



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ & ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ : Καθηγητής Α. Μιχαηλίδης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ*

*Σιώπης Νικόλαος*

*ΑΕΜ : 5157*

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Επίκουρος καθηγητής Χ. Σαλπιστής

*ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ Σεπτέμβριος 2016*

## *Πρόλογος*

Η παρούσα εργασία αποτελεί διπλωματική εργασία στα πλαίσια του προγράμματος σπουδών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Πριν την παρουσίαση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους από τους ανθρώπους που γνώρισα, συνεργάστηκα μαζί τους και έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην πραγματοποίησή της.

Πρώτο απ' όλους θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθητή της διπλωματικής εργασίας επ. Καθηγητή Χ. Σαλπιστή για την πολύτιμη καθοδήγησή του και την εμπιστοσύνη και εκτίμηση που μου έδειξε.

Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Αντώνη Τσακίρη για όλη την βοήθεια και την καθοδήγηση για τη εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

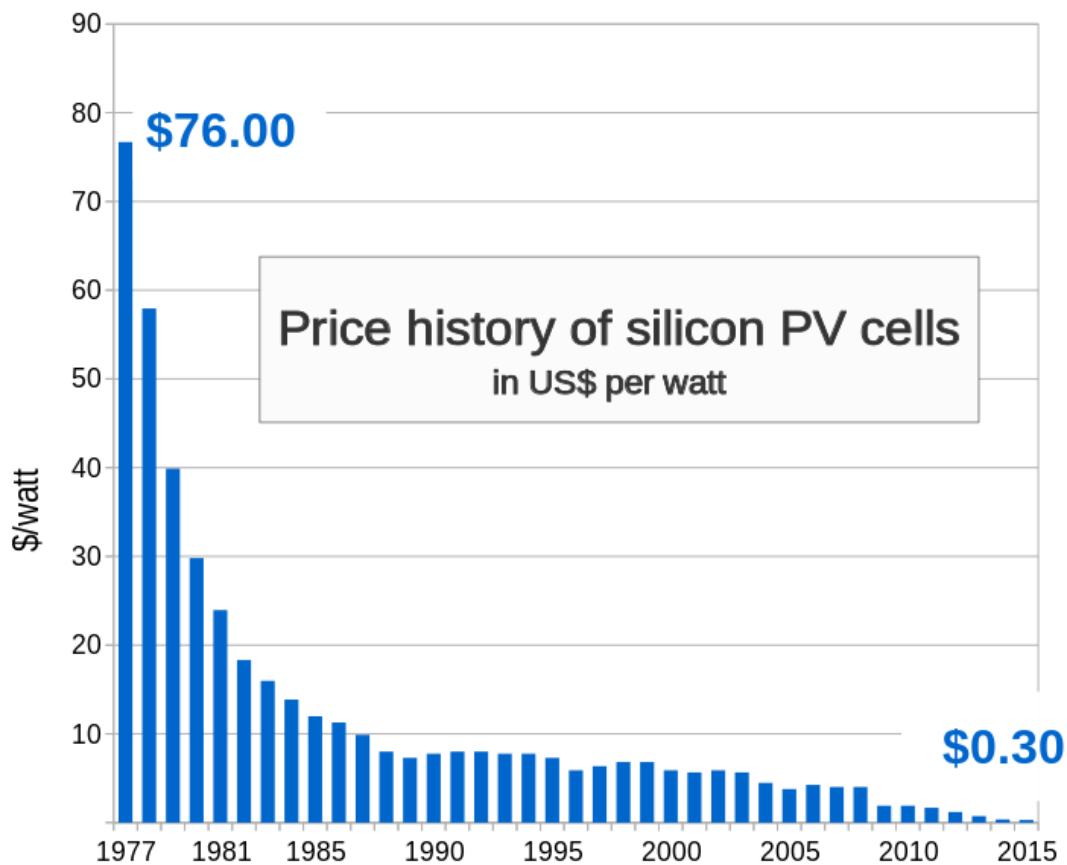
Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Αθανάσιο Μιχαηλίδη για τις πολύτιμες συμβουλές του σε σημαντικά σημεία της διπλωματικής αλλά και όλα τα μέλη του εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών & Μηχανολογικού Σχεδιασμό για την προσιτότητα τους αλλά και το ευχάριστο κλίμα που επικρατεί και βοηθά τους φοιτητές στην εκμάθηση και στην προσαρμογή στις συνθήκες της επιστήμης του Μηχανολόγου Μηχανικού.

## *Περιεχόμενα*

1. Εισαγωγή.....	
2. Ιχνηλάτηση της πορείας του ήλιου (solar tracking).....	
3. Αρχική μελέτη κατασκευής.....	
4. Μελέτη μηχανισμού πτυσόμενων πάνελ.....	
5. Μελέτη συστήματος ιχνηλάτησης ηλίου (solar tracking).....	
5.1. Μηχανισμός κλίσης-ανύψωσης.....	
5.2. Μηχανισμός περιστροφής-αζιμούθιου.....	
6. Ηλεκτρονικός έλεγχος συστήματος.....	
7. Βιβλιογραφία.....	
8. Παράρτημα.....	

## 1. Εισαγωγή

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί έναν από τους ακρογωνιαίους λίθους της σύγχρονης κοινωνίας. Πέρα από την κάλυψη όμως των ενεργειακών αναγκών της κοινωνίας πρέπει να προστατεύσουμε τον πλανήτη και το περιβάλλον μας. Τα τελευταία χρόνια έχει καταστεί αναγκαία η στροφή σε πράσινες τεχνολογίες για την παραγωγή ενέργειας. Η ηλιακή τεχνολογία και κυρίως τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι μια ξεκάθαρη λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα εκμεταλλεύονται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο το οποίο είναι η δημιουργία τάσης ή έντασης ρεύματος με την έκθεση ενός υλικού (φωτοβολταϊκό κελί) στο ηλιακό φως. Το πρώτο φωτοβολταϊκό κελί κατασκευάστηκε από τον Charles Fritts το 1880. Από τότε η εξέλιξη στον τομέα αυτόν είναι πολύ μεγάλη κάτι που καταστά πλέον τα φωτοβολταϊκά συστήματα από τις πιο αξιόπιστες και οικονομικές λύσεις για την παραγωγή ενέργειας.



Source: Bloomberg New Energy Finance & [pv.energytrend.com](http://pv.energytrend.com)

Με την αύξηση των αναγκών για ενέργεια είναι αναγκαία η εξεύρεση λύσεων που θα αυξάνουν την αποδοτικότητα και θα προσφέρουν ευελιξία.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός ενός φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο θα είναι φορητό και αυτόνομο. Για την αύξηση της αποδοτικότητας της κατασκευής επιλέχθηκε η τοποθέτηση συστήματος ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου (solar tracking). Με αυτόν τον

τρόπο τα φωτοβολταϊκά πάνελ θα βρίσκονται κάθε στιγμή κάθετα στις ακτίνες του ηλίου και η προσπίπτουσα ακτινοβολία θα είναι η μέγιστη άρα και η παραγόμενη ενέργεια απο αυτά. Συστήματα τέτοιου τύπου προσφέρουν αύξηση στην παραγωγή ενέργειας της τάξης 30%-40%. Για την φορητότητα του συστήματος το κύριο πρόβλημα είναι ο όγκος της κατασκευής. Η μείωση του όγκου όμως οδηγεί και στην μείωση της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών άρα και στην μείωση της ισχύος. Γι' αυτόν τον λόγο το σύστημα των πάνελ σχεδιάστηκε πτυσσόμενο για να μπορεί να συνδιαστεί η επιθυμητή ισχύς με μικρό όγκο ώστε να μπορεί να μεταφέρεται με ευκολία. Στην συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι αρχές που διέπουν τα συστήματα ιχνηλάτησης του ηλίου και ακολουθεί η σχεδιομελέτη της κατασκευής.

## 2. Ιχνηλάτηση της πορείας του ήλιου (solar tracking)

Η ιχνηλάτηση της πορείας του ήλιου (solar tracking) αποτελεί μια τεχνική η οποία στοχεύει στην μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της προσπάθειας της κίνησης των βάσεων των πάνελ κατά την διάρκεια της ημέρας ώστε να επιτυγχάνεται συνεχώς η κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα συστήματα ιχνηλάτησης ή ηλιοπαρακολουθητές ή solar trackers χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στον σχεδιασμό και στην κατασκευή σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων αλλά προσφέρουν αυξημένη απόδοση, κατά μέσο όρο της τάξης 30%. Τα συστήματα αυτά χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες με βάση των αριθμών αξόνων του μηχανισμού και είναι:

- Συστήματα μονού άξονα

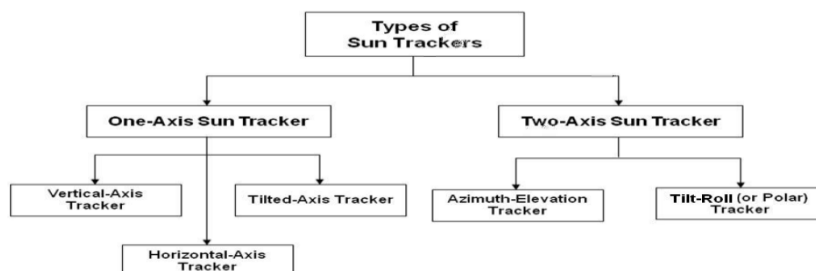
Τα συστήματα μονού άξονα χαρακτηρίζονται από την παρουσία ενός άξονα κίνησης για την παρακολούθηση του ήλιου και η τοποθέτηση του πάνελ σε σχέση με τις ακτίνες του ήλιου είναι προσεγγιστική. Αποτελούν την πιο οικονομική λύση συστημάτων ιχνηλάτησης. Χωρίζονται σε τρεις διαφορετικούς τύπους.

1. *Ιχνηλάτηση οριζοντίου άξονα* (horizontal-axis tracker):  
Ο άξονας του μηχανισμού παραμένει συνεχώς παράλληλα με το έδαφος και προσανατολίζεται σε μια κατεύθυνση μεταξύ Ανατολής-Δύσης ή Βορά-Νότου.
2. *Ιχνηλάτηση επικλινή άξονα* (tilted-axis tracker):  
Ο άξονας του μηχανισμού έχει μόνιμα μια κλίση στην κατεύθυνση Βορά-Νότου.
3. *Ιχνηλάτηση κάθετου άξονα* (vertical-axis tracker):  
Ο άξονας του μηχανισμού είναι κάθετος σε σχέση με το έδαφος.

- Συστήματα δύο αξόνων

Τα συστήματα δύο αξόνων χαρακτηρίζονται από την παρουσία δύο αξόνων κίνησης για την παρακολούθηση του ήλιου οπότε τα πάνελ τοποθετούνται ακριβώς κάθετα σε σχέση με την θέση του ήλιου. Αποτελούν τα πιο αποδοτικά συστήματα tracking αφού τα πάνελ παράγουν με αυτό τον τρόπο το μέγιστο δυνατό κάθε στιγμή. Χωρίζονται σε δύο βασικούς τύπους.

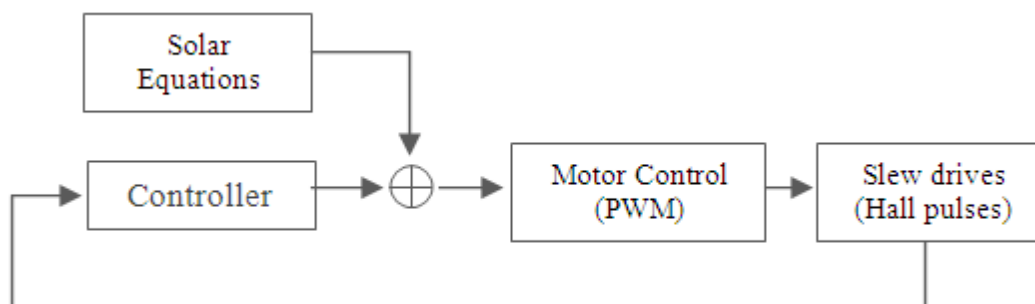
1. *Ιχνηλάτηση αζιμούθιου-ανύψωσης* (azimuth-elevation tracker)
2. *Ιχνηλάτηση κλίσης-περιστροφής* (tilt-roll tracking)



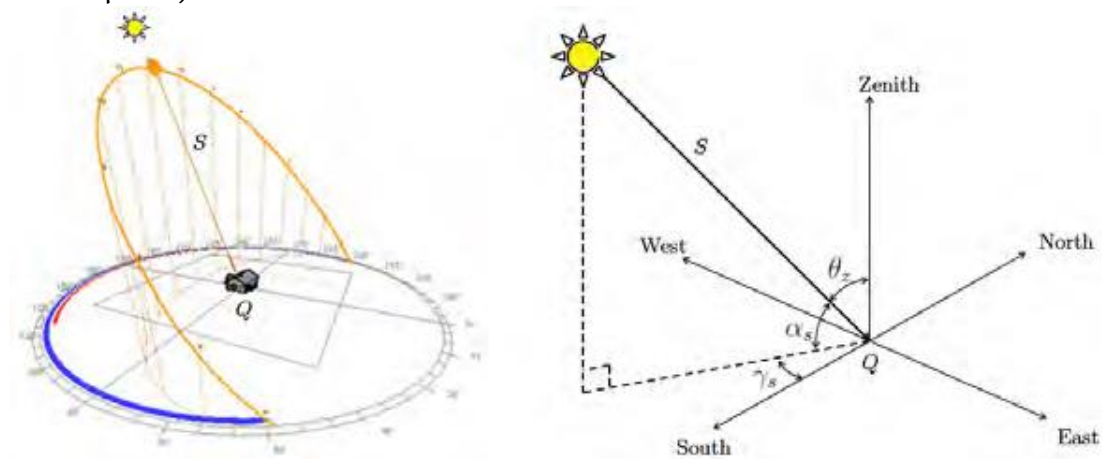
Μια άλλη κατηγοριοποίηση για τους μηχανισμούς ιχνηλάτησης ή solar tracking γίνεται με βάση τον τρόπο του ηλεκτρονικού ελέγχου. Έτσι έχουμε συστήματα ανοιχτού βρόγχου, κλειστού βρόγχου και υβριδικά συστήματα ελέγχου.

- Συστήματα ελέγχου ανοιχτού βρόγχου

Στα συστήματα αυτά ο υπολογισμός της θέσης του ηλίου και ο προσδιορισμός του ηλιακού διανύσματος  $S_Q(\gamma_s, \theta_s)$  γίνεται με βάση αστρονομικούς αλγόριθμους. Με χρήση δεδομένων GPS και δεδομένων πραγματικού χρόνου γίνονται οι υπολογισμοί για την τοποθέτηση των πάνελ στην πιο αποδοτική θέση. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι για τον υπολογισμό της ηλιακής θέσης αλλά ο πιο διαδεδομένος και ακριβής είναι ο NREL Solar position algorithm (SPA). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος υπολογίζει την ηλιακή θέση με σφάλμα  $0.0003^\circ$  για το διάστημα 2000 με 6000 μ.Χ. Αντίστοιχοι αλγόριθμοι όπως ο Grena και ο PSA είναι λιγότερο ακριβείς ή παρεκκλίνουν με το πέρασ του χρόνου από την επιθυμητή ακρίβεια αλλά προσφέρουν απλότητα στην υλοποίηση και μικρότερη επεξεργαστική ισχύ.



Ο αλγόριθμος *SPA* καθορίζει την θέση του ηλίου για οποιαδήποτε χρονική στιγμή για δεδομένη τοποθεσία. Θεωρείται αστρονομικός αλγόριθμος λόγω του μεγάλου βαθμού ακρίβειας που προσφέρει. Οι γωνίες της γης που θα περιγραφούν παρακάτω είναι οι γωνίες που απαιτούνται για να καθοριστεί η θέση του ηλίου με δεδομένο επίπεδο σε κάποιο συγκεκριμένο προσανατολισμό. Ακολουθεί η λίστα με τις παραμέτρους που απαιτούνται για τον προσδιορισμό του ηλιακού διανύσματος.



1. *Γεωγραφικό πλάτος ( $\varphi$ )*: είναι μια γεωγραφική συντεταγμένη που καθορίζει την θέση ενός σημείου στην επιφάνεια της γης ως προς βορρά-νότο σε σχέση με τον ισημερινό.
2. *Γεωγραφικό μήκος ( $\zeta$ )*: είναι μια γεωγραφική συντεταγμένη που καθορίζει την θέση ενός σημείου στην επιφάνεια της γης ως προς ανατολή-δύση σε σχέση με το μεσημβρινό του Greenwich.
3. *Απόκλιση ( $\delta_s$ )*: είναι η γωνία του ηλίου κατα το ηλιακό μεσημέρι σε σχέση με τον ισημερινό.
4. *Επιφανιακή γωνία αζιμουθίου ( $\gamma$ )*: είναι η απόκλιση της κατεύθυνσης της κλίσης σε σχέση με τον τοπικό μεσημβρινό.
5. *Ηλιακή γωνία αζιμουθίου ( $\gamma_s$ )*: είναι η γωνία του ηλίου σε σχέση με τον τοπικό μεσημβρινό ή την επιφάνεια αζιμούθιου με ωρολογιακή φορά από τον νότο.
6. *Γωνία ανύψωσης ( $\alpha_s$ )*: είναι η ανύψωση του ηλιακού διάνυσματος ως προς τον παρατηρητή.
7. *Γωνία ζενίθ ( $\theta_z$ )*: είναι η γωνία πρόσπτωσης στο οριζόντιο επίπεδο ( $90^\circ - \alpha_s$ )
8. *Γωνία πρόσπτωσης και ανάκλασης ( $\theta$ )*: είναι η γωνία μεταξύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και της επιφάνειας των πάνελ
9. *Γωνία ώρας βασιζόμενη στον ηλιακό χρόνο( $\omega$ )*: είναι η μετατροπή του ηλιακού χρόνου σε μια γωνία όπου  $24 \text{ ώρες} = 360^\circ$  και στο ηλιακό μεσημέρι η γωνία είναι μηδέν.

Το ηλιακό διάνυσμα  $S_0(\gamma_s, \theta_s)$  αντιπροσωπεύει την ηλιακή γωνία και την ανύψωση για ένα συγκεκριμένο σημείο στην επιφάνεια της γης. Με δεδομένο γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να υπολογιστούν από τις παρακάτω εξισώσεις.

$$\text{Solartime} = \text{Standartime} + 4 * (\zeta_{st} - \zeta_{loc}) + E$$

$$E = 229.2 * (0.000075 + 0.001868 * \cos(B) - 0.04089 * \sin(2B))$$

$$B = \frac{360}{365} * (n - 1)$$

$$\delta = 23.45 * \sin\left(\frac{360}{365} * (284 + n)\right)$$

$$\cos\theta_z = (\cos\varphi * \cos\delta_s * \cos\omega) + (\sin\varphi * \sin\delta_s)$$

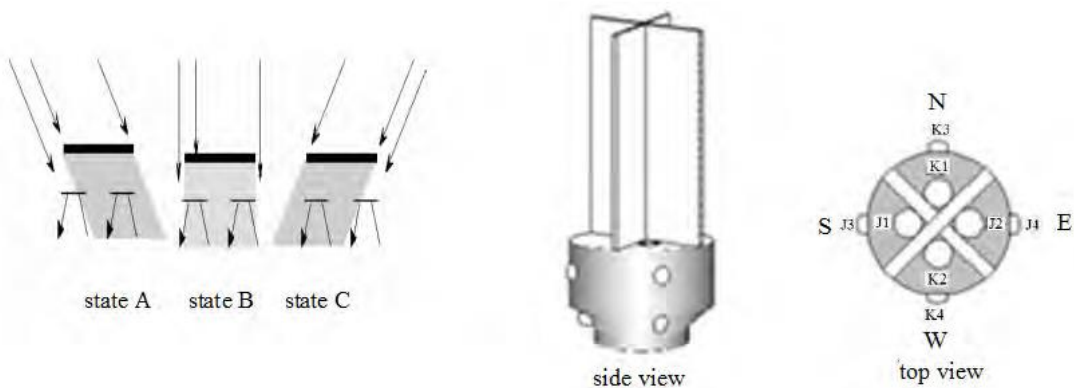
$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) * |\cos^{-1}((\cos\theta_z * \sin\varphi - \sin\delta_s)/(\sin\theta_z * \cos\varphi))|$$



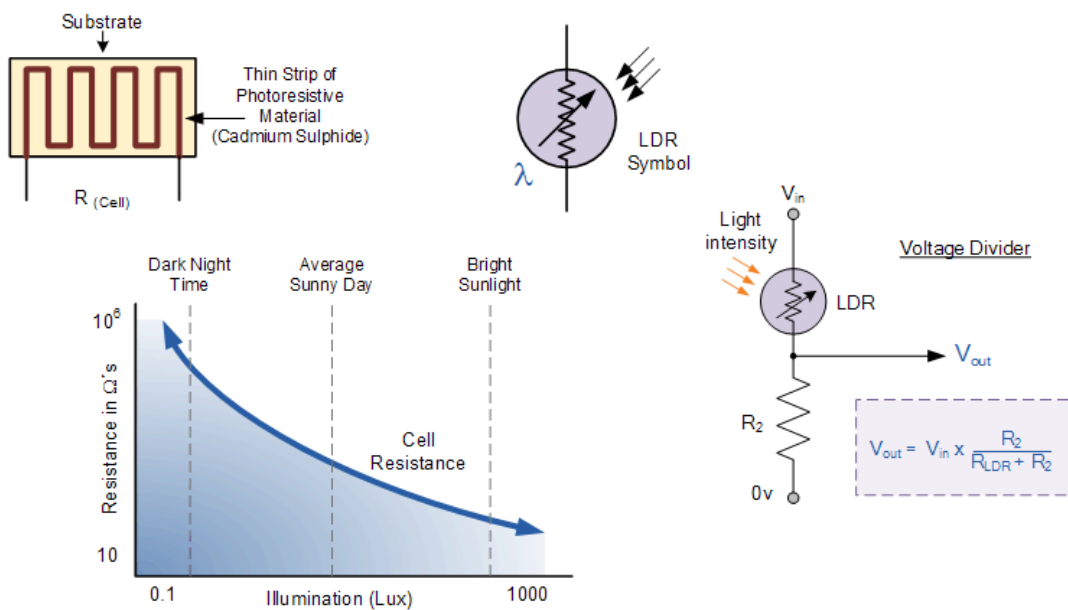
- Συστήματα ελέγχου κλειστού βρόγχου

Ηλιακοί αισθητήρες ανάδρασης και οπτικοί αποκωδικοποιητές χρησιμοποιούνται σαν είσοδοι σε συστήματα ελέγχου κλειστού βρόγχου με σκοπό να ενεργοποιηθούν μηχανισμοί κίνησης και να τοποθετηθούν τα ηλιακά πάνελ κάθετα στις ακτίνες του ηλίου. Οι αισθητήρες αυτοί δημιουργούν σήματα ανάδρασης και ενημερώνουν τον ελεγκτή του συστήματος για την θέση του ηλίου. Τέτοια συστήματα όμως που στηρίζονται μόνο σε οπτικούς αισθητές μπορούν εύκολα να επηρεαστούν από σύννεφα, καιρικές συνθήκες και περιβαλλοντικούς παράγοντες. Τέτοια συστήματα είναι τα παρακάτω.

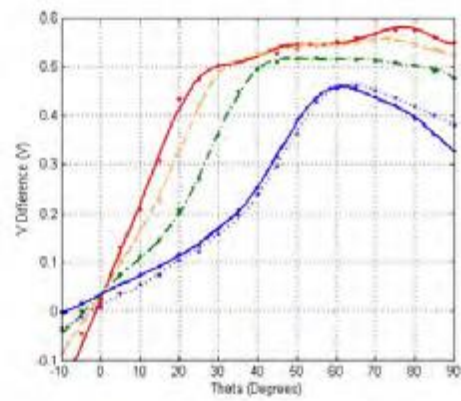
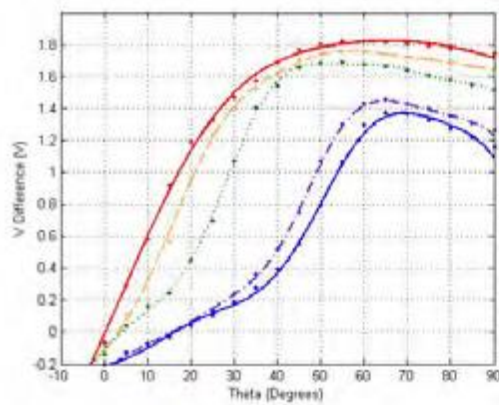
1. Ηλιακή ιχνηλάτηση με φωτοδιόδους και τρανζίστορ.



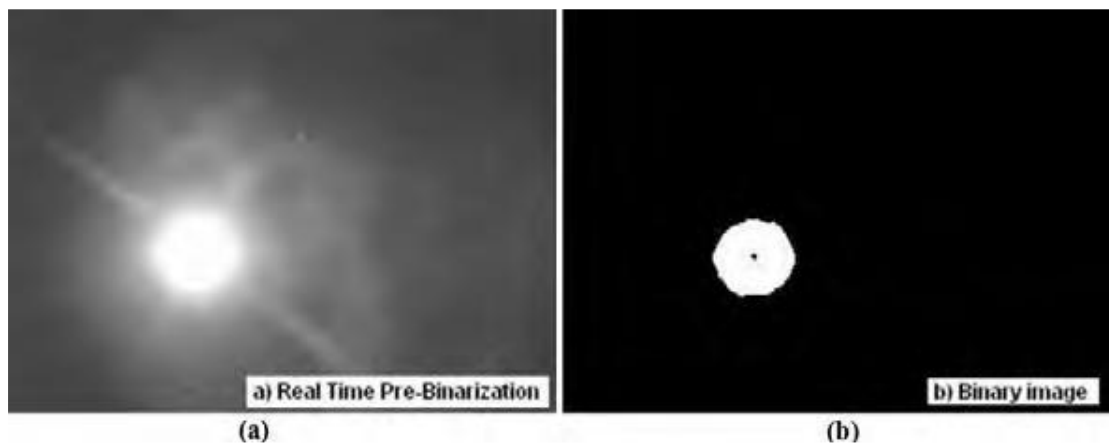
2. Ιχνηλάτηση με φωτοαντιστάσεις (LDR)



### 3. Ιχνηλάτηση με μικρά φωτοβολταϊκά κελιά

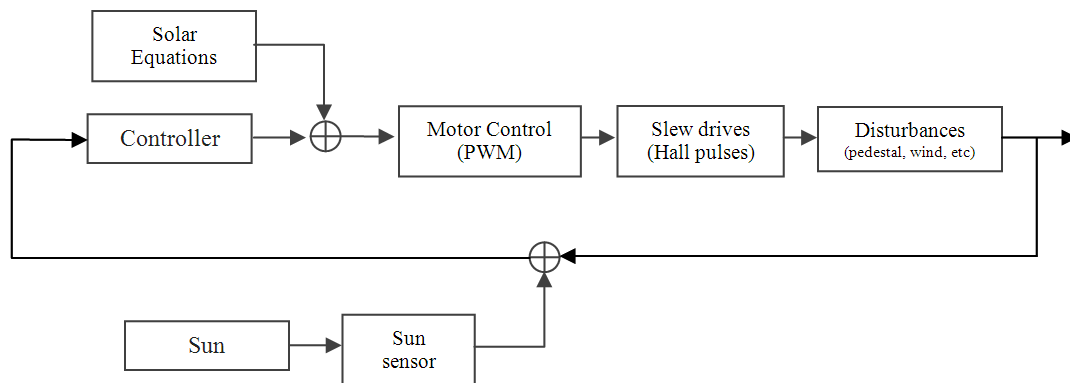


### 4. Ιχνηλάτηση με επεξεργασία εικόνας



- Υβριδικά συστήματα ελέγχου

Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της δυναμικής συμπεριφοράς solar trackers και συνδυάζουν τεχνικές συστημάτων ανοιχτού και κλειστού βρόγχου. Τα σήματα που χρησιμοποιούνται μπορούν να είναι είτε διακριτά είτε συνεχή και οι είσοδοι/έξοδοι εξαρτώνται είτε από γεγονότα είτε από τον χρόνο. Για τον υπολογισμό του ηλιακού διανύσματος χρησιμοποιούνται αστρονομικοί αλγόριθμοι για τον προσδιορισμό της θέσης καθώς και αισθητές για την παρακολούθηση και διόρθωση των σφαλμάτων. Ο υβριδικός έλεγχος συνδυάζει τα πλεονεκτήματα συστημάτων κλειστού και ανοιχτού βρόγχου και η τοποθέτηση των ηλιακών πάνελ είναι ακριβής.



### 3. Αρχική μελέτη κατασκευής

Κατά την έναρξη της διαδικασίας του σχεδιασμού της κατασκευής αρχικά προσδιορίστηκαν με λεπτομέρεια απαιτήσεις και περιορισμοί. Με βάση αυτά επιλέχθηκαν όλα τα χαρακτηριστικά, η μορφή και ο τρόπος λειτουργίας. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί που προσδιορίστηκαν πριν την έναρξη του σχεδιασμού.

- *Η συνολική ισχύς των φωτοβολταϊκών πάνελ :* Για να μπορεί η κατασκευή να καλύπτει μεγάλο φάσμα εφαρμογών στόχος ήταν μια τιμή από 1-2kW.
- *Η δυνατότητα μεταφοράς της κατασκευής :* Η συγκεκριμένη απαίτηση έφερε τον περιορισμό στις συνολικές διαστάσεις της κατασκευής ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί και να μεταφερθεί με trailer.
- *Η δυνατότητα πτυσόμενης λειτουργίας της πλατφόρμας των πάνελ :* Η ιδέα της πτυσόμενης λειτουργίας προήλθε από τον συνδιασμό των παραπάνω δύο απαιτήσεων. Στόχος ήταν ο σχεδιασμός μηχανισμού σχετικά απλού και μικρού σε όγκο.
- *Το σύστημα ηλιακής ιχνηλάτησης (solar tracking) :* Αρχικά έπρεπε να επιλεγεί ο αριθμός αξόνων του μηχανισμού καθώς και ο τρόπος που θα γίνεται η κίνηση αλλά και το εύρος λειτουργίας του εκάστωτε μηχανισμού.
- *Μικρές απαιτήσεις ενέργειας για την λειτουργία :* Η απαίτηση αυτή αφορά τους μηχανισμούς κίνησης. Ειδικά για το σύστημα tracking όπου σκοπό έχουμε τον έλεγχο της θέσης των πάνελ και θέλουμε την διατήρηση του μηχανισμού σε συγκεκριμένη θέση θα πρέπει η διατήρηση αυτή να μην γίνεται με ηλεκτρονικό ή ηλεκτρικό τρόπο για να μην έχουμε κατανάλωση ρεύματος.

Η επιλογή των διαφόρων στοιχείων της κατασκευής και η λύση στα παραπάνω προβλήματα έγιναν με τις εξής επιλογές:

- *Συνολική ισχύς 1.5kW :* Για την κάλυψη της επιθυμητής ισχύος της κατασκευής επιλέχθηκαν τα φωτοβολταϊκά πάνελ της εταιρίας *DCsolar* και συγκεκριμένα η σειρά *DC-90*. Το κάθε πάνελ έχει ισχύ 90W και η κατασκευή θα έχει συνολικά 16 πάνελ. Το βασικότερο κριτήριο της επιλογής των συγκεκριμένων πάνελ ήταν οι διαστάσεις τους, καθώς η επιθυμητή γεωμετρία ήταν λεπτά και μακρόστενα πάνελ ώστε να μην ξεφύγουν οι διαστάσεις της πτυσόμενης πλατφόρμας και κατ' επέκταση οι συνολικές διαστάσεις της κατασκευής. Δευτερεύον κριτήριο αλλά εξίσου σημαντικό ήταν ο μεγάλος βαθμός απόδοσης που παρουσιάζουν τα πάνελ που μπορεί να φτάσει και το 21.5%. Με αυτόν τον τρόπο τα πάνελ που επιλέχθηκαν έχουν την δυνατότητα παραγωγής 2400kWh/έτος στην Ελλάδα ενώ η κατασκευή σε συνδιασμό με το σύστημα solar tracking δύο

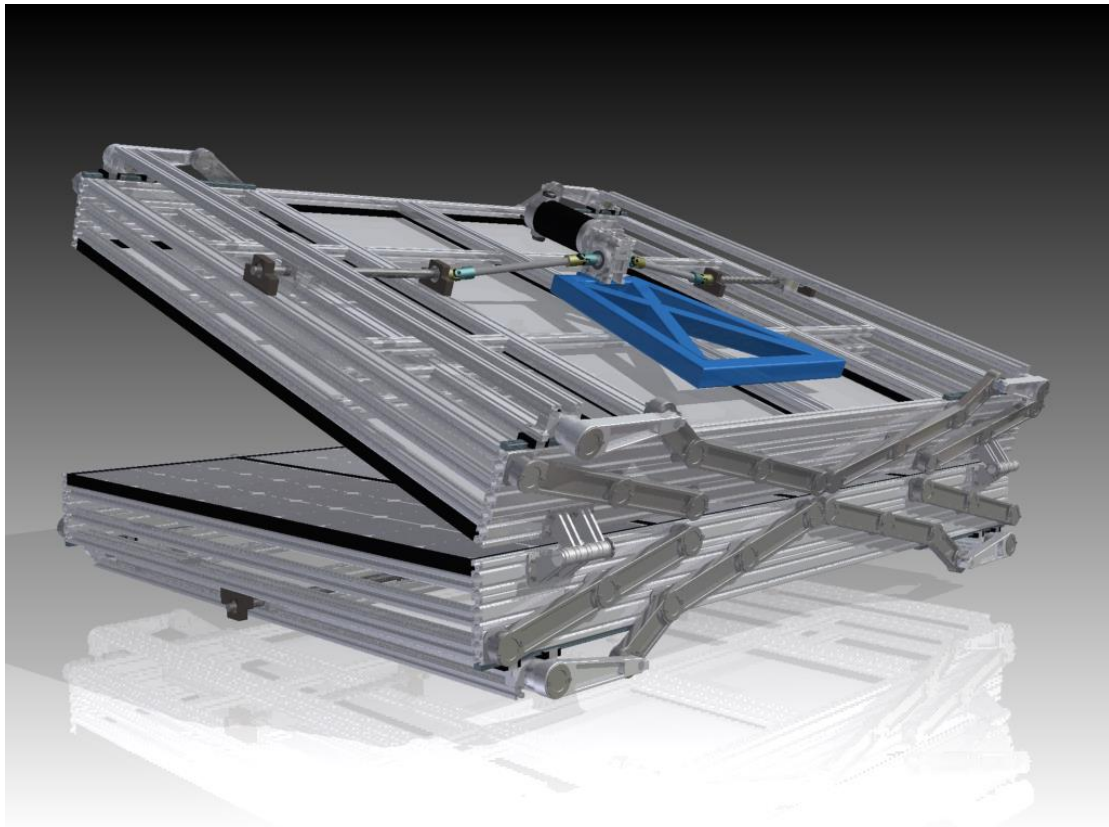
αξόνων μπορεί να φτάσει και σε παραγωγή 3000kWh/έτος. Με τέτοια παραγωγή μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές απαιτήσεις ενός νυκοκυριού στην Ελλάδα σε ποσοστό 80%.

- *Δυνατότητα μεταφοράς της κατασκευής :* Για να επιτευχθεί η συγκεκριμένη απαίτηση θα πρέπει η κατασκευή να μπορεί να τοποθετηθεί και να μεταφερθεί με trailer. Για αυτό τον λόγο οι συνολικές διαστάσεις περιορίστηκαν στο 1.7m σε μήκος και πλάτος. Επιπροσθέτως για την τοποθέτηση και την μεταφορά στο trailer τοποθετήθηκαν ρόδες που διευκολύνουν την συγκεκριμένη διαδικασία.

Οι επιλογές για την κάλυψη των υπολοίπων απαιτήσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω θα καλυφθούν αναλυτικά στο κεφάλαιο σχεδιομελέτης των διαφόρων μηχανισμών κίνησης.

#### 4. Μελέτη μηχανισμού πτυσόμενων πάνελ

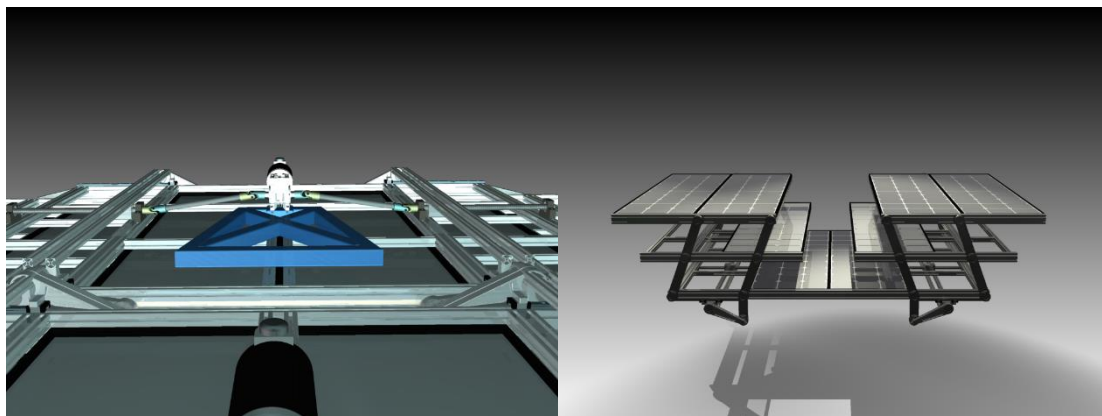
Η επιλογή για τον σχεδιασμό μηχανισμού πτυσόμενων πάνελ έγινε με γνώμονα της ευελιξία της κατασκευής. Το μεγάλο πλεονέκτημα που προσφέρει αυτή η επιλογή είναι η μείωση της επιφάνειας και του όγκου που καλύπτει η κατασκευή όταν απαιτείται (μεταφορά, προστασία από άσχημες καιρικές συνθήκες). Κατά τον σχεδιασμό στόχος ήταν η απλότητα του μηχανισμού, η ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία του καθώς και το μέγιστο δυνατό κέρδος σε επιφάνεια κατά το κλείσιμο του. Η πλατφόρμα των πτυσόμενων πάνελ αποτελείται από δύο φύλλα αρθρωμένα μεταξύ τους όπου το καθένα έχει αυτόνομο μηχανισμό ανοίγματος και κλεισίματος των πάνελ. Με τη επικάλυψη των δύο φύλλων έχουμε μείωση της επιφάνειας στο μισό. Η διαδικασία του ανοίγματος/κλεισίματος των αρθρωμένων φύλλων γίνεται από τον χρήστη καθώς δεν υπάρχει κάποιο αυτόματο ηλεκτρομηχανικό σύστημα.



*Εικόνα: Αρθρωμένα φύλλα της πτυσόμενης πλατφόρμας πάνελ.*

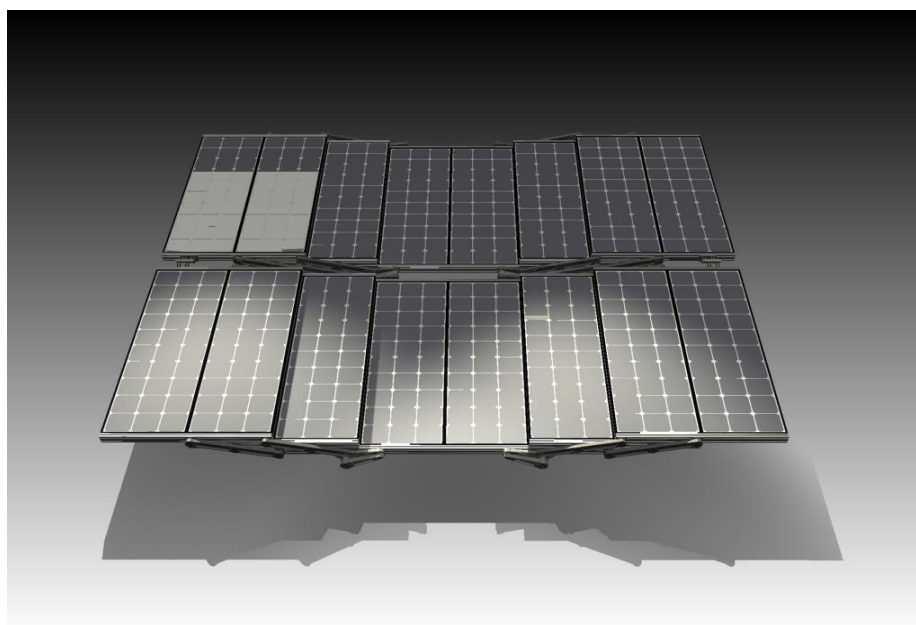
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το κάθε φύλλο είναι αυτόνομο στην λειτουργία και έχει αυτόματο ηλεκτρομηχανικό σύστημα για το άνοιγμα/κλείσιμο. Ο μηχανισμός αποτελείται από τρία επίπεδα παράλληλα κάθε στιγμή μεταξύ τους όπου το καθένα έχει διαφορετικό αριθμό πάνελ και αυτό λόγω του διαφορετικού τρόπου επικάλυψης μεταξύ των επιπέδων. Το κάτω επίπεδο αποτελεί την βάση της πλατφόρμας και παραμένει ακίνητο κατά την λειτουργία. Το δεύτερο και τρίτο επίπεδο αποτελούν τα κινούμενα μέρη του μηχανισμού και εκτελούν δισδιάστατη μεταφορική κίνηση. Η ενεργοποίηση του συστήματος προέρχεται από DC κινητήρα με γωνιακό μειωτήρα που μεταδίδει την κίνηση με

σταυρούς καρντάν σε γραμμικό σύστημα κοχλία κίνησης. Για την μείωση των ενεργοποιητών του συστήματος χρησιμοποιούνται δύο γραμμικά συστήματα, το πρώτο με δεξιόστροφο και το δεύτερο με αριστερόστροφο κοχλία κίνησης.



**Εικόνα :** Αριστερά: Ηλεκτρομηχανικό σύστημα με κινητήρα-μειωτήρα και κοχλία κίνησης, Δεξιά: Ενδιάμεσο στάδιο λειτουργίας του μηχανισμού.

Από την γραμμική κίνηση του περικοχλίου του μηχανισμού παίρνουμε τη περιστροφική κίνηση των βραχιόνων που συγκρατούν τα διαφορετικά επίπεδα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται το άνοιγμα/κλείσιμο, έχουμε πλήρη επικάλυψη μεταξύ των επιπέδων και διπλασιάζεται/υποδιπλασιάζεται η επιφάνεια της πλατφόρμας αντίστοιχα. Ο συνδιασμός των δύο παραπάνω σταδίων επιφέρει τετραπλασιασμό της επιφάνειας της πλατφόρμας κατά το άνοιγμα.

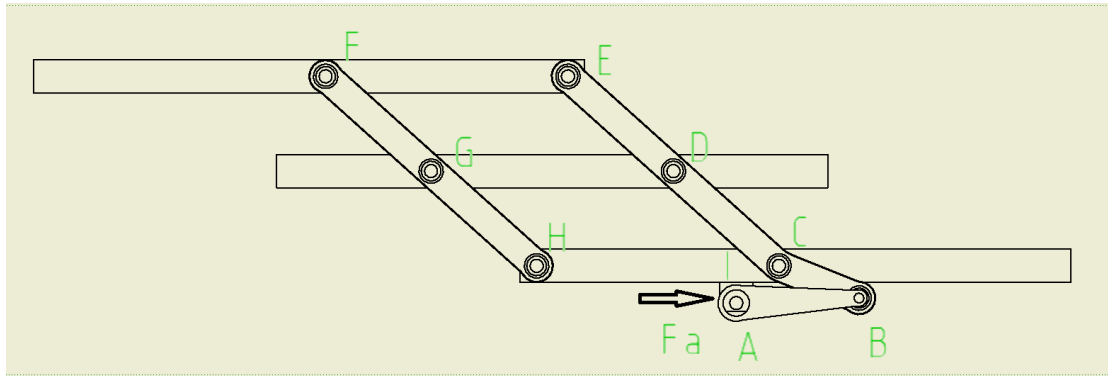


**Εικόνα :** Συνολική επιφάνεια της πλατφόρμας

Τα πλαίσια των διαφόρων μελών του μηχανισμού σχεδιάστηκαν με τυποποιημένο βιομηχανικό προφίλ αλουμινίου λόγω της μεγάλης ευκολίας και ευελιξίας που προσφέρει στον σχεδιασμό και στην συναρμολόγηση αλλά και στην μείωση του συνολικού βάρους της πλατφόρμας. Ο σχεδιασμός και η μελέτη του

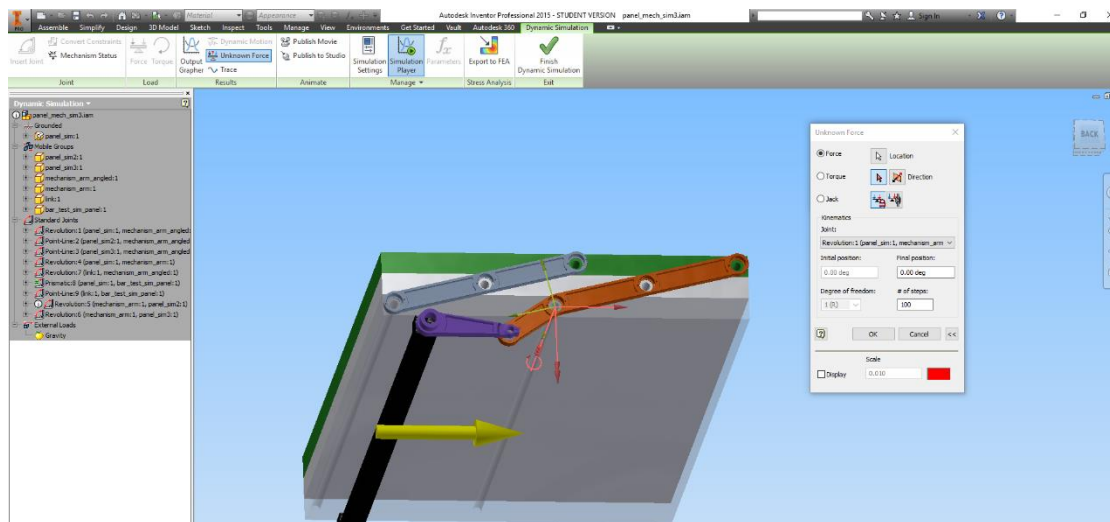


μηχανισμού έγινε με την βοήθεια του προγράμματος *Autodesk Inventor*. Για την επιλογή του συστήματος κινητήρα-μειωτήρα και τον προσδιορισμό των φορτίων στα διάφορα κατασκευαστικά στοιχεία της πλατφόρμας έγινε χρήση του περιβάλλοντος *Dynamic Simulation* του *Autodesk Inventor*. Για να καταφέρει ο μηχανισμός να υλοποιήσει την λειτουργία του θα πρέπει να υπερνικήσει το βάρος των πάνελ όπου αποτελεί το πιο σημαντικό φορτίο. Αρχικά υπολογίστηκαν οι δυνάμεις στο περικόχλιο και στις αρθρώσεις για την συγκράτηση του μηχανισμού σε μια τυχαία θέση.



Εικόνα : Σκαρίφημα απλοποιημένου προβλήματος.

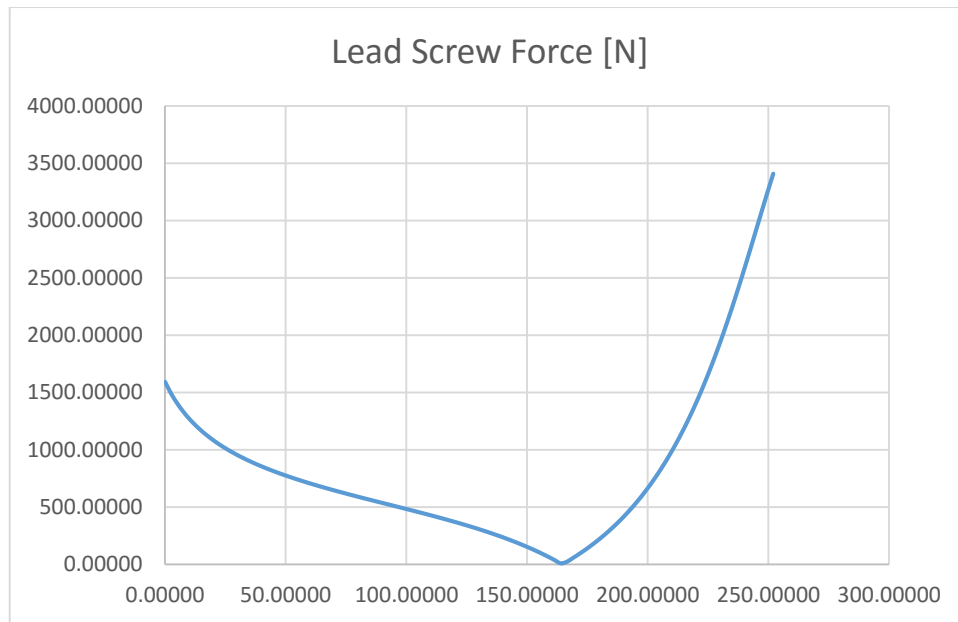
Το γραμμικό σύστημα κίνησης μοντελοποιήθηκε ως πρισματική άρθρωση και η δύναμη  $F_A$  είναι το εξωτερικό φορτίο που δέχεται το περικόχλιο. Με την επιλογή *Unknown Force* υπολογίζεται μια άγνωστη δύναμη ενός μηχανισμού για την συγκράτηση σε μια συγκεκριμένη θέση για ένα εύρος τιμών ενός βαθμού ελευθερίας.



Εικόνα : Υπολογισμός δυνάμεων με την επιλογή *Unknown Force* του *Autodesk Inventor*.

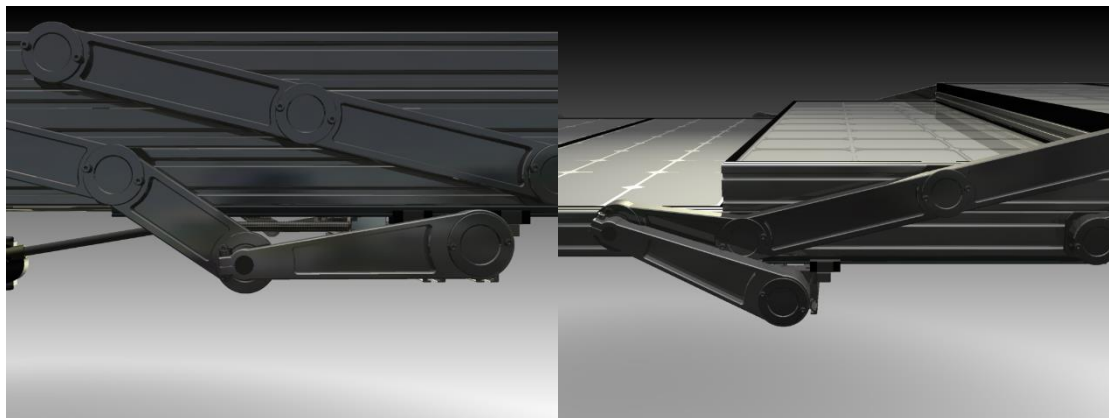
Από τον προσδιορισμό του αξονικού φορτίου του περικοχλίου επιλέχθηκε και υπολογίστηκε ο κοχλίας κίνησης και το περικόχλιο του μηχανισμού και τα χαρακτηριστικά τους.





**Εικόνα :** Αξονική δύναμη περικοχλίου συναρτήσει της γραμμικής θέσης του περικοχλίου.

Όπως φαίνεται από την παρακάτω εικόνα η γωνία μεταξύ των δυο βραχιόνων είναι μικρότερη στην τελική θέση ανοίγματος γι' αυτό και παρουσιάζεται στην θέση αυτή η μεγαλύτερη τιμή της δύναμης στο παραπάνω διάγραμμα.



**Εικόνα :** Αριστερά: γωνία βραχιόνων στην κλειστή θέση, Δεξιά: γωνία βραχιόνων στην ανοιχτή θέση

Για να κινηθεί το σύστημα ο κινητήρας πρέπει να υπερνικήσει την παραπάνω δύναμη και το φαινόμενο των τριβών γι' αυτό λαμβάνεται υπόψιν ένας συνετλεστής ασφαλείας  $S_1$ . Η τιμή της αξονικής δύναμης του περικοχλίου μπορεί να μεταφραστεί σε ροπή στρέψης που απαιτεί ο κοχλίας κίνησης από τον παρακάτω τύπο.

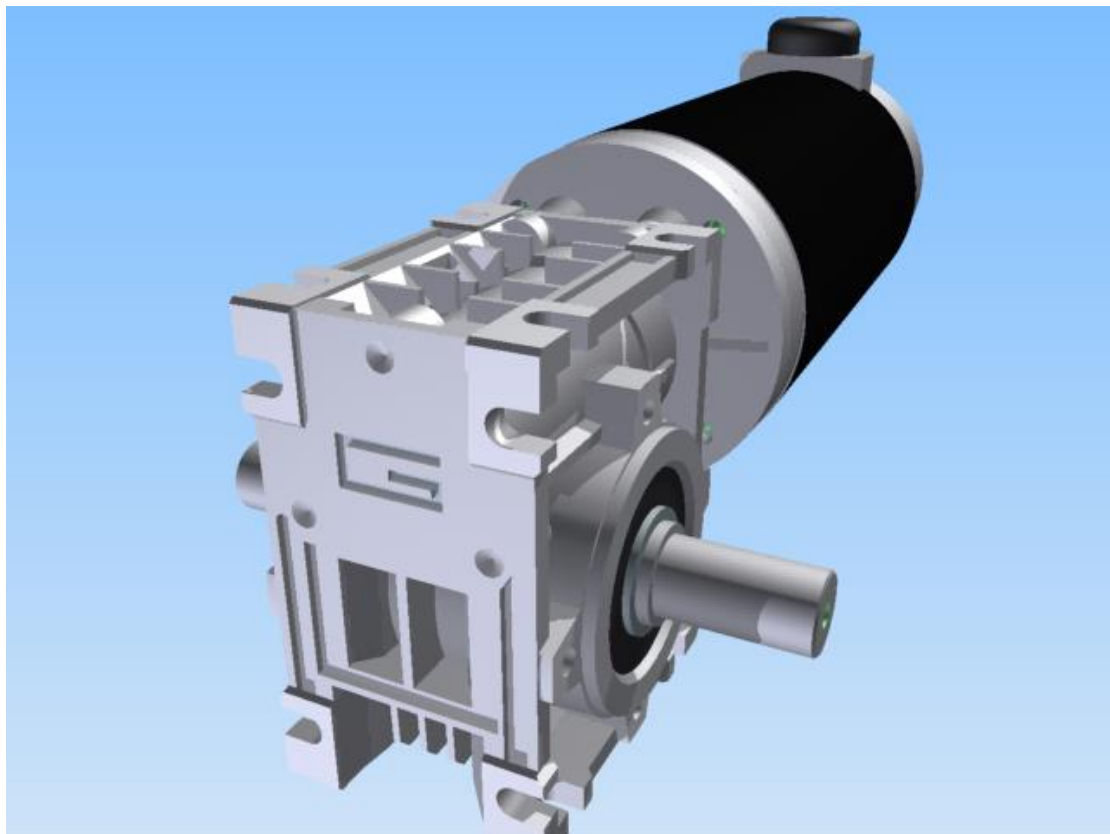
$$T_K = F_A * \frac{d_2}{2} * \tan(a_2 \mp \rho')$$

Όπου:

- $d_2$  = η μέση διάμετρος του σπειρώματος (mm).
- $\rho'$  = η ανηγμένη γωνία δυναμικής τριβής.
- $\tan(\rho') = \mu / \cos\beta$ .

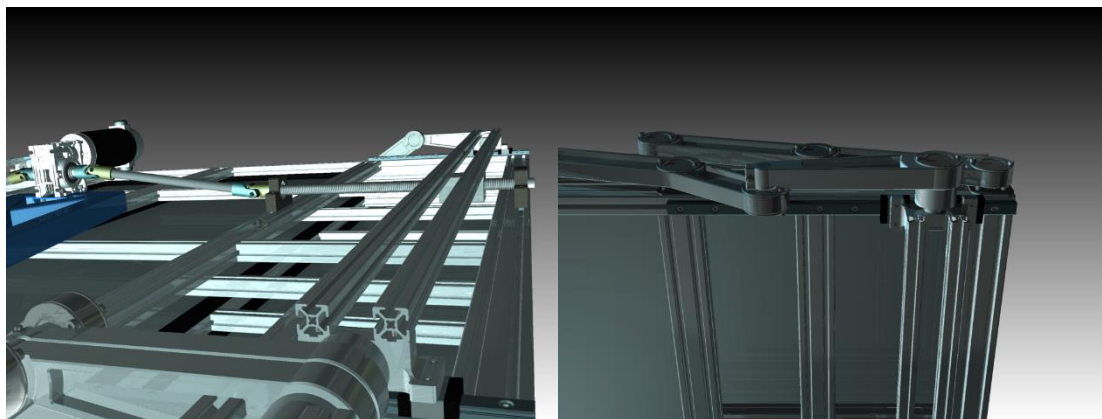
- $\mu = \tan\rho$ , ο συντελεστής δυναμικής τριβής μεταξύ κοχλία και περικοχλίου
- $\rho =$  η γωνία δυναμικής τριβής.
- $\beta =$  η γωνία της παρειάς των σπειρωμάτων του κοχλία και του περικοχλίου.
- $\alpha_2 =$  η γωνία ελικώσεως του σπειρώματος.
- $F_A =$  το αξονικό φορτίο του περικοχλίου (N).
- $T_k =$  η στρεπτική ροπή του κοχλία (N\*mm).

Η ροπή που υπολογίζεται από τον παραπάνω τύπο είναι η μισή της επιθυμητής αφού ο κινητήρας-μειωτήρας πρέπει να περιστρέψει δύο κοχλίες. Η τιμή της ροπής μαζί με τον επιθυμητό χρόνο για το άνοιγμα/κλείσιμο του μηχανισμού μας οδηγεί στην επιλογή κινητήρα και μειωτήρα. Ο κοχλίας κίνησης που επιλέχθηκε είναι *Tr20-4*. Η στρεπτική ροπή που απαιτείται είναι 14 Nm και η ισχύς του κινητήρα 180 W.



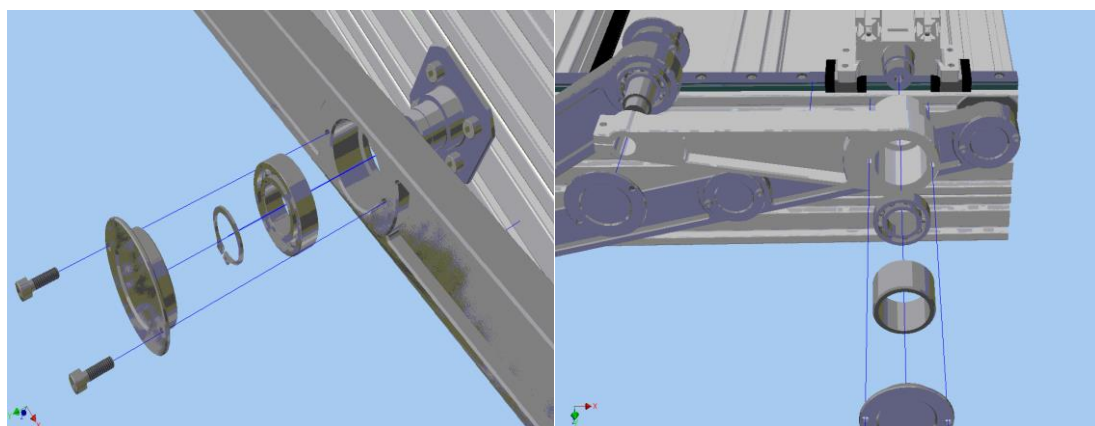
**Εικόνα :** Σύστημα κινητήρα-μειωτήρα της εταιρίας *Transtecno*.

Ο κινητήρας που επιλέχθηκε είναι συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη και ισχύος 180 W και λειτουργεί στις 3000 rpm στα 24 V. Επιλέχθηκε γωνιακός μειωτήρας (με σχέση μετάδοσης 25) λόγω της δυνατότητας αμφίπλευρης εξόδου ώστε να μεταδίδεται η κίνηση στον δεξιόστροφο και αριστερόστροφο κοχλία με την χρήση αρθρωτών συνδέσμων (σταυροί καρντάν). Οι κοχλίες είναι εδρασμένοι σε έδρανα κυλίσεως πάνω στο πλαίσιο αλουμινίου της πλατφόρμας για την παραλαβή των αξονικών φορτίων του κοχλία.



**Εικόνα :** Αριστερά: μετάδοση κίνησης με αρθρωτούς συνδέσους και έδραση κοχλία, Δεξιά: γραμμικά ρουλεμάν.

Το περικόχλιο επιλέχθηκε αυτασφαλιζόμενο ώστε να μπορεί ο μηχανισμός να διατηρείται σε επιθυμητή θέση χωρίς την παρουσία κάποιου εξωτερικού φρένου. Για να μεταφερθεί η γραμμική κίνηση στους βραχίονες του μηχανισμού χρησιμοποιούνται γραμμικά ρουλεμάν για την παραλαβή των φορτίων κατά την λειτουργία. Για τις αρθρώσεις του μηχανισμού επιλέχθηκε η χρήση εδράνων κυλίσεως. Οι πείροι των αρθρώσεων είναι βιδωμένοι στο πλαίσιο αλουμινίου του κάθε επιπέδου. Η μελέτη όλων των κατασκευαστικών στοιχείων του μηχανισμού παρουσιάζεται συνοπτικά στο παράρτημα αποτελεσμάτων.

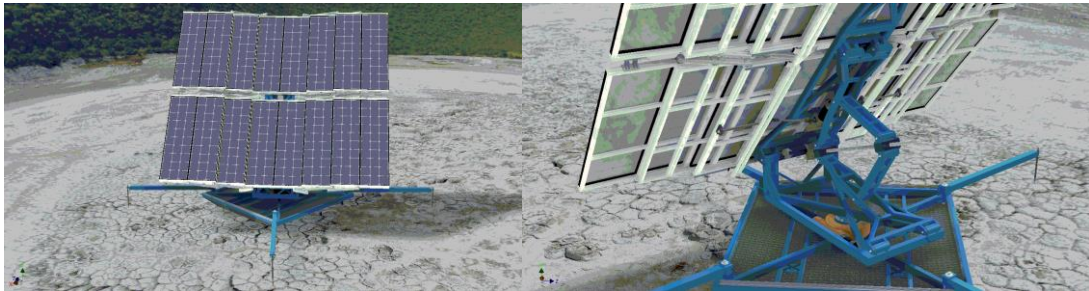


**Εικόνα :** Αριστερά: Συναρμολόγηση άρθρωσης πρώτου βραχίονα, Δεξιά: Συναρμολόγηση άρθρωσης δεύτερου βραχίονα.

Για τον έλεγχο του μηχανισμού που παρουσιάστηκε χρησιμοποιούνται τερματικοί διακόπτες στις δύο ακραίες θέσεις του καθώς δεν μας ενδιαφέρουν οι ενδιάμεσες θέσεις λειτουργίας και απλουστεύεται ο έλεγχος ενώ παράλληλα μειώνεται το κόστος.

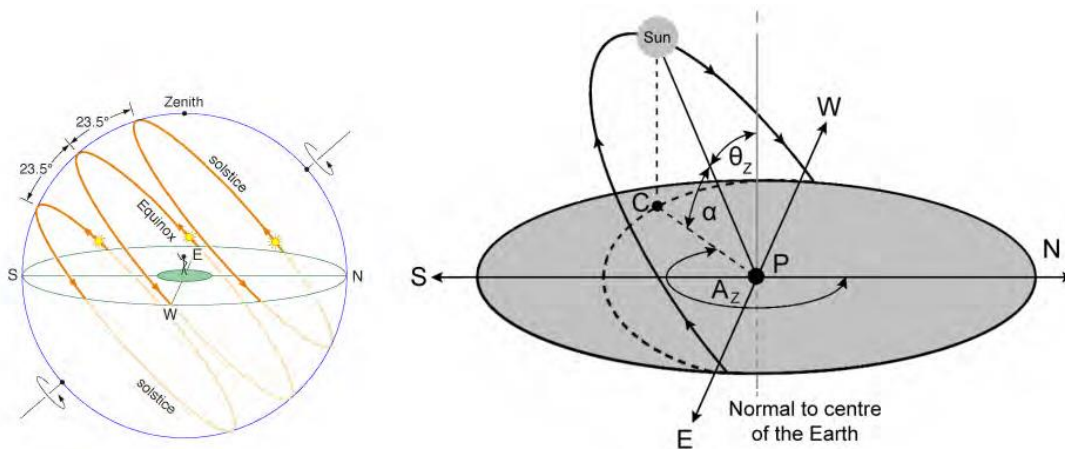
## 5. Μελέτη συστήματος ιχνηλάτησης ηλίου (solar tracking)

Το σύστημα ιχνηλάτησης ηλίου της κατασκευής επιλέχθηκε να είναι δύο αξόνων τύπου *azimuth-elevation solar tracking*. Ο έλεγχος του συστήματος γίνεται με την χρήση αστρονομικού αλγορίθμου *SPA* δηλαδή έχουμε έλεγχο ανοιχτού βρόγχου. Επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος τύπος ελέγχου διότι είναι ο πιο ακριβής και αξιόπιστος και συστήματα τέτοιου τύπου παρουσιάζουν αύξηση έως και 40% στην παραγωγή ενέργειας σε σχέση με συστήματα σταθερών βάσεων.



**Εικόνα:** Αριστερά: η κατασκευή κατά την διάρκεια ιχνηλάτησης, Δεξιά: σύστημα δύο αξόνων solar tracking

Το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί δεδομένα GPS και δεδομένα πραγματικού χρόνου για να υπολογίσει κάθε στιγμή την θέση του ηλίου σε σχέση με την θέση της πλατφόρμας. Η κίνηση της πλατφόρμας γίνεται από δύο ανεξάρτητους μηχανισμούς που ρυθμίζουν την γωνία κλίσης και την γωνία του αζιμούθιου που πρέπει να έχει η πλατφόρμα.



**Εικόνα:** Γωνία κλίσης και γωνία αζιμουθίου του ηλίου για ένα ακίνητο παρατηρητή

Για την επιλογή των στοιχείων και των ηλεκτρομηχανικών εξαρτημάτων των δύο μηχανισμών έγινε αρχικά η αναγνώριση των φορτίων που δέχεται η κατασκευή. Η κύρια καταπόνηση που δέχεται η κατασκευή είναι λόγω της πίεσης του ανέμου στην επιφάνεια της πλατφόρμας. Έχοντας γνωστή την επιφάνεια της πλατφόρμας καθώς και τους άξονες περιστροφής για την ρύθμιση της θέσης έγινε ο υπολογισμός της ανεμοπίεσης. Ακολουθήθηκε τυποποίηση σύμφωνα με τον *Ευρωκώδικα I*. Μέγιστη ταχύτητα ανέμου ορίστηκε ίση με  $v_b=18 \text{ m/s}$  για την δυσμενέστερη περίπτωση κλίσης της πλατφόρμας στις  $90^\circ$  από το οριζόντιο επίπεδο. Το ύψος αναφοράς της κατασκευής είναι  $z = 3.5 \text{ m}$ . Τα φορτία που υπολογίστηκαν χρησιμοποιήθηκαν για την διαστασιολόγηση των συστημάτων

κινητήρα-μειωτήρα των μηχανισμών καθώς και για τους υπολογισμούς των διαφόρων κατασκευαστικών στοιχείων. Ανάλογα με την διεύθυνση του ανέμου η διεύθυνση της ανεμοπίεσης μπορεί να είναι είτε προς τα κάτω (για προσβολή από εμπρός), είτε προς τα επάνω (για προσβολή από πίσω).

Η μέση ταχύτητα ανέμου για το ύψος  $z$  δίνεται από τη σχέση:

$$z_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b$$

Όπου,

$c_r(z)$  είναι ο συντελεστής τραχύτητας

$c_0(z)$  είναι ο συντελεστής αναγλύφου

Ο συντελεστής αναγλύφου για εγκατάσταση σε πεδινές εκτάσεις είναι  $c_0(z)=1$ .

Ο συντελεστής τραχύτητας υπολογίζεται από την σχέση:

$$c_r(z) = k_T * \ln\left(\frac{z_0}{z}\right)^{0.07}$$

Για κατηγορία εδάφους I, όπου είναι και η δυσμενέστερη, προδιαγράφονται  $k_T=0.19$ ,  $z_0=0.01$ ,  $z=1$  οπότε από την παραπάνω σχέση υπολογίζεται:

$$c_r(z) = 0.19 * \ln\left(\frac{0.01}{1}\right)^{0.07} = 0.8749$$

Τελικά, η μέση ταχύτητα για το ύψος υπολογισμού προκύπτει  $v_m(z)=15.75 \text{ m/s}$ .

Η ασκούμενη πίεση του ανέμου υπολογίζεται από την σχέση:

$$w_w = c_p * q_p(z_e)$$

Όπου,

$c_p$  είναι ο συντελεστής κατασκευής

$q_p(z_e)$  είναι η μέγιστη πίεση ανέμου και προκύπτει από την σχέση

$$q_p(z) = [1 + 7 * l_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m(z)^2$$

Όπου,

$$l_v(z) = \frac{k_I}{c_0(z) * \ln\frac{z}{z_0}}$$

Ο συντελεστής τύρβης λαμβάνεται  $k_I=1$  και η πυκνότητα του αέρα  $\rho=1.25 \text{ kg/m}^3$ . Έτσι προκύπτει ότι:

$$l_v(z) = \frac{1}{1 * \ln\frac{3.5}{0.01}} = 0.1709$$

Η μέγιστη πίεση ανέμου που προκύπτει τελικά είναι:

$$q_p(z) = [1 + 7 * 0.1709] * \frac{1}{2} * 1.25 * 15.75 = 340.2909 \text{ N/m}^2$$

Θεωρήθηκαν δύο διευθύνσεις για γωνίες 0° και 180° που προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τις συστάσεις του *Ευρωκώδικα Ι* θεωρώντας μηδενική παρεμπόδιση ( $\varphi=0$ ). Η συνολική δύναμη που προκύπτει στην κατασκευή υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F = cscd * c_f * A_{ref} * q_p(z)$$

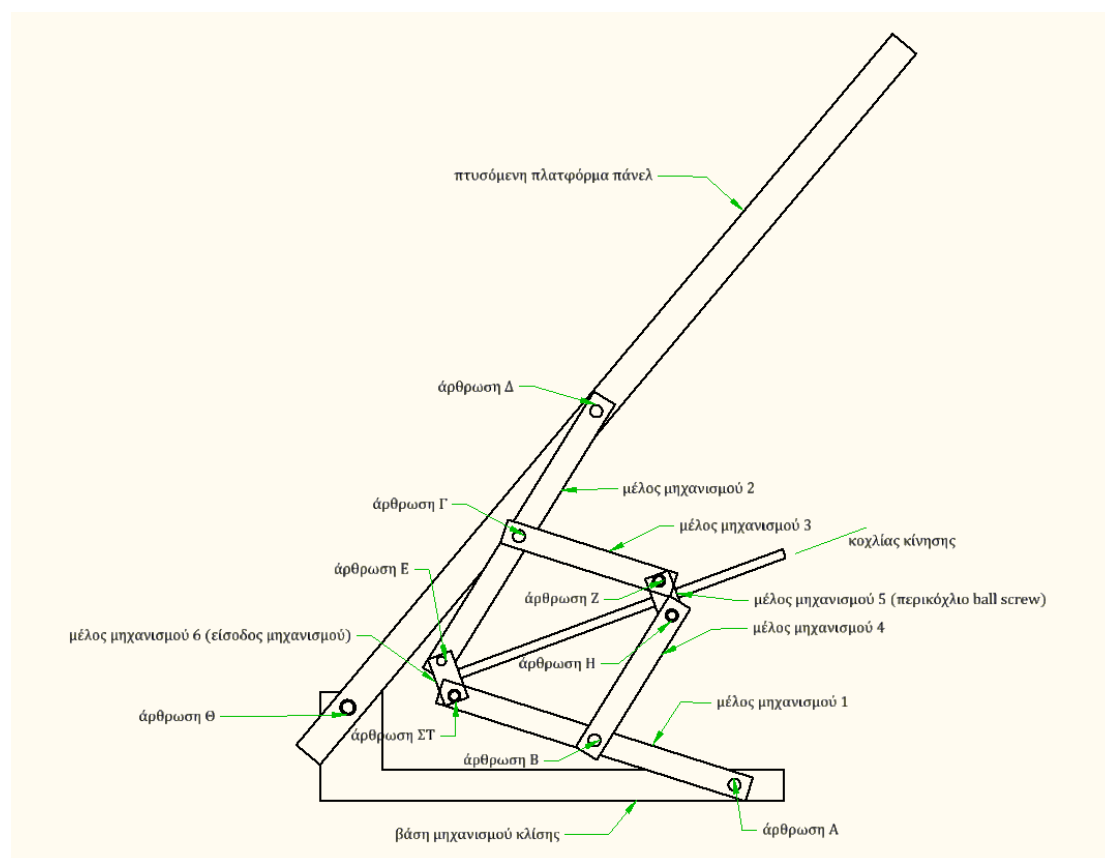
Ο συντελεστής κατασκευής λαμβάνεται  $cscd=1$  ενώ ο συντελεστής δύναμης  $c_f=1.8$  και για τις δύο περιπτώσεις φόρτισης.

Έτσι από αντικατάσταση προκύπτει η δύναμη που δέχεται η πλατφόρμα στην περίπτωση μέγιστης ανεμοπίεσης.

$$F = 1 * 1.8 * 9.6 * 340.2909 = 5880.227 \text{ N}$$

### 5.1 Μηχανισμός κλίσης-ανύψωσης (elevation mechanism)

Για την ρύθμιση της κλίσης της πλατφόρμας σχεδιάστηκε ο μηχανισμός του παρακάτω σχήματος.

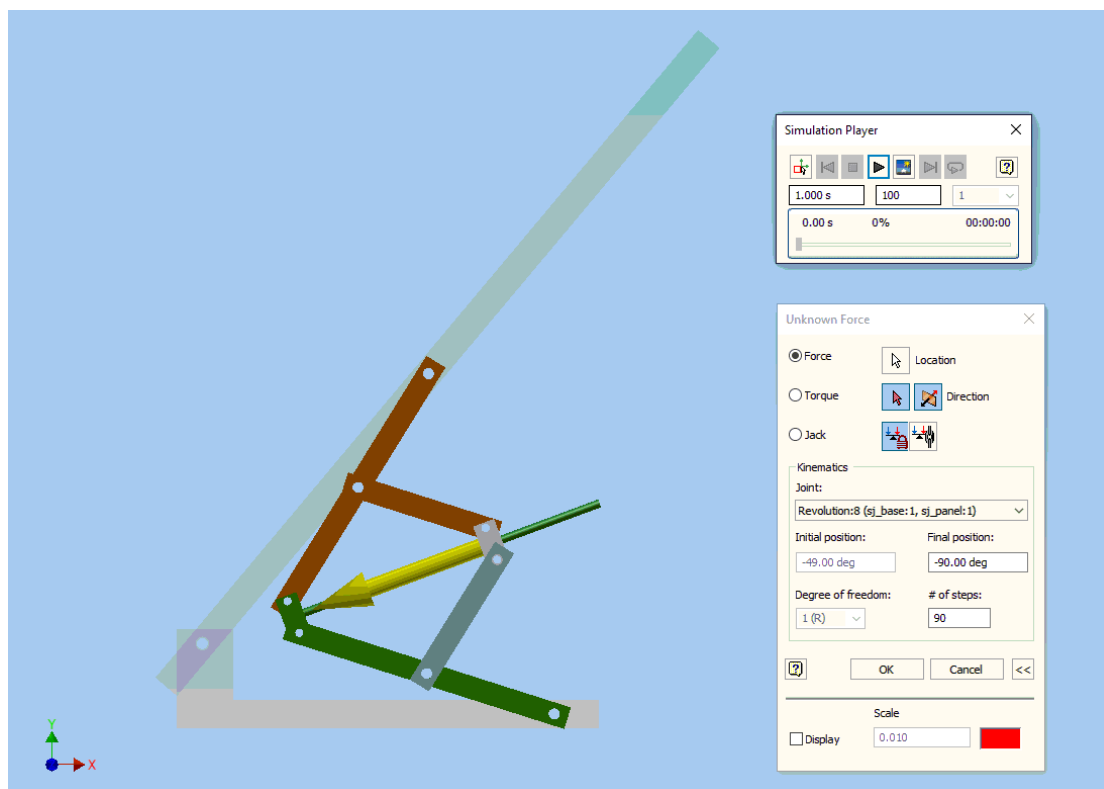


**Εικόνα :** Σκαρίφημα μηχανισμού κλίσης (elevation mechanism)

Στόχος του μηχανισμού είναι η ρύθμιση της κλίσεως της άρθρωσης Θ για τιμές από  $0^\circ$  (η πλατφόρμα των πάνελ είναι παράλληλη με το οριζόντιο επίπεδο) έως  $90^\circ$  (η πλατφόρμα των πάνελ είναι κάθετη στο οριζόντιο επίπεδο). Αυτό επιτυγχάνεται με την γραμμική μετατόπιση του περικοχλίου (μέλος μηχανισμού 5) από τη περιστροφή του κοχλίας κίνησης. Η είσοδος ισχύος στο σύστημα γίνεται από το μέλος του μηχανισμού 6 όπου ο κινητήρας-μειωτήρας συνδέεται με ελαστικό σύνδεσμο με τον κοχλία κίνησης. Η δυσκολία στον σχεδιασμό του μηχανισμού ήταν ο περιορισμός του ύψους της κατασκευής στην οριζόντια θέση. Γι αυτό τον λόγο ο άξονας περιστροφής της πλατφόρμας για την ρύθμιση της γωνίας ανύψωσης έπρεπε να είναι όσο το δυνατό πιο χαμηλά στην πλατφόρμα. Ένα πρόβλημα που προκύπτει από την συγκεκριμένη σχεδίαση είναι ότι το κέντρο βάρους της πλατφόρμας έχει σημαντική απόσταση από τον άξονα περιστροφής και οι απαιτήσεις ισχύος στην εφαρμογή γίνονται μεγαλύτερες. Τα σημαντικότερα φορτία που δέχεται η κατασκευή κατά την λειτουργία της είναι το βάρος της πτυσσόμενης πλατφόρμας των πάνελ σε συνδιασμό με την μέγιστη ανεμοπίεση που υπολογίστηκε παραπάνω. Για την μελέτη του μηχανισμού χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα *Autodesk Inventor* και το περιβάλλον *Dynamic*



*Simulation.* Με την επιλογή *Unknown Force* υπολογίστηκε η αξονική δύναμη που δέχεται το περικόχλιο για την συγκράτηση του μηχανισμού σε μια τυχαία θέση.

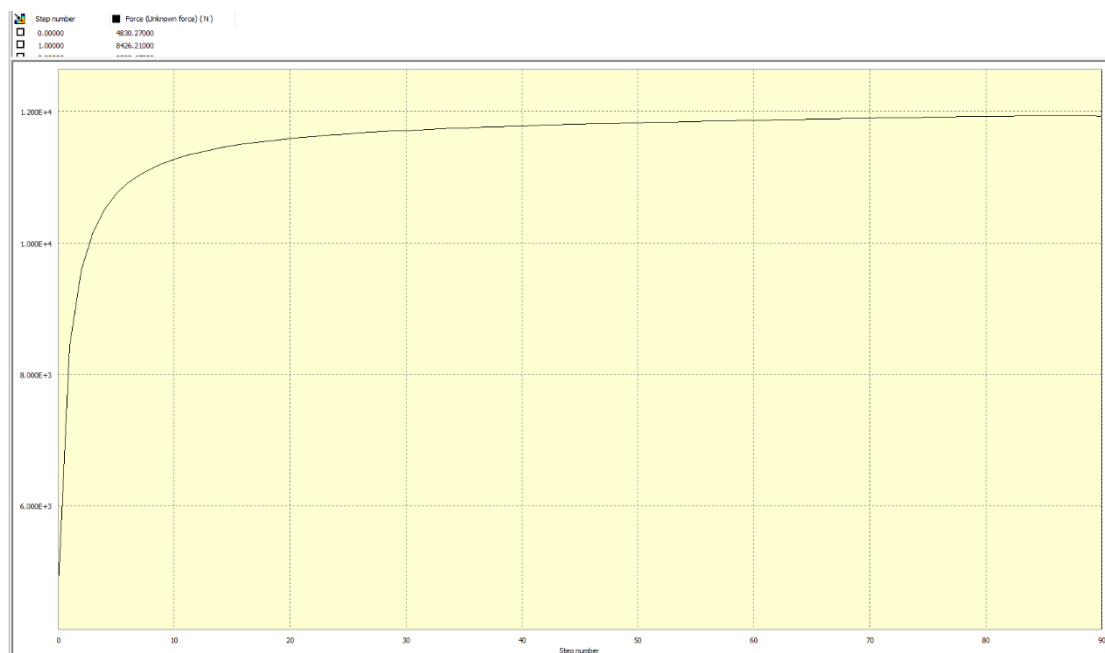


**Εικόνα:** Υπολογισμός δυνάμεων με την επιλογή *Unknown Force* του Autodesk Inventor.

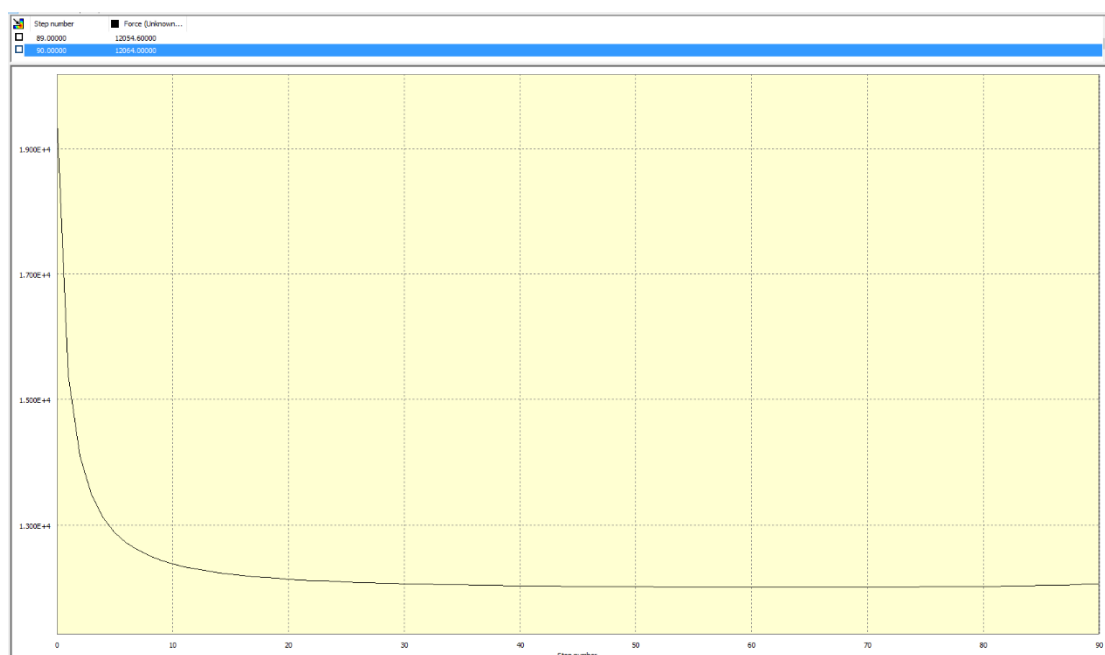
Από την παραπάνω διαδικασία υπολογίστηκαν η αξονική δύναμη του περικοχλίου καθώς και οι δυνάμεις στις αρθρώσεις του μηχανισμού σε όλες τις θέσεις της πλατφόρμας των πάνελ. Ο μηχανισμός έχει στόχο τον έλεγχο θέσης της πλατφόρμας γι' αυτό τον λόγο επιλέχθηκε περικόχλιο με σώματα κυλίσεως (ball screw). Περικόχλια με σώματα κυλίσεως ενδείκνυνται για εφαρμογές ελέγχου θέσης καθώς παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό απόδοσης (90%) και μειώνουν στο ελάχιστο τον τζόγο του περικοχλίου σε σταθερή θέση. Μ' αυτό τον τρόπο οι απαιτήσεις ισχύος μειώνονται. Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης επιλογής είναι ότι το περικόχλιο δεν είναι αυτασφαλιζόμενο επιλέχθηκε όμως αυτασφαλιζόμενος μειωτήρας για την συγκράτηση του μηχανισμού σε μια συγκεκριμένη θέση. Η ανάλυση έγινε για περιπτώσεις ανεμοπύσης προς τα κάτω και ανεμοπύσης προς τα επάνω. Η δυσμενέστερη περίπτωση καταπόνησης για τον μηχανισμό είναι ανεμοπύση προς τα κάτω όπως φαίνεται και από τα παρακάτω διαγράμματα.



## Σχεδιασμός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος



**Εικόνα:** Αξονική δύναμη περικοχίου [N] για ανεμοπίεση προς τα επάνω συναρτήσει της κλίσης της πλατφόρμας[deg].



**Εικόνα:** Αξονική δύναμη περικοχίου [N] για ανεμοπίεση προς τα κάτω συναρτήσει της κλίσης της πλατφόρμας[deg].

Η αξονική δύναμη του περικοχλίου που προέκυψε από τη δυσμενέστερη περίπτωση καταπόνησης μπορεί να μεταφραστεί σε ροπή στρέψης του κοχλίου από τον παρακάτω τύπο.

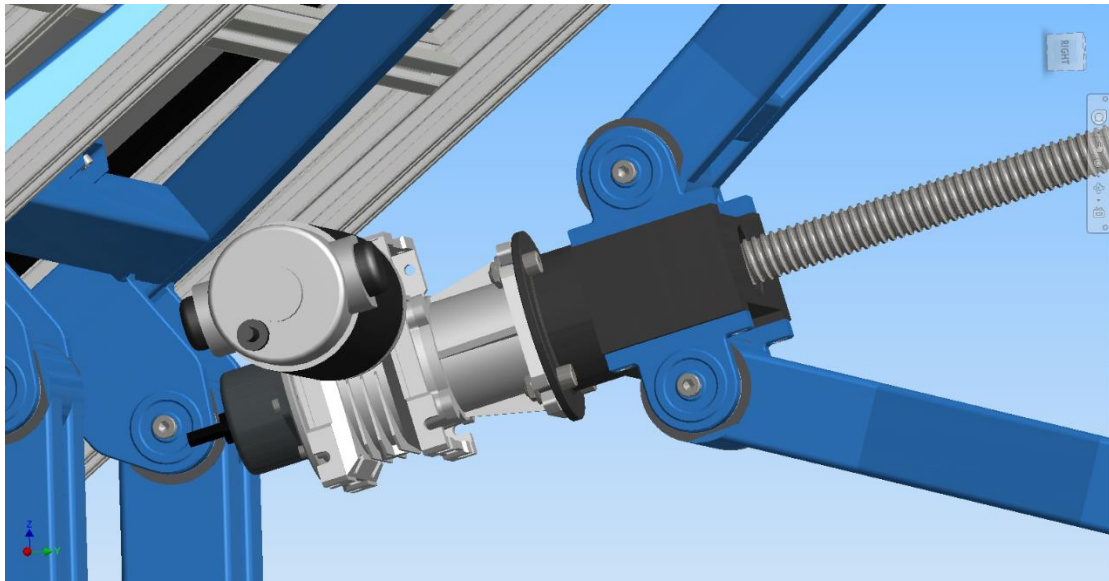
$$T_K = F_A * \frac{d_2}{2} * \tan(a_2 \mp \rho')$$

Όπου:

- $d_2$  = η μέση διάμετρος του σπειρώματος (mm).

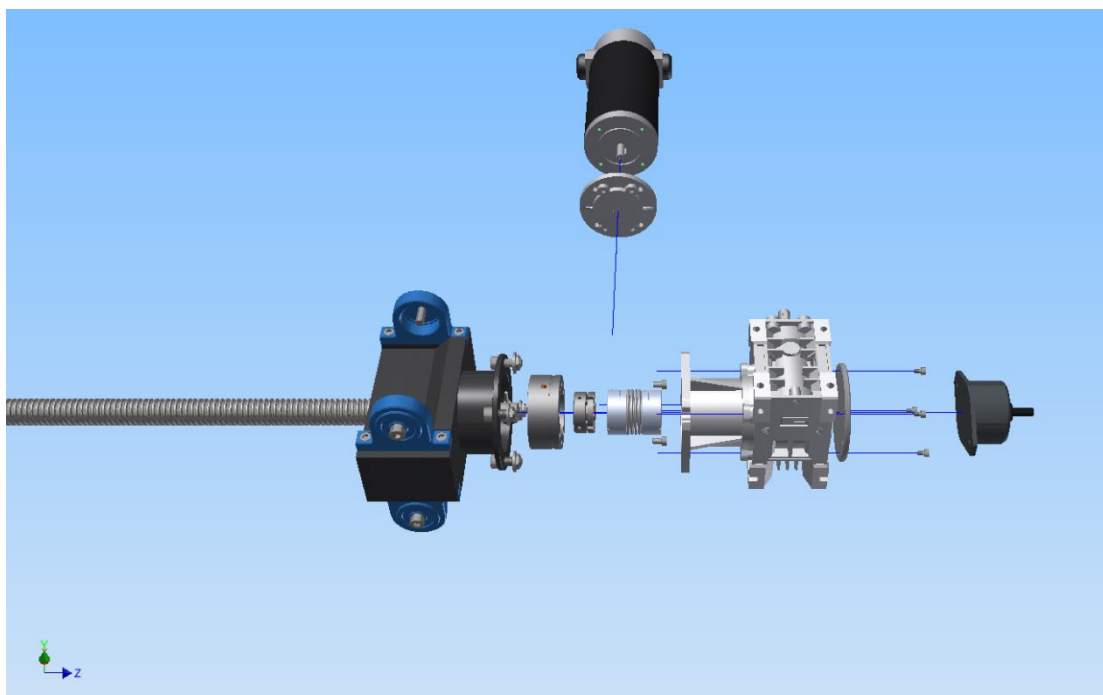
- $\rho' =$  η ανηγμένη γωνία δυναμικής τριβής.
- $\tan(\rho') = \mu/\cos\beta$ .
- $\mu = \tan\rho$ , ο συντελεστής δυναμικής τριβής μεταξύ κοχλία και περικοχλίου
- $\rho =$  η γωνία δυναμικής τριβής.
- $\beta =$  η γωνία της παρειάς των σπειρωμάτων του κοχλία και του περικοχλίου.
- $\alpha_2 =$  η γωνία ελικώσεως του σπειρώματος.
- $F_A =$  το αξονικό φορτίο του περικοχλίου (N).
- $T_k =$  η στρεπτική ροπή του κοχλία (N\*mm).

Η απαιτούμενη ροπή για την περιστροφή του κοχλία υπολογίστηκε στα 19 Nm. Επιλέχθηκε σύστημα κινητήρα-γωνιακού μειωτήρα για την είσοδο ισχύος στο σύστημα.



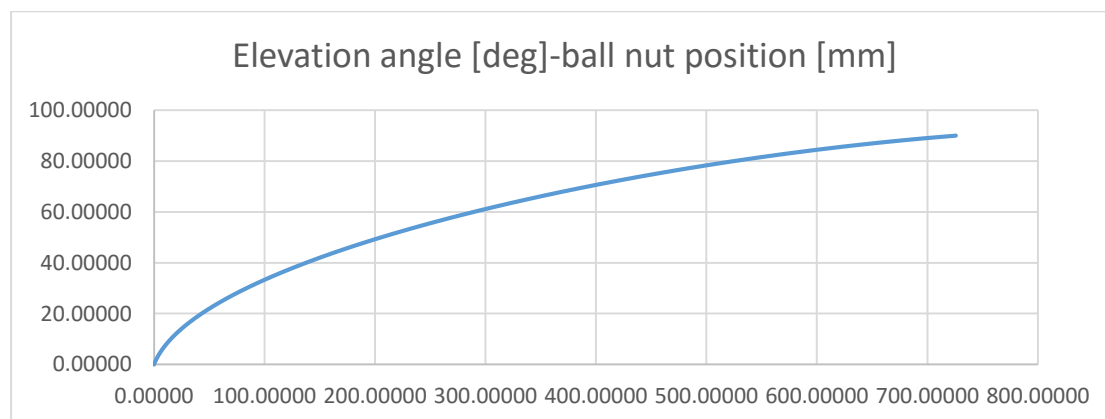
*Εικόνα: Είσοδος ισχύος του μηχανισμού κλίσης.*

Ο κινητήρας που επιλέχθηκε είναι συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη ισχύος 250W και λειτουργεί στις 3000rpm στα 24V. Ο γωνιακός μειωτήρας επιλέχθηκε τέτοιου τύπου λόγω της αυτασφάλισης που προσφέρει ώστε να συγκρατείται ο μηχανισμός σε επιθυμητή θέση χωρίς την παρουσία κάποιου εξωτερικού φρένου. Ο άξονας του μειωτήρα συνδέεται με τον κοχλία κίνησης με την χρήση ελαστικού συνδέσμου για την μεταφορά της απαιτούμενης ροπής. Η έδραση του κοχλία γίνεται με έδρανο κυλίσεως. Για την αξονική στερέωση χρησιμοποιείται περικόχλιο ατράκτου.



**Εικόνα :** Κατασκευαστικά στοιχεία εισόδου ισχύος του μηχανισμού.

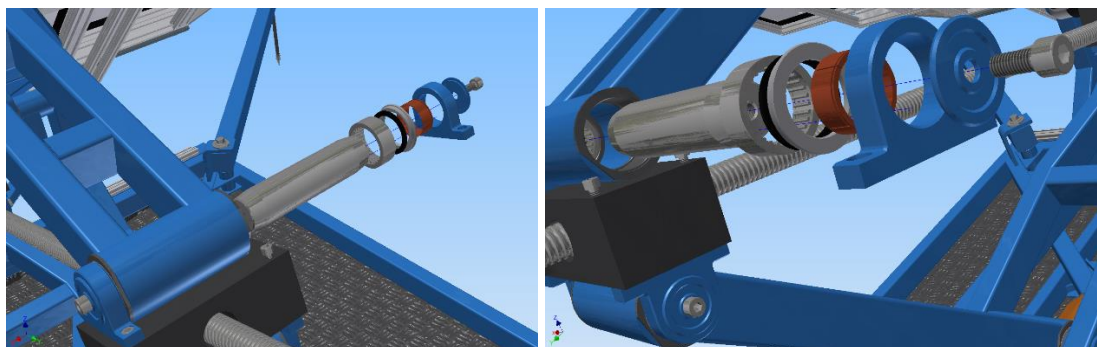
Για την μέτρηση της γωνιακής θέσης του κοχλία χρησιμοποιείται μαγνητικός incremental encoder. Με τη περιστροφή του κοχλία έχουμε γραμμική μετατόπιση του περικοχλίου. Με την ρύθμιση της γραμμικής μετατόπισης αυτής ρυθμίζονται οι γωνίες των μελών του μηχανισμού καθώς και η γωνία κλίσης της πλατφόρμας των πάνελ. Η σχέση της γωνίας κλίσης με την γραμμική μετατόπιση του περικοχλίου φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



**Εικόνα :** Διάγραμμα γωνίας κλίσης συναρτήσει γραμμικής μετατόπισης περικοχλίου.

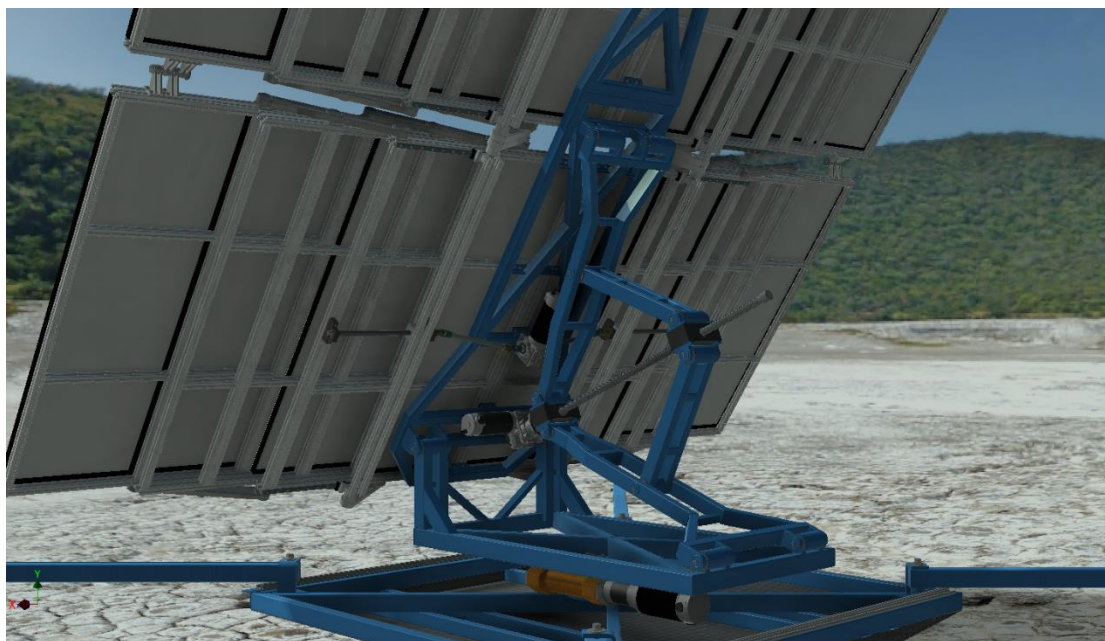
Η σχέση των δυο μεγεθών είναι μη γραμμική κάτι το οποίο δυσκολεύει τον υπολογισμό σε πραγματικό χρόνο. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος οι παραπάνω τιμές αποθηκεύονται απο πρίν στο μικροελεγκτή για μείωση της υπολογιστικής ισχύος κατά την λειτουργία. Με την χρήση των παραπάνω δεδομένων γνωρίζουμε ακριβώς την γωνιακή θέση που πρέπει να έχει ο κοχλίας για να τοποθετήσουμε τα πάνελ σε μια επιθυμητή θέση. Από τα πιο σημαντικά κομμάτια σχεδίασης του μηχανισμού ήταν οι αρθρώσεις του. Για την ομαλή λειτουργία του μηχανισμού και για τον έλεγχο θέσης οι αρθρώσεις πρέπει να

έχουν όσο το δυνατόν μικρότερο τζόγο και μικρότερες τριβές. Για την μείωση των τριβών επιλέχθηκαν βελονωτά έδρανα κυλίσεως.



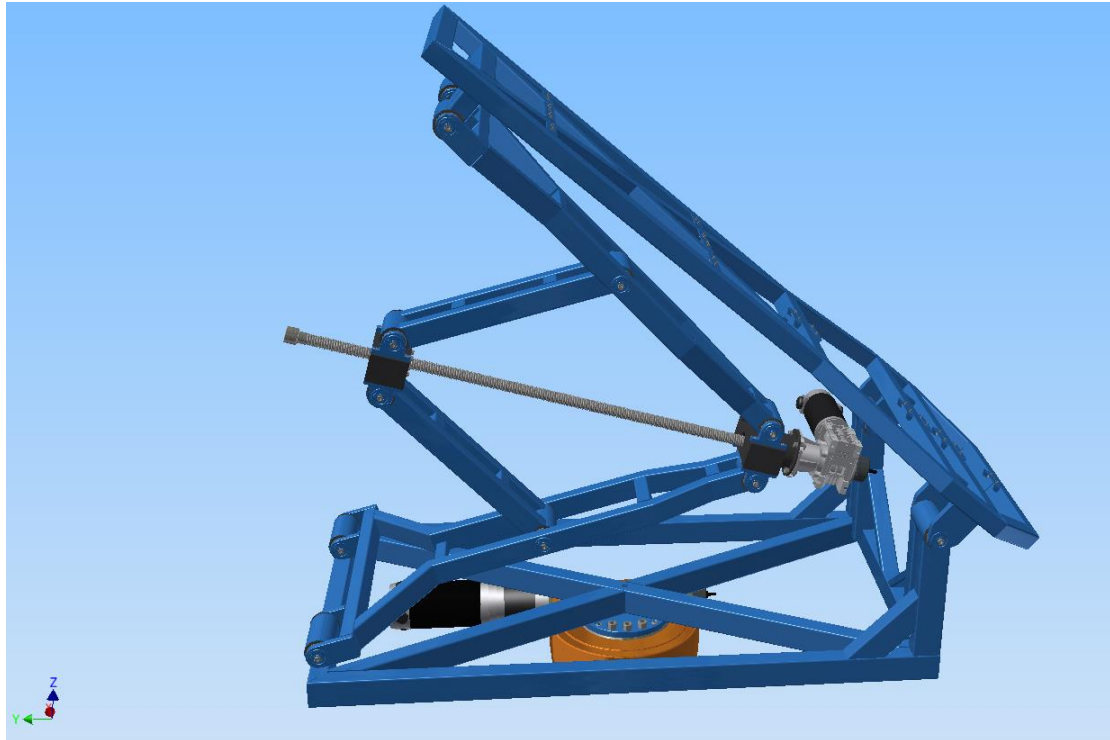
*Εικόνα : Συναρμολόγηση άρθρωσης μηχανισμού κλίσης.*

Ο πείρος σχεδιάστηκε με κωνική διαμόρφωση στα δύο άκρα του. Για τον εκμηδενισμό του τζόγου τοποθετήθηκαν κωνικά ελαστικά στοιχεία τα οποία μέσω της προέντασης του καπακιού σφηνώνουν ανάμεσα από τον πείρο και το βάκτρο της άρθρωσης. Με αυτόν τον τρόπο ο πείρος διατηρείται σε σταθερή θέση χωρίς να δημιουργείται χάρη ακόμα και μετά από χρόνια χρήσης του μηχανισμού. Με την συγκεκριμένη λύση διευκολύνεται και η συντήρηση του μηχανισμού. Τέλος τοποθετήθηκε και ένα δαχτυλίδι για τη παραλαβή των αξονικών φορτίων, όπου είναι σχεδόν αμελητέα, καθώς και στεγανοποίηση.



*Εικόνα : Μηχανισμός κλίσης σε τυχαία θέση λειτουργίας.*

Για τον σχεδιασμό όλων των μελών του μηχανισμού κλίσης επιλέχθηκε η χρήση κοιλοδοκών χάλυβα λόγω χαμηλού κόστους αλλά και της απαιτούμενης στιβαρότητας που παρέχουν. Όλες οι κατασκευές των μελών είναι συγκολλητές.



*Εικόνα : Μέλη μηχανισμού κλίσης χωρίς την πλατφόρμα των πάνελ.*

## 5.2 Μηχανισμός περιστροφής-αζιμούθιου (*azimuth mechanism*)

Για την ρύθμιση την γωνίας αζιμούθιου χρειάζεται η περιστροφή της κατασκευής γύρω από έναν άξονα ο οποίος είναι κάθετος στο επίπεδο του εδάφους. Η σχεδίαση του μηχανισμού αζιμούθιου σε σχέση με την σχεδίαση του μηχανισμού κλίσης και του πτυσόμενου μηχανισμού των πάνελ είναι πολύ πιο απλή. Η επιθυμητή περιστροφή γίνεται απευθείας από το σύστημα κινητήρα-μειωτήρα χωρίς την ύπαρξη κάποιων μελών στον μηχανισμό. Το σύστημα μειωτήρα αποτελείται από δύο στάδια μείωσης, τριβάθμιο πλανητικό μειωτήρα για το πρώτο στάδιο, ατέρμονα κοχλία με γρανάτζι για το δεύτερο στάδιο. Για την διαστασιολόγηση του συστήματος κινητήρα-μειωτήρα προσδιορίστηκαν αρχικά τα φορτία του μηχανισμού. Για να εκτελέσει ο μηχανισμός την κίνηση θα πρέπει να υπερνικήσει τις δυνάμεις λόγω αδράνειας καθώς και την μέγιστη ανεμοπίεση στην πλατφόρμα των πάνελ. Η απαιτούμενη ροπή υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο.

$$T = I * \alpha + T_{wind}$$

Όπου

- $I$  = η ροπή αδράνειας του περιστρεφόμενου φορτίου.
- $\alpha$  = η επιτάχυνση του περιστρεφόμενου φορτίου.
- $T_{wind}$  = η ροπή αντίστασης λόγω ανεμοπίεσης.
- $T$  = η απαιτούμενη ροπή για την περιστροφή του φορτίου.

Η ροπή αδράνειας του φορτίου καθώς και η επίδραση της ανεμοπίεσης μεταβάλλονται για διαφορετικές γωνίες κλίσης. Επομένως ο παραπάνω τύπος συναρτήσει της γωνίας κλίσης γίνεται:

$$T = I(\theta) * \alpha + F_A * \sin(\theta) * L$$

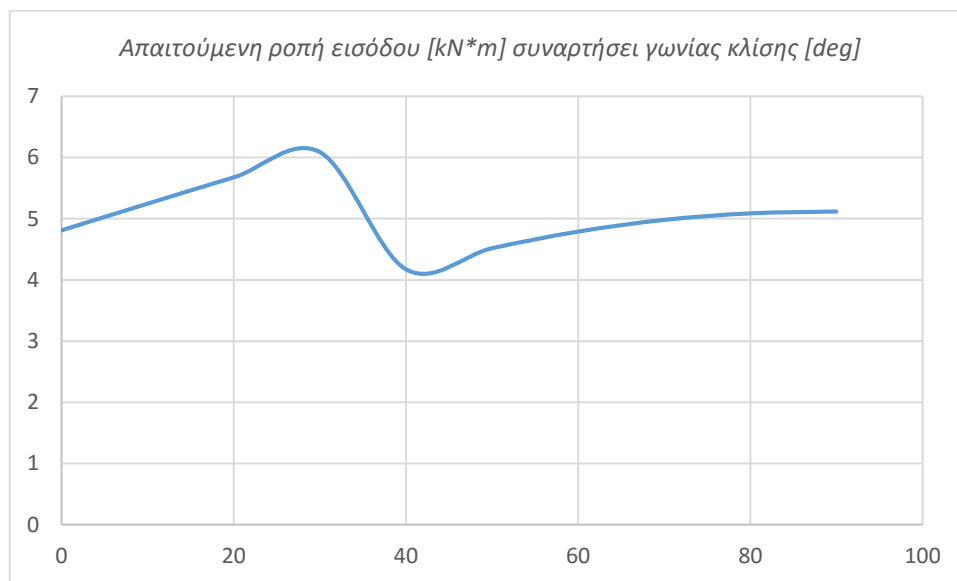
Όπου,

- $I(\theta)$  = η ροπή αδράνειας του περιστρεφόμενου φορτίου συναρτήσει της γωνίας κλίσης.
- $\alpha$  = η επιτάχυνση του περιστρεφόμενου φορτίου.
- $F_A$  = η μέγιστη δύναμη λόγω της ανεμοπίεσης.
- $L$  = η απόσταση του περιστρεφόμενου άξονα από το σημείο εφαρμογής της ανεμοπίεσης.
- $\theta$  = η γωνία κλίσης της πλατφόρμας των πάνελ από το οριζόντιο επίπεδο.

Με τον υπολογισμό της ροπής για διάφορες θέσεις του μηχανισμού εντοπίστηκε η δυσμενέστερη περίπτωση λειτουργίας και σε συνδιασμό με την επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής του φορτίου επιλέχθηκε το σύστημα κινητήρα-μειωτήρα για την είσοδο ισχύος στον μηχανισμό. Οι απαιτήσεις του συστήματος σε ισχύ είναι πολύ μεγάλες καθώς πρέπει περιστρέψει την πλατφόρμα των πάνελ αλλά και τον μηχανισμό της κλίσης και παραλαμβάνει όλα τα φορτία που δέχεται η κατασκευή. Η ταχύτητα της γωνίας αζιμούθιου του ηλίου είναι πολύ αργή οπότε το σύστημα παρουσιάζει αυξημένη ροπή (εώς 7kN\*m) και μικρή ταχύτητα

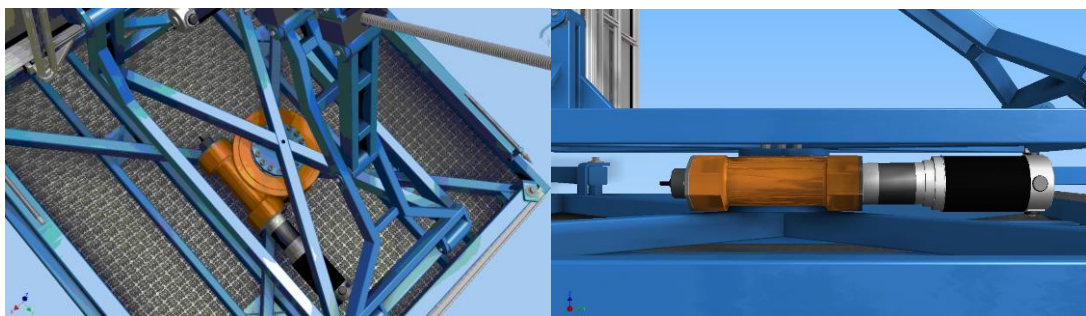


(0.46rpm) . Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών.



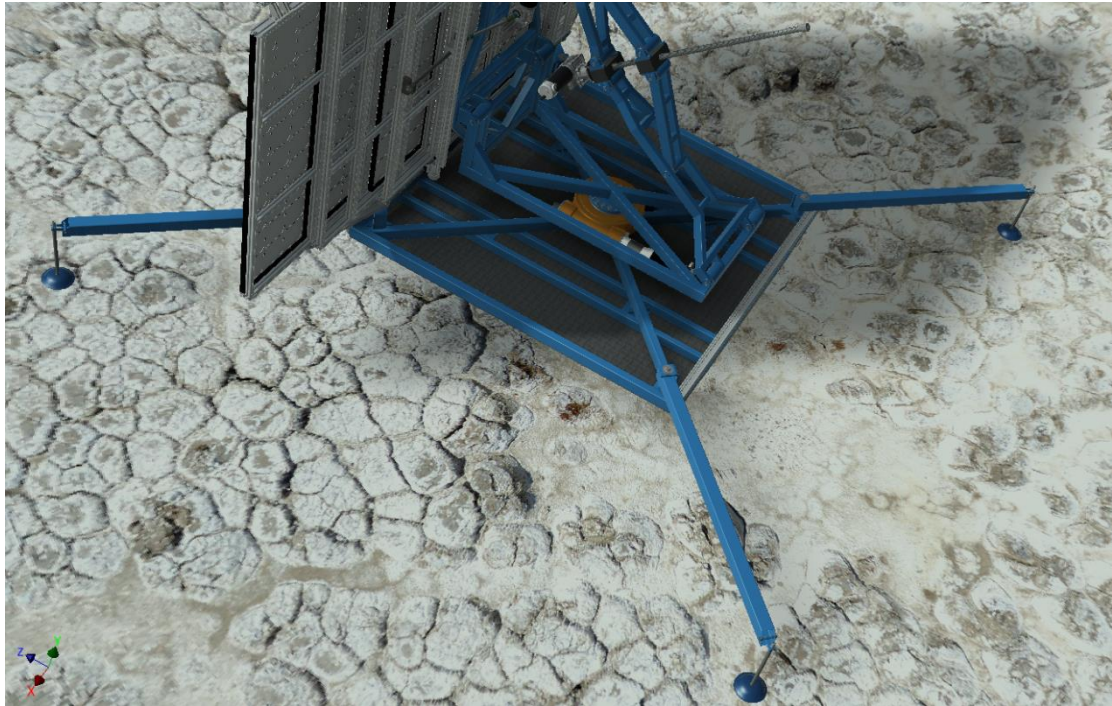
**Εικόνα :** Απαιτούμενη ροπή κινητήρα για διάφορες γωνίες κλίσης του φορτίου

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα επιλέχθηκε κινητήρας συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη ισχύος 800W με λειτουργία στις 3000rpm στα 24V με δύο στάδια μειωτήρα. Στο πρώτο στάδιο επιλέχθηκε πλανητικός τριβάθμιος μειωτήρας με σχέση μετάδοσης  $i=107$  ενώ για το δεύτερο στάδιο επιλέχθηκε γωνιακός μειωτήρας με ενσωματωμένο έδρανο κυλίσεως επαφής τεσσάρων σημείων με σχέση μετάδοσης  $i=61$ .

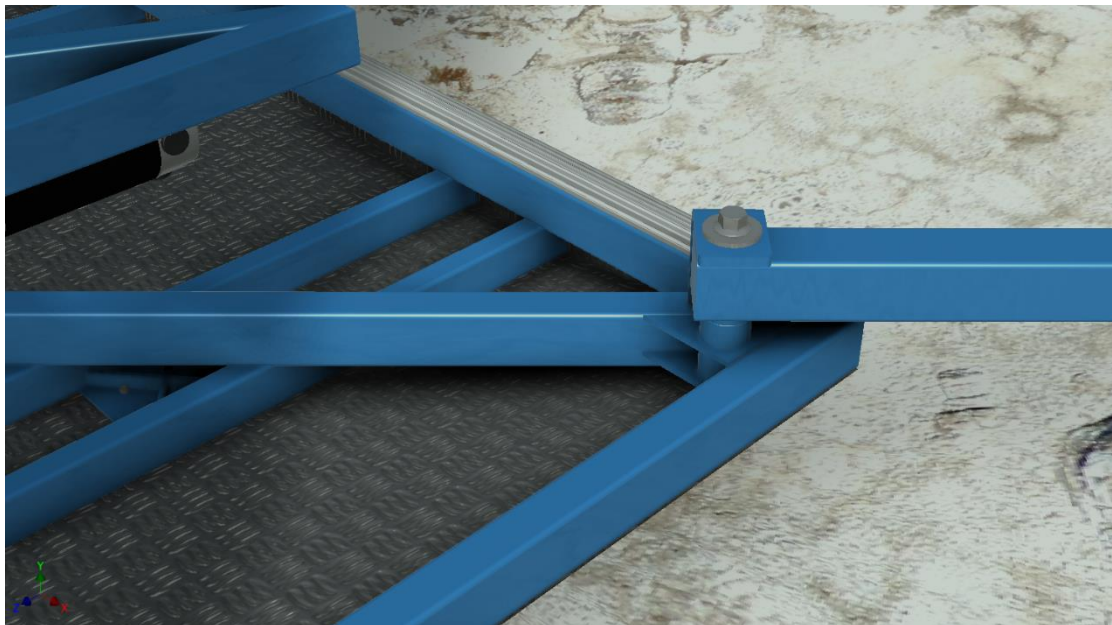


**Εικόνα :** Σύστημα κινητήρα-μειωτήρα του μηχανισμού αζιμούθιου.

Το περιστρεφόμενο φορτίο στερεώθηκε πάνω στο κινούμενο μέρος του μειωτήρα μέσω μιας φλάντζας συγκολλημένης στη βάση του ενώ το ακίνητο μέρος του μειωτήρα μέσω μιας φλάντζας συγκολλημένη στη σταθερή βάση της κατασκευής. Για την στιβαρότητα της σταθερής βάσης και την παραλαβή όλων των φορτίων της κατασκευής τοποθετήθηκαν αρθρωτοί βραχίονες όπου τοποθετούνται σε ανοιχτή θέση και βιδώνονται στο έδαφος πριν την εκκίνηση της λειτουργίας της κατασκευής. Υπάρχει η δυνατότητα κλεισίματος των βραχιόνων ώστε με την τοποθέτηση του καλύματος να περιορίζεται ο όγκος και να διευκολύνεται η μεταφορά.



***Εικόνα :** Βραχίονες στήριξης σε ανοιχτή θέση.*



***Εικόνα :** Άρθρωση βραχίονα στην ακίνητη βάση της κατασκευής*



## 6. Ηλεκτρονικός έλεγχος συστήματος

Για τον ηλεκτρονικό έλεγχο της κατασκευής επιλέχθηκε σύστημα ανοιχτού βρόγχου με συλλογή δεδομένων μέσω GPS και υπολογισμό της θέσης του ηλίου με χρήση αστρονομικού αλγορίθμου. Στόχος του συστήματος ελέγχου είναι η τοποθέτηση της πλατφόρμας των πάνελ στο σημείο μέγιστης ακτινοβολίας του ηλίου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη κάθετη πρόσπτωση των ακτινών του ηλίου στα φωτοβολταϊκά κελιά. Για την τοποθέτηση των πάνελ στην επιθυμητή θέση απαιτείται σύστημα ενεργοποιητών ελέγχου θέσης. Επίσης υπάρχει έλεγχος της ταχύτητας του ανέμου για την προστασία της κατασκευής σε δυσμενείς συνθήκες. Για την υλοποίηση όλων του απαιτούμενων λειτουργιών στο σύστημα επιλέχθηκε η χρήση PLC. Παρακάτω ακολουθεί συνοπτική περιγραφή των εξαρτημάτων του συστήματος ελέγχου.

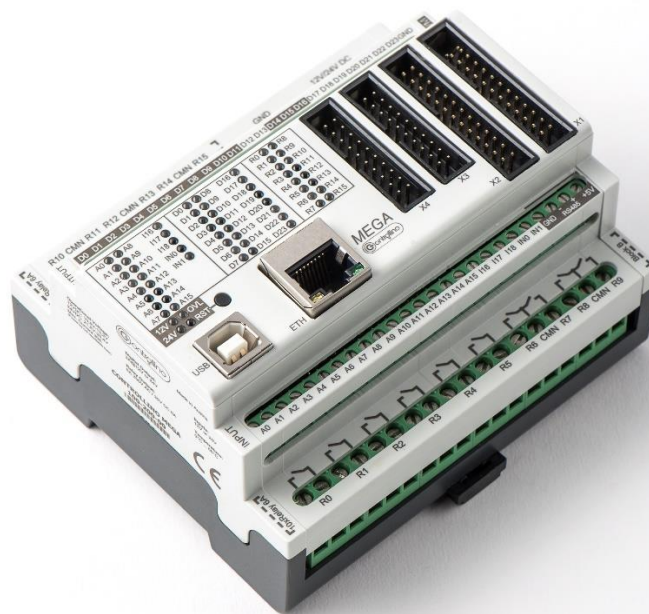
- PLC (Programmable logic controller)

Το PLC αποτελεί μια αξιόπιστη λύση για εφαρμογές αυτοματισμού και είναι απο τις πιο διαδεδομένες επιλογές στις εφαρμογές της βιομηχανίας. Στο παρόν σύστημα το PLC αναλαμβάνει τον συντονισμό όλων των λειτουργιών του συστήματος ελέγχου. Είσοδοι στο σύστημα ελέγχου είναι τα δεδομένα του GPS και συγκεκριμένα το γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος που βρίσκεται η κατασκευή. Σε συνδυασμό με το RTC (real time clock) του ελεγκτή έχουμε όλα τα δεδομένα για τον υπολογισμό του ηλιακού διανύσματος μέσω του αστρονομικού αλγορίθμου SPA (solar position algorithm). Στην συνέχεια απαιτείται ο προσανατολισμός της πλατφόρμας των πάνελ κάθετα στις ακτίνες του ηλίου. Για να καταστεί δυνατό πρέπει πέρα από την θέση στον χώρο να γνωρίζουμε και τον αρχικό προσανατολισμό της κατασκευής μέσω ψηφιακής πυξίδας (compass sensor). Για την τοποθέτηση της πλατφόρμας των πάνελ στην επιθυμητή θέση χρησιμοποιούνται συστήματα servo με χρήση κινητήρων DC μόνιμου μαγνήτη, servo driver με λειτουργία PID καθώς και incremental encoders για την ανάδραση. Άλλοι είσοδοι στο PLC είναι ένας αισθητήρας ανέμου για την μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου κάθε στιγμή και σε περίπτωση που η τιμή αυτή ξεπεράσει το επιτρεπτό όριο το σύστημα τοποθετείται στην ασφαλή θέση λειτουργίας (παράλληλα με το επίπεδο του εδάφους). Για την υλοποίηση των παραπάνω λειτουργιών επιλέχθηκε το PLC Controllino Mega λόγω της αξιοπιστίας που προσφέρει σαν PLC αλλά και της συμβατότητας του με Arduino.

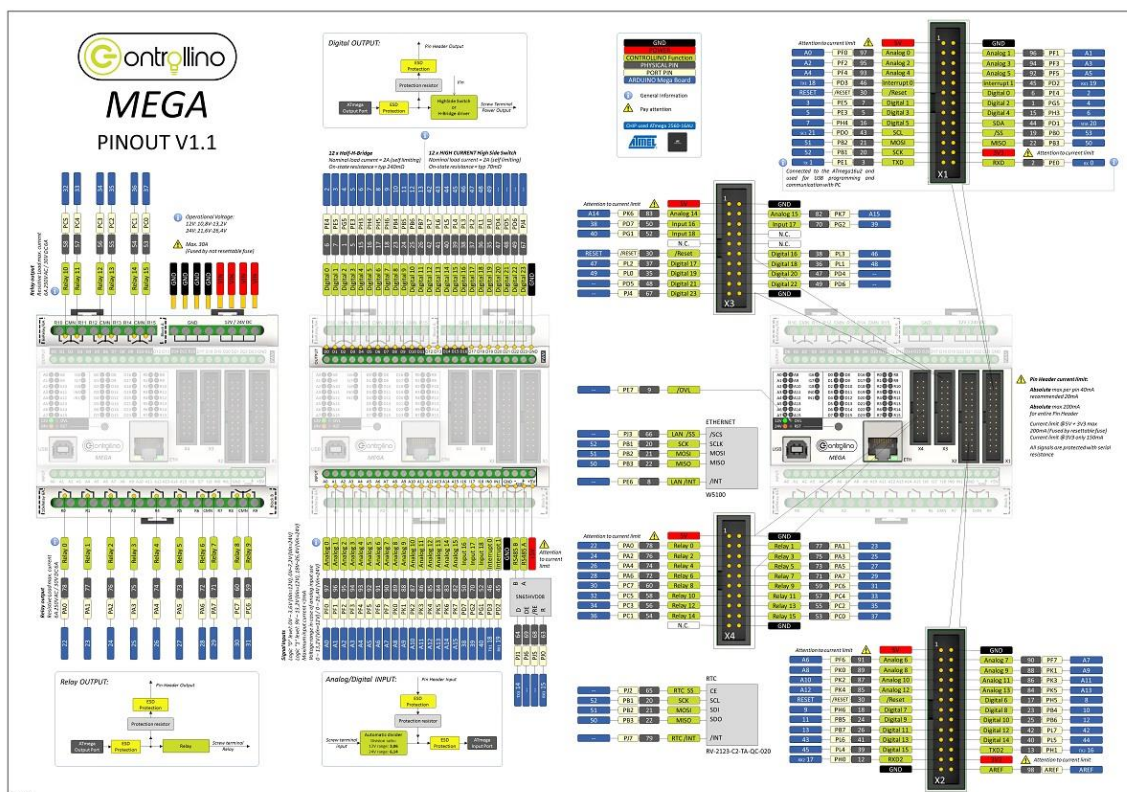
Χαρακτηριστικά Controllino Mega:

Microcontroller: ATmega2560  
Clock Speed: 16 MHz  
RTC  
Ethernet Connector  
2x serial Interface  
1x RS485 Interface  
1x I2C Interface  
1x SPI Interface  
Input current Max. 30A  
16x Relays Outputs – 230V / 6A  
21x Analog/Digital Inputs  
12x Digital Outputs – High Side Switch – 2A @12V or 24V  
12x Digital Outputs – Half-Bridge - 2A @12V or 24V

*Σχεδιασμός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος*



**Εικόνα:** *Controllino Mega*



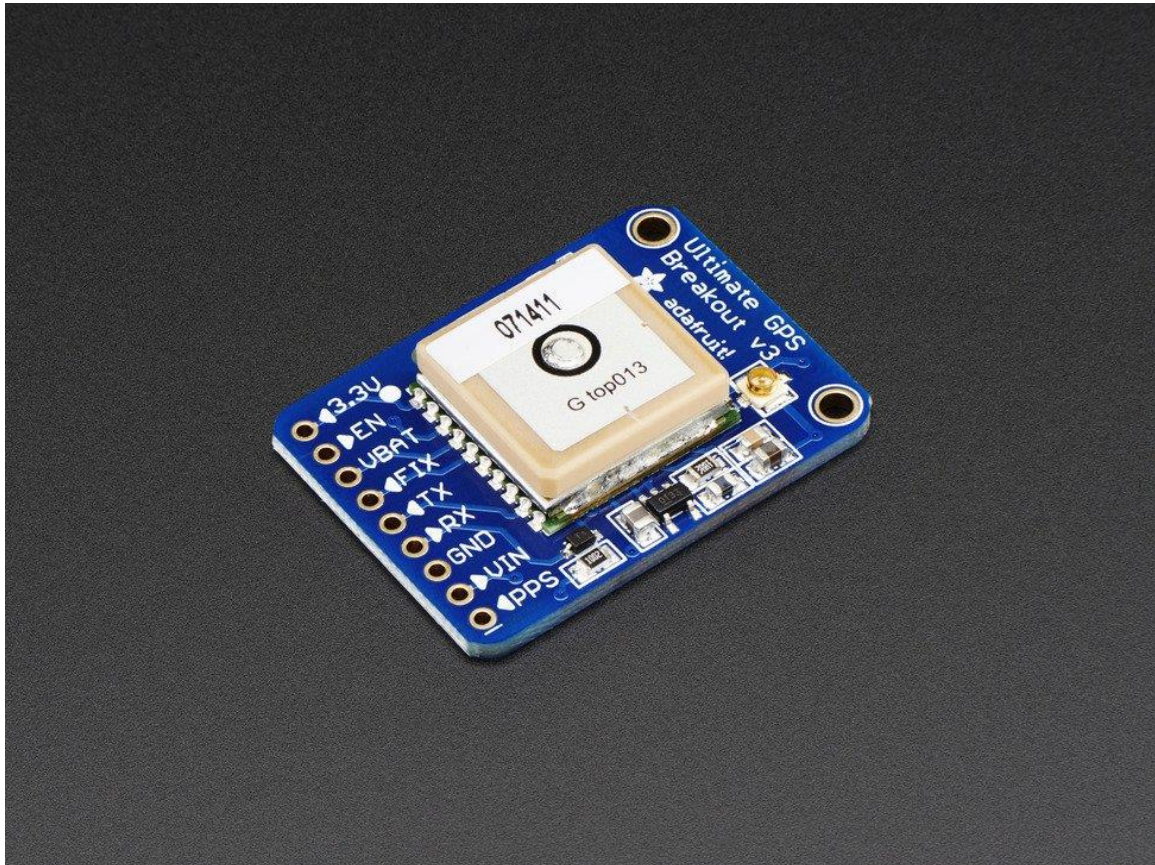
**Εικόνα:** Συνδεσμολογία Controllino Mega

### *Σχεδιασμός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος*

- GPS module

Για την συλλογή δεδομένων GPS επιλέχθηκε το Adafruit HMC5883 breakout με τα εξής χαρακτηριστικά.

- I2C interface
- 1-2 degree heading accuracy
- Integrated 12-bit ADC
- 160Hz max data rate
- Range of -8 to +8 Gauss



*Εικόνα : Adafruit HMC5883*

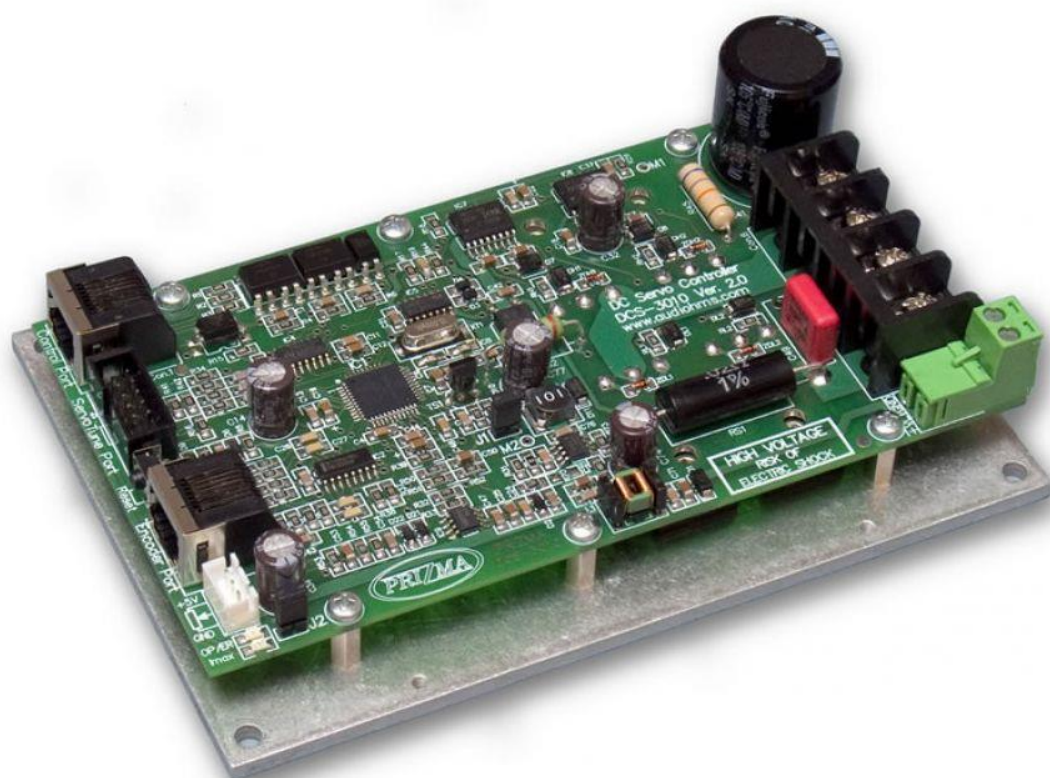
- Servo driver

Ο driver για το σύστημα servo επιλέχθηκε ο DCS-3010 που ενδείκνυται για εφαρμογές ελέγχου θέσης και οδήγηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη. Με την χρήση του προγράμματος ServoTune 3 μπορούν να ρυθμιστούν με ευκολία όλες οι παράμετροι του συστήματος για την σωστή λειτουργία του PID. Πέρα από τον κινητήρα στον driver συνδέεται και ο encoder. Τα χαρακτηριστικά του driver είναι τα παρακάτω.



*Σχεδιασμός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος*

Type	PWM closed loop PMDC Servo drive with PID controller algorithm
PWM frequency	10 ÷ 20 kHz, software set up
Number of axis	1
DC motor supply voltage	10 ÷ 100 V DC
DC motor current	3 ÷ 30 A max, software set up
Logic circuit power supply	18 ÷ 28 V DC / 200 mA
Input control interface	Digital control modes via opto-isolated lines STEP/DIR/ENA, CW/CCW/ENA and Encoder follower (1x, 2x and 4x) Analog 0 ÷ 5 V with and without feedback
Command line current	5 mA at 5 V
Output	Opto-isolated Track Error
Frequency of STEP command	< 600 kHz
Command line pulse width	> 0,5 $\mu$ s
Feedback	Incremental encoder with phase-shifted square signal
Encoder resolution	$\times 1$ , $\times 2$ and $\times 4$ multiplication, software set up
Encoder power supply	Source on drive +5 V DC / 250 mA
Parameter set up	Via IDC10 connector and programming interface (PI-RS232, IPI-USB or Bluetooth BT-PI)
Build in protections	Over-voltage and over-temperature
Dimensions (W x L x H)	154 mm x 105 mm x 45 mm
Weight	~300 g

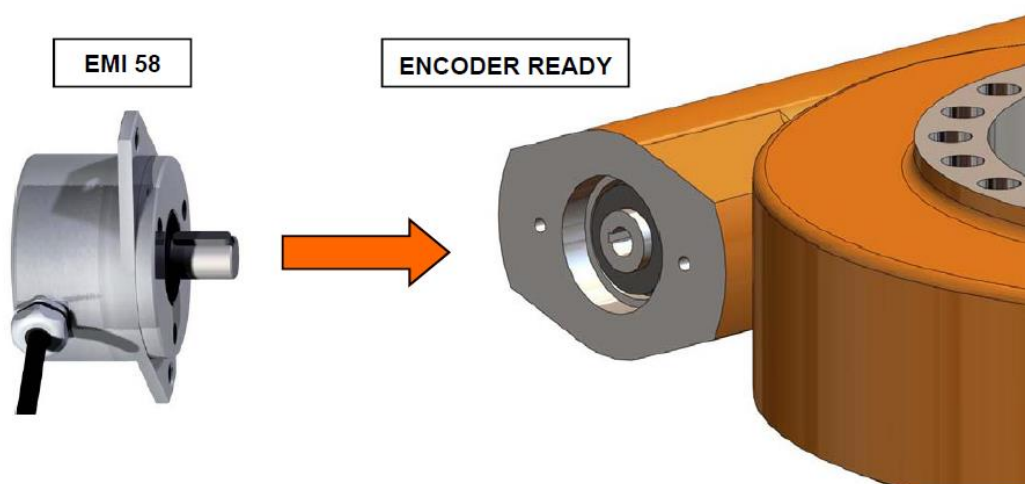


*Εικόνα : DCS-3010 servo driver*

- Encoder

Για την μέτρηση της γωνιακής θέσης του εκάστωτε άξονα απαιτείται η παρουσία ενός encoder στο σύστημα servo. Επιλέχθηκε ο encoder EMI 58 όπως προτείνεται από την κατασκευάστρια εταιρία των κινητήρων και μειωτήρων που επιλέχθηκαν στο σύστημα, Transtecno. Τα χαρακτηριστικά του:

- *Magnetic incremental encoder*
- *IP66*
- *Vibration and shock resistant;*
- *Working temperature range from – 25°C up to +100° C.*
- *SKINTOP wire length 1,5m*
- *No load input current 100mA max.*
- *Working frequency 205kHz max.*
- *Precision +/-0.35° max.*
- *EMC:*  
*IEC 61000-6-2;*  
*IEC 61000-6-3.*



## ***7. Βιβλιογραφία***

- Solar Tracking - Gerro Prinsloo, Robert Dobson
- Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications – Ibrahim Reda Afshin Andreas
- Στοιχεία Μηχανών – Π. Γραϊκούσης
- Kinematic and Dynamic Simulation – Eduardo Bayo
- Autodesk Inventor Simulation manual

## *8. Παράρτημα*