



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

**« Σχεδίαση και υλοποίηση συστήματος αποκομιδής ενέργειας από
ταλαντώσεις»**

«Design and implementation of an energy harvesting system by oscillations»

Υπό

BENETIA MARIA ΟΥΡΕΪΛΙΔΗ

Πτυχιακή Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Πτυχίου του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας

Επιβλέπων: Θεοδόσιος Θεοδοσίου, Αναπληρωτής Καθηγητής

Λάρισα, 2024

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

Με το παρόν κείμενο βεβαιώνω ότι ο κάτωθι υπογράφων είμαι συγγραφέας της παρούσης πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και η οποία παραδόθηκε, μετά από έγκριση του επιβλέποντας καθηγητή μου, σε έντυπη και ψηφιακή μορφή στη Γραμματεία του Τμήματος. Επίσης δηλώνω πως κάθε πηγή που χρησιμοποίησα (βιβλιογραφία, αρθρογραφία, δικτυογραφία), για την υποστήριξη των υποθέσεων της μελέτης και της ερευνάς μου, είναι πλήρως συμβατή με τα ακολουθούμενα επιστημονικά πρότυπα και, επιπλέον, αναφέρεται ρητά, υπό μορφή αναφοράς-παραπομπής, σε όλο το φάσμα κειμένων της παρούσης εργασίας. Το αυτό ισχύει για τη χρήση δευτερογενών δεδομένων (πινάκων, διαγραμμάτων και εικόνων), ιδεών και λέξεων, τα οποία και αναφέρονται είτε ακριβώς όπως υπάρχουν στις πηγές είτε μεθερμηνεύονται από εμένα.

ΕΠΩΝΥΜΟ	ΟΥΡΕΪΔΗ
ΟΝΟΜΑ	BENETIA MARIA
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2920161
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

© 2024. BENETIA MARIA ΟΥΡΕΪΔΗ

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας της Σχολής Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Θεοδοσίου Θεοδόσιο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την πτυχιακή μου εργασία σε ένα θέμα αιχμής και για την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για τις γνώσεις που μου παρείχε η συνεργασία μας σχετικά με το αντικείμενο των πιεζοηλεκτρικών υλικών.

Χωρίς την υποστήριξη των αγαπημένων μου προσώπων, η εργασία αυτή και οι σπουδές μου δεν θα είχαν ποτέ ολοκληρωθεί. Τους ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	IV
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	VI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	VII
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	IX
ABSTRACT.....	X
ΚΙΝΗΤΡΑ.....	XI
A. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	13
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΠΟΚΟΜΙΔΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	13
1.2 ΟΡΙΣΜΟΙ	13
1.3 ΙΣΤΟΡΙΑ.....	13
1.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΠΟΚΟΜΙΔΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	14
1.5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	15
1.6 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	18
1.6.1 Πιεζοκεραμικά.....	19
1.6.2 Πιεζοπολυμερή.....	20
1.6.3 Ο πιεζοηλεκτρικός μηχανισμός στα πολυμερή	22
1.6.4 Χαρακτηρισμός πιεζοηλεκτρικών πολυμερών	23
1.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	23
1.8 ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΑΠΟΚΟΜΙΔΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	26
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ MODELICA.....	29
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MODELICA.....	29
2.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗ MODELICA	29
ΣΚΟΠΟΣ.....	33
B. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	34
3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ.....	35
3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ.....	35
3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΣΤΗ MODELICA.....	35
3.2.1 Περιγραφή της δομής του μοντέλου.....	35
3.2.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων- Επιλογή διάταξης	37
3.2.3 Μελέτη φόρτισης πυκνωτή	41
3.2.4 Μελέτη χαρακτηριστικών αντίστασης.....	42
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	44
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	44
Γ. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	48
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι : ΚΩΔΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	50
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	57

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά εξαρτημάτων του κυκλώματος που κατασκευάστηκε. . 45

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα	1.	Λειτουργία	Πιεζοηλεκτρικών,	Πηγή:	
					https://onscale.com/piezoelectricity/what-is-piezoelectricity/ 16
Εικόνα 2.		Αναπαράσταση της πιεζοηλεκτρικής λειτουργίας σε επίπεδο κρυστάλλου,		Πηγή:	https://onscale.com/piezoelectricity/what-is-piezoelectricity/ 16
Εικόνα 3.		Βασικά στοιχεία ενός συστήματος αποκομιδής ενέργειας.	Πηγή:	[15]	 28
Εικόνα 4.		Απεικόνιση πυκνωτή σε Modelica.	Πηγή:	Modelica	 30
Εικόνα 5.		Απεικόνιση γείωσης σε Modelica.	Πηγή:	Modelica	 30
Εικόνα 6.		Απεικόνιση πηνίου σε Modelica.	Πηγή:	Modelica	 30
Εικόνα 7.		Απεικόνιση αντίστασης σε Modelica.	Πηγή:	Modelica	 31
Εικόνα 8.		Απεικόνιση διόδου σε Modelica.	Πηγή:	Modelica	 31
Εικόνα 9.		Απεικόνιση πηγής τάσης σε Modelica.	Πηγή:	Modelica	 32
Εικόνα 10.		Συμπεριφορά πηγής τάσης στον άξονα του χρόνου.	Πηγή:	Modelica	 32
Εικόνα 11.		Προτεινόμενα κυκλώματα αποκομιδής (όπου το A ονομάζεται στη συνέχεια «1 ^ο κύκλωμα», το B ονομάζεται «2 ^ο κύκλωμα», το C ονομάζεται «3 ^ο κύκλωμα» και το D ονομάζεται «4 ^ο κύκλωμα»). Πηγή:	[18].		 35
Εικόνα 12.		Σχεδιαστική αποτύπωση μοντέλου 1 ^{ου} κυκλώματος στη Modelica.			 36
Εικόνα 13.		Σχεδιαστική αποτύπωση μοντέλου 2 ^{ου} κυκλώματος στη Modelica.			 36
Εικόνα 14		Σχεδιαστική αποτύπωση μοντέλου 3 ^{ου} κυκλώματος στη Modelica.			 36
Εικόνα 15.		Σχεδιαστική αποτύπωση μοντέλου 4 ^{ου} κυκλώματος στη Modelica.			 37
Εικόνα 16.		Διάγραμμα των V και I στη Modelica για 1 sec.			 38
Εικόνα 17.		Διάγραμμα των V και I στο Modelica για 0,03 sec.			 38
Εικόνα 18.		Διάγραμμα Ισχύος-χρόνου για το 1 ^ο κύκλωμα.			 39
Εικόνα 19.		Διάγραμμα P-t για το 2ο κύκλωμα.			 39
Εικόνα 20.		Διάγραμμα P-t για το 3ο κύκλωμα.			 39
Εικόνα 21.		Διάγραμμα P-t για το 4ο κύκλωμα.			 40
Εικόνα 22.		Συγκεντρωτικό διάγραμμα P-t για τα κυκλώματα 1 έως 4.			 40

Εικόνα 23. Διάγραμμα V-t για το 1 ^ο κύκλωμα.	41
Εικόνα 24. Διάγραμμα V-t για το 2 ^ο κύκλωμα.	41
Εικόνα 25. Διάγραμμα V-t για το 3 ^ο κύκλωμα.	42
Εικόνα 26. Διάγραμμα V-t για το 4 ^ο κύκλωμα.	42
Εικόνα 27. Διάγραμμα σύγκρισης P-t για τα 2 κυκλώματα.	43
Εικόνα 28. Αναπαράσταση του υπό κατασκευή κυκλώματος στο Tinkercad.....	44
Εικόνα 29. Τοποθέτηση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου στην breadboard.	45
Εικόνα 30. Τοποθέτηση του πυκνωτή στην breadboard.	46
Εικόνα 31. Σύνδεση της γέφυρας με τον πυκνωτή και την πηγή.....	46
Εικόνα 32. Σύνδεση led με πυκνωτή-γέφυρα και διακόπτη με led.....	46
Εικόνα 33. Το τελικό κύκλωμα με αναμμένο Led.	47

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά την παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε διεξοδική μελέτη του τρόπου λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Επίσης, πραγματοποιήθηκε εξοικείωση με το λογισμικό περιβάλλον Modelica και προσομοίωση σ' αυτό τεσσάρων κυκλωμάτων αποκομιδής και αποθήκευσης ενέργειας που επιλέχθηκαν από την βιβλιογραφία. Στην συνέχεια, αφού έγινε σύγκριση των τεσσάρων αυτών κυκλωμάτων, έγινε επιλογή του ενός για κατασκευή. Κριτήριο για την αξιολόγηση και επιλογή της βέλτιστης διάταξης αποτέλεσε, αρχικά, η επίτευξη της μέγιστης ισχύος στον ίδιο χρόνο. Καθώς, όμως, αυτό το κριτήριο δεν κατέστη ικανό να αναδείξει την καλύτερη διάταξη, αλλά προέκυψαν όλες ισοδύναμες, ελέγχθηκε η ταχύτητα φόρτισης του πυκνωτή. Ακολούθησε κατασκευή ενός κυκλώματος με χρήση πιεζοηλεκτρικού στοιχείου για αποκομιδή ενέργειας. Προ της κατασκευής έγινε και προσομοίωση της συνδεσμολογίας του στο περιβάλλον "Tinkercad". Τέλος, έγινε δοκιμή του κυκλώματος με διέγερση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και διαπιστώθηκε η λειτουργικότητα του κυκλώματος. Στην παρούσα εργασία έγινε γνωριμία και πρακτική ενασχόληση με τον πολλά υποσχόμενο τομέα της χρήσης των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων για αποκομιδή και αποθήκευση ενέργειας.

Λέξεις- κλειδιά: πιεζοηλεκτρισμός, Modelica, αποκομιδή ενέργειας, ηλεκτρικό κύκλωμα, προσομοίωση κυκλωμάτων

ABSTRACT

In the present thesis, a thorough study of the theoretical principles and the functional behavior of piezoelectric materials was carried out. Also, familiarization with the Modelica software environment was accomplished through the simulation of four energy harvesting and storage circuits selected from the literature. In the next stage, after the comparison of the behavior of these circuits, one was selected to be assembled. The criterion for the evaluation and selection of the optimal circuit-design was, at the first stage, to achieve the maximum power in the same time. However, as this criterion was not able to identify the best circuit, as all of them were equivalent, the charging speed of the capacitor was checked. This was followed by the assembly phase of the circuit using a piezoelectric element for energy harvesting. Prior to the manufacturing, simulation of the set-up was done in the "Tinkercad" environment. Finally, the circuit was tested by simulating the piezoelectric element's operational conditions and the functionality of the circuit was verified. In this thesis, the promising field of using piezoelectric cells for energy harvesting and storage was introduced and practically explored.

Key words: piezoelectricity, Modelica, energy harvesting, electric circuit, circuit simulation

KΙΝΗΤΡΑ

Η ενασχόληση με την συγκεκριμένη εργασία προέκυψε από το ενδιαφέρον της γράφουσας για ενασχόληση με ένα διεπιστημονικό αντικείμενο αιχμής, όπως είναι το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Συνδυάζοντας κλάδους όπως η μηχανολογία, η ηλεκτρολογία, ο προγραμματισμός και η επιστήμη υλικών, η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και η ενασχόληση με μία εφαρμογή των πιεζοηλεκτρικών υλικών και κυκλωμάτων λειτουργίας αποτελεί μια ευκαιρία γνωριμίας με μια ποικιλία εννοιών και προβλημάτων της επιστήμης.

Ακόμη, στον σύγχρονο κόσμο είναι επιτακτική ανάγκη η ανάπτυξη εναλλακτικών ενεργειακών τεχνολογιών που συμβάλλουν στην απεξάρτηση από παραδοσιακές μορφές και στην αποδοτικότερη διαχείριση του τεχνητού και φυσικού περιβάλλοντος. Σε αυτή την κατεύθυνση, οι πιεζοηλεκτρικές τεχνολογίες και οι σχετικές εφαρμογές, όπως το θέμα της παρούσας εργασίας, είναι στην αιχμή της ανάπτυξης τέτοιων λύσεων και αποτελούν έμπνευση για χρήση της επιστήμης με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος.

A. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1.1 Εισαγωγή στην αποκομιδή ενέργειας

Η μηχανική ενέργεια είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ενέργειας στην φύση, βρίσκεται σε αφθονία στα περισσότερα συστήματα και μπορεί να συλλεχθεί και να μετατραπεί σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια [1]. Υπάρχουν τρεις τρόποι μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική: ο ηλεκτρομαγνητικός, ο ηλεκτροστατικός ή τριβοηλεκτρικός και ο πιεζοηλεκτρικός [2]. Απ' τους παραπάνω τρόπους ο πιο ευρέως μελετημένος είναι ο πιεζοηλεκτρισμός, αφού είναι ιδανική μέθοδος για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή τάση, πυκνότητα ενέργειας, χωρητικότητα και μικρή μηχανική απόσβεση λόγω και της ευκολίας διαμόρφωσης των απαραίτητων διατάξεων. Συγκεκριμένα, καθώς το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο βασίζεται αποκλειστικά στην εγγενή πόλωση του υλικού, στις διατάξεις δεν απαιτείται πρόβλεψη για ξεχωριστή πηγή τάσης, μαγνητικό πεδίο ή επαφή με άλλο υλικό παρά μόνο η παρουσία του συλλέκτη [3].

1.2 Ορισμοί

Πιεζοηλεκτρισμός ή πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, ονομάζεται η εμφάνιση ηλεκτρικού δυναμικού στα άκρα ορισμένων στερεών υλικών, όταν υφίστανται μηχανική καταπόνηση ή δόνηση [4].

Σύμφωνα με τους Briscoe and Dunn πιεζοηλεκτρισμός είναι «το ηλεκτρικό φορτίο που συσσωρεύεται ως απόκριση στην εφαρμοζόμενη μηχανική καταπόνηση σε υλικά που έχουν μη κεντροσυμμετρική κρυσταλλική δομή», ενώ σύμφωνα με τους Erturk και Inman «μια μορφή σύζευξης μεταξύ της μηχανικής και της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των κεραμικών και των κρυστάλλων που ανήκουν σε ορισμένες κατηγορίες» [2].

Ακόμη, βασικό στοιχείο του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου που το διακρίνει από άλλες κατηγορίες είναι ότι λειτουργεί και αντίστροφα. Δηλαδή, η εφαρμογή ηλεκτρικού φορτίου σε ένα πιεζοϋλικό, προκαλεί μηχανική καταπόνηση [5].

1.3 Ιστορία

Η πρώτη επίδειξη του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου πραγματοποιήθηκε το 1880 από τους αδερφούς Pierre και Jacques Curie, οι οποίοι συνδύασαν τις γνώσεις πυροηλεκτρισμού που διέθεταν με την κατανόηση της δομής και συμπεριφοράς κρυστάλλων [6]. Χρησιμοποίησαν κρυστάλλους τουρμαλίνης, χαλαζία, τοπαζιού,

ζαχαροκάλαμου και αλατιού Rochelle. Από τα παραπάνω, ο χαλαζίας και το άλας Rochelle, παρουσίαζαν την μεγαλύτερη πιεζοηλεκτρική ικανότητα εκείνη την εποχή [7]. Συγκεκριμένα, ο Jacques έγραψε: «Αν κάποιος τραβήξει ή πιέσει κατά μήκος του κυρίου άξονα (ενός μπλοκ χαλαζία) εμφανίζονται στα άκρα αυτού του άξονα, ίσες ποσότητες ηλεκτρισμού με αντίθετα πρόσημα, ανάλογες με την ασκούμενη δύναμη και ανεξάρτητες από τις διαστάσεις του χαλαζία» [4].

Τα επόμενα χρόνια η έρευνα του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου περιορίστηκε σε κάποιες εργαστηριακές μελέτες. Σημαντική ήταν η συμβολή του Woldemar Voigt, ο οποίος περιέγραψε τις 20 φυσικές κατηγορίες κρυστάλλων που είναι ικανές για πιεζοηλεκτρισμό και όρισε αυστηρά τις πιεζοηλεκτρικές σταθερές χρησιμοποιώντας την ανάλυση τανυστών [6]. Με το ξέσπασμα του Α' Παγκοσμίου πολέμου πραγματοποιήθηκε η πρώτη εφαρμογή του αντίστροφου φαινομένου, που ήταν μία συσκευή σόναρ, από τον Paul Langevin.

Αργότερα, κατά τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο, ερευνητικές ομάδες από τις Ηνωμένες Πολιτείες, τη Ρωσία και την Ιαπωνία ανέπτυξαν ένα νέο είδος τεχνητών υλικών, τα σιδηροηλεκτρικά, τα οποία παρουσίαζαν πιεζοηλεκτρικές σταθερές, κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές των φυσικών υλικών [7]. Αυτό αποτέλεσε το έναυσμα για την ανάπτυξη άλλων δύο τεχνητών υλικών, του τιτανικού βαρίου και του τιτανικού ζirkονικού μολύβδου.

1.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα πιεζοηλεκτρικής αποκομιδής ενέργειας

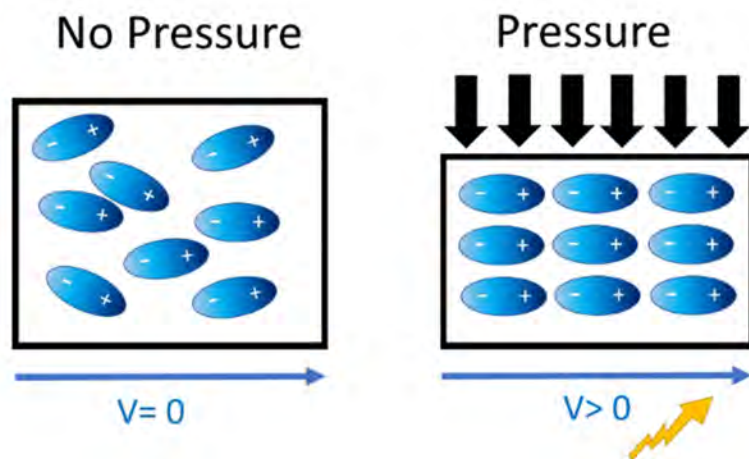
Η πιεζοηλεκτρική αποκομιδή ενέργειας παρουσιάζει όπως συνοπτικά αναφέρθηκε παραπάνω πλήθος πλεονεκτημάτων. Αρχικά, δίνει υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, έχει χαμηλό κόστος, καλή επεκτασιμότητα και ευκολία εφαρμογής [2]. Εκτός από τα παραπάνω, παρουσιάζει απλή δομή, δεν χρειάζεται εξωτερική πηγή τάσης, μπορεί να κατασκευαστεί τόσο σε μέγεθος όσο και σε μικροκλίμακα και δεν επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η υγρασία, η θερμοκρασία ή άλλες συνθήκες όπως το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο [1]. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά ακόμη, μπορούν να διασυνδεθούν σε υβριδικά υλικά για την παραγωγή ενός ευρέος φάσματος τάσεων, ενώ έχουν υψηλή θερμοκρασία Curie (η θερμοκρασία πάνω από την οποία τα υλικά χάνουν τον πιεζοηλεκτρισμό) [2]. Τέλος, οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς έχουν ευέλικτα σχήματα και μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν σε δομές συλλογής ενέργειας [8].

Ωστόσο, παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα, η αποκομιζόμενη ισχύς είναι χαμηλή σε σύγκριση με άλλες τεχνικές αποκομιδής και δημιουργείται η ανάγκη για ανόρθωση, μέγιστη εξαγωγή ισχύος και ρύθμιση της τάσης εξόδου [2]. Τέλος, λόγω της υψηλής παραγόμενης τάσης και του χαμηλού ρεύματος εξόδου, οι πιεζοηλεκτρικοί συλλέκτες ενέργειας δεν είναι πάντα κατάλληλοι για χρήση σε όλες τις προς τροφοδοσία διατάξεις.

1.5 Περιγραφή λειτουργίας

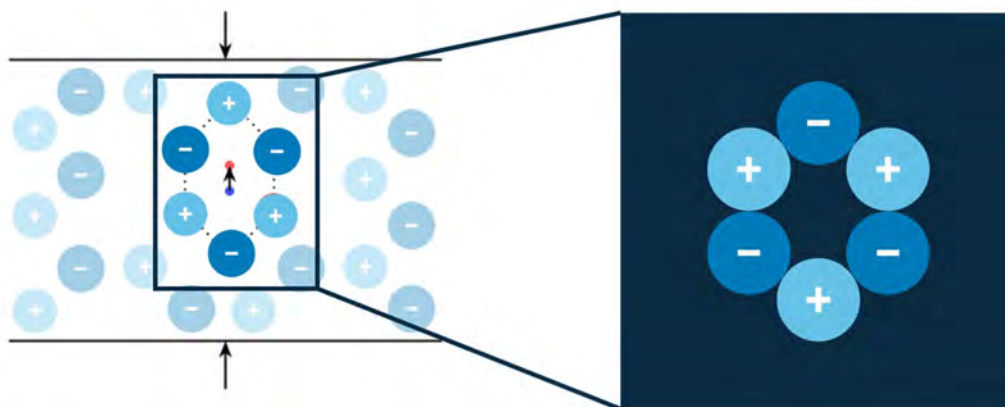
Γενικά, τα υλικά αποτελούνται από μόρια τα οποία είναι διατεταγμένα με έναν ορισμένο τρόπο, όταν το υλικό βρίσκεται σε ελεύθερη κατάσταση (χωρίς να του ασκείται πίεση), και η διάταξη αυτή αντιστοιχεί σε μια ισορροπία. Στην ισορροπία τα φορτία των μορίων εξουδετερώνονται στο σύνολό τους. Ακόμη, στο εσωτερικό των υλικών οι μοριακές δομές διατάσσονται σε κρυστάλλους που ορίζονται από την κυψελίδα, την οργανωμένη, δηλαδή, και επαναλαμβανόμενη δομή των ατόμων που συγκρατούνται μεταξύ τους με δεσμούς.

Σε ένα μη πιεζοηλεκτρικό υλικό το συνολικό κέντρο φόρτισης των θετικών και αρνητικών ιόντων στην κυψελίδα συμπίπτει ενώ όταν εφαρμόζεται παραμόρφωση εξουδετερώνονται χωρίς να εμφανίζεται συνολική πόλωση, γεγονός που το καθιστά μη ικανό για πιεζοηλεκτρικούς σκοπούς [9]. Αντίθετα, η δομή, στους πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους δεν είναι συμμετρική, παρόλο που εξακολουθούν να υπάρχουν σε μια ηλεκτρικά ουδέτερη ισορροπία. Ωστόσο, αν ασκηθεί μηχανική πίεση σε έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, η δομή του παραμορφώνεται, τα άτομα αλλάζουν θέση, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ηλεκτρικής διπολικής ροπής με μη μηδενικό συνολικό φορτίο, έναν κρύσταλλο, δηλαδή, που άγει ηλεκτρικό ρεύμα [10]. Η διαδικασία αυτή αποτυπώνεται στην παρακάτω **Εικόνα 1**.



Εικόνα 1. Λειτουργία Πιεζοηλεκτρικών, Πηγή: <https://Onscale.Com/Piezoelectricity/What-Is-Piezoelectricity/>.

Για την ακρίβεια, η απόσταση μεταξύ των ατόμων δεν αλλάζει, αλλά ουσιαστικά, το υλικό διαστέλλεται οριζόντια, απομακρύνοντας τα θετικά και τα αρνητικά φορτία, ενώ δεν συμπίπτουν τα κεντροειδή τους. Η διαφορά αυτή στην συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών και των λοιπών υλικών είναι λόγω της ειδικής διάταξης των κρυστάλλων σε εξαγωνική διάταξη, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2**.



Εικόνα 2. Αναπαράσταση της πιεζοηλεκτρικής λειτουργίας σε επίπεδο κρυστάλλου, Πηγή: <https://Onscale.Com/Piezoelectricity/What-Is-Piezoelectricity/>.

Στην μορφή αυτή, όταν ασκείται τάση στον κρύσταλλο, τα δυο θετικά φορτία στην κορυφή κινούνται οριζόντια και όχι κάθετα, με αποτέλεσμα το κέντρο του θετικού φορτίου να αλλάζει θέση προς τα πάνω. Το ίδιο ισχύει και για τα αρνητικά φορτία. Ο μέσος όρος των 3 αρνητικών φορτίων μετακινείται προς τα κάτω. Σε έναν μη συμπιεσμένο κρύσταλλο, τα θετικά και τα αρνητικά φορτία απλώς αλληλοεξουδετερώνονται και το συνολικό φορτίο που προκύπτει είναι μηδενικό. Όταν ο κρύσταλλος συμπιέσσει λόγω της παραπάνω λειτουργίας, σε έναν συγκεκριμένο

προσανατολισμό, μετατοπίζεται ελαφρώς η μέση θέση των θετικών φορτίων προς μία κατεύθυνση και η μέση θέση των αρνητικών φορτίων προς την άλλη κατεύθυνση. Αυτό δημιουργεί μια συσσώρευση θετικών φορτίων στη μια όψη και μια συσσώρευση αρνητικών φορτίων στην άλλη όψη. Το φαινόμενο αυτό σε μακροσκοπικό επίπεδο, διατρέχει ολόκληρη τη δομή του υλικού, έτσι ώστε τα καθαρά θετικά και αρνητικά φορτία να εμφανίζονται στις αντίθετες, εξωτερικές επιφάνειες του κρυστάλλου [4]. Είναι σημαντικό να τονιστεί εδώ ότι τα παραγόμενα φορτία ενός υλικού είναι αρκετά μικρά και απαιτείται ενίσχυση τους για να χρησιμοποιηθούν.

Η αντίστροφη διαδικασία μπορεί να εξηγηθεί και σε μοριακό επίπεδο. Αν ένας από αυτούς τους κρυστάλλους που παράγουν τάση εκτεθεί σε ηλεκτρικό πεδίο, επιμηκύνεται ή βραχύνεται ανάλογα με την πολικότητα του πεδίου και ανάλογα με την ένταση του πεδίου. Αν εφαρμοστεί, δηλαδή, μια τάση σε έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο και τα άτομα στο εσωτερικό του υποβληθούν σε "ηλεκτρική πίεση", αναγκάζονται να κινηθούν για να επαναφέρουν την ισορροπία τους, γεγονός που προκαλεί την παραμόρφωσή τους (ελαφριά αλλαγή σχήματος). Ακόμη, ενδιαφέρον έχει ότι το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι μια δυναμική διαδικασία χωρίς ξεκάθαρο σημείο μη εμφάνισης - τερματισμού του φαινομένου. Δηλαδή, ακόμη και όταν ένα υλικό είναι συμπιεσμένο, δεν λειτουργεί ως μπαταρία αποθηκεύοντας ενέργεια, αφού τα αφαιρεθέντα φορτία δεν αναγεννώνται, αλλά είναι ικανά να δημιουργούνται νέα επιφανειακά φορτία, κατά την περαιτέρω συμπίεση ή κατά τη διαστολή του υλικού [9].

Η ηλεκτρική συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών υλικών μπορεί να περιγράψει με χρήση του Νόμου του Hooke. Η ηλεκτρική συμπεριφορά των υλικών θεμελιώνεται από την παρακάτω εξίσωση (**Εξίσωση 1**):

$$D = \varepsilon E \quad (1)$$

όπου D είναι η μετατόπιση πυκνότητας φορτίου, ε η διαπερατότητα και E είναι η ισχύς του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

Ακόμη σύμφωνα με τον Νόμου του Hooke για ένα θεμελιώδες σύστημα (**Εξίσωση 2**):

$$S = s T \quad (2)$$

όπου, όπου S είναι η παραμόρφωση, s είναι η ενδοτικότητα και T είναι η τάση.

Με μια απλοποίηση στον συνδυασμό των παραπάνω οι παρακάτω εξισώσεις (**Εξισώσεις 3, 4**) παράγονται για την περιγραφή των μορφών του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου :

$$D = d T + \varepsilon E \quad (3)$$

$$S = s T + d E \quad (4)$$

όπου d είναι ο πιεζοηλεκτρικός συντελεστής.

Η απόδοση των πιεζοηλεκτρικών συσκευών αποκομιδής ενέργειας εξαρτάται από την απόδοση της μηχανικής-ηλεκτρικής μετατροπής του μετατροπέα ($E\%$). Η απόδοση της μετατροπής ενέργειας για έναν πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα μπορεί να υπολογιστεί με την ακόλουθη εξίσωση (**Εξίσωση 5**):

$$E\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} 100\% \quad (5)$$

όπου P_{out} είναι η ηλεκτρική ισχύς εξόδου και P_{in} είναι η μηχανική ισχύς εισόδου, όπως ορίζονται στις ακόλουθες εξισώσεις (**Εξισώσεις 6, 7**).

$$P_{out} = u_p i_p \quad (6)$$

$$P_{in} = F v \quad (7)$$

όπου u_p είναι η συνολική τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων του μετατροπέα, i_p είναι το ρεύμα που διαρρέει τον πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, F είναι η εξωτερική μηχανική δύναμη και v είναι η ταχύτητα του κινούμενου αντικειμένου [2].

1.6 Πιεζοηλεκτρικά υλικά

Υπάρχει πληθώρα υλικών που χρησιμοποιούνται για πιεζοηλεκτρικούς σκοπούς, φυσικά και τεχνητά. Μερικά τεχνητά από αυτά είναι ο χαλαζίας, το αλάτι Rochelle, το τοπάζι, η τουρμαλίνη, το τιτανικό βάριο, ο τιτανικός ζirkονικός μόλυβδος. Στα φυσικά υλικά που επιδεικνύουν υπό συνθήκες αντίστοιχες δυνατότητες συμπεριλαμβάνονται και το ζαχαροκάλαμο καθώς και οστά.

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά γνωρίζουν μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια με συνεχή απομάκρυνση από τα παραδοσιακά χρησιμοποιούμενα. Εξαιτίας της αυξανόμενης περιβαλλοντικής ανησυχίας, τα τελευταία χρόνια, σχετικά με την τοξικότητα των συσκευών που περιέχουν μόλυβδο υπήρξε ώθηση για την ανάπτυξη πιεζοηλεκτρικών υλικών χωρίς μόλυβδο. Αποτέλεσμα αυτής της πρωτοβουλίας για την ανάπτυξη νέων

πιεζοηλεκτρικών υλικών χωρίς μόλυβδο, είναι μια ποικιλία νέων πιεζοηλεκτρικών υλικών που είναι πιο ασφαλή για το περιβάλλον. Γενικότερα, έχουν πραγματοποιηθεί πολλές ερευνητικές και αναπτυξιακές προσπάθειες για υλικά και μεθόδους κατασκευής σε μικρο- και νανοκλίμακα αλλά και διεύρυνση των πεδίων εφαρμογής τους. Νεοαναπτυγμένα πιεζοηλεκτρικά υλικά, όπως κεραμικά, πολυμερή, σύνθετα υλικά και φυσικά υλικά εμπνευσμένα από τη βιολογία με τη μορφή διαφόρων νανοδομών, στοιβάδων στρώσεων και λεπτών υμενίων με ικανοποιητικές φυσικές ιδιότητες όπως υψηλούς πιεζοηλεκτρικούς συντελεστές, ευκαμψία, και μηχανικές ιδιότητες [1].

1.6.1 Πιεζοκεραμικά

Μία επιλογή, λοιπόν, υλικού για αποκομιδή ενέργειας πιεζοηλεκτρικά είναι τα κεραμικά. Κατασκευάζονται από στερεά διαλύματα τιτανικού βαρίου (BaTiO_3), τιτανικού ζirkονικού και τιτανικού μολύβδου (PZT) και στερεά διαλύματα πολλαπλών συστατικών που σχετίζονται με την κρυσταλλική δομή τύπου περοβσκίτη [11]. Συγκεκριμένα, ένα τυπικό πιεζοηλεκτρικό κεραμικό αποτελείται από μία μάζα κεραμικών κρυστάλλων περοβσκίτη, καθένας από τους οποίους με τη σειρά του αποτελείται από ένα μικρό, τετρασθενές μεταλλικό ιόν, συνήθως τιτάνιο ή ζirkόνιο, σε ένα πλέγμα μεγαλύτερων, δισθενών μεταλλικών ιόντων, συνήθως μόλυβδο ή βάριο, και ιόντων O_2 . Έτσι, υπό συγκεκριμένες συνθήκες προσδίδεται στους κρύσταλλους τετραγωνική ή ρομβοεδρική συμμετρία και αποκτούν μια διπολική ροπή, απαραίτητη για το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Η μηχανική συμπίεση ή τάση σε ένα πολωμένο πιεζοηλεκτρικό κεραμικό στοιχείο αλλάζει τη διπολική ροπή, δημιουργώντας μια τάση. Η συμπίεση κατά μήκος της διεύθυνσης της πόλωσης ή η τάση κάθετα προς τη διεύθυνση της πόλωσης δημιουργεί τάση της ίδιας πολικότητας με την τάση πόλωσης. Η τάση κατά μήκος της διεύθυνσης της πόλωσης, ή η συμπίεση κάθετα προς τη διεύθυνση της πόλωσης, δημιουργεί τάση με πολικότητα αντίθετη από εκείνη της τάσης πόλωσης.

Για την παρασκευή ενός πιεζοηλεκτρικού κεραμικού, αναμιγνύονται λεπτές σκόνες PZT των συστατικών οξειδίων μετάλλων σε συγκεκριμένες αναλογίες, οι οποίες, στη συνέχεια, θερμαίνονται και σχηματίζεται μια ομοιόμορφη σκόνη. Η παραπάνω σκόνη, αναμιγνύεται με ένα οργανικό συνδετικό υλικό και διαμορφώνεται σε δομικά στοιχεία με επιθυμητό σχήμα (δίσκοι, ράβδοι, πλάκες). Αυτά, στη συνέχεια, ψήνονται

σε συγκεκριμένο χρόνο και θερμοκρασία, μέχρις ότου συσσωματωθούν τα σωματίδια πιεζόσκονης και το υλικό αποκτήσει πυκνή κρυσταλλική δομή. Τελικά, τα στοιχεία ψύχονται και διαμορφώνονται ή κόβονται σύμφωνα με προδιαγραφές για να εφαρμοστούν ηλεκτρόδια στις κατάλληλες επιφάνειες. Γενικά, οι πιεζοηλεκτρικές, ελαστικές και διηλεκτρικές σταθερές των πολωμένων κεραμικών εξαρτώνται έντονα από τη θερμοκρασία. Η θέρμανση άνω του σημείου Curie καταστρέφει την επίδραση της πόλωσης και οι ιδιότητες υποβαθμίζονται [12].

1.6.2 Πιεζοπολυμερή

Τα πιεζοηλεκτρικά πολυμερή είναι φυσικά εύκαμπτα, ανθεκτικά και εύκολα στην επεξεργασία, ευνοώντας έτσι πολλές εφαρμογές [1]. Δεν παρουσιάζουν τόσο υψηλή πιεζοηλεκτρική απόκριση όσο τα κεραμικά, καθίστανται, ωστόσο, σημαντικά ως κατηγορία υλικών λόγω της βιοσυμβατότητάς και βιοαποικοδομησιμότητας ορισμένων, του χαμηλού κόστους και της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας σε σύγκριση με άλλα πιεζοϋλικά (κεραμικά κ.λπ.). Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν μελετηθεί και εφαρμοστεί μη τοξικά, πιεζοηλεκτρικά πολυμερή, λόγω της ευελιξίας τους και της μικρότερης ακουστικής τους αντίστασης. Τα πιεζοηλεκτρικά πολυμερή και τα μη τοξικά σύνθετα πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένων των διαφορετικών φυσικών ιδιοτήτων τους [6].

Αν και τα μεγέθη των φαινομένων στα πολυμερή είναι πολύ μικρότερα από εκείνα των σιδηροηλεκτρικών κεραμικών, τα πολυμερή έχουν χαμηλή διαπερατότητα και χαμηλή ακουστική αντίσταση. Είναι διαθέσιμα σε φύλλα μεγάλης επιφάνειας (λεπτά υμένα), εύκαμπτα, ελαφριά και σχετικά χαμηλού κόστους. Έχουν μεγάλη ελαστική συμμόρφωση, και ως εκ τούτου μπορούν να διαμορφωθούν στις επιφάνειες καμπύλων δομών [1].

Τα πιεζοηλεκτρικά πολυμερή μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- Χύδην Πολυμερή

Η πιεζοαπόκρισή τους οφείλεται, κυρίως, στη μοριακή δομή τους. Υπάρχουν δύο τύποι χύδην πολυμερών: τα άμορφα και τα ημικρυσταλλικά. Παραδείγματα ημικρυσταλλικών πολυμερών είναι το φθοριούχο πολυβινυλίδιο (PVDF) και τα συμπολυμερή του, τα πολυαμίδια και το παρυλένιο-C. Τα μη κρυσταλλικά πολυμερή, όπως το πολυϊμίδιο και το χλωριούχο πολυβινυλίδιο (PVDC), εμπίπτουν στα άμορφα πολυμερή όγκου. Το PVDF, ένα από τα πιο ευρέως

χρησιμοποιούμενα πιεζοηλεκτρικά πολυμερή, παρουσιάζει αρκετές φορές μεγαλύτερη πιεζοηλεκτρικότητα από τον χαλαζία. Η πιεζοηλεκτρική του απόκριση είναι περίπου 20-30 pC/N, μια τάξη μεγέθους 5-50 φορές μικρότερη από εκείνη του πιεζοηλεκτρικού κεραμικού τιτανικού ζirkονικού μολύβδου (PZT). Η θερμική σταθερότητα του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου των πολυμερών της οικογένειας PVDF φτάνει μέχρι τους 125 °C. ενώ μερικές εφαρμογές τους είναι αισθητήρες πίεσης, υδρόφωνα και αισθητήρες κρουστικών κυμάτων [6].

Συναντώνται ακόμη και φυσικά πολυμερή όπως το πολύ-L-γαλακτικό οξύ (PLLA) που είναι ένα «πράσινο» πολυμερές το οποίο προέρχεται από φυτά και χρησιμοποιείται συχνά ως βιομηχανική πρώτη ύλη. Η βιοσυμβατότητα, η ευελιξία και ο πιεζοηλεκτρισμός του PLLA προσέλκυσαν το ερευνητικό ενδιαφέρον για τη αποκομιδή ενέργειας. Ενδιαφέρουσα είναι η ερευνητική εργασία των Zhu κ.ά., οι οποίοι κατασκεύασαν πιεζοηλεκτρική διάταξη με βάση νανοϊνες PLLA για ανίχνευση τάσης και συλλογή ενέργειας από την κίνηση της ανθρώπινης άρθρωσης. Καλά οργανωμένες πορώδεις νανοϊνες PLLA σχηματίστηκαν σε ένα ηλεκτρόδιο σχήματος χτένας χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ηλεκτροστατικής ινοποίησης. Το ηλεκτρικό πεδίο συνεχούς ρεύματος της διαδικασίας ηλεκτροστατικής ινοποίησης βοήθησε στην πόλωση της συνιστώσας ηλεκτρικού διπόλου κατά μήκος της κύριας αλυσίδας άνθρακα των νανοϊνών PLLA. Επιτεύχθηκε τάση ανοικτού κυκλώματος 0,55 V και ρεύμα βραχυκύκλωσης 230 pA. Η γραμμική σχέση μεταξύ του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοικτού κυκλώματος έδειξε ότι η πιεζοηλεκτρική διάταξη που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας παραμόρφωσης. Η ενέργεια από την κίνηση της ανθρώπινης άρθρωσης παρήγαγε μέγιστη ηλεκτρική ισχύ 19,5 nW [1].

- Σύνθετα πολυμερή

Είναι συνήθως ενσωματωμένα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά σωματίδια σε ένα πολυμερές φιλμ. Ένα πολυμερές δεν χρειάζεται να είναι πιεζοενεργό προκειμένου να αποτελεί αποτελεσματικό υλικό για ένα σύνθετο πολυμερές. Στην περίπτωση αυτή, μια αρχιτεκτονική υλικού θα μπορούσε να είναι μια αδρανής μήτρα με ένα ξεχωριστό πιεζοενεργό συστατικό [6].

1.6.3 Ο πιεζοηλεκτρικός μηχανισμός στα πολυμερή

Αν και δεν υπάρχει καθολική και κοινή θεωρία που να εξηγεί τον πιεζοηλεκτρικό μηχανισμό στα πολυμερή, υποθέτεται ότι το φαινόμενο προκύπτει λόγω των ηλεκτρικών φορτίων εντός του υλικού με βάση κάποιον βαθμό πολικότητας στο μόριο του πολυμερούς, ίσως από ηλεκτραρνητικά στοιχεία όπως το φθόριο και το οξυγόνο. Ωστόσο, υπάρχουν πολυάριθμα πολυμερή που περιέχουν αυτά τα στοιχεία, τα οποία μπορούν να υποστούν επεξεργασία ώστε να διαθέτουν τη σωστή συμμετρία, τα οποία όμως δεν παρουσιάζουν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Η κατανόηση της προέλευσης του φαινομένου απαιτεί τον προσδιορισμό του τρόπου με τον οποίο αυτά τα φορτία συνδέονται, μέσω των πολυμερικών αλυσίδων και της πολυμερικής δομής, με το εξωτερικό ερέθισμα - είτε αυτό είναι μηχανικό είτε ηλεκτρικό.

Υπάρχουν αντικρουόμενες θεωρίες σχετικά με το ρόλο της κρυσταλλικότητας στην πιεζοηλεκτρική συμπεριφορά των πολυμερών. Το μοντέλο διαστάσεων είναι μια δημοφιλής θεωρία που περιγράφει το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο στο κοινό PVDF και τα συμπολυμερή του. Σε αυτό το μοντέλο, τα μοριακά δίπολα που συνδέονται με τις πολυμερικές αλυσίδες είναι άκαμπτα και αμετάβλητα από μια εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση. Η παραμόρφωση του υλικού απλώς μετακινεί τα επιφανειακά ηλεκτρόδια εντός του πεδίου που δημιουργείται από αυτά τα άκαμπτα μοριακά δίπολα, με αποτέλεσμα αλλαγές στο φορτίο που συσσωρεύεται σε κάθε ηλεκτρόδιο. Δεδομένου ότι τα δίπολα θεωρούνται άκαμπτα και σταθερά, η παραμόρφωση προσαρμόζεται από την άμορφη μήτρα και, ως εκ τούτου, το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να αποδοθεί στο άμορφο κλάσμα του υλικού. Πράγματι, στο διαστατικό μοντέλο, δεν υπάρχει απαίτηση το υλικό να περιέχει κρυσταλλικές περιοχές, εφόσον το υλικό περιέχει κάποια δίπολα και αυτά μοιράζονται μια κοινή ευθυγράμμιση. Από την άλλη πλευρά, ορισμένα υπολογιστικά μοντέλα της κρυσταλλικής δομής του PVDF ισχυρίζονται ότι το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί πλήρως λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις αλλαγές στις σταθερές πλέγματος της κυψελίδας. Δηλαδή, οι κρυσταλλικές περιοχές είναι αποκλειστικά υπεύθυνες για τα παρατηρούμενα πιεζοηλεκτρικά φαινόμενα και η άμορφη μήτρα δεν είναι παρά μια απλή μήτρα. Στην υπολογιστική μοντελοποίηση των πιεζοηλεκτρικών πολυμερών, το άμορφο κλάσμα συχνά αγνοείται εντελώς [13].

1.6.4 Χαρακτηρισμός πιεζοηλεκτρικών πολυμερών

Για τον πλήρη χαρακτηρισμό του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου στα πολυμερή, είναι απαραίτητο να χαρακτηριστεί τόσο η ηλεκτρομηχανική απόκριση όσο και η δομή του πολυμερούς. Ο προσανατολισμός και οι κρυσταλλικές φάσεις που υπάρχουν στη δομή του πολυμερούς θα καθορίσουν τη ρύθμιση των αξόνων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της πιεζοηλεκτρικής μήτρας. Η γνώση του προσανατολισμού αυτών των αξόνων θα δώσει το πλαίσιο στις ηλεκτρομηχανικές μετρήσεις του δείγματος.

Τυπικές μέθοδοι ηλεκτρομηχανικού χαρακτηρισμού για πιεζοηλεκτρικά υλικά, όπως η λείζερ η συμβολομετρία, η μικροσκοπία δύναμης πιεζοαντίδρασης (PFM) και τα τυπικά πιεζόμετρα είναι, επίσης, ευρέως εφαρμόσιμες στα πιεζοηλεκτρικά πολυμερή [13].

1.7 Εφαρμογές

Υπάρχει μια πληθώρα εφαρμογών του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, σε διαφορετικούς τομείς, όπως η ιατρική, οι μεταφορές καθώς και περιπτώσεις ρευστομηχανικής.

Ιατρική

Στον τομέα της ιατρικής, μία από τις εφαρμογές είναι η βαθιά εγκεφαλική διέγερση, μιας νευροχειρουργικής θεραπείας, κατά την οποία συγκεκριμένοι στόχοι στον εγκέφαλο διεγείρονται μέσω ακριβώς εμφυτευμένων ηλεκτροδίων από συνεχή ηλεκτρικά ερεθίσματα που παράγονται από έναν νευροδιεγέρτη. Οι Fan et al. [1] πρότειναν τη χρήση ενέργειας από την ανθρώπινη κάτω γνάθο για την τροφοδοσία του βαθύς εγκεφαλικού διεγέρτη. Αναπτύχθηκε μια πειραματική διάταξη για τη μίμηση των ανθρώπινων δυνάμεων μάσησης και την ανάλυση των επιδόσεων παραγωγής ενέργειας μιας πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας τοποθετημένης στη συνθετική κάτω γνάθο. Ωστόσο, η ισχύς που παρήγαγε η πιεζοηλεκτρική γεννήτρια ήταν ανεπαρκής για την τροφοδοσία ενός εμπορικού εγκεφαλικού διεγέρτη. Οι Hwang et al. [1] ανέπτυξαν μια εύκαμπτη πιεζοηλεκτρική γεννήτρια υψηλής απόδοσης που βασίζεται σε ένα τροποποιημένο με ίνδιο μονοκρυσταλλικό λεπτό υμένιο (PIMNT) σε πλαστικό υπόστρωμα. Η κατασκευασμένη γεννήτρια χρησιμοποιήθηκε ως αυτοτροφοδοτούμενος βαθύς εγκεφαλικός διεγέρτης για την πρόκληση κινήσεων του αντιβραχίου σε ποντίκια.

Μία άλλη εφαρμογή είναι η αποκομιδή καρδιακής ενέργειας. Οι καρδιακοί βηματοδότες παράγουν ηλεκτρικούς παλμούς για να βοηθήσουν τη λειτουργία της καρδιάς διορθώνοντας τους μη φυσιολογικούς καρδιακούς ρυθμούς που προκαλούνται από το σύνδρομο του αρρωστημένου φλεβοκόμβου ή την απόφραξη της καρδιάς. Έχουν προταθεί στρατηγικές συλλογής καρδιακής ενέργειας για την τροφοδοσία των βηματοδοτών ως εναλλακτική λύση στην εφαρμογή μπαταριών. Οι Ansari και Karami [1] χρησιμοποίησαν τις δονήσεις του καρδιακού παλμού για την τροφοδοσία ενός βηματοδότη χωρίς μόλυβδο χρησιμοποιώντας μια δομή πιεζοηλεκτρικών δοκών με ανεμιστήρα. Το μέγεθος της συσκευής αποκομιδής ενέργειας που αναπτύχθηκε ήταν $2\text{ cm} \times 0,5\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ που επέτρεπε τη λειτουργία σε πολύ υψηλές συχνότητες. Οι Dong et al. [1] ανέφεραν μια *in vivo* στρατηγική αποκομιδής καρδιακής ενέργειας που εξαλείφει την επαφή της συσκευής αποκομιδής με την καρδιά και την παρέμβαση στην καρδιαγγειακή λειτουργία. Αναπτύχθηκε μια πιεζοηλεκτρική συσκευή αποκομιδής ενέργειας βασισμένη σε πορώδες λεπτό υμένιο με βιολογικά εμπνευσμένη ελικοειδή δομή αυτο-τύλιξης για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας από το καλώδιο ενός βηματοδότη ή εμφυτεύσιμου καρδιομετατροπέα-απινιδωτή σε ηλεκτρική ενέργεια. Η συσκευή αποκομιδής που αναπτύχθηκε εξαλείφει την ανάγκη για πρόσθετες χειρουργικές επεμβάσεις, καθώς ενσωματώνεται στο καλώδιο του βηματοδότη και είναι συμβατή με την προσέγγιση εμφύτευσης του καλωδίου του βηματοδότη.

Μεταφορές

Ειδικά για τα οχήματα, μία βασική εφαρμογή είναι η αποκομιδή ενέργειας από την οδική κυκλοφορία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς, όπως η τροφοδοσία των φώτων σηματοδότησης της κυκλοφορίας, η παρακολούθηση της δομικής κατάστασης των δρόμων και η αυτοτροφοδότηση του συστήματος ζύγισης οχημάτων. Ο Li [1] χρησιμοποίησε μια δοκιμή πίεσης τροχού παρακολούθησης ενός τεμαχίου δοκού για να προσδιορίσει την ικανότητα παραγωγής πιεζοηλεκτρικής ενέργειας του οδοστρώματος. Οι Jung [1] ανέπτυξαν μια μονάδα πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας με βάση το PVDF για τη συλλογή ενέργειας από τους δρόμους. Η μελέτη κατέδειξε υψηλή πυκνότητα παραγωγής ισχύος, συγκρίσιμη με τα συστήματα που βασίζονται σε κεραμικά για τη αποκομιδή ενέργειας από οδοστρώματα, συνδέοντας παράλληλα γεννήτριες εξήντα μονάδων.

Άλλη εφαρμογή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου στις μεταφορές είναι σε γέφυρες. Η ενέργεια των δονήσεων της γέφυρας, που προκαλείται από τα οχήματα που διέρχονται από αυτή, μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση συσκευών αποκομιδής ενέργειας δόνησης. Η ενέργεια αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς, όπως για φωτισμό ή για την παρακολούθηση της δομικής κατάστασης της γέφυρας. Για παράδειγμα, ο Karimi [1] χρησιμοποίησε μια πιεζοηλεκτρική γεννήτρια τύπου δοκού προβόλου για τη αποκομιδή ενέργειας από τις δονήσεις της γέφυρας.

Εκτός των παραπάνω, άλλες περιπτώσεις χρήσης είναι σε σιδηροδρομική γραμμή, σε σαμαράκια, αλλά και στα ίδια τα οχήματα. Στην τελευταία περίπτωση, η αποκομισθείσα ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές όπως παρακολούθηση της πίεσης των ελαστικών, ενώ μπορεί να προέρχεται από πηγές όπως η ίδια η λειτουργία του κινητήρα του οχήματος.

Ρευστομηχανική

Μία χρήση του φαινομένου είναι η χρήση του ωκεάνιου κύματος για την συλλογή ενέργειας. Οι Hwang et al. [1] σχεδίασαν έναν πιεζοηλεκτρικό συλλέκτη ενέργειας με μια δομή προβόλου και έναν μαγνήτη ως μάζα άκρου και τοποθετήθηκε στην κορυφή ένας σωλήνας με μια μεταλλική σφαίρα που κινείται μέσω του σωλήνα. Το σύστημα δοκιμάστηκε υπό προσομοίωση ωκεάνιων κυμάτων.

Αντίστοιχα με το παραπάνω, εύκαμπτες πιεζοηλεκτρικές διατάξεις έχουν αξιοποιηθεί για την αποκομιδή της αιολικής ενέργειας. Οι Orrego et al. [1] διερεύνησαν την απόδοση της αποκομιδής αιολικής ενέργειας ανεστραμμένων πιεζοηλεκτρικών σημαίων σε ελεγχόμενες και περιβαλλοντικές συνθήκες ανέμου.

Άλλες εφαρμογές με ρευστά είναι οι ετικέτες ψαριών, για τα πρότυπα μετανάστευσης και τις κινήσεις των ειδών ψαριών, μέσω της ασύρματης επικοινωνίας, που εμφυτεύονται εξωτερικά ή εσωτερικά στα ψάρια, η θέρμανση, ο εξαερισμός και κλιματισμός (HVAC) ενώ έρευνα έχει γίνει και σε μικρορευστικό επίπεδο [1].

Πιεζοηλεκτρισμός και βάδισμα

Η αποκομιδή ενέργειας μέσω του βαδίσματος με χρήση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, που αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της παρούσης εργασίας, έχει απασχολήσει τον ερευνητικό κόσμο. Ωστόσο, οι σχετικές μελέτες, στο βαθμό που

είναι δυνατόν να γνωρίζουμε, είναι περιορισμένες, κάτι που ενισχύει και την πρωτοτυπία της μελέτης μας [14].

Γενικά, οι παλμοί επιτάχυνσης που προκαλούνται από το πάτημα της φτέρνας, η επιτάχυνση από την ταλάντωση του ποδιού και η συμπιεστική δύναμη που ασκείται στο παπούτσι λόγω του βάρους ενός ατόμου είναι οι τρεις πηγές ενέργειας από τη δραστηριότητα βάδισης που μπορούν να συλλεχθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [1]. Ο τελευταίος μηχανισμός είναι και αυτός που θα χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή που μελετάται στην παρούσα εργασία. Παρακάτω θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση των ερευνητικών εργασιών που ασχολούνται με το αντικείμενο.

Αρχικά, οι Zhou et al. [1] κατασκεύασαν προσθετικά μια εύκαμπτη και ελαστική πιεζοηλεκτρική γεννήτρια με δομή kirigami που βασίζεται σε νανοσύνθετο P(VDF-TrFE)/BT και μπορεί να τοποθετηθεί σε μια κάλτσα για να συλλέξει την ενέργεια από το πάτημα του ποδιού και να λειτουργήσει ως αυτοτροφοδοτούμενος αισθητήρας βάδισης. Προκειμένου να συλλέξουν ενέργεια από τις τρεις παραπάνω διαφορετικές διεγέρσεις της δραστηριότητας βάδισης, οι Fan et al. [1] ανέπτυξαν μια πιεζοηλεκτρική γεννήτρια, που αποτελείται από μια πιεζοηλεκτρική δοκό προβόλου, μια εγκάρσια δοκό και μια σιδηρομαγνητική σφαίρα, η οποία τοποθετήθηκε μέσα σε ένα παπούτσι. Η τάση εξόδου και η ισχύς αυξήθηκαν από 1,06 V σε 3,55 V και 0,03-0,35 mW, αντίστοιχα, με τη μεταβολή της ταχύτητας βάδισης από 2 km/h σε 8 km/h. Επίσης, οι Turkmen et al. [1] ανέπτυξαν ένα πιεζοηλεκτρικό κεραμικό σύστημα PZT-5H με χαλύβδινο πλαίσιο ενσωματωμένο σε ανθρώπινο παπούτσι βάρους 90 kg. Το σύστημα μπόρεσε να μετατρέψει το 0,4% της εφαρμοζόμενης δύναμης σε ηλεκτρική ισχύ με ρυθμό εξόδου 1,43 mW. Τέλος, οι Hwang et al. [1] σχεδίασαν ένα πιεζοηλεκτρικό πλακίδιο για τη συλλογή ενέργειας από τα βήματα. Χρησιμοποιήθηκε ένα πλακίδιο με ελατήρια και μια μάζα άκρου για να αποτραπεί η θραύση της πιεζοηλεκτρικής μονάδας. Το σύστημα που αναπτύχθηκε δοκιμάστηκε με την πρόσκρουση μιας ατσάλινης μπάλας που έπεφτε ελεύθερα, η οποία απέδωσε μέγιστη ισχύ εξόδου 55 mW [1].

1.8 Κυκλώματα αποκομιδής και αποθήκευσης ενέργειας

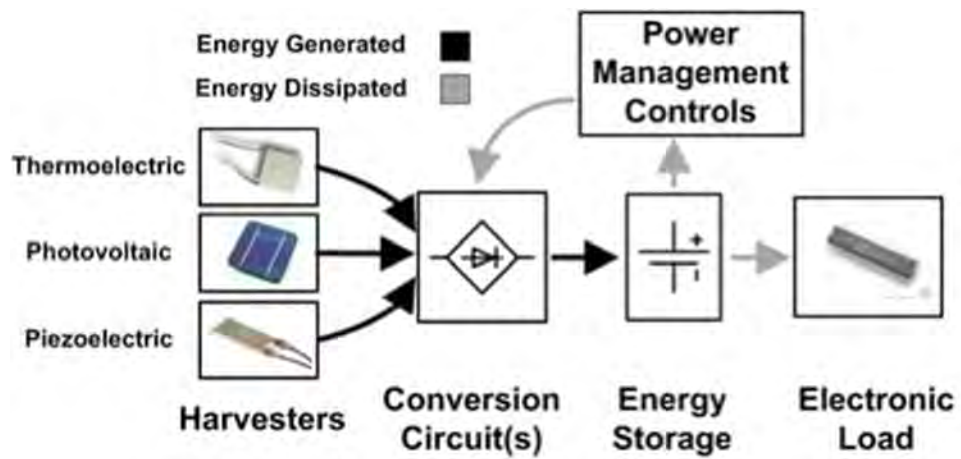
Γενικά, η διαδικασία της αποκομιδής ενέργειας απαιτεί μια μορφή κυκλώματος μετατροπής ισχύος για την αποτελεσματική συλλογή, διαχείριση και μετατροπή της

ενέργειας από μία πηγή σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια και λαμβάνει διάφορες μορφές ανάλογα με την πηγή, την ποσότητα και τον τύπο της ενέργειας που μετατρέπεται. Στην απλούστερη μορφή του, το σύστημα αποκομιδής ενέργειας απαιτεί, αρχικά, μια πηγή ενέργειας, όπως θερμότητα, φως ή δόνηση. Εν συνεχεία, απαιτείται ένας μετατροπέας-συλλέκτης ενέργειας, ο οποίος συλλέγει και μετατρέπει την ενέργεια από την πηγή σε ηλεκτρική ενέργεια. Στην προκειμένη περίπτωση ο μετατροπέας αυτός είναι το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Η ενέργεια που μετατρέπεται από τον μετατροπέα ανορθώνεται για τη δημιουργία συνεχούς τάσης, κατάλληλης για φορτίο και αποθήκευση ενέργειας. Ο κύριος στόχος κατά το σχεδιασμό κυκλωμάτων αποκομιδής ενέργειας είναι η διατήρηση υψηλής απόδοσης σε κάθε στάδιο. Επομένως, χρειάζεται ένα κύκλωμα προσαρμογής σύνθετης αντίστασης μεταξύ του μετατροπέα και του ανορθωτή για μέγιστη μεταφορά ισχύος. Μετά την ανόρθωση, η τάση μπορεί να πολλαπλασιαστεί με κυκλώματα πολλαπλασιαστή τάσης για συμβατότητα.

Στην συνέχεια, χρησιμοποιείται ένας πυκνωτής ή μία μπαταρία για την αποθήκευση ενέργειας. Ορισμένα εξελιγμένα συστήματα χρησιμοποιούν προσαρμοστικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που αντισταθμίζουν τις αδυναμίες των μεμονωμένων συσκευών αποθήκευσης ενέργειας.

Από εκεί και πέρα ένα κύκλωμα αποκομιδής και αποθήκευσης μπορεί να περιλαμβάνει πιο σύνθετα στοιχεία όπως ρυθμιστές, σύνθετα κυκλώματα ελέγχου, μικροελεγκτές, αισθητήρες, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή [15].

Παρακάτω (**Εικόνα 3**) παρουσιάζεται σχεδιαστικά ένα ενδεικτικό, απλό κύκλωμα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.



Εικόνα 3. Βασικά στοιχεία ενός συστήματος αποκομιδής ενέργειας. Πηγή: [15]

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ MODELICA

2.1 Περιγραφή λογισμικού Modelica

Η Modelica είναι μια γλώσσα που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση εικονικών και φυσικών συστημάτων. Η προσομοίωση των συστημάτων γίνεται με την συσχέτιση των χαρακτηριστικών μεγεθών των εξαρτημάτων τους, μέσω μαθηματικών σχέσεων. Για τον σκοπό αυτό, στο πρόγραμμα παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας των συστημάτων με χρήση αντικειμένων. Μια λειτουργία, που διευκολύνει την προσομοίωση σύνθετων προβλημάτων, όπως εκείνα που περιέχουν συνδυασμούς μηχανικών, ηλεκτρικών, ηλεκτρονικών, μαγνητικών, υδραυλικών, θερμικών και άλλων υποσυστημάτων [16].

Ακόμη, η Modelica σε αντίθεση με τις συμβατικές γλώσσες προγραμματισμού είναι γλώσσα μοντελοποίησης. Ειδικότερα, μοιάζει με αντικειμενοστραφείς γλώσσες, όπως η C++ ή η Java, αλλά διαφέρει σε δύο σημαντικά σημεία. Πρώτον, οι κλάσεις της Modelica δεν μεταγλωττίζονται με τη συνήθη έννοια, αλλά μεταφράζονται σε αντικείμενα τα οποία στη συνέχεια υλοποιούνται από μια μηχανή προσομοίωσης. Η μηχανή προσομοίωσης δεν καθορίζεται από τη γλώσσα, αν και περιγράφονται ορισμένες απαιτούμενες δυνατότητες. Δεύτερον, αν και οι κλάσεις μπορεί να περιέχουν αλγοριθμικά στοιχεία παρόμοια με τις εντολές ή τα μπλοκ στις γλώσσες προγραμματισμού, το κύριο περιεχόμενό τους είναι ένα σύνολο εξισώσεων [17].

2.2 Μοντελοποίηση στοιχείων κυκλώματος στη Modelica

Το OpenModelica είναι ένα περιβάλλον μοντελοποίησης και προσομοίωσης ανοιχτού κώδικα. Για κάθε εξάρτημα που θα χρησιμοποιηθεί στην μοντελοποίηση των κυκλωμάτων, στην παρούσα εργασία, φαίνεται παρακάτω το αντίστοιχο εικονίδιο στο λογισμικό, ο συμβολισμός του στον κώδικα και ορισμένες πληροφορίες.

Ο γραμμικός πυκνωτής συνδέει την τάση V του κλάδου με το ρεύμα I του κλάδου, μέσω της **Εξίσωσης 8**. Η χωρητικότητα C επιτρέπεται να είναι θετική ή μηδενική. Η απεικόνιση του πυκνωτή φαίνεται στην **Εικόνα 4**.

$$I = C \cdot \frac{dV}{dt} \quad (8)$$



Εικόνα 4. Απεικόνιση πυκνωτή σε Modelica. Πηγή: Modelica

Συμβολισμός σε περιβάλλον προγραμματισμού:

```
SystemModel["Modelica.Electrical.Analog.Basic.Capacitor"]
```

Κάθε ηλεκτρικό κύκλωμα πρέπει να περιέχει τουλάχιστον μία γείωση. Το δυναμικό στον κόμβο γείωσης είναι μηδέν. Η απεικόνιση της γείωσης φαίνεται στην **Εικόνα 5**.



Εικόνα 5. Απεικόνιση γείωσης σε Modelica. Πηγή: Modelica

Συμβολισμός σε περιβάλλον προγραμματισμού:

```
SystemModel["Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground"]
```

Το γραμμικό πηνίο συνδέει την τάση V του κλάδου με το ρεύμα I του κλάδου, μέσω της **Εξίσωσης 9**. Η επαγωγή L επιτρέπεται να είναι θετική ή μηδενική. Η απεικόνιση του πηνίου φαίνεται στην **Εικόνα 6**.

$$V = L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (9)$$



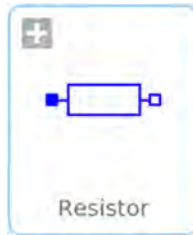
Εικόνα 6. Απεικόνιση πηνίου σε Modelica. Πηγή: Modelica

Συμβολισμός σε περιβάλλον προγραμματισμού:

```
SystemModel["Modelica.Electrical.Analog.Basic.Inductor"]
```

Η γραμμική αντίσταση συνδέει την τάση V του κλάδου με το ρεύμα I του κλάδου, μέσω της **Εξίσωσης 10**. Η αντίσταση R επιτρέπεται να είναι θετική, μηδενική ή αρνητική. Η απεικόνιση της αντίστασης φαίνεται στην **Εικόνα 7**.

$$I \cdot R = V \quad (10)$$

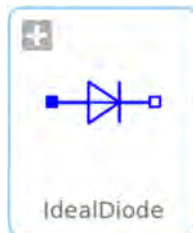


Εικόνα 7. Απεικόνιση αντίστασης σε Modelica. Πηγή: Modelica

Συμβολισμός σε περιβάλλον προγραμματισμού:

```
SystemModel["Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor"]
```

Πρόκειται για μια ιδανική διόδο, η οποία είναι είτε αγωγίμη είτε κλειστή ανάλογα με την τιμή της τάσης. Η απεικόνιση της διόδου φαίνεται στην **Εικόνα 8**.



Εικόνα 8. Απεικόνιση διόδου σε Modelica. Πηγή: Modelica

Συμβολισμός σε περιβάλλον προγραμματισμού:

```
SystemModel["Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode"]
```

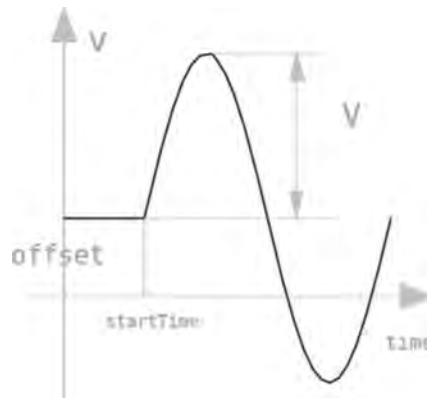
Πρόκειται για μία πηγή παροχής τάσης στο κύκλωμα η οποία στο πρόγραμμα παρέχεται από το πακέτο Modelica.Blocks.Sources. Η απεικόνιση της πηγής τάσης φαίνεται στην **Εικόνα 9**. Η πηγή παρέχει ρεύμα της μορφής που απεικονίζεται στην παρακάτω **Εικόνα 10**. Ακόμη, παρέχεται από το λογισμικό η δυνατότητα μετατόπισης της συμπεριφοράς στον άξονα του χρόνου μέσω της παραμέτρου «startTime».



Εικόνα 9. Απεικόνιση πηγής τάσης σε Modelica. Πηγή: Modelica

Συμβολισμός σε περιβάλλον προγραμματισμού:

`SystemModel["Modelica.Electrical.Analog.Sources.SineVoltage"]`



Εικόνα 10. Συμπεριφορά πηγής τάσης στον άξονα του χρόνου. Πηγή: Modelica

ΣΚΟΠΟΣ

Οι στόχοι της παρούσας πτυχιακής εργασίας συνοψίζονται ως εξής:

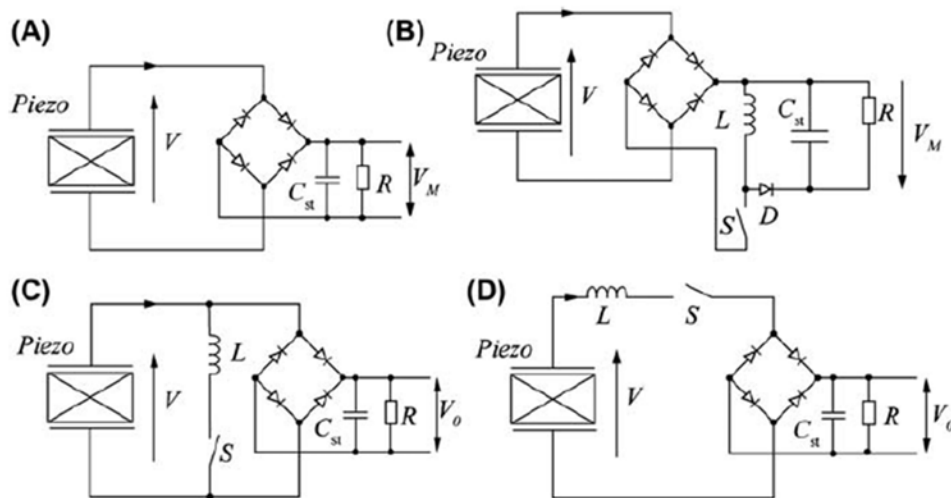
- 1. Μελέτη του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.** Αρχικός στόχος ήταν η κατανόηση και η μελέτη του φαινομένου της πιεζοηλεκτρικής λειτουργίας και των σχετικών υλικών.
- 2. Μελέτη κυκλωμάτων αποκομιδής ενέργειας.** Η μελέτη κυκλωμάτων ήταν βασικός στόχος για την αποδοτικότερη αξιοποίηση των πιεζοηλεκτρικών υλικών και την αποθήκευση της ενέργειας που συλλέγεται.
- 3. Μοντελοποίηση και σύγκριση.** Βασικό στόχο αποτέλεσε η μοντελοποίηση αυτών των κυκλωμάτων και η σύγκρισή τους. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό περιβάλλον της Modelica.
- 4. Κατασκευή διάταξης.** Τέλος, στόχο της εργασίας αυτής αποτέλεσε και η κατασκευή μίας πειραματικής διάταξης για την αποθήκευση και αποκομιδή ενέργειας με χρήση πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, με σκοπό την πρακτική κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των αντίστοιχων κυκλωμάτων που μελετήθηκαν.

Β. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

3.1 Επιλογή κυκλωμάτων

Στην παρούσα, χρησιμοποιήθηκαν τα 4 κυκλώματα που αναφέρει ο Wang [18], ως τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα στην σχετική βιβλιογραφία, κυκλώματα αποκομιδής και αποθήκευσης ενέργειας. Τα κυκλώματα αυτά είναι τα εξής: κύκλωμα διεπαφής αντίστασης μονού φορτίου, το πρότυπο κύκλωμα διεπαφής, το κύκλωμα διεπαφής σύγχρονης εξαγωγής ηλεκτρικού φορτίου (SECE) και το κύκλωμα διεπαφής σειράς ή παράλληλο κύκλωμα «σύγχρονης αποκομιδής με διακόπτη σε επαγωγή» (SSHI), τα οποία φαίνονται παρακάτω, στην **Εικόνα 11**.

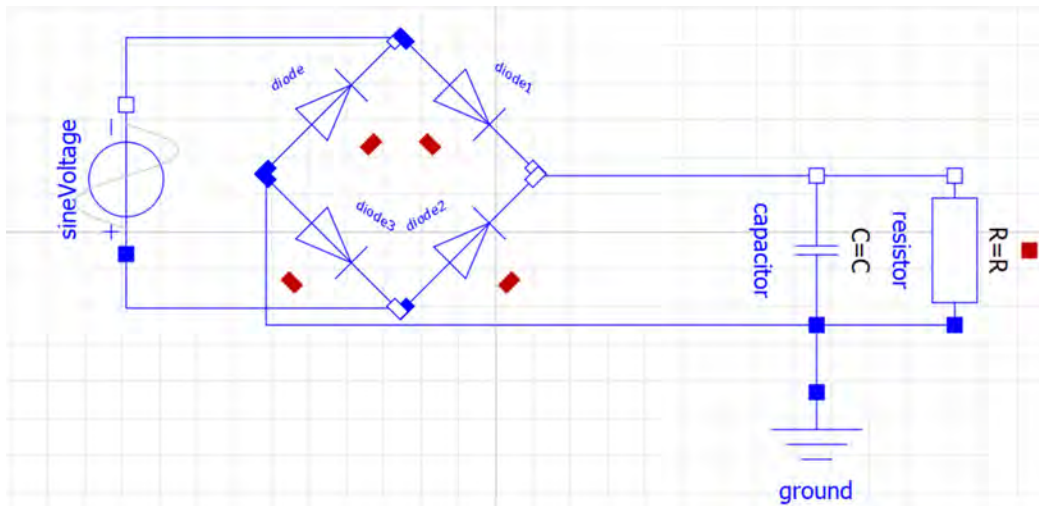


Εικόνα 11. Προτεινόμενα κυκλώματα αποκομιδής (όπου το A ονομάζεται στη συνέχεια «1^ο κύκλωμα», το B ονομάζεται «2^ο κύκλωμα», το C ονομάζεται «3^ο κύκλωμα» και το D ονομάζεται «4^ο κύκλωμα»). Πηγή: [18]

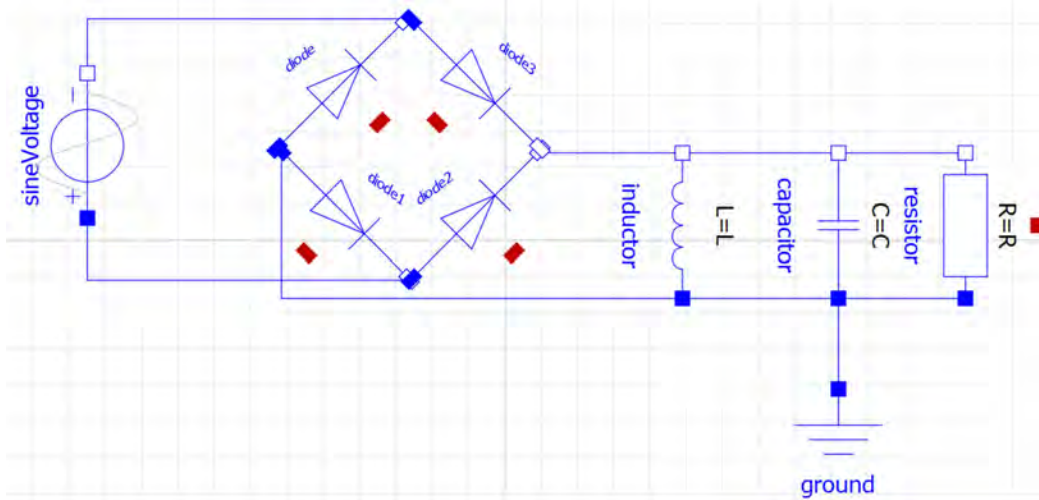
3.2 Προσομοίωση κυκλωμάτων στη Modelica

3.2.1 Περιγραφή της δομής του μοντέλου

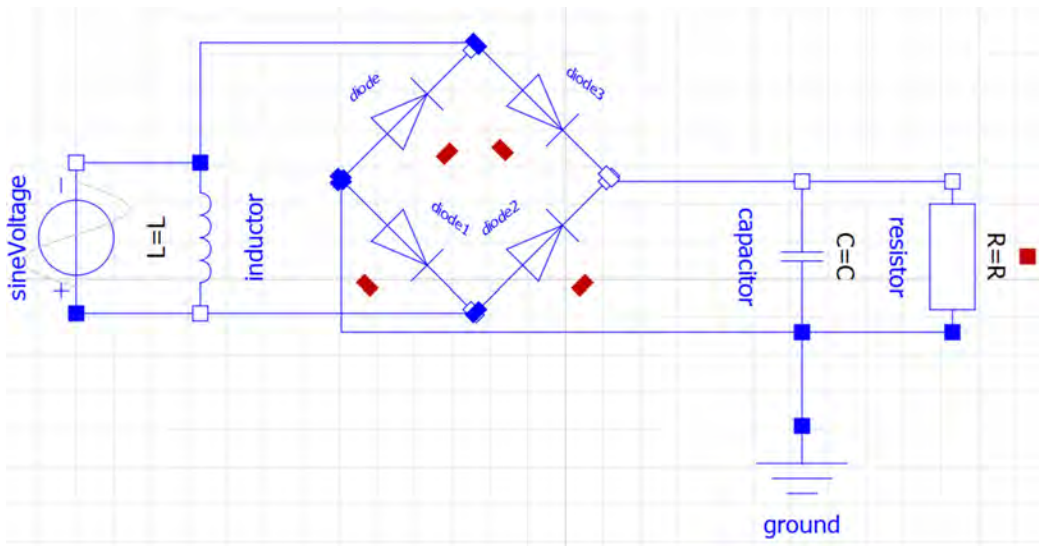
Σχεδιάστηκαν τα κυκλώματα στο περιβάλλον της MODELICA. Έγινε χρήση των προσφερόμενων από το λογισμικό στοιχείων για μοντελοποίηση του εξοπλισμού των κυκλωμάτων. Όλα τα κυκλώματα αποτελούνται από μία πηγή τάσης, μία αντίσταση, μία γέφυρα διόδων και έναν πυκνωτή, ενώ τα 2, 3 και 4 έχουν επιπλέον και ένα πηνίο. Τα 2, 3 και 4, λοιπόν, διαφέρουν ως προς τον τρόπο σύνδεσης του πηνίου. Στις παρακάτω εικόνες (**Εικόνες 12, 13, 14, 15**) παρουσιάζονται οι σχεδιαστικές αποτυπώσεις των μοντέλων των κυκλωμάτων 1, 2, 3, 4 αντίστοιχα.



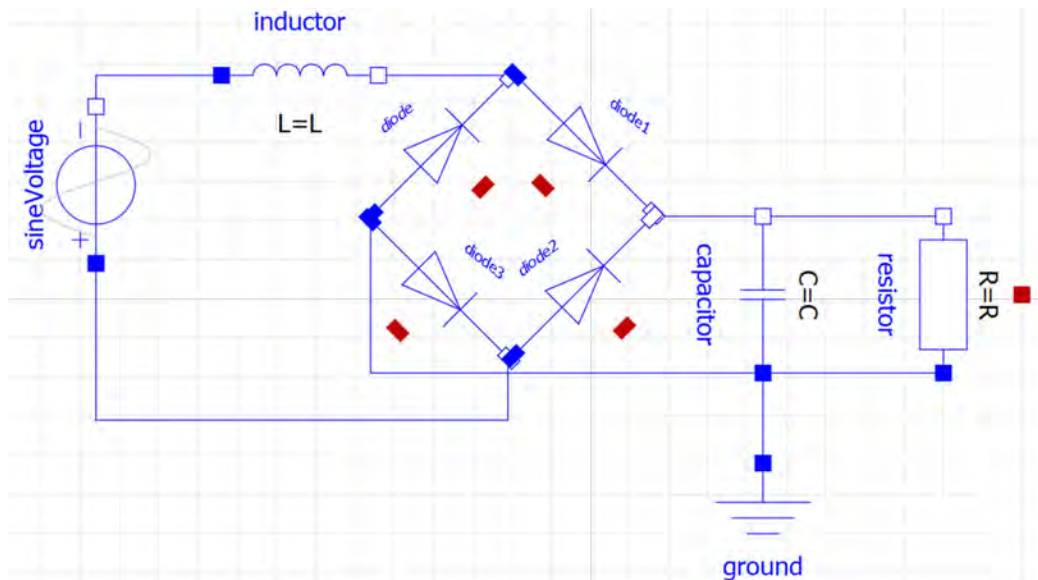
Εικόνα 12. Σχεδιαστική αποτύπωση μοντέλου 1^{ου} κυκλώματος στη Modelica.



Εικόνα 13. Σχεδιαστική αποτύπωση μοντέλου 2^{ου} κυκλώματος στη Modelica.



Εικόνα 14. Σχεδιαστική αποτύπωση μοντέλου 3^{ου} κυκλώματος στη Modelica.



Εικόνα 15. Σχεδιαστική αποτύπωση μοντέλου 4^{ου} κυκλώματος στη Modelica.

Παραμετροποιήθηκαν στον κώδικα της επίλυσης οι βασικές παράμετροι κάθε εξαρτήματος. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η επανάληψη της διαδικασίας λύσης / προσομοίωσης κάθε κυκλώματος για διαφορετική κάθε φορά τιμή. Αρχικά, ως τιμές αναφοράς, χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τιμές:

- $R=30 \, \Omega$
- $C=189 \times 10^{-6} \, \text{F}$
- $L=0,01 \, \text{H}$
- $F=100 \, \text{Hz}$
- $V=2 \, \text{V}$

Οι κώδικες που δημιουργήθηκαν για τις προσομοιώσεις των κυκλωμάτων παρουσιάζονται για κάθε τύπο κυκλώματος στο **Παράρτημα Ι**.

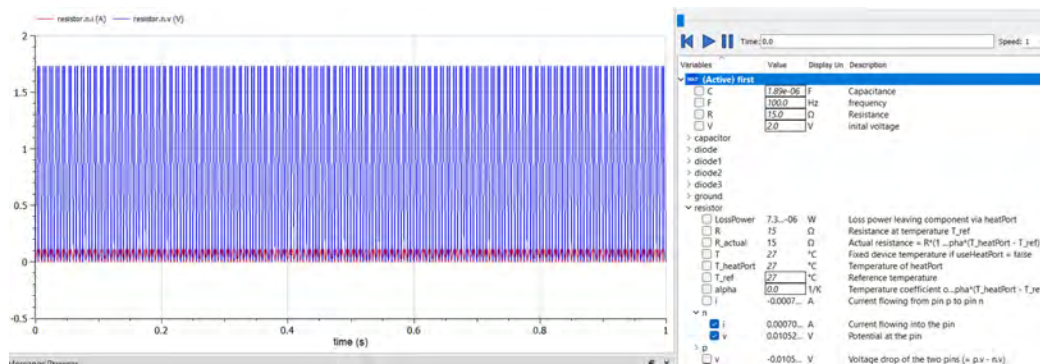
3.2.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων- Επιλογή διάταξης

Σκοπός της παρούσας ενότητας ήταν η επιλογή της βέλτιστης διάταξης από τις παραπάνω προτεινόμενες διατάξεις με στόχο τον πειραματικό έλεγχο της. Ως κριτήριο επιλογής της βέλτιστης διάταξης ορίστηκε, αρχικά, η επίτευξη της μεγαλύτερης ενέργειας του κυκλώματος στον ίδιο χρόνο (μεγαλύτερη ισχύς). Για την αρχική αξιολόγηση των κυκλωμάτων, επιλέχθηκαν τυχαία τα 0,03 sec ως χρόνος φόρτισης του κυκλώματος. Έτσι, με την χρήση των τεσσάρων προσομοιώσεων, έγινε

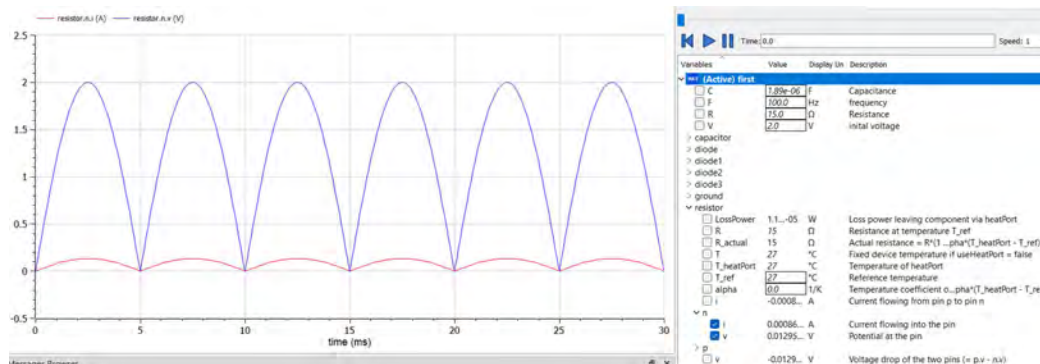
εξαγωγή των δεδομένων από το πρόγραμμα. Χρησιμοποιήθηκαν, συγκεκριμένα, τα Volt και η ένταση της αντίστασης για να υπολογιστεί η παραγόμενη ισχύς από τον τύπο (11):

$$P = I \cdot V \quad (11)$$

Παρακάτω στις **Εικόνες 16 και 17**, φαίνονται ενδεικτικά οι απεικονίσεις των τιμών V και I όπως φαίνονται στο περιβάλλον του προγράμματος. Είναι φανερό ότι στο 1 sec είναι πολύ πυκνό το δείγμα των τιμών που δίνει το πρόγραμμα, ενώ στα 0,03 sec πολύ πιο ευκρινές το διάγραμμα με λιγότερες τιμές.

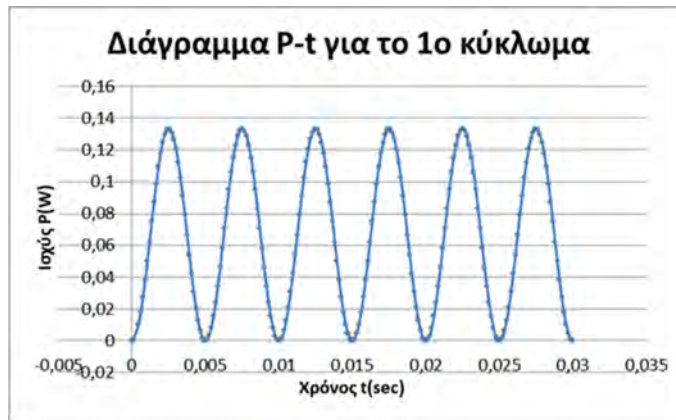


Εικόνα 16. Διάγραμμα των V και I στη Modelica για 1 sec.

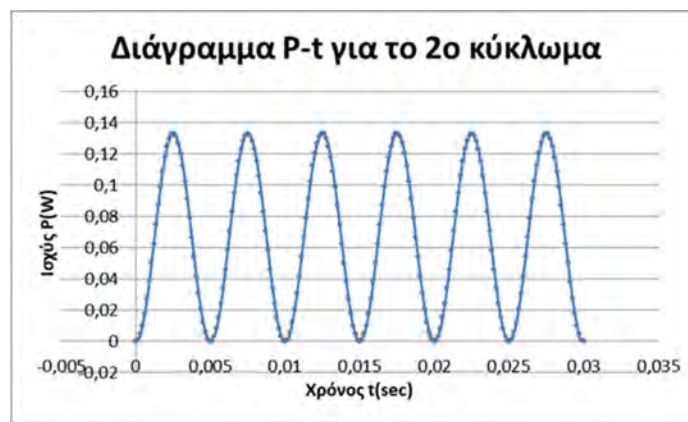


Εικόνα 17. Διάγραμμα των V και I στο Modelica για 0,03 sec.

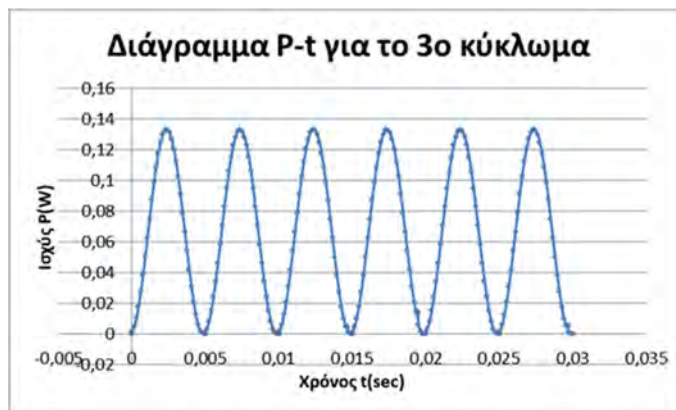
Παρακάτω στις **Εικόνες 18 έως 21** παρουσιάζονται τα διαγράμματα ισχύος σε συνάρτηση με τον χρόνο για κάθε ένα κύκλωμα.



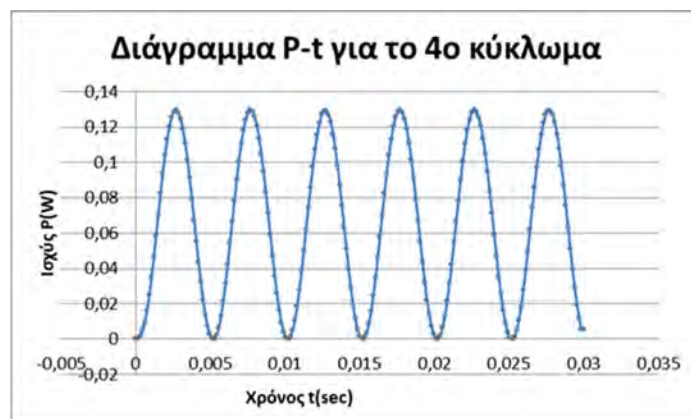
Εικόνα 18. Διάγραμμα Ισχύος-χρόνου για το 1^ο κύκλωμα.



Εικόνα 19. Διάγραμμα P-t για το 2ο κύκλωμα.

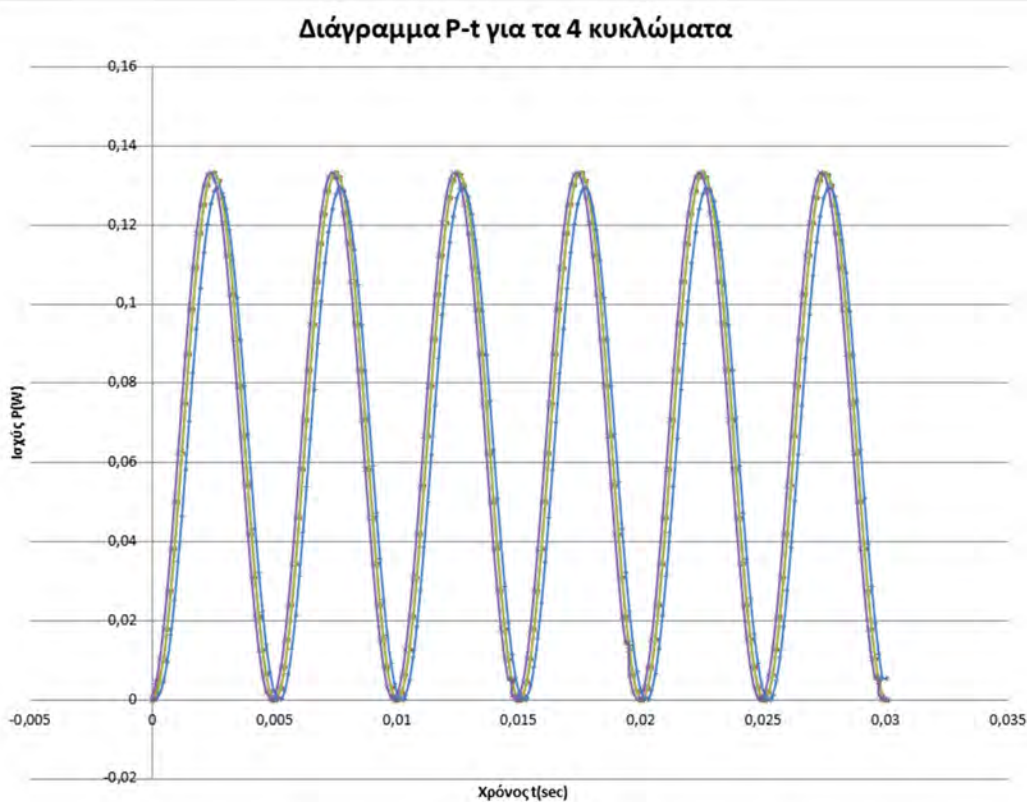


Εικόνα 20. Διάγραμμα P-t για το 3ο κύκλωμα.



Εικόνα 21. Διάγραμμα P-t για το 4ο κύκλωμα.

Παρακάτω, στην **Εικόνα 22**, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά και τα τέσσερα παραπάνω διαγράμματα.



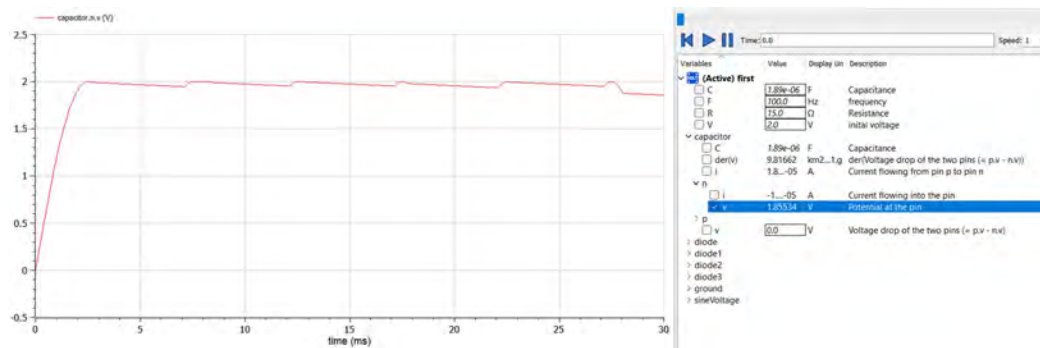
Εικόνα 22. Συγκεντρωτικό διάγραμμα P-t για τα κυκλώματα 1 έως 4.

Ακόμη, με την χρήση της εφαρμογής ανάλυσης δεδομένων Origin, αφού απομονώθηκε η 1^η καμπύλη απ' τα εν λόγω διαγράμματα P-t, υπολογίστηκε το εμβαδόν που περικλείεται. Το εμβαδόν κάθε σχήματος ισοδυναμεί με την μέση ισχύ κάθε κυκλώματος. Προέκυψαν τα παρακάτω εμβαδά για κάθε κύκλωμα αντίστοιχα: 0,000333489, 0,000333063, 0,000333065, και 0,000324498.

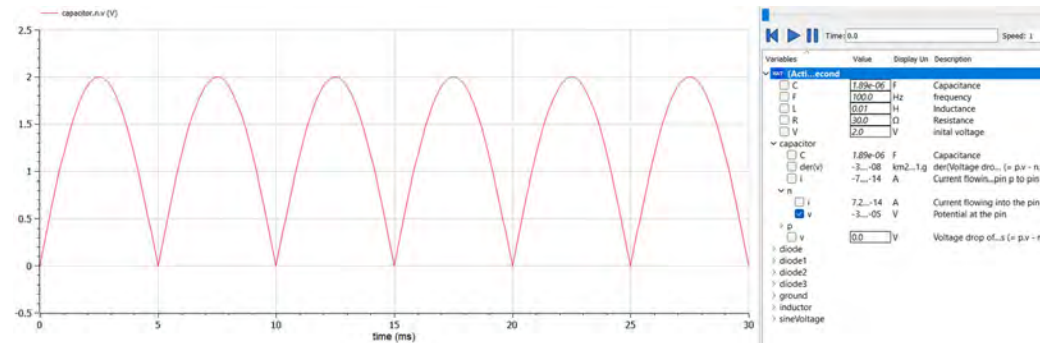
Είναι, λοιπόν, εμφανές ότι τα τέσσερα κυκλώματα είναι σχεδόν ισοδύναμα και δεν προκύπτει κάποια βέλτιστη επιλογή. Αυτό ήταν αναμενόμενο ως ένα σημείο, καθώς πρόκειται για βελτιστοποιημένα κυκλώματα της βιβλιογραφίας, που αναμένεται να έχουν παραπλήσιες δυνατότητες. Για τον λόγο αυτό θα μελετηθεί και η φόρτιση του πυκνωτή ως προς τον χρόνο.

3.2.3 Μελέτη φόρτισης πυκνωτή

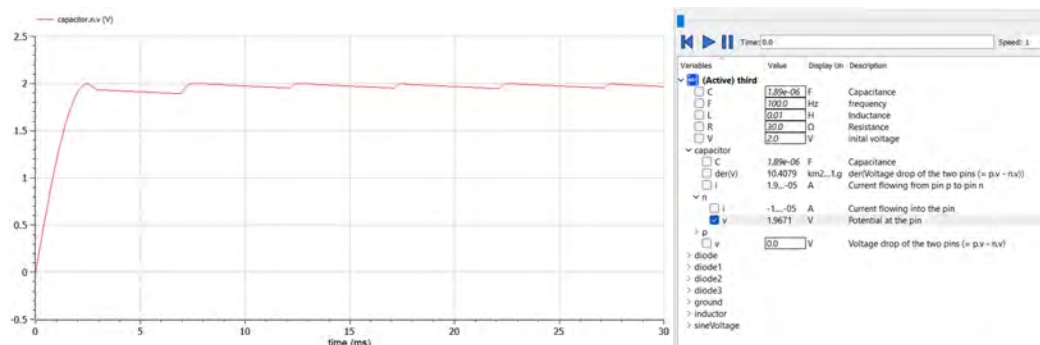
Σκοπός είναι να ελεγχθεί αν σε κάποιο απ' τα κυκλώματα ο πυκνωτής φορτίζει γρηγορότερα από τα υπόλοιπα. Έτσι, αφού αφαιρεθεί από όλα τα κυκλώματα η αντίσταση, λαμβάνονται απ' την εφαρμογή, για 0.03 sec, τα διαγράμματα τάσης πυκνωτή- χρόνου που φαίνονται παρακάτω στις **Εικόνες 23, 24, 25 και 26**.



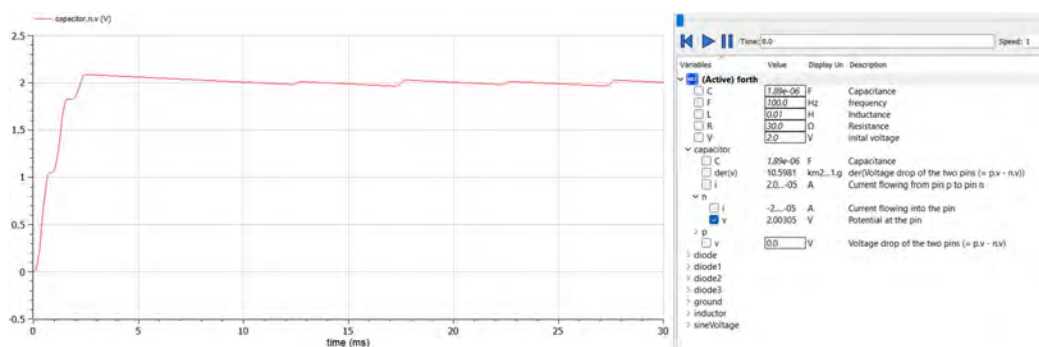
Εικόνα 23. Διάγραμμα V-t για το 1^ο κύκλωμα.



Εικόνα 24. Διάγραμμα V-t για το 2^ο κύκλωμα.



Εικόνα 25. Διάγραμμα V-t για το 3^ο κύκλωμα.



Εικόνα 26. Διάγραμμα V-t για το 4^ο κύκλωμα.

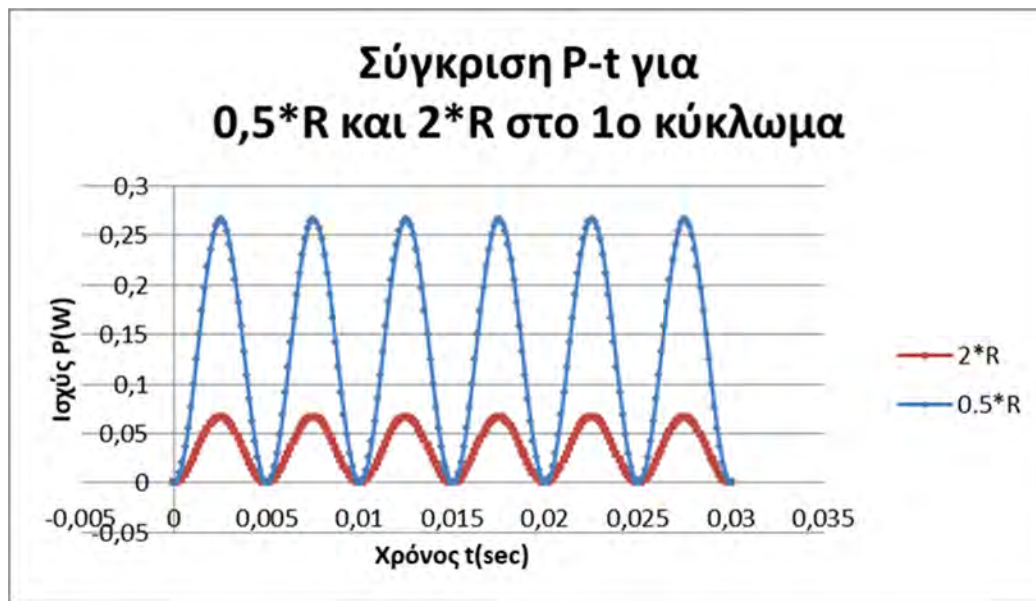
Παρατηρώντας τις παραπάνω εικόνες, φαίνεται ότι τα κυκλώματα 1, 3 και 4 είναι παρόμοια και φορτίζουν την ίδια ακριβώς στιγμή. Αντίθετα, στο 2^ο κύκλωμα λόγω παράλληλης σύνδεσης πυκνωτή - πηνίου, παρατηρείται συνεχής φόρτιση και εκφόρτιση του πυκνωτή, με την φόρτιση να πραγματοποιείται, επίσης στην ίδια χρονική στιγμή με τα υπόλοιπα τρία.

Έτσι, λοιπόν, το 2^ο κύκλωμα απορρίπτεται, ενώ δεν προκύπτει μια ξεκάθαρη βέλτιστη επιλογή ως προς τον τύπο του κυκλώματος. Για την πειραματική διάταξη επιλέγεται να κατασκευαστεί ο πρώτος τύπος.

3.2.4 Μελέτη χαρακτηριστικών αντίστασης

Στο κύκλωμα που επιλέχθηκε, το μοναδικό στοιχείο που μπορεί να παραμετροποιηθεί ως προς τα χαρακτηριστικά του είναι η αντίσταση. Για τον σκοπό αυτό έγινε μια μελέτη για επιλογή τιμής της αντίστασης που θα πραγματοποιηθεί. Ως τιμή αναφοράς χρησιμοποιήθηκε η τιμή που δίνεται στην περιγραφή των κυκλωμάτων στο [16]. Έτσι, μελετήθηκαν, επιπλέον, οι διαφορές που προκύπτουν στην απόδοση τροποποιώντας το αρχικό R σε 2R και 0,5R, ακολουθώντας ξανά την παραπάνω διαδικασία.

Ακολουθείται όλη η παραπάνω διαδικασία που ακολουθήθηκε στην επιλογή του καλύτερου τύπου κυκλώματος, δηλαδή η εξαγωγή δεδομένων από το πρόγραμμα, η κατασκευή P-t διαγραμμάτων και ο υπολογισμός του εμβαδού της 1^{ης} καμπύλης με την χρήση του Origin. Στην **Εικόνα 27** παρουσιάζεται ένα συγκριτικό διάγραμμα των παραπάνω δοκιμών.



Εικόνα 27. Διάγραμμα σύγκρισης P-t για τα 2 κυκλώματα.

Τα εμβαδά των παραπάνω, λοιπόν, είναι 0,000999364 για το $R*2$ και 0,003997513 για το $R*0,5$. Επιβεβαιώνεται το αναμενόμενο αποτέλεσμα, η συνολική παραγόμενη ισχύς, δηλαδή, είναι η βέλτιστη στο 0,5R, χειρότερη στο R και ακόμα χειρότερη στο 2R. Άρα, εν τέλει, το βέλτιστο κύκλωμα είναι το 1^ο με 0,5R, και αυτό είναι και το κύκλωμα που θα κατασκευαστεί.

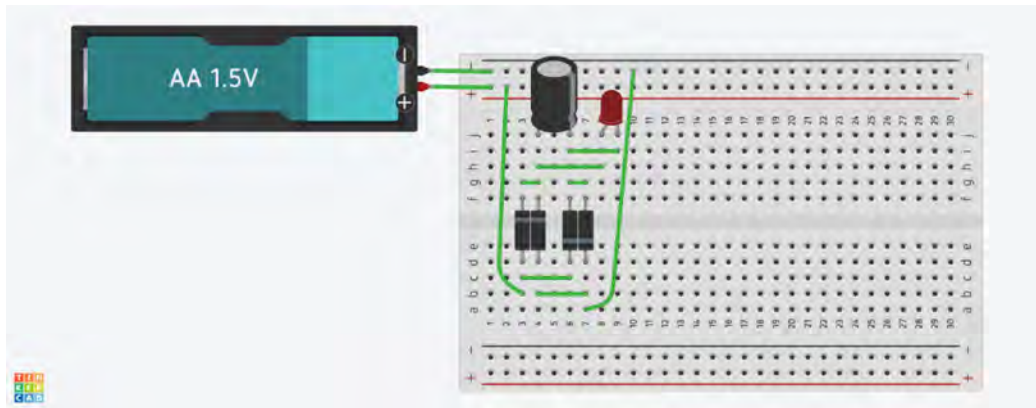
Στην συνέχεια, ακολούθησαν δοκιμές χωρίς αντίσταση στο επιλεγμένο κύκλωμα, για διάφορους συνδυασμούς χρόνου- intervals, καταλήγοντας στον βέλτιστο: 1 sec και 300 intervals.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Σκοπός του πειραματικού μέρους είναι η δημιουργία μιας πειραματικής διάταξης με σκοπό τον έλεγχο της λειτουργικότητας του κυκλώματος. Συγκεκριμένα, στόχο αποτελεί η επίτευξη αποθήκευσης ικανής ποσότητας ενέργειας για το άναμμα ενός λαμπτήρα Led με χρήση μίας ταλαντούμενης πηγής χαμηλής συχνότητας.

Για την προσομοίωση της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Tinkercad, το οποίο αποτελεί πρόγραμμα μοντελοποίησης 3D εικονικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, και προγραμματισμού κινούμενων 3D μοντέλων. Στην **Εικόνα 28** φαίνεται η απεικόνιση του κυκλώματος στο Tinkercad.



Εικόνα 28. Αναπαράσταση του υπό κατασκευή κυκλώματος στο Tinkercad.

Ταυτόχρονα, για την κατασκευή της ίδιας της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω υλικά με τα χαρακτηριστικά τους, όπως παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**. Σε σχέση με το κύκλωμα που προσομοιώθηκε, έγινε αντικατάσταση της αντίστασης, που στην φάση του σχεδιασμού αντιπροσώπευε το στοιχείο κατανάλωσης στο κύκλωμα, με ένα λαμπάκι τύπου led με σκοπό τον έλεγχο της λειτουργικότητας του κυκλώματος.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά εξαρτημάτων του κυκλώματος που κατασκευάστηκε.

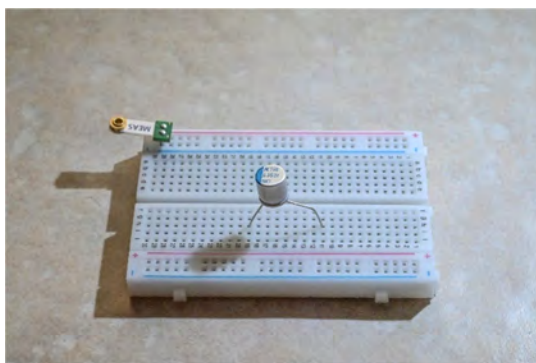
Στοιχείο Κυκλώματος	Χαρακτηριστικά
Πηγή	Αισθητήρας δόνησης χαμηλής συχνότητας
Πυκνωτής	6.3V, 680μF
Διακόπτης	On-Off, tact switch
Γέφυρα ανόρθωσης	50V, 2A
Καλώδια jumper	Male to male
Λαμπάκι led	1.8-2.4V, 3mm
Πλακέτα δοκιμών	Τύπου Breadboard

Αρχικά, πρέπει να σημειωθεί ότι τα παρακάτω εξαρτήματα έχουν πολικότητα, γεγονός που σημαίνει ότι πρέπει να τοποθετηθούν με συγκεκριμένη φορά, ειδάλλως το κύκλωμα θα βραχυκυκλώσει. Τα εξαρτήματα αυτά είναι η γέφυρα, το Led και ο πυκνωτής. Για την κατασκευή, λοιπόν, του πρώτου κυκλώματος, τοποθετείται, αρχικά, το πιεζοηλεκτρικό πάνω στην breadboard, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 29**.



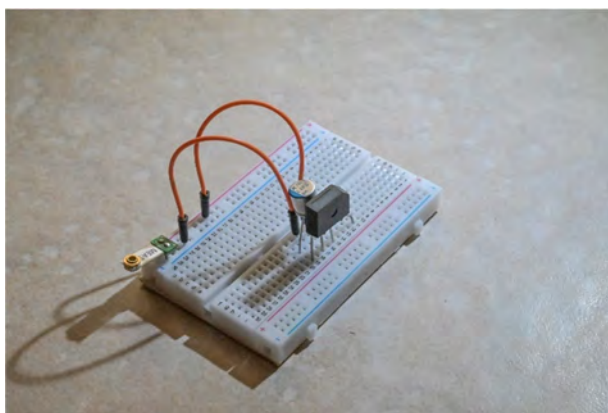
Εικόνα 2929. Τοποθέτηση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου στην breadboard.

Στην συνέχεια, τοποθετήθηκε ο πυκνωτής σε ανεξάρτητες σειρές, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 30**.



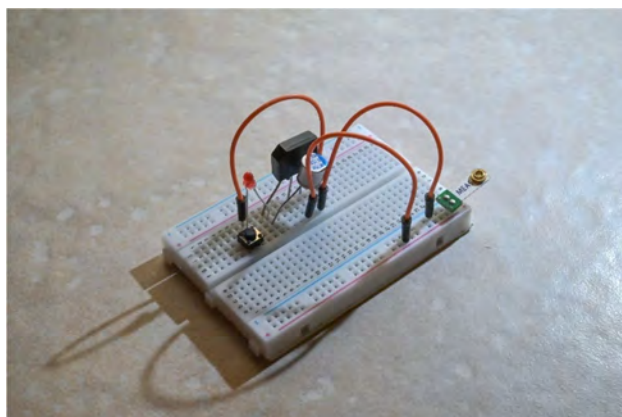
Εικόνα 300. Τοποθέτηση του πυκνωτή στην breadboard.

Ακολουθώντας, η γέφυρα συνδέθηκε με τα μεσαία άκρα της με καλώδια με την πηγή ενώ τα δύο άλλα άκρα συνδέθηκαν στις ίδιες σειρές με τα άκρα του πυκνωτή, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 31**.



Εικόνα 311. Σύνδεση της γέφυρας με τον πυκνωτή και την πηγή.

Τέλος, συνδέεται ο λαμπτήρας Led στα κοινά άκρα πυκνωτή και γέφυρας, αλλά και ο διακόπτης στην ίδια σειρά- καλώδιο με το Led, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 32**.



Εικόνα 322. Σύνδεση led με πυκνωτή-γέφυρα και διακόπτη με led.

Για την φόρτιση του κυκλώματος, επιλέχθηκε μετά από κάποιες δοκιμές μία ξυριστική μηχανή, με συχνότητα λειτουργίας 60 Hz. Συγκεκριμένα, η μηχανή τοποθετήθηκε σε επαφή με το πιεζοηλεκτρικό, ώστε να δονείται στην συχνότητά της. Η διαδικασία διήρκεσε λίγο λιγότερο από μία ώρα. Προηγουμένως είχε δοκιμαστεί η φόρτιση σε ψυγείο, σε πλυντήριο και σε αυτοκίνητο. Κανένας, όμως απ' τους παραπάνω τρόπους δεν κατέστησε δυνατή και επαρκή την φόρτιση του πυκνωτή ώστε να ανάψει το Led. Για καλύτερο έλεγχο της διαδικασίας, χρησιμοποιήθηκε ένα πολύμετρο, για την γνώση ανά πάσα στιγμή των Volt του κυκλώματος, αλλά και για την συμπλήρωση της επιθυμητής τάσης λειτουργίας του Led (1,8 - 2,4 Volt). Το πολύμετρο τοποθετείται στο κύκλωμα στα άκρα του πυκνωτή. Το Led άναψε όταν η τάση του πυκνωτή έφτασε στα 1,8 Volt, όπως φαίνεται παρακάτω στην **Εικόνα 33**.



Εικόνα 333. Το τελικό κύκλωμα με αναμμένο Led.

Γ. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την παρούσα εργασία επιτεύχθηκαν τα παρακάτω:

1. Μοντελοποίηση Κυκλωμάτων Φόρτισης και Αποθήκευσης Ενέργειας με Πιεζοηλεκτρικά Στοιχεία:

Η μελέτη επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη μοντέλων κυκλωμάτων, σε περιβάλλον Modelica, που βασίζονται στην πιεζοηλεκτρική λειτουργία, τα οποία αξιοποιούν τη δυνατότητα μετατροπής μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η ανάπτυξη αυτού του μοντέλου ήταν κρίσιμη γιατί έδωσε την δυνατότητα παραμετροποίησης των κυκλωμάτων αυτών για κατανόηση και μελέτη του τρόπου λειτουργία τους.

2. Παραμετρική Μελέτη Διαφόρων Συνδεσμολογιών Κυκλωμάτων Πιεζοηλεκτρικών Στοιχείων:

Στο πλαίσιο της εργασίας, πραγματοποιήθηκε εκτενής παραμετρική ανάλυση διάφορων πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων της βιβλιογραφίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, αν και υπήρξαν μικρές διαφοροποιήσεις στην απόδοση των διαφόρων συνδεσμολογιών, αυτές οι διαφορές κρίθηκαν αμελητέες.

3. Κατασκευή και Επίδειξη Λειτουργίας του Συστήματος:

Έπειτα από την ολοκλήρωση των θεωρητικών και προσομοιωτικών μελετών, κατασκευάστηκε ένα πλήρως λειτουργικό πρωτότυπο του ενός κυκλώματος. Η κατασκευή αυτή περιλάμβανε την ενσωμάτωση πιεζοηλεκτρικού στοιχείου σε ένα κύκλωμα φόρτισης και αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο δοκιμάστηκε με την χρήση ενός λαμπτήρα Led. Οι δοκιμές αυτές απέδειξαν την ικανότητα του συστήματος να παράγει και να αποθηκεύει ενέργεια με αποδοτικό τρόπο και λειτούργησαν ως φυσική επίδειξη της λειτουργίας που είχε προσομοιωθεί.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι : ΚΩΔΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Παρακάτω παρατίθενται οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για μοντελοποίηση των κυκλωμάτων στο πρόγραμμα της Modelica.

Για το πρώτο κύκλωμα:

```
model first
import Modelica.Units.SI;
parameter SI.Resistance R=30 "Resistance";
parameter SI.Capacitance C = 0.00000189 "Capacitance";
parameter SI.Voltage V = 2 "inital voltage";
parameter SI.Frequency F = 100 "frequency";
Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {-88, 68}, extent =
  {{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = 45)));
Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode1 annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {-14, 68}, extent =
  {{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = -45)));
Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode2 annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {-14, -6}, extent =
  {{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = 45)));
Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode3 annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {-88, -6}, extent =
  {{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = -45)));
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Capacitor capacitor(C = C) annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {172, -10}, extent =
  {{-40, -40}, {40, 40}}, rotation = 90)));
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {172, -126}, extent =
  {{-40, -40}, {40, 40}}, rotation = 0)));
Modelica.Electrical.Analog.Sources.SineVoltage sineVoltage(V = V, f = F)
annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {-198, 28}, extent =
  {{-40, -40}, {40, 40}}, rotation = 90)));
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor resistor annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {246, -10}, extent =
  {{-40, -40}, {40, 40}}, rotation = 90)));
equation
connect(diode.n, diode1.p) annotation(
  Line(points = {{-53, 103}, {-49, 103}}, color = {0, 0, 255}));
connect(diode1.n, diode2.n) annotation(
  Line(points = {{21, 33}, {21, 29}}, color = {0, 0, 255}));
connect(diode2.p, diode3.n) annotation(
  Line(points = {{-49, -41}, {-53, -41}}, color = {0, 0, 255}));
connect(diode3.p, diode.p) annotation(
```

```

    Line(points = {{-123, 29}, {-123, 33}}, color = {0, 0, 255}));
connect(diode3.p, capacitor.p) annotation(
    Line(points = {{-123, 29}, {-123, -50}, {172, -50}}, color = {0, 0,
255}));
connect(capacitor.n, diode2.n) annotation(
    Line(points = {{172, 30}, {21, 30}, {21, 29}}, color = {0, 0, 255}));
connect(ground.p, capacitor.p) annotation(
    Line(points = {{172, -86}, {172, -50}}, color = {0, 0, 255}));
connect(sineVoltage.p, diode3.n) annotation(
    Line(points = {{-198, -12}, {-198, -41}, {-53, -41}}, color = {0, 0,
255}));
connect(sineVoltage.n, diode1.p) annotation(
    Line(points = {{-198, 68}, {-198, 104}, {-50, 104}}, color = {0, 0,
255}));
connect(capacitor.n, resistor.n) annotation(
    Line(points = {{172, 30}, {246, 30}}, color = {0, 0, 255}));
connect(capacitor.p, resistor.p) annotation(
    Line(points = {{172, -50}, {246, -50}}, color = {0, 0, 255}));
annotation(
    uses(Modelica(version = "4.0.0")),
    Diagram(coordinateSystem(extent = {{-300, -150}, {300, 150}})),
    Icon(coordinateSystem(extent = {{-300, -150}, {300, 150}})),
    version = "");
end first;

```

Για το δεύτερο κύκλωμα:

```

model second
    import Modelica.Units.SI;
    parameter SI.Capacitance C = 0.00000189 "Capacitance";
    parameter SI.Resistance R=30 "Resistance";
    parameter SI.Voltage V = 2 "inital voltage";
    parameter SI.Frequency F = 100 "frequency";
    parameter SI.Inductance L=0.01 "Inductance";
    Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode annotation(
        Placement(visible = true, transformation(origin = {-90, 86}, extent =
{{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = 45)));
    Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode1 annotation(
        Placement(visible = true, transformation(origin = {-88, 14}, extent =
{{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = -45)));
    Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode2 annotation(
        Placement(visible = true, transformation(origin = {-16, 14}, extent =
{{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = 45)));
    Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode3 annotation(

```

```

    Placement(visible = true, transformation(origin = {-16, 86}, extent =
{{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = -45));
    Modelica.Electrical.Analog.Basic.Capacitor capacitor(C = C) annotation(
    Placement(visible = true, transformation(origin = {184, 8}, extent = {{-
40, -40}, {40, 40}}, rotation = 90)));
    Modelica.Electrical.Analog.Basic.Inductor inductor(L = L) annotation(
    Placement(visible = true, transformation(origin = {98, 8}, extent = {{-
40, -40}, {40, 40}}, rotation = 90)));
    Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground annotation(
    Placement(visible = true, transformation(origin = {184, -122}, extent =
{{-40, -40}, {40, 40}}, rotation = 0)));
    Modelica.Electrical.Analog.Sources.SineVoltage sineVoltage(V = V, f = F)
annotation(
    Placement(visible = true, transformation(origin = {-230, 52}, extent =
{{-40, -40}, {40, 40}}, rotation = 90)));
    Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor resistor(R=R) annotation(
    Placement(visible = true, transformation(origin = {282, 10}, extent =
{{-40, -40}, {40, 40}}, rotation = 90)));
equation
    connect(inductor.n, capacitor.n) annotation(
    Line(points = {{98, 48}, {184, 48}}, color = {0, 0, 255}));
    connect(capacitor.p, ground.p) annotation(
    Line(points = {{184, -32}, {184, -82}}, color = {0, 0, 255}));
    connect(diode.n, diode3.p) annotation(
    Line(points = {{-55, 121}, {-51, 121}}, color = {0, 0, 255}));
    connect(diode2.n, diode3.n) annotation(
    Line(points = {{19, 49}, {19, 51}}, color = {0, 0, 255}));
    connect(diode2.p, diode1.n) annotation(
    Line(points = {{-51, -21}, {-53, -21}}, color = {0, 0, 255}));
    connect(diode.p, diode1.p) annotation(
    Line(points = {{-125, 51}, {-125, 50}, {-123, 50}, {-123, 49}}, color =
{0, 0, 255}));
    connect(inductor.p, diode1.p) annotation(
    Line(points = {{98, -32}, {-123, -32}, {-123, 49}}, color = {0, 0,
255}));
    connect(inductor.n, diode3.n) annotation(
    Line(points = {{98, 48}, {19, 48}, {19, 51}}, color = {0, 0, 255}));
    connect(inductor.p, capacitor.p) annotation(
    Line(points = {{98, -32}, {184, -32}}, color = {0, 0, 255}));
    connect(sineVoltage.n, diode3.p) annotation(
    Line(points = {{-230, 92}, {-230, 122}, {-52, 122}}, color = {0, 0,
255}));
    connect(diode2.p, sineVoltage.p) annotation(
    Line(points = {{-52, -22}, {-230, -22}, {-230, 12}}, color = {0, 0,
255}));

```

```

connect(resistor.n, capacitor.n) annotation(
  Line(points = {{282, 50}, {233, 50}, {233, 48}, {184, 48}}, color = {0,
0, 255}));
connect(resistor.p, capacitor.p) annotation(
  Line(points = {{282, -30}, {232, -30}, {232, -32}, {184, -32}}, color =
{0, 0, 255}));
annotation(
  uses(Modelica(version = "4.0.0"));
end second;

```

Για το τρίτο κύκλωμα:

```

model third
import Modelica.Units.SI;
parameter SI.Resistance R=30 "Resistance";
parameter SI.Capacitance C = 0.00000189 "Capacitance";
parameter SI.Voltage V = 2 "inital voltage";
parameter SI.Frequency F = 100 "frequency";
parameter SI.Inductance L=0.01 "Inductance";
Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {-84, 88}, extent =
{{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = 45)));
Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode1 annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {-84, 18}, extent =
{{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = -45)));
Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode2 annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {-12, 18}, extent =
{{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = 45)));
Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode3 annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {-12, 90}, extent =
{{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = -45)));
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Capacitor capacitor(C = C) annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {126, 12}, extent =
{{-40, -40}, {40, 40}}, rotation = 90)));
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor resistor(R = R) annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {206, 12}, extent =
{{-40, -40}, {40, 40}}, rotation = 90)));
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Inductor inductor(L = L) annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {-200, 96}, extent =
{{-40, -40}, {40, 40}}, rotation = 270)));
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {126, -118}, extent =
{{-40, -40}, {40, 40}}, rotation = 0)));
Modelica.Electrical.Analog.Sources.SineVoltage sineVoltage(V = V, f = F)
annotation(

```

```

    Placement(visible = true, transformation(origin = {-272, 60}, extent =
{{-40, -40}, {40, 40}}, rotation = 90)));
equation
connect(resistor.n, capacitor.n) annotation(
    Line(points = {{206, 52}, {126, 52}}, color = {0, 0, 255}));
connect(resistor.p, capacitor.p) annotation(
    Line(points = {{206, -28}, {126, -28}}, color = {0, 0, 255}));
connect(capacitor.p, ground.p) annotation(
    Line(points = {{126, -28}, {126, -78}}, color = {0, 0, 255}));
connect(diode.n, diode3.p) annotation(
    Line(points = {{-49, 123}, {-49, 124}, {-47, 124}, {-47, 125}}, color =
{0, 0, 255}));
connect(diode3.n, diode2.n) annotation(
    Line(points = {{23, 55}, {23, 53}}, color = {0, 0, 255}));
connect(diode2.p, diode1.n) annotation(
    Line(points = {{-47, -17}, {-49, -17}}, color = {0, 0, 255}));
connect(diode.p, diode1.p) annotation(
    Line(points = {{-119, 53}, {-119, 53}}, color = {0, 0, 255}));
connect(capacitor.p, diode1.p) annotation(
    Line(points = {{126, -28}, {-119, -28}, {-119, 53}}, color = {0, 0,
255}));
connect(diode3.n, capacitor.n) annotation(
    Line(points = {{23, 55}, {28, 55}, {28, 52}, {126, 52}}, color = {0, 0,
255}));
annotation(
    uses(Modelica(version = "4.0.0")),
    Diagram(coordinateSystem(extent = {{-300, -150}, {300, 150}})),
    Icon(coordinateSystem(extent = {{-300, -150}, {300, 150}})),
    version = "");
end third;

```

Για το τέταρτο κύκλωμα:

```

model forth
import Modelica.Units.SI;
parameter SI.Resistance R = 30 "Resistance";
parameter SI.Capacitance C = 0.00000189 "Capacitance";
parameter SI.Voltage V = 2 "inital voltage";
parameter SI.Frequency F = 100 "frequency";
parameter SI.Inductance L = 0.01 "Inductance";
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Inductor inductor(L = L) annotation(
    Placement(visible = true, transformation(origin = {-148, 114}, extent =
{{-40, -40}, {40, 40}}, rotation = 0)));
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Capacitor capacitor(C = C) annotation(
    Placement(visible = true, transformation(origin = {88, 2}, extent = {{-
40, -40}, {40, 40}}, rotation = 90)));

```

```

Modelica.Electrical.Analog.Basic.Resistor resistor(R = R) annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {180, 2}, extent = {{-
40, -40}, {40, 40}}, rotation = 90)));
Modelica.Electrical.Analog.Basic.Ground ground annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {88, -124}, extent =
{{-40, -40}, {40, 40}}, rotation = 0)));
Modelica.Electrical.Analog.Sources.SineVoltage sineVoltage(V = V, f = F)
annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {-252, 58}, extent =
{{-40, -40}, {40, 40}}, rotation = 90)));
Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {-75.9289, 78.0711},
extent = {{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = 45)));
Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode1 annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {-2.9289, 78.9289},
extent = {{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = -45)));
Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode3 annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {-76.929, 4.9289},
extent = {{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = -45)));
Modelica.Electrical.Analog.Ideal.IdealDiode diode2 annotation(
  Placement(visible = true, transformation(origin = {-3.8198, 6.1802},
extent = {{-50, -30}, {50, 30}}, rotation = 45)));
equation
connect(capacitor.p, ground.p) annotation(
  Line(points = {{88, -38}, {88, -84}}, color = {0, 0, 255}));
connect(capacitor.n, resistor.n) annotation(
  Line(points = {{88, 42}, {180, 42}}, color = {0, 0, 255}));
connect(capacitor.p, resistor.p) annotation(
  Line(points = {{88, -38}, {180, -38}}, color = {0, 0, 255}));
connect(diode3.p, diode.p) annotation(
  Line(points = {{-112.284, 40.2842}, {-112.284, 43.2842}, {-111.284,
43.2842}}, color = {0, 0, 255}));
connect(diode3.n, diode2.p) annotation(
  Line(points = {{-41.5737, -30.4264}, {-41.5737, -29}, {-39, -29}}, color
= {0, 0, 255}));
connect(diode.n, diode1.p) annotation(
  Line(points = {{-40.5736, 113.426}, {-40.5736, 114.426}, {-37.5736,
114.426}}, color = {0, 0, 255}));
connect(diode2.n, capacitor.n) annotation(
  Line(points = {{32, 42}, {88, 42}}, color = {0, 0, 255}));
connect(inductor.n, diode1.p) annotation(
  Line(points = {{-108, 114}, {-38, 114}}, color = {0, 0, 255}));
connect(sineVoltage.n, inductor.p) annotation(
  Line(points = {{-252, 98}, {-252, 114}, {-188, 114}}, color = {0, 0,
255}));

```

```

connect(diode3.p, capacitor.p) annotation(
  Line(points = {{-112, 40}, {-112, -38}, {88, -38}}, color = {0, 0,
255}));
connect(sineVoltage.p, diode3.n) annotation(
  Line(points = {{-252, 18}, {-252, -62}, {-42, -62}, {-42, -30}}, color =
{0, 0, 255}));
connect(diode1.n, diode2.n) annotation(
  Line(points = {{32, 44}, {32, 42}}, color = {0, 0, 255}));
annotation(
  uses(Modelica(version = "4.0.0")),
  Diagram(coordinateSystem(extent = {{-300, -150}, {300, 150}})),
  version = "",
  Icon(coordinateSystem(extent = {{-300, -150}, {300, 150}})));
end forth;

```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] N. Sezer και M. Κοç, ‘A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting’, *Nano Energy*, τ. 80, σ. 105567, Φεβρουαρίου 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105567.
- [2] C. Covaci και A. Gontean, ‘Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review’, *Sensors*, τ. 20, τχ. 12, σ. 3512, Ιουνίου 2020, doi: 10.3390/s20123512.
- [3] H. Shaukat, A. Ali, S. Bibi, W. A. Altabey, M. Noori, και S. A. Kouritem, ‘A Review of the Recent Advances in Piezoelectric Materials, Energy Harvester Structures, and Their Applications in Analytical Chemistry’, *Applied Sciences*, τ. 13, τχ. 3, σ. 1300, Ιανουαρίου 2023, doi: 10.3390/app13031300.
- [4] ‘<https://www.explainthatstuff.com/piezoelectricity.html>’.
- [5] D. Bolten, U. Böttger, και R. Waser, ‘Reversible and irreversible piezoelectric and ferroelectric response in ferroelectric ceramics and thin films’, *Journal of the European Ceramic Society*, τ. 24, τχ. 5, σσ. 725–732, Μαΐου 2004, doi: 10.1016/S0955-2219(03)00317-0.
- [6] ‘<https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>’.
- [7] ‘<https://www.nanomotion.com/nanomotion-technology/the-piezoelectric-effect/>’.
- [8] Y. Wu, Y. Ma, H. Zheng, και S. Ramakrishna, ‘Piezoelectric materials for flexible and wearable electronics: A review’, *Materials & Design*, τ. 211, σ. 110164, Δεκεμβρίου 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110164.
- [9] ‘<https://onscale.com/piezoelectricity/what-is-piezoelectricity/>’.
- [10] ‘<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/piezoelectricity/>’.
- [11] multifuntional ferroelectric materials.
- [12] ‘<https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/piezoelectricity.html>’.
- [13] M. Smith και S. Kar-Narayan, ‘Piezoelectric polymers: theory, challenges and opportunities’, *International Materials Reviews*, τ. 67, τχ. 1, σσ. 65–88, Ιανουαρίου 2022, doi: 10.1080/09506608.2021.1915935.

- [14] E. M. Nia, N. A. W. A. Zawawi, και B. S. M. Singh, ‘A review of walking energy harvesting using piezoelectric materials’, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., τ. 291, τχ. 1, σ. 012026, Σεπτεμβρίου 2017, doi: 10.1088/1757-899X/291/1/012026.
- [15] A. Schlichting, R. Tiwari, και E. Garcia, ‘Passive multi-source energy harvesting schemes’, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, τ. 23, τχ. 17, σσ. 1921–1935, Νοεμβρίου 2012, doi: 10.1177/1045389X12455723.
- [16] ‘<https://openmodelica.org/>’.
- [17] ‘<https://modelica.org/language/>’.
- [18] X. Wang, ‘Analysis of Piezoelectric Vibration Energy Harvester System With Different Interface Circuits’, στο Frequency Analysis of Vibration Energy Harvesting Systems, Elsevier, 2016, σσ. 43–68. doi: 10.1016/B978-0-12-802321-1.00003-0.