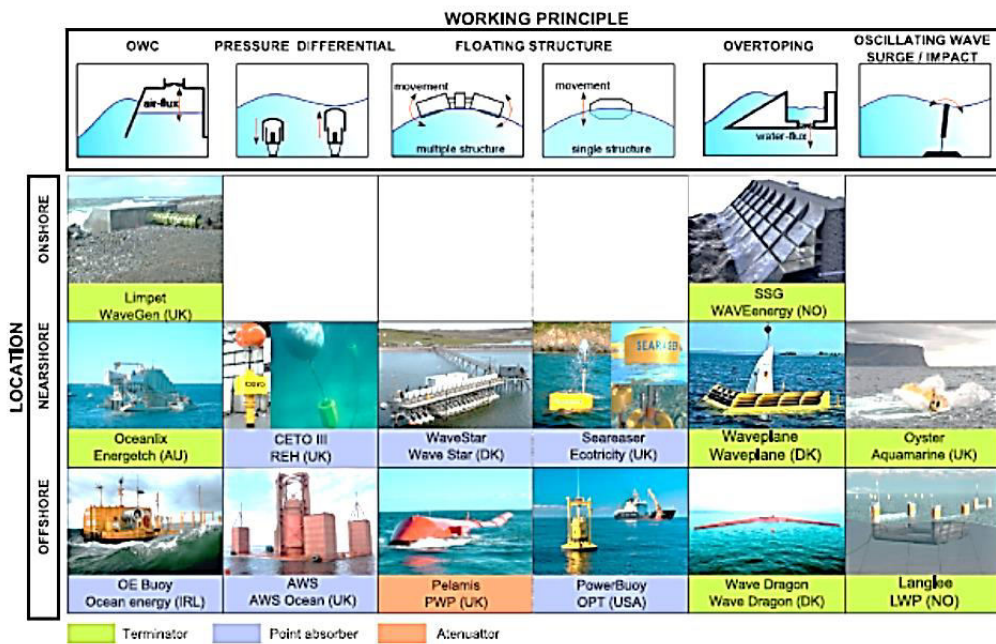
Σχήμα 2.19: Στάδια ενεργειακής μετατροπής (Πηγή: *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2013*)

2.1.4) Επικρατέστερες τεχνολογίες

Το τοπίο στην αγορά και την κατασκευή του συγκεκριμένου προϊόντος μόνο ξεκάθαρο δεν μπορεί να θεωρηθεί, ειδικά με τους ρυθμούς ανάπτυξης νέων πρωτοτύπων και μαζικής παραγωγής όλο και περισσότερων μηχανισμών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μέχρι το 2009 περισσότερες από χίλιες πατέντες είχαν προταθεί. Εν τούτοις μέχρι σήμερα υπάρχουν στην διεθνή αγορά εταιρείες του κλάδου που μπορούν να θεωρηθούν leaders, όπως αποτυπώνεται στο σχήμα 2.21 (Iraide López , etc., 2013).



Σχήμα 2.20: Πλήθος εφευρέσεων ανά χώρα. (Πηγή: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2013)



Σχήμα 2.21: Κυρίαρχες τεχνολογίες και project (Πηγή: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2013)

## Παράγραφος 2<sup>η</sup> : Περιγραφή επιλεγμένης συσκευής

### 2.2.1) Διαδικασία επιλογής

Έχοντας αναλύσει τις κατηγορίες των επιμέρους συσκευών, είναι πλέον η στιγμή να αποσαφηνιστούν οι λεπτομέρειες της συσκευής, η οποία και θα μελετηθεί. Αποτελεί συνδυασμό ήδη υπάρχουσών τεχνολογιών, κυρίως σε κατασκευαστικά θέματα, στα οποία και θα γίνει σύντομη αναφορά στην παρούσα παράγραφο. Ο μηχανισμός που θα αναλυθεί λοιπόν, φέρει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- Ανήκει στις υπεράκτιες εφαρμογές (off-shore)
- Κατηγοριοποιείται ως σημειακός απορροφητής μονού σώματος ( single body point absorber)
- Σταθεροποιείται με σύστημα heave-plate
- Παράγεται υδραυλική ενέργεια η οποία στην συνέχεια αποθηκεύεται σε ταμιευτήρα
- Η αγκύρωσή του γίνεται στον πυθμένα

Αυτό το οποίο δεν έχει σχολιαστεί και προκαλεί αίσθηση από τα παραπάνω είναι το γεγονός ότι η λειτουργία του δεν βασίζεται σε απευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπως η πλειοψηφία των συσκευών που λειτουργούν αλλά στην αποθήκευση ενέργειας. Οι δυσκολίες σε θέματα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν την πλέον σημαντική τροχοπέδη της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε μεγαλύτερο βαθμό από αυτόν του παρόντος. Όταν λοιπόν η συστοιχία μηχανισμών λειτουργεί, αντλεί νερό σε υψηλότερη στάθμη, σε έναν ταμιευτήρα, και εκεί γίνεται διαθέσιμη προς εκμετάλλευση η ενέργεια που δαπανήθηκε για την υψομετρική ανύψωση του όγκου νερού. Η ενέργεια αυτή μπορεί να παραχθεί οποιαδήποτε στιγμή το θελήσει ο διαχειριστής του δικτύου μέσω της υδατικής πτώσεως σε υδροστρόβιλο. Είναι ξεκάθαρη η ομοιότητα λειτουργίας της προτεινόμενης εγκατάστασης με τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά έργα. Στοχεύοντας λοιπόν στην αποθήκευση και όχι στην άμεση παραγωγή ισχύος, το κέρδος είναι πολλαπλό (Παπαντώνης, 2009). Συγκεκριμένα :

- Με χρήση ταμιευτήρα δίνεται η δυνατότητα κάλυψης αιχμών στη ζήτηση. Η ενέργεια παράγεται τη στιγμή που χρειάζεται.
- Η διαχείριση του μεγάλου ποσού ενέργειας που αποθηκεύεται, καθώς αποτελεί το άθροισμα των στιγμιαίων ποσών ενέργειας που αποθηκεύει και «αντλεί» ο μηχανισμός, είναι πιο εύκολη από ό,τι η διαχείριση της ενέργειας που θα παραγόταν απευθείας.
- Η περίπτωση ταμιευτήρα αποτελεί την μοναδική στην οποία είναι εφικτή η αποθήκευση μεγάλων ποσών ενέργειας (0-20000 MWh).
- Παρουσιάζει γρήγορη απόκριση στις ανάγκες του δικτύου και πολύ καλό βαθμό απόδοσης πλήρους κύκλου.
- Η αδυναμία των συμβατικών ηλεκτρικών σταθμών ορυκτών καυσίμων να λειτουργήσουν κάτω από ένα όριο, η διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο , με τις έντονες διακυμάνσεις που οφείλονται στα φυσικά φαινόμενα, και κυρίως η

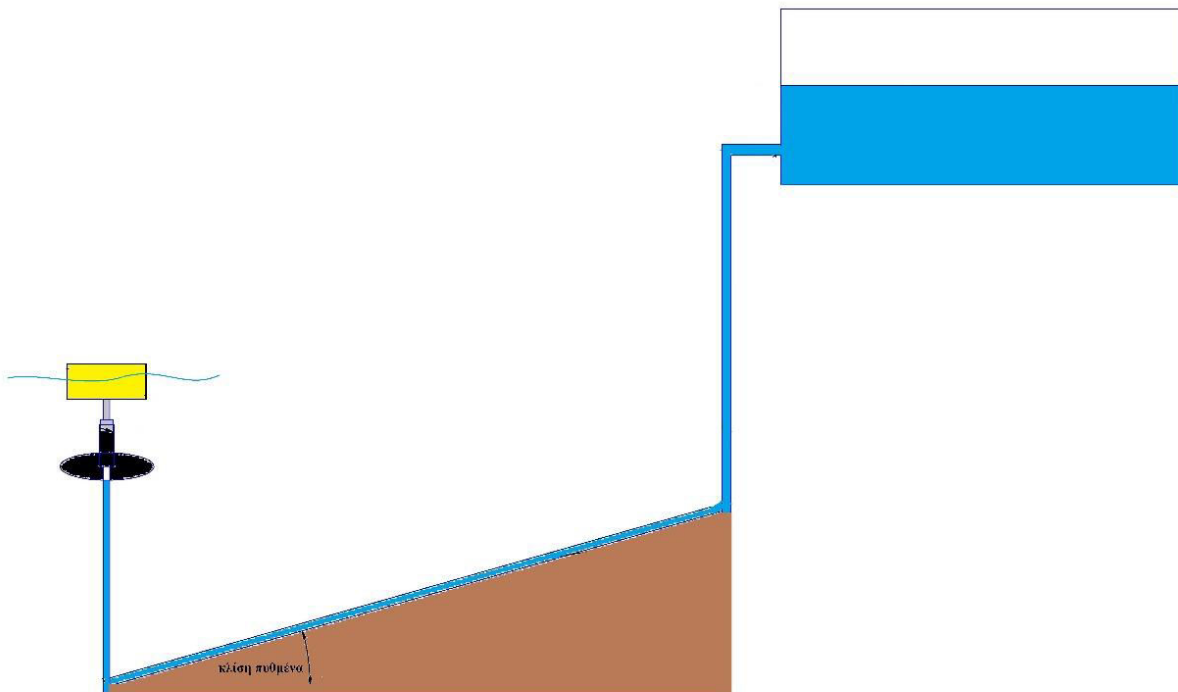


μεγάλη διείσδυση των αιολικών, είναι αιτίες εμφάνισης αστάθειας στο δίκτυο σε περιόδους υψηλής ή χαμηλής ζήτησης. Αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί μόνο με τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.

- Είναι χαρακτηριστικό ότι ακόμη και σε ισχυρά διασυνδεδεμένες περιπτώσεις ΑΠΕ, μεγάλο ποσό της ενέργειας που παράγουν απλώς απορρίπτεται. Η σπατάλη αυτή μπορεί να μετριαστεί σε μεγάλο βαθμό με τεχνολογίες αποθήκευσης και χρήσης της ενέργειας όταν παρουσιάζεται ανάγκη σε περιόδους αιχμής.

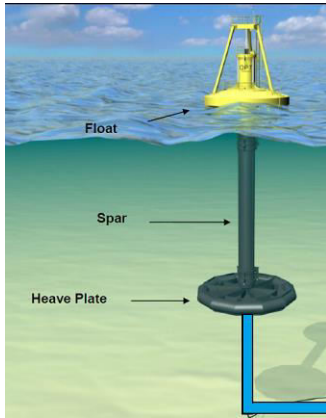
### 2.2.2) Περιγραφή συσκευής

Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού και της διάταξης που θα καταστήσει ξεκάθαρα τα όσα αναφέρθηκαν.

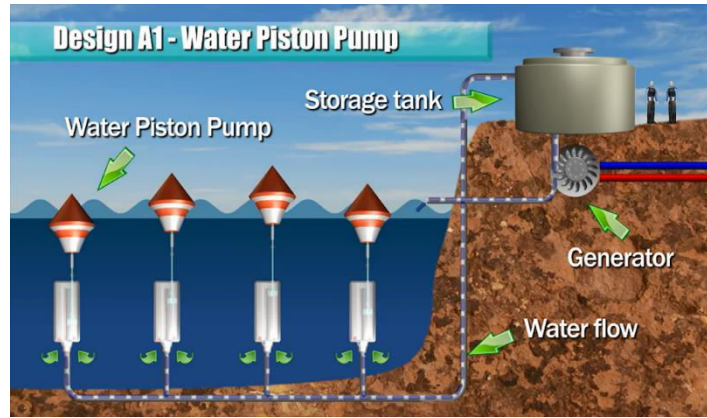


Σχήμα 2.22: Διάταξη πλωτήρα-αγωγού-ταμιευτήρα

Η τεχνολογική πρόοδος επιτρέπει πλέον την λειτουργία τέτοιων συσκευών εξ ολοκλήρου πλωτών χωρίς καμία ανάγκη θεμελίωσης παρά μόνο αγκύρωσης (σχήμα 2.23). Τέτοιας φύσεως είναι και η πλειοψηφία των συσκευών εν ενεργεία, καθώς λειτουργούν σε μεγάλα βάθη όπου η προοπτική θεμελίωσης είναι τουλάχιστον ασύμφορη ακόμη και επικίνδυνη. Η μελέτη αυτού του τύπου συσκευής είναι όμοια με αυτήν που ακολουθεί, αν αμεληθούν τα φορτία λόγω αγκύρωσης και η επιφάνεια σταθεροποίησης της κίνησης (heave plate) θεωρηθεί ευσταθής και τέτοια ώστε να εξασφαλίζει την απρόσκοπτη κατακόρυφη κίνηση του πλωτήρα-εμβόλου-διωστήρα. Στην περίπτωση αυτή η άντληση του νερού μπορεί να γίνει με αγωγό μέχρι την θέση που βρίσκεται ο ταμιευτήρας, και με εύκαμπτες συνδέσεις (fittings) όπου χρειάζεται. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση αυξάνει κατά πολύ η μάζα του συστήματος κυρίως λόγω της heave plate, όχι όμως και της παλινδρομούσας μάζας που επηρεάζει τους υπολογισμούς.



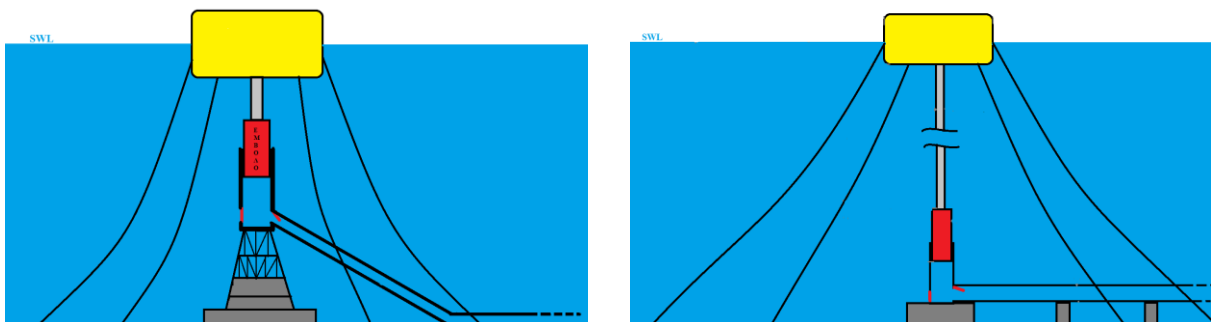
Σχήμα 2.23: Fully floating σύστημα  
(Πηγή: Texas A&M University)



Σχήμα 2.24: Συστοιχία συσκευών- Πλήρης διάταξη  
(Πηγή: LamTengChoy, 2012)

Η χρήση Heave-Plate στην οποία ενσωματώνεται και ο κύλινδρος της αντλίας, επιτρέπει την εφαρμογή και σε μεγάλα βάθη, καθώς, όπως αναφέρθηκε, μειώνονται δραματικά οι καταπονήσεις μηχανικών μερών, όπως του δικτυώματος μιας πιθανής θεμελίωσης μεγάλου ύψους ή τα φορτία στον διωστήρα στην περίπτωση μικρού ύψους θεμελίωσης και μεγάλου μήκους διωστήρα.

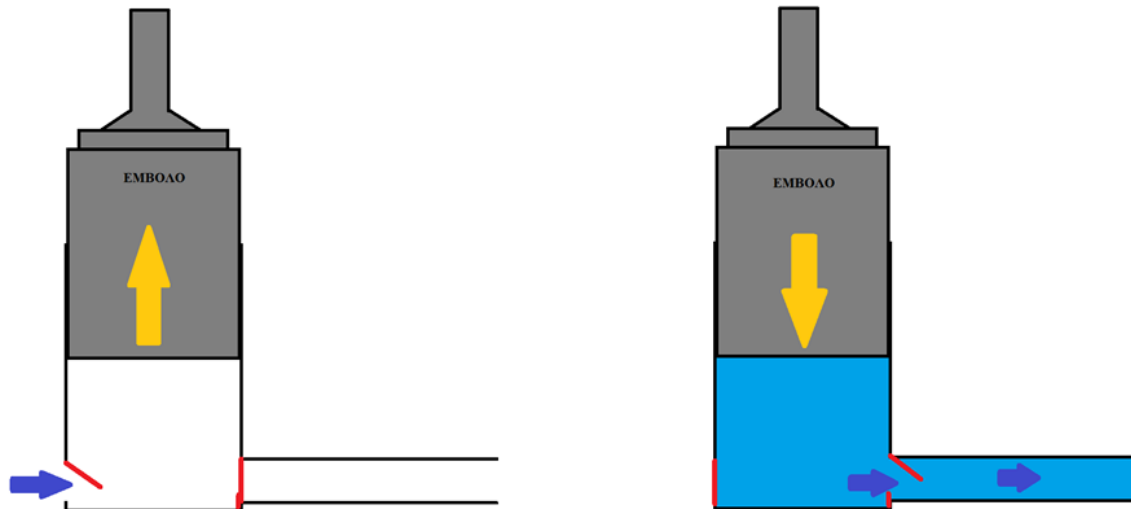
Για την σύνδεση πλωτήρα-διωστήρα- εμβόλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σφαιρικές αρθρώσεις που θα παραλάβουν τυχόν μικρές μετατοπίσεις και στροφές κατά μη επιθυμητές διευθύνσεις. Η μόνη επίδραση που θα έχει ο τύπος άρθρωσης που θα χρησιμοποιηθεί είναι στις αναπτυσσόμενες τριβές και στην κατανομή των φορτίων, όταν ο διωστήρας εκτρέπεται από την κατακόρυφη θέση λόγω δυνάμεων κατά τον x-άξονα. Στην παρούσα μελέτη θεωρούμε ότι πλωτήρας-διωστήρας-έμβολο λειτουργούν ως συσσωμάτωμα.



Σχήμα 2.25 : Σύστημα με μεγάλου μήκους θεμελίωση (αριστερά) και διωστήρα (δεξιά)

Η αρχή λειτουργίας του μηχανισμού είναι η στοιχειώδης μεταφορά της κινητικής ενέργειας των κυμάτων στον πλωτήρα και η από εκεί μεταφορά της στο έμβολο της αντλίας και το ρευστό το οποίο και αντλείται σε ταμειωτήρα με στόχο την μετέπειτα αξιοποίηση του για παραγωγή εκμεταλλεύσιμης μορφής ενέργειας.

Σε ό,τι αφορά την αντλία, πρόκειται για απλή παλινδρομική βυθιζόμενη μονής ενέργειας. Φέρει δύο αντεπίστρεφες βαλβίδες : μία που ανοίγει κατά την φάση της αναρρόφησης (αριστερά, σχήμα 2.26) και μία που ανοίγει κατά την φάση άντλησης (δεξιά, σχήμα 2.26). Η βαλβίδα εξαγωγής αρκετά συχνά τοποθετείται στον πυθμένα, χωρίς φυσικά να αλλάζει το παραμικρό στον τρόπο λειτουργίας.



Σχήμα 2.26: Αρχή λειτουργίας παλινδρομικής αντλίας

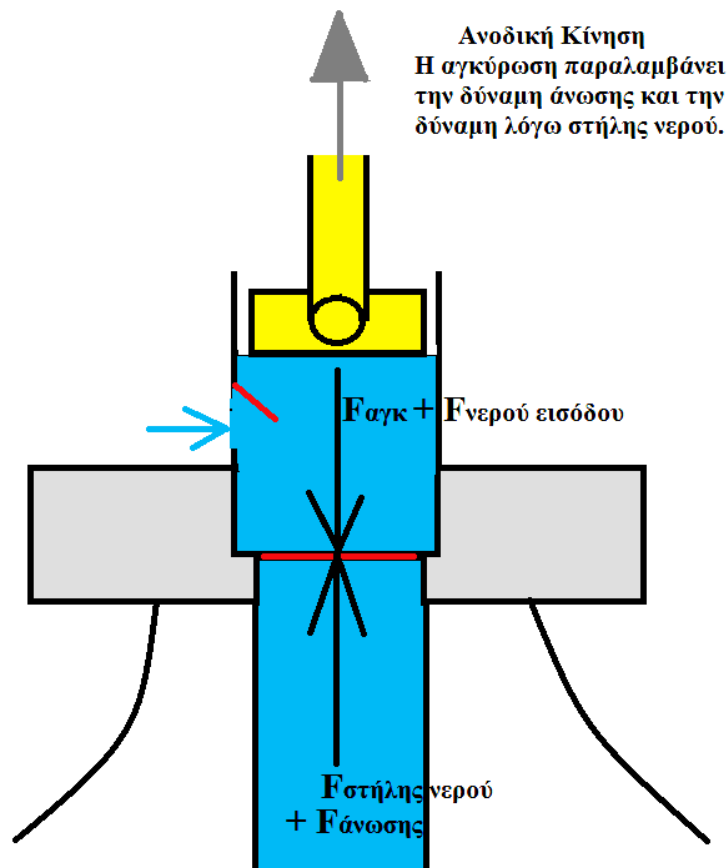
### 2.2.3) Δυναμική ανάλυση heave plate

Για λόγους πληρότητας, αν και δεν σχετίζεται με την δυναμική και ενεργειακή ανάλυση του μηχανισμού που εκτελεί ταλάντωση και ενδιαφέρει στη συγκεκριμένη μελέτη, θα γίνει μια πρώτη προσέγγιση στον τρόπο λειτουργίας και εγκατάστασης του συστήματος αγκύρωσης του κυλίνδρου της αντλίας σε σταθερή και ακλόνητη, σχετικά, θέση.

Σε πρώτη φάση θεωρείται δεδομένο ότι με βάση πραγματικές και όχι υποθετικές τεχνολογίες, είναι πλέον δυνατή η αγκύρωση πλωτών σωμάτων κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ελευθερία κίνησης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Το σύστημα λοιπόν της heave plate και του κυλίνδρου της αντλίας είναι καταρχήν αγκυρωμένο στον πυθμένα με αυτό τον τρόπο. Επιτρέπεται λοιπόν κίνηση μόνο κατά τον κατακόρυφο άξονα στον οποίο επικεντρώνεται και η ακόλουθη ανάλυση. Ωστόσο στην περίπτωση της εγκατάστασης που μελετάται είναι επιθυμητή η δέσμευση και αυτού του βαθμού ελευθερίας, ώστε ο κύλινδρος να παραμένει ακλόνητος και το έμβολο να επιτελεί απρόσκοπτα την αντλητική του κίνηση. Εκ κατασκευής και επιλογής υλικών η heave plate δέχεται μια δύναμη άνωσης. Η δύναμη αυτή παραλαμβάνεται από την αγκύρωση. Ωστόσο, δέχεται και επιπλέον δυνάμεις κατά την λειτουργία του μηχανισμού:

Ανοδική κίνηση εμβόλου :

Νερό πληρώνει τον κύλινδρο. Η στήλη νερού του αγωγού ασκεί δύναμη στην αντεπίστροφη βαλβίδα και επομένως στην heave plate. Σε συνδυασμό με την άνωση και συγκρινόμενες με τη δύναμη λόγω του νερού εισόδου στον κύλινδρο, η συνιστώσα προκύπτει προς τα πάνω και παραλαμβάνεται από την αγκύρωση. Εξασφαλίζεται ακινησία της heave plate.



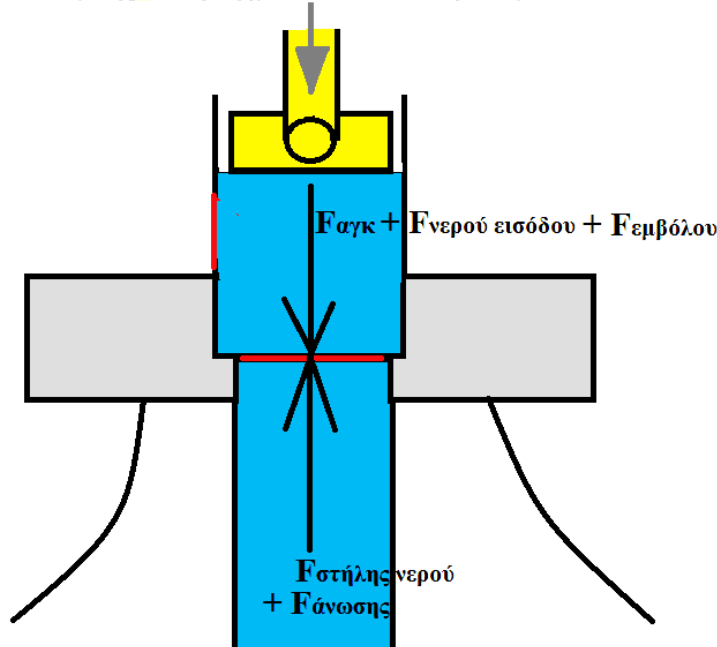
Σχήμα 2.27: Δυναμική ανάλυση heave plate ανοδικής κίνησης

Καθοδική κίνηση εμβόλου :

Το έμβολο ασκεί την κυρίαρχη δύναμη επί της βαλβίδας ωθώντας την να ανοίξει. Στο άνοιγμα αντιστέκεται η δύναμη στήλης νερού και η άνωση. Μόλις η δύναμη εμβόλου γίνει μεγαλύτερη των άλλων δύο, η συνιστώσα προκύπτει προς τα κάτω και τείνει να εκτρέψει την heave plate από την θέση της όσο η βαλβίδα παραμένει κλειστή.

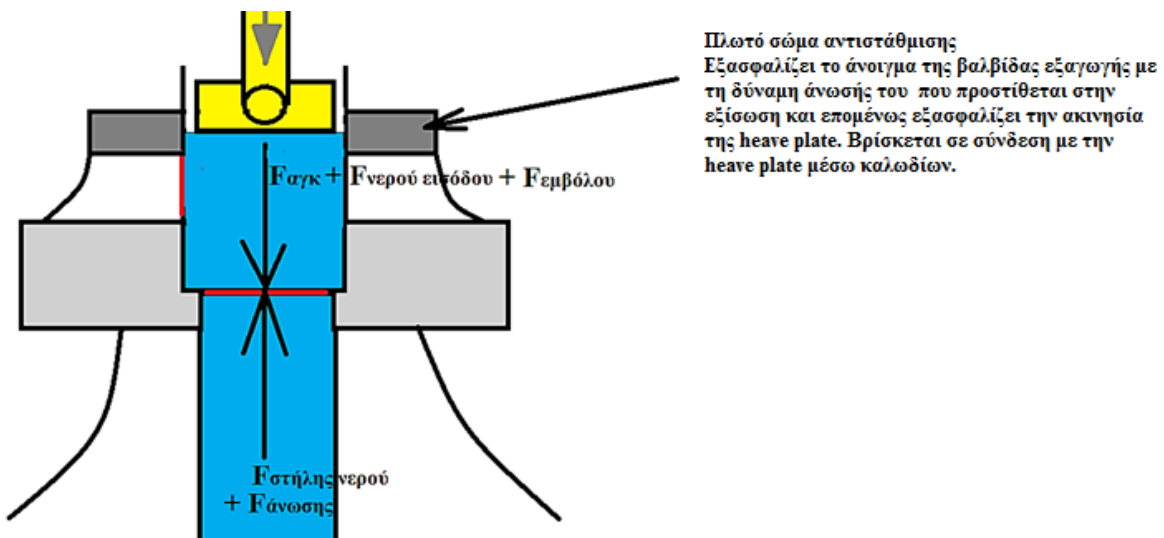
**Καθοδική Κίνηση**

Όσο η  $(F_{\text{εμβόλου}} + F_{\text{νερού εισόδου}} < F_{\text{άνωσης}} + F_{\text{στήλης νερού}})$  λειτουργεί η αγκύρωση και παραλαμβάνει την συνιστώσα που έχει φορά προς τα πάνω. Μόλις  $(F_{\text{εμβόλου}} + F_{\text{νερού εισόδου}} > F_{\text{άνωσης}} + F_{\text{στήλης νερού}})$ , τότε οριακά η heave plate τείνει να κινηθεί καθοδικά. Αυτό συμβαίνει όσο η βαλβίδα εξαγωγής παραμένει κλειστή. Μόλις ανοίξει αποκαθίσταται επικοινωνία και η δύναμη του εμβόλου μετατρέπεται σε κίνηση του νερού στον αγωγό. Αρκεί λοιπόν μία μικρή αντιστάθμιση μέσω δύναμης, μέχρι να ανοίξει η βαλβίδα. Η δύναμη αυτή πρέπει να έχει φορά προς τα πάνω και μπορεί να προέρχεται από ένα δεύτερο σώμα που επιπλέει σε σύνδεση με την heave plate.



Σχήμα 2.28: Δυναμική ανάλυση heave plate καθοδικής κίνησης

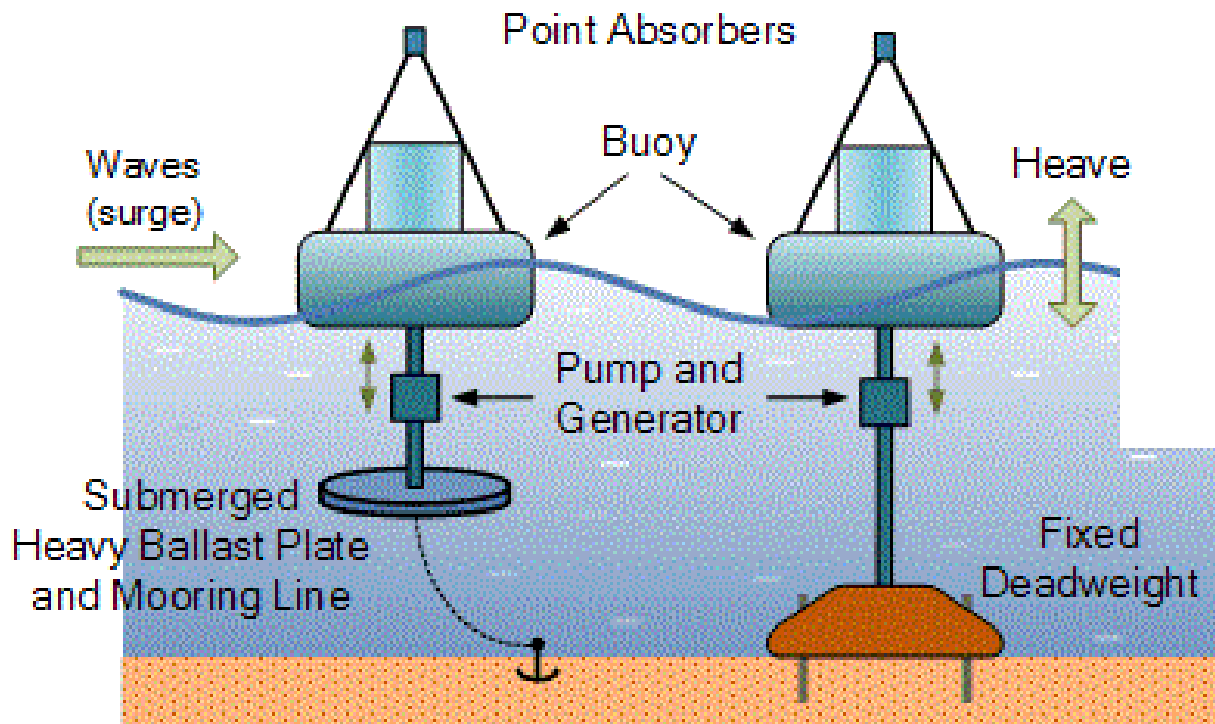
Μέσω ενός ακόμη επιπλέοντος σώματος και της άνωσής του εξασφαλίζεται ο απαραίτητος χρόνος ώστε να ικανοποιηθεί το κριτήριο ανοίγματος της βαλβίδας και να αποκατασταθεί επικοινωνία με τον αγωγό, ώστε η δύναμη του εμβόλου να διοχετεύεται στο νερό του αγωγού και όχι στην heave plate. Εξασφαλίζεται κι εδώ ακινησία της heave plate.



Σχήμα 2.29: Μέθοδος πλωτής αντιστάθμισης heave plate

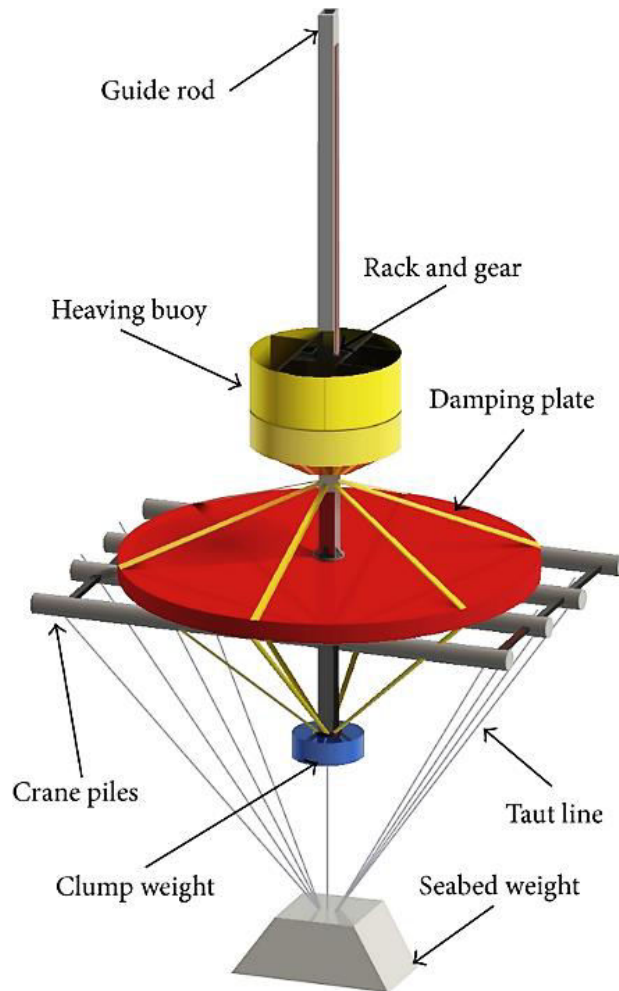
Η παραπάνω εξήγηση της απλής αυτής μεθόδου εξασφάλισης σταθερότητας του κυλίνδρου της αντλίας είναι ενδεικτική πρόταση και αποτελεί θεωρητική προσέγγιση. Το συμπέρασμα είναι ότι υπάρχουν τρόποι εξασφάλισης σχεδόν σταθερής θέσης του συστήματος που μας ενδιαφέρει μέσω διάφορων μηχανισμών, πολύπλοκων και μη, οι οποίοι είναι αντικείμενο μελέτης μηχανικών του κατασκευαστικού τομέα που θα αναλάβουν την πιθανή υλοποίηση σε συνεργασία με τον ενεργειακό μηχανολόγο μηχανικό. Τυχόν αποκλίσεις σε μικρές μετατοπίσεις παραλαμβάνονται από αρθρώσεις της συσκευής. Το αντικείμενο της παρούσης μελέτης επικεντρώνεται στην ανάλυση της δυναμικής απόκρισης και της ενεργειακής συναλλαγής των μαζών σε ταλάντωση λόγω κύματος και όχι σε λεπτομερή θέματα θεμελίωσης και αγκύρωσης.

Η συσκευή που προτείνεται διαφέρει από την αριστερή της εικόνας 2.30 μόνο στο ότι το νερό αντλείται σε ταμειυτήρα και δεν γίνεται επί τόπου παραγωγή ισχύος με γεννήτρια.



Σχήμα 2.30: Διαφορετική θεμελίωση point absorbers  
(Πηγή: [alternative-energy-tutorials.com](http://alternative-energy-tutorials.com))

Ακολουθεί στο σχήμα 2.31 η πλήρης διάταξη του σημειακού απορροφητή με λεπτομέρειες που αφορούν και την αγκύρωση του συστήματος και φανερώνουν και τον τρόπο λειτουργίας της heave plate.



*Σχήμα 2.31: Διάταξη εγκατάστασης-αγκύρωσης point absorber  
(Πηγή : "Effects of damping plate and taut line system on mooring  
stability of small wave energy converter.",2015)*





## Κεφάλαιο 3 : Μαθηματική ανάλυση

### Παράγραφος 1<sup>η</sup> : Κυματική Θεωρία

#### 3.1.1) Εισαγωγή

Οικεία είναι η εικόνα της «ρυτιδιασμένης» θάλασσας. Κύρια αιτία σχηματισμού αυτών των ρυτίδων, των κυμάτων στην επιφάνεια του αρχικά ηρεμούντος ύδατος σε κλειστές θάλασσες, όπως είναι η Μεσόγειος, η Βαλτική και άλλες, που δεν επηρεάζονται από παλίρροιες, είναι ο άνεμος, ο οποίος αποβάλλει με αυτό τον τρόπο μέρος της κινητικής του ενέργειας. Τα κύματα παρουσιάζουν ακανόνιστο σχήμα και διεύθυνση όσο ο άνεμος δρα στην επιφάνεια του ρευστού με μεταβλητή ένταση. Ωστόσο, όταν παύσει να πνέει, ο κυματισμός λαμβάνει συγκεκριμένη σχηματική μορφή, δηλαδή ορισμένο ύψος, μήκος και περίοδο, η οποία περίοδος μάλιστα, αν δεν την επηρεάζουν άλλες αιτίες, διατηρείται μέχρι της πλήρους απόσβεσης του φαινομένου.

Με μια πιο προσεκτική μελέτη του κύματος γίνεται αντιληπτό ότι πρόκειται για περιοδικές ταλαντώσεις των μορίων του νερού με τις οποίες μεταφέρεται η κινητική ενέργεια του ανέμου στο ρευστό. Βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία αυτής της ενεργειακής συναλλαγής είναι η ταχύτητα του ανέμου, η διάρκεια αλληλεπίδρασης ανέμου-θάλασσας, καθώς και το μήκος αλληλεπίδρασης. Σε βαθιά νερά οι απώλειες είναι μικρές και η εκτόνωση της ενέργειας που μεταφέρουν γίνεται κυρίως με την θραύση τους στην ακτή.

Το μέγιστο ύψος κύματος που είχε καταγραφεί μέχρι το 1965, ήταν στον Βόρειο Ατλαντικό περίπου 22 μέτρα. Η κινητική ενέργεια όμως ακόμη και μετρίων κυμάτων είναι πολύ μεγάλη. Κύμα ύψους περίπου 8 μέτρων, μεταφέρει ενέργεια σε προσβαλλόμενη ακτογραμμή ίση με 700 HP/μέτρο, ενδεικτικό του ενεργειακού δυναμικού αυτής της εναλλακτικής πηγής.

Βασική αρχή που διέπει το φαινόμενο είναι η μη μετατόπιση μάζας ύδατος, όπως κοινώς πιστεύεται, αλλά η μεταβολή μόνο του σχήματος της κατανομής των κυμάτων επί της επιφάνειας του ύδατος.

Με βάση την αρχή της επαλληλίας η συνολική εικόνα στην επιφάνεια του ύδατος προκύπτει από σύνθεση συντρεχόντων κυμάτων διαφορετικών χαρακτηριστικών. Πρόκειται για ένα αρκετά περίπλοκο μαθηματικό μοντέλο και κατά καιρούς έχουν γίνει προσπάθειες για την ανάπτυξη θεωριών (Laplace, Newton, Lagrange, Cauchy, Poisson, Webers, Russel, Green, Airy, και άλλοι). Η απλούστερη και πιο διαδεδομένη από αυτές είναι η θεωρία Airy (1841), γνωστή και ως Γραμμική Θεωρία Κύματος η οποία θα αναπτυχθεί στην συνέχεια.

### 3.1.2) Χαρακτηριστικά Κύματος

Κορυφή κύματος: Το υψηλότερο σημείο του κύματος (όρος)

Κοίλο κύματος: Το χαμηλότερο σημείο του κύματος (κοιλιάδα)

Μήκος κύματος: Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων της ίδιας φάσης (δηλαδή κορυφών ή κοίλων). Συνήθως συμβολίζεται με το γράμμα  $\lambda$  ή  $L$ .

Ύψος κύματος: Η κάθετη απόσταση μεταξύ της κορυφής και του κοίλου του κύματος (πλάτος στη κυματική). Συμβολίζεται με  $H$ .

Ταχύτητα κύματος: Ο λόγος της προέλασης του κύματος στο χρόνο που διέρρευσε, συμβολίζεται με  $c$ .

Περίοδος κύματος: Ο απαιτούμενος χρόνος για να διέλθουν από ένα (σταθερό) σημείο δύο διαδοχικά σημεία ίδιων φάσεων, (δύο κορυφές, ή δύο κοίλα), συμβολίζεται με  $\tau$  ή  $T$ .

Συχνότητα κύματος: Ο αριθμός των μηκών κύματος που διέρχονται από ένα συγκεκριμένο σημείο στη μονάδα του χρόνου. Συμβολίζεται με  $f$ .

Κυκλική συχνότητα κύματος : Συμβολίζεται με  $\omega$ . Ισούται με  $\omega=2\pi f$ .

Βάθος νερού : Η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι τον βυθό. Συμβολίζεται με  $d$ .

Στην περίπτωση του δισδιάστατου αρμονικού κύματος τα μεγέθη : μήκος κύματος- $\lambda$ , περίοδος κύματος- $T$ , βάθος νερού- $d$ , ύψος κύματος- $H$  είναι αρκετά για την πλήρη περιγραφή του. Από τα παραπάνω εξάγονται οι παρακάτω χρήσιμοι τύποι:

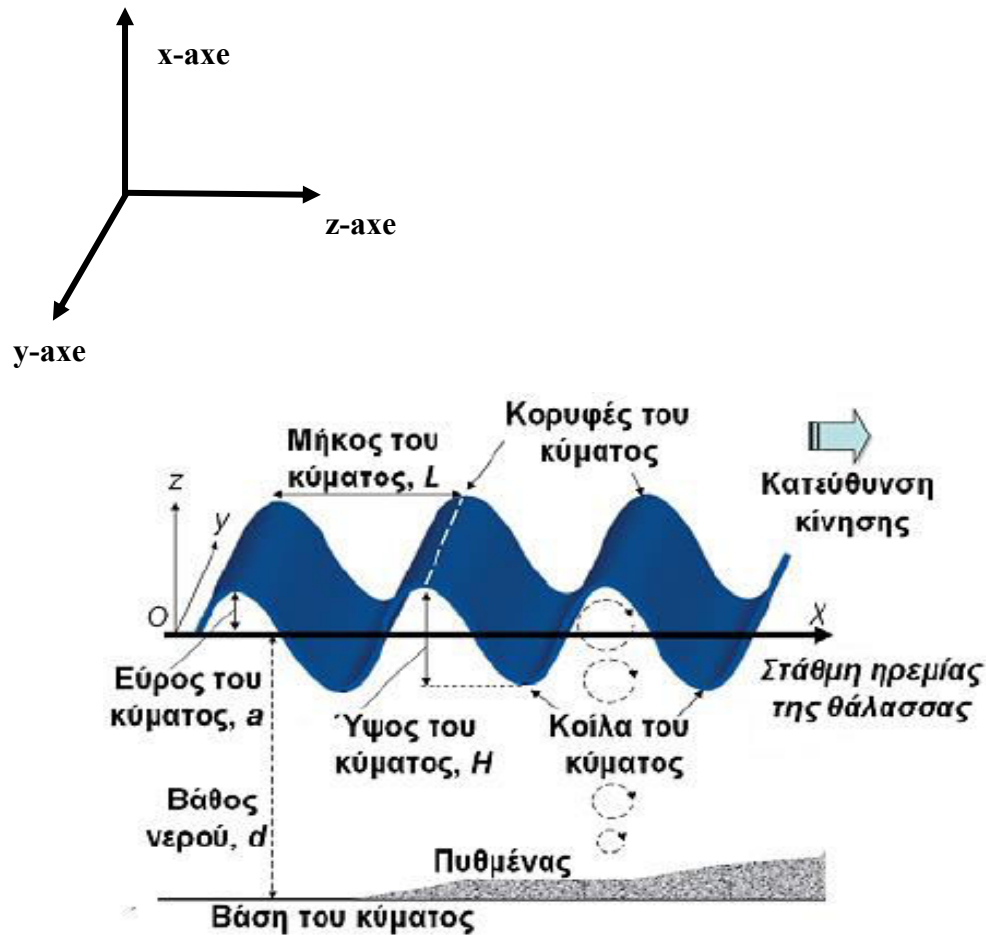
Αριθμός κύματος ( $k$ ): 
$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Πλάτος κύματος ( $A$ ): 
$$A = \frac{H}{2}$$

Συχνότητα κύματος ( $f$ ): 
$$f = \frac{1}{T}$$

Κυκλική συχνότητα κύματος ( $\omega$ ): 
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Ταχύτητα κύματος ( $c$ ): 
$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}$$



Σχήμα 3.1: Χαρακτηριστικά κύματος (Πηγή: NTUA,2011)

### 3.1.3) Γραμμική θεωρία κύματος – Airy Theory

Πρόκειται για την πλέον διαδεδομένη κυματική θεωρία που οδηγεί στην σχετικά απλή επίλυση του ρευστομηχανικού προβλήματος (Τσάγγαρης Σ. 2005). Στηρίζεται στις εξής παραδοχές:

- Δισδιάστατο-2d πεδίο ροής ( κύμα μη μεταβαλλόμενων χαρακτηριστικών κατά την κατακόρυφη-y διεύθυνση)
- Μη συνεκτικό ρευστό (ατριβές ρευστό)
- Αμελητέες επιφανειακές τάσεις
- Ασυμπιεστο ρευστό (πυκνότητα  $\rho = \text{const}$ )
- Αστρόβιλο πεδίο ροής
- Στάθμη μηδενικής πίεσης : Η επιφάνεια του ρευστού
- Πλάτος κύματος μικρό ως προς το μήκος κύματος και το βάθος του υγρού ( $H \ll \lambda, d$ )

Μαθηματική θεμελίωση

Με την παραδοχή 2-d αστρόβιλου πεδίου ροής μη συνεκτικού ρευστού, ορίζοντας την συνάρτηση δυναμικού  $\Phi(x,y,z,t)$  η εξίσωση συνέχειας γίνεται :

$$\text{Εξίσωση Laplace : } \nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.1)$$

Ισχύει επίσης ο νόμος Bernoulli, ο οποίος λαμβάνει την παρακάτω μορφή για μη μόνιμο δυναμικό πεδίο ροής, δηλαδή πεδίο μεταβλητό με το χρόνο στο οποίο συνυπολογίζονται οι βαρυτικές δυνάμεις (g) :

$$\text{Εξίσωση Bernoulli : } \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{p}{\rho} + g z = f(t) \quad (3.2)$$

Συνοριακές Συνθήκες

- Συνθήκη Μη Εισχώρησης: Στο στερεό όριο του βυθού ισχύει :

$$z = -h \quad (3.3)$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

- Συνθήκη Συνέχειας της πίεσης στην ελεύθερη επιφάνεια  $p = 0$  (παραδοχή θεωρίας) :

$$\text{Εξίσωση Ελεύθερης επιφανείας : } z = \eta(x,t) \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g z = 0 \quad (3.6)$$

- Συνθήκη Κινηματικής υλικής επιφανείας: Η ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού είναι υλική επιφάνεια δηλαδή αποτελείται συνέχεια από το ίδιο στρώμα «σωματιδίων»

$$\frac{D(z - \eta(x,t))}{Dt} = 0 \quad (3.7)$$

η οποία τελικά γίνεται

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (3.8)$$

Γραμμικοποίηση προβλήματος συνοριακών συνθηκών

Το πρόβλημα που μόλις διατυπώθηκε είναι μη γραμμικό. Με την παραδοχή όμως μικρού πλάτους κύματος ως προς το πλάτος κύματος και το βάθος του υγρού ( $H \ll \lambda, d$ ) οι μη γραμμικοί όροι είναι αμελητέοι και το τελικό σύστημα διαμορφώνεται ως εξής:

$$\text{Για : } z = \eta(x, t)$$

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\eta = 0 \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (3.11)$$

$$\text{Για : } z = -h$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (3.12)$$

Εύρεση πεδίου ταχυτήτων και εξισώσεων κίνησης κατά Euler

Χρησιμοποιώντας την μέθοδο χωρισμού των μεταβλητών βρίσκουμε την συνάρτηση δυναμικού- $\Phi$  και από αυτήν το πεδίο ταχύτητας ως εξής:

$$V = (u, v) \quad (3.13)$$

$$\Phi_x = u \quad (3.14)$$

$$\Phi_y = v \quad (3.15)$$

Έπειτα από το πεδίο ταχυτήτων με ολοκλήρωση οδηγούμαστε στις εξισώσεις κίνησης:

Εξίσωση κίνησης ελεύθερης επιφάνειας:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (3.16)$$

Εξίσωση κίνησης κάθε σωματιδίου στον z-άξονα:

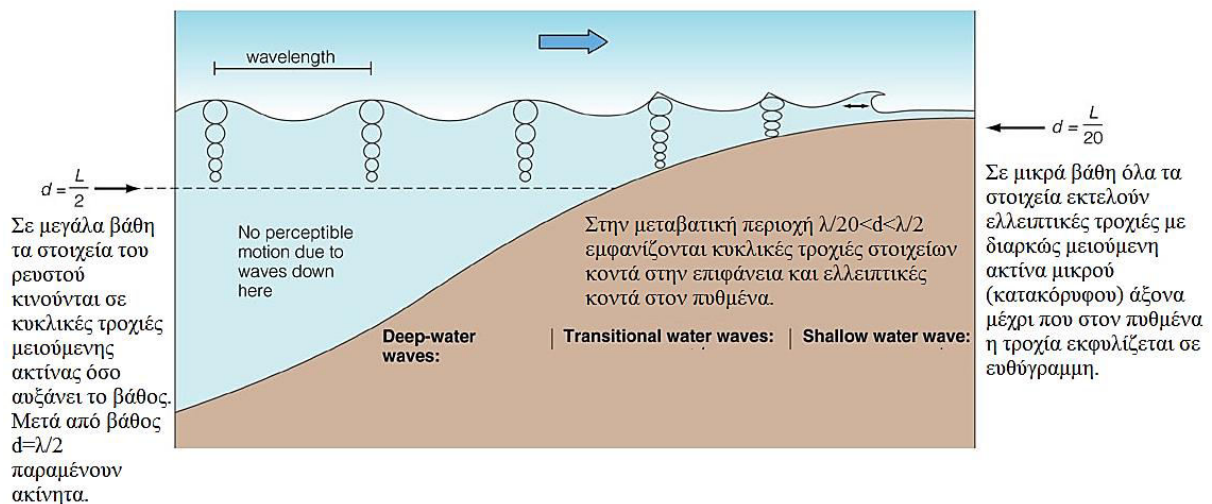
$$\xi(x, z, t) = -\frac{H}{2} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (3.17)$$

η οποία για βαθιά νερά ( $d/\lambda > 0.5$ ) γίνεται :

$$\xi(x, z, t) = \frac{H}{2} e^{kz} \cos(kx - \omega t) \quad (3.18)$$

Σε ό,τι αφορά την εξίσωση του μήκους κύματος :  $\lambda = \frac{T^2 g}{2\pi} \tanh(kd)$  υπάρχουν δύο δυνατά σενάρια :

- Βαθιά νερά : Τότε  $\tanh(kd)$  τείνει στη μονάδα οπότε :  $\lambda = \frac{T^2 g}{2\pi}$  και επομένως το μήκος κύματος άρα και η ταχύτητα δεν εξαρτάται από το βάθος.
- Αβαθή νερά :  $\lambda = T\sqrt{gd}$  και επομένως το μήκος κύματος άρα και η ταχύτητα επηρεάζεται από το βάθος.



Σχήμα 3.2: Τροχιές στοιχείων ρευστού ανάλογα με το βάθος

Εύρεση κατανομής πίεσης

Ακολούθως η επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes για δισδιάστατο μη μόνιμο δυναμικό πεδίο ροής μη συνεκτικού ρευστού οδηγούν στην ακόλουθη κατανομή πίεσης :

$$\frac{p}{\rho g} = \frac{H}{2} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) - z \quad (3.19)$$

Στην περίπτωση βαθιών νερών όπου ισχύει  $\frac{d}{\lambda} > 0.5$  η κατανομή πίεσης γίνεται:

$$\frac{p}{\rho g} = \frac{H}{2} e^{kz} \cos(kx - \omega t) - z \quad (3.20)$$

Στον Πίνακα I.1 του Παραρτήματος I συνοψίζονται όλες οι εξισώσεις της κυματικής θεωρίας.

**3.1.4) Κυματική ενέργεια**

Σύμφωνα με την θεωρία Airy το φυσικό φαινόμενο του κυματισμού επί της επιφάνειας ύδατος μπορεί να προσεγγιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια με τον μοντέλο ενός αρμονικού κύματος. Στην περίπτωση αυτή το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται σε ένα κύμα είναι το άθροισμα της δυναμικής ενέργειας λόγω ταλάντωσης και της κινητικής ενέργειας των στοιχείων του ρευστού. Μέρος αυτής της ενέργειας αποσκοπεί να εκμεταλλευτεί η ανάπτυξη και εγκατάσταση ποικίλων μηχανισμών σε διάφορα μέρη του κόσμου. Η παραδοχή αρμονικού κύματος και μάλιστα ημιτονοειδούς η οποία απλοποιεί τους υπολογισμούς, είναι αποδεκτή ως προς την ακρίβεια του μοντέλου και θα ισχύει από εδώ και στο εξής.

Θεωρούμε στοιχείο του ρευστού με στοιχειώδη όγκο

$$dV = \xi dx \quad (3.21)$$

και κέντρο βάρους το

$$\bar{\xi} = \frac{1}{2} \xi \quad (3.22)$$

Η δυναμική ενέργεια του συγκεκριμένου σωματιδίου τότε είναι :

$$d(E_p) = \rho g \bar{\xi} dV \quad (3.23)$$

Η μέση δυναμική ενέργεια ανά ισοβαθή, δηλαδή οριζόντια, επιφάνεια κύματος προκύπτει με ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσης και είναι :

$$E_p = \frac{1}{4} \rho g A^2 \quad (J / m^2) \quad (3.24)$$

Η κινητική ενέργεια του στοιχείου είναι :

$$d(E_K) = \frac{1}{2} (u^2 + w^2) \rho dx dz \quad (3.25)$$

όπου  $u, w$  οι ταχύτητες κατά τον οριζόντιο- $x$  άξονα και κατά τον κατακόρυφο- $z$  άξονα αντίστοιχα.

Ολοκληρώνοντας σ' όλο το ρευστό ευρίσκεται η έκφραση της ολικής κινητικής ενέργειας των στοιχείων του, η οποία λαμβάνει την ακόλουθη έκφραση :

$$E_K = \frac{1}{4} \rho g A^2 \quad (J / m^2) \quad (3.26)$$

Για την περίπτωση λοιπόν ημιτονοειδούς κύματος ισχύει ότι  $E_p = E_K$  και :

$$E = E_p + E_K = \frac{(\rho g A^2)}{2} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (J / m^2) \quad (3.27)$$

Υπολογίζεται στη συνέχεια η ροή ενέργειας  $J$  ( Kw/ m κυματομετώπου) :

$$J = E c_g \quad (3.28)$$

όπου  $c_g$  η φασική ταχύτητα ομάδας και η οποία για βαθιά νερά είναι:

$$c_g = \frac{1}{2} c = g \frac{T}{4\pi} \quad (3.29)$$

επομένως:

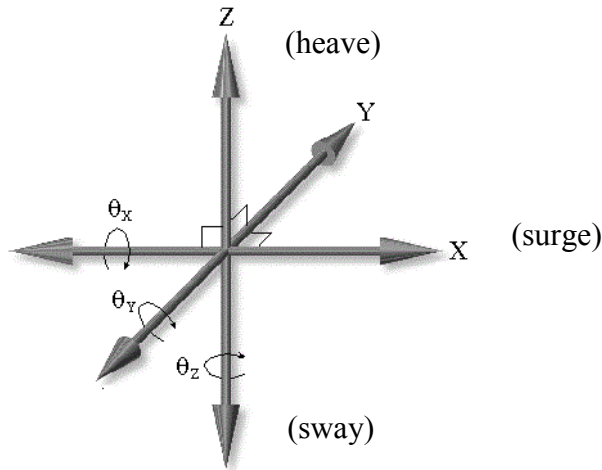
$$J = \rho g^2 T_E \frac{H^2}{32\pi} \quad (3.30)$$

όπου  $T_E$  η περίοδος της ενέργειας του κύματος άρα :  $T_E = \frac{T}{2}$



## Παράγραφος 2<sup>η</sup> : Ανάλυση δυνάμεων

Για οποιοδήποτε σώμα στον χώρο διακρίνουμε έξι βαθμούς ελευθερίας , έξι δηλαδή δυνατές κινήσεις : τρεις μετατοπίσεις κατά των τριών αξόνων και τρεις δυνατές περιστροφές γύρω από αυτούς, οι οποίες και παρουσιάζονται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Χωρικοί βαθμοί ελευθερίας

Ένα σώμα το οποίο επιπλέει σε ρευστό μπορεί επομένως να κινηθεί γραμμικά κατά τους τρεις άξονες και να στραφεί γύρω από αυτούς. Η κίνηση του αποτελεί σύνθεση όλων αυτών των στοιχειωδών συνιστωσών μετατοπίσεων γραμμικών και γωνιακών.

Σε ό,τι αφορά τις συσκευές αξιοποίησης της ενέργειας των κυμάτων για τη δέσμευση και αξιοποίησή της εκμεταλλεύονται κάποια ή κάποιες από αυτές τις μετατοπίσεις. Στην περίπτωση του πλωτήρα και της παρούσης μελέτης η κίνηση που αξιοποιείται είναι η κατακόρυφη παλινδρόμηση στον z-άξονα του σώματος (heave move) (H.O. Berteaux,1976). Βασική παραδοχή που γίνεται στα πλαίσια της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι ο μη συνυπολογισμός της όποιας αλληλεπίδρασης σώματος συσκευής και ατμοσφαιρικού αέρα (δευτερεύουσα κίνηση σε ρευστό).

### 3.2.1) Δυνάμεις σε επιπλέοντα σώματα

$F_b$  : Ανωστική δύναμη (buoyancy force)

$$\text{Δύναμη άνωσης : } dF = \rho g dV \quad (3.31)$$

$$\text{Ολοκληρώνοντας κατά τον άξονα z : } F_b = -\rho g S_w z \quad (3.32)$$

όπου  $S_w$  : η επιφάνεια του σώματος

Η άνωση υπολογίζεται ως συνάρτηση τόσο της θέσης του μηχανισμού όσο και του κύματος, για να λαμβάνεται υπόψη το βύθισμα την κάθε στιγμή, δηλαδή το  $z$  μόνο για την άνωση αντικαθίσταται με :

$$z = (\text{μετατόπιση κύματος} - \text{μετατόπιση συστήματος}) = y_K - y_A \quad (3.33)$$

Ουσιαστικά υπολογίζεται η διαφορά άνωσης – βάρους κάθε στιγμή. Πρέπει ωστόσο να δοθεί προσοχή στην απαίτηση ο πλωτήρας να μην εξέρχεται, διότι η συμπεριφορά του αλλάζει (εμφάνιση slamming) . Αυτό γίνεται με τη θέσπιση κατάλληλου κριτηρίου όπως θα φανεί.

$F_r$  : Δύναμη ακτινοβολίας (radiation force)

Θεωρούμε την επιφάνεια του ρευστού απαλλαγμένη από οποιοδήποτε κύμα και σώμα-πλωτήρα που ηρεμεί επί αυτής. Στην αρχή του χρόνου διεγείρουμε στιγμιαία τον πλωτήρα σε κατακόρυφη ταλάντωση γωνιακής συχνότητας  $\omega$ . Αποτέλεσμα της κίνησης αυτής είναι η δημιουργία κυμάτων που έχουν ως πηγή τον πλωτήρα. Η κίνηση του συνεχίζεται μέχρι την πλήρη απόσβεσή της λόγω της αλληλεπίδρασης του ρευστού με την επιφάνεια του πλωτήρα. Τότε η δύναμη που ασκείται επί του σώματος ονομάζεται δύναμη ακτινοβολίας και υπολογίζεται ως :

$$F_{r,j,j} = i\omega\rho \iint_s (\varphi_r \eta_j) dS = -Z_{j,j} v_j \quad (3.34)$$

όπου  $\Phi_r$  : Δυναμικό ακτινοβολούμενης ταχύτητας

$Z_{j,j}$  : Αντίσταση ακτινοβολίας

$\hat{v}_j$  : Ταχύτητα πλωτήρα

Στην περίπτωση της κατακόρυφης συνιστώσας ταλάντωσης του πλωτήρα η σχέση (3.34) γίνεται :

$$F_r = -m_a \ddot{z} - b\dot{z} \quad (3.35)$$

όπου  $m_a$  : Πρόσθετη μάζα συστήματος

$b$  : Συντελεστής απόσβεσης

*Πρόσθετη μάζα συστήματος  $m_\alpha$*  : Η ίδιου μέτρου επιτάχυνση σώματος βυθισμένου σε ρευστό απαιτεί επενέργεια μεγαλύτερης δύναμης, όπως προκύπτει από τον Δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα, επί του σώματος, καθώς μαζί με αυτό «αναγκάζεται» να επιταχυνθεί και μάζα ρευστού γύρω και κάτω από το σώμα.

Η πρόσθετη μάζα είναι:

$$m_\alpha = C_A m = C_A \rho V \quad (3.36)$$

όπου  $V$  : Βυθισμένος όγκος πλωτήρα

$C_A$  : *Συντελεστής πρόσθετης μάζας* : Πρόκειται για συνάρτηση της γωνιακής συχνότητας  $\omega$  της ταλάντωσης και της γεωμετρίας του σώματος. Υπάρχουν πίνακες στην διεθνή βιβλιογραφία με τις προσεγγιστικές τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής αυτός, όπως ο Πίνακας I.2 του Παραρτήματος I.

*Συντελεστής αντίστασης  $b$*  : Πρόκειται για μία πολύ βασική παράμετρο ειδικά σε ό,τι αφορά θέματα υπολογισμού ισχύος. Είναι συνάρτηση της γωνιακής ταχύτητας  $\omega$  και στην περίπτωση αξονοσυμμετρικού σώματος που παλινδρομεί στον κατακόρυφο-z άξονα είναι :

$$b = \frac{\epsilon_3 \omega \rho \alpha^3 2\pi}{3} \quad (3.37)$$

όπου  $\epsilon_3$  : συντελεστής(σταθερά)

$\alpha$  : ακτίνα του σώματος

Επίσης μπορεί να ευρεθεί μέσω της δύναμης διέγερσης μέσω της ακόλουθης σχέσης για αξονοσυμμετρικά σώματα :

$$b = \left( \frac{k}{8J} \right) F_e^2 = \left( \frac{\omega k}{2\rho g^2} \right) \frac{F_e^2}{A^2} \quad (3.38)$$

$F_e$  : Διεγείρουσα δύναμη (excitation force)

Πρόκειται για τη δύναμη που δέχεται ο βυθισμένος πλωτήρας σε σταθερό βάθος λόγω του κύματος που προσπίπτει στην πλευρική του επιφάνεια χωρίς να προκαλεί αυξομείωση της κατακόρυφης ταλάντωσής του.

$$F_{e,j} = i\omega\rho\iint_s (\varphi_o + \varphi_d)\eta_j dS \quad (3.39)$$

όπου  $\varphi_o$  : δυναμικό ανενόχλητου κύματος

$\varphi_d$  : δυναμικό κύματος από περίθλαση

Το φαινόμενο της περίθλασης εξηγεί την δημιουργία ανακλώμενου κύματος λόγω της πρόσπτωσης του αρχικού στην επιφάνεια του επιπλέοντος σώματος. Η συνολική δύναμη μπορεί να αναλυθεί σε δύο επιμέρους δυνάμεις :

$$F_e = F_{FK} + F_D \quad (3.40)$$

όπου  $F_{FK}$  : Δύναμη Foude-Krylov

$F_D$  : Δύναμη περίθλασης

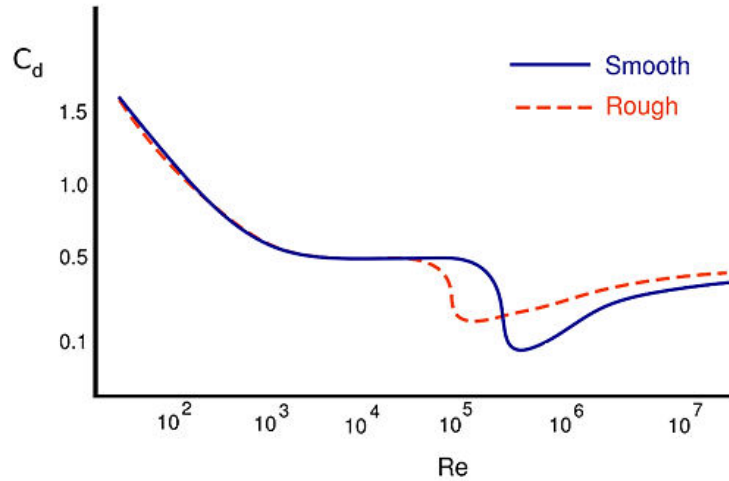
Αναφορικά με αυτές τις δύο δυνάμεις σημειώνεται ότι η δύναμη περίθλασης υπερτερεί της δύναμης Froude-Krylov για μεγάλα σώματα ενώ στην περίπτωση γενικά σωμάτων μικρών διαστάσεων όπου  $\frac{\pi D}{\lambda} < 0.5$ , με D την κύρια διάσταση του σώματος (στην περίπτωση κυλίνδρου αυτή είναι η διάμετρος) η δύναμη Froude-Krylov είναι πολύ μεγαλύτερη της δύναμης περίθλασης (H.O. Berteaux, 1976). Η γεωμετρία των πλωτήρων στην πλειονότητα των περιπτώσεων είναι απλή, τα σώματα αξονοσυμμετρικά και ο υπολογισμός της διεγείρουσας δύναμης απλοποιείται σημαντικά.

 $F_v$  : Δύναμη αντίστασης (Drag force)

Το κύμα βρίσκεται σε σχετική κίνηση ως προς τον πλωτήρα. Αν θεωρήσουμε ωστόσο σύστημα συντεταγμένων σωματόδετο στο κύμα, τότε και ο πλωτήρας βρίσκεται σε σχετική κίνηση ως προς το κύμα. Από την μηχανική των ρευστών είναι γνωστό ότι οποιοδήποτε σώμα κινούμενο σε ρευστό δέχεται δύναμη αντίστασης, γνωστή ως οπισθέλκουσα, ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητάς του.

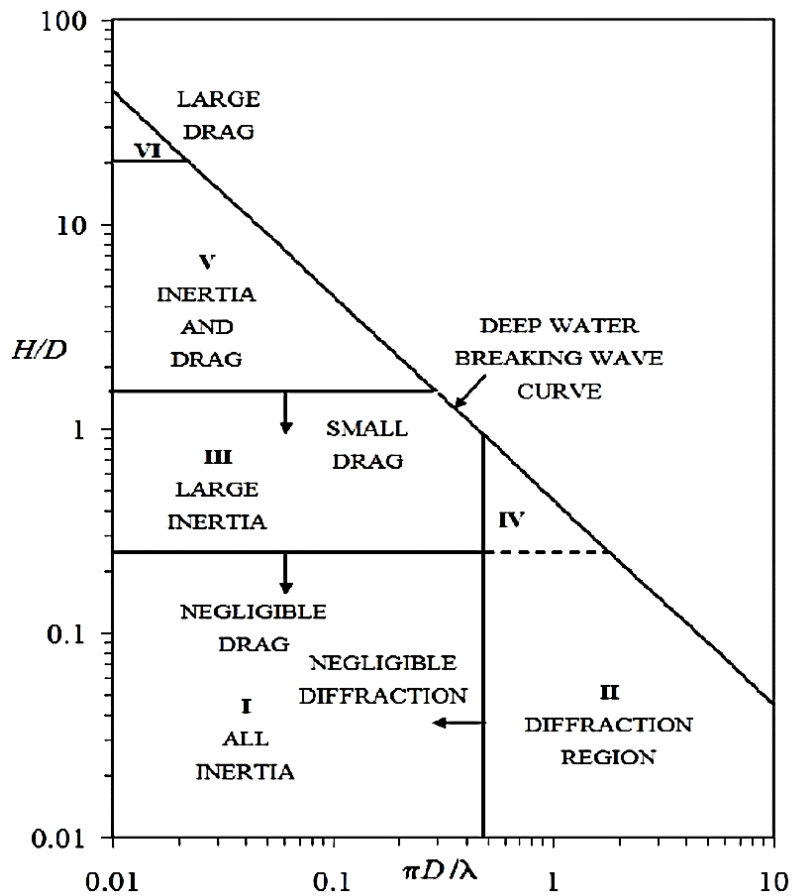
$$F_v = -\frac{1}{2}\rho C_d S_w |v|v \quad (3.41)$$

Ο όρος  $C_d$  είναι ο αδιάστατος συντελεστής αντίστασης ο οποίος καθορίζεται από την γεωμετρία του σώματος και τον αριθμό Reynolds της ροής. Στην περίπτωση κυλινδρικού σώματος-πλωτήρα ο  $C_d$  υπολογίζεται ανάλογα με τον Reynolds από το παρακάτω γράφημα. Η επίδραση της οπισθέλκουσας είναι εντονότερη σε μικρά σώματα.



Σχήμα 3.4: Συντελεστής αντίστασης συναρτήσει Reynolds για κώλυδρο (Πηγή: Wikimedia Commons)

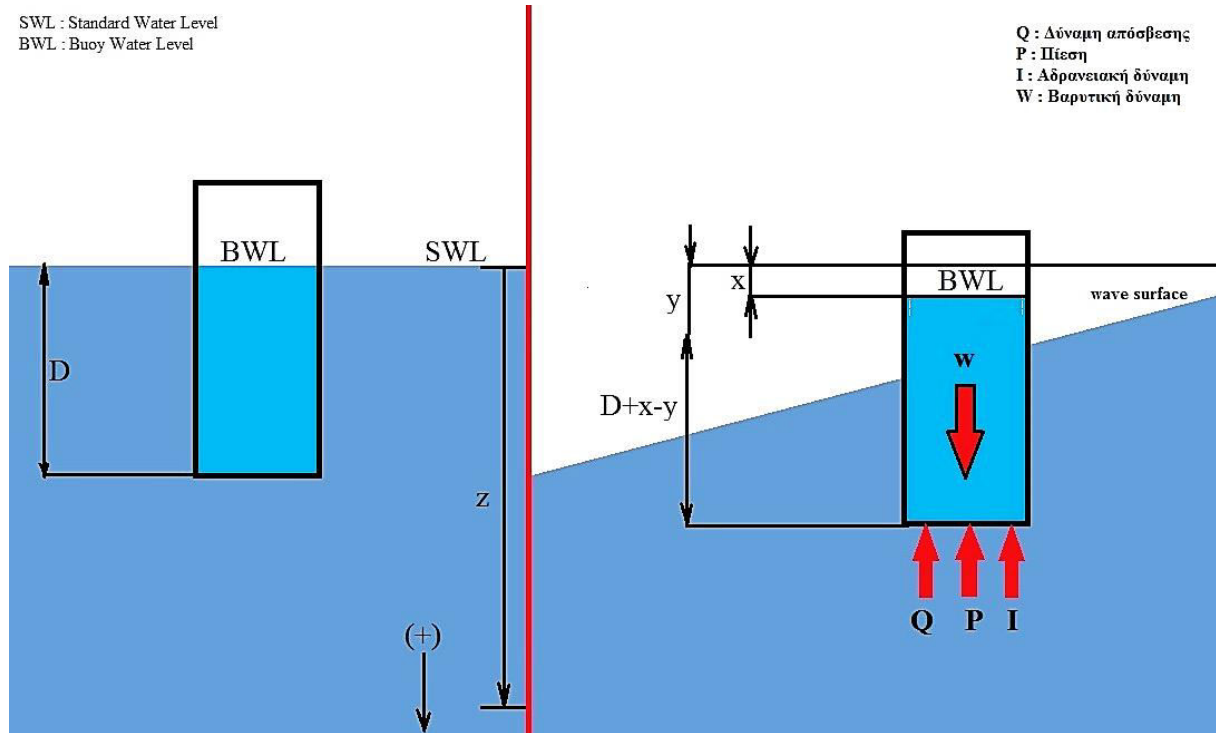
### Συνοπτική παρουσίαση των δυνάμεων



Σχήμα 3.5: Δυνάμεις αλληλεπίδρασης συναρτήσει βάθους  $H$  και βυθίσματος  $D$  (Πηγή: Buoy Engineering, H.O. Berteaux, 1976)

### 3.2.2) Δυνάμεις στον πλωτήρα : Περίπτωση κατακόρυφης κίνησης

Υπενθυμίζεται σε αυτό το σημείο η παραδοχή αρμονικού κύματος το οποίο αλληλεπιδρά με τον πλωτήρα.



Σχήμα 3.6: Δυνάμεις σε μερικώς βυθισμένο πλωτήρα

$x$  : κατακόρυφη απόσταση ελεύθερης επιφάνειας θάλασσας και στάθμης νερού πλωτήρα (SWL-BWL). Πρόκειται δηλαδή για την κατακόρυφη μετατόπιση του συστήματος. Σημειώνεται ότι ο πλωτήρας δεν περιέχει απαραίτητα νερό που εξασφαλίζει την επιθυμητή βύθισή του, αλλά αυτή επιτυγχάνεται λόγω βάρους του συστήματος. Ωστόσο στην ολική μάζα του συστήματος από εδώ και πέρα αναφερόμαστε στη συνολική μάζα της συσκευής με η χωρίς νερό.

$y$  : κατακόρυφη μετατόπιση αρμονικού κύματος :  $y = A \cos \omega t$

$z$  : κατακόρυφη απόσταση οποιουδήποτε σημείου από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Θετική φορά λαμβάνεται προς τα κάτω.

Δεύτερος Νόμος του Νεύτωνα :

$$m\ddot{x} = W - P - Q - I \quad (3.42)$$

όπου

W - βαρυτική δύναμη :

Ισούται με το βάρος του νερού που εκτοπίζει ο πλωτήρας και δίνεται από την σχέση

$$W = \rho g S_w D \quad (3.43)$$

P - πίεση κάτω πλευράς :

Η κατανομή πίεσης για βαθιά νερά δίνεται από την σχέση

$$P = \rho g S_w (z - ye^{-kz}) = \rho g S_w (x + D - ye^{-kz}) \quad (3.44)$$

και για την κάτω πλευρά του πλωτήρα έχουμε  $z = -D$  οπότε :

$$P = \rho g S_w x + \rho g S_w D - \rho g S_w ye^{-kD} \quad (3.45)$$

Q - δύναμη απόσβεσης :

$$Q = b(\dot{x} - \dot{y}e^{-kD}) \quad (3.46)$$

I - αδρανειακή δύναμη :

$$I = m_a(\ddot{x} - \ddot{y}e^{-kD}) \quad (3.47)$$

Με αντικατάσταση των παραπάνω στην εξίσωση (3.42) προκύπτει :

$$(m + m_a)\ddot{x} + b\dot{x} + \rho g S_w x = (m_a \ddot{y} + b\dot{y} + \rho g S_w y)e^{-kD} \quad (3.48)$$

Στην περίπτωση όμως αρμονικού κύματος ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις όπως αυτές προκύπτουν με παραγωγήιση :

$$y = A \cos(\omega t) \quad (3.49)$$

$$\dot{y} = -\omega A \sin(\omega t) \quad (3.50)$$

$$\ddot{y} = -\omega^2 A \cos(\omega t) \quad (3.51)$$

και τελικά η (3.48) γίνεται :  $(m_a \ddot{y} + b\dot{y} + \rho g S_w y)e^{-kD} = F_e$  (3.52)

ή ισοδύναμα :  $(m_a \ddot{y} + b\dot{y} + \rho g S_w y)e^{-kD} = F_E \cos(\omega t + \sigma)$  (3.53)

όπου :  $F_E = A e^{-kD} \sqrt{(\rho g S_w - m_a \omega^2)^2 + b^2 \omega^2}$  (3.54)

Η δύναμη  $F_e$  που υπεισέρχεται στην εξίσωση (3.52) είναι η δύναμη διέγερσης που αναλύθηκε προηγουμένως.

Η δύναμη αυτή βρίσκεται σε διαφορά φάσης με το κύμα :

$$\sigma = \tan^{-1} \frac{b\omega}{\rho g S_w - m_a \omega^2} \quad (3.55)$$

ωστόσο για μικρές τιμές των συχνοτήτων- $\omega$  το  $\sigma$  τείνει στο μηδέν.

Η τελική εξίσωση (3.52) αποτελεί και τη στοιχειώδη εξίσωση κινηματικής του μηχανισμού , ενώ ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο είναι πιο περίπλοκο, καθώς περιλαμβάνει και επιπλέον δυνάμεις, όπως θα φανεί στην συνέχεια. Παρόλα αυτά η διαφορική εξίσωση κίνησης, αν και πολύπλοκη, είναι απαλλαγμένη οριακών συνθηκών, μιας και το φαινόμενο το οποίο αναπαριστά είναι περιοδικό. Η τελική της επίλυση θα γίνει με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης και ανάπτυξη κώδικα σε γλώσσα Matlab (Mathworks Matlab & Simulink, 2015).



## Κεφάλαιο 4 : Μοντελοποίηση συστήματος

### Παράγραφος 1<sup>η</sup> : Κατάστροφη συστήματος εξισώσεων κίνησης

#### 4.1.1) Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η μοντελοποίηση του συστήματος, η μετάβαση δηλαδή από το πραγματικό μοντέλο του μηχανισμού στο μαθηματικό του ισοδύναμο το οποίο και θα επιλυθεί.

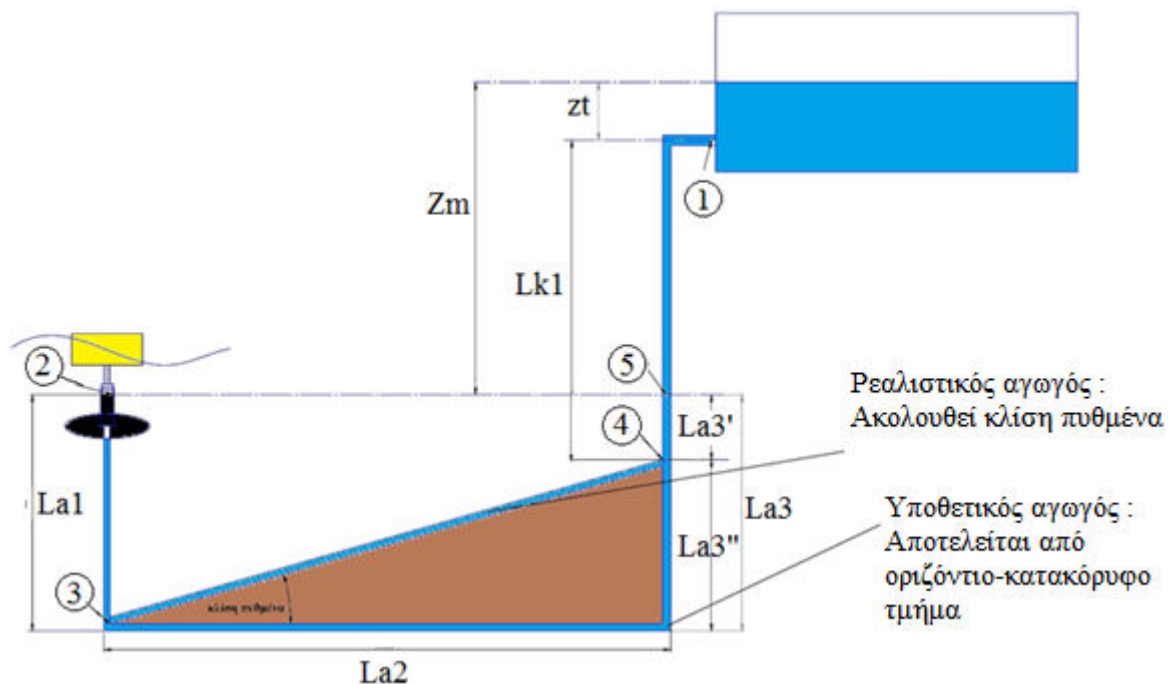
Η κίνηση του πλωτήρα θα θεωρηθεί ότι είναι μόνο κατακόρυφη. Πρόκειται για μία παραδοχή, καθώς το φυσικό φαινόμενο εξελίσσεται στον τρισδιάστατο χώρο, είναι μη μόνιμο και ιδιαίτερα δυναμικό. Πρωταρχικής σημασίας για την όσο δυνατόν καλύτερη «δέσμευση» αυτής της κατακόρυφης κίνησης είναι η μέθοδος αγκύρωσης που θα χρησιμοποιηθεί και ο σχεδιασμός της heave plate. Πρόκειται για ολόκληρη μελέτη, ενώ μερικά σημεία που χρειάστηκαν αποσαφήνιση στην λειτουργία της συσκευής και την δυναμική ανάλυση της heave plate, δόθηκαν κατά την περιγραφή της συσκευής. Στο σημείο αυτό αξίζει μόνο να αναφερθεί ότι οι σύγχρονες τεχνικές επιτρέπουν σε μεγάλο βαθμό την επίτευξη της μόνο κατακόρυφης κίνησης του επιπλέοντος στερεού.

Η κίνηση του πλωτήρα και κατ' επέκταση του διωστήρα και του εμβόλου, επομένως και της στήλης νερού που ακολουθεί, μπορεί να διακριθεί σε δύο φάσεις: πρώτη κατά την κάθοδο του πλωτήρα υπό την επίδραση της διέγερσης και κατά την οποία το ρευστό αντλείται με το άνοιγμα της αντίστοιχης βαλβίδας της παλινδρομικής αντλίας μονής ενέργειας και επομένως υπάρχει αλληλεπίδραση μηχανισμού και στήλης ρευστού, και δεύτερη κατά την ανοδική κίνηση του πλωτήρα υπό την επίδραση του κύματος, φάση στην οποία ανοίγει η βαλβίδα αναρρόφησης υπό την ανάστροφη κίνηση του εμβόλου. Στη φάση αυτή δεν υπάρχει επίδραση της αντίστασης της στήλης νερού επί του εμβόλου, καθώς η βαλβίδα εξαγωγής παραμένει κλειστή. Όπως αναμένεται και διαισθητικά, το σώμα θα παρασύρεται από το κύμα στην ανοδική του κίνηση σχετικά εύκολα, σε σύγκριση με την καθοδική του κίνηση, όπου μία επιπλέον αντίσταση κάνει την εμφάνισή της, αυτή της στήλης νερού, η οποία φυσικά λαμβάνεται υπόψιν και είναι αυτή που ευθύνεται για την μείωση του πλάτους ταλάντωσης στην κάθοδο.

Αφού λοιπόν πρώτα γίνουν κάποιοι απαραίτητοι γεωμετρικοί υπολογισμοί για την ρεαλιστικότερη μοντελοποίηση του συστήματος, θα γίνει εστίαση κατά περίπτωση στις δύο ευδιάκριτες φάσεις λειτουργίας: την ανοδική κίνηση και την καθοδική κίνηση-κίνηση άντλησης, οι οποίες θα μελετηθούν ξεχωριστά και στη συνέχεια θα είναι αυτές οι οποίες θα «τροφοδοτήσουν» τον αλγόριθμο επίλυσης. Κυρίαρχο ρόλο στους υπολογισμούς και τα τελικά αποτελέσματα διαδραματίζουν τα μεγέθη του προβλήματος που υπεισέρχονται είτε ως σταθερές είτε ως παράμετροι και θα πρέπει να καθοριστούν για τη μεν πρώτη περίπτωση οι τιμές τους, για την δε δεύτερη τα εύρη μεταβολής τους, στα όρια των οποίων θα γίνει η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού κατά την πορεία επίλυσης. Πληθώρα ανάλογων ερευνών υπάρχει στην διεθνή βιβλιογραφία στις οποίες ακολουθείται ανάλογη πορεία μοντελοποίησης (Erik Dölerud , 2012), (Griet De Backer, 2009), κυρίως σε ό,τι αφορά τη δυναμική ανάλυση .

#### 4.1.2) Γεωμετρικοί υπολογισμοί

Ο μηχανισμός θεωρείται ότι λειτουργεί σε βαθιά νερά, όπως αναλύθηκε κατά την κυματική θεωρία. Το μήκος κύματος για περίοδο 6sec, η οποία και επιλέγεται παρακάτω, είναι 56 m και λόγω της συνθήκης για βαθιά νερά,  $d/\lambda > 0,5$ , προκύπτει αναγκαίο βάθος 28 m τουλάχιστον. Θεωρείται βάθος 44 m στη θέση εγκατάστασης του μηχανισμού. Θεωρείται ότι οι μάζες που παλινδρομούν κατέρχονται σε βάθος 4 m, και αυτές είναι το βυθισμένο τμήμα του πλωτήρα, ο διωστήρας και το έμβολο, δηλαδή πρόκειται ουσιαστικά για τη στάθμη της θέσης του στομίου του αγωγού άντλησης. Επομένως  $La_1 = 40$  m. Υποτίθεται κλίση πυθμένα  $2^0$  και οριζόντια απόσταση μηχανισμού-ακτής περίπου  $La_2 = 440$  m. Επομένως  $La_3'' = 15,35$  m,  $La_3' = 40 - 15,35 = 24,65$  m. Επίσης η απόσταση (34) = 437 m περίπου.

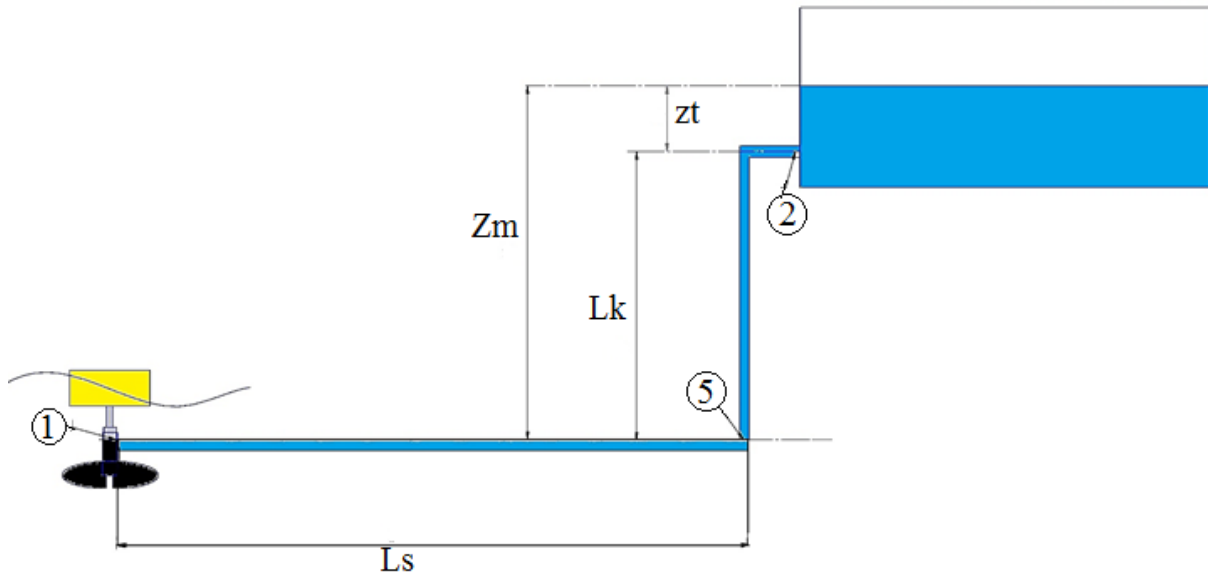


Σχήμα 4.1: Ρεαλιστική διάταξη συστήματος

Με βάση την εξίσωση Bernoulli και γνωρίζοντας ότι η στάθμη των σημείων 2 και 5 είναι η ίδια, όλο το σύστημα σωληνογραμμής κάτω από την στάθμη του 2, δηλαδή το σύστημα 2-3-4-5, αν ήταν απομονωμένο και γεμάτο νερό, τότε η στήλη νερού θα ισορροπούσε (θεωρία ταλάντωσης μάζας σε υοειδή σωλήνα) (Παπαντώνης, 2013). Επομένως το σύστημα 2-3-4-5 ισοδυναμεί με οριζόντιο αγωγό μήκους  $L_s = 40 + 437 + 24,65 = 501,6$  m, έστω δηλαδή 500 m οριζόντιο αγωγό που ενώνει τα σημεία 2-5. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται και με εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli μεταξύ των σημείων: Περιβάλλον-1, 1-5, 5-4, 4-3, 3-2, 2-Περιβάλλον. Έγινε η υπόθεση σταθερής ταχύτητας στον αγωγό και γι' αυτό αμελήθηκαν οι όροι μεταβολής της κινητικής ενέργειας. Ο όρος επιτάχυνσης που εμφανίζεται στην εξίσωση για την περίπτωση της μη μόνιμης ροής μοντελοποιείται κανονικά παρακάτω για το απλοποιημένο σχέδιο της διάταξης. Ακόμη το σύστημα του ρεαλιστικού αγωγού είναι σχεδόν ισοδύναμο με το σύστημα του υποθετικού αγωγού, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπως προκύπτει και πάλι με εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli για τα σημεία 3-4. Η μόνη διαφορά που εντοπίζεται αφορά τις συνολικές υδραυλικές απώλειες λόγω διαφορετικής γεωμετρίας και ολικού μήκους αγωγού.

Επομένως αυτό που τελικά ενδιαφέρει είναι η διαφορά στάθμης εμβόλου και ταμιευτήρα, δηλαδή η  $Z_m$ .

Με αυτό τον τρόπο το σύστημα απλοποιείται στο παρακάτω, το οποίο στη συνέχεια μοντελοποιείται μαθηματικά και τελικά επιλύεται:



Σχήμα 4.2: Απλοποιημένη διάταξη συστήματος

Αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας υπολογισμού ήταν η εύρεση του μήκους  $L_s$  του ισοδύναμου οριζόντιου αγωγού της απλοποιημένης διάταξης, το οποίο και υπολογίστηκε ίσο με 500 m για επιλογή θέσης μηχανισμού σε οριζόντια απόσταση 400 m από την ακτή και τη θέση του ταμιευτήρα. Ο υπολογισμός του ολικού μήκους έγινε συναρτήσει βάθους και κλίσης πυθμένα. Οι τιμές των μεγεθών επιλέγονται τυχαία βάσει ρεαλιστικών τιμών. Σε κάθε περίπτωση μελέτης η διαδικασία είναι η ίδια, σαφώς πολυπλοκότερη, όταν οδεύουν προς πειραματική επαλήθευση και εγκατάσταση, και η διαδικασία μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης θα πρέπει να γίνεται από την αρχή.

### 4.1.3) Κοινά φορτία

Κατά την ανοδική κίνηση του συστήματος ανοίγει η αντεπίστροφη βαλβίδα εισαγωγής υπό τη διαφορά πίεσης στις δύο πλευρές της θυρίδας της (κλαπέτου) και την ανάστροφη κίνηση του εμβόλου, και νερό πληρώνει τον κύλινδρο της αντλίας, ενώ κατά την καθοδική κίνηση κλείνει η βαλβίδα εισαγωγής και ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής-κατάθλιψης υπό την πίεση του νερού εντός του κυλίνδρου λόγω της κίνησης-εξώθησης του εμβόλου. Πέρα από τις ήδη αναλυθείσες δυνάμεις λόγω αλληλεπίδρασης πλωτήρα και κύματος, στο μηχανισμό αναπτύσσονται και επιπλέον φορτία.

Δύναμη βάρους μηχανισμού :

Εκτός από το βάρος του πλωτήρα που αναλύθηκε προηγουμένως, αναπτύσσεται και το φορτίο βάρους των υπόλοιπων εξαρτημάτων του μηχανισμού (διωστήρας, έμβολο, πείροι σύνδεσης, εάν υπάρχουν). Η επιλογή υλικών και οι κατασκευαστικές διαστάσεις τους είναι στην περίπτωση του συγκεκριμένου μηχανισμού νόμισμα με δύο όψεις, καθώς κατά την ανοδική κίνηση θέλουμε ελαχιστοποίηση του βάρους τους, ενώ κατά την κάθοδο τους επιθυμούμε μέγιστη δύναμη βαρύτητας για επίτευξη καλύτερων συνθηκών άντλησης. Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψιν και ο διαβρωτικός χαρακτήρας του εργαζόμενου μέσου, του θαλασσινού νερού. Ο «πρωταγωνιστής» στην επιστήμη των υλικών για παρόμοιες εφαρμογές τα τελευταία χρόνια είναι το Carbon Reinforced PEEK (Polyetheretherketone), το οποίο λόγω του αντιδιαβρωτικού χαρακτήρα και της υψηλής αντοχής του επιλέγεται και στη συγκεκριμένη περίπτωση για την κατασκευή του εμβόλου και του διωστήρα.

$$\text{Όγκος κυλίνδρου : } V = \pi r^2 L$$

$$\text{Διωστήρας : Κυλινδρικός } L_{\delta}, d_{\delta}, \text{ GRP } (\rho = 1,85 \text{ gr/cm}^3)$$

$$\text{Έμβολο : Κυλινδρικό } L_{\epsilon}, d_{\epsilon}, \text{ CFRP } (\rho = 1,41 \text{ gr/cm}^3)$$

$$\text{Βάρος } \Delta, E : W_{\Delta, E} = W_{\Delta} + W_E = \rho_{CFRP} g (V_{\Delta} + V_E)$$

Στη διαδικασία επίλυσης οι διάμετροι και τα μήκη αποτελούν τις παραμέτρους βελτιστοποίησης του σχεδιασμού του μηχανισμού. Θεωρούμε σε πρώτη φάση το βάρος  $W_{\Delta, E}$  ως υποπολλαπλάσιο του βάρους του πλωτήρα, που είναι και το κυρίαρχο. Η επίδραση του βάρους τόσο της συσκευής όσο και του περιεχόμενου νερού για βύθιση υπεισέρχεται στη δύναμη διέγερσης  $F_e$  και άνωσης  $F_b$  και στους υπολογισμούς ως ολική μάζα της συσκευής.

Μηχανική τριβή  $F_{fm}$  :

Οι συνολικές απώλειες λόγω τριβών των κινούμενων μερών του μηχανισμού (πλωτήρας, έμβολο, σφαιρικές αρθρώσεις, εδράσεις, βαλβίδες) ανέρχονται σε ποσοστό 10% της συνολικής ισχύος εισόδου μέσω του κύματος. Ποσοστό περίπου 5-7% οφείλεται στην υδροδυναμική τριβή ρευστού-πλωτήρα. Το υπόλοιπο ποσοστό είναι οι μηχανικές τριβές και μπορεί να μειωθεί με χρήση κατάλληλων μη διασπώμενων και μη διαλυόμενων λιπαντικών, καθώς και με την χρήση ελατηρίων (rings) μεταξύ εμβόλου και κυλίνδρου για την επίτευξη τόσο της στεγάνωσης και της λίπανσης όσο και της μείωσης της επιφάνειας τριβής μεταξύ εμβόλου και κυλίνδρου. Γίνεται φανερό ότι οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις μηχανικής τριβής αποτελούν πολύ μικρά μεγέθη και μπορούν χωρίς μεγάλο σφάλμα να αμεληθούν.

Δυνάμεις αγκύρωσης -  $F_u$  :

Στην πραγματικότητα αναπτύσσονται φορτία λόγω της αγκύρωσης στη διεύθυνση κίνησης που μελετάται, αλλά λόγω της σημαντικής προόδου στις τεχνικές και τα συστήματα αγκύρωσης τα τελευταία χρόνια είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι η κίνηση του πλωτήρα κατά μία επιθυμητή διεύθυνση, εδώ κατά τον z-άξονα, είναι απαλλαγμένη από τέτοια φορτία.

**4.1.4) Περίπτωση 1<sup>η</sup> : Ανοδική κίνηση εμβόλου**

Το κύμα παρασύρει κινούμενο προς το όρος του και τον μηχανισμό. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι οι ήδη αναλυθείσες δυνάμεις αλληλεπίδρασης ρευστού-συστήματος καθώς και όσες ακολουθούν :

Δύναμη υποπίεσης κατά την αναρρόφηση :

Η ταχύτητα με την οποία το έμβολο σαρώνει την επιφάνεια του κυλίνδρου κατά την ανοδική του κίνηση, δηλαδή η ταχύτητα με την οποία απελευθερώνεται χώρος για πλήρωση από το νερό, καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του κύματος. Η ταχύτητα με την οποία το νερό πληρώνει τον κύλινδρο καθορίζεται από το βάθος στο οποίο βρίσκεται η θυρίδα εισαγωγής, δηλαδή ουσιαστικά από την υδροστατική πίεση που επικρατεί στο περιβάλλον της βαλβίδας, και από το άνοιγμα της θυρίδας. Οι ταχύτητες ωστόσο απελευθέρωσης και πλήρωσης του χώρου του κυλίνδρου πρακτικά δεν είναι ίσες. Λόγω λοιπόν αυτής της διαφοράς αναπτύσσεται υποπίεση και επομένως δύναμη που αντιστέκεται στην κίνηση του εμβόλου. Ωστόσο, η δύναμη αυτή είναι πολύ μικρού μεγέθους, εφόσον το νερό εισρέει στον κύλινδρο της αντλίας λόγω της διαφοράς πίεσης περιβάλλοντος-εσωτερικού του κυλίνδρου και όχι λόγω της ανάστροφης κίνησης του εμβόλου, όπως συμβαίνει σε κυλίνδρους κινητήρων όπου επιβάλλεται η βεβιασμένη πλήρωση με νέα γόμωση. Πρακτικά εδώ μπορεί να αμεληθεί με πάρα πολύ μικρό σφάλμα.

Υδροδυναμική τριβή -  $F_f$  :

Πρόκειται για τη δύναμη τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ του ρευστού που πληρώνει τον κύλινδρο και των τοιχωμάτων αυτού. Τριβές αναπτύσσονται στο στόμιο εισόδου - εντοπισμένης μορφής απώλειες (μεταβολή διαμέτρου) - καθώς και στα τοιχώματα του κυλίνδρου λόγω της ανοδικής κίνησης του νερού που πληρώνει τον κύλινδρο (pipe friction losses- απώλειες σε σωλήνωση). Ουδεμία είναι η επίδραση των μεγεθών αυτών επί της ανοδικής

κίνησης του συστήματος, καθώς, όπως γίνεται φανερό αμέσως παρακάτω, το νερό πληρώνει τον κύλινδρο ελεύθερα και όχι επειδή «έλκεται» από την ανάστροφη κίνηση του εμβόλου.

Δύναμη αναπτυσσόμενη από την εισερχόμενη στήλη νερού –  $F_w$  :

Όπως έχει ήδη τονιστεί, εφόσον η αντλία είναι βυθισμένη εξ ολοκλήρου στο νερό, τότε λόγω της διαφοράς πίεσης που επικρατεί στο περιβάλλον της και το εσωτερικό της, όταν αυτό είναι κενό, μόλις απελευθερωθεί η βαλβίδα εισαγωγής από το έμβολο, αυτή ανοίγει υπό την επίδραση της υδροστατικής πίεσης του περιβάλλοντος και ρευστό εισέρχεται ελεύθερα στον κύλινδρο. Καμία δύναμη δεν αναπτύσσεται επί του εμβόλου και συνεπώς επί του πλωτήρα λόγω του εισερχόμενου στον κύλινδρο νερού.

Τελική εξίσωση κίνησης για την ανοδική κίνηση του πλωτήρα :

$$m_{tot} \ddot{z} = F_e + F_r + F_b + F_v + F_f + F_w + F_u \quad (4.1)$$

$$m_{tot} = m_{\text{πλωτήρα}} + m_{\text{εμβόλου}} + m_{\text{διωστήρα}} \quad (4.2)$$

$$F_f = F_w = F_u = 0 \quad (4.3)$$

$$\text{άρα} \quad (m_{tot} + m_a) \ddot{z} = -b\dot{z} - \frac{1}{2} \rho C_d S_w |\dot{z}| \dot{z} - \rho g S_w z + F_e \quad (4.4)$$

#### 4.1.5) Περίπτωση 2<sup>η</sup> : Καθοδική κίνηση εμβόλου

Στη φάση αυτή το έμβολο σαρώνει τον κύλινδρο με την καθοδική του κίνηση (downstroke), η πίεση εντός του κυλίνδρου αυξάνει και ως αποτέλεσμα κλείνει η βαλβίδα εισαγωγής και ανοίγει η βαλβίδα κατάθλιψης μέσω της οποίας το νερό ωθείται στο σύστημα αγωγών που οδηγούν στον ταμιευτήρα. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στην κατακόρυφη διεύθυνση και επομένως επηρεάζουν την κίνηση, είναι οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης πλωτήρα-κύματος, καθώς και οι ακόλουθες:

Υδροδυναμική τριβή –  $F_f$  :

Αμελητέες όμως δεν είναι και σε αυτή την περίπτωση οι αναπτυσσόμενες τριβές υδροδυναμικής φύσεως. Η θεωρούμενη στήλη νερού αναγκάζεται υπό την δράση του εμβόλου να κινηθεί εντός συστήματος αγωγών μεγάλου μήκους. Αν και θεωρήθηκε στην ανάπτυξη της θεωρίας Airy ιδανικό ρευστό, στο σημείο αυτό θα ληφθούν υπόψη οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ ρευστού και τοιχωμάτων των σωληνώσεων. Οι απώλειες αυτές περιλαμβάνουν τις γραμμικές απώλειες στον αγωγό, καθώς και τις εντοπισμένες απώλειες στα διάφορα στοιχεία της σωλήνωσης και συγκεκριμένα: στο στόμιο της βαλβίδας κατάθλιψης λαμβανόμενο ως μεταβολή της διαμέτρου, στις γωνίες της τροχιάς του αγωγού, καθώς και σε όργανα μέτρησης που μπορεί να παρεμβάλλονται (Μαθιουλάκης Δ. Σ. , Αναγνωστόπουλος Ι. Σ. , Τουζόπουλος Δ. Γ., 2006). Οι εντοπισμένες αυτές απώλειες χαρακτηρίζονται από ένα τοπικό συντελεστή απωλειών  $\zeta_i$  και μπορούν να αναχθούν σε γραμμικές μέσω ενός ισοδύναμου μήκους αγωγού. Οι συνολικές προκύπτουν ως γραμμικές στο συνολικό μήκος του αγωγού, στο άθροισμα δηλαδή του πραγματικού μήκους του και των ι-ισοδύναμων μηκών των εντοπισμένων απωλειών.

$$\text{Γραμμικές απώλειες : } \delta p_f = l_f \frac{8L\rho Q^2}{\pi^2 d_a^5} \quad (4.5)$$

$$\text{Αναγωγή εντοπισμένων απωλειών σε ισοδύναμες γραμμικές : } L_{is} = \frac{\zeta d_a}{l_f} \quad (4.6)$$

$$\text{Ολικές απώλειες : } \delta p_{tot} = l_f \frac{8 (\sum L_{is(i)} + L_{αγωγού}) \rho Q^2}{\pi^2 d_a^5} \quad (4.7)$$

$$\text{Δύναμη τριβής επί του εμβόλου : } F_f = \delta p_{tot} A_e \quad (4.8)$$

όπου  $l_f$  : ο συντελεστής τριβής

$d_a$  : η εσωτερική διάμετρος του αγωγού

Η ροή του θαλασσινού νερού στους 20 °C είναι τυρβώδης, όπως θα φανεί και στη συνέχεια, και ο υπολογισμός των τοπικών  $\zeta_i$  γίνεται με χρήση πινάκων της βιβλιογραφίας. Για σχεδιασμό σωλήνωσης μορφής του πραγματικού δικτύου της εικόνας (4.1) προκύπτουν οι εξής εντοπισμένες απώλειες και συντελεστές απωλειών αντίστοιχα:

- Μεταβολή διαμέτρου στο στόμιο εισόδου του αγωγού κωνικής διαμόρφωσης :  $\zeta_1=0.2$
- Μεταβολή της κατεύθυνσης της ροής σε γωνίες :
- Οξεία γωνία (λεία)  $70^\circ$  με καμπύλη :  $\zeta_2=0.15$
- Αμβλεία γωνία (λεία)  $110^\circ$  με καμπύλη :  $\zeta_3=0.2$
- Στρογγυλεμένη λεία ορθή γωνία  $90^\circ$  :  $\zeta_4=0.2$
- Μεταβολή διαμέτρου στο στόμιο εξόδου του αγωγού:  $\zeta_5=0.2$
- Παρεμβολή μετρητικών οργάνων και διατάξεων(μανόμετρα, φίλτρα κ.λπ.) :  $\zeta_6=3.0$

$$\text{Υπολογίζεται το ολικό πρόσθετο μήκος αναγωγής : } L_{is} = \frac{\zeta_{tot} d_a}{l_f} \quad (4.9)$$

Δύναμη αντίστασης λόγω στήλης νερού :

Πρόκειται για μία ακόμη δύναμη αντίστασης που δρα στο σύστημα και βασικό παράγοντα της τελικής ενεργειακής απόδοσης. Ακολουθεί η συλλογιστική πορεία διατύπωσης της μαθηματικής της έκφρασης (Παπαντώνης, 2008).

*Παραδοχές :*

- Ασυμπίεστο ρευστό (με πολύ καλή προσέγγιση αφού πρόκειται για νερό)
- Κυλινδρικός ταμιευτήρας γεμάτος νερό στάθμης  $Z_2$  και εσωτερικής διαμέτρου  $d_\tau$ .
- Διαδρομή εμβόλου (απόσταση ΑΝΣ-ΚΝΣ)  $h_\kappa$  εκφρασμένη ως αξιοποιήσιμο ύψος του κυλίνδρου της αντλίας και όγκος εμβολισμού :

$$V_\varepsilon = \frac{\pi d_\varepsilon^2}{4} h_\kappa \quad (4.10)$$

- Η στάθμη του ταμιευτήρα παραμένει σταθερή
- Αργή μεταβολή: ισχύει η θεωρία συμπαγούς στήλης νερού
- Στόμιο αναρρόφησης και στόμιο εισαγωγής στον ταμιευτήρα πολύ κοντά στον αντίστοιχο πυθμένα, δηλαδή πρακτικά η βύθιση των στομιών ισούται με την αντίστοιχη στάθμη.

*Εξίσωση συνέχειας*

Για τη διατομή εμβόλου και τη διατομή του αγωγού ισχύει :

$$A_\varepsilon U_\varepsilon = A_\alpha U_\alpha \quad (4.11)$$

$$\text{όπου } U_\varepsilon = \frac{dz_\varepsilon}{dt} = \dot{z} \quad (4.12)$$

$$\text{άρα } U_\alpha = \dot{z} \frac{A_\varepsilon}{A_\alpha} = \dot{z} \frac{d_\varepsilon^2}{d_\alpha^2} \quad (4.13)$$

*Εξίσωση Bernoulli*

Για μη μόνιμη ροή λαμβάνει την παρακάτω μορφή :

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho} + g(z_2 - z_1) + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + \int_1^2 \frac{du}{dt} ds = 0 \quad (4.14)$$



όπου ο δείκτης 1 αναφέρεται στη θέση του εμβόλου και ο δείκτης 2 στη θέση του ταμιευτήρα ενώ

$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} \rightarrow 0 \quad (4.15)$$

Επομένως :

$$P_\varepsilon = P_\tau + \rho g (z_\tau + L_k - z_\varepsilon) + \rho L_a \frac{du_\alpha}{dt} \quad (4.16)$$

Ενώ, αν ληφθούν υπόψη και οι απώλειες λόγω υδροδυναμικής τριβής που αναφέρθηκαν, η εξίσωση γίνεται :

$$P_\varepsilon = P_\tau + \rho g (z_\tau + L_k - z_\varepsilon) + \rho L_a \frac{du_\alpha}{dt} + \delta p_{tot} \quad (4.17)$$

και ισχύει  $z_\varepsilon = h_k - z$  η στάθμη του εμβόλου,

όπου  $h_k$  η διαδρομή του εμβόλου, ενώ  $L_k$  είναι το μήκος του κατακόρυφου τμήματος του αγωγού.

Παραγωγίζοντας την (4.13) προκύπτει:

$$\frac{du_\alpha}{dt} = \ddot{z} \frac{d_\varepsilon^2}{d_\alpha^2} \quad (4.18)$$

Επίσης η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια του πλωτήρα αποκαθίσταται και στο εσωτερικό του κυλίνδρου της αντλίας κατά την είσοδο του νερού επομένως τελικά :

$$P_\varepsilon = \rho g (z_\tau + L_k - z_\varepsilon) + \rho L_a \frac{du_\alpha}{dt} + \delta p_{tot} \quad (4.19)$$

Η δύναμη αντίστασης που ασκείται στο έμβολο λόγω της στήλης νερού ισούται λοιπόν με

$$F_\varepsilon = P_\varepsilon A_\varepsilon \quad (4.20)$$

Η στάθμη εντός του κυλίνδρου της αντλίας είναι ποσότητα αμελητέα σε σύγκριση με τα μεγέθη  $L_k$  και  $Z_\tau$ , γι' αυτό και θεωρούμε μια μέση στάθμη

$$Z_m = Z_\tau + L_k \quad (4.21)$$

εφόσον φυσικά η στάθμη του πλωτήρα θεωρείται σταθερή παράμετρος του προβλήματος και αμετάβλητη κατά την λειτουργία του συστήματος.

Τελική εξίσωση κίνησης για την καθοδική κίνηση του πλωτήρα :

$$m_{tot} \ddot{z} = F_e + F_r + F_b + F_v + F_\varepsilon + F_u \quad (4.22)$$

$$m_{tot} = m_{\pi\lambda\omega\tau\eta\rho\alpha} + m_{\varepsilon\mu\beta\acute{o}\lambda\omicron\upsilon} + m_{\delta\iota\omega\sigma\tau\eta\rho\alpha} \quad (4.23)$$

$$F_u = 0 \quad (4.24)$$

άρα 
$$\ddot{z}(m_{tot} + m_\alpha) = -b\dot{z} - \frac{1}{2}\rho C_d S_w |\dot{z}|\dot{z} - \rho g S_w z + F_e - P_\varepsilon A_\varepsilon \quad (4.25)$$

$$\ddot{z}\left(m_{tot} + m_\alpha - \rho L_\alpha A_\varepsilon \frac{d_\varepsilon^2}{d_\alpha^2}\right) = -b\dot{z} - \frac{1}{2}\rho C_d S_w |\dot{z}|\dot{z} - \rho g S_w z + F_e - \rho g Z_m A_\varepsilon - \delta p_{tot} A_\varepsilon \quad (4.26)$$

#### 4.1.6) Τελικό σύστημα εξισώσεων

Κατά την επίλυση του προβλήματος αριθμητικά σε περιβάλλον Matlab , κομβικής σημασίας είναι ο καθορισμός της κατεύθυνσης κάθε δύναμης ανάλογα με τη φάση στην οποία βρίσκεται το σύστημα. Το τελικό σύστημα διατυπώνεται ως εξής, με ιδιαίτερη προσοχή στη σήμανση των δυνάμεων:

Ανοδική κίνηση

$$(m_{tot} + m_\alpha) \ddot{z} = F_E \cos(\omega t) - b\dot{z} - \frac{1}{2}\rho C_d S_w |\dot{z}|\dot{z} + \rho g S_w (z_{wave} - z) \quad (4.27)$$

Καθοδική κίνηση

$$\ddot{z}\left(m_{tot} + m_\alpha + \rho L_\alpha A_\varepsilon \frac{d_\varepsilon^2}{d_\alpha^2}\right) = F_E \cos(\omega t) - b\dot{z} - \frac{1}{2}\rho C_d S_w |\dot{z}|\dot{z} + \rho g S_w (z_{wave} - z) - \rho g Z_m A_\varepsilon - \delta p_{tot} A_\varepsilon \quad (4.28)$$

Η διέγερση προσημαίνεται προφανώς ως θετική, ενώ οι αντιστάσεις της οπισθέλκουσας, της ακτινοβολίας, της στήλης νερού και των συνολικών γραμμικών απωλειών του αγωγού , όπως δηλώνει και ο όρος αντιστάσεις, υπεισερχονται με αρνητικό πρόσημο. Η άνωση, ως φυσικό επακόλουθο έχει φορά προς τα πάνω και προσημαίνεται ανάλογα. Ωστόσο, όταν το κύμα κατέλθει κάτω από τη στάθμη ισορροπίας του σώματος, δηλαδή :  $(z_{wave} - z) < 0$ , τότε δεν πρόκειται για άνωση με φορά προς τα πάνω, αλλά για ποσοστό του βάρους του σώματος με προς τα κάτω φυσικά φορά. Η ανάγκη για την με αυτό τον τρόπο μοντελοποίηση της άνωσης είναι λοιπόν προφανής.

## Παράγραφος 2<sup>η</sup> : Προσδιορισμός σταθερών μεγεθών

### 4.2.1) Υδροδυναμικά χαρακτηριστικά και περιβαλλοντικές συνθήκες

Στο σύστημα των παραπάνω εξισώσεων κίνησης του μηχανισμού υπεισέρχεται πληθώρα συντελεστών και μεγεθών. Ορισμένα από αυτά θα θεωρηθούν αμετάβλητα κατά την μελέτη τόσο γιατί μπορεί να υπακούν σε φυσικούς νόμους που επιβάλλουν την μη μεταβολή τους, όσο κι επειδή οι τυχόν μεταβολές και τα λάθη που επάγονται και διαχέονται με τη θεώρησή τους ως αμετάβλητων ποσοτήτων είναι μικρής σημασίας για τη συγκεκριμένη μελέτη από την οπτική του μηχανολόγου μηχανικού (Μαθιουλάκης Δ. Σ. , Αναγνωστόπουλος Ι. Σ. , Τουζόπουλος Δ. Γ., 2006)

Στο σημείο αυτό θα προσδιοριστούν λοιπόν οι αμετάβλητες ποσότητες που εντοπίζονται στις εξισώσεις κίνησης.

*Εργαζόμενο μέσο: Θαλασσινό νερό 20°C,*

$$\text{Ατμοσφαιρική πίεση : } P_{atm} = 101325 \text{ N / m}^2$$

$$\text{Πυκνότητα ρευστού : } \rho = 1025 \text{ kg / m}^3$$

$$\text{Επιτάχυνση βαρύτητας : } g = 9,81 \text{ m / s}^2$$

$$\text{Κινηματική συνεκτικότητα ρευστού : } \nu = 1,05 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

*Αριθμός Reynolds ροής :*

Το αναπτυσσόμενο πεδίο ταχύτητας κυμαίνεται στα 2 m/s και η διάμετρος του αγωγού στα 0,5m. Επομένως :  $R_e = 10^6$

*Απόλυτη τραχύτητα αγωγού :*

Για σωλήνα εξελάσεως χωρίς ραφή από πλαστικό, νέο και με τεχνητή λείανση είναι  $\varepsilon = 0,002$

Συντελεστής γραμμικών απωλειών :

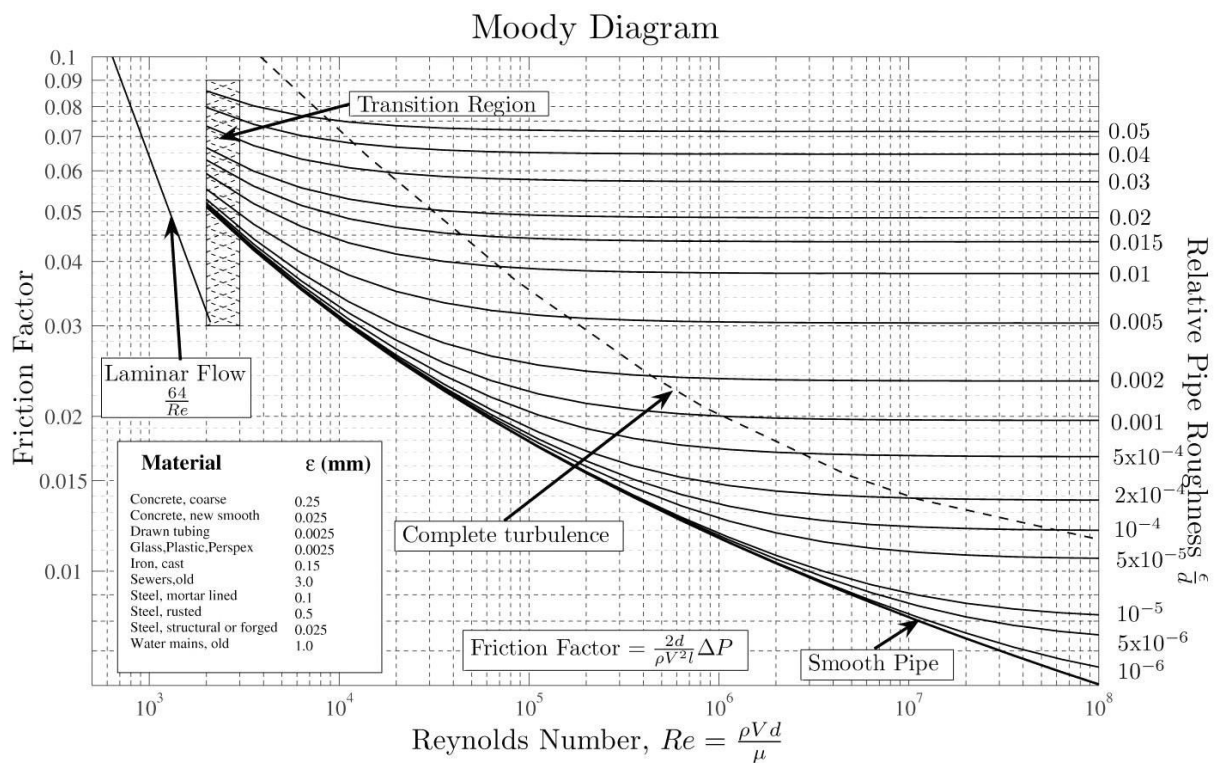
Υπολογίζεται είτε αριθμητικά μέσω της σχέσης :

$$\text{Colebrook-White} : \frac{1}{\sqrt{l_f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{l_f}} \right) \quad (4.28)$$

με επαναλήψεις μέχρι συγκλίσεως της μεθόδου θεωρώντας ως τιμή εκκίνησης για ταχύτερη σύγκλιση του αλγόριθμου την τιμή που πρότεινε ο Moody :

$$\lambda = 0,0055 + 0,15 \sqrt[3]{\varepsilon} \quad (4.29)$$

Θα μπορούσε να προσδιοριστεί και γραφικά από το διάγραμμα Moody που ακολουθεί.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα Moody (Πηγή: Wikipedia)

Τελικά προσδιορίζεται ότι μια καλή προσέγγιση της μέσης τιμής του συντελεστή γραμμικών απωλειών για τα δεδομένα μεγέθη είναι  $l_f = 0,025$ .

*Συντελεστής αντίδρασης:*

Κυλινδρικός πλωτήρας,  $R_e = 10^6$  και από το σχήμα (3.4) προσδιορίζεται:  $C_d = 0,5$

*Συντελεστής πρόσθετης μάζας:*

Προσεγγίζεται με μικρό σφάλμα και μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά αμετάβλητος. Για κυλινδρικά σώματα κυμαίνεται από 0,5 μέχρι 1,10, όπως φαίνεται και στον Πίνακα I.2 του Παραρτήματος I, και για την περίπτωση ανοιχτής βαθιάς θάλασσας είναι μικρότερος της μονάδας. Επιλέγεται με καλή προσέγγιση για κυλινδρική γεωμετρία πλωτήρα  $C_A = 1$ .

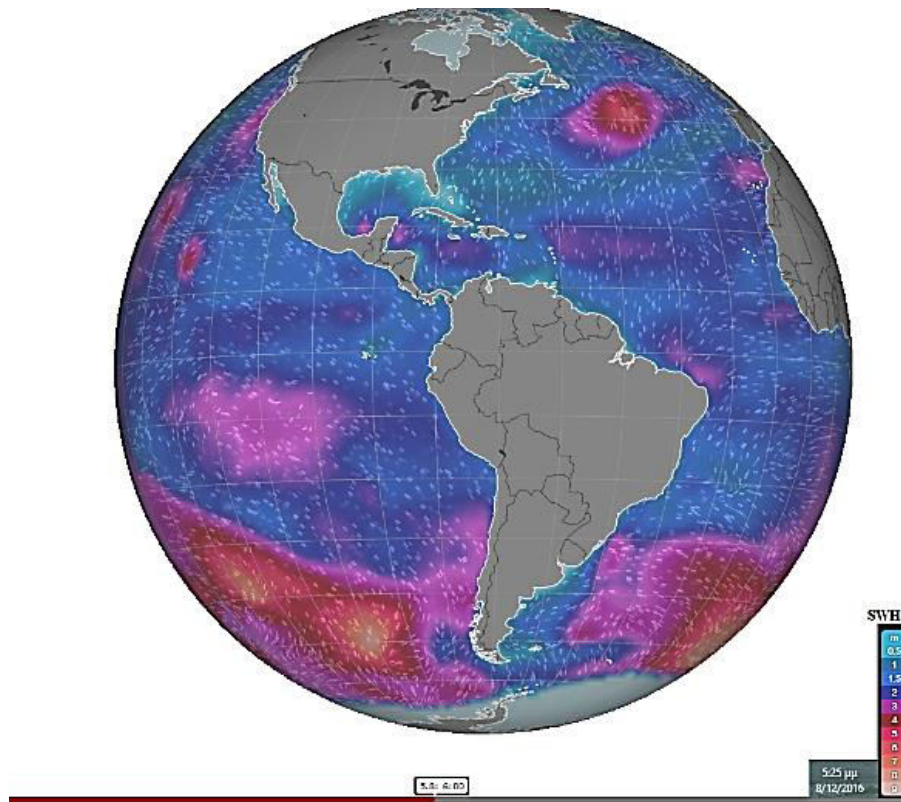
*Ολικός συντελεστής τριβής εντοπισμένων απωλειών:*

Αναφέρθηκε παραπάνω ο ορισμός και ο προσδιορισμός των επιμέρους συντελεστών. Άρα:  $\zeta_{tot} = 3,95$ .

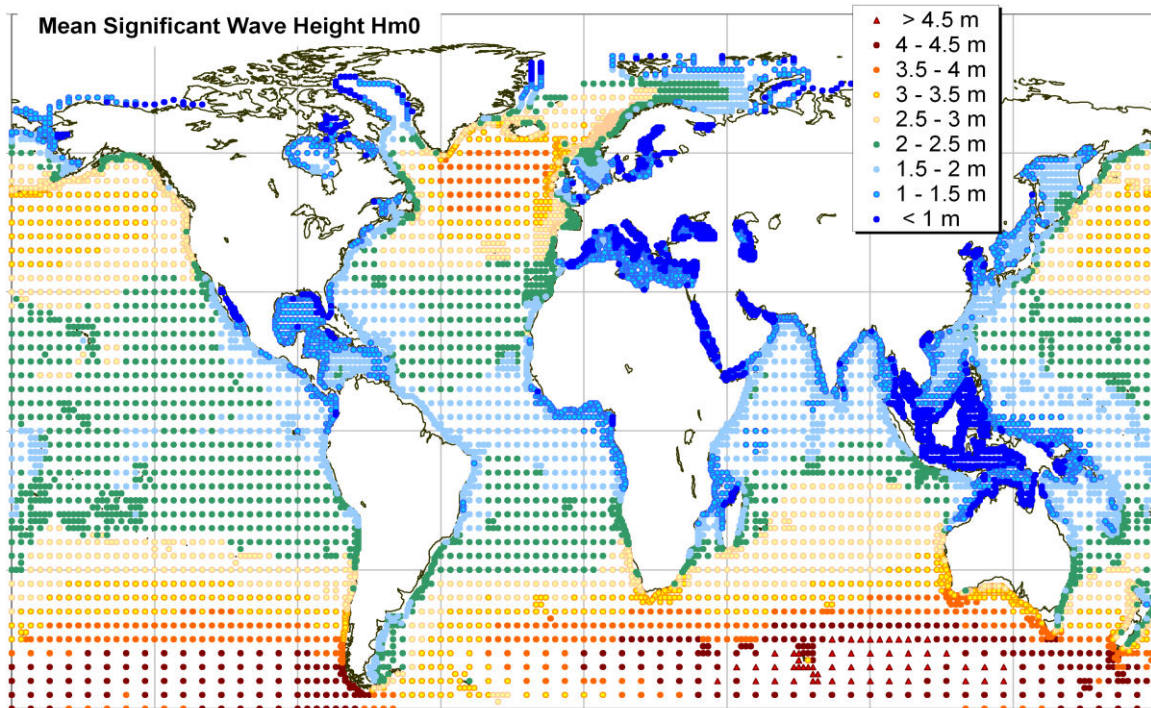
Η γεωμετρία του πλωτήρα που επιλέχθηκε είναι απλή κυλινδρική, ενώ σε πραγματικές εφαρμογές επιδιώκεται βελτιστοποίηση της απόδοσης και ελαχιστοποίησης του κόστους, γεγονός που οδηγεί σε συνθετότερες γεωμετρίες (Chris Blommaert, 2009). Συνήθως προτιμάται γεωμετρία ημισφαιρίου ή σύνθετη κωνική με στόχο την μεγιστοποίηση της επιφάνειας του πλωτήρα που βρίσκεται στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας για την καλύτερη δέσμευση της διεγείρουσας δύναμης.

#### **4.2.2) Κυματικά δεδομένα**

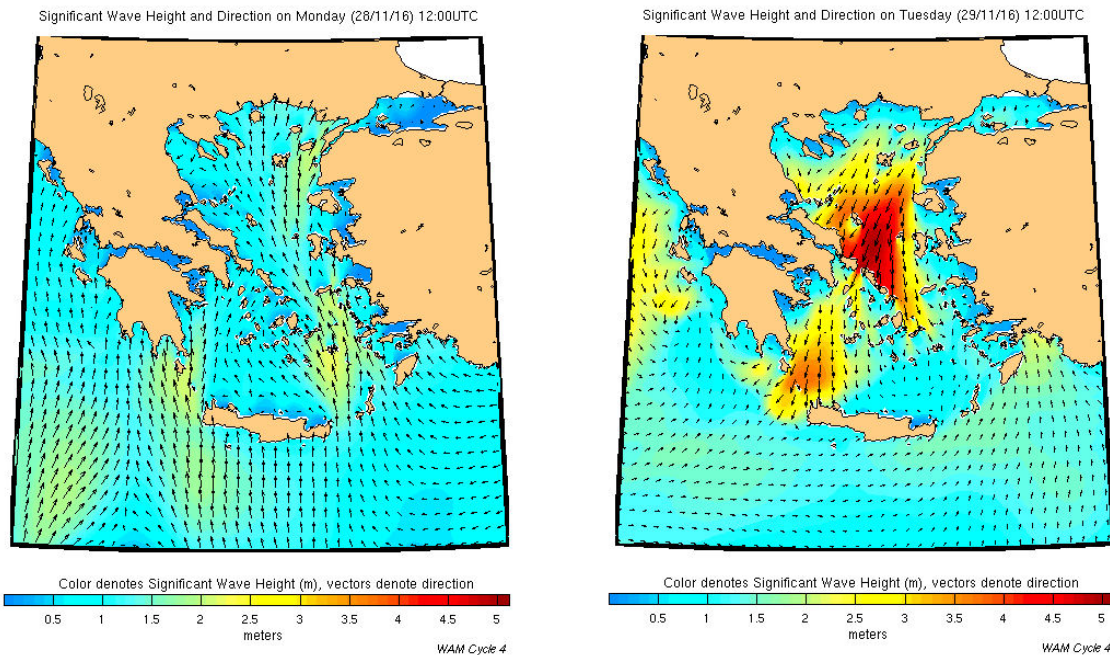
Σε ό,τι αφορά τον ελλαδικό χώρο είναι διαθέσιμοι χάρτες κυματικών συνθηκών, όπως αυτοί που ακολουθούν, καθώς και online συνδέσεις με ενημερώσεις πραγματικού χρόνου, όπως το Σύστημα Ποσειδών και το Windyty για την εύρεση δεδομένων που αφορούν το ύψος κύματος.



Σχήμα 4.4: Στιγμιότυπο SWH από Windyty (5:25pm 8-12-2016)



Σχήμα 4.5: Μέσο σημαντικό ύψος κύματος (mean SWH)(m) (1997-2006).  
(Πηγή ECMWF/WAM model calibrated and corrected by Fugro OCEANOR)



Σχήμα 4.6: Στιγμιότυπα SWH στον ελλαδικό χώρο (Πηγή: Poseidon system)

Η περίοδος κυμαίνεται για τις ελληνικές θάλασσες σε ποσοστό άνω του 99% μεταξύ 2-10 sec, ενώ περίοδοι 7-8 sec συναντώνται πολύ σπάνια. Στην παρούσα μελέτη επιλέγεται  $T=7$  sec, ενώ το πλάτος του κύματος μπορεί να εκτιμηθεί από χάρτες ανάλογους με τους παραπάνω, για έντονα φαινόμενα, σε περίπου  $A=1,8$  m . Να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο ύψος κύματος που έχει παρατηρηθεί στις ελληνικές θάλασσες είναι 15 m μεταξύ Ρόδου και Καρπάθου. Στην περίπτωση εγκατάστασης σε ωκεανό οι περίοδοι αυξάνονται σε μέσες τιμές των 8-10 sec, ενώ το μέσο ύψος είναι μεταξύ 4-5 m . Μια πιο ακριβής μελέτη σχεδιασμού που περιλαμβάνει χρονοσειρές κυματικού πλάτους για συγκεκριμένη τοποθεσία θα γίνει και στην παρούσα εργασία σε επόμενο κεφάλαιο.

Επίσης σε ό,τι αφορά τα κυματικά χαρακτηριστικά από τους ακόλουθους τύπους υπολογίζονται μεγέθη που μετέχουν στους υπολογισμούς :

$$\text{Γωνιακή συχνότητα } \omega : \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\text{Μήκος κύματος } \lambda : \quad \lambda = g \frac{T^2}{2\pi}$$

$$\text{Κυματάριθμος } \kappa : \quad \kappa = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega^2}{g}$$

### 4.2.3) Τοπογραφικά δεδομένα

Η τοπογραφία της περιοχής εγκατάστασης επιβάλλει τις τιμές των παρακάτω μεγεθών:

- Επιτάχυνση βαρύτητας :  $g = 9,81(m / s^2)$
- Μήκος οριζόντιου αγωγού  $L_s$  : Υπολογίστηκε στην ενότητα (4.1.2) ίσο με 500 m .
- Μήκος κατακόρυφου αγωγού  $L_k$  : Αφήνεται ως παράμετρος, και αναλύεται στην ενότητα (4.2.4) .

Συνοπτικά λοιπόν οι σταθερές που υπεισέρχονται στο σύστημα των εξισώσεων είναι:

*Πίνακας 4.1: Σταθερές παράμετροι προβλήματος*

$g=9,81$	Επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m/s^2$ )
$\rho=1025$	Πυκνότητα ρευστού ( $kg/m^3$ )
$P_{atm}=101325$	Ατμοσφαιρική πίεση( $N/m^2$ )
$L_f=0,025$	Συντελεστής τριβής
$L_s=500$	Ολικό μήκος ευθύγραμμου αγωγού(θέση μηχανισμού) (m)
$C_d=0.5$	Συντελεστής αντίστασης
$C_A=1$	Συντελεστής πρόσθετης μάζας
$Z_{tot}=3,95$	Ολικός συντελεστής εντοπισμένων απωλειών
$T=7$	Περίοδος κύματος (sec)
$A=1,8$	Πλάτος κύματος (m)
$w=(2\pi)/T$	Γωνιακή συχνότητα κύματος (rad/sec)
$k=(\omega^2)/g$	Κυματάριθμος ( $m^{-1}$ )



#### 4.2.4) Προσδιορισμός κατασκευαστικών και λειτουργικών παραμέτρων

Ο κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων έχει μορφή που επιτρέπει τον καθορισμό των παραμέτρων και του εύρους κάθε μίας από αυτές σε αρχικό στάδιο. Ο τελικός σκοπός είναι η επίτευξη της σχεδιαστικής και λειτουργικής βελτιστοποίησης του μηχανισμού με αποτέλεσμα και την μεγιστοποίηση της αποθηκευόμενης στον ταμιευτήρα ενέργειας. Στην επόμενη παράγραφο θα γίνει αναλυτική περιγραφή της συλλογιστικής πορείας που ακολουθήθηκε τόσο κατά την γραφή του κώδικα όσο και κατά τη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας που μελετάται. Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει καθορισμός του εύρους μεταβολής κάθε παραμέτρου, μια προς μια, με βάση τρέχουσα project παρόμοιας τεχνολογίας ανά την υφήλιο.

Το μέγεθος κάθε παραμέτρου, με κατάλληλο scaling και των υπολοίπων, μπορεί να κινείται σε ένα ευρύ φάσμα τιμών, το οποίο ενίοτε μπορεί να είναι και υπερβολικό και να οδηγεί σε αποτελέσματα να μην ευσταθή και λογικά από αριθμητικής απόψεως, ωστόσο δύσκολα επιτεύξιμα κατασκευαστικά ή ασύμφορα οικονομικά. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η επιλογή μίας μάζας συσκευής αρκετών δεκάδων τόνων οδηγεί σε παράλογα απαιτούμενα βυθίσματα από τη μία, ενώ αυτή η υπερδιαστασιολόγηση δίνει την «ευκαιρία» και σε άλλες κατασκευαστικές παραμέτρους, όπως η διάμετρος του πλωτήρα, να κυμανθούν σε πολύ υψηλές τιμές. Επομένως οι παράμετροι και το εύρος τους για τη συγκεκριμένη μελέτη καθορίζονται βάσει τιμών σε λογικά πλαίσια και μεγεθών ανάλογων των μεγεθών παρόμοιων εφαρμογών ανά τον κόσμο. Ο εκάστοτε χρήστης όμως μπορεί με τον κώδικα να ελέγξει και τιμές που αποκλίνουν σημαντικά από αυτό το εύρος ανάλογα με την περίπτωση σχεδιασμού στην οποία εστιάζει το ενδιαφέρον του.

Η επιλογή του εύρους διακύμανσης κάθε παραμέτρου για τη διαδικασία βελτιστοποίησης έγινε με βάση δοκιμές επί του προγράμματος ENALIOS.m για διάφορα set-παραμέτρων. Η τελική επιλογή του εύρους είναι ελεύθερη, καθώς η δομή του προγράμματος, με χρήση κατάλληλων κριτηρίων, απορρίπτει μη αποδεκτές λύσεις-προτάσεις κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

mtot : Ολική μάζα συσκευής (kg)

Στις ταλαντευόμενες μάζες του μηχανισμού συγκαταλέγονται ο πλωτήρας, ο διωστήρας σύνδεσης, το έμβολο και οι μεταξύ τους συνδέσεις, καθώς και το εμπεριεχόμενο νερό. Η μάζα των μηχανικών μερών αποτελεί πολύ βασική παράμετρο, καθώς επηρεάζει άμεσα την κίνηση του μηχανισμού και την αποδοτικότητά του. Σε πολλές εφαρμογές ίδιας φιλοσοφίας και αρχών μία επιπλέον μάζα από χυτοσίδηρο τάξης μεγέθους μερικών δεκάδων κιλών προσκολλάται στο κάτω μέρος του πλωτήρα για καλύτερη ευστάθεια.

Με βάση λοιπόν τη σύγχρονη τεχνολογία και προηγμένα υλικά μια πρώτη προσέγγιση του εύρους μεταβολής της μάζας των μηχανικών μερών mtot είναι μεταξύ 3 -20 tn . Προσδιορίζεται ακολούθως η πρόσθετη μάζα  $m_a = CA \cdot m_{tot}$ , όπου  $CA=1$  αντίστοιχα σε εύρος 3 -20 tn. Επομένως η ολική μάζα  $M = m_{tot} + m_a$  κυμαίνεται από 6 tn έως 40 tn .

dp : Διάμετρος πλωτήρα (m)

Πρακτικά μεγέθη της διαμέτρου του πλωτήρα είναι της τάξης των 2-4 m για μάζα που κυμαίνεται στα προαναφερθέντα όρια. Το αρχικό εύρος μεταβολής που επιλέχθηκε είναι από 1 m έως 4 m . Στην περίπτωση του κυλινδρικού πλωτήρα η διάμετρος του είναι καίρια παράμετρος, καθώς συνδέεται άμεσα με τη βρεχόμενη επιφάνεια και επομένως με την επιφάνεια αλληλεπίδρασης σώματος και ρευστού.

de : Διάμετρος εμβόλου (m)

Επιλέγεται διάμετρος εμβόλου που κυμαίνεται από 10cm μέχρι 100cm. Ως αντικείμενο έρευνας προτείνεται η μελέτη πιθανής τεχνολογίας προσαρμογής αυτής της διαμέτρου σε πραγματικό χρόνο (real time diameter adjustment) ανάλογα με τα ισχύοντα εκείνη τη χρονική στιγμή κυματικά δεδομένα.

da : Διάμετρος αγωγού (m)

Ο αγωγός κατάθλιψης θα έχει εσωτερική διάμετρο που περιορίζεται από το αναπτυσσόμενο πεδίο ταχυτήτων. Η διαδικασία επιλογής περιγράφεται παρακάτω. Συνοπτικά αναφέρεται ότι βάσει του μετώπου Pareto που προκύπτει στο πρώτο στάδιο βελτιστοποίησης και συνδέει παροχή με κόστος αγωγού, επιλέγεται η διάμετρος da. Η τελική τιμή που θα προκύψει μετά τη βελτιστοποίηση θα πρέπει να τυποποιηθεί σε τιμή που επιβάλλεται από διεθνή πρότυπα, αν και πάντα υπάρχει το σενάριο ενός custom made αγωγού, με την ανάλογη όμως αύξηση του κόστους. Το μήκος του  $L_s$  καθορίζεται από την τοπογραφία και θεωρείται σταθερό. Έπειτα, έχοντας ως σταθερό τον αγωγό, βελτιστοποιούνται και οι υπόλοιπες παράμετροι σχεδιασμού.

Η μέγιστη ταχύτητα εντός του αγωγού δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τα 5m/s στη μόνιμη κατάσταση , αν δηλαδή αγνοηθούν παροδικές μεγάλες ταχύτητες κατά τη μεταβατική απόκριση. Η παροχή καθορίζεται από την κίνηση του μηχανισμού και τις διαστάσεις του εμβόλου:  $Q = \dot{z} A_e$  και  $U_a = \dot{z} \frac{A_e}{A_a} = \dot{z} \frac{d_e^2}{d_a^2}$  άρα οριακά για  $U_a = 5 m/s$  και  $\dot{z} = 4 m/s$  , (ως εκτίμηση προς την πλευρά ασφαλείας) , προκύπτει  $d_a = 0.6 m$ , τονίζεται ως πρώτη εκτίμηση της.

Lk : Μήκος κατακόρυφου αγωγού (m)

Είναι ενδεικτικό μέγεθος του ποσού ενεργειακής αποθήκευσης που επιτυγχάνει ο μηχανισμός, καθώς, εφόσον ο πλωτήρας βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας, η υψομετρική διαφορά που καλείται να υπερνικήσει, είναι αυτή από τη στάθμη του κυλίνδρου της αντλίας μέχρι τη θέση του στομίου εισόδου στον ταμιευτήρα, και είναι αυτή η υψομετρική διαφορά που αντιστοιχεί στην υδατική πτώση του υδροστρόβιλου, ο οποίος ακολουθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μειωμένη κατά το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο κύλινδρος της αντλίας. Θεωρείται ότι ο υδροστρόβιλος βρίσκεται στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας. Ενδιαφέρει

να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, εφόσον φυσικά εξασφαλίζει την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Όριο της είναι η συνθήκη μηδενικής παροχής στον ταμιευτήρα. Προφανώς και η τιμή της καθορίζεται από την τοπογραφία της περιοχής.

Το συγκεκριμένο μέγεθος είναι δείκτης της ικανότητας του μηχανισμού να αντλεί νερό σε αυτό το ύψος και φυσικά καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την τοπογραφία της περιοχής και η δυνατότητα ανθρώπινης επέμβασης σε αυτό δεν ξεπερνά τα μερικά μέτρα με κατάλληλα έργα πολιτικού μηχανικού για χαμηλότερη υδροληψία του ταμιευτήρα από τον αγωγό άντλησης. Επομένως η παραμετροποίηση του  $L_k$  δεν γίνεται για λόγους βελτιστοποίησης του σχεδιασμού, αλλά για κάλυψη των διαφορετικών αποδόσεων της ίδιας συσκευής σε διαφορετικές μορφολογικά γεωγραφικές θέσεις. Θεωρητικά για κάθε διαφορετική θέση απαιτείται και εκ νέου μελέτη και βελτιστοποίηση. Ως τιμή του μεγέθους του αλγορίθμου δίνεται  $L_k=60$  m, τονίζεται και πάλι, όπως επιβάλλεται από την τοπογραφία της περιοχής .

#### $L_{is}$ : Ισοδύναμο μήκος για εντοπισμένες απώλειες

Καθορίζεται από τους επιμέρους συντελεστές των εντοπισμένων απωλειών της σωληνογραμμής, από τον συντελεστή γραμμικών απωλειών  $l_f$ , καθώς και από τη διάμετρο  $d_a$  του αγωγού κατάθλιψης με βάση τον τύπο :  $L_{is} = \frac{\zeta_{tot} d_a}{l_f}$  όπου η μοναδική παράμετρος είναι η  $d_a$ -διάμετρος του αγωγού. Η  $d_a$  εκτιμάται αρχικά σε 0.6 m επομένως για  $\zeta_{tot} = 3,95$  και  $l_f = 0,025$  συνάγεται ότι  $L_{is} = 94,8$  m .

#### $L_a$ : Ολικό μήκος αγωγού (m)

Είναι το άθροισμα του μήκους του ευθύγραμμου αγωγού, του μήκους του κατακόρυφου αγωγού και του ισοδύναμου μήκους του αγωγού :  $L_a=L_s+L_k+L_{is}$  και κατ' επέκταση καθορίζεται από τις παραμέτρους  $L_s$ ,  $L_k$  και  $L_{is}$  του αθροίσματος.

#### $z_t$ : Στάθμη ταμιευτήρα (m)

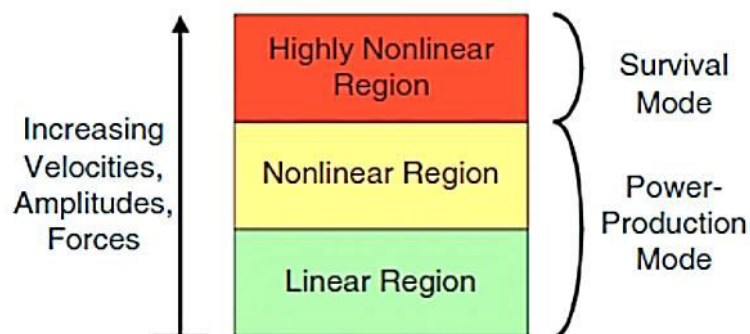
Η στάθμη του ταμιευτήρα θεωρούμε ότι παραμένει σταθερή κατά τη λειτουργία του συστήματος άντλησης ενός μόνο πλωτήρα. Ωστόσο η στάθμη η οποία τηρείται στον ταμιευτήρα επηρεάζει τη λειτουργία και αποτελεί και αυτή παράμετρο, καθώς μετέχει στον υπολογισμό της δύναμης αντίστασης λόγω της στήλης νερού κατά την καθοδική κίνηση που αποτελεί και την αντλητική φάση. Στην παρούσα μελέτη θεωρείται ότι η στάθμη διατηρείται στα 20 m . Σε συνδυασμό με το μήκος  $L_k$  του αγωγού , αν αμεληθεί η πολύ μικρή στάθμη στον κύλινδρο της αντλίας σχετικά με αυτά τα δύο μεγέθη, καθορίζουν την υψομετρική διαφορά και την αναπτυσσόμενη αντίσταση λόγω στήλης νερού που αναπτύσσεται κατά την καθοδική κίνηση του μηχανισμού.

D : Βύθισμα πλωτήρα (m)

Καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη διεγείρουσα δύναμη που επενεργεί στο σώμα . Προκύπτει από τη συνθήκη πλευσης του συστήματος, δηλαδή από την ανάγκη ισότητας βάρους και άνωσης ώστε αυτός να βρίσκεται σε κατάσταση αδιάφορης ισορροπίας, ούτε να βυθίζεται ούτε να ανέρχεται, όταν η θάλασσα ηρεμεί.

$$W = F_{buoy} \Rightarrow mg = \rho g SwH_p \quad (4.30)$$

όπου  $H_p$  είναι το ύψος του πλωτήρα. Σε κατάσταση λειτουργίας όμως το βύθισμα μεταβάλλεται λόγω άνισης και με διαφορά φάσης μετατόπισης συστήματος και κύματος. Η μεταβολή αυτή λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της δύναμης άνωσης αλλά και στη θέσπιση κριτηρίου για τη μη έξοδο του πλωτήρα από το νερό .Επίσης η επιλογή του  $H_p$ , κατασκευαστικά θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε ο πλωτήρας να μη βυθίζεται και πλήρως, διότι αλλάζει η δυναμική του συστήματος με την εμφάνιση πίεσης και στην άνω πλευρά του. Το ύψος  $H_p$  επιλέγεται ελεύθερα από τον μελετητή εντός του προγράμματος και μετέχει στον υπολογισμό κάποιων κατασκευαστικών και μόνο λεπτομερειών.



Σχήμα 4.7: Καταστάσεις λειτουργίας point absorber  
(Πηγή: IEEE Control Systems Magazine, 2014)

#### 4.2.5) Υπολογισμός διεγείρουσας δύναμης $F_e$

Ο υπολογισμός του πλάτους FE της διεγείρουσας συνάρτησης και του συντελεστή απόσβεσης  $b$  εξαρτάται από τις παραμέτρους σχεδίασης και αποτελούν και αυτά με την σειρά τους παραμέτρους του τελικού συστήματος. Ο υπολογισμός έγινε με χρήση κώδικα Matlab ενσωματωμένου στο τελικό πρόγραμμα. Η συλλογιστική πορεία που ακολουθήθηκε περιγράφεται στην παρούσα παράγραφο. Οι εξισώσεις από τις οποίες υπολογίστηκαν τα παραπάνω μεγέθη είναι :

$$m_a = C_A m_{tot} \quad (4.31)$$

$$C_A = 1 \quad (4.32)$$

$$b = \frac{\omega k}{2\rho g^2} \frac{f_e^2}{A^2} \quad (4.33)$$

$$F_e = F_E \cos(\omega t + \sigma) \quad (4.34)$$

όπου  $\sigma \rightarrow 0$  για τις  $\omega$  που αφορούν την συγκεκριμένη εφαρμογή

$$(m_a \ddot{y} + b\dot{y} + \rho g S_w y)e^{-kD} = F_e \quad (4.35)$$

Με αντικατάσταση του  $b$  στην (4.35) προκύπτει δευτεροβάθμια εξίσωση ως προς  $f_e$ , παραμετρική ως προς τον χρόνο και τις μεταβλητές  $m_a$ ,  $S_w$  και  $D$ . Με χρήση διπλού βρόχου υπολογίστηκε σε κάθε χρονική στιγμή- $i$  και για κάθε τιμή της παραμέτρου- $j$  η τιμή των  $m_a$ ,  $S_w$  και  $D$  και επομένως και των συντελεστών του  $f_e^2$ , του  $f_e$  και ο σταθερός όρος. Προέκυψαν λοιπόν  $j \times i$  τριάδες συντελεστών της εξίσωσης. Για κάθε μία από αυτές τις τριάδες συντελεστών βρέθηκαν οι 2-το πολύ λύσεις της εξίσωσης. Από αυτές επιλέχθηκαν οι ρεαλιστικές τιμές και έτσι στο σημείο αυτό είχε βρεθεί η δύναμη  $f_e$  για κάθε παράμετρο και κάθε χρονική στιγμή. Έπειτα βρίσκοντας το μέγιστο της  $f_e$  σε κάθε περίπτωση ( $j,i$ ) βρέθηκε το πλάτος της διεγείρουσας  $FE(j)$ . Φυσικό επακόλουθο είναι να προκύψουν τόσα πλάτη όσες και οι περιπτώσεις- $j$  των παραμέτρων. Τέλος για κάθε πλάτος  $FE$  υπολογίστηκε ο όρος

$$Constb(j) = \frac{\omega k}{2\rho g^2} \frac{F_E^2}{A^2} \quad (4.36)$$

ο οποίος δεν είναι άλλος παρά ο  $b$  χωρίς το συνημιτονικό όρο, δηλαδή :

$$b = Constb \cos^2(\omega t) \quad (4.37)$$

Ο υπολογισμός της δύναμης διέγερσης έγινε με την παραδοχή σταθερού βυθίσματος  $D$ . Αυτό ενδέχεται να μεταβάλλεται κατά τη λειτουργία του μηχανισμού λόγω ταυτόχρονης αλλά με διαφορά φάσης μετατόπισης συστήματος και μετατόπισης κύματος. Ωστόσο διαπιστώνεται εύκολα ότι μια μεταβολή του βυθίσματος της τάξης του 90% επιφέρει μεταβολή του πλάτους διέγερσης σε αύξηση κατά 18%. Επομένως ακόμη και στην ακραία αυτή περίπτωση γίνεται φανερή η δυνατότητα παραδοχής σταθερού πλάτους μόνο σε αυτή τη φάση, παραδοχή η ανάγκη της οποίας εντείνεται, αν ληφθεί υπόψη και το εκθετικά αυξημένο υπολογιστικό κόστος σε περίπτωση επίλυσης της παραπάνω εξίσωσης σε κάθε βήμα του αλγορίθμου για την εύρεση του εκάστοτε πλάτους διέγερσης και την έπειτα επίλυση του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων.

Με τον τρόπο αυτό τα μεγέθη  $FE$  και  $b$  έγιναν διαθέσιμα ως υπολογισμένες παράμετροι για την γραφή των διαφορικών εξισώσεων σε μορφή handle και την επίλυση του συστήματος με Runge Kutta 4<sup>th</sup> Order (Γιαννάκογλου Κ. Χ., Αναγνωστόπουλος Ι. Σ., Μπεργελές Γ. 2003).

## Παράγραφος 3<sup>η</sup> : Ενεργειακός Ισολογισμός

### 4.3.1) Ενέργεια δέσμευσης

Στην παράγραφο (3.1.4) δόθηκε ο μαθηματικός τύπος υπολογισμού της ενέργειας του κύματος. Η ροή ενέργειας του κύματος, η οποία δηλώνει τη μεταφερόμενη ισχύ ανά μέτρο κυματομετώπου, αποτελεί το βασικό κριτήριο ενεργειακής αξιολόγησης και ταξινόμησης των κυμάτων, υπολογίζεται δε ως :

$$J = \rho g^2 T_E \frac{H^2}{32\pi} \quad (4.38)$$

όπου υπενθυμίζεται ότι  $T_E = \frac{T}{2}$  η περίοδος της ενέργειας.

Αυτό το ποσό ισχύος λοιπόν γίνεται διαθέσιμο προς αξιοποίηση από τον πλωτήρα. Η πραγματική ισχύς που παρέχεται στο σύστημα είναι :

$$P_{WAVE} = J dp \quad (4.39)$$

καθώς η ροή ισχύος είναι ανηγμένη σε μονάδες μήκους, επομένως πρέπει να πολλαπλασιαστεί με την αντίστοιχη διάσταση του προσβαλλόμενου από το κύμα πλωτήρα, δηλαδή τη διάμετρό του.

Η ενέργεια που λαμβάνει ο πλωτήρας σε κάθε περίοδο αποτελεί το άθροισμα της δυναμικής και της κινητικής του ενέργειας κάθε στιγμή. Γνωρίζοντας ότι το σύστημα σε ταλάντωση ακινητεί στις δύο ακραίες θέσεις του, η ενέργειά του υπολογίζεται ως δυναμική ενέργεια από το Κάτω Νεκρό Σημείο (Lower Dead Point) μέχρι το Άνω Νεκρό Σημείο (Upper Dead Point), θεωρώντας ως επίπεδο μηδενικής δυναμικής ενέργειας την επιφάνεια της ήρεμης θάλασσας, στην οποία και η κατακόρυφη μετατόπιση του πλωτήρα θεωρείται μηδενική. Επομένως :

Η υψομετρική διαφορά των ακροτάτων μετατοπίσεων του πλωτήρα (m) :

$$DH = UDP + |LDP| \quad (4.40)$$

$$\text{Δυναμική ενέργεια πλωτήρα σε μία περίοδο (J)} : E_p = m_{tot} g DH \quad (4.41)$$

$$\text{Ισχύς του πλωτήρα σε μία περίοδο (W)} : P_p = \frac{E_p}{T} \quad (4.42)$$

### 4.3.2) Ενέργεια αποταμίευσης

Το ποσό της ενέργειας που δεσμεύει ένα ελεύθερο πλεύσιμο σώμα είναι σαφώς μικρότερο από το παρεχόμενο ποσό ενέργειας από το κύμα. Στη συγκεκριμένη όμως διάταξη, πέρα από τις αντιστάσεις λόγω αλληλεπίδρασης σώματος και ρευστού, αναπτύσσονται δύο ακόμη δυνάμεις επί του κινούμενου συστήματος. Αυτές είναι η αντίσταση της στήλης νερού και η μοντελοποίηση των γραμμικών απωλειών στον αγωγό ως δύναμης αντίστασης επί του εμβόλου και επομένως και επί του πλωτήρα. Αυτές μετέχουν στην κατάστρωση των εξισώσεων δυναμικής και επομένως το ποσό της ενέργειας που δεσμεύει ο πλωτήρας είναι μικρότερο από αυτό που θα δέσμευε απομονωμένος από τον αγωγό άντλησης.

Ο ενεργειακός ισολογισμός λοιπόν μεταξύ πλωτήρα και κύματος φέρει και απώλειες, ενώ αντίθετα ο ισολογισμός μεταξύ πλωτήρα και ταμιευτήρα, λόγω μοντελοποίησης, δεν έχει απώλειες. Επομένως, όση ενέργεια καταφέρνει να δεσμεύσει ο πλωτήρας με το σύνολο των αντιστάσεων να δρουν σε αυτόν, γίνεται διαθέσιμη και στον ταμιευτήρα.

Η ενέργεια αυτή είναι ουσιαστικά η ικανότητα του μηχανισμού να αντλεί νερό σε κάποια υψομετρική ανύψωση με κάποια περιοδική συνάρτηση παροχής, ανάλογη της περιοδικής κίνησης του μηχανισμού και συγκεκριμένα της ταχύτητάς του,

$$Q_i = \dot{z} A_e = U_a A_a \quad (4.43)$$

όπως προκύπτει από την εξίσωση συνέχειας μεταξύ εμβόλου και αγωγού.

Από τη γραφική παράσταση της παροχής υπολογίζεται ολοκληρωτικά ο συνολικός όγκος νερού που αποθηκεύεται στον ταμιευτήρα σε κάποιο χρονικό διάστημα. Έπειτα η μέση παροχή προκύπτει με διαίρεση του ολικού όγκου αποταμιευόμενου νερού προς το χρονικό διάστημα που αυτός επετεύχθη. Στόχος, όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, είναι ο σχεδιασμός για βελτιστοποίηση αυτής της μέσης παροχής, άρα και της ενέργειας που αποταμιεύεται. Σημαντικό κριτήριο ωστόσο παραμένει η ανάγκη διατήρησης της ταχύτητας στον αγωγό κάτω από την τιμή των 5m/s, με την εκτίμηση αυτή να είναι ιδιαίτερα υψηλή και επικίνδυνη για την ανάπτυξη έντονων μεταβατικών φαινομένων εντός του αγωγού με αποτέλεσμα την μείωση της διάρκειας ζωής του.

### 4.3.3) Βαθμός απόδοσης

Η απόδοση του συστήματος, το λεγόμενο efficiency, αποτελεί δείκτη αξιολόγησης της ικανότητάς του να δεσμεύσει ενέργεια και πόσο αποτελεσματικά μπορεί να το κάνει. Όλες οι ενεργειακές συναλλαγές χαρακτηρίζονται από ανάλογους βαθμούς στηριζόμενους στην ίδια φιλοσοφία.

Ειδικά για της συσκευές μετατροπής της κυματικής ενέργειας ο αντίστοιχος δείκτης ονομάζεται Ρυθμός Δέσμευσης Πλάτους (Capture Width Ratio –CWR) με μονάδες μήκους (m). Δηλώνει το μήκος κυματομετώπου που μεταφέρει ενέργεια ίση με αυτή που αποθηκεύει το σύστημα. Για καλύτερη κατανόηση στον αλγόριθμο υπολογίζεται και χρησιμοποιείται ως CWR ο παραπάνω με μία μετατροπή:

$$CWR = 100 \frac{P_P}{P_{WAVE}} \quad (4.44)$$

ώστε να δηλώνει ως αδιάστατος αριθμός το ποσοστό επί τοις εκατό (%) της ενέργειας του κύματος που δεσμεύεται από το σύστημα.

Στην ιδεατή αντιμετώπιση του δυναμικού φαινομένου του κυματισμού ως αρμονικής συνάρτησης σταθερού πλάτους και περιόδου, ο συντελεστής αυτός αναμένεται ιδιαίτερα υψηλός. Στην πραγματικότητα όμως αυτό δε συμβαίνει με αποτέλεσμα συσκευές σε πραγματικές συνθήκες να φθάνουν σε efficiency μέγιστο 50% , ενώ συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 30-40% .

#### 4.3.4) Συνθήκες συντονισμού

Η μέγιστη απορρόφηση ισχύος για αρμονικό κύμα από τον πλωτήρα συμβαίνει μόνο όταν βρίσκεται σε συντονισμό με την διεγείρουσα δύναμη. Η συχνότητα συντονισμού είναι :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\rho g S_W}{m + m_a}} \quad (4.45)$$

και η μέγιστη ισχύς που απορροφά ο πλωτήρας :

$$P_{\max} = \frac{F_e^2}{8b} \quad (4.46)$$

Ορίζεται το θεωρητικό πλάτος μέγιστης απορρόφησης  $L_{\max}$  για συμμετρικό σώμα ως το πηλίκο της μέγιστης ισχύος απορρόφησης προς τη ροή ενέργειας και εκφράζει το μήκος κύματος σε μέτρα το οποίο πολλαπλασιαζόμενο με το κυματικό δυναμικό  $J$ (kW/m) δίνει την ίδια ισχύ απορρόφησης με το συμμετρικό σώμα.

$$L_{\max} = \frac{P_{\max}}{J} = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (4.47)$$

Τα επιθυμητά σε αυτή την εφαρμογή φαινόμενα συντονισμού όμως είναι αρκετά σπάνια και έτσι οι κατά τόπους συσκευές λειτουργούν σε υποπολλαπλάσια της μέγιστης ισχύος. Τα τελευταία χρόνια γίνεται διαρκής έρευνα μεθόδων επίτευξης συντονισμού για μεγιστοποίηση



της ισχύος απορρόφησης με μηχανισμούς απόσβεσης ή ενίσχυσης της παλινδρομικής κίνησης του πλωτήρα και ελέγχου της διαφοράς φάσης μεταξύ συστήματος και κύματος (Hydraulic Power Take Off systems-PTOs) (Gunnar Steinn Asgeirsson, 2013) .

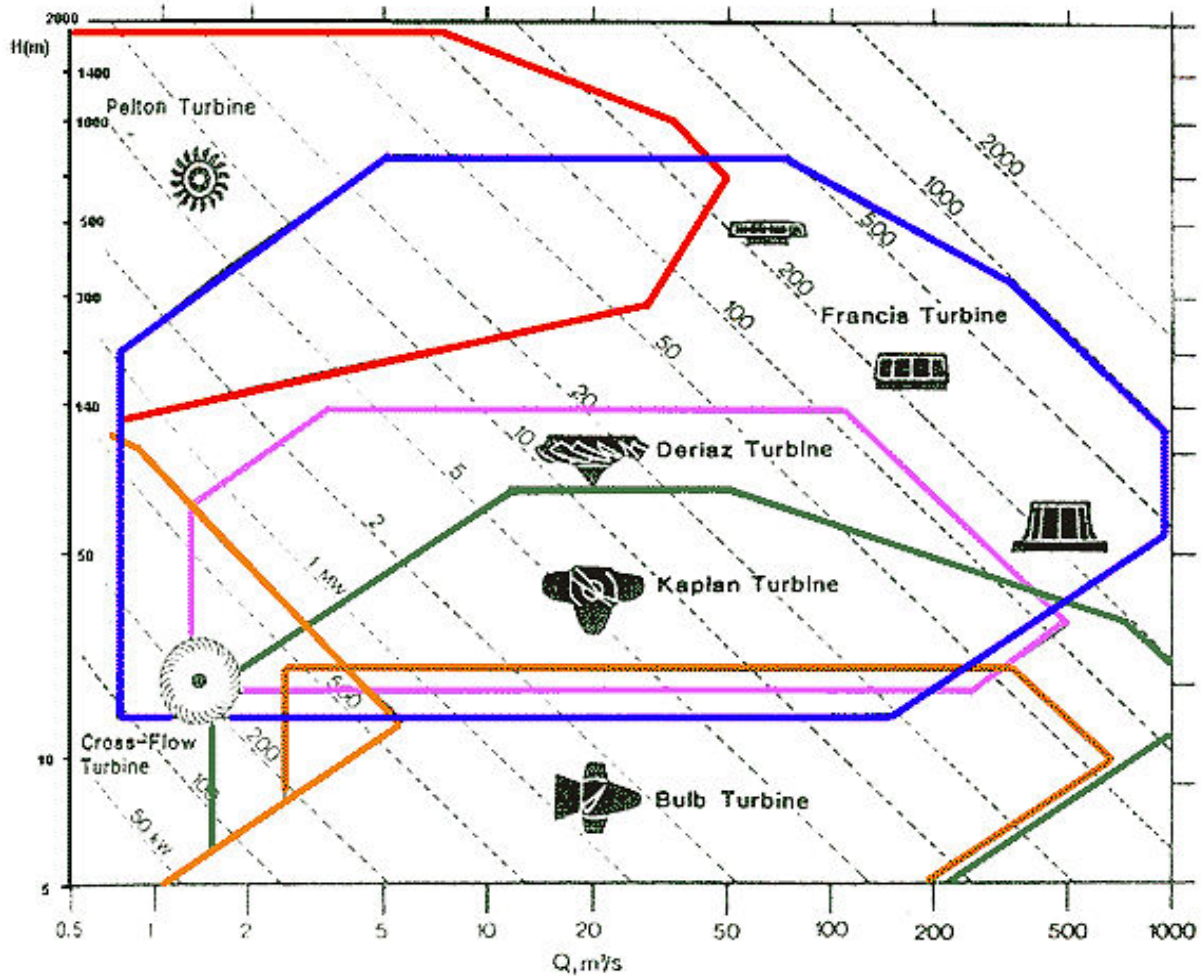
#### 4.3.5) Επιλογή μονάδας παραγωγής ισχύος

Η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στον ταμιευτήρα είναι διαθέσιμη για παραγωγή ηλεκτρισμού οποιαδήποτε στιγμή παρουσιαστεί ανάγκη. Η ικανότητα απόδοσης ισχύος τη στιγμή της ζήτησης, το σύστημα δηλαδή Make To Order, αποτελεί ισχυρό πλεονέκτημα τέτοιων μονάδων, έχοντας ως αποτέλεσμα οι περισσότερες να οργανώνονται ως μονάδες αιχμής. Στην περίπτωση αυτή το κυματικό πάρκο αποτελείται από λιγότερες σε αριθμό συσκευές, οι οποίες «οδηγούν» ενέργεια στον ταμιευτήρα και από εκεί στον υδροστρόβιλο, όποτε είναι αναγκαίο. Σε περίπτωση οργάνωσης ως μονάδας βάσης, τότε απαιτείται τέτοιος αριθμός συσκευών ώστε να αντλείται τόσο νερό όσο οδηγείται στον Υ/Σ κάθε στιγμή.

Στην περίπτωση μονάδας βάσης επιλέγεται υδροστρόβιλος ανάλογα με τη διαθέσιμη υδατική πτώση και την επιθυμητή παραγόμενη ισχύ. Ο αριθμός των συσκευών καθορίζεται από την ανάγκη ισότητας εισερχόμενου και εξερχόμενου νερού στον ταμιευτήρα ως το πηλίκο της ονομαστικής παροχής προς τον υδροστρόβιλο προς τη μέση παροχή κάθε συσκευής.

Στην περίπτωση μονάδας αιχμής τότε επιλέγεται μεγαλύτερης ισχύος υδροστρόβιλος, ικανός να καλύψει τις απότομες ανάγκες ζήτησης του δικτύου. Επιλέγεται βάσει και πάλι της διαθέσιμης υδατικής πτώσης και της ονομαστικής παροχής.

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διαγράμματα κατασκευαστών και εταιρειών για την επιλογή υδροστροβίλου, όπως αυτό του σχήματος 4.8 της Escher Wyss. Η τελική επιλογή στηρίζεται όχι μόνο σε ενεργειακά δεδομένα και αξιολογήσεις αλλά και σε πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κατά κατηγορία υδροστροβίλου και φυσικά σε οικονομικά κριτήρια (Παπαντώνης, 2009).



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα επιλογής υδροστροβίλου (Πηγή: Escher Wyss)

#### 4.3.6) Κυματικό πάρκο

Προφανώς, όταν γίνεται μελέτη εγκατάστασης και λειτουργίας τέτοιων συσκευών, όταν πρόκειται για παραγωγή ισχύος και όχι πειραματική μελέτη, αυτή γίνεται σε ευρεία κλίμακα της τάξεως μερικών εκατοντάδων ή έστω αρκετών δεκάδων όμοιων συσκευών.

Ορθός τρόπος μελέτης και βελτιστοποίησης είναι η μελέτη κυματικών δεδομένων της περιοχής ενδιαφέροντος για τη διάρκεια αρκετών, περίπου πέντε με δέκα, ετών, ώστε να αξιολογηθεί με ασφάλεια το ικανό κυματικό δυναμικό της. Έπειτα παράγεται μία χρονοσειρά σημαντικού ύψους κύματος και περιόδου. Σε αυτές διακριτοποιείται η διάρκεια του έτους, ο οριζόντιος δηλαδή άξονας, και σε κάθε διάστημα εντοπίζεται μία μέση τιμή ύψους και περιόδου στα αντίστοιχα διαστήματα. Για τα διακριτά αυτά ζεύγη κυματικών δεδομένων υπολογίζεται ο όγκος νερού που αντλείται και στο τέλος αθροίζονται όλοι όσοι προέκυψαν από κάθε υποδιάστημα. Στη συνέχεια γίνεται βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της συσκευής για τη συγκεκριμένη περιοχή και καθορίζεται το είδος της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος με την επιλογή του υδροστροβίλου. Τέλος καθορίζεται ο αριθμός των αναγκαίων συσκευών, όπως αυτός καθορίζεται μέσω των σχημάτων πρόβλεψης της ηλεκτρικής ζήτησης του δικτύου

διασύνδεσης. Σε πιο απλοϊκή μελέτη απλά υποτίθεται ένα θεωρητικό σενάριο λειτουργίας και γίνεται κατά ανάλογο τρόπο η διαστασιολόγηση του πάρκου. Αξίζει να επισημανθεί και εδώ ότι ο τρόπος διάταξης των συσκευών αποφέρει σημαντικό ενεργειακό όφελος λόγω επίτευξης καλύτερης ενεργειακής συναλλαγής που οφείλεται σε σύνθετα φαινόμενα αλληλεπίδρασης γειτονικών πλωτήρων.

Η εγκατάσταση τέτοιων πάρκων θα μπορούσε υποθετικά να γίνει σε περιοχές όπου ήδη λειτουργούν αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά έργα, με σημαντική μείωση του κόστους, αφού ταμιευτήρας και υδροηλεκτρικός σταθμός υπάρχουν ήδη, στην περίπτωση πάντα ικανού κυματικού δυναμικού. Επίσης τελευταία γίνονται απόπειρες συνδυασμού υπεράκτιων συνδυασμένων αιολικών και κυματικών πάρκων με ιδιαίτερο ενδιαφέρον.



## Κεφάλαιο 5 : Αλγόριθμος

### Παράγραφος 1<sup>η</sup> : Πρόγραμμα Enalios.m

#### 5.1.1) Κώδικας Matlab

Η ανάλυση της χρονικής απόκρισης του συστήματος είναι ο βασικός στόχος της συγκεκριμένης μελέτης, καθώς στην δυναμική του συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά της στηρίζεται ο κάθε υπολογισμός-ισολογισμός που έγινε στην συνέχεια.

Η δυναμική ανάλυση οδήγησε σε ένα σύστημα δύο διαφορικών εξισώσεων, μία για την καθοδική κίνηση (downstroke) και μία για την ανοδική κίνηση (upstroke) του συστήματος. Στις εξισώσεις αυτές υπεισέρχονται διάφορα κατασκευαστικά και κυματικά δεδομένα-παράμετροι. Στον κώδικα που δημιουργήθηκε σε περιβάλλον προγραμματισμού Matlab, έγινε μερική παραμετροποίηση αυτών των εξισώσεων, όπως αναλύθηκε στο τρίτο κεφάλαιο. Το τελικό παραμετρικό σύστημα επιλέχθηκε να λυθεί με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης και συγκεκριμένα με Runge Kutta 4<sup>ης</sup> τάξης.

Τα κινηματικά μεγέθη που υπολογίστηκαν με αυτή την διαδικασία είναι η κατακόρυφη μετατόπιση και η παράγωγός της, δηλαδή η ταχύτητα του συστήματος. Η επιτάχυνση υπολογίστηκε με σχήμα ανάντι πεπερασμένων διαφορών πρώτης τάξης, δηλαδή με χρήση δύο γειτονικών τιμών ταχύτητας.

Η τελική μορφή του κώδικα δίδεται για πληρότητα στο Παράρτημα II, ενώ στο ίδιο παράρτημα θα δοθεί το λογικό διάγραμμα στο οποίο αυτός στηρίχτηκε. Ο πλήρης κώδικας συνοδεύεται από αναλυτικά σχόλια που θα βοηθήσουν στην προσπάθεια κατανόησης του από τον αναγνώστη. Δίνεται επίσης στο Παράρτημα II ο κατάλογος με όλες τις μεταβλητές που υπάρχουν στο πρόγραμμα. Αντιπροσωπευτικό το όνομά του, ENALIOS.m, που δηλώνει αυτόν που υπάρχει στη θάλασσα, όπως και η ενέργεια στην εκμετάλλευση της οποίας στοχεύει η συσκευή υπό μελέτη.

Κατά την διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν επίσης πολλές παραλλαγές του βασικού κώδικα, ειδικά στην διαδικασία βελτιστοποίησης όπου άλλαζαν οι στόχοι και οι παράμετροι. Στο Παράρτημα III μπορούν να βρεθούν οι βασικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν συνολικά, χωρίς όμως να παρατίθεται και η κάθε μία παραλλαγή αυτών για ευνόητους λόγους.

Η δημιουργία του προγράμματος αποτέλεσε την πιο κοπιαστική αλλά συγχρόνως και την πιο ουσιαστική διαδικασία κατά την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας. Αποτέλεσμα ήταν να εξασφαλισθεί μία ικανοποιητική ευελιξία ως προς την επιλογή του εύρους των παραμέτρων παράλληλα με ικανοποιητική ακρίβεια, καθιστώντας δυνατή την χρήση του για case study ανάλυση σε διαφορετικές συνθήκες κυματισμού και για διαφορετικά προτεινόμενα design συσκευής σημειακού απορροφητή.

Χρήση του έγινε κατά κόρον στην διαδικασία ελέγχου των ευρών διακύμανσης των παραμέτρων και στην παρουσίαση και αξιολόγηση της τελικής-βέλτιστης πρότασης σχεδιασμού.

Η δημιουργία του έγινε τμηματικά, όπως προχωρούσε και η μελέτη, με τον κατά περίπτωση και ανάγκη υπολογισμό μεγεθών που ενδιέφεραν στην εκάστοτε φάση, κάτι το οποίο είναι εμφανές στο λογικό διάγραμμα από την ευρεία χρήση ξεχωριστών βρόχων.

Ο κυρίως κώδικας μαζί με το λογικό του διάγραμμα υπάρχουν στο Παράρτημα III, ενώ συμπληρωματικοί σύντομοι και απλοί κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν υπάρχουν στο Παράρτημα IV.

Συνοπτικά μπορεί κανείς να ξεχωρίσει κάποιους τομείς μέσα στο ίδιο το πρόγραμμα.

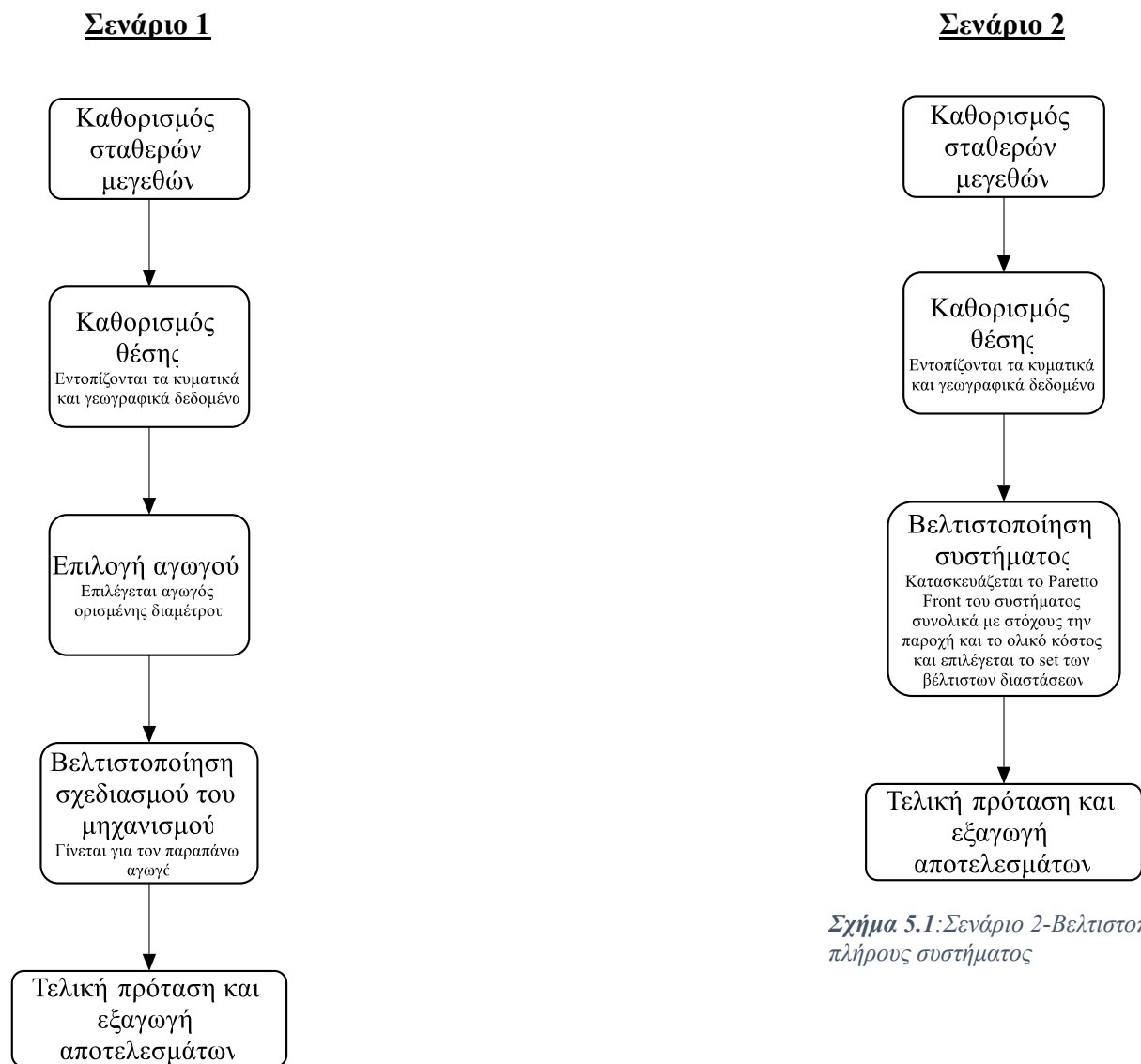
Τα περιεχόμενα λοιπόν, κατά μία έννοια, του προγράμματος είναι :

- Καθορισμός σταθερών μεγεθών
- Καθορισμός παραμέτρων και ευρών διακύμανσης
- Καθορισμός κυματικών χαρακτηριστικών
- Υπολογισμός παραμετρικών μεγεθών
- Υπολογισμός πλάτους διεγείρουσας δύναμης
- Υπολογισμός συντελεστή αντίστασης
- Αρχικοποίηση αλγορίθμου
- Κυρίως ρουτίνα επίλυσης δυναμικού συστήματος διαφορικών εξισώσεων
- Υπολογισμός και σχεδίαση κινηματικών μεγεθών του συστήματος
- Αναλυτικός υπολογισμός διέγερσης και συντελεστή απόσβεσης
- Υπολογισμός διαφοράς φάσης συστήματος-κύματος
- Ενεργειακός ισολογισμός συστήματος –κύματος
- Ενεργειακός ισολογισμός συστήματος-ταμιευτήρα
- Θέσπιση κριτηρίων ορθής και ασφαλούς λειτουργίας
- Σχεδίαση απόκρισης μόνιμης κατάστασης συστήματος
- Οικονομική μελέτη αγωγού άντλησης
- Μελέτη ορισμένων κατασκευαστικών στοιχείων και λεπτομερειών εγκατάστασης του πλωτήρα
- Μελέτη ενεργειακής απόδοσης για επιλογή υποθετικού υδροστροβίλου
- Θεωρητικό σενάριο λειτουργίας: ενεργειακή και οικονομική απόδοση
- Δημιουργία animation πλωτήρα
- Υπολογισμός δυνάμεων και γραφικές παραστάσεις αυτών

Να σημειωθεί ότι για λόγους ταχύτητας στην εκτέλεση του προγράμματος, πολλές δευτερεύουσες λειτουργίες του κώδικα δίνονται ως σχόλια, όπως για παράδειγμα η απεικόνιση της κίνησης του πλωτήρα σε συνάρτηση με το χρόνο στο ίδιο διάγραμμα με το κύμα να απεικονίζεται όχι ως συνημιτονική καμπύλη αλλά ως επιφάνεια με άνω όριο την συνημιτονική καμπύλη. Για οποιαδήποτε απορία ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στα σχόλια που συνοδεύουν τις εντολές στον κώδικα.

### 5.1.2) Βήματα διαδικασίας

Στο σημείο αυτό ήρθε η ώρα να αναλυθεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην πορεία προς την εξασφάλιση των τελικών αποτελεσμάτων. Δύο είναι τα πιθανά σενάρια, τα οποία και ακολουθήθηκαν και συνοψίζονται ως εξής :



Σχήμα 5.1: Σενάριο 2-Βελτιστοποίηση πλήρους συστήματος

Σχήμα 5.2 : Σενάριο 1-Επιλογή αγωγού και βελτιστοποίηση

## Παράγραφος 2<sup>η</sup> : Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης

### 5.2.1) Λογισμικό EASY

Ο κώδικας ENALIOS.m αν και έχει μορφή που επιτρέπει την παραμετρική μελέτη της απόδοσης του συστήματος, εν τούτοις η διαδικασία βελτιστοποίησης είναι ιδιαίτερα επίπονη και αμφιβόλου ακριβείας. Ο πιο ορθολογικός τρόπος είναι αυτός με χρήση ενός σχήματος εξελικτικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

Το λογισμικό EASY (Evolutionary Algorithm System), το οποίο αναπτύχθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (National Technical University of Athens) είναι μια εμπορική πλατφόρμα χρήσης εξελικτικών αλγορίθμων για βελτιστοποίηση ορισμένων παραμέτρων σχεδίασης με κριτήριο την ελαχιστοποίηση μιας (SOO-Single Objective Optimization) ή περισσοτέρων (MOO-Multi Objective Optimization) στόχων-αντικειμενικών συναρτήσεων. Σε αυτό το περιβάλλον εργασίας έγινε και η οποιαδήποτε διαδικασία βελτιστοποίησης στην παρούσα εργασία.

Στόχος της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού της συσκευής είναι η μεγιστοποίησή της προς τον ταμειυτήρα παροχής. Αυτή είναι και η αντικειμενική συνάρτηση στόχος της διαδικασίας. Ως πηγαίος κώδικας για τη δημιουργία του απαραίτητου για το πρόγραμμα EASY εκτελέσιμου αρχείου χρησιμοποιήθηκε τμήμα του κώδικα ENALIOS.m, με κατάλληλη επιλογή μόνο των τμημάτων που ενδιέφεραν σε κάθε περίπτωση και την αποκοπή των περιττών για αύξηση της ταχύτητας. Η δημιουργία των εκτελέσιμων αρχείων έγινε σε περιβάλλον Matlab.

Σημαντική είναι η παρατήρηση ότι το λογισμικό EASY χειρίζεται μόνον προβλήματα ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης, απαίτηση που πρέπει να ικανοποιείται με κατάλληλη γραφή της ή των αντικειμενικών συναρτήσεων.

Η βασική λογική των εξελικτικών αλγορίθμων, αν και ιδιαίτερα πολύπλοκη αν κάποιος εστιάσει σε λεπτομέρειες λειτουργίας, σύγκλισης και ανάπτυξης μεταμοντέλων, μπορεί εν τούτοις να εξηγηθεί αρκετά σύντομα.

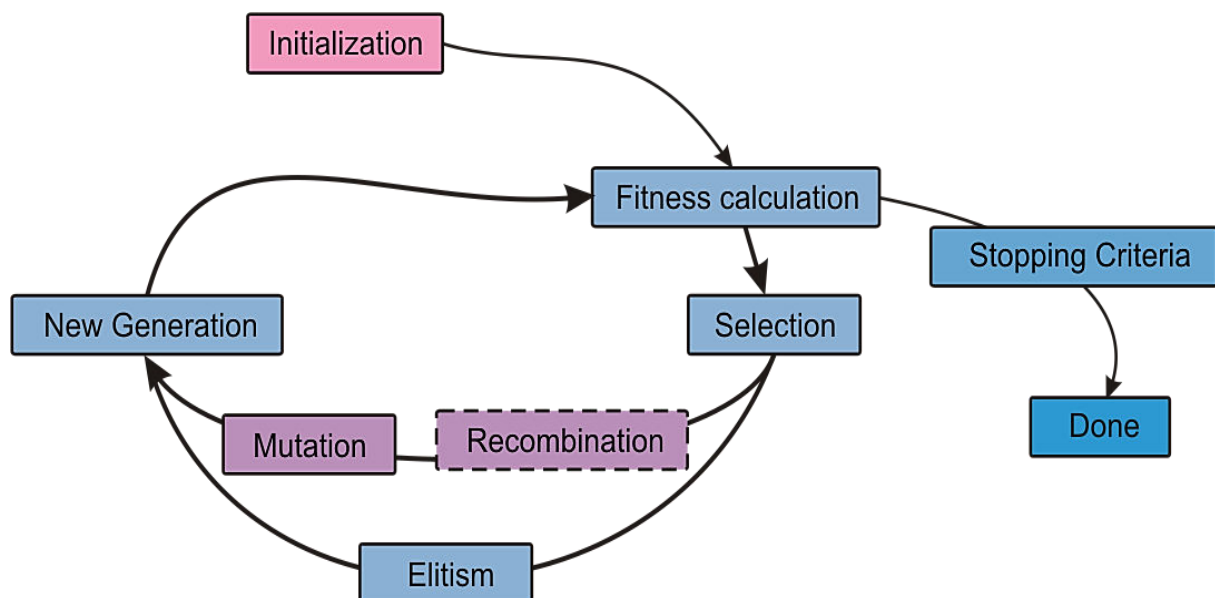
Η λογική των εξελικτικών αλγορίθμων προσομοιάζει την ίδια την φύση. Στηρίζεται στην απλή αποδοχή της θεωρίας της επιβίωσης του καταλληλότερου ατόμου από έναν πληθυσμό. Βασική ανάγκη που οδήγησε στην ανάπτυξή τους ήταν ευρωστία, δηλαδή η ικανότητα τόσο επίλυσης συγκεκριμένων προβλημάτων όσο και η επιθυμητή αποτελεσματικότητα στην επιβίωση σε διαφορετικά περιβάλλοντα.

Αρχικά ο εξελικτικός αλγόριθμος έχει να χειριστεί ένα πλήθος ατόμων (individuals). Κάθε άτομο αντιπροσωπεύει και ένα σημείο στον n-διάστατο χώρο των πιθανών λύσεων, όπου n είναι ο αριθμός των παραμέτρων του συστήματος (design variables). Αυτά τα άτομα μέσω διάφορων τελεστών και διαδικασιών όπως η μετάλλαξη (mutation) και ο ανασυνδυασμός (recombination) εξελίσσονται. Ο μεν ανασυνδυασμός επιτρέπει την μίξη χαρακτηριστικών των



γονέων, ενώ η μετάλλαξη επιτρέπει την εισαγωγή απρόσμενων-καινοτόμων χαρακτηριστικών στον πληθυσμό. Δίνεται έτσι η δυνατότητα στον αλγόριθμο να εξερευνήσει την περιοχή γειτονικά των μέχρι εκείνη την στιγμή καλύτερων ατόμων (exploitation) όσο και η δυνατότητα εξερεύνησης και απομακρυσμένων περιοχών του χώρου λύσεων (exploration). Η εξέλιξη αυτή γίνεται βάσει και κάποιων γνώσεων-περιορισμών για τον χώρο που δίνονται ως περιορισμοί (constraints) από τον χρήστη. Για κάθε άτομο του πληθυσμού αντιστοιχίζεται μια τιμή ποιότητας (fitness) το οποίο και κωδικοποιείται σε κατάλληλη συνάρτηση (fitness function) και η οποία σχετίζεται άμεσα με την αντικειμενική συνάρτηση-στόχο. Σε κάθε επίπεδο ο αλγόριθμος εστιάζει σε άτομα υψηλής ποιότητας και από αυτά μέσω μιας διαδικασίας ελιτισμού και κάποια κριτήρια που θέτει ο χρήστης επιλέγει τα λεγόμενα ελίτ άτομα (elites). Τα ικανότερα άτομα του αρχικού, γονικού, πληθυσμού και ορισμένοι προκρινόμενοι elites αποτελούν τον πληθυσμό των parents από τους οποίους θα προκύψει η επόμενη γενιά απογόνων offsprings. Με την σειρά της αυτή η γενιά απογόνων θα δώσει τα ικανότερα μέλη της που θα αποτελέσουν τους γονείς για την επόμενη γενιά. Η διαδικασία είναι αυξανόμενης ακριβείας μέχρι είτε την ικανοποίηση των κριτηρίων ποιότητας για τερματισμό, πολλές φορές πρακτικά δύσκολο έως αδύνατο, είτε συνήθως την ολοκλήρωση του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων που καθορίζεται από τον χρήστη. Μία σημαντική διαφορά εξελικτικών και γενετικών αλγορίθμων είναι η αναλογία γονέων και απογόνων. Στους γενετικούς είναι ίση με 1/2 ενώ στους εξελικτικούς λαμβάνει μικρότερη τιμή, συνήθως 1/3 με 1/7.

Απαραίτητη είναι η αρχικοποίηση των παραμέτρων του συστήματος για την εκκίνηση του αλγορίθμου. Στηριζόμενος λοιπόν στην παραπάνω λογική ο αλγόριθμος κινείται διαρκώς προς καλύτερες περιοχές του χώρου λύσεων παρέχοντας τελικά ως έξοδο-λύση τα βέλτιστα άτομα της τελευταίας γενιάς.



Σχήμα 5.3: Σχεδιάγραμμα εξελικτικού αλγορίθμου (Πηγή: *physiol.gu.se*)

### 5.2.2) Η βελτιστοποίηση της μελέτης

Η διαδικασία βελτιστοποίησης παραμέτρων του συστήματος, στηριζόμενη στη χρήση του λογισμικού EASY, έγινε για διαφορετικές συνθήκες και σκοπούς κατά την διάρκεια εκπόνησής της. Στο σημείο αυτό θα γίνει συνοπτική παρουσίαση των προαναφερθέντων φάσεων μελέτης, ενώ αναλυτική παρουσίαση της οργάνωσης και αρχικοποίησης του λογισμικού EASY θα γίνει στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων για καλύτερη εποπτεία των μεγεθών και των παραμέτρων. Από τα προαναφερθέντα δύο σενάρια αναλύθηκε κυρίως το πρώτο, ενώ παρατίθενται και αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του δευτέρου σεναρίου.

#### Βελτιστοποίηση συστήματος

- Όλες οι κατασκευαστικές παράμετροι ( $m_{tot}, d_p, d_e, d_a$ ) αφήνονται ελεύθερες (free design variables).
- Δημιουργείται το εκτελέσιμο αρχείο OptimumSYSTEM.exe.
- Δύο είναι τώρα οι αντικειμενικές συναρτήσεις:  $F_1 = -Q_{tm}$  η ογκομετρική παροχή και  $F_2 = TotalCost$ , το κόστος επένδυσης της συσκευής και του αγωγού.

Αποτέλεσμα είναι η απεικόνιση των εφικτών βέλτιστων λύσεων σε ένα μέτωπο Pareto (Pareto Front). Κάθε σημείο του αντιπροσωπεύει κι ένα set παραμέτρων του μηχανισμού και η τελική επιλογή είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ κόστους και παροχής που καλείται να κάνει κάθε ενδιαφερόμενος κατασκευαστής-επενδυτής.

Οι παραπάνω μελέτες έγιναν με την υπόθεση σταθερού κυματισμού, με σταθερά δηλαδή τα μεγέθη της περιόδου  $T$  και του πλάτους κύματος  $A$ , καθώς και για συγκεκριμένη γεωγραφική θέση, δηλαδή σταθερά τα μεγέθη  $L_k, L_s, Z_t$ .

#### Βελτιστοποίηση κατασκευαστικών μεγεθών συσκευής

- Οι ελεύθερες παράμετροι σχεδίασης (free design variables) είναι η ολική μάζα  $m_{tot}$ , η διάμετρος του πλωτήρα  $d_p$  και η διάμετρος του εμβόλου  $d_e$ , ενώ θεωρείται ότι έχει επιλεγεί σταθερός αγωγός διαμέτρου  $d_a$ .
- Δημιουργείται το εκτελέσιμο αρχείο OptimusWEC.exe.
- Αντικειμενική συνάρτηση είναι η  $F = -Q_{tm}$ , δηλαδή η αρνητική τιμή της μέσης παροχής στην μεγιστοποίηση της οποίας στοχεύουμε. Δίνεται με αυτόν τον τρόπο, γιατί, όπως επισημάνθηκε, ο EASY χειρίζεται μόνο προβλήματα ελαχιστοποίησης.

Βελτιστοποίηση σχεδίασης με ανάλυση χρονοσειράς ύψους κύματος

Αποτελεί ρεαλιστικότερη μελέτη του φαινομένου και επομένως οδηγεί σε αποδοτικότερη σχεδίαση για λειτουργία σε μεταβλητές κυματικές συνθήκες.

- Οι ελεύθερες παράμετροι σχεδίασης (free design variables) είναι η ολική μάζα  $m_{tot}$ , η διάμετρος του πλωτήρα  $d_p$ , η διάμετρος του εμβόλου  $d_e$  και η διάμετρος του αγωγού.
- Γίνεται κατάλληλη μορφοποίηση του κώδικα ώστε να λαμβάνεται πλέον και το πλάτος  $A$  ως παράμετρος.
- Δημιουργείται το εκτελέσιμο OptimusWECSeries.exe.
- Καθορίζονται τα μέσα πλάτη κύματος ανά χρονικό διάστημα του διακριτοποιημένου χρόνου με μελέτη της ετήσιας χρονοσειράς τους.
- Για κάθε ένα από αυτά τα πλάτη υπολογίζεται ο ολικός όγκος νερού που αντλείται στον ταμιευτήρα
- Αθροίζονται όλοι οι όγκοι νερού που οδηγείται στον ταμιευτήρα για τις διάφορες συνθήκες πλάτους.
- Αντικειμενική συνάρτηση είναι η  $F=-VWATER$ , στην ελαχιστοποίηση της οποίας στοχεύει το λογισμικό, δηλαδή στην μεγιστοποίηση του αντλούμενου όγκου στη διάρκεια του έτους.



## Κεφάλαιο 6 : Παραδοχή σταθερού κυματισμού : Αποτελέσματα

### Παράγραφος 1<sup>η</sup> : Δεδομένα εισαγωγής

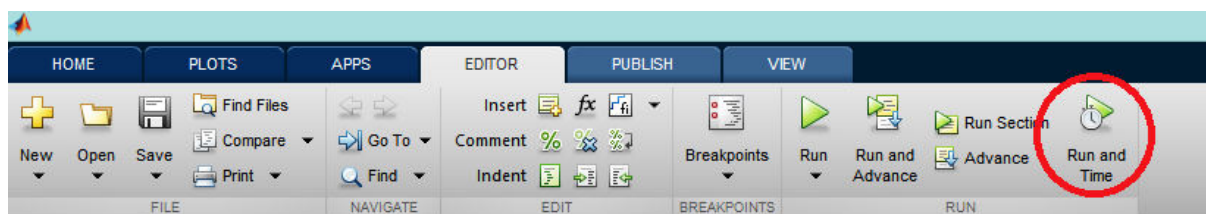
#### 6.1.1) Χαρακτηριστικά χρονικής μεθόδου

Η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων είναι η 4ης τάξης Runge Kutta. Το χρονικό βήμα  $h$  της μεθόδου επιλέγεται από τον εκάστοτε χρήστη του προγράμματος. Αυτό που καλείται να κάνει ο καθένας είναι ο συμβιβασμός μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικού κόστους. Πρόκειται για ανταγωνιστικούς στόχους: αυξανόμενης της ακρίβειας αυξάνει και το υπολογιστικό κόστος στην CPU.

Το τοπικό σφάλμα της μεθόδου Runge Kutta 4<sup>th</sup> Order εκτιμάται ότι είναι ανάλογο της πέμπτης δύναμης του χρονικού βήματος.

$$Error_{RK} (topical) = O(h^5)$$

Ο χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος υπολογίστηκε με χρήση κατάλληλων εργαλείων της Matlab, και συγκεκριμένα της εντολής Run & Time, η οποία ουσιαστικά χρονομετρεί το πρόγραμμα και μάλιστα γραμμή προς γραμμή, επιτρέποντας βελτιώσεις όπου χρειάζεται και είναι εφικτές. Ως χρονικό διάστημα επίλυσης για τη χρονομέτρηση δόθηκε μία περίοδος. Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται τα δεδομένα που αναφέρθηκαν.



Σχήμα 6.1: Η επιλογή Run and Time της Matlab

Τελική επιλογή βήματος είναι  $h=0.01$  sec ως βέλτιστη λύση με καλή ακρίβεια και μικρό υπολογιστικό κόστος. Ως χρονικό διάστημα επίλυσης επιλέχθηκαν οι είκοσι περίοδοι, ώστε να έχει αποκατασταθεί η μόνιμη απόκριση για αρκετό χρονικό διάστημα και τα αποτελέσματα να είναι όσο το δυνατόν πιο ασφαλή, ειδικά σε ό,τι αφορά τις μέσες τιμές μεγεθών που χρησιμοποιούνται κατά κόρον. Επίσης στο πρόγραμμα ενσωματωμένα στις γραφικές παραστάσεις αρκετών μεγεθών είναι και ορισμένα φίλτρα. Η χρήση του φίλτρου median και του φίλτρου Savitzky–Golay συνιστάται όταν τα αποτελέσματα παρουσιάζουν αριθμητικό θόρυβο. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να απομονωθεί ο θόρυβος με μηδαμινό υπολογιστικό κόστος. Διαφορετικά θα πρέπει να μειωθεί μέχρι το κατάλληλο σημείο το χρονικό βήμα της μεθόδου με την επακόλουθη εκθετική αύξηση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου. Στη

συγκεκριμένη ωστόσο μελέτη τα αποτελέσματα δεν παρουσίαζαν αριθμητικό θόρυβο και τα φίλτρα παρέμειναν αδρανή.

### 6.1.2) Χαρακτηριστικά κυματισμού

Επιλέχθηκαν χαρακτηριστικά σταθερού κυματισμού έντονου χαρακτήρα. Συγκεκριμένα :

*Πίνακας 6.1: Κυματικά δεδομένα*

Πλάτος κύματος A	1,8 m
Περίοδος κύματος T	7 sec

Ο λόγος επιλογής έντονων φαινομένων αποσκοπεί στην καλύτερη αναπαράσταση της δυναμικής φύσεως του μοντέλου αλλά και τον υπολογισμό κατά κάποιο τρόπο της μέγιστης δυνατότητας αποταμίευσης νερού στον ταμιευτήρα, μιας και όταν τα φαινόμενα είναι έντονα και ευνοϊκά, τότε αυξάνει η παρεχόμενη από το κύμα ισχύς, άρα και η ισχύς που απορροφά τελικά η συσκευή.

### 6.1.3) Χαρακτηριστικά τοπογραφίας

Η γεωγραφική θέση της περιοχής εγκατάστασης και η μορφολογία του εδάφους της καθορίζουν ορισμένες από τις παραμέτρους του προβλήματος όπως αναλύθηκε. Εδώ συνοψίζονται αυτά τα μεγέθη:

*Πίνακας 6.2: Τοπογραφικά δεδομένα*

Οριζόντια απόσταση θέσης μηχανισμού και θέσης ταμιευτήρα $L_s$	500 m
Υψομετρική διαφορά στάθμης μηχανισμού και ταμιευτήρα $L_k$	60 m
Επιτάχυνση βαρύτητας g	9,81 m/s <sup>2</sup>
Στάθμη στον ταμιευτήρα $Z_t$	20 m

Τα μεγέθη αυτά της παραγράφου (6.1.3) όσο και της (6.1.2) συμπεριλαμβανομένων των υδροδυναμικών συντελεστών  $C_A, C_d, I_f$  και  $Z_{tot}$  που έχουν ήδη αναλυθεί θεωρούνται σταθερά σε όλη τη διαδικασία.

#### 6.1.4) Εύρος διακύμανσης παραμέτρων

Υπενθυμίζονται τα εύρη στα οποία κινούνται οι ελεύθερες παράμετροι του συστήματος. Η χρήση κριτηρίων ασφάλειας και ορθότητας της ανάλυσης επιτρέπει τον ελεύθερο καθορισμό των ευρών σε οποιαδήποτε μεγέθη, μιας και οι ανέφικτες λύσεις απορρίπτονται κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, δηλαδή, όταν ένα κριτήριο δεν πληρείται για παράδειγμα προκύπτει ότι ο πλωτήρας εξέρχεται του νερού, αυτομάτως η αντικειμενική συνάρτηση-στόχος μηδενίζεται και η λύση απορρίπτεται. Κριτήρια θεσπίζονται για το κρίσιμο βύθισμα ώστε να μην ανέρχεται ο πλωτήρας και για την ταχύτητα στον αγωγό που δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 5m/s για την αποφυγή καταστροφής του.

*Πίνακας 6.3: Εύρος ελεύθερων παραμέτρων σχεδίασης*

Μάζα κινούμενων τμημάτων μηχανισμού $mtot$	3.000-20.000 kg
Διάμετρος πλωτήρα $dp$	1-4 m
Διάμετρος εμβόλου $de$	0,1-1 m
Διάμετρος αγωγού $da$	0,1-1,2 m

## Παράγραφος 2<sup>η</sup> : Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

### 6.2.1) Διαδικασία βελτιστοποίησης συστήματος

Η διαδικασία βελτιστοποίησης του συστήματος συνολικά για τα παραπάνω δεδομένα κυματισμού και τοπογραφίας έγκειται στην προσπάθεια υπολογισμού του βέλτιστου σετ παραμέτρων που θα επιτυγχάνει την μεγιστοποίηση της παροχής στον ταμιευτήρα και επομένως της ενέργειας που αποθηκεύεται με το ελάχιστο κόστος. Οι δύο αυτοί στόχοι αποτελούν και τις αντικειμενικές συναρτήσεις της διαδικασίας.

Η παροχή προς τον ταμιευτήρα είναι ουσιαστικά η μέση τιμή της στιγμιαίας παροχής και υπολογίζεται ολοκληρωτικά από αυτήν. Το κόστος είναι το κόστος επένδυσης τόσο της συσκευής όσο και του αγωγού. Το κόστος συντήρησης είναι σχετικά μικρό για όλες αυτές τις διατάξεις μπροστά στο κόστος επένδυσής τους. Μάλιστα η ανάγκη για πολλούς χρηματικούς πόρους για έρευνα, ανάπτυξη και εγκατάσταση τέτοιων μηχανισμών, αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα της προόδου σε αυτόν τον τομέα. Στο ολικό κόστος δεν συμπεριλαμβάνεται αυτό του υδροηλεκτρικού σταθμού και του ταμιευτήρα που ακολουθούν στην ενεργειακή ροή. Αυτά υποτίθενται ως σταθερά, καθοριζόμενα από τις ανάγκες σε ενέργεια του δικτύου και είναι ίδια για κάθε είδους συσκευή που θα εγκατασταθεί. Στόχος δηλαδή είναι η κάλυψη της απαιτούμενης ενεργειακής ζήτησης με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Το κόστος εκτιμάται σε 8.78m\$/MW για τεχνολογίες σχετικά προηγμένες και όχι εξαιρετικά προηγμένες όπου το κόστος εκτινάσσεται στο διπλάσιο. Πράγματι η προτεινόμενη συσκευή

δεν έχει ιδιαίτερης απαιτήσεις σε υλικά και τεχνογνωσία συγκρινόμενη με τις υπόλοιπες του ίδιου κλάδου.

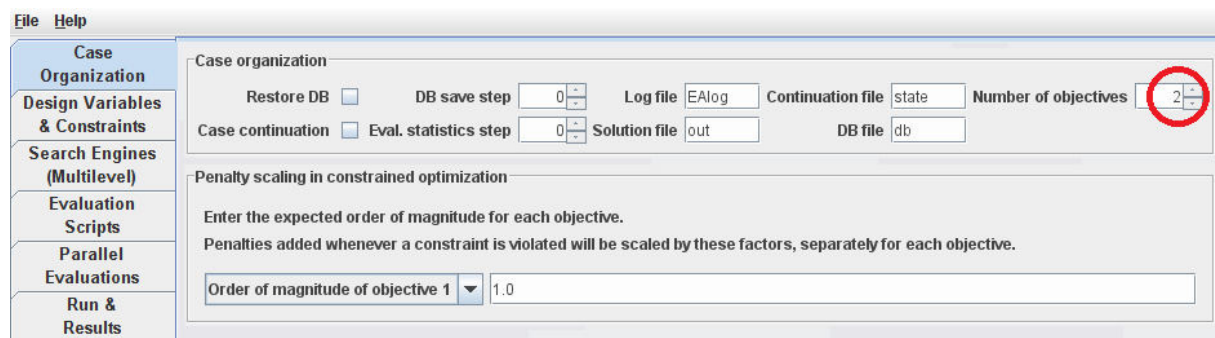
Το κόστος του αγωγού υπολογίζεται ως το άθροισμα τόσο του κόστους υλικού όσο και του κόστους εγκατάστασης της σωλήνωσης βάσει διεθνών τιμών και συντελεστών, Συγκεκριμένα ως υλικό κατασκευής της σωλήνωσης επιλέγεται το GRP (Glass Reinforced Plastic) λόγω των αντιδιαβρωτικών χαρακτηριστικών του, της καλής αντοχής του και της ικανοποιητικής ελαστικότητάς του για παραλαβή τυχόν κραδασμών του συστήματος, αλλά και φυσικά του χαμηλού σχετικά κόστους του σε σχέση με μεταλλικές σωληνώσεις ειδικών επιστρώσεων. Βάσει της τιμής του χάλυβα που ανέρχεται αυτή την στιγμή (12-2016) σε 500 \$/tn και του συντελεστή αναγωγής από κόστος υλικού σε ολικό κόστος εγκατάστασης, ο οποίος ισούται με 14 % και είναι το ποσοστό του κόστους υλικού ως προς το κόστος εγκατάστασης, υπολογίζεται το ολικό κόστος εγκατάστασης χαλύβδινης σωλήνωσης. Έπειτα μέσω ενός συντελεστή αναγωγής σε άλλα υλικά, ο οποίος για το GRP ισούται με 1,69 και πολλαπλασιάζεται με το ολικό κόστος χαλύβδινης σωλήνωσης, υπολογίζεται το κόστος επένδυσης του αγωγού. Συνοπτικά λοιπόν σε ό,τι αφορά την οικονομική ανάλυση και τον υπολογισμό του κόστους, αν  $P_p$  είναι η ισχύς σε kW της συσκευής, αυτό ισούται με :

$$TotalCost = InvestCostWEC + GRPpipeCost = 8780 * P_p + GRPpipecost$$

Για τον υπολογισμό της μάζας της σωλήνωσης θεωρήθηκε κυλινδρικός σωλήνας σταθερής διαμέτρου, ενώ διαμορφώσεις, συνδέσεις και μετρητικά όργανα κοστολογούνται και περιλαμβάνονται στο ολικό κόστος μέσω του συντελεστή αναγωγής από το κόστος υλικού στο κόστος εγκατάστασης.

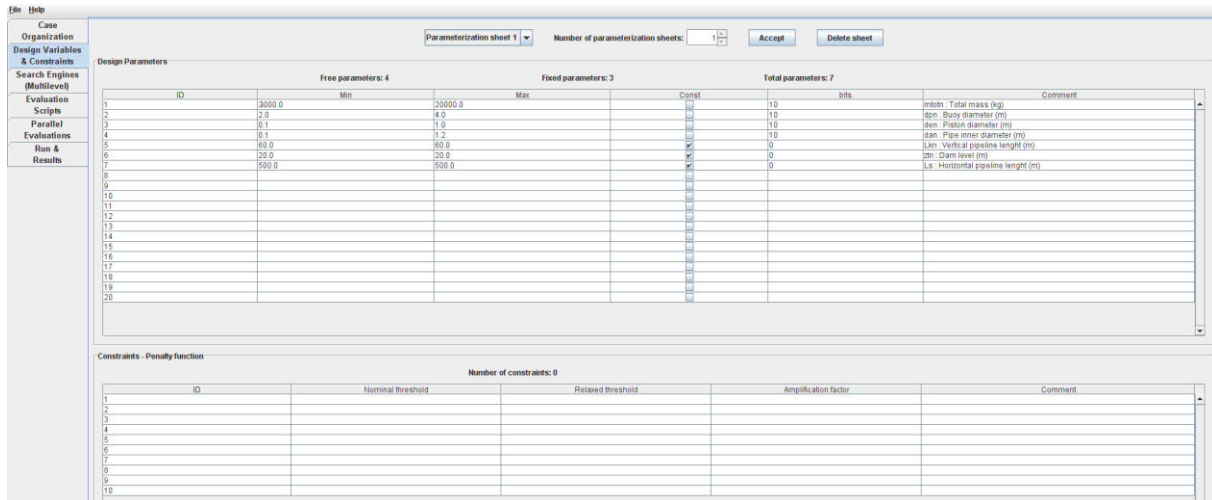
Η διαδικασία βελτιστοποίησης έγινε μέσω των εξελικτικών αλγορίθμων του λογισμικού EASY. Το λογισμικό παρέχει πληθώρα επιλογών και η ανάλυσή τους είναι χρονοβόρα και δεν αποτελεί αντικείμενο του παρόντος. Παρόλα αυτά θα δοθούν για πληρότητα και κατανόηση ορισμένες βασικές επιλογές που έγιναν κατά το setup.

Στο πρώτο βήμα, η βασική ρύθμιση είναι η επιλογή δύο αντικειμενικών συναρτήσεων :



Σχήμα 6.2: EASY setup: Επιλογή δύο συναρτήσεων στόχων





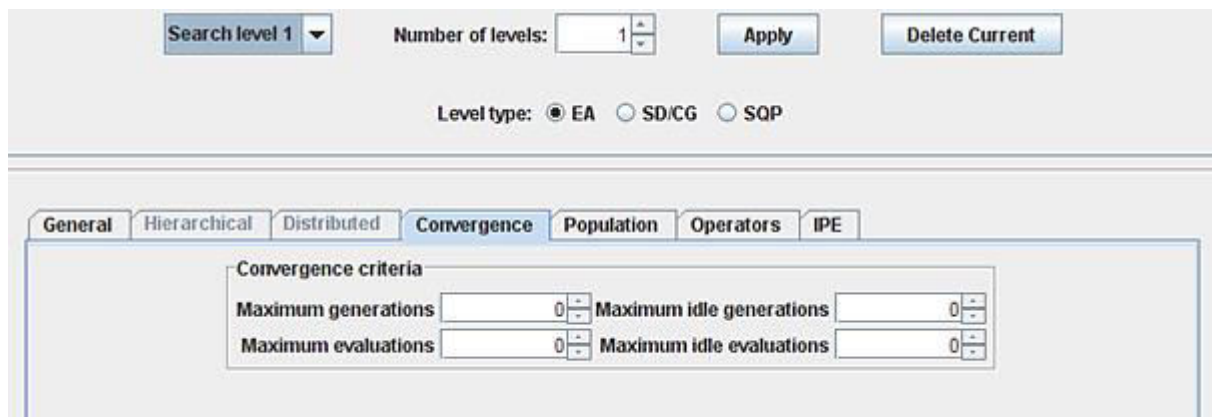
Σχήμα 6.3: EASY setup: Καθορισμός design variables

Έπειτα καθορίζονται το είδος, ελεύθερη ή σταθερή, το εύρος και τα bits (συνήθως 10) αναπαράστασης κάθε μεταβλητής, ενώ δίνονται και τυχόν περιορισμοί, αν υπάρχουν.

Πίνακας 6.4: Παράμετροι συστήματος και EASY

ID	System Parameter	Type
Variable 1	Total oper. mass $m_{tot}$	Free
Variable 2	Buoy diameter $d_p$	Free
Variable 3	Piston diameter $d_e$	Free
Variable 4	Pipe diameter $d_a$	Free
Variable 5	Altitude difference $L_k$	Constant
Variable 6	Damn level $Z_t$	Constant
Variable 7	Hor. Buoy-Damn distance $L_s$	Constant

Σε ό,τι αφορά τις ρυθμίσεις του αλγορίθμου (search engines), παρέχονται πολλές default ρυθμίσεις, ενώ εδώ ο χρήστης επιλέγει χαρακτηριστικά της εξέλιξης του αλγορίθμου σε κάθε βήμα και της σύγκλισης. Εδώ θα δοθούν ορισμένες βασικές επιλογές που έγιναν.



Σχήμα 6.4: EASY setup : Καθορισμός κριτηρίων σύγκλισης

Στα κριτήρια σύγκλισης, μέγιστου πλήθους όμοιων γενεών και πλήθους επαναλήψεων αντίστοιχα τίθεται μηδέν, ώστε ουσιαστικά το πρόγραμμα να τερματίσει όταν ολοκληρώσει το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων, που καθορίζεται παρακάτω.

Καθορίζεται έπειτα το πλήθος των τελικών elites, ουσιαστικά των σημείων του μετώπου Pareto.

The screenshot shows the 'Population' configuration window in the EASY software. The 'Elite archive size' is set to 40, highlighted with a red circle. Other parameters include: Parent population size (20), Offspring population size (60), Max life span (0), Parents of one offspring (5), Tournament size (2), and Tournament prob. (0,9). The 'Level type' is set to EA.

Σχήμα 6.5: EASY setup: Καθορισμός χαρακτηριστικών γενεών εξελικτικού αλγορίθμου

The screenshot shows the 'Scripts' table in the EASY v2.0 interface. The table has three columns: Script ID, Script Filename, and Maximum evaluations. The first row shows Script ID 1, Script Filename 'task.bat', and Maximum evaluations '1200', which is circled in red.

Script ID	Script Filename	Maximum evaluations
1	task.bat	1200
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Σχήμα 6.6: EASY setup: Καθορισμός μέγιστου πλήθους επαναλήψεων

Τέλος καθορίζεται ο αριθμός μέγιστων επαναλήψεων, δηλαδή πόσες φορές θα κληθεί το εκτελέσιμο αρχείο από το λογισμικό EASY στην προσπάθεια ανεύρεσης της βέλτιστης λύσης.

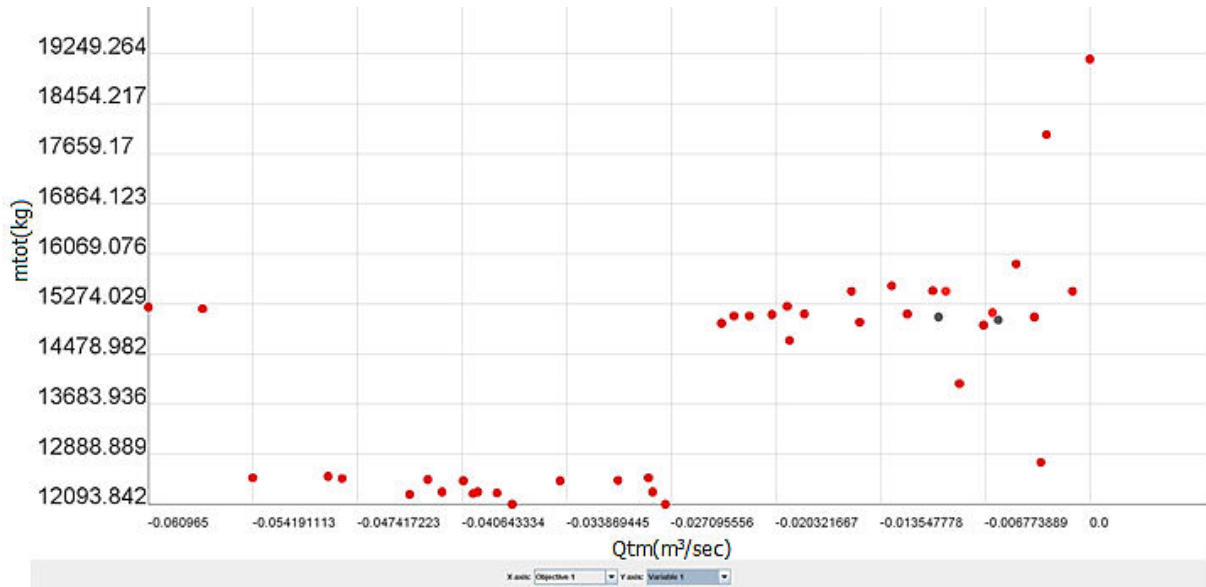
Στη συνέχεια επιλέγεται το Run και αναμένεται η τελική «πρόταση» βέλτιστου συνδυασμού των ελεύθερων παραμέτρων του προγράμματος. Το εκτελέσιμο αρχείο ονομάζεται OptimusWEC.exe και δημιουργήθηκε στο περιβάλλον Matlab. Με μικροαλλαγές, κυρίως σε ό,τι αφορά την ή τις αντικειμενικές συναρτήσεις, καθώς και κάποια επιπλέον παραμετροποίηση, προήλθαν όλα τα εκτελέσιμα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκάστοτε βελτιστοποίηση: το OptimumSYSTEM.exe που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα φάση για την βελτιστοποίηση του συστήματος συνολικά, και το OptimusWECSeries.exe που χρησιμοποιήθηκε στη φάση βελτιστοποίησης για μεταβλητό ύψος κύματος βάσει των χρονοσειρών αυτού.



Σχήμα 6.7: Το εκτελέσιμο αρχείο OptimusWEC v1.0

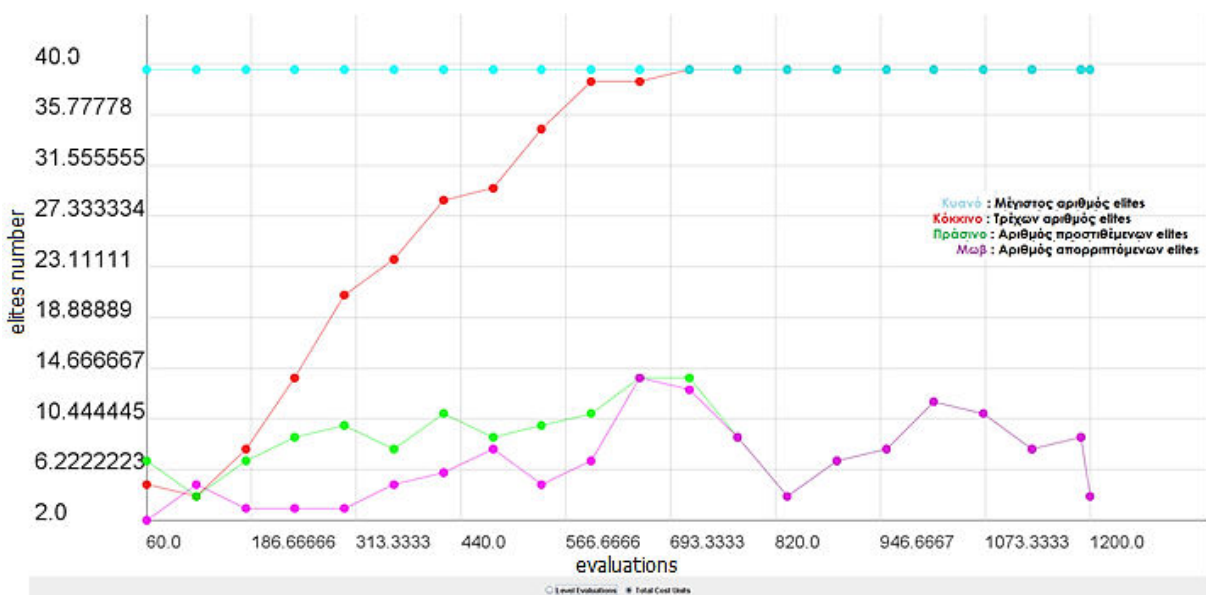
Διαθέσιμη είναι και η γραφική απεικόνιση της «κίνησης» του αλγορίθμου σε κάθε βήμα αναζήτησης. Στο ακόλουθο γράφημα απεικονίζεται η αναζήτηση της βέλτιστης μάζας  $m_{tot}$  του μηχανισμού που έχει δοθεί ως Variable 1. Στον αριστερό άξονα απεικονίζονται οι τιμές της μεταβλητής και στον οριζόντιο οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης της παροχής. Υπενθυμίζεται εδώ ότι ο EASY χειρίζεται μόνο προβλήματα ελαχιστοποίησης, άρα οι αντικειμενικές συναρτήσεις πρέπει να δίνονται κατάλληλα, όπως για παράδειγμα εδώ δίνεται η (-μέση παροχή) στην ελαχιστοποίηση της οποίας στοχεύει το πρόγραμμα. Με κόκκινο απεικονίζονται οι elites του τρέχοντος επιπέδου-γενεάς, ενώ με γκρι αυτοί του προηγούμενου επιπέδου-γενεάς. Επίσης μπορεί κανείς να αντιληφθεί την κίνηση και την αναζήτηση του αλγορίθμου τόσο σε γειτονικές περιοχές (extrapolation), όσο και σε απομακρυσμένα τυχαία σημεία που μπορεί να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα (exploration). Παρόμοια γραφήματα είναι διαθέσιμα για όλες τις μεταβλητές του προβλήματος συναρτήσει όλων των αντικειμενικών συναρτήσεων αλλά και τυχόν συναρτήσεων ποινής (penalty functions), όταν δίνεται η δυνατότητα στον EASY να «παραβιάσει» τα εύρη των παραμέτρων που δόθηκαν

στην προσπάθεια ανεύρεσης καλύτερης λύσης. Στην παρούσα μελέτη δεν δίνεται η δυνατότητα αυτή. Επομένως περαιτέρω ανάλυση επί του συγκεκριμένου είναι άνευ ουσίας.



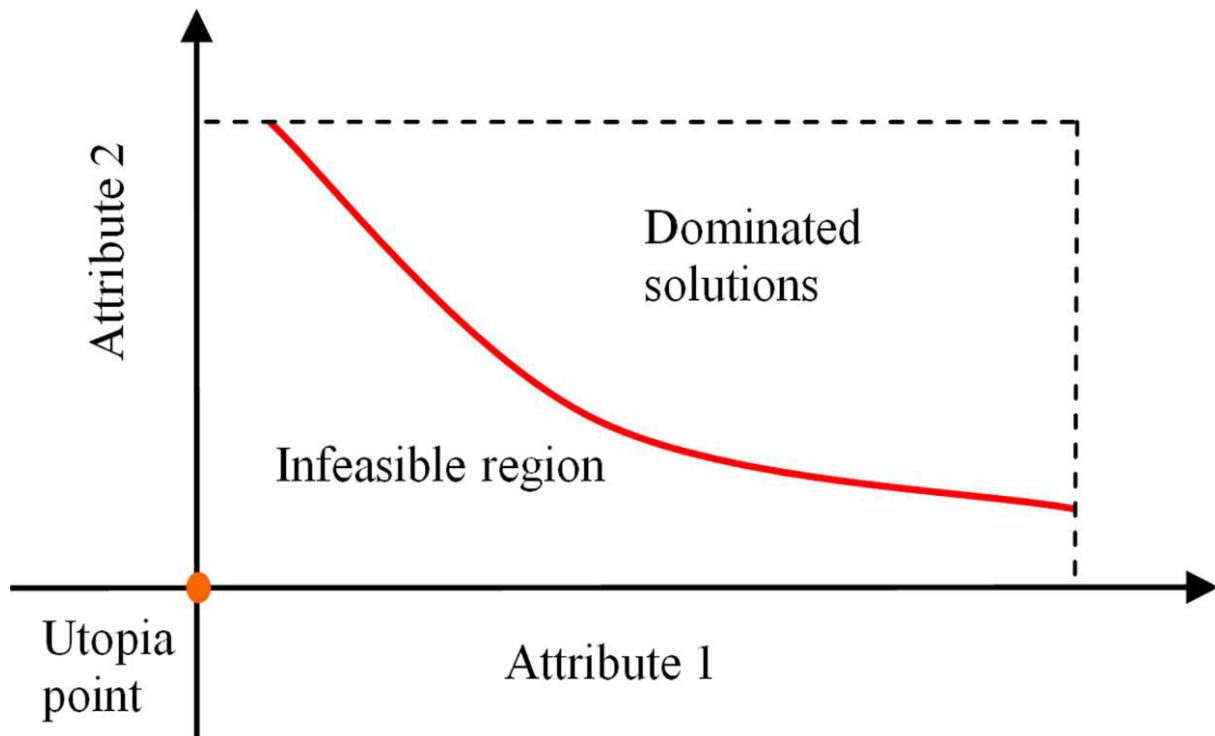
Σχήμα 6.8: EASY results: Γράφημα σύγκλισης αλγορίθμου ως προς την παράμετρο ολικής μάζας (mtot)

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται η εξέλιξη του αριθμού των elites, δηλαδή η πορεία συγκλίσεως που ακολουθεί ο αλγόριθμος. Στον οριζόντιο άξονα αποτυπώνεται ο αριθμός επαναλήψεων.



Σχήμα 6.9: EASY results: Γράφημα εξέλιξης elites αλγορίθμου

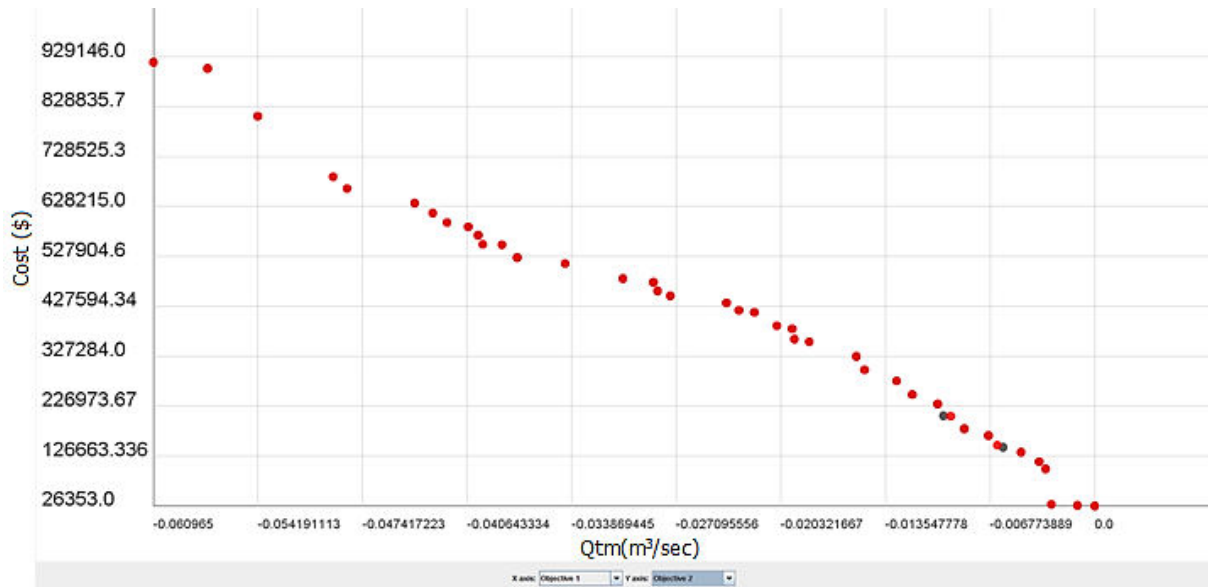
Το σημαντικότερο και πιο χρήσιμο στην περίπτωση αυτή γράφημα είναι το ακόλουθο. Αναπαριστά την αλληλεξάρτηση των δύο ανταγωνιστικών στόχων του προβλήματος, και στο συγκεκριμένο σύστημα του κόστους επένδυσης και της παροχής και είναι το λεγόμενο μέτωπο Pareto. Απεικονίζει την περιοχή των δυνατών λύσεων μέσω ενός συνόρου που τις διαχωρίζει από τις ανέφικτες λύσεις. Επάνω σε αυτό το σύνορο βρίσκονται οι βέλτιστες λύσεις. Η θεωρητικά ιδανική-ουτοπική λύση βρίσκεται στην αρχή των αξόνων και δεν μπορεί να επιτευχθεί.



Σχήμα 6.10: Περιοχές μετώπου Pareto

Η διαδικασία σύγκλισης πρακτικά θα μπορούσε να είναι αέναη και το μέτωπο Pareto να κινείται όλο και πιο κοντά στο «ιδανικό σημείο». Ωστόσο εδώ τερματίζεται μετά από 1200 επαναλήψεις για λόγους κόστους χρόνου, αφού χρειάστηκαν αρκετές ώρες για την περάτωση αυτού του αριθμού επαναλήψεων.

Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται η (-παροχή) σε κυβικά μέτρα ανά δευτερόλεπτο ( $m^3/sec$ ), ενώ στον κατακόρυφο απεικονίζεται το ολικό κόστος επένδυσης σε δολάρια (\$). Είναι προφανής ο συμβιβασμός που καλείται να κάνει κάθε επενδυτής μεταξύ της επιθυμίας για μεγιστοποίηση της παροχής και άρα του ενεργειακού και κατ' επέκταση οικονομικού κέρδους, και του κεφαλαίου που πρέπει να δαπανήσει για την επίτευξη αυτού του στόχου.



Σχήμα 6.11: EASY results: Μέτωπο Pareto βελτιστοποίησης συστήματος

Κάθε σημείο του παραπάνω διαγράμματος αντιπροσωπεύει και ένα set παραμέτρων που έχουν αυτές τις τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων. Τα set αυτά είναι οι τελικοί elites, δηλαδή οι elites της τελευταίας γενιάς και αποτελούν το περιεχόμενο του αρχείου εξόδου out\_L1.txt, καθώς και τον πίνακα των elites στα αποτελέσματα του EASY. Εδώ παρουσιάζονται οι πρώτοι δέκα για ευνόητους λόγους. Το σύνολό τους είναι σαράντα, όπως επιλέχθηκε κατά το setup του λογισμικού EASY, και απεικονίζονται με τα σαράντα κόκκινα σημεία του μετώπου.

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Variable 1	19249.264	15519.064	15519.064	15120.232	15605.08	15151.511...	15120.232	15151.511...	15143.696	12469.208
Variable 2	2.0351906	2.414468	2.0997068	2.414468	2.432062	2.414468	2.428152	2.414468	2.447702	2.422288
Variable 3	0.3894427...	0.3384163	0.9868033	0.3384163	0.3252196...	0.3384163	0.337537	0.3357775...	0.3234601...	0.3313783
Variable 4	0.1	0.3731179	0.1010752...	0.3666663...	0.2397847	0.3118280...	0.3139786	0.3118280...	0.2387099...	0.3451613...
Variable 5	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
Variable 6	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Variable 7	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
Objective 1	-0.0	-0.015439	-0.001119	-0.02204	-0.012831	-0.011813	-0.023041	-0.018485	-0.020578	-0.040564
Objective 2	26353.0	330635.0	27279.1	420423.0	280581.0	252946.0	424496.0	360395.0	392941.0	594305.0

Σχήμα 6.12: EASY results: Δέκα τελικοί elites βελτιστοποίησης συστήματος

Όπου η Objective1, δηλαδή η παροχή γίνεται μηδέν, αυτομάτως η λύση αυτή απορρίπτεται, επειδή όχι απαραίτητα δεν αντλείται νερό αλλά επειδή παραβιάζεται κάποιο από τα κριτήρια ασφαλείας και οδηγεί στον αυτόματο μηδενισμό της αντικειμενικής συνάρτησης, όπως τέθηκε κατά την συγγραφή του κώδικα.

Προτείνεται επίσης η χρήση χρωματικού κώδικα για την αξιολόγηση των παραπάνω βέλτιστων λύσεων. Θεσπίζεται μία χρωματική κλίμακα για το κόστος και μία για την παροχή που επιτυγχάνεται. Το άθροισμά τους θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση κάποιας πρότασης. Δίνεται ακολούθως ένα παράδειγμα δημιουργίας τέτοιου είδους χρωματικού χάρτη. Ανάλογες τεχνικές αξιολόγησης εφαρμόζονται ευρέως στον τομέα των μηχανολογικών αναλύσεων και ιδιαίτερα σε κατασκευαστικές μελέτες.

	ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΟ	ΧΑΜΗΛΟ	ΜΕΙΡΙΟ ΠΡΟΣ ΧΑΜΗΛΟ	ΜΕΙΡΙΟ	ΜΕΙΡΙΟ ΠΡΟΣ ΥΨΗΛΟ	ΥΨΗΛΟ	ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΟ
ΜΕΓΕΘΟΣ ΟΛΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ							
ΜΕΓΕΘΟΣ ΠΑΡΟΧΗΣ							
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ							

Σχήμα 6.13: Χρωματικός κώδικας ενεργειακής-οικονομικής αξιολόγησης συστήματος

### 6.2.2) Διαδικασία βελτιστοποίησης μηχανισμού για σταθερό αγωγό

Η μελέτη θα γίνει αυτή την φορά για σταθερό αγωγό διαμέτρου :

$$d_a = 0,6 m$$

Η διαδικασία βελτιστοποίησης θα γίνει πλέον με μία λιγότερη ελεύθερη μεταβλητή (free design variable), καθώς η διάμετρος του αγωγού θα δοθεί ως σταθερή ποσότητα. Στη συνέχεια, πέρα από την βελτιστοποίηση, θα γίνει και δυναμική και ενεργειακή ανάλυση του μηχανισμού, καθώς και ανάλυση κάποιων κατασκευαστικών χαρακτηριστικών αυτού. Επίσης, στόχος της βελτιστοποίησης θα είναι μόνο η μεγιστοποίηση της παροχής, ανεξαρτήτως κόστους. Επομένως μια αντικειμενική συνάρτηση θα δοθεί στον EASY.

Design Parameters				
Free parameters: 3			Fixed parameters: 4	
ID	Min	Max	Const	
1	3000.0	20000.0	<input type="checkbox"/>	
2	1.0	4.0	<input type="checkbox"/>	
3	0.1	1.0	<input type="checkbox"/>	
4	0.6	0.6	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	60.0	60.0	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	20.0	20.0	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	500.0	500.0	<input checked="" type="checkbox"/>	

Σχήμα 6.14: EASY setup: Καθορισμός design variables για σταθερό αγωγό

Καθορίζεται επίσης ο αριθμός μέγιστων επαναλήψεων στις 1200.

Scripts (for evaluation and interlevel data exchange in Multilevel Parameterization)		
Number of scripts: 1		
Script ID	Script Filename	Maximum evaluations
1	task.bat	1200
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

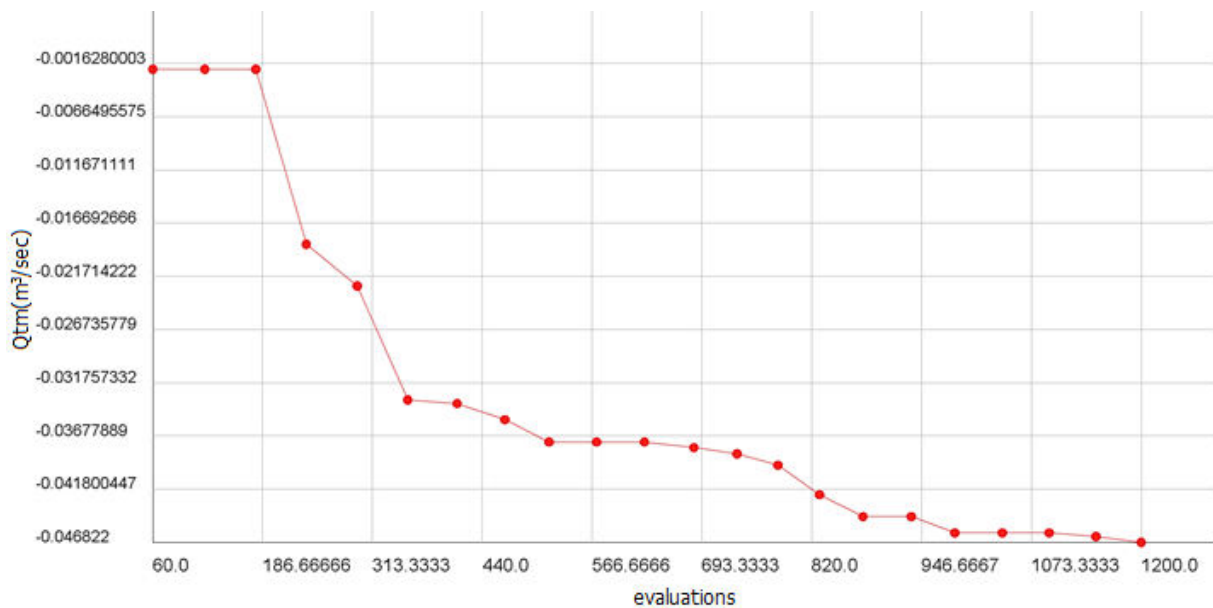
Σχήμα 6.15: EASY setup: Καθορισμός μέγιστου πλήθους επαναλήψεων

Οι τελικοί elites συνοψίζονται ως εξής :

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Variable 1	18853.367	18869.993...	18869.993...	18886.602	18836.758	18604.112...	17789.83	17789.83	17789.83	17789.83
Variable 2	3.005866	3.049852	3.049852	3.049852	3.049852	3.049852	3.049852	3.049852	3.049852	3.049852
Variable 3	0.4290319	0.4255128...	0.4255128...	0.4255128...	0.4255128...	0.4255128...	0.4281526	0.4281526	0.4281526	0.4281526
Variable 4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Variable 5	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
Variable 6	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Variable 7	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
Objective 1	-0.046822	-0.046285	-0.046285	-0.046241	-0.046186	-0.04598	-0.045929	-0.045929	-0.045929	-0.045929

Σχήμα 6.16: EASY results: Τελικοί δέκα elites

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γράφημα σύγκλισης του σχήματος, το οποίο διαφέρει από αυτό όταν χειρίζεται δύο αντικειμενικές συναρτήσεις.



Σχήμα 6.17: EASY results: Γράφημα σύγκλισης αλγορίθμου



Στον κατακόρυφο άξονα υπάρχουν οι τιμές τις αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή της παροχής. Στον οριζόντιο άξονα δίνεται ο αριθμός των επαναλήψεων (evaluations) του αλγορίθμου. Προσέχοντας κανείς την ανεστραμμένη φορά του κατακόρυφου άξονα, αντιλαμβάνεται εύκολα την κίνηση του αλγορίθμου προς διαρκώς βελτιωμένες προτάσεις και τιμές αντικειμενικής συνάρτησης.

Επομένως το βέλτιστο set παραμέτρων είναι :

*Πίνακας 6.5: Βέλτιστο set παραμέτρων*

mtot	18853,36 kg
dp	3,0058 m
de	0,429 m
da	0,6 m

και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για αυτό το set είναι η ακόλουθη μέση παροχή :

*Πίνακας 6.6: Βέλτιστη τιμή παροχής*

Q <sub>tm</sub>	0,0468 m <sup>3</sup> /sec
-----------------	----------------------------

Προσοχή συνίσταται στην κατανόηση της έννοιας της μέσης παροχής σε αυτή την περίπτωση. Ο μηχανισμός λειτουργεί περιοδικά, όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, και αντλεί νερό μόνο στη φάση της καθοδικής του κίνησης. Οι τιμές της παροχής σε αυτή τη φάση φθάνουν σε πολύ υψηλότερες τιμές από αυτή των 48,6 kg/sec, αλλά επίσης οι τιμές μηδενίζονται στη φάση της ανοδικής κίνησης του συστήματος. Επομένως στο μέγεθος της μέσης παροχής εμπεριέχονται και οι δύο αυτές διαφορετικές φάσεις. Ερμηνεύοντάς το διαφορετικά, αυτό σημαίνει ότι ο όγκος νερού που αποταμιεύεται σε μία περίοδο λειτουργίας του μηχανισμού ισούται με τον όγκο νερού που θα αποταμιευόταν από μία σταθερή παροχή της τάξεως των 46,8 kg/sec .

Αυτό που παρατηρήθηκε κατά τη διαδικασία και αν δεν έχει γίνει μέχρι τώρα κατανοητό, θα γίνει στη συνέχεια μέσω των γραφικών παραστάσεων, είναι ότι τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης αυτομάτως πληρούν και τα κριτήρια ασφαλούς λειτουργίας του μηχανισμού. Το σημαντικότερο από αυτά είναι το κριτήριο κρίσιμου βυθίσματος. Πρόκειται για τη συνθήκη μη εξόδου του πλωτήρα από το νερό και επομένως την αποφυγή φαινομένων που σχετίζονται με την αλλαγή του ρευστού από νερό σε αέρα, καθώς και την εμφάνιση άλλων συνθηκών και καταστάσεων λειτουργίας, όπως η κρούση του στην επιφάνεια τη θάλασσας (slamming) και άλλα, τα οποία δεν έχουν ληφθεί υπόψη στην παρούσα ανάλυση και πρέπει να αποφεύγεται η εμφάνισή τους τόσο για την ορθότητα των αποτελεσμάτων όσο και για την ασφαλή λειτουργία του μηχανισμού. Το άλλο κριτήριο της ταχύτητας εντός του αγωγού με την ανάγκη αυτή να διατηρείται κάτω από τα 5 m/s , δεν έχει τόση ισχύ και τέτοια επίδραση στην απόρριψη λύσεων, μιας και παρατηρείται μικρότερο πεδίο ταχυτήτων από αυτό.

Ο εξελικτικός αλγόριθμος διαπιστώθηκε μέσω αλληπάλληλων δοκιμών ότι κινείται στα όρια της μη εξόδου του πλωτήρα από το νερό, Προσπαθεί δηλαδή να μεγιστοποιήσει την παροχή και αυτό το καταφέρνει στο όριο βύθισης του πλωτήρα στο νερό. Αποτέλεσμα είναι τα παραμετρικά μεγέθη να παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία. Περισσότερα θα αναλυθούν στην παράγραφο της ανάλυσης ευαισθησίας. Ωστόσο αυτά που μόλις αναλύθηκαν, κρίθηκαν απαραίτητα για την κατανόηση των μετέπειτα γραφικών παραστάσεων.

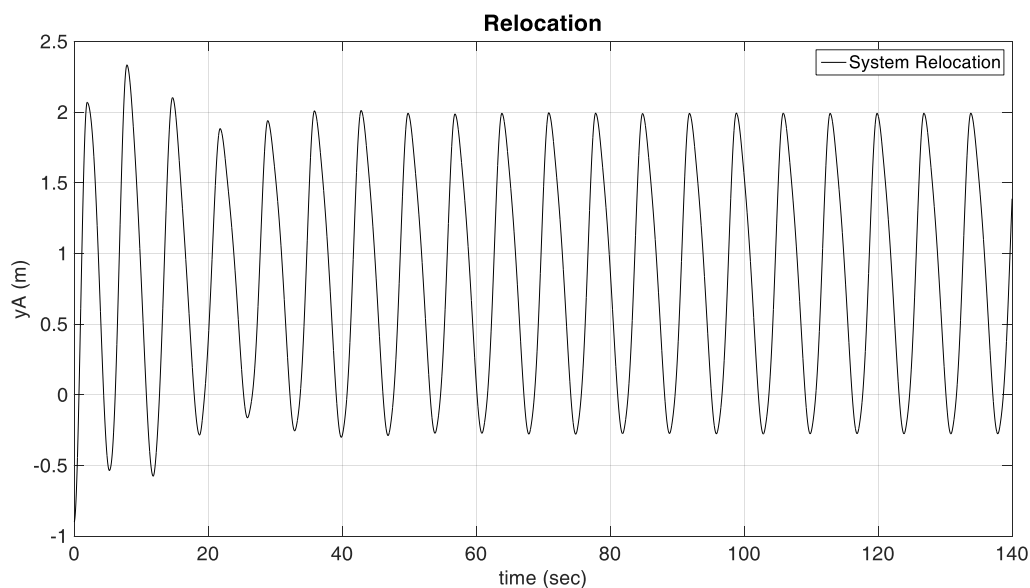
## Παράγραφος 3<sup>η</sup> : Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης

### 6.3.1) Κινηματικά μεγέθη και ογκομετρική παροχή πλήρους απόκρισης

Η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων οδήγησε στην εύρεση δυο βασικών κινηματικών μεγεθών του συστήματος και συγκεκριμένα της μετατόπισης και της ταχύτητάς του. Η επιτάχυνση υπολογίζεται στη συνέχεια με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης. Τα μεγέθη αυτά αποτελούν και τα βασικά στοιχεία υπολογισμού κάθε άλλου μεγέθους κατά την πορεία εκτέλεσης του κώδικα ENALIOS.m. Επίσης η απόκριση του συστήματος, όπως και κάθε άλλου, περιλαμβάνει δύο φάσεις: αυτή της μεταβατικής απόκρισης στην οποία πιθανώς εμφανίζονται έντονες διακυμάνσεις που μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο την επιβίωση του μηχανισμού, και στη μόνιμη απόκριση όπου πλέον έχει αποκατασταθεί περιοδικότητα και τα μεγέθη κινούνται εντός σταθερών ευρών, τα οποία λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό της συσκευής. Οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις προέκυψαν με τις εξής αρχικές συνθήκες:

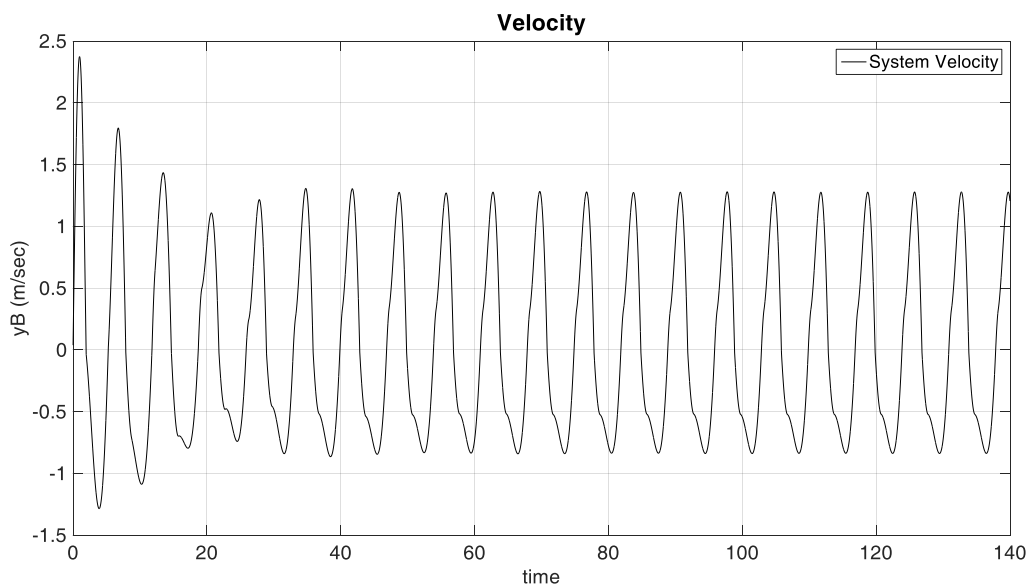
$$\begin{aligned} \text{Αρχική συνθήκη θέσης :} & \quad -A/2 \\ \text{Αρχική συνθήκη ταχύτητας :} & \quad 0 \end{aligned}$$

#### Μετατόπιση συστήματος-Πλήρης απόκριση



Εμφανής είναι η περιοδικότητα στο γράφημα της μετατόπισης του συστήματος, καθώς και οι παροδικά έντονες διακυμάνσεις στα πρώτα στάδια κίνησης, στη φάση δηλαδή της μεταβατικής απόκρισης. Το σπουδαιότερο ίσως στοιχείο είναι το σημαντικά μικρότερο πλάτος στην κάθοδο από αυτό στην άνοδο του συστήματος. Έτσι ενώ λοιπόν φθάνει για τη μόνιμη απόκριση στα 1,9959 m στην άνοδο, δεν ξεπερνάει τα 0,2774 m στην κάθοδο. Αιτία εμφάνισης αυτής της ανισότητας είναι η δράση της αντίστασης της στήλης νερού και των ολικών απωλειών του αγωγού στην κίνηση του μηχανισμού. Ως αντιστάσεις δρουν διαρκώς όσο είναι ανοιχτή η αντεπίστροφη βαλβίδα κατάθλιψης, όσο δηλαδή ο μηχανισμός κινείται καθοδικά, εμποδίζοντας την πλήρη εκμετάλλευση της δράσης της συνισταμένης δύναμης που εμφανίζεται και στην άνοση και περιλαμβάνει μόνο τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης σώματος και ρευστού : διέγερση, άνοση, οπισθέλκουσα και δύναμη ακτινοβολίας. Ωστόσο, σκοπός της λειτουργίας του μηχανισμού είναι η άντληση νερού κατά την κάθοδο και αυτό συμβαίνει στην κίνησή του από το Άνω Νεκρό Σημείο μέχρι το Κάτω Νεκρό Σημείο, έστω και αν αυτό είναι αρκετά κοντά στη θέση ισορροπίας του μηχανισμού. Για την παραπάνω λοιπόν κίνηση του συστήματος η οποία προήλθε από την επίλυση του συστήματος για τις βέλτιστες παραμέτρους του EASY προέκυψε η καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή της παροχής.

#### Ταχύτητα συστήματος-Πλήρης απόκριση

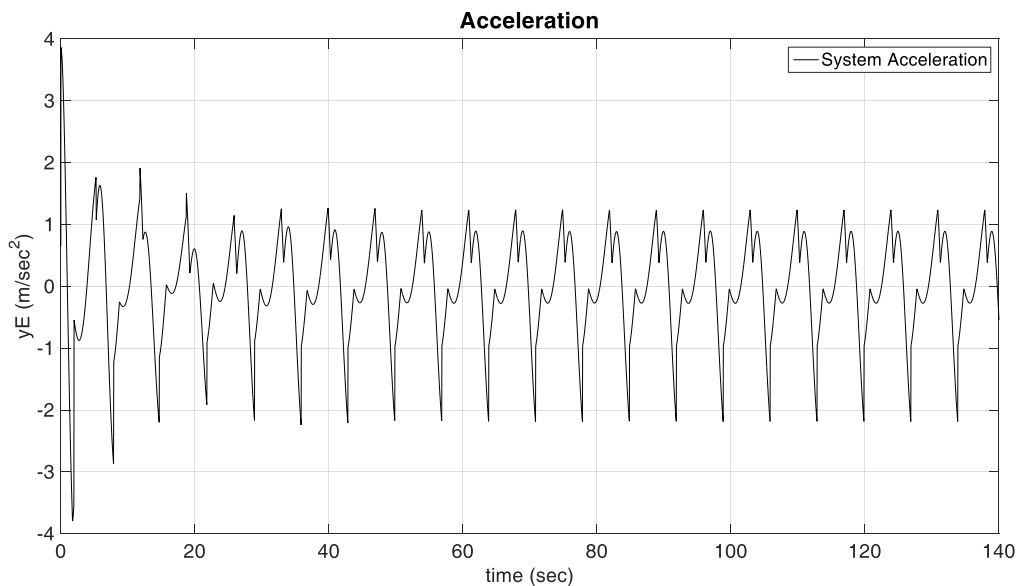


*Σχήμα 6.19: Ταχύτητα συστήματος-Πλήρης απόκριση*

Η σημαντικά μικρότερη ταχύτητα στην κάθοδο λόγω της δράσης των αντιστάσεων της στήλης νερού και των απωλειών του αγωγού αλλά κυρίως η εμφάνιση ασυνεχειών και απόκλισης από την αρμονική μορφή είναι οι σημαντικότερες παρατηρήσεις που αφορούν την ταχύτητα του συστήματος. Η δράση των αντιστάσεων σαν πέδη κατά την κάθοδο είναι λογική λόγω της αντίθετης φοράς τους ως προς την διέγερση, ενώ το υποθετικά ακαριαίο άνοιγμα και κλείσιμο της βαλβίδας κατάθλιψης είναι η αιτία εμφάνισης των ασυνεχειών στην ταχύτητα. Σε ό,τι αφορά την μεταβατική απόκριση, επιλέχθηκαν ορισμένες αρχικές συνθήκες για λόγους

γρηγορότερης αποκατάστασης της μεταβατικής απόκρισης, όπως θα αναλυθεί στο επόμενο εδάφιο. Στη μόνιμη απόκριση η μέγιστη ταχύτητα ανόδου φθάνει τα 1,2796 m/sec, ενώ στην κάθοδο φθάνει τα 0,8397 m/sec .

### Επιτάχυνση συστήματος-Πλήρης απόκριση

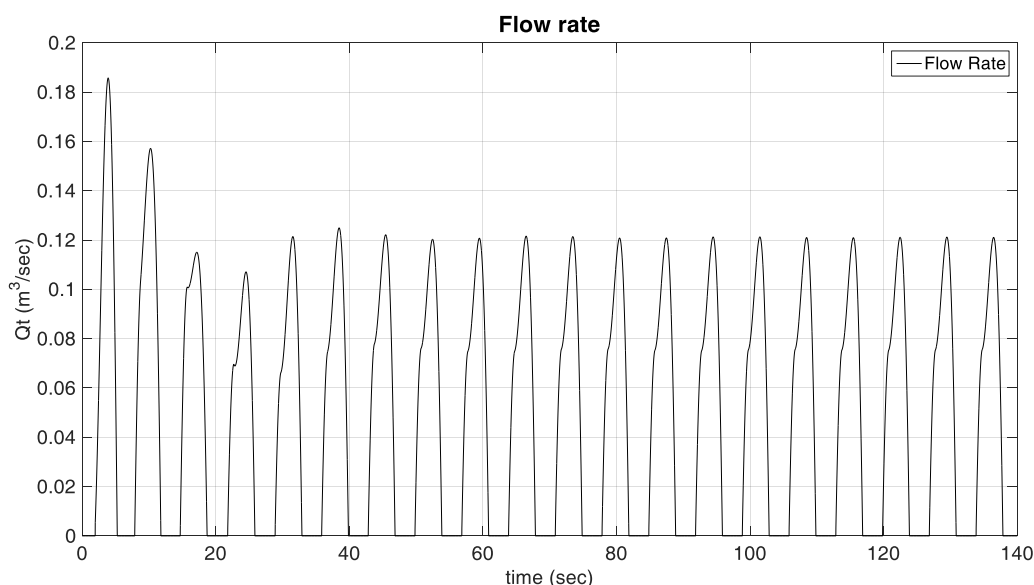


Σχήμα 6.20: Επιτάχυνση συστήματος-Πλήρης απόκριση

Η επιτάχυνση του συστήματος υπολογίζεται με ανάντι πεπερασμένες διαφορές από την ταχύτητα (Μπεργελές Γ. 2012).

$$yE(j,i+1) = \frac{yB(j,i+1) - yB(j,i)}{h} \quad (6.1)$$

Ο δείκτης  $j$  αναφέρεται στην παραμετροποίηση του προβλήματος, ενώ ο δείκτης  $i$ , ο οποίος και ενδιαφέρει, αναφέρεται στη χρονική προέλαση. Εδώ πλέον είναι πιο ορατές οι διακυμάνσεις και οι ασυνέχειες λόγω της λειτουργίας της βαλβίδας και κυρίως λόγω του πολύ γρήγορου χειρισμού της και εντοπίζονται για παράδειγμα στα 36 sec και στα 40 sec. Επίσης εμφανίζεται ασυνέχεια πολύ μικρού εύρους, σχεδόν ανεπαίσθητη, όπως φαίνεται στο γράφημα της ταχύτητας, κοντά στη θέση ισορροπίας του συστήματος, η οποία οφείλεται πιθανώς στην αλλαγή του προσήμου της διέγερσης και γίνεται αντιληπτό ως μικρού μεγέθους κραδασμός. Ελάχιστη τιμή επιτάχυνσης είναι τα -2,2037 m/sec<sup>2</sup> και μέγιστη τα 1,2416 m/sec<sup>2</sup>.

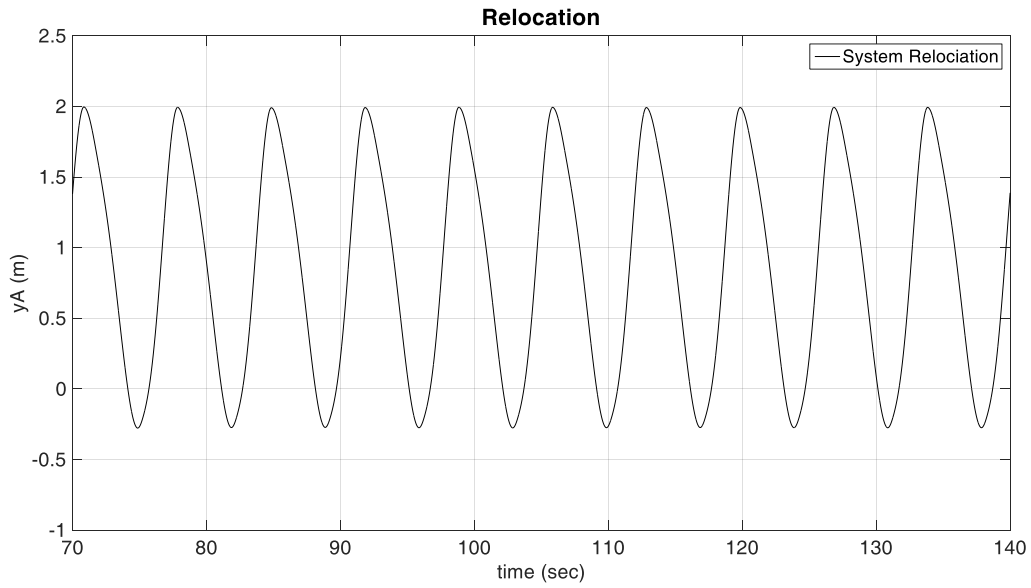
Ογκομετρική παροχή-Πλήρης απόκριση

*Σχήμα 6.21: Ογκομετρική παροχή συστήματος-Πλήρης απόκριση*

Όπως και η ταχύτητα, έτσι και η παροχή στον ταμιευτήρα, η οποία προκύπτει από την ταχύτητα στην κάθοδο του συστήματος, παρουσιάζουν μία περιοδική ασυνέχεια λόγω της λειτουργίας της βαλβίδας. Επίσης είναι φανερό ότι αν και η μέση παροχή είναι 46,8 kg/sec, εντούτοις η στιγμιαία μπορεί να φθάσει και τα 121,4 kg/sec, και είναι αυτή στην οποία καλείται να αντέξει ο αγωγός αλλά και αυτή που «μεταφέρει» και το μεγαλύτερο ενεργειακό ποσό. Επίσης σημειώνεται ότι λόγω του τρόπου μοντελοποίησης, και συγκεκριμένα της μοντελοποίησης των απωλειών του αγωγού ως δύναμης επί του εμβόλου, και φυσικά λόγω ισχύος της Αρχής της Συνέχειας, όση είναι η παροχή στη θέση του εμβόλου τόση είναι και στο στόμιο του ταμιευτήρα, ενώ ο ενεργειακός ισολογισμός μεταξύ εμβόλου, αγωγού και ταμιευτήρα είναι απαλλαγμένος απωλειών. Διαφορετική θεώρηση των απωλειών αγωγού σε μετέπειτα στάδιο της ενεργειακής ροής και όχι επί της κίνησης του πλωτήρα θα οδηγούσε σε εμφάνιση απωλειών στον παραπάνω αναφερθέντα ενεργειακό ισολογισμό.

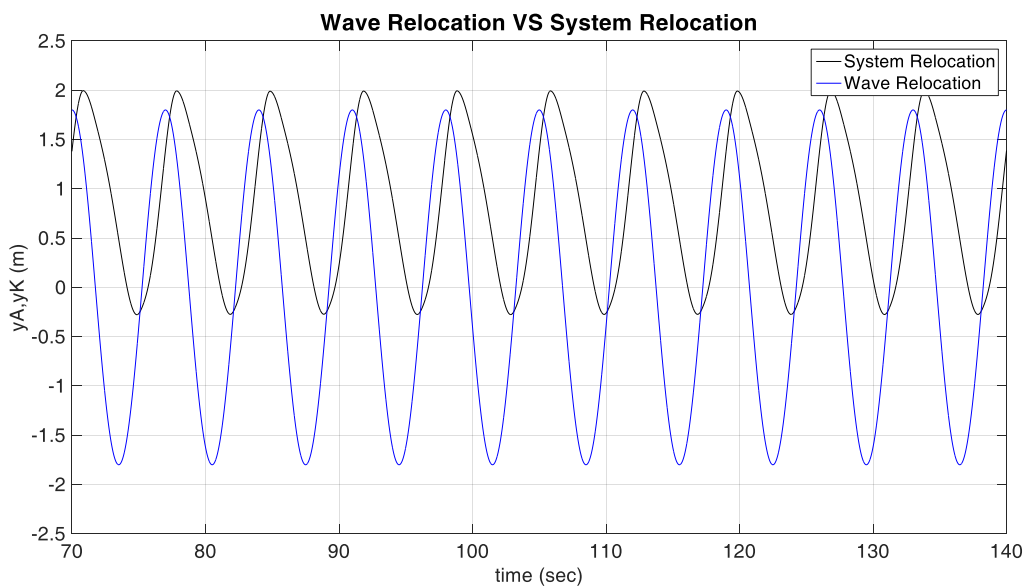
### 6.3.2) Κινηματικά μεγέθη και ογκομετρική παροχή μόνιμης απόκρισης

Αν και η μόνιμη απόκριση και η μελέτη της μπορεί να γίνει με απομόνωσή της από τα παραπάνω διαγράμματα, η παρουσίαση του μεγέθους της μετατόπισης σε κατάσταση μόνιμης απόκρισης (Μ.Κ.) κρίνεται αναγκαία για την καλύτερη κατανόηση και την καλύτερη παρουσίαση του εύρους διακύμανσης αυτής όταν έχει πλέον επέλθει η δυναμική ισορροπία.



Σχήμα 6.22: Μετατόπιση συστήματος-Μόνιμη απόκριση

Περισσότερα μπορούν να αναλυθούν και να γίνουν αντιληπτά αν στο ίδιο γράφημα παρασταθεί η μετατόπιση του συστήματος και η μετατόπιση του κύματος, η οποία είναι αρμονική, περιοδική και μάλιστα συνημιτονικής μορφής (γραμμική θεωρία Airy) .



Σχήμα 6.23: Μετατόπιση συστήματος και κύματος-Μόνιμη απόκριση

Μπορεί κανείς να παρατηρήσει τη θετική δράση της συνισταμένης και να αξιολογήσει το μέγεθος των δυνάμεων αντίστασης, αν λάβει υπόψιν του ότι κατά την άνοδο το σύστημα φθάνει σε υψηλότερο πλάτος από το κύμα λόγω αδράνειας και διέγερσης απαλλαγμένης των ισχυρών αντιστάσεων της στήλης νερού πρωτίστως, και σε πολύ μικρότερο βαθμό των δυνάμεων απωλειών του αγωγού, συγκρινόμενο με το πολύ μικρότερο πλάτος καθόδου.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς του γίνεται φανερό, αυτό της διαφοράς φάσης με το κύμα. Αποδεικνύεται ότι η διαφορά φάσης μεταξύ κύματος και διέγερσης είναι μηδενική, δηλαδή όντως ισχύει :

$$F_e = F_E \cos(\omega t + \sigma) \text{ με } \sigma \rightarrow 0 \quad (6.2)$$

Ωστόσο, η συνισταμένη δράση των υπόλοιπων δυνάμεων μαζί με την διέγερση καθώς και η αδράνεια του συστήματος, προκαλούν μια λογική χρονική υστέρηση του συστήματος ως προς το κύμα η οποία υπολογίζεται στα 1,22 rad ή 69,9°.

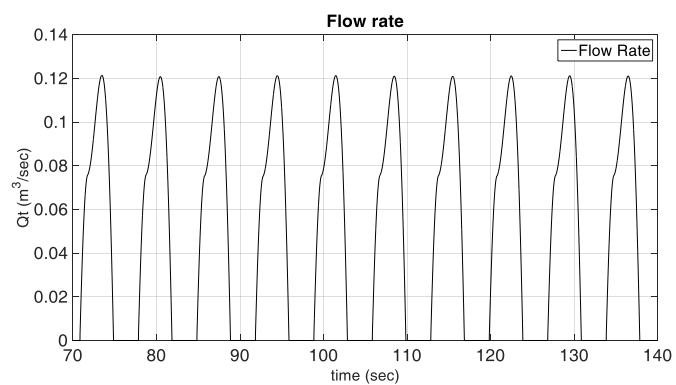
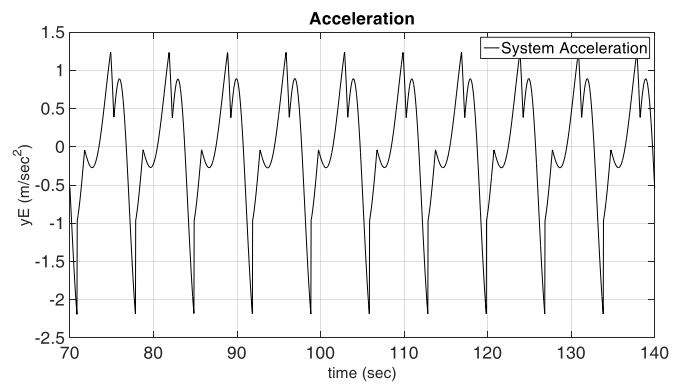
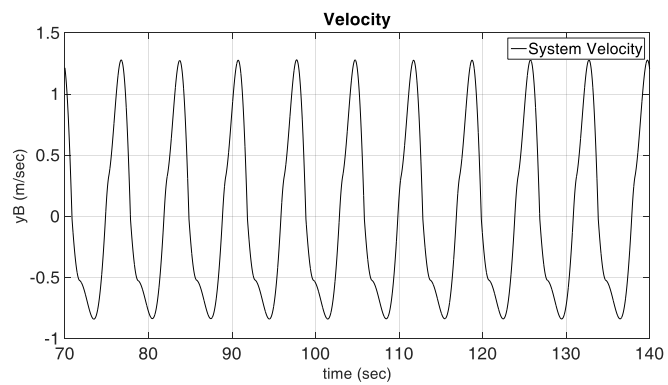
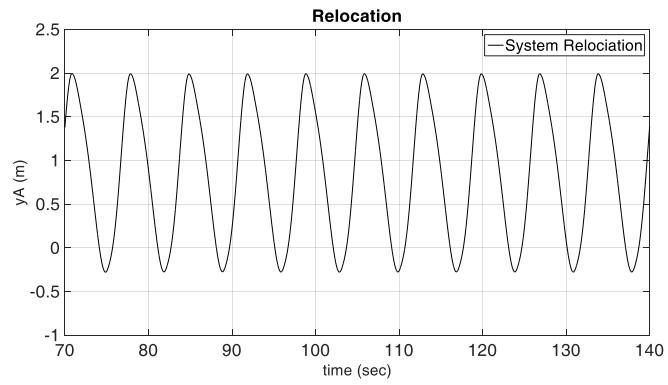
Ως τιμές των μεγεθών στη μόνιμη απόκριση επιλέγονται αυτές στο χρονικό διάστημα από  $[0,5 \cdot N, N]$ , όπου  $N$  είναι το πλήθος των υποδιαστημάτων του διακριτοποιημένου χρόνου:

$$t_{final} = 20T = 140 \text{ sec} \quad (6.3)$$

$$h = 0,01 \text{ sec} \quad (6.4)$$

$$N = \text{ceil}\left(\frac{t_{final}}{h}\right) = 14000 \quad (6.5)$$

Η εντολή ceil στρογγυλοποιεί την τιμή του  $N$  στον αμέσως μεγαλύτερο ακέραιο αριθμό.



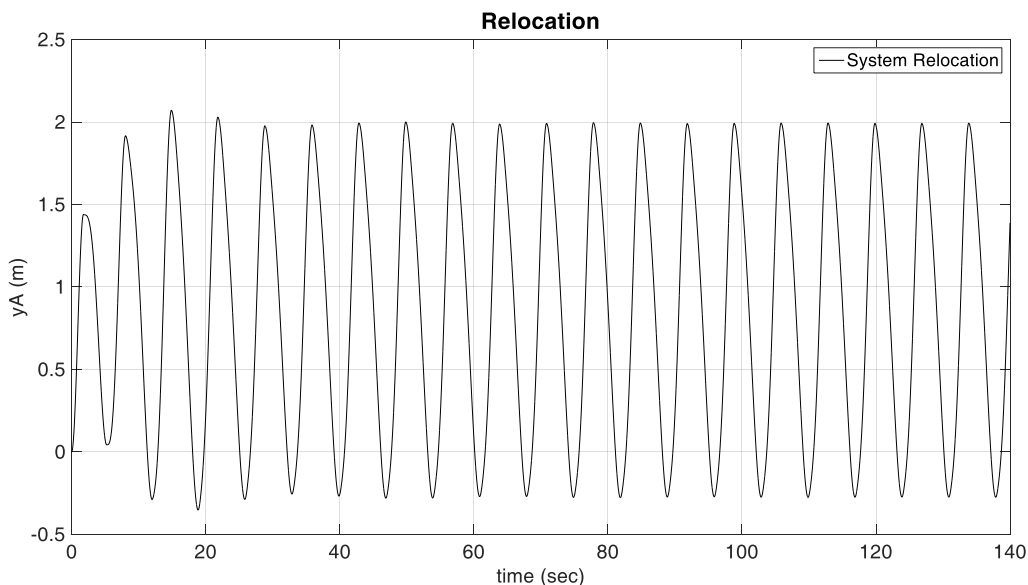


### 6.3.3) Αρχικές συνθήκες και μεταβατική απόκριση

Το φαινόμενο, αν και μη αρμονικό, είναι περιοδικό και επομένως ανεξάρτητο των αρχικών συνθηκών του προβλήματος. Η ανεξαρτησία αυτή όμως αφορά τη μόνιμη απόκριση του συστήματος. Σε ό,τι αφορά τη μεταβατική απόκριση, εκεί οι αρχικές συνθήκες έχουν σημαντική επίδραση. Επιθυμητό είναι ο χρόνος αποκατάστασης της μόνιμης απόκρισης να είναι ο ελάχιστος δυνατός, μιας και, όπως αναφέρθηκε, όσο το σύστημα βρίσκεται στην φάση της μεταβατικής απόκρισης τίθεται σε κίνδυνο η επιβίωσή του. Η ελαχιστοποίηση αυτού λοιπόν του χρόνου μπορεί να γίνει με την επιλογή κατάλληλων αρχικών συνθηκών. Ακόμη και στην πράξη είναι δυνατή μία τέτοια επιλογή μέσω επιβολής μιας αρχικής διέγερσης, ενός δηλαδή ερεθίσματος της ταχύτητας ή εκκίνησης από συγκεκριμένη θέση μέσω αντισταθμιστικής δύναμης που απελευθερώνεται την κατάλληλη στιγμή. Η επίδραση των αρχικών συνθηκών γίνεται φανερή στις παρακάτω δύο περιπτώσεις. Στόχος είναι να επιτυγχάνεται γρήγορη αποκατάσταση χωρίς να εμφανίζονται ιδιαίτερα μεγάλες διακυμάνσεις των κινηματικών μεγεθών και άρα όχι και τόσο μεγάλα φορτία καταπόνησης του μηχανισμού, ενώ συγχρόνως ούτε στη μεταβατική απόκριση να εξέρχεται ο πλωτήρας από το νερό:

*Πίνακας 6.7: Μηδενικές αρχικές συνθήκες*

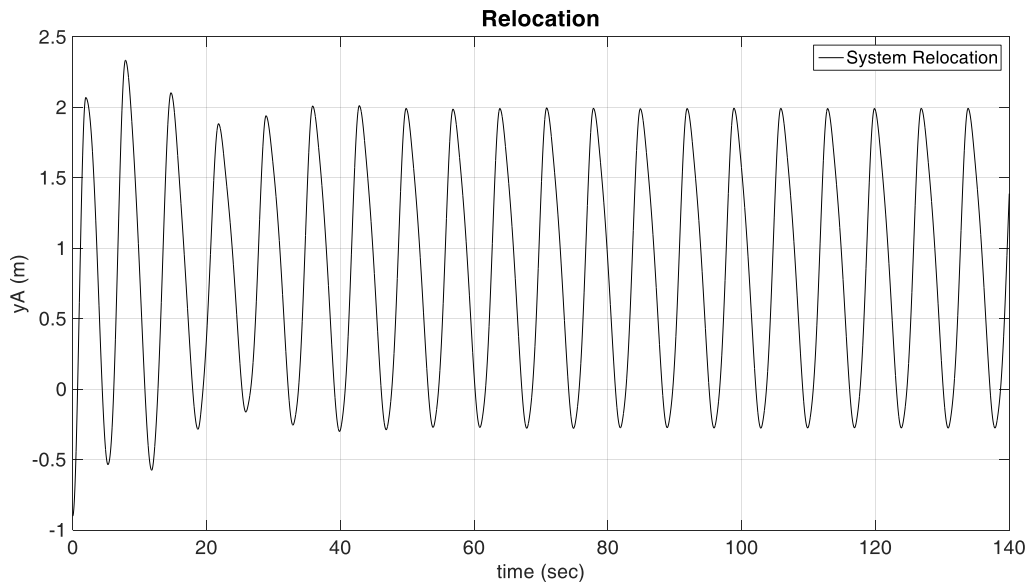
Αρχική συνθήκη θέσης	0
Αρχική συνθήκη ταχύτητας	0
Χρόνος αποκατάστασης	28 sec



*Σχήμα 6.24: Μετατόπιση συστήματος-Πλήρης απόκριση-Μηδενικές αρχικές συνθήκες*

*Πίνακας 6.8: Αρχική συνθήκη θέσης (-A/2)*

Αρχική συνθήκη θέσης	-A/2
Αρχική συνθήκη ταχύτητας	0
Χρόνος αποκατάστασης	35 sec



*Σχήμα 6.25: Μετατόπιση συστήματος-Πλήρης απόκριση-Αρχική συνθήκη θέσης (-A/2)*

Από εδώ και στο εξής η μελέτη εστιάζεται στη μόνιμη απόκριση. Επομένως οι όποιες αρχικές συνθήκες ουδεμία επίδραση έχουν σε αυτήν.

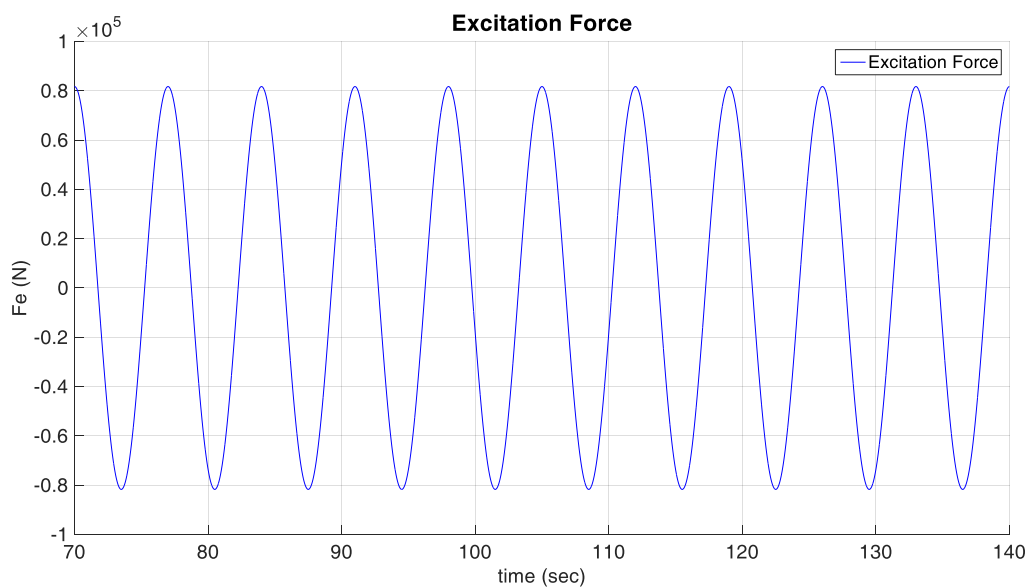
#### **6.3.4) Αναπτυσσόμενες δυνάμεις στη μόνιμη απόκριση**

Για καλύτερη κατανόηση οι δυνάμεις που κινούν το σύστημα θα απεικονίζονται με μπλε χρώμα, ενώ οι αντιστάσεις με κόκκινο, δείχνοντας έτσι και το πρόσημο με το οποίο υπεισέρχονται στους υπολογισμούς. Όλες οι δυνάμεις εξαρτώνται από το πρόσημο της ταχύτητας με μία μόνο εξαίρεση, αυτή της άνωσης, το πρόσημο της οποίας εξαρτάται από το εκάστοτε βύθισμα. Για αυτό τον λόγο κρίθηκε σωστό να παρουσιαστούν όλες τους συναρτήσει του μεγέθους από το οποίο εξαρτώνται.

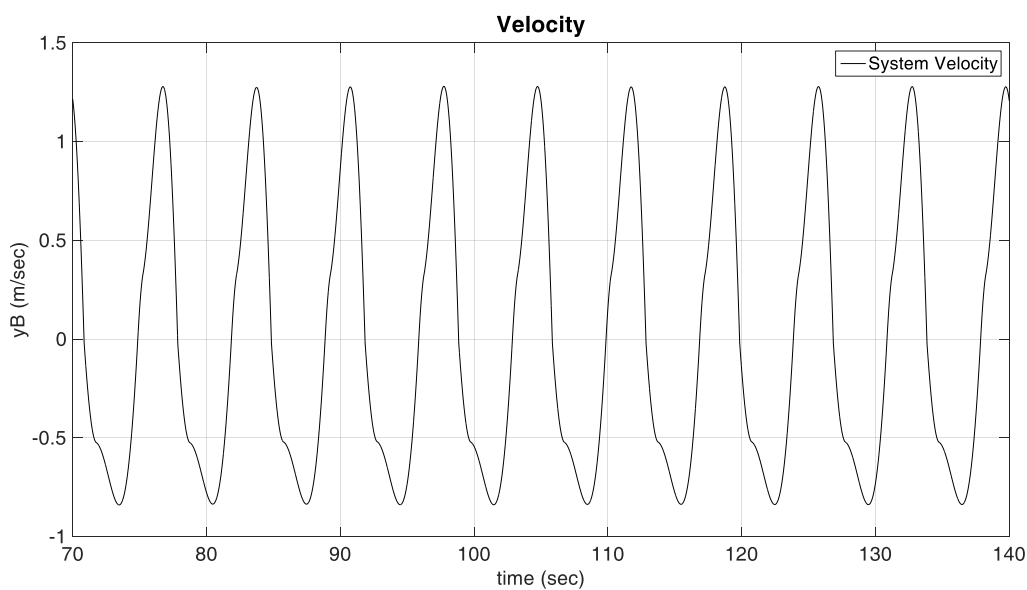
Διέγερση-Excitation force

Η δύναμη διέγερσης αποτελεί και την κινητήρια δύναμη του συστήματος. Επιδίωξη αποτελεί η διέγερση να βρίσκεται σε φάση με την ταχύτητα του συστήματος ώστε να ευνοείται το φαινόμενο του συντονισμού και επομένως η μεγιστοποίηση της ενέργειας που απορροφά το σύστημα. Το παρών σύστημα όμως, όπως διαπιστώθηκε, διέπεται από διαφορετική εξίσωση κίνησης στην κάθοδο και την άνοδο και η κίνησή του δεν έχει αρμονικό χαρακτήρα. Παρόλα αυτά όμως η διέγερση εμφανίζεται σχεδόν σε φάση με την ταχύτητα του συστήματος, γεγονός-απόδειξη της ενεργειακά αξιόλογης λειτουργίας της συσκευής.

$$F_e = F_E \cos(\omega t + \sigma) , \text{ με } \sigma \rightarrow 0 \quad (6.6)$$



Σχήμα 6.26: Δύναμη διέγερσης-Μόνιμη απόκριση

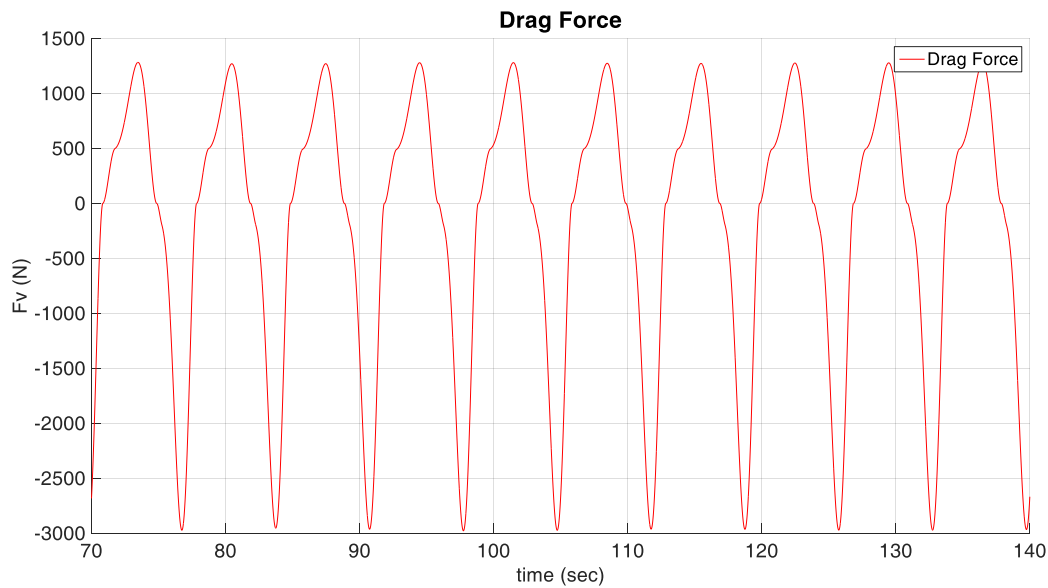


Σχήμα 6.27: Ταχύτητα συστήματος-Μόνιμη απόκριση

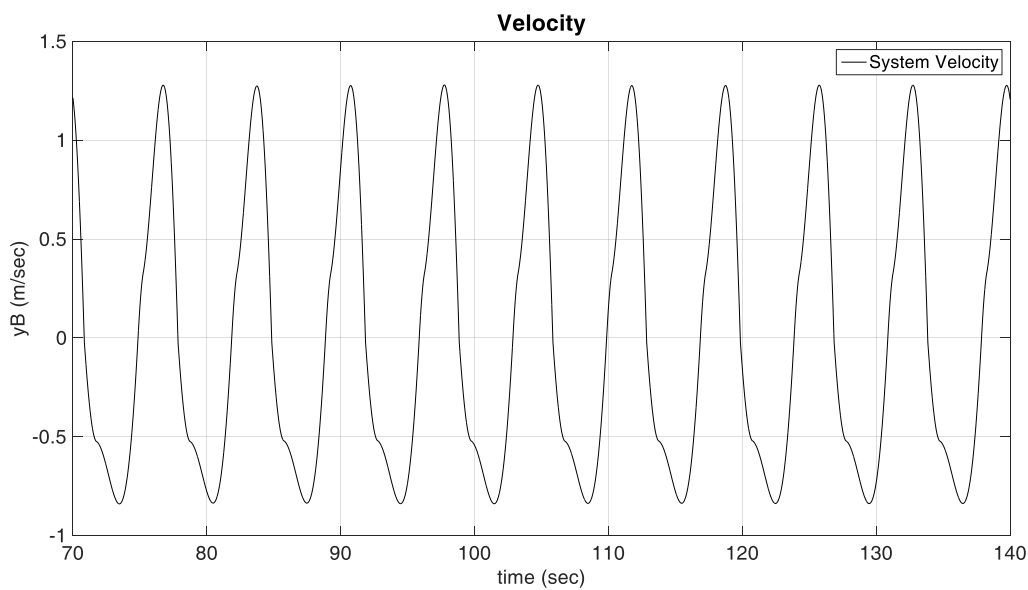
### Οπισθέλκουσα-Drag force

Η δύναμη αντίστασης ή οπισθέλκουσα είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας όπως φαίνεται και από τον παρακάτω τύπο, το δε μέγεθός της είναι σημαντικά μικρότερο, μία τάξη μεγέθους, από τη δύναμη διέγερσης. Κάθε στιγμή έχει φορά αντίθετη της κίνησης. Άρα, όπως μαρτυρά και το αρνητικό πρόσημο, βρίσκεται σε διαφορά φάσης  $\pi$  rad με την ταχύτητα του συστήματος.

$$F_v = -\frac{1}{2} \rho C_d S_w |\dot{z}| \dot{z} \quad (6.7)$$



Σχήμα 6.28: Δύναμη οπισθέλκουσας-Μόνιμη απόκριση

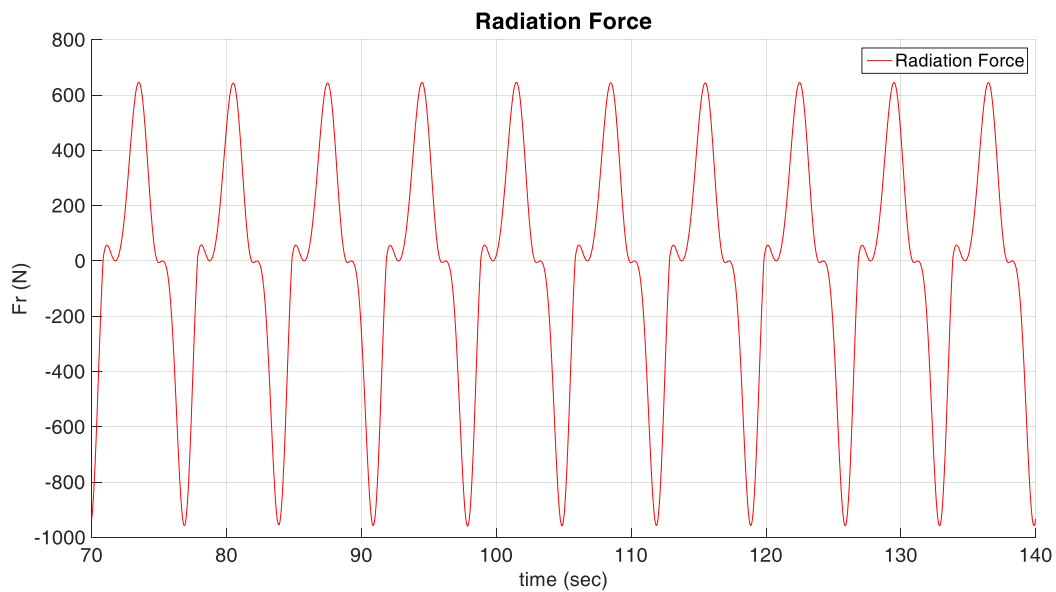


Σχήμα 6.29: Ταχύτητα συστήματος-Μόνιμη απόκριση

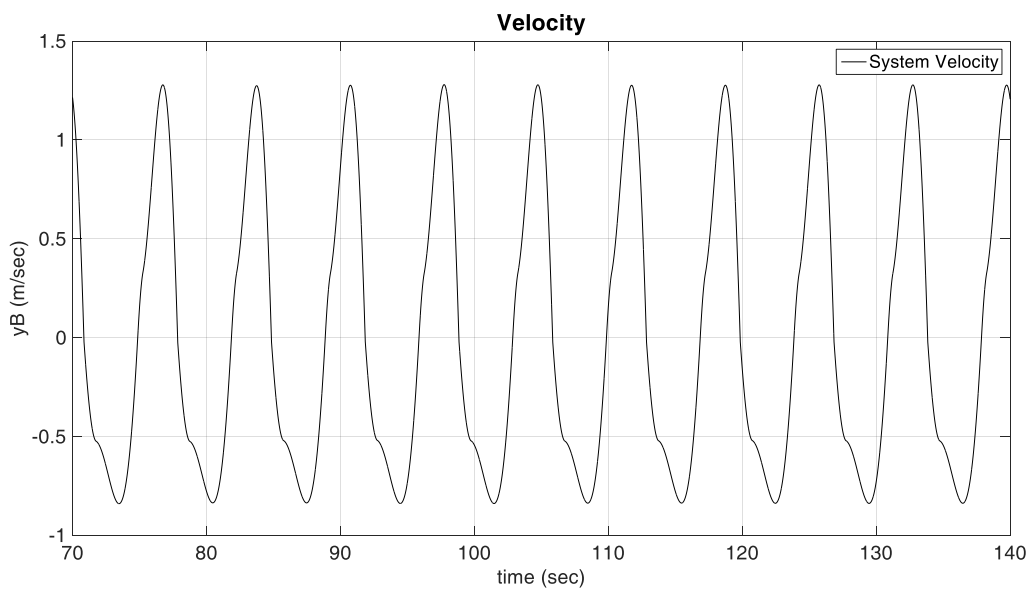
Δύναμη ακτινοβολίας-Radiation force

Πρόκειται επίσης για δύναμη αντίστασης, ίδιας τάξης μεγέθους με την οπισθέλκουσα αλλά μικρότερου πλάτους. Ο συντελεστής αντίστασης  $b$  υπολογίζεται κατά τα γνωστά από το εδάφιο (4.2.5). Βρίσκεται σε διαφορά φάσης  $\pi$  rad με την ταχύτητα του συστήματος και είναι ανάλογη αυτής.

$$F_r = -b\dot{z} \quad (6.8)$$



Σχήμα 6.30: Δύναμη ακτινοβολίας-Μόνιμη απόκριση

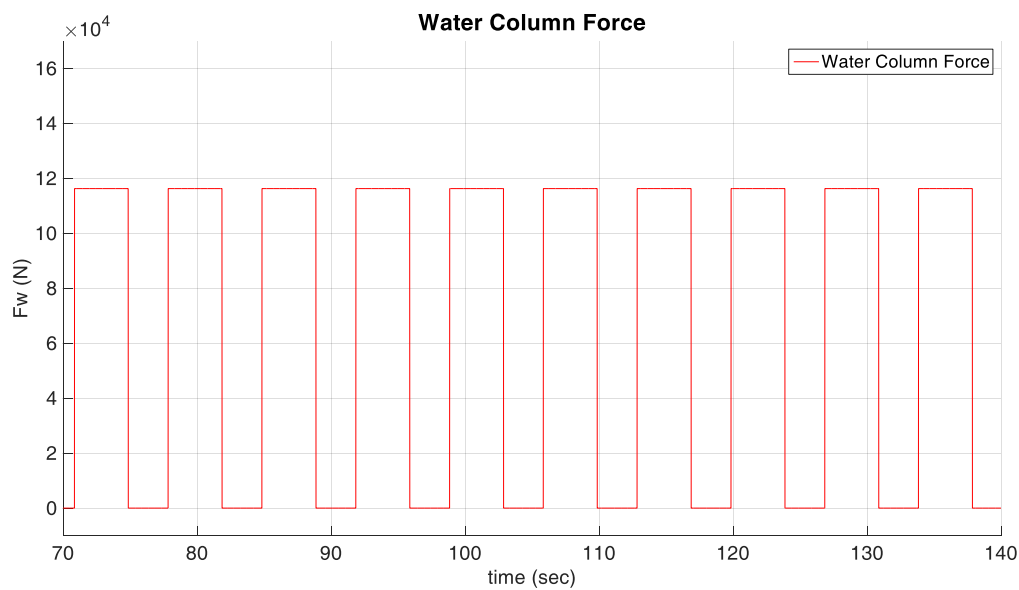


Σχήμα 6.31: Ταχύτητα συστήματος-Μόνιμη απόκριση

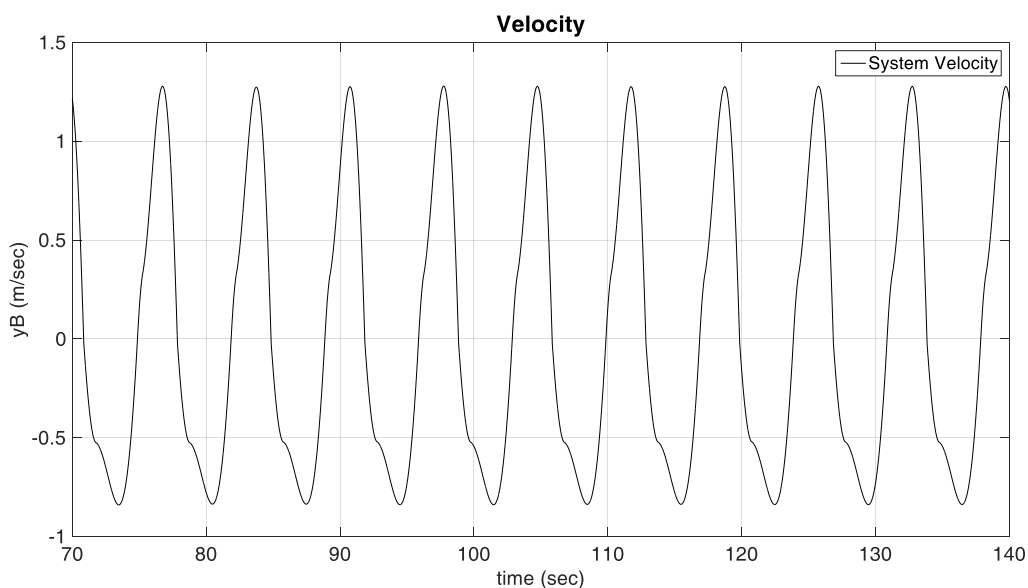
### Αντίσταση στήλης νερού-Water Column Force

Η σημαντικότερη αντίσταση του συστήματος κατά την κάθοδό του είναι αυτή της στήλης νερού. Βασικός παράγοντας του μεγέθους της είναι η υψομετρική διαφορά στην οποία αντλείται το νερό. Η τάξη μεγέθους της είναι ίδια με αυτή της διέγερσης. Η δύναμη δρα όσο υπάρχει επικοινωνία μεταξύ του χώρου του κυλίνδρου και του αγωγού, όσο δηλαδή είναι ανοιχτή η βαλβίδα κατάθλιψης ή διαφορετικά όσο το σύστημα βρίσκεται σε κάθοδο.

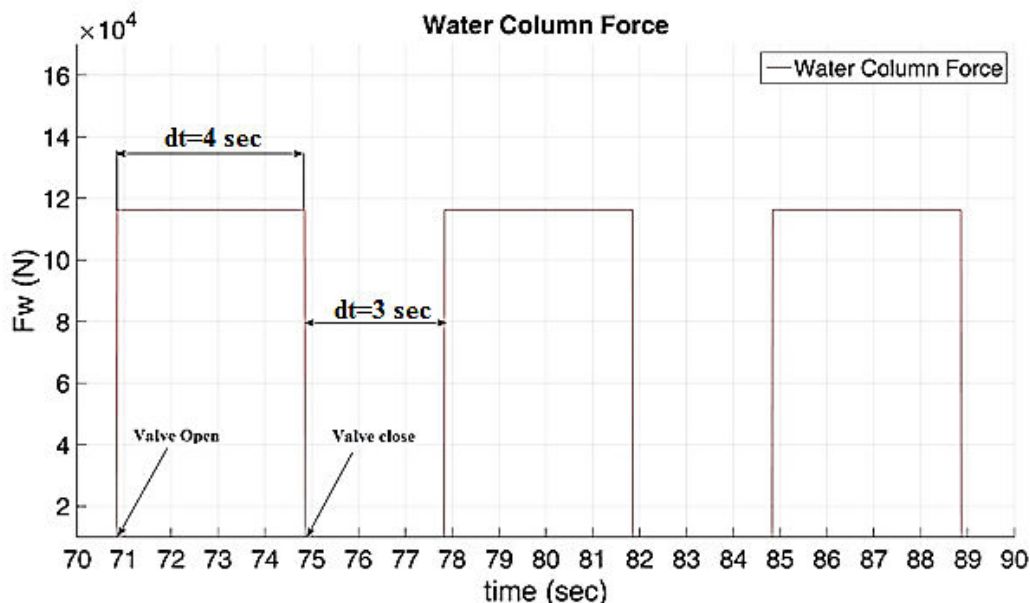
$$F_w = -\rho g Z_m A_e \quad (6.9)$$



Σχήμα 6.32: Δύναμη αντίστασης στήλης νερού-Μόνιμη απόκριση



Σχήμα 6.33: Ταχύτητα συστήματος-Μόνιμη απόκριση



Σχήμα 6.34: Λειτουργία βαλβίδας και εμφάνιση αντίστασης στήλης νερού

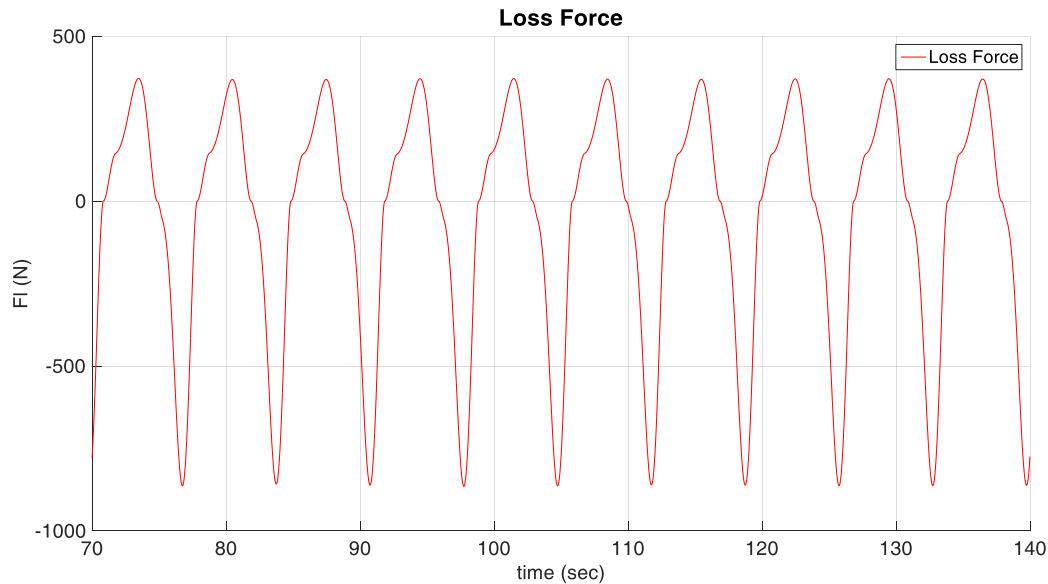
Από το παραπάνω γράφημα διαπιστώνεται ότι ο χρόνος καθόδου, δηλαδή ο χρόνος από το ΑΝΣ έως το ΚΝΣ, είναι μεγαλύτερος και συγκεκριμένα κατά περίπου 1 sec του χρόνου ανόδου, ενδεικτικό της δυσκολίας που συναντά το σύστημα στην κάθοδο λόγω κυρίως της αντίστασης στήλης νερού. Η διαφορά αυτή στον χρόνο καθόδου του συστήματος θα επεξηγηθεί ακόμη καλύτερα με τη χρήση στιγμιότυπων της κίνησης του συστήματος. Επίσης φαίνονται τα σημεία χειρισμού της βαλβίδας. Ο ταχύτερος χειρισμός είναι επιθυμητός από την μία γιατί απελευθερώνει άμεσα την «εγκλωβισμένη» παροχή στον κύλινδρο. Ωστόσο μπορεί να αποβεί μοιραίος για τον αγωγό, καθώς ευνοεί την ανάπτυξη ισχυρών μεταβατικών φαινομένων, ενώ είναι αιτία εμφάνισης κραδασμών, όπως φαίνεται και από το γράφημα της επιτάχυνσης, που δοκιμάζουν την κατασκευαστική αντοχή του όλου συστήματος. Η ανάπτυξη υδραυλικού πλήγματος (water hammer) πρέπει να αποφεύγεται και να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό και αυτής της μορφής αντλιοστασίου με την κατασκευή κατάλληλων αντιπληγματικών διατάξεων, όπως στήλη ανάπαυσης ή βαλβίδες ανακούφισης. Η χρήση διαφορετικού νόμου ελέγχου της βαλβίδας πιθανώς μέσω χρήσης συστήματος αυτομάτου ελέγχου με κατάλληλο κριτήριο ανοίγματος που υλοποιείται από τον επενεργητή είναι μεγάλης σημασίας ώστε να ελαχιστοποιούνται οι υπερπιέσεις και υποπιέσεις κατά το χειρισμό της.

### Αντίσταση ολικών απωλειών αγωγού -Loss Force

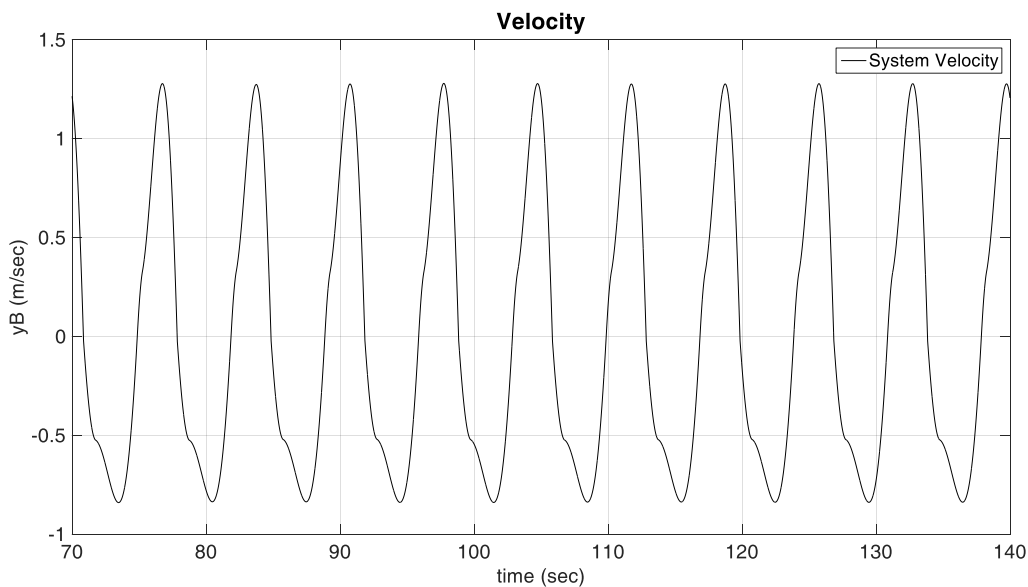
Όταν αναφέρονται οι ολικές απώλειες αγωγού, ουσιαστικά εννοούνται οι γραμμικές απώλειες και οι εντοπισμένες απώλειες οι οποίες ανάγονται σε γραμμικές μέσω ενός ισοδύναμου μήκους αγωγού, όπως και έγινε. Οι αντιστάσεις αυτές, οι υδροδυναμικές τριβές, βάση της μοντελοποίησης, μετέχουν στον καθορισμό της κίνησης του πλωτήρα, καθώς ανάγονται ως δύναμη στην επιφάνεια του εμβόλου και φυσικά ως αντίσταση, άρα σε διαφορά φάσης  $\pi$  rad

με την ταχύτητα. Η τάξη μεγέθους είναι ίδια με αυτή της οπισθέλκουσας και ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας. Ο ακόλουθος τύπος προέκυψε στο εδάφιο (4.1.5).

$$F_L = -l_f L_a \rho \frac{d_e^4}{d_a^5} \dot{z} |\dot{z}| A_e \quad (6.10)$$



Σχήμα 6.35: Δύναμη αντίστασης απωλειών αγωγού-Μόνιμη απόκριση



Σχήμα 6.36: Ταχύτητα συστήματος-Μόνιμη απόκριση

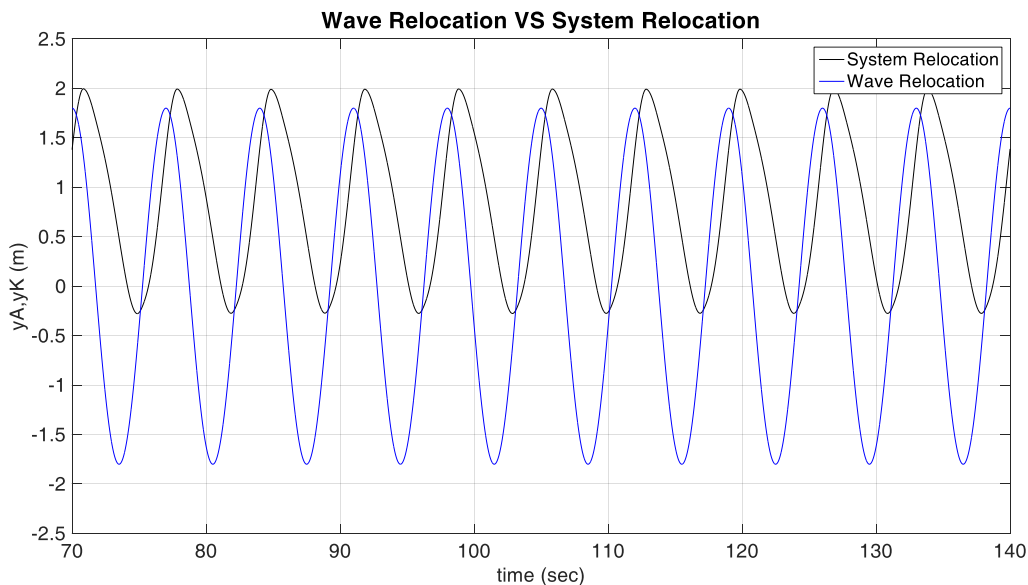
Να σημειωθεί ότι η μοντελοποίηση θα μπορούσε να είχε γίνει διαφορετικά. Συγκεκριμένα οι απώλειες αυτές να μην μετείχαν ως δύναμη επί του εμβόλου αλλά ως απώλειες ταχύτητας εντός του αγωγού. Στην περίπτωση αυτή ο ενεργειακός ισολογισμός μεταξύ εμβόλου και ταμιευτήρα θα περιείχε απώλειες.



### Ανωση -Buoyancy Force

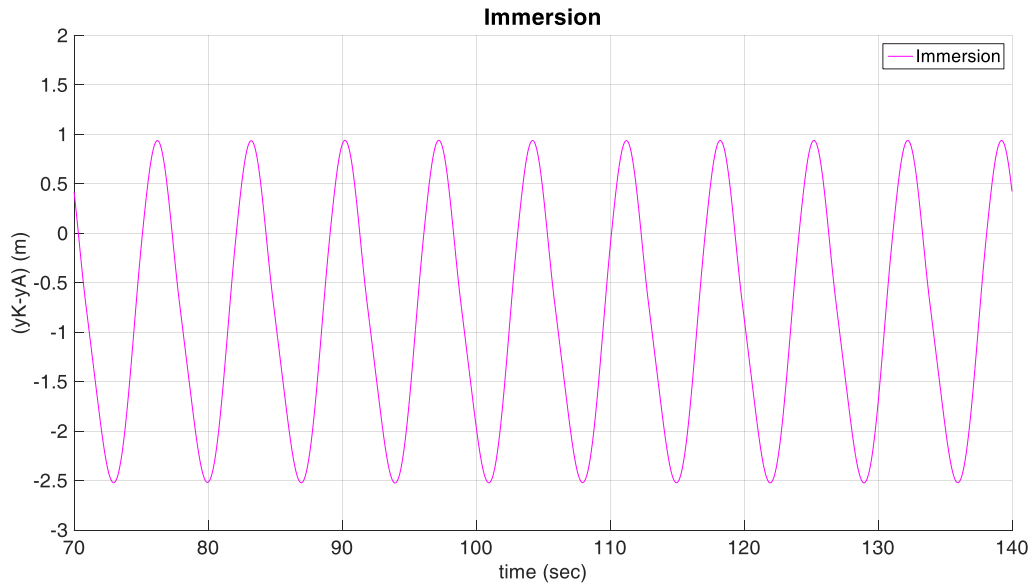
Η δύναμη άνωσης μοντελοποιείται ως διαφορά βάρους και άνωσης. Αυτό ήταν αναγκαίο μιας και κύμα και σύστημα βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους. Επομένως το βύθισμα του σώματος μεταβάλλεται κάθε στιγμή. Μάλιστα, όπως διαπιστώθηκε και σχολιάστηκε, ο τρόπος με τον οποίο ο εξελικτικός αλγόριθμος οδηγεί την βελτιστοποίηση κινείται στο οριακό βύθισμα του πλωτήρα. Σε αυτή την φάση δηλαδή ελάχιστο τμήμα του σώματος βρίσκεται εντός του νερού. Επομένως, αν στη θέση ηρεμίας η άνωση εξισορροπεί το βάρος του σώματος και αυτό έχει ένα βύθισμα  $D$  που προσδιορίζεται από την συνθήκη πλευσης, τότε σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση βυθίσματος μία από τις δύο συνιστώσες, το βάρος και η άνωση, υπερτερεί της άλλης, καθορίζοντας έτσι και το πρόσημο της διαφοράς τους που μετέχει στο σύστημα των διαφορικών εξισώσεων σε σχέση πάντα με την φορά της κίνησης. Έτσι άλλες στιγμές η άνωση υποβοηθάει την κίνηση και άλλες την παρεμποδίζει. Ο δίστημος αυτός χαρακτήρας της οδηγεί και στη διαφορετική χρωματική της απεικόνιση, με μωβ χρώμα.

$$F_b = \rho g S_w (y_k - y_A) \quad (6.11)$$

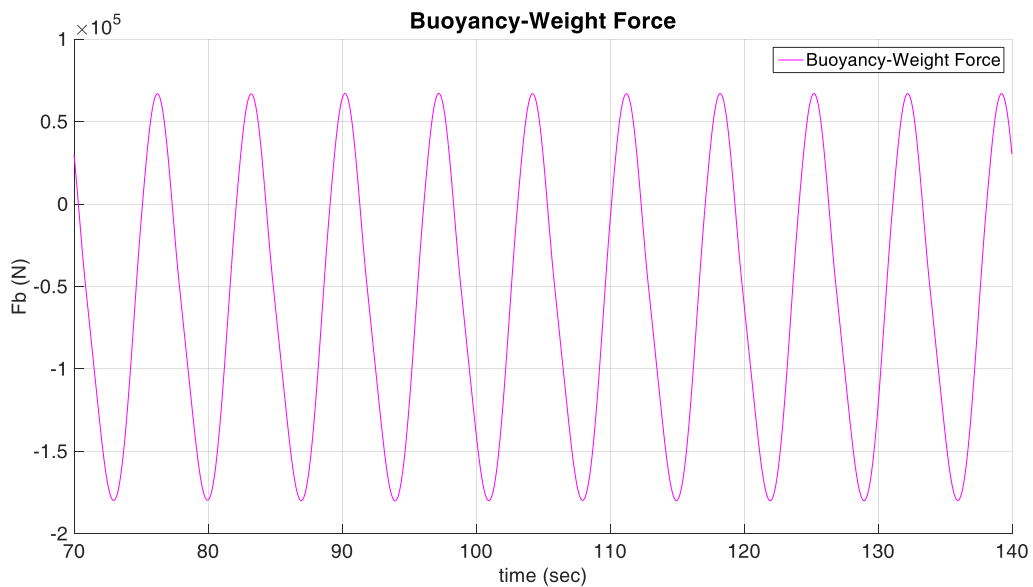


Σχήμα 6.37: Μετατόπιση συστήματος και κύματος-Μόνιμη απόκριση

Τις στιγμές που το κύμα βρίσκεται πάνω από το σύστημα, για παράδειγμα στα 91 sec , η διαφορά  $(y_k - y_A)$  είναι θετική. Άρα το βύθισμα θεωρείται θετικό, μιας και είναι μεγαλύτερο από το βύθισμα  $D$  της θέσης ηρεμίας και επομένως η δύναμη (Ανωση-Βάρος) είναι θετική. Τα αντίθετα συμβαίνουν όταν το κύμα υποχωρεί σε σχέση με το σύστημα, οπότε πλέον υπερτερεί το βάρος του συστήματος όπως για παράδειγμα στα 108 sec, και το βύθισμα λαμβάνεται κατά σύμβαση αρνητικό μιας και είναι μικρότερο από το βύθισμα  $D$  της θέσης ισορροπίας.



Σχήμα 6.38: Βύθισμα πλωτήρα-Μόνιμη απόκριση



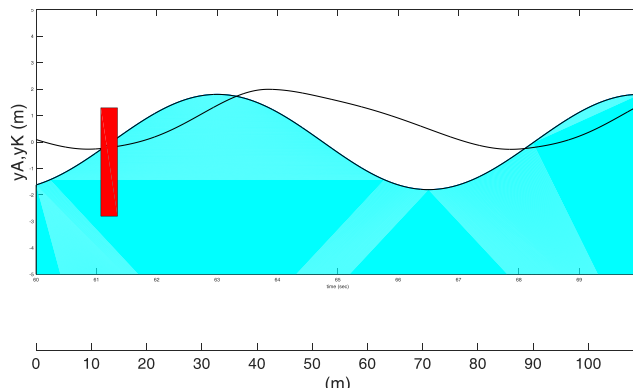
Σχήμα 6.39: Δύναμη (Άνωσης-Βάρους)-Μόνιμη απόκριση

Η τάξη μεγέθους της άνωσης είναι ίδια με των άλλων δύο κυρίαρχων δυνάμεων του συστήματος, αυτών της διέγερσης και της αντίστασης στήλης νερού, και καθορίζουν στο μεγαλύτερο βαθμό τα χαρακτηριστικά της κίνησής του.

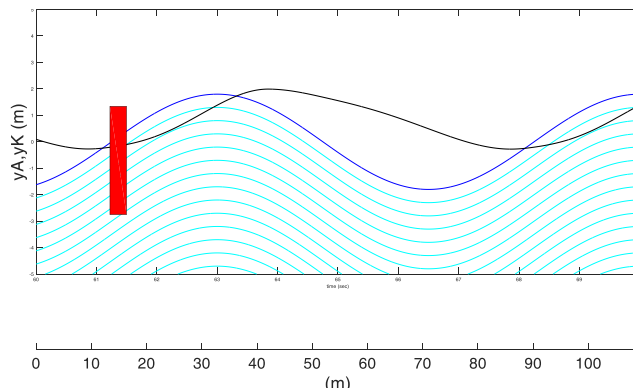
### 6.3.5) Δυναμική αναπαράσταση της μετατόπισης του μηχανισμού

Στα πλαίσια της ανάπτυξης του κώδικα δημιουργήθηκε και το τμήμα του που αφορά τη δυναμική αναπαράσταση της κίνησής του (animation), ως εργαλείο καλύτερης κατανόησης και παρατήρησης της σχετικής κίνησης συστήματος και κύματος.

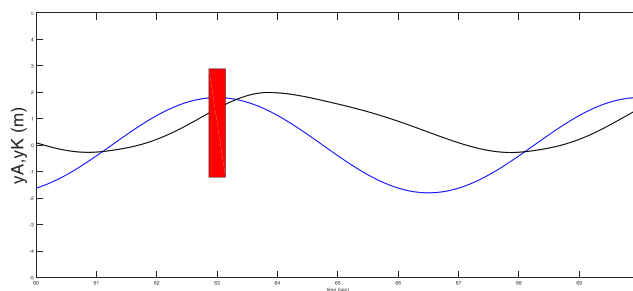
Διατίθενται τρεις διαφορετικές απεικονίσεις κυρίως για λόγους παρουσίασης και επιλέγεται ένας από αυτούς ελεύθερα, λαμβάνοντας υπόψη ό,τι όσο πιο πολύπλοκος είναι ο τρόπος παρουσίασης και συγκεκριμένα ο τρόπος παρουσίασης του κύματος, τόσο αυξάνει και το υπολογιστικό κόστος.



Σχήμα 6.40: Στιγμιότυπο animation-Αναπαράσταση επιφάνειας κύματος



Σχήμα 6.41: Στιγμιότυπο animation-Αναπαράσταση κύματος με ισοϋψείς συνημιτονικές καμπύλες



Σχήμα 6.42: Στιγμιότυπο animation-Απλή αναπαράσταση κύματος με συνημιτονική καμπύλη επιφάνειας

Ο πλωτήρας απεικονίζεται με το κόκκινο ορθογώνιο. Η διαφορά έγκειται στον τρόπο απεικόνισης της θάλασσας και γίνεται είτε ως επιφάνεια με όριο την συνημιτονική καμπύλη, είτε με ισοϋψείς συνημιτονικές καμπύλες του κύματος, είτε ως μόνο με την συνημιτονική καμπύλη της επιφανείας. Η απαίτηση σε χρόνο είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη σειρά παρουσίασής τους. Εν πάση περιπτώσει, ο τρόπος παρουσίασης έχει να κάνει ξεκάθαρα με διαισθητικά θέματα και μόνο.

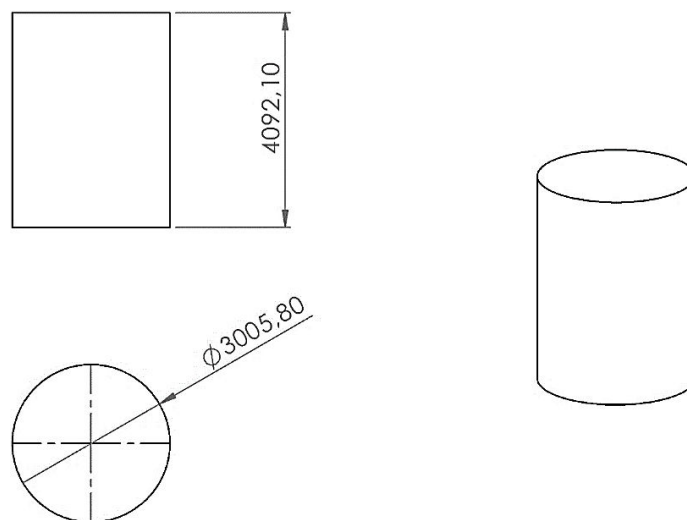
Εστιάζοντας τώρα σε πιο ουσιώδη θέματα. Θα μελετηθεί η κίνηση και ορισμένα χαρακτηριστικά της βάσει λήψης στιγμιότυπων από το animation. Πριν από αυτό όμως θα πρέπει να δοθούν τα κατασκευαστικά μεγέθη του πλωτήρα και ο τρόπος ανάγνωσης της αναπαράστασης με την εξήγηση των τριών αξόνων.

Πίνακας 6.9: Χαρακτηριστικά πλωτήρα

Γεωμετρία	Απλή κυλινδρική
Διάμετρος $d_p$	3,005 m
Ύψος $H_p$	4,092 m
Βύθισμα στην θέση ισορροπίας $D$	2,592 m
Υλικό κατασκευής	GRP

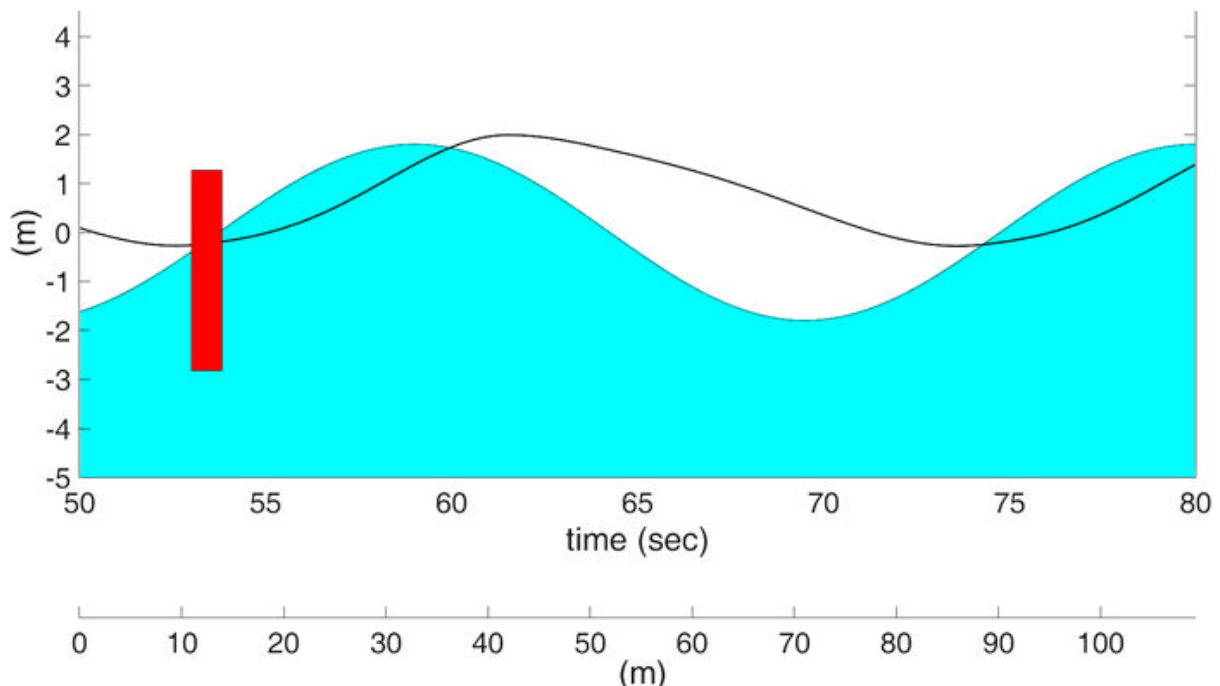
Αν και η ακρίβεια των διαστάσεων είναι ίσως υπερβολική για τέτοιου μεγέθους συσκευή, όπως θα φανεί στο τεστ ευαισθησίας των παραμέτρων, υπάρχει αρκετά σημαντικό περιθώριο χάρις. Ωστόσο, αν αυτό γίνει υπερβολικά μεγάλο, τότε θα παρουσιαστεί και μείωση της απόδοσης.

Η μόνη ελεύθερη παράμετρος για επιλογή από τον εκάστοτε μελετητή είναι το ύψος του τμήματος του πλωτήρα που θα εξέχει της επιφάνειας της θάλασσας, όταν αυτός ηρεμεί. Εδώ επιλέγεται ίσο με 1,5 m, και αθροιζόμενο με το βύθισμα  $D$  δίνει το ύψος του πλωτήρα. Η διάμετρος  $d_p$  και η μάζα του συστήματος  $m_{tot}$ , η οποία και καθορίζει το βύθισμα στη θέση ισορροπίας βάσει της συνθήκης πλευσης, προκύπτουν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης.



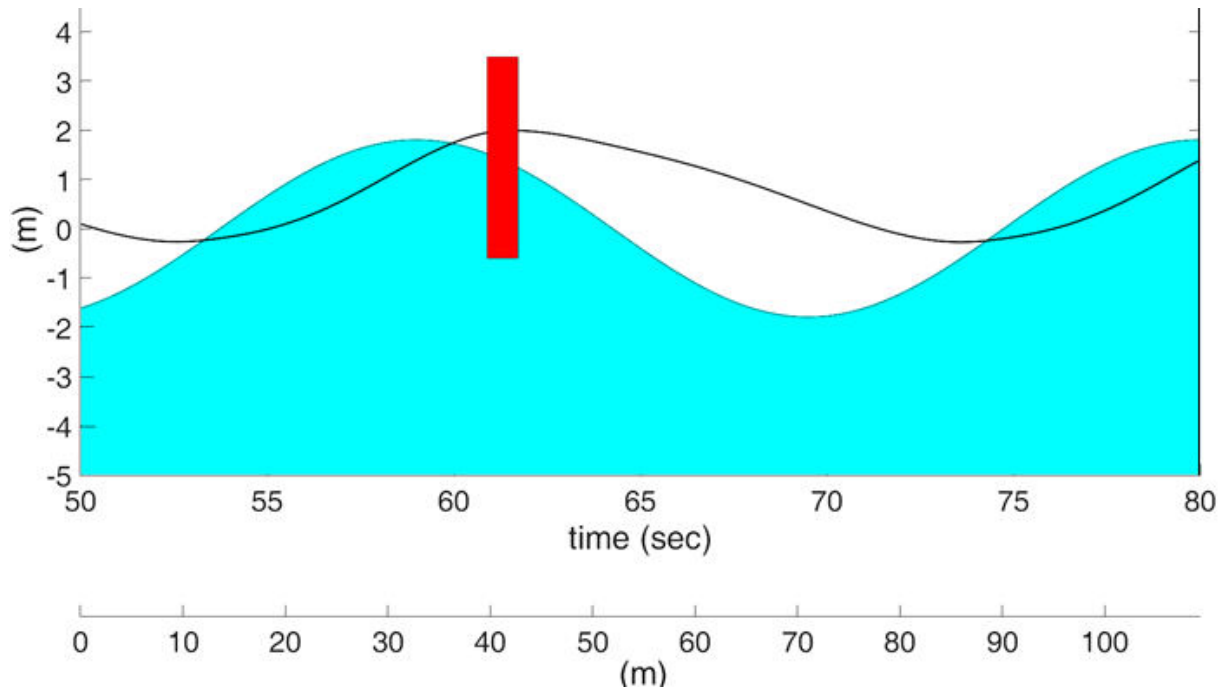
Σχήμα 6.43: Ονομαστικές διαστάσεις πλωτήρα

Σε ό,τι αφορά την ανάγνωση της αναπαράστασης διακρίνονται τρεις άξονες: δύο οριζόντιοι και ένας κατακόρυφος. Ο κατακόρυφος άξονας είναι βαθμονομημένος με μονάδες μήκους και συγκεκριμένα μέτρα (m). Από εκεί διαβάζεται το ύψος του πλωτήρα και η κάθε στιγμή κατακόρυφη μετατόπιση τόσο του συστήματος όσο και του κύματος, χωρίς κάποια δυσκολία. Ο πρώτος (πάνω) οριζόντιος άξονας είναι βαθμονομημένος ως άξονας χρόνου με μονάδες δευτερόλεπτα (sec). Από αυτόν εντοπίζεται η κάθε χρονική στιγμή που αντιστοιχεί σε κάποια από τις προαναφερθείσες μετατοπίσεις, καθώς μπορεί να βρεθεί φυσικά και η περίοδος του κύματος. Ο δεύτερος (κάτω) οριζόντιος άξονας φέρει μονάδες μήκους και συγκεκριμένα μέτρα (m). Χρησιμοποιείται για την ανάγνωση του μήκους κύματος αλλά και της διαμέτρου του πλωτήρα. Λόγω διαφορετικής κλίμακας μεταξύ των αξόνων η σχέση των διαστάσεων του πλωτήρα παρουσιάζεται οπτικά αλλοιωμένη σε σχέση με την πραγματική που φαίνεται στα παραπάνω σχέδια. Ωστόσο, η ανάγνωση των διαστάσεων από τους άξονες με τον τρόπο που περιγράφηκε δεν ενέχει λάθη.



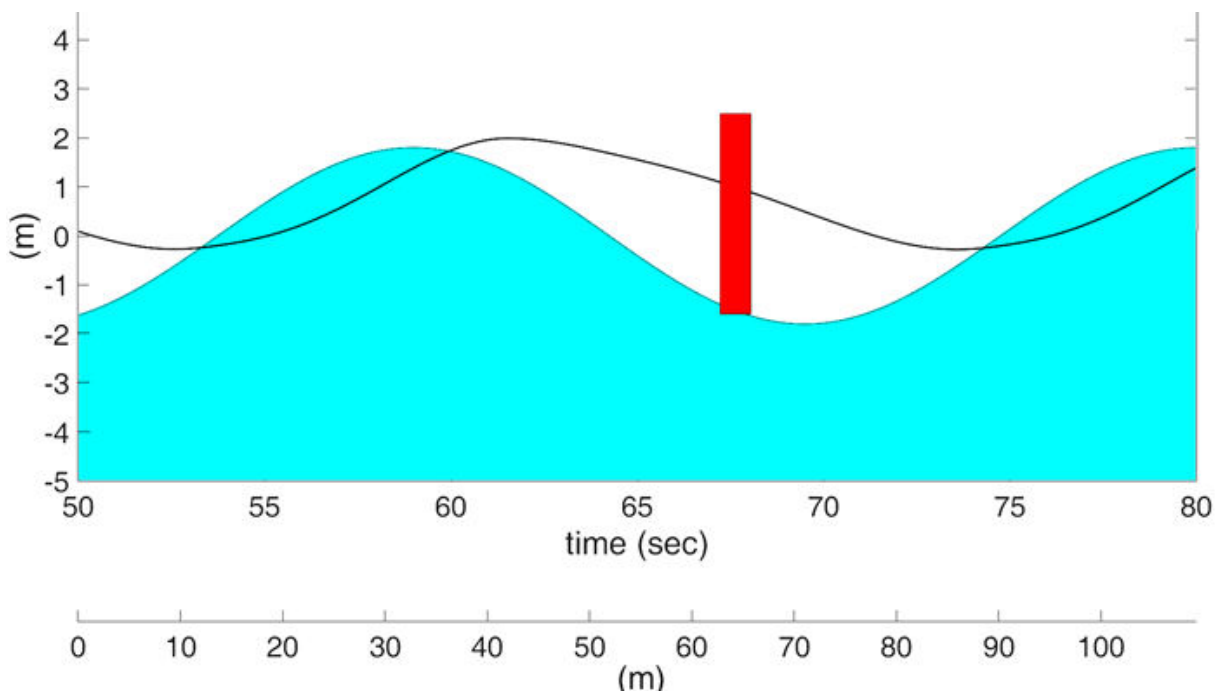
Σχήμα 6.44: Στιγμιότυπο animation-Πλωτήρας στην θέση  $y_A=y_K$

Στο παραπάνω στιγμιότυπο ο πλωτήρας διέρχεται από το σημείο όπου μετατόπιση κύματος και συστήματος είναι ίσες. Στη θέση αυτή έχει βύθισμα  $D$  και η άνωση εξουδετερώνει μόνο το βάρος του. Επίσης βρίσκεται σε φάση ανόδου παρουσιάζοντας χρονική υστέρηση ως προς το κύμα.



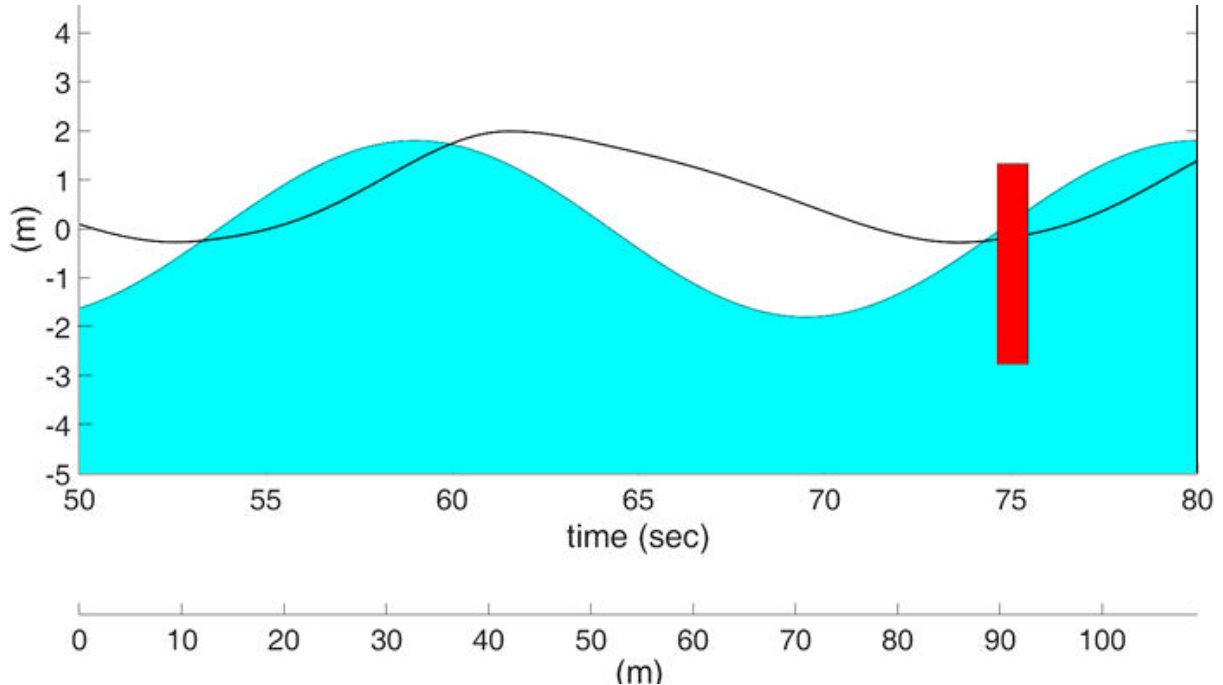
Σχήμα 6.45: Στιγμιότυπο animation-Πλωτήρας στο ANΣ

Στο δεύτερο κατά σειρά στιγμιότυπο απεικονίζεται ο πλωτήρας στο ANΣ, δηλαδή στη μέγιστη θετική του μετατόπιση. Από το σημείο αυτό και μετά ξεκινά η κάθοδος (downstroke) και ανοίγει η βαλβίδα κατάθλιψης. Επίσης παρατηρείται ότι το κύμα έχει σχετικά υποχωρήσει, το βύθισμα είναι μικρότερο του  $D$  και επομένως η διαφορά (Άνωση-Βάρος) είναι αρνητική, δηλαδή το βάρος υπερτερεί και ωθεί το σώμα προς τα κάτω ενισχύοντας σε όλη την κάθοδο όπως φαίνεται την κίνησή του.



Σχήμα 6.46: Στιγμιότυπο animation-Σημείο ελάχιστου βυθίσματος

Στο σημείο αυτό εμφανίζεται το ελάχιστο βύθισμα. Η βελτιστοποίηση οδηγεί τον πλωτήρα οριακά να παραμένει εντός του νερού με ακραία περίπτωση αυτή που απεικονίζεται παραπάνω. Η επίδραση του βάρους πλέον έχει γίνει η μέγιστη δυνατή, αφού το κύμα έχει σχεδόν ολοκληρωτικά υποχωρήσει.



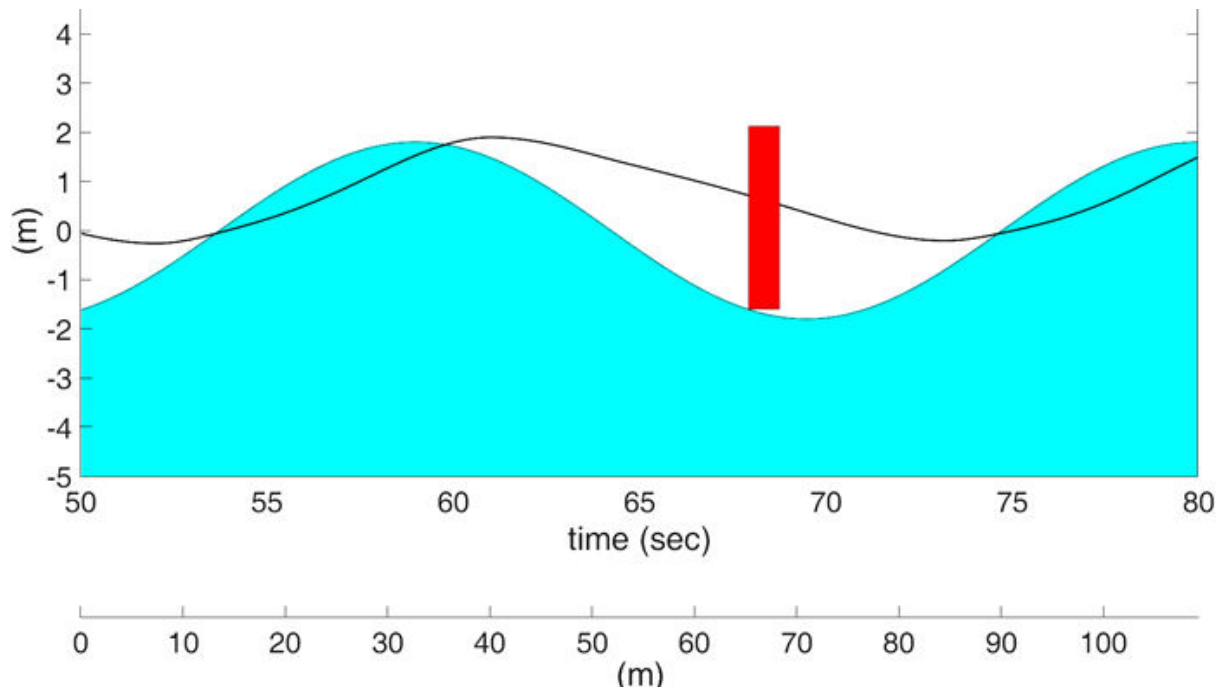
Σχήμα 6.47: Στιγμιότυπο animation-Πλωτήρας στο ΚΝΣ

Το σώμα πλέον βρίσκεται στο ΚΝΣ, εκκινεί η ανοδική του κίνηση με το ταυτόχρονο κλείσιμο της βαλβίδας κατάθλιψης, το κύμα έχει επανέλθει και η άνωση υπερτερεί του βάρους

Για πληρότητα ακολουθεί και η περίπτωση ενός set κατασκευαστικών παραμέτρων που οδηγεί σε έξοδο του πλωτήρα από το νερό. Συγκεκριμένα η μάζα  $m_{tot}$  μειώθηκε από 18853,36 kg σε 16153,36 kg, ενώ οι άλλες παράμετροι παρέμειναν ως έχουν. Η δοκιμή αυτή αποτελεί ιδανική εισαγωγή των τεστ ευαισθησίας που ακολουθούν σε επόμενο εδάφιο.

Πίνακας 6.10: Set παραμέτρων που οδηγούν σε έξοδο του πλωτήρα

$m_{tot}$	16153,36 kg
$d_p$	3,0058 m
$d_e$	0,429 m
$d_a$	0,6 m



Σχήμα 6.48: Στιγμιότυπο animation-Εξοδος πλωτήρα από το νερό

## Παράγραφος 4<sup>η</sup> : Αποτελέσματα ενεργειακής ανάλυσης

Ακολουθούν τα μεγέθη που προέκυψαν από την ενεργειακή ανάλυση του βέλτιστου set για σταθερό αγωγό διαμέτρου  $d_a=0,6$  m.

### 6.4.1) Κυματική ενέργεια

Με βάση τα κυματικά χαρακτηριστικά υπολογίζονται τα ακόλουθα βασικά ενεργειακά μεγέθη του κύματος. Επισημαίνεται και πάλι ότι τα συγκεκριμένα κυματικά χαρακτηριστικά αναφέρονται σε έντονα φαινόμενα, και ειδικά για τα ελληνικά δεδομένα είναι ιδιαίτερα σπάνια. Ακόμη όμως και για περιοχές με έντονο κυματισμό η παραδοχή σταθερού και τόσο υψηλού πλάτους κύματος και περιόδου αποτελεί ουτοπικό σενάριο, κάτι το οποίο θα καταστεί σαφές και στο επόμενο κεφάλαιο με τη μελέτη των χρονοσειρών κυματικών δεδομένων.



$$\text{Πλάτος κύματος : } A = 1,8 \text{ m}$$

$$\text{Περίοδος κύματος : } T = 7 \text{ sec}$$

$$\text{Περίοδος ενέργειας : } T_E = \frac{T}{2} = 3,5 \text{ sec}$$

$$\text{Ύψος κύματος : } H = 2A = 3,6 \text{ m}$$

$$\text{Φασική ταχύτητα : } C_g = \frac{Tg}{4\pi} = 5,46 \text{ m/sec}$$

$$\text{Ροή κυματικής ενέργειας : } J = \rho \frac{T_E g^2 H^2}{32\pi} 10^{-3} = 44,507 \left( \frac{kW}{m} \right)$$

$$\text{Ισχύς του κύματος : } P_{WAVE} = J dp = 133,78 \text{ kW}$$

#### 6.4.2) Ενέργεια συστήματος και βαθμός απόδοσης

$$\text{Υψομετρική διαφορά κίνησης πλωτήρα : } DH = UDP + |LDP| = 2,273 \text{ m}$$

$$\text{Ενέργεια πλωτήρα σε μία περίοδο : } E_p = mtot g DH = 420,45 \text{ KJ}$$

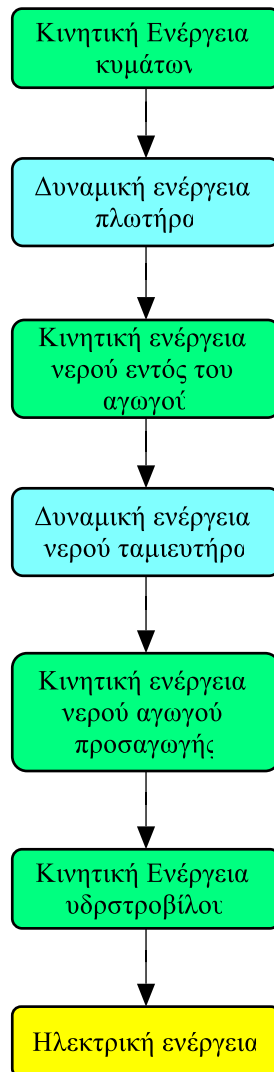
$$\text{Ισχύς πλωτήρα : } P_p = \frac{E_p}{T} = 60,06 \text{ kW}$$

$$\text{Βαθμός απόδοσης : } CWR = \frac{P_p}{P_{WAVE}} = 44,9 \%$$

Από τα 133,78 kW που «προσφέρει» το κύμα, η συσκευή δεσμεύει τα 60,06 kW παρουσιάζοντας ένα συντελεστή απόδοσης της τάξεως του 44,9 % . Πραγματικές συσκευές έχουν συντελεστή απόδοσης μεταξύ 30% και 40%, ενώ θεωρητικά μπορούν να φτάσουν στο 50%. Αν ληφθεί υπόψη ότι ο συγκεκριμένος μηχανισμός διαφέρει σημαντικά ως προς τον σκοπό λειτουργίας, ο οποίος είναι η αποθήκευση ενέργειας και όχι η επί τόπου μετατροπή της σε ευγενέστερη μορφή, και για τον λόγο αυτό έχει να αντιμετωπίσει και την αντίσταση της στήλης νερού μαζί με τις γραμμικές απώλειες του αγωγού, τότε γίνεται προφανής ο πολύ υψηλός βαθμός απόδοσης που παρουσιάζει.

### 6.4.3) Επιλογή υδροστροβίλου

Το επόμενο βήμα της ενεργειακής ροής είναι η επιλογή των διατάξεων και μηχανών που θα συγκροτήσουν τον υδροηλεκτρικό σταθμό. Η σημαντικότερη συνιστώσα είναι φυσικά ο υδροστροβίλος στον οποίο θα γίνεται και η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του νερού λόγω της υδατικής πτώσης σε ηλεκτρική την οποία θα απορροφά και το δίκτυο. Η ροή ενέργειας λοιπόν συνοψίζεται ως εξής :



Σχήμα 6.49: Ροή ενέργειας

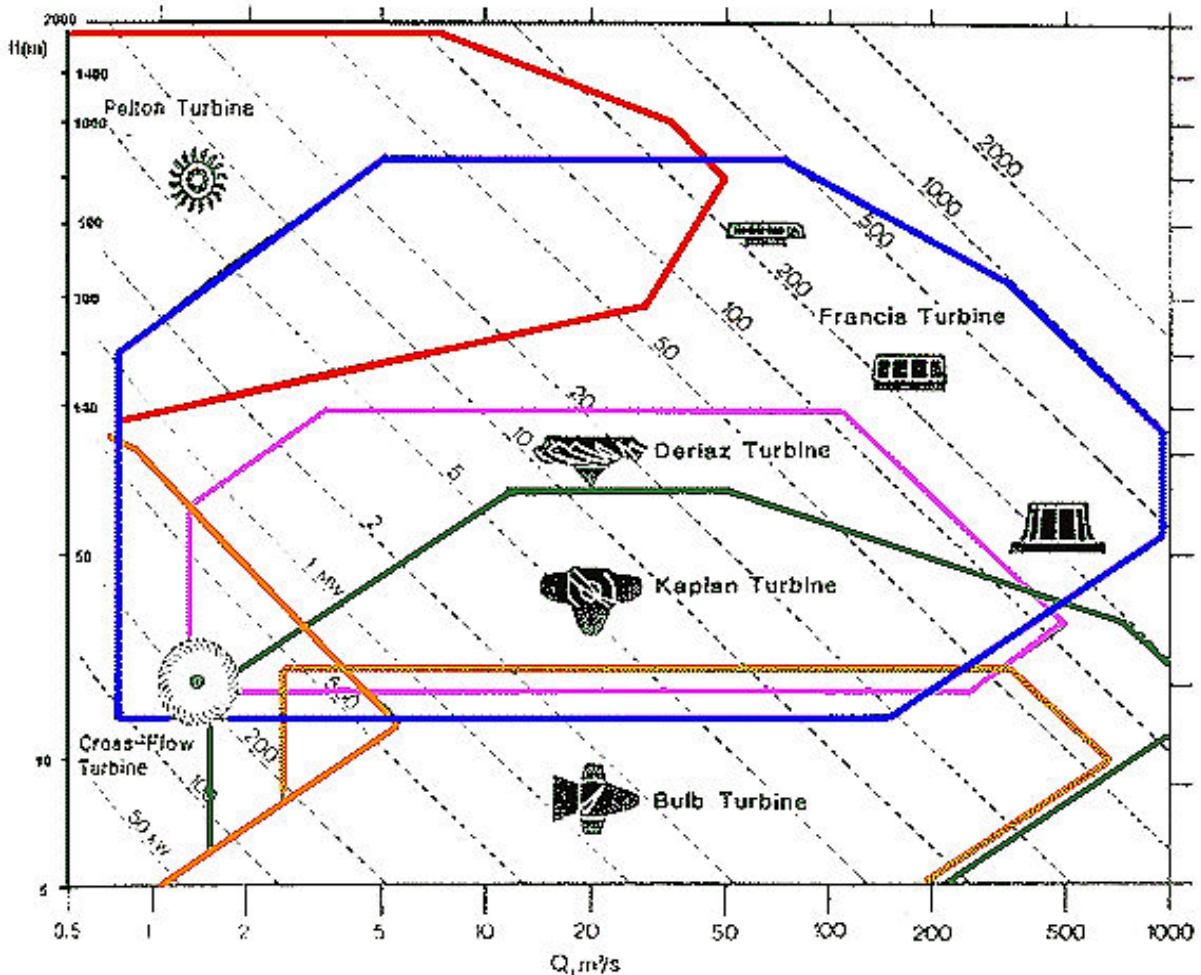
Η επιλογή του υδροστροβίλου στηρίζεται σε πληθώρα παραμέτρων όπως ο τρόπος λειτουργίας του υ/η σταθμού ως μονάδα ισχύος ή ως μονάδα βάσης, το κόστος και πολλές άλλες. Οι βασικότερες όμως είναι η διαθέσιμη υδραυλική πτώση και η επιθυμητή παροχή προς αυτόν, η οποία καθορίζεται από την ανάγκη σε παραγόμενη ισχύ. Επομένως το σενάριο επιλογής του είναι υποθετικό και στοχεύει να καταδείξει ορισμένες ακόμα παραμέτρους σχετικές με την ενεργειακή ανάλυση (Παπαντώνης, 2009).

Από τα δεδομένα του προβλήματος λοιπόν είναι η διαθέσιμη υδραυλική πτώση. Η υψομετρική διαφορά θέσης εμβόλου και θέσης ταμιευτήρα είναι  $L_k=60\text{ m}$ . Αν υποθεθεί ότι ο μηχανισμός κατέρχεται σε βάθος 4 m και ότι το στόμιο εισαγωγής του νερού στον ταμιευτήρα βρίσκεται στην ίδια στάθμη με το στόμιο του αγωγού προσαγωγής στον υδροστρόβιλο, ο οποίος βρίσκεται στη στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας, τότε :

$$\text{Διαθέσιμη υδραυλική πτώση } H_{HT} = 60 - 4 = 56\text{ m} \quad (6.12)$$

Αν η μονάδα προορίζεται ως μονάδα βάσης, θα επιλεγεί υδροστρόβιλος σχετικά μεγάλης ισχύος άρα και σχετικά μεγάλης παροχής σε σχέση με αυτή της συσκευής. Έστω λοιπόν ότι :

$$\text{Παροχή υδροστρόβιλου } Q_{HT} = 4\text{ m}^3 / \text{sec} \quad (6.13)$$



Σχήμα 6.50: Διάγραμμα επιλογής υδροστρόβιλου (Πηγή: Escher Wyss)

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα και τη διεθνή βιβλιογραφία επιλέγεται υδροστρόβιλος Francis και συγκεκριμένα ο Francis E770 με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

*Πίνακας 6.11: Χαρακτηριστικά υδροστρόβιλου*

Type	Francis (reaction turbine)
Series	E770
Nom. Power	2 MW
Turbine Efficiency	92%
ns (rpm)	280
Generator Efficiency	98%

Ως ολικός βαθμός απόδοσης του υδροστρόβιλου προσδιορίζεται το γινόμενο τριών ξεχωριστών βαθμών απόδοσής του: του μηχανικού  $\eta_m$ , του υδραυλικού  $\eta_h$  και του ογκομετρικού  $\eta_q$ , :

$$\eta_{HT} = \eta_m * \eta_h * \eta_q \quad (6.14)$$

Με την επιλογή του υδροστρόβιλου κλείνει η παρούσα φάση ενεργειακής μελέτης και αυτό γιατί οποιαδήποτε ανάλυση του κυματικού πάρκου θα στηριζόταν στην παραδοχή σταθερού έντονου κυματισμού σε όλη τη διάρκεια του έτους, κάτι το οποίο φυσικά είναι αδύνατο και οδηγεί σε σοβαρές αποκλίσεις. Η ανάλυση αυτή θα γίνει, αφού πρώτα μελετηθούν τα κυματικά δεδομένα για ολόκληρο το έτος και προκύψουν ασφαλέστερες εκτιμήσεις κυματικών δεδομένων ανά διακριτά διαστήματα του χρόνου.

## Παράγραφος 5<sup>η</sup> : Ανάλυση ευαισθησίας

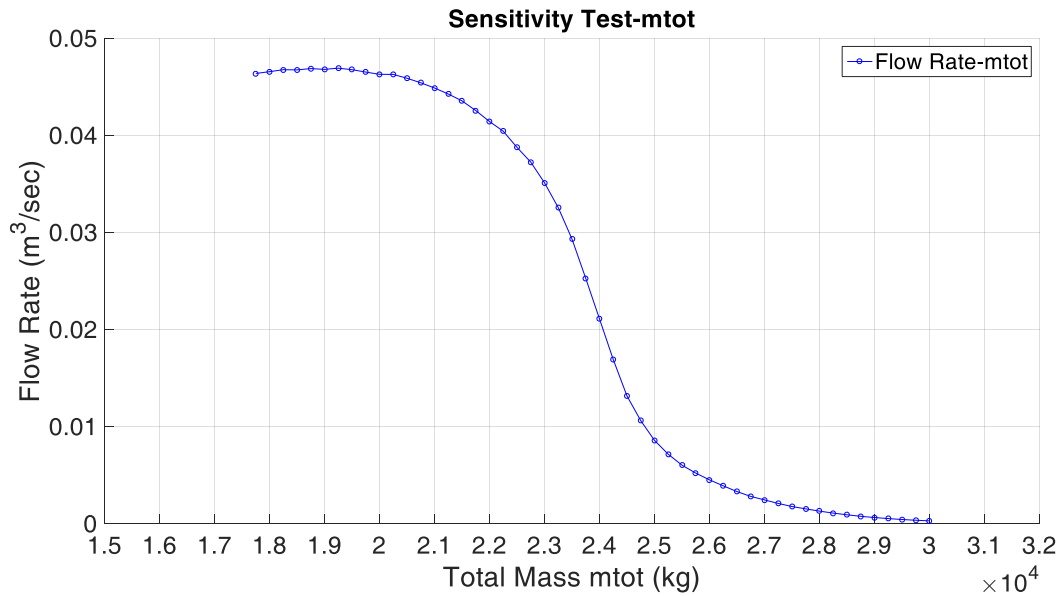
Αντικείμενο αυτής της παραγράφου είναι η μελέτη της επίδρασης κάθε παραμέτρου στην απόδοση της συσκευής. Ενδιαφέρει δηλαδή κατά πόσο επηρεάζεται η απόδοση, δηλαδή η μέση παροχή προς τον ταμιευτήρα, όταν με σταθερές όλες τις υπόλοιπες μεταβάλλεται μία μόνο παράμετρος. Με τον τρόπο αυτόν καταδεικνύεται αφενός μεν η βαρύτητα κάθε παραμέτρου αφετέρου δε η κατασκευαστική ελευθερία, δηλαδή το πόσο μπορούν να μεταβληθούν οι παράμετροι και ο μηχανισμός να συνεχίσει να λειτουργεί με ασφάλεια αλλά φυσικά σε μετατοπισμένο σημείο λειτουργίας. Επίσης θα γίνει φανερό το πόσο αποδοτική και ακριβής ήταν η διαδικασία βελτιστοποίησης, καθώς θα πρέπει στις βέλτιστες παραμέτρους να μεγιστοποιείται και η απόδοση. Η βελτιστοποίηση ολοκληρώθηκε μετά από 1200 επαναλήψεις. Ο αγωγός θεωρείται σταθερής διαμέτρου  $d_a=0,6$  m. Η ανάλυση θα γίνει τόσο για κατασκευαστικές παραμέτρους του συστήματος όσο και για λειτουργικές καθώς και για μεταβολή των κυματικών συνθηκών.

### 6.5.1) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την ολική μάζα $mtot$

Το εύρος διακύμανσης της μάζας  $mtot$  διαπιστώθηκε ότι είναι από 17750-30000 kg . Εκτός των ορίων αυτών ο μηχανισμός εξέρχεται του νερού και παύει να υπακούει στις αρχές που διέπουν την κίνησή του, όπως αυτή έχει αναλυθεί στο τρίτο κεφάλαιο. Παρόλα αυτά υπάρχει μεγάλη ευελιξία ως προς την ολική μάζα του συστήματος.

Πίνακας 6.12: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Μάζα συστήματος)

$Q_{tm}$ (m <sup>3</sup> /sec)	$mtot$ (kg)	$Q_{tm}$ (m <sup>3</sup> /sec)	$mtot$ (kg)
0,046376	17750	0,021097	24000
0,04656	18000	0,016912	24250
0,046764	18250	0,013157	24500
0,046744	18500	0,010622	24750
<b>0,046879</b>	<b>18750</b>	0,008589	25000
0,046797	19000	0,007159	25250
<b>0,046922</b>	<b>19250</b>	0,006032	25500
0,046767	19500	0,005215	25750
0,046521	19750	0,004519	26000
0,046288	20000	0,003906	26250
0,046282	20250	0,003311	26500
0,045883	20500	0,002814	26750
0,045417	20750	0,002454	27000
0,044881	21000	0,00209	27250
0,04426	21250	0,001774	27500
0,043555	21500	0,001531	27750
0,042556	21750	0,001298	28000
0,041429	22000	0,001095	28250
0,04043	22250	0,000921	28500
0,038764	22500	0,000764	28750
0,037245	22750	0,000638	29000
0,035117	23000	0,000532	29250
0,03256	23250	0,000436	29500
0,029322	23500	0,000358	29750
0,025272	23750	0,000297	30000



Σχήμα 6.51: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Μάζα συστήματος)

Η βελτιστοποίηση οδήγησε στην τιμή :

Πίνακας 6.13: Βέλτιστη μάζα συστήματος και παροχή

mtot Opt.	18853,36 kg
Q <sub>tm</sub>	0,0468 m <sup>3</sup> /sec

η οποία κυμαίνεται μεταξύ των επισημασμένων τιμών και, όπως διαπιστώνεται τόσο από τον πίνακα όσο και από το γράφημα, είναι με πολύ καλή προσέγγιση η βέλτιστη μάζα του συστήματος. Επομένως ο αριθμός επαναλήψεων είναι αρκετός για τη σύγκλιση του αλγορίθμου με πολύ καλή ακρίβεια στη βέλτιστη τιμή της παραμέτρου mtot. Μάλιστα, όπως παρατηρήθηκε μέσα από τις δοκιμές βελτιστοποίησης και χρήσης του προγράμματος EASY, η μάζα αποτελεί την παράμετρο η οποία οδηγείται αρκετά γρήγορα στο βέλτιστο σημείο, παρουσιάζει δηλαδή γρήγορη σύγκλιση. Για 1200 επαναλήψεις λοιπόν έχει προσεγγισθεί με απόκλιση της τάξεως του 2%.

### 6.5.2) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την διάμετρο του πλωτήρα $dp$

Πίνακας 6.14: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Διάμετρος πλωτήρα)

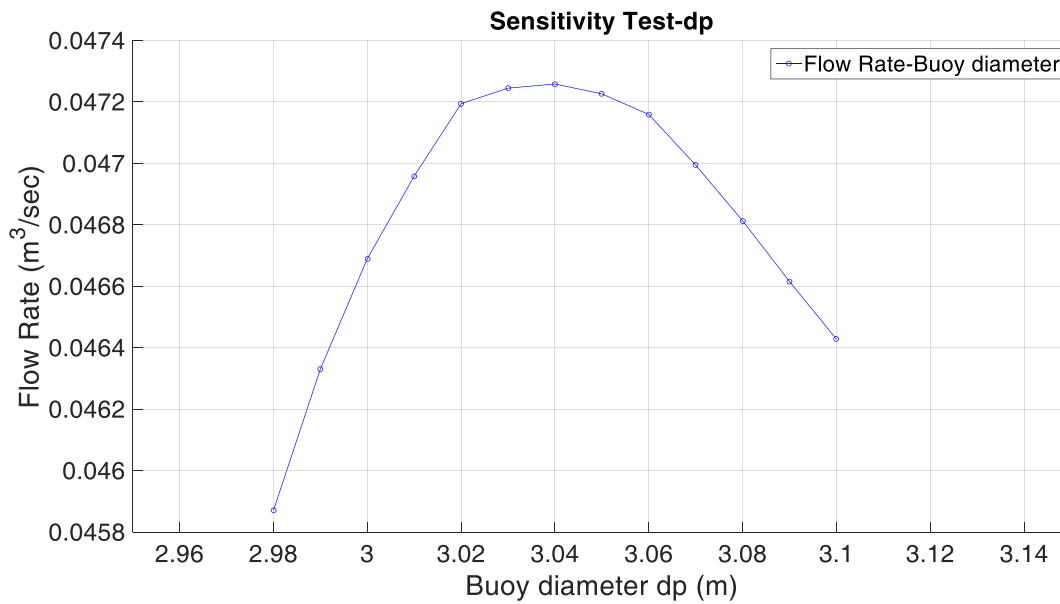
$Q_{tm}$ (m <sup>3</sup> /sec)	$dp$ (m)
0,04587	2,98
0,046331	2,99
<b>0,04669</b>	<b>3</b>
<b>0,046959</b>	<b>3,01</b>
0,047194	3,02
0,047245	3,03
<b>0,047258</b>	<b>3,04</b>
0,047226	3,05
0,047159	3,06
0,046994	3,07
0,046813	3,08
0,046616	3,09
0,046428	3,1

Η βελτιστοποίηση οδήγησε στην τιμή :

Πίνακας 6.15: Βέλτιστη διάμετρος πλωτήρα και παροχή (EASY)

$dp$ Opt.	3,0058 m
$Q_{tm}$	0,0468 m <sup>3</sup> /sec

Η τιμή αυτή κυμαίνεται μεταξύ των τιμών του πίνακα που έχουν επισημανθεί. Όπως παρατηρείται, δεν είναι η μέγιστη δυνατή παροχή, δηλαδή το γράφημα δεν παρουσιάζει ακρότατο στο σημείο αυτό, καθώς η βέλτιστη τιμή αναμένεται στη γειτονιά των 3,04 m διαμέτρου. Ο λόγος που παρατηρείται αυτό και συμβαίνει όπως θα φανεί μόνο για αυτή την παράμετρο, είναι ότι το λογισμικό EASY δεν έχει ολοκληρώσει τη διαδικασία βελτιστοποίησης ως προς την παράμετρο  $dp$ , δηλαδή θα χρειαζόταν περισσότερες από 1200 επαναλήψεις. Πρακτικά η διαδικασία βελτιστοποίησης είναι αέναη με διαρκώς βελτιούμενες τιμές, ακόμη και σε πολύ μικρό δεκαδικό ψηφίο. Ωστόσο, πάντα υπάρχει το ενδεχόμενο μέσω ενός τελεστή μετάλλαξης και την εξερεύνηση μακρινών σημείων του χώρου από τον αλγόριθμο να προκύψει ακόμα καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Επομένως πρόκειται για ένα συμβιβασμό τον οποίο καλείται να κάνει ο χρήστης. Ο συμβιβασμός λοιπόν αυτός, του τερματισμού της διαδικασίας μετά από 1200 επαναλήψεις, οδήγησε στην παραπάνω απόκλιση ως προς τη βέλτιστη τιμή της διαμέτρου του πλωτήρα. Επίσης να σημειωθεί ότι το σύστημα οδηγείται πολύ πιο εύκολα σε μη αποδεκτή λειτουργία, καθώς το εύρος διακύμανσης της διαμέτρου του πλωτήρα είναι μόλις 0,12 m. Εκτός αυτού ο πλωτήρας ανέρχεται πλήρως.



Σχήμα 6.52: Ανάλυση ευαισθησίας (Διάμετρος πλωτήρα-Παροχή)

### 6.5.3) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την διάμετρο του εμβόλου de

Εξίσου λεπτή ρύθμιση απαιτεί και η διάμετρος του εμβόλου. Το εύρος διακύμανσης έχει πλάτος 0,03 m και πρέπει η διάμετρος να βρίσκεται εντός αυτού ώστε να εξασφαλιστεί ασφαλής λειτουργία.

Πίνακας 6.16: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Διάμετρος εμβόλου)

Q <sub>tm</sub> (m³/sec)	de (m)
0,03855	0,4
0,04014	0,405
0,041881	0,41
0,043579	0,415
0,044993	0,42
<b>0,046119</b>	<b>0,425</b>
<b>0,046855</b>	<b>0,43</b>

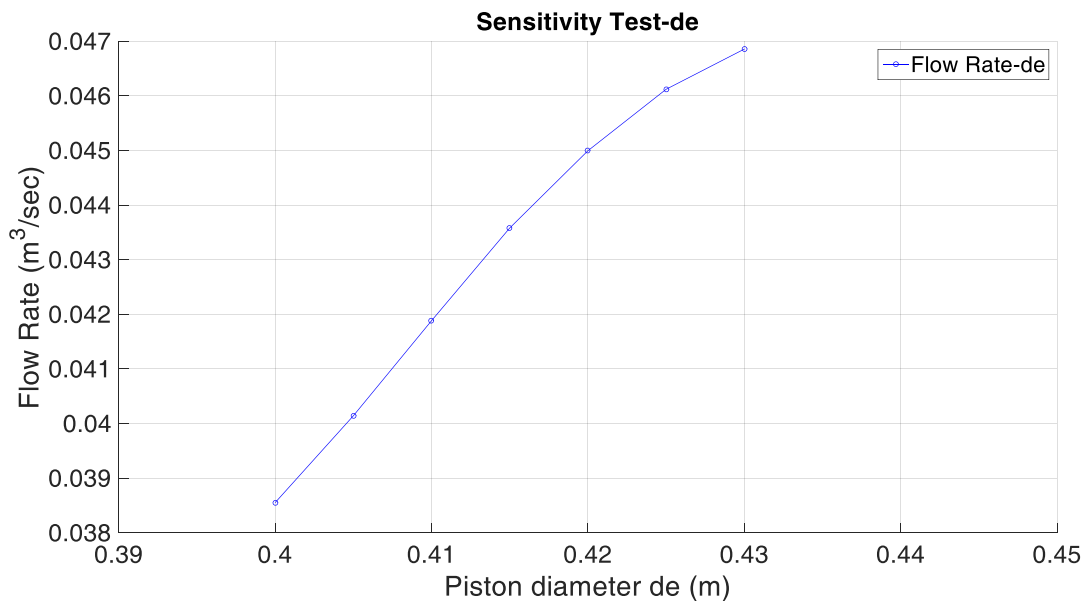
Η τιμή που πρόκυψε από τη βελτιστοποίηση και είναι :

Πίνακας 6.17: Βέλτιστη διάμετρος εμβόλου και παροχή

de Opt.	0,429 m
Q <sub>tm</sub>	0,0468 m³/sec



αποδεικνύει ότι η διαδικασία έχει συγκλίνει ικανοποιητικά ως προς και αυτή την παράμετρο, κάτι το οποίο φαίνεται και από το γράφημα. Επίσης παρατηρείται ότι κινείται οριακά εντός του διαστήματος ασφαλείας και συγκεκριμένα του άνω ορίου του.



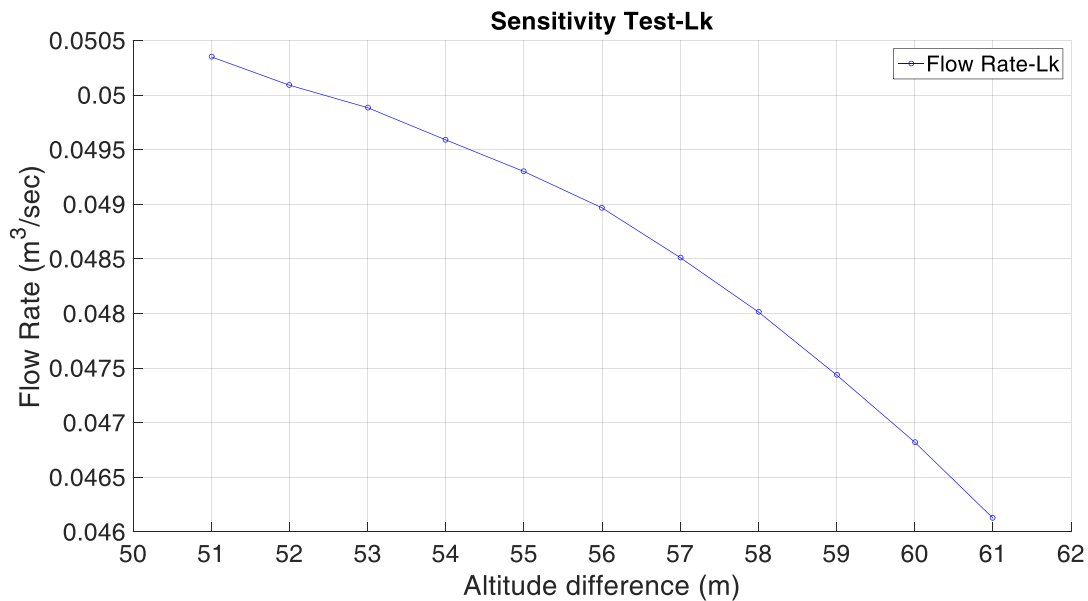
Σχήμα 6.53: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Διάμετρος εμβόλου)

#### 6.5.4) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την υψομετρική διαφορά $L_k$

Το ύψος στο οποίο αντλεί νερό ο μηχανισμός είναι ενδεικτικό της ενεργειακής αποθήκευσης που πετυχαίνει. Η βελτιστοποίηση έγινε για ύψος 60 m. Τα επιτρεπτά όρια είναι τα 51 m και τα 61 m, καθώς εκτός αυτών ο πλωτήρας ανέρχεται πλήρως. Όπως αναμένεται, όταν το ύψος αυτό μειωθεί, η μέση παροχή αυξάνει, καθώς ο μηχανισμός έχει να αντιμετωπίσει μικρότερες αντιστάσεις. Επίσης, όπως γίνεται φανερό, η το άνω όριο είναι πολύ κοντά στην αρχική τιμή, γεγονός που φανερώνει ότι για πολύ μικρή αύξηση των αντιστάσεων του συστήματος αυτό οδηγείται σε μη επιθυμητή λειτουργία.

Πίνακας 6.18: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Υψομετρική διαφορά)

$Q_{tm}$ ( $m^3/sec$ )	$L_k$ (m)
0,05035	51
0,050091	52
0,049885	53
0,04959	54
0,0493	55
0,048967	56
0,048512	57
0,048014	58
0,047437	59
<b>0,046822</b>	<b>60</b>
0,046127	61



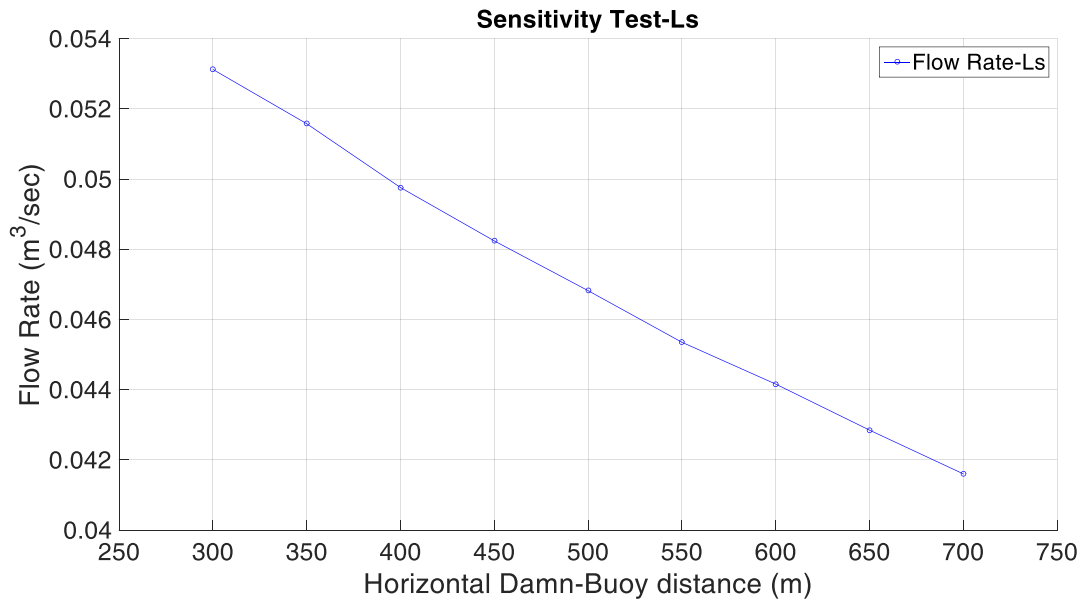
Σχήμα 6.54: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Υψομετρική διαφορά)

### 6.5.5) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την οριζόντια απόσταση ταμιευτήρα και μηχανισμού Ls

Ανάλογη είναι η συμπεριφορά του συστήματος και ως προς την οριζόντια απόσταση θέσης μηχανισμού και ταμιευτήρα. Αύξησή της σημαίνει αύξηση των απωλειών και των αντιστάσεων και επομένως μείωση της παροχής προς τον ταμιευτήρα. Η βελτιστοποίηση έγινε για οριζόντια απόσταση 500 m.

Πίνακας 6.19: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Οριζόντια απόσταση)

Q <sub>tm</sub> (m <sup>3</sup> /sec)	L <sub>s</sub> (m)
0,053123	300
0,051577	350
0,049759	400
0,048239	450
<b>0,046822</b>	<b>500</b>
0,045353	550
0,044161	600
0,042849	650
0,041603	700



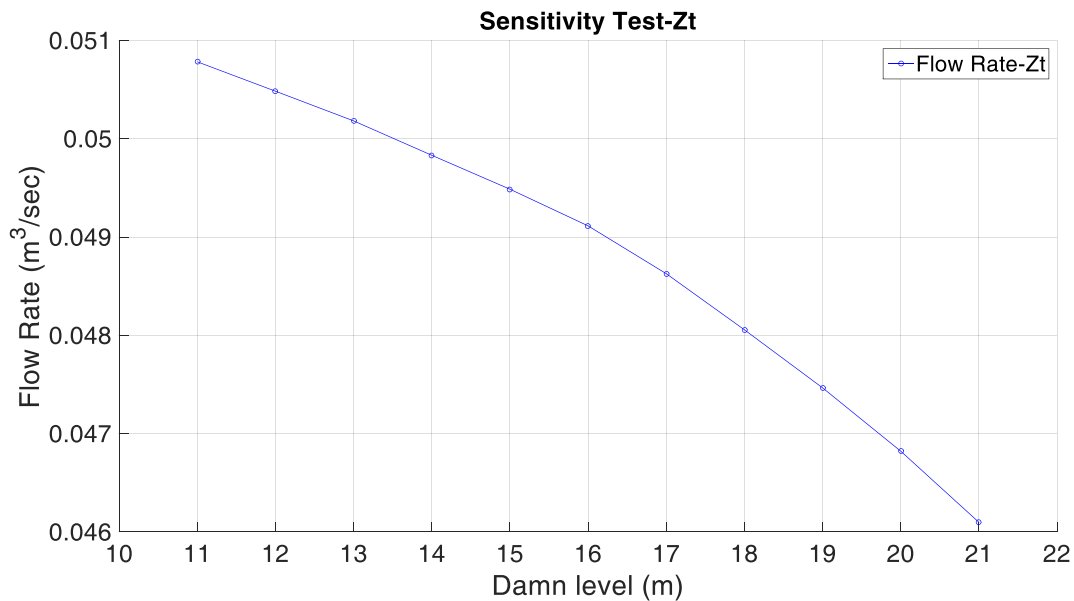
Σχήμα 6.55: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Οριζόντια απόσταση)

### 6.5.6) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την στάθμη του ταμιευτήρα $Z_t$

Η στάθμη του ταμιευτήρα θεωρείται ότι διατηρείται σταθερή. Το ύψος όμως στο οποίο αυτή διατηρείται μετέχει στους υπολογισμούς ως αντίσταση, και συγκεκριμένα αποτελεί όρο του αθροίσματος της μέσης στάθμης  $Z_m$  και επομένως πρόκειται για απώλειες. Η βελτιστοποίηση έγινε για στάθμη 20 m. Αν αυτή μειωθεί, μειώνονται οι απώλειες και αυξάνει η απόδοση, δηλαδή η μέση παροχή. Το αντίθετο συμβαίνει αν αυξηθεί. Μεταβολή εκτός των ορίων οδηγεί σε παραβίαση του κριτηρίου βυθίσματος.

Πίνακας 6.20: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Στάθμη ταμιευτήρα)

$Q_{tm}$ (m³/sec)	$Z_t$ (m)
0,050783	11
0,050484	12
0,050182	13
0,049832	14
0,049487	15
0,049114	16
0,048627	17
0,048057	18
0,047466	19
<b>0,046822</b>	<b>20</b>
0,046098	21



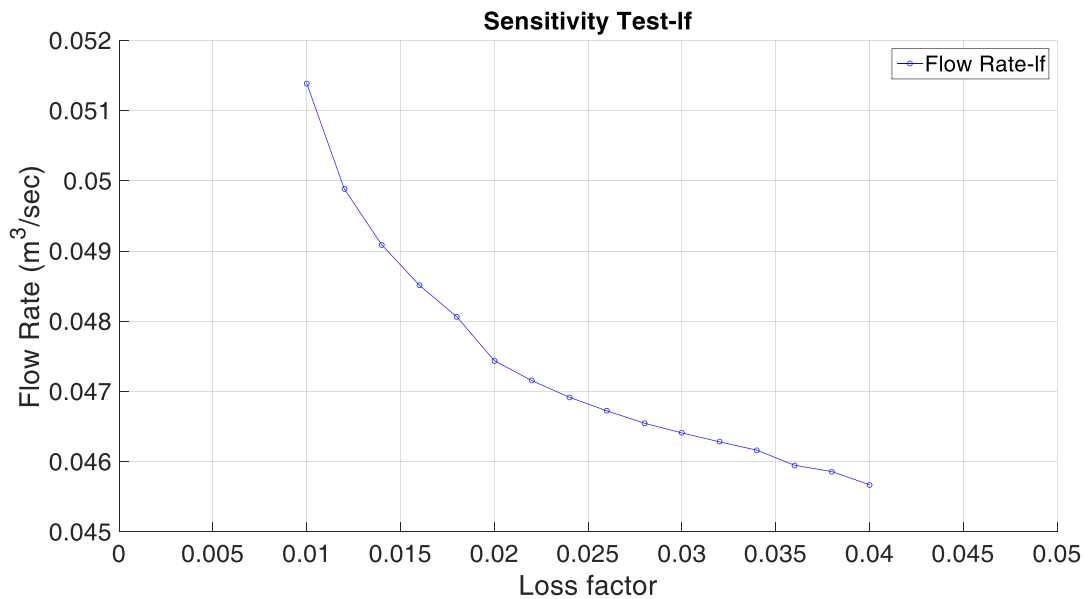
Σχήμα 6.56: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Στάθμη ταμιευτήρα)

### 6.5.7) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τον συντελεστή γραμμικών απωλειών If

Η λειτουργία του αγωγού προφανώς με τον καιρό μεταβάλλεται. Επικαθίσεις, διαβρώσεις, γήρανση και φθορά λόγω του πεδίου ταχυτήτων έχουν σαν αποτέλεσμα αύξηση του συντελεστή γραμμικών απωλειών και μείωση της απόδοσης. Έγινε για αυτό τον λόγο η ανάλογη παραμετρική μελέτη. Ως αρχική τιμή του συντελεστή χρησιμοποιήθηκε η 0,025, η οποία και χρησιμοποιήθηκε στη βελτιστοποίηση. Ανάλογα με τη συμπεριφορά του αυξομειώνονται και οι απώλειες οδηγώντας σε αντίστροφη συμπεριφορά της μέσης παροχής.

Πίνακας 6.21: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Συντελεστής γραμμικών απωλειών αγωγού)

Q <sub>tm</sub> (m <sup>3</sup> /sec)	If
0,05139	0,01
0,049888	0,012
0,049089	0,014
0,048517	0,016
0,048064	0,018
0,04744	0,02
0,047155	0,022
<b>0,046919</b>	<b>0,024</b>
<b>0,046725</b>	<b>0,026</b>
0,046549	0,028
0,046411	0,03
0,046284	0,032
0,046165	0,034
0,04595	0,036
0,04586	0,038
0,045673	0,04



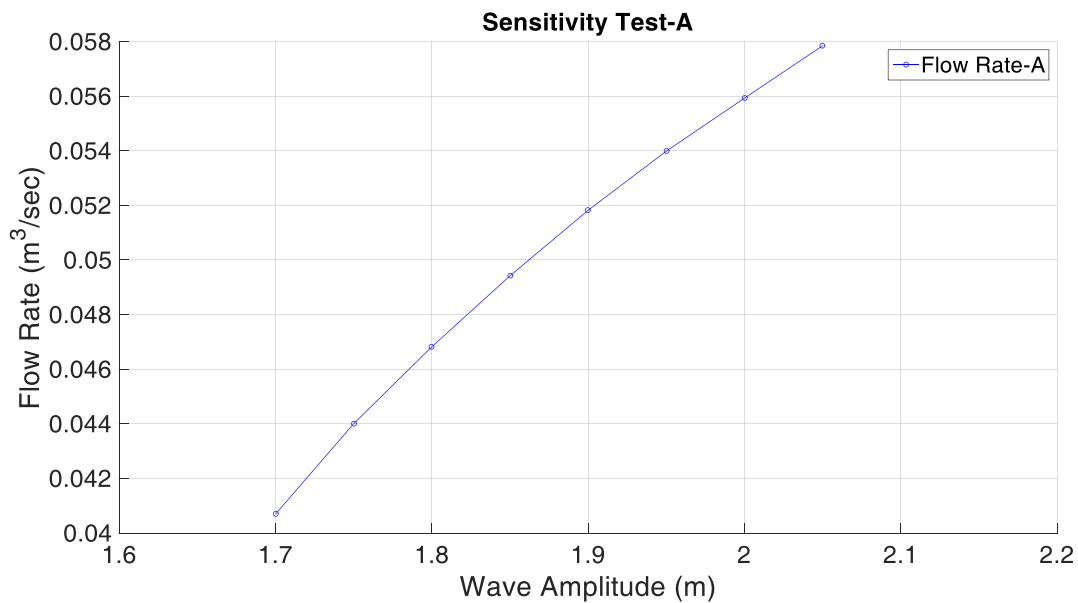
Σχήμα 6.57: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Συντελεστής γραμμικών απωλειών αγωγού)

### 6.5.8) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς το πλάτος του κύματος A

Ως πλάτος κύματος χρησιμοποιήθηκαν τα 1,8 m . Ωστόσο η λειτουργία του μηχανισμού είναι εφικτή και για ελαφρώς μεταβλητά πλάτη κύματος. Εκτός των ορίων ο μηχανισμός εξέρχεται με συμπεριφορά που δεν έχει αναλυθεί και είναι ανεπιθύμητη. Αύξηση του πλάτους του κύματος επιφέρει αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας και επομένως και της μέσης παροχής. Ανάλογη είναι η συμπεριφορά για μείωση του πλάτους. Η ανταπόκριση λοιπόν του συστήματος σε αυξομειώσεις του πλάτους είναι η λογικά αναμενόμενη.

Πίνακας 6.22: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Πλάτος κύματος)

Q <sub>tm</sub> (m <sup>3</sup> /sec)	A (m)
0,040693	1,7
0,044002	1,75
<b>0,046822</b>	<b>1,8</b>
0,049418	1,85
0,051821	1,9
0,053987	1,95
0,055929	2
0,057847	2,05



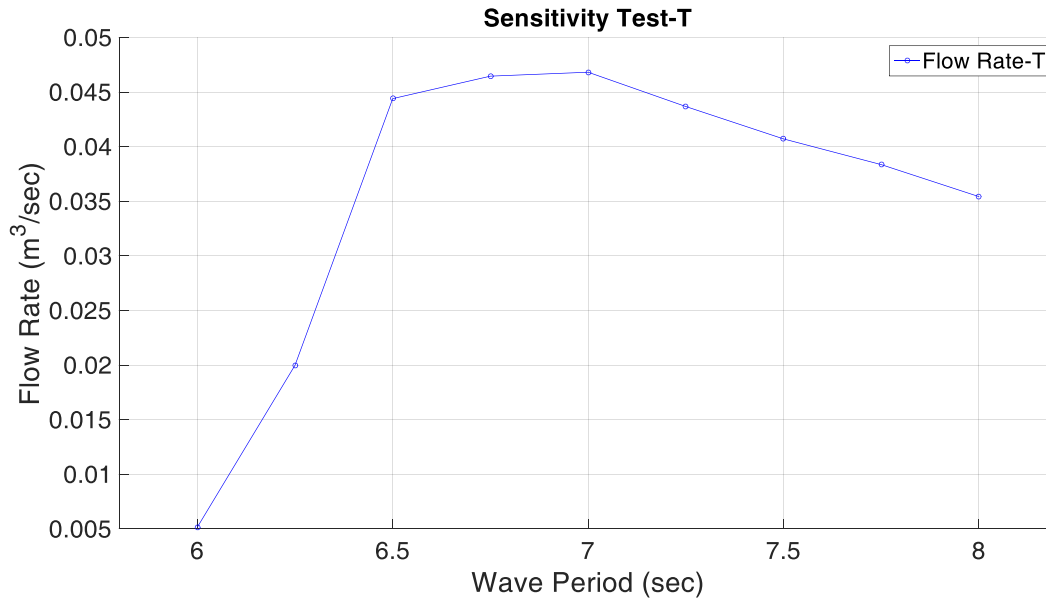
Σχήμα 6.58: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Πλάτος κύματος)

### 6.5.9) Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την περίοδο του κύματος T

Η μεταβολή της απόκρισης του συστήματος ως προς τη μεταβολή της περιόδου του έχει πιο σύνθετη φύση. Αυτό που πρέπει να επισημανθεί είναι ότι για την τιμή της περιόδου για την οποία έγινε η βελτιστοποίηση, τα 7 sec, η απόδοση είναι μέγιστη. Εκτός των ορίων του πίνακα ο πλωτήρας εξέρχεται του νερού.

Πίνακας 6.23: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Περίοδος κύματος)

Q <sub>tm</sub> (m <sup>3</sup> /sec)	T (sec)
0,005164	6
0,019995	6,25
0,044404	6,5
0,046462	6,75
<b>0,046822</b>	<b>7</b>
0,043679	7,25
0,040715	7,5
0,038362	7,75
0,035431	8



Σχήμα 6.59: Ανάλυση ευαισθησίας (Παροχή-Περίοδος κύματος)

#### 6.5.10) Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Type	Point absorber WEC-Damn system
$m_{tot}$ : Ολική μάζα κινούμενου μηχανισμού	18853,36 kg
$d_p$ : Διάμετρος πλωτήρα	3,005 m
$d_e$ : Διάμετρος εμβόλου	0,429 m
$d_a$ : Διάμετρος αγωγού	0,6 m
$D$ : Βύθισμα στην Θ.Ι.	2,592 m
$H_p$ : Ύψος πλωτήρα	4,092 m
$L_k$ : Ύψομετρική διαφορά μηχανισμού-ταμιευτήρα	60 m
$H_{HT}$ : Διαθέσιμη υδραυλική πτώση	56 m
$L_S$ : Οριζόντια απόσταση μηχανισμού-ταμιευτήρα	500 m
$Z_t$ : Στάθμη ταμιευτήρα	20 m
$A$ : Πλάτος κύματος	1,8 m
$T$ : Περίοδος κύματος	7 sec
$J$ : Ροή κυματικής ενέργειας	44,5 kW/m
$Q_{tm}$ : Μέση παροχή στον ταμιευτήρα	0,0468 m <sup>3</sup> /sec
$CWR$ : Βαθμός απόδοσης	44,9 %





## Κεφάλαιο 7 : Ανάλυση χρονοσειρών

### Παράγραφος 1<sup>η</sup> : Επιλογή θέσης

#### 7.1.1) Η σημασία της ανάλυσης

Στα προηγούμενα κεφάλαια μελετήθηκε και βελτιστοποιήθηκε συσκευή μετατροπής της κυματικής ενέργειας με την παραδοχή σταθερών κυματικών δεδομένων πλάτους και περιόδου. Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν είναι αντιπροσωπευτικά έντονων φαινομένων και ενδεικτικά της μέγιστης παρεχόμενης ισχύος από τη θάλασσα στον μηχανισμό.

Οι πραγματικές συνθήκες ασφαλώς είναι πολύ διαφορετικές. Πέρα από τις όποιες παραδοχές που έγιναν κατά την δυναμική ανάλυση και στοχεύουν στο να καταστήσουν το μαθηματικό μοντέλο επιλύσιμο και σχετικά απλό, φυσικά με κάποιες αποκλίσεις από την πραγματική λειτουργία, ίσως η σημαντικότερη παραδοχή που έγινε στα προηγούμενα εδάφια να ήταν αυτή του σταθερού κυματισμού. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις και η δυναμική τους αυτή συμπεριφορά καθιστά ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα τη στατιστική ανάλυσή τους.

Ανά τον κόσμο υπάρχουν οργανισμοί και εταιρείες που συλλέγουν ακόμη και ωριαίες τιμές σημαντικών μεγεθών που σχετίζονται με τον κυματισμό, με διάφορους τρόπους και συνήθως με πλευστές συσκευές τύπου πλωτήρα. Τα δεδομένα αυτά αρχειοθετούνται σε βάσεις δεδομένων και χρησιμοποιούνται για περαιτέρω ανάλυση με στόχο μελέτες όπως η παρούσα καθώς και ανάπτυξη μοντέλων πρόγνωσης κυματισμών. Πάμπολλα είναι τα παραδείγματα τέτοιων οργανισμών. Ενδεικτικά αναφέρονται ο διεθνής οργανισμός NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), το ερευνητικό πρόγραμμα CDIP (Coastal Data Information Programm), το πρόγραμμα TOPEX/Poseidon υπό την αιγίδα της NASA (National Aeronautics and Space Administration), που μέχρι τώρα έχει στείλει σε τροχιά τρεις δορυφόρους (Jason-1, OSTM/Jason-2, Jason-3), ενώ στον ελληνικό χώρο δραστηριότητα παρατηρείται στο πρόγραμμα Ποσειδών για λογαριασμό του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών). Η πρόσβαση σε ιστορικά δεδομένα που έχουν συλλεγεί, συνήθως απαιτεί εγγραφή και παροχή κάποιων διαπιστεύσεων για το σκοπό χρήσης τους, ενώ υπάρχουν και ελεύθερες βιβλιοθήκες στον παγκόσμιο ιστό.

Μία συλλογή λοιπόν τέτοια χρησιμοποιήθηκε και στην μελέτη που θα ακολουθήσει. Αιτία επιλογής της θέσης είναι η όσο το δυνατόν πιο έντονη φύση των φαινομένων ώστε το κυματικό δυναμικό της πρότασης να είναι αξιόλογο. Επίσης, λόγω της αρχής λειτουργίας του μηχανισμού, επιθυμητή είναι και ορισμένη τοπογραφία της περιοχής. Συγκεκριμένα ένα μεγάλο βάθος σχετικά κοντά στην ακτή και η ύπαρξη κάποιας υψομετρικής διαφοράς σε αυτή ώστε να αντληθεί νερό σε υψηλότερη στάθμη και ικανή υδατική πτώση, είναι αναγκαία.

### 7.1.2) Επιλογή θέσης

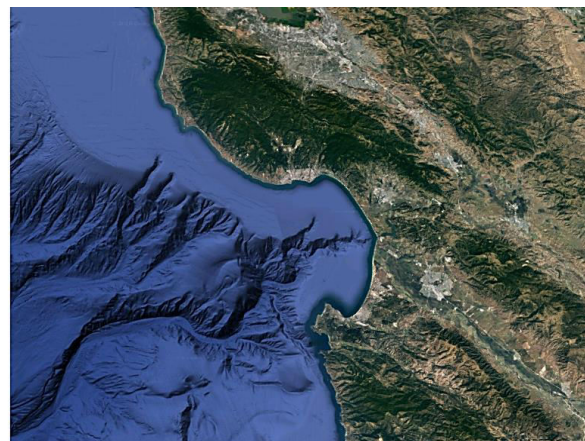
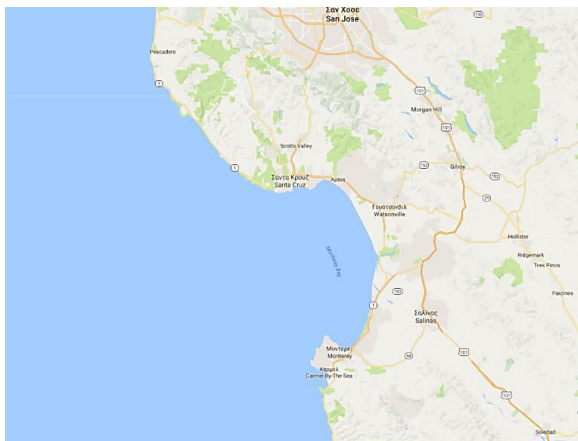
Τα τοπογραφικά δεδομένα της θέσης θα θεωρηθούν σταθερά με τα προαναφερθέντα και συγκεκριμένα:

- Βάθος στην θέση εγκατάστασης : 44 (m)
- Οριζόντια απόσταση ως την θέση ταμιευτήρα : 500 (m)
- Διαφορά στάθμης μηχανισμού και ταμιευτήρα : 60 (m)

Τα μεγέθη αυτά είναι ενδεικτικά της θέσης επιλογής για την οποία βρέθηκαν και τα απαιτούμενα δεδομένα χρονικής μεταβολής των κυματικών χαρακτηριστικών. Φυσικά μπορούν να μεταβάλλονται κατά περίπτωση ανάλυσης οδηγώντας όμως είτε σε λειτουργία εκτός του ονομαστικού σημείου της ίδιας συσκευής σε όλες τις περιπτώσεις χρήσης, είτε στην ανάγκη για νέα βελτιστοποίηση για τη θέση ενδιαφέροντος και την κατασκευή μηχανισμού με νέα χαρακτηριστικά.

Ως θέση μελέτης επιλέγεται η τοποθεσία Monterey Bay ( $36^{\circ}48'36.1''N$   $122^{\circ}08'08.6''W$ ) της πολιτείας Καλιφόρνια στην δυτική όχθη των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής ως μια αντιπροσωπευτική θέση με έντονο κυματισμό, κατάλληλη μορφολογία εδάφους και συγκεκριμένα βόρεια από τον κόλπο όπου διακρίνονται τοποθεσίες με ικανό υψόμετρο για την κατασκευή του ταμιευτήρα, καθιστώντας την ιδανικό παράδειγμα τοποθεσίας για την εγκατάσταση παρόμοιων μηχανισμών σε ανάλογες θέσεις, ενώ η συγκεκριμένη ίσως έχει και οικονομικό ενδιαφέρον λόγω εγγύτητας με μεγάλα αστικά κέντρα. Όλες αυτές είναι παράμετροι στις οποίες απαιτείται εμβάθυνση και ξεχωριστή ανάλυση πριν την οποιαδήποτε πρόταση εγκατάστασης, που δεν αποτελεί αντικείμενο του παρόντος.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται προέρχονται από το πρόγραμμα CDIP το οποίο και διατηρεί μία βάση δεδομένων αρκετών χρόνων για την δυτική όχθη των Η.Π.Α. . Ο μηχανισμός με τον οποίον συλλέγησαν είναι πειραματικός πλωτήρας (station 185) ο οποίος μάλιστα είναι εν ενεργεία από το 2011 μέχρι και σήμερα.

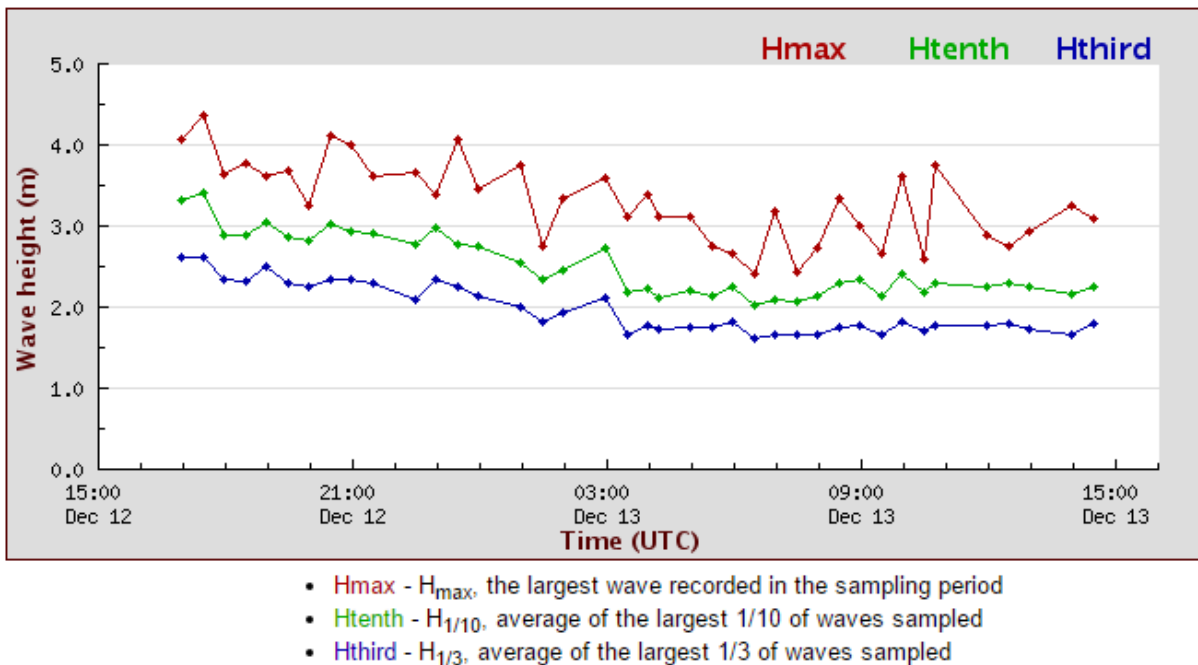


Σχήμα 7.1: Πολιτικός και γεωγραφικός χάρτης επιλεγμένης θέσης- Κόλπος του Μοντερέι (Πηγή: Google maps)

## Παράγραφος 2<sup>η</sup> : Επεξεργασία δεδομένων

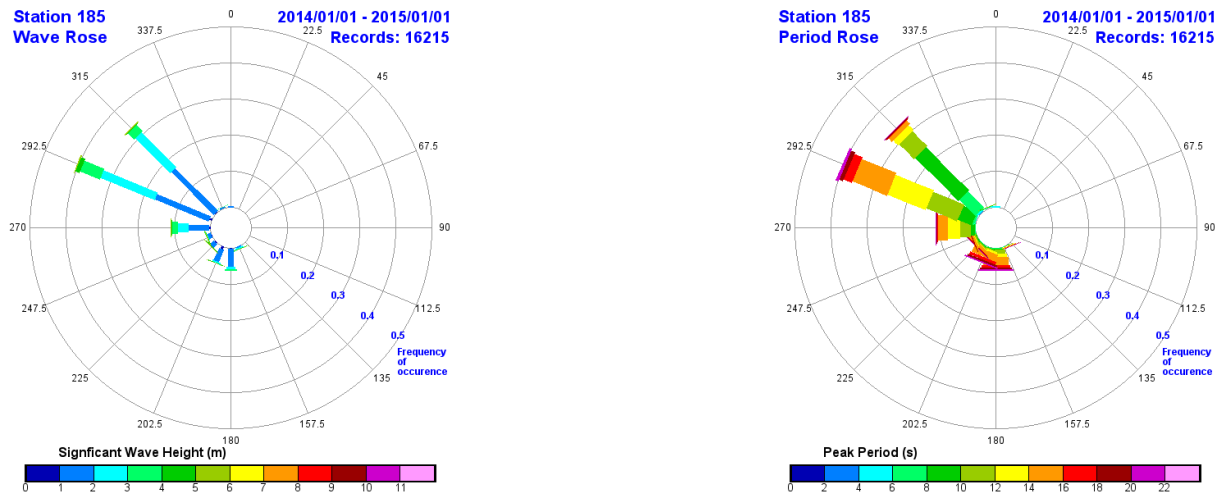
### 7.2.1) Δεδομένα εισαγωγής

Τα κυματικά δεδομένα της επιλεγμένης θέσης στον Κόλπο του Μοντερέι παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα μαζί με την επεξήγηση της στατιστικής ανάλυσης όπου χρειάζεται. Το πρώτο και πολύ βασικό βήμα είναι να γίνει ξεκάθαρο ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων το μέγεθος το οποίο αναλύεται και στο οποίο δίνεται έμφαση είναι το Σημαντικό Ύψος Κύματος (Significant Wave Height). Είναι ένα στατιστικό μέγεθος ενδεικτικό κυματισμού και μάλιστα στην ουσία πρόκειται για το μέσο κύμα (mean wave). Υπολογίζεται ως το ένα τρίτο του μέγιστου ύψους κύματος κάθε στιγμή. Υπενθυμίζεται ότι το ύψος του κύματος είναι το διπλάσιο του πλάτους της συνημιτονικής συνάρτησης που το περιγράφει.



Σχήμα 7.2: Στατιστική ανάλυση ύψους κύματος

Πέρα από ποσοτικής φύσεως δεδομένα, όπως το ύψος του κύματος και η περίοδος, όταν πρόκειται να γίνει εγκατάσταση μιας τέτοιας συσκευής, μελετώνται και ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως το ρόδο ύψους κύματος και το ρόδο της περιόδου, πολικά διαγράμματα που δείχνουν τη διεύθυνση των αντίστοιχων μεγεθών ανά χρονική περίοδο. Για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται εδώ ενδεικτικά δύο για την επιλεγμένη θέση (σχήμα 7.3).

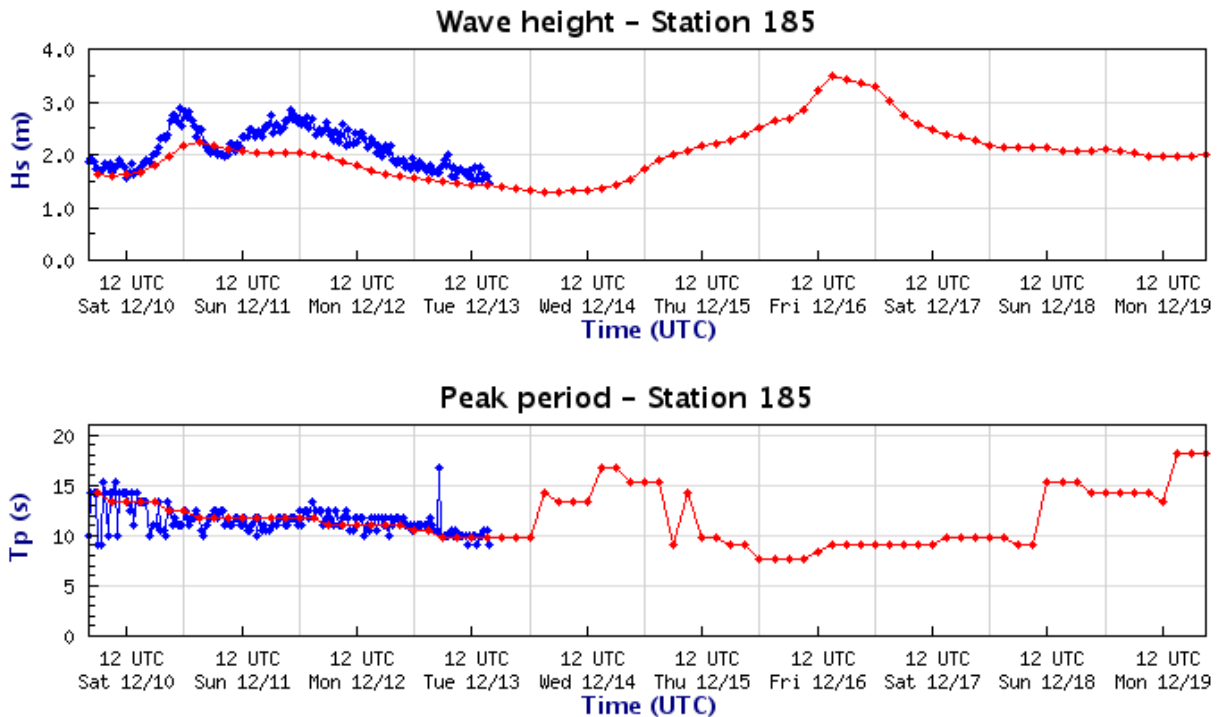


Σχήμα 7.3: Ροδόγραμμα SWH (αριστερά) και T (δεξιά), Monterey Bay (2015) (Πηγή: CDIP)

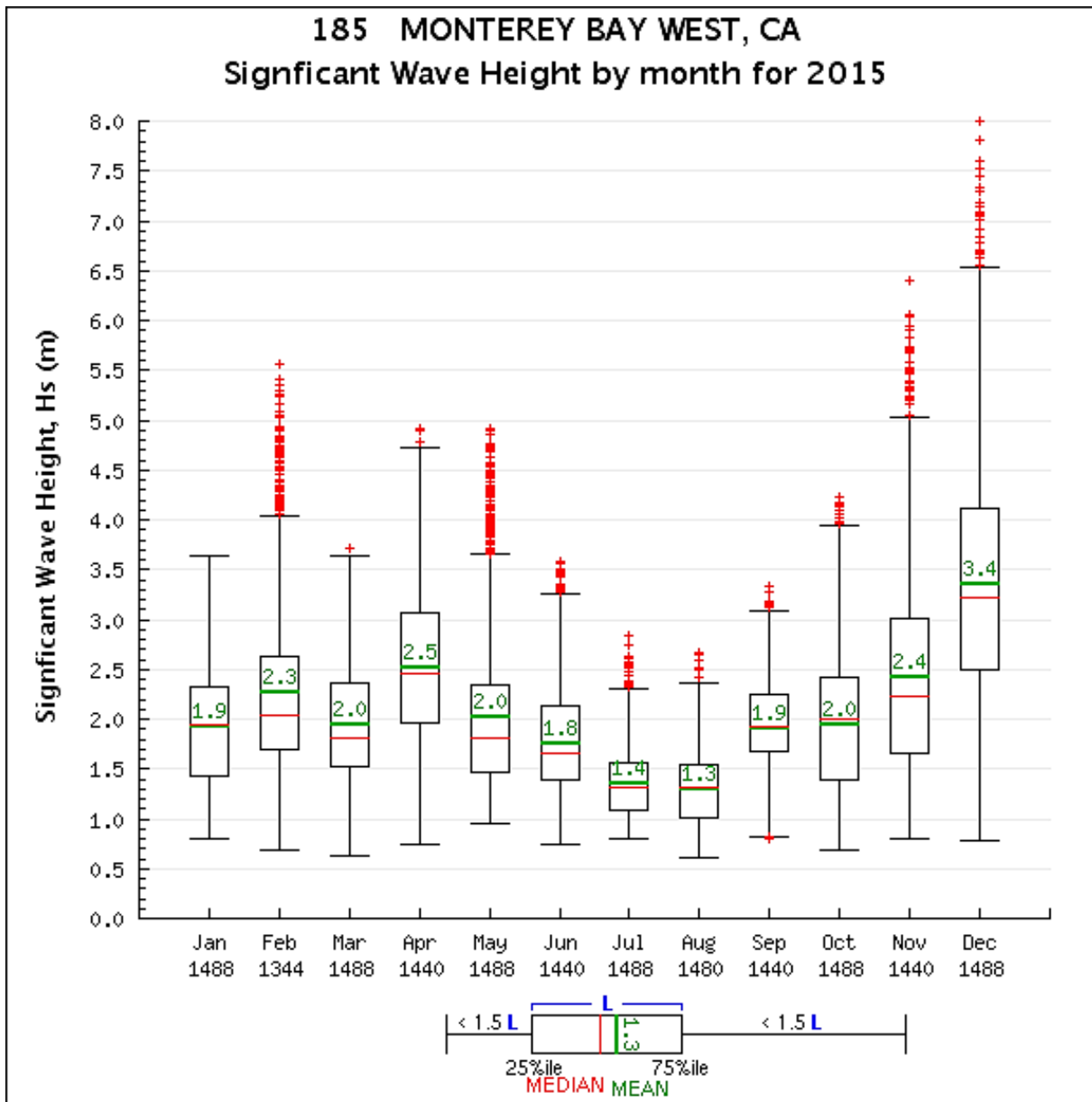
Εστιάζοντας τώρα στα δεδομένα που πρόκειται να αναλυθούν, την περίοδο και το σημαντικό ύψος κύματος, αναλύθηκαν δεδομένα που αναφέρονται σε διαφορετικά χρονικά βήματα συλλογής της πληροφορίας. Τα διαθέσιμα δείγματα λήφθηκαν ανά ώρα και από εκεί προέκυψαν οι κατανομές σε ημερήσια, εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια βάση. Η βασική στατιστική ανάλυση θα στηριχτεί σε μακροχρόνια δεδομένα διάρκειας ετών λειτουργίας της πειραματικής διάταξης και συγκεκριμένα της τετραετίας 2011-2015. Διαθέσιμα είναι στον ιστότοπο του CDIP και ιστογράμματα ετήσιων τιμών των μεγεθών καθώς και της εξέλιξής τους σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή με χρονικό βήμα δειγματοληψίας ωρών. Αξιολογή είναι και η χρήση μοντέλων πρόγνωσης, όπως στα διαγράμματα που ακολουθούν.

Monterey Bay West, CA Conditions + Forecast ( 2016 )

Observations: CDIP buoy 185  
Forecast : NOAA WW3 46114



Σχήμα 7.4: Κομματικές συνθήκες (SWH,T) και μοντέλο πρόγνωσης, Monterey Bay (2016) (Πηγή: CDIP)



Σχήμα 7.5: SWH και στατιστικά μεγέθη, Monterey Bay (2015) (Πηγή: CDIP)

Στο παραπάνω γράφημα απεικονίζεται το σημαντικό ύψος κύματος σε μηνιαία βάση για το έτος 2015 στην επιλεγμένη τοποθεσία, και τα βασικά στατιστικά μεγέθη, το μέσο ύψος κύματος (mean) με πράσινο χρώμα και ο διάμεσος (median) με κόκκινου χρώματος γραμμή. Επίσης διακρίνονται και οι ακραίες τιμές του μεγέθους.

Μεγαλύτερη στατιστική αξία έχουν οι μέσες μηνιαίες τιμές των μεγεθών, οι οποίες θα υποβληθούν και στη στατιστική ανάλυση.

Πίνακας 7.1: Μέσες μηνιαίες κυματικές συνθήκες, Monterey Bay, (2011-2015)

Year	Month	SWH(m)	mean T (sec)	Records
2011	9	2,71	8,94	156
2011	10	2,07	7,91	1488
2011	11	2,64	8,52	1440
2011	12	2,45	9,54	1488
2012	1	2,68	9,04	1488
2012	2	3,07	9,14	1392
2012	3	2,68	8,71	1488
2012	4	2,51	7,89	1440
2012	5	2,03	6,64	1488
2012	6	2,11	6,98	1440
2012	7	1,9	6,89	1488
2012	8	1,68	6,55	1488
2012	9	1,87	7,68	1440
2012	10	1,84	8,54	1488
2012	11	2,4	9,38	31
2013	6	1,73	6,68	540
2013	7	1,64	7,34	1488
2013	8	1,29	6,13	1488
2013	9	1,86	7,5	1440
2013	10	2,1	8,33	1488
2013	11	1,87	8,42	1440
2013	12	2,15	8,75	1488
2014	1	2,24	10,59	1488
2014	2	2,17	7,83	1344
2014	3	2,63	9,37	1488
2014	4	2,37	8,6	1439
2014	5	1,86	7,17	1488
2014	6	2,01	7,22	1440
2014	7	1,59	7,1	1457
2014	8	1,62	7,53	1467
2014	9	1,59	7,88	1411
2014	10	1,81	7,81	216
2014	11	2,05	8,52	1440
2014	12	2,84	8,55	1488
2015	1	1,94	8,82	1488
2015	2	2,27	8,21	1344
2015	3	1,95	7,68	1488
2015	4	2,53	7,9	1440
2015	5	2,03	7,7	1488
2015	6	1,76	7,26	1440
2015	7	1,37	8,26	1488
2015	8	1,31	7,03	1479
2015	9	1,93	7	1440
2015	10	1,95	7,93	1488
2015	11	2,42	8,35	1440
2015	12	3,42	9,8	1440

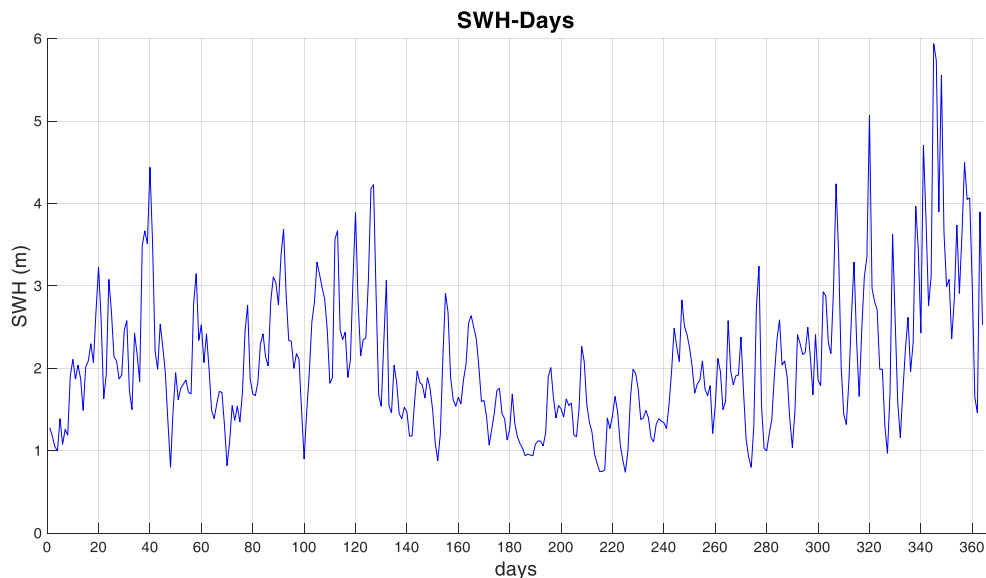
Με βάση τις ημερήσιες παρατηρήσεις λοιπόν μπορούν να εξαχθούν μέσοι όροι για την ημέρα, την εβδομάδα, το μήνα και το έτος με αυξανόμενη ακρίβεια ως προς τον μέσο όρο, εφόσον προοδευτικά απαλλάσσονται από χρονικές ασυνέχειες και περιστασιακές διακυμάνσεις. Με βάση λοιπόν τις τιμές του Πίνακα 7.1 παράγεται και ο ακόλουθος Πίνακας 7.2 που συνοψίζει τα παραπάνω σε μηνιαία μεγέθη σε μέσους όρους του έτους.

*Πίνακας 7.2: Μέσες ετήσιες κυματικές συνθήκες, Monterey Bay, (2011-2015)*

Year	SWH(m)	mean T (sec)	Records
2011	2,40	8,67	4572
2012	2,23	7,80	14671
2013	1,81	7,68	9372
2014	2,09	8,22	16166
2015	2,07	7,99	17463

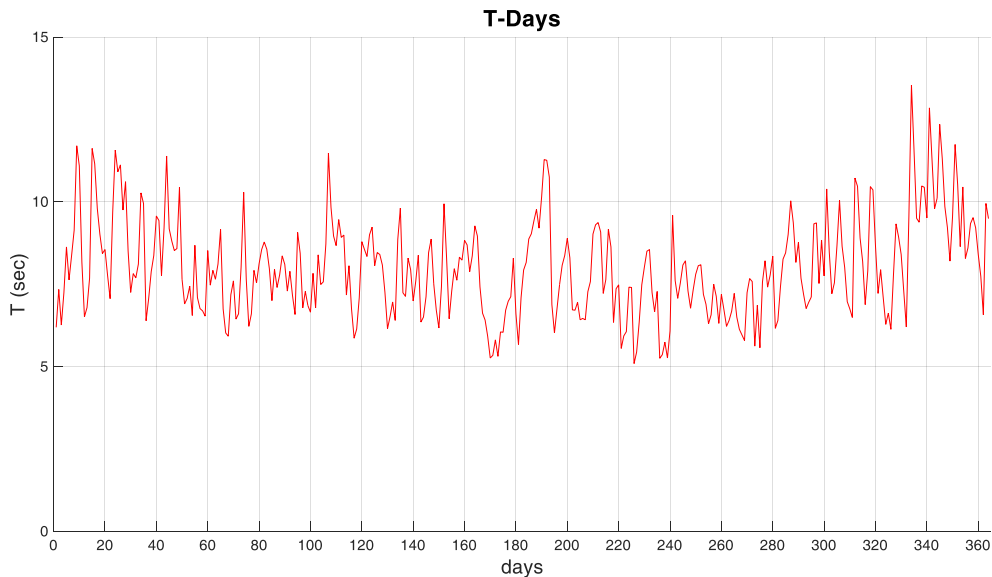
### 7.2.2) Στατιστική επεξεργασία δεδομένων

Η μελέτη βελτιστοποίησης του σχεδιασμού θα γίνει για μελέτη των δεδομένων ενός έτους με χρονικό βήμα μιας ημέρας. Ως έτος αναφοράς επιλέγεται το 2015. Παράγεται λοιπόν ένας πίνακας 364 ημερών και των αντίστοιχων μέσων τιμών σημαντικού ύψους και περιόδου. Τα περιεχόμενα του Πίνακα IV.1, που μπορεί να βρει κανείς στο Παράρτημα IV, οπτικοποιούνται στις ακόλουθες γραφικές παραστάσεις.



*Σχήμα 7.6: Χρονοσειρά SWH, Monterey Bay, (2015)*

Για το έτος 2015 παρατηρήθηκε μέγιστο SWH 5,94 m και ελάχιστο 0,74 m, ενώ η μέση τιμή του εκτιμάται σε 2,07 m . Από το παραπάνω γράφημα είναι εμφανής η έντονη διακύμανση του σημαντικού ύψους κύματος από μέρα σε μέρα, γεγονός που αποδεικνύει την απλότητα της παραδοχής σταθερού κυματισμού.



Σχήμα 7.7: Χρονοσειρά T, Monterey Bay, (2015)

Για το 2015 η μέγιστη τιμή της περιόδου ήταν 13,54 sec, ενώ η ελάχιστη 5,09 sec. Σε ό,τι αφορά την ανάλυση και ως προς την περίοδο, αυτή θα θεωρηθεί σταθερή και ίση με την μέση τιμή του έτους , δηλαδή 7,99 sec .

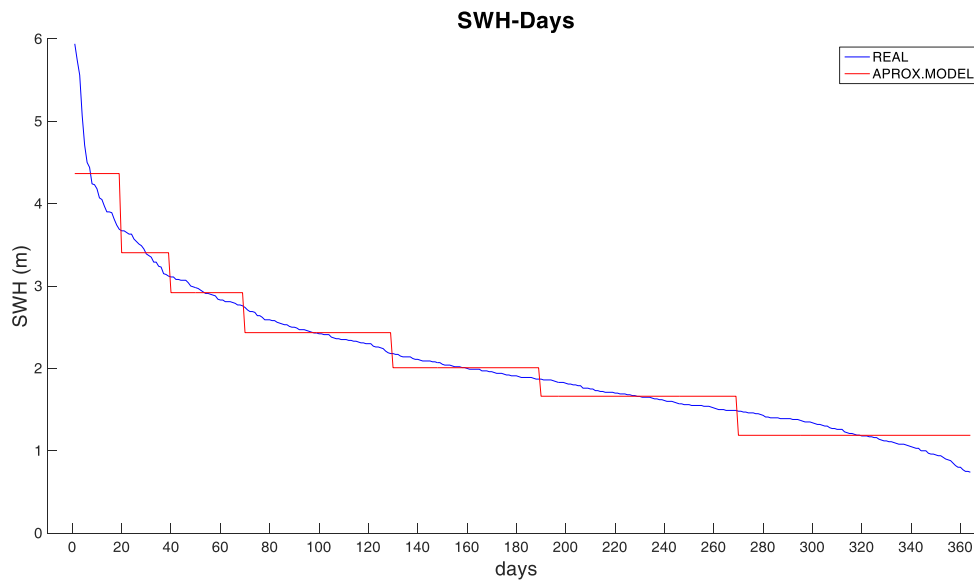
$$T = 7,99 \text{ sec} \quad (7.1)$$

Με χρήση των δεδομένων από τη χρονοσειρά του σημαντικού ύψους κύματος μπορεί να κατασκευαστεί και η αντίστοιχη καμπύλη διάρκειας κυματισμού, με το αντίστοιχο απλοποιημένο μοντέλο της χρονικής διακριτοποίησης και της θεώρησης σταθερού μέσου κυματισμού στο κάθε χρονικό διάστημα βάσει του πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 7.3: Μέσες τιμές πλάτους και περιόδου απλοποιημένου μοντέλου διακριτοποιημένου χρόνου, Monterey Bay (2015)

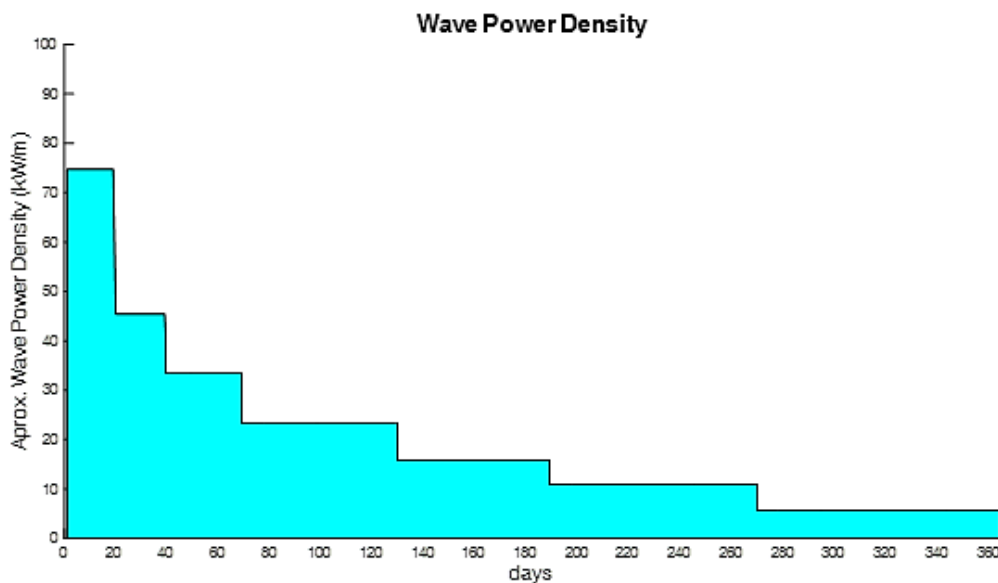
<b>A (m)</b>	0,590	0,825	1,000	1,210	1,455	1,695	2,180
<b>T (sec)</b>	7,99	7,99	7,99	7,99	7,99	7,99	7,99
<b>Year Days</b>	94	80	60	60	30	20	20





Σχήμα 7.8: Καμπύλη διάρκειας SWH και απλοποιημένο μοντέλο προσέγγισης, Monterey Bay (2015)

Με βάση λοιπόν το παραπάνω προσεγγιστικό μοντέλο-ιστόγραμμα μπορεί να κατασκευαστεί η καμπύλη διάρκειας κυματικής ισχύος. Πρόκειται για την ισχύ που μεταφέρει το κύμα ανά μέτρο κυματομετώπου και, όπως έχει επισημανθεί, αποτελεί μέγεθος-βαθμό του κυματικού δυναμικού της κάθε περιοχής.



Σχήμα 7.9: Καμπύλη διάρκειας ισχύος προσεγγιστικού μοντέλου, Monterey Bay (2015)

Η ισχύς ξεπερνά για πολύ μικρό χρονικό διάστημα στη διάρκεια του έτους τα 40kW/m και εντάσσεται στην κατηγορία υψηλής κυματικής ενεργειακής πυκνότητας. Η θεώρηση σταθερού κυματισμού και μάλιστα έντονου οδηγεί προφανώς σε υπερεκτίμηση της ετήσιας απόδοσης της συσκευής.

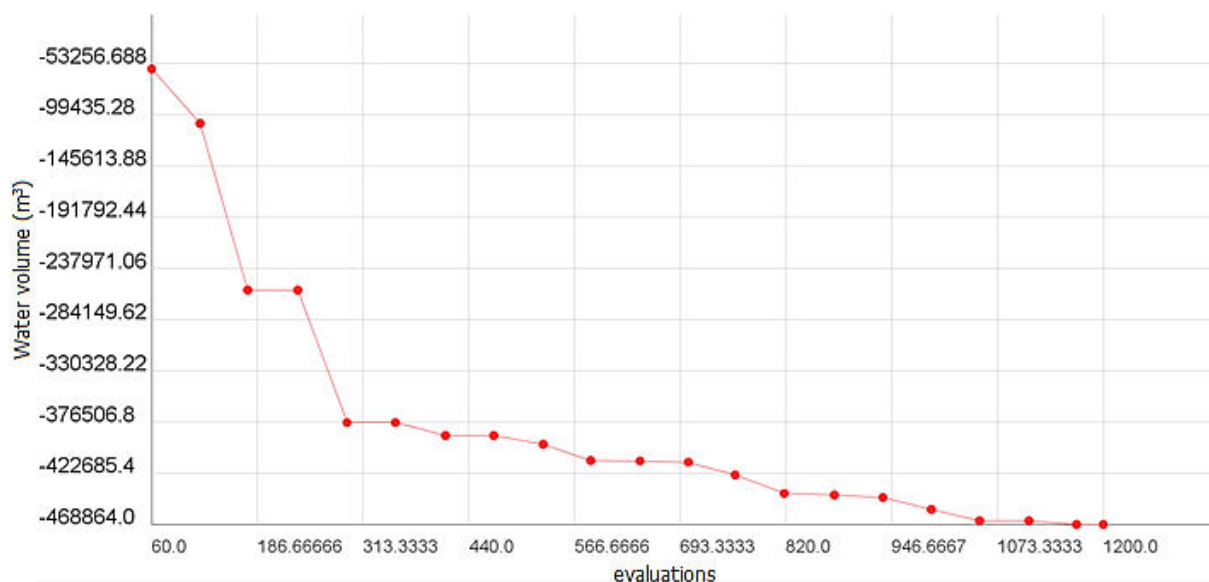


## Κεφάλαιο 8 : Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών

### 8.1) Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Η βελτιστοποίηση με το λογισμικό EASY έγινε με συνάρτηση-στόχο τον ετήσιο όγκο αποταμιευόμενου νερού. Ο κώδικας εκτελούνταν σε κάθε κλήση του αρχείου task.bat για λογαριασμό του EASY επτά φορές, όσα και τα υποδιαστήματα στα οποία διαιρέθηκε το έτος και στα οποία αντιστοιχίστηκαν μέσες τιμές σημαντικού ύψους κύματος. Επιλέχθηκαν 1200 επαναλήψεις και η διαδικασία ήταν αρκετά χρονοβόρα.

Ακολουθεί το διάγραμμα σύγκλισης του αλγορίθμου και τα δέκα καλύτερα set παραμέτρων (elites) και υπενθυμίζεται η ανεστραμμένη φορά του κατακόρυφου άξονα :



Σχήμα 8.1: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης EASY. Διάγραμμα σύγκλισης

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Variable 1	19734.12	19734.12	19734.12	17623.655	18155.432	18404.686	18122.197	18404.686	18404.686	18404.686
Variable 2	2.8035189...	2.8035189...	2.8035189...	2.79472	2.791789	2.800588	2.818183	2.806453	2.800588	2.800588
Variable 3	0.3155428	0.3146626	0.3173023...	0.3199411...	0.3199411...	0.3199411...	0.3199411...	0.3199411...	0.3199411...	0.3199411...
Variable 4	0.2032257...	0.2032257...	0.2032257...	0.2032257...	0.20430112	0.2053763...	0.2053763...	0.20645162	0.20645162	0.20645162
Variable 5	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
Variable 6	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Variable 7	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
Objective 1	-468864.0	-468234.0	-467288.0	-466217.0	-465731.0	-465647.0	-463241.0	-463140.0	-462420.0	-462420.0

Σχήμα 8.2: Elites βελτιστοποίησης συστήματος

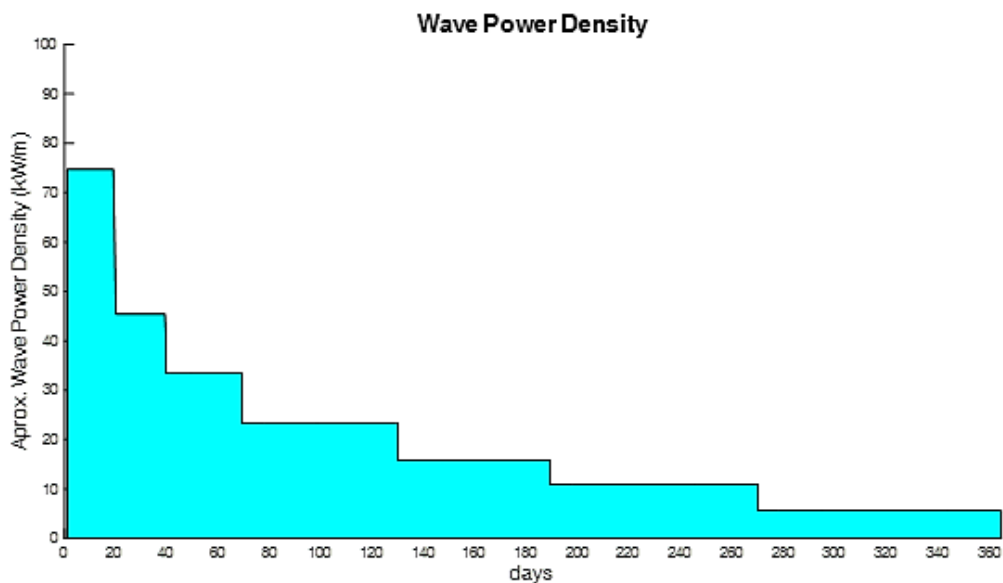
Η πρώτη στήλη του παραπάνω πίνακα αποτελεί και τη βέλτιστη λύση, η οποία συνοψίζεται ακολούθως :

*Πίνακας 8.1: Τιμές μεταβλητών βελτιστοποίησης και μοντέλου*

ID	System Parameter	Size
Variable1	mtot	19734,12 kg
Variable2	dp	2,804 m
Variable3	de	0,316 m
Variable4	da	0,203 m
Variable5	$L_k$	60 m
Variable6	$Z_t$	20 m
Variable7	$L_s$	500 m
Objective1	$V_{WATER}$	468864 m <sup>3</sup>

## 8.2) Αποτελέσματα ενεργειακής ανάλυσης

Από την καμπύλη διάρκειας της ροής ισχύος υπολογίζεται ολοκληρωτικά η ολική παρεχόμενη ισχύς ανά έτος :



*Σχήμα 8.3: Καμπύλη διάρκειας ισχύος προσεγγιστικού μοντέλου, Monterey Bay (2015)*

Το εμβαδόν της καμπύλης διάρκειας ισχύος είναι ημερήσια ενέργεια ανά μέτρο. Πολλαπλασιαζόμενη με τις ώρες μιας ημέρας και την διάμετρο του πλωτήρα δίνει της διαθέσιμες προς απορρόφηση MWh στη διάρκεια ενός έτους και από μία συσκευή.

$$\text{Ετήσια κυματική ενέργεια : } E_{WAVE} = \text{trapz}(J) * dp * 24 = 477,3 \text{ MWh} \quad (8.1)$$

Η ενέργεια που «οδηγείται» προς αποταμίευση σε ένα έτος από μία συσκευή υπολογίζεται ως εξής :

$$\text{Ετήσια αποταμιευόμενη ενέργεια : } E_{DAMN} = \frac{9,81}{1000} * 1025 * 56 * \frac{468864}{60 * 60} = 73,3 \text{ MWh} \quad (8.2)$$

$$\text{Ετήσια απορρόφηση : } YearAbs = 100 \frac{E_{DAMN}}{E_{WAVE}} = 15,3 \% \quad (8.3)$$

Αυτό που γίνεται αντιληπτό είναι ότι πλέον ο βαθμός απόδοσης σε ετήσια βάση, αυτό δηλαδή που ονομάστηκε ετήσια απορρόφηση, είναι σημαντικά μικρότερος του CWR λόγω λειτουργίας της ίδιας συσκευής σε διαφορετικές συνθήκες και με κριτήριο την μη έξοδο έστω και ελάχιστα του πλωτήρα από το νερό. Επίσης η διαδικασία βελτιστοποίησης θα μπορούσε να οδηγήσει σε ακόμη καλύτερη απόδοση, αν είχε επιλεγεί μεγαλύτερος αριθμός επαναλήψεων. Ακόμη, με βάση τον χαμηλό βαθμό απορρόφησης, πρόσφορο έδαφος βρίσκει και η ιδέα που σχετίζεται με το design της συσκευής. Συγκεκριμένα πώς θα μπορούσε να γίνεται προσαρμογή μιας ή περισσοτέρων εκ των λειτουργικών και κατασκευαστικών παραμέτρων της στον ανάλογο κυματισμό ώστε να μετατοπίζεται κάθε φορά το σημείο λειτουργίας της προς καλύτερες επιδόσεις, καθιστώντας πιο αποδοτική την λειτουργία της και μεγαλύτερο τον όγκο νερού που αποταμιεύεται. Παρόλα αυτά, αν αναλογιστεί κανείς ότι πρόκειται για μία μόνο συσκευή, οι 73,3 MWh είναι αξιόλογη ποσότητα ενέργειας, κάτι το οποίο θα γίνει φανερό και παρακάτω, με την οικονομική ανάλυση υποθετικής ενεργειακής κυματικής φάρμας.

### 8.3) Αποτελέσματα ενεργειακής ανάλυσης κυματικού πάρκου

Όπως βρέθηκε παραπάνω, η ενέργεια που αποταμιεύεται χάρη σε μία μόνο συσκευή σε ετήσια βάση είναι 73,3 MWh. Μελετάται πλέον η εγκατάσταση 80 τέτοιων συσκευών και η δημιουργία κυματικής φάρμας. Με την εγκατάσταση και λειτουργία 80 συσκευών στη θέση του σταθμού 185 στον Κόλπο του Μοντερέι προκύπτει η ετήσια ενέργεια που θα αποταμιεύεται, η οποία, με την προϋπόθεση όμοιας απόδοσης και κυματικών δεδομένων όμοιων με το έτος 2015, για το οποίο έγινε και η ανάλυση χρονοσειρών και κατασκευάστηκε η καμπύλη διάρκειας ισχύος, ισούται με :

$$\text{numWECs} = 80 \quad (8.4)$$

$$\text{Energy}_{Farm} = \text{numWECs} * E_{DAMN} = 5,864 \text{ GWh} \quad (8.5)$$

Αν υποθεθεί ότι χρησιμοποιείται ο υδροστρόβιλος που επιλέχθηκε στο εδάφιο (6.4.3). με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

Πίνακας 8.2: Χαρακτηριστικά υδροστροβίλου

Type	FRANCIS (reaction turbine)
Series	E770
Nom. Power	2 MW
Turbine Efficiency	92%
ns (rpm)	280
Generator Efficiency	98%
$Q_{HT}$	4 m <sup>3</sup> /sec

δηλαδή ο υδροηλεκτρικός σταθμός λειτουργεί ως μονάδα ισχύος για την κάλυψη των αιχμών ζήτησης του δικτύου, και υποθεθεί ότι ο ολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου παραμένει σταθερός σε όλη την διάρκεια λειτουργίας του, τότε συνολικά αντλούνται στον ταμιευτήρα :

$$V_{water/year} = numWECs * V_{WATER} = 80 * 468864 = 37509120 m^3 / year \quad (8.6)$$

Αυτός ο όγκος νερού εξασφαλίζει λειτουργία του Υ/Σ :

$$Oper.Hours_{HT} = V_{water/year} / Q_{HT} = 2604,8 hrs \quad (8.7)$$

Σε ετήσια βάση παράγεται ηλεκτρική ενέργεια ίση με :

$$Energy_{elec.year} = Nom.power_{HT} * Oper.Hours_{HT} * \eta_{HT} * \eta_G = 4,696 GWh \quad (8.8)$$

Ως Συντελεστής Φορτίου (Capacity or Load Factor) ορίζεται το πηλίκο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στη διάρκεια ενός έτους προς την ενέργεια που θα παραγόταν αν όλο το έτος, δηλαδή επί 8760 ώρες, ο Υ/Σ λειτουργούσε με την ονομαστική ισχύ του. Στην παρούσα μελέτη ισούται με :

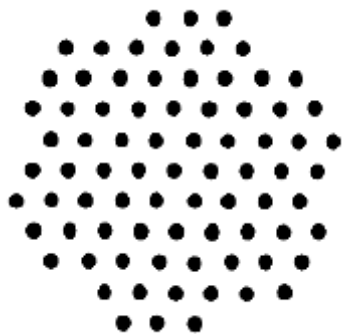
$$CF = \frac{Energy_{elec.year}}{Nom.power_{HT} * 8760} = 26,8 \% \quad (8.9)$$

Στα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, τα οποία προορίζονται για μονάδες αιχμής, ο CF κυμαίνεται μεταξύ 0,25-0,4 (Παπαντώνης, 2009), γεγονός που αποδεικνύει την ενεργειακή αξία του κυματικού δυναμικού.

#### 8.4) Στοιχεία χωροθέτησης

Η χωροθέτηση των συσκευών αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης επιστημονικής έρευνας και απαιτεί εμβάθυνση σε υδροδυναμικά φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση των πλωτών σωμάτων. Αυτό που έχει αποδειχθεί είναι ότι μπορεί να οδηγήσει σε απορρόφηση μεγαλύτερου μέρους της κυματικής ενέργειας και επομένως αύξηση της απόδοσης.

Οι απορροφητές τοποθετούνται στην κύρια κατεύθυνση κυμάτων, όπως προκύπτει από το ροδόγραμμα του κυματισμού. Οι σειρές που έπονται της πρώτης αναμένεται να λαμβάνουν προοδευτικά μικρότερο ποσό ενέργειας, μια και αυτή εξασθενεί από σειρά σε σειρά (shadowing effect) . Ωστόσο με κατάλληλη τοποθέτηση οι απώλειες αυτές μπορούν να μετριαστούν στο ποσοστό μικρότερο του 2% από σειρά σε σειρά. Συνηθισμένη είναι η διάταξη εξαγωνικής μορφής με τους πλωτήρες σε απόσταση ( $2 d_p$ ) μεταξύ τους, όπως η ακόλουθη του σχήματος 8.5, που περιλαμβάνει 80 συσκευές, όπως στο σενάριο που αναλύθηκε προηγουμένως. Η διάμετρος της συστοιχίας προσδιορίζεται σε περίπου 100 m και επομένως η απαιτούμενη έκταση σε  $7850 \text{ m}^2$



**Σχήμα 8.4:** Εξαγωνικής μορφής χωροθέτηση 80 συσκευών

(Πηγή : Χαρτογράφηση του Ελληνικού Θαλάσσιου Χώρου στα Πλαίσια ενός Σχεδίου Δράσης με Αντικείμενο την Ολοκληρωμένη Θαλάσσια Πολιτική Η συνεισφορά των αλτιμετρικών γεωδαιτικών δορυφόρων, Δ. Δεληκαράογλου, Σ. Δεληκαράογλου, 2010)



**Σχήμα 8.5:** Μεταφορά συσκευών στη θέση εγκατάστασης (Πηγή: OceanPowerTechnologies)

Επίσης προφανώς οι παροχές από κάθε σύστημα θα συμβάλλουν σε έναν μεγαλύτερο αγωγό, ο οποίος και θα καταλήγει στον ταμιευτήρα. Καμία απολύτως μεταβολή της συμπεριφοράς δεν θα υπάρξει, καθώς κάθε αγωγός θα μετέχει κατά το ποσό που του αναλογεί στη διακίνηση του ρευστού εντός του κεντρικού αγωγού. Έτσι η κίνηση των πλωτήρων θα παρουσιάζει διαφορά φάσης, η οποία όμως, να μεν θα προκαλεί αυξομειώσεις και της παροχής στον ταμιευτήρα, αλλά από την άλλη δεν θα επηρεάζει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος με τρόπο διαφορετικό από ό,τι επηρεάζει την δυναμική και ενεργειακή απόκριση του ενός μηχανισμού, όπως παρουσιάστηκε στο έκτο κεφάλαιο.





## Κεφάλαιο 9 : Συμπεράσματα και προτάσεις διερεύνησης

### 9.1) Συμπεράσματα

Με το τρέχον κεφάλαιο ολοκληρώνεται η διπλωματική εργασία και μια προσπάθεια. Η προσπάθεια να μοντελοποιηθεί και να αναλυθεί η πρόταση για έναν μηχανισμό μετατροπής της κυματικής ενέργειας, ο οποίος όμως παρουσιάζει μια βασική διαφορά με όσους λειτουργούν. Η διαφορά αυτή έγκειται στο γεγονός ότι δεν αποσκοπεί στην απευθείας μετατροπή της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική και την μεταφορά της μέσω καλωδίου στην ακτή, αλλά επιχειρεί να συμβάλλει σε έναν τομέα της ενεργειακής τεχνολογίας που χρήζει άμεσης ανάπτυξης, αυτόν της αποθήκευσης ενέργειας. Εκμεταλλευόμενος λοιπόν την αρχή των ανάστροφων υδροηλεκτρικών έργων στοχεύει στην άντληση νερού σε υψηλότερη στάθμη και την μετέπειτα αξιοποίηση αυτής της δυναμικής ενέργειας με πτώση σε υδροστρόβιλο.

Αφού επιλέχθηκε και κατηγοριοποιήθηκε η συσκευή βάσει της ισχύουσας κατάστασης στον συγκεκριμένο τομέα ενέργειας, επιχειρήθηκε η μοντελοποίηση του συστήματος με την προσπάθεια ρεαλιστικών συνθηκών και παραμέτρων κυρίως σε ό,τι αφορά την τοπογραφία της περιοχής. Κατά τη διαδικασία της διαπιστώθηκε ότι μια πολύ ισχυρή αντίσταση εμφανίζεται κατά την καθοδική κίνηση του συστήματος, η αντίσταση στήλης νερού, η οποία αποτελεί και τον βασικό ανασταλτικό παράγοντα της επίτευξης υψηλής παροχής στον ταμιευτήρα. Επίσης έγινε μερική μελέτη της στήριξης και της εξασφάλισης των επιθυμητών βαθμών ελευθερίας και μόνο του μηχανισμού.

Σε πρώτη φάση για την επίλυση βρέθηκαν οι τιμές και τα εύρη διακύμανσης των παραμέτρων του προβλήματος. Αντί να προταθεί μια συσκευή και να μελετηθεί η απόκρισή της επιχειρήθηκε να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός για ορισμένα κυματικά χαρακτηριστικά με χρήση των εξελικτικών αλγορίθμων που ενσωματώνει το λογισμικό EASY. Στην επόμενη φάση μία εκ των κατασκευαστικών παραμέτρων, η διάμετρος του αγωγού, θεωρήθηκε σταθερή. Εκ νέου βελτιστοποίηση οδήγησε σε μια τελική πρόταση σχεδιασμού η οποία κινείται στα όρια των επιτρεπτών τιμών κριτηρίων ασφαλούς λειτουργίας της συσκευής. Ακολουθώντας, το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν την κίνηση της συγκεκριμένης συσκευής, διακρινόμενη στις δύο φάσεις της, την άνοδο και την κάθοδο, επιλύθηκε με την αριθμητική μέθοδο Runge Kutta 4<sup>ης</sup> τάξης. Αποτέλεσμα ήταν να προκύψουν δυο εκ των κινηματικών μεγεθών, η μετατόπιση και η ταχύτητα του συστήματος. Ήδη από αυτή την φάση έγινε φανερή η αρνητική επίδραση της στήλης νερού. Επιτάχυνση και ογκομετρική παροχή προήλθαν αριθμητικά από την ταχύτητα. Η μελέτη της επίδρασης των αρχικών συνθηκών και των δυνάμεων έγινε στα τελευταία εδάφια του συγκεκριμένου κεφαλαίου. Η δυναμική απεικόνιση της κίνησης, το animation, αποτέλεσε ευκαιρία εμβάθυνσης σε προγραμματιστικά εργαλεία και επέτρεψε την καλύτερη διαισθητική παρουσίαση της κίνησης του πλωτήρα. Η ανάλυση της ευαισθησίας της απόκρισης ως προς της παραμέτρους της πραγματοποιήθηκε και απέδειξε ότι για ορισμένες από αυτές, όπως η διάμετρος του εμβόλου, τα περιθώρια ελευθερίας είναι αρκετά μικρά, ενώ έδειξε ότι ο επιλεγμένος αριθμός των 1200 επαναλήψεων στην διαδικασία βελτιστοποίησης ήταν αρκετός για ικανοποιητική σύγκλιση. Γενικώς η διαδικασία της βελτιστοποίησης μέσω EASY, όποτε και αν χρησιμοποιήθηκε, έγινε για ορισμένο αριθμό

επαναλήψεων. Αν και θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτιωμένη απόδοση, αν είχε επιλεγθεί μεγαλύτερος αριθμός επαναλήψεων, η εργασία στοχεύει στο να καταδείξει τον τρόπο και να επεξεργαστεί ορισμένα ρεαλιστικά μεγέθη και σενάρια και όχι να βελτιστοποιήσει πλήρως το σύστημα. Επομένως ο καθορισμός του πλήθους επαναλήψεων στηρίχτηκε σε έναν συμβιβασμό μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικού κόστους.

Οι σημαντικότερες διαπιστώσεις έγιναν, όπως ήταν αναμενόμενο, στη φάση της ενεργειακής ανάλυσης. Πετυχαίνοντας μια μέση παροχή της τάξεως των 46,8 kg/sec και κυρίως ένα βαθμό απόδοσης της τάξεως του 44,9 %, η πρόταση αυτή απέδειξε ότι υπάρχει προοπτική ανάπτυξης και περαιτέρω μελέτης και βελτιστοποίησης, αφού υφιστάμενες τεχνολογίες φθάνουν σε απόδοση της τάξεως του 30-40%. Ωστόσο, από την μια πλευρά τα περιθώρια βελτίωσης της απόδοσης με πιο προηγμένη γεωμετρία, αλλά και η θεώρηση σταθερού και έντονου κυματισμού αποτελούν παραδοχές που σίγουρα αλλοιώνουν την εικόνα που έχει κάποιος για τον μηχανισμό. Μια σύντομη ανάλυση έγινε και σε θέματα επιλογής υδροστροβίλου της μονάδας παραγωγής ισχύος που ακολουθεί στην ενεργειακή ροή.

Τα αποτελέσματα της μελέτης των χρονοσειρών ήρθαν να καταδείξουν την απλότητα της παραδοχής σταθερού κυματισμού και την υπερεκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης στην οποία οδηγούν. Αφού επιλέχθηκε θέση εγκατάστασης στον Κόλπο Μοντερέι της πολιτείας της Καλιφόρνια των Η.Π.Α. , αναζητήθηκαν και βρέθηκαν κυματικά δεδομένα για το έτος 2015 το οποία υφιστάμενα στατιστική ανάλυση οδήγησαν στην διακριτοποίηση της χρονικής διάρκειας του έτους και τον εντοπισμό αντίστοιχων μέσω κυματικών συνθηκών και την κατασκευή των αντίστοιχων καμπυλών διάρκειας. Μέσω νέας βελτιστοποίησης βρέθηκε ο μέγιστος όγκος νερού που αντλείται ετησίως και οι διαστάσεις της συσκευής που το επιτυγχάνει, αποφέροντας ενεργειακό κέρδος 73,3 MWh ετησίως. Η δημιουργία και η μερική ενεργειακή ανάλυση κυματικού πάρκου με συστοιχία 80 όμοιων συσκευών οδήγησε σε αρκετά ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα η εξασφάλιση νερού για λειτουργία του Υ/Σ επί 2604 hr ετησίως θα αποφέρει 4,697GWh και μάλιστα με συντελεστή απορρόφησης 26,8 % , μια τιμή συγκρινόμενη με τις επιδόσεις υδροηλεκτρικών έργων βάσης. Κλείνοντας τέθηκε το θέμα της χωροθέτησης με ορισμένες λεπτομέρειες για το πώς αυτή επηρεάζει την απόδοση κάθε συσκευής.

## 9.2) Προτάσεις διερεύνησης

Πέρα από τα προαναφερθέντα αποτελέσματα, η συγκεκριμένη μελέτη καταδεικνύει με τον πιο εμφατικό τρόπο τις προοπτικές εμβάθυνσης και βελτιώσεων σε αυτού του είδους τους μηχανισμούς. Αν και εξαντλήθηκε κάθε χρονικό περιθώριο και έγινε προσπάθεια γενικής παρουσίασης της διάταξης και της απόκρισής της, εν τούτοις πολλά είναι τα σημεία τα οποία χρήζουν περισσότερης και ξεχωριστής ανάλυσης. Διαπιστώσεις που έγιναν κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας κατέστησαν σαφές σε όσους ασχολήθηκαν, και θα το πράξουν και με όσους την διαβάσουν, ότι σε λεπτομερή θέματα ανάλυσης και σχεδίασης «κρύβεται» η βελτίωση της επίδοσης.

Σε πρώτο στάδιο λοιπόν είναι εξαιρετικής σημασίας να αρθεί μια εκ των βασικότερων παραδοχών. Η παραδοχή αρμονικού κύματος υπακούοντος στην Γραμμική Θεωρία Airy θα μπορούσε να αντικατασταθεί με ρεαλιστικότερα μη γραμμικά μοντέλα κυματισμού. Στην κατεύθυνση αυτή κινούνται οι θεωρίες του Stokes καθώς και η εξίσωση Korteweg–de Vries, η επίλυση της οποίας αποτελεί το περιεχόμενο της λεγόμενης Cnoidal Theory.

Σχεδιαστικά και λειτουργικά ζητήματα έπειτα αποτελούν αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. Η επιβολή διαφορετικού νόμου ελέγχου της βαλβίδας για ομαλότερο χειρισμό και μείωσης των μεταβατικών φαινομένων αποτελεί ένα από αυτά. Ανάπτυξη μεγάλων και απότομων διακυμάνσεων στην ταχύτητα έχει σαν αποτέλεσμα εμφάνιση κραδασμών επικίνδυνων για τον μηχανισμό, και οφείλεται, όπως φάνηκε, στο χειρισμό της βαλβίδας. Από την άλλη όμως, ένα πραγματικό μοντέλο το οποίο λειτουργεί υπό πραγματικές συνθήκες θα υφίσταται σίγουρα φορτία με έντονες διακυμάνσεις. Επομένως η μελέτη και ανάπτυξη συστημάτων προστασίας έναντι κραδασμών θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο έρευνας.

Η μελέτη και ο σχεδιασμός διαφορετικής της απλής κυλινδρικής γεωμετρίας, θα οδηγήσει σίγουρα σε βελτίωση της απόδοσης. Η ανάλυση, ο σχεδιασμός σε CAD και η μελέτη προηγμένων υλικών και μεθόδων βιομηχανικής παραγωγής κινείται σε αυτό ακριβώς το μήκος κύματος.

Επίσης ήδη γίνεται προσπάθεια ελέγχου της διαφοράς φάσης και επίτευξης του συντονισμού μεταξύ κύματος και συστήματος. Μέθοδοι όπως το latching, η χρήση συσσωρευτών ελέγχου και των συστημάτων PTO (Power-Take-off) είναι μερικές μόνο, και ικανές να σταθούν ως ξεχωριστή μελέτη.

Από τις πιο ενδιαφέρουσες μελέτες, η σημασία των οποίων ανέκυψε κατά την παρούσα εργασία εντάσσεται στο θέμα του design. Σε δοκιμές που έγιναν σε πρώιμο στάδιο, και, όπως αναμένεται βάσει θεωρίας, η απόκριση του συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πλάτος του κύματος και παρουσιάζει την ανάγκη μεταβολής (adjustment) για καλύτερη προσαρμογή και απόκριση στη διέγερση. Η ικανότητα του μηχανισμού να ρυθμίζει την λειτουργία του, για παράδειγμα με ρύθμιση της αδράνειάς του ή της διαμέτρου του εμβόλου, ή με μετατόπιση του σημείου λειτουργίας του και της κίνησης του εργαζόμενου μέσου μέσω διατάξεων στον αγωγό, όπως για παράδειγμα η χρήση ακροφύσιου, ώστε να ανταποκρίνεται

κατά βέλτιστο τρόπο στις κυματικές συνθήκες, θα αποτελέσει βασικό συστατικό βελτίωσης της απόδοσης και αντικείμενο μιας ιδιαίτερα ενδιαφέρουσας μελέτης.

Ένας πιθανός συνδυασμός ηλεκτροπαραγωγής και άντλησης νερού προς αφαλάτωση σε περιοχές όπου παρουσιάζεται έλλειψη του υδάτινου πόρου, μπορεί να ανακουφίσει τον τοπικό πληθυσμό τόσο ενεργειακά όσο και σε θέματα κάλυψης αναγκών σε ύδρευση και άρδευση. Ανάλογο μοντέλο εφαρμόζεται από την εταιρεία Carnegie με το όνομα CETO στην Αυστραλία.

Η εφαρμογή όλων των παραπάνω σε μοντέλο μικροκλίμακας και η διεξαγωγή πειραμάτων αποτελεί το επιστέγασμα όλων των ξεχωριστών μελετών και τελευταίο στάδιο εργαστηριακής μελέτης και ανάπτυξης. Είθε η παρούσα εργασία να αποτελέσει ερέθισμα, εργαλείο και βοήθημα σε αυτή την προσπάθεια.

## Βιβλιογραφία

1. Berteaux H. O. (1976), Buoy Engineering, John Wiley & Sons, New York
2. BOEM, Bureau of Ocean Energy Management (2016), Ocean Wave Energy
3. Chris Blommaert (2009), Composite Floating 'Point Absorbers' for Wave Energy Converters: Survivability Design, Production Method and Large-Scale Testing, Ghent University, Belgium
4. Dr. John Huckerby (2012), Development of Marine Energy in the Global Context, Ocean Energy Systems-OES
5. EASY, The Evolutionary Algorithm System, User's Manual, NTUA.
6. EMEC Orkney, The European Marine Energy Centre LTD
7. Erik Dölerud (2012), Automated optimization of a heaving point absorber: A wave energy converter design methodology, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
8. European Commission, Climate Action, EU Action.
9. European Environment Agency (2016), Renewable Energy in Europe in 2016, EEA Report, No 4/2016.
10. Griet De Backer (2009), Hydrodynamic Design Optimization of Wave Energy Converters Consisting of Heaving Point Absorbers, Ghent University, Belgium
11. Gunnar Steinn Asgeirsson (2013), Hydrodynamic Investigation of Wave Power Buoys, Royal Institute of Technology, Stockholm.
12. Iraide López, Jon Andreu, Salvador Ceballos, Iñigo Martínez de Alegría, Iñigo Kortabarria (2013), Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment, University of the Basque Country UPV/EHU, Spain, Elsevier Article
13. Mathworks Matlab & Simulink (2015), User's Manual.
14. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Data Buoy Center.
15. Renewable Energy Policy Network (2015), Renewables 2015 Global Status Report.
16. The Coastal Data Information Program, Integrative Oceanography Division.
17. Ye Li, Yi-Hsiang Yu, A Synthesis of Numerical Methods for Modeling Wave Energy Converter-Point Absorbers, NREL, USA
18. Γιαννάκογλου Κ. Χ., Αναγνωστόπουλος Ι. Σ., Μπεργελές Γ. (2003), Αριθμητική Ανάλυση για Μηχανικούς, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
19. Μαθιουλάκης Δ. Σ., Αναγνωστόπουλος Ι. Σ., Τουζόπουλος Δ. Γ. (2006), Βιομηχανική Ρευστομηχανική, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
20. Μπεργελές Γ. (2012), Υπολογιστική Ρευστομηχανική, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
21. Παπαντώνης Δ. Ε. (2008), Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
22. Παπαντώνης Δ. Ε. (2009), Υδροδυναμικές Μηχανές, Αντλίες-Υδροστρόβιλοι-Υδροδυναμικές Μεταδόσεις, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
23. Παπαντώνης Δ. Ε. (2013), Υδροδυναμικές Εγκαταστάσεις, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα
24. Τσάγγαρης Σ. (2005), Μηχανική των Ρευστών, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.


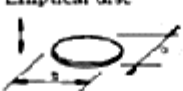
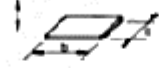

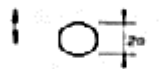
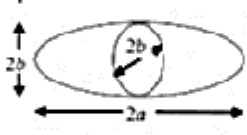
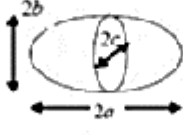
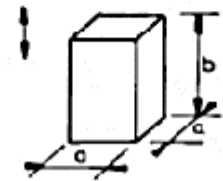



## Παράρτημα Ι

Πίνακας Ι.1) Εξισώσεις κυματικής θεωρίας

Μεγέθη	Γενική Εξίσωση	Βαθιά Νερά ( $d/\lambda > 0.5$ )	Πηχά Νερά ( $d/\lambda < 0.05$ )
Στάθμη Επιφάνειας	$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$	όπου $\kappa = 2\pi/L$ και	$\omega = 2\pi/T$
Μήκος κύματος	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd)$	$L_o = \frac{gT^2}{2\pi}$	$L = T\sqrt{gd}$
Ταχύτητα κύματος	$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kd)$	$c = \frac{gT}{2\pi}$	$c = \sqrt{gd}$
Φασική ταχύτητα κύματος	$c_g = \frac{c}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$	$c_g = \frac{1}{2} c = \frac{gT}{4\pi}$	$c_g = c = \sqrt{gd}$
Οριζόντια μετατόπιση στοιχείου-η	$-\frac{H}{2} \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t)$	$-\frac{H}{2} e^{kz} \sin(kx - \omega t)$	$-\frac{HT}{4\pi} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin(kx - \omega t)$
Κατακόρυφη μετατόπιση στοιχείου-ξ	$\frac{H}{2} \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t)$	$\frac{H}{2} e^{kz} \cos(kx - \omega t)$	$\frac{H}{2} \left( 1 + \frac{z}{d} \right) \cos(kx - \omega t)$
Οριζόντια ταχύτητα στοιχείου	$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cos(kx - \omega t)$	$u = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(kx - \omega t)$	$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos(kx - \omega t)$
Κατακόρυφη ταχύτητα στοιχείου	$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh k(z+d)}{\cosh kd} \sin(kx - \omega t)$	$w = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin(kx - \omega t)$	$w = \frac{H\pi}{T} \left( 1 + \frac{z}{d} \right) \sin(kx - \omega t)$
Οριζόντια επιτάχυνση στοιχείου	$a_x = \frac{g\pi H}{L} \left[ \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kh} \right] \sin(kx - \omega t)$	$a_x = 2H \left( \frac{\pi}{T} \right)^2 e^{kz} \sin(kx - \omega t)$	$a_x = \frac{H\pi}{T} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin(kx - \omega t)$
Κατακόρυφη επιτάχυνση στοιχείου	$a_z = -\frac{g\pi}{L} \frac{H}{L} \left[ \frac{\sinh k(z+d)}{\cosh kh} \right] \cos(kx - \omega t)$	$a_z = -2H \left( \frac{\pi}{T} \right)^2 e^{kz} \cos(kx - \omega t)$	$a_z = -2H \left( \frac{\pi}{T} \right)^2 \left( 1 + \frac{z}{d} \right) \cos(kx - \omega t)$
Κατανομή Πίεσης	$\frac{P}{\rho g} = \eta - \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} z$	$\frac{P}{\rho g} = \eta e^{kz} - z$	$\frac{P}{\rho g} = \eta - z$

Πίνακας Ι.2) Συντελεστής Πρόσθετης Μάζας για 3-d σώματα σε άπειρο ρευστό

Body shape	Direction of motion	$C_A$				$V_R$	
		$b/a$	$C_A$	$b/a$	$C_A$		
Flat plates	Circular disc 	Vertical	$2/\pi$				$\frac{4}{3} \pi a^3$
	Elliptical disc 	Vertical	$\infty$	1.000	5.0	0.952	$\frac{\pi}{6} a^3 b$
			14.3	0.991	4.0	0.933	
			12.8	0.989	3.0	0.900	
			10.0	0.984	2.0	0.826	
7.0			0.972	1.5	0.758		
6.0			0.964	1.0	0.637		
Rectangular plates 	Vertical	$b/a$	$C_A$	$b/a$	$C_A$	$\frac{\pi}{4} a^2 b$	
		1.00	0.579	3.17	0.840		
		1.25	0.642	4.00	0.872		
		1.50	0.690	5.00	0.897		
		1.59	0.704	6.25	0.917		
		2.00	0.757	8.00	0.934		
		2.50	0.801	10.00	0.947		
		3.00	0.830	$\infty$	1.000		
Triangular plates 	Vertical	$\frac{1}{\pi} (\tan \theta)^{3/2}$				$\frac{a^3}{3}$	
Bodies of revolution	Spheres 	Any direction	$1/2$				$\frac{4}{3} \pi a^3$
	Spheroids 	Lateral or axial	$a/b$	$C_A$		$\frac{4}{3} \pi b^2 a$	
				Axial	Lateral		
1.0			0.500	0.500			
1.5			0.304	0.622			
2.0			0.210	0.704			
2.5			0.156	0.762			
4.0			0.082	0.860			
5.0			0.059	0.894			
6.0	0.045	0.917					
7.0	0.036	0.933					
8.0	0.029	0.945					
Ellipsoid 	Axial	$C_A = \frac{\alpha_0}{2 - \alpha_0}$ where $\alpha_0 = \varepsilon \delta \int_0^{\pi/2} (1+u)^{-1/2} (\varepsilon^2 + u)^{-1/2} (\delta^2 + u)^{-1/2} du$ $\varepsilon = b/a \quad \delta = c/a$				$\frac{4}{3} \pi abc$	
Square prisms 	Vertical	$b/a$	$C_A$		$a^2 b$		
		1.0	0.68				
		2.0	0.36				
		3.0	0.24				
		4.0	0.19				
		5.0	0.15				
		6.0	0.13				
		7.0	0.11				
10.0	0.08						
Right circular cylinder 	Vertical	$b/2a$	$C_A$		$\pi a^2 b$		
		1.2	0.62				
		2.5	0.78				
		5.0	0.90				
		9.0	0.96				
$\infty$	1.00						



## Παράρτημα II

### II.1) Κώδικας matlab ENALIOS.m

```

% ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
% ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

% ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ, ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
% ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.

% Μπονόβας Μάρκος
% Αθήνα, 2016

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Δ Υ Ν Α Μ Ι Κ Η      Α Ν Α Λ Υ Σ Η
% ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^

% Χρησιμοποιήθηκε στη δυναμική ανάλυση μέθοδος RUNGE KUTTA 4TH ORDER
% για την επίλυση παραμετρικής Δ.Ε. δευτέρας τάξεως, αφού πρώτα αναλύθηκε
% σε σύστημα 2 Δ.Ε. πρώτης τάξεως, εκ των οποίων η δεύτερη διαφοροποιείται
% κατά περίπτωση κίνησης (ανοδική ή καθοδική).

% ΠΑΡΑΔΟΧΗ : Αλληλεπίδραση συστήματος και ρευστού έχουμε μόνο με το
% θαλασσινό νερό. Τυχόν αλληλεπίδραση με τον ατμοσφαιρικό αέρα τμήματος
% του πλωτήρα θεωρείται αμελητέα.

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all % Διαγραφή προηγούμενων δεδομένων
close all % Διαγραφή προηγούμενων γραφικών παραστάσεων

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ

g=9.81; % Επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)
p=1025; % Πυκνότητα ρευστού (kg/m^3)
Patm=101325; % Ατμοσφαιρική Πίεση (N/m^2)
lf=0.025; % Συντελεστής τριβής(Moody's Diagram)
Ls=500; % Ολικό μήκος ευθύγραμμου αγωγού(θέση μηχανισμού) (m)
Cd=0.5; % Συντελεστής αντίστασης
CA=1; % Συντελεστής πρόσθετης μάζας
ztot=3.95; % Ολικός συντελεστής εντοπισμένων απωλειών

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

mtotn=[18853.36]; % Ολική μάζα συσκευής (kg)
man=CA*mtotn; % Πρόσθετη μάζα (kg)
dpn=[3.0058]; % Διάμετρος πλωτήρα (m)
den=[0.4290]; % Διάμετρος εμβόλου (m)
dan=(0.6); % Διάμετρος αγωγού (m)
Lkn=60; % Μήκος κατακόρυφου αγωγού (m)
Lisn=(ztot*dan)/lf; % Ισοδύναμο μήκος για εντοπισμένες απώλειες
Lan=Ls+Lkn+Lisn; % Ολικό μήκος αγωγού (m)
ztn=20; % Στάθμη ταμιευτήρα (m)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΟΣ

T=7; % Περίοδος κύματος (sec)
A=1.8; % Πλάτος κύματος (m)
w=(2*pi)/T; % Γωνιακή συχνότητα κύματος (rad/sec)
k=(w^2)/g; % Κυματάριθμος (m^-1)

% y(t)=A*cos(w*t) : Μετατόπιση κύματος
% y'(t)=-A*w*sin(w*t) : Ταχύτητα κύματος
% y''(t)=-A*(w^2)*cos(w*t) : Επιτάχυνση κύματος

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΛΗΘΟΥΣ ΤΙΜΩΝ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ

r=max([size(mtotn,2) size(man,2) size(dpn,2) size(den,2) size(dan,2)
size(Lkn,2) size(Lisn,2) size(Lan,2) size(ztn,2) ]);

mtot=(mtotn.*ones(1,r))';
ma=(man.*ones(1,r))';
dp=(dpn.*ones(1,r))';
de=(den.*ones(1,r))';
da=(dan.*ones(1,r))';
Lk=(Lkn.*ones(1,r))';
Lis=(Lisn.*ones(1,r))';
La=(Lan.*ones(1,r))';
zt=(ztn.*ones(1,r))';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ

% ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΕΜΒΟΛΟΥ
% Θεωρείται κυλινδρικό έμβολο
Ae=pi*(de.^2)/4;

% ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΠΛΩΤΗΡΑ
% Θεωρείται κυλινδρικός πλωτήρας
Sw=pi*(dp.^2)/4;

% ΟΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
% Είναι το άθροισμα των μηχανικών μαζών και πρόσθετης μάζας
M=mtot+ma;

% ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΑΓΩΓΟΥ (ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ+ΕΝΤΟΠΙΣΜΕΝΕΣ)
dptotCoef=lf*8.*La*p.*(de.^4)/(16.*(da.^5));

% ΑΝΑΓΚΑΙΟ ΒΥΘΙΣΜΑ ΠΛΩΤΗΡΑ
% Προκύπτει από την συνθήκη πλεύσης
Dn=mtot./(p.*Sw);
D=(Dn' .*ones(1,r))';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΧΡΟΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

h      =0.01;           % Βήμα
tfinal =20*T;          % Τέλος χρόνου
N      =ceil(tfinal/h); % Αριθμός βημάτων

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΕΓΕΙΡΟΥΣΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ Fe

for j=1:r % εκφράζει τις τιμές των παραμέτρων
for i=1:N % εκφράζει τις χρονικές στιγμές

% ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
t(1)=0;

% UPDATE ΧΡΟΝΟΥ
t(i+1)=t(i)+h;

% ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΗΣ 2ου ΒΑΘΜΟΥ

C1=(-(w^2)*A.*ma./exp(k.*D)) +(p*g.*Sw*A)./exp(k.*D))*cos(w*t);
C2=(w*k/(2*p*(g^2)*(A^2)))*ones(size(C1,1),size(C1,2));
C3=((w*A)./exp(k.*D))*sin(w*t).*C2;

```

```

%          Θέτω fe=x1
%          x1^2*C3+x1-C1=0      Η μορφή της εξίσωσης 2ου βαθμού

Pvec1 =C3;                    %διάνυσμα του συντελεστή x^2
Pvec2=1*ones(r,size(C3,2));  %διάνυσμα του συντελεστή x
Pvec3=-C1;                    %διάνυσμα του συντελεστή x^0 (σταθερός όρος)

%   Pvec1*x1^2 + Pvec2*x1 + Pvec3 = 0      Η μορφή της εξίσωσης 2ου βαθμού

% Δημιουργώ το διάνυσμα των συντελεστών για κάθε τιμή παραμέτρου και χρόνου
% Είναι ένα μητρώο j-κελιών και στο καθένα υπάρχουν i-τριάδες συντελεστών.

[Pvec]=[(Pvec1(1:r,:))' (Pvec2(1:r,:))' (Pvec3(1:r,:))'];

end;
end;

for q=1:r      % Σημείωση :το q ταυτίζεται με το j που
               % εκφράζει τις παραμέτρους.

PVEC{q}={[(Pvec(:,q)) (Pvec(:,r+q)) (Pvec(:,2*r+q))]};

% Δημιουργώ cell array με q-κελιά σε καθένα απο τα οποία περιέχεται κελί-q
% με i(x)3 στοιχεία και αντιπροσωπεί τα διανύσματα των συντελεστών για
% κάθε χρονική στιγμή για την συγκεκριμένη τιμή της q-παραμέτρου

VECTOR{q}=PVEC{1,q}{1,1};
% Απλοποιώ την παρουσίαση του PVEC απο 1*[q*cell(i*3)] σε q*cell(i*3)

V=VECTOR{1,q,:};
% Είναι το προλεχθέν q-κελί που περιέχει όλα τα διανύσματα των συντελεστών
% για κάθε χρονική στιγμή για την συγκεκριμένη τιμή της q-παραμέτρου

% display(V) %προαιρετική παρουσίαση του V

% Έχω λοιπόν δημιουργήσει όλα τα διανύσματα-τριάδες συντελεστών για όλες
% τις q-παραμέτρους και για όλες τις i-χρονικές στιγμές

% Εσωτερική loop υπολογισμού του πλάτους FE
% Σε κάθε βήμα υπολογίζεται το πλάτος FE(έννας αριθμός) της διεγείρουσας

for n=1:i % Σημείωση: το n ταυτίζεται με το i που εκφράζει
           % τις χρονικές στιγμές.

solutcell{n}={roots(V(n,:))}; % υπολογίζω τις ρίζες κάθε σειράς n του
V
solut{n}=solutcell{1,n}{1,1}; % μητρώο n-κελιών που καθένα περιέχει
τις 2 ρίζες της εξίσωσης

```

```

    solut{1,1}=solut{1,1}.*ones(2,1); % η πρώτη λύση είναι μοναδική για
αυτό κάνω διανυσματοποίηση
    fereal{n}={solut{1,n}(2)};% ρεαλιστικές ρίζες αυτές τις δεύτερης
στήλης του solut
    fecell{n}=fereal{1,n}{1,1};% μητρώο n-κελιών που το καθένα περιέχει
την αποδεκτή λύση
    fe=[fecell{n}];% μετατροπή απο cell σε matrix. Είναι οι τιμές τις
διεγείρουσας
    FEone=max(fe(1,:)); % το πλάτος της διεγείρουσας είναι το μέγιστο της
FE

end;

% disp(FE(1,:)); % προαιρετική παρουσίαση του FE

FEchar(1,:) = [evalc('disp(FEone(1,:))')]; % μετατροπή σε char
FE(q) = [str2num(FEchar(1,:))]; % μετατροπή σε num

% Το FE διάνυσμα περιέχει τα FE(j)-πλάτη για κάθε τιμή-j της παραμέτρου

end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ b

% b = [(FE*cos(w*t))^2]*w*k/2*p*(g^2)*(A^2)
% = [cos(w*t)]^2 * [(FE^2)*w*k]/[2*p*(g^2)*(A^2)]
% = [cos(w*t)]^2 * Constb

for j=1:r % Υπολογισμός συντελεστή Constb για κάθε παράμετρο
    Constb(j)=(FE(j)^2)*w*k/(2*p*(g^2)*(A^2));
end;

% ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ FE και Constb
FE=(FE.*ones(1,r))';
Constb=(Constb.*ones(1,r))';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%ΣΗΜΕΙΩΣΗ
% Αν και το βύθισμα αλλάζει κατά την κίνηση του συστήματος, εντούτοις
% αποδεικνύεται ότι μεταβολή -90% στο βύθισμα αποφέρει -15% μείωση στο
% πλάτος της διέγερσης. Η παραδοχή σταθερού βυθίσματος κατά τον υπολογισμό
% της διέγερσης μπορεί να γίνει δεκτή, με μικρό σφάλμα.

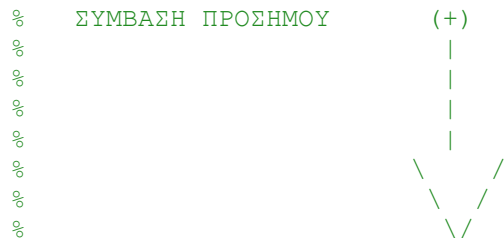
```

% ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ

% g=9.81;                   Επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)  
 % p=1025;                   Πυκνότητα ρευστού (kg/m^3)  
 % Patm=101325            Ατμοσφαιρική Πίεση (N/m^2)  
 % lf=0.025;               Συντελεστής τριβής  
 % Ls=500;                  Ολικό μήκος ευθύγραμμου αγωγού(θέση μηχανισμού) (m)  
 % Cd=0.5;                  Συντελεστής αντίστασης  
 % CA=1;                    Συντελεστής πρόσθετης μάζας  
 % ztot=3.95                Ολικός συντελεστής εντοπισμένων απωλειών  
 % T=7;                     Περίοδος κύματος (sec)  
 % A=1.8;                   Πλάτος κύματος (m)  
 % w=(2\*pi)/T;             Γωνιακή συχνότητα κύματος (rad/sec)  
 % k=(w^2)/g;              Κυματάριθμος (m^-1)

% ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

% mtot                    Ολική μάζα (πλωτήρας+έμβολο+διωστήρας) (kg)  
 % ma                     Πρόσθετη μάζα (kg)  
 % Dp                     Διάμετρος πλωτήρα (m)  
 % de                     Διάμετρος εμβόλου (m)  
 % da                     Διάμετρος αγωγού (m)  
 % Lk                     Μήκος κατακόρυφου αγωγού (m)  
 % Lis                    Ισοδύναμο μήκος για εντοπισμένες απώλειες  
 % La                     Ολικό μήκος αγωγού (m)  
 % zt                     Στάθμη ταμιευτήρα (m)  
 % D                     Βύθισμα πλωτήρα (m)  
 % FE                     Πλάτος διεγείρουσας  
 % Constb                Σταθερός συντελεστής του b:συντελεστή απόσβεσης



% ΣΗΜΕΙΩΣΗ  
 % Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν όλα τα μεγέθη πλοτάρονται με "-"  
 % ώστε να αναιρεθεί η παραπάνω σύμβαση, λόγω καλύτερης αντίληψης και  
 % κατανόησης της θετικής φοράς ως την φορά προς τα πάνω. Προσοχή όμως, σε  
 % όλους τους υπολογισμούς ισχύει η σύμβαση προσήμου, και τα μεγέθη  
 % προσημαίνονται και ονομάζονται ανάλογα. Μόνο στις γραφικές παραστάσεις  
 % αναιρείται για καλύτερη εποπτεία. Σε κάθε σημείο υπάρχουν επεξηγηματικά  
 % σχόλια του κώδικα.

%%%

```

% ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

% ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ LOOP ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ

for j=1:r
% ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ LOOP ΓΙΑ ΤΙΣ ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΣΤΙΓΜΕΣ

for i=1

% ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
t(j,1)=0;
yAin(j,1)=A/2;
yBin(j,1)=0;

% Ο πλωτήρας αφήνεται ελεύθερος από A/2 αρχικές συνθήκες κινούμενος προς
% τα πάνω με μία αρχική εξωτερική διέγερση κατά την εγκατάσταση.

% ΑΡΧΙΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ ΚΥΜΑΤΟΣ
yK1(1)=0;

% ΣΗΜΕΙΩΣΗ : Αυτή η συνθήκη σημαίνει ότι το σώμα διεγείρεται αρχικά από
% αρχική θέση yA=A/2 έχοντας βύθισμα (D+A/2) την ίδια στιγμή που το κύμα
% διέρχεται από την θέση ισορροπίας yK1=0. Πρακτικά δλδ υπολογίζουμε στο
% πρώτο βήμα , για την εκκίνηση και μόνο του κυρίως κώδικα, μια
% στοιχειώδη μεταβολή των κινηματικών μεγεθών, χωρίς ιδιαίτερη σημασία,
% αφού τελικά η μόνιμη κατάσταση είναι ανεξάρτητη των αρχικών συνθηκών.
% Αρχικοποίηση θα μπορούσε να γίνει και χωρίς RK και αρχικές συνθήκες ,
% δίνοντας μόνο κάποιες τιμές εκκίνησης του παρακάτω αλγορίθμου, μόνο και
% μόνο για να επιλέξει φορά κίνησης και αντίστοιχη Δ.Ε. την 1η φορά.
% Οι αρχικές συνθήκες επηρεάζουν μόνο την μεταβατική απόκριση του
% συστήματος .Με δοκιμές αποδεικνύεται ότι για την παραπάνω αρχική
% διέγερση έχουμε ταχύτατη σχετικά αποκατάσταση μόνιμης απόκρισης.

% ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

% RUN την R.K. για i=1, για την πρώτη δηλαδή στιγμή του χρόνου
% Έστω ότι ξεκινάει να κινείται ανοδικά (δλδ προς αρνητική μετατόπιση).
% Με βάση την σύμβαση προσήμου, η διεγείρουσα στην ανοδική κίνηση είναι
% αρνητικής φοράς όπως και η άνωση ενώ οι υπόλοιπες αντιστάσεις είναι
% θετικής φοράς .Στην άνοδο η ταχύτητα είναι αρνητική για αυτό και
% χρησιμοποιείται η abs(ταχύτητα) εφόσον έχουν ήδη προσημανθεί οι
% δυνάμεις, ώστε να μην αναιρεθεί αυτό το πρόσημο. Χρησιμοποιούμε abs
% εφόσον έχουμε προσημάνει τις δυνάμεις.

% ΓΡΑΦΗ Δ.Ε. ΩΣ handle

fA=@(t,yAin,yBin) yBin;
fB=@(t,yAin,yBin) (-
(FE./M).*abs(cos(w*t)))+((Constb./M).* (cos(w*t).^2)).*abs(yBin)
+((0.5*p*Cd.*Sw.*abs(yBin).*abs(yBin))./M)+(-p*g.*Sw.*(yAin-yK1)./M);

```

```

                                % UPDATE ΧΡΟΝΟΥ

                                t(j,i+1)=t(j,i)+h;

% UPDATING yA , yB // yC , yD ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ-i ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ-j

                                k1Aa=fA(t(j,i),yAin(j,i),yBin(j,i));
                                k1Ain=(k1Aa*ones(1,r));
                                k1Ba=fB(t(j,i),yAin(j,i),yBin(j,i));
                                k1Bin=(k1Ba*ones(1,r));

                                k2Aa=fA(t(j,i)+h/2,yAin(j,i)+h/2*k1Ain(j),yBin(j,i)+h/2*k1Bin(j));
                                k2Ain=(k2Aa*ones(1,r));
                                k2Ba=fB(t(j,i)+h/2,yAin(j,i)+h/2*k1Ain(j),yBin(j,i)+h/2*k1Bin(j));
                                k2Bin=(k2Ba*ones(1,r));

                                k3Aa=fA(t(j,i)+h/2,yAin(j,i)+h/2*k2Ain(j),yBin(j,i)+h/2*k2Bin(j));
                                k3Ain=(k3Aa*ones(1,r));
                                k3Ba=fB(t(j,i)+h/2,yAin(j,i)+h/2*k2Ain(j),yBin(j,i)+h/2*k2Bin(j));
                                k3Bin=(k3Ba*ones(1,r));

                                k4Aa=fA(t(j,i)+h,yAin(j,i)+h*k3Ain(j),yBin(j,i)+h*k3Bin(j));
                                k4Ain=(k4Aa*ones(1,r));
                                k4Ba=fB(t(j,i)+h,yAin(j,i)+h*k3Ain(j),yBin(j,i)+h*k3Bin(j));
                                k4Bin=(k4Ba*ones(1,r));

yAin(j,i+1)=yAin(j,i)+h/6*(k1Ain(j)+2*k2Ain(j)+2*k3Ain(j)+k4Ain(j));
yBin(j,i+1)=yBin(j,i)+h/6*(k1Bin(j)+2*k2Bin(j)+2*k3Bin(j)+k4Bin(j));

% Για την σύνθεση της κίνησης θα εστιάσω στην μονοτονία της μετατόπισης
% για το προσδιορισμό της κατεύθυνσης κίνησης και άρα και της εξίσωσης
% που την διέπει. Ουσιαστικά πρόκειται για την ταχύτητα, απλά δίνεται έτσι
% για αποφυγή σύγχυσης στην συνέχεια.

%          Την t(i=1) αρνητική μετατόπιση άρα : MONOT(i=1)<0
%          MONOT(j,i+1)=((yAin(j,i+1)-yAin(j,i))/h);

                                end;
                                end;

% ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ-ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΕΙΣΩΣΕΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ

                                % ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ LOOP ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ
for j=1:r

                                % ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ LOOP ΓΙΑ ΤΙΣ ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΣΤΙΓΜΕΣ
for i=1:N

```



```

% UPDATE ΧΡΟΝΟΥ
t(j,i+1)=t(j,i)+h;

% ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

% Εκκινεί εκ νέου ο αλγόριθμος αλλά με αρχικές συνθήκες αυτές που προέκυψαν
% παραπάνω και καθορίζονται ως εξής :
% 1) Την t=0 βρίσκεται σε ανοδική φάση από το A/2
% 2) Αρχική συνθήκη θέσης είναι η yAin : Θετική μετατόπιση που βαίνει
% μειούμενη.
% 3) Κινείται ανοδικά άρα η ταχύτητα αρνητική:-abs(yBin)
% 4) Ο MONOTnew ρυθμός είναι <0 .

MONOTnew(j,1)=-abs(MONOT(j,2));
yA(j,1)=abs(yAin(j,2));
yB(j,1)=-abs(yBin(j,2));

% ΕΙΣΩΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΥΜΑΤΟΣ
yK1(i+1)=-A*cos(w*t(1,i+1));

% ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ

COEFF=M+(p.*La.*Ae.*(de.^2./da.^2)); % Παρονομαστής εξίσωσης καθόδου
% Είναι συντελεστής μάζας (kg).

Zm=zt+Lk; % Μέση διαφορά στάθμης ταμιευτήρα και εμβόλου.
% Η κάθε στιγμή στάθμη εντός του κυλίνδρου της αντλίας
% είναι ποσότητα αμελητέα σε σύγκριση με την υψομετρική
% διαφορά εμβόλου-επιφάνειας ταμιευτήρα .

% ΥΠΕΝΘΥΜΙΣΗ: Σύμβαση προσήμου θετική προς τα κάτω
% Η διεγείρουσα στην ανοδική κίνηση είναι αρνητικής φοράς όπως και η άνωση
% ενώ οι υπόλοιπες αντιστάσεις είναι θετικής φοράς. Το αντίθετο ισχύει για
% την διέγερση στην καθοδική κίνηση (θετική έννοια) , στην οποία όμως
% υπεισέρχονται και οι επιπλέον αντιστάσεις λόγω στήλης νερού και τριβής,
% φυσικά με αρνητική φορά, ενώ και η άνωση πλέον λαμβάνεται ως αντίσταση,
% άρα αρνητική. Στην άνοδο η ταχύτητα είναι αρνητική για αυτό και
% χρησιμοποιείται η abs(ταχύτητα) για να μην αναστραφεί το πρόσημο εφόσον
% έχουν ήδη προσημανθεί οι δυνάμεις. Στην κάθοδο είναι θετική και δεν
% χρειάζεται abs στους όρους ταχύτητας.

% ΓΡΑΦΗ Δ.Ε. ΩΣ handle

if MONOTnew(j,i)<eps % Συνθήκη για ανοδική κίνηση

fCNEW=@(t,yA,yB) (-
(FE./M).*abs(cos(w*t)))+(Constb./M).*cos(w*t).^2).*abs(yB)
+((0.5*p*Cd.*Sw.*abs(yB).*abs(yB))./M)+(-p*g.*Sw.*(yA-yK1)./M);

```

```

else % Συνθήκη για καθοδική κίνηση : MONOTnew(j,i)>0

fcNEW=@(t,yA,yB) ((FE./COEFF).*abs(cos(w*t)))+(-
(Constb./COEFF).*cos(w*t).^2).*abs(yB) +((-
0.5*p*Cd.*Sw.*abs(yB).*abs(yB))./COEFF)+(-p*g.*Sw.*(yA-yK1)./COEFF)-
(p*g.*Zm.*Ae./COEFF)-(dptotCoef.*Ae.*(yB.^2)./COEFF);

end;

% UPDATING yA , yB // yC , yD ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ-i ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟ-j

k1Ab=fA(t(j,i),yA(j,i),yB(j,i));
k1A=(k1Ab*ones(1,r));
k1Bb=fcNEW(t(j,i),yA(j,i),yB(j,i));
k1B=(k1Bb*ones(1,r));

k2Ab=fA(t(j,i)+h/2,yA(j,i)+h/2*k1A(j),yB(j,i)+h/2*k1B(j));
k2A=(k2Ab*ones(1,r));
k2Bb=fcNEW(t(j,i)+h/2,yA(j,i)+h/2*k1A(j),yB(j,i)+h/2*k1B(j));
k2B=(k2Bb*ones(1,r));

k3Ab=fA(t(j,i)+h/2,yA(j,i)+h/2*k2A(j),yB(j,i)+h/2*k2B(j));
k3A=(k3Ab*ones(1,r));
k3Bb=fcNEW(t(j,i)+h/2,yA(j,i)+h/2*k2A(j),yB(j,i)+h/2*k2B(j));
k3B=(k3Bb*ones(1,r));

k4Ab=fA(t(j,i)+h,yA(j,i)+h*k3A(j),yB(j,i)+h*k3B(j));
k4A=(k4Ab*ones(1,r));
k4Bb=fcNEW(t(j,i)+h,yA(j,i)+h*k3A(j),yB(j,i)+h*k3B(j));
k4B=(k4Bb*ones(1,r));

yA(j,i+1)=yA(j,i)+h/6*(k1A(j)+2*k2A(j)+2*k3A(j)+k4A(j));
yB(j,i+1)=yB(j,i)+h/6*(k1B(j)+2*k2B(j)+2*k3B(j)+k4B(j));

% UPDATING MONOTnew
MONOTnew(j,i+1)=(yA(j,i+1)-yA(j,i))/h;

% ΕΞΑΓΩΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

% yA(j,i) : Μετατόπιση συστήματος
% yB(j,i) : Ταχύτητα συστήματος
% yE(j,i) : Επιτάχυνση συστήματος
% Qt(j,i) : Παροχή στον ταμιευτήρα

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΣΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

% Στιρίζεται στην εξίσωση συνέχειας (δλδ στην Α.Δ.Π.)

% Αντληση έχουμε μόνο όταν το έμβολο κατεβαίνει άρα όταν η ταχύτητα(yB)
% είναι θετική(σύμβαση προσήμου).

Qt(j,i+1)=(subplus(yB(j,i+1))*pi*(de(j)^2))/4; % Στιγμαιαία παροχή (m^3/s)

Ua(j,i+1)= 4*Qt(j,i+1)/(pi*(da(j)^2)); % Ταχύτητα στον αγωγό (m/s)

% ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ

% Με ανάντι διαφορές (i+1) τιμές ταχύτητας δίνουν (i+1) τιμές επιτάχυνσης
% Υπολογίζεται εδώ αλλά φέρει σημαντικό αριθμητικό θόρυβο ο οποίος
% αποκόπτεται με φίλτρο Savitzky-Golay.

yE(j,i+1)=(yB(j,i+1)-yB(j,i))/h;

end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

figure('name',sprintf('ΠΛΗΡΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗ'),'NumberTitle','off');

% ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(2,3,1)
plot(t,-yA(j,1:end),'k')
xlabel('time (sec)','fontsize',24);ylabel('yA (m)','fontsize',24);
title('Relocation','fontsize',28)
set(gca,'XLim',[0,140],'XTick',[0:20:140],'fontsize',24)
legend('System Relocation')

hold on

% ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(2,3,2)
plot(t,medfilt1(-yB(j,1:end),1),'k')
xlabel('time','fontsize',24);ylabel('yB (m/sec)','fontsize',24);
title('Velocity','fontsize',28);
set(gca,'XLim',[0,140],'XTick',[0:20:140],'fontsize',24)
legend('System Velocity')

hold on

% ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(2,3,3)
plot(t,medfilt1(sgolayfilt(-yE(j,1:end),1,3),1),'k')
xlabel('time (sec)','fontsize',24);ylabel('yE (m/sec^2)','fontsize',24);
title('Acceleration','fontsize',28);
set(gca,'XLim',[0,140],'XTick',[0:20:140],'fontsize',24)
legend('System Acceleration')

```

```

hold on

% ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ ΣΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(2,3,5)
plot(t,medfilt1(Qt(j,1:end),1),'k')
xlabel('time (sec)','fontsize',24);ylabel('Qt (m^3/sec)','fontsize',24);
title('Flow rate','fontsize',28);
set(gca,'XLim',[0,140],'XTick',[0:20:140],'fontsize',18)
legend('Flow Rate')

hold on

% ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ VS ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(2,3,4)
plot(t,-yA(j,1:end),'k')
xlabel('time (sec)','fontsize',24);ylabel('yA,yK (m)','fontsize',24);
title('Wave Relocation VS System Relocation','fontsize',28)
set(gca,'XLim',[0,140],'ylim',[-2.5
2.5],'XTick',[0:20:140],'fontsize',18)

hold on

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

% Προσημαίνεται με "-" λόγω της σύμβασης προσήμου.

for i=1:N
    yK(i+1)=-A*cos(w*t(1,i+1));
end;
plot(t,-yK,'b');

hold on

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΙΕΓΕΙΡΟΥΣΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

for j=1:r
    for i=1:N

% Εφόσον πάντα το κύμα κινείται ως yK=-A*cos(wt) λόγω σύμβασης προσήμου
% έτσι "κινείται και η διέγερση, εφόσον αποδεικνύεται ότι σ-->0,
% για αυτό και χρησιμοποιείται και εδώ το "-".

fe(j,i+1)=-FE(j)*cos(w*t(1,i+1));

% ΥΠΟΛΟΓΙΖΕΤΑΙ Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ b ΚΑΙ Η ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΑΣΗΣ (σ) fe-κύματος

b(j,i+1)=Constb(j)*((cos(w*t(j,i+1)))^2);
sphase(j,i)=1/tan(((b(j,i)*w)/(p*g*Sw(j)-ma(j)*(w^2)))));

% Πρέπει σ-->0(στην μόνιμη κατάσταση) όπως θεωρήθηκε στους
% υπολογισμούς και εδώ πρέπει να επαληθευτεί αυτή η υπόθεση.

```

```

end;

subplot(2,3,6)
plot(t,-fe(j,1:end),'k');
xlabel('time (sec)','fontsize',24);ylabel('fe','fontsize',24);
title('Excitation Force','fontsize',28)
set(gca,'XLim',[0,140],'XTick',[0:20:140],'fontsize',18)
legend('Excitation Force')

hold on

end;

end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΦΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

for j=1:r

    UDP(j)=max(yA(j,0.5*N:end)); % Άνω Νεκρό σημείο (δλδ με βάση την
    % σύμβαση προσήμου το βαθύτερο σημείο
    % που φτάνει το σύστημα)

    LDP(j)=min(yA(j,0.5*N:end)); % Κάτω Νεκρό σημείο (δλδ με βάση την
    % σύμβαση προσήμου το πιο επιφανειακό
    % σημείο που φτάνει το σύστημα)

    % ΣΗΜΕΙΩΣΗ : Στον παραπάνω υπολογισμό των UDP ΚΑΙ LDP επιλέγω εκκίνηση
    % από την χρονική στιγμή 0.5*N για να εξασφαλίσω ότι είμαι στην μόνιμη
    % απόκριση .

    momentfoya(j)=find(yA(j,:)==UDP(j)); % Διακριτές-ί στιγμές όπου το
    % σύστημα φτάνει στο μέγιστο

    tforya(j)=h*(momentfoya(j)); % Χρονικές στιγμές όπου το
    % σύστημα φτάνει στο μέγιστο

    momentforyk=find(yK==A); % Διακριτές-ί στιγμές όπου το
    % κύμα φτάνει στο μέγιστο

    tforyk=h*(momentforyk); % Χρονικές στιγμές όπου το
    % κύμα φτάνει στο μέγιστο

    Dtime(j)=min(abs(tforyk-tforya(j))); % Ελάχιστη χρονική διαφορά των
    % παραπάνω στιγμών

    Dphase(j)=w*Dtime(j); % Διαφορά φάσης

end;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% E N E Ρ Γ Ε Ι Α Κ Η   Α Ν Α Λ Υ Σ Η
% ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

lw=2*pi/k;           % Μήκος κύματος (m)

% Το μήκος κύματος κυμαίνεται σε τιμές>>dp  οπότε ολόκληρη η επιφάνεια
% του πλωτήρα αλληλεπιδρά με ένα κύμα κάθε φορά.

Hw=A*2;              % Ύψος κύματος (m)
Ewred=p*g*(Hw^2)/8; % Ενέργεια κύματος (J/m^2) ανηγμένη σε επιφάνεια
Cg=g*T/(4*pi);      % Φασική ταχύτητα ομάδας για αρμονικό κύμα (m/sec)
Ten=0.5*T;           % Περίοδος ενέργειας (sec)
J=(1e-3)*p*(g^2)*Ten*(Hw^2)/(32*pi); % Ροή ενέργειας (kw/m κυματομετώπου)
PWAVE=J.*dp;         % Ισχύς του κύματος σε (KW)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΛΩΤΗΡΑ

for j=1:r

    DH(j)=UDP(j)+abs(LDP(j)); % Υψομετρική διαφορά ΑΝΣ-ΚΝΣ

    Ep(j)=mtot(j)*g*DH(j); % Ενέργεια πλωτήρα σε 1 περίοδο-T
    % Πρόκειται για την δυναμική του ενέργεια

    Pp(j)=(1e-3)*Ep(j)/T; % Ισχύς του πλωτήρα σε (KW)

    CWR(j)=100*Pp(j)/PWAVE(j); % Capture Width Ratio (%)
    % Βαθμός δέσμευσης ενέργειας κύματος απο
    % τον πλωτήρα επί %.

    % Ουσιαστικά το CWR είναι Pp(KW)/J(KW/m) και δίνει το κυματομέτωπο(m)
    % που περιέχει την ίδια ενέργεια με αυτή που απορροφά ο WEC. Εδώ γίνεται
    % ο υπολογισμός όπως παραπάνω και είναι ουσιαστικά το efficiency του
    WEC.
    % Σε πραγματικές εφαρμογές κυμαίνεται στο 30_40 %, με βέλτιστο το 50%.

end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΙΣΧΥΣ ΣΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

% Με την παραδοχή ότι το στόμιο του αγωγού προσαγωγής τον Υ/Σ βρίσκεται
% στην ίδια στάθμη με αυτό της εισαγωγής τότε η ενέργεια που αποθηκεύεται
% στον πλωτήρα είναι ουσιαστικά η υψομετρική διαφορά Lk αντλίας και θέσης
% ταμιευτήρα.

for j=1:r
    for i=1:N
        Nprow(j,i+1)=p*g*Lk(j)*Qt(j,i+1); % Στιγμιαία Ισχύς (W)
    end;

% Για τον υπολογισμό των ολοκληρωμάτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του
% τραπεζίου μιας και δεν υπάρχει αναλυτική συνάρτηση διαθέσιμη
% Υπολογίζω απο (0.5N:end) για να αποκόψω την μεταβατική απόκριση.

% Ολικός όγκος νερού που αποθηκεύεται (m^3) σε χρόνο 0.5*tfinal=5T
Vwttotal(j) = trapz(t(1,0.5*N:end),Qt(j,0.5*N:end));

Qtm(j)=Vwttotal(j)/(0.5*tfinal); % Μέση παροχή (m^3/sec)
Qtmh(j)=Qtm(j)*3600; % Μέση παροχή (m^3/hr)

% Σε 1 περίοδο λειτουργίας του μηχανισμού Qtm(m^3/s)*T(s) ανεβαίνουν στον
% ταμιευτήρα σε υψομετρική διαφορά Lk.

Vstore(j)=Qtm(j)*T; % Όγκος νερού που αποθηκεύεται στον ταμιευτήρα σε 1T
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ-ΟΡΘΟΤΗΤΑΣ
% ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^

% ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΒΥΘΙΣΜΑΤΟΣ

% Σε κάθε στιγμή λειτουργίας ο πλωτήρας δεν θα πρέπει να εξέρχεται του
% νερού διότι αλλάζουν οι νόμοι που διέπουν την κίνησή του. Θεσπίζεται
% λοιπόν το ακόλουθο κατάλληλο κριτήριο βυθίσματος.

for j=1:r
    for i=1:N

% Ανοδική κίνηση (yA<0) : Πρέπει ο πλωτήρας να μην ανέλθει D-περισσότερο
% από το κύμα, κάθε χρονική στιγμή.
        if yA(j,i)<=0 & yA(j,i)<yK(j,i)
            DIFFERENCE(j,i)=abs(yA(j,i)-yK(j,i));

% Καθοδική κίνηση (yA>0) : Πρέπει το κύμα να μην κατέλθει D-περισσότερο
% από τον πλωτήρα , κάθε χρονική στιγμή.

        else if yA(j,i)>0 & yA(j,i)<yK(j,i)

```

```

DIFFERENCE(j,i)=abs(yA(j,i)-yK(j,i));

% Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση ο πλωτήρας παραμένει σε υδάτινο περιβάλλον,
% είτε επιπλέοντας, είτε βυθιζόμενος, αλλά δεν υπάρχει ο κίνδυνος να
% ανέλθει για αυτό και θέτω την διαφορά-κριτήριο μηδενική, ώστε να μην
% ληφθεί καθόλου υπόψη κατά την εφαρμογή του κριτηρίου .
    else
        DIFFERENCE(j,i)=0;

    end;
end;

% Καθορισμός κρίσιμης απόστασης πλωτήρα-κύματος
criteriaforD(j)=max(DIFFERENCE(j,(0.5*N:N)));
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for j=1:r

% Κριτήριο μη ανόδου του πλωτήρα
    if D(j)<criteriaforD(j)
        clear all
        clear figure
        casestudy=['ΑΔΥΝΑΤΟ DESIGN , Ο ΠΛΩΤΗΡΑΣ ΑΝΕΡΧΕΤΑΙ'];
        disp(casestudy)
        return

% Κριτήριο-δικλείδα ενεργειακού ισολογισμού
    else if CWR(j)>100
        clear all
        clear figure
        casestudy=['ΑΔΥΝΑΤΟ DESIGN , CWR >>'];
        disp(casestudy)
        return

% Κριτήριο μέγιστης ταχύτητας στον αγωγό
    else if max(Ua(j,0.5*N:end))>5
        clear all
        clear figure
        casestudy=['ΑΔΥΝΑΤΟ DESIGN , Ua > 5'];
        disp(casestudy)
        return

% Κριτήριο ασφαλείας έναντι κραδασμών (ΠΡΟΣΟΧΗ στον αριθμητικό θόρυβο)
    else if max(yE(j,0.5*N:end))>18
        clear all
        clear figure
        casestudy=['ΑΔΥΝΑΤΟ DESIGN , ΕΝΤΟΝΟΙ ΚΑΡΑΔΑΣΜΟΙ , yE>>'];
        disp(casestudy)
        return

```



```

% Κριτήριο μέγιστου βυθίσματος (υποκειμενικό)
else if D(j)>5
    clear all
    clear figure
    casestudy=['ΑΔΥΝΑΤΟ DESIGN , ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΟ ΒΥΘΙΣΜΑ'];
    disp(casestudy)
    return

% Κριτήριο μέγιστης διαμέτρου (υποκειμενικό)
else if dp(j)>4
    clear all
    clear figure
    casestudy=['ΑΔΥΝΑΤΟ DESIGN , ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ'];
    disp(casestudy)
    return

else casestudy=['ΕΦΙΚΤΟ DESIGN ΓΙΑ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ j=',num2str(j)];
    disp(casestudy)
end;
end;
end;
end;
end;

end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
% ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^

% Χρησιμοποιώ τιμές των μεγεθών και χρονικές στιγμές μετά από χρόνο
% 0.5*N ώστε να έχει αποκατασταθεί η μόνιμη κατάσταση. Υπενθυμίζεται η
% αντιστροφή της σύμβασης προσήμου για καλύτερη εποπτεία.

figure('name',sprintf('ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΟΝΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ'),'NumberTitle','off');

for j=1:r

    % ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ-ΧΡΟΝΟΣ
    subplot(2,3,1)
    plot(t(j,0.5*N:end),-yA(j,0.5*N:end),'k')
    xlabel('time (sec)','fontsize',30);ylabel('yA (m)','fontsize',30);
    title('Relocation','fontsize',34)
    set(gca,'XLim',[70,140],'YLim',[-1
2.5],'XTick',[70:10:140],'fontsize',34)
    legend('System Relociation')

    hold on

```

```

% ΣΗΜΕΙΩΣΗ
% Η ταχύτητα yB και η επιτάχυνση yE, η οποία υπολογίζεται με
% πεπερασμένες διαφορές από την ταχύτητα, φέρουν αριθμητικό θόρυβο
% ο οποίος αποκόπτεται με χρήση φίλτρου σε αυτό το σημείο, χωρίς σοβαρό
% σφάλμα. Εδώ λοιπόν και όπου αλλού, και τονίζεται, αν χρειάζεται,
% ανάλογα με την μορφή των αποτελεσμάτων, αν ο θόρυβος είναι έντονος
% αποκόπτεται με κατάλληλης τάξης φίλτρο 1-D median(spikes cut off)
% και φίλτρο Savitzky-Golay(smoothing), με προσοχή στην τάξη ώστε να μην
% αλλοιώνεται το βασικό σήμα. Η επιλογή τάξης φίλτρου είναι καθαρά θέμα
% του μελετητή, της ακρίβειας της μεθόδου RK και της επιθυμητής τελικής
% ακρίβειας και ομαλότητας των γραφικών παραστάσεων. Στην παρούσα μελέτη
% και για τις τελικές τιμές των παραμέτρων δεν χρειάστηκαν ουσιαστικά
% φίλτρα μιας και η μέθοδος RK έδωσε καλή ακρίβεια και μηδενικό
% αριθμητικό θόρυβο. Ωστόσο στον κώδικα δίνονται για πληρότητα και τα
% φίλτρα, επιλέγοντας εδώ πολύ χαμηλές τάξεις, αφού δεν χρειάστηκαν όπως
% αναφέρθηκε.

% ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(2,3,2)
plot(t(j,0.5*N:end),medfilt1(-yB(j,0.5*N:end),1),'k')
xlabel('time (sec)','fontsize',30);ylabel('yB (m/sec)','fontsize',30);
title('Velocity','fontsize',34);
grid on
set(gca,'XLim',[70,140],'XTick',[70:10:140],'fontsize',34)
legend('System Velocity')

hold on

% ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(2,3,3)
plot(t(j,0.5*N:end),medfilt1(sgolayfilt(-yE(j,0.5*N:end),1,3),1),'k')
xlabel('time (sec)','fontsize',30);ylabel('yE (m/sec^2)','fontsize',30);
title('Acceleration','fontsize',34);
set(gca,'XLim',[70,140],'XTick',[70:10:140],'fontsize',34)
legend('System Acceleration')

hold on

% ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ ΣΤΟΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(2,3,5)
plot(t(j,0.5*N:end),medfilt1(Qt(j,0.5*N:end),1),'k')
xlabel('time (sec)','fontsize',30);ylabel('Qt (m^3/sec)','fontsize',30);
title('Flow rate','fontsize',34);
set(gca,'XLim',[70,140],'XTick',[70:10:140],'fontsize',34)
legend('Flow Rate')

hold on

% ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ VS ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(2,3,4)
plot(t(j,0.5*N:end),-yA(j,0.5*N:end),'k')
hold on
hold off
hold on
set(gca,'XLim',[70,140],'YLim',[-2.5
2.5],'XTick',[70:10:140],'fontsize',24)
xlabel('time (sec)','fontsize',24);ylabel('yA,yK (m)','fontsize',24);
title('Wave Relocation VS System Relocation','fontsize',28)

```

```

legendInfo{j}=['System Relocation for case j=',num2str(j)];

hold on
end;

plot(t(1,0.5*N:end),-yK(0.5*N:end),'b')
legendInfo{r+1}=['Wave Relocation'];
legend(legendInfo)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΓΩΓΟΥ
% ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^

% Το υλικό που επιλέγεται είναι το Epoxy GRP (Glass Rienforced Plastic).
% Θεωρείται σταθερή διάμετρος αγωγού σε όλο το μήκος του.

pGRP=1850; % Πυκνότητα υλικού Epoxy GRP (kg/m^3)

% LOOP ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ da(j)

for j=1:r
% da          % Εσωτερική διάμετρος αγωγού (m)
% La         % Ολικό μήκος αγωγού (m)
e=0.023/2;   % Πάχος αγωγού (m) (εκτίμηση από διεθνή τυποποίηση GRP pipes)

% Εξωτερική διάμετρος αγωγού (m)
Da(j)=da(j)+2*e;

% Όγκος υλικού αγωγού (m^3)
Va(j)=(pi*(Da(j)^2)/4)-(pi*(da(j)^2)/4)*La(j);

% Μάζα υλικού αγωγού (tn)
mpipe(j)=(1e-3)*Va(j)*pGRP;

% Με βάση τις διεθνείς τιμές του Carbon Steel $/tn και την διεθνή
% βιβλιογραφία προκύπτει ότι το κόστος υλικού είναι ένα ποσοστό του ολικού
% κόστους (υλικό+εγκατάσταση) της σωλήνωσης.

% Κόστος υλικού Carbon Steel (υλικό αναφοράς) ($/tn)
CrbnStPrice=500;
% Ποσοστό κόστους υλικού προς το συνολικό κόστος για Carbon Steel(%)
InstCostFactorCrbnSt=14;
% Ολικό κόστος σωλήνωσης Carbon Steel ($/tn)
CrbnStpipe= CrbnStPrice*100/InstCostFactorCrbnSt;

% Έχοντας ως υλικό αναφοράς το Carbon Steel οι τιμές των υπόλοιπων υλικών
% υπολογίζονται ως το γινόμενο του ολικού κόστους σωλήνωσης Carbon Steel
% επί ενός συντελεστή αναγωγής για το εκάστοτε υλικό. Για την εφαρμογή αυτή
% επιλέγεται το συνθετικό Epoxy GRP λόγω της καλής αντίστασης σε διάβρωση ,
% το χαμηλό κόστος και την σχετική ευκαμψία που είναι απαραίτητη στο
% περιβάλλον στο οποίο θα εγκατασταθεί και θα λειτουργεί. Θα
% χρησιμοποιηθούν εύκαμπτες συνδέσεις (fittings) και κατάλληλα έργα
% πολιτικού μηχανικού για την εξασφάλιση ευστάθειας της σωληνογραμμής.

```

```

% Συντελεστής αναγωγής υλικού Epoxy GRP
MaterialFac=1.69;

% Ολικό κόστος σωλήνωσης ανά μάζα GRP ($/tn)
GRPpipe=MaterialFac*CrbnStpipe;

% Ολικό κόστος σωλήνωσης GRP ($)
GRPCost(j)=GRPpipe*mpipe(j);

end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

                                % ΣΧΕΔΙΟ ΠΛΩΤΗΡΑ

for j=1:r

Hp(j)=D(j)+1.5;                % Ορατό τμήμα πλωτήρα(έξοδος από SWL) (m)
thbuoy=0.1;                   % Πάχος τοιχώματος πλωτήρα (m)
dpinner(j)=dp(j)-2*thbuoy;    % Εσωτερική διάμετρος πλωτήρα (m)
pmatbuoy=1850;                % Πυκνότητα υλικού πλωτήρα (GRP) (kg/m^3)

% Θεωρούμε πλήρως κυλινδρικό πλωτήρα και ομοιόμορφη κατανομή πάχους

                                % Όγκος υλικού πλωτήρα (m^3)
Vmatbuoy(j)=(pi*(dp(j)^2)*Hp(j)/4)-(pi*(dpinner(j)^2)*(Hp(j)-2*thbuoy)/4);

                                % Μάζα υλικού πλωτήρα (kg)
mbuoymat(j)=pmatbuoy*Vmatbuoy(j);

                                % Μάζα υπολοίπων μηχανικών μερών (kg)
                                % 20% της ολικής μάζας
mmech(j)=0.2*mtot(j);

                                % Μάζα νερού πλήρωσης του πλωτήρα (kg)
mwaterbuoy(j)=mtot(j)-mbuoymat(j)-mmech(j);

                                % Ελεύθερος όγκος πλωτήρα (m^3)
Vbuoyfree(j)=pi*(dpinner(j)^2)*(Hp(j)-2*thbuoy)/4;

                                % Όγκος νερού πλήρωσης (m^3)
Vbuoywater(j)=mwaterbuoy(j)/p;

                                % Στάθμη νερού πλωτήρα (Buoy Water Level) (m)
BWL(j)=4*Vbuoywater(j)/(pi*(dpinner(j)^2));

end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

depthmech=4; % Απόσταση θέσης κυλίνδρου από επιφάνεια (m)

% Υποτίθεται ότι ο ΥΣ είναι στην στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας

Hturbine=Lk-depthmech; % Διαθέσιμη υδραυλική πτώση (m)
% Είναι το οφέλιμο ύψος άντλησης νερού.

Qturbine=4; % Επιθυμητή παροχή ΥΣ (m3/sec)

% Επιλέγεται βάση της υδραυλικής πτώσης και της παροχής ο FRANCIS E770
hturbine=0.92; % Ολικός βαθμός απόδοσης ΥΣ
hgenerator=0.98; % Βαθμός απόδοσης γεννήτριας
ns=3470*(Hturbine^(-0.625)); % Ειδικός αριθμός στροφών (rpm)

Nturbine=p*g*Hturbine*Qturbine*hturbine*(1e-6); % Ισχύς ΥΣ (MW)
Ngenerator= Nturbine*hgenerator; % Ισχύς γεννήτριας (MW)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ
% ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

% ΥΠΟΘΕΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ

% Ακολουθεί ένα υποθετικό σενάριο λειτουργίας της συσκευής και γίνεται μια
% σύντομη μελέτη κυματικού πάρκου.

% Κάθε μηχανισμός αντλεί Qtm m3/sec . Αυτή είναι η μέση παροχή και
% προφανώς η πραγματική λειτουργία έχει διακυμάνσεις όπως φαίνεται και από
% την γ.π της παροχής με τον χρόνο. Ωστόσο ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις,
% το αποτέλεσμα της πραγματικής λειτουργίας του μηχανισμού με στιγμές
% μέγιστης και μηδενικής παροχής, ισούται με συνεχή λειτουργία άντλησης
% με ρυθμό Qtm m3/sec .
% Επίσης οι μηχανισμοί θα βρίσκονται σε διαφορά φάσης μεταξύ τους, με
% αποτέλεσμα η στιγμιαία ολική παροχή να είναι υπέρθεση των επιμέρους
% στιγμιαίων παροχών, ωστόσο και εδώ τονίζεται ότι το συνολικό αποτέλεσμα
% ισούται με συνεχή λειτουργία καθενός υπό Qtm παροχή.
% Επομένως για συνεχή λειτουργία του ΥΣ σε μέγιστο φορτίο (100%) , και
% παροχή 4 m3/sec υπολογίζεται ο απαιτούμενος αριθμός μηχανισμών :

for j=1:r
neededWECS(j)=ceil(Qturbine/Qtm(j)); % Πλήθος μηχανισμών συν. λειτουργίας
% Τονίζεται ότι υπολογίστηκε για συνεχή λειτουργία του ΥΣ για αυτό και
% είναι σχετικά μεγάλο.
% Με αυτό το πλήθος όσο υπάρχει κύμα ο ΥΣ λειτουργεί στο 100% συνεχώς.

% Αν υποθεθεί το ρεαλιστικότερο σενάριο της εγκατάστασης 10 μηχανισμών
% που λειτουργούν κάποιες ώρες τις μέρας που οι κυματικές συνθήκες το
% επιτρέπουν τότε γίνεται ο ακόλουθος υπολογισμός:

% Εγκατεστημένοι μηχανισμοί
instWECS=10;

```

```

% Ωρες λειτουργίας ημερησίως σε παροχή 100% της Qtm (A>Aav m)
OperhoursWEC1=8;
% Ωρες λειτουργίας ημερησίως σε παροχή 70% της Qtm (A<Aav m)
OperhoursWEC2=5;
% Ωρες λειτουργίας ημερησίως σε παροχή 40% της Qtm (A<<Aav m)
OperhoursWEC3=3;
% Ωρες λειτουργίας ημερησίως σε παροχή 140% της Qtm (A>Aav m)
OperhoursWEC4=5;
% Διαθεσιμότητα (80-90% βάση θεωρίας)
Totalhours=OperhoursWEC1+OperhoursWEC2+OperhoursWEC3+OperhoursWEC4;
Availability=100*Totalhours/24;

% Ολικός όγκος νερού που αποταμιεύεται ημερησίως (m^3)
Vwtotalsystem1(j)=Qtm(j)*(OperhoursWEC1*3600)*instWECS;
Vwtotalsystem2(j)=0.7*Qtm(j)*(OperhoursWEC2*3600)*instWECS;
Vwtotalsystem3(j)=0.4*Qtm(j)*(OperhoursWEC3*3600)*instWECS;
Vwtotalsystem4(j)=1.4*Qtm(j)*(OperhoursWEC4*3600)*instWECS;
Vwtotalsystem(j)=Vwtotalsystem1(j)+Vwtotalsystem2(j)+Vwtotalsystem3(j)+Vwtotalsystem4(j);

%Ογκος νερού διαθέσιμος ημερησίως στον ΥΣ (m^3)
Vwforturbine(j)=Vwtotalsystem(j);
%Ωρες λειτουργίας ΥΣ ημερησίως στο πλήρες φορτίο
OperhoursHT(j)=(Vwforturbine(j)/Qturbine)/3600;

% Ηλεκτρική Ενέργεια ημερησίως (MWh)
EnergyElecDay(j)=OperhoursHT(j)*Ngenerator;

% Ηλεκτρική Ενέργεια ετησίως (MWh)
EnergyElecYear(j)=EnergyElecDay(j)*365;

% Τιμή KWh (Euros)
% Προσδιορίζεται αναλογικά για τα διεθνή δεδομένα με κριτήριο τις τιμές
% των άλλων ΑΠΕ, το υψηλό κόστος παραγωγής/MWh στην παρούσα φάση και την
% προωθητική οικονομική πολιτική για ανάπτυξη του τομέα κυματικής
ενέργειας.
% Συγκρινόμενο με τα 1.0 εκατομ. Euros /MW των αιολικών είναι αρκετά
% ικανοποιητικό αν ληφθεί υπόψη και το πολύ υψηλότερο ποσοστό
% διαθεσιμότητας της κυματικής ενέργειας σε σχέση με την αιολική
%(80-90% vs 20-30%). Βασικός στόχος είναι η μείωση του κόστους παραγωγής
και
% εγκατάστασης των μηχανισμών με την βιομηχανοποίηση της μαζικής παραγωγής.
EnergyPrice=0.4; %Euros/KWh

% Κέρδος ετησίως (Euros)
YearProfit(j)=EnergyPrice*EnergyElecYear(j)*1000;

% Κόστος WEC (Επένδυσης+Λειτουργικό ενός έτους)
% Υπολογίζεται σε 8.78m$/MW ως επένδυση και σε 150000$/MW/year το κόστος
% συντήρησης.
WECcost(j)=8780*Pp+150*Pp;
InvestCostWEC(j)=8780*Pp; % $/kW
OperCostWEC(j)=150*Pp; % $/kW/year

% Ολικό Κόστος επένδυσης
TotalCost=InvestCostWEC(j)+GRPcost(j);

```

```
% ΣΗΜΕΙΩΣΗ
% Το κόστος /MW βρέθηκε από την διεθνή βιβλιογραφία για μέσες τεχνολογίες,
% όχι δηλαδή κάτι πολύ προηγμένο και επομένως ακριβότερο. Επίσης σε θέματα
% βελτιστοποίησης, αυτό τέθηκε και ως αντικειμενική συνάρτηση-στόχος. Δεν
% λήφθηκε υπόψη το κόστος κατασκευής νέου σταθμού αφού αυτό απαιτεί
% ξεχωριστή μελέτη ενώ επίσης θα μπορούσε να θεωρηθεί σταθερός όρος
% ανεξάρτητα από τον την συσκευή WEC που θα επιλεγεί, ο οποίος όρος
% καθορίζεται από τις ενεργειακές ανάγκες.
```

```
end;
```

```
% ΣΗΜΕΙΩΣΗ
% Η βελτιστοποίηση της χωροθέτησης τους είναι αντικείμενο που ξεφεύγει
% από την παρούσα μελέτη, αναφέρεται όμως ότι οδηγεί σε κέρδος ως προς
% την ενέργεια που απορροφά ο καθένας ξεχωριστά και όλοι μαζί αθροιστικά
% λόγω φαινομένων που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση πλευστών σωμάτων
% σε κοντινή απόσταση.
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% ΣΗΜΕΙΩΣΗ : Το τμήμα κώδικα που ακολουθεί είναι μη παραμετρικό και
% συνίσταται να εκτελείται μόνον και εφόσον έχει ολοκληρωθεί η
% διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων γιατί σε αντίθετη
% περίπτωση, για παραμετρική δομή του, θα μειωνόταν υπερβολικά
% η ταχύτητα εκτέλεσης του προγράμματος.
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% A N I M A T I O N
```

```
figure('name',sprintf('ANIMATION ΚΙΝΗΣΗΣ'),'NumberTitle','off');
```

```
% Κλίμακα
```

```
timespec=(7001-6001)/h;
xupperlimit=(timespec/T)*lw;
% Οι timespec μονάδες χρόνου αντιπροσωπεύουν timespec/T περιόδους, άρα και
% timespec/T μήκη κύματος, δηλαδή (timespec/T)*lw μέτρα. Η μονάδα χρόνου
% είναι xupperlimit/timespec μονάδες μήκους. Βρίσκω πόσες μονάδες χρόνου
% είναι οι dp μονάδες μήκους. Από εκεί βρίσκω με ποιόν συντελεστή πρέπει
% να διαιρέσω την x διάσταση του πλωτήρα για να ικανοποιείται η κλίμακα των
% αξόνων.
```

```
scalefactor=xupperlimit/timespec;
```

```
% Δημιουργία οριζόντιων αξόνων-κλιμάκων
```

```
b=axes('Position',[.1 .1 .8 1e-12]);
set(b,'Units','normalized');
set(b,'Color','none');
```

```
a=axes('Position',[.1 .3 .8 .7]);
set(a,'Units','normalized');
```

```
set(a,'xlim',[50 80],'ylim',[-5 5],'YTick',[-5:1:5],'fontsize',30);
set(b,'xlim',[0 xupperlimit/10000],'ylim',[-5 5],'fontsize',30);
xlabel(a,'time (sec)','fontsize',34)
xlabel(b,'(m)','fontsize',34)
ylabel(a,'(m)','fontsize',34);
```

```

hold off

% Απεικόνιση πλωτήρα
x = [-dp dp dp -dp -dp]/(2*scalefactor) ; % Πλάτος-Διάμετρος πλωτήρα (m)
y = [-(Hp-D) -(Hp-D) D D D] ; % Ύψος πλωτήρα (m)
yp=yA;

for i=6001:7001

% Μετατόπιση κύματος

% ΒΑΣΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ

plot(t(6001:7001),-yK(6001:7001),'b','LineWidth',1);
hold on

% ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕ ΙΣΟΥΨΕΙΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

% ΔΕΝ ΣΥΝΙΣΤΑΤΑΙ : Πολύ αργή αναπαράσταση

% for nn=1:20
% plot(t(6001:7001),-yK(6001:7001)-nn*0.5,'c','LineWidth',1);
% hold on
% end;

% ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

% ΔΕΝ ΣΥΝΙΣΤΑΤΑΙ : Πολύ αργή αναπαράσταση

curve1 = -yK(6001:7001);
curve2 = -yK(6001:7001)-10;
plot(t(6001:7001), curve1, 'c', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(t(6001:7001), curve2, 'c', 'LineWidth', 2);
t2 = [t(6001:7001), fliplr(t(6001:7001))];
inBetween = [curve1, fliplr(curve2)];
fill(t2, inBetween, 'c');

% Εξίσωση κίνησης πλωτήρα
xi=x+t(i);
yi=y+yp(i);
title('Movement Animation','fontsize',30)
xlabel('time (sec)','fontsize',30);ylabel('yA,yK (m)','fontsize',34);

% Μετατόπιση πλωτήρα
plot(t(6001:7001), -yp(6001:7001), 'k', 'LineWidth', 2);
axis([60 70 -5 5])

hold on
hold off

% Τροχιά πλωτήρα
patch(xi,-yi,'r','edgecolor','k')

% Ταχύτητα αναπαραγωγής
pause(0.001);

end;

```



```

% ANAGNΩΣΗ ANIMATION

% Κατακόρυφος άξονας
% Είναι βαθμονομημένος σε (m), οπότε φαίνεται η κατακόρυφη μετατόπιση αλλά
% και το ύψος, δηλαδή η y-διάσταση (Hr+D) του πλωτήρα, σε (m)

% Πάνω οριζόντιος άξονας
% Είναι βαθμονομημένος σε sec. Από εδώ διαβάζεται η περίοδος του κύματος
% και φαίνονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις κάθε χρονική στιγμή.

% Κάτω οριζόντιος άξονας
% Είναι βαθμονομημένος σε (m). Από εδώ διαβάζεται το μήκος κύματος και η
% αντίστοιχη x-διάσταση(dp) του πλωτήρα.

% Προφανώς λόγο κλίμακας των αξόνων η εικονική αναλογία των δύο διαστάσεων
% του πλωτήρα, οι οποίες από τους άξονες διαβάζονται σωστά, δεν είναι
% οπτικά σωστή.

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Γ Ρ Α Φ Ι Κ Ε Σ Π Α Ρ Α Σ Τ Α Σ Ε Ι Σ
% ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ
% ΔΥΝΑΜΕΩΝ
% ΒΥΘΙΣΜΑΤΟΣ

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ

figure('name',sprintf('ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΜΟΝΙΜΗΣ
ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ'),'NumberTitle','off');

% ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(3,1,1)
set(gca,'xlim',[85 105],'XTick',[70:1:140],'fontsize',18);
hold on
plot(t(j,8500:10500),medfilt1(-yB(j,8500:10500),1),'k')
xlabel('time (sec)','fontsize',24);ylabel('yB (m/sec)','fontsize',24);
title('Velocity','fontsize',28);
legend('System Velocity')

hold on

% ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(3,1,2)
set(gca,'xlim',[85 105],'XTick',[70:1:140],'fontsize',18);
hold on
plot(t(j,8500:10500),medfilt1(sgolayfilt(-yE(j,8500:10500),1,3),1),'k')
xlabel('time (sec)','fontsize',24);ylabel('yE (m/sec^2)','fontsize',24);
title('Acceleration','fontsize',28);
legend('System Acceleration')

hold on

```

```

% ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ VS ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(3,1,3)
set(gca, 'xlim', [85 105], 'XTick', [70:1:140], 'fontsize', 18);
hold on
plot(t(j, 8500:10500), -yA(j, 8500:10500), 'k')
hold on
hold off
hold on

xlabel('time (sec)', 'fontsize', 24); ylabel('yA, yK (m)', 'fontsize', 24);
title('Wave Relocation VS System Relocation', 'fontsize', 28)

legendInfo{j}=['System Relocation', num2str(j)];

hold on

set(gca, 'xlim', [85 105], 'XTick', [70:1:140], 'fontsize', 18);
hold on
plot(t(1, 8500:10500), -yK(8500:10500), 'b')
legendInfo{r+1}=['Wave Relocation'];
legend(legendInfo)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΔΥΝΑΜΕΙΣ

EXCITATION=FE*(cos(w*t)); % Διέγερση
DRAG=(0.5*p*Cd.*Sw.*(yB).*abs(yB)); % Οπισθέλκουσα
RADIATION=((Constb).*(cos(w*t).^2)).*(yB); % Ακτινοβολίας
WATERCOLUMN=p*g*Zm*Ae*(subplus(yB)./ (yB)); % Αντίσταση στήλης νερού
LOSS=(dptotCoef.*Ae.*(yB).*abs(yB)); % Αντίσταση απωλειών αγωγού
BUOYANCY=(p*g.*Sw.*(A*cos(w*t)+yA)); % Άνωση

% ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗ ΔΥΝΑΜΗ ΚΑΙ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ

figure('name', sprintf('ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗ ΔΥΝΑΜΗ-
ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ'), 'NumberTitle', 'off');

for i=1:N
    if yB(j, i) >= 0
        SFF(j, i+1) = yE(j, i+1) * COEFF;
    else
        SFF(j, i+1) = yE(j, i+1) * M;
    end
end;

% ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΗ-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(2,1,1)
set(gca, 'xlim', [25 145], 'XTick', [10:10:150], 'fontsize', 18);
hold on
plot(t(j, :), medfilt1(-SFF(j, :), 10), 'k')
xlabel('time (sec)', 'fontsize', 24); ylabel('SFF (N)', 'fontsize', 24);
title('Total Force', 'fontsize', 28)

```

```

% ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(2,1,2)
set(gca, 'xlim', [25 145], 'XTick', [10:10:150], 'fontsize', 18);
hold on
plot(t(j,:), medfilt1(sgolayfilt(-yE(j,:), 1, 3), 1), 'k')
xlabel('time (sec)', 'fontsize', 24); ylabel('yE (m/sec^2)', 'fontsize', 24);
title('Acceleration', 'fontsize', 28);

% ΔΥΝΑΜΕΙΣ

figure('name', sprintf('ΔΥΝΑΜΕΙΣ'), 'NumberTitle', 'off');

% EXCITATION-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(6,1,1)
set(gca, 'xlim', [70 140], 'XTick', [10:10:150], 'fontsize', 30);
hold on
grid on
plot(t(j, 7000:14000), EXCITATION(j, 7000:14000), 'b')
xlabel('time (sec)', 'fontsize', 34); ylabel('Fe (N)', 'fontsize', 34);
title('Excitation Force', 'fontsize', 30)
legend('Excitation Force')

% DRAG-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(6,1,2)
set(gca, 'xlim', [70 140], 'XTick', [10:10:150], 'fontsize', 30);
hold on
grid on
plot(t(j, 7000:14000), DRAG(j, 7000:14000), 'r')
xlabel('time (sec)', 'fontsize', 34); ylabel('Fv (N)', 'fontsize', 34);
title('Drag Force', 'fontsize', 30);
legend('Drag Force')

% RADIATION-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(6,1,3)
set(gca, 'xlim', [70 140], 'XTick', [10:10:150], 'fontsize', 30);
hold on
grid on
plot(t(j, 7000:14000), RADIATION(j, 7000:14000), 'r')
xlabel('time (sec)', 'fontsize', 34); ylabel('Fr (N)', 'fontsize', 34);
title('Radiation Force', 'fontsize', 30);
legend('Radiation Force')

% (BUOYANCY-WEIGHT)-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(6,1,4)
set(gca, 'xlim', [70 140], 'XTick', [10:10:150], 'fontsize', 30);
hold on
grid on
plot(t(j, 7000:14000), BUOYANCY(j, 7000:14000), 'm')
xlabel('time (sec)', 'fontsize', 34); ylabel('Fb (N)', 'fontsize', 34);
title('Buoyancy-Weight Force', 'fontsize', 30);
legend('Buoyancy-Weight Force')

```

```

% WATERCOLUMN-XPONOS
subplot(6,1,5)
set(gca,'xlim',[70 140],'ylim',[-10000
170000],'XTick',[10:1:150],'fontsize',30);
hold on
grid on
plot(t(j,7000:14000),medfilt1(WATERCOLUMN(j,7000:14000),1),'r');
xlabel('time (sec)','fontsize',34);ylabel('Fw (N)','fontsize',34);
title('Water Column Force','fontsize',30);
legend('Water Column Force')

% LOSS-XPONOS
subplot(6,1,6)
set(gca,'xlim',[70 140],'ylim',[-1000
500],'XTick',[10:10:150],'fontsize',30);
hold on
grid on
plot(t(j,7000:14000),LOSS(j,7000:14000),'r')
xlabel('time (sec)','fontsize',34);ylabel('Fl (N)','fontsize',34);
title('Loss Force','fontsize',30);
legend('Loss Force')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ΒΥΘΙΣΜΑ-ΑΝΩΣΗ
figure('name',sprintf('ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ,ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ
ΒΥΘΙΣΜΑ'),'NumberTitle','off');

% ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ VS ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ-ΧΡΟΝΟΣ
subplot(2,1,1)
set(gca,'xlim',[70 140],'YLim',[-2.5
2.5],'XTick',[10:10:150],'fontsize',30);
hold on
plot(t(j,7000:14000),-yA(j,7000:14000),'k')
grid on
hold on

xlabel('time (sec)','fontsize',34);ylabel('yA,yK (m)','fontsize',34);
title('Wave Relocation VS System Relocation','fontsize',30)
legendInfo{j}=['System Relocation'];
hold on
plot(t(1,7000:14000),-yK(7000:14000),'b')

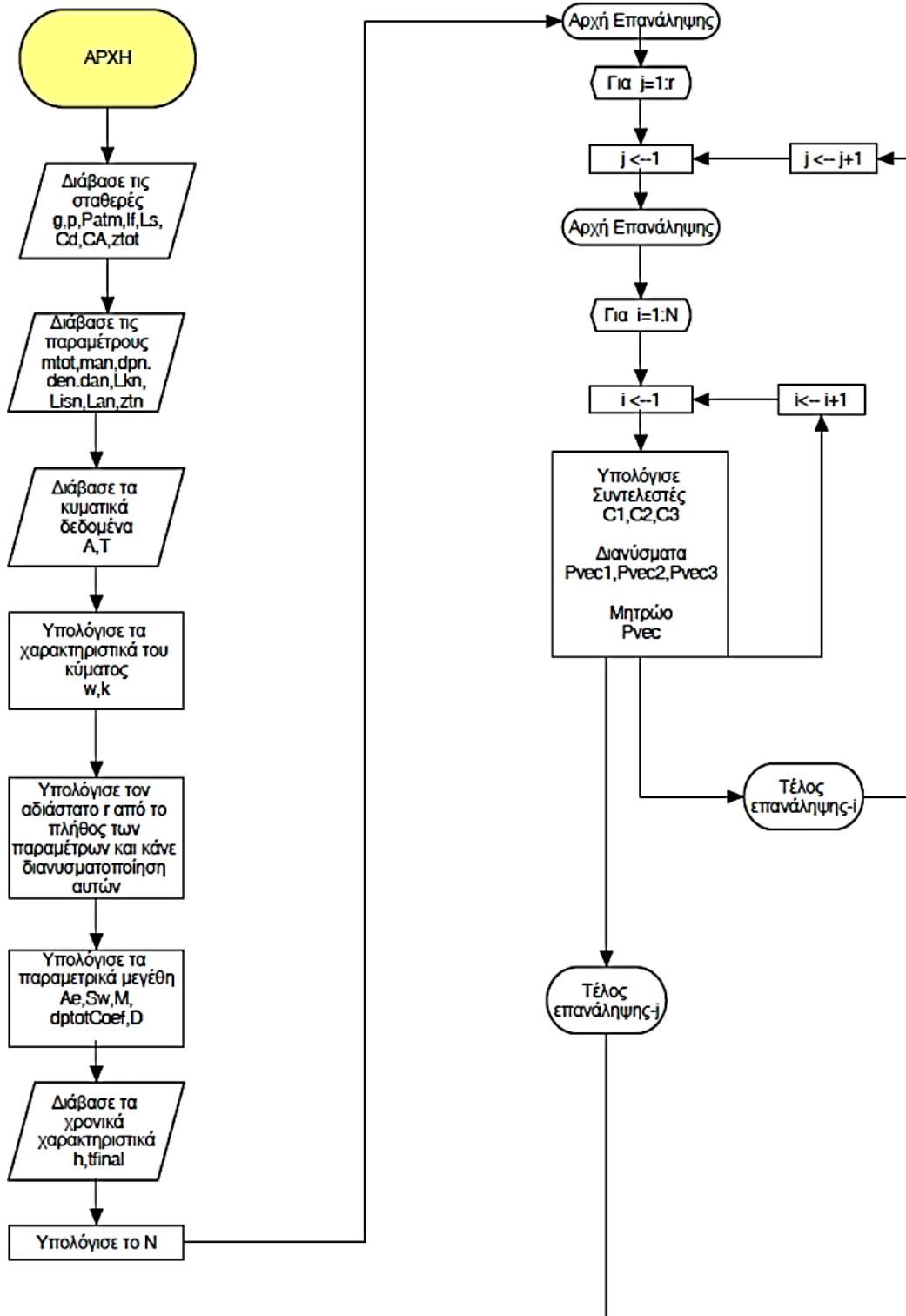
% ΒΥΘΙΣΜΑ
% Κάθε στιγμή το βύθισμα δίνεται από το βύθισμα D που εξισορροπεί το βάρος
% του σώματος και την διαφορά μετατοπίσεων (yA-yK). Όταν δε [D+(yA-yK)]-->0
% τότε υπάρχει ο κίνδυνος να εξέλθει ο πλωτήρας από το νερό.
subplot(2,1,2)
set(gca,'xlim',[85 105],'ylim',[0 5],'XTick',[10:1:150],'fontsize',18);
hold on
plot(t(j,8500:10500),(D+(yA(j,8500:10500)-yK(j,8500:10500))), 'k')
xlabel('time (sec)','fontsize',24);ylabel('D+(yA-yK)
(m)','fontsize',24);
title('Absolute Immersion-D','fontsize',28)
legend('Immersion')

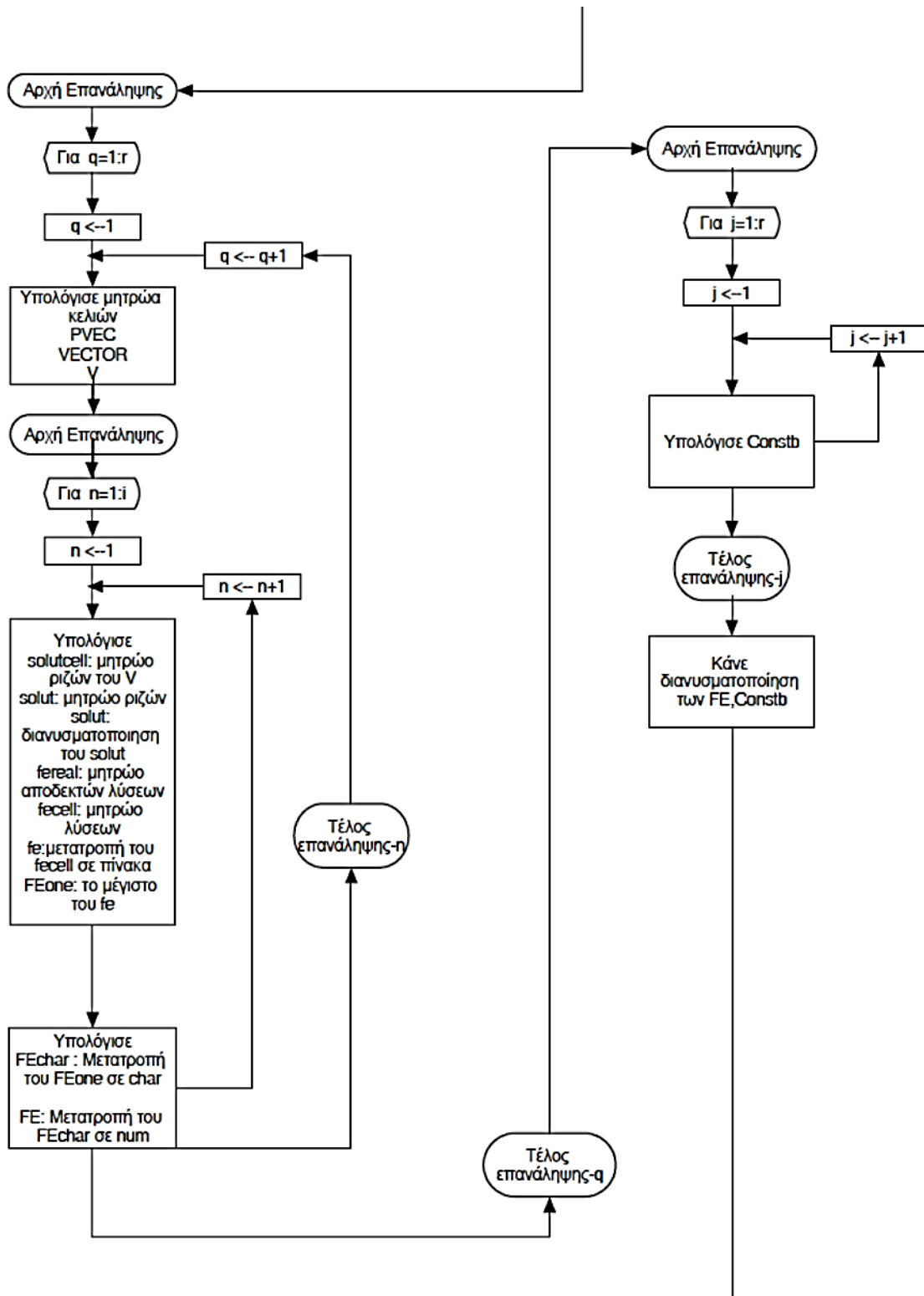
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

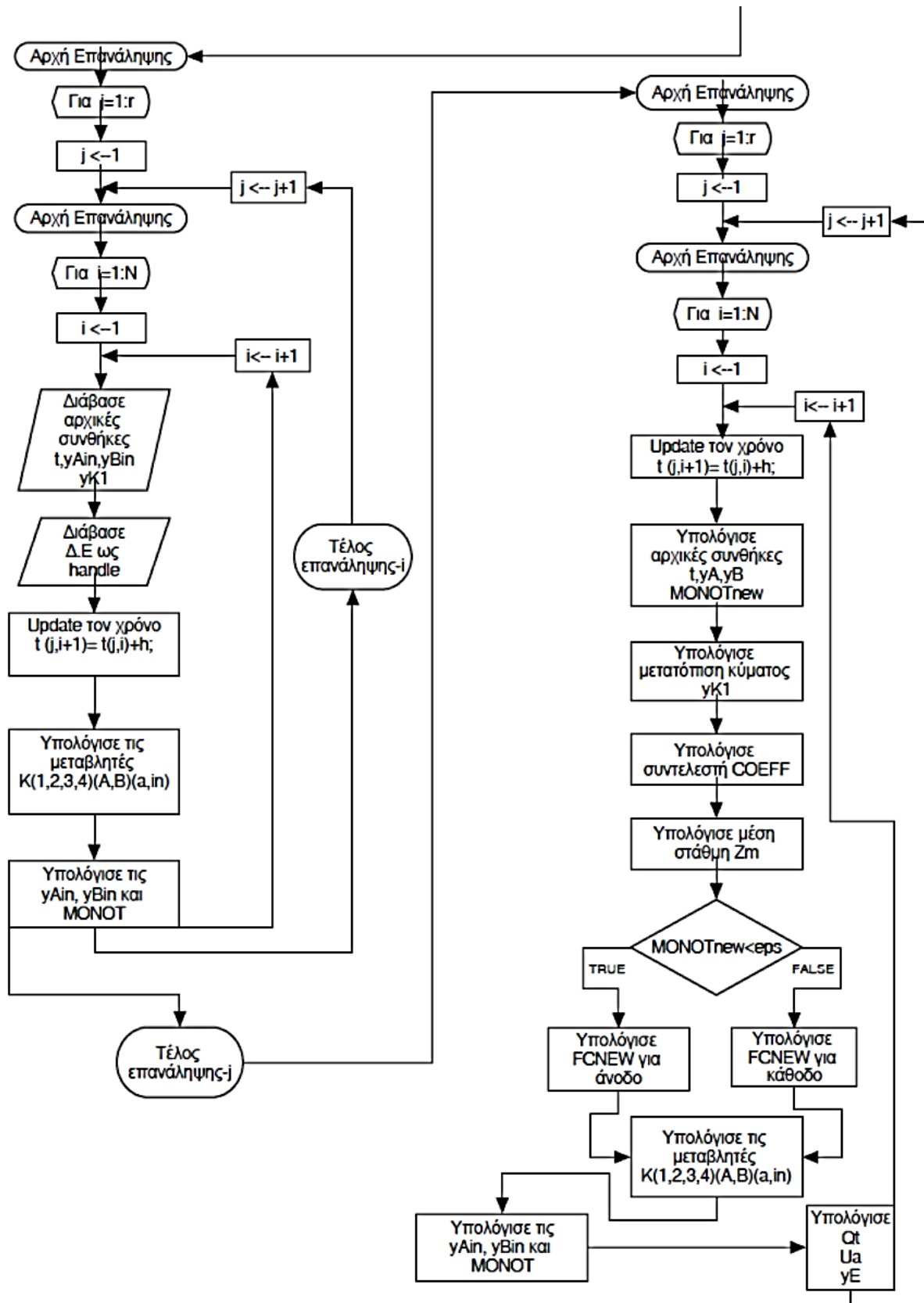
% _____ Τ Ε Λ Ο Σ _____ %

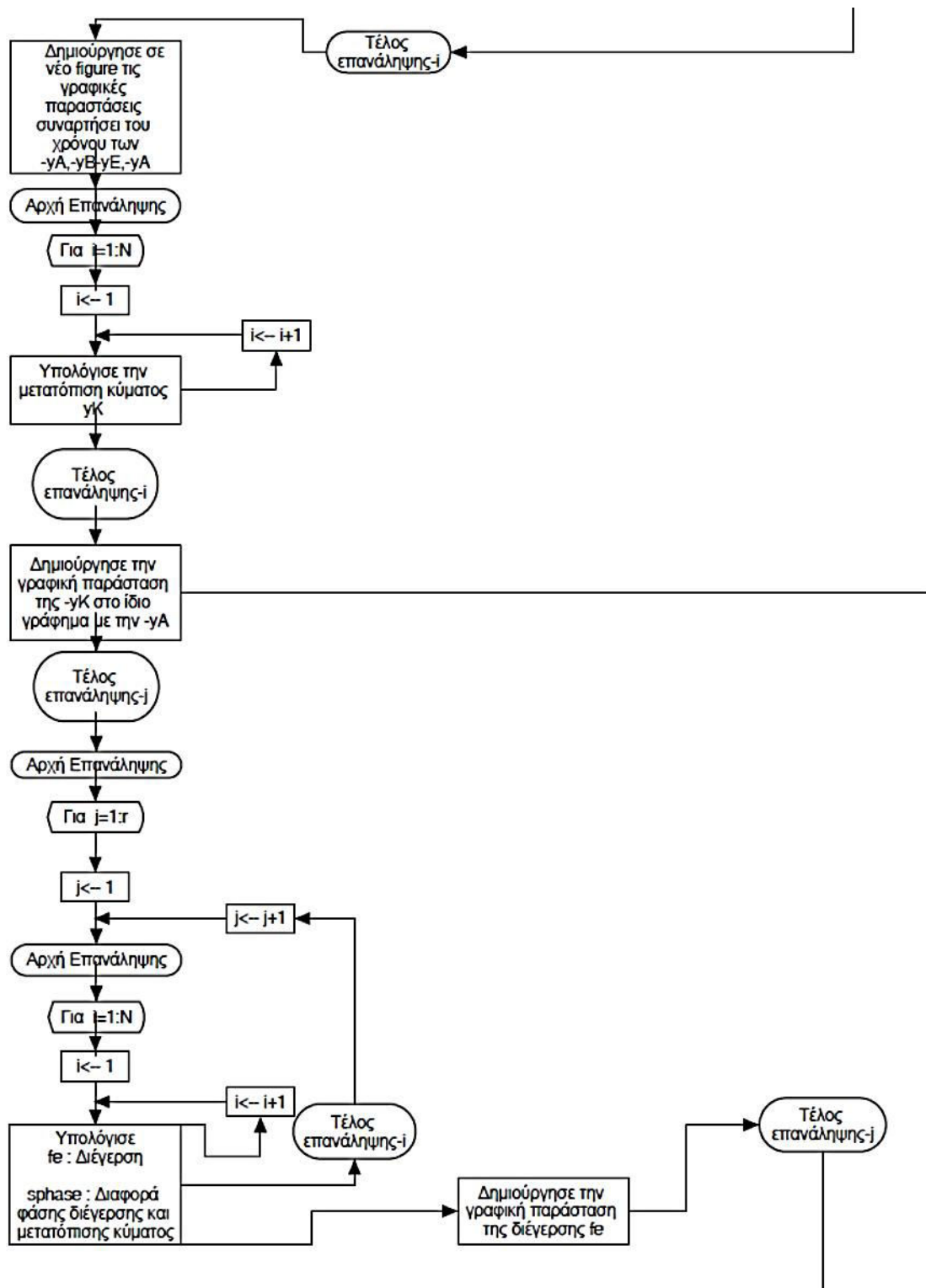
```

II.2) Λογικό διάγραμμα κώδικα matlab «ENALIOS.m»

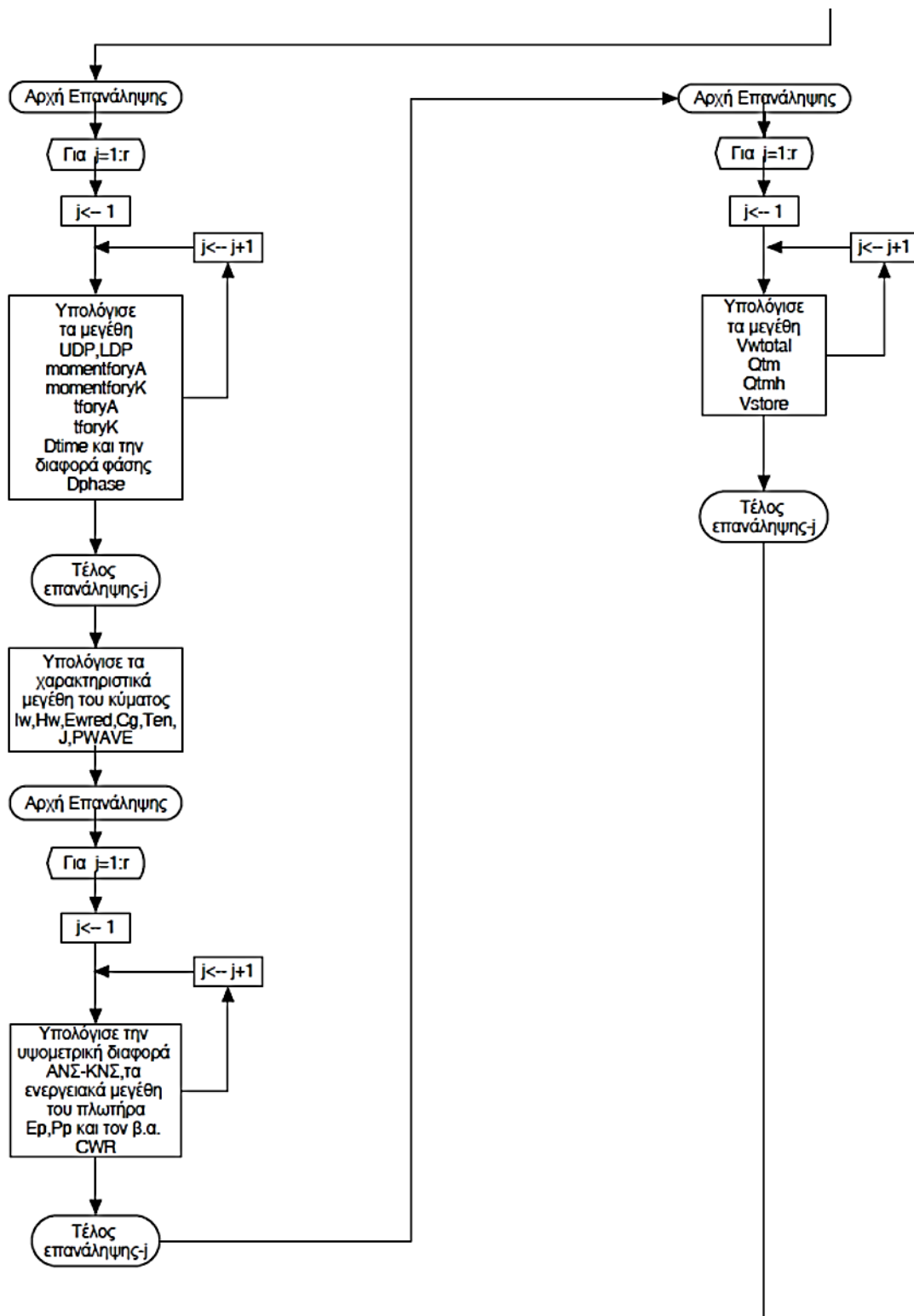


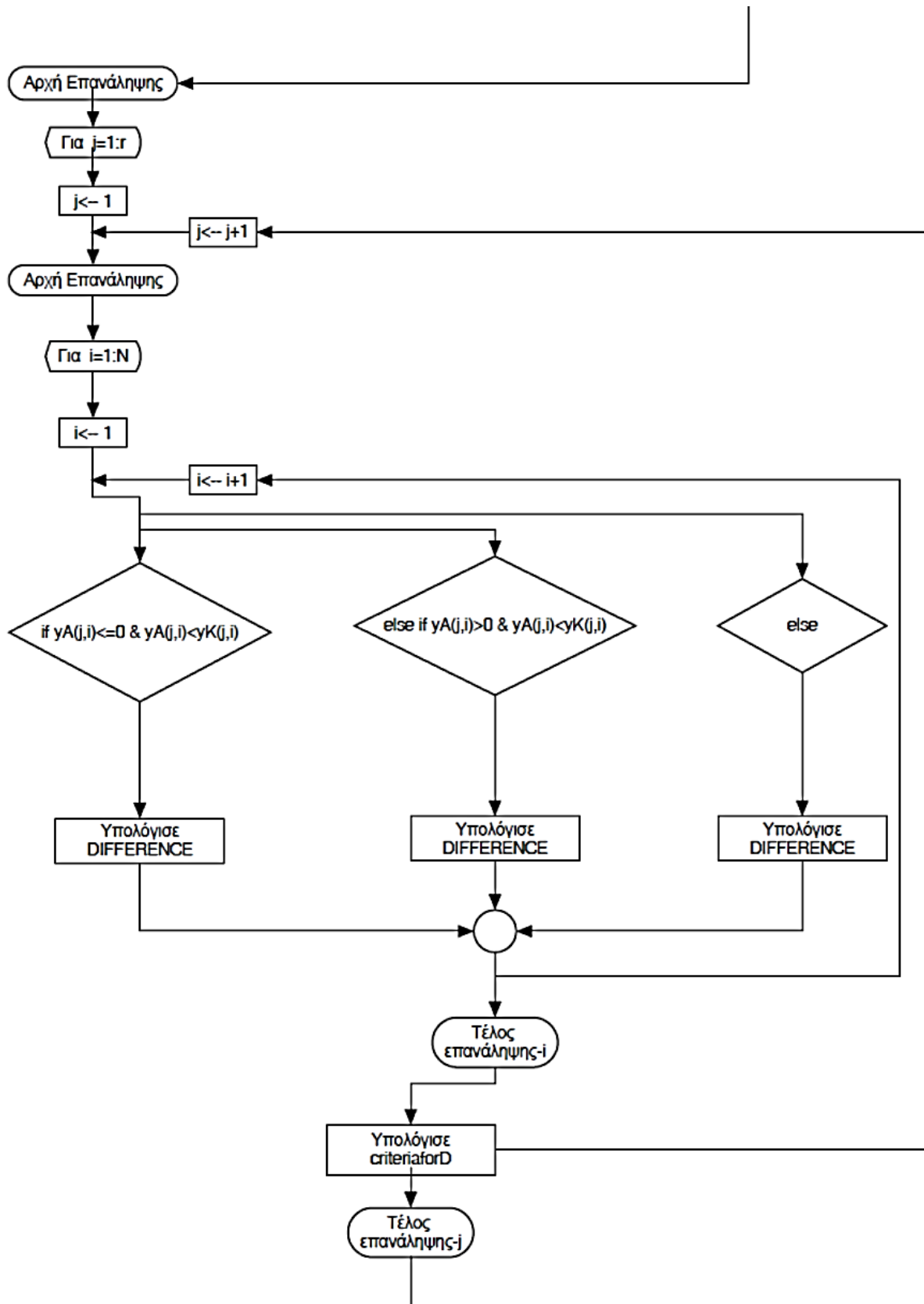


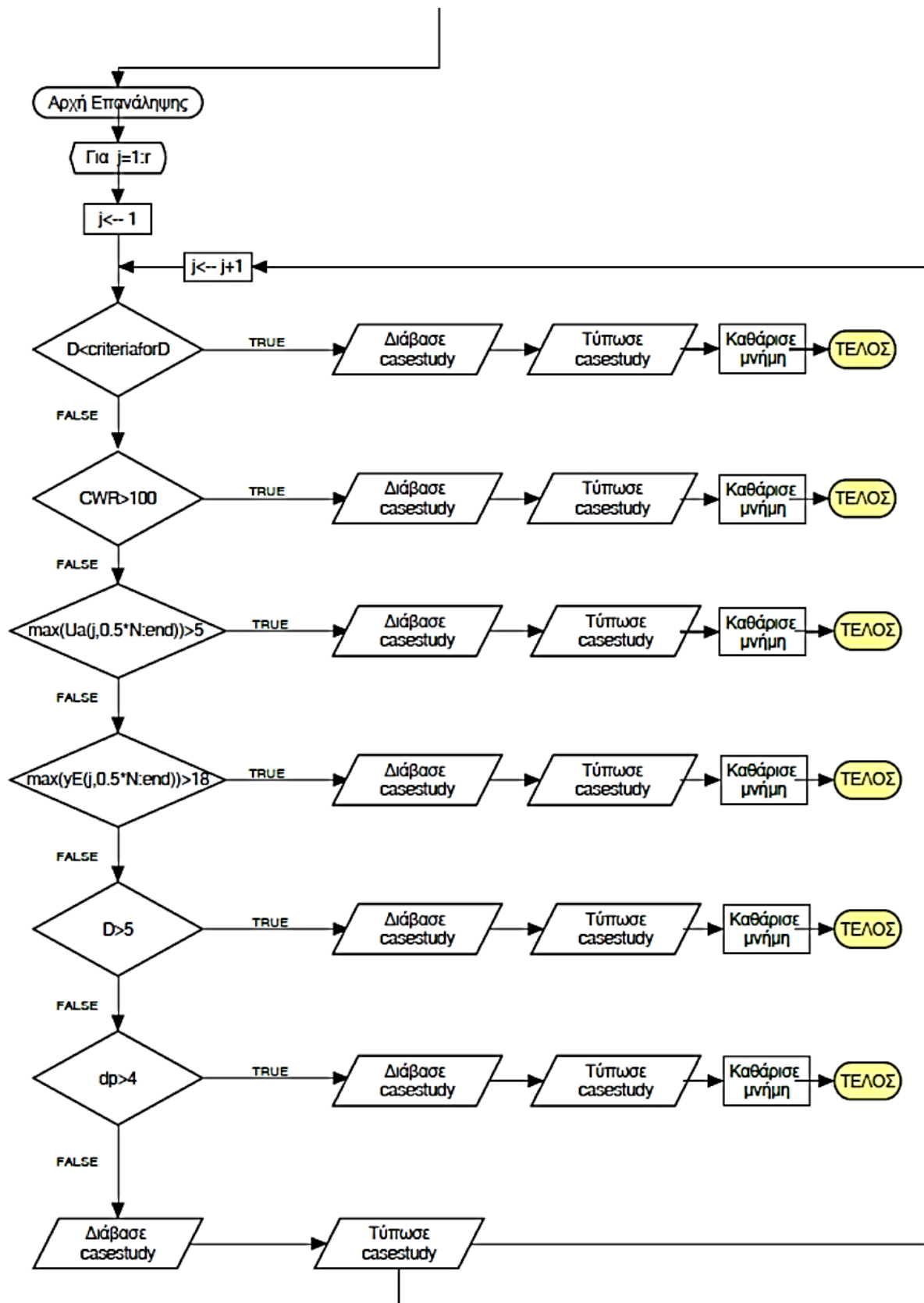


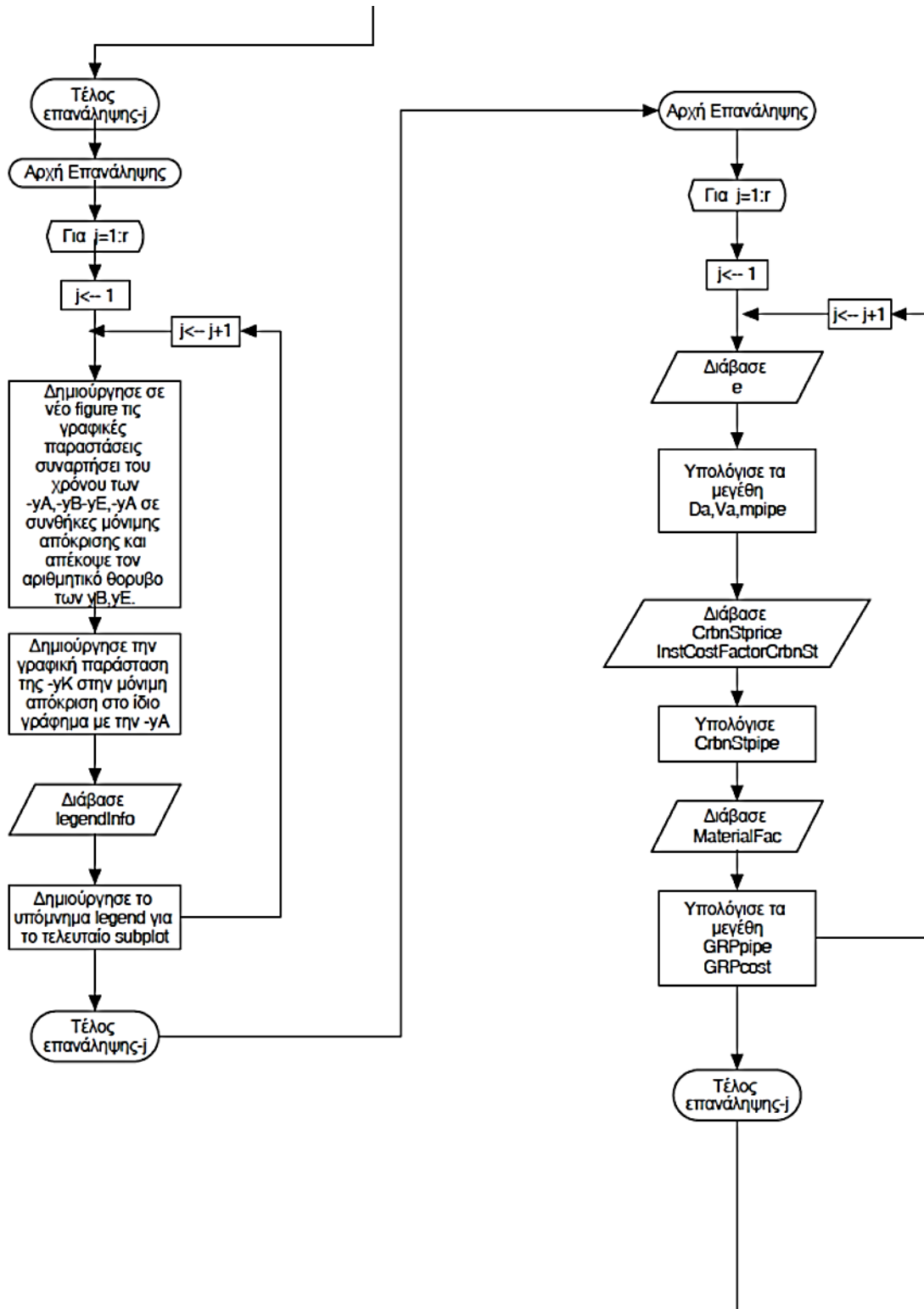


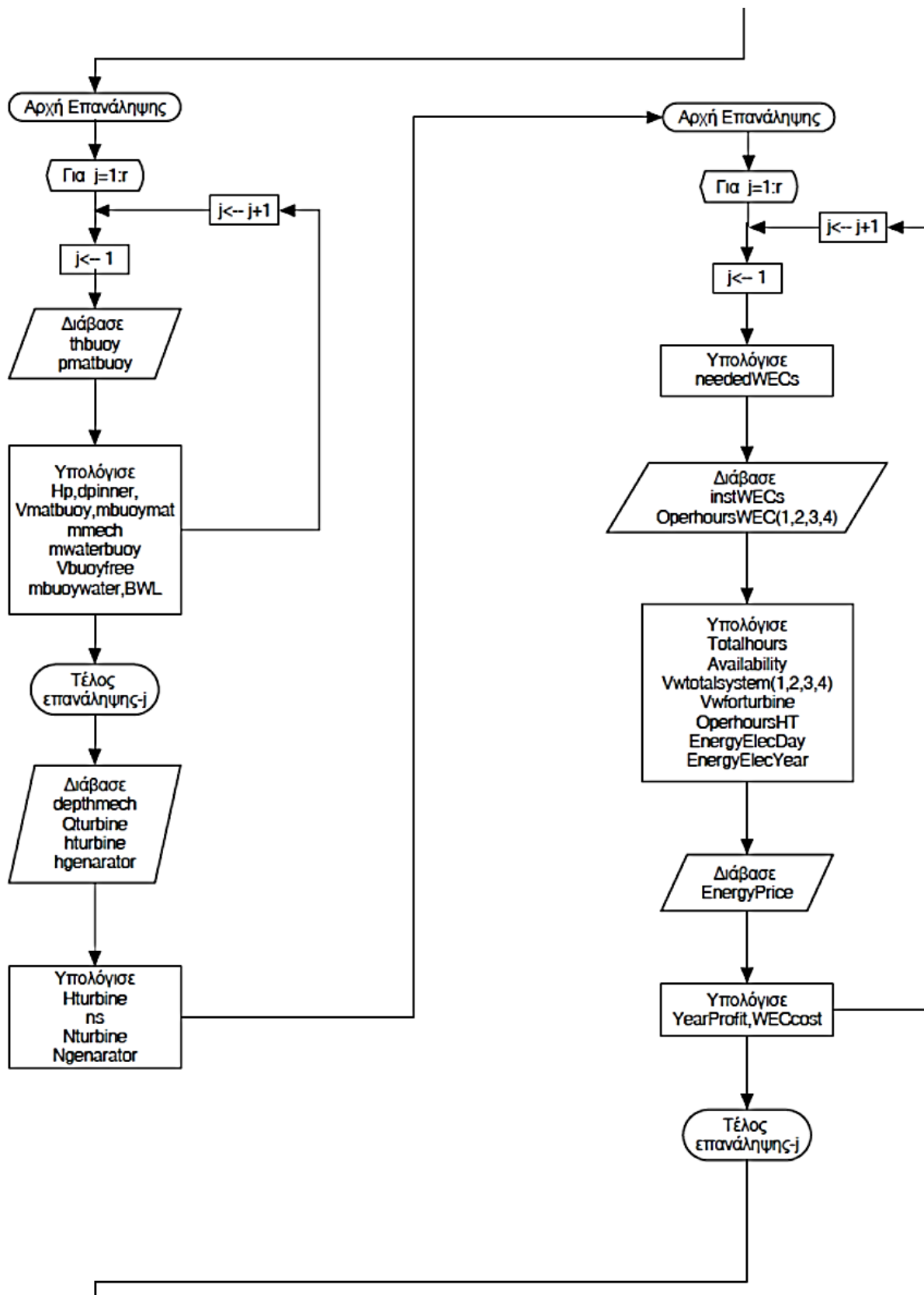


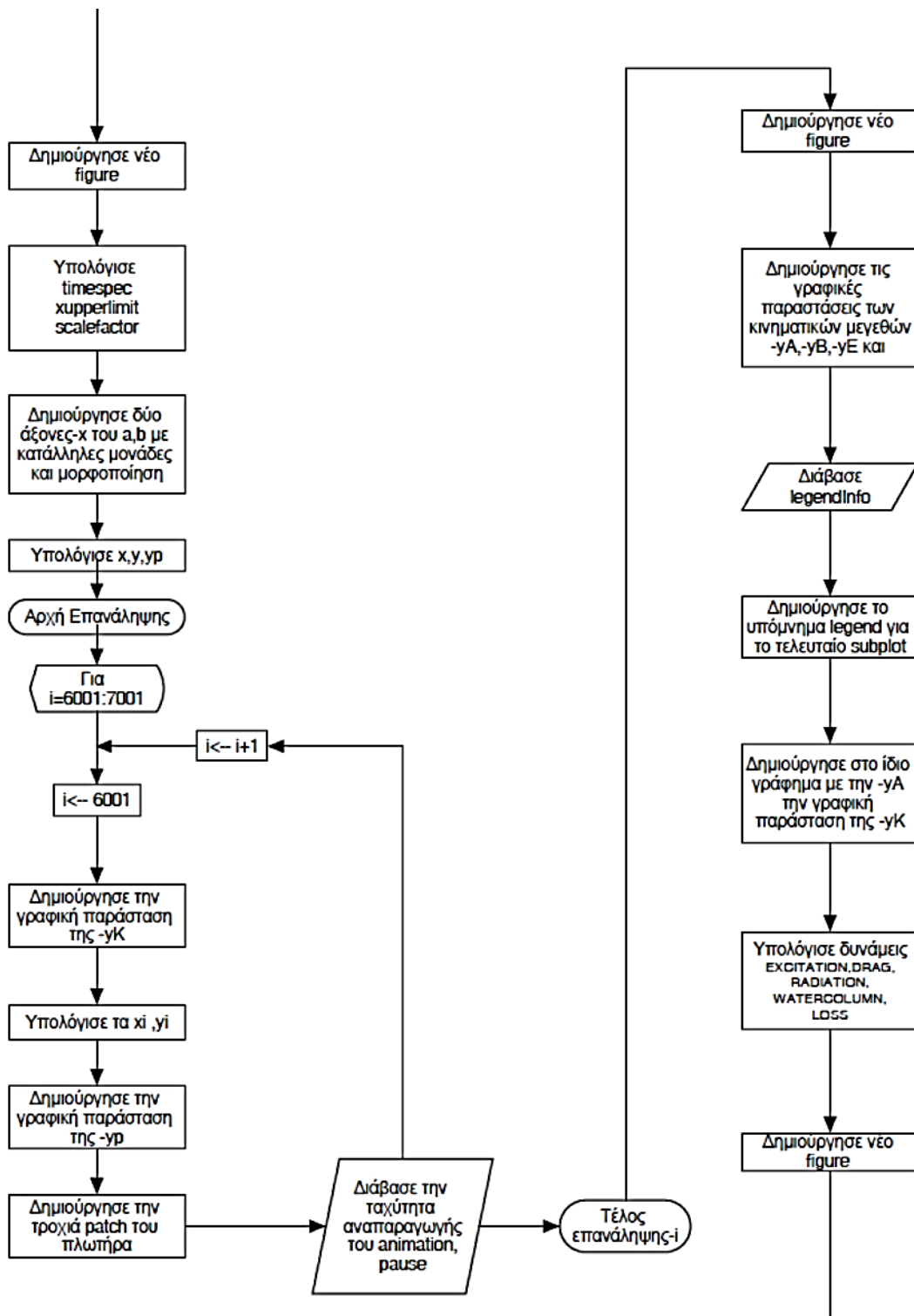


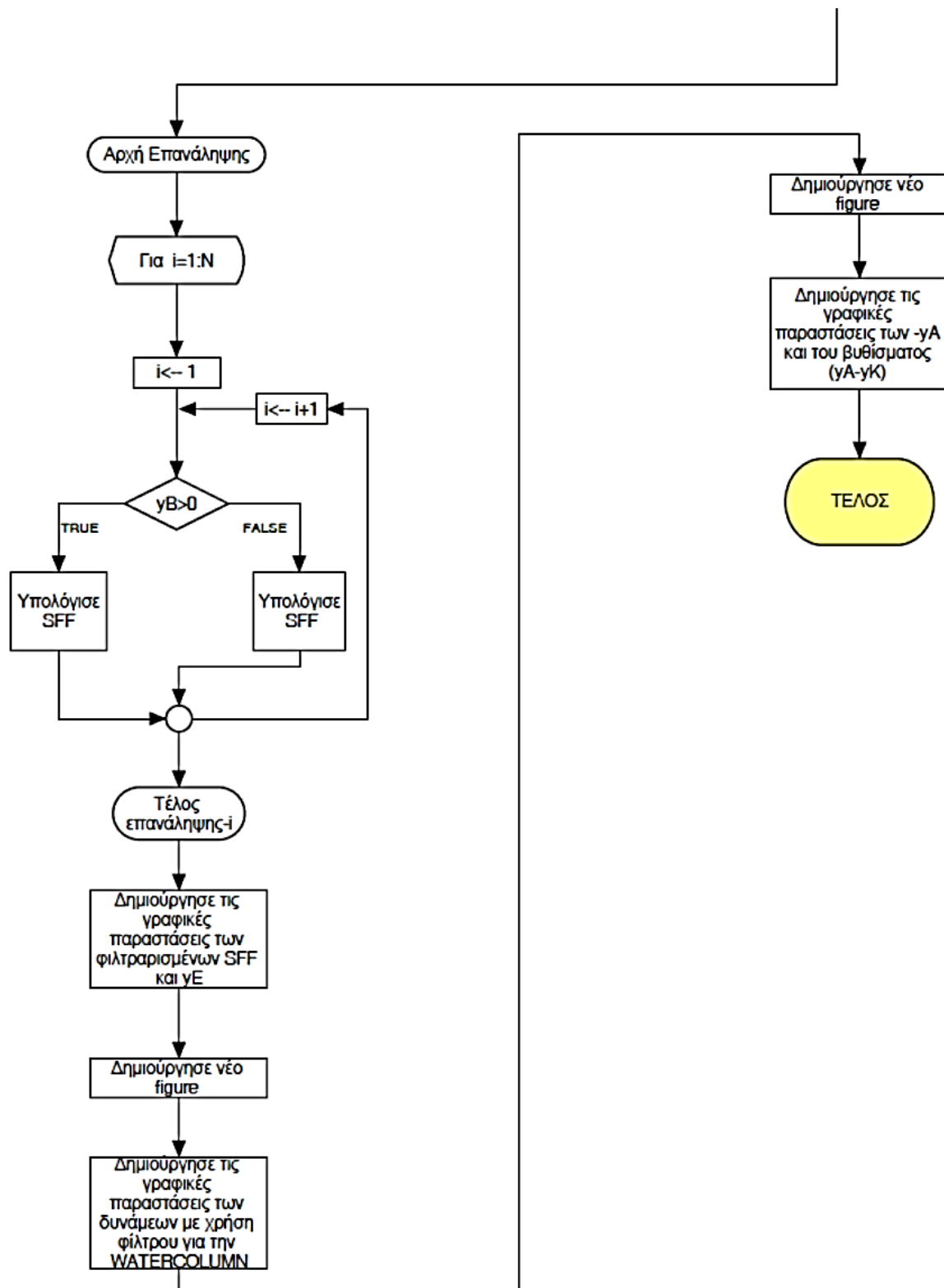
















## Παράρτημα III

### III.1) Κώδικας matlab «TIMESERIES.m» για επεξεργασία και ανάλυση των χρονοσειρών.

```

% ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ

% Έχοντας ως αρχείο input ένα αρχείο excel με όνομα TIME SERIES
% κατασκευάζονται οι καμπύλες διάρκειας των κυματικών μεγεθών

% SWH      : Σημαντικό ύψος κύματος (m) ανά ημέρα
% Tmean    : Μέση Περίοδος κύματος (sec) ανά ημέρα
% YEAR     : Έτος
% MONTHS   : Μήνας
% DAY      : Ημέρα
% Records  : Δείγματα
% daysum   : Αθροιστικές μέρες

clear all
close all

% ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ
seriesdata=xlsread('TIME SERIES');
YEAR=seriesdata(:,1);
MONTH=seriesdata(:,2);
DAY=seriesdata(:,3);
SWH=seriesdata(:,4);
Tmean=seriesdata(:,5);
Records=seriesdata(:,6);
daysum=seriesdata(:,7);

% ΕΤΗΣΙΕΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

figure('name',sprintf('ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ
ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ'),'NumberTitle','off');

% SWH-HMEPA
subplot(2,1,1)
set(gca,'xlim',[0 365],'ylim',[0 6],'XTick',[0:20:364],'fontsize',18);
hold on
grid on
xlabel('days','fontsize',24);ylabel('SWH (m)','fontsize',24);
title('SWH-Days','fontsize',28);
plot(daysum,SWH,'b','MarkerSize',2,'LineWidth',0.25)

% T-HMEPA
subplot(2,1,2)
set(gca,'xlim',[0 365],'ylim',[0 15],'XTick',[0:20:364],'fontsize',18);
hold on
grid on
xlabel('days','fontsize',24);ylabel('T (sec)','fontsize',24);
title('T-Days','fontsize',28);
plot(daysum,Tmean,'r','MarkerSize',2,'LineWidth',0.25)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ΜΕΣΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ (sec)

```

```

T=mean(Tmean);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ SWH

figure('name',sprintf('ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ
ΚΥΜΑΤΟΣ'),'NumberTitle','off');
set(gca,'xlim',[-10 370],'ylim',[0 6],'XTick',[0:20:364],'fontsize',18);
hold on
xlabel('days','fontsize',24);ylabel('SWH (m)','fontsize',24);
title('SWH-Days','fontsize',28);
plot(daysum,abs(-
sort(SWH,'descend')),'b','MarkerSize',2,'LineWidth',0.25)

SWHsort=abs(-sort(SWH,'descend')); % Σορταρισμένο SWH (m)
yeardays=[90 80 70 60 30 20 14]; % Ημέρες υποδιαστημάτων

for i=1:364

% 1ο ΥΠΟΔΙΑΣΤΗΜΑ
if daysum(i)<=20
SWHpoint(i)=mean(SWHsort(1:20));
% 2ο ΥΠΟΔΙΑΣΤΗΜΑ
else if daysum(i)>=20&daysum(i)<=40
SWHpoint(i)=mean(SWHsort(20:40));
% 3ο ΥΠΟΔΙΑΣΤΗΜΑ
else if daysum(i)>=40&daysum(i)<=70;
SWHpoint(i)=mean(SWHsort(40:70));
% 4ο ΥΠΟΔΙΑΣΤΗΜΑ
else if daysum(i)>=70&daysum(i)<=130
SWHpoint(i)=mean(SWHsort(70:130));
% 5ο ΥΠΟΔΙΑΣΤΗΜΑ
else if daysum(i)>=130&daysum(i)<=190
SWHpoint(i)=mean(SWHsort(130:190));
% 6ο ΥΠΟΔΙΑΣΤΗΜΑ
else if daysum(i)>=190&daysum(i)<=270
SWHpoint(i)=mean(SWHsort(190:270));
% 7ο ΥΠΟΔΙΑΣΤΗΜΑ
else
SWHpoint(i)=mean(SWHsort(270:364));

end
end
end
end
end
end
end

Aoper=[mean(SWHsort(1:20)) mean(SWHsort(21:40)) mean(SWHsort(41:70))
mean(SWHsort(71:130)) mean(SWHsort(131:190)) mean(SWHsort(191:270))
mean(SWHsort(270:364))];

% ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ
plot(daysum,SWHpoint,'r','MarkerSize',2,'LineWidth',0.25);
legend('REAL','APROX.MODEL');

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΕ ΕΤΗΣΙΑ ΒΑΣΗ

g=9.81;          % Επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)
p=1025;         % Πυκνότητα ρευστού (kg/m^3)
Ten=T/2;        % Περίοδος ενέργειας (sec)

J=(1e-3)*p*(g^2)*Ten*(SWHpoint.^2)/(32*pi); % Ροή ενέργειας (kW/m
κυματομετώπου)

figure('name',sprintf('ΚΑΜΠΥΛΗ ΡΟΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ
ΙΣΧΥΟΣ'),'NumberTitle','off');
set(gca,'xlim',[0 364],'ylim',[0 100],'XTick',[0:20:364],'fontsize',18);
hold on
area(daysum,J,'EdgeColor','k','FaceColor','c');
xlabel('days','fontsize',24);
ylabel('Aprox. Wave Power Density (kW/m)','fontsize',24);
title('Wave Power Density','fontsize',28);
```



## Παράρτημα IV

**ΠΙΝΑΚΑΣ IV.1) : Ημερήσιες κυματικές συνθήκες έτους 2015 Monterey Bay Station 185 (Πηγή CDIP)**

<i>YEAR</i>	<i>MONTH</i>	<i>DAY</i>	<i>SWH (m)</i>	<i>Tmean(sec)</i>	<i>Records</i>	<i>daysum</i>
2015	1	1	1,28	6,19	48	1
2015	1	2	1,18	7,34	48	2
2015	1	3	1,05	6,26	48	3
2015	1	4	1	7,24	48	4
2015	1	5	1,39	8,63	48	5
2015	1	6	1,08	7,63	48	6
2015	1	7	1,26	8,37	48	7
2015	1	8	1,19	9,14	48	8
2015	1	9	1,91	11,7	48	9
2015	1	10	2,11	11,09	48	10
2015	1	11	1,87	8,17	48	11
2015	1	12	2,04	6,51	48	12
2015	1	13	1,88	6,79	48	13
2015	1	14	1,49	7,68	48	14
2015	1	15	2,02	11,62	48	15
2015	1	16	2,09	11,15	48	16
2015	1	17	2,3	9,8	48	17
2015	1	18	2,07	9,02	48	18
2015	1	19	2,69	8,43	48	19
2015	1	20	3,23	8,55	48	20
2015	1	21	2,59	7,77	48	21
2015	1	22	1,63	7,06	48	22
2015	1	23	1,93	9,68	48	23
2015	1	24	3,08	11,57	48	24
2015	1	25	2,69	10,91	48	25
2015	1	26	2,14	11,12	48	26
2015	1	27	2,09	9,75	48	27
2015	1	28	1,87	10,61	48	28
2015	1	29	1,92	8,51	48	29
2015	1	30	2,46	7,25	48	30
2015	1	31	2,58	7,82	48	31
2015	2	1	1,73	7,69	48	32
2015	2	2	1,5	8,11	48	33
2015	2	3	2,43	10,27	48	34
2015	2	4	2,17	9,95	48	35
2015	2	5	1,84	6,39	48	36
2015	2	6	3,49	7,06	48	37
2015	2	7	3,67	7,88	48	38
2015	2	8	3,51	8,37	48	39

<i>YEAR</i>	<i>MONTH</i>	<i>DAY</i>	<i>SWH (m)</i>	<i>Tmean(sec)</i>	<i>Records</i>	<i>daysum</i>
2015	2	9	4,44	9,57	48	40
2015	2	10	3,54	9,43	48	41
2015	2	11	2,21	7,76	48	42
2015	2	12	1,99	9,21	48	43
2015	2	13	2,54	11,39	48	44
2015	2	14	2,26	9,18	48	45
2015	2	15	1,94	8,81	48	46
2015	2	16	1,35	8,52	48	47
2015	2	17	0,8	8,58	48	48
2015	2	18	1,49	10,44	48	49
2015	2	19	1,95	7,65	48	50
2015	2	20	1,62	6,9	48	51
2015	2	21	1,76	7,07	48	52
2015	2	22	1,81	7,44	48	53
2015	2	23	1,86	6,55	48	54
2015	2	24	1,71	8,68	48	55
2015	2	25	1,69	7,09	48	56
2015	2	26	2,79	6,76	48	57
2015	2	27	3,15	6,69	48	58
2015	2	28	2,34	6,53	48	59
2015	3	1	2,53	8,52	48	60
2015	3	2	2,07	7,47	48	61
2015	3	3	2,42	7,92	48	62
2015	3	4	1,99	7,65	48	63
2015	3	5	1,49	8,11	48	64
2015	3	6	1,39	9,16	48	65
2015	3	7	1,57	6,75	48	66
2015	3	8	1,72	6,02	48	67
2015	3	9	1,71	5,92	48	68
2015	3	10	1,31	7,18	48	69
2015	3	11	0,82	7,6	48	70
2015	3	12	1,11	6,44	48	71
2015	3	13	1,55	6,6	48	72
2015	3	14	1,37	8,02	48	73
2015	3	15	1,54	10,29	48	74
2015	3	16	1,35	7,65	48	75
2015	3	17	1,71	6,22	48	76
2015	3	18	2,45	6,6	48	77
2015	3	19	2,77	7,92	48	78
2015	3	20	1,87	7,54	48	79
2015	3	21	1,69	8,12	48	80
2015	3	22	1,67	8,55	48	81
2015	3	23	1,83	8,78	48	82
2015	3	24	2,3	8,56	48	83
2015	3	25	2,42	7,97	48	84

<i>YEAR</i>	<i>MONTH</i>	<i>DAY</i>	<i>SWH (m)</i>	<i>Tmean(sec)</i>	<i>Records</i>	<i>daysum</i>
2015	3	26	2,14	7	48	85
2015	3	27	2,03	7,95	48	86
2015	3	28	2,81	7,4	48	87
2015	3	29	3,11	7,78	48	88
2015	3	30	3,04	8,36	48	89
2015	3	31	2,77	8,1	48	90
2015	4	1	3,37	7,29	48	91
2015	4	2	3,69	7,89	48	92
2015	4	3	2,89	7,16	48	93
2015	4	4	2,34	6,58	48	94
2015	4	5	2,33	9,07	48	95
2015	4	6	2	8,44	48	96
2015	4	7	2,18	6,78	48	97
2015	4	8	2,11	7,28	48	98
2015	4	9	1,49	6,85	48	99
2015	4	10	0,9	6,65	48	100
2015	4	11	1,48	7,83	48	101
2015	4	12	1,94	6,78	48	102
2015	4	13	2,56	8,39	48	103
2015	4	14	2,8	7,49	48	104
2015	4	15	3,29	7,57	48	105
2015	4	16	3,14	8,72	48	106
2015	4	17	2,98	11,48	48	107
2015	4	18	2,84	9,83	48	108
2015	4	19	2,47	8,96	48	109
2015	4	20	1,82	8,67	48	110
2015	4	21	1,89	9,46	48	111
2015	4	22	3,57	8,92	48	112
2015	4	23	3,67	8,99	48	113
2015	4	24	2,47	7,17	48	114
2015	4	25	2,35	8,06	48	115
2015	4	26	2,44	6,74	48	116
2015	4	27	1,89	5,86	48	117
2015	4	28	2,1	6,14	48	118
2015	4	29	3,07	7,09	48	119
2015	4	30	3,89	8,79	48	120
2015	5	1	2,81	8,56	48	121
2015	5	2	2,15	8,34	48	122
2015	5	3	2,35	9	48	123
2015	5	4	2,37	9,23	48	124
2015	5	5	3,07	8,06	48	125
2015	5	6	4,18	8,46	48	126
2015	5	7	4,23	8,4	48	127
2015	5	8	2,9	8,08	48	128
2015	5	9	1,68	7,25	48	129

<i>YEAR</i>	<i>MONTH</i>	<i>DAY</i>	<i>SWH (m)</i>	<i>Tmean(sec)</i>	<i>Records</i>	<i>daysum</i>
2015	5	10	1,54	6,15	48	130
2015	5	11	2,32	6,52	48	131
2015	5	12	3,07	6,96	48	132
2015	5	13	1,55	6,4	48	133
2015	5	14	1,46	8,86	48	134
2015	5	15	2,04	9,81	48	135
2015	5	16	1,83	7,24	48	136
2015	5	17	1,45	7,13	48	137
2015	5	18	1,39	8,29	48	138
2015	5	19	1,53	7,94	48	139
2015	5	20	1,47	6,99	48	140
2015	5	21	1,18	7,59	48	141
2015	5	22	1,18	8,38	48	142
2015	5	23	1,6	6,35	48	143
2015	5	24	1,97	6,5	48	144
2015	5	25	1,83	7,12	48	145
2015	5	26	1,8	8,46	48	146
2015	5	27	1,64	8,87	48	147
2015	5	28	1,89	7,51	48	148
2015	5	29	1,76	6,71	48	149
2015	5	30	1,5	6,17	48	150
2015	5	31	1,1	7,42	48	151
2015	6	1	0,88	9,94	48	152
2015	6	2	1,2	8,3	48	153
2015	6	3	2,14	6,45	48	154
2015	6	4	2,91	7,29	48	155
2015	6	5	2,68	7,97	48	156
2015	6	6	1,89	7,62	48	157
2015	6	7	1,62	8,32	48	158
2015	6	8	1,54	8,23	48	159
2015	6	9	1,65	8,83	48	160
2015	6	10	1,57	8,69	48	161
2015	6	11	1,86	7,88	48	162
2015	6	12	2,05	8,36	48	163
2015	6	13	2,55	9,27	48	164
2015	6	14	2,64	8,96	48	165
2015	6	15	2,5	7,42	48	166
2015	6	16	2,36	6,62	48	167
2015	6	17	2,02	6,41	48	168
2015	6	18	1,6	5,92	48	169
2015	6	19	1,61	5,26	48	170
2015	6	20	1,41	5,34	48	171
2015	6	21	1,07	5,81	48	172
2015	6	22	1,26	5,31	48	173
2015	6	23	1,46	6,05	48	174



<i>YEAR</i>	<i>MONTH</i>	<i>DAY</i>	<i>SWH (m)</i>	<i>Tmean(sec)</i>	<i>Records</i>	<i>daysum</i>
2015	6	24	1,73	6,04	48	175
2015	6	25	1,76	6,71	48	176
2015	6	26	1,45	6,98	48	177
2015	6	27	1,39	7,12	48	178
2015	6	28	1,13	8,29	48	179
2015	6	29	1,26	6,6	48	180
2015	6	30	1,69	5,67	48	181
2015	7	1	1,33	7,09	48	182
2015	7	2	1,17	7,93	48	183
2015	7	3	1,09	8,16	48	184
2015	7	4	1,03	8,87	48	185
2015	7	5	0,94	9,03	48	186
2015	7	6	0,96	9,42	48	187
2015	7	7	0,95	9,77	48	188
2015	7	8	0,94	9,2	48	189
2015	7	9	1,08	10,14	48	190
2015	7	10	1,12	11,28	48	191
2015	7	11	1,12	11,26	48	192
2015	7	12	1,06	10,75	48	193
2015	7	13	1,22	6,88	48	194
2015	7	14	1,9	6,02	48	195
2015	7	15	2,01	6,76	48	196
2015	7	16	1,65	7,49	48	197
2015	7	17	1,4	8,07	48	198
2015	7	18	1,55	8,37	48	199
2015	7	19	1,51	8,89	48	200
2015	7	20	1,41	8,3	48	201
2015	7	21	1,63	6,72	48	202
2015	7	22	1,55	6,71	48	203
2015	7	23	1,58	6,95	48	204
2015	7	24	1,19	6,42	48	205
2015	7	25	1,17	6,46	48	206
2015	7	26	1,52	6,42	48	207
2015	7	27	2,27	7,27	48	208
2015	7	28	2,08	7,58	48	209
2015	7	29	1,56	9,02	48	210
2015	7	30	1,35	9,3	48	211
2015	7	31	1,23	9,37	48	212
2015	8	1	0,96	9,08	48	213
2015	8	2	0,85	7,22	48	214
2015	8	3	0,75	7,64	48	215
2015	8	4	0,75	9,17	48	216
2015	8	5	0,77	8,63	48	217
2015	8	6	1,4	6,34	48	218
2015	8	7	1,27	7,36	39	219

<i>YEAR</i>	<i>MONTH</i>	<i>DAY</i>	<i>SWH (m)</i>	<i>Tmean(sec)</i>	<i>Records</i>	<i>daysum</i>
2015	8	8	1,43	7,48	48	220
2015	8	9	1,66	5,55	48	221
2015	8	10	1,47	5,93	48	222
2015	8	11	1,08	6,06	48	223
2015	8	12	0,89	7,41	48	224
2015	8	13	0,74	7,4	48	225
2015	8	14	1	5,09	48	226
2015	8	15	1,65	5,44	48	227
2015	8	16	1,99	6,35	48	228
2015	8	17	1,94	7,48	48	229
2015	8	18	1,75	8,01	48	230
2015	8	19	1,38	8,5	48	231
2015	8	20	1,4	8,55	48	232
2015	8	21	1,49	7,25	48	233
2015	8	22	1,4	6,66	48	234
2015	8	23	1,16	7,28	48	235
2015	8	24	1,11	5,25	48	236
2015	8	25	1,32	5,36	48	237
2015	8	26	1,39	5,74	48	238
2015	8	27	1,36	5,26	48	239
2015	8	28	1,34	6,08	48	240
2015	8	29	1,27	9,59	48	241
2015	8	30	1,56	7,61	48	242
2015	8	31	1,97	7,07	48	243
2015	9	1	2,49	7,53	48	244
2015	9	2	2,26	8,08	48	245
2015	9	3	2,08	8,21	48	246
2015	9	4	2,83	7,29	48	247
2015	9	5	2,51	6,77	48	248
2015	9	6	2,41	7,32	48	249
2015	9	7	2,25	7,8	48	250
2015	9	8	2,02	8,06	48	251
2015	9	9	1,7	8,09	48	252
2015	9	10	1,81	7,19	48	253
2015	9	11	1,86	6,89	48	254
2015	9	12	2,09	6,3	48	255
2015	9	13	1,75	6,57	48	256
2015	9	14	1,67	7,5	48	257
2015	9	15	1,79	7,13	48	258
2015	9	16	1,21	6,31	48	259
2015	9	17	1,56	7,19	48	260
2015	9	18	2,12	6,72	48	261
2015	9	19	1,96	6,22	48	262
2015	9	20	1,5	6,4	48	263
2015	9	21	1,6	6,68	48	264

<i>YEAR</i>	<i>MONTH</i>	<i>DAY</i>	<i>SWH (m)</i>	<i>Tmean(sec)</i>	<i>Records</i>	<i>daysum</i>
2015	9	22	2,58	7,22	48	265
2015	9	23	1,97	6,5	48	266
2015	9	24	1,8	6,13	48	267
2015	9	25	1,91	5,96	48	268
2015	9	26	1,92	5,79	48	269
2015	9	27	2,38	7,24	48	270
2015	9	28	1,71	7,67	48	271
2015	9	29	1,14	7,58	48	272
2015	9	30	0,92	5,62	48	273
2015	10	1	0,8	6,86	48	274
2015	10	2	1,3	5,57	48	275
2015	10	3	2,74	7,57	48	276
2015	10	4	3,24	8,21	48	277
2015	10	5	1,55	7,41	48	278
2015	10	6	1,03	7,78	48	279
2015	10	7	1	8,35	48	280
2015	10	8	1,21	6,16	48	281
2015	10	9	1,38	6,4	48	282
2015	10	10	1,91	7,42	48	283
2015	10	11	2,35	8,26	48	284
2015	10	12	2,59	8,45	48	285
2015	10	13	2,04	9,01	48	286
2015	10	14	2,09	10,03	48	287
2015	10	15	1,89	9,36	48	288
2015	10	16	1,38	8,16	48	289
2015	10	17	1,04	8,77	48	290
2015	10	18	1,48	7,68	48	291
2015	10	19	2,41	7,19	48	292
2015	10	20	2,3	6,76	48	293
2015	10	21	2,17	6,95	48	294
2015	10	22	2,19	7,11	48	295
2015	10	23	2,5	9,33	48	296
2015	10	24	2,14	9,36	48	297
2015	10	25	1,68	7,52	48	298
2015	10	26	2,41	8,84	48	299
2015	10	27	1,86	7,75	48	300
2015	10	28	1,79	10,39	48	301
2015	10	29	2,93	8,48	48	302
2015	10	30	2,88	7,21	48	303
2015	10	31	2,31	7,54	48	304
2015	11	1	2,18	8,67	48	305
2015	11	2	2,95	10,04	48	306
2015	11	3	4,24	8,65	48	307
2015	11	4	3,39	8,01	48	308
2015	11	5	2,01	6,97	48	309

<i>YEAR</i>	<i>MONTH</i>	<i>DAY</i>	<i>SWH (m)</i>	<i>Tmean(sec)</i>	<i>Records</i>	<i>daysum</i>
2015	11	6	1,44	6,75	48	310
2015	11	7	1,32	6,49	48	311
2015	11	8	1,85	10,72	48	312
2015	11	9	2,64	10,47	48	313
2015	11	10	3,29	8,9	48	314
2015	11	11	2,33	8,19	48	315
2015	11	12	1,66	6,88	48	316
2015	11	13	2,47	7,91	48	317
2015	11	14	3,11	10,46	48	318
2015	11	15	3,35	10,36	48	319
2015	11	16	5,07	8,66	48	320
2015	11	17	2,97	7,22	48	321
2015	11	18	2,81	7,94	48	322
2015	11	19	2,71	7,1	48	323
2015	11	20	1,99	6,28	48	324
2015	11	21	1,99	6,62	48	325
2015	11	22	1,3	6,13	48	326
2015	11	23	0,97	7,78	48	327
2015	11	24	1,7	9,33	48	328
2015	11	25	3,63	8,93	48	329
2015	11	26	2,59	8,4	48	330
2015	11	27	1,59	7,29	48	331
2015	11	28	1,16	6,2	48	332
2015	11	29	1,72	9,54	48	333
2015	11	30	2,24	13,54	48	334
2015	12	1	2,62	11,57	48	335
2015	12	2	1,96	9,5	48	336
2015	12	3	2,31	9,38	48	337
2015	12	4	3,97	10,48	48	338
2015	12	5	3,45	10,44	48	339
2015	12	6	2,43	9,51	48	340
2015	12	7	4,71	12,85	48	341
2015	12	8	3,81	11,29	48	342
2015	12	9	2,76	9,79	48	343
2015	12	10	3,12	10,11	48	344
2015	12	11	5,94	12,35	48	345
2015	12	12	5,74	11,31	48	346
2015	12	13	3,9	9,86	48	347
2015	12	14	5,56	9,22	48	348
2015	12	15	3,65	8,2	48	349
2015	12	16	2,99	9,55	48	350
2015	12	17	3,08	11,74	48	351
2015	12	18	2,36	10,51	48	352
2015	12	19	2,83	8,64	48	353
2015	12	20	3,74	10,45	48	354

---

<i>YEAR</i>	<i>MONTH</i>	<i>DAY</i>	<i>SWH (m)</i>	<i>Tmean(sec)</i>	<i>Records</i>	<i>daysum</i>
2015	12	21	2,91	8,28	48	355
2015	12	22	3,63	8,6	48	356
2015	12	23	4,5	9,34	48	357
2015	12	24	4,05	9,52	48	358
2015	12	25	4,07	9,21	48	359
2015	12	26	3	8,41	48	360
2015	12	27	1,65	7,74	48	361
2015	12	28	1,46	6,57	48	362
2015	12	29	3,9	9,95	48	363
2015	12	30	2,53	9,49	48	364



