



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ, 73 100 ΧΑΝΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός και ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων υδραυλικής βάσης φωτοβολταϊκού ιχνηλάτη διπλού άξονα

ΠΑΥΛΙΔΗ ΕΛΕΝΗ
ΑΜ : 2007010108

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο, για όλη την βοήθειά που μου παρείχε ,κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσης διπλωματικής εργασίας, καθώς και κατά την εκμάθηση των επιμέρους προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον μεταπτυχιακό φοιτητή Ρεντούμη Μελέτιο, για την ουσιαστική συνεισφορά στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και φίλους μου Μιχάλη, Ανδριανή, Σπύρο, Χρυσήδα, και Μαρία για όλη την συμπαράσταση και βοήθεια τους όλο αυτό τον καιρό.

Στις ευχαριστίες θα ήθελα να συμπεριλάβω τους συντρόφους μου, οι οποίοι αποτέλεσαν ένα σημαντικό κομμάτι της ζωής μου στα Χανιά, μαθαίνοντας μου την έννοια της συλλογικότητας και της αλληλεγγύης, αποκτώντας όλα αυτά τα χρόνια εμπειρίες και βιώματα ζωής.

Επιπροσθέτως, ευχαριστώ ξεχωριστά τις φίλες μου και οικογένειά μου στα Χανιά, Ελένη, Εύη, Δήμητρα, Ζωή και Βαϊτσα για όλες τις υπέροχες στιγμές γέλιου, χαράς και αγάπης που έχω περάσει μαζί τους.

Την διπλωματική εργασία, θα ήθελα να την αφιερώσω, μαζί με ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου και στην οικογένειά μου.

Περίληψη

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας, είναι να σχεδιαστεί και να αναλυθεί στατικά μία αυτόνομη υδραυλική περιστρεφόμενη βάση δύο αξόνων για φωτοβολταϊκά τύπου tracker .

Στα πρώτα κεφάλαια, πραγματοποιείται θεωρητική προσέγγιση τεχνολογιών και κατασκευής φωτοβολταϊκών. Επίσης αναφέρονται τρόποι στήριξης κατά την εγκατάσταση ΦΒ συστημάτων. Στη συνέχεια παρατίθεται αναλυτικά ο τρόπος σχεδίασης της βάσης στήριξης που πρόκειται να αναλυθεί στατικά.

Η βάση στήριξης, σχεδιάστηκε στο περιβάλλον του προγράμματος Pro/ENGINEER. Όσον αφορά στη διαστασιολόγηση και σχεδίαση, τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τα μηχανολογικά σχέδια του εγχειριδίου κατασκευής του δεδομένου μοντέλου, ενώ σε ορισμένα σημεία χρησιμοποιήθηκαν τυποποιημένες διαστάσεις της αγοράς . Η στατική μελέτη του μοντέλου έγινε στο περιβάλλον του προγράμματος z88, σύμφωνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στόχος της εργασίας είναι ο έλεγχος αντοχής της κατασκευής ακόμα και στις χειρότερες περιπτώσεις καταπόνησης. Λόγω αυτού, η προσομοίωση της καταπόνησης των μοντέλων έγινε τόσο για φυσιολογικές συνθήκες, όσο και για μεγάλα εξωτερικά φορτία . Πιο συγκεκριμένα, σε φυσιολογικές συνθήκες προστέθηκαν μόνο τα βάρη των πάνελ στην κατασκευή. Εν συνεχεία, επαναλήφθηκε η ίδια διαδικασία για την πιθανότητα εμφάνισης ακραίων καιρικών συνθηκών. Για αυτή τη περίπτωση, εκτός από τα βάρη των πάνελ, συνυπολογίστηκαν φορτίσεις από το βάρος του χιονιού σε οριζόντια θέση της σχάρας καθώς και από τη δύναμη του ανέμου στην πιο ακραία θέση κλίσης της σχάρας και συνθήκες εδάφους.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, παρατίθενται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα παραμόρφωσης για όλες τις περιπτώσεις εξωτερικών φορτίων. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται αν η κατασκευή είναι ικανοποιητικά ανθεκτική. Επίσης, επισημαίνονται τυχόν προβλήματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της εργασίας και παρουσιάζεται ο τρόπος επίλυσής τους.

Abstract

The purpose of this thesis is the design and structural analysis of a of dual axis hydraulic photovoltaic base .The hydraulic base consists of a dual axis design which is and is to be used with solar panels of the tracker type.

The first chapters are devoted to a theoretical background of photovoltaic technologies as well as the construction of photovoltaic systems. Support systems during the installation of PV systems are also discussed. Finally, a detailed analysis of the hydraulic base is presented followed by a structural analysis.

The support base was designed using Pro / ENGINEER computer software. In terms of the dimensions and design, the data which was collected and subsequently applied, was based on the engineering drawings in the construction manual of the tracker solar panel, while in some instances standard dimensions commonly found in the market were used. The structural design of the model was carried out using the z88 programming software, according to the method of finite element analysis.

The aim of the thesis is to measure maximum endurance of the structure even under extreme conditions. In light of this, the simulation of stress patterns took place both under normal conditions and under conditions of extreme external loads. More specifically, under normal conditions, the only weight added to the structure was that of the panels. Subsequently, the same procedure was repeated taking into account the possibility of extreme weather conditions. In these instances various variables were considered. Apart from the weight of the panels, the weight of possible accumulation of snow on the grill was considered. Other factors included the power of the wind and its effect on the grill even in the most inclined position. Ground conditions were also taken into consideration.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 ^ο : Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	7
1.1 Εισαγωγή	7
1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	7
1.3 Ηλιακή Ενέργεια.....	8
1.3.1 Μέθοδοι Αξιοποίησης Ηλιακής Ενέργειας.....	8
1.4 Αξιοποίηση Ηλιακής Ενέργειας και ΑΠΕ στην Ελλάδα	9
Κεφάλαιο 2 ^ο : Φωτοβολταϊκά Συστήματα	11
2.1 Εισαγωγή	11
2.2 Ιστορικά στοιχεία	11
2.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα	13
2.4 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο	14
2.5 Συστοιχίες Κυττάρων	15
2.5.1 Φ/Β Στοιχείο (Κύτταρο)- PV CELL	15
2.5.2 Φ/Β Πλαίσιο	15
2.5.3 Φ/Β Πανέλα (PANELS)	16
2.5.4 Φ/Β Ηλιακή Συστοιχία (PV ARRAY)	16
2.5.5 Φ/Β Πάρκα	17
2.5.6 Φ/Β Γεννήτρια	17
2.6 Τεχνολογίες Φ/Β Κυττάρων	17
2.6.1 Τύποι Φ/Β συστημάτων Πυριτίου Μεγάλου Πάχους	18
2.6.2 Τεχνολογίες λεπτού υμενίου (thin-film)	19
2.6.3 Άλλες τεχνολογίες	22
2.7 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Απόδοση των Φ/Β Συστημάτων	22
2.7.1 Παράγοντες περιβάλλοντος	22
2.7.2 Άλλοι παράγοντες	23
2.8 Κατηγοριοποίηση Φ/Β Συστημάτων.....	25
2.8.1 Δομή/Μέρη ενός τυπικού φωτοβολταϊκού συστήματος	26
Κεφάλαιο 3 ^ο : Βάσεις Στήριξης Φ/Β Συλλεκτών	28
3.1 Εισαγωγή	28
3.2 Είδη Βάσεων Στήριξης	28
3.2.1 Σταθερές Βάσεις	29
3.2.2 Συστήματα Συνεχούς Ημερήσιας Παρακολούθησης, Ηλιοτρόπια (trackers).....	31
3.2.3 Συστήματα μονού άξονα (single axis systems).....	32
3.2.4 Συστήματα διπλού άξονα (dual axis systems)	34
3.3 Βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου	35

Κεφάλαιο 4 ^ο : Πεπερασμένα στοιχεία	37
4.1 Εισαγωγή	37
4.2 Μέθοδος Πεπερασμένων στοιχείων	37
Κεφάλαιο 5 ^ο : Σχεδιασμός Μοντέλου	39
5.1 Εισαγωγή	39
5.2 Pro Engineer	39
5.3 Αναλυτική Σχεδίαση των Επιμέρους Τμημάτων της Υδραυλικής Βάσης Στήριξης Δύο Αξόνων	40
5.3.1 Σωληνωτές στηρίξεις σχάρας (Arms)	40
5.3.2 Βάση Στήριξης (Base)	43
5.3.3 Έμβολο (Cyl)	45
5.3.4 Εξωτερικός Κύλινδρος (Cylinder_Max)	46
5.3.5 Επίγεια Βάση Στήριξης (Grav_Base)	48
5.3.6 Κοχλίας (Screw_base)	49
5.3.7 Κοχλίας Σχάρας (Screw_top)	50
5.3.8 Σχάρα	51
5.4 Συναρμολόγηση (Assembly)	56
5.5 Αποθήκευση Αρχείου	60
Κεφάλαιο 6 ^ο : Στατική Ανάλυση του Μοντέλου	61
6.1 Εισαγωγή	61
6.2 Εισαγωγή δεδομένων υλικού κατασκευής και δημιουργίας πλέγματος.	61
6.3 Προσδιορισμός των φορτίσεων και εισαγωγή τους μοντέλο	62
6.3.1 Βάρος των πάνελ	62
6.3.2 Βάρος χιονιού	63
6.3.3 Μοντέλο ανέμου	64
6.3.3.1 Περίπτωση Ανεμοπίεσης 1 ^η	65
6.3.3.2 Περίπτωση ανεμοπίεσης 2 ^η	66
6.4 Αποτελέσματα	69
6.4.1 Μοντέλο χιονιού	69
6.4.2 Μοντέλο ανεμοπίεσης: Περίπτωση 1 ^η	76
6.4.3 Μοντέλο ανεμοπίεσης: Περίπτωση 2 ^η	84
Συμπεράσματα	93
Βιβλιογραφία	94
Παράρτημα	96

Κεφάλαιο 1^ο: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

1.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση έχει αυξηθεί με ραγδαίους ρυθμούς. Η ανάγκη του ανθρώπου για περισσότερη ενέργεια συμβαδίζει με το επίπεδο του τεχνολογικού πολιτισμού και είναι απότοκη της έντασης των δραστηριοτήτων λόγω της συγκέντρωσης του πληθυσμού στα μεγάλα αστικά κέντρα. Με το πέρασμα των δεκαετιών, η αλόγιστη χρήση των ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, στερεά καύσιμα, φυσικό αέριο) οδήγησε την παγκόσμια κοινότητα μπροστά σε δύο σοβαρότατα προβλήματα. Αφενός τη μόλυνση του περιβάλλοντος λόγω αέριων εκπομπών καταστροφικών προς τη ατμόσφαιρα και αφετέρου την εξάντληση των ορυκτών καυσίμων από τα οποία εξαρτάται η παγκόσμια παραγωγή ενέργειας. Με την πάροδο του χρόνου προέκυψε έντονη ανησυχία όσον αφορά τις καταστροφικές επιπτώσεις των ανθρώπινων επεμβάσεων στο περιβάλλον, της εξάντλησης των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων, σε συνδυασμό με τον ολοένα και αυξανόμενο ρυθμό των ενεργειακών απαιτήσεων του πλανήτη.

Η διεθνής κοινότητα πραγματοποίησε στροφή προς χρήση άλλων ενεργειακών πηγών, φιλικών προς το περιβάλλον, γνωστών ως ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Σημαντική ώθηση στις ΑΠΕ σημειώθηκε αρχικά στη δεκαετία του 70, με «ωθούσα» δύναμη την πετρελαϊκή κρίση του 1973. Από το 1990 και μετά παρατηρήθηκε περαιτέρω εξέλιξη των ΑΠΕ, κυρίως λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της χρήσεως ορυκτών καυσίμων και, δευτερευόντως, λόγω της ευαισθητοποίησης μεγάλων τμημάτων της κοινωνίας. Η ανάγκη για τον παγκόσμιο περιορισμό και τη διάσωση του περιβάλλοντος οδήγησε στη θέσπιση μέτρων και πολιτικών όσον αφορά την κάλυψη της ενεργειακής κατανάλωσης, τη μείωση των αέριων εκπομπών όπως του φαινομένου του θερμοκηπίου και την εισαγωγή εναλλακτικών μορφών ενέργειας στον παγκόσμιο ενεργειακό σκηικό.

1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ, renewable energy source) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες ανεξάντλητες φυσικές διαδικασίες. Σύμφωνα με τον ορισμό του International Energy Association (IEA), οι ΑΠΕ ταξινομούνται ως εξής:

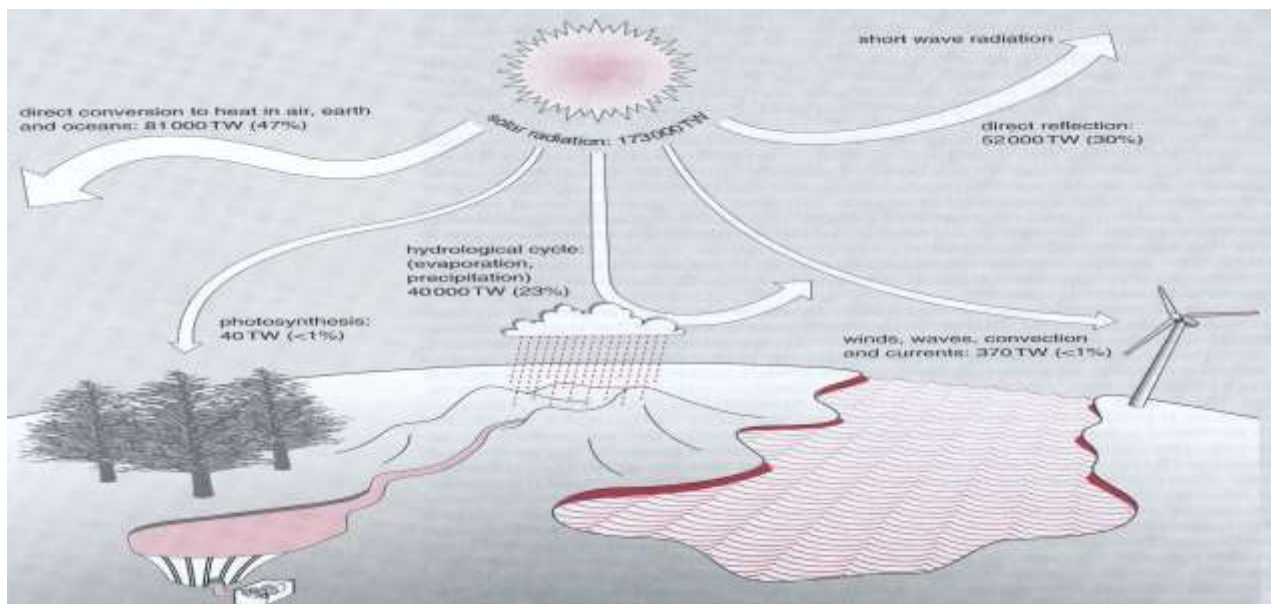
- 1) Ηλιακή ενέργεια
- 2) Υδροηλεκτρική ενέργεια ή υδροίςχύς
- 3) Αιολική ενέργεια
- 4) Καύσιμες ανανεώσιμες πηγές και απορρίμματα-Βιομάζα (combustible renewables and waste, CRW)
- 5) Γεωθερμία (και οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας)
- 6) Παλιρροϊκή ενέργεια
- 7) Ενέργεια από τα κύματα
- 8) Θερμότητα από τους ωκεανούς

Συχνά οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας βρίσκονται με τις ονομασίες εναλλακτικές πηγές ενέργειας (alternative energy sources), από το γεγονός ότι μπορούν να αντικαταστήσουν τις συμβατικές μορφές ενέργειας, ή σαν ήπιες (benign). Υπάρχει πληθώρα μεθόδων αξιοποίησης των ΑΠΕ, μερικές από τις οποίες συμμετέχουν ήδη σε σημαντικό βαθμό στις ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας, ιδιαίτερα των αναπτυσσόμενων χωρών. (παραγωγή ηλεκτρισμού, μεταφορές, θερμότητα).

Η δεδομένη εργασία ασχολείται αποκλειστικά με την ηλιακή ενέργεια και συγκεκριμένα με τα φωτοβολταϊκά συστήματα

1.3 Ηλιακή Ενέργεια

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε ετήσια βάση στη γη, είναι 15.000 φορές μεγαλύτερη από την ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στον κόσμο. Η γη δέχεται συνολικά 174 PW (petawatts) εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στο πάνω τμήμα της ατμόσφαιρας. Κατά τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας στη Γη, περίπου το 30% ανακλάται πάλι προς το διάστημα, ενώ η υπόλοιπη απορροφάται από τα σύννεφα, τους ωκεανούς και το έδαφος της γης. Όσον αφορά τις ενεργειακές απολαβές από τον ήλιο, η ενέργεια ανά m^2 , που φτάνει στην επιφάνεια της γης κατά τη περίοδο μιας μέρας, εξαρτάται από τη κλίση της συλλεκτικής επίπεδης επιφάνειας, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, την ημέρα του χρόνου, και από τις συγκεντρώσεις των αερίων, υγρών και στερεών συστατικών και αιωρημάτων της ατμόσφαιρας κατά την ημέρα εκείνη.



Εικόνα 1: Ηλιακή ενέργεια (Πηγή:www.google.gr)

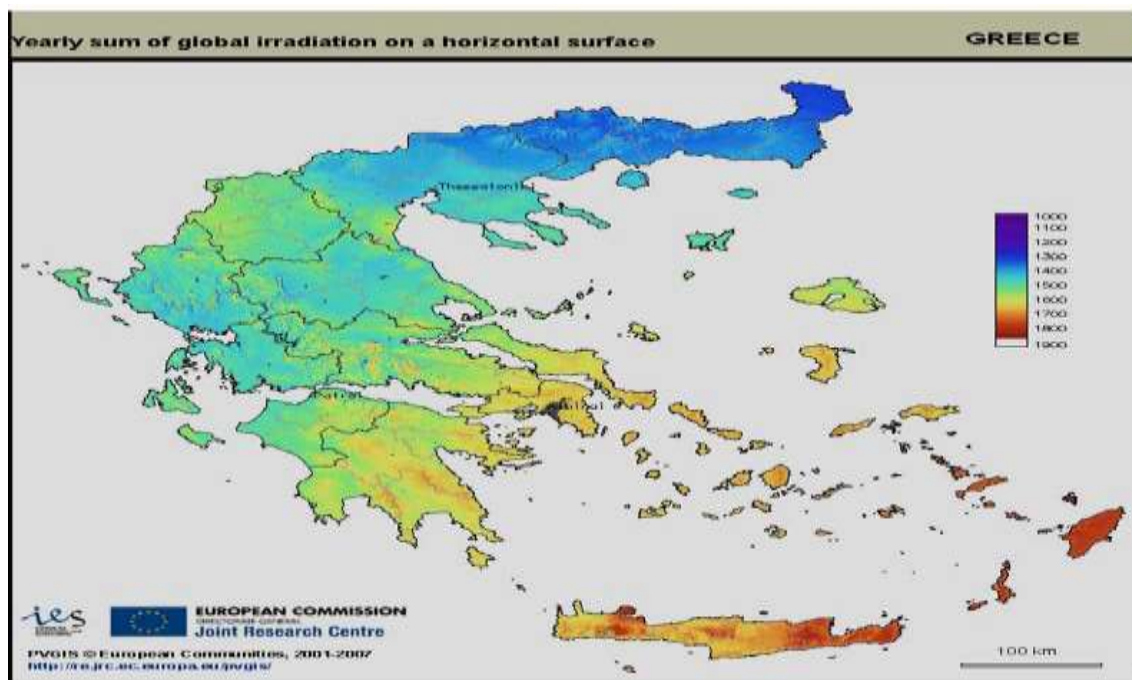
1.3.1 Μέθοδοι Αξιοποίησης Ηλιακής Ενέργειας

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί για θέρμανση, φωτισμό, και παραγωγή μηχανικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, οι κυριότερες τεχνολογίες για την αξιοποίηση της άμεσης ηλιακής ενέργειας είναι:

- **Ενεργητικά ηλιακά συστήματα:** Σε αυτά τα συστήματα γίνεται μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα σε κάποια δεξαμενή. Χρησιμοποιούνται ηλιακοί συλλέκτες. Περιλαμβάνουν τεχνολογίες για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, παραγωγής αφαλατωμένου νερού, θέρμανσης χώρων και νερού και μαγείρεμα.
- **Παθητικά συστήματα θέρμανσης- Δροσισμού:** Σε αυτά τα συστήματα εγκαταλούνται κατάλληλα σχεδιασμένα και συνδυασμένα δομικά στοιχεία των οικονομικών κατασκευών για την όσο το δυνατόν μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση, ούτως ώστε να συμβάλλουν είτε στην θέρμανση των κτηρίων κατά τους χειμερινούς μήνες, είτε στην διατήρηση ικανοποιητικής θερμοκρασίας κατά τους θερινούς μήνες.
- **Φωτοηλεκτρικές μέθοδοι:** Σε αυτές περιλαμβάνονται το φωτοβολταϊκό, το φωτοηλεκτρικό και το θερμοιονικό φαινόμενο με πιο σημαντικό το πρώτο κατά το οποίο γίνεται άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

1.4 Αξιοποίηση Ηλιακής Ενέργειας και ΑΠΕ στην Ελλάδα

Μετά από τις δύο πετρελαϊκές κρίσεις της δεκαετίας του εβδομήντα και τις επιδράσεις τους στην Ελληνική οικονομία, οι ενεργειακές πολιτικές που υιοθετήθηκαν είχαν στόχο τη μείωση της εξάρτησης του ενεργειακού συστήματος της χώρας από το πετρέλαιο. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), εξαιρουμένων των μεγάλων υδροηλεκτρικών, άρχισαν να αποτελούν αξιοσημείωτη πηγή για την παραγωγή ενέργειας από τα τέλη της δεκαετίας του '90. Στο χάρτη που ακολουθεί εμφανίζονται οι ετήσιες τιμές διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας για την Ελλάδα σε Kwh/m^2 και σε επίπεδο οριζόντιο. Διακρίνουμε, ότι καμία περιοχή της Ελλάδας δεν υπολείπεται των 1250 Kwh/m^2 , ενώ το μεγαλύτερο μέρος της χώρας διαθέτει από 1400 έως 1800 Kwh/m^2 .



Εικόνα 2: Ηλιακό Δυναμικό της Ελλάδας Πηγή: <http://www.erdgas.gr/iliakixartes.html>

Στην Ελλάδα, τα προγράμματα ανάπτυξης των ΑΠΕ υποστηρίζονται από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), που είναι ερευνητικός φορέας εποπτευόμενος από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) του Υπουργείου Ανάπτυξης, τα Περιφερειακά Ενεργειακά Γραφεία, τη ΔΕΗ, τα Ιδρύματα Τεχνολογίας και Έρευνας, τα Πανεπιστήμια, τα Τεχνολογικά Εκπαιδευτικά Ιδρύματα (ΤΕΙ), την Τοπική Αυτοδιοίκηση κ.α. Επιπλέον, έντονη είναι η δραστηριότητα του ιδιωτικού τομέα. Ειδικά προγράμματα από την ΕΕ, επιδοτούν την έρευνα και στηρίζουν εφαρμογές μεγάλης ισχύος, σε βιομηχανικές μονάδες, ξενοδοχεία κ.α.

Όσον αφορά την Ελληνική νομοθεσία:

- **νόμος (ν. 1559/85):** δόθηκε δυνατότητα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας από ιδιώτες και η δυνατότητα πώλησης της περίσσειας της ηλεκτρικής ενέργειας στη ΔΕΗ.
- **νόμος (ν.2244/94):**, δόθηκε δυνατότητα παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ σε ιδιώτες με μοναδικό σκοπό την πώληση της παραγόμενης ενέργειας στην ΔΕΗ, όρισε επαρκείς τιμές αγοράς της ενέργειας και δεκαετή διάρκεια συμβάσεων, και επιπλέον αναπτυξιακά κίνητρα (Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ενέργειας, Αναπτυξιακός Νόμος, κ.α.) τα οποία περιλάμβαναν επιδοτήσεις των δαπανών εγκατάστασης ΑΠΕ και Συμπαγωγής.

- **νόμος (ν.2773/99):** δόθηκε η δυνατότητα υποβολής αιτήσεων για τη χορήγηση Αδειών Παραγωγής με βάση τον «Κανονισμό Αδειών Παραγωγής και Προμήθειας Ηλεκτρικής Ενέργειας.
- **νόμος (ν. 3468/06):** δόθηκαν ευνοϊκά κίνητρα σε ιδιώτες και σε επιχειρήσεις που σκοπεύουν να επενδύσουν στην παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας (επιδότηση αρχικής εγκατάστασης, χαμηλή τιμή πώλησης, δυνατότητα σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο ενέργειας).
- **νόμος (ν.3734/2009):** τροποποιούνται άρθρα του προηγούμενου νόμου (ρυθμίζονται θέματα αδειοδότησης και τιμολόγησης, δίδεται, η δυνατότητα εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σε κτίρια).

Το υπουργείο περιβάλλοντος αναφέρει πως οι στόχοι για τις ΑΠΕ έως και τα έτη 2014 και 2020 μπορούν να υπερκαλυφθούν , καθώς το πρώτο εξάμηνο του Ιουνίου του 2011 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς τους αυξήθηκε κατά 238 MW.



Εικόνα 3: Πηγή: ΛΕΙΤΟΥΡΓΟΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Α.Ε., Συνοπτικό πληροφοριακό δελτίο <http://www.laie.gr>

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, προωθείται η επέκταση των ΑΠΕ σύμφωνα με τις επιταγές μέτρων και πολιτικών όπως τον στόχο που έχουν βάλει τα ευρωπαϊκά κράτη μέχρι το 2020 (γνωστό ως 20-20-20, που σημαίνει παραγωγή του 20% της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, 20% μείωση των ρύπων και 20% εξοικονόμηση ενέργειας), την Πράσινη Βίβλο, τα συμβούλια του Γκέτεμποργκ(2001) ,και της Βαρκελώνης . Σε παγκόσμιο επίπεδο η προώθηση των ΑΠΕ στοιχίζεται γύρω από πολιτικές ενίσχυσης των ΑΠΕ που προέκυψαν από το πρωτόκολλο του Κ्यοτο (1997) , τη σύνοδο της Στοκχόλμης(1972) ,τη διάσκεψη του Ρίο(1992), τη διάσκεψη Κορυφής στο Γιοχάνεσμπουργκ(2002). Όλα τα παραπάνω αφορούν πολιτικές προώθησης ΑΠΕ ,λόγω της ανάγκης παγκόσμιου περιορισμού και διάσωσης του περιβάλλοντος. Κρίνεται λοιπόν περισσότερο από αναγκαία η χρησιμοποίηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη. Χαρακτηριστικά ο διεθνής οργανισμός ενέργειας εκτιμά ότι η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση θα αυξηθεί κατά 60% έως το 2030 . όσον αφορά την Ελλάδα , προβλεπόταν να αυξησει τις εκπομπές της κατά 39,2% έως το 2010 και κατά 57,6% έως το 2020. Επίσης σε ότι αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, οι προβλεπόμενες αυξήσεις είναι 47,6% και 67,8% για τα έτη 2010 και 2020 αντίστοιχα, σε σχέση με το 1990 που είναι το έτος βάσης.

Κεφάλαιο 2^ο: Φωτοβολταϊκά Συστήματα

2.1 Εισαγωγή

Ο όρος φωτοβολταϊκό (Φ/Β) είναι σύνθετος. Αποτελείται από την ελληνική λέξη φως ενώ το "Volt" προέρχεται από όνομα του Alessandro Volta, 1745-1827, ο οποίος ανακάλυψε τη μονάδα της τάσης Volt. Συνεπώς ο όρος φωτοβολταϊκό, αναφέρεται σε ηλεκτρισμό από το ηλιακό φως.

Τα φωτοβολταϊκά είναι η τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος συνεχούς ρεύματος(DC) η οποία μετρείται σε Watts(W), από ημιαγωγούς όταν φωτίζονται από φωτόνια. Είναι πολύ ευέλικτα συστήματα, που μπορεί να καλύπτουν τόσο μικρές (π.χ. ενέργεια για ένα φορητό υπολογιστή), όσο και μεγάλες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια(ένα ολόκληρο χωριό). Η λειτουργία τους δεν στηρίζεται μόνο στην ηλιακή ακτινοβολία αλλά επίσης στις ιδιότητες των ημιαγωγικών υλικών.

Δομικό στοιχείο των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο (ή κυψελίδες, solar/photovoltaic cell), το οποίο είναι ένα σύστημα δύο υλικών σε επαφή που όταν φωτίζεται εμφανίζει στα άκρα του ηλεκτρική τάση.



Εικόνα 4: Desertec (Πηγή : <http://www.energia.gr/>)

2.2 Ιστορικά στοιχεία

Αρχικά η εγκατάσταση και χρήση ΦΒ συστημάτων παρουσιάστηκε σε περιοχές που η χρήση συμβατικής ενέργειας ήταν αδύνατη ή αντιοικονομική (εφαρμογή σε δορυφόρους, σε απομακρυσμένα συστήματα τηλεπικοινωνιών, σε φάρους, για άντληση νερού κτλ.). Η διερεύνηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου παρόλα αυτά ξεκίνησε έναν αιώνα νωρίτερα, το 1839, από τον Γάλλο επιστήμονα Edmond Becquerel, ο οποίος πειραματιζόμενος με ηλεκτρολυτικό στοιχείο αποτελούμενο από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια σε αγωγίμο υγρό, παρατήρησε ότι η ροή αυξανόταν με την έκθεση στον ήλιο. Αν και οι σημειώσεις του γύρω από το φαινόμενο, είχαν φανεί πολύ ενδιαφέρουσες στην επιστημονική κοινότητα δεν υπήρξε καμία πρακτική εφαρμογή έως το 1883, όταν ο Charles Fritz παρήγαγε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 1-2%. Το 1921 απονέμεται βραβείο Νόμπελ στον μελετητή που επεξηγεί εμπεριστατωμένα τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού φαινομένου, τον Albert Einstein. Το 1918 ο Πολωνός Jan Czochralski ανακαλύπτει μια μέθοδο κατασκευής φωτοβολταϊκού κελιού από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο , το οποίο και κατασκευάζεται το 1940. Παράλληλα παρατηρείται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο στο κάδμιο σελήνιο (1932) το οποίο σήμερα (CdS) αποτελεί πολύ σημαντικό υλικό παραγωγής φωτοβολταϊκών panel.

Το 1954 , στα εργαστήρια Bell, κατασκευάζεται η πρώτη ηλιακή κυψέλη από τους Chapin, Fuller και Pearson, οι οποίοι ανακάλυψαν ότι το πυρίτιο είναι πολύ ευαίσθητο στο φως με αποτέλεσμα την κατασκευή των πρώτων φωτοβολταϊκών στοιχείων με απόδοση έως και 6%. Το 1955 ξεκίνησε η προετοιμασία για παραγωγή ενέργειας , μέσω των ηλιακών κυψελών στους διαστημικούς δορυφόρους. Τρία χρόνια μετά, το 1958 η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσαρτάται στον χώρο των διαστημικών εφαρμογών, όταν τοποθετείται ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα , με απόδοση 9%, στον δορυφόρο Vanguard I .Στις 17 Μαρτίου εκτοξεύεται ο πρώτος δορυφόρος τροφοδοτούμενος από φωτοβολταϊκά, που θα δουλέψει συνεχόμενα για 8 χρόνια. Δύο ακόμη δορυφόροι ο Explorer III & ο Vanguard II εκτοξεύονται από τους Αμερικάνους και ο Sputnik III από τους Σοβιετικούς, ενώ στη Georgia κατασκευάζεται ο πρώτος τροφοδοτούμενος από φωτοβολταϊκά στοιχεία τηλεφωνικός αναμεταδότης.

Το 1963 η μεγαλύτερη ΦΒ εγκατάσταση στον κόσμο γίνεται στην Ιαπωνία από την Sharp, σε έναν φάρο, με εγκατεστημένη ισχύ 242Wp και έχει εξαιρετική απόδοση ακόμα και σε ανεμοθύελλες. Το 1972 οι Γάλλοι εγκαθιστούν άμορφα CdS φωτοβολταϊκά σε ένα σχολείο στην επαρχία Niger. Το 1976 ξεκινούν οι πρώτες εφαρμογές φωτοβολταϊκών για την τροφοδότηση ψυγείων, τηλεπικοινωνιακού & ιατρικού εξοπλισμού, άντλησης νερού και φωτισμού. Έως το 1977 η συνολική παραγωγή φωτοβολταϊκών έχει ξεπεράσει τα 500 kW.

Η πρώτη εγκατάσταση PV που φτάνει στα επίπεδα του 1MW (μεγαβατ) γίνεται στην Καλιφόρνια το 1980 από την ARCO Solar χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα και σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου 2 αξόνων (dual-axis trackers). Το 1983 η παγκόσμια παραγωγή ΦΒ φτάνει τα 22MW και ο συνολικός τζίρος τα 250.000.000\$, ενώ το 1984 κυκλοφορούν τα άμορφα φωτοβολταϊκά. Το 1999 η εταιρία Spectrolab σε συνεργασία με το NREL αναπτύσσουν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 32,3%. Το στοιχείο αυτό είναι συνδυασμός τριών υλικών (στρώσεων) και ειδικό για εφαρμογές σε συγκεντρωτικά συστήματα CPV. Την ίδια χρονιά η απόδοση των Thin Films φτάνει στο 18.8%. Το 2002 συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ σε φωτοβολταϊκά φτάνει τα 2000MW. Γερμανία και Ιαπωνία κυριαρχούν στην κατασκευή ΦΒ πάνελ και πλέον σε όλες τις αναπτυσσόμενες χώρες αρχίζουν, με τον έναν (παραγωγή εξοπλισμού) ή τον άλλον τρόπο (κατασκευή ΦΒ εγκαταστάσεων), να υιοθετούν τις τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών και να τις παγιώνουν στην συνείδηση των επενδυτών αλλά και των καταναλωτών ενέργειας. Η συνολική παραγωγή το 2004 έφτασε τα 1.200 MegaWatt ΦΒ στοιχείων ενώ ο τζίρος της ίδιας χρονιάς άγγιξε τα 6.500.000.000\$.

Σήμερα με οικονομίες μεγάλης κλίμακας έχουν επιτευχθεί μεγάλες αποδόσεις στα κρυσταλλικά κυρίως υλικά και αρκετές χώρες με πρωτοπόρες την Γερμανία και την Ιαπωνία έχουν ήδη επενδύσει τεράστια κονδύλια με σκοπό την ευρύτερη εκμετάλλευση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Ήδη βέβαια οι χώρες αυτές έχουν αρχίσει και απολαμβάνουν τους καρπούς της εξελιγμένης τεχνολογίας τους. Τελικός στόχος είναι έως το 2020 το 20% της συνολικής παραγωγής ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.



Εικόνα 5: Neuhardenberg Solar Park (Πηγή:<http://interestingengineering.com/top-10-solar-power-plants-in-the-world/>)

2.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα ΦΒ συστήματα χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια που αποτελεί μια ανανεώσιμη πηγή, για παραγωγή ηλεκτρισμού. Είναι φανερό ότι σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους έχουν αρκετά θετικά όπως και αρνητικά χαρακτηριστικά, τα οποία στοιχίζονται στους παρακάτω άξονες (οικονομικούς, περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς και τεχνικούς).

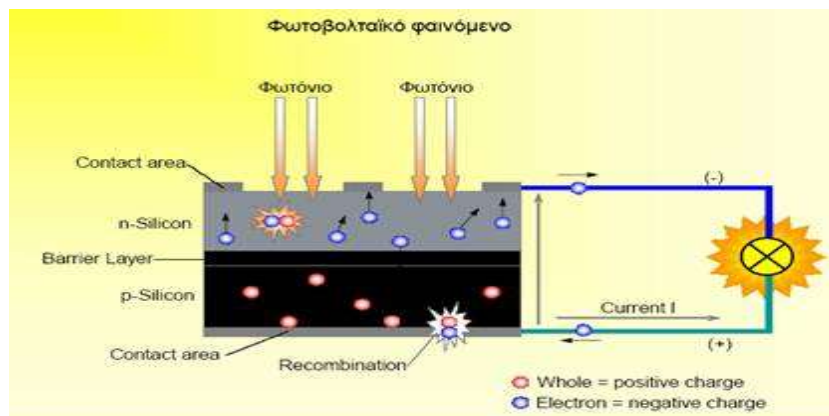
Στα μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων, από τεχνικής και περιβαλλοντικής πλευράς, συγκαταλέγεται η έκλυση ατμοσφαιρικών ρύπων κατά το στάδιο παραγωγής, μεταφοράς, συντήρησης και αποικοδόμησής τους. Στα αρνητικά εντάσσονται και θέματα οπτικής όχλησης και διατάραξης της αισθητικής και του τοπίου. Ένα επιπλέον μειονέκτημα των φωτοβολταϊκών είναι η εξάρτησή τους από καιρικά φαινόμενα, σκίαση από άλλα κτήρια, αλλά και η επίδραση σκόνης και άλλων παραγόντων στη λειτουργία τους. Παράλληλα εντοπίζονται ορισμένα μειονεκτήματα που δεν είναι τεχνικά αλλά σχετίζονται κυρίως με οικονομικά στοιχεία, και συγκεκριμένα με το υψηλό αρχικό κόστος που απαιτείται για την εγκατάστασή τους, το οποίο παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις παραμένει ακόμη δυσπρόσιτο για μεγάλα κομμάτια του πληθυσμού που θα μπορούσαν να επωφεληθούν από τη φωτοβολταϊκή παραγωγή ενέργειας.

Τα παραπάνω αντισταθμίζονται μερικώς από μια πολύ υψηλή αποδοχή από το κοινό, καθώς υπάρχουν πολλοί λόγοι για την επιλογή των φωτοβολταϊκών έναντι των συμβατικών συστημάτων. Αν και κοινό χαρακτηριστικό τους είναι ότι και τα δύο είναι πολύ αξιόπιστα, στερούνται του πλεονεκτήματος της αποθήκευσης. Δεδομένου ότι στην παραγωγή ενέργειας από συμβατικές πηγές εντοπίζονται σημαντικά μειονεκτήματα με κυριότερα το ευρύ φάσμα περιβαλλοντικά επικίνδυνων εκπομπών, τα μέρη που υφίστανται φθορά και το σταθερά αυξανόμενο κόστος καυσίμου, πλέον υπάρχει μικρή αποδοχή από την κοινή γνώμη. Αντίθετα τίποτε από τα παραπάνω δε συναντάται σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, εφόσον στα συστήματα αυτά δεν προκαλούνται ρύποι από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Όσον αφορά το στάδιο λειτουργίας τους, τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μια αξιόπιστη και φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας. Θετικές συνέπειες στο στάδιο λειτουργίας τους, το οποίο και διαρκεί για περισσότερο από 20 χρόνια, είναι η παραγωγή ηλεκτρισμού έλλειψη ατμοσφαιρικών ρύπων, ηχορύπανσης και ηλεκτροδότηση ακόμα και σε περιοχές απομακρυσμένες συμβάλλοντας έτσι στην ανάπτυξή τους. Εκτός από την κάλυψη θέσεων για περαιτέρω έρευνα και βελτίωση των ΦΒ συστημάτων, η απασχόληση και η κατάρτιση εργατικού δυναμικού, αποτελεί ένα θετικό γεγονός για την σημερινή συγκυρία. Επιπροσθέτως, λόγω του ότι τα ΦΒ συστήματα δεν διαθέτουν κινητά μέρη (απαιτούν ελάχιστη συντήρηση), μπορούν να ενσωματωθούν σε νέες ή υπάρχουσες εγκαταστάσεις, έχουν χαμηλό κόστος λειτουργίας (αφού δεν υπάρχει καύσιμο) και υψηλή αξιοπιστία. Επιπλέον η ημερήσια παραγωγή μπορεί να καλύψει την τοπική ζήτηση, και έχουν εξαιρετικό ιστορικό ασφαλείας. Όσον αφορά τις δυνατότητες λειτουργίας τους, ένα θετικό είναι ότι μπορούν να παράγουν ενέργεια ακόμα και σε συνθήκες συννεφιάς, λόγω της διάχυτης ακτινοβολίας που υπάρχει στο περιβάλλον. Είναι αξιοσημείωτο ότι για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται ημιαγώγιμα υλικά, τα οποία υπάρχουν σε αφθονία στο φλοιό της Γης. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας μειώνει την εξάρτησή από το πετρέλαιο και τους κολοσσούς παραγωγής και εκμετάλλευσής του μειώνοντας το ποσό χρημάτων που ρέει προς της χώρες εξαγωγής πετρελαίου. Τα Φ/β συστήματα μπορούν να αποτελέσουν εγχώριες πηγές ενέργειας και να συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας σε επίπεδο εγχώριου κοινωνικού σχηματισμού.

2.4 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Η απευθείας μετατροπή της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια γίνεται μέσω των ηλιακών κυττάρων των οποίων η αρχή λειτουργίας τους είναι το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο, ορίζεται ως η απορρόφηση ενέργειας του φωτός από τα ηλεκτρόνια των ατόμων του φωτοβολταϊκού στοιχείου και την απόδραση των ηλεκτρονίων αυτών από τις κανονικές τους θέσεις. Το ηλεκτρικό πεδίο που προϋπάρχει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο οδηγεί το ρεύμα στο φορτίο. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο πραγματοποιείται σε ένα λεπτό στρώμα κατάλληλου ημιαγωγίμου υλικού, π.χ. πυριτίου, όταν ζεύγη οπών –ηλεκτρονίων δημιουργούνται από την πρόσπτωση ηλιακών φωτονίων, ενώ η ασυνέχεια του δυναμικού του κυττάρου διαχωρίζει τις οπές από τα ηλεκτρόνια και δημιουργεί διαφορά δυναμικού.



Εικόνα 6: Φ/Β φαινόμενο (Πηγή: <http://www.tmth.gr/sciencerelated/59-applications/560-photovoltaika>)

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από 2 ή περισσότερες στοιβάδες ημιαγωγών. Όταν τα φωτόνια της ακτινοβολίας προσπίπτουν σε ένα στοιχείο μπορούν να ανακλαστούν, να απορροφηθούν είτε να διαπεράσουν το στοιχείο. Κάθε φωτόνιο με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Συγκεκριμένα, τα φωτόνια, που δέχεται το στοιχείο στην άνω όψη, τύπου n, παράγουν, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσια από ζεύγη φορέων (ελευθέρων e και οπές). Ένα μέρος από τους φορείς διαχωρίζεται με την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα εμπρός (ελεύθερα e) ή προς τα πίσω (οπές h+). Τα ελεύθερα e εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της διόδου. Όπως αναφέρθηκε, μόνο τα απορροφημένα φωτόνια δημιουργούν ιοντικά ζεύγη άρα και ηλεκτρισμό, που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός. Αυτά τα φορτία κινούνται μέσα στο πλέγμα των ημιαγωγών και όταν περάσουν από τον ένα ημιαγωγό στον άλλον δημιουργούν ένα δυναμικό. Η ποσότητα της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από ένα ΦΒ στοιχείο εξαρτάται από την απόδοση του στοιχείου (είδος υλικού), την επιφάνειά του και την ηλιακή ακτινοβολία (ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και μήκος κύματος της).

Ως κύριος ημιαγωγός χρησιμοποιείται το πυρίτιο (Si), το δεύτερο αφθονότερο στοιχείο στον φλοιό της γης, και προσμίξεις του με φώσφορο (N-type) και βόριο (P-type). Όταν το πυρίτιο συνδυάζεται με ένα ή περισσότερα υλικά, παρουσιάζει ηλεκτρικές ιδιότητες, υπό το φως του ηλίου. Τα ηλεκτρόνια διεγείρονται από το φως και κινούνται μέσω του πυριτίου. Αυτό είναι γνωστό ως φωτοβολταϊκή επίδραση και οδηγεί στην άμεση παραγωγή συνεχούς ηλεκτρικής ενέργειας (DC). Ένα τυπικό στοιχείο πυριτίου 100 cm² δημιουργεί περίπου 1,5 W ισχύ σε δυναμικό ανοικτού κυκλώματος περίπου 0,5 V DC και 3 A σε καλοκαιρινή ακτινοβολία (1000 Wm⁻²). Η μέγιστη απόδοση που έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα είναι 25%.

2.5 Συστοιχίες Κυττάρων

2.5.1 Φ/Β Στοιχείο (Κύτταρο)- PV CELL

Φ/Β κύτταρο είναι η ηλεκτρονική διάταξη που παράγει ηλεκτρική ενέργεια, όταν δέχεται ακτινοβολία. Λόγω της μικρής ατομικής ισχύος των ηλιακών κυττάρων (δεν ξεπερνά τα 0,4W), κρίνεται απαραίτητη η σύνδεση πολλών ηλιακών κυττάρων για να επιτευχθεί η ζητούμενη ισχύς εξόδου. Τα Φ/Β κύτταρα υπάρχουν σε πολλά μεγέθη. Συνήθως ένα κύτταρο 10cm x 10cm παράγει μισό βολτ. Τα κύτταρα συνδέονται μαζί για να παράγουν υψηλότερες τάσεις και παρεχόμενη ισχύ. Παραδείγματος χάριν μια ενότητα 12-βολτ, θα μπορούσε να έχει 30 έως 40 κύτταρα PV μια ενότητα που παράγει 50 Watt έχει μέγεθος 40cm x 100cm. Όσον αφορά την απόδοσή τους, τα Φ/Β κύτταρα μετατρέπουν περίπου το 12-15% του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, καθιστώντας τα ως μη αποδοτικά. (τα εργαστηριακά μπορούν να φτάσουν έως και 30%). Η τάση εξόδου των Φ/Β κυττάρων δεν υπερβαίνει τα 0,7 V, ενώ το ρεύμα εξόδου δεν υπερβαίνει το 1 A. Συνεπώς, εξ αιτίας της μικρής ισχύος του, κρίνεται απαραίτητη η σύνδεση πολλών ηλιακών κυττάρων σε σειρά ή παράλληλα ή σε συνδυασμό των δύο συνδεσμολογιών, κατασκευάζοντας έτσι ένα Φ/Β πλαίσιο.



Εικόνα 7: Φ/Β στοιχείο (Πηγή: Ένας πρακτικός τεχνικός οδηγός ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ www.helapco.gr)

2.5.2 Φ/Β Πλαίσιο

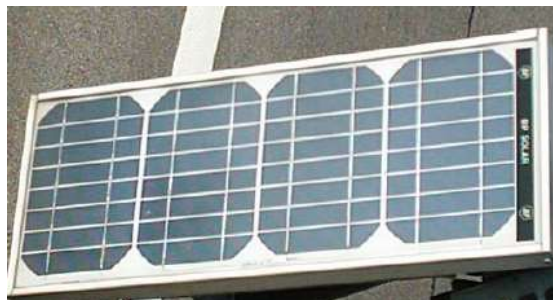
Ένας τρόπος για να αυξηθεί η τάση και η ισχύς από ηλιακά στοιχεία είναι να τοποθετηθούν πολλά μαζί (ανά 10 έως 50 περίπου) με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Τα στοιχεία στην περίπτωση αυτή συνδέονται στη σειρά, συγκροτώντας μια διάταξη που αποκαλείται ηλεκτρικό πλαίσιο. Αποτελεί τη βασική δομική Φ/Β μονάδα, που χρησιμεύει ως συλλέκτης της ακτινοβολίας. Το πλήθος των στοιχείων που απαρτίζουν κάθε πλαίσιο, εξαρτάται από την επιθυμητή τάση που πρέπει να παραχθεί, και του ρεύματος απορρόφησης ανά ημέρα / βδομάδα. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αποτελείται από τις ηλεκτρονικές συσκευές που παίρνουν την τάση που δίνουν τα πλαίσια, και την μεταβιβάζουν αναλόγως στα ac/dc φορτία ή στις μπαταρίες για φόρτιση. Τα πλαίσια κατασκευάζονται σε μορφή διαδοχικών στρώσεων από σειρές στοιχείων, τα οποία συγκολλούνται σε ένα ανθεκτικό φύλλο μετάλλου (αλουμίνιο συνήθως) ή ενισχυμένο πλαστικό, που αποτελεί το πίσω μέρος του πλαισίου. Το μπροστινό μέρος καλύπτεται από προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού. Το εμπρός και πίσω μέρος συγκρατούνται στεγανά και μόνιμα μεταξύ τους, ενώ περιμετρικά συσφίγγονται με ένα μεταλλικό περίβλημα. Το κόστος κατασκευής σε σχέση με το ηλιακό στοιχείο είναι μεγαλύτερο. Κάθε πλαίσιο παρουσιάζει τα δικά του χαρακτηριστικά, που εξαρτώνται από αντίστοιχα μεγέθη των ηλιακών στοιχείων που το αποτελούν. Παράλληλα εξαρτώνται και από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου υλικού. Κάθε τύπος υλικού, αξιολογείται με διαφορετική απόδοση.



Εικόνα 8: Φ/Β πλαίσιο (Πηγή: Ένας πρακτικός τεχνικός οδηγός ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ www.helapco.gr)

2.5.3 Φ/Β Πανέλα (PANELS)

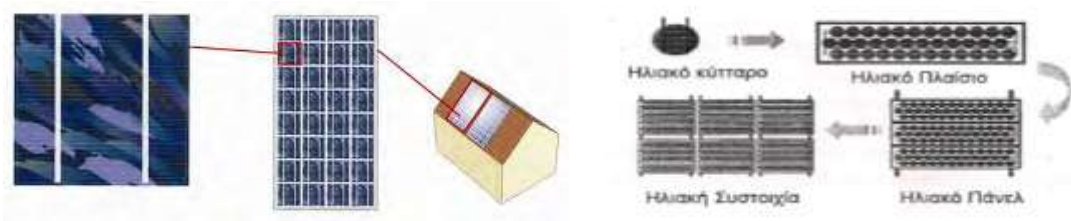
Τα Φ/Β πανέλα αποτελούνται από πολλά χωριστά πλαίσια, συνδεδεμένα το ένα δίπλα στο άλλο, που έχουν προκατασκευαστεί και συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή και διαθέτουν κοινή ηλεκτρική σύνδεση. Συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει συνδυασμός εν σειρά και παράλληλης σύνδεσης, γεγονός που αυξάνει την αξιοπιστία του πάνελου (αφού σε περίπτωση βλάβης, η παραγόμενη ισχύς δεν μηδενίζεται, όπως θα συνέβαινε εάν υπήρχε μόνο εν σειρά σύνδεση). Δύο κύρια προβλήματα εντοπίζονται κατά τη σύνδεση των Φ/Β πανέλων. Αφ' ενός, συναντάται το πρόβλημα του σφάλματος (**mismatch**), σύμφωνα με το οποίο η σύνδεση των Φ/Β στοιχείων δεν αποδίδει ισχύ ίση με το άθροισμα ισχύος των στοιχείων, λόγω του ότι το ρεύμα που διαρρέει την κατασκευή δεν μπορεί να υπερβεί σε ένταση, την ένταση του πιο αδύνατου ηλιακού στοιχείου. Αφ' ετέρου, προκύπτει το πρόβλημα του ζεστού σημείου" (**hot spot**). Σε αυτή την περίπτωση, η απώλεια ισχύος που παρατηρείται στο πρόβλημα σφάλματος, διοχετεύεται από τα πιο ισχυρά στα πιο αδύναμα στοιχεία, με αποτέλεσμα, το ράγισμα των Φ/Β στοιχείων. Αντιμετωπίζεται προστατεύοντας τα πιο αδύναμα Φ/Β στοιχεία, συνδέοντας διόδους παράλληλα με ομάδα αδύναμων στοιχείων (συνήθως ανά 15). Όσον αφορά το πρόβλημα του σφάλματος, αντιμετωπίζεται είτε με τον ίδιο τρόπο, είτε με την ταξινόμηση των Φ/Β στοιχείων σε ομάδες με όμοιο κύκλωμα βραχυκύκλωσης και παράλληλης σύνδεσης των ομάδων αυτών.



Εικόνα 9: Φ/Β πάνελ (Πηγή: Ένας πρακτικός τεχνικός οδηγός ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ www.helapco.gr)

2.5.4 Φ/Β Ηλιακή Συστοιχία (PV ARRAY)

Σε αρκετές εφαρμογές, οι απαιτήσεις είναι τέτοιες ώστε να χρειαστεί η χρησιμοποίηση μιας Φ/Β συστοιχίας, δηλαδή μιας ομάδας περισσότερων συνενωμένων Φ/Β πλαισίων ή πανέλων και με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση. Συνδέονται πάνω σε μια βάση στήριξης και σχηματίζουν μια μονάδα παροχής ισχύος, υπό συνεχή τάση. Σε μια τέτοια περίπτωση, η σύνδεση των επιμέρους πλαισίων ή πανέλων, εν σειρά ή παράλληλα, γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή τάση στην έξοδο της συστοιχίας.



Εικόνα 10: Φ/Β συστοιχία (Πηγή: Ένας πρακτικός τεχνικός οδηγός ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ www.helapco.gr)

2.5.5 Φ/Β Πάρκα

Η συνένωση πολλών Φ/Β συστοιχιών, ούτως ώστε να παραχθεί η απαιτούμενη ισχύς (π.χ. πάνω από 20 kWp) ορίζεται ως υποσυγκρότημα συστοιχιών. Το σύνολο των υποσυγκροτημάτων αποτελεί ένα συγκρότημα συστοιχιών ή Φ/Β πάρκο. Σε κάθε τέτοια εγκατάσταση τα Φ/Β πλαίσια, πάνελα ή συστοιχίες, τοποθετούνται σπονδυλωτά, ούτως ώστε να μην σκιάζονται αισθητά μεταξύ τους, αλλά ούτε και από εξωτερικά εμπόδια (δένδρα, βουνά, κτίρια, κ.τ.λ.) Ένα Φ/Β πάρκο διαιρείται σε επιμέρους, παράλληλα συνδεδεμένες μονάδες. Μέσω των μετατροπών και άλλων κατάλληλων διατάξεων, το ρεύμα διαρρέει το σύστημα ή οδεύει στους συσσωρευτές. Όλες οι λειτουργίες από το ηλιακό πάρκο ελέγχονται από μια μονάδα ελέγχου.



Εικόνα 11: Δεξιά Φ/Β πάρκο στην Κρήτη. Αριστερά Φ/Β πάρκο στα Βουλγαρία.

2.5.6 Φ/Β Γεννήτρια

Η φ/β γεννήτρια αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό συστατικό κάθε Φ/Β εφαρμογής. Καλείται έτσι διότι είναι η μονάδα παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος, μιας Φ/Β εγκατάστασης, μέσω των ηλιακών στοιχείων που περιλαμβάνει. Μπορεί να αποτελείται από ένα μόνο πλαίσιο ή πάνελο, είτε από ομάδες αυτών, δηλαδή από συστοιχίες.

2.6 Τεχνολογίες Φ/Β Κυττάρων

Ένας αρχικός διαχωρισμός μπορεί να γίνει ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιούν για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και πιο συγκεκριμένα με το πάχος του στρώματος απορρόφησης. Έτσι προκύπτει η εξής κατηγοριοποίηση:

- Φ/Β συστήματα Πρώτης γενιάς-Πλαίσια μεγάλου Πάχους(wafer panels)
- Φ/Β συστήματα Δεύτερης γενιάς- Πλαίσια λεπτής επίστρωσης (thin-film panels)
- Φ/Β συστήματα Τρίτης γενιάς (βρίσκονται σε πολύ αρχικό στάδιο ανάπτυξης, επιθυμείται περεταίρω βελτίωση απόδοσης με μείωση των απωλειών).

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν κατά βάση κρυσταλλικά υλικά, τα οποία μπορούν, δευτερευόντως να διακριθούν σε πολυκρυσταλλικά και μονοκρυσταλλικά. Από την άλλη, κατασκευάζονται πλαίσια thin-film τόσο με κρυσταλλική δομή όσο και πλαίσια από άμορφο πυρίτιο (a-Si) Παράλληλα θα αναφερθούν και άλλες τεχνολογίες, οι οποίες βρίσκονται ακόμα σε στάδιο έρευνας χωρίς εμπορικές εφαρμογές.

2.6.1 Τύποι Φ/Β συστημάτων Πυριτίου Μεγάλου Πάχους

- **Φ/Β Στοιχεία Μονοκρυσταλλικού πυριτίου**

Τα κελιά μονοκρυσταλλικού¹ πυριτίου κατασκευάζονται από κυψέλες που έχουν κοπεί από έναν μεγάλο κυλινδρικό κρυσταλλικό δίσκο πυριτίου (wafer). Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών Φ/Β είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (Float Zone). Και οι δύο μέθοδοι βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Τα στοιχεία αυτά, χαρακτηρίζονται επίσης, από υψηλή απόδοση, της τάξης του 15-18% αλλά και υψηλό κόστος, ενώ το πάχος τους φτάνει τα 0,3 χιλιοστά. Τα ηλιακά κελιά κατασκευάζονται σε σχήμα κύκλου, ή σχεδόν κύκλου καθώς και τετράγωνα. Τα κυκλικά ηλιακά κελιά είναι φθηνότερα από τα υπόλοιπα, επειδή είναι λιγότερα τα υπολείμματα κατά την κατασκευή τους. Ωστόσο δε χρησιμοποιούνται συχνά στην κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ επειδή δεν χρησιμοποιείται αποδοτικά μία επιφάνεια, λόγω των κενών μεταξύ τους, όταν τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο. Αποτελούν όμως μία καλή προοπτική για ενσωμάτωση σε κτίρια όταν απαιτείται μερική διαπερατότητα στο φως. Το χρώμα τους είναι συνήθως βαθύ μπλε έως μαύρο όταν διαθέτουν αντί-ανακλαστική (AR) επίστρωση ή γκρι (χωρίς αντί- ανακλαστική επίστρωση).



Εικόνα 12: Κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Πηγή: Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φ/Β Έργων, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας)

- **Φ/Β στοιχεία Πολυκρυσταλλικού πυριτίου**

Το πολυκρυσταλλικό² πυρίτιο αποτελείται από περιοχές μονοκρυσταλλικού πυριτίου, αλλά δεν έχει την ομοιόμορφη κρυσταλλική δομή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα πολυκρυσταλλικά Φ/Β κατασκευάζονται από ράβδους λιωμένου και επανακρυσταλλομένου πυριτίου, που κόβονται σε λεπτά τμήματα από τα οποία κατασκευάζεται η κυψέλη του Φ/Β. Η διαδικασία κατασκευής τους είναι απλούστερη από εκείνη των μονοκρυσταλλικών Φ/Β με αποτέλεσμα τα κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου να έχουν φθηνότερο κόστος παράγωγης από αυτά του μονοκρυσταλλικού πυριτίου αλλά και να είναι λιγότερο αποδοτικά (της τάξεως του 12%). Αξίζει να σημειωθεί ότι σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως 15% για τα Φ/Β πλαίσια. Η απόδοσή τους εξαρτάται από την έκταση των μονοκρυσταλλικών περιοχών, και αυξάνεται όσο αυξάνεται η έκτασή τους. Το σχήμα τους είναι συνήθως τετράγωνο και το χρώμα τους είναι συνήθως μπλε (με αντί-ανακλαστική επίστρωση) ή γκρι-ασημί (χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση). Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου (χύτευση) και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.

¹ Μονοκρυσταλλικό υλικό, θεωρείται το στερεό αντικείμενο, το οποίο απαντάται στη φύση (ή σχηματίζεται στο εργαστήριο), με ομοιόμορφη χημική σύσταση, και διαμορφώνεται από επίπεδες συμμετρικές χημικές έδρες. Η συμμετρία αυτή, καθορίζει συγκεκριμένες και επακριβώς προσδιορισμένες γωνίες. Η δημιουργία του κρυστάλλου μιας χημικής ουσίας οφείλεται στη μετάβαση, υπό κατάλληλες συνθήκες, από αέρια ή υγρή κατάσταση σε στερεά.

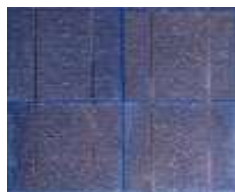
² Στα πολυκρυσταλλικά κελιά δεν υπάρχει απαίτηση για τέλεια ποιότητα κρυστάλλου και έτσι το πλέγμα τους αποτελείται από κόκκους με ίδια κρυσταλλική δομή αλλά με πολλούς προσανατολισμούς.



Εικόνα 13: Κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Πηγή: Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φ/Β Έργων, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας)

- **Φ/Β στοιχεία ταινίας πυριτίου(Ribbon-Si)**

Αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα πυριτίου που έχει εναποτεθεί ομοιόμορφα σε κατάλληλο υπόβαθρο (μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μεγάλη γκάμα υλικών από δύσκαμπτα μέχρι ελαστικά). Προσφέρει έως και 50% μείωση στη χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών Φ/Β κυψελών πυριτίου. Η απόδοση για τα Φ/Β στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί μεγαλύτερες απόδοσης.



Εικόνα 14: Ταινία Πυριτίου (Πηγή: http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php)

2.6.2 Τεχνολογίες λεπτού υμενίου (thin-film)³

Οι κυριότερες τεχνολογίες παραγωγής πλαισίων thin-film είναι οι εξής:

- **Κελιά άμορφου πυριτίου (amorphous-Si)⁴**

Αποτελούν την πιο συνηθισμένη μορφή και χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρονικά προϊόντα ευρείας κατανάλωσης (π.χ. υπολογιστές τσέπης). Ως υλικό αν και εμφανίζει μεγάλη αταξία στη δομή του, βρίσκει εφαρμογή στη Φ/Β τεχνολογία με τη μορφή κράματος σε υδρογόνο, βελτιώνοντας τις ηλεκτρικές του ιδιότητες. Έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις προηγούμενες κατηγορίες. Το άμορφο πυρίτιο, η μη-κρυσταλλική μορφή του πυριτίου, μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα αγωγίμο υπόστρωμα σε στρώμα πάχους μερικών μικρομέτρων δημιουργώντας ένα κελί τεχνολογίας λεπτού υμενίου. Η διαδικασία τοποθέτησης επιτρέπει στο άμορφο πυρίτιο να έχει λιγότερο από 1% του πάχους ενός κρυσταλλικού κελιού. Επιπλέον, τα κελιά άμορφου πυριτίου δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής εύκαμπτων φωτοβολταϊκών πάνελ. Το κυριότερο πλεονέκτημα είναι ότι έχει υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η κατασκευαστική διαδικασία απαιτεί χαμηλότερες θερμοκρασίες και επομένως λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Έτσι το συνολικό κόστος είναι χαμηλότερο ανά μονάδα επιφάνειας, συγκρινόμενο με τα στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου. Τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα (για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά Φ/Β στοιχεία) ο χαμηλός βαθμός απόδοσης (κυμαίνεται από 6-9%) για στοιχεία του εμπορίου και η βαθμιαία μείωση του βαθμού απόδοσης (μέσα σε μερικούς μήνες μπορεί να μειωθεί από 10 έως και 15%). Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά ενώ το πάχος του υποστρώματος μπορεί να είναι από 1-3 χιλιοστά.

³ Χαρακτηρίζονται από το έντονα σκούρο (σχεδόν μαύρο) χρώμα. Η γενική μέθοδος παραγωγής τους, έγκειται στην ύπαρξη ενός υποστρώματος και την εναπόθεση σε αυτό, των διάφορων υλικών που αποτελούν το ενεργό κομμάτι της κατασκευής (a-Si, CdTe, CIGS). Τα υλικά αυτά εναποτίθενται στο υπόστρωμα σε μορφή ατμών, μέσα από μια καλά σχεδιασμένη και αυτοματοποιημένη διεργασία.

⁴ Στα άμορφα υλικά, τα άτομα συναθροίζονται με ένα τελείως τυχαίο τρόπο. Η άμορφη κατάσταση προκύπτει όταν το στερεό σχηματίζεται υπό συνθήκες, στις οποίες η ευκινησία των ατόμων δεν επαρκεί ώστε αυτά να διευθετηθούν σε κανονική, περιοδική δομή, δηλαδή σε κρυσταλλικό πλέγμα.



Εικόνα 15: Κελί άμορφου πυριτίου (Πηγή: http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php)

- **Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός (CuInSe₂ ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)**

Είναι ένα ημιαγώγιμο υλικό (τύπου-n ή τύπου-p) με τον υψηλότερο συντελεστή απορρόφησης. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εξαρτώνται από το λόγο χαλκού /ινδίου. Η απόδοσή του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (εργαστηριακά 18,8 %). Πλεονεκτούν σε σχέση με τα στοιχεία άμορφου πυριτίου, καθώς δεν εμφανίζουν βαθμιαία πτώση της απόδοσης. Με την πρόσμιξη γαλλίου η απόδοσή του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο (CIGS). Μειονεκτήματα αποτελούν, η περιορισμένη ποσότητα ινδίου στη φύση, η πολυπλοκότητα του CIS (δυσκολεύει την κατασκευή του) και η επικινδυνότητα κατά τη διάρκεια της κατασκευής του (περιλαμβάνει το σεληνιούχο υδρογόνο, ένα εξαιρετικά τοξικό αέριο).



Εικόνα 16: Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CIS, CIGS) (Πηγή: http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php)

- **Κελιά καδμίου-τελλουρίου (CdTe)**

Έχει ενεργειακό χάσμα γύρω στο 1 eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα , (δυνατότητα απορρόφησης του 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας). Χρησιμοποιεί περίπου το 1% του ημιαγώγιμου υλικού σε σχέση με ένα κρυσταλλικό κελί. Οι σύγχρονες τεχνικές προσφέρουν αποδόσεις 6-8%, ενώ εργαστηριακά 16%. Η διαδικασία πλεγματικής εκτύπωσης προσφέρει μία τεχνολογία με χαμηλό κόστος παραγωγής , αλλά και μια εντελώς χαμηλού ρυθμού παραγωγή (η θερμοκρασιακή επεξεργασία της μελάνης εκτύπωσης μετά την απόθεση , απαιτεί σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, περίπου 500°C για περιόδους μιας ώρας). Μειονέκτημα τους επίσης, αποτελεί το γεγονός της χρήσης του σπάνιου μετάλλου τελλουρίου. Επιπλέον, η χρήση του καδμίου επιβάλλει την αναγκαστική ανακύκλωση τους μετά το πέρας της ζωής τους και σύμφωνα με έρευνες το κάδμιο είναι καρκινογόνο, με αποτέλεσμα να προβληματίζει η πιθανότητα εκτεταμένης χρήσης του. Σημαντικότερη χρήση του CdTe είναι η ενθυλάκωσή του στο γυαλί, ως δομικό υλικό, κατάλληλο για ενσωμάτωση σε κτήρια.



Εικόνα 17: Κελί Καδμίου-Τελλουρίου (Πηγή: http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php)

- **Κελιά χαλκού-ινδίου / Γαλλίου – Δισεληνιούχου**

Αποτελούν συνδυασμό χαλκού-ινδίου- δισεληνιούχου και χαλκού-γαλλίου-δισεληνιούχου (κελιά CIGS). Τα κελιά αυτά έχουν τις υψηλότερες αποδόσεις για κελιά λεπτού υμενίου , της τάξης του 19,9%.



Εικόνα 18: Κελί CIGS (Πηγή: http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php)

- **Κελιά Γαλλίου-Αρσενιούχου (GaAs)**

Το γάλλιο είναι σπάνιο παραπροϊόν της ρευστοποίησης μετάλλων (π.χ. αλουμίνιο, ψευδάργυρος) ενώ το αρσένικο είναι δηλητηριώδες. Το Αρσενιούχο γάλλιο έχει ενεργειακό χάσμα 1,43eV (τιμή που είναι στη βέλτιστη περιοχή για τη Φ/Β μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας με θεωρητική απόδοση περίπου 25-30%). Η απόδοσή του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί (29%). Επίσης το GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικό στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν τη χρήση τους σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators) και συναντάται σε διαστημικές εφαρμογές λόγω της υψηλής θερμικής αδράνειας του και του υψηλού βαθμού απόδοσής (η απόδοση GaAs πέφτει στο μισό, σε σύγκριση με την απόδοσή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος , όταν θερμανθούν στους 200°C, ενώ η αντίστοιχη μείωση στα στοιχεία πυριτίου παρατηρείται από 120°C). Το μεγαλύτερο μειονέκτημα είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος, περίπου πενταπλάσιο από αυτό του κρυσταλλικού πυριτίου.



Εικόνα 19: Κελί Γαλλίου-Αρσενιούχου (Πηγή: http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php)

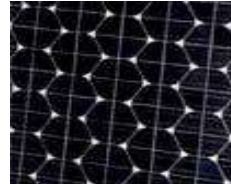
Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών			
ΤΥΠΟΣ	'Λεπτού υμενίου' ή 'Thin Film'	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά
Εμφάνιση			
Απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας	a-Si: 4,5-6,5% μ-Si: 8-9% CIS-CIGS: 6-12% CdTe: 6-11%	11-16%	11-19%
Επιφάνεια ανά kWp	9-25 m ²	7-9 m ²	5,5-9 m ²

Εικόνα 20: Βασικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών των Φ/Β κελιών (Πηγή: Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φ/Β Έργων, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας)

2.6.3 Άλλες τεχνολογίες

Η τεχνολογία των Φ/Β εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια ανά τον κόσμο παρουσιάζουν νέες πατέντες. Κάποιες από τις τεχνολογίες που φαίνεται να ξεχωρίζουν είναι οι εξής:

- Κελιά πολλαπλής συνένωσης
- Υβριδικά κελιά
- Νανοκρυσταλλικά Φ/Β στοιχεία πυριτίου
- Οργανικά /πολυμερή στοιχεία



Εικόνα 21: Υβριδικό φωτοβολταϊκό (HIT) (Πηγή: http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php)

2.7 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Απόδοση των Φ/Β Συστημάτων

Οι παρακάτω παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την τιμή του ποσοστού απόδοσης:

2.7.1 Παράγοντες περιβάλλοντος

- **Θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών μονάδων**

Η ισχύς και η αποδοτικότητα μίας ηλιακής κυψέλης εξαρτάται μεταξύ άλλων και από τη θερμοκρασία της φωτοβολταϊκής μονάδας. Τα Φ/Β συστήματα λειτουργούν ιδανικά συνήθως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μια φωτοβολταϊκή μονάδα είναι ιδιαίτερα αποδοτική σε χαμηλές θερμοκρασίες. Εάν κατά τη διάρκεια κακοκαιρίας το σύνολο της ηλιακής ακτινοβολίας προσπέσει πάνω στην κρύα φωτοβολταϊκή μονάδα, τότε η μονάδα αυτή θα δουλέψει με μεγάλη αποδοτικότητα. Το γεγονός αυτό μπορεί να παρουσιάσει για σύντομο διάστημα μία υψηλή τιμή ποσοστού απόδοσης. Ωστόσο, μετά από μία συγκεκριμένη ώρα η φωτοβολταϊκή μονάδα ζεσταίνεται και η αποδοτικότητα πέφτει ξανά. Τις περισσότερες φορές η θερμοκρασία του Φ/Β συστήματος υπό πραγματικές συνθήκες, διαφέρει σημαντικά, κυρίως κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών. Οι υψηλές θερμοκρασίες της κυψέλης, έχουν αρνητική επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αύξηση της θερμοκρασίας, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της διαφοράς δυναμικού της ηλιακής κυψέλης, με αποτέλεσμα, όταν ένα φορτίο συνδεθεί στα άκρα του, η διαφορά δυναμικού να είναι αισθητά μειωμένη. Σε περίπτωση που τα Φ/Β συστήματα λειτουργούν σε θερμοκρασίες πάνω από την ενδεικτική τιμή, τότε η δυναμική παραγωγική ενέργειά τους μπορεί να μειωθεί περισσότερο από 14%.

- **Πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας και ισχύς απώλειας**

Η ενέργεια που παράγεται από ένα Φ/Β σύστημα σε ετήσια βάση είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, και ως εκ τούτου εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης του συστήματος. Τις πρωινές και βραδινές ώρες και ιδίως το χειμώνα, ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά, η τιμή της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας πλησιάζει την τιμή για την ισχύ απώλειας πολύ περισσότερο σε σχέση με άλλες μέρες και περιόδους του έτους. Για το λόγο αυτό η τιμή του ποσοστού απόδοσης τις εν λόγω χρονικές στιγμές υπολογίζεται μικρότερη από ότι συνήθως. Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός συλλέκτη είναι με τη σειρά της άμεσα εξαρτώμενη από τον προσανατολισμό του πλαισίου ως προς τον ήλιο. Για μεγαλύτερα λαμβανόμενα ποσά της ηλιακής ενέργειας, τα πλαίσια πρέπει να προσανατολίζονται κατάλληλα και να είναι τοποθετημένα στη βέλτιστη γωνία κλίσης εφόσον δεν χρησιμοποιούνται στρεφόμενες βάσεις ενός ή δύο αξόνων. Η αύξηση της

ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και συνεπώς, μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ.

- **Σκίαση ή ακαθαρσίες στη συσκευή μέτρησης ή στις Φ/Β μονάδες**

Υπάρχει περίπτωση η συσκευή μέτρησης της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης να σκιάζεται από φυτά ή κτίρια, προκαλώντας σύντομη ή συνεχή σκίαση της συσκευής μέτρησης ή των Φ/Β μονάδων. Όσον αφορά τη συσκευή μέτρησης, ιδιαίτερα σε περιόδους όπου ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά, ακόμα και τμήματα της ίδιας της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης μπορούν να σκιάσουν τη συσκευή μέτρησης. Η μερική ή πλήρης σκίαση της συσκευής μέτρησης ενδέχεται να οδηγήσει σε τιμές ποσοστού απόδοσης και πάνω από το 100%. Επιπλέον, περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως χιόνι, σκόνη ή γύρη ενδέχεται να επηρεάσουν αφενός τη συσκευή μέτρησης της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (ποσοστό απόδοσης πάνω από 100%), αφετέρου να προκαλέσουν σκίαση των φωτοβολταϊκών μονάδων. Η σκίαση αυτή έχει ως αποτέλεσμα οι φωτοβολταϊκές μονάδες να μπορούν να απορροφήσουν λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα, η αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών μονάδων να μειώνεται όπως και η τιμή ποσοστού απόδοσης της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Τέλος, η ηλεκτροπαραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να μειωθεί από ρύπανση της επιφάνειάς τους, κυρίως σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλούνται ισχυρά ακαθαρσίες στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, χωρίς να μπορεί η απομακρυνθούν με τη βροχή. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνεται περιοδικός καθαρισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απορρυπαντικό. Σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90° (κάθετοι) για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού, ή τουλάχιστον 45° για να μην συγκρατείται η σκόνη. Όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια βρίσκεται σε μία περιοχή που εκτιμάμε ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

2.7.2 Άλλοι παράγοντες

- **Χρονικό διάστημα καταγραφής**

Όταν το χρονικό διάστημα καταγραφής είναι μικρότερο από 1 μήνα, υπάρχουν ελλιπή δεδομένα μέτρησης για τον υπολογισμό του ποσοστού απόδοσης. Η χαμηλή θέση του ήλιου, οι χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η σκίαση επηρεάζουν σε αυτήν την περίπτωση πολύ περισσότερο το αποτέλεσμα του υπολογισμού, επειδή οι τιμές αυτές δεν έχουν κατά πάσα πιθανότητα καταγραφεί πλήρως.

- **Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου**

Η ταχύτητα του ανέμου, μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της θερμοκρασίας του στοιχείου καθότι μεγάλες ταχύτητες, έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Όταν οι άνεμοι είναι βόρειοι είναι συνήθως κρύοι και τα φωτοβολταϊκά λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές που θα λειτουργούσαν εάν υπήρχε άπνοια, με αποτέλεσμα να αλλάζουν τα ίδια ποσοστά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, σε αντίθεση με ότι συμβαίνει για θερμούς ανέμους.

- **Γήρανση**

Λόγω της φθοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων (και των υπολοίπων μερών ενός φωτοβολταϊκού συστήματος), αναμένεται ότι με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται

μία μικρή βαθμιαία πτώση στην ποσότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος, που συνήθως υπολογίζεται από 1% ως 2% για κάθε έτος.

- **Απώλειες του φωτοβολταϊκού συστήματος**

Κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, πρέπει να συνυπολογιστούν και ηλεκτρικές απώλειες στους αγωγούς που συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στις συστοιχίες, καθώς και τις συνδέσεις τους με άλλα μέρη του συστήματος, όπως διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου, συσσωρευτές, μετατροπείς κλπ. Επομένως, κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας των φωτοβολταϊκών ενός συστήματος, πρέπει να γίνεται πρόβλεψη, ανάλογα με την περίπτωση και για την κάλυψη όλων αυτών των απωλειών, που μπορεί να είναι της τάξης του 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή και περισσότερο. Όσον αφορά τις απώλειες αγωγού, κατά τη μεταφορά της ενέργειας από τον μετατροπέα στον μετρητή τροφοδοσίας του φορέα εκμετάλλευσης δικτύου παρατηρούνται απώλειες, εξαιτίας του είδους και του υλικού του χρησιμοποιούμενου καλωδίου, και η τιμή του ποσοστού απόδοσης μπορεί να μειωθεί.

- **Οπτικές απώλειες**

Ο όρος οπτική απώλεια αναφέρεται στη διαφοροποίηση της ανακλαστικότητας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (υαλοπίνακας, αντανάκλαστικό επίστρωμα, υλικό φωτοβολταϊκών κυττάρων) σε σχέση με την αντίστοιχη ανακλαστικότητα σε Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς (STC). Η ανακλαστικότητα του οπτικού συστήματος όψεως του φωτοβολταϊκού πλαισίου, σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή σε Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς, αυξάνει καθώς αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων στην επιφάνειά του (ιδιαίτερα σε γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60°). Επίσης, οπτικές απώλειες παρατηρούνται με τη διαφοροποίηση του φάσματος της ακτινοβολίας (για φωτοβολταϊκά στενής φασματικής περιοχής οι ετήσιες απώλειες είναι σημαντικές) και λόγω διαφοροποίησης της πόλωσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας (η μέση ετήσια επίδραση του παράγοντα αυτού προσδιορίζεται γύρω στο 2%). Τέλος, οπτικές απώλειες παρατηρούνται λόγω χαμηλών τιμών της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του ηλιακού κυττάρου μειώνεται στις χαμηλές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, ιδιαίτερα κάτω από την τιμή των 200 W/m^2 . Συμπερασματικά, οι οπτικές απώλειες, αποδεικνύονται μικρής σημασίας για εμπορικά πλαίσια καλής ποιότητας. (σε μερικές περιπτώσεις σε 3%, κατά μέσο όρο στο έτος).

- **Βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών μονάδων, και του μετατροπέα.**

Ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών μονάδων επιδρά καταλυτικά πάνω στο ποσοστό απόδοσης της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Όσο ψηλότερος ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών μονάδων, τόσο υψηλότερη η τιμή του ποσοστού απόδοσης (σε κατάλληλες επικρατούσες συνθήκες, όπως υψηλή πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στο σημείο τοποθέτησης κ.α.). Όσον αφορά τον μετατροπέα που είναι συνδεδεμένος με την εγκατάσταση, εάν έχει υψηλό βαθμό απόδοσης, τότε αυτό μπορεί να επιφέρει υψηλές τιμές ποσοστού απόδοσης. Τέλος, όσον αφορά τη διάταξη της συσκευής μέτρησης, στη περίπτωση η συσκευή μέτρησης είναι τμήμα της φωτοβολταϊκής εγκατάστασής αλλά δεν έχει ρυθμιστεί κατάλληλα προς τις φωτοβολταϊκές μονάδες της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, τότε εξαιτίας της διαφορετικής πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας οι τιμές του ποσοστού απόδοσης μπορεί να φτάσουν και πάνω από 100%.

- **Διαφορετικές τεχνολογίες ηλιακών κυψελών στις φωτοβολταϊκές μονάδες και στη συσκευή μέτρησης**

Υπάρχουν διάφορα είδη ηλιακών κυψελών στις φωτοβολταϊκές μονάδες. Συνήθως χρησιμοποιούνται τα τρία παρακάτω είδη ηλιακών κυψελών: μονοκρυσταλλικές κυψέλες σιλικόνης, πολυκρυσταλλικές κυψέλες σιλικόνης και κυψέλες λεπτής μεμβράνης. Εάν η συσκευή μέτρησης που έχει τοποθετηθεί στη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση χρησιμοποιεί διαφορετική τεχνολογία ηλιακών κυψελών από ότι οι φωτοβολταϊκές μονάδες, τότε ενδέχεται να εμφανιστούν αποκλίσεις στον υπολογισμό του ποσοστού απόδοσης. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί υποβιβασμός των ηλιακών κυψελών λόγω παλαιώσής με το πέρασμα των χρόνων, προκαλώντας χαμηλές τιμές ποσοστού απόδοσης. Οι μονοκρυσταλλικές και πολυκρυσταλλικές ηλιακές κυψέλες παλαιώνουν γρηγορότερα (μέχρι και 20 % μέσα σε 20 χρόνια).

2.8 Κατηγοριοποίηση Φ/Β Συστημάτων

- **Συστήματα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο (grid connected)**

Τα βασικά μέρη είναι: Φ/Β πλαίσιο-μετατροπέας-Δίκτυο ΔΕΗ-οικιακές συσκευές. Ένα τέτοιου είδους σύστημα είναι συνδεδεμένο με ένα μεγάλο ανεξάρτητο δίκτυο (το δίκτυο της ΔΕΗ), το οποίο τροφοδοτεί με την παραγόμενη ισχύ. Δεν διαθέτουν σύστημα αποθήκευσης (μπαταρίες), οπότε δεν έχουν και αναλώσιμα υλικά. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν καταναλώνεται από τον ιδιοκτήτη και η πλεονάζουσα ή και όλη η παραγόμενη ενέργεια πωλείται στο δίκτυο. Για τα διασυνδεδεμένα (on-grid) συστήματα, δεν απαιτείται η χρήση μπαταριών, ενώ για τον έλεγχο της προσφερόμενης ενέργειας στο σύστημα τοποθετείται ένας μετρητής που καταγράφει τις παραγόμενες kWh.



Εικόνα 22: Πηγή: Ένας πρακτικός τεχνικός οδηγός ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ www.helapco.gr

- **Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα (stand alone pv systems):**

Στα συστήματα αυτά δε συνεισφέρουν άλλες πηγές ενέργειας, ούτε υπάρχει σύνδεση με το δίκτυο πόλεως επομένως η ολική απαιτούμενη από το φορτίο ενέργεια πρέπει να δίνεται εξ' ολοκλήρου από τη διάταξη των φωτοβολταϊκών. Τα κύρια μέρη που αποτελείται το Φ/Β σύστημα είναι το Φ/Β πλαίσιο , ο ρυθμιστής τάσης , ο μετατροπέας (inverter) και ο καταναλωτής.



Εικόνα 23: Πηγή: Ένας πρακτικός τεχνικός οδηγός ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ
www.helapco.gr

- **Υβριδικά συστήματα (hybrid systems)**

Αυτά τα συστήματα συνδυάζουν τα φωτοβολταϊκά με άλλες μορφές παραγωγής ενέργειας, συνήθως με γεννήτριες diesel. Πολλές φορές χρησιμοποιούν και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, για παράδειγμα αιολική.

2.8.1 Δομή/Μέρη ενός τυπικού φωτοβολταϊκού συστήματος

Συνοπτικά, τα βασικά μέρη ενός τυπικού Φ/Β συστήματος είναι τα εξής:

- **Φ/Β πλαίσια:** Είναι η βασική μονάδα παραγωγής ρεύματος. Αποτελούνται από ορισμένο αριθμό Φ/Β στοιχείων, 10 έως 15 συνήθως, ενωμένα με κατάλληλες μεταλλικές επαφές και προστατευμένων εξωτερικά μέσω αντι-ανακλαστικής μεμβράνης και επικάλυψης γυαλιού, και τοποθετημένα σε πλαίσιο αλουμινίου.
- **Μετατροπέας (inverter):** Μετατρέπει το συνεχές ρεύμα (D.C.= Direct Current) που παράγεται από τα Φ/Β πλαίσια σε εναλλασσόμενο (A.C.= Altering Current) προκειμένου να γίνει συμβατό με τη λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών.
- **Ρυθμιστής τάσης:** Ρυθμίζει και διατηρεί τη κανονική φόρτιση των μπαταριών από τα Φ/Β στοιχεία. Ουσιαστικά ελαττώνει το ρεύμα που προσφέρουν τα Φ/Β πλαίσια στη μπαταρία, καθώς όταν η μπαταρία υπερφορτώνεται, τότε ελαττώνεται ο χρόνος ζωής της.
- **Φωτοβολταϊκή γεννήτρια:** Με τη μηχανική υποστήριξη και πιθανόν ένα σύστημα παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς.
- **Μπαταρίες (υποσύστημα αποθήκευσης):** Πλέον δεν χρησιμοποιούνται, εκτός σε απομακρυσμένες εγκαταστάσεις όπως είναι π.χ. οι Φάροι, διαφορετικά η σύνδεση του πάνελ γίνεται απευθείας με το υφιστάμενο δίκτυο της ΔΕΗ. Χρησιμοποιούνται σε περίπτωση αυτόνομου συστήματος, καθώς τότε υπάρχει η αναγκαιότητα αποθήκευσης του παραγόμενου ρεύματος που δεν καταναλώνεται άμεσα. Η μπαταρία προσφέρει την αποθηκευμένη ενέργεια τις ώρες που δεν υπάρχει ηλιακό φως, δηλαδή τις βραδινές.
- **Καθορισμό ισχύος και συσκευή ελέγχου:** Περιλαμβάνει φροντίδα για μέτρηση και παρατήρηση.
- **Εφεδρική γεννήτρια.** Η επιλογή του πώς και ποια από αυτά τα στοιχεία ολοκληρώνονται μέσα στο σύστημα εξαρτάται από ποικίλες εκτιμήσεις.

Επιπλέον, οι Φ/Β συλλέκτες τοποθετούνται πάνω σε τοποθετούνται πάνω σε βάσεις στήριξης, οι οποίες παρατίθενται παρακάτω αναλυτικά.



Εικόνα 24: Πηγή: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2011/12/photovoltaic-installations-around-the-world>

Κεφάλαιο 3^ο: Βάσεις Στήριξης Φ/Β Συλλεκτών

3.1 Εισαγωγή

Για την τοποθέτηση των Φ/Β συλλεκτών χρειάζεται προσεκτική μελέτη (χωροταξική τοποθέτηση υλικών για τη βελτιστοποίηση της κάλυψης και της ασφαλούς λειτουργίας) που αφορά δύο στάδια:

- την κατασκευή των βάσεων (συναρμολόγηση)
- την στήριξη των Φ/Β συλλεκτών πάνω στις βάσεις.

3.2 Είδη Βάσεων Στήριξης

Από τις εταιρείες κατασκευής των Φ/Β κατασκευάζονται και βάσεις στήριξης (σταθερές ή περιστρεφόμενες) που αφορούν τους διάφορους τύπους και τον αριθμό των συλλεκτών που τοποθετούνται πάνω σε αυτές. Αποτελούνται από τμήματα μεταλλικών κοιλοδοκών κυκλικής, τετραγωνικής ή γωνιακής διατομής, πάχους τουλάχιστον 3mm , γαλβανισμένα εν θερμώ , ανοξείδωτα ή αλουμινίου.

Οι βάσεις στήριξης των Φ/Β συλλεκτών μπορούν να κατασκευαστούν:

- **σταθερές** , χωρίς δυνατότητα αυξομείωσης της κλίσης
- **αρθρωτές**, με δυνατότητα χειροκίνητης αυξομείωσης της κλίσης ανά μια ή ανά πέντε μοίρες από 25° μέχρι 75°
- **κινούμενες (περιστρεφόμενες), με αυτόματη πορεία** από Ανατολικά προς Δυτικά, κατά τη διάρκεια της ημέρας και προσανατολισμό Νότιο με χειροκίνητη μεταβολή ως προς οριζόντιο άξονα
- **κινούμενες (περιστρεφόμενες), με αυτόματη παρακολούθηση** της κίνησης του ηλίου καθημερινά και σε ετήσια βάση, έτσι ώστε να έχουμε συνεχώς κάθετη πρόσπτωση των ηλιακών ακτίνων πάνω στους συλλέκτες.

Τα Φ/Β πλαίσια για να έχουν τη μέγιστη απόδοση , θα πρέπει να δέχονται συνεχώς τη μέγιστη ακτινοβολία. Οι ηλιακές ακτίνες θα πρέπει να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνειά του, γιατί τότε έχουν τη μεγαλύτερη πυκνότητα στην μονάδα επιφάνειας και δεν ανακλώνται στην γυάλινη επικάλυψη του πλαισίου. Ωστόσο ο ήλιος κινείται κατά τη διάρκεια της ημέρας και για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοσή του πλαισίου, θα πρέπει το Φ/Β πλαίσιο να παρακολουθεί συνεχώς την κίνηση του ηλίου. Κάθε Φ/Β σύστημα, το οποίο παράγει ηλεκτρική ενέργεια το διακρίνουν κάποιες απαιτήσεις, οι οποίες καθορίζουν τον τρόπο τοποθέτησης και στήριξης των Φ/Β πλαισίων του. Τα στοιχεία που προσδιορίζουν τον τρόπο τοποθέτησης των πλαισίων είναι τα ακόλουθα:

- Η ενέργεια που πρέπει να παραχθεί καθορίζει το πλήθος των Φ/Β στοιχείων, το μηχανολογικό και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό που θα τοποθετηθεί στο σύστημά μας.
- Το περιβάλλον και οι τοπικές καιρικές συνθήκες καθορίζουν τη θέση και τον τρόπο στήριξης.
- Η οικονομική δυνατότητα που υπάρχει είναι αυτή που περιορίζει ή την εγκατάσταση ενός ακριβού συστήματος, το οποίο όμως θα έχει καλύτερη απόδοση από ένα οικονομικότερο.

Η στήριξη των Φ/Β συστημάτων έχει μεγάλη σημασία καθώς δεν εξασφαλίζει μόνο τη στατική επάρκεια αλλά κυρίως τη μέγιστη ενεργειακή απολαβή, η οποία εξαρτάται ακόμη από το κλίμα της περιοχής, το γεωγραφικό πλάτος και την ηλικία των Φ/Β πάνελ.

Όπως αναφέρθηκε, τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) πάνελ συνήθως εδράζονται επί εδάφους με δύο τρόπους:

- 1) Σε βάσεις σταθερής κλίσης ως προς την οριζόντιο, συνήθως αναφερόμενες ως «σταθερές βάσεις»
- 2) Σε βάσεις επί διατάξεων παρακολούθησης της πορείας του ήλιου, αναφερόμενες συνήθως ως συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου ή ηλιοπαρακολουθητές ή τράκερς (trackers)
- 3) Σε βάσεις εποχιακά ρυθμιζόμενης κλίσης

3.2.1 Σταθερές Βάσεις

- **Στήριξη με σταθερή γωνία κλίσης του συλλέκτη**

Οι σταθερές βάσεις με σταθερή γωνία κλίσης του συλλέκτη είναι ο απλούστερος, οικονομικότερος και πιο διαδεδομένος τρόπος έδρασης Φ/Β συλλεκτών. Ο σχεδιασμός του συστήματος είναι αρκετά απλός καθώς στο μόνο που πρέπει να δοθεί προσοχή είναι η γωνία κλίσης και ο προσανατολισμός των συλλεκτών. Είναι ένας αρκετά αξιόπιστος τρόπος καθώς δεν έχει κινητά μέρη και προτείνεται σε μέρη με ισχυρούς ανέμους (π.χ. βουνά). Επίσης, χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να ενσωματώσουμε τους συλλέκτες σε κτίρια (στέγη, πρόσοψη).

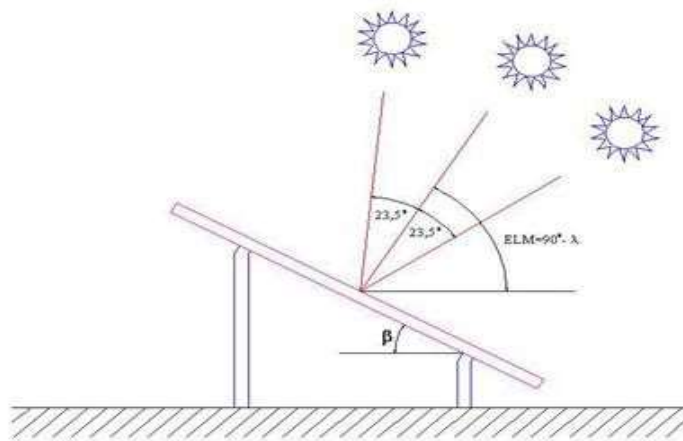


Εικόνα 25: Φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτίρια. (Πηγή: www.greenenergia.gr)

Αρχές Σχεδιασμού (Γωνία κλίσης και προσανατολισμός)

Για την τοποθέτηση των συλλεκτών πρέπει να επιλεγεί η καταλληλότερη γωνία κλίσης και ο προσανατολισμός. Κυρίαρχο ρόλο παίζει η ηλιακή ακτινοβολία και η γωνία πρόσπτωσης της στο Φ/Β πάνελ. Όταν ο τόπος τοποθέτησης δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία καθόλη τη διάρκεια της μέρας και του έτους, είναι η πιο απλή περίπτωση. Η τοποθέτηση γίνεται με προσανατολισμό το νότο και με μόνιμη κλίση την ετήσια βέλτιστη κλίση της συγκεκριμένης περιοχής. Για να προκύψει η βέλτιστη γωνία κλίσης πρέπει να καταγραφούν όλα αυτά τα μετεωρολογικά στοιχεία για αρκετά χρόνια και σε διαφορετικές γωνίες. Συνήθως όμως δεν είναι διαθέσιμες λόγω του μεγάλου κόστους των μετρήσεων, για το λόγο αυτό οι μετρήσεις γίνονται με έναν αισθητήρα ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. πυρανόμετρο) σε οριζόντια θέση για

το μέγιστο χρονικό διάστημα. Μετά τη λήψη των μετρήσεων και κατάλληλη επεξεργασία προσδιορίζεται η βέλτιστη γωνία του συλλέκτη. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετρήσεις για πλησιέστερη περιοχή, λαμβάνοντας υπόψη το albedo του εδάφους. Όσον αφορά συγκεκριμένα τον προσανατολισμό, η κατεύθυνση του συλλέκτη όταν βρισκόμαστε στο βόρειο ημισφαίριο πρέπει να έχει νότιο προσανατολισμό, και όταν βρισκόμαστε στο νότιο ημισφαίριο πρέπει να είναι αντίστροφη. Έχει παρατηρηθεί ότι, η μέγιστη απόδοση του Φ/Β συστήματος παρουσιάζεται για γωνία κλίσης ίση με 30° και νότιο προσανατολισμό. Όσο απομακρύνεται η τοποθέτηση από το νότο η απόδοση μειώνεται σημαντικά, φτάνοντας έως και 40% μείωση για γωνία κλίσης ίση με 30° και βόρειο προσανατολισμό. Επίσης για γωνία κλίσης ίση με 0° η απόδοση του Φ/Β συστήματος δεν επηρεάζεται από τον προσανατολισμό και παραμένει σταθερή και ίση με 90%.



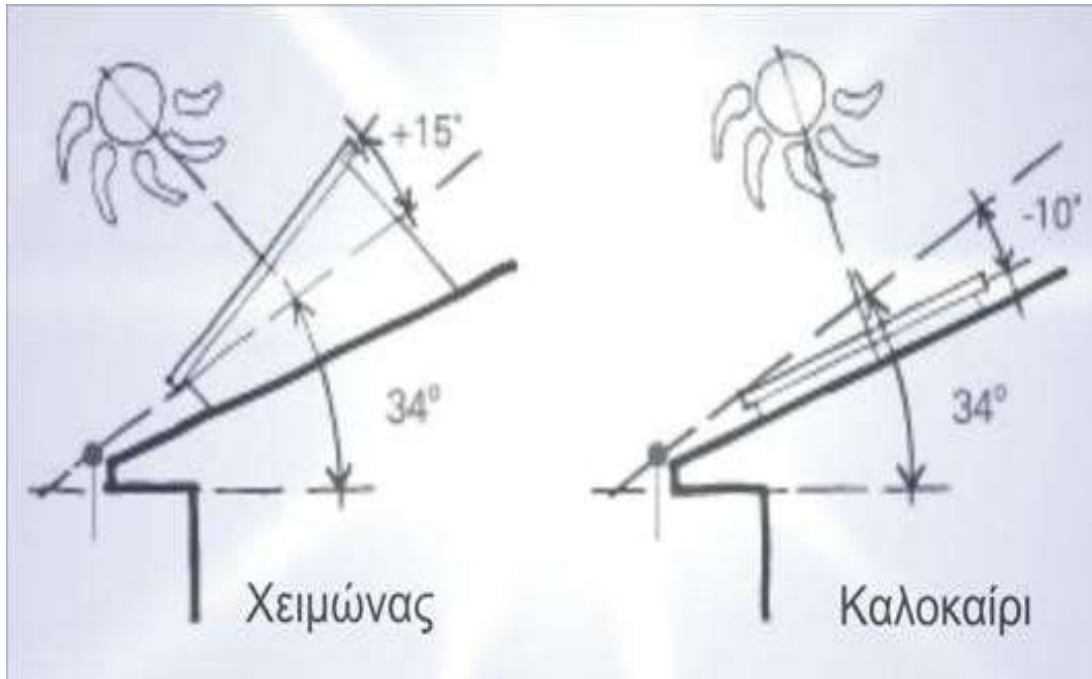
Εικόνα 26: Στήριξη με σταθερή γωνία κλίσης (Πηγή: www.greenenergia.gr)

Για να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση ενός Φ/Β συστήματος πρέπει να επιλεχθεί η κατάλληλη γωνία κλίσης και ο κατάλληλος προσανατολισμός. Δεδομένου ότι στην περίπτωση των κτιριακών Φ/Β εγκαταστάσεων οι βέλτιστες τιμές κλίσης και προσανατολισμού της Φ/Β συστοιχίας μπορεί να είναι ανέφικτες (λόγω των περιορισμών που προκύπτουν από τις δεδομένες διαθέσιμες επιφάνειες του κτηρίου), θα πρέπει να γίνει εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί η Φ/Β συστοιχία. Η μείωση της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (στην επιφάνεια της Φ/Β συστοιχίας) συγκριτικά με τη μέγιστη θεωρητική τιμή της (βέλτιστες τιμές κλίσης και προσανατολισμού) συνίσταται να μην υπερβαίνει το 10% προκειμένου να μεγιστοποιούνται τα οικονομικά οφέλη του ανεξάρτητου παραγωγού. Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που προκύπτουν από τις διαθέσιμες επιφάνειες των κτιρίων, προτιμώνται γενικά επιφάνειες νότιου προσανατολισμού με απόκλιση έως 70° από την κατεύθυνση του και κλίσης στο εύρος 0° - 50° . Σημειώνεται ότι η χρήση γωνιών κλίσης άνω των 10° - 15° διευκολύνει τον αυτοκαθαρισμό των πλαισίων από σωματίδια σκόνης και άλλους ρύπους μέσω της βροχής.

- **Στήριξη με εποχιακή ρύθμιση της κλίσης του συλλέκτη**

Στα Φ/Β συστήματα σταθερής γωνίας κλίσης δεν υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής της γωνίας κλίσης του συλλέκτη, με αποτέλεσμα η εγκατάσταση να αποδίδει πολύ λιγότερο από τις δυνατότητές της. Για να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος κατασκευάζονται βάσεις, στις οποίες τοποθετούνται οι συλλέκτες, με δυνατότητα ρύθμισης της κλίσης τους. Η μηχανολογική κατασκευή είναι σχετικά φθηνή και απλή ώστε όλοι οι χρήστες να μπορούν να κάνουν την εποχιακή (είτε την μηνιαία, είτε όποτε το επιθυμούν) ρύθμιση. Η ρύθμιση του συλλέκτη γίνεται δύο φορές το χρόνο, μία κατά το χειμερινό εξάμηνο (22 Σεπτεμβρίου-21 Μαρτίου) και μία κατά το θερινό (21 Μαρτίου-22 Σεπτεμβρίου). Η αλλαγή αυτή γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η κλίση μεταξύ των ακτίνων του ηλίου και της επιφάνειας του συλλέκτη να

πλησιάζει όσο το δυνατόν τις 90° . Για τον προσδιορισμό της σωστής γωνίας του συλλέκτη πρέπει να είναι γνωστά τα μετεωρολογικά δεδομένα του τόπου (ηλιοφάνειας, ανέμου, θερμοκρασίας, κ.λπ.), καθώς και το albedo⁵ του εδάφους, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο.



Εικόνα 27: Στήριξη με δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας κλίσης (Πηγή: www.greenenergia.gr)

Κατά την τοποθέτηση συλλεκτών με ρυθμιζόμενη κλίση, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στα εξής:

- ✓ Σε περιοχές με φυσικά εμπόδια ο συλλέκτης πρέπει να τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτει η μέγιστη ενεργειακή απολαβή κατά τη διάρκεια όλου του έτους.
- ✓ Πρέπει να γίνεται σωστή μελέτη και σχεδιασμός της κατασκευής ώστε και στις δύο κλίσεις να επιτυγχάνεται η βέλτιστη γωνία για μέγιστη απόδοση.

3.2.2 Συστήματα Συνεχούς Ημερήσιας Παρακολούθησης, Ηλιοτρόπια (trackers)

Για να είναι εφικτή η μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας των Φ/Β πλαισίων, θα πρέπει να επιτυγχάνεται βέλτιστη εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, εφόσον η πορεία του ήλιου αλλάζει τόσο με την ώρα της ημέρας όσο και με τη μέρα του έτους, συμπεραίνεται πως για να παράγει ένα πλαίσιο τη μέγιστη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να περιστρέφεται ώστε να μπορεί να ακολουθεί την τροχιά του ήλιου και να είναι συνεχώς κάθετο στην κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Όπως προαναφέρθηκε, οι συλλέκτες τοποθετούνται είτε με σταθερή κλίση είτε με εποχιακή ρύθμιση της γωνίας. Στην πρώτη περίπτωση, η απολαβή της ενέργειας από τον ήλιο είναι μικρή ενώ στη δεύτερη περίπτωση, όπου αποτελεί μια βελτιωμένη μέθοδο, έχουμε αυξημένη απολαβή σε σχέση με την πρώτη. Για υψηλότερη απολαβή ισχύος κατασκευάζονται

⁵Λευκαύγεια (Albedo) ενός αντικειμένου ή μιας επιφάνειας είναι ο λόγος της διάχυτα ανακλώμενης ακτινοβολίας (ηλιακής) προς την προσπίπτουσα.

συσκευές διαρκούς παρακολούθησης της πορείας του ήλιου. Οι συσκευές αυτές μοιάζουν αρκετά με το φυτό ηλιοτρόπιο ή ηλιανθος, από όπου πήραν και το όνομά τους. Τα ηλιοτρόπια (trackers) στρέφουν τους συλλέκτες έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια του συλλέκτη. Με τα ηλιοτρόπια υπάρχει μια αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος από 20% έως 45%, σε σχέση με τους σταθερούς τρόπους στήριξης. Οι συσκευές αυτές βρίσκουν χρήση τόσο σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές όσο και σε θερμικά συστήματα. Τα συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου ή ηλιοπαρακολουθητές ή τράκερ (tracker) χαρακτηρίζονται από μεγάλη πολυπλοκότητα σε σχέση με τα συστήματα βάσεων. Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, στα συστήματα μονού άξονα και στα συστήματα διπλού άξονα.

3.2.3 Συστήματα μονού άξονα (single axis systems)

Πρόκειται για συστήματα στα οποία λαμβάνει χώρα η κίνηση των πάνελ σε έναν άξονα, αυτόν της Ανατολής-Δύσης κατά τη διάρκεια μιας ημέρας. Τα συστήματα μονού άξονα διακρίνονται στις εξής κατηγορίες, το αζιμουθιακό ηλιοτρόπιο και το πολικό ηλιοτρόπιο.

- **Αζιμουθιακό ηλιοτρόπιο**

Το σύστημα περιστρέφεται ως προς κατακόρυφο άξονα, έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να πέφτουν κάθετα στον συλλέκτη. Για την επιλογή της γωνίας κλίσης των συλλεκτών ακολουθείται η ίδια λογική με τις προηγούμενες μεθόδους, όπου οι συλλέκτες τοποθετούνται με σταθερή γωνία η οποία επιλέγεται βάση του γεωγραφικού πλάτους. Χρησιμοποιούνται σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς αυξάνουν την παραγωγή ενέργειας. Η αύξηση ισχύος είναι περίπου 20-30%, εξαρτάται βέβαια από την τοποθεσία, την ποιότητα του συστήματος και τον τρόπο ελέγχου της κίνησης.

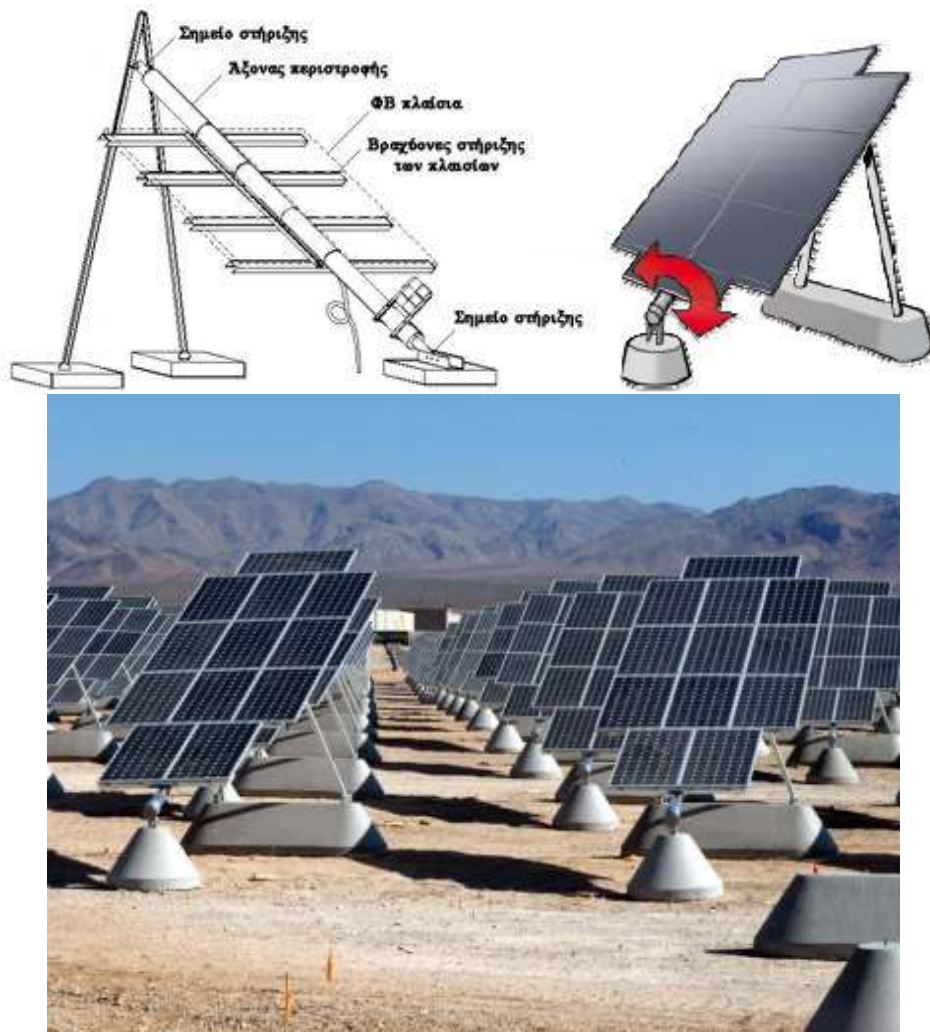


Εικόνα 28: Αριστερά, περιστροφή συστήματος γύρω από κατακόρυφο άξονα (Πηγή: www.google.gr). Δεξιά, απεικονίζονται Αζιμουθιακά Ηλιοτρόπια (Πηγή: www.greenenergia.gr)

- **Πολικό ηλιοτρόπιο (polar tracker)**

Το σύστημα περιστρέφεται ως προς άξονα τοποθετημένο σε γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και παράλληλα με τον πολικό άξονα της γης. Με αυτό τον τρόπο ο ήλιος βρίσκεται συνεχώς στο επίπεδο που είναι κάθετο στο συλλέκτη. Κατά τη διάρκεια του έτους η γωνία μεταξύ των ακτίνων του ηλίου και της κάθετης στο συλλέκτη κυμαίνεται από $-23,5^\circ$ έως $+23,5^\circ$ (όπως προαναφέρθηκε).

Η βασική χρήση των συστημάτων αυτών είναι σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς να αποκλείεται και η χρήση τους σε θερμικούς σταθμούς. Η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας φτάνει και το 35% ανάλογα με την εποχή του έτους. Είναι σχετικά απλά στην κατασκευή και στον έλεγχο. Μειονεκτούν σημαντικά όσον αφορά στην αντοχή τους σε ισχυρούς ανέμους. Για την προστασία τους χρειάζονται ισχυρά συστήματα πέδησης. Επίσης, τα πλαίσια δεν τοποθετούνται ομοιόμορφα, αλλά σε τριγωνικό σχηματισμό, έτσι ώστε να μην εφάπτονται με το έδαφος το πρωί και το απόγευμα. Αν δεν εφαρμοστεί αυτός ο τρόπος τοποθέτησης μένει αρκετός χώρος αναξιοποίητος. Σε πολλές περιπτώσεις τοποθετούνται και κάτοπτρα για την αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στους.



Εικόνα 29: Πολικό Ηλιοτρόπιο (Πηγή: www.greenenergia.gr , www.helapco.gr, www.google.gr)

3.2.4 Συστήματα διπλού άξονα (dual axis systems)

Πρόκειται για συστήματα στα οποία είναι επιπλέον δυνατή η ρύθμιση της κλίσης των πάνελ ως προς την οριζόντιο. Η επιπλέον αυτή δυνατότητα παρέχει αυξημένη απόδοση κατά τυπικά 35%-45% σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων. Η αποδοτικότητα των Φ/Β συστημάτων εξαρτάται από την ενέργεια την οποία μπορούν να συλλέξουν. Τα συστήματα ιχνηλάτησης εξασφαλίζουν τη βέλτιστη αξιοποίηση όλης της ηλιακής ακτινοβολίας



Εικόνα 30: Περιστροφή συστήματος γύρω από δύο άξονες (Πηγή: www.google.gr , www.helapco.gr)



Εικόνα 31: Διατάξεις ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου διπλού άξονα (Πηγή: www.google.gr)

3.3 Βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου

Η κίνηση στα συστήματα αυτά επιτυγχάνεται συνήθως με ηλεκτρο-μηχανικά ή ηλεκτρο-υδραυλικά μέσα. Κατά συνέπεια, όλα τα συστήματα ιχνηλάτησης χαρακτηρίζονται από ιδιοκαταναλώσεις, οι οποίες είναι μικρές καθώς η κίνηση δεν είναι συνεχής αλλά περιοδική, τυπικά μία κίνηση ανά δέκα λεπτά. Ωστόσο, είναι σκόπιμο η ενέργεια αυτή να προέρχεται από το δίκτυο της ΔΕΗ και όχι από τα Φ/Β πάνελ λόγω της διαφοράς τιμής. Η ανίχνευση της πορείας του ήλιου γίνεται συνήθως με δύο τρόπους: ο πρώτος τρόπος είναι με ηλιακούς αισθητήρες, οι οποίοι αντιλαμβάνονται τη θέση του ήλιου. Ο δεύτερος είναι μέσω λογισμικού από αστρονομικά δεδομένα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η θέση και η πορεία του ήλιου για κάθε μέρα του έτους, ανάλογα με τις γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής.

Λόγω της ανάγκης κίνησης σημαντικού αριθμού πάνελ, τα συστήματα ιχνηλάτησης χαρακτηρίζονται από επίπεδες επιφάνειες τοποθετημένες σε μία κάθετη ως προς το έδαφος βάση στήριξης (εξαιρούνται τα πολικά ηλιοτρόπια). Το γεγονός αυτό οδηγεί σε κατασκευές σημαντικού ύψους το οποίο κυμαίνεται από 2,5 έως 10-12 μέτρα, αναλόγως της κατασκευής. Το ύψος κατασκευής συνήθως αυξάνει με την αύξηση της επιφάνειας των πάνελ. Σήμερα τα συστήματα ιχνηλάτησης κατασκευάζονται για να φέρουν ισχύ πάνελ που κυμαίνεται από 2-3kWp έως περίπου 33kWp (το καθένα). Το σημαντικό μέγεθος της κατασκευής καθιστά πολυπλοκότερη και την έδραση. Συνήθως οι βάσεις στήριξης εδράζονται σε οπλισμένο σκυρόδεμα σημαντικού όγκου (από 2-3 έως και περίπου 20-30 κυβ. μέτρα) ώστε να εξασφαλίζεται η στατική τους επάρκεια. Είναι προφανές, ότι τα κόστη εγκατάστασης αυξάνονται σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων.

Το σημαντικό μέγεθος των συστημάτων αυτών (και κυρίως το ύψος τους) αυξάνει τις απαιτήσεις χώρου σε σχέση με ένα σύστημα σταθερών βάσεων, συνήθως κατά 1,5-2 φορές, λόγω των μεγαλύτερων αποστάσεων μεταξύ τους για την αποφυγή σκιάσεων. Επιπλέον, το μέγεθος των τράκερ τους καθιστά περισσότερο ευάλωτους (σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων) σε ανεμοπιέσεις. Η συνηθέστερη τεχνική που χρησιμοποιείται είναι να χρησιμοποιείται ένα ανεμόμετρο και όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει ένα όριο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το σύστημα κίνησης να λαμβάνει εντολή να θέτει την επιφάνεια των πάνελ σχεδόν παράλληλα με το έδαφος, μια διαδικασία γνωστή ως «οριζοντίωση», για λόγους προστασίας. Η ταχύτητα αυτή κυμαίνεται ανάλογα με τον κατασκευαστή, αλλά μπορεί να είναι και χαμηλή και να αντιστοιχεί σε άνεμο έντασης 5-6 Bf. Κατά συνέπεια, κάθε μελετητής μηχανικός θα πρέπει να εκτιμά τα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής εγκατάστασης προτού προχωρήσει στην επιλογή ενός συγκεκριμένου τύπου τέτοιου συστήματος.

Πέραν των παραπάνω, κάθε μελετητής μηχανικός και εν δυνάμει ιδιοκτήτης Φ/Β πάρκου θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν του τα εξής πρακτικά ζητήματα που αφορά την τοποθέτηση των συστημάτων ιχνηλάτησης:

- Όλα τα συστήματα ιχνηλάτησης χρήζουν συντήρησης (ετήσιο κόστος συντήρησης περίπου ίσο με το 1% του κόστους επένδυσης) λόγω της ύπαρξής ηλεκτρο-μηχανικών ή ηλεκτρο-υδραυλικών μέσων κίνησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να καταστεί απαραίτητος ο επαναπρογραμματισμός του λογισμικού του συστήματος κίνησης, λόγω απώλειας δεδομένων.
- Λόγω του σημαντικού τους ύψους είναι απαραίτητη η έκδοση οικοδομικής άδειας και όχι έγκριση εργασιών δόμησης μικρής κλίμακας, όπως ισχύει για τα συστήματα σταθερών βάσεων. Το γεγονός αυτό αυξάνει το κόστος εγκατάστασης και επηρεάζει το χρόνο υλοποίησης κατασκευής του σταθμού.

- Επιπρόσθετα, λόγω του σημαντικού ύψους, η εκτέλεση διαφόρων εργασιών γίνεται δυσκολότερη σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων. Παραδείγματα τέτοιων εργασιών αποτελούν η αντικατάσταση ενός πάνελ που έχει υποστεί φθορά ή ο καθαρισμός των πάνελ.

Τέλος έχει παρατηρηθεί ότι:

- Τα συστήματα σταθερής βάσης παρουσιάζουν τη μικρότερη απόδοση.
- Με εφαρμογή της εποχιακής ρύθμισης (2 ρυθμίσεις/έτος ή μηνιαία ρύθμιση) παρατηρείται μικρή βελτίωση της απόδοσης. Η μηνιαία ρύθμιση είναι πιο αποδοτική από την εξαμηνιαία.
- Τα συστήματα με trackers παρουσιάζουν σημαντική βελτίωση της απόδοσης. Εάν επιπλέον εφαρμόσουμε και σε αυτά ρύθμιση της γωνίας κλίσης, τότε η βελτίωση είναι μεγαλύτερη αλλά όχι αξιοσημείωτη.
- Η μεγαλύτερη διαφορά στην απόδοση εμφανίζεται μεταξύ συστήματος μονού άξονα και συστήματος σταθερής βάσης με μηνιαία ρύθμιση της γωνία κλίσης.

Κεφάλαιο 4^ο: Πεπερασμένα στοιχεία

4.1 Εισαγωγή

Οι βασικές έννοιες της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων προήλθαν από τις εξελίξεις στη δομική ανάλυση αεροσκαφών. Το 1941, ο Hrenikoff παρουσίασε μία λύση προβλημάτων ελαστικότητας με τη χρήση της “μεθόδου των δικτυωμάτων”. Το 1943 δημοσιεύτηκε μία εργασία του Courant, η οποία χρησιμοποιούσε κατά τμήματα τριγωνική παρεμβολή σε τριγωνικές υποπεριοχές για να μοντελοποιήσει προβλήματα στρέψης. Οι Turner και άλλοι, δημιούργησαν μητρώα ακαμψίας για δικτυώματα, δοκούς και άλλα στοιχεία, και παρουσίασαν τα ευρήματά τους το 1956. Ο όρος πεπερασμένα στοιχεία πρωτοεμφανίστηκε και χρησιμοποιήθηκε από τον Clough το 1960. Στις αρχές του 1960, οι μηχανικοί χρησιμοποίησαν τη μέθοδο για να δώσουν προσεγγιστικές λύσεις σε προβλήματα ανάλυσης τάσεων, ροής ρευστών, μεταφοράς θερμότητας και άλλων τομέων. Ο Αργύρης, το 1955, σε ένα βιβλίο για θεωρήματα ενέργειας και μητρωϊκές μεθόδους, έθεσε τα θέματα για μελλοντική ανάπτυξη στις μελέτες των πεπερασμένων στοιχείων. Το πρώτο βιβλίο για πεπερασμένα στοιχεία των Zienkiewicz και Chung κυκλοφόρησε το 1967. Στα τέλη της δεκαετίας του 60’ και αρχές του 70’, η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόστηκε σε μη γραμμικά προβλήματα και άλλες παραμορφώσεις. Το βιβλίο του Oden για τα μη γραμμικά συνεχή εμφανίστηκε το 1972. Οι μαθηματικές βάσεις τέθηκαν στη δεκαετία του 70’ και περιλαμβάνουν την ανάπτυξη νέων στοιχείων, μελέτες σύγκλισης και άλλους σχετικούς τομείς. Σήμερα, οι εξελίξεις στους μεγάλους Η/Υ και η διαθεσιμότητα ισχυρών μικροϋπολογιστών έχουν φέρει τη μέθοδο αυτή στη διάθεση σπουδαστών και μηχανικών που εργάζονται σε βιομηχανίες.

4.2 Μέθοδος Πεπερασμένων στοιχείων

Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων αποτελεί πλέον ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων του μηχανικού. Οι εφαρμογές εκτείνονται από την παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα, κτίρια και γέφυρες, μέχρι την ανάλυση πεδίων ροής θερμότητας, ροής υγρών, μαγνητικής ροής, υπόγειας ροής και άλλων προβλημάτων ροής. Με τις εξελίξεις στην τεχνολογία των Η/Υ και των συστημάτων CAD σύνθετα προβλήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν πολύ εύκολα. Διάφορες εναλλακτικές συνθέσεις μπορούν να δοκιμαστούν σε έναν Η/Υ πριν κατασκευαστεί το πρώτο πρότυπό του. Όλα αυτά υποδεικνύουν την ανάγκη επαφής με αυτές τις εξελίξεις, κατανοώντας τη βασική θεωρία, τις τεχνικές μοντελοποίησης και τις υπολογιστικές έννοιες της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Σε αυτή τη μέθοδο ανάλυσης, μία περίπλοκη περιοχή, η οποία ορίζει ένα συνεχές, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (finite elements). Οι ιδιότητες των υλικών και οι διέπουσες σχέσεις υπολογίζονται πάνω σε αυτά τα στοιχεία και εκφράζονται σε όρους των άγνωστων τιμών στις γωνίες των στοιχείων. Μία διαδικασία σύνθεσης, η οποία καταλλήλως θεωρεί τα φορτία και τους περιορισμούς, έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο εξισώσεων. Η λύση αυτών των εξισώσεων δίνει την κατά προσέγγιση συμπεριφορά του συνεχούς.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

- 1) Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο (στην δεδομένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Pro-Engineer).
- 2) Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται pre processor (προεπεξεργαστές).
- 3) Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα που επιλύουν λέγονται solver και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.
- 4) Όταν τελειώσει η επίλυση τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται post processor (μετεπεξεργαστής), για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

4.3 Z88Aurora

Το z88 αναπτύχθηκε από την επιστημονική ομάδα του καθηγητή Dr.-Ing. Frank Rieg, στο πανεπιστήμιο Bayreuth της Γερμανίας. Το Z88Aurora είναι ένα δωρεάν πακέτο λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων για στατική ανάλυση στον τομέα της μηχανολογίας. Εκτός γραμμική στατική ανάλυση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλες περιπτώσεις (π.χ. θερμική ανάλυση). Είναι γρήγορο και συμπαγές και συντάχθηκε κατευθείαν για τον προσωπικό υπολογιστή, σε αντίθεση με προγράμματα μεγάλων υπολογιστών που προσαρμόστηκαν για μικροϋπολογιστή. Επίσης είναι ευέλικτο και διαφανές, καθοδηγείται από αρχεία δεδομένων. Επιπλέον δίνει τη δυνατότητα πλήρους ανταλλαγής δεδομένων με προγράμματα CAD μέσω αρχείων DXF, όπως και εισαγωγή δεδομένων από το πρόγραμμα Pro/ENGINEER. Είναι χωρίς κωδικούς, προστασία αντιγραφής και κόστος, με απλούστατη εγκατάσταση, χωρίς υποφακέλους και αλλαγή δεδομένων. Το Z88 επεξεργάζεται πάντα ό,τι του ζητείται εκείνη τη στιγμή. Συνεπώς το Z88 δεν είναι ένα μεγάλο, μονολιθικό πρόγραμμα, αλλά αποτελείται από χωριστά τμήματα σύμφωνα με την φιλοσοφία που επικρατεί στο UNIX "Small Is Beautiful". Τα τμήματα αυτά φορτώνονται στην κύρια μνήμη σύμφωνα με τις απαιτήσεις, εκτελούν την αποστολή τους και απελευθερώνουν ξανά την κύρια μνήμη. Με αυτό τον τρόπο το Z88 επιτυγχάνει την μεγάλη ταχύτητα υπολογισμού και συναγωνίζεται άλλα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων. Η επικοινωνία μεταξύ των τμημάτων επιτυγχάνεται μέσω αρχείων δεδομένων, του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Λόγω του ανοιχτού λογισμικού, πολλές εφαρμογές χρησιμοποιούν Z88 solvers,. Πιο συγκεκριμένα το Z88 χρησιμοποιείται για ανάλυση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων από τις «Boeing Missile and Defense/USA», «Teledyne Brown Engineering/USA», «Winimac Coil Spring Inc./USA, Double D Design Ltd/New Zealand», «RINGSPANN GmbH/Germany», «KTR Kupplungstechnik GmbH/Germany» κ.α.

Το περιβάλλον του Z88Aurora χωρίζεται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες:

- FE-Preprocessor
- FE-Solver (Cholesky, SICCG, SORCG, Sparse-solver)
- FE-Postprocessor

Σε επόμενη ενότητα, παρατήθεται αναλυτικά η διαδικασία εκπόνησης στατικής ανάλυσης με τη βοήθεια του προγράμματος Z88Aurora.

Κεφάλαιο 5^ο: Σχεδιασμός Μοντέλου

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρατίθεται αναλυτικά ο τρόπος σχεδίασης της βάσης. Η βάση σχεδιάστηκε στο περιβάλλον του προγράμματος Pro/ENGINEER. Η διαδικασία σκεδίασης των επιμέρους τμημάτων της τελικής κατασκευής, παρουσιάζεται αλφαβητικά παρακάτω.

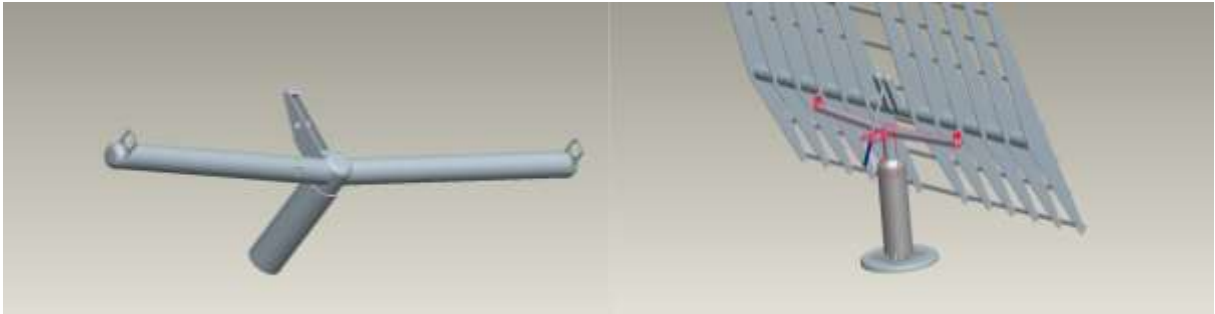
5.2 Pro Engineer

Το σχεδιαστικό λογισμικό Pro Engineer (πλέον Creo Elements) αναπτύχθηκε στα 1987 από την εταιρία Parametric Technology (P.T.C) και είναι ένα από τα πλέον δημοφιλέστερα και ταχέως αναπτυσσόμενα λογισμικά στερεάς μοντελοποίησης. Η εταιρία έχει πάνω από 100.000 εργαζομένους σε όλο τον κόσμο αλλά και πολλούς χρήστες που το εμπιστεύονται για την σταθερότητά του και την δυναμική του στον τομέα της μοντελοποίησης. Ήταν η πρώτη εταιρεία στην αγορά που αξιοποίησε τον παραμετρικό σχεδιασμό. Η χρήση του προγράμματος αυτού, παρέχει στερεά μοντελοποίηση, μοντελοποίηση συναρμολόγησης και, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Στα μέσα της δεκαετίας του 1980, ο Δρ Samuel P. Geisberg δημιούργησε το Pro /ENGINEER το οποίο υπήρξε το πρώτο επιτυχές πρόγραμμα που βασίζεται σε κανόνες περιορισμού. Η παραμετρική μοντελοποίηση αποτελεί μια προσέγγιση η οποία χρησιμοποιεί ως παραμέτρους τις διαστάσεις, τα χαρακτηριστικά και τις μαθηματικές σχέσεις με σκοπό την σύλληψη της συμπεριφοράς των προϊόντων. Το Pro /ENGINEER παρέχει ένα πλήρες σύνολο του σχεδιασμού, της ανάλυσης και των δυνατοτήτων κατασκευής σε μία, ενσωματωμένη, επεκτάσιμη πλατφόρμα. Οι απαιτούμενες ικανότητες περιλαμβάνουν Στερεά και Επιφανειακή Μοντελοποίηση (Solid-Surface Modeling), δημιουργώντας δεδομένα διαλειτουργικά, τα οποία αξιοποιούνται για τον Σχεδιασμό Συστημάτων, Προσομοίωση, Ανάλυση Αντοχής, καθώς και Σχεδιασμό εργαλείων. Το Pro Engineer χρησιμοποιείται από ένα μεγάλο εύρος βιομηχανιών, από πολλά πανεπιστήμια ακόμη και από την ιατρική επιστήμη. Οι εταιρείες χρησιμοποιούν το Pro /ENGINEER με στόχο τη δημιουργία ενός πλήρους 3D ψηφιακού μοντέλου των προϊόντων τους. Τα μοντέλα αποτελούνται από 2D και 3D στερεά μοντέλα δεδομένων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιπρόσθετα στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, στην ταχεία προτυποποίηση, στον σχεδιασμό εργαλείων και στις CNC κατασκευές.

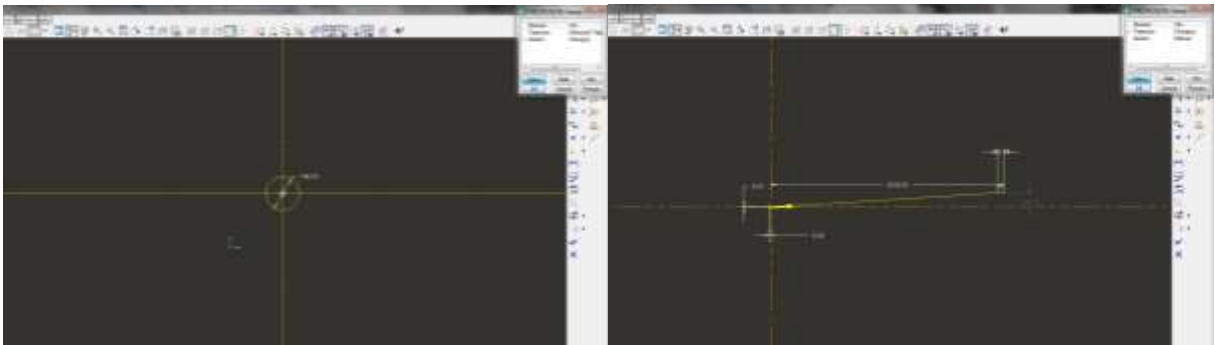
5.3 Αναλυτική Σχεδίαση των Επιμέρους Τμημάτων της Υδραυλικής Βάσης Στήριξης Δύο Αξόνων

5.3.1 Σωληνωτές στηρίξεις σχάρας (Arms)

Οι άξονες στήριξης, ενώνουν τη σχάρα στήριξης και τη βάση στήριξης. Παρα κάτω παρατίθενται αναλυτικά οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για τη σχεδίαση των αξόνων στήριξης σχάρας. Έχουν σχεδιαστεί επιπλέον και οι προεκτάσεις που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση και κίνηση της υδραυλικής βάσης του φωτοβολταϊκού.



Εικόνα 32: Γενική εικόνα τοποθέτησης των αξόνων στήριξης της σχάρας, στην τελική συναρμολόγηση



Εικόνα 33: Σχεδιάστηκε το μήκος στο οποίο προκειται να προστεθεί υλικό με την εντολή sweep protrusion. Αρχικά σχεδιάστηκε η καμπύλη της τροχιάς του άξονα, καθώς και η διατομή.



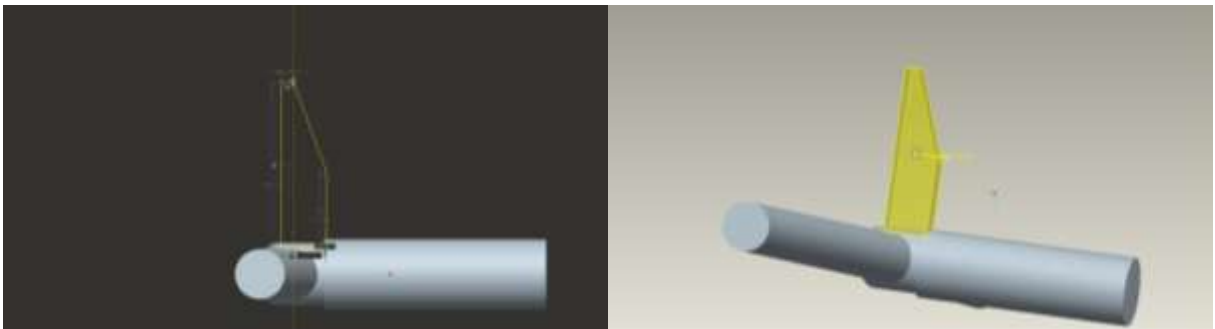
Εικόνα 34: Δεξιά φαίνεται το τελικό αποτέλεσμα του sweep protrusion. Αριστερά, με την εντολή mirror, δημιουργείται ένα αντίγραφο του αρχικού, με αντικατοπτρισμό, με άξονα συμμετρίας το right datum plane. Με την εντολή sketch, σχεδιάζεται διατομή στη μέση των 2 αξόνων



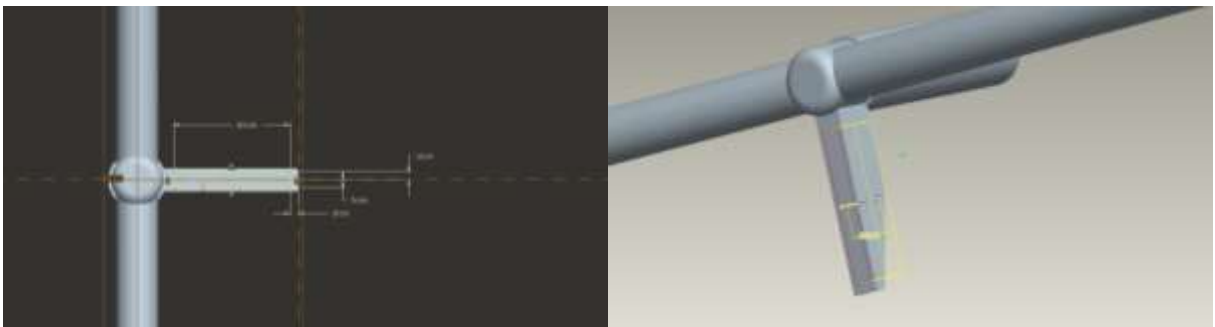
Εικόνα 35: Με την εντολή extrude , δίνεται μήκος στη σχεδιασμένη διατομή , με προσθήκη υλικού, προς την μια πλευρά .Δεξιά, με την εντολή mirror αντικατοπτρίζεται η επεκτεταμένη διατομή , και προς άνω διεύθυνση. Οι γωνίες , επεξεργάζονται και στρογγυλεύονται με την εντολή round



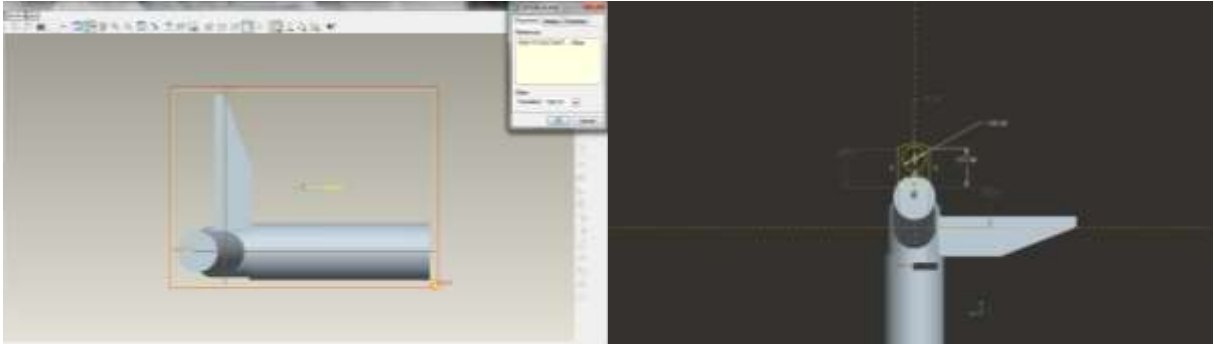
Εικόνα 36: Με την εντολή sketch σχεδιάζεται 2^η διατομή , στο κάτω μέρος του τεμαχίου. Με extrude δίδεται προέκταση της προηγούμενης σχεδίασης (με προσθήκη υλικού), σε διαστάσεις συμβατές των άλλων κομματιών που πρόκειται να σχεδιαστούν, για να είναι δυνατή η μετέπειτα συναρμολόγηση.



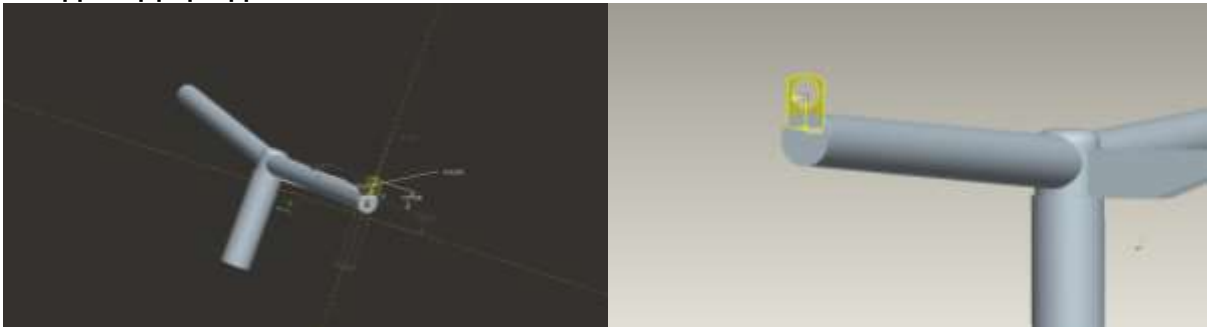
Εικόνα 37: Με sketch , σχεδιάζεται η προέκταση στην οποία θα προσαρμόζεται η δοκός από το άλλο εξάρτημα .Με extrude δίδεται όγκος στη προέκταση, με προσθήκη υλικού συμμετρικά ως προς το right datum plane.



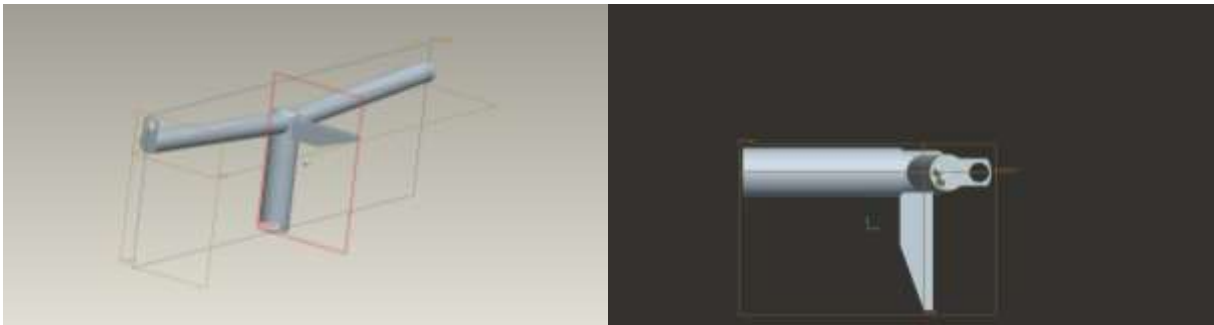
Εικόνα 38: Σχεδιάζεται ορθογώνια διατομή , από την οποία στη συνέχεια πρόκειται να αφαιρεθεί υλικό. Με extrude πραγματοποιείται αφαίρεση υλικού.



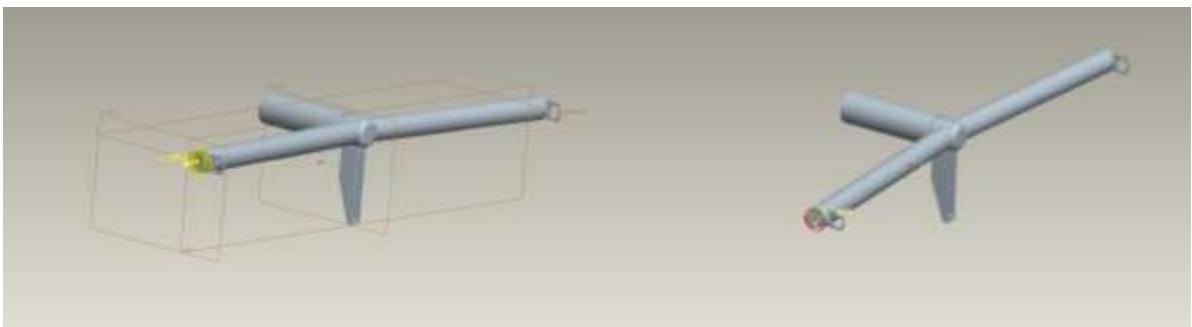
Εικόνα 39: Πραγματοποιείται προσθήκη datum plane , για τη διευκόλυνση της σχεδίασης .Με sketch σχεδιάζεται στο νέο datum plane , η προεξοχή που θα διευκολύνει τη στήριξη και κίνηση των προς συναρμολόγηση κομματιών.



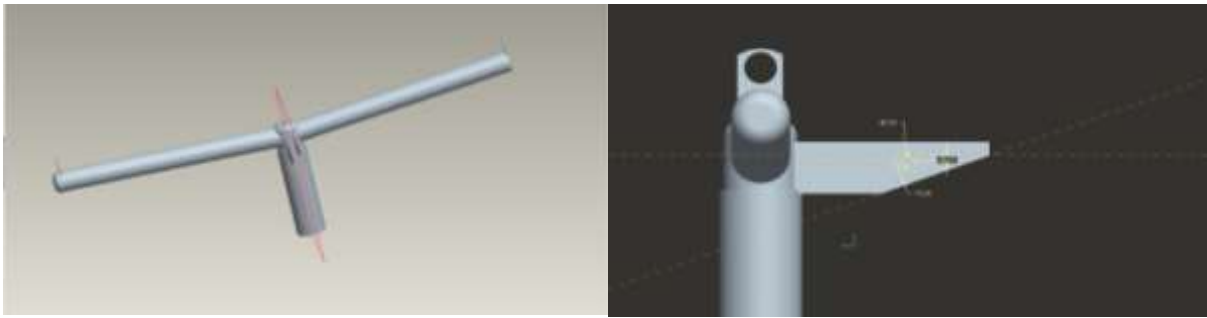
Εικόνα 40: Αριστερά, διαφορετική οπτική της σχεδίασης της προέκτασης , για κατανόηση της χωροθέτησης της σχεδίασης. Δεξιά, extrude για να δωθεί όγκος στη προέκταση.



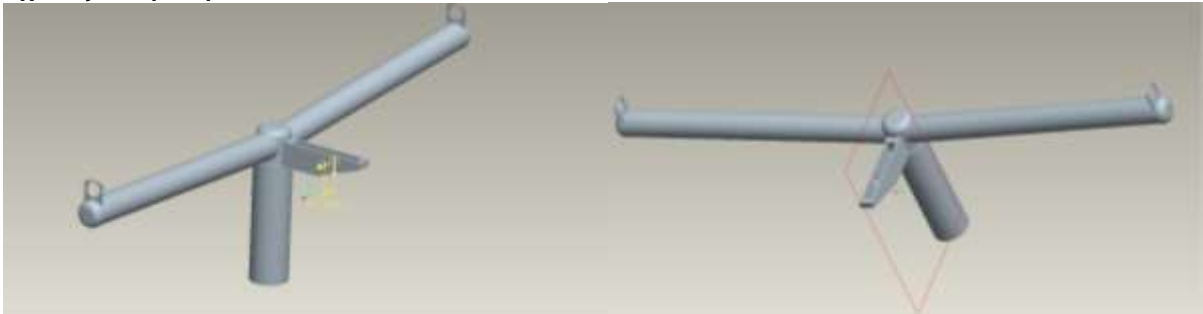
Εικόνα 41: Με mirror αντικατοπτρίζεται η σχεδιασμένη προέκταση , συμμετρικά ως προς το right datum plane, από την άλλη πλευρά των 2 αξόνων. Με ένα επιπλέον sketch , σχεδιάζεται με χρήση ομόκεντρων κύκλων σχεδίασης.



Εικόνα 42: Με extrude , και προσθήκη υλικού, πραγματοποιείται προέκταση του σχεδιασμένου κύκλου. Με round στρογγυλεύεται η εξωτερική επιφάνεια της τελευταίας προσθήκης.



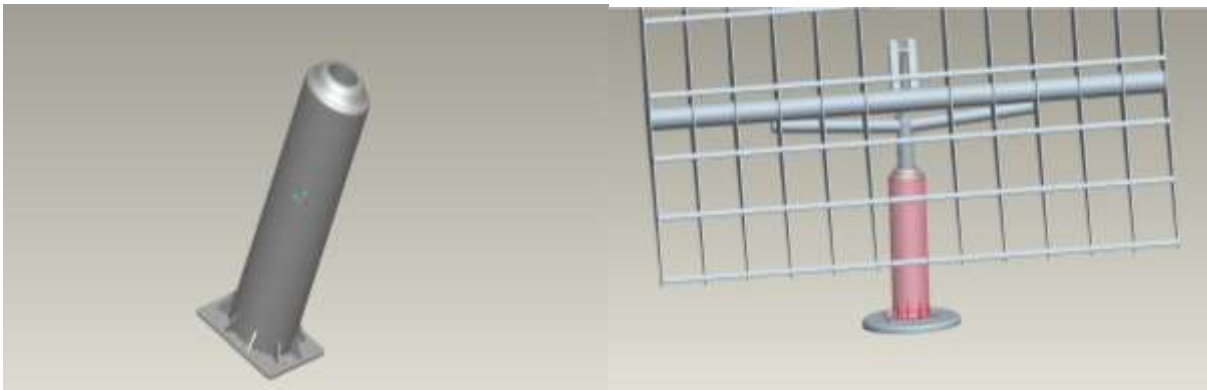
Εικόνα 43: Με mirror, ως προς το right datum plane, αντικατοπτρίζεται η τελευταία προσθήκη από την άλλη πλευρά των αξόνων. Προστίθενται τα references που φαίνονται στην εικόνα και με sketch σχεδιάζεται η οπή.



Εικόνα 44: Με extrude και αφαίρεση υλικού, εμφανίζεται η οπή της προέκτασης του τεμαχίου. Με mirror ως προς το right datum plane, αντικατοπτρίζεται η οπή και από την άλλη μεριά της προέκτασης.

5.3.2 Βάση Στήριξης (Base)

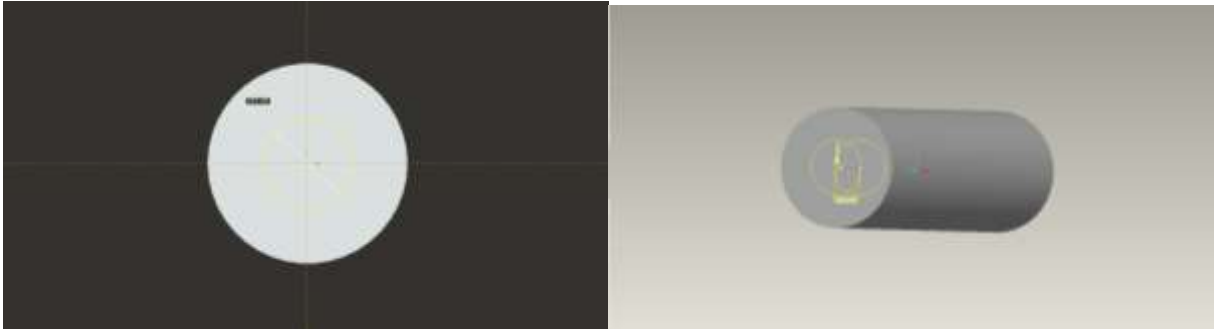
Κατά τη σχεδίαση της βάσης στήριξης, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στις διαστάσεις, καθώς στη συνέχεια θα παίξουν ρόλο στη συναρμολόγηση του τελικού κομματιού. Χρησιμοποιήθηκε μια σειρά εντολών, οι οποίες φαίνονται αναλυτικά παρα κάτω.



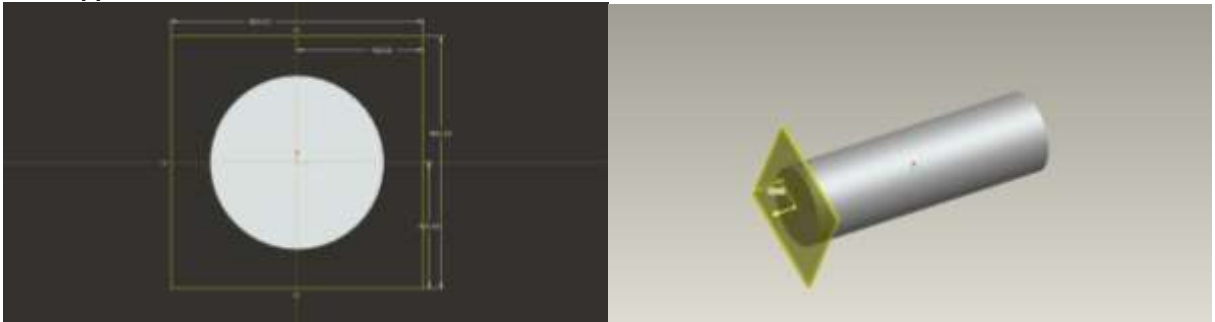
Εικόνα 45: Γενική εικόνα τοποθέτησης της βάσης στήριξης στο τελικό σχέδιο



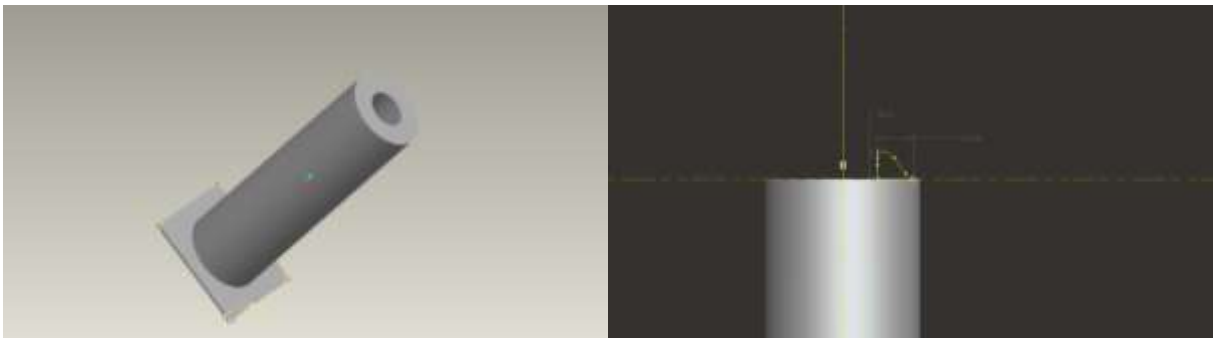
Εικόνα 46: Αρχικά με την εντολή sketch, σχεδιάστηκε μια διατομή με τις ζητούμενες διαστάσεις. Στη συνέχεια με την εντολή extrude, πραγματοποιήθηκε επιμήκυνση της σχεδιασμένης διατομής.



Εικόνα 47: Με χρήση της εντολής sketch δημιουργείται οπή που θα βοηθάει μετέπειτα στη σύνδεση των δύο κομματιών. Στη συνέχεια με extrude, και με επιλογή αφαίρεσης υλικού, δίδεται η ζητούμενη εσοχή στο κομμάτι.



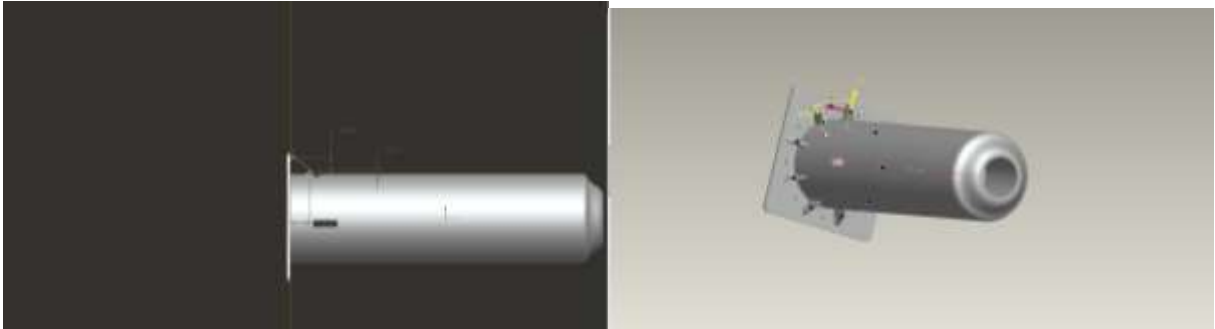
Εικόνα 48: Στη συνέχεια με sketch από την κάτω πλευρά της βάσης, σχεδιάζεται η τετραγωνική βάση στήριξης. Με extrude και προσθήκη υλικού, δίδεται το ζητούμενο βάθος.



Εικόνα 49: Με την εντολή round στρογγυλεύονται οι τέσσερις γωνίες της βάσης στήριξης (με ακτίνα 40). Ένα επιπλέον sketch στο πάνω μέρος της βάσης, με περιμετρικό γέμισμα θα δώσει την τελική μορφή του άνω μέρους της σύνδεσης.



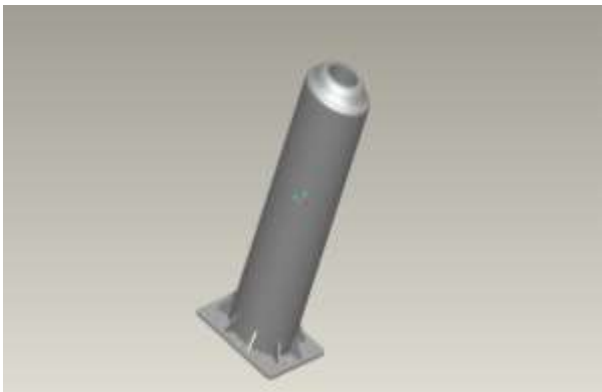
Εικόνα 50: Με την εντολή revolve για 360° ως προς τον κεντρικό άξονα, ολοκληρώνεται το πάνω μέρος. Με round του δίνουμε το κυκλικό σχήμα



Εικόνα 51: Με την εντολή sketch την εξωτερική επιφάνεια του νεύρου της βάσης στήριξης στα οποία θα δοθεί όγκος με χρήση της εντολής rid. Με χρήση της εντολής pattern αντιγράφω περιμετρικά 8 ίδια νευρα περιμετρικά της βάσης



Εικόνα 52: Έπειτα σε ένα sketch σχεδιάζεται μία οπή, η οποία πρόκειται να αντιγραφεί στη συνέχεια περιμετρικά. Και με pattern αντιγράφεται περιμετρικά 8 φορές

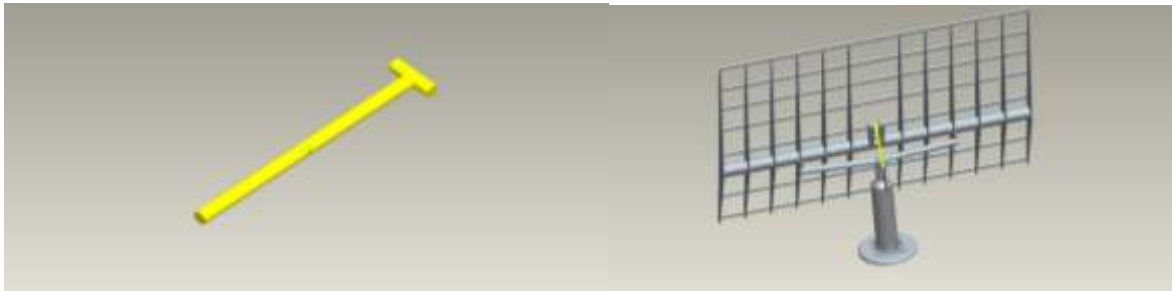


Εικόνα 53: Η τελική μορφή του εξαρτήματος.

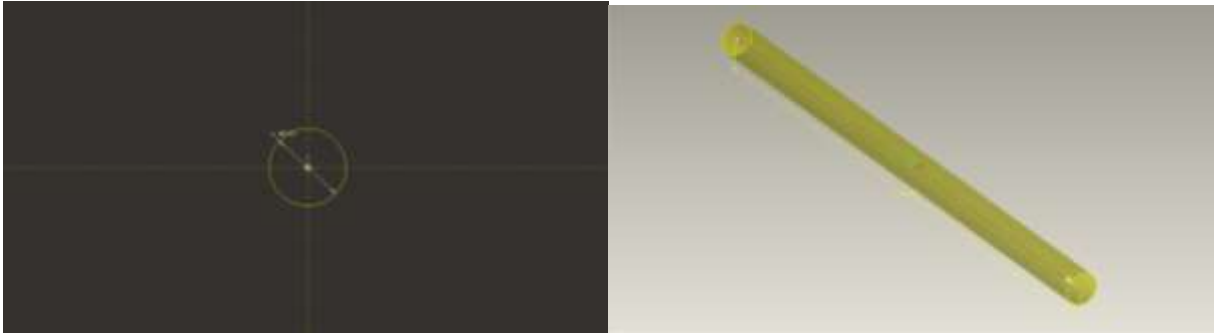
5.3.3 Έμβολο (Cyl)

Το εξάρτημα αυτό, χρησιμεύει στην σύνδεση της σχάρας με άξονες της βάσης. Πιο συγκεκριμένα, επιτρέπει τη στήριξη και κίνηση όλης της υδραυλικής βάσης στήριξης.

Το έμβολο σχεδιάστηκε, με μια αλληλουχία εντολών, όπως φαίνεται παρακάτω..



Εικόνα 54: Παρατίθεται και η ακριβής του θέση, μετά τη συναρμολόγηση, για την καλύτερη κατανόηση της δομής της κατασκευής



Εικόνα 55: Αρχικά με την εντολή sketch, σχεδιάζεται η αρχική διατομή. Στη συνέχεια, με την εντολή extrude, δίδεται όγκος, με προσθήκη υλικού.



Εικόνα 56: Με την εντολή sketch, σχεδιάζεται στο top datum plane, μια διατομή η οποία πρόκειται να προεκταθεί, κάθετα στον κεντρικό άξονα. Και στην συνέχεια extrude, προστίθεται υλικό, συμμετρικά ως προς το top datum plane.

5.3.4 Εξωτερικός Κύλινδρος (Cylinder_Max)

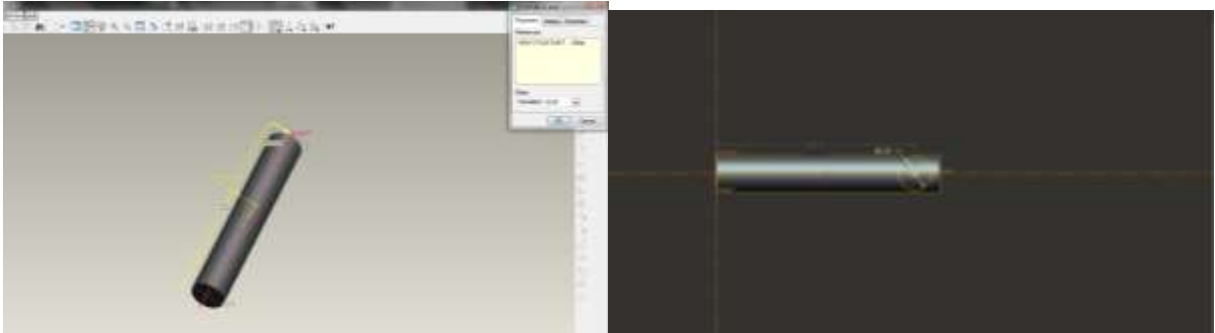
Στον εξωτερικό κύλινδρο επίσης έχει δοθεί προσοχή στις διαστάσεις. Έχει δοθεί επιπλέον μήκος από το έμβολο, για να αποφευχθεί κατά τη σύνθεση, τυχόν τραυματισμός του εξωτερικού κυλίνδρου, για οριακή θέση της σχάρας. Παρακάτω παρατίθενται κομβικά οι κύριες εντολές της σχεδίασης του εξωτερικού κυλίνδρου.



Εικόνα 57: Γενική εικόνα τοποθέτησης του εμβόλου στο τελικό σχέδιο



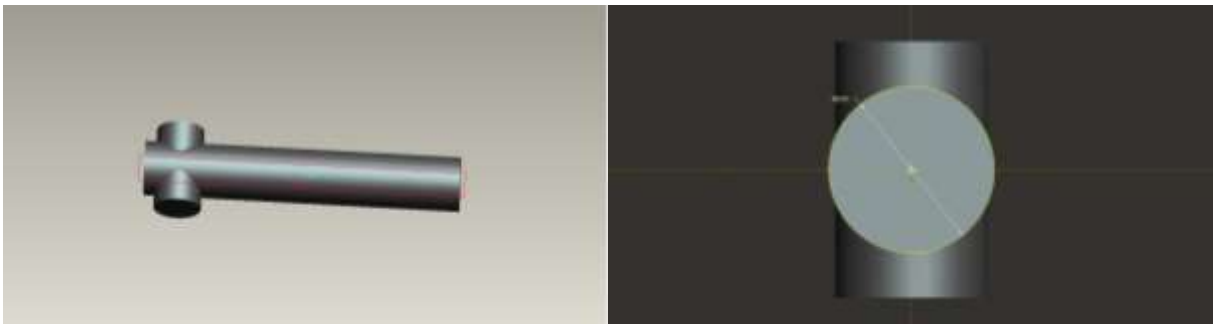
Εικόνα 58: Με sketch, σχεδιάζεται η αρχική διατομή, σύμφωνα με τις διαστάσεις και των άλλων εξαρτημάτων. Έπειτα, με extrude δίδεται όγκος στην διατομή και δημιουργείται η δοκός.



Εικόνα 59: Στην συνέχεια δημιουργείται ένα καινούργιο datum plane σε απόσταση 50 από το right datum plane , όπως φαίνεται στην εικόνα. Με την εντολή sketch σχεδιάζεται η οπή (δεξιά)



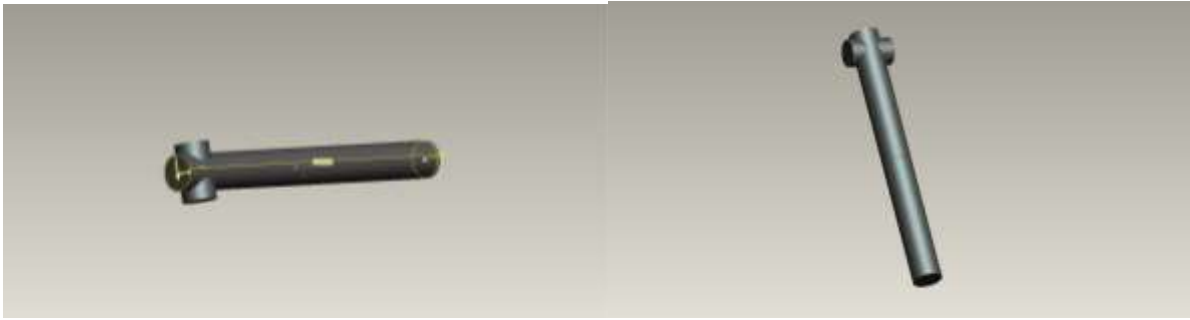
Εικόνα 60: Ακόμα με την εντολή extrude , προστίθεται όγκος στο τελευταίο σχέδιο. Με την εντολή mirror και με άξονα συμμετρίας το right datum plane , αντικατοπτρίζεται από την άλλη μεριά



Εικόνα 61: Με ένα δεύτερο mirror προκύπτει επέκταση και συνεπώς διπλασιασμός του κύριου άξονα, όπως φαίνεται στην εικόνα. Δεξιά σχεδιάζεται μια διατομή με της επιθυμητές διαστάσεις.



Εικόνα 62: Με την εντολή extrude προεκτείνεται το παραπάνω sketch .Σχεδιάζεται ένας κύκλος, με τις απαραίτητες διαστάσεις με την εντολή sketch.



Εικόνα 63: Τέλος με την εντολή *extrude* και με αφαίρεση υλικού δημιουργείται η κατάλληλη κοιλότητα για την σύνδεση των τεμαχίων. Δεξιά παρατήθεται η τελική μορφή του εξαρτήματος.

5.3.5 Επίγεια Βάση Στήριξης (Grav_Base)

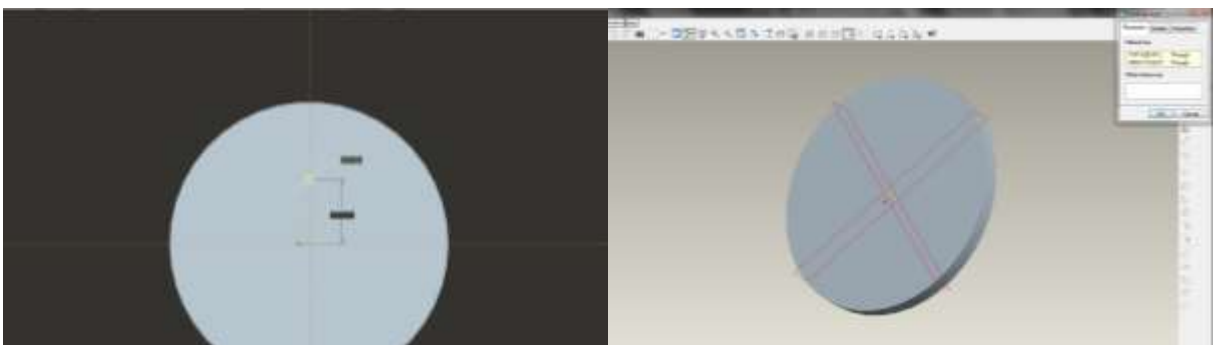
Το εξάρτημα αυτό, χρησιμοποιείται για την στήριξη όλης της κατασκευής. Δένεται πάνω στη βάση στήριξης, με τη βοήθεια κοχλιών, και εφάπτεται με το έδαφος. Η σχεδίαση της επίγειας βάσης στήριξης φαίνεται αναλυτικά παρακάτω



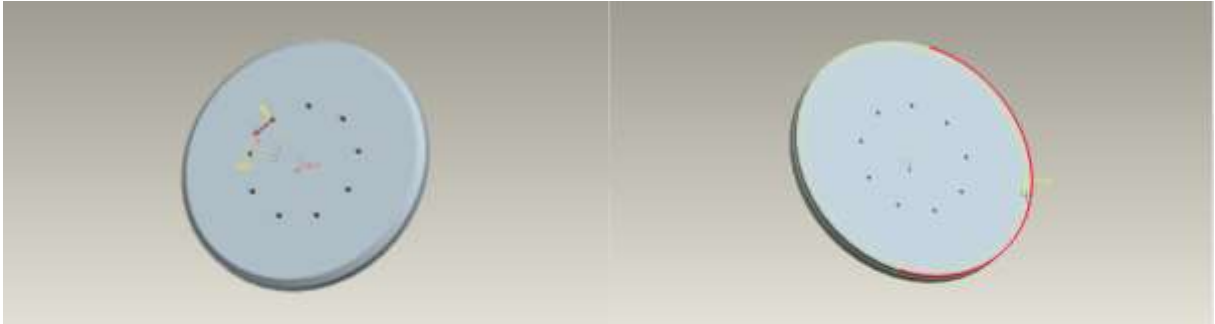
Εικόνα 64: Γενική εικόνα τοποθέτησης της βάσης



Εικόνα 65: Με την εντολή *sketch* σχεδιάζεται ένα κυκλικό τμήμα. Στην συνέχεια με την εντολή *extrude* προστίθεται όγκος



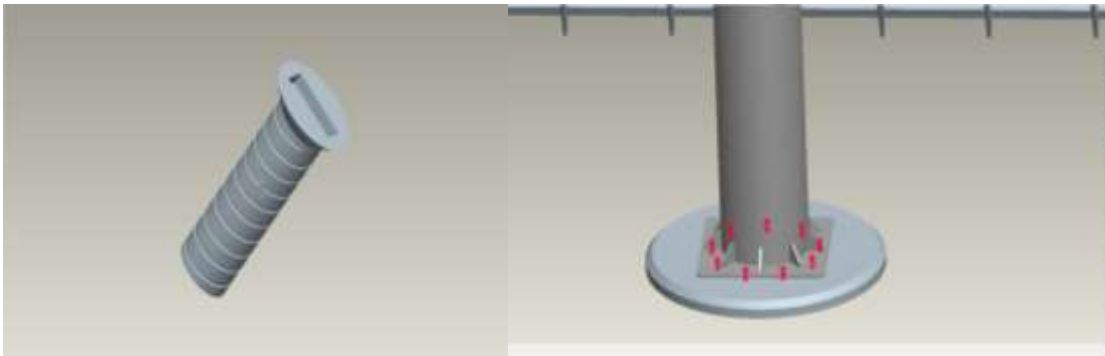
Εικόνα 66: Στο κομμάτι σχεδιάζεται μια οπή στις επιθυμητές διαστάσεις. Προστίθεται ένας άξονας στο σημείο τομής των επιπέδων *top datum plane* και *right datum plane*.



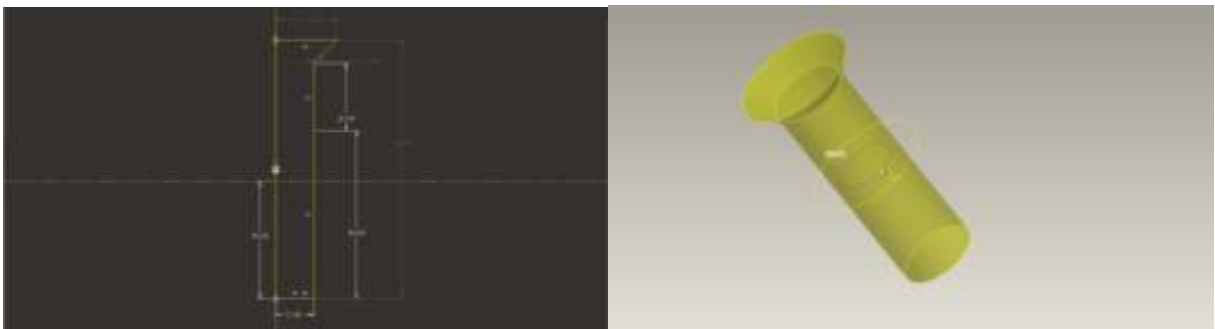
Εικόνα 67: Με την εντολή pattern σχεδιάζονται περιμετρικά από τον καινούργιο μας άξονα, οι οπές της βάσης. Με την εντολή chamfer, διαμορφώθηκαν «σπασίματα» στις άκρες της επίγειας βάσης στήριξης

5.3.6 Κοχλίας (Screw_base)

Το εξάρτημα αυτό χρησιμεύει στη σύνδεση της επίγειας βάσης στήριξης με την βάση στήριξης. Στο στάδιο της συναρμολόγησης, προσαρμόζονται στις οπές των δύο προαναφερθέντων εξαρτημάτων.



Εικόνα 68: Γενική εικόνα τοποθέτησης των κοχλιών στη βάση



Εικόνα 69: Με την εντολή sketch, σχεδιάζεται η εξωτερική μορφή του κοχλία. Με revolve, γύρω από τον άξονα συμμετρίας κατά 360° , δίδεται ο απαιτούμενος όγκος, συμβατός των οπών των άλλων δύο εξαρτημάτων.



Εικόνα 70: Με χρήση της εντολής sketch, σχεδιάζεται ορθογωνική διατομή για τη δημιουργία κοιλότητας στο πάνω μέρος της βίδας. Με την εντολή extrude, πραγματοποιείται με αφαίρεση υλικού, στην διατομή που σχεδιάσθηκε.

5.3.7 Κοχλίας Σχάρας (Screw_top)

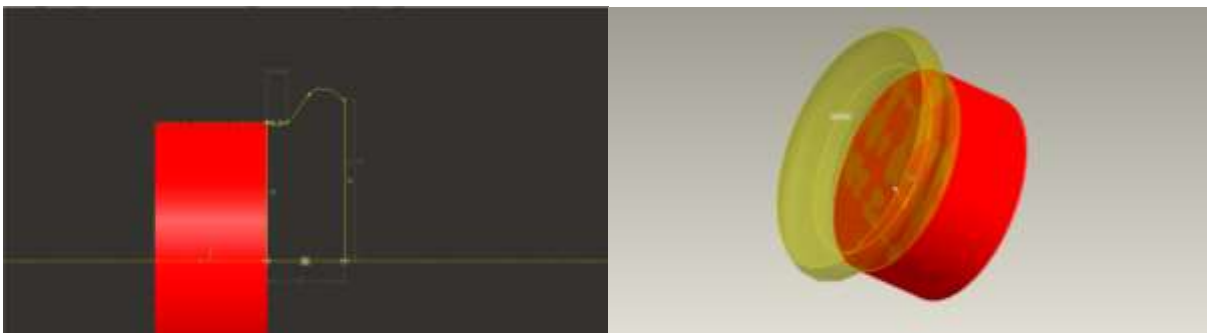
Το εξάρτημα αυτό χρησιμεύει για τη συγκράτηση της σύνδεσης σχάρας, αξόνων. Όπως και στα άλλα εξαρτήματα, κατά τη σχεδίαση του κοχλία δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στις διαστάσεις, ούτως ώστε να είναι συμβατές με τα υπόλοιπα εξαρτήματα.



Εικόνα 71: Με κόκκινο χρώμα, φαίνεται η τελική θέση του εξαρτήματος και η τελική τοποθέτησή του στην κατασκευή.



Εικόνα 72: Με την εντολή sketch σχεδιάσθηκε η αρχική διατομή. Με την εντολή extrude δόθηκε όγκος στη διατομή



Εικόνα 73: Χρησιμοποιώντας την εντολή sketch, σχεδιάσθηκε η εξωτερική επιθυμητή τρύχιά που θα δωθεί μετέπειτα όγκος. Με χρήση της εντολής revolve κατά 360° ως προς τον δοσμένο άξονα συμμετρίας, προκύπτει το εξής



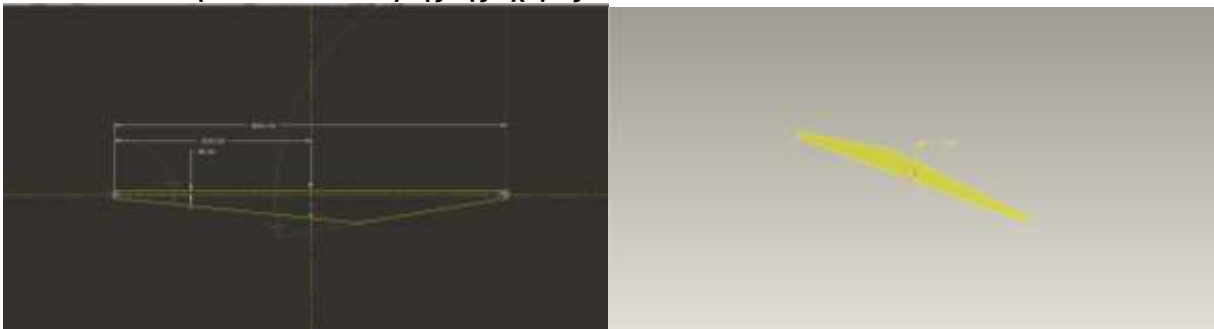
Εικόνα 74: Χρησιμοποιείται η εντολή mirror, με την οποία αντικατοπτρίζεται η μορφή του εξαρτήματος ως προς το front datum plane. Η τελική μορφή του εξαρτήματος (δεξιά)

5.3.8 Σχάρα

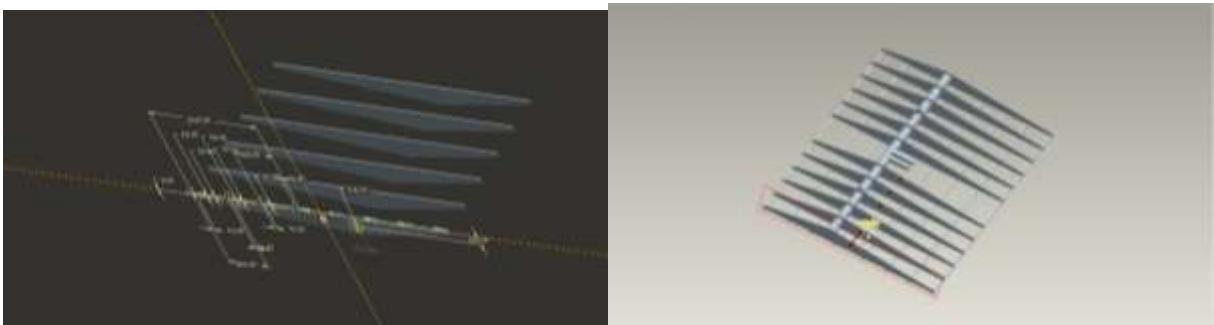
Η σχάρα είναι το κύριο τμήμα της υδραυλικής βάσης στήριξης, πάνω στην οποία προσαρμόζονται τα φ/β κελιά. Παρά κάτω παρατίθενται αναλυτικά οι εντολές σχεδίασης του συγκεκριμένου εξαρτήματος.



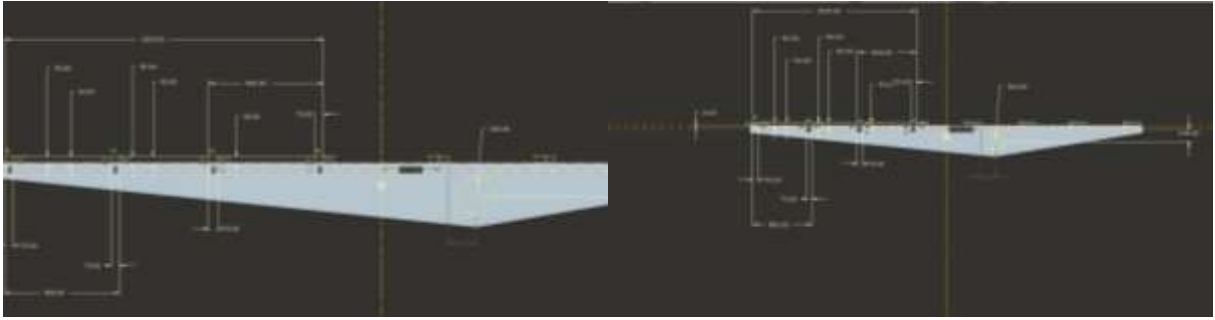
Εικόνα 75: Γενική εικόνα τοποθέτησης της σχάρας



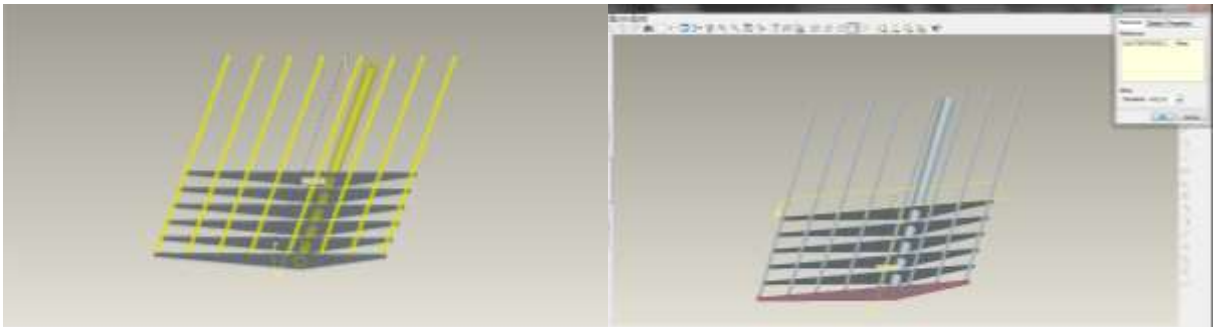
Εικόνα 76: Με χρήση της εντολής sketch, σχεδιάζεται μια αρχική διατομή. Στη διατομή, δίδεται όγκος με χρήση της εντολής extrude, με προσθήκη υλικού.



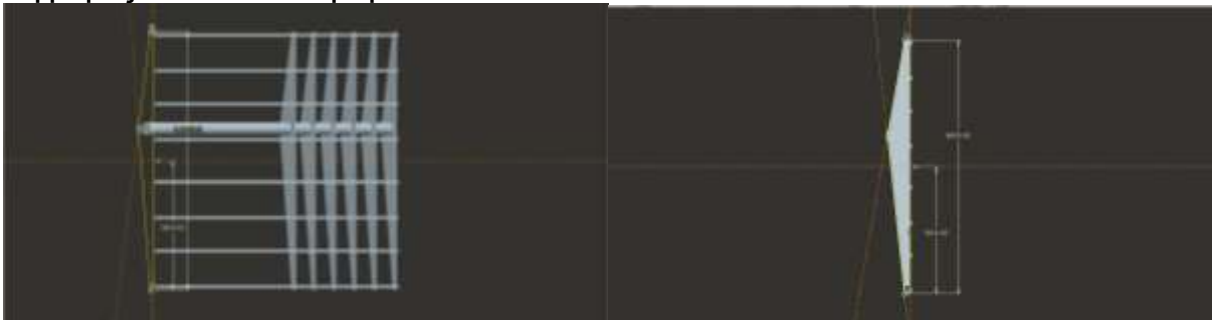
Εικόνα 77: Η εντολή pattern, χρησιμοποιείται για να αντιγραφεί η διατομή 5 φορές



Εικόνα 78: Χρησιμοποιώντας την εντολή sketch, σχεδιάζονται οι διατομές στις οποίες θα δοθεί στη συνέχεια προέκταση, κάθετα του αρχικού σχεδίου. Διαφορετική οπτική του sketch, ώστε να εμφανίζονται καλύτερα οι ζητούμενες διατομές



Εικόνα 79: Με χρήση της εντολής extrude, επιμηκύνονται οι καινούριες διατομές. Ορίζεται νέο datum plane, το οποίο απέχει 4000 από την εξωτερική επιφάνεια, το οποίο θα χρησιμεύσει ως άξονας συμμετρίας στον αντικατοπτρισμό.



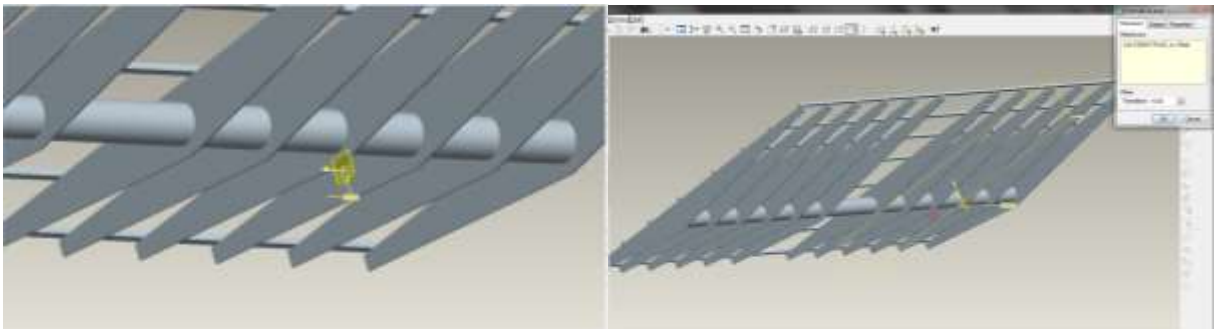
Εικόνα 80: Χρησιμοποιείται η εντολή sketch, για τον σχεδιασμό της εξωτερικής επιφάνειας, από την άλλη πλευρά της σχάρας. Σχεδιάζεται στην εξωτερική επιφάνεια, ορίζοντας ως References το right και προσανατολισμό το top.



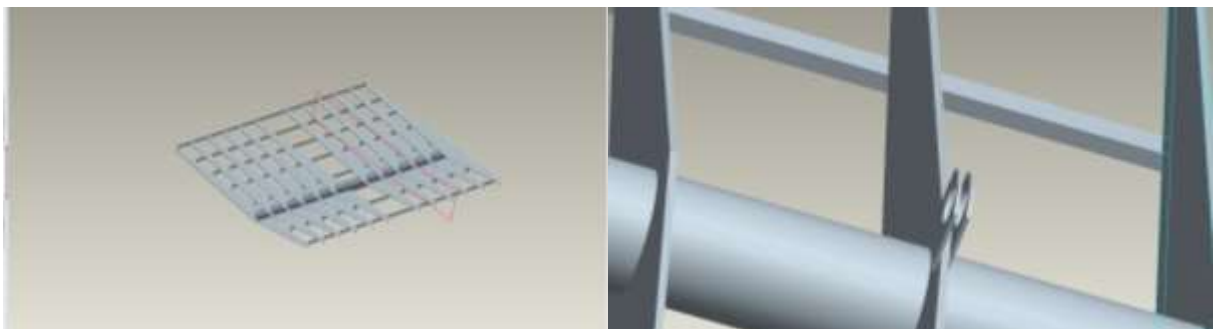
Εικόνα 81: Με χρήση της εντολής extrude δίδεται όγκος στη σχεδιασμένη διατομή. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η εντολή pattern, 5 φορές, όπως έγινε και στο άλλο μισό της σχάρας.



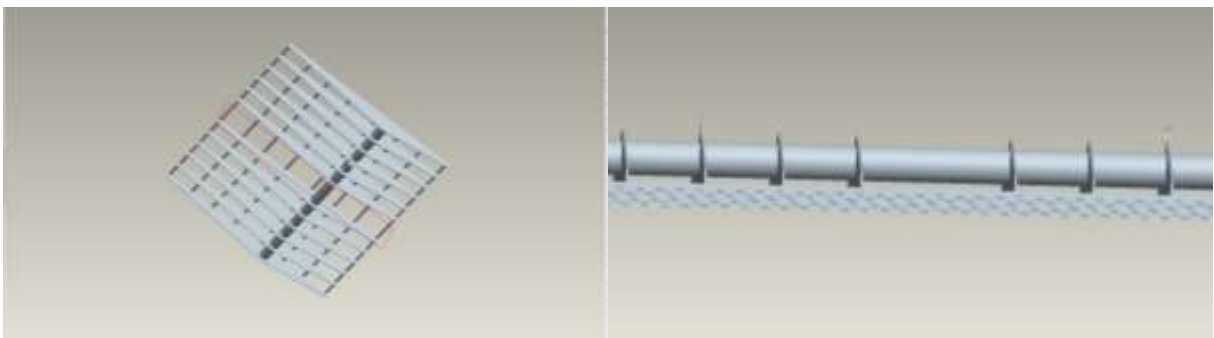
Εικόνα 82: Με χρήση της εντολής *sketch* , σχεδιάζονται οι υποδοχές που θα συνδεθεί η σχάρα με τους άξονες, στο 4^ο κάθετο κομμάτι της σχάρας. Διαφορετικές οπτικές της σχεδίασης.



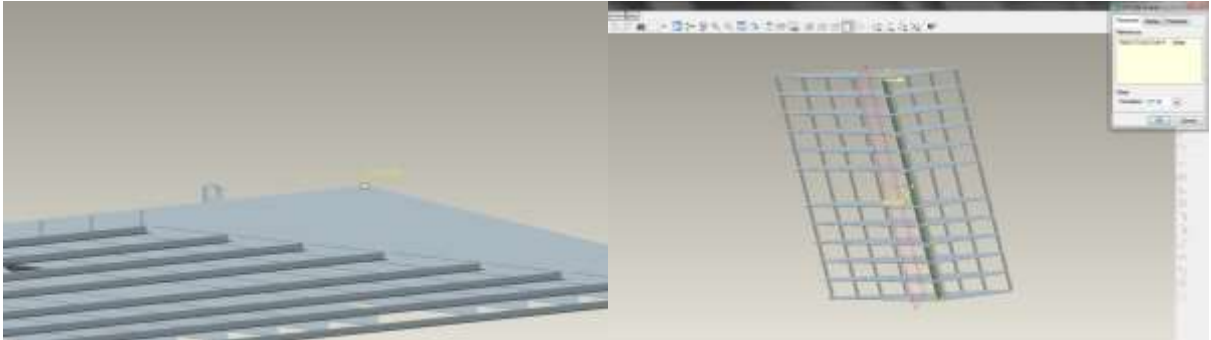
Εικόνα 83: Με χρήση της εντολής *extrude*, δίδεται όγκος στη σχεδιασμένη προεξοχή, η οποία έχει διαστάσεις οπής συμβατές με αυτές της προεξοχής των 2 αξόνων. Ορίζεται νέο *datum plane* 2, με απόσταση από την εξωτερική επιφάνεια της τελευταίας διατομής , 10, όπως φαίνεται στην εικόνα.



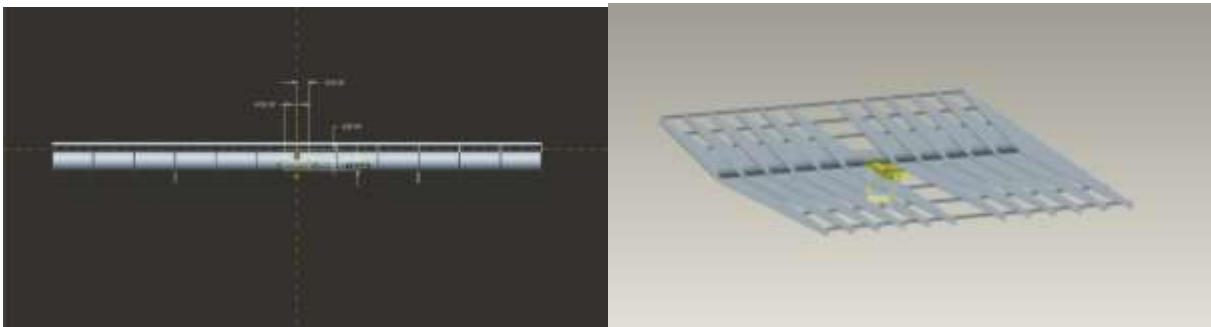
Εικόνα 84: Επιτυγχάνεται με *mirror*, αντικατοπτρισμός της τελευταίας διατομής , ως προς το νέο *datum plane*. Το *mirror* πραγματοποιείται για συγκεκριμένη απόσταση, ανάλογη της απόστασης της επιφάνειας του άλλου εξαρτήματος που θα εισαχθεί εν συνεχεία στο στάδιο της συναρμολόγησης. Δίνεται προσοχή στις διαστάσεις της οπής και της απόστασης του *mirror* . Διαφορετική οπτική του αποτελέσματος.



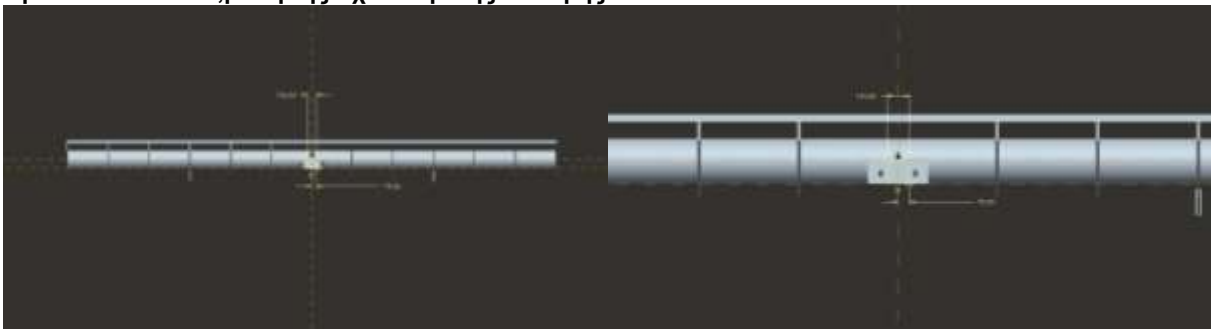
Εικόνα 85: Επαναχρησιμοποιείται η εντολή *mirror*, για αντικατοπτρισμό των δύο προεξοχών , από την άλλη πλευρά της σχάρας. Δεξιά διαφορετική οπτική του νέου αντικατοπτρισμού.



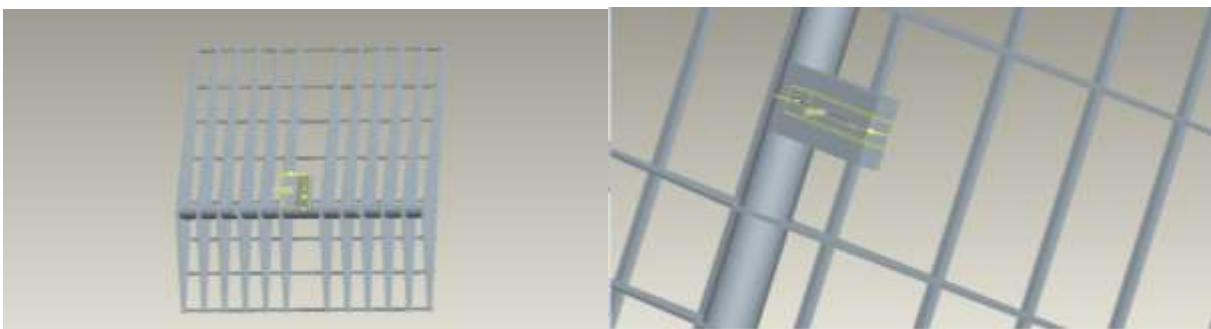
Εικόνα 86: Με χρήση της εντολής *round*, στρογγυλεύονται οι γωνίες, όπως φαίνονται στην εικόνα. Στη συνέχεια ορίζεται νέο datum plane 3, σε απόσταση 727.38 από το right datum plane.



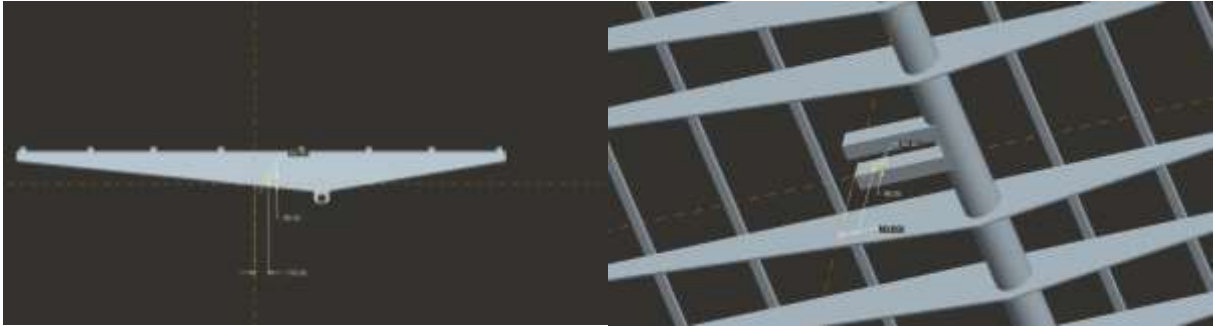
Εικόνα 87: Με χρήση της εντολής *sketch* σχεδιάζεται η εικονιζόμενη ορθογώνια διατομή. Με *extrude* προστίθεται υλικό, βάση της σχεδιασμένης διατομής.



Εικόνα 88: Χρησιμοποιείται η εντολή *sketch*, για σχεδίαση του κομματιού από το οποίο θα αφαιρεθεί υλικό. Δεξιά διαφορετική οπτική της σχεδίασης.



Εικόνα 89: Με χρήση της εντολής *extrude*, επιτυγχάνεται αφαίρεση υλικού, από την τελευταία διατομή. Δεξιά διαφορετική οπτική για την αφαίρεση υλικού



Εικόνα 90: Με χρήση της εντολής sketch, σχεδιάζεται οπή στη τελευταία προεξοχή. Δεξιά διαφορετική οπτική, του σημείου της οπής



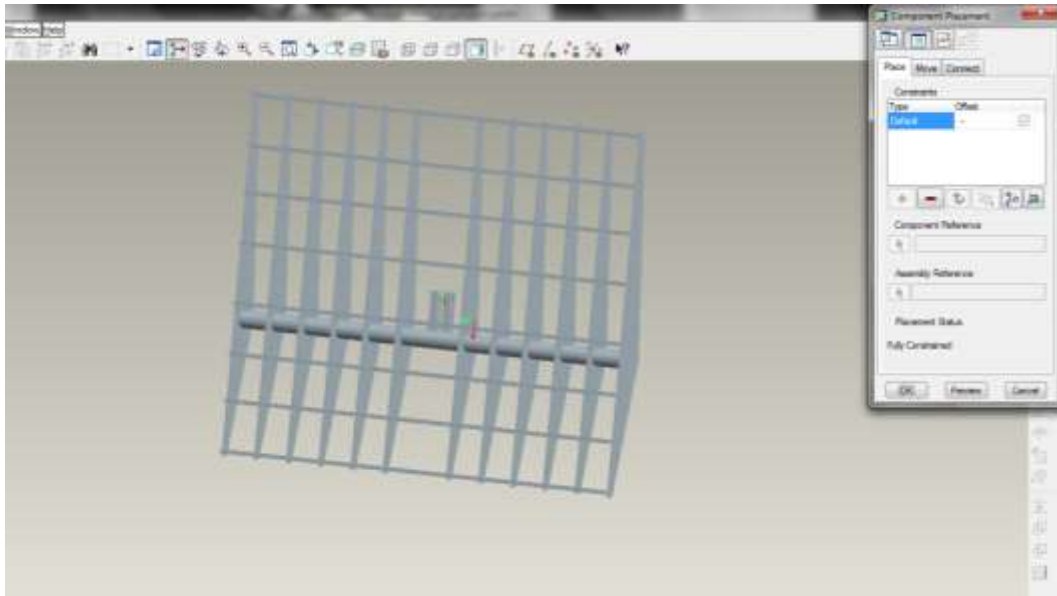
Εικόνα 91: Με extrude, και αφαίρεση υλικού, δημιουργείται η ζητούμενη οπή η οποία χρησιμεύει για την σύνδεση και στήριξη του εμβόλου. Με χρήση της εντολής mirror αντικατοπτρίζουμε την οπή από πού σχεδιάστηκε πιο πάνω, ως προς το datum plane 1 το οποίο έχει ορισθεί προηγουμένως.



Εικόνα 92: Με χρήση της εντολής round, επιτυγχάνεται το στρογγύλεμα της εξωτερικής επιφάνειας της προεξοχής, όπως φαίνεται στην εικόνα. Δεξιά, παρατίθεται η τελική μορφή της σχάρας.

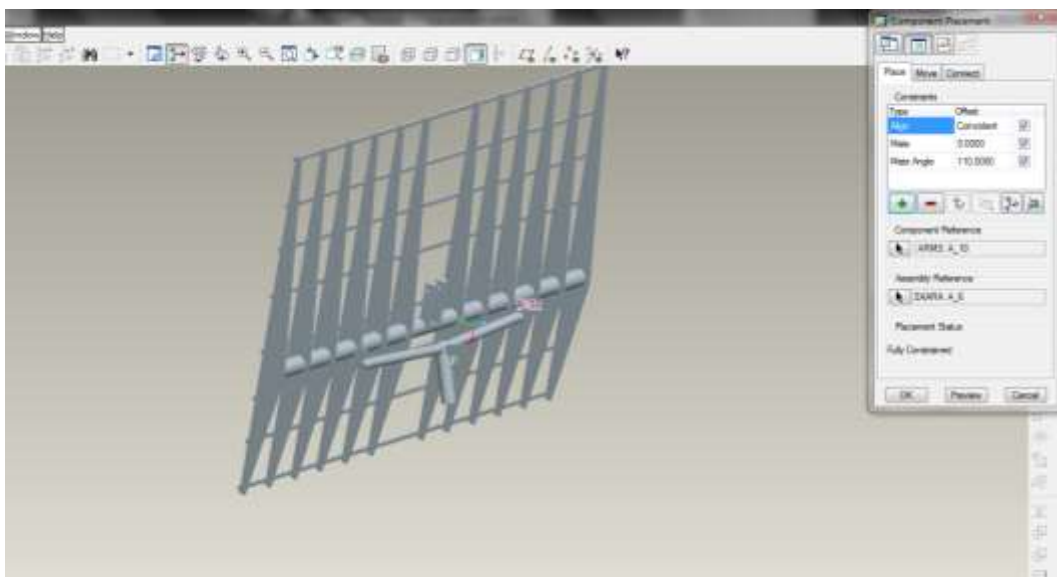
5.4 Συναρμολόγηση (Assembly)

Αφού έχουν σχεδιασθεί , όλα τα τεμάχια, στις κατάλληλες διαστάσεις, βάση των αρχικών μηχανολογικών σχεδίων, ακολουθεί το στάδιο της συναρμολόγησης. Παρά κάτω παρατίθενται αναλυτικά , οι συνδέσεις των εξαρτημάτων μεταξύ τους , και το τελικό αποτέλεσμα της ολικής συναρμολογημένης κατασκευής. Το πρώτο κομμάτι που εισάχθηκε στο assembly ήταν η σχάρα. Διαλέγουμε από το παράθυρο την επιλογή full constrained, υποδηλώνοντας δηλαδή ότι είναι πλήρως τοποθετημένο στον χώρο. Βάση των αξόνων της σχάρας , θα τοποθετηθούν και θα συναρμολογηθούν , όλα τα υπόλοιπα τεμάχια.



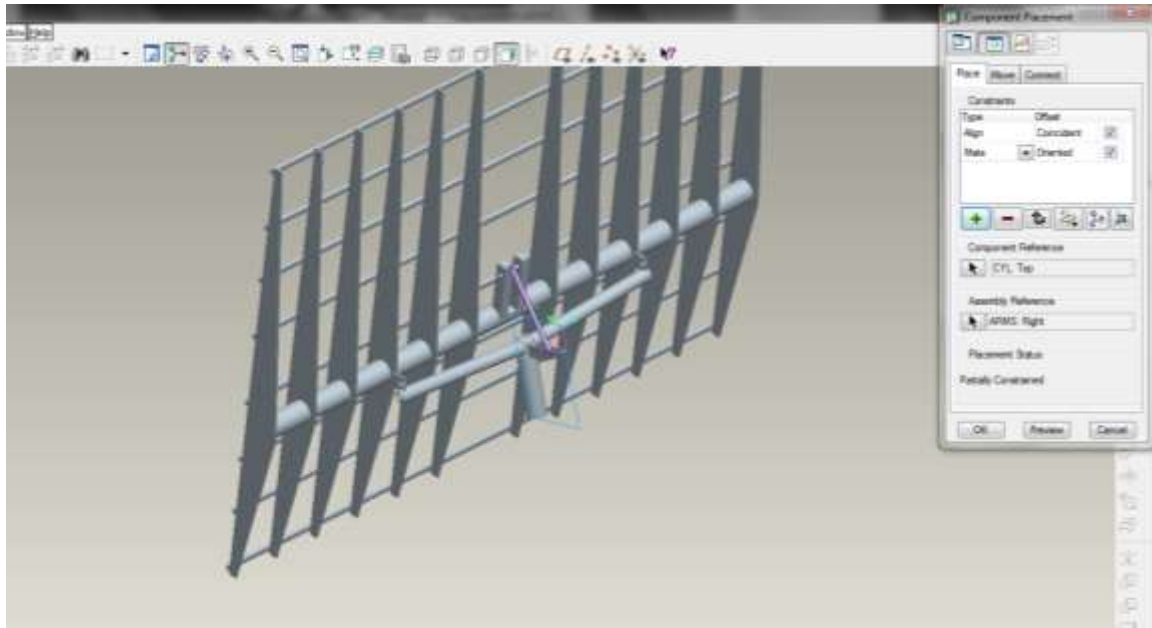
Εικόνα 93: Συναρμολόγηση

Το πρώτο τεμάχιο που συναρμολογείται πάνω στη σχάρα είναι το arms. Επιλέγεται αρχικά το align (επιλογή coincident), και συσχετίζονται τα 2 επίπεδα των τεμαχίων. Στη συνέχεια , με το mate constraint με τιμή 0 , τα arms ευθυγραμμίζονται και τοποθετούνται στο επιθυμητό ύψος, σε σχέση με τη σχάρα. Τέλος , με το mate angle constraint μπορεί να δοθεί η επιθυμητή γωνία κλίσης της περιστρεφόμενης υδραυλικής βάσης. Έστω ότι δίνεται η τιμή 110, σύμφωνα με την οποία , είναι οι εικόνες που παρατίθενται.



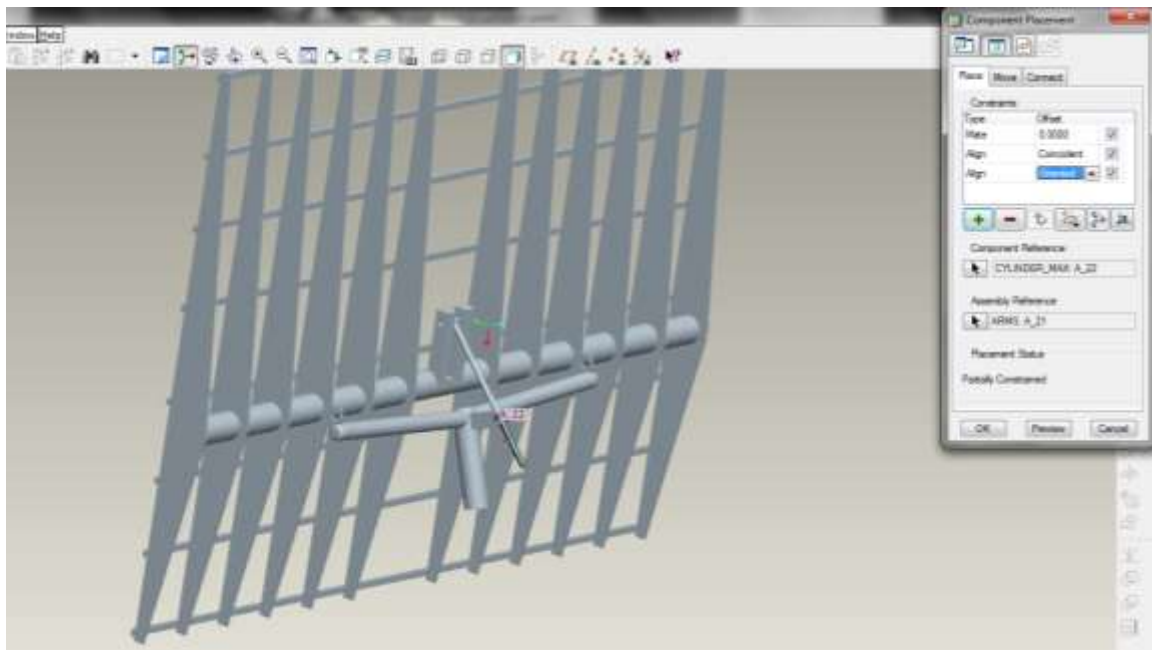
Εικόνα 94: Συναρμολόγηση

Το επόμενο κομμάτι που εισάγεται για συναρμολόγηση , είναι το cyl. Αρχικά, με **align constraint** , ενώνεται το τεμάχιο με τη σχάρα, και στη συνέχεια , με **mate** (oriented) τοποθετείται κατάλληλα , επιλέγοντας το top datum plane του τεμαχίου, και το right datum plane του τεμαχίου arms .



Εικόνα 95: Συναρμολόγηση

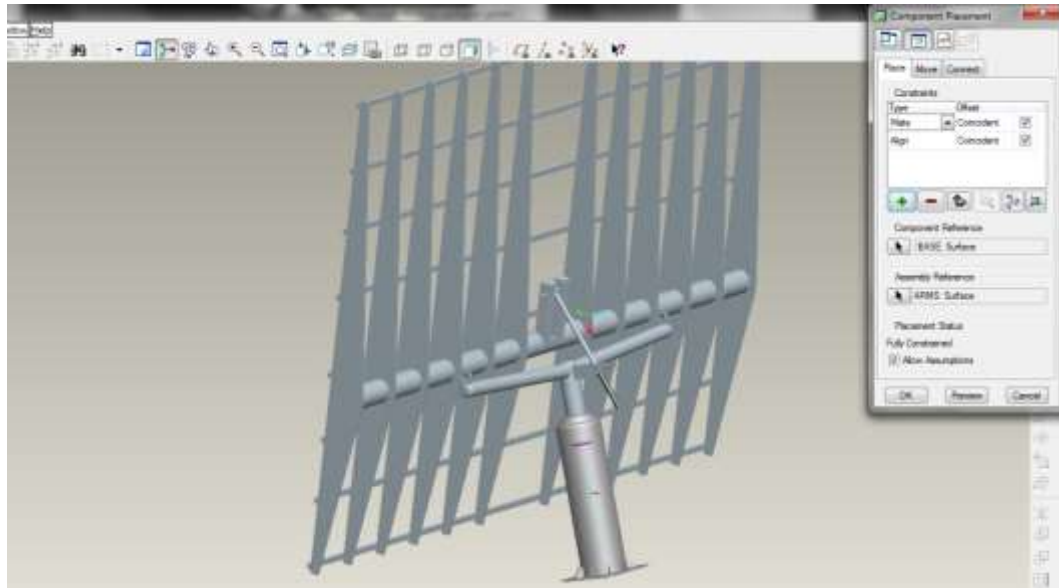
Στη συνέχεια, τοποθετείται το κομμάτι cylinder. Με **mate** , ευθυγραμμίζεται στο κατάλληλο ύψος με το cyl. Το δεύτερο **constraint** που επιλέχθηκε , ήταν το **align** (coincident), ώστε να τοποθετηθεί σωστά στην κατασκευή , και **align** (oriented) για την τελική τοποθέτηση του τεμαχίου. Πιο συγκεκριμένα, ως **component reference** επιλέχθηκε ο άξονας του cylinder, ενώ ως **assembly reference** , ο άξονας του τεμαχίου arms. Η συναρμολόγηση μετά το πέρας των παραπάνω επιλογών έχει ως εξής



Εικόνα 96: Συναρμολόγηση

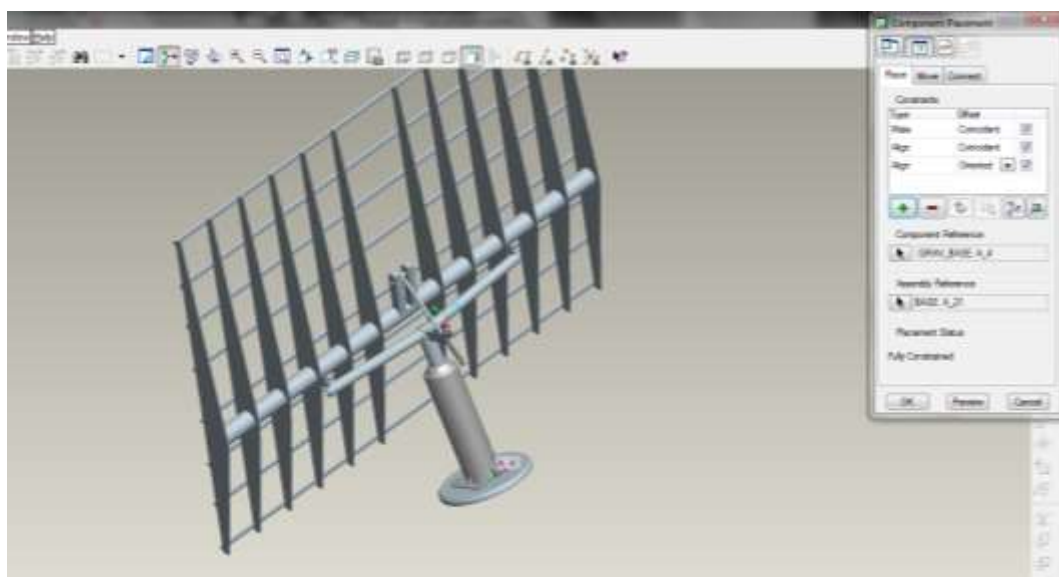
Εισάγεται το επόμενο κομμάτι , το οποίο είναι το τεμάχιο base , το οποίο θα συνδεθεί στο τεμάχιο arms. Αρχικά ως πρώτο constraint επιλέγεται το mate(coincident). Ως **component**

reference επιλέγεται η εσωτερική κυλινδρική άνω επιφάνεια της βάσης(base), ενώ ως **assembly reference** , η κυκλική κάτω επιφάνεια του τεμαχίου arms. Τέλος για να ορισθεί πλήρως στο χώρο η βάση, χρειάζεται να προστεθεί ένα **align constraint** (coincident), σύμφωνα με το οποίο, οι 2 άξονες των τεμαχίων ευθυγραμμίζονται.



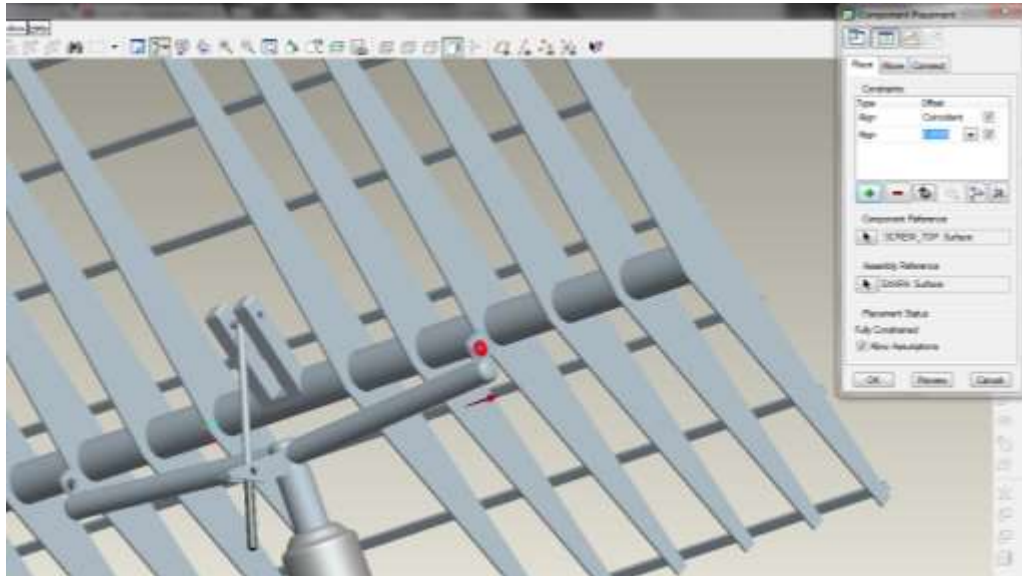
Εικόνα 97:Συναρμολόγηση

Έπειτα , εισάγεται το κομμάτι grave_base, και τοποθετείται στο τεμάχιο base. Αρχικά, χρησιμοποιείται ως πρώτο **constraint** το **mate**(coincident), το οποίο φέρνει στο κατάλληλο ύψος την κάτω επιφάνεια του τεμαχίου base με την άνω επιφάνεια του τεμαχίου grave_base. Στη συνέχεια ως **component** προσθέτουμε ένα **align**(coincident), επιλέγοντας ως **component reference** και ως **assembly reference**, τους κάθετους άξονες των 2 κομματιών , ούτως ώστε τα κομμάτια να ευθυγραμμιστούν . Τέλος , ως τελευταίο constraint προστέθηκε το **align** (oriented), ευθυγραμμίζοντας τους άξονες των οπών που θα τοποθετηθούν εν συνεχεία οι κοχλίες. Με αυτόν τον τρόπο, στρέφεται το grave_base στην επιθυμητή γωνία σε σχέση με την υπόλοιπη κατασκευή, για να μπορούν να εισαχθούν χωρίς πρόβλημα οι κοχλίες που θα «δένουν» την κατασκευή με το έδαφος.



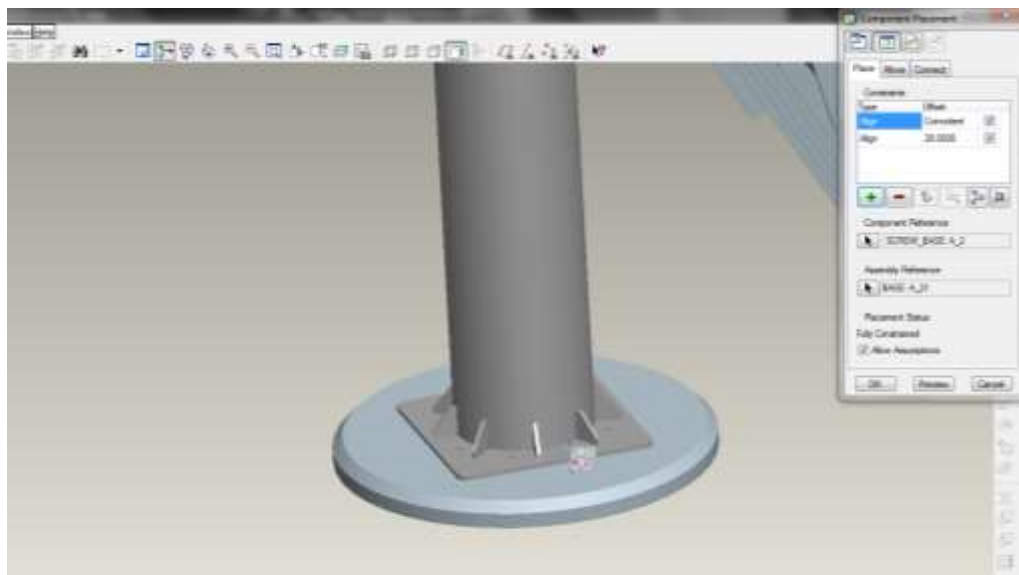
Εικόνα 98:Συναρμολόγηση

Σε αυτό το σημείο, τοποθετούνται τα 2 τεμάχια screw_top , τα οποία χρησιμεύουν στην συγκράτηση της σύδεσης της σχάρας με τα arms. Ως πρώτο **constraint** επιλέχθηκε το **align**(coincident), ώστε να επέλθει ο κοχλίας στο κατάλληλο ύψος, επιλέγοντας ως **component reference** και ως **assembly reference** τους άξονες της οπής της σχάρας και του κοχλίου , όπως φαίνεται στην εικόνα. Ως δεύτερο **constraint** , προστίθεται ξανά **align** , και μεταξύ των 2 επιφανειών επιλέχθηκε απόσταση 0. Η τελική μορφή αυτού του σταδίου της συναρμολόγησης φαίνεται στην εικόνα.

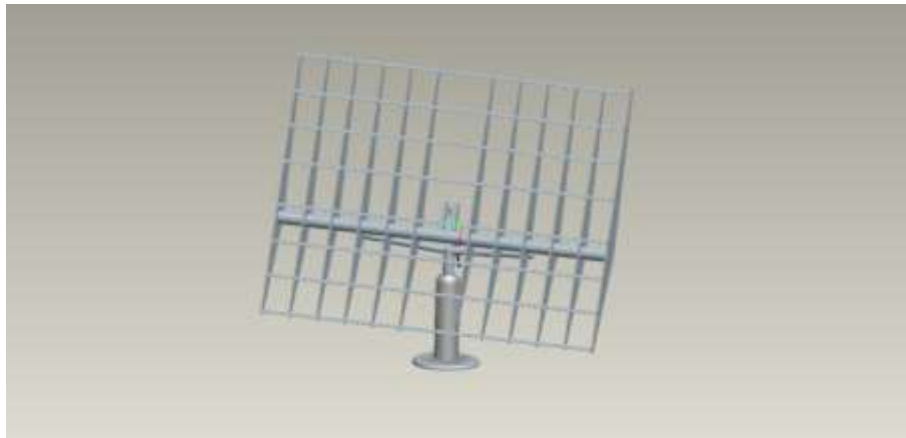


Εικόνα 99:Συναρμολόγηση

Τέλος, εισάγεται το τεμάχιο screw_base, στις οπές τη σύνδεσης του grave_base με το base. Αρχικά , ως πρώτο **constraint** προστίθεται ένα **align** (coincident), με το οποίο ταυτίζονται οι άξονες του κοχλίου με αυτόν της βάσης. Στη συνέχεια, ως **constraint** προστίθεται ένα επιπλέον **align** , με **component reference** την άνω επιφάνεια του screw_base , με **assembly reference** την άνω επιφάνεια του grave_base και με απόσταση 28. Με αυτόν τον τρόπο ο κάθε κοχλίας τοποθετείται και μετακινείται ελάχιστα προς την άνω διεύθυνση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται ακόμα 7 φορές, ούτως ώστε να τοποθετηθούν και να συναρμολογηθούν και οι 8 κοχλίες της κατασκευής. Η τελική μορφή αυτής της συναρμολόγησης έχει τη εξής μορφή.



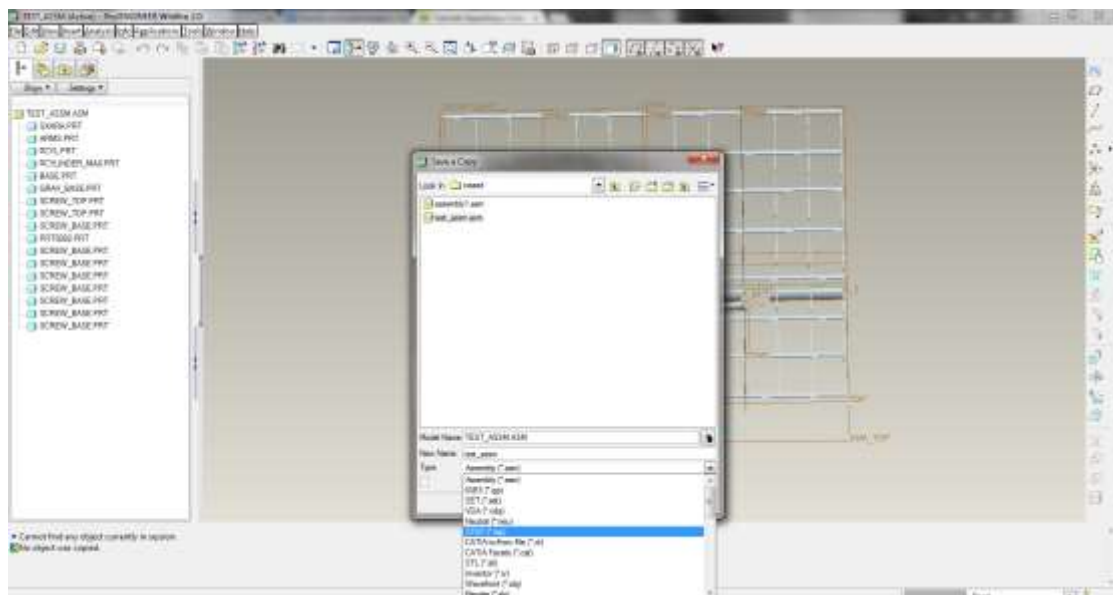
Εικόνα 100:Συναρμολόγηση



Εικόνα 101: Εικόνα της κατασκευής, συνολικά διαμορφωμένη

5.5 Αποθήκευση Αρχείου

Τέλος αποθηκεύεται το αρχείο σε μορφή αναγνωρίσιμη από το πρόγραμμα z88(*.stp). Πιο συγκεκριμένα, αρχικά αποθηκεύτηκε ως IGES file(*.igs). Έπειτα ανοίχθηκε ως ένα ενιαίο part και αποθηκεύτηκε ως **step file**, όπως φαίνεται στην εικόνα, και στη συνέχεια εισάχθηκε στο επόμενο πρόγραμμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι πριν από κάθε αποθήκευση δίνεται μεγάλη σημασία στο σύστημα διαστασιολόγησης (πρέπει να ελεγχθεί ότι είναι σε από τη καρτέλα) ούτως ώστε να είναι συμβατό με τη διαστασιολόγηση που χρησιμοποιείται σε επόμενο πρόγραμμα.⁶



Εικόνα 102: Αποθήκευση αρχείου

⁶ Σε περίπτωση εμφάνισης προβλήματος στο z88, εισάγεται το κάθε ένα εξάρτημα της συνολικής κατασκευής, και έπειτα η σταδιακή συναρμολόγησή τους, έως ότου βρεθεί ο λόγος της μη συμβατότητας των 2 προγραμμάτων.

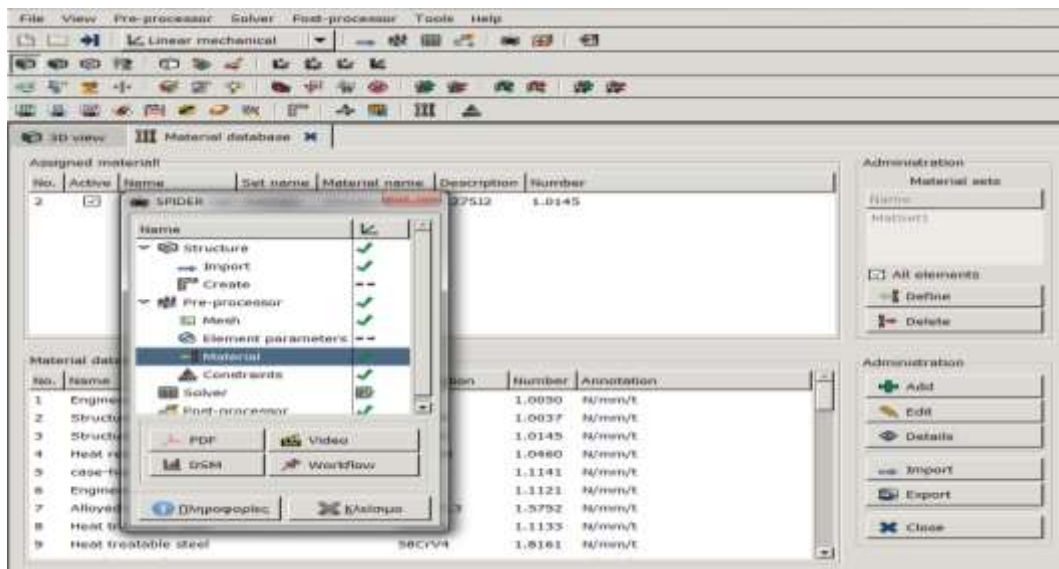
Κεφάλαιο 6^ο: Στατική Ανάλυση του Μοντέλου

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται στατικά το μοντέλο που έχει εισαχθεί στο πρόγραμμα z88, λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένες παραδοχές. Εν συνεχεία, αφού εισαχθούν οι φορτίσεις τις κάθε κατηγορίας παραδοχών, εισάγονται τα δεδομένα του υλικού κατασκευής. Έπειτα πραγματοποιείται πλεγματοποίηση και τέλος, επίλυση του μοντέλου.

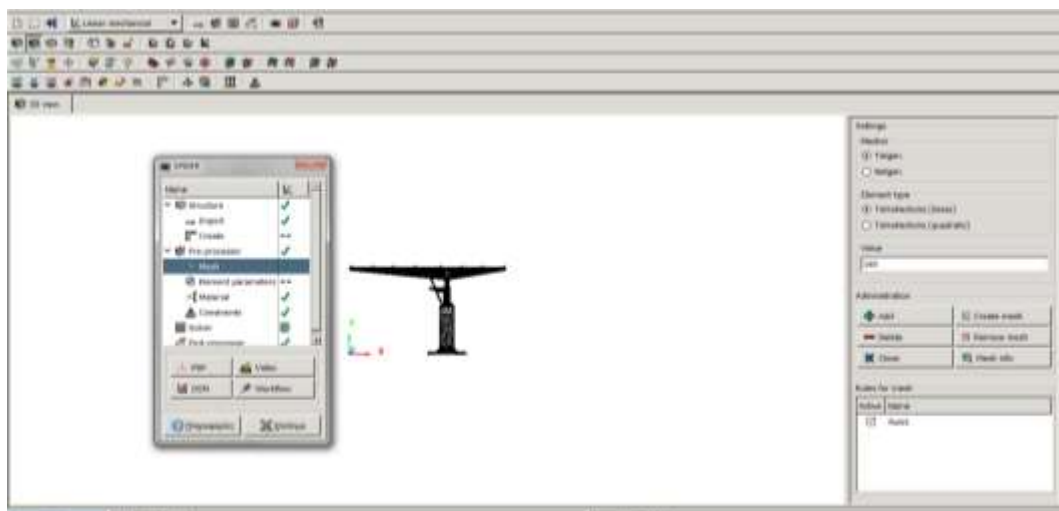
6.2 Εισαγωγή δεδομένων υλικού κατασκευής και δημιουργίας πλέγματος.

Αρχικά το μοντέλο εισάγεται με τη μορφή step(.stp) στο z88. Στη συνέχεια, εισάγονται τα δεδομένα του υλικού. Το φωτοβολταϊκό αποτελείται από Γαλβανισμένο αστάλι (Galvanized steel) για καλύτερη αντοχή και ανθεκτικότητα στη σκουριά. Επιλέγεται συνεπώς, η κατηγορία υλικού με τιμές κοντά στα χαρακτηριστικά του υλικού.



Εικόνα 103: Εισαγωγή στοιχείων υλικού κατασκευής

Έπειτα πραγματοποιείται πλεγματοποίηση γραμμική, ούτως ώστε να μπορεί να υπολογιστούν δυνάμεις και τάσεις σε οποιοδήποτε σημείο του μοντέλου.



Εικόνα 104: διαδικασία εισαγωγής πλέγματος

6.3 Προσδιορισμός των φορτίσεων και εισαγωγή τους μοντέλο

Αρχικά πραγματοποιείται ο υπολογισμός των δυνάμεων που ασκούνται στο δεδομένο σύστημα. Ειδικότερα, υπολογίζονται οι εξής δυνάμεις:

- Βάρος των πάνελ
- Βάρος του χιονιού (σε οριζόντια θέση της σχάρας ως προς τον κεντρικό άξονα)
- Περιπτώσεις ανεμοπίεσης (στην πιο ακραία θέση της σχάρας ως προς τον κεντρικό άξονα).

Αξίζει να αναφερθεί ότι για τον υπολογισμό του βάρους των πάνελ, το ίδιο βάρος των δοκών έχει ληφθεί υπ' όψιν κατά την εισαγωγή των δεδομένων όσον αφορά το υλικό της κατασκευής. Επίσης, ανάλογα με την περίπτωση που μελετάται, εισάγεται η σχεδιασμένη βάση, για διαφορετική θέση της σχάρας, σε σχέση με τον κάθετο άξονα.

6.3.1 Βάρος των πάνελ

Όσον αφορά τις διαστάσεις και το βάρος του κάθε πάνελ, τα δεδομένα συλλέχτηκαν από σχετική ιστοσελίδα στο διαδίκτυο⁷.

Πιο συγκεκριμένα, για το δεδομένο μοντέλο τα στοιχεία παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Όνομα μοντέλου	Sinosola
Κωδικός- Μέγιστη ισχύς	130W-155W
Υλικό	Monocrystalline
Διαστάσεις	1196*808*35mm
Βάρος/ τεμάχιο	12 kg

Πίνακας 6.1: Στοιχεία πάνελ

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τη διαστασιολόγηση που χρησιμοποιήθηκε κατά το σχεδιασμό του μοντέλου, μέσω του προγράμματος **Pro-Engineer**, υπολογίζεται το συνολικό βάρος της κατασκευής.

Η συνολική επιφάνεια του tracker όπως υπολογίζεται από τις περιμετρικές δοκούς είναι :

$$6(m) * 8(m) = 48(m^2)$$

Ενώ η επιφάνεια του κάθε πάνελ είναι:

$$1,2(m) * 0,8(m) = 0,96 (m^2)$$

Επομένως ο αριθμός των πάνελ υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{array}{l} 6/1,2=5 \\ 8/0,8=10 \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \right\} 5 * 10 = \mathbf{50 \text{ πάνελ}}$$

Σύμφωνα με τα στοιχεία του **πίνακα 6.1** το βάρος του κάθε πάνελ είναι **12(kg)**. Άρα το συνολικό βάρος προκύπτει ότι είναι:

$$50*12(kg)=600(kg)$$

⁷ http://www.alibaba.com/product-gs/51537374/pv_solar_panel_module.html?s=p

Εν συνεχεία πραγματοποιείται μετατροπή των κιλών σε Newton, για την εύρεση της συνολικής δύναμης, θεωρώντας μοναδική δύναμη που δέχεται η κατασκευή, το βάρος από τα πάνελ :

$$600(\text{kg}) * 9,80665(\text{m/s}^2) = 5883,99(\text{N})$$

Με τον παρακάτω υπολογισμό πραγματοποιείται κατανομή της δύναμης στις 8 δοκούς:

$$5883,99(\text{N})/8 = 735,5(\text{N})$$

Σύμφωνα με τη διαστασιολόγηση του μοντέλου η επιφάνεια κάθε δοκού είναι:

$$8(\text{m}) * 0,07(\text{m}) = 0,56(\text{m}^2)$$

Συνεπώς η δύναμη που ασκείται σε κάθε δοκό από το βάρος των πάνελ είναι:

$$735,5(\text{N})/0,56(\text{m}^2) = 1313,39(\text{N/m}^2)$$

Η παραπάνω δύναμη , θεωρείται ότι εφαρμόζεται σε κάθε μία δοκό, σε οριζόντια θέση της σχάρας.

6.3.2 Βάρος χιονιού

Με παρόμοιο τρόπο, για τον υπολογισμό των φορτίσεων λόγω του βάρους του χιονιού, συνυπολογίζεται το βάρος των πάνελ και το βάρος του χιονιού ανά m^2 , για οριζόντια θέση της σχάρας. Θεωρείται ότι για ακραία περίπτωση χιονιού (EMY) για κάθε m^2 υπάρχουν 60cm χιόνι ανά m^2 . Όπως προαναφέρθηκε για συνολική επιφάνεια 48m^2 υπολογίζεται ότι το συνολικό βάρος που δέχεται η κατασκευή από το χιόνι θα είναι:

$$0,6 * 48 (\text{m}^2) = 28,8 \text{τόνους ή } 28800 (\text{kg})$$

Στη συνέχεια μετατρέπονται τα κιλά σε Newton ως εξής:

$$28800(\text{kg}) * 9.80665(\text{m/s}^2) = 282431,52(\text{N})$$

Ενώ η δύναμη κατανέμεται ισοδύναμα στις 8 οριζόντιες δοκούς ως εξής :

$$282431,52 (\text{N})/8 = 35303,94(\text{N})$$

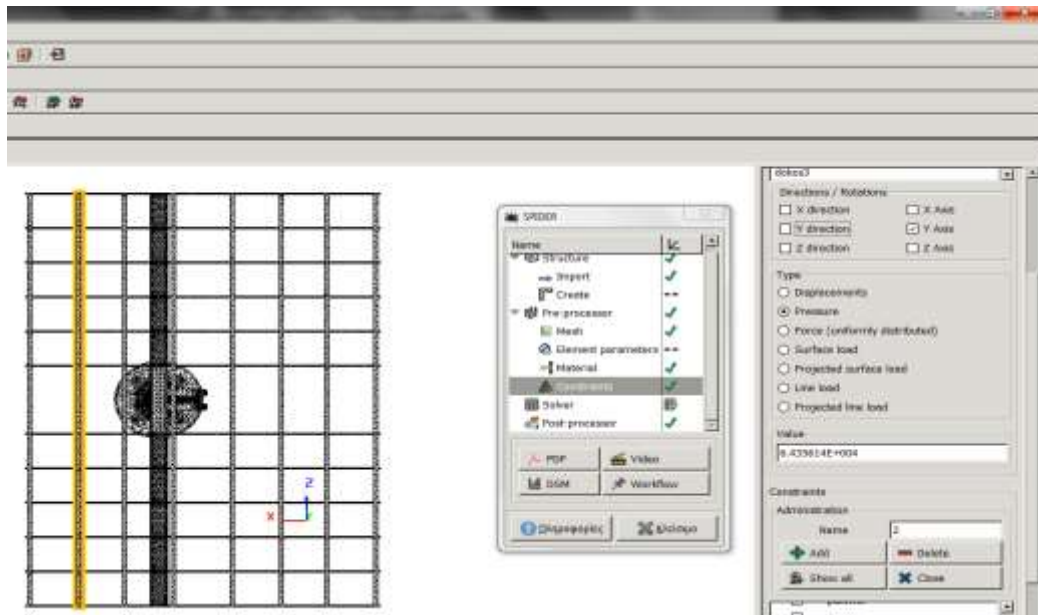
Έπειτα, διαμορφώνεται η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας με τον ακόλουθο υπολογισμό:

$$35303,94 / 0,56 = 63042,75(\text{N/m}^2)$$

Συμπερασματικά η συνολική δύναμη που δέχεται η κάθε δοκός προκύπτει ότι είναι:

$$63042,75 (\text{N/m}^2) + 1313,39 (\text{N/m}^2) = 64356,14(\text{N/m}^2) = 0,0643614(\text{N/mm}^2)$$

Στο πρόγραμμα z88 εισάγονται αρχικά οι φορτίσεις που δέχονται κάθε μία από τις δοκούς, ως προς την επιφάνεια. Επίσης ορίζεται πάκτωση στο κάτω μέρος της βάσης στήριξης, σημειακά. Επιπλέον όπως προαναφέρθηκε, εισάγονται δεδομένα για το υλικό, και γίνεται πλεγματοποίηση και για αυτή την κατηγορία.



Εικόνα 105: Εισαγωγή των τιμών των φορτίσεων για κάθε μια δοκό



Εικόνα 106: εισαγωγή της πάκτωσης, σημειακά, στη βάση της κατασκευής

6.3.3 Μοντέλο ανέμου

Στο σημείο αυτό πραγματοποιείται στατική μελέτη του μοντέλου υπό συνθήκες ανεμοπίεσης, σύμφωνα με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από ευρωκώδικα. Η ακραία θέση ανύψωσης της σχάρας είναι υπό κλίση γωνίας $\beta = 20^\circ$ ως προς τον κάθετο άξονα. Επιπλέον η σχάρα αντιμετωπίζεται σαν μονοκλινής στέγη. Τέλος η διεύθυνση του ανέμου θεωρείται οριζόντια ως προς τον οριζόντιο άξονα, με γωνία $\theta = 0^\circ$. Για κάθε υποπερίπτωση, όσον αφορά τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν οι ακραίες τιμές, με αποτέλεσμα την πιο εύκολη μελέτη της ανθεκτικότητας βάσης του συγκεκριμένου υλικού που χρησιμοποιήθηκε. Οι παράμετροι που ελέγχθηκαν είναι οι τιμές των δεικτών που επιλέγονται για το έδαφος που τοποθετείται η στήριξη, το υψόμετρο τοποθέτησης της στήριξης και η ταχύτητα ανέμου.

6.3.3.1 Περίπτωση Ανεμοπίεσης 1^η

Στην περίπτωση αυτή λαμβάνονται υπόψη δείκτες σχετικοί με την επιφάνεια της σχάρας και το έδαφος που τοποθετείται η στήριξη. Όπως αναφέρθηκε, η σχάρα τοποθετείται στην ακραία θέση και θεωρείται ως μονοκλινής στέγη.

Η συνολική δύναμη που ασκείται, υπολογίζεται από την εξίσωση 4/5.2.2 , (Beton-Kalender 1988, Teil II, 1988) :

$$w = c_p * q$$

Η τιμή για τον συντελεστή c_p προκύπτει από τον **πίνακα 1** του παραρτήματος. Επιλέγεται η **περίπτωση 4.3** , συνεπώς η τιμή του συντελεστή c_p είναι **0.7**

Από τον **πίνακα 2** του παραρτήματος , επιλέγεται η ακραία περίπτωση υποπίεσης , ίση με

$$q = 1.3(\text{KN/m}^2)$$

Συνεπώς, για τη συνολική επιφάνεια, η δύναμη προκύπτει:

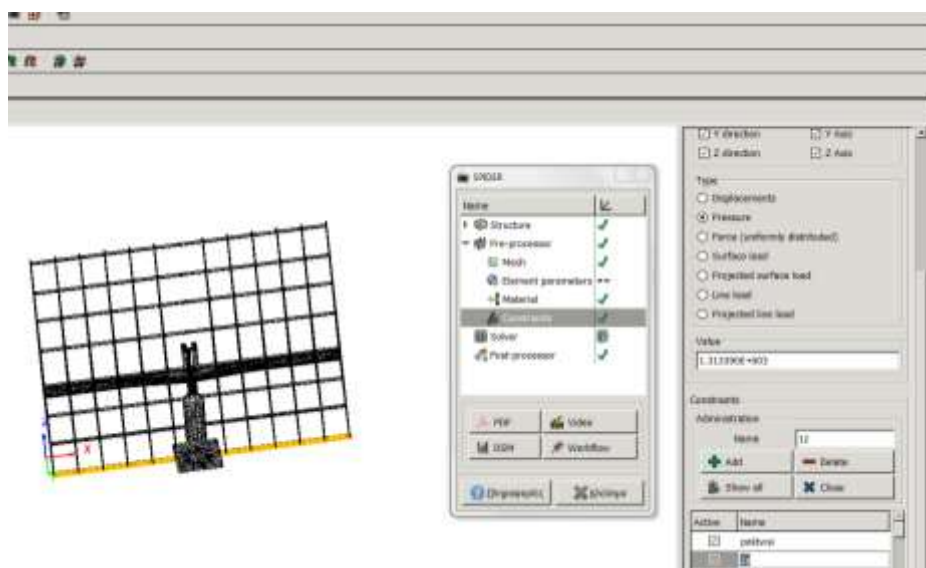
$$W = 910(\text{N/ m}^2) * 48 (\text{m}^2) = 43680(\text{N})$$

Συνεπώς, η συνολική δύναμη που θα ασκείται σε κάθε δοκό θα είναι η συνισταμένη δύναμη της εξωτερικής πίεσης και του βάρους των πανελ. Επειδή στο πρόγραμμα εισάγονται ως πιέσεις η δύναμη αυτή θα εκφραστεί ανά μονάδα επιφάνειας και θα είναι ίση με:

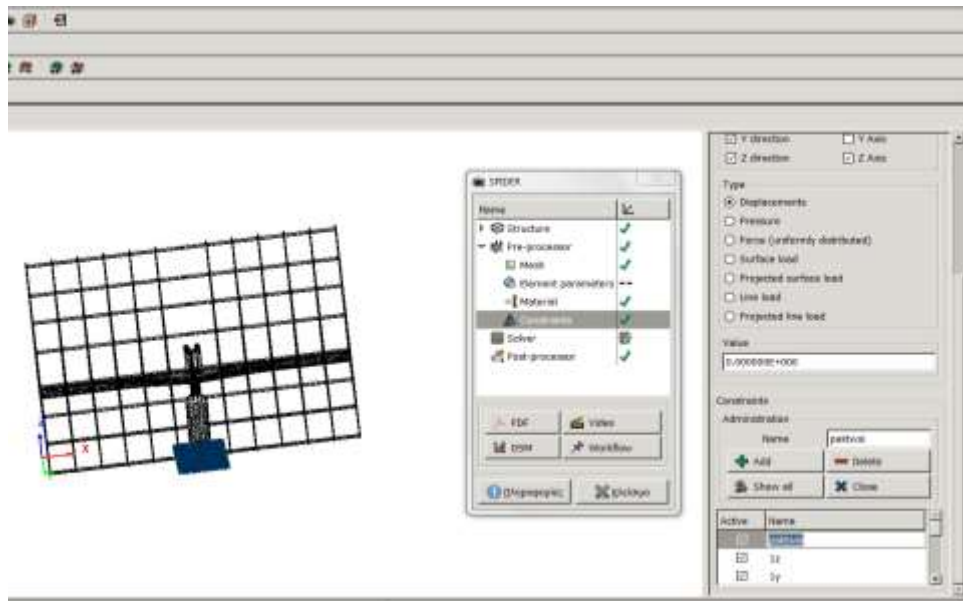
$$P = \frac{F * \sin 20 + \frac{W}{8} * \cos 70}{A_{\text{δοκού}}} = \frac{43680 * \sin 20 + \frac{735.5}{8} * \cos 70}{0,56} = 26733,72 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)$$

$$= 0,02673 (\text{N/mm}^2)$$

Τοποθετούνται οι δυνάμεις σε κάθε δοκό, ως προς την επιφάνεια. Έπειτα, τοποθετείται σημειακά πάκτωση στη βάση της κατασκευής, και στο έμβολο. Επιπλέον όπως προαναφέρθηκε, εισάγονται δεδομένα για το υλικό, και γίνεται πλεγματοποίηση και για αυτή την κατηγορία.



Εικόνα 107:Εισαγωγή φορτίσεων σε κάθε μια δοκό



Εικόνα 108:Εισαγωγή δεδομένων πάκτωσης , στη βάση της κατασκευής

6.3.3.2 Περίπτωση ανεμοπίεσης 2^η

Σε αυτή τη περίπτωση θα υπολογίσουμε την εξωτερική πίεση **We** χρησιμοποιώντας και τον παράγοντα ταχύτητας του ανέμου.

Για την δεδομένη κατηγορία, τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν , συλλέχθηκαν από τον ευρωκώδικα (Standarization, European Committee for. EUROPEAN PRESTANDARD. Brussels,1995). Επίσης, όπως προαναφέρθηκε, η βάση αντιμετωπίζεται σαν μονοκλινής στέγη, με ακραία θέση ως προς τον κάθετο άξονα.

Η εξωτερική πίεση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{We = q_{ref} * C_e * Z_e * C_{pe}}$$

εξίσωση 5.1 (Standarization 1995)

Όπου:

Την τιμή του **C_{pe}** την λαμβάνουμε από τον **πίνακα 3** του παραρτήματος. Για επιφάνεια σχάρας μεγαλύτερη από 10 m², αναφέρεται ότι **C_{pe} = C_{pe,10}** .

Ειδικότερα, για κλίση βάσης **α=60°** ως προς το οριζόντιο επίπεδο και κατεύθυνση ανέμου

θ= 0° , από τον **πίνακα 4** του παραρτήματος, ο συντελεστής είναι **C_{pe} =0,7**.

Για να βρεθεί το **Z_e** παρατίθεται ο **πίνακας 5** του παραρτήματος.

Στην περίπτωση της μονοκλινούς στέγης ισχύει η πρώτη **κατηγορία (α)**, όπου:

$$\mathbf{Z_e = h}$$

Αναλυτικότερα, από το σχέδιο, **Z_e = 6521.3251mm**

Για να βρεθεί το **q_{ref}** χρησιμοποιείται η **εξίσωση 7.1** (Standarization 1995). Δηλαδή:

$$\mathbf{q_{ref} = (p/2) * v_{ref}^2}$$

Σύμφωνα με την **εξίσωση 7.2** (Standarization 1995).

$$\mathbf{v_{ref} = c_{drtr} * c_{tem} * c_{alt} * v_{ref}}$$

όπου:

- **cdtr**: παράγοντας κατεύθυνσης ανέμου από παράρτημα A (Standarization 1995) (για δεδομένα Ελλάδα λαμβάνεται ίσο με τη μονάδα)
- **ctem**: προσωρινός (εποχιακός) παράγοντας. Λαμβάνεται ως μονάδα, εκτός εάν προσδιορίζεται διαφορετικά από παράρτημα A (Standarization 1995).
- **calt**: παράγοντας υψόμετρου ο οποίος λαμβάνεται ως μονάδα, εκτός εάν προσδιορίζεται διαφορετικά στο παράρτημα A (Standarization 1995).

Το v_{ref} λαμβάνεται για την πιο ακραία περίπτωση ανέμου ίσο με $v_{ref} = 200 \text{ km/h}$. Στην Ελλάδα από στοιχεία της μετεωρολογικής υπηρεσίας η τιμή του ανέμου είναι κατά πολύ χαμηλότερη. Ελέγχεται λοιπόν η τιμή της πιο ακραίας περίπτωσης, η οποία, προφανώς θα ισχύει και για την Ελλάδα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ισχύει:

$$q_{ref} = \left(\frac{\rho}{2}\right) * v_{ref}^2, \text{ εξίσωση 7.1 (Standarization 1995)}$$

Άρα για πυκνότητα αέρα ίση με:

$$\rho = 1,25 \text{ Kg} \cdot \text{m}^3$$

Και $v_{ref} = 200 \text{ km/h}$

Με αντικατάσταση στον τύπο θα ισχύει:

$$q_{ref} = (1,25/2) * (200.000\text{m}/3600\text{s})^2 = 1917.26(\text{N})$$

Από **πίνακα 6** του παραρτήματος, επιλέγεται η **περίπτωση I** για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας ϵ . Λαμβάνεται ως παραδοχή ότι η βάση τοποθετείται κοντά σε θάλασσα. Η κάθε τιμή του πίνακα αναλύεται παρακάτω:

kT : παράγοντας εδάφους.

Zmin : ελάχιστο υψόμετρο

Από περίπτωση 1 του πίνακα, λαμβάνεται για:

$$kT = 0,17$$

$$Z_0 = 0,01$$

$$Z_{min} = 2$$

Ο συντελεστής τραχύτητας θα είναι ίσος με:

$$\epsilon = 0,13$$

Από **πίνακα 7** του παραρτήματος, για τις τιμές που αναφέρθηκαν παραπάνω, (δηλαδή για ελάχιστο υψόμετρο ίσο με **Zmin= 2**), λαμβάνονται οι τιμές της **περίπτωσης I**.

Συνεπώς προκύπτει προσεγγιστικά ότι :

$$C_e(z) = 2,8$$

Για ύψος κατασκευής πάνω από το έδαφος $Z=5.256$ μέτρα (όπως προκύπτει από το σχέδιο), αντικαθιστώνται οι τιμές στην εξίσωση 5.1:

$$W_e = q_{ref} * C_e * Z_e * C_{pe}$$

$$W_e = 1917.26 * 2,8 * 6521.3251 * 0,7$$

Συμπερασματικά, η συνολική εξωτερική πίεση θα είναι της τάξεως των

$$W_e = 24506.02 \text{ (N)} .$$

Συνεπώς, η συνολική δύναμη που θα ασκείται σε κάθε δοκό θα είναι η συνισταμένη δύναμη της εξωτερικής πίεσης και του βάρους των πάνελ. Επειδή στο πρόγραμμα εισάγονται ως πιέσεις η δύναμη αυτή θα εκφραστεί ανά μονάδα επιφάνειας και θα είναι ίση με:

$$P = \frac{F * \sin 30 + \frac{W}{8} * \cos 60}{A_{δοκού}} = \frac{24506,02 * \sin 30 + \frac{735,5}{8} * \cos 60}{0,56} = 21962,5 \left(\frac{N}{m^2} \right) \\ = 0,021962 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με τον τρόπο που έχει εισαχθεί το σχέδιο στο z88, ο κάθετος άξονα είναι ο z ενώ ο άξονας που ασκείται η ανεμοπίεση είναι ο y. Επιπροσθέτως, τοποθετείται πάκτωση στη βάση της κατασκευής, σημειικά ,όπως επίσης και .στο έμβολο.

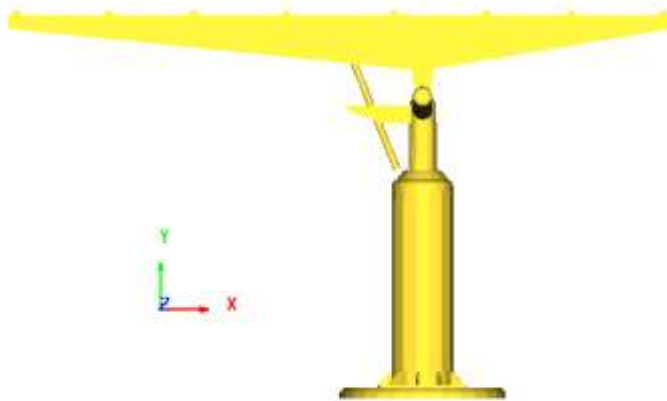
Επιπλέον όπως προαναφέρθηκε, εισάγονται δεδομένα για το υλικό, και γίνεται πλεγματοποίηση και για αυτή την κατηγορία.

6.4 Αποτελέσματα

Στη παράγραφο αυτή, θα γίνει παράθεση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων για τις 2 περιπτώσεις ακραίων καιρικών συνθηκών, χιονιού και ανέμου. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κάθε κατηγορίας, λαμβάνοντας υπόψη κάθε φορά διαφορετικές συνθήκες ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

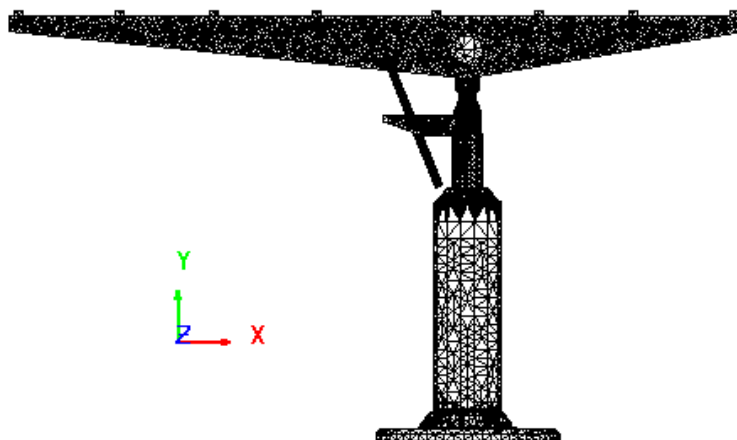
6.4.1 Μοντέλο χιονιού

Αρχικά, εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής, στο πρόγραμμα z88 ως step file(*.stp). Όπως αναφέρθηκε, η γωνία κλίσης της σχάρας ως προς τον οριζόντιο άξονα είναι 0^0 .



Εικόνα 109: Εισαγωγή μοντέλου

Στη συνέχεια πραγματοποιείται εισαγωγή δεδομένων για το υλικό της κατασκευής. Επιπλέον, ορίζονται τα δεδομένα για να πραγματοποιηθεί πλεγματοποίηση του συνεχούς, σε επιμέρους στοιχεία. Παρακάτω παρατίθεται εικόνα της κατασκευής, αφού έχει πλεγματοποιηθεί.



Εικόνα 110: Πλεγματοποίηση μοντέλου

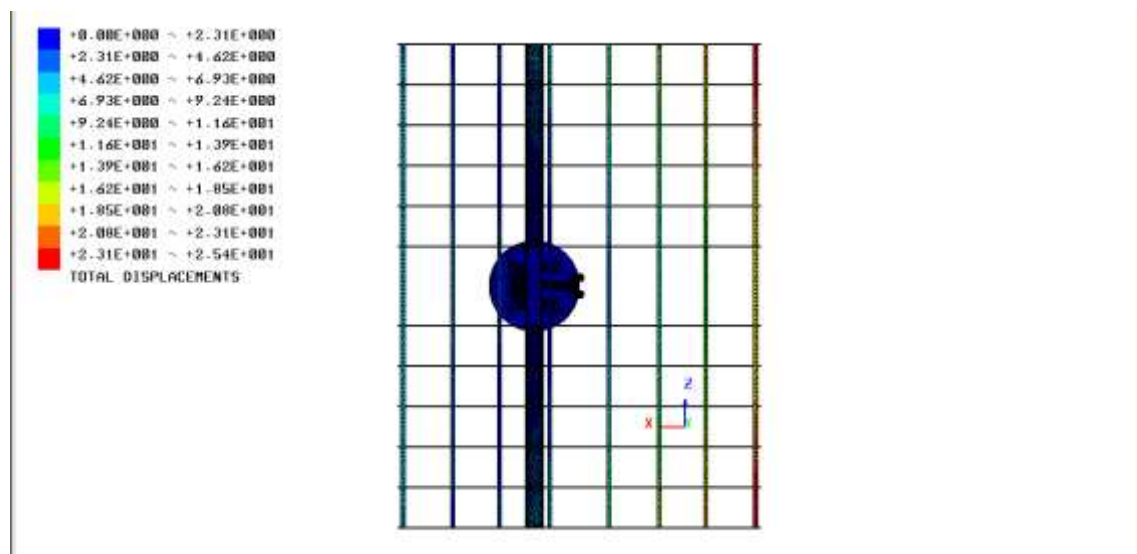
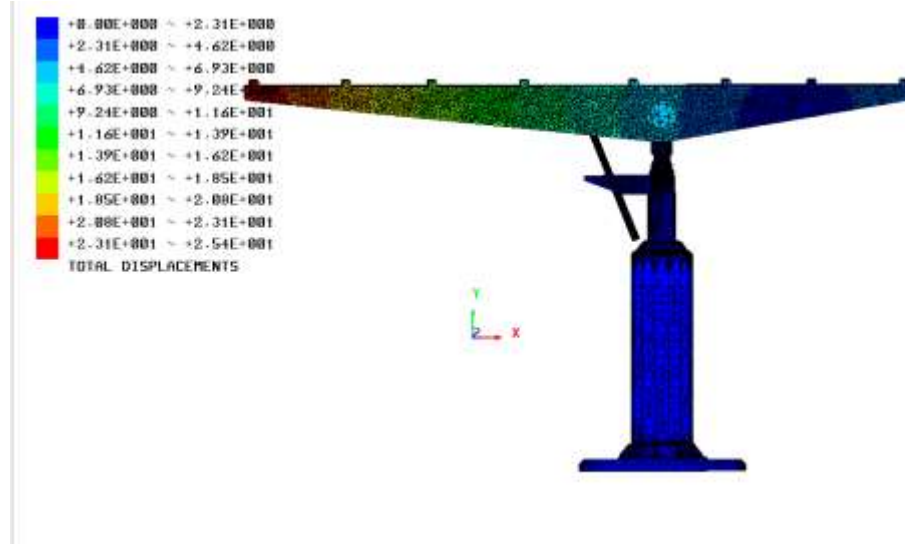
Έπειτα εισάγονται οι φορτίσεις που θα εφαρμοστούν οι δυνάμεις που υπολογίστηκαν, όπως και οι άξονες στους οποίους εφαρμόζονται. Επιπλέον, προστίθεται πάκτωση στη βάση της κατασκευής, και στο σημείο που βρίσκεται το έμβολο.

Στη συνέχεια, το πρόβλημα επιλύεται γραμμικά, χρησιμοποιώντας τον SICCG solver. Ο επιλυτής προτιμάται έναντι των άλλων, καθώς επιτρέπει μεγάλο πλήθος βαθμών ελευθερίας (πάνω από 200.000), επιτυγχάνει μεγάλες ταχύτητες επίλυσης και απαιτεί σχετικά μικρή μνήμη αποθήκευσης.

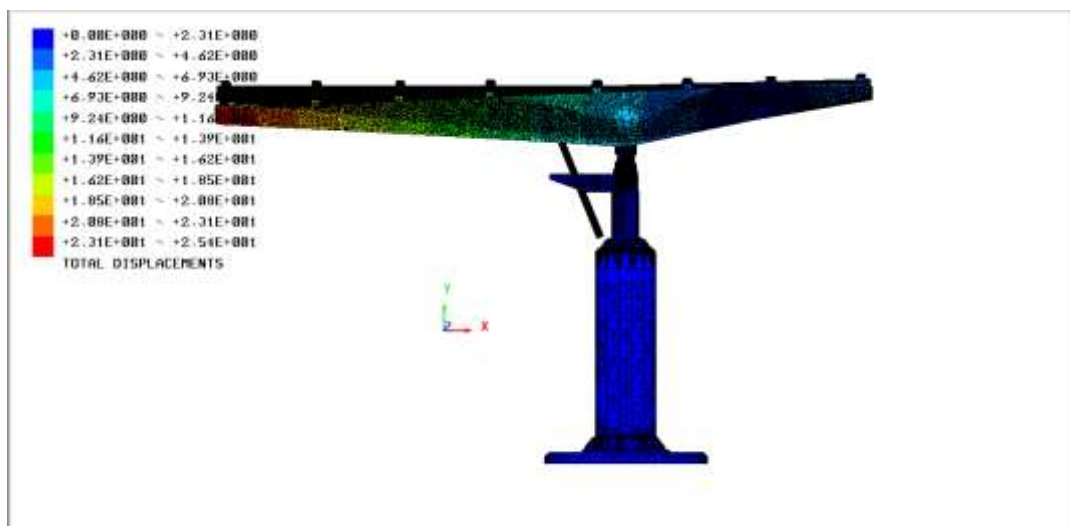
Επιπλέον, ως κριτήριο αποτυχίας χρησιμοποιείται το θεώρημα von Mises. Οι τάσεις von Mises, δεν υπολογίζονται στους γωνιακούς κόμβους (κάτι που θα οδηγούσε σε εσφαλμένα αποτελέσματα ιδιαίτερα για παραμορφωμένα στοιχεία), αλλά σχεδιάζονται ως μέση τιμή για κάθε στοιχείο. Οι τάσεις υπολογίζονται στα σημεία gauss, αθροίζονται και στη συνέχεια διαιρούνται με τον υπόψη αριθμό των σημείων gauss. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης τάσεων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων παρατίθενται παρακάτω.

Αποτελέσματα υπο συνθήκες φόρτισης χιονιού

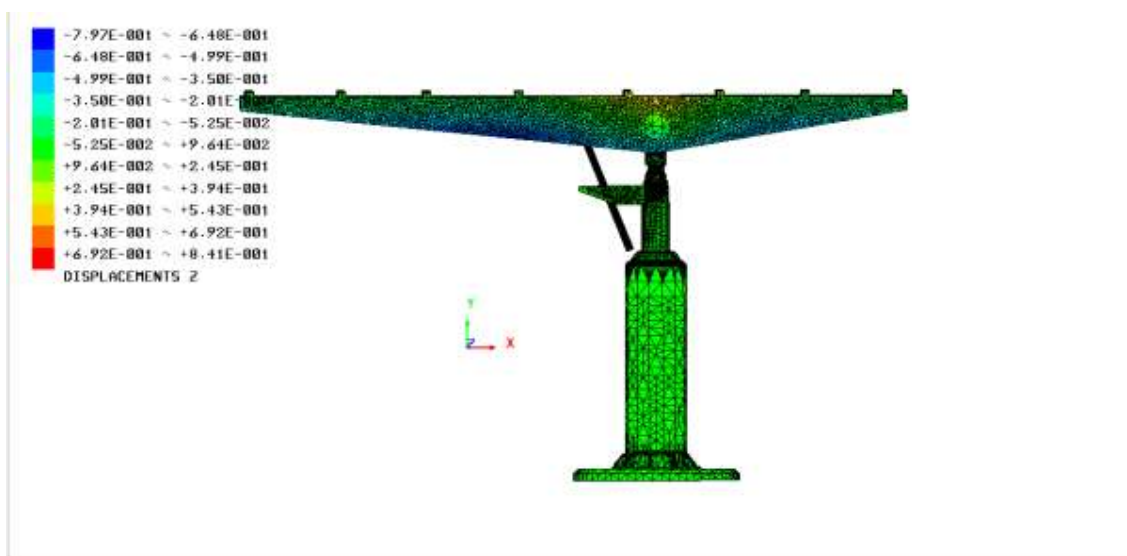
Ολικές μετατοπίσεις:



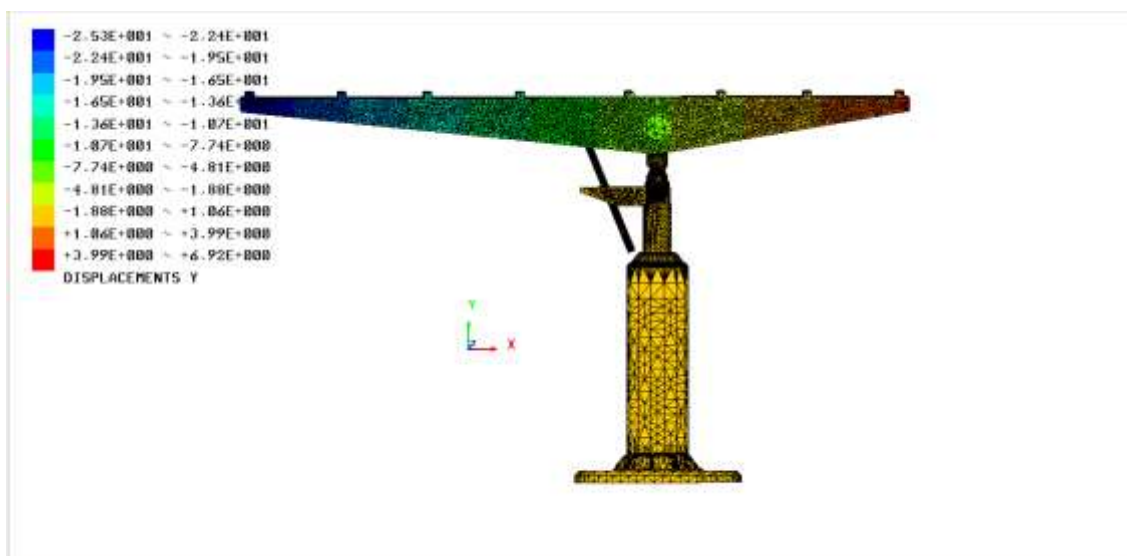
Εικόνα 111: Αποτελέσματα ολικών μετατοπίσεων



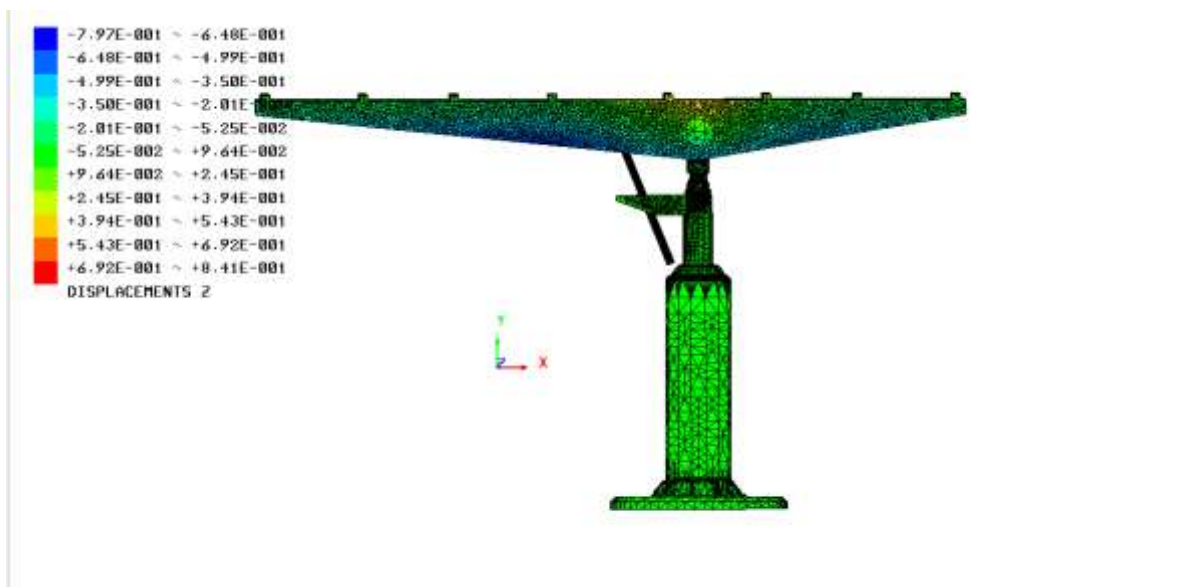
Εικόνα 112: Σύγκριση τελικής κατάστασης παραμορφώσεων με αρχική κατάσταση



Εικόνα 113: Μετατοπίσεις στον άξονα των x



Εικόνα 114: Μετατοπίσεις στον άξονα των y



Εικόνα 115: Μετατοπίσεις στον άξονα των z

Παρατηρείται ότι ακόμα και για τα δεδομένα χάλυβα (του υλικού κατασκευής) , τα αποτελέσματα παραμόρφωσης, λαμβάνοντας υπόψη τη μετατόπιση είναι αρκετά ικανοποιητικά. Υπό τη φόρτιση του χιονιού σε οριακή κλίση της σχάρας, όπου όλο το βάρος του χιονιού κατανέμεται σε αυτήν, οι ολικές μετατοπίσεις είναι της τάξεως χιλιοστών . Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι , δεδομένης πάκτωσης στη βάση και στο έμβολο, η μετατόπιση αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το σημείο της πάκτωσης, στο πιο απομακρυσμένο σημείο. Παρατίθενται επίσης, τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων ως προς κάθε άξονα. Οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις παρατηρούνται ως προς τον x άξονα. Τα αποτελέσματα ως προς τον άξονα y, είναι φυσιολογικά, καθώς η μεγαλύτερη παραμόρφωση βρίσκεται , όπως προσμένεται, στο κέντρο βάρους της κατασκευής. Τέλος συγκρίνοντας την αρχική με την τελική κατάσταση μετά από την φόρτιση, παρατηρείται ότι οι η τάξεις μεγέθους των μετατοπίσεων, δεν αποτελούν κίνδυνο για τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής.

Δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους:

Συνολικές:



Εικόνα 116: Συνολικές δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους



Εικόνα 117: Δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους ως προς τον άξονα x



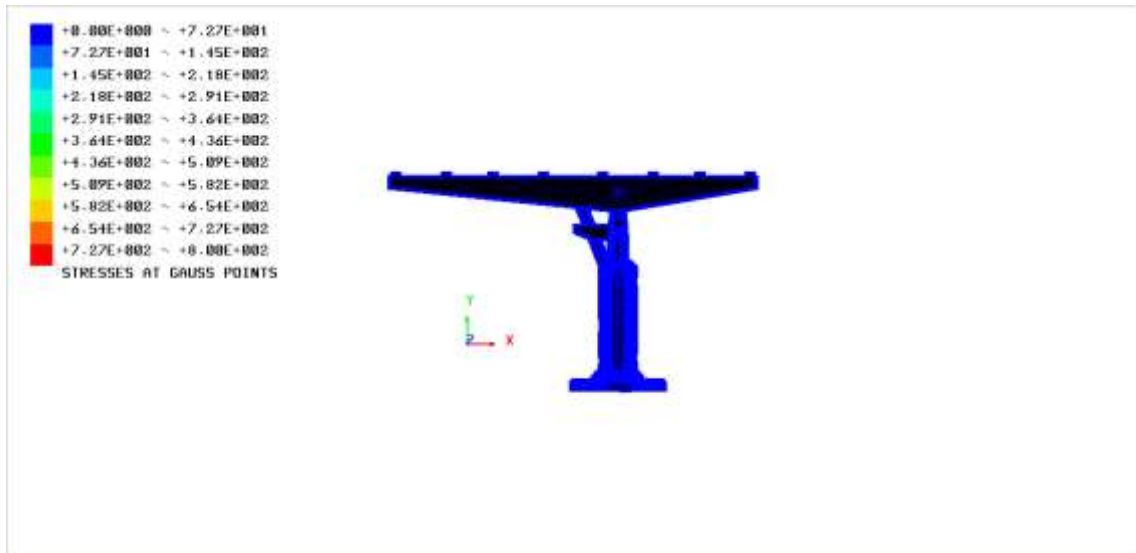
Εικόνα 118: Δυνάμεις που ασκούνται ως προς τον άξονα y



Εικόνα 119: Δυνάμεις που ασκούνται ως προς τον άξονα των z

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα έχουν μικρές παραμορφώσεις συγκριτικά με το μέγεθος της κατασκευής και δεδομένου του φορτίου που ασκείται. Παρατίθενται οι φορτίσεις κόμβων ως προς τους 3 άξονες, όπως και οι συνολικές. Οι τιμές κυμαίνονται στα αναμενόμενα πλαίσια. Επεξηγηματικά, όσον αφορά τις συνολικές δυνάμεις στους κόμβους, οι φορτίσεις κυμαίνονται από $0-2.67 \cdot 10^3$, καθώς καμία δύναμη σε οποιοδήποτε άξονα δεν ξεπερνά αυτό το πλαίσιο. Επίσης, όπως φαίνεται, ο ασθενής άξονας, ο οποίος δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση, είναι ο άξονας των y.

Φορτίσεις που ασκούνται στα σημεία gauss:



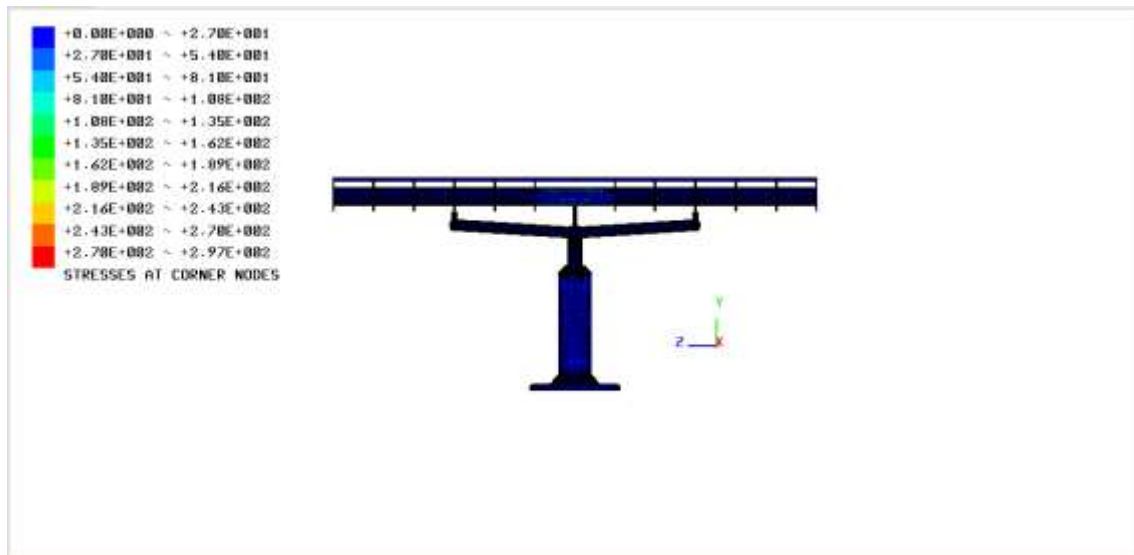
Εικόνα 120: Φορτίσεις που ασκούνται στα σημεία gauss

Όπως ήταν αναμενόμενο, τα αποτελέσματα των φορτίσεων στα σημεία gauss παρουσιάζουν μικρότερες τιμές σε σχέση με αυτά των φορτίσεων στους κόμβους. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα στο σύνολο της κατασκευής κυμαίνονται στις χαμηλότερες τιμές φορτίσεων. Τα αποτελέσματα αυτά είναι και τα πιο ρεαλιστικά, όσον αφορά την αντοχή της κατασκευής, επειδή τα σημεία gauss είναι τα σημεία που δίνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις φορτίσεις σε μια κατασκευή, οπότε είναι και πιο κοντά στις πραγματικές τιμές.

Φορτίσεις σε εξωτερικούς κόμβους:



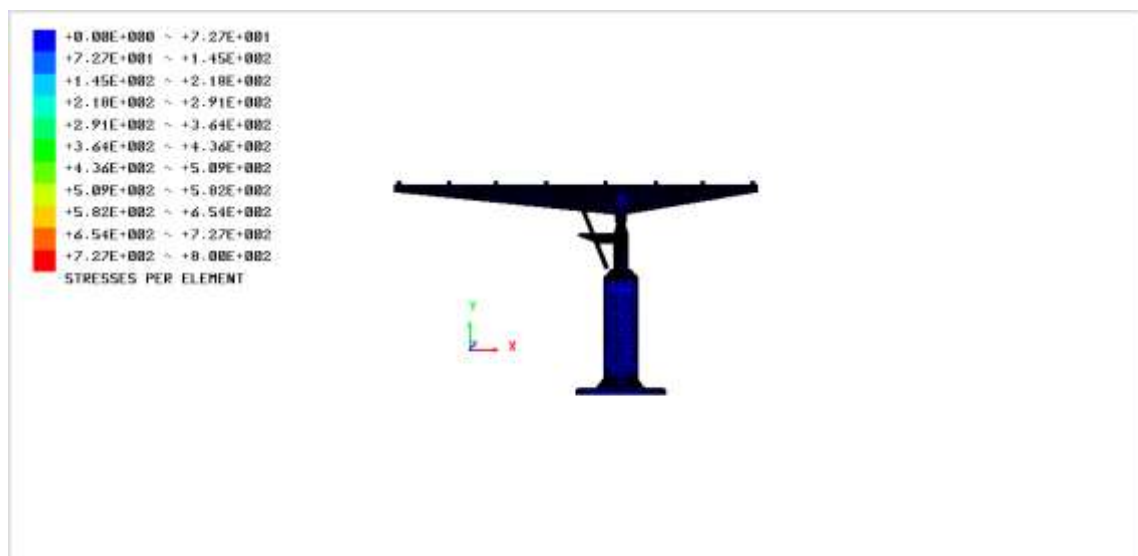
Εικόνα 121: Φορτίσεις που ασκούνται στους εξωτερικούς κόμβους



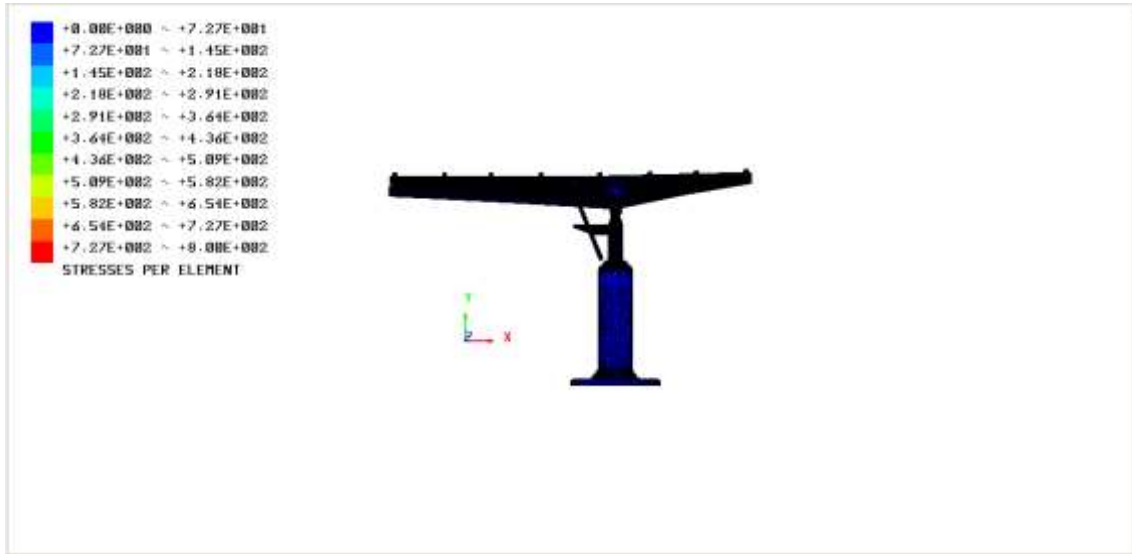
Εικόνα 122: Φορτίσεις που ασκούνται στους εξωτερικούς κόμβους

Παρατηρείται ότι στις φορτίσεις στους εξωτερικούς κόμβους, τα αποτελέσματα είναι κοντά με αυτά από τα σημεία gauss. Οπότε συμπερνεύεται ότι η πλεγματοποίηση της κατασκευής, είναι αρκετά ακριβής. Ωστόσο, όπως είναι γνωστό από τη θεωρία, τα δεδομένα που μπορούν να δώσουν μεγαλύτερη ακρίβεια είναι τα σημεία gauss, καθότι επειδή είναι εσωτερικά στοιχεία, αναμένεται να έχουν ελαφρώς μεγαλύτερες τάσεις.

Φορτίσεις ανά στοιχείο:



Εικόνα 123: Φορτίσεις που ασκούνται σε κάθε στοιχείο

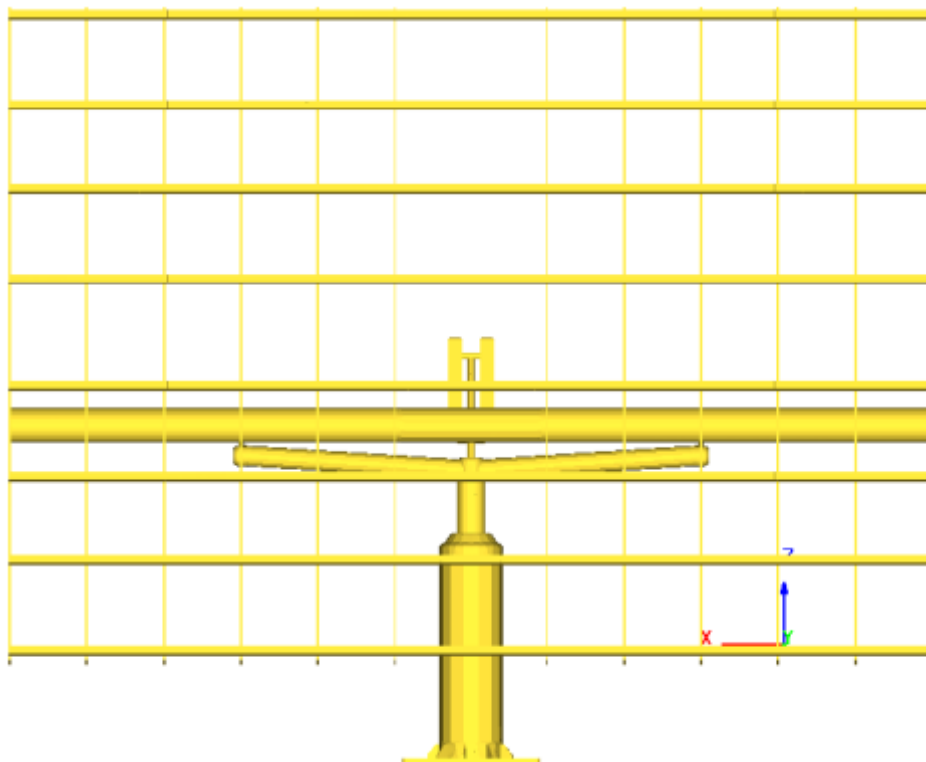


Εικόνα 124: Σύγκριση αποτελεσμάτων των φορτίσεων ανά στοιχείο σε σχέση με την αρχική κατάσταση

Παρουσιάζονται οι φορτίσεις ως προς το κάθε στοιχείο που αποτελείται η κατασκευή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν σχετικά μικρές φορτίσεις, δεδομένου του φορτίου, όπως φαίνεται παρά πάνω. Και αυτά τα αποτελέσματα, έχουν αρκετή ομοιότητα με τα σημεία gauss. Συμπερασματικά, το πλέγμα που έχει γίνει για την κατασκευή είναι ικανοποιητικό, καθώς τα σημεία οριακά συγκλίνουν. Επιπροσθέτως, οι τάσεις κυμαίνονται σε φυσιολογικά επίπεδα, συνεπώς δεν αποτελούν κίνδυνο για τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής.

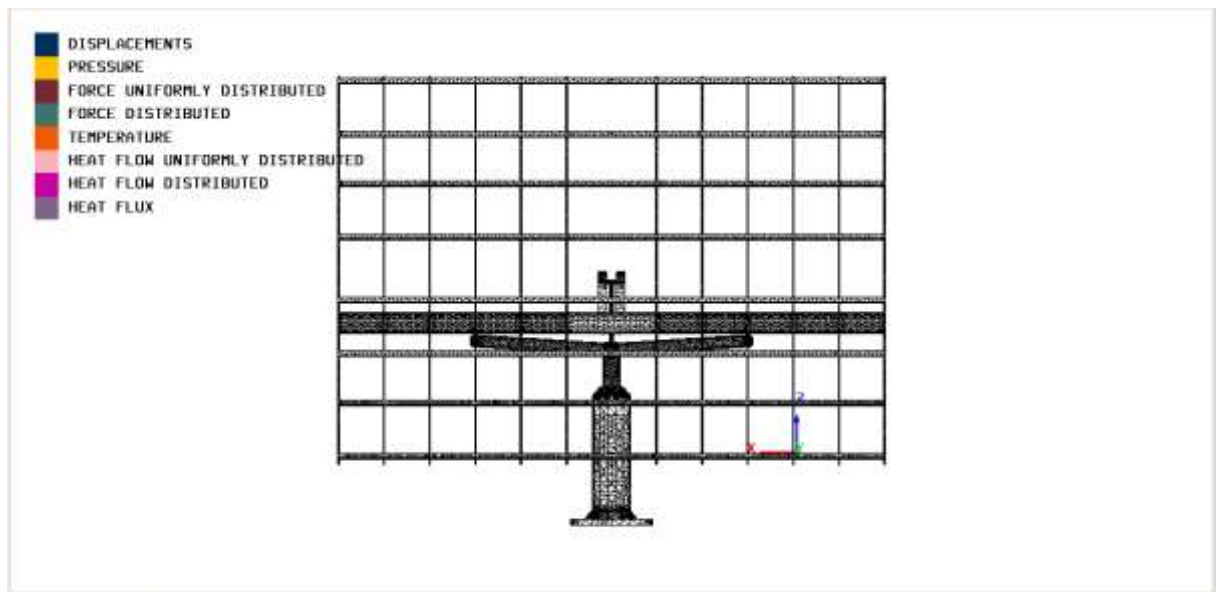
6.4.2 Μοντέλο ανεμοπίεσης: Περίπτωση 1η

Αρχικά, εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής, στο πρόγραμμα z88 ως step file (*.stp). Όπως αναφέρθηκε, η γωνία κλίσης της σχάρας ως προς τον οριζόντιο άξονα είναι 70° .



Εικόνα 126: Εισαγωγή μοντέλου

Στη συνέχεια πραγματοποιείται εισαγωγή δεδομένων για το υλικό της κατασκευής. Επιπλέον, ορίζονται τα δεδομένα για να πραγματοποιηθεί πλεγματοποίηση του συνεχούς, σε επιμέρους στοιχεία. Παρακάτω παρατίθεται εικόνα της κατασκευής, αφού έχει πλεγματοποιηθεί.



Εικόνα 127: Πλεγματοποίηση μοντέλου

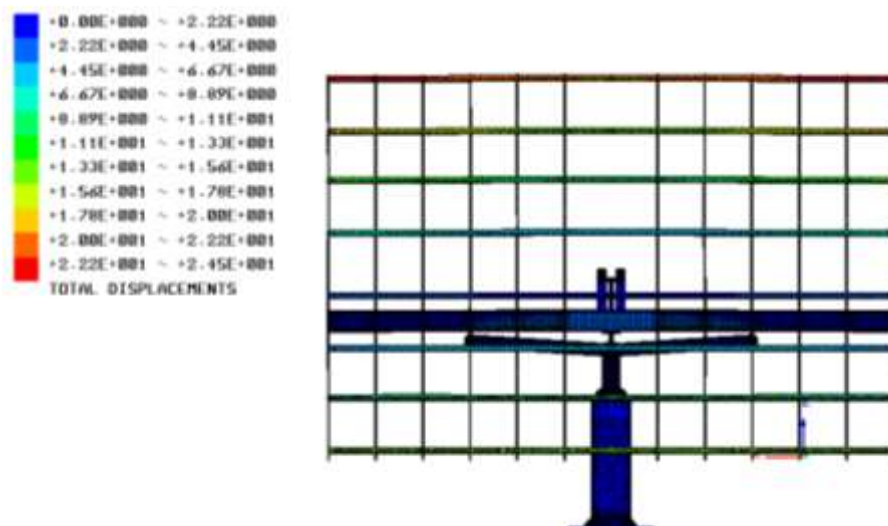
Έπειτα εισάγονται οι φορτίσεις που θα εφαρμοστούν οι δυνάμεις που υπολογίστηκαν, όπως και οι άξονες στους οποίους εφαρμόζονται. Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η φόρτιση σε κάθε δοκό εισάγεται ως η συνισταμένη δύναμη του ανέμου και του βάρους των πάνελ, ως προς την κάθετη επιφάνεια. Επιπλέον, προστίθεται πάκτωση στη βάση της κατασκευής, και στο σημείο που βρίσκεται το έμβολο.

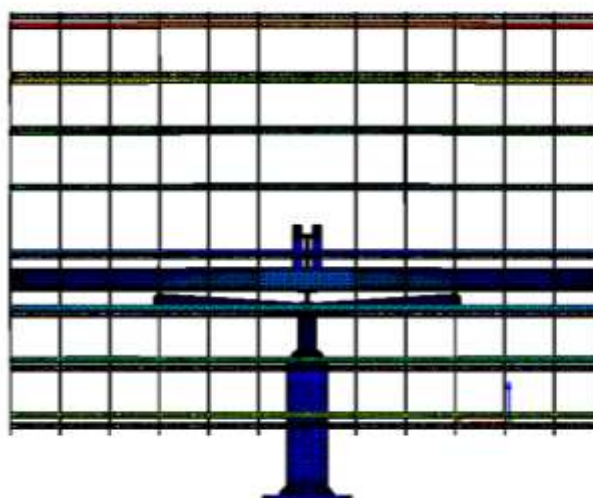
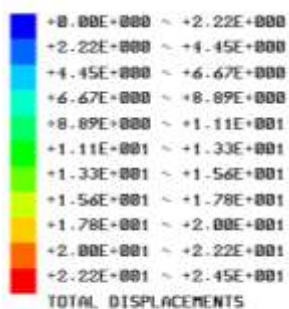
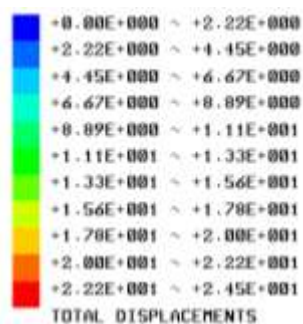
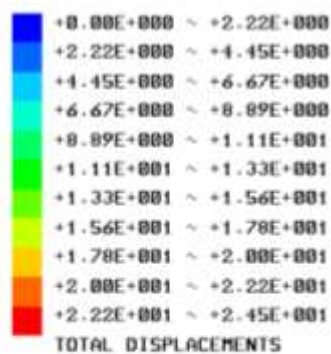
Στη συνέχεια, το πρόβλημα επιλύεται γραμμικά, χρησιμοποιώντας τον SICCG solver, με το ίδιο σκεπτικό που χρησιμοποιήθηκε και στην προηγούμενη περίπτωση. Επιπλέον, σχεδιάζεται με τάσεις von mises των γωνιακών κόμβων.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης τάσεων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων παρατίθενται παρακάτω.

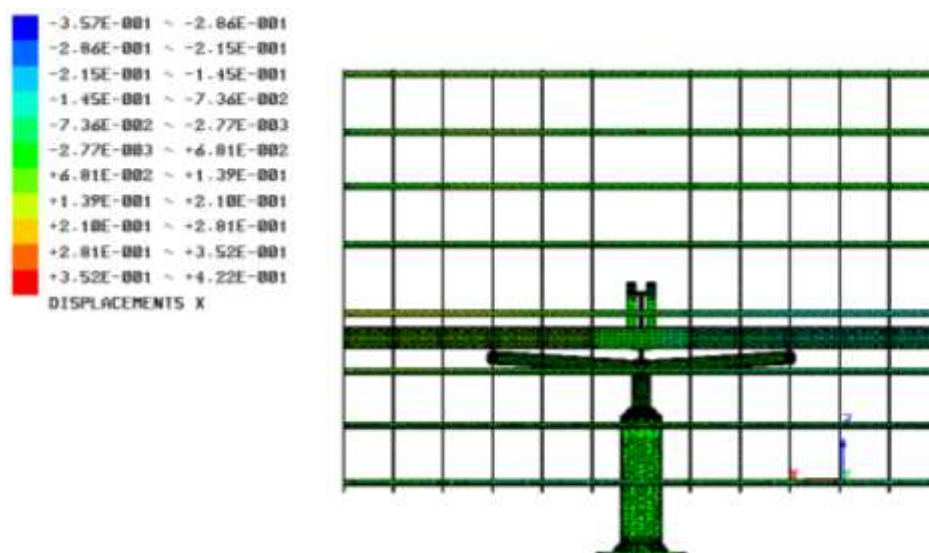
Αποτελέσματα υπό συνθήκες ανεμοπίεσης.

Ολικές μετατοπίσεις:

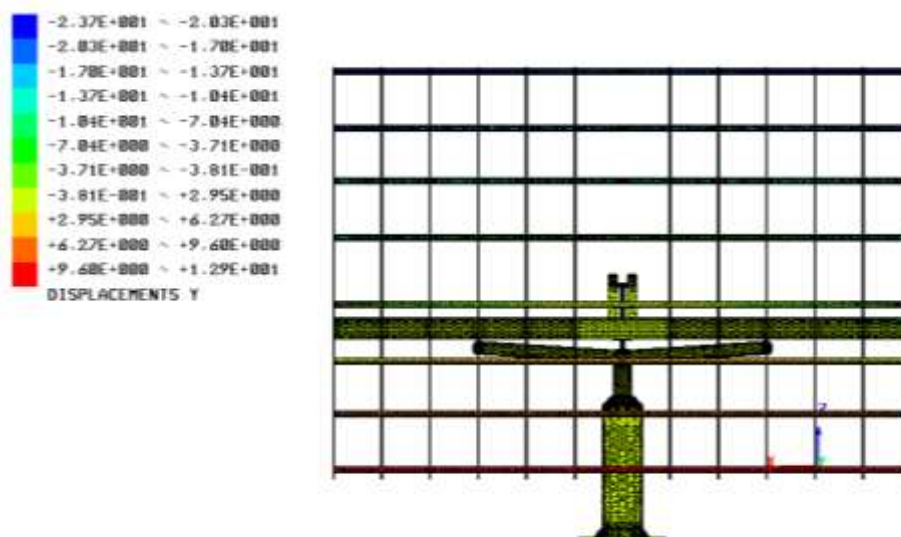




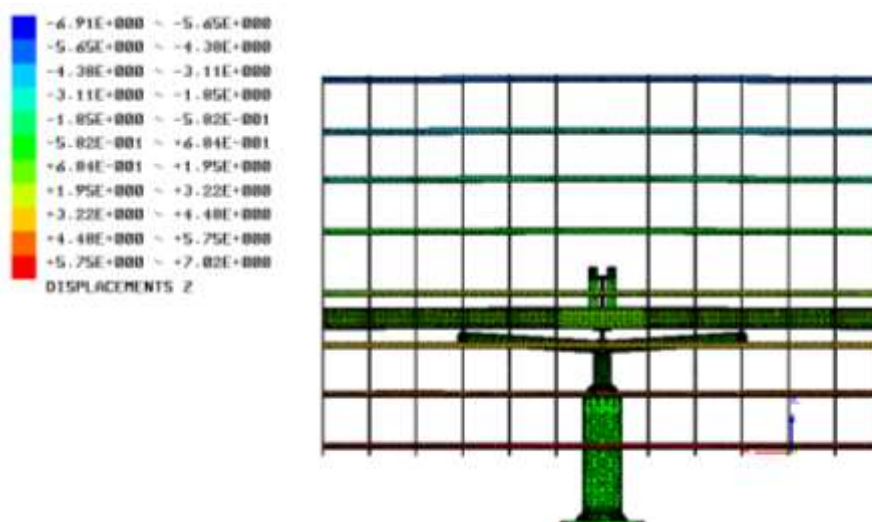
Εικόνα 128: Αποτελέσματα ολικών μετατοπίσεων



Εικόνα 129: Μετατοπίσεις στον άξονα των x



Εικόνα 130: Μετατοπίσεις στον άξονα των y

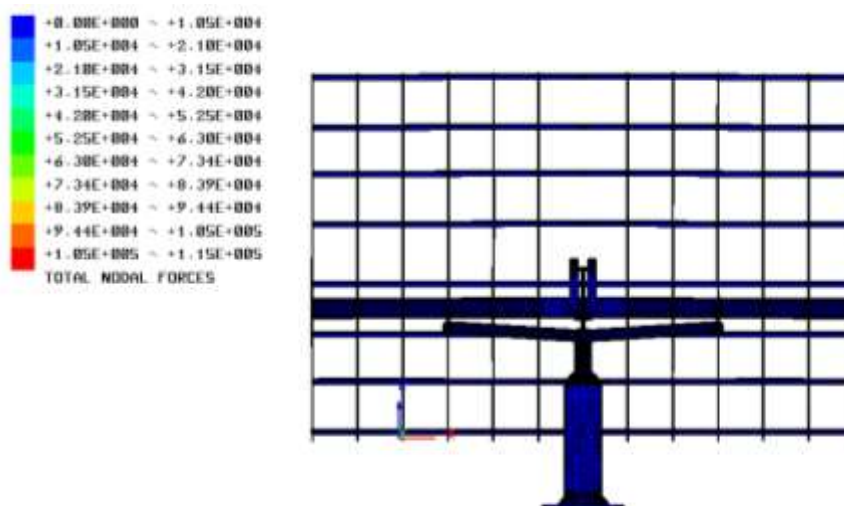


Εικόνα 131: Μετατοπίσεις στον άξονα των z

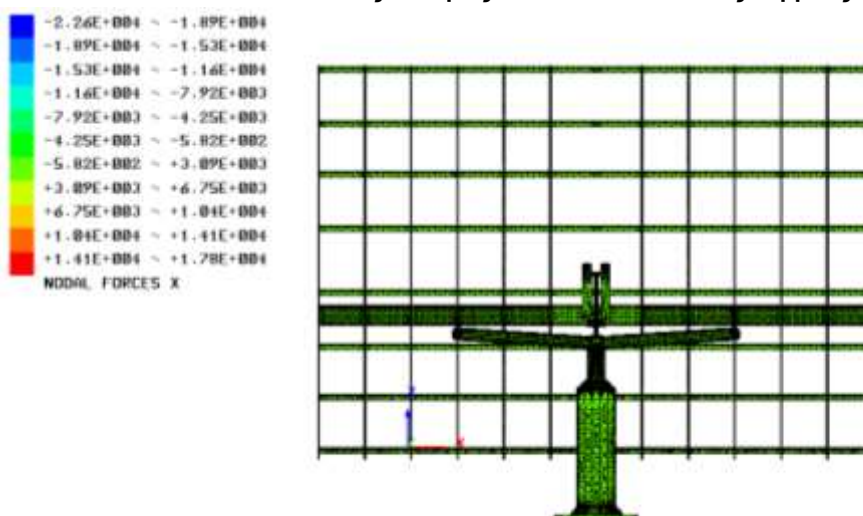
Παρά πάνω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων λαμβάνοντας υπόψη τις μετατοπίσεις, δεδομένης της δύναμης που ασκείται από την ανεμοπύση. Τα αποτελέσματα που παρατίθενται είναι αρκετά ικανοποιητικά, και οι μετατοπίσεις είναι της τάξεως χιλιοστών. Παρατηρείται ότι προχωρώντας από το σημείο της πάκτωσης στο έμβολο, προς τη περιφέρεια της σχάρας, οι μετατοπίσεις αυξάνονται. Η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στο πιο απομακρυσμένο σημείο. Οι μετατοπίσεις, είναι σχετικά μικρές, αν και η σχάρα είναι σε οριακή γωνία κλίσης, και η κατασκευή δέχεται μεγάλες φορτίσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις δίνονται στον άξονα των x . Παρατηρείται επίσης ότι ο πιο καταπονημένος άξονας ότι είναι αυτός που δέχεται τη φόρτιση του ανέμου, δηλαδή ο άξονας των y , έτσι όπως έχει εισαχθεί η γεωμετρία. Ο κατακόρυφος άξονας, δηλαδή ο z , δέχεται μόνο τη συνιστώσα του βάρους και συνεπώς εμφανίζει μικρότερες τιμές, επειδή εμπεριέχει το ίδιο βάρος της κατασκευής. Τέλος συγκρίνοντας την αρχική με την τελική κατάσταση μετά από την φόρτιση, παρατηρείται ότι οι τάξεις μεγέθους των μετατοπίσεων, δεν αποτελούν κίνδυνο για τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής.

Δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους:

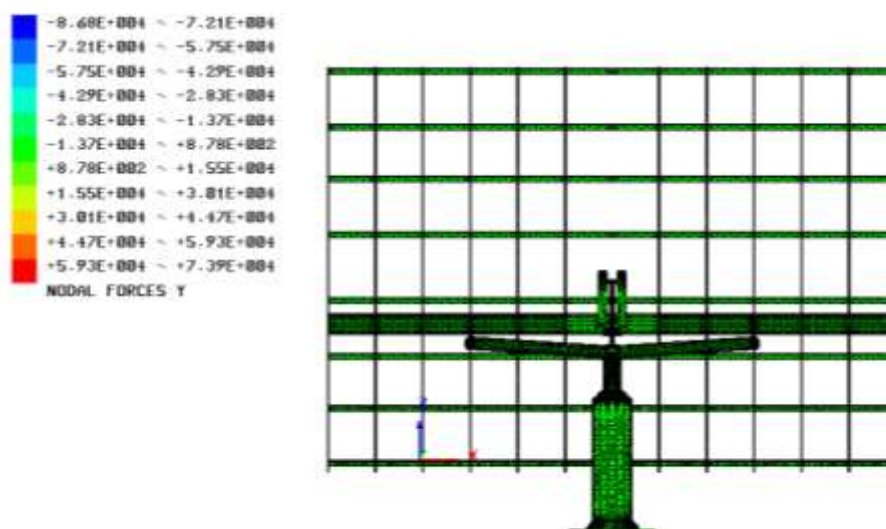
Συνολικές:



Εικόνα 132: Συνολικές δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους



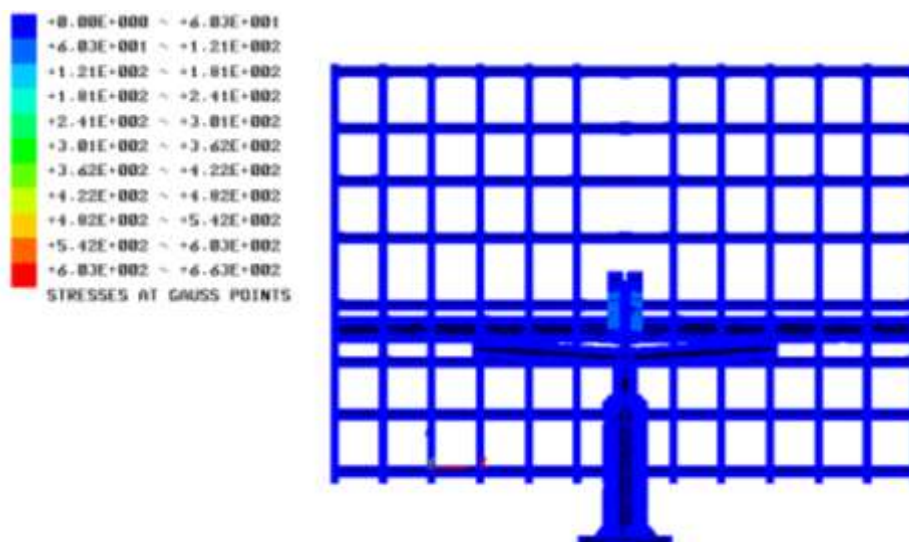
Εικόνα 133: Συνολικές δυνάμεις που ασκούνται ως προς τον άξονα των x



Εικόνα 134: Συνολικές δυνάμεις που ασκούνται ως προς τον άξονα των y

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα των δυνάμεων που ασκούνται στους κόμβους, κυμαίνονται μέσα στα αναμενόμενα πλαίσια, λαμβάνοντας υπόψη την οριακή γωνία κλίσης της σχάρας και το μέγιστο του φορτίου που ασκείται. Παρατίθενται οι φορτίσεις κόμβων ως προς τους 3 άξονες, όπως και οι συνολικές. Οι τιμές κυμαίνονται στα αναμενόμενα πλαίσια. Επεξηγηματικά, όσον αφορά τις συνολικές δυνάμεις στους κόμβους, οι φορτίσεις κυμαίνονται από $0-1,5 \times 10^4$, καθώς καμία δύναμη σε οποιοδήποτε άξονα δεν ξεπερνά αυτό το πλαίσιο. Επίσης, όπως φαίνεται, οι άξονες στους οποίους υπάρχει η μεγαλύτερη καταπόνηση, είναι οι άξονες των y και των z.

Φορτίσεις που ασκούνται στα σημεία gauss:

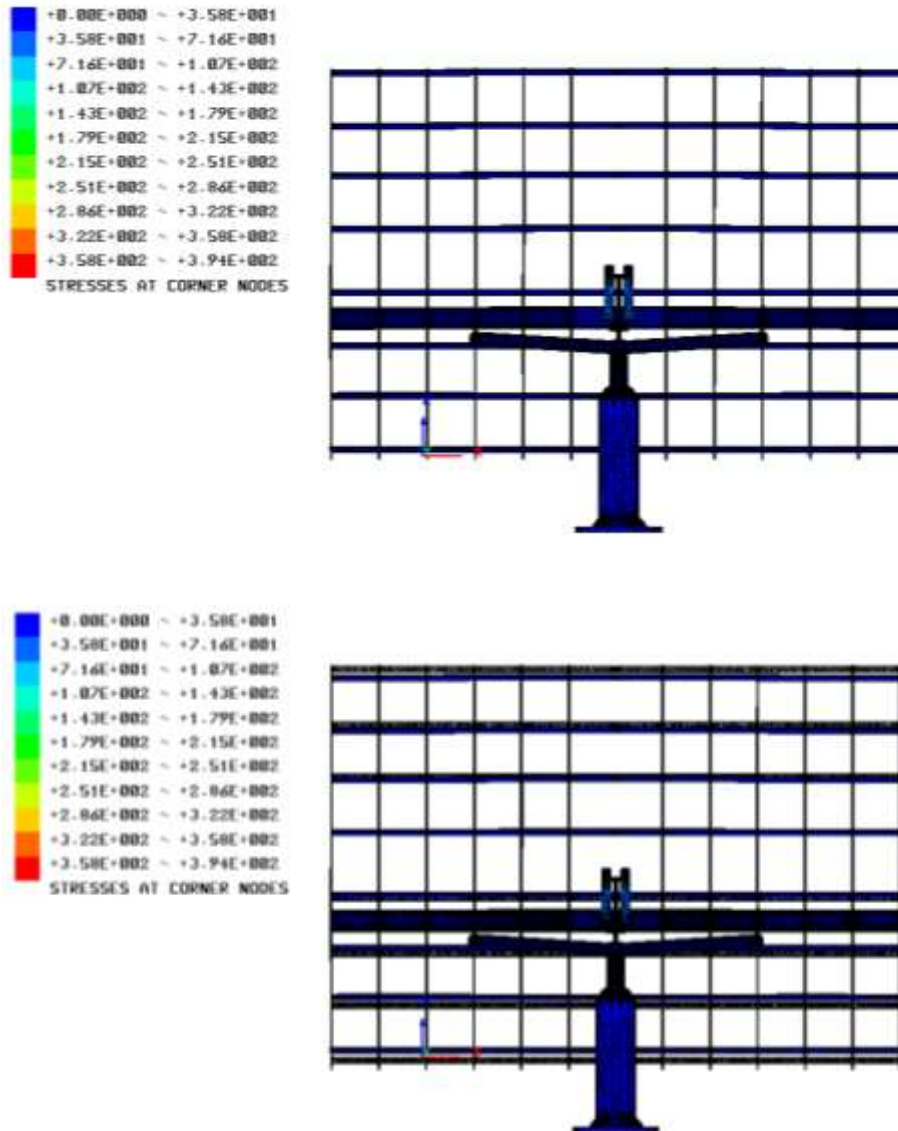


Εικόνα 135: Φορτίσεις που ασκούνται στα σημεία gauss

Τα αποτελέσματα των φορτίσεων ως προς τα σημεία gauss είναι αρκετά ικανοποιητικά. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, οι τιμές είναι σαφώς μικρότερες από αυτές των φορτίσεων στους κόμβους. Επίσης, παρατηρείται ότι στην εικόνα, οι φορτίσεις που δέχεται η κατασκευή κυμαίνονται στα μικρότερα πλαίσια φορτίσεων. Τα αποτελέσματα αυτά είναι και τα πιο ρεαλιστικά, όσον αφορά την αντοχή της κατασκευής, επειδή τα σημεία gauss είναι τα σημεία που δίνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις φορτίσεις σε μια κατασκευή, οπότε είναι και

πιο κοντά στις πραγματικές τιμές. Παρατηρείται επίσης, ότι υπάρχει μεγαλύτερης τάξης μεγέθους τάση, στο κέντρο της κατασκευής, καθότι σε εκείνο το σημείο υπάρχει πάκτωση και συνεπώς οι τάσεις που εμφανίζονται είναι μεγαλύτερες.

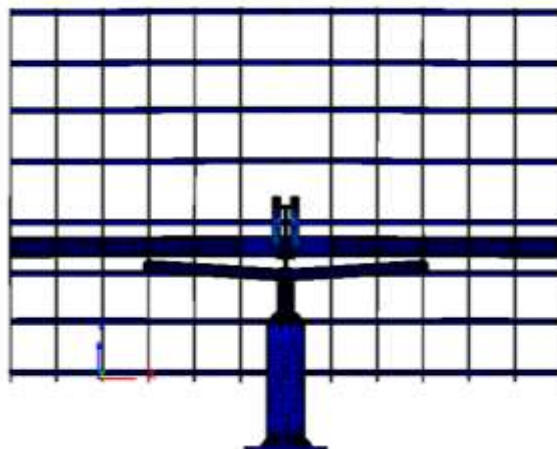
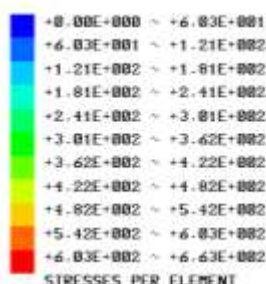
Φορτίσεις στους εξωτερικούς κόμβους:



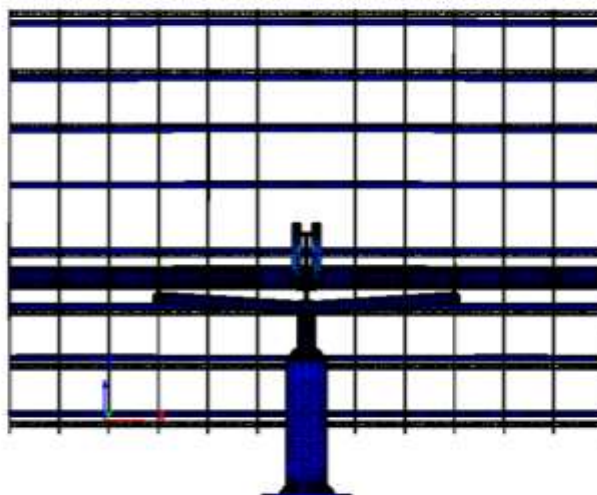
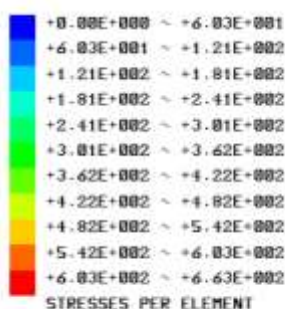
Εικόνα 136: Δυνάμεις που ασκούνται στους εξωτερικούς κόμβους

Παρατηρείται ότι στις φορτίσεις στους εξωτερικούς κόμβους, τα αποτελέσματα είναι κοντά με αυτά από τα σημεία gauss. Παρατηρείται επίσης, ότι υπάρχει μεγαλύτερης τάξης μεγέθους τάση, στο κέντρο της κατασκευής, καθότι σε εκείνο το σημείο υπάρχει πάκτωση και συνεπώς οι τάσεις που εμφανίζονται είναι μεγαλύτερες. Συμπεραίνεται ότι η πλεγματοποίηση της κατασκευής, είναι αρκετά ακριβής. Ωστόσο, όπως είναι γνωστό από τη θεωρία, τα δεδομένα που μπορούν να δώσουν μεγαλύτερη ακρίβεια είναι τα σημεία gauss, καθότι επειδή είναι εσωτερικά στοιχεία, αναμένεται να έχουν ελαφρώς μεγαλύτερες τάσεις.

Φορτίσεις ανά στοιχείο:



Εικόνα 137: Φορτίσεις που ασκούνται σε κάθε στοιχείο

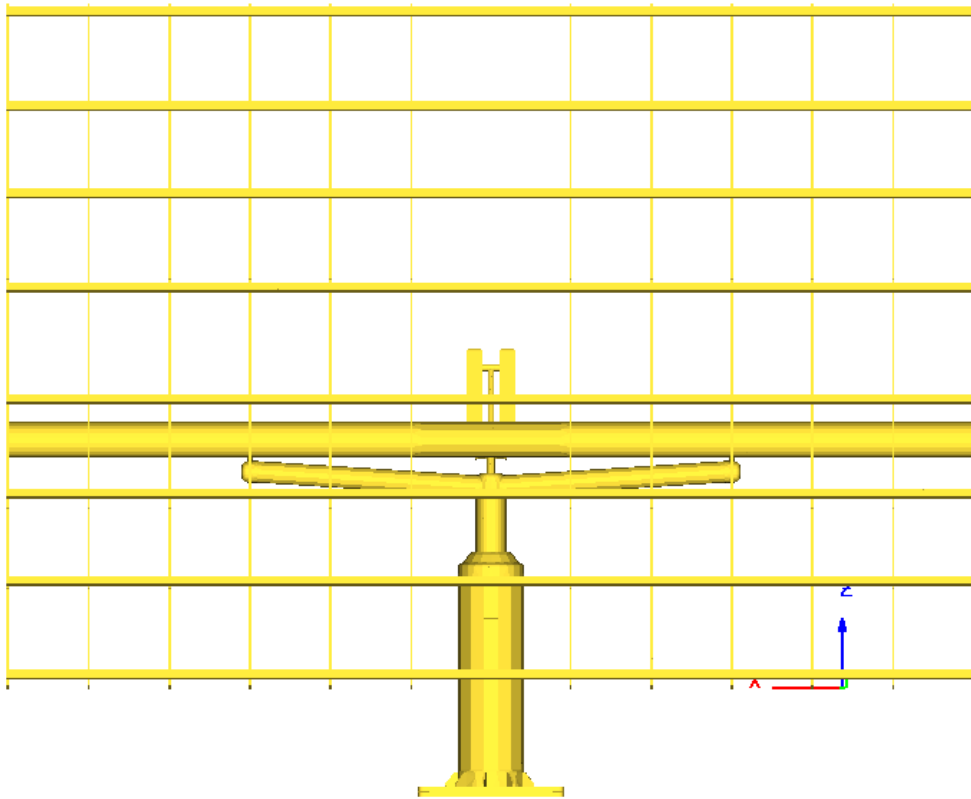


Εικόνα 138: Σύγκριση αποτελεσμάτων των φορτίσεων ανά στοιχείο σε σχέση με την αρχική κατάσταση

Παρατηρείται ότι οι φορτίσεις που ασκούνται στα κομμάτια, είναι σε σχετικά χαμηλές τιμές. Παρουσιάζονται οι φορτίσεις ως προς το κάθε στοιχείο που αποτελείται η κατασκευή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν σχετικά μικρές φορτίσεις, δεδομένου του φορτίου, όπως φαίνεται παρά πάνω. Και αυτά τα αποτελέσματα, έχουν αρκετή ομοιότητα με τα σημεία gauss. Συμπερασματικά, το πλέγμα που έχει γίνει για την κατασκευή είναι ικανοποιητικό, καθώς τα σημεία οριακά συγκλίνουν. Στην τελευταία εικόνα φαίνεται και η παραμόρφωση της κατασκευής σε σχέση με την αρχική κατάσταση, όπου παρουσιάζεται η τελική καταπόνηση, ενώ παρατηρείται ότι οι τάσεις κυμαίνονται σε φυσιολογικά επίπεδα, συνεπώς δεν αποτελούν κίνδυνο για τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής.

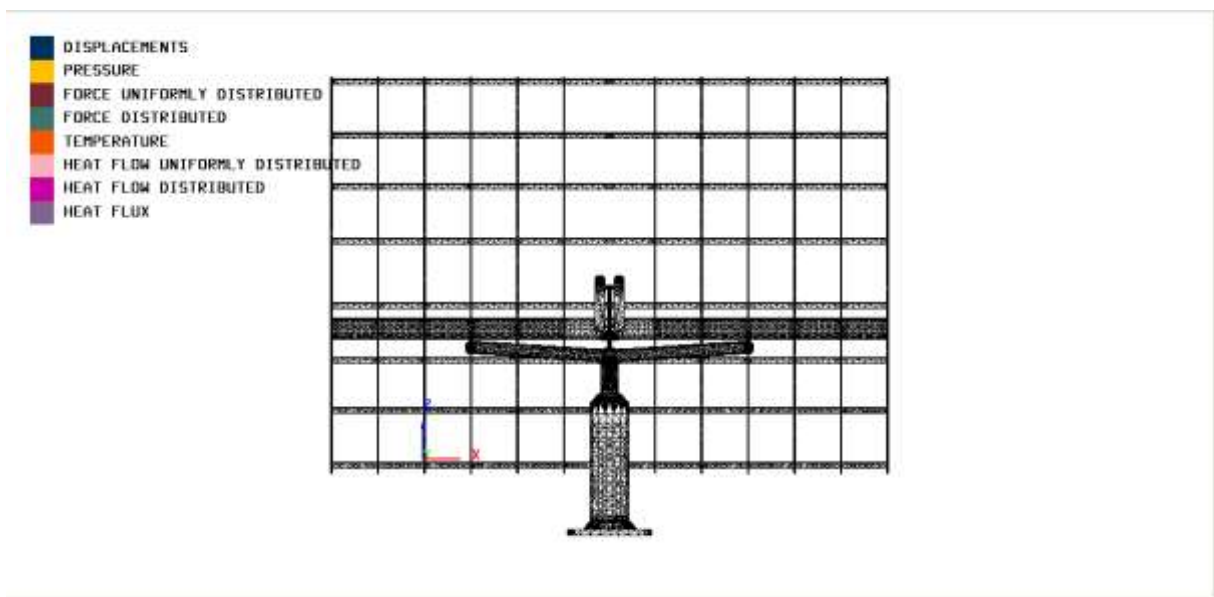
6.4.3 Μοντέλο ανεμοπίεσης: Περίπτωση 2^η

Αρχικά, εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής, στο πρόγραμμα z88 ως step file (*.stp). Όπως αναφέρθηκε, η γωνία κλίσης της σχάρας ως προς τον οριζόντιο άξονα είναι 60° .



Εικόνα 139: Εισαγωγή μοντέλου

Στη συνέχεια πραγματοποιείται εισαγωγή δεδομένων για το υλικό της κατασκευής. Επιπλέον, ορίζονται τα δεδομένα για να πραγματοποιηθεί πλεγματοποίηση του συνεχούς, σε επιμέρους στοιχεία. Παρακάτω παρατίθεται εικόνα της κατασκευής, αφού έχει πλεγματοποιηθεί.

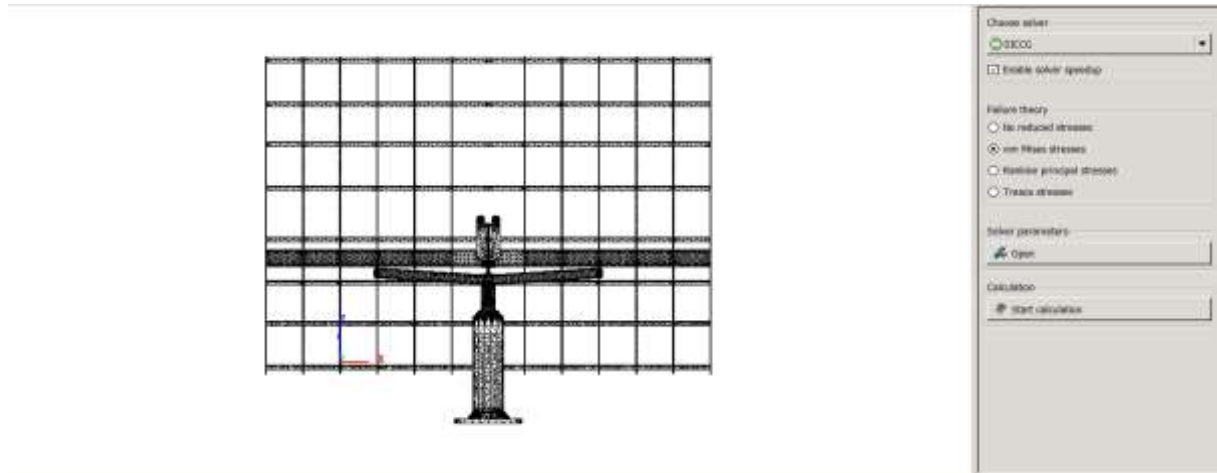


Εικόνα 140: Πλεγματοποίηση μοντέλου

Έπειτα εισάγονται οι φορτίσεις που θα εφαρμοστούν οι δυνάμεις που υπολογίστηκαν, όπως και οι άξονες στους οποίους εφαρμόζονται. Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο,

η φόρτιση σε κάθε δοκό εισάγεται ως η συνισταμένη δύναμη του ανέμου και του βάρους των πάνελ , ως προς την κάθετη επιφάνεια. Επιπλέον, προστίθεται πάκτωση στη βάση της κατασκευής, και στο σημείο που βρίσκεται το έμβολο.

Στη συνέχεια, το πρόβλημα επιλύεται γραμμικά , χρησιμοποιώντας τον SICCG solver, με το ίδιο σκεπτικό που χρησιμοποιήθηκε και στην προηγούμενη περίπτωση. Επιπλέον , σχεδιάζεται με τάσεις von mises των γωνιακών κόμβων.

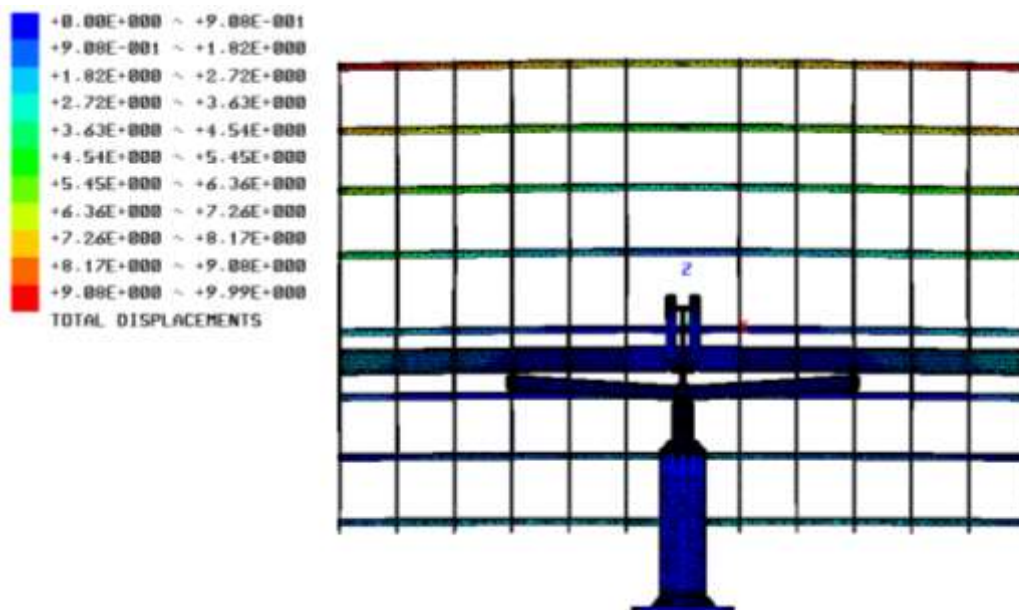


Εικόνα 141: Επιλογή κατάλληλου solver

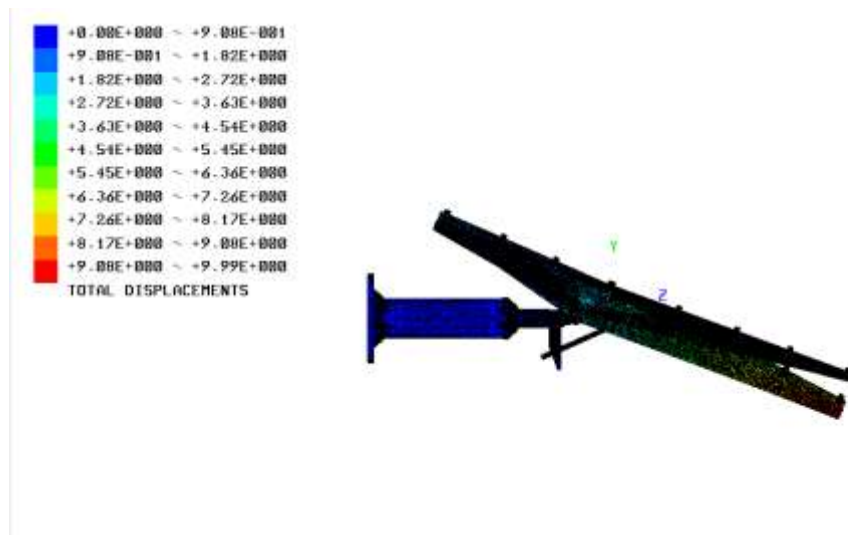
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης τάσεων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων παρατίθενται παρακάτω.

Αποτελέσματα υπό συνθήκες ανεμοπίεσης.

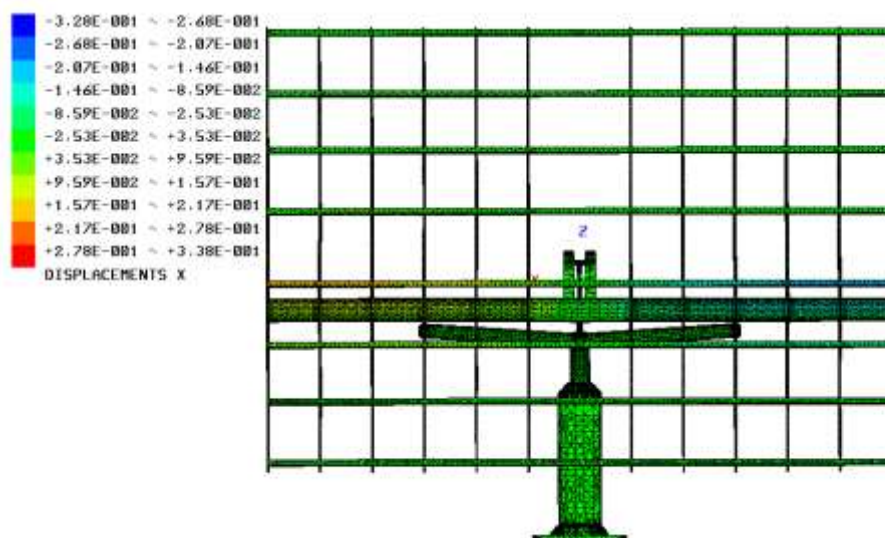
Ολικές μετατοπίσεις:



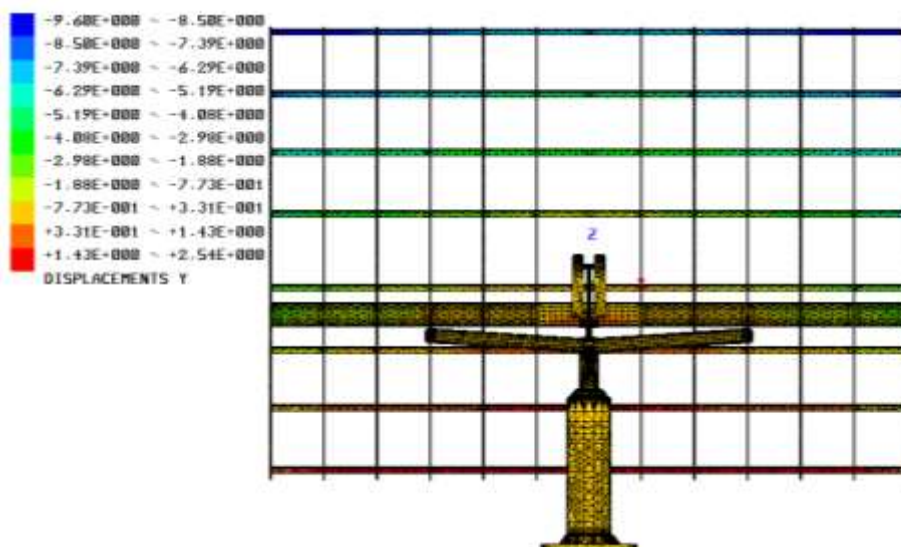
Εικόνα 142: Αποτελέσματα ολικών μετατοπίσεων



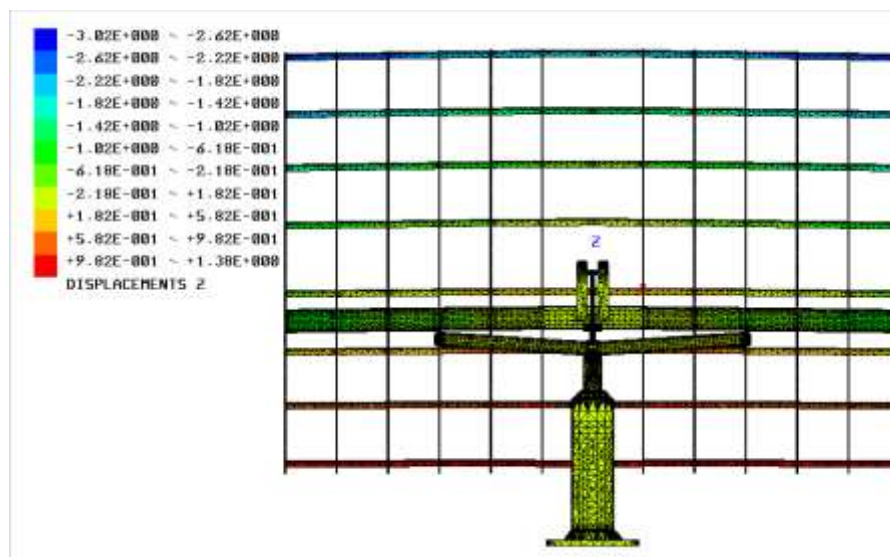
Εικόνα 143: Σύγκριση τελικής κατάστασης παραμορφώσεων με αρχική κατάσταση



Εικόνα 144: Μετατοπίσεις στον άξονα των x



Εικόνα 145: Μετατοπίσεις στον άξονα των y

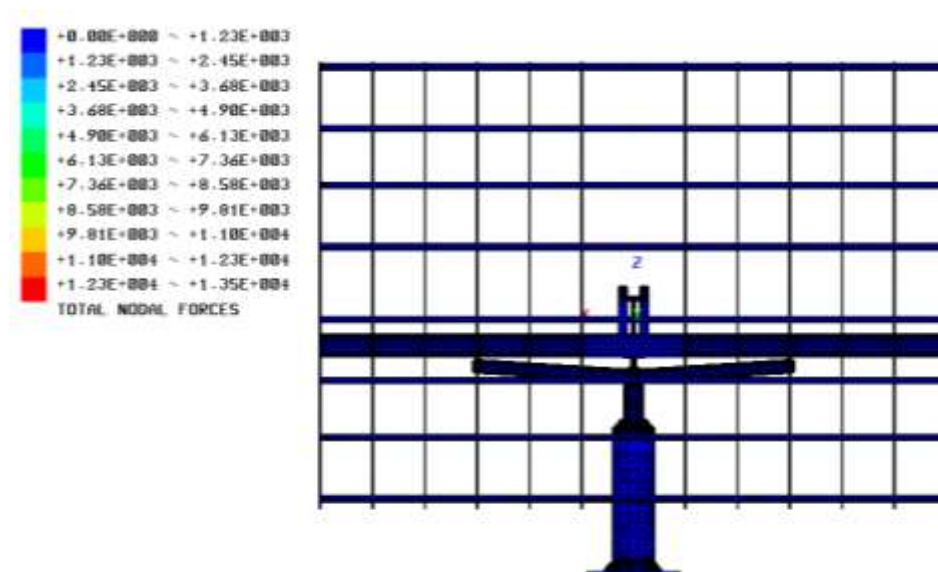


Εικόνα 146: Μετατοπίσεις στον άξονα των z

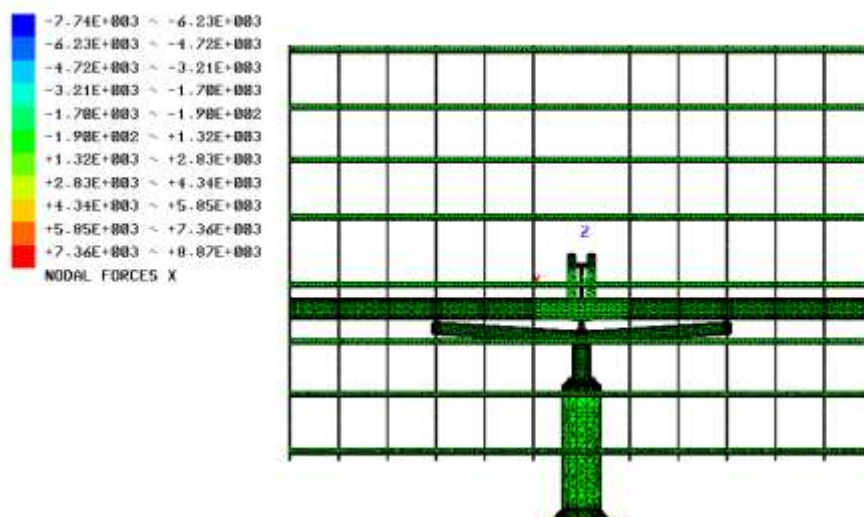
Παρατηρείται ότι ακόμα και για τα δεδομένα χάλυβα (του υλικού), υπό κατάσταση φόρτισης της κατασκευής και υπό γωνία κλίσης της σχάρας, για τις δεδομένες συνθήκες τα αποτελέσματα παραμόρφωσης, λαμβάνοντας υπόψη τη μετατόπιση είναι αρκετά ικανοποιητικά, και οι ολικές μετατοπίσεις είναι της τάξεως χιλιοστών. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι, δεδομένης πάκτωσης στη βάση και στο έμβολο, η μετατόπιση αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το σημείο της πάκτωσης, στο πιο απομακρυσμένο σημείο. Παρατίθενται επίσης, τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων ως προς κάθε άξονα. Οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις παρατηρούνται ως προς τον x άξονα. Παρατηρείται επίσης ότι ο πιο καταπονημένος άξονας ότι είναι αυτός που δέχεται τη φόρτιση του ανέμου, δηλαδή ο άξονας των y, έτσι όπως έχει εισαχθεί η γεωμετρία. Ο κατακόρυφος άξονας, δηλαδή ο z, δέχεται μόνο τη συνιστώσα του βάρους και συνεπώς εμφανίζει μικρότερες τιμές, επειδή εμπεριέχει το ίδιο βάρους της κατασκευής. Τέλος συγκρίνοντας την αρχική με την τελική κατάσταση μετά από την φόρτιση, παρατηρείται ότι οι η τάξεις μεγέθους των μετατοπίσεων, δεν αποτελούν κίνδυνο για τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής.

Δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους:

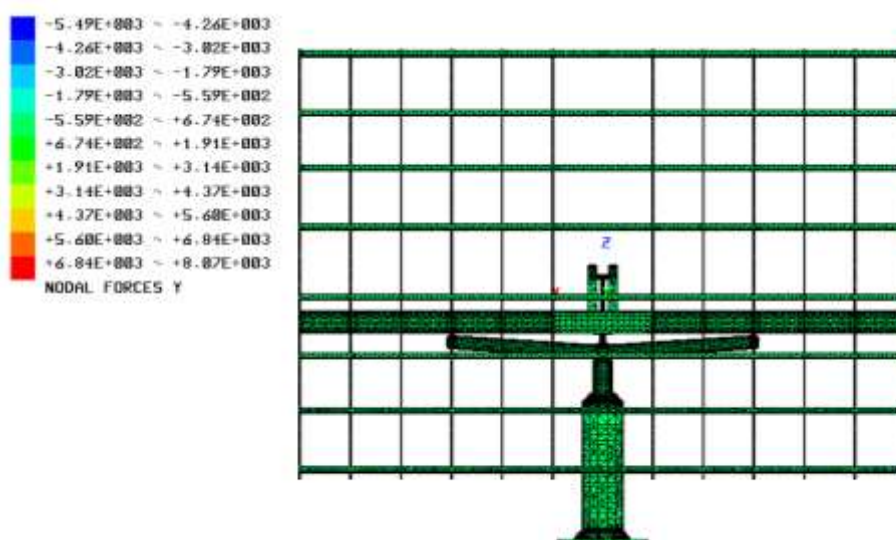
Συνολικές:



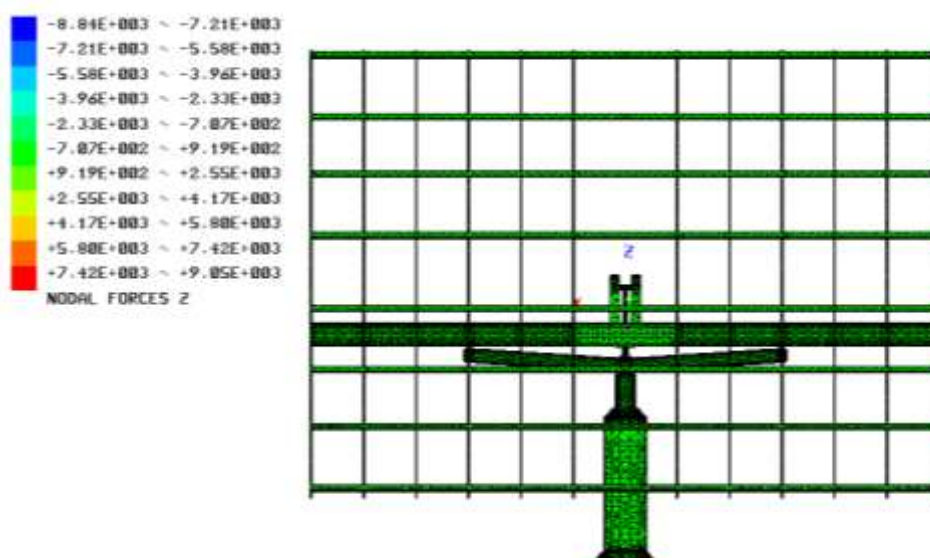
Εικόνα 147: Συνολικές δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους



Εικόνα 148: Δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους ως προς τον άξονα των x



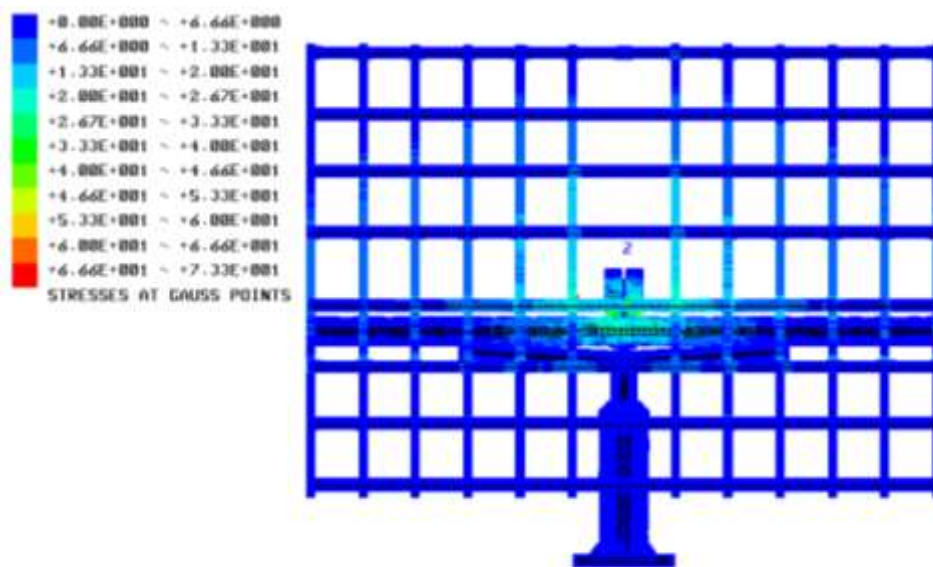
Εικόνα 149: Δυνάμεις που ασκούνται ως προς τον άξονα των y



Εικόνα 150: Δυνάμεις που ασκούνται ως προς τον άξονα των z

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα έχουν μικρές παραμορφώσεις συγκριτικά με το μέγεθος της κατασκευής και δεδομένου του φορτίου που ασκείται. Παρατίθενται οι φορτίσεις κόμβων ως προς τους 3 άξονες, όπως και οι συνολικές. Οι τιμές κυμαίνονται στα αναμενόμενα πλαίσια. Επεξηγηματικά, όσον αφορά τις συνολικές δυνάμεις στους κόμβους, οι φορτίσεις κυμαίνονται από $0-1,2 \text{ E}+003$, καθώς καμία δύναμη σε οποιοδήποτε άξονα δεν ξεπερνά αυτό το πλαίσιο. Επίσης, όπως φαίνεται, οι άξονες στους οποίους υπάρχει η μεγαλύτερη καταπόνηση, είναι οι άξονες των y και των z .

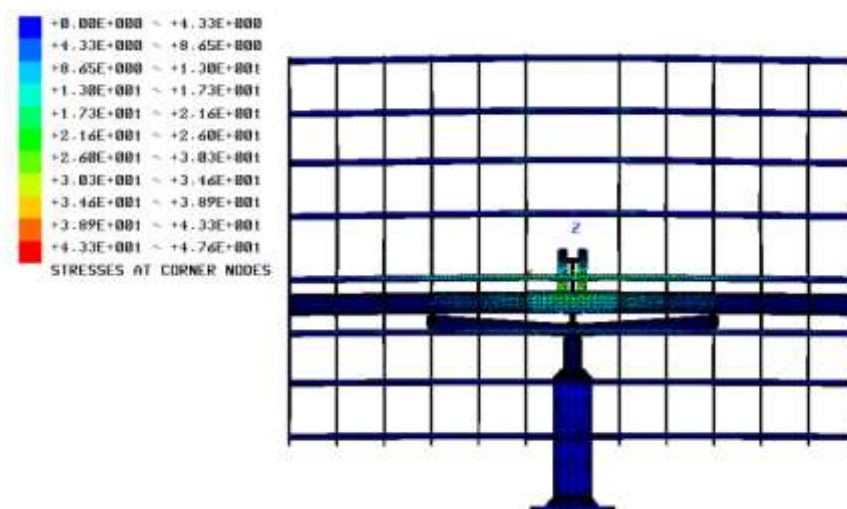
Φορτίσεις που ασκούνται στα σημεία gauss:



Εικόνα 151: Φορτίσεις που ασκούνται στα σημεία gauss

Τα αποτελέσματα των φορτίσεων ως προς τα σημεία gauss είναι αρκετά ικανοποιητικά. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση ανεμοπίεσης, οι τιμές είναι σαφώς μικρότερες από αυτές των φορτίσεων στους κόμβους. Επίσης, παρατηρείται ότι στην εικόνα, οι φορτίσεις που δέχεται η κατασκευή κυμαίνονται στα μικρότερα πλαίσια φορτίσεων. Τα αποτελέσματα αυτά είναι και τα πιο ρεαλιστικά, όσον αφορά την αντοχή της κατασκευής, επειδή τα σημεία gauss είναι τα σημεία που δίνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις φορτίσεις σε μια κατασκευή, οπότε είναι και πιο κοντά στις πραγματικές τιμές. Παρατηρείται επίσης, ότι υπάρχει μεγαλύτερης τάξης μεγέθους τάση, στο κέντρο της κατασκευής, καθότι σε εκείνο το σημείο υπάρχει πάκτωση και συνεπώς οι τάσεις που εμφανίζονται είναι μεγαλύτερες.

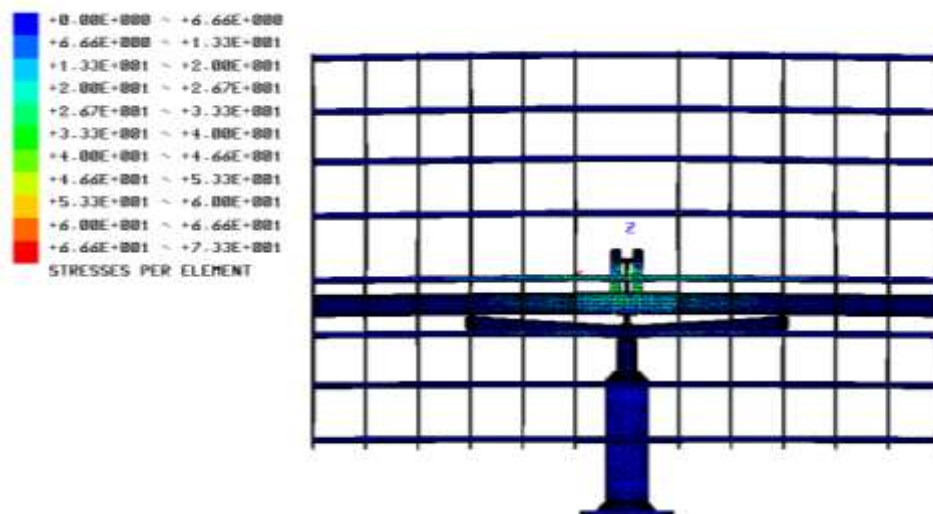
Φορτίσεις σε εξωτερικούς κόμβους:



Εικόνα 152: Φορτίσεις που ασκούνται σε εξωτερικούς κόμβους

Παρατηρείται ότι στις φορτίσεις στους εξωτερικούς κόμβους, τα αποτελέσματα είναι κοντά με αυτά από τα σημεία gauss. Παρατηρείται επίσης, ότι υπάρχει μεγαλύτερης τάξης μεγέθους τάση, στο κέντρο της κατασκευής, καθότι σε εκείνο το σημείο υπάρχει πάκτωση και συνεπώς οι τάσεις που εμφανίζονται είναι μεγαλύτερες. Συμπεραίνεται ότι η πλεγματοποίηση της κατασκευής, είναι αρκετά ακριβής. Ωστόσο, όπως είναι γνωστό από τη θεωρία, τα δεδομένα που μπορούν να δώσουν μεγαλύτερη ακρίβεια είναι τα σημεία gauss, καθότι επειδή είναι εσωτερικά στοιχεία, αναμένεται να έχουν ελαφρώς μεγαλύτερες τάσεις.

Φορτίσεις ανά στοιχείο:



Εικόνα 153: Φορτίσεις που ασκούνται σε κάθε στοιχείο

Παρουσιάζονται οι φορτίσεις ως προς το κάθε στοιχείο που αποτελείται η κατασκευή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν σχετικά μικρές φορτίσεις, δεδομένου του φορτίου, όπως φαίνεται παρά πάνω. Και αυτά τα αποτελέσματα όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, έχουν αρκετή ομοιότητα με τα σημεία gauss. Συμπερασματικά, το πλέγμα που έχει γίνει για την κατασκευή είναι ικανοποιητικό, καθώς τα σημεία οριακά συγκλίνουν. Επιπροσθέτως, οι τάσεις κυμαίνονται σε φυσιολογικά επίπεδα, συνεπώς δεν αποτελούν κίνδυνο για τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής.

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων και των τριών περιπτώσεων:

		ΜΟΝΤΕΛΟ ΧΙΟΝΙΟΥ	ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΕΜΟΠΟΙΗΣΗΣ 1	ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΕΜΟΠΟΙΗΣΗΣ 2
TOTAL DISPLACEMENTS		0-2,31 mm	0-2,22 mm	0-0,908 mm
		2,31-4,62 mm	2,22-4,45 mm	0,908-1,82 mm
		4,62-6,93 mm	4,45-6,67 mm	1,82-2,72 mm
		6,93-9,24 mm	6,67-8,89 mm	2,72-3,63 mm
		9,24-11,6 mm	8,89-11,1 mm	3,63-4,54 mm
		11,6-13,9 mm	11,1-13,3 mm	4,54-5,45 mm
		13,9-16,2 mm	13,3-15,6 mm	5,45-6,36 mm
		16,2-18,5 mm	15,6-17,8 mm	6,36-7,26 mm
		18,5-20 mm	17,8-20 mm	7,26-8,17 mm
		20-23,1 mm	20-22,2 mm	8,17-9,08 mm
		23,1-25,4 mm	22,2-24,5 mm	9,08-9,99 mm
TOTAL NODAL FORCES		0-2670 Nt	0-10500 Nt	0-1230 Nt
		2670-5350 Nt	10500-21000 Nt	1230-2450 Nt
		5350-8020 Nt	21000-31500 Nt	2450-3680 Nt
		8020-10700 Nt	31500-42000 Nt	3680-4900 Nt
		10700-13400 Nt	42000-52500 Nt	4900-6130 Nt
		13400-16000 Nt	52500-63000 Nt	6130-7360 Nt
		16000-18700 Nt	63000-73400 Nt	7360-8580 Nt
		18700-21400 Nt	73400-83900 Nt	8580-9810 Nt
		21400-24100 Nt	83900-94400 Nt	9810-11000 Nt
		24100-26700 Nt	94400-105000 Nt	11000-12300 Nt
		26700-29400 Nt	105000-115000 Nt	12300-13500 Nt
STRESSES AT GAUSS POINTS		0-72,7 Nt/mm	0-60,3 Nt/mm	0-6,66 Nt/mm
		72,7-145 Nt/mm	60,3-121 Nt/mm	6,66-13,3 Nt/mm
		145-218 Nt/mm	121-181 Nt/mm	13,3-20 Nt/mm
		218-291 Nt/mm	181-241 Nt/mm	20-26,7 Nt/mm
		291-364 Nt/mm	241-301 Nt/mm	26,7-33,3 Nt/mm
		364-436 Nt/mm	301-362 Nt/mm	33,3-40 Nt/mm
		436-509 Nt/mm	362-422 Nt/mm	40-46,6 Nt/mm
		509-582 Nt/mm	422-482 Nt/mm	46,6-53,3 Nt/mm
		582-654 Nt/mm	482-542 Nt/mm	53,3-60 Nt/mm
		654-727 Nt/mm	542-603 Nt/mm	60-66,6 Nt/mm
		727-800 Nt/mm	603-663 Nt/mm	66,6-73,3 Nt/mm
STRESSES AT CORNER NODES		0-27 Nt/mm	0-35,8 Nt/mm	0-4,33 Nt/mm
		27-54 Nt/mm	35,8-71,6 Nt/mm	4,33-8,65 Nt/mm
		54-81 Nt/mm	71,6-107 Nt/mm	8,65-13 Nt/mm
		81-108 Nt/mm	107-143 Nt/mm	13-17,3 Nt/mm
		108-135 Nt/mm	143-179 Nt/mm	17,3-21,6 Nt/mm
		135-162 Nt/mm	179-215 Nt/mm	21,6-26 Nt/mm
		162-189 Nt/mm	215-251 Nt/mm	26-30,3 Nt/mm
		189-216 Nt/mm	251-286 Nt/mm	30,3-34,6 Nt/mm
		216-243 Nt/mm	286-322 Nt/mm	34,6-38,9 Nt/mm
		243-278 Nt/mm	322-358 Nt/mm	38,9-43,3 Nt/mm
		278-297 Nt/mm	358-394 Nt/mm	43,3-47,6 Nt/mm

		ΜΟΝΤΕΛΟ ΧΙΟΝΙΟΥ	ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΕΜΟΠΟΙΗΣΗΣ 1	ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΕΜΟΠΟΙΗΣΗΣ 2
STRESSES PER ELEMENT		0-72,7 Nt/mm	0-60,3 Nt/mm	0-6,66 Nt/mm
		72,7-145 Nt/mm	60,3-121 Nt/mm	6,66-13,3 Nt/mm
		145-210 Nt/mm	121-181 Nt/mm	13,3-20 Nt/mm
		210-291 Nt/mm	181-241 Nt/mm	20-26,7 Nt/mm
		291-364 Nt/mm	241-301 Nt/mm	26,7-33,3 Nt/mm
		364-436 Nt/mm	301-362 Nt/mm	33,3-40 Nt/mm
		436-509 Nt/mm	362-422 Nt/mm	40-46,6 Nt/mm
		509-582 Nt/mm	422-482 Nt/mm	46,6-53,3 Nt/mm
		582-654 Nt/mm	482-542 Nt/mm	53,3-60 Nt/mm
		654-727 Nt/mm	542-603 Nt/mm	60-66,6 Nt/mm
		727-800 Nt/mm	603-663 Nt/mm	66,6-73,3 Nt/mm

Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε στατική μελέτη περιστρεφόμενης βάσης φωτοβολταϊκού διπλού άξονα. Αρχικά η βάση, σχεδιάστηκε με το πρόγραμμα Pro-Engineer και στη συνέχεια εισήχθη στο z88 για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση. Επειδή παρουσιάστηκαν προβλήματα συμβατότητας ανάμεσα στα 2 προγράμματα, πραγματοποιήθηκαν τροποποιήσεις όσων αφορά τη γεωμετρία του σχεδίου. Επίσης, όσον αφορά την ταχύτητα υπολογισμού, παρουσιάστηκαν δυσκολίες.

Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης και για τις 3 περιπτώσεις φορτίσεων ήταν αρκετά ικανοποιητικά, δείχνοντας την αρτιότητα της κατασκευής σε συνθήκες καταπόνησης.

Μετά από την πλεγματοποίηση και την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων η οποία πραγματοποιήθηκε για το παρόν μοντέλο, η κατασκευή εξετάστηκε σε ότι αφορά τις μετατοπίσεις που πραγματοποιούνται κατόπιν επιβολής φορτίσεων. Μετά το πέρας της εξέτασης και της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, προέκυψε ότι τα αποτελέσματα είναι σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Και για τις 3 περιπτώσεις, οι μετατοπίσεις κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα, της τάξεως των χιλιοστών, ενώ οι άξονες που δέχονται την περισσότερη καταπόνηση είναι αυτοί οι οποίοι είναι παράλληλοι στη διεύθυνση των φορτίων. Επίσης οι κόμβοι οι οποίοι είναι πιο απομακρυσμένοι από την πάκτωση, έχουν μεγαλύτερες μετατοπίσεις.

Όσον αφορά, τις φορτίσεις στους κόμβους, και για τις 3 περιπτώσεις, παρατηρείται ότι κινούνται σε χαμηλά επίπεδα, και δεν προκαλούν κάποιον προβληματισμό.

Επίσης, οι τάσεις στα σημεία gauss είναι μικρότερες από αυτές των φορτίσεων στους κόμβους. Τα αποτελέσματα αυτά είναι και τα πιο ρεαλιστικά, όσον αφορά την αντοχή της κατασκευής, επειδή τα σημεία gauss είναι τα σημεία που δίνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις τάσεις σε μια κατασκευή, οπότε είναι και πιο κοντά στις πραγματικές τιμές. Παρατηρείται επιπροσθέτως, ότι υπάρχει μεγαλύτερης τάξης μεγέθους τάση, στο κέντρο της κατασκευής, καθώς σε εκείνο το σημείο υπάρχει πάκτωση και συνεπώς οι τάσεις που εμφανίζονται είναι μεγαλύτερες.

Επιπλέον από τα διαγράμματα των σημείων gauss, των επιμέρους στοιχείων και των κόμβων, συμπεραίνεται ότι η πλεγματοποίηση είναι αρκετά ακριβής.

Παρατηρείται από τα αποτελέσματα, ότι σε κατάσταση φόρτισης υπό ανεμοπίεση, και θεωρώντας την σχάρα ως επικλινή στέγη, είναι η δυσμενέστερη φόρτιση για τη βάση, συμφωνώντας με τις επιταγές του ευρωκώδικα.

Συμπερασματικά, είναι εμφανές ότι η κατασκευή δεν αστοχεί ακόμα και κάτω από ακραίες συνθήκες φόρτισης (χιόνι και ανεμοπίεση). Επίσης παρατηρείται ότι λόγω των μικρών παραμορφώσεων στους κόμβους, η πιθανότητα να υπάρξει θραύση του φωτοβολταϊκού είναι πολύ μικρή. Επιπλέον οι δοκοί στήριξης αποκλείεται να αστοχήσουν καθώς τα όρια μετατόπισης τους είναι κατά πολύ μεγαλύτερα. Συνεπώς, η κατασκευή κρίνεται άρτια και ακόμα και υπό ακραία φόρτιση δεν αστοχεί.

Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία

1. SMA Solar Technology AG Τεχνική Πληροφορία Perfratio-UGR100810
2. Βασιλική Περράκη, “Νέες τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών στοιχείων”,
3. Γάγλια Α., «Απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε πραγματικές συνθήκες – Δυνατότητα εφαρμογής στα ελληνικά κτίρια», Νοέμβριος 2009
4. Δ.Μπιτζιώνης, «ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ», Εκδόσεις Τζιόλα, 2011
5. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2007
6. Εκπαιδευτικό υλικό μαθήματος υπολογιστικής μηχανικής, Γ.Ε. Σταυρουλάκης,
7. Ένας πρακτικός τεχνικός οδηγός ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ, 2011
8. ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Πάτρα 2002
9. Ι.Ε Φραγκιαδάκης. “Φωτοβολταϊκά Συστήματα”, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2007
10. Κ. Καγκαράκης. “Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία”, Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 1992
11. ΛΕΙΤΟΥΡΓΟΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Α.Ε., Συνοπτικό πληροφοριακό δελτίο. 2013
12. Μηχανικών, Cork Institute of Technology, Energy Engineering Group,
13. Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων ΤΕΕ, ΤΚΜ 2011
14. Π.Κ. Μπαταγιάννης M.Eng., Dr. C. Gibbons, Τμήμα Μηχανολόγων
15. Σημειώσεις εργαστηρίου CAD για το Pro-engineer
16. Στατική μηχανική του απαραμόρφωτου στερεού. Αναστάσιος Χ. Χρυσάκης,,Αθήνα 1999.
17. Φωτοβολταϊκά συστήματα. Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, 3η έκδοση, εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη (2009).

Διεθνής βιβλιογραφία

1. Beer/Johnson. ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ, ΤΟΜΟΣ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ,ΣΤΑΤΙΚΗ. Αθήνα: Fountas.
2. Beton-Kalender 1988, Teil II, . Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 1988.
3. Chandrupatla, Ashok D. Belegundu, εκδόσεις Κλειδάριθμος.
4. Chu and Chu. “Thin film II-VI photovoltaics”. Solid state electronics,38(3): 533–549, 1995.
5. Green. “Photovoltaics: Technology overview”. Energy Policy, 28:989–99,2000.
6. Photovoltaic Power for Europe, Michael R. Starr Sir William Halcrow and Partners, Swindon, England & W. Palz , Commission of the European Communities, εκδόσεις Kluwer.
7. Solar Energy Dictionary, V. Daniel Hunt, εκδόσεις Industrial
8. Standarization, European Committee for. EUROPEAN PRESTANDARD. Brussels,1995.
9. Tomas Markvart, “ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ ΑΠΟ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ”, Εκδόσεις ΙΩΝ,2003
10. Tomas Markvart, “ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ ΑΠΟ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ”, Εκδόσεις ΙΩΝ,2003
11. WILLIAM D. CALLISTER, JR. ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ. Αθήνα: ΤΖΙΟΛΑ, 2004.
12. Wind loads on solar energy roofs. Chris P.W. Geurts, Carine A. van Bentum.
13. Εγχειρίδιο Pro-engineer
14. Εγχειρίδιο z88
15. Εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία για μηχανικούς (2005). Tirupathi R.

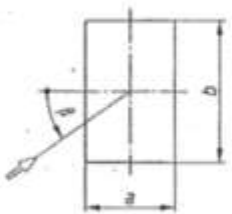
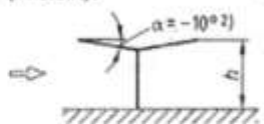
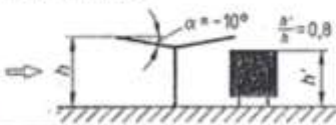
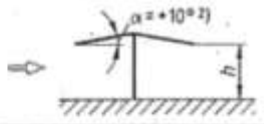
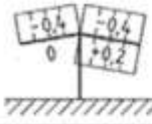
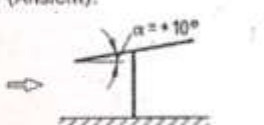
Δικτυακοί τόποι

1. energy.iastate.edu (Iowa Energy Center)
2. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (<http://www.eea.europa.eu/>)
3. <http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/6079/1/%CE%94%CE%B9%CF%80%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE.pdf>
4. <http://helios.teiath.gr/patheogk/anadromh.htm>

5. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractReferences.jsp?tp=&arnumber=5212084&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5212084
6. http://lhlogismiki.gr/inc_gr.php?f=/presentations/p_fespa.htm&t=FESPA&selecttab=5&gclid=CPi6qObEibkCFc2_3godk3UAQQ
7. http://makaig.gr/?page_id=657
8. http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/OMADESERGASIAS/fwtovoltaika_ergwn.pdf
9. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/index.htm>
10. <http://statikes-meletes.gr>
11. <http://tensis.gr/pv%20mounting%20design.html>
12. <http://vipconstruction.gr/%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B5%CF%83-%CE%BC%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CF%84%CE%B5%CF%83-c-52.html>
13. Wikipedia en.wikipedia.org/wiki/
14. www.alibaba.com/product-gs/51537374/pv_solar_panel_module.html?s=p (Στοιχεία πάνελ)
15. www.allaboutenergy.gr/Paragogi321.html
16. www.alten.gr/fotovoltaiika_systimata_apodosh.html
17. www.appropedia.org/LCA_of_silicon_PV_panels
18. www.clamps.gr/1C039197.el.aspx
19. www.conergy.gr/desktopdefault.aspx/tabid-30/37_read-42/
20. www.cres.gr/kape/pdf/datainfo/2007_gr.pdf
21. www.energypoint.gr
22. [www.enhe.gr\(ΕΝΩΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΩΝ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ\)](http://www.enhe.gr(ΕΝΩΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΩΝ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ))
23. www.enpi-info.eu/mainmed.php?id=20604&id_type=1&lang_id=450 (CONFERENCE ON THE MEDITERRANEAN SOLAR PLAN)
24. www.eshops.gr/images/ovak-manual.htm
25. www.greenenergia.gr
26. www.helapco.gr (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών)
27. www.photon.info/photon_site_db_solarmodule_en.photon?ActiveID=1242
28. www.resilience.org/stories/2006-06-16/energy-payback-roof-mounted-photovoltaic-cells
29. www.selasenergy.gr
30. www.seners.gr
31. www.slideshare.net/Kats961/ss-12247930
32. www.solar-systems.gr/solar-mounting.html
33. www.telematica.gr
34. www.tmth.gr/sciencelated/59-applications/560-photovoltaika
35. www.treehugger.com/clean-technology/new-life-cycle-assessment-reveals-your-photovoltaic-mileage-may-vary.html
36. www.worldlingo.com/ma/enwiki/el/Finite_element_analysis

Παράρτημα

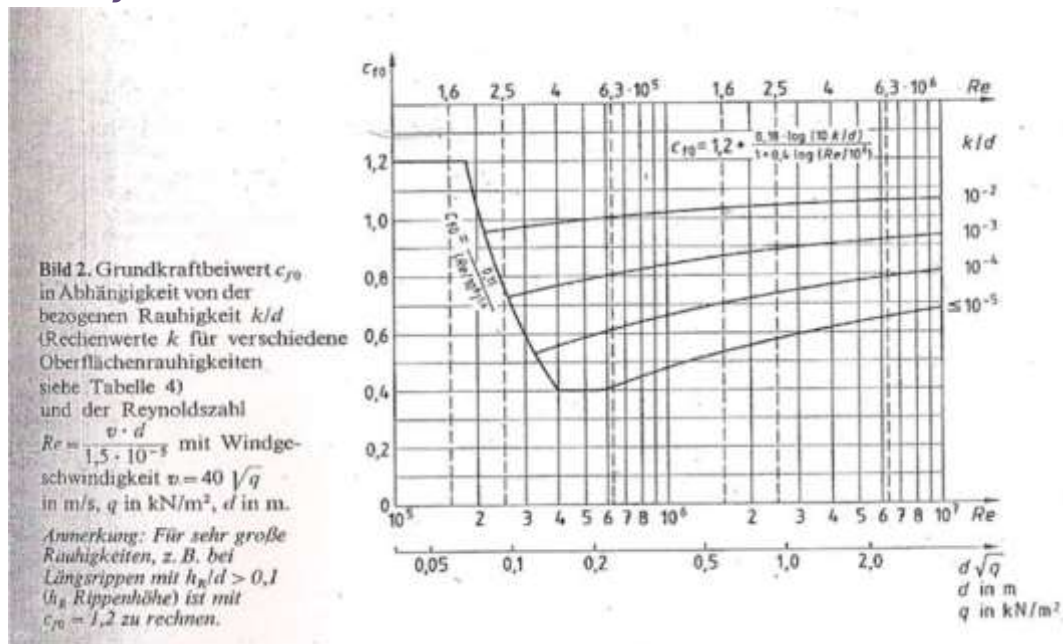
Πίνακας 1:

Lfd. Nr	Form und Lage des Baukörpers	Druckbeiwert c_p
	1	2
4	Freistehende Dächer ¹⁾ Grundriß:  Abmessungsverhältnisse: $a \leq b \leq 5a$ $0,5 \leq h/a \leq 1$ Querschnittshöhe der Dachscheibe $\leq 0,03a$	
4.1	Typ 1 (Ansicht):  mit Versperrung: 	$\beta = 0^\circ$  $\beta = 0^\circ$ $\beta = 180^\circ$ 
4.2	Typ 2 (Ansicht):  mit Versperrung:	$\beta = 0^\circ$  c_p entsprechend lfd. Nr 4.1
4.3	Typ 3 (Ansicht):  mit Versperrung:	$\beta = 0^\circ$ $\beta = 180^\circ$  c_p entsprechend lfd. Nr 4.1
1) Bei Anströmung in Richtung der Längsachse des Daches können die zum Dach tangentialen Windkräfte von Bedeutung sein. In Teilbereichen auf das Dach wirkende Sogspitzen können nach Tabelle 12 abgeschätzt werden. 2) Für Dachneigungen $-10^\circ < \alpha < +10^\circ$ darf zwischen den Druckbeiwerten für $\alpha = -10^\circ$ und $\alpha = +10^\circ$ linear interpoliert werden; in den Beiwerten ist eine mögliche Versperrung der durchströmten Fläche unterhalb des Daches bis zu 15% berücksichtigt.		

Πίνακας 2:

1	2	3
Höhe über Gelände m	Windge- schwindigkeit v m/s	Staudruck q kN/m ²
von 0 bis 8	28,3	0,5
über 8 bis 20	35,8	0,8
über 20 bis 100	42,0	1,1
über 100	45,6	1,3

Πίνακας 3:



Πίνακας 4:

Pitch angle α	Zone for wind direction $\theta = 0^\circ$						Zone for wind direction $\theta = 180^\circ$					
	F		G		H		F		G		H	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-2,3	-2,5	-1,3	-2,0	-0,8	-1,2
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2
	+0,2		+0,2		+0,2							
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-1,1	-2,3	-0,8	-1,5	-0,8	
	+0,7		+0,7		+0,4							
45°	+0,7		+0,7		+0,6		-0,6	-1,3	-0,5		-0,7	
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,5	-1,0	-0,5		-0,5	
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,5	-1,0	-0,5		-0,5	

Pitch angle α	Zone for wind direction $\theta = 90^\circ$							
	F		G		H		I	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5°	-1,6	-2,2	-1,8	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5	
15°	-1,3	-2,0	-1,9	-2,5	-0,8	-1,2	-0,7	-1,2
30°	-1,2	-2,0	-1,5	-2,0	-1,0	-1,3	-0,8	-1,2
45°	-1,2	-2,0	-1,4	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
60°	-1,2	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,7	-1,2
75°	-1,2	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,5	

Notes: (i) At $\theta = 0^\circ$ the pressure changes rapidly between positive and negative values around a pitch angle of $\alpha = +15^\circ$ to $+30^\circ$, so both positive and negative values are given.

(ii) Linear interpolation for intermediate pitch angles may be used between values of same sign.

Πίνακας 5:

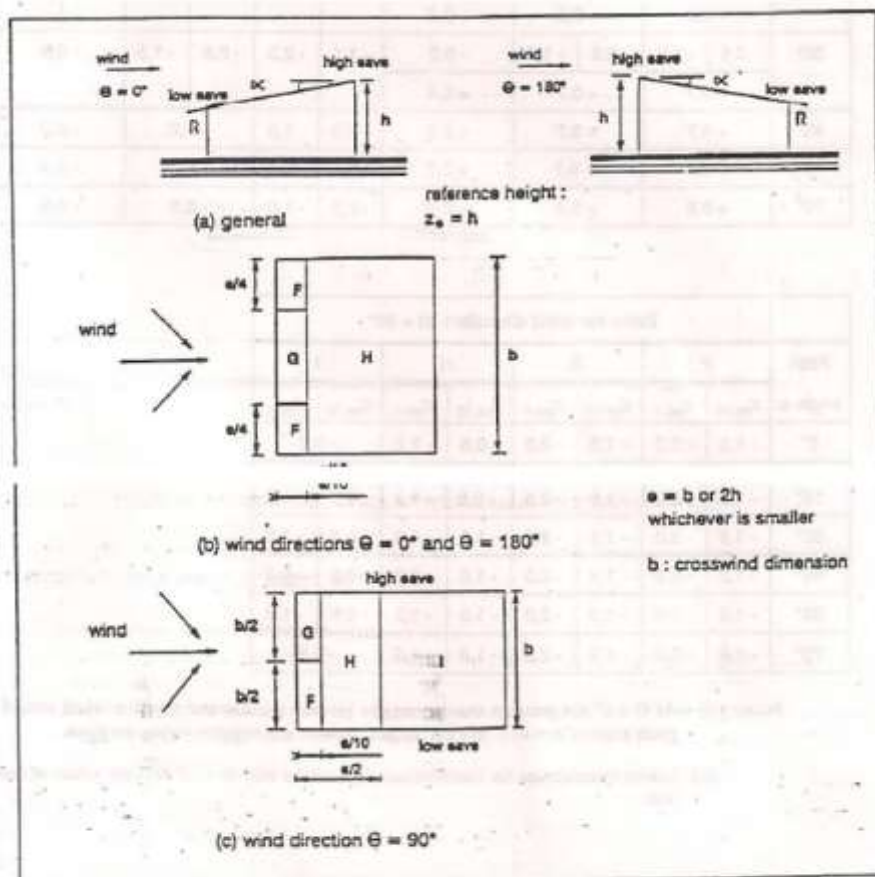


Figure 10.2.5: Key for monopitch roofs

Πίνακας 6:

terrain category	k_T	z_0 [m]	z_{min} [m]	ϵ
I Rough open sea, lakes with at least 5 km fetch upwind and smooth flat country without obstacles	0,17	0,01	2	[0,13]
II Farmland with boundary hedges, occasional small farm structures, houses or trees	0,19	0,05	4	[0,26]
III Suburban or industrial areas and permanent forests	0,22	0,3	8	[0,37]
IV Urban areas in which at least 15% of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m	0,24	1	16	[0,46]

Note: The parameters of Table 8.1 are calibrated to obtain the best fit of available data. The values k_T , z_0 and z_{min} are used in 8.2, the value ϵ is used in annex B (section 3).

Πίνακας 7:

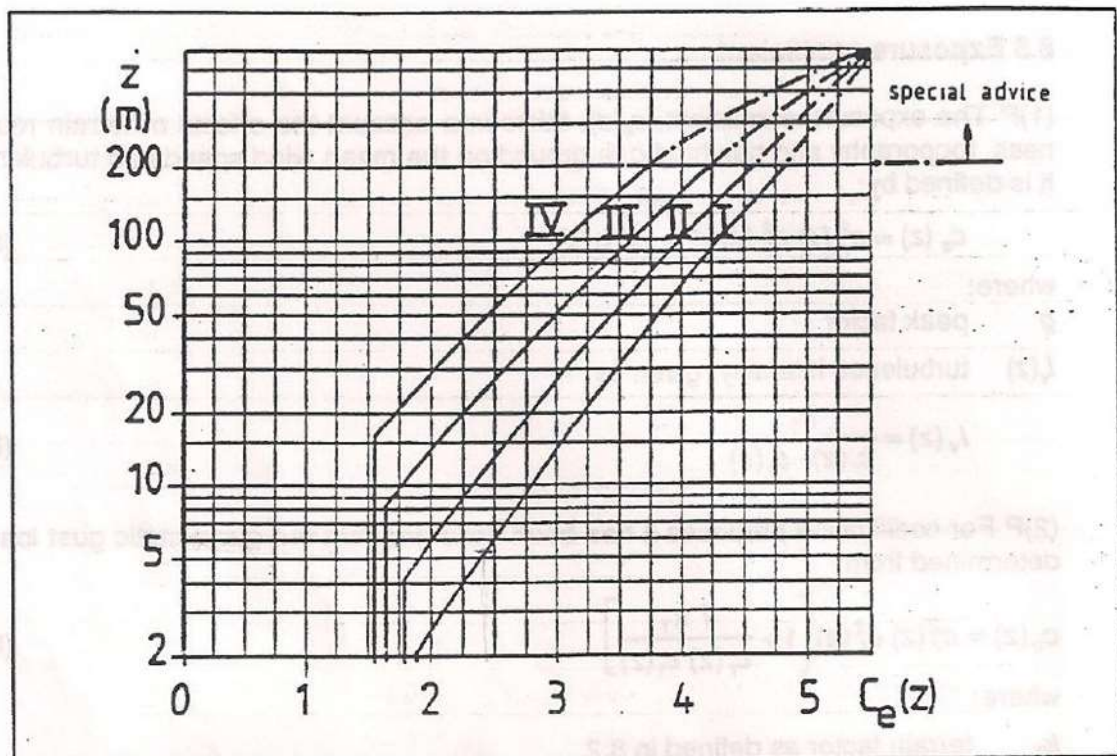


Figure 8.3: Exposure coefficient $c_e(z)$ as a function of height z above ground and terrain categories I to IV (see Table 8.1) for $c_s = 1$