

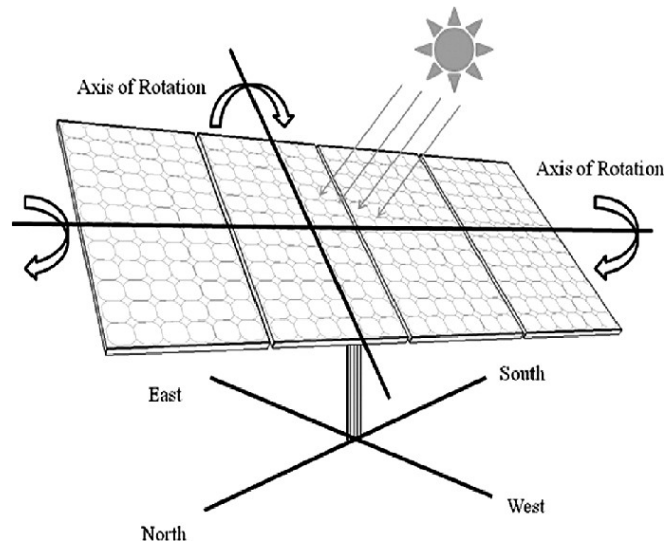


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## Διπλωματική Εργασία

Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης  
συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά  
Συστήματα



Φοιτητής: ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ

ΑΜ: 18387223

Επιβλέπων Καθηγητής

ΠΥΡΟΜΑΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Επίκουρος Καθηγητής

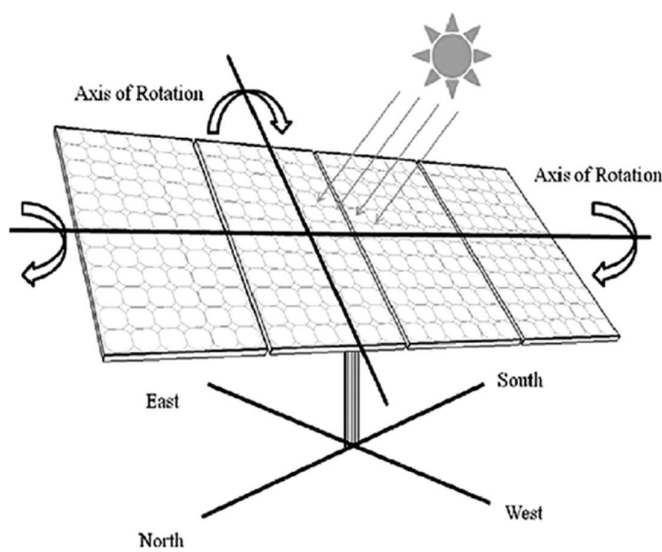
ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Ιούλιος 2023



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

### **Model-based design and simulation of a solar tracking system for PV**



**Student: PAPAGEORGIU EFSTRATIOS**  
**Registration Number: 18387223**

**Supervisor**

**PIROMALIS DIMITRIOS**  
**Assistant Professor**

**ATHENS-EGALEO, July 2023**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

| Πυρομάλης Δημήτριος<br>Επίκουρος Καθηγητής | Βόκας Γεώργιος<br>Καθηγητής | Καμινάρης Σταύρος<br>Καθηγητής |
|--|-----------------------------|--------------------------------|
| (Υπογραφή)                                 | (Υπογραφή)                  | (Υπογραφή)                     |

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Παπαγεωργίου Ευστράτιος, Ιούλιος, 2023**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Παπαγεωργίου Ευστράτιος του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 18387223 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή»

Ο Δηλών  
Παπαγεωργίου Ευστράτιος



## **Ευχαριστίες**

Έχοντας φτάσει ένα βήμα πριν την παραλαβή του διπλώματός μου θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με την δική τους συμβολή με βοήθησαν να φέρω εις πέρας αυτό το δύσκολο αλλά όμορφο ταξίδι σπουδών. Ιδιαίτερα θέλω να δώσω ένα τεράστιο ευχαριστώ στον σύμβουλό μου κύριο Παναγιώτη Παπαγέωργα που με την εμπιστοσύνη του και την καθοδήγησή του έπαιξε τον πιο καθοριστικό ρόλο για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσης διπλωματικής. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα κύριο Δημήτριο Πυρομάλη που ήταν πρόθυμος στο να βοηθήσει στην επίλυση προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στην πορεία της διπλωματικής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου που ήταν εκεί από την αρχή έως το τέλος αυτής της διαδρομής πιστεύοντας σε μένα, δίνοντας κουράγιο και συμβουλές στις δύσκολες στιγμές και αντλώντας χαρά και ενθουσιασμό από τις επιτυχίες μου.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε σχεδιασμός και προσομοίωση, βάσει τεχνικών μοντελοποίησης, ενός συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα. Αυτό το πλήρως αυτόματο σύστημα ανιχνεύει τη θέση του ήλιου ανεξάρτητα από το αν ο ήλιος είναι ορατός ή όχι και έχει την ικανότητα περιστροφής στον άξονα X και στον άξονα Y. Εάν ο ήλιος είναι ορατός, η θέση του ανιχνεύεται από αισθητήρες φωτός και εάν δεν είναι ορατός, η θέση του ανιχνεύεται από τις εξισώσεις του ήλιου που υπολογίζουν τη θέση του στον ουρανό. Το σύστημα προσομοιώθηκε στο Simulink και δημιουργήθηκαν κατάλληλα δομικά στοιχεία διαγράμματα για την επιτυχή προσομοίωση. Οι αισθητήρες φωτός αποτελούνται από εξαιρετικά ευαίσθητες φωτοδιόδους. Το σύστημα ελέγχεται με τη βοήθεια της πλατφόρμας Arduino MEGA 2560 και συγκεκριμένα με τον μικροελεγκτή ATmega2560 της AVR. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της υλοποίησης αυτού του συστήματος είναι ότι μπορεί να αναπτυχθεί και να λειτουργήσει χωρίς να υπάρχει κάποιος περιορισμός στα γεωμορφολογικά στοιχεία του τόπου που θα τοποθετηθεί. Επίσης υπάρχει ένα εκτεταμένο φάσμα υποστήριξης μικροελεγκτή και λογισμικού καθώς υπάρχει η ευχέρεια της συνεργασίας του συστήματος με το MATLAB/Simulink το οποίο μπορεί να παράγει αυτόματο κώδικα σε γλώσσα C. Τέλος, ένα άλλο χαρακτηριστικό του συστήματος είναι ότι η πληροφορία της ώρας που απαιτείται για τον υπολογισμό της θέσης του ήλιου μέσω των εξισώσεων προέρχεται από ένα πραγματικό ρολόι (το οποίο μπορεί να ρυθμιστεί από τον χρήστη ανάλογα με τις αλλαγές της ώρας).

## Λέξεις – κλειδιά

Συστήματα ηλιακής παρακολούθησης, ανιχνευτή τεταρτημόριου, μοντελοποίηση, προσομοίωση, εξισώσεις του ήλιου, MATLAB/Simulink.

## **Abstract**

In this thesis, a solar monitoring system for Photovoltaic Systems was designed and simulated, based on modeling techniques. This fully automatic system detects the position of the sun regardless of whether the sun is visible or not and has the ability to rotate in the X-axis and Y-axis. If the sun is visible, its position is detected by light sensors and if it is not visible, its position is detected by sun equations that calculate its position in the sky. The system was simulated in Simulink and appropriate block diagrams were created for successful simulation. The light sensors consist of highly sensitive photodiodes. The system is controlled with the help of the Arduino MEGA 2560 platform, specifically the AVR ATmega2560 microcontroller. Another feature of this system implementation is that it can be deployed and operated without any restriction on the geomorphological features of the site where it will be placed. There is also an extensive range of microcontroller and software support as there is the facility for the system to work with MATLAB/Simulink which can generate automatic code in C language. Finally, another feature of the system is that the time information required to calculate the position of the sun in the middle of the equations is derived from a real clock (which can be adjusted by the user according to time changes).

## **Keywords**

Solar tracking systems, quadratic detector, modelling, simulation, solar equations, MATLAB/Simulink.

## Περιεχόμενα

|  |           |
|--|-----------|
| Κατάλογος Πινάκων.....   | 11        |
| Κατάλογος Εικόνων.....   | 11        |
| Αλφαβητικό Ευρετήριο.....  | 15        |
| <b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>   | <b>16</b> |
| Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....   | 16        |
| Σκοπός και στόχοι.....   | 16        |
| Μεθοδολογία.....   | 17        |
| Καινοτομία.....  | 17        |
| <b>1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....</b>   | <b>18</b> |
| 1.1 Ηλιακή Ενέργεια.....   | 18        |
| 1.2 Πλεονεκτήματα χρήσης ηλιακής ενέργειας.....  | 19        |
| 1.3 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η φωτοβολταϊκή τεχνολογία.....   | 20        |
| 1.4 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων.....   | 21        |
| 1.5 Μοντελοποίηση ηλιακού κελιού.....  | 21        |
| 1.6 Ηλιακή ακτινοβολία.....  | 23        |
| 1.7 Ένταση ακτινοβολίας και επίδραση της θερμοκρασίας.....   | 25        |
| 1.8 Σύνδεση ηλιακών κελιών.....  | 26        |
| 1.9 Απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων.....  | 28        |
| 1.10 Τα βασικά μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.....   | 29        |
| 1.11 Ταξινόμηση των συστημάτων ηλιακής παρακολούθησης.....   | 29        |
| 1.12 Κανόνες χωροθέτησης.....  | 32        |
| 1.13 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακά πάνελ στην Ελλάδα.....   | 33        |
| <b>2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Εξιιώσεις για την ανίχνευση του Ήλιου.....</b>   | <b>34</b> |
| 2.1 Ο Ήλιος.....   | 34        |
| 2.2 Ιστορική αναδρομή.....   | 36        |
| 2.3 Οι μαθηματικές εξισώσεις για την εύρεση της θέσης του ήλιου.....   | 37        |
| <b>3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Αισθητήρας θέσης ηλιακής ακτινοβολίας.....</b>   | <b>47</b> |
| 3.1 Μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας.....  | 47        |
| 3.2 Σκοπός της χρήσης του αισθητήρα θέσης.....   | 49        |
| 3.3 Ιστορική ανασκόπηση της τεχνολογίας quadratic detector.....  | 50        |
| 3.4 Ανάλυση της διάταξης του αισθητήρα θέσης.....  | 52        |
| 3.5 Στάδια κατασκευής του ηλεκτρονικού κυκλώματος του αισθητήρα θέσης.....   | 53        |
| <b>4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Κυβερνοφυσικά Συστήματα &amp; Ψηφιακά Δίδυμα (Cyber Physical Systems &amp; Digital Twins).....</b> | <b>62</b> |



|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.1  | Εισαγωγή.....   | 63 |
| 4.2  | Ανάλυση Κυβερνοφυσικών Συστημάτων.....  | 63 |
| 4.3  | Ανάλυση Ψηφιακών Διδύμων.....   | 64 |
| 4.4  | Διαφορές των Κυβερνοφυσικών Συστημάτων & των Ψηφιακών Διδύμων.....  | 65 |
| 4.5  | Συμπεράσματα.....   | 66 |
| 5    | <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : Σχεδιασμός&amp; Προγραμματισμός Βάσει Μοντελοποίησης (Model-Based Design &amp; Programming)</b> ..... | 66 |
| 5.1  | Εισαγωγή.....   | 66 |
| 5.2  | Στάδια του Σχεδιασμού Βάσει Μοντελοποίησης.....   | 67 |
| 5.3  | Ανάλυση του Υλικού Σε Βρόχο (Hardware In the Loop).....   | 69 |
| 5.4  | Στάδιο του Προγραμματισμού Βάσει Μοντελοποίησης.....  | 69 |
| 6    | <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> : Περιβάλλον ανάπτυξης και μοντελοποίησης</b> .....   | 71 |
| 6.1  | Τι είναι το MATLAB.....   | 71 |
| 6.2  | Δυνατότητες.....  | 72 |
| 6.3  | Βιβλιοθήκες.....  | 72 |
| 6.4  | Γλώσσες διασύνδεσης.....  | 73 |
| 6.5  | Περιβάλλον εργασίας.....  | 73 |
| 6.6  | Βασικά χαρακτηριστικά.....  | 75 |
| 6.7  | Simulink.....   | 75 |
| 6.8  | Βασικά χαρακτηριστικά και λειτουργίες.....  | 75 |
| 6.9  | Περιήγηση στο περιβάλλον Simulink.....  | 76 |
| 6.10 | Αυτόματη δημιουργία κώδικα στο Simulink.....  | 78 |
| 7    | <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> : Πλατφόρμα υλοποίησης υλικού ανοικτού κώδικα Arduino</b> .....   | 81 |
| 7.1  | Εισαγωγή.....   | 81 |
| 7.2  | Δυνατότητες και πλεονεκτήματα του Arduino Uno.....  | 81 |
| 7.3  | Δυνατότητες και πλεονεκτήματα του Arduino MEGA 2560.....  | 82 |
| 7.4  | Arduino Uno vs. Arduino MEGA 2560.....  | 82 |
| 7.5  | Ανάλυση και τεχνικά χαρακτηριστικά του Arduino MEGA 2560.....   | 83 |
| 8    | <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup> : Σερβομηχανισμός</b> .....   | 86 |
| 8.1  | Σερβοκινητήρας.....   | 86 |
| 8.2  | Τι περιέχει ένας DC σερβοκινητήρας.....   | 87 |
| 8.3  | Τρόπος λειτουργίας.....   | 87 |
| 9    | <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup> : Ελεγκτής PID</b> .....  | 88 |
| 9.1  | Εισαγωγή.....   | 89 |
| 9.2  | Λειτουργία PID.....   | 90 |
| 9.3  | Τα χαρακτηριστικά και η σημασία των όρων P, I, D.....   | 90 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 9.4    | Μέθοδοι συντονισμού PID ελεγκτών .....   | 93  |
| 9.5    | Περιορισμοί του PID ελεγκτή.....   | 94  |
| 10     | <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10<sup>ο</sup> : Σχεδιασμός Βάσει Μοντελοποίησης και Προσομοίωση (Model-based design and Simulation)</b> ..... | 95  |
| 10.1   | Εισαγωγή.....  | 95  |
| 10.2   | Μοντελοποίηση - Προσομοίωση του σερβοκινητήρα .....  | 95  |
| 10.2.1 | Μοντελοποίηση - Προσομοίωση του κινητήρα DC.....   | 95  |
| 10.2.2 | Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα.....   | 98  |
| 10.2.3 | Έλεγχος ευστάθειας.....  | 99  |
| 10.3   | Σχεδίαση του ελεγκτή (Control design).....   | 102 |
| 10.3.1 | .....  | 102 |
| 10.3.2 | Ψηφιακή μορφή PID ελεγκτών και ολοκλήρωση της σχεδίασης Ελεγκτή για την πλατφόρμα Arduino .....                            | 107 |
| 10.4   | Προσομοίωση συστήματος (Στάδιο Λογισμικού στον βρόγχο-SIL) .....   | 113 |
| 10.4.1 | Ο σκοπός του SIL και τα toolboxes που χρησιμοποιήθηκαν .....   | 113 |
| 10.4.2 | Ανάλυση των δομικών στοιχείων που απαρτίζουν το μοντελοποιημένο σύστημα για την προσομοίωση.....                           | 113 |
| 10.4.3 | Αποτελέσματα του SIL.....  | 121 |
| 10.5   | Προσομοίωση Υλικού Σε Βρόγχο (Hardware In the Loop Simulation).....  | 122 |
| 10.5.1 | Στάδιο PIL .....   | 122 |
| 10.5.2 | Ανάλυση του μοντελοποιημένου κυκλώματος του σταδίου HIL.....   | 122 |
| 10.5.3 | Απεικόνιση των αποτελεσμάτων του σταδίου HIL .....   | 127 |
| 11     | <b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....  | 129 |
|        | <b>Βιβλιογραφία – Αναφορές – Διαδικτυακές Πηγές</b> .....  | 129 |

## Κατάλογος Πινάκων

**Πίνακας 9.1.** Οι γενικές επιδράσεις κάθε παραμέτρου του ελεγκτή ( $KP, KI, KD$ ) σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου. [45].....91

## Κατάλογος Εικόνων

|   |    |
|---|----|
| <b>Εικόνα 1.1.</b> Ανάλυση ηλιακής ακτινοβολίας. [1] .....  | 19 |
| <b>Εικόνα 1.2.</b> Σχηματικό διάγραμμα ηλιακού κελιού. [2] .....  | 21 |
| <b>Εικόνα 1.3.</b> Μοντέλο θεωρητικού ηλιακού κελιού. [3] .....   | 22 |
| <b>Εικόνα 1.4.</b> Μοντέλο πραγματικού ηλιακού κελιού. [4] .....  | 22 |
| <b>Εικόνα 1.5.</b> (α) I-V καμπύλη του ηλιακού κελιού (β) P-V καμπύλη του ηλιακού κελιού [5].....   | 23 |
| <b>Εικόνα 1.6.</b> Τύποι ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτουν στην επιφάνεια της γης. [6] .....   | 24 |
| <b>Εικόνα 1.7.</b> Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες επιφάνειες (στραμμένες) κατά τη διάρκεια ενός έτους. [7] .....   | 24 |
| <b>Εικόνα 1.8.</b> Γραφική απεικόνιση της καμπύλης I-V για διάφορες εντάσεις ακτινοβολίας. [8] .....  | 25 |
| <b>Εικόνα 1.9.</b> Γραφική απεικόνιση της καμπύλης I-V για διάφορες θερμοκρασίες. [9] .....   | 26 |
| <b>Εικόνα 1.10.</b> (α) Ηλιακά κελιά συνδεδεμένα σε σειρά, (β) Ηλιακά κελιά συνδεδεμένα παράλληλα. [10].....  | 27 |
| <b>Εικόνα 1.11.</b> Απεικόνιση της I-V όταν έχουμε συνδεσμολογία σε σειρά. [11].....  | 27 |
| <b>Εικόνα 1.12.</b> Απεικόνιση της I-V όταν έχουμε παράλληλη συνδεσμολογία. [12] .....  | 28 |
| <b>Εικόνα 1.13.</b> Στο πρώτο σχήμα παρουσιάζεται ο μηχανισμός του αζιμουθιακού ηλιοτρόπιου και στο δεύτερο σχήμα παρουσιάζεται ο μηχανισμός του πολικού ηλιοτρόπιου. [13]..... | 31 |
| <b>Εικόνα 1.14.</b> Σύστημα ανιχνευτή ηλίου διπλού άξονα. [14].....   | 31 |
| <b>Εικόνα 1.15.</b> Εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς. [15].....   | 33 |
| <b>Εικόνα 1.16.</b> Αλλαγή της δυναμικότητας του ηλεκτρικού δικτύου το 2021 στην Ελλάδα. [16].....  | 34 |
| <b>Εικόνα 2.1.</b> Η εικόνα του Ήλιου και της Γης. [17].....  | 35 |
| <b>Εικόνα 2.2.</b> Το αστρονομικό μοντέλο που ανέπτυξε ο Νικόλαος Κοπέρνικος. [18].....   | 36 |
| <b>Εικόνα 2.3.</b> Απόκλιση άξονα Γης ως προς το επίπεδο της εκλειπτική τροχιάς. [19] .....   | 38 |
| <b>Εικόνα 2.4.</b> Ετήσια διακύμανση της απόκλισης του άξονα της Γης. [20] .....  | 39 |
| <b>Εικόνα 2.5.</b> Επιφάνεια της γης σε μερκατορικό χάρτη. [21] .....   | 40 |
| <b>Εικόνα 2.6.</b> Σχηματική επεξήγηση της ωριαίας γωνίας $\omega$ του ήλιου. [22] .....  | 42 |
| <b>Εικόνα 2.7.</b> Γωνία ζενιθ ( $\theta_z$ ), Ηλιακό ύψος ( $\beta$ ) και Αζιμούθιο ( $\varphi_s$ ). [23] .....  | 43 |
| <b>Εικόνα 2.8.</b> Το ηλιακό ύψος στο Αιγάλεω.....  | 44 |
| <b>Εικόνα 2.9.</b> Μέση ημερήσια διακύμανση του ηλιακού ύψους στο Αιγάλεω του κάθε μήνα συναρτήσει του πολιτικού χρόνου.....  | 45 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Εικόνα 2.10.</b> Μέση ημερήσια διακύμανση του αζιμούθιου του ήλιου στο Αιγάλεω στον κάθε μήνα .....                    | 46 |
| <b>Εικόνα 2.11.</b> Μεταβολή του ηλιακού ύψους μίας ολόκληρης ημέρας συναρτήσει του αζιμούθιου του ήλιου. ....            | 47 |
| <b>Εικόνα 3.1.</b> Γραφική απεικόνιση του νόμου των συνημίτονων του Lambert. [24] .....                                   | 49 |
| <b>Εικόνα 3.2.</b> Απεικόνιση ενός κομματιού της συγκεκριμένης πατέντας που αναφέρεται στο quadratic detector. [25] ..... | 51 |
| <b>Εικόνα 3.3.</b> Απεικόνιση ενός κομματιού της συγκεκριμένης πατέντας που αναφέρεται στο quadratic detector. [26] ..... | 51 |
| <b>Εικόνα 3.4.</b> Δομή ενός quadratic detector. [27] .....   | 52 |
| <b>Εικόνα 3.5</b> Ενισχυτής συνδεδεμένος με φωτοδίοδο σε λειτουργία φωτοβολταϊκής σύνδεσης. [28] .                        | 54 |
| <b>Εικόνα 3.6.</b> Ενισχυτής συνδεδεμένος με φωτοδίοδο σε λειτουργία φωτοαγωγίμης σύνδεσης. [29]..                        | 55 |
| <b>Εικόνα 3.7.</b> Το πρώτο στάδιο του αισθητήρα quadratic detector. ....   | 55 |
| <b>Εικόνα 3.8.</b> Σύμβολο διαφορικού ενισχυτή. [30].....   | 56 |
| <b>Εικόνα 3.9.</b> Τελεστικός ενισχυτής σε συνδεσμολογία που ενισχύει τη διαφορά.....                                     | 57 |
| <b>Εικόνα 3.10.</b> Κύκλωμα Δγ. ....  | 58 |
| <b>Εικόνα 3.11.</b> Κύκλωμα Δχ. ....  | 58 |
| <b>Εικόνα 3.12.</b> Κύκλωμα αθροιστή.....   | 59 |
| <b>Εικόνα 3.13.</b> Δεύτερο στάδιο του κυκλώματος του αισθητήρα quadratic detector. ....                                  | 59 |
| <b>Εικόνα 3.14.</b> Κύκλωμα που επιτυγχάνει την αύξηση της τάσης εξόδου. ....   | 60 |
| <b>Εικόνα 3.15.</b> Τρισδιάστατο μοντέλο του αισθητήρα. ....  | 61 |
| <b>Εικόνα 3.16.</b> Ανάλυση για τον υπολογισμό του ύψους της διαχωριστικής επιφάνειας.....                                | 62 |
| <b>Εικόνα 4.1.</b> Αναλυτική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας των CPS. [31] .....  | 64 |
| <b>Εικόνα 4.2.</b> Αναλυτική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας των DTs. [32] .....  | 65 |
| <b>Εικόνα 5.1.</b> Σχεδιασμός συστημάτων ελέγχου με το MATLAB. [37].....  | 67 |
| <b>Εικόνα 5.2.</b> Διαδρομή παραγωγής κώδικα από μοντελοποιημένο σύστημα στο Simulink. [38] .....                         | 71 |
| <b>Εικόνα 6.1.</b> Κάποια βασικά μέρη από το περιβάλλον εργασίας μοντελοποίησης.....                                      | 74 |
| <b>Εικόνα 6.2.</b> Περιβάλλον Simulink. ....  | 76 |
| <b>Εικόνα 6.3.</b> Περιβάλλον του Simulink με την επιλογή του <b>Library Browser</b> . ....                               | 77 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Εικόνα 6.4.</b> Εξίσωση $fx = 3 \cdot x^2 + 5 \cdot x + 2$ στο Simulink. ....   | 78  |
| <b>Εικόνα 6.5.</b> Εισαγωγή για την επιλογή λεπτομερειών για την αυτόματη δημιουργία κώδικα. ....  | 79  |
| <b>Εικόνα 6.6.</b> Απεικόνιση της επιλογής παραθύρου καθορισμού παραμέτρων (Configuration Parameters).....   | 80  |
| <b>Εικόνα 6.7.</b> Το πλαίσιο επιλογής παραγωγής κώδικα (Build, Deploy & Start) και εκτέλεσης.....   | 80  |
| <b>Εικόνα 6.8.</b> Περιγραφή φακέλου αρχείων που περιέχει τον κώδικα που δημιουργήθηκε αυτόματα μέσω Simulink. ....  | 81  |
| <br>   |     |
| <b>Εικόνα 7.1.</b> Πλατφόρμα του Arduino MEGA 2560. [33].....  | 85  |
| <br>   |     |
| <b>Εικόνα 8.1.</b> Κατανομή μέγιστου βάρους ενός σερβοκινητήρα των 25kg-cm. [34].....  | 86  |
| <b>Εικόνα 8.2.</b> Τα δομικά μέρη ενός DC σερβοκινητήρα. [35].....   | 87  |
| <b>Εικόνα 8.3.</b> Το εσωτερικό κύκλωμα του DC σερβοκινητήρα για έλεγχο της θέσης εξόδου με την επιλογή του χρήστη μέσω ποτενσιόμετρου της επιθυμητή θέσης εξόδου. [36].....                                 | 88  |
| <br>   |     |
| <b>Εικόνα 9.1.</b> Δομικό διάγραμμα ενός απλού συστήματος κλειστού βρόχου και εξίσωση εξόδου του PID ελεγκτή. ....   | 90  |
| <b>Εικόνα 9.2.</b> Χρονική απόκριση συστήματα χωρίς ελεγκτή <b>(a)</b> , με τον P όρο <b>(b)</b> , Με τον P και D όρο <b>(c)</b> , Με τον P και τον I όρο <b>(d)</b> , Με όλους τους όρους <b>(e)</b> . .... | 93  |
| <br>   |     |
| <b>Εικόνα 10.1.</b> Κύκλωμα DC κινητήρα. ....  | 96  |
| <b>Εικόνα 10.2.</b> Μοντελοποίηση του σερβοκινητήρα. ....  | 97  |
| <b>Εικόνα 10.3.</b> Μοντελοποίηση DC κινητήρα χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα δομικά στοιχεία που υλοποιούν τις διαφορικές του εξισώσεις. ....  | 97  |
| <b>Εικόνα 10.4.</b> Απόκριση του σερβοκινητήρα με είσοδο βηματική συνάρτηση. ....  | 98  |
| <b>Εικόνα 10.5.</b> Κύκλωμα στο οποίο θα γίνει έλεγχος ευστάθειας. ....  | 100 |
| <b>Εικόνα 10.6.</b> Χρονική απόκριση του συστήματος της εικόνας 10.5. ....   | 101 |
| <b>Εικόνα 10.7.</b> Το κύκλωμα με την προσθήκη του δομικού στοιχείου Κέρδους (Gain). ....  | 101 |
| <b>Εικόνα 10.8.</b> Γεωμετρικός τόπος ριζών της συνάρτησης ανοιχτού βρόχου με μεταβαλλόμενο $n$ ..   | 102 |
| <b>Εικόνα 10.9.</b> Το τελικό δομικά στοιχεία διάγραμμα στο οποίο θα γίνει η ρύθμιση του PID.....  | 103 |
| <b>Εικόνα 10.10.</b> Παράθυρο επιλογών του PID Controller. ....  | 105 |
| <b>Εικόνα 10.11.</b> Παράθυρο επιλογών του PID Tuner. ....   | 105 |
| <b>Εικόνα 10.12.</b> Επιθυμητή απόκριση του συστήματος μετά από ρύθμιση των επιλογών <b>Response Time</b> και <b>Transient Behavior</b> . ....   | 106 |
| <b>Εικόνα 10.13.</b> Απόκριση του συστήματος έχοντας ως είσοδο τετραγωνικούς παλμούς.....  | 107 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Εικόνα 10.14.</b> Σύστημα ελέγχου. ....  | 108 |
| <b>Εικόνα 10.15.</b> Τελικό δομικό διάγραμμα και η ρύθμιση του PID ελεγκτή. ....  | 109 |
| <b>Εικόνα 10.16.</b> Επίτευξη της καλύτερης δυνατής απόκρισης του συστήματος με κατάλληλη ρύθμιση των PID χαρακτηριστικών. ....   | 110 |
| <b>Εικόνα 10.17.</b> Χρονική απόκριση του ΣΑΕ για τετραγωνικό παλμό με πλάτος 1. ....   | 111 |
| <b>Εικόνα 10.18.</b> Χρονική απόκριση του ΣΑΕ για τετραγωνικό παλμό με πλάτος 4. ....   | 111 |
| <b>Εικόνα 10.19.</b> Χρονική απόκριση του ΣΑΕ για προιοντή είσοδο με πλάτος 4. ....   | 112 |
| <b>Εικόνα 10.20.</b> Χρονική απόκριση του ΣΑΕ για ημιτονοειδή είσοδο με πλάτος 4. ....  | 112 |
| <b>Εικόνα 10.21.</b> Μοντελοποιημένο σύστημα που επιτυγχάνει το Software-In-the-Loop simulation. ....   | 114 |
| <b>Εικόνα 10.22.</b> Δομικό στοιχείο του συστήματος που εξασφαλίζει την ευστάθεια στο σύστημα αλλά και την περιστροφή του φωτοβολταϊκού. ....                                 | 115 |
| <b>Εικόνα 10.23.</b> Κύκλωμα μανδαλωτή. ....  | 116 |
| <b>Εικόνα 10.24.</b> Κύκλωμα D-Latch. ....  | 116 |
| <b>Εικόνα 10.25.</b> Κύκλωμα Master-Slave. ....   | 116 |
| <b>Εικόνα 10.26.</b> Κύκλωμα T flip-flop. ....  | 117 |
| <b>Εικόνα 10.27.</b> Κύκλωμα Counter. ....  | 118 |
| <b>Εικόνα 10.28.</b> Τελικό κύκλωμα Clock. ....   | 118 |
| <b>Εικόνα 10.29.</b> Δομικό στοιχείο που περιέχει τις εξισώσεις του ήλιου. ....   | 119 |
| <b>Εικόνα 10.30.</b> Δομικό στοιχείο για την αντίληψη οποιασδήποτε μεταβολής του άξονα X και του άξονα Y. ....  | 120 |
| <b>Εικόνα 10.31.</b> Απόκριση του συστήματος προσομοίωσης. ....   | 121 |
| <b>Εικόνα 10.32.</b> Το 1 <sup>ο</sup> μέρος της αναπαράστασης του συνολικού κυκλώματος. ....   | 122 |
| <b>Εικόνα 10.33.</b> Το 2 <sup>ο</sup> μέρος της αναπαράστασης του συνολικού κυκλώματος. ....   | 123 |
| <b>Εικόνα 10.34.</b> Το 3 <sup>ο</sup> μέρος της αναπαράστασης του συνολικού κυκλώματος. ....   | 124 |
| <b>Εικόνα 10.35.</b> Απεικόνιση της απόκρισης των δύο σερβοκινητήρων στους άξονες X και Y κατά τη διάρκεια της ανίχνευσης του φωτός για μία τυχαία θέση της πηγής φωτός. .... | 128 |
| <b>Εικόνα 10.36.</b> Απεικόνιση της απόκρισης των δύο σερβοκινητήρων στους άξονες X και Y κατά τη διάρκεια της ανίχνευσης του φωτός για μία τυχαία θέση της πηγής φωτός. .... | 128 |

## Αλφαβητικό Ευρετήριο

QD: Quadratic Detector

CPS: Cyber Physical System

DTs: Digital Tweens

MBD: Model-Based Design

MBP: Model-Based Programming

SIL: Software-In-the-Loop

PIL: Processor-In-the-Loop

HIL: Hardware-In-the-Loop

ADC: Analog to Digital Converter

DAC: Digital to Analog Converter

MW: Mega Watt

CMES: Coral Mass Ejections

CCD: Charge-Coupled Devices

RTD: Resistance Temperature Detector

CMRR: Common Mode Rejection Ratio

IR: Infrared

UV: Ultraviolet

APD: Avalanche Photodiode

PCB: Printed Circuit Board

RTL: Register Transfer Level

IDE: Integrated Development Environment

IoT: Internet of Things

SRAM: Static Random-Access Memory

EEPROM: Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

PWM: Pulse Width Modulation

UART: Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

SPI: Serial Peripheral Interface

I2C: Inter-Integrated Circuit

USB: Universal Serial Bus

DC: Direct Current

AC: Alternating Current

BLDC: Brushless DC electric motor

FLC: Fuzzy Logic Controllers

MPC: Model Predictive Controller

ANN: Artificial Neural Network

BEMF: Back Electromotive Force

RT: Rate Transition

ΓΤΡ: Γεωμετρικός Τόπος Ριζών

ΣΑΕ : Σύστημα Αυτομάτου Ελέγχου

Φ/Β: Φωτοβολταϊκό

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εποχή που διανύουμε χαρακτηρίζεται έντονα από την αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας καθώς τα ενεργειακά αποθέματα του εδάφους έχουν μειωθεί σε σημαντικό βαθμό.

Μια εναλλακτική μορφή ενέργειας είναι η φωτοβολταϊκή τεχνολογία η οποία μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, είναι μια καθαρή και βιώσιμη ενεργειακή λύση, καθώς παράγει ηλεκτρική ενέργεια χωρίς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ή άλλων επιβλαβών ρύπων και αυτό την καθιστά αυτομάτως φιλική προς το περιβάλλον.

### Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η αυτόματη φωτοβολταϊκή τεχνολογία, δηλαδή ενός συστήματος με αυτόματη ανίχνευση του ηλίου (solar tracking), το οποίο θα μπορεί να περιστραφεί και στους δύο άξονες (X,Y).

Ο τρόπος με τον οποίο θα επιτυγχάνεται η ανίχνευση του ηλίου θα είναι με τον ανιχνευτή τεταρτημόριου τις ηλιόλουστες μέρες και όταν ο ανιχνευτής τεταρτημόριου δεν είναι αποτελεσματικός λόγω του πολύ χαμηλού ηλιακού φωτός θα αναλαμβάνει την εύρεση του ηλίου στον ορίζοντα οι εξισώσεις του ήλιου.

Με την περιστροφή του φωτοβολταϊκού επιτυγχάνετε η κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε αυτό και έχει ως αποτέλεσμα μία μεγάλη αύξηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού. Έτσι, θα καλυφθούν περισσότερες ανάγκες του εκάστοτε χρήστη με αποτέλεσμα την μείωση της χρήσης των ενεργειακών αποθεμάτων του εδάφους και την αύξηση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

### Σκοπός και στόχοι

Ο σκοπός και ο στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής είναι ο εξής:



- Η πλήρης κατανόηση του συστήματος για τον επιτυχή σχεδιασμό βάση μοντελοποίησης στο περιβάλλον του Simulink.
- Η επιτυχή προσομοίωση του solar tracking συστήματος σε πραγματικό χρόνο και η ομαλή λειτουργία του.
- Η επιτυχή υλοποίηση ενός συστήματος που μπορεί να τοποθετηθεί σε φωτοβολταϊκό και να αυξήσει την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

### **Μεθοδολογία**

Η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε για την επιτυχή ολοκλήρωση της διπλωματικής βασίστηκε στα στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού που είναι το καταλυτικό μέρος του Model-Based Design ενός συστήματος και εν συνεχεία ολοκληρώθηκε και το στάδιο του Model-Based Programming για την δημιουργία κώδικα, ικανό να χρησιμοποιηθεί από τον μικροελεγκτή και να δώσει τα κατάλληλα αποτελέσματα στο σύστημα της ηλιακής παρακολούθησης. Η ανάλυση αυτών υπάρχει στο κεφάλαιο 5. Για να ολοκληρωθούν αυτά τα στάδια θα πρέπει πρώτα να γίνουν τα εξής:

- Αναλυτική μελέτη των εξισώσεων του ήλιου.
- Ανάλυση των κυκλωμάτων του ανιχνευτή τεταρτημόριου, του σερβοκινητήρα και του PID ελεγκτή που χρησιμοποιήθηκαν.

### **Καινοτομία**

Η καινοτομία της παρούσης διπλωματικής είναι ο σχεδιασμός βάση μοντελοποίησης ενός συστήματος ηλιακής παρακολούθησης και ο προγραμματισμός του βάση μοντελοποίησης, μέσω του περιβάλλοντος του Simulink που παρέχει το MATLAB.

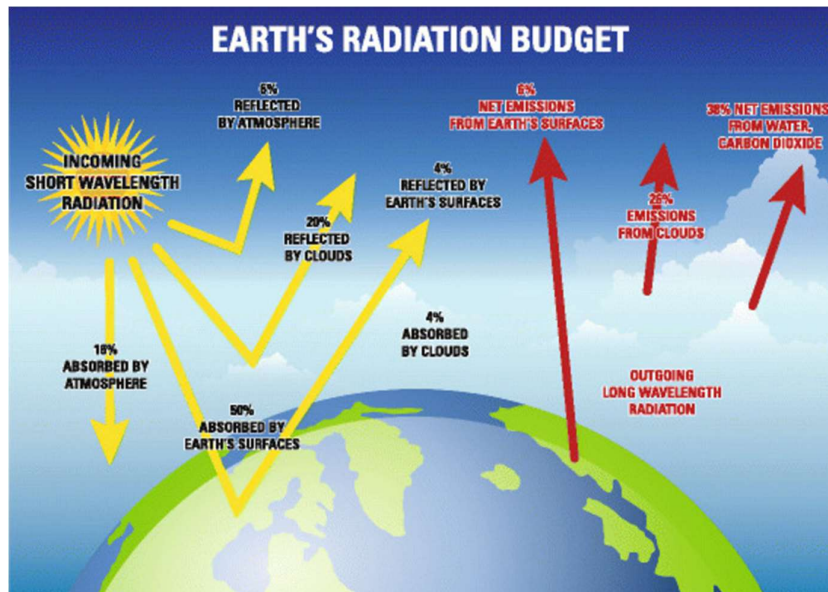
## 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει μία επισκόπηση της ηλιακής ενέργειας (που είναι το “καύσιμο” των φωτοβολταϊκών) αλλά και των πλεονεκτημάτων της. Θα αναλυθεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο για να γίνει αντιληπτός ο τρόπος λειτουργίας του φωτοβολταϊκού και θα γίνει παρουσίαση των κατηγοριών των φωτοβολταϊκών. Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί ο τρόπος μοντελοποίησης ενός ηλιακού κελιού και η ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν το φωτοβολταϊκό που είναι η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία. Επιπλέον θα παρουσιαστεί η σύνδεση των ηλιακών κελιών και εν συνεχεία η απόδοση των φωτοβολταϊκών, καθώς και τα μέρη αυτών. Επίσης θα αναλυθεί η ταξινόμηση των συστημάτων ηλιακής παρακολούθησης και θα αναφερθούν οι κανόνες χωροθέτησης. Τέλος θα γίνουν κάποιες παρατηρήσεις σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακά πάνελ στην Ελλάδα. [42]

### 1.1 Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι η ακτινοβολούμενη φωτεινή και θερμική ενέργεια που εκπέμπει ο Ήλιος. Είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια ή θερμότητα μέσω διαφόρων τεχνολογιών. Ο Ήλιος παράγει τεράστια ποσότητα ενέργειας μέσω της πυρηνικής σύντηξης στον πυρήνα του. Η ενέργεια αυτή εκπέμπεται στη συνέχεια στο διάστημα με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία περιλαμβάνει το ορατό φως, τις υπεριώδεις (UV) ακτίνες και την υπέρυθη (IR) ακτινοβολία. Όταν αυτή η ακτινοβολία φτάνει στην ατμόσφαιρα της Γης, ένα μέρος της ανακλάται πίσω στο διάστημα, ενώ το υπόλοιπο περνάει και φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Όταν προσπίπτει στην επιφάνεια της γης για μια δεδομένη χρονική στιγμή, η ένταση και η διεύθυνση πρόσπτωσης είναι αυτά που τη χαρακτηρίζουν. Όταν η ακτινοβολία του Ήλιου φτάνει στη Γη, το κάνει με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι ενεργειακά κύματα που ταξιδεύουν στο διάστημα με την ταχύτητα του φωτός.

Όταν το ηλιακό φως φτάνει στην ατμόσφαιρα της Γης, συναντά διάφορα σωματίδια, όπως μόρια, αερολύματα και σύννεφα, τα οποία διασκορπίζουν το ηλιακό φως προς διάφορες κατευθύνσεις. Αυτή η διαδικασία σκέδασης έχει ως αποτέλεσμα το ηλιακό φως να διασκορπιστεί και να κατανεμηθεί σε μεγαλύτερη έκταση, με αποτέλεσμα τη διάχυτη ακτινοβολία.



### Εικόνα 1.1. Ανάλυση ηλιακής ακτινοβολίας. [1]

Η παγκόσμια μέση ηλιακή ακτινοβολία εκτιμάται ότι είναι περίπου 164 Watt ανά τετραγωνικό μέτρο ( $W/m^2$ ), που αντιστοιχεί σε έναν ετήσιο μέσο όρο περίπου 5.000 kWh/m<sup>2</sup>.

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας σε εσωτερικούς χώρους με τη χρήση ηλιοθερμικών συστημάτων ή για την άμεση θέρμανση του νερού μέσω από τους ηλιακούς θερμοσίφωνες. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων.

### 1.2 Πλεονεκτήματα χρήσης ηλιακής ενέργειας

- **Ανανεώσιμη και βιώσιμη:** Η ηλιακή ενέργεια είναι μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Η ενέργεια του ήλιου είναι άφθονη και θα συνεχίσει να λάμπει για δεκαετομμύρια χρόνια.
- **Φιλική προς το περιβάλλον:** Η παραγωγή ηλιακής ενέργειας δεν εκπέμπει αέρια του θερμοκηπίου, ρύπους ή επιβλαβή υποπροϊόντα, καθιστώντας την καθαρή και βιώσιμη εναλλακτική λύση έναντι των ορυκτών καυσίμων.
- **Ενεργειακή ανεξαρτησία:** Μειώνει την εξάρτηση από παραδοσιακές πηγές ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα, προωθώντας την ενεργειακή ανεξαρτησία για άτομα, κοινότητες και έθνη.
- **Χαμηλότεροι λογαριασμοί ενέργειας:** Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μπορεί να αντισταθμίσει ή να εξαλείψει την ανάγκη αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, με αποτέλεσμα τη μείωση των λογαριασμών ενέργειας με την πάροδο του χρόνου.
- **Μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση κόστους:** Αν και η αρχική επένδυση σε ηλιακούς συλλέκτες μπορεί να είναι σημαντική, τα συστήματα ηλιακής ενέργειας έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και μπορούν να προσφέρουν εξοικονόμηση κόστους κατά τη διάρκεια της λειτουργικής τους ζωής.
- **Οικονομικά κίνητρα:** Πολλές κυβερνήσεις προσφέρουν οικονομικά κίνητρα, όπως φορολογικές πιστώσεις, επιχορηγήσεις και εκπτώσεις, για να ενθαρρύνουν την υιοθέτηση συστημάτων ηλιακής ενέργειας, μειώνοντας περαιτέρω το κόστος εγκατάστασης.
- **Επεκτάσιμη και αρθρωτή:** Τα συστήματα ηλιακής ενέργειας μπορούν να επεκταθούν ή να μειωθούν ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες. Μπορούν εύκολα να προστεθούν πρόσθετοι πίνακες, επιτρέποντας ευελιξία στο μέγεθος και τη χωρητικότητα του συστήματος.
- **Χαμηλή συντήρηση:** Οι ηλιακοί συλλέκτες απαιτούν ελάχιστη συντήρηση, με πρωταρχικές εργασίες τον περιοδικό καθαρισμό και τις επιθεωρήσεις. Δεν διαθέτουν κινούμενα μέρη, μειώνοντας τον κίνδυνο μηχανικών βλαβών.
- **Δυνατότητα λειτουργίας εκτός δικτύου:** Τα συστήματα ηλιακής ενέργειας μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να λειτουργούν ανεξάρτητα από το δίκτυο, καθιστώντας τα κατάλληλα για απομακρυσμένες περιοχές ή μέρη με αναξιόπιστη ή καθόλου πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια.

- **Ποικίλες εφαρμογές:** Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, της θέρμανσης και της ψύξης, της θέρμανσης νερού και της τροφοδοσίας οχημάτων
- **Τεχνολογικές εξελίξεις:** Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη της ηλιακής τεχνολογίας οδηγεί σε καινοτομίες, βελτιώνει την αποδοτικότητα και μειώνει το κόστος, καθιστώντας την ηλιακή ενέργεια μια όλο και πιο ελκυστική επιλογή.

### 1.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η φωτοβολταϊκή τεχνολογία

Το **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**, αναφέρεται στη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος σε ορισμένα υλικά όταν αυτά εκτίθενται στο φως. Το φαινόμενο αυτό ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά το 1839 από τον Γάλλο φυσικό Alexandre Edmond Becquerel. Το φαινόμενο οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ φωτονίων (σωματίδια του φωτός) και των ατόμων ή μορίων ενός ημιαγωγικού υλικού.

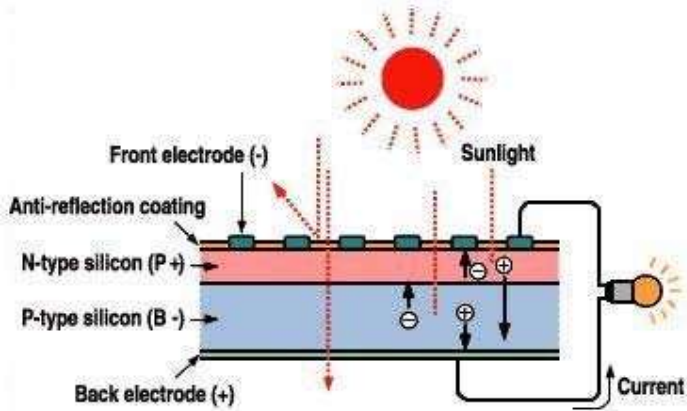
Όταν τα φωτόνια προσπίπτουν στην επιφάνεια ενός ημιαγωγικού υλικού, μεταφέρουν την ενέργειά τους σε ηλεκτρόνια μέσα στα άτομα του υλικού. Αυτή η απορρόφηση ενέργειας διεγείρει τα ηλεκτρόνια, επιτρέποντάς τους να απελευθερωθούν από τις ατομικές τους τροχιές και να γίνουν ελεύθερα κινούμενα. Αυτά τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μπορούν στη συνέχεια να ρέουν ως ηλεκτρικό ρεύμα.

Η **φωτοβολταϊκή τεχνολογία** αξιοποιεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο για να μετατρέψει το ηλιακό φως απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Περιλαμβάνει τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων, γνωστών και ως ηλιακών κυψελών, τα οποία συνήθως κατασκευάζονται από ημιαγωγικά υλικά, συνήθως από πυρίτιο.

Τα στάδια του τρόπου λειτουργίας είναι τα εξής:

- **Απορρόφηση του φωτός:** Όταν το ηλιακό φως (που αποτελείται από φωτόνια) φτάνει στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, απορροφάται από το ημιαγωγικό υλικό.
- **Δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων-οπών:** Τα απορροφημένα φωτόνια μεταφέρουν την ενέργειά τους σε ηλεκτρόνια στο ημιαγωγικό υλικό, δημιουργώντας ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Τα ηλεκτρόνια αποκτούν ενέργεια και μετακινούνται σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη, αφήνοντας πίσω τους θετικά φορτισμένες "οπές" στις αρχικές τους θέσεις.
- **Διαχωρισμός των φορτίων:** Το ηλεκτρικό πεδίο εντός του φωτοβολταϊκού στοιχείου, που συνήθως δημιουργείται από μια ένωση p-n (όριο μεταξύ δύο διαφορετικών τύπων ημιαγωγικών υλικών), διαχωρίζει τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Τα ηλεκτρόνια έλκονται προς τη μία πλευρά του στοιχείου, ενώ οι οπές έλκονται προς την άλλη πλευρά.
- **Δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος:** Τα διαχωρισμένα ηλεκτρόνια και οι οπές δημιουργούν μια ανισορροπία φορτίων, δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού ή τάση κατά μήκος του κελιού. Συνδέοντας ένα εξωτερικό κύκλωμα, όπως καλώδια, στο κύτταρο, η ροή των ηλεκτρονίων μπορεί να αξιοποιηθεί ως ηλεκτρικό ρεύμα.
- **Αξιοποίηση και παραγωγή ισχύος:** Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία διαφόρων συσκευών, από μικρές ηλεκτρονικές συσκευές έως εφαρμογές

μεγάλης κλίμακας. Πολλαπλές φωτοβολταϊκές κυψέλες συνδέονται συνήθως σε σειρά ή παράλληλα για να σχηματίσουν ένα ηλιακό πάνελ, αυξάνοντας τη συνολική τάση ή το ρεύμα εξόδου.



Εικόνα 1.2. Σχηματικό διάγραμμα ηλιακού κελιού. [2]

#### 1.4 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων

Οι κατηγορίες των φωτοβολταϊκών συστημάτων με βάση τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ηλιακών κυψελών (κελιών) είναι οι εξής:

- **Φ/Β συστήματα κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si)**
  - Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (mono-Si)
  - Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (poly-Si)
- **Φ/Β συστήματα λεπτής μεμβράνης**

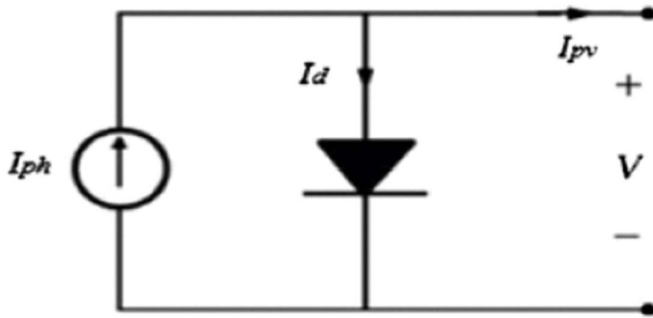
Οι κύριοι τύποι των φωτοβολταϊκών αυτού του είδους περιλαμβάνουν:

- Άμορφο πυρίτιο (a-Si)
- Τελλουριούχο κάδμιο (CdTe)
- Σεληνιούχο χαλκό-ίνδιο-γάλλιο (CIGS)
- Οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV)
- **Φ/Β συστήματα πολλαπλών διακλαδώσεων**
- **Αναδυόμενες φωτοβολταϊκές τεχνολογίες**

Η συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνει ηλιακά κελιά περοβσκίτη, ηλιακά κελιά κβαντικής κουκκίδας και άλλα υλικά νέας γενιάς με δυνατότητες για υψηλή απόδοση και χαμηλό κόστος.

#### 1.5 Μοντελοποίηση ηλιακού κελιού

Στην εικόνα 1.3 φαίνεται η μοντελοποίηση ενός ιδανικού (θεωρητικού) ηλιακού κελιού.



**Εικόνα 1.3.** Μοντέλο θεωρητικού ηλιακού κελιού. [3]

Η βασική εξίσωση από τη θεωρία των ημιαγωγών που περιγράφει μαθηματικά τη σχέση I-V του ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι:

**Εξίσωση 1:**  $I = I_{ph} - I_d \cdot (e^{\frac{qV}{aKT}} - 1)$

Όπου:

$I_{ph}$ : είναι το ρεύμα που παράγεται από το προσπίπτον φως.

$I_d$ : είναι το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού ή διαρροής της διόδου.

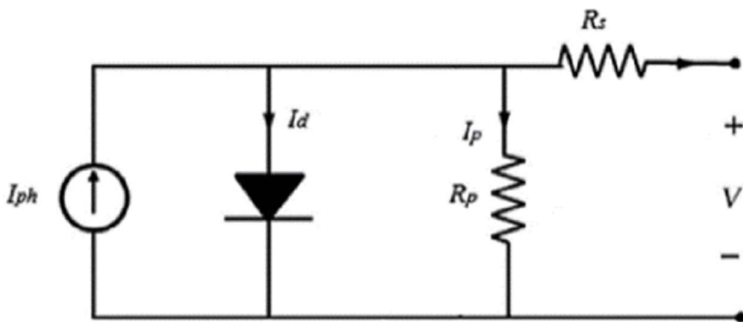
$q$ : είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου ( $1,60217646 \times 10^{-19}$  C).

$K$ : είναι η σταθερά Boltzman ( $1,3806503 \times 10^{-23}$  J/K).

$T$ : είναι η θερμοκρασία σε Kelvin της ένωσης p-n.

$a$ : είναι η σταθερά ιδεατότητας της διόδου.

Στην εικόνα 1.4 φαίνεται η μοντελοποίηση ενός πραγματικού ηλιακού κελιού.



**Εικόνα 1.4.** Μοντέλο πραγματικού ηλιακού κελιού. [4]

Οι πρακτικές μονάδες αποτελούνται από πολλά συνδεδεμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία και η παρατήρηση των I-V στους ακροδέκτες των φωτοβολταϊκών μονάδων απαιτεί τη συμπερίληψη πρόσθετων παραμέτρων στην **εξίσωση 1**. Αυτό φαίνεται στην παρακάτω **εξίσωση 2**.

**Εξίσωση 3:**  $I = I_{ph} - I_d \cdot \left( e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{aKT}} - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_s}{R_p}$

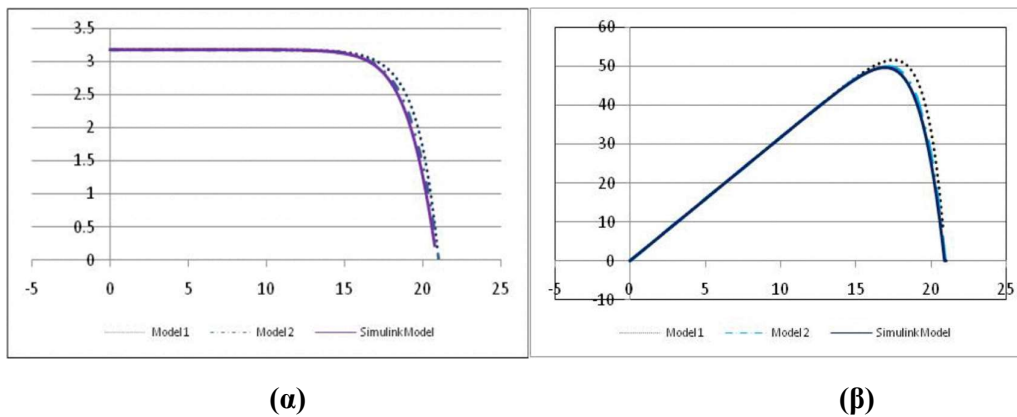
Όπου  $R_s$  και  $R_p$  οι ηλεκτρικές αντιστάσεις.

Επίσης ένα κελί μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη βοήθεια των καμπυλών I-V και P-V που έχουν υλοποιηθεί υπό κάποιες συνθήκες που ονομάζονται Πρότυπες Συνθήκες Ελέγχου (Standard Test Condition)

Οι συνθήκες αυτές είναι:

- Ένταση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ίσης προς  $1000\text{W}/\text{m}^2$ .
- Θερμοκρασία κελιού ίση προς  $25^\circ\text{C}$ .

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται δύο τέτοιες καμπύλες υπό αυτές τις συνθήκες.

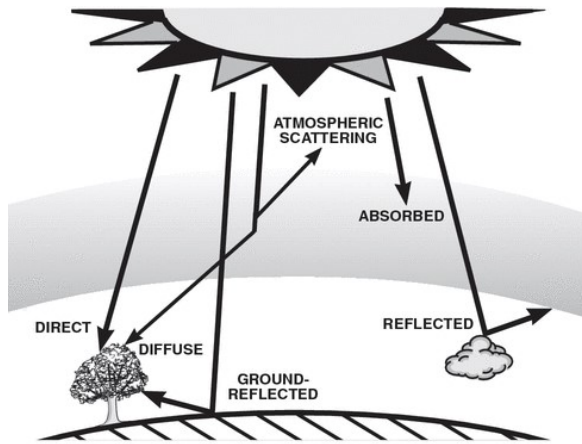


**Εικόνα 1.5.** Στο (α) είναι η I-V καμπύλη του ηλιακού κελιού και στο (β) η P-V καμπύλη του ηλιακού κελιού. [5]

## 1.6 Ηλιακή ακτινοβολία

Η έρευνα για την ακτινοβολία του ήλιου είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση των Φ/Β, επειδή πρέπει να πέφτει όσο το δυνατόν περισσότερη ακτινοβολία του ήλιου απευθείας στα ηλιακά κελιά που αποτελούν το φωτοβολταϊκό πάνελ και για όσο το δυνατόν περισσότερο χρόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του πάνελ. Το ζήτημα του σωστού προσανατολισμού της φωτοβολταϊκής μονάδας σχετίζεται με τη θέση της σε σχέση με τον ορίζοντα, το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας, τη θέση του ήλιου, τις καιρικές συνθήκες, το υψόμετρο και την ατμοσφαιρική υγρασία.

Η ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια περιλαμβάνει τη συλλογή μετεωρολογικών δεδομένων και την επιλογή της ακριβέστερης μεθόδου υπολογισμού της ακτινοβολίας με βάση τα δεδομένα αυτά. Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι τύποι της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτουν στην επιφάνεια της γης.

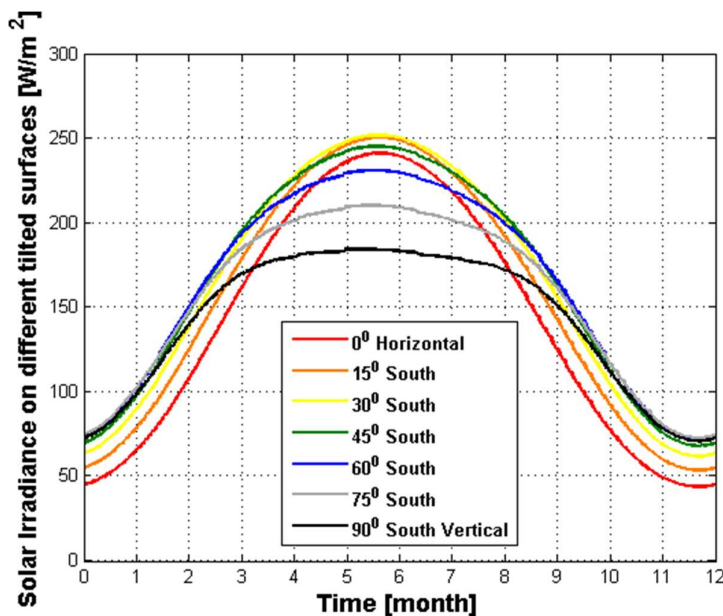


**Εικόνα 1.6.** Τύποι ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτουν στην επιφάνεια της γης. [6]

Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα η ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο δέντρο και κατ' επέκταση σε μία επιφάνεια οφείλεται από τα τρία παρακάτω είδη ηλιακής ακτινοβολίας.

- Η απευθείας ακτινοβολία.
- Η διάχυτη ακτινοβολία.
- Η ανακλώμενη ακτινοβολία που προκαλείται λόγω του εδάφους.

Επίσης υπάρχει μεγάλη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας με την πάροδο του χρόνου και αυτό είναι ένα ακόμα πρόβλημα για την απόδοση και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μία οριζόντια επιφάνεια αλλά και σε υπό κλίση επιφάνειες διάφορων γωνιών.



**Εικόνα 1.7.** Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες επιφάνειες (στραμμένες) κατά τη διάρκεια ενός έτους. [7]

Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα για επιφάνειες υπό κλίση 15,30 και 45 μοιρών παρατηρείται πως δέχονται παραπάνω ηλιακή ακτινοβολία από αυτή που είναι οριζόντια με αποτέλεσμα να αυξάνεται η

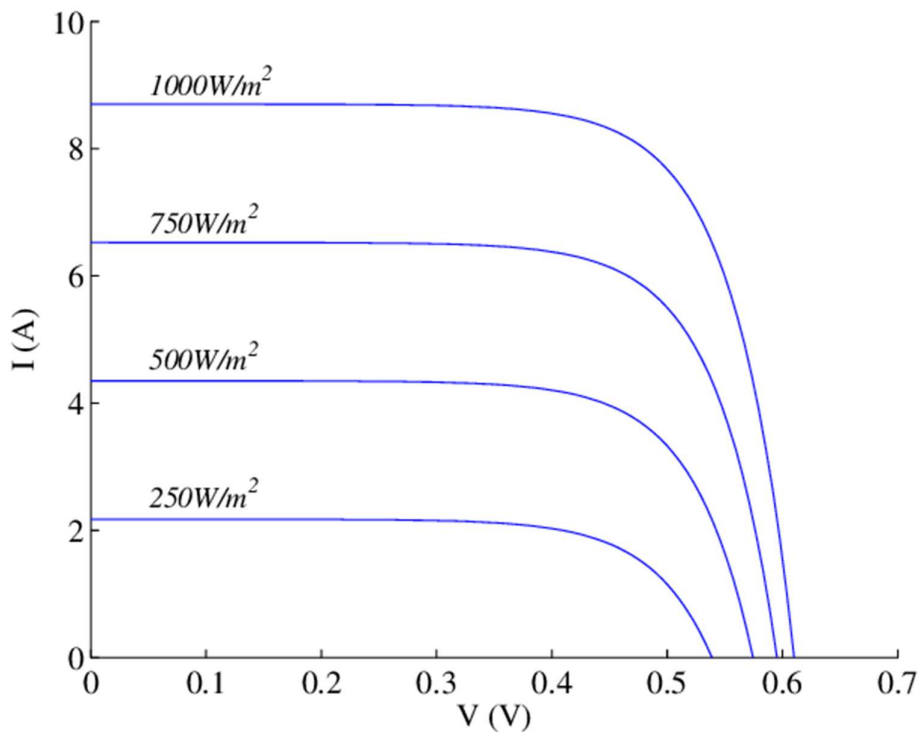


απόδοση και η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως είναι καλύτερο το φωτοβολταϊκό πάνελ να είναι τοποθετημένο υπό κλίσει.

Ένας ακόμα τρόπος που θα βελτιστοποιήσει το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό πάνελ είναι να τοποθετηθεί σε ένα πλαίσιο που θα κινείται σύμφωνα με τις εξισώσεις του ήλιου (equations of the sun), με αισθητήρες και με ένα κύκλωμα ελέγχου. Ξέροντας τις γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής και την ώρα, με τη βοήθεια των εξισώσεων του ήλιου το σύστημα μπορεί να γνωρίζει κάθε στιγμή τη θέση του ήλιου. Αλλιώς, με τη χρήση αισθητήρων που είναι σε θέση να παρακολουθούν την πορεία του ήλιου κάθε στιγμή και ένα κύκλωμα ελέγχου για να κινεί κατάλληλα το σύστημα. Περισσότερα θα αναλυθούν στο πειραματικό κομμάτι τη εργασίας. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται αύξηση της απόδοσης και της ηλεκτρικής ισχύος του Φ/Β καθώς εξασφαλίζεται συνεχώς η κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας.

### 1.7 Ένταση ακτινοβολίας και επίδραση της θερμοκρασίας

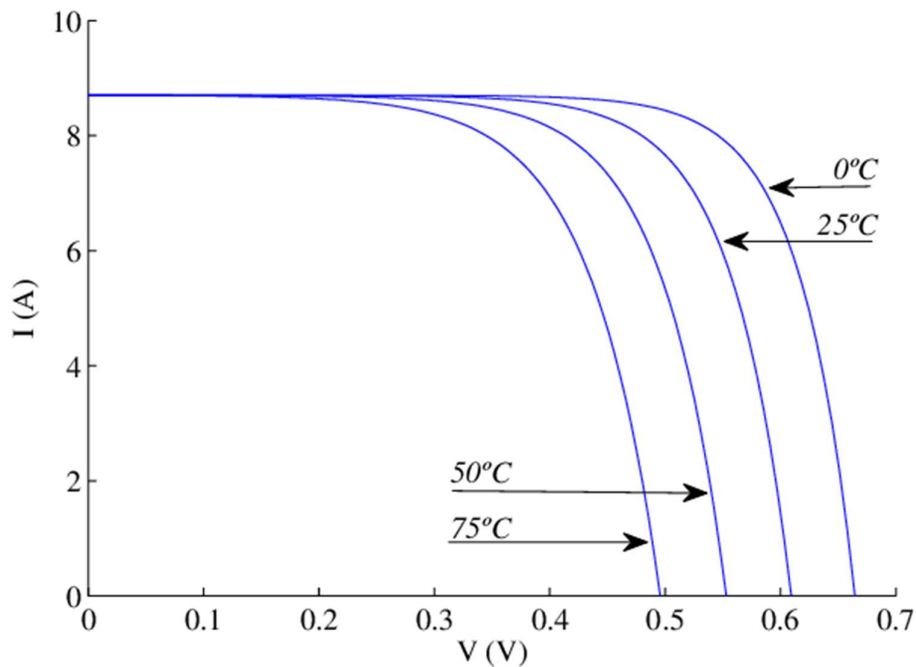
Οι παράγοντες που ασκούν την μεγαλύτερη επίδραση στην παραγωγή ενέργειας ενός ηλιακού κελιού είναι η ένταση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Στην εικόνα 1.8 φαίνεται η γραφική απεικόνιση της μεταβολής I-V ενός ηλιακού κελιού με μεταβαλλόμενη ένταση ακτινοβολίας.



**Εικόνα 1.8.** Γραφική απεικόνιση της καμπύλης I-V για διάφορες εντάσεις ακτινοβολίας. [8]

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρείται πως το ρεύμα βραχυκύκλωσης του ηλιακού κελιού επηρεάζεται σχεδόν ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας σε αντίθεση με την τάση ανοιχτού κυκλώματος που με την αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας αυξάνεται ελαφρώς. Επομένως αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναλογική σχέση μεταξύ έντασης ακτινοβολίας και την ισχύ του ηλιακού κελιού.

Στην εικόνα 1.9 φαίνεται η γραφική απεικόνιση της μεταβολής I-V ενός ηλιακού κελιού με μεταβαλλόμενη θερμοκρασία.



**Εικόνα 1.9.** Γραφική απεικόνιση της καμπύλης I-V για διάφορες θερμοκρασίες. [9]

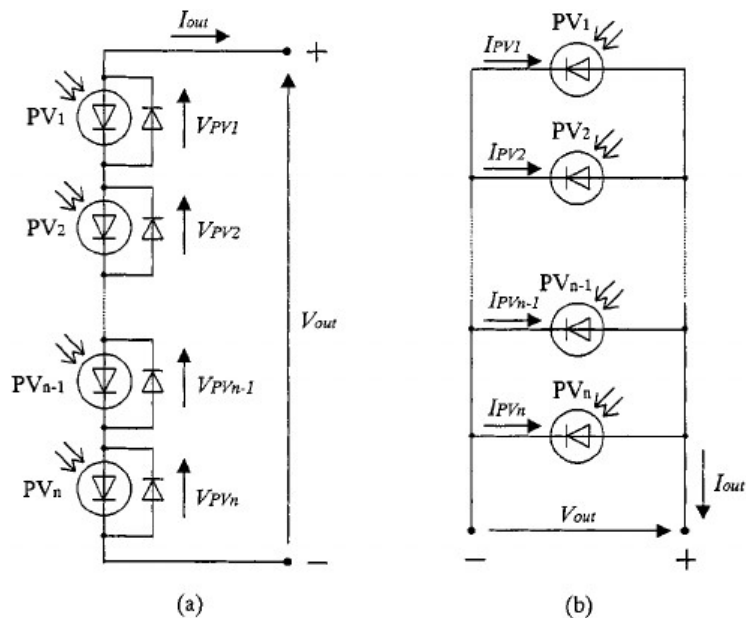
Από την παραπάνω εικόνα παρατηρείται πως το ρεύμα βραχυκύκλωσης του ηλιακού κελιού παραμένει σταθερό με την αλλαγή της θερμοκρασίας σε αντίθεση με την τάση ανοιχτού κυκλώματος που με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται αρκετά. Επομένως αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ισχύς του ηλιακού κελιού με την αύξηση της θερμοκρασίας.

### 1.8 Σύνδεση ηλιακών κελιών

Είναι σπάνιο να δει κάποιος να γίνεται χρήση ενός ηλιακού κελιού μόνο. Τις περισσότερες φορές τα ηλιακά κελιά συνδέονται για την δημιουργία φωτοβολταϊκών πάνελ προκειμένου να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ισχύς.

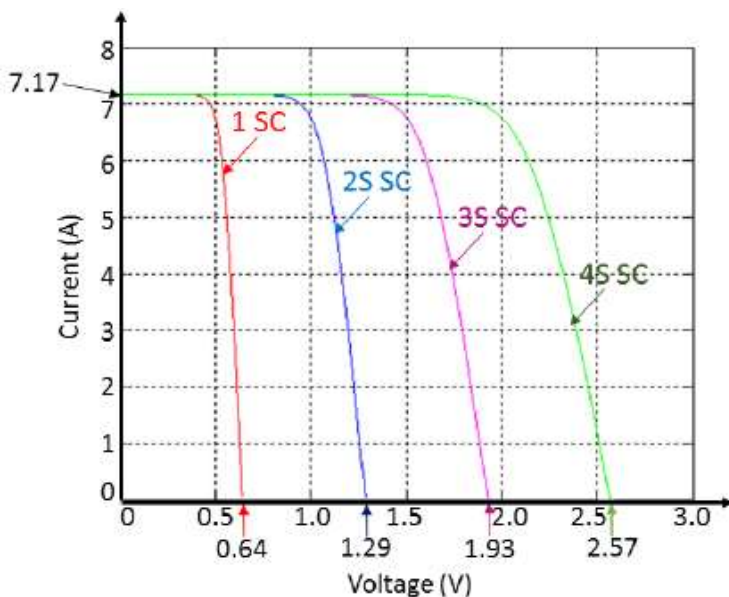
Οι τρόποι σύνδεσης των ηλιακών κελιών είναι σε σειρά και παράλληλα.

Στην εικόνα 1.10 φαίνονται οι δύο τρόποι σύνδεσης.

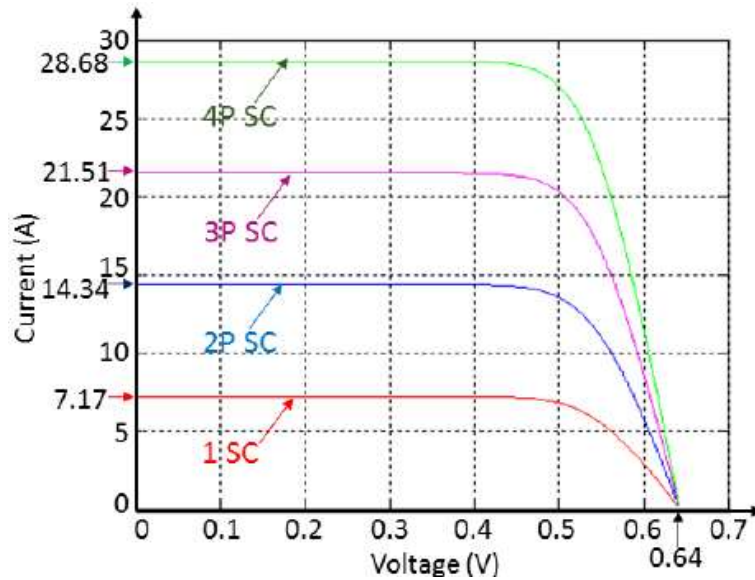


**Εικόνα 1.10.** (α) Ηλιακά κελιά συνδεδεμένα σε σειρά, (β) Ηλιακά κελιά συνδεδεμένα παράλληλα. [\[10\]](#)

Από την εικόνα 1.10 παρατηρείται πως στην σύνδεση σε σειρά η συνολική τάση ( $V_{out}$ ) είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων κάθε κελιού ενώ το συνολικό ρεύμα ( $I_{out}$ ) παραμένει σταθερό καθώς αυτό διαπερνά το κύκλωμα. Ακόμη παρατηρείται πως στην παράλληλη σύνδεση η συνολική τάση ( $V_{out}$ ) παραμένει η ίδια με αυτή που έχει το κάθε κελί, ενώ το συνολικό ρεύμα ( $I_{out}$ ) προκύπτει από το άθροισμα των ρευμάτων που διαρρέει το κάθε κελί. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις εικόνες 1.11 και 1.12 που φαίνονται οι γραφικές απεικονίσεις της I-V όσο αυξάνεται ο αριθμός των ηλιακών κελιών (solar cells) που είναι συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα αντίστοιχα.



**Εικόνα 1.11.** Απεικόνιση της I-V όταν έχουμε συνδεσμολογία σε σειρά. [\[11\]](#)



Εικόνα 1.12. Απεικόνιση της I-V όταν έχουμε παράλληλη συνδεσμολογία. [12]

Τις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται η σύνδεση σε σειρά καθώς στην παράλληλη σύνδεση για να επιτευχθεί υψηλότερη ένταση ρεύματος απαιτούνται και μεγαλύτερες διατομές αγωγών και ταυτόχρονα οι απώλειες αυξάνονται με τη μείωση της τάσης.

### 1.9 Απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Ορισμένοι βασικοί παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι οι εξής:

- **Ηλιακή ακτινοβολία:** Οι περιοχές με υψηλότερα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας παράγουν γενικά περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από τους ηλιακούς συλλέκτες.
- **Θερμοκρασία:** Τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι ευαίσθητα στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, η απόδοση των ηλιακών κυψελών μπορεί να μειωθεί. Οι υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση της τάσης και της ισχύος εξόδου του συστήματος. Ως εκ τούτου, η διατήρηση των πάνελ σε δροσερό περιβάλλον ή η χρήση τεχνολογιών που ελαχιστοποιούν το φαινόμενο της θερμοκρασίας μπορεί να βελτιώσει την απόδοση.
- **Σκίαση:** Ακόμη και η μερική σκίαση σε ένα μόνο ηλιακό κύτταρο μπορεί να μειώσει σημαντικά την απόδοση ολόκληρης της μονάδας ή της σειράς πλαισίων. Είναι ζωτικής σημασίας ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων με τρόπο που ελαχιστοποιεί τη σκίαση από κοντινά αντικείμενα, όπως δέντρα, κτίρια ή άλλες κατασκευές.
- **Σκόνη, βρωμιά και ρύπανση:** Η συσσώρευση σκόνης, βρωμιάς ή άλλων ακαθαρσιών στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να μειώσει την απόδοσή τους. Ο τακτικός καθαρισμός και η συντήρηση είναι απαραίτητες για να εξασφαλιστεί η μέγιστη απορρόφηση του ηλιακού φωτός.
- **Σχεδιασμός συστήματος και ποιότητα εξαρτημάτων:** Ο σωστός σχεδιασμός του συστήματος, η σωστή διαστασιολόγηση και τα εξαρτήματα υψηλής ποιότητας μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη συνολική απόδοση και τη μακροζωία του συστήματος.

- **Γήρανση και υποβάθμιση:** Με την πάροδο του χρόνου, οι ηλιακοί συλλέκτες μπορεί να υποβαθμιστούν και να μειωθεί η απόδοσή τους. Παράγοντες όπως η έκθεση σε δύσκολες καιρικές συνθήκες, η υπεριώδης ακτινοβολία (UV) και περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορούν να συμβάλουν σε αυτή την υποβάθμιση. Η παρακολούθηση της απόδοσης του συστήματος και η περιοδική συντήρηση μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό και την αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων απόδοσης.

### 1.10 Τα βασικά μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από διάφορα βασικά εξαρτήματα που συνεργάζονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλιακό φως. Τα κύρια μέρη είναι τα εξής:

- **Ηλιακά πάνελ:** Περιέχουν πολλαπλά διασυνδεδεμένα ηλιακά κελιά που μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.
- **Δομή στήριξης:** Η δομή στήριξης παρέχει στήριξη και συγκρατεί τα ηλιακά πάνελ. Η δομή διασφαλίζει ότι τα πάνελ είναι κατάλληλα τοποθετημένα ώστε να μεγιστοποιείται η έκθεση στο ηλιακό φως ή μπορεί να είναι μία κινητή στήριξη που να στρέφει τα πάνελ πάντα προς τη μεριά του ήλιου.
- **Μετατροπέας:** Μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος (DC) που παράγεται από τα ηλιακά πάνελ σε ηλεκτρική ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Οι αντιστροφείς παρέχουν επίσης λειτουργίες παρακολούθησης και ελέγχου του συστήματος.
- **Αποθήκευση ενέργειας (μπαταρίες):** Χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε περιόδους υψηλής ηλιοφάνειας για χρήση σε περιόδους χαμηλής ηλιοφάνειας ή κατά τη διάρκεια διακοπών ρεύματος.
- **Ηλεκτρονικός ρυθμιστής:** Χρησιμοποιείται για την διαχείριση της φόρτισης των μπαταριών σε αυτόματα συστήματα.

### 1.11 Ταξινόμηση των συστημάτων ηλιακής παρακολούθησης

Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους, τα συστήματα ηλιακής παρακολούθησης ταξινομούνται σε ανοιχτού και κλειστού βρόχου.

#### ▪ Ανοιχτού βρόχου

Τα συστήματα ηλιακής παρακολούθησης ανοιχτού βρόχου λειτουργούν χωρίς ανατροφοδότηση από αισθητήρες ή μηχανισμούς ελέγχου. Αντ' αυτού, βασίζονται σε προκαθορισμένους αλγορίθμους ή χρονοδιαγράμματα για τον προσδιορισμό της θέσης των ηλιακών συλλεκτών σε διαφορετικές ώρες της ημέρας.

#### ▪ Κλειστού βρόχου

Τα συστήματα ηλιακής παρακολούθησης κλειστού βρόχου χρησιμοποιούν μηχανισμούς ανατροφοδότησης για τη συνεχή προσαρμογή της θέσης των ηλιακών συλλεκτών σε ανταπόκριση στις μεταβαλλόμενες συνθήκες ηλιακού φωτός. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται συνήθως από αισθητήρες, κυκλώματα ελέγχου και ενεργοποιητές. Παρακολουθούν συνεχώς και πραγματοποιούν

προσαρμογές με βάση την ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντάς τους να διατηρούν την ακριβή τοποθέτηση των ηλιακών συλλεκτών καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια αλλά είναι και πιο πολύπλοκα και δαπανηρά στην εφαρμογή τους σε σύγκριση με τα συστήματα ανοικτού βρόχου.

Από μία άλλη οπτική γωνία, τα συστήματα ηλιακής παρακολούθησης μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το είδος της κίνησης που κάνουν. Έτσι μπορούν και να ταξινομηθούν ως συστήματα μονού άξονα και διπλού άξονα.

- **Μονού άξονα**

Στα συστήματα μονού άξονα διακρίνουμε δύο υποκατηγορίες. Αυτές είναι το αζιμουθιακό ηλιοτρόπιο και το πολικό ηλιοτρόπιο.

- **Αζιμουθιακό ηλιοτρόπιο**

Το αζιμουθιακό σύστημα ηλιοτροπίου έχει σχεδιαστεί για να παρακολουθεί την κίνηση του ήλιου κατά μήκος της γωνίας αζιμούθιου, η οποία αντιπροσωπεύει τη θέση του ήλιου στο οριζόντιο επίπεδο.

Καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, το σύστημα χρησιμοποιεί αισθητήρες ή έναν αλγόριθμο για τον προσδιορισμό της γωνίας αζιμούθιου του ήλιου. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, ο μηχανοκίνητος μηχανισμός περιστροφής προσαρμόζει τη δομή στήριξης, διασφαλίζοντας ότι τα ηλιακά πάνελ είναι συνεχώς στραμμένα προς τον ήλιο καθώς αυτός κινείται.

Το σύστημα αζιμουθιακής ηλιοφάνειας αυξάνει την ισχύ κατά 20%-30%. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιοχές όπου η θέση του ήλιου αλλάζει κυρίως στο οριζόντιο επίπεδο.

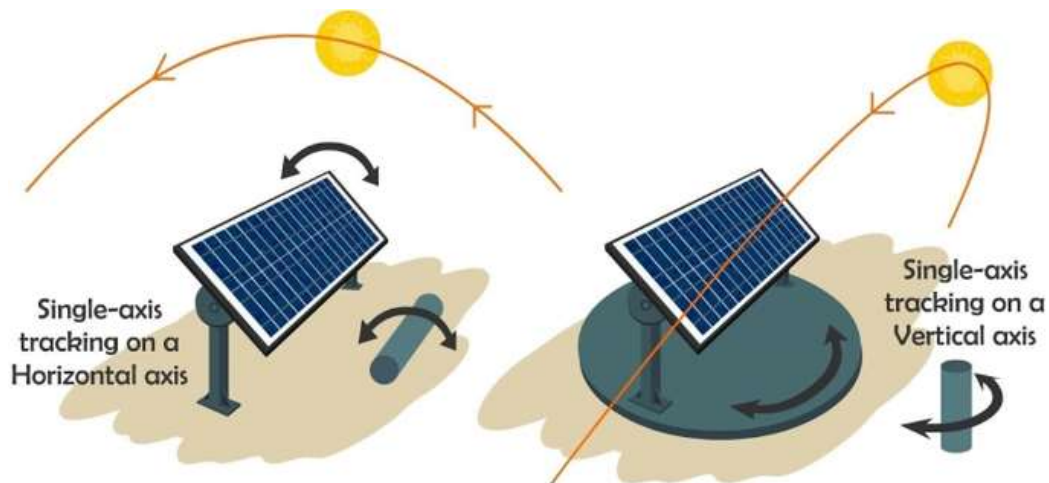
- **Πολικό ηλιοτρόπιο**

Το πολικό σύστημα ηλιοτροπίου έχει σχεδιαστεί για να παρακολουθεί την κίνηση του ήλιου κατά μήκος της γωνίας ανύψωσης καθώς αυτό έχει τοποθετηθεί υπό γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος του συγκεκριμένου μέρους και είναι παράλληλο ως προς τον πολικό άξονα της γης.

Το σύστημα χρησιμοποιεί αισθητήρες ή αλγόριθμους για τον προσδιορισμό της γωνίας ανύψωσης του ήλιου. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, ο μηχανισμός περιστροφής προσαρμόζει τη δομή στήριξης, διασφαλίζοντας ότι τα ηλιακά πάνελ είναι συνεχώς στραμμένα προς τον ήλιο και διατηρούν τη βέλτιστη γωνία κλίσης για μέγιστη έκθεση στο ηλιακό φως.

Το σύστημα του πολικού ηλιοτροπίου αυξάνει την ισχύ έως και 35%. Βασικό τους μειονέκτημα αποτελεί η μειωμένη αντοχή τους σε ισχυρούς ανέμους.

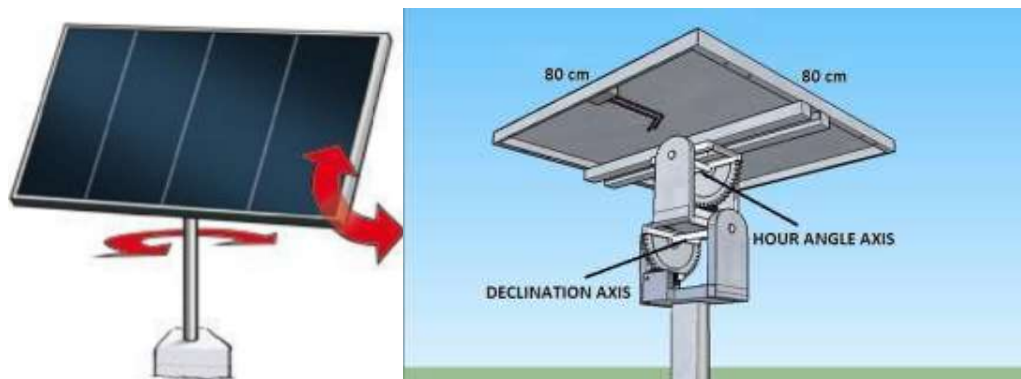
Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα



**Εικόνα 1.13.** Στο πρώτο σχήμα παρουσιάζεται ο μηχανισμός του αζιμουθιακού ηλιοτρόπιου και στο δεύτερο σχήμα παρουσιάζεται ο μηχανισμός του πολικού ηλιοτρόπιου. [13]

- **Διπλού άξονα**

Τα συστήματα ηλιακής παρακολούθησης διπλού άξονα είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τον προσανατολισμό των ηλιακών πάνελ προς τον ήλιο με συνεχή παρακολούθηση της κίνησής του σε δύο άξονες: το αζιμούθιο (οριζόντιο) και την ανύψωση (κατακόρυφο). Σε αντίθεση με τους σταθερούς ηλιακούς συλλέκτες, οι οποίοι είναι ακίνητοι και βλέπουν προς μια σταθερή κατεύθυνση, οι ανιχνευτές διπλού άξονα επιτρέπουν στα ηλιακά πάνελ να ακολουθούν την πορεία του ήλιου καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, μεγιστοποιώντας την έκθεσή τους στο ηλιακό φως.



**Εικόνα 1.14.** Σύστημα ανιχνευτή ηλίου διπλού άξονα. [14]

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί το συγκεκριμένο σύστημα είναι ο εξής:

- **Παρακολούθηση αζιμούθιου:** Ο ιχνηλάτης περιστρέφει τις φωτοβολταϊκές μονάδες οριζόντια για να τις ευθυγραμμίσει με τη γωνία αζιμούθιου του ήλιου.
- **Παρακολούθηση ανύψωσης (elevation):** Επίσης ρυθμίζει τη γωνία ανύψωσης των ηλιακών πάνελ για να βελτιστοποιήσει την κλίση τους προς τον ήλιο. Η προσαρμογή αυτή αντισταθμίζει το μεταβαλλόμενο ύψος του ήλιου στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας και τις διαφορετικές εποχές.

Το συγκεκριμένο σύστημα λαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τη θέση του ήλιου και χρησιμοποιεί αλγόριθμους για τον υπολογισμό των κατάλληλων γωνιών αζιμούθιου και ανύψωσης για τα πάνελ. Στη συνέχεια, το σύστημα ελέγχου στέλνει σήματα στους κινητήρες ή τους ενεργοποιητές για να ρυθμίσουν ανάλογα τα πάνελ.

Συχνά ενσωματώνουν διάφορους αισθητήρες και εξαρτήματα για να βοηθήσουν στη λειτουργία και την ακρίβειά τους. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν αισθητήρες θέσης του ήλιου, δέκτες GPS ή ψηφιακές πυξίδες, για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης του ήλιου στον ουρανό.

Τα συγκεκριμένα συστήματα διασφαλίζουν ότι οι φωτοβολταϊκές μονάδες είναι πάντα τοποθετημένες σε βέλτιστη γωνία σε σχέση με τον ήλιο. Αυτό μεγιστοποιεί την ποσότητα του ηλιακού φωτός που συλλαμβάνεται, οδηγώντας σε υψηλότερη παραγωγή ενέργειας σε σύγκριση με τα σταθερά συστήματα. Μπορούν να αυξήσουν την παραγωγή ενέργειας κατά 20-40% ή και περισσότερο, ανάλογα με τη θέση και τη συγκεκριμένη τεχνολογία παρακολούθησης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, ενώ οι ανιχνευτές διπλού άξονα προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα απόδοσης, είναι πιο πολύπλοκοι και ακριβοί σε σύγκριση με τις σταθερές εγκαταστάσεις. Επίσης το μεγάλο μέγεθος που έχουν κάποιες φωτοβολταϊκές μονάδες τις καθιστά ευάλωτες στους δυνατούς ανέμους (συγκριτικά με τα συστήματα σταθερών βάσεων).

### 1.12 Κανόνες χωροθέτησης

Ο προσανατολισμός και κλίση του ηλιακού πάνελ είναι ένας από τους βασικούς κανόνες χωροθέτησης. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ πρέπει να προσανατολίζονται και να έχουν κλίση ώστε να μεγιστοποιείται η έκθεσή τους στον ήλιο. Στο βόρειο ημισφαίριο, τα πάνελ είναι συνήθως στραμμένα προς τον νότο, ενώ στο νότιο ημισφαίριο είναι στραμμένα προς τον βορρά. Η γωνία κλίσης των πλαισίων πρέπει γενικά να είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας για τη βελτιστοποίηση της συλλογής ηλιακής ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ωστόσο, η γωνία κλίσης μπορεί να προσαρμοστεί με βάση τις συγκεκριμένες εποχιακές ενεργειακές απαιτήσεις. Στην Ελλάδα θα πρέπει να έχουν νότιο προσανατολισμό και μία μέση κλίση των 30 μοιρών.

Επίσης ένας ακόμα βασικός κανόνας είναι η αποφυγή σκιάσεων του ηλιακού πάνελ που πιθανόν να προκαλούνται εξαιτίας εμποδίων. Για την αποφυγή σκιάσεων εξαιτίας κάποιων άλλων φωτοβολταϊκών πάνελ θα πρέπει η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σειρών να είναι τουλάχιστον διπλάσια από το ύψος της εγκατάστασης.

Επιπλέον ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει την χωροθέτηση αλλά και την επιλογή του σωστού ηλιακού πάνελ είναι τα κλιματολογικά δεδομένα της κάθε περιοχής. Φωτοβολταϊκά πάνελ επιλεγμένα από τον ίδιο κατασκευαστή και με τον ίδιο ακριβώς τρόπο τοποθετημένα σε δύο διαφορετικές περιοχές με διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας θα δίνουν αρκετά διαφορετικά ποσά παραγόμενης ενέργειας.



### 1.13 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακά πάνελ στην Ελλάδα

Η γνώση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει η Ελλάδα από τα ηλιακά πάνελ είναι καίριας σημασίας καθώς από αυτό φαίνεται πόσο μπορεί να εξελιχθεί η συγκεκριμένη τεχνολογία για να αυξήσει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

#### Renewable energy: Solar capacity

| Installed photovoltaic (PV) power*  |             |             |             |             |             |              |              |              |              |              |              | Growth rate per annum |              |              |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|
|                                     | 2011        | 2012        | 2013        | 2014        | 2015        | 2016         | 2017         | 2018         | 2019         | 2020         | 2021         | 2021                  | 2011-21      | 2021         |
| Gigawatts                           |             |             |             |             |             |              |              |              |              |              |              |                       |              |              |
| Canada                              | 0.6         | 0.8         | 1.2         | 1.8         | 2.5         | 2.7          | 2.9          | 3.1          | 3.3          | 3.3          | 3.6          | 8.9%                  | 19.2%        | 0.4%         |
| Mexico                              | +           | 0.1         | 0.1         | 0.2         | 0.3         | 0.6          | 1.1          | 2.5          | 4.4          | 5.1          | 7.0          | 36.8%                 | 66.7%        | 0.8%         |
| US                                  | 5.2         | 8.1         | 11.8        | 16.0        | 21.7        | 33.0         | 41.4         | 49.8         | 59.1         | 73.8         | 93.7         | 27.3%                 | 33.6%        | 11.1%        |
| <b>Total North America</b>          | <b>5.8</b>  | <b>9.0</b>  | <b>13.1</b> | <b>18.0</b> | <b>24.5</b> | <b>36.3</b>  | <b>45.4</b>  | <b>55.4</b>  | <b>66.8</b>  | <b>82.3</b>  | <b>104.4</b> | <b>27.2%</b>          | <b>33.4%</b> | <b>12.4%</b> |
| Argentina                           | +           | +           | +           | +           | +           | +            | +            | 0.2          | 0.4          | 0.8          | 1.1          | 40.6%                 | 96.4%        | 0.1%         |
| Brazil                              | +           | +           | +           | +           | +           | 0.1          | 1.2          | 2.4          | 4.6          | 7.9          | 13.1         | 66.1%                 | 115.3%       | 1.5%         |
| Chile                               | +           | +           | +           | 0.2         | 0.6         | 1.1          | 1.8          | 2.1          | 2.7          | 3.2          | 4.4          | 36.4%                 | ne           | 0.5%         |
| Honduras                            | +           | +           | +           | +           | 0.4         | 0.4          | 0.5          | 0.5          | 0.5          | 0.5          | 0.5          | 0.3%                  | 60.7%        | 0.1%         |
| Other S. & Cent. America            | 0.2         | 0.3         | 0.4         | 0.6         | 0.9         | 1.1          | 1.8          | 2.2          | 2.8          | 3.2          | 3.8          | 20.3%                 | 36.0%        | 0.5%         |
| <b>Total S. &amp; Cent. America</b> | <b>0.2</b>  | <b>0.4</b>  | <b>0.5</b>  | <b>0.8</b>  | <b>1.9</b>  | <b>2.8</b>   | <b>5.3</b>   | <b>7.5</b>   | <b>11.0</b>  | <b>15.5</b>  | <b>22.8</b>  | <b>47.2%</b>          | <b>61.6%</b> | <b>2.7%</b>  |
| Austria                             | 0.2         | 0.3         | 0.6         | 0.8         | 0.9         | 1.1          | 1.3          | 1.5          | 1.7          | 2.0          | 2.7          | 32.1%                 | 31.5%        | 0.3%         |
| Belgium                             | 2.0         | 2.6         | 2.9         | 3.0         | 2.1         | 3.3          | 3.6          | 4.0          | 4.6          | 5.6          | 6.6          | 18.4%                 | 12.8%        | 0.8%         |
| Bulgaria                            | 0.2         | 1.0         | 1.0         | 1.0         | 1.0         | 1.0          | 1.0          | 1.0          | 1.0          | 1.1          | 1.2          | 8.4%                  | 22.7%        | 0.1%         |
| Czech Republic                      | 1.9         | 2.0         | 2.1         | 2.1         | 2.1         | 2.1          | 2.1          | 2.1          | 2.1          | 2.1          | 2.1          | 0.1%                  | 1.0%         | 0.3%         |
| Denmark                             | +           | 0.4         | 0.6         | 0.6         | 0.8         | 0.9          | 0.9          | 1.0          | 1.1          | 1.3          | 1.5          | 18.4%                 | 56.9%        | 0.2%         |
| France                              | 3.0         | 4.4         | 5.3         | 6.0         | 7.1         | 7.7          | 8.6          | 9.7          | 10.8         | 12.0         | 14.7         | 22.7%                 | 17.2%        | 1.7%         |
| Germany                             | 26.9        | 34.1        | 36.7        | 37.9        | 39.2        | 40.7         | 42.3         | 45.2         | 48.9         | 53.7         | 58.5         | 9.1%                  | 8.5%         | 6.9%         |
| Greece                              | 0.6         | 1.5         | 2.6         | 2.6         | 2.6         | 2.6          | 2.6          | 2.7          | 2.8          | 3.3          | 3.5          | 7.7%                  | 19.2%        | 0.4%         |
| Hungary                             | +           | +           | +           | 0.1         | 0.2         | 0.2          | 0.3          | 0.7          | 1.4          | 2.1          | 2.1          | 0.3%                  | 87.3%        | 0.3%         |
| Italy                               | 13.1        | 16.8        | 18.2        | 18.6        | 18.9        | 19.3         | 19.7         | 20.1         | 20.9         | 21.7         | 22.7         | 5.1%                  | 5.6%         | 2.7%         |
| Netherlands                         | 0.1         | 0.3         | 0.7         | 1.0         | 1.5         | 2.1          | 2.9          | 4.6          | 7.2          | 10.9         | 14.2         | 30.5%                 | 57.8%        | 1.7%         |
| Poland                              | +           | +           | +           | +           | 0.1         | 0.2          | 0.3          | 0.6          | 1.5          | 4.0          | 6.3          | 68.6%                 | 137.2%       | 0.7%         |
| Portugal                            | 0.2         | +           | 0.3         | 0.4         | 0.4         | 0.5          | 0.6          | 0.7          | 0.9          | 1.1          | 1.8          | 64.2%                 | 26.5%        | 0.2%         |
| Romania                             | +           | +           | 0.8         | 1.3         | 1.3         | 1.4          | 1.4          | 1.4          | 1.4          | 1.4          | 1.4          | 1.4%                  | 106.3%       | 0.2%         |
| Slovakia                            | 0.5         | 0.5         | 0.5         | 0.5         | 0.5         | 0.5          | 0.5          | 0.5          | 0.6          | 0.5          | 0.5          | 0.3%                  | 0.8%         | 0.1%         |
| Spain                               | 4.3         | 4.6         | 4.7         | 4.7         | 4.7         | 4.7          | 4.7          | 4.8          | 4.8          | 4.8          | 4.8          | 23.1%                 | 12.3%        | 1.6%         |
| Sweden                              | +           | +           | +           | 0.1         | 0.1         | 0.2          | 0.2          | 0.4          | 0.7          | 1.1          | 1.6          | 42.9%                 | 62.9%        | 0.2%         |
| Switzerland                         | 0.2         | 0.4         | 0.8         | 1.1         | 1.4         | 1.7          | 1.9          | 2.2          | 2.5          | 3.0          | 3.4          | 16.3%                 | 31.5%        | 0.4%         |
| Turkey                              | +           | +           | +           | +           | 0.2         | 0.8          | 3.4          | 5.1          | 6.0          | 6.7          | 7.8          | 17.5%                 | 102.6%       | 0.9%         |
| Ukraine                             | 0.2         | 0.4         | 0.7         | 0.8         | 0.8         | 1.0          | 1.2          | 2.0          | 5.9          | 7.3          | 8.1          | 10.3%                 | 45.6%        | 1.0%         |
| United Kingdom                      | 1.0         | 1.8         | 2.9         | 5.5         | 9.6         | 11.9         | 12.8         | 13.1         | 13.3         | 13.5         | 13.7         | 2.0%                  | 29.9%        | 1.6%         |
| Other Europe                        | 0.1         | 0.3         | 0.5         | 0.6         | 0.7         | 0.8          | 1.0          | 1.1          | 1.6          | 2.3          | 3.0          | 28.7%                 | 35.9%        | 0.4%         |
| <b>Total Europe</b>                 | <b>53.6</b> | <b>71.7</b> | <b>81.9</b> | <b>88.8</b> | <b>97.5</b> | <b>104.6</b> | <b>113.3</b> | <b>124.2</b> | <b>146.0</b> | <b>167.0</b> | <b>191.1</b> | <b>14.7%</b>          | <b>13.6%</b> | <b>22.7%</b> |

Εικόνα 1.15. Εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς. [15]

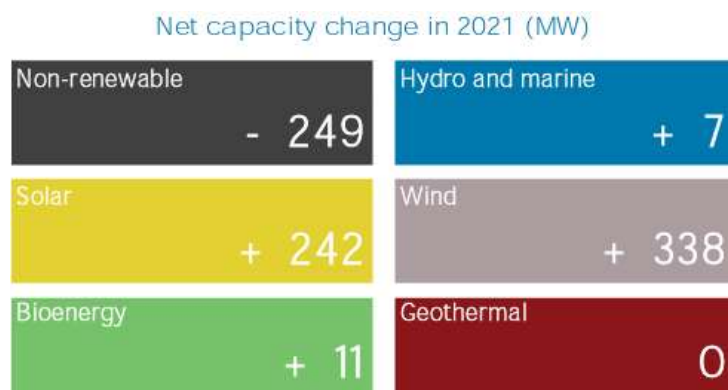
Η συγκεκριμένη εικόνα αναφέρεται στο solar capacity, δηλαδή στη μέγιστη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από την ηλιακή ενέργεια στις χώρες που αναφέρονται. Αντιπροσωπεύει την εγκατεστημένη ισχύ των ηλιακών φωτοβολταϊκών πλαισίων ή των συστημάτων συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας.

Η ηλιακή ισχύς παρατηρείται πως μετράτε σε μονάδες ισχύος γιγαβάτ (GW). Αντιπροσωπεύει τη συνολική δυναμική παραγωγή των ηλιακών εγκαταστάσεων όταν λειτουργούν στη μέγιστη ισχύ τους υπό ιδανικές συνθήκες. Ωστόσο, η πραγματική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ενέργεια εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η διαθεσιμότητα του ηλιακού φωτός, η απόδοση του συστήματος και η γεωγραφική θέση.

Παρατηρείται πως η Ελλάδα το 2021 είχε ικανότητες παραγωγής έως και 3.5 GW ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η Γερμανία είχε 58.5 GW παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα ηλιακά πάνελ.

Πρέπει να σημειωθεί πως η μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία στη Γερμανία κυμαίνεται από περίπου 900 έως 1.200 κιλοβατώρες ανά τετραγωνικό μέτρο (kWh/m<sup>2</sup>) ενώ στην Ελλάδα κυμαίνεται από περίπου 1.400 έως 1.800 kWh/m<sup>2</sup> που είναι αρκετά μεγαλύτερη από της Γερμανίας.

Συμπεραίνεται πως η δυνατότητα αύξησης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση ηλιακών πάνελ στην Ελλάδα έχει πολλά να προσφέρει στο ενεργειακό κομμάτι της χώρας. Χρησιμοποιώντας την κατάλληλη τεχνολογία και εάν γίνει χρήση συστημάτων ηλιακής παρακολούθησης διπλού άξονα θα υπάρχει τεράστια αύξηση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



**Εικόνα 1.16.** Αλλαγή της δυναμικότητας του ηλεκτρικού δικτύου το 2021 στην Ελλάδα. [16]

Η παραπάνω εικόνα δείχνει πως είχαν επηρεάσει οι διάφορες τεχνολογίες μετατροπής ανανεώσιμων και μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο της Ελλάδος.

Παρατηρείται πως τα ηλιακά πάνελ πρόσφεραν μία αύξηση ισχύος κατά 242 MW στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω εάν χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλες τεχνολογίες και γίνει χρήση συστημάτων ηλιακής παρακολούθησης διπλού άξονα αυτή η ποσότητα θα εκτοξευθεί. Για τους παραπάνω λόγους στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η υλοποίηση διάταξης ανίχνευσης του ήλιου με τεχνολογίες ανοικτού κώδικα με στόχο την δημιουργία μιας πλατφόρμας για την χρήση της σε φωτοβολταϊκές διατάξεις προσανατολιζόμενες αυτόματα προς τον ήλιο διπλού άξονα και κλειστού βρόγχου ελέγχου. Η διάταξη που υλοποιήθηκε θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ερευνητικά για την βελτιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας με τεχνολογίες αυτής της μορφής με την ανάπτυξη των βέλτιστων αλγορίθμων ελέγχου κίνησης της φωτοβολταϊκής διάταξης και τον βέλτιστο προσανατολισμό της προς τον ήλιο.

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Εξισώσεις για την ανίχνευση του Ήλιου

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μία ανάλυση του Ήλιου, στη συνέχεια θα αναφερθεί η ιστορική εξέλιξη των εξισώσεων του ήλιου και στο τέλος θα αναλυθούν όλοι οι παράγοντες που συμβάλουν στην ανάπτυξη των εξισώσεων του ήλιου και θα παρουσιαστούν οι επιθυμητές εξισώσεις. [48][49]

### 2.1 Ο Ήλιος

Ο Ήλιος είναι ένα αστέρι που βρίσκεται στο κέντρο του Ηλιακού μας Συστήματος. Είναι μακράν το πιο εμφανές αντικείμενο στον ουρανό, παρέχοντας φως, θερμότητα και ενέργεια που είναι απαραίτητα για τη ζωή στη Γη.

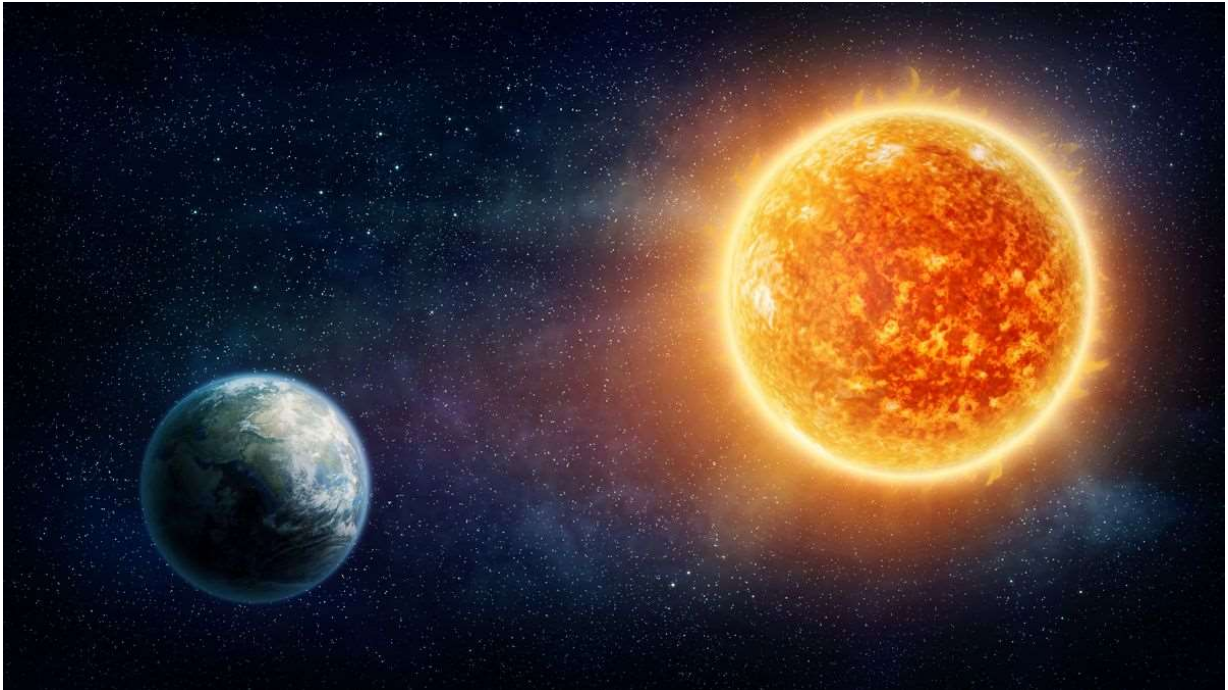
Ακολουθεί μια μικρή ανάλυση του Ήλιου:

Ο Ήλιος αποτελείται κυρίως από υδρογόνο (περίπου 74% κατά μάζα) και ήλιο (He) (περίπου 24% κατά μάζα). Μικρές ποσότητες βαρύτερων στοιχείων, όπως το οξυγόνο, ο άνθρακας και ο σίδηρος, αποτελούν το υπόλοιπο 2%.

#### 1. Μέγεθος και μάζα:

Ο Ήλιος είναι ένα αστέρι μέσου μεγέθους, αλλά φαίνεται μεγάλος και κυρίαρχος λόγω της εγγυτητάς του στη Γη. Έχει διάμετρο περίπου 1,4 εκατομμύρια χιλιόμετρα, δηλαδή περίπου 109 φορές

μεγαλύτερη από τη διάμετρο της Γης. Όσον αφορά τη μάζα του, ο Ήλιος έχει περίπου 333.000 φορές μεγαλύτερη μάζα από τη Γη, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 99,86% της συνολικής μάζας του Ηλιακού Συστήματος.



**Εικόνα 2.1.** Η εικόνα του Ήλιου και της Γης. [17]

## 2. Παραγωγή ενέργειας:

Ο Ήλιος παράγει ενέργεια μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται πυρηνική σύντηξη. Στον πυρήνα του, οι πυρήνες υδρογόνου ενώνονται κάτω από ακραίες θερμοκρασίες και πιέσεις, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ηλίου (He). Αυτή η διαδικασία σύντηξης απελευθερώνει ένα τεράστιο ποσό ενέργειας με τη μορφή φωτός και θερμότητας. Η ενέργεια που παράγεται από τον Ήλιο είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ζωής στη Γη και για την καθοδήγηση των καιρικών συνθηκών, των ωκεάνιων ρευμάτων και του κλιματικού συστήματος της Γης.

## 3. Ηλιακή δραστηριότητα:

Ο Ήλιος παρουσιάζει διάφορες μορφές δραστηριότητας, όπως ηλιακές κηλίδες, ηλιακές εκλάμψεις και στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας (coronal mass ejections ή CMEs). Οι ηλιακές κηλίδες είναι οι σκοτεινότερες και ψυχρότερες περιοχές στην επιφάνεια του Ήλιου οι οποίες προκαλούνται από έντονη μαγνητική δραστηριότητα. Οι ηλιακές εκλάμψεις είναι ξαφνικές απελευθερώσεις ενέργειας με τη μορφή έντονων εκρήξεων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ενώ οι CME είναι μαζικές εκρήξεις πλάσματος και μαγνητικών πεδίων στο διάστημα. Αυτές οι δραστηριότητες μπορούν να επηρεάσουν τη μαγνητόσφαιρα της Γης και να έχουν επιπτώσεις στην τεχνολογική μας υποδομή.

## 4. Ηλιακός κύκλος:

Ο Ήλιος υφίσταται έναν κύκλο περίπου 11 ετών, γνωστό ως ηλιακός κύκλος ή κύκλος των ηλιακών κηλίδων. Κατά τη διάρκεια αυτού του κύκλου, ο αριθμός των ηλιακών κηλίδων και η ηλιακή δραστηριότητα αυξάνεται και μειώνεται. Στο αποκορύφωμα του κύκλου, η ηλιακή δραστηριότητα είναι υψηλότερη, οδηγώντας σε αυξημένη εμφάνιση ηλιακών εκλάμψεων και CMEs. Ο ηλιακός

κύκλος επηρεάζει τον διαστημικό καιρό και μπορεί να επηρεάσει τις δορυφορικές επικοινωνίες, τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και άλλα συστήματα στη Γη.

## 5. Διάρκεια ζωής:

Ο Ήλιος έχει ηλικία περίπου 4,6 δισεκατομμυρίων ετών και βρίσκεται σήμερα στη μέση της φάσης της κύριας ακολουθίας του. Εκτιμάται ότι ο Ήλιος θα συνεχίσει να καίει το καύσιμο υδρογόνο του για άλλα 5 δισεκατομμύρια χρόνια. Καθώς θα εξαντλεί το υδρογόνο του, θα εξελιχθεί σε ερυθρό γίγαντα, θα επεκταθεί σε μέγεθος και θα καταπιεί τους εσωτερικούς πλανήτες, συμπεριλαμβανομένης της Γης.

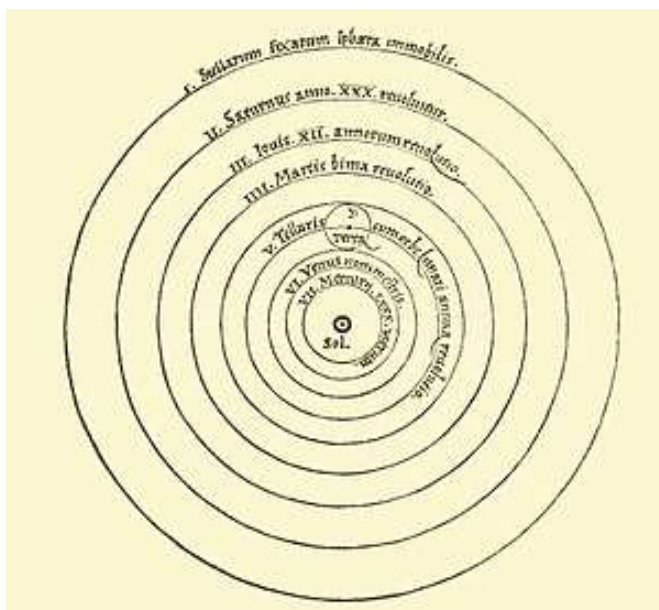
Επιπλέον είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η ημερήσια ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι περίπου 10 με 15 χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από το σύνολο της παγκόσμιας κατανάλωσης μέσα σε μία μέρα. Ακόμη μέσα στο χρονικό διάστημα μίας ώρας η γη λαμβάνει ποσό ηλιακής ενέργειας που είναι ικανό να καλύψει της ενεργειακές της ανάγκες για ένα έτος.

Συμπεραίνεται πως μέχρι σήμερα μόνο ένα πολύ μικρό ποσό της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στη γη χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας και ένα τεράστιο ποσό μένει ανεκμετάλλευτο.

## 2.2 Ιστορική αναδρομή

Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό της θέσης του ήλιου σε σχέση με τη Γη έχουν αναπτυχθεί και τελειοποιηθεί επί αιώνες. Οι αρχαίοι πολιτισμοί, όπως οι Έλληνες και οι Αιγύπτιοι συνέβαλαν σημαντικά στην κατανόηση της κίνησης των ουράνιων σωμάτων, συμπεριλαμβανομένου του ήλιου.

Ένα σημαντικό ορόσημο στην ανάπτυξη των εξισώσεων της ηλιακής θέσης ήταν η διατύπωση του ηλιοκεντρικού μοντέλου του ηλιακού συστήματος από τον Νικόλαο Κοπέρνικο τον 16ο αιώνα. Το μοντέλο του Κοπέρνικου τοποθέτησε τον ήλιο στο κέντρο του ηλιακού συστήματος, παρέχοντας ένα ακριβέστερο πλαίσιο για τον υπολογισμό των θέσεων των ουράνιων σωμάτων, συμπεριλαμβανομένου του ήλιου.



**Εικόνα 2.2.** Το αστρονομικό μοντέλο που ανέπτυξε ο Νικόλαος Κοπέρνικος. [18]

Τον 17ο αιώνα, ο Γιοχάνες Κέπλερ διατύπωσε τους νόμους της πλανητικής κίνησης, οι οποίοι περιέγραφαν τις ελλειπτικές τροχιές των πλανητών γύρω από τον ήλιο. Ανακάλυψε πως οι τροχιές των πλανητών δεν είναι κύκλοι, αλλά αντίθετα ήταν οι επιμήκεις ή πεπλατυσμένοι κύκλοι που οι γεωμέτρους ονομάζουν ελλείψεις. Οι νόμοι που διατύπωσε, μαζί με μεταγενέστερες ανακαλύψεις και παρατηρήσεις, άνοιξαν το δρόμο για ακριβέστερους υπολογισμούς των ουράνιων θέσεων. [39]

Στα τέλη του 19ου και στις αρχές του 20ού αιώνα, οι αστρονόμοι και οι μαθηματικοί ανέπτυξαν πιο εξελιγμένα μαθηματικά μοντέλα και εξισώσεις για τον ακριβή προσδιορισμό των θέσεων των ουράνιων σωμάτων. Αυτό περιλάμβανε την ανάπτυξη εφήμερων πινάκων, οι οποίοι παρείχαν ακριβή δεδομένα για τις θέσεις του ήλιου, της σελήνης και των πλανητών σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Με την έλευση των υπολογιστών και των προηγμένων υπολογιστικών τεχνικών τον 20ό αιώνα, οι αστρονόμοι και οι μηχανικοί μπόρεσαν να αναπτύξουν ακριβέστερους και αποτελεσματικότερους αλγόριθμους για τον υπολογισμό των θέσεων των ουράνιων σωμάτων, συμπεριλαμβανομένου του ήλιου. Αυτοί οι αλγόριθμοι λαμβάνουν υπόψη παραμέτρους όπως η τροχιά της Γης, η αξονική κλίση και διάφορα αστρονομικά φαινόμενα.

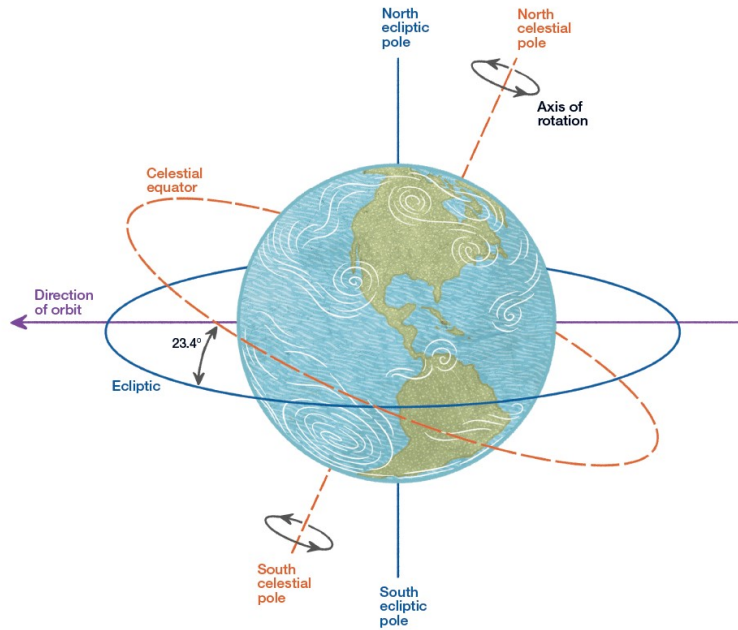
### 2.3 Οι μαθηματικές εξισώσεις για την εύρεση της θέσης του ήλιου Ηλιακή Απόκλιση

Η Γη κινείται σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τον Ήλιο, με τον Ήλιο να βρίσκεται σε μία από τις δύο εστίες της έλλειψης. Αυτό σημαίνει ότι η απόσταση μεταξύ της Γης και του Ήλιου μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους, αλλά η διαφορά είναι σχετικά μικρή.

Η τροχιά της Γης είναι σχεδόν κυκλική και ο άξονας στον οποίο περιστρέφεται ονομάζεται πολικός άξονας. Το σχήμα της αναφέρεται ως έλλειψη επειδή η εκκεντρότητα της τροχιάς είναι κοντά στο μηδέν. Η μέση απόσταση μεταξύ της Γης και του Ήλιου είναι περίπου 150 εκατομμύρια χιλιόμετρα.

Η Γη ολοκληρώνει μια τροχιά γύρω από τον Ήλιο σε περίπου 365,25 ημέρες, γι' αυτό και έχουμε δίσεκτα έτη κάθε τέσσερα χρόνια για να υπολογίσουμε το επιπλέον τέταρτο της ημέρας. Αυτή η διάρκεια είναι γνωστή ως τροπικό έτος ή ηλιακό έτος και αντιπροσωπεύει το χρόνο που χρειάζεται η Γη για να επιστρέψει στην ίδια θέση της τροχιάς της σε σχέση με τον Ήλιο.

Η τροχιά της Γης έχει επίσης κλίση σε σχέση με τον άξονά της. Ο άξονας περιστροφής της Γης δεν είναι κάθετος στο εκλειπτικό επίπεδο, αλλά έχει κλίση προς αυτό. Η κλίση αυτή, γνωστή ως **ηλιακή κλίση  $\delta$** , είναι περίπου 23,5 μοίρες. Όπως το εκλειπτικό επίπεδο εκτείνεται σε έναν άπειρο κύκλο από την τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο, έτσι και ο ουράνιος ισημερινός εκτείνεται σε έναν άπειρο κύκλο από τον ισημερινό της Γης, ο οποίος έχει κλίση 23,5° από το επίπεδο της τροχιάς της Γης. Αυτή η κλίση είναι που προκαλεί την αλλαγή των εποχών, καθώς διαφορετικά μέρη της Γης δέχονται διαφορετικές ποσότητες ηλιακού φωτός κατά τη διάρκεια του έτους. Επίσης αλλάζει ημιτονικά σε συνάρτηση με το χρόνο και οι τιμές που έχει είναι μεταξύ του -23,45 και 23,5.



**Εικόνα 2.3.** Απόκλιση άξονα Γης ως προς το επίπεδο της εκλειπτική τροχιάς. [19]

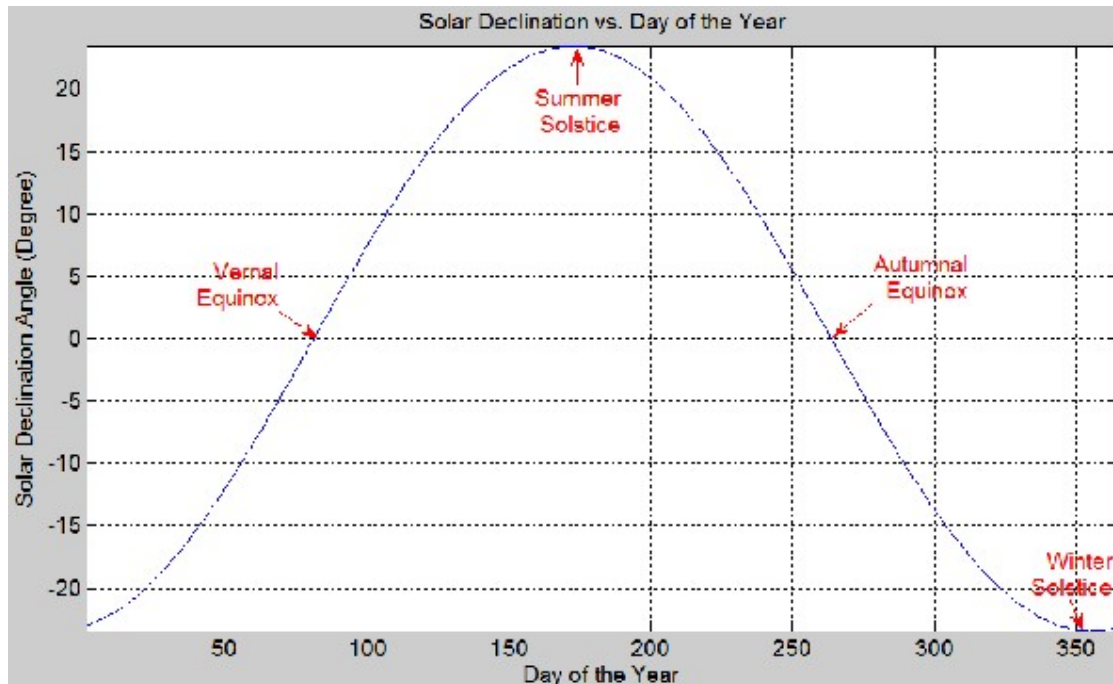
Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ της εκλειπτικής, που είναι το επίπεδο της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο, και του ουράνιου ισημερινού, που είναι ουσιαστικά ο ισημερινός της Γης που εκτείνεται στο διάστημα.

Ο παρακάτω τύπος μας δίνει την ετήσια διακύμανση της απόκλισης του άξονα της Γης

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left( 2 \cdot \pi \cdot \frac{(284+n)}{365} \right) = 23.45 \cdot \sin \left( 2 \cdot \pi \cdot \frac{(n-81)}{365} \right), \text{ (μοίρες)}$$

Όπου  $n$ , ο αριθμός της ημέρας του έτους. Δηλαδή για  $n=1$  έχουμε 1 Ιανουαρίου και για  $n=365$  έχουμε 31 Δεκεμβρίου.

Στην εικόνα 2.4 φαίνεται η διακύμανση της απόκλισης του άξονα της Γης στη διάρκεια ενός έτους.



Εικόνα 2.4. Ετήσια διακύμανση της απόκλισης του άξονα της Γης. [20]

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από αυτή την εικόνα είναι τα εξής:

- Η απόκλιση του άξονα της Γης μηδενίζεται στις 21 Μαρτίου και στις 22 Σεπτεμβρίου.
- Έχει μέγιστη τιμή στις 21 Ιουνίου ίση με 23.45.
- Έχει ελάχιστη τιμή στις 21 Δεκεμβρίου ίση με -23.45.

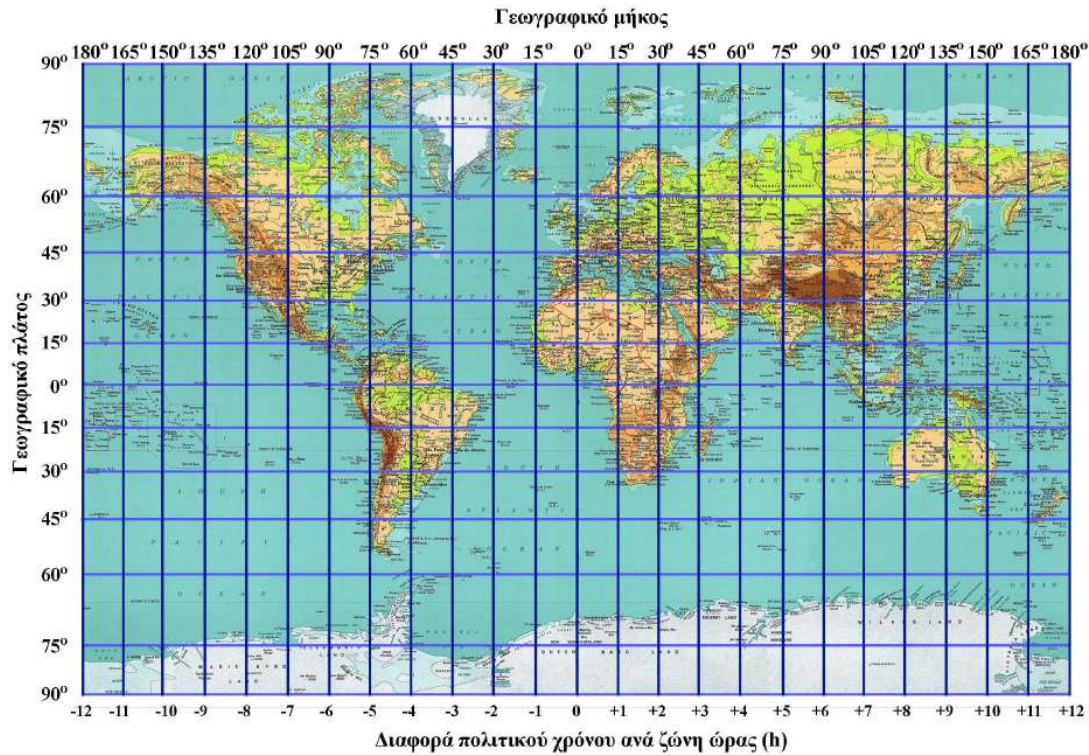
### Πολικός και Ηλιακός χρόνος

- Πολικός χρόνος

Ο πολικός χρόνος είναι ο χρόνος που έχει το κάθε μέρος της Γης αυτή τη στιγμή. Για να κάνει η Γη μία ολόκληρη περιστροφή ως προς τον άξονά της, σύμφωνα με τον πολικό χρόνο διαρκεί 24 ώρες.

Αρα παρατηρείται πως η Γη περιστρέφεται  $\frac{360\text{μοίρες}}{24\text{ώρες}} = 15 \frac{\text{μοίρες}}{\text{ώρα}}$ .

Όπως φαίνεται και στη παρακάτω εικόνα οι τυποποιημένες ζώνες ώρας χωρίζουν τον κόσμο σε 24 διαμήκεις λωρίδες πλάτους 15 μοιρών, ώστε να εξασφαλίζεται συνεπής χρονομέτρηση εντός κάθε ζώνης. Κάθε ζώνη ώρας βασίζεται συνήθως σε έναν συγκεκριμένο πρότυπο μεσημβρινό, ο οποίος είναι μια γραμμή γεωγραφικού μήκους που επιλέγεται ως σημείο αναφοράς για τη συγκεκριμένη ζώνη.



**Εικόνα 2.5.** Επιφάνεια της γης σε μερκατορικό χάρτη. [21]

Επιπλέον, δεδομένου ότι η περιστροφή της γης γίνεται από τη δύση προς την ανατολή, οι γεωγραφικές περιοχές ανατολικά του πρώτου μεσημβρινού βρίσκονται μπροστά όσο αφορά το χρόνο, ενώ οι περιοχές δυτικά του πρώτου μεσημβρινού βρίσκονται πίσω χρονικά. Ως αποτέλεσμα, τα γεωγραφικά σημεία μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου μεσημβρινού ανατολικά του Greenwich (0-15) θα έχουν πολιτική ώρα μία ώρα μπροστά από αυτόν του Greenwich. Το γεωγραφικό σημείο ανατολικά του Greenwich μεταξύ του 2<sup>ου</sup> και του 3<sup>ου</sup> μεσημβρινού (15-30) θα έχει πολιτικό χρόνο δύο ώρες μπροστά από αυτόν του Greenwich, ενώ το γεωγραφικό σημείο δυτικά του Greenwich μεταξύ του 3<sup>ου</sup> και του 4<sup>ου</sup> μεσημβρινού (30-45) θα έχει πολιτικό χρόνο τρεις ώρες πίσω από αυτόν του Greenwich.

- Ηλιακός χρόνος

Ο ηλιακός χρόνος ή πραγματικός της Γης αναφέρεται στη μέτρηση του χρόνου με βάση τη θέση του Ήλιου στον ουρανό. Συνδέεται στενά με την περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της, η οποία καθορίζει το μήκος της ημέρας.

Δύο γεωγραφικά σημεία μπορεί να ανήκουν στην ίδια ζώνη ώρας και στην ίδια χώρα αλλά να έχουν διαφορά μεταξύ τους κατά τη διεύθυνση ανατολής – δύσης, δηλαδή να έχουν διαφορά στα γεωγραφικά μήκη τους και ως αποτέλεσμα να έχουν διαφορετικούς ηλιακούς χρόνους.

Επομένως, η διαφορά της θέσης που έχει ο ήλιος στον ορίζοντα αποτυπώνεται με τον ηλιακό χρόνο.

Με τον παρακάτω τύπο υπολογίζεται ο ηλιακός χρόνος ο οποίος μεταβάλλεται και μπορεί να πάρει και δεκαδική μορφή, δηλαδή εάν ο ηλιακός χρόνος είναι 11 το πρωί μετά από ενενήντα λεπτά θα είναι 12.5.

$$ts = tc + \left( \frac{(\lambda std - \lambda loc)}{15} \right) + \frac{Et}{60}$$



Όπου:

**ts:** Ο ηλιακός χρόνος σε ώρες.

**tc:** Ο επίσημος χρόνος Greenwich της ζώνης σε ώρες.

**lstd:** Η ζώνη ώρας στην οποία ανήκει η περιοχή μελέτης σε μοίρες.

**loc:** Το γεωγραφικό μήκος στην περιοχή μελέτης σε μοίρες.

**Et:** Η διαφορά ηλιακού – πολιτικού χρόνου σε λεπτά.

Σύμφωνα με τον πολιτικό χρόνο μία ολόκληρη περιστροφή γύρω από τον άξονά της διαρκεί 24 ώρες. Η συγκεκριμένη χρονική διαφορά ονομάζεται Εξίσωση Χρόνου και αφού αναφέρεται στην περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της είναι η ίδια για όλα τα μέρη της γη, ανεξάρτητα από τη θέση του κάθε γεωγραφικού σημείου της επιφάνειάς της. Η Εξίσωση Χρόνου φαίνεται παρακάτω και εξαρτάται μόνο από τη θέση της γης ως προς τον ήλιο.

$$Et = 3.82 \cdot (0.000075 + 0.001868 \cdot \cos(B) - 0.032077 \cdot \sin(B) - 0.014615 \cdot \cos(2B) - 0.04089 \cdot \sin(2B))$$

$$\text{Όπου } B = 360 \cdot \frac{n-1}{365}$$

Και **n:** Ο αριθμός της ημέρας του έτους.

### Ωριαία γωνία του Ήλιου

Η ωριαία γωνία του ήλιου, είναι ένα μέτρο της θέσης του ήλιου στον ουρανό σε σχέση με μια συγκεκριμένη θέση στην επιφάνεια της Γης. Ορίζεται ως η γωνιακή απόσταση μεταξύ του ήλιου και του τοπικού μεσημβρινού, μετρούμενη προς τα δυτικά από τον μεσημβρινό.

Για να κατανοήσουμε την έννοια της ωριαίας γωνίας, πρέπει πρώτα να κατανοήσουμε μερικούς συναφείς όρους:

**Ηλιακή μεσημβρία:** Είναι η στιγμή κατά την οποία ο ήλιος φτάνει στο υψηλότερο σημείο του στον ουρανό για μια δεδομένη ημέρα. Στην ηλιακή μεσημβρία, ο ήλιος βρίσκεται ακριβώς νότια (στο βόρειο ημισφαίριο) ή ακριβώς βόρεια (στο νότιο ημισφαίριο).

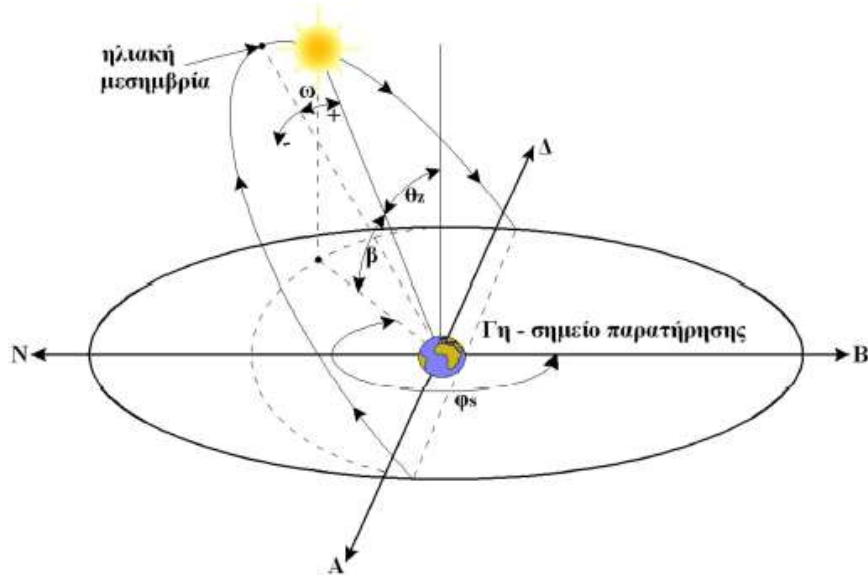
**Τοπικός μεσημβρινός:** Ο τοπικός μεσημβρινός είναι μια νοητή γραμμή που εκτείνεται από τον βόρειο ουράνιο πόλο στον νότιο ουράνιο πόλο, περνώντας ακριβώς πάνω από μια συγκεκριμένη θέση στην επιφάνεια της Γης. Αντιπροσωπεύει τη γραμμή βορρά-νότου της θέσης του παρατηρητή.

Η ωριαία γωνία έχει ως συμβολισμό το ελληνικό γράμμα  $\omega$ , μετριέται σε μοίρες και μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου καθώς η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της. Αυξάνεται κατά 15 μοίρες για κάθε ώρα που περνά μετά την ηλιακή μεσημβρία. Έτσι, μία ώρα μετά το ηλιακό μεσημέρι, η ωριαία γωνία είναι 15 μοίρες- δύο ώρες μετά το ηλιακό μεσημέρι, είναι 30 μοίρες κ.ο.κ.

Εάν ο ήλιος βρίσκεται ανατολικά του τοπικού μεσημβρινού (δηλαδή πριν από την ηλιακή μεσημβρία), η ωριαία γωνία είναι αρνητική. Για παράδειγμα, δύο ώρες πριν από το ηλιακό μεσημέρι, η ωριαία γωνία θα είναι -30 μοίρες.

Αντίθετα, εάν ο ήλιος βρίσκεται δυτικά του τοπικού μεσημβρινού (δηλαδή μετά την ηλιακή μεσημβρία), η ωριαία γωνία είναι θετική. Για παράδειγμα, δύο ώρες μετά το ηλιακό μεσημέρι, η ωριαία γωνία θα ήταν +30 μοίρες.

Στην εικόνα 2.6 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο βρίσκεται η ωριαία γωνία του ήλιου.



**Εικόνα 2.6.** Σχηματική επεξήγηση της ωριαίας γωνίας  $\omega$  του ήλιου. [22]

Με τον ορισμό της ωριαίας γωνίας του ήλιου συμπεραίνουμε πως περιγράφει την θέση του ήλιου στον ορίζοντα (ουρανό) κάτι που κάνει και ο ηλιακός χρόνος. Επομένως αναμένουμε πως αυτά τα δύο θα συνυπάρχουν στην εξίσωση της περιγραφής της ωριαίας γωνίας του ήλιου. Πράγματι, παρακάτω φαίνεται η συγκεκριμένη εξίσωση.

$$\omega = \frac{ts - 12}{24} \cdot 360 = (ts - 12) \cdot 15 \frac{\text{μοίρες}}{\text{ώρα}}$$

### Γωνία Ζενίθ

Η γωνία ζενίθ συμβολίζεται με  $\theta_z$ , είναι ένα μέτρο της γωνιακής απόστασης μεταξύ ενός ουράνιου αντικείμενου, όπως ο ήλιος και του ζενίθ του παρατηρητή. Το ζενίθ είναι το σημείο που βρίσκεται ακριβώς πάνω από έναν παρατηρητή στην επιφάνεια της Γης.

Για την κατανόηση της γωνίας ζενίθ, βοηθάει να φανταστούμε τον ήλιο ο οποίος προβάλλεται σε μια ουράνια σφαίρα που περιβάλλει τη Γη. Ο παρατηρητής βρίσκεται στο κέντρο αυτής της σφαίρας, με τον ήλιο να εμφανίζεται σε μια συγκεκριμένη θέση στη σφαίρα.

Η γωνία ζενίθ ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της γραμμής που συνδέει τον παρατηρητή με το ουράνιο αντικείμενο και της γραμμής που εκτείνεται κάθετα από τον παρατηρητή προς το ζενίθ. Μετρείται κατά μήκος της οπτικής γραμμής του παρατηρητή.

Η γωνία ζενίθ είναι πάντα θετική και κυμαίνεται από 0 μοίρες όταν το ουράνιο αντικείμενο βρίσκεται ακριβώς πάνω από το κεφάλι (στο ζενίθ) έως 90 μοίρες όταν το αντικείμενο βρίσκεται στον ορίζοντα.

Ο τύπος υπολογισμού της γωνίας ζενίθ είναι ο ακόλουθος

$$\cos(\theta_z) = \sin(\lambda) \cdot \sin(\delta) + \cos(\lambda) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)$$

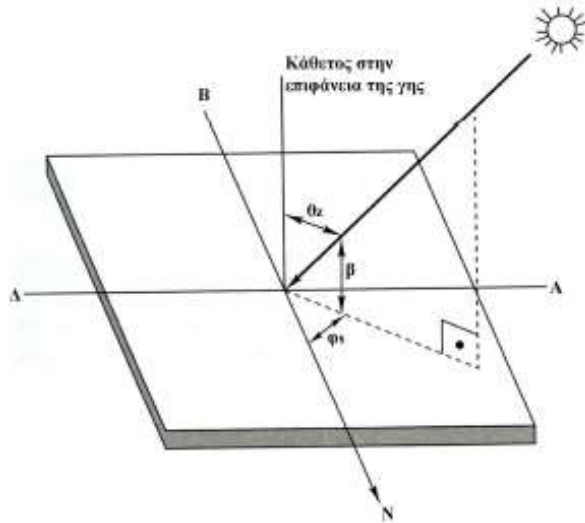
Όπου,

$\lambda$ : Το γεωγραφικό πλάτος.

$\delta$ : Η ηλιακή απόκλιση.

$\omega$ : Ωριαία γωνία του ήλιου.

Στην εικόνα 2.7 παρουσιάζεται η γωνία ζενίθ που μόλις αναλύθηκε και το ηλιακό ύψος με το αζιμούθιο τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.



**Εικόνα 2.7.** Γωνία ζενίθ ( $\theta_z$ ), Ηλιακό ύψος ( $\beta$ ) και Αζιμούθιο ( $\phi_s$ ). [23]

### Ηλιακό ύψος

Το ηλιακό ύψος είναι ένα θεμελιώδες μέγεθος που καθορίζει τη θέση του ήλιου στον ουρανό σε σχέση με τη θέση ενός παρατηρητή στην επιφάνεια της Γης και συμβολίζεται με **EL**. Ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το εν λόγω γεωγραφικό σημείο με τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα και στην προβολή της ανωτέρω ευθείας στην επιφάνεια της γης. Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 2.7.

Το ηλιακό ύψος μετριέται σε μοίρες και μπορεί να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς η θέση του ήλιου αλλάζει λόγω της περιστροφής της Γης και της ετήσιας τροχιάς της γύρω από τον ήλιο.

Το ηλιακό ύψος είναι μηδέν μοίρες όταν το κέντρο του ήλιου βρίσκεται ακριβώς στον ορίζοντα, υποδεικνύοντας την ανατολή ή τη δύση του ήλιου. Καθώς ο ήλιος ανεβαίνει πάνω από τον ορίζοντα, το ηλιακό υψόμετρο αυξάνεται, φθάνοντας στη μέγιστη τιμή του στην ηλιακή μεσημβρία (όταν ο ήλιος βρίσκεται ψηλότερα στον ουρανό).

Επίσης μπορεί να κυμαίνεται από -90 μοίρες έως 90 μοίρες ακριβώς πάνω από το κεφάλι (ζενίθ) για τους παρατηρητές στον ισημερινό. Παίρνει την τιμή 0 όταν ο ήλιος βρίσκεται στον ορίζοντα, θετικές τιμές όταν ο ήλιος βρίσκεται πάνω από τον ορίζοντα και αρνητικές τιμές όταν βρίσκεται κάτω από τον ορίζοντα.

Ο τύπος υπολογισμού της γωνίας του ηλιακού ύψους φαίνεται παρακάτω:

$$\sin(EL) = \sin(\lambda) \cdot \sin(\delta) + \cos(\lambda) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)$$

Όπου,

$\lambda$ : Το γεωγραφικό πλάτος.

$\delta$ : Η ηλιακή απόκλιση.

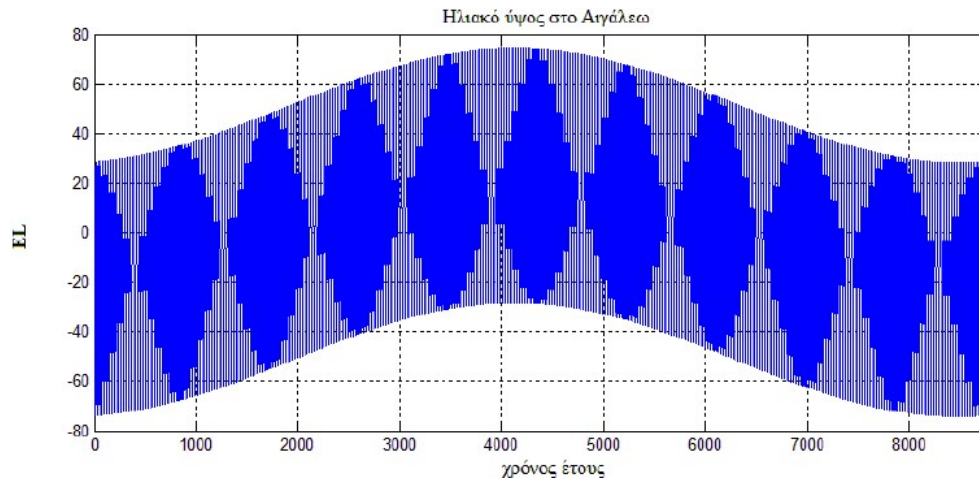
$\omega$ : Ωριαία γωνία του ήλιου.

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που προαναφέρθηκαν υλοποιήθηκε αλγόριθμος στο περιβάλλον του MATLAB για να υπολογιστεί το ηλιακό ύψος στο Αιγάλεω. Λήφθηκε υπόψιν το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της συγκεκριμένης περιοχής όπου,

Γεωγραφικό πλάτος = 37,98330 μοίρες.

Γεωγραφικό μήκος = 23.68330 μοίρες.

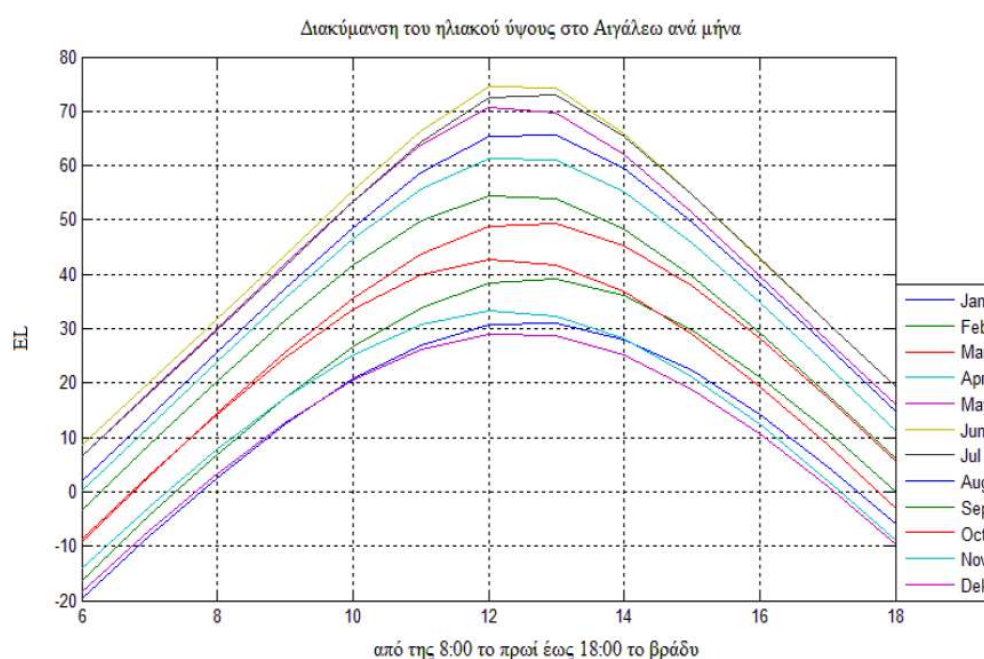
Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 2.8.



**Εικόνα 2.8.** Το ηλιακό ύψος στο Αιγάλεω.

Παρατηρείται πως το ηλιακό ύψος στο Αιγάλεω κατά τη χειμερινή διάρκεια παίρνει την μεγαλύτερη τιμή κοντά στις 30 μοίρες ενώ, την περίοδο του καλοκαιριού παίρνει μέγιστη τιμή περίπου 75 μοίρες. Ακόμη να σημειωθεί πως από τη χειμερινή διάρκεια μέχρι την περίοδο του καλοκαιριού το ηλιακό ύψος αυξάνεται ενώ αντίστοιχα από την περίοδο καλοκαιριού μέχρι την χειμερινή περίοδο το ηλιακό ύψος μειώνεται.

Τέλος, στην εικόνα 2.9 φαίνεται η μέση ημερήσια διακύμανση του ηλιακού ύψους στο Αιγάλεω του κάθε μήνα ξεχωριστά, συναρτήσει του πολιτικού χρόνου από τις 8:00 έως τις 18:00.



**Εικόνα 2.9.** Μέση ημερήσια διακύμανση του ηλιακού ύψους στο Αιγάλεω του κάθε μήνα συναρτήσει του πολιτικού χρόνου.

Όπως αναμενόταν το ηλιακό ύψος αυξάνεται από τον Δεκέμβριο μέχρι τον Ιούνιο και μειώνεται από τον Ιούνιο έως τον Δεκέμβριο.

### Αζιμουθιακή γωνία του ήλιου

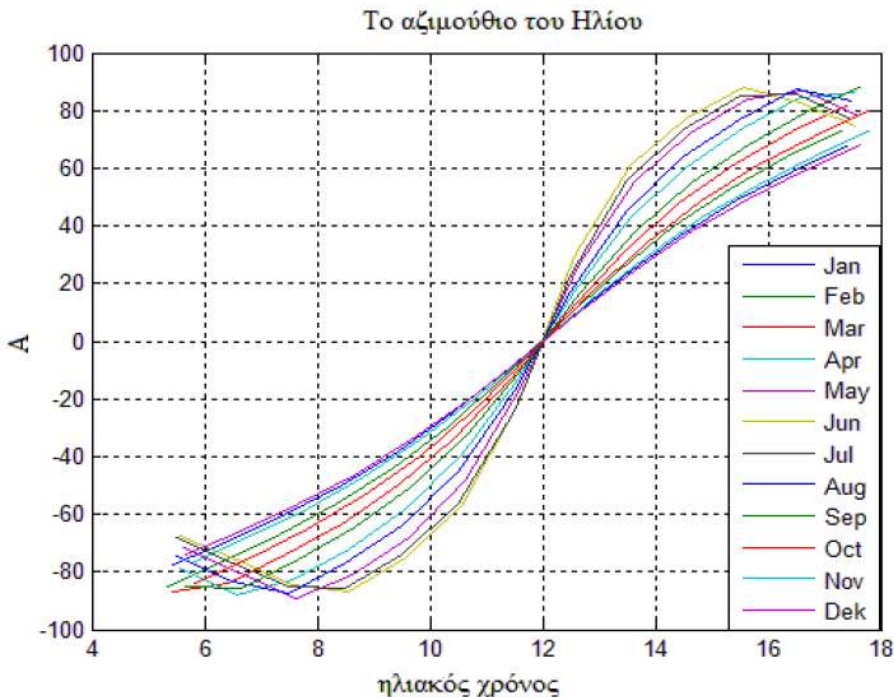
Η αζιμουθιακή γωνία του ήλιου συμβολίζεται με  $A$  και είναι και αυτή μία θεμελιακή παράμετρος για τον υπολογισμό της θέσης του ηλίου. Αντιπροσωπεύει τη γωνία μεταξύ της νότιας (ή βόρειας, ανάλογα με το ημισφαίριο) κατεύθυνσης του παρατηρητή και της προβολής της θέσης του ήλιου στο έδαφος.

Η αζιμουθιακή γωνία μετράτε συνήθως δεξιόστροφα από την κατεύθυνση του παρατηρητή προς νότο, και κυμαίνεται από 0 μοίρες έως 360 μοίρες. Οι μηδέν μοίρες αντιστοιχούν στη νότια κατεύθυνση, οι 90 μοίρες αντιστοιχούν στη δυτική κατεύθυνση, οι 180 μοίρες αντιστοιχούν στη βόρεια κατεύθυνση και οι 270 μοίρες αντιστοιχούν στην ανατολική κατεύθυνση.

Ο τύπος για τον υπολογισμό της Αζιμουθιακής γωνίας είναι ο εξής:

$$\sin(A) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(EL)}$$

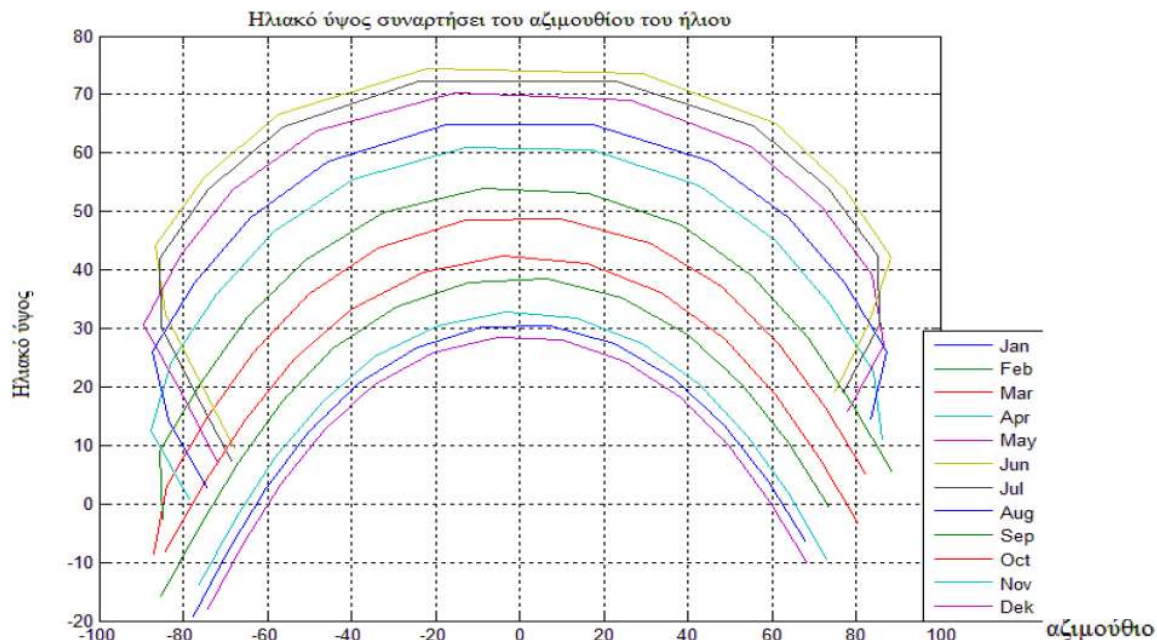
Στην εικόνα 2.10 φαίνεται η μέση ημερήσια διακύμανση του αζιμούθιου του ήλιου στο Αιγάλεω στον κάθε μήνα ξεχωριστά συναρτήσει του ηλιακού χρόνου. Για την διεξαγωγή πιο ξεκάθαρων συμπερασμάτων επιλέχθηκε οι τιμές του αζιμούθιου του ήλιου να είναι από τη δύση του ηλίου έως την ανατολή του.



**Εικόνα 2.10.** Μέση ημερήσια διακύμανση του αζιμούθιου του ήλιου στο Αιγάλεω στον κάθε μήνα συναρτήσει του ηλιακού χρόνου.

Συμπεραίνεται πως όσο πλησιάζει η καλοκαιρινή περίοδος η κλίση μεταβολής του αζιμούθιου αυξάνεται. Ακόμη παρατηρείται πως ο ήλιος περνάει από τη νότια κατεύθυνση πάντα όταν ο ηλιακός χρόνος ισούται με  $ts = 12:00$  (στην ηλιακή μεσημβρία).

Τέλος, στην εικόνα 2.11 παρουσιάζεται η μεταβολή του ηλιακού ύψους μίας ολόκληρης ημέρας συναρτήσει του αζιμούθιου του ήλιου στο Αιγάλεω. Όπως φαίνεται και από την συγκεκριμένη εικόνα αυτή η γραφική απεικόνιση αντιπροσωπεύει τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα.



**Εικόνα 2.11.** Μεταβολή του ηλιακού ύψους μίας ολόκληρης ημέρας συναρτήσει του αζιμούθιου του ήλιου.

Όπως ήταν προβλεπόμενο, την θερινή περίοδο ο ήλιος εμφανίζεται ψηλότερα στον ουρανό και η διαδρομή του στον ουρανό είναι μεγαλύτερη από αυτή της χειμερινής περιόδου. Αυτό σημαίνει ότι ο ήλιος ανατέλλει νωρίτερα, φτάνει σε υψηλότερο ύψος στην ηλιακή μεσημβρία και δύει αργότερα σε σύγκριση με τους χειμερινούς μήνες.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την τροχιά του ήλιου και παρατέθηκαν στο κεφάλαιο αυτό θα χρησιμοποιηθούν για την προσεγγιστική καθοδήγηση της διάταξης ανίχνευσης ηλίου ώστε σε καταστάσεις π.χ. συννεφιάς ή την νύχτα να προσεγγίζει αυτόματα η διάταξη την αναμενόμενη θέση του ήλιου.

### 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Αισθητήρας θέσης ηλιακής ακτινοβολίας

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα δοθεί έμφαση στον αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της παρούσης διπλωματικής. Αρχικά θα παρουσιαστούν οι τρόποι μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας και στη συνέχεια θα γίνει αναφορά σχετικά με το σκοπό της χρήσης του αισθητήρα. Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί μία ιστορική ανασκόπηση της τεχνολογίας quadratic detector και θα γίνει η ανάλυση του αισθητήρα. Τέλος θα γίνει ανάλυση των σταδίων για την κατασκευή του κυκλώματος του αισθητήρα.

#### 3.1 Μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας

Η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να επιτευχθεί με τα κατάλληλα όργανα μέτρησης. Τα όργανα μέτρησης που μπορούν να το επιτύχουν διακρίνονται σε δύο κατηγορίες.

- **Θερμικοί αισθητήρες**

Οι θερμικοί αισθητήρες μετρούν τη θερμοκρασία ανιχνεύοντας αλλαγές στις φυσικές ιδιότητες που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, όπως η ηλεκτρική αντίσταση ή η τάση. Αυτοί οι αισθητήρες εκμεταλλεύονται την αρχή ότι η θερμοκρασία επηρεάζει τη συμπεριφορά ορισμένων υλικών, επιτρέποντας τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μετρήσιμα ηλεκτρικά σήματα.

- **Ηλεκτρονικής διέγερσης αισθητήρες**

Οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες διέγερσης μετατρέπουν το προσπίπτον φως σε ηλεκτρικά σήματα μέσω της δημιουργίας και ανίχνευσης ζευγών ηλεκτρονίων-οπών. Χρησιμοποιούν την αλληλεπίδραση των φωτονίων με τα υλικά ημιαγωγών για να δημιουργήσουν μια ηλεκτρική απόκριση, η οποία μπορεί να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία και μέτρηση.

Μερικοί από τους βασικότερους **θερμικούς αισθητήρες** είναι οι εξής:

- **Θερμοζεύγη:** Είναι αισθητήρες θερμοκρασίας που βασίζονται στο φαινόμενο Seebeck, όπου η τάση που παράγεται στην ένωση δύο ανόμοιων μετάλλων είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας, και χρησιμοποιούνται συνήθως σε βιομηχανικές μετρήσεις θερμοκρασίας.
- **Ανιχνευτές θερμοκρασίας με αντίσταση (Resistance Temperature Detector-RTD):** Οι RTD κατασκευάζονται από υλικό με γνωστή σχέση αντίστασης-θερμοκρασίας, όπως η πλατίνα. Καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία, η αντίσταση του υλικού μεταβάλλεται, επιτρέποντας τη μέτρηση της θερμοκρασίας με βάση την αντίσταση.

- **Θερμίστορ:** Είναι αντιστάσεις ευαίσθητες στη θερμοκρασία με υψηλό θερμοκρασιακό συντελεστή αντίστασης. Παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή της αντίστασης με τη θερμοκρασία, επιτρέποντας τη μέτρηση της θερμοκρασίας με βάση τη μεταβολή της αντίστασης.
- **Αισθητήρες υπέρυθρων (Infra Red-IR):** Ανιχνεύουν και μετρούν τη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από αντικείμενα. Αποτελούνται από έναν ανιχνευτή που μετατρέπει την ακτινοβολία IR σε ηλεκτρικό σήμα, συνήθως χρησιμοποιώντας πυροηλεκτρικό ή βολομετρικό μηχανισμό ανίχνευσης.
- **Πυροηλεκτρικοί αισθητήρες:** Χρησιμοποιούν υλικά που παράγουν ηλεκτρικό φορτίο όταν υπόκεινται σε μεταβολές της θερμοκρασίας. Η αλλαγή της θερμοκρασίας προκαλεί αλλαγή στην πόλωση του υλικού, με αποτέλεσμα ένα μετρήσιμο ηλεκτρικό σήμα.
- **Αισθητήρες θερμοκρασίας ζώνης πυριτίου:** Αυτοί οι αισθητήρες βασίζονται στη θερμοκρασιακή εξάρτηση της τάσης σε ένα χάσμα ζώνης πυριτίου. Με τη μέτρηση αυτής της τάσης μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια η θερμοκρασία, καθώς μεταβάλλεται προβλέψιμα με αυτή.

Από την άλλη, κάποιοι από τους **ηλεκτρονικούς αισθητήρες διέγερσης** είναι οι εξής:

- **Φωτοδιόδοι:** Όταν το φως προσπίπτει στη φωτοδίοδο, τα φωτόνια διεγείρουν τα ηλεκτρόνια, δημιουργώντας ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Τα ζεύγη αυτά δημιουργούν ρεύμα που είναι ανάλογο της έντασης του προσπίπτοντος φωτός.
- **Συσκευές συνδεδεμένες με φορτίο (CCD):** Τα φωτόνια του προσπίπτοντος φωτός δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών στην φωτοευαίσθητη περιοχή του CCD (Charge-Coupled Devices). Αυτοί οι φορείς φορτίου στη συνέχεια μεταφέρονται και αποθηκεύονται σε μια σειρά πυκνωτών, σχηματίζοντας ένα ηλεκτρικό σήμα που αναπαριστά την εικόνα.
- **Φωτοδιόδοι χιονοστιβάδας (APD):** Παρόμοια με τις φωτοδιόδους, οι APD παράγουν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών όταν φωτόνια προσπίπτουν στη διάταξη. Ωστόσο, μια εσωτερική πόλωση τάσης ενεργοποιεί ένα φαινόμενο χιονοστιβάδας, πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των φορέων φορτίου και ενισχύοντας το ηλεκτρικό σήμα.
- **Αισθητήρες φθορισμού:** Αυτοί οι αισθητήρες εκπέμπουν φως διαφορετικού μήκους κύματος κατά τη διέγερση από το προσπίπτον φως. Το εκπεμπόμενο φως μετράτε και η ένταση παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη συγκέντρωση ή τις ιδιότητες της ουσίας που έχει ο αισθητήρας.
- **Σωλήνες εκκένωσης αερίου:** Το αέριο στο εσωτερικό του σωλήνα ιονίζεται όταν υπόκειται σε συγκεκριμένα αέρια ή ηλεκτρικά πεδία, επιτρέποντας την ηλεκτρική αγωγή. Η προκύπτουσα αλλαγή ρεύματος ή τάσης υποδεικνύει την παρουσία ή το επίπεδο του αερίου που βρίσκεται στο εσωτερικό του σωλήνα.

Πρέπει να σημειωθεί πως για την επίτευξη της ηλιακής παρακολούθησης ο αισθητήρας που επιλέχθηκε για την ανίχνευση του ηλιακού φωτός είναι η φωτοδίοδος, η οποία θα αναλυθεί παρακάτω.



### 3.2 Σκοπός της χρήσης του αισθητήρα θέσης

Τα ηλιακά πάνελ πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερη ώρα κάθετα με τις ακτίνες του ήλιου για να δέχονται μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό έρχεται να το επιβεβαιώσει και ο Lambert με το νόμο των συνημίτονων το 1760.

Πρόκειται για μια θεμελιώδη αρχή της φυσικής και της οπτικής που περιγράφει τη σχέση μεταξύ της έντασης του φωτός που πέφτει σε μια επιφάνεια και της γωνίας υπό την οποία το φως προσπίπτει στην επιφάνεια.

Σύμφωνα με τον νόμο των συνημίτονων του Lambert, η ένταση του φωτός που προσπίπτει σε μια επιφάνεια είναι ευθέως ανάλογη του συνημίτονου της γωνίας μεταξύ της κατεύθυνσης του εισερχόμενου φωτός και του κάθετου διανύσματος στην επαπτόμενη επιφάνεια. Μαθηματικά, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$E = k \cdot \cos(\theta)$$

Όπου:

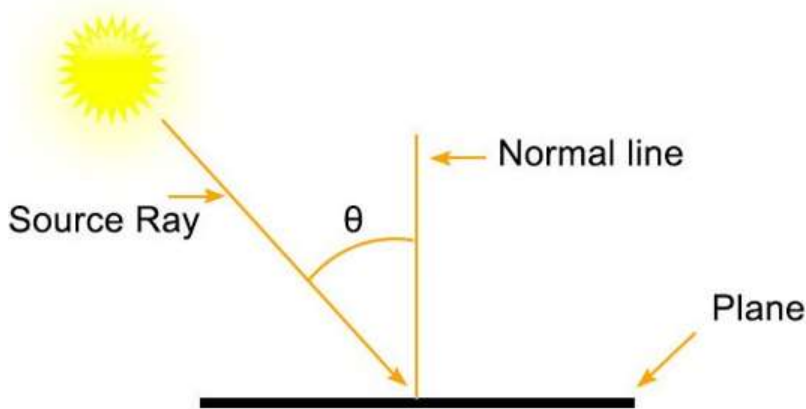
**E:** Είναι η ένταση ή η φωτεινότητα του φωτός στην επιφάνεια.

**k:** Είναι η ένταση της φωτεινής πηγής.

**$\theta$ :** Είναι η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης του εισερχόμενου φωτός και της κάθετης στην επιφάνεια.

Αυτός ο νόμος περιγράφει πώς η ένταση του φωτός μειώνεται καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης. Όταν το φως είναι κάθετο στην επιφάνεια ( $\theta = 0$ ), το συνημίτονο της γωνίας είναι 1, με αποτέλεσμα τη μέγιστη ένταση. Καθώς η γωνία αυξάνεται, το συνημίτονο μειώνεται, οδηγώντας σε μείωση της έντασης του φωτός που πέφτει στην επιφάνεια.

Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 3.1.



Equation:  $E = k \cdot \cos\theta$

**Εικόνα 3.1.** Γραφική απεικόνιση του νόμου των συνημίτονων του Lambert. [24]

Έτσι, για να πετύχει η επιφάνεια του ηλιακού πάνελ να είναι όσο το δυνατόν περισσότερη ώρα κάθετα με τον ήλιο για να αυξήσει τα ποσά της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται και κατ' επέκταση την ισχύ που παράγει σε σχέση με ένα σταθερό ηλιακό πάνελ έγινε η χρήση αισθητήρων για την ανίχνευση του ήλιου. Οι οποίοι με την αλλαγή της θέσης του ήλιου (και της ηλιακής ακτινοβολίας) θα δίνουν

πληροφορία στο σύστημα προκειμένου να μετατοπίζει την επιφάνεια του ηλιακού πάνελ για να πέφτει κάθετα το ηλιακό φως.

Για την επίτευξη του συγκεκριμένου σκοπού χρησιμοποιήθηκε η βασική δομή ενός αισθητήρα ανιχνευτή τεταρτημόριου (**quadratic detector**).

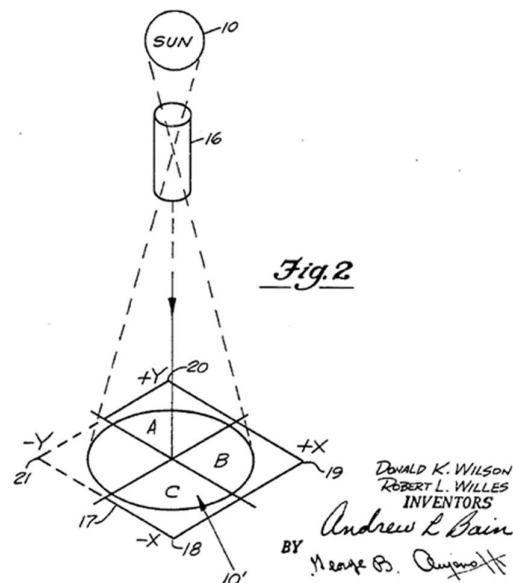
### 3.3 Ιστορική ανασκόπηση της τεχνολογίας quadratic detector

Η πρώτη εμφάνιση της τεχνολογίας του quadratic detector για να γίνεται ανίχνευση του ηλίου έγινε το 1960 από την πατέντα **U.S.Pat. No. 3098934**. [40]

Ήταν μία εφεύρεση η οποία αναφερόταν στον προσανατολισμό επανδρωμένων και μη επανδρωμένων οχημάτων τόσο στο περιβάλλον της ατμόσφαιρας όσο και του διαστήματος με την ανίχνευση του ήλιου. Επίσης, ένα ακόμα αντικείμενο, της τότε κατασκευής ήταν να παρέχει έναν τρόπο με τον οποίο θα παρακολουθούσε τον ήλιο από το όχημα.

Σε μία ευρύτερη πτυχή εξετάζει ένα τηλεσκοπικό σύστημα το οποίο βλέπει τον ήλιο και θα προβάλλει την εικόνα του σε ένα πλήθος από ανιχνευτές διατεταγμένους με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε, όταν το τηλεσκοπικό τμήμα του συστήματος στοχεύει το κέντρο του ήλιου, κάθε ανιχνευτής θα βλέπει το ίδιο ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας. Εάν δεν δείχνει στο κέντρο του ήλιου τότε ένας ανιχνευτής θα βλέπει μικρότερο τμήμα του ήλιου από τους άλλους. Έτσι μετρώντας και συγκρίνοντας τα σήματα εξόδου των ανιχνευτών παράγεται ένα σήμα διόρθωσης για να μετακινήσει το “τηλεσκόπιο” μέχρι οι περιοχές ή οι εντάσεις της εικόνας του ήλιου στους ανιχνευτές να είναι και πάλι όλες ίσες.

Ένας τρόπος για να προσδιοριστεί το κέντρο είναι να χωριστεί ο δίσκος σε 4 τμήματα των 90 μοιρών ή τεταρτημόρια (quadratic detector). Όταν και τα τέσσερα τμήματα θα είναι ίσα τότε θα ανιχνεύεται το κέντρο. Στην πραγματικότητα, όταν τρεις από τις τέσσερις περιοχές είναι ίσες τότε και η τέταρτη θα είναι κι αυτή ίση. Επομένως τα σήματα εξόδου που χρησιμοποιούνται για να γίνει η επεξεργασία της πληροφορίας για το που πρέπει να μετακινηθεί το “τηλεσκόπιο” γίνεται από τρεις ανιχνευτές και όχι από τέσσερις.

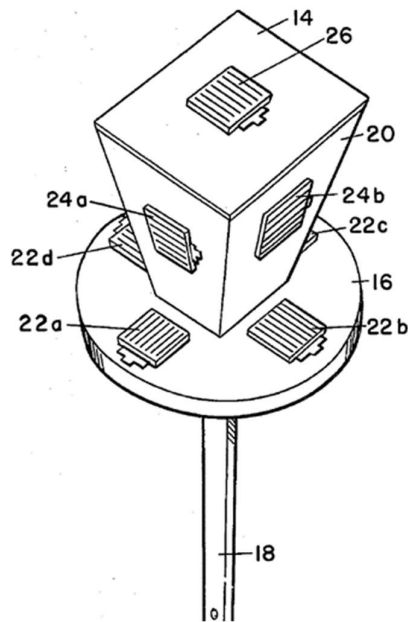


**Εικόνα 3.2.** Απεικόνιση ενός κομματιού της συγκεκριμένης πατέντας που αναφέρεται στο quadratic detector. [25]

Η επόμενη πατέντα από την οποία αντλήθηκε η ιδέα για την κατασκευή της παρούσης κατασκευής είναι η **U.S.Pat. No. 4225781** του 1980. [41] Στην συγκεκριμένη πατέντα χρησιμοποιείται η φιλοσοφία του quadratic detector για να γίνεται η ανίχνευση του ήλιου αλλά προστέθηκαν και :

- Ένα υπερυψωμένο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο που έχει τον ρόλο της διαχωριστικής επιφάνειας και η βάση του βρίσκεται στο κέντρο του quadratic detector.
- Σε κάθε πλευρά του ορθογωνίου παραλληλογράμμου έχει τοποθετηθεί και από ένα φωτοκύτταρο, όπως και στην κορυφή του.

Αυτά τα οποία μόλις αναφέρθηκαν φαίνονται στην εικόνα 3.3.



**Εικόνα 3.3.** Απεικόνιση ενός κομματιού της συγκεκριμένης πατέντας που αναφέρεται στο quadratic detector. [26]

Η χρήση του ορθογωνίου παραλληλογράμμου προσφέρει σκίαση, έτσι ώστε, εάν ο ανιχνευτής δεν βρίσκεται κάθετα με τις ακτίνες του ήλιου, τουλάχιστον ένας αισθητήρας να μην λαμβάνει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνουν οι υπόλοιποι και να δημιουργείται έτσι ένα σήμα διόρθωσης προκειμένου να στρέφεται το σύστημα στο μέρος που και οι τέσσερις αισθητήρες δέχονται το ίδιο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας.

Όταν ο ανιχνευτής ήλιου έρχεται σε επαφή με τον ήλιο για πρώτη φορά (πχ στην ανατολή του ήλιου) είναι πολύ πιθανό και οι τέσσερις αισθητήρες (που αποτελούν το quadratic detector) να μην δέχονται καθόλου ηλιακή ακτινοβολία. Για τον λόγο αυτό έχουν τοποθετηθεί σε κάθε πλευρά του ορθογωνίου παραλληλογράμμου αισθητήρες, για να ανιχνεύουν τον ήλιο σε τέτοιες περιπτώσεις και να μετακινούν στη σωστή θέση το σύστημα, με τα σήματα που παράγει η έξοδός τους για να ξεκινήσουν να ανιχνεύουν τη θέση του ήλιου οι αισθητήρες του quadratic detector.

Ο αισθητήρας που είναι στο πάνω μέρος του ορθογωνίου παραλληλογράμμου αντισταθμίζει τις προσωρινές διαταραχές, όπως όταν ένα σύννεφο καλύπτει τον ήλιο. Όταν η ποσότητα φωτισμού αυτού

του φωτοκύτταρου πέφτει κάτω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο, τα σήματα σφάλματος από τα άλλα φωτοκύτταρα μπορούν να αποτραπούν από το να προκαλέσουν την παρακολούθηση.

Τέλος να αναφερθεί πως στην συγκεκριμένη διπλωματική δεν χρησιμοποιήθηκαν οι επιπλέον αισθητήρες παρά μόνο οι τέσσερις που αποτελούν το quadratic detector γιατί προστέθηκε στο σύστημα ένας αλγόριθμος που γνωρίζει κάθε στιγμή τη θέση του ήλιου και ενεργοποιείται όταν οι αισθητήρες δεν δέχονται ηλιακή ακτινοβολία.

### 3.4 Ανάλυση της διάταξης του αισθητήρα θέσης

Χρησιμοποιώντας την φιλοσοφία των προηγούμενων πατεντών φτιάχτηκε ένα σύστημα το οποίο μπορεί να ανιχνεύει τον ήλιο.

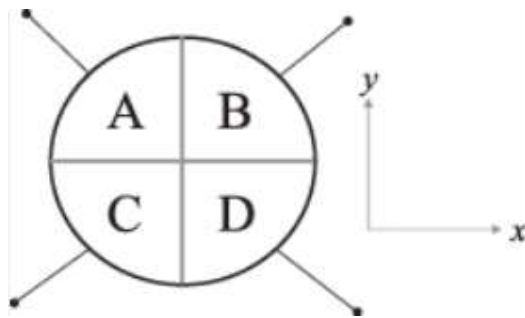
Το σύστημα ανίχνευσης περιέχει τέσσερις φωτοдиодους **BPW34** οι οποίες θα χωρίζονται μεταξύ τους με διαχωριστικές επιφάνειες (όπως φάνηκε και στην δεύτερη πατέντα) για να δημιουργηθούν σκιάσεις έτσι ώστε, εάν ο ανιχνευτής δεν βρίσκεται κάθετα με τις ακτίνες του ήλιου, τουλάχιστον ένας αισθητήρας να μην λαμβάνει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνουν οι υπόλοιποι και να δημιουργείται έτσι ένα σήμα διόρθωσης προκειμένου να στρέφεται το σύστημα στο μέρος που και οι τέσσερις αισθητήρες δέχονται το ίδιο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας.

Επίσης το σύστημα θα περιέχει και κάποια κυκλώματα για υπολογισμό των μαθηματικών σχέσεων (**X, Y, SUM**) με βοήθεια των τελεστικών ενισχυτών **TLC2272** που η χρησιμότητά τους θα αναλυθεί παρακάτω.

#### Η βασική δομή και ο τρόπος λειτουργίας

Η βασική δομή του quadratic detector αποτελείται από τέσσερις ξεχωριστές φωτοдиодους τοποθετημένες σε τετράγωνο ή ορθογώνιο σχήμα. Κάθε φωτοδιόδος τοποθετείται σε ένα τεταρτημόριο της διάταξης. Η ενεργός περιοχή κάθε φωτοδιόδου καλύπτεται συνήθως με ένα φίλτρο που επιτρέπει τη διέλευση μόνο ενός συγκεκριμένου εύρους μήκους κύματος φωτός, εξασφαλίζοντας ότι η συσκευή ανταποκρίνεται κυρίως στην επιθυμητή πηγή φωτός.

Στο σχήμα 3.4 φαίνεται ένα παράδειγμα δομής ενός QD (quadratic detector).



**Εικόνα 3.4.** Δομή ενός quadratic detector. [27]

Όταν το προσπίπτον φως από μια πηγή, όπως ο ήλιος, πέφτει στη συσκευή, η ένταση του φωτός θα είναι διαφορετική σε κάθε τεταρτημόριο με βάση τη θέση της φωτεινής πηγής. Οι φωτοдиодοι στα τεταρτημόρια που βρίσκονται πιο κοντά στην πηγή φωτός θα λαμβάνουν μεγαλύτερη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ οι πιο απομακρυσμένες θα λαμβάνουν μικρότερη.

Οι μεμονωμένες φωτοдиодοι στον ανιχνευτή τεταρτημορίων παράγουν φωτορεύματα ανάλογα με την ποσότητα φωτός που δέχονται. Αυτά τα φωτορεύματα συνδυάζονται και επεξεργάζονται με τη χρήση ηλεκτρικών κυκλωμάτων (όπως ADC) για τον προσδιορισμό της θέσης του ήλιου.

Για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος προσδιορισμός χρειάζεται να γίνουν και κάποιες μαθηματικές πράξεις (με βοήθεια τελεστικών ενισχυτών **TLC2272**) που θα δώσουν στη συνέχεια τα κατάλληλα σήματα εξόδου για να δέχονται και οι τέσσερις φωτοдиодοι την ίδια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας.

Αυτές οι μαθηματικές πράξεις είναι οι εξής:

- **Το άθροισμα των τεσσάρων σημάτων**

$$SUM = A + B + C + D$$

- **Η κανονικοποιημένη συντεταγμένη X**

$$X = \frac{(A + B) - (C + D)}{SUM}$$

- **Η κανονικοποιημένη συντεταγμένη Y**

$$Y = \frac{(A + C) - (B + D)}{SUM}$$

Όταν και οι τέσσερις φωτοдиодοι δέχονται την ίδια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας το σύστημα θα έχει 4 ταυτόσημα φωτορεύματα στην έξοδο που θα έχουν την τιμή 0 και οι κανονικοποιημένες συντεταγμένες X,Y θα ισούνται με το 0. Εάν η θέση του ήλιου μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα αλλάξει τότε η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας δεν θα είναι ίδια σε όλες τις φωτοдиодους με αποτέλεσμα τα σήματα να μην είναι ίσα με μηδέν και θα προκύψει ένα σήμα σφάλματος το οποίο θα κινήσει το σύστημα προς την κατεύθυνση που και οι 4 φωτοдиодοι δέχονται την ίδια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας.

### 3.5 Στάδια κατασκευής του ηλεκτρονικού κυκλώματος του αισθητήρα θέσης

Τα στάδια κατασκευής του κυκλώματος είναι τέσσερα. Τα τρία πρώτα αναφέρονται στην ηλεκτρονική δομή του αισθητήρα ενώ το τέταρτο αναφέρεται στην διαχωριστική επιφάνεια.

#### Πρώτο στάδιο:

Οι φωτοдиодοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

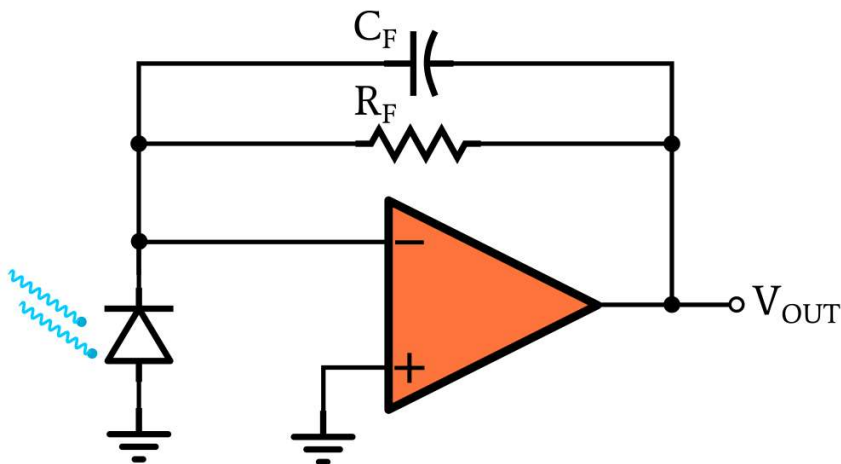
- **Φωτοдиодοι μεγάλης περιοχής:** Η μεγαλύτερη φωτοευαίσθητη περιοχή τους επιτρέπει να συλλαμβάνουν περισσότερο προσπίπτον φως, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ευαισθησία. Μπορούν να συλλέγουν περισσότερα φωτόνια και να παράγουν μεγαλύτερο φωτορεύμα, γεγονός που βελτιώνει τον λόγο σήματος προς θόρυβο. Ωστόσο, οι φωτοдиодοι μεγάλης επιφάνειας έχουν γενικά βραδύτερους χρόνους απόκρισης σε σύγκριση με τις φωτοдиодους μικρής επιφάνειας λόγω της μεγαλύτερης χωρητικότητάς τους (30pF έως 3000pF).
- **Φωτοдиодοι μικρής περιοχής:** Οι συγκεκριμένοι φωτοдиодοι, έχουν μικρότερη φωτοευαίσθητη περιοχή. Χαρακτηρίζονται από τους γρήγορους χρόνους απόκρισης, καθιστώντας τις κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν ανίχνευση και διαμόρφωση υψηλής ταχύτητας. Οι φωτοдиодοι μικρής επιφάνειας έχουν χαμηλότερη χωρητικότητα (από 10pF και κάτω) λόγω της μειωμένης επιφάνειάς τους, η οποία επιτρέπει ταχύτερη συλλογή φορέων φορτίου και ταχύτερη απόκριση. Ωστόσο, η μικρότερη επιφάνειά τους οδηγεί σε χαμηλότερη ευαισθησία σε σύγκριση με τις φωτοдиодους μεγάλης επιφάνειας, περιορίζοντας την απόδοσή τους σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού

Τις περισσότερες φορές γίνεται χρήση ενός ενισχυτή διαντίστασης (transimpedance) έτσι ώστε το ρεύμα φωτοδίοδου να μετατρέπεται σε τάση με τον καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR). Στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτός ο ενισχυτής απαρτίζεται από ένα τελεστικό ενισχυτή με αρνητική ανάδραση μέσω μίας αντίστασης  $R_F$ .

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως στις φωτοδιόδους μεγάλης περιοχής, κατά τον σχεδιασμό ενισχυτών χαμηλού θορύβου πρέπει να δοθεί έμφαση στη μείωση του θορύβου της τάσης εισόδου του τελεστικού ενισχυτή, ενώ στις φωτοδιόδους μικρής περιοχής πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στη μείωση του θορύβου των ρευμάτων εισόδου του τελεστικού ενισχυτή και των παρασιτικών χωρητικότητων.

Στο συγκεκριμένο σύστημα αποφασίστηκε να γίνει χρήση φωτοδίοδων μεγάλης επιφάνειας λόγω της υψηλότερης ευαισθησίας τους. Ακόμα ένας λόγος είναι πως μπορούν να συλλάβουν περισσότερο προσπίπτον φως, επιτρέποντας την ακριβή παρακολούθηση της θέσης του ήλιου καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Έτσι η υψηλότερη ευαισθησία επιτρέπει ακριβείς προσαρμογές στη θέση των ηλιακών συλλεκτών ή των κατόπτρων για τη μεγιστοποίηση της απορρόφησης της ηλιακής ενέργειας.

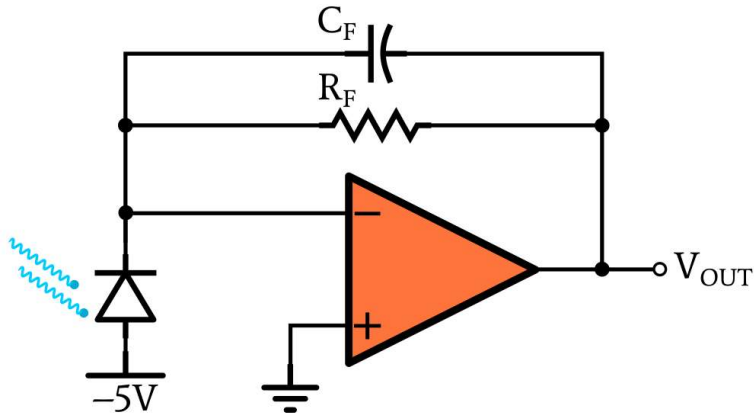
Στην εικόνα 3.5 παρουσιάζεται ένας ενισχυτής για μία φωτοδίοδο μεγάλης περιοχής όταν λειτουργεί σε φωτοβολταϊκή σύνδεση.



**Εικόνα 3.5** Ενισχυτής συνδεδεμένος με φωτοδίοδο σε λειτουργία φωτοβολταϊκής σύνδεσης. [28]

Ο βασικός λόγος της χρήσης του πυκνωτή  $C_F$  είναι για την ελαχιστοποίηση του θορύβου στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή και ακόμη δρα και σαν βαθυπερατό φίλτρο στις υψηλές συχνότητες, καθώς η σύνθετη αντίσταση του  $C_F$  γίνεται πολύ μικρή και παραλληλίζεται με αυτή της  $R_F$  έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση του κέρδους του ενισχυτή με την αύξηση της συχνότητας.

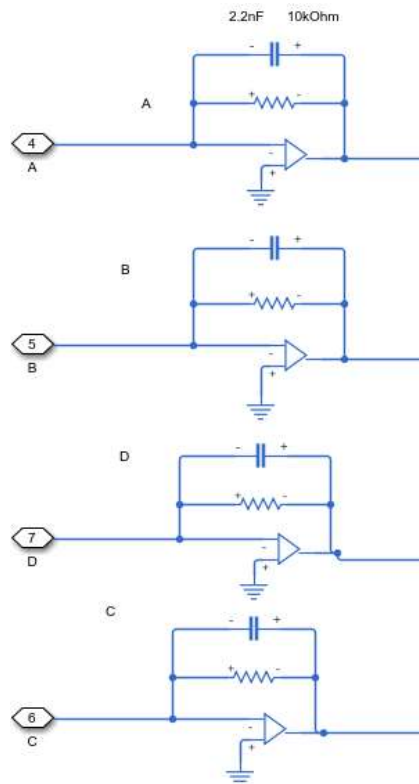
Στην περίπτωση που υπάρχουν απαιτήσεις για πιο ευαίσθητη φωτοδίοδο ή μεγιστοποίηση της ικανότητας του ανιχνευτή να ανταποκρίνεται σε ταχείες μεταβολές της φωτεινότητας τότε χρησιμοποιείται η λειτουργία φωτοαγωγιμότητας στην οποία γίνεται εφαρμογή αντίστροφης τάσης όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.6.



**Εικόνα 3.6.** Ενισχυτής συνδεδεμένος με φωτοδιόδο σε λειτουργία φωτοαγωγίμης σύνδεσης. [29]

Πρέπει να σημειωθεί πως στη συγκεκριμένη περίπτωση αυξάνετε τόσο το ρεύμα διαρροής όσο και ο θόρυβος της φωτοδιόδου.

Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται το πρώτο στάδιο του αισθητήρα quadratic detector που αποτελείτε από 4 ενισχυτές διαντίστασης.



**Εικόνα 3.7.** Το πρώτο στάδιο του αισθητήρα quadratic detector.

**Δεύτερο στάδιο:**

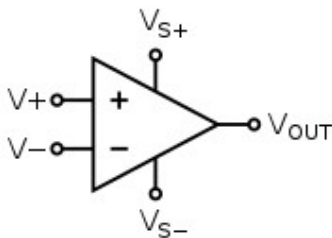
Το δεύτερο στάδιο είναι τα κυκλώματα που αποτελούν τον αισθητήρα και είναι υπεύθυνα για την μετατροπή των παραγόμενων σημάτων από τους ενισχυτές διαντίστασης σε σήματα συντεταγμένων στους άξονες (X,Y). Για να πραγματοποιηθεί αυτό πρέπει να γίνει χρήση ενισχυτών διαφοράς και αθροίσματος οι οποίοι θα υλοποιούν τις πράξεις που χρειάζονται για την σωστή λειτουργία των ζητούμενων κυκλωμάτων.

- **Διαφορικός ενισχυτής**

Ο διαφορικός ενισχυτής είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που ενισχύει τη διαφορά τάσης μεταξύ δύο σημάτων εισόδου, ενώ απορρίπτει οποιαδήποτε τάση κοινού τρόπου. Χρησιμοποιείται συνήθως σε διάφορες εφαρμογές όπου απαιτείται ενίσχυση και απόρριψη θορύβου. Η πρωταρχική λειτουργία ενός διαφορικού ενισχυτή είναι να ενισχύει τη διαφορά μεταξύ δύο τάσεων εισόδου, ακυρώνοντας παράλληλα τυχόν σήματα που είναι κοινά και στις δύο εισόδους.

Επίσης τις περισσότερες φορές είναι το πρώτο ηλεκτρονικό κύκλωμα όταν πρόκειται για σύστημα συλλογής δεδομένων που επεξεργάζεται το σήμα εισόδου του αισθητήρα.

Στην εικόνα 3.8 παρουσιάζεται το σύμβολο του διαφορικού ενισχυτή.



**Εικόνα 3.8.** Σύμβολο διαφορικού ενισχυτή. [30]

Όπου οι  $V_{S+}$  και  $V_{S-}$  είναι οι τάσεις τροφοδοσίας. Συχνά παραλείπονται από το διάγραμμα για λόγους απλότητας.

Η έξοδος του συγκεκριμένου ενισχυτή δίνεται από την παρακάτω μαθηματική πράξη:

$$V_{out} = A(V_{in}^+ - V_{in}^-)$$

Όπου  $A$ : Το μέτρο της ενίσχυσης του διαφορικού ενισχυτή.

Να σημειωθεί πως η διαφορική ενίσχυση του διαφορικού ενισχυτή προσδιορίζεται, αν θεωρήσουμε αντίθετα σήματα στις εισόδους του  $V_{in}^+ \neq V_{in}^-$  ενώ, η ενίσχυση κοινού τρόπου του διαφορικού ενισχυτή προσδιορίζεται αν θεωρήσουμε ίδια σήματα στις εισόδους του  $V_{in}^+ = V_{in}^-$ .

Στην πράξη, ωστόσο, το κέρδος δεν είναι εντελώς ίσο για τις δύο εισόδους. Αυτό σημαίνει, για παράδειγμα, ότι εάν  $V_{in}^+$  και  $V_{in}^-$  είναι ίσες, η έξοδος δεν θα είναι μηδενική, όπως θα ήταν στην ιδανική περίπτωση. Μια πιο ρεαλιστική έκφραση για την έξοδο ενός διαφορικού ενισχυτή περιλαμβάνει επομένως έναν δεύτερο όρο:

$$V_{out} = A(V_{in}^+ - V_{in}^-) + A_c \cdot \frac{V_{in}^+ + V_{in}^-}{2}$$

Όπου  $A_c$ : ονομάζεται κέρδος κοινής λειτουργίας του ενισχυτή.



Καθώς οι διαφορικοί ενισχυτές χρησιμοποιούνται συχνά για τον μηδενισμό του θορύβου ή των τάσεων πόλωσης που εμφανίζονται και στις δύο εισόδους, είναι συνήθως επιθυμητό μία χαμηλή ενίσχυση κοινού τρόπου.

Ο λόγος απόρριψης κοινού τρόπου (**CMRR**), που συνήθως ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της ενίσχυσης του διαφορικού τρόπου και του κέρδους κοινού τρόπου, δείχνει την ικανότητα του ενισχυτή να ακυρώνει με ακρίβεια τάσεις που είναι κοινές και στις δύο εισόδους. Ο λόγος απόρριψης κοινού τρόπου ορίζεται ως εξής:

$$CMRR = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{A}{A_c} \right)^2 = 20 \cdot \log_{10} \frac{A}{|A_c|}$$

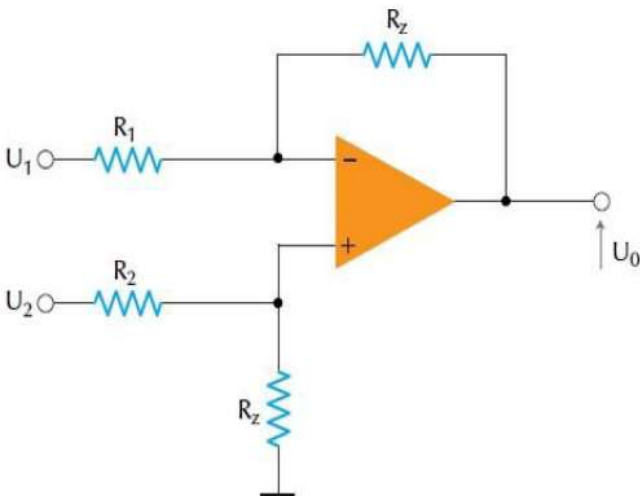
Σε έναν απόλυτα συμμετρικό διαφορικό ενισχυτή, το  $A_c$  είναι μηδέν και το **CMRR** είναι άπειρο.

#### • Υλοποίηση του δεύτερου σταδίου

Επειδή όλα αυτά που προαναφέρθηκαν μπορεί να τα κάνει και ένας τελεστικός ενισχυτής, για την υλοποίηση του παρόντος κυκλώματος θα χρησιμοποιηθεί ο τελεστικός ενισχυτής **TLC2272**.

Θα χρησιμοποιηθεί λοιπόν ο συγκεκριμένος τελεστικός ενισχυτής σε συνδεσμολογία που ενισχύει τη διαφορά και με τις αντιστάσεις  $R_z, R_1$  και  $R_2$  οι οποίες είναι όλες ίσες.

Η συγκεκριμένη δομή του τελεστικού ενισχυτή φαίνεται στην εικόνα 3.9.



**Εικόνα 3.9.** Τελεστικός ενισχυτής σε συνδεσμολογία που ενισχύει τη διαφορά.

Ο ανιχνευτής **QP50-6-TO8** έχει συνδυαστεί με ένα κύκλωμα το οποίο είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό των  $\Delta_x, \Delta_y$  και το **SUM**. Οι μαθηματικοί τύποι που υλοποιούν αυτούς τους υπολογισμούς είναι οι εξής:

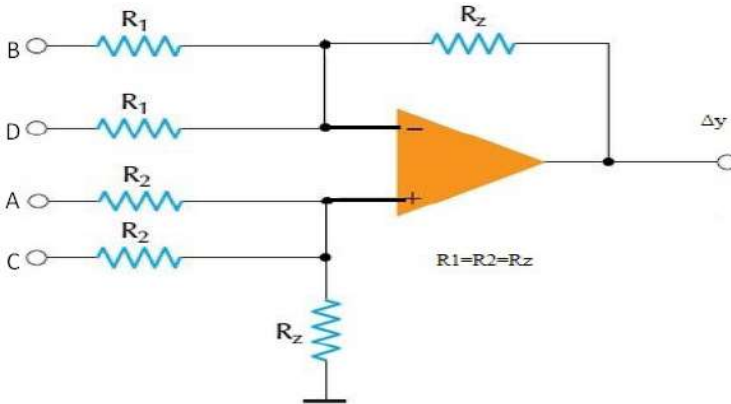
$$\Delta_x = (A + B) - (C + D)$$

$$\Delta_y = (A + C) - (B + D)$$

$$SUM = A + B + C + D$$

Παρατηρείται πως εκτός από την πράξη της αφαίρεσης χρειάζεται να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα και η πράξη της πρόσθεσης μεταξύ δύο αριθμών προκειμένου να δημιουργήσουμε τα αποτελέσματα των  $\Delta x$  και  $\Delta y$ .

Στην εικόνα 3.10 φαίνεται το κύκλωμα υλοποίησης του  $\Delta y$ .

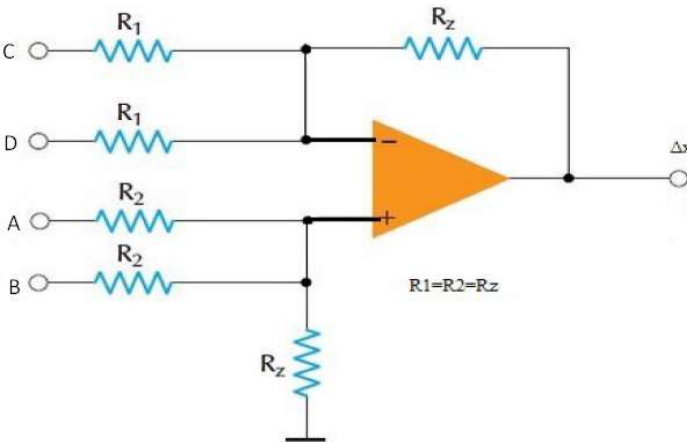


**Εικόνα 3.10.** Κύκλωμα  $\Delta y$ .

Από το Θεώρημα της Επαλληλίας υπολογίζουμε ότι:

$$\Delta y = A - B + C - D = (A + C) - (B + D)$$

Στην εικόνα 3.11 φαίνεται το κύκλωμα υλοποίησης του  $\Delta x$ .



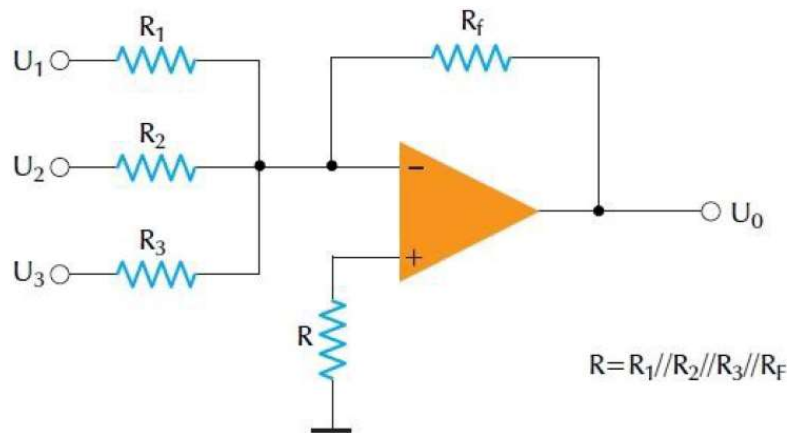
**Εικόνα 3.11.** Κύκλωμα  $\Delta x$ .

Από το Θεώρημα της Επαλληλίας υπολογίζουμε ότι:

$$\Delta x = A - C + B - D = (A + B) - (C + D)$$

Στην εικόνα 3.12 παρουσιάζεται το κύκλωμα που παράγει το αποτέλεσμα του SUM αλλά χρησιμοποιεί τρεις εισόδους αντί για 4. Επίσης να σημειωθεί πως  $R_f = R_1 = R_2 = R_3$ .

Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα



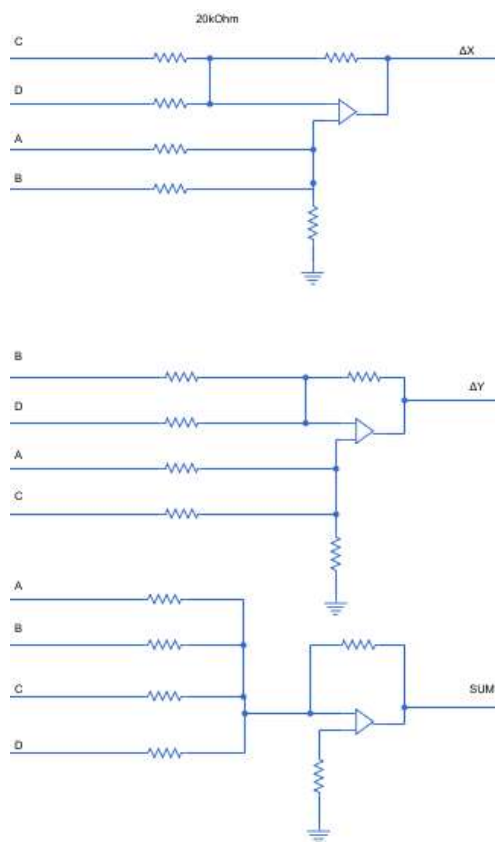
**Εικόνα 3.12.** Κύκλωμα αθροιστή.

Υπολογίζεται ότι:

$$U_0 = -(U_1 + U_2 + U_3)$$

Στην εικόνα 3.13 φαίνεται η ολοκλήρωση του δεύτερου σταδίου του κυκλώματος quadratic detector.

Παρατηρείται πως αποτελείται από δύο ενισχυτές διαφορικής ενίσχυσης για τον υπολογισμό των  $\Delta x$  και  $\Delta y$  και έναν ενισχυτή αθροίσματος για τον υπολογισμό του **SUM**.



**Εικόνα 3.13.** Δεύτερο στάδιο του κυκλώματος του αισθητήρα quadratic detector.

### Τρίτο στάδιο:

Στο τρίτο στάδιο υπάρχει μία διάταξη η οποία είναι υπεύθυνη για την επεξεργασία των τιμών που παράγονται από τον αισθητήρα.

Η μονάδα που θα χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη διπλωματική είναι ένας μικροελεγκτής AVR εγκατεστημένος πάνω στην πλατφόρμα Arduino MEGA 2560. Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής είναι μια μονάδα επεξεργασίας και πληροφορίας που η δειγματοληψία της πληροφορίας δεν μπορεί να διαχειριστεί αρνητικά επίπεδα τάσης.

Η συγκεκριμένη πλατφόρμα περιέχει 16 κανάλια στα οποία μπορεί το σήμα να μετατραπεί από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC) με εύρος ανάλυσης 10-bit. Δηλαδή οι τάσεις εισόδου που είναι από 0V έως 3,3V ή 5V μεταφράζονται σε ακέραιες τιμές μεταξύ των 0 έως 1023.

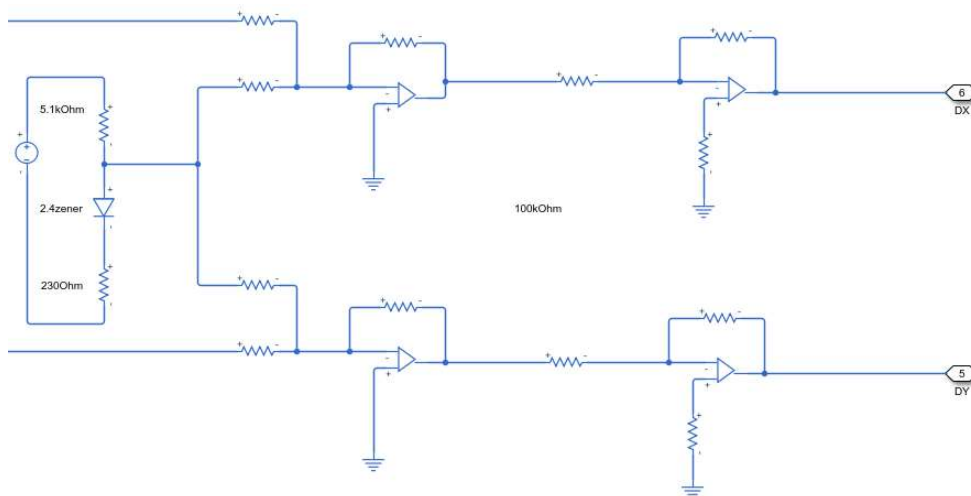
Η διακριτική ικανότητα της συγκεκριμένης πλατφόρμας είναι:

$$Q = \frac{5 \text{ volts}}{1024 \text{ μονάδες}} = 4.9 \frac{\text{mV}}{\text{μονάδα}}$$

Μία συμμετρική τροφοδοσία τροφοδοτεί τον αισθητήρα και η τάση εξόδου του θα κυμαίνεται από -2V έως 2V, ανάλογα με την θέση του ήλιου στον ορίζοντα, το πόσο ηλιακή ακτινοβολία δέχεται ο αισθητήρας και το πόσο ευαίσθητο είναι το κύκλωμα. Η ευαισθησία του κυκλώματος ρυθμίζεται από τις αντιστάσεις  $R_f$  που υπάρχουν στους ενισχυτές διαντίστασης.

Καθώς όπως προαναφέρθηκε δεν μπορεί ο ADC να διαχειριστεί αρνητικά επίπεδα τάσεων θα χρειαστεί να αυξήσουμε κατά 2.5V την τάση εξόδου.

Το κύκλωμα της εικόνας 3.14 πετυχαίνει αυτή την αύξηση της τάσης εξόδου. Όπως φαίνεται αποτελείται από κατάλληλο κύκλωμα αθροιστή, μία τάση αναφοράς που είναι σταθερή με μία διάοδο Zener και έναν αντιστροφέα με 180 μοίρες φάση προκειμένου να είναι η τάση εξόδου σε φάση με την τάση εισόδου.



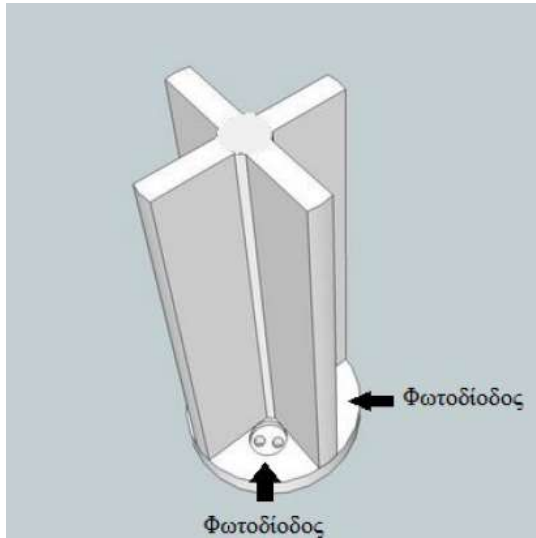
**Εικόνα 3.14.** Κύκλωμα που επιτυγχάνει την αύξηση της τάσης εξόδου.

Αυτό ήταν και το τελευταίο στάδιο της ανάλυσης του αισθητήρα, όσο αφορά την ηλεκτρονική του δομή.

### Τέταρτο στάδιο:

Στο τέταρτο στάδιο αναλύεται η διαχωριστική επιφάνεια του αισθητήρα. Έχει κομβικό ρόλο στη δομή του αισθητήρα καθώς είναι η αιτία δημιουργίας σκιάσεων και με αυτό τον τρόπο καθορίζεται η ακρίβεια του αισθητήρα σε σχέση με την κατακόρυφη ηλιακή ακτινοβολία.

Στην εικόνα 3.15 παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο του αισθητήρα.

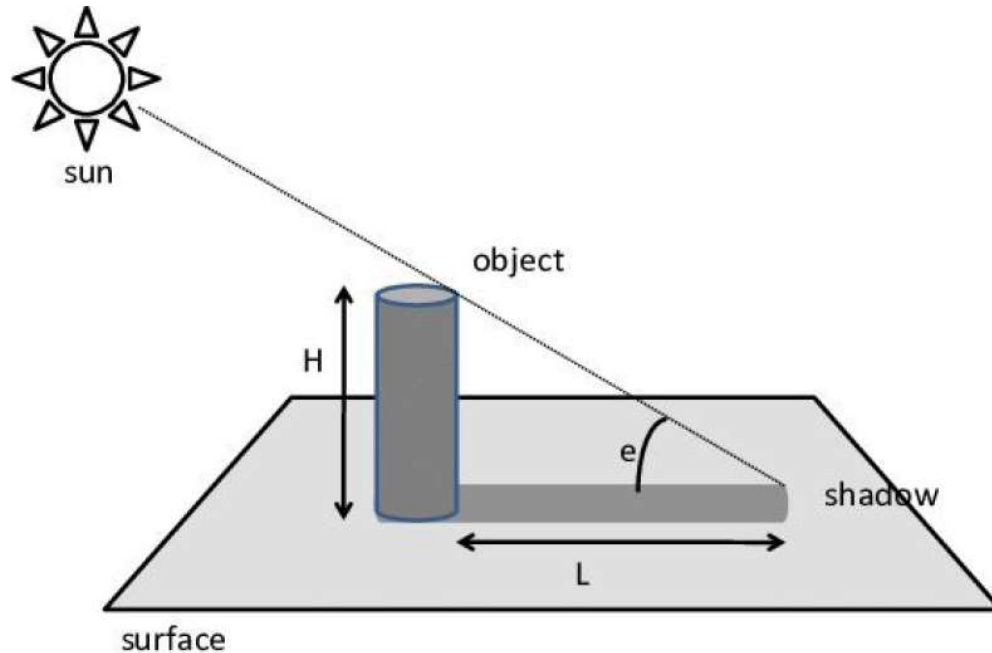


**Εικόνα 3.15.** Τρισδιάστατο μοντέλο του αισθητήρα.

Κατά την κατασκευή της PCB πλακέτας οι φωτοδιόδοι τοποθετήθηκαν σε απόσταση 2cm η μία από την άλλη για λόγους ευκολότερης υλοποίησης της PCB πλακέτας. Άρα συμπεραίνουμε πως αυτό που έχει μείνει για να μεταβληθεί και να επηρεάσει την ακρίβεια του αισθητήρα ως προς την κατακόρυφη ηλιακή ακτινοβολία είναι το ύψος της διαχωριστικής επιφάνειας.

Γνωρίζοντας πως όταν η θέση του ήλιου είναι κάθετη ως προς τον αισθητήρα, οι τέσσερις φωτοδιόδοι δέχονται το ίδιο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας. Στην περίπτωση που η θέση του ήλιου είναι  $\neq 90$  μοίρες τότε τουλάχιστον μία φωτοδίοδος δεν θα δέχεται το ίδιο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας με τις υπόλοιπες.

Με βάση την εικόνα 3.16 μπορεί να υπολογιστεί το ζητούμενο ύψος της διαχωριστικής επιφάνειας.



Εικόνα 3.16. Ανάλυση για τον υπολογισμό του ύψους της διαχωριστικής επιφάνειας.

Το πάχος της διαχωριστικής επιφάνειας είναι 1cm.

Τα δεδομένα είναι τα εξής:

- $L = 2cm - 1cm = 1cm$
- Η απόκλιση σε σχέση με την κατακόρυφη ακτινοβολία του ήλιου είναι 5 μοίρες.  
Άρα όταν ο ήλιος είναι κάθετος με τη διαχωριστική επιφάνεια σχηματίζει γωνία 90 μοιρών και εφόσον η μέγιστη απόκλιση που θα έχει είναι 5 μοίρες προκύπτει ότι:  
$$e = 90^\circ - 5^\circ \Rightarrow e = 85^\circ$$

Χρησιμοποιώντας τον τύπο που προκύπτει από το σχήμα 40 υπολογίζεται το ύψος της διαχωριστικής επιφάνειας.

$$L = \frac{H}{\tan(e)} \Rightarrow H \geq L \cdot \tan(e) \Rightarrow H \geq 0.01 \cdot \tan(85) \Rightarrow H \geq 11.4cm \Rightarrow H = 12cm$$

Αξίζει να σημειωθεί πως δεν είναι εφικτό να υπάρξει απόκλιση μικρότερη της 1 μοίρας καθώς το ύψος της διαχωριστικής επιφάνειας σχεδόν θα πενταπλασιαστεί. Για την ύπαρξη της συγκεκριμένης απόκλισης θα έπρεπε οι φωτοдиодοι να τοποθετηθούν κολητά με τη διαχωριστική επιφάνεια.

#### 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Κυβερνοφυσικά Συστήματα & Ψηφιακά Δίδυμα (Cyber Physical Systems & Digital Twins)

Στο παρόν κεφάλαιο λοιπόν, θα πραγματοποιηθεί μία μικρή ανάλυση των κυβερνοφυσικών συστημάτων (CPS) και των ψηφιακών διδύμων (DTs), εν συνεχεία θα γίνει μία συσχέτιση μεταξύ τους και στο τέλος θα εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα. [44]

#### 4.1 Εισαγωγή

Με την συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας πάνω στα συστήματα συλλογής δεδομένων (Data-Acquisition Systems), στο κομμάτι της τεχνολογίας της πληροφορίας (Information Technology (IT)) αλλά και στις τεχνολογίες δικτύων (network technologies), η πλειοψηφία των κατασκευαστικών ενεργειών ενός συστήματος οδεύουν στην ψηφιοποίησή τους.

Με τη συγκεκριμένη ψηφιοποίηση επιτυγχάνεται ένας έξυπνος τρόπος κατασκευής ενός συστήματος που ο κεντρικός πυλώνας και ο πυρήνας για την υλοποίηση αυτού του τρόπου είναι η κατασκευή του κυβερνοφυσικού συστήματος (**Cyber Physical System (CPS)**) και των ψηφιακών διδύμων (**Digital Twins (DTs)**).

#### 4.2 Ανάλυση Κυβερνοφυσικών Συστημάτων

Η σημερινή έρευνα σχετικά με τα **CPS** επικεντρώνεται κυρίως σε συζητήσεις σχετικά με την έννοια, την αρχιτεκτονική, τις τεχνολογίες και τις προκλήσεις, ενώ οι περιπτώσεις **CPS** στο πρακτικό κομμάτι της μηχανικής βρίσκονται σε πολύ χαμηλό στάδιο. Σε σύγκριση με τα ενσωματωμένα συστήματα, το IoT (Internet of Things), τους αισθητήρες και άλλες τεχνολογίες, τα **CPS** είναι πιο θεμελιώδη, καθώς δεν αναφέρονται άμεσα σε προσεγγίσεις υλοποίησης ή συγκεκριμένες εφαρμογές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα **CPS** να μοιάζουν περισσότερο με μια επιστημονική κατηγορία παρά με μια κατηγορία μηχανικής.

Η ουσία των **CPS** είναι η προσθήκη νέων δυνατοτήτων στα φυσικά συστήματα με τη χρήση υπολογισμών και επικοινωνίας, τα οποία αλληλεπιδρούν εντατικά με τις φυσικές διεργασίες.

Η αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο και η αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ του κυβερνοχώρου και του φυσικού κόσμου επιτρέπουν τις λειτουργίες των **CPS**.

- **Περιγραφή του τρόπου λειτουργίας**

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί πως τα **CPS** ενσωματώνουν τεχνολογίες **3C** για να εξοπλίσουν τις φυσικές διεργασίες με τις εξής βασικές λειτουργίες:

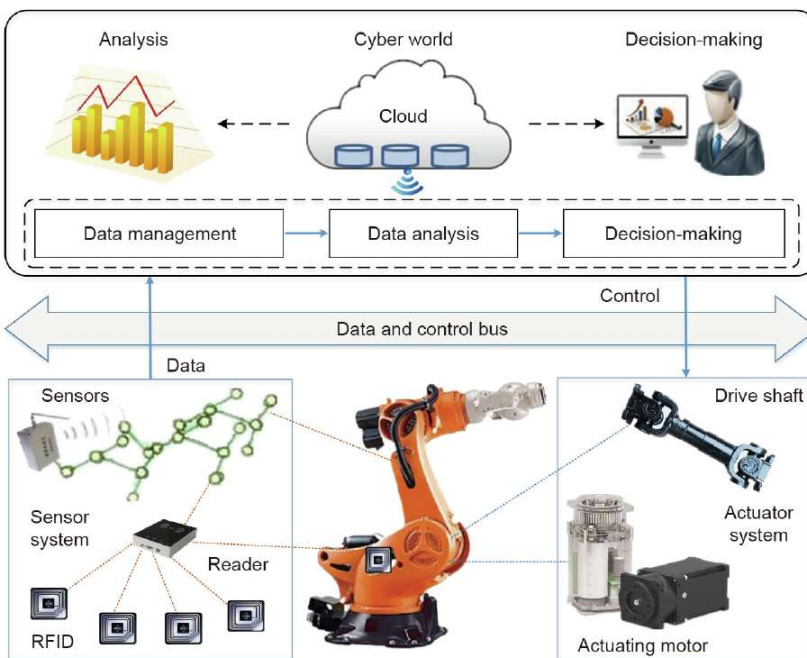
- Ακριβή έλεγχο.
- Απομακρυσμένη συνεργασία.
- Αυτόνομη διαχείριση.

Να σημειωθεί πως ο όρος **3C** είναι μια συντομογραφία που αντιπροσωπεύει τη σύγκλιση τριών τομέων και συγκεκριμένα τον τομέα των υπολογιστών, της επικοινωνίας και των ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης.

Τα **CPS** είναι στενά συνδεδεμένα με τις φυσικές διεργασίες και η νοημοσύνη τους προέρχεται από τα δεδομένα. Οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές είναι απαραίτητοι για την αλληλεπίδραση με τον φυσικό κόσμο για την ανταλλαγή δεδομένων, η οποία αποτελεί το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των **CPS**, καθώς είναι υπεύθυνοι για την ανίχνευση των συνθηκών από τις φυσικές μηχανές και το περιβάλλον και την εκτέλεση εντολών ελέγχου.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1, μέσω πολλαπλών αισθητήρων κατανεμημένων στις φυσικές συσκευές και στο περιβάλλον, η μεγάλης κλίμακας κατανεμημένη απόκτηση δεδομένων (π.χ. ιδιότητες υλικών, απόδοση σε πραγματικό χρόνο και περιβαλλοντικές συνθήκες) και οι ταυτοποιήσεις καταστάσεων πραγματοποιούνται για να καταστεί δυνατή η αλληλεπίδραση μεταξύ του κυβερνοχώρου και του φυσικού κόσμου.

Μέσω της διαχείρισης, επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων στον κυβερνοχώρο, παράγονται εντολές ελέγχου με βάση προκαθορισμένους κανόνες και τη σημασιολογική προδιαγραφή ελέγχου. Τα αποτελέσματα ανατροφοδοτούνται στους ενεργοποιητές, οι οποίοι εκτελούν λειτουργίες σύμφωνα με τις εντολές ελέγχου προκειμένου να προσαρμοστούν στις αλλαγές. Ο διάυλος δεδομένων και ελέγχου παρέχει υποστήριξη για επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Με τους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές, οποιασδήποτε αλλαγές στη φυσική διαδικασία (π.χ. συμπεριφορά, συνθήκες ή απόδοση) προκαλούν αλλαγές στον κυβερνοχώρο και αντίστροφα. Ως εκ τούτου, οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές μπορούν να θεωρηθούν ως τα βασικά στοιχεία των CPS.



Εικόνα 4.1. Αναλυτική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας των CPS. [31]

### 4.3 Ανάλυση Ψηφιακών Διδύμων

Για την επίλυση όλο και πιο σύνθετων προβλημάτων, όπως για παράδειγμα στα μηχανικά συστήματα, χρησιμοποιούνται τα **DTs**. Τα **DTs** έχουν επίσης υιοθετηθεί και χρησιμοποιούνται σε διάφορους κλάδους όπως στο σχεδιασμό συστημάτων, στο σχεδιασμό των γραμμών παραγωγής στη βιομηχανία και στη βελτιστοποίηση των συστημάτων.

Επομένως αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα **DTs** να είναι κάτι σαν μηχανική κατηγορία.

Σκοπός των **DTs** είναι να παρέχουν μια ολοκληρωμένη φυσική και λειτουργική περιγραφή ενός εξαρτήματος, προϊόντος ή συστήματος. Το πρώτο και σημαντικότερο βήμα είναι η δημιουργία εικονικών μοντέλων υψηλής αξιοπιστίας για τη ρεαλιστική αναπαραγωγή των γεωμετριών, των φυσικών ιδιοτήτων, των συμπεριφορών και των κανόνων του φυσικού κόσμου.

Ακόμη με τα εικονικά μοντέλα, μπορούν να προσομοιώσουν τη χωροχρονική τους κατάσταση, τις συμπεριφορές, τις λειτουργίες και άλλα.

Με άλλα λόγια, τα εικονικά μοντέλα και τα φυσικά συστήματα έχουν παρόμοια εμφάνιση όπως ακριβώς και τα δίδυμα, και τις ίδιες συμπεριφορές όπως ένα είδωλο.



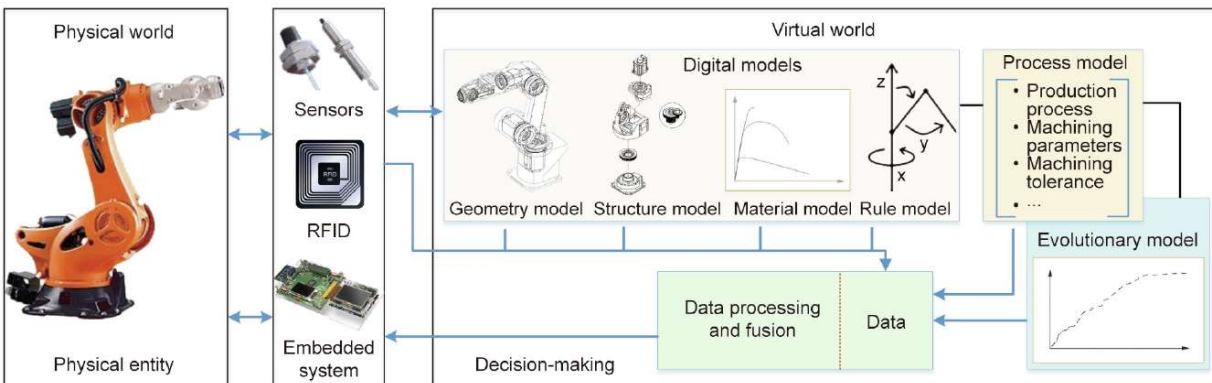
### • Περιγραφή του τρόπου λειτουργίας

Η βασική ιδέα του DTs είναι η δημιουργία ενός ψηφιακού αντιγράφου (εικονικών μοντέλων) για φυσικές οντότητες με σκοπό την προσομοίωση και την αποτύπωση της κατάστασης και της συμπεριφοράς τους μέσω της μοντελοποίησης και την ανάλυσης της προσομοίωσης, καθώς και την πρόβλεψη και τον έλεγχο των μελλοντικών καταστάσεων και συμπεριφορών τους μέσω της ανατροφοδότησης.

Δεδομένου ότι η κατάσταση, οι συμπεριφορές και οι ιδιότητες του φυσικού κόσμου αλλάζουν δυναμικά, συνεχώς παράγονται, χρησιμοποιούνται και αποθηκεύονται όλα τα είδη δεδομένων από την αρχή μέχρι και την ολοκλήρωση του συστήματος.

Το DT ενσωματώνει ολόκληρα στοιχεία και ολόκληρα τα δεδομένα της διαδικασίας για να διασφαλίσει τη συνοχή. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2, τα μοντέλα που ενσωματώνουν τη γεωμετρία, τη δομή, τις ιδιότητες των υλικών, τους κανόνες, τη διαδικασία κ.ο.κ. επιτρέπουν την ψηφιοποίηση και την οπτικοποίηση του συστήματος παραγωγής και της διαδικασίας. Σε συνδυασμό με την ανάλυση δεδομένων, ένα DT επιτρέπει στους κατασκευαστές να κάνουν ακριβέστερες προβλέψεις, ορθολογικές αποφάσεις και ενημερωμένη παραγωγή.

Επιπλέον, κατά τη διαδικασία της συνεξέλιξης των μοντέλων και των φυσικών διεργασιών, τα μοντέλα παράγουν νέα δεδομένα. Τα μοντέλα χρησιμεύουν ως μηχανισμός επικοινωνίας και καταγραφής για να βοηθήσουν στην ερμηνεία της συμπεριφοράς των μηχανών ή των συστημάτων και στην πρόβλεψη της μελλοντικής τους κατάστασης με βάση τα δεδομένα πραγματικού χρόνου, τα ιστορικά δεδομένα, την εμπειρία και τη γνώση, καθώς και τα δεδομένα από τα μοντέλα. Ως εκ τούτου, τα μοντέλα και τα δεδομένα μπορούν να θεωρηθούν ως τα βασικά στοιχεία του DT.



Εικόνα 4.2. Αναλυτική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας των DTs. [32]

### 4.4 Διαφορές των Κυβερνοφυσικών Συστημάτων & των Ψηφιακών Διδύμων

Σε σύγκριση με τα DTs, τα CPS δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στις ισχυρές υπολογιστικές και επικοινωνιακές δυνατότητες του κυβερνοχώρου, οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα του φυσικού κόσμου.

Σε σύνθεση, τόσο τα CPS όσο και τα DTs περιλαμβάνουν τον φυσικό κόσμο και τον κόσμο του κυβερνοχώρου. Μέσω της κυβερνο-φυσικής αλληλεπίδρασης και του ελέγχου, και τα δύο επιτρέπουν την ακριβή και καλύτερη διαχείριση και λειτουργία του φυσικού κόσμου.

Ωστόσο, όσον αφορά τον κυβερνοχώρο, τα CPS και τα DTs εστιάζουν σε διαφορετικές λειτουργίες, οι οποίες είναι οι εξής:

- Τα DTs εστιάζουν περισσότερο στα εικονικά μοντέλα, τα οποία επιτρέπουν την αντιστοιχία ένα προς ένα σε ένα DT.
- Τα CPS δίνουν έμφαση στις δυνατότητες της 3C, οι οποίες οδηγούν σε αντιστοιχία ένα προς πολλά.

Όσον αφορά την υλοποίηση των λειτουργιών των CPS και των DTs, οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές επιτρέπουν την αλληλεπίδραση μεταξύ φυσικού και κυβερνοχώρου για την ανταλλαγή δεδομένων και ελέγχου. Συγκριτικά, τα μοντέλα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε ένα DT για να βοηθήσουν στην ερμηνεία και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του φυσικού κόσμου με βάση διάφορα δεδομένα.

Έτσι, οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές μπορούν να θεωρηθούν ως τα βασικά στοιχεία στα CPS, ενώ τα μοντέλα και τα δεδομένα είναι τα βασικά στοιχεία σε ένα DT.

#### 4.5 Συμπεράσματα

Έχοντας ολοκληρώσει με την περιγραφή και την ανάλυση των CPS και των DTs συμπεραίνεται πως στην παρούσα διπλωματική γίνεται χρήση του DT καθώς, όπως θα αναλυθεί και στα επόμενα κεφάλαια το σύστημα solar tracking θα μοντελοποιηθεί στο περιβάλλον του Simulink και θα συλλεχθούν τα δεδομένα και τα αποτελέσματα από την διαδικασία της προσομοίωσης και της πειραματικής διαδικασίας.

Επομένως γίνεται εμφανές πως η υλοποίηση του ηλιακού ανιχνευτή που θα παρουσιασθεί στα επόμενα κεφάλαια περιλαμβάνει όλα τα επιμέρους δομικά στοιχεία που πρέπει να έχει ένα DT.

## 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : Σχεδιασμός & Προγραμματισμός Βάσει Μοντελοποίησης (Model-Based Design & Programming)

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, αρχικά θα γίνει μία εισαγωγή για το Model-Based Design (MBD) και το Model-Based Programming (MBP), στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα στάδια του MBD και θα γίνει μία μικρή ανάλυση του σταδίου Hardware In the Loop (HIL). Τέλος θα αναλυθεί το στάδιο του MBP. [47]

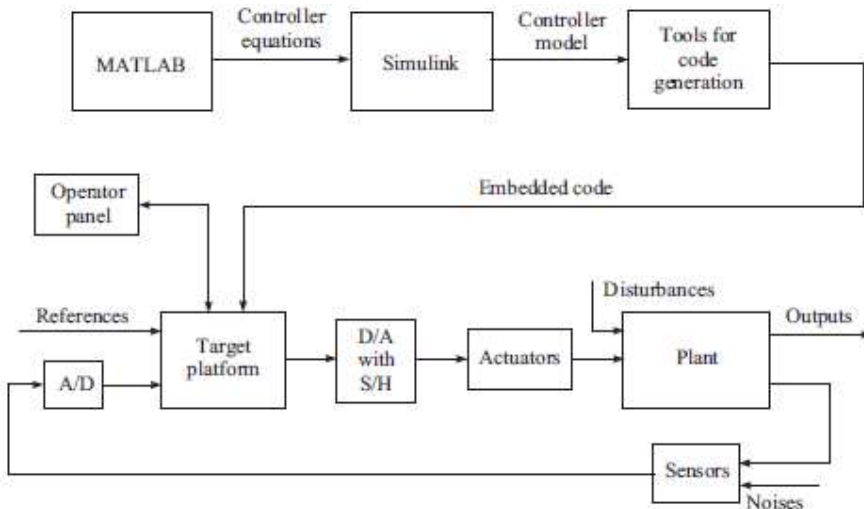
### 5.1 Εισαγωγή

Το Model-Based Design (MBD) και το Model-Based Programming (MBP) είναι καινοτόμες προσεγγίσεις που φέρνουν επανάσταση στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη πολύπλοκων συστημάτων. Αυτές οι μεθοδολογίες αξιοποιούν την δύναμη που έχουν οι προσομοιώσεις στον υπολογιστή και τις γραφικές ικανότητες στο περιβάλλον προγραμματισμού για να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα, την αξιοπιστία και την ποιότητα του σχεδιασμού συστημάτων και της ανάπτυξης λογισμικού.

Ο σχεδιασμός συστημάτων ελέγχου βασισμένα στις αρχές MBD και MBP θα βασισθεί στα εργαλεία ανάπτυξης εφαρμογών MATLAB/Simulink και περιγράφεται απλουστευμένα με τις εξής διαδικασίες:

- Η διαδικασία του σχεδιασμού του ελεγκτή.
- Η διαδικασία της δημιουργίας του κώδικα για τον ελεγκτή.
- Η διαδικασία της ενσωμάτωσης του κώδικα στο υλικό-hardware.

Οι παραπάνω διαδικασίες παρουσιάζονται στην εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1. Σχεδιασμός συστημάτων ελέγχου με το MATLAB. [37]

Η δομή και οι παράμετροι του ελεγκτή διακριτού χρόνου καθορίζονται στο MATLAB με βάση τα μοντέλα της διεργασίας (plant), των αισθητήρων και των ενεργοποιητών που ενσωματώνουν διαταραχές και θορύβους. Για το σκοπό αυτό ο σχεδιαστής χρησιμοποιεί εργαλείοθκες γενικού ή ειδικού σκοπού που παρέχει το MatLab (θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο). Η περιγραφή του ελεγκτή λαμβάνεται με τη μορφή εξισώσεων χώρου καταστάσεων διακριτού χρόνου ή συναρτήσεων μεταφοράς. Ένας μοντελοποιημένος ελεγκτής, με βάση αυτή την περιγραφή, κατασκευάζεται στο Simulink με τη χρήση κατάλληλων δομικών στοιχείων. Χρησιμοποιώντας τα εργαλεία για τη δημιουργία κώδικα (Simulink® Coder™ και Embedded Coder® ή HDL Coder™) παράγεται αυτόματα ο κώδικας C και C++ για την λειτουργία του ελεγκτή και ενσωματώνεται στο hardware του συστήματος.

## 5.2 Στάδια του Σχεδιασμού Βάσει Μοντελοποίησης

Η διαδικασία σχεδιασμού (**design process**) είναι το βασικότερο κομμάτι της προσέγγισης Model-Based Design και μπορεί να περιλαμβάνει τα ακόλουθα κύρια στάδια:

- **Plant modeling**

Το μοντέλο της εγκατάστασης (**plant model**) προκύπτει με θεωρητική μοντελοποίηση βάσει των πρώτων (φυσικών) αρχών ή με πειραματική μοντελοποίηση (experimental modeling) (ταυτοποίηση) με τη χρήση μετρημένων μεταβλητών εισόδου και εξόδου. Γενικά, το μοντέλο της εγκατάστασης μπορεί να περιλαμβάνει τμήματα που περιγράφονται από μη γραμμικές αλγεβρικές ή διαφορικές εξισώσεις. Για τους σκοπούς του σχεδιασμού ελεγκτών, οι εξισώσεις αυτές γραμμικοποιούνται και διακριτοποιούνται. Συνήθως το plant είναι ένα μη γραμμικό δυναμικό σύστημα πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων (πολυμεταβλητό) υψηλής τάξης, οι ιδιότητες του οποίου καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί από το σύστημα κλειστού βρόχου.

- **Controller design**

Η σύγχρονη θεωρία ελέγχου προσφέρει μια πλούσια ποικιλία μεθόδων για το σχεδιασμό ελεγκτών. Αυτές περιλαμβάνουν γραμμικούς και μη γραμμικούς ελεγκτές που σχεδιάζονται με τη χρήση διαφορετικών τεχνικών. Σκοπός αυτών των ελεγκτών είναι να εξασφαλίζουν την ακριβή παρακολούθηση των εντολών αναφοράς παρουσία ντετερμινιστικών και στοχαστικών διαταραχών και μεταβολών των παραμέτρων της εγκατάστασης.

- **Software-in-the-loop simulation (SIL)**

Στη δοκιμή που πραγματοποιείται στο στάδιο του **SIL** το hardware του συστήματος αναπαρίσταται εξ ολοκλήρου από μοντέλα λογισμικού στο Simulink. Αρχικά, τα μοντέλα λογισμικού μπορεί να λειτουργούν με πλήρη (διπλή) ακρίβεια κινούμενης υποδιαστολής (**double precision floating point**), αλλά σε μεταγενέστερο στάδιο μπορούν να λαμβάνουν υπόψη τη διαφορετική ακρίβεια των αισθητήρων, των ενεργοποιητών και του ελεγκτή και να υλοποιούνται και σε αριθμητική ακεραίων (**integer**), ανάλογα με τους διαθέσιμους πόρους hardware του χρησιμοποιούμενου μικροελεγκτή, τα επιτρεπόμενα επίπεδα θορύβου από πράξεις λόγω προσεγγίσεων και την επιθυμητή ταχύτητα εκτέλεσης του λογισμικού. Το λειτουργικό λογισμικό (operational software) παράγεται αυτόματα από τα μοντέλα Simulink και δοκιμάζεται σε περιβάλλον προσομοίωσης μη πραγματικού χρόνου για διαταραχές και θορύβους.

- **Rapid control prototyping**

Ο στόχος του rapid control prototyping είναι η εξομοίωση (**emulation**) ελεγκτή σε πραγματικό χρόνο με διαφορετικό hardware από το hardware της τελικής χρήσης. Χρησιμοποιείται για τη δοκιμή αλγορίθμων ελέγχου λογισμικού σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου πριν από την υλοποίηση του κώδικα σε ενσωματωμένο επεξεργαστή. Η εγκατάσταση, οι ενεργοποιητές και οι αισθητήρες μπορούν στη συνέχεια να είναι πραγματικοί. Το rapid control prototyping μπορεί να μειώσει τα μοντέλα και τους αλγορίθμους ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις φθηνότερου hardware μαζικής παραγωγής και να βοηθήσει στον καθορισμό των προδιαγραφών για το τελικό hardware και software.

- **Processor-in-the-loop (PIL) simulation**

Όταν ο ενσωματωμένος επεξεργαστής (**embedded processor**) πραγματικού χρόνου είναι διαθέσιμος, το λειτουργικό λογισμικό δοκιμάζεται στον ενσωματωμένο επεξεργαστή πραγματικού χρόνου, χρησιμοποιώντας προσομοιωμένο hardware. Αυτή η δοκιμή PIL επικυρώνει τις λειτουργίες και τις επιδόσεις του λογισμικού. Σε αυτή τη φάση της δοκιμής, λαμβάνονται επίσης εκτιμήσεις της απόδοσης του επεξεργαστή, της μνήμης και του χρονισμού.

- **Hardware-in-the-loop (HIL) simulation**

Μετά τη δοκιμή **PIL**, το λειτουργικό λογισμικό και το πρωτότυπο υλικό είναι έτοιμα για τη δοκιμή **HIL**, η οποία χρησιμοποιείται για την επαλήθευση της ολοκληρωμένης λειτουργικής και επιχειρησιακής απόδοσης. Ακόμη επαληθεύεται η απόδοση του συστήματος κλειστού βρόχου.

Μερικά από τα κυριότερα πλεονεκτήματα του **MBD** είναι τα εξής:

- Το MBD επιτρέπει στους μηχανικούς να δημιουργούν και να προσομοιώνουν μοντέλα συστημάτων πριν από τη φυσική εφαρμογή. Αυτό επιτρέπει την έγκαιρη επικύρωση και επαλήθευση της συμπεριφοράς, των επιδόσεων και της λειτουργικότητας του συστήματος με αποτέλεσμα να μειώνεται ο κίνδυνος δαπανηρών σφαλμάτων και αλλαγών στο σχεδιασμό αργότερα στη διαδικασία ανάπτυξης.
- Το MBD παρέχει μια οπτική αναπαράσταση της συμπεριφοράς και της δομής του συστήματος μέσω γραφικών μοντέλων. Αυτά τα μοντέλα χρησιμεύουν ως κοινή γλώσσα μεταξύ μηχανικών, ειδικών του τομέα και ενδιαφερομένων, διευκολύνοντας την αποτελεσματική επικοινωνία και κατανόηση. Με αυτό τον τρόπο προωθείται η συνεργασία και μειώνονται οι παρεξηγήσεις.

- Το MBD υποστηρίζει μια επαναληπτική προσέγγιση σχεδιασμού, όπου τα μοντέλα μπορούν να βελτιώνονται και να τροποποιούνται καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας ανάπτυξης. Οι μηχανικοί μπορούν να επαναλαμβάνουν τα μοντέλα, κάνοντας προσαρμογές και βελτιώσεις με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και την ανατροφοδότηση. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία σχεδιασμού επιτρέπει τη συνεχή βελτιστοποίηση της απόδοσης, της συμπεριφοράς και της αποδοτικότητας του συστήματος.

### 5.3 Ανάλυση του Υλικού Σε Βρόχο (Hardware In the Loop)

Η προσομοίωση **HIL** είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή και την επικύρωση πολύπλοκων συστημάτων. Περιλαμβάνει τη σύνδεση φυσικών εξαρτημάτων hardware (ή ενός υποσυνόλου αυτών) σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης, προκειμένου να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του πλήρους συστήματος.

Σε μια προσομοίωση **HIL**, τα φυσικά στοιχεία του hardware, όπως αισθητήρες, ενεργοποιητές, ελεγκτές ή ακόμη και ολόκληρα συστήματα, διασυνδέονται με έναν υπολογιστή που εκτελεί το μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος.

Τα εξαρτήματα hardware συνδέονται με το περιβάλλον προσομοίωσης μέσω διεπαφών, συνήθως χρησιμοποιώντας μηχανισμούς ανταλλαγής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, όπως αναλογικές και ψηφιακές διεπαφές εισόδου/εξόδου, δίαυλοι επικοινωνίας ή άλλες ειδικές διεπαφές. Το μοντέλο προσομοίωσης λαμβάνει δεδομένα από τα στοιχεία του hardware, τα επεξεργάζεται και παράγει κατάλληλα σήματα που αποστέλλονται πίσω στο hardware σε πραγματικό χρόνο.

Στόχος της προσομοίωσης **HIL** είναι η δημιουργία ενός ρεαλιστικού περιβάλλοντος δοκιμών, όπου μπορεί να αξιολογηθεί η συμπεριφορά του πλήρους συστήματος υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας και σενάρια.

Κάποια από τα πλεονεκτήματα του **HIL** είναι τα εξής:

- Σχεδιασμός και δοκιμή του hardware και του software ελέγχου χωρίς τη λειτουργία μιας πραγματικής διεργασίας.
- Δοκιμή του hardware και του software ελέγχου υπό ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες στο εργαστήριο.
- Δοκιμή των επιπτώσεων των σφαλμάτων και των βλαβών των ενεργοποιητών, των αισθητήρων και των υπολογιστών στο συνολικό σύστημα.
- Λειτουργία και δοκιμή επικίνδυνων συνθηκών λειτουργίας.
- Αναπαραγωγή πειράματα, συχνά επαναλαμβανόμενα.
- Εύκολη λειτουργία με διαφορετικές διεπαφές ανθρώπου-μηχανής.
- Εξοικονόμηση κόστους και χρόνου ανάπτυξης.

### 5.4 Στάδιο του Προγραμματισμού Βάση Μοντελοποίησης

Το Model-Based Programming (MBP) είναι μια συμπληρωματική προσέγγιση του **MBD**, καθώς ενσωματώνει το στάδιο του προγραμματισμού, επιτρέποντας στους μηχανικούς να αξιοποιούν τα μοντέλα του συστήματος για τη δημιουργία εκτελέσιμου κώδικα.

Εφόσον έχει ολοκληρωθεί το στάδιο του **MBD** στο περιβάλλον του Simulink, χρησιμοποιώντας τις δυνατότητές του και του MATLAB, ο σχεδιαστής μπορεί να παράγει αυτόματα τον κώδικα ελέγχου, ο οποίος αυξάνει την αποτελεσματικότητα, βελτιώνει την απόδοση και προωθεί την καινοτομία των αλγορίθμων ελέγχου.

Μια από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες για την αυτόματη παραγωγή κώδικα που προορίζεται για φόρτωση σε μικροελεγκτές και επεξεργαστές ψηφιακού σήματος βασίζεται στα εργαλεία προγραμματισμού **Simulink Coder™** και **Embedded Coder**, τα οποία περιλαμβάνονται στο σύστημα προγραμματισμού MATLAB.

- **Simulink Coder (ή Real-Time Workshop)**

Παράγει και εκτελεί κώδικες C και C++ από δομικά στοιχεία του Simulink, Stateflow® διαγράμματα και συναρτήσεις του MATLAB. Ο παραγόμενος κώδικας εξόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές σε πραγματικό και μη πραγματικό χρόνο, συμπεριλαμβανομένης της επιταχυνόμενης προσομοίωσης, της rapid prototyping και της προσομοίωσης HIL. Ο παραγόμενος κώδικας μπορεί να ρυθμιστεί και να αποσφαλματωθεί χρησιμοποιώντας το Simulink ή μπορεί να εκτελεστεί εκτός MATLAB και Simulink.

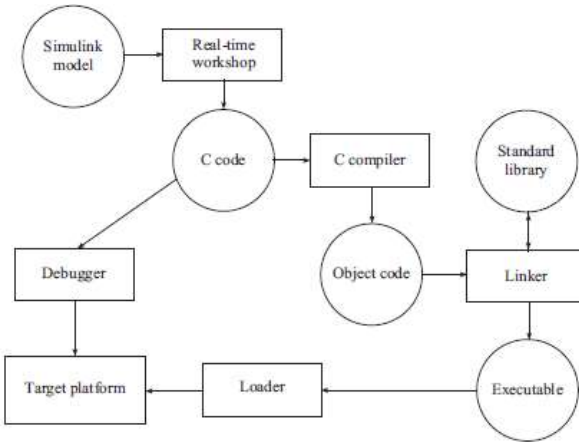
- **Embedded Coder**

Παράγει συμπαγή και γρήγορο κώδικα C και C++ για χρήση σε ενσωματωμένους επεξεργαστές και μικροελεγκτές για μαζική παραγωγή. Ο Embedded Coder δίνει πρόσθετες δυνατότητες για τη διαμόρφωση του MATLAB Coder και του Simulink Coder και τη βελτιστοποίηση του παραγόμενου κώδικα, των αρχείων και των δεδομένων. Αυτές οι βελτιστοποιήσεις βελτιώνουν την αποδοτικότητα του κώδικα και διευκολύνουν την ενσωμάτωση με προηγούμενο κώδικα, τύπους δεδομένων και παραμέτρους βαθμονόμησης, που χρησιμοποιούνται στην ενσωμάτωση.

Όπως φαίνεται και από τα προηγούμενα ο προγραμματισμός των ενσωματωμένων συστημάτων βασίζεται συνήθως στη γλώσσα C. Ωστόσο, ορισμένες λειτουργίες register transfer level (**RTL**) εξακολουθούν να προγραμματίζονται σε γλώσσα χαμηλότερου επιπέδου, δηλαδή σε assembly.

Τέλος, τα προγράμματα μεταγλώττισης και σύνδεσης είναι απαραίτητα για τη δημιουργία εκτελέσιμου κώδικα για μια πλατφόρμα hardware, καθώς, για να ολοκληρωθεί η διαδικασία του **MBP** πρέπει να γίνει η μεταγλώττιση και η φόρτωση του κώδικα στον μικροελεγκτή του συστήματος.

Στην εικόνα 5.2 φαίνεται η διαδρομή της παραγωγής κώδικα από ένα μοντελοποιημένο σύστημα στο περιβάλλον του Simulink.



**Εικόνα 5.2.** Διαδρομή παραγωγής κώδικα από μοντελοποιημένο σύστημα στο Simulink. [38]

Μερικά από τα πλεονεκτήματα που έχει το **MBP** είναι τα εξής:

- Αφαιρεί αρκετά κομμάτια από τη δουλειά των μηχανικών, επιτρέποντάς τους να επικεντρωθούν στη σχεδίαση και τη λογική του συστήματος και όχι σε λεπτομέρειες υλοποίησης χαμηλού επιπέδου.
- Προάγει την επαναχρησιμοποίηση και την αρτιότητα, αποτυπώνοντας τη λειτουργικότητα του λογισμικού σε μοντέλα, τα οποία μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν και να επαναχρησιμοποιηθούν σε διαφορετικά πλαίσια.
- Το **MBP** ενισχύει τη συνεργασία και την επικοινωνία μεταξύ των προγραμματιστών λογισμικού και των ειδικών του τομέα, καθώς τα μοντέλα παρέχουν μια κοινή γλώσσα για την έκφραση των απαιτήσεων και της συμπεριφοράς του συστήματος.

## 6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> : Περιβάλλον ανάπτυξης και μοντελοποίησης

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει μια επισκόπηση του περιβάλλοντος ανάπτυξης και μοντελοποίησης που είναι το MATLAB/Simulink, επισημαίνοντας τις δυνατότητές τους, τις βιβλιοθήκες, τις γλώσσες διασύνδεσης, το περιβάλλον εργασίας, τα βασικά χαρακτηριστικά και τις βασικές λειτουργίες. Το MATLAB και το Simulink είναι ισχυρά εργαλεία λογισμικού που χρησιμοποιούνται ευρέως στον ακαδημαϊκό και βιομηχανικό χώρο για διάφορες εφαρμογές, όπως ανάλυση δεδομένων, μοντελοποίηση, προσομοίωση και ανάπτυξη αλγορίθμων. [43]

### 6.1 Τι είναι το MATLAB

Το MATLAB, συντομογραφία του "**Matrix Laboratory**", είναι μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου και ένα υπολογιστικό περιβάλλον σχεδιασμένο για τεχνικούς υπολογισμούς και ανάλυση δεδομένων. Το MATLAB αναπτύχθηκε από την MathWorks και παρέχει μια ισχυρή πλατφόρμα για την επίλυση σύνθετων μαθηματικών προβλημάτων, τη διεξαγωγή αριθμητικών υπολογισμών, την οπτικοποίηση δεδομένων και την ανάπτυξη αλγορίθμων και εφαρμογών.

Το συντακτικό του MATLAB έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι διαισθητικό και εκφραστικό, επιτρέποντας στους χρήστες να εκτελούν αποτελεσματικά πράξεις πινάκων και συστοιχιών. Με τη μεγάλη συλλογή ενσωματωμένων συναρτήσεων και εργαλείοι, το MATLAB προσφέρει ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων για διάφορους τομείς, καθιστώντας το μια δημοφιλή επιλογή μεταξύ μηχανικών, επιστημόνων, ερευνητών και φοιτητών.

## 6.2 Δυνατότητες

Το MATLAB παρέχει ένα εκτεταμένο σύνολο δυνατοτήτων που δίνουν στους χρήστες τη δυνατότητα να αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά ποικίλες υπολογιστικές εργασίες. Αυτές οι δυνατότητες περιλαμβάνουν:

- **Αριθμητικοί υπολογισμοί και ανάλυση δεδομένων:** Το MATLAB υπερέχει στην εκτέλεση σύνθετων μαθηματικών υπολογισμών, συμπεριλαμβανομένης της γραμμικής άλγεβρας, της βελτιστοποίησης, της επεξεργασίας σήματος και της στατιστικής ανάλυσης. Παρέχει μια εκτεταμένη βιβλιοθήκη μαθηματικών συναρτήσεων και αλγορίθμων, επιτρέποντας στους χρήστες να χειρίζονται και να αναλύουν δεδομένα με ευκολία.
- **Οπτικοποίηση και σχεδίαση:** Προσφέρει ισχυρά εργαλεία οπτικοποίησης, επιτρέποντας στους χρήστες να δημιουργούν διαδραστικές γραφικές παραστάσεις, διαγράμματα και γραφήματα. Υποστηρίζει 2D και 3D απεικονίσεις, κινούμενες εικόνες, επεξεργασία εικόνας και προσαρμοσμένες γραφικές διεπαφές, διευκολύνοντας την εξερεύνηση και παρουσίαση δεδομένων.
- **Ανάπτυξη και υλοποίηση αλγορίθμων:** Παρέχει ένα πλούσιο περιβάλλον για την ανάπτυξη αλγορίθμων και την αποτελεσματική υλοποίησή τους. Με το εκτεταμένο σύνολο συναρτήσεων και εργαλείοι, οι χρήστες μπορούν να πρωτοτυποποιήσουν, να δοκιμάσουν και να βελτιώσουν αλγορίθμους για διάφορες εφαρμογές, όπως επεξεργασία εικόνας, συστήματα ελέγχου και μηχανική μάθηση.
- **Ανάπτυξη εφαρμογών:** Επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν αυτόνομες εφαρμογές, γραφικές διεπαφές και διαδικτυακές εφαρμογές χρησιμοποιώντας τα εργαλεία ανάπτυξης εφαρμογών του. Παρέχει λειτουργικότητα για τη δημιουργία φιλικών προς το χρήστη διεπαφών, την ενσωμάτωση με εξωτερικά συστήματα και βάσεις δεδομένων και την ανάπτυξη εφαρμογών για χρήση από άλλους.
- **Άλλες δυνατότητες και εργαλείοι:** Προσφέρει πολυάριθμες εξειδικευμένες εργαλειοθήκες που απευθύνονται σε συγκεκριμένους τομείς, όπως η επεξεργασία εικόνας, τα συστήματα ελέγχου, η βελτιστοποίηση, η μηχανική μάθηση και άλλα. Αυτές οι εργαλειοθήκες επεκτείνουν τη λειτουργικότητα του MATLAB, παρέχοντας πρόσθετους αλγορίθμους, μοντέλα και μεθόδους προσαρμοσμένες σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

## 6.3 Βιβλιοθήκες

Το MATLAB παρέχει μια ολοκληρωμένη συλλογή βιβλιοθηκών, γνωστές ως εργαλειοθήκες (toolboxes), που επεκτείνουν τη λειτουργικότητά του σε συγκεκριμένους τομείς. Αυτές οι βιβλιοθήκες προσφέρουν προ-εφαρμοσμένους αλγορίθμους, μοντέλα και συναρτήσεις για την απλοποίηση πολύπλοκων εργασιών και επιτρέπουν στο χρήστη να αντιμετωπίζει εξειδικευμένες εργασίες πιο αποδοτικά και αποτελεσματικά. Ορισμένα toolboxes είναι τα εξής:

- **Toolbox επεξεργασίας εικόνας:** Επιτρέπει τον χειρισμό, το φιλτράρισμα, την κατάτμηση και την ανάλυση εικόνων.



- **Toolbox συστήματος ελέγχου:** Διευκολύνει το σχεδιασμό, την ανάλυση και την προσομοίωση συστημάτων ελέγχου.
- **Toolbox επεξεργασίας σήματος:** Παρέχει ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών για την επεξεργασία και ανάλυση ψηφιακών σημάτων.
- **Toolbox στατιστικής και μηχανικής μάθησης:** Προσφέρει εργαλεία για στατιστική ανάλυση, αλγορίθμους μηχανικής μάθησης και μοντελοποίηση πρόβλεψης.
- **Toolbox βελτιστοποίησης:** Βοηθά στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης και στην εκτέλεση αριθμητικής βελτιστοποίησης.
- **Simulink:** Ένα περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού για τη μοντελοποίηση, προσομοίωση και ανάλυση δυναμικών συστημάτων.

#### 6.4 Γλώσσες διασύνδεσης

Το MATLAB υποστηρίζει διάφορες γλώσσες διασύνδεσης που επιτρέπουν την ενσωμάτωση με άλλες γλώσσες προγραμματισμού και συστήματα προσφέροντας στον χρήστη μεγάλη ευελιξία. Οι γλώσσες διασύνδεσης είναι οι εξής:

- **Γλώσσα MATLAB:** Παρέχει ένα συντακτικό υψηλού επιπέδου για τη συγγραφή κώδικα MATLAB και την εκτέλεση υπολογισμών.
- **C, C++ και Fortran:** Μπορεί να ενσωματωθεί υπάρχοντας κώδικας γραμμένος σε αυτές τις γλώσσες σε προγράμματα MATLAB για βελτιωμένη απόδοση ή διαλειτουργικότητα.
- **Java:** Επιτρέπει στους χρήστες να αλληλεπιδρούν με αντικείμενα, βιβλιοθήκες και πλαίσια (frameworks) της Java.
- **Python:** Οι χρήστες μπορούν να καλούν συναρτήσεις Python και να χρησιμοποιούν βιβλιοθήκες Python μέσα στο MATLAB.
- **.NET Framework:** Επιτρέπει στους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε αντικείμενα και βιβλιοθήκες .NET.

#### 6.5 Περιβάλλον εργασίας

Το MATLAB παρέχει ένα φιλικό προς το χρήστη και διαδραστικό περιβάλλον εργασίας. Προωθεί την παραγωγικότητα, την οργάνωση του κώδικα και τη συνεργασία, βελτιώνοντας τη συνολική εμπειρία ανάπτυξης. Το περιβάλλον εργασίας περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

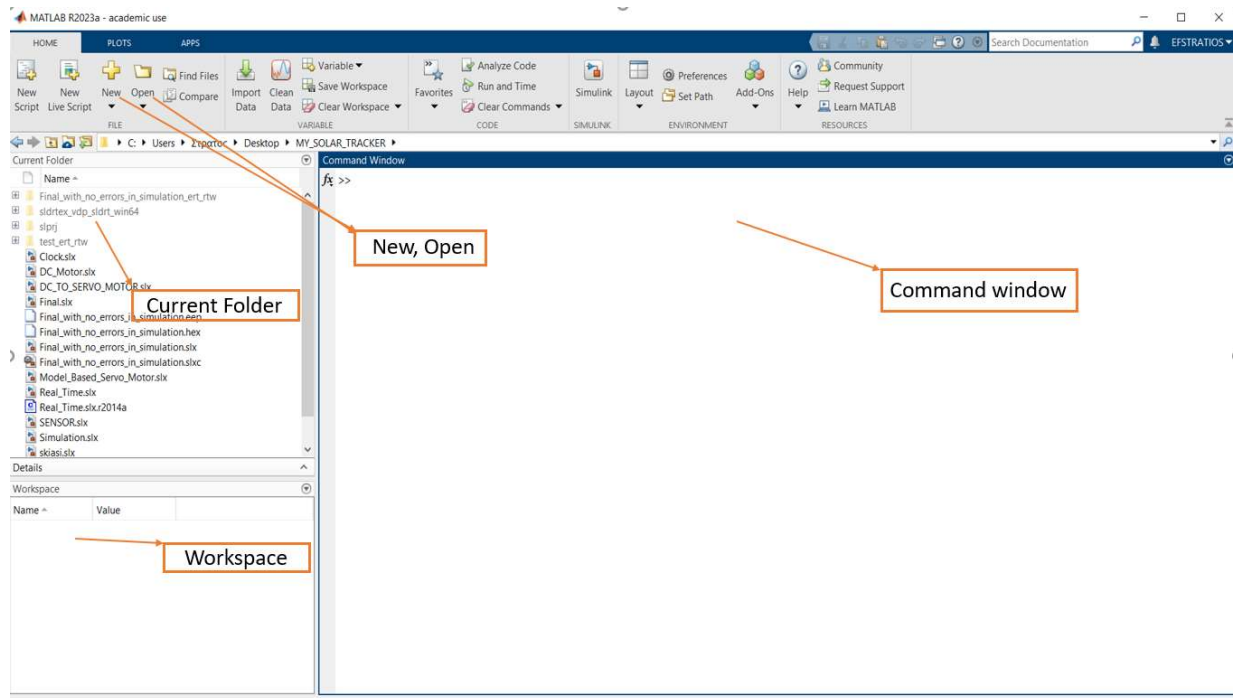
- **Παράθυρο εντολών και διεπαφή γραμμής εντολών:** Οι χρήστες μπορούν να αλληλεπιδρούν άμεσα με το MATLAB μέσω του παραθύρου εντολών, εκτελώντας εντολές και λαμβάνοντας άμεση ανατροφοδότηση.
- **Επεξεργαστής (Editor) και ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE):** Το MATLAB προσφέρει έναν ενσωματωμένο επεξεργαστή με υπογράμμιση συντακτικού, δυνατότητες

Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα

αποσφαλμάτωσης και δυνατότητες οργάνωσης κώδικα. Το IDE παρέχει έναν ολοκληρωμένο χώρο εργασίας για την ανάπτυξη, τον έλεγχο και τη διαχείριση του κώδικα του MATLAB.

- **Ζωντανά σενάρια (live scripts) και σημειωματάρια:** Υποστηρίζει τη δημιουργία ζωντανών σεναρίων και σημειωματάρων, συνδυάζοντας κώδικα, οπτικοποιήσεις και αφηγηματικό κείμενο σε ένα ενιαίο έγγραφο. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν διαδραστικές και αναπαραγώγιμες αναφορές ή παρουσιάσεις.
- **Έλεγχος εκδόσεων και συνεργασία:** Ενσωματώνεται με δημοφιλή εκδόσεις συστημάτων ελέγχου, όπως το Git source, επιτρέποντας στους χρήστες να διαχειρίζονται αποθετήρια κώδικα, να παρακολουθούν τις αλλαγές και να συνεργάζονται αποτελεσματικά με άλλους.

Στην εικόνα 6.1 παρουσιάζονται κάποια πολύ βασικά μέρη από το περιβάλλον εργασίας του MATLAB.



**Εικόνα 6.1.** Κάποια βασικά μέρη από το περιβάλλον εργασίας μοντελοποίησης.

Όπως φαίνεται και στη εικόνα 6.1, πάνω αριστερά υπάρχει το **New** και το **Open**, όπου το πρώτο χρησιμοποιείται σε περίπτωση που ο χρήστης θέλει να φτιάξει ένα καινούριο κώδικα ή συνάρτηση και στην συνέχεια να την αποθηκεύσει. Το δεύτερο χρησιμοποιείται όταν υπάρχει θέληση για να ανοίξει ένα καινούριο φάκελο που εμπεριέχει κάποια άλλα αρχεία προς εκτέλεση.

Κάτω από το **New** και το **Open** βρίσκεται ο χώρος του **Current Folder** που εμπεριέχει τα αρχεία που βρίσκονται στον φάκελο που έχει διαλέξει ο χρήστης να εμφανιστεί.

Το **Workspace** περιέχει τις τιμές των μεταβλητών μετά από κάποια εκτέλεση πράξης.

Τέλος, το **Command window** (παράθυρο εντολών) είναι το μέρος που ο χρήστης μπορεί να γράφει εντολές και να δέχεται αμέσως το αποτέλεσμα που του δίνει το MATLAB.

Αυτά ήταν κάποια από τα στοιχειώδη μέρη του περιβάλλοντος εργασίας του MATLAB .

## 6.6 Βασικά χαρακτηριστικά

Το MATLAB ενσωματώνει διάφορα βασικά χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στη δημοτικότητα και την αποτελεσματικότητά του:

Αρχικά, το συντακτικό του MATLAB έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι ευανάγνωστο από τον άνθρωπο και συνοπτικό, μοιάζοντας με μαθηματική σημειογραφία. Αυτό διευκολύνει την έκφραση πολύπλοκων μαθηματικών πράξεων και αλγορίθμων με φυσικό και διαισθητικό τρόπο.

Επίσης, αντιμετωπίζει τους πίνακες ως θεμελιώδεις δομές δεδομένων, επιτρέποντας αποδοτικούς υπολογισμούς σε μεγάλα σύνολα δεδομένων. Αυτό το παράδειγμα απλοποιεί τις μαθηματικές πράξεις, καθιστώντας βολικό για τους χρήστες να εκτελούν διανυσματικούς υπολογισμούς.

Ακόμη, προσφέρει μια εκτεταμένη συλλογή ενσωματωμένων συναρτήσεων και βιβλιοθηκών που καλύπτουν διάφορες μαθηματικές, στατιστικές και μηχανικές πράξεις. Αυτές οι συναρτήσεις παρέχουν έτοιμες προς χρήση λύσεις, εξαλείφοντας την ανάγκη των χρηστών να υλοποιούν πολύπλοκους αλγορίθμους από την αρχή.

Επιπλέον, παρέχει ισχυρά εργαλεία για την οπτικοποίηση δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων παραμετροποιήσιμων γραφικών παραστάσεων, διαγραμμάτων και γραφικών παραστάσεων. Οι χρήστες μπορούν να δημιουργούν διαδραστικές απεικονίσεις, να χειρίζονται τις ιδιότητες των γραφικών και να δημιουργούν σχήματα ποιότητας δημοσίευσης.

Τέλος, προσφέρει δυνατότητες εντοπισμού σφαλμάτων, όπως σημεία διακοπής, βηματική εκτέλεση και επιθεώρηση μεταβλητών, βοηθώντας στον εντοπισμό και την επίλυση σφαλμάτων κώδικα. Τα εργαλεία σκιαγράφησης προφίλ επιτρέπουν στους χρήστες να αναλύουν την απόδοση του κώδικα και να εντοπίζουν σημεία συμφόρησης.

## 6.7 Simulink

Το Simulink, που αναπτύχθηκε από την MathWorks, είναι ένα ισχυρό γραφικό περιβάλλον προγραμματισμού που ενσωματώνεται στο MATLAB. Επιτρέπει στους χρήστες να μοντελοποιούν, να προσομοιώνουν και να αναλύουν δυναμικά συστήματα χρησιμοποιώντας δομικά στοιχεία σε ένα οπτικό περιβάλλον εργασίας. Το Simulink χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάπτυξη μοντέλων σε τομείς όπως τα συστήματα ελέγχου, η επεξεργασία σήματος, οι επικοινωνίες και τα συστήματα αυτοκινήτων.

## 6.8 Βασικά χαρακτηριστικά και λειτουργίες

Το Simulink προσφέρει αρκετά βασικά χαρακτηριστικά και λειτουργίες για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση συστημάτων. Μερικά από αυτά είναι τα εξής:

- **Δομικά στοιχεία διαγράμματα και στοιχεία του μοντέλου:** Οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν δομικά στοιχεία συνδέοντας προκαθορισμένα δομικά στοιχεία που αντιπροσωπεύουν στοιχεία του συστήματος. Αυτά τα δομικά στοιχεία εμπεριέχουν μαθηματικές εξισώσεις, αλγορίθμους και συμπεριφορές.
- **Προσομοίωση και εκτέλεση μοντέλου:** Επιτρέπει στους χρήστες να προσομοιώνουν και να εκτελούν μοντέλα, παρέχοντας πληροφορίες για τη συμπεριφορά, τη δυναμική και τις αποκρίσεις του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες. Οι χρήστες μπορούν να ορίζουν παραμέτρους

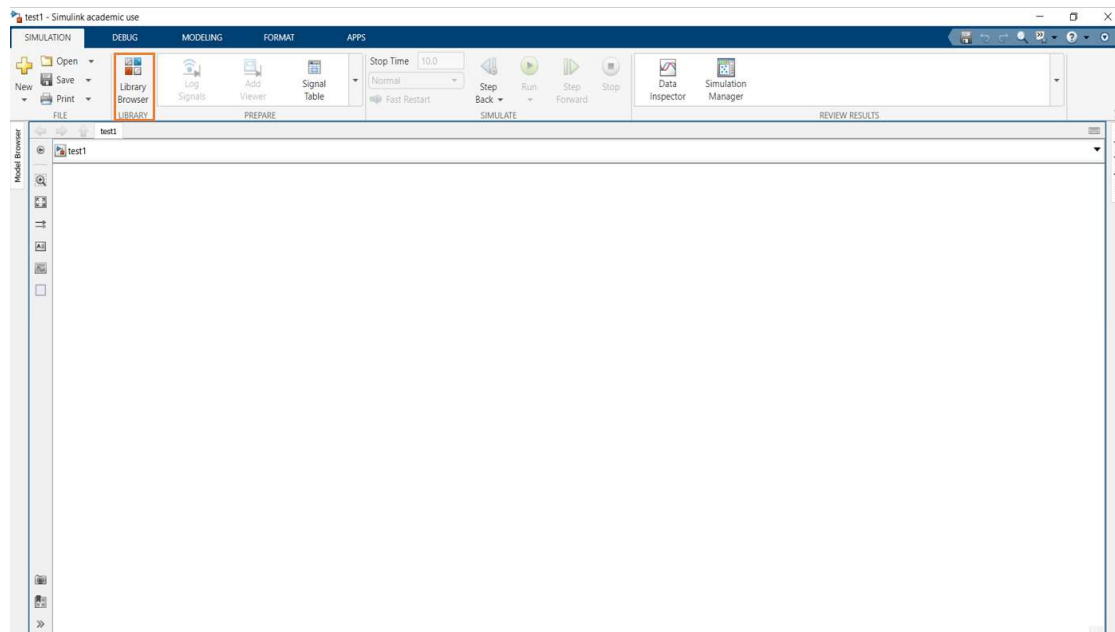
Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα

προσομοίωσης, να εκτελούν προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου και να αναλύουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

- **Ροή σήματος και ροή δεδομένων** : Τα μοντέλα Simulink αναπαριστούν τη ροή σημάτων και δεδομένων μέσω διασυνδεδεμένων δομικών στοιχείων, επιτρέποντας στους χρήστες να αποτυπώνουν τη συμπεριφορά και τις σχέσεις του συστήματος με γραφικό τρόπο.
- **Σχεδιασμός και ανάπτυξη με βάση το μοντέλο**: Υποστηρίζει τη σχεδίαση βάσει μοντέλου, επιτρέποντας στους χρήστες να σχεδιάζουν, να αναλύουν και να επαληθεύουν συστήματα σε υψηλότερο επίπεδο αφαίρεσης. Διευκολύνει τη συνεργασία μεταξύ ειδικών πάνω σε κάποιον τομέα, σχεδιαστών συστημάτων και προγραμματιστών λογισμικού.

## 6.9 Περιήγηση στο περιβάλλον Simulink

Στην εικόνα 6.2 παρουσιάζεται το περιβάλλον του Simulink.

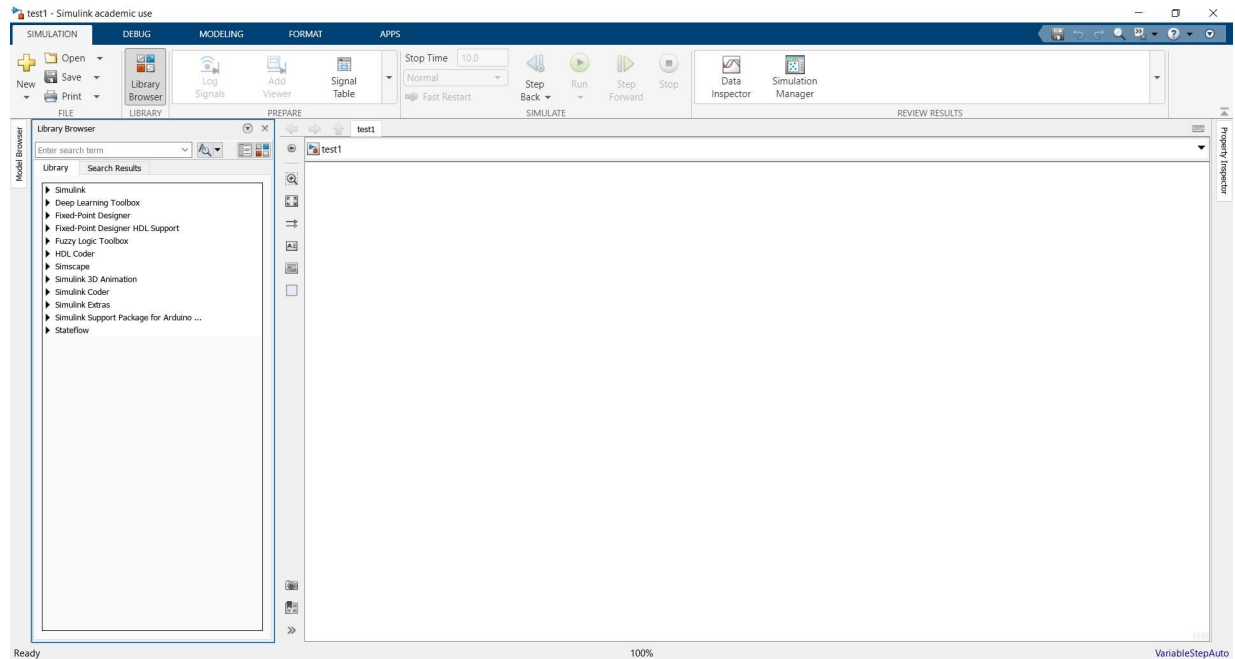


**Εικόνα 6.2.** Περιβάλλον Simulink.

Το πορτοκαλί πλαίσιο έχει τοποθετηθεί στο εικονίδιο του **Library Browser**. Με το πάτημα του συγκεκριμένου φαίνονται όλα τα διαθέσιμα blocks που έχει στη διάθεσή του ο χρήστης και τα αντίστοιχα toolboxes.

Στην εικόνα 6.3 φαίνεται το περιβάλλον του Simulink με το πάτημα του **Library Browser**.

## Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα



**Εικόνα 6.3.** Περιβάλλον του Simulink με την επιλογή του **Library Browser**.

Όπως φαίνεται και από την εικόνα έχει ανοίξει ένα παράθυρο το οποίο περιέχει τα ονόματα των κατηγοριών που έχει ο χρήστης διαθέσιμα για να χρησιμοποιήσει.

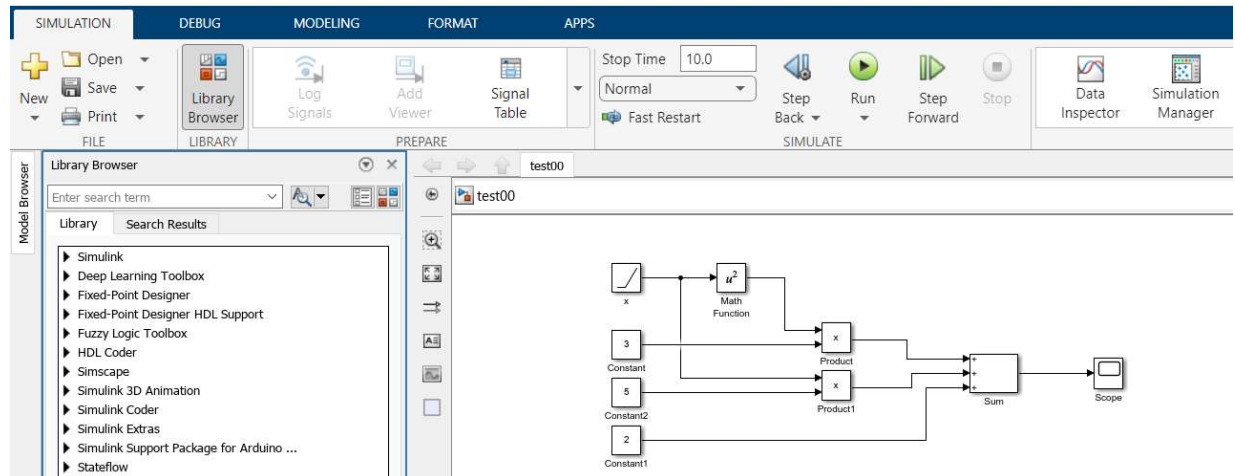
Μέσα στη κάθε ξεχωριστή κατηγορία βρίσκονται τα αντίστοιχα block διαγράμματα. Κάποια είναι για γενικές εφαρμογές όπως η πρώτη κατηγορία που ονομάζεται **Simulink** και κάποια είναι για ειδικές εφαρμογές όπως το **Simulink Support Package for Arduino Hardware** και το **Simscape** που χρησιμοποιήθηκαν σε συνεργασία με βασικά blocks από την κατηγορία **Simulink** στη συγκεκριμένη διπλωματική για την μοντελοποίηση του συστήματος solar tracker.

Να σημειωθεί πως μόλις βρεθεί το block που αναζητά ο χρήστης, με τη μέθοδο drag-and-drop το βάζει στο λευκό πλαίσιο που βρίσκεται στο δεξί μέρος του παραθύρου που άνοιξε με το πάτημα του **Library Browser**.

Ένα απλό παράδειγμα για την καλύτερη κατανόηση του Simulink είναι να υλοποιηθεί η εξίσωση:

$$f(x) = 3 \cdot x^2 + 5 \cdot x + 2$$

Στην εικόνα 6.4 φαίνεται η συγκεκριμένη εξίσωση στο περιβάλλον του Simulink.



Εικόνα 6.4. Εξίσωση  $f(x) = 3 \cdot x^2 + 5 \cdot x + 2$  στο Simulink.

Για να αναπαρασταθεί η μεταβλητή  $x$  χρησιμοποιείται ένα block που είναι η συνάρτηση ράμπας και τα αποτελέσματα μπορούν να φανούν στο block του Scope. Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης συνάρτησης χρησιμοποιήθηκαν block διαγράμματα από την πρώτη κατηγορία με όνομα Simulink.

### 6.10 Αυτόματη δημιουργία κώδικα στο Simulink

Το Simulink έχει την ικανότητα της αυτόματης παραγωγής κώδικα C/C++ από τη μοντελοποίηση ενός συστήματος. Για να επιτευχθεί η δημιουργία του κώδικα χρειάζονται τα εξής εργαλεία που παρέχονται από το MATLAB:

- **MATLAB Coder**

Το MATLAB Coder είναι ένα εργαλείο της MathWorks που επιτρέπει την αυτόματη παραγωγή κώδικα C ή C++ από κώδικα MATLAB. Παρέχει μια σειρά χαρακτηριστικών και λειτουργιών για τη μετατροπή αλγορίθμων και συναρτήσεων του MATLAB σε αποδοτικό κώδικα C/C++, ο οποίος είναι κατάλληλος για την ανάπτυξη σε ενσωματωμένα συστήματα.

Το MATLAB Coder όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το Simulink, παρέχει μια ολοκληρωμένη λύση για τη δημιουργία κώδικα και την ανάπτυξη σύνθετων ενσωματωμένων συστημάτων. Αξιοποιώντας το MATLAB Coder, οι μηχανικοί μπορούν να επιταχύνουν την υλοποίηση αλγορίθμων MATLAB σε ενσωματωμένο hardware.

- **Simulink Coder**

Το Simulink Coder, είναι και αυτό ένα εργαλείο της MathWorks. Είναι ειδικά σχεδιασμένο για να επιτρέπει την αυτόματη παραγωγή αποδοτικού και υψηλής ποιότητας κώδικα από μοντέλα Simulink. Πρόκειται για ένα πρόσθετο εργαλείο για το Simulink που διευκολύνει τη μετάφραση των γραφικών μοντέλων που δημιουργούνται στο Simulink σε εκτελέσιμο κώδικα C ή C++.

Επιπλέον, εξορθολογίζει τη διαδικασία παραγωγής κώδικα, βελτιώνει την απόδοση, υποστηρίζει εκτέλεση σε πραγματικό χρόνο και παρέχει ευελιξία για προσαρμογή, καθιστώντας το απαραίτητο εργαλείο για την ανάπτυξη μοντέλων Simulink σε πλατφόρμες ενσωματωμένου hardware.

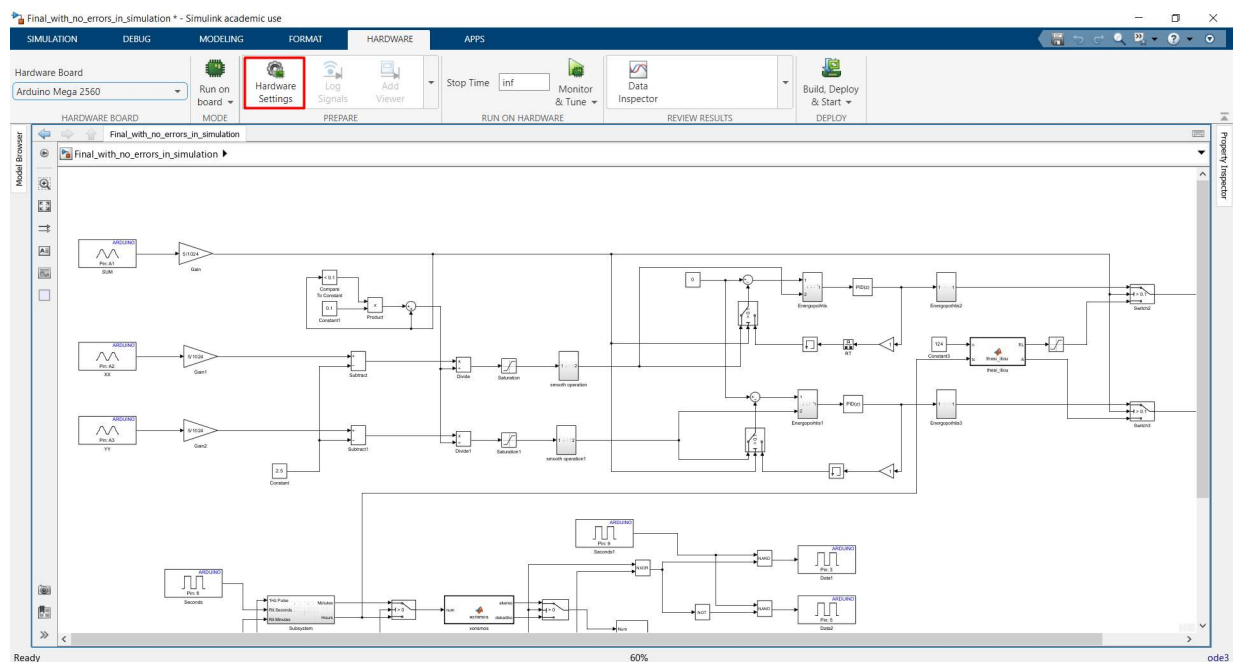
- **Embedded Coder**

Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Το Embedded Coder, που αναπτύχθηκε από τη MathWorks, είναι ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για την αυτόματη παραγωγή κώδικα και την ανάπτυξη μοντέλων MATLAB και Simulink σε ενσωματωμένα συστήματα. Δίνει τη δυνατότητα παραγωγής αποδοτικού και βελτιστοποιημένου κώδικα C ή C++ από αλγορίθμους MATLAB και μοντέλα Simulink, διευκολύνοντας την υλοποίηση και την ανάπτυξη ενσωματωμένων συστημάτων.

Επίσης, απλοποιεί τη διαδικασία δημιουργίας κώδικα, υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα από πλατφόρμες hardware, διευκολύνει την εκτέλεση σε πραγματικό χρόνο και προσφέρει επιλογές προσαρμογής, καθιστώντας το απαραίτητο εργαλείο για την αποτελεσματική ανάπτυξη και εγκατάσταση ενσωματωμένων συστημάτων.

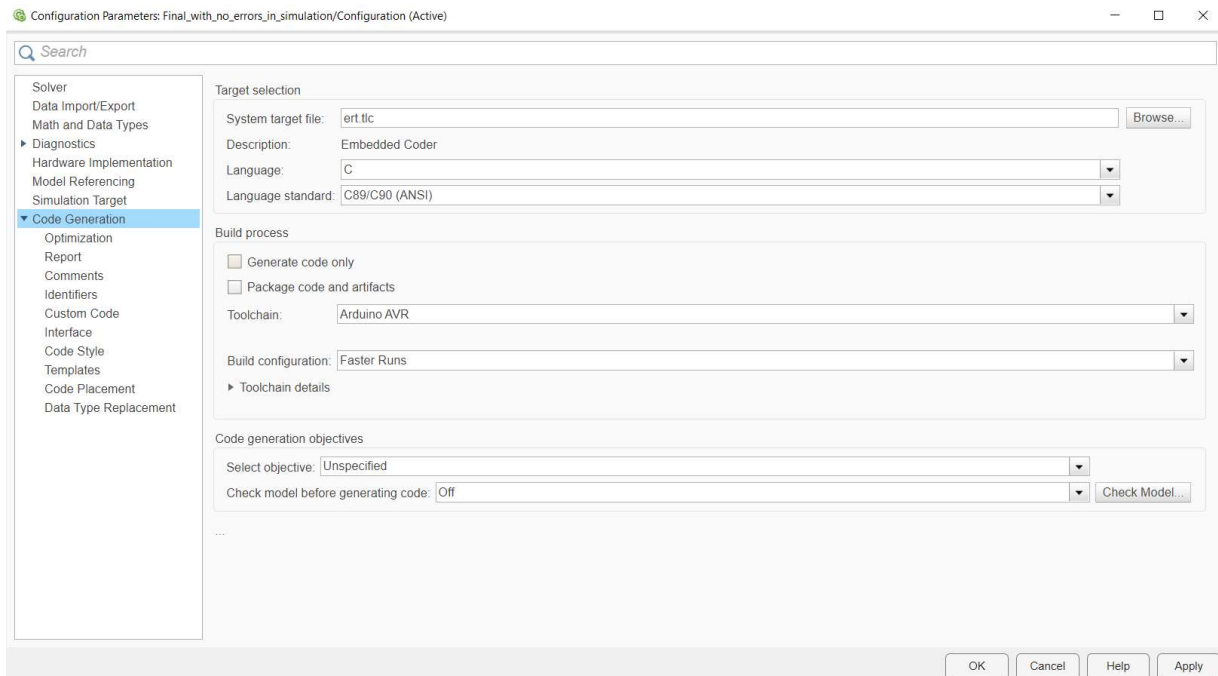
Στην εικόνα 6.5 φαίνεται ένα μοντελοποιημένο σύστημα στο περιβάλλον Simulink. Για να φανούν οι λεπτομέρειες σχετικά με την αυτόματη δημιουργία κώδικα C/C++ πρέπει να πατηθεί το **Hardware Settings** που φαίνεται μέσα σε κόκκινο πλαίσιο.



**Εικόνα 6.5.** Εισαγωγή για την επιλογή λεπτομεριών για την αυτόματη δημιουργία κώδικα.

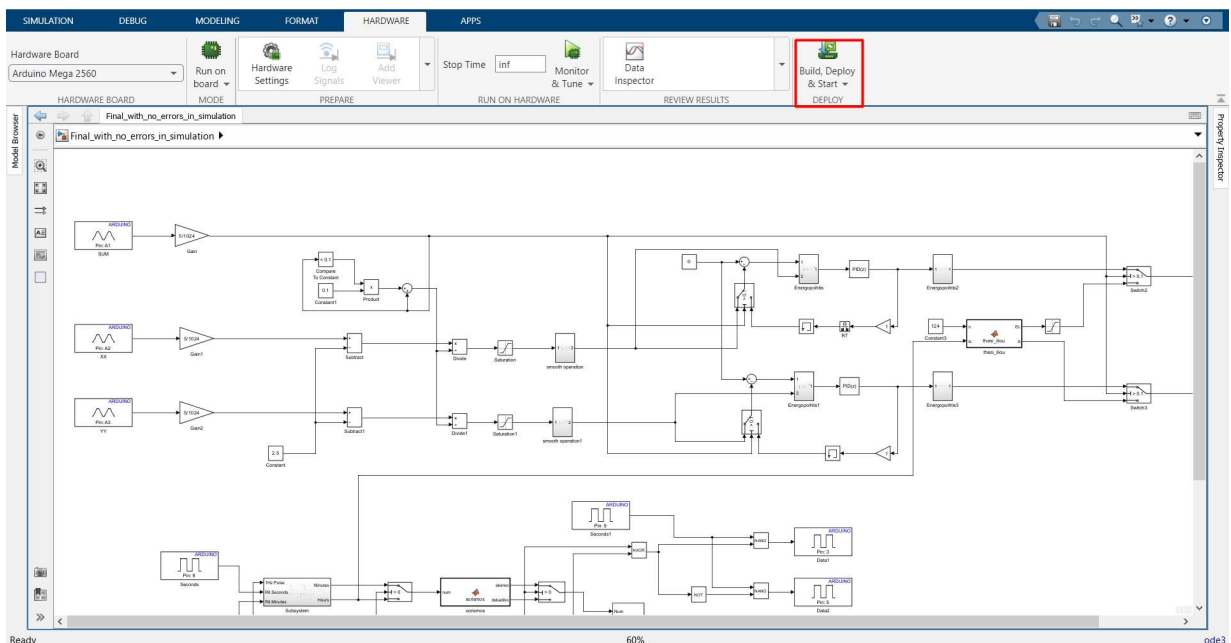
Με το πάτημα του συγκεκριμένου εμφανίζεται ένα παράθυρο με το όνομα **Configuration Parameters** που φαίνεται στην εικόνα 6.6. Πατώντας το **Code Generation** πρέπει στο **System target file** να είναι η επιλογή του **ert.tcl**, καθώς, με αυτή την επιλογή γίνεται αποδεκτός ο κώδικας από εμπορικές πλακέτες μικροελεγκτών και δεν δημιουργεί πολλά αρχεία που περιέχουν βιβλιοθήκες για την εκτέλεση του κώδικα που κάνει η επιλογή **realtime.tcl**. Ακόμη, στο πεδίο **Language** μπορεί να επιλεγεί η γλώσσα του κώδικα που θα δημιουργηθεί (C ή C++).

## Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα



**Εικόνα 6.6.** Απεικόνιση της επιλογής παραθύρου καθορισμού παραμέτρων (Configuration Parameters).

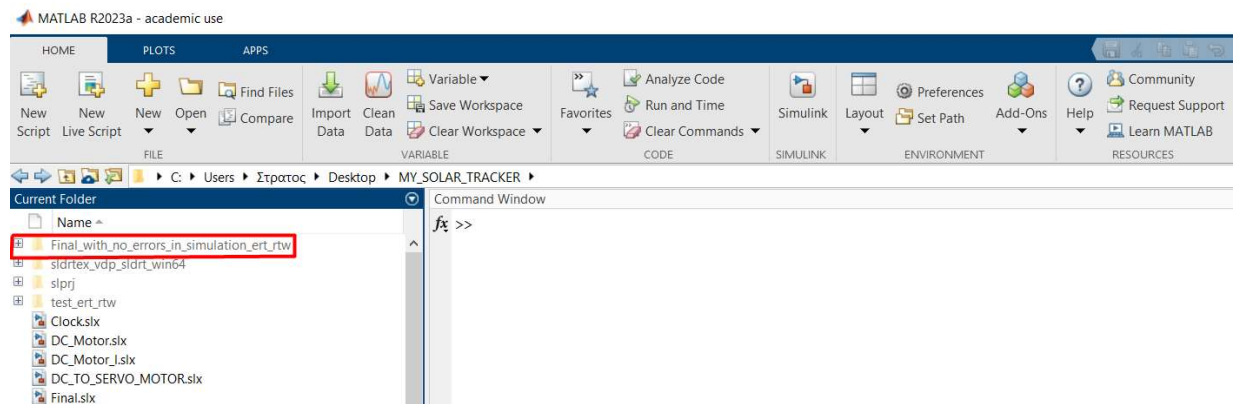
Μόλις έχουν πραγματοποιηθεί οι κατάλληλες ρυθμίσεις και έχει συνδεθεί το σύστημα με την πλατφόρμα hardware πρέπει να πατηθεί το **Build, Deploy & Start** (που φαίνεται στο κόκκινο πλαίσιο της εικόνα 6.7) για να ξεκινήσει η διαδικασία της δημιουργίας αυτόματου κώδικα και να γίνει επιτυχώς η φόρτωσή του στην πλατφόρμα hardware. Ταυτόχρονα δημιουργείται ένας φάκελος στο πλαίσιο του **Current Folder** του MATLAB ο οποίος περιέχει τον κατάλληλο κώδικα και βιβλιοθήκες σε γλώσσα C που φορτώθηκε στην πλατφόρμα hardware.



**Εικόνα 6.7.** Το πλαίσιο επιλογής παραγωγής κώδικα (με το Build, Deploy & Start) και εκτέλεσης



Αυτός ο φάκελος που περιέχεται στο Current Folder φαίνεται στην εικόνα 6.8.



**Εικόνα 6.8.** Περιγραφή φακέλου αρχείων που περιέχει τον κώδικα που δημιουργήθηκε αυτόματα μέσω Simulink.

## 7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> : Πλατφόρμα υλοποίησης υλικού ανοικτού κώδικα Arduino

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί μία εισαγωγή για την πλατφόρμα υλοποίησης του ηλιακού ανιχνευτή που θα βασίζεται στο υλικού ανοικτού κώδικα Arduino, θα παρουσιαστούν οι δυνατότητες και τα πλεονεκτήματα του Arduino UNO και MEGA 2560 και εν συνεχεία θα γίνει μία σύγκριση μεταξύ των δύο πλατφορμών. Τέλος θα γίνει μία ανάλυση και θα παρουσιαστούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Arduino MEGA 2560.

### 7.1 Εισαγωγή

Το Arduino είναι μια ευέλικτη και προσιτή πλατφόρμα που φέρνει επανάσταση στα έργα ηλεκτρονικής. Αποτελείται από μια φιλική προς το χρήστη πλακέτα μικροελεγκτή και μια διεπαφή λογισμικού. Το Arduino απλοποιεί την ενσωμάτωση hardware και software, καθιστώντας εύκολη τη δημιουργία διαδραστικών συσκευών από οποιονδήποτε. Ο χαρακτήρας του ως ανοικτού κώδικα και η εκτεταμένη βιβλιοθήκη λειτουργιών του, επιτρέπουν στους χρήστες να εξερευνήσουν τη ρομποτική, τη φορητή τεχνολογία και πολλά άλλα. Με μια υποστηρικτική παγκόσμια κοινότητα, το Arduino προσφέρει ατελείωτες δυνατότητες για καινοτομία και δημιουργικότητα.

### 7.2 Δυνατότητες και πλεονεκτήματα του Arduino Uno

Το Arduino Uno είναι μια δημοφιλής πλακέτα μικροελεγκτή που βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega328P. Προσφέρει αρκετές δυνατότητες και πλεονεκτήματα που την καθιστούν μια ευέλικτη επιλογή για διάφορα έργα.

Μερικές από τις δυνατότητές του είναι οι εξής:

- **Ευελιξία:** Είναι συμβατό με ένα ευρύ φάσμα αισθητήρων, ενεργοποιητών και ασπίδων (shields), καθιστώντας το κατάλληλο για ποικίλες εφαρμογές, όπως ρομποτική, οικιακός αυτοματισμός και έργα IoT.
- **Ευκολία χρήσης:** Διαθέτει ένα φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον ανάπτυξης που απλοποιεί τον προγραμματισμό και επιτρέπει τη γρήγορη δημιουργία πρωτοτύπων. Το ολοκληρωμένο

περιβάλλον ανάπτυξης του (IDE) παρέχει μια απλή και διαισθητική διεπαφή, επιτρέποντας ακόμη και στους αρχάριους να ξεκινήσουν εύκολα.

- **Μέγεθος και συντελεστής μορφής:** Έχει συμπαγή συντελεστή μορφής, καθιστώντας το κατάλληλο για έργα με περιορισμένο χώρο. Το μικρό του μέγεθος επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωση σε συσκευές ή την ενσωμάτωση σε πρωτότυπα.
- **Πληθώρα πόρων:** Έχει μια μεγάλη και ενεργή κοινότητα χρηστών, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει πληθώρα διαθέσιμων διαδικτυακών πόρων, εκπαιδευτικών προγραμμάτων και βιβλιοθηκών. Αυτή η τεράστια υποστήριξη της κοινότητας διευκολύνει την αντιμετώπιση προβλημάτων και τη γρήγορη εύρεση λύσεων.
- **Αποδοτικότητα κόστους:** Είναι σχετικά προσιτό σε σύγκριση με άλλες πλακέτες μικροελεγκτών, καθιστώντας το μια ελκυστική επιλογή για έργα με χαμηλό προϋπολογισμό.

### 7.3 Δυνατότητες και πλεονεκτήματα του Arduino MEGA 2560

Το Arduino MEGA 2560 είναι μια άλλη ευρέως χρησιμοποιούμενη πλακέτα μικροελεγκτή που προσφέρει βελτιωμένες δυνατότητες και διευρυμένους πόρους σε σύγκριση με το Arduino Uno. Βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega2560.

Μερικές από τις δυνατότητές του είναι οι εξής:

- **Αυξημένη μνήμη:** Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του Arduino MEGA 2560 έναντι του Arduino Uno είναι η σημαντικά μεγαλύτερη μνήμη του. Διαθέτει 256 KB μνήμης flash, παρέχοντας άφθονο χώρο για την αποθήκευση σύνθετου κώδικα και δεδομένων.
- **Περισσότερες ακίδες εισόδου/εξόδου:** Το Arduino MEGA 2560 προσφέρει έναν εκτεταμένο αριθμό ψηφιακών και αναλογικών ακροδεκτών, με 54 ψηφιακές ακίδες εισόδου/εξόδου και 16 αναλογικές εισόδους. Αυτό το καθιστά κατάλληλο για έργα που απαιτούν μεγάλο αριθμό αισθητήρων, ενεργοποιητών ή εξωτερικών συσκευών.
- **Πολλαπλές διεπαφές επικοινωνίας:** Υποστηρίζει διάφορες διεπαφές επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των UART, SPI και I2C, επιτρέποντας την απρόσκοπτη ενσωμάτωση με ένα ευρύ φάσμα εξωτερικών συσκευών και μονάδων.
- **Ιδανικό για σύνθετα έργα:** Οι διευρυμένοι πόροι και δυνατότητες του Arduino MEGA 2560 το καθιστούν εξαιρετική επιλογή για πιο προηγμένα έργα που απαιτούν εκτεταμένη μνήμη, πολυάριθμες ακίδες εισόδου/εξόδου και αυξημένη επεξεργαστική ισχύ.

### 7.4 Arduino Uno vs. Arduino MEGA 2560

Παρακάτω γίνεται η επιλογή ανάμεσα στο Arduino MEGA 2560 και στο Arduino Uno ανάλογα με το κριτήριο της πολυπλοκότητας της εφαρμογής, το κόστος και ο περιορισμός χώρου.

- **Πολυπλοκότητα της εφαρμογής:** Το Arduino Uno είναι κατάλληλο για σχετικά απλούστερες εφαρμογές που απαιτούν μέτριους πόρους και δυνατότητες. Το Arduino MEGA 2560 είναι καταλληλότερο για πιο σύνθετα έργα που απαιτούν μεγαλύτερη μνήμη, περισσότερα pins εισόδου/εξόδου και μεγαλύτερη επεξεργαστική ισχύ.

- **Κόστος:** Το Arduino Uno είναι γενικά πιο προσιτό σε σύγκριση με το Arduino MEGA 2560, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα εάν υπάρχει περιορισμένος προϋπολογισμός.
- **Περιορισμοί χώρου:** Εάν ο χώρος δεν αποτελεί πρόβλημα, ο μικρότερος παράγοντας μορφής του Arduino Uno μπορεί να είναι πιο κατάλληλος. Το μεγαλύτερο μέγεθος του Arduino MEGA 2560 μπορεί να είναι πλεονέκτημα όταν απαιτούνται πρόσθετοι πόροι και δυνατότητες επέκτασης.

Στην παρούσα διπλωματική, αρχικά έγινε χρήση του Arduino UNO αλλά επειδή η υπολογιστική ισχύς και η μνήμη για να γίνουν οι απαιτούμενες πράξεις και η επεξεργασία των δεδομένων δεν ήταν αρκετές, καθώς υπήρχε μεγάλη πολυπλοκότητα στο σύστημα του solar tracker, χρησιμοποιήθηκε το **Arduino MEGA 2560**.

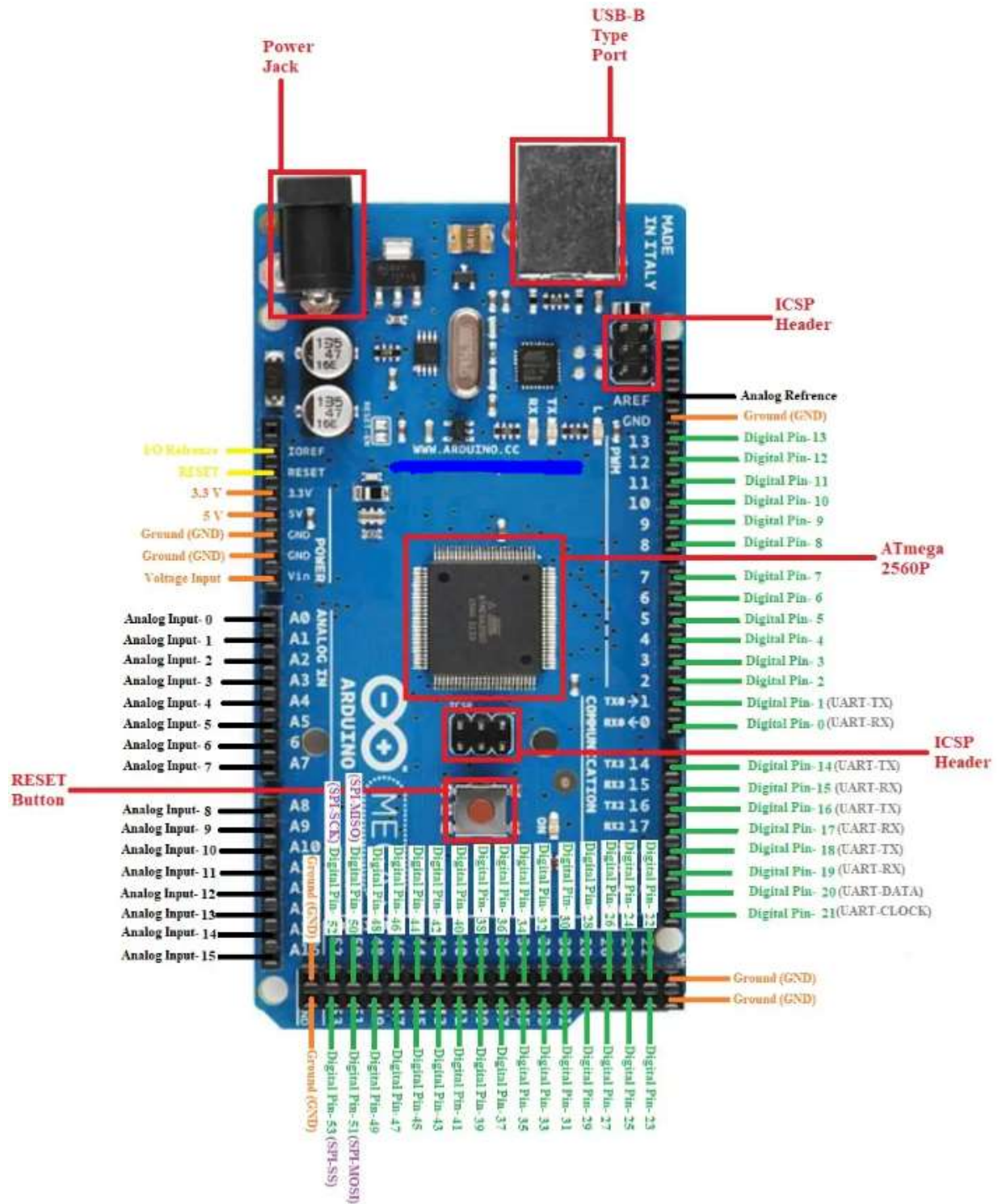
## 7.5 Ανάλυση και τεχνικά χαρακτηριστικά του Arduino MEGA 2560

- **Μικροελεγκτής:** Βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega2560. Αυτός ο μικροελεγκτής είναι μέρος της οικογένειας **AVR 8-bit** και προσφέρει έναν ισχυρό και αποδοτικό πυρήνα επεξεργασίας για την εκτέλεση προγραμμάτων Arduino.
- **Τάση λειτουργίας:** Λειτουργεί σε τάση **5V**, η οποία είναι η τυπική τάση λειτουργίας για τις περισσότερες πλακέτες Arduino. Αυτό επιτρέπει τη συμβατότητα με ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και αισθητήρων.
- **Μνήμη flash:** Διαθέτει μνήμη **flash 256 KB** διαθέσιμη για την αποθήκευση κώδικα προγράμματος. Αυτός ο άφθονος αποθηκευτικός χώρος πλεονεκτεί για έργα που απαιτούν πολύπλοκους αλγορίθμους, μεγάλα σύνολα δεδομένων ή εκτεταμένες βιβλιοθήκες.
- **SRAM:** Διαθέτει **8 KB** στατικής μνήμης τυχαίας προσπέλασης (SRAM). Η SRAM χρησιμοποιείται για την αποθήκευση μεταβλητών και δεδομένων κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Η μεγαλύτερη χωρητικότητα SRAM επιτρέπει την αποθήκευση περισσότερων μεταβλητών και δεδομένων, επιτρέποντας τη διεκπεραίωση μεγαλύτερων και πιο σύνθετων εργασιών.
- **EEPROM:** Διαθέτει **4 KB** ηλεκτρικά διαγράψιμης προγραμματιζόμενης μνήμης μόνο για ανάγνωση (EEPROM). Η EEPROM είναι μη πτητική μνήμη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση δεδομένων που πρέπει να διατηρούνται ακόμη και όταν αφαιρείται η τροφοδοσία από την πλακέτα. Είναι χρήσιμη για την αποθήκευση σημαντικών ρυθμίσεων διαμόρφωσης ή δεδομένων χρήστη.
- **Ταχύτητα ρολογιού:** Λειτουργεί με ταχύτητα ρολογιού **16 MHz**. Όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα ρολογιού τόσο ταχύτερα εκτελούνται οι εντολές, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης και της απόκρισης της πλακέτας.

- **Ψηφιακά pins εισόδου/εξόδου:** Προσφέρει σημαντικό αριθμό ψηφιακών ακροδεκτών εισόδου/εξόδου. Παρέχει συνολικά **54 ψηφιακά pins I/O**, εκ των οποίων τα 15 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έξοδοι διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM).
- **Αναλογικά pins εισόδου:** Διαθέτει **16 ακροδέκτες αναλογικής εισόδου**, επιτρέποντας τη μέτρηση αναλογικών σημάτων από αισθητήρες ή άλλες αναλογικές πηγές. Αυτές οι αναλογικές εισοδοί παρέχουν ευελιξία για έργα που απαιτούν ακριβείς αναλογικές μετρήσεις.
- **Διεπαφές επικοινωνίας:** Υποστηρίζει πολλαπλές διεπαφές επικοινωνίας, όπως Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (**UART**), Serial Peripheral Interface (**SPI**) και Inter-Integrated Circuit (**I2C**). Αυτές οι διεπαφές επιτρέπουν την επικοινωνία με άλλες συσκευές, όπως αισθητήρες, οθόνες ή εξωτερικές μονάδες.
- **Επιλογές τροφοδοσίας:** Μπορεί να τροφοδοτηθεί είτε μέσω της σύνδεσης USB είτε μέσω εξωτερικής πηγής τροφοδοσίας. Η τάση που συνιστάται για την εξωτερική πηγή τροφοδοσίας κυμαίνεται από **7V** έως **12V DC**. Αυτή η ευελιξία στις επιλογές τροφοδοσίας επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωση με διαφορετικές διαμορφώσεις τροφοδοσίας.
- **Διαστάσεις:** Έχει διαστάσεις **101,52mm x 53,3mm**, οι οποίες παρέχουν μεγαλύτερο αποτύπωμα σε σύγκριση με το Arduino Uno. Αυτό το μεγαλύτερο μέγεθος φιλοξενεί τον αυξημένο αριθμό ακίδων και πόρων, αλλά θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό εφαρμογών με περιορισμούς χώρου.

Στην εικόνα 7.1 παρουσιάζεται η πλατφόρμα του Arduino MEGA 2560 με απεικόνιση και αναφορά των στοιχείων της.

Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα



Εικόνα 7.1. Πλατφόρμα του Arduino MEGA 2560. [33]

## 8 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8° : Σερβομηχανισμός

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μία ανάλυση του σερβοκινητήρα, θα ακολουθήσει η παρουσίαση των εξαρτημάτων που περιέχει ένας DC σερβοκινητήρας και τέλος θα αναλυθεί ο τρόπος λειτουργίας του. Στην διάταξη του ηλιακού ανιχνευτή θα χρησιμοποιηθούν δύο σερβοκινητήρες υλοποιώντας τους ενεργοποιητές θέσης του αισθητήρα ανίχνευσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

### 8.1 Σερβοκινητήρας

Ο σερβοκινητήρας είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή και συγκεκριμένα ένας γραμμικός ή περιστροφικός ενεργοποιητής που μετατρέπει τα ηλεκτρικά σήματα σε ακριβή μηχανική κίνηση. Έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με υψηλή ακρίβεια, ταχύτητα και έλεγχο της γωνιακής θέσης και της ταχύτητας. Σε αντίθεση με τους τυπικούς κινητήρες, οι σερβοκινητήρες λειτουργούν με σερβομηχανισμό, δηλαδή είναι εξοπλισμένοι με μηχανισμούς ανατροφοδότησης, όπως κωδικοποιητές ή resolvers, για τη συνεχή παρακολούθηση και προσαρμογή της απόδοσής τους ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή έξοδος. Ο κινητήρας σε έναν σερβοκινητήρα μπορεί να είναι διαφόρων τύπων, όπως κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC), κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) ή BLDC κινητήρες.

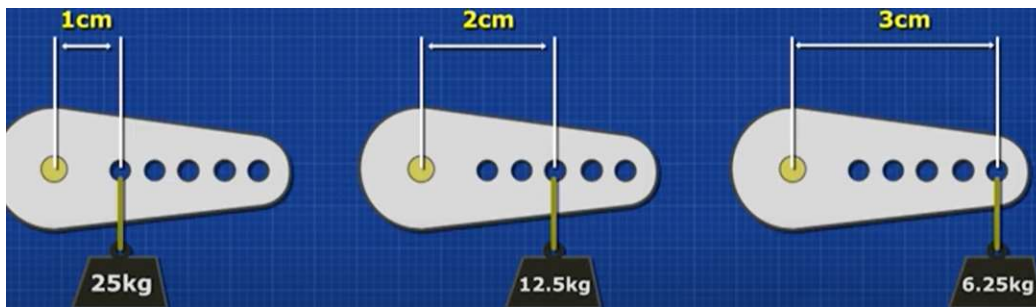
Καθώς στην συγκεκριμένη διπλωματική έγινε χρήση σερβοκινητήρων που περιέχουν DC κινητήρα όλα τα επόμενα που θα αναφερθούν έχουν να κάνουν μόνο με τέτοιου τύπου σερβοκινητήρες.

Ο DC σερβοκινητήρας είναι είτε κλειστού τύπου (close loop), δηλαδή κάνει περιστροφή μέχρι 180 μοίρες. Ή είναι ανοιχτού τύπου (open loop), δηλαδή δεν έχει όρια περιστροφής, μπορεί να φτάσει τις 360 μοίρες.

Το close loop αποτελεί τον καλύτερο έλεγχο και χρησιμοποιείται περισσότερο σχετικά με το open loop. Επιτυγχάνεται βάζοντας ένα limiting pin στο τελευταίο γρανάζι (γρανάζι εξόδου).

Στα πλάγια του σερβοκινητήρα συνήθως γράφεται ένα βάρος. Αυτό το βάρος είναι η ροπή του κινητήρα (δηλαδή πόση δύναμη μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μοχλό). Οι μονάδες μέτρησης είναι τις περισσότερες φορές kg ανά cm.

Στην εικόνα 8.1 φαίνεται το πως κατανέμετε το βάρος ενός σερβοκινητήρα όπου η δύναμη που μπορεί να εφαρμοστεί σε έναν μοχλό είναι 25kg ανά cm



**Εικόνα 8.1.** Κατανομή μέγιστου βάρους ενός σερβοκινητήρα των 25kg-cm. [34]

Παρατηρείται πως σε απόσταση 1 cm από τον άξονα μπορεί να υποστηρίξει 25 kg και όσο απομακρύνεται η θέση που ασκείται το βάρος από τον άξονα τόσο μικρότερα κιλά μπορεί να υποστηρίξει.

Στο datasheet υπάρχουν και τα επιτρεπτά όρια της τροφοδοσίας της τάσης. Ισχύει πως όσο μεγαλύτερη τάση του δίνω τόσο μεγαλύτερη ροπή έχει και μπορεί να υποστηρίξει περισσότερα kg.

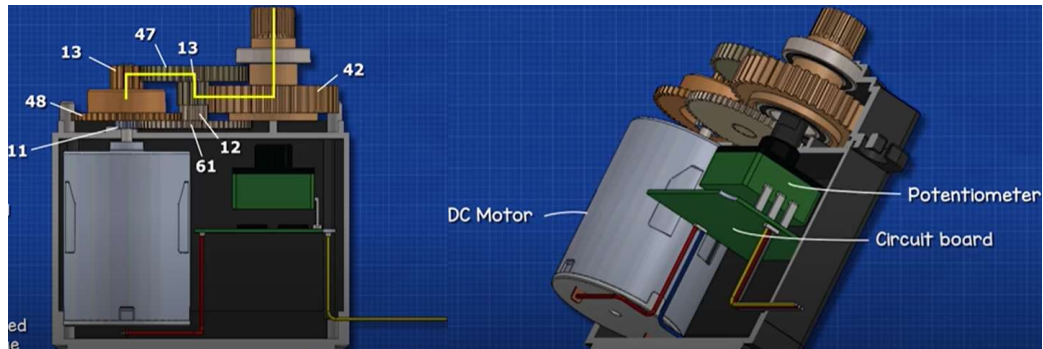
## 8.2 Τι περιέχει ένας DC σερβοκινητήρας.

Ένας DC σερβοκινητήρας εξωτερικά έχει το προστατευτικό του κέλυφος.

Τα καλώδια που βγαίνουν από το κέλυφος είναι τα εξής:

- Κόκκινο positive (καλώδιο τάσης).
- Καφέ negative (καλώδιο γείωσης).
- Πορτοκαλί είναι το καλώδιο σήματος διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM).

Στην εικόνα 8.2 παρουσιάζονται τα δομικά μέρη ενός DC σερβοκινητήρα



**Εικόνα 8.2.** Τα δομικά μέρη ενός DC σερβοκινητήρα. [35]

Στο πάνω μέρος φαίνεται ένα γρανάζι που μπορεί να συνδεθεί ο μοχλός ή ότι άλλο αναλόγως την εφαρμογή.

Εσωτερικά παρατηρείται ένας αριθμός από γρανάζια.

Το γρανάζι που συνδέεται τελευταίο είναι το γρανάζι εξόδου, ενώ το γρανάζι που συνδέεται με τον DC κινητήρα είναι το γρανάζι εισόδου.

Ο DC κινητήρας έχει πολύ μεγάλη ταχύτητα αλλά πολύ μικρή ροπή. Έτσι με την συνδεσμολογία των γραναζιών πετυχαίνετε το γρανάζι εξόδου να έχει μικρή ταχύτητα και μεγάλη ροπή.

Με τη σειρά του, ο DC κινητήρας συνδέεται σε μία μικρή ηλεκτρονική πλακέτα. Αυτή ελέγχει την περιστροφή του κινητήρα καθώς και την φορά περιστροφής του κινητήρα.

Ακόμα στην ηλεκτρονική πλακέτα είναι συνδεδεμένο ένα ποτενσιόμετρο, το οποίο συνδέεται με το γρανάζι εξόδου.

Καθώς το γρανάζι εξόδου περιστρέφεται, περιστρέφει και το ποτενσιόμετρο, το οποίο αλλάζει την αντίσταση και η ηλεκτρονική πλακέτα το διαβάζει για να ξέρει την θέση της εξόδου.

## 8.3 Τρόπος λειτουργίας

Ένας ελεγκτής (Arduino, servo tester) στέλνει ένα σήμα στο DC σερβοκινητήρα που καθορίζει σε ποια θέση πρέπει να περιστραφεί.

Αυτό είναι ένα σήμα διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM), που σημαίνει πως στέλνει παλμούς ρεύματος. Το πλάτος των παλμών ποικίλει.

Θα μπορούσε να παρομοιαστεί με το άνοιγμα και το κλείσιμο ενός διακόπτη για να ανάμμα και σβήσιμο μιας λάμπας. Όσο πιο μεγάλη η διάρκεια που είναι πατημένος ο διακόπτης τόσο πιο μεγάλη θα είναι και η διάρκεια του ηλεκτρικού παλμού.

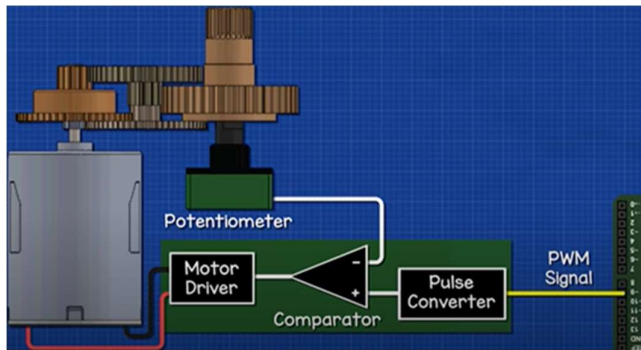
Οι παλμοί στέλνονται κάθε 20 ms, δηλαδή έχουμε 50 παλμούς το δευτερόλεπτο (50Hz).

Το πλάτος του παλμού καθορίζει την θέση του DC σερβοκινητήρα.

Με μικρό παλμό περιστρέφεται στα αριστερά και με μεγάλο παλμό περιστρέφεται προς τα δεξιά. Όσο ο παλμός παραμένει ίδιος, ο κινητήρας κρατάει την θέση του και δεν περιστρέφεται.

Χρησιμοποιώντας ένα Arduino, ο DC σερβοκινητήρας μπορεί να προγραμματιστεί για να περιστρέφεται μόνος του ή προσθέτοντας ένα ποτενσιόμετρο στο κύκλωμα μπορεί να προγραμματιστεί και να τον χειρίζεται ο χρήστης χειροκίνητα με το ποτενσιόμετρο.

Στην εικόνα 8.3 φαίνεται αυτή η διαδικασία.



**Εικόνα 8.3.** Το εσωτερικό κύκλωμα του DC σερβοκινητήρα για έλεγχο της θέσης εξόδου με την επιλογή του χρήστη μέσω του ποτενσιόμετρου την επιθυμητή θέση εξόδου. [36]

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα το σήμα εισέρχεται στην ηλεκτρονική πλακέτα του DC σερβοκινητήρα και μετατρέπεται σε τάση, περνάει μέσα από έναν συγκριτή (**comparator**) όπου η άλλη είσοδος είναι του ποτενσιόμετρου η οποία παρακολουθεί την τάση για την παροχή ανάδρασης.

Η έξοδος του comparator πηγαίνει στον motor driver, όπου ο δεύτερος ελέγχει την περιστροφή του DC κινητήρα.

Ο comparator στην ουσία συγκρίνει την τάση του ποτενσιόμετρου και την τάση του σήματος ελέγχου (έξοδος του **pulse converter**). Καθώς το ποτενσιόμετρο περιστρέφεται αλλάζει η αντίσταση και ως εκ τούτου αλλάζει και η τάση του. Εάν οι τάσεις είναι διαφορετικές τότε ο κινητήρας θα στρίβει μέχρι η διαφορά των τάσεων να φτάσει κοντά στο μηδέν. Όταν φτάσει κοντά στο μηδέν ( $\sim=0$ ) ο σερβοκινητήρας θα βρίσκεται στην σωστή θέση και θα παραμείνει σε αυτή τη θέση/κατάσταση μέχρι να υπάρξει αλλαγή στην επιθυμητή θέση.

Οι σερβοκινητήρες που περιγράφηκαν στο παρόν κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκαν στον ηλιακό ανιχνευτή που αναπτύχθηκε.

## 9 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup> : Ελεγκτής PID

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο έγινε μία εισαγωγή σχετικά με τους τύπους των ελεγκτών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλιακής παρακολούθησης. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση της λειτουργίας του PID και των χαρακτηριστικών και της σημασίας των όρων P, I και D.



Τέλος, παρουσιάστηκαν οι μέθοδοι συντονισμού των PID ελεγκτών και κάποιοι περιορισμοί αυτών. [\[45\]\[46\]](#)

## 9.1 Εισαγωγή

Στον τομέα των συστημάτων ελέγχου, οι ελεγκτές διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη της επιθυμητής συμπεριφοράς και απόδοσης του συστήματος. Ο πρωταρχικός στόχος ενός ελεγκτή είναι η ρύθμιση της εξόδου ενός συστήματος με βάση την είσοδο και το επιθυμητό σημείο ρύθμισης. Οι ελεγκτές είναι απαραίτητοι σε πολυάριθμες εφαρμογές, που κυμαίνονται από βιομηχανικές διεργασίες έως τη ρομποτική και ακόμη και τις οικιακές συσκευές. Παρέχουν σταθερότητα, ακρίβεια και ανταπόκριση για να εξασφαλίζουν τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ελεγκτών. Μερικοί από τους πιο συνηθισμένους που χρησιμοποιούνται σε συστήματα solar tracking είναι οι εξής:

- **Ελεγκτές PID**

Οι ελεγκτές PID χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορα συστήματα ελέγχου. Παρακολουθούν συνεχώς το σφάλμα μεταξύ της επιθυμητής θέσης των ηλιακών panel και της πραγματικής τους θέσης. Ο ελεγκτής PID υπολογίζει σήματα ελέγχου με βάση τρεις συνιστώσες: αναλογική (P), ολοκληρωτική (I) και παραγωγική (D). Με τη ρύθμιση αυτών των συνιστωσών, οι ελεγκτές PID μπορούν να επιτύχουν ακριβή έλεγχο και να ελαχιστοποιήσουν τις ταλαντώσεις γύρω από την επιθυμητή θέση.

- **Ελεγκτές ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic Controllers)**

Οι ελεγκτές ασαφούς λογικής (FLC) είναι ένας τύπος ελεγκτή που μπορεί να χειριστεί ανακριβείς ή αβέβαιες πληροφορίες. Μπορούν να λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως οι μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες, η σκίαση και τα χαρακτηριστικά των panel για τη βελτιστοποίηση της τοποθέτησης των ηλιακών panel. Οι ασαφείς ελεγκτές χρησιμοποιούν γλωσσικές μεταβλητές και κανόνες για να λαμβάνουν αποφάσεις και να προσαρμόζουν τον προσανατολισμό του ηλιακού συστήματος παρακολούθησης. Μπορούν να παρέχουν αξιόπιστο έλεγχο ακόμη και όταν αντιμετωπίζουν πολύπλοκα και αβέβαια περιβάλλοντα.

- **Ελεγκτές πρόβλεψης μοντέλου (Model Predictive Controller)**

Είναι μια προηγμένη στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιεί ένα μαθηματικό μοντέλο του συστήματος για να προβλέψει τη μελλοντική του συμπεριφορά. Οι ελεγκτές MPC βελτιστοποιούν τη θέση των ηλιακών panel επιλύοντας ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με βάση την προβλεπόμενη συμπεριφορά του συστήματος. Αυτοί οι ελεγκτές λαμβάνουν υπόψη διάφορους περιορισμούς του συστήματος, όπως μηχανικά όρια και ενεργειακή απόδοση, και μπορούν να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες σε πραγματικό χρόνο. Είναι γνωστοί για την ικανότητά τους να χειρίζονται πολύπλοκα συστήματα και να βελτιστοποιούν την απόδοση σε μεγαλύτερους χρονικούς ορίζοντες.

- **Ελεγκτές τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Network Controllers)**

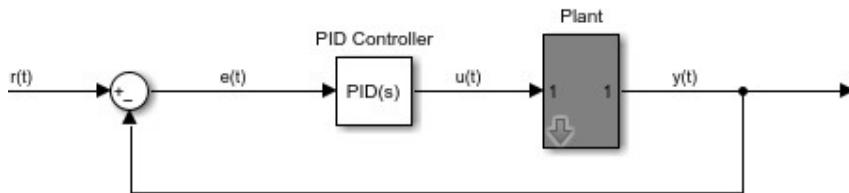
Οι ελεγκτές ANN χρησιμοποιούν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τα οποία είναι υπολογιστικά μοντέλα εμπνευσμένα από τη δομή και τη λειτουργία των βιολογικών νευρωνικών δικτύων. Μπορούν να μαθαίνουν και να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες εισόδους και να βελτιστοποιούν την τοποθέτηση των ηλιακών panel με βάση τα δεδομένα εκπαίδευσης. Αυτοί οι ελεγκτές μπορούν να καταγράψουν πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ μεταβλητών εισόδου, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η

θέση του panel και η παραγωγή ενέργειας και να λαμβάνουν ακριβείς αποφάσεις ελέγχου. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι όταν πρόκειται για μη γραμμικά και δυναμικά συστήματα.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική χρησιμοποιήθηκε ο PID ελεγκτής και θα γίνει περαιτέρω ανάλυση παρακάτω.

## 9.2 Λειτουργία PID

Στην εικόνα 9.1 παρουσιάζεται το block διάγραμμα ενός απλού συστήματος κλειστού βρόχου στο πεδίο του χρόνου και η εξίσωση εξόδου του PID ελεγκτή.



$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int e(t) \cdot dt + K_D \cdot \frac{de}{dt}$$

**Εικόνα 9.1.** Δομικό Block διάγραμμα ενός απλού συστήματος κλειστού βρόχου και εξίσωση εξόδου του PID ελεγκτή.

Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα θα αναλυθεί ο τρόπος λειτουργίας του PID ελεγκτή.

Η μεταβλητή (**e**) αντιπροσωπεύει το σφάλμα παρακολούθησης, δηλαδή είναι η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής εξόδου (**r**) και της πραγματικής εξόδου (**y**). Αυτό το σήμα σφάλματος (**e**) τροφοδοτείται στον PID ελεγκτή και ο ελεγκτής υπολογίζει τόσο την παράγωγο όσο και το ολοκλήρωμα αυτού του σήματος σφάλματος ως προς το χρόνο. Το σήμα ελέγχου (**u**) προς τη μονάδα είναι ίσο με το αναλογικό κέρδος (**K<sub>P</sub>**) επί το μέγεθος του σφάλματος συν το ολοκληρωτικό κέρδος (**K<sub>I</sub>**) επί το ολοκλήρωμα του σφάλματος συν το παραγωγικό κέρδος (**K<sub>D</sub>**) επί την παράγωγο του σφάλματος.

Αυτό το σήμα ελέγχου (**u**) τροφοδοτείται στο plant και λαμβάνεται η νέα έξοδος (**y**). Η νέα έξοδος (**y**) τροφοδοτείται στη συνέχεια και συγκρίνεται με την αναφορά για να βρεθεί το νέο σήμα σφάλματος (**e**). Ο ελεγκτής λαμβάνει αυτό το νέο σήμα σφάλματος και υπολογίζει μια ενημέρωση της εισόδου ελέγχου. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται όσο ο ελεγκτής είναι σε ισχύ.

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός ελεγκτή PID βρίσκεται εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό **Laplace** στην εξίσωση της εικόνας **9.1**.

Η συνάρτηση μεταφοράς φαίνεται παρακάτω.

$$U(s) = K_P \cdot E(s) + K_I \cdot \frac{E(s)}{s} + K_D \cdot E(s) \cdot s \Rightarrow \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s$$

## 9.3 Τα χαρακτηριστικά και η σημασία των όρων P, I, D

Όπως είναι γνωστό ο PID ελεγκτής αποτελείται από τρεις όρους.

- Τον αναλογικό P (**K<sub>P</sub>**), Proportional.
- Τον ολοκληρωτικό I (**K<sub>I</sub>**), Integrator.

- Τον παραγωγικό  $D$  ( $K_D$ ), Derivative.

Τα χαρακτηριστικά και η σημασία αυτών των όρων στον ελεγκτή αναλύονται παρακάτω.

- **Αναλογικός όρος P**

Η αύξηση του αναλογικού κέρδους ( $K_P$ ) έχει ως αποτέλεσμα την αναλογική αύξηση του σήματος ελέγχου για το ίδιο επίπεδο σφάλματος. Το γεγονός ότι ο ελεγκτής θα "ωθεί" πιο δυνατά για ένα δεδομένο επίπεδο σφάλματος τείνει να κάνει το σύστημα κλειστού βρόχου να αντιδράσει πιο γρήγορα, αλλά και να υπερβεί την επιθυμητή τιμή περισσότερο (**overshoot**). Ένα άλλο αποτέλεσμα της αύξησης του  $K_P$  είναι ότι τείνει να μειώσει, αλλά όχι να εξαλείψει, το σφάλμα μόνιμης κατάστασης (**steady-state error**).

- **Ολοκληρωτικός όρος I**

Η προσθήκη ενός ολοκληρωτικού όρου στον ελεγκτή ( $K_I$ ) τείνει να συμβάλλει στη μείωση του σφάλματος μόνιμης κατάστασης. Εάν υπάρχει ένα σταθερό σφάλμα, ο ολοκληρωτής αυξάνει το σήμα ελέγχου και οδηγεί το σφάλμα προς το μηδέν. Ένα μειονέκτημα του ολοκληρωτικού όρου, ωστόσο, είναι ότι μπορεί να κάνει το σύστημα πιο αργό και με μικρές ταλαντώσεις, καθώς όταν το σήμα σφάλματος αλλάζει πρόσημο, μπορεί να χρειαστεί λίγος χρόνος για να "ξετυλιχθεί" ο ολοκληρωτής.

- **Παραγωγικός όρος D**

Η προσθήκη ενός παράγωγου όρου στον ελεγκτή ( $K_D$ ) προσθέτει την ικανότητα του ελεγκτή να "προβλέπει" το σφάλμα. Με τον απλό αναλογικό έλεγχο, εάν το  $K_P$  είναι σταθερό, ο μόνος τρόπος για να αυξηθεί ο έλεγχος είναι εάν αυξηθεί το σφάλμα. Με τον έλεγχο της παραγωγού, το σήμα ελέγχου μπορεί να γίνει μεγάλο αν το σφάλμα αρχίσει να παίρνει κλίση προς τα πάνω, ακόμη και όταν το μέγεθος του σφάλματος είναι ακόμη σχετικά μικρό. Αυτή η πρόβλεψη τείνει να προσθέσει απόσβεση στο σύστημα, μειώνοντας έτσι την υπέρβαση από την επιθυμητή τιμή. Η προσθήκη του όρου της παραγωγού, ωστόσο, δεν έχει καμία επίδραση στο σφάλμα μόνιμης κατάστασης.

Οι γενικές επιδράσεις κάθε παραμέτρου του ελεγκτή ( $K_P, K_I, K_D$ ) σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου συνοψίζονται στον παρακάτω **πίνακα 9.1**.

Να σημειωθεί πως αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές ισχύουν σε πολλές περιπτώσεις, αλλά όχι σε όλες. Αν πραγματικά θέλει κάποιος να γνωρίζει την επίδραση της ρύθμισης των επιμέρους κερδών, θα πρέπει να κάνει περισσότερη ανάλυση ή θα πρέπει να εκτελέσει δοκιμές στο πραγματικό σύστημα.

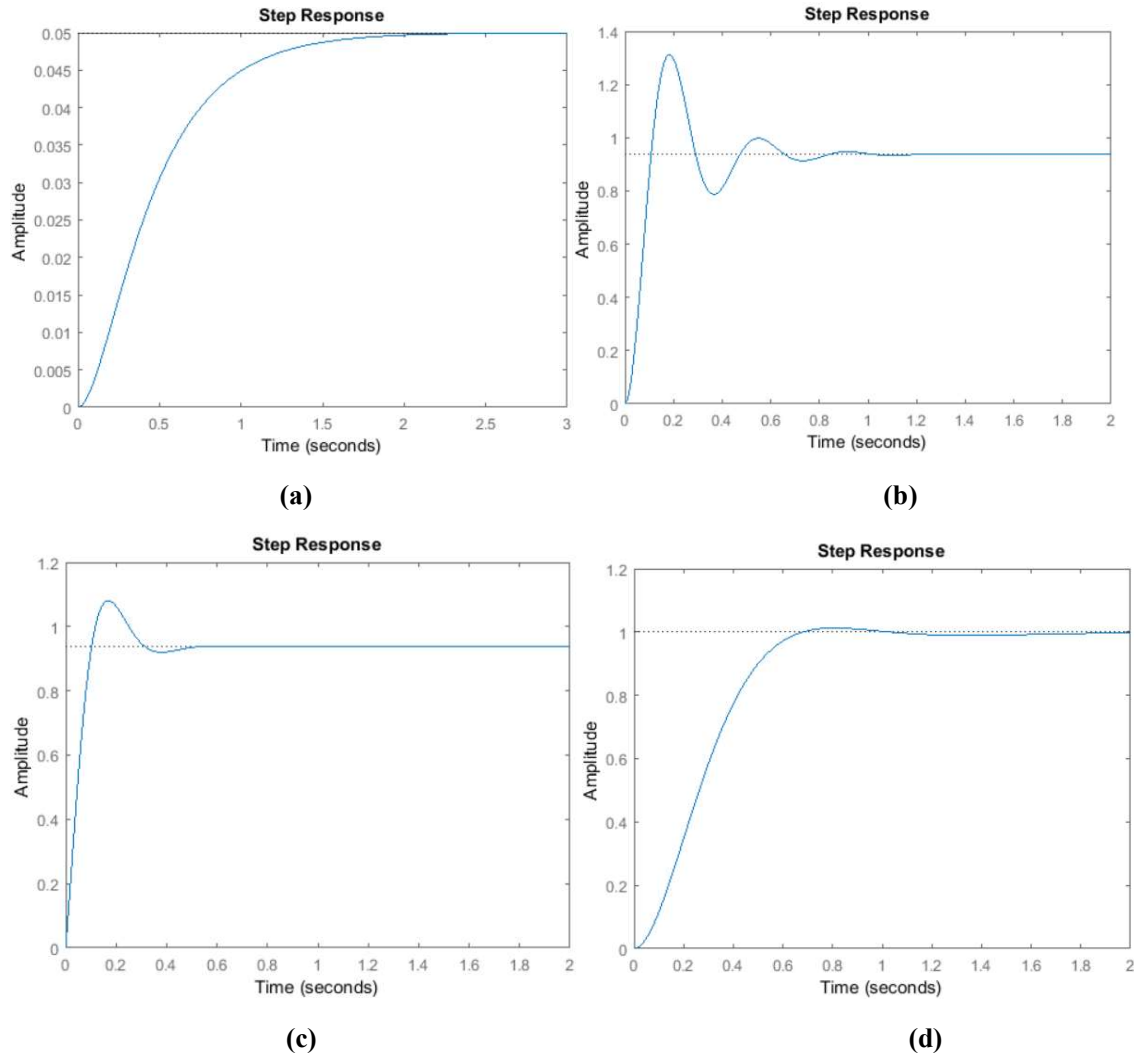
**Πίνακας 9.1.** Οι γενικές επιδράσεις κάθε παραμέτρου του ελεγκτή ( $K_P, K_I, K_D$ ) σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου. [45]

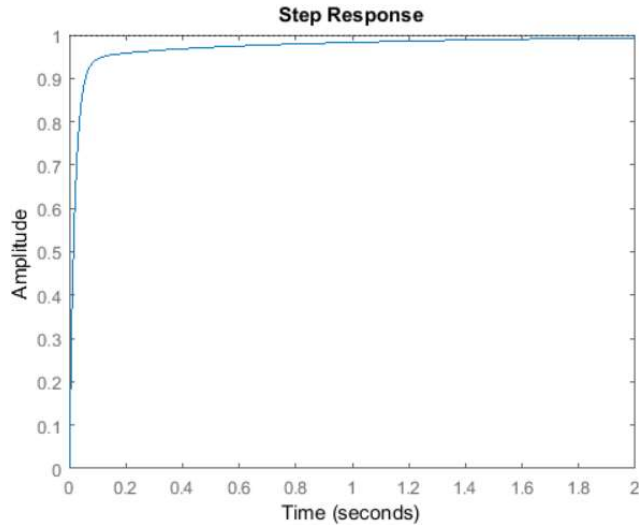
| Παράμετρος Ελεγκτή | Χρόνος Ανόδου | Overshoot | Χρόνος Ισορροπίας | Σφάλμα Μόνιμης Κατάστασης |
|--------------------|---------------|-----------|-------------------|---------------------------|
| $K_P$              | Μείωση        | Αύξηση    | Μικρή αλλαγή      | Μείωση                    |
| $K_I$              | Μείωση        | Αύξηση    | Αύξηση            | Μείωση                    |
| $K_D$              | Μικρή αλλαγή  | Μείωση    | Μείωση            | Καμία Αλλαγή              |

Να σημειωθεί πως ο αλγόριθμος του PID ελεγκτή δεν παρέχει τον βέλτιστο έλεγχο του κάθε συστήματος. Κάποια συστήματα μπορεί να χρειάζονται μόνο έναν ή δύο από τους όρους του PID για

να επιτυγχάνεται ο σωστός έλεγχος του συστήματος και αυτό σημαίνει πως οι όροι που δεν θα χρησιμοποιούνται θα μηδενίζονται. Για παράδειγμα ο σωστός έλεγχος μπορεί να επιτευχθεί με χρήση **PI, PD, P, I**. Οι PI ελεγκτές χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά, δεδομένου ότι η δράση της παραγώγου είναι ευαίσθητη στο θόρυβο μέτρησης, ενώ η απουσία του ολοκληρωμένου όρου μπορεί να εμποδίσει το σύστημα να φτάσει στην επιθυμητή τιμή.

Στην εικόνα 9.2 φαίνονται κάποια παραδείγματα χρήσης P, PD, PI και PID ελεγκτή στο ίδιο σύστημα.





(e)

**Εικόνα 9.2.** Χρονική απόκριση συστήματα χωρίς ελεγκτή (a), με τον P όρο (b), Με τον P και D όρο (c), Με τον P και τον I όρο (d), Με όλους τους όρους (e).

Παρατηρώντας όλες τις περιπτώσεις της εικόνας 9.2, συμπεραίνεται πως όσα ειπώθηκαν για τα χαρακτηριστικά του κάθε όρου του PID ελεγκτή επαληθεύονται.

#### 9.4 Μέθοδοι συντονισμού PID ελεγκτών

Ο συντονισμός ενός PID ελεγκτή περιλαμβάνει την επιλογή κατάλληλων τιμών για τα αναλογικά, ολοκληρωτικά και παραγωγικά κέρδη ( $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ ) ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση ελέγχου. Υπάρχουν διάφορες διαθέσιμες μέθοδοι ρύθμισης, η καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και ζητήματα. Εδώ, θα αναφερθούν ορισμένες συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι συντονισμού για PID ελεγκτές:

- **Χειροκίνητος συντονισμός**

Είναι μια απλή μέθοδος όπου τα κέρδη του PID ρυθμίζονται χειροκίνητα με βάση την εμπειρία του χειριστή και την κατανόηση του συστήματος. Περιλαμβάνει την επαναληπτική ρύθμιση των κερδών και την παρατήρηση της απόκρισης του συστήματος μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση. Η χειροκίνητη ρύθμιση παρέχει ευελιξία και μπορεί να είναι αποτελεσματική όταν ο χειριστής έχει καλή κατανόηση της δυναμικής του συστήματος. Ωστόσο, μπορεί να είναι χρονοβόρος και μπορεί να μην αποδίδει πάντα τα βέλτιστα αποτελέσματα, ιδίως για πολύπλοκα συστήματα.

- **Μέθοδος Ziegler-Nichols**

Η μέθοδος Ziegler-Nichols είναι μια δημοφιλής και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος ρύθμισης που βασίζεται στην απόκριση βημάτων του συστήματος. Περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- a) Θέστε όλα τα κέρδη του PID ( $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ ) στο μηδέν.
- b) Αυξήστε το αναλογικό κέρδος ( $K_P$ ) έως ότου το σύστημα παρουσιάσει συνεχείς ταλαντώσεις.
- c) Μετρήστε το τελικό κέρδος ( $K_U$ ) και την περίοδο ταλάντωσης ( $T_U$ ).
- d) Υπολογίστε τα κέρδη του PID χρησιμοποιώντας ειδικούς τύπους με βάση το τελικό κέρδος και την περίοδο ταλάντωσης.

- **Μέθοδος Cohen-Coon:**

Η μέθοδος Cohen-Coon είναι μια άλλη μέθοδος συντονισμού που χρησιμοποιεί την βηματική απόκριση του συστήματος. Περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- a) Προσδιορισμός των χρονικών σταθερών και των χρονικών καθυστερήσεων της διαδικασίας με βάση την βηματική απόκριση.
- b) Υπολογισμός των κερδών PID με τη χρήση ειδικών τύπων με βάση τις προσδιορισμένες παραμέτρους.

Η μέθοδος Cohen-Coon είναι σχετικά απλή στην εφαρμογή και παρέχει λογικά αποτελέσματα συντονισμού. Ωστόσο, προϋποθέτει ότι η δυναμική της διεργασίας μπορεί να προσεγγιστεί από ένα μοντέλο πρώτης τάξης συν χρονική καθυστέρηση, το οποίο μπορεί να μην είναι πάντα ακριβές για πολύπλοκα συστήματα.

- **Αυτόματη μέθοδος συντονισμού**

Το περιβάλλον του Simulink προσφέρει την εφαρμογή PID Tuner, ένα ισχυρό εργαλείο για αυτόματο συντονισμό των παραμέτρων του PID. Η εφαρμογή PID Tuner χρησιμοποιεί τεχνικές με τις οποίες γίνεται η αναγνώριση του συστήματος και των δεδομένων της βηματικής απόκρισης κλειστού βρόχου για τον υπολογισμό των βέλτιστων κερδών PID.

Η εφαρμογή PID Tuner παρέχει οπτικοποιήσεις της απόκρισης του συστήματος και επιτρέπει στους χρήστες να προσαρμόζουν διαδραστικά τα κριτήρια απόδοσης για να επιτύχουν την επιθυμητή απόκριση ελέγχου. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τους χρήστες που επιθυμούν μια αυτοματοποιημένη διαδικασία ρύθμισης με βάση τις μετρήσεις του συστήματος.

Περαιτέρω ανάλυση της συγκεκριμένης μεθόδου θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.

## 9.5 Περιορισμοί του PID ελεγκτή

Ενώ οι ελεγκτές PID εφαρμόζονται σε πολλά προβλήματα ελέγχου και συχνά αποδίδουν ικανοποιητικά χωρίς βελτιώσεις, μπορούν να αποδώσουν ανεπαρκώς σε ορισμένες εφαρμογές και γενικά δεν παρέχουν βέλτιστο έλεγχο. Η θεμελιώδης δυσκολία με τον έλεγχο PID είναι ότι πρόκειται για ένα σύστημα ελέγχου με ανάδραση, με σταθερές παραμέτρους και χωρίς άμεση γνώση της διεργασίας, και συνεπώς η συνολική απόδοση είναι αντιδραστική και αποτελεί συμβιβασμό.

Οι ελεγκτές PID, όταν χρησιμοποιούνται μόνοι τους, μπορούν να δώσουν κακή απόδοση όταν τα κέρδη του βρόχου PID πρέπει να μειωθούν ώστε το σύστημα ελέγχου να μην υπερβεί, να μην ταλαντωθεί ή να μην κυνηγήσει την τιμή του σημείου ρύθμισης ελέγχου. Έχουν επίσης δυσκολίες στην παρουσία μη γραμμικοτήτων, μπορεί να συμβιβάζουν τη ρύθμιση με το χρόνο απόκρισης και έχουν καθυστέρηση στην απόκριση σε μεγάλες διαταραχές. Τέλος, ένα πρόβλημα που υπάρχει με τον διαφορικό όρο είναι ότι ενισχύει τις μετρήσεις υψηλότερης συχνότητας ή το θόρυβο διεργασίας, που μπορεί να προκαλέσει αισθητές αλλαγές στην έξοδο. Συχνά είναι χρήσιμο να φιλτράρονται οι μετρήσεις με ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης για να αφαιρεθεί ο θόρυβος των υψηλών συχνοτήτων.

## 10 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10<sup>ο</sup> : Σχεδιασμός Βάσει Μοντελοποίησης και Προσομοίωση (Model-based design and Simulation)

Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά θα γίνει μία εισαγωγή του τρόπου λειτουργίας του συστήματος της ηλιακής παρακολούθησης. Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση και η προσομοίωση του σερβοκινητήρα, η οποία θα περιλαμβάνει την μοντελοποίηση – προσομοίωση του DC κινητήρα και τον έλεγχο της ευστάθειας. Επίσης θα γίνει η σχεδίαση του ελεγκτή που θα έχει το σύστημα και θα περιλαμβάνει την ανάλυση του σταδίου του control design και την ολοκλήρωση του συγκεκριμένου σταδίου με την ψηφιακή μορφή των PID ελεγκτών για το Arduino. Ακόμη θα γίνει η προσομοίωση του συστήματος που περιλαμβάνεται στο στάδιο SIL και θα αναλυθούν τα δομικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη του συγκεκριμένου σταδίου καθώς και η απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Τέλος θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του Hardware In the Loop (HIL) που θα περιλαμβάνει το στάδιο PIL, την ανάλυση του μοντελοποιημένου κυκλώματος του σταδίου HIL και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Όλα αυτά θα λάβουν χώρα στο περιβάλλον του MATLAB-Simulink. [50] [51] [52]

### 10.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3, το κύκλωμα που είναι υπεύθυνο για την ανίχνευση του ήλιου, όταν αυτός υπάρχει στον ορίζοντα, είναι το quadratic detector, το οποίο έχει ως κύριο εξάρτημα για την ανίχνευση του ήλιου τις φωτοδιόδους. Όταν ο ήλιος απουσιάζει κατά την διάρκεια της ημέρας ή χάνετε για μικρό χρονικό διάστημα λόγω συννεφιάς, τότε λαμβάνουν δράση οι εξισώσεις του ήλιου και με τα αποτελέσματα που δίνουν κινούν κατάλληλα το φωτοβολταϊκό. Το συγκεκριμένο σύστημα λειτουργεί και με τις δύο μεθόδους. Δηλαδή, όταν υπάρχει ηλιακό φως το σύστημα του quadratic detector καθορίζει το πως θα κινηθεί το φωτοβολταϊκό για να είναι κεντραρισμένο με τις ακτίνες του ήλιου. Όταν υπάρχει απουσία του ηλιακού φωτός, τότε την πληροφορία για τις κινήσεις που θα πράξουν οι σερβοκινητήρες την δέχονται από τις εξισώσεις του ήλιου.

Η περιστροφή του συστήματος επιτυγχάνεται με δύο σερβοκινητήρες, όπου ο ένας είναι κατάλληλα τοποθετημένος για να στρέφει το φωτοβολταϊκό στον άξονα X ενώ ο άλλος είναι τοποθετημένος για να το στρέφει στον άξονα Y.

### 10.2 Μοντελοποίηση - Προσομοίωση του σερβοκινητήρα

Στην παρούσα ενότητα θα πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση του σερβοκινητήρα. Η σχεδίαση βάση μοντελοποίησης του συστήματος solar tracking ξεκινάει από την μοντελοποίηση του σερβοκινητήρα καθώς είναι από τα βασικότερα εξαρτήματα του συστήματος. Με την επιτυχή μοντελοποίηση του σερβοκινητήρα θα ξεκινήσει η διαδικασία της σχεδίασης του συστήματος με τα στάδια που περιλαμβάνει το **MBD** που παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.

#### 10.2.1 Μοντελοποίηση - Προσομοίωση του κινητήρα DC

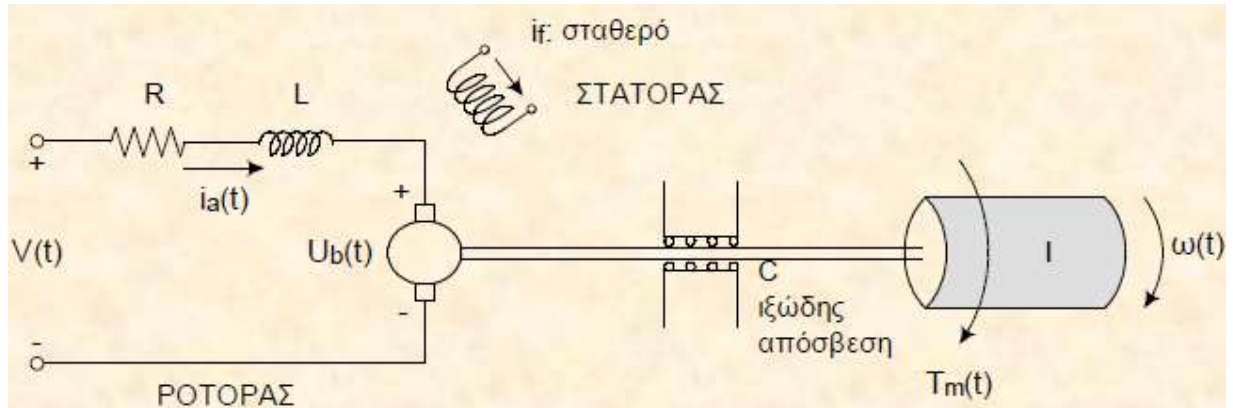
Για να επιτευχθεί και να ολοκληρωθεί η προσομοίωση ενός κινητήρα πρέπει είτε να μοντελοποιηθεί βάση των μαθηματικών εξισώσεων που τον διέπουν, έτσι ώστε να υπολογιστεί η συνάρτηση μεταφοράς του, ή μέσω έτοιμων βιβλιοθηκών που διαθέτουν κάποια toolboxes του Simulink στα οποία υπάρχουν έτοιμα δομικά στοιχεία τα οποία αναπαριστούν κινητήρες.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική επιλέχθηκε η χρήση της πρώτης επιλογής που περιέχει την εύρεση της συνάρτησης μεταφοράς του κινητήρα.

Όπως θα αναλυθεί παρακάτω από τη τάση που εφαρμόζεται στον οπλισμό και από τη γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα θα υπολογιστεί η συνάρτηση μεταφοράς.

Για την εύρεση αυτών των δύο μεγεθών θα χρησιμοποιηθούν οι δύο διαφορικές εξισώσεις. Η μία προκύπτει από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και η άλλη από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του.

Στην εικόνα 10.1 παρατηρείται ένα κύκλωμα ενός DC κινητήρα.



**Εικόνα 10.1.** Κύκλωμα DC κινητήρα.

Με τη βοήθεια του παραπάνω κυκλώματος δίνεται η δυνατότητα σύνταξης και κατανόησης των διαφορικών εξισώσεων τόσο με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά όσο και με τα μηχανικά.

Το παραπάνω κύκλωμα παρατηρείται πως αποτελείται από μια πηγή τάσης ( $V(t)$ ) και μία αυτεπαγωγή ( $L$ ), με μία αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά ( $R$ ) και με μία επαγόμενη τάση ( $U_b(t)$ ) συνδεδεμένη σε σειρά τα οποία αναπαριστούν το πηνίο του οπλισμού. Η  $U_b(t)$  αντιτίθεται στην  $V(t)$  και δημιουργείται από την περιστροφή του ηλεκτρικού πηνίου μέσω των σταθερών γραμμών ροής των μόνιμων μαγνητών. Επίσης η  $U_b(t)$  ονομάζεται και οπίσθια ηλεκτρομαγνητική δύναμη (**BEMF**). Το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα του ρότορα είναι το  $i_a(t)$ . Ακόμη,  $T_m(t)$  είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή και  $\omega(t)$  είναι η ταχύτητα περιστροφής του οπλισμού.

- **Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά**

Από το κύκλωμα του ρότορα:

Με τη βοήθεια του νόμου του Kirchhoff και του Ohm προκύπτει η παρακάτω σχέση που στη συνέχεια έχει εφαρμοστεί και ο μετασχηματισμός Laplace.

$$V(t) = R \cdot i_a(t) + L \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + U_b(t) \xrightarrow{\text{Laplace}} V(s) = R \cdot I(s) + L \cdot I(s) \cdot s + U_b(s) \quad (1)$$

Για την **BEMF** Ισχύει ότι:

$$U_b(t) = k_e \cdot \omega(t) \xrightarrow{\text{Laplace}} U_b(s) = k_e \cdot \Omega(s) \quad (2)$$

Όπου  $k_e$  είναι η σταθερά ταχύτητας που καθορίζεται από την πυκνότητα ροής των μόνιμων μαγνητών, την απροθυμία του σιδερένιου πυρήνα του οπλισμού και τον αριθμό των στροφών της περιέλιξης του οπλισμού

Επίσης στο (S.I) ισχύει:  $k = k_e = k_T$  (3)



Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Όπου  $k_T$  είναι η σταθερά ροπής η οποία καθορίζεται από τα ίδια χαρακτηριστικά που καθορίζεται και η  $k_e$ .

$$\text{Από (1), (2) και (3)} \Rightarrow V(s) = R \cdot I(s) + L \cdot I(s) \cdot s + k \cdot \Omega(s) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V(s) = I(s) \cdot [R + L \cdot s] + k \cdot \Omega(s) \quad (4)$$

• **Μηχανικά χαρακτηριστικά:**

Από το μηχανικό σύστημα ισχύει η παρακάτω σχέση όπου στη συνέχεια έχει εφαρμοστεί και ο μετασχηματισμός Laplace.

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_m - c \cdot \omega \xrightarrow{\text{Laplace}} J \cdot \Omega(s) \cdot s = T_m(s) - c \cdot \Omega(s) \quad (5)$$

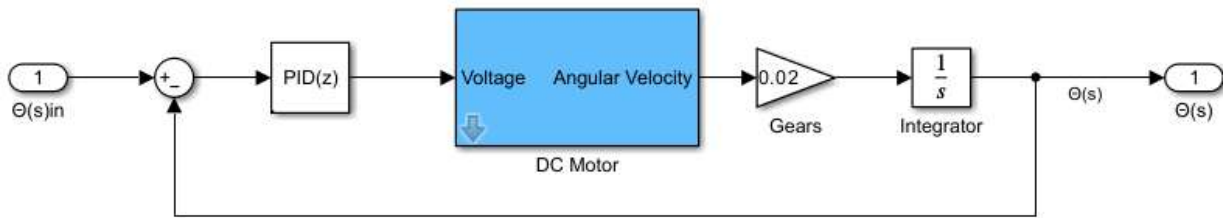
Όπου,  $J$  είναι η αδράνεια του δρομέα και  $c$  ο συντελεστής απόσβεσης.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι ανάλογη προς το ρεύμα μέσω της περιέλιξης σπλισμού και ισχύει ότι:

$$T_m = k_T \cdot i_a \xrightarrow{\text{Laplace}} T_m = k_T \cdot I(s) \quad (6)$$

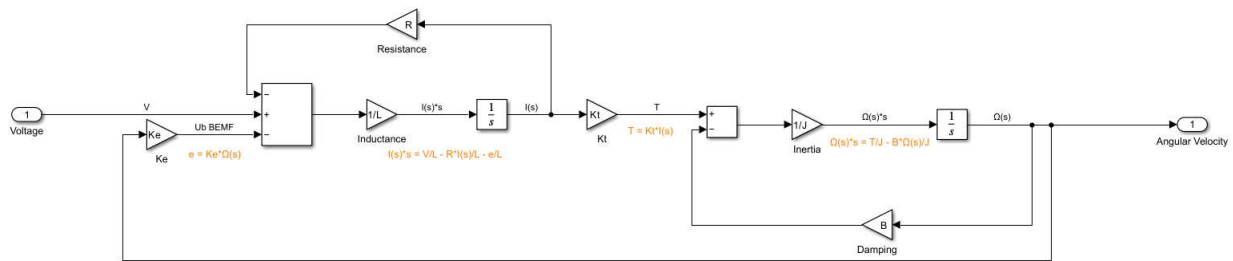
$$\text{Από (5), (6) και (3)} \Rightarrow J \cdot \Omega(s) \cdot s = k \cdot I(s) - c \cdot \Omega(s) \Rightarrow \Omega(s) = \frac{k \cdot I(s)}{J \cdot s + c} \quad (7)$$

Στην εικόνα 10.2 αναπαριστάτε η μοντελοποίηση ενός σερβοκινητήρα.



**Εικόνα 10.2.** Μοντελοποίηση του σερβοκινητήρα.

Με βάση τις εξισώσεις (7) και (4) δημιουργήθηκε, όπως φαίνεται και στην εικόνα 10.3, τα δομικά στοιχεία ενός DC κινητήρα που χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη της προσομοίωσης του σερβοκινητήρα. Το συγκεκριμένο εμπεριέχεται στο εσωτερικό του subsystem **DC Motor**.



**Εικόνα 10.3.** Μοντελοποίηση DC κινητήρα χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα δομικά στοιχεία που υλοποιούν τις διαφορικές του εξισώσεις.

Από την εικόνα 10.2 παρατηρείται πως υπάρχει ο ελεγκτής PID, που είναι κρίσιμης σημασίας για την σωστή αναπαράσταση του σερβοκινητήρα. Αυτό συμβαίνει για να διατηρείται η ευστάθεια στον σερβοκινητήρα καθόλη τη λειτουργία του και για να επιτυγχάνει την επιθυμητή θέση που πρέπει να περιστραφεί ο κινητήρας.

### 10.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα

- Πειραματικός DC κινητήρας με ξεχωριστή διέγερση

$$k_T = 0.06 \text{ Nm/A}$$

$$k_e = 0.06 \text{ Ns/rad}$$

$$J = 6.2 \cdot 10^{-4} \text{ Nms}^2/\text{rad}$$

$$\omega_{max} = \text{rad/s}$$

$$I_{max} = 2 \text{ A}$$

$$\omega_{NL} = \text{rad/s}$$

$$P_{max} = 54 \text{ Watt}$$

$$R = 1.2 \Omega$$

$$B = 10^{-4} \text{ Nms/rad}$$

- Labvolt DC motor (model 8211-0A)

$$k_T = 2.161 \text{ Nm/A}$$

$$k_e = 2.161 \text{ Ns/rad}$$

$$J = 0.47 \text{ Nms}^2/\text{rad}$$

$$\omega_{max} = 101.108 \text{ rad/s}$$

$$I_{max} = 1.5 \text{ A}$$

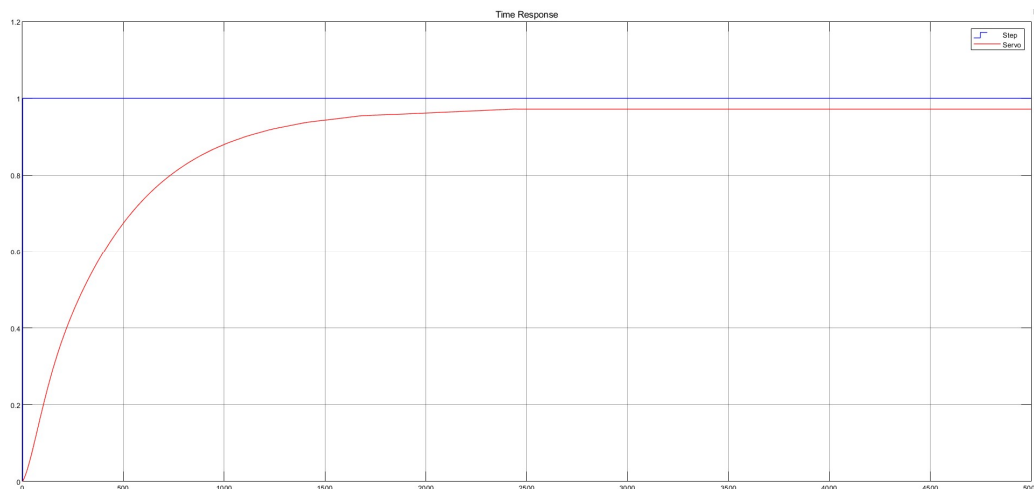
$$\omega_{NL} = 111.051 \text{ rad/s}$$

$$P_{max} = 472.643 \text{ Watt}$$

$$R = 30.467 \Omega$$

$$B = 0.046 \text{ Nms/rad}$$

Στην εικόνα 10.4 απεικονίζεται η απόκριση του σερβοκινητήρα έχοντας ως είσοδο τη βηματική συνάρτηση.



**Εικόνα 10.4.** Απόκριση του σερβοκινητήρα με είσοδο βηματική συνάρτηση.

Επειδή για κανένα σύστημα δεν γίνεται να γνωρίζει με σιγουριά κάποιος πως είναι ευσταθές, παρακάτω θα ελεγχθεί η ευστάθεια του συστήματος με τη βοήθεια του Γεωμετρικού Τόπου Ριζών (ΓΤΡ).

### 10.2.3 Έλεγχος ευστάθειας

Από τις εξισώσεις (4) και (7) και με τη βοήθεια του διαγράμματος που φαίνεται στην εικόνα 10.4 εύκολα συμπεραίνουμε πως η συνάρτηση μεταφοράς είναι η εξής:

$$F(s) = \frac{\Omega(s)}{I(s) \cdot [R + L \cdot s] + k \cdot \Omega(s)} \Rightarrow F(s) = \frac{\frac{k}{L \cdot J}}{s^2 + \left(\frac{B}{J} + \frac{R}{L}\right) \cdot s + \frac{R \cdot B}{J \cdot L} + \frac{k^2}{J \cdot L}}$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω εξίσωση τις τιμές των μεταβλητών που φαίνονται παρακάτω, καταλήγουμε στην κάτωθι συνάρτηση μεταφοράς:

- $L = 1.8 \cdot 10^{-4} H$
- $R = 2.6 \Omega$
- $k_T = 7.67 \cdot 10^{-3} Nm/A$
- $k_e = 7.67 \cdot 10^{-3} Ns/rad$
- $J = 5.3 \cdot 10^{-7} Nms^2/rad$
- $B = 7.7 \cdot 10^{-6} Nms/rad$

$$F(s) = \frac{8.0398322851 \cdot 10^7}{s^2 + 14458.9727463312 \cdot s + 826508.3857442348}$$

Από τον κατασκευαστή του ο σερβοκινητήρας περιέχει ένα κύκλωμα το οποίο απεικονίζει ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου προκειμένου η γωνία εξόδου να διορθώνεται και να ισούται με την επιθυμητή γωνία.

Αρα τα χαρακτηριστικά του PID ελεγκτή να είναι τα εξής:

$$P + I \cdot \frac{1}{s} + D \cdot \frac{N}{1 + N \cdot \frac{1}{s}}$$

Όπου,

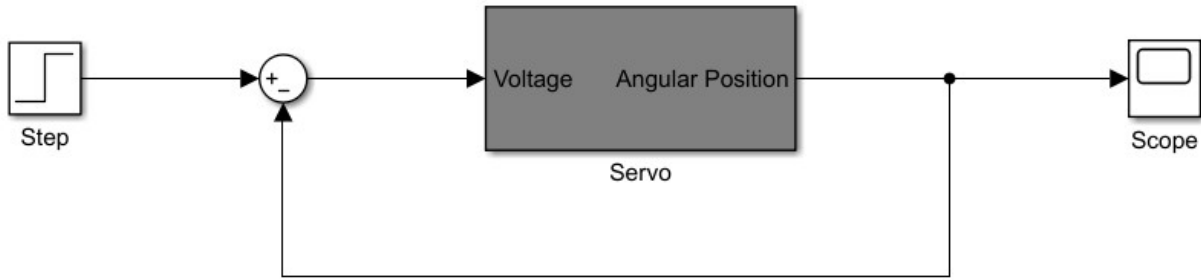
- $P=0.0733224326$
- $I=8.0015967198 \cdot 10^{-5}$
- $D=0.1659698816$

Βλέποντας την εικόνα 10.3 που αναπαρίσταται ολόκληρη η μοντελοποίηση του σερβοκινητήρα εξάγεται η συνάρτηση μεταφοράς του σερβοκινητήρα.

$$F_1(s) = \frac{7.555041135 \cdot 10^6 \cdot s^2 + 739808.4352 \cdot s + 800.324412}{s^4 + 14459.09715 \cdot s^3 + 8.383348308 \cdot 10^6 \cdot s^2 + 842631.2953 \cdot s + 800.324412}$$

Καθώς η συνάρτηση μεταφοράς  $F_1(s)$  θα τοποθετηθεί σε βρόχο αρνητικής ανάδρασης θα ελεγχθεί η ευστάθεια και το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση.

Το κύκλωμα από το οποίο θα ελεγχθεί η ευστάθειά του φαίνεται στην εικόνα 10.5, καθώς ήταν αυτό που χρησιμοποιήθηκε.



**Εικόνα 10.5.** Κύκλωμα στο οποίο θα γίνει έλεγχος ευστάθειας.

Η συνάρτηση μεταφοράς του συγκεκριμένου κυκλώματος είναι η εξής:

$$F_2(s) = \frac{F_1(s)}{1+F_1(s) \cdot H(s)} = \frac{7.555041135 \cdot s^2 + 739808.4352 \cdot s + 800.324412}{s^4 + 14459.09715 \cdot s^3 + 1.593838944 \cdot 10^7 \cdot s^2 + 1.582439731 \cdot 10^6 \cdot s + 1600.648824}$$

Για να ελέγξουμε την ευστάθεια του συγκεκριμένου συστήματος αυτομάτου ελέγχου θα υπολογιστούν οι πόλοι του με τη βοήθεια του MATLAB.

Γράφοντας στο μέρος του Command Window τις εξής εντολές:

```
Command Window
>> y=[1,14459.09715,1.593838944e7,1.582439731e6,1600.648824];
poloi=roots(y);
```

Υπολογίζονται οι ζητούμενοι πόλοι. Το αποτέλεσμα είναι το εξής:

**poloi: s1 = -13256.8284362784, s2 = -1202.1694200734**  
**s3 = -0.0982716205, s4 = -0.0010220276**

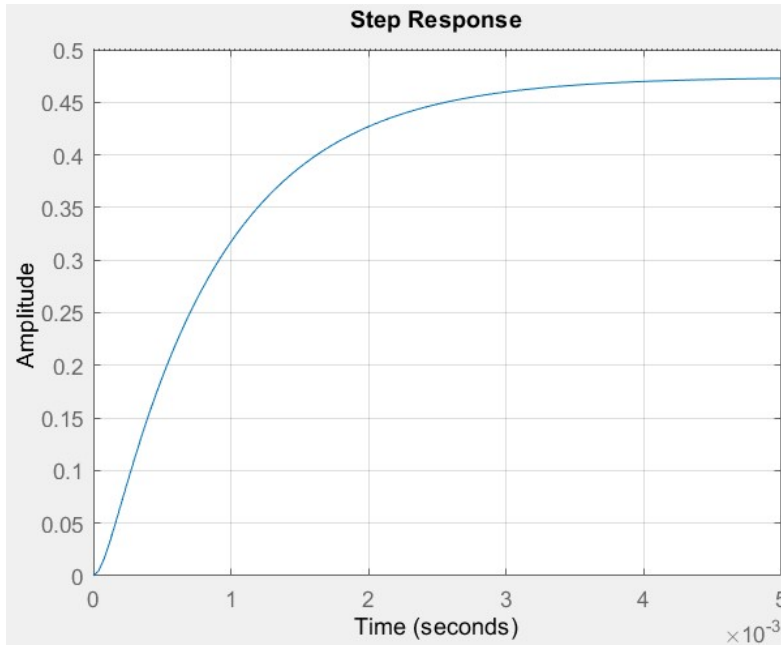
Παρατηρώντας τα συγκεκριμένα αποτελέσματα των πόλων συμπεραίνεται πως το σύστημα είναι ευσταθές, καθώς οι πόλοι του βρίσκονται στο αριστερό ημιεπίπεδο.

Στη συνέχεια απεικονίστηκε με τη βοήθεια του MATLAB η χρονική απόκριση του συγκεκριμένου συστήματος έχοντας ως είσοδο τη μοναδιαία βηματική συνάρτηση.

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε είναι ο εξής:

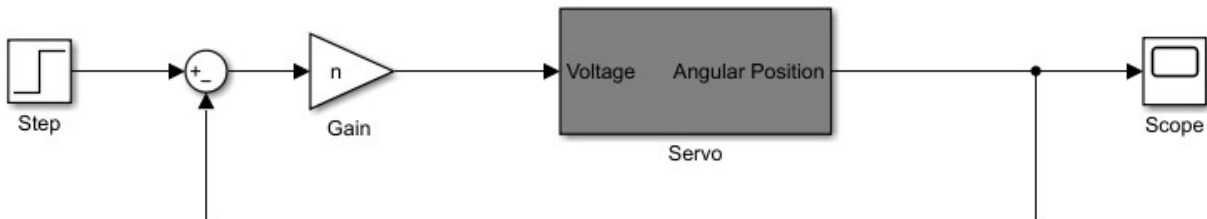
```
Command Window
>> Numerator =[7.555041135e6,739808.4352,800.324412];
Denominator =[1,14459.09715,1.593838944e7,1.582439731e6,1600.648824];
F=tf(Numerator,Denominator)
figure(1);
step(F)
grid on
```

Στην εικόνα 10.6 φαίνεται η χρονική απόκριση που μας εμφάνισε ο παραπάνω κώδικας



**Εικόνα 10.6.** Χρονική απόκριση του συστήματος της εικόνας 10.5.

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρείται πως η έξοδος του συστήματος, έχοντας ως είσοδο την μοναδιαία βηματική συνάρτηση, έχει απόκλιση σχεδόν 52% από την επιθυμητή τιμή που είναι η μονάδα. Για την αντιμετώπιση της συγκεκριμένης απόκλισης θα μπει ένα δομικό στοιχείο Gain πριν τον σερβοκινητήρα όπως φαίνεται και στη εικόνα 10.7.



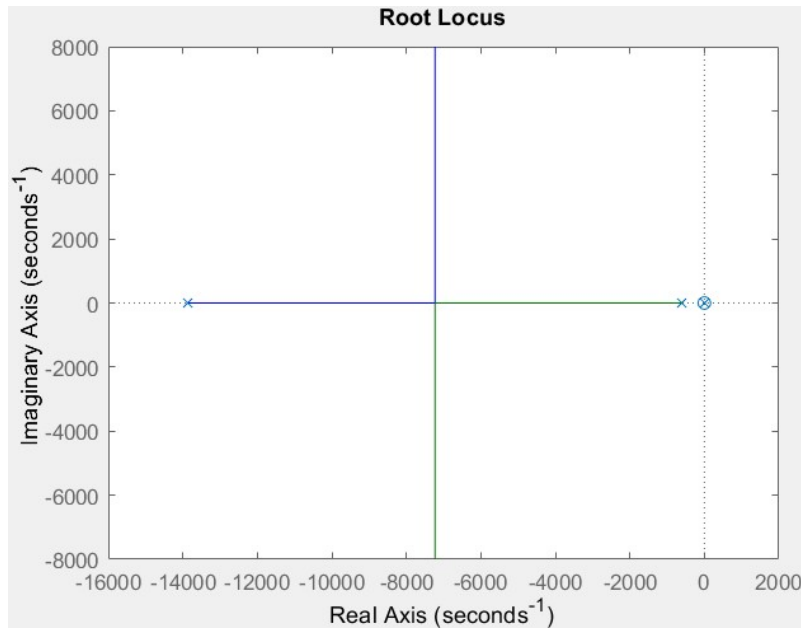
**Εικόνα 10.7.** Το κύκλωμα με την προσθήκη του δομικού στοιχείου Κέρδους (Gain).

Για τον έλεγχο της ευστάθειας μετά και την προσθήκη του δομικού στοιχείου Gain θα χαραχτεί γεωμετρικός τόπος ριζών (ΓΤΡ) της συνάρτησης ανοιχτού βρόχου με μεταβαλλόμενο  $n$  από 0 έως άπειρο.

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στο περιβάλλον του MATLAB για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος έλεγχος είναι ο εξής:

```
Command Window
>> Numerator=[7.555041135e6,739808.4352,800.324412];
Denominator=[1,14459.09715,8.383348308e6,842631.2953,800.324412];
GH=tf(Numerator,Denominator)
figure(1);
rlocus(GH);
```

Το αποτέλεσμα του συγκεκριμένου κώδικα φαίνεται στην εικόνα 10.8.



**Εικόνα 10.8.** Γεωμετρικός τόπος ριζών της συνάρτησης ανοιχτού βρόχου με μεταβαλλόμενο  $n$ .

Συμπεραίνεται πως κατά τη διάρκεια μεταβολής του  $n$  από το μηδέν έως το άπειρο το σύστημα θα παραμένει ευσταθές σε όλη τη διάρκεια και με την απομάκρυνση από το 0 το σφάλμα θα μειώνεται.

Στην πραγματικότητα τα πράγματα δεν είναι τόσο ιδανικά. Θα χρειαστεί να προστεθούν κάποια ακόμα δομικά στοιχεία στο σύστημα της εικόνας 10.8 για να αντικατοπτρίζουν την πραγματική συμπεριφορά του συστήματος. Τα δομικά στοιχεία που θα προστεθούν φαίνονται και αναλύονται στην επόμενη ενότητα

### 10.3 Σχεδίαση του ελεγκτή (Control design)

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα αναλυθεί το στάδιο του **Control design** που είναι από τα πρώτα στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού **MBD** που αναλύθηκαν λεπτομερώς στο κεφάλαιο 5.

Το συγκεκριμένο στάδιο περιλαμβάνει την υλοποίηση του ελεγκτή που θα χρησιμοποιηθεί για το **MBD** του συστήματος. Ο ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε, όπως έχει αναφερθεί, είναι ένας **PID ελεγκτής**. Ο συγκεκριμένος φαίνεται στην εικόνα 10.10 πριν από το Servo και ο συντονισμός του θα αναλυθεί παρακάτω.

#### 10.3.1 Ανάλυση των δομικών στοιχείων και έναρξη του σχεδιασμού του ελεγκτή (Control design)

Ξεκινώντας, θα αναφερθούν τα δομικά στοιχεία που προστέθηκαν στην εικόνα 10.9 για να φέρουν το σύστημα στα πλαίσια της πραγματικότητας.

Αυτά που θα προστεθούν είναι τα εξής:

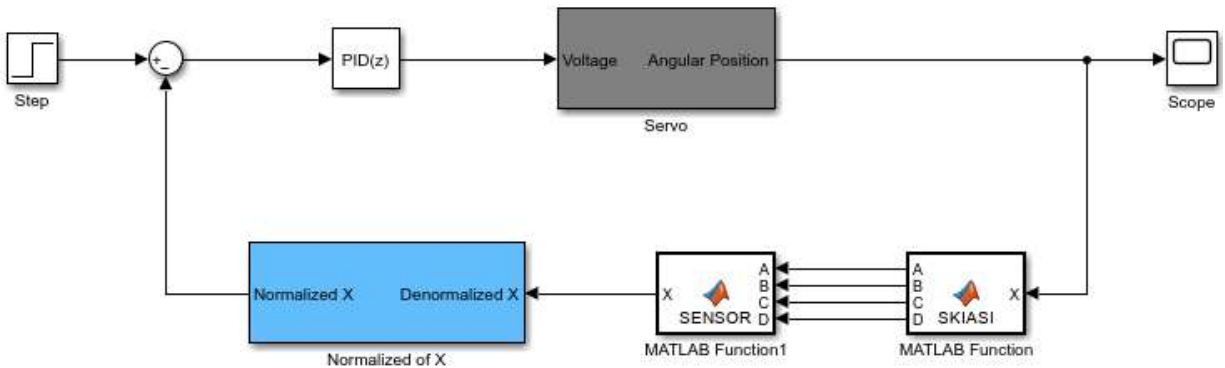
- Ένα δομικό στοιχείο το οποίο θα αναπαριστά τον αισθητήρα quadratic detector και θα τοποθετηθεί στο μέρος της ανάδρασης του συστήματος ( $H(s)$ ) και θα δίνει στην έξοδό του :

$$X = ((D + C) - (A + B))/(A + B + C + D)$$

Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα

- Ένα δομικό στοιχείο που θα υπολογίζει τα **A,B,C** και **D** και θα τα δέχεται ως εισόδους το δομικό στοιχείο του αισθητήρα για να υπολογίσει το **X**.
- Ένα δομικό στοιχείο που θα αναλάβει την αποκανονικοποίηση του **X** καθώς θα είναι κανονικοποιημένη η τιμή του **X** στην έξοδο του αισθητήρα.
- Καθώς αυξάνεται η τιμή του **n** (Gain) το σφάλμα ελαχιστοποιείται. Ταυτόχρονα ελαττώνεται και ο χρόνος ανόδου λόγω της αύξησης του overshoot που έχει ως αποτέλεσμα να οδηγήσει σε μεγαλύτερη αποκατάσταση η οποία δεν είναι επιθυμητή στην λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος.

Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψιν, χρησιμοποιήθηκε ένας ακόμα PID ελεγκτής, ο οποίος συντονίστηκε μέσα από το PID Tuner που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.



**Εικόνα 10.9.** Τα τελικά δομικά στοιχεία στα οποίο θα γίνει η ρύθμιση του PID.

Παρατηρείται πως το διάγραμμα δομικών στοιχείων αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Το υποσύστημα-Subsystem με όνομα **Servo** το οποίο το έχει αναλυθεί.
- Έναν ελεγκτή **PID**.
- Ένα δομικό στοιχείο MATLAB Function1 με όνομα **SENSOR**.
- Ένα δομικό στοιχείο MATLAB Function με όνομα **SKIASI**.
- Ένα υποσύστημα με όνομα **Normalized of X**.

Το **MATLAB Function1** είναι ένα δομικό στοιχείο το οποίο περιέχει σε μορφή κώδικα, μία συνάρτηση που υπολογίζει για δεδομένες τιμές **A,B,C,D** την έξοδο **X** του αισθητήρα. Δηλαδή πιο απλά, αναπαριστά τη λειτουργία του αισθητήρα.

Το **Normalized of X** είναι ένα subsystem δομικό στοιχείο που είναι υπεύθυνο για την αποκανονικοποίηση της μεταβλητής **X**. Δηλαδή όταν η έξοδος του αισθητήρα είναι 1 θα πρέπει να δώσει γωνία ίση με 90 μοίρες, όταν η έξοδος του αισθητήρα είναι 0.5 θα πρέπει να δώσει γωνία ίση με 45 μοίρες.

Το **MATLAB Function** είναι ένα δομικό στοιχείο που είναι υπεύθυνο για την αντίληψη οποιασδήποτε μεταβολής του **X** και την παραγωγή τεσσάρων εξόδων. Για την απλούστευση της δημιουργίας του κώδικα στο συγκεκριμένο δομικό στοιχείο, έστω ότι αναλύεται μόνο ο άξονας **X** (Αζιμούθιο), απορρίπτοντας τον άξονα **Y** (ύψος του ήλιου) καθώς γίνεται η υπόθεση πως ο αισθητήρας και ο ήλιος είναι στο ίδιο ύψος. Δηλαδή ο ήλιος μετακινείται ακτινικά μόνο στον άξονα **X** από +90 έως -90 μοίρες. Οπότε η προσέγγιση της εξόδου του αισθητήρα γίνεται πιο εύκολη και αυτό θα επιτευχθεί με διαδοχικές προσεγγίσεις μέχρι να φτάσει στην επιθυμητή τιμή.

Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Ο αλγόριθμος που χρειάστηκε για να επιτύχει το συγκεκριμένο είναι ο κάτωθι:

```
DC_Motor ▶ MATLAB Function
1 function [A,B,C,D] = SKIASI(X)
2
3 X = X/90;
4 X1 = 0;
5 A = 5;
6 B = 5;
7 C = 5;
8 D = 5;
9
10 if (X>0)
11     while(X1<X)
12         %κώδικας για σταδιακή αύξηση του X1 μέχρι να φτάσει το X
13         X1 = (((D+C)-(A+B))/(A+B+C+D));
14         C = C + 0.001;
15         D = D + 0.001;
16         A = A - 0.001;
17         B = B - 0.001;
18     end
19 elseif (X<0)
20     while(X1>X)
21         %κώδικας για σταδιακή μείωση του X1 μέχρι να φτάσει το X
22         X1 = (((D+C)-(A+B))/(A+B+C+D));
23         C = C - 0.001;
24         D = D - 0.001;
25         A = A + 0.001;
26         B = B + 0.001;
27     end
28 end
29 if (A<0)
30     A = 0;
31 end
32 if (B<0)
33     B = 0;
34 end
35 if (C<0)
36     C = 0;
37 end
38 if (D<0)
39     D = 0;
40 end
41 end
```

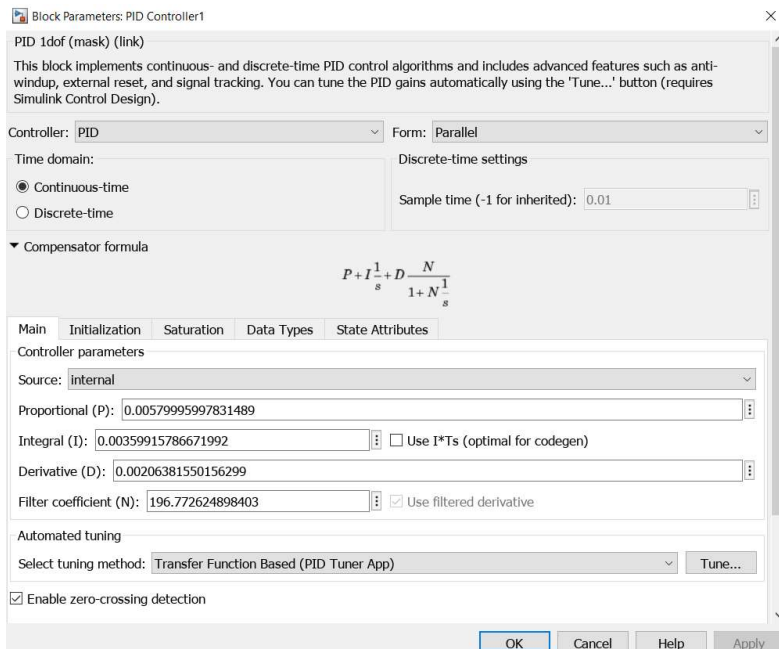
Σε αυτό το σημείο ξεκινάει το στάδιο του **Control design**.

Το δομικό στοιχείο του **PID Controller** θα συντονιστεί αυτόματα μέσω του PID Tuner, όπου οι συντελεστές του PID υπολογίζονται αυτόματα και παράλληλα γίνεται και η χάραξη της βηματικής απόκρισης του συστήματος θεωρώντας ως είσοδο την μοναδιαία βηματική συνάρτηση.

Για να ενεργοποιηθεί το PID Tuner πρέπει να ανοίξει το παράθυρο του δομικού στοιχείου PID Controller με διπλό αριστερό κλικ και μετά με αριστερό κλικ να πατηθεί το **Tune...** που φαίνεται κάτω δεξιά στην εικόνα 10.10.



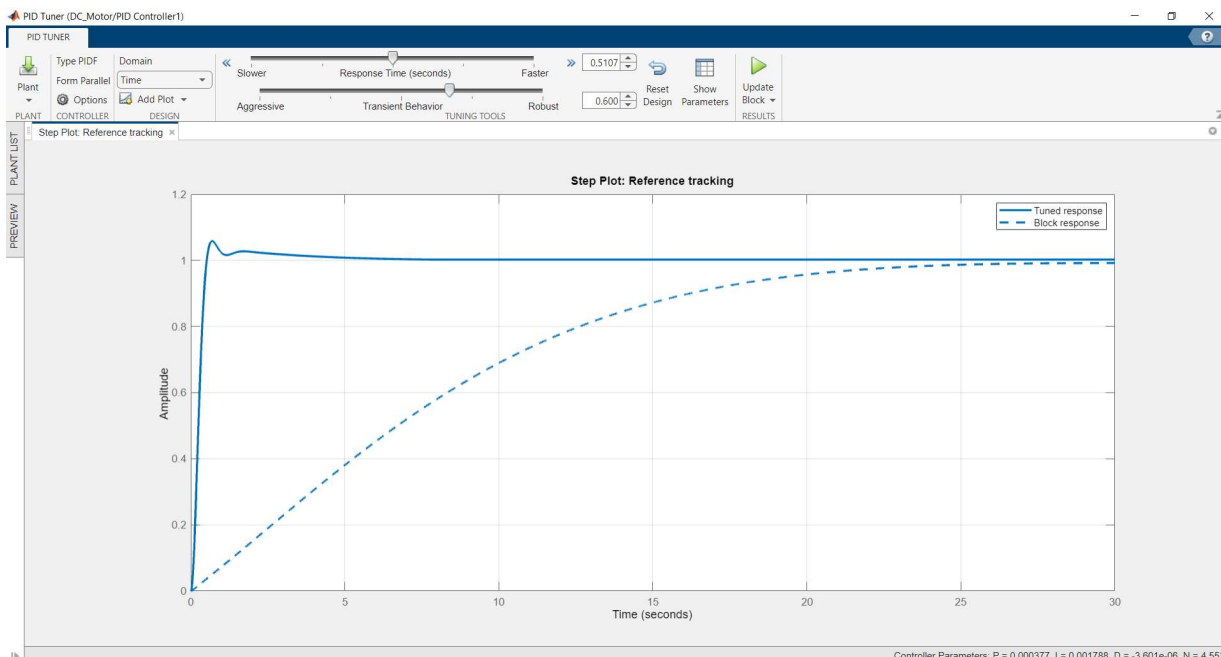
## Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα



**Εικόνα 10.10.** Παράθυρο επιλογών του PID Controller.

Για πιο αναλυτικές πληροφορίες όσο αφορά το δομικό στοιχείο PID Controller υπάρχει η δυνατότητα του κουμπιού Help που φαίνεται κάτω δεξιά στην εικόνα 10.10, όπου εξηγεί τα πάντα όσο αφορά το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο.

Πατώντας το κουμπί **Tune...** εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο που φαίνεται στην εικόνα 10.11.



**Εικόνα 10.11.** Παράθυρο του PID Tuner.

Στο συγκεκριμένο παράθυρο φαίνεται η απόκριση του συστήματος για μοναδιαία βηματική είσοδο. Με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η απόκριση που έχει το σύστημα χωρίς να γίνει ρύθμιση των

Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα

παραμέτρων του PID και με μη διακεκομμένη φαίνεται η απόκριση του συστήματος έχοντας ρυθμίσει αυτόματα τις παραμέτρους του PID το Simulink.

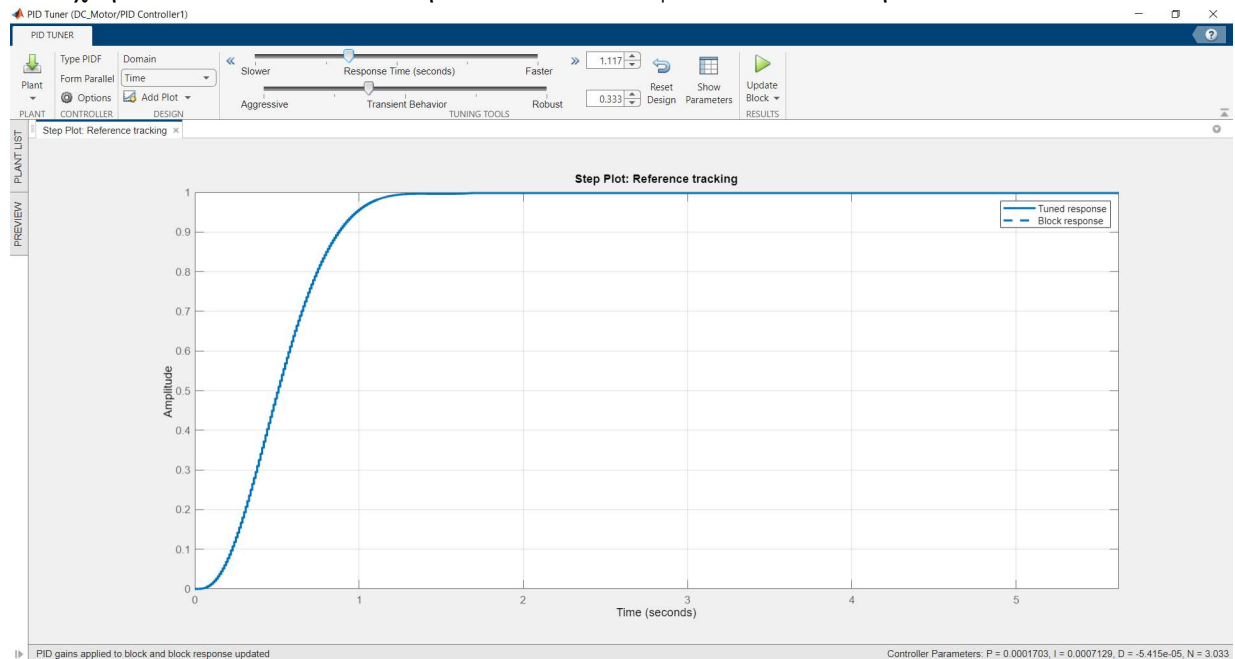
Όπως φαίνεται και στο πάνω μέρος της εικόνας 10.12 υπάρχουν δύο μεταβαλλόμενες τιμές. Η μία ονομάζεται **Response Time** (Χρόνος Απόκρισης) και η άλλη **Transient Behavior** (Μεταβατική Συμπεριφορά). Αλλάζοντας τις συγκεκριμένες μεταβλητές αλλάζει αυτόματα και το Simulink τις τιμές των χαρακτηριστικών του PID προκειμένου να προσαρμόσει τον ελεγκτή για να έχει το σύστημα την επιθυμητή απόκριση.

Αναλόγως τις ανάγκες της κατασκευής διαλέγεται η κατάλληλη απόκριση μεταβάλλοντας το **Response Time** και το **Transient Behavior**.

Η ανάγκες της συγκεκριμένης κατασκευής είναι οι εξής:

- Η χρονική απόκριση του συστήματος να μην είναι αρκετά απότομη καθώς θα έχει ένα φωτοβολταϊκό τοποθετημένο επάνω και οι κινήσεις πρέπει να είναι ήρεμες.
- Το σφάλμα επιθυμητής και πραγματικής τιμής να είναι πολύ μικρό.
- Να μην υπάρχει αποσβενόμενη ταλάντωση για να μην υπάρξει διαταραχή στον κατακόρυφο άξονα γίνεται η οριζόντια ευθυγράμμιση.

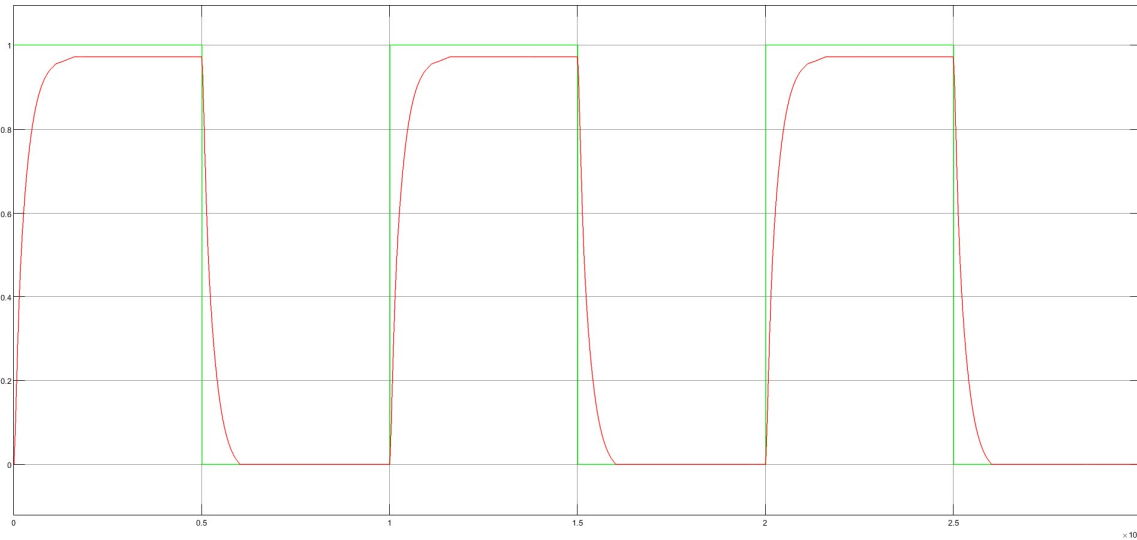
Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω ανάγκες έγινε η ρύθμιση των μεταβλητών και η απόκριση που επιλέχθηκε είναι αυτή που φαίνεται στην εικόνα 10.12.



**Εικόνα 10.12.** Επιθυμητή απόκριση του συστήματος μετά από ρύθμιση των επιλογών **Response Time** και **Transient Behavior**.

Όταν χρησιμοποιηθεί το πραγματικό μοντέλο ο PID μπορεί να ξανά ρυθμιστεί μέσω του PID Tuner για να διορθώσει τυχόν ατέλειες.

Στην εικόνα 10.13 φαίνεται η απόκριση του συστήματος δέχοντας σαν είσοδο τετραγωνικούς παλμούς.



**Εικόνα 10.13.** Απόκριση του συστήματος έχοντας ως είσοδο τετραγωνικούς παλμούς.

### 10.3.2 Ψηφιακή μορφή PID ελεγκτών και ολοκλήρωση της σχεδίασης ελεγκτή για τη πλατφόρμα Arduino

Σήμερα η χρήση ψηφιακών συστημάτων αυτομάτου ελέγχου έχει γίνει μονόδρομος. Η ρύθμιση των συγκεκριμένων γίνεται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή (H/Y), ψηφιακούς μικροελεγκτές, κ.α.

Σε έναν ψηφιακό ελεγκτή PID καθοριστικό ρόλο παίζουν ο μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC) και ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC) τα οποία είναι υπεύθυνα για τη μετατροπή των σημάτων μεταξύ του ψηφιακού και του αναλογικού τομέα.

Παρακάτω θα αναλυθούν οι λειτουργίες τους και το πώς χρησιμοποιούνται σε έναν ψηφιακό ελεγκτή PID.

- **Μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC):**

Ο DAC είναι υπεύθυνος για τη μετατροπή του ψηφιακού σήματος ελέγχου που παράγεται από τον αλγόριθμο PID σε αναλογικό σήμα τάσης ή ρεύματος. Η έξοδος του αλγορίθμου PID είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση του σήματος ελέγχου, συνήθως με τη μορφή δυαδικού αριθμού. Ο DAC λαμβάνει αυτή τη δυαδική είσοδο και τη μετατρέπει σε μια αντίστοιχη αναλογική τιμή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το χειρισμό του ελεγχόμενου συστήματος. Αυτό το αναλογικό σήμα δίνεται ανα χρονικό διάστημα  $T$ .

Η ανάλυση του DAC καθορίζει τη λεπτομέρεια της αναλογικής εξόδου. Συνήθως προσδιορίζεται ως προς τον αριθμό των bit, όπως 8-bit, 12-bit ή 16-bit DAC. Ένας υψηλότερος αριθμός bit επιτρέπει ακριβέστερη ανάλυση ελέγχου, με αποτέλεσμα πιο ομαλά και ακριβή σήματα ελέγχου. Ωστόσο, είναι σημαντικό να εξισορροπηθεί η ανάλυση με τις επιθυμητές απαιτήσεις του συστήματος ελέγχου και τους σχετικούς περιορισμούς του hardware.

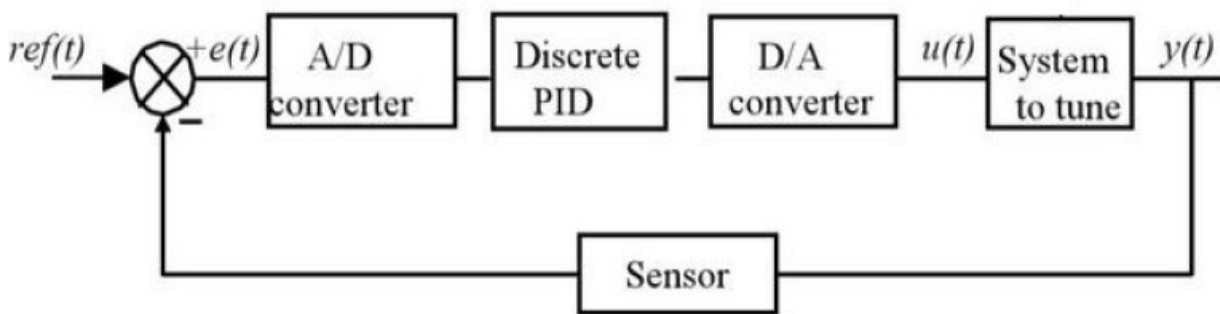
- **Αναλογικό-ψηφιακός μετατροπέας (ADC):**

Ο ADC χρησιμοποιείται για τη μετατροπή αναλογικών σημάτων από αισθητήρες ή συσκευές ανατροφοδότησης σε ψηφιακές αναπαραστάσεις που μπορούν να αναγνωριστούν και να επεξεργαστούν από τον αλγόριθμο PID. Σε έναν ελεγκτή PID, η ανατροφοδότηση από τον

ελεγχόμενο σύστημα είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του σφάλματος μεταξύ του επιθυμητού σημείου ρύθμισης και της πραγματικής εξόδου του συστήματος.

Ο **ADC** δειγματοληπτεί το αναλογικό σήμα ανά χρονικά διαστήματα **T** και το κβαντίζει σε ψηφιακή τιμή. Η ανάλυση του ADC καθορίζει τον αριθμό των διακριτών επιπέδων στα οποία διαιρείται το αναλογικό σήμα. Παρόμοια με τον DAC, η ανάλυση του ADC καθορίζεται σε bit. Ένας ADC υψηλότερης ανάλυσης μπορεί να συλλάβει μικρότερες αλλαγές στην αναλογική είσοδο, παρέχοντας ακριβέστερη ανατροφοδότηση στον αλγόριθμο PID.

Η παραπάνω ανάλυση παρουσιάζεται και στην εικόνα 10.14. Όπως φαίνεται από τη συγκεκριμένη εικόνα το κυρίως ψηφιακό κομμάτι του συστήματος είναι ο PID controller ο οποίος επεξεργάζεται το σήμα σφάλματος που έχει μεταφραστεί σε ψηφιακό μέσα από τον **ADC** και παράγει ένα ψηφιακό σήμα εισόδου, όπου μετά περνάει από έναν **DAC** και η ελεγχόμενη διεργασία δέχεται ως είσοδο το κατάλληλο αναλογικό σήμα. Έτσι το σήμα εξόδου θα είναι το επιθυμητό.



**Εικόνα 10.14.** Σύστημα ελέγχου.

Οι σημαντικότερες διαφορές μεταξύ των ψηφιακών συστημάτων ελέγχου και των αναλογικών είναι οι εξής:

1. Το αναλογικό σύστημα ελέγχου επεξεργάζεται το συνεχές σήμα, ενώ το ψηφιακό σύστημα ελέγχου επεξεργάζεται τα δείγματα.
2. Η περιγραφή του ψηφιακού ελεγκτή γίνεται μέσω των εξισώσεων διαφορών. Ο αναλογικός ελεγκτής έχει τις διαφορετικές εξισώσεις άρα θα πρέπει να μετατραπούν σε εξισώσεις διαφορών. Επομένως θα πρέπει τα σήματα που δέχεται ο ψηφιακός ελεγκτής να είναι διακριτής μορφής, ενώ τα σήματα τα οποία λαμβάνει το ελεγχόμενο σύστημα να είναι συνεχή.

Εν κατακλιδι, το σήμα που είναι να δεχτεί ως είσοδο ο ψηφιακός ελεγκτής λαμβάνεται σε συγκεκριμένους χρόνους. Αυτό το χρονικό διάστημα που χωρίζει τους συγκεκριμένους χρόνους ονομάζεται χρόνος δειγματοληψίας. Ο χρόνος δειγματοληψίας καθορίζει κάθε πότε θα λαμβάνεται ένα δείγμα και θα μετατρέπεται σε δυαδικό αριθμό προκειμένου να μπορεί να αναγνωριστεί και να επεξεργαστεί από τον ψηφιακό ελεγκτή. Όταν υπολογιστούν τα δείγματα από το σήμα σφάλματος, τότε ο ψηφιακός ελεγκτής PID για να υπολογίσει το κατάλληλο σήμα που θα εμφανίσει στην έξοδο του πραγματοποιεί μερικούς υπολογισμούς με τον αλγόριθμο που έχει.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως ο ολοκληρωτικός όρος που χρησιμοποιείται στον ελεγκτή PID εξαναγκάζει την έξοδο του, στο να μην σταθερομοιείται για όσο χρονικό διάστημα το σφάλμα είναι διάφορο του μηδενός. Αρκετές φορές το σφάλμα αδυνατεί να μηδενιστεί βραχυπρόθεσμα, με αποτέλεσμα η τιμή του ολοκληρωτικού όρου να αυξάνεται και να οδηγεί στον κορεσμό της

Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα

ρυθμιστικής ικανότητας. Πρέπει να είναι λοιπόν γνωστό πως, ένας PI ελεγκτής χρειάζεται κάποιες συγκεκριμένες προστατευτικές λειτουργίες για την αντιμετώπιση του κορεσμού.

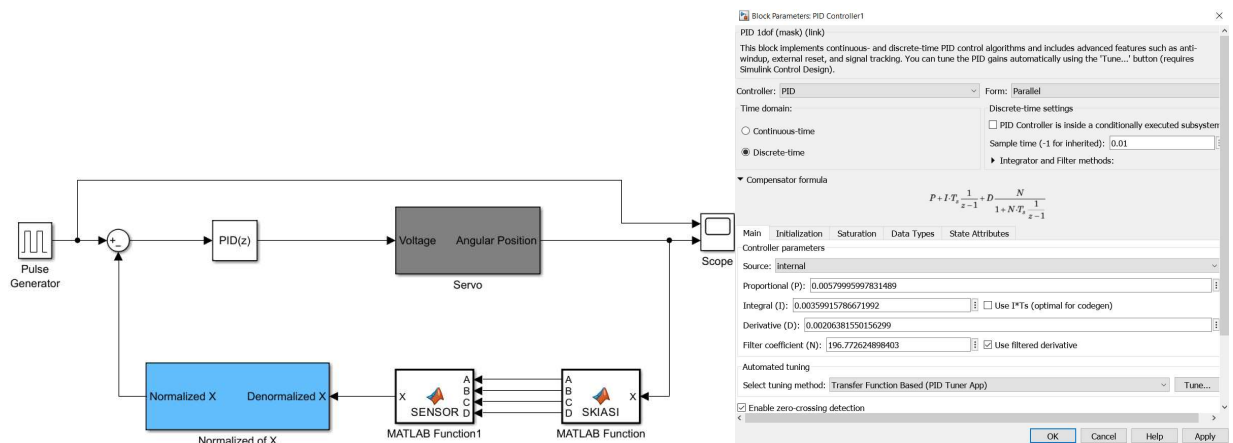
Επειδή η ψηφιακή μονάδα που αναλαμβάνει την εκτέλεση του PID ελεγκτή είναι το Arduino, το στάδιο του **Control design** θα ολοκληρωθεί με την συγκεκριμένη προηπόθεση και θα προσαρμοστεί κατάλληλα όπως θα φανεί παρακάτω.

Στην παρούσα διπλωματική η ψηφιακή μονάδα που αναλαμβάνει τον υπολογισμό, τον έλεγχο και την ευθυγράμμιση είναι η πλατφόρμα **Arduino MEGA 2560**, όπου η πρώτη και σημαντικότερη λειτουργία θα είναι η εκτέλεση του αλγορίθμου του ελεγκτή PID προκειμένου να υπολογίσει την έξοδο του συγκεκριμένου ελεγκτή βασιζόμενος στα δείγματα που λαμβάνονται από το σήμα σφάλματος. Η έξοδος του ελεγκτή θα είναι υπεύθυνη για την σωστή και επιτυχημένη οδήγηση δυο σερβοκινητήρων. Πλέον η έξοδος του ελεγκτή δεν χρειάζεται να μετατραπεί σε αναλογική μορφή και πρέπει να σημειωθεί πως το Arduino δειγματοληπτεί τα σήματα αναλογικής μορφής με ταχύτητα 100Hz και τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά καθώς έπρεπε να επιτευχθεί αργή απόκριση.

Οι ανάγκες του συγκεκριμένου συστήματος απαιτούν την επίτευξη των εξής:

- Επειδή θα κινείται ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο με τα αποτελέσματα που θα δίνει ο ψηφιακός ελεγκτής PID μέσω του Arduino, πρέπει η χρονική απόκριση του ΣΑΕ για μοναδιαία βηματική είσοδο να μην πραγματοποιεί απότομες κινήσεις διότι, με την ελαχιστοποίηση της μεταβολής κίνησης, τόσο λιγότερη δύναμη δέχεται το σύστημα.
- Το σφάλμα μεταξύ επιθυμητής και της πραγματικής τιμής να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο.
- Να μην υπάρχει αποσβενόμενη ταλάντωση για να μην υπάρξει διαταραχή στον κατακόρυφο άξονα γίνεται η οριζόντια ευθυγράμμιση.
- Η συχνότητα λειτουργίας του Arduino MEGA2560 είναι 16MHz και συμπεραίνεται πως θα υπάρξει μία καθυστέρηση εκτέλεσης του κώδικα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι ο χρόνος της απόκρισης, στην μεταβατική συμπεριφορά, θα αργεί κατά πολύ από την προσδοκώμενη. Γι' αυτό το λόγο επιλέχτηκε χαμηλός χρόνος δειγματοληψίας.

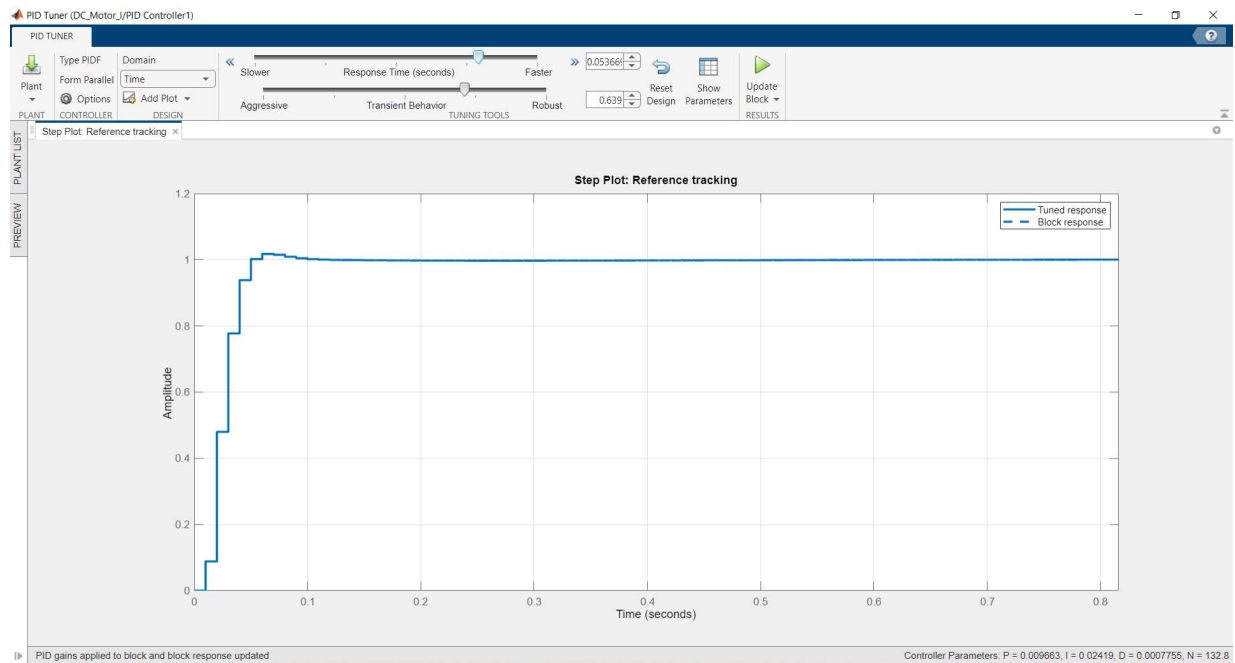
Στην εικόνα 10.15 φαίνεται το τελικό διάγραμμα των δομικών στοιχείων για τη ρύθμιση του PID ελεγκτή, απλώς στο συγκεκριμένο διάγραμμα των δομικών στοιχείων ο PID ελεγκτής έχει επιλεγεί να είναι διακριτού χρόνου για να αντιπροσωπεύει τον ψηφιακό ελεγκτή. Η συχνότητα δειγματοληψίας που έχει επιλεγεί είναι στα 100Hz.



Εικόνα 10.15. Τελικό δομικό διάγραμμα και η ρύθμιση του PID ελεγκτή.

Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Στην εικόνα 10.16 φαίνεται το περιβάλλον του PID Tuner όπου ρυθμίζεται το **Response Time**, και το **Transient Behavior** για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή χρονική απόκριση του συστήματος βάση των αναγκών που έχουν αναλυθεί παραπάνω.



**Εικόνα 10.16.** Επίτευξη της καλύτερης δυνατής απόκρισης του συστήματος με κατάλληλη ρύθμιση των PID χαρακτηριστικών.

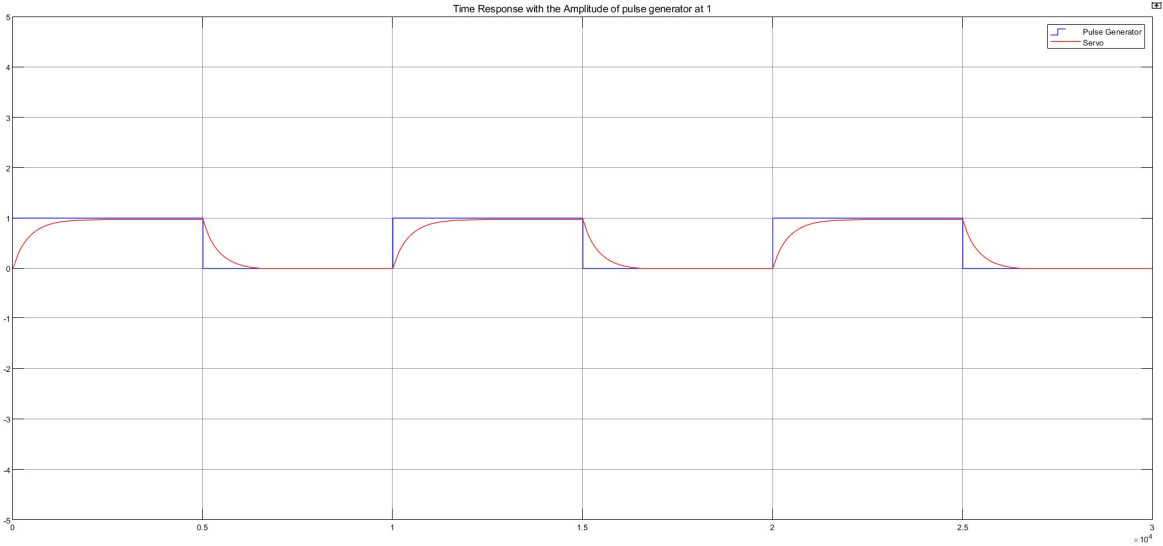
Τα χαρακτηριστικά του PID ελεγκτή που προέκυψαν είναι τα εξής:

- $P = 0.009663$
- $I = 0.02419$
- $D = 0.0007755$

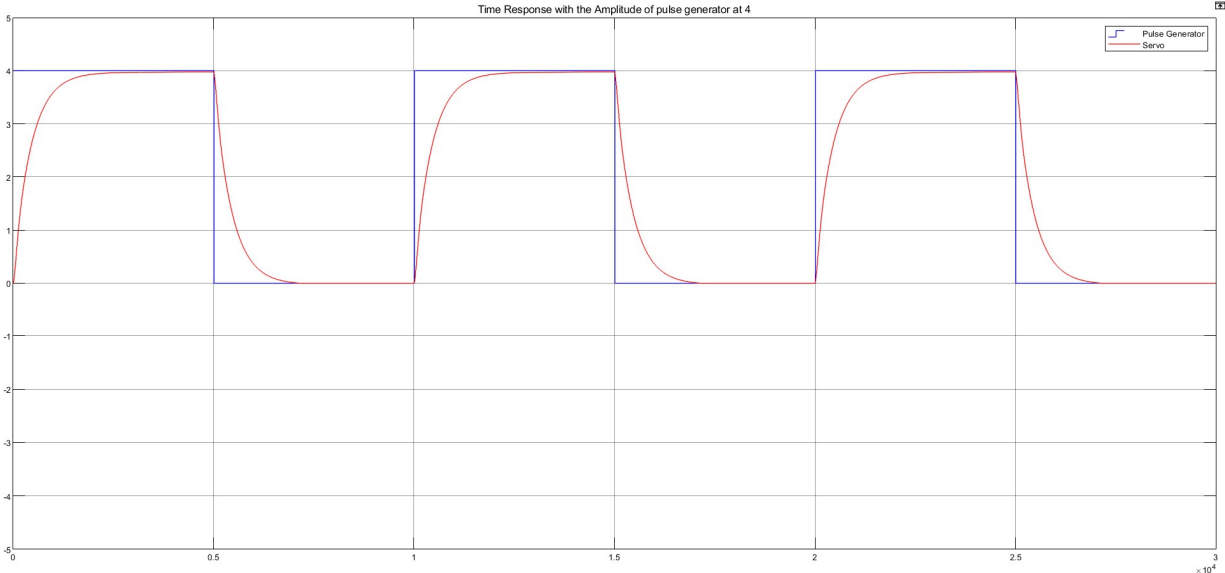
Ο χρόνος δειγματοληψίας (**sample time**) είναι 0.01.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι χρονικές αποκρίσεις του κλειστού συστήματος αυτομάτου ελέγχου για εισόδους όπως τετραγωνικός παλμός, πριονοτή συνάρτηση και ημιτονική συνάρτηση.

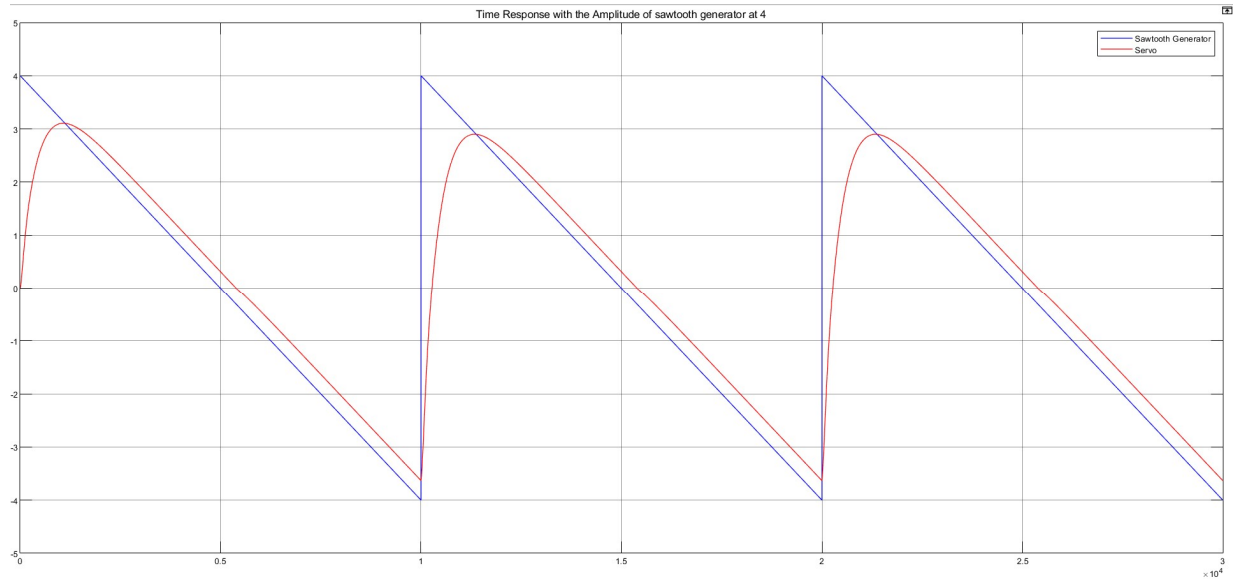
Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα



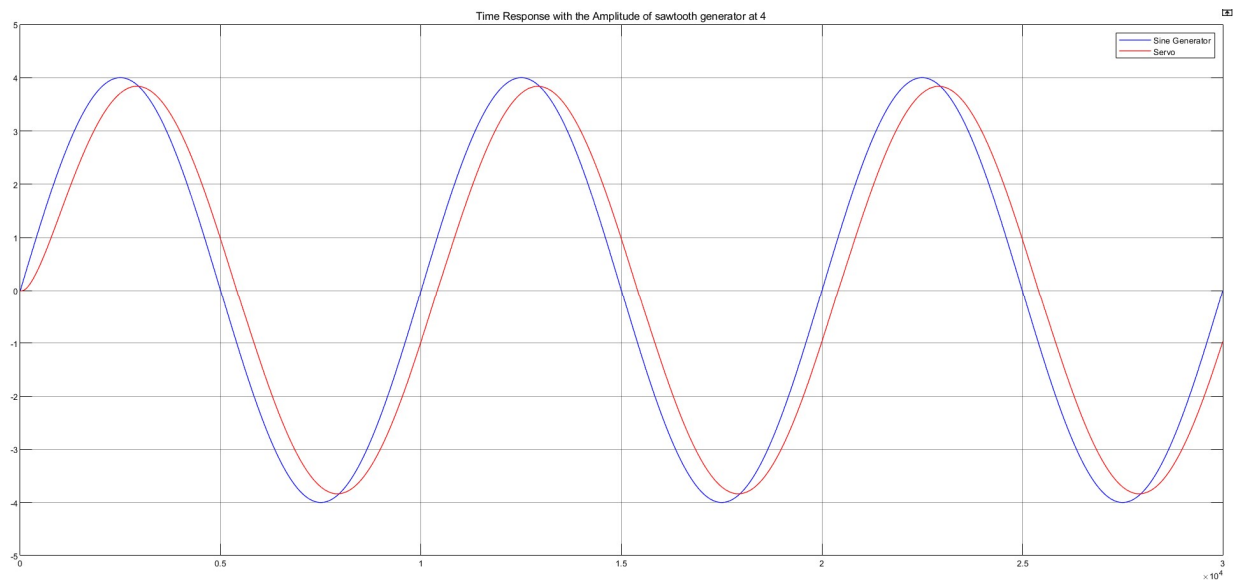
Εικόνα 10.17. Χρονική απόκριση του ΣΑΕ για τετραγωνικό παλμό με πλάτος 1.



Εικόνα 10.18. Χρονική απόκριση του ΣΑΕ για τετραγωνικό παλμό με πλάτος 4.



**Εικόνα 10.19.** Χρονική απόκριση του ΣΑΕ για πριονοτή είσοδο με πλάτος 4.



**Εικόνα 10.20.** Χρονική απόκριση του ΣΑΕ για ημιτονοειδή είσοδο με πλάτος 4.

Οι παραπάνω χρονικές αποκρίσεις που απεικονίστηκαν από το συγκεκριμένο σύστημα αυτομάτου ελέγχου που αναλύθηκε αναφέρονταν σε μία ηλιόλουστη μέρα. Όταν θα χαθεί ο ήλιος για λίγο ή η μέρα είναι συννεφιασμένη τότε αναλαμβάνει δράση το δομικό στοιχείο Subsystem με όνομα **Plios**. Το συγκεκριμένο Subsystem είναι υπεύθυνο πλέον για τις εντολές που θα λαμβάνουν οι σερβοκινητήρες έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η σωστή περιστροφή του φωτοβολταϊκού. Πρέπει να λαμβάνει ως είσοδο τον αριθμό της ημέρας τη στιγμή που καλείται να κάνει τους υπολογισμούς. Με την λήψη της συγκεκριμένης πληροφορίας αναλαμβάνουν κάποια δομικά στοιχεία που περιέχουν συναρτήσεις και κώδικα αλλά και ένα δομικό στοιχείο με όνομα **clock**, τα οποία βρίσκουν την θέση του ήλιου και δίνουν την κατάλληλη πληροφορία στους σερβοκινητήρες.



## 10.4 Προσομοίωση συστήματος (Στάδιο Λογισμικού στο Βρόχο (SIL))

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα αναλυθεί το στάδιο του **SIL**. Δηλαδή θα γίνει η απεικόνιση του μοντελοποιημένου συστήματος και η ανάλυση των δομικών στοιχείων που το απαρτίζουν. Τέλος θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

### 10.4.1 Ο σκοπός του SIL και τα toolboxes που χρησιμοποιήθηκαν

Σκοπός του συγκεκριμένου σταδίου είναι να γίνει η προσομοίωση του solar tracking συστήματος στο περιβάλλον Simulink μόνο από δομικά στοιχεία διαγράμματα για να παρατηρηθούν τυχόν διαταραχές, σφάλματα και μη επιθυμητές ενέργειες. Έτσι θα αποφευχθεί οποιαδήποτε ζημιά στο hardware.

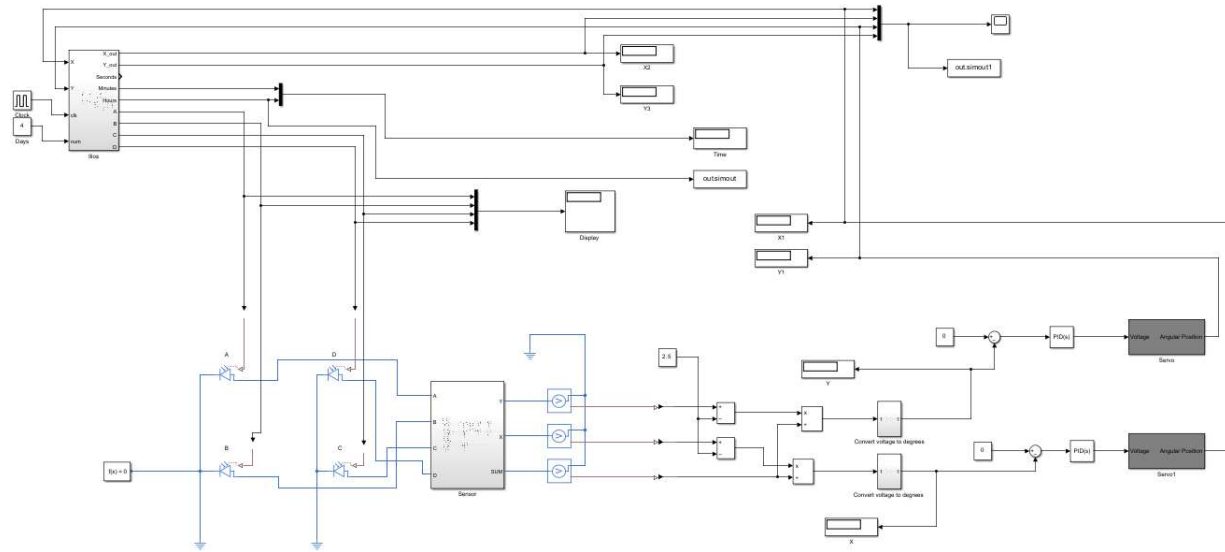
Οι εργαλειοθήκες (toolboxes) που χρησιμοποιήθηκαν για να ολοκληρωθεί με επιτυχία το συγκεκριμένο στάδιο είναι οι εξής:

- **Simulink Support Package for Arduino Hardware:** Αυτό το toolbox επιτρέπει την ενσωμάτωση του Arduino hardware με το Simulink, επιτρέποντας στους χρήστες να σχεδιάζουν και να προσομοιώνουν συστήματα ελέγχου για έργα βασισμένα στο Arduino. Παρέχει μια βολική διεπαφή για τη σύνδεση μοντέλων Simulink με Arduino boards, διευκολύνοντας τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο και την απόκτηση δεδομένων.
- **Simscape:** Είναι ένα toolbox φυσικής μοντελοποίησης στο Simulink που επιτρέπει στους χρήστες να προσομοιώνουν και να αναλύουν φυσικά συστήματα πολλαπλών περιοχών. Παρέχει ένα ολοκληρωμένο σύνολο στοιχείων και βιβλιοθηκών για τη μοντελοποίηση μηχανικών, ηλεκτρικών, υδραυλικών και άλλων φυσικών συστημάτων. Το Simscape επιτρέπει στους μηχανικούς να δημιουργούν σύνθετα μοντέλα χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση βασισμένη στη φυσική, ενισχύοντας τις δυνατότητες ανάλυσης και σχεδιασμού σε επίπεδο συστήματος στο Simulink.

### 10.4.2 Ανάλυση των δομικών στοιχείων που απαρτίζουν το μοντελοποιημένο σύστημα για την προσομοίωση

Στην εικόνα 10.21 φαίνεται η ολοκλήρωση του σταδίου του Software-In-the-Loop (SIL) όπου γίνεται η προσομοίωση αναπαριστώντας το σύστημα με δομικά στοιχεία.

Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα

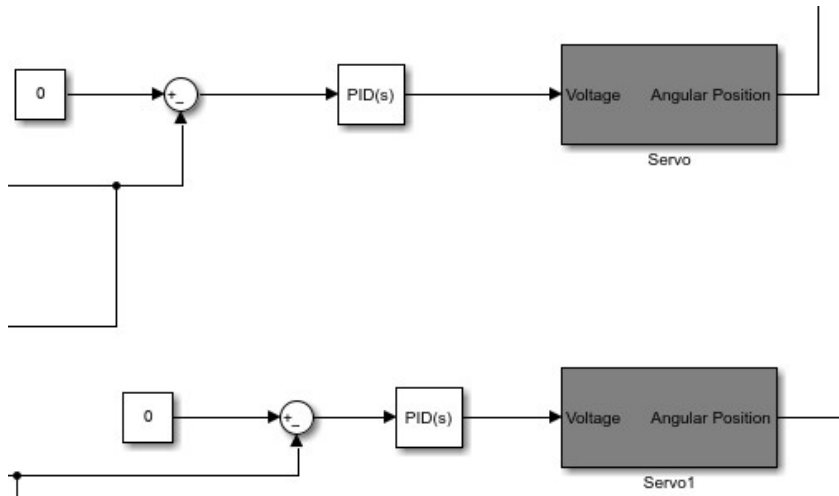


**Εικόνα 10.21.** Μοντελοποιημένο σύστημα που επιτυγχάνει το Software-In-the-Loop simulation.

Βάση της εικόνας 10.21 θα κάνουμε μία μικρή ανάλυση στο σύστημα της προσομοίωσης του σταδίου **SIL** .

Κάτω αριστερά φαίνεται η είσοδος του συστήματος, η οποία αποτελείται από τις τιμές των τάσεων που δίνουν οι φωτοдиодοι. Στη συνέχεια το δομικό στοιχείο **Sensor** λαμβάνει ως είσοδο τις συγκεκριμένες τιμές των τάσεων και εσωτερικά περιέχει το ηλεκτρονικό κύκλωμα του quadratic detector που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3. Μετά την επεξεργασία, οι έξοδοι του συγκεκριμένου δομικού στοιχείου συνδέονται με βολτόμετρα για να γνωρίζει ο χρήστης κάθε στιγμή την τιμή της τάσης. Μετά έχει συνδεθεί ένα δομικό στοιχείο **PS- Simulink Converter** για να μεταφράζει τις τιμές τις τάσης σε σήμα που μπορούν να το επεξεργαστούν τα δομικά στοιχεία του Simulink. Ακόμη σε συνδεσμολογία σειράς είναι τα δομικά στοιχεία **Add** τα οποία σε συνεργασία με το δομικό στοιχείο που έχει τιμή 2.5 μετατρέπουν τις αρνητικές τιμές σε θετικές. Τα δομικά στοιχεία των διαιρετών είναι και αυτά συνδεδεμένα σε σειρά. Η διαίρεση που κάνουν είναι η τάση X,Y με την τάση Sum ώστε να εμφανιστούν οι κανονικοποιημένες τιμές.

Ύστερα, υπάρχουν τα δύο δομικά στοιχεία **Subsystem (Convert Voltage to degrees)** τα οποία μετατρέπουν τις τιμές των τάσεων σε μοίρες. Ακόμη στην εικόνα 10.22 παρουσιάζεται το κομμάτι που έχει καταλυτικό ρόλο στην εξασφάλιση της ευστάθειας του συστήματος.



**Εικόνα 10.22.** Δομικό στοιχείο του συστήματος που εξασφαλίζει την ευστάθεια στο σύστημα αλλά και την περιστροφή του φωτοβολταϊκού.

Οι ελεγκτές PID εξασφαλίζουν αντιστάθμιση στο σύστημα. Δέχονται ως είσοδο ένα σήμα το οποίο αποτελείται από την αφαίρεση δύο σημάτων. Το σήμα που δείχνει τις μοίρες που βρίσκεται εκείνη τη στιγμή το σύστημα αφαιρείται από το μηδέν που μεταφράζεται ως η επιθυμητή θέση του συστήματος. Στην συνέχεια οι δύο σερβοκινητήρες δέχονται αυτή την πληροφορία ώστε να ξεκινήσουν να περιστρέφονται ανάλογα. Προηγουμένως έγινε εκτεταμένη ανάλυση και του σερβοκινητήρα αλλά και του PID ελεγκτή (**Control design**)

Τα ακόλουθα δομικά στοιχεία που αναλύονται βρήσκονται στο εσωτερικό του Subsystem με όνομα Pios που βρίσκεται πάνω αριστερά στην εικόνα 10.21.

- **Παρακάτω φαίνεται η ανάλυση του clock σε 6 βήματα**

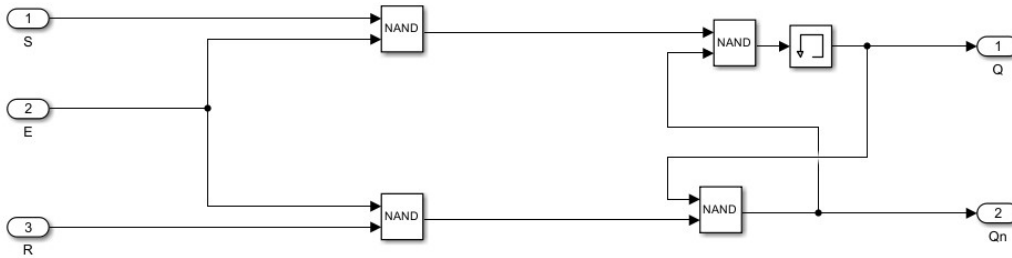
Για τη σωστή λειτουργία του συστήματος, όταν αναλαμβάνουν να βρουν οι εξισώσεις του ήλιου την θέση του ήλιου, είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα ρολόι (**clock**). Με την ύπαρξη του clock, το σύστημα θα δέχεται πληροφορίες για τον πραγματικό χρόνο και έτσι θα επιτυγχάνεται η λειτουργία του σε πραγματικές συνθήκες. Σε αντίθετη περίπτωση το σύστημα θα λειτουργούσε προσεγγιστικά και αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την ύπαρξη σφαλμάτων. Ακόμη δεν θα είχε την δυνατότητα λειτουργίας χωρίς υπολογιστή.

Παρακάτω αναλύεται η δημιουργία του clock σε 6 βήματα.

### **1<sup>ο</sup> Βήμα**

Στο πρώτο βήμα υπάρχει η δημιουργία του μανδαλωτή (**latch**). Οι τεχνικές με τις οποίες μπορεί να υλοποιηθεί ένας μανδαλωτής ποικίλουν αναλόγως για τον λόγο χρήσης. Στο συγκεκριμένο σύστημα επιλέχθηκε ο μανδαλωτής να κατασκευαστεί με τέσσερις πύλες **NAND**. Ο λόγος ύπαρξης των δύο πρώτων πυλών **NAND** είναι για την αποφυγή των ανεπιθύμητων παλμών μικρού εύρους στις εισόδους **S (Set)**, και **R (Reset)** έτσι ώστε η λειτουργία του μανδαλωτή να συγχρονίζεται από τους παλμούς που εφαρμόζονται στην είσοδο του clock. Με τη σωστή συνδεσμολογία, οι υπόλοιπες πύλες **NAND** δημιουργούν τον **SR μανδαλωτή**. Στην εικόνα 10.23 φαίνεται η υλοποίηση του συγκεκριμένου μανδαλωτή.

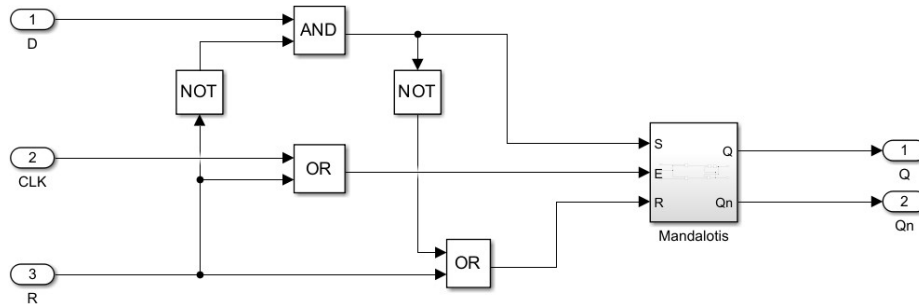
Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα



**Εικόνα 10.23.** Κύκλωμα μανδαλωτή.

## 2<sup>ο</sup> Βήμα

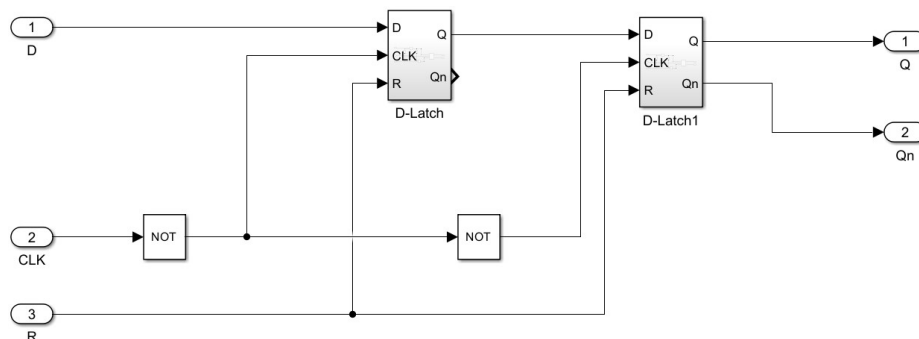
Στο δεύτερο βήμα είναι η δημιουργία ενός μανδαλωτή τύπου D (**D-Latch**). Για την υλοποίηση του συγκεκριμένου θα πρέπει να τοποθετηθεί μία πύλη NOT από την είσοδο SET προς την είσοδο RESET του μανδαλωτή. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 10.24, η κατασκευή του κυκλώματος που θα αναπαριστά τον D-Latch περιέχει δύο πύλες **OR**, δύο πύλες **NOT** και μία πύλη **AND** συνδεδεμένες κατάλληλα. Η δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων έχει δώσει το παρόν όνομα στον συγκεκριμένο μανδαλωτή.



**Εικόνα 10.24.** Κύκλωμα D-Latch.

## 3<sup>ο</sup> Βήμα

Στο τρίτο βήμα είναι η δημιουργία ενός **Master-Slave** ή (D flip-flop) ο οποίος κατασκευάζεται συνδέοντας δύο **D-Latch** σε σειρά με μία πύλη **NOT**. Η κατασκευή του συγκεκριμένου κυκλώματος φαίνεται στην εικόνα 10.25.



**Εικόνα 10.25.** Κύκλωμα Master-Slave.

Το πρώτο D-Latch ονομάζεται κύριο (**Master**) και η κατάστασή του αλλάζει όταν το **CLK = 1**. Το δεύτερο D-Latch ονομάζεται εξαρτημένο (**Slave**) και η κατάστασή του αλλάζει όταν **CLK = 0** λόγω της ύπαρξης της πύλης **NOT**.

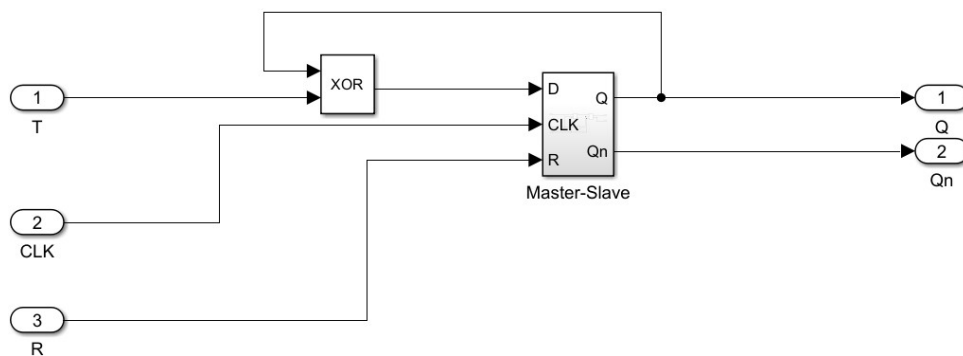
Όταν λοιπόν,  $CLK = 1$ , ο μανδαλωτής Master παρακολουθεί τις αλλαγές της εισόδου **D**, ενώ ο Slave είναι απενεργοποιημένος. Επομένως παρατηρείται πως η έξοδος του πρώτου D-Latch (**Q**) παρακολουθεί την είσοδο **D** ενώ η έξοδος του δεύτερου D-Latch (**Q**) παραμένει σταθερή.

Όταν το  $CLK = 0$ , ο μανδαλωτής Master σταματάει να παρακολουθεί τις αλλαγές της εισόδου **D** και ο μανδαλωτής Slave παρακολουθεί την τιμή της εξόδου του πρώτου D-Latch (**Q**) και η εξοδος του μεταβάλλεται αναλόγως. Εξαιτίας της μη αλλαγής της εξόδου **Q**, όταν  $CLK = 0$ , ο μανδαλωτής Slave μπορεί να αλλάξει μόνο μία φορά κατά τη διάρκεια ενός ωρολογιακού παλμού. Ακόμα, η αλλαγή της τιμής εξόδου του συνολικού κυκλώματος γίνεται μόνο κατά τα αρνητικά μέτωπα των ωρολογιακών παλμών.

#### 4<sup>ο</sup> Βήμα

Στο τέταρτο βήμα βρίσκεται η δημιουργία ενός **T flip-flop**. Αυτό επιτυγχάνεται μετατρέποντας το Master-Slave σε T flip-flop. Η ματατροπή αυτή γίνεται με την προσθήκη μίας πύλης **XOR** όπου η μία είσοδος της XOR είναι η έξοδος **Q** του Master-Slave και η άλλη είσοδος είναι η είσοδος **T** του T flip-flop. Η έξοδος της πύλης XOR συνδέεται με την είσοδο **D** του Master-Slave.

Στην εικόνα 10.26 φαίνεται η συνδεσμολογία του T flip-flop.



Εικόνα 10.26. Κύκλωμα T flip-flop.

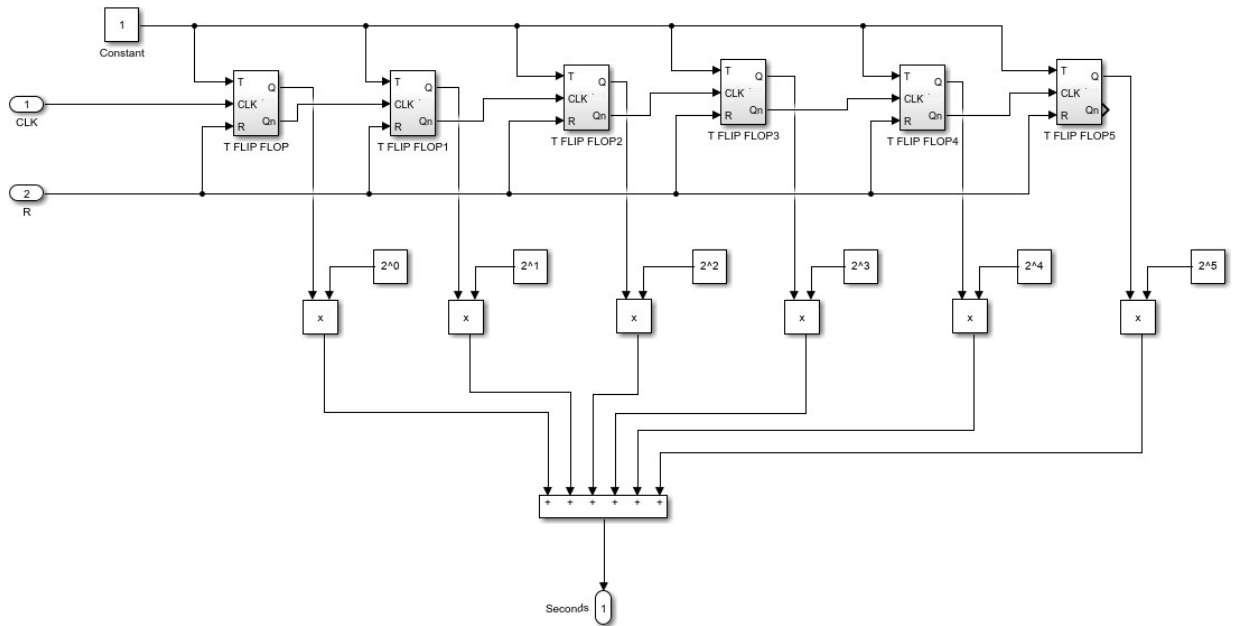
#### 5<sup>ο</sup> Βήμα

Στο πέμπτο βήμα δημιουργείται ένας μετρητής (**Counter**). Η υλοποίηση του Counter γίνεται με την σύνδεση ενός συγκεκριμένου αριθμού T flip-flop. Ο αριθμός αυτός καθορίζεται από το πόσα bit πρέπει να είναι ο Counter.

Σε κάθε T flip-flop, η είσοδος **T** είναι συνδεδεμένη με ένα δομικό στοιχείο το οποίο ονομάζεται Constant και περιέχει μονίμως (σταθερά) την τιμή 1. Λαμβάνοντας ως είσοδο την τιμή 1 το T flip-flop αλλάζει κατάσταση σε κάθε θετικό μέτωπο των ωρολογιακών παλμών. Η είσοδος **CLK** του πρώτου T flip-flop συνδέεται με το ωρολογιακό σήμα και οι επόμενες αντίστοιχες εισοδοί των T flip-flop συνδέονται με την έξοδο **Qn** του προηγούμενου T flip-flop προκειμένου να αλλάζει η κατάσταση τους όποτε αλλάζει και η κατάσταση του προηγούμενου. Άρα ο σκοπός του συγκεκριμένου κυκλώματος είναι να μετρά τον αριθμό των παλμών που φτάνουν στην είσοδό του (η βασική λειτουργία ενός ρολογιού).

Στην εικόνα 10.27 φαίνεται η συνδεσμολογία του Counter.

Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα

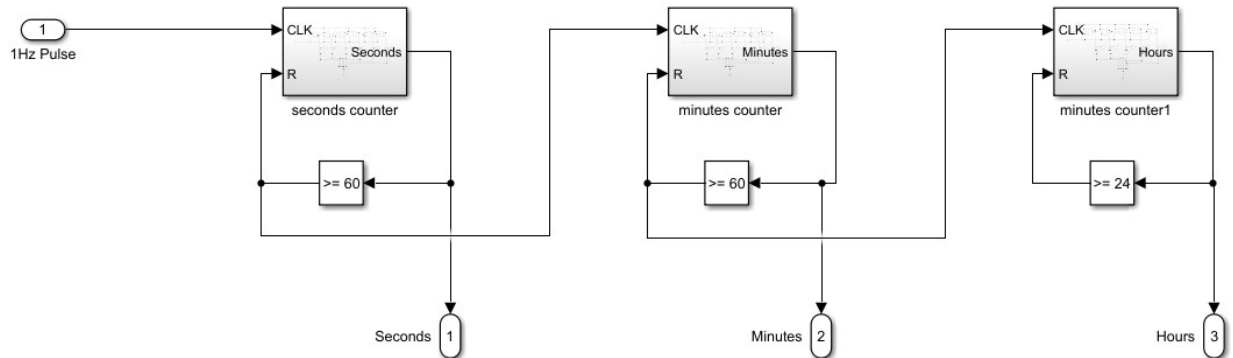


Εικόνα 10.27. Κύκλωμα Counter.

### 6<sup>ο</sup> Βήμα

Στο έκτο και τελευταίο βήμα φαίνεται το τελικό κύκλωμα που αναπαριστά ένα **Clock**. Αυτό περιέχει τρεις Counter και συγκεκριμένα Up-Counter, καθώς και οι τρεις μετράνε από το μηδέν με αύξων ρυθμό.

Στην εικόνα 10.28 φαίνεται το τελικό κύκλωμα του Clock.



Εικόνα 10.28. Τελικό κύκλωμα Clock.

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα, ο πρώτο Counter μετράει τα δευτερόλεπτα, ο δεύτερος τα λεπτά και ο τελευταίος τις ώρες. Οι δύο πρώτοι είναι μεγέθους 6 bit και μπορούν να μετρήσουν από το 0 έως το 63. Ο τελευταίος είναι μεγέθους 5 bit και έχει τη δυνατότητα μέτρησης από 0 έως 32.

Παρατηρείται πως και οι τρεις μετράνε πάνω από τις επιθυμητές τιμές. Το συγκεκριμένο πρόβλημα λύνεται με την προσθήκη περιοριστών οι οποίοι έχουν ως είσοδο την έξοδο του Counter και η έξοδός τους πηγαίνει στην είσοδο **R** (Reset) του Counter. Δηλαδή γίνεται κάθε φορά μία σύγκριση με τον μέγιστο αριθμό που πρέπει να μετρήσει ο κάθε Counter και μόλις τον υπερβεί σταματάει η μέτρηση.

- Παρακάτω γίνεται η ανάλυση του δομικού στοιχείου που περιέχει τις εξισώσεις του ήλιου

Το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε για την επιτυχή υλοποίηση των εξισώσεων του ήλιου φαίνεται στην εικόνα 10.29.



**Εικόνα 10.29.** Δομικό στοιχείο που περιέχει τις εξισώσεις του ήλιου.

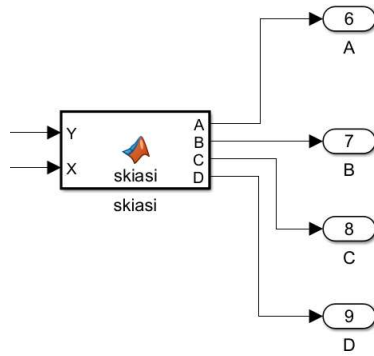
Παρατηρείται πως το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο είναι τύπου (MATLAB Function), δέχεται σαν εισόδους το **n** (αριθμός της ημέρας) και το **tc** (ο επίσημος χρόνος Greenwich της ζώνης σε ώρες) και έχει ως εξόδους το **EL** (ηλιακό ύψος) και το **A** (Αζιμουθιακή γωνία του ήλιου) τα οποία έχουν αναλυθεί στο κεφάλαιο 2.

Ο κώδικας που περιέχεται στο συγκεκριμένο δομικό στοιχείο και εμφανίζει τα επιθυμητά αποτελέσματα είναι γραμμένος στο Matlab και φαίνεται παρακάτω:

```
function [EL,A] = thesi_iliou(n,tc)
%Otan n=1 --> 1 Ianuariou
%Otan n=365 --> 31 Dekembriou
%Lloc --> Geprgrafiko mikos
%l --> Geografiko platos
%d --> etisia diakimansi tis apoklisis tou aksona tis gis
Lloc = -23.4; %arnitiko epidi vriskomaste anatluka
l = 38;
d = 23.45*sind(2*pi*((284+n)/365));
%E --> Eksisosi xronou (diafora polikou xronou me iliakou xronou)
B = 360*((n-1)/365);
E = 3.82*(0.000075+0.001868*cosd(B)-0.032077*sind(B)-0.014615*cosd(2*B)-0.04089*sind(2*B));
%ts --> iliakos xronos se h
%tc --> o episimos xronos se Greenwich se h
%Lstd --> i zoni oras pou anikei i perioxi se moires
Lstd = 30;
ts = tc + ((Lstd-Lloc)/15) + E/60;
%w --> oriaia gonia iliou
w = ((ts-12)/24)*360;
%Z --> zenithia gonia
%EL --> iliako ipsos
%A --> azimouthiaki gonia iliou
Z = acosd(sind(l)*sind(d) + cosd(l)*cosd(d)*cosd(w));
EL = asind(sind(l)*sind(d) + cosd(l)*cosd(d)*cosd(w));
A = asind((cosd(d)*sind(w))/cosd(EL));
end
```

- **Ακολουθεί η ανάλυση του δομικού στοιχείου με όνομα skiasi**

Το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο φαίνεται στην εικόνα 10.30.



**Εικόνα 10.30.** Δομικό στοιχείο για την αντίληψη οποιασδήποτε μεταβολής του άξονα  $X$  και του άξονα  $Y$ .

Το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο είναι τύπου (MATLAB Function). Είναι ένα δομικό στοιχείο που είναι υπεύθυνο για την αντίληψη οποιασδήποτε μεταβολής του άξονα  $X$  (Αζιμουθιακή γωνία του ήλιου) και του άξονα  $Y$  (ηλιακό ύψος) και την παραγωγή τεσσάρων εξόδων ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ) που αντιπροσωπεύουν τις τιμές των φωτοδιόδων.

Ο κώδικας που περιέχεται στο συγκεκριμένο δομικό στοιχείο και εμφανίζει τα επιθυμητά αποτελέσματα είναι γραμμένος στο Matlab και φαίνεται παρακάτω:

```
function [A,B,C,D] = skiasi(Y,X)
X = X/90;
Y = Y/90;
X1 = 0;
Y1 = 0;

A = 5;
B = 5;
C = 5;
D = 5;

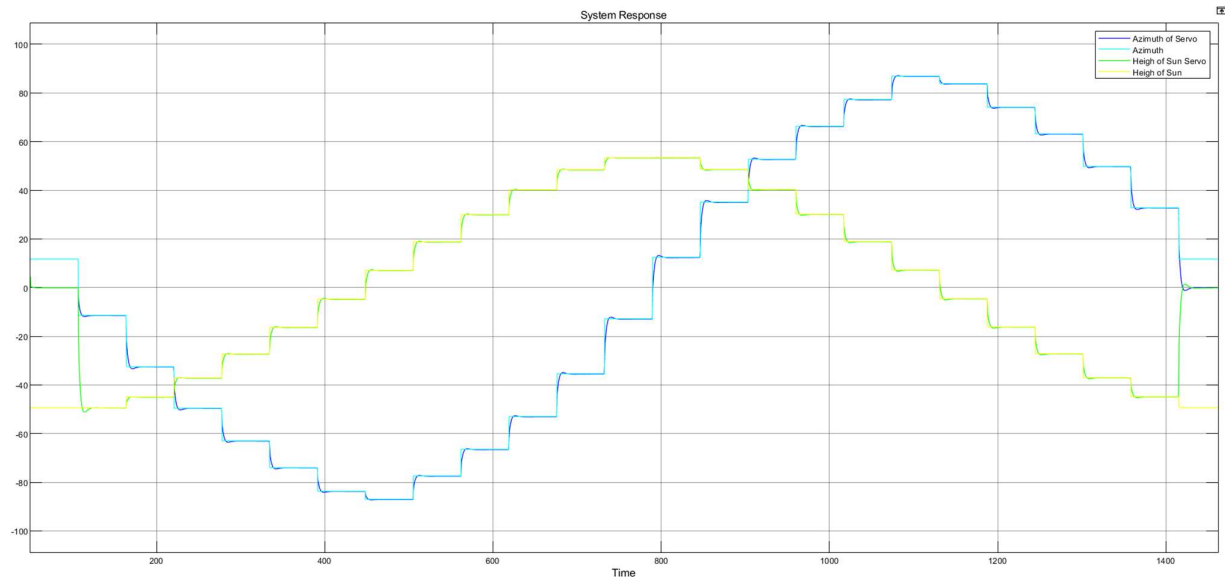
if Y>0
    while (Y1<Y)
        Y1 = ((A+D)-(B+C))/(A+B+C+D);
        A = A+0.0001;
        D = D+0.0001;
        C = C-0.0001;
        B = B-0.0001;
    end
elseif Y<0
    while (Y1>Y)
        Y1 = ((A+D)-(B+C))/(A+B+C+D);
        A = A-0.0001;
        D = D-0.0001;
        C = C+0.0001;
        B = B+0.0001;
    end
end
if X>0
    while (X1<X)
        X1 = ((D+C)-(A+B))/(A+B+C+D);
        D = D+0.0001;
        C = C+0.0001;
        A = A-0.0001;
        B = B-0.0001;
    end
end
```



```
end
elseif X<0
    while (X1>X)
        X1 = ((D+C)-(A+B))/(A+B+C+D);
        D = D-0.0001;
        C = C-0.0001;
        A = A+0.0001;
        B = B+0.0001;
    end
end
if A<0
    A=0;
end
if B<0
    B=0;
end
if C<0
    C=0;
end
if D<0
    D=0;
end
```

### 10.4.3 Αποτελέσματα του SIL

Στην εικόνα 10.31 φαίνεται η απόκριση του συστήματος και συγκεκριμένα την ημέρα 4 Ιανουαρίου για ένα ολόκληρο εικοσιτετράωρο.



**Εικόνα 10.31.** Απόκριση του συστήματος προσομοίωσης.

#### Παρατηρήσεις:

Το ηλιακό ύψος, το οποίο απεικονίζεται με το κίτρινο χρώμα, παρατηρείται πως ξεκινάει από την κατώτερη θέση του και καθώς περνάει ο χρόνος αυξάνεται μέχρι που φτάνει στα 740 min περίπου (~= 12:00 μμ) όπου εκεί αποκτά το μέγιστο ύψος και μετά ξεκινάει και χαμηλώνει με το πέρας της ώρας.

## 10.5 Προσομοίωση Υλικού Σε Βρόχο (Hardware In the Loop Simulation)

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει μία μικρή αναφορά στο στάδιο **PIL**, θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση του μοντελοποιημένου συστήματος που ολοκληρώνει το στάδιο HIL και θα απεικονιστούν τα αποτελέσματα του πραγματικού συστήματος σε real time.

### 10.5.1 Στάδιο PIL

Όπως αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 4 στο στάδιο **PIL** λαμβάνονται εκτιμήσεις της απόδοσης του επεξεργαστή, της μνήμης και του χρονισμού.

Ξεκινώντας την υλοποίηση του hardware επιλέχθηκε η πλατφόρμα Arduino Uno ως πιο οικονομική. Ολοκληρώντας το στάδιο του PIL λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων μνήμης της συγκεκριμένη πλατφόρμας δεν ήταν εφικτή η λειτουργία της προσομοίωσης σε real time.

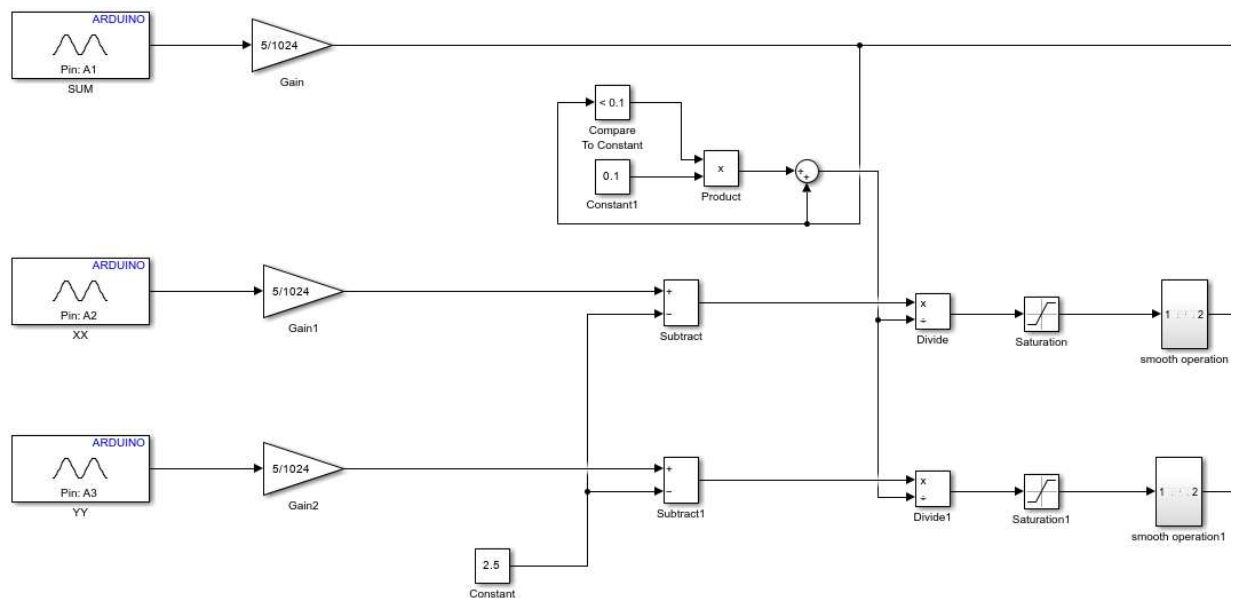
Κρήθηκε λοιπόν αναγκαίο η αντικατάσταση με την πλατφόρμα Arduino MEGA 2560 η οποία όπως έχει αναλυθεί και στο κεφάλαιο 5 έχει πολύ μεγαλύτερη μνήμη από την προηγούμενη πλατφόρμα.

### 10.5.2 Ανάλυση του μοντελοποιημένου κυκλώματος του σταδίου HIL

Θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση του μοντελοποιημένου συστήματος solar tracker που επιτυγχάνει την ολοκλήρωση του σταδίου **HIL**. Συγκεκριμένα θα γίνει η αναφορά στο κάθε δομικό στοιχείο που υπάρχει.

Λόγο του μεγάλου μεγέθους και για να γίνει πιο κατανοητή η εξήγηση των δομικών στοιχείων, το κύκλωμα θα αναλυθεί σε 3 μέρη.

#### 1<sup>ο</sup> Μέρος



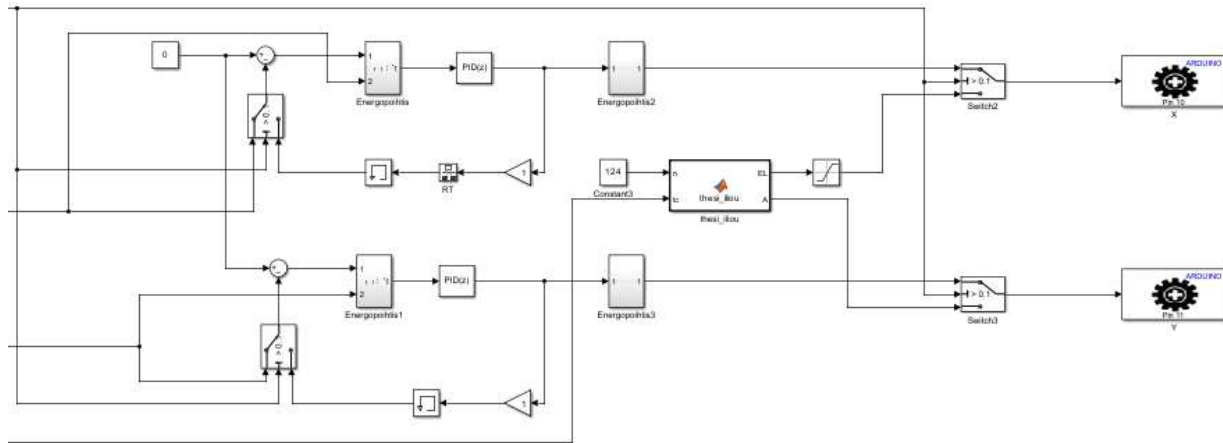
**Εικόνα 10.32.** Το 1<sup>ο</sup> μέρος της αναπαράστασης του συνολικού κυκλώματος.

Η ανάλυση των δομικών στοιχείων που φαίνονται στην εικόνα 10.32 παρουσιάζεται παρακάτω.

- **SUM, XX, YY:** Είναι οι αναλογικές εισοδοί του συστήματος.
- **Gain, Gain1, Gain2:** Τα συγκεκριμένα δομικά στοιχεία επιτυγχάνουν την αποκανονικοποίηση των bit του Arduino σε πραγματικούς αριθμούς και συγκεκριμένα σε 5V καθώς ο αριθμός που βρίσκεται στο παρονομαστή είναι το μέγεθος του ADC μετατροπέα που είναι 10 bit (1024).

- **Constant:** Επιτυγχάνεται η διόρθωση της δειγματοληψίας καθώς το Arduino δεν διαβάζει αρνητικές τιμές.
- **Divide:** Το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο κάνει μία διαίρεση όπου στον αριθμητή είναι το αποτέλεσμα της αφαίρεσης του δομικού στοιχείου **Subtrack**.
- **Saturation:** Λαμβάνει ως είσοδο την έξοδο της διαίρεσης και η έξοδος του συγκεκριμένου δομικού στοιχείου είναι εντός των ορίων  $-1$  έως  $1$ . Δηλαδή περιορίζει την έξοδο της διαίρεσης να είναι εντός των συγκεκριμένων ορίων.
- **smooth operation, smooth operation1:** Τα συγκεκριμένα δομικά στοιχεία παίζουν καθοριστικό ρόλο στη σωστή λειτουργία του συστήματος, καθώς η έξοδός τους δεν θα είναι συνεχώς ανάλογη της εισόδου τους. Στην πραγματικότητα η έξοδος εξαρτάται από το πόσο έχουν αλλάξει οι προηγούμενες τιμές. Δηλαδή, παρέχουν έναν μέσο όρο που έχουν υπολογίσει από όλες τις προηγούμενες τιμές και δεν αφήνουν να περάσουν τιμές που έχουν μεγάλη απόκλιση. Έτσι επιτυγχάνεται η σωστή και ομαλή λειτουργία του συστήματος, αλλά και η γραμμική διόρθωση της θέσης του.
- **Compare to constant, Constant1, product:** Στην περίπτωση που υπάρξει έντονη συννεφιά (σκοτάδι), τότε το SUM θα έχει την τιμή  $0$  και αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα να γίνει μία διαίρεση με παρονομαστή το μηδέν που το συγκεκριμένο δεν υφίσταται. Για να μην υπάρξει τέτοιο ενδεχόμενο, πραγματοποιείται μία σύγκριση με την τιμή  $0.1$  και εάν η τιμή του SUM είναι μικρότερη από αυτή, τότε προστίθεται μία πολύ μικρή τιμή.

## 2<sup>ο</sup> Μέρος



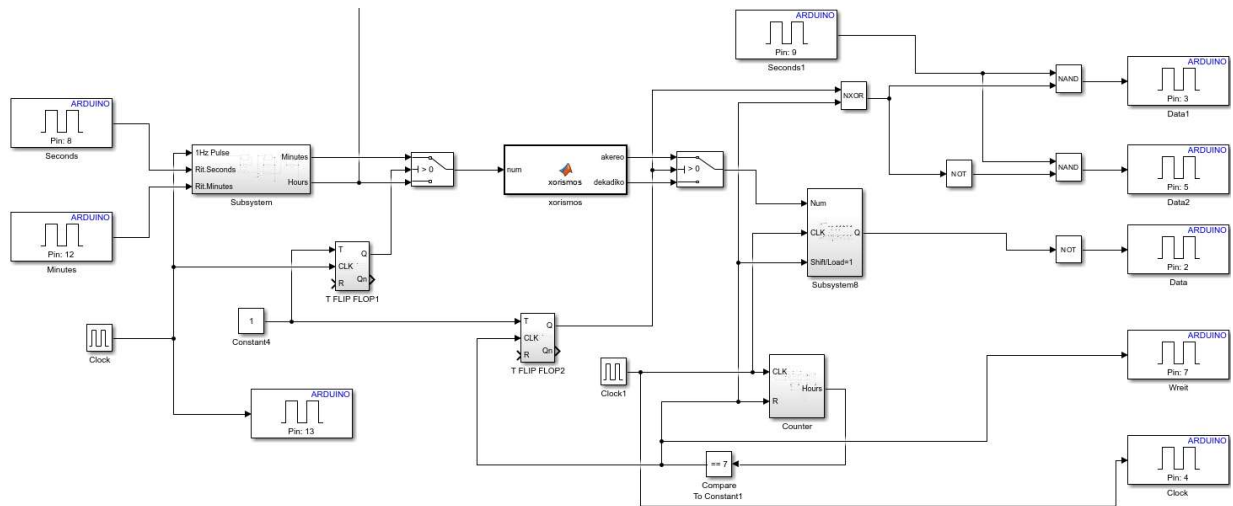
Εικόνα 10.33. Το 2<sup>ο</sup> μέρος της αναπαράστασης του συνολικού κυκλώματος.

Η ανάλυση των δομικών στοιχείων που φαίνονται στην εικόνα 10.33 παρουσιάζεται παρακάτω.

- **Energopoihtis, Energopoihtis1:** Το συγκεκριμένο subsystem έχει δύο εισόδους. Η μία είναι αυτούσια η έξοδος από το δομικό στοιχείο smooth operation και η άλλη είναι πάλι η έξοδος του smooth operation (εάν το  $SUM > 0.1$ ) αλλά με το αντίθετο πρόσημο (σφάλμα) καθώς γίνεται αφαίρεση από το  $0$ . Σκοπός αυτού του δομικού στοιχείου είναι να αναγνωρίζει εάν υπάρχει διαφορά της τιμής κατά  $0.05$  και εάν υπάρχει τότε βγάζει στη έξοδό του μία τιμή όπου είναι η τιμή σφάλματος και την δέχεται σαν είσοδο ο ελεγκτής PID προκειμένου να διορθωθεί η θέση του αισθητήρα είτε στον άξονα  $Y$  είτε στον άξονα  $X$ . Αναλόγως σε ποιον άξονα παρουσιάστηκε το σφάλμα.

- **RT (Rate Transition):** Το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο είναι υπεύθυνο για τον χειρισμό της μεταφοράς δεδομένων μεταξύ δομικών στοιχείων που λειτουργούν με διαφορετικούς ρυθμούς. Το δομικό στοιχείο μετάβασης ρυθμού μεταφέρει δεδομένα από την έξοδο του δομικού στοιχείου Gain που λειτουργεί με έναν ρυθμό στην είσοδο του δομικού στοιχείου Memory που λειτουργεί με διαφορετικό ρυθμό. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η ανταλλαγή διατηρώντας την ακεραιότητα των δεδομένων.
- **PID:** Ο PID συνδέεται σε σειρά και η λειτουργία του περιορίζεται λόγω της ανάδρασης εξαιτίας της διαγραφής της μνήμης που οφείλεται στον ολοκληρωτικό παράγοντα του PID.
- **Contant3:** Εισαγωγή του αριθμού της ημέρας στο σύστημα για τον υπολογισμό της αζιμουθιακής γωνίας του ήλιου αλλά και του ηλιακού ύψους.
- **Energopoihtis2, Energopoihtis3:** Κανονικοποίηση της τιμής εξόδου του PID σε μοίρες για να μπορούν να δεχτούν την πληροφορία τα δομικά στοιχεία του servo.
- **thesi\_iliou:** Περιέχει τον κώδικα για τον υπολογισμό της αζιμουθιακής γωνίας του ήλιου και του ηλιακού ύψους.
- **Switch2, Switch 3:** Καθορίζουν εάν η είσοδος του δομικού στοιχείου του σερβοκινητήρα θα είναι η κανονικοποιημένη τιμή από την έξοδο του PID (Εάν  $SUM > 0.1$ ) ή εάν θα είναι τα αποτελέσματα των εξισώσεων του ηλίου σαν είσοδος.

### 3<sup>ο</sup> Μέρος



Εικόνα 10.34. Το 3<sup>ο</sup> μέρος της αναπαράστασης του συνολικού κυκλώματος.

Η ανάλυση των δομικών στοιχείων που φαίνονται στην εικόνα 10.34 παρουσιάζεται παρακάτω.

- **Seconds και Minutes:** Τα συγκεκριμένα δομικά στοιχεία είναι ψηφιακές εισοδοι και συνδέονται στο Arduino στα pin 8 και 12 αντίστοιχα για να ρυθμίζεται η ώρα.
- **Subsystem:** Στο συγκεκριμένο μπλοκ εμπεριέχεται η υλοποίηση του clock που έγινε αναλυτικά παραπάνω.
- **T FLIP FLOP1:** Με τη χρήση του συγκεκριμένου δομικού στοιχείου, το υποσύστημα λαμβάνει την πληροφορία σχετικά με το πότε λαμβάνει τα λεπτά και πότε την ώρα.
- **xorismos:** Το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο είναι τύπου MATLAB Function και ο κώδικας που εμπεριέχεται μέσα φαίνεται παρακάτω.

```
function [akereo,dekadiko] = xorismos(num)
if num>9
    lep1 = num/10;
else
    lep1 = num;
end

if (mod(num,10) >= 5)
    lep1 = lep1 - 0.5;
end

akereo = uint8(lep1);

if num>9
    dekadiko = mod(num,10);
else
    dekadiko = 0;
end
end
```

Ο σκοπός του συγκεκριμένου κώδικα είναι ο χωρισμός οποιουδήποτε διψήφιου αριθμού σε δύο μονοψήφιους αριθμούς. Δηλαδή εάν είναι ο αριθμός 10, τότε πρώτα θα εμφανιστεί το 1 και μετά το 0.

- **T FLIP FLOP2:** Το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο καθορίζει ποιο από τα δύο ψηφία του αριθμού (Ποια από τις δύο εξόδους του δομικού στοιχείου xorismos θα πρέπει να δεχτεί ως είσοδο το **Subsystem8**).
- **Seconds1:** Είναι ένα δομικό στοιχείο ψηφιακής εισόδου που έχει συνδεθεί με το pin 9 του Arduino και λειτουργεί σαν διακόπτης. Εάν είναι ανοικτός εμφανίζεται η ώρα και όταν είναι κλειστός δεν εμφανίζεται.
- **Subsystem8:** Στο συγκεκριμένο δομικό στοιχείο εμπεριέχεται ένας Shift Register για να μετατρέπει τα παράλληλα δεδομένα σε σειρά και ένα δομικό στοιχείο τύπου MATLAB Function που θα φανεί αμέσως τώρα.
- **segment:** Ανοίγοντας το Subsystem8 φαίνεται το δομικό στοιχείο τύπου MATLAB Function με όνομα segment, όπου έχει το ρόλο του αποκωδικοποιητή. Ο κώδικας που υπάρχει μέσα στο συγκεκριμένο δομικό στοιχείο καθορίζει το άναμα των LED και είναι σημαντικό να αναφερθεί πως τα LED ανάβουν με 1 και σβήνουν με 0. Ο συγκεκριμένος κώδικας είναι ο εξής:

```
function [a,b,c,d,e,f,g] = segment(NUM)
lep1 = NUM;

if lep1 == 0
    a=1;
    b=1;
    c=1;
    d=1;
    e=1;
    f=1;
    g=0;

elseif lep1 == 1
    a=0;
    b=1;
    c=1;
    d=0;
    e=0;
```

Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα

```
f=0;  
g=0;
```

```
elseif lep1 == 2
```

```
a=1;  
b=1;  
c=0;  
d=1;  
e=1;  
f=0;  
g=1;
```

```
elseif lep1 == 3
```

```
a=1;  
b=1;  
c=1;  
d=1;  
e=0;  
f=0;  
g=1;
```

```
elseif lep1 == 4
```

```
a=0;  
b=1;  
c=1;  
d=0;  
e=0;  
f=1;  
g=1;
```

```
elseif lep1 == 5
```

```
a=1;  
b=0;  
c=1;  
d=1;  
e=0;  
f=1;  
g=1;
```

```
elseif lep1 == 6
```

```
a=0;  
b=0;  
c=1;  
d=1;  
e=1;  
f=1;  
g=1;
```

```
elseif lep1 == 7
```

```
a=1;  
b=1;  
c=1;  
d=0;  
e=0;  
f=0;  
g=0;
```

```
elseif lep1 == 8
```

```
a=1;  
b=1;
```

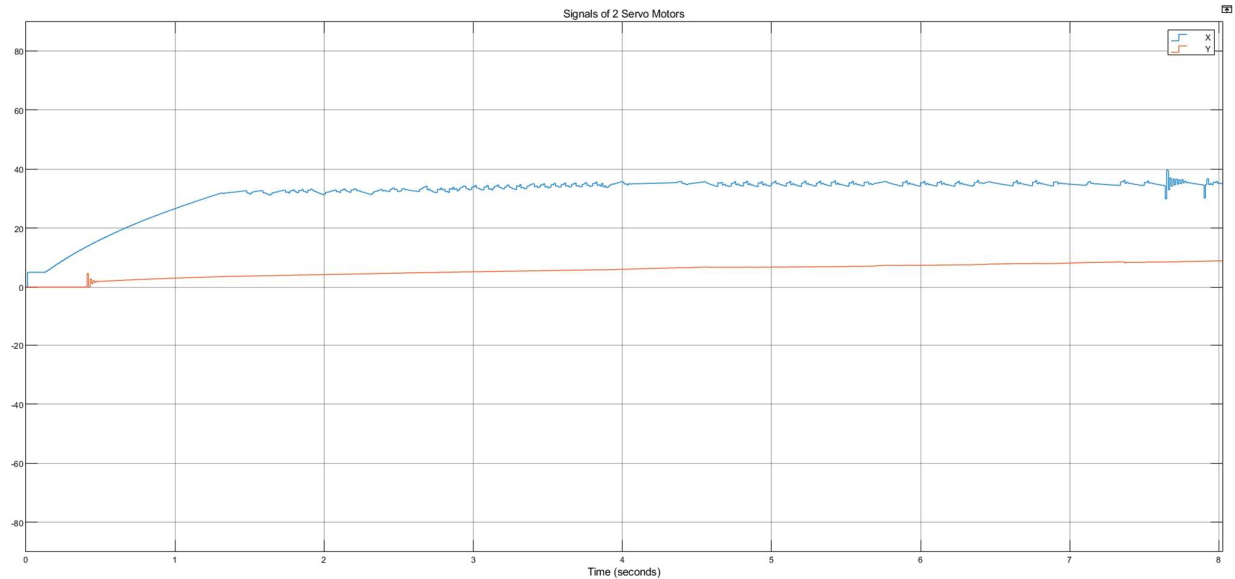
```
c=1;  
d=1;  
e=1;  
f=1;  
g=1;  
  
else  
a=1;  
b=1;  
c=1;  
d=0;  
e=0;  
f=1;  
g=1;  
end  
end
```

- **Counter:** Το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο μετράει εάν έλαβε και τα 7 bit. Μόλις τα λαμβάνει δίνει σήμα στο Subsystem8 μέσω της εισόδου Shift/Load=1 ώστε να φορτωθεί η νέα τιμή ή το επόμενο ψηφίο του αριθμού. Ακόμη, το συγκεκριμένο σήμα πηγαίνει και στη είσοδο CLK του T FLIP FLOP2 για να αλλάζει την κατάσταση για το δεύτερο αριθμό.
- **Wreit:** Είναι δομικό στοιχείο ψηφιακής εξόδου και ο λόγος χρήσης του είναι για να δώσει άσσο στο pin 7 του Arduino όταν ο Counter λάβει και τα 7 bit.
- **Data:** Είναι δομικό στοιχείο ψηφιακής εξόδου και ο λόγος χρήσης είναι να μεταφέρει πληροφορίες στο ολοκληρωμένο 74795 μέσω του pin 2 του Arduino.
- **Clock:** Είναι δομικό στοιχείο ψηφιακής εξόδου και ο λόγος χρήσης είναι να ενημερώνει το ολοκληρωμένο 74795 για τις πληροφορίες που δέχεται μέσω του χρονισμού (clock). Ο χρονισμός γίνεται μέσω του pin 4 του Arduino.
- **Data1, Data2:** Είναι δομικό στοιχείο ψηφιακής εξόδου και ο λόγος χρήσης είναι για την οδήγηση των pnp τρανζίστορ του ολοκληρωμένου μέσω των pin 3 και 5 του Arduino αντίστοιχα.

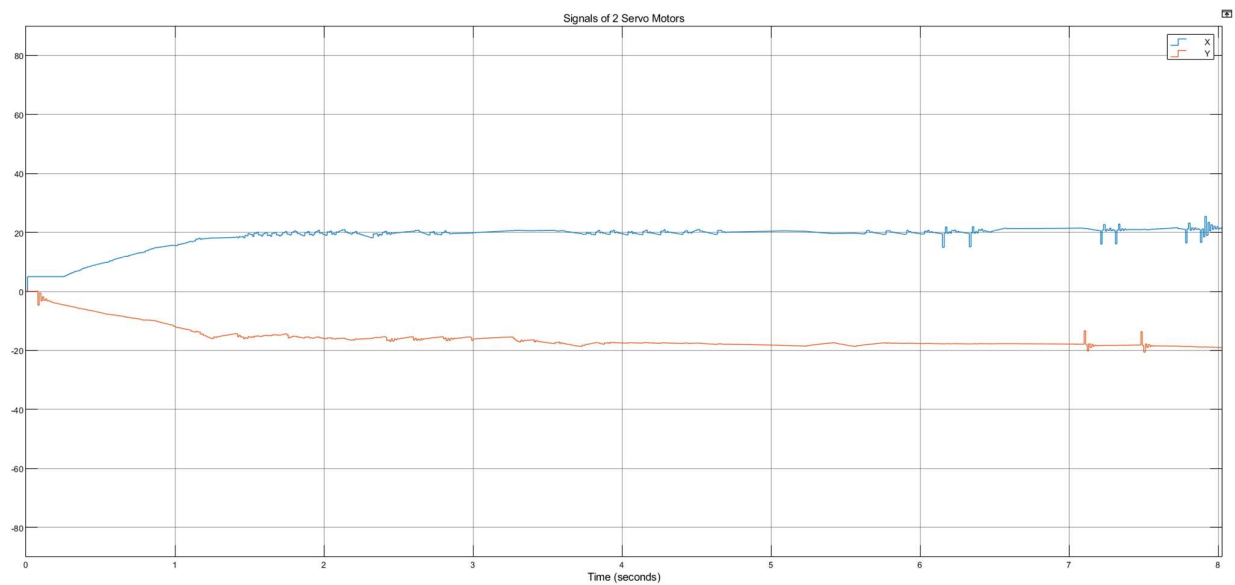
### 10.5.3 Απεικόνιση των αποτελεσμάτων του σταδίου HIL

Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του σταδίου HIL σε πραγματικό χρόνο φαίνονται στις εικόνες 10.35 και 10.36.

Σχεδιασμός και προσομοίωση βάσει τεχνικών Μοντελοποίησης συστήματος ηλιακής παρακολούθησης για Φωτοβολταϊκά Συστήματα



**Εικόνα 10.35.** Απεικόνιση της απόκρισης των δύο σερβοκινητήρων στους άξονες X και Y κατά τη διάρκεια της ανίχνευσης του φωτός για μία τυχαία θέση της πηγής φωτός.



**Εικόνα 10.36.** Απεικόνιση της απόκρισης των δύο σερβοκινητήρων στους άξονες X και Y κατά τη διάρκεια της ανίχνευσης του φωτός για μία τυχαία θέση της πηγής φωτός.

Παρατηρώντας τις εικόνες 10.35 και 10.36 παρατηρείται πως και στις δύο η απόκριση των σερβοκινητήρων που είναι υπεύθυνοι για την σωστή και ομαλή περιστροφή στους άξονες X και Y είναι η επιθυμητή. Φαίνεται πως υπάρχει κατά τη διαδικασία της εξάλιψης του σφάλματος της μόνιμης κατάστασης, δηλαδή καθώς προσπαθεί το σύστημα να ‘κεντράρει’ την πηγή φωτός, κάποιος μικρός μη επιθυμητός θόρυβος που στο τέλος των 8 δευτερολέπτων της προσομοίωσης του HIL γίνεται λίγο μεγαλύτερος.



## 11 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με το πέρας και την ολοκλήρωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας εξάγονται κάποια συμπεράσματα που αφορούν την προσομοίωση του συστήματος και την σύνδεση της προσομοίωσης με το hardware του συστήματος.

Σε πρώτη φάση συμπεραίνεται πως από αρχιτεκτονικής σκοπιάς, τα μοντέλα που έχουν τη μορφή στοιχείων και μονάδων τοποθετήθηκαν σε ένα σύστημα που αποτελείται από πλατφόρμες με τη μορφή hardware και με τη μορφή software. Επομένως, η αρχιτεκτονική του συστήματος περιλαμβάνει τόσο λειτουργικά στοιχεία hardware όσο και software, αλλά συγχρόνως είναι αγνωστικό για τις δύο πλατφόρμες (Platform Agnostic). Ο στόχος του Platform Agnostic είναι η δημιουργία μοντέλων που είναι φορητά και μπορούν εύκολα να αναπτυχθούν σε διαφορετικές πλατφόρμες χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις. Ακόμη επιτυγχάνεται η ευελιξία και η επεκτασιμότητα του συστήματος. Στη συνέχεια εξάγονται τα συμπεράσματα κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων SIL και HIL.

Κατά τη διάρκεια του SIL σταδίου επιτυγχάνεται η προσομοίωση του συστήματος με τη χρήση μοντέλων στο περιβάλλον του MATLAB/Simulink και όχι σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τον έλεγχο της ύπαρξης τυχόν σφαλμάτων στον ελεγκτή αλλά και στο σύστημα γενικότερα. Έτσι επιτεύχθηκε η ασφαλής μετάβαση στην προσομοίωση που έγινε σε πραγματικό χρόνο με τη σύνδεση του hardware.

Στο στάδιο του HIL πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση του συστήματος στην πλατφόρμα του hardware σε πραγματικό χρόνο και έγινε η αυτόματη δημιουργία κώδικα που δέχτηκε ο μικροελεγκτής. Η διαδικασία της αυτόματης δημιουργίας του κώδικα έγινε σε μηδενικό χρόνο και δεν παρουσιάστηκαν μη επαληθευμένα θραύσματα κώδικα. Ακόμη έγινε η λήψη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και έτσι μπορούσαν να φανούν τυχόν αστοχίες του συστήματος.

Επομένως, συμπεραίνεται πως με τον προγραμματισμό και σχεδιασμό βάση μοντελοποίησης (MBP&MBD) ενός συστήματος επιτυγχάνεται η επαλήθευση και η επικύρωση των αποτελεσμάτων μεταξύ του σταδίου SIL και του HIL. Επιπλέον, έγινε συλλογή δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τυχόν αναβάθμιση και βελτίωση του μοντέλου. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί πως ο χρόνος που απαιτήθηκε για την ανάπτυξη του λογισμικού έγινε σε πολύ γρήγορο χρονικό διάστημα, φτάνοντας να μειωθεί έως και δύο με τρεις φορές σχετικά με άλλες μεθόδους σχεδιασμού.

Τέλος, το παρόν μοντελοποιημένο σύστημα είναι πολύ εύκολο να τροποποιηθεί και να προσαρμοστεί σε διάφορες ανάγκες που απαιτούνται, τροποποιώντας απλώς τα κατάλληλα σημεία της μοντελοποίησης που έχει πραγματοποιηθεί στο MATLAB/Simulink. Έτσι καθίσταται επαναχρησιμοποιήσιμο και μπορεί εύκολα να ενημερωθεί για τυχόν αλλαγές. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η παραγωγικότητα και η αποδοτικότητα.

### Βιβλιογραφία – Αναφορές

- 1) ΜΗΧΑΤΡΟΝΙΚΗ, 6<sup>η</sup> έκδοση, Συγγραφέας: William Bolton, Εκδόσεις Τζιόλα
- 2) ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ & ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ, Συγγραφέας: Νίκος Σταθόπουλος, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Αράκυνθος
- 3) ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ, 8<sup>η</sup> έκδοση, Συγγραφείς: Albert Malvino, David J. Bates, Εκδόσεις Τζιόλα
- 4) ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ, 7<sup>η</sup> έκδοση, Συγγραφείς: Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith, Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- 5) ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ, 2<sup>η</sup> έκδοση, Συγγραφέας: Παντελής Β. Μαλατέστας, Εκδόσεις Τζιόλα

- 6) Design of Embedded Robust Control Systems Using MATLAB/Simulink, Συγγραφείς: Petko H. Petkov, Tsonyo N. Slavov and Jordan K. Kravev, Εκδόσεις: The Institution of Engineering and Technology
- 7) Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Συγγραφείς: Διονύσης Κ. Ασημακόπουλος, Γεώργιος Κ. Αραμπατζής, Αθανάσιος Αγγελής – Δημάκης, Αβραάμ Καρταλίδης, Γεώργιος Τσιλιγκιρίδης, Εκδόσεις: Σοφία

## Επιστημονικά Άρθρα-Διαδικτυακές Πηγές

- [1] Ανάλυση ακτινοβολίας. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Components-of-the-earths-radiation-budget-adapted-from-NASA\\_fig1\\_291186092](https://www.researchgate.net/figure/Components-of-the-earths-radiation-budget-adapted-from-NASA_fig1_291186092)
- [2] Σχηματικό διάγραμμα ηλιακού κελιού. URL: [https://www.researchgate.net/figure/typical-schematic-diagram-of-the-solar-cell\\_fig1\\_287301630](https://www.researchgate.net/figure/typical-schematic-diagram-of-the-solar-cell_fig1_287301630)
- [3] Μοντέλο θεωρητικού ηλιακού κελιού. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8702932>
- [4] Μοντέλο θεωρητικού ηλιακού κελιού. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8702932>
- [5] Στο (α) είναι η I-V καμπύλη και στο (β) η P-V. URL: [https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6139509?casa\\_token=pRR4dQm1LRYYYYAA:Vj4r0XMoOqpJpnFRCD-xfsj\\_Nel89KqbOlsWmONDehzFNjbdPi0c6v5HAase4q0nSAuwRxIUJv9-](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6139509?casa_token=pRR4dQm1LRYYYYAA:Vj4r0XMoOqpJpnFRCD-xfsj_Nel89KqbOlsWmONDehzFNjbdPi0c6v5HAase4q0nSAuwRxIUJv9-)
- [6] Τύποι ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτουν στην επιφάνεια της γης. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Different-form-of-solar-radiation-arriving-on-earths-surface\\_fig5\\_258833765](https://www.researchgate.net/figure/Different-form-of-solar-radiation-arriving-on-earths-surface_fig5_258833765)
- [7] Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες επιφάνειες (στραμμένες) κατά τη διάρκεια ενός έτους. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Solar-Irradiance-daily-averaged-on-different-tilted-surfaces-In-Fig-10-is-obtained-the\\_fig8\\_274242818](https://www.researchgate.net/figure/Solar-Irradiance-daily-averaged-on-different-tilted-surfaces-In-Fig-10-is-obtained-the_fig8_274242818).
- [8] Γραφική απεικόνιση της καμπύλης I-V για διάφορες εντάσεις ακτινοβολίας. URL: [https://www.researchgate.net/figure/I-V-characteristics-for-various-conditions-of-solar-radiation\\_fig3\\_312317924](https://www.researchgate.net/figure/I-V-characteristics-for-various-conditions-of-solar-radiation_fig3_312317924)
- [9] Γραφική απεικόνιση της καμπύλης I-V για διάφορες θερμοκρασίες. URL: [https://www.researchgate.net/figure/I-V-characteristics-for-the-temperature-variation-between-0-and-75C\\_fig5\\_312317924](https://www.researchgate.net/figure/I-V-characteristics-for-the-temperature-variation-between-0-and-75C_fig5_312317924).
- [10] (α) Ηλιακά κελιά συνδεδεμένα σε σειρά, (β) Ηλιακά κελιά συνδεδεμένα παράλληλα. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Series-and-parallel-connection-of-photovoltaic-modules-a-Series-connection-b\\_fig1\\_3280112](https://www.researchgate.net/figure/Series-and-parallel-connection-of-photovoltaic-modules-a-Series-connection-b_fig1_3280112)
- [11] Απεικόνιση της I-V όταν έχουμε συνδεσμολογία σε σειρά. URL: [https://www.researchgate.net/figure/IV-curve-of-series-connected-solar-cells\\_fig10\\_283569310](https://www.researchgate.net/figure/IV-curve-of-series-connected-solar-cells_fig10_283569310)

- [12] Απεικόνιση της I-V όταν έχουμε παράλληλη συνδεσμολογία. URL: [https://www.researchgate.net/figure/IV-curve-of-series-parallel-connected-solar-cells\\_fig12\\_283569310](https://www.researchgate.net/figure/IV-curve-of-series-parallel-connected-solar-cells_fig12_283569310)
- [13] Στο πρώτο σχήμα φαίνεται ο μηχανισμός του αζιμουθιακού ηλιοτρόπιου και στο δεύτερο σχήμα φαίνεται του πολικού ηλιοτρόπιου. URL: <https://www.skillstg.co.uk/blog/how-photovoltaic-panels-use-solar-trackers>
- [14] Σύστημα ανιχνευτή ηλίου διπλού άξονα. URL1: [https://www.researchgate.net/figure/Dual-Axis-Solar-Tracker\\_fig3\\_286765408](https://www.researchgate.net/figure/Dual-Axis-Solar-Tracker_fig3_286765408)  
URL2: [https://www.researchgate.net/figure/Mechanical-structure-for-the-dual-axis-solar-tracker\\_fig2\\_315666507](https://www.researchgate.net/figure/Mechanical-structure-for-the-dual-axis-solar-tracker_fig2_315666507)
- [15] Εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
- [16] Αλλαγή της δυναμικότητας του ηλεκτρικού δικτύου το 2021 στην Ελλάδα. URL: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Statistics/Statistical\\_Profiles/Europe/Greece\\_Europe\\_RE\\_SP.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Statistics/Statistical_Profiles/Europe/Greece_Europe_RE_SP.pdf)
- [17] Η εικόνα του Ήλιου και της Γης. URL: <https://www.popularmechanics.com/space/solar-system/a43340339/earths-water-is-older-than-the-sun/>
- [18] Το αστρονομικό μοντέλο που ανέπτυξε ο Νικόλαος Κοπέρνικος. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Copernican\\_heliocentrism](https://en.wikipedia.org/wiki/Copernican_heliocentrism)
- [19] Απόκλιση άξονα Γης ως προς το επίπεδο της εκλειπτική τροχιάς. URL: <https://skyandtelescope.org/astronomy-resources/what-is-the-ecliptic/>
- [20] Ετήσια διακύμανση της απόκλισης του άξονα της Γης. URL: [https://www.researchgate.net/figure/The-yearly-variance-of-declination-angle-Hour-angle-is-the-angle-between-the-longitude\\_fig2\\_298318962](https://www.researchgate.net/figure/The-yearly-variance-of-declination-angle-Hour-angle-is-the-angle-between-the-longitude_fig2_298318962)
- [21] Επιφάνεια της γης σε μερκατορικό χάρτη. URL: [https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/6167/3/00\\_master\\_document-KOY.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/6167/3/00_master_document-KOY.pdf)
- [22] Σχηματική επεξήγηση της ωριαίας γωνίας  $\omega$  του ήλιου. URL: [https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/6167/3/00\\_master\\_document-KOY.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/6167/3/00_master_document-KOY.pdf)
- [23] Γωνία ζενίθ ( $\theta_z$ ), Ηλιακό ύψος ( $\beta$ ) και Αζιμούθιο ( $\varphi_s$ ). URL: [https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/6167/3/00\\_master\\_document-KOY.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/6167/3/00_master_document-KOY.pdf)
- [24] Γραφική απεικόνιση του νόμου των συνημίτονων του Lambert. URL: <https://www.gophotonics.com/community/what-is-lambert-s-cosine-law>
- [25] Απεικόνιση ενός κομματιού της συγκεκριμένης πατέντας που αναφέρεται στο quadratic detector. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://image-pubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/3098934>

- [26] Απεικόνιση ενός κομματιού της συγκεκριμένης πατέντας που αναφέρεται στο quadratic detector. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/4225781>
- [27] Δομή ενός quadratic detector. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/ebooks/FG/Field-Guide-to-Adaptive-Optics-Second-Edition/Quad-Cells/Quad-Cells/10.1117/3.923078.ch30>
- [28] Ενισχυτής συνδεδεμένος με φωτοδίοδο σε λειτουργία φωτοβολταϊκής σύνδεσης. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-photovoltaic-and-photoconductive-modes-of-photodiode-operation/>
- [29] Ενισχυτής συνδεδεμένος με φωτοδίοδο σε λειτουργία φωτοαγωγίμης σύνδεσης. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-photovoltaic-and-photoconductive-modes-of-photodiode-operation/>
- [30] Σύμβολο διαφορικού ενισχυτή. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Differential\\_amplifier](https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_amplifier)
- [31] Αναλυτική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας των CPS. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209580991830612X>
- [32] Αναλυτική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας των DTs. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209580991830612X>
- [33] Πλατφόρμα του Arduino MEGA 2560. URL: [https://www.etechnophiles.com/arduino-mega-pinout-pin-diagram-schematic-and-specifications-in-detail/?utm\\_content=cmp-true](https://www.etechnophiles.com/arduino-mega-pinout-pin-diagram-schematic-and-specifications-in-detail/?utm_content=cmp-true)
- [34] Κατανομή μέγιστου βάρους ενός σερβοκινητήρα των 25kg-cm. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=1WnGv-DPexc&t=517s>
- [35] Το περιεχόμενο ενός DC σερβοκινητήρα. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=1WnGv-DPexc&t=517s>
- [36] Το εσωτερικό κύκλωμα του DC σερβοκινητήρα για έλεγχο της θέσης εξόδου δίνοντας ο χρήστης μέσω του ποτενσιόμετρου την επιθυμητή θέση εξόδου. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=1WnGv-DPexc&t=517s>
- [37] Σχεδιασμός συστημάτων ελέγχου με το MATLAB. Design of Embedded Robust Control Systems Using MATLAB/Simulink, Συγγραφείς: Petko H. Petkov, Tsonyo N. Slavov and Jordan K. Kravev, Εκδόσεις: The Institution of Engineering and Technology
- [38] Διαδρομή παραγωγής κώδικα από μοντελοποιημένο σύστημα στο Simulink. Design of Embedded Robust Control Systems Using MATLAB/Simulink, Συγγραφείς: Petko H. Petkov, Tsonyo N. Slavov and Jordan K. Kravev, Εκδόσεις: The Institution of Engineering and Technology
- [39] Orbits and Kepler's Laws. URL: <https://solarsystem.nasa.gov/resources/310/orbits-and-keplers-laws/>
- [40] Πατέντα U.S.Pat. No. 3098934. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/3098934>

- [41] Πατέντα U.S.Pat. No.\4225781. URL: chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/4225781
- [42] Δαμιανίδης Μ., Κατσαρός Γ., Τόλης Μ., Στεργιόπουλος Φ. 2011. Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, Αριθμός σελίδων: 176. [http://tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2018/02/fwtovoltaika\\_ergwn.pdf](http://tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2018/02/fwtovoltaika_ergwn.pdf)
- [43] Γεωργίου Γ., Ξενοφώντος Χ. 2007. Εισαγωγή στη MATLAB. Αριθμός σελίδων: 306. <https://www.csd.uoc.gr/~hy215/tutorials/MATLABbook.pdf>
- [44] Fei Tao, Qinglin Qi, Lihui Wang, A.Y.C. Nee. 2019. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. Engineering, 653-661. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209580991830612X>
- [45] Dawn Tilbury, Bill Messner, Rick Hill, JD Taylor. Control Tutorials for MATLAB and Simulink. <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction&section=ControlPID>
- [46] PID controller. [https://en.wikipedia.org/wiki/PID\\_controller](https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller)
- [47] Petko H. Petkov, Tsonyo N. Slavov and Jordan K. Krlev. 2018. Design of Embedded Robust Control Systems Using MATLAB/Simulink. The Institution of Engineering and Technology. Αριθμός σελίδων: 534
- [48] Elibrahimi M., Elmouatamid A., Bakhouya M., Feddi K., Ouladsine R. 2018. Performance Evaluation of Fixed and Sun Tracking Photovoltaic Systems. IEEE Xplore, International Renewable and Sustainable Energy Conference, p. 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8702932>
- [49] Rizvi A., Addoweesh K., El-Leathy A., Al-Ansary H. 2014. Sun position algorithm for sun tracking applications. IEEE Xplore, Annual Conference of Industrial Electronics Society, p. 1-4. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7049356>
- [50] Γκέτσης Ζ. 2011. Εισαγωγή στην Μοντελοποίηση Φυσικών Συστημάτων. Webinar in Mathworks. [https://ch.mathworks.com/videos/introduction-to-physical-modeling-81541.html?elqsid=1541777222876&potential\\_use=Student](https://ch.mathworks.com/videos/introduction-to-physical-modeling-81541.html?elqsid=1541777222876&potential_use=Student)
- [51] 2015. Design of Automatic Solar Tracking Prototype. Electronics maker : <https://electronicsmaker.com/design-of-automatic-solar-tracking-prototype>
- [52] He N., Huang H.-W. 2017. Use of model-based design to teach embedded systems programming. IEEE Xplore, International Conference on Electro-Information Technology, p. 1-4. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8053336>