



ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Μοντελοποίηση Θαλάσσιου Ενεργειακού Συλλέκτη με
χρήση Πιεζοηλεκτρικής Τεχνολογίας και ανάλυση με
μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων »**

Φουρνιανάκης Σ. Ιωάννης

Αριθμός Μητρώου: 2012019038

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Σταυρουλάκης

Χανιά, Αύγουστος 2015

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσοι συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας που σηματοδοτεί το τέλος των μεταπτυχιακών φοιτητικών μου χρόνων.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για όλα όσα μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον άνθρωπο που με στήριξε σε όλη τη διάρκεια της μελέτης τόσο στα εύκολα όσο και στα δύσκολα , τη Βάλια Εμμανουηλίδη .

Φουρνιανάκης Ιωάννης,
Χανιά Σεπτέμβριος 2015

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1.	Εισαγωγή	8
1.1	Σκοπός και σημασία θέματος.....	8
1.2	Δομή Διπλωματικής	9
2	Πιεζοηλεκτρισμός	10
2.1	Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού.....	10
2.1.1	Τρόπος κατασκευής.....	11
2.1.2	Ιδιότητες.....	13
3	Κυματική Ενέργεια και αλληλεπίδραση σε Offshore κατασκευή.....	15
3.1	Ανεμογενής Κυματισμός	15
3.2	Σχηματισμός Κύματος	16
3.3	Μαθηματικό μοντέλο γραμμικών κυμάτων	17
3.3.1	Airy wave Theory	20
3.3.2	Περιβαλλοντικές Δυνάμεις.....	22
3.3.3	Υδροδυναμικοί Συντελεστές	25
4	Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων.....	28
4.1	COMSOL Multiphysics – SolidWorks - MATLAB	30
4.2	Υλικά Διάταξης	30
4.3	Κύκλωμα «Energy Harvesting».....	32
5	Εφαρμογές Πιεζοηλεκτρισμού.....	35
5.1	Τεχνολογίες υγείας	35
5.2	Επιστημονικός Εξοπλισμός	36
5.3	Μέτρηση Αποστάσεων	37
5.4	Συγκομιδή Ενέργειας «Energy Harvesting».....	38
5.4.1	Energy harvesting με χρήση πιεζο-κεραμικών υλικών	38
5.4.2	Σχεδιασμός Energy Harvesting Μοντέλου	42
6	Μοντελοποίηση.....	44
6.1	Στάδια κατασκευής μοντέλου	44
6.1.1	Καθορισμός περιβάλλοντος μοντελοποίησης.....	44
6.1.2	Σχεδίαση γεωμετρικού μοντέλου	45
6.1.3	Επιλογή υλικών διάταξης.....	50
6.1.4	Καθορισμός οριακών συνθηκών	51
6.1.5	Δημιουργία πλέγματος «Mesh».....	52
7	Επίλυση και Αποτελέσματα	54

7.1	Επίλυση.....	54
7.2	Αποτελέσματα.....	60
7.3	Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....	63
8	Βιβλιογραφία	66

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1 Κρυσταλλική δομή ενός πιεζοηλεκτρικού κεραμικού	10
Εικόνα 2-2 Πόλωση πιεζοηλεκτρικού υλικού	12
Εικόνα 2-3 Γραφική παράσταση Πόλωσης.....	12
Εικόνα 2-4 Γραφική παράσταση Field-Strain	13
Εικόνα 2-5 Δράσεις πιεζοηλεκτρικών στοιχείων	14
Εικόνα 3-1 Δημιουργία Ανεμογενούς Κυματισμού.....	17
Εικόνα 3-2 Βασικά χαρακτηριστικά κύματος.....	19
Εικόνα 3-3 Διάγραμμα της "Airy Wave" θεωρίας.....	20
Εικόνα 3-4 Εφαρμογές των κυματικών θεωριών.....	22
Εικόνα 3-5 Δυνάμεις σε εύκαμπτη δοκό	24
Εικόνα 3-6 Συντελεστής Δύναμης Αδράνειας	26
Εικόνα 3-7 Συντελεστής Δύναμης Αντίστασης.....	27
Εικόνα 3-8 Συντελεστής Δύναμης Ανύψωσης	27
Εικόνα 4-1 Μοντέλο Αεροπλάνου με χρήση FEM	28
Εικόνα 4-2 Διαχωρισμός Τομέων.....	29
Εικόνα 4-3 Bridge-type κύκλωμα ανορθωτή	33
Εικόνα 5-1 Ανιχνευτής Air Bubble σε ορό αίματος	36
Εικόνα 5-2 Πιεζοηλεκτρικές εφαρμογές στο Διάστημα.....	37
Εικόνα 5-3 Πιεζοηλεκτρικό Αισθητήρας Παρκαρίσματος.....	38
Εικόνα 5-4 Διαφορά Ηλεκτροστατικών, Ηλεκτρομαγνητικών και Πιεζοηλεκτρικών Ενεργειών	39
Εικόνα 5-5 Αξιοποίηση Βάδισης με σκοπό τη παραγωγή ενέργειας.....	40
Εικόνα 5-6 Πρόβολο με δύο στρώσεις PZT	41
Εικόνα 5-7 Κύμβαλο με τοξωτό σχήμα	41
Εικόνα 5-8 Πιεζοηλεκτρικός συλλέκτης τύπου κελύφους	42
Εικόνα 6-1 Ορισμός "Physics" μοντέλου	44
Εικόνα 6-2 Γραφικό περιβάλλον SolidWorks 2015.....	46
Εικόνα 6-3 Δημιουργία μοντέλου με Συναρμολόγηση "Assembly"	46
Εικόνα 6-4 Εισαγωγή υλικών	50
Εικόνα 6-5 Επιλογές μεθόδου "Piezoelectric Devices"	51
Εικόνα 6-6 Πλέγμα "A" μοντέλου.....	53
Εικόνα 6-7 Πλέγμα "B" μοντέλου.....	53
Εικόνα 7-1 Κατακόρυφη απεικόνιση Μετατόπισης και Ηλεκτρικού δυναμικού	61
Εικόνα 7-2 Οριζόντια απεικόνιση Μετατόπισης και Ηλεκτρικού δυναμικού.....	61
Εικόνα 7-3 Κατακόρυφη απεικόνιση Μετατόπισης και Ηλεκτρικού δυναμικού	62
Εικόνα 7-4 Οριζόντια απεικόνιση Μετατόπισης και Ηλεκτρικού δυναμικού.....	62
Εικόνα 7-5 Θαλάσσια κατασκευή επάνω από την επιφάνεια της θάλασσας ...	64

Εικόνα 7-6 Θαλάσσια κατασκευή βυθισμένη κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.....	64
Εικόνα 7-7 Εναλλακτική εφαρμογή πιεζοηλεκτρισμού εκμεταλλευόμενη την δύναμη του ανέμου.....	65

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η παραγωγή ηλεκτρικού δυναμικού με ταυτόχρονη εκμετάλλευση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και των θαλάσσιων ρευμάτων. Αυτή η συλλογή ενέργειας ή αλλιώς Energy Harvesting γίνεται με τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική με χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Δύο μοντέλα αναλύονται ύψους 3,0 m και πλάτους 0,30 m τοποθετημένα κάθετα στον πυθμένα της θάλασσας σε βάθος 3,00 m. Η ανάλυση έγινε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και με χρήση προγραμμάτων όπως COMSOL, SolidWorks και MATLAB. Το πιεζοηλεκτρικό υλικό είναι σε μορφή λεπτών πλακών που τοποθετούνται σε διαφορετικές θέσεις σε κάθε μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα στο μοντέλο «Α» το πιεζοηλεκτρικό υλικό τοποθετείται στην εξωτερική πλευρά της ελαστικής δοκού, ενώ στο μοντέλο «Β» έγινε η τοποθέτηση εσωτερικά της δοκού. Η δύναμη που ασκούν τα θαλάσσια ρεύματα ταλαντώνουν το σύστημα και παράγεται διαφορά δυναμικού η οποία και συλλέγεται.

Στο τέλος πάρθηκαν αποτελέσματα για τα δυο μοντέλα ξεχωριστά για συγκεκριμένες τιμές της κυματικής δύναμης, όπως ύψος κύματος, μήκος κύματος και περίοδος. Ωστόσο τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν να παράγουν συγκεκριμένες ποσότητες ενέργειας και σχεδόν πάντα χρειάζεται ενίσχυση. Ο μελλοντικός στόχος είναι να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία και να παράγονται όσο το δυνατόν μεγαλύτερες και πιο αξιοποιήσιμες ποσότητες ενέργειας.

Λέξεις κλειδιά : Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, κυματική ενέργεια, ηλεκτρικό δυναμικό θαλάσσιες κατασκευές, Energy Harvesting

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και σημασία θέματος

Η προσπάθεια του ανθρώπου για τη συνεχή άνοδο του βιοτικού του επιπέδου σε συνδυασμό με τη αύξηση του πληθυσμού της γης και των ενεργειακών αναγκών του, οδηγούν την ανθρωπότητα σε ένα μακρύ ενεργειακό χειμώνα. Συμφωνά με μελέτες, οι ενεργειακές ανάγκες αυξάνονται σχεδόν 3% κατά μέσο όρο παγκοσμίως κάθε χρόνο και προβλέπεται να συνεχιστεί αυτή η αύξηση και την επόμενη δεκαετία.

Με τα φυσικά καύσιμα να στερεούνται η στροφή του ανθρώπου προς τις εναλλακτικές πηγές ενέργειας είναι πλέον μονόδρομος. Η ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων για τον ενεργειακό εφοδιασμό του πλανήτη, που θα είναι βιώσιμες και υψηλού τεχνολογικού επιπέδου, ώστε να παράγουν ενέργεια σε ανταγωνιστικούς ρυθμούς είναι απαραίτητη. Τη λύση θα τη δώσει η εκμετάλλευση των ενεργειακών φορτίων που βρίσκονται στη φύση, όπως ο ήλιος, ο άνεμος και το νερό.

Οι διεγέρσεις που προκαλούνται από ροή αέρα και νερού είναι ένα συχνό φαινόμενο στη φύση όπως οι σημαία που ανεμίζει, τα φύλλα που πέφτουν από τα δέντρα, η κίνηση των θαλάσσιων φυκιών κ.α. Το βασικό ερώτημα είναι κατά πόσο είναι δυνατό να εκμεταλλευτεί ο άνθρωπος αυτή τη διαθέσιμη κινητική ενέργεια της ροής και να τη μετατρέψει σε ηλεκτρική. Αν αυτό είναι εφικτό τότε θα προκύψει μια καινούργια και αξιόπιστη πηγή ενέργειας για να καλύψει τις όλο και αυξανόμενες ανάγκες του σύγχρονου ανθρώπου. Σε αυτή τη μετάβαση από κινητική ενέργειας σε ηλεκτρική, δηλαδή στη συγκομιδή ενέργειας «Energy Harvesting», θα χρησιμοποιηθούν οι εφαρμογές του πιεζοηλεκτρισμού, καθώς είναι οι πλέον διαδεδομένες σε φαινόμενα παραγωγής ενέργειας από ταλαντώσεις.

Παρόμοιες εφαρμογές, συγκομιδής ενέργειας μέσω πιεζοηλεκτρικών συλλεκτών έχουν γίνει στο παρελθόν από ερευνητές όπως ο Taylor, ο οποίος παρουσίασε ένα μηχανισμό από εύκαμπτο πολυμερές φθοριούχο βινύλιο (PVDF) που το ονόμασε χαρακτηριστικά «χέλι». Το πιεζοηλεκτρικό πολυμερές μετέτρεπε τη ροή του νερού των ποταμών σε ηλεκτρική ενέργεια εκμεταλλευόμενο τα απόνερα των δινών που σχηματίζονταν από ένα στατικό κύλινδρο. Οι Weinstein και Goushcha ανέπτυξαν ένα σύστημα που συνέλεγε ενέργεια από τις ταλαντώσεις δοκών σε δίνες που σχηματιζόταν από τα απόνερα κινούμενου σωλήνα. Ο Murray και Rastegar παρουσίασαν ένα μοντέλο ηλεκτρικών συλλεκτών από πλωτές κατασκευές οι οποίες εκμεταλλεύονται την αλληλεπίδραση μεταξύ κυμάτων και κατασκευής. Το σύστημα διεγείρει δονούμενα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και παράγει

ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η καινοτόμα μέθοδος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στάθηκε το ερέθισμα για τη παρούσα διπλωματική εργασία.

Σκοπός της εργασίας είναι η μοντελοποίηση μιας αρθρωτής θαλάσσιας κατασκευής και η αναλυτική περιγραφή της συμπεριφοράς του πιεζοηλεκτρικού μηχανισμού που έχει τοποθετηθεί. Η κυματική ενέργεια ταλαντώνει τη κατασκευή και μέσω αυτής της διέγερσης το πιεζοηλεκτρικό υλικό παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Το παραγόμενο ηλεκτρικό φορτίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη κάλυψη ενεργειακών αναγκών απομακρυσμένων περιοχών.

1.2 Δομή Διπλωματικής

Το παρόν **κεφάλαιο 1** αποτελεί μια εισαγωγή του θέματος και παρουσιάζει τη δομή της εργασίας. Στο **κεφάλαιο 2** παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση του φαινομένου του πιεζοηλεκτρισμού. Στο **κεφάλαιο 3** δίνονται κάποιες θεωρητικές έννοιες για τη θαλάσσιας κυματική ενέργεια , καθώς και ο τρόπος που επηρεάζει τις θαλάσσιες κατασκευές στο χώρο δράσης της. Στο **κεφάλαιο 4** γίνεται μια εισαγωγή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων καθώς είναι και η βασική μέθοδος επίλυσης. Στο **κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται οι εφαρμογές του πιεζοηλεκτρισμού και η εκμετάλλευση του φαινομένου ως εναλλακτική πηγή ενέργειας. Στο **κεφάλαιο 6** ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή των μοντέλων που αναπτύχθηκαν στο περιβάλλον του COMSOL και τέλος στο **κεφάλαιο 7** ολοκληρώνεται η διπλωματική εργασία με τη παράθεση των συμπερασμάτων της μοντελοποίησης.

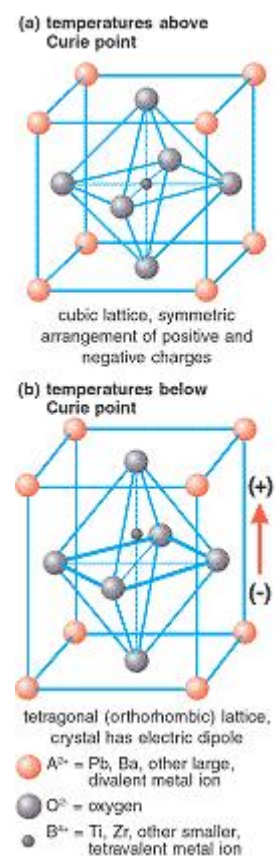
2 Πιεζοηλεκτρισμός

2.1 Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού

Το 1880, οι Jacques και Pierre Curie ανακάλυψαν ένα ασυνήθιστο χαρακτηριστικό σε κρυσταλλικά ορυκτά: όταν υπόκεινται σε μηχανική δύναμη, οι κρύσταλλοι αποκτούν ηλεκτρική πολικότητα. Η τάση και η συμπίεση παράγουν τάση αντίθετης πολικότητας, ανάλογη με την ασκούμενη δύναμη. Ακολούθως, επιβεβαιώθηκε το συμπέρασμα αυτής της σχέσης: όταν ένας από τους παραπάνω ενεργειακούς κρυστάλλους παραγωγής τάσης (Volt) εκτίθεται σε ηλεκτρικό πεδίο έχει τη τάση να επιμηκυνθεί ή να συρρικνωθεί σύμφωνα με τη πολικότητα του πεδίου. Επίσης η δύναμη του πεδίου στο οποίο λαμβάνει χώρα το φαινόμενο επηρεάζει αναλογικά. Αυτές οι παρατηρήσεις της συμπεριφοράς των κρυσταλλικών δομών υπό πίεση, επισημάναν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και το αντίστροφο φαινόμενο, αντίστοιχα, από την ελληνική λέξη «πιέζω» *piezein*.

Αν και η σημασία του μεγέθους της πιεζοηλεκτρικής τάσης, της κίνησης ή ακόμα και των δυνάμεων είναι μικρής κλίμακας συχνά χιάζεται ενίσχυση. Ωστόσο σταδιακά τα πιεζοηλεκτρικά υλικά σταδιακά προσαρμόζονται με εντυπωσιακά αποτελέσματα σε ευρείας κλίμακας εφαρμογές. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές εντοπισμού κίνησης, όπως αισθητήρες δύναμης ή μετατόπισης. Στις αρχές του 20ου αιώνα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά που βασίζονται σε μεταλλικά οξείδια και άλλα υλικά επέτρεψαν στους σχεδιαστές να χρησιμοποιήσουν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σε καινούργιες, πρωτοπόρες για την εποχή, εφαρμογές. Η σύσταση, το σχήμα, και οι διαστάσεις ενός πιεζο-κεραμικού στοιχείου μπορεί να τροποποιηθεί έτσι ώστε να φτάσει στις απαιτούμενες προδιαγραφές για το συγκεκριμένο σκοπό χρήσης. Το θετικό αυτών των υλικών είναι ότι παρουσιάζουν μια ανθεκτικότητα, είναι χημικά αδρανή και σχετικά φθηνά στην κατασκευή.

Τα κεραμικά που κατασκευάζονται από τιτανιούχο ζirkονιούχο μόλυβδο παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ευαισθησία και υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας, συγκριτικά με κεραμικά άλλης σύστασης και για αυτό το λόγο είναι αυτή τη στιγμή τα πιο διαδεδομένα σε χρήση πιεζοηλεκτρικά υλικά.



Εικόνα 2-1 Κρυσταλλική δομή ενός πιεζοηλεκτρικού κεραμικού

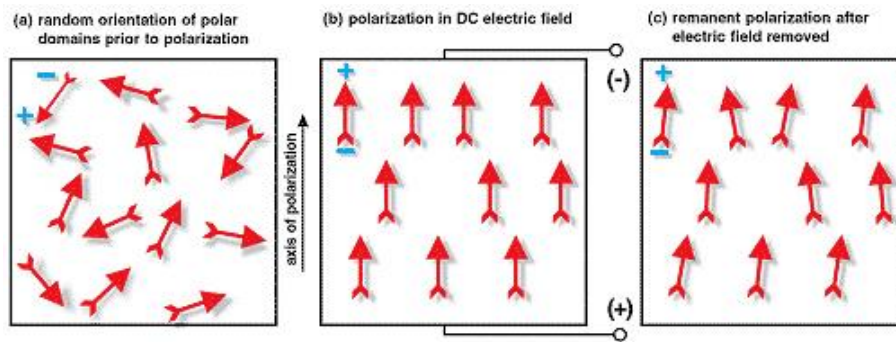
Από τις ενώσεις Perovskite-Zirconate-Titanate προκύπτει για συντομία η λέξη «PZT».

2.1.1 Τρόπος κατασκευής

Το παραδοσιακό πιεζοηλεκτρικό κεραμικό είναι μια μάζα από κεραμικούς κρυστάλλους περοβσκίτη (CaTiO_3), οι οποίες αποτελούνται από τετρασθενής μεταλλικά ιόντα, συνήθως τιτάνιο ή ζirkόνιο, σε ένα μεγαλύτερο δικτύωμα δισθενούς ιόντων όπως Βάριο (Ba) και O_2^- ιόντα. Η διάταξη τους στο χώρο παρουσιάζει κυβική συμμετρία στη κρυσταλλική τους μορφή και ο κάθε κρύσταλλος κάτω από ειδικές συνθήκες λειτουργεί ως δίπολο (εικόνα 2.1.β).

Για να προετοιμαστεί ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό, αναμιγνύονται εκλεκτές PZT σκόνες από τα δομικά στοιχεία των μεταλλικών οξειδίων σε προκαθορισμένες αναλογίες. Στη συνέχεια θερμαίνεται για να σχηματιστεί μια ομοιόμορφη σκόνη.

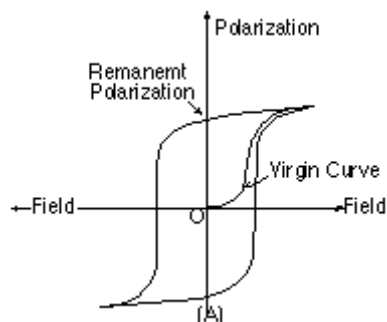
Η σκόνη που παράγεται αναμειγνύεται με μια οργανική ένωση και σχηματίζει δομικά στοιχεία με κατάλληλο σχήμα για χρήση (δίσκοι, ράβδοι, πλακέτες). Αυτά τα στοιχεία ακολουθούν ένα πρόγραμμα επεξεργασίας στο οποίο θερμαίνονται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία με αποτέλεσμα τα μικρά κομμάτια της πιέζο-σκόνης να λιώσουν και να το υλικό να πάρει τη πυκνή κρυσταλλική του μορφή. Τέλος τα στοιχεία υφίστανται την τελική τους επεξεργασία και τοποθετούνται σε επιφάνειες κατάλληλα επιλεγμένες. Το σημείο Curie, είναι το κρίσιμο σημείο του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου. Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες του σημείου αυτού, η κρυσταλλική δομή αποκτά τετραγωνική συμμετρία και λειτουργεί σαν δίπολο παρουσιάζοντας ηλεκτρική διπολική ροπή (εικόνα 2.1.β). Γειτονικά δίπολα με τοπική ευθυγράμμιση ονομάζονται τομείς. Αυτή η ευθυγράμμιση δίνει μια δικτυακή διπολική ροπή στο τομέα και αυτό σα συνέπεια μια δικτυακή πολικότητα. Η κατεύθυνση της πολικότητας σε γειτονικούς τομείς είναι τυχαία ωστόσο το κεραμικό στοιχείο δεν έχει συνολική πολικότητα (εικόνα 2.2.β).



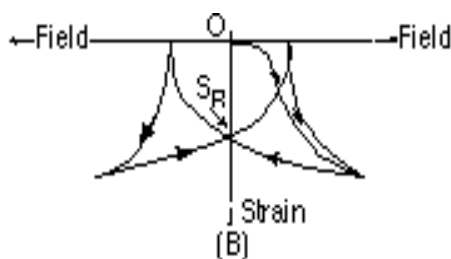
Εικόνα 2-2 Πόλωση πιεζοηλεκτρικού υλικού

Η ευθυγράμμιση των τομέων σε ένα πιέζο-κεραμικό στοιχείο γίνεται όταν εκτίθεται το στοιχείο σε ένα ισχυρό πεδίο συνεχούς ρεύματος, σε θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη από το σημείο Curie (εικόνα 2.2.β). Με αυτή τη πόλωση τα δίπολα του στοιχείου ευθυγραμμίζονται προς μια κατεύθυνση στο πεδίο. Όταν αφαιρεθεί αυτό το αρχικό ηλεκτρικό πεδίο τα περισσότερα δίπολα διατηρούν τη διάταξη τους (εικόνα 2.2.γ). Το στοιχείο πλέον παρουσιάζει μια μόνιμη πολικότητα και μια μόνιμη επιμήκυνση.

Όπως προαναφέρθηκε τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά δε παρουσιάζουν συμμετρία πάνω από τη θερμοκρασία Curie αντίθετα μια συμμετρική δομή πάνω από αυτή τη κρίσιμη θερμοκρασία. Με τα δίπολα τυχαία τοποθετημένα και προσανατολισμένα το στοιχείο δε παρουσιάζει κανένα πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Αντίθετα με την εφαρμογή συνεχόμενης τάσης παρουσιάζεται ευθυγράμμιση των δίπολων άρα πόλωση. Αυτό έχει ως συνέπεια το υλικό να παρουσιάζει πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες ακόμα και μετά την απομάκρυνση της αρχικής τάσης. Μετά τη πόλωση το υλικό διατηρεί μια πολικότητα και πίεση όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα (εικόνα 2.3 και 2.4).



Εικόνα 2-3 Γραφική παράσταση Πόλωσης

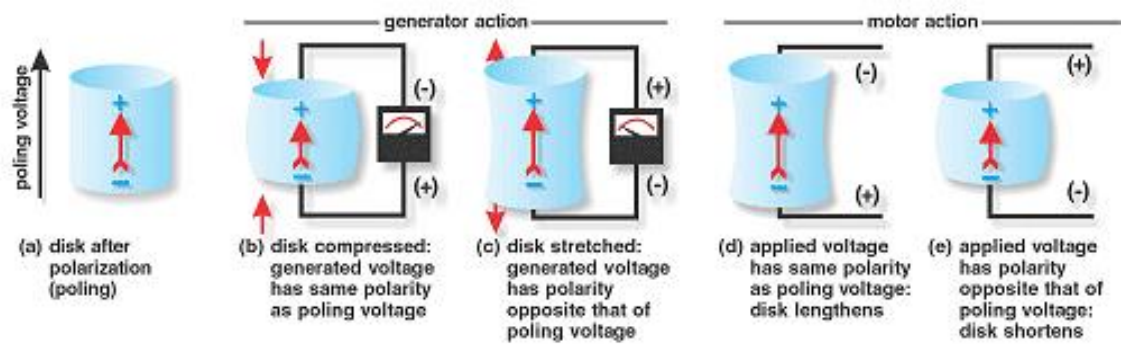


Εικόνα 2-4 Γραφική παράσταση Field-Strain

Καθώς στο «πολωμένο» κεραμικό ασκείται πίεση, το κρυσταλλικό δίκτυωμα παραμορφώνεται με αποτέλεσμα μερικοί τομείς να μεγαλώνουν σε βάρος άλλων. Αυτή η μεταβολή επηρεάζει τη συνολική διπολική ροπή του υλικού. Σε ένα συγκεκριμένο εύρος πίεσης, αυτή η αλλαγή της διπολικής ροπής αυξάνει τη ιδιότητα του πιεζοηλεκτρικού υλικού με συνέπεια τη πρακτική του χρήση καθώς η αντίδραση του υλικού είναι σχεδόν γραμμική.

2.1.2 Ιδιότητες

Μια μηχανική συμπίεση σε πολωμένο πιεζοηλεκτρικό υλικό αλλάζει τη διπολική ροπή, εμφανίζοντας ηλεκτρική τάση στο σύστημα. Συμπίεση με φορά ίδια με τη πολικότητα ή τέντωμα αντίθετο της κατεύθυνσης πολικότητας, παράγει τάση ίδιας πολικότητας με την αρχική τάση που είχε εφαρμοστεί για τη πόλωση του κεραμικού (εικόνα 2.5.β). Αυτή η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική τάση είναι οι βασικές δράσεις του φαινομένου του πιεζοηλεκτρισμού. Αυτή τη συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών υλικών αρχίζει να χρησιμοποιείται σε ευρύ φάσμα εφαρμογών στη βιομηχανία (συσκευές ανάφλεξης καυσίμων, solid state batteries, μηχανισμοί αισθητήρων δύναμης). Οι τιμές της ηλεκτρικής τάσης που προκύπτουν από τη συμπιεστική δύναμη, που εφαρμόζεται στο πιεζοηλεκτρικό υλικό, είναι ανάλογες των προδιαγραφών του. Το ίδιο ισχύει και στη περίπτωση που εφαρμόζουμε τάση και παράγεται πίεση στο υλικό. Σε αντίθετη εφαρμογή μπορεί να παραχθεί μηχανική ενέργεια από ηλεκτρική τάση. Σε τάση ίδιας πολικότητας με τη πολικότητα της τάσης πόλωσης του κεραμικού υλικού, το στοιχείο θα επιμηκυνθεί και η διάμετρος του θα γίνει μικρότερη. Με αντίθετη πολικότητα το στοιχείο θα γίνει μικρότερο και πιο φαρδύ (εικόνα 2.5δ και 2.5.ε). Αν συνδυαστούν αυτές οι δυο μεταβολές στο μέγεθος του υλικού με βάση τη πολικότητα της τάσης που του εφαρμόζεται, το αποτέλεσμα είναι μηχανική ενέργεια που μπορεί να εφαρμοστεί σε κατασκευές με βάση πιεζοηλεκτρικά υλικά.



Εικόνα 2-5 Δράσεις πιεζοηλεκτρικών στοιχείων

3 Κυματική Ενέργεια και αλληλεπίδραση σε Offshore κατασκευή

Οι μελέτες με θέμα την συγκομιδή ενέργειας από θαλάσσιους κυματισμούς με χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες : **παραγωγή δονήσεων** σε κατασκευή, όπως π.χ. δοκάρια, αρθρωτές κατασκευές από δίνες οι οποίες προκαλούνται από σώματα πακτωμένα σε σταθερά σημεία τόσο στην επιφάνεια όσο και στο πυθμένα της θάλασσας. Από **επίδραση θαλάσσιων κυμάτων** σε σηματοδότες στην επιφάνεια της θάλασσας και τέλος σε **προβόλους** κάθετα τοποθετημένους στην επιφάνεια της θάλασσας περιτριγυρισμένους με πιεζοηλεκτρικά υλικά που απορροφούν δονήσεις από μικρούς κυματισμούς κατά μήκος της κατασκευής.

Διαφορετικές συνθήκες διεξαγωγής των μετρήσεων παράγουν διαφορετικά αποτελέσματα όπως για παράδειγμα, την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια . Παράγοντες όπως οι διαστάσεις του προβόλου, το βάθος της θάλασσας, το ύψος του κύματος, ο λόγος του μήκους κύματος ως προς το βάθος, η αναλογία μαζών της κατασκευής και άλλα , έχουν άμεση σχέση στην απόδοση. Στο κεφάλαιο της μοντελοποίησης θα υπολογιστούν και αναλυθούν με κάθε λεπτομέρεια όλοι οι παραπάνω παράγοντες. Ακολουθεί μια γενική εισαγωγή των βασικών αρχών της κυματικής ενέργειας καθώς επίσης και την επίδραση που έχει σε offshore κατασκευές.

3.1 Ανεμογενής Κυματισμός

Στη δυναμική των ρευστών , τα κύματα που δημιουργούνται από τη δύναμη των ανέμων , είναι κύματα που εμφανίζονται στην ελεύθερη επιφάνεια ωκεανών, θαλασσών, ποταμών , λιμνών ακόμα και σε μικρότερες επιφάνειες υγρών μαζών. Τα επιφανειακά κύματα είναι αποτέλεσμα κυρίως αιολικών δυνάμεων που δρουν στην επιφάνεια του υγρού. Τα κύματα που σχηματίζονται στην επιφάνεια των ωκεανών , έχουν την ικανότητα να ταξιδέψουν χιλιάδες μίλια μέχρι να φτάσουν στη στεριά. Το μέγεθος των κυμάτων ποικίλει ανάλογα με τις συνθήκες δημιουργίας , από μικρά κυματάκια ύψους ενός μέτρου έως και 30 μέτρων σε συγκεκριμένες περιοχές.

Όταν ένα κύμα παράγεται και επηρεάζεται από τοπικούς ανέμους τότε καλείται κυματισμός θαλάσσης. Τη στιγμή που σταματάει να φυσάει ο άνεμος και έχει πλέον δημιουργηθεί το κύμα τότε ονομάζεται κύμα ωκεανού. Γενικότερα τα κύματα των ωκεανών αποτελούνται από κύματα αέρα που δεν επηρεάζονται από τοπικούς ανέμους. Έχουν δημιουργηθεί κάπου αλλού , υπό άλλες συνθήκες ακόμα και πολύ καιρό πριν.

Οι κυματισμοί διαφέρουν μεταξύ τους καθώς οι συνθήκες που δημιουργούνται είναι διαφορετικές. Το ύψος, η διάρκεια και το σχήμα είναι τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν αυτό το φυσικό φαινόμενο. Το κύμα

μπορεί να περιγραφεί ως μια στοχαστική διαδικασία , σε συνδυασμό με τους νόμους της φυσικής που το επηρεάζουν από την παραγωγή μέχρι το τελικό στάδιο εκδήλωσης του. Την «εξίσωση» επηρεάζουν και άλλες μεταβλητές όπως η κινητικότητα που εμφανίζεται στην περιοχή εκδήλωσης του φαινομένου, η ταχύτητα και η πίεση του υγρού. Για τη καλύτερη περιγραφή αυτού του φαινομένου έχει αναπτυχθεί το αντίστοιχο μαθηματικό μοντέλο ή αλλιώς κυματικό μοντέλο.

3.2 Σχηματισμός Κύματος

Κατά τη γένεση των ανεμογενών κυματισμών γίνεται μεταφορά ενέργειας από τα κινούμενα κατώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα στις επιφανειακές θαλάσσιες μάζες. Το αποτέλεσμα του κύματος που εμφανίζεται στην ακτή , είναι το τελικό στάδιο του φαινομένου. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη δομή της ροής του κύματος είναι οι εξής :

- Η ταχύτητα ή η δύναμη του ανέμου σε σχέση με τη ταχύτητα του κύματος
- Το μήκος αναπτύγματος θαλάσσιου πεδίου (Fetch)
- Η επιφάνεια που επηρεάζεται από το «Fetch»
- Η διάρκεια του ανέμου που πνέει σε μια περιοχή
- Το βάθος του νερού

Οι παραπάνω παράγοντες αλληλεπιδρούν και καθορίζουν τη δομή ενός κύματος και περιγράφεται από τις παρακάτω ιδιότητες :

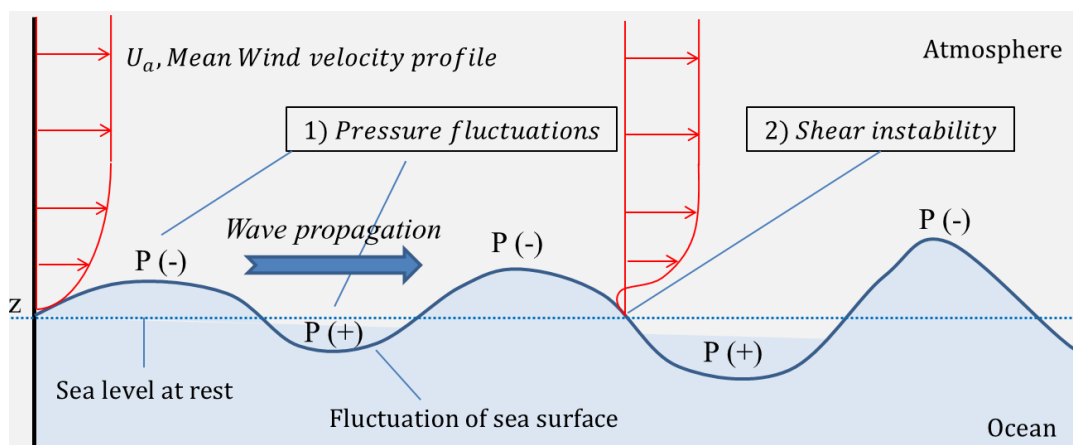
- Μήκος κυματισμού
- Ύψος κυματισμού
- Περίοδος κυματισμού
- Κατεύθυνση διάδοσης κυματισμού

Ο μηχανισμός γένεσης ανεμογενών κυματισμών όπως τον παρουσίασαν οι Philips 1957, Miles 1960 έχει τις εξής φάσεις :

- Τυρβώδες οριακό στρώμα πνοής ανέμου
- Διακυμάνσεις πεδίου πίεσης στην ελεύθερη επιφάνεια
- Δημιουργία ρυτιδώσεων της ελεύθερης επιφάνειας
- Συντονισμός ρυτιδώσεων (τραχεία επιφάνεια) και τυρβωδών δινών της ροής του ανέμου
- Σταδιακή εξέλιξη και αύξηση (γραμμική) των ρυτιδώσεων σε κύματα
- Αποκόλληση της ροής του ανέμου στην κορυφή του κύματος και δημιουργία κυκλοφορίας αέρα στην περιοχή πάνω από την κοιλάδα του κύματος

- Δημιουργία πεδίου πίεσης εκτός φάσης με την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας που προκαλεί περαιτέρω αύξηση (εκθετική) του ύψους κύματος

Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζεται η δημιουργία ενός κύματος καθώς επίσης και οι εξωτερικοί παράγοντες που επηρεάζουν το συγκεκριμένο φαινόμενο. Όπως είναι λογικό, η κατεύθυνση διάδοσης του κύματος είναι ίδια με τη κατεύθυνση της ταχύτητας του ανέμου.



Εικόνα 3-1 Δημιουργία Ανεμογενούς Κυματισμού

3.3 Μαθηματικό μοντέλο γραμμικών κυμάτων

Ένα αρμονικό κύμα που ταξιδεύει μέσω του υγρού στοιχείου πολλαπλασιάζεται με δεδομένα χαρακτηριστικά. Κατά συνέπεια έχει ευδιάκριτο μήκος κύματος, περίοδο κύματος και ύψος κύματος.

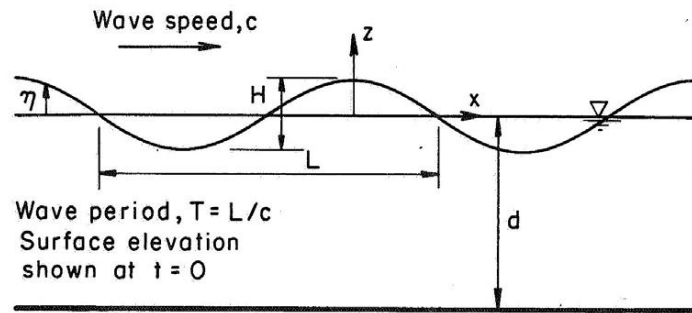
- ❖ **Μήκος κύματος** : Το μήκος κύματος λ είναι η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κορυφών κύματος.
- ❖ **Περίοδος κύματος** : Η περίοδος κύματος T είναι η χρονική διάρκεια που χρειάζονται δυο διαδοχικές κορυφές κύματος να περάσουν από ένα συγκεκριμένο σημείο.
- ❖ **Ταχύτητα κύματος** : Η παραγόμενη ταχύτητα του κύματος, ονομάζεται φάση ταχύτητας ή ταχύτητα κύματος «celerity» και ο τύπος της είναι $c = \frac{\lambda}{T}$.
- ❖ **Συχνότητα κύματος** είναι η αντίστροφη της κυματικής περιόδου με τύπο $f = \frac{1}{T}$.
- ❖ **Γωνιακή συχνότητα** : $\omega = \frac{2\pi}{T}$.
- ❖ **Αριθμός κυμάτων** : $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

- ❖ **Ανύψωση επιφάνειας :** Η ανύψωση επιφάνειας $z = n(x, y, t)$ είναι η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας της ήρεμης θάλασσας και του επιπέδου του κύματος.
- ❖ **Σημειακό ύψος κύματος A_c** είναι η απόσταση μεταξύ επιφάνειας ήρεμης θάλασσας και της κορυφής του κύματος.
- ❖ **Βάθος κύματος A_T** είναι η απόσταση από την επιφάνεια ήρεμης θάλασσας μέχρι το ενδιάμεσο βάθος.
- ❖ **Συνολικό ύψος κύματος :** Το ύψος του κύματος H είναι η κάθετη απόσταση από το ενδιάμεσο βάθος ως τη κορυφή $H = A_c + A_T$.

Αναλυτικές κυματικές θεωρίες έχουν αναπτυχθεί για αμετάβλητο βάθος νερού d . Το αντικείμενο κάθε θεωρίας είναι να καθορίσει τη σχέση μεταξύ T και λ καθώς επίσης της κίνησης των σωματιδίων του νερού κατά τη διάρκεια της ροής.

Η σχέση της διασποράς είναι η σχέση μεταξύ της περιόδου του κύματος, του μήκους κύματος και του ύψους κύματος και ένα δεδομένο βάθος κύματος d . Τα μη-γραμμικά κύματα παρουσιάζουν ασυμμετρία δηλαδή $A_c > A_T$ για αυτό το λόγο η σχέση διασποράς είναι μια λειτουργική σχέση των T , λ και H . Ο μέσος όρος ενεργειακής πυκνότητας E είναι το άθροισμα του μέσου όρου κινητικής ενέργειας και της δυνητικά αξιοποιήσιμης κυματικής ενέργειας που παράγεται σε μια μοναδιαία επιφάνεια. Η ροή ενέργειας P είναι ο μέσος όρος της μεταδιδόμενης ενέργειας ανά μονάδα πλάτους ενός επιπέδου που είναι κανονικό με τη κατεύθυνση παραγωγής των κυμάτων. Τέλος ορίζεται η ταχύτητα της μεταφοράς κυματικής ενέργειας $c_g = P/E$.

Ωστόσο οι κυματισμοί που δημιουργούνται από την επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας, δεν είναι αρμονικοί (μονοχρωματικοί). Σε μη αρμονικά ή τυχαία κύματα, η ελεύθερη ανύψωση της θάλασσας είναι μια τυχαία διαδικασία. Το τοπικό μήκος κύματος μπορεί να οριστεί ως η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών σημείων όπου μηδενίζεται το κύμα ως προς την επιφάνεια ηρεμίας του υγρού. Επίσης τα σημεία κορυφής και βάθους δεν είναι σταθερά και καθορίζονται από το μέσο όρο ανύψωσης και βύθισης αντίστοιχα.



Εικόνα 3-2 Βασικά χαρακτηριστικά κύματος

Τρεις παράγοντες καθορίζουν ποια κυματική θεωρία θα εφαρμοστεί σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Αυτές είναι το ύψος κύματος H , η περίοδος κύματος T και το βάθος του ύδατος d . Αυτοί οι παράμετροι χρησιμοποιούνται για να ορίσουν τρεις καινούργιες παραμέτρους που με τη σειρά τους καθορίζουν τα όρια εφαρμογής των διαφορετικών θεωριών.

- Παράμετρος καμπυλότητας κυματισμού, «steepness» $S = 2\pi (H/g T^2) = H/\lambda_0$
- Παράμετρος αβαθούς ύδατος $\mu = 2\pi (d/g T^2) = d/\lambda_0$
- Αριθμός Ursell $U_R = (H \lambda^2)/d^3$

Οι τρεις παράμετροι δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Η σχέση που τους συνδέει δίδεται από τον παρακάτω τύπο.

$$U_R = S/\mu^3$$

Ακολουθεί Πίνακας με τις Κλίμακες Εφαρμογής των θεωριών. Η παρούσα διπλωματική εστιάζει στη εφαρμογή της Linear wave Theory όπου εφαρμόζεται τόσο για βαθιά όσο και για ρηχά νερά με εύρος παραμέτρων όπως φαίνεται παρακάτω.

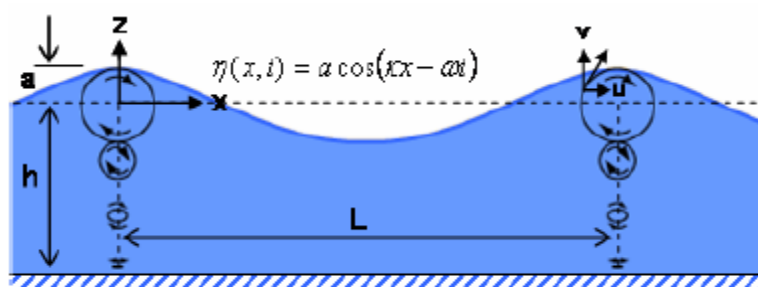
Κλίμακες Εφαρμογής θεωριών κυμάτων		
Θεωρία	Εφαρμογή	
	Βάθος	εύρος
Linear (Airy) wave	Βαθιά και Ρηχά νερά	$S < 0.006$ $S/\mu < 0.03$
2nd order Stokes wave	Βαθιά νερά	$U_r < 0.65$ $S < 0.04$
5th order Stokes Wave	Βαθιά νερά	$U_r < 0.65$ $S < 0.14$
Cnoidal theory	Ρηχά νερά	$U_r > 0.65$ $\mu < 0.125$

Πίνακας 1 Κλίμακες εφαρμογής θεωριών Κυμάτων

3.3.1 Airy wave Theory

Έχουν αναπτυχθεί αρκετές κυματικές θεωρίες για να περιγράψουν τα κινούμενα σωματίδια του νερού σε σχέση με τα κύματα των ωκεανών διαφορετικής κλίμακας, πολυπλοκότητας και επιπέδου αποδοχής. Μερικές από τις πιο γνωστές είναι η «Airy theory», η «Stokes Theory», η «Stream-Function Theory» και η «Cnoidal Theory». Η πολυπλοκότητα των μη γραμμικών κυμάτων στην επιφάνεια της θάλασσας που επηρεάζεται από πολλά φαινόμενα όπως για παράδειγμα οι τοπικές καταιγίδες δημιουργούν πρόβλημα στη μοντελοποίηση και τη μελέτη τους. Για αυτό το λόγο γίνεται μια προσέγγιση των κυμάτων σε μικρότερα, με διαφορετικές παραμέτρους αλλά υπό τις γενικές συνθήκες μιας από τις παραπάνω θεωρίες κυμάτων.

Η πιο απλή κυματική θεωρία λαμβάνεται με τη θεώρηση ότι το ύψος των κυμάτων είναι αρκετά μικρότερο από το μήκος κύματος και του βάθους του υγρού. Αυτή η θεωρία αναφέρεται και ως μικρού εύρους κυματική θεωρία, θεωρία γραμμικών κυμάτων ή «Airy Theory». Για συνηθισμένα γραμμικά κύματα το σημειακό ύψος κύματος A_c είναι ίσο με το σημειακό βάθος κύματος A_T άρα $a = A_c + A_T$ και το συνολικό ύψος ορίζεται ως $H = 2a$. Η ανύψωση επιφάνειας $\eta(x, t) = a \cos \Theta$ όπου $\Theta = k(x \cos \beta) - \omega t$ και β είναι η κατεύθυνση αναπαράγωγής του κύματος μετρώντας από τον άξονα x' .



Εικόνα 3-3 Διάγραμμα της "Airy Wave" θεωρίας

Η σχέση μεταξύ της περιόδου του κύματος T και του μήκους κύματος λ για γραμμικά κύματα με πεπερασμένο βάθος νερού d :

$$T = [(g/2\pi\lambda) \tanh(2\pi d/\lambda)]^{-1/2}$$

όπου $\omega = 2\pi/T$ και $k = 2\pi/\lambda$ και η επιτάχυνση της βαρύτητας g είναι ίση με $9,8 \text{ m/s}^2$.

Άρα $\omega = [g k \tanh(k d)]^{1/2}$ ή $\omega^2 = g k \tanh(k d)$

Μια ακριβής προσέγγιση του μήκους κύματος λ είναι και της ταχύτητας c :

$$\lambda = T(g d)^{1/2} (f(\tilde{\omega}) / 1 + \tilde{\omega} f(\tilde{\omega}))^{1/2}$$

όπου $f(\tilde{\omega}) = 1 + \sum_{n=1}^4 a_n \tilde{\omega}^n$, $\tilde{\omega} = (4\pi^2 d) / (g T^2)$ και a_n γνωστά

$$c = \sqrt{\left(\frac{g\lambda}{2\pi}\right) \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)}.$$

Σε περίπτωση που $d > \lambda/2$ οι παραπάνω σχέσεις απλοποιούνται στις παρακάτω μορφές :

$$c = \sqrt{g\lambda/2\pi} = g/\omega \text{ και } \lambda = (g T^2)/2\pi \text{ ή } \lambda = 1.56T^2, \lambda(\text{m}) \text{ και } T(\text{s}).$$

Οι ταχύτητες κατά μήκος του κύματος $u(x, t)$ και κάθετα στο κύμα $v(x, t)$, των σωματιδίων του νερού σε ένα «Airy» κύμα στη θέση z όταν μετράται από το επίπεδο ηρεμίας του νερού (Mean Water Level) σε βάθος d χαρακτηρίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις :

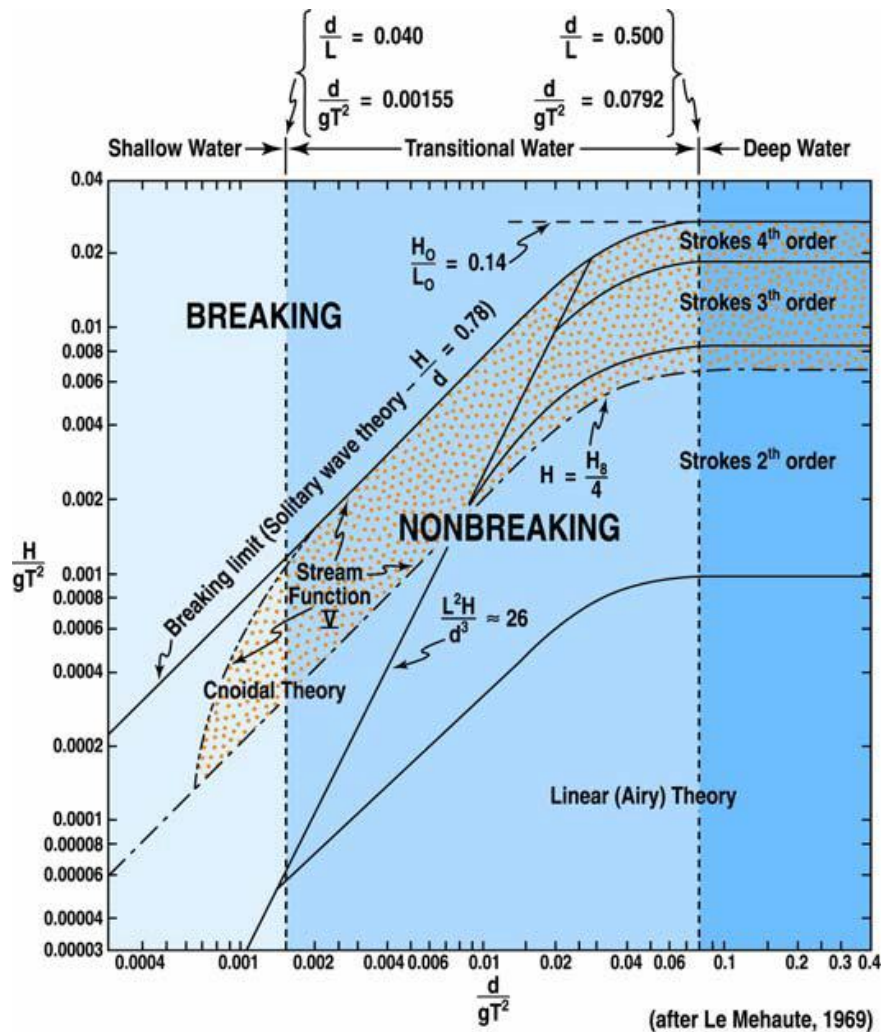
$$u(x, t) = \frac{\alpha \omega \cosh(k(z + d))}{\sin(kd)} \cos(kx - \omega t)$$

$$v(x, t) = \frac{\alpha \omega \sinh(k(z + d))}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t)$$

Επίσης ο τύπος της επιτάχυνσης δίδεται από τον παρακάτω τύπο :

$$\dot{u}(x, t) = \frac{\alpha \omega^2 e^{kz} \cosh(k(z + d))}{\sin(kd)} \sin(kx - \omega t)$$

Ο Le Mehaute (1969) παρουσίασε ένα διάγραμμα με τις δυνατότητες εφαρμογής των διαφόρων κυματικών θεωριών, χρησιμοποιώντας τη παράμετρο καμπυλότητας του κυματισμού ως προς τη μεταβλητή του βάθους.



Εικόνα 3-4 Εφαρμογές των κυματικών θεωριών

3.3.2 Περιβαλλοντικές Δυνάμεις

Όταν οι διαδικασίες εκτελούνται σε θαλάσσιο περιβάλλον, τα φορτία κυμάτων, η ροή υγρού και η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού ασκούν δυνάμεις σε ένα αντικείμενο που βρίσκεται σε αυτό το περιβάλλον. Αυτές τις δυνάμεις καλούνται περιβαλλοντικές. Είναι σημαντική η κατανόηση της φύσης και ο προσδιορισμός της έκτασης των δυνάμεων με σκοπό την σωστή εφαρμογή τους σε θαλάσσιες επιχειρήσεις.

3.3.2.1 Άνωση

Η υδροστατική πίεση είναι αποτέλεσμα της πυκνότητας του υγρού. Αυτή η πίεση δρα προς όλες τις κατευθύνσεις και εξαρτάται από το βάθος στο οποίο είναι βυθισμένο το αντικείμενο καθώς επίσης και τη πυκνότητα του υγρού. Σε ένα στερεό αντικείμενο, η υδροστατική πίεση που ασκείται στην πάνω μεριά του είναι μικρότερη από αυτή που ασκείται στην κάτω μεριά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ασκείται μια δύναμη με φορά προς τα πάνω με συγκεκριμένη

τιμή. Αυτή η δύναμη είναι γνωστή σαν «Άνωση» και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο :

$$f_{Bi} = \rho g V V \quad \text{όπου } F_B = 0 \text{ N για } i = 1, 2$$

3.3.2.2 Δύναμη Ροής

Μια ιδιότητα της δύναμης ροής των κυμάτων είναι ότι μπορεί να ταξιδέψει με σταθερή ταχύτητα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Εξαρτάται από το βάθος σύμφωνα με το φαινόμενο οριακών στρωμάτων. Η συνολική ταχύτητα ροής είναι αποτέλεσμα θερμοκρασίας, επιφανειακού αέρα και ταχύτητα ρευμάτων.

$$V_{Current} = V_{temp} + V_{wind} + V_{tides}$$

Η παρουσία αυτής της σταθερής ταχύτητας, ασκεί μια δύναμη αντίστασης με κατεύθυνση τη ροή του υγρού, στον άξονα του αντικειμένου. Οι εξισώσεις της απλής δύναμης αντίστασης, που εφαρμόζονται σε μια λεπτή κυκλική κατασκευή με διάμετρο D και σε ένα μικρό αντικείμενο τριών διαστάσεων με επιφάνεια S, είναι οι παρακάτω :

$$f_C = \frac{1}{2} \rho C_D D u(t)^2$$

$$f_C = \frac{1}{2} \rho C_D S u(t)^2$$

3.3.2.3 Φορτία Κυμάτων

Ένα αντικείμενο βυθισμένο ή στην επιφάνεια του νερού είναι εκτεθειμένο σε ένα αριθμό διαφορετικών δυνάμεων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Τα υφιστάμενα φορτία των κυμάτων εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συνολικής θαλάσσιας κατασκευής (το μέγεθος του αντικειμένου σε σχέση με το μήκος του κύματος και τον προσανατολισμό του σε σχέση με τη διάδοση του κύματος) όπως επίσης αν η κατασκευή είναι ευλύγιστη ή άκαμπτη. Κατασκευές μεγάλων διαστάσεων που είναι ικανές να μπλοκάρουν το πλήττων κύμα ($\frac{D}{L} > 0.2$ όπου D είναι η διάμετρος του αντικειμένου και L είναι το μήκος κύματος) δεν επηρεάζονται, ενώ μικρότερες κατασκευές υπόκεινται στα «Morison» φορτία.

Το διάνυσμα της δύναμης που ασκείται σε ένα αντικείμενο μπορεί να αναλυθεί σε περισσότερα όπως το διάνυσμα κάθετης δύναμης f_N , το διάνυσμα εφαπτόμενης δύναμης f_T και το διάνυσμα της δύναμης ανύψωσης f_L . Για τον υπολογισμό του μέτρου αυτών των δυνάμεων χρησιμοποιείται η εξίσωση Morison.

$$f(z, t) = f_I(z, t) + f_D(z, t)$$

Η εξίσωση περιγράφει το μέτρο της συνολικής δύναμης ως το άθροισμα της **δύναμης αδράνειας** $f_I(z, t)$ αναλογική της επιτάχυνσης και της **δύναμης αντίστασης** $f_D(z, t)$ αναλογικής του τετραγώνου της ταχύτητας και υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους :

$$f_I(z, t) = \frac{\pi}{4} \rho C_M D^2 \ddot{u}(z, t)$$

$$f_D(z, t) = 0.5 \rho C_D D u(z, t) |u(z, t)|$$

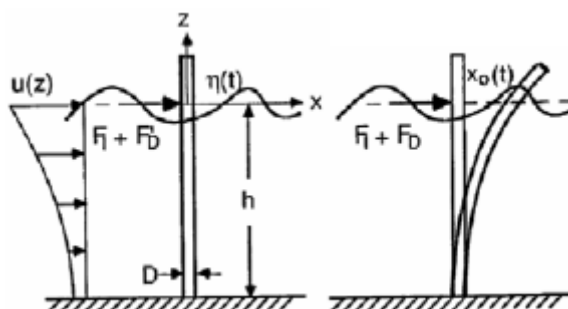
Η εγκάρσια δύναμη ανύψωσης μπορεί να εμφανιστεί σε θαλάσσιες κατασκευές σαν αποτέλεσμα εναλλασσόμενων σχηματισμών από δίνες «vortex» κατά τη ροή των κυμάτων. Ο τύπος της δύναμης δίδεται παρακάτω όπου U_m είναι η μέγιστη κατά μήκος ταχύτητα των σωματιδίων του νερού, σε ένα αντικείμενο με διάμετρο D .

$$f_L = 0.5 \rho C_L D U_m |U_m|$$

Οι συντελεστές C_D , C_L και C_M ονομάζονται υδροδυναμικοί συντελεστές και θα αναφερθούν αναλυτικότερα στη παρακάτω ενότητα του κεφαλαίου.

Σε μια θαλάσσια βυθισμένη κατασκευή η οποία είναι εύκαμπτη δηλαδή προσαρμόζεται με τις δυνάμεις που της ασκούνται, όπως για παράδειγμα η μετατόπιση κατά μήκος του άξονα z από την ελεύθερη επιφάνεια δίδεται από την εξίσωση $x(z, t)$. Έτσι η δύναμη που ασκείται κατά μήκος ή επάνω στην επιφάνεια της δοκού $f(z, t)$, από την επίδραση των κυμάτων δίδεται με τη βοήθεια της εξίσωσης Morison. Με δεδομένη τη σχετική ταχύτητα στη θέση z η τελική μορφή είναι :

$$f(z, t) = \frac{\pi}{4} \rho C_M D^2 \ddot{u}(z, t) + \frac{1}{2} \rho C_D D (u(z, t) - \dot{x}(z, t)) |u(z, t) - \dot{x}(z, t)|$$



Εικόνα 3-5 Δυνάμεις σε εύκαμπτη δοκό

3.3.3 Υδροδυναμικοί Συντελεστές

Όταν γίνεται χρήση της εξίσωσης Morison για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών φορτίων του κύματος σε μια κατασκευή, θα πρέπει να υπολογιστούν οι συντελεστές ισχύος (δύναμης) C . Αυτοί οι συντελεστές είναι μεταβαλλόμενοι για κάθε δύναμη όπως για παράδειγμα η δύναμη f_D έχει τον δικό του συντελεστή C_D . Οι υδροδυναμικοί συντελεστές είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι για τον υπολογισμό των δυνάμεων. Η αναπαράσταση τους σε μαθηματικό μοντέλο είναι ένας πίνακας 6×6 . Οι συντελεστές είναι συμμετρικοί άρα $C_{ij} = C_{ji}$. Αυτό αμέσως περιορίζει τον συνολικό αριθμό του πίνακα σε 21, διαφορετικούς μεταξύ τους.

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix}$$

Έως τώρα δεν έχει προσδιοριστεί μια συγκεκριμένη θεωρητική μέθοδος που να καθορίζει τον πίνακα σταθερών. Οι περισσότερες προσεγγίσεις βασίζονται σε εμπειρικούς υπολογισμούς. Ο O. Øritsland και η ομάδα του πραγματοποίησαν ένα μεγάλο αριθμό πειραμάτων σε μοντέλα με διαφορετικές παραμέτρους με σκοπό να καθορίσουν τους υδροδυναμικούς συντελεστές. Για ταλαντευόμενα σώματα, όλοι οι παράγοντες επηρεάζουν τους συντελεστές. Για σώματα σε σταθερή ροή μόνο η γεωμετρία του σώματος καθώς και ο αριθμός Reynold λαμβάνονται υπόψη.

Οι σταθερές παίρνουν διάφορες τιμές που εξαρτώνται από :

- **Αριθμός Reynolds, (Re)** Ποσότητα χωρίς διαστάσεις στο χώρο που περιγράφει τον τύπο του υγρού $Re = v \frac{D}{\nu}$, όπου v = ταχύτητα ροής (m/s), D = διάμετρος αντικειμένου (m) και ν = κινηματικό ιξώδες (m^2/s).

$Re < 2 \times 10^5$ Subcritical

$2 \times 10^5 < Re < 5 \times 10^5$ Critical

$5 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$ Supercritical

$3 \times 10^6 < Re$ Post-Supercritical

- **Αριθμός Keulegan-Carpenter (KC)** Αριθμός που παρουσιάζει την έλλειψη του δονούμενου κύματος $KC = u_{max} \frac{T}{D}$, όπου T = περίοδος

κύματος (s), u_{\max} = μέγιστη ταχύτητα σωματιδίων νερού (m/s). Όταν η τιμή του KC είναι μεγαλύτερη από 30, τότε το κύμα έχει επίπεδο ελλειπτικό σχήμα. Αν το KC είναι κοντά στη τιμή 1 τότε συνεπάγεται κυκλική κίνηση κύματος.

- **Παράμετρος τραχύτητας** ($\frac{k}{D}$) $\Delta = \frac{k}{D}$ όπου k = ύψος τραχύτητας (m).
- **Σχήμα και Γεωμετρία** του σώματος, οι διαστάσεις και η δομή για παράδειγμα μοντέλα τριών διαστάσεων, σχήμα(κυκλικό , σφαιρικό).

Για $KC < 10$ κυριαρχεί η δύναμη της αδράνειας, για $10 < KC < 20$ τόσο η δύναμη της αδράνειας όσο και η δύναμη της αντίστασης επιδρούν στο σύστημα και για $KC > 20$ η δύναμη της αντίστασης σταδιακά κυριαρχεί.

Πιο συγκεκριμένα ο Sarpkaya (1976) πραγματοποίησε πειράματα σε οριζόντιους δοκιμαστικούς κυλίνδρους σε ελεγχόμενα ταραγμένα ύδατα. Ακόμα και σήμερα αυτοί οι πειραματισμοί παραμένουν ως οι πλέον αξιόπιστοι σχετικά με τους συντελεστές δύναμης Morison. Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται οι συντελεστές C_D , C_M και C_L συναρτήσει των αριθμών Re και KC. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι όσο αυξάνεται το C_D τόσο μειώνεται το C_M και αντίστροφα όπως επίσης και ότι η διακύμανση των τιμών είναι [0.8-2.0]. Για τον συντελεστή C_L μπορεί να αναφερθεί η άμεση εξάρτηση του από τις συνθήκες και τις παραμέτρους ροής του υγρού.

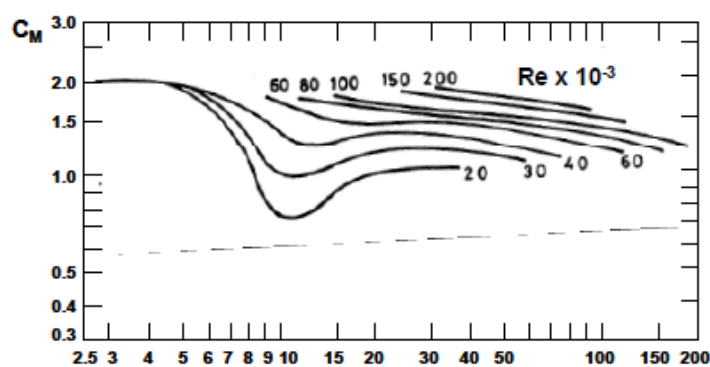
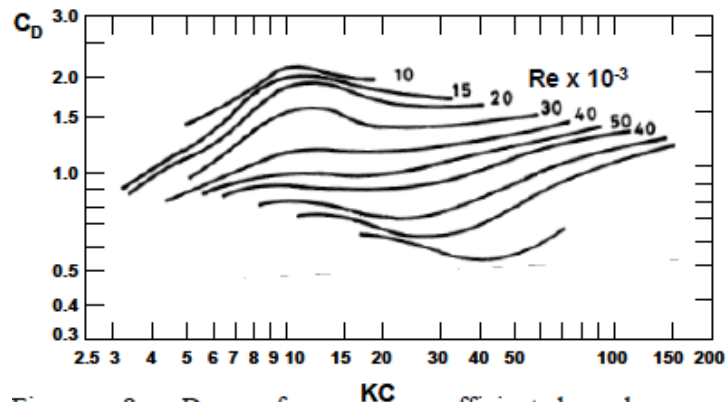
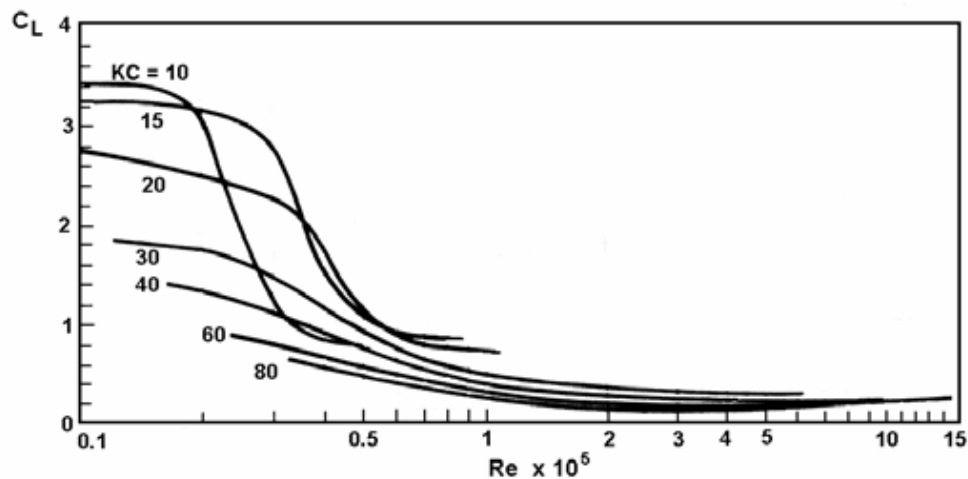


Figure 7: Inertia force KC coefficient dependence on

Εικόνα 3-6 Συντελεστής Δύναμης Αδράνειας



Εικόνα 3-7 Συντελεστής Δύναμης Αντίστασης



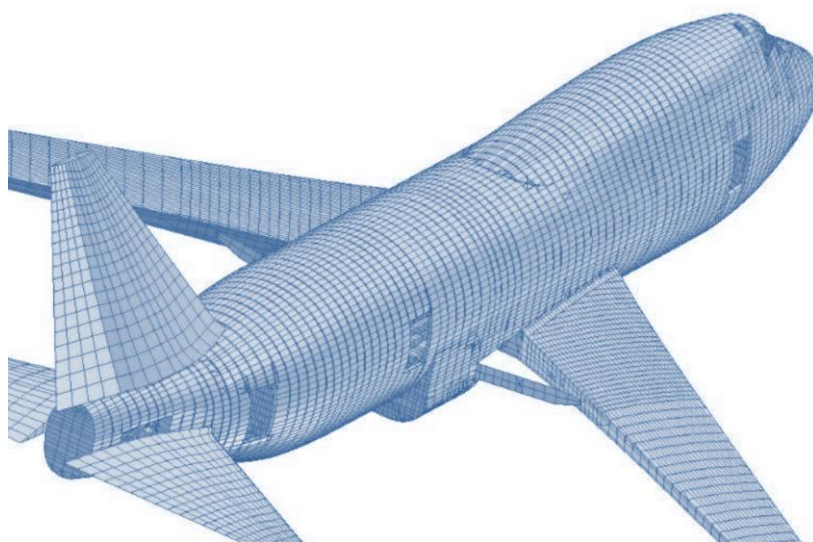
Εικόνα 3-8 Συντελεστής Δύναμης Ανύψωσης

Η εξίσωση του Morison έθεσε τις βάσεις για τη σχεδίαση πλήθος από θαλάσσιες κατασκευές σε παγκόσμια κλίμακα. Η θεωρία του λειτούργησε ως σημαντικός παράγοντας στην βάση της υποδομής για τη θεμελίωση βασικών αρχών της μηχανικής θαλάσσιων κατασκευών. Παρακάτω στο κεφάλαιο της μοντελοποίησης και πιο συγκεκριμένα στην ανάλυση των δεδομένων της δύναμης που ασκείται στο κατακόρυφο κύλινδρο, γίνεται ανάλυση των δεδομένων με βάση μικρά ανεμογενή κύματα και τις επιπτώσεις που έχουν σύμφωνα με τις αρχές του Morison.

Συμπερασματικά, το υδάτινο περιβάλλον ασκεί δυνάμεις σε κάθε σώμα που βρίσκεται μέσα του. Διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα θα αντιμετωπίσουν διαφορετικά μεγέθη δυνάμεων. Κρίνεται αναγκαία μια προσεκτική και λεπτομερή ανάλυση των δυνάμεων με σκοπό τη σχεδίαση του επιθυμητού μοντέλου.

4 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Η ανάγκη μελέτης πολύπλοκων κατασκευαστικών προβλημάτων οδήγησε στη ανάπτυξη διαφόρων προσεγγιστικών μεθόδων και πιο συγκεκριμένα στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (finite elements). Οι εφαρμογές της μεθόδου έχουν μεγάλο φάσμα, από τη παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε κατασκευές μέχρι ανάλυση πεδίων θερμότητας και προβλημάτων ροής υγρών. Μη-γραμμικά προβλήματα, δυναμική συμπεριφορά στοιχείων ταλάντωση και μελέτη συχνοτήτων είναι μερικά από τα πεδία ανάλυσης της μεθόδου. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα, ωστόσο το μειονέκτημα της είναι οι αυξημένες ανάγκες σε υπολογιστική ισχύ, κυρίως σε σύνθετα μοντέλα.

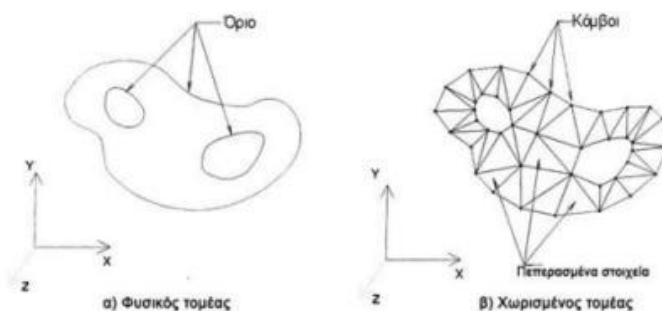


Εικόνα 4-1 Μοντέλο Αεροπλάνου με χρήση FEM

Η βασική ιδέα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων προήλθε από την εξέλιξη στη δομική ανάλυση αεροσκαφών. Το 1941, ο Hrenikoff παρουσίασε τη μέθοδο των δικτυωμάτων που εφαρμόζε στη λύση προβλημάτων ελαστικότητας. Το 1943, μια εργασία του Courant χρησιμοποιούσε πολυωνυμική παρεμβολή σε τριγωνικές υπο-περιοχές για μοντελοποίηση εφαρμογών στρέψης. Το 1956, ο Turner δημιούργησε μοντέλα ακαμψίας για δικτυώματα, δοκούς και άλλα στοιχεία. Το 1960, πρωτοεμφανίστηκε ο όρος πεπερασμένο στοιχείο από τον Clough.

Η μέθοδος είναι μια εξέλιξη των μητρώϊκών μεθόδων που τεκμηριώθηκε από τους επιστήμονες όπως ο Αργύρης Ι., ο Ritz και άλλοι όπως προαναφέρθηκε. Το μαθηματικό υπόβαθρο που εφαρμόζει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων καθιερώθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 70. Πιο συγκεκριμένα σε

μια περιοχή , η οποία ορίζει ένα χωρίο Ω , διακριτοποιείται σε μικρότερα στοιχεία τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Στο εσωτερικό των υπό-χωρίων γίνεται μια αναπαράσταση της συνάρτησης του προβλήματος σε απλούστερες συναρτήσεις παρεμβολής με άγνωστους συντελεστές. Το αρχικό πρόβλημα από άπειρους βαθμούς ελευθερίας , μετατρέπεται σε πεπερασμένο πλήθος βαθμών ελευθερίας.



Εικόνα 4-2 Διαχωρισμός Τομέων

Η λύση των επιμέρους συστημάτων μας οδηγεί στη γενική λύση του συστήματος. Η ακρίβεια της μεθόδου βελτιώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων- κόμβων ωστόσο μεγάλος αριθμός κόμβων σημαίνει μεγάλος χρόνος υπολογισμού. Με την ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων και των σχεδιαστικών προγραμμάτων τύπου CAD , σύνθετα προβλήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν εύκολα. Αυτές οι εξελίξεις στο τεχνολογικό τομέα έχουν οδηγήσει στην εξέλιξη και χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων όλο και συχνότερα.

Τα βασικά στάδια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι τα εξής:

- Δημιουργία 3D μοντέλου σε πρόγραμμα CAD σύμφωνα με τη γεωμετρία και τις γενικές απαιτήσεις της κατασκευής.
- Χρήση pre processor προγραμμάτων για το διαχωρισμό του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία και επιλογή του είδους επίλυσης με βάση των δεδομένων εισόδου.
- Εισαγωγή τελικών δεδομένων σε προγράμματα, τύπου solver , όπου γίνεται η μαθηματική λύση των συστημάτων.
- Χρήση post processor προγραμμάτων που επιτρέπουν στον χρήστη της μεθόδου να δει τα αποτελέσματα.

4.1 COMSOL Multiphysics – SolidWorks – MATLAB

Το πρόγραμμα COMSOL Multiphysics είναι ένα λογισμικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται κυρίως για τη μοντελοποίηση και την επίλυση επιστημονικών και μηχανικών προβλημάτων. Το CM παρέχει στον χρήστη ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον εργασίας και τη δυνατότητα επεξεργασίας του μοντέλου που δημιουργήσε. Το εργαλείο παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας του μοντέλου που περιγράφει ο χρήστης χωρίς να προαπαιτεί μαθηματικό ή αριθμητικό υπόβαθρο.

Η επιλογή του συγκεκριμένου λογισμικού έγινε επειδή το COMSOL χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements). Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα στον χρήστη να προσαρμόζει την πυκνότητα του πλέγματος «Mesh» ανάλογα με τις απαιτήσεις του σε ακρίβεια και παράλληλα να κάνει έλεγχο σφαλμάτων με τη βοήθεια των εργαλείων του. Οι εφαρμογές τους αναλύουν διάφορα φυσικά προβλήματα όπως η δομική ανάλυση, η στρωτή ροή, η ακουστική πίεση, τα ηλεκτρικά ρεύματα, τη μεταφορά θερμότητας κ.α. και το καθιστούν κατάλληλο για μοντελοποίηση εφαρμογών όπως αισθητήρες, ακουστικές συσκευές, αντιδραστήρες, ανάλυση θαλάσσιων κατασκευών και στη συγκεκριμένη περίπτωση μελέτη ενός μοντέλου που θα παράγει ηλεκτρική ενέργεια εκμεταλλευόμενο τη μηχανική ενέργεια του θαλάσσιου κύματος.

Το γραφικό περιβάλλον του COMSOL Multiphysics παρέχει στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να δημιουργήσει και να απεικονίσει το μοντέλο που μελετάει σε δύο(2D) ή τρεις διαστάσεις (3D). Παράλληλα παρέχει τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης με προγράμματα μοντελοποίησης που χρησιμοποιούνται ευρέως όπως η MATLAB, το AutoCAD και το SolidWorks.

4.2 Υλικά Διάταξης

Το πιεζοηλεκτρικό υλικό που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί είναι ο ζirkονιούχος τιτανιούχος μόλυβδος (PZT) και συγκεκριμένα ο PZT-4 καθώς είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο πιεζοηλεκτρικό κεραμικό υλικό. Οι βασικές του ιδιότητες είναι οι παρακάτω:

- φυσικά ισχυρό και ανθεκτικό
- χημικά αδρανές
- περιορισμένο κόστος

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας που χρησιμοποιείται τόσο συχνά είναι η προσαρμοστικότητα του σε κάλυψη αναγκών εξειδικευμένου σκοπού, εξαιτίας της μεγάλης ευαισθησίας του σε υψηλές θερμοκρασίες, σε αντίθεση

με άλλα κεραμικά υλικά. Οι ιδιότητες του στοιχείου αυτού του επιτρέπουν να λειτουργεί ως αισθητήρας-διεγέρτης σε μεγάλο φάσμα συχνοτήτων. Είναι κατάλληλα για χρήση σε υπερηχητικές εφαρμογές και σε ακραίες συνθήκες για μετρήσεις υψηλής ακρίβειας.

Ακολουθούν οι πίνακες των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών PZT και PZT-4

Material	Piezoelectric Constant (d_{33}) (10^{-12} C/N)	Relative Permittivity (ϵ)	Density (g/cm^3)	Young's Modulus (GPa)	Acoustic Impedance ($10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$)
Quartz	$d_{33} = 2.31$	4.5	2.65	107	15
Polyvinylidene fluoride (PVDF)	$d_{31} = 23$ $d_{33} = -33$	12	1.78	3	2.7
LiNbO ₃	$D_{31} = -4$, $d_{33} = 23$	28	4.6	245	34
BaTiO ₃	$d_{31} = 78$, $d_{33} = 190$	1,700	5.7		30
PZT	$D_{31} = -171$, $d_{33} = 370$	1,700	7.7	53	30
ZnO	$d_{31} = 5.2$, $d_{33} = 246$	1,400	5.7	123	33

Πίνακας 2 Ιδιότητες υλικού PZT

Crystal Symmetry Class	Uniaxial
Density	7500 kg/m ³

Πίνακας 3 Ιδιότητες υλικού PZT- 4

Compliance

$$\mathbf{s}_E = \begin{bmatrix} 12.3 & -4.05 & -5.31 & 0 & 0 & 0 \\ -4.05 & 12.3 & -5.31 & 0 & 0 & 0 \\ -5.31 & -5.31 & 15.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 39 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 39 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 32.7 \end{bmatrix} * 10^{-12} \frac{\text{m}^2}{\text{N}}$$

Piezoelectric Coupling

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 496 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 496 & 0 & 0 \\ -123 & -123 & 289 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{N}}$$

Relative Permittivity

$$\frac{\epsilon_{\mathbf{T}}}{\epsilon_0} = \begin{bmatrix} 1475 & 0 & 0 \\ 0 & 1475 & 0 \\ 0 & 0 & 1300 \end{bmatrix}, \quad \epsilon_0 = 8.854 * 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

Για την δημιουργία των μοντέλων προτιμήθηκε η σιλικόνη, ένα ανθεκτικό και συνάμα ελαστικό υλικό που κάτω από τις δυνάμεις των θαλάσσιων ρευμάτων μπορεί να παράγει μηχανική ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα για τις ιδιότητες της σιλικόνης παραθέεται ο παρακάτω πίνακας από την ιστοσελίδα της [Wikipedia.org/Silicone](https://en.wikipedia.org/wiki/Silicone).

Ιδιότητες Σιλικόνης	
Πυκνότητα (Density) - rho	293-443 kg/m ³
Μέτρο Young (young's modulus) - E	130-188 GPa
Μέτρο Poisson (Poisson rate) -nu	0.064-0.28

Πίνακας 4 Ιδιότητες Σιλικόνης "Silicone"

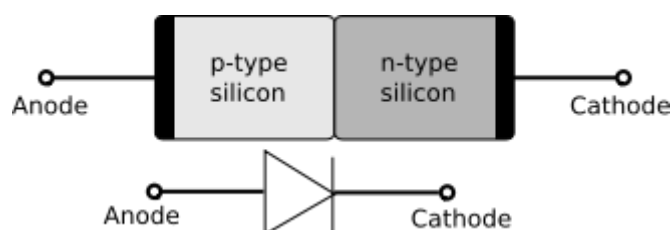
4.3 Κύκλωμα «Energy Harvesting»

Η μέθοδος συλλογής ενέργειας από δονήσεις με χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών δημιουργεί την ανάγκη ανάπτυξης ενός κυκλώματος ή καλύτερα μιας συσκευής συγκομιδής ενέργειας. Στη φύση, οι δονούμενοι συλλέκτες πιεζοηλεκτρικής ενέργειας βασίζονται στην μηχανικές δονήσεις, με ποικίλο εύρος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής εναλλασσόμενης τάσης AC από τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Πολλές δοκιμές έγιναν για να αξιοποιηθεί ο πιεζοηλεκτρικός ενεργειακός συλλέκτης και έγιναν κυρίως με χρήση ανορθωτή. Ο ανορθωτής είναι μια συσκευή που μετατρέπει το

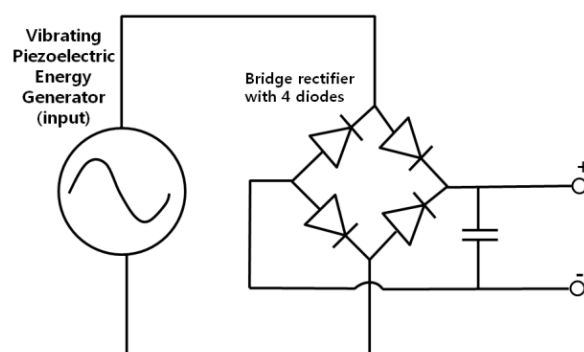
εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές DC. Πολλά ήδη ανορθωτών προτάθηκαν και μελετήθηκαν όπως

- vacuum tube diodes
- mercury arc valves
- silicon based switches
- solid state diodes

Ωστόσο ο καλύτερος προτεινόμενος τρόπος για τη μετατροπή του AC σε DC είναι με χρήση P-N διόδου διασταύρωσης.



Η χρήση μιας P-N διόδου μπορεί να πάρει μόνο το μισό εισερχόμενο κύμα. Για να καλυφθεί ολοκληρωμένη κυματική ανόρθωση δονούμενης πιεζοηλεκτρικής συσκευής, χρειάζεται μια γέφυρα με 4 διόδους. Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για να βελτιωθεί η επάρκεια του κυκλώματος και της μετατροπής του ρεύματος. Για το δεύτερο, παρουσιάστηκε η τεχνική της συγχρονισμένης εξόρυξης φορτίου που επηρεάζει άμεσα στην αυξημένη παραγόμενη ενέργεια. Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το κύκλωμα τεσσάρων διόδων PN σε σχηματισμό γέφυρας για ένα δονούμενο πιεζοηλεκτρικό συλλέκτη ενέργειας.



Εικόνα 4-3 Bridge-type κύκλωμα ανορθωτή

Επιπλέον, για την πλήρη μελέτη ανάπτυξης ισχύος, ο πιο ειδικευμένος τρόπος για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας περιλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο σύστημα μη καταστροφικού ελέγχου. Σε αυτό το (KMESHM) περιλαμβάνεται η αντίστοιχη τιμή της αντίστασης που χρησιμοποιείται. Από τον βασικό τύπο υπολογισμού της ισχύος

$$P = \frac{V^2}{R}$$

όπου P = Ισχύς(Watts), V = Διαφορά Ηλεκτρικού Δυναμικού (Volts) και R = Αντίσταση (Ω) υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς. Η συλλογή ενέργειας στη μορφή ρεύματος πραγματοποιείται με την ενσωμάτωση καλωδίων στις δυο πλευρές του πιεζοηλεκτρικού υλικού.



5 Εφαρμογές Πιεζοηλεκτρισμού

Η πιεζο-τεχνολογία χρησιμοποιείται όλο και συχνότερα στις εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας όπως σε ιατρικό και επιστημονικό εξοπλισμό, συστήματα για μετρήσεις αποστάσεων και τέλος στη συγκομιδή ενέργειας ή Energy Harvesting. Οι παραπάνω εφαρμογές επηρεάζουν σταδιακά τη καθημερινότητα του σύγχρονου ανθρώπου ακόμα και αν αυτό δεν είναι άμεσα αντιληπτό. Ωστόσο οι δυνατότητες του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου δεν έχουν φτάσει σε τελικό στάδιο. Για την αποδοτικότερη λειτουργία και την πιο αξιόπιστη εφαρμογή τους πραγματοποιούνται όλο και περισσότερες επιστημονικές μελέτες. Ένα παράδειγμα καθημερινής εφαρμογής του πιεζοηλεκτρισμού είναι ο ηλεκτρικός αναπτήρας και πιο συγκεκριμένα ο κρύσταλλος που προκαλεί υψηλή τάση, κατόπιν πίεσης, με αποτέλεσμα να προκαλεί ανάφλεξη του αερίου.

Παρακάτω θα ακολουθήσει αναλυτικότερη περιγραφή σημαντικών τεχνολογικών εφαρμογών, που εκμεταλλεύονται την πιεζο-τεχνολογία.

5.1 Τεχνολογίες υγείας

Στις τεχνολογίες υγείας και στους τομείς της βιο-πληροφορικής γίνεται όλο και πιο αναγκαία η χρήση βασικών λειτουργικών στοιχείων, τα οποία πρέπει να είναι γρήγορα, αξιόπιστα και με ελεγχόμενη ενεργειακή κατανάλωση. Σημαντικός παράγοντας σε αυτή την εξίσωση είναι και η κλίμακα των στοιχείων καθώς συνεχώς μικραίνει. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά και οι εφαρμογές τους ταιριάζουν απόλυτα στις σύγχρονες απαιτήσεις της υγείας.

Το μικρό μέγεθος των συσκευών επιτρέπουν την εμφύτευση τους στον ασθενή βελτιώνοντας τη ποιότητα ζωής τους καθώς τους διευκολύνει στη κίνηση. Το πεδίο εφαρμογών αυτών των ιατρικών εμφυτευμάτων ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες, για παράδειγμα από ακουστικά συστήματα σε βαλβίδες μέτρησης φαρμάκων.

Πιεζοηλεκτρικοί υπερηχητικοί μετατροπείς για ανίχνευση φουσαλίδων αέρα

Απλοί πιεζοηλεκτρικοί δίσκοι χρησιμοποιούνται ως υπερηχητικές συσκευές ανίχνευσης σε ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως για παράδειγμα στην ανίχνευση φουσαλίδων σε συστήματα ροής υγρών σε ιατρικά σωληνάκια.

Η μέθοδος ανίχνευσης φουσαλίδας βασίζεται στη μέτρηση χρόνου διάδοσης με υπερηχητική τεχνολογία. Εναλλασσόμενα σήματα διάδοσης και αποδοχής υπερηχητικών παλμών εκπέμπονται, προς τη κατεύθυνση ροής και την αντίθετη της. Ο αισθητήρας πραγματοποιεί μια αναγνώριση φουσαλίδων αέρα στο υγρό, επιτρέποντας τη συνέχιση της διαδικασίας. Οι συσκευές

πομπού –δέκτη αποτελείται από πιεζοηλεκτρικούς υπερηχητικούς μετατροπείς.

Αυτοί οι ελεγκτές φυσαλίδων αέρα (Air Bubble Detectors) διασφαλίζουν την σωστή ροή αίματος σε μηχανήματα υποστήριξης καρδιάς και πνευμόνων. Επίσης με σωστή προστασία η πιεζο-τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μαγνητικούς τομογράφους.



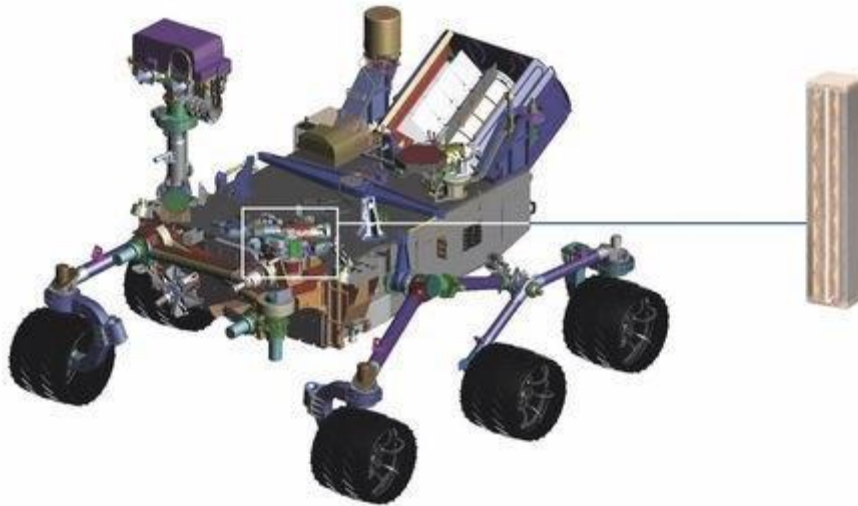
Εικόνα 5-1 Ανιχνευτής Air Bubble σε ορό αίματος

5.2 Επιστημονικός Εξοπλισμός

Τα εξαρτήματα που αποτελούνται από πιεζο-κεραμικά στοιχεία έχουν πλέον εδραιωθεί στις μοντέρνες επιστήμες ως οδηγοί και μετατροπείς. Η αξιόπιστη λειτουργία τους σε ακραίες συνθήκες όπως μαγνητικά πεδία , μεταβλητές θερμοκρασίες και πιέσεις, είναι ο λόγος που έχουν ευρεία εφαρμογή σε παγκόσμιο επίπεδο. Υψηλής ακρίβειας μετρήσεις βρίσκουν εφαρμογή από απλές εργαστηριακές εφαρμογές μέχρι τη βιομηχανία και τις εφαρμογές εξαρτημάτων για διαστημικό εξοπλισμό.

Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες στο διάστημα

Στην αποστολή της NASA στον Άρη το όχημα περιπλάνησης «Curiosity» έγινε χρήση πιεζοηλεκτρικών μηχανισμών. Συγκεκριμένα , στην ανάλυση δειγμάτων από ορυκτά της επιφάνειας του πλανήτη. Για να πραγματοποιηθεί δειγματοληψία των πετρωμάτων πρέπει αρχικά να γίνει μια ανάλυση και ταξινόμηση τους. Με κατάλληλες συχνότητες γίνεται ο καθορισμός της πυκνότητας και του ομογενούς μεγέθους τους . Αυτή η επιλογή γίνεται με τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες όπως φαίνεται και στο σχήμα.



Εικόνα 5-2 Πιεζοηλεκτρικές εφαρμογές στο Διάστημα

5.3 Μέτρηση Αποστάσεων

Αισθητήρες υπερηχητικών σημάτων παράγουν υψηλής συχνότητας ηχητικούς παλμούς που δε μπορούν να γίνουν αντιληπτοί από το ηχητικό κατώφλι του ανθρώπου. Το χρονικό διάστημα που ο παλμός κάνει να επιστρέψει , υπολογίζεται ηλεκτρονικά και αυτή η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές της μετρολογίας.

Αισθητήρες ελέγχου θέσης παρκαρίσματος

Το κεντρικό κομμάτι του αισθητήρα είναι ένας δίσκος φτιαγμένος από πιεζοηλεκτρικό υλικό συνδεδεμένο με μια σεισμική μάζα. Όταν το σύστημα επιταχύνει , με αποτέλεσμα η μάζα να παράγει μηχανική ενέργεια. Με την ιδιότητα του πιεζοηλεκτρισμού παράγεται μια μετρήσιμη τάση. Οι αισθητήρες παράγουν διαφορετικές συχνότητες ανάλογα με την επιτάχυνση και παρουσιάζεται γραμμική απόκριση κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Αυτοί οι αισθητήρες τοποθετούνται σε κατάλληλα σημεία στα αυτοκίνητα , όπου στέλνουν και λαμβάνουν δεδομένα σε μορφή σημάτων σχετικά με τη θέση τους. Αυτά τα δεδομένα κατόπιν υπολογίζουν τις αποστάσεις και ενημερώνουν τον οδηγό.



Εικόνα 5-3 Πιεζοηλεκτρικό Αισθητήρας Παρκαρίσματος

5.4 Συγκομιδή Ενέργειας «Energy Harvesting»

Η συγκομιδή ενέργειας ή Energy Harvesting αναφέρεται στη παραγωγή ενέργειας από εξωτερικές διαθέσιμες πηγές (π.χ. δονήσεις ,θερμοκρασίες περιβάλλοντος ,ροή αέρα). Αυτές οι πηγές παρουσιάζονται ως φυσικές ενέργειες όπως αιολική ,ηλιακή ,κυματική. Η λογική περισυλλογής αυτής της ενέργειας είναι η εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας και η μετατροπή της σε ηλεκτρική. Η μετατροπή της διαθέσιμης ενέργειας επιτρέπει την ανάπτυξη αυτοτροφοδοτούμενων ενεργειακών μονάδων που διαχειρίζονται από μικρά ενεργειακά φορτία μέχρι μοντέλα μεγαλύτερων ενεργειακά αναγκών.

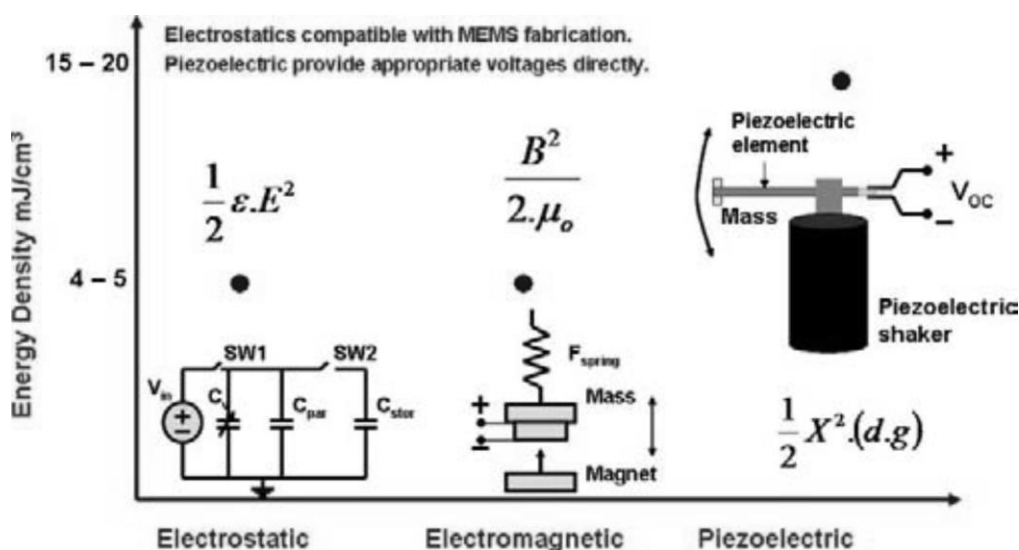
Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια ολοένα και αυξανόμενη τάση προς τον τομέα της συγκομιδής ενέργειας . Με τη ραγδαία ανάπτυξη των ασυρμάτων και των μικρο-ήλεκτρο-μηχανικών συστημάτων , το Energy Scavenging παρουσιάζεται ως η εναλλακτική λύση της συμβατικής μπαταρίας. Σε περιοχές όπου η αντικατάσταση / επαναφόρτιση μιας μπαταρίας είναι δύσκολη ,το αυτοτροφοδοτούμενο σύστημα είναι απαραίτητο.

5.4.1 Energy harvesting με χρήση πιεζο-κεραμικών υλικών

Σε αυτό το τομέα παρουσιάζονται εφαρμογές όπου γίνεται συγκομιδή ενέργειας από δονήσεις με χρήση πιεζο-κεραμικών. Η πιεζο-τεχνολογία βασίζεται σε μηχανικές δονήσεις που παράγονται από καθημερινά φαινόμενα μηχανικής ταλάντωσης. Ως πηγή δονήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι μηχανισμών όπως πρόβολοι , κύμβαλα και άλλοι πιο σύνθετοι όπως το ανθρώπινο σώμα .Αυτές οι πηγές μπορούν να παράγουν από mW μέχρι και MW ενέργειας.

Ο Priya παρουσίασε μια αναλυτική αναφορά στην οποία χρησιμοποίησε χαμηλής συχνότητας μετατροπείς για παραγωγή και συγκομιδή ενέργειας με βάση τον πιεζοηλεκτρισμό. Σύμφωνα με τους θεωρητικούς υπολογισμούς του , η πυκνότητα των πιεζοηλεκτρικών ενεργειακών συλλεκτών είναι 3-5 φορές

υψηλότερη από τις αντίστοιχα ηλεκτροστατικές και ηλεκτρομαγνητικές συσκευές.



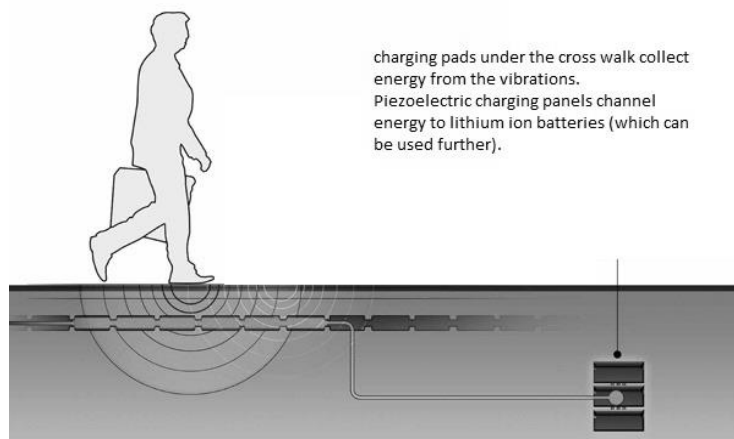
Εικόνα 5-4 Διαφορά Ηλεκτροστατικών, Ηλεκτρομαγνητικών και Πιεζοηλεκτρικών Ενεργειών

Μια χαρακτηριστική εφαρμογή συγκομιδής ενέργειας είναι η πρόταση που έκανε ο Paradiso , όπου πρότεινε το πιεζοηλεκτρικό παπούτσι. Η ιδέα βασίστηκε στην εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας, εφαρμόζοντας στη σόλα του παπουτσιού πιεζοηλεκτρικό υλικό. Αυτή η «παρασιτική» συγκομιδή ενέργειας αργότερα τροποποιήθηκε με σκοπό την παραγωγή βέλτιστων αποτελεσμάτων με σκοπό την κάλυψη μικρών ενεργειακών αναγκών.

Μια έξυπνη ιδέα εκμετάλλευσης της δόνησης από ανθρώπινη πηγή μηχανικής τάσης είναι το καθημερινό βάδισμα και η κίνηση των αυτοκινήτων. Πιεζοηλεκτρικές πλάκες τοποθετούνται κάτω από το οδόστρωμα και αφού τους ασκηθεί πίεση από τα διερχόμενα αυτοκίνητα , παράγουν ηλεκτρισμό περίπου 200kW σε μήκος ενός χιλιομέτρου δρόμου. Παρόμοια εφαρμογή στη Τουλούζ της Γαλλίας, στην οποία , πιεζοηλεκτρικές πλάκες τοποθετήθηκαν σε πεζοδρόμιο. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες για το φωτισμό τους συγκεκριμένου δρόμου.

Μεγάλες εταιρίες στο χώρο του Energy Harvesting (Innowat Tech, Ισραήλ) επενδύουν σε καινοτόμες ιδέες χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικά στοιχεία σε αυτοκινητόδρομους, αεροδρόμια και σιδηροδρομικές γραμμές. Στην εικόνα 5.5 παρουσιάζεται ο τρόπος τοποθέτησης των πλακών κάτω από το πεζοδρόμιο. Οι πιεζοηλεκτρικές πλάκες φορτίζουν με τη σειρά τους

μπαταρίες. Με αυτό τον τρόπο γίνεται η αποθήκευση ενέργειας για μελλοντική χρήση.

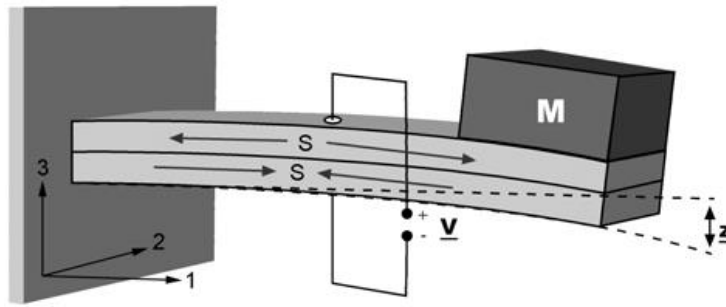


Εικόνα 5-5 Αξιοποίηση Βάδισης με σκοπό τη παραγωγή ενέργειας

Παρακάτω θα γίνει αναλυτική παρουσίαση διαφορετικών τύπων ενεργειακών συλλεκτών που λειτουργούν κυρίως κάτω από την επίδραση δονήσεων. Δυνάμεις ασκούνται σε προβόλους, κύμβαλα και αρθρωτών κατασκευών δημιουργώντας ταλάντωση στο σύστημα. Η ταλάντωση ενεργοποιεί τα πιεζοηλεκτρικά υλικά και αυτά με τη σειρά τους παράγουν ηλεκτρική τάση.

5.4.1.1 Τύπου Προβόλου

Οι ενεργειακοί συλλέκτες τύπου δονούμενου προβόλου έχουν πολύ απλή δομή και μπορούν να παράγουν μεγάλη παραμόρφωση κάτω από συνθήκες δόνησης. Οι Flynn και Sander επέβαλαν θεμελιώδεις περιορισμούς στα PZT υλικά και έδειξαν ότι το όριο της μηχανικής τάσης είναι ο πιο αποτελεσματικός περιορισμός στα συνηθισμένα PZT υλικά. Ο Wright και η ομάδα του παρουσίασαν μια σειρά από δονούμενους ενεργειακούς συλλέκτες. Στην αρχή προσπάθησαν να εντοπίσουν πηγές χαμηλής συχνότητας δονήσεων που συμβαίνουν στη καθημερινότητα μέσα σε ένα σπίτι ή ένα γραφείο. Στη συνέχεια βελτιστοποίησαν ένα μοντέλο προβόλου όπως φαίνεται στην εικόνα 5.6, που παρήγαγε πιεζοηλεκτρική ενέργεια. Τα αποτελέσματα τους υποστηρίχθηκαν και από θεωρητικές αναλύσεις. Τέλος ο Choi ανέπτυξε ενεργειακούς συλλέκτες τεχνολογίας MEMS χρησιμοποιώντας λεπτό φιλμ από PZT υλικού για να ενεργοποιήσει αυτοεξυπηρετούμενους ανιχνευτές.

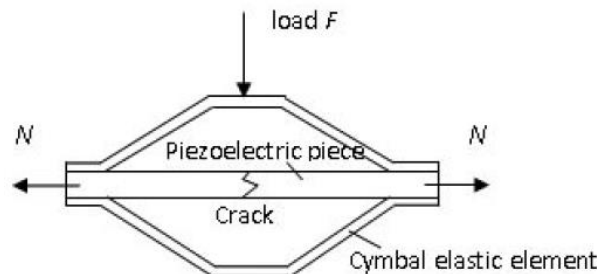


Εικόνα 5-6 Πρόβολο με δύο στρώσεις PZT

Όλες αυτές οι μοντελοποιήσεις έγιναν για τη σωστή καθοδήγηση της εκμετάλλευσης χαμηλής συχνότητας δονήσεων, που παρουσιάζονται στο περιβάλλον, με σκοπό τη μέγιστη συλλογή ενέργειας.

5.4.1.2 Τύπου Κυμβάλου

Οι κατασκευές που βασίζονται σε κύμβαλα, μπορούν να παράγουν μεγάλη τάση, χωρίς να παραμόρφωση, κάτω από εγκάρσιες εξωτερικές δυνάμεις. Αυτή η ιδιότητα των κυμβάλων είναι πολύ χρήσιμη για μικρό-ενεργειακούς συλλέκτες. Έρευνες από τον Li και την ομάδα του έδειξαν ότι ενεργειακοί πιεζοηλεκτρικοί συλλέκτες σε τοξωτό σχήμα, οι οποίοι συμπίεζονται από την επάνω μεριά του τόξου, παράγουν περισσότερη ηλεκτρική τάση από τους συμβατικούς που τεντώνουν. Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα συλλέκτη τύπου κυμβάλου.

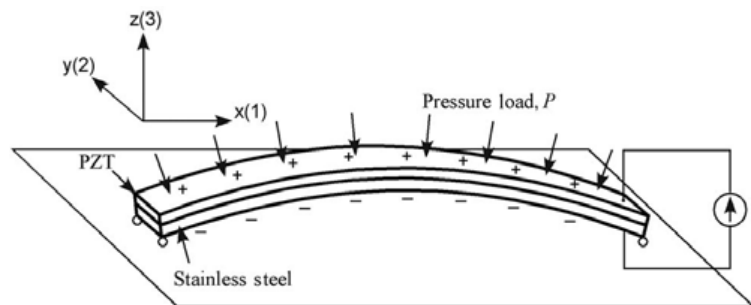


Εικόνα 5-7 Κύμβαλο με τοξωτό σχήμα

5.4.1.3 Τύπου Κελύφους

Οι δομές σε σχήμα κελύφους μπορούν να παράγουν μεγαλύτερες καταπονήσεις από τις αντίστοιχες των επίπεδων πλακών. Αυτή η ιδιότητα τους μπορεί να αυξήσει την επάρκεια των πιεζοηλεκτρικών συλλεκτών. Με την αύξηση της μηχανικής τάσης αυξάνεται και η παραγόμενη ηλεκτρική τάση. Μελέτες έδειξαν ότι υπάρχει μεγαλύτερη εξάρτηση της πιεζοηλεκτρικής σταθεράς με την ασκούμενη τάση και κατά συνέπεια με τη παραγόμενη

ηλεκτρική τάση εξόδου. Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η κατανομή μιας κατακόρυφης δύναμης σε καμπυλωτό πιεζοηλεκτρικό υλικό.



Εικόνα 5-8 Πιεζοηλεκτρικός συλλέκτης τύπου κελύφους

5.4.2 Σχεδιασμός Energy Harvesting Μοντέλου

Ο σχεδιασμός ενός μοντέλου συγκομιδής ενέργειας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά και τις ανάγκες των περιβαλλοντολογικών παραγόντων μιας περιοχής. Για παράδειγμα όταν γίνεται μελέτη της πηγής ενέργειας, πρέπει να γίνει μια ανάλυση των γεωφυσικών δεδομένων και της μορφής της μηχανικής ενέργειας που θα μετατραπεί σε ηλεκτρική. Επίσης πρέπει να είναι γνωστή η απαιτούμενη ενεργειακή ανάγκη που καλείται να καλύψει το μοντέλο.

Με αυτά τα δεδομένα είναι ικανός ο σχεδιασμός του ενεργειακού μετατροπέα, το κύκλωμα αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και ο μηχανισμός που θα τοποθετηθεί για τη συλλογή και μετατροπή της μηχανικής ενέργειας.



Οι δυνατότητες του πιεζοηλεκτρισμού δεν είναι σε τελικό στάδιο καθώς γίνονται έρευνες για το πώς μπορεί να αυξηθεί η απόδοση και η αξιοπιστία του έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα στον καταναλωτή.

6 Μοντελοποίηση

6.1 Στάδια κατασκευής μοντέλου

Το μοντέλο που θα μελετηθεί κατασκευάστηκε αρχικά στο σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks και κατόπιν έγινε η μεταφορά του σχεδίου στο COMSOL 3.6 . Στο γεωμετρικό κομμάτι του μοντέλου έγινε μια απλή μορφή για την ευκολία μελέτης και συγκομιδής δεδομένων. Στο φυσικό κομμάτι έγινε λεπτομερή μελέτη των δυνάμεων που ασκούνται καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος και έγινε μια προσπάθεια όσο το δυνατόν ακριβέστερης αναπαράστασης. Τα στάδια ροής της μοντελοποίησης είναι τα εξής:

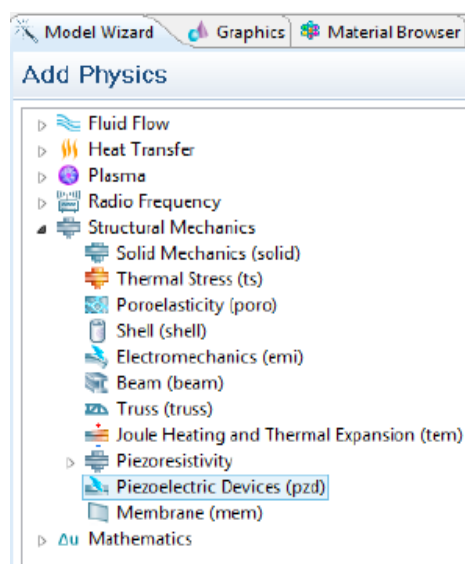
1. Καθορισμός περιβάλλοντος μοντελοποίησης
2. Σχεδίαση γεωμετρικού μοντέλου
3. Επιλογή υλικών διάταξης και ιδιοτήτων τους
4. Καθορισμός οριακών συνθηκών
5. Δημιουργία πλέγματος «Mesh»
6. Προσομοίωση
7. Λήψη αποτελεσμάτων

Για κάθε ένα από τα βήματα που προαναφέρθηκαν ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή, παρέχοντας έτσι μια ολοκληρωμένη εικόνα για τον τρόπο λειτουργίας των προγραμμάτων μοντελοποίησης.

6.1.1 Καθορισμός περιβάλλοντος μοντελοποίησης

Κατά την έναρξη του COMSOL , πρώτη επιλογή του χρήστη είναι η εισαγωγή του μοντέλου που θέλει να δημιουργήσει. Με την επιλογή **Add Model**

πραγματοποιείται η καταχώρηση και ουσιαστικά ξεκινάει η ανάλυση. Οι διαθέσιμες διαστάσεις στο χώρο που διαθέτει το πρόγραμμα είναι τρισδιάστατο μοντέλο (3D), δισδιάστατο συμμετρικό ως προς ένα άξονα (2D axonometric), δισδιάστατο (2D) σε ελεύθερη συμμετρία, μονοδιάστατο συμμετρικό ως προς ένα άξονα (1D axonometric) και τέλος σε απλό μονοδιάστατο (1D). Η επιλογή που έγινε στη παρούσα διπλωματική είναι η δημιουργία των μοντέλων σε τρεις διαστάσεις στο χώρο (3D) καθώς καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις.



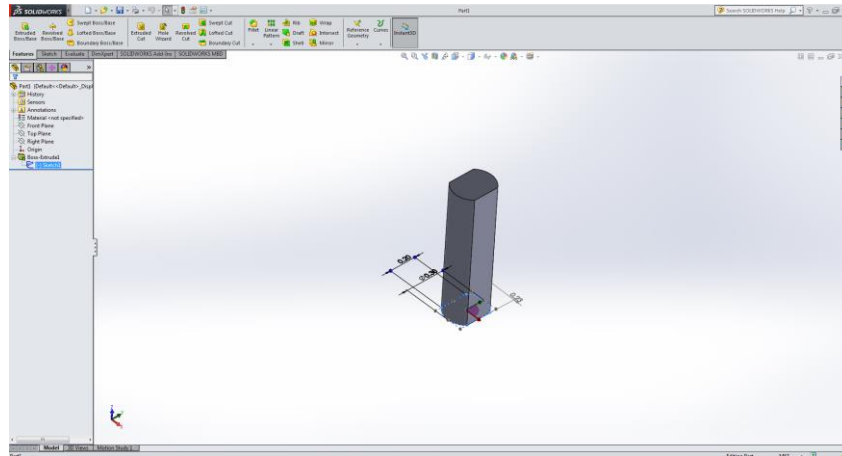
Εικόνα 6-1 Ορισμός "Physics" μοντέλου

Στη συνέχεια το πρόγραμμα καλεί τον χρήστη να επιλέξει/ορίσει τη φυσική που θέλει να ασκήσει στο μοντέλο που μελετάει με σκοπό να πάρει αποτελέσματα. Στη καρτέλα **Add Physics** παρέχεται μια λίστα από φυσικών φαινομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προς μελέτη. Κάθε επιλογή παρέχει και μια σύντομη περιγραφή σχετικά με το χρόνο επίλυσης και την υπολογιστική ισχύ που θα χρειαστεί. Η επιλογή του προγράμματος COMSOL έγινε επειδή παρέχει την επιλογή που ενσωματώνει το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και το οποίο επιλέγεται. Στην λίστα από το την μετά την επιλογή **Structural Mechanics** υπάρχει η μέθοδος πιεζοηλεκτρισμού (**Piezoelectric Devices**) όπου και επιλέγεται.

Για τη περεταίρω μελέτη του συστήματος, γίνεται η επιλογή που αφορά τα στάδια (**Study Steps**) και το είδος της λύσης που θα προκύψει. Τα είδη των μελετών που είναι διαθέσιμα είναι προκαθορισμένα από το πρόγραμμα μοντελοποίησης. Σε μοντέλα που υπόκεινται σε στατικές μελέτες ακολουθούν την επιλογή **Stationary**. Εφόσον όλες οι επιλογές έχουν γίνει σωστά, οι κόμβοι μελέτης στο δέντρο κατασκευής είναι ολοκληρωμένοι και ο χρήστης είναι πλέον έτοιμος να προχωρήσει στο στάδιο σχεδίασης του μοντέλου του στο χώρο.

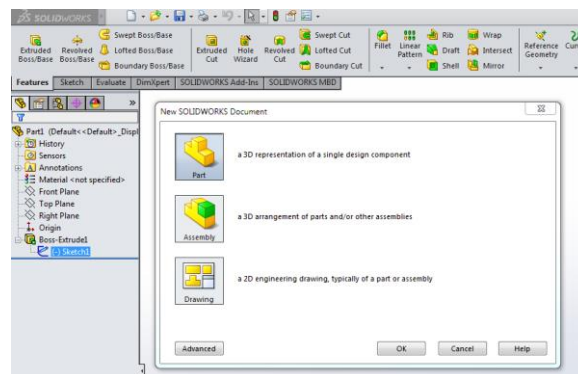
6.1.2 Σχεδίαση γεωμετρικού μοντέλου

Παρά το γεγονός ότι το πρόγραμμα COMSOL διαθέτει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον σχεδίασης **Geometry**, για το σχεδιασμό των μοντέλων στη παρούσα διπλωματική, έγινε η χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος SolidWorks 2015. Το σχεδιαστικό περιβάλλον του συγκεκριμένου προγράμματος είναι αρκετά εύχρηστο και παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα λεπτομερής αποτύπωσης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μοντέλου που θέλει να σχεδιάσει και να επεξεργαστεί. Στην εικόνα 6.1 παρουσιάζεται ένα βασικό κομμάτι του πρώτου μοντέλου κατά την διαδικασία κατασκευής του. Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής κάθε κομματιού ακολουθεί παρακάτω. Αξίζει να σημειωθεί ότι και τα δυο μοντέλα αποθηκεύονται ως αρχεία .x_t και στη συνέχεια γίνονται εισαγωγή (**import**) στο πρόγραμμα COMSOL για την περεταίρω επεξεργασία. Αυτή η τροποποίηση του ονόματος του αρχείου έγινε καθώς παρουσιάστηκε σφάλμα κα την εισαγωγή αρχείων της μορφής .SLDPRT τόσο στο COMSOL 5.0 όσο και σε παλαιότερες εκδόσεις.



Εικόνα 6-2 Γραφικό περιβάλλον SolidWorks 2015

Όπως είναι λογικό κάθε μοντέλο αποτελείται από πολλά διαφορετικά κομμάτια ενωμένα κατάλληλα μεταξύ τους. Αυτή η σύνθεση των επιμέρους κομματιών έγινε και πάλι με το σχεδιαστικό πρόγραμμα COMSOL και πιο συγκεκριμένα με την επιλογή συναρμολόγησης «Assembly» κατά την έναρξη του προγράμματος. Η εικόνα 6.2 παρουσιάζει την οπτική του χρήστη.



Εικόνα 6-3 Δημιουργία μοντέλου με Συναρμολόγηση "Assembly"

Πιο αναλυτικά για την κατασκευή των δύο μοντέλων έχουμε τα παρακάτω κομμάτια που παρουσιάζεται στον πίνακα με τις αντίστοιχες γεωμετρικές τιμές τους και μια μικρή περιγραφή της θέσης που θα τοποθετηθούν. Η διαδικασία και οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των τμημάτων είναι πανομοιότυπη.

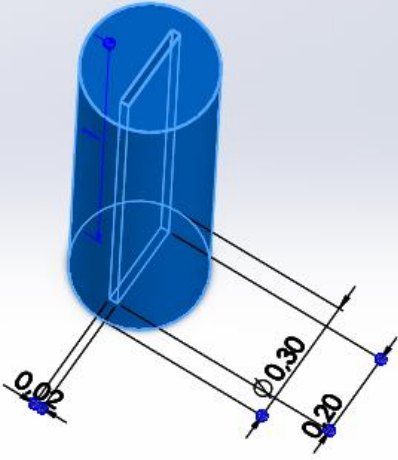


Πιο συγκεκριμένα για το στοιχείο της εικόνας 6.1 . Αρχικά έγινε η δημιουργία του σχεδίου στη καρτέλα **Sketch**, σε οριζόντιο επίπεδο. Ένας κύκλος με ακτίνα 0,15 m δημιουργήθηκε με το εργαλείο **Circle**. Στη συνέχεια με το εργαλείο **Corner Rectangle** και **Trim Entities** δημιουργήθηκε το κυρτό

πολύγωνο με πλάτος 0,20 στις ευθείες πλευρές του. Με το εργαλείο **Smart Dimension** έγινε έλεγχος των διαστάσεων και αποτύπωση τους, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά. Αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε για την δημιουργία του σχεδίου σε 2 διαστάσεις. Για να αναπτυχθεί και η τρίτη διάσταση και να πάρει τη τελική του μορφή έγινε η χρήση του εργαλείου **Extruded Boss/Base** που ενεργοποιείται στην καρτέλα **Features**. Με ύψος 1,00 m το κομμάτι είναι πλέον τριών διαστάσεων και έτοιμο για χρήση. Παρόμοια διαδικασία έγινε και για το δεύτερο κομμάτι του Α μοντέλου με τη μόνη αλλαγή στις τιμές των διαστάσεων.

Για τη συναρμολόγηση των στοιχείων και τη δημιουργία της τελικής κατασκευής έγινε η επιλογή **Assembly**, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.2. Με την εντολή **Insert Components** τοποθετήθηκαν τα επιμέρους στοιχεία. Ως βάση της κατασκευής ορίστηκε το εικονιζόμενο στην πρώτη θέση του πίνακα «Μοντέλο Α». Στη συνέχεια έγινε η σύνθεση και το ταίριασμα όλων των στοιχείων με την εντολή **Mate**. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κατά το ταίριασμα των στοιχείων οι συνδέσεις που απαιτούνται για την τελική τοποθέτηση ενός στοιχείου επάνω στο άλλο είναι τουλάχιστον τρεις έτσι ώστε να μη μπορεί να μετακινηθεί από τη θέση του και ουσιαστικά να κλειδώσει. Διάφορες άλλες χρήσιμες εντολές είναι οι **Move Component** που επιτρέπει στο χρήστη την ελεύθερη μετακίνηση των αντικειμένων στο χώρο πριν τη τελική τους τοποθέτηση καθώς επίσης και τα διάφορα **Layout** εργαλεία που βοήθησαν στην ορθή κατασκευή.

Ακολουθούν οι Πίνακες των στοιχείων από τα οποία αποτελείται κάθε μοντέλο και μια μικρή περιγραφή τους.

Μοντέλο «Α»	
	<p>Μήκος : 0,30 m Πλάτος : 0,20 m Ύψος : 1,00 m</p> <p>Είναι βασικό στοιχείο της κατασκευής καθώς αποτελεί τη βάση στη οποία θα τοποθετηθούν αργότερα τα πιεζοηλεκτρικά τμήματα και θα του ασκηθούν και οι αντίστοιχες δυνάμεις. Θα χρειαστούν 3 όμοια στοιχεία τα οποία θα τοποθετηθούν το ένα επάνω στο άλλο δημιουργώντας μια κατασκευή ύψος 3,00 m.</p>
	<p>Μήκος : 0,20 m Πλάτος : 0,05 m Ύψος : 3,00 m</p> <p>Από τις προδιαγραφές του στοιχείου προκύπτει μια αρκετά ψηλή και λεπτή κατασκευή η οποία θα κατασκευαστεί αργότερα με πιεζοηλεκτρικό υλικό και θα παράγει την ηλεκτρική τάση.</p>
	<p>Μήκος : 0,30 m Πλάτος : 0,20 m Ύψος : 3,00 m</p> <p>Η τελική μορφή του «Α» μοντέλου αποτελείται από τα παραπάνω κομμάτια. Στη κατασκευή θα ασκηθούν δυνάμεις από το θαλάσσιο περιβάλλον και θα μελετηθεί το συνολικό φορτίο ενέργειας που παράγεται. Η κατασκευή θα τοποθετηθεί στο πυθμένα της θάλασσας σε συνολικό βάθος 3,00 m.</p>

Μοντέλο «Β»	
	<p> Διάμετρος : 0,30 m Μήκος Εγκοπής : 0,20 m Πλάτος Εγκοπής : 0,02 m Ύψος : 1,00 m </p> <p> Η βάση του «Β» μοντέλου και βασικό στοιχείο ομοίως. Κυλινδρική κατασκευή με ενδιάμεση εγκοπή μέσα στην οποία θα τοποθετηθεί το πιεζοηλεκτρικό υλικό. Θα χρειαστούν 3 ίδια στοιχεία που θα τοποθετηθούν το ένα επάνω στο άλλο δημιουργώντας κατασκευή ύψους 3 μέτρων. </p>
	<p> Μήκος : 0,20 m Πλάτος : 0,02 m Ύψος : 3,00 m </p> <p> Από τις προδιαγραφές του στοιχείου προκύπτει μια αρκετά ψηλή και λεπτή κατασκευή η οποία θα κατασκευαστεί αργότερα με πιεζοηλεκτρικό υλικό και θα παράγει την ηλεκτρική τάση. Με την ίδια λογική όπως και το αντίστοιχο στοιχείο του στο «Α» μοντέλο. </p>
	<p> Διάμετρος : 0,30 m Ύψος : 3,00 m </p> <p> Η τελική μορφή του «Β» μοντέλου αποτελούμενο από τα παραπάνω κομμάτια. Κυλινδρική κατασκευή που περιέχει μέσα το πιεζοηλεκτρικό υλικό και ταλαντώνεται σύμφωνα με τις δυνάμεις που του ασκούνται. Η κατασκευή θα τοποθετηθεί στο πυθμένα της θάλασσας σε συνολικό βάθος 3,00 m. </p>

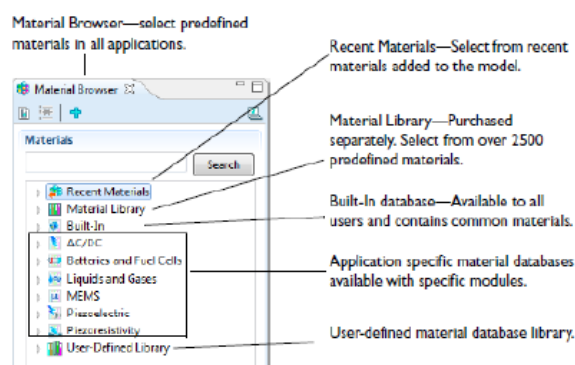
Ο διαχωρισμός σε τρία επίπεδα σε κάθε μοντέλο ξεχωριστά έγινε γιατί θα χρειαστεί στο επόμενο στάδιο της μοντελοποίησης και πιο συγκεκριμένα στην δημιουργία του πλέγματος. Επίσης ένας ακόμα σημαντικό λόγος διαχωρισμού επιπέδων είναι για την ακριβή επιμέρους άσκηση δυνάμεων στη δοκό. Σε διαφορετικό ύψος ασκείται και διαφορετικό μέτρο δύναμης. Ο διαχωρισμός επιτρέπει μια πιο ευέλικτη μοντελοποίηση σε επίπεδο δυνάμεων, όπως θα φανεί πιο αναλυτικά και στο **κεφάλαιο 7**.

6.1.3 Επιλογή υλικών διάταξης

Αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή του μοντέλου το αμέσως επόμενο βήμα που καλείται ο χρήστης να προσδιορίσει είναι η επιλογή των υλικών από τα οποία αποτελείται κάθε κομμάτι της κατασκευής. Στη καρτέλα **Materials** και πιο συγκεκριμένα **Material Browser** ο χρήστης του COMSOL Multiphysics διαθέτει μια μεγάλη και πλούσια βιβλιοθήκη υλικών, τα οποία μπορεί να συνδυάσει και να κάνει τη τελική του επιλογή.

Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα παρέχει στο χρήστη τα υλικά κατηγοριοποιημένα σε δυο κύριες κατηγορίες σχετικά με τις ιδιότητες και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Η

πρώτη κατηγορία είναι τα **Built-In** υλικά που περιέχουν όλες τις ιδιότητες των υλικών και η δεύτερη περιλαμβάνει όλα τα υπόλοιπα χωρισμένα σε κατηγορίες ανάλογες με τα είδη των μοντέλων που μελετάει ο χρήστης. Μια αδυναμία που παρατηρείται στη δεύτερη κατηγορία υλικών είναι ότι μερικά υλικά μπορεί να παρουσιάσουν ελλιπή τιμές σε ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Το πρόγραμμα ωστόσο επιτρέπει την εισαγωγή παραμέτρων χειροκίνητα πράγμα που γίνεται με περεταίρω διαδικτυακή αναζήτηση. Καλύτερο θα ήταν η επιλογή των υλικών να γίνεται από την πρώτη κατηγορία, όταν αυτό είναι εφικτό, για να αποφεύγονται τεχνικά προβλήματα.



Εικόνα 6-4 Εισαγωγή υλικών

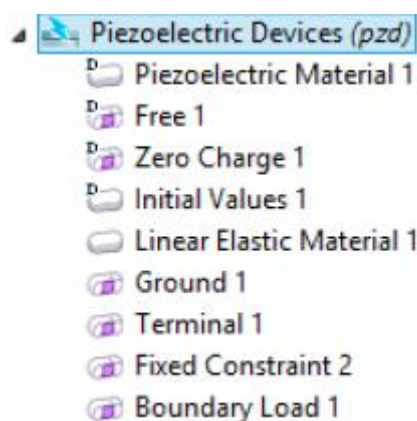
Στο δέντρο κατασκευής και συγκεκριμένα στον κόμβο **Materials** υπάρχει η επιλογή **Open Material Browser** γίνεται η εισαγωγή των υλικών από τα οποία θα αποτελούνται τα επιμέρους στοιχεία των δύο μοντέλων. Τα δυο υλικά που έχουν επιλεγεί είναι το πιεζοηλεκτρικό υλικό ζirkονιούχος τιτανιούχος μόλυβδος **PZT-4** για τις πιεζοηλεκτρικές ράβδους και η σιλικόνη

Silicone για τον βασικό κορμό της κατασκευής. Και για τα δύο υλικά υπάρχουν καταχωρημένα αναλυτικά δεδομένα σχετικά με τις ιδιότητες τους (βλ. κεφάλαιο 4 στη παράγραφο **Υλικά Διάταξης**) τα οποία επεξεργάζεται η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.

6.1.4 Καθορισμός οριακών συνθηκών

Ο καθορισμός των οριακών συνθηκών είναι ένα από τα βασικότερα στάδια της μοντελοποίησης. Σε αυτό το στάδιο ορίζονται οι οριακές συνθήκες που αφορούν το στατικό και ηλεκτρικό κομμάτι των μοντέλων όπως ποια είναι η βάση των μοντέλων στο χώρο και ποιες πλευρές των πιεζοηλεκτρικών υλικών θα λειτουργήσουν σαν γείωση.

Στις καινούργιες εκδόσεις του προγράμματος μοντελοποίησης COMSOL υποστηρίζεται η μέθοδος **Piezoelectric Devices** όπου με τη σωστή χρήση της, καθορίζεται από τον χρήστη ποια υλικά θα παρουσιάζουν πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες καθώς επίσης και τις τιμές των οριακών συνθηκών τους.



Εικόνα 6-5 Επιλογές μεθόδου "Piezoelectric Devices"

Στη συνθήκη **Piezoelectric Material** ο χρήστης καθορίζει ποια στοιχεία του μοντέλου θα παρουσιάσουν πιεζοηλεκτρική συμπεριφορά. Τα στοιχεία που καθορίστηκαν, από τα προηγούμενα βήματα, έχουν σαν κύριο υλικό κατασκευής το **PZT-4**. Η επόμενη συνθήκη **Free** αφορά τις ελεύθερες επιφάνειες της διάταξης των μοντέλων. Όλες οι επιφάνειες του μοντέλου είναι προκαθορισμένες ως ελεύθερες, δηλαδή δεν έχουν κάποια οριακή συνθήκη. Στη συνθήκη **Zero Charge** επιβεβαιώνει ο χρήστης ότι το υλικό δεν έχει αρχική ηλεκτρική φόρτιση. Επόμενες δυο συνθήκες είναι οι **Initial Values** που ενσωματώνει τα στοιχεία του μοντέλου για τα οποία ορίζονται αρχικές συνθήκες και η **Linear Elastic Material** που ενσωματώνει τα γραμμικώς ελαστικά ή έκαμπτα στοιχεία της κατασκευής.

Βασικές συνθήκες που θα πρέπει να οριστούν είναι **Ground**, **Terminal**, **Fixed Constraint** και **Boundary Load**. Για γείωση (**Ground**) επιλέγουμε τη κάτω πλευρά των πιεζοηλεκτρικών υλικών των μοντέλων. Με την εντολή **Fixed Constraint** γίνεται ο καθορισμός της βάσης του μοντέλου δηλαδή σε πιο σημείο θα πακτωθούν τα μοντέλα. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέχθηκε η κάτω βάση όπως φαίνεται και στο σχήμα. Τέλος για την εφαρμογή των διαφορετικών φορτίων σε κάθε στοιχείο του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε η συνθήκη **Boundary Load**.

6.1.5 Δημιουργία πλέγματος «Mesh»

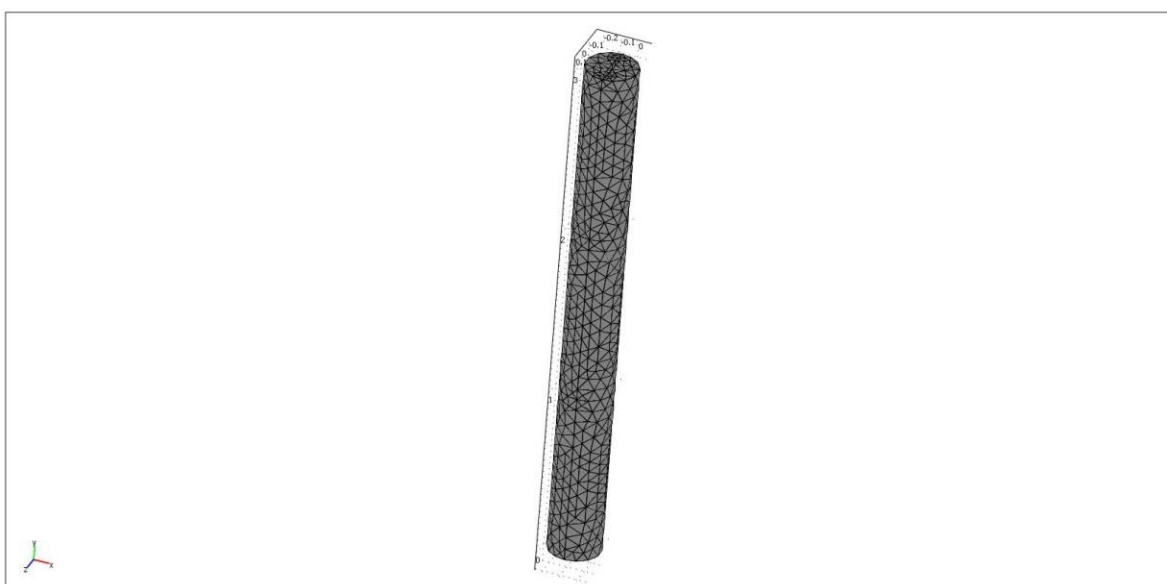
Το τελικό στάδιο της επίλυσης του μοντέλου είναι η διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος. Στη «πλεγματοποίηση» βασίζεται η επίλυση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, αφού με τη δημιουργία μικρών στοιχείων, διαφορετικού σχήματος, οι αλγόριθμοι αποκτούν δεδομένα προς επίλυση. Το περιβάλλον του COMSOL παρέχει τη καρτέλα **Mesh** και τις επιλογές **Initialize Mesh** και **Refine Mesh** όπως επίσης και επιλογή δημιουργίας του πλέγματος χειροκίνητα και όχι αυτόματα.

Για την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης έγινε η επιλογή του **Initialize Mesh** αντί για **Refine Mesh** με άμεσο αποτέλεσμα στο μικρό αριθμό των στοιχείων του πλέγματος. Το κέρδος αυτής της επιλογής είναι το μικρότερο κόστος σε υπολογιστική ισχύ εφόσον οι υπολογιστικές πράξεις είναι σαφώς λιγότερες όπως επίσης ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου είναι αρκετά μικρότερος. Με επιλογή **Refine Mesh** θα είχαμε μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα μας ωστόσο κατά την επιλογή αυτής της μεθόδου παρουσιάστηκαν μεγάλοι χρόνοι επίλυσης που συχνά μπλόκαραν το υπολογιστικό σύστημα.

Τα μοντέλα κατά τη διάρκεια της «πλεγματοποίησης» έχουν τη παρακάτω μορφή. Αξίζει να σημειωθεί ότι πλεγματοποίηση έχει γίνει και στα εσωτερικά στοιχεία του «B» μοντέλου δημιουργώντας μια ενιαία δομή.



Εικόνα 6-6 Πλέγμα "Α" μοντέλου



Εικόνα 6-7 Πλέγμα "Β" μοντέλου

7 Επίλυση και Αποτελέσματα

7.1 Επίλυση

Με την ολοκλήρωση των πέντε πρώτων βημάτων των σταδίων κατασκευής του μοντέλου σειρά έχει η επίλυση του προβλήματος και η συλλογή και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Για την επίλυση του μοντέλου ακολουθεί η επιλογή **Study**. Για κάθε αλλαγή δεδομένων προκύπτει καινούργια μελέτη, όπως είναι λογικό. Για τα δύο μοντέλα που αναλύονται προκύπτουν δυο διαφορετικές μελέτες και παρουσιάζονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα τους.

Όπως αναφέρθηκε και στο **κεφάλαιο 3**, η μελέτη της δύναμης που ασκείται σε μια κατακόρυφη δοκό, βυθισμένη στη θάλασσα είναι ένα αρκετά περίπλοκο φαινόμενο. Ωστόσο από μελέτες έχουν προκύψει μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν με ακρίβεια τη δύναμη που ασκείται σε θαλάσσιες κατασκευές από τα περιοδικά θαλάσσια κύματα.

Πιο συγκεκριμένα έγινε η επίλυση των παρακάτω εξισώσεων με τη βοήθεια του προγράμματος MATLAB.

$$f(z,t) = \frac{\pi}{4} \rho C_M D^2 \dot{u}(z,t) + \frac{1}{2} \rho C_D D (u(z,t) - \dot{x}(z,t)) |u(z,t) - \dot{x}(z,t)|$$

$$u(x,t) = \frac{\alpha \omega \cosh(k(z+d))}{\sin(kd)} \cos(kx - \omega t)$$

$$\dot{u}(x,t) = \frac{\alpha \omega^2 e^{kz} \cosh(k(z+d))}{\sin(kd)} \sin(kx - \omega t)$$

Στο πρόγραμμα main.m έχει γίνει αρχικοποίηση των δεδομένων και παράλληλα τρέχει τρεις διαφορετικές συναρτήσεις. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται σε τρία διαφορετικά γραφήματα και αναλύονται. Οι αρχικές μεταβλητές που τέθηκαν ως δεδομένα είναι

- Η επιτάχυνση της βαρύτητας g που είναι ίση με $9.8 \frac{m}{s}$
- Το ύψος των δυο μοντέλων d , με συνολικό μήκος $3.0 m$
- Το συνολικό ύψος κύματος H , με μήκος $2.0 m$
- Το μήκος κύματος $\lambda = 15 m$
- Το πλάτος της κατασκευής D , με μήκος $0.3 m$

Για τον υπολογισμό πιο εξειδικευμένων μεταβλητών όπως οι υδροδυναμικοί συντελεστές C_D και C_M έγινε μια προσέγγιση. Αρχικά υπολογίστηκαν οι αριθμοί Reynolds και Keulegan- Carpenter με τις τιμές 15 και 44×10^{-3}

αντίστοιχα. Κατόπιν με τη βοήθεια των διαγραμμάτων (βλ. εικόνα 3.6 και 3.7) εδόθησαν οι τιμές $C_D = 1.1$ και $C_M = 1.2$ και παράλληλα καταχωρήθηκαν στο πρόγραμμα.

Τέλος η μεταβλητή που ορίστηκε είναι η πυκνότητα της θάλασσας σύμφωνα με τον πίνακα της εικόνας 7.1 με τιμή $\rho = 1025 \frac{kg}{m^3}$.

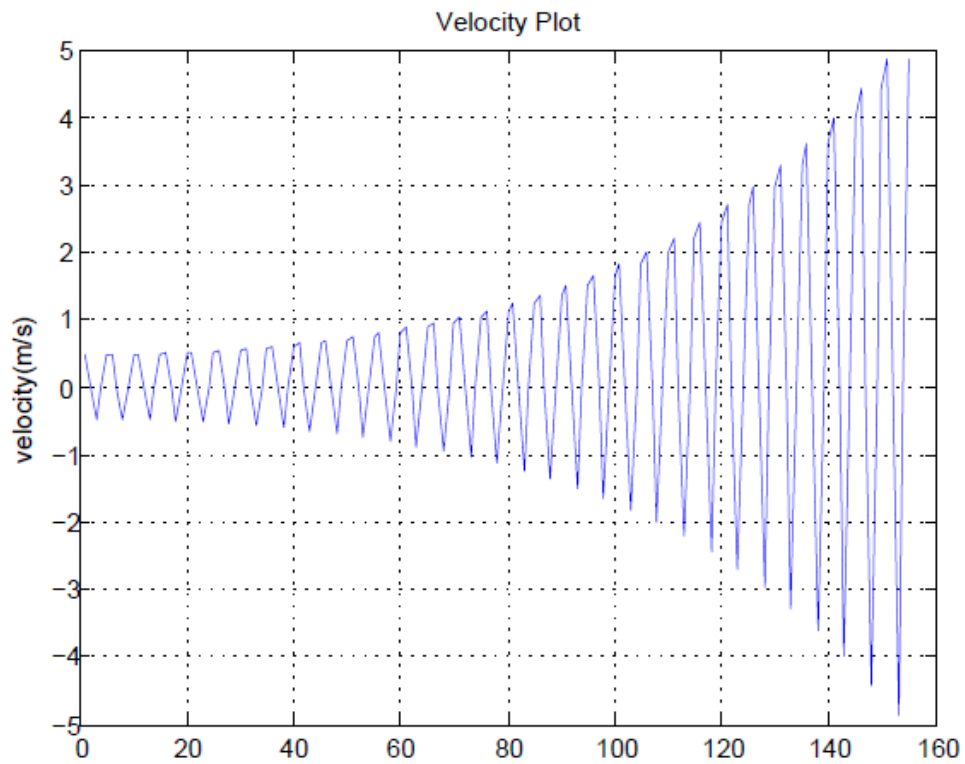
Πυκνότητα και ταχύτητα καθαρού αέρα, θαλασσινού νερού και ξηρού αέρα			
Θερμοκρασία [°C]	Πυκνότητα ρ [kg/m ³]		
	Καθαρός αέρας	Θαλασσινό νερό *	Ξηρός αέρας **
0	999.8	1028.0	1.293
5	1000.0	1027.6	1.270
10	999.7	1026.9	1.247
25	999.1	1025.9	1.226
20	998.2	1024.7	1.205
25	997.0	1023.2	1.184
30	995.6	1021.7	1.165

Πίνακας 5 Πυκνότητα θαλασσινού νερού σε διαφορετικές θερμοκρασίες

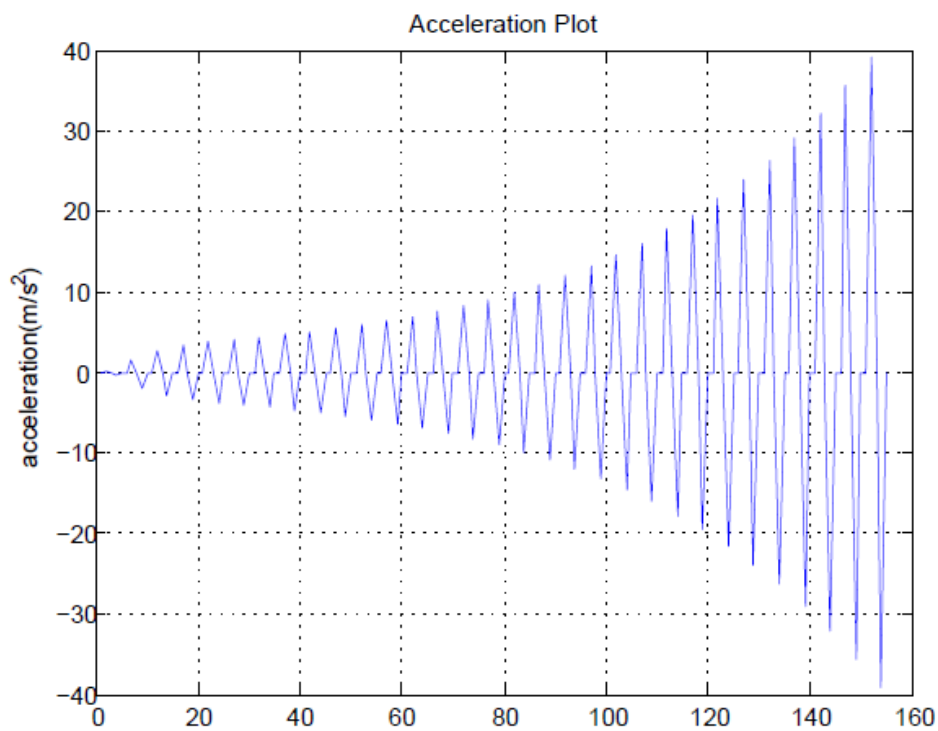
* Περιεκτικότητα σε αλάτι = 35 parts/thousand

** Η πίεση κατά τη μέτρηση της πυκνότητας του ξηρού αέρα είναι 1.013×10^5 Pa.

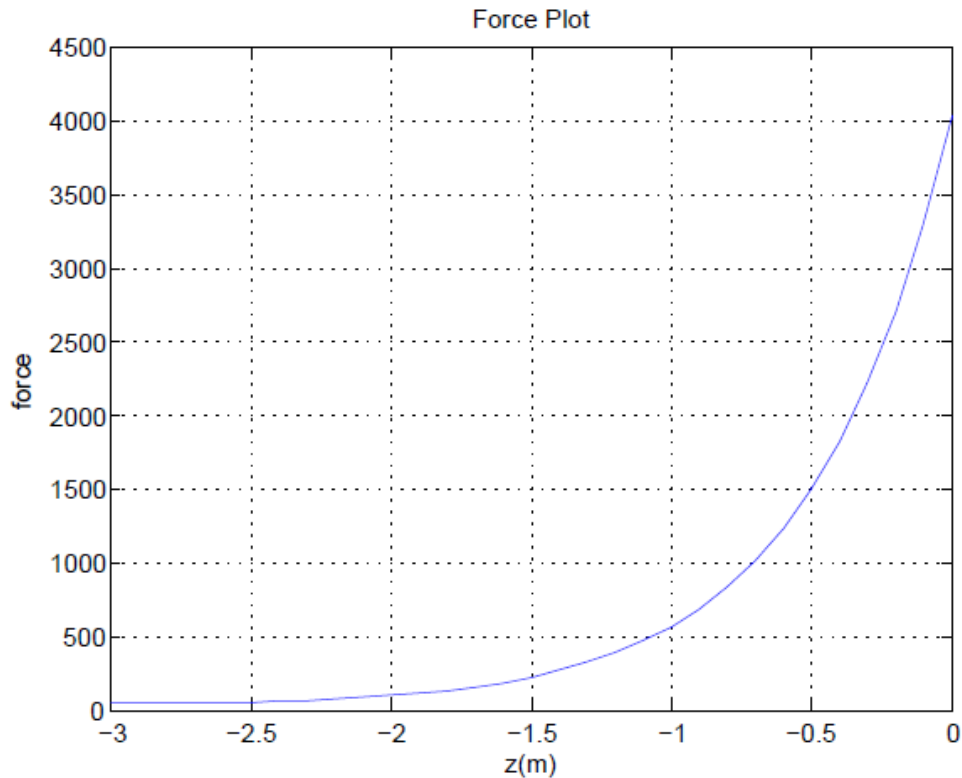
Με την επίλυση του Tperiod.m γίνεται ο υπολογισμός της περιόδου του κύματος. Στη συνέχεια υπολογίζεται η ταχύτητα $u(z, t)$ στο αρχείο velocity.m και η επιτάχυνση $\dot{u}(z, t)$ στο αντίστοιχο αρχείο acceleration.m. Το z είναι η μεταβλητή που παίρνει τιμές από -3 έως 0 με αυξανόμενο βήμα 1 σε κάθε επανάληψη και ουσιαστικά μελετάει τις αλλαγές της δύναμης κατά μήκος της δοκού, αρχίζοντας από τον πυθμένα. Ακολουθούν τα γραφήματα μεταβολής της ταχύτητας, της επιτάχυνσης και της δύναμης. Στο παράρτημα παραθέτεται το περιεχόμενο κάθε αρχείο τύπου x. m αναλυτικά.



Γράφημα 1 Γράφημα Ταχύτητας κύματος κατά μήκος της θέσης Z



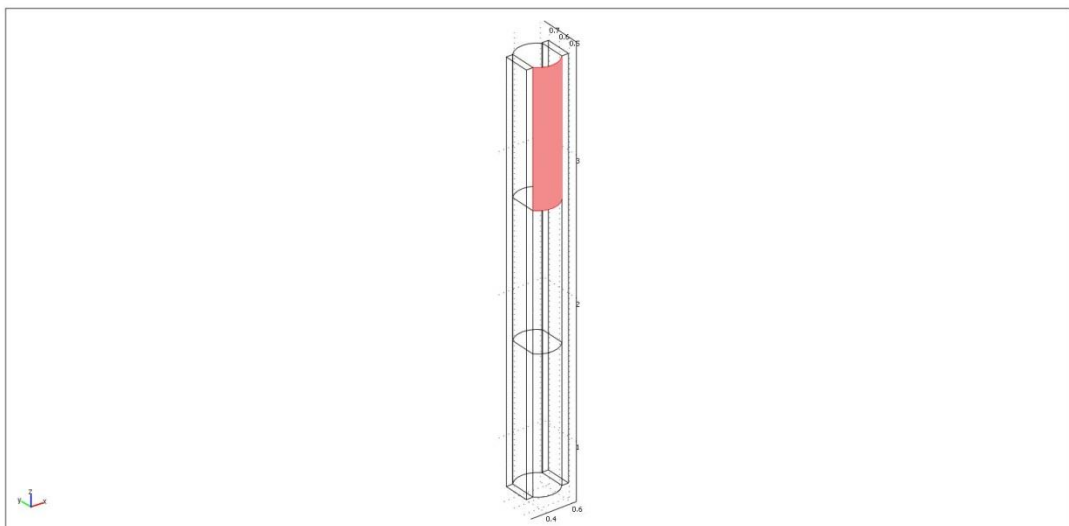
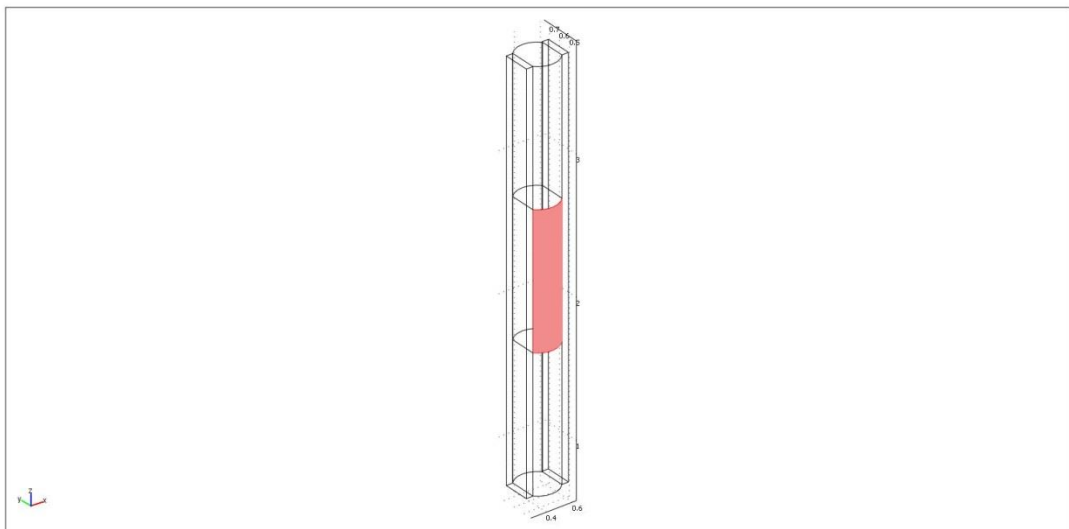
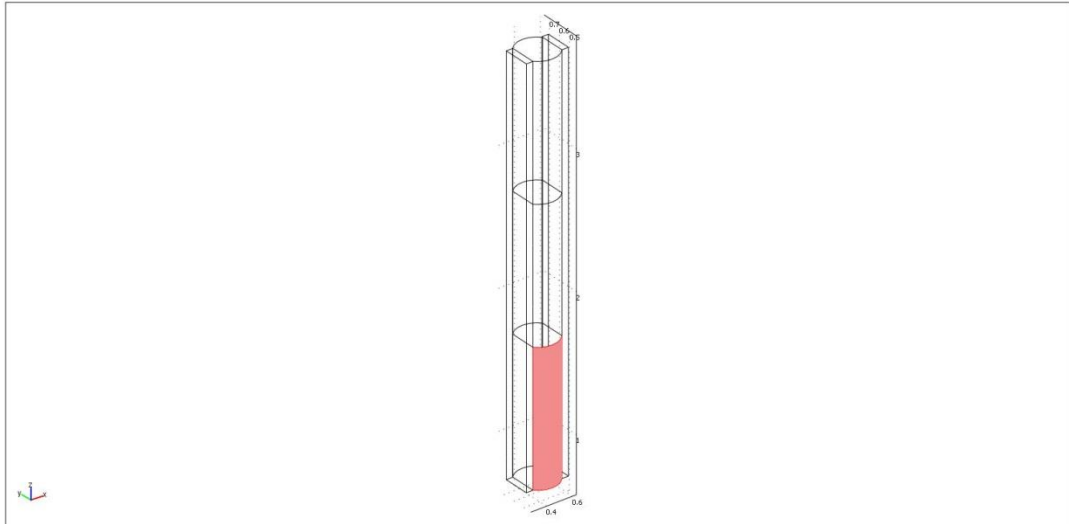
Γράφημα 2 Γράφημα επιτάχυνσης κύματος κατά μήκος της θέσης Z

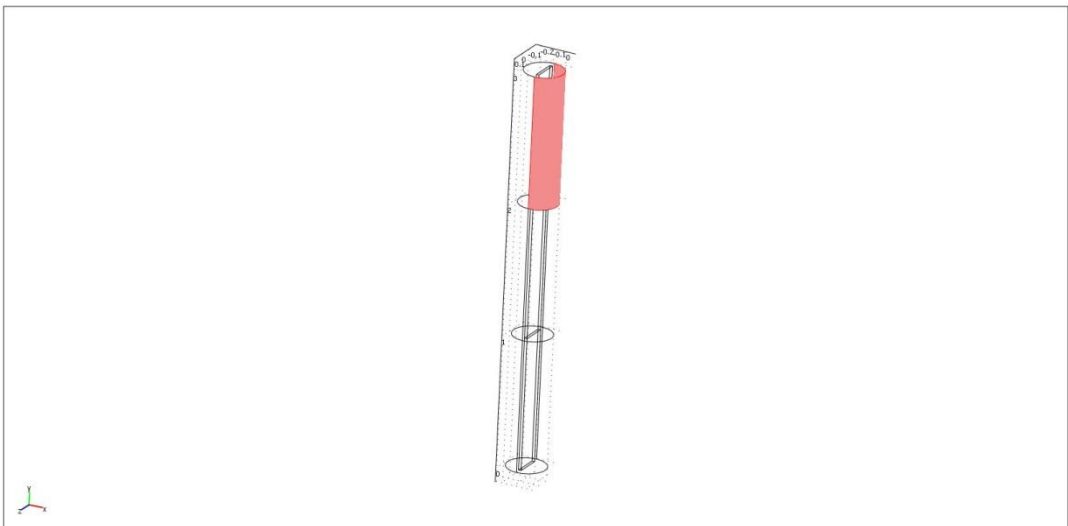
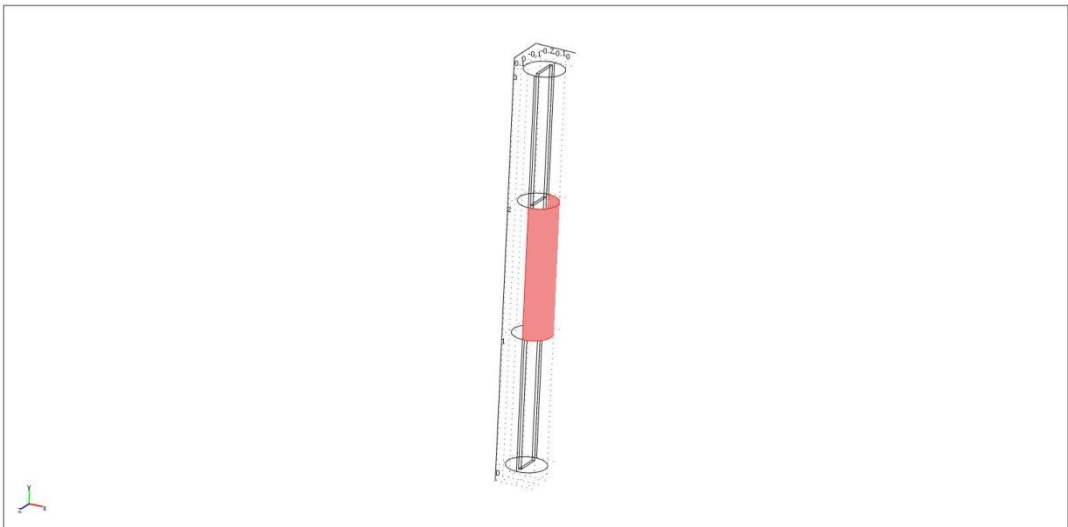
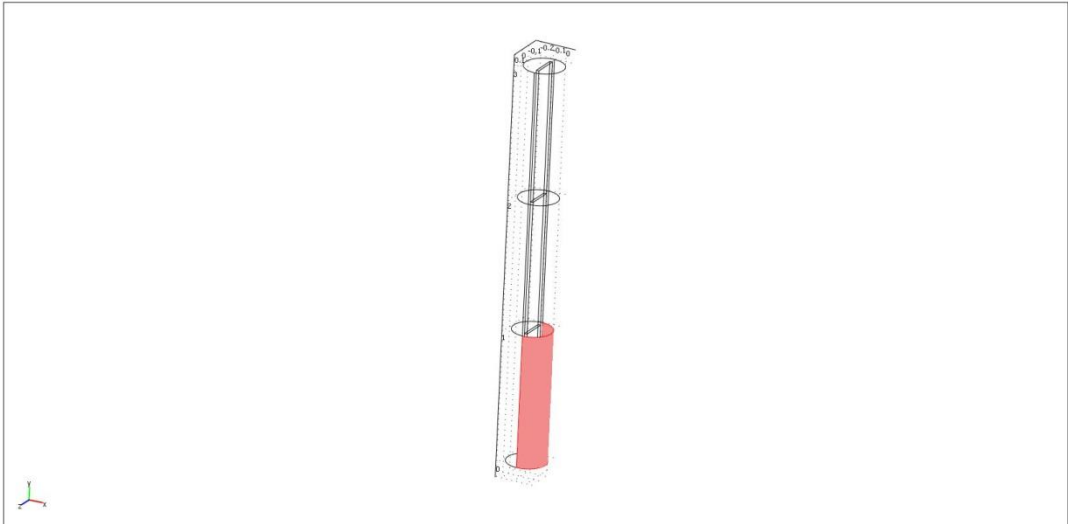


Γράφημα 3 Γράφημα Δύναμης κατά μήκος της βυθισμένης ράβδου

Όπως αναμενόταν οι γραφικές απεικονίσεις ταχύτητας και επιτάχυνσης είναι ημιτονοειδής και συνημιτονοειδής συναρτήσεις με μέτρο που αυξάνεται όσο αυξάνεται το μέτρο του Z . Στα δύο πρώτα γραφήματα οι συναρτήσεις αναλύονται για 160 βήματα και αυτό συμβαίνει επειδή κατά την επίλυση στη MATLAB επιλέχθηκε συγκεκριμένο βήμα επαναλήψεων για πιο ακριβή αποτελέσματα. Για το γράφημα της δύναμης συναρτήσει της θέσης Z στη ράβδο μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι το μέτρο της δύναμης αυξάνεται όσο «ανεβαίνει» η θέση Z . Μεγαλύτερα μέτρα δυνάμεων ασκούνται στα ψηλότερα σημεία ενώ στη βάση της δοκού το μέτρο δύναμης είναι σχεδόν μηδενικό.

Για τη καλύτερη προσομοίωση της μοντελοποίησης έγινε προσπάθεια για εφαρμογή αυτών των δυνάμεων σε διαφορετικά σημεία. Τα σημεία που επιλέχθηκαν για να εφαρμοστεί αυτή η οριζόντια δύναμη είναι κατά μήκος των δοκών και πιο συγκεκριμένα στη βάση, στο μεσαίο τμήμα και στο άνω άκρο. Ακολουθεί αναλυτική απεικόνιση των θέσεων άσκησης δύναμης σε κάθε μοντέλο ξεχωριστά.



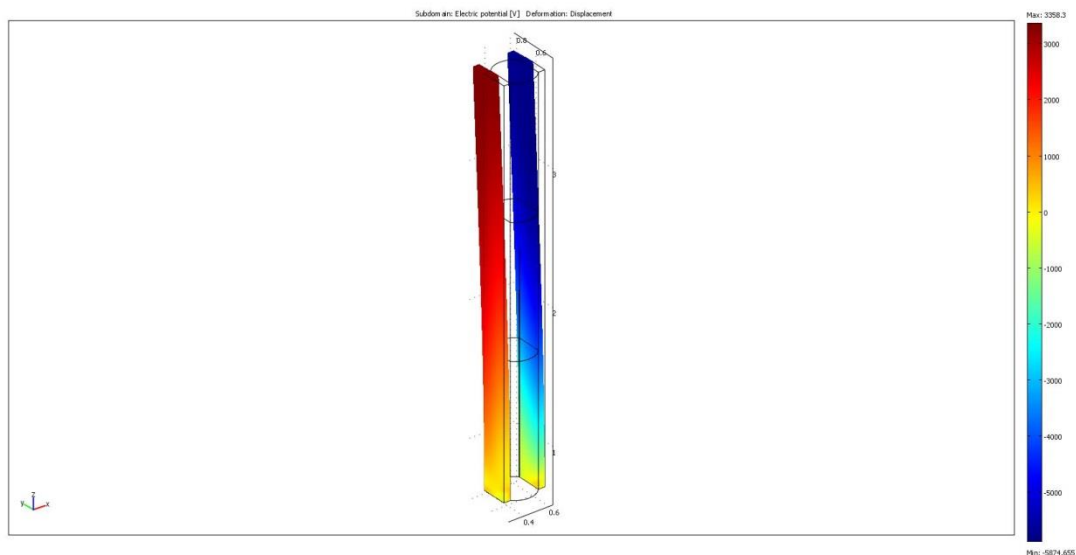


7.2 Αποτελέσματα

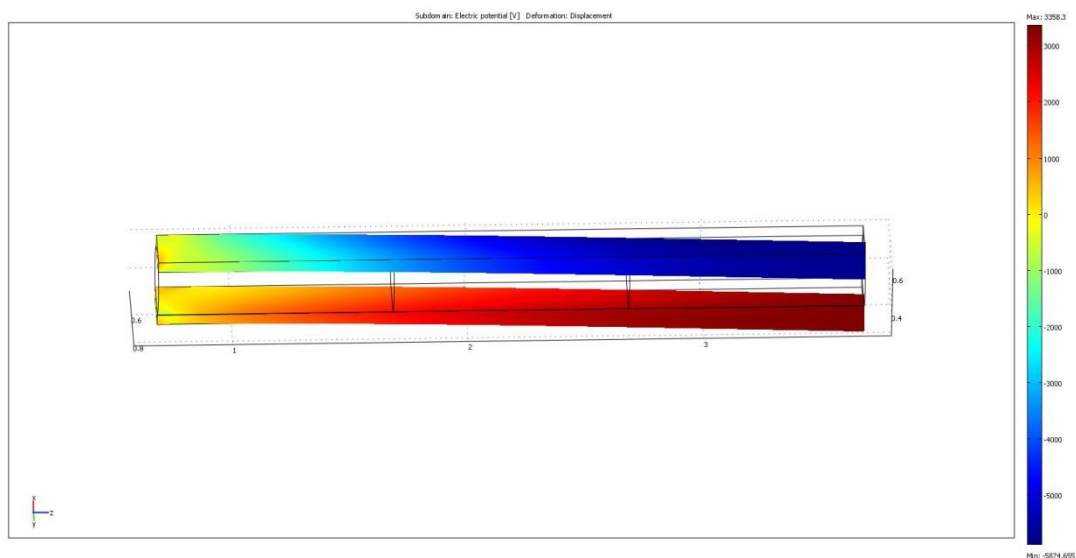
Ο χρόνος επίλυσης των μοντέλων εξαρτάται κυρίως από δυο παράγοντες. Ο πρώτος είναι η επιλογή των στοιχείων του πλέγματος και ο δεύτερος είναι η πολυπλοκότητα των μοντέλων που επεξεργάζεται το σύστημα. Για τον πρώτο παράγοντα επιλέχθηκε η δημιουργία **Initialize Mesh** γεγονός που περιορίζει αρκετά το υπολογιστικό κομμάτι των πράξεων. Για τον δεύτερο παράγοντα, τα μοντέλα που επιλύονται δεν είναι πολύπλοκα γεγονός που δε προσθέτει επιπλέον υπολογιστικό φορτίο στο σύστημα. Το COMSOL επιτρέπει στον χρήστη τη δυνατότητα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων του με χρήση της επιλογής **Results**. Μερικές από τις επιλογές που προσφέρονται είναι η εξαγωγή τρισδιάστατων ή δισδιάστατων εικόνων, η δημιουργία βίντεο και διαγραμμάτων σχετικά με τη διακύμανση των αποτελεσμάτων.

Τα αποτελέσματα που αφορούν τη συγκεκριμένη μοντελοποίηση είναι η μετατόπιση των μοντέλων στον κατακόρυφο άξονα και η παραγωγή ηλεκτρικού δυναμικού από τα πιεζοηλεκτρικά τους στοιχεία. Με γνώση της διαφοράς δυναμικού που αναπτύσσεται μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η παραγόμενη ισχύς. Τα αποτελέσματα του COMSOL αποτυπώνουν την μετατόπιση των δοκών (**displacement**) καθώς και τη πιθανή παραγωγή ηλεκτρικού δυναμικού (**electric potential**) στα πιεζοηλεκτρικά υλικά.

Για να υπολογιστεί η διαφορά δυναμικού θα πρέπει να οριστεί το μέγιστο και το ελάχιστο σημείο τάσης καθώς και το σημείο στο οποίο εμφανίζεται. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι διακυμάνσεις της τάσης κατά μήκος των δοκών και παρουσιάζονται στα αντίστοιχα γραφήματα τα αποτελέσματα. Στις εικόνες 7.1 έως 7.4 παρουσιάζεται το εκτόπισμα και το ηλεκτρικό δυναμικό με χρωματικές διακυμάνσεις για να τονίσουν τις διαφορές. Για καλύτερη κατανόηση παρουσιάζονται δυο εικόνες από κάθε μοντέλο. Μια οριζόντια και μια κατακόρυφη εικόνα που παρουσιάζει τα σημεία που εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τιμές δυναμικού.



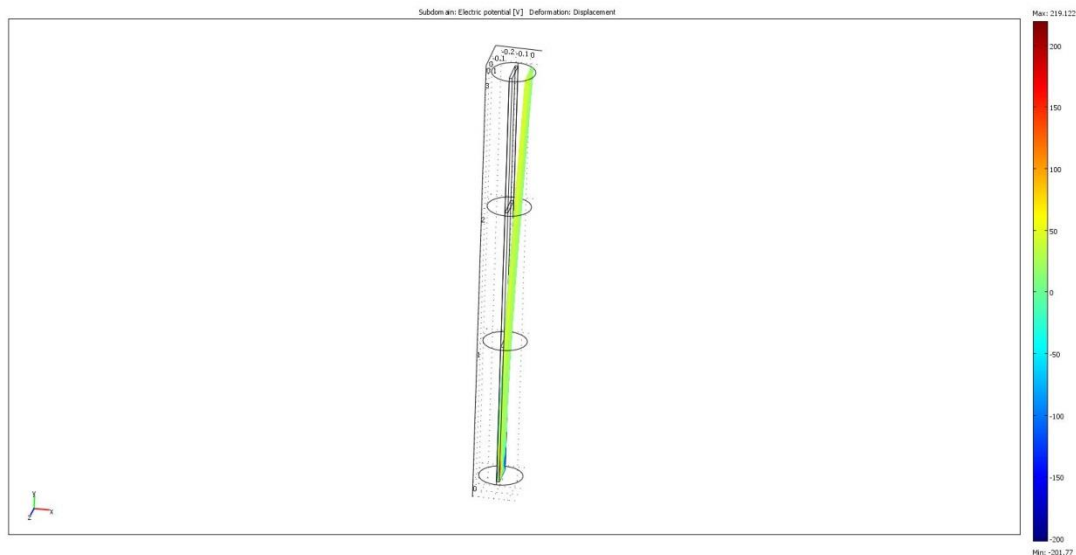
Εικόνα 7-1 Κατακόρυφη απεικόνιση Μετατόπισης και Ηλεκτρικού δυναμικού



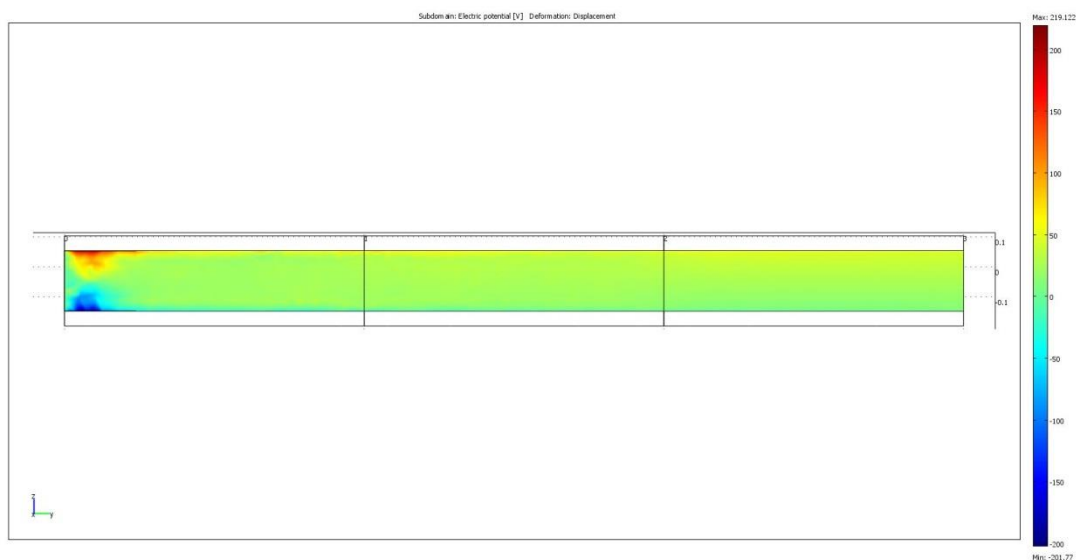
Εικόνα 7-2 Οριζόντια απεικόνιση Μετατόπισης και Ηλεκτρικού δυναμικού

Η συνολική μετατόπιση και παραγωγή δυναμικού του μοντέλου «Α» περιγράφονται από τις χρωματικές διακυμάνσεις των παραπάνω εικόνων. Στην εικόνα 7.1 το αποτέλεσμα είναι αρκετά κοντά στο προβλεπόμενο θεωρητικό μοντέλο. Στη βάση του μοντέλου, δηλαδή στον πυθμένα της θάλασσας, όπου και δεν εμφανίζονται σχεδόν μηδενικά μέτρα δυνάμεων υπάρχει μηδενική μετατόπιση και μηδενική παραγωγή τάσης. Αυτό εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί από τις χρωματικές διακυμάνσεις των αποτελεσμάτων. Από τη μέση της δοκού και μέχρι τη κορυφή όπου και εμφανίζονται μεγαλύτερες ταλαντώσεις το παραγόμενο δυναμικό αυξάνεται. Κάτι που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι κατά την διάρκεια εκτέλεσης του

πειράματος επιλέχθηκε το σημείο ασκήσεως των δυνάμεων να μην είναι επάνω στις πιεζοηλεκτρικές πλάκες. Αυτό έγινε διότι η δύναμη δεν έπρεπε να ασκηθεί άμεσα στο πιεζοηλεκτρικό υλικό αλλά έμμεσα και πιο συγκεκριμένα μέσω της ταλάντωσης να μετατραπεί από μηχανική σε ηλεκτρική.



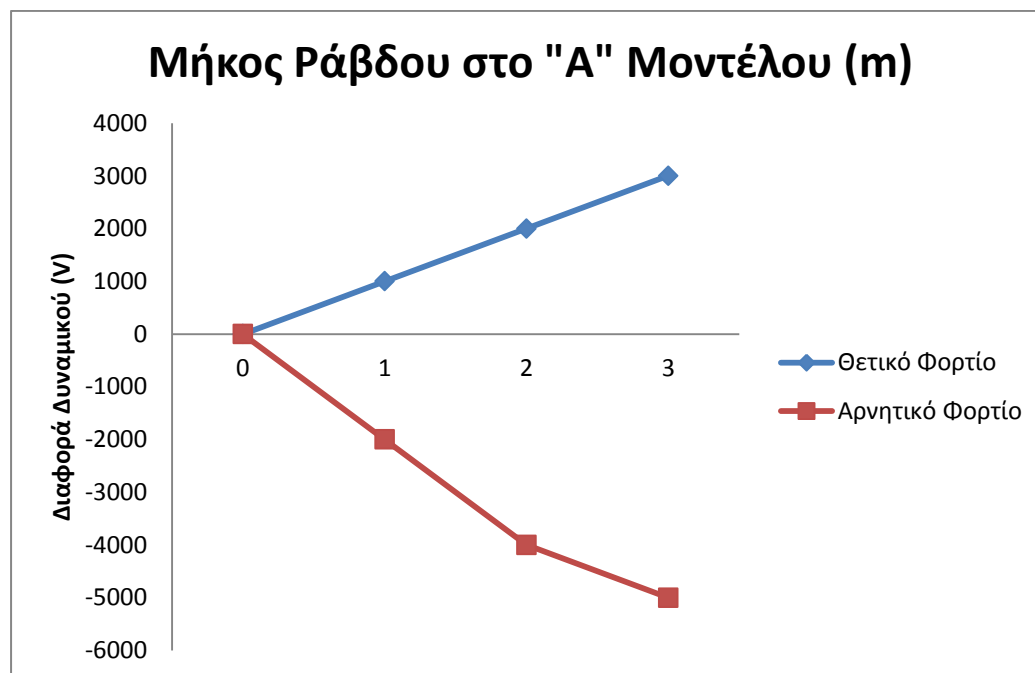
Εικόνα 7-3 Κατακόρυφη απεικόνιση Μετατόπισης και Ηλεκτρικού δυναμικού



Εικόνα 7-4 Οριζόντια απεικόνιση Μετατόπισης και Ηλεκτρικού δυναμικού

Ομοίως για το μοντέλο «B» περιγράφονται από τις χρωματικές διακυμάνσεις η συνολική μετατόπιση και η παραγωγή δυναμικού. Στις εικόνες 7.3 και 7.4 τα αποτελέσματα διαφέρουν από τα αναμενόμενα. Παρατηρείται μια ενιαία χρωματική διακύμανση κατά μήκος της ράβδου. Εύκολα μπορεί να

παρατηρήσει κανείς ότι η παραγωγή της τάσης επηρεάζεται από τη πολυπλοκότητα της κατασκευής. Ωστόσο και με το μοντέλο «Β» παρατηρείται παραγωγή τάσης, έστω και μικρότερη σε σύγκριση με το μοντέλο «Α». Επίσης στην εικόνα 7.4 παρατηρείται μεγαλύτερη τάση στη βάση της κατασκευής και πιο συγκεκριμένα στο σημείο στήριξης.

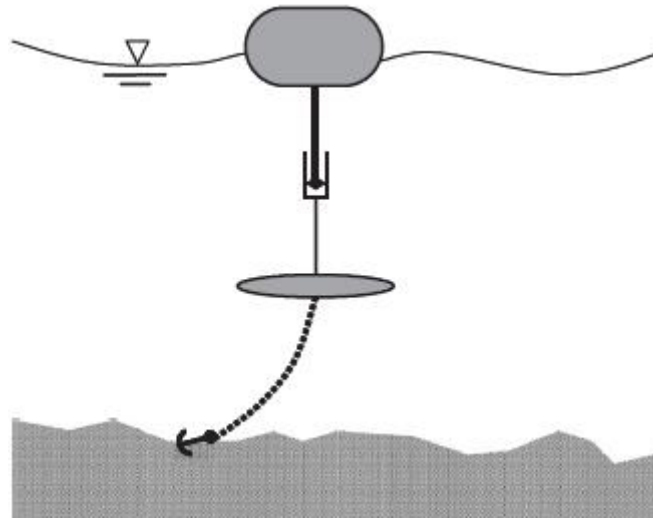


Γράφημα 4 Διαφορά Δυναμικού κατά μήκος "Α" μοντέλου

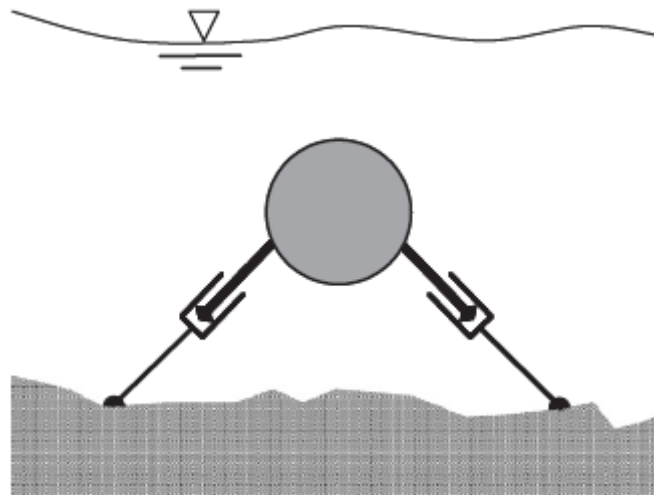
7.3 Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

Η παραγωγή ενέργειας μέσω των πιεζοηλεκτρικών υλικών μπορεί να βρει πολλές εφαρμογές και να βοηθήσει στη κάλυψη των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών του σύγχρονου ανθρώπου. Μικρές ενεργειακές ανάγκες όπως φωταγωγήση σηματοδότης ή θαλάσσιου μετεωρολογικού σταθμού μπορούν να καλυφτούν με αυτό τον τρόπο.

Στη παρούσα διπλωματική περιγράφηκε και αναλύθηκε η εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων πάνω σε δυο συγκεκριμένα μοντέλα. Θα ήταν ενδιαφέρον η λεπτομερής μελέτη θαλάσσιας κατασκευής, με σκοπό την βελτιστοποίηση τη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στις εικόνες 7-5 και 7-6 παρουσιάζονται δυο κατασκευές για μελλοντική μελέτη.



Εικόνα 7-5 Θαλάσσια κατασκευή επάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

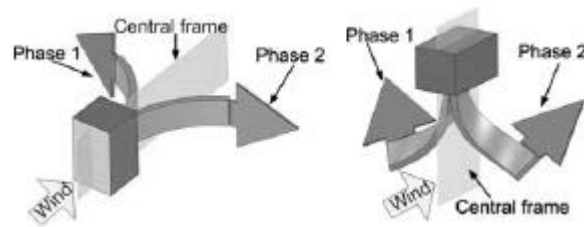


Εικόνα 7-6 Θαλάσσια κατασκευή βυθισμένη κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας

Η ιδέα, σε γενικές γραμμές, είναι η ίδια και έχει να κάνει με εκμετάλλευση της ενέργειας των ρευμάτων τόσο της επιφάνειας όσο και του εσωτερικού θαλάσσιου χώρου. Η τοποθέτηση των πιεζοηλεκτρικών υλικών γίνεται στα σημεία στήριξης των κατασκευών. Με τη ταλάντωση που προκαλείται από τα θαλάσσια ρεύματα ή τα επιφανειακά κύματα αντίστοιχα, παράγεται ηλεκτρική τάση. Ωστόσο τα συγκεκριμένα μοντέλα παρουσιάζουν πολυπλοκότερη κατασκευή και χρειάζονται λεπτομερή μελέτη.

Μια άλλη εφαρμογή που αξίζει τη προσοχή είναι η τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικών υλικών σε εύκαμπτα στοιχεία εκτεθειμένα στη δύναμη του αέρα. Η ταλάντωση αυτή τη φορά θα προκαλείται όχι από το κύμα αλλά από τον αέρα. Τα στοιχεία αυτά μπορεί να είναι τεχνητά φύλλα ή μικρότερα υλικά ραμμένα σε σημαίες. Με αυτό τον τρόπο γίνεται η εκμετάλλευση της δύναμης

του αέρα χωρίς καμία επιβάρυνση προς το περιβάλλον. Η παραπάνω ιδέα περιγράφεται από την εικόνα 7-7. Η ριπή του αέρα προκαλεί ταλάντωση στο πιεζοηλεκτρικό υλικό και παράγεται ηλεκτρικό δυναμικό.



Εικόνα 7-7 Εναλλακτική εφαρμογή πιεζοηλεκτρισμού εκμεταλλευόμενη την δύναμη του ανέμου

8 Βιβλιογραφία

1. Γιώργος Σταυρουλάκης, Ευαγγελία Λουκογεωργάκη (2015) Σύγχρονες Εξελίξεις στις Θαλάσσιες Κατασκευές, Περιγραφή Προβλημάτων Αλληλεπίδρασης Θαλάσσιου Περιβάλλοντος & Θαλάσσιων Κατασκευών: Ακραίες Περιβαλλοντικές Συνθήκες
2. Athanassios A.Dimas (2015) Modern Development in Offshore Structures/Wind, University of Patras, Greece
3. Ch. Koutitas, Th. V. Karambas (2015) Modern Development in Offshore Structures/Ρεύματα – Θαλάσσιοι Κυματισμοί, Aristotle University of Thessaloniki, Greece
4. N.Haritos (2007) Introduction to the Analysis and Design of Offshore Structures- An Overview, University of Melbourne, Australia
5. Rujun Song, Xiaobiao Shan, Fenghi Lv, Tao Xie (Οκτώβριος 2014) A study of vortex-included energy harvesting from water using PZT piezoelectric cantilever with cylindrical extension, Harbin Institute of Technology, China
6. Det Norske Veritas (Οκτώβριος 2010) Environmental Conditions And Environmental Loads, Wave Conditions
7. Det Norske Veritas As (Μάιος 2014) Design of Offshore Wind Turbine Structures, Wave Climate
8. Heung Soo Kim, Joo-Hyong Kim and Jaehwan Kim (Νοέμβριος 2011) A Review of Piezoelectric Energy Harvesting Based on Vibration, South Korea
9. Johannes Falnes (Σεπτέμβριος 2007) A review of wave-energy extraction, NTNU, Trondheim, Norway
10. X.D Xie, Q.Wang, N.Wu (Νοέμβριος 2013) Potential of a Piezoelectric Energy Harvester from Sea Waves, Hubei University, China
11. Xiaobiao Shan, Rujun Song, Bo Liu, Tao Xie (Μάρτιος 2015) Novel Energy Harvesting: A Macro Fiber Composite Piezoelectric Energy Harvester in the Water Vortex, Harbin, PR China

Χρήσιμα Links από Διαδίκτυο

- I. <http://www.piceramic.com/applications.html>
- II. <http://www.noliac.com/applications/>
- III. www.sciencedirect.com
- IV. <https://en.wikipedia.org/>
- V. www.comsol.com (COMSOL Multiphysics Modeling Software)

Διπλωματικές Εργασίες - Παρουσιάσεις

- a) Azeem Ahmad Khan, Piezoelectricity and it's Applications
- b) Mohammed Ali Mohammed (Ιούνιος 2014) Evaluation of Module Handling System on Current Riserless Light Well Intervention Units to Improve Up-time, University of Stavanger
- c) Min Wu (Ιούνιος 2013) Dynamic Analysis Of a Subsea Module During Splash -zone Transit, NTNU, Trondheim, Norway