



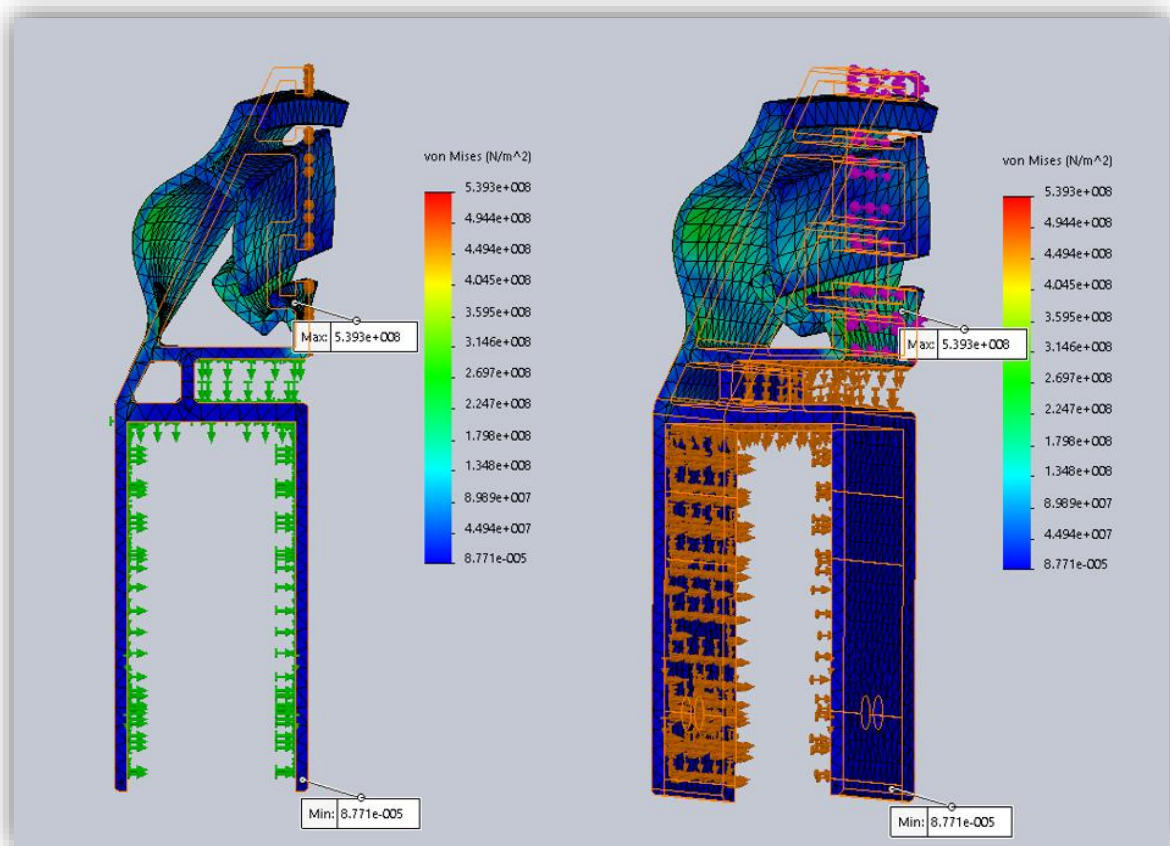
ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ 3D ΔΟΜΩΝ ΜΕ ΤΟ
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SOLIDWORKS»



Του φοιτητή:
Φωτιάδη Σαβ. Γεωργίου
Αρ. Μητρώου: **512118**

Επιβλέπων καθηγητής:
Κιοσκερίδης Ιορδάνης

Θεσσαλονίκη 10/9/2020

Τίτλος πτυχιακής εργασίας:

« Σχεδίαση και έλεγχος αντοχής 3D δομών με το λογισμικό SolidWorks»

Κωδικός πτυχιακής εργασίας: **17155**

Ημερομηνία ανάληψης: **19/10/2017**

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: **Γεώργιος Φωτιάδης**

Όνοματεπώνυμο Εισηγητή: **Ιορδάνης Κιοσκερίδης**

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια, την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή **Γεωργίου Φωτιάδη** που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Περίληψη

Αυτή η μελέτη, έχει ως στόχο να περιγράψει την χρήση και λειτουργία του λογισμικού **SolidWorks**, το οποίο χρησιμοποιείται για να σχεδιάσουμε και να προσομοιώσουμε ένα ολοκληρωμένο σύστημα φωτοβολταϊκού, ειδικότερα εξετάζοντας τη δομή του καθώς και τα υλικά που το απαρτίζουν. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται η διαδικασία σχεδιασμού και επιλογής των κατάλληλων υλικών για την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στις βάσεις των φωτοβολταϊκών, τον σχεδιασμό και την δομή τους καθώς και προσομοίωση αυτών σε πραγματικές συνθήκες με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων (FEA analysis). Τέλος, τα συμπεράσματα που εξάγονται μας βοηθούν να έχουμε μια σφαιρική άποψη σχετικά με την λειτουργία και συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, σε πραγματικές συνθήκες.

Δομή της εργασίας

- Η εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και πιο συγκεκριμένα στην ηλιακή ενέργεια.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο και στην εξέλιξη που έχουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα τελευταία χρόνια. Τέλος αναφέρονται οι συνθήκες όπου επικρατούν στον Ελλαδικό χώρο σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά πάρκα.
- Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η κατασκευάστρια εταιρία Alumil καθώς και η βάση στήριξης Helios 2100 AS190, της εταιρίας.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και πως αυτή εφαρμόζεται στα σύγχρονα σχεδιαστικά λογισμικά. Παρατίθεται μια εισαγωγή στο λογισμικό SolidWorks, καθώς και παράδειγμα σχεδίασης ενός αρθρωτού βραχίονα κίνησης.
- Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η σχεδίαση και μοντελοποίηση την βάση στήριξης Helios 2100 AS190, καθώς και οι στατικές αναλύσεις.

Abstract

This study aims to describe the use and function of **SolidWorks**, a piece of software which is used to design and simulate a complete solar panel system. It particularly examines its structure as well as the parts that it consists of. More specifically, it analyses the process of designing and the selection of the suitable parts for the installation of a solar panel system. Special attention is given to the solar panel mounting systems, their design and their structure as well as to the simulation of their function in real weather conditions with the help of finite elements (FEA analysis). Finally, the conclusions drawn help us have a better understanding of the function and behaviour of a solar panel system in real weather conditions.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κύριο Ιορδάνη Κιοσκερίδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθώς και την αφορμή που μου έδωσε να ασχοληθώ εντατικότερα με το λογισμικό SolidWorks με αποτέλεσμα να αποκομίσω ωφέλιμες γνώσεις για το επαγγελματικό μου μέλλον. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή και φίλο Λάζαρο Τσομπανίδη που συμπορευτήκαμε την φοιτητική μας διαδρομή και η βοήθεια του στάθηκε πολλές φορές απαραίτητη. Το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην γυναίκα μου Δέσποινα που μου συμπαραστέκεται όλα αυτά τα χρόνια καθώς και στους γιους μου Σάββα και Νικόλα που μου χαρίζουν όμορφες στιγμές.

Με εκτίμηση,
Φωτιάδης Σαβ. Γεώργιος
fwtiadis.giorgos@gmail.com
Θεσσαλονίκη 2020

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 . Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	8
1.1.Εισαγωγή.....	8
1.2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	9
1.3. Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	10
1.4. Ηλιακή ενέργεια.....	11
1.5. Η ηλιακή ενέργεια στον Ελλαδικό χώρο.....	13
Κεφάλαιο 2. Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	15
2.1. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο – ιστορική αναδρομή.....	15
2.2. Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	16
2.3. Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκού συστήματος.....	18
2.4. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο.....	20
2.5. Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	21
2.6. Φωτοβολταϊκά πάρκα στην Ελλάδα.....	22
Κεφάλαιο 3. Βάση στήριξης Helios 2100 AS190 της Alumil.....	24
3.1. Βάσεις φωτοβολταϊκών.....	24
3.2. Κατασκευάστρια εταιρία Alumil.....	27
3.3. Η Βάση στήριξης Helios 2100 AS190 της Alumil.....	27
3.4. Τεχνικό φυλλάδιο συστήματος AS 190.....	29
3.5. Πιστοποίηση στατικού υπολογισμού βάσης AS 190.....	30
3.6. Εξαρτήματα που απαρτίζουν την βάση στήριξης και το φωτοβολταϊκό σύστημα.....	31
3.7. Υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των βάσεων στήριξης.....	34
Κεφάλαιο 4. Πεπερασμένα στοιχεία και το λογισμικό SolidWorks.....	36
4.1. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	36
4.2. Ορισμός CAD.....	37
4.3. Ορισμός CAE.....	37
4.4. Μοντελοποίηση – τύποι πεπερασμένων στοιχείων.....	38
4.5. Αυτόματη γέννηση πλέγματος.....	41
4.6. Είδη ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.....	51
4.7. Το λογισμικό SolidWorks.....	53
4.7. Περιβάλλον και χρήση του λογισμικού SolidWorks.....	54
4.8. Εισαγωγή στο λογισμικό SolidWorks με σχεδίαση ενός βραχίονα.....	55
Κεφάλαιο 5. Προσομοίωση της βάσης Helios 2100 AS190.....	72
5.1. Βάση στήριξης Helios 2100 AS190 και η διαδικασία παραγωγής της.....	72
5.2. Προφίλ αλουμινίου που αποτελούν την βάση.....	73
5.3. Σχεδίαση εξαρτήματος με το λογισμικό SolidWorks.....	75

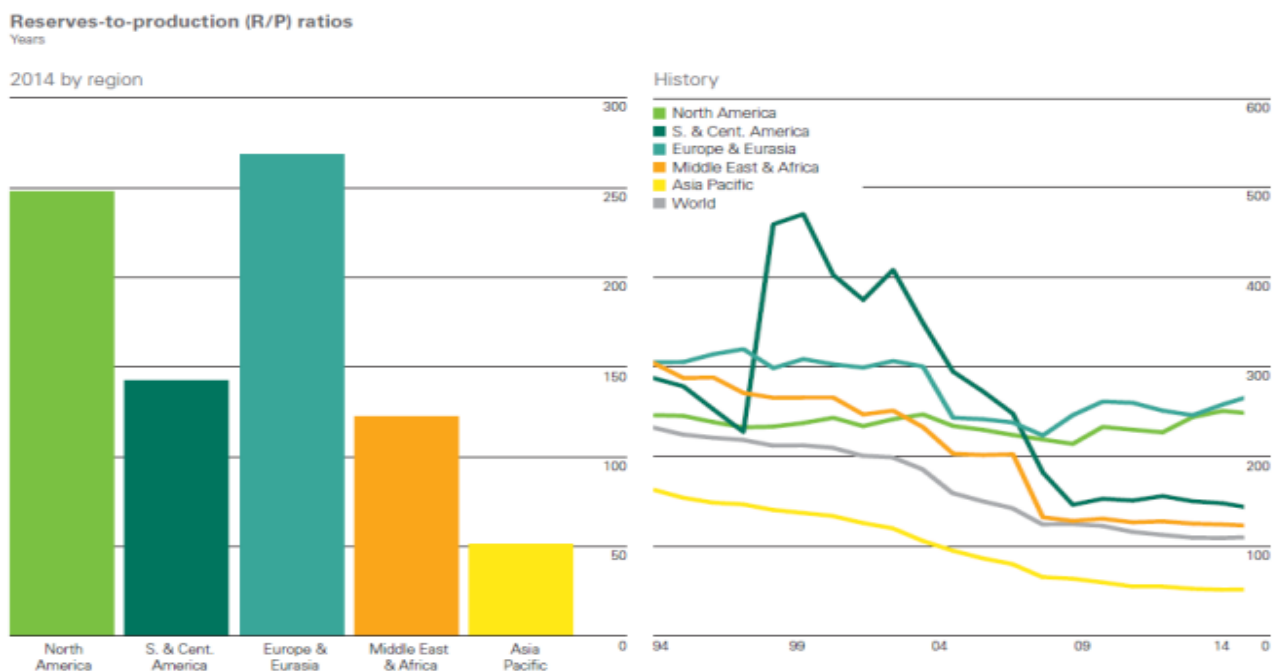
5.4. Προσομοίωση του εξαρτήματος με το εργαλείο SolidWorks Simulation.....	76
5.4. Μοντελοποίηση και εκτύπωση του συνδέσμου σε 3D printer	83
5.5. Σύνθεση της βάσης στήριξης Helios 2100 AS190 με το λογισμικό SolidWorks.....	89
5.6. Flow Simulation της βάσης στήριξης με το λογισμικό SolidWorks.....	91
Συμπεράσματα.....	95
Παράρτημα 1.....	96
Παράρτημα 2.....	109
Βιβλιογραφία	111

Κεφάλαιο 1 . Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

1.1.Εισαγωγή

Είναι κοινώς παραδεκτό, ότι ο σύγχρονος κόσμος εξαρτά την επιβίωση και την ευημερία του από την ηλεκτρική ενέργεια, ο άνθρωπος από τότε που ανακάλυψε τη φωτιά ξεκίνησε να εξελίσσεται ταχύτατα. Το ίδιο συνέβη και στην περίοδο της βιομηχανικής επανάστασης, όπου με την χρήση του ατμού και του ηλεκτρισμού, η ανθρώπινη ιστορία άλλαξε άρδην. Καθώς η ανθρώπινη τεχνολογία μεγάλωνε, δημιουργούνταν νέες πηγές ενέργειας, για μεγαλύτερη απόδοση και αυτάρκεια. Έτσι εκτός από το λιγνίτη και γενικά τους γαιάνθρακες, ξεκίνησε και η άντληση του πετρελαίου, όπου μαζί με τα παράγωγά του χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για κίνηση ακόμα και για θέρμανση.

Ο συγκεκριμένος τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή με καύση κάποιας πρώτης ύλης δεν είναι καθόλου αποδοτικός και πέραν αυτού δημιουργεί ποικίλα προβλήματα στο περιβάλλον, όπου έχουν άμεσες επιπτώσεις στην ανθρώπινη ύπαρξη. Εκτός από τα διάφορα προβλήματα που προκαλεί η καύση των γαιανθράκων καθώς και του πετρελαίου έρχεται να προστεθεί σε αυτά και η μείωση των αποθεμάτων τους. Εκτιμάται ότι με τον τρέχοντα ρυθμό κατανάλωσης των γαιανθράκων οι πόροι άνθρακα θα διαρκέσουν περισσότερο από 800 χρόνια, ενώ τα αποθέματα (πόροι άνθρακα που πληρούν ορισμένα οικονομικά και τεχνολογικά κριτήρια) 258 χρόνια (δεδομένα 2015, BP Statistical Review). Αντίθετα, αν η χρήση αυξάνει κατά 2% το χρόνο (ρεαλιστική εκτίμηση ιδιαίτερα με το ρυθμό αύξησης των τελευταίων ετών), οι πόροι θα διαρκέσουν 150 χρόνια και τα αποθέματα μόνον 65 χρόνια. Οι εκτιμήσεις αυτές ισχύουν προφανώς κάτω από τις εξής προϋποθέσεις: δεν θα ανακαλυφθούν νέα αξιόλογα κοιτάσματα και δεν θα βελτιωθεί η τρέχουσα απόδοση των διεργασιών εξόρυξης και αξιοποίησης των ανθράκων. Τα μεγαλύτερα αποθέματα ανθράκων βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο. Οι Η.Π.Α., η Ρωσία και η Κίνα κατέχουν το 80% των παγκόσμιων ανακτήσιμων πόρων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Λόγοι αποθεμάτων γαιάνθρακα ανά περιοχή (αριστερά) και λόγοι αποθεμάτων (δεξιά) προς το ρυθμό παραγωγής τους. Με το λόγο αυτόν εκτιμάται ο χρόνος εξάντλησης αυτού του καυσίμου στα 268 χρόνια με την προϋπόθεση του σταθερού ρυθμού παραγωγής (BP Statistical Review 2015).

Η κατάσταση στην χώρα μας δεν διαφέρει κατά πολύ, καθώς το σημαντικότερο ενεργειακό καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο λιγνίτης. Με βάση τα συνολικά αποθέματα και τον προγραμματιζόμενο ρυθμό κατανάλωσης στο μέλλον, υπολογίζεται ότι στην Ελλάδα οι ποσότητες λιγνίτη επαρκούν για τα επόμενα 61 χρόνια. Τα συνολικά επιβεβαιωμένα γεωλογικά αποθέματα λιγνίτη στη χώρα μας ανέρχονται σε περίπου 3 δισ. τόνους. Το 2015 εξορύχθηκαν συνολικά 50 εκ. τόνοι λιγνίτη. Οι επτά λιγνιτικοί σταθμοί της ΔΕΗ αποτελούν το 25% της εγκατεστημένης ισχύος και παράγααν το 2015 περίπου το 48% της ηλεκτρικής ενέργειας στο διασυνδεδεμένο δίκτυο.

Οι παραπάνω πηγές ενέργειας, δηλαδή οι μη ανανεώσιμες πηγές, είναι αυτές που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη κατά 93%, ενώ οι ανανεώσιμες πηγές καλύπτουν μόλις το 7%. Ομολογουμένως υπάρχει ένα μεγάλο χάσμα μεταξύ των ανανεώσιμων και μη πηγών ενέργειας που μας οδηγεί μονόδρομα στην περαιτέρω ανάπτυξη και εδραίωση των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, και παράλληλα την μείωση των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

1.2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η παγκόσμια επιτροπή για το περιβάλλον και την ανάπτυξη διατύπωσαν την εξής έννοια της βιώσιμης η αειφόρου ανάπτυξης «βιώσιμη είναι η ανάπτυξη η οποία ικανοποιεί τις ανάγκες της σημερινής γενιάς, χωρίς να χειροτερεύει την ικανότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιήσουν τις δικές τους ανάγκες». Η δυνατότητα της βιώσιμης ανάπτυξης είναι υπαρκτή, όσο υπάρχουν ανανεώσιμοι πόροι συμπεριλαμβανομένων και των ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών και αξιοποιούνται στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Η ευρύτερη έννοια των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αναφέρεται σε κάθε πηγή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ανανεώνεται μέσω φυσικών φαινομένων μόνιμου κύκλου. Πρόκειται για καθαρές μορφές ενέργειας, πολύ φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα τις τάξης του 93 %, ενώ για την εκμετάλλευση τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση όπως εξόρυξη, άντληση καύση αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενεργείας στην φύση. Αυτό σημαίνει πως πρόκειται για ανεξάντλητες πηγές ενέργειας που βασίζονται σε διάφορες φυσικές διαδικασίες όπως:

- Ο ήλιος (ηλιακή ενέργεια)
- Ο άνεμος (αιολική ενέργεια)
- Τα ρεύματα των ωκεανών
- Η βιομάζα
- Η γεωθερμία
- Οι υδατοπτώσεις (υδροηλεκτρική ενέργεια)
- Τα κύματα θαλασσών

Οι ΑΠΕ Μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε άμεσα (κυρίως για θέρμανση), είτε μετατρεπόμενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια). Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό απ' τις Α.Π.Ε. είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Η υψηλή όμως μέχρι πρόσφατα, τιμή των νέων ενεργειακών εφαρμογών, τα τεχνικά προβλήματα εφαρμογής, καθώς και οι πολιτικές και οικονομικές σκοπιμότητες που συνδέονται με τη διατήρηση του παρόντος επιπέδου ανάπτυξης στον ενεργειακό τομέα, εμπόδισαν την εκμετάλλευση έστω και μέρους αυτού του δυναμικού.

Το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους, παρουσιάσθηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή χρήση του 1979, ως αποτέλεσμα κυρίως των απαντών πετρελαϊκών κρίσεων της εποχής, και παγιώθηκε την τελευταία δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων από την χρήση κλασικών πηγών ενέργειας. Ιδιαίτερα ακριβές στην αρχή, ξεκίνησαν σαν πειραματικές εφαρμογές. Σήμερα όμως λαμβάνονται υπόψη στους επίσημους σχεδιασμούς των ανεπτυγμένων κρατών για την ενέργεια, λόγω της εξέλιξης των τεχνολογιών τους και της διεύρυνσης της παραγωγικής βάσης τεχνολογίας σε αναπτυσσόμενες χώρες, με αντίστοιχη μείωση του κόστους επένδυσης και παραγωγής. Αποτελούν επίσης για τα κράτη στρατηγική επιλογή, αφού έχουν ωριμάσει και είναι ασφαλείς, ανταγωνιστικές και ελκυστικές σε ιδιώτες και επενδυτές. Ενώ η εφαρμογή τους συμβάλλει στη βελτίωση των περιβαλλοντικών δεικτών και ειδικότερα στη μείωση των εκπομπών CO₂ και στην απεξάρτηση από το εισαγόμενο πετρέλαιο. Μπορούν δηλαδή, να απαντήσουν αποτελεσματικά στο τρίπτυχο των προβλημάτων που απασχολούν τον τομέα της ενέργειας:

- 1) Επάρκεια αποθεμάτων
- 2) Ασφάλεια ανεφοδιασμού
- 3) Προστασία του περιβάλλοντος

Οι Α.Π.Ε. αποτελούν ομολογουμένως ευέλικτες εφαρμογές που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας παράλληλα την ανάγκη για τεράστιες μονάδες ενεργειακής παραγωγής, αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Ταυτόχρονα, υποβοηθείται η αποκέντρωση και η ανάπτυξη της τοπικής οικονομίας σε κάθε περιοχή όπου εγκαθίσταται τέτοιου είδους μονάδες.

1.3. Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διαθέτουν πολλαπλά πλεονέκτημα, γεγονός που καθιστά την αυξημένη συμμετοχή τους στο ενεργειακό ισοζύγιο μιας χώρας επιβεβλημένη. Τα κυριότερα από τα πλεονεκτήματα τους είναι τα εξής (πηγή, ΚΑΠΕ):

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους εξαντλήσιμους συμβατικούς ενεργειακούς τύπους.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι διάσπαρτες γεωγραφικά και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, παρέχοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας της απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή).
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος, που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών και σε μικρή ή σε μεγάλη

κλίμακα αντίστοιχα και έχουν μικρή διάρκεια κατασκευής, επιτρέποντας έτσι την γρήγορη ανταπόκριση της προσφοράς προς τη ζήτηση ενέργειας.

- Οι επενδύσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι εντάσεως εργασίας, δημιουργώντας πολλές θέσεις εργασίας, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. θερμοκηπιακές καλλιέργειες με χρήση γεωθερμικής ενέργειας).
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

Από την άλλη πλευρά, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζουν ορισμένα χαρακτηριστικά που δυσχεραίνουν την αξιοποίηση και την ταχεία ανάπτυξη τους. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι τα ακόλουθα (πηγή, ΚΑΠΕ):

- Το διασπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος.
- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς για μεγάλες τιμές ισχύος απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.
- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητα τους, που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας, απαιτώντας έτσι την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητα τους συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος είναι αρκετά υψηλό.

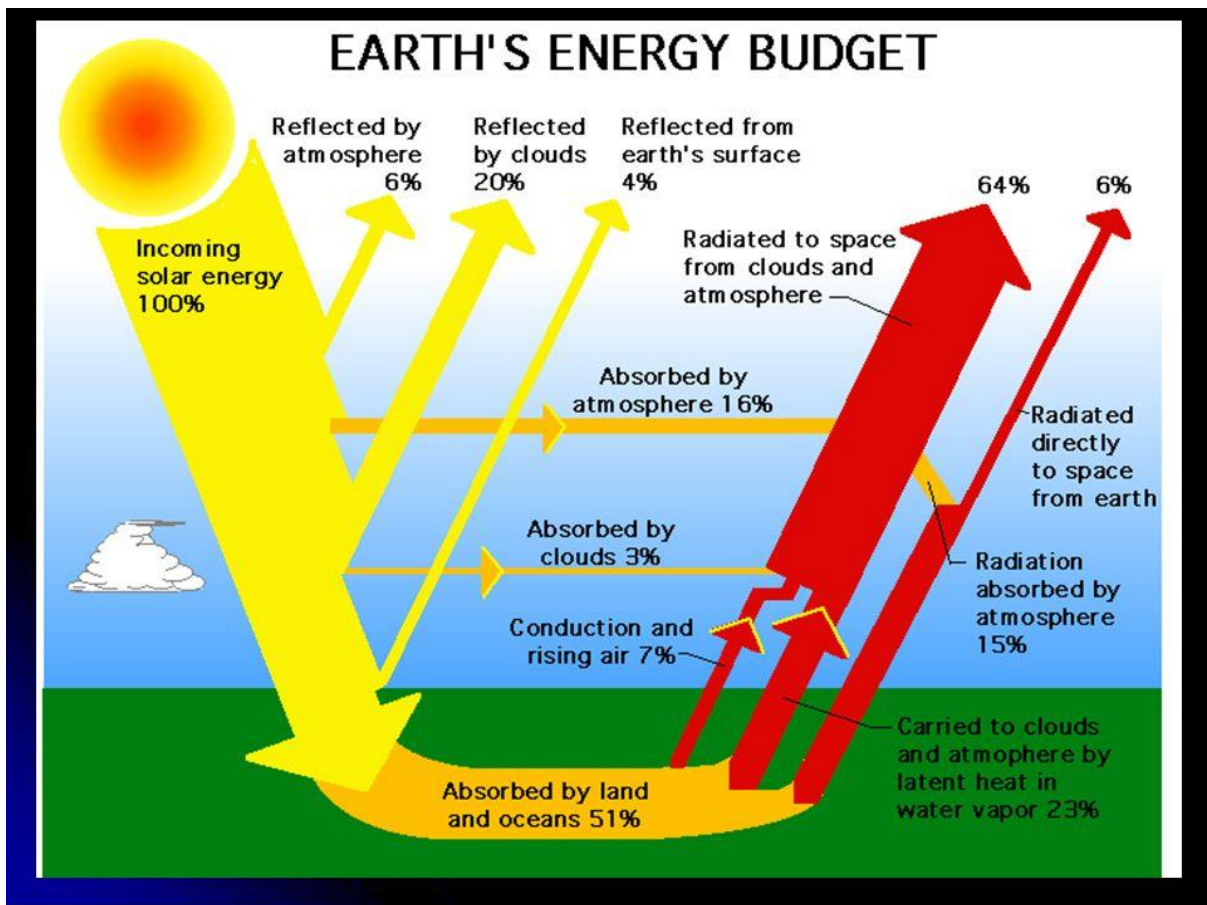
1.4. Ηλιακή ενέργεια

Σχεδόν οτιδήποτε συμβαίνει στη Γη, απαιτεί κάποιου είδους ενέργεια. Ο ήλιος είναι η βασική πηγή ζωτικής ενέργειας του πλανήτη μας, καθώς δίνει ζωή σε κάθε οργανισμό της βιόσφαιρας, είναι ένα ελεύθερο αγαθό, χαρίζει φως και θερμότητα και είναι η πηγή όλης σχεδόν της ενέργειας που χρησιμοποιούμε. Στην Ελλάδα, υπάρχει σε αφθονία και ακτινοβολεί μία μεγάλη ποσότητα ενέργειας, με μηδενικό κόστος και χωρίς βλαβερές εκπομπές για το περιβάλλον. Ως ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι η φωτεινή ενέργεια, η θερμική ενέργεια, καθώς και η ενέργεια ακτινοβολίας. Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο.

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης, είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται στον ήλιο. Ο ήλιος είναι αστέρας μέσου μεγέθους όπου, λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών που επικρατούν (μερικών εκατομμυρίων κελσίου), τα μόρια και άτομα των στοιχείων που τον συνθέτουν βρίσκονται σε κατάσταση νέφους θετικών και αρνητικών ιόντων ή κατάσταση ιονισμένου πλάσματος, όπως ονομάστηκε. Σε αυτές τις θερμοκρασίες οι ταχύτατα κινούμενοι πυρήνες υδρογόνου συσσωματώνονται, υπερνικώντας τις μεταξύ τους απωστικές ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις και δημιουργούν πυρήνες του στοιχείου ηλίου. Η πυρηνική αυτή σύντηξη είναι ισχυρά εξώθερμη και οι παραγόμενες τεράστιες ποσότητες ενέργειας ακτινοβολούνται προς όλες τις κατευθύνσεις στο διάστημα.

Η γη συλλαμβάνει το ένα δισεκατομμυριοστό της εκπεμπόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, που όμως αντιστοιχεί σε τεράστια ενεργειακή ποσότητα αν αναλογιστούμε ότι η ηλιακή ενέργεια που φτάνει στη γη σε μία εβδομάδα είναι περίπου ίση με τη συνολικά αποθηκευμένη ενέργεια όλων των καυσίμων του πλανήτη. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα σημείο στην επιφάνεια της γης μια δεδομένη χρονική στιγμή χαρακτηρίζεται από την ένταση και την διεύθυνση πρόσπτωσης. Στην επιφάνεια της γης φτάνει μόνο ένα μέρος της ακτινοβολίας που προέρχεται άμεσα από τον ήλιο (άμεση ηλιακή ακτινοβολία), ενώ το υπόλοιπο είτε απορροφάται από τα συστατικά της ατμόσφαιρας είτε ανακλάται πάλι προς το διάστημα ή προς την επιφάνεια της γης. Η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης μετά από διαδοχικές ανακλάσεις δεν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση και καλείται διάχυτη ακτινοβολία.

Η γη δέχεται ετήσια ηλιακή ενέργεια με ακτινοβολία της τάξης του $173 \times 10^{15} \text{ W}$. Σε ένα 24ωρο κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας της γης δέχεται κατά μέσο όρο 4-6 KWh ηλιακής ενέργειας με ακτινοβολία 800-2500 KWh/m³ ετησίως. Η ποσότητα αυτή είναι περίπου η διπλάσια από αυτή που θα μπορούσε ποτέ να ληφθεί από το σύνολο των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της Γης και περισσότερη από αυτή που καταναλώνει σήμερα ο άνθρωπος σε ένα χρόνο. Γι' αυτό κρίνεται σκόπιμη η πρακτική εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας. Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής



Σχήμα 1.2 Πρόσπτωση και ανάκλαση ηλιακών ακτινών στη γη.



Σχήμα 1.3 Συστήματα εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας.

ενέργειας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα, μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

1.5. Η ηλιακή ενέργεια στον Ελλαδικό χώρο

Στο μεγαλύτερο τμήμα της Ελλάδας, η συνολική ηλιοφάνεια κυμαίνεται περισσότερες από 2700 ώρες ετησίως. Αναλυτικότερα, στην δυτική Μακεδονία καθώς και στην Ήπειρο παρουσιάζονται σχετικά οι μικρότερες τιμές που κυμαίνονται από τις 2200 έως και τις 2300 ώρες. Από την άλλη πλευρά, στην Ρόδο, καθώς και στην Νότια πλευρά της Κρήτης, η ηλιοφάνεια ξεπερνά στο σύνολο τις 3100 ώρες ετησίως. Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός, ότι ακόμη και το ελάχιστο ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια στέγη, είναι κατά πολύ περισσότερη από εκείνη που εισάγεται στο οίκημα με την βοήθεια των ηλεκτρικών καλωδίων (Κ.Α.Π.Ε, 2010).

Παραδείγματος χάρη, σ' ένα ομοιόμορφο στρέμμα εδάφους, το ποσοστό της άμεσης ακτινοβολίας του ηλίου έχει την ικανότητα να παράγει ισχύ, ίση με περίπου τέσσερις χιλιάδες ίππους, το οποίο μπορεί να αντιστοιχηθεί με την ισχύ μιας μεγάλης ατμομηχανής ενός σιδηροδρόμου. Σε ένα χρονικό διάστημα το οποίο είναι πιο μικρό από τρεις μέρες, το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο φθάνει στην γη είναι κατά πολύ πιο μεγάλο από την εκτίμηση των συνολικών απολιθωμένων καυσίμων που υπάρχουν αυτή την στιγμή στον πλανήτη μας. Στην Ελλάδα ο πιο διαδεδομένος τρόπος ο οποίος αξιοποιεί την ηλιακή ενέργεια, είναι η χρήση των ηλιακών θερμοσίφωνων. Με γνώμονα μια έρευνα που διεξήχθη μέσω της Greenpeace, η Ελλάδα κατατάσσεται ως η δεύτερη χώρα η οποία χρησιμοποιεί ηλιοσυλλέκτες για την θέρμανση του νερού. Αναλυτικότερα περίπου το 30% των νοικοκυριών έχουν τοποθετήσει ηλιακούς θερμοσίφωνες. Το ποσοστό αυτό θα μπορούσε να είναι ακόμη πιο μεγάλο, καθώς η Ελλάδα χαρακτηρίζεται ως μια χώρα με τα μεγαλύτερα ποσοστά ηλιοφάνειας σε όλη την Ευρώπη.

Αξίζει να σημειωθεί επίσης, ότι για κάθε κιλοβατώρα που παράγεται από φωτοβολταϊκά και άρα όχι από συμβατικά καύσιμα, συνεπάγεται την αποφυγή έλκυσης ενός περίπου κιλού διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα (με βάση το σημερινό ενεργειακό μείγμα στην Ελλάδα και τις μέσες απώλειες του δικτύου). Ένα κιλοβάτ αποτρέπει κάθε χρόνο την έλκυση 1,3 τόνων διοξειδίου του άνθρακα (εικόνα 1.5.1). Χρειάζονται 2 στρέμματα δάσους ή περίπου 100 δέντρα για να απορροφήσουν αυτή την ποσότητα CO₂. Για να παραχθεί η ίδια ηλεκτρική ενέργεια από πετρέλαιο, απαιτούνται 2,2 βαρέλια πετρελαίου κάθε χρόνο. Από περιβαλλοντική άποψη, αποφεύγοντας 1.300 κιλά CO₂ ετήσιος, είναι σαν να κάνει ένα μέσο αυτοκίνητο 7.000 χιλιόμετρα κάθε χρόνο. Επιπλέον, η υποκατάσταση ρυπογόνων καυσίμων από φωτοβολταϊκά συνεπάγεται λιγότερες εκπομπές άλλων επικίνδυνων ρύπων (όπως αιωρούμενα μικροσωματίδια, το οξείδιο του αζώτου, οι ενώσεις του θείου κ.λπ.). Όπως είναι γνωστό οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα πυροδοτούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και αλλάζουν το κλίμα της γης, ενώ η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον.



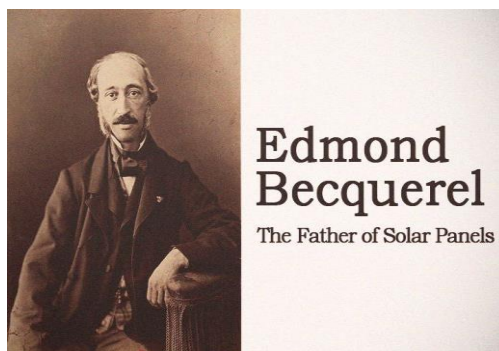
Σχήμα 1.4 Ισοδυναμία προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο με ένα βαρέλι πετρέλαιο.

Όπως ήδη έχει ειπωθεί, ο μεγαλύτερος ανασταλτικός παράγοντας για την κατασκευή μιας τέτοιας εγκατάστασης, είναι το υψηλό της κόστος, παρόλο που μια τέτοια κατασκευή θα προσφέρει μέγιστα ποσοστά οικονομίας όσον αφορά την κατανάλωση του ηλεκτρικού ρεύματος. Όσο αναφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας με την βοήθεια των φωτοβολταϊκών, η όλη διαδικασία βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο και η αξιοποίηση της είναι αρκετά χαμηλή. Και σε αυτή την περίπτωση οι λόγοι που δεν έχει την απαιτούμενη ανάπτυξη είναι οικονομικοί. Κατά τον γενικό κανόνα, το πλήθος των φωτοβολταϊκών συστημάτων που εγκαθίστανται στην Ελλάδα εξυπηρετούν απομονωμένες χρήσεις σε εκείνα τα σημεία που το δίκτυο της ΔΕΗ απουσιάζει ή η σύνδεση του κοστίζει περισσότερο από την τοποθέτηση ενός φωτοβολταϊκού. Αυτό βέβαια τα τελευταία χρόνια, φαίνεται να αλλάζει και πλέον η χώρα να μπαίνει σε μια τροχιά ανάπτυξης, βασιζόμενη κυρίως σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Κεφάλαιο 2. Φωτοβολταϊκά συστήματα

2.1. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο – ιστορική αναδρομή

Η πρώτη γνωριμία του ανθρώπου με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο έγινε το 1839 όταν ο Γάλλος φυσικός **Edmond Becquerel** (σχήμα 2.1.), ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο κατά την διάρκεια πειραμάτων του με μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δυο μεταλλικά ηλεκτρόδια.



Σχήμα 2.1 Ο Γάλλος Φυσικός Edmond Becquerel (1820 – 1891).

Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν ο **Adams** (1836 – 1915) και ο φοιτητής του **Day**, παρατήρησαν ότι μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο (Se), όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως. Το 1918 ο Πολωνός **Czochralski** (1885 – 1953), πρόσθεσε την μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si), με την σχετική έρευνα του και η οποία μάλιστα χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμα και σήμερα. Το 1949 οι **Mott** και **Schottky** ανέπτυξαν την θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Στο μεταξύ η κβαντική θεωρία είχε ξεδιπλωθεί και ο δρόμος πλέον για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές είχε ανοίξει. Το πρώτο ηλιακό κελί ήταν γεγονός στα εργαστήρια της **Bell** το 1954 από τους **Chapin, Fuller, Pearson**. Η απόδοση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ήταν αρχικά χαμηλή. Ως βαθμός απόδοσης εκφράζεται το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλιακή ενέργεια στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία που σχεδιάστηκαν τον 19^ο αιώνα, δεν είχαν παρά 1 – 2 % απόδοση, ενώ το 1954 τα εργαστήρια Bell Laboratories δημιούργησαν τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου με απόδοση 6 %.

Τέσσερα χρόνια μετά, το 1958 η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσαρτάται στον χώρο των διαστημικών εφαρμογών όταν τοποθετήθηκε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα στον δορυφόρο Vanguard I (σχήμα 2.2). Το σύστημα αυτό λειτούργησε επιτυχώς για οκτώ ολόκληρα



Σχήμα 2.2 Ο δορυφόρος Vanguard I με το πρώτο αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα.

χρόνια και ήταν ένα από τα πρώτα φωτοβολταϊκά συστήματα. Από το χρονικό αυτό σημείο και μετά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα άρχισαν να ενσωματώνονται σταδιακά σε διάφορες εφαρμογές και η τεχνολογία να βελτιώνεται συνεχώς. Το 1962 η μεγαλύτερη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση στον κόσμο γίνεται στην Ιαπωνία, από την Sharp. Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος είναι 242 Wp. Τα φωτοβολταϊκά ξεκίνησαν να κάνουν την εμφάνισή τους, αλλά λόγω του υψηλού κόστους η εφαρμογή τους ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Η έρευνα όμως προχωρούσε και η απόδοση των φωτοβολταϊκών βελτιώνονταν συνεχώς. Στην πορεία του χρόνου και σε συσχέτιση με την εξέλιξη της τεχνολογίας ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών όλο και αυξάνεται. Η αύξηση αυτή έστω και κατά μία ποσοστιαία μονάδα θεωρείται επίτευγμα στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Στην σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13 – 19 %.

2.2. Φωτοβολταϊκά συστήματα

Με τον γενικό όρο φωτοβολταϊκά συστήματα, ονομάζεται η βιομηχανική διάταξη πολλών φωτοβολταϊκών (σχήμα 2.3) στοιχείων σε μία σειρά. Στην ουσία πρόκειται για τεχνητούς ημιαγωγούς, (συνήθως από πυρίτιο) οι οποίοι ενώνονται με σκοπό να δημιουργήσουν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα σε σειρά. Οι ημιαγωγοί αυτοί απορροφούν φωτόνια από την ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν μια ηλεκτρική τάση, αυτή η διαδικασία ονομάζεται "Φωτοβολταϊκό φαινόμενο". Τα φωτοβολταϊκά ανήκουν στην κατηγορία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και πιο συγκεκριμένα των ηλιακών πηγών.



Σχήμα 2.3 Μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό πάνελ της εταιρίας Sharp, ισχύος 360 Wp.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ομαδοποιούνται κατάλληλα και συγκροτούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ή γεννήτριες (module), τυπικής ισχύος από 20W έως 360Wp. Οι Φ/Β γεννήτριες συνδέονται ηλεκτρολογικά μεταξύ τους και δημιουργούνται οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες (arrays). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία χωρίζονται στις εξής τρεις βασικές κατηγορίες:

1) Μονοκρυσταλλικά (m – Si)

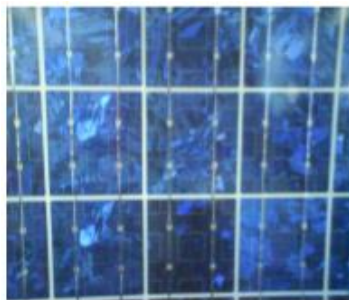
Οι μονοκρυσταλλικές κυψέλες (σχήμα 2.4) κατασκευάζονται τεμαχίζοντας έναν ενιαίο κρύσταλλο, (πάχος κυψέλης 1/3 έως 1/2 του χιλιοστού), από ένα μεγάλο πλίνθωμα ενιαίου κρυστάλλου που έχει επεξεργαστεί σε θερμοκρασίες περίπου 1400°C, κάτι που είναι μια ιδιαίτερα δαπανηρή διαδικασία. Το πυρίτιο πρέπει να είναι πολύ υψηλής καθαρότητας και να έχει τέλεια δομή κρυστάλλου. Αυτού του είδους τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν και την μεγαλύτερη απόδοση, δηλαδή μετατρέπουν μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Η απόδοση τους κυμαίνεται γύρω στο 18%-23%, δηλαδή αν η ηλιακή ακτινοβολία είναι 700 Wh/μ² την ημέρα, τότε αυτά θα παράγουν για την συγκεκριμένη μέρα 120 Wh/m² με 160 Wh/m².



Σχήμα 2.4 Μονοκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου

2) Πολυκρυσταλλικά (p – Si)

Οι πολυκρυσταλλικές κυψέλες (σχήμα 2.5) γίνονται με μια διαδικασία χύτευσης στην οποία το λειωμένο βιομηχανικό πυρίτιο χύνεται σε μια φόρμα όπου και μορφοποιείται και τεμαχίζεται. Δεδομένου ότι οι πολυκρυσταλλικές κυψέλες γίνονται από χύτευση, είναι σημαντικά φθηνότερη η παραγωγή τους, αλλά όχι τόσο αποδοτικές όσο και οι μονοκρυσταλλικές. Αυτή η χαμηλότερη αποδοτικότητα που κυμαίνεται μεταξύ 13% και 15%, οφείλεται στις ατέλειες στη δομή του κρυστάλλου ως αποτέλεσμα της διαδικασίας χύτευσης.



Σχήμα 2.5 Πολυκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου

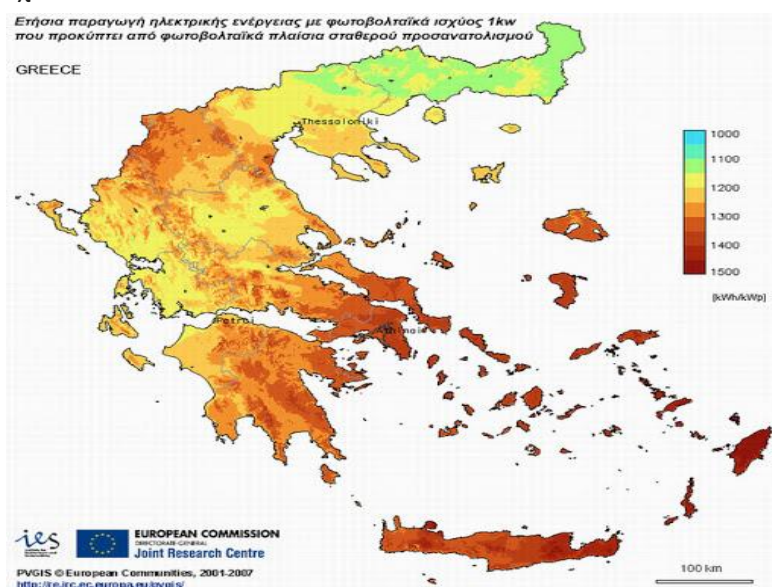
3) Άμορφου πυριτίου (a – Si) Το άμορφο πυρίτιο (σχήμα 2.6), μια από τις τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης (thin film technology) γίνεται με την εναπόθεση του πυριτίου επάνω σε ένα υπόστρωμα γυαλιού από ένα αντιδραστικό αέριο όπως το σιλάνιο (SiH₄). Δεν έχει κρυσταλλική δομή και το πάχος του (2-3 μm) είναι ιδιαίτερα μικρότερο από το κρυσταλλικής μορφής πυρίτιο (200-500 μm). Από κατασκευαστική

άποψη είναι το απλούστερο και επομένως το πιο φθηνό, αλλά η απόδοσή του είναι συγκριτικά μικρότερη. Παρόλα αυτά, είναι ικανοποιητική ακόμη και σε συνθήκες έλλειψης ηλιοφάνειας. Τα ηλιακά στοιχεία άμορφου πυριτίου έχουν μια κοκκινωπή-καφέ απόχρωση, σχεδόν μαύρη, και επιφάνεια αποτελούμενη από στενές μεγάλου μήκους λωρίδες. Η αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών άμορφου πυριτίου κυμαίνεται μεταξύ 4% και 11%, ανάλογα με την τεχνολογία και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 2.6 Στοιχεία άμορφου πυριτίου

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ, μαζί με τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην επιθυμητή μορφή. Η επιλογή των πάνελ και του εξοπλισμού γίνεται με γνώμονα τις ανάγκες τις εκάστοτε κατασκευής και των χρημάτων φυσικά που διατίθενται. Κατά γενική ομολογία η εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στην Ελλάδα είναι αξιόλογη μελέτης, λόγω των ευνοϊκών καιρικών συνθηκών που επικρατούν (όπως φαίνεται στον παρακάτω χάρτη ηλιακής ενέργειας, σχήμα 2.7). Η χώρα μας είναι πρωταθλήτης ηλιοφάνειας πανευρωπαϊκά, με συνέπεια να έχει τη μεγαλύτερη παραγωγή κιλοβατώραν το χρόνο, περισσότερες από την Ισπανία, που κατατάσσεται στη 2η θέση, με 3η τη Νότια Γαλλία, και 4η την Ιταλία. Σύμφωνα με τα γεωγραφικά, μετεωρολογικά και ηλιακής ακτινοβολίας δεδομένα της πανευρωπαϊκής βάσης Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), στην Αθήνα παράγονται 1.550 KWh, έναντι 1.540 KWh στη Μαδρίτη, 1.500 KWh στη Μασσαλία, 1.460 KWh στη Ρώμη, 1.040 KWh στο Μόναχο, και 1.030 KWh στη νότια Τσεχία.



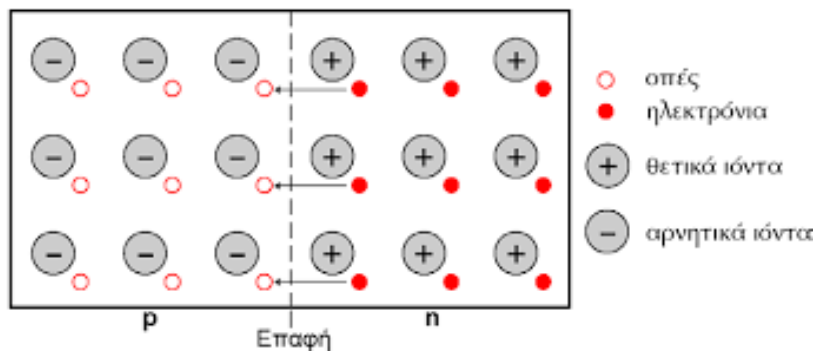
Σχήμα 2.7 Χάρτης ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα.

2.3. Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκού συστήματος

Η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος και γενικότερα το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, στηρίζεται στις ιδιότητες των ημιαγωγών υλικών. Οι ημιαγωγοί έχουν την δυνατότητα να μετατρέπουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλεκτρική του αγωγιμότητα μπορεί να ελεγχθεί μόνιμα ή και δυναμικά. Ο ημιαγωγός γενικότερα έχει ένα χαρακτηριστικό στοιχείο που το κάνει να ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα. Αυτό είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων ενός ατόμου που βρίσκεται στην εξωτερική στοιβάδα.

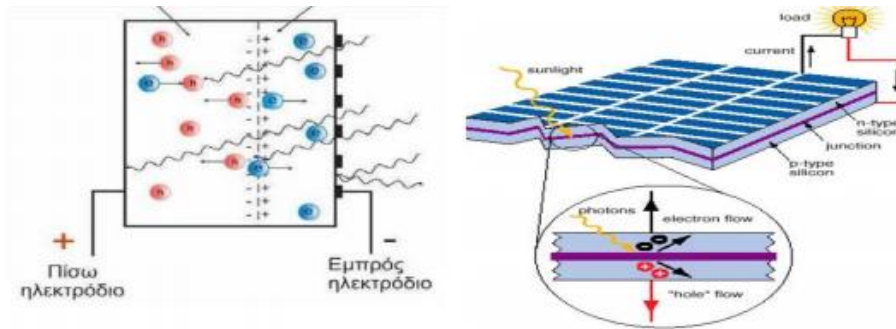
Ο πιο γνωστός ημιαγωγός είναι το πυρίτιο (Si), και οι διαφορετικοί τύποι αυτού όπως αναφέρθηκαν παραπάνω. Αποκτά τις ημιαγωγικές ιδιότητες του με τεχνητό τρόπο. Η πρόσμιξη του με στοιχεία τα οποία έχουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο ή ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο στην στοιβάδα σθένους τους (εξωτερική), κάνει τον κρύσταλλο δεκτικό σε θετικά φορτία (υλικό τύπου p), είτε σε αρνητικά (υλικό τύπου n). Έτσι γίνεται η δημιουργία ηλεκτρικά φορτισμένων ημιαγωγών. Το πυρίτιο αποτελεί το κύριο στοιχείο στην κατασκευή των φωτοβολταϊκών.

Για να δημιουργηθεί ηλεκτρικό πεδίο πρέπει να έρθουν σε επαφή δυο κομμάτια πυριτίου τύπου n και τύπου p. Στην θέση επαφής έτσι, δημιουργείται μια ζώνη στην οποία εναλλάσσονται ηλεκτρόνια και οπές. Έτσι ελεύθερα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού n εισέρχονται στον ημιαγωγό p και συμπληρώνουν τις αντίστοιχες οπές. Οι ελεύθερες οπές από τον ημιαγωγό p εισέρχονται στον ημιαγωγό n και ενώνονται με ίσο αριθμό ηλεκτρονίων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η πλευρά n να αποκτά θετικό δυναμικό και η πλευρά p αρνητικό έτσι σχηματίζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή επαφής των δύο ημιαγωγικών στοιχείων (σχήμα 2.8) που ονομάζεται ημιαγωγική επαφή ή δίοδος επαφής p - n.



Σχήμα 2.8 Επαφή ημιαγωγικού στοιχείου p - n .

Η ηλιακή ενέργεια έρχεται με την μορφή φωτονίων, τα οποία όταν προσπίπτουν στο φωτοβολταϊκό κελί (σχήμα 2.9) περνούν την περιοχή τύπου n και χτυπούν τα άτομα της περιοχής τύπου p. Τα ηλεκτρόνια αυτά αρχίζουν και κινούνται μεταξύ των οπών και τελικά φτάνουν στην περιοχή της δίοδου. Εκεί έλκονται από το θετικό πεδίο της περιοχής, και μόλις ξεπεράσουν το ενεργειακό χάσμα της περιοχής αυτής είναι αδύνατο να επιστρέψουν. Επιστρέφοντας στην περιοχή n παρατηρείται ότι μπορεί να εκμεταλλευτούν τα περισσευούμενα ηλεκτρόνια τα οποία μπορούν να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτό γίνεται τοποθετώντας έναν μεταλλικό αγωγό ή κάποια παρόμοια διάταξη στο κάτω μέρος της επαφής p και στο πάνω μέρος της επαφής n και ένα φορτίο στο ενδιάμεσο, με τέτοιο τρόπο που να κλείνει ένας αγωγίμος δρόμος για το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.



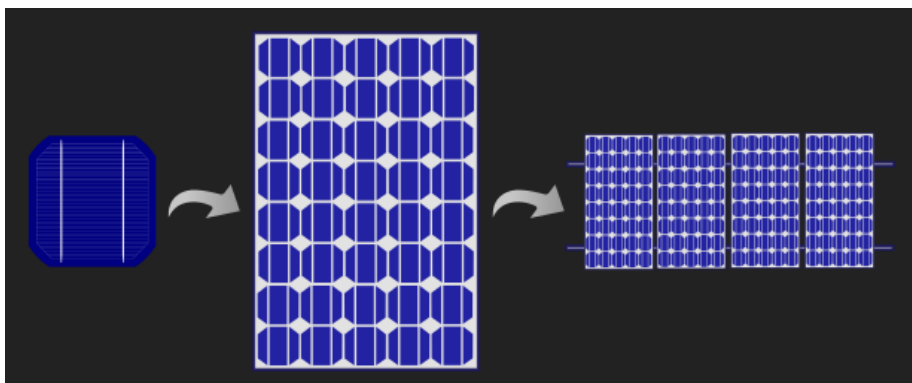
Σχήμα 2.9 Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε ένα φωτοβολταϊκό κελί.

2.4. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Τα κυριότερα μέρη όπου αποτελούν ένα ολοκληρωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι τα παρακάτω.

- Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από ένα σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων, τα οποία είναι ηλεκτρονικά συνδεδεμένα μεταξύ τους και αποτελούν την βασική μονάδα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος
- Τα φωτοβολταϊκά κελιά σφραγίζονται ερμητικά μέσα σε πλαστική ύλη για να προστατεύονται από τις καιρικές συνθήκες και ειδικότερα από την υγρασία. Η μπροστινή όψη του πλαισίου προστατεύεται από αυθεντικό γυαλί.
- Τα πλαίσια αυτά τοποθετούνται σε κοινή κατασκευή και αλληλοσυνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους δημιουργώντας μια ομάδα από φωτοβολταϊκά πλαίσια (σχήμα 2.10). Ο συνδυασμός τέτοιων ομάδων συνδεδεμένων σε σειρά ή παράλληλα ονομάζεται φωτοβολταϊκή συστοιχία. Έχουν διάφορες τιμές ισχύος που κυμαίνονται από 20w – 360w.

Στην αγορά κυκλοφορούν τα μονοκρυσταλλικά πλαίσια, τα πολυκρυσταλλικά καθώς και τα άμορφα όπως αναλύθηκε παραπάνω. Ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιούν όταν εκτεθούν στην ηλιακή ακτινοβολία είναι σε θέση να μετατρέψουν περίπου 10% - 15% της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν ωστόσο παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Τέτοιοι είναι η γήρανση, όπου η απόδοση μειώνεται της αλλοίωσης των υλικών που απαρτίζουν το πλαίσιο περίπου 1% για κάθε χρόνο χρήσης. Ένας άλλος παράγοντας επίσης είναι η ρύπανση της επιφάνειας του πλαισίου. Η αύξηση της θερμοκρασίας και η δίοδος αντεπιστροφής που είναι μια δίοδος η οποία εμποδίζει την αντίστροφη διέλευση ρεύματος όταν το πλαίσιο δεν φωτίζεται και προκαλεί απώλεια περίπου 1%.



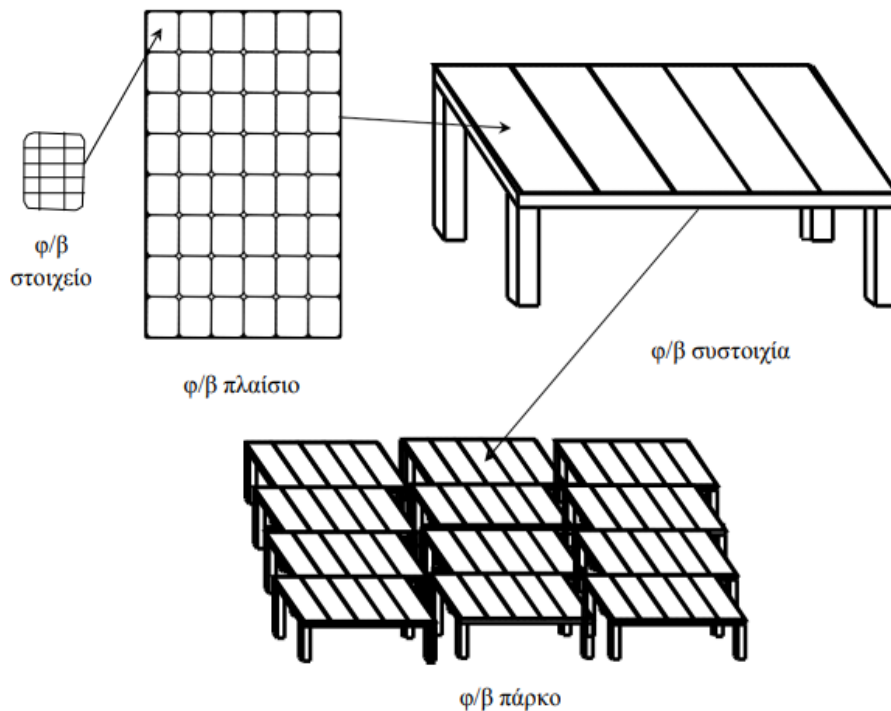
Σχήμα 2.10 Απεικόνιση φωτοβολταϊκού στοιχείου όπου δημιουργεί αρχικά ένα φωτοβολταϊκό πάνελ και στην συνέχεια με την σύνδεση πολλών πάνελ δημιουργείται μια φωτοβολταϊκή συστοιχία.

2.5. Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Για να μπορέσουν να ομαδοποιηθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και να δημιουργήσουν μια φωτοβολταϊκή συστοιχία, καθώς και στην συνέχεια ένα φωτοβολταϊκό πάρκο, πρέπει να τοποθετηθούν κατάλληλα και να αλληλοσυνδεθούν ηλεκτρονικά (σχήμα 2.11). Υπάρχουν διάφοροι τρόποι που μπορεί να γίνει αυτό και εξαρτάται από την περιοχή τοποθέτησης και τις απαιτήσεις όπου υπάρχουν. Ένας τρόπος είναι η τοποθέτηση των πάνελ σε σταθερές βάσεις και ένας άλλος η τοποθέτηση τους σε κινητές βάσεις (trackers) ιχνηλάτησης της πορείας του ηλίου, για μέγιστη αποτελεσματικότητα. Για την καλύτερη δυνατή απόδοση από τα φωτοβολταϊκά πρέπει να μελετηθούν και να οριστούν ορισμένες προϋποθέσεις:

- Να υπάρχει αρκετός ελεύθερος καθώς και ασκίαστος χώρος. Χρειάζεται περίπου ένα τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας για κάθε πλαίσιο των 100w κρυσταλλικού πυριτίου. Για βέλτιστη απόδοση θα πρέπει ο χώρος να παραμένει ασκίαστος σε όλη την διάρκεια της ημέρας.
- Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν μεγαλύτερα απόδοση όταν τοποθετούνται με Νότιο προσανατολισμό. Μπορούμε να έχουμε έως και 45° απόκλιση από το Νότο, όμως η απόδοση θα είναι αρκετά μειωμένη.
- Η τοποθέτηση του συλλέκτη θα πρέπει να γίνεται με κλίση 10% - 15% μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους. Πολλές φορές η κλίση καθορίζεται με βάση τις τοπικές καιρικές συνθήκες όπως τοπική υγρασία κλπ.

Οι σταθερές βάσεις στήριξης των πάνελ είναι οι πιο διαδεδομένες και οι οικονομικότερα προσιτές, και η αρχή λειτουργίας τους είναι πολύ απλή. Κατά τις μεσημβρινές ώρες οι προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες πρέπει να προσπίπτουν κάθετα πάνω στο φωτοβολταϊκό πάνελ. Οι βάσεις λοιπόν κατασκευάζονται έτσι ώστε να επιτρέπουν την τοποθέτηση των πάνελ σε σταθερή κλίση περίπου 30° . Οι 30° είναι μια μέση τιμή που θεωρείται ιδανική για τα Ελληνικά δεδομένα.



Σχήμα 2.11 Απεικόνιση ομαδοποίησης και δημιουργίας φωτοβολταϊκού πάρκου από φωτοβολταϊκά στοιχεία.

2.6. Φωτοβολταϊκά πάρκα στην Ελλάδα

Η εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ήταν, είναι και θα είναι ελκυστική στη χώρα της ατέρμονης ηλιοφάνειας. Η Ελλάδα είναι απ' τις χώρες με τα υψηλότερα ηλιακά δυναμικά παγκοσμίως. Με την πρόοδο της επιστήμης και της τεχνολογίας και την πτώση των τιμών των φωτοβολταϊκών πλαισίων καθίσταται αξιόπιστη και οικονομική η τροφοδότηση όλων των μεγεθών των καταναλώσεων, ακόμα και τριφασικών. Η ωρίμανση του κλάδου μετατοπίζει το κέντρο βάρους της ανάπτυξης από τις μικρές και μεσαίες εταιρείες, στους μεγαλύτερους ομίλους που έχουν τη δυνατότητα να ανταπεξέλθουν σε μεγάλης κλίμακας επενδύσεις. Στην Ελλάδα οι μεγαλύτερες εταιρείες της αγοράς είναι η Τέρνα Ενεργειακή, η ΜΕΤΚΑ EGN της Μυτιληναίος, η ΕΛΠΕ Ανανεώσιμες, η ΔΕΗ Ανανεώσιμες, η ΕΛΤΕΧ Άνεμος, ο όμιλος Παναγάκου (Spes Solaris), οι οποίοι αναπτύσσουν μεγάλα πάρκα. Σε ό,τι αφορά τους διεθνείς παίκτες στην ελληνική αγορά σταδιακά επαναδραστηριοποιούνται στα φωτοβολταϊκά διεθνείς εταιρείες, όπως η Juwi, η Sunedison, η ABO Wind, η Total Eren και οι κινεζικές εταιρείες China Energy, Sumec Energy και Sri Energy. Η αγορά των φωτοβολταϊκών είχε γνωρίσει εκρηκτική ανάπτυξη από το 2010 έως το 2013 όταν δόθηκαν υπερβολικά κίνητρα με υψηλότερες τιμές αποπληρωμής χωρίς περιορισμούς, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί πρόβλημα συνολικά στον κλάδο των ΑΠΕ και στις πληρωμές και τα κόστη της αγοράς. Τελικά με το "κούρεμα" των τιμών η αγορά κατέρρευσε και ακολούθησε μια πενταετία πλήρους ακινησίας. Με το νέο καθεστώς των διαγωνισμών αλλά και σε επόμενο στάδιο με την ανταγωνιστική λειτουργία των φ/β στην αγορά, πλέον εξορθολογίζεται ο κλάδος ενώ υπάρχει στενή παρακολούθηση με στόχο να μην υπάρξει ξανά υπερθέρμανση και "φούσκα".

Το 2019 η αγορά έδειξε τα πρώτα ουσιαστικά σημάδια ανάκαμψης, καθώς η τάση είναι να επανέλθει σύντομα σε μεγέθη της τάξης των εκατοντάδων μεγαβάτ ετησίως. Το 2019, η αγορά των συστημάτων αυτοπαραγωγής παρουσίασε μια αύξηση της τάξης του 3,1% σε σχέση με την προηγούμενη χρονιά, τα φωτοβολταϊκά κάλυψαν περίπου το 7% των αναγκών της χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια, φέρνοντας την Ελλάδα στην τέταρτη θέση διεθνώς μετά από Ονδούρα, Ιταλία και Γερμανία, σε ό,τι αφορά στην συμβολή των φωτοβολταϊκών στη συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Διασυνδεδεμένα συστήματα	MWp
Νέα εγκατεστημένη ισχύς διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών το 2019	160
Συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών ως και το 2019	2.828



Σχήμα 2.12 Στατιστικά στοιχεία της Ελληνικής αγοράς φωτοβολταϊκών

Νέες εγκαταστάσεις που διασυνδέθηκαν εντός του 2019	Αριθμός συστημάτων	Ισχύς (MWp)
Φωτοβολταϊκά πάρκα	246	150,29
Net Metering	362	9,57
Φωτοβολταϊκά Ειδικού Προγράμματος (έληξε 31.12.2019)	17	0,16
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ	625	160,02

Σχήμα 2.13 Νέες εγκαταστάσεις που συνδέθηκαν το έτος 2019

Κεφάλαιο 3. Βάση στήριξης Helios 2100 AS190 της Alumil

3.1. Βάσεις φωτοβολταϊκών

Οι βάσεις στήριξης των φωτοβολταϊκών αποτελούν το βασικό δομικό στοιχείο για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών συστοιχιών και κατ' επέκταση φωτοβολταϊκών πάρκων. Η μεγάλη αντοχή στο χρόνο, καθώς και οι μηχανικές τους ιδιότητες κρίνονται πολύ σημαντικές για την εύρυθμη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πάρκου σε βάθος χρόνου. Στον ελλαδικό χώρο και κυρίως στις ορεινές αλλά και τις παραθαλάσσιες περιοχές, συχνά επικρατούν ακραία καιρικά φαινόμενα (μεγάλες ταχύτητες ανέμων, έντονες βροχοπτώσεις, χιονοπτώσεις κ.α.) και είναι απαραίτητο οι βάσεις οι οποίες τοποθετούνται για την δημιουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων, να έχουν τις κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες, έτσι ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν των ακραίων καιρικών φαινομένων, χωρίς δομικές απώλειες, όπου θα ήταν καταστροφικές για την εύρυθμη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Η βάση στήριξης ενός φωτοβολταϊκού συνδέει το φωτοβολταϊκό και κατ' επέκταση την εκάστοτε επένδυση με το έδαφος, αν πρόκειται για φωτοβολταϊκό πάρκο ή με το κτίριο, αν πρόκειται για φωτοβολταϊκό σύστημα οικίας ή βιομηχανικής εγκατάστασης πάνω στο οποίο βρίσκεται. Το κόστος των βάσεων ενός φωτοβολταϊκού καταλαμβάνει περίπου το 10% της επένδυσης, αλλά η αξία του είναι πολλαπλάσια. Ανάλογα με τη θέση και τον τρόπο στήριξης του φωτοβολταϊκού καθώς και την περιοχή τοποθέτησης επιλέγεται και διαφορετικό είδος βάσης. Γενικά υπάρχουν δυο κατηγορίες βάσεων στήριξης οι κινητές(trackers) και οι σταθερές.

Οι σταθερές βάσεις στήριξης χωρίζονται και αυτές σε υποκατηγορίες καθώς μπορούν και αυτές να μεταβάλλουν την γωνιά κλίσης προς το ήλιο. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται βάσεις στήριξης που χρησιμοποιούνται σε κεραμοσκεπές, σε στήριξη δώματος καθώς και βιομηχανικές στέγες. Αναλυτικότερα οι τύποι των βάσεων αναφέρονται παρακάτω.

- Οι βάσεις στήριξης σε κεραμοσκεπές (σχήμα 3.1) αποτελούνται από εξαρτήματα κυρίως αλουμινένια όπου στηρίζουν τα πάνελ πάνω στα κεραμίδια χωρίς να δημιουργούν πρόβλημα υδρορροής στην σκεπή.



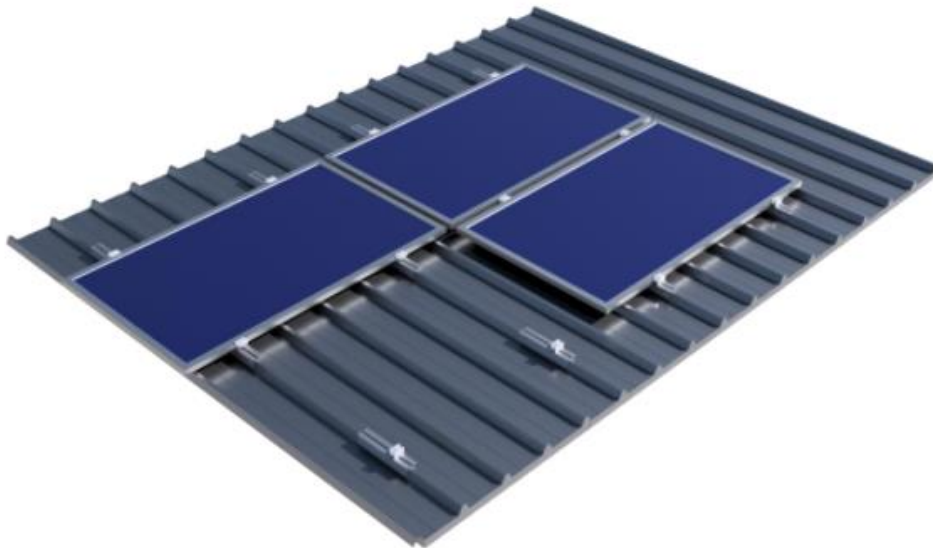
Σχήμα 3.1 Βάση στήριξης σε κεραμοσκεπή.

- Οι βάσεις στήριξης σε ταρατσες ή δώματα (σχήμα 3.2) αποτελούνται από μικρό αριθμό αλουμινένιων κυρίως εξαρτημάτων, και έχουν δυνατότητα επιλογής κλίσης των πάνελ όπου κυμαίνεται από 15 έως 30 μοίρες.



Σχήμα 3.2 Βάση στήριξης σε ταράτσες και δώματα.

- Οι βάσεις στήριξης για βιομηχανικές στέγες (σχήμα 3.3) έχουν ως γνωρίσματα την γρήγορη και ασφαλή τοποθέτηση τους, την εύκολη συναρμολόγηση, την προσαρμογή σε διαφόρους τύπους βιομηχανικών προφίλ.



Σχήμα 3.3 Βάση στήριξης σε βιομηχανική στέγη.

- Οι βάσεις στήριξης φωτοβολταϊκών σε χωράφια (σχήμα 3.4) αποτελούνται κυρίως από προφίλ αλουμινίου και γαλβανισμένου χάλυβα εν θερμώ, έχουν την δυνατότητα να ρυθμιστούν σε κλίση προς τον ήλιο 15 έως 30 μοίρες και να υποστηρίξουν όλους τους τύπους και διατάξεις των φωτοβολταϊκών πάνελ (portrait, landscape).



Σχήμα 3.4 Βάση στήριξης για τοποθέτηση σε χωράφια.

- Οι κινητές βάσεις φωτοβολταϊκών ή αλλιώς trackers (σχήμα 3.5) έχουν την δυνατότητα παρακολούθησης του ηλίου προσφέροντας απόδοση τουλάχιστον 30% επιπλέον από τις σταθερές βάσεις. Είναι κατασκευασμένες από αλουμίνιο και η κίνηση τους επιτυγχάνεται με την χρήση απλών κινητήρων (ένας κινητήρας 120W κινεί 75 Φ/Β πλαίσια) με βάση τους αστρονομικούς χάρτες.



Σχήμα 3.5 Κινητή βάση στήριξης, Tracker.

3.2. Κατασκευάστρια εταιρία Alumil



Σχήμα 3.6 Κατασκευάστρια εταιρία προφίλ αλουμινίου ALUMIL.

Η ALUMIL έχει ιδρυθεί από την οικογένεια Μυλωνά στην βιομηχανική περιοχή του Σταυροχωρίου στο Κιλκίς το έτος 1988. Είναι μια αμιγώς Ελληνική εταιρία διέλασης αλουμινίου με παγκόσμια παρουσία. Το έτος 2000 η Alumil ξεκινάει την δραστηριότητα της στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με την παραγωγή και διάθεση προφίλ αλουμινίου σε έργα φωτοβολταϊκών σε όλο τον κόσμο. Το 2009 ιδρύει την θυγατρική Alumil Solar με σκοπό την εκμετάλλευση της τεχνογνωσίας όπου έχει αποκτήσει όλα αυτά τα χρόνια. Η Alumil πλέον μετράει 20 έτη εμπειρίας στην παραγωγή βάσεων στήριξης σε φωτοβολταϊκά πάνελ για χωράφια και στέγες και θεωρείται ως μια από τις μεγαλύτερες εταιρίες σε αυτόν τον τομέα παγκοσμίως.

Η Alumil Solar είναι ένα Business Unit του ομίλου της Alumil που παρέχει πιστοποιημένες βάσεις στήριξης Φ/Β από κράμα αλουμινίου υψηλής ανθεκτικότητας σε διάβρωση (Al 6005T6). Η πλήρης σειρά των βάσεων στήριξης (με την επωνυμία HELIOS) είναι διεθνώς πιστοποιημένη, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Ευρωκώδικα 1,3 και 9. Κατά τον σχεδιασμό έχουν υπολογιστεί τα μόνιμα φορτία, οι θερμοκρασιακές μεταβολές, το φορτίο χιονιού και ανέμου σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Ευρωκώδικα 1. Επιπλέον έχουν ληφθεί υπόψη τα δυναμικά φορτία όπως προκύπτουν βάση του φάσματος σχεδιασμού του ισχύοντος Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού 2000 (ΕΑΚ-2000) με τις συμπληρώσεις του 2003. Η διαστασιολόγηση των μελών έγινε σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Ευρωκώδικα 9. Ο καινοτόμος δομικός σχεδιασμός επιτρέπει την συνεργασία των βάσεων στήριξης με όλα τα μεγέθη των Φ/Β πλαισίων είτε σε portrait είτε σε landscape διάταξη και με όλες τις τεχνολογίες Φ/Β πλαισίων (κρυσταλλικού πυριτίου, thin film) ελαχιστοποιώντας συγχρόνως το χρόνο εγκατάστασης. Κατά τα τελευταία χρόνια, η Alumil έχει ουσιαστική εμπειρία σε μεγάλης κλίμακας Φ/Β έργα με εγκατεστημένη ισχύ άνω του 1 GW σε διάφορες χώρες όπως η Ιταλία, η Γερμανία, η Βουλγαρία, η Ρουμανία, η Τουρκία, η Βοσνία, η Αγγλία, η Σερβία, η Κύπρος, η Ιαπωνία, η Αίγυπτος κλπ.

3.3. Η Βάση στήριξης Helios 2100 AS190 της Alumil

Το σύστημα **AS 190** (σχήμα 3.7) είναι ένα πρωτοποριακό σύστημα στήριξης εγκαταστάσεων φωτοβολταϊκών έργων σε αγρούς. Επιπλέον δίνει την δυνατότητα στον τεχνικό εγκατάστασης να αντιμετωπίσει ανισοσταθμίες και κλίσεις του εδάφους με απλό και οικονομικά προσιτό τρόπο. Τα κύρια πλεονεκτήματα και οι καινοτομίες του στηρίγματος είναι εξής:

- Ρύθμιση της στήριξης σε επικλινή εδάφη έως και +/-10° ή 18%.
- Ελαχιστοποίηση του χρόνου εγκατάστασης λόγω των εξής καινοτομιών.
 1. Ένας πάσσαλος ανά τρίγωνο στήριξης
 2. Λιγότερος χρόνος για το αλφάδιασμα αφού πλέον ο εγκαταστάτης έχει να αλφαδιάσει μόνο κατά την κατεύθυνση Ανατολής – Δύσης.
 3. Λιγότερες βίδες
 4. Το σύστημα διατίθεται προσυναρμολογημένο.

- Ελάχιστη παρέμβαση στο έδαφος.
- Εύκολη πρόσβαση για την καλύτερη συντήρηση των πάνελ.
- Εξαρτήματα υψηλής αντοχής – 20ετής εγγύηση.
- Στατική ανάλυση με βάση τους Ευρωκώδικες 1,3,9 και τον Ελληνικό αντισεισμικό κανονισμό.
- Ειδικό σύστημα αποφυγής της επαφής χαλύβδινου πασσάλου – αλουμινίου.



Σχήμα 3.7 Η Βάση στήριξης Helios 2100 AS190 της Alumil.

Τεχνικά χαρακτηριστικά

Σειρά:	H2100
Τύπος:	AS190
Εφαρμογή:	Ύπαιθρος
Κράμα:	6005T6
Τοποθέτηση:	Portrait
Κλίση:	25 – 30 μοίρες
Θεμελίωση:	Με πασσάλους

Ειδικά χαρακτηριστικά:

- Ρύθμιση της στήριξης σε επικλινή εδάφη έως και +/- 10⁰ ή 18%.
- Προσυναρμολογημένο
- Ειδικό σύστημα αποφυγής χαλύβδινου πασσάλου – αλουμινίου.

3.4. Τεχνικό φυλλάδιο συστήματος AS 190



PRODUCT DATA SHEET
PRODUCT INFORMATION

AS190 - H2100 HELIOS Free Field

H2100-190 system is the most innovative mounting system for PV installation in fields which gives the opportunity to the installer to deal with the imbalances and the soil inclinations with a simple and economical manner.

Advantages and innovations that are included in this type of mounting system:

- Adjustable up to +/-10o (or 18%) soil's inclination.
- Minimization of the installation time.
- Usage of only one pile per mounting triangle
- Less time for the leveling since the installer has to level only according to East-West direction.
- Fewer screws.
- Certified according to Eurocodes with 20 years' warranty.
- Structural and static study for each project after clinching the deal.
- Special system preventing from direct contact between steel and aluminum parts.



Materials

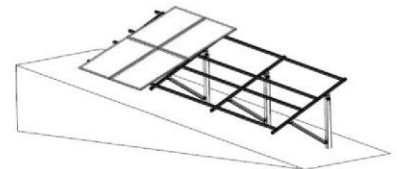
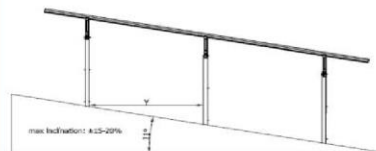
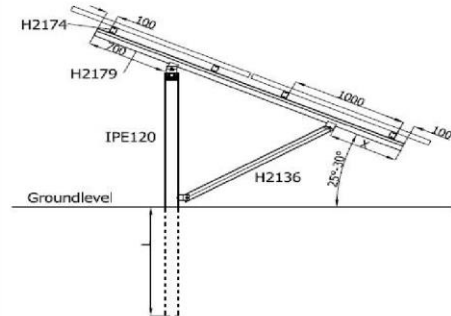
- Aluminum Alloy 6005T6
- Hot dip Galvanized pile IPE120
- Polyamide part preventing from direct contact between steel and aluminum parts

General characteristics

- Series: H2100
- Type: AS190
- Application: Free field
- Alignment: Portrait
- Inclination: 25° – 30°
- Foundation: Pile ramming or pile combined with concrete
- Special characteristics: Pre assembled

Certification

- TUV Certification H12/8171-A
- Static Analysis According Eurocodes 1,3,9
- ISO 9001 / ISO 14001
- Technical Manual
- Alumil 20 Year Guarantee



PRODUCT ACCESSORIES

Triangle Codes

EX-8961902500 TRIANGLE-BASE OF AS190 SERIES

Purling Codes*

EX-8960740300 PROFILE H2174 OF LENGTH 6200
EX-8960740200 PROFILE H2174 OF LENGTH 4200
EX-8960740100 PROFILE H2174 OF LENGTH 2100
EX-8960850600 PROFILE H2185 LENGTH 6200mm
EX-8960850400 PROFILE H2185 LENGTH 4200mm
EX-8960850200 PROFILE H2185 LENGTH 2100mm
EX-8960906000 PROFILE H2190 OF LENGTH 6200mm
EX-8960904000 PROFILE H2190 OF LENGTH 4200mm
EX-8960902000 PROFILE H2190 OF LENGTH 2100mm

Aluminum Accessories

EX-8960260000 CONNECTION PLATE SMALL 40mm
EX-8960750000 CORE FOR PROFILE H2174
EX-8964825000 CORE FOR PROFILE H2185
EX-8960910000 CORE FOR H2190
EX-8962307300 CONNECTOR FOR WINDSHIELD
EX-8960180200 MID CLAMP
EX-8960660000 CAP OF PANEL CLAMP WITH 55mm LENGTH
EX-8960XX0100 END CLAMP XXmm, L=55mm - depends on panel thickness
EX-WINDSHIELD AS182 WINDSHIELD H2309
EX-8960740040 END CUP FOR H2174 PROFILE-RAL 1003 YELLOW
EX-8960850040 PLASTIC END CUP FOR H2185 PROFILE-YELLOW
EX-8960900040 PLASTIC END CUP FOR H2190 PROFILE-YELLOW

Galvanized Piles

EX-8961224000 GALVANIZED PILE IPE120 LENGTH 3,0M
EX-8961230000 GALVANIZED PILE IPE120 LENGTH 3,0M
EX-8961235000 GALVANIZED PILE IPE120 LENGTH 3,5M

Bolts & Nuts

EX-8968008103 T-SLOT NUT M8 ALUMINIUM
EX-762908XX01 HEX SOCKET SCREW ISO4762 M8x XX A2 INOX - depends on panel thickness
EX-8968808201 HEXAGON NUT DIN6923 M8 WITH SERRATION M8 INOX
EX-7627300801 SERRATED LOCK WASHER DIN6798-A M8 A2 INOX
EX-7626703201 DIN 7504-K SELF DRILLING SCREW 6,3x32 A2 INOX
EX-7622802001 HEXAGON SCREW M8X20 DIN933 INOX A2
EX-7628200901 SQUARE NUT DIN557 M8 A2 INOX

*In large scale project purlings can be produced in special lengths

20 YEARS GUARANTEE

3.5. Πιστοποίηση στατικού υπολογισμού βάσης AS 190



ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ

Αρ. Πιστ.: TUV-H13/8216

Με το παρόν πιστοποιείται ότι η στατική μελέτη:

«ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΣΗΣ AS190»

της εταιρίας:

**ΑΛΟΥΜΥΛ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ Α.Ε.
ΒΙ.ΠΕ. ΣΤΑΥΡΟΧΩΡΙΟΥ ΚΙΛΚΙΣ**

συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις των προτύπων/κανονισμών:

Eurocode 1

Eurocode 3

Eurocode 9

ΕΑΚ 2000 (όπως συμπληρώθηκε το 2003)

οι οποίοι καθορίζουν τις απαιτήσεις για τις τεχνικές μελέτες στην Ελλάδα.

Το φάσμα της ισχύος και οι λεπτομέρειες έγκρισης της μελέτης αναφέρονται στην έκθεση με Αρ.: TUV-H13/8216-A

(Το πιστοποιητικό αυτό ισχύει σε συνδυασμό με την αναφερόμενη έκθεση)

Αθήνα, 14/03/2013

Σ. ΤΟΓΙΑΣ
Διευθυντής
Κτιριακών –Τεχνικών
Επιθεωρήσεων

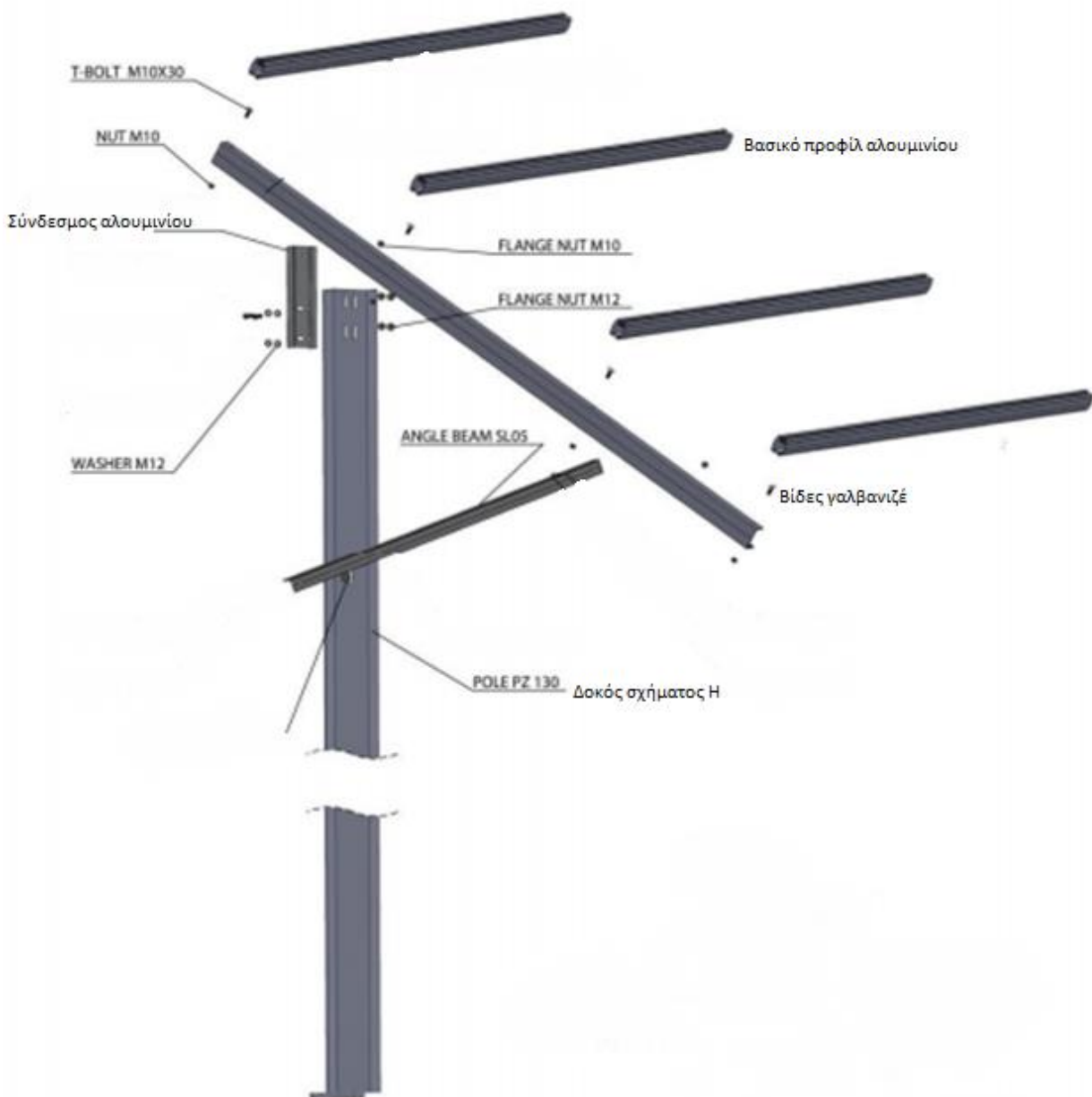


TUV CODE: 08.21.194

Απαγορεύεται η μερική αναπαραγωγή του παρόντος εγγράφου
Κεντρικά Γραφεία: Λ. Μεσογείων 282, 155 62, Χολαργός, Τηλ.: 215 215 7400, Fax: 210-6528025, Email: info@tuvhellas.gr, Site: www.tuvhellas.gr

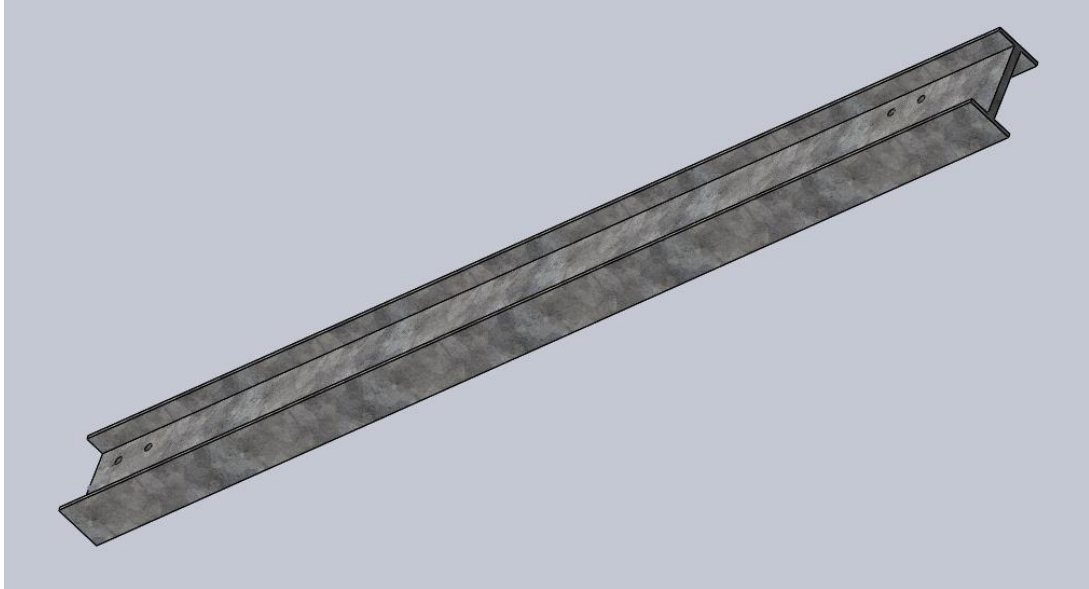
3.6. Εξαρτήματα που απαρτίζουν την βάση στήριξης και το φωτοβολταϊκό σύστημα

Η μονοπάσαλη βάση στήριξης της Alumil AS190 (σχήμα 3.8) απαρτίζεται κυρίως από στοιχεία αλουμινίου συγκεκριμένης σύστασης και επεξεργασίας. Επιπρόσθετος το κύριο τμήμα όπου στηρίζονται οι βέργες αλουμινίου και εν συνέχεια τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι ένας χαλύβδινος δοκός σχήματος Η γαλβανισμένος εν θερμώ. Αυτή κατεργασία γίνεται για να προσδώσει στο υλικό καλύτερες ιδιότητες σε σχέση με την διάβρωση που θα υποστεί λόγω των βροχοπτώσεων στο μέλλον.



Σχήμα 3.8 Σχηματική αναπαράσταση της βάσης AS 190 της Alumil

Η δομή της συγκεκριμένης βάσης είναι πολύ απλή, και σε αυτό συντέλεσε η προσπάθεια που έγινε από τους μηχανικούς της Alumil για το όσο γίνεται λιγότερα εξαρτήματα, έτσι ώστε να μειωθεί ο χρόνος συναρμολόγησης, καθώς και το κόστος χωρίς όμως να μειωθεί η ποιότητα και η αντοχή στον χρόνο. Το βασικό στοιχείο το οποίο και έρχεται σε επαφή με το έδαφος είναι ένας χαλύβδινος δοκός μεγάλης αντοχής σχήματος Η (σχήμα 3.9) ο οποίος έχει επεξεργαστεί καταλλήλα.



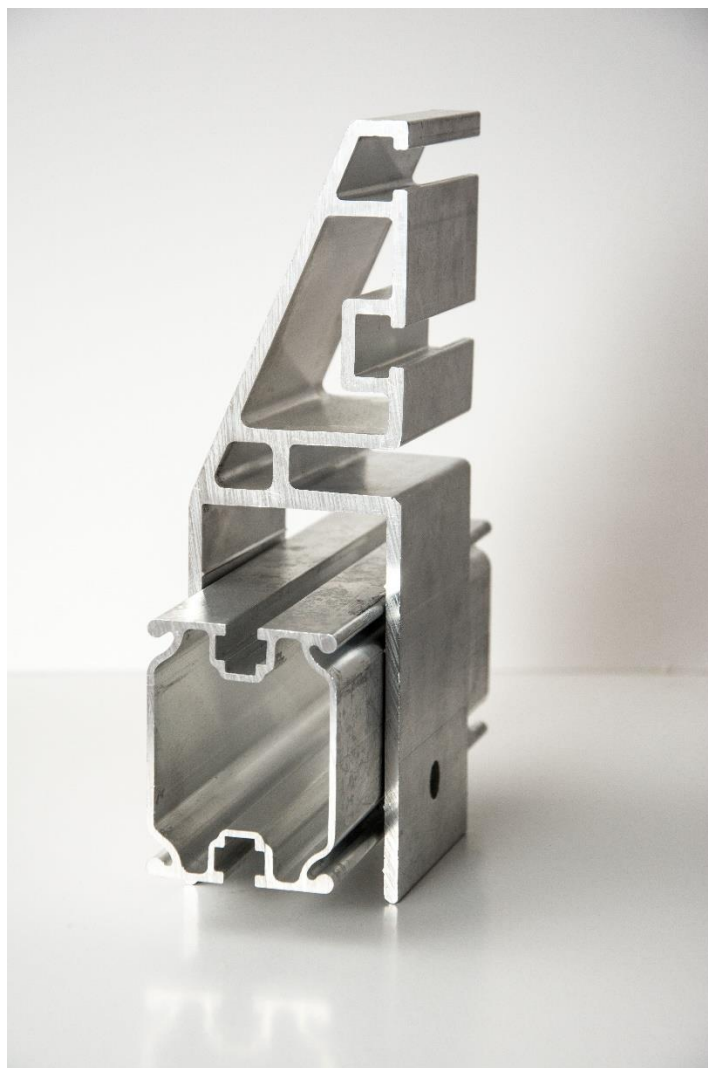
Σχήμα 3.9 Χαλύβδινη δοκός στήριξης σχήματος Η

Εν συνεχεία η βασική δοκός αφού στερεωθεί στο έδαφος με την μέθοδο της πασσαλόμπηξης, συνδέεται με τα προφίλ αλουμινίου, σχηματίζοντας ένα τρίγωνο, όπου πάνω σε αυτό στην συνέχεια στηρίζονται παράλληλα προφίλ αλουμινίου (σχήμα 3.10) και πάνω σε αυτά τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.



Σχήμα 3.10 Προφίλ αλουμινίου

Τα δύο παραπάνω μέρη τα συνδέει μεταξύ τους ένας σύνδεσμος (σχήμα 3.11) ο οποίος έχει καινοτόμα σχεδίαση, όπου του επιτρέπει να τοποθετείται αντίθετα στο άνω και το κάτω άκρο διαδοχικά για την δημιουργία του τριγώνου. Αυτή η καινοτομία είναι μια λύση που προσφέρει έξτρα μειωμένο κόστος, γιατί σε διαφορετική περίπτωση θα έπρεπε να υπάρχει ακόμη ένα εξάρτημα. Το συγκεκριμένο εξάρτημα αναλύεται στα επόμενα κεφάλαια με την στατική ανάλυση.



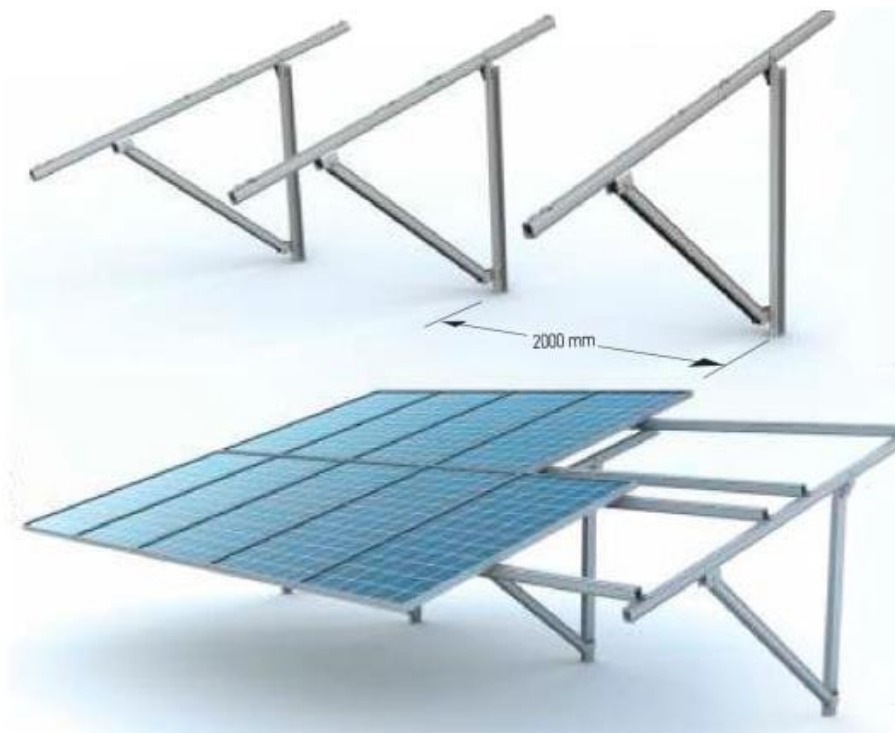
Σχήμα 3.11 Σύνδεσμος αλουμινίου

Μεταξύ του συνδέσμου και της δοκού από χάλυβα, περιβάλλεται ένα άλλο καινοτόμο εξάρτημα το οποίο παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην διάρκεια ζωής της όλης κατασκευής. Το εξάρτημα αυτό είναι κατασκευασμένο από πολυαμίδιο, το πολυαμίδιο είναι ένα πολυμερές το οποίο έχει υψηλή αντοχή σε γήρανση σε υψηλές θερμοκρασίες και για μεγάλες χρονικές περιόδους. Είναι ουσιαστικά ένα μονωτικό μεταξύ του χάλυβα και του αλουμινίου. Το συγκεκριμένο κρίνεται απαραίτητο για την αντοχή στην διάβρωση κυρίως από βροχοπτώσεις και από ατμοσφαιρικούς ρύπους.

Η διάβρωση σε αυτά τα υλικά επέρχεται όταν δύο μέταλλα με διαφορετική ηλεκτροαρνητικότητα (electronegativity) έρχονται σε επαφή σε υγρό περιβάλλον, το πιο ηλεκτροαρνητικό από τα δύο, μέταλλο, υφίσταται μια ηλεκτρική και οξειδωτική τάση. Το αλουμίνιο είναι περισσότερο ηλεκτροαρνητικό συγκρινόμενο με τα άλλα μέταλλα. Ο εκτεθειμένος

(απροστάτευτος) χάλυβας, οξειδώνεται και επιτίθεται στο αλουμίνιο. Για να αποφευχθεί η διάβρωση του αλουμινίου, θα πρέπει να τοποθετείται μεταξύ των δύο μετάλλων ένα μονωτικό διαχωριστικό. Αντιθέτως, η επαφή με τον ανοξείδωτο χάλυβα, από όσα γνωρίζουμε μέχρι σήμερα, δεν φαίνεται να βλάπτει το αλουμίνιο. Η επαφή με τον χαλκό και τα κράματά του είναι εξαιρετικά επιζήμια για το αλουμίνιο και η προστασία με επιφανειακή μόνωση αυτών των δύο υλικών απαιτείται. Τέλος και ο μόλυβδος είναι πιο ηλεκτροθετικός από το αλουμίνιο και θα πρέπει να μονώνεται επίσης.

Το μονωτικό διαχωριστικό ουσιαστικά συνδέει ουσιαστικά την κύρια χαλύβδινο δοκό σχήματος Η με το προφίλ αλουμινίου προσφέροντας έτσι την απαραίτητη μόνωση. Το διαχωριστικό είναι κατασκευασμένο από πολυαμίδιο, το πολυαμίδιο είναι ένα πολυμερές. Η χαλύβδινη δοκός είναι στερεωμένη στο έδαφος και συνδεμένη με τα προφίλ αλουμινίου σχηματίζοντας διαδοχικά τρίγωνα (σχήμα 3.12) σε απόσταση δυο μέτρων μεταξύ τους. Η ανάπτυξη τέτοιων τριγώνων γίνεται εν σειρά



στον εκάστοτε αγρό σχηματίζοντας ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων.

3.7. Υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των βάσεων στήριξης.

Εκτός από την δοκό σχήματος Η οποία επιλέχθηκε να είναι από χάλυβα κατάλληλα επεξεργασμένο εν θερμό για να την προσδώσει τις απαραίτητες στατικές ιδιότητες, το σύνολο των υπολοίπων εξαρτημάτων και δομικών στοιχείων είναι κατασκευασμένα από κράμα αλουμινίου. Το κράμα όπου χρησιμοποιείται περιέχει σε ποσοστά τα ακόλουθα υλικά: πυρίτιο (Si), σίδηρο (Fe), χαλκό (Cu), μαγγάνιο (Mn), μαγνήσιο (Mg), χρώμιο (Cr), ψευδάργυρο (Zn), τιτάνιο (Ti).

Σχήμα 3.12 Αναπαράσταση ανάπτυξης της βάσης φωτοβολταϊκού

Είναι πολύ σημαντική παράμετρος στην επιλογή βάσεων στήριξης για Φ/Β εφαρμογές που κατασκευάζονται από αλουμίνιο, το κράμα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους. Οι περισσότερες εταιρείες στην παγκόσμια βιομηχανία επιλέγουν κράματα όπως το 6060 ή 6063, καθώς λόγω της ευρείας χρήσης τους είναι εύκολα διαθέσιμα στην αγορά. Η Alumil Solar είναι η μοναδική εταιρεία που κατασκευάζει τις βάσεις στήριξης Φ/Β πάνελ από υψηλής σκληρότητας κράμα αλουμινίου (AL 6005T6) στην σύγχρονη διέλαση αλουμινίου που διαθέτει. Παρακάτω (σχήμα 3.13) βλέπουμε μία αναλυτική σύγκριση μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων 6060 - 6063 - 6106 & 6005-6005A.

% Χημική σύσταση									Μηχανικές ιδιότητες				
Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Όριο θραύσης Rm Mpa min Values	Όριο διαρροής Rp Mpa min Values	% min επιμήκυνση A50	min Σκληρότητα HBRINELL	Συνήθεις Τιμές Alumil
6005A	0,50 - 0,90	0,35	0,30	0,50	0,40-0,70	0,30	0,20	0,10	255	215	6	85	90-100
6005	0,60—0,90	0,35	0,10	0,10	0,40-0,60	0,10	0,10	0,10	255	215	6	85	90-100
6106	0,30-0,60	0,35	0,25	0,05-0,20	0,40-0,80	0,20	0,10		250	200	6	80	Not in use
6063	0,20-0,60	0,35	0,10	0,10	0,45-0,90	0,10	0,10	0,10	245	200	6	70	70-80
6060	0,30-0,60	0,10-0,30	0,10	0,10	0,35-0,60	0,05	0,15	0,10	215	160	6	65	70-75

Σχήμα 3.13 Χημική σύσταση και μηχανικές ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου

Η οικογένεια κραμάτων 6005 περιλαμβάνει τα κράματα 6005A και 6005. Το κράμα 6005A, είναι σχεδόν όμοιο με το 6005 με την εξαίρεση ότι διαφοροποιείται μερικώς όσον αφορά τα εύρη των επιμέρους χημικών συστάσεων ώστε να βελτιωθεί η αντοχή – σκληρότητά του. Είναι κράμα που υπόκειται σε θερμική επεξεργασία, κατάλληλο για εφαρμογές που δέχονται φορτία και παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στην διάβρωση. Παρόλα αυτά, η άμεση επαφή μεταξύ διαφορετικών μετάλλων μπορεί να προκαλέσει γαλβανική διάβρωση. Για αυτόν τον λόγο σε τέτοιες περιπτώσεις στην Alumil Solar χρησιμοποιούνται ειδικά πολυαμίδια, τα οποία εμποδίζουν την άμεση επαφή. Για επιπλέον αντιδιαβρωτική προστασία μπορεί να επιλεγεί η ανοδίωση των προφίλ αλουμινίου. Σε περιβάλλον C4 & C5 ή σε περιοχές κοντύτερα από 3Km από την θάλασσα συστήνεται η χρήση ανοδίωσης προκειμένου να αποφευχθεί η διάβρωση. Επιπλέον, τα κράματα 6005 & 6005A εμφανίζουν εξαιρετικό δείκτη συνδυασμού διελασιμότητας – ανταπόκρισης στην ψύξη την ώρα της διέλασης – απόδοσης μηχανικών ιδιοτήτων, σε σύγκριση με τον ίδιο δείκτη των υπολοίπων δημοφιλών κραμάτων διέλασης στην Ευρωπαϊκή βιομηχανία 6060/6063/6106.

Εστιάζοντας αποκλειστικά στις μηχανικές ιδιότητες, στην πράξη είναι σύνηθες το φαινόμενο διελάσεις με κράμα 6005 & 6005A, να επιτυγχάνουν όριο θραύσης και όριο διαρροής έως και 20-30% περισσότερο από τις αντίστοιχες με κράμα 6060 & 6063, ενώ ταυτόχρονα ο άλλος βασικός δείκτης της επιμήκυνσης μέχρι το όριο θραύσης τους (ελαστικότητα) να παραμένει σχεδόν στα ίδια επίπεδα. Για όλους αυτούς του λόγους η χρήση της οικογένειας κραμάτων 6005 συνέχεια διευρύνεται και έχει εδραιωθεί σε πολλές περιοχές εφαρμογών όπως ναυπηγική, σιδηροδρόμους, λεωφορεία, φορτηγά, πυλώνες και πύργους, σωλήνες για ιστούς σκαφών, σκαλωσιές. Για αυτό και η Alumil Solar πιστή στην δέσμευση ποιότητας με τους πελάτες της επιμένει στην επιλογή της για χρήση αποκλειστικά του κράματος 6005 στην παραγωγή βάσεων στήριξης για Φ/Β πάνελ.

Κεφάλαιο 4. Πεπερασμένα στοιχεία και το λογισμικό SolidWorks

4.1. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητικά μέθοδος, μέθοδος υπολογισμού με την χρήση Η/Υ, για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σ ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Όμως υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και για αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές λύσεις. Μια τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημα της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών.

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε αρχικά από τον Γερμανό μαθηματικό Ritz στις αρχές του εικοστού αιώνα το 1909. Το 1915 ο Ρώσος μαθηματικός Galerkin ανέπτυξε σε βάθος την θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων. Η απουσία του ηλεκτρονικού υπολογιστή καθυστέρησε την διάδοση και περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου και παρέμεινε στάσιμη μέχρι της ανακαλύψεως του υπολογιστή. Με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή η μέθοδος έγινε γνωστή και διαδόθηκε στους ερευνητές. Η ιδέα της ανάπτυξης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων γεννήθηκε στην αεροναυπηγική από την ανάγκη της εύρεσης λύσης στα δύσκολα προβλήματα που αντιμετώπιζαν στην κατασκευή των αεροσκαφών. Το 1941 ο Hrenikoff εισήγαγε την καλούμενη framework method (μέθοδο του πλαισίου) με την οποία ένα επίπεδο ελαστικό μέσο μπορούσε να αντικατασταθεί με ένα ισοδύναμο σύστημα ράβδων και δοκών. Το 1943 ο Γερμανός μαθηματικός Courant έλυσε το πρόβλημα της στρέψης χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία με την αρχή της ελαχίστης δυναμικής ενέργειας (minimum potential energy) και την ονόμασε Rayleigh-Ritz μέθοδο. Επειδή τότε δεν υπήρχε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, η θεωρία του Courant δεν μπορούσε να εφαρμοσθεί και ξεχάστηκε μέχρι που ανακαλύφθηκε ο υπολογιστής και οι επιστήμονες ξανά θεμελίωσαν την μέθοδο. Το **1955 ο Έλληνας Ι. Αργύρης** έγραψε ένα βιβλίο με θέμα 'Ένεργειακά θεωρήματα και η μέθοδος των μητρώων' και εισήγαγε τις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων. Το 1956 οι Αμερικανοί Turner, Clough, Martin και Top υπολόγισαν το μητρώο δυσκαμψίας της ράβδου και άλλων στοιχείων. Το 1960 ο Ι. Αργύρης και ο Kelsey δημοσίευσαν την εργασία τους η οποία βασιζόταν στις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων. Το 1960 ο Clough καθηγητής του πανεπιστημίου 'University of California, Berkeley' της Αμερικής, χρησιμοποίησε για πρώτη φορά το όνομα 'Πεπερασμένα στοιχεία' (Finite elements) στην εργασία του και από τότε όλοι χρησιμοποιούν την παραπάνω ονομασία. Το 1967 οι Zienkiewicz και Chung έγραψαν το πρώτο βιβλίο των πεπερασμένων στοιχείων. Από τότε ένας μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων και βιβλίων ακολούθησε με αντικείμενο την εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων στην μηχανική, στα ρευστά, τη θερμότητα, την ακουστική, την κατεργασία των μετάλλων, τον ηλεκτρισμό και ηλεκτρομαγνητισμό και σε πολλές άλλες επιστήμες.

Για την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

- Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο.
- 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.

- Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται solver και χρησιμοποιούνται για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.
- Όταν τελειώσει η επίλυση τα αποτελέσματα προβάλλονται από ένα πρόγραμμα που αποκαλείται post processor.

Υπάρχουν βέβαια και προγράμματα τα οποία την παραπάνω διαδικασία την κάνουν εξολοκλήρου μόνα τους χωρίς την βοήθεια υποπρογραμμάτων.

4.2. Ορισμός CAD

Η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Design: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού. Με τον όρο CAD εννοούμε τη δημιουργία γεωμετρικών απεικονίσεων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Προφανώς δεν περιοριζόμαστε στη γνωστή διαδικασία αντικατάστασης του drafting, δηλ. του δισδιάστατου (2-D) παραδοσιακού σχεδίου του μηχανικού, αλλά κυρίως στην περίπτωση τρισδιάστατης (3-D) απεικόνισης κατασκευών ή δομών, όπου χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένες διαδικασίες προσέγγισης επιφανειών (μέσω των παρεμβολών Coons, Bezier και Nurbs) ή/και όγκων. Έτσι, είναι πολύ ευκολότερη και ελέγξιμη η αλλαγή της γεωμετρίας ενός μηχανολογικού εξαρτήματος μέχρις ότου ο μελετητής καταλήξει σε μία καταρχήν αποδεκτή κατασκευαστική λύση. Επιπλέον, όλα τα συστήματα CAD διαθέτουν κατάλληλα φίλτρα – interfaces (DXF, IGES, STEP) που δίνουν τη δυνατότητα μεταφοράς της γεωμετρικής πληροφορίας από το ένα σύστημα στο άλλο (εναλλαξιμότητα).

Τα εργαλεία CAD μπορούν να ποικίλλουν μεταξύ γεωμετρικών εργαλείων διαχείρισης σχημάτων (ένα άκρο), μέχρι εξειδικευμένα προγράμματα εφαρμογών, όπως ανάλυση και βελτιστοποίηση (άλλο άκρο). Μεταξύ αυτών των δύο άκρων, τυπικά εργαλεία που είναι διαθέσιμα επί του παρόντος, περιλαμβάνουν ανάλυση ανοχών, υπολογισμούς ιδιοτήτων μάζας (κέντρα βάρους, ροπές αδρανείας, κλπ.), μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (FEM) και οπτικής απεικόνισης (visualization) των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, μεταξύ άλλων. Ο σημαντικότερος ρόλος του CAD είναι ο καθορισμός της γεωμετρίας του υπό σχεδιασμού προϊόντος που είναι ουσιώδης σε όλες τις επόμενες φάσεις του κύκλου. Στη συνέχεια, η εν λόγω γεωμετρία αξιοποιείται από το CAE.

4.3. Ορισμός CAE

Η ανάλυση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Engineering: CAE) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με τη χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάλυση γεωμετρίας CAD, που επιτρέπει στο σχεδιαστή να προσομοιώσει και να μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν, έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. Τα εργαλεία CAE διατίθενται σε ευρεία κλίμακα αναλύσεων. Κινηματικά προγράμματα, για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση λειτουργίας μηχανών. Προγράμματα δυναμικής ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση σύνθετων συναρμολογημένων δομών όπως λ.χ. τα οχήματα ή συσκευασιών σε πτώση επί του εδάφους.

Μεταξύ των πλέον διαδεδομένων μεθόδων ανάλυσης είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method: FEM) που επιτρέπει τη στατική και δυναμική ανάλυση τάσεων και μετατοπίσεων, θερμική ανάλυση, ρευστομηχανική και αεροδυναμική ανάλυση, ακουστική ανάλυση,

κατανομή μαγνητικού πεδίου ή και άλλων πεδίων. Η εφαρμογή της FEM απαιτεί τη χρήση ενός απλουστευμένου αφαιρετικού μοντέλου που πρέπει να γεννηθεί είτε με αλληλεπίδραση του χρήστη ή και αυτόματα. Το λογισμικό που καθιστά δυνατή την κατασκευή του αφαιρετικού μοντέλου και τη γένεση των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί τους προ-επεξεργαστές (pre-processors). Μετά την εκτέλεση της ανάλυσης σε κάθε στοιχείο, ο Η/Υ συγκεντρώνει τα αποτελέσματα και τα εμφανίζει με ευανάγνωστο οπτικό τρόπο. Περιοχές υψηλών τάσεων μπορεί να παριστάνονται με κόκκινο χρώμα για παράδειγμα. Το λογισμικό τέτοιων απεικονίσεων αποτελεί τους λεγόμενους μετα-επεξεργαστές (post-processors).

Επίσης, είναι διαθέσιμα πολλά εργαλεία βελτιστοποίησης σχεδιασμού. Παρόλο που τα εργαλεία βελτιστοποίησης μπορούν να θεωρηθούν σαν εργαλεία CAE, συνήθως ταξινομούνται με ξεχωριστό τρόπο. Διάφορες ερευνητικές προσπάθειες εξελίσσονται προς την κατεύθυνση αυτόματου σχεδιασμού με ολοκλήρωση των διαδικασιών βελτιστοποίησης και ανάλυσης. Σε αυτές τις προσεγγίσεις, γίνεται η παραδοχή ενός απλού αρχικού σχήματος σχεδιασμού, όπως ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο για δισδιάστατο εξάρτημα που αποτελείται από μικρά στοιχεία διαφορετικών πυκνοτήτων. Κατόπιν, εκτελείται η διαδικασία βελτιστοποίησης προς υπολογισμό των βέλτιστων τιμών αυτών των πυκνοτήτων που αποβλέπει στην επίτευξη ενός στόχου με παράλληλη ικανοποίηση των συνθηκών τάσεων ή/και μετατοπίσεων. Συνήθως ο στόχος είναι η επίτευξη του ελάχιστου βάρους. Με βάση τις βέλτιστες τιμές πυκνοτήτων, το βέλτιστο σχήμα του σχεδιασμού λαμβάνεται με απαλοιφή των στοιχείων χαμηλής πυκνότητας.

Η γοητεία των μεθόδων ανάλυσης και βελτιστοποίησης είναι ότι επιτρέπουν στο μηχανικό να δει τον τρόπο με τον οποίο το προϊόν θα συμπεριφερθεί και να επισημάνει τα όποια λάθη έχουν γίνει μέχρι τη στιγμή εκείνη, προτού προχωρήσει σε χρονοβόρες και δαπανηρές διαδικασίες κατασκευής και ελέγχου φυσικών πρωτοτύπων. Επειδή το κόστος μελέτης μεταβάλλεται εκθετικά στα τελευταία στάδια ανάπτυξης και παραγωγής του προϊόντος, η πρώιμη βελτιστοποίηση και εξευγενισμός που επιτυγχάνεται από την ανάλυση CAE τελικά αποπληρώνεται με μείωση χρόνου και κόστους.

4.4. Μοντελοποίηση – τύποι πεπερασμένων στοιχείων

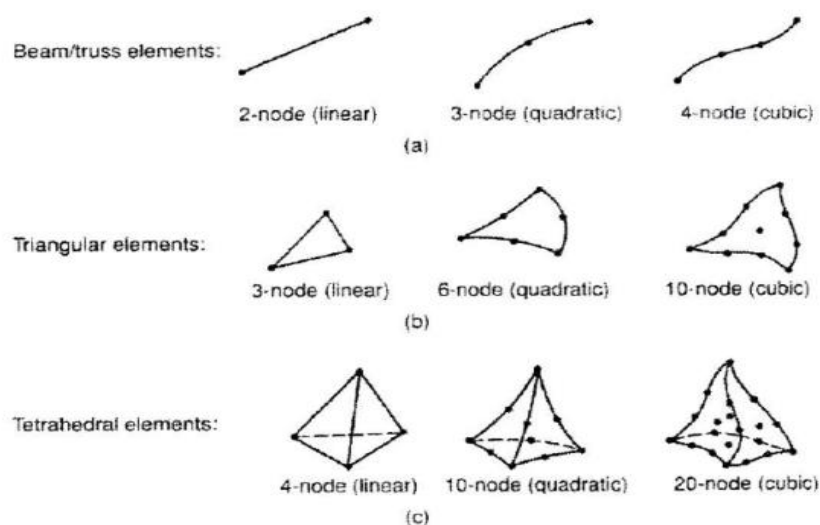
Το σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, δηλ. η εισαγωγή της γεωμετρίας, η γένεση του πλέγματος, η επιβολή στηρίξεων και φόρτισης αποτελούν αυτό που συνοπτικά ονομάζεται μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (finite-element modeling), η οποία συνήθως εκτελείται με τη βοήθεια κατάλληλου προ-επεξεργαστή. Πολύ παλαιότερα, η εισαγωγή των δεδομένων δινόταν με γραμμές εντολών με τη βοήθεια ενός αυτόνομου αρχείου δεδομένων (batch file).

Ο προ-επεξεργαστής (pre-processor) ξεκινάει από τη γεωμετρία του αντικείμενου ή του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Παραδοσιακά συστήματα FEA (Finite Element Analysis) είχαν μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες μοντελοποίησης, αλλά σήμερα τα περισσότερα είτε προσφέρουν προηγμένες δυνατότητες ή έχουν στενούς δεσμούς με συστήματα CAD (μερικές φορές και τα δύο). Συστήματα που στηρίζονται σε γεωμετρική μοντελοποίηση CAD είτε εργάζονται απευθείας με το μοντέλο CAD ή μεταφράζουν και εισάγουν τη γεωμετρία. Η απευθείας σύνδεση με CAD κερδίζει όλο και μεγαλύτερο έδαφος, διότι εξαλείφει τα βήματα μετάφρασης την απώλεια δεδομένων και μικραίνει τον κύκλο σχεδιασμού ανάλυσης-αλλαγής. Περαιτέρω, η χρήση συστήματος CAD διευκολύνει τη μοντελοποίηση και παρέχει πιο ισχυρές λειτουργίες δημιουργίας και αλλαγής σύνθετης γεωμετρίας. Πράγματι, σήμερα τα περισσότερα υβριδικά συστήματα μοντελοποίησης (με ολοκληρωμένη μοντελοποίηση όγκου, επιφάνειας και wireframe, και παραμετρικών μεθόδων που

στηρίζονται σε features) μπορούν να κτίσουν οποιαδήποτε γεωμετρία απαιτείται για ανάλυση. Τα περισσότερα συστήματα FEA δίνουν επίσης έμφαση στη δυνατότητα που έχουν να εισάγουν τη γεωμετρία, είτε μέσω τυποποιήσεων όπως το IGES ή απευθείας από συγκεκριμένα συστήματα CAD. Ωστόσο, η απευθείας χρήση δεν είναι πάντα άμεσα εφαρμόσιμη. Το μοντέλο μπορεί να φαίνεται στο μάτι ότι είναι τέλειο αλλά μπορεί στην πραγματικότητα να έχει σφάλματα που αποκαλύπτονται στο σύστημα FEA, κυρίως κατά την διαδικασία γένεσης πλέγματος. Μερικά συστήματα προσφέρουν λειτουργίες που μπορούν να «καθαρίσουν» την εισαγόμενη γεωμετρία. Επιπλέον, ακόμη και αν η γεωμετρία CAD δεν περιέχει σφάλματα, η ανάλυση δεν απαιτεί όλες τις λεπτομέρειές του, οπότε μερικές από αυτές (π.χ. ένα fillet) θα μπορούσαν να απαλειφθούν. Μερικά συστήματα διαθέτουν τέτοιες αυτόματες δυνατότητες απενεργοποίησης γεωμετρικών οντοτήτων.

Το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία πλέγματος και κατανομής κόμβων. Όταν σε κάθε πλέγμα αποδίδονται κόμβοι, τότε αυτό μετατρέπεται σε πεπερασμένο στοιχείο. Η γένεση πλέγματος είναι το πλέον σημαντικό και δύσκολο στάδιο της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διευκόλυνση αυτού του σταδίου, σήμερα όλα τα συστήματα προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η τυπική προσέγγιση είναι να προσφέρουν αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία για επιφάνεια στο τρισδιάστατο χώρο (κελύφη, επίπεδη εντατική ή επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Πολλά συστήματα επιτρέπουν στους χρήστες να επέμβουν στις παραμέτρους αυτόματης γένεσης πλέγματος, όπως η πυκνότητα πλέγματος. Αυτές επιπλέον επιτρέπουν τοπική επέμβαση σε κρίσιμες περιοχές. Πολλά συστήματα επιτρέπουν τη διασύνδεση πλέγματος με τη γεωμετρία, έτσι ώστε κάθε αλλαγή αυτής να αντανακλάται αυτόματα στο πλέγμα.

Τα διάφορα στοιχεία που υποστηρίζονται από ένα σύστημα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν τη λεγόμενη βιβλιοθήκη στοιχείων (element library). Όσο πιο μεγάλο το είδος των στοιχείων τόσο περισσότερα είδη προβλημάτων μπορούν να επιλυθούν. Η σχήμα 4.1 δείχνει τυπικά πεπερασμένα στοιχεία που υποστηρίζονται από τους περισσότερους κώδικες. Να σημειωθεί ότι το ίδιο πλέγμα μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία ανάλογα με τον αριθμό κόμβων που αποδίδονται σε αυτό. Τέλος, οι ζώνες στις οποίες αναμένεται απότομη μεταβολή στη συμπεριφορά των προς επίλυση αγνώστων (όπως συγκέντρωση τάσεων γύρω από οπές) πρέπει να διακριτοποιηθούν από στοιχεία μεγαλύτερης πυκνότητας πλέγματος από εκείνες που εμφανίζουν προοδευτική μεταβολή.



Σχήμα 4.1 Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για a) μονοδιάστατα, b) δισδιάστατα και c) τρισδιάστατα προβλήματα.

Μια διαφορετική προσέγγιση στο δίλημμα του πλέγματος είναι η χρήση της p-version μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή στηρίζεται σε ένα απλούστερο, αυτόματα γεννημένο πλέγμα, αλλά κατόπιν μεταβάλλει αυτόματα τον πολυωνυμικό βαθμό των συναρτήσεων μορφής. Παρόλο που σήμερα είναι διαθέσιμα πολλά τέτοια προγράμματα FEA, δύο προγράμματα (PTC's Pro/MECHANICA και CADSI's PolyFEM) σχεδιάστηκαν ειδικά για ανάλυση τύπου p-version. Επιπλέον, από το εύκολο πλέγμα, τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι η ικανότητα να καθορίσουν όρια ακρίβειας και πλησιέστερης προσέγγισης της γεωμετρίας του μοντέλου CAD. Χρησιμοποιώντας χαμηλότερο επίπεδο ακρίβειας, ο σχεδιαστής μπορεί να πάρει γρήγορα αποτελέσματα ανάλυσης στο προκαταρκτικό στάδιο σχεδιασμού.

Αφού επιλεγεί η διάταξη των στοιχείων, καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης (π.χ., στατική ή δυναμική, γραμμική ή μη-γραμμική, επίπεδη εντατική κατάσταση, και επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Επίσης, οι άγνωστοι ή αλλιώς οι βαθμοί ελευθερίας συσχετίζονται με τους κόμβους. Οι άγνωστοι περιέχουν μετατοπίσεις, περιστροφές, θερμοκρασία, ροή θερμότητας, κ.ο.κ. Κατόπιν καθορίζονται οι οριακές συνθήκες. Οριακές συνθήκες, όπως μετατοπίσεις, δυνάμεις, και θερμοκρασίες συνήθως είναι γνωστές για το συνεχές τμήμα του συνόρου του αντικείμενου. Αυτές οι οριακές συνθήκες πρέπει να εκφραστούν σαν ένα σύνολο τιμών μετατοπίσεων, δυνάμεων, ή θερμοκρασιών σε συγκεκριμένους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, μερικές φορές τα πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να γεννηθούν χωρίς να έχουν οριακές συνθήκες. Εάν πρόκειται να εισαχθούν σημειακά φορτία, πρέπει να δημιουργηθούν κόμβοι στα αντίστοιχα σημεία εφαρμογής τους. Τα περισσότερα συστήματα που είναι συνδεδεμένα με CAD επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει τις οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, και σε αυτήν την περίπτωση οι οριακές συνθήκες μετατρέπονται σε ισοδύναμες οριακές συνθήκες στους κόμβους του πλέγματος από το ίδιο το σύστημα. Οι περισσότεροι μοντελοποιητές πεπερασμένων στοιχείων επίσης παρέχουν έναν αριθμό τρόπων εύκολου καθορισμού των φορτίσεων και των οριακών συνθηκών για το χειρισμό ευρείας κλίμακας προβλημάτων και ρεαλιστικών συνθηκών.

Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει επίσης να αποδοθούν ιδιότητες υλικού. Αυτές οι ιδιότητες είναι τυπικά το μέτρο ελαστικότητας του Young, και ο λόγος του Poisson (για ελαστικές κατασκευές). Το πάχος στοιχείων κελύφους και πλακών αντιμετωπίζεται περισσότερο σαν ιδιότητα του υλικού παρά σαν γεωμετρική ιδιότητα για την αποφυγή επίλυσης του προβλήματος στις τρεις διαστάσεις. Άλλες ιδιότητες υλικών περιλαμβάνουν θερμικές ιδιότητες (ειδική θερμότητα, συντελεστής αγωγιμότητας, λανθάνουσα θερμότητα, κ.λπ.), ιξωδοελαστικότητα, κ.λπ., για άλλου τύπου προβλήματα. Γίνεται μόνο μια απλή παραδοχή: σε διαφορετικές περιοχές στοιχείων αποδίδονται διαφορετικές ιδιότητες υλικών. Αυτό λ.χ. δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αναλύσει ένα αντικείμενο κατασκευασμένο από σύνθετο υλικό. Ένα κρίσιμο ζήτημα στην ανάλυση σύνθετων υλικών είναι η διαχείριση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων προκειμένου να υπολογισθεί η αποκόλληση (delamination).

Από τη στιγμή που ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα στάδιο που παραδοσιακά ονομάζεται μετα-επεξεργαστής (post-processor). Τα περισσότερα πακέτα προσφέρουν ποικίλους τρόπους καταλογοποίησης, εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, τα οποία τυπικά περιλαμβάνουν τάσεις, παραμορφώσεις, και παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής. Ο παραδοσιακός τρόπος είναι υπό μορφή ζωνών «ισοστασικών» επιφανειών κυρίως με χρήση χρωματικής κλίμακας. Στην περίπτωση δυναμικής ανάλυσης όλα τα πακέτα διαθέτουν animation, τόσο για την εποπτεία των ιδιόμορφων ταλάντωσης όσο και για την προσφερόμενη χρονική ολοκλήρωση που είναι το μοναδικό εργαλείο στην περίπτωση μη-γραμμικών αναλύσεων.

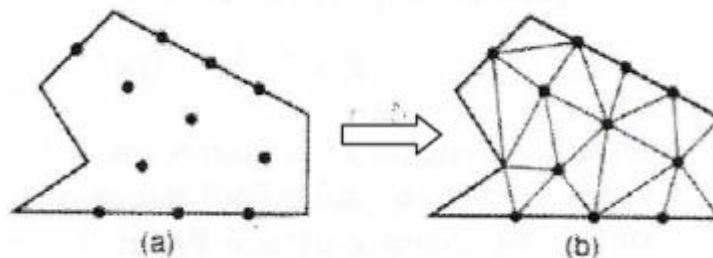
Επίσης, πολλά συστήματα διαθέτουν τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε μορφή που μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω, σαν κείμενα, παρουσιάσεις, videos, e-mail, ή αποστολή στο διαδίκτυο.

4.5. Αυτόματη γέννηση πλέγματος

Η γένεση πλέγματος συνεπάγεται τη δημιουργία κομβικών συντεταγμένων και στοιχείων. Περιλαμβάνει επίσης την αυτόματη αρίθμηση των κόμβων και στοιχείων βασισμένων στην ελάχιστη αλληλεπίδραση με το χρήστη. Έτσι, υποτίθεται ότι οι μέθοδοι αυτόματης γένεσης πλέγματος απαιτούν μόνο το γεωμετρικό μοντέλο (γεωμετρία και τοπολογία) του προς διακριτοποίηση αντικειμένου, τα χαρακτηριστικά του πλέγματος όπως πυκνότητα πλέγματος και τύπο στοιχείου και τις οριακές συνθήκες, περιλαμβάνοντας σαν είσοδο συνθήκες φόρτισης. Άλλες μέθοδοι που απαιτούν πρόσθετη είσοδο, όπως υποδιαίρεση του αντικειμένου σε υποχωρία ή υποπεριοχές, ταξινομούνται σαν ημιαυτόματες μέθοδοι. Εν συντομία, εισάγουμε τις μεθόδους γένεσης πλέγματος με βάση την ταξινόμηση που πρότείνει ο Ho-Le (1988).

- Μέθοδος Σύνδεσης Κόμβων (N.C.A.)

Η μέθοδος σύνδεσης κόμβων (node connection approach) προκειμένου να παράγουν πλέγμα είναι πολύ δημοφιλής, διότι είναι πολύ απλή στη σύλληψη της. Οι δύο κύριες φάσεις αυτής της προσέγγισης είναι (a) η γένεση κόμβων και (b) η γένεση στοιχείων που φαίνονται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 Μέθοδος σύνδεσης κόμβων.

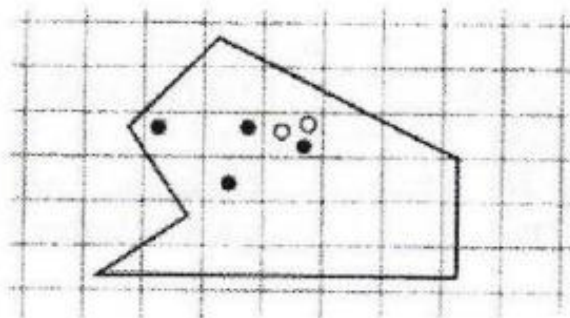
- **Μέθοδος του Cavendish (1974)**

Σε αυτή τη μέθοδο, εισάγονται αρχικά κόμβοι στο σύνορο του αντικειμένου με το χέρι του χρήστη (manually). Κατόπιν οι εσωτερικοί κόμβοι γεννώνται αυτόματα, έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις πυκνότητας πλέγματος. Το αντικείμενο υποδιαιρείται σε ένα πλήθος ζωνών διαφορετικών επιθυμητών μεγεθών στοιχείων. Στη ζώνη i , υπερτίθεται ένα τετραγωνικό grid βήματος $r(i)$. Η εικόνα 4.5.2. δείχνει ένα υπερτιθέμενο μονό grid, που βασίζεται στην παραδοχή ότι είναι επιθυμητή η ομοιόμορφη πυκνότητα πλέγματος. Για κάθε τετράγωνο του grid, γεννιέται με τρόπο τυχαίο ένας εσωτερικός κόμβος. Αυτό μπορεί να γίνει παράγοντας τυχαίους αριθμούς μεταξύ 0 και 1 δύο φορές, μια για την κατεύθυνση x και μια για την κατεύθυνση y , και υπολογίζοντας την ισοδύναμη θέση των τιμών x και y . Εάν ο παραγόμενος κόμβος πέφτει μέσα στο αντικείμενο και έχει απόσταση από το σύνορο μεγαλύτερη από το $r(i)$, αλλά και από τους προηγούμενα παραγόμενους κόμβους, τότε γίνεται αποδεκτός. Εάν όχι, ένας άλλος κόμβος παράγεται τυχαία και ελέγχεται. Εάν δεν καταστεί δυνατόν να βρεθεί ένας αποδεκτός κόμβος μετά από ένα συγκεκριμένο

αριθμό προσπαθειών (ας πούμε, πέντε), τότε το εν λόγω τετράγωνο παραλείπεται και θεωρείται το επόμενο. Η μέθοδος αυτή είναι επεκτάσιμη και στις 3 διαστάσεις, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται τρισδιάστατο grid.

- **Μέθοδος του Shimada (1992)**

Αυτή η μέθοδος γεμίζει το εσωτερικό του προς διακριτοποίηση αντικειμένου με «φυσαλίδες» όπως φαίνεται στην σχήμα 4.3, και λαμβάνει τα κέντρα τους σαν κόμβους. Το μέγεθος κάθε φυσαλίδας προσδιορίζεται από την κατανομή θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στην επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Κατόπιν οι θέσεις των φυσαλίδων προσδιορίζονται από την ικανοποίηση της ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων μεταξύ αυτών.



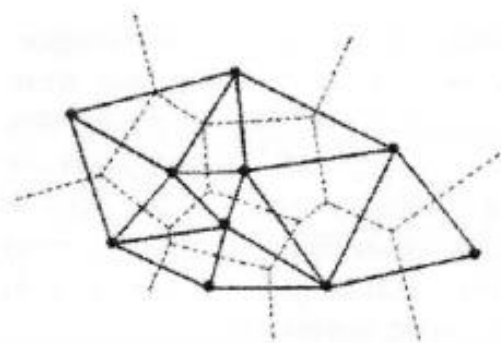
Σχήμα 4.3 Μέθοδος γέννησης κόμβων κατά Cavendish

- **Γένεση στοιχείων:** Σε αυτή τη δεύτερη φάση, κόμβοι που γεννήθηκαν στην προηγούμενη φάση συνδέονται για να αποτελέσουν στοιχεία έτσι ώστε να μη επικαλύπτονται και να καλύπτεται ολόκληρο το χωρίο. Αναφερόμαστε στη μέθοδο του Lee διότι αυτή μπορεί να οδηγήσει σε τετραπλευρικά στοιχεία. Ωστόσο, η μέθοδος τριγωνοποίησης του Delaunay είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος σύνδεσης κόμβων. Στις επεξηγήσεις που ακολουθούν, θεωρούμε στοιχεία που έχουν κόμβους μόνο στις κορυφές τους. Εάν επιθυμούμε στοιχεία με ενδιάμεσους κόμβους, τότε αυτοί προκύπτουν εύκολα από τους γωνιακούς.
- **Μέθοδος Lee (1983).** Σε αυτή τη μέθοδο, επί του αντικειμένου υπερτίθεται ένα τετραγωνικό πλέγμα υποβάθρου (grid) του οποίου το βήμα είναι ίσο προς το επιθυμητό μέγεθος στοιχείων. Κατόπιν οι κόμβοι που παρήχθησαν στην προηγούμενη φάση συσχετίζονται με τα κελιά του πλέγματος υποβάθρου. Τα κελιά και οι αντίστοιχοι κόμβοι επισκέπτονται στήλη-προς-στήλη από αριστερά προς τα δεξιά και, μέσα στην ίδια στήλη, από τα κάτω προς τα πάνω. Μέσα σε ένα κελί, οι κόμβοι διατάσσονται κατά σειρά αύξουσας τετμημένης x . Κόμβοι με την ίδια τετμημένη x , διατάσσονται κατά σειρά αύξουσας τεταγμένης y . Οι κόμβοι επισκέπτονται κατά σειρά και για κάθε κόμβο, οι γειτονικοί κόμβοι βρίσκονται έτσι ώστε να διαμορφώνουν τους κόμβους ενός καλοσηματισμένου τετραπλεύρου. Στην περίπτωση αδυναμίας σχηματισμού καλώς ορισμένου τετραπλεύρου, δημιουργείται αντίστοιχο τριγωνικό στοιχείο.
- **Μέθοδος τριγωνοποίησης Delaunay.** Αυτή είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος γένεσης τριγώνων που συνδέει δεδομένους κόμβους, διότι μεγιστοποιεί το άθροισμα των μικρότερων γωνιών σε όλα τα τρίγωνα που δημιουργούνται. Έτσι, αποφεύγονται τα λεπτά τρίγωνα. Μια τυπική τριγωνοποίηση Delaunay ξεκινάει από ένα διάγραμμα

Voronoi ή Dirichlet tessellation. Ένα διάγραμμα Voronoi ενός συνόλου N σημείων, P_i ($i=1,2,\dots,N$), αποτελείται από N πολύγωνα (πολύεδρα στις 3 διαστάσεις), V_i καθένα από τα οποία έχει κέντρο το σημείο P_i , έτσι ώστε ο γεωμετρικός τόπος των σημείων του επιπέδου (του χώρου στις 3 διαστάσεις) που είναι πλησιέστερα στον κόμβο i , να περιλαμβάνονται στον V_i . Μαθηματικά, το V_i (επιφάνεια ή όγκος) εκφράζεται ως:

$$V_i = \{ x: |x - P_i| < |x - P_j| \text{ για όλα τα } j \neq i \}$$

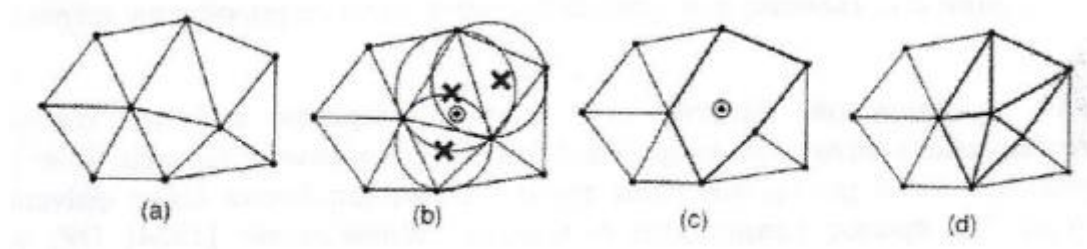
όπου $|\dots|$ συμβολίζει το μέτρο του διανύσματος εντός του και κάθε V_i , είναι ένα κυρτό πολύγωνο (πολύεδρο) που περιβάλλεται από γραμμές (επίπεδα) τέμνοντα κάθετα τις γραμμές μεταξύ P_i , και των γειτονικών του κόμβων. Αυτή η διαίρεση του (δισδιάστατου ή τρισδιάστατου) χώρου από ένα σύνολο V_i καλείται Dirichlet tessellation. Κάθε πολύγωνο (πολύεδρο) Voronoi έχει έναν κόμβο που συνδέεται με αυτό. Μετά τη γένεση του διαγράμματος Voronoi, μπορούμε να δημιουργήσουμε τριγωνικά (τετραεδρικά, στις 3 διαστάσεις) στοιχεία συνδέοντας τα σημεία που σχετίζονται με γειτονικά πολύγωνα (πολύεδρα) Voronoi. Το σχήμα 4.4 δείχνει το διάγραμμα Voronoi και την αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay για 10 κόμβους στη δισδιάστατη περίπτωση.



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα Voronoi και η αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay.

Η τριγωνοποίηση Delaunay μπορεί να γεννηθεί απευθείας από το δεδομένο σύνολο σημείων (κόμβων) χωρίς να είναι απαραίτητο πρώτα να έχει γίνει το διάγραμμα Voronoi, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Watson για τη δισδιάστατη τριγωνοποίηση. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, ένα τρίγωνο διαμορφώνεται από τρία μη-συνευθειακά σημεία, όταν ένας κύκλος που περνάει από αυτά, ο οποίος ονομάζεται περιγεγραμμένος του τριγώνου, δεν περιλαμβάνει καθόλου άλλα σημεία. Ο αλγόριθμος υλοποιείται ως ακολούθως. Στην αρχή διαμορφώνεται ένα τρίγωνο T_0 , που περιέχει όλους τους κόμβους· μπορεί να πρέπει να εισαχθούν επιπλέον σημεία στις κορυφές του T_0 . Τότε εισάγουμε κόμβους από ένα δεδομένο σύνολο, έναν προς ένα, και βρίσκουμε εκείνα τα τρίγωνα, στο καθένα από τα οποία ο περιγεγραμμένος κύκλος περικλείει τον κόμβο. Αυτά τα πολύγωνα, που ονομάζονται τεμνόμενα πολύγωνα (intersection polygons) απαλείφονται. Στο σχήμα 4.5 (b), τα τεμνόμενα πολυώνυμα συμβολίζονται με \times , όταν ένας νέος κόμβος \odot εισάγεται στα υπάρχοντα τρίγωνα, όπως στο σχήμα 4.5 (a), που γεννώνται από τους ήδη εισαχθέντες κόμβους. Το σχήμα 4.5 (c) δείχνει το αποτέλεσμα μετά την απαλοιφή των τεμνόμενων αυτών πολυγώνων. Κατόπιν, νέα τρίγωνα διαμορφώνονται συνδέοντας το νέο κόμβο με τις κορυφές των τεμνόμενων επιπέδων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5 (d). Τελικά, τα τρίγωνα που είναι συνδεδεμένα με τα επιπλέον σημεία που διαμορφώνουν το T_0 , απαλείφονται. Αυτή η διαδικασία μπορεί εύκολα να επεκταθεί για τρισδιάστατη γένεση πλεγμάτων στοιχείων χρησιμοποιώντας περιγεγραμμένες σφαίρες από 4 κόμβους αντί περιγεγραμμένους κύκλους από 3 κόμβους. Ωστόσο, η τρισδιάστατη τριγωνοποίηση

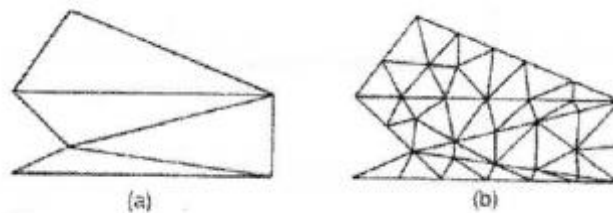
Delaunay μπορεί να περιέχει πολύ λεπτά τετράεδρα, ενώ η δισδιάστατη τριγωνοποίηση Delaunay είναι, με κάποια έννοια, η βέλτιστη τριγωνοποίηση για ένα δεδομένο σύνολο σημείων.



Σχήμα 4.5 Αλγόριθμος τριγωνοποίησης του Watson

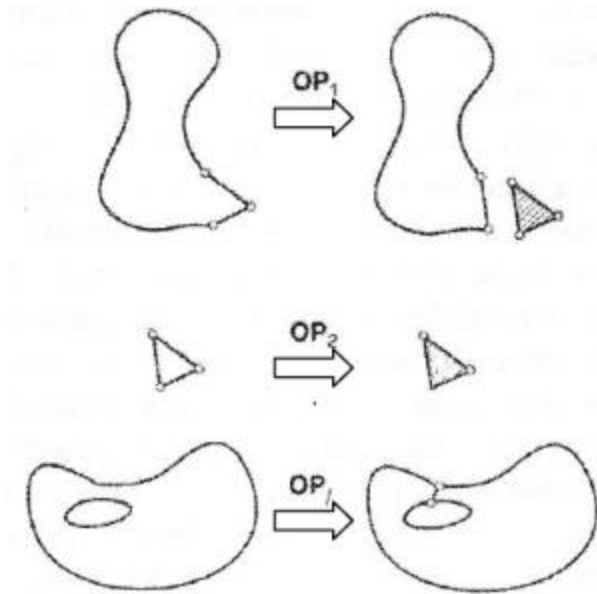
- **Μέθοδος Αποσύζευξης Τοπολογίας (T.D.A.)**

Η δισδιάστατη μέθοδος αποσύζευξης τοπολογίας (topology decomposition approach) αναπτύχθηκε από τον Wordenweber (1984). Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύγωνο και το τελευταίο κατακερματίζεται σε ένα σύνολο μεγάλων στοιχείων συνδέοντας τις κορυφές προς διαμόρφωση τριγώνων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6 (a). Κατόπιν, αυτά τα μεγάλα στοιχεία εκλεπτύνονται, ώστε να ικανοποιήσουν την απαιτούμενη πυκνότητα κατανομής πλέγματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6 (b). Το μέγεθος των στοιχείων και το σχήμα τους δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν εξωτερικά, διότι τα μεγάλα στοιχεία προσδιορίζονται μόνο τους από την αρχική τοπολογία του αντικειμένου, ιδιαίτερα από την κατανομή των κορυφών. Οι κορυφές που ανήκουν στο ίδιο μεγάλο στοιχείο μπορούν να προσδιορισθούν από τη μέθοδο τριγωνοποίησης Delaunay που περιεγράφηκε σε παραπάνω ενότητα.



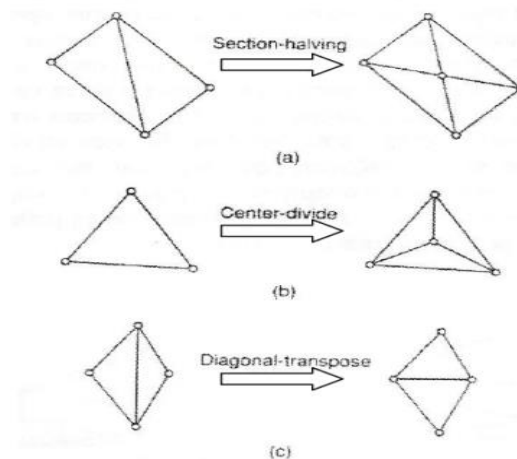
Σχήμα 4.6 Παράδειγμα μεθόδου τοπολογικής αποσύζευξης

Κατά τη διαδικασία γένεσης ενός συνόλου τριγώνων από τις κορυφές, ο Wordenweber εισήγαγε και εφάρμοσε επίσης τους λεγόμενους τελεστές Euler με τον τρόπο που αυτοί χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση όγκων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7, πρώτος εφαρμόζεται ο τελεστής Wordenweber (1984) OP₁ για να απαλείψει τις τρύπες στο αντικείμενο. Κατόπιν διαμορφώνονται τα τρίγωνα από τις κορυφές και αποχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας επαναληπτικά τον τελεστή OP₁ μέχρις ότου απομείνουν μόνο 3 κορυφές. Τελικά, εφαρμόζεται ο τελεστής OP₂ για να διαμορφώσει το τελευταίο τρίγωνο.



Σχήμα 4.7 Τελεστές που χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν τρίγωνα.

Μόλις το αντικείμενο μετατραπεί σε ένα σύνολο μεγάλων τριγώνων, κάθε τρίγωνο εκλεπτύνεται έτσι ώστε να υπακούει στην απαιτούμενη πυκνότητα πλέγματος. Για την εκλέπτυνση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τρεις μέθοδοι που δείχνουν στο σχήμα 4.8. Το σχήμα 4.8 (a) δείχνει μία μέθοδο που εφαρμόζεται όταν δύο λεπτά τρίγωνα συναντώνται κατά μήκος της μακρύτερης πλευράς τους. Δηλαδή, προστίθεται ένας κόμβος στην κοινή ακμή, και τα γειτονικά στοιχεία υποδιαιρούνται συνδέοντας τους κόμβους τους με τον νέο κόμβο. Στο σχήμα 4.8 (b), ένα μεγάλο τριγωνικό στοιχείο υποδιαιρείται προσθέτοντας ένα νέο κόμβο στο κέντρο βάρους του. Όταν το υποδιαιρέσουμε



Σχήμα 4.8 Μέθοδος εκλέπτυνσης τριγώνων

με τους τρόπους που περιγράψαμε παραπάνω, μπορεί να συναντήσουμε λεπτά τρίγωνα όπως φαίνονται σχήμα 4.8 (c). Αυτά τα τρίγωνα είναι ήδη αρκετά μικρά για τη δοθείσα πυκνότητα πλέγματος. Σε αυτή την περίπτωση, μπορούμε να βελτιώσουμε την ποιότητα του πλέγματος στρίβοντας τη διαγώνιο του

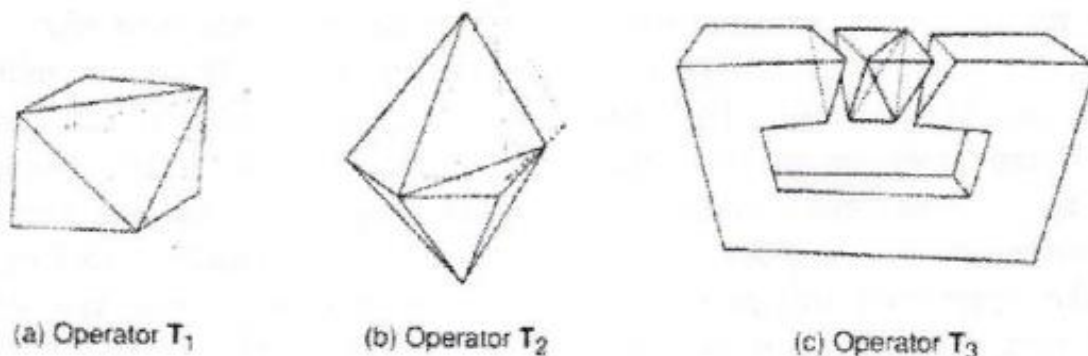
τετραπλεύρου που διαμορφώνεται από τις κορυφές των δύο αρχικών τριγώνων. Παρατηρείστε ότι το αποτέλεσμα της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να μην είναι αρκετά ακριβές εάν υπάρχουν πάρα πολλά λεπτά στοιχεία.

Η μέθοδος της τοπολογικής αποσύζευξης μπορεί να επεκταθεί στην τρισδιάστατη γένεση πλέγματος. Το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύεδρο, και το πολύεδρο κατατέμενεται σε τετραεδρικά στοιχεία συνδέοντας τις κορυφές τους. Κατόπιν, τα τετραεδρικά στοιχεία εκλεπτύνονται με υποδιαίρεση. Οι Woo και Thomas (1984) πρότειναν τελεστές παραπλήσιους με αυτούς που πρότεινε ο Wordenweber για να διευκολύνει τον σχηματισμό των τετραεδρικών στοιχείων. Αυτοί οι τελεστές, που φαίνονται στο σχήμα 4.9, χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό ως εξής:

Πρώτα, εφαρμόζεται ο τελεστής T_3 για να απαλείψει τις οπές του αντικειμένου αποτέμοντας το κατάλληλο τμήμα του έτσι ώστε η οπή να αποκαλυφθεί, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9 (c). Σημειώστε ότι σε αυτό το στάδιο τρία τετράεδρα διαμορφώνεται σαν αποτέλεσμα παράπλευρης διαδικασίας.

Κατόπιν, οι κυρτές κορυφές στις οποίες όπου συναντώνται τρεις ακμές, που καλούνται convex trivalent vertices (κορυφές) διαχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας τον τελεστή T_1 , όπως εικονίζεται στο σχήμα 4.9 (a). Αυτός ο τελεστής εφαρμόζεται επαναληπτικά μέχρις ότου δεν υπάρξει καμία κυρτή trivalent κορυφή. Εάν όλες οι κορυφές που απομένουν δεν είναι convex trivalent τότε ο τελεστής T_2 εφαρμόζεται για να σκάψει ένα τετράεδρο, όπως εικονίζεται στο σχήμα 4.9 (b). Αυτός ο τελεστής παρέχει τις νέες convex trivalent κορυφές και έτσι ο T_1 εφαρμόζεται ξανά.

Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου το αντικείμενο περιορισθεί σε ένα μόνο τετράεδρο.

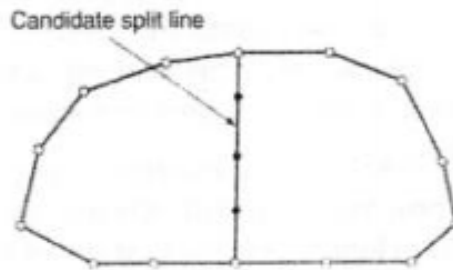


Σχήμα 4.9 Τελεστές αποσύζευξης γεωμετρίας στις 3 διαστάσεις

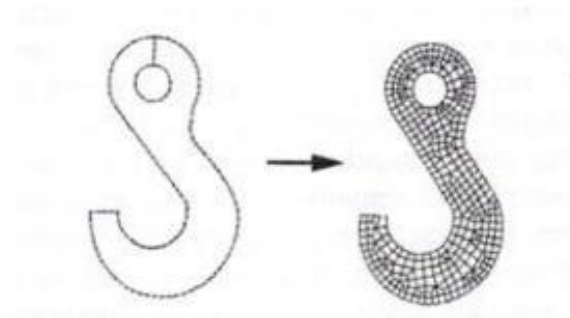
- **Μέθοδος Αποσύζευξης Γεωμετρίας (G.D.A.)**

Οι μέθοδοι αποσύζευξης γεωμετρίας (geometry decomposition approaches) εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες: σε αυτές που βασίζονται σε αναδρομές και αυτές που βασίζονται σε επαναλήψεις. Στη συνέχεια επεξηγείται μόνο η μέθοδος αναδρομής, καθώςσον αυτή είναι επεκτάσιμη στις τρεις διαστάσεις. Η μέθοδος αναδρομικής αποσύζευξης (recursive geometry decomposition method) γεννά τριγωνικά και τετρακομβικά στοιχεία στις 2 διαστάσεις με τον

ακόλουθο τρόπο. Πρώτα, το αρχικό αντικείμενο διαιρείται σε κυρτά μέρη είτε με το χέρι ή αυτόματα. Αυτόματη αποσύζευξη αντικειμένου σε κυρτά τμήματα περιγράφεται από τον Bykat (1976). Για κάθε κυρτό τμήμα, εισάγονται κόμβοι στο σύνορο του, έτσι ώστε να ικανοποιήσει την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Κατόπιν, κάθε κυρτό τμήμα υποδιαιρείται προσεγγιστικά στο μέσον του «μακρύτερου άξονα», όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10. Στη συνέχεια, εισάγονται περισσότεροι κόμβοι κατά μήκος της διαχωριστικής γραμμής σύμφωνα με τις απαιτήσεις της πυκνότητας πλέγματος και τα δύο ημίσεα υποδιαιρούνται επαναληπτικά, μέχρις ότου γίνουν τρίγωνα ή τετράπλευρα. Μερικές μέθοδοι επαναλαμβάνουν την υποδιαίρεση, μέχρις ότου καταλήξει σε εξάγωνα ή οκτάγωνα και παράγουν τριγωνικά και τετραπλευρικά στοιχεία από αυτά σύμφωνα με προαποθηκευμένα πρότυπα. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να ληφθούν περισσότερα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία. Το σχήμα 4.11 δείχνει ένα παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου.



Σχήμα 4.10 Υποδιαίρεση με διαχωριστική γραμμή (split line).



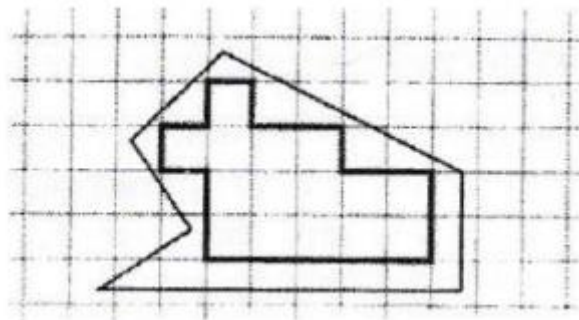
Σχήμα 4.11 Παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου.

Η βασική μέθοδος που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί να επεκταθεί και στη γένεση τρισδιάστατου πλέγματος. Σε αυτή την περίπτωση το αντικείμενο υποδιαιρείται σε δύο υπο-όγκους μέσω ενός διαχωριστικού επιπέδου, μέχρις ότου όλοι οι όγκοι περιορισθούν σε τετράεδρα. Σε αντίθεση με τη δισδιάστατη περίπτωση, όπου μπορούν να παραχθούν τετράπλευρα, δεν είναι δυνατόν να γεννηθούν τετράεδρα με απευθείας τρόπο. Ωστόσο, κάθε τετράεδρο μπορεί να υποδιαιρεθεί σε 4 εξάεδρα, ή στοιχεία brick, εάν είναι επιθυμητό.

- **Μέθοδος Βάσει Πλέγματος (G.B.A.)**

Η μέθοδος βάσει πλέγματος (grid-based approach) προκύπτει από την παρατήρηση ότι ένα grid μοιάζει με ένα πλέγμα και ότι αυτό μπορεί να μετασχηματισθεί στο τελευταίο υπό την προϋπόθεση ότι τα κελιά του grid κατά μήκος του συνόρου του αντικειμένου μπορούν να μετασχηματιστούν σε στοιχεία.

Η μέθοδος των Thacker, Gonzalez και Putland (1980) είναι ίσως η πρώτη σχετική δημοσίευση που έκανε χρήση της μεθόδου βάσει grid. Σε αυτή τη μέθοδο ένα αντικείμενο αρχικά επικαλύπτεται από ένα τριγωνικό grid και τα σημεία του grid που πέφτουν εκτός αντικειμένου εξαλείφονται, αφήνοντας ένα σύνορο μορφής zigzag. Το σημεία του grid που βρίσκονται πάνω στο zigzag σύνορο μετακινούνται προς το σύνορο του αντικειμένου, ώστε να αποτελέσουν το τελικό πλέγμα. Οι διαφοροποιήσεις αυτής έγκειται στον τρόπο διαχείρισης του συνόρου. Ο Kikuchi (1986) επέκτεινε τη μέθοδο, έτσι ώστε εκτός από κυρίως τετράπλευρα να περιλαμβάνει ακόμη και μερικά τρίγωνα, χρησιμοποιώντας ορθογωνικό grid, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12. Ένα πρόβλημα και των δύο αυτών μεθόδων είναι ότι μικρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, με πολύ μικρές ακμές σε σχέση με το βήμα του grid, χάνονται. Σε άλλες μεθόδους τα σημεία του zigzag συνόρου δε μετακινούνται στο σύνορο του αντικειμένου. Αντ' αυτού, δημιουργούνται τριγωνικά στοιχεία στην περιοχή μεταξύ zigzag και συνόρου αντικειμένου μέσω ενός αλγορίθμου τριγωνοποίησης.



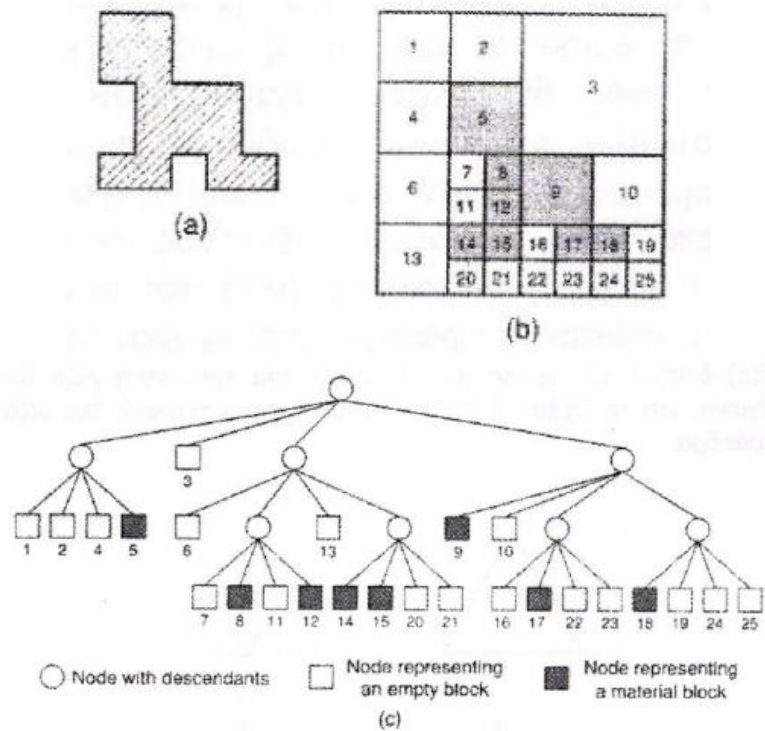
Σχήμα 4.12 Χρήση τριγωνικού grid για τη μέθοδο “grid-based”.

Οι Yerry και Shephard (1983) χρησιμοποίησαν μια δενδρική (quadree) αναπαράσταση του αντικειμένου για τη γένεση πλεγμάτων. Ένα quadree είναι το δισδιάστατο ανάλογο του octree. Παριστά ένα δισδιάστατο αντικείμενο, σαν αυτό που φαίνεται στο σχήμα 4.13 (a), σαν ένα σύνολο τετραγώνων έκαστο διαφορετικού μεγέθους με επαναληπτική υποδιαίρεση της root square που περικλείει το αντικείμενο. Το σχήμα 4.13 (b) δείχνει τη διαδικασία υποδιαίρεσης του αντικειμένου και το σχήμα 4.13 (c) δείχνει την αναπαράσταση quadree αυτής της υποδιαίρεσης. Τα πλέγματα γεννώνται ως εξής:

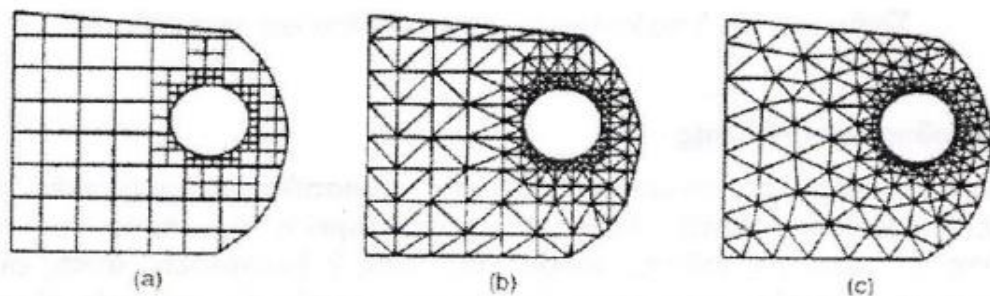
Βήμα 1ο: Δημιουργείται ένα root square που περικλείει το αντικείμενο και υποδιαιρείται σε τέσσερα τέταρτα (quadrants) υποδιπλασιάζοντας τις πλευρές του. Κατόπιν κάθε τέταρτο ταξινομείται ανάλογα με τη θέση του ως προς το αντικείμενο. Εάν το τέταρτο δεν είναι ούτε πλήρως εντός αλλά ούτε και πλήρως εκτός του αντικειμένου, τότε αυτό διαιρείται ξανά. Αυτή η

διαδικασία υποδιαίρεσης επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ικανοποιηθεί η κατανομή πυκνότητας πλέγματος και τα τέταρτα βρεθούν είτε πλήρως εντός ("completely inside") αντικειμένου ή επικαλύπτονται ("overlapping"). Έτσι, το αντικείμενο που θα παριστάνεται από τη συλλογή των πλήρως εντός και των τροποποιημένων επικαλυπτόμενων τετάρτων θα φαίνεται όπως στο σχήμα 4.14 (a).

Βήμα 2ο: Κάθε τροποποιημένα επικαλυπτόμενο τέταρτο διαιρείται μέσα στα τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιώντας το αποθηκευμένο πρότυπο (prestored template) που βασίζεται στο σχήμα του τετάρτου. Κατόπιν, το «εντελώς εντός» τέταρτο επίσης υποδιαιρείται ώστε να ικανοποιήσει την προσαρμογή του πλέγματος με τα γειτονικά πλέγματα. Δύο γειτονικά στοιχεία ονομάζονται συμβατά (conforming) εάν μοιράζονται μια πλήρη ακμή (μια ολόκληρη έδρα σε 3-D στοιχεία). Το σχήμα 4.14 (b) δείχνει το αποτέλεσμα της γενέσης πλέγματος.



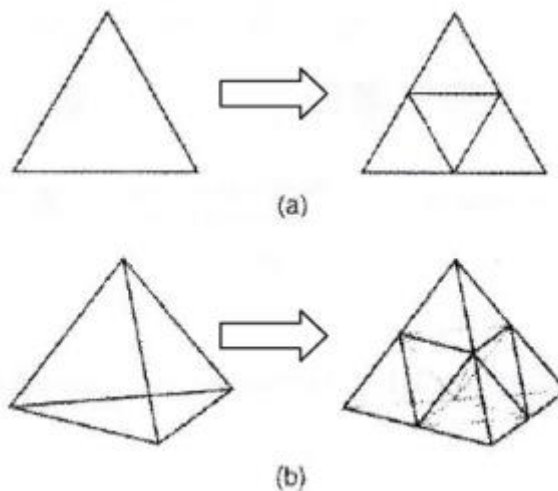
Σχήμα 4.13 Μέθοδος σύνδεσης κόμβων.



Σχήμα 4.14 Γένεση πλέγματος με χρήση παράστασης quadree.

Βήμα 3: Οι κόμβοι των στοιχείων μετακινούνται ελαφρώς (adjustment), έτσι ώστε να βελτιώσουν τα σχήματα των πλεγμάτων. Το σχήμα 4.14 (c) δείχνει το αποτέλεσμα της εξομάλυνσης του πλέγματος. Η μέθοδος εξομάλυνσης αναφέρεται αργότερα. Αυτή η μέθοδος έχει επεκταθεί και στις 3 διαστάσεις χρησιμοποιώντας κωδικοποίηση octree. Στις τρεις διαστάσεις, τα «επικαλυπτόμενα» όγδοα (octants) τροποποιούνται, έτσι ώστε να καταλαμβάνουν μόνο τον εσωτερικό χώρο του αντικειμένου και κατόπιν διασπάται σε τετράεδρα, όπως τα τροποποιημένα επικαλυπτόμενα τέταρτα διασπώνται σε τρίγωνα στις δύο διαστάσεις. Το τροποποιημένο επικαλυπτόμενο όγδοο πρέπει να διασπασθεί σε τετράεδρα που ικανοποιούν τη συμβιβαστότητα του πλέγματος με τα γειτονικά όγδοα. Θεωρώντας όλες τις ειδικές περιπτώσεις, αυτό απαιτεί ένα περίπλοκο αλγόριθμο. Πράγματι, ούτε και η διάσπαση του τροποποιημένου τετάρτου στις δύο διαστάσεις είναι εύκολο πρόβλημα.

Οι Jung και Lee (1993) πρότειναν μια νέα μέθοδο, αρχίζοντας από τη τριγωνική ρίζα (τετράεδρη ρίζα στις 3 διαστάσεις) αντί της τετραγωνικής ρίζας (κυβικής ρίζας) για να αποφύγουν τη δυσκολία που μόλις αναφέραμε. Σε αυτή τη μέθοδο, η παράσταση quadree ενός δισδιάστατου αντικειμένου είναι η προσέγγιση του αντικειμένου σαν σύνολο τριγώνων. Παρόμοια, η αναπαράσταση octree ενός τρισδιάστατου αντικειμένου θα ήταν ένα σύνολο τετραέδρων. Έτσι μπορούμε να λάβουμε τα πλέγματα συλλέγοντας τα «εντελώς εντός» και «επικαλυπτόμενα» τρίγωνα (τετράεδρα στις τρεις διαστάσεις) μετά από μετακίνηση των κορυφών των «επικαλυπτόμενων» τριγώνων (τετράεδρα) στο αρχικό σύνορο του αντικειμένου. Το σχήμα 4.15 (a) δείχνει τον τρόπο με τον οποίο μια τριγωνική ρίζα διασπάται σε τέσσερα τρίγωνα, και το σχήμα 4.15 (b) δείχνει πως μια τετραεδρική ρίζα διασπάται σε οκτώ τετράεδρα.



Σχήμα 4.15 Υπό διαίρεση του τριγώνου και τετραέδρου.

Μέθοδος Απεικόνισης

Η μέθοδος απεικόνισης χρησιμοποιείται στις περισσότερες εμπορικές γεννήτριες πλέγματος. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την υποδιαίρεση του προς διακριτοποίηση αντικειμένου σε περιοχές ειδικής τοπολογίας. Στις 2

διαστάσεις, αυτές οι περιοχές είναι μορφής «κουτιού» (boxlike). Μετά σε κάθε περιοχή, το πλέγμα παράγεται αυτόματα με απεικόνιση της περιοχής προς ένα κανονικοποιημένο χωρίο αναφοράς (ένα κανονικό τρίγωνο ή τετράπλευρο στις δύο διαστάσεις και ένα κύβο στις τρεις διαστάσεις), δημιουργώντας διακριτοποίηση στο κανονικοποιημένο χωρίο με βάση την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος, και επαναπεικόνιση του διακριτοποιημένου χωρίου προς την αρχική περιοχή του πραγματικού αντικειμένου. Κατόπιν, το τελικό πλέγμα προκύπτει από συνένωση των περιοχών που διακριτοποιήθηκαν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Οι κοινές πλευρές που μοιράζονται σε γειτονικές περιοχές πρέπει να έχουν τον ίδιο αριθμό έτσι ώστε να ικανοποιούν το συμβιβαστό του πλέγματος (mesh conformity). Η απαίτηση αυτή μπορεί να επιβληθεί με επέμβαση του χρήστη ή αλγοριθμικά την ώρα που παράγονται τα πλέγματα γειτονικών περιοχών. Πολλές μέθοδοι απεικόνισης μπορούν να εφαρμοσθούν.

Βελτίωση Ποιότητας πλέγματος

Μερικές μέθοδοι γένεσης πλέγματος, κυρίως εκείνες που βασίζονται στην προσέγγιση κατακερματισμού της τοπολογίας, δεν παράγουν αρχικό πλέγμα για την περαιτέρω ανάλυση. Έτσι, πρέπει να ακολουθήσουμε μια πορεία τριών βημάτων ώστε να το βελτιώσουμε:

- Εάν τα στοιχεία που παράγονται δεν είναι του επιθυμητού τύπου, τότε τα υποδιαιρούμε στον επιθυμητό τύπο.
- Εάν τα στοιχεία δεν έχουν μεγέθη συμβατά με την επιθυμητή κατανομή πυκνότητας πλέγματος, τότε τα εκλεπτύνουμε.
- Εάν τα στοιχεία δεν είναι καλοσχηματισμένα, τότε εφαρμόζουμε μια τεχνική εξομάλυνσης (smoothing technique).

4.6. Είδη ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Οι δυνατότητες των πακέτων πεπερασμένων στοιχείων είναι πολλές. Εκτός από τις τετριμμένες ελαστικές αναλύσεις, σε πολλά από αυτά τα πακέτα υπάρχουν δυνατότητες επίλυσης ποικίλων άλλων προβλημάτων σε μεγάλο τμήμα των εξισώσεων που διέπουν τα φυσικά φαινόμενα: θερμικά, ακουστικά, ηλεκτρικά, μαγνητικά (δινορεύματα: eddycurrent), ηλεκτρομαγνητικά, υδροδυναμικά, ρευστομηχανικά, περιγραφής διάβρωσης υλικών, κλπ. Το σύνολο αυτό των δυνατοτήτων συνήθως αποδίδεται με τον όρο “MultiPhysics”, δηλαδή επίλυση των ποικίλων εξισώσεων της Φυσικής.

- **Καθορισμός του Είδους Ανάλυσης**

Παρόλο που δεν είναι δυνατόν να κωδικοποιηθεί ο τρόπος ανάλυσης, στη συνέχεια θα δοθούν κάποιες γενικές κατευθύνσεις. Η αρχική επιλογή είναι ο καθορισμός του φυσικού φαινομένου, το οποίο καλείται ο μελετητής να προσομοιώσει. Για παράδειγμα, ελαστική ανάλυση (elastic analysis) ή πρόβλημα δυναμικού (potential problem). Τα προβλήματα δυναμικού αφορούν την επίλυση των εξισώσεων Laplace και Poisson που διέπουν τη μηχανική ατρίβους ρευστού, μετάδοση θερμότητας, κοκ. Μια δεύτερη επιλογή που καλείται να κάνει ο μελετητής είναι ο καθορισμός του προβλήματος ως: Στατικό πρόβλημα (static analysis), δηλαδή μη-εξαρτημένο από το χρόνο, ή Δυναμικό πρόβλημα (dynamic analysis), δηλαδή χρονικά

εξαρτώμενο. Παραδείγματα είναι η ταλάντωση μιας μηχανής, ο ερπυσμός και η χαλάρωση, η διάδοση ήχου στον αέρα ή σε άλλο μέσον, κλπ. Μια άλλη κατάταξη αφορά στο εάν το πρόβλημα είναι γραμμικό (linear) ή μη γραμμικό (nonlinear).

Γραμμικό λέγεται ένα πρόβλημα στο οποίο, εάν διπλασιασθεί το μέγεθος των εξωτερικών δράσεων (π.χ. δυνάμεων), τότε διπλασιάζεται το μέγεθος του αποτελέσματος (π.χ. μετατοπίσεων). Τα περισσότερα προβλήματα της πράξης είναι (ή μάλλον θεωρούνται) γραμμικά.

Μη γραμμικό λέγεται ένα πρόβλημα, στο οποίο δεν ισχύει η αναλογία που αναφέρθηκε προηγουμένα. Σε «ελαστικά» προβλήματα η μη-γραμμικότητα μπορεί να οφείλεται στο ελαστοπλαστικό υλικό (material nonlinearity) ή στην μεταβαλλόμενη επαφή μεταξύ δύο ή περισσότερων σωμάτων (geometrical nonlinearity). Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, το μητρώο δυσκαμψίας δεν είναι σταθερό αλλά είναι συνάρτηση των μετατοπίσεων. Μη-γραμμικότητες υπάρχουν και σε προβλήματα δυναμικού, π.χ. όταν ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας.

- **Στάδια Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων**

Για τη μοντελοποίηση μιας κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία διακρίνονται τα ακόλουθα στάδια:

1ο Στάδιο: Κατασκευή της γεωμετρίας.

2ο Στάδιο: Επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων και διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία.

3ο Στάδιο: Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών (μπορεί να γίνει και σε προηγούμενο στάδιο) και επιβολή των οριακών συνθηκών.

4ο Στάδιο: Επιλογή του τρόπου επίλυσης (γραμμικό – μη γραμμικό μεταβατικό – υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων κ.α.) και επίλυση.

5ο Στάδιο: Ανάγνωση των αποτελεσμάτων και γραφική αναπαράστασή τους.

- **Είδος Πεπερασμένων Στοιχείων**

Τα βασικά πεπερασμένα στοιχεία είναι:

- Ράβδος (2 κόμβοι)
- Σύρμα – σχοινί
- Δοκός (2 κόμβοι)
- Επίπεδη εντατική καταπόνηση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρικό με αξονοσυμμετρική φόρτιση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρικό με τυχαία φόρτιση (που αναλύεται σε αρμονικές)
- Πλάκα (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Μembrάνη
- Κέλυφος
- Ορθοτροπικό – πολυστρωματικό υλικό
- Τετράεδρο (3 κόμβοι)
- Πρίσμα (π.χ. 6 κόμβοι)
- Εξάεδρο (8 κόμβοι)

Ανάλογα με το είδος του προβλήματος, το πλήθος των βαθμών ελευθερίας ανά κόμβο ποικίλλει.

4.7. Το λογισμικό SolidWorks



Σχήμα 4.16 Λογότυπο του λογισμικού SolidWorks

Όλα ξεκίνησαν το 1993 όταν ο Jon Hirschtick, κάτοχος SB and SM Μηχανολόγων Μηχανικών του MIT, διευθυντής μηχανικών της Computervision (Computer Aided Design and Manufacturing, εταιρεία σχεδίασης και κατασκευής με τη βοήθεια υπολογιστών) και μέλος του MIT Blackjack Team (μιας ομάδας φοιτητών/πρώην φοιτητών του Ινστιτούτου Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης και του πανεπιστημίου Χάρβαρντ, που χρησιμοποίησαν τεχνικές καταμέτρησης καρτών και πιο εξελιγμένες στρατηγικές για να κερδίσουν χαρτοπαικτικές λέσχες στο Blackjack παγκοσμίως) αποφάσισε να διαθέσει τα κέρδη του, ύψους 1 εκατομμυρίου, προκειμένου να ιδρύσει την εταιρεία SolidWorks corporation.

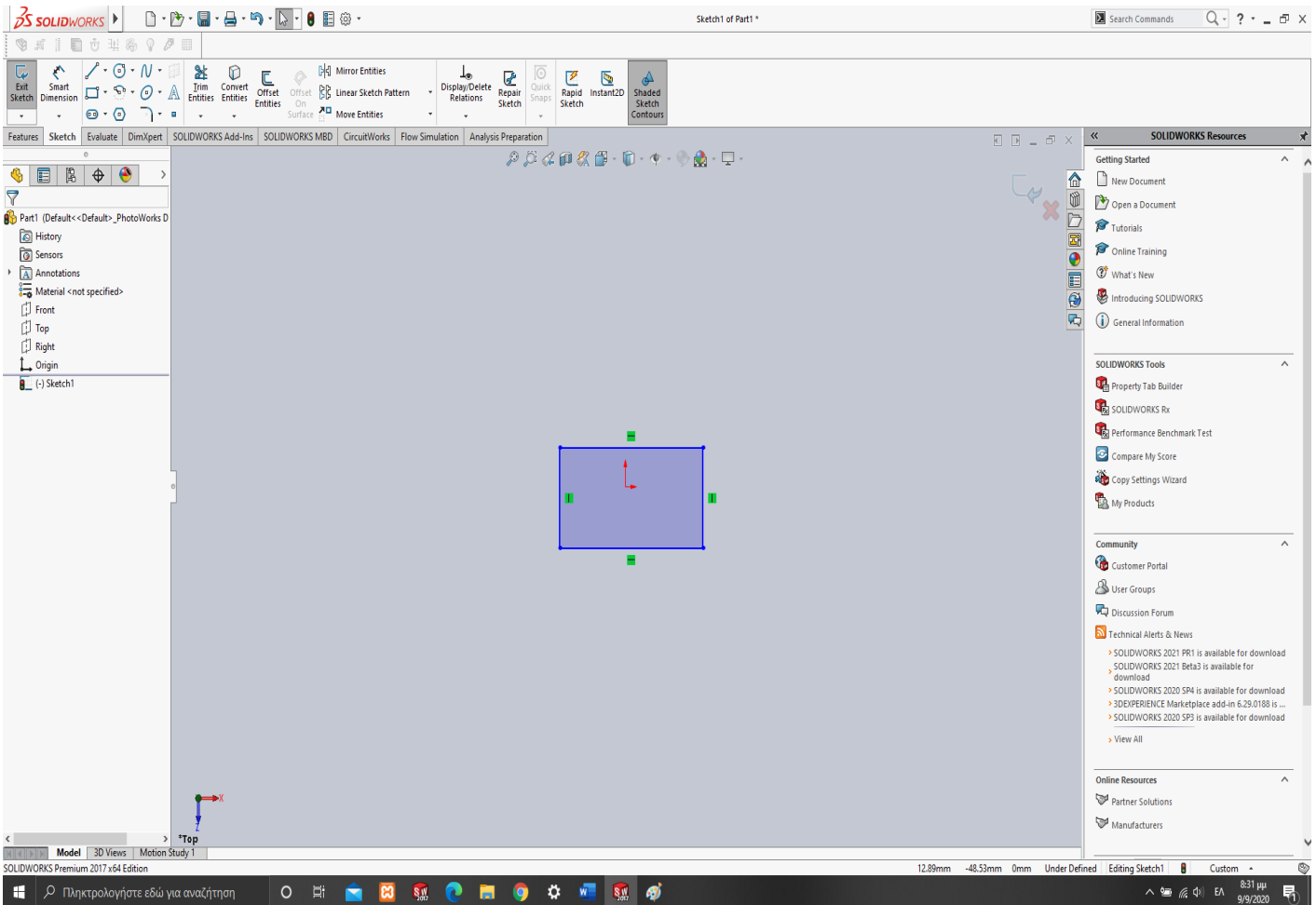
Ο Hirschtick προσέλαβε ομάδες μηχανικών με κύριο σκοπό τους να δημιουργήσουν ένα 3D CAD λογισμικό, που θα ήταν εύκολο στη χρήση, προσιτό και διαθέσιμο σε περιβάλλον Windows. Το Νοέμβριο του 1995 κυκλοφόρησε το πρώτο προϊόν της εταιρείας, SolidWorks 95, ενώ το 1997 η εταιρεία πέρασε στα χέρια της Dassault Systèmes S.A. έναντι του ποσού 310 εκατομμυρίων δολαρίων. Ο Jon Hirschtick παρέμεινε στο ρόλο του διευθυντή της εταιρείας και κατάφερε να ανεβάσει την αξία της κατά 100 εκατομμύρια δολάρια. Σήμερα η εταιρεία βγάζει κατά μέσο όρο πάνω από 500 εκατομμύρια δολάρια το χρόνο έχοντας χτίσει ένα κοινό 3.600.000 χρήστες σε 240.010 τοποθεσίες και 80 χώρες, ενώ ταυτόχρονα πάνω από 2 εκατομμύρια φοιτητές κάθε χρόνο αποφοιτούν με εξειδικευμένες γνώσεις πάνω στο SolidWorks.

Το λογισμικό SolidWorks είναι ένα φιλικό προς τον χρήστη λογισμικό μοντελοποίησης στερεών στοιχείων που χρησιμοποιεί μια παραμετρική προσέγγιση βασισμένη σε χαρακτηριστικά που αρχικά αναπτύχθηκαν από την PTC. Κύριος στόχος του είναι να κάνει τη σχεδίαση 3D CAD (Computer-Aided Design, Σχεδίαση-υποβοηθούμενη από υπολογιστή) μοντέλων πιο προσιτή. Με τη βοήθεια του SolidWorks μπορεί οποιοσδήποτε μηχανικός (χωρίς απαραίτητα να έχει υψηλό επίπεδο σπουδών πάνω στα πεπερασμένα στοιχεία) να σχεδιάσει και να προσομοιώσει μοντέλα παντός τύπου. Το μόνο που έχει να κάνει είναι να εισάγει μέσα από μια πληθώρα επιλογών στο λογισμικό, τις κατάλληλες παραμέτρους που θα καθορίσουν το είδος των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, το σχήμα και τις διαστάσεις τους. Από τα προαναφερόμενα μπορούμε να συμπεράνουμε πως η διαδικασία μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων έχει απλοποιηθεί αρκετά σε σχέση με το παρελθόν. Πριν από μερικά μόλις χρόνια μια τέτοια μελέτη απαιτούσε σπουδές υψηλού επιπέδου πάνω στα πεπερασμένα στοιχεία ενώ ταυτόχρονα το κόστος για τις εταιρείες ήταν τεράστιο, καθώς δεν υπήρχε η δυνατότητα προσομοίωσης των στοιχείων σε ακραίες συνθήκες. Η έρευνα γινόταν εξολοκλήρου κατευθείαν σε περιβάλλον εργασίας.

Αυτός είναι και ο λόγος που αποτελεί το νούμερο λογισμικό σχεδίασης πεπερασμένων στοιχείων. Για να καταλάβει κανείς το μέγεθος συμβολής του SolidWorks στην αγορά κατασκευής, αρκεί να αναλογιστεί πως μέσα σε μόλις 2 χρόνια κατάφερε να «εισβάλει» στις περισσότερες εταιρείες σχεδιασμού και να γίνει η νούμερο ένα επιλογή των μηχανικών, οι οποίοι άρχισαν για πρώτη φορά στην ιστορία να επωφελούνται από το 3D CAD.

4.7. Περιβάλλον και χρήση του λογισμικού SolidWorks

Το διαισθητικό περιβάλλον του SolidWorks και οι δυνατότητες προσαρμογής του στις ανάγκες και τις συνθήκες στο σχεδιασμό και στην μελέτη, εξασφαλίζουν τη χρήση του κατάλληλου εργαλείου την κατάλληλη στιγμή. Το SolidWorks 3D Design είναι σχεδιασμένο για να κάνει άμεσα παραγωγικό τον εκάστοτε σχεδιαστή και να μπορεί να το εξατομικεύει ανάλογα με την εμπειρία και το τομέα εξειδίκευσης. Τα εργαλεία που διαθέτει, οι βοηθοί και οι διαγνωστικές διεργασίες μειώνουν την πολυπλοκότητα του τρισδιάστατου παραμετρικού σχεδιασμού CAD. Τα πανίσχυρα εργαλεία μοντελοποίησης δημιουργούν εύκολα πολύπλοκες μορφές διευκολύνοντας την εργασία του χρήστη.



Σχήμα 4.17 Περιβάλλον του λογισμικού SolidWorks.

Ισχυρή Μοντελοποίηση SOLIDWORKS

Με δυνατότητες μοντελοποίησης του πιο απλού πρισματικού αντικειμένου έως και τις πιο πολύπλοκες γεωμετρίες, το SOLIDWORKS επιταχύνει με κατάλληλα εργαλεία τη διαδικασία σχεδίασης και διαχειρίζεται άψογα τις διάφορες παραλλαγές σχεδιασμού.

Μεγάλες Κατασκευές SOLIDWORKS

Οι αυτόματες μηχανολογικές βιβλιοθήκες SOLIDWORKS, η εύκολη ομαδοποίηση και αναζήτηση τεμαχίων, η μμιούμενη την πραγματικότητα συναρμολόγηση, η προσομοίωση κίνησης, ο

έλεγχος λειτουργικότητας μίας κατασκευής και άλλα πολλά εργαλεία SOLIDWORKS κάνουν το σχεδιασμό αποτελεσματικό και αποδοτικό.

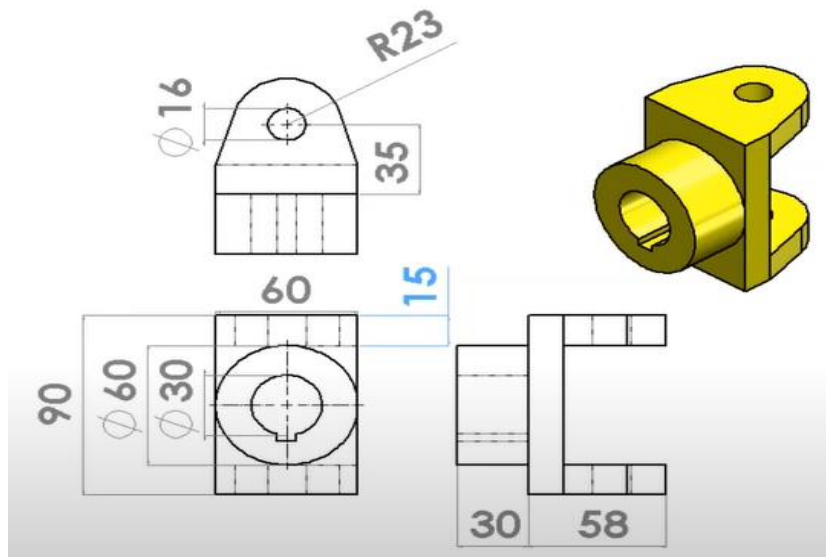
Έξυπνη σχεδίαση 2 διαστάσεων: Το δισδιάστατο σχέδιο είναι η ραχοκοκαλιά της τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Οι κατανοητές σχέσεις και οι αυτοματισμοί του SOLIDWORKS Sketching επιτρέπουν την αποτύπωση κανόνων και στόχων στο σχέδιο απλοποιώντας την οποιαδήποτε αλλαγή, προσαρμόζοντας το σχέδιο κατάλληλα και διορθώνοντας αυτόματα τυχόν προβλήματα.

- **Ασυναγώνιστη δημιουργία σχεδίων:** Τα σχέδιά σας αποτελούν σημαντικό κομμάτι του τρόπου με τον οποίο επικοινωνείτε με τους κατασκευαστές και το λογισμικό SOLIDWORKS σας παρέχει τα εργαλεία, ώστε να δημιουργήσετε απόλυτα κατανοητά σχέδια. Τα δισδιάστατα σχέδια (SOLIDWORKS 2D design) συνδέονται αυτόματα με το αντίστοιχο 3D μοντέλο σας. Όταν τροποποιείται το τρισδιάστατο μοντέλο (SOLIDWORKS 3D design), τότε το αντίστοιχο 2D σχέδιο ενημερώνεται αυτόματα, εξασφαλίζοντας ότι κάθε άποψη του σχεδίου σας θα είναι ενημερωμένη και το σχέδιο είναι υπό κλίμακα. Μπορείτε εύκολα να δημιουργείτε και να τοποθετείτε απόψεις με μερικά μόνο κλικ. Ευφυή εργαλεία SOLIDWORKS τοποθετούν αυτόματα διαστάσεις των εξαρτημάτων διασφαλίζοντας ότι τα σχέδιά σας περιέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες που απαιτούνται για να υλοποιηθούν στην παραγωγή. Τυποποιημένα πρότυπα και αυτοματοποιημένοι έλεγχοι, βοηθούν στον εξορθολογισμό απλών καθημερινών εργασιών επικύρωσης σχεδίων. Το πρόγραμμα αυτοματοποιεί τη δημιουργία Πίνακα – Λίστας Υλικών (BOM), σημειώσεων και σχολίων και διαθέτει εξειδικευμένα εργαλεία για διαστασιολόγηση και τοποθέτηση ανοχών. Πλέον μπορείτε να διαθέσετε περισσότερο χρόνο επί του σχεδίου και λιγότερο για τον έλεγχό του.
- **Προσομοίωση – Simulation FEA και βελτιστοποίηση κατασκευών – optimization:** Η απόλυτη συνεργασία μεταξύ SOLIDWORKS 3D CAD και προσομοίωσης σε πολλές ειδικότητες σας επιτρέπει να δοκιμάζετε κάθε σχεδιαστική αλλαγή, ερευνώντας τον αντίκτυπο της επίδοσης του προϊόντος σε πραγματικές συνθήκες. Το SOLIDWORKS είναι αρκετά διαισθητικό για τον απλό χρήστη, αλλά και αρκετά ισχυρό για να περατώσει προχωρημένες αναλύσεις. Με τη χρήση προσομοίωσης καθ' όλη τη σχεδιαστική διαδικασία, αναγνωρίζονται και προλαμβάνονται σφάλματα όταν ακόμα είναι ανέξοδη η αντιμετώπισή τους.

4.8. Εισαγωγή στο λογισμικό SolidWorks με σχεδίαση ενός βραχίονα

Η σχεδίαση και υλοποίηση ενός πολύπλοκου μοντέλου 3D ξεκινάει πάντα από ένα δισδιάστατο σχέδιο με τις κατάλληλες παραμέτρους. Το λογισμικό SolidWorks δίνει την δυνατότητα ξεκινώντας από ένα απλό σχέδιο δυο διαστάσεων να προχωράει ο χρήστης βήμα - βήμα σε ένα 3D μοντέλο, και ενώ έχει περάσει στο 3D μοντέλο να σχεδιάζει επάνω σε αυτό σε δύο διαστάσεις και να προχωράει κατά αυτόν τον τρόπο το σχέδιο και το μοντέλο 3D. Σε αυτό το μέρος θα αναλυθεί από την αρχή το σχέδιο και η τελική υλοποίηση ενός αρθρωτού συστήματος κίνησης για την κατανόηση της λειτουργίας του προγράμματος καθώς και για την επίδειξη των δυνατοτήτων του.

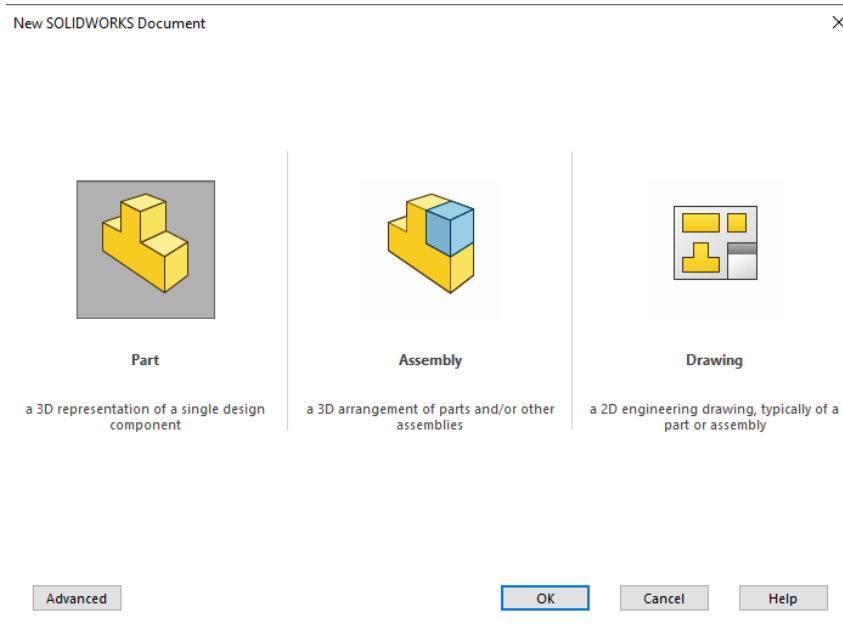
Ξεκινώντας την σχεδίαση του αρθρωτού συστήματος κίνησης, το βασικό εξάρτημα όπως φαίνεται στο αρχικό σχέδιο (σχήμα 4.18) είναι ο βραχίονας, ο οποίος εμπεριέχεται στο τελικό μοντέλο δύο φορές και είναι αυτός που δίνει την δυνατότητα να κινείται το μοντέλο προς διαφορετικές κατεύθυνσης.



Σχήμα 4.18 Σχέδιο βραχίονα μετάδοσης κίνησης.

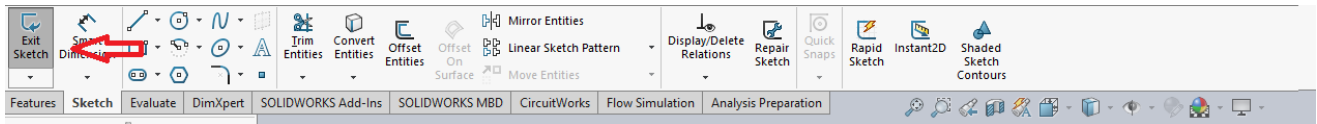
Αρχικά το λογισμικό SolidWorks δίνει 3 επιλογές ως προς το είδος του αρχείου που θα δημιουργηθεί όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.19, αυτές οι επιλογές είναι οι εξής:

1. Part: Δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει ένα σχέδιο.
2. Assembly: Δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει ένα μοντέλο αποτελούμενο από πολλά κομμάτια.
3. Drawing: Δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει ένα τεχνικό σχέδιο δύο διαστάσεων.



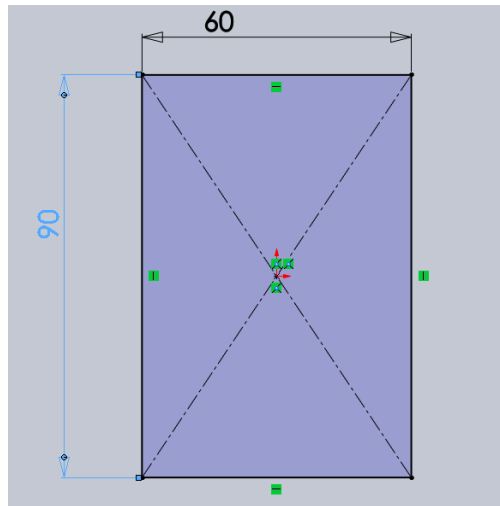
Σχήμα 4.19 Αρχικές επιλογές σχεδίασης του λογισμικού SolidWorks.

Για την σχεδίαση του αρθρωτού συστήματος κίνησης γίνεται η πρώτη επιλογή, το part, και εν συνεχεία από την γραμμή εργαλείων (σχήμα 4.20) και την επιλογή του **sketch** ξεκινάει βήμα – βήμα η σχεδίαση του εξαρτήματος.



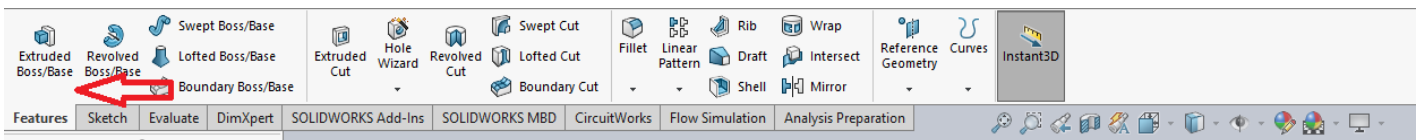
Σχήμα 4.20 Γραμμή εργαλείων του λογισμικού SolidWorks.

Τα βήματα και οι ενέργειες μέχρι ο βραχίονα να πάρει την τελική του μορφή είναι αρκετά. Το σχέδιο ξεκινάει από ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο διαστάσεων 60mm * 90mm (σχήμα 4.21).

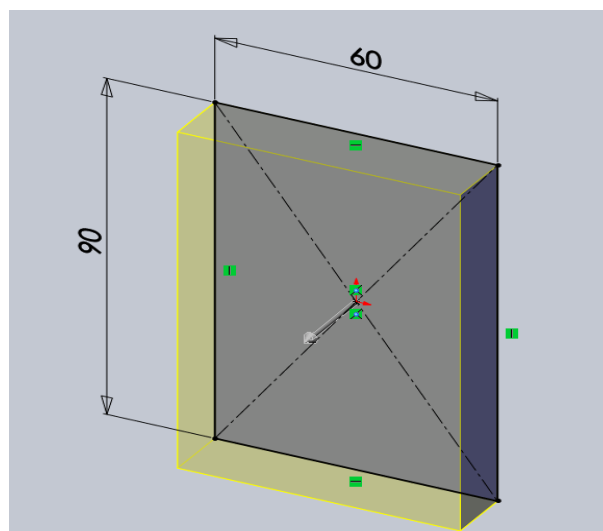


Σχήμα 4.21 Ορθογώνιο παραλληλόγραμμο – αρχή του σχεδίου.

Στην συνέχεια από την γραμμή εργαλείων και από το μενού **Features** επιλέγετε **Extruded Boss/Base**. (σχήμα 4.22) Αυτή η επιλογή δίνει την δυνατότητα να 'φουσκώσει' το ορθογώνιο (σχήμα 4.23).

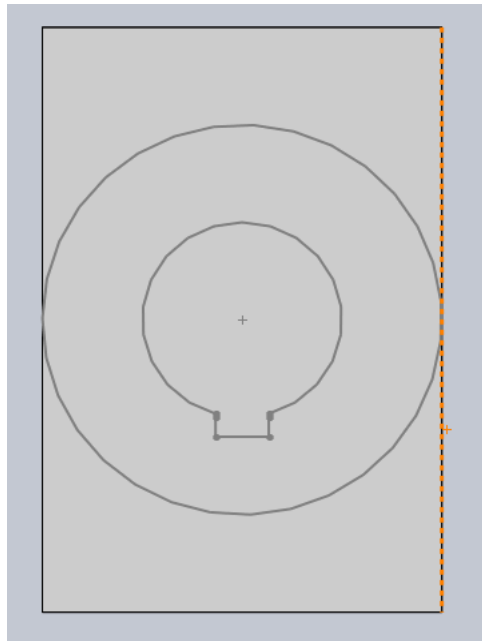


Σχήμα 4.22 Γραμμή εργαλείων του λογισμικού SolidWorks.



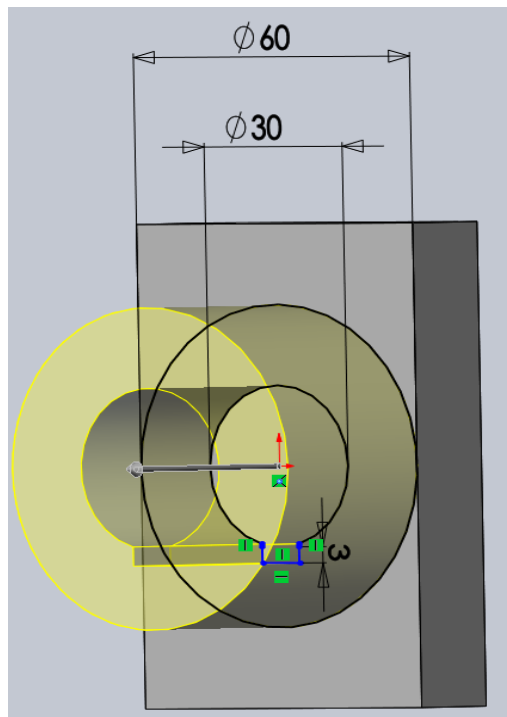
Σχήμα 4.23 Extruded Boss/Base στο ορθογώνιο.

Στην συνέχεια επιλέγετε το μενού **sketch** και **Top plane** για να σχεδιαστεί επάνω στο ορθογώνιο μια δακτύλιος με ένα διακεκομμένο τμήμα (σχήμα 4.24).



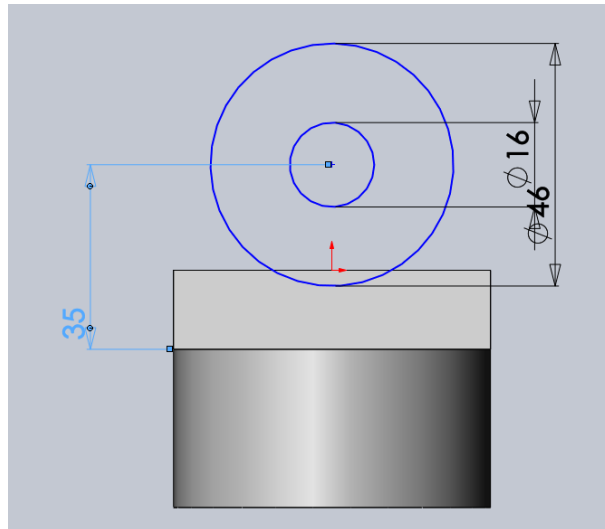
Σχήμα 4.24 Δακτύλιος.

Επιλέγετε και πάλι **Extruded Boss/Base** από το μενού **Features** έτσι ώστε να φουσκώσει η δακτύλιος (σχήμα 4.25).

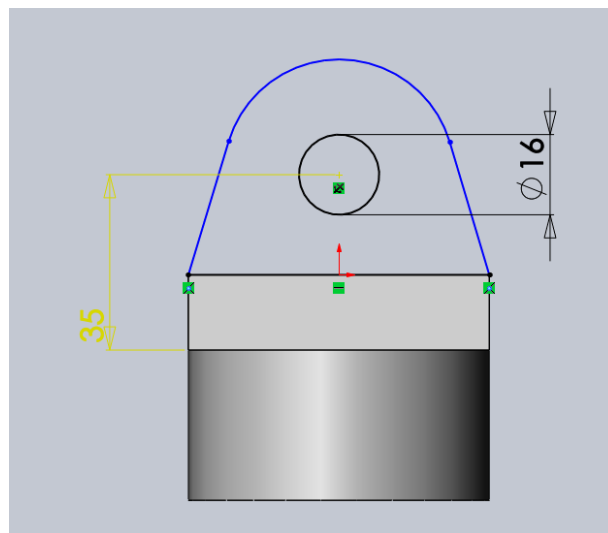


Σχήμα 4.25. Δακτύλιος φουσκωμένη.

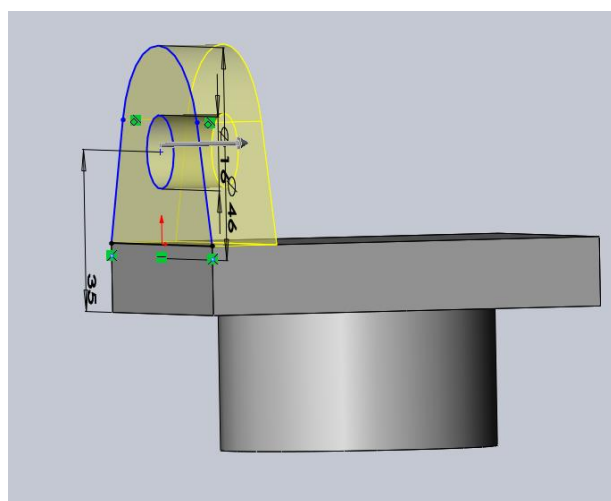
Στο σημείο αυτό επιλέγεται να σχεδιαστεί ένα **sketch** στην επάνω πλευρά του ορθογώνιου (σχήμα 4.26) για να δημιουργηθεί τελικά ο βραχίονας σε 3 βήματα τα οποία φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 4.26 Βήμα 1^ο.

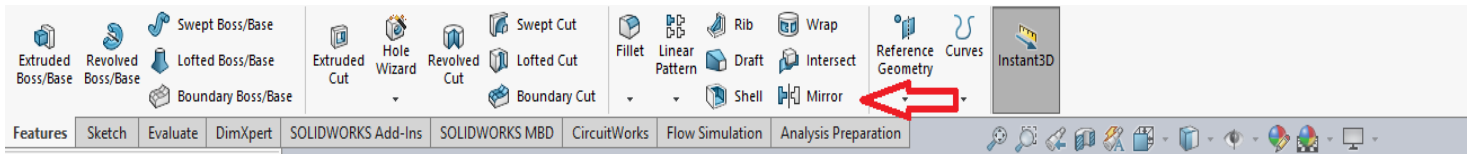


Σχήμα 4.27 Βήμα 2^ο.

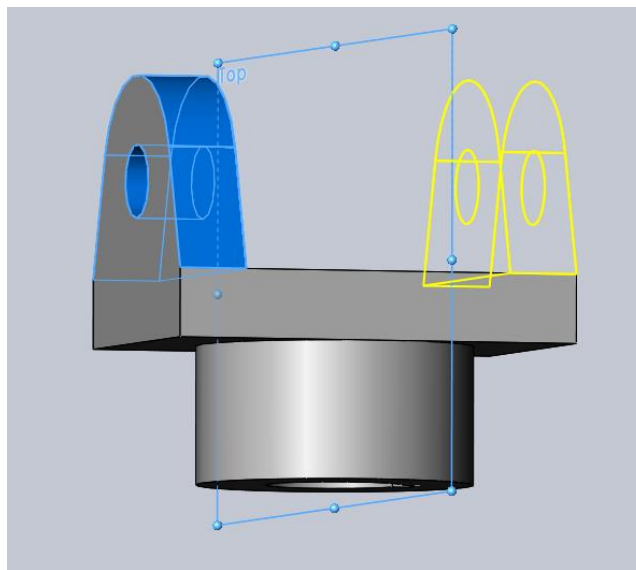


Σχήμα 4.28 Βήμα 3^ο.

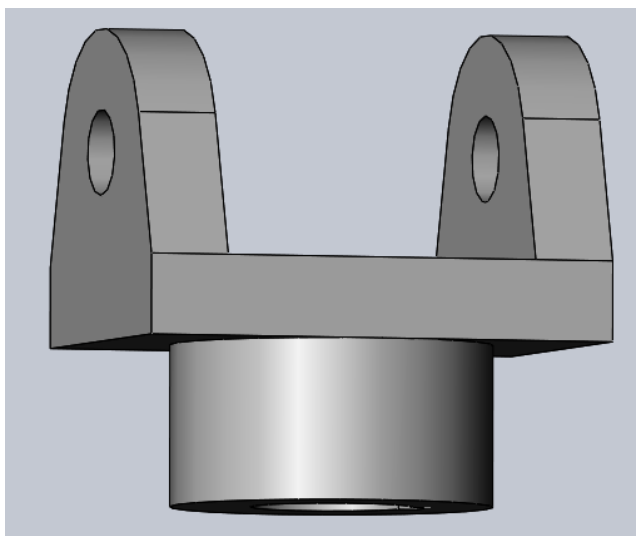
Η τελική μορφή του βραχίονα είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 4.31 Το λογισμικό SolidWorks έχει πολλά εργαλεία και επιλογές για να διευκολύνει τον χρήστη κατά την σχεδίαση, και να μειώνεται τελικά ο χρόνος εργασίας για την δημιουργία ενός εξαρτήματος, μια σχετική επιλογή είναι το **Mirror** (σχήμα 4.29, 4.30), μια επιλογή η οποία δίνει την δυνατότητα να δημιουργηθεί ένα είδωλο ενός σχεδίου από την απέναντι πλευρά, παίρνοντας ως βάση μια διάσταση, χωρίς να χρειάζεται ο χρήστης να σχεδιάζει το ίδιο σχέδιο δύο φορές.



Σχήμα 4.29 Επιλογή **Mirror**.

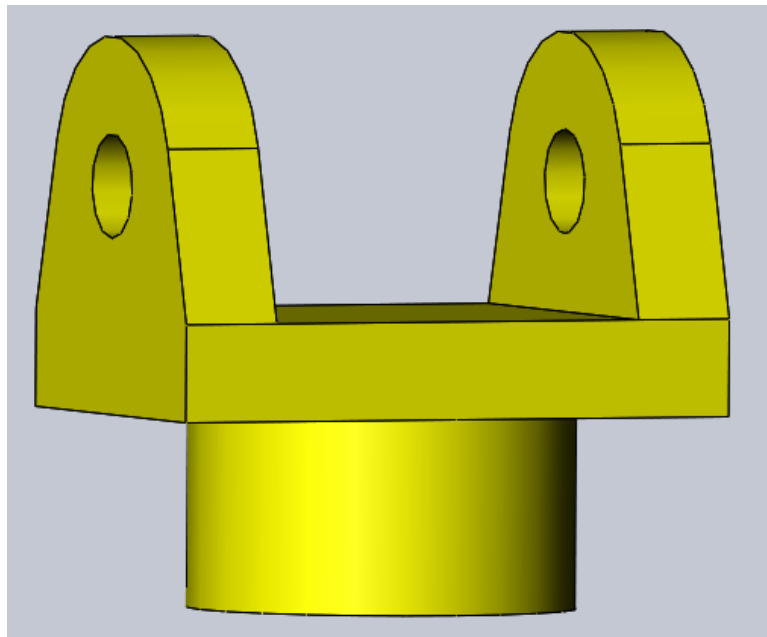


Σχήμα 4.30 Επιλογή **Mirror**.



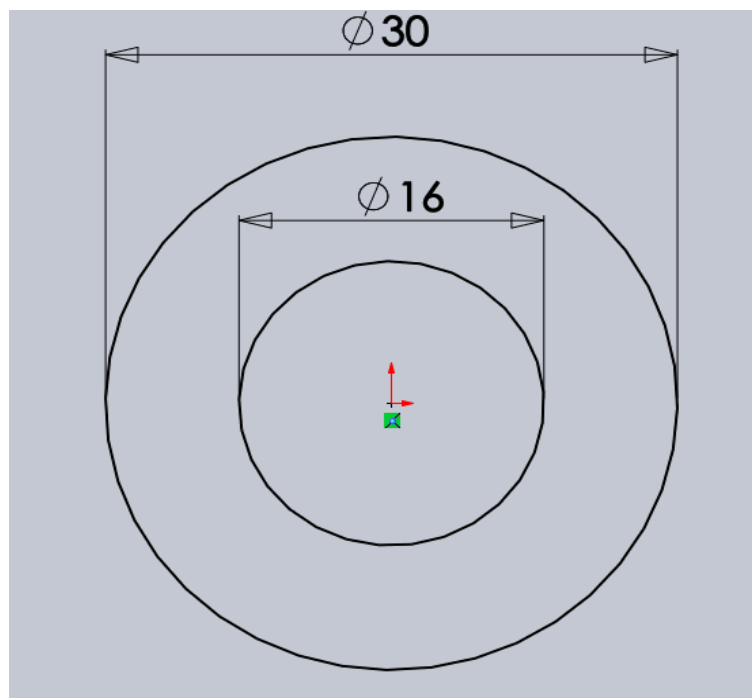
Σχήμα 4.31 Τελική μορφή του βραχίονα.

Το λογισμικό δίνει την δυνατότητα να χρωματιστούν τα διάφορα αντικείμενα – μοντέλα 3D έτσι ώστε να γίνονται διακριτά στην τελική τους μορφή όταν αυτά συναρμολογήσουν, έτσι το συγκεκριμένο εξάρτημα χρωματίζεται κίτρινο (σχήμα 4.32).



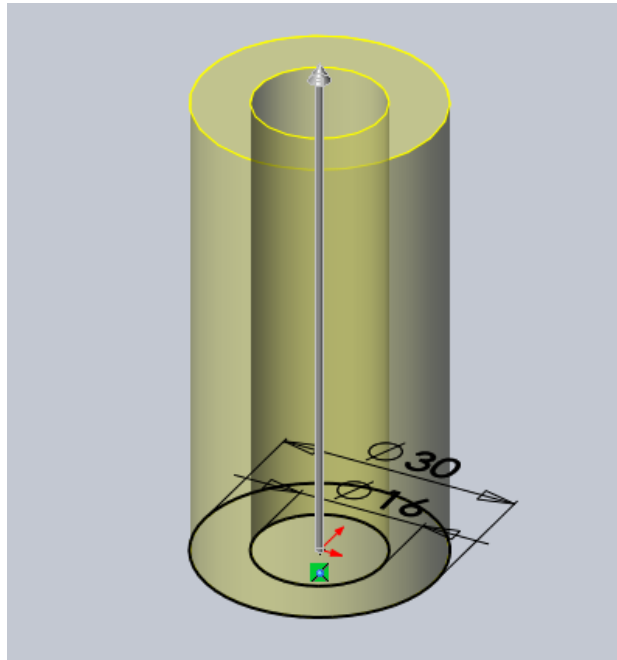
Σχήμα 4.32 Χρωματισμένος βραχίονας.

Στην συνέχεια σε πέντε βήματα θα σχεδιαστεί το ενδιάμεσο εξάρτημα οπου συνδέει τους δύο βραχίονες μεταξύ τους και έχει την δυνατότητα να δίνει σε αυτούς τον βαθμό ελευθερίας.

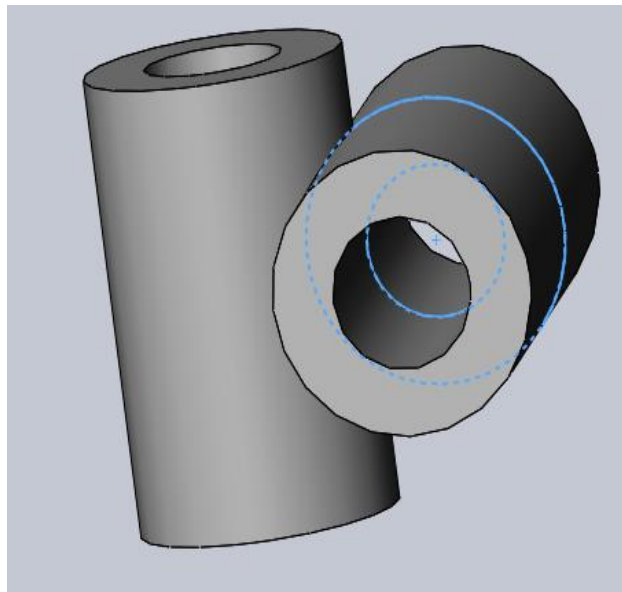


σχήμα 4.33 Βήμα 1^ο.

Με την επιλογή του **Extruded Boss/Ba.se** από το μενού **Features** δημιουργείται μια δοκός με κέντρο συμμετρίας το μέσο της δοκού (σχήμα 4.35).

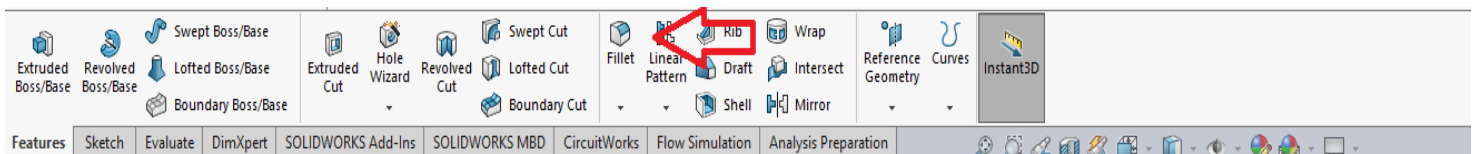


Σχήμα 4.34 Βήμα 2°.

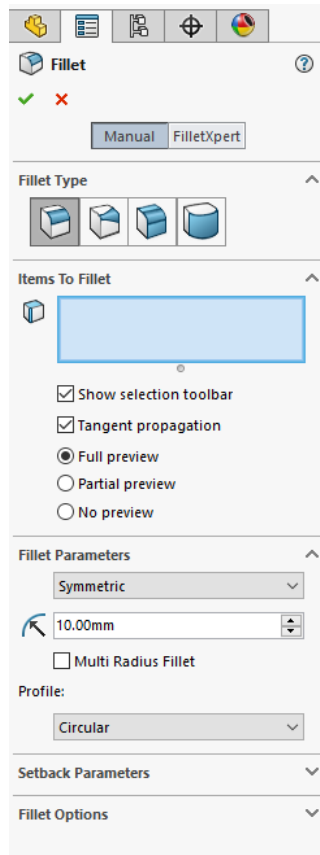


Σχήμα 4.35 Βήμα 3°.

Εφόσον έχουν δημιουργηθεί οι δοκοί και υπάρχει το σημείο το οποίο τέμνονται, θα χρησιμοποιηθεί μία επιλογή έτσι ώστε το σημείο τομής τους να γίνει λείο, η επιλογή αυτή είναι από την γραμμή εργαλείων (σχήμα 4.36) **Fillet**. Εφόσον επιλεγεί το **Fillet** ανοίγει ένα παράθυρο στα αριστερά του προγράμματος με επιλογές για την καμπύλη που θα δημιουργηθεί ανάμεσα στις δύο δοκούς (σχήμα 4.37).

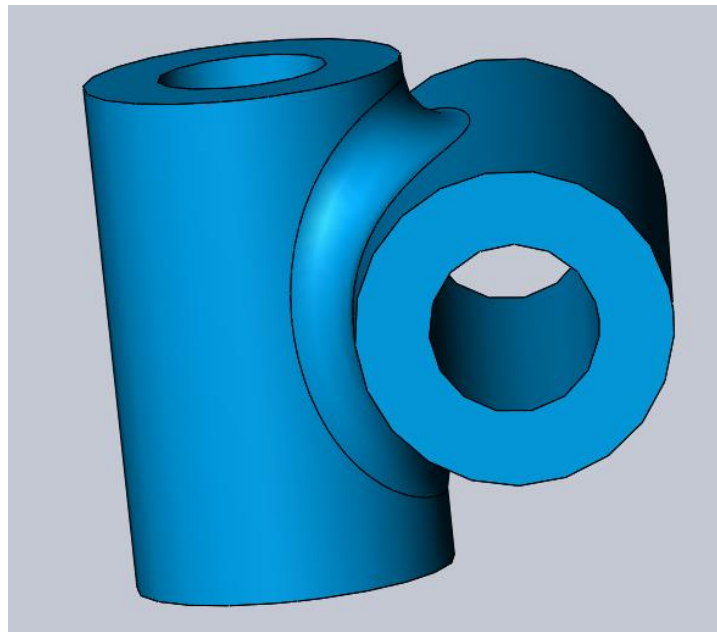


Σχήμα 4.36 Γραμμή εργαλείων του λογισμικού SolidWorks.



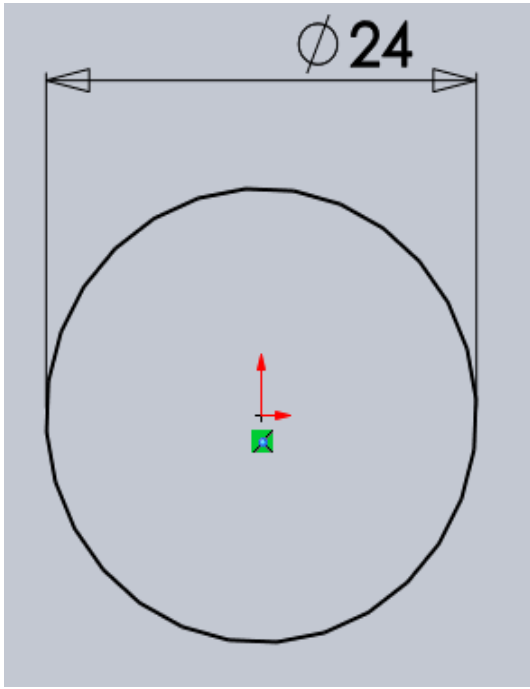
Σχήμα 4.37 Επιλογές του μενού *Fillet*.

Η τελική μορφή του ενδιάμεσου συνδέσμου μετά την εφαρμογή του *Fillet* είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 4.38.

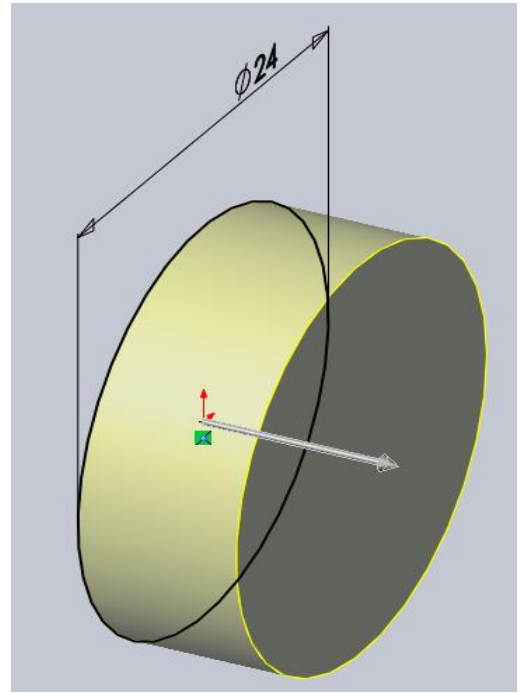


Σχήμα 4.38 Τελική μορφή ενδιάμεσου συνδέσμου.

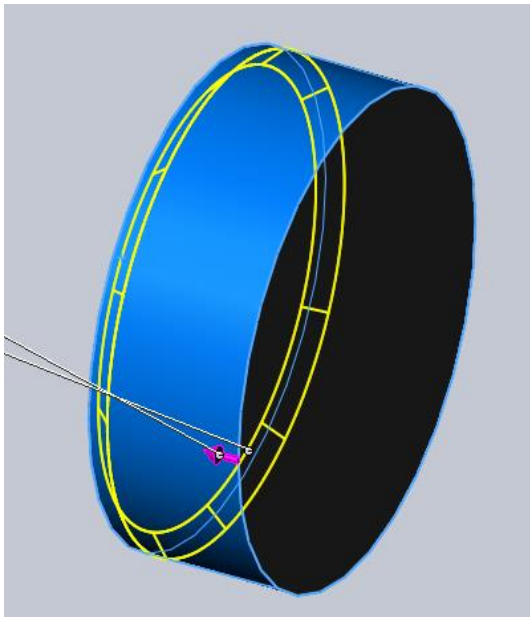
Στην συνέχεια δημιουργούνται μια βίδα, μια ροδέλα και μια ασφάλεια η οποία συγκρατεί όλα τα εξαρτήματα μεταξύ τους δημιουργώντας έτσι το τελικό αρθρωτό σύστημα κίνησης.



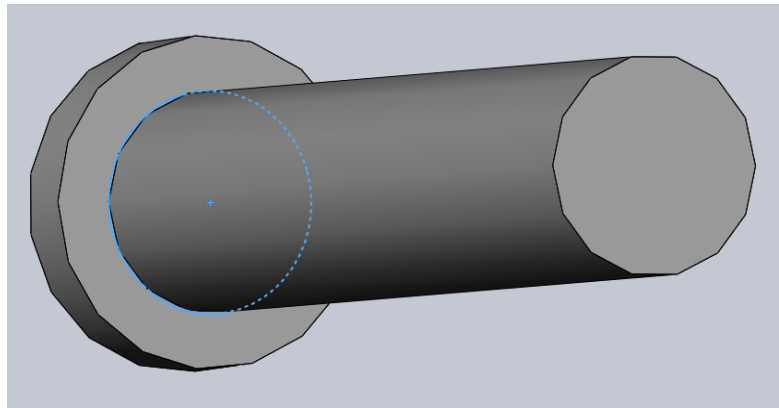
Σχήμα 4.39 Βήμα 1°.



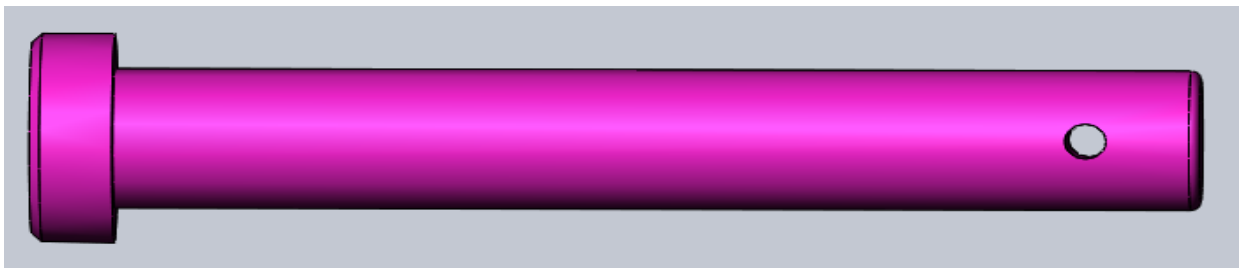
Σχήμα 4.40 Βήμα 2°.



Σχήμα 4.41 Βήμα 3°.

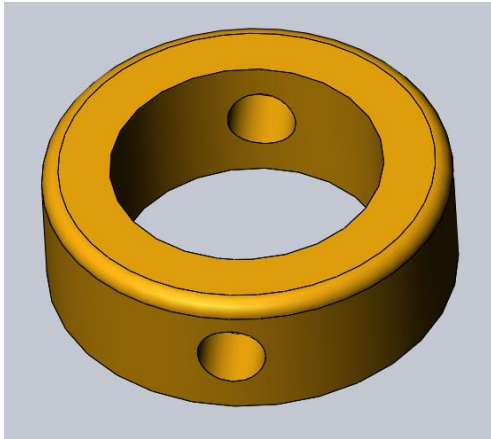


Σχήμα 4.42 Βήμα 4°.

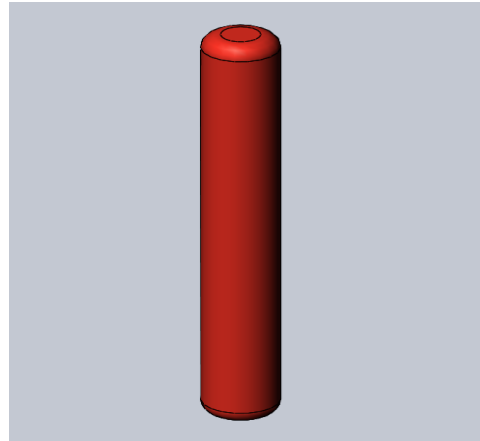


Σχήμα 4.43 Τελική μορφή βίδας.

Η ροδέλα και ασφάλεια συγκράτησης όπως σχεδιάστηκαν στα παρακάτω σχήματα.

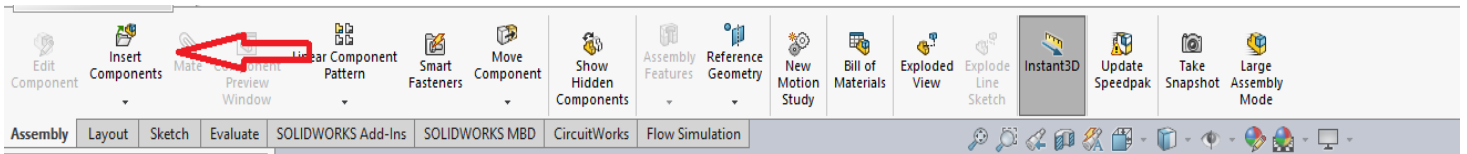


Σχήμα 4.44 Ροδέλα συγκράτησης.

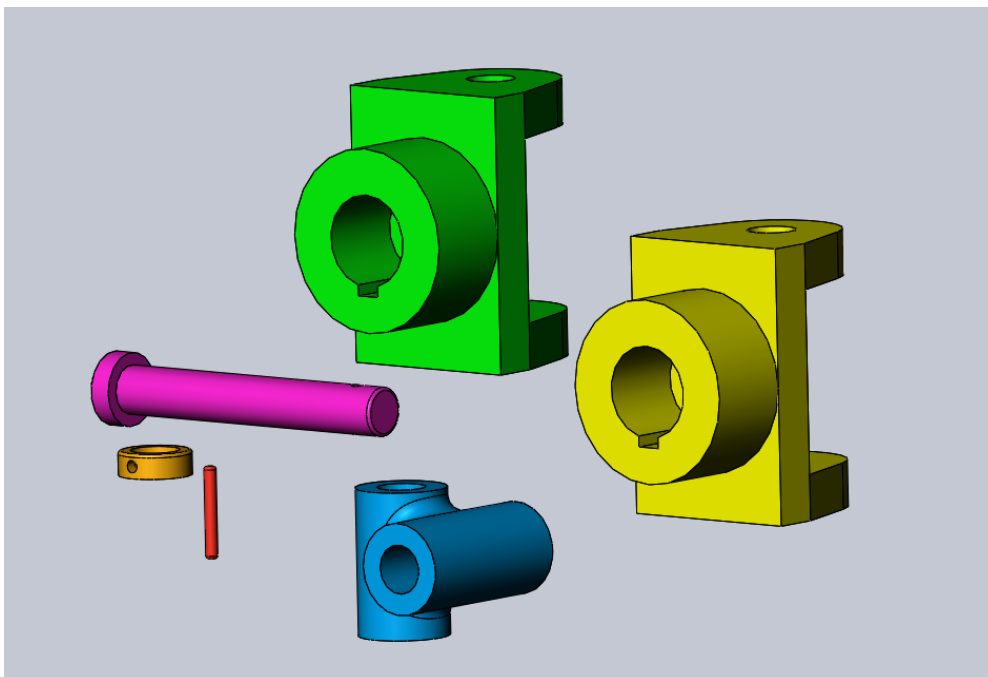


Σχήμα 4.45 Ασφάλεια συγκράτησης.

Εφόσον έχει ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός όλων των εξαρτημάτων επιλέγετε από το αρχικό μενού το **Assembly** (σχήμα 4.19) έτσι ώστε να συναρμολογηθεί το τελικό εξάρτημα. Η συναρμολόγηση ξεκινάει εισάγοντας τα εξαρτήματα από τον φάκελο που είναι αποθηκευμένα στο μενού του **Assembly** με την επιλογή **Insert Components** (σχήμα 4.46). Τα εξαρτήματα τοποθετούνται όλα στο περιβάλλον εργασίας όπως φαίνονται στο σχήμα 4.47.

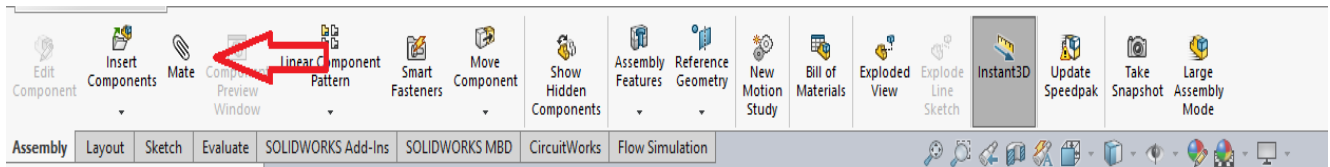


Σχήμα 4.46 Μενού Assembly.

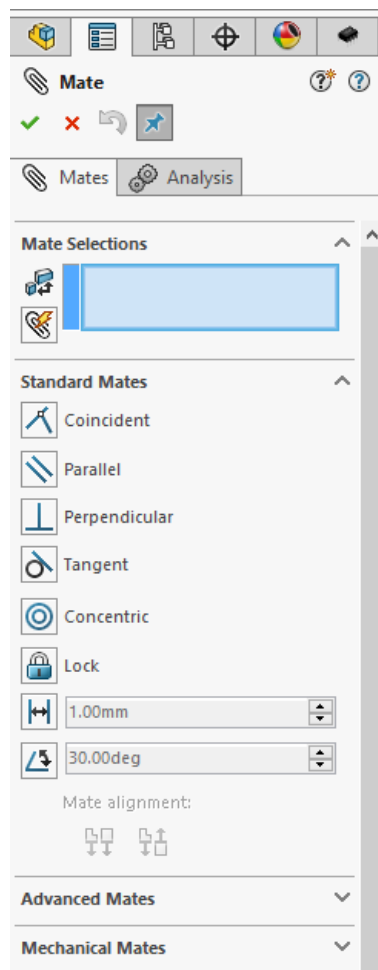


Σχήμα 4.47 Συνολικά εξαρτήματα στο περιβάλλον εργασίας.

Στην συνέχεια τα εξαρτήματα τοποθετούνται ένα – ένα στην τελική τους θέση, η διαδικασία αυτή είναι περίπλοκη και περιλαμβάνει διάφορες σχέσεις όπου μπορεί να έχει το ένα εξάρτημα με το άλλο , π.χ. μπορεί να είναι η ασφάλεια κάθετα τοποθετημένη και να έχει την δυνατότητα να περιστρέφεται, ή μπορεί να είναι κλειδωμένη. Οι παραπάνω παράμετροι ορίζονται από το μενού **Mate** και από το παράθυρο που βρίσκεται στα αριστερά του προγράμματος.

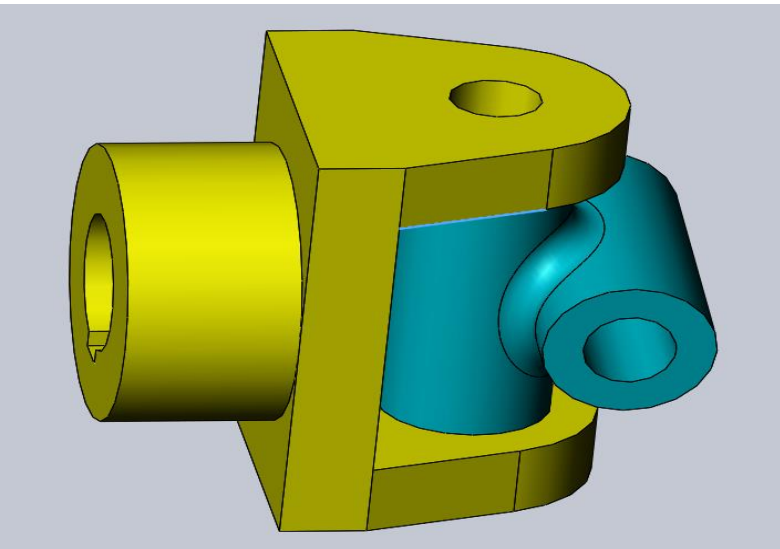


Σχήμα 4.48 Μενού **Mate**.

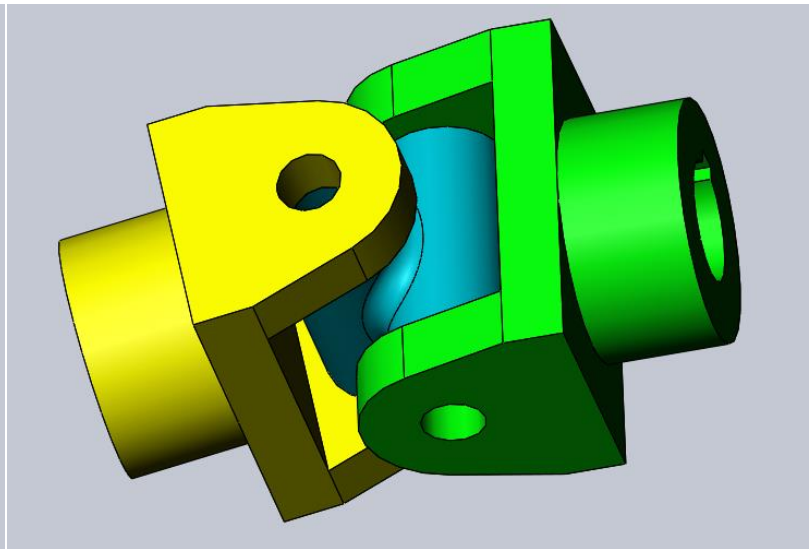


Σχήμα 4.49 Μενού επιλογής παραμέτρων.

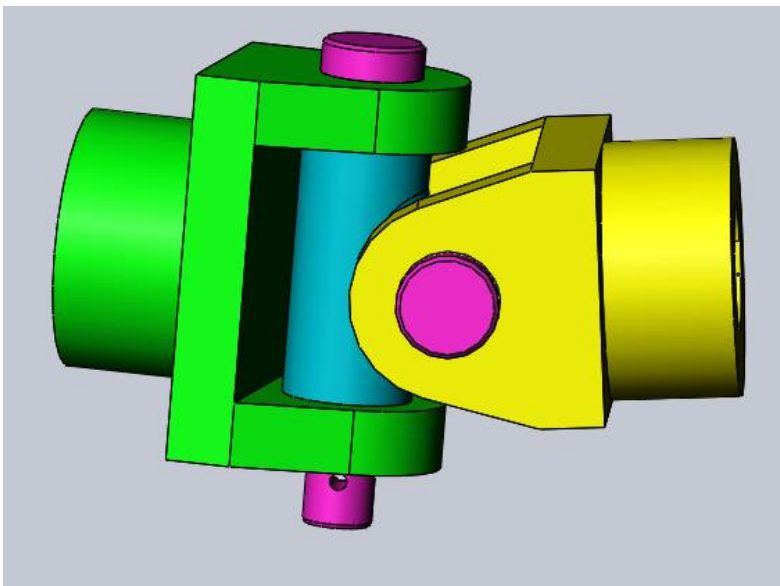
Παρακάτω φαίνεται αναλυτικά σε εικόνες τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την συναρμολόγηση όλων των εξαρτημάτων και την δημιουργία του τελικού αρθρωτού συστήματος κίνησης.



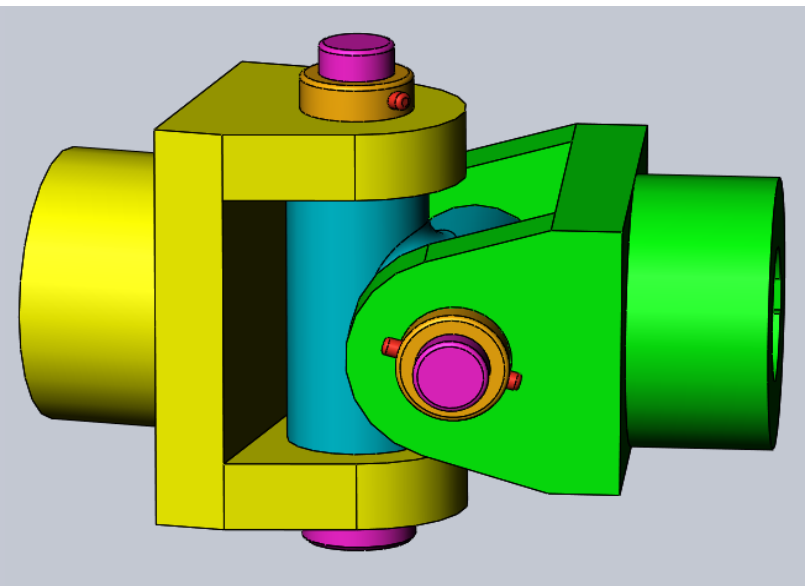
Σχήμα 4.50 Βήμα 1°.



Σχήμα 4.51 Βήμα 2°.

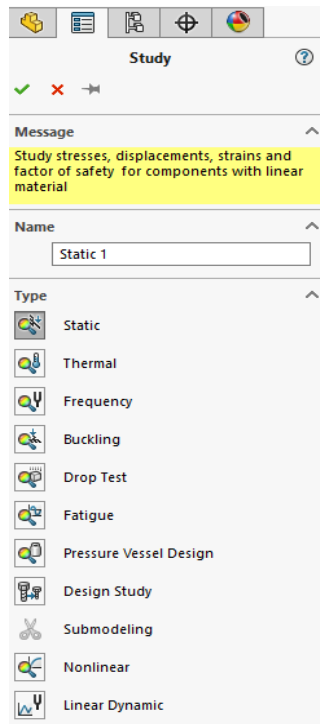


Σχήμα 4.52 Βήμα 3°.



Σχήμα 4.53 Βήμα 4°.

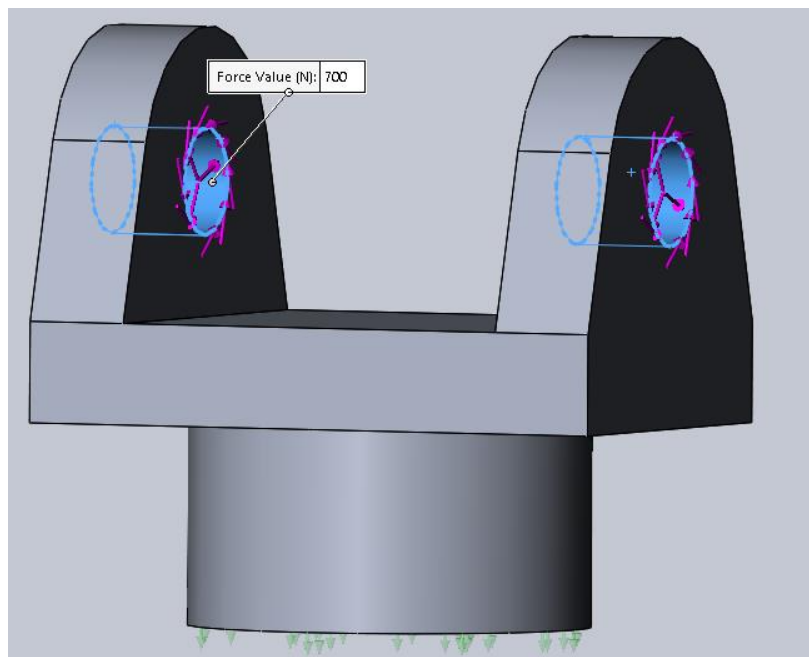
Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η συναρμολόγηση του τελικού εξαρτήματος, μπορεί αν επιθυμεί ο σχεδιαστής να γίνει προσομοίωση σε διάφορες συνθήκες που ορίζονται στο πρόγραμμα. Το λογισμικό SolidWorks έχει μια μεγάλη γκάμα συστημάτων και μενού προσομοίωσης όπως για παράδειγμα το **SolidWorks Simulation**, το **Flow Simulation** κ.α. Μπορεί να γίνει ανάλυση με γνώμονα τα πεπερασμένα στοιχεία FEA, μερικές από τις επιλογές φαίνονται στο παρακάτω μενού (σχήμα 4.54).



Σχήμα 4.54 Επιλογές ανάλυσης στο μενού SolidWorks Simulation

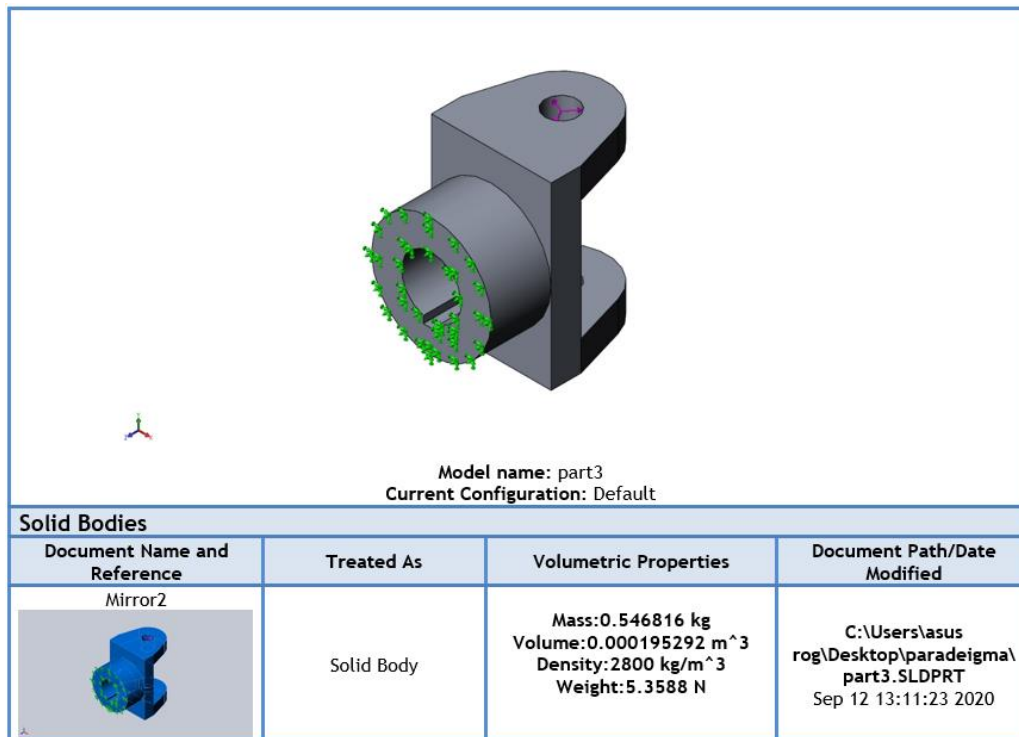
Στην προκειμένη περίπτωση επιλέγεται το **Static** γιατί θα γίνει στατική ανάλυση στο εξάρτημα. Έπειτα επιλέγεται το υλικό το οποίο θα αντιστοιχιστεί το εξάρτημα του βραχίονα. Το υλικό το οποίο επιλέγεται είναι το κράμα **201.0 – T6 Insulated Mold Casting** όπου χρησιμοποιείται κατά την χύτευση, δηλαδή ρευστοποιείται και έπειτα χυτεύεται σε ειδικά διαμορφωμένα καλούπια.

Ως σταθερό σημείο στην προσημείωση ορίζεται η βάση του συνδέσμου (σχήμα 4.55). Η δύναμη που ασκείται ορίζεται στο σημείο όπου εφάπτεται ο μεσαίος σύνδεσμος συγκράτησης και η τιμή της είναι 700 N, όπου αντιστοιχίζονται σε 71,38 κιλά.

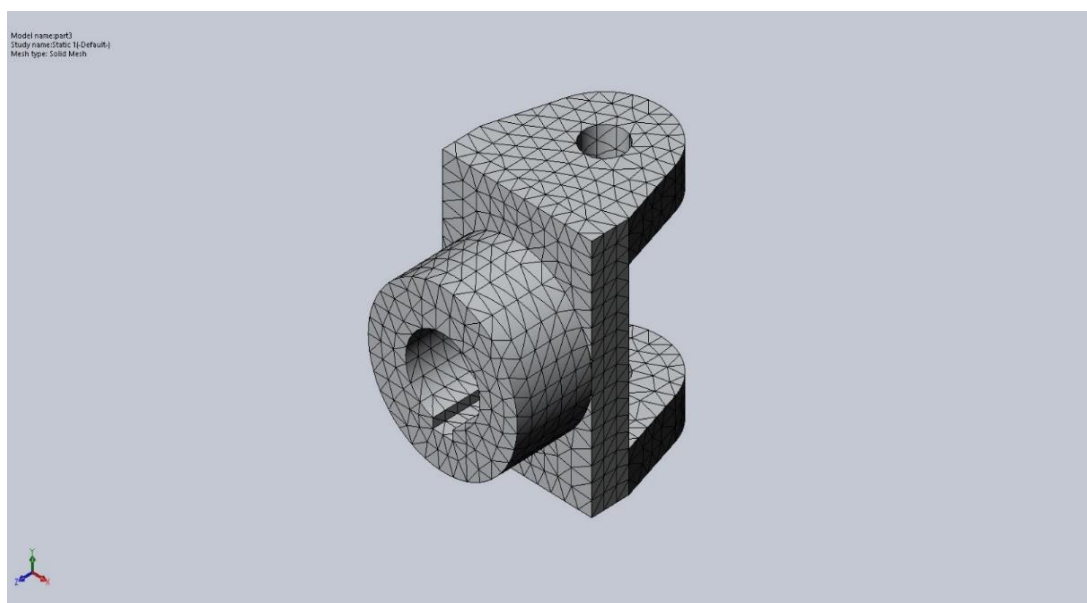


Σχήμα 4.55 Ασκούμενη δύναμη 700N στο σημείο συγκράτησης του συνδέσμου.

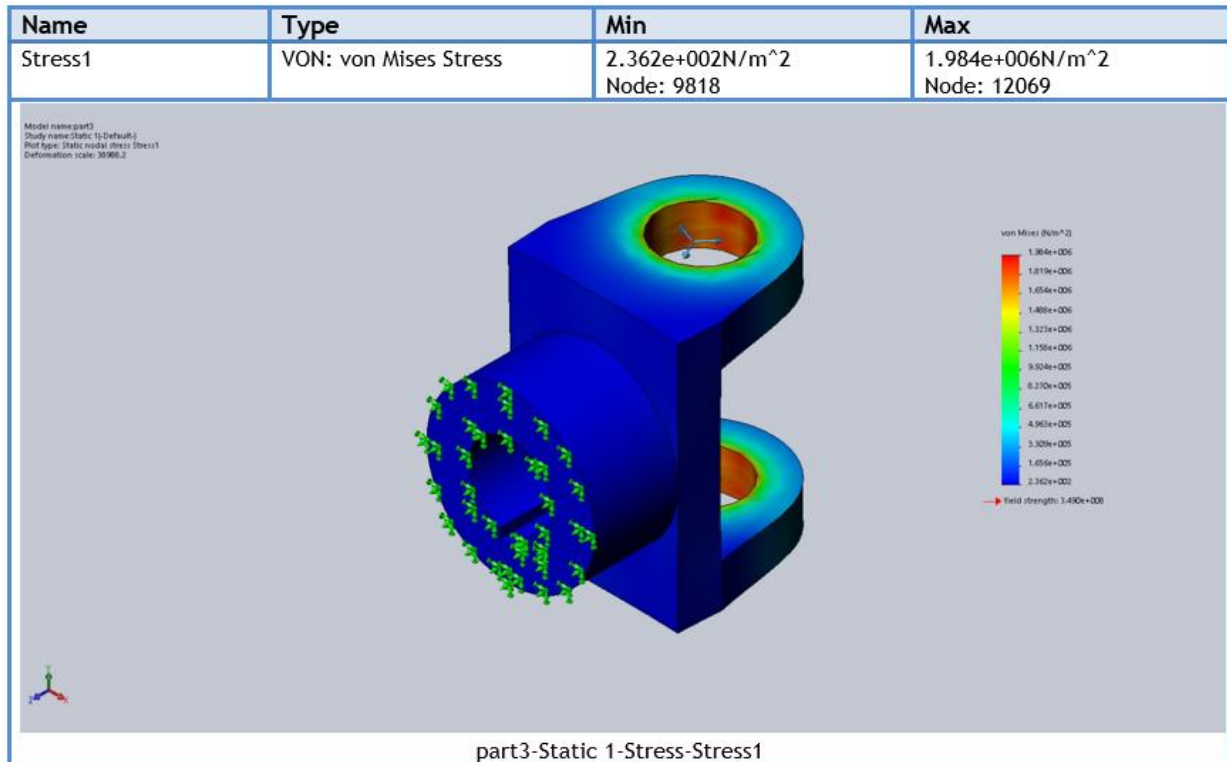
Στο σημείο αυτό εφόσον έχουν οριστεί τα σταθερά σημεία συγκράτησης καθώς και τα σημεία όπου ασκούνται οι δυνάμεις και τα φορτία, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να δει τον διαχωρισμό του εξαρτήματος σε πλέγμα (σχήμα 4.57) για την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και κάποιες πληροφορίες σχετικά με την ανάλυση, όπως για παράδειγμα το βάρος του εξαρτήματος την πυκνότητα κ.α. Στα παρακάτω σχήματα παρατίθενται τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης.



Σχήμα 4.56 Δομικές πληροφορίες του εξαρτήματος.

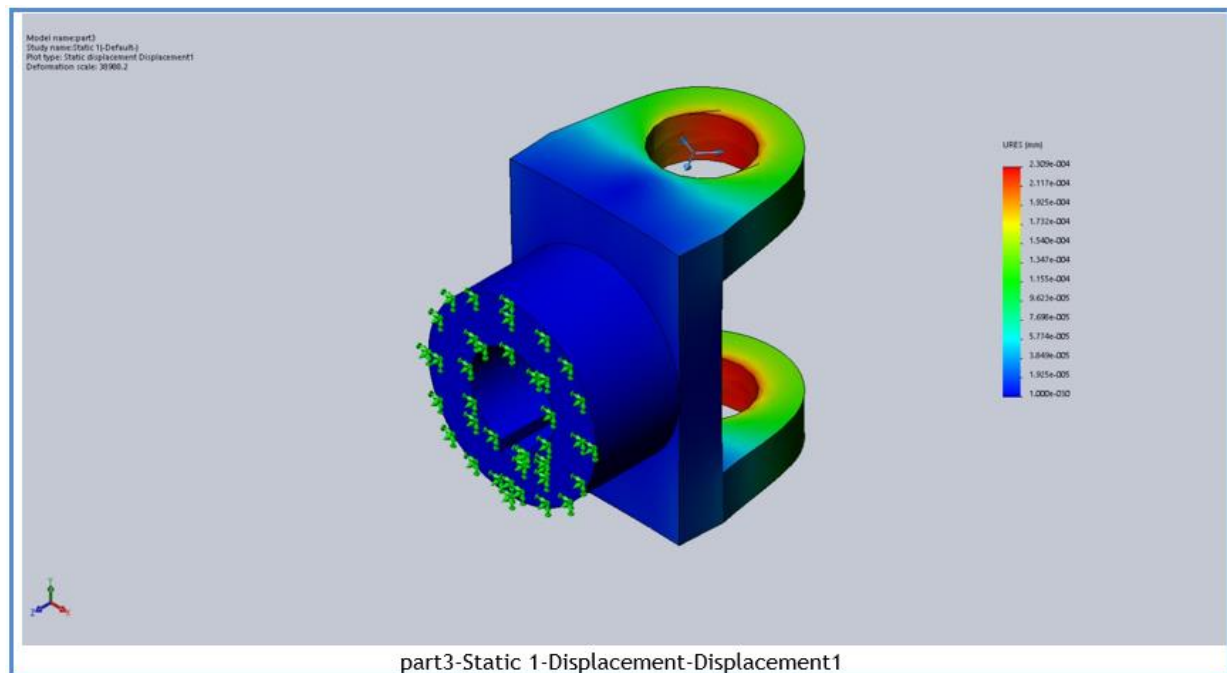


Σχήμα 4.57 Κατακερματισμός του εξαρτήματος σε πλέγμα.

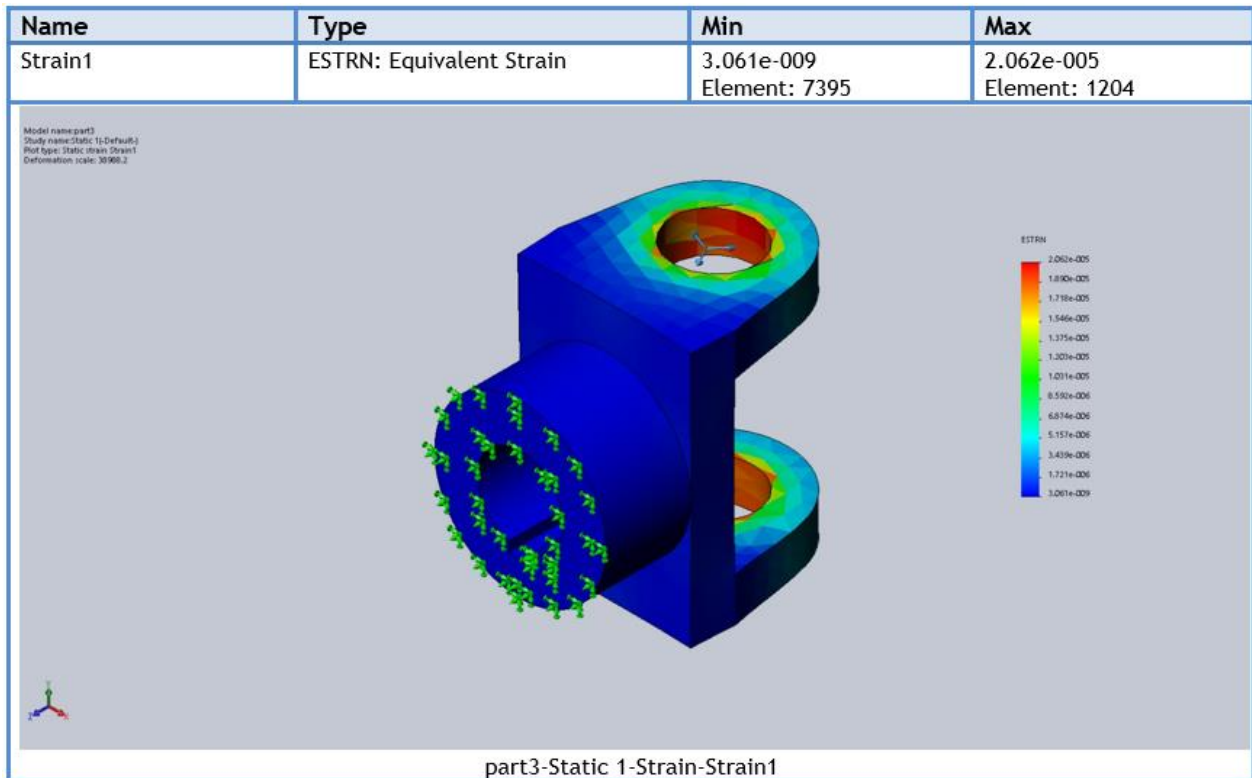


Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0.000e+000mm Node: 105	2.309e-004mm Node: 12077

Σχήμα 4.58 Αποτελέσματα Stress Analysis.



Σχήμα 4.59 Αποτελέσματα Stress Analysis.



Σχήμα 4.60 Αποτελέσματα Strain Analysis.

Η ανάλυση και η προσομοίωση ενός μοντέλου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας δίνει την δυνατότητα της βέλτιστης λύσης στον σχεδιαστή. Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής διαφορετικών υλικών, δημιουργίας υλικών με την σύσταση και την πυκνότητα όπου επιθυμεί ο σχεδιαστής ώστε τα επέλθει το επιθυμητό αποτέλεσμα καθώς και το πιο συμφέρων.

Κεφάλαιο 5. Προσομοίωση της βάσης Helios 2100 AS190

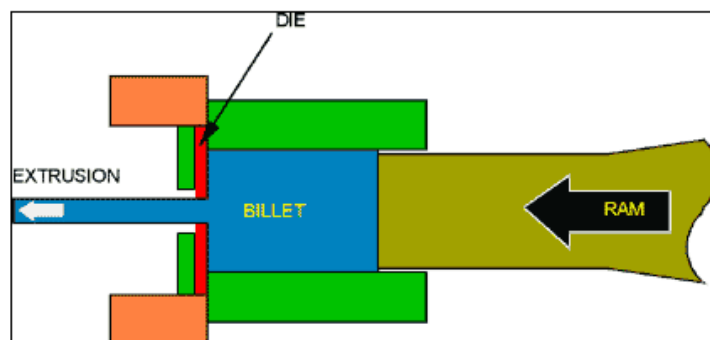
5.1. Βάση στήριξης Helios 2100 AS190 και η διαδικασία παραγωγής της



Σχήμα 5.1 Η Βάση στήριξης Helios 2100 AS190 της Alumil.

Τα στοιχεία που αποτελούν την συγκεκριμένη βάση στήριξης φωτοβολταϊκών, είναι κατασκευασμένα κυρίως από αλουμίνιο, πέραν της δοκού όπου πασσαλομπήγεται στο έδαφος και είναι κατασκευασμένη από γαλβανισμένο χάλυβα, η διαδικασία παραγωγής των εξαρτημάτων αλουμινίου είναι η διέλαση. Κατά την διαδικασία της διέλασης (extrusion) το αρχικό τεμάχιο αλουμινίου ή αλλιώς μιγγιέτα (είναι η πρώτη ύλη), αφού θερμανθεί σε μια θερμοκρασία 500 βαθμών κελσίου οδηγείται σε ένα μηχάνημα που ονομάζεται πρέσα (σχήμα 5.2). Το θερμό μέταλλο συμπιέζεται μέσα σε ένα χώρο που από την μια μεριά είναι κλεισμένος με την μήτρα, η οποία έχει τα αναγκαία ανοίγματα όμοια με το τελικό προφίλ που είναι σχεδιασμένο να παραχθεί.

Το προφίλ μετά την έξοδο του από την μήτρα, ψήχεται με την βοήθεια ανεμιστήρων αφού ευθυγραμμισθεί κόβεται στα επιθυμητά μήκη. Το τελευταίο στάδιο της όλης διαδικασίας είναι η γήρανση. Το προφίλ οδηγείται σε φούρνο και παραμένει μια ορισμένη θερμοκρασία για μια χρονική περίοδο. Με την γήρανση επιτυγχάνετε τελικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των προϊόντων.



Σχήμα 5.2 Σχηματική παράσταση εμβόλου πρέσας παραγωγής προφίλ

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των προϊόντων διέλασης αναφέρονται, κυρίως, στο όριο θραύσης μετά από την δοκιμασία εφελκυσμού σύμφωνα με το πρότυπο EN 10002 και στη δομική σκληρότητα σύμφωνα με το πρότυπο EN - (σε κλίμακα BRINELL. Τα παραπάνω μηχανικά χαρακτηριστικά εξαρτώνται από την χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου που χρησιμοποιείται καθώς και από τον τύπο της θερμικής επεξεργασίας (π.χ. τεχνητή γήρανση).

Τα συγκεκριμένα προφίλ αλουμινίου οπου αποτελούν την βάση και διακρίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες είναι κατασκευασμένα από κράμα αλουμινίου **AL 6005T6**. Το συγκεκριμένο κράμα προσδίδει έξτρα αντοχή και σκληρότητα στο τελικό προφίλ και είναι κατάλληλο για εφαρμογές που δέχονται φορτία.

5.2. Προφίλ αλουμινίου που αποτελούν την βάση

Το βασικό προφίλ αλουμινίου που σχηματίζει τα διαδοχικά τρίγωνα στον εκάστοτε αγρό και επάνω του τοποθετούνται τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 5.3 και 5.4.

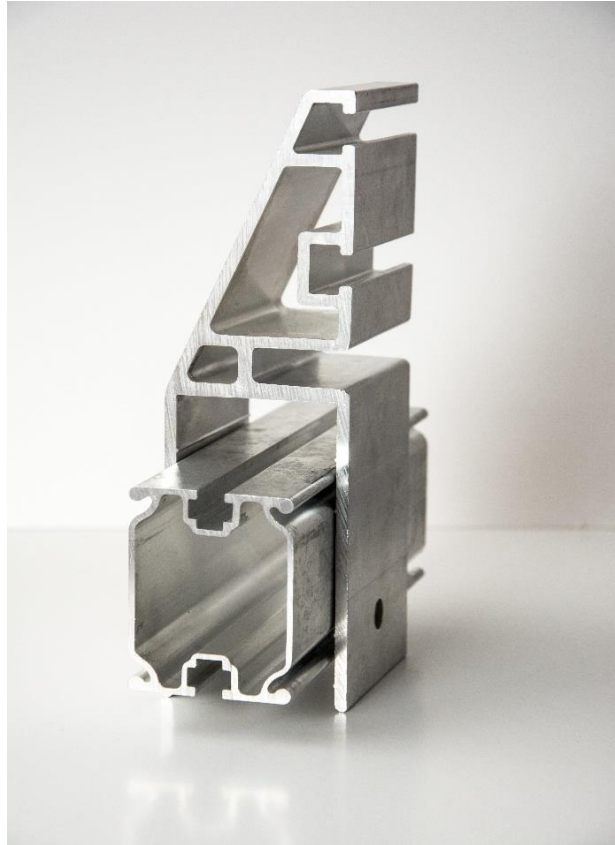


Σχήμα 5.3 Προφίλ αλουμινίου



Σχήμα 5.4 Προφίλ αλουμινίου

Το προφίλ αυτό το συνδέει με την χαλύβδινη δοκό στήριξης ένα άλλο εξάρτημα (σχήμα 5.5) οπου και αυτό έχει παραχθεί με την διαδικασία της διέλασης και είναι κατασκευασμένο από κράμα αλουμινίου **AL 6005T6**. Το συγκεκριμένο εξάρτημα όπως θα αναλυθεί παρακάτω τοποθετείται δύο φορές στο άνω και κάτω άκρο του τριγώνου έτσι ώστε να σχηματιστεί η βάση.



Σχήμα 5.5 Εξάρτημα βάσης στήριξης.

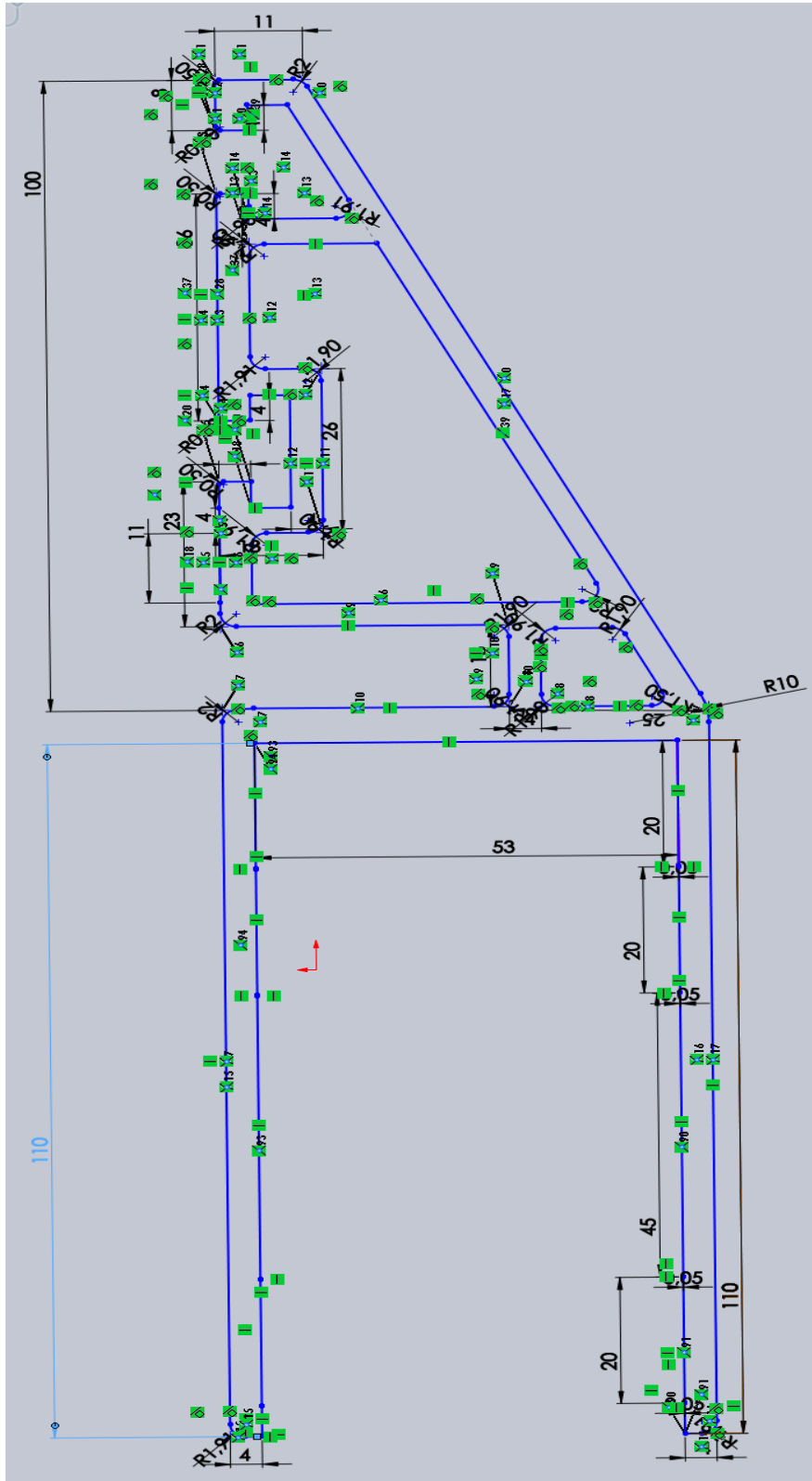
Κατά την εφαρμογή και τοποθέτηση του εξαρτήματος αυτού στην δοκό στήριξης η οποία είναι κατασκευασμένη από γαλβανισμένο χάλυβα, τοποθετείτε ενδιάμεσα τους ένα μονωτικό εξάρτημα όπου είναι κατασκευασμένο από πολυαμίδιο (σχήμα 5.6) ώστε να αποφευχθεί η διάβρωση και η φθορά του αλουμινίου από την σκουριά.



Σχήμα 5.6 Μονωτικό εξάρτημα πολυαμιδίου.

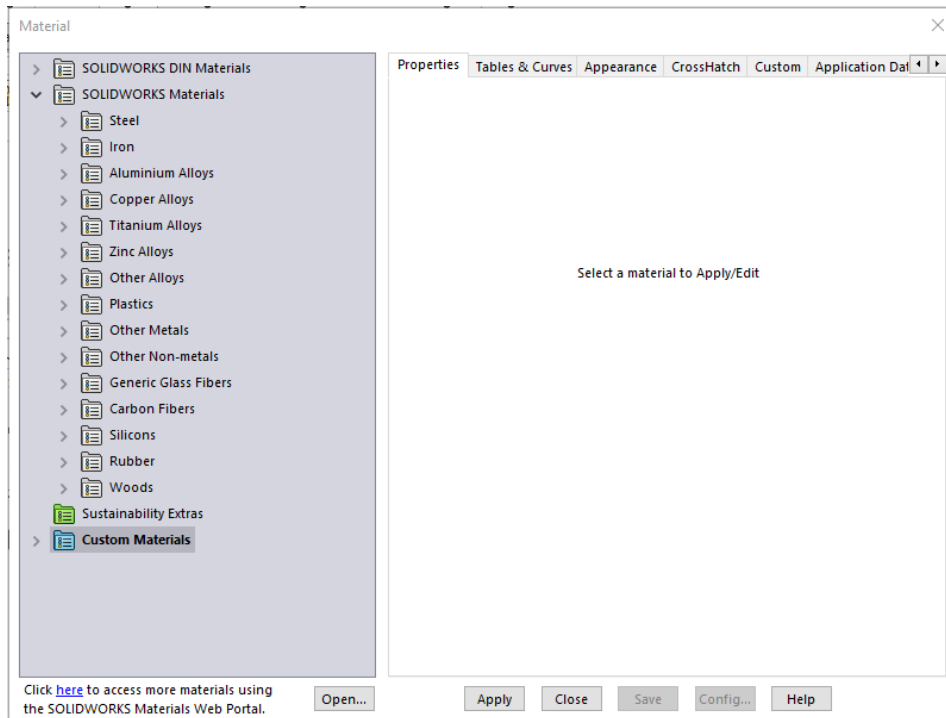
5.3. Σχεδίαση εξαρτήματος με το λογισμικό SolidWorks

Στο σημείο αυτό θα σχεδιαστεί το παραπάνω εξάρτημα στο λογισμικό SolidWorks και θα μοντελοποιηθεί σε ένα αντικείμενο 3D όπου στην συνέχεια θα γίνει μελέτη στατικής επάρκειας με συνδυασμούς διαφορετικών υλικών. Η σχεδίαση του εξαρτήματος ξεκινά μια βάση ενός σχεδίου δύο διατάσεων όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7 Δισδιάστατο σχέδιο εξαρτήματος αλουμινίου.

Με την επιλογή του **Apply Material** ανοίγει ένα παράθυρο (σχήμα 5.10) στο οποίο εμπεριέχονται διάφορα υλικά, καθώς και τα χαρακτηριστικά τους. Για το συγκεκριμένο εξάρτημα αρχικά θα επιλεγεί το κράμα αλουμινίου 6063 – T6 τα χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στο σχήμα 5.11.

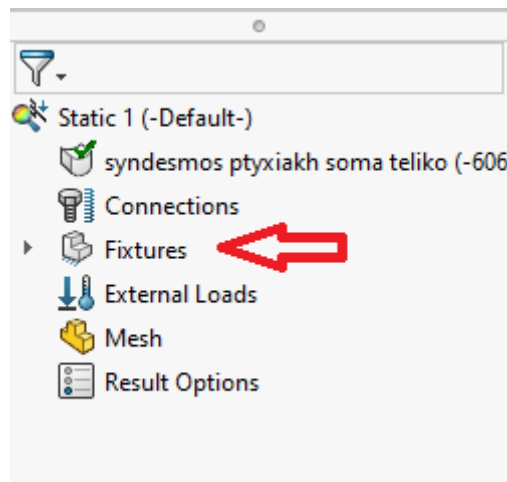


Σχήμα 5.10 Μενού επιλογής υλικών.

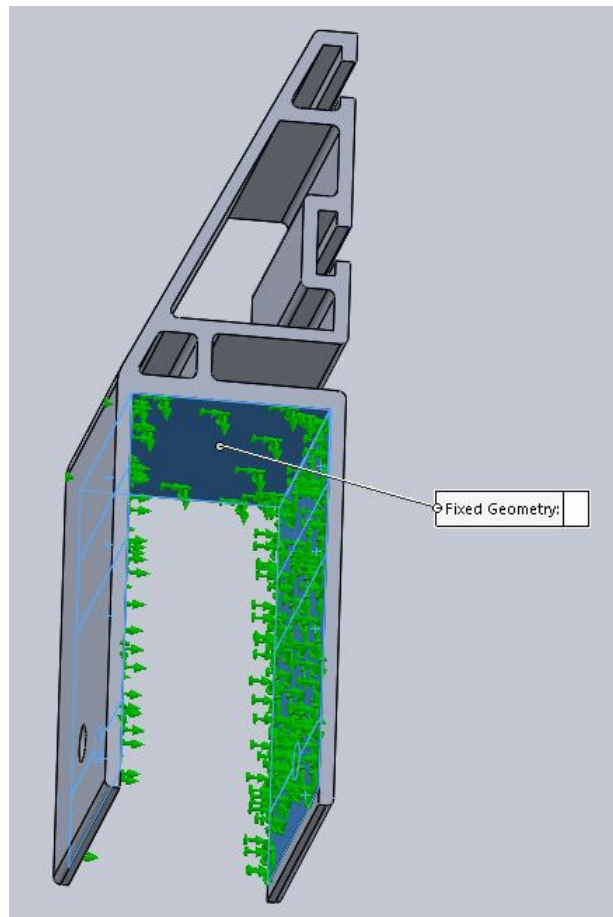
Material Details	
Study name	Static 1 (-Default-)
Material name	6063-T6
Material source	Simulation
Material library	solidworks materials
Material ID	170
Model type	Linear Elastic Isotropic
EX	6.9E+010 N/m ²
NUXY	0.33
GXY	2.58E+010 N/m ²
DENS	2700 kg/m ³
SIGXT	2.4E+008 N/m ²
SIGYLD	2.15E+008 N/m ²
ALPX	2.34E-005 /Kelvin
KX	209 W/(m.K)
C	900 J/(kg.K)

Σχήμα 5.11 Χαρακτηριστικά αλουμινίου 6063 – T6

Εφόσον γίνει η επιλογή του υλικού, το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός των σταθερών σημείων του εξαρτήματος, δηλαδή σε ποια σημεία είναι στερεωμένο το εξάρτημα και με ποιον τρόπο. Αυτό το βήμα ολοκληρώνεται από το μενού επιλογών που βρίσκεται στα αριστερά του προγράμματος (σχήμα 5.12). Επιλέγετε **Fixtures** και στην συνέχεια **Fixed Geometry**, έτσι ορίζονται τα σταθερά σημεία του εξαρτήματος (σχήμα 5.13).

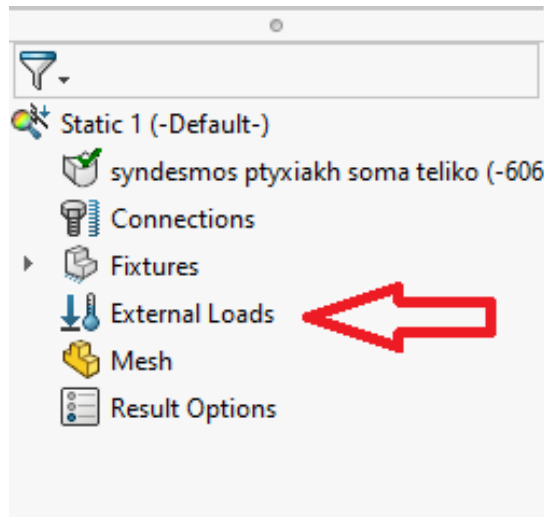


Σχήμα 5.12 Επιλογή σταθερών σημείων.

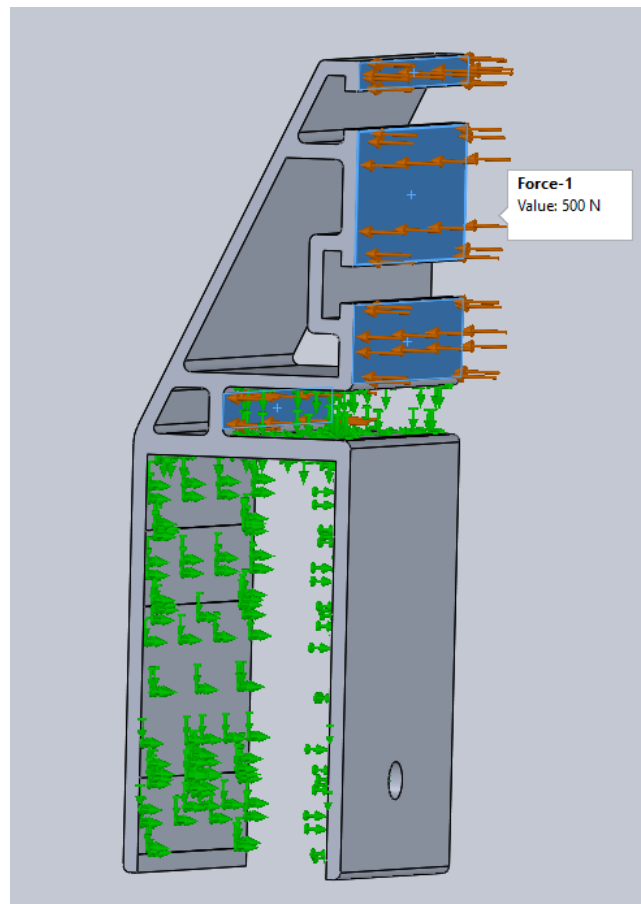


Σχήμα 5.13 Ορισμός σταθερών σημείων.

Το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός των δυνάμεων που ασκούνται πάνω στον σύνδεσμο. Αυτό επιλέγεται από το μενού και πιο συγκεκριμένα, επιλέγετε **External Loads** (σχήμα 5.14) και ορίζετε η δύναμη η οποία θα ασκηθεί, καθώς και τις επιφάνειες που θα ασκείται. Στην προκειμένη περίπτωση ορίζεται μια δύναμη της τάξης των 500N (σχήμα 5.15) η οποία αντιστοιχίζεται σε 50,98 κιλά.

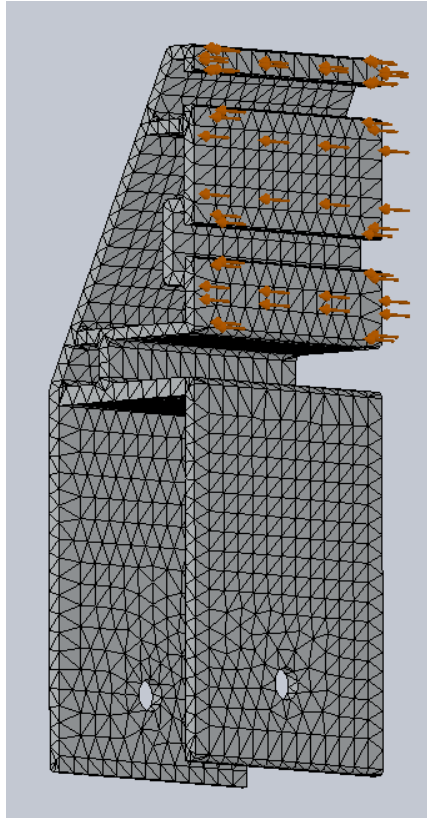


Σχήμα 5.14 Επιλογή ασκούμενων δυνάμεων.



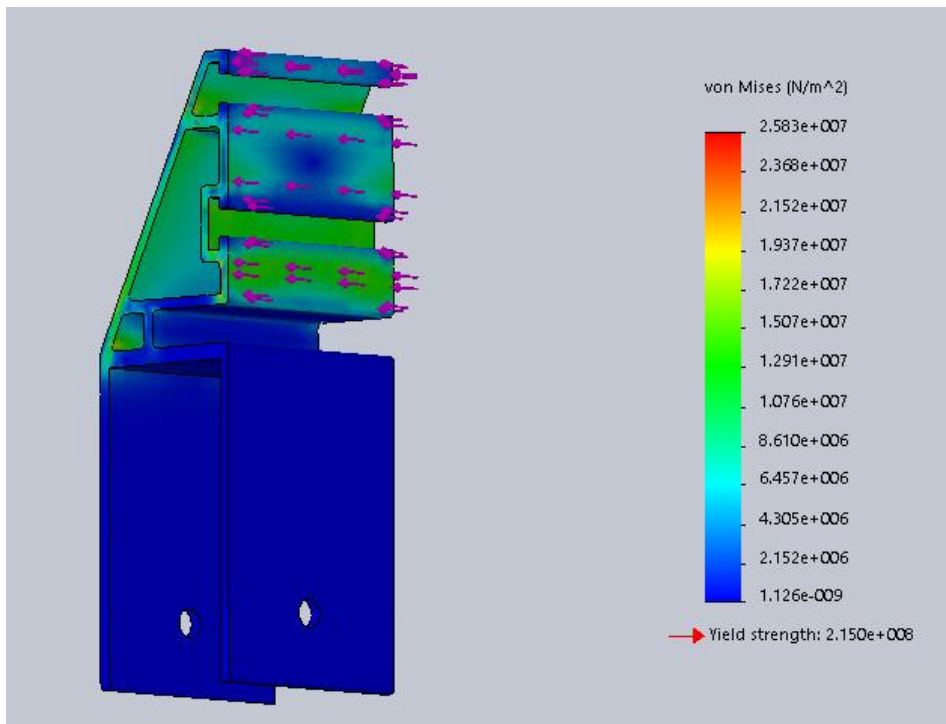
Σχήμα 5.15 Ορισμός ασκούμενων δυνάμεων.

Μπορεί να διακριθεί στο εκάστοτε εξάρτημα όπου γίνεται στατική ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το πλέγμα που δημιουργείται για να κατακερματιστεί το εξάρτημα σε μικρότερα τμήματα ώστε να δημιουργηθεί το μαθηματικό μοντέλο για την επίλυση της προσομοίωσης. Το πλέγμα του συγκεκριμένου εξαρτήματος διακρίνεται στο σχήμα 5.16.



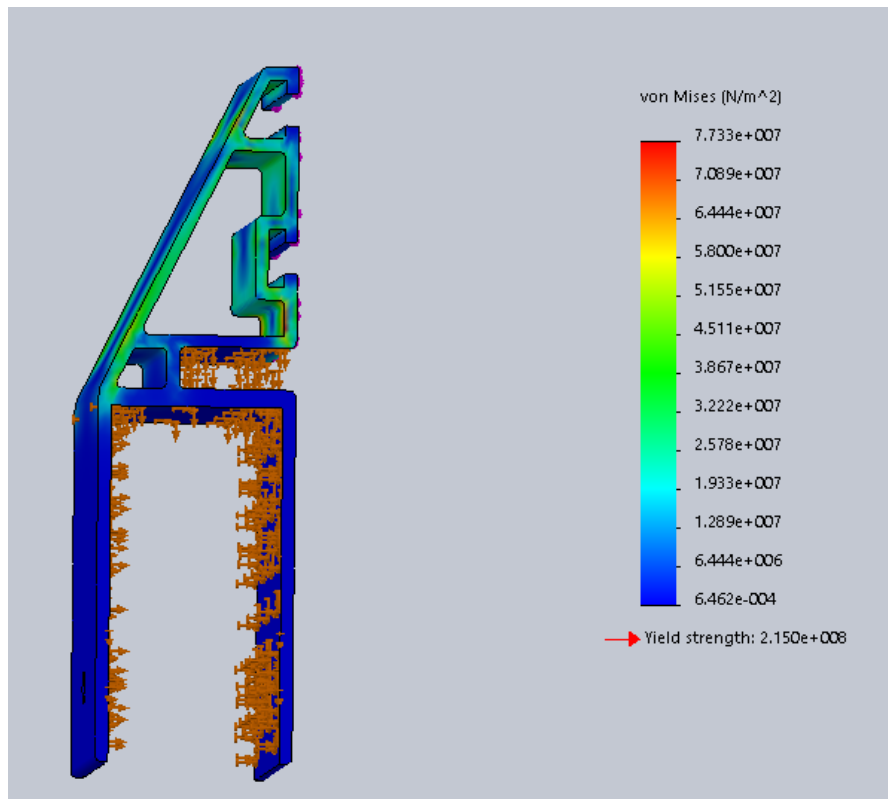
Σχήμα 5.16 Κατακερματισμός του συνδέσμου σε πλέγμα.

Το σχηματικό αποτέλεσμα της ανάλυσης με την κλίμακα των φορτίων όπου ασκούνται διακρίνεται στο σχήμα 5.17. Το λογισμικό SolidWorks έχει την δυνατότητα έκδοσης τεχνικού εγγράφου για τις αναλύσεις όπου λαμβάνουν χώρα στο πρόγραμμα. Ένα τέτοιο τεχνικό έγγραφο με την παραπάνω στατική ανάλυση υπάρχει στο **παράρτημα 1**.

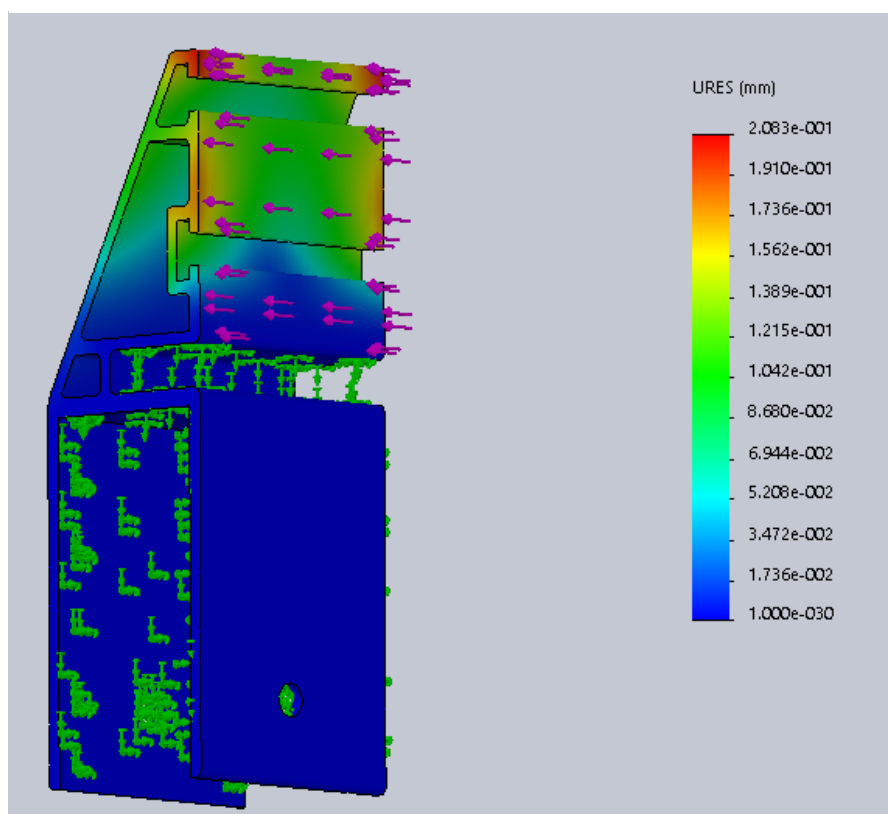


Σχήμα 5.17 Αποτέλεσμα Stress Analysis 500N.

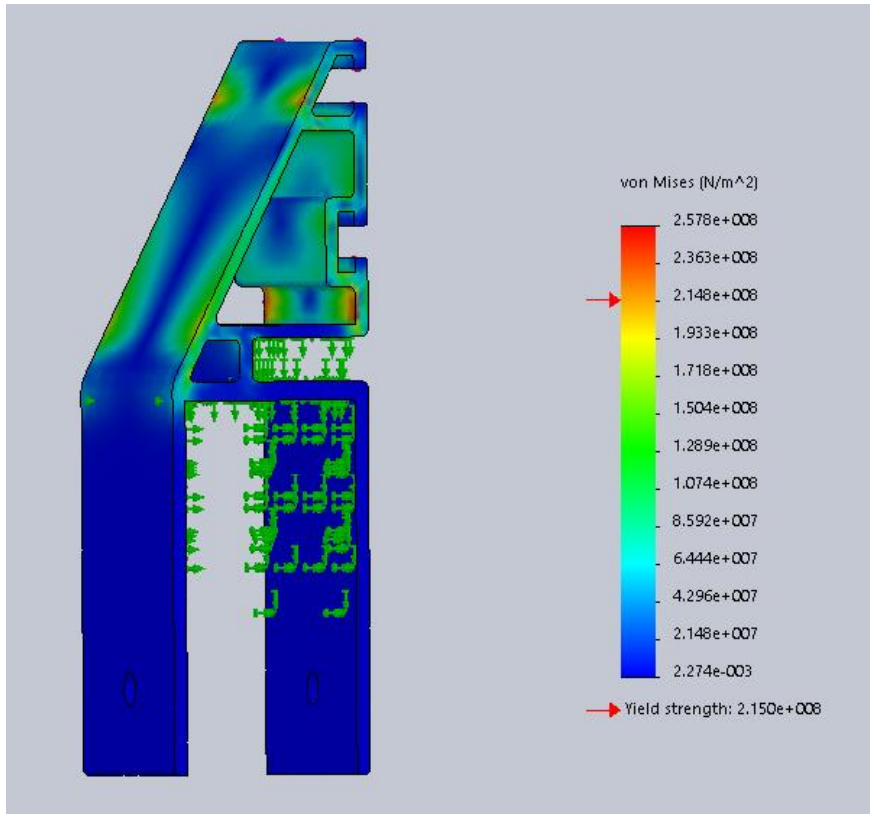
Στο σημείο αυτό θα εφαρμοστεί μια δύναμη 1500 N όπου αντιστοιχεί σε 152.95 κιλά για να ελεγχθεί η αντοχή του συνδέσμου, και παρακάτω θα εφαρμοστεί μια δύναμη της τάξης των 5000 N όπου αντιστοιχεί σε 509,85 κιλά. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στα σχήματα όπου ακολουθούν.



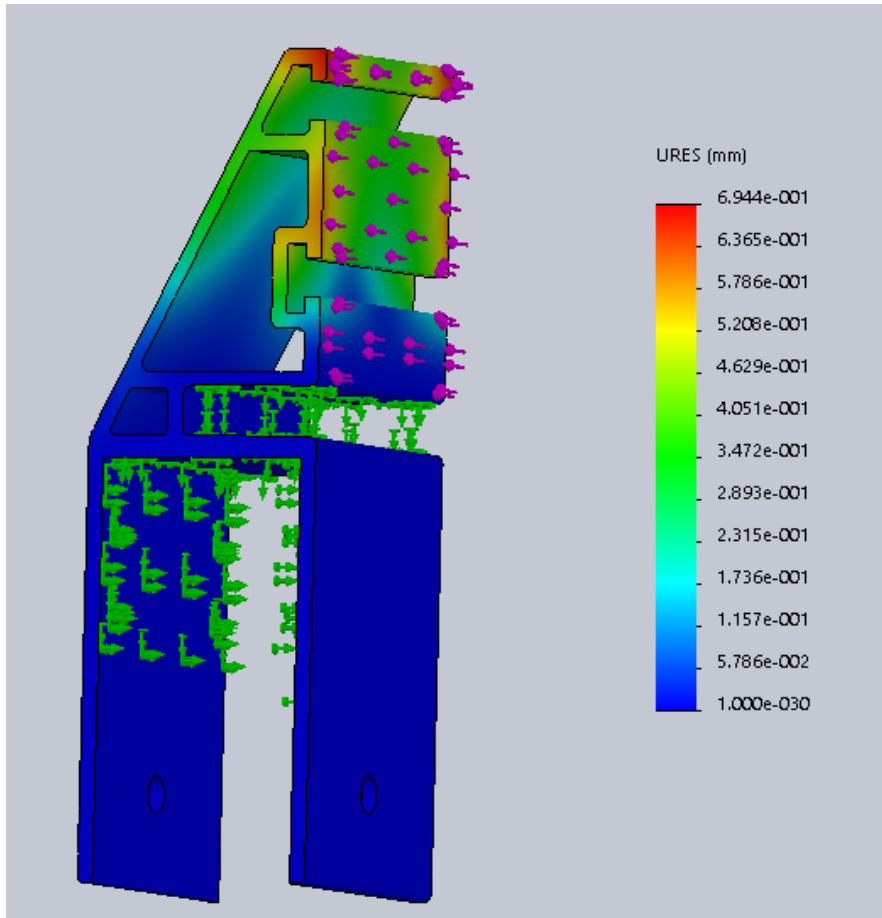
Σχήμα 5.18 Αποτέλεσμα Stress Analysis 1500N.



Σχήμα 5.19 Αποτέλεσμα Stress Analysis 1500N.



Σχήμα 5.20 Αποτέλεσμα Stress Analysis 5000N.



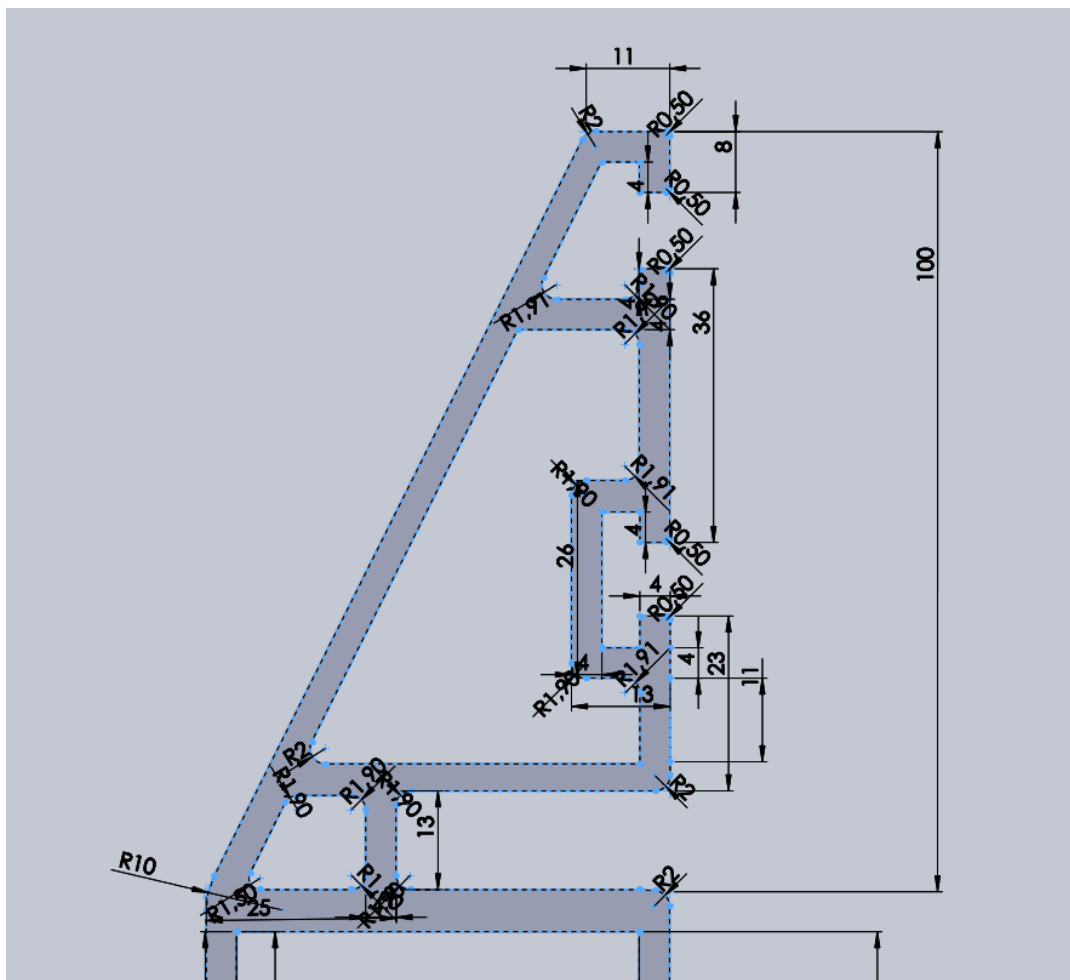
Σχήμα 5.21 Αποτέλεσμα Stress Analysis 5000N.

5.4. Μοντελοποίηση και εκτύπωση του συνδέσμου σε 3D printer

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε η σχεδίαση του συνδέσμου και η προσομοίωση του σε πραγματικές συνθήκες εφαρμογής με διαφορετικές τιμές ασκούμενων δυνάμεων. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί για εκπαιδευτικούς λόγους πώς μπορεί ένα σχέδιο να μετατραπεί σε ένα πρωτότυπο εξάρτημα δοκιμής ώστε να υπάρχει μια σφαιρική εικόνα σχετικά με τον σχεδιασμό, την προσομοίωση καθώς και την παραγωγή πρωτότυπου εξαρτήματος με την βοήθεια ενός κορυφαίου λογισμικού σχεδίασης, το SolidWorks.

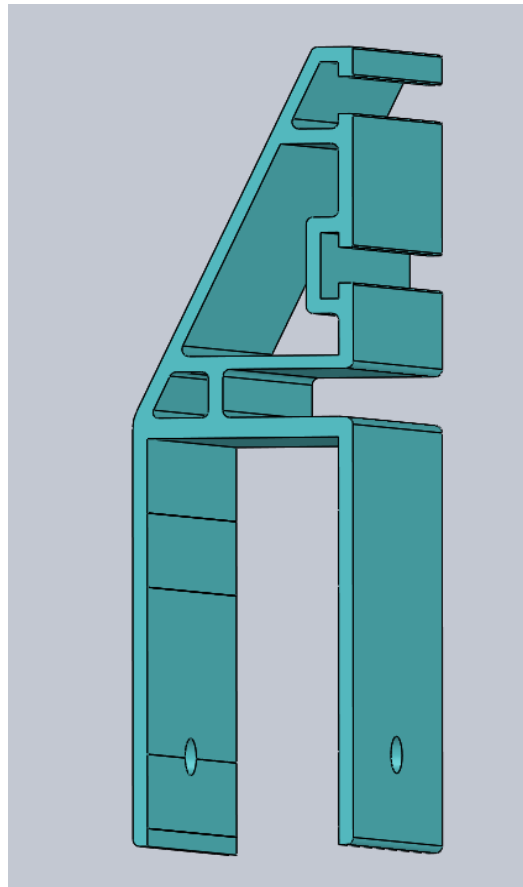
Στην σύγχρονη βιομηχανία η διαδικασία παραγωγής περιλαμβάνει τρία στάδια για την ανάπτυξη ενός εξαρτήματος. Το τμήμα έρευνας και ανάπτυξης (R&D – research and development) ξεκινώντας από το πρώτο στάδιο παραγωγής σχεδιάζει σε ένα σχήμα δύο διαστάσεων το εξάρτημα που πρόκειται να κατασκευαστεί. Στο δεύτερο στάδιο παραγωγής γίνεται η μοντελοποίηση του, η παραμετροποίηση καθώς και οι δοκιμές αντοχής ώστε να επιλεγεί το κατάλληλο υλικό. Τέλος το τρίτο στάδιο περιλαμβάνει την δημιουργία ενός πρωτοτύπου εξαρτήματος όπου σε αυτό θα γίνουν οι αντίστοιχες δοκιμές για να διαπιστωθεί αν οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό προσομοίωσης ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Εφόσον ολοκληρωθούν με επιτυχία τα τρία παραπάνω στάδια το εξάρτημα περνάει στην φάση την μαζικής παραγωγής.

Στην προκειμένη περίπτωση υπάρχει το τελικό εξάρτημα το οποίο θα επανασχεδιαστεί, θα μοντελοποιηθεί και στο τέλος θα τυπωθεί σε έναν 3D printer. Η αρχική διαδικασία είναι η παραγωγή ενός σχεδίου δυο διαστάσεων και διακρίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.22.



Σχήμα 5.22 Σχέδιο δύο διαστάσεων του συνδέσμου.

Το επόμενο βήμα είναι η παραγωγή ενός τρισδιάστατου μοντέλου όπου θα γίνουν και η στατική ανάλυση καθώς και η προσομοίωση. Τα βήματα για την παραγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, οπότε το μοντέλο που παράγεται από το λογισμικό διακρίνεται στο σχήμα 5.23.



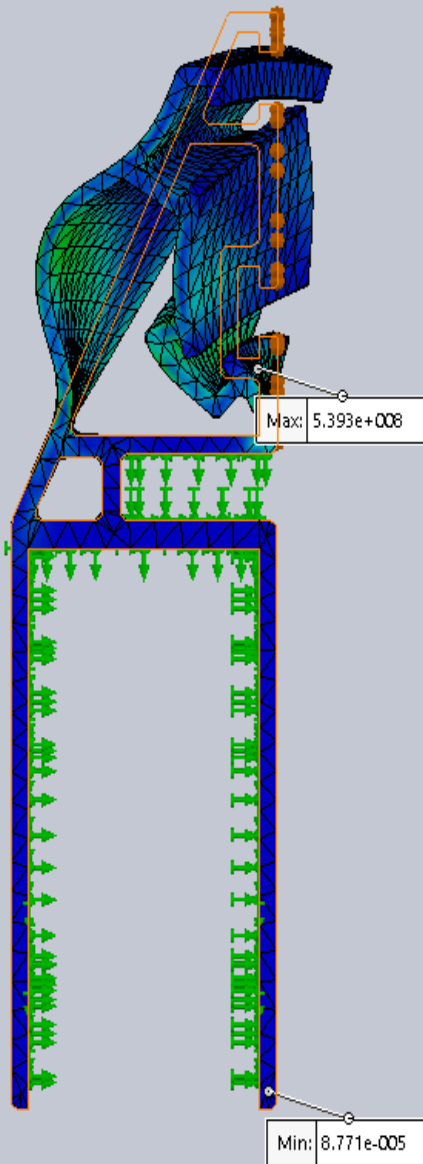
Σχήμα 5.23 Τρισδιάστατο μοντέλο του συνδέσμου.

Καθώς έχει δημιουργηθεί το τρισδιάστατο μοντέλο το επόμενο στάδιο είναι η επιλογή του υλικού όπου θα αντιστοιχιστεί ο σύνδεσμος για να γίνει η στατική ανάλυση. Το υλικό που επιλέγεται από το μενού **Apply Material** είναι πλαστικό ABS διότι με αυτό το υλικό θα τυπωθεί στον 3D printer ο σύνδεσμος που έχει σχεδιαστεί. Τα χαρακτηριστικά του υλικού φαίνονται στο σχήμα 5.24. Από την επιλογή του συγκεκριμένου υλικού ABS, το λογισμικό υπολογίζει ότι το τελικό βάρος του συνδέσμου θα είναι 189 γραμμάρια.

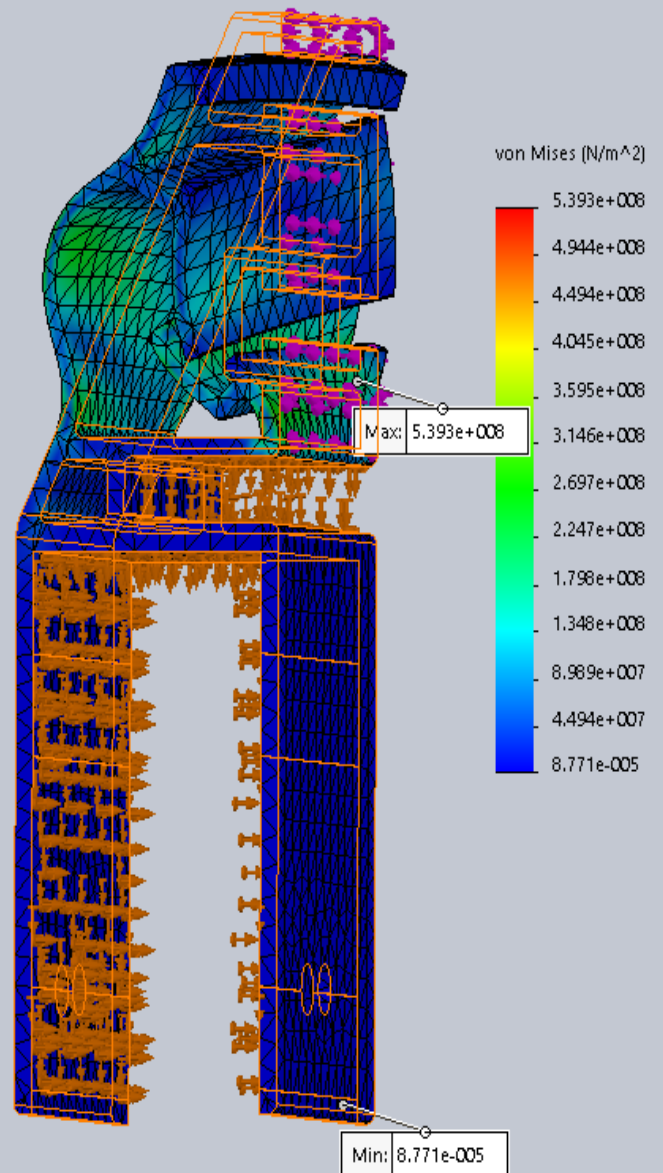
Study name	Static 1 (-Default-)
Material name	ABS
Material source	Simulation
Material library	solidworks materials
Material ID	33
Model type	Linear Elastic Isotropic
EX	2E+009 N/m ²
NUXY	0.394
GXY	3.189E+008 N/m ²
DENS	1020 kg/m ³
SIGXT	3E+007 N/m ²
KX	0.2256 W/(m.K)
C	1386 J/(kg.K)

Σχήμα 5.24 Χαρακτηριστικά του υλικού που χρησιμοποιείται.

Στην προσομοίωση ορίζονται ως σταθερό σημείο η βάση του εξαρτήματος και τα σημεία όπου ασκούνται οι δυνάμεις, οι εγκοπές του. Η δύναμη που ορίζεται στην προσομοίωση είναι 1500 N και αντιστοιχεί σε 512,95 κιλά. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης διακρίνεται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 5.25 Αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης.



Σχήμα 5.26 Αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης.

Η παραμόρφωση όπου έχει υποστεί ο σύνδεσμος είναι εμφανής και θα ήταν καταστροφική για την ολική κατασκευή. Η παραμόρφωση είναι τόσο μεγάλη διότι έχει επιλεγεί σαν υλικό το πλαστικό ABS όπου θα χρησιμοποιηθεί και στην 3D εκτύπωση για εκπαιδευτικούς λόγους όπως προαναφέρθηκε. Το υλικό όπου χρησιμοποιείται στην πραγματική κατασκευή είναι ένα κράμα αλουμινίου **AL 6005T6** υψηλής αντοχής, η παραγωγή του οποίου γίνεται με την διαδικασία της διέλασης. Για το συγκεκριμένο κράμα έγινε προσομοίωση στο προηγούμενο κεφάλαιο με δυνάμεις της τάξεων των 5000 N όπου αντιστοιχούν σε 509,85 κιλά και παρατηρήθηκαν εξαιρετικά αποτελέσματα και μηδενική μηχανική παραμόρφωση.

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζετε το αποτέλεσμα της 3D εκτύπωσης του εξαρτήματος καθώς και σύγκριση με το πρωτότυπο εξάρτημα το οποίο είναι κατασκευασμένο από κράμα αλουμινίου. Επίσης γίνεται εφαρμογή στο εκτυπωμένο εξάρτημα το ενδιάμεσο μονωτικό πολυαμίδιο, το οποίο είναι πρωτότυπο και κατασκευάζεται από την εταιρία Alumil.



Σχήμα 5.27 Εκτυπωμένος σύνδεσμος με υλικό ABS.



Σχήμα 5.28 Εκτυπωμένος σύνδεσμος μαζί με το μονωτικό υλικό.



Σχήμα 5.29 Εκτυπωμένος σύνδεσμος μαζί με το μονωτικό υλικό.



Σχήμα 5.30 Πρωτότυπος σύνδεσμος της εταιρίας ALUMIL.

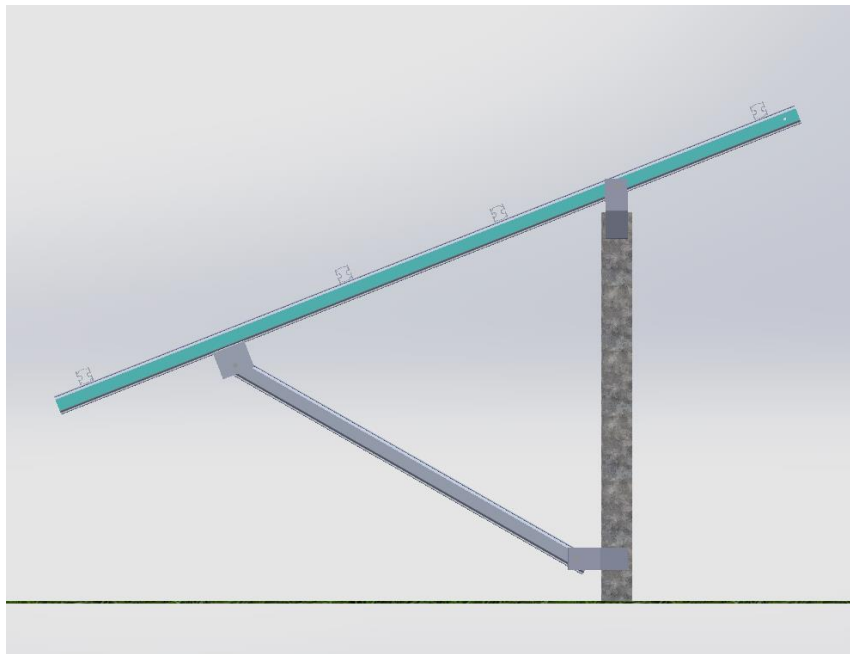
Σε αυτά τα σχήματα διακρίνονται από την αριστερή πλευρά, το εκτυπωμένο με 3D εκτυπωτή εξάρτημα που σχεδιάστηκε στο λογισμικό SolidWorks και από την δεξιά πλευρά το πρωτότυπο εξάρτημα όπου είναι κατασκευασμένο από κράμα αλουμινίου. Και στα δύο εξαρτήματα έχει τοποθετηθεί το ενδιάμεσο μονωτικό υλικό.



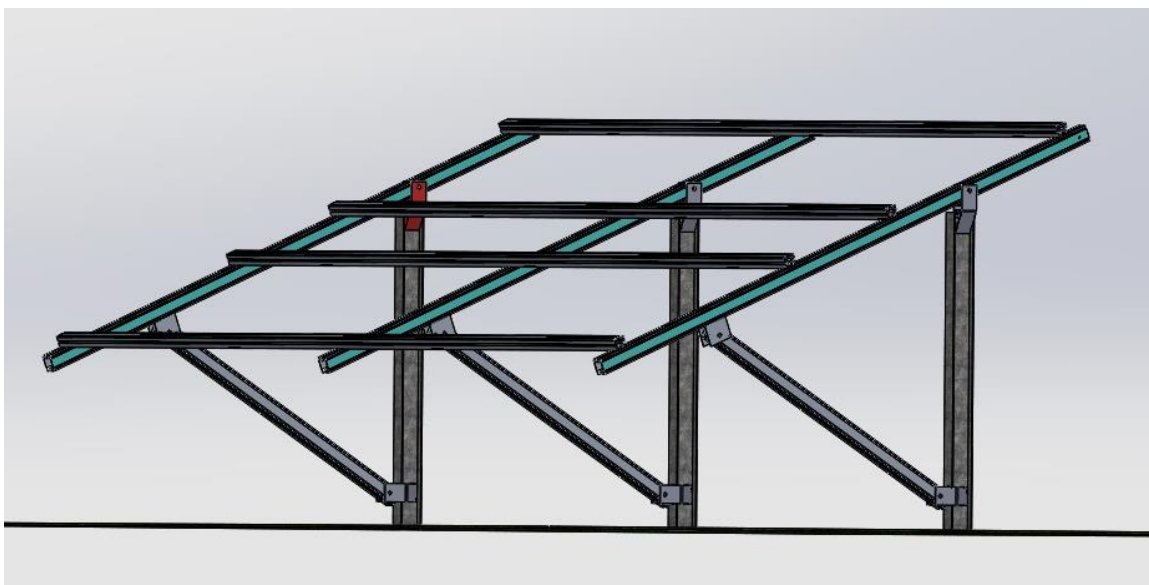
Σχήμα 5.31 Σύγκριση των δύο συνδέσμων, εκτυπωμένου και πρωτότυπου.

5.5. Σύνθεση της βάσης στήριξης Helios 2100 AS190 με το λογισμικό SolidWorks

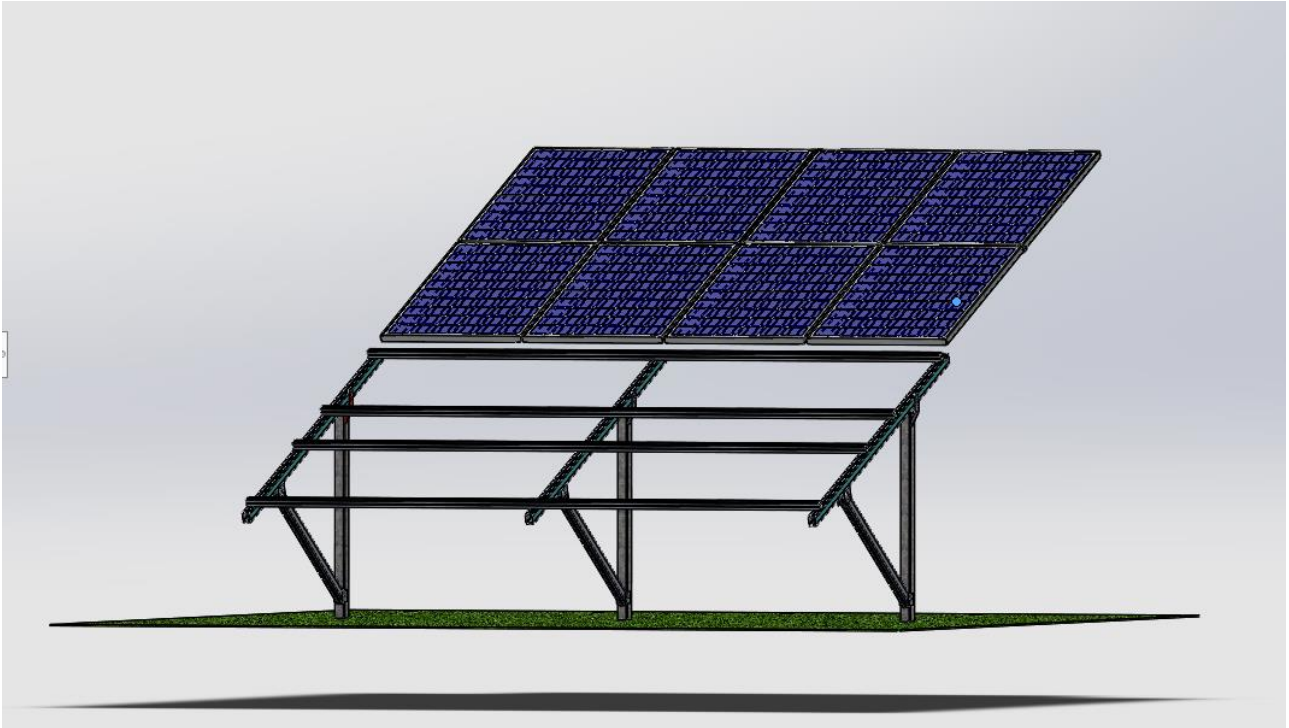
Η σύνθεση της βάσης στήριξης Helios 2100 AS190 με το λογισμικό SolidWorks ξεκινάει εφόσον έχουν σχεδιαστεί όλα τα εξαρτήματα που την απαρτίζουν, και έχει επιλεγεί και το φωτοβολταϊκό πάνελ που θα τοποθετηθεί στην βάση. Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκε η σχεδίαση κάποιων εξαρτημάτων όπου απαρτίζουν την βάση. Η σύνθεση της βάσης γίνεται με από την επιλογή του κεντρικού μενού **Assembly**, όπου τοποθετούνται διαδοχικά ένα προς ένα τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται η βάση στήριξης. Στην συνέχεια ορίζονται οι συνδέσεις όπου έχουν μεταξύ τους τα εξαρτήματα, καθώς και τελικές τους θέσεις. Η τελική μορφή της βάσης χωρίς την προσθήκη των φωτοβολταϊκών διακρίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 5.32 Προφίλ της βάσεως στήριξης.

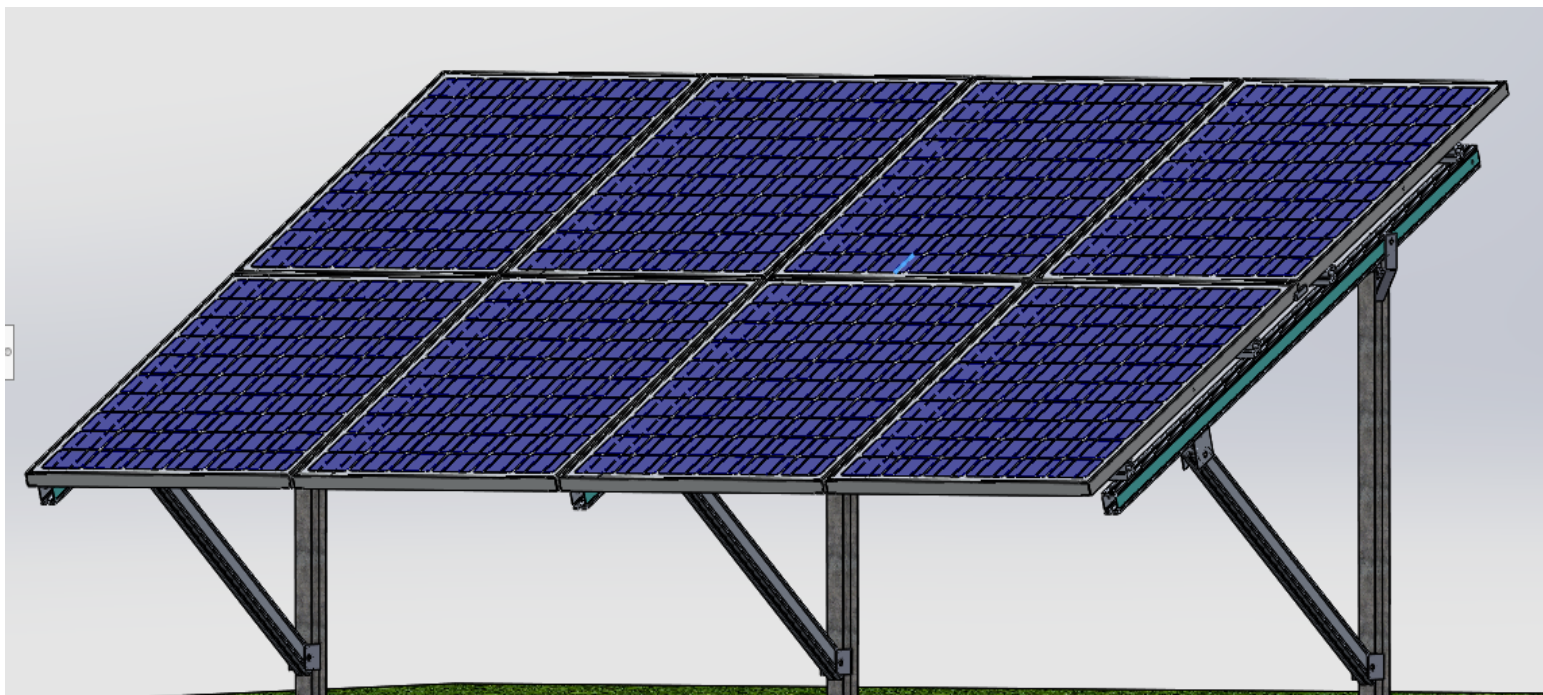


Σχήμα 5.33 Σχηματική αναπαράσταση της βάσεως χωρίς τα φωτοβολταϊκά πάνελ.



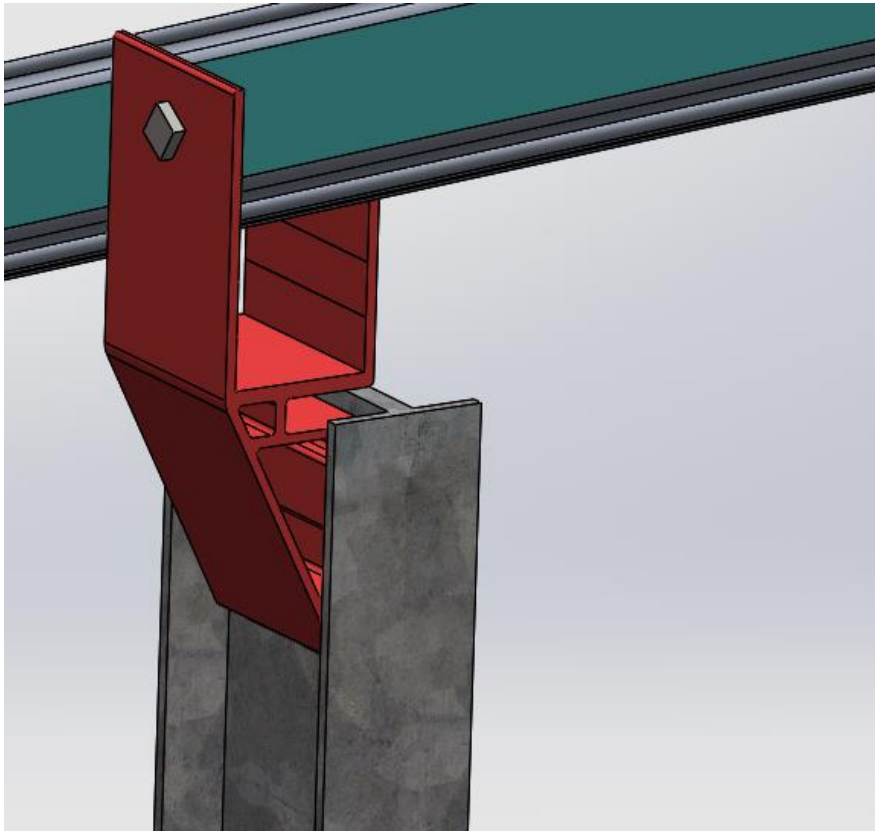
Σχήμα 5.34 Βάση στήριξης

Αυτή είναι η τελική μορφή της βάσης όπου έχουν τοποθετηθεί τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Τα πάνελ τοποθετούνται επάνω στο βασικό προφίλ αλουμινίου με ειδικούς συνδέσμους ώστε να υπάρχει τέλεια εφαρμογή. Έχουν τοποθετηθεί 8 φωτοβολταϊκά πάνελ σε συνολική κατασκευή τεσσάρων μέτρων μήκους. Τα πάνελ είναι της κατασκευάστριας εταιρίας SHARP και πιο συγκεκριμένα το μοντέλο **SharpNUU240F2** (τεχνικό φυλλάδιο στο παράρτημα 2).



Σχήμα 5.35 Ολοκληρωμένο σύστημα στήριξης φωτοβολταϊκών πάνελ.

Σε αυτό το σχήμα παρατηρείτε ο σύνδεσμος όπου σχεδιάστηκε και με ποιόν τρόπο τοποθετείται στην βάση στήριξης των φωτοβολταϊκών συνδέοντας την χαλύβδινη δοκό στήριξης με το βασικό προφίλ αλουμινίου, όπου πάνω σε αυτό στηρίζονται τα φωτοβολταϊκά πάνελ.

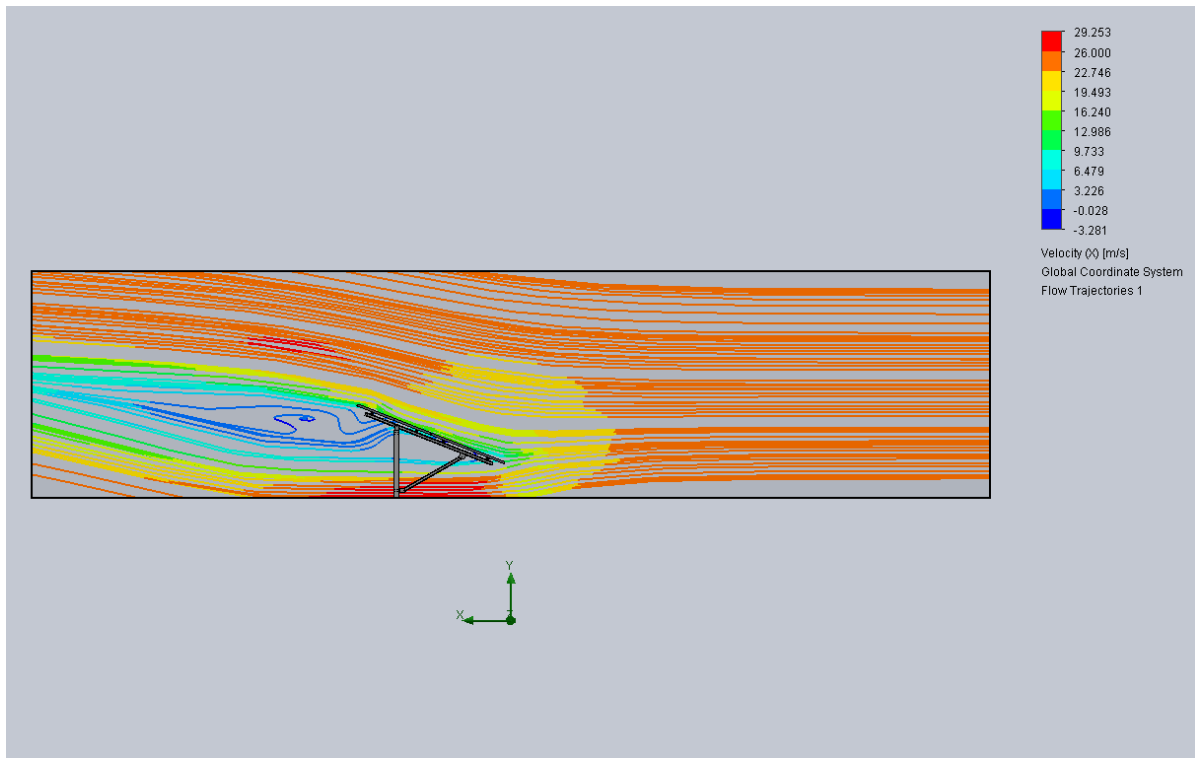


Σχήμα 5.36 Πεδίο τοποθέτησης του συνδέσμου.

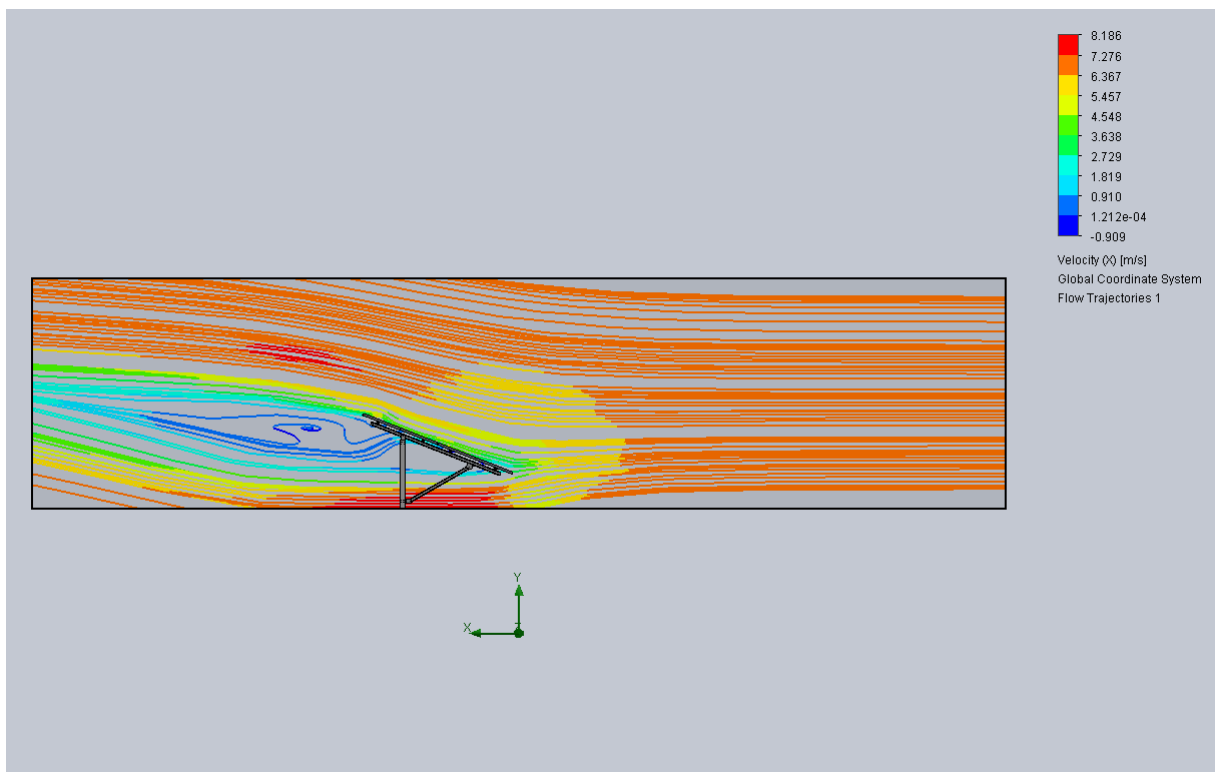
5.6. Flow Simulation της βάσης στήριξης με το λογισμικό SolidWorks

Το λογισμικό SolidWorks πέραν των άλλων, διαθέτει ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για τις ανάγκες του μηχανικού το οποίο είναι το **Flow Simulation**. Αυτό το εργαλείο δίνει την δυνατότητα να προσομοιωθεί η βάση στήριξης σε συνθήκες όπου ορίζει ο σχεδιαστής. Οι παράμετροι που μπορούν να οριστούν στην προσομοίωση αφορούν κυρίως τις ανεμοπιέσεις που ασκούνται στην βάση στήριξης. Είναι σημαντικό να γνωρίζει ο μηχανικός – σχεδιαστής την συμπεριφορά της βάσης στήριξης φωτοβολταϊκών, τα φορτία του ανέμου όπου ασκούνται διότι οι βάσεις τοποθετούνται σε ορεινές ή παραθαλάσσιες περιοχές όπου αρκετές ημέρες τον χρόνο παρατηρούνται ακραία καιρικά φαινόμενα στα οποία πρέπει να αντέχει το σύστημα στήριξης και να μην επηρεάζεται η στατική δομή του.

Υλοποιούνται δυο παραδείγματα με διαφορετικές παραμέτρους, όσον αφορά τα φορτία του αέρα. Στο πρώτο παράδειγμα η τιμή του ανέμου όπου εφαρμόζεται είναι της τάξεως των **8 m/s** όπου αντιστοιχίζεται στην κλίμακα μποφόρ σε 4 μποφόρ, όπου ο καιρός είναι σχεδόν μέτριος. Στο επόμενο παράδειγμα εφαρμόζεται τιμή ανέμου της τάξεως των **30 m/s** όπου αντιστοιχίζεται στην κλίμακα μποφόρ σε 11 μποφόρ, όπου ο καιρός που επικρατεί είναι βίαιη – σφοδρή θύελλα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων διακρίνονται στα παρακάτω σχήματα, καθώς και τα διαγράμματα των ανεμοπιέσεων.

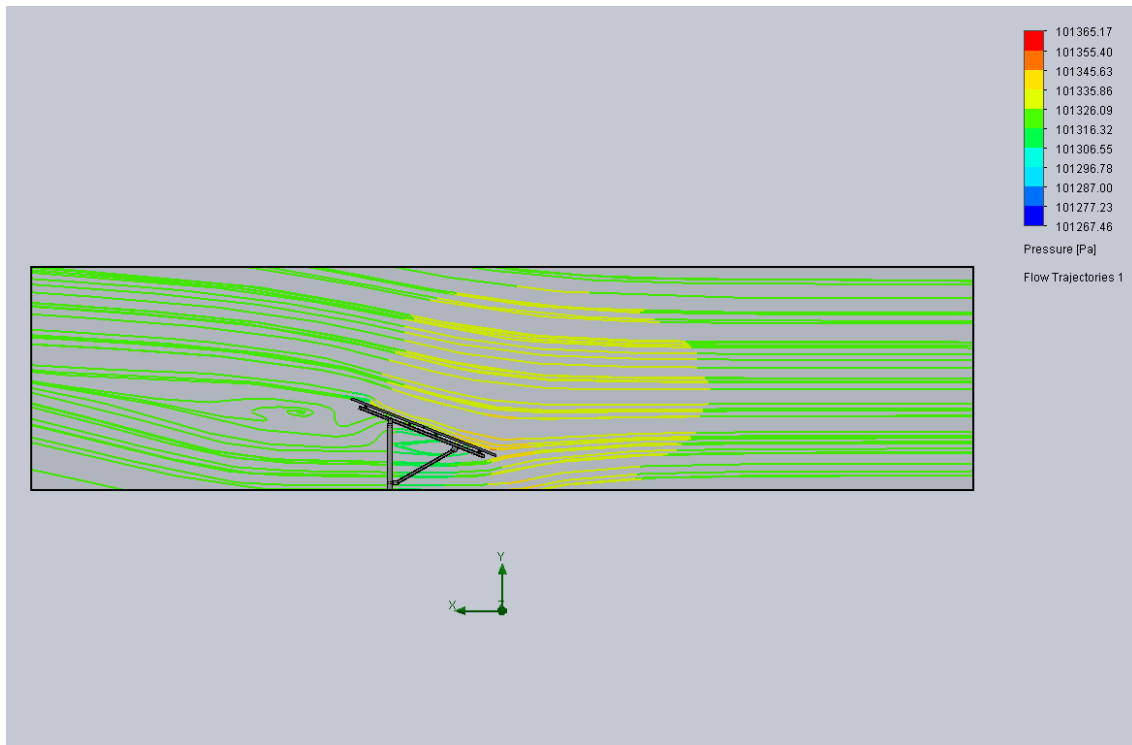


Σχήμα 5.37 Προσομοίωση της βάσης στην κλίμακα των 4 μπόφόρ, ταχύτητα ανέμου.

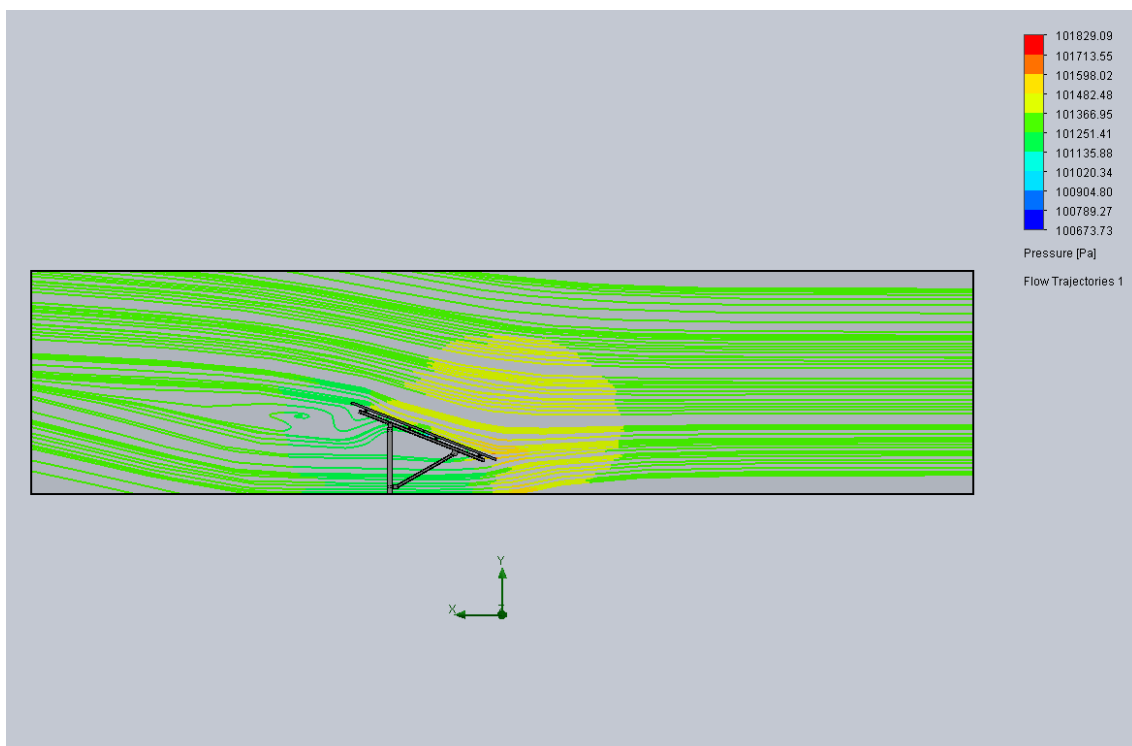


Σχήμα 5.38 Προσομοίωση της βάσης στην κλίμακα των 11 μπόφόρ, ταχύτητα ανέμου.

Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη καταπόνηση που δέχεται η βάση στήριξης είναι στην βάση της, δηλαδή στην χαλύβδινη δοκό στήριξης και αυτή σε πολύ μικρή επιφάνεια. Αυτό συμβαίνει λόγω της κλίσης όπου έχει συνολικά η κατασκευή και είναι 30°. Στα επόμενα σχήματα διακρίνεται η πίεση του ανέμου όπου υπάρχει πάνω και κάτω από τα φωτοβολταϊκά πάνελ.

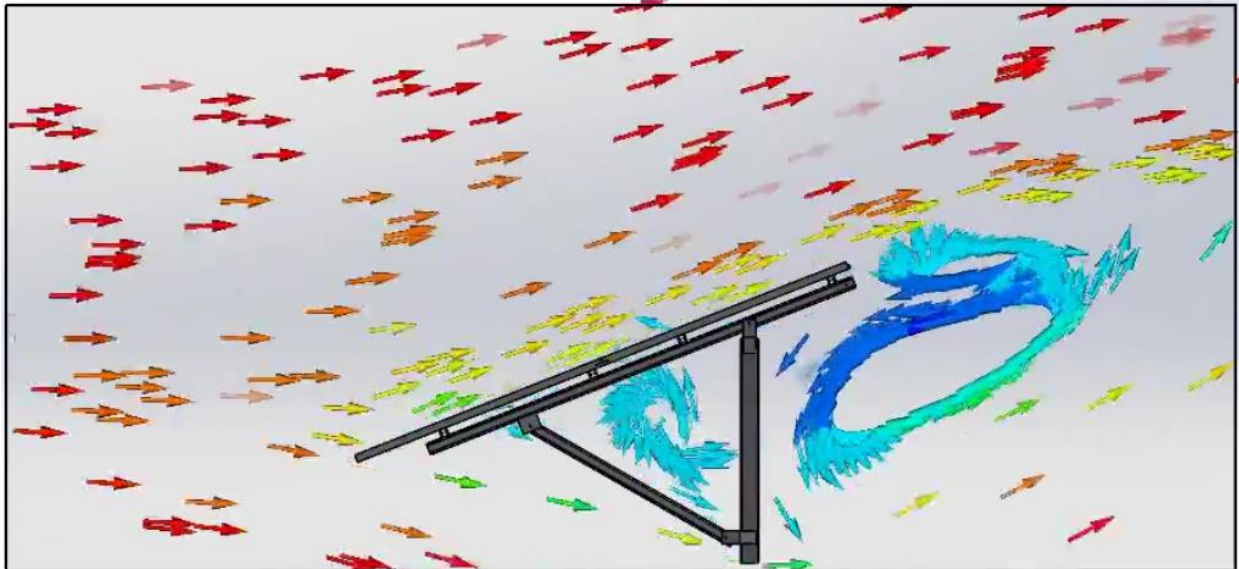


Σχήμα 5.39 Πίεση ανέμου στην περίπτωση των 4 μποφόρ.



Σχήμα 5.40 Πίεση ανέμου στην περίπτωση των 11 μποφόρ.

Η πίεση του ανέμου όπου υπάρχει στο άνω και κάτω τμήμα των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στην καταπόνηση τους διότι σε ακραία φαινόμενα και όταν η κλίση τους ως προς το έδαφος είναι σε διαφορετικές τιμές από αυτή των 30° παρατηρούνται στροβιλισμοί στο κάτω τμήμα των φωτοβολταϊκών καθώς και στο τελείωμα της κατασκευής (σχήμα 5.41) που μπορεί να είναι καταστροφικοί για την στατική δομή της συνολικής κατασκευής.



Σχήμα 5.41 Στροβιλισμοί του αέρα στην βάση στήριξης των φωτοβολταϊκών πάνελ.

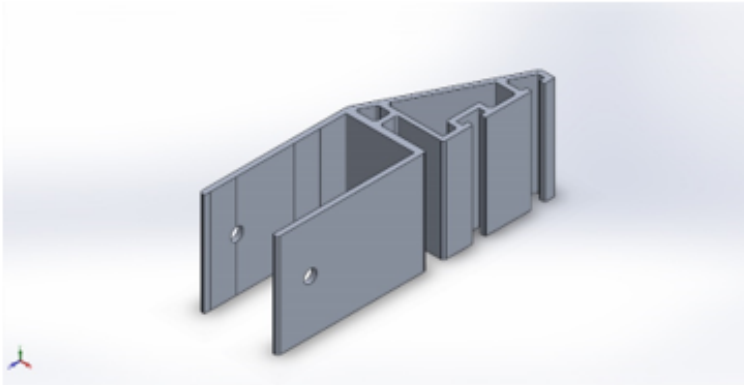
Συμπεράσματα

Όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, η προσομοίωση ενός μοντέλου, ενός συστήματος ή ενός τελικού προϊόντος έχει πολύ μεγάλη σημασία για τον μηχανικό – σχεδιαστή και αυτό διότι δίνεται η δυνατότητα παρατήρησης του μοντέλου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Στην σύγχρονη βιομηχανία είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση και ο έλεγχος ενός εξαρτήματος, πόσο μάλλον ενός συστήματος, διότι μπορούν να προβλεφθούν πριν την παραγωγική διαδικασία λάθη στατικής δομής, διαφοροποιήσεις ως προς την επιλογή του κατάλληλου υλικού, ακόμη και ως προς τον χρόνο παραγωγής του εξαρτήματος. Παρατηρήθηκε μετά από διάφορα μοντέλα που αναπτύχθηκαν, αδυναμίες στατικής δομής, όπου μπορούσαν να διορθωθούν με την επιλογή διαφορετικού υλικού. Ακόμη δίνετε η δυνατότητα επιλογής της σύστασης του υλικού, δηλαδή του βάρους του, όπου μπορεί να σημάνει μειωμένο κόστος παραγωγής.

Συμπερασματικά το λογισμικό **SolidWorks** είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα σχεδίασης καθώς και προσομοίωσης, όπου διαδραματίζει πρωταρχικό ρόλο στην παραγωγική διαδικασία ενός νέου εξαρτήματος – συστήματος στην σύγχρονη βιομηχανία. Το λογισμικό αυτό είναι ένα πολυεργαλείο στα χέρια του μηχανικού – σχεδιαστή και μπορεί να εκτοξεύσει της ιδέες του, δημιουργώντας μοντέλα προσομοιάζοντας τα και δοκιμάζοντας τα σε πραγματικές συνθήκες.

Πολύ σημαντική, για την ερεύνα και ανάπτυξη ενός εξαρτήματος, κρίνεται η δυνατότητα έκδοσης τεχνικού εγγράφου με την στατική μελέτη και όλα τα απαραίτητα σχεδιαγράμματα.

Όσον αφορά την βάση στήριξης των φωτοβολταϊκών, η μεγαλύτερη καταπόνηση που δέχεται παρατηρείται στην χαλύβδινη δοκό στήριξης. Για αυτόν το λόγο έχει γίνει και η επιλογή του συγκεκριμένου υλικού και σε αυτές της διαστάσεις.



Simulation of part component

Date: Σάββατο, 19 Σεπτεμβρίου 2020
Designer: George Fotiadis
Study name: Static 1
Analysis type: Static

Table of Contents

Description	1
Assumptions	2
Model Information	2
Study Properties	3
Units	3
Material Properties	4
Loads and Fixtures	5
Connector Definitions	5
Contact Information	6
Mesh information	7
Sensor Details	8
Resultant Forces	8
Beams	9
Study Results	10
Conclusion	13

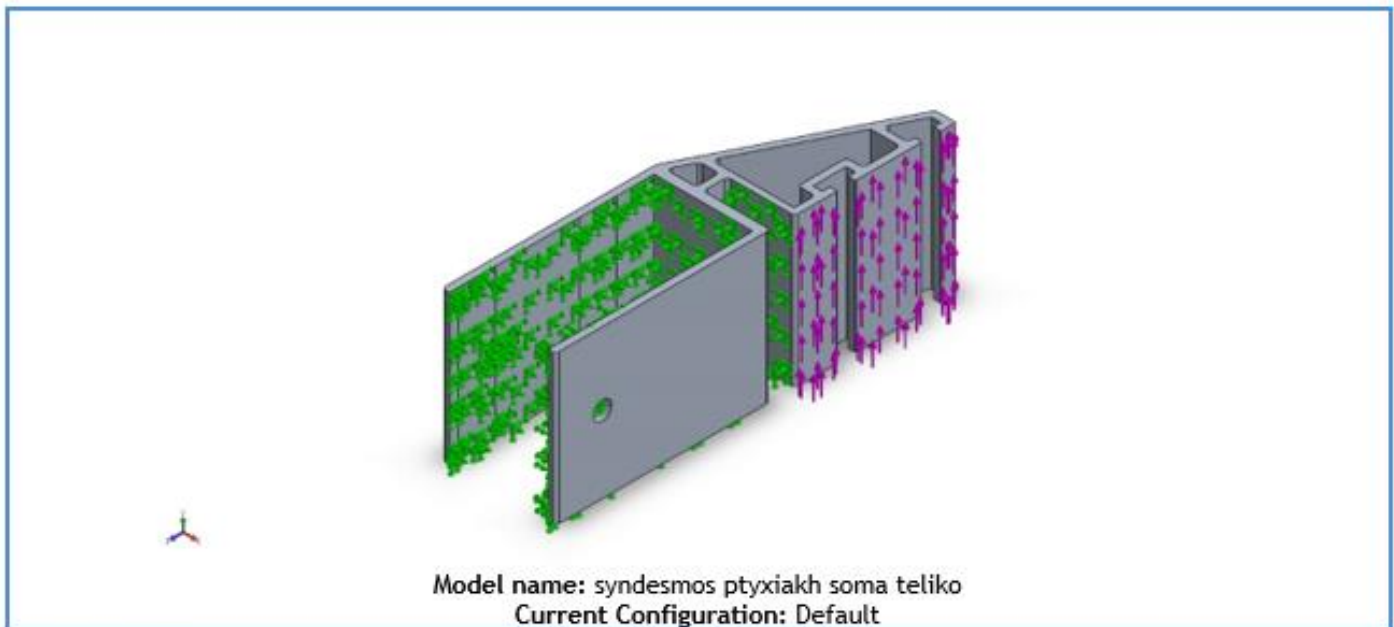
Description

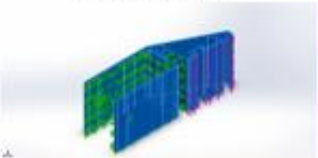
No Data

Assumptions



Model Information



Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Cut-Extrude1 	Solid Body	Mass:0.503329 kg Volume:0.000186418 m ³ Density:2700 kg/m ³ Weight:4.93262 N	C:\Users\asus rog\Desktop\ΠΤΥΧΙΑΚΗ\sy ndesmos ptyxiakh soma teliko.SLDPRT

Study Properties

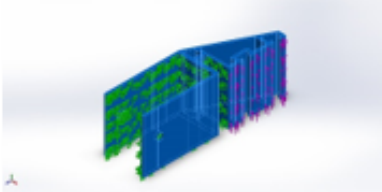
Study name	Static 1
Analysis type	Static
Mesh type	Solid Mesh
Thermal Effect:	On
Thermal option	Include temperature loads
Zero strain temperature	298 Kelvin
Include fluid pressure effects from SOLIDWORKS Flow Simulation	Off
Solver type	FFEPlus
Inplane Effect:	Off
Soft Spring:	Off
Inertial Relief:	Off
Incompatible bonding options	Automatic
Large displacement	Off
Compute free body forces	On
Friction	Off
Use Adaptive Method:	Off
Result folder	SOLIDWORKS document (C:\Users\asus rog\Desktop\ΠΤΥΧΙΑΚΗ)

Units

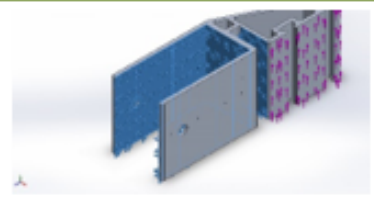
Unit system:	SI (MKS)
Length/Displacement	mm
Temperature	Kelvin
Angular velocity	Rad/sec
Pressure/Stress	N/m ²



Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	<p>Name: 6063-T6 Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 2.15e+008 N/m² Tensile strength: 2.4e+008 N/m² Elastic modulus: 6.9e+010 N/m² Poisson's ratio: 0.33 Mass density: 2700 kg/m³ Shear modulus: 2.58e+010 N/m² Thermal expansion coefficient: 2.34e-005 /Kelvin</p>	<p>SolidBody 1(Cut-Extrude1)(syndesmos ptyxiakh soma teliko)</p>
Curve Data:N/A		

Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
Fixed-1		Entities: 13 face(s) Type: Fixed Geometry		
Resultant Forces				
Components	X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)	0.0702124	-15000	-0.151415	15000
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0

Load name	Load Image	Load Details
Force-1		Entities: 3 face(s) Type: Apply force Values: 5000, ---, --- N

Connector Definitions

No Data



Contact Information

No Data



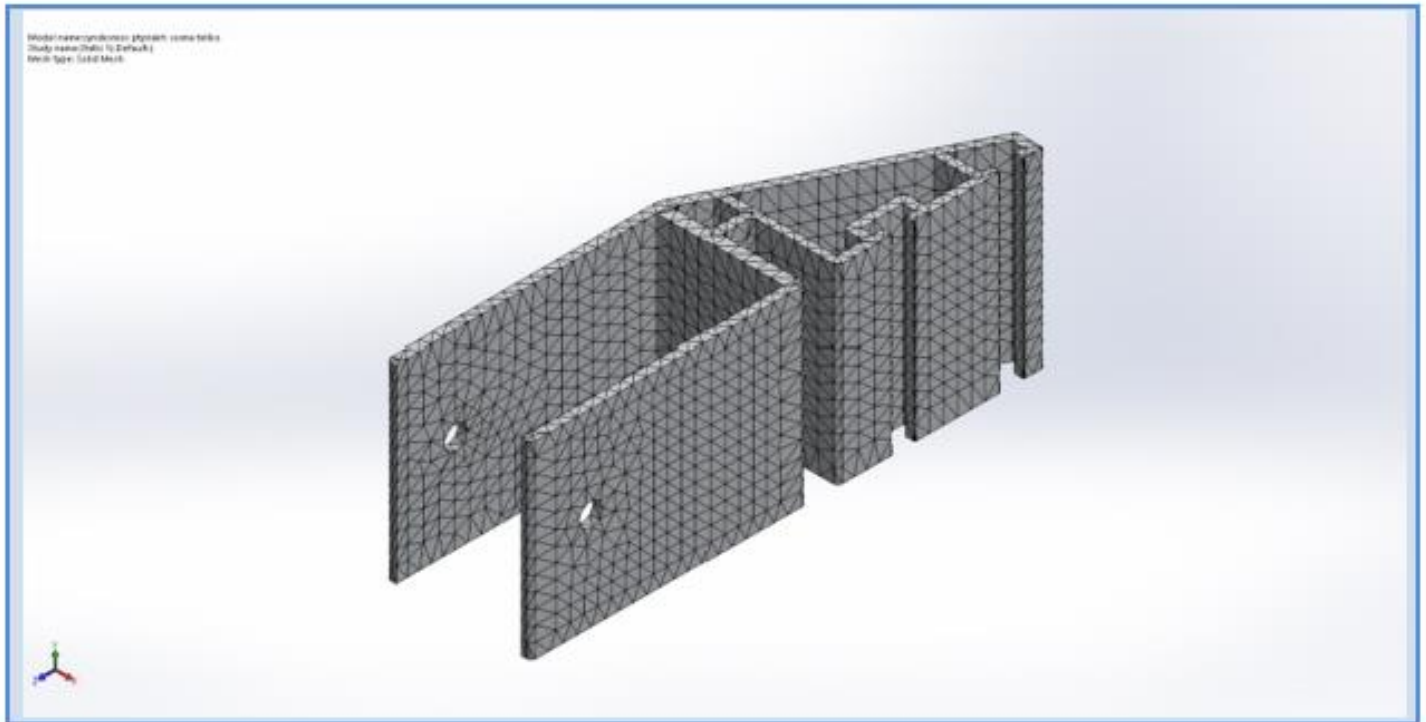
Mesh information

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points	4 Points
Element Size	6.13639 mm
Tolerance	0.30682 mm
Mesh Quality Plot	High

Mesh information - Details

Total Nodes	18221
Total Elements	9091
Maximum Aspect Ratio	34.537
% of elements with Aspect Ratio < 3	85.5
% of elements with Aspect Ratio > 10	0.154
% of distorted elements(Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:01
Computer name:	





Sensor Details

No Data

Resultant Forces

Reaction forces

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	0.0702124	-15000	-0.151415	15000

Reaction Moments

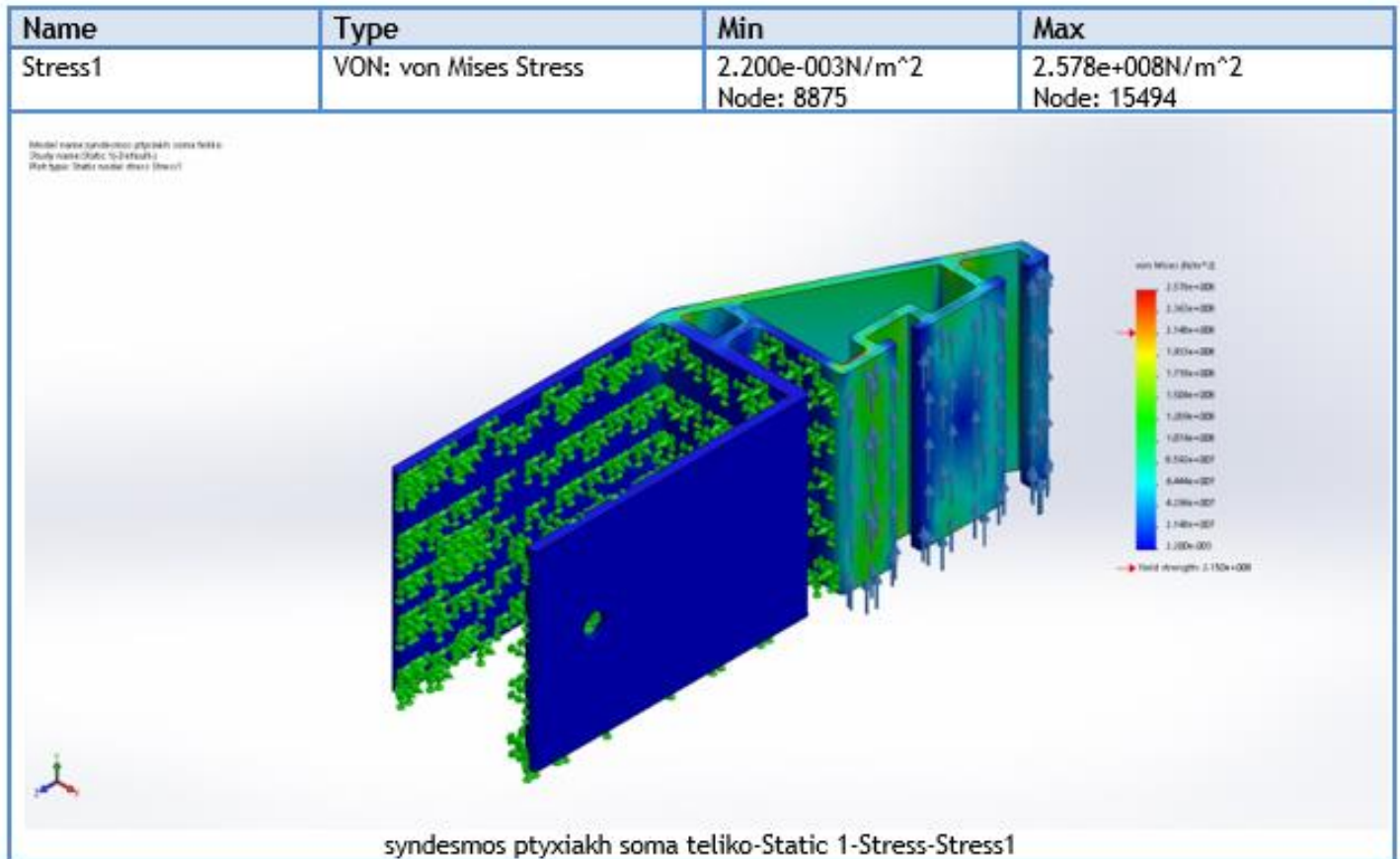
Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N.m	0	0	0	0



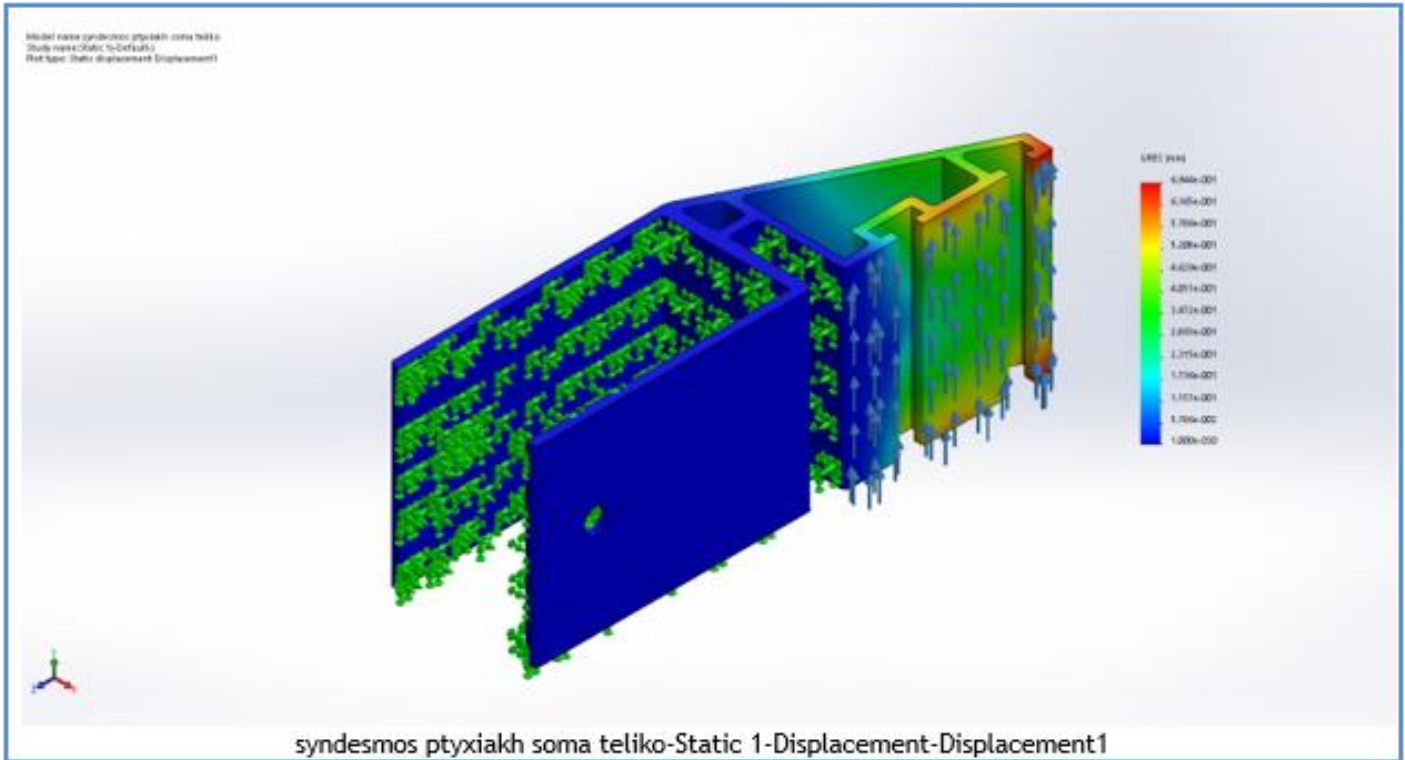
Beams
No Data



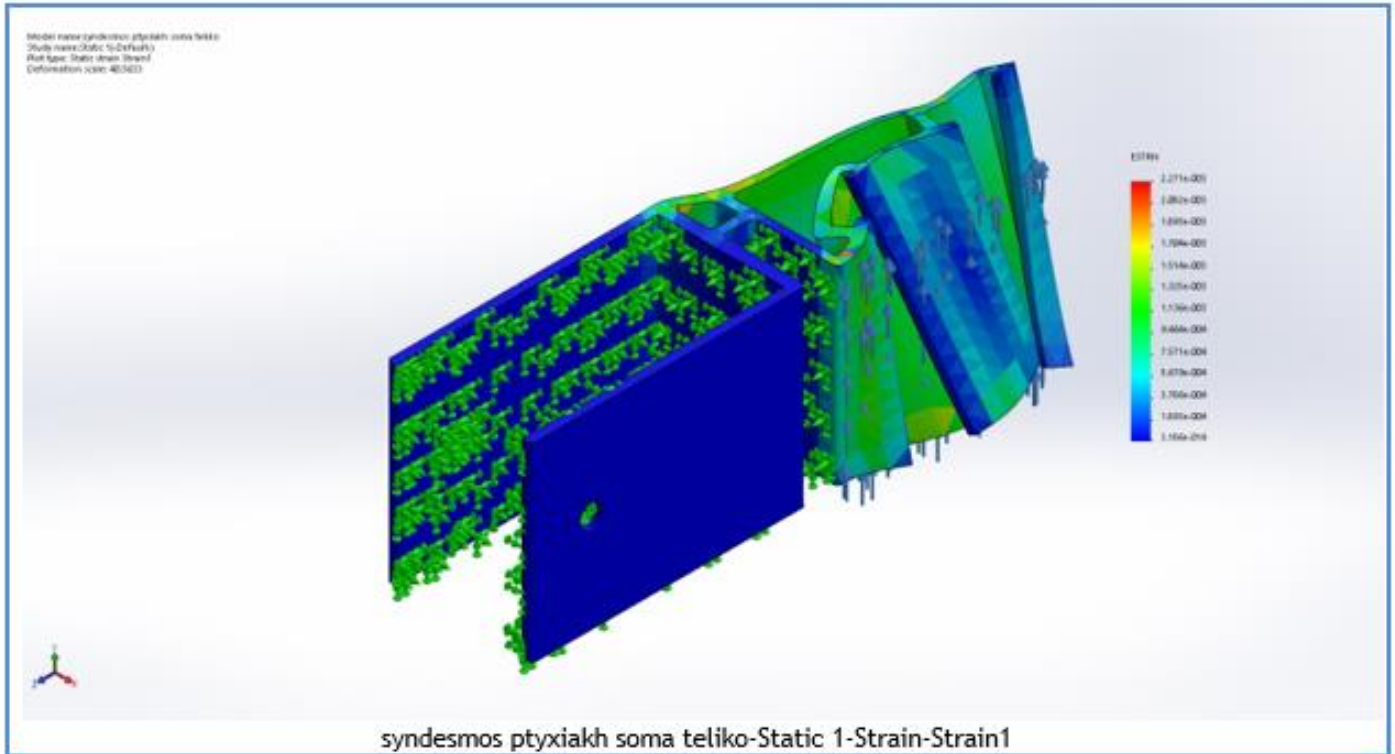
Study Results



Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement	0.000e+000mm Node: 5	6.944e-001mm Node: 4316



Name	Type	Min	Max
Strain1	ESTRN: Equivalent Strain	3.186e-014 Element: 6595	2.271e-003 Element: 207



Model name: component_simulation_name_title
(Study name: Static (1) Default)
Plot type: Stress (von Mises Stress)

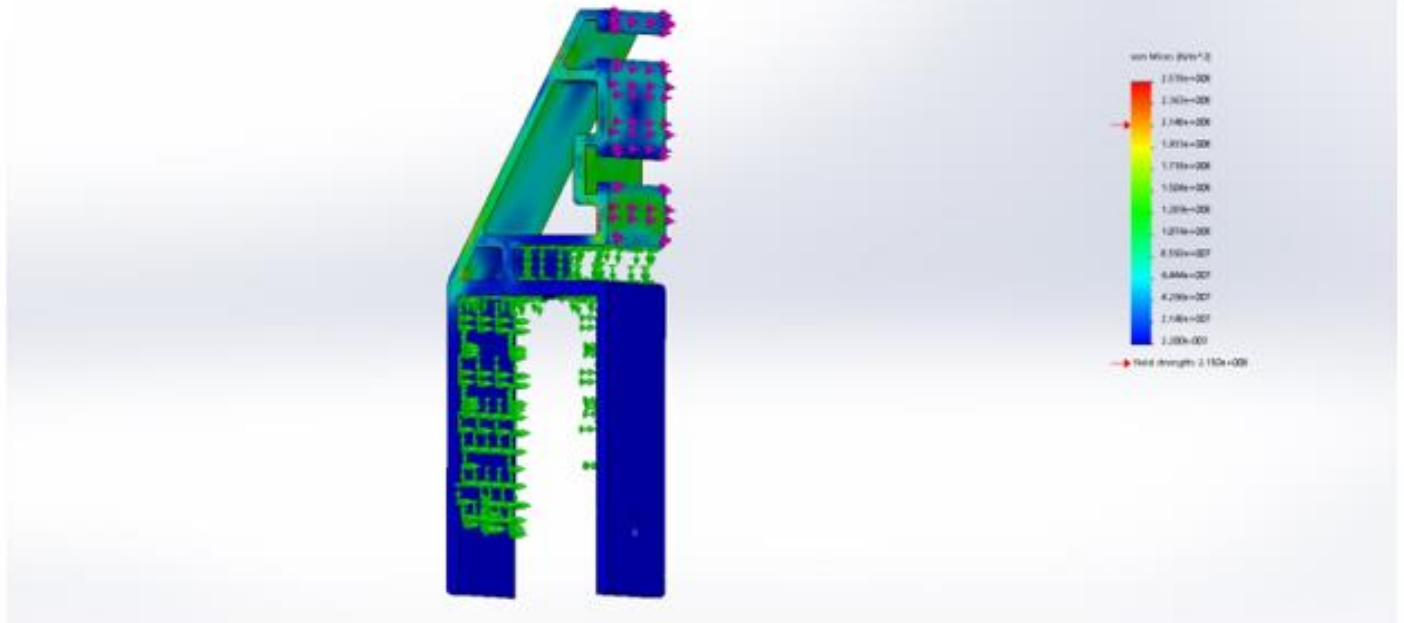


Image-1

Conclusion



SHARP

solar electricity

240 WATT

MULTI-PURPOSE MODULE

NEC 2008 Compliant



NU-U240F2

MULTI-PURPOSE 240 WATT
MODULE FROM THE WORLD'S
TRUSTED SOURCE FOR SOLAR.

Using breakthrough technology, made possible by nearly 50 years of proprietary research and development, Sharp's NU-U240F2 solar module incorporates an advanced cell surface texturing process to increase light absorption and improve efficiency. Common applications include commercial and residential grid-tied roof systems as well as ground mounted arrays. Designed to withstand many harsh operating conditions, this module offers high power output per square foot of solar array.



Business leaders install this module in large commercial applications, demonstrating financial astuteness and environmental stewardship.

ENGINEERING EXCELLENCE

High module efficiency for an outstanding balance of size and weight to power and performance.

DURABLE

Tempered glass, EVA lamination and weatherproof backskin provide long-life and enhanced cell performance.

RELIABLE

25-year limited warranty on power output.

HIGH PERFORMANCE

This module uses an advanced solar cell surface texturing process to increase light absorption and improve efficiency.

INNOVATIVE

156 mm pseudo-square monocrystalline solar cells provide high power output. Ideal for large commercial rooftops where space is a premium.



The NU-U240F2 offers industry-leading performance for a variety of applications.

Improved Frame Technology

SHARP: THE NAME TO TRUST

When you choose Sharp, you get more than well-engineered products. You also get Sharp's proven reliability, outstanding customer service and the assurance of our 25-year limited warranty on power output. A global leader in solar electricity, Sharp powers more homes and businesses than any other solar manufacturer worldwide.

BECOME POWERFUL

240 WATT

NU-U240F2

NEC 2008 Compliant
Module output cables: 12 AWG PV Wire

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Maximum Power (Pmax)*	240 W
Tolerance of Pmax	+10%/-5%
Type of Cell	Monocrystalline silicon
Cell Configuration	60 in series
Open Circuit Voltage (Voc)	37.4 V
Maximum Power Voltage (Vpm)	30.1 V
Short Circuit Current (Isc)	8.65 A
Maximum Power Current (Ipm)	7.98 A
Module Efficiency (%)	14.7%
Maximum System (DC) Voltage	600 V
Series Fuse Rating	15 A
NOCT	47.5°C
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.485%/°C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.351%/°C
Temperature Coefficient (Isc)	0.053%/°C

*Illumination of 1 kW/m² (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5 (ASTM E892 global spectral irradiance) at a cell temperature of 25°C.


MECHANICAL CHARACTERISTICS

Dimensions (A x B x C below)	39.3" x 64.6" x 1.8"/994 x 1640 x 46 mm
Cable Length (G)	43.3"/1100 mm
Output Interconnect Cable**	12 AWG with MC4 Locking Connector
Weight	41.9 lbs / 19.0 kg
Max Load	50 psf (2400 Pascals)
Operating Temperature (cell)	-40 to 194°F / -40 to 90°C

**A safety lock clip (Multi Contact part number PV-55H4) may be required in readily accessible locations per NEC 2008 690.33 (C)

**PV Wire per UL Subject 4703

QUALIFICATIONS

UL Listed	UL 1703	
Fire Rating	Class C	

WARRANTY

25-year limited warranty on power output
Contact Sharp for complete warranty information

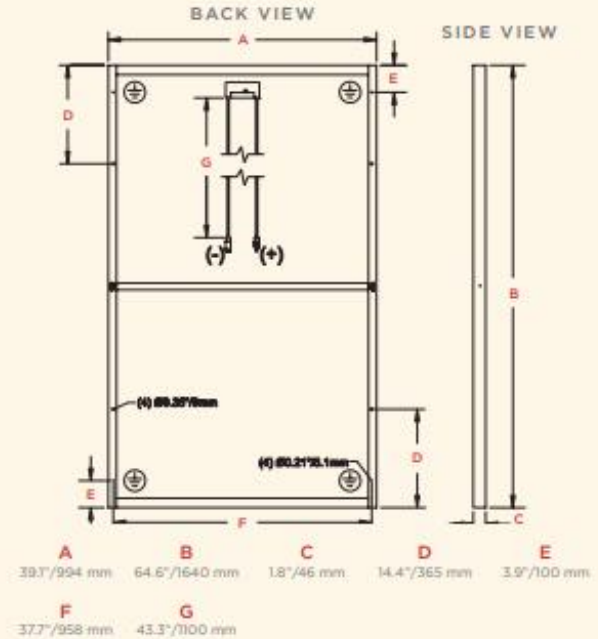
Design and specifications are subject to change without notice.
Sharp is a registered trademark of Sharp Corporation. All other trademarks are property of their respective owners. Contact Sharp to obtain the latest product manuals before using any Sharp device. Cover photo: Solar Installation by SPG Solar.



SHARP®

SHARP ELECTRONICS CORPORATION
5901 Bolsa Avenue, Huntington Beach, CA 92647
1-800-SOLAR-06 • Email: sharpsolar@sharpusa.com
www.sharpusa.com/solar

DIMENSIONS



Contact Sharp for tolerance specifications

"BUY AMERICAN"

Sharp solar modules are manufactured in the United States and Japan, and qualify as "American" goods under the "Buy American" clause of the American Recovery and Reinvestment Act (ARRA).

Βιβλιογραφία

- Κιοσκερίδης Ιορδάνης, **ΑΝΑΝΑΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ**: ΤΖΙΟΛΑΣ, 2017.
- Νικόλαος Ανδρίτσος, **ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ** , Διδακτικές σημειώσεις: Βόλος 2008.
- Tirupathi R. Chandrupatla, Asok D. Belegundu, **ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ**, ΑΘΗΝΑ: ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, 2005.
- Γεώργιος Β. Ασημακόπουλος, Σπυρίδων Β. Λέτσης, **ΜΕΛΕΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ 60KW**. Πτυχιακή εργασία, ΑΘΗΝΑ 2013.
- Κόλλιας Ιωάννης, **ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ**, Πτυχιακή εργασία, ΑΘΗΝΑ 2016.
- Μακρής Παναγιώτης, Ψυλάκης Γεώργιος, **ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**, Διπλωματική εργασία, ΧΑΝΙΑ 2015.
- Μπιλάλης Νικόλαος, Μαραβελάκης Εμμανουήλ, **ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD/CAM ΚΑΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ**, ΑΘΗΝΑ: ΚΡΙΤΙΚΗ, 2009.
- Μπούνταλης Σταύρος, **ΔΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ**, Διπλωματική Εργασία, ΧΑΝΙΑ: 2013.
- AlfaSolid, **ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SolidWorks**, <http://www.alfasolid.gr/>
- Innovera, **ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SolidWorks**, <https://innovera.gr/>
- SolidWorks, **ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SolidWorks**, <https://www.solidworks.com/>
- ΡΑΕ, **Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας**, <http://www.rae.gr/>
- Κ.Α.Π.Ε, **Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**, <http://www.cres.gr/cres/index.html>
- ΣΠΕΦ, **Σύνδεσμος Παραγωγών Ενέργειας Με Φωτοβολταϊκά**, <https://www.spef.gr/index.php/el/>
- Helapco, **Σύνδεσμος Εταιρών Φωτοβολταϊκών**, <https://helapco.gr/>
- Alumil, **Κατασκευάστρια εταιρία προφίλ αλουμινίου**, <https://www.alumil.com/greece/homeowners/products>
- Alumil Solar, **Συστήματα στήριξης φωτοβολταϊκών**, <https://www.alumilsolar.com/>