

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Καινοτόμος Σχεδιασμός, Ανάλυση και Έλεγχος Ακρίβειας Ηλιακών Συστημάτων Παρακολούθησης με Χρήση Μαλακών Ρομποτικών Ενεργοποιητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Φοιτητής: Άγγελος Αγουρίδης

Αριθμός μητρώου: ΤΜ20039

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής Παναγιώτης Πολυγερινός

Ηράκλειο © 2024



HELLENIC MEDITERRANEAN UNIVERSITY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Innovative Design, Analysis and Precision Control of Solar Tracking Systems Using Soft Robotic Actuators

---

DIPLOMA THESIS

Student: Angelos Agouridis

Registration Number: TM20039

Supervisor: Associate Professor Panagiotis Polygerinos

Heraklion © 2024

<u>Υπεύθυνη Δήλωση</u> *: Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην διπλωματική εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η διπλωματική εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου.*

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο καινοτόμος σχεδιασμός, ανάλυση και έλεγχος ακρίβειας ηλιακών συστημάτων παρακολούθησης με χρήση μαλακών ρομποτικών ενεργοποιητών. Είναι μια διάταξη που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα που χρησιμοποιείται σε συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ηλιακών συλλεκτών (γνωστά διεθνώς με τον όρο solar tracker). Όταν αυτή η συσκευή εφαρμόζεται σε ένα σύστημα ηλιακής ενέργειας, η αποτελεσματικότητά της αυξάνεται σημαντικά. Η αυξανόμενη ζήτηση για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη πιο αποδοτικών συστημάτων ανάπτυξης ηλιακής ενέργειας. Ένα ηλιακό σύστημα παρακολούθησης που ακολουθεί την πορεία του ήλιου για βέλτιστη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ένα σημαντικό μέτρο για τη βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Η καινοτομία αυτής της μελέτης έγκειται στη χρήση μαλακών ενεργοποιητών (“soft robotics”), οι οποίοι παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμοστικότητα από τους παραδοσιακούς άκαμπτους μηχανισμούς. Οι μαλακοί ενεργοποιητές (“soft robotics”), μπορούν να προσαρμοστούν στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες και να παρέχουν ακριβέστερο έλεγχο των ηλιακών συλλεκτών.

Η μελέτη περιλαμβάνει, τον στον σχεδιασμό του μαλακού ενεργοποιητή με τον καθορισμό του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί, την μορφή και το σχήμα που θα επιτρέπουν την αντοχή του κατά την αποτελεσματική λειτουργία του σε εξωτερικές συνθήκες. Επιπρόσθετα, θα πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις και πειραματικές δοκιμές που θα αξιολογηθεί η απόδοση του επενεργητή. Θα αναπτυχθούν αλγόριθμοι και στρατηγικές ελέγχου για την αποτελεσματική και ακριβή ιχνηλάτιση του ήλιου, έχοντας λάβει υπόψιν τις ικανότητες του επενεργητή. Τέλος, θα γίνει ενσωμάτωση του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες ώστε να πραγματοποιηθεί σύγκριση και αξιολόγηση του συστήματος με τα παραδοσιακά συστήματα παρακολούθησης. Η κατασκευή και η συναρμολόγηση πραγματοποιείται στα μηχανήματα του Εργαστήριο Συστημάτων Ελέγχου και Ρομποτικής (C.S.R.L.) του ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ..

Η ανεμοφόρτιση είναι κρίσιμη στον σχεδιασμό ενός ηλιακού ιχνηλάτη, καθώς οι δυνάμεις και οι ροπές από τον άνεμο μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές καταπονήσεις στα φωτοβολταϊκά πάνελ και τη δομή. Ο σχεδιασμός πρέπει να διασφαλίζει αντοχή στην κάμψη και τη στρέψη, καθώς και να βελτιστοποιεί την αεροδυναμική. Η βροχόπτωση και η υγρασία απαιτούν στεγανά υλικά και αντιδιαβρωτικά επιχρίσματα για προστασία. Το χιόνι και ο πάγος αυξάνουν το βάρος και επηρεάζουν την κίνηση, καθιστώντας απαραίτητα τα συστήματα αποστράγγισης και αποφυγής πάγου. Ωστόσο, στην παρούσα διπλωματική εργασία, αυτές οι επιδράσεις δεν θα ληφθούν υπόψη λόγω της εργαστηριακής φύσης του πειραματικού συστήματος.

Τα αποτελέσματα της μελέτης αναμένεται να δείξουν ότι η χρήση μαλακών ενεργοποιητών ρομπότ μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία των ηλιακών συστημάτων παρακολούθησης και να προσφέρει μια πιο βιώσιμη και αποτελεσματική λύση για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.

Λέξεις κλειδιά: Ηλιακά συστήματα παρακολούθησης, Μαλακοί ρομποτικοί ενεργοποιητές, Ηλιακά πάνελ, Ρομποτική τεχνολογία

Abstract

The aim of this thesis is the innovative design, analysis, and precise control of the solar tracking system using soft robot motion. The solar collector used to detect the position of the sun on the horizon is used in power generation systems (known internationally as solar tracking devices), if there is a solar energy system on this device, its efficiency is very important. With the increasing demand for renewable energy, there is a need to develop more efficient solar energy systems. A solar tracking system that follows the path of the sun for optimal absorption of solar radiation is an important measure to improve the performance of photovoltaic systems.

The innovation in this research lies in the use of soft actuators ("soft robotics"), which provide greater flexibility and adaptability than traditional rigid mechanisms. Soft robotics can adapt to changing environmental conditions and achieve more precise control of solar panels.

The study includes the design of soft actuators by defining the materials used, shapes, and forms that maintain strength during effective operation in external conditions. In addition, simulation and experimental tests are carried out to evaluate the performance of the actuator. Algorithms and control strategies will be developed for efficient and accurate solar tracking considering the capabilities of the actuator. Finally, the system will be integrated into the actual conditions to compare and evaluate the system with the traditional monitoring system. The construction and assembly are created on the machines of the Laboratory of Control Systems and Robotics (C.S.R.L.) of H.M.U..

Wind loading is crucial in the design of a solar tracker, as forces and moments from the wind can cause significant stresses on the photovoltaic panels and the frame. The design must ensure resistance to bending and torsion caused by wind and optimize the system's aerodynamics. Rainfall and humidity can affect the tracker’s operation, making it necessary to use waterproof materials and apply anti-corrosion coatings for protection. Snow and ice increase weight and affect movement, necessitating drainage systems and ice formation prevention, as well as ensuring the structure's resistance to snow load. However, in this thesis, these effects will not be considered due to the construction of an experimental system in a laboratory setting.

The results of this study generally show that the use of soft energy can significantly improve the efficiency and reliability of solar tracking systems and provide a more sustainable and efficient solution for harnessing solar energy.

Keywords: Solar tracking systems, Soft robotic actuators, Solar panels, Robotics technology

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Πολυγερινό Παναγιώτη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του, την επιμονή και υπομονή του, το αμείωτο ενδιαφέρον του, τη συμπαράστασή του, τη συνεχή του υποστήριξη και το αμείωτο ενδιαφέρον που έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος.

Τέλος, θα ήθελα εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου και στους φίλους μου για όλη τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόησή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη 3

Abstract 4

Ευχαριστίες 5

Περιεχόμενα 6

Κατάλογος εικόνων 11

Κατάλογος διαγραμμάτων και πινάκων 14

1 Εισαγωγή 17

1.1 Σκοπός εργασίας 17

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση 17

1.3 Δομή εργασίας 20

2 Τεχνολογίες soft robotics και ηλιακής ενέργειας: θεωρία, εφαρμογές και καινοτομίες 21

2.1 Εισαγωγή 21

2.2 Τι είναι η τεχνολογία των Soft Robotics; 21

2.2.1 Soft Robotics 22

2.2.2 Σύγκριση διαφόρων ομάδων ρομπότ 24

2.2.3 Ταξινόμηση ανάλογα με την εφαρμογή 25

2.2.3.1 Βιο-εμπνευσμένα ρομπότ και κινήσεις 26

2.2.3.2 Συνεχή ρομπότ (continuum robots) 26

2.2.3.3 Μαλακές/Ευέλικτες αρπάγες (Soft Grippers) 27

2.2.3.4 Ιατρικά και φορετά ρομπότ 27

2.2.4 Μαλακοί ρευστοδυναμικοί επενεργητές 28

2.2.5 Μοντελοποίηση "soft" επενεργητών 28

2.2.6 Αίσθηση και έλεγχος 29

2.3 Η ηλιακή ακτινοβολία και η επίδραση της ατμόσφαιρας της γης 29

2.3.1 Ο ήλιος 30

2.3.2 Η ακτινοβολία του ήλιου 30

2.4 Ηλιακή γεωμετρία 30

2.4.1 Ήλιος και Γη 30

2.4.2 Σχετική κίνηση Ήλιου - Γης 32

2.4.3 Μοντέλο μελέτης κίνησης 33

2.4.4 Γεωγραφικό πλάτος 34

2.4.5 Γεωγραφικό μήκος 35
2.4.6 Ηλιακή Ώρα 35
2.4.7 Μεσημβρινός αναφοράς 35
2.4.8 Πραγματικός ηλιακός χρόνος 35
2.4.9 Εξίσωση χρόνου 36
2.4.10 Ηλιακή απόκλιση δ 36
2.4.11 Γωνία ζενίθ και αζιμούθιο ήλιου 37
2.4.12 Ωριαία γωνία ηλίου και ηλιακοί χρόνοι ανατολής και δύσης 38
2.4.13 Υπολογισμός ηλιακού ύψους, γωνίας ζενίθ και αζιμούθιου ήλιου 38
2.4.14 Αζιμούθια γωνία επιφάνειας και γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια 38
2.4.15 Βέλτιστη κλίση επιφάνειας 39
2.4.16 Ηλιακή ακτινοβολία 40
2.4.17 Διαγραμματική παρουσίαση της θεωρίας 41
2.5 Θεωρία και ιστορικών εφαρμογής των φωτοβολταϊκών 42
2.5.1 Χαρακτηριστικά των ΦΒ συστημάτων 43
2.5.2 Κατηγορίες και σύνθεση ΦΒ συστημάτων 43
2.5.3 Φωτοβολταϊκά 44
2.5.4 Ηλιακή ιχνηλάτιση (solar tracking) 44
2.5.5 Ενεργητική ηλιακή ιχνηλάτιση 44
2.5.6 Παθητική ηλιακή ιχνηλάτιση 45
2.5.7 Αλγόριθμοι και γωνίες παρακολούθησης ηλίου 45
2.5.8 Υφιστάμενα προϊόντα 46
2.5.9 Συμπυκνωμένη φωτοβολταϊκή τεχνολογία 46
3 Προδιαγραφές και δυνατότητες του συστήματος 48
3.1 Τοποθεσία εγκατάστασης 48
3.2 Εύρος κίνησης 48
3.3 Η ζενίθια γωνία του ήλιου z του ήλιου 49
3.4 Η αζιμουθιακή γωνία του ήλιου A του ήλιου 49
3.5 Εύρος κίνησης επενεργητή 51
3.6 Φωτοβολταϊκός συλλέκτης 51
3.7 Μέθοδος τοποθέτησης του φωτοβολταϊκού πάνελ 51

3.8 Τρόποι διάταξης των επενεργητών ή του επενεργητή και πιθανοί τρόποι κατασκευής του συστήματος 52
4 Προσομοίωση και ψηφιακή μοντελοποίηση του "soft" επενεργητή 56
4.1 Αρχική σχεδίαση του επενεργητή 56
4.2 Επιλογή διατομών για τον επενεργητή 57
4.3 Υπολογισμός των υπόλοιπων διαστάσεων του επενεργητή 58
4.4 Μοντελοποίηση των soft επενεργητών σε Abaqus FEA 58
4.4.1 Προσομοίωση επενεργητή με μεταβαλλόμενη την τιμή p 59
4.4.2 Προσομοίωση επενεργητή με μεταβαλλόμενη την τιμή φ και βέλτιστη σταθερή τιμή p 63
4.4.3 Προσομοίωση επενεργητή με σταθερή την μικρότερη τιμή p 67
4.4.4 Προσομοίωση των τελευταίων πιθανών σχεδίων που δεν έχουν εξεταστεί 71
4.5 Παραμετροποίηση διαστάσεων του σχεδίου του επενεργητή 75
4.6 Βελτιστοποίηση του σχεδίου του επενεργητή 76
4.6.1 Βελτιστοποίηση μέσω τοποθέτησης δακτυλίων 76
4.6.2 Υπολογισμός πλήθους και πάχος δακτυλίων 78
5 Παραμετροποίηση του "soft" επενεργητή 81
5.1 Σχεδίαση του επενεργητή με μείωση των αρχικών διαστάσεων κατά το ήμισυ 81
5.2 Προσομοίωση του επενεργητή με τις νέες διαστάσεις 82
5.3 Βελτιστοποίηση ανθεκτικότητας του επενεργητή με τις νέες διαστάσεις 85
5.4 Σχέδιο επενεργητή προσαρμοσμένο στις ανάγκες προσομοίωσης σε πραγματικές συνθήκες 86
5.5 Σχεδίαση καλουπιού και απαραιτήτων εξαρτημάτων του επενεργητή 88
5.5.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) 88
5.5.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης 89
5.5.2 Σχεδιασμός καλουπιού του επενεργητή 90
5.5.3 Σχεδιασμός βάσης του επενεργητή 92
5.5.4 Σχεδιασμός βάσης για το φωτοβολταϊκό πάνελ του επενεργητή 94
5.5.5 Σχεδιασμός βάσης για την τοποθέτηση του επενεργητή 94
5.5.6 Συνοπτική ψηφιακή απεικόνιση της κατασκευής του επενεργητή 95
6 Κατασκευή και συναρμολόγηση καλουπιών για την χύτευση και την δημιουργία του επενεργητή 96
6.1 Υλικό και τρόπος κατασκευής επενεργητή 96
6.2 Συναρμολόγηση καλουπιού 97

6.3 Χύτευση για την κατασκευή του επενεργητή 98

6.4 Κατασκευή εξαρτημάτων για την βάση του φωτοβολταϊκού πάνελ και της βάσης για την τοποθέτηση του επενεργητή και όλου του συστήματος 101

6.5 Συναρμολόγηση όλων εξαρτημάτων και του επενεργητή 102

7 Κινηματική μοντελοποίηση και πειραματική διαδικασία 103

7.1 Κινηματική μοντελοποίηση 103

7.1.1 Ευθύ κινηματικό 103

7.1.2 Αντίστροφο κινηματικό 105

7.2 Μικροελεκτής και ηλεκτρολογικά μέρη 106

7.2.1 Ο μικροελεκτής Arduino Uno Rev3 107

7.2.2 Ηλεκτροπνευματικοί ρυθμιστές πίεσης SMC ITV0050-3BL 107

7.2.3 Adafruit MCP4728 I2C Quad DAC 109

7.3 Διάγραμμα ροής του συστήματος του επενεργητή 109

7.4 Πρόγραμμα λειτουργίας του συστήματος του επενεργητή 111

7.5 Συνδεσμολογία του συστήματος του επενεργητή 112

7.5.1 Κουτί οργανωτικής συνδεσμολογίας 113

7.5.1.1 Σχεδιασμός κουτιού οργανωτικής συνδεσμολογίας 113

7.5.1.2 Κατασκευή κουτιού οργανωτικής συνδεσμολογίας 115

7.6 Πειραματική διάταξη του συστήματος ηλιακής ιχνηλάτησης με την τεχνολογία των «soft robotics» 116

7.7 Πειραματική διαδικασία σύγκρισης αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πραγματικότητας του επενεργητή 116

7.8 Πειραματική διαδικασία του συστήματος του επενεργητή για ηλιακή ιχνηλάτηση 118

7.9 Πειραματική διαδικασία ηλιακής ιχνηλάτησης σε πραγματικές συνθήκες και σύγκριση παραγωγής ενέργειας με ένα σταθερό τοποθετημένο φωτοβολταϊκό πάνελ 123

8 Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία 128

8.1 Εισαγωγή 128

8.2 Συμπεράσματα 128

8.3 Μελλοντική εργασία 129

Αναφορές - Βιβλιογραφία 131

Παραρτήματα 135

Παράρτημα 1 135

Παράρτημα 2 137

Παράρτημα 3.....138
Παράρτημα 4.....145
Παράρτημα 5.....155
Παράρτημα 6.....158
Παράρτημα 7.....164
Παράρτημα 8.....164
Παράρτημα 9.....168
Παράρτημα 10.....170
Παράρτημα 11.....172

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Ηλιακοί ιχνηλάτες: Μονού Άξονα (Single-Axis Trackers) vs Διπλού Άξονα (Dual-Axis Trackers).[3] 18
Εικόνα 2: Shams 1, Έργο ηλιακού σταθμού στο Άμπου Ντάμπι των ΗΑΕ.[6] 20
Εικόνα 3: Το Topaz Solar Farm στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής από το διάστημα.[7] 20
Εικόνα 4: Gripper of soft robotics.[11] 22
Εικόνα 5: Σχέδιο ταξινόμησης των ρομπότ σύμφωνα με την ευελιξία και την προσαρμοστικότητά τους. Από αριστερά προς τα δεξιά. [11] 25
Εικόνα 6: Σχήμα από τις κύριες εφαρμογές των "soft robotics". [16], [17] 26
Εικόνα 7: Μαλακός ρευστοδυναμικός ενεργοποιητής (soft fluidic actuators) και μοντελοποίηση “soft” ενεργοποιητή. [67], [66] 29
Εικόνα 8: Το ηλιακό σύστημα.[40] 31
Εικόνα 9: Η τροχιά της γης γύρο από τον ήλιο.[41] 31
Εικόνα 10: Μεσημβρινοί και Παράλληλοι κύκλοι.[42] 32
Εικόνα 11: Προσδιορισμός γεωγραφικών συντεταγμένων.[44] 32
Εικόνα 12: Ελλειπτική τροχιά Γης- γωνιακή απόκλιση.[45] 33
Εικόνα 13: Μοντέλο σχετικής κίνησης Ήλιου-Γης.[45] 33
Εικόνα 14: Τροχιά και συντεταγμένες Ηλίου στον ουράνιο θόλο.[44] 34
Εικόνα 15: Η τροχιά της Γης.[44] 36
Εικόνα 16: Γωνία ζενίθ, ωριαία γωνία κα ύψος και αζιμούθιο ήλιου.[45] 37
Εικόνα 17: Βέλτιστη κλίση επιφάνειας.[45] 39
Εικόνα 18: Άντληση δεδομένων από το S.A.M.[46] 41
Εικόνα 19: Κατηγορίες και λειτουργία Φ/Β συστημάτων. 44
Εικόνα 20: Τόπος εγκατάστασης με γεωγραφικές συντεταγμένες. 48
Εικόνα 21: Τρόπος τοποθέτησης φωτοβολταϊκού πάνελ. 52
Εικόνα 22: Πιθανοί τρόποι διάταξης των επενεργητών ή του επενεργητή. 53
Εικόνα 23: Επικρατέστερος τρόπος κατασκευής του συστήματος. 55
Εικόνα 24: Σχέδιο με παραμέτρους. 57
Εικόνα 25: Απεικόνιση επενεργητή σε κλίση. 59
Εικόνα 26: Επενεργητής σε κλίση 90 μοιρών. 60
Εικόνα 27: Καταπονήσεις πιθανών επενεργητών από την προσομοίωση επενεργητή με μεταβαλλόμενη την τιμή p. 62
Εικόνα 28: Επικρατέστερο σχέδιο από την πρώτη προσομοίωση του επενεργητή. 63
Εικόνα 29: Καταπονήσεις πιθανών επενεργητών από την προσομοίωση επενεργητή με μεταβαλλόμενη την τιμή φ και σταθερή τιμή p από την προηγούμενη προσομοίωση. 66
Εικόνα 30: Καταπονήσεις πιθανών επενεργητών από την προσομοίωση επενεργητή με σταθερή την μικρότερη τιμή p. 70
Εικόνα 31: Καταπονήσεις πιθανών επενεργητών από την προσομοίωση των τελευταίων πιθανών σχεδίων που δεν έχουν εξεταστεί 73
Εικόνα 32: Παραμετροποίηση διαστάσεων σχεδίου επενεργητή. 76
Εικόνα 33: Επενεργητής με δακτυλίους. 77
Εικόνα 34: Επενεργητής με δακτυλίους σε κλίση 90 μοιρών. 79
Εικόνα 35: Καταπονήσεις πιθανών επενεργητών με δακτυλίους. 80
Εικόνα 36: Διαστάσεις επενεργητή. 81
Εικόνα 37: Επενεργητής σε κλίση 90 μοίρες. 83
Εικόνα 38: Καταπόνηση επενεργητή με τις αρχικές διαστάσεις και παραμετροποιημένος. 84
Εικόνα 39: Επενεργητής με διαστάσεις κατά το ήμισυ σε κλίση 90 μοίρες με δακτυλίους. 85

Εικόνα 40: Επενεργητής με βάση και δακτυλίδια. 87
Εικόνα 41: 3d printer.[60] 89
Εικόνα 42: Σχεδιασμός καλουπιού. 90
Εικόνα 43: Περιθώρια από τα κομμάτι 2 και κομμάτι 3. 91
Εικόνα 44: Κομμάτι 1, κομμάτι 2 και κομμάτι 3. 91
Εικόνα 45: Κομμάτια 1, 2, 3, 4 και 5. 91
Εικόνα 46: Κομμάτια 1, 2, 3, 4, 5 και 7. 92
Εικόνα 47: Εξάρτημα για την βάση του επενεργητή. 93
Εικόνα 48: Μορφή εκτύπωσης ρητίνης. 93
Εικόνα 49: 18V 4.5W Mini Solar Panel 115x85mm.[61] 94
Εικόνα 50: Βάση για το φωτοβολταϊκό πάνελ. 94
Εικόνα 51: Βάση την τοποθέτησης του «soft» επενεργητή. 95
Εικόνα 52: Ψηφιακή συνοπτική συναρμολόγηση CAD. 95
Εικόνα 53: ZA 22 MOULD.[62] 96
Εικόνα 54: Όλα τα μέρη του καλουπιού και δακτυλίδια. (A) - Κομμάτι 5, (B) - Κομμάτι 2, (C) - Κομμάτι 1, (D) - Κομμάτι 3, (E) – Ένας δακτύλιος, (F) - Κομμάτι 7, (G) - Κομμάτι 4, (H) - Σετ από 20 δακτυλίους και (I) - Κομμάτι 6 (x4). Αναλυτικά στο παράρτημα 7. 97
Εικόνα 55: Βήματα συναρμολόγησης καλουπιού επενεργητή: Βήμα 1: Τοποθέτηση δακτυλίων στο Κομμάτι 1, Βήμα 2: Ένωση του Κομματιού 1 με το Κομμάτι 2, Βήμα 3: Ένωση του Κομματιού 3 με τα υπόλοιπα Κομμάτια 1 και 2, Βήμα 4: Ένωση των ήδη ενωμένων Κομματιών με το Κομμάτι 5, Βήμα 5: Ένωση όλων των ήδη ενωμένων Κομματιών με το Κομμάτι 4, Βήμα 6: Τοποθέτηση των τεσσάρων Κομματιών 6 στα υπόλοιπα κομμάτια και Βήμα 7: Τελική ένωση του Κομματιού 7 με τα υπόλοιπα. Από τις τρύπες του Κομματιού 7 θα γίνει η χύτευση της σιλικόνης. Μετά την πήξη της σιλικόνης και την αποσυναρμολόγηση του καλουπιού, θα έχει δημιουργηθεί ο επενεργητής. 98
Εικόνα 56: Δοχείο, ξυλάκι, ζυγαρία, βάση και καταλύτης. 99
Εικόνα 57: Δοχείο αρνητικής πίεσης. 99
Εικόνα 58: Φούρνος ρυθμισμένος στο 45 βαθμούς Κελσίου (σε αυτή την θερμοκρασία δεν κινδυνεύει να παραμορφωθεί το καλούπι επειδή είναι από PLA). 100
Εικόνα 59: Επενεργητής μετά την απομάκρυνση του καλουπιού. 100
Εικόνα 60: Επενεργητής με κλειστή την άνω επιφάνεια. 101
Εικόνα 61: Συνοπτική απεικόνιση όλων εξαρτημάτων και του επενεργητή. 1: Βάση φωτοβολταϊκού πάνελ, 2: Βάση ολόκληρου του συστήματος και 3: Βάση τοποθέτησης του επενεργητή. 101
Εικόνα 62: Συνοπτική απεικόνιση του συναρμολογημένου επενεργητή από διαφορετικές οπτικές γωνίες με αριθμημένα μέρη: 1 Πάνελ, 2 Βάση πάνελ, 3 Επενεργητής με δακτυλίους, 4 Βάση επενεργητή και 5 Βάση τοποθέτησης. 102
Εικόνα 63: Configuration Space (Χώρος Λειτουργίας). 105
Εικόνα 64: Μοντέλο με σταθερή καμπυλότητα. Όταν στους θαλάμους δίνονται με διαφορετικές πιέσεις, το μοντέλο κάμπτεται και διαμορφώνει μια σταθερή καμπυλότητα. Το κέντρο στο πάνω μέρος pc του μοντέλου καθορίζεται μέσω του παραμορφωμένου μήκους του κάθε θαλάμου. .106
Εικόνα 65: Arduino Uno Rev3.[64] 107
Εικόνα 66: SMC ITV0050-3BL.[65] 108
Εικόνα 67: Διάγραμμα αρχής λειτουργίας βαλβίδας. 108
Εικόνα 68: Adafruit MCP4728 I2C Quad DAC.[66] 109
Εικόνα 69: Διάγραμμα ροής του συστήματος του επενεργητή. 110
Εικόνα 70: Αρχή λειτουργίας συστήματος επενεργητή. 112

Εικόνα 71: Συνδεσμολογία του συστήματος του επενεργητή. 113
Εικόνα 72: Απεικόνιση όλων των ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων του κουτιού οργανωτικής συνδεσμολογίας. 114
Εικόνα 73: Ψηφιακά συναρμολογημένο το κουτί οργανωτικής συνδεσμολογίας ανά βήμα. Στο βήμα 7 τοποθετούνται το Arduino και το DAC και στο βήμα 10 τοποθετούνται τα σωληνάκια. Αναλυτικές οδηγίες στο Παράρτημα 11. 114
Εικόνα 74: Αριθμημένα τα εκτυπωμένα μέρη κουτιού οργανωτικής συνδεσμολογίας . Αναλυτική παρουσίαση στο Παράρτημα 11. 115
Εικόνα 75: Συναρμολογημένο το κουτί οργανωτικής συνδεσμολογίας μαζί με μικροελεγκτή, βαλβίδες, καλώδια και σωληνάκια. 115
Εικόνα 76: Εργαστηριακή διάταξη ελέγχου και λειτουργίας του συστήματος ηλιακής ιχνηλάτησης με την τεχνολογία των «soft robotics». 116
Εικόνα 77: Πειραματική διαδικασία. 117
Εικόνα 78: Επενεργητής σε κλίση από το πρόγραμμα Kinovea. 117
Εικόνα 79: Πειραματική διαδικασία ανίχνευσης κίνησης επενεργητή. 119
Εικόνα 80: Ηλιακή ιχνηλάτηση σε εργαστηριακό χώρο για την μεγαλύτερη μέρα του χρόνου 21 Ιουνίου με βήμα 2 ώρες. 120
Εικόνα 81: Παρακολούθηση παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκό από Arduino με την χρήση αισθητήρων. 123
Εικόνα 82: Σταθερό τοποθετημένο φωτοβολταϊκό πάνελ σε κλίση 45°. 123
Εικόνα 83: Ηλιακή ιχνηλάτηση σε πραγματικές συνθήκες. 124
Εικόνα 84: Ηλιακός ιχνηλάτης με την τεχνολογία των «soft robotics». 127
Εικόνα 85: Ηλιακοί ιχνηλάτες με την τεχνολογία των «soft robotics» συνδεδεμένοι σε σειρά και παράλληλα. 130
Εικόνα 86: Βαλβίδες η μία δίπλα στην άλλη. 174
Εικόνα 87: Συναρμολόγηση βαλβίδων με τα Parts 1 και 2. 175
Εικόνα 88: Συναρμολόγηση Part 3 με τα υπόλοιπα μέρη. 175
Εικόνα 89: Συναρμολόγηση Part 4 και 5 με τα υπόλοιπα μέρη. 176
Εικόνα 90: Συναρμολόγηση Part 6 με τα υπόλοιπα μέρη. 176
Εικόνα 91: Συναρμολόγηση Part 7 με τα υπόλοιπα μέρη. 177
Εικόνα 92: Συναρμολόγηση Part 8 και 9 με τα υπόλοιπα μέρη. 177
Εικόνα 93: Ψηφιακά συναρμολογημένο το κουτί οργανωτικής συνδεσμολογίας. 178

Κατάλογος διαγραμμάτων και πινάκων

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Απόκλιση ηλίου δ (o) vs Ημέρες του Έτους. 41
Διάγραμμα 2: Ωριαίες γωνίες ανατολής και δύσης vs Ημέρες του Έτους. 42
Διάγραμμα 3: Ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα vs Ημέρες του Έτους....42
Διάγραμμα 4: Ηλιακό αζιμούθιο vs ηλιακό ύψος για την τοποθεσία του Ηρακλείου παρουσιάζοντας τις μέγιστες και τις ελάχιστες γωνίες που θα πραγματοποιηθούν στην διάρκεια ενός. 51
Διάγραμμα 5: Bending angle vs Pressure για την πρώτη προσομοίωση του επενεργητή. 60
Διάγραμμα 6: Strain vs Pressure για την πρώτη προσομοίωση του επενεργητή. 61
Διάγραμμα 7: Bending angle vs Pressure για την δεύτερη προσομοίωση του επενεργητή. 64
Διάγραμμα 8: Strain vs Pressure για την δεύτερη προσομοίωση του επενεργητή. 65
Διάγραμμα 9: Bending angle vs Pressure για την τρίτη προσομοίωση του επενεργητή. 68
Διάγραμμα 10: Strain vs Pressure για την τρίτη προσομοίωση του επενεργητή. 69
Διάγραμμα 11: Bending angle vs Pressure για την τέταρτη προσομοίωση του επενεργητή. 72
Διάγραμμα 12: Strain vs Pressure για την τέταρτη προσομοίωση του επενεργητή. 74
Διάγραμμα 13: Γραμμική επέκταση vs αριθμού δακτυλίων. [59] 77
Διάγραμμα 14: Γραμμική επέκταση vs πίεση. [59] 78
Διάγραμμα 15: Bending angle vs Pressure με δακτύλιος. 79
Διάγραμμα 16: Strain vs Pressure με δακτύλιος, ...80
Διάγραμμα 17: Bending angle vs Pressure για το νέο παραμετροποιημένο σχέδιο. 83
Διάγραμμα 18: Strain vs Pressure επενεργητή με τις αρχικές διαστάσεις και παραμετροποιημένος. 84
Διάγραμμα 19: Bending angle vs Pressure με παραμετροποιημένο επενεργητής με δακτυλίους. 85
Διάγραμμα 20: Strain vs Pressure με παραμετροποιημένο επενεργητής με δακτυλίους. 86
Διάγραμμα 21: Bending angle vs Pressure σχεδίου χωρίς τις απαιτούμενες αλλαγές σε σύγκριση με τις απαιτούμενες αλλαγές. 87
Διάγραμμα 22: Pressure vs Bending Angle (Πραγματικό μοντέλο vs αντίστροφο κινηματικό vs μοντέλο προσομοίωσης).. 118
Διάγραμμα 23: Azimuth Angle vs Zenith Angle (Date: 2024-12-21) - (Date: 2024-06-21) - (Date: 2024-09-21) - (Date: 2024-05-21). 119
Διάγραμμα 24: Πίεση ανά chamber (Date: 2024-12-21) - (Date: 2024-06-21) - (Date: 2024-09-21) - (Date: 2024-05-21). 121
Διάγραμμα 25: Azimuth Angle vs Zenith Angle (Date: 2024-12-21) - (Date: 2024-06-21) - (Date: 2024-09-21) - (Date: 2024-05-21) που πραγματοποιεί ο επενεργητής vs γωνίες που πραγματοποιεί ο επενεργητής ήλιος. 121
Διάγραμμα 26: Πίεση ανά chamber (Date: 2024-12-21) - (Date: 2024-06-21) - (Date: 2024-09-21) - (Date: 2024-05-21) για να πραγματοποιεί τις υπολογισμένες γωνίες. 122
Διάγραμμα 27: Κοινό διάγραμμα Voltage (Volt), Current (Amp) και Power (Watt) vs Time (hours of day) για σταθερό τοποθετημένο φωτοβολταϊκό πάνελ σε κλίση 45° 124
Διάγραμμα 28: Κοινό διάγραμμα Voltage (Volt), Current (Amp) και Power (Watt) vs Time (hours of day) ηλιακής ιχνηλάτησης με την τεχνολογία των «soft robotics». 125
Διάγραμμα 29: Voltage (Volt) vs Time (hours of day) ηλιακής ιχνηλάτησης με την τεχνολογία των «soft robotics» vs σταθερό τοποθετημένο φωτοβολταϊκό πάνελ σε κλίση 45° 125

Διάγραμμα 30: Current (Amp) vs Time (hours of day) ηλιακής ιχνηλάτησης με την τεχνολογία των «soft robotics» vs σταθερό τοποθετημένο φωτοβολταϊκό πάνελ σε κλίση 45° 126
Διάγραμμα 31: Power (Watt) vs Time (hours of day) ηλιακής ιχνηλάτησης με την τεχνολογία των «soft robotics» vs σταθερό τοποθετημένο φωτοβολταϊκό πάνελ σε κλίση 45° 126

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Δυνατότητες μονού (Single-Axis Tracker) και διπλού (Dual-Axis Tracker) άξονα ηλιακού ιχνηλάτη. 18
Πίνακας 2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλιακού ιχνηλάτη. 19
Πίνακας 3: Σύγκριση Hard robots vs Adaptable Robots vs Mixed Soft Robots vs Soft Robots.[15] 24
Πίνακας 4: Θετικά και αρνητικά των ΦΒ συστημάτων. 43
Πίνακας 5: Γωνία ώρας και ζενίθια γωνία για τις ημερομηνίες 21 Ιουνίου και 21 Δεκεμβρίου. 49
Πίνακας 6: Γωνία ώρας και αζιμούθια γωνία για τις ημερομηνίες 21 Ιουνίου και 21 Δεκεμβρίου.50
Πίνακας 7: Έξι ποιο πιθανοί τρόποι κατασκευής του συστήματος. 54
Πίνακας 8: Προδιαγραφές σιλικόνης για το πρόγραμμα προσομοίωσης. 58
Πίνακας 9: Διαστάσεις σχεδίων πρώτης προσομοίωσης του επενεργητή. 59
Πίνακας 10: Πιέσεις σχεδίων για κάμψη 90 μοιρών από την πρώτη προσομοίωση του επενεργητή. 61
Πίνακας 11: Διαστάσεις σχεδίων δεύτερης προσομοίωσης του επενεργητή. 63
Πίνακας 12: Πιέσεις σχεδίων για κάμψη 90 μοιρών από την δεύτερη προσομοίωση του επενεργητή. 64
Πίνακας 13: Πιθανοί σχεδιασμοί του επενεργητή έπειτα από την προσομοίωση επενεργητή με μεταβαλλόμενη την τιμή φ και βέλτιστη σταθερή τιμή p από την προηγούμενη προσομοίωση. .67
Πίνακας 14: Διαστάσεις σχεδίων τρίτης προσομοίωσης του επενεργητή. 68
Πίνακας 15: Πιέσεις σχεδίων για κάμψη 90 μοιρών από την τρίτη προσομοίωση του επενεργητή. 69
Πίνακας 16: Πιθανοί σχεδιασμοί του επενεργητή έπειτα από την προσομοίωση επενεργητή με σταθερή την μικρότερη τιμή p. 71
Πίνακας 17: Διαστάσεις σχεδίων τέταρτης προσομοίωσης του επενεργητή. 72
Πίνακας 18: Πιέσεις σχεδίων για κάμψη 90 μοιρών από την τέταρτη προσομοίωση του επενεργητή. 72
Πίνακας 19: Τελικός πίνακας σχεδίων από τις προσομοιώσεις. 75
Πίνακας 20: Διαστάσεις επενεργητή κατά το ήμισυ 82
Πίνακας 21: Διαστάσεις του επενεργητή. 90
Πίνακας 22: Όγκος και μάζα επενεργητή. 98
Πίνακας 23: Μέρη καλουπιού επενεργητή. 164
Πίνακας 24: Μέρη οργανωτικού κουτιού. 174

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός εργασίας

Ένας ηλιακός ανιχνευτής (solar tracker) είναι μια συσκευή που ευθυγραμμίζει ένα φωτοβολταϊκό προς τον ήλιο καθώς αυτός διασχίζει τον ουρανό. Η ηλιακή ανίχνευση μπορεί να βελτιώσει την παραγόμενη ισχύ ενός φωτοβολταϊκού μοντέλου έως και 30-40% ετησίως σε σύγκριση με έναν σταθερό μοντέλο που κλίνεται σε βέλτιστη γωνία, ή περίπου κατά 70% σε σύγκριση με έναν οριζόντια σταθερό μοντέλο. Οι ηλιακοί ανιχνευτές κατασκευάζονται παραδοσιακά από άκαμπτους στατικούς μηχανισμούς, όπως ηλεκτροκινητήρες (stepper motors), γρανάζια, ράγες, καλώδια και υδραυλικά έμβολα. Ωστόσο, δεν έχουν εφαρμοστεί ευρέως λόγω του υψηλού κόστους και των συχνά περίπλοκων και δυσκίνητων δομών τους που προσέθεταν σημαντικό βάρος στο αρχικό σύστημα.

Για αρκετά χρόνια, τα soft robots απέκτησαν αυξανόμενη δημοτικότητα σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς επενεργητές. Επιτυχή παραδείγματα εφαρμογών περιλαμβάνουν από χειρολαβές, υπερ-πολλαπλών βαθμών ελευθερίας, έως εξωσκελετούς. Οι λόγοι για αυτήν τη δημοτικότητα είναι πολλαπλοί και περιλαμβάνουν τα πλεονεκτήματα που κατέχουν σε σχέση με τα παραδοσικακά ρομπότ. Η εγγενής ελαστικότητά τους, τους καθιστά ανθεκτικούς στις μικρές εξωτερικές διαταραχές και ανθεκτικούς στους ισχυρούς εξωτερικούς κραδασμούς και τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Επιπλέον, η συνεχής παραμόρφωση της δομής με τη μυϊκή τους ενεργοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερο αριθμό βαθμών ελευθερίας και καλύτερη χωρική ολοκλήρωση. Τέλος, η ευελιξία εξατομίκευσης και η ευκολία κατασκευής των μαλακών ρομπότ επιτρέπουν γρήγορες εξερευνήσεις και αξιολογήσεις σχεδιασμού. Οι προκλήσεις των soft robots είναι οι αργές χρόνοι ανταπόκρισης, καθώς και ο σχεδιασμός και ο έλεγχός τους.

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η εφαρμογή αυτής της καινοτόμας τεχνολογίας των soft robotics στην ηλιακή ιχνηλάτιση. Τα πλεονεκτήματα αυτού του συνδυασμού έναντι των συμβατικών ηλιακών ανιχνευτών είναι η μειωμένη μηχανική πολυπλοκότητα λόγω λιγότερων κινούμενων μερών, η μείωση του βάρους και τα χαμηλότερα κόστη κατασκευής.

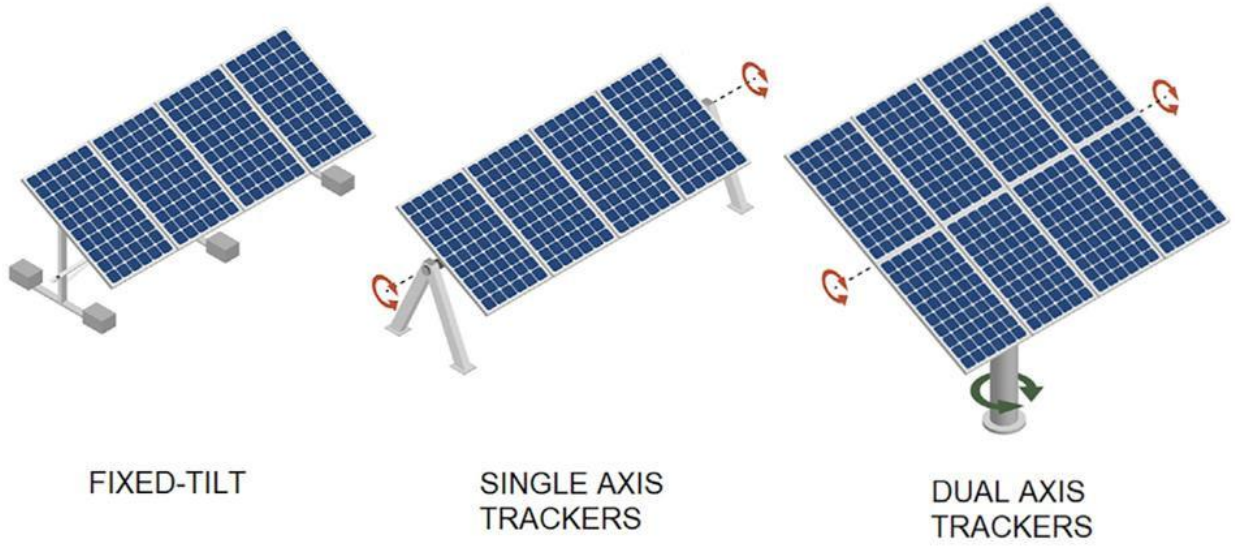
Οι συνεισφορές της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός, η μοντελοποίηση, ο χαρακτηρισμός και ο έλεγχος του συστήματος, καθώς και η επιτυχημένη τη ηλιακή ανίχνευση.

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Ένας ηλιακός ιχνηλάτης είναι ένα σύστημα που κατευθύνει τους ηλιακούς συλλέκτες ή τους κεντρικούς ηλιακούς καθρέφτες προς τον ήλιο για να μεγιστοποιήσει την απόδοση της συλλογής ηλιακής ενέργειας. Αυτή η τεχνολογία είναι σημαντική για την αύξηση της παραγωγής ενέργειας από ηλιακή ενέργεια και ηλιακούς σταθμούς. Οι ηλιακοί ιχνηλάτες διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες [1], [2]:

Μονού Άξονα (Single-Axis Trackers)	Διπλού Άξονα (Dual-Axis Trackers)
Κινείται κατά μήκος ενός άξονα, συνήθως από ανατολή προς δύση.	Κινείται κατά μήκος δύο αξόνων, επιτρέποντας πλήρη παρακολούθηση της πορείας του ήλιου.
Χρησιμοποιείται κυρίως σε φωτοβολταϊκά πάρκα μεγάλης κλίμακας.	Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υψηλής απόδοσης, όπως συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά (CPV) και ηλιακές θερμικές μονάδες.
Αυξάνει την απόδοση κατά 25-35% σε σύγκριση με σταθερά συστήματα.	Μπορεί να αυξήσει την απόδοση έως και 40% σε σύγκριση με σταθερά συστήματα.

Πίνακας 1: Δυνατότητες μονού (Single-Axis Tracker) και διπλού (Dual-Axis Tracker) άξονα ηλιακού ιχνηλάτη.



Εικόνα 1: Ηλιακοί ιχνηλάτες: Μονού Άξονα (Single-Axis Trackers) vs Διπλού Άξονα (Dual-Axis Trackers).[3]

Οι ηλιακοί ιχνηλάτες βασίζονται σε διάφορους μηχανισμούς κίνησης, όπως:

- **Μηχανικά Συστήματα:** Κινητήρες, συνήθως βηματικοί κινητήρες (stepper motors), και γρανάζια που κινούν το φωτοβολταϊκό πάνελ.
- **Ηλεκτρονικά Συστήματα:** Αισθητήρες φωτός που καθορίζουν την κίνηση ανάλογα με τη θέση του ήλιου ή χρησιμοποιώντας έτοιμα ηλιακά με βάση την γεωγραφική θέση της εγκατάστασης.
- **Υδραυλικά Συστήματα:** Χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνά λόγω του κόστους και της πολυπλοκότητας, αλλά προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια.

Η ηλιακή ιχνηλάτηση διαθέτει, όπως όλα τα συστήματα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Οι ηλιακοί ιχνηλάτες αυξάνουν την παραγωγή ενέργειας κατά 10-25% σε σύγκριση με τα σταθερά πάνελ για να διατηρούν τις βέλτιστες γωνίες έκθεσης όλη τη διάρκεια της ημέρας.	Οι ηλιακοί ιχνηλάτες είναι ακριβοί στην εγκατάσταση και απαιτούν συχνότερη συντήρηση λόγω των μηχανικών εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται.
Κάνουν την καλύτερη χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας σε περιοχές με μεγάλες διακυμάνσεις του ηλιακού φωτός κατά τη διάρκεια της ημέρας.	Η παρουσία κινούμενων εξαρτημάτων αυξάνει την πιθανότητα μηχανικής βλάβης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε χρόνο διακοπής λειτουργίας και αυξημένο κόστος επισκευής.
Με την αύξηση της απόδοσης, μειώνεται η ανάγκη για περισσότερα πάνελ, εξοικονομώντας χώρο και κόστος εγκατάστασης.	Οι ηλιακοί ιχνηλάτες χρειάζονται περισσότερο χώρο για να λειτουργούν σωστά επειδή πρέπει να κινούνται και να μην έχουν εμπόδια.
Ο ιχνηλάτης επιτρέπει στο πάνελ να συλλέγει περισσότερο φως όταν ο ήλιος είναι χαμηλός στον ορίζοντα.	Οι ηλιακοί ιχνηλάτες μπορεί να είναι πιο ευάλωτοι σε ακραίες καιρικές συνθήκες, όπως ισχυροί άνεμοι και χιονοπτώσεις, και απαιτούν πρόσθετα μέτρα προστασίας.

Πίνακας 2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλιακού ιχνηλάτη.

Οι ηλιακοί ιχνηλάτες προσφέρουν τα σημαντικά πλεονεκτήματα στην αποδοτικότητα της παραγωγής ηλιακής ενέργειας, ειδικά σε πολλές περιοχές με μεγάλη ηλιοφάνεια. Ωστόσο, η απόφαση χρήσης τους πρέπει να λαμβάνει υπόψη το αυξανόμενο κόστος, τις απαιτήσεις συντήρησης και τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής. Η επιλογή εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εργασία και την προτεραιότητα του χρήστη.[4]

Η τεχνολογία των ηλιακών ιχνηλατών εξελίσσεται συνεχώς προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση και να μειωθεί το κόστος. οι σύγχρονες εξελίξεις περιλαμβάνουν:

- **Αλγόριθμος παρακολούθησης:** Υπολογίζει τη διαδρομή του ήλιου χρησιμοποιώντας ένα προγνωστικό μοντέλο.
- **Αυτονομία και έξυπνος ιχνηλάτης**: Ενσωματωμένη η τεχνητή νοημοσύνη και αισθητήρες για αυτορρύθμιση και βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο.
- **Σχεδιασμός και υλικά για ελαφριά κατασκευή**: Μείωση της πολυπλοκότητας κατασκευής και τα κόστη συντήρησης.[5]

Το ηλιακά συστήματα με ιχνηλάτηση χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εγκαταστάσεις, από τις μικρές οικιακές εφαρμογές μέχρι στα μεγάλα ηλιακά πάρκα. Μερικά παραδείγματα περιλαμβάνουν:

Shams 1: Ένα από τα μεγαλύτερα ηλιακά θερμικά πάρκα στον κόσμο, που χρησιμοποιεί ηλιακούς ιχνηλάτες διπλού άξονα.



Εικόνα 2: Shams 1, Έργο ηλιακού σταθμού στο Άμπου Ντάμπι των ΗΑΕ.[6]

- **Topaz Solar Farm**: Ένα από τα μεγαλύτερα φωτοβολταϊκά πάρκα στις ΗΠΑ, που χρησιμοποιεί ηλιακούς ιχνηλάτες μονού άξονα.



Εικόνα 3: Το Topaz Solar Farm στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής από το διάστημα.[7]

Οι ηλιακοί ιχνηλάτες είναι μια βασική τεχνολογία για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Παρά την αύξηση του κόστους εκκίνησης, η ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, γεγονός που καθιστά τον ιχνηλάτη μια ελκυστική επένδυση για πολλές εφαρμογές. Αυτή η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας παρέχει μια επισκόπηση της τεχνολογίας ηλιακού ιχνηλάτη, της τρέχουσας ανάπτυξης και της εφαρμογής της με βάση έγκυρες πηγές και επιστημονική βιβλιογραφία.

1.3 Δομή εργασίας

Η δομή της εργασίας οργανώνεται με στόχο να προσφέρει μια λεπτομερή παρουσίαση και ανάλυση της τεχνολογίας των “soft robotics”, τη σύνδεσή της με την ηλιακή ακτινοβολία και τις εφαρμογές της στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Το Κεφάλαιο 2 καλύπτει τα θεωρητικά στοιχεία, ξεκινώντας με μια εισαγωγή στην τεχνολογία των “soft robotics” και μια αναλυτική σύγκριση με άλλες κατηγορίες ρομπότ, καταλήγοντας στην επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ηλιακής γεωμετρίας. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι προδιαγραφές και οι δυνατότητες του συστήματος,

ενώ το Κεφάλαιο 4 εστιάζει στην προσομοίωση και τη μοντελοποίηση του “soft” επενεργητή. Το Κεφάλαιο 5 συνεχίζει με την παραμετροποίηση του επενεργητή, ενώ το Κεφάλαιο 6 περιγράφει την κατασκευή του επενεργητή και τη συναρμολόγηση των καλουπιών. Το Κεφάλαιο 7 επικεντρώνεται στην κινηματική μοντελοποίηση και την πειραματική διαδικασία. Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντική εργασία. Αυτή η δομή διασφαλίζει μια συνεκτική και ολοκληρωμένη παρουσίαση του θέματος, από τη θεωρία και τη σχεδίαση έως την κατασκευή και την πρακτική εφαρμογή.

2 Τεχνολογίες soft robotics και ηλιακής ενέργειας: θεωρία, εφαρμογές και καινοτομίες

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνονται όλα τα στοιχεία θεωρίας που ήταν αναγκαία για την εκπόνηση αυτής της μελέτης. Παρουσιάζονται η τεχνολογία των «soft robotics» μαζί με εφαρμογές τους, ηλιακή γεωμετρία, η ηλιακή ακτινοβολία και η επίδραση της ατμόσφαιρας της γης και η θεωρία και ιστορικών εφαρμογής των φωτοβολταϊκών.

2.2 Τι είναι η τεχνολογία των Soft Robotics;

Από τα αρχαία χρόνια, όταν προέκυπταν προβλήματα κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του ανθρώπου, αυτός στρεφόταν στη φύση και στην αρχιτεκτονική του περιβάλλοντος για να βρει λύσεις. Παρατηρώντας και μελετώντας το περιβάλλον ο άνθρωπος, στράφηκε προς την επίλυση προβλημάτων του και την καλύτερη κατανόηση του φυσικού κόσμου. Σήμερα, η μελέτη και η εφαρμογή των λύσεων της φύσης από τον άνθρωπο είναι το αντικείμενο του επιστημονικού κλάδου της βιομιμητικής δηλαδή, η μελέτη και η εφαρμογή φυσικών λύσεων σε ανθρώπινα προβλήματα [8]. Παράλληλα, πήρε τις λειτουργίες της φύσης και τις εφάρμοσε στο δικό του σχεδιασμό και την αρχιτεκτονική του.

Ιδέες εμπνευσμένες από τη φύση και συνδεδεμένες με την τεχνολογία και τα μέσα κάθε περιόδου, μπορούν να παρατηρηθούν από την εποχή του Λεονάρντο ντα Βίντσι, ο οποίος σχεδίασε ιπτάμενες μηχανές, μέχρι την περίοδο της Αναγέννησης. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, οι καινοτομίες στον τομέα της βιομιμητικής έχουν εξαπλωθεί από τις φυσικές επιστήμες, τη μηχανική και την αρχιτεκτονική στην ιατρική. Τα σύγχρονα μέσα, οι τεχνολογικές εξελίξεις και οι επιστημονικές εξελίξεις έχουν δημιουργήσει μοντέλα εφαρμογών που ενσωματώνουν τα αξιώματα της βιομιμητικής στην καθημερινή ζωή και στο δομημένο περιβάλλον. Από την εφαρμογή τεχνικών αναδίπλωσης και μοτίβων που βρίσκονται στα φύλλα των φυτών μέχρι την κατασκευή δορυφορικών εξαρτημάτων στο διάστημα [9], έως την κατασκευή «soft robots» που μαθαίνουν από τις κινήσεις και τις προσαρμογές ασπόνδυλων, όπως τα χταπόδια, οι μελέτες της φύσης σε συνδυασμό με την τεχνολογία έχουν αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι προσεγγίζουν και ζουν στο περιβάλλον.

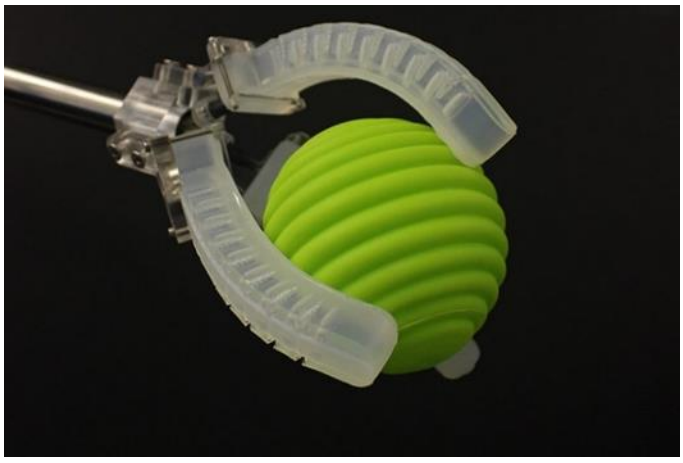
Ωστόσο, η ίδια η φύση έχει υποστεί σοβαρές ζημιές από την κλιματική αλλαγή λόγω των ανθρώπινων παρεμβάσεων για την εκμετάλλευση της φύσης. Η φύση, η οποία είναι ο καταλύτης της ανθρώπινης δημιουργίας και το ερευνητικό αντικείμενο της τεχνολογικής προόδου, έχει καταστραφεί από τον άνθρωπο σε αυτή τη διαδικασία. Ωστόσο, εκτός από αυτό το πρόβλημα, υπάρχουν και λύσεις για την περιβαλλοντική καταστροφή που προκαλείται από την τεχνολογία.

Βιομιμητικές προσεγγίσεις και αυτοματοποιημένες λύσεις μπορούν να βρεθούν και να εφαρμοστούν στο σημερινό δομημένο περιβάλλον, ώστε η σύγχρονη αρχιτεκτονική να συνυπάρξει σε αρμονία με τις φυσικές δομές. Η εξάντληση των φυσικών πόρων και τα ενεργειακά προβλήματα μπορούν να επιλυθούν με την υιοθέτηση των βιολογικών αρχών της φύσης και τη δημιουργία ευφυών μηχανισμών που αλληλοεπιδρούν με αυτές. Είναι απαραίτητο να δοθεί έμφαση στη σχέση μεταξύ του φυσικού κόσμου και των νέων τεχνολογιών και στην προσαρμογή τους μέσω της ανάπτυξης νέων τεχνολογικών μοντέλων στο περιβάλλον. Είναι απαραίτητο τα νέα ευφυή συστήματα να ενσωματώνουν χωρικές παραμέτρους στη χρήση και τη λειτουργία τους και να αναπτύσσουν μηχανισμούς για να αντιλαμβάνονται και να υπολογίζουν το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν. Επομένως, αναφερόμενοι στην αρχιτεκτονική και τις μεθόδους της και θέτοντας υπό αμφισβήτηση τον ρόλο των μηχανών στην καθημερινή ζωή και τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον, πρέπει να δημιουργήσει η ανθρωπότητά νέους αλγορίθμους και λειτουργίες παραγωγής που θα είναι πιο αποτελεσματικές και θα απομονώνουν την επαφή τους με τον περιβάλλοντα χώρο και τις επιπτώσεις τους σε αυτόν.

Ένας νέος τεχνολογικός τομέας που ονομάζεται Soft Robotics συζητείται επί του παρόντος. Αν και ο ελληνικός όρος μεταφράζεται μερικές φορές ως "μαλακά ρομπότ", στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο αγγλικός όρος "Soft Robots" ή “Soft Robotics”. Τα Soft Robotics είναι ένας κλάδος που μελετά τα ασπόνδυλα, τα ζώα χωρίς σκελετό (π.χ. καλαμάρια, αστερίες, σκουλήκια). Οι έννοιες που χαρακτηρίζουν καλύτερα τα Soft Robots είναι η προσαρμοστικότητα, η ευελιξία και η ακρίβεια. Τα Soft Robots χωρίζονται σε δύο μεγάλες υποκατηγορίες, τα αρθρωτά ή articulated Soft Robots και τα Continuum Soft Robots. Το πρώτο είναι ένα ρομπότ που συνδυάζει άκαμπτα και ελαστικά στοιχεία, το σημείο εκκίνησης του οποίου είναι το σκελετικό σύστημα των σπονδυλωτών, το δεύτερο είναι ένα ρομπότ με δυνατότητα συνεχούς παραμόρφωσης του σώματος που ακολουθεί τη φυσική δομή των ασπόνδυλων [10][4].

2.2.1 Soft Robotics

Ο ορισμός του “soft” ρομπότ είναι ακόμη υπό ανάπτυξη, καθώς οι τεχνολογίες, τα υλικά, και ούτω καθεξής που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αυτών των ρομπότ υπόκεινται σε μια μεγάλη διαδικασία καινοτομίας, επομένως ο ορισμός πρέπει να προσαρμοστεί σύμφωνα με τις νέες εξελίξεις.



Εικόνα 4: Gripper of soft robotics.[11]

Όσον αφορά τον τομέα της ρομποτικής, η σημερινή παραγωγή επικεντρώνεται στη δημιουργία γνωστών παραδοσιακών ρομπότ άκαμπτου σώματος, τα λεγόμενα «Rigid Robots», τα οποία αποτελούνται κυρίως από μεταλλικά μέρη αλλά έχουν διάφορους περιορισμούς ως προς την απόδοση. την αποτελεσματικότητά τους ή την προσαρμοστικότητά τους στο περιβάλλον τους. Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα είναι η αδυναμία τους να λειτουργήσουν παρουσία ανθρώπων, καθώς τα υλικά από τα οποία αποτελούνται θα μπορούσαν να αποδειχθούν επικίνδυνα. Επομένως, σε χώρους εργασίας όπου υπάρχουν ρομπότ, απομονώνονται και περιορίζονται σε ειδικά διαμορφωμένους χώρους, εκτός ορίων για τον άνθρωπο, για λόγους ασφαλείας. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των «Rigid Robots», είναι ο περιορισμός των μεθόδων ενεργοποίησης, γεγονός που ενισχύει την ανάγκη δημιουργίας νέων μορφών ρομπότ.

Οι αδυναμίες των παραδοσιακών ρομπότ αντικαθίστανται από τα soft robots, τα οποία βοηθούν στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών κατασκευής, στη δημιουργία νέων μορφών στο δομημένο περιβάλλον και στην κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών χωρίς να επιβαρύνουν τη φύση, γεφυρώνοντας έτσι το χάσμα μεταξύ ανθρώπου και μηχανών. Σε σύγκριση με τα rigid robots, τα soft robots είναι κατασκευασμένα από μαλακά υλικά που είναι εύκολα στη χρήση αλλάζει (π.χ. σιλικόνη, ελαστομερή κ.λπ.) και απορροφά την ενέργεια αυτής της αλλαγής, όπως ένα βιολογικό σύστημα που ενεργοποιείται από τους μύες. Αυτή η μεταβλητότητα οδηγεί φυσικά σε πολλαπλασιασμό των βαθμών ελευθερίας και των δυνατοτήτων των μαλακών ρομπότ σε σχέση με τα παραδοσιακά ρομπότ.

Η έρευνα των soft robots έχει τη δυνατότητα να προτείνει νέους τρόπους προσαρμογής, αίσθησης και κατανόησης του περιβάλλοντος και κίνησης μέσα σε αυτό. Τα soft robots έχουν μια ποικιλία ικανοτήτων που μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Ικανότητα κίνησης και κάμψης και στρίψιμο χωρίς περιορισμό από τον περιβάλλοντα χώρο
- Το σώμα παραμορφώνεται συνεχώς με τέτοιο τρόπο ώστε να μιμείται έναν ζωντανό οργανισμό
- Προσαρμογή του σώματος τους στον χώρο και εκτέλεση κινήσεων για χειρισμό αντικειμένων και πλοήγηση τους σε συγκεκριμένες διαδρομές εμφανίζοντας αντοχή και ανθεκτικότητα
- Εκτέλεση γρήγορων και αποτελεσματικών ελιγμών [12]

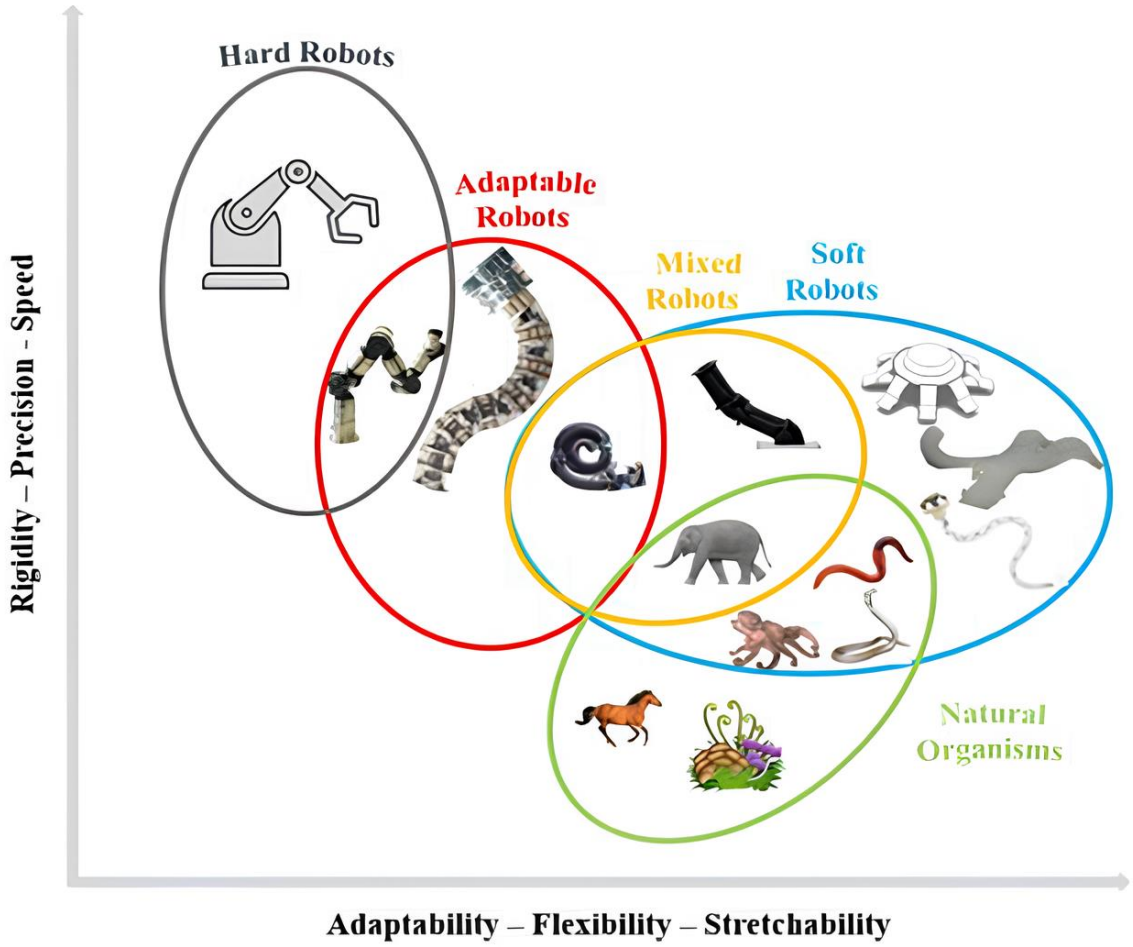
Ωστόσο, η δημιουργία των soft robots αποτελεί πρόκληση σε πολλούς τομείς, καθώς απαιτεί την ενσωμάτωση της τεχνολογίας μέσω της μελέτης της δυναμικής, των αισθητήρων, των επενεργητών και του κατάλληλου λογισμικού για τη δημιουργία της επιθυμητής συμπεριφοράς, προκειμένου να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητές της. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητη η δημιουργία νέων συστημάτων ελέγχου που προσαρμόζονται στα δεδομένα των soft robots και, κατά συνέπεια, νέων «soft» υλικών που απαιτούν νέους αλγορίθμους χειρισμού.

2.2.2 Σύγκριση διαφόρων ομάδων ρομπότ

Σύγκριση των χαρακτηριστικών, των δυνατοτήτων, της διαδικασίας υλοποίησης και της κύριας εφαρμογής των διαφόρων ομάδων ρομπότ (Hard robots, Adaptable Robots, Mixed Soft Robots, Soft Robots). Η προσαρμοστικότητα και η ασφαλής αλληλεπίδραση αυξάνονται από Hard robots, σε Soft Robots, ενώ η ακρίβεια, η ταχύτητα και η ικανότητα φόρτωσης μειώνονται. Ο σχεδιασμός, η μοντελοποίηση και ο έλεγχος ορίζονται ως «εύκολοι» για τα 'Hard robots', καθώς το πρόβλημα είναι γνωστό. Στην περίπτωση εφαρμογών, μόνο τα πραγματικά ή εμπορικά προϊόντα θεωρούνται εφαρμογές και όχι τα διαφορετικά πρωτότυπα που αναπτύχθηκαν. Επιπλέον, μόνο η κύρια αίτηση αναφέρεται ως η πιο σημαντική[13], [14].

	Hard robots	**Adaptable Robots**	**Mixed Soft Robots**	**Soft Robots**
Χαρακτηριστικά				
Βαθμοί ελευθερίας DOF, n	n≤6	n≥12	n=∞	n=∞
Αντοχή Υλικών (Pa)	E = $10^{10} - 10^{13}$	E = $10^{8} - 10^{11}$	E = $10^{4} - 10^{10}$	E = $10^{4} - 10^{8}$
Ευκαμψία	Όχι	Περιορισμένη	Άπειρη	Άπειρη
Ελαστικότητα	Όχι	Όχι	Περιορισμένη	Άπειρη
Δυνατότητες				
Ακρίβεια	●●●●●	●●●●○	●○○○○	●○○○○
Ταχύτητα	●●●●●	●●●○○	●●○○○	●○○○○
Ικανότητα φόρτισης	●●●●●	●●●○○	●●○○○	●○○○○
Ικανότητα προσαρμογής	●○○○○	●●●●○	●●●●●	●●●●●
Ασφαλής αλληλεπίδραση	●○○○○	●●●○○	●●●●●	●●●●●
Πραγματοποίηση				
Βιομηχανοποίηση	Παραδοσιακή Μηχανική Κατεργασία	Παραδοσιακή Μηχανική Κατεργασία και 3D κατασκευή προτύπων	3D και 4D κατασκευή προτύπων	3D και 4D κατασκευή προτύπων
Σχεδιασμός	Εύκολο	Από απλός σε σύνθετός	Σύνθετος	Σύνθετος
Μοντελοποιήση	Εύκολο	Από απλός σε σύνθετη	Σύνθετή	Σύνθετή
Έλεγχος	Εύκολο	Από απλός σε σύνθετός	Σύνθετος	Σύνθετος
Κόστος	Υψηλό	Μεσαίο προς Υψηλό	Μεσαίο προς Χαμηλό	Χαμηλό

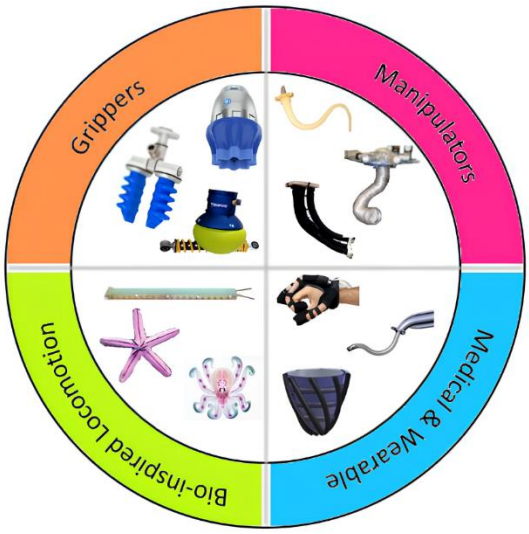
Πίνακας 3: Σύγκριση Hard robots vs Adaptable Robots vs Mixed Soft Robots vs Soft Robots.[15]



Εικόνα 5: Σχέδιο ταξινόμησης των ρομπότ σύμφωνα με την ευελιξία και την προσαρμοστικότητά τους. Από αριστερά προς τα δεξιά. [11]

2.2.3 Ταξινόμηση ανάλογα με την εφαρμογή

Η ταξινόμηση των “soft robots” εξαρτάται από τον ορισμό “soft robots” που εξετάζετε, καθώς ορισμένα ρομπότ μπορεί να αποκλειστούν. Επιπλέον, δεδομένου ότι είναι ένα πλήρως ανεπτυγμένο πεδίο, πολλά πρωτότυπα που κατασκευάστηκαν δεν έχουν ειδικές εφαρμογές και είναι μόνο πειράματα και δοκιμές υλικών και ενεργοποιητών. Επομένως, θα εξεταστούν τέσσερις κύριες ομάδες. Σχεδόν όλα τα πρωτότυπα που μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία μπορούν να συνοψιστούν σε αυτές τις ομάδες. Ένα διάγραμμα αυτής της ταξινόμησης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. [16], [17]



Εικόνα 6: Σχήμα από τις κύριες εφαρμογές των "soft robotics". [16], [17]

2.2.3.1 Βιο-εμπνευσμένα ρομπότ και κινήσεις

Η πρώτη ομάδα που μπορεί να αναγνωριστεί είναι μια ομάδα βιο-εμπνευσμένων ρομπότ. Αυτή η ομάδα, ίσως η πιο σημαντική, είναι η μελέτη της φύσης, η οποία οδηγεί στην ανάπτυξη αυτού του νέου πεδίου ρομποτικής, και αυτό που προσελκύει την προσοχή των ερευνητών είναι ότι τα ζώα είναι κυρίως σκουλήκια, κάμπιες, πλοκάμια, αστέρια, μέδουσες, και πολλοί φυσικοί οργανισμοί που έχουν δοκιμαστεί να αναπαραχθούν. Χάρη σε αυτά, μελετήθηκαν η περιστροφική κίνηση του, GoQBot [18], η περισταλτική του Meshworm[13], η υποβρύχια κίνηση περπατήματος του PoseiDRONE [19], η κολύμβηση με τζετ και μερικά [20], [21].

Αυτό που ενώνει όλα τα προηγούμενα παραδείγματα είναι ότι τα μεγαλύτερα ασπόνδυλα βρίσκονται στο νερό (χταπόδια, μέδουσες) ή υπόγεια (γιγαντιαία σκουλήκια) [22]. Αντιπροσωπεύει αυτούς τους περιορισμούς και σχετίζεται επίσης με προβλήματα ελέγχου ακαμψίας. Ωστόσο, τα επόμενα χρόνια, χάρη στην πρόοδο της τεχνολογίας κατασκευής προσθέτων και στις προσπάθειες να δοθεί σε αυτά τα ρομπότ ιδιοδεκτικότητα, δηλαδή την ικανότητα να αντιλαμβάνονται σχήματα και θέσεις στο διάστημα, αναμένεται ότι θα αναπτυχθούν καλύτερα πρωτότυπα [23]. Η βασική ιδέα της ικανότητας αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον [24].

2.2.3.2 Συνεχή ρομπότ (continuum robots)

Η δεύτερη ομάδα που μπορεί να εντοπιστεί είναι αυτή των συνεχών ρομπότ. Αν και αυτά τα ρομπότ είναι αξιοσημείωτα βιολογικά εμπνευσμένα από πλοκάμια ή κορμούς, αποτελούν ήδη μια ξεχωριστή ομάδα στην τελευταία λέξη της τεχνολογίας [25]. Μία από τις πρώτες διαφορές για την πρώτη ομάδα είναι ότι αυτά τα ρομπότ έχουν συνήθως μια συγκεκριμένη εφαρμογή όπως το να πιάνουν και να επεξεργάζονται αντικείμενα, να επιθεωρούν απρόσιτα μέρη ή να αλληλεπιδρούν με ανθρώπους. Με αυτή την έννοια, η βιοέμπνευση βρίσκεται στην επιθυμία να αναδημιουργηθεί η κίνηση των φυσικών ομολόγων της [26].

Δεν μπορούν να θεωρηθούν όλα τα πρωτότυπα αυτής της ομάδας “soft”, αλλά όλα έχουν μεγάλη προσαρμοστικότητα στο περιβάλλον χάρη στους πολυάριθμους βαθμούς ελευθερίας τους (DOF) και χάρη σε αυτό μπορούν να θεωρηθούν ασφαλή [27].

Ανάμεσα στα πιο διάσημα πρωτότυπα είναι το Octarm, ένας βραχίονας κατασκευασμένος με τεχνητούς πνευματικούς μύες ικανός να πιάνει αρκετά μεγάλα αντικείμενα όπως κώνους κυκλοφορίας, το Air-Octor, το οποίο διέθετε διπλή πνευματική ενεργοποίηση και τένοντα, και το Bionic Handling Assistant [28], [29].

2.2.3.3 Μαλακές/Ευέλικτες αρπάγες (Soft Grippers)

Η τρίτη ομάδα που εντοπίστηκε είναι οι soft grippers, οι πιο προηγμένες όσον αφορά την ανάπτυξη αφού πολλά από τα πρωτότυπά της χρησιμοποιούνται ήδη στη βιομηχανία. Η ανάγκη για αρπάγες που δεν θα μπορούσαν να καταστρέψουν τα αντικείμενα που κρατούσαν ήταν αρκετά αισθητό πρόβλημα στον τομέα των τροφίμων και της γεωργίας, Οι soft grippers επιτρέπουν τη σύλληψη αντικειμένων που κατανέμουν τις δυνάμεις επαφής και έτσι αποφεύγουν να αφήνουν σημάδια [30].

Οι τεχνολογίες που επιτρέπουν σε αυτές τις λαβές να προσαρμόζονται σε αντικείμενα είναι πολύ διαφορετικές. Η απλούστερη λύση είναι να δημιουργηθούν τα δάχτυλα ως παθητικές δομές που σχηματίζονται από διάφορους συνδέσμους, που ενεργοποιούνται με καλώδια και εξωτερικούς κινητήρες. Σε αυτή την περίπτωση, η λαβή δεν είναι απαραίτητα μαλακή αφού η προσαρμοστικότητά της δεν εξαρτάται από το υλικό αλλά από τα συνεχόμενα δάχτυλα. Για το λόγο αυτό, μπορεί να μην είναι η καλύτερη επιλογή για το χειρισμό ιδιαίτερα παραμορφώσιμων και ευαίσθητων αντικειμένων [31].

Μια άλλη δυνατότητα είναι η χρήση παθητικών κατασκευών, που γενικά ενεργοποιούνται με εξωτερικούς κινητήρες, κατασκευασμένες με μαλακά υλικά που παραμορφώνονται όταν αλληλεπιδρούν με αντικείμενα [32].

Μια άλλη οικογένεια Soft Grippers που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικό επίπεδο είναι οι πνευματικές αρπάγες. Σε αυτή την περίπτωση, τα δάχτυλα είναι πνευματικοί θάλαμοι σχεδιασμένοι έτσι ώστε όταν φουσκώνουν, να μπορούν να προσαρμοστούν στα αντικείμενα. Τα δάχτυλα είναι γενικά κατασκευασμένα από υλικά όπως η σιλικόνη, η οποία εγγυάται μεγάλη ευελιξία και προσαρμοστικότητα [33], [34], [35].

2.2.3.4 Ιατρικά και φορετά ρομπότ

Η τελευταία ομάδα που μπορεί να εντοπιστεί είναι τα ιατρικά και φορετά ρομπότ. Αποφασίστηκε να ενταχθούν σε αυτές τις δύο ομάδες, καθώς τα πρωτότυπα έχουν σχεδιαστεί για να αλληλεπιδρούν στενά με το ανθρώπινο σώμα και στις δύο περιπτώσεις. Εάν τα ρομπότ με βιολογική έμπνευση ήταν η περιοχή που οδήγησε αρχικά τη μαλακή ρομποτική, τα ιατρικά ρομπότ θα την οδηγήσουν στο μέλλον. Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη μαλακών ρομπότ που μπορούν να χειριστούν, να διαγνώσουν, να χορηγήσουν φάρμακα, να εκτελέσουν αποκατάσταση, να χρησιμοποιηθούν ως προσθετικά, τεχνητά όργανα και προσομοιωτές οργάνων είναι τεράστιο. Οι δυνατότητες φαίνονται ατελείωτες και μπορεί να γίνεται μάρτυρας μιας αλλαγής παραδείγματος στην υγειονομική περίθαλψη, καθώς παρέχουν υψηλή ασφάλεια (θα απορροφούν μηχανικά φορτία χωρίς να τα μεταδίδουν στον ασθενή). Αν και ακόμα έχουν πολύ δρόμο να διανύσουν για να χρησιμοποιηθούν ευρέως στα νοσοκομεία, ορισμένα πρωτότυπα χρησιμοποιούνται ήδη για ελάχιστα επεμβατικές χειρουργικές επεμβάσεις [36] Συγκεκριμένα, τα soft robots επιτρέπουν την ανάπτυξη καλύτερων ενδοσκοπίων, καθώς είναι εγγενώς ασφαλή και μειώνουν την πιθανότητα βλάβης στους ιστούς και τα όργανα των ασθενών. Επιπλέον, παρουσιάζουν υψηλότερη ικανότητα ελιγμών από τις παραδοσιακές λύσεις, θεμελιώδες χαρακτηριστικό σε αυτό το είδος εφαρμογής.

Αρχίζουν ήδη να χρησιμοποιούνται για τη χορήγηση φαρμάκων, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν το φάρμακο πρέπει να φτάσει σε απομακρυσμένο μέρος του σώματος, όπως ο εγκέφαλος, καθώς δεν θα βλάψει τους ιστούς. Ωστόσο, υπάρχουν πολλά ανεπίλυτα ζητήματα σχετικά με τα υλικά και τον έλεγχο. Οι πιο ενδιαφέρουσες εφαρμογές είναι η δημιουργία τεχνητών οργάνων και τμημάτων του σώματος για προσομοιώσεις και έρευνα [37].

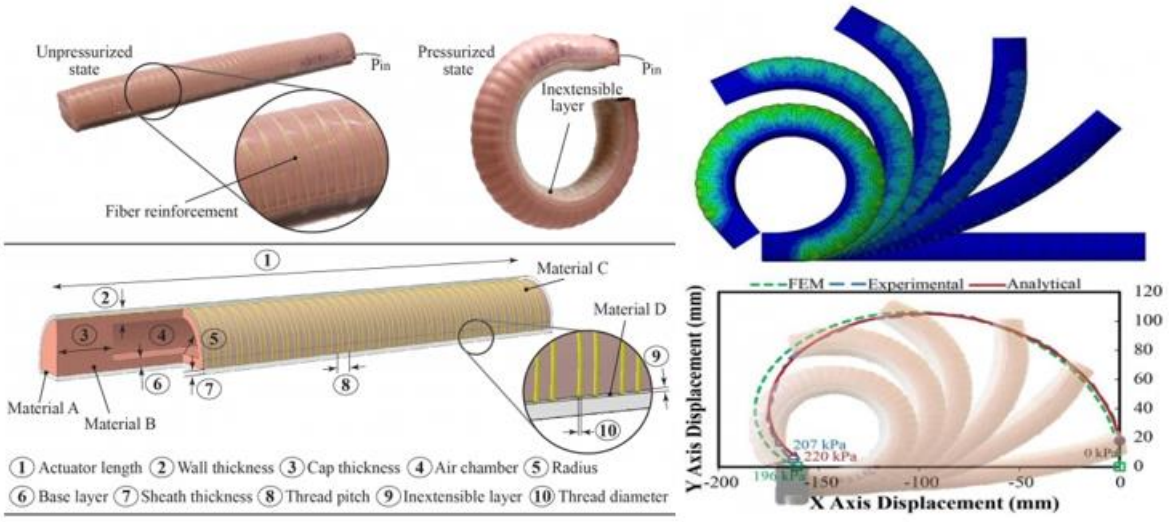
Οι φορετές συσκευές προσελκύουν επίσης σημαντικό ενδιαφέρον, όχι μόνο συσκευές αποκατάστασης όπως εξωσκελετές και προσθετικά, αλλά και απτικές συσκευές ενσωματωμένες στην εικονική πραγματικότητα. Οφείλεται, μεταξύ άλλων, στην ελαφρότητα και τη φορητότητα που διακρίνει αυτές τις μαλακές συσκευές από αυτές που είχαν αναπτυχθεί στο παρελθόν. Αυτά τα χαρακτηριστικά δημιουργούν στον χρήστη περισσότερη άνεση και λιγότερη σωματική κόπωση. Επιπλέον, είναι πιο εύκολο να φορεθούν και να αφαιρεθούν και είναι ασφαλέστερα για τους χρήστες [38].

2.2.4 Μαλακοί ρευστοδυναμικοί επενεργητές

Οι μαλακοί ρευστοδυναμικοί ενεργοποιητές (soft fluidic actuators) αποτελούνται από ελαστομερείς μήτρες ενσωματωμένες σε εύκαμπτα υλικά (π.χ. ύφασμα, χαρτί, ίνες, σωματίδια) παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη ρομποτική, επειδή είναι ελαφροί, οικονομικοί και προσαρμόζονται εύκολα σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Αυτοί οι ενεργοποιητές μπορούν να κατασκευαστούν γρήγορα σε μια διαδικασία χύτευσης πολλαπλών σταδίων και να επιτύχουν ένα συνδυασμό συστολής, διαστολής, κάμψης και στρέψης με απλές εισροές ελέγχου, όπως ρευστά υπό πίεση. Η προσέγγισή μας είναι να βελτιώσουμε την απόδοση αυτών των ενεργοποιητών σε σχέση με τα υπάρχοντα σχέδια χρησιμοποιώντας νέες σχεδιαστικές ιδέες, κατασκευαστικές προσεγγίσεις και μαλακά υλικά. Ειδικότερα, καθορίζουμε τις απαιτήσεις για τα προφίλ κίνησης και δύναμης για εφαρμογές όπως οι συσκευές καρδιακής υποστήριξης και τα μαλακά ρομποτικά γάντια. Αυτές οι απαιτήσεις επιδόσεων μπορούν στη συνέχεια να επιτευχθούν με απλές εισόδους ελέγχου με την ενσωμάτωση μηχανικής νοημοσύνης σε αυτούς τους μαλακούς ενεργοποιητές [10].

2.2.5 Μοντελοποίηση “soft” επενεργητών

Ο χαρακτηρισμός και η πρόβλεψη των “soft” ενεργοποιητών πολλαπλών υλικών είναι δύσκολος τόσο λόγω της μη γραμμικότητας των υπερελαστικών υλικών όσο και λόγω της μεγάλης κίνησης κάμψης που παράγουν. Η αρχή λειτουργίας αυτών των ενεργοποιητών έχει περιγράφει λεπτομερώς με αναλυτικές, αριθμητικές και πειραματικές προσεγγίσεις και οι έξοδοι τους (κίνηση και δύναμη) έχουν μελετηθεί ώστε να χαρακτηρίζονται ως συνάρτηση της πίεσης εισόδου και των γεωμετρικών και υλικών παραμέτρων. Τόσο το μοντέλο όσο και το πείραμα παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του ενεργοποιητή και τις παραμέτρους σχεδιασμού που τον επηρεάζουν [10].



Εικόνα 7: Μαλακός ρευστοδυναμικός ενεργοποιητής (soft fluidic actuators) και μοντελοποίηση "soft" ενεργοποιητή. [67], [66]

2.2.6 Αίσθηση και έλεγχος

Ο έλεγχος ενός "soft" ενεργοποιητή απαιτεί ένα μέσο για την παρακολούθηση της κινηματικής του, των δυνάμεων αλληλεπίδρασης με αντικείμενα στο περιβάλλον και της εσωτερικής πίεσης. Το κάνουμε αυτό χρησιμοποιώντας αισθητήρες που μπορούν να ενσωματωθούν στο σχεδιασμό του ενεργοποιητή κατά τη διαδικασία παραγωγής. Χρησιμοποιούμε έτοιμα εξαρτήματα όπως ηλεκτρονικές βαλβίδες, αντλίες, ρυθμιστές, αισθητήρες και πίνακες ελέγχου για τροφοδοσία και έλεγχο. Χρησιμοποιώντας την πίεση, η κίνηση και η δύναμη ανατροφοδοτούν τον έλεγχο για να ρυθμίσουν γρήγορα την πίεση μέσα στην αίθουσα ενεργοποιητών. Μπορείτε επίσης να χρησιμοποιήσετε το αναλυτικό μοντέλο που αναπτύσσετε για να προβλέψετε μεταβλητές κατάστασης που μπορεί να είναι δύσκολο να μετρηθούν άμεσα [3].

2.3 Η ηλιακή ακτινοβολία και η επίδραση της ατμόσφαιρας της γης

Ο ήλιος είναι ο βασικότερος αστέρας του λεγόμενου ηλιακού-πλανητικού συστήματος όπου βέβαια ανήκει και η Γη. Με τον όρο ηλιακή ακτινοβολία ή ηλιακή ενέργεια εννοούμε την ακτινοβολία – ενέργεια που παίρνει ο πλανήτης μας από τον ήλιο. Αξίζει να σημειωθεί ότι από την τεράστια ηλιακή ενέργεια που εκπέμπεται από τον ήλιο μόνο τα 2 δισεκατομμυριοστά δέχεται ο πλανήτης μας. Το ποσό της ηλιακής ενέργειας που πέφτει κάθετα στη μονάδα της επιφάνειας , που τοποθετείται στο ανώτερο όριο της ατμόσφαιρας , ανά μονάδα χρόνου και όταν η γη βρίσκεται στη μέση απόσταση από τον ήλιο , λέγεται «ηλιακή σταθερά» και εκτιμάται σε 2cal/cm2min= 1371 W/m2.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της γης εξαρτάται:

- από την εκάστοτε απόσταση ηλίου-γης
- από το ύψος του ηλίου πάνω από τον ορίζοντα του τόπου και
- από την εκάστοτε διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα.

2.3.1 Ο ήλιος

Ο ήλιος είναι ένα τυπικό αστέρι με μάζα 2 x 1030 kg, ακτίνα 700 000 km, ηλικία 5 x 10 έτη και εκτιμώμενη διάρκεια ζωής 5 δισεκατομμύρια έτη. Η επιφανειακή θερμοκρασία του Ήλιου είναι περίπου 5800 K και η εσωτερική θερμοκρασία είναι περίπου 15 εκατομμύρια K. Η υψηλή θερμοκρασία του Ήλιου οφείλεται σε μια αυτοσυντηρούμενη πυρηνική αντίδραση που συμβαίνει όταν το υδρογόνο μετατρέπεται σε ήλιο στο εσωτερικό του. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, η πυρηνική αντίδραση [4 H → He + Ενέργεια] δικαιολογεί, με το έλλειμμα μάζας, την εκλυόμενη ενέργεια με βάση τη γνωστή σχέση $E=mc^2$, από την ειδική θεωρία της σχετικότητας του Einstein. Υπολογίζεται ότι για κάθε γραμμάριο υδρογόνου, πού μετατρέπεται σε Η, εκλύεται ενέργεια ίση 18 με 1,67χ105 kWh. Η ηλιακή ενέργεια διαδίδεται στο σύμπαν, κυρίως με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλλά και με σωματιδιακή μορφή.

2.3.2 Η ακτινοβολία του ήλιου

Η τροχιά της γης, κατά την κίνησή της γύρω απ' τον ήλιο, είναι έλλειψη, με τον ήλιο στη μία των εστιών της, με μήκος μεγάλου ημιάξονα, α = 149,6×106 km και εκκεντρότητα, e ~ 0,01673. Η απόσταση γης-ήλιου μεταβάλλεται περιοδικά, και τά τη διάρκεια του έτους, μεταξύ της μεγίστης τιμής της (4 Ιουλίου), που ονομάζεται αφήλιο (152,1x106 km) και της ελαχίστης (3 Ιανουαρίου), που ονομάζεται περιήλιο (147,1x10 km). Το μήκος του μεγάλου ημιάξονα, α, προσεγγιστικά 150.000.000 km, λαμβάνεται ως μονάδα μήκους σε διαστημικές αποστάσεις, ονομάζεται Αστρονομική Μονάδα και συμβολίζεται ως 1 AU (Astronomical Unit). Για να διανύσει την απόσταση αυτή το φως, με την ταχύτητα των 300.000 km/s, απαιτούνται 8,5 min. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία απομακρύνεται ακτινικά από τον αστέρα προς το διάστημα και άρα η πυκνότητα ισχύος Ε, της ακτινοβολίας του, μεταβάλλεται αντιστρόφως αναλόγως με το τετράγωνο της απόστασης:

$$E = \frac{P}{4\pi d^2} \qquad (2.1)$$

όπου P η ολική, σ' όλα τα μήκη κύματος, εκπεμπόμενη από απ' όλη την επιφάνειά του, ισχύς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και d η απόσταση από τον ήλιο, στην οποία μετράται η ένταση.

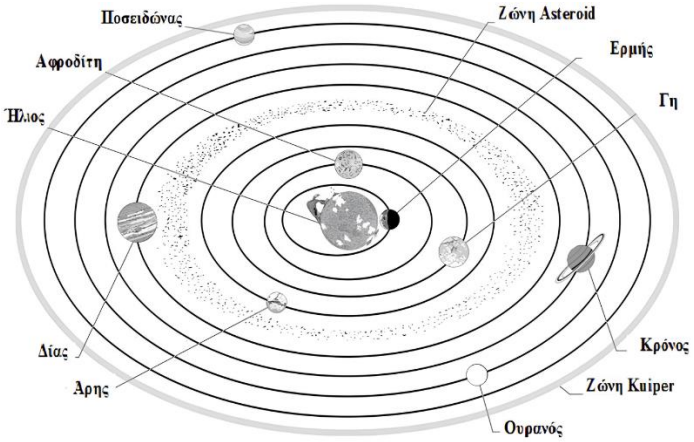
2.4 Ηλιακή γεωμετρία

Αυτό κεφάλαιο μελετά κάποια χαρακτηριστικά του Ήλιου και της Γης όπως επίσης και των κινήσεων τους. Ακόμα εξετάζει ένα μοντέλο που μελετά τη σχετική τους κίνηση και διατυπώνει τις εξισώσεις που το περιγράφουν. Τέλος, το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται για της συντεταγμένες του Ηρακλείου Κρήτης και στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα όσον αφορά την ηλιοφάνεια και την τροχιά του ηλίου.

2.4.1 Ήλιος και Γη

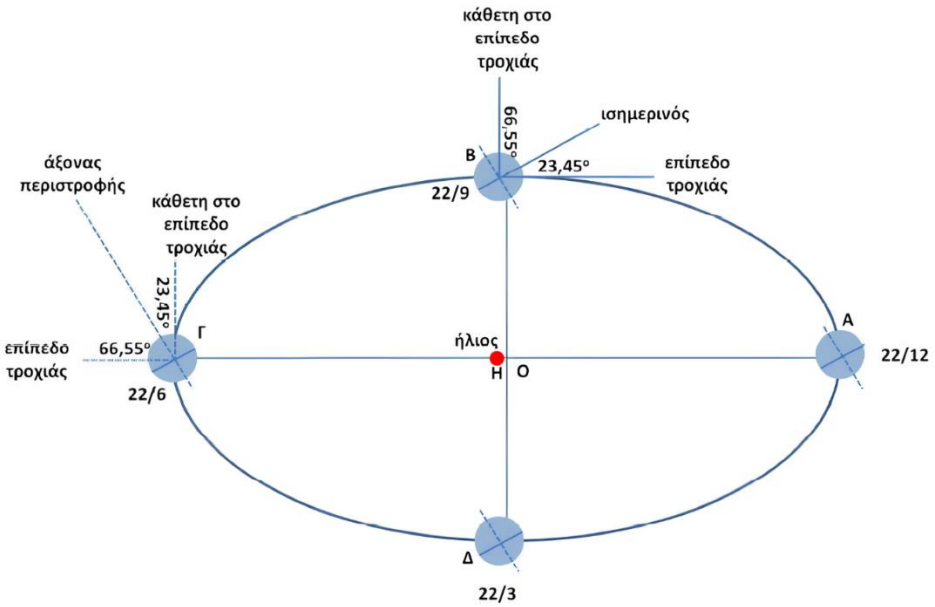
Ο ήλιος είναι ένα αστέρι κύριας ακολουθίας με φασματικό τύπο G2v, με μάζα και θερμοκρασία υψηλότερη από το μέσο αστέρι, αλλά σημαντικά χαμηλότερη από τον μπλε γίγαντα, του οποίου η ηλικία εκτιμάται σε 5 δισεκατομμύρια. Ακολουθεί μια τροχιά μέσα στον γαλαξία σε απόσταση 25.000-28.000 έτη φωτός από το κέντρο του και ολοκληρώνει την τροχιά του σε περίπου 22.600 εκατομμύρια χρόνια. Υπάρχουν 8 πλανήτες γύρω από τον ήλιο, μεταξύ των οποίων και η γη.

Στην έννοια του μεγέθους του ήλιου, συχνά αναφέρεται ο όρος "φαινομενική διάμετρος του ήλιου". Η φαινομενική διάμετρος του ήλιου είναι η γωνία ΑΓΒ στην οποία παρατηρείται ο ήλιος από τη Γη, όταν τα Α και Β είναι αντίθετα σημεία της περιφέρειας του ηλιακού δίσκου και Γ είναι το σημείο της Γης (παρατηρητής). Το διωνυμικό ΑΓΒ αντιπροσωπεύει την απόσταση μεταξύ της γης και του ήλιου. Η φαινομενική διάμετρος του ήλιου ποικίλλει καθ ' όλη τη διάρκεια του έτους: 3 Ιανουαρίου γίνεται ίση με το μέγιστο 32΄ 36΄΄α, αλλά 4 Ιουλίου περιορίζεται σε ένα ελάχιστο 31΄ 32΄΄.[39]



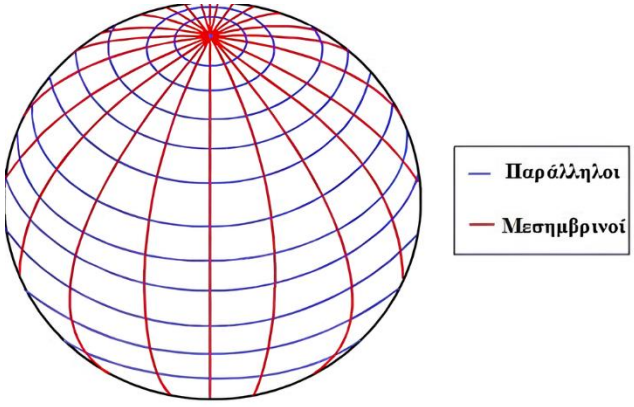
Εικόνα 8: Το ηλιακό σύστημα.[40]

Αυτή η φαινομενική αλλαγή στη διάμετρο αποδεικνύει ότι η γη δεν περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο σε κυκλική τροχιά, αλλά μάλλον ελλειπτική, έτσι ώστε η ελάχιστη απόσταση μεταξύ της γης και του ήλιου την 4η Ιανουαρίου να είναι 147.098.074 χιλιόμετρα και την 4η Ιουλίου η μέγιστη επιβράδυνση είναι 152.100.000 χιλιόμετρα στα. Δηλαδή, η μέση τιμή της απόστασης είναι 152.097.701 χλμ.



Εικόνα 9: Η τροχιά της γης γύρο από τον ήλιο.[41]

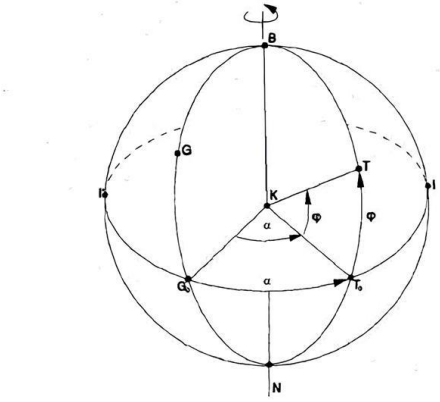
Όπως είναι γνωστό, οποιαδήποτε θέση στη Γη καθορίζεται από ένα κατακόρυφο ημικύκλιο που ονομάζεται μεσημβρινός και έναν οριζόντιο παράλληλο κύκλο που ονομάζεται παράλληλος.



Εικόνα 10: Μεσημβρινοί και Παράλληλοι κύκλοι.[42]

Τα σημεία εκκίνησης αυτού του συστήματος είναι ο μεσημβρινός του Γκρίνουιτς και ο ισημερινός, επομένως η τομή τους αποτελεί σημείο αναφοράς στην επιφάνεια της Γης.

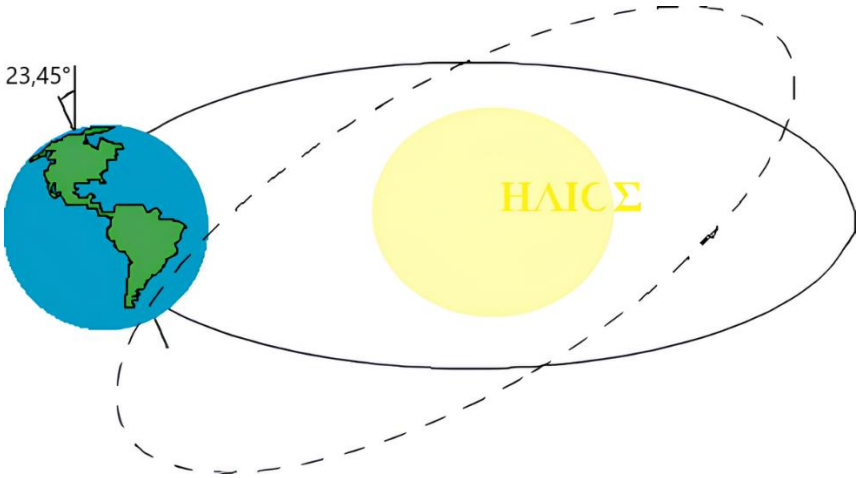
Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του ισημερινού επιπέδου και μιας νοητής γραμμής που συνδέει το κέντρο της Γης και τη θέση που πρέπει να προσδιοριστεί ονομάζεται γεωγραφικό πλάτος φ και παίρνει θετική τιμή στο βόρειο ημισφαίριο. Η γωνία με τον πρώτο μεσημβρινό ονομάζεται επομένως γεωγραφικό μήκος α ή τοπικό, λαμβάνοντας θετικές τιμές δυτικά του Γκρίνουιτς.[43]



Εικόνα 11: Προσδιορισμός γεωγραφικών συντεταγμένων.[44]

2.4.2 Σχετική κίνηση Ήλιου - Γης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η Γη βρίσκεται σε συνεχή κίνηση γύρω από τον εαυτό της και τον Ήλιο. Χρειάζονται 365,25 ημέρες για να περιστραφεί μια φορά γύρω από τον ήλιο και 23 ώρες και 56 λεπτά για να περιστραφεί γύρω από τον πολικό άξονα. Η τροχιά του σχηματίζει μια έλλειψη που ορίζει το επίπεδο της εκλειπτικής. Όσον αφορά τον πολικό άξονα της Γης, όπως γνωρίζουμε τώρα, δεν είναι κατακόρυφος, αλλά σχηματίζει γωνία δ=23,45° με την κάθετη στο εκλειπτικό επίπεδο. Αυτή η γωνία ονομάζεται γωνιακή απόκλιση.

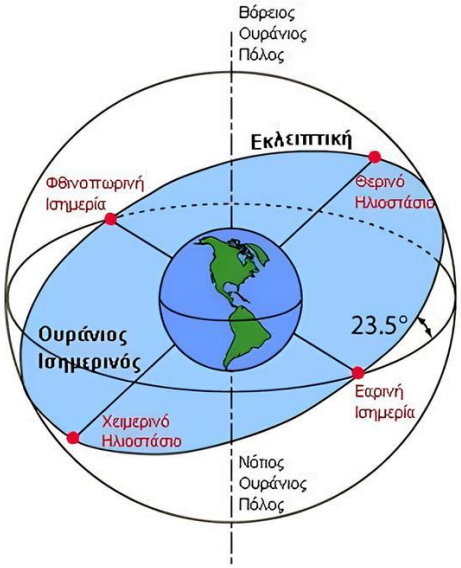


Εικόνα 12: Ελλειπτική τροχιά Γης- γωνιακή απόκλιση.[45]

2.4.3 Μοντέλο μελέτης κίνησης

Επειδή παρατηρούμε τον Ήλιο από τη Γη, η μελέτη της γεωμετρίας του γίνεται πολύ δύσκολη δεδομένου ότι ο παρατηρητής κινείται. Αυτή η περίπλοκη θεώρηση και υπολογισμός μπορεί να απλοποιηθεί θεωρώντας τη Γη ως το κέντρο της ελλειπτικής τροχιάς στην οποία ταξιδεύει ο Ήλιος αυτή τη φορά. Σε αυτό το απλοποιημένο μοντέλο, ο άξονας της Γης γίνεται κατακόρυφος και το επίπεδο που ορίζει την ελλειπτική τροχιά του Ήλιου σχηματίζει μια γωνία με το επίπεδο που ορίζεται από τον ισημερινό της Γης (ο ουράνιος ισημερινός) που ισούται με την απόκλιση του Ήλιου.

Στην πραγματικότητα, τοποθετώντας τον παρατηρητή στη Γη και όχι έξω από το σύστημα, το μοντέλο ταιριάζει απόλυτα με την πραγματική κίνηση των ουράνιων σωμάτων.



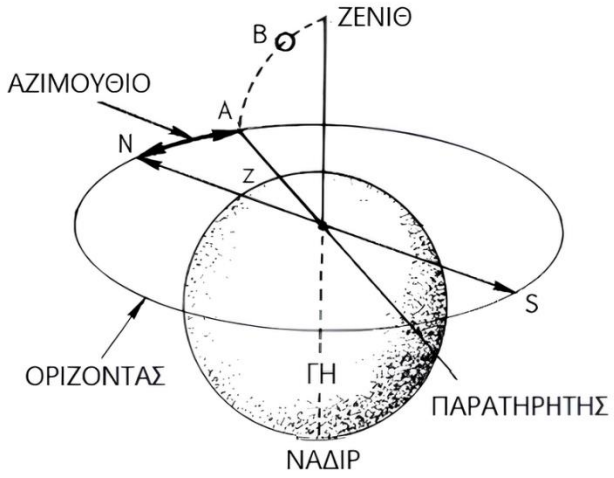
Εικόνα 13: Μοντέλο σχετικής κίνησης Ήλιου-Γης.[45]

Αυτό το μοντέλο περιγράφει τώρα την κίνηση του «Ήλιου σε σχέση με τη Γη», επιτρέποντας σε έναν παρατηρητή στο κέντρο της Γης να τοποθετήσει τον Ήλιο σε γωνία δ από τον ουράνιο ισημερινό. Αλλά και αυτή η θέση δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα γιατί δεν

είναι πιθανή θέση για τον παρατηρητή. Επομένως, πρέπει να ληφθεί υπόψη η πραγματική θέση του παρατηρητή στη γήινη σφαίρα. Αυτό προϋποθέτει ότι το σύστημα συντεταγμένων μεταφέρεται στο ζητούμενο σημείο συμπεριλαμβάνοντας τις συντεταγμένες αυτής της θέσης.

Αφού μεταφερθούν οι συντεταγμένες, όλοι οι υπολογισμοί γίνονται στο «φυσικό» σύστημα συντεταγμένων κάθε παρατηρητή που βρίσκεται στην επιφάνεια της Γης. Αυτό το σύστημα αναφέρεται στο εφαπτομενικό επίπεδο σε μια συγκεκριμένη θέση και τέμνει την ουράνια σφαίρα στον ορίζοντα. Αυτή η άποψη είναι πολύ πρακτική γιατί πιστεύουμε ότι ο Ήλιος κινείται κατά μήκος της ουράνιας σφαίρας. Για τα μοντέλα, το πιο σημαντικό και συχνά αναφέρεται είναι το σημείο ζενίθ, το οποίο είναι το σημείο τομής της κάθετης γραμμής στο οριζόντιο επίπεδο με την ουράνια σφαίρα.

Για να προσδιορισθεί η ακριβή θέση του Ήλιου στην ουράνια σφαίρα, χρειάζονται δύο γωνίες, οι οποίες είναι και οι συντεταγμένες του Ήλιου. Η γωνία β που σχηματίζεται μεταξύ του οριζόντιου επιπέδου και της νοητής γραμμής που συνδέει τον παρατηρητή με τον ήλιο ονομάζεται ύψος του ήλιου και είναι η πρώτη συντεταγμένη. Η γωνία Z μεταξύ μιας διεύθυνσης που αναφέρεται στο νότο και της προβολής του ήλιου στο οριζόντιο επίπεδο, που ονομάζεται αζιμούθιο, είναι η δεύτερη συντεταγμένη. Η γωνία β μπορεί να πάρει τιμές από 0° έως 90°. Η τιμή 0° αναφέρεται στη δύση ή την ανατολή, ενώ οι 90° είναι το μέγιστο υψόμετρο του ήλιου, το οποίο επιτυγχάνεται μόνο σε ορισμένα γεωγραφικά πλάτη και ορισμένες ημέρες του χρόνου. Η γωνία αζιμουθίου Z μπορεί να πάρει τιμές από -180° έως 180°. Η τιμή 0º αντιστοιχεί στονότο ενώ έχουμε θετικές τιμές όσο κινούμαστε προς τη δύση. Το ζεύγος (β, Z) αρκεί για τον πλήρη προσδιορισμό της θέσης του ηλίου στην ουράνια σφαίρα. Βοηθητικά χρησιμοποιείται η γωνία φ_Z η οποία σχηματίζεται μεταξύ του ζενίθ καιτης νοητής ευθείας που ενώνει τον παρατηρητή με τον ήλιο και είναι συμπληρωματική της β.[39]



Εικόνα 14: Τροχιά και συντεταγμένες Ηλίου στον ουράνιο θόλο.[44]

2.4.4 Γεωγραφικό πλάτος

Γεωγραφικό πλάτος (φ) ενός σημείου που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης είναι η γωνία που σχηματίζει η κατακόρυφος του τόπου με το επίπεδο του ισημερινού. Το γεωγραφικό πλάτος χαρακτηρίζεται Βόρειο Β (North N) ή Νότιο Ν (South S) ανάλογα σε ποιο ημισφαίριο βρίσκεται το σημείο. Σημεία του ίδιου ημισφαιρίου έχουν ομώνυμα πλάτη σε αντίθεση με σημεία διαφορετικού

ημισφαιρίου που έχουν ετερώνυμα πλάτη. Το γεωγραφικό πλάτος μετράται σε μοίρες και υποδιαιρέσεις αυτών, πρώτα και δεύτερα από 0° - 90° Β ή 0° - 90° N (αρχής γενομένης της μέτρησης από τον ισημερινό του οποίου το γεωγραφικό πλάτος είναι 0°).[43]

2.4.5 Γεωγραφικό μήκος

Γεωγραφικό μήκος (longitude) (λ) ενός σημείου στην επιφάνεια της γης είναι η στερεή γωνία που σχηματίζεται από το επίπεδο του μεσημβρινού που διέρχεται από το εν λόγω σημείο με το επίπεδο του πρώτου μεσημβρινού. Το γεωγραφικό μήκος χαρακτηρίζεται Ανατολικό Α (East E) ή Δυτικό Δ (West W) ανάλογα σε ποιο ημισφαίριο βρίσκεται το σημείο. Σημεία του ίδιου ημισφαιρίου έχουν ομώνυμα μήκη σε αντίθεση με τόπους διαφορετικού ημισφαιρίου που έχουν ετερώνυμα μήκη. Το γεωγραφικό μήκος μετράται σε μοίρες και υποδιαιρέσεις αυτών, πρώτα και δεύτερα από 0° - 180° Α ή 0° - 180° Δ (αρχής γενομένης της μέτρησης από τον πρώτο μεσημβρινό με γεωγραφικό μήκος 0° - Μεσημβρινός του Greenwich).[43]

2.4.6 Ηλιακή Ώρα

Ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας στη μελέτη της κίνησης του ήλιου είναι η ηλιακή ώρα δηλαδή η ώρα που αναφέρεται στον ήλιο. Η ηλιακή ώρα Tsolar διαφέρει από την ώρα του εκάστοτε τόπου αφού η τοπική ώρα Tlocal εξαρτάται από το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του κάθε τόπου όπως επίσης και από την ημέρα του έτους στην οποία αναφέρεται ο υπολογισμός. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζονται διορθώσεις στην τοπική ώρα ώστε να προσεγγίσουμε την Tsolar.[43]

2.4.7 Μεσημβρινός αναφοράς

Για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα της θέσης του ζητούμενου τόπου προσαρμόζουμε χρονικά το συγκεκριμένο γεωγραφικό του μήκος στην αντίστοιχη ζώνη ώρας. Ο συλλογισμός αυτός βασίζεται στο ότι η Γη στρέφεται κατά 15ο ανά μία ώρα και είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη ζώνη ώρας του τόπου ΔT_{GMT} δηλαδή τη διαφορά ώρας με την ώρα GMT (Greenwich mean time). Με αυτό τον τρόπο υπολογίζουμε τις μοίρες του μεσημβρινού αναφοράς Lst με τη βοήθεια του παρακάτω τύπου:

$$\mathrm{Lst} = \frac{15^\circ}{\mathrm{h} * \Delta \mathrm{T}_{\mathrm{GMT}}} \tag{2.2}$$

Για παράδειγμα αν θέλαμε να υπολογίσουμε το μεσημβρινό αναφοράς των Φαρσάλων από τον τύπο θα παίρναμε ότι Lst = 15ο /h *(-2) h=-30ο αφού η ζώνη ώρας για την Ελλάδα είναι -2 h.[43]

2.4.8 Πραγματικός ηλιακός χρόνος

Έχοντας ως δεδομένο τον τοπικό πολιτικό χρόνο tstd (ο χρόνος που αναγράφεται στο ρολόι) υπολογίζουμε τον πραγματικό ηλιακό χρόνο tsol:

$$\mathrm{t_{sol}} = \mathrm{t_{std}} + \frac{\mathrm{L_{loc}} - \mathrm{L_{std}}}{15^\circ/\mathrm{h}} + \frac{\mathrm{E_t}}{60/\mathrm{h}} \tag{2.3}$$

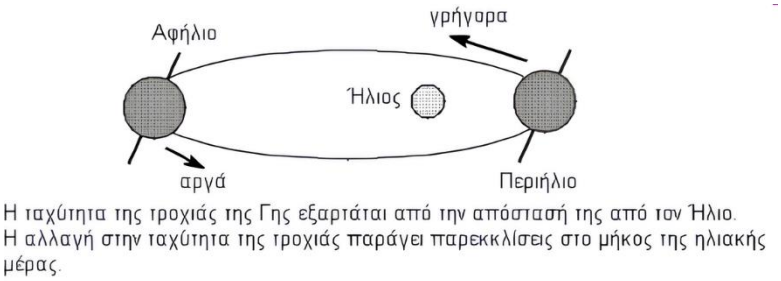
όπου:

- Lloc: το γεωγραφικό μήκος της θέσης μελέτης

- Lstd: η ζώνη ώρας της θέσης μελέτης (με θετικό πρόσημο ανατολικά του Greenwich και αρνητικό δυτικά του)
- Et: η εξίσωση χρόνου.

2.4.9 Εξίσωση χρόνου

Η τροχιά της Γης είναι ελλειπτική έτσι όταν είναι η Γη είναι στο πιοκοντινό σημείο της με τον Ήλιο (περιήλιο) κινείται πιο γρήγορα. Όταν είναι στο πιο απόμακρο σημείο από τον Ήλιο (αφήλιο) η Γη κινείται πιο αργά. Η ηλιακή ημέρα είναι ο χρόνος μεταξύ των μεσημβρινών μεταβάσεων του ήλιου. Στο περιήλιο, η Γη κινείται γρήγορα έτσι ο Ήλιος εμφανίζεται να κινείται πιο γρήγορα προς ανατολικά απ' ό,τι σε άλλη περίοδο του έτους.



Εικόνα 15: Η τροχιά της Γης.[44]

Τα πραγματικά ρολόγια βασίζονται σε έναν ομοιόμορφα κινούμενο ήλιο, στο μέσο ήλιο, που κινείται κατά μήκος του Ουράνιου Ισημερινού σε μια καθορισμένη τιμή 360 μοίρες ανά 365,2564 ημέρες. Η απόκλιση μεταξύ του πραγματικού ηλιακού χρόνου και του χρόνου του μέσου ήλιου ονομάζεται εξίσωση χρόνου και δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} E_t = 2{,}2918 \cdot [&0{,}0075 + 0{,}1868 \cdot \cos(\Gamma) - 3{,}2077 \cdot \sin(\Gamma) \\ &- 1{,}4615 \cdot \cos(2\Gamma) - 4{,}089 \\ &\cdot \sin(2\Gamma)](\min) \end{aligned} \quad (2.4)$$

όπου $\Gamma = 360^\circ \cdot \frac{n-1}{365}$ (2.5) και n ο τρέχων αριθμός ημέρας του έτους.

2.4.10 Ηλιακή απόκλιση δ

Άλλος ένας σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό της θέσης του ηλίου στην ουράνια σφαίρα είναι η ηλιακή απόκλιση δ δηλαδή η γωνία μεταξύ του επιπέδου του ουράνιου ισημερινού και της νοητής ευθείας μεταξύ Γης και ήλιου. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω η γωνία δ θα είναι 23,45° στο θερινό ηλιοστάσιο, - 23,45° στο χειμερινό ηλιοστάσιο ενώ θα μηδενίζεται στις δύο ισημερίες. Υπάρχουν δύο τύποι που συνυπολογίζουν την επίδραση της ημέρας του έτους στη γωνία δ. Αυτοί είναι:[43]

$$\delta = 23{,}45 \sin \frac{360*(n+284)}{365} \quad (2.6)$$

όπου n ο τρέχων αριθμός ημέρας του έτους ή από τη σχέση

$$\delta = 23{,}45 \sin \frac{360 * (n + 284 * 24)}{365 * 24} \quad (2.7)$$

2.4.11 Γωνία ζενίθ και αζιμούθιο ήλιου

Η θέση του ήλιου στον ουρανό ενός τόπου περιγράφεται συνήθως με δύο γωνίες:[43]

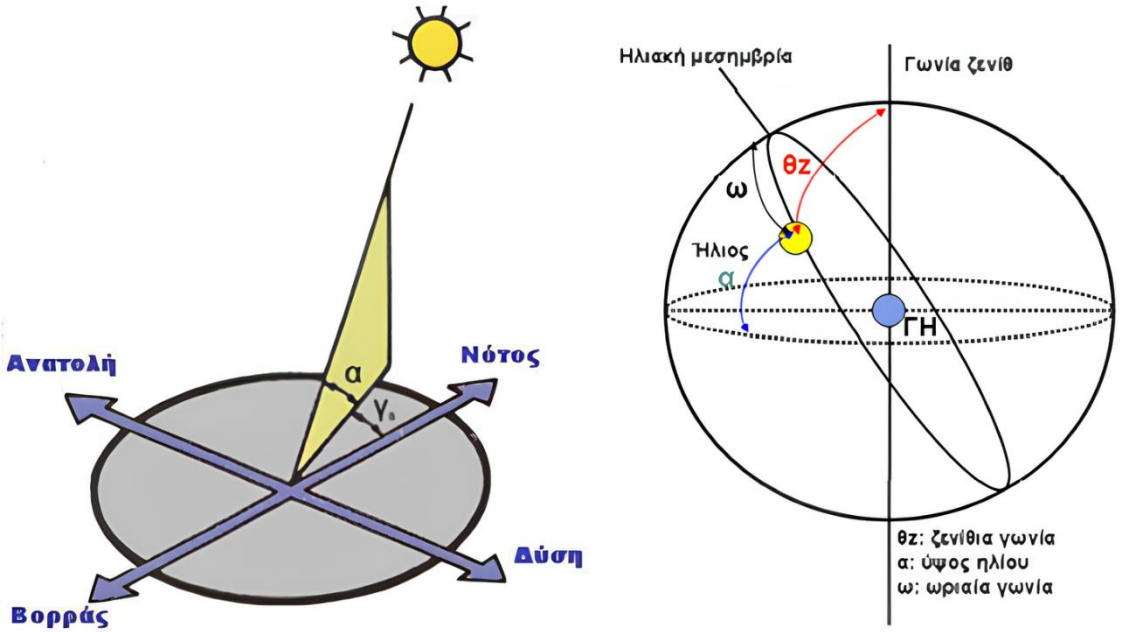
- το ύψος του ήλιου (α)
- το αζιμούθιο του ήλιου (γ).

Το ύψος του ήλιου (α) είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στο οριζόντιο επίπεδο.

Αζιμούθιο γ είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά - νότου. Το αζιμούθιο είναι:

- Για νότιο προσανατολισμό γ=0
- Για γωνίες δυτικά από το νότο παίρνει θετικές τιμές.
- Για γωνίες ανατολικά από το νότο παίρνει αρνητικές τιμές.

Αντί για το ύψος, χρησιμοποιείται επίσης συχνά η συμπληρωματική του γωνία, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο, που ονομάζεται ζενιθιακή απόσταση ή γωνία ζενίθ ή ζενιθιακή γωνία του ήλιου (θz). Ζενίθ είναι το σημείο του ουρανού που συναντά η κατακόρυφος ενός τόπου και ο όρος προέρχεται από την αραβική λέξη Senit που σημαίνει ευθεία οδός.



Εικόνα 16: Γωνία ζενίθ, ωριαία γωνία κα ύψος και αζιμούθιο ήλιου.[45]

2.4.12 Ωριαία γωνία ηλίου και ηλιακοί χρόνοι ανατολής και δύσης

Ορίζεται ως ωριαία γωνία (ω) του ήλιου η γωνιακή απόσταση του ηλίου από την ηλιακή μεσημβρία λόγω περιστροφής της γης περί τον άξονά της. Στην ηλιακή μεσημβρία ω=0° ενώ κάθε ώρα η ω μεταβάλλεται κατά 15°. Τις πρωινές ώρες η ω είναι αρνητική και κατά τις απογευματινές γίνεται θετική:[43]

$$\omega = \frac{(t_{sol}-12)h}{24\,h} \cdot 360^\circ \Leftrightarrow \omega = (t_{sol} - 12) \cdot 15^\circ \quad (2.8)$$

Η ωριαία γωνία του ήλιου κατά την ανατολή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega_{sr} = \cos^{-1}(-tan\,\lambda \cdot tan\,\delta) \quad (2.9)$$

όπου λ το γεωγραφικό πλάτος στη θέση μελέτης και δ η απόκλιση ηλίου. Η ωριαία γωνία του ήλιου κατά τη δύση υπολογίζεται από τη σχέση: $\omega_{ss} = -\omega_{sr}$. Ο ηλιακός χρόνος ανατολής και δύσης ηλίου δίνεται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$t_{sr} = 12 - \frac{24}{360} \cdot \omega_{sr} \quad (2.10) \qquad t_{ss} = 12 - \frac{24}{360} \cdot \omega_{ss} \quad (2.11)$$

2.4.13 Υπολογισμός ηλιακού ύψους, γωνίας ζενίθ και αζιμούθιου ήλιου

Το ηλιακό ύψος β σε δεδομένη χρονική στιγμή δίνεται από τη σχέση:

$$\sin(\beta) = \cos(\lambda) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\lambda) \cdot \sin(\delta) \quad (2.12)$$

όπου:

- λ το γεωγραφικό πλάτος του σημείου μελέτης
- δ η τρέχουσα απόκλιση του ήλιου
- ω η τρέχουσα ωριαία γωνία του ήλιου.

Η γωνία ζενίθ του ήλιου θz σε δεδομένη χρονική στιγμή δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_z = 90^\circ - \beta \quad (2.13)$$

Το αζιμούθιο του ήλιου φs σε δεδομένη χρονική στιγμή δίνεται από τη σχέση:

$$\sin\varphi_s = \frac{\cos\delta \cdot \sin\omega}{\cos\beta} \quad (2.14)$$

2.4.14 Αζιμούθια γωνία επιφάνειας και γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια

Η αζιμούθια γωνία της επιφάνειας (φp) είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου της επιφάνειας και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από -180° μέχρι +180°. Η γωνία -180° (που συμπίπτει με την +180°) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση της επιφάνειας προς το βορρά, η γωνία –90° προς την ανατολή, η γωνία 0ο προς το νότο και η γωνία +90° προς τη δύση.[43]

Η γωνία πρόσπτωσης θi της ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια δίνεται από τη σχέση:

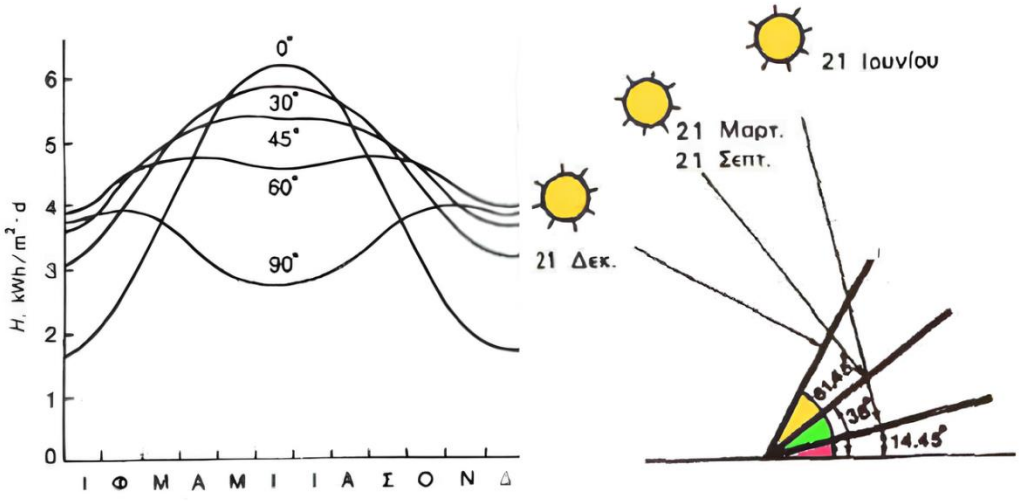
$$\cos(\theta_i) = \cos(\beta) \cdot \sin(\theta_p) \cdot \cos(\gamma) + \sin(\beta) \cdot \cos(\theta_p) \qquad (2.15)$$

όπου:

- θp: η γωνία κλίσης της επιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο
- γ = φs - φp : το αζιμούθιο ήλιου – γωνία επιφανείας (2.16)

2.4.15 Βέλτιστη κλίση επιφάνειας

Η βέλτιστη γωνία κλίσης (θp) προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η συλλογή άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας θα πρέπει να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (λ). Κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου: Η βέλτιστη γωνία κλίσης (θp) πρέπει να είναι περίπου 10°-15° μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (λ). Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου: Η βέλτιστη γωνία κλίσης (θp) πρέπει να είναι περίπου 10°-15° μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (λ). Αν στο έδαφος υπάρχει επιφάνεια με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης (π.χ. χιόνι) απαιτείται μεγαλύτερη κλίση. Ο βέλτιστος προσανατολισμός επιφάνειας (αζιμούθιο φp) είναι νότιος (γ=0°), ενώ απόκλιση κατά 20° - 30° από νότο έχει μικρή επίδραση στην ετήσια συλλεγόμενη ενέργεια. [43]



Εικόνα 17: Βέλτιστη κλίση επιφάνειας.[45]

Τα παραπάνω ισχύουν για τη συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που έρχεται σαν δέσμη από τον ήλιο. Για τις άλλες, από ενεργειακή άποψη λιγότερο σημαντικές, μορφές της ηλιακής ακτινοβολίας, ο κυριότερος παράγοντας είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης του συλλέκτη, ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου. Όσο η κλίση απέχει περισσότερο από το οριζόντιο, τόσο μεγαλύτερο ποσό ανακλώμενης ακτινοβολίας από το έδαφος δέχεται ο συλλέκτης, αλλά και τόσο μικρότερο ποσό διάχυτης ακτινοβολίας από τον ουρανό. Για παράδειγμα, σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα, ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό, η βέλτιστη κλίση του ηλιακού συλλέκτη για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι περίπου 10 - 15% μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού

πλάτους. Έτσι, ο συλλέκτης αντικρίζει περισσότερο τον ουρανό και δέχεται αφθονότερα τη διάχυτη ακτινοβολία.

2.4.16 Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα της γης λαμβάνεται από τη σχέση (n ο τρέχων αριθμός ημέρας):[43]

$$I_O = \left(1 + 0{,}033 \cdot \cos \frac{360° \cdot (n-3)}{365}\right) \cdot 1.373 \frac{W}{m^2} \quad (2.17)$$

Έστω Iglo η πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας στη θέση μελέτης (σε W/m2). Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{I_{dif}}{I_{glo}} = 1{,}00 - 0{,}09 \cdot K_\tau \quad \gamma\iota\alpha \quad 0 \le K_\tau \le 0{,}22 \quad (2.18)$$

$$\frac{I_{dif}}{I_{glo}} = 0{,}9511 - 0{,}1604 \cdot K_\tau + 4{,}388 \cdot K_\tau^2 - 16{,}638 \cdot K_\tau^3 + 12{,}336 \cdot K_\tau^4, \quad 0 < K_\tau \le 0{,}8 \quad (2.19)$$

$$\frac{I_{dif}}{I_{glo}} = 0{,}165 \ \gamma\iota\alpha \quad K_\tau > 0{,}8 \quad (2.20)$$

Όπου $K_\tau = \frac{I_{glo}}{I_o * \cos\theta_z}$ (2.21) θ_z (η γωνί ζενίθ του ήλιου)

Η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{dir} = I_{glo} - I_{dif} \quad (2.21)$$

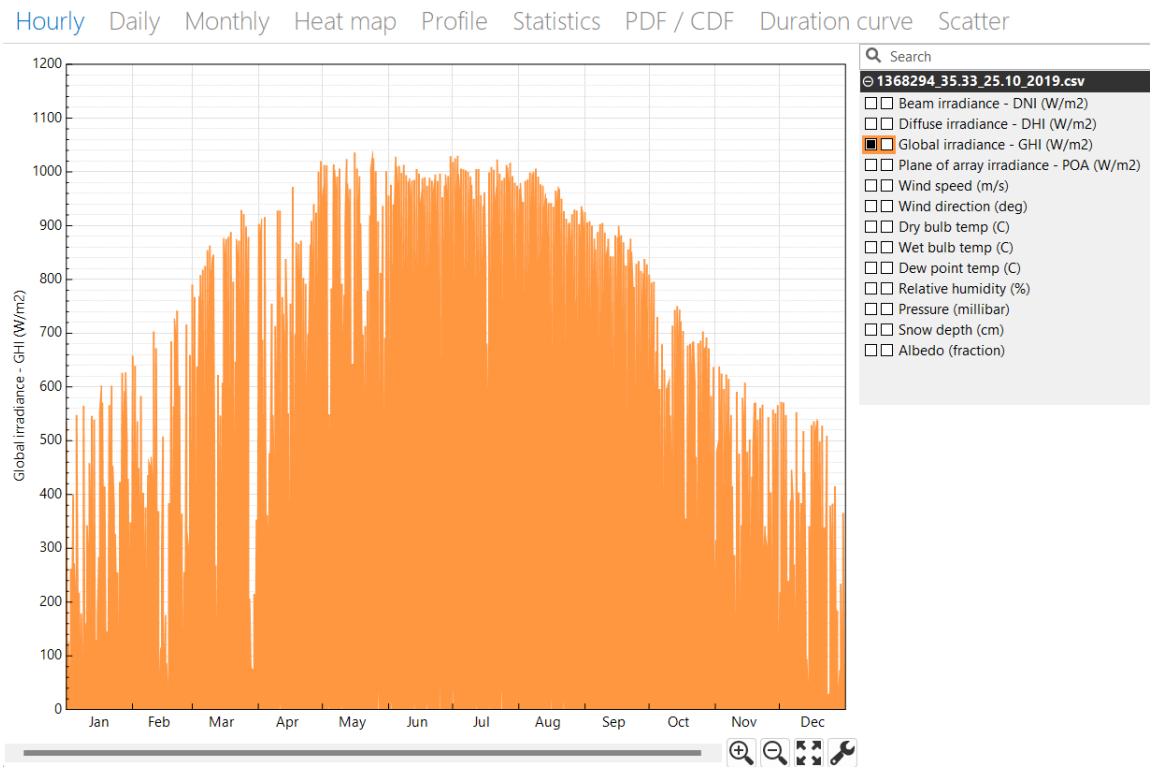
Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια υπό κλίση:

$$I_{glo,p} = I_{dir} \cdot \frac{\cos\theta_i}{\cos\theta_z} + I_{dif} \cdot F_{sky} + I_{glo,hor} \cdot p_g \cdot F_{grd} \quad (2.22)$$

όπου

$$F_{sky} = \frac{1 + \cos\theta_p}{2} \ (2.23) \quad F_{grd} = \frac{1 - \cos\theta_p}{2} \ (2.24)$$

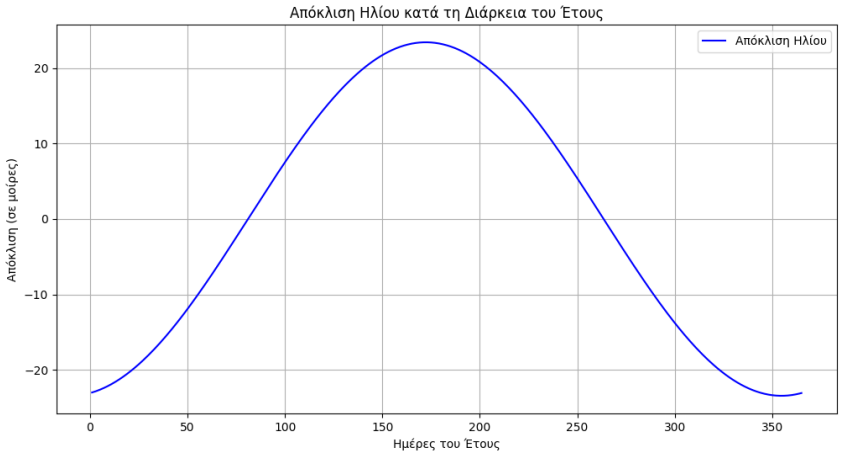
Για τον υπολογισμό του Iglo δηλαδή η πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας στη θέση μελέτης (σε W/m2). Χρειάστηκε να χρησιμοποιήσουμε την ιστοσελίδα του National Renewable Energy Laboratory (NREL) (https://www.nrel.gov/) που εγκαταστήσαμε το πρόγραμμα S.A.M. (System Advisor Model). Με αυτό το πρόγραμμα θα μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε τα μετεωρολογικά δεδομένα που θα αντλήσουμε από το NREL National Solar Radiation Database (NSRDB) και από εκεί να αντλήσουμε το Iglo.



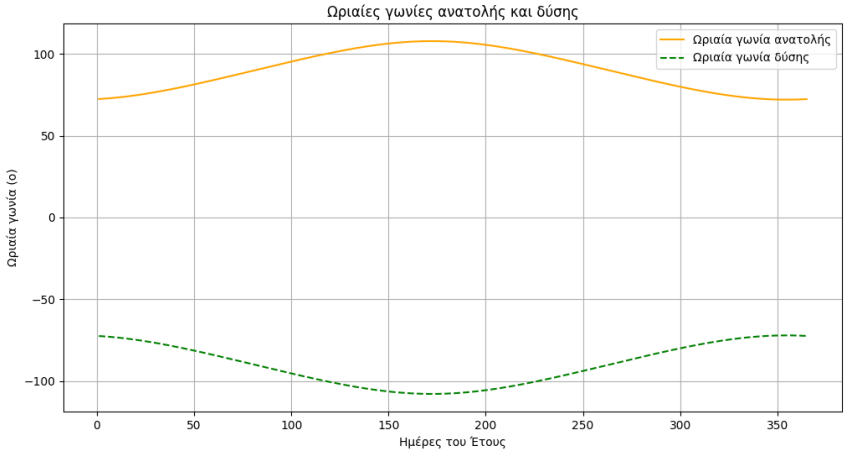
Εικόνα 18: Άντληση δεδομένων από το S.A.M.[46]

2.4.17 Διαγραμματική παρουσίαση της θεωρίας

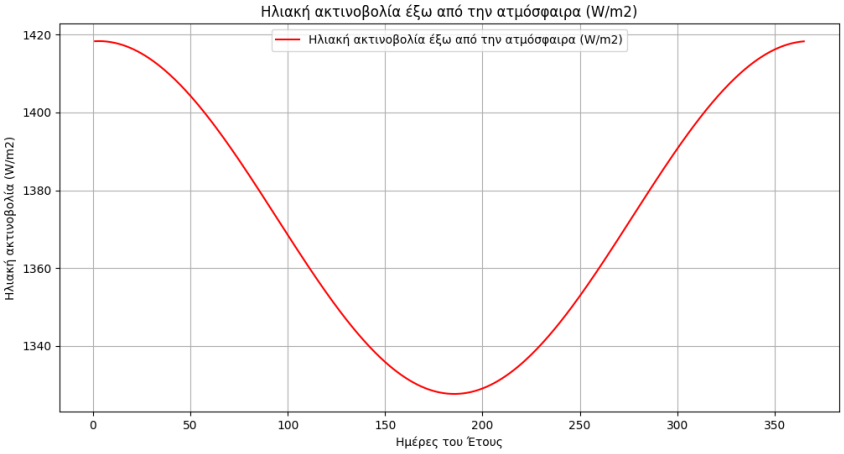
Για την παρούσα διπλωματική τα πρωτεύοντα διαγράμματα που είναι χρήσιμα για την κατασκευή και μελέτη του επενεργητή είναι της ηλιακής απόκλισης δ, την γωνίας ώρα ανατολής και δύσης και της ηλιακής ακτινοβολίας.



Διάγραμμα 1: Απόκλιση ηλίου δ (ο) vs Ημέρες του Έτους.



Διάγραμμα 2: Ωριαίες γωνίες ανατολής και δύσης vs Ημέρες του Έτους.



Διάγραμμα 3: Ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα vs Ημέρες του Έτους.

2.5 Θεωρία και ιστορικών εφαρμογής των φωτοβολταϊκών

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει τις έννοιες και τις πληροφορίες που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή και είναι απαραίτητο για την κατανόηση της παρούσας έκθεσης. Αρχικά, ως εισαγωγή, περιγράφεται η δομή των φωτοβολταϊκών στοιχείων και τα ημιαγωγικά υλικά που περιέχουν, ώστε ο αναγνώστης να κατανοήσει τη φύση του τομέα αυτού. Στη συνέχεια περιγράφονται λεπτομερώς τόσο η ενεργητική όσο και η παθητική ηλιακή παρακολούθηση, καθώς και διάφοροι αλγόριθμοι ηλιακής παρακολούθησης. Ακολουθεί μια σύντομη κατανόηση της τεχνολογίας φωτοβολταϊκών συγκεντρωτών και των συγκεκριμένων συστημάτων συγκεντρωτών που θα συζητηθούν. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή. Τέλος, παρουσιάζονται υφιστάμενα παρόμοια προϊόντα για να ολοκληρωθεί το κεφάλαιο αυτό.

2.5.1 Χαρακτηριστικά των ΦΒ συστημάτων

Τα ΦΒ συστήματα διακρίνονται έναντι των άλλων πηγών Α.Π.Ε. με βάση τα επό- μένα χαρακτηριστικά τους, σε συντομία:

Θετικά	**Αρνητικά**
Άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε μικρή ή μεγάλη ισχύ	Ουσιαστικά, δεν υφίστανται. Το κόστος της ΦΒ kWh, που ήταν στο παρελθόν υψηλό, είναι, πλέον, ανταγωνιστικό σε σχέση, όχι μόνο με τις λοιπές ΑΠΕ αλλά και με τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Εξάλλου, ο χρόνος αποπληρωμής του κόστους παραγωγής (Energy payback) ενός ΦΒ πλαισίου, είναι πια ακόμα και κάτω του έτους, εξαρτώμενος από την τεχνολογία κατασκευής του.
Δυνατότητα σταδιακής υλοποίησης του συστήματος,	
Μηδενικές εκπομπές ρύπων κατά τη λειτουργία τους,	
Αθόρυβη λειτουργία	
Ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης	
Μεγάλη αξιοπιστία	
Μεγάλη διάρκεια ζωής	
Αποδεκτή αισθητική παρουσία	

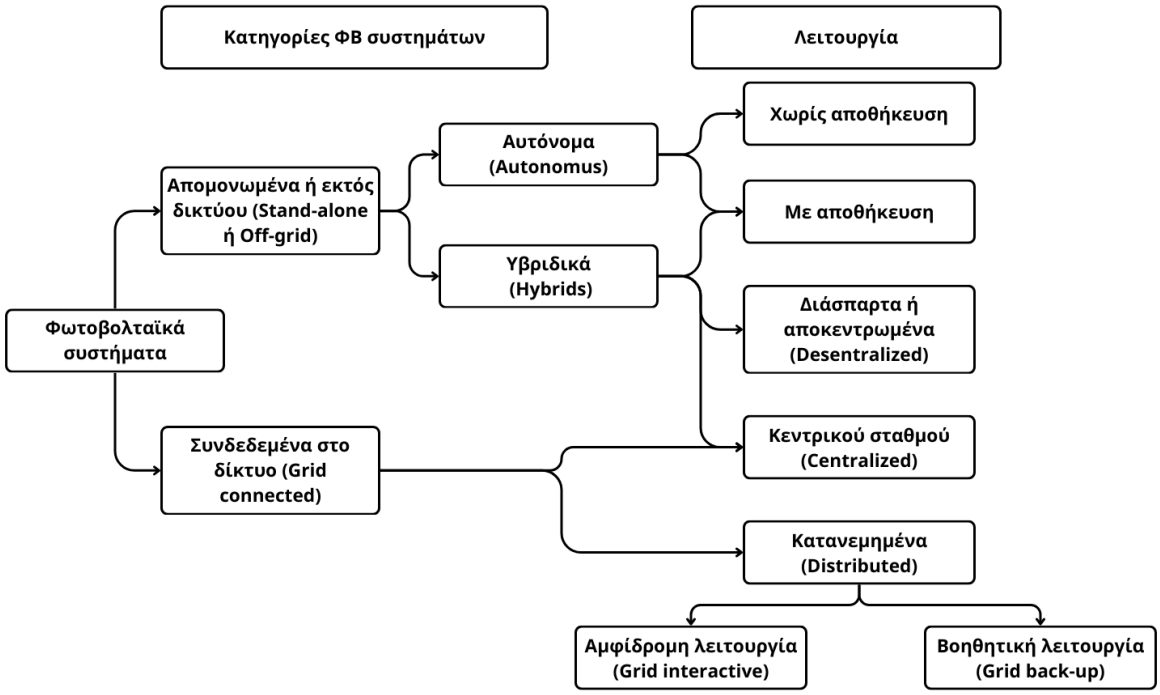
Πίνακας 4: Θετικά και αρνητικά των ΦΒ συστημάτων.

2.5.2 Κατηγορίες και σύνθεση ΦΒ συστημάτων

Τα ΦΒ στοιχεία μπορούν να αξιοποιηθούν σε πλήθος ηλεκτρικών εφαρμογών. Καλύπτουν ευρεία περιοχή ισχύος, από το μέγεθος της πολύ χαμηλής ισχύος ευρείας χρήσεως καταναλωτικών προϊόντων, όπως είναι οι αριθμητικοί υπολογιστές, τα μικρά φωτιστικά σώματα κήπου κ.α., έως συστήματα μεγάλης ισχύος, για την τροφοδοσία νησιών ή πρότυπων μεγάλων κτιριακών συγκροτημάτων, συνδεδεμένων ή όχι στο δίκτυο. Όπου εδώ αναφέρεται ο όρος δίκτυο, εννοείται το εθνικό (ή διακρατικό, πλέον) ή τοπικό δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές πηγές. Τα ΦΒ συστήματα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες τα απομονωμένα (Stand-alone) ή εκτός δικτύου (Off grid) συστήματα και τα συνδεδεμένα στο δίκτυο (Grid connected), εικόνα 19. Τα απομονωμένα ΦΒ συστήματα διακρίνονται επίσης σε αυτόνομα και υβριδικά. Το κριτήριο για τον προσδιορισμό της σύνθεσης του καταλληλότερου ΦΒ συστήματος

στις κατηγορίες αυτές, προκύπτει με βάση την απαίτηση για πλήρη ή μερική κάλυψη (αυτονομία) των ενεργειακών καταναλώσεων της εφαρμογής, από το ΦΒ σύστημα, μηνιαίως ή ετησίως.

2.5.3 Φωτοβολταϊκά



Εικόνα 19: Κατηγορίες και λειτουργία Φ/Β συστημάτων.

Τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά για την τροφοδοσία δορυφόρων στο διάστημα από το 1958 [47], αλλά σήμερα ο τομέας έχει επεκταθεί σε πιο γενικές μεθόδους. Όπως υποδηλώνει και το όνομά τους (photo = φως, volt = ηλεκτροκινητική δύναμη), τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ροή ηλεκτρονίων, δηλαδή σε ηλεκτρική ενέργεια. Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, το στοιχείο αποτελείται από ημιαγωγικό υλικό που απορροφά μέρος του φωτός που προσπίπτει σε αυτό και έτσι μεταφέρει την ενέργεια του φωτός στο ημιαγωγικό υλικό. Το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο ημιαγωγικό υλικό είναι το κρυσταλλικό υλικό πυριτίου εμποτισμένο με άτομα πρόσμιξης και υπερδιασπαρμένο με ελεύθερα ηλεκτρόνια (τύπου n) από τη μία πλευρά και οπές (τύπου p) από την άλλη. Αυτά τα δύο συναντώνται για να σχηματίσουν μια επαφή pn. Όταν ο ήλιος λάμπει σε αυτή την ένωση[48].

2.5.4 Ηλιακή ιχνηλάτιση (solar tracking)

Δύο κύριοι τύποι κίνησης ιχνηλάτη λειτουργούν τον κινούμενο δέκτη: ενεργητική και παθητική παρακολούθηση.

2.5.5 Ενεργητική ηλιακή ιχνηλάτιση

Οι ενεργοί ιχνηλάτες χρησιμοποιούν έναν ελεγκτή που παρακολουθεί την κινούμενη θέση του ήλιου για να κατευθύνει τους κινητήρες που κινούν τον ιχνηλάτη. Αυτός ο τύπος κίνησης χρησιμοποιεί κινητήρες, γρανάζια και άλλους ελεγκτές για τη λειτουργία της ηλιακής παρακολούθησης. Η ηλιακή παρακολούθηση μπορεί να διαμορφωθεί με διάφορους τρόπους και

μπορεί να συναρμολογηθεί με τρίγωνα, περιστρεφόμενες κυψέλες, διπλούς άξονες ή απλούς άξονες, εκ των οποίων ο τελευταίος αναλαμβάνει αυτό το έργο. Ένα τρίγωνο αποτελείται από δύο πάνελ που είναι στραμμένα προς αντίθετες κατευθύνσεις, ενώ μια κυψέλη περιστροφής καλύπτει ένα κωνικό πλαίσιο. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, χρησιμοποιείται παρακολούθηση ενός άξονα, η οποία μπορεί να γίνει είτε οριζόντια είτε κάθετα σε σχέση με το έδαφος. Η τελευταία αναφέρεται επίσης ως παρακολούθηση προσανατολισμού ενός άξονα. Τα συστήματα δύο αξόνων μπορούν να κινούνται τόσο σε κατακόρυφη όσο και σε οριζόντια κατεύθυνση [49].

Μελέτες έχουν δείξει ότι η παρακολούθηση του ήλιου με έναν κατακόρυφο μονοαξονικό ιχνηλάτη (VSAT) μπορεί να αυξήσει το ενεργειακό κέρδος έως και κατά 40% ετησίως [50]. Ωστόσο, όταν ένας δεύτερος άξονας προστίθεται στον ιχνηλάτη για να τον καταστήσει ιχνηλάτη δύο αξόνων, η επιφανειακή ακτινοβολία αυξάνεται μόνο κατά περίπου 4%, σύμφωνα με μελέτη του Lubitz [51].

2.5.6 Παθητική ηλιακή ιχνηλάτιση

Οι παθητικοί ιχνηλάτες βασίζονται αποκλειστικά στην ηλιακή θερμότητα για την καθοδήγηση και την κίνηση του ιχνηλάτη. Βασικά, ένα συμπιεσμένο αέριο ρευστό χαμηλού σημείου βρασμού οδηγείται προς τη μία ή την άλλη πλευρά, κινώντας τον ιχνηθέτη σαν λάμψη ως απόκριση σε μια ανισορροπία που δημιουργείται από τη θερμότητα του ήλιου. Αυτός ο τύπος μονάδας παρακολουθείται με βάση τη θερμοκρασία του ήλιου. Αρχικά, ο ήλιος θερμαίνει ένα υγρό με χαμηλότερο σημείο βρασμού σε ένα δοχείο στο πλάι της φωτοβολταϊκής μονάδας. Στη συνέχεια, η ηλιακή θερμότητα δημιουργεί πίεση αερίου, η οποία ωθεί το βαρύτερο υγρό στο σκιασμένο δοχείο στην άλλη πλευρά της μονάδας, προκαλώντας την περιστροφή της μονάδας προς τον ήλιο [49].

2.5.7 Αλγόριθμοι και γωνίες παρακολούθησης ηλίου

Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι για την παρακολούθηση του ήλιου, συμπεριλαμβανομένου του υπολογισμού του ηλιακού αζιμούθιου και της γωνίας ζενίθ. Οι υπολογιζόμενες γωνίες βοηθούν στην παρακολούθηση των πάνελ στον ήλιο. Υπάρχουν επίσης παραδείγματα υπολογισμού της δύσης και της ανατολής του ήλιου με βάση τις συντεταγμένες θέσης και τις γωνίες απόκλισης [52]. Επομένως, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πολλαπλές ηλιακές γωνίες κατά την εγκατάσταση και τη διαμόρφωση των φωτοβολταϊκών μονάδων.

Όλοι οι αλγόριθμοι εξαρτώνται από τη θέση, το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος της περιοχής. Μπορεί να προσδιοριστεί η κύρια κατεύθυνση προς την οποία πρέπει να είναι στραμμένο το πλαίσιο και η γωνία κλίσης. Η τελευταία εξαρτάται επίσης από την εποχή, με τις ηλιακές αποκλίσεις να ποικίλλουν ανάλογα με την εποχή του έτους.

Επομένως, είναι χρήσιμο να ρυθμίζετε τη γωνία κλίσης του σταθερού πίνακα ανάλογα με την εποχή. Εάν η μονάδα διαθέτει άξονα αυτόματης ρύθμισης, ο δεύτερος άξονας μπορεί να ρυθμίζεται χειροκίνητα σε τακτά χρονικά διαστήματα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ωστόσο, η προσαρμογή της γωνίας κλίσης είναι πιο επωφελής για τα σταθερά μοντέλα έχει δείξει ότι η μηνιαία προσαρμογή αυξάνει την ετήσια παραγωγή ενέργειας ενός ανιχνευτή ενός άξονα κατά 0,9%.

2.5.8 Υφιστάμενα προϊόντα

Οι τρέχουσες εξελίξεις στον τομέα των φωτοβολταϊκών εστιάζονται στην ανάπτυξη πραγματικών ηλιακών κυψελών και όχι μονάδων που περιέχουν τις κυψέλες. Ωστόσο, ορισμένες εταιρείες έχουν αναπτύξει νέες τεχνολογίες για την αποτελεσματικότερη τοποθέτηση πάνελ. Η Solar Energy Scandinavia AB, για παράδειγμα, συνεργάζεται με την SmartFlower. Η εταιρεία παράγει ηλιακές μονάδες που ακολουθούν τον ήλιο με έναν συντονισμένο με GPS ιχνηλάτη δύο αξόνων, δηλαδή τα προϊόντα της ακολουθούν τον ήλιο με τη χρήση GPS [53]. Αντ' αυτού, χρησιμοποιούμε πολλαπλές φωτοβολταϊκές κυψέλες. Αυτό συμβαίνει επειδή τα φωτοβολταϊκά κύτταρα ενημερώνουν συνεχώς τη θέση του ήλιου χωρίς να την προσδιορίζουν με ακρίβεια.

2.5.9 Συμπυκνωμένη φωτοβολταϊκή τεχνολογία

Η αντανάκλαση χρησιμοποιείται σπάνια με αυτόν τον τρόπο, εκτός από τις οικιακές μονάδες. Ωστόσο, είναι εξαιρετικά επισφαλής, καθώς τα στοιχεία μπορούν να καταστραφούν εάν η θερμότητα δεν ρυθμίζεται. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών (CPV) είναι μια μονάδα που αποτελείται από φακό ή καμπύλο κάτοπτρο που συγκεντρώνει το ηλιακό φως σε μικρά, εξαιρετικά αποδοτικά ηλιακά κύτταρα πολλαπλών διακλαδώσεων τα CPV μπορεί να είναι υψηλής ή χαμηλής συγκέντρωσης, τα πρώτα έχουν ψήκτρα θερμότητας και λειτουργούν μόνο σε άμεσο ηλιακό φως, αλλά με συντελεστή συγκέντρωσης μεταξύ 300 και 1000 s. Τα δεύτερα χρησιμοποιούνται κυρίως σε ψυχρότερα κλίματα με πιο διάχυτη ακτινοβολία και έχουν συντελεστή συλλογής φωτός μικρότερο από 100 s. Η μονάδα μας είναι πιο κοντά σε ένα χαμηλότερο CPV επειδή δεν χρησιμοποιεί ψήκτρα, η οποία μειώνει τη θερμοκρασία του κυττάρου και οδηγεί σε υψηλότερη απόδοση. Σύμφωνα με μια καναδική μελέτη περίπτωσης, η προσθήκη ενός συγκεντρωτή σε μια κρυσταλλική φωτοβολταϊκή μονάδα με βάση το πυρίτιο μπορεί να αυξήσει την ενέργεια κατά 23-34% σε σύγκριση με ένα συμβατικό βελτιστοποιημένο σύστημα [54].

Η CPV ανταγωνίζεται τη συγκεντρωτική ηλιακή ενέργεια (CSP), η οποία χρησιμοποιεί έναν συγκεντρωτή, όπως ένα κάτοπτρο, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας το ηλιακό φως για την κίνηση μιας θερμικής μηχανής που συνδέεται με μια γεννήτρια [55].

Ωστόσο, ενώ τα κάτοπτρα αυξάνουν την ενέργεια, προκαλούν επίσης ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία είναι πιθανό να έχει το αντίθετο από το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας [56]. Αυτό συμβαίνει επειδή η μέγιστη ενέργεια ενός ηλιακού συλλέκτη μπορεί να υπολογιστεί με βάση την απόδοσή του πολλαπλασιάζοντας το μέγιστο ρεύμα με τη μέγιστη τάση και διαιρώντας το γινόμενο με την ισχύ εισόδου από τον ήλιο. Όταν τα πάνελ εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες, το ρεύμα αυξάνεται και η τάση μειώνεται. Ωστόσο, δεδομένου ότι η τάση πέφτει ταχύτερα από την αύξηση του ρεύματος, η απόδοση μειώνεται. Διαφορετικοί ηλιακοί συλλέκτες έχουν διαφορετικά αποτελέσματα απόδοσης. Τα φύλλα δεδομένων στον πίνακα δείχνουν πόσο μειώνεται η απόδοση για κάθε αύξηση κατά 1°C πάνω από την τυπική συνθήκη δοκιμής (STC) T = 25°C. Η προδιαγραφή στο φύλλο δεδομένων ονομάζεται "συντελεστής θερμοκρασίας NOCT (ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας κυψέλης) Pmax" [57]

Οι Akbarzadeh και Wadowaski [58] διεξήγαγαν μια μελέτη. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι όταν η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου αυξάνεται από 46°C σε 84°C, η απόδοση των ηλιακών κυψελών μειώνεται κατά 50% υπό συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία. Επομένως, η

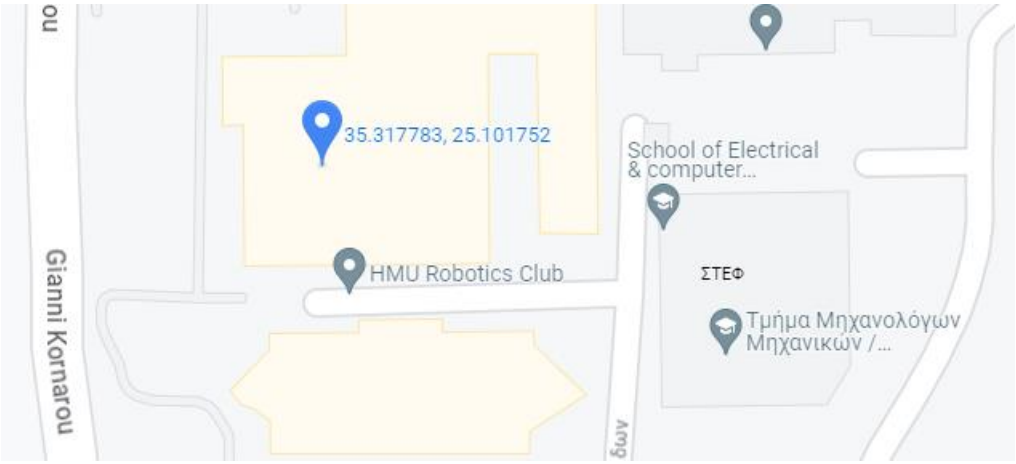
αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να επιλυθεί με την προσθήκη ενός συστήματος ψύξης στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, όπως οι ψύκτρες που χρησιμοποιούνται στις μονάδες υψηλής CPV, ή οι μονάδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε ψυχρότερα κλίματα, όπως στις μονάδες χαμηλής CPV.

3 Προδιαγραφές και δυνατότητες του συστήματος

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστεί το εύρος κίνησης του συστήματος, οι προδιαγραφές και οι δυνατότητες του συστήματος.

3.1 Τοποθεσία εγκατάστασης

Ο τόπος εγκατάστασης βρίσκεται στην ταράτσα του κτιρίου της ρομποτικής του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου με γεωγραφικό πλάτος 35,318° και γεωγραφικό μήκος 25,102°.



Εικόνα 20: Τόπος εγκατάστασης με γεωγραφικές συντεταγμένες.

3.2 Εύρος κίνησης

Για μια συλλεκτική επιφάνεια που παρακολουθεί συνεχώς την τροχιά του ήλιου χρησιμοποιώντας 2 άξονες (έναν οριζόντιο για τη ρύθμιση της κλίσης και έναν κατακόρυφο για τη ρύθμιση του αζιμουθίου), πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις: $cos\ \theta = 1 \Leftrightarrow \theta = 0°$, $\beta = z$ και $A\Sigma = A$. Όπου θ είναι η γωνία πρόσπτωσης θ μιας επιφάνειας ορίζεται ως η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και της καθέτου στην επιφάνεια. Όπου β είναι η κλίση μιας επιφάνειας είναι η γωνία που σχηματίζει σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο και z είναι η ζενίθια γωνία του ήλιου. Όπου Α είναι η αζιμουθιακή γωνία του ήλιο και ΑΣ είναι η αζιμουθιακή γωνία του συλλέκτη.

Την μέγιστη και ελάχιστη ζενιθιακή και αζιμουθιακή γωνία που θα διαγράψει το σύστημα θα υπολογιστούν από τον υπολογισμό των γωνιών αυτών για τις ημερομηνίες 21 Δεκεμβρίου και 21 Ιουνίου όπου, τότε έχουμε την μικρότερη και μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας αντίστοιχα για την κάθε ημερομηνία.

Αρχικά, θα πρέπει να υπολογιστεί η ηλιακή απόκλιση για εκείνες τις ημερομηνίες. Η ηλιακή απόκλιση δ είναι η γωνία ανάμεσα στην ευθεία ήλιου-γης και την προβολή της στο επίπεδο του ισημερινού και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = 23{,}45 \times \sin\left(\frac{360\times(284+n)}{365}\right) \tag{3.1}$$

όπου n είναι η ημέρα του έτους. Η ηλιακή απόκλιση παίρνει τη μέγιστη τιμή της (23,45°) κατά το θερινό ηλιοστάσιο (21 Ιουνίου), και την ελάχιστη τιμή της (-23,45°) κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκεμβρίου).

3.3 Η ζενίθια γωνία του ήλιου z του ήλιου

Η ζενίθια γωνία του ήλιου z είναι η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και της κατακόρυφης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$cos\ z = sin\ \varphi \cdot sin\ \delta + cos\ \varphi \cdot cos\ \delta \cdot cos\ \omega \quad (3.2)$$

όπου φ είναι το γεωγραφικό πλάτος, δ είναι η ηλιακή απόκλιση και ω η γωνία ώρας. Θα υπολογίσουμε την ζενίθια γωνία του ήλιου για την γωνία ώρας ανατολής, δύσης και ηλιακής μεσημβρίας, για τις δύο ημερομηνίες 21 Δεκεμβρίου και 21 Ιουνίου, εικόνα 26.

Η γωνία ώρα δύσης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\omega_{ss} = \cos^{-1}(-\tan\varphi * \tan\delta) \quad (3.3)$$

Η γωνία ώρα ανατολής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\omega_{ee} = -\cos^{-1}(-\tan\varphi * \tan\delta) \quad (3.4)$$

Η γωνία ώρας ηλιακής μεσημβρίας είναι ίση με μηδέν $\omega_{aa} = 0$. Θα υπολογιστεί η γωνία ώρας δύσης για την 21 Ιουνίου με την χρήση της εξίσωσης (3.3):

$$\omega_{ss} = \cos^{-1}(-\tan 35{,}318° * \tan 23{,}45°) = 107{,}899° \quad (3.5)$$

άρα η γωνία ώρας ανατολής είναι $\omega_{ee} = -107{,}899$.

Άρα η ζενίθια γωνία είναι για την γωνία ώρα δύσης με την χρήση της εξίσωσης (3.2):

$$\cos z = \sin 35.318° * \sin 23.45° + \cos 35.318° * \cos 23.45° * \cos 107{,}899° = 90° \quad (3.6)$$

Η ίδια ζενίθια γωνία είναι και για ώρα ανατολής. Η ζενίθια γωνία για την γωνία ώρα ηλιακής μεσημβρίας με την χρήση της εξίσωσης (3.2):

$$\cos z = \sin 35.318° * \sin 23.45° + \cos 35.318° * \cos 23.45° * \cos 0° = 11{,}87° \quad (3.7)$$

Όμοια και για την 21 Δεκεμβρίου.

Δεδομένα	21 Δεκεμβρίου	21 Ιουνίου
Γωνία ώρας Δύσης ω_{ss}	72,101°	107,899°
Γωνία ώρας Ανατολής ω_{ee}	-72,101°	-107,899°
Γωνία ώρας ηλιακής μεσημβρίας ω_{aa}	0°	0°
Ζενίθια γωνία για την γωνία ώρας Δύσης ω_{ss}	90°	90°
Ζενίθια γωνία για την γωνία ώρας Ανατολής ω_{ee}	90°	90°
Ζενίθια γωνία για την γωνία ώρας ηλιακής μεσημβρίας ω_{aa}	58,77°	11,87°

Πίνακας 5: Γωνία ώρας και ζενίθια γωνία για τις ημερομηνίες 21 Ιουνίου και 21 Δεκεμβρίου.

3.4 Η αζιμουθιακή γωνία του ήλιου Α του ήλιου

Η αζιμουθιακή γωνία του ήλιου είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του βορρά και της προβολής της ηλιακής ακτινοβολίας στον ορίζοντα σε ένα συγκεκριμένο σημείο και χρόνο. Η αζιμουθιακή γωνία μετράτε συνήθως στον ορίζοντα και αυξάνεται δεξιόστροφα από το βορρά.

Για να υπολογιστεί η αζιμουθιακή γωνία του ήλιου, χρειάζονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου εγκατάστασης και τη θέση του ήλιου. Η ακρίβεια του υπολογισμού εξαρτάται από το πόσο λεπτομερείς παράμετροι λαμβάνονται υπόψη, όπως η ώρα της ημέρας, η ημερομηνία και άλλες αστρονομικές παράμετροι. Ο τύπος υπολογισμούς της αζιμουθιακής γωνίας:

$$A = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\omega}{\cos\varphi\tan\delta - \sin\varphi\cos\omega}\right) \quad (3.8)$$

όπου φ είναι το γεωγραφικό πλάτος, δ είναι η ηλιακή απόκλιση και ω η γωνία ώρας. Θα υπολογίσουμε την αζιμουθιακή γωνία του ήλιου για την γωνία ώρας ανατολής, δύσης και ηλιακής μεσημβρίας, για τις δύο ημερομηνίες 21 Δεκεμβρίου και 21 Ιουνίου. Θα υπολογιστεί η αζιμουθιακή γωνία για την γωνία ώρας ανατολής, δύσης και ηλιακής μεσημβρίας για την 21 Ιουνίου. Για την γωνία ώρα ανατολής:

$$A1 = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(-107{,}899°)}{\cos(35{,}318°)\tan(23{,}45°) - \sin(35{,}318°)\cos(-107{,}899°)}\right) = -60{,}81° \quad (3.9)$$

Για γωνία ώρα δύσης:

$$A2 = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(107{,}899°)}{\cos(35{,}318°)\tan(23{,}45°) - \sin(35{,}318°)\cos(-107{,}899°)}\right) = 60{,}81° \quad (3.10)$$

Για γωνία ώρα ηλιακής μεσημβρίας:

$$A3 = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(0)}{\cos(35{,}318°)\tan(23{,}45°) - \sin(35{,}318°)\cos(0)}\right) = 0° \quad (3.11)$$

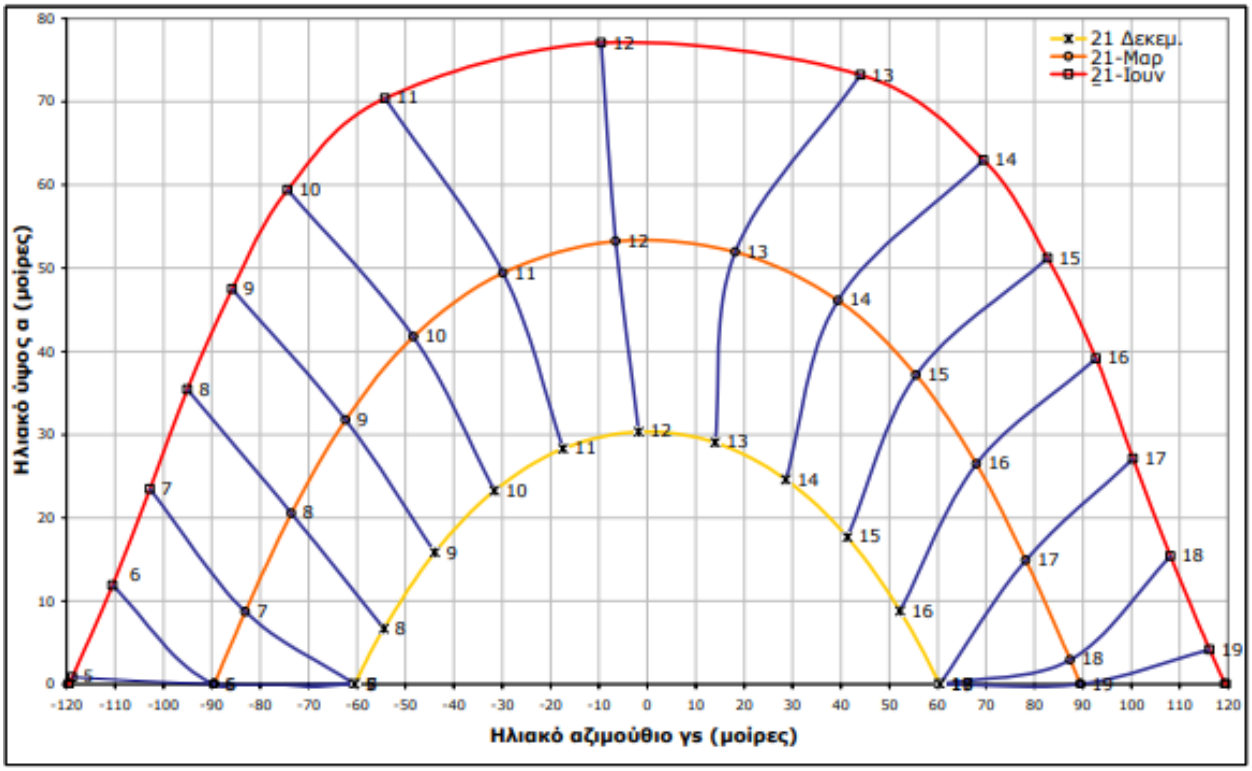
Όμοια και για την 21 Δεκεμβρίου.

Δεδομένα	**21 Δεκεμβρίου**	**21 Ιουνίου**
Γωνία ώρας Δύσης ω_{ss}	72,101°	107,899°
Γωνία ώρας Ανατολής ω_{ee}	-72,101°	-107,899°
Γωνία ώρας ηλιακής μεσημβρίας ω_{aa}	0°	0°
Αζιμούθια γωνία για την γωνία ώρας Δύσης $A1$	-60,81°	60,81°
Αζιμούθια γωνία για την γωνία ώρας Ανατολής $A2$	60,81°	-60,81°
Αζιμούθια γωνία για την γωνία ώρας ηλιακής μεσημβρίας $A3$	0°	0°

Πίνακας 6: Γωνία ώρας και αζιμούθια γωνία για τις ημερομηνίες 21 Ιουνίου και 21 Δεκεμβρίου.

3.5 Εύρος κίνησης επενεργητή

Με βάση την θεωρία, η ζενίθια και αζιμουθιακή γωνία είναι οι γωνίες θα πραγματοποιεί ο επενεργητής επομένως θα είναι και το εύρος κίνησης που θα καλύπτει ο επενεργητής. Ο επενεργητής θα πραγματοποιεί τις γωνίες με βάση τα μαθηματικά μοντέλα που υπάρχουν, τα οποία υπολογίζουν τις απαραίτητες γωνίες που πραγματοποίει ο ήλιος και σε επέκταση ο επενεργητής, για κάθε ημέρα και ώρα του έτους.



Διάγραμμα 4: Ηλιακό αζιμούθιο vs ηλιακό ύψος για την τοποθεσία του Ηρακλείου παρουσιάζοντας τις μέγιστες και τις ελάχιστες γωνίες που θα πραγματοποιηθούν στην διάρκεια ενός.

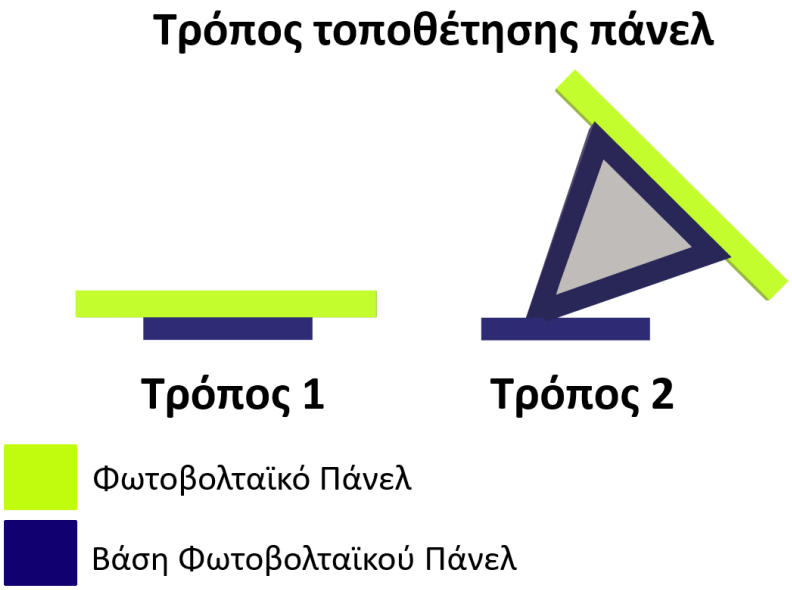
3.6 Φωτοβολταϊκός συλλέκτης

Ο φωτοβολταϊκός συλλέκτης που θα χρησιμοποιηθεί στο πρωτότυπο σύστημα έχει ονομαστική ισχύ (Pmax): 10Wp, τάση ανοιχτού κυκλώματος (Voc): 22.3V, μέγιστη τάση (Vmpp): 18.7V, ρεύμα βραχυκυκλώματος (Isc): 0.58A, μέγιστη τιμή ρεύματος (Impp): 0.53A, διαστάσεις: 1,7 x 24 x 29 cm και βάρος: 0,5kg.

3.7 Μέθοδος τοποθέτησης του φωτοβολταϊκού πάνελ

Στην παρούσα κατασκευή θα έχουμε δύο πιθανούς τρόπους τοποθέτησης του φωτοβολταϊκού πάνελ. Ο ένας με καθόλου κλίση και ο άλλος με 45°. Οι κλίσεις αυτές επιλέχθηκαν αρχικά, για κλίση 45° επειδή συνήθως τα σταθερά φωτοβολταϊκά τοποθετούνται σε αυτή την κλίση και με αυτή την κλίση τοποθέτησης ο επενεργητής ή επενεργητές μπορεί να χρειάζονται λιγότερη ενέργεια για να πραγματοποιήσουν τις απαιτούμενες γωνίες. Για κλίση 0° επιλέχθηκε ώστε να πραγματοποιεί ακριβώς ο επενεργητής ή επενεργητές τις απαιτούμενες γωνίες, χωρίς κάποια

αρχική κλίση του φωτοβολταϊκού πάνελ όπου, με αυτό τον τρόπο μπορεί ο επενεργητής ή επενεργητές να δέχονται λιγότερη καταπόνηση.

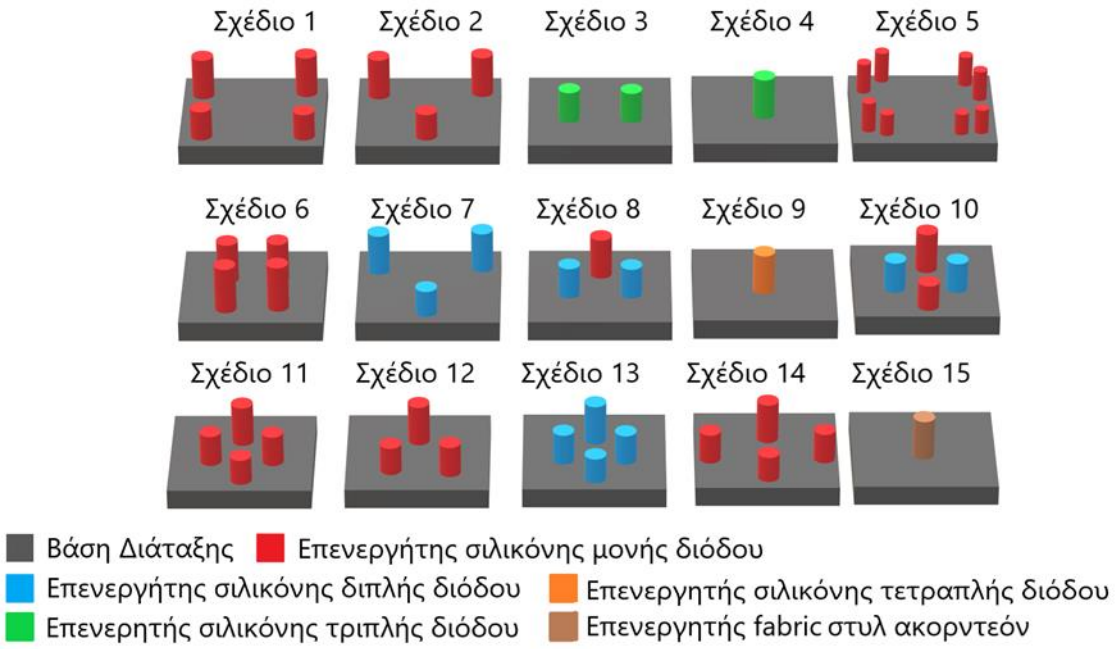


Εικόνα 21: Τρόπος τοποθέτησης φωτοβολταϊκού πάνελ.

3.8 Τρόποι διάταξης των επενεργητών ή του επενεργητή και πιθανοί τρόποι κατασκευής του συστήματος

Οι τρόποι διάταξης των επενεργητών ή του επενεργητή και οι πιθανοί τρόποι κατασκευής του συστήματος θα επιλεχθούν από την μέθοδο Pugh Matrix. Η μέθοδος Pugh Matrix είναι μια δομημένη μέθοδος αξιολόγησης και σύγκρισης διαφορετικών εναλλακτικών λύσεων και είναι ιδανική για λήψη αποφάσεων. Αρχικά, ορίζονται τα κριτήρια αξιολόγησης και όλες οι πιθανές εναλλακτικές λύσεις. Επιλέγετε μία από τις εναλλακτικές λύσεις ως βάση σύγκρισης και βαθμολογούνται όλες οι υπόλοιπες λύσεις με βάση τα κριτήρια λειτουργίας που έχουν τεθεί για το σύστημα. Η συνολική βαθμολογία για κάθε εναλλακτική βοηθά στην ιεράρχηση των λύσεων. Η μέθοδος παρέχει αντικειμενικές συγκρίσεις που βοηθούν στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων, στον εντοπισμό πλεονεκτημάτων και αδυναμιών και μπορούν να εφαρμοστούν σε ποικίλα πεδία και προβλήματα.

Στην παρούσα κατασκευή εξετάστηκαν δεκαπέντε πιθανοί τρόποι διάταξης των επενεργητών ή του επενεργητή. Η εικόνα 22 δείχνει δεκαπέντε απλοποιημένα διαφορετικά σχέδια διάταξης ενεργοποιητών που λαμβάνονται μέσω μιας συστηματικής διαδικασίας συνδυασμού βασικών μοντέλων ενεργοποιητών, όπως ενεργοποιητές μονής, διπλής, τριπλής και τετραπλής διόδου και υφασμάτινων ενεργοποιητών τύπου «ακορντεόν». Αρχικά, καθορίζονται κριτήρια αξιολόγησης όπως η λειτουργικότητα, η αποτελεσματικότητα, η πολυπλοκότητα της κατασκευής και το κόστος. Στη συνέχεια, κάθε διάταξη συγκρίθηκε και αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Pugh Matrix, με αποτέλεσμα την επιλογή των καταλληλότερων σχεδίων για περαιτέρω ανάλυση και υλοποίηση.



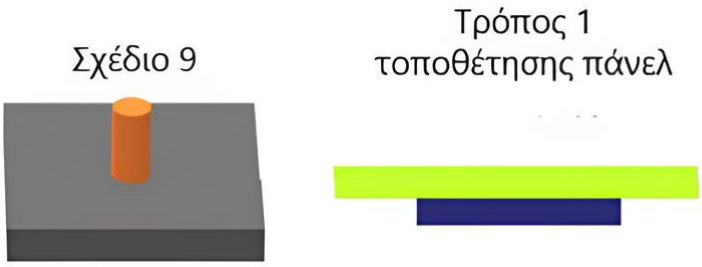
Εικόνα 22: Πιθανοί τρόποι διάταξης των επενεργητών ή του επενεργητή.

Η κατασκευή του συστήματος θα είναι ο συνδυασμός των δεκαπέντε σχεδιαστικών συνδυασμών με τους δύο τρόπους τοποθέτησης του φωτοβολταϊκού πάνελ. Άρα έχουμε τριάντα διαφορετικούς τρόπους κατασκευής. Αυτούς τους τρόπους θα συγκριθούν μεταξύ τους ως προς τον τρόπο τοποθέτησης, την απλότητα λειτουργίας, την ανθεκτικότητα, την ευλυγισία, την ποσότητα υλικού, αν είναι αδιάβροχο, την πιθανότητα βλάβης, τον τρόπο κατασκευής, την ευκολία κατασκευής, το κόστος, την κάλυψη εύρους κίνησης στους δύο άξονες και την ευκολία ανύψωσης κατασκευής. Οι πρώτοι δεκαπέντε συνδυασμοί θα είναι οι δεκαπέντε σχεδιαστικοί συνδυασμοί σε συνδυασμό με τον πρώτο τρόπο τοποθέτησης του πάνελ, ενώ οι υπόλοιποι δεκαπέντε συνδυασμοί θα είναι οι δεκαπέντε σχεδιαστικοί συνδυασμοί σε συνδυασμό με τον δεύτερο τρόπο τοποθέτησης του πάνελ. Η σύγκριση θα γίνει με βάση την εμπειρία και την βιβλιογραφία, όπου τα κριτήρια θα βαθμολογούνται με -1, 0 και 1, και με το άθροισμα των κριτήριών για κάθε κατασκευή ξεχωριστά, αυτό που θα έχει το μεγαλύτερο άθροισμα θα είναι ο τρόπος κατασκευής του επενεργητή. Επομένως παρουσιάζονται οι έξι ποιο πιθανοί τρόποι κατασκευής, πιο αναλυτικά για όλους τους τρόπους κατασκευής παρουσιάζονται στο Παράρτημα 6 μαζί με ανάλυση επιλογής κριτηρίων και επιλογής αυτής της μεθόδου.

	Σχεδιαστικοί Συνδυασμοί					
Κριτήρια	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 3**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 4**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 9**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 18**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 19**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 24**
Απλότητα λειτουργίας	1	1	1	1	1	1
Ανθεκτικότητα	1	0	0	1	0	0
Ευλυγισία	0	1	1	1	1	1
Ποσότητα Υλικού	0	1	1	0	1	1
Αδιάβροχο	1	1	1	1	1	1
Πιθανότητα βλάβης	0	-1	-1	0	-1	-1
Τρόπος κατασκευής	0	0	1	0	0	1
Ευκολία κατασκευής	0	1	1	0	1	1
Κόστος	1	1	1	1	1	1
Κάλυψη εύρους κίνησης στους δύο άξονες	1	0	0	1	1	1
Ευκολία ανύψωσης κατασκευής	1	1	1	1	1	1
Βάρος	0	0	0	-1	-1	-1
Άθροισμα	6	6	8	6	6	7

Πίνακας 7: Έξι ποιο πιθανοί τρόποι κατασκευής του συστήματος.

Με βάση το άθροισμα των κριτηρίων για κάθε κατασκευή παρατηρείτε ότι το προτεινόμενο σχέδιο προς υλοποίηση είναι το 9. Η οποία συνδυάζει το σχέδιο 9 με τον πρώτο τρόπο τοποθέτησης του πάνελ.



Εικόνα 23: Επικρατέστερος τρόπος κατασκευής του συστήματος.

4 Προσομοίωση και ψηφιακή μοντελοποίηση του “soft“ επενεργητή

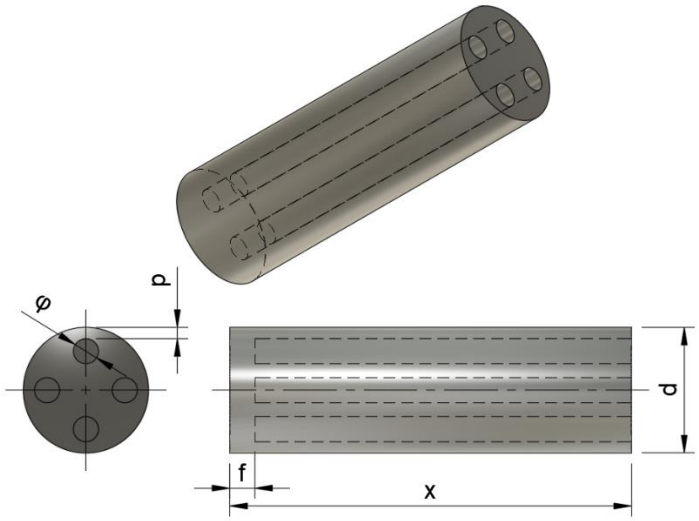
Η προσομοίωση και η ψηφιακή μοντελοποίηση του "soft" επενεργητή αποτελούν έναν σημαντικό τομέα έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα της τεχνολογίας. Οι επενεργητές αυτοί, αποτελούν ουσιαστικά συσκευές που ελέγχονται με λογισμικό και χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα προσαρμογής και ευελιξίας τους. Η διπλωματική εργασία αυτή αποσκοπεί στην ανάπτυξη ενός ψηφιακού μοντέλου για τον σχεδιασμό, την ανάλυση και την αποτίμηση του συγκεκριμένου επενεργητή. Στο πλαίσιο αυτό, η προσομοίωση αποτελεί ένα απαραίτητο εργαλείο που επιτρέπει την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του επενεργητή υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας και φορτίου. Μέσω της ψηφιακής μοντελοποίησης, επιτυγχάνεται η περαιτέρω κατανόηση των χαρακτηριστικών και των δυνατοτήτων του επενεργητή, ενώ παράλληλα παρέχεται ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τον σχεδιασμό και τη βελτίωση των μελλοντικών εκδόσεών του. Ο τρόπος εξέτασης των πιθανών επενεργητών είναι με ψηφιακή προσομοίωση και όχι με κατασκευή πραγματικών μοντέλων διότι, με την επιλογή της ψηφιακής προσομοίωσης δεν θα γινόταν σπατάλη υλικών.

Η ανεμοφόρτιση είναι μια σημαντική εξωτερική επίδραση που πρέπει να ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό ενός ηλιακού ιχνηλάτη, καθώς οι δυνάμεις και οι ροπές που δημιουργούνται από τον άνεμο μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές καταπονήσεις στα φωτοβολταϊκά πάνελ και τον σκελετό. Ο σχεδιασμός πρέπει να εξασφαλίζει την αντοχή στην κάμψη και τη στρέψη που προκαλούνται από τον άνεμο και να βελτιστοποιεί την αεροδυναμική του συστήματος. Επιπλέον, η βροχόπτωση και η υγρασία μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία του ιχνηλάτη, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση στεγανών υλικών και την εφαρμογή αντιδιαβρωτικών επιχρισμάτων για την προστασία από την υγρασία και τη διάβρωση. Τέλος, το χιόνι και ο πάγος μπορούν να αυξήσουν το βάρος στα πάνελ και να επηρεάσουν την κίνηση του ιχνηλάτη. Για τον λόγο αυτό, είναι σημαντικό να σχεδιαστούν συστήματα αποστράγγισης και αποφυγής σχηματισμού πάγου, καθώς και να εξασφαλιστεί η αντοχή της κατασκευής στο βάρος του χιονιού. Ωστόσο, στην προκειμένη διπλωματική εργασία, οι επιδράσεις αυτές δεν θα ληφθούν υπόψη λόγω της κατασκευής ενός πειραματικού συστήματος σε εργαστηριακό χώρο.

4.1 Αρχική σχεδίαση του επενεργητή

Αρχικά, ο επενεργητής σχεδιάζετε χωρίς διαστάσεις αλλά με παραμετροποιήσιμες ώστε να επιλεχθούν οι κατάλληλες διαστάσεις έπειτα, από την προσομοίωση και τον έλεγχο των ήδη υπάρχων συνθηκών.

Το ζητούμενο είναι οι επιλογή των ιδανικών διαστάσεων του επενεργητή ώστε, να μπορεί να λυγίσει 90° με την λιγότερη πίεση που θα ασκείται στους εσωτερικούς θαλάμους φ (εικόνα 24) και την λιγότερη καταπόνηση του.



Εικόνα 24: Σχέδιο με παραμέτρους.

Στο πρωτότυπο που κατασκευάστηκε για την πειραματική επαλήθευση των υπολογιστικών μοντέλων, το μήκος του επενεργητή επιλέχθηκε x = 320 mm και η διάμετρος d = 100 mm. Το μήκος είναι x = 320 mm διότι, οι διαστάσεις του φωτοβολταϊκού πάνελ που επιλέχθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, οδηγούν σε αυτή την επιλογή ώστε, να μπορεί ο επενεργητής να λυγίσει 90° και το φωτοβολταϊκό πάνελ να μην ακουμπήσει το έδαφος και να έχει ένα περιθώριο 1,5 cm από αυτό. Η διάμετρος επιλέχθηκε να είναι d = 100 mm ώστε, ο επενεργητής να είναι τοποθετημένος στο κέντρο του φωτοβολταϊκού πάνελ και να έχει περιθώριο από τις πλευρές του 7 cm, περιθώριο αρκετό. Ο επενεργητής στην μία πλευρά θα είναι κλειστός με πάχος f = 20 mm.

4.2 Επιλογή διατομών για τον επενεργητή

Οι κυλινδρικές διατομές, για παράδειγμα στους σωλήνες, θεωρούνται γενικά ανώτερες από τις τετραγωνικές διατομές ή άλλα σχήματα για διάφορους λόγους:

- **Υψηλή αντοχή στην πίεση:** Η κυλινδρική διατομή κατανέμει ομοιόμορφα τις δυνάμεις και τις πιέσεις στο σωλήνα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι στρογγυλές επιφάνειες δεν έχουν γωνίες όπου συγκεντρώνονται οι δυνάμεις.
- **Ελάχιστη αντίσταση αέρα/υγρού:** Η μικρότερη αντίσταση λόγω της κυλινδρικής επιφάνειας καθιστά τη ροή του υλικού μέσω του σωλήνα πιο αποτελεσματική και συνήθως οδηγεί σε χαμηλότερη πτώση πίεσης.
- **Ευκολία κατασκευής:** Σε σύγκριση με πιο σύνθετα σχήματα όπως τα τετράγωνα. Οι κυλινδρικοί σωλήνες είναι επίσης ευκολότερο να συνδεθούν μεταξύ τους.
- **Εξοικονόμηση υλικού:** Οι κυλινδρικές διατομές απαιτούν γενικά λιγότερο υλικό από τις τετραγωνικές διατομές και άλλες μη κυλινδρικές διατομές για να επιτευχθεί η ίδια αντοχή. Αυτό σημαίνει χαμηλότερο κόστος κατασκευής.

Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου άλλες διατομές είναι επιθυμητές, όπως όταν η χωρητικότητα φορτίου ή η επιθυμητή ροή δικαιολογεί τη χρήση άλλων σχημάτων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η κατασκευή θα διαθέτει κυκλικές διατομές.

4.3 Υπολογισμός των υπόλοιπων διαστάσεων του επενεργητή

Ο υπολογισμός των υπόλοιπων διαστάσεων αποτελεί κρίσιμο βήμα στη διαδικασία μοντελοποίησης και προσομοίωσης του "soft" επενεργητή. Αυτό περιλαμβάνει τον υπολογισμό των υπόλοιπων παραμέτρων που επηρεάζουν τη λειτουργία και την απόδοση του επενεργητή. Οι υπολογισμοί αυτοί συμβάλλουν στην ακρίβεια του μοντέλου και την αξιολόγηση των επιδόσεών του σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Μέσω του υπολογισμού αυτών των διαστάσεων, επιτυγχάνεται η εξασφάλιση μιας πλήρους και ολοκληρωμένης κατανόησης του επενεργητή και η διασφάλιση της βέλτιστης απόδοσής του.

4.4 Μοντελοποίηση των soft επενεργητών σε Abaqus FEA

Η ψηφιακή μοντελοποίηση και η προσομοίωση αυτών των επενεργητών επιτρέπει την αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας και φορτίου, διευκολύνοντας τον σχεδιασμό και την βελτιστοποίησή τους.

Η γεωμετρία του επενεργητή σχεδιάστηκε με βάση τις παραμέτρους που φαίνονται στην εικόνα 24. Συγκεκριμένα, το μήκος του επενεργητή είναι x=320 mm και η διάμετρος d=100 mm. Ο επενεργητής έχει τέσσερις εσωτερικούς θαλάμους με διάμετρο ϕ, τοποθετημένους συμμετρικά γύρω από τον κεντρικό άξονα. Η μία πλευρά του επενεργητή είναι κλειστή με πάχος f=20 mm. Στην συνέχεια έγινε δημιουργία πλέγματος (meshing), χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατο δίκτυο πλέγματος για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια στα αποτελέσματα.

Ο επενεργητής κατασκευάστηκε από ελαστομερές υλικό με υψηλή ελαστικότητα. Ορίστηκαν οι οριακές συνθήκες με στερέωση του ενός άκρου και εφαρμογή πίεσης στους εσωτερικούς θαλάμους για προσομοίωση της λειτουργίας του επενεργητή μέσω πεπιεσμένου αέρα. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη δυναμική μέθοδο (Abaqus/Explicit) για καταγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς του επενεργητή κατά την κάμψη του υπό διάφορα σενάρια φόρτισης.

Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι ο επενεργητής μπορεί να λυγίσει έως και 90° με την κατάλληλη πίεση. Η κατανομή των τάσεων και παραμορφώσεων έδειξε ότι οι κυκλικές διατομές των θαλάμων κατανέμουν ομοιόμορφα τις δυνάμεις, αποφεύγοντας συγκεντρώσεις τάσεων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν καταστροφή του υλικού.

Παρατηρήθηκε, ότι στον πρώτο έλεγχο υπήρχε μεγάλη διαφορά στην πίεση που χρειάζεται να ασκηθεί σε ένα chamber, για να λυγίσει ο επενεργητής 90°, αυτό οφείλεται επειδή στον πρόγραμμα προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν κάποιες αρχικές προδιαγραφές για την σιλικόνη που δεν ταιριάζουν με αυτή που χρησιμοποιήθηκε οπότε, πρέπει να βρεθούν οι σωστές προδιαγραφές μέσω ελέγχου του εφελκυσμού και της θλίψης με την χρήση μηχανής εφελκυσμού και θλίψης. Τα δεδομένα που αναπτύχθηκαν για αυτή την σιλικόνη έγιναν πειραματικά, λόγο έλλειψης στο εργαστήριο μηχανής εφελκυσμού και θλίψης. Επομένως, τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

Abaqus FEA	Material type	Strain energy	Input source	C10	C20
Hyperelastic	Isotropic	Yeoh	Coefficients	0,045	0,02
Density (g/cc)	1,15				

Πίνακας 8: Προδιαγραφές σιλικόνης για το πρόγραμμα προσομοίωσης.

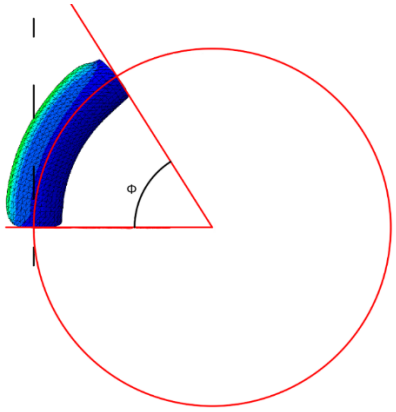
4.4.1 Προσομοίωση επενεργητή με μεταβαλλόμενη την τιμή p

Σύμφωνα με τη διατομή φ στην εικόνα 24, εφαρμόζεται πίεση με τη μορφή πεπιεσμένου αέρα για να επιτευχθεί η κάμψη του ενεργοποιητή. Οι προσομοιώσεις θα πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Αρχικά, θα εκτελεστεί ένα σύνολο προσομοιώσεων με σταθερή διάμετρο φ και μεταβαλλόμενο πάχος τοιχώματος p. Η ελάχιστη τιμή της παραμέτρου p ορίζεται στα 5 mm. Παρατηρήθηκε πειραματικά ότι οι μικρές τιμές p καθιστούν τα τοιχώματα του ενεργοποιητή ευαίσθητα στις υψηλές τάσεις που δημιουργούνται στο υλικό λόγω της συμπίεσης του θαλάμου. Για το πρώτο σύνολο προσομοιώσεων, η τιμή διαμέτρου φ θα είναι 20 mm. Η παράμετρος p θα αυξάνεται κατά 2 mm σε κάθε προσομοίωση.

	x (mm)	*d (mm)*	*p (mm)*	*φ (mm)*
Design 1	320	100	5	20
Design 2	320	100	7	20
Design 3	320	100	9	20
Design 4	320	100	11	20
Design 5	320	100	13	20
Design 6	320	100	15	20
Design 7	320	100	17	20

Πίνακας 9: Διαστάσεις σχεδίων πρώτης προσομοίωσης του επενεργητή.

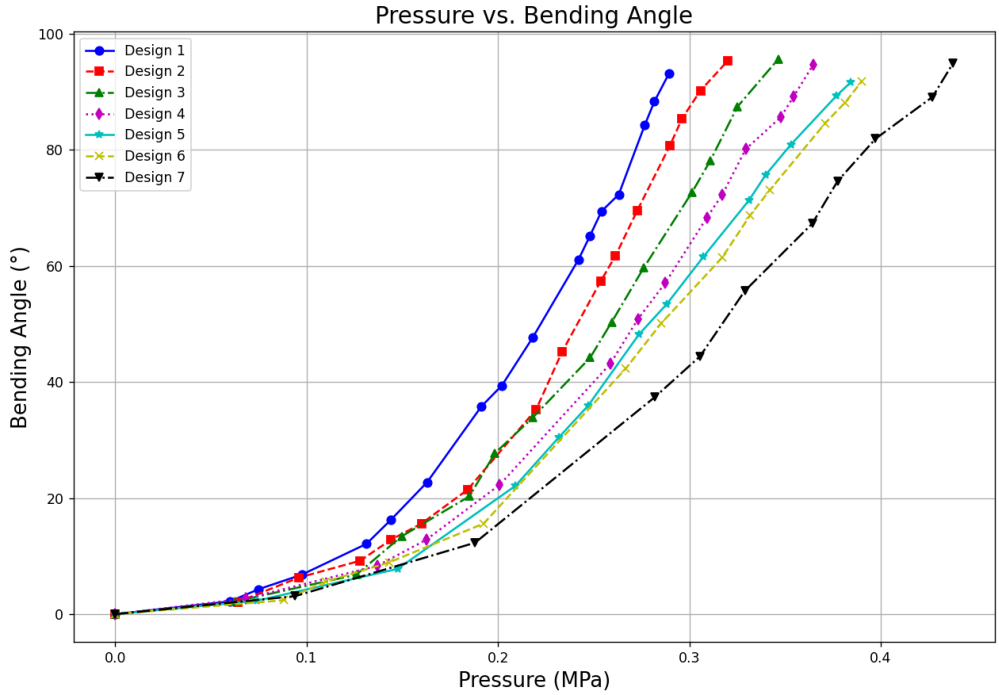
Με αυτά τα Designs θα υπολογιστεί το πόσο πίεση χρειάζεται ώστε, να λυγίσουν και να δημιουργήσουν 90° γωνία οι επενεργητές με το έδαφος και το πόσο κάμπτονται αναλόγως την πίεση (bending angle).



Εικόνα 25: Απεικόνιση επενεργητή σε κλίση.

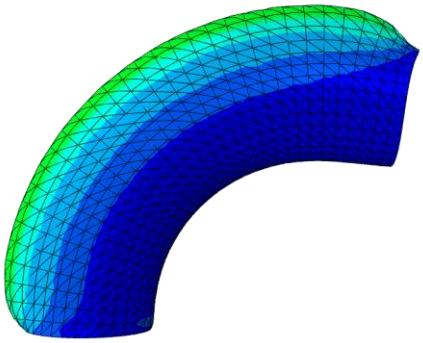
Με την πραγματοποίηση επτά διαφορετικών προσομοιώσεων σχεδίων, με στόχο τη λύση του επενεργητή κατά 90°, αναδείχθηκαν σημαντικά αποτελέσματα που αξίζει να εξεταστούν. Κάθε προσομοίωση επιτρέπει την ανάλυση της κλίσης του επενεργητή και της πίεσης που ασκείται στη διατομή φ, προσφέροντας έτσι μια πολυδιάστατη εικόνα της συμπεριφοράς του. Οι προσομοιώσεις επιτρέπουν την εξαγωγή σημαντικών δεδομένων, όπως η γωνία κλίσης του επενεργητή και η μέγιστη πίεση που μπορεί να αντέξει η διατομή του. Αυτές οι πληροφορίες είναι

ζωτικής σημασίας για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη του επενεργητή και τη διαμόρφωση του σχεδίου με βάση τις ανάγκες της εφαρμογής.



Διάγραμμα 5: Bending angle vs Pressure για την πρώτη προσομοίωση του επενεργητή.

Από αυτό το διάγραμμα παρατηρείτε ότι όσο αυξάνεται το p τόσο μεγαλύτερη πίεση πρέπει να ασκείται για να λυγίσει ο επενεργητής 90°. Το οποίο αποδεικνύεται και από τον παρακάτω πίνακα. Παρόλο που με το μικρότερο p παρατηρείται η λιγότερη πίεση που ασκείται για την απαιτούμενη κλίση, μπορεί να μην είναι το επιθυμητό διότι, μπορεί να καταπονείται αρκετά ο επενεργητής. Για αυτό τον λόγο θα συγκριθούν τα τρία πρώτα σχέδια ως προς την καταπόνηση που δέχεται ο επενεργητής, αυτή η δυνατότητα παρέχεται από το πρόγραμμα προσομοίωσης. Σε περίπτωση που αποδειχθεί, το τρίτο σχέδιο δέχεται λιγότερη καταπόνηση σε σχέση με το Design 1 και Design 2, τότε η πίεση, σε σύγκριση με την μικρότερη που είναι 0,28 MPa του Design 1, θα ανέβει σε 0,33 MPa του Design 3, όπου το κόστος θα είναι αύξηση της πίεσης 0,05 MPa όπου θα προσφέρει, την δυνατότητα μείωσης των πιθανοτήτων να προκληθεί κάποια φθορά στη κατασκευή ή στην ακραία περίπτωση των περιπτώσεων την ολοκληρωτική καταστροφή της.

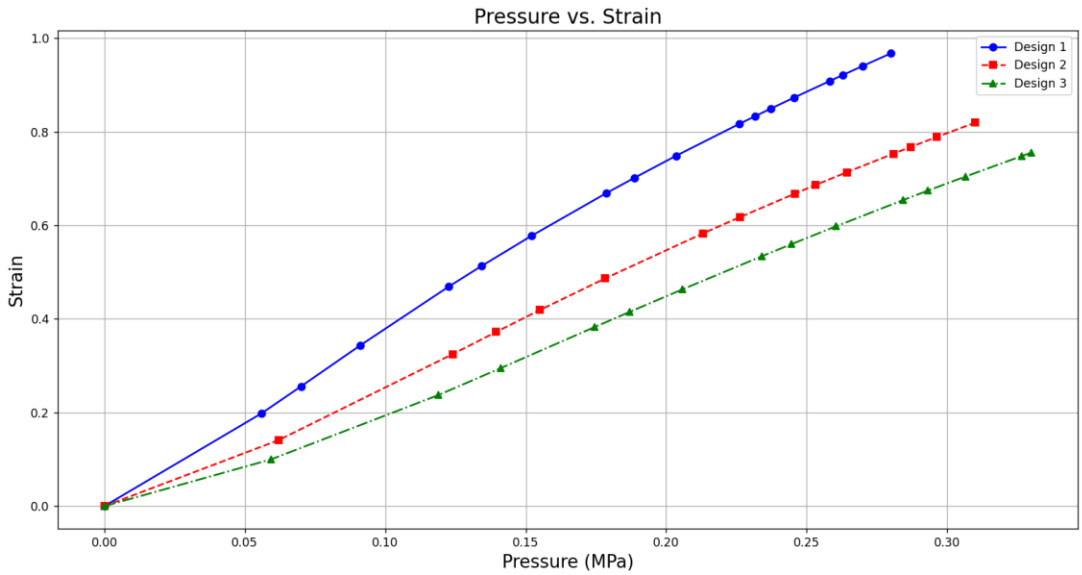


Εικόνα 26: Επενεργητής σε κλίση 90 μοιρών.

	Πίεση (MPa) για επίτευξη κλίσης 90 μοιρών (°)
Design 1	0,28
Design 2	0,31
Design 3	0,33
Design 4	0,36
Design 5	0,38
Design 6	0,39
Design 7	0,43

Πίνακας 10: Πιέσεις σχεδίων για κάμψη 90 μοιρών από την πρώτη προσομοίωση του επενεργητή.

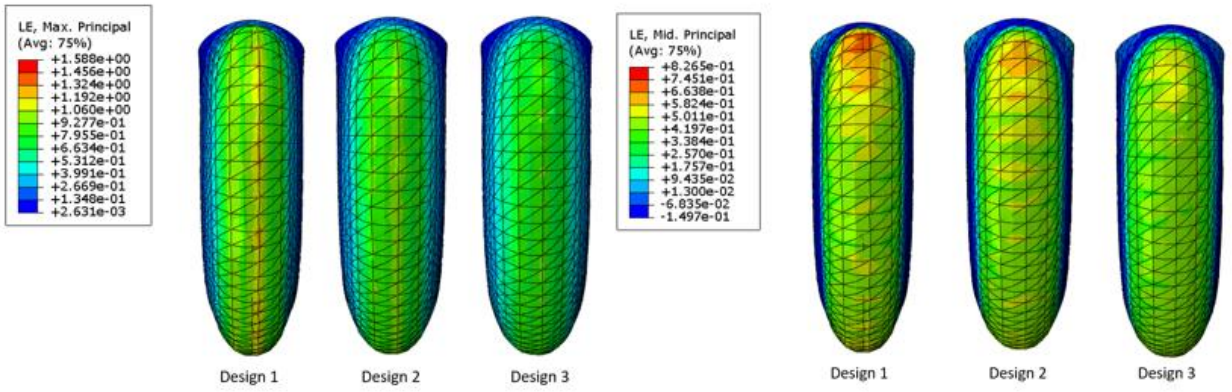
Αρχικά, θα γίνει η σύγκριση του πρώτου σχεδίου με το δεύτερο και με το τρίτο ως προς την καταπόνηση που ασκείται σε όλη την διατομή του επενεργητή και θα γίνει η σύγκριση μεταξύ τους. Το διάγραμμα "Pressure vs. Strain" παρουσιάζει τη σύγκριση τριών διαφορετικών σχεδίων ενεργοποιητών (Design 1, Design 2 και Design 3) ως προς την καταπόνηση που ασκείται σε όλη τη διατομή τους υπό διάφορες πιέσεις



Διάγραμμα 6: Strain vs Pressure για την πρώτη προσομοίωση του επενεργητή.

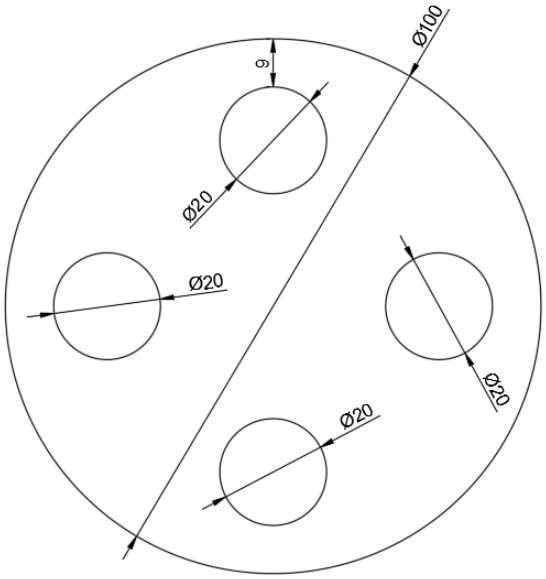
Αυτά τα δύο σχήματα που ακολουθούν δείχνουν την ανάλυση καταπόνησης για τρία Designs ενεργοποιητών (Design 1, Design 2 και Design 3) χρησιμοποιώντας χρωματική κωδικοποίηση. Το πρώτο γράφημα δείχνει την κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης (LE, μέγιστη κύρια τάση), όπου το Design 1 δείχνει την υψηλότερη τάση, ακολουθούμενο από το Design 2 και το Design 3, όπου το Design 3 έχει τη χαμηλότερη τάση. Το δεύτερο γράφημα δείχνει την κατανομή της μέσης κύριας τάσης (LE, μέτρια κύρια τάση), με το Design 1 να εξακολουθεί να είναι το πιο καταπονημένο, αλλά σε μικρότερο βαθμό, και το Design 3 να δείχνει ακόμα την καλύτερη αντοχή και τις χαμηλότερες τιμές τάσης. Η κύρια διαφορά είναι ότι η πρώτη εικόνα εστιάζει στη

μέγιστη παραμόρφωση που μπορεί να αντέξει κάθε Design, ενώ η δεύτερη εικόνα δείχνει μια πιο ισορροπημένη κατανομή τάσεων, βοηθώντας στην κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς του σχεδίου κάτω από διαφορετικά φορτία και τάσεις.



Εικόνα 27: Καταπονήσεις πιθανών επενεργητών από την προσομοίωση επενεργητή με μεταβαλλόμενη την τιμή p.

Το διάγραμμα 6 "Pressure vs. Strain" δείχνει μια σύγκριση των τάσεων που ασκούνται στη διατομή τριών διαφορετικών σχεδίων του ενεργοποιητή (Design 1, Design 2 και Design 3) σε διαφορετικές πιέσεις. Το Design 1 (μπλε γραμμή) δείχνει τη μέγιστη καταπόνηση σε κάθε επίπεδο πίεσης, υποδεικνύοντας υψηλή ευαισθησία στις αλλαγές πίεσης. Η μέγιστη καταπόνηση για το Design 1 είναι 0.96. Το Design 2 (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) δείχνει μέτρια καταπόνηση, με μέγιστη τιμή 0.82, ενώ το Design 3 (πράσινη διακεκομμένη γραμμή) δείχνει τη χαμηλότερη τάση, με μέγιστη καταπόνηση 0.74, υποδηλώνοντας μεγαλύτερη αντοχή και λιγότερη παραμόρφωση. Αυτή η σύγκριση βοηθά στην επιλογή του καταλληλότερου σχεδιασμού με βάση τις απαιτήσεις της εφαρμογής, με το Design 1 να είναι πιο κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη ευαισθησία πίεσης και το Design 3 να είναι πιο κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη αντοχή. Επομένως, το Design 3 είναι σε σχέση με τα υπόλοιπα σχέδια αυτό που δέχεται την λιγότερη καταπόνηση και την λιγότερη πίεση στην διατομή φ ώστε να λυγίσει 90°. Συμπερασματικά, είναι το καλύτερο και θα είναι το μέτρο σύγκρισης για τις επόμενες προσομοιώσεις, επομένως παρατηρήθηκε ότι σε αυτό το σετ προσομοιώσεων το p=9 mm είναι το ιδανικότερο.



Εικόνα 28: Επικρατέστερο σχέδιο από την πρώτη προσομοίωση του επενεργητή.

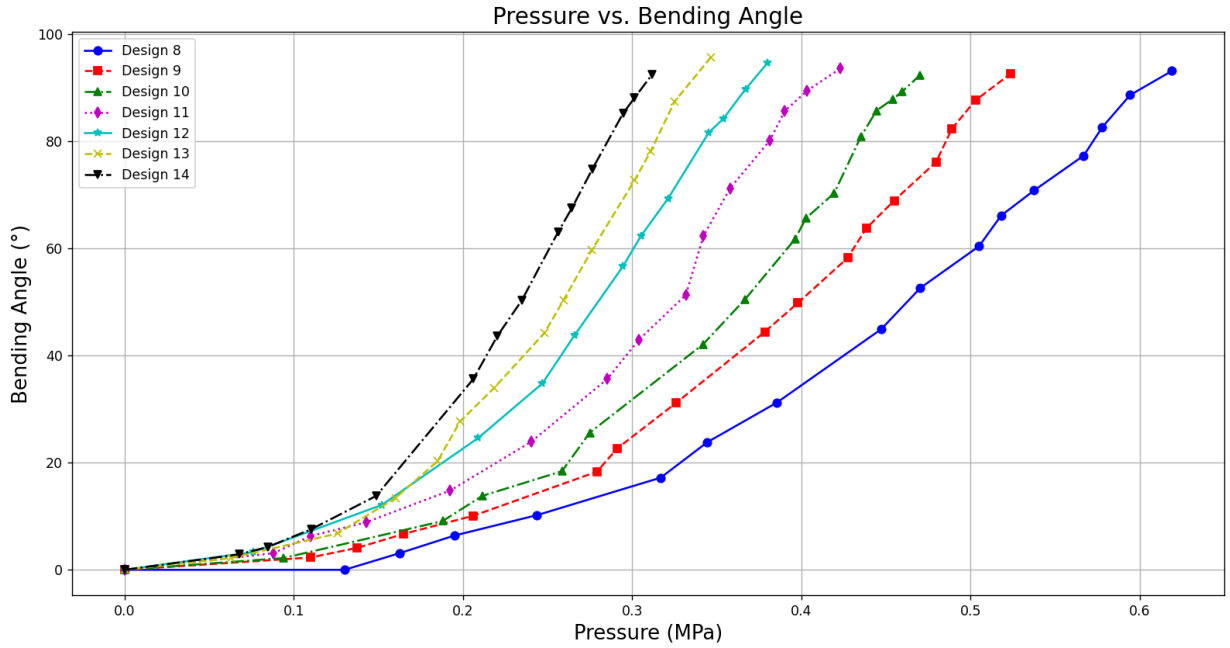
4.4.2 Προσομοίωση επενεργητή με μεταβαλλόμενη την τιμή φ και βέλτιστη σταθερή τιμή p

Από το προηγούμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης το Design 3 για τη σύγκριση με τα υπόλοιπα σχέδια που θα μελετηθούν. Σε αυτό το σύνολο προσομοιώσεων, θα ληφθούν υπόψη επτά σχέδια στα οποία το πάχος τοιχώματος p είναι ίσο με 9 mm (το προηγούμενο σύνολο προσομοιώσεων αποδείχθηκε βέλτιστο), ενώ η διάμετρος φ θα ποικίλλει. Η ελάχιστη τιμή του φ που λαμβάνεται υπόψη είναι 10 mm, καθώς δεν χρειάζεται να ληφθούν υπόψη μικρότερες τιμές. Αυτό συμβαίνει επειδή η πίεση ορίζεται ως η δύναμη που ασκείται κάθετα σε μια επιφάνεια διαιρούμενη με την περιοχή αυτής της επιφάνειας. Επομένως, όσο μικρότερη είναι η διατομή, τόσο μεγαλύτερη είναι η πίεση που απαιτείται. Ακολουθούν επτά σχέδια που πρέπει να ληφθούν υπόψη:

	x (mm)	*d (mm)*	*p (mm)*	*φ (mm)*
Design 8	320	100	9	10
Design 9	320	100	9	12
Design 10	320	100	9	14
Design 11	320	100	9	16
Design 12	320	100	9	18
Design 13 = Design 3	320	100	9	20
Design 14	320	100	9	22

Πίνακας 11: Διαστάσεις σχεδίων δεύτερης προσομοίωσης του επενεργητή.

Εκτελέστηκαν επτά διαφορετικές προσομοιώσεις σχεδίασης με στόχο την κλίση του επενεργητή στις 90°. Ελήφθησαν μερικά αξιοσημείωτα ευρήματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Μια πολυδιάστατη εικόνα της συμπεριφοράς του επενεργητή μπορεί να ληφθεί αναλύοντας την πίεση που εφαρμόζεται στη διατομή φ και την κλίση του επενεργητή σε κάθε προσομοίωση. Σημαντικά δεδομένα, συμπεριλαμβανομένης της γωνίας κλίσης του επενεργητή και της υψηλότερης πίεσης που μπορεί να υποστεί η διατομή του, μπορούν να εξαχθούν από τις προσομοιώσεις. Αυτά τα δεδομένα είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη και το σχεδιασμό του επενεργητή, καθώς και για την τροποποίηση του σχεδιασμού ώστε να ταιριάζει στις απαιτήσεις της εφαρμογής.



Διάγραμμα 7: Bending angle vs Pressure για την δεύτερη προσομοίωση του επενεργητή.

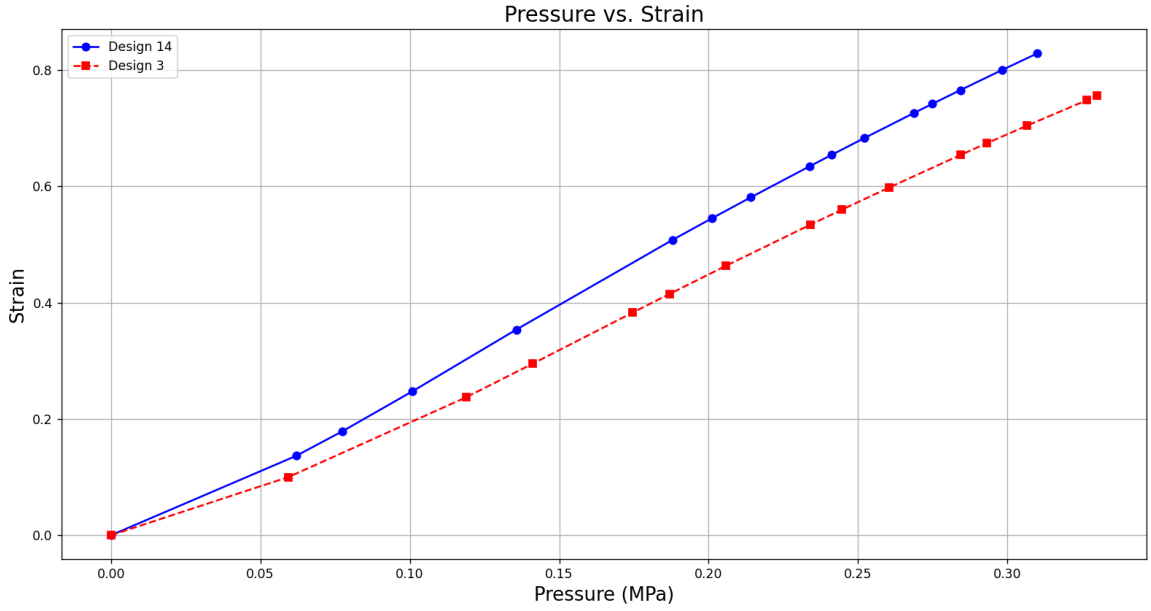
Από αυτό το διάγραμμα παρατηρείτε ότι όσο αυξάνεται το φ τόσο μικρότερη πίεση πρέπει να ασκείται για να λυγίσει ο επενεργητής 90°. Το οποίο αποδεικνύεται και από τον παρακάτω πίνακα.

	Πίεση (MPa) για Κλίση 90 (°)
Design 8	0,60
Design 9	0,51
Design 10	0,46
Design 11	0,41
Design 12	0,37
Design 13 = Design 3	0,33
Design 14	0,31

Πίνακας 12: Πιέσεις σχεδίων για κάμψη 90 μοιρών από την δεύτερη προσομοίωση του επενεργητή.

Παρόλο που με το μεγαλύτερο φ παρατηρείται η λιγότερη πίεση που ασκείται για την απαιτούμενη κλίση, μπορεί να μην είναι το επιθυμητό διότι, μπορεί να καταπονείται αρκετά ο επενεργητής. Για αυτό τον λόγο θα συγκριθούν τα δύο τελευταία Designs (Design 13 = Design 3 και Design 14) ως προς την καταπόνηση που δέχεται ο επενεργητής, αυτή η δυνατότητα παρέχεται από το πρόγραμμα προσομοίωσης. Σε περίπτωση που αποδειχθεί, το Design 14 δέχεται λιγότερη καταπόνηση σε σχέση με το Design 13 = Design 3, τότε η πίεση, σε σύγκριση με την μικρότερη από το προηγούμενο σετ προσομοιώσεων που είναι 0,33 MPa του Design 3, θα μειωθεί 0,31 MPa όπου θα γίνει μείωση της πίεσης 0,02 MPa. Με τον έλεγχο των καταπονήσεων δίνεται η δυνατότητα μειώσεις των πιθανοτήτων να προκληθεί κάποια φθορά στη κατασκευή ή στην ακραία περίπτωση των περιπτώσεων την ολοκληρωτική καταστροφή της.

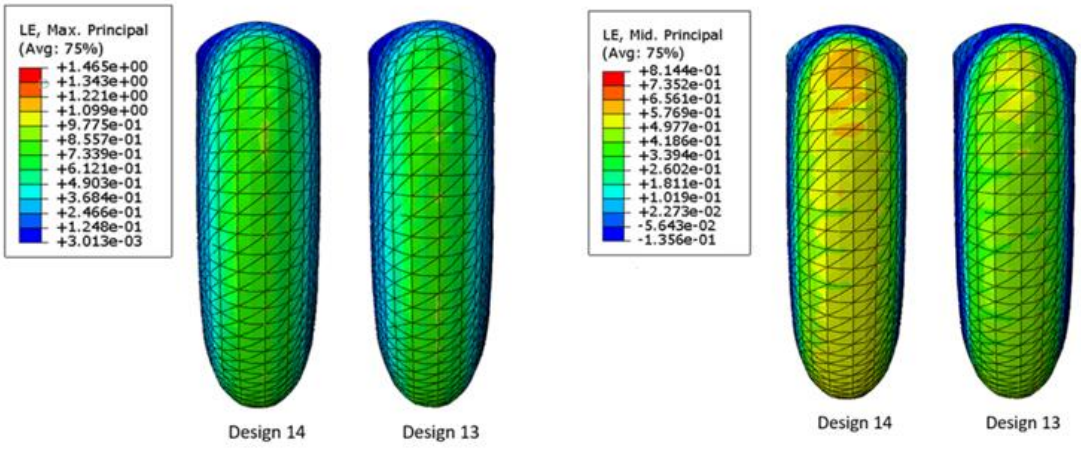
Επομένως, αφού πραγματοποιηθεί η σύγκριση των δύο σχεδίων ως προς την καταπόνηση που ασκείται σε όλη τη διατομή του επενεργητή, μπορούμε να αναδείξουμε σημαντικά στοιχεία σχετικά με την απόδοση και την αντοχή του επενεργητή σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Η κατανόηση της καταπόνησης που υφίσταται ο επενεργητής σε όλη τη διατομή του μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε την αποτελεσματικότητά του σε σχέση με τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις του συστήματος. Επιπλέον, η ανάλυση αυτή μας επιτρέπει να αξιολογηθεί η αντοχή και η ασφάλεια του επενεργητή κατά την εγκατάσταση και τη λειτουργία του στο περιβάλλον του φωτοβολταϊκού συστήματος. Αυτές οι πληροφορίες είναι σημαντικές για την περαιτέρω βελτίωση του σχεδιασμού και την εξασφάλιση της αποτελεσματικής λειτουργίας του επενεργητή στο πλαίσιο του φωτοβολταϊκού συστήματος.



Διάγραμμα 8: Strain vs Pressure για την δεύτερη προσομοίωση του επενεργητή.

Το γράφημα διάγραμμα 8 "Pressure vs. Strain" δείχνει μια σύγκριση της συμπεριφοράς δύο διαφορετικών σχεδίων, Design 14 και Design 3, σε διάφορες πιέσεις. Ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει την πίεση (σε MPa) και ο κατακόρυφος άξονας την καταπόνηση. Τα δεδομένα για το Design 14 εμφανίζονται με μπλε και κύκλους, ενώ τα δεδομένα για το Design 3 εμφανίζονται

με κόκκινο και τετράγωνα. Η καμπύλη του Design 14 είναι υψηλότερη, υποδηλώνοντας μεγαλύτερη παραμόρφωση υπό την ίδια πίεση σε σύγκριση με το Design 3. Η μέγιστη καταπόνηση για το Design 14 είναι 0.84, ενώ για το Design 3 είναι 0.74. Αυτό υποδηλώνει ότι το Design 14 είναι πιο επιρρεπές στο άγχος και μπορεί να είναι πιο ευαίσθητο από το Design 3. Συνολικά, το σχήμα υπογραμμίζει ότι το Design 14 έχει διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες από το Design 3, επομένως είναι σημαντικό να επιλέξετε το κατάλληλο σχέδιο με βάση τις απαιτήσεις αντοχής και παραμόρφωσης.



Εικόνα 29: Καταπονήσεις πιθανών επενεργητών από την προσομοίωση επενεργητή με μεταβαλλόμενη την τιμή φ και σταθερή τιμή ρ από την προηγούμενη προσομοίωση.

Αυτά τα δύο σχήματα συγκρίνουν την κατανομή των μέγιστων και των μέσων κύριων στελεχών για το Design 14 και το Design 13. Η αριστερή εικόνα δείχνει τη μέγιστη κύρια παραμόρφωση (LE, Max.Principal) και η δεξιά εικόνα δείχνει τη μέση κύρια παραμόρφωση (LE, Mid.Principal). Η χρωματική κλίμακα αντιπροσωπεύει τον βαθμό παραμόρφωσης, με το κόκκινο να αντιστοιχεί σε υψηλότερες τιμές και το μπλε σε χαμηλότερες τιμές. Σε σύγκριση με το Design 13 το Design 14 εμφανίζει υψηλότερες τιμές παραμόρφωσης και στις δύο εικόνες, υποδεικνύοντας ότι είναι πιο επιρρεπές σε παραμόρφωση υπό τις ίδιες συνθήκες φόρτωσης. Αυτή η σύγκριση υπογραμμίζει τη μεγαλύτερη συνολική παραμόρφωση του Design 14, καθιστώντας το λιγότερο ανθεκτικό από το Design 13.

Από την μελέτη καταπόνησης παρατηρείται ότι το Design 14 καταπονείται περισσότερο σε σχέση με το Design 13. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα των καταπονήσεων οδηγούν στην επιλογή του Design 13 ως καλύτερο σχέδιο και στο δεύτερο σετ προσομοιώσεων. Η συνδυασμένη ανάλυση των αποτελεσμάτων των δύο προηγούμενων σετ προσομοιώσεων επιτρέπει τον αποκλεισμό αρκετών πιθανών συνδυασμών σχεδιασμών με βάση μια πιο εξεικονισμένη εικόνα. Μέσω αυτής της διαδικασίας, μπορεί να γίνει εστίαση σε εκείνους τους συνδυασμούς που φαίνονται να παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συμβατότητα με τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές του επενεργητή.

Αναλύοντας τον παρακάτω πίνακα, μπορούμε να εξάγουμε σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τους πιθανούς συνδυασμούς σχεδιασμών και τις αντίστοιχες αποδόσεις τους. Αυτό επιτρέπει να απορριφθούν οι συνδυασμοί που ενδέχεται να μην είναι εφικτοί ή να μην επιτυγχάνουν τις επιθυμητές επιδόσεις. Κατά συνέπεια, η διαδικασία του σχεδιασμού γίνεται πιο εστιασμένη και αποτελεσματική, επιτρέποντάς να επικεντρωθούν οι σχεδιασμοί σε λύσεις που

ανταποκρίνονται πλήρως στις απαιτήσεις μας και εξασφαλίζουν τη βέλτιστη λειτουργία του επενεργητή. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση και αξιοπιστία στο σύστημά, προάγοντας έτσι την ανάπτυξη της τεχνολογίας και ενισχύοντας την αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα σχέδια που έχουν μικρότερη πίεση ή ίση από το Design 3 απορρίπτονται λόγο του ελέγχου καταπόνησης αλλά παραμένουν πιθανά σχέδια λόγο της λιγότερης πίεσης που χρειάζονται για να λυγίσουν 90° σε σχέση με το Design 3.

Ο παρακάτω πίνακας είναι ένας πίνακας αξιολόγησης σχεδιασμού με βάση τη διάμετρο (φ) και το πάχος (p) σε χιλιοστά. Ο πίνακας χωρίζεται σε δύο μέρη: σχέδια που εξετάστηκαν και σχέδια που απορρίφθηκαν, θεωρήθηκαν δυνητικά κατάλληλα ή δεν έχουν εξεταστεί και θα εξεταστούν σε επόμενη προσομοίωση. Τα πορτοκαλί κελιά αντιπροσωπεύουν σχέδια που έχουν επιθεωρηθεί, τα ερυθρά κελιά αντιπροσωπεύουν σχέδια που έχουν απορριφθεί, τα κίτρινα κελιά θα εξεταστούν σε επόμενη προσομοίωση και τα μπλε κελιά αντιπροσωπεύουν σχέδια που θεωρούνται δυνητικά κατάλληλα. Γίνονται συγκρίσεις για πάχη από 5 έως 17 mm και διαμέτρους από 10 έως 22 mm, με κάθε στοιχείο να περιέχει ένα σύμβολο "+" για επιβεβαίωση των σχεδίων που θα εξεταστούν ή έχουν εξεταστεί ήδη. Ο πίνακας δείχνει την καταλληλόλητα και την αξιολόγηση του κάθε σχεδίου υπό διαφορετικές παραμέτρους.

Σχέδια που έχουν εξετασθεί								
		Φ (mm)						
		10	12	14	16	18	20	22
P (mm)	5	+	+	+	+	+	+	+
	7	+	+	+	+	+	+	+
	9	+	+	+	+	+	+	+
	11	+	+	+	+	+	+	+
	13	+	+	+	+	+	+	+
	15	+	+	+	+	+	+	+
	17	+	+	+	+	+	+	+
Σχέδια που έχουν απορριφθεί ή δεν εξετασθεί ή τίθενται πιθανά κατάλληλα								
		Φ (mm)						
		10	12	14	16	18	20	22
P (mm)	5	+	+	+	+	+	+	+
	7	+	+	+	+	+	+	+
	9	+	+	+	+	+	+	+
	11	+	+	+	+	+	+	+
	13	+	+	+	+	+	+	+
	15	+	+	+	+	+	+	+
	17	+	+	+	+	+	+	+

	Σχέδια που έχουν εξετασθεί
	Σχέδια που δεν έχουν εξετασθεί
	Σχέδια που τίθενται πιθανά κατάλληλα
	Σχέδια που απορρίπτονται

Πίνακας 13: Πιθανοί σχεδιασμοί του επενεργητή έπειτα από την προσομοίωση επενεργητή με μεταβαλλόμενη την τιμή φ και βέλτιστη σταθερή τιμή p από την προηγούμενη προσομοίωση.

4.4.3 Προσομοίωση επενεργητή με σταθερή την μικρότερη τιμή p

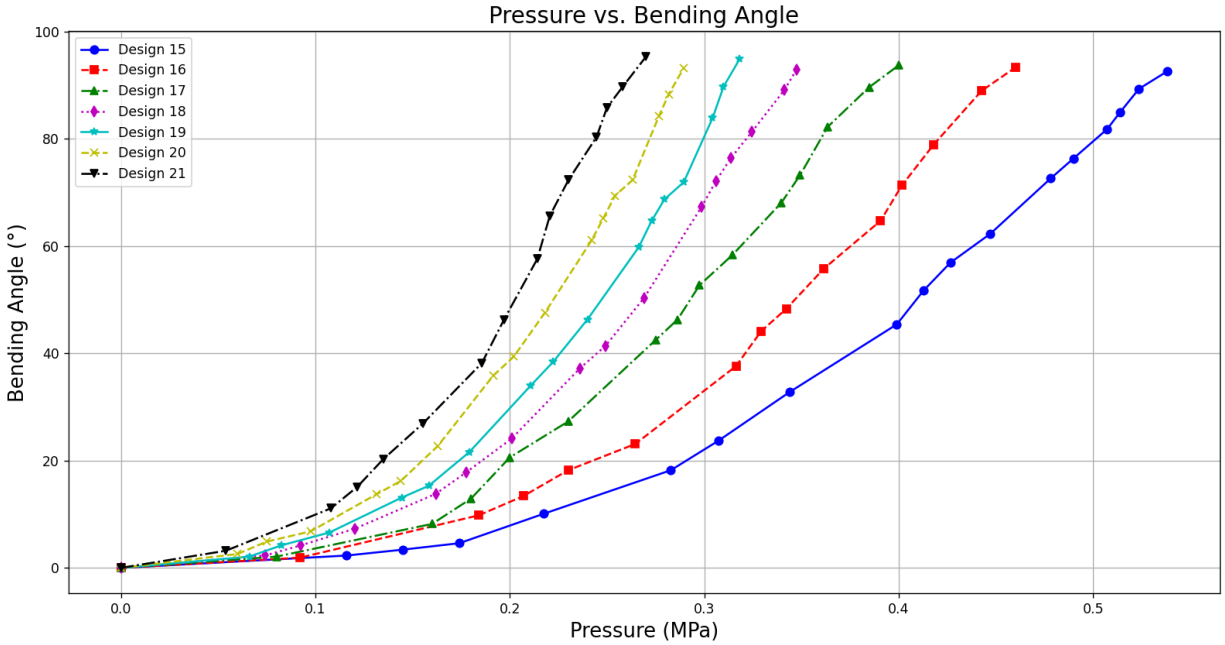
Από το προηγούμενο κεφάλαιο εξασφαλίστηκε σαν μέτρο σύγκρισης το Design 3 ώστε να συγκριθούν τα υπόλοιπα σχέδια που θα μελετηθούν. Σε αυτό το σετ προσομοιώσεων, θα

μελετηθούν επτά σχέδια εκ των οποίων το p θα είναι ίσο με 5 mm και θα μεταβάλλεται το φ επειδή, αποδείχθηκε από τα προηγούμενα σετ προσομοιώσεων ότι όταν p ισούται με μικρή τιμή ασκείται λιγότερη πίεση στην διατομή φ και όταν αυξάνεται η τιμή φ ομοίως λιγότερη πίεση στην διατομή φ. Η μικρότερη τιμή του φ που θα μελετηθεί θα είναι 10 mm, πιο μικρή δεν χρειάζεται να μελετηθεί, διότι πίεση ονομάζεται το πηλίκο της δύναμης που ασκείται κάθετα σε μία επιφάνεια προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής. Επομένως, όσο μικρότερη διατομή τόσο μεγαλύτερη θα χρειαστεί. Τα σχέδια που θα εξεταστούν είναι επτά και είναι τα εξής:

	x (mm)	d(mm)	p(mm)	φ(mm)
Design 15	320	100	5	10
Design 16	320	100	5	12
Design 17	320	100	5	14
Design 18	320	100	5	16
Design 19	320	100	5	18
Design 20 = Design 1	320	100	5	20
Design 21	320	100	5	22

Πίνακας 14: Διαστάσεις σχεδίων τρίτης προσομοίωσης του επενεργητή.

Εκτελέστηκαν επτά διαφορετικές προσομοιώσεις σχεδίασης με στόχο την κλίση του επενεργητή να φτάσει στις 90°. Κατά τη διάρκεια αυτών των προσομοιώσεων, ανακαλύφθηκαν μερικά σημαντικά ευρήματα που απαιτούν περαιτέρω ανάλυση. Μπορούμε να προσεγγίσουμε τη συμπεριφορά του επενεργητή μέσω πολυδιάστατων εικόνων, εξετάζοντας την πίεση που ασκείται στη διατομή και την κλίση του επενεργητή σε κάθε προσομοίωση. Σημαντικά δεδομένα, όπως η γωνία κλίσης του επενεργητή και η μέγιστη πίεση που μπορεί να υποστεί η διατομή του, μπορούν να εξαχθούν από αυτές τις προσομοιώσεις. Αυτά τα δεδομένα είναι ουσιώδη για την ανάπτυξη και τον σχεδιασμό του επενεργητή, καθώς και για την προσαρμογή του σχεδιασμού προκειμένου να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της εφαρμογής.



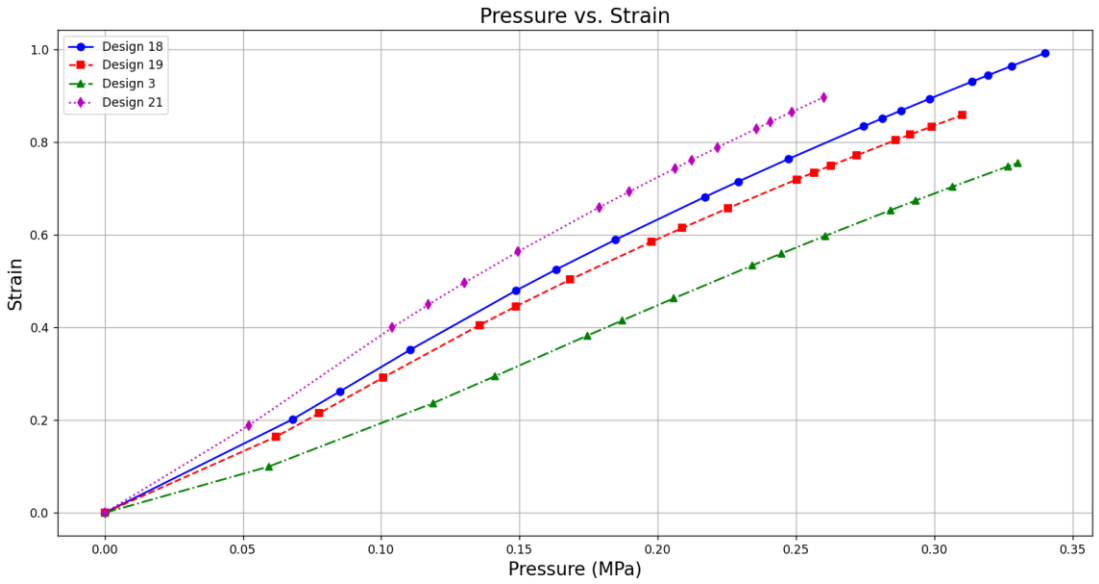
Διάγραμμα 9: Bending angle vs Pressure για την τρίτη προσομοίωση του επενεργητή.

Από το γράφημα προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η τιμή της διατομής, απαιτείται μικρότερη πίεση για να προκαλέσει την κλίση του επενεργητή στα 90°. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τον παρακάτω πίνακα:

	Πίεση (MPa) για Κλίση 90 (°)
Design 15	0,53
Design 16	0,45
Design 17	0,39
Design 18	0,34
Design 19	0,31
Design 20 = Design 1	0,28
Design 21	0,26

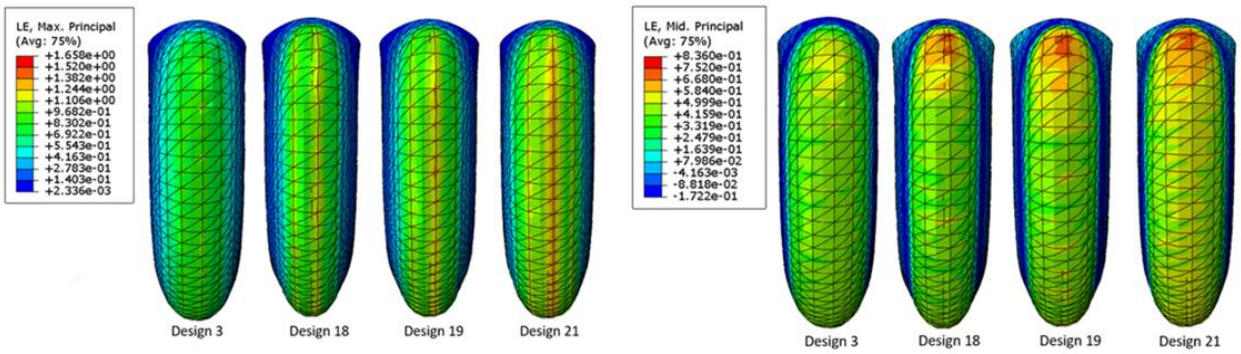
Πίνακας 15: Πιέσεις σχεδίων για κάμψη 90 μοιρών από την τρίτη προσομοίωση του επενεργητή.

Αν και παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει η διάμετρος, μειώνεται η απαιτούμενη πίεση για την επίτευξη της επιθυμητής κλίσης, αυτό δεν είναι απαραίτητα επιθυμητό. Υπάρχει η πιθανότητα ο επενεργητής να υποστεί σημαντικές φθορές. Με βάση των παραπάνω πίνακα παρατηρείτε τα σχέδια Design 18, Design 19, Design 20 = Design 1 και Design 21 έχουν πίεση μικρότερη από το μέτρο σύγκρισης, το Design 3 εκτός όμως από το Design 18 που έχει 0,01 MPa αλλά αξίζει να μελετηθεί και αυτός ο πιθανός σχεδιασμός διότι με μία πρώτη ματιά το κόστος είναι μόνο 0,01 MPa. Τα σχέδια θα συγκριθούν με το Design 3 ως προς την καταπόνηση που ασκείται σε όλη την διατομή του επενεργητή. Το Design 20 έχει συγκριθεί με το Design 3 σε προηγούμενο κεφάλαιο και έχει αποδειχθεί πως υπερτερεί το Design 3. Επομένως θα εξετασθούν και θα συγκριθούν με το Design 3 τα σχέδια Design 18, Design 19 και Design 21.



Διάγραμμα 10: Strain vs Pressure για την τρίτη προσομοίωση του επενεργητή.

Το διάγραμμα αυτό δείχνει ξεκάθαρα ότι το Design 3 είναι το πιο ανθεκτικό σχέδιο, καθώς παρουσιάζει τη μικρότερη παραμόρφωση υπό τις ίδιες συνθήκες πίεσης, με μέγιστη καταπόνηση 0.74. Αντίθετα, το Design 21 είναι το λιγότερο ανθεκτικό, παρουσιάζοντας τη μεγαλύτερη παραμόρφωση, με μέγιστη καταπόνηση 0.88. Το Design 18 (με μέγιστη καταπόνηση 0.97) και το Design 19 (με μέγιστη καταπόνηση 0.86) βρίσκονται ενδιάμεσα, με το Design 18 να υπερτερεί ελαφρώς σε ανθεκτικότητα σε σχέση με το Design 19.



Εικόνα 30: Καταπονήσεις πιθανών επενεργητών από την προσομοίωση επενεργητή με σταθερή την μικρότερη τιμή ρ.

Αυτές οι δύο εικόνες συγκρίνουν την κατανομή της παραμόρφωσης χρησιμοποιώντας τη μέγιστη κύρια τάση (Max.Principal) και τη μέση κύρια τάση (Mid.Principal) σε τέσσερα διαφορετικά σχέδια (Design 3, Design 18, Design 19, Design 21). Η μέγιστη κύρια τάση φαίνεται στην αριστερή εικόνα, με το Design 21 να δείχνει την υψηλότερη τιμή παραμόρφωσης και το Design 3 τη χαμηλότερη, υποδεικνύοντας ότι το Design 3 είναι πιο ανθεκτικό στη μέγιστη κύρια τάση. Οι μέσες κύριες παραμορφώσεις φαίνονται στο σχήμα στα δεξιά, με το Design 21 να συνεχίζει να εμφανίζει υψηλότερες τιμές καταπόνησης σε σύγκριση με τα άλλα σχέδια, ενώ το Design 3 παραμένει το πιο ανθεκτικό σχέδιο. Συνολικά, το Design 3 είναι το πιο ανθεκτικό σχέδιο, εμφανίζοντας τις χαμηλότερες τιμές παραμόρφωσης και στις δύο παραμέτρους, ενώ το Design 21 είναι το λιγότερο ανθεκτικό, εμφανίζοντας τις υψηλότερες τιμές παραμόρφωσης.

Από την μελέτη καταπόνησης που πραγματοποιήθηκε σε αυτό το σετ προσομοιώσεων, λιγότερο καταπονείται το Design 3 και στις καταπονήσεις που εξετάζονται τα δοκίμια. Το Design 18 παρόλο που εξετάστηκε ενώ είχε μεγαλύτερη πίεση από το Design 3 αποδείχθηκε και ότι καταπονείται περισσότερο και απορρίφθηκε. Το Design 3 συνεχίζει με βάση τα αποτελέσματα να καταπονείται περισσότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα σχέδια. Επομένως, τα αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το Design 3 καταπονείται λιγότερο και χρειάζεται την λιγότερη πίεση να λυγίσει στην επιθυμητή γωνία των 90°. Αναλύοντας τα αποτελέσματα και των τριών προηγούμενων σετ προσομοιώσεων, είναι δυνατόν να αποκλειστούν πολλοί πιθανοί συνδυασμοί σχεδιασμών μέσω μιας πιο ολοκληρωμένης ανάλυσης. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την εστίαση σε εκείνους τους συνδυασμούς που φαίνεται να είναι πιο συμβατοί με τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές του επενεργητή. Τα σχέδια που έχουν μικρότερη πίεση ή ίση από το Design 3 απορρίπτονται αλλά, παραμένουν πιθανά σχέδια λόγο της λιγότερης πίεσης που χρειάζονται για να λυγίσουν 90 ° σε σχέση με το Design 3.

Σχέδια που έχουν εξετασθεί								
		Φ (mm)						
		10	12	14	16	18	20	22
P (mm)	5	+	+	+	+	+	+	+
	7	+	+	+	+	+	+	+
	9	+	+	+	+	+	+	+
	11	+	+	+	+	+	+	+
	13	+	+	+	+	+	+	+
	15	+	+	+	+	+	+	+
	17	+	+	+	+	+	+	+
Σχέδια που έχουν απορριφθεί ή δεν εξετασθεί ή τίθενται πιθανά κατάλληλα								
		Φ (mm)						
		10	12	14	16	18	20	22
P (mm)	5	+	+	+	+	+	+	+
	7	+	+	+	+	+	+	+
	9	+	+	+	+	+	+	+
	11	+	+	+	+	+	+	+
	13	+	+	+	+	+	+	+
	15	+	+	+	+	+	+	+
	17	+	+	+	+	+	+	+

	Σχέδια που έχουν εξετασθεί
	Σχέδια που δεν έχουν εξετασθεί
	Σχέδια που τίθενται πιθανά κατάλληλα
	Σχέδια που απορρίπτονται

Πίνακας 16: Πιθανοί σχεδιασμοί του επενεργητή έπειτα από την προσομοίωση επενεργητή με σταθερή την μικρότερη τιμή ρ.

Από την ανάλυση του παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι ένα πολύ μεγάλο ποσοστό των πιθανών σχεδιασμών έχει απορριφθεί λόγο των συμπερασμάτων που έχουν προκύψει από τις προηγούμενες προσομοιώσεις. Κύριος λόγος απόρριψης τους είναι διότι, δεν μπορούν να πετύχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα με το λιγότερο κόστος, στην παρούσα περίπτωση την λιγότερη πίεση και καταπόνηση. Επιπρόσθετα, ένα μικρό εύρος δεν μπορεί ακόμα να εξετασθεί με βάση τα συμπεράσματα των προηγούμενων προσομοιώσεων, επομένως πρέπει να εξεταστούν. Ο παραπάνω πίνακας σε σύγκριση με τον πίνακα 14 είναι ο ίδιος αλλά ανανεωμένος με αποτελέσματα από την προηγούμενη προσομοίωση, αν και χρησιμοποιεί τις ίδιες χρωματικές κατηγορίες, προσφέρει μεγαλύτερη σαφήνεια στη διάκριση μεταξύ των σχεδίων που θεωρούνται πιθανώς κατάλληλα και αυτών που δεν έχουν εξεταστεί. Συγκριτικά, και οι δύο πίνακες δείχνουν ότι τα σχέδια με μεγαλύτερη διάμετρο και πάχος έχουν εξεταστεί περισσότερο, αλλά ο δεύτερος πίνακας παρέχει καλύτερη κατηγοριοποίηση, βοηθώντας στην πιο αποτελεσματική αξιολόγηση και επιλογή των κατάλληλων σχεδίων για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη.

4.4.4 Προσομοίωση των τελευταίων πιθανών σχεδίων που δεν έχουν εξεταστεί

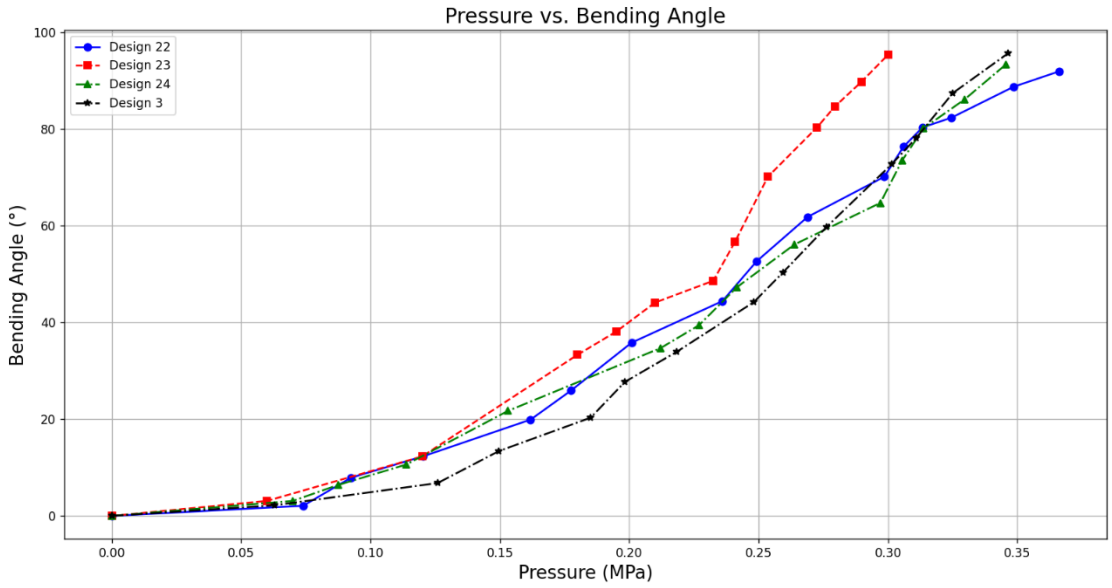
Με βάση το προηγούμενη προσομοίωση δεν μπορεί ακόμα να οριστικοποιηθεί κάποιο σχέδιο και πρέπει να πραγματοποιηθούν μερικές ακόμα προσομοιώσεις. Οι προηγούμενες προσομοιώσεις με τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που δημιούργησαν οδηγούν στην

μελέτη προσομοίωσης τριών ακόμα σχεδίων, των Design 22, Design 23 και Design 24. Οι διαστάσεις τους ακολουθούν στον παρακάτω πίνακα.

	x (mm)	d(mm)	p(mm)	φ(mm)
Design 22	320	100	7	18
Design 23	320	100	7	22
Design 24	320	100	11	22
Design 3	320	100	9	20

Πίνακας 17: Διαστάσεις σχεδίων τέταρτης προσομοίωσης του επενεργητή.

Τα τρία σχέδια θα εξετασθούν δηλαδή, θα πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις για το κάθε ένα ξεχωριστά ώστε να δημιουργηθούν τα κατάλληλα αποτελέσματα ώστε να δημιουργηθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα. Τα σχέδια έχουν αρχικό σκοπό στην προσομοίωση τους, όπως και οι προηγούμενες προσομοιώσεις, να εξάγουν σαν αποτέλεσμα την απαιτούμενη πίεση που χρειάζονται να λυγίσουν 90°.



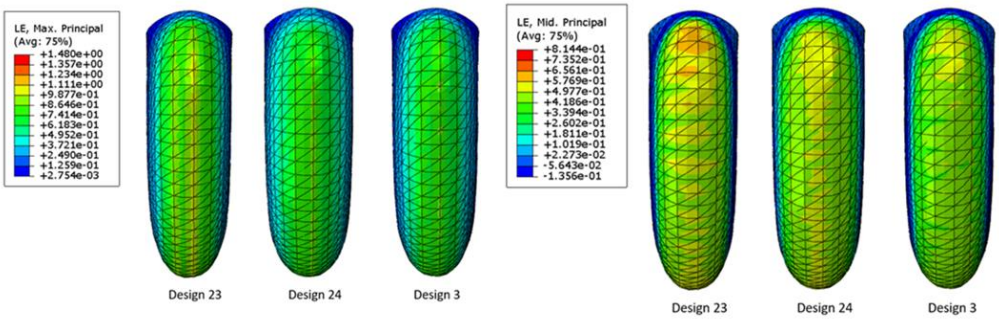
Διάγραμμα 11: Bending angle vs Pressure για την τέταρτη προσομοίωση του επενεργητή.

Από το γράφημα προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

	Πίεση (MPa) για Κλίση 90 (°)
Design 22	0,36
Design 23	0,29
Design 24	0,34

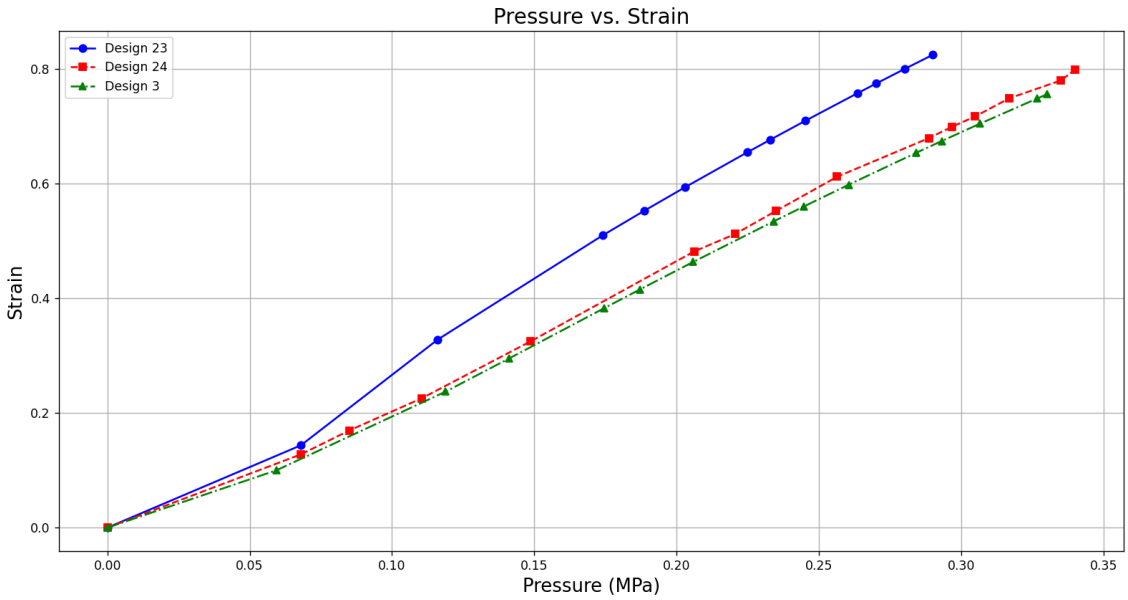
Πίνακας 18: Πιέσεις σχεδίων για κάμψη 90 μοιρών από την τέταρτη προσομοίωση του επενεργητή.

Με βάση τα αποτελέσματα απορρίπτεται χωρίς κάποιον παραπάνω έλεγχο το Design 22 διότι χρειάζεται 0,03 MPa, σε σχέση με Design 3 που έχει προκύψει προς το παρόν το καλύτερο σχέδιο, να λυγίσει 90. Τα σχέδια Design 23 και Design 24, θα συγκριθούν και ως προς την καταπόνηση. Το Design 23 έχει μικρότερη πίεση από το Design 3 αλλά το Design 24 έχει μεγαλύτερη πίεση κατά 0,01 MPa από το Design 3 αλλά, στην περίπτωση που καταπονείται το Design 24 λιγότερο από το Design 3 το κόστος θα είναι αύξηση της σε σχέση με το Design 3 μόνο 0,01 MPa.



Εικόνα 31: Καταπονήσεις πιθανών επενεργητών από την προσομοίωση των τελευταίων πιθανών σχεδίων που δεν έχουν εξεταστεί .

Αυτά τα δύο σχήματα συγκρίνουν την κατανομή της παραμόρφωσης σε τρία διαφορετικά σχέδια (Design 23, Design 24, Design 3) χρησιμοποιώντας τη μέγιστη κύρια τάση (Max. Principal) και τη μέση κύρια τάση (Mid. Principal). Στην αριστερή εικόνα, το Design 23 δείχνει την υψηλότερη τιμή μέγιστης παραμόρφωσης, ενώ το Design 3 έχει τη χαμηλότερη τιμή μέγιστης παραμόρφωσης, υποδεικνύοντας ότι το Design 3 είναι πιο ανθεκτικό στη μέγιστη κύρια τάση. Στην εικόνα στα δεξιά, το Design 23 συνεχίζει να εμφανίζει υψηλότερες μέσες τιμές καταπόνησης σε σύγκριση με τα άλλα δύο σχέδια, ενώ το Design 24 και το Design 3 δείχνουν χαμηλότερες τιμές. Συνολικά, το Design 3 είναι το πιο ανθεκτικό από τα τρία, εμφανίζοντας τις χαμηλότερες τιμές καταπόνησης τόσο στη μέγιστη κύρια τάση όσο και στη μέση κύρια τάση, ενώ το Design 23 είναι το λιγότερο ανθεκτικό, εμφανίζοντας την υψηλότερη τιμή καταπόνησης.



Διάγραμμα 12: Strain vs Pressure για την τέταρτη προσομοίωση του επενεργητή.

Το διάγραμμα "Pressure vs. Strain" δείχνει τη σχέση μεταξύ πίεσης και καταπόνησης για το Design 23, το Design 24 και το Design 3. Το Design 23, που εμφανίζεται ως μπλε γραμμή και κύκλος, δείχνει μεγαλύτερες παραμορφώσεις σε οποιαδήποτε δεδομένη πίεση, υποδεικνύοντας ότι είναι το λιγότερο ανθεκτικό στην παραμόρφωση με μέγιστη καταπόνηση 0.83. Το Design 24 (με κόκκινες διακεκομμένες γραμμές και τετράγωνα) έχει μέτρια απόδοση, παρουσιάζοντας σταθερή αύξηση της καταπόνησης με την πίεση και μέγιστη καταπόνηση 0.80. Το Design 3, που εμφανίζεται με πράσινες διακεκομμένες γραμμές και τρίγωνα, έχει ελάχιστη παραμόρφωση, καθιστώντας το πιο ανθεκτικό Design υπό πίεση με μέγιστη καταπόνηση 0.74. Συνολικά, το γράφημα δείχνει ότι το Design 3 έχει την υψηλότερη ανθεκτικότητα, το Design 24 έχει μέση απόδοση και το Design 23 έχει τη χειρότερη ανθεκτικότητα.

Σχέδια που έχουν εξετασθεί								
		Φ (mm)						
		10	12	14	16	18	20	22
P (mm)	5	+	+	+	+	+	+	+
	7	+	+	+	+	+	+	+
	9	+	+	+	+	+	+	+
	11	+	+	+	+	+	+	+
	13	+	+	+	+	+	+	+
	15	+	+	+	+	+	+	+
	17	+	+	+	+	+	+	+
Σχέδια που έχουν απορριφθεί ή τίθενται πιθανά κατάλληλα								
		Φ (mm)						
		10	12	14	16	18	20	22
P (mm)	5	+	+	+	+	+	+	+
	7	+	+	+	+	+	+	+
	9	+	+	+	+	+	+	+
	11	+	+	+	+	+	+	+
	13	+	+	+	+	+	+	+
	15	+	+	+	+	+	+	+
	17	+	+	+	+	+	+	+

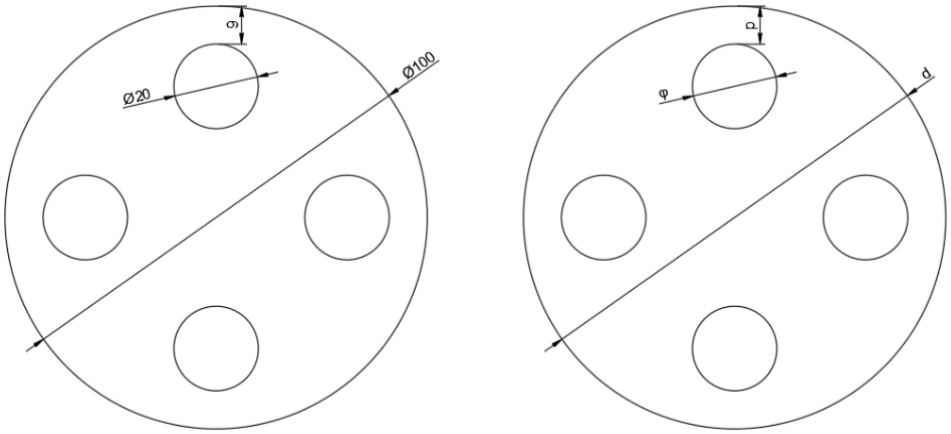
	Σχέδια που έχουν εξετασθεί
	Σχέδια που δεν έχουν εξετασθεί
	Σχέδια που τίθενται πιθανά κατάλληλα
	Σχέδια που απορρίπτονται
	Ιδανικότερο σχέδιο

Πίνακας 19: Τελικός πίνακας σχεδίων από τις προσομοιώσεις.

Ο παραπάνω πίνακας είναι ο τελικός πίνακας από τις προσομοιώσεις και παρουσιάζει την αξιολόγηση διάφορων σχεδίων με βάση τη διάμετρο (φ) και το πάχος (p), επισημαίνοντας ποια σχέδια έχουν εξεταστεί, απορριφθεί, ή θεωρούνται πιθανώς κατάλληλα. Με βάση τα συμπεράσματα που προέκυψαν το Design 3 είναι αυτό που θα επιλεχθεί σαν σχέδιο αλλά, τα σχέδια που ήταν πολύ κοντά στο να είναι τα ιδανικότερα θα θεωρηθούν σαν πιθανά κατάλληλα σε περίπτωση που χρειαστούν τα αποτελέσματα σε κάποια άλλη μελέτη ή παρόμοια κατασκευή. Οι προηγούμενοι πίνακες, πίνακας 13 και πίνακας 16, ήταν σημαντικοί διότι βοήθησαν στην επιλογή των πιο υποσχόμενων σχεδίων για περαιτέρω ανάλυση ώστε, να προκύψει το Design 3 ως το πιο ανθεκτικό σχέδιο.

4.5 Παραμετροποίηση διαστάσεων του σχεδίου του επενεργητή

Με βάση τα αποτελέσματα των προηγούμενων προσομοιώσεων ότι οι διαστάσεις (όλες σε χιλιοστά) του «soft» επενεργητή είναι, όπου d=100, p=9, φ=20, f = 20, και το μήκος x=320. Θα συσχετιστούν οι διαστάσεις με το μήκος του επενεργητή, επειδή είναι η μεγαλύτερη, ώστε σε περίπτωση που αλλάξει το μέγεθος του να αλλάξουν όλες οι υπόλοιπες διαστάσεις ομοιόμορφα. Επομένως, οι διαστάσεις θα γίνουν d=0,3125x, p=0,028123x, f=0,0625x και φ=0,0625x.



Εικόνα 32: Παραμετροποίηση διαστάσεων σχεδίου επενεργητή.

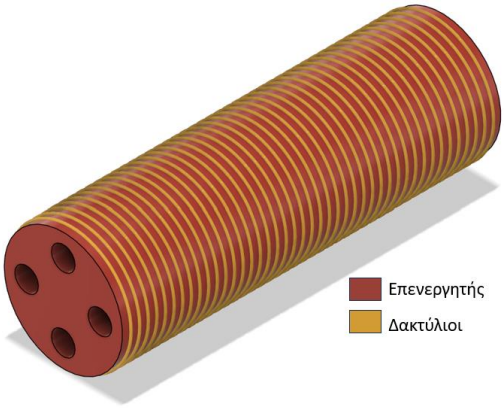
Η εικόνα 32 παρουσιάζει δύο τομές του επενεργητή με διαφορετικά σύμβολα για τις διαστάσεις τους. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο μερών είναι ότι το αριστερό μέρος χρησιμοποιεί συγκεκριμένες αριθμητικές τιμές και το δεξιό μέρος χρησιμοποιεί γενικά σύμβολα τα οποία δείχνουν την σύνδεση των συμβόλων με τις διαστάσεις και βοηθούν στην παραμετροποίηση διαστάσεων του σχεδίου του επενεργητή.

4.6 Βελτιστοποίηση του σχεδίου του επενεργητή

Το επερχόμενο κεφάλαιο αναλύει και προβαίνει στη βελτιστοποίηση του επιλεγμένου σχεδίου, γνωστού ως Design 3, για τον επενεργητή. Η επιλογή του Design 3 προέκυψε μετά από εκτενή διαδικασία αξιολόγησης και σύγκρισης με άλλες προτάσεις σχεδίου, βασιζόμενη σε αναλύσεις προσομοιώσεων και καταπόνησης. Στο πλαίσιο αυτού του κεφαλαίου, εξετάζονται πιο λεπτομερώς οι διάφορες πτυχές του Design 3, καθώς και οι πιθανότητες βελτίωσής του με στόχο την ενίσχυση της απόδοσης, της αντοχής και της αποτελεσματικότητάς του. Μέσω συστηματικών αναλύσεων, πειραμάτων και εφαρμογής τεχνικών βελτιστοποίησης, διερευνάται η δυνατότητα επίτευξης ενός ισορροπημένου και αποδοτικού σχεδιασμού που θα πληροί τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές του εν λόγω επενεργητή.

4.6.1 Βελτιστοποίηση μέσω τοποθέτησης δακτυλίων

Σύμφωνα με αυτό το επιστημονικό άρθρο [59] έχει αποδειχθεί ότι με την τοποθέτηση δακτυλίων στον επενεργητή, όπως την εικόνα που ακολουθεί, πετυχαίνετε βελτιστοποίηση του επενεργητή ως προς την καταπόνηση και χρήση λιγότερης πίεσης για να λυγίσει 90°.

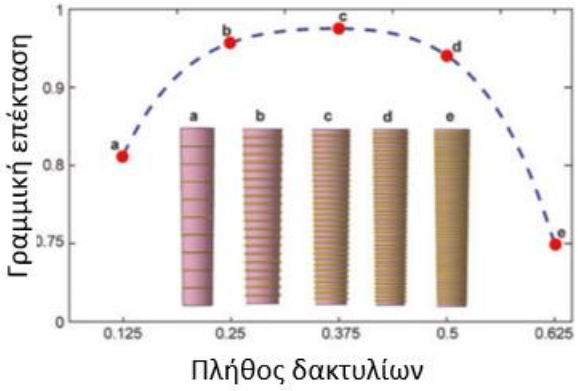


Εικόνα 33: Επενεργητής με δακτυλίους.

Η διάμετρος του δακτυλίου, το πλήθος και η απόσταση των δακτυλίων αλλάζουν την συμπεριφορά του επενεργητή. Για την βελτιστοποιήση της απόδοσης του επενεργητή, διερευνάτε πρώτα η επίδραση του αριθμού των ενισχυτικών δακτυλίων γύρω από το σώμα επενεργητή ελαστομερούς σιλικόνης. Ο αριθμός δακτυλίων στην επιφάνεια του επενεργητή ποικίλλει ως εξής [59]:

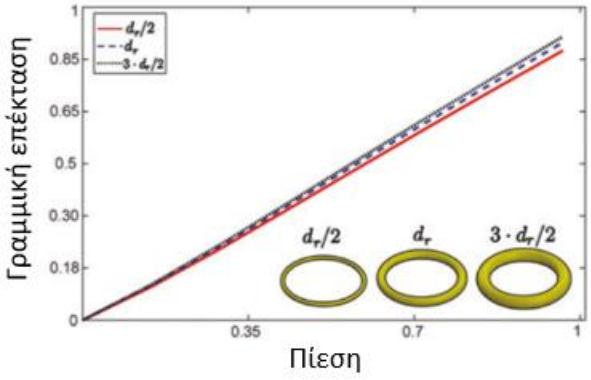
$$n = \frac{l}{d_r} * x \tag{4.1}$$

Εκεί όπου, n είναι ο αριθμός των δακτυλίων, l είναι το μήκος του επενεργητή, dr είναι η διάμετρος της διατομής του δακτυλίου και x είναι ο κανονικοποιημένος λόγος αρίθμησης δακτυλίων. Αυτός είναι ο λόγος του αριθμού των δακτυλίων n προς τον μέγιστο δυνατό αριθμό δακτυλίων, με διάμετρο dr που μπορεί να χωρέσει έναν επενεργητή μήκους l. Για παράδειγμα, ένας επενεργητής όπως στην παρούσα διπλωματική με μήκος l = 160 mm, διάμετρο dr = 2 mm και x = 0.5 οδηγεί σε έναν αριθμό δακτυλίων 80. Από το παρακάτω διάγραμμα, παρατηρείται ότι υπό τις ίδιες συνθήκες πίεσης, η αύξηση του λόγου αριθμού δακτυλίων από 0.125 σε 0.375 οδηγεί σε αύξηση της γραμμικής επέκτασης του επενεργητή. Ωστόσο, για λόγους αριθμού δακτυλίων άνω του 0.375, η επέκταση των επενεργητών εμφανίζει αντίθετο αποτέλεσμα και μειώνεται. Αυτή η μη γραμμική τάση υποδεικνύει ότι σε έναν υψηλό λόγο αριθμού δακτυλίων, ο επενεργητής ενδέχεται να μην μπορεί να επεκταθεί γραμμικά καθόλου, καθώς τα δακτυλίδια καταλαμβάνουν το μεγάλο μέρος της επιφάνειάς του και περιορίζουν την υπερελαστική επέκταση.



Διάγραμμα 13: Γραμμική επέκταση vs αριθμού δακτυλίων. [59]

Σε δεύτερη φάση εξετάζεται το βέλτιστο πάχος των δακτυλίων με το να ποικίλλεται η ακτινική τους διάμετρος από $dr/2$ mm έως $3dr/2$ mm, όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για να συσχετιστεί η επέκταση του επενεργητή ως συνάρτηση της πίεσης για κάθε ποικιλία πάχους του δακτυλίου, δείχνοντας ότι η επίδραση στην επέκταση λόγω του πάχους του δακτυλίου είναι ελάχιστη. Ρυθμίζοντας ένα αυθαίρετο αριθμό δακτυλίων, αξιολογούνται προσομοιώσεις με ποικίλες πάχους (από $dr/2$ έως $3dr/2$). Παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχουν αισθητές αλλαγές στην επέκταση μεταξύ των διαφορετικών παχών, όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί [59].



Διάγραμμα 14: Γραμμική επέκταση vs πίεση. [59]

4.6.2 Υπολογισμός πλήθους και πάχος δακτυλίων

Με βάση τα συμπεράσματα από το προηγούμενο κεφάλαιο, ο λόγος αριθμού δακτυλίων που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του αριθμού των δακτυλίων στην παρούσα μελέτη είναι 0.375 και το dr= 3 mm. Με την επίλυση της (4.1) για l= 320 mm τα αποτελέσματα είναι:

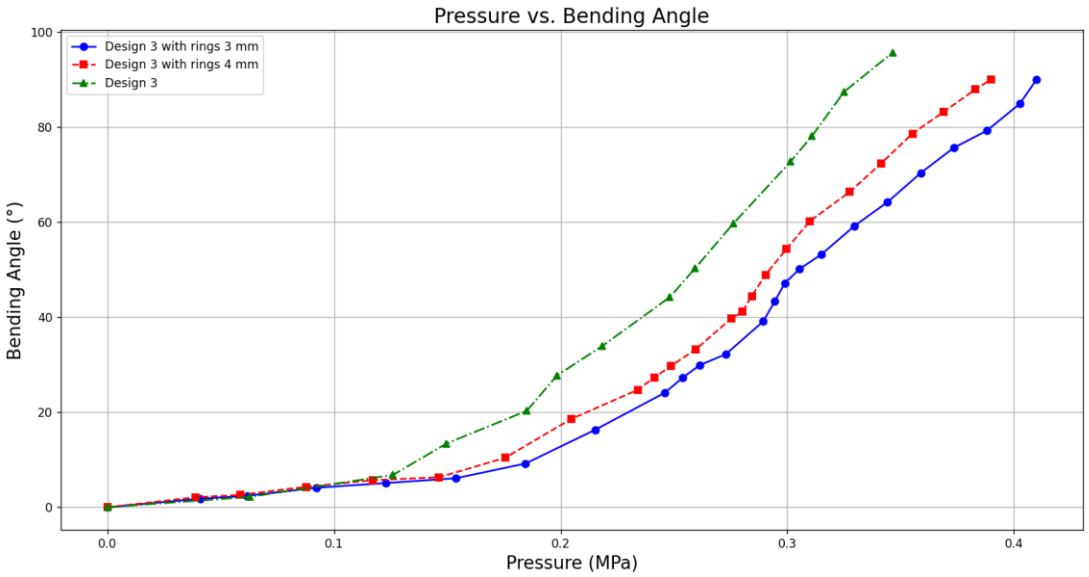
$$\mathrm{n} = \frac{\mathrm{l}}{\mathrm{d_r}} * \mathrm{x} = \frac{320}{3} * 0{,}375 = 40 \qquad (4.2)$$

Άρα το πλήθος των δακτυλίων είναι n=40 και θα τοποθετούνται ανά 9 mm.

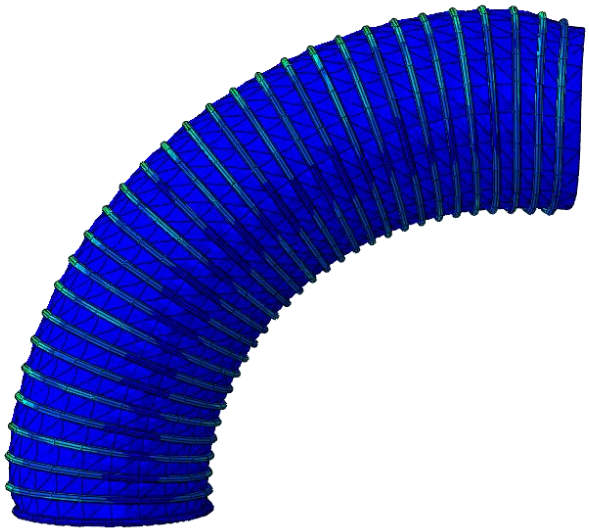
Θα εφαρμοστεί ξανά ο τύπος (1) με διαφορετικό το dr= 4 mm Με την επίλυση της (1) για l= 320 mm τα αποτελέσματα είναι:

$$\mathrm{n} = \frac{\mathrm{l}}{\mathrm{d_r}} * \mathrm{x} = \frac{320}{4} * 0{,}375 = 3 \qquad (4.3)$$

Άρα το πλήθος των δακτυλίων είναι n= 30 και θα τοποθετούνται ανά 12 mm.

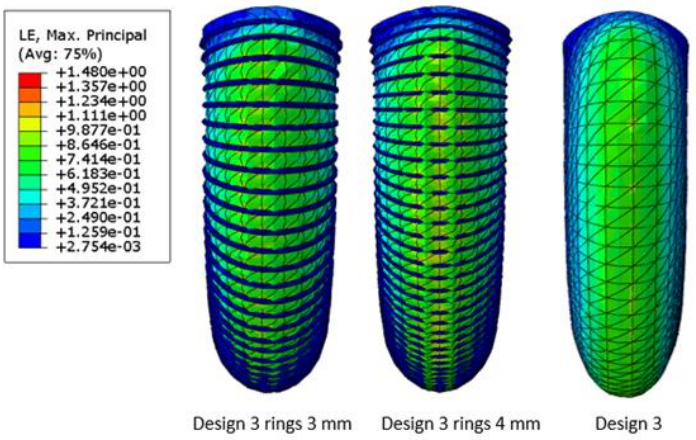


Διάγραμμα 15: Bending angle vs Pressure με δακτύλιος.



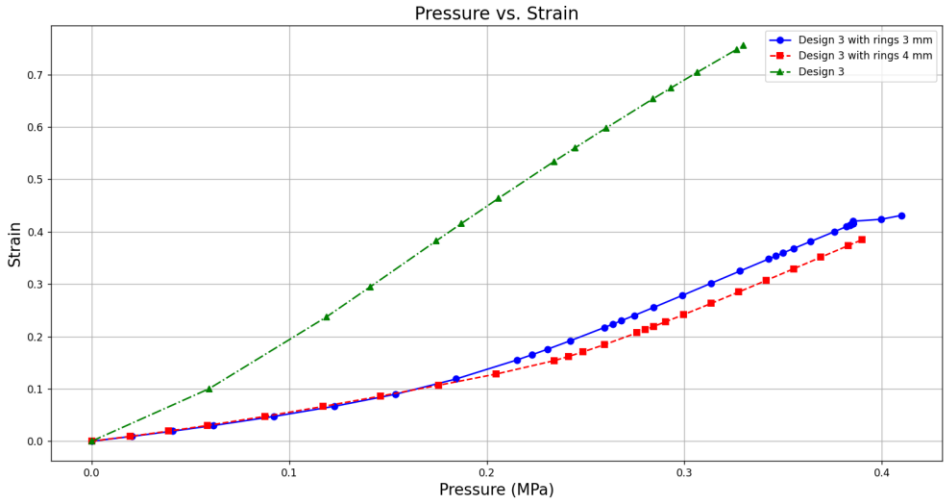
Εικόνα 34: Επενεργητής με δακτυλίους σε κλίση 90 μοιρών.

Θα γίνει σύγκριση των δύο διαφορετικών επενεργητών με δακτυλίους με τον επενεργητή χωρίς δακτυλίους. Με βάση το επιστημονικό άρθρο [59] το αναμενόμενο αποτέλεσμα είναι η μείωση των καταπονήσεων με αντίκτυπο την αύξηση της πίεσης για να λυγίσει ο επενεργητής στις 90 μοίρες.



Εικόνα 35: Καταπονήσεις πιθανών επενεργητών με δακτυλίους.

Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει την κατανομή της μέγιστης κύριας παραμόρφωσης (LE, Max. Principal) για τρεις παραλλαγές του Design 3: χωρίς δακτυλίους, με δακτυλίους 3 mm, και με δακτυλίους 4 mm. Η χρωματική κλίμακα υποδεικνύει τις τιμές της παραμόρφωσης, με το κόκκινο να αντιπροσωπεύει τις υψηλότερες τιμές και το μπλε τις χαμηλότερες. Το Design 3 με δακτυλίους 3 mm και 4 mm παρουσιάζει μια πιο ομοιόμορφη κατανομή παραμόρφωσης, ενώ το Design 3 χωρίς δακτυλίους εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης σε συγκεκριμένες περιοχές.



Διάγραμμα 16: Strain vs Pressure με δακτύλιος,

Από το διάγραμμα Pressure vs. Strain που δείχνει τη σχέση μεταξύ της πίεσης (Pressure) και της παραμόρφωσης (Strain) για τις τρεις παραλλαγές του Design 3. Οι καμπύλες δείχνουν ότι το Design 3 χωρίς δακτυλίους (πράσινη γραμμή) παρουσιάζει τη μεγαλύτερη παραμόρφωση, με μέγιστη καταπόνηση 0,74, για κάθε δεδομένη πίεση, καθιστώντας το λιγότερο ανθεκτικό. Το Design 3 με δακτυλίους 4 mm (κόκκινη γραμμή) και το Design 3 με δακτυλίους 3 mm (μπλε γραμμή) παρουσιάζουν μικρότερες παραμορφώσεις, με το Design 3 με δακτυλίους 4 mm, με μέγιστη καταπόνηση 0,38, να είναι ελαφρώς πιο ανθεκτικό από το Design 3 με δακτυλίους 3 mm, με μέγιστη καταπόνηση 0,44. Άρα για να ενισχυθεί η κατασκευή θα επιλεχθεί ο πρώτος συνδυασμός με 30 δακτυλίους.

5 Παραμετροποίηση του “soft“ επενεργητή

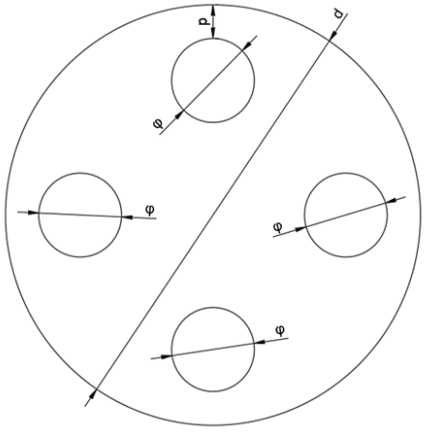
Η προηγούμενη μελέτη έχει προσδιορίσει ορισμένες αρχικές διαστάσεις που είναι σημαντικές για την παραμετροποίηση του "soft" επενεργητή. Ωστόσο, για να μειωθεί η πολυπλοκότητα της μελέτης και να επικεντρωθούμε στις πλέον σημαντικές παραμέτρους, πρόκειται να πραγματοποιηθεί μια πιο συνοπτική μελέτη με τη μείωση των προηγούμενων διαστάσεων κατά το ήμισυ.

Αυτή η προσέγγιση θα επιτρέψει στην εστίαση στις πλέον κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν τη λειτουργία του επενεργητή και να αγνοηθούν οι λιγότερο σημαντικές. Με τη μείωση των διαστάσεων κατά το ήμισυ, θα επιτευχθεί μια πιο συμπαγής και εστιασμένη ανάλυση, επιτρέποντας να κατανοηθούν και να εφαρμοστούν αποτελεσματικά τις παραμέτρους που είναι πιο σημαντικές για την απόδοση του "soft" επενεργητή.

Η μείωση των διαστάσεων κατά το ήμισυ και του επενεργητή όπου, θα οδηγήσει επίσης σε σημαντική εξοικονόμηση χρόνου, χώρου και υλικού στην ανάλυση και υλοποίηση της μελέτης. Με λιγότερες παραμέτρους προς εξέταση, η ανάλυση και ο υπολογισμός των πιθανών σεναρίων γίνονται πιο γρήγορα και αποτελεσματικά. Επιπλέον, η μείωση των διαστάσεων ενδέχεται να επιτρέψει τη χρήση πιο αποδοτικών αλγορίθμων και τεχνικών ανάλυσης, που απαιτούν λιγότερη υπολογιστική ισχύ και μνήμη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένο χρόνο εκτέλεσης και σε μικρότερη ανάγκη για υλικούς πόρους, καθιστώντας τη μελέτη πιο αποτελεσματική και οικονομική. Συνολικά, η μείωση των προηγούμενων διαστάσεων κατά το ήμισυ θα συμβάλει στη βελτίωση της απόδοσης και της αποτελεσματικότητας της μελέτης, εξοικονομώντας ταυτόχρονα σημαντικούς πόρους.

5.1 Σχεδίαση του επενεργητή με μείωση των αρχικών διαστάσεων κατά το ήμισυ

Για να ελεγχθεί περαιτέρω ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζονται οι συνολικές παράμετροι του επενεργητή σε περίπτωση αλλαγής της κλίμακας μεγέθους, πραγματοποιείται μια διαδικασία μείωσης των διαστάσεων κατά το ήμισυ. Αυτό το βήμα στοχεύει στην απλοποίηση της ανάλυσης και της αξιολόγησης του επενεργητή. Οι νέες διαστάσεις προσδιορίζονται ως εξής:



Εικόνα 36: Διαστάσεις επενεργητή.

Με τη μείωση των διαστάσεων κατά το ήμισυ, είναι εφικτό να εξεταστεί πώς η αλλαγή κλίμακας επηρεάζει τις επιδόσεις και τα χαρακτηριστικά του επενεργητή. Συγκεκριμένα, η ανάλυση περιλαμβάνει τη διερεύνηση της δομικής ακεραιότητας, της απόδοσης και της αποδοτικότητας του επενεργητή υπό τις νέες συνθήκες λειτουργίας. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτή η διαδικασία αλλαγής κλίμακας μπορεί να αποκαλύψει πτυχές της συμπεριφοράς του επενεργητή που δεν ήταν προφανείς στις αρχικές διαστάσεις. Η ενδελεχής ανάλυση των νέων παραμέτρων θα προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση και την προσαρμογή του σχεδιασμού του επενεργητή για διάφορες εφαρμογές.

	x (mm)	d(mm)	p(mm)	φ(mm)	f(mm)
Διαστάσεις επενεργητή	160	50	4,5	10	10

Πίνακας 20: Διαστάσεις επενεργητή κατά το ήμισυ

Αυτές οι νέες τιμές αποτελούν τη μείωση των αρχικών διαστάσεων κατά το ήμισυ, διατηρώντας ωστόσο την ουσιαστική γεωμετρία και λειτουργία του επενεργητή. Αυτό επιτυγχάνεται εστιάζοντας στις κύριες πτυχές και παραμέτρους που επηρεάζουν τον επενεργητή, ενώ απορρίπτονται οι λιγότερο σημαντικές παράμετροι.

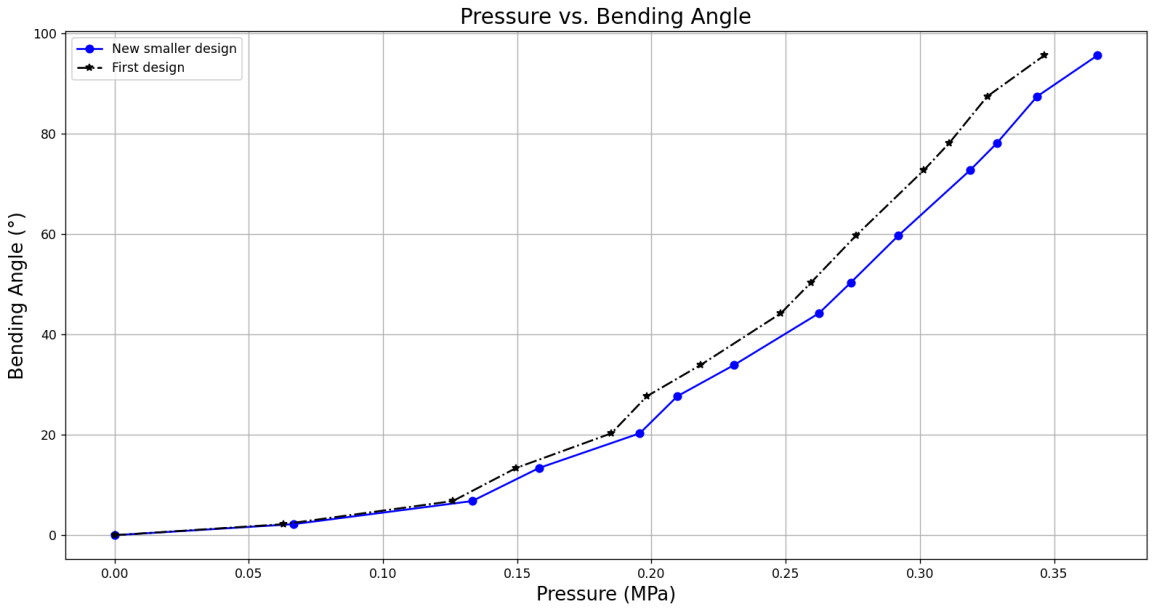
Με τη μείωση των διαστάσεων στο ήμισυ, πετυχαίνετε μια πιο αποδοτική και απλή ανάλυση του επενεργητή, ενώ εξακολουθεί να διατηρεί την ουσιαστική του λειτουργία και γεωμετρία. Αυτό επιτρέπει την εστιάσει στα κύρια χαρακτηριστικά και στην απόδοση του επενεργητή, εξοικονομώντας ταυτόχρονα πόρους και χρόνο.

5.2 Προσομοίωση του επενεργητή με τις νέες διαστάσεις

Η προσομοίωση του επενεργητή με τις νέες διαστάσεις (50 mm για τη διάσταση d, 4.5 mm για το πάχος p, 10 mm για το πλάτος φ, και 160 mm για το μήκος x) απαιτεί τη χρήση κατάλληλου λογισμικού προσομοίωσης στην παρούσα διπλωματική το Abaqus Finite Element Analysis.

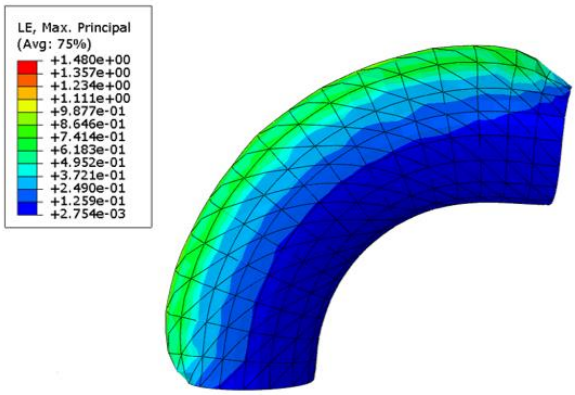
Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, θα παρατηρηθούν οι αλλαγές στη συμπεριφορά του επενεργητή, την απόδοσή του και τυχόν επιπτώσεις από τις νέες διαστάσεις. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα δώσουν μια καλύτερη εικόνα για το πώς ο επενεργητής ανταποκρίνεται στις νέες διαστάσεις και εάν απαιτούνται περαιτέρω προσαρμογές ή βελτιώσεις.

Αρχικά, θα υπολογιστεί το πόσο πίεση χρειάζεται ώστε, να λυγίσει και να δημιουργήσει 90° γωνία ο επενεργητής με το έδαφος και το πόσο κάμπτεται αναλόγως την πίεση (bending angle).



Διάγραμμα 17: Bending angle vs Pressure για το νέο παραμετροποιημένο σχέδιο.

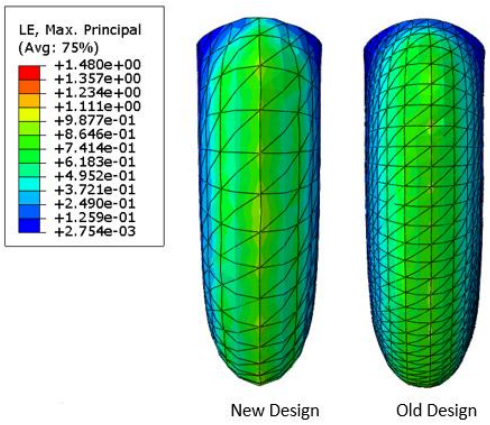
Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι για να πετύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα ο επενεργητής χρειάζεται να το ασκηθεί πίεση 0,35 MPa. Σε σύγκριση με τις αρχικές διαστάσεις παρατηρείται μία μικρή αύξηση της πίεσης 0,02 MPa το οποίο είναι μικρό κόστος σε σχέση με την μείωση χρήσης υλικού για τις πειραματικές διαδικασίες.



Εικόνα 37: Επενεργητής σε κλίση 90 μοίρες.

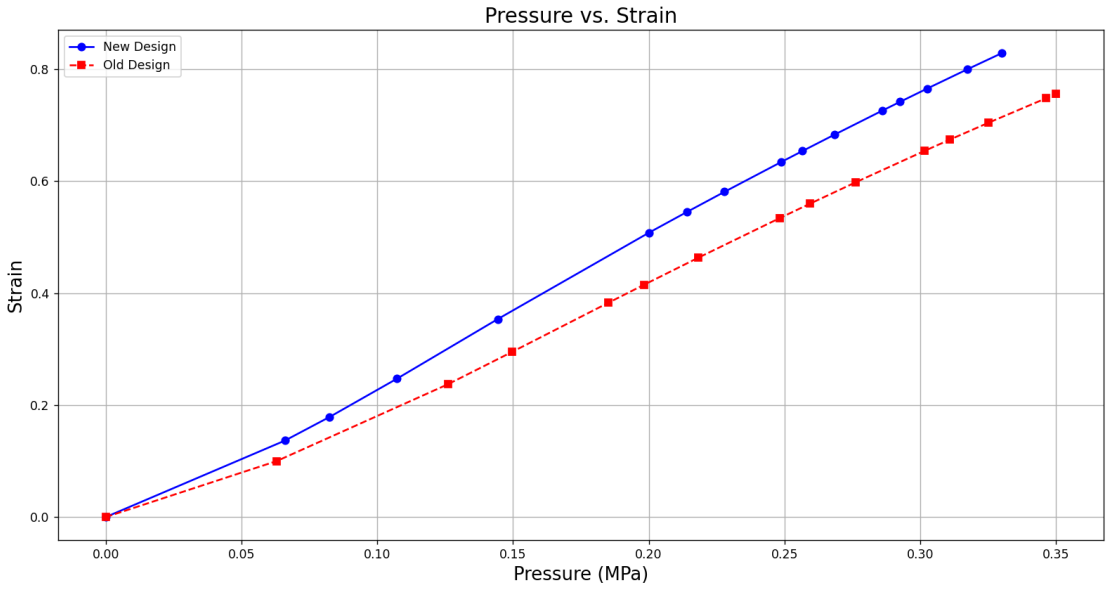
Κατά τη προσομοίωση, παρατηρήθηκε ότι ο επενεργητής με τις νέες διαστάσεις υφίσταται λιγότερη καταπόνηση. Αυτό αποδεικνύεται από το διάγραμμα 18 που ακολουθεί, το οποίο παρουσιάζει την καταπόνηση των επενεργητών. Το διάγραμμα δείχνει μια σαφή μείωση στην καταπόνηση με τις νέες διαστάσεις, επιβεβαιώνοντας την επίδραση της μείωσης των διαστάσεων στην απόδοση και την αντοχή του επενεργητή. Σε σχέση με την καταπόνηση που δέχεται ο επενεργητής, παρατηρήθηκε το αναμενόμενο αποτέλεσμα, ότι θα δέχεται λιγότερη καταπόνηση σε σχέση με τις αρχικές διαστάσεις επειδή τώρα μειώθηκαν στο μισό. Οι παρατηρήσεις από την προσομοίωση δείχνουν ότι η μείωση των διαστάσεων στο μισό οδηγεί σε μειωμένη καταπόνηση του επενεργητή σε σχέση με τις αρχικές διαστάσεις. Αυτό είναι συνέπεια της μειωμένης ποσότητας

υλικού που χρησιμοποιείται, καθώς και της μειωμένης εσωτερικής τάσης που αντιμετωπίζει ο επενεργητής



Εικόνα 38: Καταπόνηση επενεργητή με τις αρχικές διαστάσεις και παραμετροποιημένος.

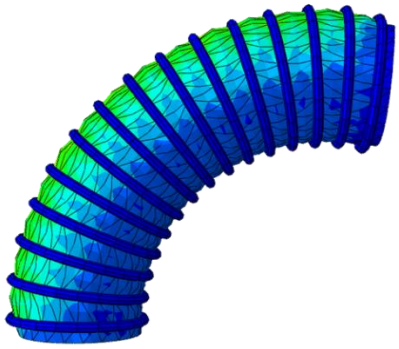
Το διάγραμμα 18 Pressure vs Strain συγκρίνει τον νέο σχεδιασμό του επενεργητή με τον παλαιό. Η καμπύλη του νέου σχεδιασμού (μπλε γραμμή) δείχνει ότι για την ίδια πίεση επιτυγχάνεται μεγαλύτερη παραμόρφωση σε σχέση με τον παλαιό σχεδιασμό (κόκκινη γραμμή). Συγκεκριμένα, για πίεση 0.35 MPa, η παραμόρφωση στον νέο σχεδιασμό φτάνει το 0.83, ενώ στον παλαιό σχεδιασμό είναι 0.74. Αυτή η διαφορά υποδηλώνει ότι ο νέος επενεργητής είναι πιο ευέλικτος και απορροφά καλύτερα την πίεση, αποδεικνύοντας βελτιωμένη απόδοση. Επιπλέον, η γραμμική σχέση μεταξύ πίεσης και παραμόρφωσης στον νέο σχεδιασμό δείχνει σταθερή και προβλέψιμη συμπεριφορά, ενισχύοντας την αξιοπιστία του νέου σχεδιασμού σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.



Διάγραμμα 18: Strain vs Pressure επενεργητή με τις αρχικές διαστάσεις και παραμετροποιημένος.

5.3 Βελτιστοποίηση ανθεκτικότητας του επενεργητή με τις νέες διαστάσεις

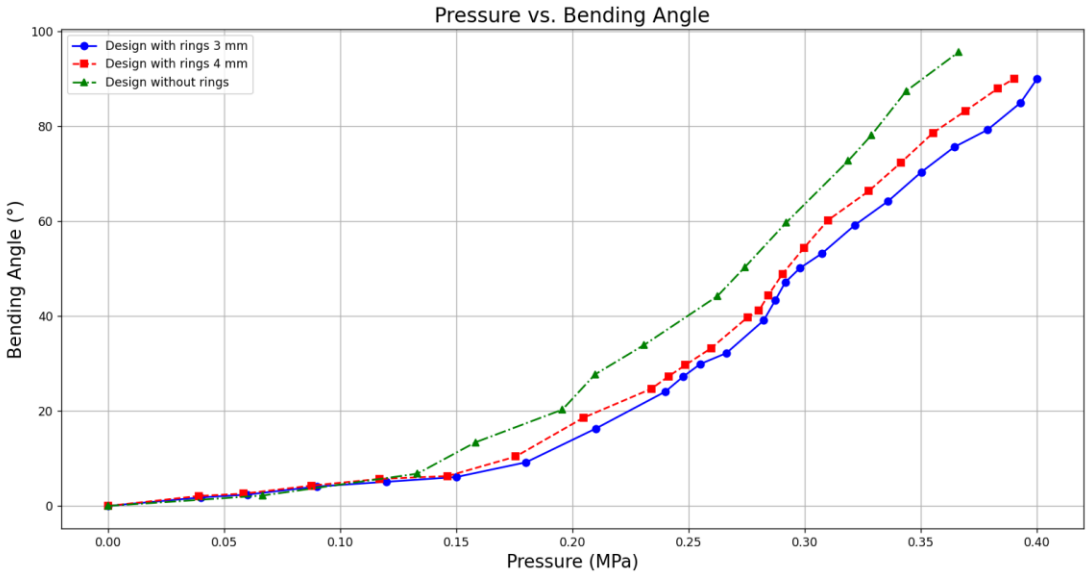
Όπως πραγματοποιήθηκε βελτίωσή του σχεδιασμού και για τις αρχικές διαστάσεις του επενεργητή, το ίδιο ακριβώς θα συμβεί και για τον σχεδιασμό με τις νέες διαστάσεις με τον ίδιο τρόπο. Θα πραγματοποιηθεί μία μελέτη για την τοποθέτηση δακτυλίων πάχους 3 mm. Με βάση τα προηγούμενα κεφάλαια θα το τοποθετηθούν 20 δακτύλιοι.



Εικόνα 39: Επενεργητής με διαστάσεις κατά το ήμισυ σε κλίση 90 μοίρες με δακτυλίους.

Θα πραγματοποιηθεί μία ακόμη μελέτη τοποθέτηση δακτυλίων πάχους 4 mm. Με βάση τα προηγούμενα κεφάλαια θα το τοποθετηθούν 15 δακτύλιοι. Με βάση τα προηγούμενα κεφάλαια η τοποθέτηση δακτυλίων πάχους 3 mm θα είναι πιο αποτελεσματική. Η μελέτη για τοποθέτηση δακτυλίων πάχους μικρότερου των 3 mm δεν θεωρείται αναγκαία για τι θα αυξηθεί το πλήθος των δακτυλίων και θα είναι πιο εύκολο να υποστούν θραύση.

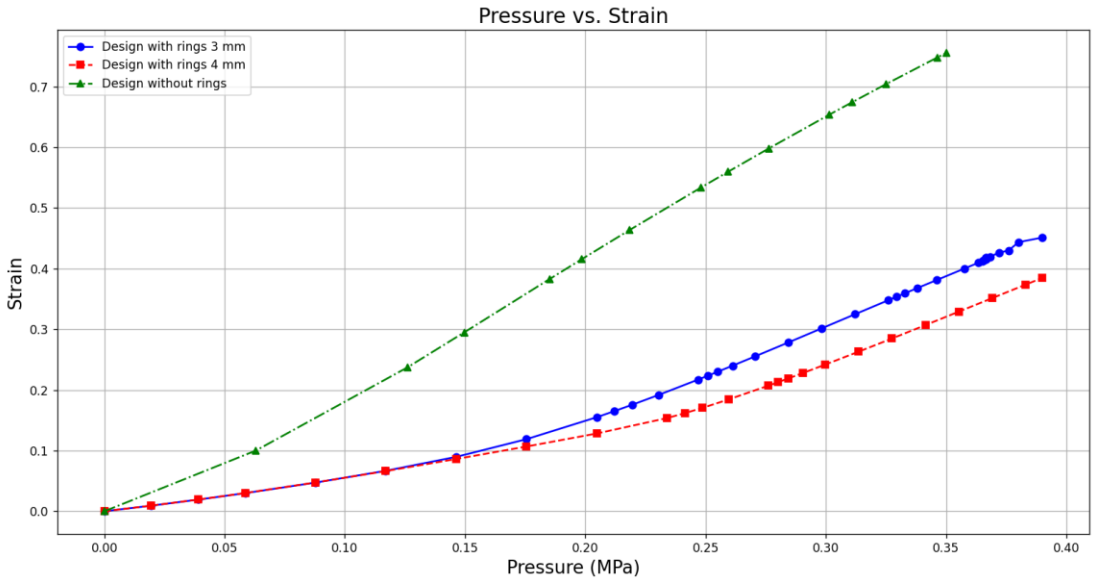
Θα γίνει σύγκριση των δύο διαφορετικών επενεργητών με δακτυλίους με τον επενεργητή χωρίς δακτυλίους. Με βάση τα προηγούμενα κεφάλαια το αναμενόμενο αποτέλεσμα είναι η μείωση των καταπονήσεων με αντίκτυπο την αύξηση της πίεσης για να λυγίσει ο επενεργητής στις 90 μοίρες.



Διάγραμμα 19: Bending angle vs Pressure με παραμετροποιημένο επενεργητής με δακτυλίους.

Η παρατήρηση αυτή αναδεικνύει τη σημασία της σύγκρισης της καταπόνησης του επενεργητή σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, ιδίως όταν αλλάζουν οι παράγοντες όπως η εφαρμοζόμενη πίεση. Αρχικά, παρατηρήθηκε ότι για να επιτευχθεί η απαιτούμενη κλίση των 90 μοιρών με τη χρήση δακτυλίων, αυξάνεται η πίεση. Συγκεκριμένα, σε μία περίπτωση παρατηρήθηκε αύξηση της πίεσης κατά 0,04 MPa, ενώ σε μια άλλη περίπτωση παρατηρήθηκε αύξηση κατά 0,05 MPa.

Ωστόσο, η αύξηση της πίεσης μπορεί να επηρεάσει επίσης την καταπόνηση του επενεργητή. Επομένως, απαιτείται σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών περιπτώσεων ως προς την καταπόνηση του επενεργητή. Αυτή η σύγκριση θα μας βοηθήσει να κατανοηθεί η επίδραση της πίεσης στην αντοχή και την απόδοση του επενεργητή και να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητά του σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

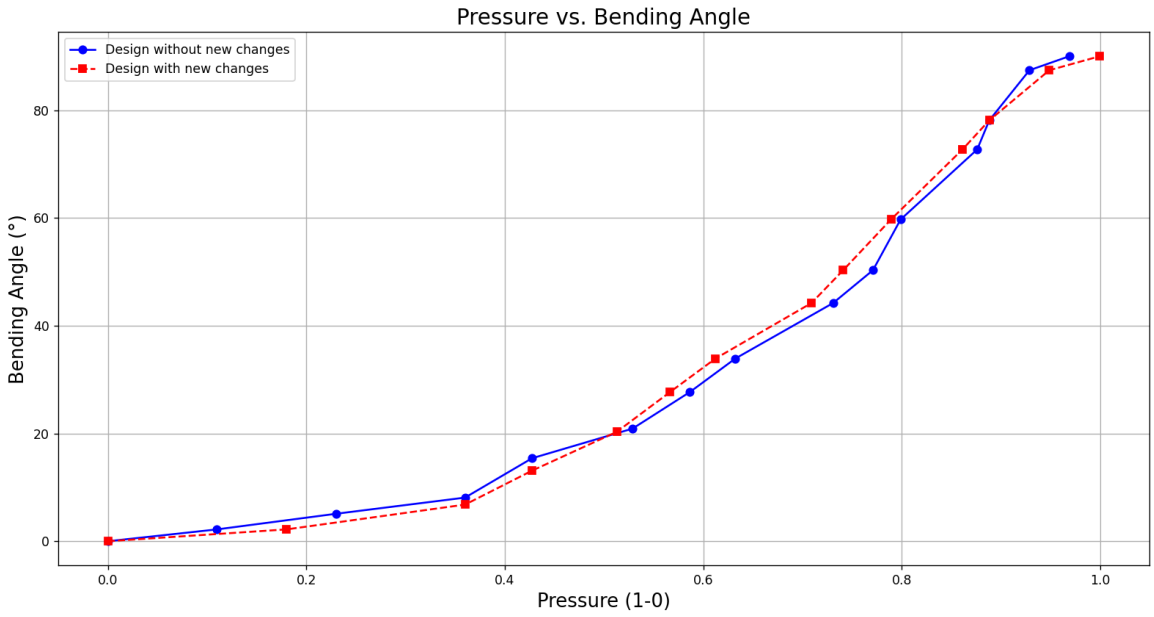


Διάγραμμα 20: Strain vs Pressure με παραμετροποιημένο επενεργητής με δακτυλίους.

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι την λιγότερη καταπόνηση δέχεται το Design με 20 δακτυλίους με πάχος 3 mm, σε σχέση με το Design με 15 δακτυλίους με πάχος 4 mm. Άρα για να ενισχυθεί η κατασκευή θα επιλεχθεί ο πρώτος συνδυασμός με 20 δακτυλίους με πάχος 3 mm.

5.4 Σχέδιο επενεργητή προσαρμοσμένο στις ανάγκες προσομοίωσης σε πραγματικές συνθήκες

Παρατηρήθηκε, ότι πρέπει ο επενεργητής για να ανταποκριθεί σωστά στις πραγματικές συνθήκες προσομοίωσης χρειάζεται, να αυξηθεί κατά 2 χιλιοστά η διάμετρος του επενεργητή για να κρατάει σταθερούς τους δακτυλίους, επιπρόσθετα αναπτύχθηκε η ανάγκη, να δημιουργηθεί μία βάση που θα κρατάει τον επενεργητή σταθερό. Έγινε μία ακόμη προσομοίωση με βάση αυτές τις αλλαγές και παρατηρήθηκαν μικρές αλλαγές, σχεδόν αμελητέες δηλαδή, μία μικρή αύξηση της πίεσης κατά 0,1 bar.



Διάγραμμα 21: Bending angle vs Pressure σχεδίου χωρίς τις απαιτούμενες αλλαγές σε σύγκριση με τις απαιτούμενες αλλαγές.

Επομένως, το προσαρμοσμένο, στις πραγματικές συνθήκες προσομοίωσης σχέδιο, μετά την μείωση των διαστάσεων κατά το ήμισυ, που υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 4, ακολουθεί στην επόμενη εικόνα. Όπου η βάση έχει ύψος 20 mm και διάμετρο 64 mm. Στην εικόνα που ακολουθεί το κάτω μέρος του επενεργητή είναι η βάση.



Εικόνα 40: Επενεργητής με βάση και δακτυλίδια.

5.5 Σχεδίαση καλουπιού και απαραιτήτων εξαρτημάτων του επενεργητή

Το κεφάλαιο αυτό της διπλωματικής επικεντρώνεται στη διαδικασία ψηφιακής σχεδίασης καλουπιού και των και απαραιτήτων εξαρτημάτων του “soft“ του επενεργητή, η κατασκευή του βασίζεται στη χρήση σιλικόνης ως κύριου υλικού. Η σιλικόνη παρέχει εξαιρετική ελαστικότητα και ανθεκτικότητα, καθιστώντας την ιδανική για τη δημιουργία ευέλικτων ρομποτικών συστημάτων. Επιπλέον, τα καλούπια που απαιτούνται για την κατασκευή των επενεργητών θα είναι κατασκευασμένα με τη χρήση τεχνολογίας εκτύπωσης 3D. Αυτή η συνδυαστική προσέγγιση συνδυάζει την αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα της σιλικόνης με την ακρίβεια και την ευελιξία που προσφέρουν οι τεχνολογίες εκτύπωσης 3D, εξασφαλίζοντας την αποτελεσματική και αξιόπιστη κατασκευή του "soft" επενεργητή.

5.5.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing)

Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι μια καινοτόμος ιδέα που αποσκοπεί στην παραγωγή πραγματικών αντικειμένων και εμφανίστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής που δημιουργεί αντικείμενα προσθέτοντας διαδοχικά στρώματα υλικού. Η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να χρησιμοποιήσει πολλούς τύπους υλικών, κυρίως κεραμικά και πολυμερή. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές είναι γενικά πιο γρήγοροι, φθηνότεροι και πιο εύχρηστοι από άλλες τεχνολογίες και εξοπλισμό κατασκευής πρόσθετων. Ως εκ τούτου, πολλοί άνθρωποι πιστεύουν ότι η παγκόσμια παραγωγή εμπορευμάτων θα αναπτυχθεί προς αυτή την κατεύθυνση τα επόμενα χρόνια, αντικαθιστώντας σταδιακά τις παραδοσιακές τεχνολογίες. Πολλοί πιστεύουν ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση θα αποτελέσει μια «νέα βιομηχανική επανάσταση», διότι θα επιφέρει την αποκέντρωση της παραγωγικής διαδικασίας και θα ανοίξει το δρόμο για τοπική, μικρής κλίμακας παραγωγή που προσαρμόζεται στις τρέχουσες ανάγκες. Η τεχνολογία, η οποία εμφανίστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980, βασίζεται στη δημιουργία ψηφιακών σχεδίων κάθε είδους αντικειμένων, τα οποία εναποτίθενται σε επάλληλα στρώματα με τη βοήθεια μιας συσκευής συνδεδεμένης με υπολογιστή και μετατρέπονται σε πραγματικά αντικείμενα. Πρόκειται ουσιαστικά για μια μέθοδο ταχείας προτυποποίησης. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι και τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης, αλλά το κοινό χαρακτηριστικό αυτών των τεχνικών είναι η χρήση προγραμμάτων CAD για τη δημιουργία ενός ψηφιακού σχεδίου ενός αντικειμένου. Στη συνέχεια, το αντικείμενο εκτυπώνεται χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο υλικό, για παράδειγμα PLA.



Εικόνα 41: 3d printer.[60]

Παράγεται με τη διαστρωμάτωση λεπτών στρωμάτων υλικού σύμφωνα με το ψηφιακό σχέδιο από την κατάλληλη κεφαλή. Ο φυσικός γενικός όρος στην τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιείται είναι «additive manufacturing», γεγονός που υποδηλώνει εύστοχα τη διαφορά από τις σημερινές τεχνικές που βασίζονται στην αφαίρεση υλικού από αδιαμόρφωτα τεμάχια με τη χρήση των λεγόμενων μηχανών CNC, δηλαδή subtractive manufacturing.[60]

5.5.1.1Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η ταχεία προτυποποίηση κατασκευών επιτρέπει την έγκαιρη διόρθωση σφαλμάτων και τη βελτιστοποίηση του προϊόντος πριν από την ανάπτυξη των ακριβών καλουπιών που απαιτούνται για τη μαζική παραγωγή. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο αποτελεί την κύρια εφαρμογή των τρισδιάστατων εκτυπωτών. Ωστόσο, ο αριθμός των τρισδιάστατων εκτυπωτών που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα με τις προβλέψεις, μέχρι το 2025 οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές θα αντιπροσωπεύουν το 50% του συνόλου των κατασκευαζόμενων αντικειμένων.

Τα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις συμβατικές μηχανές CNC είναι επίσης σαφή: Το υλικό μπορεί να εξοικονομηθεί καθώς το αντικείμενο παράγεται με την προσθήκη υλικού αντί για την αφαίρεσή του. Κατά την παραγωγή ορισμένων πολύπλοκων εξαρτημάτων. Κατά την παραγωγή τεμαχίων με πολύπλοκη γεωμετρία και υψηλή αντοχή, οι τρέχουσες μέθοδοι περιλαμβάνουν την κατεργασία συμπαγών τεμαχίων, πράγμα που σημαίνει ότι το 90% του υλικού αφαιρείται και απορρίπτεται σε μορφή που δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί στην παραγωγή του τεμαχίου.

Από την άλλη πλευρά, η σημερινή τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης υπολείπεται των παραδοσιακών τεχνολογιών, όσον αφορά την ποικιλία των υλικών παραγωγής με ομοιόμορφη και ακριβή πυκνότητα και ακρίβεια διαστάσεων (σε πολλές περιπτώσεις η πυκνότητα και η ακρίβεια πρέπει να είναι 100% επαρκείς. Η πυκνότητα και η ακρίβεια πρέπει να είναι 100% επαρκείς για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος). Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα είναι η μη γρήγορη μαζική παραγωγή. Ενώ η διαμόρφωση και η παραγωγή με θερμή διαμόρφωση και σφράγιση διαρκεί λιγότερο από ένα λεπτό, χρειάζονται αρκετές ώρες για να παραχθεί το ίδιο αντικείμενο με έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή. Τα μεγέθη των αντικειμένων που μπορούν να

παραχθούν με τους υπάρχοντες τρισδιάστατους εκτυπωτές είναι περιορισμένα και οι μηχανές που μπορούν να παράγουν μεγαλύτερα αντικείμενα είναι πολύ ακριβές. Επιπλέον, οι χρόνοι παραγωγής είναι σημαντικά μεγαλύτεροι για τα μεγαλύτερα αντικείμενα και ορισμένα αντικείμενα έχουν διαστάσεις που υπερβαίνουν τη χωρητικότητα των υφιστάμενων τρισδιάστατων εκτυπωτών.

5.5.2 Σχεδιασμός καλουπιού του επενεργητή

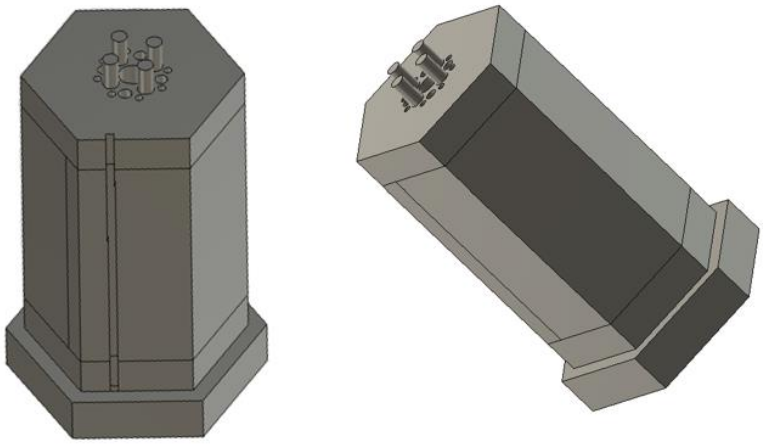
Με βάση το προηγούμενο κεφάλαιο, ο επενεργητής θα έχει τις εξής διαστάσεις:

	x (mm)	d(mm)	p(mm)	φ(mm)	f(mm)
Design	180	50	4,5	10	10

Πίνακας 21: Διαστάσεις του επενεργητή.

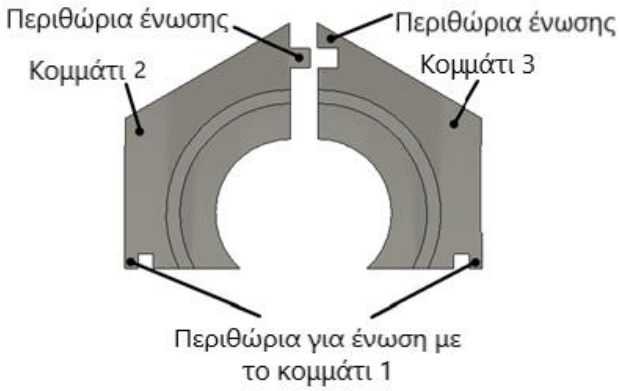
Και θα ενισχυθεί με την ισομετρική τοποθέτηση 20 δακτυλίων πάχους 3 mm στην εξωτερική πλευρά του επενεργητή.

Αρχικά, παρατηρήθηκε ότι πρέπει να αυξηθεί κατά 2 χιλιοστά η διάμετρος του επενεργητή ώστε οι δακτύλιοι να παραμένουν στην θέση τους και να μην μετακινούνται επιπρόσθετα, να δημιουργηθεί μία βάση που θα κρατάει τον επενεργητή σταθερό. Έγινε μία ακόμη προσομοίωση με βάση αυτές τις αλλαγές και παρατηρήθηκαν μικρές αλλαγές, σχεδόν αμελητέες μία μικρή αύξηση της πίεσης κατά 0,1 bar. Ο σχεδιασμός καλουπιού θα αποτελείται από εννέα διαφορετικά κομμάτια τα οποία όταν ενωθούν μεταξύ τους και γίνει η χύτευση της σιλικόνης, θα δημιουργήσουν τον επενεργητή. Αναλυτικά ο κατάλογος και η ποσότητα των Parts στο Παράρτημα 7.



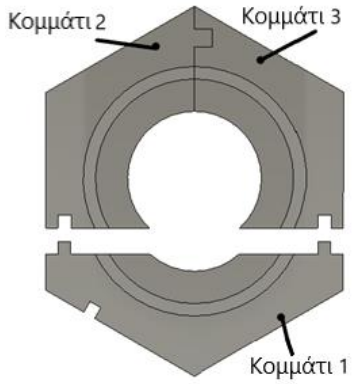
Εικόνα 42: Σχεδιασμός καλουπιού.

Σε όλα τα επιμέρους κομμάτια, εκτός από το κομμάτι 6, υπάρχουν περιθώρια (lips) τα οποία εμποδίζουν τη σιλικόνη να βγει από το καλούπι. Τα περιθώρια είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε το ένα κομμάτι να κουμπώνει με το άλλο.



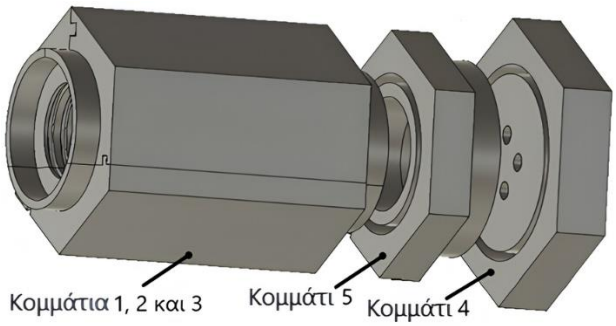
Εικόνα 43: Περιθώρια από τα κομμάτι 2 και κομμάτι 3.

Αρχικά, θα ενωθούν τα κομμάτι 1, κομμάτι 2 και κομμάτι 3 με τη βοήθεια των περιθωρίων.



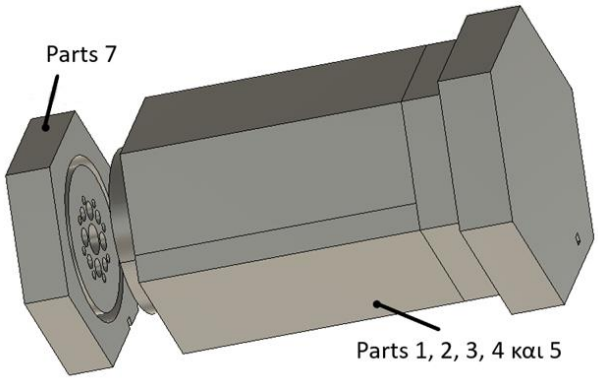
Εικόνα 44: Κομμάτι 1, κομμάτι 2 και κομμάτι 3.

Στο επόμενο στάδιο της διαδικασίας, τα ήδη ενωμένα κομμάτι 1, κομμάτι 2 και κομμάτι 3 θα συνδεθούν με το κομμάτι 5 και στη συνέχεια με το κομμάτι 4, χρησιμοποιώντας τα περιθώρια ως καθοδηγητικό σημείο. Αυτό θα διασφαλίσει τη σωστή ευθυγράμμιση και σύνδεση των τμημάτων μεταξύ τους, ενισχύοντας τη σταθερότητα και την ακρίβεια του συνολικού δομικού σχήματος.



Εικόνα 45: Κομμάτια 1, 2, 3, 4 και 5.

Τα ενωμένα μέρη θα συνδεθούν με το κομμάτι 7 με τη χρήση ενός οδηγού, ο οποίος θα προσφέρει κατευθυντήρια γραμμή με βάση τα περιθώρια.



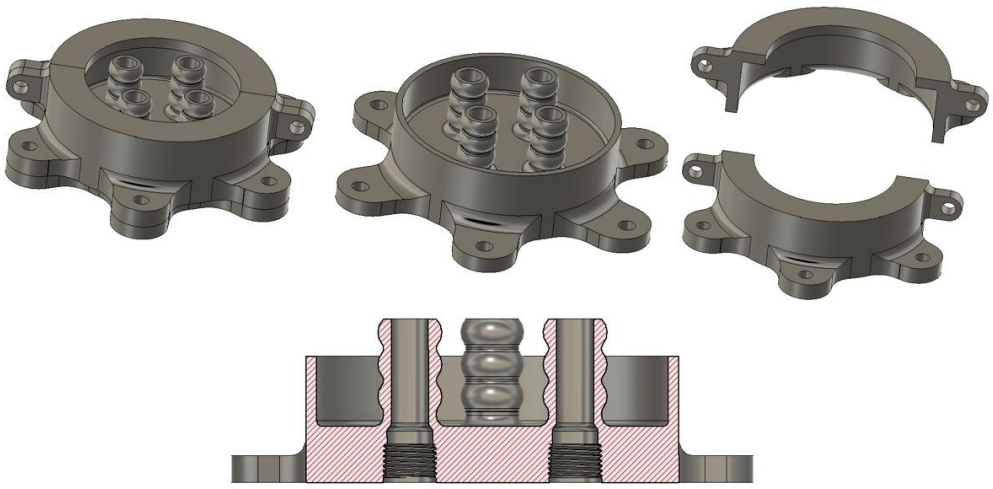
Εικόνα 46: Κομμάτια 1, 2, 3, 4, 5 και 7.

Κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, τα τέσσερα τμήματα κομμάτι 6 θα τοποθετηθούν στις ειδικές εγκοπές που προσφέρει το κομμάτι 7. Το κομμάτι 7 διαθέτει αυτές τις τρύπες ώστε να είναι οδηγός για τα κομμάτι 6 και οι υπόλοιπες είναι για να μπαίνει το υλικό μέσα στο καλούπι, που όταν γίνεται η χύτευση πέφτει έξω από την κεντρική τρύπα και να μην πάει χαμένο. Αυτή η διαδικασία θα εξασφαλίσει τη σταθερή σύνδεση και ενοποίηση των τμημάτων, δημιουργώντας ένα ολοκληρωμένο δομικό σχήμα. Έτσι, με τα τέσσερα τμήματα κομμάτι 6 συνδεδεμένα με το κομμάτι 7, η διαδικασία ολοκληρώνεται. Αυτή η συνδεσμολογία ενισχύει την ακεραιότητα του συνόλου, προσφέροντας μια σταθερή και αξιόπιστη δομή. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μια σταθερή και ανθεκτική κατασκευή που πληροί τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Αποτέλεσμα της ένωσης όλων των μερών είναι ο τελικός σχεδιασμός, ο οποίος περιλαμβάνει ένα συνολικό και ολοκληρωμένο σχεδιασμό. Η συνεκτικότητα και η σταθερότητα του σχεδιασμού προκύπτουν από τη σωστή ευθυγράμμιση και σύνδεση όλων των τμημάτων. Ο τελικός σχεδιασμός προσφέρει όχι μόνο μια ενιαία εμφάνιση, αλλά και την απαιτούμενη λειτουργικότητα και ανθεκτικότητα για την προβλεπόμενη χρήση. Μέσω της ολοκλήρωσης και της ενοποίησης όλων των στοιχείων, ο τελικός σχεδιασμός αντιπροσωπεύει την ολοκλήρωση του σχεδιαστικού διαδικαστικού και την επίτευξη του τελικού επιθυμητού αποτελέσματος.

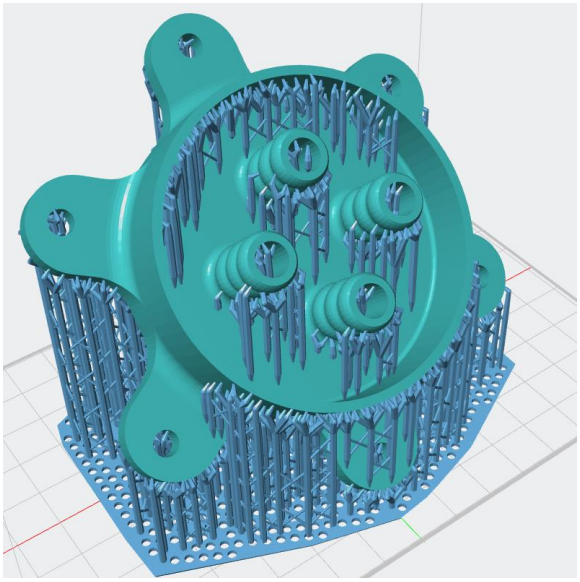
5.5.3 Σχεδιασμός βάσης του επενεργητή

Άρα θα σχεδιαστεί μία κατασκευή που θα «αγκαλιάζει» την βάση του επενεργητή, θα την σφίγγει και θα την κρατάει σταθερή όταν γίνεται η τροφοδότηση του πεπιεσμένου αέρα για να λυγίσει ο επενεργητής. Στην βάση υπάρχει σπείρωμα ώστε να βιδώσουν οι υποδοχές για τα σωληνάκια που έχουν σπείρωμα NPT 1/8. Σχέδια Παράρτημα 8.



Εικόνα 47: Εξάρτημα για την βάση του επενεργητή.

Οι οπές που υπάρχουν στο παραπάνω εξάρτημα είναι για να τοποθετηθούν κοχλίες, περικόχλια και ασφάλειες M6 ώστε να συγκρατούν τον επενεργητή όταν σφίγγουν οι κοχλίες και τα περικόχλια. Η κατασκευή αυτού του εξαρτήματος θα γίνει με χρήση 3d printer ρητίνης διότι έχει μεγαλύτερη ακρίβεια και αντοχή σε σχέση με τον απλό 3d printer. Η τρισδιάστατη εκτύπωση ρητίνης είναι μια προηγμένη μέθοδος κατασκευής πρόσθετων που χρησιμοποιεί υγρή ρητίνη και φως UV για τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων με εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια και λεπτομέρεια. Η διαδικασία περιλαμβάνει την προετοιμασία του μοντέλου σε λογισμικό CAD, τη ρύθμιση των παραμέτρων εκτύπωσης και την εφαρμογή ρητίνης στρώμα προς στρώμα μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο. Τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν την υψηλή ανάλυση και την ικανότητα κατασκευής πολύπλοκων σχημάτων, ενώ τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν το κόστος και την ανάγκη για προσεκτική μετα-επεξεργασία και χειρισμό τοξικών ρητινών. Αυτή η μέθοδος είναι ιδανική για εφαρμογές όπως το κόσμημα, η οδοντιατρική και η δημιουργία πρωτοτύπων.



Εικόνα 48: Μορφή εκτύπωσης ρητίνης.

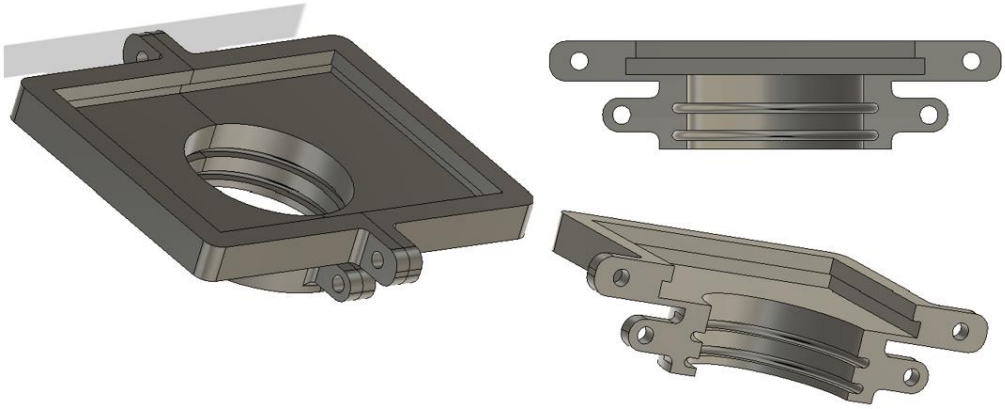
5.5.4 Σχεδιασμός βάσης για το φωτοβολταϊκό πάνελ του επενεργητή

Στην κορυφή του επενεργητή θα το τοποθετηθεί το φωτοβολταϊκό πάνελ. Επειδή έγινε παραμετροποίηση του επενεργητή θα τοποθετηθεί πάνελ μικρότερο κατά το ήμισυ σε σχέση με αυτό που μελετήθηκε αρχικά. Το νέο πάνελ θα έχει διαστάσεις 115x85mm με τάση 18 V και ισχύς εξόδου 4,5 W. Σχέδιο Παράρτημα 9.



Εικόνα 49: 18V 4.5W Mini Solar Panel 115x85mm.[61]

Με βάση αυτές τις προδιαγραφές σχεδιάστηκε η εξής βάση

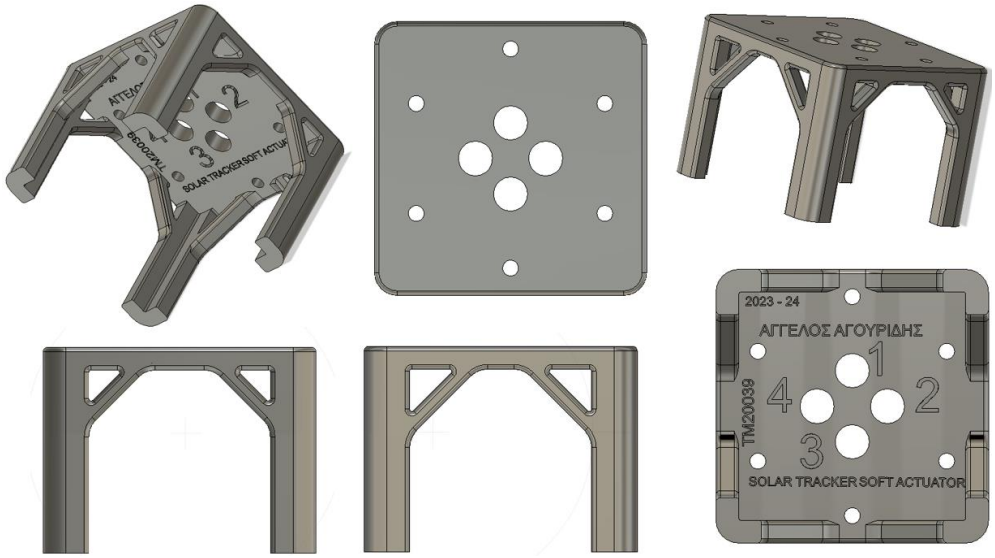


Εικόνα 50: Βάση για το φωτοβολταϊκό πάνελ.

Αποτελείται από δύο μέρη που το ένα είναι «καθρέφτης» του άλλου. Οι οπές που υπάρχουν στο παραπάνω εξάρτημα είναι για να τοποθετηθούν κοχλίες, περικόχλια και ασφάλειες M6 ώστε να συγκρατούν την κατασκευή και το φωτοβολταϊκό πάνελ σταθερά. Υπάρχουν οι ειδικές εγκοπές που ταυτίζονται με τα δακτυλίδια ώστε να εφαρμόσει εκεί η κατασκευή και να παραμένει σταθερή.

5.5.5 Σχεδιασμός βάσης για την τοποθέτηση του επενεργητή

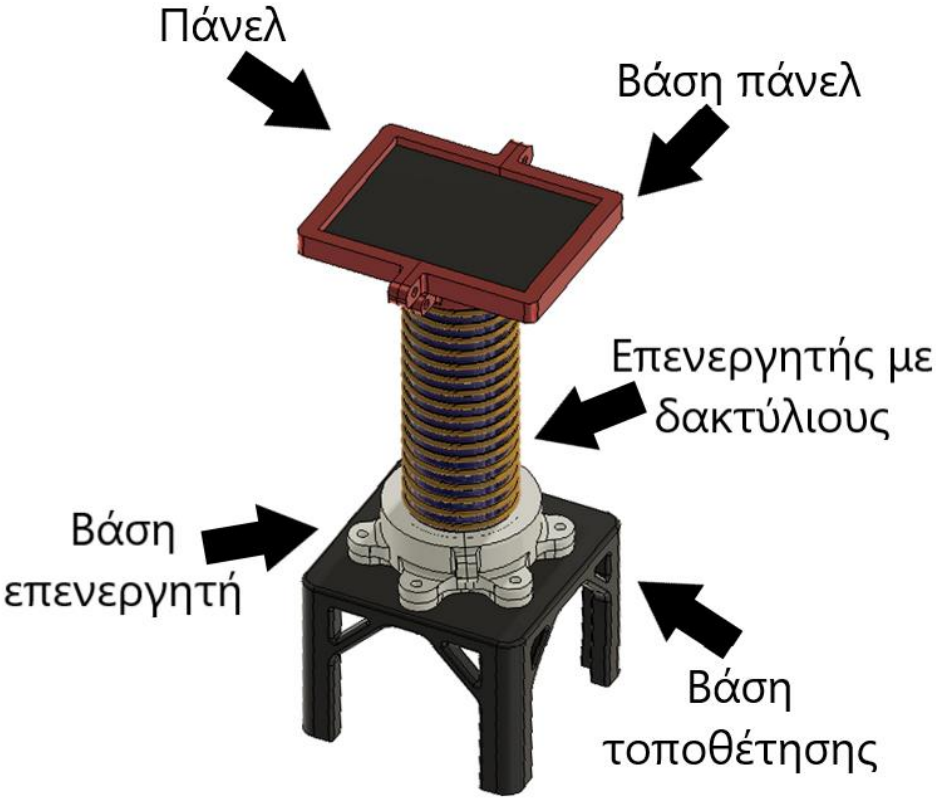
Η βάση αυτή θα έχει την μορφή μικρού τραπεζιού που θα υπάρχουν οπές που θα μπορούν να τοποθετηθούν οι κοχλίες, τα περικόχλια, οι ασφάλειες και οι υποδοχές για τα σωληνάκια της βάσης του επενεργητή. Σχέδιο Παράρτημα 10.



Εικόνα 51: Βάση την τοποθέτησης του «soft» επενεργητή.

5.5.6 Συνοπτική ψηφιακή απεικόνιση της κατασκευής του επενεργητή

Με την κατασκευή του επενεργητή και όλων των απαραίτητων εξαρτημάτων η συνοπτική απεικόνιση της κατασκευής είναι η εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 52: Ψηφιακή συνοπτική συναρμολόγηση CAD.

6 Κατασκευή και συναρμολόγηση καλουπιών για την χύτευση και την δημιουργία του επενεργητή

Η κατασκευή και η συναρμολόγηση καλουπιών είναι ένα σημαντικό στάδιο στη διαδικασία χύτευσης και δημιουργίας του επενεργητή. Αυτό το στάδιο είναι απαραίτητο όχι μόνο για την επίτευξη του επιθυμητού σχήματος του επενεργητή, αλλά και για τη διασφάλιση της ποιότητας και της ακρίβειας της συνολικής εικόνας του επενεργητή. Σε αυτή την ενότητα, θα παρουσιαστούν οι διαδικασίες που σχετίζονται με την κατασκευή του επενεργητή, καταγράφοντας λεπτομερώς το επιθυμητό σχήμα και την σημασία της ακρίβειας και της αξιοπιστίας σε αυτό το σημαντικό στάδιο της διαδικασίας.

6.1 Υλικό και τρόπος κατασκευής επενεργητή

Για την κατασκευή του επενεργητή, θα χρησιμοποιηθεί η σιλικόνη ZA 22 MOULD[62]. Η ZA 22 MOULD είναι μία σιλικόνη RTV προσθήκης δύο συστατικών (βάσης και καταλύτη) που πήζει σε θερμοκρασία δωματίου.



Εικόνα 53: ZA 22 MOULD.[62]

Οι κύριες ιδιότητες αυτής της σιλικόνης είναι:

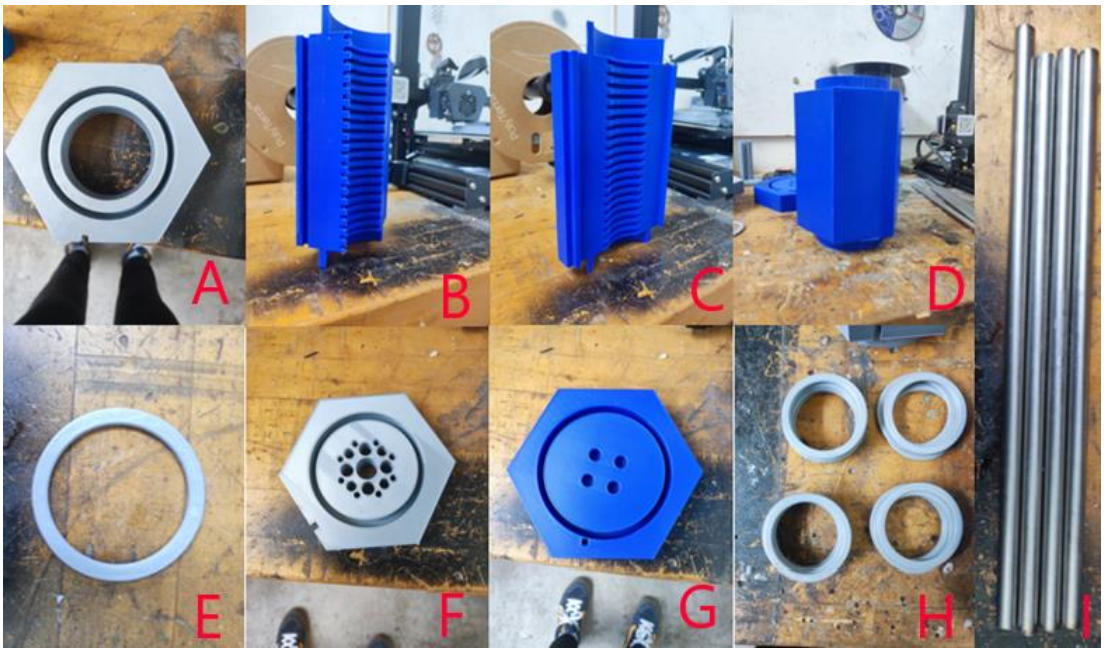
- Υψηλή χημική αντοχή στα επιθετικά συστατικά ορισμένων τύπων ρητίνης.
- Εξαιρετικά υψηλή αντοχή σε σχίσιμο (αυτό το χαρακτηριστικό εγγυάται υψηλή αντοχή στη φθορά).
- Υψηλή ακρίβεια στην αναπαραγωγή πολύ μικρών λεπτομερειών.
- Υψηλή σταθερότητα διαστάσεων στο χρόνο και παραμόρφωση.
- Αξιοσημείωτη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες και τη γήρανση.
- Εξαιρετικό αντικολλητικό αποτέλεσμα.

Για την κατασκευή του «soft» επενεργητή χρειάζονται, τα δύο προϊόντα (βάση και καταλύτης) που πρέπει να ανακινηθούν πριν τη χρήση. Αρχικά, ζυγίζεται ίση ποσότητα καταλύτη και βάσης (π.χ. 100 γραμμάρια καταλύτη και 100 γραμμάρια βάσης), σε περίπτωση που κάποιο προϊόν έχει λίγο μεγαλύτερη ποσότητα υπάρχει εύρους σφάλματος 5% όπου το τελικό αποτέλεσμα δεν αλλοιώνεται. Μόλις ζυγιστεί το προϊόν και βεβαιωθεί ότι η βάση και ο καταλύτης είναι ίσοι σε ποσότητα, τα δύο συστατικά εισάγονται σε ένα δοχείο και αναμειγνύονται επιμελώς. Είναι σημαντικό να ελεχθεί κατά την ανάμειξη ότι δεν παραμένουν υπολείμματα στη βάση και στον καταλύτη στα πλαϊνά των δοχείων. Ανακατεύονται η βάση και ο καταλύτης σταθερά και δυνατά μέχρι να ομογενοποιηθούν η βάση και ο καταλύτης συνεπώς, το χρώμα του προϊόντος. Μόλις το

προϊόν αναμειχθεί, χύνεται, κατά προτίμηση 30 cm πάνω από το δοχείο μέσα στο καλούπι. Συνιστάται να τοποθετηθεί το μείγμα σε δοχείο αρνητικής πίεσης για να απελευθερωθούν οι θύλακες αέρα (φυσαλίδες). Ο χρόνος πήξης (χρόνος που χρειάζεται να πήξει η σιλικόνη) είναι περίπου στους 23°C. Αφού ολοκληρωθεί η πήξη, στο καλούπι μπορεί να διαχωρίστεί το μοντέλο από το καλούπι. Εάν είναι αναγκαίο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αέρας υπό πίεση για να διευκολυνθεί ο διαχωρισμός. Είναι σημαντικό να μην εξαναγκάζεται ο διαχωρισμός με αιχμηρά αντικείμενα που μπορούν να παραμορφώσουν το τελικό προϊόν. Ο χρόνος εργασίας και επομένως ο χρόνος πήξης μειώνονται εάν η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 23°C (π.χ. εάν η θερμοκρασία είναι 40°C, ο χρόνος εργασίας είναι μειώνεται στο μισό και ο χρόνος πήξης μειώνεται περίπου στο μισό). Εάν η θερμοκρασία είναι μικρότερη από 23°C, τόσο ο χρόνος εργασίας όσο και ο χρόνος πήξης αυξάνονται σημαντικά. (π.χ. Εάν η θερμοκρασία είναι 4°C, ο χρόνος εργασίας διπλασιάζεται και ο χρόνος ρύθμισης αυξάνεται τρεις φορές τα λεπτά που υποδεικνύονται στους 23°C) .[62]

6.2 Συναρμολόγηση καλουπιού

Αφού εκτυπωθούν όλα τα μέρη καλουπιού είναι τα εξής:



Εικόνα 54: Όλα τα μέρη του καλουπιού και δακτυλίδια. (A) - Κομμάτι 5, (B) - Κομμάτι 2, (C) - Κομμάτι 1, (D) - Κομμάτι 3, (E) – Ένας δακτύλιος, (F) - Κομμάτι 7, (G) - Κομμάτι 4, (H) - Σετ από 20 δακτυλίους και (I) - Κομμάτι 6 (x4). Αναλυτικά στο παράρτημα 7.

Καταρχάς, οι δακτύλιοι τοποθετούνται στο Κομμάτι 1. Στο επόμενο βήμα ενώνεται το Κομμάτι 1 με το Κομμάτι 2. Έπειτα, το Κομμάτι 3 ενώνεται με τα υπόλοιπα κομμάτια και όλα αυτά μαζί ενώνονται με το Κομμάτι 5. Στη συνέχεια, ενώνονται όλα τα ήδη ενωμένα κομμάτια με το Κομμάτι 4. Στο επόμενο βήμα, τοποθετούνται τα τέσσερα Κομμάτια 6 στα υπόλοιπα κομμάτια. Τέλος, θα ενωθεί και το τελευταίο κομμάτι, το Κομμάτι 7, με τα υπόλοιπα. Τώρα, από τις τρύπες που διαθέτει το Κομμάτι 7, θα γίνει η χύτευση της σιλικόνης, ώστε όταν πήξει η σιλικόνη και αποσυναρμολογηθεί το καλούπι, θα έχει δημιουργηθεί ο επενεργητής. Αυτή είναι η διαδικασία συναρμολόγησης για τη δημιουργία του επενεργητή.



Εικόνα 55: Βήματα συναρμολόγησης καλουπιού επενεργητή: Βήμα 1: Τοποθέτηση δακτυλίων στο Κομμάτι 1, Βήμα 2: Ένωση του Κομματιού 1 με το Κομμάτι 2, Βήμα 3: Ένωση του Κομματιού 3 με τα υπόλοιπα Κομμάτια 1 και 2, Βήμα 4: Ένωση των ήδη ενωμένων Κομματιών με το Κομμάτι 5, Βήμα 5: Ένωση όλων των ήδη ενωμένων Κομματιών με το Κομμάτι 4, Βήμα 6: Τοποθέτηση των τεσσάρων Κομματιών 6 στα υπόλοιπα κομμάτια και Βήμα 7: Τελική ένωση του Κομματιού 7 με τα υπόλοιπα. Από τις τρύπες του Κομματιού 7 θα γίνει η χύτευση της σιλικόνης. Μετά την πήξη της σιλικόνης και την αποσυναρμολόγηση του καλουπιού, θα έχει δημιουργηθεί ο επενεργητής.

6.3 Χύτευση για την κατασκευή του επενεργητή

Αφού έχει γίνει η συναρμολόγηση των καλουπιών, γίνεται η χύτευση. Ένα δοχείο, μαζί με ένα αναδευτήρα, χρησιμοποιούνται ώστε να αναμιχθούν οι κατάλληλες ποσότητες βάσης και καταλύτη. Αρχικά, ζυγίζεται ίση ποσότητα καταλύτη και βάσης, στην προκειμένη περίπτωση 220 γραμμάρια από το κάθε ένα. Ο υπολογισμός των γραμμαρίων προέκυψε από τον υπολογισμό του όγκου του επενεργητή, ο οποίος υπολογίστηκε από τους όγκους των καλουπιών στο CAD, με την ικανότητα εξαγωγής τέτοιων δεδομένων από το σχεδιαστικό πρόγραμμα, και με τη χρήση του τύπου της πυκνότητας. Η πυκνότητα είναι γνωστή από τον κατασκευαστή, ο οποίος παρέχει τον λόγο της μάζας m προς τον όγκο V του υλικού που την περιέχει. Με τις κατάλληλες μετατροπές προέκυψαν τα γραμμάρια. Μόλις ζυγιστεί το προϊόν και βεβαιωθεί ότι η βάση και ο καταλύτης είναι ίσοι σε ποσότητα, τα δύο συστατικά εισάγονται σε ένα δοχείο και αναμειγνύονται επιμελώς.

Πυκνότητα (gr/cc)	Μάζα σιλικόνης (gr)	Μάζα βάσης (gr)	Μάζα καταλύτη (gr)	Όγκος (cc)
1,15	440	220	220	382

Πίνακας 22: Όγκος και μάζα επενεργητή.



Εικόνα 56: Δοχείο, ξυλάκι, ζυγαρία, βάση και καταλύτης.

Είναι σημαντικό να ελεχθεί κατά την ανάμειξη ότι δεν παραμένουν υπολείμματα στη βάση και στον καταλύτη στα πλαϊνά των δοχείων. Ανακατεύονται η βάση και ο καταλύτης σταθερά και δυνατά μέχρι να ομογενοποιηθούν η βάση και ο καταλύτης συνεπώς, το χρώμα του προϊόντος. Μόλις το προϊόν αναμειχθεί, χύνεται, κατά προτίμηση 30 cm πάνω από το δοχείο μέσα στο καλούπι. Συνιστάται να τοποθετηθεί το μείγμα σε δοχείο αρνητικής πίεσης για να απελευθερωθούν οι θύλακες αέρα (φυσαλίδες).



Εικόνα 57: Δοχείο αρνητικής πίεσης.

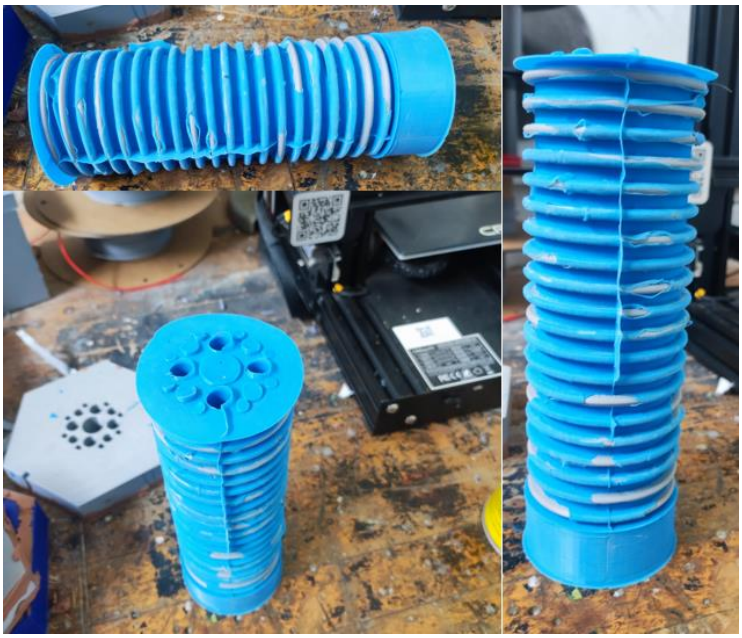
Ο χρόνος πήξης (χρόνος που χρειάζεται να πήξει η σιλικόνη) είναι περίπου στους 23°C. Αφού ολοκληρωθεί η πήξη, στο καλούπι μπορεί να διαχωρίστεί το μοντέλο από το καλούπι. Εάν είναι αναγκαίο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αέρας υπό πίεση για να διευκολυνθεί ο διαχωρισμός. Είναι σημαντικό να μην εξαναγκάζεται ο διαχωρισμός με αιχμηρά αντικείμενα που μπορούν να παραμορφώσουν το τελικό προιόν. Ο χρόνος εργασίας και επομένως ο χρόνος πήξης μειώνονται εάν η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 23°C (π.χ. εάν η θερμοκρασία είναι 40°C, ο χρόνος εργασίας είναι μειώνεται στο μισό και ο χρόνος πήξης μειώνεται περίπου στο μισό). Εάν η θερμοκρασία είναι μικρότερη από 23°C, τόσο ο χρόνος εργασίας όσο και ο χρόνος πήξης αυξάνονται

σημαντικά. (π.χ. Εάν η θερμοκρασία είναι 4°C, ο χρόνος εργασίας διπλασιάζεται και ο χρόνος ρύθμισης αυξάνεται τρεις φορές τα λεπτά που υποδεικνύονται στους 23°C). Στην παρούσα περίπτωση χρησιμοποιήθηκε φούρνος για την διευκόλυνση και γρήγορη πήξη της σιλικόνης.



Εικόνα 58: Φούρνος ρυθμισμένος στο 45 βαθμούς Κελσίου (σε αυτή την θερμοκρασία δεν κινδυνεύει να παραμορφωθεί το καλούπι επειδή είναι από PLA).

Όταν βγει το καλούπι από τον φούρνο και έχει στερεοποιηθεί η σιλικόνη, θα απομακρυνθούν τα μέρη του καλουπιού και θα έχει ο επενεργητής την εξής μορφή:



Εικόνα 59: Επενεργητής μετά την απομάκρυνση του καλουπιού.

Παρατηρείτε ότι υπάρχουν λόγο του καλουπιού ότι ο επενεργητής δεν είναι κλειστός από πάνω και πρέπει να κλείσουν οι τρύπες ώστε να είναι λειτουργικός ο επενεργητής. Με βάση την μελέτη που έχει γίνει πρέπει το υλικό που θα προστεθεί να έχει πάχος 10 mm, αυτό θα επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τα κομμάτια 6 τοποθετώντας τα 10 mm πιο κάτω από την ανοιχτή επιφάνεια με την βοήθεια του παχύμετρου. Αφού έχουν τοποθετηθεί σωστά τα κομμάτια 6 γίνεται μία ακόμη μικρή χύτευση σε αυτά τα σημεία και ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως προηγουμένως.



Εικόνα 60: Επενεργητής με κλειστή την άνω επιφάνεια.

6.4 Κατασκευή εξαρτημάτων για την βάση του φωτοβολταϊκού πάνελ και της βάσης για την τοποθέτηση του επενεργητή και όλου του συστήματος

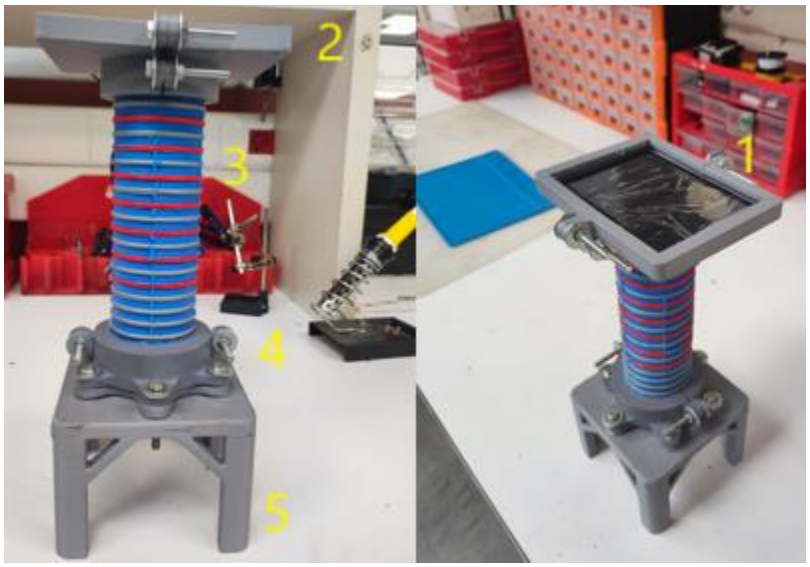
Με την κατασκευή της βάσης τοποθέτησης του επενεργητή και της βάσης τοποθέτησης του φωτοβολταϊκού, αποτελεί το τελευταίο στάδιο της ολοκλήρωσης ολόκληρου του συστήματος του επενεργητή. Η βάση τοποθέτησης του επενεργητή έχει την ίδια μορφή χωρίς καμία αλλαγή με την ψηφιακή σχεδίαση που έχει πραγματοποιηθεί. Η βάση τοποθέτησης του φωτοβολταϊκού πάνελ έχει την ίδια μορφή χωρίς καμία αλλαγή με την ψηφιακή σχεδίαση που έχει πραγματοποιηθεί. Τέλος, για την τοποθέτηση όλου του συτήματος σε μία βάση πραμτοποιήθηκε η κατασκευή της βάσης ολόκληρου του συστήματος.



Εικόνα 61: Συνοπτική απεικόνιση όλων εξαρτημάτων και του επενεργητή. 1: Βάση φωτοβολταϊκού πάνελ, 2: Βάση ολόκληρου του συστήματος και 3: Βάση τοποθέτησης του επενεργητή.

6.5 Συναρμολόγηση όλων εξαρτημάτων και του επενεργητή

Με την συναρμολόγηση όλων των εξαρτημάτων και του επενεργητή αποτελεί τον τελικό σταθμό της διαδικασίας κατασκευής ολόκληρου του συστήματος. Σε αυτό το στάδιο, τα εξαρτήματα που έχουν κατασκευαστεί και ελεγχθεί προηγουμένως συναρμολογούνται σε ένα σύνολο λειτουργικό και έτοιμο για λειτουργία.



Εικόνα 62: Συνοπτική απεικόνιση του συναρμολογημένου επενεργητή από διαφορετικές οπτικές γωνίες με αριθμημένα μέρη: 1 Πάνελ, 2 Βάση πάνελ, 3 Επενεργητής με δακτυλίους, 4 Βάση επενεργητή και 5 Βάση τοποθέτησης.

7 Κινηματική μοντελοποίηση και πειραματική διαδικασία

Η κινηματική μοντελοποίηση και οι πειραματικές διαδικασίες είναι σημαντικοί παράγοντες για την κατανόηση και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος. Η κινηματική μοντελοποίηση παρέχει την ανάλυση και την πρόβλεψη της κίνησης και της απόδοσης του επενεργητή, ενώ η πειραματική διαδικασία επαληθεύει θεωρητικές προβλέψεις μέσω πραγματικών δοκιμών και μετρήσεων. Αυτή η ενότητα εξετάζει τις αρχές και τις μεθόδους κινηματικής μοντελοποίησης, καθώς και τις τεχνικές και τα αποτελέσματα των πειραματικών διαδικασιών που εφαρμόζονται για την επαλήθευση και τη βελτιστοποίηση του συστήματος. Χάρη στη συνδυασμένη προσέγγιση της θεωρίας και του πειράματος, μπορεί να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη κατανόηση και βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

7.1 Κινηματική μοντελοποίηση

Ο επενεργητής αλλάζει μορφή και κάμπτεται, ανάλογα με την πίεση που ασκείται στους θαλάμους Συνδυασμοί μονοαξονικών κινήσεων των τεσσάρων θαλάμων του επενεργητή επιτρέπουν γραμμικές κινήσεις και τις κάμψεις του μοντέλου. Με την μοντελοποίηση και την απόκριση πίεσης του μοντέλου στον τρισδιάστατο χώρο και την αντίστροφη κινηματική για τον υπολογισμό της απαιτούμενης εσωτερικής πίεσης ώστε ο επενεργητής να φτάσει στο επιθυμητό σημείο στο χώρο.

Η γενική μέθοδος για την επίλυση του συστήματος δεσμών ενός στερεού σώματος λαμβάνοντας υπόψη τη συστολή και τη διαστολή με τις αλλαγές στο μήκος του κάθε τόξου δεν ήταν κατάλληλη για ένα εύκαμπτο σώμα. Η ανάλυση είναι πιο περίπλοκη εφόσον συνεχείς γραμμικές παραμορφώσεις και κάμψεις πραγματοποιούνται σε όλα τα στοιχεία που απαρτίζουν το σώμα. Η προσέγγιση για να απλοποιηθεί αυτό το πολύπλοκο σύστημα είναι να υποθέσουμε ότι το μοντέλο έχει σταθερή καμπυλότητα.[63]

7.1.1 Ευθύ κινηματικό

Έστω με ότι υπάρχει η υπόθεση της σταθερής καμπυλότητας, η θέση του μοντέλου περιγράφεται σε σχέση με το κέντρο των δύο άκρων. Η θέση και η στάση καθορίζεται από τα μήκη των τεσσάρων τόξων $l_1, l_2, l_3 \, και \, l_4$. Αυτά τα μήκη είναι μεταβλητές στο χώρο του επενεργητή (actuator space), δηλαδή $(q = [l_1, l_2, l_3, l_4]^T)$ και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μετατροπής στον χώρο διαμόρφωσης (configuration space).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το μήκος των τόξων περιλαμβάνουν την εσωτερική πίεση, τις γεωμετρικές παραμέτρους και τις χαρακτηριστικές ιδιότητες του υλικού του δοχείου. Σύμφωνα με τον νόμο του Hooke, η πίεση p_{bi} που ασκείται στο i_{th} δοχείο προκαλεί τη μεταβολή μήκους και το μήκος του τόξου του i_{th} δοχείου μπορεί να εκφραστεί ως

$$\Delta \mathrm{l_i} = \frac{\mathrm{p_{bi}} \mathrm{A_{eff}}}{\mathrm{k_i}} \tag{7.1}$$

$$\mathrm{l_i} = \Delta \mathrm{l_i} + \mathrm{l_0} \tag{7.2}$$

Όπου i= 1, 2, 3 και 4 και Δl_i είναι το παραμορφωμένο μήκος του i_{th} θάλαμο, A_{eff} είναι η αποτελεσματική ενεργή διατομή του δοχείου, υποθέτοντας ότι παραμένει σταθερή, l_i είναι το μήκος του τόξου, l_0 είναι το αρχικό μήκος της ενεργής περιοχής, k_i είναι η δομική επιμήκυνση.[63]

Στην παρούσα μελέτη, θα ασκείται πίεση μεμονωμένα δηλαδή ξεχωριστά στο κάθε θάλαμο ή θα ασκείται πίεση σε δύο διπλανά chambers (l_1 $και$ l_2, l_2 $και$ l_3, l_3 $και$ l_4, l_1 $και$ l_4).

$$\mathrm{l_c}(\mathbf{q}) = \frac{\mathrm{l_1} + \mathrm{l_2} + \mathrm{l_3} + \mathrm{l_4}}{4} \tag{7.3}$$

$$\phi(\mathbf{q}) = \tan^{-1}\left(\frac{\mathrm{l_4} - \mathrm{l_2}}{\mathrm{l_3} - \mathrm{l_1}}\right) \tag{7.4}$$

$$\kappa(\mathbf{q}) = \frac{(\mathrm{l_1} - 3\mathrm{l_2} + \mathrm{l_3} + \mathrm{l_4})\sqrt{(\mathrm{l_4} - \mathrm{l_2})^2 + (\mathrm{l_3} - \mathrm{l_1})^2}}{\mathrm{d}(\mathrm{l_1} + \mathrm{l_2} + \mathrm{l_3} + \mathrm{l_4})(\mathrm{l_4} - \mathrm{l_2})} \tag{7.5}$$

$$\theta(\mathbf{q}) = \mathrm{l_c}(\mathbf{q}) * \kappa(\mathbf{q}) \tag{7.6}$$

όπου l_c είναι το μήκος του τόξου μεταξύ του κέντρου στο πάνω και το κάτω μέρος φ είναι το γωνία που σχηματίζεται γύρω από τον άξονα x όταν το κέντρο στο πάνω μέρος προβάλλεται στο επίπεδο x-y, κ είναι η καμπυλότητα του μοντέλου, d είναι η απόσταση μεταξύ του κέντρου στο πάνω μέρος και του κέντρου κάθε δοχείου, και θ είναι το γωνία που σχηματίζεται από το τμήμα του τόξου με το επίπεδο x-y.[63] Από το configuration space, η θέση του κέντρου στο πάνω μέρος καθορίζεται μέσω της γεωμετρικής σχέσης. Το μοντέλο έχει κάποια σημεία που είναι παθητικά που δεν επηρεάζονται από την ενεργοποίηση του επενεργητή, και επομένως μπορούν να μοντελοποιηθούν ως:

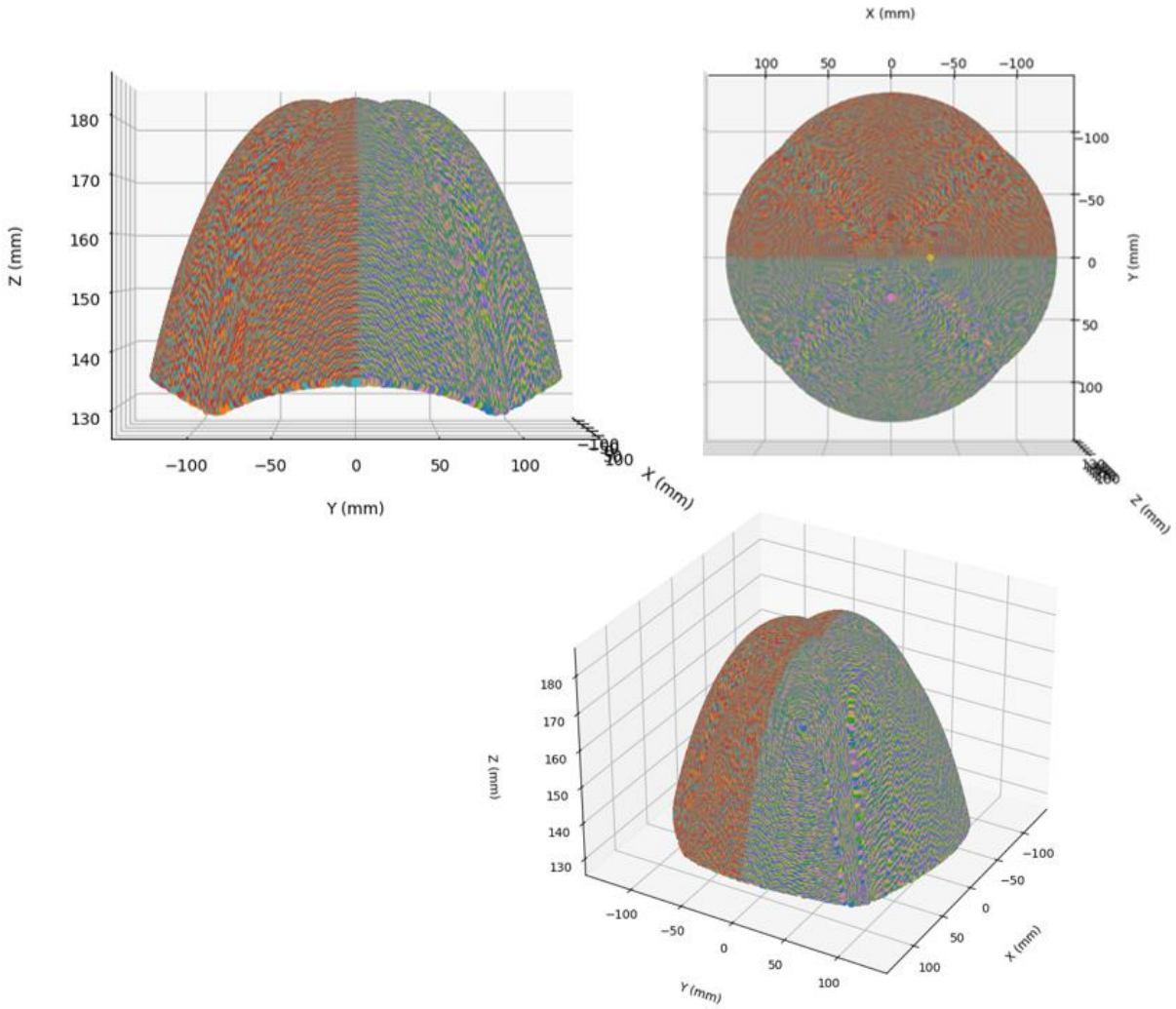
$$\mathrm{c} = 2\rho \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{7.7}$$

$$\mathrm{x_c} = \mathrm{c} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\phi + \mathrm{l_u} \sin\theta \cos\phi \tag{7.8}$$

$$\mathrm{y_c} = \mathrm{c} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\phi + \mathrm{l_u} \sin\theta \sin\phi \tag{7.9}$$

$$\mathrm{z_c} = \mathrm{c} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \mathrm{l_b} + \mathrm{l_u} \cos\phi \tag{7.10}$$

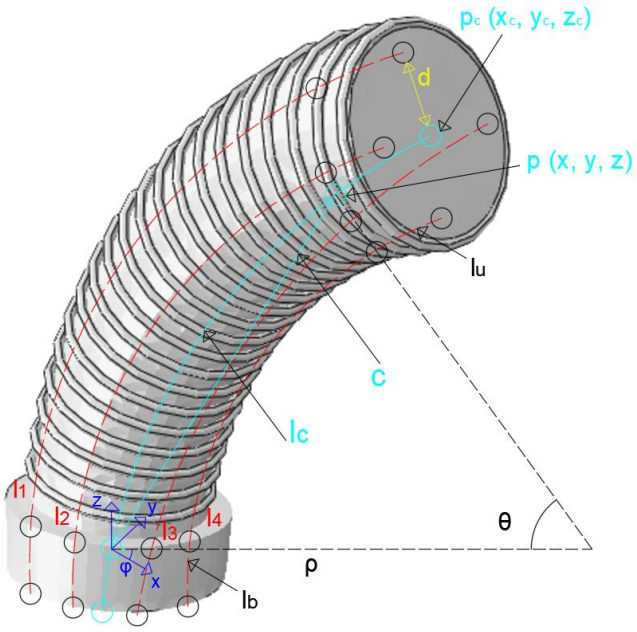
όπου c είναι το μήκος του χορδής, ρ είναι ο ακτίνα καμπυλότητας, l_u και l_b είναι τα μήκη των παθητικών δομών στο πάνω και στο κάτω μέρος αντίστοιχα και x_c, y_cκαι z_c είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες του σημείου p_c.



Εικόνα 63: Configuration Space (Χώρος Λειτουργίας).

7.1.2 Αντίστροφο κινηματικό

Η αντίστροφη κινηματική, χρησιμοποιήθηκε για να προσδιοριστεί η πίεση που χρειάζεται κάθε θάλαμο από ένα σημείο p (x, y, z) στον χώρο λειτουργίας, με αρχικά δεδομένα τις γωνίες φ και θ χρησιμοποιώντας το μήκος και τις εξισώσεις (7,1) και (7,2). Η αντίστροφη κινηματική λύθηκε με βάση τις γωνίες φ[63].



Εικόνα 64: Μοντέλο με σταθερή καμπυλότητα. Όταν στους θαλάμους δίνονται με διαφορετικές πιέσεις, το μοντέλο κάμπτεται και διαμορφώνει μια σταθερή καμπυλότητα. Το κέντρο στο πάνω μέρος p_c του μοντέλου καθορίζεται μέσω του παραμορφωμένου μήκους του κάθε θαλάμου.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1) και (2), ο προσδιορισμός της παραμόρφωσης Δl_i του i_{th} θάλαμος και η αντίστοιχη εσωτερική πίεση p_{bi} καθορίζονται ως:

$$\Delta l_i = l_i - l_0 \tag{7.11}$$

$$p_{bi} = \frac{\Delta l_i k_i}{A_{eff}} \tag{7.12}$$

Για να χρησιμοποιηθούν οι τύποι (11) και (12) πρέπει πρώτα να υπολογιστούν τα $l_c(\mathbf{q})$ και $\kappa(\mathbf{q})$.

$$\kappa(\mathbf{q}) = \frac{\theta(\mathbf{q})}{l_c(\mathbf{q})} \tag{7.13}$$

$$l_c(\mathbf{q}) = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}{4} \tag{7.3}$$

$$\phi(\mathbf{q}) = \tan^{-1}\left(\frac{l_4 - l_2}{l_3 - l_1}\right) \tag{7.4}$$

$$\kappa(\mathbf{q}) = \frac{(l_1 - 3l_2 + l_3 + l_4)\sqrt{(l_4 - l_2)^2 + (l_3 - l_1)^2}}{d(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)(l_4 - l_2)} \tag{7.5}$$

Έχοντας, γνωστές τις γωνίες φ και θ και με την επίλυση του συστήματος μπορεί να υπολογιστεί η αντίστοιχη εσωτερική πίεση p_{bi} για κάθε θάλαμο.

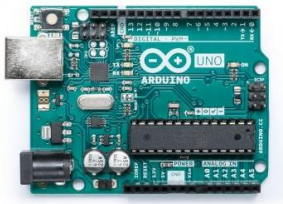
7.2 Μικροελεκτής και ηλεκτρολογικά μέρη

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί ο τρόπος προγραμματισμού του “soft solar tracker”, ο μικροελεκτής, τα ηλεκτρολογικά μέρη και οι συνδεσμολογίες που έγιναν έτσι ώστε να είναι

λειτουργικό όλο το σύστημα. Ο μικροελεκτής που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο Arduino Uno Rev3. Επιπρόσθετα, θα χρειαστούν τέσσερις ηλεκτροπνευματικοί ρυθμιστές πίεσης που είναι της SMC με μοντέλο ITV0050-3BL. Τέλος, θα είναι αναγκαίος ένας μετατροπέας (DAC) του ψηφιακού σήματος που παρέχει σαν έξοδος το Arduino Uno Rev3 σε αναλογικό (Digital to Analog Converter). Το DAC που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι το Adafruit MCP4728 I2C Quad DAC.

7.2.1 Ο μικροελεκτής Arduino Uno Rev3

Το Arduino Uno είναι η βασική πλακέτα για την τεχνολογία Arduino και συνιστάται να αρχίσει κάποιος να ασχολείται με τα ηλεκτρονικά και τον προγραμματισμό. Το μοντέλο Uno της οικογένειας Arduino είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο και είναι συμβατό με πολλούς αισθητήρες και επεκτάσεις. [64]



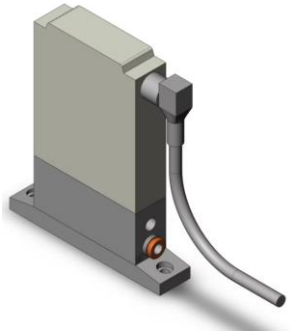
Εικόνα 65: Arduino Uno Rev3.[64]

Η έκδοση 3 (Rev3) είναι η τελευταία έκδοση και είναι πλήρως συμβατή με παλιούς και νέους πίνακες επέκτασης. Το Arduino Uno Rev3 βασίζεται στον μικροελεγκτή Atmega328 της Atmel. Είναι ένας πλήρης πίνακας που είναι προγραμματισμένος και περιέχει όλα όσα χρειάζεται να λειτουργήσει συνδέοντάς το με ένα απλό καλώδιο USB ή τροφοδοτικό υποδοχής στον υπολογιστή, καθώς και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια απλή μπαταρία. Αναλυτικά, η πλακέτα διαθέτει 14 ψηφιακές εισόδους ή εξόδους (6 εκ των οποίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εξόδους PWM), 6 αναλογικές εισόδους, 1 θύρα USB (τύπου B) για προγραμματισμό και τροφοδοσία της πλακέτας, 1 είσοδο ισχύος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά για τροφοδοσία από πρίζα ή απλή μπαταρία, 1 υποδοχή ICSP υπάρχει ένα κουμπί για την επαναφορά της πλακέτας στο τέλος. Ο μικροελεγκτής συγχρονίζεται σε 16 megacycles (crystal 16MHz). Αυτή η έκδοση του Arduino Uno είναι ένας αφαιρούμενος μικροελεγκτής (έκδοση DIP) και μπορείτε να τον αντικαταστήσετε με έναν νέο με μικρό κόστος, οπότε ο ελεγκτής είναι εύκολος στη χρήση. [64]

Η μνήμη flash Arduino Uno όπου μπορείτε να αποθηκεύσετε το πρόγραμμα (sketch) είναι 32KB και αν δεν μπορείτε να επιλέξετε έναν μεγάλο πίνακα Arduino όπως το Arduino Mega2560, μπορείτε να αποδεχτείτε το απλούστερο πρόγραμμα. Το Arduino Uno λειτουργεί με ισχύ 5V DC από την είσοδο usb ή 9V/12V DC από την είσοδο του τροφοδοτικού χωρίς τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας.

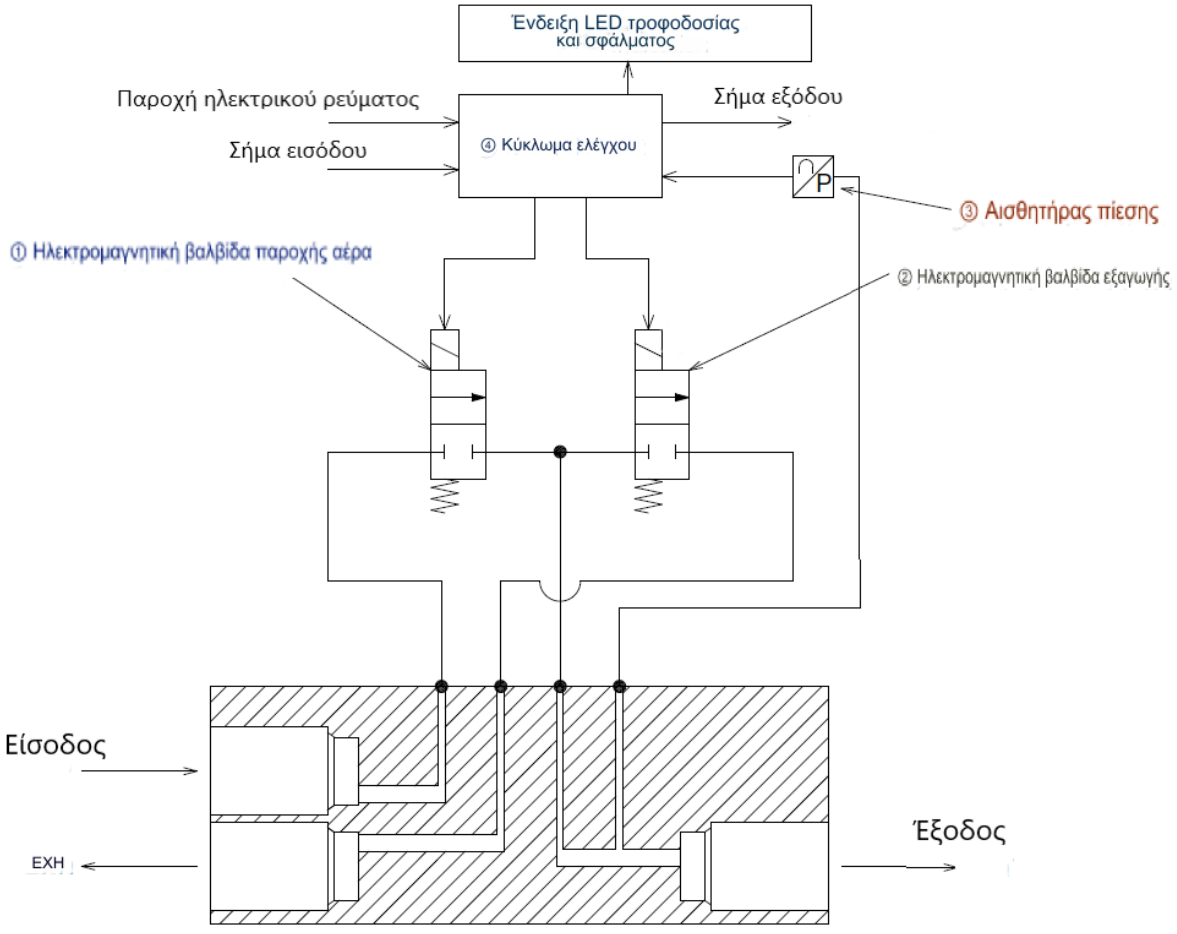
7.2.2 Ηλεκτροπνευματικοί ρυθμιστές πίεσης SMC ITV0050-3BL

Οι τέσσερις ηλεκτροπνευματικοί ρυθμιστές πίεσης της σειράς ITV ελέγχουν την πίεση αέρα/ αδιάκοπα σε αναλογία με ένα ηλεκτρικό σήμα. Έχουν ελαφρύ σχεδιασμό περίπου 100 γραμμάρια, με φωτεινή σηματοδότηση LED η οποία ανάβει σταθερά όταν λειτουργεί σωστά ο ηλεκτροπνευματικός ρυθμιστής πίεσης και αναβοσβήνει όταν δεν λειτουργεί σωστά. Επιπλέον διαθέτει έξοδο σε αναλογική μορφή που δείχνει την πίεση που ασκεί. [65]



Εικόνα 66: SMC ITV0050-3BL.[65]

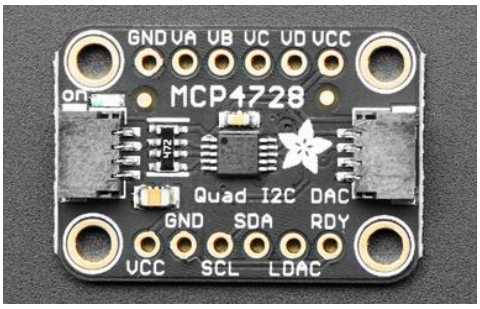
Αυτός ο ηλεκτροπνευματικός ρυθμιστής πίεσης έχει εύρος ρύθμισης πίεσης από 0,001 έως 0,9 MPa με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος 24 Volt DC. Όταν ανεβαίνει το σήμα εισόδου, η ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα παροχής αέρα q ανάβει. Εξαιτίας αυτού, μέρος της πίεσης τροφοδοσίας διέρχεται μέσω της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας παροχής αέρα q και αλλάζει σε πίεση εξόδου. Αυτή η πίεση εξόδου ανατροφοδοτείται στο κύκλωμα ελέγχου r μέσω του αισθητήρα πίεσης e. Εδώ, οι διορθώσεις πίεσης συνεχίζονται έως ότου η πίεση εξόδου γίνει ανάλογη με το σήμα εισόδου, επιτρέποντας την πίεση εξόδου που είναι ανάλογη με το σήμα εισόδου.[65]



Εικόνα 67: Διάγραμμα αρχής λειτουργίας βαλβίδας.

7.2.3 Adafruit MCP4728 I2C Quad DAC

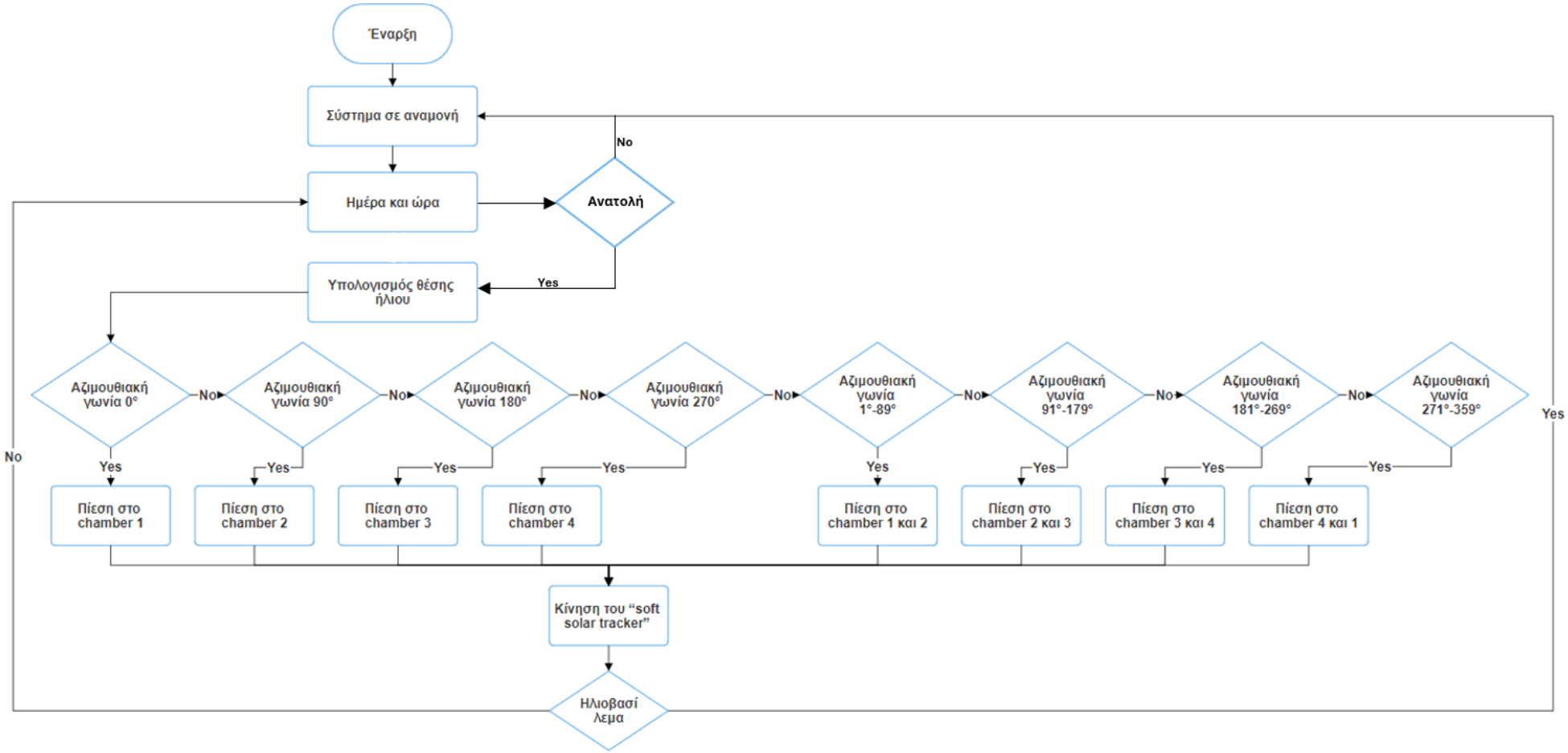
Το Adafruit MCP4728 I2C Quad DAC είναι ένας μετατροπέας (DAC) του ψηφιακού σήματος που παρέχει σαν έξοδος το Arduino Uno Rev3 σε αναλογικό (Digital to Analog Converter) διότι οι βαλβίδες αυτές για να λειτουργούν σωστά χρειάζονται αυτή την μετατροπή. Το Adafruit MCP4728 είναι μια προηγμένη και ευέλικτη πλακέτα μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό σήμα (DAC) τεσσάρων καναλιών, βασισμένη στο IC MCP4728. Προσφέρει τέσσερα ανεξάρτητα κανάλια DAC με ανάλυση 12-bit, επιτρέποντας την ταυτόχρονη παραγωγή διαφορετικών αναλογικών σημάτων. Επικοινωνεί μέσω του πρωτοκόλλου I2C και περιλαμβάνει EEPROM για αποθήκευση ρυθμίσεων, οι οποίες διατηρούνται μετά την απενεργοποίηση. Κάθε κανάλι μπορεί να χρησιμοποιήσει είτε την εσωτερική αναφορά τάσης 2.048V είτε μια εξωτερική αναφορά, προσφέροντας ευελιξία στην προσαρμογή της εξόδου. Η συσκευή είναι κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν ακριβή αναλογικά σήματα, όπως η δημιουργία κυματομορφών, οι ηχητικές εφαρμογές και τα συστήματα ελέγχου. Λειτουργεί με τάση τροφοδοσίας από 2.7V έως 5.5V και είναι συμβατή με διάφορους μικροελεγκτές.[66]



Εικόνα 68: Adafruit MCP4728 I2C Quad DAC.[66]

7.3 Διάγραμμα ροής του συστήματος του επενεργητή

Για να κατανοηθεί η λειτουργία ενός επενεργητή, είναι απαραίτητο να απεικονιστεί με σαφήνεια και συστηματικά τα βήματα και τις διαδικασίες που εμπλέκονται στη λειτουργία του. Τα διαγράμματα ροής είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την απεικόνιση ενός συνόλου λειτουργιών και αλληλεπιδράσεων μέσα στο σύστημα ενός επενεργητή. Αυτή η ενότητα παρουσιάζει ένα διάγραμμα ροής του συστήματος του επενεργητή, αναλύει κάθε στάδιο και επισημαίνει τις κρίσιμες διαδικασίες που εξασφαλίζουν την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία του συστήματος. Χάρη σε αυτήν την οπτική αναπαράσταση, ο αναγνώστης θα έχει μια πλήρη εικόνα των διαδικασιών και των αλληλεπιδράσεων που αποτελούν τη λειτουργία του ενεργοποιητή.



Εικόνα 69: Διάγραμμα ροής του συστήματος του επενεργητή.

7.4 Πρόγραμμα λειτουργίας του συστήματος του επενεργητή

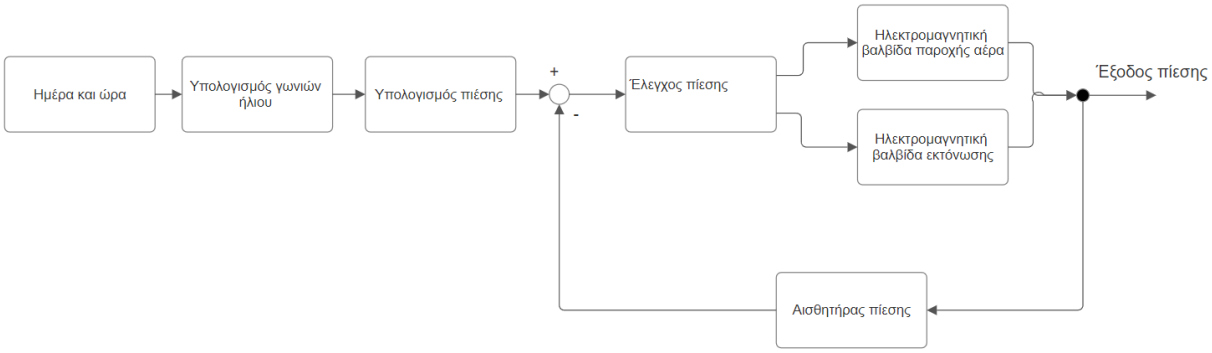
Αρχικά, δημιουργήθηκε ένας κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού python που υπολογίζει διάφορες ηλιακές γωνίες και παραμέτρους για μια δεδομένη τοποθεσία, βασισμένος στην τρέχουσα ημερομηνία. Υπολογίζει την ηλιακή απόκλιση, τη γωνία της ώρας, τη ζενιθιακή γωνία, τη γωνία ηλιακής ανύψωσης, τη γωνία ηλιακού αζιμούθιου, τη γωνία πρόσπτωσης και τους χρόνους ανατολής/δύσης του ηλίου. Πρώτα, εισάγει τα απαραίτητα modules, συμπεριλαμβανομένων των `math` για μαθηματικές συναρτήσεις και `datetime` για τη διαχείριση των ημερομηνιών. Ο κώδικας ορίζει συναρτήσεις για τον υπολογισμό της ηλιακής απόκλισης, της γωνίας της ώρας, της ζενιθιακής γωνίας, της ηλιακής ανύψωσης, του ηλιακού αζιμούθιου, της γωνίας πρόσπτωσης και των χρόνων ανατολής/δύσης. Η κύρια συνάρτηση ορίζει ένα γεωγραφικό πλάτος και λαμβάνει την τρέχουσα ημερομηνία για να προσδιορίσει την ημέρα του έτους. Στη συνέχεια, υπολογίζει την ηλιακή απόκλιση και τους χρόνους ανατολής/δύσης του ηλίου. Επαναλαμβάνει για κάθε τέταρτο της ώρας μεταξύ ανατολής και δύσης για να υπολογίσει και να εκτυπώσει τη ζενιθιακή γωνία, τη γωνία ηλιακής ανύψωσης, τη γωνία ηλιακού αζιμούθιου και τη γωνία πρόσπτωσης. Αυτοί οι υπολογισμοί βοηθούν στην κατανόηση της θέσης του ήλιου. Ο ίδιος κώδικα δημιουργήθηκε και με το να πληκτρολογεί ο χρήστης την ημερομηνία χειροκίνητα. (Παράρτημα 1 και Παράρτημα 2).

Με την βοήθεια του αντίστροφου κινηματικού δημιουργήθηκε ένας κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού python που υπολογίζει έχοντας γνωστές τις γωνίες κάμψης και περιστροφής (Bending angle (θ) (0°- 90°) και Angle of actuation (φ) (0°- 360°)). Ο κώδικας πραγματοποιεί υπολογισμούς σχετικούς με την πίεση και την μεταβολή του μήκους σε κάθε chamber ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη τις γωνίες κάμψης και περιστροφής και συνθήκες. Αρχικά, εισάγονται οι απαραίτητες βιβλιοθήκες όπως οι `numpy`, `math`, `matplotlib.pyplot` και `sympy`. Έπειτα, ορίζονται οι αρχικές παράμετροι όπως το αρχικό μήκος του κάθε chamber (lo), η εφαρμοζόμενη πίεση (P), ο συντελεστής σκληρότητας (k), η απόσταση μεταξύ του κέντρου του επενεργητή και του κάθε chamber (d), το μήκος της άνω και κάτω παθητικής δομής (lu, lb) και η διατομή του θαλάμου (A). Υπολογίζεται η μεταβολή του μήκους (Δl) λόγω της πίεσης και το νέο μήκος του κάθε chamber (l). Κατόπιν, ορίζεται μία συνάρτηση για τη μετατροπή μοιρών σε ακτίνια. Οι τις γωνίες κάμψης και περιστροφής (Bending angle (θ) (0°-90°) και Angle of actuation (φ) (0°-360°)) μετατρέπονται σε ακτίνια (φφ, θθ). Με βάση αυτές τις γωνίες και τις συνθήκες που δίνουν, υπολογίζονται οι νέες πιέσεις στους θαλάμους και τα αντίστοιχα νέα μήκη. Ο κώδικας ελέγχει διάφορες περιπτώσεις για την γωνία περιστροφής (φ) και εκτελεί υπολογισμούς για την πίεση σε κάθε chamber, μετατρέποντας τα αποτελέσματα σε διαφορετικές μονάδες (MPa, Bar και Psi) και εκτυπώνοντας τα αποτελέσματα. (Παράρτημα 3).

Σε συνδυασμό αυτοί οι δύο κώδικες δημιουργούν τον κώδικα λειτουργίας του “soft solar tracker” διότι στην περίπτωση της ηλιακής ιχνηλάτισης ισχύει ότι, η ηλιακή αζιμουθιακή ηλιακή γωνία θα είναι ίση με την γωνία περιστροφής του επενεργητή (Angle of actuation (φ) (0°-360°)) και η ζενίθια γωνία του ήλιου θα είναι ίση με την γωνία κάμψης του επενεργητή (Bending angle (θ) (0°-90°)). Επομένως, αφού αρχικά υπολογίζονται αυτές οι γωνίες ανά τέταρτο της ώρας, μπορούν να υπολογιστούν οι πιέσεις που χρειάζονται για να τις πραγματοποιήσει ο επενεργητής τις γωνίες αυτές ανά ένα τέταρτο της ώρας. Αυτές οι πιέσεις αποθηκεύονται σε μορφή λίστας ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από των κώδικα που θα δημιουργηθεί για τον μικροελεκτή. (Παράρτημα 4)

Επομένως, ο κώδικας λειτουργίας για τον μικροελεκτή, διαχειρίζεται την πίεση σε τέσσερα διαφορετικά chambers του επενεργητή χρησιμοποιώντας τον μετατροπέα Adafruit MCP4728

Digital-to-Analog (DAC). Αρχικά, περιλαμβάνει τις απαραίτητες βιβλιοθήκες για τον MCP4728 και την επικοινωνία I2C. Ορίζει αναλογικές ακίδες (A0 έως A3) για να διαβάζει τιμές πίεσης από αισθητήρες που είναι συνδεδεμένοι με βαλβίδες για κάθε θάλαμο. Σε τέσσερις πίνακες είναι αποθηκευμένες οι προκαθορισμένες τιμές πίεσης σε psi για κάθε chamber, οι οποίες αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένα προφίλ πίεσης που απαιτούνται για την επίτευξη διαφόρων γωνιών (Bending angle (θ) (0°- 90°) και Angle of actuation (φ) (0°- 360°)). Οι διαστάσεις αυτών των πινάκων υπολογίζονται και αποθηκεύονται σε αντίστοιχες μεταβλητές. Στη συνάρτηση setup, η επικοινωνία μέσω σειριακής θύρας αρχικοποιείται για σκοπούς αποσφαλμάτωσης και ο MCP4728 DAC ρυθμίζεται. Αν ο DAC δεν βρεθεί, ο κώδικας εισέρχεται σε έναν ατελείωτο βρόχο, εκτυπώνοντας ένα μήνυμα σφάλματος. Στη συνάρτηση loop επαναλαμβάνεται μέσω των τιμών πίεσης στους πίνακες, πρώτα σε αύξουσα σειρά και μετά σε φθίνουσα. Κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης, διαβάζει τις τιμές πίεσης από τις αναλογικές ακίδες χρησιμοποιώντας τη analogRead. Αυτές οι τιμές χαρτογραφούνται σε πιέσεις σε psi βάσει των παραμέτρων βαθμονόμησης του αισθητήρα. Για κάθε επανάληψη, οι προκαθορισμένες τιμές πίεσης ανακτώνται από τους πίνακες και χαρτογραφούνται σε τιμές DAC (κυμαινόμενες από 0 έως 4095) κατάλληλες για τον 12-bit DAC. Αυτές οι τιμές DAC στη συνέχεια ρυθμίζονται στα αντίστοιχα κανάλια DAC για να προσαρμόσουν την πίεση σε κάθε chamber. Τέλος, με την κυκλική εναλλαγή των προκαθορισμένων πιέσεων, το σύστημα μπορεί να ελέγχει με ακρίβεια τις γωνίες περιστροφής και κάμψης των chamber, το οποίο είναι χρήσιμο για εφαρμογές στην “soft” ρομποτική. (Παράρτημα 5).

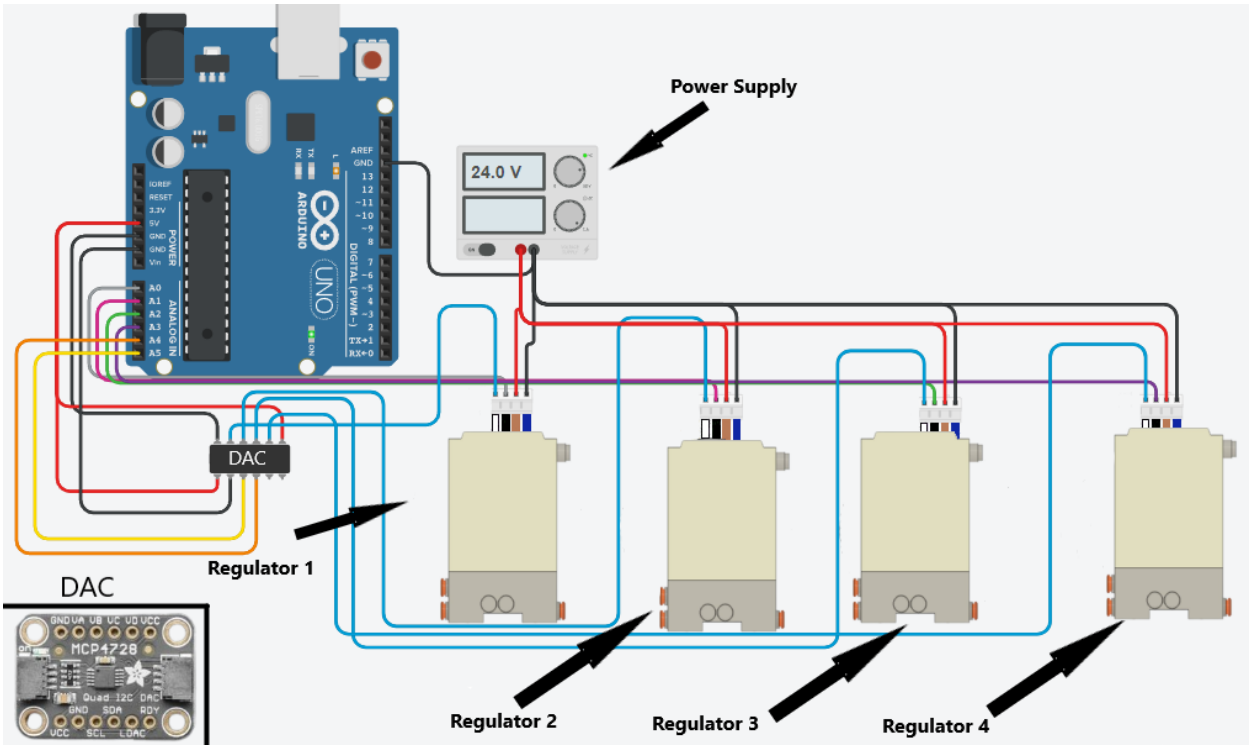


Εικόνα 70: Αρχή λειτουργίας συστήματος επενεργητή.

7.5 Συνδεσμολογία του συστήματος του επενεργητή

Η συνδεσμολογία του συστήματος του επενεργητή είναι κρίσιμη για τη σωστή λειτουργία και την αποτελεσματική απόδοση του συστήματος. Με βάση τις προδιαγραφές του μικροελεγκτή, της βαλβίδας, του μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό (DAC) και των προδιαγραφών σε όλο το

σύστημα, οι ψηφιακές συνδέσεις μπορούν να καθοριστούν για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία και η βέλτιστη απόδοση.

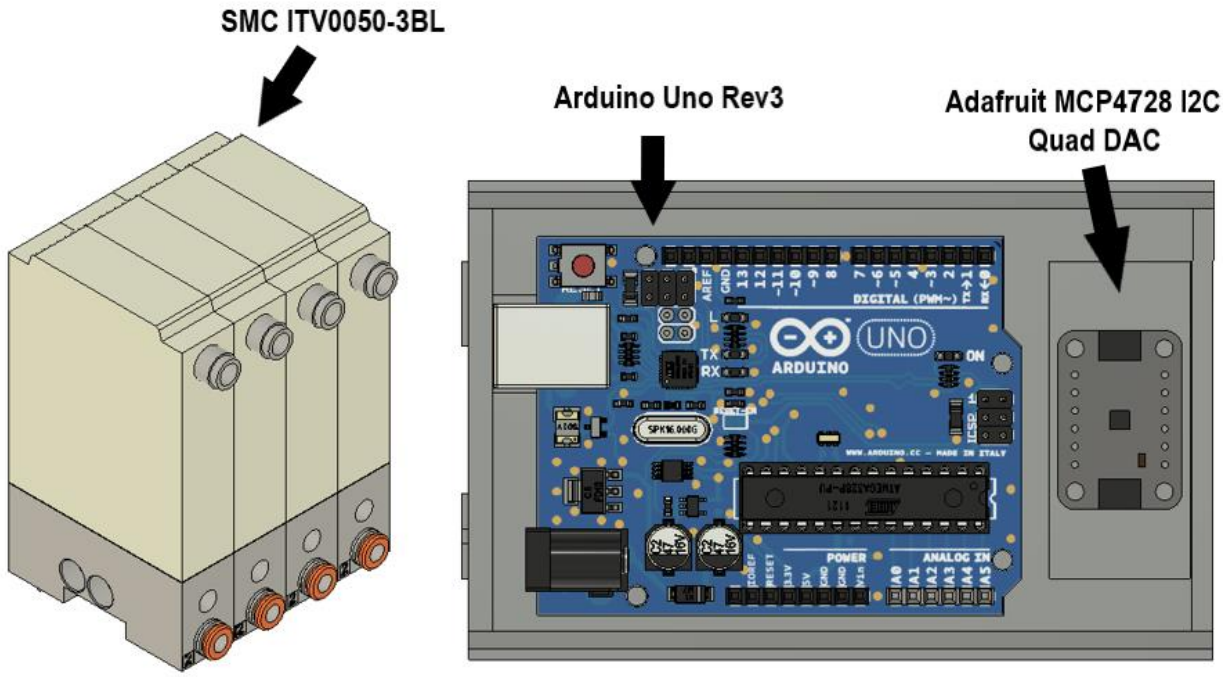


Εικόνα 71: Συνδεσμολογία του συστήματος του επενεργητή.

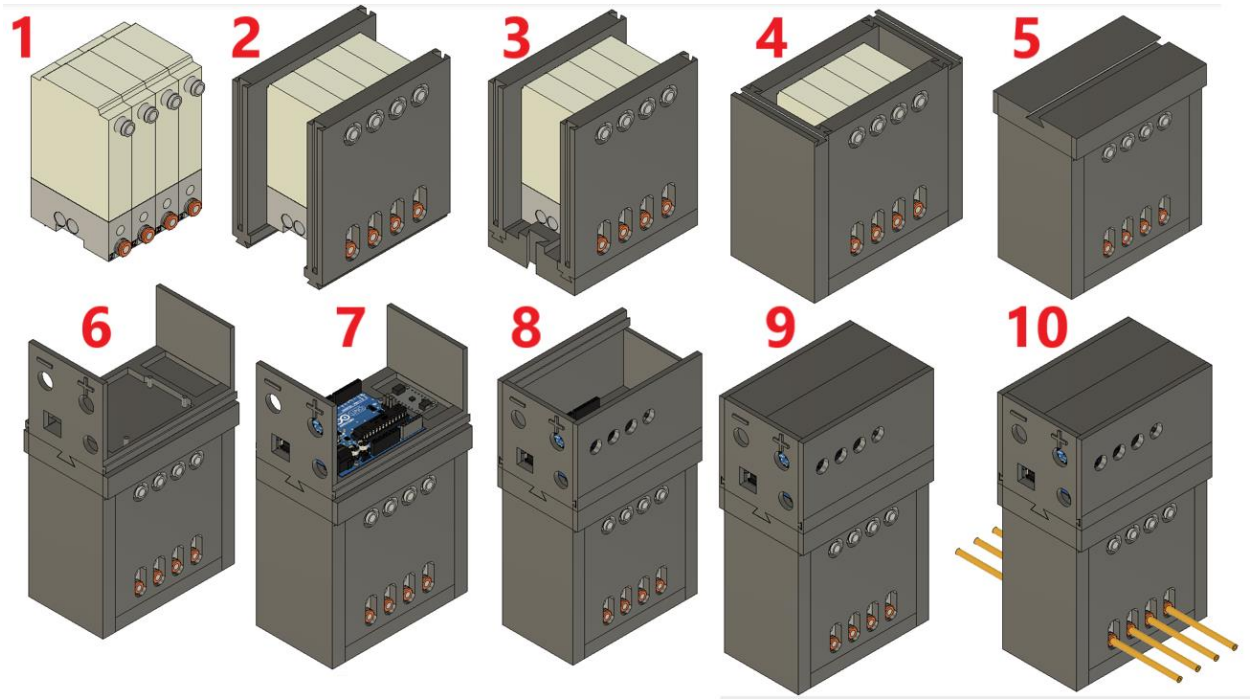
7.5.1 Κουτί οργανωτικής συνδεσμολογίας

7.5.1.1 Σχεδιασμός κουτιού οργανωτικής συνδεσμολογίας

Η συνδεσμολογία είναι πολύ σημαντική, για αυτό τον λόγο δημιουργήθηκε η ανάγκη να κατασκευαστεί ένα κουτί το οποίο θα περιέχει τον μικροελεκτή και όλα τα απαραίτητα ηλεκτρολογικά μέρη, ώστε να είναι τακτοποιημένα, οργανωμένα και να πραγματοποιηθεί σωστά η συνδεσμολογία. Ο πρώτος στόχος είναι το κουτί αυτό να είναι απλό και λειτουργικό. Η αρχική του σκέψη είναι να αποτελείται από μέρη τα οποία κουμπώνουν το ένα με το άλλο, ώστε να είναι εύκολο να συναρμολογηθεί και αποσυναρμολογηθεί από το χρήστη. Το κουτί αποτελείται από δέκα διαφορετικά μέρη. Αναλυτικά η συναρμολόγηση είναι στο Παράρτημα 11.



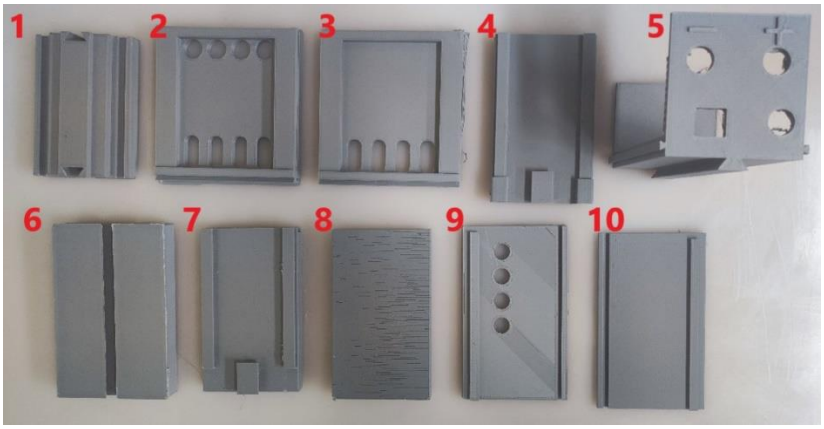
Εικόνα 72: Απεικόνιση όλων των ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων του κουτιού οργανωτικής συνδεσμολογίας.



Εικόνα 73: Ψηφιακά συναρμολογημένο το κουτί οργανωτικής συνδεσμολογίας ανά βήμα. Στο βήμα 7 τοποθετούνται το Arduino και το DAC και στο βήμα 10 τοποθετούνται τα σωληνάκια. Αναλυτικές οδηγίες στο Παράρτημα 11.

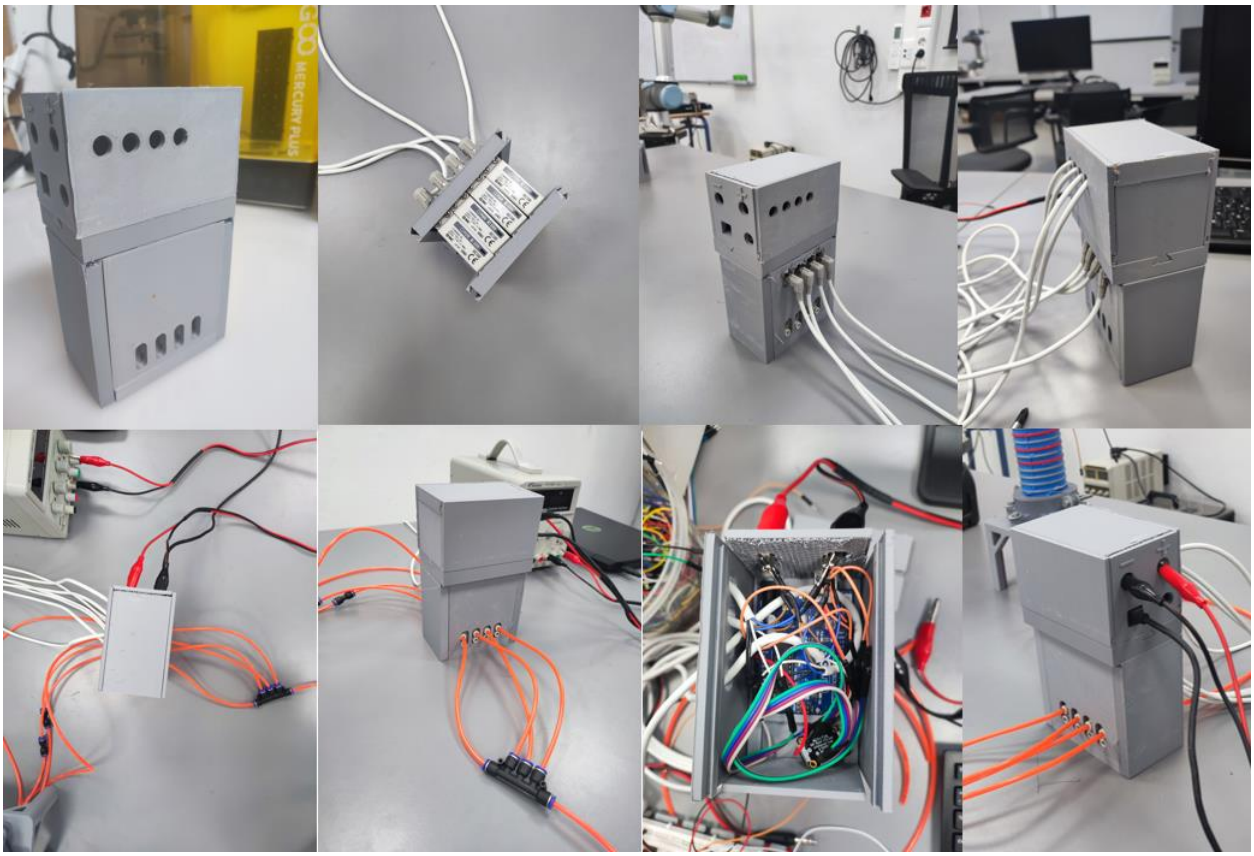
7.5.1.2 Κατασκευή κουτιού οργανωτικής συνδεσμολογίας

Όλα τα επιμέρους μέρη του κουτιού, κατασκευάστηκαν με την χρήση 3d printer, όπως έγινε με την διαδικασία κατασκευής του καλουπιού.



Εικόνα 74: Αριθμημένα τα εκτυπωμένα μέρη κουτιού οργανωτικής συνδεσμολογίας . Αναλυτική παρουσίαση στο Παράρτημα 11.

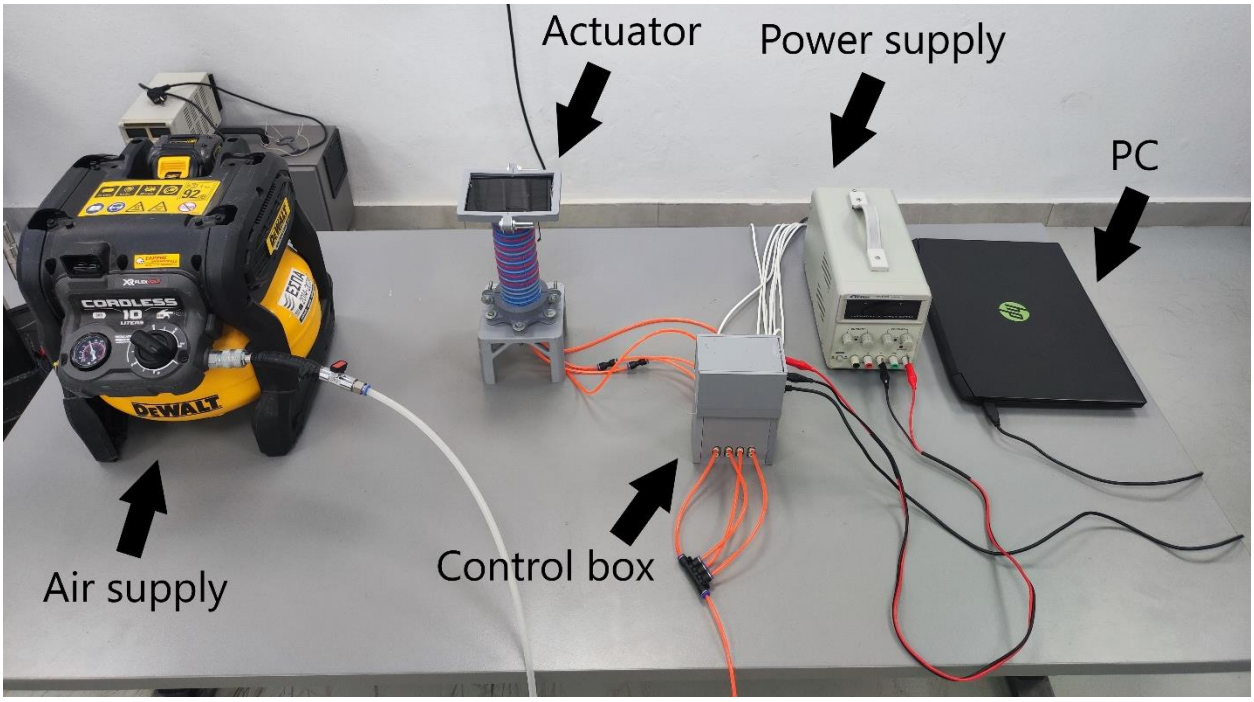
Με βάση την διαδικασία συναρμολόγησης που περιεγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έγινε η διαδικασία συναρμολόγησης του κουτιού με τα εκτυπωμένα μέρη.



Εικόνα 75: Συναρμολογημένο το κουτί οργανωτικής συνδεσμολογίας μαζί με μικροελεγκτή, βαλβίδες, καλώδια και σωληνάκια.

7.6 Πειραματική διάταξη του συστήματος ηλιακής ιχνηλάτησης με την τεχνολογία των «soft robotics»

Η πειραματική διάταξη του συστήματος ηλιακής ιχνηλάτησης το οποίο χρησιμοποιεί τεχνολογία «soft robotics», περιλαμβάνει μια μονάδα παροχής αέρα που μεταφέρει πεπιεσμένο αέρα στον επενεργητή, ο οποίος είναι το κεντρικό στοιχείο της μελέτης. Αυτός ο επενεργητής, επιτρέπει την ακριβή και ευέλικτη κίνηση του ηλιακού πλαισίου για την παρακολούθηση της πορείας του ήλιου με τον καλύτερο τρόπο. Το τροφοδοτικό παρέχει την ισχύ που απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος και ο υπολογιστής σε συνδυασμό με τον μικροελεκτή (Arduino) χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και την παρακολούθηση των παραμέτρων του συστήματος. Όλα τα καλώδια και οι συνδέσεις τακτοποιούνται στο κουτί οργανωτικής συνδεσμολογίας για να εξασφαλίσουν την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα του πειραματικού μοντέλου. Αυτό το σύστημα επιτρέπει την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση της ηλιακής παρακολούθησης, η οποία περιλαμβάνει καινοτόμο τεχνολογία «soft robotics».

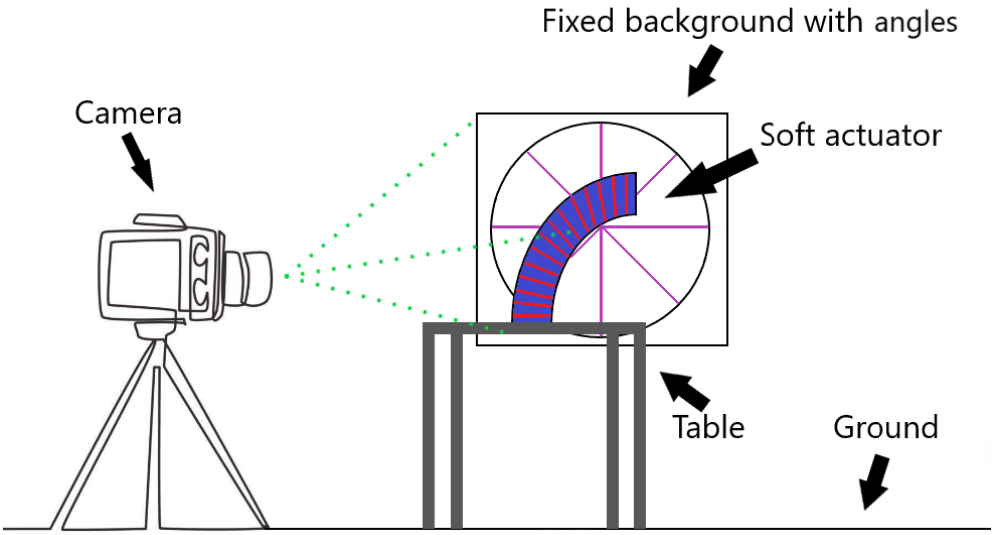


Εικόνα 76: Εργαστηριακή διάταξη ελέγχου και λειτουργίας του συστήματος ηλιακής ιχνηλάτησης με την τεχνολογία των «soft robotics».

7.7 Πειραματική διαδικασία σύγκρισης αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πραγματικότητας του επενεργητή

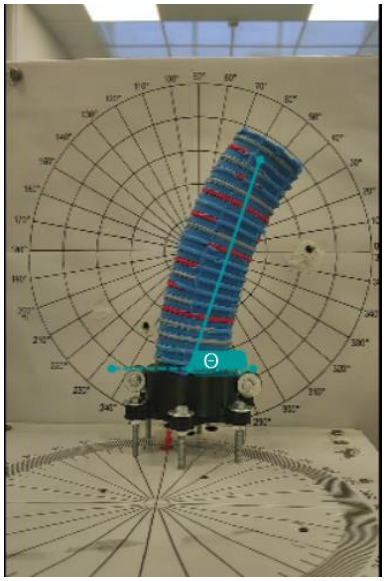
Αρχικά, η πρώτη πειραματική διαδικασία είναι ο έλεγχος των αποτελεσμάτων που δημιουργήθηκαν από την προσομοίωση του επενεργητή. Με την συλλογή δεδομένων, μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ του πραγματικού μοντέλου με το μοντέλο προσομοίωσης. Με την χρήση του λογισμικού Kinovea, το οποίο παρέχει την δυνατότητα, μέσα από βίντεο να εξάγει δεδομένα γωνιών, σε συνδυασμό με τις πιέσεις που ασκούντουσαν, μπορεί να δημιουργηθεί το διάγραμμα Pressure vs Bending Angle για το πραγματικό μοντέλο. Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει την

πειραματική διαδικασία εξαγωγής δεδομένων γωνιών, σε συνδυασμό με τις πιέσεις. Η κάμερα είναι τοποθετημένη σε τρίποδο ώστε να είναι σταθερή η λήψη και ευθυγραμμισμένη με τον επενεργητή, καταγράφει την κίνηση του επενεργητή μπροστά από ένα σταθερό φόντο με γωνίες, οι οποίες βοηθούν στη μετρήσεις. Ο επενεργητής και το φόντο είναι τοποθετημένα σε ένα τραπέζι, διασφαλίζοντας τη σταθερότητά τους και το κατάλληλο ύψος για την λήψη. Αυτή η διάταξη επιτρέπει την ακριβή ανάλυση των κινήσεων του επενεργητή.



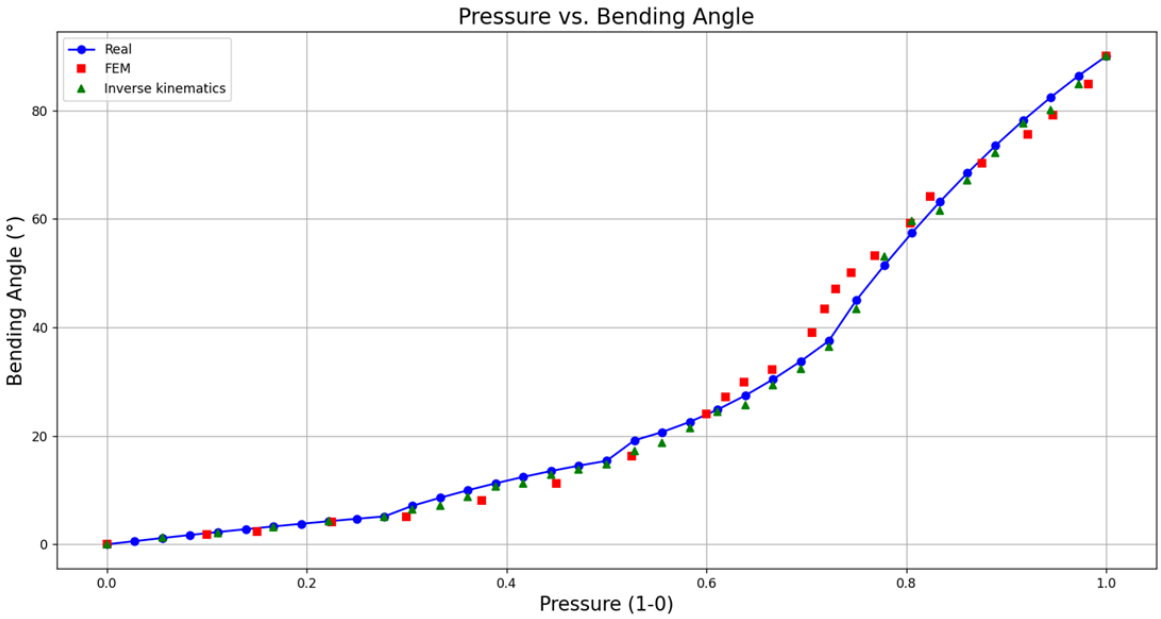
Εικόνα 77: Πειραματική διαδικασία.

Η πίεση που ασκήθηκε σε κάθε chamber για να λυγίσει ο επενεργητής 90° ήταν ίδια και εξάχθηκαν τα ίδια δεδομένα για κάθε chamber.



Εικόνα 78: Επενεργητής σε κλίση από το πρόγραμμα Kinovea.

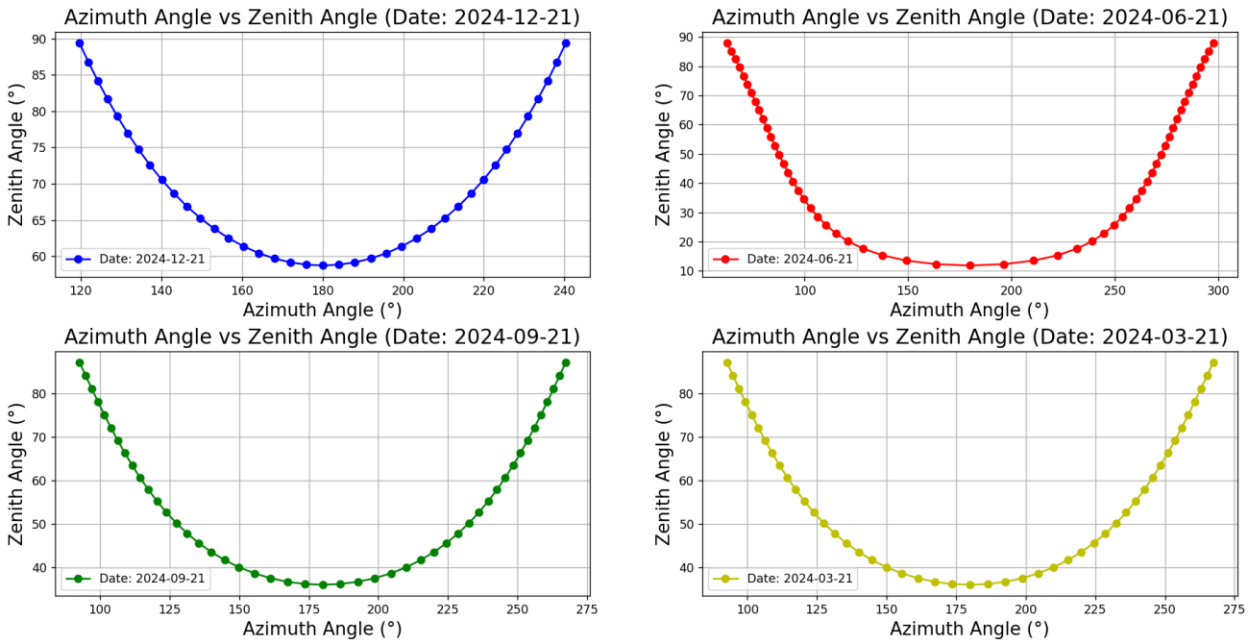
Με τη βοήθεια του λογισμικού εξάχθηκε διάγραμμα (διάγραμμα 22) του πραγματικού μοντέλου. Από αυτό το διάγραμμα παρατηρείται ότι το πραγματικό μοντέλο και το μοντέλο προσομοίωσης είναι πολύ κοντά με μικρές διαφορές, οι οποίες είναι λογικές, καθώς το πρόγραμμα προσομοίωσης κάνει παραδοχές και είναι δύσκολο να εξάγει αποτελέσματα που να ταιριάζουν απόλυτα με την πραγματικότητα. Το μέσο σφάλμα (RMSE) που υπάρχει μεταξύ αυτών των δύο γραφικών παραστάσεων είναι 11%. Το επόμενο στάδιο είναι να γίνει σύγκριση του πραγματικού μοντέλου και των αποτελεσμάτων που δημιουργήθηκαν από το αντίστροφο κινηματικό. Από αυτό το διάγραμμα παρατηρείται ότι το πραγματικό μοντέλο και το αντίστροφο κινηματικό είναι πολύ κοντά με μικρές διαφορές. Το σφάλμα (RMSE) που υπάρχει μεταξύ αυτών των δύο γραφικών παραστάσεων είναι 5%. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι όταν ο επενεργητής ήταν σε κλίση, οι βαλβίδες κρατούσαν την πίεση σταθερή, δηλαδή δεν παρουσιαζόταν ταλάντωση στον επενεργητή.



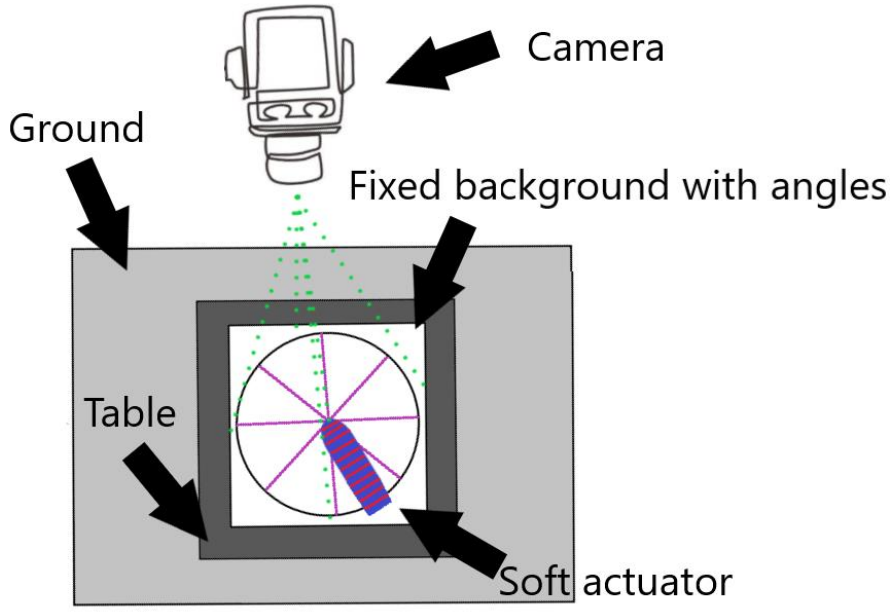
Διάγραμμα 22: Pressure vs Bending Angle (Πραγματικό μοντέλο vs αντίστροφο κινηματικό vs μοντέλο προσομοίωσης)..

7.8 Πειραματική διαδικασία του συστήματος του επενεργητή για ηλιακή ιχνηλάτηση

Με βάση των κώδικα που έχει δημιουργηθεί, ανάλογα με την θέση του ήλιου και την ημερομηνία μπορούν να υπολογιστούν οι πιέσεις σε κάθε chamber που απαιτούνται, για να δημιουργήσει τις κατάλληλες συνθήκες. Η παρακάτω εικόνα σε συνδυασμό με την προηγουμένη πειραματική διαδικασία, απεικονίζει μια πειραματική διάταξη για την παρατήρηση των γωνιών (αζιμουθιακή και ζενιθιακή γωνία) που πραγματοποιεί ο επενεργητής . Η κάμερα είναι τοποθετημένη κάθετα από την πάνω μεριά του επενεργητή ώστε να είναι σταθερή η λήψη και ευθυγραμμισμένη με τον επενεργητή, καταγράφει την κίνηση του επενεργητή μπροστά από ένα σταθερό φόντο με γωνίες, οι οποίες βοηθούν στη μετρήσεις. Ο επενεργητής και το φόντο είναι τοποθετημένα σε ένα τραπέζι, διασφαλίζοντας τη σταθερότητά τους και το κατάλληλο ύψος για την λήψη. Αυτή η διάταξη επιτρέπει την ακριβή ανάλυση των κινήσεων του επενεργητή.



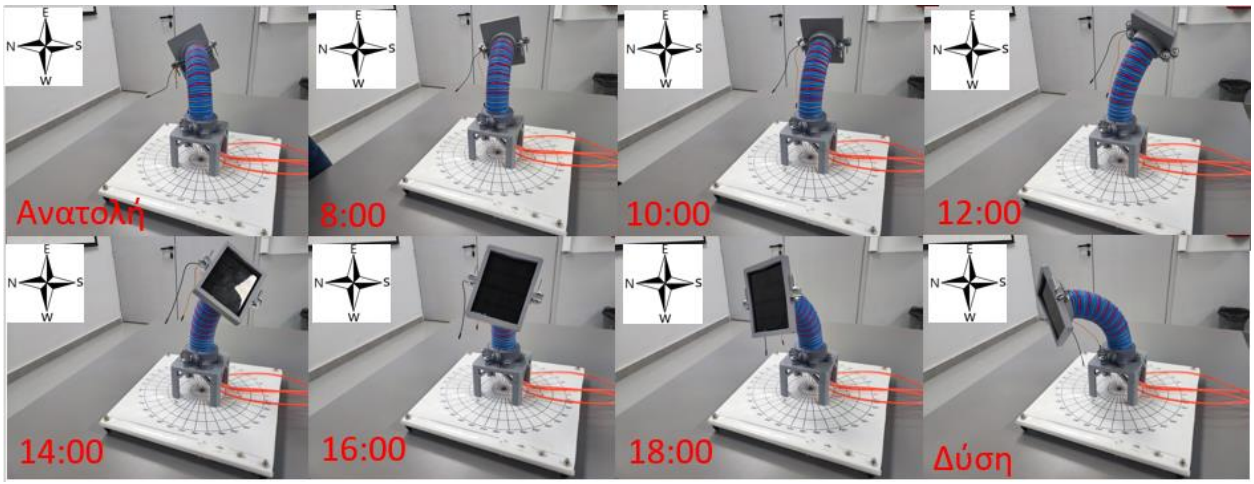
Διάγραμμα 23: Azimuth Angle vs Zenith Angle (Date: 2024-12-21) - (Date: 2024-06-21) - (Date: 2024-09-21) - (Date: 2024-05-21).



Εικόνα 79: Πειραματική διαδικασία ανίχνευσης κίνησης επενεργητή.

Θα πραγματοποιηθούν τέσσερις διαφορετικές ηλιακές ιχνηλατήσεις για 21 Ιουνίου και 21 Δεκεμβρίου επειδή αυτές τις ημερομηνίες είναι που η μέρα έχει μεγαλύτερη διάρκεια και μικρότερη διάρκεια αντίστοιχα και για τις ημερομηνίες 21 Μαρτίου και Σεπτεμβρίου που υπάρχει ηλιακή ισημερία. Με βάση των κώδικα που έχει αναπτυχθεί οι γωνίες που πρέπει να πραγματοποιήσει ο επενεργητής και τις πιέσεις που χρειάζονται κάθε chamber ξεχωριστά παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

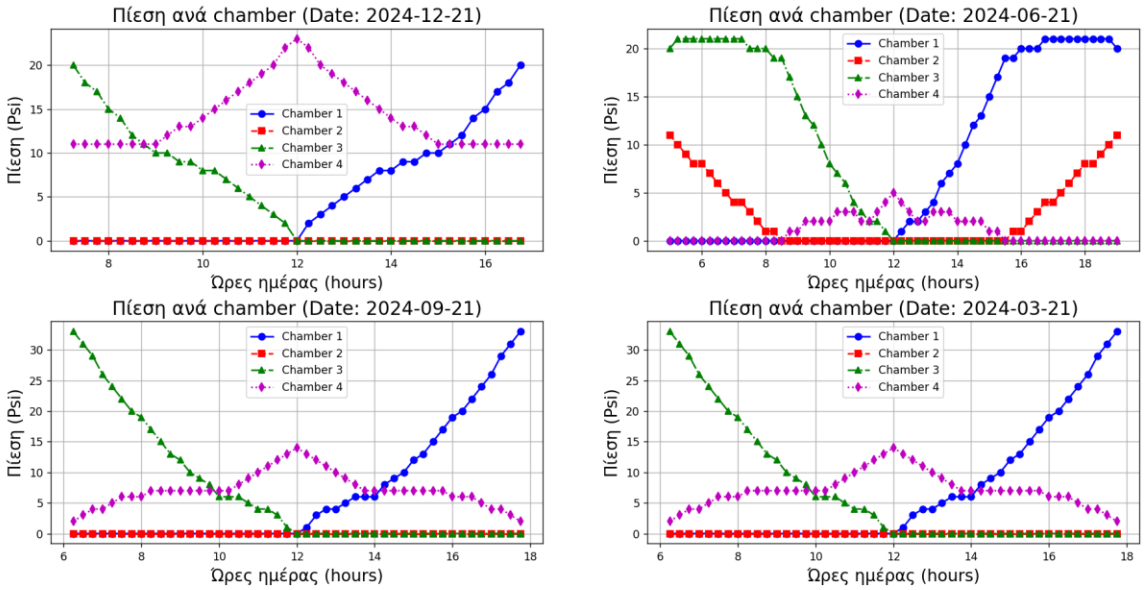
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται στις 21 Δεκεμβρίου που είναι το χειμερινό ηλιοστάσιο στο βόρειο ημισφαίριο, η καμπύλη είναι πιο ανοιχτή με τη χαμηλότερη τιμή ζενίθιας γωνίας γύρω στις 65° και στην ανατολή και η δύση του ήλιου εμφανίζονται σε σχετικά υψηλές γωνίες αζιμουθίου (περίπου από 120° έως 240°). Στις 21 Δεκεμβρίου που είναι το θερινό ηλιοστάσιο στο βόρειο ημισφαίριο, η καμπύλη είναι πιο κλειστή με τη χαμηλότερη τιμή γωνίας ζενίθιας γωνίας γύρω στις 10° και η ανατολή και η δύση του ήλιου εμφανίζονται σε χαμηλότερες γωνίες αζιμουθίου (περίπου από 60° έως 300°). Για τις δύο ισημερίες την φθινοπωρινή και την εαρινή η καμπύλη είναι συμμετρική και πιο ανοιχτή σε σχέση με το θερινό ηλιοστάσιο αλλά πιο κλειστή από το χειμερινό, η χαμηλότερη τιμή γωνίας ζενίθιας είναι περίπου στις 40° και η ανατολή και η δύση του ήλιου εμφανίζονται περίπου από 100° έως 275°.



Εικόνα 80: Ηλιακή ιχνηλάτηση σε εργαστηριακό χώρο για την μεγαλύτερη μέρα του χρόνου 21 Ιουνίου με βήμα 2 ώρες.

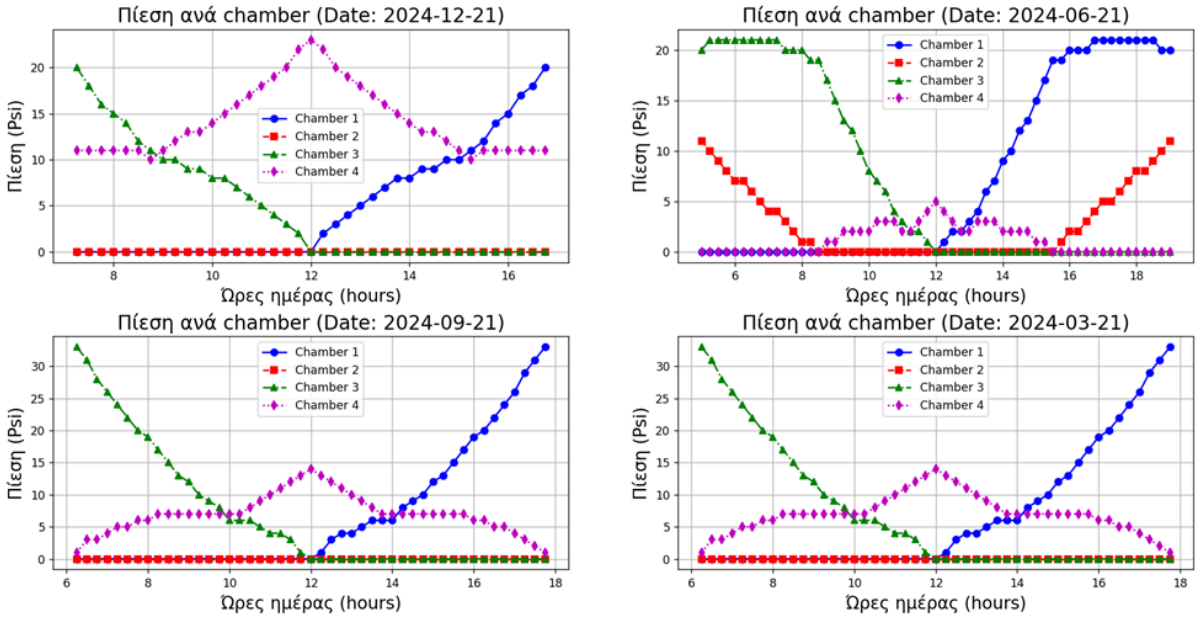
Στο θερινό ηλιοστάσιο, ο ήλιος φτάνει στο υψηλότερο σημείο του ουρανού (η χαμηλότερη γωνία ζενίθ). Στο χειμερινό ηλιοστάσιο, ο ήλιος φτάνει στο χαμηλότερο σημείο του ουρανού (η υψηλότερη γωνία ζενίθ). Στην ισημερία, η καμπύλη είναι συμμετρική και ενδιάμεση μεταξύ των άκρων του ηλιοστασίου. Το αζιμούθιο που καλύπτεται από τον ήλιο υποδηλώνει ότι είναι μεγαλύτερο το καλοκαίρι, μικρότερο το χειμώνα, υποδηλώνοντας μεγαλύτερη διάρκεια ημέρας το καλοκαίρι και μικρότερη το χειμώνα. Αυτή η σύγκριση δείχνει πώς οι εποχές και η γεωγραφική θέση επηρεάζουν την πορεία του ήλιου στον ουρανό.

Το διάγραμμα 24 απεικονίζει τη μεταβολή της πίεσης σε τέσσερις θαλάμους (chambers) κατά τη διάρκεια της ημέρας για τέσσερις διαφορετικές ημερομηνίες το έτος 2024. Στις 21 Δεκεμβρίου, η πίεση στον chamber 1 (μπλε) αυξάνεται μετά τις 12:00 και φτάνει σε μέγιστη τιμή γύρω στις 17:00, ενώ η πίεση στον chamber 2 (κόκκινο) παραμένει σταθερή κοντά στο μηδέν τη διάρκεια της ημέρας. Η πίεση στον chamber 3 (πράσινο) μειώνεται από το πρωί και φτάνει στο μηδέν περίπου στις 12:00, ενώ η πίεση στον chamber 4 (μωβ) παραμένει σχεδόν σταθερή όλη τη διάρκεια της ημέρας με μια ελαφρά αύξηση και μείωση το μεσημέρι.



Διάγραμμα 24: Πίεση ανά chamber (Date: 2024-12-21) - (Date: 2024-06-21) - (Date: 2024-09-21) - (Date: 2024-05-21).

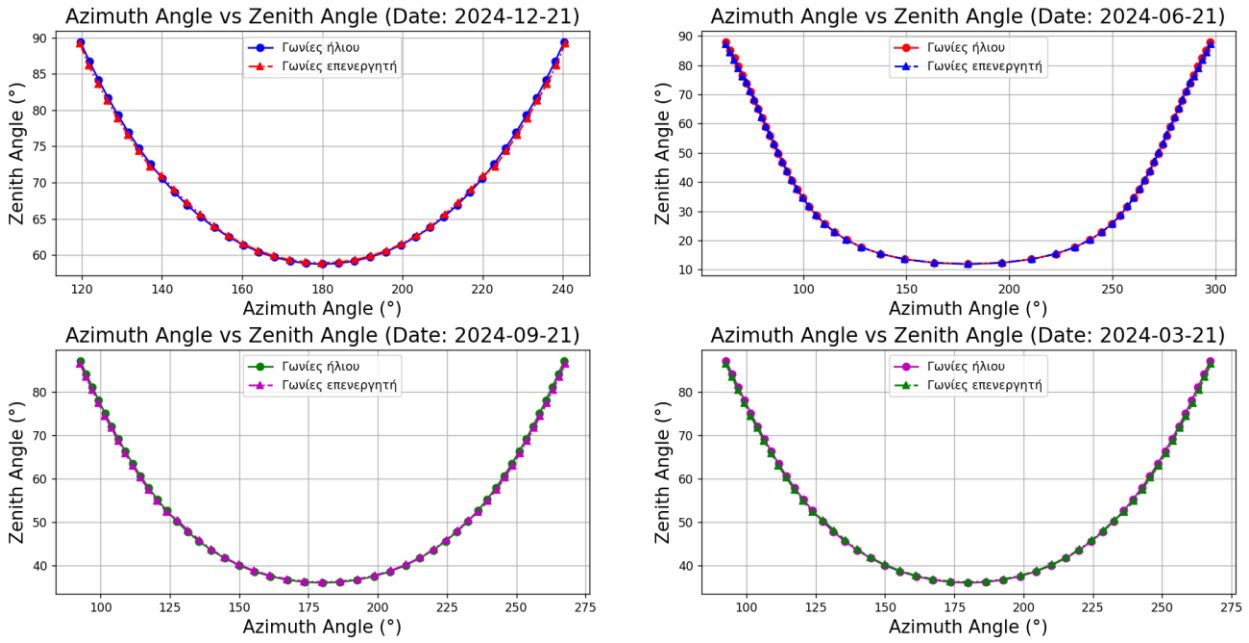
Στις 21 Ιουνίου, η πίεση στον chamber 1 αυξάνεται σταθερά από τις 8:00 έως τις 18:00. Στον chamber 2, η πίεση αυξάνεται από τις 8:00 και μειώνεται μετά το μεσημέρι, ενώ στον chamber 3 η πίεση μειώνεται δραματικά από τις 6:00 και φτάνει στο μηδέν γύρω στις 14:00. Η πίεση στον chamber 4 παραμένει σχεδόν σταθερή όλη τη διάρκεια της ημέρας.Στις 21 Σεπτεμβρίου και 21 Μαρτίου, η πίεση στον chamber 1 αυξάνεται σταθερά από τις 8:00 έως τις 18:00, ενώ στον chamber 2 παραμένει σταθερή κοντά στο μηδέν. Η πίεση στον chamber 3 μειώνεται σταθερά από το πρωί και φτάνει στο μηδέν περίπου στις 12:00, και στον chamber 4 παραμένει σχεδόν σταθερή όλη τη διάρκεια της ημέρας με μια μικρή αύξηση και μείωση γύρω στο μεσημέρι.



Διάγραμμα 25: Azimuth Angle vs Zenith Angle (Date: 2024-12-21) - (Date: 2024-06-21) - (Date: 2024-09-21) - (Date: 2024-05-21) που πραγματοποιεί ο επενεργητής vs γωνίες που πραγματοποιεί ο επενεργητής ήλιος.

Συνολικά, παρατηρείτε ότι η πίεση στον chamber 1 παρουσιάζει σταθερή αύξηση το απόγευμα και φτάνει στη μέγιστη τιμή αργά την ημέρα για όλες τις ημερομηνίες. Η πίεση στον chamber 2 παραμένει σταθερή και κοντά στο μηδέν σχεδόν σε όλες τις ημερομηνίες, εκτός από τον Ιούνιο όπου παρουσιάζει αύξηση και πτώση το μεσημέρι. Η πίεση στον chamber 3 μειώνεται δραματικά από το πρωί και φτάνει στο μηδέν περίπου το μεσημέρι για όλες τις ημερομηνίες, ενώ η πίεση στον chamber 4 είναι σχεδόν σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας με μικρές αυξομειώσεις γύρω στο μεσημέρι. Οι πιέσεις των θαλάμων κατά τη διάρκεια της ημέρας, με μικρές διαφορές ανάλογα με την ημερομηνία, και πιθανές αλλαγές στις εξωτερικές συνθήκες ή στη λειτουργία των θαλάμων κατά τις διάφορες εποχές. Στην συνέχεια, θα ασκηθούν οι πιέσεις που έχουν υπολογιστεί για αυτές τις ημερομηνίες ανά chamber και θα καταγραφούν οι γωνίες που δημιουργεί ο επενεργητής. Επομένως, θα γίνει σύγκριση των γωνιών που πραγματοποιεί ο επενεργητής με τις υπολογισμένες πιέσεις που πρέπει να ασκηθούν ανά chamber.

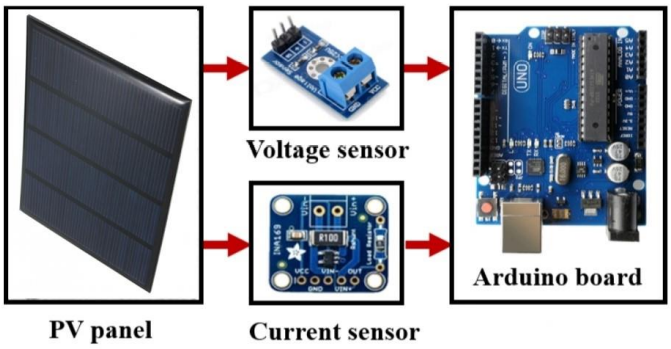
Με μία πρώτη ματιά, παρατηρείται ένα σφάλμα όπως είναι λογικό διότι, παρατηρήθηκε εξ αρχής από τη πρώτη πειραματική διαδικασία, αλλά επειδή χρησιμοποιούνται δύο chamber αυξάνεται το μέσο σφάλμα κατά 4% και το τελικό μέσο σφάλμα είναι 9% σε σχέση με των μαθηματικών υπολογισμών των γωνιών και των γωνιών που πραγματοποιεί ο επενεργητής. Στην συνέχεια, θα ασκηθούν οι πιέσεις που χρειάζονται για να δημιουργεί ο επενεργητής ακριβώς τις γωνίες. Το διάγραμμα 24 με το διάγραμμα 25 έχουν παρόμοια πρότυπα για τις πιέσεις στους θαλάμους κατά τη διάρκεια της ημέρας για τις τέσσερις διαφορετικές ημερομηνίες. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες μικρές διαφορές στις συγκεκριμένες τιμές της πίεσης σε ορισμένα χρονικά σημεία. Αυτές οι διαφορές πιθανόν να οφείλονται σε διορθώσεις ή βελτιώσεις στα πειραματικά δεδομένα, με αποτέλεσμα την αύξηση του μέσου σφάλματος κατά 4%, φέρνοντας το τελικό μέσο σφάλμα στο 9%. Στη συνέχεια, θα εφαρμοστούν οι πιέσεις που απαιτούνται για να επιτευχθούν οι ακριβείς γωνίες που χρειάζεται να δημιουργεί ο επενεργητής, επιτρέποντας έτσι τη σύγκριση των υπολογισμένων πιέσεων με τις πραγματικές γωνίες που πραγματοποιεί ο επενεργητής.



Διάγραμμα 26: Πίεση ανά chamber (Date: 2024-12-21) - (Date: 2024-06-21) - (Date: 2024-09-21) - (Date: 2024-05-21) για να πραγματοποιεί τις υπολογισμένες γωνίες.

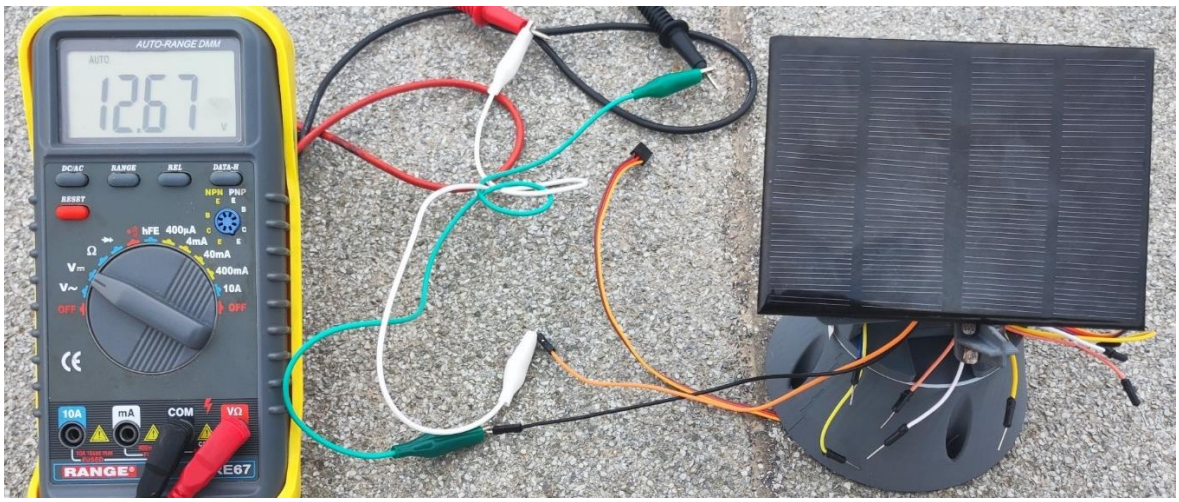
7.9 Πειραματική διαδικασία ηλιακής ιχνηλάτησης σε πραγματικές συνθήκες και σύγκριση παραγωγής ενέργειας με ένα σταθερό τοποθετημένο φωτοβολταϊκό πάνελ

Σε αυτό το πείραμα θα μελετηθεί η παραγωγή ενέργειας του συστήματος ηλιακής ιχνηλάτησης με την τεχνολογία των «soft robotics», σε σύγκριση με ένα σταθερό τοποθετημένο φωτοβολταϊκό πάνελ σε κλίση 45°. Ο στόχος του πειράματος είναι να συγκριθεί την παραγωγή ενέργειας από τα δύο συστήματα και να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της ηλιακής ιχνηλάτησης σε πραγματικές συνθήκες. Το φωτοβολταϊκό πάνελ συνδέεται με τον αισθητήρα τάσης και τον αισθητήρα ρεύματος, οι οποίοι μετρούν την τάση και το ρεύμα που παράγονται από το φωτοβολταϊκό πάνελ, αντίστοιχα. Αυτοί οι αισθητήρες επεξεργάζονται τα δεδομένα και στέλνουν τις μετρήσεις στην πλακέτα Arduino UNO, η οποία μπορεί να τις εμφανίσει ή να τις αποθηκεύσει για περαιτέρω ανάλυση. Αυτό το σύστημα επιτρέπει την παρακολούθηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων και την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης σε πραγματικό χρόνο.



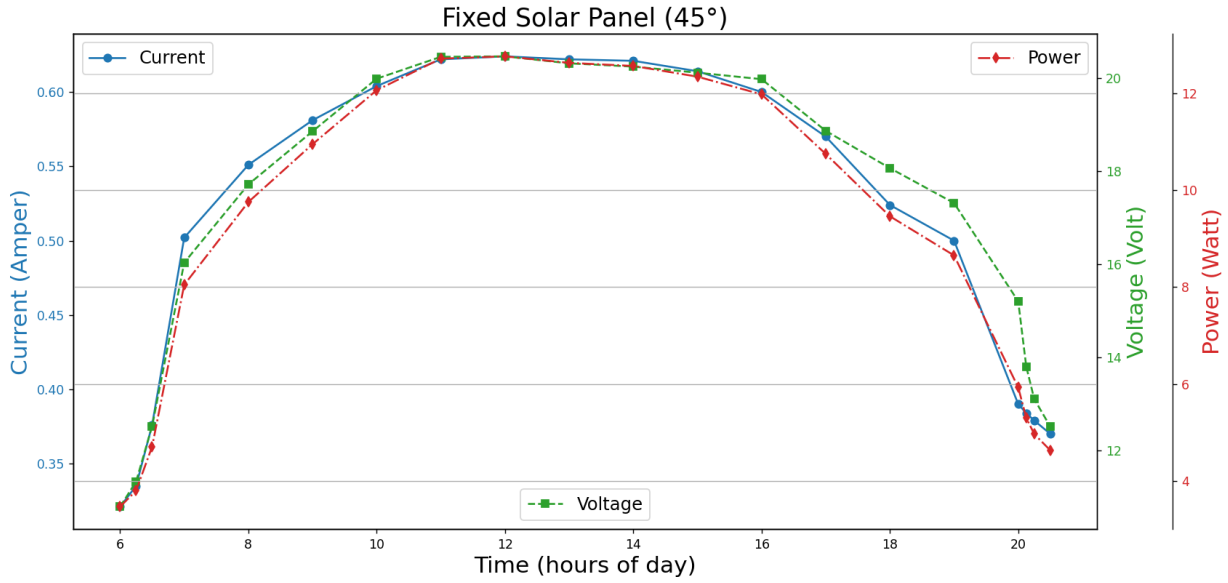
Εικόνα 81: Παρακολούθηση παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκό από Arduino με την χρήση αισθητήρων.

Σε πρώτο στάδιο, συλλέχθηκαν δεδομένα για το σταθερό τοποθετημένο φωτοβολταϊκό πάνελ σε κλίση 45°.



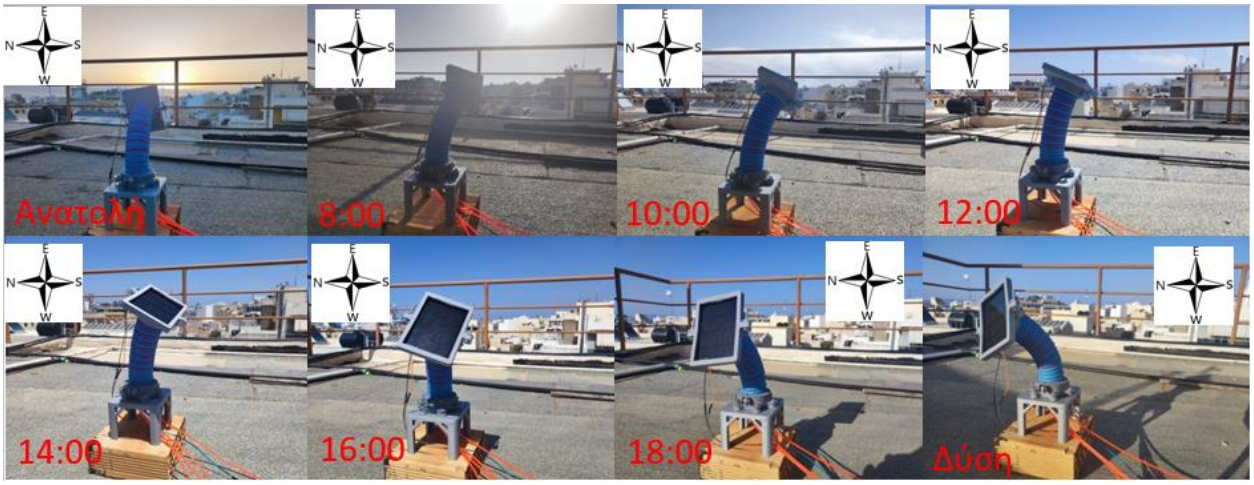
Εικόνα 82: Σταθερό τοποθετημένο φωτοβολταϊκό πάνελ σε κλίση 45°.

Τα διαγράμματα που αναπτύχθηκαν από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ήταν τάσης προς ώρες ημέρας, ρεύματος προς ώρες ημέρας και ισχύς προς ώρες ημέρας.



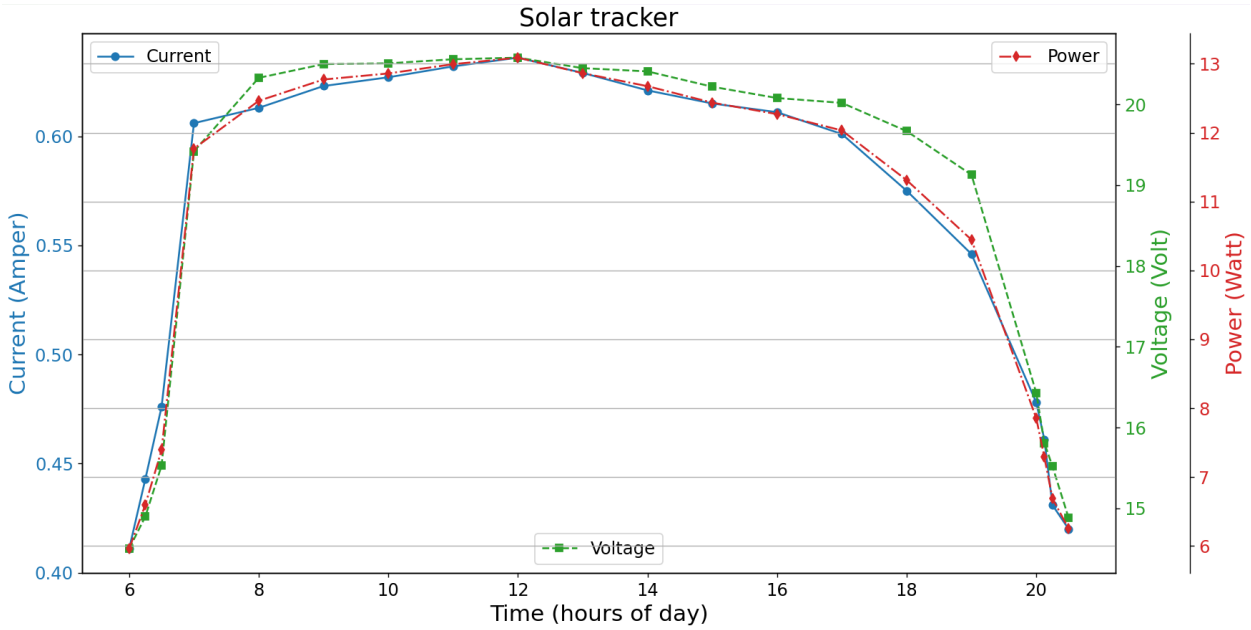
Διάγραμμα 27: Κοινό διάγραμμα Voltage (Volt), Current (Amp) και Power (Watt) vs Time (hours of day) για σταθερό τοποθετημένο φωτοβολταϊκό πάνελ σε κλίση 45°.

Στην συνέχεια, συλλέχθηκαν τα δεδομένα ηλιακής ιχνηλάτησης με την τεχνολογία των «soft robotics».



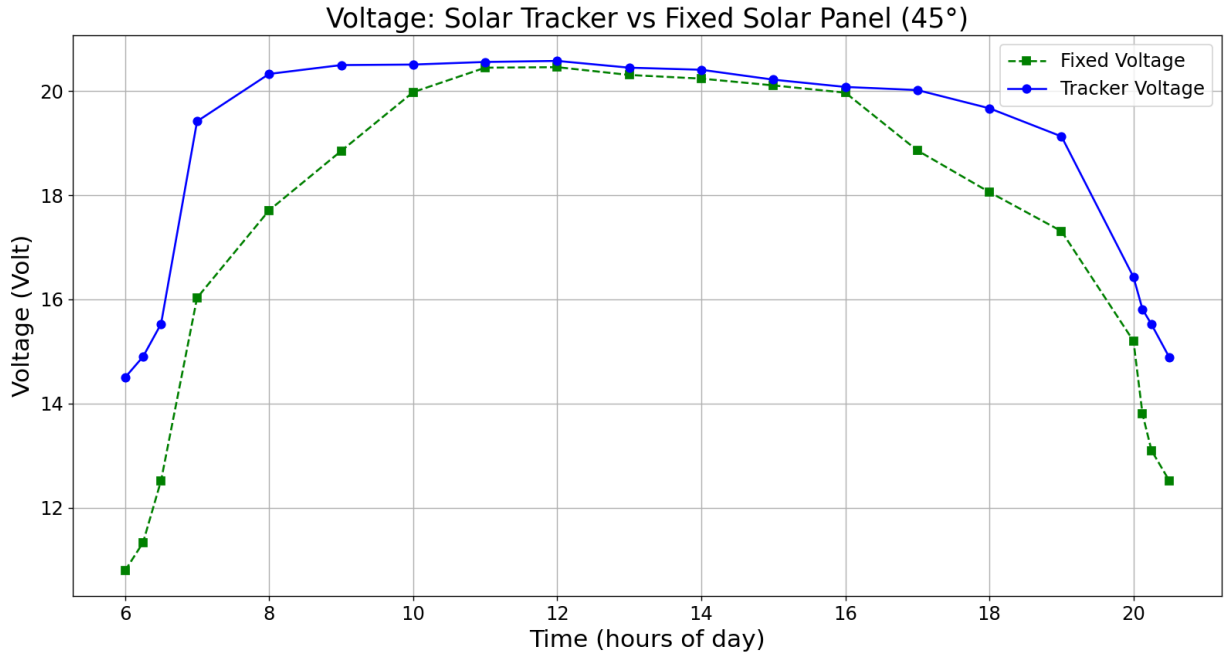
Εικόνα 83: Ηλιακή ιχνηλάτηση σε πραγματικές συνθήκες.

Τα διαγράμματα που αναπτύχθηκαν από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ήταν τάσης προς ώρες ημέρας, ρεύματος προς ώρες ημέρας και ισχύς προς ώρες ημέρας.

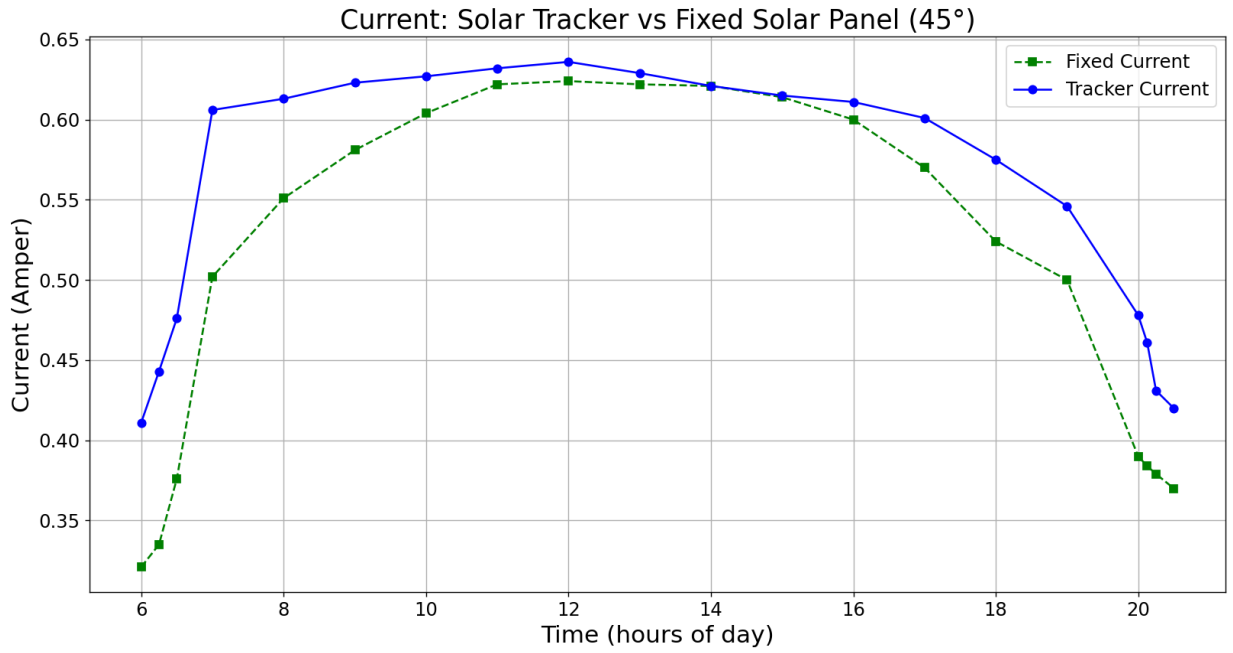


Διάγραμμα 28: Κοινό διάγραμμα Voltage (Volt), Current (Amp) και Power (Watt) vs Time (hours of day) ηλιακής ιχνηλάτησης με την τεχνολογία των «soft robotics».

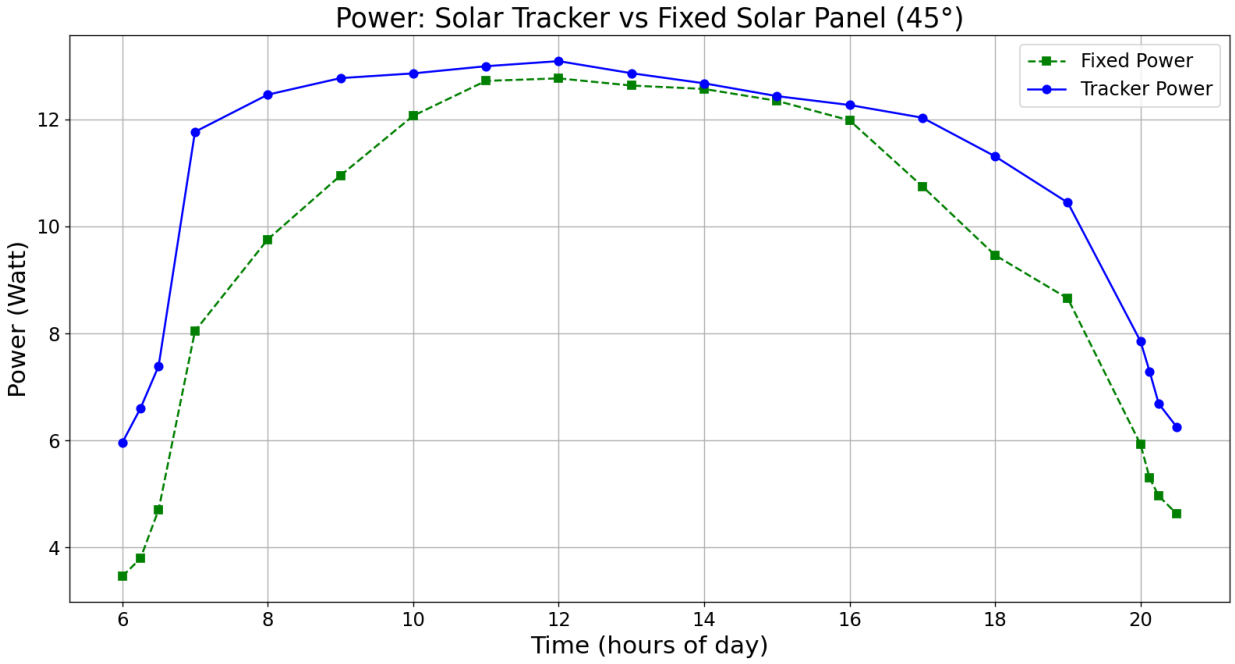
Επομένως, με την συλλογή των απαραίτητων δεδομένων μπορεί να γίνει σύγκριση της ηλιακής ιχνηλάτησης με την τεχνολογία των «soft robotics» με ένα σταθερό τοποθετημένο φωτοβολταϊκό πάνελ σε κλίση 45°, με βάση τα διαγράμματα που έχουν δημιουργηθεί.



Διάγραμμα 29: Voltage (Volt) vs Time (hours of day) ηλιακής ιχνηλάτησης με την τεχνολογία των «soft robotics» vs σταθερό τοποθετημένο φωτοβολταϊκό πάνελ σε κλίση 45°.



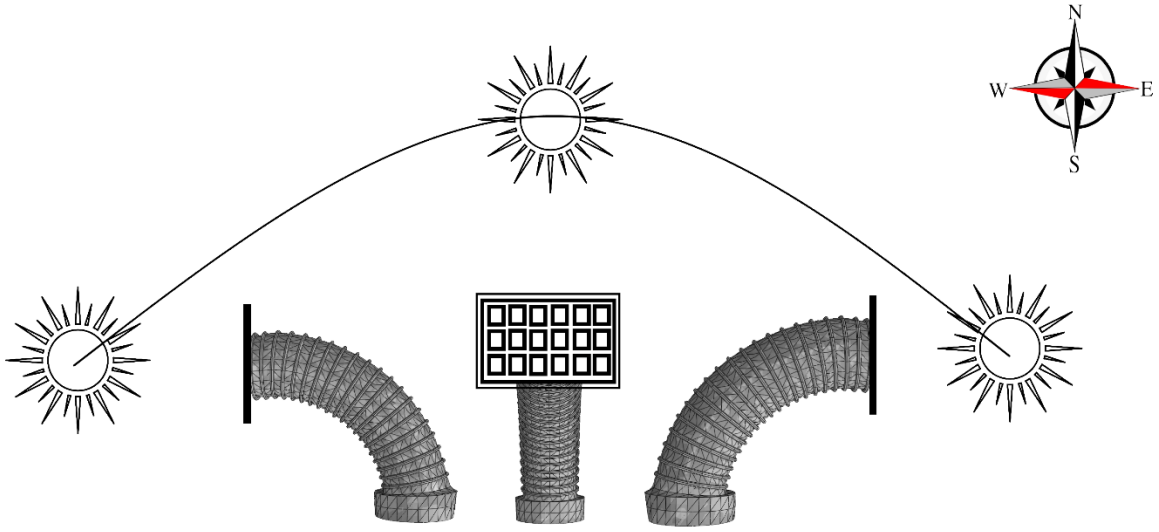
Διάγραμμα 30: Current (Amp) vs Time (hours of day) ηλιακής ιχνηλάτησης με την τεχνολογία των «soft robotics» vs σταθερό τοποθετημένο φωτοβολταϊκό πάνελ σε κλίση 45°.



Διάγραμμα 31: Power (Watt) vs Time (hours of day) ηλιακής ιχνηλάτησης με την τεχνολογία των «soft robotics» vs σταθερό τοποθετημένο φωτοβολταϊκό πάνελ σε κλίση 45°.

Τα τρία διαγράμματα παρουσιάζουν τη σύγκριση της απόδοσης μεταξύ ενός ηλιακού συλλέκτη με σταθερή γωνία 45° και ενός ηλιακού συλλέκτη με ηλιακό ιχνηλάτη σε τρεις διαφορετικές παραμέτρους: ισχύ (Watt), ένταση ρεύματος (Amp), και τάση (Volt). Από την ανάλυση των διαγραμμάτων προκύπτει ότι ο ηλιακός ιχνηλάτης υπερτερεί σε όλες τις παραμέτρους. Συγκεκριμένα, ο ηλιακός ιχνηλάτης παράγει υψηλότερη ισχύ και διατηρεί τη μέγιστη

τιμή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα της ημέρας. Παρόμοια, η ένταση του ρεύματος και η τάση που παράγεται από τον ηλιακό ιχνηλάτη είναι σταθερά υψηλότερες συγκριτικά με αυτές του σταθερού συλλέκτη. Επομένως, παρατηρείτε από τα διαγράμματα μέση αύξηση τάσης 11.33%, μέση αύξηση ρεύματος 11.54% και μέση αύξηση ισχύος 25.12% σε σύγκριση του ηλιακού ιχνηλάτη και του σταθερά τοποθετημένου πάνελ. Αυτό σημαίνει ότι ο ηλιακός ιχνηλάτης εκμεταλλεύεται καλύτερα το διαθέσιμο ηλιακό φως, διατηρώντας υψηλή απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, σε αντίθεση με τον σταθερό συλλέκτη που εμφανίζει μειωμένη απόδοση τις ώρες που ο ήλιος δεν είναι στη βέλτιστη γωνία. Συνολικά, τα δεδομένα δείχνουν ότι οι ηλιακοί συλλέκτες με ιχνηλάτες προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους σταθερούς συλλέκτες, καθιστώντας τους πιο αποδοτικούς για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας. Παρόλο το σφάλμα που είχε προκύψει από τη δεύτερη πειραματική διαδικασία που γινόταν στο εργαστήριο για ηλιακή ιχνηλάτηση, τα αποτελέσματα είναι σαφή.



Εικόνα 84: Ηλιακός ιχνηλάτης με την τεχνολογία των «soft robotics».

8 Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

8.1 Εισαγωγή

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία μελετήθηκε η κατασκευή ηλιακού ιχνηλάτη με την τεχνολογία των «soft robotics», τόσο σε επίπεδο προσομοιώσεων, όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με προσομοιώσεις του απλουστευμένου μοντέλου και με αυτόν τον τρόπο μπορούν να εξαχθούν διάφορα συμπεράσματα, καθώς επίσης και να προταθεί μελλοντική εργασία.

8.2 Συμπεράσματα

Αυτή η εργασία εστιάζει στην έρευνα, το σχεδιασμό, την κατασκευή και την πειραματική ανάλυση «soft» επενεργητών για συστήματα ηλιακής παρακολούθησης. Η εφαρμογή της τεχνολογίας «soft robotics» παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα στη βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η προσέγγιση περιλαμβάνει κινηματική μοντελοποίηση των ενεργοποιητών, κατασκευή και συναρμολόγηση εξαρτημάτων, ακριβή έλεγχο πίεσης μέσω μικροελεγκτών και ηλεκτρικών εξαρτημάτων και πειραματικές διαδικασίες για την επικύρωση θεωρητικών προβλέψεων και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος.

Η παραμετροποίηση του επενεργητή μειώνοντας το μέγεθός του κατά το ήμισυ απλοποιεί την ανάλυση και βελτιώνει την απόδοσή του. Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι η μείωση του μεγέθους μειώνει την απαραίτητη πίεση για κάμψη 90°και απαιτεί ελαφρώς υψηλότερες τάσεις κάμψης. Η προσθήκη δακτυλίων αυξάνει την αντοχή του επενεργητή και βελτιώνει τη λειτουργία του. Συνολικά, το μειωμένο μέγεθος και η ενίσχυση του βελτιώνουν την απόδοση και την ανθεκτικότητα του επενεργητή, καθιστώντας τον πιο αποτελεσματικό και οικονομικό όσον αφορά τη χρήση υλικών και πόρων.

Η χρήση σιλικόνης υψηλής ποιότητας (ZA 22 MOULD) διασφαλίζει την ανθεκτικότητα και την ευελιξία του επενεργητή. Οι ακριβείς διαδικασίες χύτευσης και συναρμολόγησης είναι κρίσιμες για την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η προσεκτική συναρμολόγηση του καλουπιού και η σωστή χύτευση αποτρέπουν την παραμόρφωση και διασφαλίζουν την ακρίβεια του επενεργητή. Η χρήση υλικών υψηλής ποιότητας και οι ακριβείς διαδικασίες κατασκευής και συναρμολόγησης εγγυώνται την ποιότητα και την ακρίβεια του τελικού προϊόντος.

Η κινηματική μοντελοποίηση έδειξε τη σχέση μεταξύ πίεσης και παραμόρφωσης του επενεργητή, επιβεβαιώνοντας τη σταθερή καμπυλότητα. Η αντίστροφη κινηματική βοηθά στον υπολογισμό των τάσεων που απαιτούνται για συγκεκριμένες γωνίες κάμψης και περιστροφής. Η πειραματική διαδικασία επιβεβαίωσε την ακρίβεια του κινηματικού μοντέλου και η απόκλιση από τα πραγματικά δεδομένα ήταν πολύ μικρή. Η κινηματική μοντελοποίηση και οι πειραματικές διαδικασίες επικυρώνουν την ακρίβεια του μοντέλου και υπογραμμίζουν τη σημασία του προσεκτικού συντονισμού των παραμέτρων για τη βελτίωση της απόδοσης του επενεργητή.

Ο ακριβής έλεγχος πίεσης διασφαλίζεται με τη χρήση ενός μικροελεγκτή και ενός ηλεκτροπνευματικού ρυθμιστή πίεσης SMC ITV0050-3BL. Ο μετατροπέας Adafruit MCP4728 I2C Quad DAC επιτρέπει την ακριβή μετατροπή σήματος ψηφιακού σε αναλογικό για τη λειτουργία βαλβίδων πίεσης. Η καλωδίωση και ο προγραμματισμός του συστήματος διασφαλίζουν την ευελιξία και την αποτελεσματικότητα του επενεργητή. Η ενσωμάτωση του μικροελεγκτή και των ηλεκτρικών εξαρτημάτων επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της πίεσης και της κίνησης του επενεργητή, καθιστώντας το σύστημα ευέλικτο και αποτελεσματικό.

Πειραματικές δοκιμές δείχνουν ότι η ηλιακή παρακολούθηση με χρήση τεχνολογίας «soft robotics» μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ. Η σύγκριση με σταθερά φωτοβολταϊκά πάνελ με κλίση 45° δείχνει ότι η ηλιακή παρακολούθηση παρέχει μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Σε σύγκριση με τα σταθερά πάνελ, τα ηλιακά συστήματα παρακολούθησης με «soft» επενεργητές παρουσίασαν μέση αύξηση τάσης 11,33%, μέση αύξηση ρεύματος 11,54% και μέση αύξηση ισχύος 25,12%. Η ηλιακή παρακολούθηση με χρήση τεχνολογίας «soft robotics» προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στην απόδοση και την παραγωγή ενέργειας των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Η μελέτη και κατασκευή του "soft" επενεργητή για χρήση σε συστήματα ηλιακής ιχνηλάτησης απέδειξε ότι η εφαρμογή της τεχνολογίας των "soft robotics" μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η κινηματική μοντελοποίηση και οι πειραματικές διαδικασίες επιβεβαίωσαν την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα του επενεργητή, ενώ η χρήση προηγμένων υλικών και τεχνολογιών εξασφάλισε την ανθεκτικότητα και την αποδοτικότητα του συστήματος. Συνολικά, η ηλιακή ιχνηλάτηση με την τεχνολογία των "soft robotics" προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα σταθερά φωτοβολταϊκά πάνελ, βελτιώνοντας την απόδοση και την παραγωγή ενέργειας.

8.3 Μελλοντική εργασία

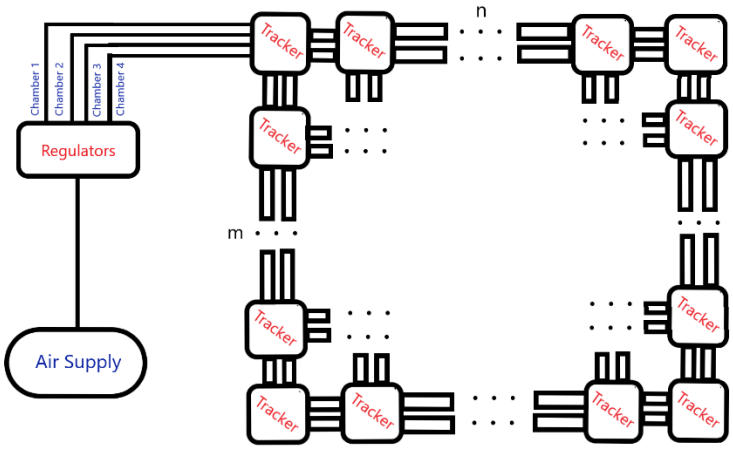
Η μελλοντική εργασία αφορά τόσο σε βελτιώσεις της υπάρχουσας έκδοσης του ηλιακού ιχνηλάτη με την τεχνολογία των «soft robotics» όσο και την εξέλιξή της.

Αρχικά, προτείνεται η προσθήκη ενός γυροσκοπίου που μπορεί να εξάγει δεδομένα γωνιών του επενεργητή, ώστε αυτά σε συνδυασμό των ήδη γνωστών γωνιών που πρέπει να πραγματοποιεί ο επενεργητής ανάλογα την ημερομηνία και την ώρα, να γίνει έλεγχος κλειστού βρόγχου ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή γωνία μειώνοντας κατά πολύ ακόμα το σφάλμα μεταξύ μαθηματικού επιπέδου και πειραματικού.

Σαν μελλοντική εργασία θα ληφθούν υπόψη οι εξωτερικές παραδοχές δυναμικής φόρτισης. Η ανεμοφόρτιση είναι μια σημαντική εξωτερική επίδραση που πρέπει να ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό ενός ηλιακού ιχνηλάτη, καθώς οι δυνάμεις και οι ροπές που δημιουργούνται από τον άνεμο μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές καταπονήσεις στα φωτοβολταϊκά πάνελ και τον σκελετό. Ο σχεδιασμός πρέπει να εξασφαλίζει την αντοχή στην κάμψη και τη στρέψη που προκαλούνται από τον άνεμο και να βελτιστοποιεί την αεροδυναμική του συστήματος. Επιπλέον, η βροχόπτωση και η υγρασία μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία του ιχνηλάτη, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση στεγανών υλικών και την εφαρμογή αντιδιαβρωτικών επιχρισμάτων για την προστασία από την υγρασία και τη διάβρωση. Τέλος, το χιόνι και ο πάγος μπορούν να αυξήσουν το βάρος στα πάνελ και να επηρεάσουν την κίνηση του ιχνηλάτη. Για τον λόγο αυτό, είναι σημαντικό να σχεδιαστούν συστήματα αποστράγγισης και αποφυγής σχηματισμού πάγου, καθώς και να εξασφαλιστεί η αντοχή της κατασκευής στο βάρος του χιονιού.

Ολοκληρώνοντας, να προστεθούν σε σειρά “n” αριθμού και παράλληλα “m” αριθμού επιπλέον ίδιοι ηλιακοί ιχνηλάτες με την τεχνολογία των «soft robotics», διότι με μία παροχή πεπιεσμένου αέρα και σε συνδυασμό με τις τέσσερις βαλβίδες και επειδή θα έχουν συνδεθεί σε σειρά και παράλληλα όλοι ηλιακοί ιχνηλάτες, θα πραγματοποιούν τις ίδιες κινήσεις. Έτσι, με αυτόν τρόπο θα αυξηθεί η παραγωγή ενέργειας λόγο περισσότερων φωτοβολταϊκών πάνελ και σε περίπτωση βλάβης ενός ηλιακού ιχνηλάτη είναι πιο εύκολη και γρήγορη η αντικατάσταση του σε

σχέση με τους παραδοσιακούς ηλιακούς ιχνηλάτες λόγο έλλειψης πολλών μηχανικών μερών. Επιπρόσθετα μπορεί να γίνει τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πάνελ με την συγκεκριμένη ηλιακή ιχνηλάτιση σε πλαγιές βουνών και λόφων που, δεν μπορούσαν να τοποθετηθούν τα παραδοσιακά συστήματα λόγω όγκου, πολλών μηχανικών μερών, του υψηλού κόστους και των συχνά περίπλοκων και δυσκίνητων δομών τους που προσέθεταν σημαντικό βάρος στο αρχικό σύστημα. Τέλος, να τοποθετηθούν πολλά τέτοια πάνελ σε παράλληλη και σειρά σύνδεση (εικόνα 85), σε προσόψεις μικρών και μεγάλων κτιρίων που μπορούν να επιτυγχάνουν ταυτόχρονα σκίαση στο κτίριο και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 85: Ηλιακοί ιχνηλάτες με την τεχνολογία των «soft robotics» συνδεδεμένοι σε σειρά και παράλληλα.

Αναφορές - Βιβλιογραφία

[1] *Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons.*

[2] *Luque, A., & Hegedus, S. (2011). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons.*

[3] "https://www.renewsysworld.com/post/solar-trackers".

[4] "Ahmad, G. E., Hussein, H. M. S., & El-Ghetany, H. H. (2003). 'Theoretical analysis and experimental verification of PV modules.' Renewable Energy, 28(2), 239-250.".

[5] "Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2011). 'A review on solar energy use in industries.' Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(4), 1777-1790.".

[6] "https://www.power-technology.com/projects/shamsonesolarpowerst/".

[7] "https://www.independent.com/2016/07/21/blue-skies-create-green-energy/".

[8] "Lexico, Oxford".

[9] "D.S.A. De Focatiis και S. D. Guest, 2002, Deployable membranes designed from folding tree leaves, Department of Engineering, University of Cambridge, The Royal Society".

[10] "Soft Robotics Toolkit (https://softroboticstoolkit.com)".

[11] H. E.-H. Ayman A. Nada, "Development of inverse static model of continuum robots based on absolute nodal coordinates formulation for large deformation applications," 2023.

[12] "Rus Daniela, Michael T. Tolley, May 2015, 'Design, Fabrication and Control of Soft Robots.' MIT Open Access Articles, Nature 521, no. 7553, 467–475, Nature Publishing Group".

[13] "S. Seok, C.D. Onal, K.-J. Cho, R.J. Wood, D. Rus, S. Kim, Meshworm: a peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators IEEE/ASME Trans., Mechatronics. 18 (2012) 1485-149".

[14] "W. McMahan, V. Chitrakaran, M. Csencsits, D. Dawson, I.D. Walker, B.A Jones, M. Pritts, D. Dienno, M. Grissom, C.D. Rahn, Field trials and testing of the OctArm continuum manipulator, in: Proc. 2006 IEEE Int. Conf. Robot. Autom. 2006. ICRA 2006., IEEE, 2006: pp. 2336-2341.".

[15] Deepak Trivedi, Chris Rahn, William Kier, and Ian D. Walker, "Soft Robotics: Biological Inspiration, State of the Art, and Future Research".

[16] "E.H. Skorina, M. Luo, C.D. Onal, A soft robotic wearable wrist device for kinesthetic haptic feedback, Front. Robot. AI. 5 (2018) 83.".

[17] "C. Rognon, M. Koehler, C. Duriez, D. Floreano, A.M. Okamura, Soft haptic device to render the sensation of flying like a drone, IEEE Robot. Autom. Lett. 4 (2019) 2524-2531.".

[18] "H.-T. Lin, G.G. Leisk, B. Trimmer, GoQBot: a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot, Bioinspir. Biomim. 6 (2011) 26007.".

[19] “A. Arienti, M. Calisti, F. Giorgio-Serchi, C. Laschi, PoseiDRONE: design of a softbodied ROV with crawling, swimming and manipulation ability, in: 2013 Ocean. Diego, IEEE, 2013: pp. 1–7.”.

[20] “C. Laschi, B. Mazzolai, M. Cianchetti, Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities, Sci. Robot. 1 (2016).”.

[21] “F. Renda, F.G. Serchi, F. Boyer, C. Laschi, Structural dynamics of a pulsed-jet propulsion system for underwater soft robots, Int. J. Adv. Robot. Syst. 12 (2015) 68.”.

[22] “S. Kim, C. Laschi, B. Trimmer, Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics, Trends Biotechnol. 31 (2013) 287–294.”.

[23] “H. Wang, M. Totaro, L. Beccai, Toward perceptive soft robots: Progress and challenges, Adv. Sci. 5 (2018) 1800541.”.

[24] “S. Coyle, C. Majidi, P. LeDuc, K.J. Hsia, Bio-inspired soft robotics: Material selection, actuation, and design, Extrem. Mech. Lett. 22 (2018) 51–59.”.

[25] Z. Wang, Panagiotis Polygerinos, J. Overvelde, Kevin C. Galloway, K. Bertoldi, and C. Walsh, “ D. Trivedi, C.D. Rahn, W.M. Kier, I.D. Walker, Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research, Appl. Bionics Biomech. 5 (2008) 99–117.”.

[26] “M. Rolf, J.J. Steil, Constant curvature continuum kinematics as fast approximate model for the Bionic Handling Assistant, in: 2012 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst., IEEE, 2012: pp. 3440–3446.”.

[27] “H. Yang, M. Xu, W. Li, S. Zhang, Design and implementation of a soft robotic arm driven by SMA coils, IEEE Trans. Ind. Electron. 66 (2018) 6108–6116.”.

[28] “M.W. Gifari, H. Naghibi, S. Stramigioli, M. Abayazid, A review on recent advances in soft surgical robots for endoscopic applications, Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg. 15 (2019) e2010.”.

[29] “W. Dou, G. Zhong, J. Cao, Z. Shi, B. Peng, L. Jiang, Soft Robotic Manipulators: Designs, Actuation, Stiffness Tuning, and Sensing, Adv. Mater. Technol. (2021) 2100018.”.

[30] “I. Hussain, M. Malvezzi, D. Gan, Z. Iqbal, L. Seneviratne, D. Prattichizzo, F. Renda, Compliant gripper design, prototyping, and modeling using screw theory formulation, Int. J. Rob. Res. (2020) 0278364920947818.”.

[31] “L.U. Odhner, L.P. Jentoft, M.R. Claffee, N. Corson, Y. Tenzer, R.R. Ma, M. Buehler, R. Kohout, R.D. Howe, A.M. Dollar, A compliant, underactuated hand for robust manipulation, Int. J. Rob. Res. 33 (2014) 736–752.”.

[32] “J. Shintake, S. Rosset, B. Schubert, D. Floreano, H. Shea, Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators, Adv. Mater. 28 (2016) 231–238.”.

[33] “J. Guo, C. Xiang, J. Rossiter, A soft and shape-adaptive electroadhesive composite gripper with proprioceptive and exteroceptive capabilities, Mater. Des. 156 (2018) 586–587.”.

[34] “E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M.R. Zakin, H. Lipson, H.M. Jaeger, Universal robotic gripper based on the jamming of granular material, Proc. Natl. Acad. Sci. 107 (2010) 18809– 18814.”.

[35] “G. Kofod, W. Wirges, M. Paajanen, S. Bauer, Energy minimization for selforganized structure formation and actuation, Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 81916.”.

[36] “M. Cianchetti, C. Laschi, A. Menciassi, P. Dario, Biomedical applications of soft robotics, Nat. Rev. Mater. 3 (2018) 143–153.”.

[37] “M. Runciman, A. Darzi, G.P. Mylonas, Soft robotics in minimally invasive surgery, Soft Robot. 6 (2019) 423–443.”.

[38] “M. Sitti, Miniature soft robots—road to the clinic, Nat. Rev. Mater. 3 (2018) 74–75.”.

[39] “https://perriskritikos.gr/ήλιος/”.

[40] “https://newageastrologymagazine.com/2015/08/17/43/”.

[41] “https://slideplayer.gr/slide/6049765/”.

[42] “https://kgudulas-geography.blogspot.com/p/blog-page_3.html”.

[43] Ιωάννης Κατσίγιαννης, “«Μελέτη - διαστασιολόγηση αυτόνομων Φ/Β συστημάτων»”.

[44]“https://science.fandom.com/el/wiki/%CE%A3%CF%86%CE%B1%CE%B9%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%A3%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%B5%CF%84%CE%B1%CE%B3%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%B7”.

[45] “https://www.pantou.gr/astrol/meteorol/milank/ClimaCh.htm”.

[46] “https://sam.nrel.gov/”.

[47] “ Perlin J. (2005). ‘Late 1950s – Saved by the Space Race’. SOLAR EVOLUTION – The History of Solar Energy. The Rahus Institute.”.

[48] “ Toothman J, Scott A. (2011). ‘How Solar Cells Work.’ HowStuffWorks.com. Discovery Communications, LLC, 2010.”.

[49] “Nadia AL-Rousan, Nor Ashidi Mat Isa, Mohd Khairunaz Mat Desa. Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 82, Part 3. (2018). Pages 2548-2569.”.

[50] “Lorenzo, E., M. Perez, A. Ezpeleta, and J. Acedo.2002. Design of Tracking Photovoltaic Systems with a Single Vertical Axis. Progress in Photovoltaic: Research and Applications 10: 533–543.”.

[51] “Lubitz W.D. Effect of manual tilt adjustments on incident irradiance on fixed and tracking solar panels. Applied Energy, Volume 88, Issue 5, 2011, p. 1710-1719.”.

[52] “Hu, Yu & Zuo, Zheng & Li, Qingbin & Duan, YL. (2013). Boolean-Based Surface Procedure for the External Heat Transfer Analysis of Dams during Construction. Mathematical Problems in Engineering. 2013. Pages 1-17.”.

[53] “SolarScandinavia. SmartFlower. Accessed 2021-01-30. (https://solarscandinavia.se/?page_id=1182)”.

[54] “Rob Andrews, Nabeil Alazzam, and Joshua M. Pearce, Model of Loss Mechanisms for Low Optical Concentration on Solar Photovoltaic Arrays with Planar Reflectors. (2011). 40th American Solar Energy Society National Solar Conference Proceedings.”.

[55] “SolarPACES. (2018, 12 june). How CSP works: Tower, Through, Fresnel or Dish. Accessed 2021-01-30. (https://www.solarpaces.org/how-csp-works/)”.

[56] “Kozak T, Maranda W. Influence of ambient temperature on the amount of electric energy produced by solar modules. (2009). Mixed Design of Integrated Circuits & Systems, MIXDES ’09. MIXDES-16th International Conference.”.

[57] “R. G. Ross, Flat-Plate Photovoltaic Array Design Optimization, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. (1980). San Diego, CA, pp. 1126-1132.”.

[58] “Akbarzadeh A, Wadowski T. Heat pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation. (1995) Applied Thermal Engineering, vol. 16, no. 1, Pages 81-87.”.

[59] 1 Curtis Sparks, 1 Sai G. Nuthi, 2 Nicholas M. Vale, 3 and Panagiotis Polygerinos1 Pham Huy Nguyen, “Soft Poly-Limbs: Toward a New Paradigm of Mobile Manipulation for Daily Living Tasks”.

[60] “https://www.crealitycloud.com/post-detail/62c53e309422aa6e9647acae”.

[61] “https://www.dsneg.com/solar-panel/oem-mono-solar-panel/oem-mono-solar-pv-panel.html”.

[62] “https://www.artsuppliesonweb.com/en/Catalogue/01-Silicone/Zhermack-silicone-rubber/Zhermack-ZA-22-Mould-250gr-250gr”.

[63] Robert J, Webster III, and Bryan A. Jones, “Design and Kinematic Modeling of Constant Curvature Continuum Robots: A Review”.

[64] “https://www.arduino.cc”.

[65] “https://www.smcpneumatics.com/ITV0050-3BL.html”.

[66] “https://learn.adafruit.com/adafruit-mcp4728-i2c-quad-dac/overview”.

Παραρτήματα

Παράρτημα 1

Αυτό το παράρτημα περιέχει έναν κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού Python που υπολογίζει διάφορες ηλιακές γωνίες και παραμέτρους για μια δεδομένη τοποθεσία, βασισμένος στην τρέχουσα ημερομηνία. Ο κώδικας υπολογίζει τη θέση του ήλιου και τις σχετικές γωνίες που είναι απαραίτητες για την παρακολούθηση της ηλιακής τροχιάς, γεγονός που επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των ηλιακών συστημάτων. Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας με λεπτομερή περιγραφή των συναρτήσεων και των υπολογισμών που πραγματοποιεί.

```
import math
from datetime import datetime, timedelta

def calculate_solar_declination(day_of_year):
    return 23.45 *
math.sin(math.radians((360/365) * (284 +
day_of_year)))

def calculate_hour_angle(solar_time):
    return 15 * (solar_time - 12)

def calculate_zenith_angle(latitude, delta,
hour_angle):
    latitude_rad = math.radians(latitude)
    delta_rad = math.radians(delta)
    hour_angle_rad = math.radians(hour_angle)

    cos_z = (math.sin(delta_rad) *
math.sin(latitude_rad) +
             math.cos(delta_rad) *
math.cos(latitude_rad) *
math.cos(hour_angle_rad))
    z = math.degrees(math.acos(cos_z))
    return z

def calculate_solar_elevation(zenith_angle):
    return 90 - zenith_angle

def calculate_azimuth_angle(latitude, delta,
zenith_angle, hour_angle):
    latitude_rad = math.radians(latitude)
    delta_rad = math.radians(delta)
    zenith_angle_rad = math.radians(zenith_angle)
    cos_A = ((math.sin(delta_rad) -
math.sin(latitude_rad) *
math.cos(zenith_angle_rad)) /
             (math.cos(latitude_rad) *
math.sin(zenith_angle_rad)))
    cos_A = max(-1.0, min(1.0, cos_A))
    A = math.degrees(math.acos(cos_A))

    if hour_angle > 0:
        A = 360 - A

    return A

def calculate_incidence_angle(solar_elevation,
surface_tilt, surface_azimuth, solar_azimuth):
    solar_elevation_rad =
math.radians(solar_elevation)
    surface_tilt_rad = math.radians(surface_tilt)
    solar_azimuth_rad =
math.radians(solar_azimuth)
    surface_azimuth_rad =
math.radians(surface_azimuth)

    cos_theta = (math.sin(solar_elevation_rad) *
math.cos(surface_tilt_rad) +
                 math.cos(solar_elevation_rad) *
math.sin(surface_tilt_rad) *
                 math.cos(solar_azimuth_rad -
surface_azimuth_rad))
    theta = math.degrees(math.acos(cos_theta))
    return theta

def calculate_sunrise_sunset(latitude, delta):
    latitude_rad = math.radians(latitude)
    delta_rad = math.radians(delta)
```

```
    cos_h = -math.tan(latitude_rad) *
math.tan(delta_rad)
    cos_h = max(-1.0, min(1.0, cos_h))
    H = math.degrees(math.acos(cos_h))

    sunrise = 12 - H / 15
    sunset = 12 + H / 15
    return round(sunrise), round(sunset)  # Round
sunrise and sunset times

def main():
    latitude = 35.313
    now = datetime.now()
    day_of_year = now.timetuple().tm_yday

    delta =
calculate_solar_declination(day_of_year)
    sunrise, sunset =
calculate_sunrise_sunset(latitude, delta)

    surface_tilt = 30  # Tilt angle of the
surface
    surface_azimuth = 180  # Azimuth angle of the
surface (south-facing)

    zenith_angles = []
    solar_azimuth_angles = []
    times = []

    print(f"Date: {now.strftime('%Y-%m-%d')}")
    print(f"Sunrise: {sunrise}:00")
    print(f"Sunset: {sunset}:00\n")

    # Add sunrise and sunset times to the times
list
    times.extend([f"{sunrise}:00",
f"{sunset}:00"])

    for solar_time in
range(int(math.floor(sunrise * 4)),
int(math.ceil(sunset * 4)) + 1):
        hour_angle =
calculate_hour_angle(solar_time / 4)
        zenith_angle =
calculate_zenith_angle(latitude, delta,
hour_angle)

        if zenith_angle > 90:
            continue  # Skip calculations if the
sun is below the horizon

        solar_elevation =
calculate_solar_elevation(zenith_angle)
        solar_azimuth =
calculate_azimuth_angle(latitude, delta,
zenith_angle, hour_angle)
        incidence_angle =
calculate_incidence_angle(solar_elevation,
surface_tilt, surface_azimuth, solar_azimuth)

        zenith_angles.append(zenith_angle)
        solar_azimuth_angles.append(solar_azimuth
)
        times.append(f"{int(solar_time //
4)}:{'00' if solar_time % 4 == 0 else '15' if
solar_time % 4 == 1 else '30' if solar_time % 4
== 2 else '45'}")
        print(f"Time: {int(solar_time //
4)}:{'00' if solar_time % 4 == 0 else '15' if
solar_time % 4 == 1 else '30' if solar_time % 4
== 2 else '45'}")
        print(f"Zenith Angle (z):
{zenith_angle:.2f} degrees")
        print(f"Solar Elevation Angle (EL):
{solar_elevation:.2f} degrees")
        print(f"Solar Azimuth Angle (A):
{solar_azimuth:.2f} degrees")
        print(f"Incidence Angle (θ):
{incidence_angle:.2f} degrees\n")
    print("Time:")
    print(times)
    print("Zenith Angles:")
    print(zenith_angles)
    print("Solar Azimuth Angles:")
    print(solar_azimuth_angles)

if __name__ == "__main__":
    main()
```

Παράρτημα 2

Αυτό το παράρτημα περιέχει έναν κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού Python που υπολογίζει διάφορες ηλιακές γωνίες και παραμέτρους για μια δεδομένη τοποθεσία και συγκεκριμένη ημερομηνία. Οι υπολογισμοί αυτοί περιλαμβάνουν τη θέση του ήλιου και τις σχετικές γωνίες, οι οποίες είναι απαραίτητες για την παρακολούθηση της ηλιακής τροχιάς και τη βελτιστοποίηση των ηλιακών συστημάτων.

```
import math
from datetime import datetime, timedelta

def calculate_solar_declination(day_of_year):
    return 23.45 * math.sin(math.radians((360 / 365) * (284 + day_of_year)))

def calculate_hour_angle(solar_time):
    return 15 * (solar_time - 12)

def calculate_zenith_angle(latitude, delta, hour_angle):
    latitude_rad = math.radians(latitude)
    delta_rad = math.radians(delta)
    hour_angle_rad = math.radians(hour_angle)

    cos_z = (math.sin(delta_rad) * math.sin(latitude_rad) +
             math.cos(delta_rad) * math.cos(latitude_rad) * math.cos(hour_angle_rad))
    z = math.degrees(math.acos(cos_z))
    return z

def calculate_solar_elevation(zenith_angle):
    return 90 - zenith_angle

def calculate_azimuth_angle(latitude, delta, zenith_angle, hour_angle):
    latitude_rad = math.radians(latitude)
    delta_rad = math.radians(delta)
    zenith_angle_rad = math.radians(zenith_angle)

    cos_A = ((math.sin(delta_rad) - math.sin(latitude_rad) * math.cos(zenith_angle_rad)) /
             (math.cos(latitude_rad) * math.sin(zenith_angle_rad)))
    cos_A = max(-1.0, min(1.0, cos_A))
    A = math.degrees(math.acos(cos_A))

    if hour_angle > 0:
        A = 360 - A

    return A

def calculate_incidence_angle(solar_elevation, surface_tilt, surface_azimuth, solar_azimuth):
    solar_elevation_rad = math.radians(solar_elevation)
    surface_tilt_rad = math.radians(surface_tilt)
    solar_azimuth_rad = math.radians(solar_azimuth)
    surface_azimuth_rad = math.radians(surface_azimuth)

    cos_theta = (math.sin(solar_elevation_rad) * math.cos(surface_tilt_rad) +
                 math.cos(solar_elevation_rad) * math.sin(surface_tilt_rad) *
                 math.cos(solar_azimuth_rad - surface_azimuth_rad))
    theta = math.degrees(math.acos(cos_theta))
    return theta

def calculate_sunrise_sunset(latitude, delta):
    latitude_rad = math.radians(latitude)
    delta_rad = math.radians(delta)

    cos_h = -math.tan(latitude_rad) * math.tan(delta_rad)
    cos_h = max(-1.0, min(1.0, cos_h))
    H = math.degrees(math.acos(cos_h))

    sunrise = 12 - H / 15
    sunset = 12 + H / 15
    return round(sunrise), round(sunset)  # Round sunrise and sunset times
```

```
def day_of_year_to_date(year, day_of_year):
    date = datetime(year, 1, 1) +
timedelta(days=day_of_year - 1)
    return date

def main():
    latitude = 35.318
    day_of_year = 83 # (262 - 83)
    year = 2024  # Example year

    date = day_of_year_to_date(year, day_of_year)
    delta =
calculate_solar_declination(day_of_year)
    sunrise, sunset =
calculate_sunrise_sunset(latitude, delta)

    times = []
    zenith_angles = []
    azimuth_angles = []

    print(f"Date: {date.strftime('%Y-%m-%d')}")
    print(f"Sunrise: {sunrise}:00")
    print(f"Sunset: {sunset}:00\n")

    for hour in range(sunrise, sunset + 1):
        for minute in [0, 15, 30, 45]:
            solar_time = hour + minute / 60
            hour_angle =
calculate_hour_angle(solar_time)
            zenith_angle =
calculate_zenith_angle(latitude, delta,
hour_angle)

            if zenith_angle > 90:
                continue  # Skip calculations if
the sun is below the horizon

            solar_elevation =
calculate_solar_elevation(zenith_angle)
            solar_azimuth =
calculate_azimuth_angle(latitude, delta,
zenith_angle, hour_angle)



            time_str =
f"{int(hour):02d}:{int(minute):02d}"
            times.append(time_str)
            popo1 = round(solar_azimuth, 2)
            popo2 = round(zenith_angle, 2)
            zenith_angles.append(popo2)
            azimuth_angles.append(popo1)
        print(f"Zenith Angle (z):
{zenith_angle:.2f} degrees")
        print(f"Solar Elevation Angle (EL):
{solar_elevation:.2f} degrees")
        print(f"Solar Azimuth Angle (A):
{solar_azimuth:.2f} degrees")
        print(f"Incidence Angle (θ):
{incidence_angle:.2f} degrees\n")

    print("Time:")
    print(times)
    print("Zenith Angles:")
    print(zenith_angles)
    print("Solar Azimuth Angles:")
    print(solar_azimuth_angles)

if __name__ == "__main__":
    main()
```

Παράρτημα 3

Αυτό το παράρτημα περιλαμβάνει έναν κώδικα Python που υπολογίζει τις πιέσεις που πρέπει να εφαρμοστούν στους τέσσερις θαλάμους ενός επενεργητή (actuator) για να επιτευχθούν συγκεκριμένες γωνίες κάμψης και περιστροφής. Ο υπολογισμός βασίζεται στις γνωστές γωνίες κάμψης (θ) και περιστροφής (φ) και λαμβάνει υπόψη τις φυσικές παραμέτρους των θαλάμων, όπως το αρχικό μήκος, η εφαρμοζόμενη πίεση, ο συντελεστής σκληρότητας και η διατομή του θαλάμου.

```
import numpy as np
import math
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
```

```
import sympy as sp
import sympy as sp1
import sympy as sp2
import sympy as sp3
lo = np.array([150, 150, 150, 150])  # initial
arc length of chamber in mm
P = np.array([0.1, 0, 0, 0])  # pressure applied
at chamber in MPa
k = np.array([9.2, 9.2, 9.2, 9.2])  # stiffness
coefficient of chamber in MPa*mm
d = 20.5  # Distance between the center of the
actuator and the center of the chamber
lu = 10  # length of top passive structure
lb = 20  # length of bottom passive structure
A = np.array([4788.5, 4788.5, 4788.5,
4788.5])   # Cross-sectional area of the chamber
in mm^2
Δl = (P * A) / k
l = Δl + lo
def degrees_to_radians(degrees):
    radians = degrees * (math.pi / 180)
    return radians
ϕ=180 #Angle of actuation (ϕ) (0-360)
θ=90  #Bending angle (θ) (0-90)
ϕϕ= degrees_to_radians(ϕ)
θθ= degrees_to_radians(θ)
print("Angle of actuation (ϕ):",ϕ, "degrees")
print ("Bending angle (θ):",θ,  "degrees")
lnew = np.copy(l)
a2 = (math.degrees(ϕϕ)- 180) / (270 - 180)
a1 = 1 - a2
#print (a1)
#print (a2)
lnew[0]=(a1*l[3]+a2*l[0])
lnew[1]=(a1*l[0]+a2*l[1])
lnew[2]=(a1*l[1]+a2*l[2])
lnew[3]=(a1*l[2]+a2*l[3])
if ϕ==0 or ϕ==90 or ϕ==180 or ϕ==270 or ϕ==360:
    if ϕ==270:
        lf=(4*θθ*20.5)+150
        #print(lf)
        DL1=lf-150
        #print (DL1)
        P1=(DL1*k[0])/(A[0])
        P1= round(P1,4)
        #print ('%.4f'%P1)
        #print (P1)
        P2=P3=P4=0
        PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
        print("Pressure in Mpa", PnewMpa)
        PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10, P3 * 10, P4
* 10]
        print("Pressure in Bar", PnewBar)
        PnewPsi = [round(P1 * 145.038), round(P2
* 145.038), round(P3 * 145.038), round(P4 *
145.038)]
        print("Pressure in Psi", PnewPsi)
        print("  ArrayPress[0] =",
PnewPsi[0],";")
        print("  ArrayPress[1] =",
PnewPsi[1],";")
        print("  ArrayPress[2] =",
PnewPsi[2],";")
        print("  ArrayPress[3] =",
PnewPsi[3],";")
    elif ϕ==90:
        lf=(4*θθ*20.5)+150
        #print(lf)
        DL3=lf-150
        #print (DL3)
        P3=(DL3*k[2])/(A[2])
        P3= round(P3,4)
        #print ('%.4f'%P1)
        #print (P3)
        P2=P1=P4=0
        PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
        print("Pressure in Mpa", PnewMpa)
        PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10, P3 * 10, P4
* 10]
        print("Pressure in Bar", PnewBar)
        PnewPsi = [round(P1 * 145.038), round(P2
* 145.038), round(P3 * 145.038), round(P4 *
145.038)]
        print("Pressure in Psi", PnewPsi)
        print("  ArrayPress[0] =",
PnewPsi[0],";")
        print("  ArrayPress[1] =",
PnewPsi[1],";")
        print("  ArrayPress[2] =",
PnewPsi[2],";")
```

```
        print("  ArrayPress[3] =",
PnewPsi[3],";")
    elif ϕ==180:
        lf=(4*θθ*20.5)+150
        #print(lf)
        DL4=lf-150
        #print (DL4)
        P4=(DL4*k[3])/(A[3])
        P4= round(P4,4)
        #print ('%.4f'%P1)
        #print (P4)
        P2=P1=P3=0
        PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
        print("Pressure in Mpa", PnewMpa)
        PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10, P3 * 10, P4
* 10]
        print("Pressure in Bar", PnewBar)
        PnewPsi = PnewPsi = [round(P1 * 145.038),
round(P2 * 145.038), round(P3 * 145.038),
round(P4 * 145.038)]
        print("Pressure in Psi", PnewPsi)
        print("  ArrayPress[0] =",
PnewPsi[0],";")
        print("  ArrayPress[1] =",
PnewPsi[1],";")
        print("  ArrayPress[2] =",
PnewPsi[2],";")
        print("  ArrayPress[3] =",
PnewPsi[3],";")
    elif ϕ==0 or ϕ==360:
        lf=(4*θθ*20.5)+150
        #print(lf)
        DL2=lf-150
        #print (DL2)
        P2=(DL2*k[1])/(A[1])
        P2= round(P2,4)
        #print ('%.4f'%P1)
        #print (P2)
        P4=P1=P3=0
        PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
        print("Pressure in Mpa", PnewMpa)
        PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10, P3 * 10, P4
* 10]
        print("Pressure in Bar", PnewBar)
        PnewPsi = [round(P1 * 145.038), round(P2
* 145.038), round(P3 * 145.038), round(P4 *
145.038)]
        print("Pressure in Psi", PnewPsi)
        print("  ArrayPress[0] =",
PnewPsi[0],";")
        print("  ArrayPress[1] =",
PnewPsi[1],";")
        print("  ArrayPress[2] =",
PnewPsi[2],";")
        print("  ArrayPress[3] =",
PnewPsi[3],";")
elif ϕ>0 and ϕ<90:
    if ϕ>45:
        P1=P4=0
        l1=l4=150
        faka=0
        X = sp.Symbol('X')
        U = θθ
        Y = math.tan(ϕϕ - (math.pi / 2))
        equation = (((X+((150-X)/Y)-
150)*(sp.sqrt((((150-X)/Y)**2)+(X-
150)**2)))/(82*((150-X)/Y))) - U
        # Solve the equation
        solutions = sp.solve(equation, X)
        marth= []
        # Print the solution
        #print("Solutions for X:")
        for sol in solutions:
            #print(sol.evalf())
            marth.append((sol.evalf()))
        #print (marth)
        if marth[0]>marth[1]:
            faka= faka + marth[0]
        else:
            faka= faka + marth[1]
        #print (faka)
        faka1=((150-faka)/math.tan(ϕϕ - (math.pi
/ 2)))+150
        #print (faka1)
        l1=0
        l2=faka
        l3=faka1
        l4=0
        Dl1=faka-150
```

```
        Dl2=faka1-150
        P2=(Dl1*k[1])/(A[1])
        P3=(Dl2*k[2])/(A[2])
        #print (P2)
        #print (P3)
        PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
        print("Pressure in Mpa", PnewMpa)
        PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10, P3 * 10, P4
* 10]
        print("Pressure in Bar", PnewBar)
        PnewPsi = [round(P1 * 145.038), round(P2
* 145.038), round(P3 * 145.038), round(P4 *
145.038)]
        print("Pressure in Psi", PnewPsi)
        print("  ArrayPress[0] =",
PnewPsi[0],";")
        print("  ArrayPress[1] =",
PnewPsi[1],";")
        print("  ArrayPress[2] =",
PnewPsi[2],";")
        print("  ArrayPress[3] =",
PnewPsi[3],";")
    elif ϕ<45:
        P1=P4=0
        l1=l4=150
        faka=0
        X = sp.Symbol('X')
        U = θθ
        Y = math.tan(ϕϕ - (math.pi / 2))
        equation1 = (((X+((150-X)/Y)-
150)*(sp1.sqrt((((150-X)/Y)**2)+(X-
150)**2)))/(82*((-150+X)))) - U
        # Solve the equation
        solutions1 = sp1.solve(equation1, X)
        marth1= []
        # Print the solution
        #print("Solutions for X:")
        for sol1 in solutions1:
            print(sol1.evalf())
            marth1.append((sol1.evalf()))
        #print (marth)
        if marth1[0]>marth1[1]:
            faka= faka + marth1[0]
        else:
            faka= faka + marth1[1]
        #print (faka)
        faka1=((150-faka)/math.tan(ϕϕ - (math.pi
/ 2)))+150
        #print (faka1)
        l1=0
        l2=faka
        l3=faka1
        l4=0
        Dl1=faka-150
        Dl2=faka1-150
        P2=(Dl1*k[1])/(A[1])
        P3=(Dl2*k[2])/(A[2])
        #print (P2)
        #print (P3)
        PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
        print("Pressure in Mpa", PnewMpa)
        PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10, P3 * 10, P4
* 10]
        print("Pressure in Bar", PnewBar)
        PnewPsi = [round(P1 * 145.038), round(P2
* 145.038), round(P3 * 145.038), round(P4 *
145.038)]
        print("Pressure in Psi", PnewPsi)
        print("  ArrayPress[0] =",
PnewPsi[0],";")
        print("  ArrayPress[1] =",
PnewPsi[1],";")
        print("  ArrayPress[2] =",
PnewPsi[2],";")
        print("  ArrayPress[3] =",
PnewPsi[3],";")
elif ϕ>90 and ϕ<180:
    if ϕ<135:
        P1=P2=0
        l1=l2=150
        faka=0
        X = sp2.Symbol('X')
        U = θθ
        Y = math.tan(ϕϕ- (math.pi / 2))
        equation2 = (((X+((-150+X)/Y)-
150)*(sp.sqrt((((-150+X)/Y)**2)+(-
X+150)**2)))/(82*((-150+X)/Y))) - U
        # Solve the equation
        solutions2 = sp2.solve(equation2, X)
        marth2= []
```

```
        # Print the solution
        #print("Solutions for X:")
        for sol2 in solutions2:
            #print(sol.evalf())
            marth2.append((sol2.evalf()))
        #print (marth)
        if marth2[0]>marth2[1]:
            faka= faka + marth2[0]
        else:
            faka= faka + marth2[1]
        print (faka)
        faka1=((faka-150)/math.tan(ϕϕ - (math.pi
/ 2)))+150
        print (faka1)
        l1=0
        l3=faka
        l4=faka1
        l2=0
        Dl1=faka-150
        Dl2=faka1-150
        P4=(Dl1*k[1])/(A[1])
        P3=(Dl2*k[2])/(A[2])
        #print (P2)
        #print (P3)
        PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
        print("Pressure in Mpa", PnewMpa)
        PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10, P3 * 10, P4
* 10]
        print("Pressure in Bar", PnewBar)
        PnewPsi = [round(P1 * 145.038), round(P2
* 145.038), round(P3 * 145.038), round(P4 *
145.038)]
        print("Pressure in Psi", PnewPsi)
        print("  ArrayPress[0] =",
PnewPsi[0],";")
        print("  ArrayPress[1] =",
PnewPsi[1],";")
        print("  ArrayPress[2] =",
PnewPsi[2],";")
        print("  ArrayPress[3] =",
PnewPsi[3],";")
    if ϕ>135:
        P1=P2=0
        l1=l2=150
        faka=0
        X = sp2.Symbol('X')
        U = θθ
        Y = math.tan(ϕϕ- (math.pi / 2))
        equation2 = (((X+((-150+X)/Y)-
150)*(sp2.sqrt((((-150+X)/Y)**2)+(X-
150)**2)))/(82*((-150+X)))) - U
        # Solve the equation
        solutions2 = sp2.solve(equation2, X)
        marth2= []
        # Print the solution
        #print("Solutions for X:")
        for sol2 in solutions2:
            #print(sol.evalf())
            marth2.append((sol2.evalf()))
        #print (marth)
        if marth2[0]>marth2[1]:
            faka= faka + marth2[0]
        else:
            faka= faka + marth2[1]
        print (faka)
        faka1=((faka-150)/math.tan(ϕϕ - (math.pi
/ 2)))+150
        print (faka1)
        l1=0
        l3=faka
        l4=faka1
        l2=0
        Dl1=faka-150
        Dl2=faka1-150
        P4=(Dl1*k[1])/(A[1])
        P3=(Dl2*k[2])/(A[2])
        #print (P2)
        #print (P3)
        PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
        print("Pressure in Mpa", PnewMpa)
        PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10, P3 * 10, P4
* 10]
        print("Pressure in Bar", PnewBar)
        PnewPsi = [round(P1 * 145.038), round(P2
* 145.038), round(P3 * 145.038), round(P4 *
145.038)]
        print("Pressure in Psi", PnewPsi)
        print("  ArrayPress[0] =",
PnewPsi[0],";")
```

```
        print("  ArrayPress[1] =",
PnewPsi[1],";")
        print("  ArrayPress[2] =",
PnewPsi[2],";")
        print("  ArrayPress[3] =",
PnewPsi[3],";")
elif ϕ>180 and ϕ<270:
    if ϕ>225:
        P2=P3=0
        l1=l4=150
        faka=0
        X = sp.Symbol('X')
        U = θθ
        Y = math.tan(ϕϕ - 3*(math.pi / 2))
        equation = (((X+((150-X)/Y)-
150)*(sp.sqrt((((150-X)/Y)**2)+(X-
150)**2)))/(82*((150-X)/Y))) - U
        # Solve the equation
        solutions = sp.solve(equation, X)
        marth= []
        # Print the solution
        #print("Solutions for X:")
        for sol in solutions:
            #print(sol.evalf())
            marth.append((sol.evalf()))
        #print (marth)
        if marth[0]>marth[1]:
            faka= faka + marth[0]
        else:
            faka= faka + marth[1]
        #print (faka)
        faka1=((150-faka)/math.tan(ϕϕ -
3*(math.pi / 2)))+150
        #print (faka1)
        l1=0
        l2=faka
        l3=faka1
        l4=0
        Dl1=faka-150
        Dl2=faka1-150
        P4=(Dl1*k[1])/(A[1])
        P1=(Dl2*k[2])/(A[2])
        #print (P2)
        #print (P3)
        PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
        print("Pressure in Mpa", PnewMpa)
        PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10, P3 * 10, P4
* 10]
        print("Pressure in Bar", PnewBar)
        PnewPsi = [round(P1 * 145.038), round(P2
* 145.038), round(P3 * 145.038), round(P4 *
145.038)]
        print("Pressure in Psi", PnewPsi)
        print("  ArrayPress[0] =",
PnewPsi[0],";")
        print("  ArrayPress[1] =",
PnewPsi[1],";")
        print("  ArrayPress[2] =",
PnewPsi[2],";")
        print("  ArrayPress[3] =",
PnewPsi[3],";")
    elif ϕ<225:
        P2=P3=0
        l1=l4=150
        faka=0
        X = sp.Symbol('X')
        U = θθ
        Y = math.tan(ϕϕ - 3*(math.pi / 2))
        equation = (((X+((150-X)/Y)-
150)*(sp1.sqrt((((150-X)/Y)**2)+(X-
150)**2)))/(82*((-150+X)))) - U
        # Solve the equation
        solutions = sp.solve(equation, X)
        marth= []
        # Print the solution
        #print("Solutions for X:")
        for sol in solutions:
            #print(sol.evalf())
            marth.append((sol.evalf()))
        #print (marth)
        if marth[0]>marth[1]:
            faka= faka + marth[0]
        else:
            faka= faka + marth[1]
        #print (faka)
        faka1=((150-faka)/math.tan(ϕϕ -
3*(math.pi / 2)))+150
        #print (faka1)
        l1=0
        l2=faka
```

```
        l3=faka1
        l4=0
        Dl1=faka-150
        Dl2=faka1-150
        P4=(Dl1*k[1])/(A[1])
        P1=(Dl2*k[2])/(A[2])
        #print (P2)
        #print (P3)
        PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
        print("Pressure in Mpa", PnewMpa)
        PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10, P3 * 10, P4
* 10]
        print("Pressure in Bar", PnewBar)
        PnewPsi = [round(P1 * 145.038), round(P2
* 145.038), round(P3 * 145.038), round(P4 *
145.038)]
        print("Pressure in Psi", PnewPsi)
        print("  ArrayPress[0] =",
PnewPsi[0],";")
        print("  ArrayPress[1] =",
PnewPsi[1],";")
        print("  ArrayPress[2] =",
PnewPsi[2],";")
        print("  ArrayPress[3] =",
PnewPsi[3],";")
elif ϕ>270 and ϕ<360:
    if ϕ<315:
        P3=P4=0
        l3=l4=150
        faka=0
        X = sp.Symbol('X')
        U = θθ
        Y = math.tan(ϕϕ - 3*(math.pi / 2))
        equation = equation2 = (((X+((-150+X)/Y)-
150)*(sp.sqrt((((-150+X)/Y)**2)+(-
X+150)**2)))/(82*((-150+X)/Y))) - U
        # Solve the equation
        solutions = sp.solve(equation, X)
        marth= []
        # Print the solution
        #print("Solutions for X:")
        for sol in solutions:
            #print(sol.evalf())
            marth.append((sol.evalf()))
        #print (marth)
        if marth[0]>marth[1]:
            faka= faka + marth[0]
        else:
            faka= faka + marth[1]
        print (faka)
        faka1=((faka-150)/math.tan(ϕϕ -
3*(math.pi / 2)))+150
        print (faka1)
        l1=0
        l2=faka
        l3=faka1
        l4=0
        Dl1=faka-150
        Dl2=faka1-150
        P2=(Dl1*k[1])/(A[1])
        P1=(Dl2*k[2])/(A[2])
        #print (P2)
        #print (P3)
        PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
        print("Pressure in Mpa", PnewMpa)
        PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10, P3 * 10, P4
* 10]
        print("Pressure in Bar", PnewBar)
        PnewPsi = [round(P1 * 145.038), round(P2
* 145.038), round(P3 * 145.038), round(P4 *
145.038)]
        print("Pressure in Psi", PnewPsi)
        print("  ArrayPress[0] =",
PnewPsi[0],";")
        print("  ArrayPress[1] =",
PnewPsi[1],";")
        print("  ArrayPress[2] =",
PnewPsi[2],";")
        print("  ArrayPress[3] =",
PnewPsi[3],";")
    elif ϕ>315:
        P3=P4=0
        l3=l4=150
        faka=0
        X = sp.Symbol('X')
        U = θθ
        Y = math.tan(ϕϕ - 3*(math.pi / 2))
        equation = equation2 = equation2 =
(((X+((-150+X)/Y)-150)*(sp2.sqrt((((-
150+X)/Y)**2)+(X-150)**2)))/(82*((-150+X)))) - U
```

```
        # Solve the equation
        solutions = sp.solve(equation, X)
        marth= []
        # Print the solution
        #print("Solutions for X:")
        for sol in solutions:
            #print(sol.evalf())
            marth.append((sol.evalf()))
        #print (marth)
        if marth[0]>marth[1]:
            faka= faka + marth[0]
        else:
            faka= faka + marth[1]
        print (faka)
        faka1=((faka-150)/math.tan(φφ -
3*(math.pi / 2)))+150
        print (faka1)
        l1=0
        l2=faka
        l3=faka1
        l4=0
        Dl1=faka-150
        Dl2=faka1-150
        P2=(Dl1*k[1])/(A[1])
        P1=(Dl2*k[2])/(A[2])
        #print (P2)
        #print (P3)
        PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
        print("Pressure in Mpa", PnewMpa)
        PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10, P3 * 10, P4
* 10]
        print("Pressure in Bar", PnewBar)
        PnewPsi = [round(P1 * 145.038), round(P2
* 145.038), round(P3 * 145.038), round(P4 *
145.038)]
        print("Pressure in Psi", PnewPsi)
        print("  ArrayPress[0] =",
PnewPsi[0],";")
        print("  ArrayPress[1] =",
PnewPsi[1],";")
        print("  ArrayPress[2] =",
PnewPsi[2],";")
        print("  ArrayPress[3] =",
PnewPsi[3],";")
```

Παράρτημα 4

Αυτό το παράρτημα περιλαμβάνει έναν κώδικα Python που υπολογίζει τις πιέσεις που πρέπει να εφαρμοστούν στους τέσσερις θαλάμους ενός επενεργητή (actuator) για να επιτευχθούν συγκεκριμένες γωνίες κάμψης και περιστροφής. Ο κώδικας υπολογίζει τις πιέσεις με βάση την αρχική πίεση, τη σκληρότητα των θαλάμων και την επιθυμητή γωνία κάμψης και περιστροφής.

```
import math
from datetime import datetime, timedelta
import math
from datetime import datetime, timedelta
import numpy as np
import math
import sympy as sp
import sympy as sp1
import sympy as sp2
import sympy as sp3
lo = np.array([150, 150, 150, 150])  # initial
arc length of chamber in mm
P = np.array([0.1, 0, 0, 0])  # pressure applied
at chamber in MPa
k = np.array([9.2, 9.2, 9.2, 9.2])  # stiffness
coefficient of chamber in MPa*mm
d = 20.5  # Distance between the center of the
actuator and the center of the chamber
lu = 10  # length of top passive structure
lb = 20  # length of bottom passive structure
A = np.array([4788.5, 4788.5, 4788.5,
4788.5])   # Cross-sectional area of the chamber
in mm^2
Δl = (P * A) / k
l = Δl + lo
def degrees_to_radians(degrees):
    radians = degrees * (math.pi / 180)
    return radians
```

```
00=[]
PP=[]
def calculate_solar_declination(day_of_year):
    return 23.45 * math.sin(math.radians((360 /
365) * (284 + day_of_year)))

def calculate_hour_angle(solar_time):
    return 15 * (solar_time - 12)

def calculate_zenith_angle(latitude, delta,
hour_angle):
    latitude_rad = math.radians(latitude)
    delta_rad = math.radians(delta)
    hour_angle_rad = math.radians(hour_angle)

    cos_z = (math.sin(delta_rad) *
math.sin(latitude_rad) +
             math.cos(delta_rad) *
math.cos(latitude_rad) *
math.cos(hour_angle_rad))
    z = math.degrees(math.acos(cos_z))
    return z

def calculate_solar_elevation(zenith_angle):
    return 90 - zenith_angle

def calculate_azimuth_angle(latitude, delta,
zenith_angle, hour_angle):
    latitude_rad = math.radians(latitude)
    delta_rad = math.radians(delta)
    zenith_angle_rad = math.radians(zenith_angle)

    cos_A = ((math.sin(delta_rad) -
math.sin(latitude_rad) *
math.cos(zenith_angle_rad)) /
             (math.cos(latitude_rad) *
math.sin(zenith_angle_rad)))
    cos_A = max(-1.0, min(1.0, cos_A))
    A = math.degrees(math.acos(cos_A))

    if hour_angle > 0:
        A = 360 - A

    return A

def calculate_incidence_angle(solar_elevation,
surface_tilt, surface_azimuth, solar_azimuth):
    solar_elevation_rad =
math.radians(solar_elevation)
    surface_tilt_rad = math.radians(surface_tilt)
    solar_azimuth_rad =
math.radians(solar_azimuth)
    surface_azimuth_rad =
math.radians(surface_azimuth)

    cos_theta = (math.sin(solar_elevation_rad) *
math.cos(surface_tilt_rad) +
                 math.cos(solar_elevation_rad) *
math.sin(surface_tilt_rad) *
                 math.cos(solar_azimuth_rad -
surface_azimuth_rad))
    theta = math.degrees(math.acos(cos_theta))
    return theta

def calculate_sunrise_sunset(latitude, delta):
    latitude_rad = math.radians(latitude)
    delta_rad = math.radians(delta)

    cos_h = -math.tan(latitude_rad) *
math.tan(delta_rad)
    cos_h = max(-1.0, min(1.0, cos_h))
    H = math.degrees(math.acos(cos_h))

    sunrise = 12 - H / 15
    sunset = 12 + H / 15
    return round(sunrise), round(sunset)  # Round
sunrise and sunset times

def day_of_year_to_date(year, day_of_year):
    date = datetime(year, 1, 1) +
timedelta(days=day_of_year - 1)
    return date

def main():
    latitude = 35.318
    day_of_year = 83 # (262 - 83)
    year = 2024  # Example year

    date = day_of_year_to_date(year, day_of_year)
```

```
    delta =
calculate_solar_declination(day_of_year)
    sunrise, sunset =
calculate_sunrise_sunset(latitude, delta)

    times = []
    zenith_angles = []
    azimuth_angles = []

    print(f"Date: {date.strftime('%Y-%m-%d')}")
    print(f"Sunrise: {sunrise}:00")
    print(f"Sunset: {sunset}:00\n")

    for hour in range(sunrise, sunset + 1):
        for minute in [0, 15, 30, 45]:
            solar_time = hour + minute / 60
            hour_angle =
calculate_hour_angle(solar_time)
            zenith_angle =
calculate_zenith_angle(latitude, delta,
hour_angle)

            if zenith_angle > 90:
                continue  # Skip calculations if
the sun is below the horizon

            solar_elevation =
calculate_solar_elevation(zenith_angle)
            solar_azimuth =
calculate_azimuth_angle(latitude, delta,
zenith_angle, hour_angle)



            time_str =
f"{int(hour):02d}:{int(minute):02d}"
            times.append(time_str)
            popo1 = round(solar_azimuth, 2)
            popo2 = round(zenith_angle, 2)
            zenith_angles.append(popo2)
            azimuth_angles.append(popo1)

            #print(f"Time: {time_str}")
            #print(f"Zenith Angle (z):
{zenith_angle:.2f} degrees")
            #print(f"Solar Elevation Angle (EL):
{solar_elevation:.2f} degrees")
            #print(f"Solar Azimuth Angle (A):
{solar_azimuth:.2f} degrees")

    # Print the lists
    print("Times:", times)
    print("Zenith Angles:", zenith_angles)
    print("Azimuth Angles:", azimuth_angles)
    CHAMBER1 =[]
    CHAMBER2 =[]
    CHAMBER3 =[]
    CHAMBER4 =[]
    for ppq in range (len(times)):
            ϕ= azimuth_angles[ppq]  # Solar
Azimuth Angle Angle of actuation (ϕ) (0-360)
            θ= zenith_angles[ppq]  # Zenith Angle
Bending angle (θ) (0-90)
            print
("////////////////////////////////////////////
/////////////////")
            print (f"Time: {times[ppq]}",
(f"Date: {date.strftime('%Y-%m-%d')}"))
            print ("Solar azimuth angle = Angle
of actuation (ϕ) (0-360):",
round(azimuth_angles[ppq], 2))
            print ("Zenith angle = Bending angle
(θ) (0-90):", round(zenith_angles[ppq], 2))
            ϕϕ= degrees_to_radians(ϕ)
            θθ= degrees_to_radians(θ)
            #print("Angle of actuation (ϕ):",ϕ,
"degrees")
            #print ("Bending angle
(θ):",θ,  "degrees")
            lnew = np.copy(l)
            a2 = (math.degrees(ϕϕ)- 180) / (270 -
180)
            a1 = 1 - a2
            #print (a1)
            #print (a2)
            lnew[0]=(a1*l[3]+a2*l[0])
            lnew[1]=(a1*l[0]+a2*l[1])
            lnew[2]=(a1*l[1]+a2*l[2])
            lnew[3]=(a1*l[2]+a2*l[3])
```

```
            if ϕ==0 or ϕ==90 or ϕ==180 or ϕ==270
or ϕ==360:
                if ϕ==270:
                    lf=(4*θθ*20.5)+150
                    #print(lf)
                    DL1=lf-150
                    #print (DL1)
                    P1=(DL1*k[0])/(A[0])
                    P1= round(P1,4)
                    #print ('%.4f'%P1)
                    #print (P1)
                    P2=P3=P4=0
                    PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
                    print("Pressure in Mpa",
PnewMpa)
                    PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10,
P3 * 10, P4 * 10]
                    print("Pressure in Bar",
PnewBar)
                    PnewPsi = [round(P1 *
145.038), round(P2 * 145.038), round(P3 *
145.038), round(P4 * 145.038)]
                    print("Pressure in Psi",
PnewPsi)
                    CHAMBER1.append(round(P1 *
145.038))
                    CHAMBER2.append(round(P2 *
145.038))
                    CHAMBER3.append(round(P3 *
145.038))
                    CHAMBER4.append(round(P4 *
145.038))
                elif ϕ==90:
                    lf=(4*θθ*20.5)+150
                    #print(lf)
                    DL3=lf-150
                    #print (DL3)
                    P3=(DL3*k[2])/(A[2])
                    P3= round(P3,4)
                    #print ('%.4f'%P1)
                    #print (P3)
                    P2=P1=P4=0
                    PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
                    print("Pressure in Mpa",
PnewMpa)
                    PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10,
P3 * 10, P4 * 10]
                    print("Pressure in Bar",
PnewBar)
                    PnewPsi = [round(P1 *
145.038), round(P2 * 145.038), round(P3 *
145.038), round(P4 * 145.038)]
                    print("Pressure in Psi",
PnewPsi)
                    CHAMBER1.append(round(P1 *
145.038))
                    CHAMBER2.append(round(P2 *
145.038))
                    CHAMBER3.append(round(P3 *
145.038))
                    CHAMBER4.append(round(P4 *
145.038))
                elif ϕ==180:
                    lf=(4*θθ*20.5)+150
                    #print(lf)
                    DL4=lf-150
                    #print (DL4)
                    P4=(DL4*k[3])/(A[3])
                    P4= round(P4,4)
                    #print ('%.4f'%P1)
                    #print (P4)
                    P2=P1=P3=0
                    PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
                    print("Pressure in Mpa",
PnewMpa)
                    PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10,
P3 * 10, P4 * 10]
                    print("Pressure in Bar",
PnewBar)
                    PnewPsi = PnewPsi = [round(P1
* 145.038), round(P2 * 145.038), round(P3 *
145.038), round(P4 * 145.038)]
                    print("Pressure in Psi",
PnewPsi)
                    CHAMBER1.append(round(P1 *
145.038))
                    CHAMBER2.append(round(P2 *
145.038))
                    CHAMBER3.append(round(P3 *
145.038))
```

```
                    CHAMBER4.append(round(P4 *
145.038))
                elif ϕ==0 or ϕ==360:
                    lf=(4*θθ*20.5)+150
                    #print(lf)
                    DL2=lf-150
                    #print (DL2)
                    P2=(DL2*k[1])/(A[1])
                    P2= round(P2,4)
                    #print ('%.4f'%P1)
                    #print (P2)
                    P4=P1=P3=0
                    PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
                    #print("Pressure in Mpa",
PnewMpa)
                    PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10,
P3 * 10, P4 * 10]
                    #print("Pressure in Bar",
PnewBar)
                    PnewPsi = [round(P1 *
145.038), round(P2 * 145.038), round(P3 *
145.038), round(P4 * 145.038)]
                    #print("Pressure in Psi",
PnewPsi)
                    PP.append(P2)
                    CHAMBER1.append(round(P1 *
145.038))
                    CHAMBER2.append(round(P2 *
145.038))
                    CHAMBER3.append(round(P3 *
145.038))
                    CHAMBER4.append(round(P4 *
145.038))
            elif ϕ>0 and ϕ<90:
                if ϕ>45:
                    P1=P4=0
                    l1=l4=150
                    faka=0
                    X = sp.Symbol('X')
                    U = θθ
                    Y = math.tan(ϕϕ - (math.pi /
2))
                    equation = (((X+((150-X)/Y)-
150)*(sp.sqrt((((150-X)/Y)**2)+(X-
150)**2)))/(82*((150-X)/Y))) - U
                    # Solve the equation
                    solutions =
sp.solve(equation, X)
                    marth= []
                    # Print the solution
                    #print("Solutions for X:")
                    for sol in solutions:
                        #print(sol.evalf())
                        marth.append((sol.evalf()
))
                    #print (marth)
                    if marth[0]>marth[1]:
                        faka= faka + marth[0]
                    else:
                        faka= faka + marth[1]
                    #print (faka)
                    faka1=((150-faka)/math.tan(ϕϕ
- (math.pi / 2)))+150
                    #print (faka1)
                    l1=0
                    l2=faka
                    l3=faka1
                    l4=0
                    Dl1=faka-150
                    Dl2=faka1-150
                    P2=(Dl1*k[1])/(A[1])
                    P3=(Dl2*k[2])/(A[2])
                    #print (P2)
                    #print (P3)
                    PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
                    print("Pressure in Mpa",
PnewMpa)
                    PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10,
P3 * 10, P4 * 10]
                    print("Pressure in Bar",
PnewBar)
                    PnewPsi = [round(P1 *
145.038), round(P2 * 145.038), round(P3 *
145.038), round(P4 * 145.038)]
                    print("Pressure in Psi",
PnewPsi)
                    CHAMBER1.append(round(P1 *
145.038))
                    CHAMBER2.append(round(P2 *
145.038))
```

```
                    CHAMBER3.append(round(P3 *
145.038))
                    CHAMBER4.append(round(P4 *
145.038))
                elif ϕ<45:
                    P1=P4=0
                    l1=l4=150
                    faka=0
                    X = sp.Symbol('X')
                    U = θ0
                    Y = math.tan(ϕϕ - (math.pi /
2))
                    equation1 = (((X+((150-X)/Y)-
150)*(sp1.sqrt((((150-X)/Y)**2)+(X-
150)**2)))/(82*((-150+X)))) - U
                    # Solve the equation
                    solutions1 =
sp1.solve(equation1, X)
                    marth1= []
                    # Print the solution
                    #print("Solutions for X:")
                    for sol1 in solutions1:
                        print(sol1.evalf())
                        marth1.append((sol1.evalf
()))
                    #print (marth)
                    if marth1[0]>marth1[1]:
                        faka= faka + marth1[0]
                    else:
                        faka= faka + marth1[1]
                    #print (faka)
                    faka1=((150-faka)/math.tan(ϕϕ
- (math.pi / 2)))+150
                    #print (faka1)
                    l1=0
                    l2=faka
                    l3=faka1
                    l4=0
                    Dl1=faka-150
                    Dl2=faka1-150
                    P2=(Dl1*k[1])/(A[1])
                    P3=(Dl2*k[2])/(A[2])
                    #print (P2)
                    #print (P3)
                    PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
                    print("Pressure in Mpa",
PnewMpa)
                    PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10,
P3 * 10, P4 * 10]
                    print("Pressure in Bar",
PnewBar)
                    PnewPsi = [round(P1 *
145.038), round(P2 * 145.038), round(P3 *
145.038), round(P4 * 145.038)]
                    print("Pressure in Psi",
PnewPsi)
                    CHAMBER1.append(round(P1 *
145.038))
                    CHAMBER2.append(round(P2 *
145.038))
                    CHAMBER3.append(round(P3 *
145.038))
                    CHAMBER4.append(round(P4 *
145.038))
            elif ϕ>90 and ϕ<180:
                if ϕ<135:
                    P1=P2=0
                    l1=l2=150
                    faka=0
                    X = sp2.Symbol('X')
                    U = θ0
                    Y = math.tan(ϕϕ- (math.pi /
2))
                    equation2 = (((X+((-
150+X)/Y)-150)*(sp.sqrt((((-150+X)/Y)**2)+(-
X+150)**2)))/(82*((-150+X)/Y))) - U
                    # Solve the equation
                    solutions2 =
sp2.solve(equation2, X)
                    marth2= []
                    # Print the solution
                    #print("Solutions for X:")
                    for sol2 in solutions2:
                        #print(sol.evalf())
                        marth2.append((sol2.evalf
()))
                    #print (marth)
                    if marth2[0]>marth2[1]:
                        faka= faka + marth2[0]
                    else:
```

```
                    faka= faka + marth2[1]
                #print (faka)
                faka1=((faka-150)/math.tan(ϕϕ
- (math.pi / 2)))+150
                #print (faka1)
                l1=0
                l3=faka
                l4=faka1
                l2=0
                Dl1=faka-150
                Dl2=faka1-150
                P4=(Dl1*k[1])/(A[1])
                P3=(Dl2*k[2])/(A[2])
                #print (P2)
                #print (P3)
                PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
                print("Pressure in Mpa",
PnewMpa)
                PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10,
P3 * 10, P4 * 10]
                print("Pressure in Bar",
PnewBar)
                PnewPsi = [round(P1 *
145.038), round(P2 * 145.038), round(P3 *
145.038), round(P4 * 145.038)]
                print("Pressure in Psi",
PnewPsi)
                CHAMBER1.append(round(P1 *
145.038))
                CHAMBER2.append(round(P2 *
145.038))
                CHAMBER3.append(round(P3 *
145.038))
                CHAMBER4.append(round(P4 *
145.038))
            if ϕ>135:
                P1=P2=0
                l1=l2=150
                faka=0
                X = sp2.Symbol('X')
                U = θθ
                Y = math.tan(ϕϕ- (math.pi /
2))
                equation2 = (((X+((-
150+X)/Y)-150)*(sp2.sqrt((((-150+X)/Y)**2)+(X-
150)**2)))/(82*((-150+X)))) - U
                # Solve the equation
                solutions2 =
sp2.solve(equation2, X)
                marth2= []
                # Print the solution
                #print("Solutions for X:")
                for sol2 in solutions2:
                    #print(sol.evalf())
                    marth2.append((sol2.evalf
()))
                #print (marth)
                if marth2[0]>marth2[1]:
                    faka= faka + marth2[0]
                else:
                    faka= faka + marth2[1]
                #print (faka)
                faka1=((faka-150)/math.tan(ϕϕ
- (math.pi / 2)))+150
                #print (faka1)
                l1=0
                l3=faka
                l4=faka1
                l2=0
                Dl1=faka-150
                Dl2=faka1-150
                P4=(Dl1*k[1])/(A[1])
                P3=(Dl2*k[2])/(A[2])
                #print (P2)
                #print (P3)
                PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
                print("Pressure in Mpa",
PnewMpa)
                PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10,
P3 * 10, P4 * 10]
                print("Pressure in Bar",
PnewBar)
                PnewPsi = [round(P1 *
145.038), round(P2 * 145.038), round(P3 *
145.038), round(P4 * 145.038)]
                print("Pressure in Psi",
PnewPsi)
```

```
                    CHAMBER1.append(round(P1 *
145.038))
                    CHAMBER2.append(round(P2 *
145.038))
                    CHAMBER3.append(round(P3 *
145.038))
                    CHAMBER4.append(round(P4 *
145.038))
            elif ϕ>180 and ϕ<270:
                if ϕ>225:
                    P2=P3=0
                    l1=l4=150
                    faka=0
                    X = sp.Symbol('X')
                    U = θθ
                    Y = math.tan(ϕϕ - 3*(math.pi
/ 2))
                    equation = (((X+((150-X)/Y)-
150)*(sp.sqrt((((150-X)/Y)**2)+(X-
150)**2)))/(82*((150-X)/Y))) - U
                    # Solve the equation
                    solutions =
sp.solve(equation, X)
                    marth= []
                    # Print the solution
                    #print("Solutions for X:")
                    for sol in solutions:
                        #print(sol.evalf())
                        marth.append((sol.evalf()
))
                    #print (marth)
                    if marth[0]>marth[1]:
                        faka= faka + marth[0]
                    else:
                        faka= faka + marth[1]
                    #print (faka)
                    faka1=((150-faka)/math.tan(ϕϕ
- 3*(math.pi / 2)))+150
                    #print (faka1)
                    l1=0
                    l2=faka
                    l3=faka1
                    l4=0
                    Dl1=faka-150
                    Dl2=faka1-150
                    P4=(Dl1*k[1])/(A[1])
                    P1=(Dl2*k[2])/(A[2])
                    #print (P2)
                    #print (P3)
                    PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
                    print("Pressure in Mpa",
PnewMpa)
                    PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10,
P3 * 10, P4 * 10]
                    print("Pressure in Bar",
PnewBar)
                    PnewPsi = [round(P1 *
145.038), round(P2 * 145.038), round(P3 *
145.038), round(P4 * 145.038)]
                    print("Pressure in Psi",
PnewPsi)
                    CHAMBER1.append(round(P1 *
145.038))
                    CHAMBER2.append(round(P2 *
145.038))
                    CHAMBER3.append(round(P3 *
145.038))
                    CHAMBER4.append(round(P4 *
145.038))
                elif ϕ<225:
                    P2=P3=0
                    l1=l4=150
                    faka=0
                    X = sp.Symbol('X')
                    U = θθ
                    Y = math.tan(ϕϕ - 3*(math.pi
/ 2))
                    equation = (((X+((150-X)/Y)-
150)*(sp1.sqrt((((150-X)/Y)**2)+(X-
150)**2)))/(82*((-150+X)))) - U
                    # Solve the equation
                    solutions =
sp.solve(equation, X)
                    marth= []
                    # Print the solution
                    #print("Solutions for X:")
                    for sol in solutions:
                        #print(sol.evalf())
                        marth.append((sol.evalf()
))
```

```
                    #print (marth)
                    if marth[0]>marth[1]:
                        faka= faka + marth[0]
                    else:
                        faka= faka + marth[1]
                    #print (faka)
                    faka1=((150-faka)/math.tan(ϕϕ
- 3*(math.pi / 2)))+150
                    #print (faka1)
                    l1=0
                    l2=faka
                    l3=faka1
                    l4=0
                    Dl1=faka-150
                    Dl2=faka1-150
                    P4=(Dl1*k[1])/(A[1])
                    P1=(Dl2*k[2])/(A[2])
                    #print (P2)
                    #print (P3)
                    PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
                    print("Pressure in Mpa",
PnewMpa)
                    PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10,
P3 * 10, P4 * 10]
                    print("Pressure in Bar",
PnewBar)
                    PnewPsi = [round(P1 *
145.038), round(P2 * 145.038), round(P3 *
145.038), round(P4 * 145.038)]
                    print("Pressure in Psi",
PnewPsi)
                    CHAMBER1.append(round(P1 *
145.038))
                    CHAMBER2.append(round(P2 *
145.038))
                    CHAMBER3.append(round(P3 *
145.038))
                    CHAMBER4.append(round(P4 *
145.038))
            elif ϕ>270 and ϕ<360:
                if ϕ<315:
                    P3=P4=0
                    l3=l4=150
                    faka=0
                    X = sp.Symbol('X')
                    U = θθ
                    Y = math.tan(ϕϕ - 3*(math.pi
/ 2))
                    equation = equation2 =
(((X+((-150+X)/Y)-150)*(sp.sqrt((((-
150+X)/Y)**2)+(-X+150)**2)))/(82*((-150+X)/Y))) -
U
                    # Solve the equation
                    solutions =
sp.solve(equation, X)
                    marth= []
                    # Print the solution
                    #print("Solutions for X:")
                    for sol in solutions:
                        #print(sol.evalf())
                        marth.append((sol.evalf()
))
                    #print (marth)
                    if marth[0]>marth[1]:
                        faka= faka + marth[0]
                    else:
                        faka= faka + marth[1]
                    #print (faka)
                    faka1=((faka-150)/math.tan(ϕϕ
- 3*(math.pi / 2)))+150
                    #print (faka1)
                    l1=0
                    l2=faka
                    l3=faka1
                    l4=0
                    Dl1=faka-150
                    Dl2=faka1-150
                    P2=(Dl1*k[1])/(A[1])
                    P1=(Dl2*k[2])/(A[2])
                    #print (P2)
                    #print (P3)
                    PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
                    print("Pressure in Mpa",
PnewMpa)
                    PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10,
P3 * 10, P4 * 10]
                    print("Pressure in Bar",
PnewBar)
```

```
                    PnewPsi = [round(P1 *
145.038), round(P2 * 145.038), round(P3 *
145.038), round(P4 * 145.038)]
                    print("Pressure in Psi",
PnewPsi)
                    CHAMBER1.append(round(P1 *
145.038))
                    CHAMBER2.append(round(P2 *
145.038))
                    CHAMBER3.append(round(P3 *
145.038))
                    CHAMBER4.append(round(P4 *
145.038))
                elif ϕ>315:
                    P3=P4=0
                    l3=l4=150
                    faka=0
                    X = sp.Symbol('X')
                    U = θθ
                    Y = math.tan(ϕϕ - 3*(math.pi
/ 2))
                    equation = equation2 =
equation2 = (((X+((-150+X)/Y)-150)*(sp2.sqrt((((-
150+X)/Y)**2)+(X-150)**2)))/(82*((-150+X)))) - U
                    # Solve the equation
                    solutions =
sp.solve(equation, X)
                    marth= []
                    # Print the solution
                    #print("Solutions for X:")
                    for sol in solutions:
                        #print(sol.evalf())
                        marth.append((sol.evalf()
))
                    #print (marth)
                    if marth[0]>marth[1]:
                        faka= faka + marth[0]
                    else:
                        faka= faka + marth[1]
                    print (faka)
                    faka1=((faka-150)/math.tan(ϕϕ
- 3*(math.pi / 2)))+150
                    print (faka1)
                    l1=0
                    l2=faka
                    l3=faka1
                    l4=0
                    Dl1=faka-150
                    Dl2=faka1-150
                    P2=(Dl1*k[1])/(A[1])
                    P1=(Dl2*k[2])/(A[2])
                    #print (P2)
                    #print (P3)
                    PnewMpa = [P1, P2, P3, P4]
                    print("Pressure in Mpa",
PnewMpa)
                    PnewBar = [P1 * 10, P2 * 10,
P3 * 10, P4 * 10]
                    print("Pressure in Bar",
PnewBar)
                    PnewPsi = [round(P1 *
145.038), round(P2 * 145.038), round(P3 *
145.038), round(P4 * 145.038)]
                    print("Pressure in Psi",
PnewPsi)
                    CHAMBER1.append(round(P1 *
145.038))
                    CHAMBER2.append(round(P2 *
145.038))
                    CHAMBER3.append(round(P3 *
145.038))
                    CHAMBER4.append(round(P4 *
145.038))
    print("Pressure in Psi for chamber
1",CHAMBER1)
    print("Pressure in Psi for chamber
2",CHAMBER2)
    print("Pressure in Psi for chamber
3",CHAMBER3)
    print("Pressure in Psi for chamber
4",CHAMBER4)
    arduinochamber1 = 'const int CHAMBER1[] = {'
+ ', '.join(map(str, CHAMBER1)) + '};'
    arduinochamber2 = 'const int CHAMBER2[] = {'
+ ', '.join(map(str, CHAMBER2)) + '};'
    arduinochamber3 = 'const int CHAMBER3[] = {'
+ ', '.join(map(str, CHAMBER3)) + '};'
    arduinochamber4 = 'const int CHAMBER4[] = {'
+ ', '.join(map(str, CHAMBER4)) + '};'
    print(arduinochamber1)
```

```
    print(arduinochamber2)
    print(arduinochamber3)
    print(arduinochamber4)

if __name__ == "__main__":
    main()
```

Παράρτημα 5

Αυτό το παράρτημα περιέχει έναν κώδικα Arduino που χρησιμοποιεί το MCP4728 DAC για να ρυθμίσει τις πιέσεις σε τέσσερις θαλάμους ενός ενεργοποιητή, προκειμένου να επιτευχθούν συγκεκριμένες γωνίες κάμψης και περιστροφής. Οι πιέσεις αυτές καθορίζονται από τις λίστες που περιέχουν τιμές σε psi για κάθε θάλαμο.

```
#include <Adafruit_MCP4728.h>
#include <Wire.h>

int AA0= A0; //pin to read the pressure for valve
1
int AA1= A1; //pin to read the pressure for valve
3
int AA2= A2; //pin to read the pressure for valve
3
int AA3= A3; //pin to read the pressure for valve
4

Adafruit_MCP4728 mcp;

// The lists contain pressures in psi for each
chamber separately, which when applied create the
angle of actuation (ϕ) (0-360) and bending angle
(θ) (0-90)
const int CHAMBER1[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 3, 4, 5,
6, 7, 8, 8, 9, 9, 10, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 18,
20};
const int CHAMBER2[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
const int CHAMBER3[] = {20, 18, 17, 15, 14, 12,
11, 10, 10, 9, 9, 8, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 0, 0,
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
0, 0};
const int CHAMBER4[] = {11, 11, 11, 11, 11, 11,
11, 11, 12, 13, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20,
22, 23, 22, 20, 19, 18, 17, 16, 15, 14, 13, 13,
12, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11};
// Define the number of elements in the lists
const int listSizeCHAMBER1 = sizeof(CHAMBER1) /
sizeof(CHAMBER1[0]);
const int listSizeCHAMBER2 = sizeof(CHAMBER2) /
sizeof(CHAMBER2[0]);
const int listSizeCHAMBER3 = sizeof(CHAMBER3) /
sizeof(CHAMBER3[0]);
const int listSizeCHAMBER4 = sizeof(CHAMBER4) /
sizeof(CHAMBER4[0]);

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial)
    delay(10); // will pause Zero, Leonardo, etc
until serial console opens

  Serial.println("Adafruit MCP4728 test!");

  // Try to initialize!
  if (!mcp.begin()) {
    Serial.println("Failed to find MCP4728
chip");
    while (1) {
      delay(10);
    }
  }
}

void loop() {
  for (int i = 0; i < listSizeCHAMBER1; i++) {
    // Read pressure values from analog pins
    int readpressure1= analogRead(AA0);
    int readpressure2= analogRead(AA1);
    int readpressure3= analogRead(AA2);
    int readpressure4= analogRead(AA3);
    // Map pressure values to psi
    float ty1= map(readpressure1, 216, 1023,
1.15, 130);  //read the pressure in psi from the
pressure sensor for valve 1
```

```
    float ty2= map(readpressure2, 195, 1023,
1.15, 130);  //read the pressure in psi from the
pressure sensor for valve 2
    float ty3= map(readpressure3, 218, 1023,
1.15, 130);  //read the pressure in psi from the
pressure sensor for valve 3
    float ty4= map(readpressure4, 199, 1023,
1.15, 130);  //read the pressure in psi from the
pressure sensor for valve 4
    // Retrieve pressure values for each chamber
    float CHAMBER1pressure1 = CHAMBER1[i];
//pressure in psi for chamber 1
    float CHAMBER2pressure2 = CHAMBER2[i];
//pressure in psi for chamber 2
    float CHAMBER3pressure3 = CHAMBER3[i];
//pressure in psi for chamber 3
    float CHAMBER4pressure4 = CHAMBER4[i];
//pressure in psi for chamber 4
    // Map pressure values to DAC values
    float CHAMBER1psi=map(CHAMBER1pressure1, 0,
130, 0, 4095);
    float CHAMBER2psi=map(CHAMBER2pressure2, 0,
130, 0, 4095);
    float CHAMBER3psi=map(CHAMBER3pressure3, 0,
130, 0, 4095);
    float CHAMBER4psi=map(CHAMBER4pressure4, 0,
130, 0, 4095);
    // Set DAC output values
    mcp.setChannelValue(MCP4728_CHANNEL_A,
CHAMBER1psi);
    mcp.setChannelValue(MCP4728_CHANNEL_B,
CHAMBER2psi);
    mcp.setChannelValue(MCP4728_CHANNEL_C,
CHAMBER3psi);
    mcp.setChannelValue(MCP4728_CHANNEL_D,
CHAMBER4psi);
    // Print pressure readings
    Serial.print("Pressure1 (psi): ");
    Serial.print(ty1);
    Serial.print(" Pressure2 (psi): ");
    Serial.print(ty2);
    Serial.print(" Pressure3 (psi): ");
    Serial.print(ty3);
    Serial.print(" Pressure4 (psi): ");
    Serial.println(ty4);
  }
  for (int i = listSizeCHAMBER1 - 1; i >= 0; i--)
{
    int readpressure1= analogRead(AA0);
    int readpressure2= analogRead(AA1);
    int readpressure3= analogRead(AA2);
    int readpressure4= analogRead(AA3);

    float ty1= map(readpressure1, 216, 1023,
1.15, 130);  //read the pressure in psi from the
pressure sensor for valve 1
    float ty2= map(readpressure2, 195, 1023,
1.15, 130);  //read the pressure in psi from the
pressure sensor for valve 2
    float ty3= map(readpressure3, 218, 1023,
1.15, 130);  //read the pressure in psi from the
pressure sensor for valve 3
    float ty4= map(readpressure4, 199, 1023,
1.15, 130);  //read the pressure in psi from the
pressure sensor for valve 4

    float CHAMBER1pressure1 = CHAMBER1[i];
//pressure in psi for chamber 1
    float CHAMBER2pressure2 = CHAMBER2[i];
//pressure in psi for chamber 2
    float CHAMBER3pressure3 = CHAMBER3[i];
//pressure in psi for chamber 3
    float CHAMBER4pressure4 = CHAMBER4[i];
//pressure in psi for chamber 4

    float CHAMBER1psi=map(CHAMBER1pressure1, 0,
130, 0, 4095);
    float CHAMBER2psi=map(CHAMBER2pressure2, 0,
130, 0, 4095);
    float CHAMBER3psi=map(CHAMBER3pressure3, 0,
130, 0, 4095);
    float CHAMBER4psi=map(CHAMBER4pressure4, 0,
130, 0, 4095);

    mcp.setChannelValue(MCP4728_CHANNEL_A,
CHAMBER1psi);
    mcp.setChannelValue(MCP4728_CHANNEL_B,
CHAMBER2psi);
    mcp.setChannelValue(MCP4728_CHANNEL_C,
CHAMBER3psi);
```

```
    mcp.setChannelValue(MCP4728_CHANNEL_D,
CHAMBER4psi);

    Serial.print("Pressure1 (psi): ");
    Serial.print(ty1);
    Serial.print(" Pressure2 (psi): ");
    Serial.print(ty2);
    Serial.print(" Pressure3 (psi): ");
    Serial.print(ty3);
    Serial.print(" Pressure4 (psi): ");
    Serial.println(ty4);
  }
}
```

Παράρτημα 6

Μια λεπτομερής επίδειξη περιλαμβάνει τη χρήση της μεθόδου Pugh Matrix για την αξιολόγηση και την επιλογή τοποθετήσεων ενεργοποιητών, η οποία είναι ιδανική για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Αρχικά, ορίζονται κριτήρια αξιολόγησης όπως η λειτουργικότητα, η αποτελεσματικότητα, η πολυπλοκότητα της κατασκευής και το κόστος. Στη συνέχεια, τεκμηριώνονται οι τεχνικές προδιαγραφές για βασικά μοντέλα ενεργοποιητών, συμπεριλαμβανομένων διαγραμμάτων και υλικών κατασκευής για ενεργοποιητές μονής, διπλής, τριπλής και τετραδιόδου, καθώς και υφασμάτινων ενεργοποιητών acrorteon. Η μέθοδος του πίνακα Pugh χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση κάθε διάταξης με τη βασική λύση, την καταγραφή των βαθμολογιών και τον υπολογισμό της συνολικής βαθμολογίας για την επιλογή των 15 τελικών σχεδίων. Τέλος, περιλαμβάνει αναλυτική περιγραφή του επιλεγμένου σχεδίου και λεπτομερή σύγκριση 30 διαφορετικών μεθόδων κατασκευής με βάση κριτήρια όπως ευκολία λειτουργίας, ανθεκτικότητα, ευελιξία, κόστος κ.λπ. για την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου κατασκευής συστήματος.

Αρχικά, για την αξιολόγηση των διατάξεων ενεργοποιητών χρησιμοποιήθηκαν τα εξής κριτήρια:

- **Λειτουργικότητα:** Πώς εξυπηρετεί την επιθυμητή εφαρμογή.
- **Αποδοτικότητα**: Πόσο αποτελεσματικά λειτουργεί.
- **Πολυπλοκότητα Κατασκευής:** Ευκολία και κόστος κατασκευής.
- **Κόστος:** Συμπεριλαμβανομένου του κόστους υλικών και εργασίας.

Κάθε κριτήριο περιγράφεται λεπτομερώς, παρέχοντας σαφείς κατευθύνσεις για την αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων.

Η αξιολόγηση κάθε διάταξης ενεργοποιητών πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Pugh Matrix:

- **Διαδικασία Βαθμολόγησης**: Κάθε διάταξη συγκρίθηκε με μια βασική λύση για κάθε κριτήριο.
- **Πίνακες Αξιολόγησης**: Καταγραφή βαθμολογιών κάθε διάταξης σε σχέση με τη βασική λύση.
- **Συγκεντρωτικές Βαθμολογίες**: Η συνολική βαθμολογία καθορίζει την καταλληλόλητα των διατάξεων.

Οι τελικές 15 επιλεγμένες διατάξεις ενεργοποιητών παρουσιάζονται λεπτομερώς με:

- **Διαγράμματα και Σχηματικές Αναπαραστάσεις**: Κάθε σχέδιο παρουσιάζεται γραφικά.
- **Λόγοι Επιλογής**: Ανάλυση βάσει των κριτηρίων αξιολόγησης.
- **Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα**: Καταγραφή των ισχυρών και αδύναμων σημείων κάθε διάταξης.
- **Προτάσεις Βελτιώσεων και Εφαρμογών**: Προτάσεις για περαιτέρω βελτιώσεις και εφαρμογές των σχεδίων.

Η κατασκευή του συστήματος θα συνδυάσει τις δεκαπέντε σχεδιαστικές διατάξεις με τους δύο τρόπους τοποθέτησης του φωτοβολταϊκού πάνελ, οδηγώντας σε τριάντα διαφορετικούς τρόπους κατασκευής. Αυτοί οι τρόποι συγκρίθηκαν ως προς:

- **Απλότητα Λειτουργίας**
- **Ανθεκτικότητα**
- **Ευλυγισία**
- **Ποσότητα Υλικού**
- **Ανθεκτικότητα στο Νερό**
- **Πιθανότητα Βλάβης**
- **Ευκολία και Κόστος Κατασκευής**
- **Κάλυψη Εύρους Κίνησης στους Δύο Άξονες**
- **Ευκολία Ανύψωσης Κατασκευής**

Κάθε κριτήριο βαθμολογήθηκε με -1, 0 και 1. Το άθροισμα των κριτηρίων για κάθε κατασκευή καθόρισε τον καταλληλότερο τρόπο κατασκευής του επενεργητή. Οι πρώτοι δεκαπέντε συνδυασμοί αντιστοιχούν στις δεκαπέντε σχεδιαστικές διατάξεις με τον πρώτο τρόπο τοποθέτησης του πάνελ, ενώ οι υπόλοιποι δεκαπέντε συνδυασμοί αντιστοιχούν στις δεκαπέντε σχεδιαστικές διατάξεις με τον δεύτερο τρόπο τοποθέτησης του πάνελ. Η συγκριτική ανάλυση παρουσιάζεται λεπτομερώς, καταλήγοντας στους έξι πιο πιθανούς τρόπους κατασκευής.

Αυτή το παράρτημα παρέχει μια ολοκληρωμένη και λεπτομερή εικόνα της διαδικασίας και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την αξιολόγηση και την επιλογή των σχεδίων ενεργοποιητών.

	Σχεδιαστικοί Συνδυασμοί					
Κριτήρια	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 1**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 2**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 3**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 4**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 5**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 6**
Απλότητα λειτουργίας	1	1	1	1	-1	0
Ανθεκτικότητα	1	1	1	0	1	1
Ευλυγισία	-1	-1	0	1	1	0
Ποσότητα Υλικού	-1	-1	0	1	-1	-1
Αδιάβροχο	1	1	1	1	1	1
Πιθανότητα βλάβης	1	1	0	-1	1	1
Τρόπος κατασκευής	1	1	0	0	0	1
Ευκολία κατασκευής	-1	-1	0	1	-1	-1
Κόστος	-1	0	1	1	-1	-1
Κάλυψη εύρους κίνησης στους δύο άξονες	-1	0	1	0	1	0
Ευκολία ανύψωσης κατασκευής	1	1	1	1	1	1
Βάρος	0	0	0	0	0	0
Άθροισμα	1	3	6	6	2	2

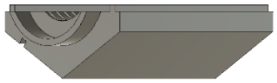
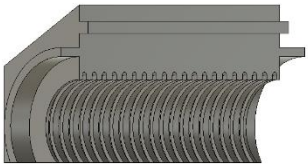
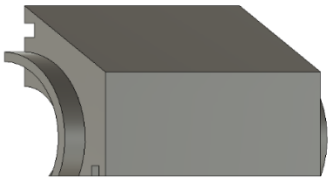
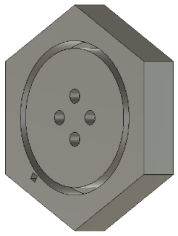
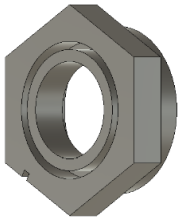
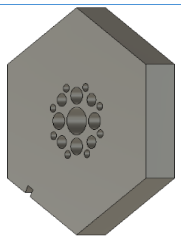
	Σχεδιαστικοί Συνδυασμοί					
Κριτήρια	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 7**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 8**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 9**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 10**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 11**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 12**
Απλότητα λειτουργίας	0	0	1	-1	-1	-1
Ανθεκτικότητα	1	1	0	1	1	1
Ευλυγισία	0	0	1	1	1	0
Ποσότητα Υλικού	-1	-1	1	-1	-1	-1
Αδιάβροχο	1	1	1	1	1	1
Πιθανότητα βλάβης	1	1	-1	0	1	1
Τρόπος κατασκευής	1	0	1	1	1	1
Ευκολία κατασκευής	0	0	1	-1	0	0
Κόστος	0	0	1	-1	-1	0
Κάλυψη εύρους κίνησης στους δύο άξονες	1	1	0	1	1	1
Ευκολία ανύψωσης κατασκευής	1	1	1	1	1	1
Βάρος	0	0	0	0	0	0
Άθροισμα	5	4	8	2	4	4

	Σχεδιαστικοί Συνδυασμοί					
Κριτήρια	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 13**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 14**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 15**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 16**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 17**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 18**
Απλότητα λειτουργίας	-1	-1	0	1	1	1
Ανθεκτικότητα	1	1	0	1	1	1
Ευλυγισία	0	-1	1	1	1	1
Ποσότητα Υλικού	-1	-1	1	-1	-1	0
Αδιάβροχο	1	1	-1	1	1	1
Πιθανότητα βλάβης	0	1	-1	1	1	0
Τρόπος κατασκευής	1	1	-1	1	1	0
Ευκολία κατασκευής	-1	-1	0	-1	-1	0
Κόστος	-1	-1	0	-1	0	1
Κάλυψη εύρους κίνησης στους δύο άξονες	1	-1	1	1	1	1
Ευκολία ανύψωσης κατασκευής	1	1	1	1	1	1
Βάρος	0	0	0	-1	-1	-1
Άθροισμα	1	-1	1	4	5	6

	Σχεδιαστικοί Συνδυασμοί					
Κριτήρια	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 19**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 20**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 21**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 22**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 23**	**Σχεδιαστικός Συνδυασμός 24**
Απλότητα λειτουργίας	1	-1	0	0	0	1
Ανθεκτικότητα	0	1	1	1	1	0
Ευλυγισία	1	1	1	1	1	1
Ποσότητα Υλικού	1	-1	-1	-1	-1	1
Αδιάβροχο	1	1	1	1	1	1
Πιθανότητα βλάβης	-1	1	1	1	1	-1
Τρόπος κατασκευής	0	0	1	1	0	1
Ευκολία κατασκευής	1	-1	-1	0	0	1
Κόστος	1	-1	-1	0	0	1
Κάλυψη εύρους κίνησης στους δύο άξονες	1	1	1	1	1	1
Ευκολία ανύψωσης κατασκευής	1	1	1	1	1	1
Βάρος	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Άθροισμα	6	1	3	5	4	7

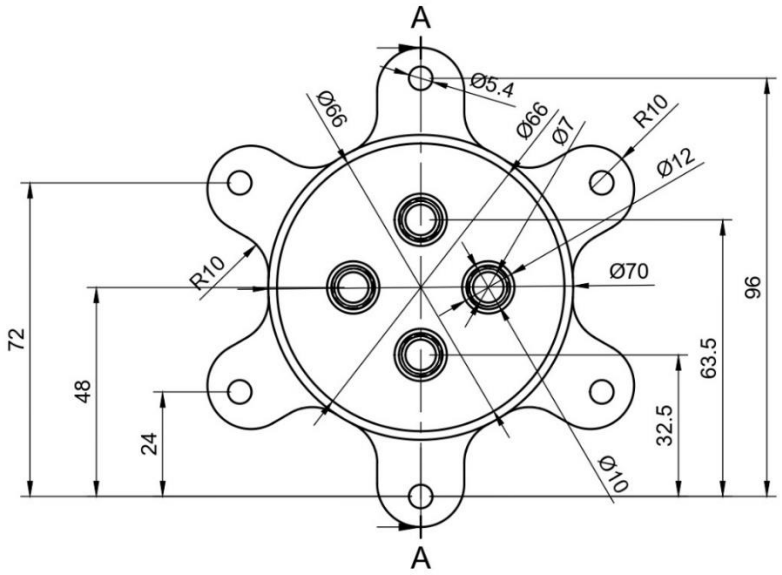
Παράρτημα 7

Ο πίνακας που ακολουθεί, παρουσιάζει τα διαφορετικά μέρη του καλουπιού.

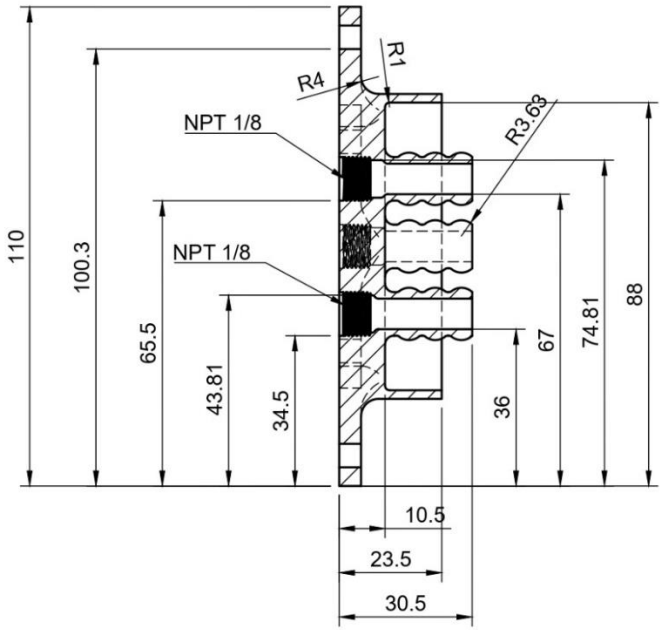
Parts	Design	Ποσότητα
Part 1		x1
Part 2		x1
Part 3		x1
Part 4		x1
Part 5		x1
Part 6		x4
Part 7		x1

Πίνακας 23: Μέρη καλουπιού επενεργητή.

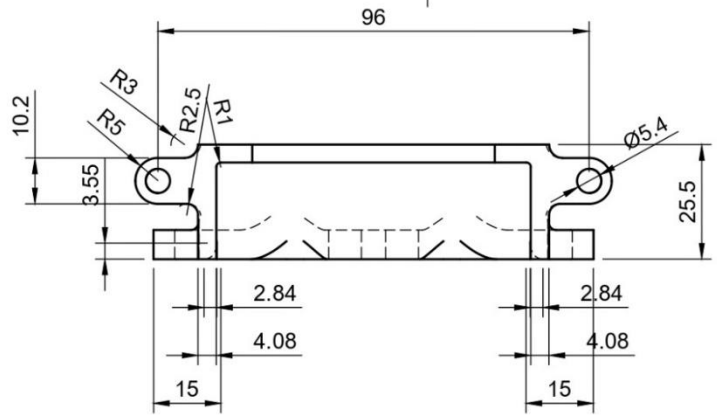
Παράρτημα 8

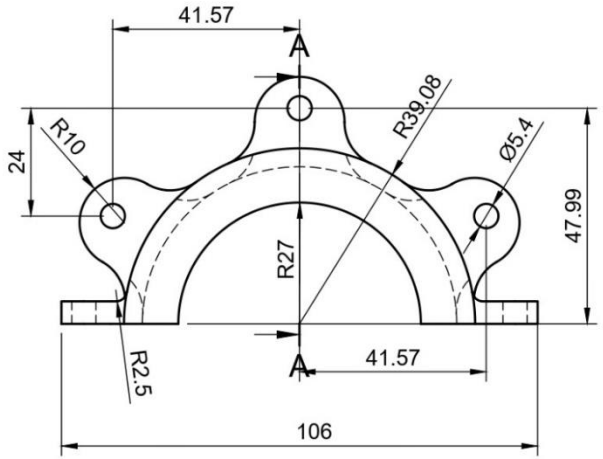


A-A (1:1)

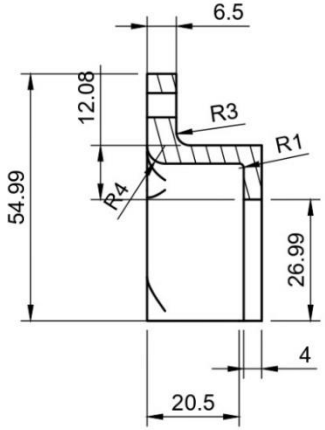


Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Document type	Document status
		Title Βάση επενεργτή Scale 1:1	DWG No.
			Rev. / Date of issue / Sheet 1/1



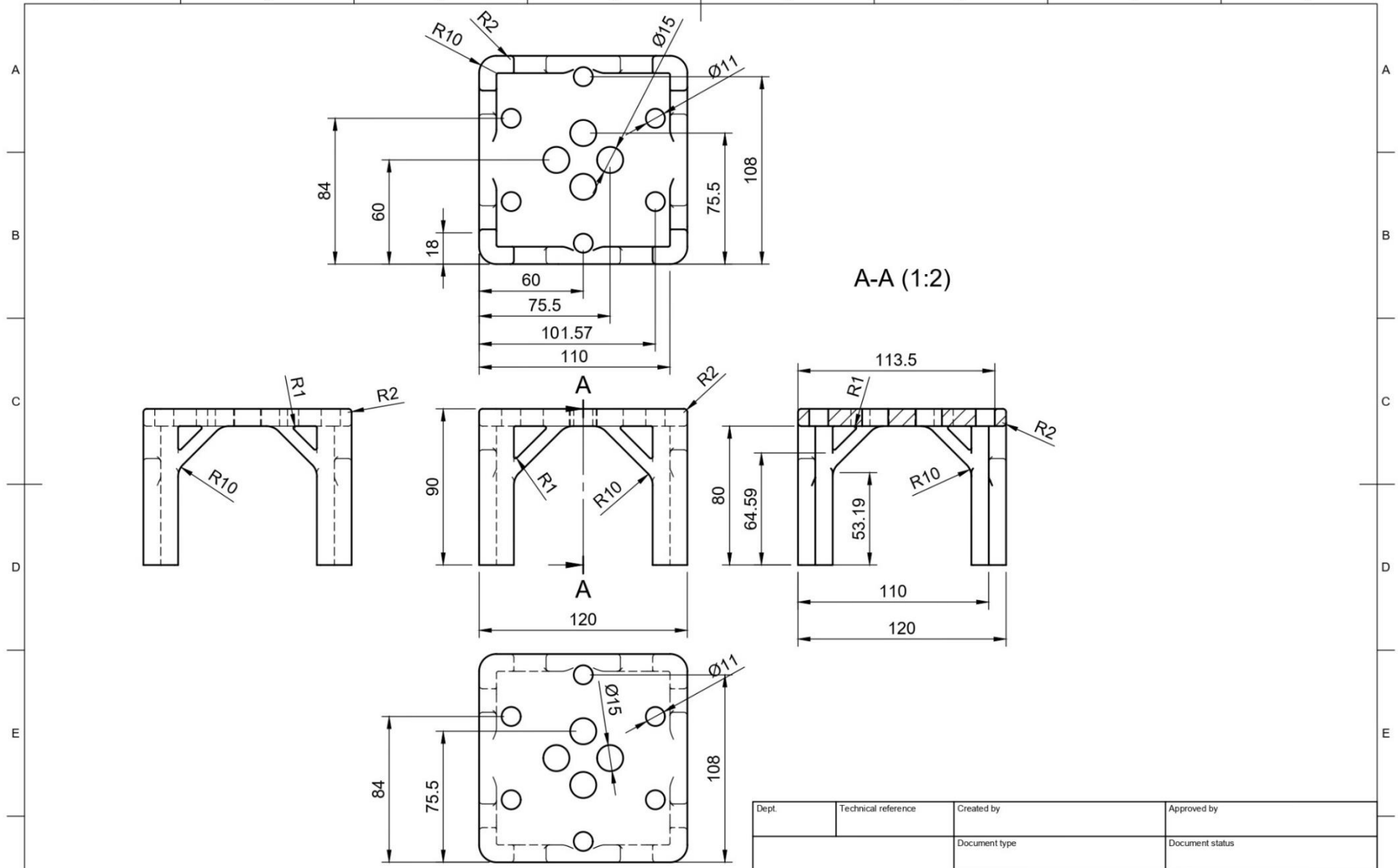


A-A (1:1)



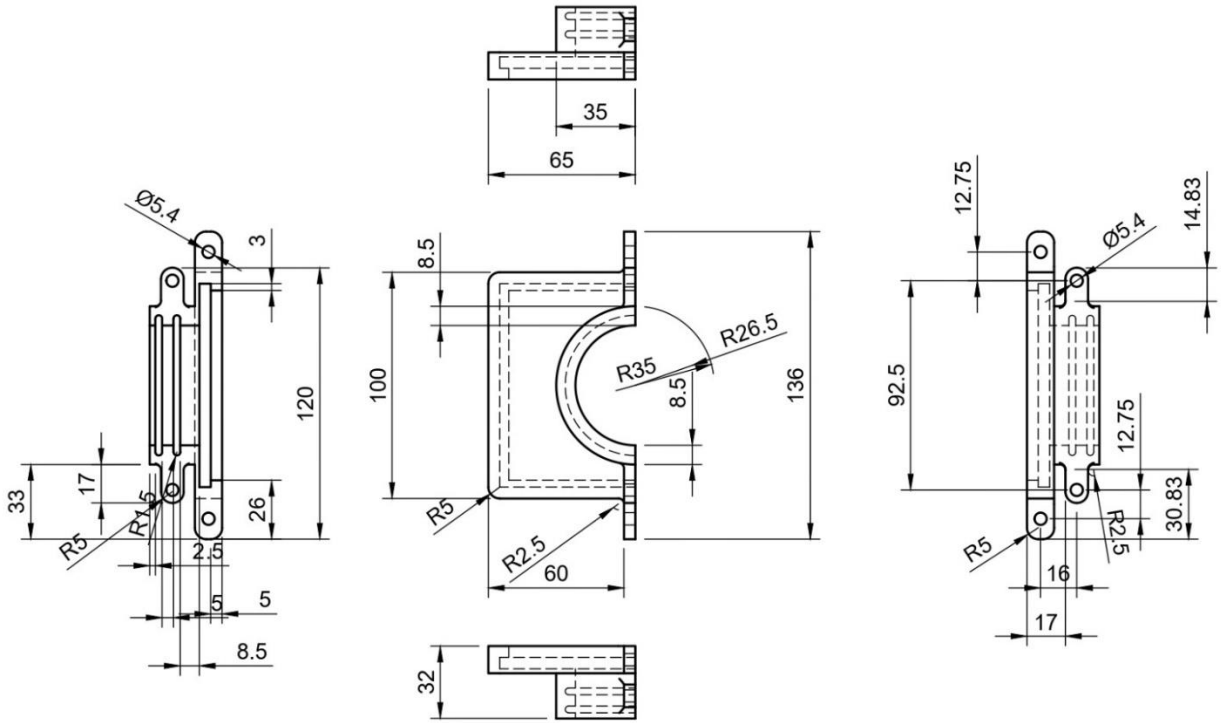
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Document type	Document status
		Title: Σφιγκτήρας βάσης Scal 1:1 Ποσότητα: 2	DWG No.
			Rev. / Date of issue / Sheet: 1/1

Παράρτημα 9



Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Document type	Document status
		Title: Base of system Scale 1:2	DWG No.
			Rev. / Date of issue / Sheet: 1/1

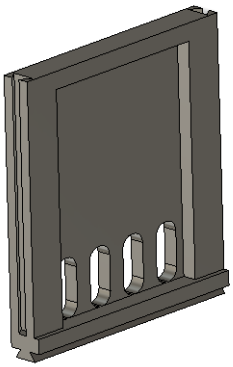
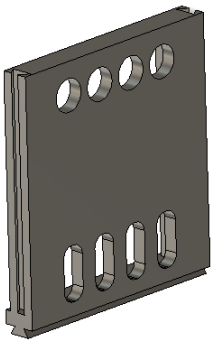
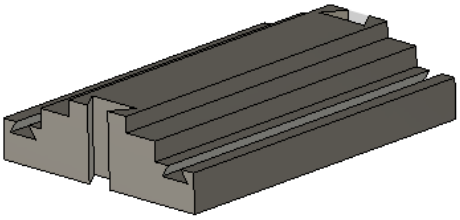
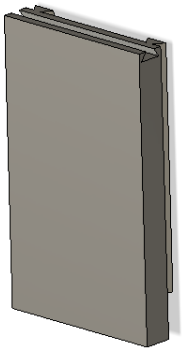
Παράρτημα 10

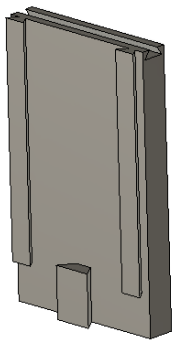
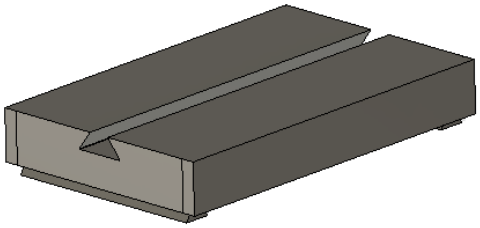
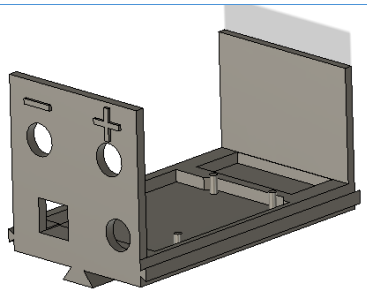
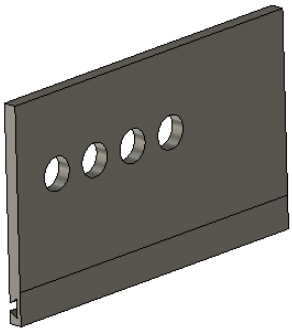
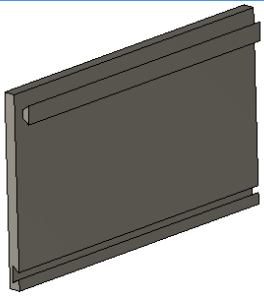


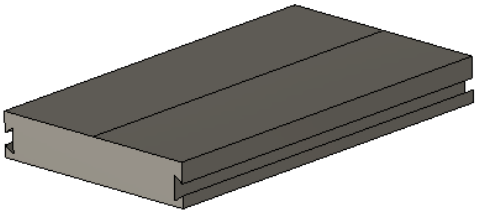
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Document type	Document status
		Title Βάση πάνελ Scale 1:2 Ποσότητα: 2	DWG No.
			Rev. / Date of issue / Sheet 1/1

Παράρτημα 11

Ο πίνακας που ακολουθεί, παρουσιάζει τα διαφορετικά μέρη του κουτιού.

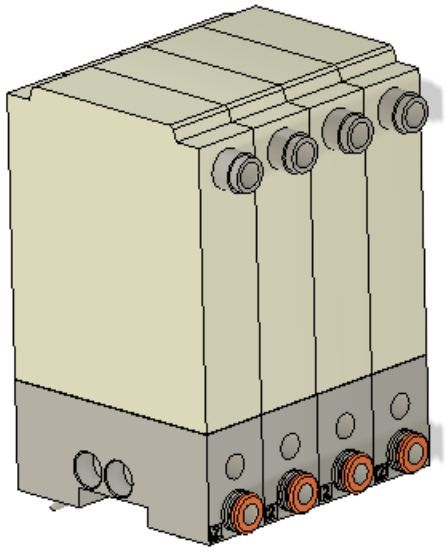
Parts	Design	Ποσότητα
Part 1		x1
Part 2		x1
Part 3		x1
Part 4		x1

Part 5		x1
Part 6		x1
Part 7		x1
Part 8		x1
Part 9		x1

Part 10		x1

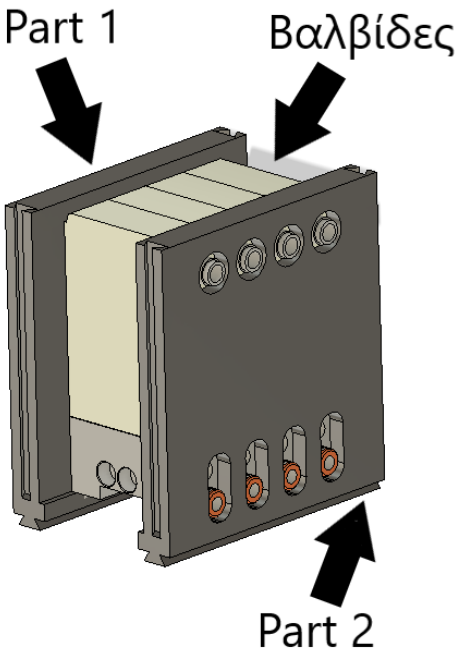
Πίνακας 24: Μέρη οργανωτικού κουτιού.

Αρχικά, για να συναρμολογηθεί το κουτί πρέπει οι βαλβίδες πρέπει να είναι μία δίπλα στην άλλη.



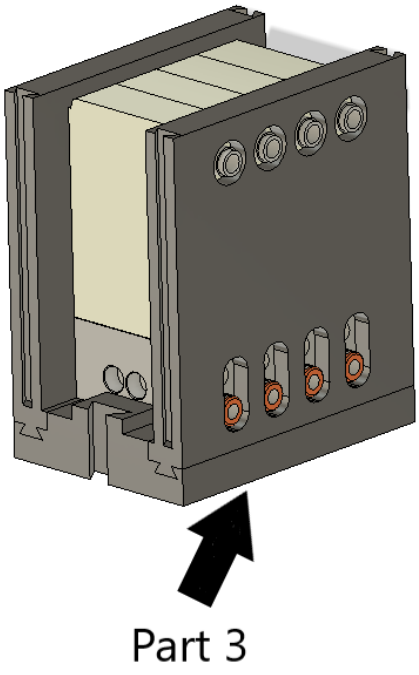
Εικόνα 86: Βαλβίδες η μία δίπλα στην άλλη.

Στην συνέχεια θα τοποθετηθούν τα Parts 1 και 2 στην μπροστινή και πίσω όψη των βαλβίδων.



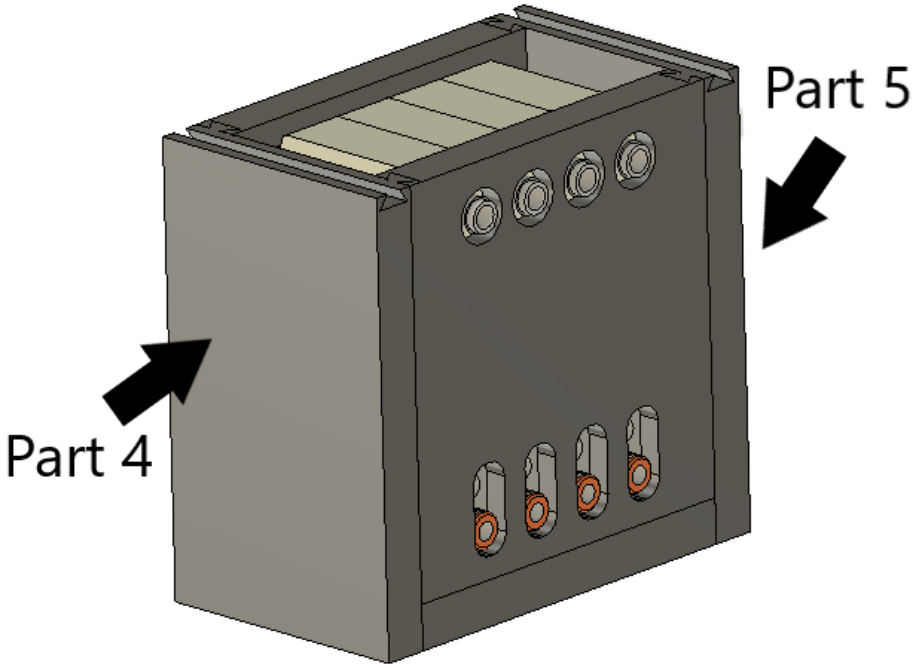
Εικόνα 87: Συναρμολόγηση βαλβίδων με τα Parts 1 και 2.

Στην συνέχεια θα ενωθεί με τις βαλβίδες και τα υπόλοιπα μέρη το Part 3,



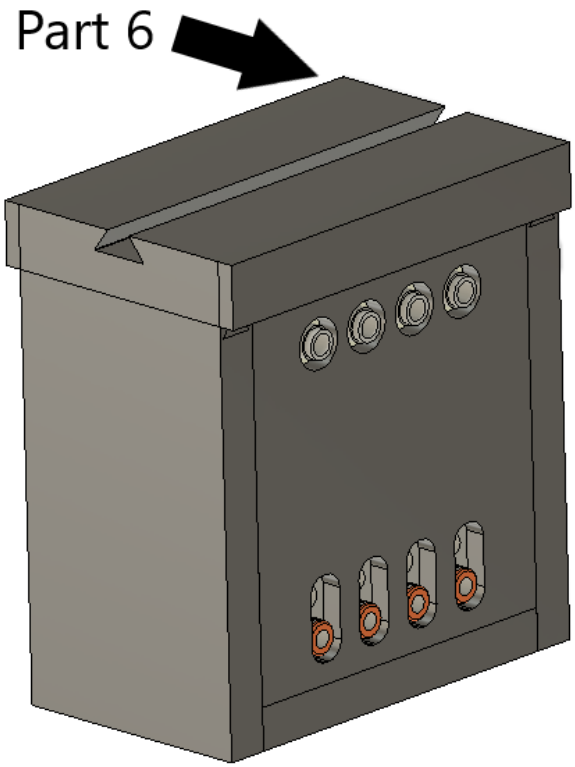
Εικόνα 88: Συναρμολόγηση Part 3 με τα υπόλοιπα μέρη.

Επόμενο βήμα είναι να ενωθούν τα Parts 4 και 5 με τα υπόλοιπα μέρη.



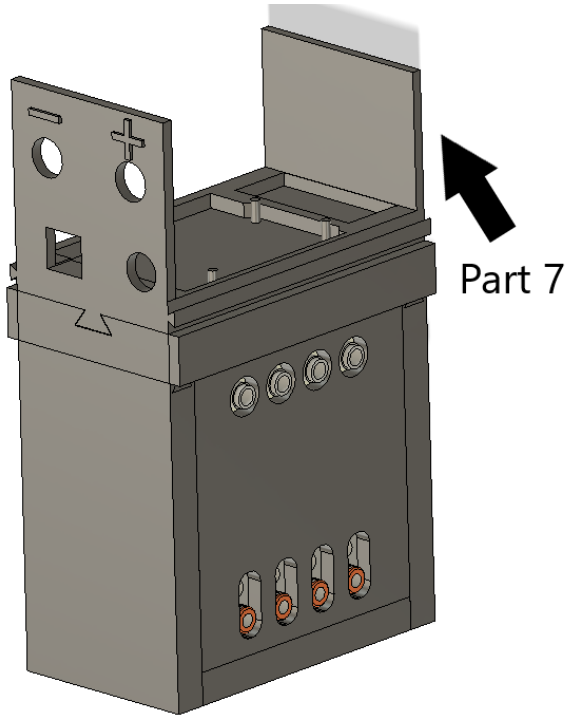
Εικόνα 89: Συναρμολόγηση Part 4 και 5 με τα υπόλοιπα μέρη.

Τέλος, θα τοποθετηθεί το Part 6 όπου με αυτόν τον τρόπο οι βαλβίδες θα είναι καλυμμένες.



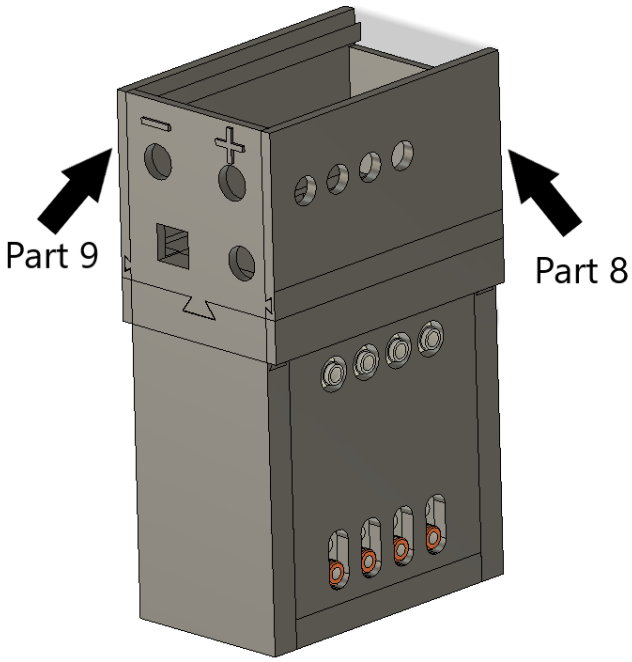
Εικόνα 90: Συναρμολόγηση Part 6 με τα υπόλοιπα μέρη.

Επόμενο βήμα είναι να τοποθετηθεί το Part 7.



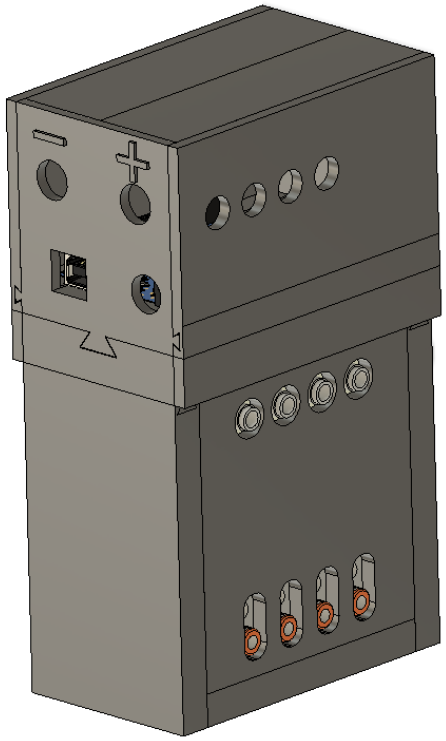
Εικόνα 91: Συναρμολόγηση Part 7 με τα υπόλοιπα μέρη.

Στην συνέχεια, θα τοποθετηθούν τα πλαϊνά Parts στο Part 7 ώστε να προστατεύουν το Arduino, το DAC και την συνδεσμολογία, διότι στο Part 7 στις ειδικές εσοχές θα τοποθετηθούν το Arduino και το DAC.



Εικόνα 92: Συναρμολόγηση Part 8 και 9 με τα υπόλοιπα μέρη.

Τέλος θα μπει το τελευταίο Part 10, όπου θα ολοκληρώσει το κουτί και έχει την δυνατότητα με την αφαίρεση του να υπάρχει άμεση πρόσβαση στο Arduino, στο DAC και στην συνδεσμολογία, σε περίπτωση που χρειάζεται να γίνει κάποιος έλεγχος στην συνδεσμολογία ή κάποια τροποποίηση σε αυτή.



Εικόνα 93: Ψηφιακά συναρμολογημένο το κουτί οργανωτικής συνδεσμολογίας.