ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Βέλτιστος Σχεδιασμός Φωτοβολταϊκών Συστημάτων σε ένα Χώρο με βάση Οικονομικά και Περιβαλλοντικά Κριτήρια

Παπασταύρου Κ. Χαράλαμπος

Διπλωματική Εργασία

Εξεταστική Επιτροπή

Κ. Καλαϊτζάκης (Καθηγητής, Επιβλέπων)
Γ. Σταυρακάκης (Καθηγητής)
Θ. Τσούτσος (Αναπληρωτής Καθηγητής)

Χανιά 2011

Βέλτιστος Σχεδιασμός Φωτοβολταϊκών Συστημάτων σε ένα Χώρο με βάση Οικονομικά και Περιβαλλοντικά Κριτήρια

Χαράλαμπος Κ. Παπασταύρου

Κ. Καλαϊτζάκης (Καθηγητής, Επιβλέπων)
Γ. Σταυρακάκης (Καθηγητής)
Θ. Τσούτσος (Αναπληρωτής Καθηγητής)

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο για την επίβλεψη της παρούσης διπλωματικής εργασίας και την υπομονή και συμπαράσταση που έδειξε μέχρι την αποπεράτωση της. Επίσης τον Καθηγητή κ. Σταυρακάκη Γεώργιο και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Τσούτσο Θεοχάρη για την συμμετοχή τους στην επιτροπή αξιολόγησης. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον κ. Κορνελάκη Άρη για την πολύτιμη βοήθεια του και την καθοδήγηση. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για τη στήριξη που επέδειξαν στα δύσκολα.

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ – Σκοποί, στόχοι και ιδέες

Πρόλογος Πρώτου Μέρους

Στο πρώτο μέρος της παρούσης εργασίας επιχειρείται η εισαγωγή του αναγνώστη στη μελέτη των ζητημάτων του αειφόρου σχεδιασμού κατά την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων με τα οποία ασχολείται η εργασία.

Έτσι, παρατίθεται σύντομη ιστορική αναδρομή ενώ παρουσιάζεται λεπτομερώς η αναγκαιότητα συνύπαρξης οικονομικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων στον σχεδιασμό κάθε εγκατάστασης. Επίσης, γίνεται μια εισαγωγή στην σημασία της Ηλιακής ακτινοβολίας πως αυτή καταλήγει στην Γήινη επιφάνεια και ορίζεται η σημαντική για τα φωτοβολταϊκά ακτινοβολία «ενός πλήρους Ηλίου».

Χάριν περισσότερο ολοκληρωμένης παρουσίασης γίνεται μια εκτενής αναφορά στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, παρατίθενται αναφορές στη φωτοβολταϊκή μετατροπή, ώστε να υπάρξει και η διασύνδεση με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια των οποίων τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες είναι η βάση για τα πειράματα στο δεύτερο μέρος της παρούσης εργασίας. Γίνεται ακόμα μια μικρή αναφορά στις υπάρχουσες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Το πρώτο μέρος κλείνει με τον ορισμό της μεθόδου της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Επεξηγούνται τα διάφορα στάδια και τα εργαλεία της μεθόδου, για να γίνει πιο κατανοητή η λογική της πάνω στην οποία στηρίχθηκαν πολλά για την συλλογή στοιχείων που μετέπειτα χρησιμοποιήθηκαν στην υλοποίηση του λογισμικού.

1. Εισαγωγή

1.1 Η Αναγκαιότητα Συνύπαρξης Οικονομικών και Περιβαλλοντικών Κριτηρίων κατά τον Αναπτυξιακό Σχεδιασμό

Η επιτάχυνση της κλιματικής αλλαγής αλλά και οι ορατές πλέον συνέπειες της παγκόσμιας οικονομικής κρίσης, όπως ο συνεχώς μειούμενος ρυθμός ανάπτυξης, οι ολοένα και περισσότερες καταρρέουσες επιχειρήσεις και οι εκατομμύρια οδηγούμενοι στην ανεργία ή την υποαπασχόληση, καθιστούν περισσότερο επίκαιρη παρά ποτέ την ανάγκη αλλαγής αναπτυξιακού μοντέλου.

Ως εκ τούτου, προκύπτει σαφώς ότι η στροφή προς τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) δεν είναι επιβεβλημένη μόνο για περιβαλλοντικούς λόγους, αλλά κυρίως διότι τα βασικά χαρακτηριστικά τους τις καθιστούν συστατικό στοιχείο μιας νέας αναπτυξιακής πολιτικής. Τα κύρια αυτά χαρακτηριστικά δεν είναι άλλα από: ανεξάντλητα συνολικώς αποθέματα, μεγάλη διασπορά στο χώρο, αμελητέες επιπτώσεις στο περιβάλλον, μικρά μεγέθη και ευέλικτη διαχείριση, και φυσικά δημιουργία νέων αποκεντρωμένων θέσεων εργασίας.

Επιπλέον, οι ΑΠΕ είναι οι μόνες πηγές ενέργειας που συνεισφέρουν σημαντικά και στους τρεις άξονες της ευρωπαϊκής πολιτικής για την ανάπτυξη: την ανταγωνιστικότητα, την προστασία του περιβάλλοντος και την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού. Πρόσφατα, η Ευρωπαϊκή Ένωση υπερψήφισε το λεγόμενο «κλιματικό-ενεργειακό πακέτο», που αφορά στη μείωση εκπομπών Διοξειδίου του Άνθρακα (ΔτΑ, CO_2) κατά 20%, την αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ στην τελική ενεργειακή κατανάλωση κατά 20% και την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας κατά 20%, μέχρι το 2020.

Η Ελλάδα είναι γνωστό ότι διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο δυναμικό ΑΠΕ. Με αιχμή την αιολική ενέργεια και με σημαντική συνεισφορά από την ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά), τόσο στις εφαρμογές στα κτίρια, όσο και σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, εκτιμάται ότι μπορεί με την ορθολογική αξιοποίηση των ΑΠΕ να καλύψει το 33% των ηλεκτρικών αναγκών μέχρι το 2020, το 55% μέχρι το 2030 και το 85% μέχρι το 2050! Η ανάπτυξη της επιστήμης και της τεχνολογίας, αλλά και ειδικότερα η έρευνα προς τη μεγιστοποίηση της δυνατότητας αξιοποίησης των ΑΠΕ, αναμένεται να ενισχύσουν σημαντικά τις προσπάθειες της χώρας προς επίτευξη των στόχων της.

Είναι μέσα σε αυτό το πνεύμα που εντάσσεται και η εργασία αυτή, ώστε να προσθέσει ένα λιθαράκι στις όλες τις προσπάθειες βέλτιστης αξιοποίησης των ΑΠΕ.

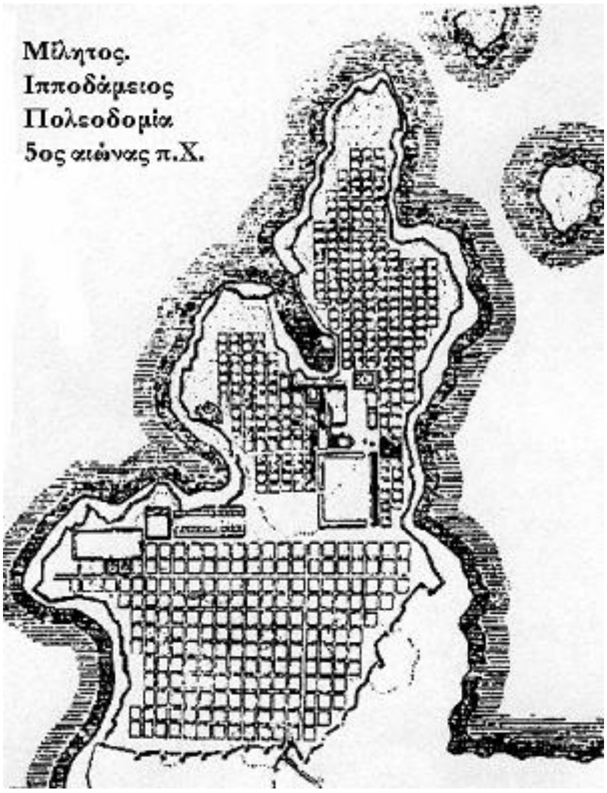
Με βάση τη μελέτη[1.1-1] τα φωτοβολταϊκά είναι η πιο «αντι-οικολογική» μορφή ΑΠΕ (32 g CO_2/ kWh_e στην καλύτερη των περιπτώσεων) μετά την παραγωγή ενέργειας με Γεωθερμία (38 g CO_2/ kWh_e), ποσό δύο και τρεις φορές μεγαλύτερο από άλλες μορφές όπως ανεμογεννήτριες (9-10 g CO_2/ kWh_e), υδροηλεκτρικά (10-13 g CO_2/ kWh_e) και ηλιοθερμικά (13 g CO_2/ kWh_e). Τα οφέλη των φωτοβολταϊκών όμως είναι πολλά και η εξάπλωση της χρήσης τους στον Ελληνικό χώρο και κυρίως στην Κρήτη μεγάλη, προσφέροντας μεγάλα οικονομικά κέρδη. Παρόλο που οι μελλοντικές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών (πχ. οργανικά φωτοβολταϊκά) υπόσχονται να μειώσουν δραστικά το περιβαλλοντικό κόστος ανά κιλοβατώρα, είναι σημαντικό να βρεθούν τρόποι έτσι ώστε να σχεδιάζονται φωτοβολταϊκά πάρκα με όσο το δυνατό πιο οικολογικά κριτήρια.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η χρήση της Ηλιακής Ακτινοβολίας ως πηγής ενέργειας είναι γνωστή στον άνθρωπο από τα βάθη της ιστορίας του.

Έστω και με τις απλούστερες εφαρμογές της θέρμανσης και της ξήρανσης τροφίμων (π.χ. φρούτων) και υλικών (π.χ. πλίνθων) ο άνθρωπος από πολύ νωρίς αντιλήφθηκε το ανεξάντλητο δυναμικό της πρωταρχικής αυτής μορφής ενέργειας. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι οι αρχαίοι λαοί λάτρεψαν εξ αρχής τον Ήλιο ως ζωοποιό, ζωοδότη και αναζωογονητή, καθιστώντας τον πανίσχυρη και κεντρική θεότητα στις θρησκείες τους. Παραδείγματα υπάρχουν πολλά και στην αρχαία Ελληνική φιλοσοφία και κοσμοαντίληψη με χαρακτηριστικότερα να είναι ο μύθος του Προμηθέα για την κατάκτηση του πυρός – «ενέργειας» ως σύμβολο της γνώσης, καθώς φυσικά και ο Έλληνας Θεός του Ήλιου, Απόλλων, η διασύνδεση του οποίου και με τις Τέχνες και τα Γράμματα υποδηλοί το φιλοσοφικό συσχετισμό από πλευράς Ελλήνων του Φωτός – Ενέργειας με την Επιστήμη και την Πρόοδο.

Οι αρχαίες Ελληνικές Πόλεις, ιδιαίτερα αυτές που ακολούθησαν το Ιπποδάμειο Σύστημα (Ιππόδαμος ο Μιλήσιος: ο πρώτος που έδωσε τις πλέον συστηματοποιημένες θεωρητικές γνώσεις πολεοδομίας, 5^{ος} αιώνας π.Χ), ήταν σχεδιασμένες και κτισμένες με ένα πλέγμα ορθογώνιων οικοδομικών τετραγώνων όπου διασταυρούμενες κάθετες και οριζόντιες οδοί στις κατευθύνσεις Ανατολή/Δύση και Βορράς/Νότος (Εικόνα 1.2-1) επέτρεπαν σε κάθε κατοικία να έχει ένα νοτίως προσανατολισμένο τοίχο από τα ανοίγματα του οποίου αξιοποιούνταν ο ήλιος. Ακόμα και ο μεγάλος Δάσκαλος Αριστοτέλης συμβούλευε τους κατασκευαστές προς αυτόν τον τρόπο δόμησης, που σήμερα ονομάζουμε βιοκλιματική αρχιτεκτονική[1.2-2], ώστε να αξιοποιείται όσο το δυνατόν περισσότερο η ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 1.2-1: : Ιπποδάμειος Πολεοδομία της Μιλήτου[1.2-1]

Φυσικά, ως κατ' εξοχήν εφαρμογές της ηλιακής ακτινοβολίας στον αρχαίο Ελληνικό και Ρωμαϊκό Κόσμο δε θα μπορούσε να παραλείψει κανείς αυτές που προέκυψαν από τη γνώση της κατοπτρικής, όπως η Ιερά Αφή της Ολυμπιακής Φλόγας (Εικόνα 1.2-2), όπου σημειώνεται ότι πραγματοποιούταν επίκληση στο Θεό Απόλλωνα, ή η καύση ρωμαϊκών πλοίων από τον Αρχιμήδη το Συρακούσιο. Οι δε Ρωμαίοι υπήρξαν οι πρώτοι στη χρήση γυαλιού στα ανοίγματα των τοίχων με τη σκέψη το διαφανές υλικό να αποτελέσει παγίδα θερμότητας επιτρέποντας την είσοδο ηλιακής ακτινοβολίας στο χώρο αλλά όχι και την ταχεία διαφυγή της. Μάλιστα είχαν θεσπίσει νόμο που απαγόρευε στα κτίρια να εμποδίζουν τον ήλιο να πέφτει στα αίθρια γειτονικών κτισμάτων[1.2-3].

Εικόνα 1.2-2: Σύγχρονη Αφή Ολυμπιακής Φλόγας στην Ολυμπία (Πηγή: www.hoc.gr)

Αργότερα, στην Ολλανδία του 18^{ου} αιώνα μ.Χ. κατασκεύαζαν τους νότιους χώρους με μεγάλα παράθυρα και πρόσθεταν παραπετάσματα που έκλειναν το βράδυ, ώστε να μονώνονται περαιτέρω οι χώροι και να διατηρούνται ζεστοί, ενώ το 19^{ο} αιώνα στη Βόρεια Ευρώπη και την Αγγλία οι αρχιτέκτονες πρόσθεταν στις αστικές κατοικίες μικρό θερμοκήπιο ή βιβλιοθήκη στους νότιους τοίχους.

Η ιστορική εξέλιξη των Φωτοβολταϊκών, βέβαια, σηματοδοτείται από το φωτοβολταϊκό φαινόμενο[1.2-4], το οποίο αναφέρθηκε για πρώτη φορά το 1839 από το Γάλλο φυσικό Edmond Becquerel (πατέρα του διάσημου Henri Becquerel που μοιράστηκε το 1903 το Nobel Φυσικής με τους Pierre και Marie Curie), ο οποίος το διαπίστωσε κατά τη διάρκεια πειραμάτων ηλεκτρολυτικής επαφής μεταλλικών ηλεκτροδίων. Το επόμενο σημαντικό βήμα πραγματοποιήθηκε το 1876, όταν οι Adams και Day παρατήρησαν τις μεταβολές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του Σεληνίου (Se) όταν εκτίθετο στο φως. Βασισμένος σε αυτές τις μελέτες, επτά χρόνια αργότερα, το 1883, ο Charles Edgar Frittis κατάφερε να κατασκευάσει στη Νέα Υόρκη ένα φωτοστοιχείο (solar cell) Σεληνίου, το οποίο έμοιαζε με τα σημερινά στοιχεία.

Ένας νέος χώρος έρευνας είχε πλέον ανοίξει και εδραιωθεί και θα οδηγούσε εκατό χρόνια αργότερα στα εγκαίνια του πρώτου φωτοβολταϊκού σταθμού και πιο μετά ακόμη στις σημερινές σύγχρονες φωτοβολταϊκές τεχνολογίες και εφαρμογές. Ενδεικτικά παρατίθεται ένα σύντομο χρονολόγιο[1.2-5].

- 1918: Ανάπτυξη της μεθόδου παραγωγής Ημιαγωγού Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (Si) από τον Czochralski.
- 1941: Κατασκευή του πρώτου φωτοβολταϊκού στοιχείου Πυριτίου από τον Russell Ohl.
- 1949: Ανάπτυξη της θεωρίας Διόδου Σταθερής Κατάστασης από τους Mott και Schottky.
- **1954**: Κατασκευή φωτοβολταϊκού στοιχείου Πυριτίου με σχηματισμό ένωσης πρωτονίων – νετρονίων p-n και με απόδοση 6% στην εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Το πρώτο φωτοστοιχείο αυτό ήταν κατόρθωμα των Chapin, Fuller και Pearson στα εργαστήρια της Bell.
- 1956: Η πρώτη εμπορική παραγωγή ηλιακών στοιχείων από την εταιρεία Hoffmann.
- **1958**: Εκτόξευση του Αμερικάνικου Δορυφόρου «Vanguard I», ο οποίος χρησιμοποιούσε ως βοηθητική πηγή ενέργειας ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα έξι στοιχείων Si που λειτούργησε επιτυχώς για οκτώ χρόνια. Την ίδια χρονιά εκτοξεύτηκε και Σοβιετικός δορυφόρος με μοναδική πηγή ενέργειας τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.
- 1959: Κατασκευή φωτοβολταϊκού στοιχείου Καδμίου με απόδοση 5%.
- 1962: Κατασκευή της μεγαλύτερης Φωτοβολταϊκής εγκατάστασης του κόσμου στην Ιαπωνία (επί ενός φάρου), από την εταιρεία Sharp, εγκατεστημένης ισχύος 242 W_p.
- 1972: Κατασκευή ιώδους ηλιακού στοιχείου Si με απόδοση 14% από τους Lindmayer και Allison.
- 1976: Κατασκευή φωτοβολταϊκού στοιχείου από άμορφο πυρίτιο (a-Si) με απόδοση 0,01% από τους Carlson και Wronski.

- 1977: Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από αρσενιούχο Γάλλιο GaAs με απόδοση 16% από τον Kamath.
- 1981: Υπέρπτηση της Μάγχης από το αεροσκάφος «Solar Challenger» που ήταν εξοπλισμένο με 16.128 φωτοβολταϊκά στοιχεία Si συνολικής ισχύος 2,7kW.
- 1981: Κατασκευή της πρώτης εγκατάστασης φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα, ισχύος 100 kWp, η οποία ήταν και η μεγαλύτερη στην Ευρώπη.
- **1983**: Έναρξη λειτουργίας του πρώτου φωτοβολταϊκού σταθμού ισχύος 1 MWp στην Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών.
- 1999: Κατασκευή από την εταιρεία Spectrolab σε συνεργασία με το National Renewable Energy Laboratory των ΗΠΑ, φωτοβολταϊκού στοιχείου με απόδοση 32,3%.
- 2004: Η τιμή των διασυνδεδεμένων συστημάτων φθάνει στα 6,5 Ευρώ ανά W_p λόγω της μαζικής πια εισόδου μεγάλων εταιρειών στην κατασκευή Φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλες τις αναπτυγμένες χώρες υιοθετούνται οι φωτοβολταϊκές τεχνολογίες με τη συνολική παραγωγή αυτή τη χρονιά να φθάνει στα 1.200 MW και το συνολικό κύκλο κερδών να ανέρχεται στα 6,5 δισεκατομμύρια δολάρια.

2.Ηλιακή Ακτινοβολία

2.1 Εισαγωγή

Η Ηλιακή Ακτινοβολία (Solar Irradiation) προέρχεται από θερμοπυρηνικές αντιδράσεις στο εσωτερικό του Ήλιου. Η μετατροπή τεράστιων ποσοτήτων Υδρογόνου (Η) σε Ήλιο (He) πραγματοποιείται με την ταυτόχρονη έκλυση τεραστίων ποσοτήτων ενέργειας. Για να αντιληφθεί κανείς τα υπέρμετρα ενεργειακά μεγέθη αρκεί ο εξής απλός και ενδεικτικός υπολογισμός:

- Ο Ήλιος μετατρέπει κάθε 1 χιλιόγραμμο (kg) Υδρογόνου σε 0,993 kg Ηλίου.
- Η διαφορά στη μάζα εκλύεται ως ενέργεια σύμφωνα με τη διάσημη εξίσωση του Albert Einstein $E = mc^2$.
- Η ενέργεια αυτή υπολογίζεται σε περίπου 63 τρισεκατομμύρια Joules…!

Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας εκτείνεται σε όλα τα μήκη κύματος, εντούτοις περίπου το 75% εξ αυτών είναι ωφέλιμο για χρήση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία, δηλαδή μετατροπή της ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια, κι αυτό διότι σε αυτό το ποσοστό περιλαμβάνονται τα μικρά μήκη κύματος τα οποία συνεπάγονται μεγάλες συχνότητες και άρα μεγάλες ενέργειες φωτονίων.

Η Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (Β) ελαττώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση από τον Ήλιο. Έτσι, μόλις η ηλιακή ακτινοβολία «φθάσει» στην αρχή της γήινης ατμόσφαιρας, υπολογίζεται με βάση την εξίσωση:

$$B_R = \frac{P_O}{4\pi R^2} \quad \text{(Εξ. 2.1-1)}$$

όπου: B_R η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας,
P_o η εκπεμπόμενη ισχύς από τον Ήλιο,
R η απόσταση της Γης από τον Ήλιο.

Το μέγεθος αυτό της έντασης παίζει μεγάλο ρόλο στην απόδοση που επιτυγχάνουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, καθώς ορίζεται ως το ποσό ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σε ένα τετραγωνικό μέτρο (m^2) επιφάνειας σε ένα δευτερόλεπτο (sec) και ο υπολογισμός του γίνεται σε Watt (W) ανά m^2, σύμφωνα με τον τύπο:

$$B=\frac{E}{S.t}=\frac{P}{S}\,(W/m^2) \quad \text{(Εξ. 2.1-2)}$$

όπου: B η ένταση,
E η προσπίπτουσα στην επιφάνεια ενέργεια,
P η προσπίπτουσα στην επιφάνεια ισχύς,
S το εμβαδόν της επιφάνειας,
t ο χρόνος.

2.2 Προσπίπτουσα Ηλιακή Ακτινοβολία στη Γήινη Επιφάνεια

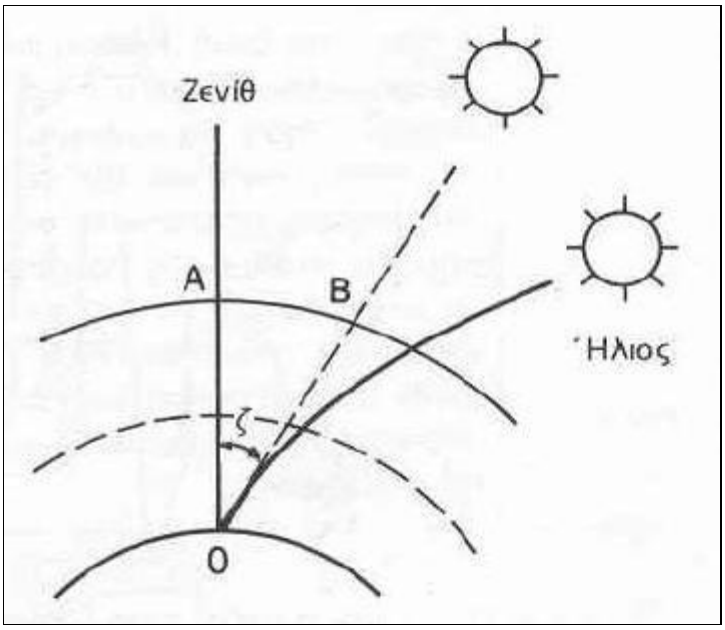
Όπως προκύπτει και από την πιο πάνω εξίσωση Εξ.2.1-1, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει σε μιαν επιφάνεια έχει άμεση σχέση (αντιστρόφως ανάλογη) με την απόσταση της επιφάνειας αυτής από τον Ήλιο. Ως εκ τούτου, η γεωμορφολογία ενός τόπου (θέση, υψόμετρο, κλπ) καθορίζει άμεσα και την ηλιακή ενέργεια που τελικώς λαμβάνει.

Θα πρέπει, επίσης, να λαμβάνονται υπ' όψιν η απορρόφηση που γίνεται σε διάφορα μήκη κύματος από τα διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας (π.χ. άζωτο, οξυγόνο, όζον, διοξείδιο του άνθρακα, υδρατμοί, τυχόν ρύποι, κλπ), καθώς και η σκέδαση και η ανάκλαση στην ατμόσφαιρα, φαινόμενα που συμβάλλουν στη μείωση της έντασης. Επιπλέον, σημειώνεται ότι η τελική μορφή και ενέργεια της προσπίπτουσας στη γήινη επιφάνεια ηλιακής ακτινοβολίας διαφοροποιείται ανάλογα με τη θέση του Ήλιου στον ουράνιο θόλο. Κατ' επέκταση, παρουσιάζεται και διακύμανση εντός του έτους, από εποχή σε εποχή, λόγω της κίνησης της Γης περί του Ήλιου.

2.3 Ακτινοβολία «Ενός Πλήρους Ήλιου»

Συνθέτοντας τα πιο πάνω, σημειώνεται ότι η πραγματική διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας εντός της ατμόσφαιρας και μέχρι να φθάσει σε έναν οποιοδήποτε τόπο (κατά συνέπεια και σε κάποια ωφέλιμη επιφάνεια σε αυτόν, όπως εκεί εγκατεστημένες φωτοβολταϊκές διατάξεις) είναι ουσιαστικά μεγαλύτερη από την υποτιθέμενη κατακόρυφή της διαδρομή.

Σύμφωνα με το «Γλωσσάριο Μετεωρολογίας της Αμερικανικής Μετεωρολογικής Κοινότητας»[2.3-1], το μέτρο του μήκους της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας εντός της ατμόσφαιρας (και μέχρι τη στάθμη της θάλασσας) είναι η Οπτική Μάζα Αέρα (m), η οποία μέσω της φόρμουλας Bemporad[2.3-1] εκφράζεται ως συνάρτηση της τέμνουσας της ζενιθιακής απόστασης (της γωνίας μεταξύ θέσης Ήλιου και κατακορύφου). Τα πιο πάνω αποδίδονται σχηματικά ως εξής:



Σχήμα 1: Οπτική Μάζα Αέρα και Θέση Ήλιου

Στο εν λόγω σχήμα διαφαίνεται ότι, με βάση τον πιο πάνω ορισμό της Οπτικής Μάζας Αέρα, θα έχουμε m = OB/OA = 1/cosζ (ιδιαίτερα για γωνίες κάτω των 70°). Η θέση του Ήλιου στο ζενίθ αντιστοιχεί προφανώς στο ελάχιστο μήκος διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας εντός της ατμόσφαιρας, κάτι που ορίζεται ως m1. Για θέση του Ήλιου σε γωνία 45° από το ζενίθ ορίζεται η m1,5, για γωνία 60° η m2 κ.ο.κ.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για ευνοϊκές συνθήκες αιχμής (π.χ. καλοκαίρι, μεσημέρι, καθαρός ουρανός), η αντιπροσωπευτικότερη προσέγγιση της μέσης έντασης ακτινοβολίας που δέχεται μια επιφάνεια κάθετη στην προσπίπτουσα ακτινοβολία, είναι αυτή η οποία προκύπτει για m1,5 και έχει τιμή 935 W/m^2. Η στρογγυλοποίηση αυτής στα 1.000 W/m^2 ονομάζεται Ακτινοβολία Ενός Πλήρους Ήλιου και αποτελεί τη συνηθέστερη βάση σύγκρισης για την ακτινοβολίας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, καθώς οι κατασκευαστές καθορίζουν την ισχύ αιχμής των διατάξεων βάσει αυτού του μεγέθους.

3.Φωτοβολταϊκές Διατάξεις

3.1 Εισαγωγή

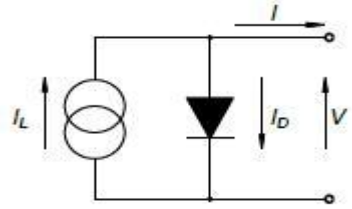
Φωτοβολταϊκή Μετατροπή είναι ένα φυσικό φαινόμενο κατά το οποίο η ακτινοβολία (ηλεκτρομαγνητική) που εκπέμπεται από τον Ήλιο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα **φωτοβολταϊκά στοιχεία** (solar cells) και οι διατάξεις τους ή πανέλα (solar panels) είναι ο κατ’ εξοχήν τύπος συσκευών που αξιοποιούν το εν λόγω φαινόμενο.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι ουσιαστικά δισκοειδείς δίοδοι ημιαγωγών στα άκρα των οποίων αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού με την πρόσπτωση στην επιφάνειά τους της ηλιακής ακτινοβολίας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι και δυναμικότητες φωτοβολταϊκών στοιχείων, αλλά κατά βάση, ανάλογα με το υλικό κατασκευής και την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μπορούν να επιτευχθούν τάσεις από 0,5 έως 1 Volt και να παραχθούν πυκνότητες ρεύματος από 20 έως 40 mA/cm^2. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται είναι υπό τη μορφή συνεχούς ρεύματος, το οποίο βέβαια μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί με την αυτή μορφή είτε να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο είτε ακόμη και να αποθηκευθεί για ύστερη χρήση.

3.2 Φωτοβολταϊκό Στοιχείο

3.2.1 Αρχή Λειτουργίας

Ένα ιδανικό Φωτοβολταϊκό Στοιχείο παρουσιάζεται ως το ισοδύναμο κύκλωμα του πιο κάτω σχήματος:



Σχήμα 3.2-1: Ισοδύναμο Κύκλωμα Ιδανικού Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Στο εν λόγω σχήμα αποδίδεται διαγραμματικά κύκλωμα αποτελούμενο από πηγή ρεύματος I_L, η οποία υποδηλοί το δημιουργούμενο από το ηλιακό φως ρεύμα, καθώς και από δίοδο ρεύματος I_D, η οποία είναι παράλληλα τοποθετημένη στην πηγή ρεύματος. Στο περιγραφόμενο στοιχείο, λοιπόν, το παραγόμενο ρεύμα I υπολογίζεται από τον πιο κάτω τύπο:

$$I=I_L-I_O\left(e^{\frac{eV}{mkT}}-1\right) \quad \text{(Εξ. 3.2.1-1)}$$

όπου:

I_0 το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης,

e το φορτίο του ηλεκτρονίου,

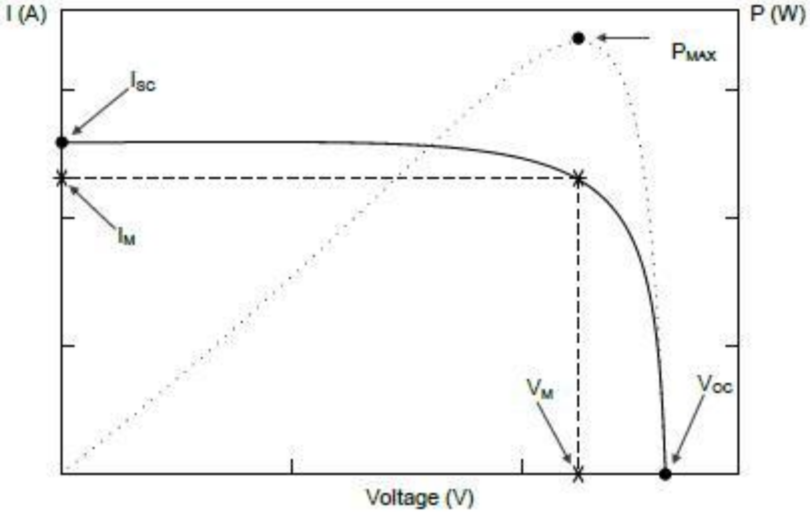
V η τάση στα άκρα του στοιχείου,

k η σταθερά του Boltzmann,

T η θερμοκρασία του στοιχείου,

m ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου, με $1 \le m \le 2$.

Για το εν λόγω κύκλωμα η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος – τάσης αποδίδεται στο πιο κάτω σχήμα:



Σχήμα 3.2-2: Χαρακτηριστική Καμπύλη Ρεύματος – Τάσης Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Η διακεκομμένη γραμμή του σχήματος αποδίδει την ισχύ του στοιχείου ως συνάρτηση της τάσης. Για μηδενική τάση, V = 0, το ρεύμα ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης και είναι το $I_{SC} = I(V{=}0) = I_L$. Αντίστροφα, για μηδενική ένταση, I = 0, η τάση λέγεται τάση ανοικτοκύκλωσης και προκύπτει από τον τύπο:

$$V_{OC} = m\frac{kT}{e}\ln\left[\frac{I_L}{I_O}+1\right] \quad \text{(Εξ. 3.2.1-2)}$$

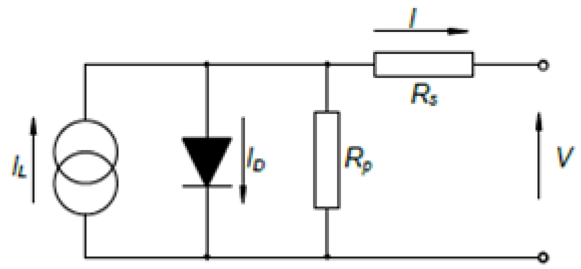
Το σημείο P_{MAX} του εν λόγω σχήματος αποτελεί το σημείο όπου η ισχύς μεγιστοποιείται και καλείται, ακριβώς, σημείο μέγιστης ισχύος. Ένα ποιοτικό μέτρο της μορφής της χαρακτηριστικής καμπύλης είναι ο λεγόμενος συντελεστής πλήρωσης FF (Fill Factor), ο οποίος προκύπτει από τον τύπο:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{SC} V_{OC}} \quad \text{(Εξ. 3.2.1-3)}$$

Ο συντελεστής FF πλησιάζει στη μονάδα όσο πιο απότομη γίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη, εντούτοις λαμβάνει τιμές συνήθως από 0,7 έως 0,8. Στο εν λόγω κύκλωμα ο υπολογισμός της ενεργειακής απόδοσης, n, γίνεται με το λόγο της μέγιστης ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί στο φορτίο ($I_m V_m$) προς την παραγόμενη από το στοιχείο ισχύ P_L (δηλαδή για ρεύμα I_L), μέσω του τύπου:

$$n = \frac{I_m V_m}{P_L} \quad \text{(Εξ. 3.2.1-4)}$$

Το ιδανικό ισοδύναμο κύκλωμα που περιγράφεται δεν ανταποκρίνεται, βέβαια, πλήρως σε πραγματικές συνθήκες όπου λαμβάνουν χώρα και διάφορα εξωτερικά φαινόμενα σε επίπεδο ημιαγωγών. Τα φαινόμενα αυτά, αν και κατανεμημένα, είναι γενικώς αποδεκτό ότι μπορούν πρακτικά να προσομοιωθούν με αντιστάσεις σταθερής τιμής. Ως εκ των άνω, προσθέτοντας στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2 μία αντίσταση R_p παράλληλα με τη δίοδο και μία αντίσταση R_s σε σειρά με το υπόλοιπο σύστημα, προκύπτει το πιο κάτω ρεαλιστικότερο κύκλωμα:



Σχήμα 3.2-3: Ισοδύναμο Κύκλωμα Ρεαλιστικού Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

όπου η πιο πάνω Εξίσωση 3.2.1-1 για το παραγόμενο ρεύμα θα μεταλλαχθεί ως εξής:

$$I = I_L - I_O\left(\exp^{\frac{e(V+IR_S)}{mkT}} - 1\right) - \frac{V+IR_S}{R_P} \quad \text{(Εξ. 3.2.1-5)}$$

από την οποία προκύπτει ότι το ρεύμα του στοιχείου θα είναι:

$$I = I_{SC}\left[1 - \exp\left(\frac{V - V_{OC} + IR_S}{V_t}\right)\right] \quad \text{(Εξ. 3.2.1-6)}$$

έχοντας κάνει, βέβαια, πρώτα τις εξής παραδοχές:

- η επίδραση της R_p είναι αμελητέα,
- το I_L είναι ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης,
- $\exp^{e(V+IRs) / mkT} >> 1$, και
- $V_t = mkT / e$

Εφαρμόζοντας την Εξίσωση 3.2.1-6 για V=0 παραδόξως δεν ισχύει το αναμενόμενο $I = I_{sc}$. Εντούτοις, για εμπορικώς διαθέσιμα Φωτοβολταϊκά Στοιχεία (τα οποία ενδιαφέρουν και απασχολούν και την παρούσα Εργασία) ισχύει ότι $V_{oc} >> IR_s$ και άρα τελικώς $I = I_{sc}$, ενώ και για V = 0 έχουμε $I \approx I_{sc}$.

3.2.2 Κατασκευαστική Τεχνολογία

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι κυρίως το **πυρίτιο**, αλλά και λεπτές επιστρώσεις (thin films) από ενώσεις όπως το τελλουριούχο κάδμιο (**CdTe**), ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (**$CuInSe_2$** ή CIS) και το αρσενικούχο γάλλιο (**GaAs**), καθώς και άλλες πιο πρόσφατες τεχνολογίες. Συνοπτικά αναφέρονται τα πιο κάτω:

- Οι τύποι πυριτίου που χρησιμοποιούνται κατασκευαστικά για τα φ/β στοιχεία είναι δύο: το άμορφο και το κρυσταλλικό, το οποίο με τη σειρά του υποδιαιρείται στις κατηγορίες του μονοκρυσταλλικού και του πολυκρυσταλλικού πυρτιτίου.
    - τα φ/β στοιχεία από άμορφο πυρίτιο (amorphous ή thin-film silicon) κατασκευάζονται με από λεπτές επιστρώσεις άμορφου πυριτίου πάνω σε ένα χαμηλού κόστους υπόστρωμα υποστήριξης, όπως για παράδειγμα γυαλί ή αλουμίνιο. Η ποσότητα πυριτίου στις επιστρώσεις είναι μικρή και έτσι γενικά η τιμή τους είναι χαμηλή (σίγουρα χαμηλότερη από τα φ/β στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου). Χαμηλές, εντούτοις, είναι και οι αποδόσεις τους σε σχέση με τα στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου, καθώς λόγω της χαμηλότερης ενεργειακής τους πυκνότητας (δηλαδή της σχέσης απόδοσης / επιφάνειας) απαιτείται σχεδόν διπλάσια επιφάνεια από τα κρυσταλλικά φ/β στοιχεία για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας. Πλεονέκτημα αυτών των φ/β στοιχείων είναι ότι δεν επηρεάζονται πολύ από υψηλές θερμοκρασίες, ενώ αξιοποιούν καλύτερα την απόδοσή τους όταν υπάρχει συννεφιά.

Εικόνα 3.2.2-1: Φ/Β Στοιχείο Άμορφου Πυριτίου[3.2.2-1]

    - τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία (single-crystalline silicon) χαρακτηρίζονται μεν από καλύτερη σχέση απόδοσης/ επιφάνειας (ενεργειακή πυκνότητα), εντούτοις υψηλότερο είναι και το κόστος κατασκευής τους. Οι βασικές τεχνικές παραγωγής τους (Czochralski και “float zone”) βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδων πυριτίου. Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3 mm και η απόδοσή τους σε εμπορικές εφαρμογές κυμαίνεται μεταξύ 15 και 18%. Εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ως και σχεδόν 25%.

Εικόνα 3.2.2-2: Μονοκρυσταλλικό Φ/Β Στοιχείο[3.2.2-1]

- στα πολυκρυσταλλικά φ/β στοιχεία (multi-crystalline silicon) η απόδοση είναι ανάλογη με την έκταση των μονοκρυσταλλικών τους περιοχών (τις οποίες μπορεί κανείς να παρατηρήσει και οπτικά). Η τιμή τους είναι ελαφρώς χαμηλότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών. Το πάχος τους επίσης είναι περίπου 0,3 mm. Οι βασικές τεχνικές παραγωγής τους είναι η «απευθείας στερεοποίηση» (“directional solidification”), η λεγόμενη «χύτευση» πυριτίου και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση. Οι εμπορικές αποδόσεις φθάνουν το 13 έως και 15%, ενώ εργαστηριακά η απόδοσή τους έχει φθάσει και το 20%.

Εικόνα 3.2.2-3: Πολυκρυσταλλικό Φ/Β Στοιχείο[3.2.2-1]

- φ/β στοιχεία «ταινίας πυριτίου» / “ribbon silicon”: πρόκειται για σχετικώς νέα τεχνολογία, η οποία προσφέρει έως και 50% μείωση στη χρήση πυριτίου, σε σχέση με τις προαναφερθείσες, πιο «παραδοσιακές» τεχνικές single- και multi-crystalline silicon.

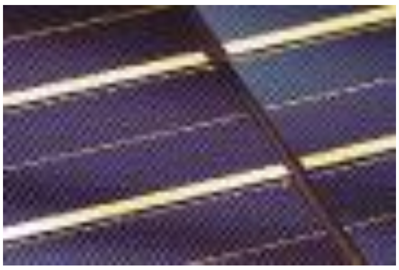
- το τελουριούχο κάδμιο (CdTe) έχει ενεργειακό διάκενο πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα (περί το 1eV), γεγονός που του δίνει το σοβαρό πλεονέκτημα της απορρόφησης του 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6 με 8%, ενώ εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 16%. Σημαντικό μειονέκτημα για την εκτεταμένη χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο, σύμφωνα με κάποιες έρευνες, είναι καρκινογόνο (σημειώνεται ότι ήδη η παγκόσμιας εμβέλειας οικολογική οργάνωση Greenpeace έχει εναντιωθεί στη χρήση του), ενώ πρόβλημα αποτελεί και το δυσεύρετο τελλούριο. Σημαντικότερη χρήση του είναι ή ενθυλάκωσή του στο γυαλί ως δομικό υλικό (Building Integrated Photovoltaic).

Εικόνα 3.2.2-4: Φ/Β Στοιχείο CdTe[3.2.2-1]

- Ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός ($CuInSe_2$ ή CIS) έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στην προσπίπτουσα ακτινοβολία, αλλά παρόλα αυτά η απόδοσή του με τις σύγχρονες τεχνικές δε μπόρεσε στις εμπορικές εφαρμογές να ξεπεράσει το 11%. Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση σχεδόν 19%, η οποία σημειώνεται πως είναι η υψηλότερη μεταξύ των υλικών λεπτής επιστρώσεως. Παρόλο που με την πρόσμιξη γαλλίου (Ga) η απόδοσή του μπορεί να αυξηθεί, εντούτοις πρόβλημα παραμένει το δυσεύρετο στη φύση ίνδιο.

Εικόνα 3.2.2-5: Φ/Β Στοιχείο $CuInSe_2$[3.2.2-1].

- τα φ/β στοιχεία αρσενικούχου γαλλίου (GaAs) είναι ιδανικά για την απορρόφηση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας καθώς το ενεργειακό τους διάκενο είναι 1,43eV. Η απόδοσή τους (στη μορφή των πολλαπλών συνενώσεων - multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί καθώς φθάνει σχεδόν το 30%, ενώ και η αντοχή τους στις υψηλές θερμοκρασίες και σε μεγάλες ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας είναι εξαιρετικά μεγάλη. Τα πλεονεκτήματα αυτά τα καθιστούν ιδανικά για εφαρμογές συγκεντρωτικών συστημάτων (“solar concentrators”) καθώς και αεροδιαστημικές εφαρμογές (aerospace applications). Τα βασικότερα μειονεκτήματά τους είναι η σπανιότητα του γαλλίου σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το αρσενικό είναι δηλητηριώδες, με αποτέλεσμα το κόστος των μονοκρυσταλλικών φ/β GaAs να είναι υπερβολικό για εμπορικές εφαρμογές.



Εικόνα 3.2.2-6: Φ/Β Στοιχείο GaAs[3.2.2-1].

- Άλλες πιο σύγχρονες τεχνολογίες φ/β στοιχείων αναπτύσσονται ραγδαία σε διάφορες εργαστηριακές εφαρμογές με στόχο την αύξηση των αποδόσεων και της απορρόφησης προσπίπτουσας ακτινοβολίας, την αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και την ανθεκτικότητα σε μεγάλες ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας. Μεταξύ άλλων, έχουν αναπτυχθεί υβριδικά φ/β από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών, φ/β από νανοκρυσταλλικές εφαρμογές των διάφορων ήδη χρησιμοποιούμενων υλικών, καθώς και φ/β από οργανικές ενώσεις και πολυμερή.

3.3 Φωτοβολταϊκά (Φ/Β) Πλαίσια

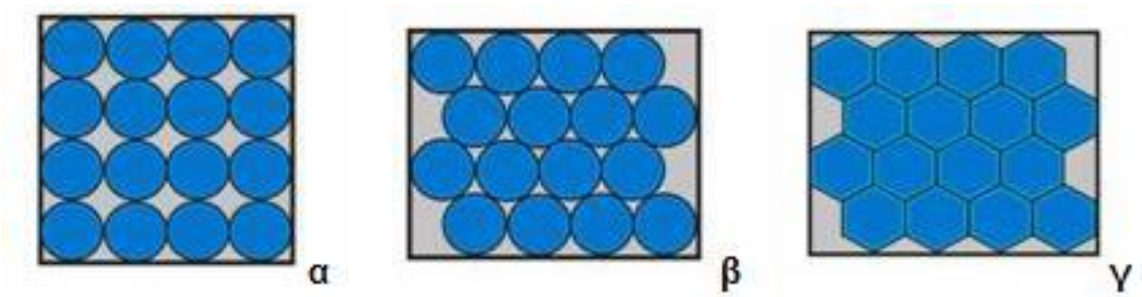
3.3.1 Εισαγωγή

Η κατασκευαστική πρακτική έχει καθιερώσει το να συνδέονται τα φ/β στοιχεία μεταξύ τους σε διατάξεις με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται **Φωτοβολταϊκά Πλαίσια (photovoltaic panels)**. Ο τρόπος κατασκευής πρόκειται ουσιαστικά για ένα ιδιόμορφο "sandwich": τα φ/β στοιχεία στερεώνονται με κολλητική ουσία σε ένα ανθεκτικό υπόστρωμα από φύλλο μετάλλου (συνήθως αλουμινίου) ή ενισχυμένου πλαστικού, το οποίο αποτελεί και την "πλάτη" του πλαισίου, ενώ η εμπρός όψη του φ/β πλαισίου καλύπτεται από ένα προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού. Τα εμπρός και πίσω φύλλα συγκρατούνται μεταξύ τους, στεγανά και μόνιμα, με τη βοήθεια μιας ταινίας από φυσικό ή συνθετικό ελαστικό και συσφίγγονται περιμετρικά με ένα μεταλλικό περίβλημα.

3.3.2 Χαρακτηριστικά Λειτουργίας

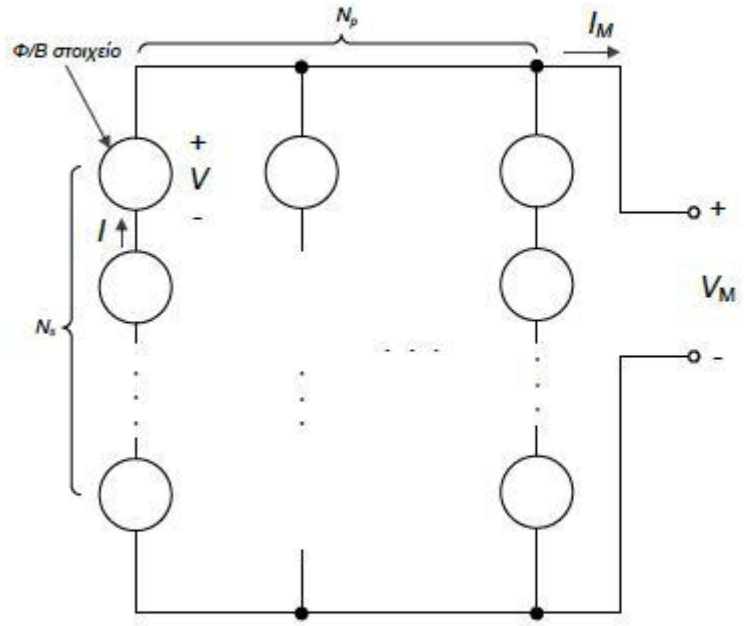
Το κάθε φ/β πλαίσιο παρουσιάζει τα δικά του χαρακτηριστικά λειτουργίας (απόδοση, τάση, ισχύ, κλπ), τα οποία διαμορφώνονται από τα αντίστοιχα μεγέθη/ χαρακτηριστικά των χωριστών φ/β στοιχείων που το απαρτίζουν.

Καθώς τα φ/β στοιχεία συνδέονται στα πλαίσια σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την επίτευξη επιθυμητής τάσης, είναι προφανές ότι ο τρόπος, το σχήμα και η πυκνότητα στερέωσης των φ/β στοιχείων σε ένα πλαίσιο θα καθορίζουν το ποσοστό κάλυψης του πλαισίου. Έτσι, ορίζεται ως συντελεστής κάλυψης ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας όπου γίνεται η απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, προς τη συνολική επιφάνεια του φ/β πλαισίου. Ενδεικτικά, για τρεις συνηθισμένους τρόπους στερέωσης φ/β στοιχείων, ο συντελεστής κάλυψης κυμαίνεται από περίπου 0,78 για κυκλικά στοιχεία σε ευθυγραμμισμένες σειρές ("α" της πιο κάτω εικόνας) και 0,88 για κυκλικά στοιχεία σε παράλληλες στοιχίσεις ("β" της πιο κάτω εικόνας), μέχρι 0,98 για τα μεγαλύτερου κόστους τετραγωνικά ή εξαγωνικά φ/β στοιχεία ("γ" της πιο κάτω εικόνας).



Σχήμα 3.3.2-1: Συνηθισμένοι Τρόποι Διάταξης Φ/Β Στοιχείων στα Φ/Β Πλαίσια

Για μια γενική, θεωρητική προσέγγιση καθορισμού των χαρακτηριστικών λειτουργίας, ας θεωρήσουμε ένα φ/β πλαίσιο αποτελούμενο από N_p παράλληλα συνδεδεμένες ομάδες, η καθεμιά των N_s φ/β στοιχείων σε σειρά, όπως στο πιο κάτω Σχήμα 3.3.2-2:



Σχήμα 3.3.2-2: Θεωρητικό Φ/Β Πλαίσιο N_p Ομάδων των N_s Στοιχείων

Για το πλαίσιο αυτό, αν ορίσουμε ως I το ρεύμα που διαρρέει το κάθε στοιχείο και V την τάση του κάθε στοιχείου, τότε το συνολικό ρεύμα θα προκύπτει ως $I_M = IN_p$ και η συνολική τάση ως $V_M = VN_S$. Αντίστοιχα, αν ορίσουμε ως I_{SC} το ρεύμα βραχυκύκλωσης και ως V_{OC} την τάση ανοικτοκύκλωσης του κάθε στοιχείου, τότε το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης θα προκύπτει ως $I_{SCM} = I_{SC}N_p$ και η συνολική τάση ανοικτοκύκλωσης ως $V_{OCM} = V_{OC}N_S$.

Ως εκ των άνω, και κατ' αντιστοιχία με την πιο πάνω Εξίσωση 3.2.1-6, το ρεύμα του φ/β πλαισίου που θεωρήσαμε θα προκύπτει από τη σχέση:

$$I_M = I_{SCM}\left(1 - \exp^{\frac{(V_M - V_{OCM} + I_M R_{SM})}{N_S V_t}}\right) \quad \text{(Εξ. 3.3.2-1)}$$

όπου $R_{SM} = R_s N_s / N_p$.

Τονίζεται ότι εξισώσεις σαν και τις Εξ. 8 και Εξ. 9 είναι δυσεπίλυτες καθώς το ρεύμα εμφανίζεται και στα δύο τους σκέλη. Εντούτοις, κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος το ρεύμα του δεύτερου σκέλους μπορεί να αντικατασταθεί χωρίς μεγάλο σφάλμα από το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Σημειώνεται ότι η χαρακτηριστική καμπύλη I_M–V_M της Εξ. 9 για το φ/β πλαίσιο είναι παρόμοια της καμπύλης του φ/β στοιχείου, όπως αυτή φαίνεται στο πιο πάνω Σχήμα 3, ενώ και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει ένα ζεύγος τιμών [V_{Mm}, I_{Mm}] για το οποίο η ισχύς εξόδου του φ/β πλαισίου μεγιστοποιείται.

Σημαντικό μέγεθος που καθορίζει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των φ/β πλαισίων είναι η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας στοιχείου ("Nominal Cell Operating Temperature – NCOT"), η οποία εκφράζει τη θερμοκρασία των στοιχείων ενός φ/β πλαισίου υπό συνθήκες ακτινοβολίας 800 W/m^2, οπτικής μάζας αέρα m1,5 (βλέπε Παράγραφο 2.3 πιο πάνω), θερμοκρασίας περιβάλλοντος 20°C και ταχύτητας ανέμου 1 m/s. Σε περίπτωση που η NCOT δεν παρέχεται από τον κατασκευαστή, η τιμή της λαμβάνεται ως 44°C. Οι κατασκευαστές φ/β πλαισίων παρέχουν τις τιμές της μέγιστης ισχύος εξόδου, του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοικτοκύκλωσης υπό συνθήκες ακτινοβολίας 1000 W/m^2, οπτικής μάζας αέρα m1,5 και θερμοκρασίας στοιχείων 25°C.

3.3.3 Υπολογισμός Ισχύος

Είναι προφανές ότι ένα φ/β πλαίσιο θα λειτουργήσει πολύ συχνά σε συνθήκες ακτινοβολίας, οπτικής μάζας αέρα και θερμοκρασίας διαφορετικές από τις συνθήκες αναφοράς του κατασκευαστή και για το λόγο αυτό είναι επιθυμητό να μπορεί να υπολογιστεί η μέγιστη ισχύς εξόδου του πλαισίου υπό οποιεσδήποτε συνθήκες. Προς τούτου, εφαρμόζονται οι πιο κάτω υπολογισμοί:

i. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός φ/β στοιχείου στις εκάστοτε συνθήκες θα προκύπτει από τη σχέση: $I_{SC} = C_1 G$, όπου G είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία και η σταθερά $C_1 = I_{SC}(1.000W/m^2)/1.000$ (Am^2/W).

ii. Ο ρυθμός μεταβολής της τάσης ανοικτοκύκλωσης με τη θερμοκρασία των φ/β στοιχείων θα προκύπτει από τη σχέση: $dV_{OC}/dT_C = -2{,}3mV/°C$.

iii. Η θερμοκρασία των στοιχείων (T_C) επηρεάζεται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_a) σύμφωνα με τη σχέση: $T_C – T_a = C_2 G$, όπου η σταθερά $C_2 = (NCOT – 20°C)/(800\ W/m^2)$.

iv. Η αντίσταση των στοιχείων των πλαισίων (R_S), η οποία θεωρείται ότι δεν αλλάζει με τις συνθήκες (π.χ. θερμοκρασία του περιβάλλοντος), θα προκύπτει από τη σχέση:

$$\mathrm{R}_S = \left[1 - \frac{FF}{FF_o}\right]\frac{V_{OC}}{I_{SC}} \quad \text{(Εξ. 3.3.3-1)}$$

1. Οι Συντελεστές Πλήρωσης (Fill Factors) συνδέονται με την εμπειρική σχέση: $FF = (V_m I_m)/(V_{OC} I_{SC}) = FF_o(1 – r_s)$.
2. Η r_s υπολογίζεται από τη σχέση: $r_s = R_s/(V_{OC}/I_{SC})$ και θα πρέπει να ισχύει πάντα $r_s < 0{,}4$ αλλιώς η παρούσα μέθοδος υπολογισμών δε θα μπορεί να εφαρμοστεί.
3. Έτσι, ο FF_o θα υπολογίζεται ως εξής:

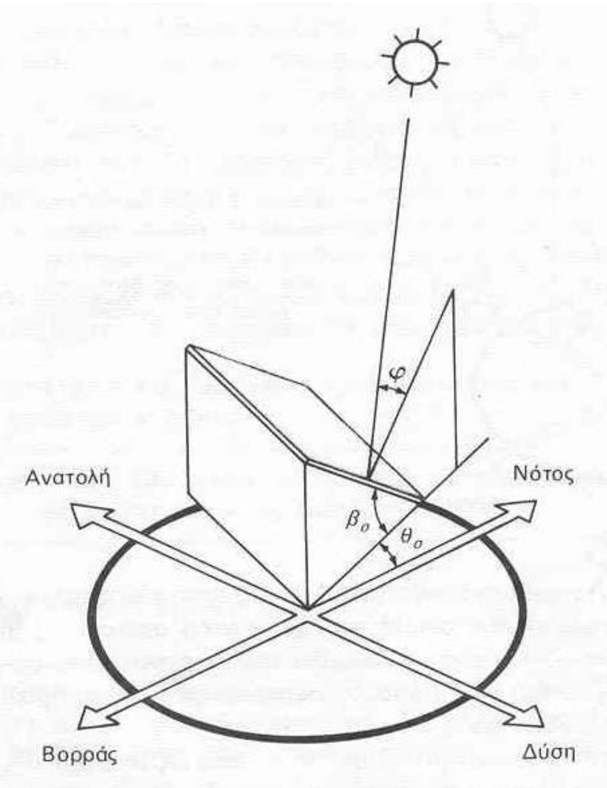
$$\mathrm{FF}_o = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72)}{V_{oc} + 1} \quad \text{(Εξ. 3.3.3-2)}$$

v. Ο κατασκευαστής παρέχει σε σταθερές συνθήκες δοκιμών (Standard Test Conditions – STC: ακτινοβολία 1000W/m^2, m1,5 και θερμοκρασία στοιχείων 25°C) τη μέγιστη ισχύ εξόδου ενός στοιχείου ως:
$P_m = P_{Mm}/N_sN_p$.
Έχοντας εφαρμόσει όλους τους πιο πάνω υπολογισμούς, η μέγιστη ισχύς ενός πλαισίου θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{Mm} = N_sN_pP_m \qquad \text{(Εξ. 3.3.3-3)}$$

3.3.4 Προσανατολισμός και Βέλτιστη Κλίση

Δύο πολύ σημαντικές παράμετροι σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι ο προσανατολισμός των φ/β πλαισίων και η κλίση τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Τα δύο μεγέθη που περιγράφουν τον προσανατολισμό και την κλίση είναι αντίστοιχα η αζιμούθια γωνία (θ_σ) και η γωνία κλίσης (β_σ), τα οποία αποδίδονται σχηματικά πιο κάτω:



Σχήμα 3.3.4-1: Αζιμούθια Γωνία (θ_σ) και Γωνία Κλίσης (β_σ) Φ/Β Πλαισίου

Η αζιμούθια γωνία, θ_σ, του φ/β πλαισίου είναι η γωνία που σχηματίζεται επί του οριζοντίου επιπέδου μεταξύ της προβολής της κατακορύφου του πλαισίου και του τοπικού μεσημβρινού Βορρά – Νότου. Για την αζιμούθια γωνία ισχύει: $-180° \leq \theta_\sigma \leq +180°$, όπου προφανώς ±180° ταυτίζονται με τοποθέτηση του πλαισίου προς το Βορρά, 0° προς το Νότο, -90° προς την Ανατολή και +90° προς τη Δύση.

Η κλίση του πλαισίου, β_σ, είναι η δίεδρη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του επιπέδου του πλαισίου και του οριζοντίου επιπέδου. Για τη γωνία κλίσης ισχύει: $0° \leq \beta_\sigma \leq 180°$, όπου προφανώς για $\beta_\sigma > 90°$ το επίπεδο του πλαισίου είναι στραμμένο προς το έδαφος.

Η γωνία φ που φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα είναι η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στο φ/β πλαίσιο. Η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας θα προκύπτει για γωνία φ = 0°, δηλαδή όταν η επιφάνεια του φ/β πλαισίου είναι κάθετη προς της προσπίπτουσα δέσμη. Είναι προφανές, βέβαια, ότι καθώς ο Ήλιος κινείται στον ουρανό, η διατήρηση της φ = 0° είναι δύσκολη. Αυτό που είθισται ως αντιστάθμισμα είναι η επιλογή μιας σταθερής κλίσης, η οποία να μειώνει το δυνατόν περισσότερο τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους και η οποία είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Πολύ συχνά, όμως, καθώς επιδιώκεται η μεγιστοποίηση παραγωγής ενέργειας, μια βελτιστοποιημένη προσέγγιση είναι η επιλογή παραπάνω της μίας κλίσης ανά έτος. Σε αυτή την περίπτωση οι κατάλληλες κλίσεις επιλέγονται σε συνάρτηση με την εποχή του χρόνου. Συνήθως, κλίσεις 10 ως 15° μικρότερες από τα γεωγραφικά πλάτη των τόπων εγκατάστασης επιλέγονται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ενώ αντίστροφα κλίσεις 10 ως 15° μεγαλύτερες από τα γεωγραφικά πλάτη των τόπων εγκατάστασης επιλέγονται το χειμώνα. Για το βόρειο ημισφαίριο, ο βέλτιστος προσανατολισμός φ/β πλαισίου επιλέγεται για αζιμούθια γωνία 0° (δηλαδή πλαίσιο στραμμένο προς το Νότο). Ως εκ των άνω, κρίνεται απαραίτητος ο υπολογισμός της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κάθε επιθυμητή κλίση.

Θεωρούμε, λοιπόν, ότι $G_d(\beta)$ είναι η συνολική ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται κεκλιμένο φ/β πλαίσιο σε κλίση β° από το οριζόντιο επίπεδο. Η $G_d(\beta)$ θα μετράται σε μονάδες Wh/m^2 και θα προκύπτει από τη σχέση:

$$G_d(\beta) = R_d(\beta) + D_d(\beta) + B_d(\beta) \quad \text{(Εξ. 3.3.4-1)}$$

όπου:

$B_d(\beta)$ η συνολική ημερήσια ακτινοβολία που προέρχεται απευθείας από τον Ήλιο (“direct irradiation”),

$D_d(\beta)$ η συνολική ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία (“diffuse irradiation”) και

$R_d(\beta)$ η συνολική ημερήσια ακτινοβολία που προέρχεται από ανακλάσεις στο έδαφος (“albedo irradiation”).

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι ως “irradiation” νοείται η προσπίπτουσα σε μια επιφάνεια ενέργεια κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης περιόδου και μετράται σε μονάδες Wh/m^2, ενώ ως “irradiance” νοείται η πυκνότητα ισχύος (ένταση) που προσπίπτει σε μια επιφάνεια και μετράται σε μονάδες W/m^2. Με άλλα λόγια, σε πιο μαθηματικοποιημένη μορφή, θα λέγαμε ότι το irradiation είναι το ολοκλήρωμα του irradiance στην περίοδο του χρόνου. Η ανάλυση των βημάτων του υπολογισμού που καταλήγει στο εν λόγω ολοκλήρωμα είναι πολύπλοκη και ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Για το λόγο αυτό παρατίθεται απευθείας η πιο κάτω σχέση για την εύρεση της συνολικά ακτινοβολούμενης ενέργειας σε μία ημέρα που δέχεται ένα κεκλιμένο φ/β πλαίσιο σε κλίση β°:

$$G_d(\beta)=\int_{\omega_{ss}}^{\omega_{ps}} G_h(\beta)dt(Wh/m^2) \qquad \text{(Εξ. 3.3.4-2)}$$

όπου:

G_h(β) η συνολική ωριαία ενέργεια σε μονάδες W/m^2,

ω_{ss} = -**ω_{ps}** = max{**ω_s**, -arcos(-tan**δ**tan(**φ** - **β**))}, η γωνία ανατολής και δύσης αντίστοιχα με το συλλέκτη σε κλίση β°, που μετράται σε ακτίνια,

ω_s η γωνία ανατολής του Ηλίου (“sunrise angle”) ίση με –arcos(tan**δ**tan**φ**) που μετράται σε ακτίνια,

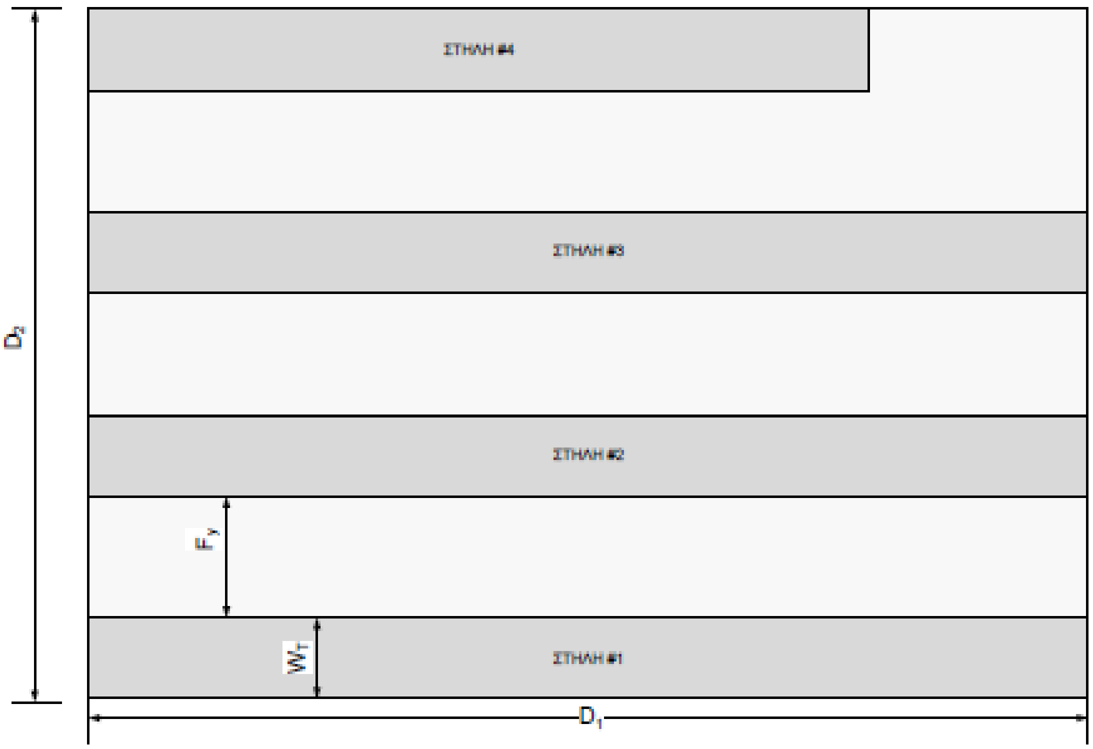
φ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου σε μοίρες (°) και

δ η γωνία ηλιακής απόκλισης (“solar declination”) σε μοίρες (°), δηλαδή η γωνία μεταξύ το ισημερινού επιπέδου και της νοητής ευθείας Γης – Ηλίου. Σημειώνεται ότι η γωνία δ προκύπτει από τη σχέση: **δ** = 23,45sin((360/365)(**d_n**+284)), όπου **d_n** η μέρα του έτους (δηλαδή 1, 2, ….365).

3.3.5 Σκίαση Φ/Β Πλαισίων

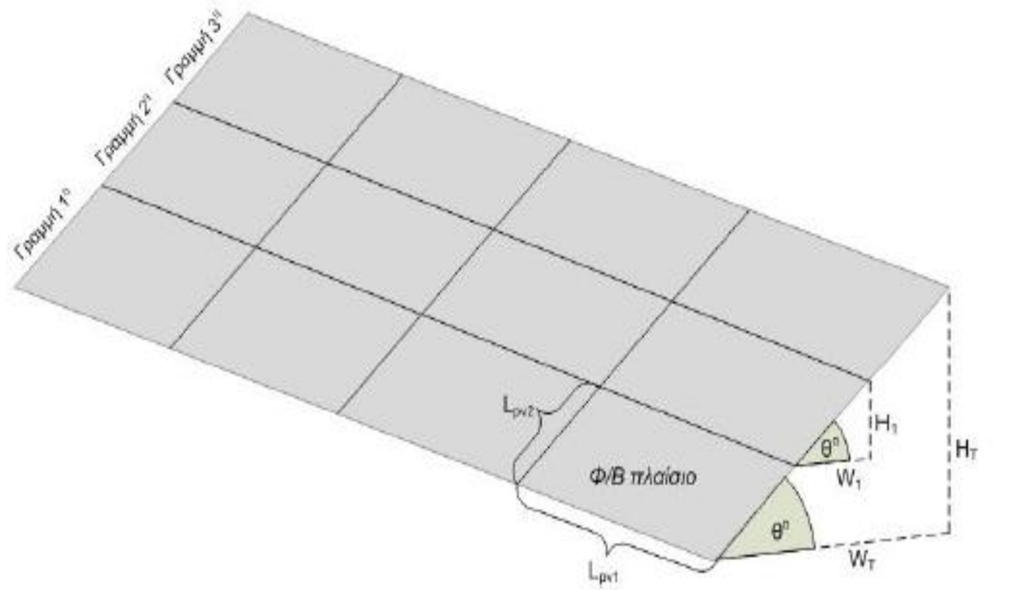
Στις εγκαταστάσεις φ/β πλαισίων δημιουργείται το φαινόμενο της σκίασης των πλαισίων από τα γειτονικά τους, με αποτέλεσμα τη μειωμένη απόδοση των σκιαζόμενων πλαισίων. Ως εκ τούτου, στο πλαίσιο της παρούσας Εργασίας που μελετά τη βέλτιστη διάταξη φ/β πλαισίων σε ένα χώρο, ο παράγοντας της σκίασης λαμβάνεται σοβαρά υπόψη.

Έστω, λοιπόν, ότι στο διαθέσιμο χώρο επιλέγεται διάταξη φ/β πλαισίων σε στήλες τέτοια ώστε μεταξύ γειτονικών στηλών να μην υπάρχει το φαινόμενο της σκίασης. Η διάταξη αυτή παρουσιάζεται σχηματικά πιο κάτω:



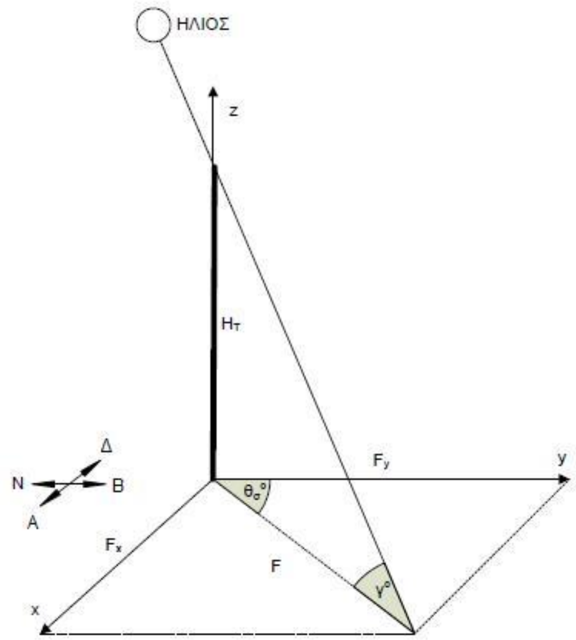
Σχήμα 3.3.5-1: Διάταξη Φ/Β Πλαισίων σε Στήλες εντός του Διαθέσιμου Χώρου

Έστω, επίσης, ότι σε κάθε στήλη του πιο πάνω σχήματος είναι δυνατή η τοποθέτηση φ/β πλαισίων σε πολλαπλές γραμμές, όπως φαίνεται πιο κάτω:



Σχήμα 3.3.5-2: Διάταξη Φ/Β Πλαισίων σε Γραμμές εντός της κάθε Στήλης

Εάν στο υπό μελέτη σύστημα φ/β πλαισίων το κάθετο ύψος στηλών είναι ίσο με H_T και το μήκος της σκίασης (δηλαδή η απόσταση του σημείου προβολής στο έδαφος του ανατολικού άκρου της βόρειας πλευράς της στήλης από το σημείο μέχρι το οποίο υπάρχει σκίαση) είναι ίσο με F, τότε για τους παράγοντες σκίασης θα έχουμε σχηματικά:



Σχήμα 3.3.5-3: Παράγοντες Σκίασης Φ/Β Πλαισίων σε Στήλες εντός του Διαθέσιμου Χώρου

Στο πιο πάνω σχήμα έχουμε:

- $\boldsymbol{\theta_\sigma}$ την αζιμούθια γωνία (όπως έχει οριστεί και προηγουμένως στην Παράγραφο 3.3.5).
- **γ** τη γωνία ηλιακού ύψους για την οποία sinγ = sinδsinφ + cosδcosφcosω, όπου
    - φ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου σε μοίρες (°),
    - δ η γωνία ηλιακής απόκλισης σε μοίρες (°), όπως καταγράφηκε για την Εξίσωση 3.3.4-2 πιο πάνω,
    - ω η γωνία ηλιακού χρόνου σε μοίρες (°), με ω = 15(t – 12).
- **F** ίσο με H_T/tanγ

Το μήκος F αναλύεται σε δύο συνιστώσες, F_x και F_y, όμως καθώς στο υπό μελέτη σύστημα θεωρείται ότι τα φ/β πλαίσια είναι προσανατολισμένα προς το Νότο και διατεταγμένα σε στήλες, ενδιαφέρον για τους υπολογισμούς μας παρουσιάζει μόνο η συνιστώσα F_y, για την οποία ισχύει: $F_y = \cos\theta_\sigma/\tan y$, από όπου με χρήση τριγωνομετρίας θα προκύψει:

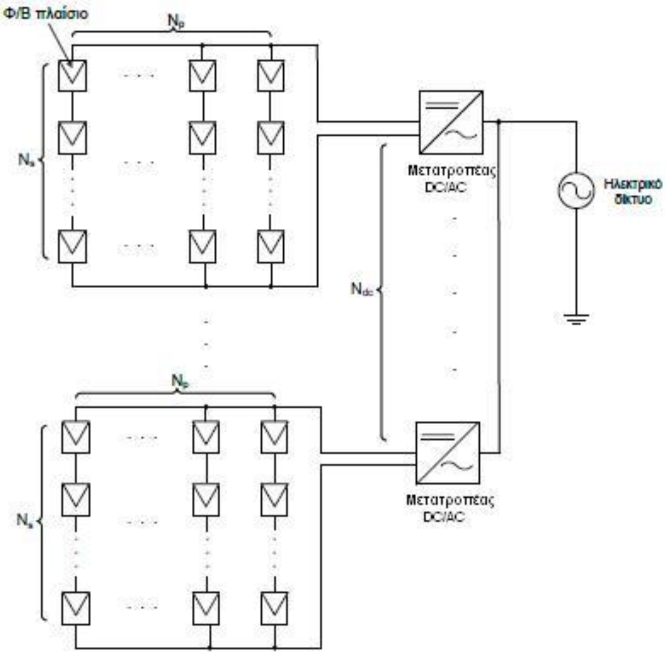
$$F_Y = H_T \frac{\sin(\varphi).\cos(\delta).\cos(\omega)\text{-}\cos(\varphi).\sin(\delta)}{\sin(\varphi).\sin(\delta)\text{-}\cos(\varphi).\cos(\delta).\cos(\omega)} \quad \text{(Εξ. 15)}$$

Στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας Εργασίας γίνεται αναζήτηση της μέγιστης τιμής της συνιστώσας F_y για όλες τις ώρες του έτους και για το γεωγραφικό πλάτος του τόπου μελέτης, ώστε ακριβώς να μην υπάρχει σκίαση και άρα ενεργειακές απώλειες. Η μέγιστη αυτή τιμή που λαμβάνεται για την F_y επιλέγεται ως η απόσταση των στηλών των φ/β πλαισίων (ύψους H_T), όπως φαίνεται και στο πιο πάνω Σχήμα 3.3.5-1.

3.3.6 Μοντέλο Φ/Β για την Παρούσα Εργασία

Το Μοντέλο Φ/β πλαισίων που μελετάται στην παρούσα εργασία αφορά σε σύστημα φ/β πλαισίων το οποίο είναι συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο με σκοπό την πώληση της παραγόμενης ενέργειας με το μέγιστο οικονομικό όφελος. Για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση του εν λόγω συστήματος χρησιμοποιούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι, καθώς εγγυώνται την παραγωγή των βέλτιστων λύσεων του προβλήματος σε πολύ σύντομο χρόνο.

Σε συνάφεια και με προηγούμενες παραγράφους της παρούσας Εργασίας, θεωρούμε ότι το υπό μελέτη σύστημα αποτελείται από φ/β πλαίσια συνδεδεμένα σε διατάξεις των N_p παράλληλα συνδεδεμένων ομάδων, η καθεμιά των N_s φ/β στοιχείων σε σειρά, με N_{dc} μετατροπείς ισχύος DC/AC, συνδεδεμένους και συγχρονισμένους με το ηλεκτρικό δίκτυο. Οι μετατροπείς αυτοί μετατρέπουν το παραγόμενο από τα φ/β πλαίσια DC ρεύμα σε AC ρεύμα προς παροχή στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το Σχήμα 3.3.6 -1 αποτυπώνει το γενικό διάγραμμα της μοντελοποίησης του μελετώμενου στην παρούσα Εργασία συστήματος παραγωγής ενέργειας.



Σχήμα 3.3.6-1: Διάγραμμα Μοντελοποίησης Μελετώμενου Συστήματος Παραγωγής Ενέργειας

Στη διαστασιολόγηση του εν λόγω συστήματος περιλαμβάνονται, όπως έχουν περιγραφεί πιο πάνω, οι υπολογισμοί που καταλήγουν στον καθορισμό:

- Βέλτιστου πλήθους των φ/β πλαισίων.
- Βέλτιστου αριθμού γραμμών φ/β πλαισίων ανά στήλη διάταξής τους εντός της διαθέσιμης έκτασης.
- Βέλτιστης κλίσης των πλαισίων κατά τη διάρκεια του έτους.

Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η βελτιστοποιημένη προσέγγιση για μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας είναι η επιλογή παραπάνω της μίας κλίσης ανά έτος. Σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται διαστασιολόγηση με δύο κλίσεις ανά έτος:

- 1^{η} κλίση, 10 ως 15° μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου εγκατάστασης, για τις ημέρες 1 ως 104 και 290 ως 365 (χειμερινοί μήνες).
- 2^{η} κλίση, 10 ως 15° μικρότερη από τα γεωγραφικό πλάτος του τόπου εγκατάστασης, για τις ημέρες 105 ως 289 (θερινοί μήνες).

Επίσης κριτήριο βελτιστοποίηση αποτελεί η μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους από την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο περιλαμβάνονται τόσο το κόστος αγοράς των επιμέρους στοιχείων όσο και το κόστος συντήρησής τους. Πιο συγκεκριμένα, για τη βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης της παρούσας μελέτης, συνυπολογίζονται οι πιο κάτω παράμετροι κόστους για τις οποίες λήφθηκαν υπόψη εμπορικώς διαθέσιμα δομικά στοιχεία και τιμές:

- Αγορά και συντήρηση φ/β πλαισίων.
- Αγορά και συντήρηση Μετατροπέων DC/AC.
- Αγορά της έκτασης εγκατάστασης του συστήματος.
- Κατασκευή βάσεων στήριξης των πλαισίων.

Στο Μοντέλο Φ/Β για την παρούσα εργασία, υποψήφια αποτελέσματα της βελτιστοποίησης είναι εκείνα τα οποία καλύπτουν πλήρως τους περιορισμούς σε σχέση με την ορθή σύνδεση των φ/β πλαισίων στους μετατροπείς DC/AC καθώς και των φ/β πλαισίων γενικότερα στη διαθέσιμη για εγκατάσταση έκταση. Πιο συγκεκριμένα, επιλέξιμο αποτέλεσμα βελτιστοποίησης είναι εκείνο που κατά την προσομοίωση υλοποιεί αλληλοσυσχέτιση των εξής παραγόντων:

- Αριθμός στοιχείων ανά πλαίσιο (N_c).
- Μέγιστη τάση εξόδου V_m και μέγιστο ρεύμα εξόδου I_m.
- Τάση ανοικτοκύκλωσης V_{oc} και ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc}.
- Μέγιστη ισχύς P_m και ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας στοιχείων NCOT.
- Αριθμός φ/β πλαισίων.
- Αριθμός γραμμών φ/β πλαισίων ανά στήλη διάταξης στη διαθέσιμη έκταση.
- Κλίση φ/β πλαισίων.
- Τρόπος σύνδεσης φ/β πλαισίων στους μετατροπείς DC/AC.

- Τρόπος διάταξης φ/β πλαισίων στη διαθέσιμη έκταση (έτσι ώστε να μην υπάρχει ποτέ κατά τη διάρκεια του έτους μεταξύ τους σκίαση).
- Μέση συνολική ημερήσια ή μέση μηνιαία τιμή ηλιακής ακτινοβολίας G (Wh/m^2) σε οριζόντιο επίπεδο, καθώς και μέση ημερήσια ή μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος T (°C) (για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας). Υπενθυμίζεται η διαδικασία της Παραγράφου 3.3.5 για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας για όλες τις κλίσεις από 0° ως 90°.
- Χρόνος αποπληρωμής, εσωτερικός βαθμός απόδοσης και τιμή καθαρής παρούσας αξίας (ώστε να πραγματοποιείται και οικονομική αξιολόγηση), τα οποία αναλύονται περαιτέρω πιο κάτω στο Κεφάλαιο 5.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην παρούσα εργασία, ο αλγόριθμος που έχει αναπτυχθεί είναι πλήρως παραμετροποιήσιμος, ώστε να είναι δυνατή η προσαρμογή από το χρήστη στις οικονομικές παραμέτρους και στα επιμέρους κόστη.

4. Ανάλυση Κύκλου Ζωής

4.1 Γενικά περί Λήψης Αποφάσεων και Περιβαλλοντικής Αξιολόγησης

Συχνά ακούγεται ότι «όλα είναι ζήτημα επιλογών». Αυτή η πρόταση ισχύει, περισσότερο από οπουδήποτε αλλού, στις διαδικασίες διαμόρφωσης πολιτικών, κατάστρωσης στρατηγικών και, γενικότερα, λήψης αποφάσεων. Οι επιλογές τις οποίες εξετάζουν οι εκάστοτε λήπτες αποφάσεων συνήθως αποτελούν εναλλακτικούς τρόπους εφαρμογής πολιτικών, ανάλογα με τα υπάρχοντα κοινωνικά διλήμματα ως προς τις αποφάσεις, αλλά και τα κόστη και οφέλη αυτών που έχουν άμεσα, συνδεδεμένα με τις αποφάσεις, συμφέροντα. Οι λήπτες αποφάσεων είναι συνεπώς αναγκασμένοι να αντιμετωπίσουν τα κοινωνικά αιτήματα και τα αντικρουόμενα – τις περισσότερες φορές – κόστη και οφέλη των διαφόρων ομάδων συμφερόντων που εμπλέκονται στη διαδικασία. Τα εργαλεία των ληπτών αποφάσεων είναι η καλή πληροφόρηση, οι διάφορες μεθοδολογίες αξιολόγησης και αποτίμησης της κατάστασης, καθώς και η ισχύουσα νομοθεσία.

Σχεδόν πάντα, οι λήπτες αποφάσεων και οι διαμορφωτές πολιτικών έρχονται αντιμέτωποι τόσο με τις προσωπικές όσο και με τις συλλογικές αξίες των ατόμων και των ομάδων συμφερόντων (stakeholders) που εμπλέκονται στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Ουσιαστικά δε, η όλη πρόκληση στην αντικειμενικά «ορθή» λήψη μιας απόφασης, ή στο σχεδιασμό μιας πολιτικής, είναι η απόφαση να παρθεί θίγοντας οικονομικά ή ηθικά όσο το δυνατόν λιγότερα άτομα ή ομάδες συμφερόντων. Για να λάβει, λοιπόν, χώρα αντικειμενικά μια απόφαση θα πρέπει να αναπτυχθούν τα κατάλληλα εργαλεία αξιολόγησης και αποτίμησης της υφιστάμενης κατάστασης και σχεδιασμού της μελλοντικής.

Ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά στα περιβαλλοντικά θέματα, αναπτύσσονται οι τεχνικές και μεθοδολογίες της περιβαλλοντικής αξιολόγησης και της αποτίμησης περιβαλλοντικών αγαθών, στη βάση των οποίων οι οικονομολόγοι του περιβάλλοντος προσπαθούν να αναπτύξουν και να υποστηρίξουν την αρχή ότι τα φυσικά φαινόμενα αποτελούν πολυλειτουργικά κεφάλαια, υπό την έννοια ότι το περιβάλλον παρέχει στον άνθρωπο ένα ευρύ φάσμα πολύτιμων υπηρεσιών και λειτουργιών, σύμφωνα και με τη γνωστή Έκθεση Brundtland “Our Common Future” για την Παγκόσμια Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη.

4.2 Ορισμός και Σκοπός Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Η αυξανόμενη περιβαλλοντική ευαισθησία και η επίγνωση των περιβαλλοντικών θεμάτων από όλο και περισσότερους κοινωνικούς εταίρους έχει οδηγήσει σταδιακά στην όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή της προσέγγισης «Ανάλυσης Κύκλου Ζωής» στις δραστηριότητες της βιομηχανίας και του εμπορίου, ώστε οι διεργασίες τους (εξαγωγή πρώτων υλών, επεξεργασία, παραγωγή, μεταποίηση, μεταφορές, κλπ) να είναι όσο το δυνατόν πιο «πράσινες», δηλαδή να έχουν όσο το δυνατό μικρότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις.

Από τη δεκαετία του 1960, οπότε και πρωτοχρησιμοποιήθηκε η έννοια της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, της έχουν δοθεί διάφοροι «ορισμοί» για το σκοπό και το περιεχόμενό της. Στο πλαίσιο της Εργασίας αυτής η Ανάλυση Κύκλου Ζωής ορίζεται μέσα από τις προσεγγίσεις της εγκυρότατης Αμερικανικής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency – US-EPA)[4.2-1] και της παγκόσμιας Κοινότητας Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας (Society of Environmental Toxicology and Chemistry – SETAC)[4.2-2]. Ως εκ τούτου, θα λέγαμε ότι η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί μια προσέγγιση τύπου “Cradle – to – Grave” («από την κούνια στον τάφο»), η οποία χρησιμοποιείται ως τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται προϊόντα, διεργασίες ή δραστηριότητες μέσω προσδιορισμού, ποσοτικοποίησης και ερμηνείας:

- όλων των εισροών και εκροών ενός προϊόντος, μιας διεργασίας ή μιας υπηρεσίας (κατάλογος απογραφής κύκλου ζωής),
- των σχετικών αποβλήτων, της ανθρώπινης υγείας και των οικολογικών επιβαρύνσεων (αποτίμηση επιπτώσεων),
- των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης (ερμηνεία κύκλου ζωής) ολόκληρου του κύκλου ζωής των προϊόντων ή των διεργασιών που εξετάζονται.

Οι «ορθές» Αναλύσεις Κύκλου ζωής αναγνωρίζουν και εκτιμούν και τις δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων.

Ως “Cradle – to – Grave” προσέγγιση, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αρχίζει με τη μελέτη του σταδίου εξόρυξης και συλλογής των πρώτων υλών που είναι απαραίτητες για να δημιουργηθεί το υπό μελέτη προϊόν ή να λειτουργήσει η υπό μελέτη διεργασία και τελειώνει στο σημείο όπου όλα τα υλικά «επιστρέφουν» στο σύστημα του περιβάλλοντος ως απόβλητα ή εκπομπές. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής, λοιπόν, αξιολογώντας όλα τα στάδια της ζωής ενός προϊόντος ως αλληλοσυνδεόμενα και αλληλοεξαρτώμενα, επιτρέπει την εκτίμηση των αθροιστικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων όλων των σταδίων του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας, και συμπεριλαμβάνει επιπτώσεις που δεν λαμβάνονται υπόψη στις περισσότερες παραδοσιακές αναλύσεις (π.χ. εξαγωγή πρώτων υλών, μεταφορά υλικών, τελική διάθεση προϊόντων, κ.λπ.). Με τη συμπερίληψη των επιπτώσεων ολόκληρου του κύκλου ζωής των προϊόντων, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής παρέχει μια περιεκτική εικόνα των περιβαλλοντικών πτυχών ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας και μια ακριβέστερη εικόνα του πραγματικού «περιβαλλοντικού κόστους» στην επιλογή προϊόντων, διεργασιών ή υπηρεσιών.

Σε συνάφεια με τα πιο πάνω, λοιπόν, βασικός σκοπός της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής είναι να αποτελέσει εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης και λήψης αποφάσεων για την αποτίμηση επιδράσεων από τη χρήση ενέργειας και την επεξεργασία υλικών, συμπεριλαμβανομένης της απόρριψης αποβλήτων στο περιβάλλον, και να εκτιμήσει τις δυνατότητες επίτευξης περιβαλλοντικών βελτιώσεων σε συνδυασμό με την ορθολογική χρήση πρώτων υλών και ενέργειας κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος η μιας διεργασίας.

4.3 Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Σύμφωνα με την έγκυρη SETAC, η μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής περιλαμβάνει τα εξής τέσσερα (4) στάδια – βήματα[4.3-1]:

- **Σκοπός και Στόχος (Goal and Scope)**. Σε αυτό το στάδιο γίνεται η διατύπωση του αντικειμένου της μελέτης. Οριοθετείται το πλαίσιο και ο σκοπός της μελέτης/ εργασίας, περιγράφονται τα φυσικά όρια, η λειτουργία του εξεταζόμενου συστήματος και οι διάφορες παραδοχές που τυχόν έχουν γίνει. Το στάδιο αυτό είναι πολύ σημαντικό, διότι ουσιαστικά υποδεικνύει την κατεύθυνση που θα ακολουθηθεί στα επόμενα βήματα.
- **Απογραφή Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory – LCI)**. Εφόσον τεθούν τα όρια της μελέτης, αρχίζει η συγκέντρωση και η περιγραφή των δεδομένων. Η LCI περιλαμβάνει όλα τα στάδια ζωής από την απόκτηση των πρώτων υλών, βιομηχανική κατεργασία, μεταφορά, διανομή, χρήση, ανακύκλωση έως την τελική διάθεση (που μπορεί να περιλαμβάνει ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση, αποτέφρωση ή ταφή). Στην LCI γίνεται πλήρης ανάλυση όλων των δεδομένων εισροών – εκροών όλων των σταδίων της διεργασίας. Τα δεδομένα συνήθως παρουσιάζονται με τη μορφή πινάκων ενώ τα αποτελέσματα της απογραφής με τη μορφή διαγραμμάτων ροής, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο τη δυνατότητα λήψης πληροφοριών για τις αλληλεπιδράσεις του εκάστοτε μελετώμενου συστήματος με το περιβάλλον. Το εν λόγω στάδιο είναι πολύ σημαντικό για την ανάλυση επιπτώσεων. Διαγραμματικά, τα πιο πάνω φαίνονται:

Σχήμα 4.3-1: Διάγραμμα Ροής Οριοθέτησης Συστήματος[4.3-2]

- **Ανάλυση Αντίκτυπου-Επιπτώσεων του Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Assessment – LCIA)**. Το έργο της ανάλυσης των επιπτώσεων είναι ο προσδιορισμός και εκτίμηση των επιπτώσεων που προκύπτουν από τη χρήση πρώτων υλών και ενέργειας και των εκπομπών ρύπων προς το περιβάλλον με τη χρήση περιβαλλοντικών δεικτών στην εκάστοτε κατηγορία.
- **Αποτίμηση – Ερμηνεία (Interpretation)**. Στο τελευταίο αυτό στάδιο πραγματοποιούνται διάφορες αναλύσεις για την εύρεση εναλλακτικών δυνατοτήτων για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων του μελετώμενου συστήματος. Στα πλαίσια αυτού του σταδίου λαμβάνουν συχνά χώρα συγκρίσεις ανταγωνιστικών προϊόντων, διεργασιών ή υπηρεσιών ή ακόμα και συγκρίσεις βελτιστοποιημένων σεναρίων, με σκοπό την ανάδειξη του προτιμότερου από περιβαλλοντικής απόψεως.

ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ – Ανάπτυξη του Συστήματος

Πρόλογος Δευτέρου Μέρους

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας αναπτύσσεται η λογική πίσω από την υλοποίηση του λογισμικού εύρεσης της βέλτιστης διάταξης των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Αρχικώς γίνεται μια λεπτομερής ανάλυση και μοντελοποίηση μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης από οικονομικής πλευράς. Ορίζονται οι παράμετροι της μοντελοποίησης και προσδιορίζονται ο χρόνος αποπληρωμής και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης.

Εν συνεχεία, γίνεται μια μικρή εισαγωγή σε όρους όπως ο χρόνος ενεργειακής αποπληρωμής, περιγράφεται η περιβαλλοντική μοντελοποίηση μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Εξηγείται ο υπολογισμός του περιβαλλοντικού κόστους σε όλα τα στάδια της κατασκευής των υλικών που χρειάζονται, την μεταφορά τους στον χώρο, την λειτουργία της εγκατάστασης μέχρι και την ανακύκλωση των υλικών.

Γίνεται εκτενής αναφορά στην μέθοδο Particle Swarm Optimization που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του λογισμικού της εργασίας. Αναλύεται επίσης ο τρόπος λειτουργίας για την εύρεση λύσης βέλτιστης διάταξης με πολλαπλά κριτήρια (οικονομικά και περιβαλλοντικά).

Τέλος, για σκοπού επίδειξης της εφαρμογής του λογισμικού που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται μια μελέτη (case study) κατασκευής μια φωτοβολταϊκής εγκατάστασης στην Κρήτη. Περιγράφονται όλα τα σενάρια μεταφοράς, εγκατάστασης και ανακύκλωσης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Τα συμπεράσματα των πειραμάτων αναλύονται στο κεφάλαιο 9 και η εργασία ολοκληρώνεται με την μελλοντική επέκταση που μπορεί να γίνει.

5.Οικονομική Ανάλυση και Μοντελοποίηση

5.1 Παράμετροι

Στην παρούσα μελέτη, η από οικονομικής πλευράς βιωσιμότητα της επένδυσης εγκατάστασης φ/β πλαισίων στη διαθέσιμη έκταση βασίζεται στον προσδιορισμό του σύνθετου χρόνου αποπληρωμής (payback period) και στον υπολογισμό του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR).

Προτού, όμως, αναλυθούν οι προαναφερθείσες παράμετροι, κρίνεται σκόπιμο όπως οριστούν τα πιο κάτω:

- Χρονικός Ορίζοντας Επένδυσης. Ο χρόνος ζωής των φ/β πλαισίων κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 20 και 30 ετών, με τους κατασκευαστές να μην εγγυώνται ουσιαστικά την ορθή λειτουργία των συσκευών πέρα από την εν λόγω χρονική περίοδο. Επίσης, ο μέσος χρόνος επιδιορθώσιμων βλαβών για τους Μετατροπείς DC/AC κυμαίνεται συνήθως περί τα 25 έτη (219.000 ώρες λειτουργίας). Ως εκ τούτου, ο χρονικός ορίζοντας μιας αξιολογήσιμης στην παρούσα μελέτη επένδυσης δε μπορεί να υπερβαίνει τις αναμενόμενες διάρκειες ζωής των συσκευών του συστήματος, όπως αυτές προαναφέρθηκαν.

- Παράμετροι Εγχώριας Οικονομίας. Η αύξηση του κόστους των αγαθών και των υπηρεσιών ανά μονάδα χρόνου είναι το μέγεθος που είναι ευρύτερα γνωστό ως πληθωρισμός. Ο πληθωρισμός g (%) καθώς και το ετήσιο κόστος χρήματος i (%) επιλέγονται βάσει προβλέψεων που αφορούν στη συμπεριφορά των οικονομικών δεικτών κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Το κόστος χρήματος, γνωστό και ως επιτόκιο αναγωγής ή προεξοφλητικό επιτόκιο, χρησιμοποιείται για την αναγωγή των μελλοντικών καθαρών ταμειακών ροών σε τρέχουσες αξίες ώστε να υπάρχει δυνατότητα σαφούς σύγκρισης με το κόστος εγκτατάστασης που εκφράζεται σε σημερινές αξίες, και αντίστροφα.

- Επιδότηση Εγκατάστασης. Το ισχύον νομικό πλαίσιο παρέχει επιδοτήσεις για την προώθηση και ενίσχυση των εγκαταστάσεων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Είναι προφανές ότι το υπό μελέτη σύστημα παραγωγής ενέργειας αποτελεί τέτοια περίπτωση επιδότησης.

- Παρούσα Αξία (P). Η έννοια της παρούσας αξίας (present value) συναντάται πολύ συχνά στα χρηματοοικονομικά και συνδέεται τη μετατροπή του συνόλου χρηματορροών που αναμένονται σε ένα μελλοντικό χρονικό ορίζονται σε ποσό σε σταθερό χρόνο μηδέν. Με απλούστερα λόγια, η παρούσα αξία απαντά συνηθέστερα στο ερώτημα “πόσο πρέπει να επενδύσω σήμερα προκειμένου να επιτύχω το σκοπό μου;”. Με αυτή την προσέγγιση, εάν σήμερα επενδύσουμε ποσό P, με προεξοφλητικό επιτόκιο (discount rate) i, τότε μετά από n έτη, το άθροισμα κεφαλαίου και τόκων, δηλαδή η απόδοση κεφαλαίου F, θα είναι: $F = P \times (1 + i)^n$.

- Συντελεστής Παρούσας Αξίας. Η σχέση που αποδίδει τον εν λόγω συντελεστή (γνωστό ως PWF – Present Worth Factor) είναι:

$$PWF=\sum_{t=1}^{n}\frac{(1+g)^{t-1}}{(1+i)^{t}}=\frac{1-\left(\frac{1+g}{1+i}\right)^{n}}{i-g} \quad \text{(Εξ. 16)}$$

Όπου: g ο πληθωρισμός, i το προεξοφλητικό επιτόκιο και n οι χρονικές περίοδοι. Έτσι, εάν μια πληρωμή επαναλαμβάνεται επί n περιόδους και δε ματαβάλλεται παρά μόνο λόγω πληθωρισμού, τότε η παρούσα αξία των n ποσών προκύπτει ως: **P = A x PWF**.

- Καθαρή Παρούσα Αξία Επένδυσης. Πρόκειται για το συνολικό καθαρό όφελος μιας επένδυσης, το οποίο προκύπτει από τη διαφορά του λειτουργικού οφέλους και του συνόλου των δαπανών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της εν λόγω επένδυσης. Με όλα τα ποσά να εκφράζονται σε παρούσα αξία (με αναγωγή στην αρχή του πρώτου έτους λειτουργίας της επένδυσης), η Καθαρή Παρούσα Αξία NPV (Net Present Value) για την παρούσα Εργασία θα προκύπτει ως:

$$NPV=\frac{R_n}{(1+i)^n}-IC_0-\frac{FC_n}{(1+i)^n} \quad \text{(Εξ. 17)}$$

Όπου: IC_0 το αρχικώς επενδεδυμένο κεφάλαιο,
FC_n το συνολικό κόστος εγκατάστασης ανηγμένο στο n-οστό έτος,
R_n τα κέρδη από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας, επίσης ανηγμένα στο n-οστό έτος

5.2 Προσδιορισμός Χρόνου Αποπληρωμής

Το χρονικό σημείο στο οποίο είναι μηδενική η διαφορά μεταξύ συνολικών εσόδων από το αρχικώς επενδεδυμένο κεφάλαιο και συνολικών εξόδων συντήρησης, ορίζεται ως χρόνος αποπληρωμής (payback period) $\mathbf{n^*}$. Σε συνέχεια, λοιπόν, με την πιο πάνω παράγραφο, μπορούμε να πούμε ότι θα έχουμε NPV = 0 για $n = n^*$. Σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία επιλέγεται το μεγαλύτερο δυνατό n^* καθώς και ότι αυτό υπολογίζεται με ακρίβεια ενός δεκάτου του έτους.

5.3 Προσδιορισμός Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης

Το κόστος χρήματος i για το οποίο η Καθαρή Παρούσα Αξία NPV της επένδυσης είναι μηδενική στα n έτη της αξιολόγησης, ορίζεται ως Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης **IRR** της επένδυσης. Δηλαδή, ισχύει η σχέση NPV = 0 για i=IRR. Βάσει αυτού, η αξιολόγηση της επένδυσης μπορεί να γίνει ως εξής:

- Για IRR > i, η επένδυση είναι αποδεκτή.
- Για IRR = i, η επένδυση είναι οριακή και άρα είτε θεωρείται ότι δεν έχει ενδιαφέρον είτε αξιολογείται κατά περίπτωση.
- Για IRR < i, η επένδυση απορρίπτεται.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι, αν και τα πιο πάνω αποτελεούν αποδεκτές μαθηματικοποιημένες προσεγγίσεις, εντούτοις ο IRR από μόνος του δεν θεωρείται ότι αρκεί ως κριτήριο αξιολόγησης της επένδυσης και για το λόγο αυτό θα πρέπει να συνδυάζεται με την τιμή της NPV.

6. Περιβαλλοντική Μοντελοποίηση

6.1 Εισαγωγή

Στην περίπτωση ενός φωτοβολταϊκού πάρκου, η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι αρκετά σύνθετη. Σε αντίθεση με άλλες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (πχ ανεμογεννήτριες, ηλιοθερμικά), τα φωτοβολταϊκά έχουν περισσότερες παραμέτρους όσο αφορά την κατασκευή τους, οι οποίες έχουν να κάνουν τόσο με την κρυσταλλική δομή του πυριτίου (Polycrystalline Si, Monocrystalline Si) αλλά και με τις διαφορετικές τεχνικές που κάθε εταιρία χρησιμοποιεί κατά την διαδικασία κατασκευής τους. Είναι μάλιστα πολύ δύσκολο οι εταιρίες να δώσουν πραγματικά στοιχεία όσο αφορά την ενέργεια που έχει ξοδευτεί για την παραγωγή των στοιχείων, μιας και στα κατάλληλα χέρια με διαδικασία αντίστροφης μηχανικής και τα σύγχρονα λογισμικά συστήματα μπορεί κάποιος να αντιγράψει την τεχνολογία της εταιρίας.

6.2 Χρόνος Ενεργειακής Αποπληρωμής (Energy Payback Time)

Ως χρόνο ενεργειακής αποπληρωμής ορίζουμε τον χρόνο που χρειάζεται για μια μονάδα οποιασδήποτε μορφής ΑΠΕ να παράξει την ενέργεια που αντιστοιχεί στην ενέργεια που καταναλώθηκε για να κατασκευαστεί εξαρχής. Στη περίπτωση των φωτοβολταϊκών, ο χρόνος αυτός είναι πολύ μεγαλύτερος από άλλες μορφές ΑΠΕ. Ενδεικτικά σε για μια μικρή οικιακή εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πολύ-κρυσταλλικού Πυριτίου (υποθέτοντας ότι η εγκατάσταση θα παράγει ενέργεια για 30 χρόνια), εκτιμάται ότι ο χρόνος ενεργειακής αποπληρωμής είναι περίπου 3,5 χρόνια[6.2-1].

Κατ' ακρίβεια για να μετρήσουμε σωστά τον χρόνο αυτό, όταν λέμε ότι μετράμε ενέργεια, ουσιαστικώς μετατρέπουμε την ενέργεια σε γραμμάρια Διοξειδίου του Άνθρακα (CO_2) και λαμβάνουμε επίσης υπόψη το ενεργειακό αποτύπωμα (carbon footprint) της χώρας κατασκευής και της χώρας στην οποία είναι εγκατεστημένη η μονάδα στο δίκτυο. Αν πχ πάρουμε δύο ίδιες ανεμογεννήτριες, μια κατασκευασμένη στην Αυστρία (που έχει ενεργειακό αποτύπωμα 0,2 kg CO_2/ kWh_e)[6.2-2] και την άλλη στην Γερμανία (εν.αποτ. 0,6 kg CO_2/ kWh_e) και τις εγκαταστήσουμε και τις δύο στο ίδιο δίκτυο, ο χρόνος ενεργειακής αποπληρωμής της ανεμογεννήτριας που κατασκευάστηκε στην Αυστρία θα είναι 3 φορές μικρότερος αυτής που κατασκευάστηκε Γερμανία.

6.3 Οικολογικός Κανιβαλισμός

Ο όρος «οικολογικός κανιβαλισμός» είναι η περιβαλλοντική διάσταση του όρου «ενεργειακός κανιβαλισμός»[6.3--1]. Ο δεύτερος ουσιαστικώς χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις περιπτώσεις όπου η ραγδαία ανάπτυξη του τομέα της ενέργειας δημιουργεί μια ανάγκη για ενέργεια η οποία καλύπτεται από τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Ενέργεια για ενέργεια με άλλα λόγια.

Ο οικολογικός κανιβαλισμός είναι η διάσταση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου του ενεργειακού κανιβαλισμού. Δηλαδή να υπάρχουν εκπομπές αερίων θερμοκηπίου προκειμένου να κατασκευαστούν τεχνολογίες που δεν θα παράγουν αέρια θερμοκηπίου. Η μελέτη των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων σε αυτή την διάσταση είναι πάρα πολύ σημαντική μιας και τα φωτοβολταϊκά από όλες τις μορφές ΑΠΕ είναι τα πιο δαπανηρά από πλευράς ενέργειας.

Για να έχει πραγματικό όφελος το περιβάλλον από μια μορφή ΑΠΕ ή μια τεχνολογία ενεργειακής εξοικονόμησης, πρέπει αυτή να αναπτύσσεται με ρυθμό αντίστροφο από τον χρόνο Ενεργειακής αποπληρωμής της[6.3-1].

6.4 Εξίσωση Υπολογισμού Περιβαλλοντικού Κέρδους

Για τον υπολογισμό του περιβαλλοντικού κέρδους του ενός φωτοβολταϊκού πάρκου χρησιμοποιούμε μια Αντικειμενική Συνάρτηση που να «παρακολουθεί» την πορεία όλων των εξαρτημάτων (από πρώτες ύλες μέχρι ανακύκλωση) και των διεργασιών που έχουν γίνει για να κατασκευαστεί το πάρκο, να λειτουργήσει και στο τέλος να επιστρέψει ο χώρος στην αρχική του κατάσταση.

ΠερΚ= ΠαρΕν – [Κτσκ + Μετ1 + Μετ2 + Ανκλς]

όπου:

ΠερΚ: Περιβαλλοντικό Κέρδος
ΠαρΕν: Παραγωγή Ενέργειας
Κτσκ: Κατασκευή εξαρτημάτων
Μετ1: Μεταφορά εξαρτημάτων από τα εργοστάσια στο χώρο του φωτοβολταϊκού πάρκου
Μετ2: Μεταφορά των εξαρτημάτων προς ανακύκλωση
Ανκλς: Ανακύκλωση των εξαρτημάτων

Η Αντικειμενική Συνάρτηση θα υπολογίζει το Περιβαλλοντικό Κέρδος σε γραμμάρια Διοξειδίου του Άνθρακα (ΔτΑ, CO_2). Σε όλες τις διεργασίες που περιγράφονται στην Αντικειμενική Συνάρτηση το περιβαλλοντικό κόστος ή κέρδος δεν έχει να κάνει μόνο με το ΔτΑ. Εκτός από τις υπόλοιπες ουσίες που μαζί με το ΔτΑ αποτελούν την ομάδα των "Αερίων Θερμοκηπίου", οι διεργασίες αυτές είναι εξίσου ρυπογόνες και για το έδαφος και για τον υδροφόρο ορίζοντα με διάφορες ουσίες. Σκοπός όμως δεν είναι όμως να υλοποιήσουμε ένα πρόγραμμα Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκού πάρκου, αλλά ένα πρόγραμμα που θα υπολογίζει τη βέλτιστη διάταξη των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων σε ένα χώρο. Συνεπώς θα παραβλέψουμε τις γενικότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον από την δημιουργία του

Φωτοβολταϊκού Πάρκου και θα μετατρέψουμε όλες τις διεργασίες σε γραμμάρια ΔτΑ στην Αντικειμενική Εξίσωση.

6.5 Παραγωγή Ενέργειας

Το φωτοβολταϊκό πάρκο θα έχει συγκεκριμένη εγκατεστημένη ισχύ. Με βάση την ισχύ αυτή και λαμβάνοντας υπόψη την μέση ηλιακή ακτινοβολία κάθε μήνα και την κλήση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, υπολογίζουμε την συνολική παραγόμενη ενέργεια του πάρκου στην διάρκεια ζωής τους (25 χρόνια).

Το ποσό της ενέργειας αυτό δεν είναι από μόνο του μέτρο εκτίμησης του περιβαλλοντικού κέρδους από την παραγόμενη ενέργεια. Όπως είχαμε αναφέρει στην παράγραφο 2.1, σε κάθε χώρα στοιχίζει διαφορετικά η κάθε παραγόμενη κιλοβατώρα σε g CO_2. Για την Ελλάδα, πηγές αναφέρουν 0,64 kg CO_2/ kWh_e[6.5-1], που είναι από τα πιο ψηλά της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Συνεπώς για τον υπολογισμό της μάζας του διοξειδίου του Άνθρακα που αντιστοιχεί στην διαδικασία παραγωγής ενέργειας, πολλαπλασιάζουμε τις συνολικές Κιλοβατώρες που παράχθηκαν τα 25 χρόνια λειτουργίας του πάρκου με τον συντελεστή kg CO_2/ kWh_e της Ελλάδας (όπου θα είναι εγκατεστημένο το φωτοβολταϊκό πάρκο).

$$\text{ΠαρΕν} = \text{Total-kWh} * \text{Συντελεστής kg } CO_2/\ kWh_e \text{ Ελλάδας}$$

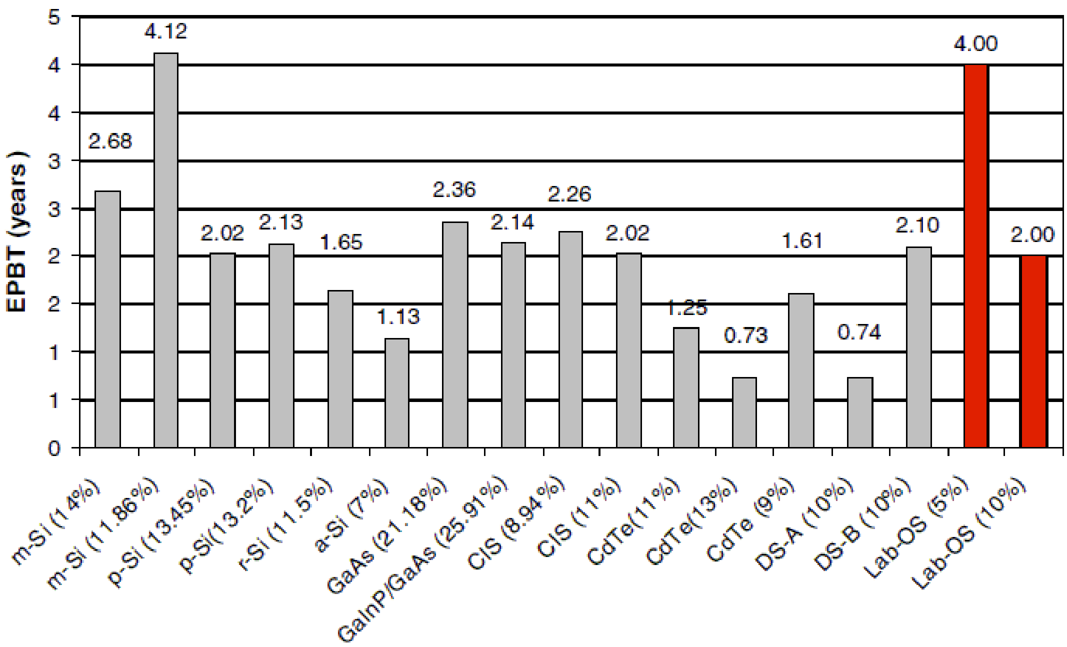
6.6 Κατασκευή Εξαρτημάτων

Τα εξαρτήματα για την κατασκευή του πάρκου είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, οι αντιστροφείς τάσης, τα καλώδια, το σκυρόδεμα (για την τοποθέτηση των πλαισίων στήριξης) και τα πλαίσια στήριξης. Το κάθε ένα εξάρτημα κατασκευάζεται από μηδενικά υλικά και υπολογίζεται η ενέργεια που καταναλώνεται σε όλα τα στάδια της διαδικασίας κατασκευής του

6.6.1 Κατασκευή των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

Η βιομηχανία παραγωγής Φωτοβολταϊκών Στοιχείων είναι μια πολύ ανταγωνιστική και κατέχει ένα τεράστιο μερίδιο της αγοράς Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας παγκόσμια. Ο μεγάλος ανταγωνισμός μεταξύ των εταιριών παραγωγής φωτοβολταϊκών έχει βοηθήσει στην ραγδαία ανάπτυξη της κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων τόσο σε επίπεδο τεχνολογιών κατασκευής (για παράδειγμα πολυκρυσταλλικού Πυριτίου, μονοκρυσταλλικού Πυριτίου, καδμίου-Τελλουρίου και τώρα τελευταία Οργανικά Φωτοβολταϊκά), όσο και σε επίπεδο ενεργειακής απόδοσης. Οι τεχνολογίες των Φωτοβολταϊκών είναι τόσες πολλές και εξελίσσονται συνεχώς με αποτέλεσμα ξεκάθαρα στοιχεία για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής τους να μην είναι εύκολα ανευρέσιμα. Άλλοι λόγοι που καθιστούν την εύρεση στοιχείων για το περιβαλλοντικό κόστος των Φωτοβολταϊκών έχουν να κάνουν με τους φόβους για βιομηχανική κατασκοπεία. Με της προηγμένες τεχνολογίες στον τομέα της Αντίστροφης Μηχανικής (Reverse Engineering) και με ακριβή στοιχεία για την απόδοση, υλικά κατασκευής και εκπομπές ΔτΑ κατά την κατασκευή (που μεταφράζονται σε ενέργεια που καταναλώθηκε), μπορεί εύκολα κάποια άλλη βιομηχανία να αντιγράψει την γραμμή παραγωγής ενός Φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Μια πολύ υποσχόμενη τεχνολογία στον τομέα των Φωτοβολταϊκών είναι τα Οργανικά Φωτοβολταϊκά. Τα οργανικά Φωτοβολταϊκά έχουν πολλά πλεονεκτήματα όσο αφορά τις δυνατότητες τους έναντι Φωτοβολταϊκών πρώτης γενιάς (κρυστάλλων Πυριτίου), όπως για παράδειγμα η ευλυγισία που έχουν που επιτρέπει να είναι εύκαμπτα όσο εύκαμπτη είναι μια κόλλα χαρτί. Το μεγαλύτερο τους πλεονέκτημα όμως, βρίσκεται στην διαδικασία παραγωγής, που δεν περιέχει στάδια που να χρειάζονται υψηλές θερμοκρασίες, και στα υλικά κατασκευής που έστω και αν ακόμα δεν έχουν καθοριστεί, όλα όσα μελετώνται είναι σχετικά φθηνά.



Εικόνα 6.6.1-1: Χρόνος Ενεργειακής Αποπληρωμής (σε χρόνια) για διάφορες τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών[6.6.1-1]. Στην παρένθεση βρίσκονται οι συντελεστές απόδοσης κάθε τεχνολογίας.

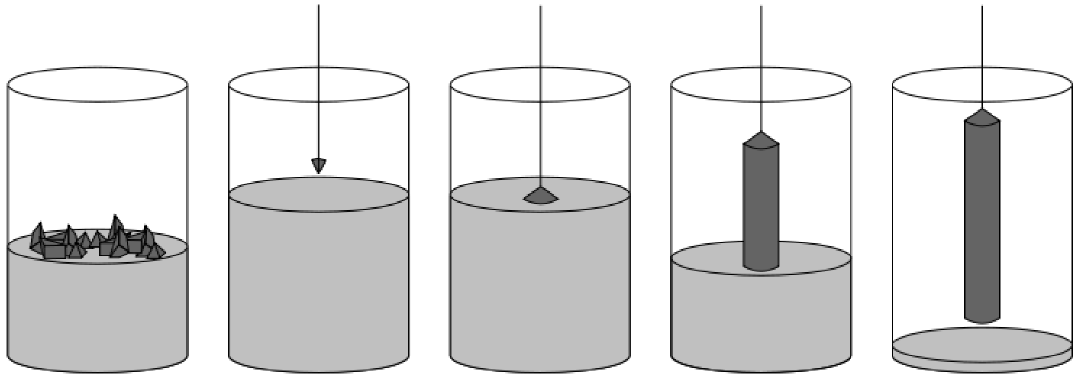
Παρόλο που ο δείκτης απόδοσης τους είναι σχετικά μικρός, με βάση μελέτη[6.6.1-1], στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου τα οργανικά φωτοβολταϊκά μπορούν να έχουν περιβαλλοντικό κόστος γύρο στα 54,95 γραμμάρια ΔτΑ ανά κιλοβατώρα παραγόμενης ενέργειας (54,95 g CO_2/ kWh) για μονάδες με συντελεστή απόδοσης 10%. Ο δείκτης απόδοσης των οργανικών Φωτοβολταϊκών είναι ένας παράγοντας που ενδέχεται να αυξηθεί σημαντικά με βάση τις προβλέψεις των επιστημόνων. Σημαντικότερο ρόλο, όμως, για την εξάπλωση των οργανικών Φωτοβολταϊκών θα παίξει η διάρκεια ζωής τους που προς το παρών δεν είναι συγκρίσιμη με άλλων τεχνολογιών. Ήδη η ενεργοβόρες μεν τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών Πυριτίου έχουν αποδείξει ότι μπορούν και αποδίδουν πάνω από 25 χρόνια, με μείωση της απόδοσης τους της τάξης του 20%[6.6.1-2].

Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία Φωτοβολταϊκών στην αγορά σήμερα είναι τα Φωτοβολταϊκά Πυριτίου, έχοντας περίπου το 90% της αγοράς Φωτοβολταϊκών[6.6.1-3]. Η διάδοση της χρήσης Πυριτίου στην ηλεκτρονική βιομηχανία βοήθησε και στην κυριαρχία του στον χώρο των Φωτοβολταϊκών λόγω της υπάρχουσας υποδομής και τεχνογνωσίας. Η αφθονία μάλιστα του υλικού αυτού στην φύση ήταν επίσης ένας παράγοντας που βοήθησε στην ανάπτυξη των τεχνολογιών Πυριτίου σε όλο τον κόσμο. Παρόλη την αποδοχή τους ως την ευρύτερα διαδεδομένη τεχνολογία αυτή την στιγμή, πολλοί είναι αυτοί που πιστεύουν ότι το μέλλον δεν ανήκει στα Φωτοβολταϊκά Πυριτίου και αυτό κυρίως έχει να κάνει με περιβαλλοντικούς λόγους.

Τα Φωτοβολταϊκά Πυριτίου χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (single-crystalline sc-Si ή monocrystalline Silicon m-Si).

  Το μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο παράγεται από υψηλής καθαρότητας πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο με την μέθοδο Czochralski. Κατά την οποία αναπτύσσονται θερμοκρασίες 1.412^{o}C[6.6.1-4] προκειμένου να ρευστοποιηθεί το πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο. Όταν το Πυρίτιο είναι σε ρευστή κατάσταση, τοποθετείται ένα μικρό κομμάτι μονοκρυσταλλικού Πυριτίου, το οποίο ονομάζεται “σπόρος κρυστάλλου” (Seed Crystal), στην άκρη μιας περιστρεφόμενης ράβδου και αφού ακουμπήσει στο ρευστό Πυρίτιο, σχηματίζεται η στερεής κατάστασης ράβδος μονοκρυσταλλικού Πυριτίου. Η ράβδος μονοκρυσταλλικού Πυριτίου στην συνέχεια κόβεται σε δίσκους, γνωστούς και ως “γκοφρέτες” (wafers) αναλόγως διαμέτρου.

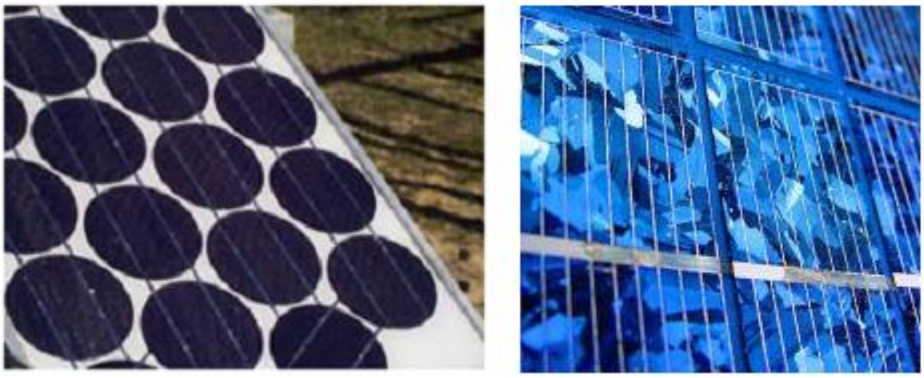


Εικόνα 6.6.1-2: Δημιουργία ράβδου Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου από υψηλής ποιότητας Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο με την μέθοδο Czochralski

Το θετικό του μονοκρυσταλλικού Πυριτίου είναι η τέλεια κρυσταλλική δομή του ενιαίου κρυσταλλικού πλέγματος (Crystal Lattice) του που μεγιστοποιεί τις αποδόσεις του. Στα αρνητικά του όμως είναι η πολύ ενεργοβόρα διαδικασία παρασκευής του αλλά. Επίσης αρνητικό είναι το γεγονός ότι λόγω της στρογγυλής μορφής των wafers κατά την κατασκευή Φωτοβολταϊκών πλαισίων μονοκρυσταλλικού Πυριτίου η τελική απόδοση υπολογίζεται από την πραγματική απόδοση του πλαισίου επί του συντελεστή κάλυψης του πλαισίου, που ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργούς επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων προς την συνολική επιφάνεια του Φωτοβολταϊκού πλαισίου[6.6.1-5].

- Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (polycrystalline Silicon p-Si ή multicrystalline Silicon mc-Si)

  Σε αντίθεση με το μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο, το πολυκρυσταλλικό αποτελείται από πολλά μονοκρυσταλλικά πλέγματα αντί από ένα ενιαίο. Τα Φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού Πυριτίου κατασκευάζονται πολύ πιο φθηνά από τα αντίστοιχα μονοκρυσταλλικά λόγω της μειωμένης απαιτούμενης ενέργειας στην διαδικασία παραγωγής τους. Η ηλεκτρική απόδοση τους όμως είναι λόγω αυτού μειωμένη σε σύγκριση με αυτή των πλαισίων μονοκρυσταλλικού Πυριτίου.

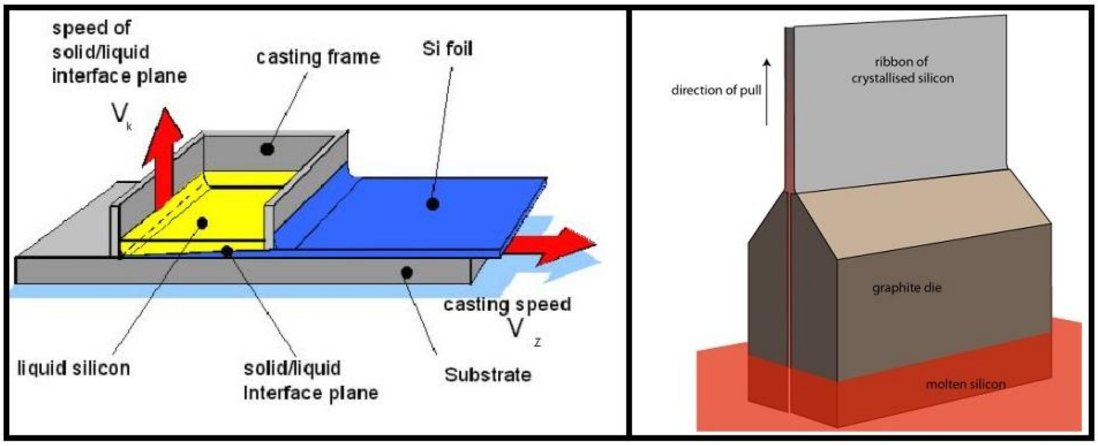


Εικόνα 6.6.1-3: Φωτοβολταϊκά στοιχεία Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (Αριστερά) και Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (Δεξιά)

- Άμορφου Πυριτίου (amorphous Silicon a-Si)

  Το άμορφο Πυρίτιο δεν έχει καμιά κρυσταλλική δομή. Είναι πάμφθηνο μιας και μπορεί να επεξεργαστεί και σε χαμηλές θερμοκρασίες της τάξης των 75^{o}C[6.6.1-6]. Μάλιστα λόγω της χαμηλής αυτής θερμοκρασίας επεξεργασίας του μπορεί να τοποθετηθεί σε υλικά όπως πλαστικό γεγονός που το κατατάσσει στην κατηγορία των Φωτοβολταϊκών "λεπτής ταινίας" (Thin Film Solar Cells) και να εφαρμοστούν στην παραγωγή του τεχνικές Roll-to-roll, απλουστεύοντας την διαδικασία παραγωγής και βελτιώνοντας κατακόρυφα την ταχύτητα κατασκευής τους.

  Οι νέες εξειδικευμένες τεχνολογίες παραγωγής κρυστάλλων Πυριτίου (crystalline Silicon c-Si) όπως η RGS (Ribbon Growth Substrate) και η EFG ribbon technology (Edge-defined-film-Fed-Growth) υπόσχονται χαμηλότερο ενεργειακό κόστος κατασκευής Φωτοβολταϊκών[6.6.1-7] και ενεργειακές αποδόσεις μεγαλύτερες του 15%[6.6.1-8].



Εικόνα 6.6.1-4: Δεξιά η μέθοδος παραγωγής κρυστάλλων Πυριτίου RGS και αριστερά η μέθοδος EFG[6.6.1-9]

Στοιχεία από έρευνα[6.6.1-10] που παρουσιάστηκε στο 19ο Ευρωπαϊκό Συνέδριο Φωτοβολταϊκών και Ηλιακής Ενέργειας (Ιούνιος του 2004) και συγκρίνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των δύο αυτών τεχνολογιών με την “παραδοσιακή” κατασκευή δισκίων Πυριτίου (Silicon Wafers) δείχνουν ξεκάθαρα ότι οι νέες αυτές τεχνολογίες προσφέρουν πολύ πιο οικολογικές λύσεις. Για τους σκοπούς της έρευνας, μελετήθηκαν Φωτοβολταϊκά Στοιχεία 1kW$_p$ πολύ-κρυσταλλικού Πυριτίου που παράχθηκαν με την “παραδοσιακή” μέθοδο (των δισκίων Πυριτίου), με την μέθοδο RGS και την μέθοδο EFG. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για τις μεθόδους RGS και EFG, σε ορίζοντα 100 χρόνων οι Δυνατότητες Εκπομπών Αερίων Θερμοκηπίου (GWP100) είναι 44,3% και 47,1% της τιμής GWP100 της “παραδοσιακής” μεθόδου. Παρόμοια είναι τα ποσοστά όσο αφορά την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, κάτι που είναι άμεσα συνδεδεμένο με τις εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου. Στα συμπεράσματα της μελέτης συμπεριλαμβάνονται και κάποιες πολύ αισιόδοξες τιμές για της περιβαλλοντικές επιπτώσεις Στοιχείων πολύ-κρυσταλλικού Πυριτίου της μεθόδου RGS, μαζί με τεχνολογία ένωσης των πλαισίων χωρίς καλώδια (PV-Wirefree), που είναι 28 g CO_2/ kWh για περιοχές της Νότιας Ευρώπης (1.275 kWh/kW$_p$/year) και 48 g CO_2/ kWh για περιοχές Γερμανίας/Ολλανδίας (750 kWh/kW$_p$/year).

Καθώς η τεχνολογία αλλάζει με ταχείς ρυθμούς, οι τεχνολογίες που βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο παρουσιάζουν πολύ υποσχόμενα αποτελέσματα όσο αφορά τους δείκτες ηλεκτρικής απόδοσης των Φωτοβολταϊκών στοιχείων που θα βρίσκονται στην αγορά σε λίγα χρόνια. Στον πιο κάτω πίνακα [6.6.1-1] δίνονται οι τρέχουσες τιμές ηλεκτρικής απόδοσης για τα πειραματικά Φωτοβολταϊκά στοιχεία και για αυτά που βρίσκονται σε μαζική παραγωγή, ανά τύπο φωτοβολταϊκού.

Τύπος Φωτοβολταϊκού	**Ποσοστό Απόδοσης Φ/Β Παραγωγής**	**Ποσοστό Απόδοσης Εργαστηριακών Φ/Β**
Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου	14 % - 17 %	24%
Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου	13 % - 15%	18%
Άμορφου Πυριτίου	5% - 7%	13%

Πίνακας 6.6.1-1: Τιμές ηλεκτρικής απόδοσης για Φ/Β που βρίσκονται ήδη σε φάση παραγωγής και αντίστοιχες για Φ/Β που βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο[6.6.1-11]

Θεωρητικά την μεγαλύτερη πρόοδο, όσο αφορά την ηλεκτρική απόδοση, υπολογίζεται να την έχουν τα Φωτοβολταϊκά Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (7%-10%), κάτι που είναι αναμενόμενο με βάση την προηγμένη τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί όλα αυτά τα χρόνια στην Παρασκευή Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου όχι μόνο για φωτοβολταϊκά. Τα φωτοβολταϊκά Άμορφου Πυριτίου υπολογίζεται να έχουν και αυτά μια σημαντική αύξηση της ηλεκτρικής τους απόδοσης (6%-8%) κυρίως γιατί είναι μια τεχνολογία που άργησε να μπει γερά στο χώρο μαζικής παραγωγής εμπορικών φωτοβολταϊκών και τα περιθώρια προόδου είναι μεγάλα. Τέλος τα φωτοβολταϊκά Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου υπολογίζεται να παρουσιάσουν την λιγότερη αλλά και πάλι αξιόλογη αύξηση της ηλεκτρικής τους απόδοσης (3%-5%).

Αύξηση της ηλεκτρικής απόδοσης δεν σημαίνει απαραίτητα και αύξηση των πωλήσεων ή του βαθμού προτίμησης μια τεχνολογίας φωτοβολταϊκών. Αν τα επόμενα χρόνια η ηλεκτρική απόδοση των φωτοβολταϊκών μονοκρυσταλλικού Πυριτίου αυξηθεί στο 24% αλλά αυξηθεί η ενέργεια κατασκευής τους δεν θα μειωθεί αρκετά ο Χρόνος Ενεργειακής Αποπληρωμής. Αντίθετα αν η τεχνολογία φωτοβολταϊκών άμορφου Πυριτίου φτάσει σε επίπεδα ηλεκτρικής απόδοσης των σημερινών εμπορικών φωτοβολταϊκών ανώτερων τεχνολογιών (13% περίπου), τότε ο Χρόνος Ενεργειακής Αποπληρωμής θα είναι ελάχιστος, καθιστώντας πολύ πιο εμπορική για μεγάλες εγκαταστάσεις. Αυτό ενισχύεται και από τις πληροφορίες της εικόνας 6.6.1-4, που δείχνει τον Χρόνο Ενεργειακής Αποπληρωμής για διάφορες τεχνολογίες. Η τεχνολογία άμορφου Πυριτίου έχει τον μικρότερο Χρόνο Ενεργειακής Αποπληρωμής από τις τεχνολογίες Πυριτίου ($3^{ο}$ μικρότερο συνολικά πίσω από τα Φωτοβολταϊκά Καδμίου-Τελλουρίου και Οργανικής Φωτοευαίσθητης Χρωστικής) την στιγμή που συνολικώς έχει την $2^{η}$ μικρότερη ηλεκτρική απόδοση με 7%.

Συγγραφέας	Χρονιά	Χαρακτηριστικά	Ρύποι g CO2/kWh
Fritsche	1989	-	32,0
Meridien Corp.	1989	Κεντρικός σταθμός ενεργειακής παραγωγής	6,5
San Martin	1989	Κεντρικός σταθμός ενεργειακής παραγωγής	5,4
Kreith	1990	Κεντρικός σταθμός ενεργειακής παραγωγής 100 MW	24,0
Uchiyama	1992	Στοιχεία Πυριτίου	201,3
Nieuwlaar	1996	Ενσωματομένο σύστημα οροφής - 30 m2 Στοιχεία Άμορφου Πυριτίου	47,0
Komiyama	1996	Ιαπωνία - Στοιχεία Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου	522,0
Komiyama	1996	Ινδονησία - Στοιχεία Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου	1004,4
Dones	1998	Στοιχεία Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου - 100yr. GWP	189,0
Dones	1998	Στοιχεία Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου - 100yr. GWP	114
IEA	1998	mc-Si	87,0
Frankl	1998	Ενεργειακό πάρκο Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου	200,0
Kato	1998	Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο	83,0
Kato	1998	Στοιχεία Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου	20,0
Kato	1998	Στοιχεία Άμορφου Πυριτίου	17,0
Alsema	2000	Άμορφου Πυριτίου λεπτής στρώσης σύστημα ενσωματωμένο σε οροφή (1700 kWh/m^2/yr, 30yr)	50,0
Alsema	2000	Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου σύστημα ενσωματωμένο σε οροφή (1700 kWh m-2 yr-1, 30yr.)	60,0
Greijer	2000	Οργανικής Φωτοευαίσθητης Χρωστικής (ncDSC) ενεργειακό πάρκο Άμορφου Πυριτίου 500MW (20 yrs. , 2190 kWh m^2) (απόδ 7%, 100 kWh m-2)	19,0
Greijer	2000	Οργανικής Φωτοευαίσθητης Χρωστικής (ncDSC) ενεργειακό πάρκο Άμορφου Πυριτίου	47,0

		500MW (20 yrs, 2190 kWh m^2)	
Greijer	2000	Στοιχεία Πυριτίου (απόδοση 12%, 220 kWh m-2)	22,0
Greijer	2000	Στοιχεία Πυριτίου (απόδοση 9%, 180 kWh m-2)	25,0
Oliver	2000	Σύστημα Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου ενσωματομένο σε κτήριο (12% ηλεκτρικής απόδοσης)	120,0
Oliver	2000	Ενεργειακό πάρκο Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (απόδοση στοιχείων 12%)	170,0
Nomura	2001	Συγκεντρωτικό στοιχείο Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου ενωμένο στο δίκτυο (τεχνολογία στο εγγύς μέλλον)	190,0
Nomura	2001	Συγκεντρωτικό στοιχείο Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου ενωμένο στο δίκτυο (βραχυπρόθεσμη τεχνολογία)	133,0
Nomura	2001	Συγκεντρωτικό στοιχείο Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου ενωμένο στο δίκτυο (μακρυπρόθεσμη τεχνολογία)	104,0
Ganon&Uchiyama	2002	-	13,0
Meier	2002	Σύστημα ενσωματομένο σε κτήριο	39,0
Ito	2003	Στοιχεία Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου 12,8% ηλεκτρικής απόδοσης	44,0

Πίνακας 6.6.1-2: Περιβαλλοντικό Κόστος διαφόρων τεχνολογιών μέσα από διάφορες μελέτες από το 1989 έως το 2003[6.6.1-12]

Στα πλαίσια της Εργασίας δόθηκε ιδιαίτερη έρευνα στις υπάρχουσες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων Πυριτίου. Μελετήθηκαν αρκετές δημοσιεύσεις και οι τιμές για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (σε αέριους ρύπους) αποτυπώνονται στον πίνακα [6.6.1-3] πιο κάτω. Η κάθε μελέτη έχει ξεχωριστές μεταβλητές όπως η ετήσια ακτινοβολία στην περιοχή της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης ή συντελεστή ηλεκτρικής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Ακόμα μεγάλο ρόλο παίζει η διάρκεια ζωής του πάρκου αλλά και συνολική ισχύς που έχει. Για να έχουμε μια πιο αντιπροσωπευτική τιμή για το περιβαλλοντικό κόστος κάθε τεχνολογίας φωτοβολταϊκών Πυριτίου, υπολογίστηκε ο μέσος όρος από τις επιμέρους μελέτες και δημοσιεύσεις.

Α/Α	**Χρονιά**	**Τοποθεσία**	**Απόδοση (%)**	**Ισχύς Εγκατ/σης**	**Ζωή Εγκατσης**	**Χ.Ε.Α**	**Εκπομπές (g CO2/kWh)**
Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο							
1[6.6.1-13]	2000	Ολλανδία	14	-	30	3,2	60
2[6.6.1-14]	2002	Ινδία	13	35 W	20	-	64,8
3[6.6.1-15]	2006	Αγγλία	11,5	14,4 kW	30	8	44
4[6.6.1-16]	2006	Σιγκαπούρη	7,3-8,9	2,7 kW	25	5,87	217
5[6.6.1-16]	2006	Σιγκαπούρη	10,6	2,7 kW	25	4,47	165
6[6.6.1-17]	2008	Νότια Ευρώπη	14	-	30	-	28
7[6.6.1-17]	2008	Νότια Ευρώπη	14	-	30	-	36
8[6.6.1-17]	2008	Νότια Ευρώπη	14	-	30	-	46
Μέσος όρος							**82,6**
Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο							
1[6.6.1-18]	2003	Κίνα	12,8	100 MW	30	1,7	12
2[6.6.1-19]	2005	Ιαπωνία	10	3 kW	30	-	53,4
3[6.6.1-20]	2005	Ιταλία	10,7	1 kW	20	3,3	26,4
4[6.6.1-21]	2005	Ελλάδα	-	3 kW	20	2,9	104
5[6.6.1-22]	2007	Η.Π.Α.	12,92	33 kW	20	5,7	72,4
6[6.6.1-23]	2008	Κίνα	12,8	100 MW	30	1,9	12,1
7[6.6.1-23]	2008	Κίνα	12,8	100 MW	30	1,5	9,4
8[6.6.1-17]	2008	Νότια Ευρώπη	13,2	-	30	-	25
9[6.6.1-17]	2008	Νότια Ευρώπη	13,2	-	30	-	35
10[6.6.1-17]	2008	Νότια Ευρώπη	13,2	-	30	-	43
Μέσος όρος							**39,27**
Άμορφο Πυρίτιο							
1[6.6.1-24]	2000	Ολλανδία	7	-	30	2,7	50
2[6.6.1-25]	2002	Η.Π.Α.	5,7	8 kW	30	-	39
3[6.6.1-22]	2007	Η.Π.Α.	6,3	33 kW	20	3,2	34,3
4[6.6.1-23]	2008	Κίνα	6,9	100 MW	30	2,5	15,6
Μέσος όρος							**34,725**

Πίνακας 6.6.1-3: Χρόνος Ενεργειακής Αποπληρωμής και Περιβαλλοντικό Κόστος από μελέτες των τριών Τεχνολογιών Πυριτίου

6.6.2 Κατασκευή των Αντιστροφέων Τάσης DC/AC

Οι αντιστροφείς τάσης (inverters) είναι απαραίτητο κομμάτι του συστήματος προκειμένου να συνδεθεί η όποια φωτοβολταϊκή μονάδα στο ηλεκτρικό δίκτυο της περιοχής. Οι αντιστροφείς τάσης καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό περιβαλλοντικού κόστους της ισορροπίας του συστήματος (balance of system, BOS), δηλαδή των εξαρτημάτων της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης πλην των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Το μεγαλύτερο μέρος από το περιβαλλοντικό κόστος ενός αντιστροφέα είναι ο χαλκός που χρειάζεται για την εξωτερική προστασία του με ποσοστό 82,7%[6.6.2-1].

Η ζωή ενός αντιστροφέα τάσης κυμαίνεται γύρω στα 10[6.6.2-2] μέχρι 16 χρόνια[6.6.2-3]. Η αλλαγή ολόκληρου του αντιστροφέα ή ενός μεγάλου ποσοστού του σε μια διάρκεια ζωής 30 χρόνων είναι απαραίτητη. Με βάση μελέτη[6.6.2-4] το περιβαλλοντικό κόστος των αντιστροφέων στην διάρκεια ζωής του ενός φωτοβολταϊκού πάρκου 33kW είναι 669 kg CO_2 για GWP 100. Αν το περιβαλλοντικό κόστος εκφραστεί με ανά παραγόμενη κιλοβατώρα, το κόστος εκτιμάτε από (1,6 g CO_2/kWh[6.6.2-5] μέχρι 5 g CO_2/kWh[6.6.2-6]. Και οι δύο αυτές τιμές περιβαλλοντικού κόστους ανά παραγόμενη μονάδα ενέργειας υπολογίσθηκαν για περιοχές της Νότιας Ευρώπης όπου η μέση ηλιακή ακτινοβολία είναι 1700 kWh/m^2/yr. Για τους σκοπούς υλοποίησης του αλγορίθμου θα θεωρήσουμε ότι το περιβαλλοντικό κόστος είναι 3,3 g CO_2/kWh.

6.6.3 Κατασκευή των Καλωδίων

Τα καλώδια που θα χρειαστούν για την συνδεσμολογία του Φωτοβολταϊκού πάρκου μπορεί να μην επηρεάζουν ουσιωδώς την διάταξη των Φωτοβολταϊκών στοιχείων (ούτε από την οικονομική πτυχή ούτε από την περιβαλλοντική) αλλά στα πλαίσια μιας πιο σωστής προσέγγισης της συνολικής εκτίμησης του περιβαλλοντικού κόστους, η μελέτη τους κρίθηκε αναγκαία.

Σε μελέτη[6.6.3-1] που εκπονήθηκε από την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος της Αμερικανικής Κυβέρνησης (Environmental Protection Agency), ένα χιλιόμετρο (1km) καλώδιο τύπου NM-B κοστίζει στο περιβάλλον 52,2 kg ΔτΑ. Ο τύπος καλωδίου NM-B είναι ικανός να αντέχει μέχρι 9.600 watt στα 240 Volts.

6.6.4 Κατασκευή του Σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα αποτελεί την βάση πάνω στην οποία θα στηθούν τα πλαίσια, πάνω στα οποία θα τοποθετηθούν τα Φωτοβολταϊκά στοιχεία. Δεν αποτελεί μεγάλο κομμάτι του οικολογικού κόστους, ο υπολογισμός του όμως είναι πολύ σημαντικός γιατί θα παίξει καταλυτικό ρόλο (μαζί με το κόστος των πλαισίων) στην βέλτιστη τοποθέτηση των Φωτοβολταϊκών στοιχείων όταν άλλα κριτήρια όπως διάσταση χωραφιού, κόστος μεταφοράς αγαθών παραμείνουν τα ίδια.

Με βάση μελέτη που έχει γίνει από το Τμήμα Σπουδών Περιβαλλοντικών και Ενεργειακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Lund της Σουηδίας[6.6.4-1], για την κατασκευή 1kg απλού σκυροδέματος στην Σουηδία, ο πλανήτης επιβαρύνεται με περίπου 107,69 g CO_2/ $kg_{σκυρ}$. Ο πιο κάτω πίνακας είναι από τον Κατάλογο Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory, LCI) της μελέτης.

Υλικό - Ενέργεια	$g\ CO_2/m^3$	$g\ CO_2$ / $kg_{σκυροδέματος}$
Τσιμέντο	211.000	87,92
Άσφαλτος	1.200	0,5
Χαλίκια	79,6	0,033
Πλαστικοποιητικό	1.040	0,433
Μεταφορά	43.600	18,167
Σύνθεση Υλικών	257	0,107
Κατεδάφιση	1.290	0,5375
Σύνολο	258.466,6	107,69

Πίνακας 6.6.4-1: Οικολογικό κόστος κατασκευής σκυροδέματος στην Σουηδία

Στην περίπτωση της Ελλάδας οι τιμές θα είναι διαφορετικές για δύο κυρίους λόγους. Ο πρώτος λόγος αφορά ότι στον υπολογισμό του οικολογικού κόστους μεταφοράς υπολογίζεται και μια διαδρομή 800Km με πλοίο για την μεταφορά των υλικών από το εργοστάσιο, κάτι που στην περίπτωση της Ελλάδας δεν θα ισχύει. Στον Κατάλογο Κύκλου Ζωής της μελέτης, από κάθε χιλιόμετρο ταξιδιού με το πλοίο διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα 22 g CO_2 και στο συνολικό ταξίδι των 800 km 17,6 kg CO_2 / $m^3_{σκυρ.}$ ή αλλιώς 7,333 g CO_2 / $kg_{σκυρ}$.

Ο δεύτερος λόγος που στην περίπτωση της Ελλάδας οι τιμές θα είναι διαφορετικές έχει να κάνει με το ότι οι ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζονται για την παραγωγή του σκυροδέματος, παράγουν περισσότερα γραμμάρια Διοξειδίου του Άνθρακα λόγω του ότι το Ενεργειακό

της Ελλάδας είναι μεγαλύτερο από της Σουηδίας. Αυτό φαίνεται και στο πιο κάτω πίνακα που δείχνει στοιχεία της Γενικής Διεύθυνσης Ενέργειας της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για το έτος 2008[6.6.4-2].

Ελλάδα		Σουηδία	
Πηγή Ενέργειας	Ποσοστό επί Συνόλου (%)	Πηγή Ενέργειας	Ποσοστό επί Συνόλου (%)
Ληγνίτης	52	Πυρηνική	43
Πετρέλαιο	16	Πετρέλαιο	1
Φυσικό Αέριο	22	Φυσικό Αέριο	1
ΑΠΕ	9	ΑΠΕ	54
Άλλες	1	Άλλες	1

Πίνακας 6.6.4-2: Ποσοστό συνεισφοράς πηγών ενέργειας για παραγωγή ενέργειας σε Σουηδία και Ελλάδα

Στο πιο κάτω πίνακα φαίνονται οι ποσότητες ενέργειας που δαπανώνται για την κατασκευή ενός κυβικού μέτρου Σκυροδέματος ($1m^3$) στην Σουηδία.

Πηγή Ενέργειας	Ενέργεια (MJ)	Κατανάλωση Ενέργειας (%)
Λιγνίτης	564	44,96
Οπτάνθρακας	148	11,799
Πετρέλαιο	344	27,424
Αργό Πετρέλαιο	4,83	0,385
Τύρφη	0,0118	0,001
Φυσικό Αέριο	12,4	0,99
Ηλεκτρική Ενέργεια	180	14,35
Σύνολο	1.254,4	

Πίνακας 6.6.4-3: Ποσότητες ενέργειας που δαπανούνται για την κατασκευή ενός τόνου σκυροδέματος στην Σουηδία

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Σουηδία είναι 24 φορές πιο οικολογική από την αντίστοιχη στην Ελλάδα[6.6.4-3], το οικολογικό κόστος των 180MJ ενέργειας στην Ελλάδα αντιστοιχούν με οικολογικό κόστος 4.320MJ στην Σουηδία κάτι που θα ανέβαζε την συνολική ενεργειακή ανάγκη για κατασκευή ενός κυβικού μέτρου Σκυροδέματος σε 5.574MJ, διπλάσια από την ενέργεια που υπολογίζεται στην μελέτη. Φυσικά τα επιπλέον 4.140MJ ηλεκτρικής ενέργειας, δεν έχουν το ίδιο περιβαλλοντικό κόστος που έχουν τα αρχικά 1.254,4 MJ που χρειάζονται για την κατασκευή του ενός κυβικού μέτρου Σκυροδέματος γιατί είναι πιο «καθαρή» ενέργεια. Το ενεργειακό αποτύπωμα της Σουηδίας[6.6.4-3] είναι 43 g CO_2 / kWh ή αλλιώς 11,94 g CO_2 / MJ, και επομένως τα επιπλέον 4.140MJ συνεισφέρουν ακόμα 49,432 kg CO_2 / $m^3_{σκυρ.}$ ή αλλιώς 20,597 g CO_2 / $kg_{σκυρ}$.

Για να υπολογιστεί το οικολογικό κόστος για την παραγωγή Σκυροδέματος προσθέτουμε στην αρχική τιμή της μελέτης του πανεπιστημίου Lund (107,694 g CO_2/ $kg_{σκυρ}$) τα επιπλέον γραμμάρια ΔτΑ λόγω της διαφοράς του Ενεργειακού Αποτυπώματος των χωρών (20,597 g CO_2 / $kg_{σκυρ}$) και αφαιρούμε τα γραμμάρια ΔτΑ που αφορούν την μεταφορά υλικών με πλοίο (7,333 g CO_2 / $kg_{σκυρ}$) και τα γραμμάρια ΔτΑ που αφορούν τις εργασίες κατεδάφισης (0,5375 g CO_2 / $kg_{σκυρ}$) που θα συμπεριληφθούν σε κατοπινό στάδιο. Συμπερασματικά κάθε κιλό Σκυροδέματος κοστίζει οικολογικά 120,421 γραμμάρια ΔτΑ (120,421 g CO_2 / $kg_{σκυρ}$).

6.6.5 Κατασκευή των Βάσεων Στήριξης

Οι βάσεις στήριξης για τα Φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι κατασκευασμένες από ατσάλι, υλικό του οποίου η κατασκευή του έχει αρκετές ιδιαιτερότητες και κατά συνέπεια ο υπολογισμός του οικολογικού κόστους κατασκευής του περιπλέκεται. Και αυτό γιατί στην διαδικασία παραγωγής ατσαλιού και σιδήρου, χρησιμοποιείται πολύ μεταλλουργικό κοκ που παρασκευάζεται από ορυκτό χάλυβα. Είναι ξεκάθαρο λοιπόν ότι στην παραγωγή σιδήρου και ατσαλιού υπάρχουν και διεργασίες που από μόνες τους έχουν το δικό τους οικολογικό κόστος. Με βάση τις κατευθυντήριες γραμμές[6.6.5-1] της Διακυβερνητικής Επιτροπής για τις Κλιματικές Αλλαγές (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), η παραγωγή μεταλλουργικού κοκ από ορυκτό χάλυβα θεωρείται παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και η παραγωγή σιδήρου και ατσαλιού σαν μια βιομηχανική διαδικασία, συνεπώς ο υπολογισμός του οικολογικού κόστους τους πρέπει να γίνεται ξεχωριστά.

Με βάση μελέτη που έχει διεξαχθεί για χάρη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής[6.6.5-2] τον Νοέμβριο του 2009, για τα έτη 2005 έως 2007 κατά μέσο όρο σε ευρωπαϊκό επίπεδο παράχθηκαν 17.402 χιλιάδες τόνοι σιδήρου το χρόνο. Το μέσο περιβαλλοντικό κόστος ανά έτος είναι 616.031 τόνοι ΔτΑ. Για να καταλάβει κανείς τα μεγέθη της συνεισφοράς της παραγωγής σιδήρου αρκεί να δει ότι το έτος 2007 οι εκπομπές ΔτΑ παγκόσμια ήταν 29.319.295 τόνοι[6.6.5-3] την στιγμή που παράχθηκαν 719.887 τόνοι ΔτΑ στην Ευρώπη για παραγωγή σιδήρου (2,45% του παγκοσμίου οικολογικού κόστους). Την ίδια χρονιά οι συνολικές εκπομπές ΔτΑ της Ελλάδας ήταν 91.118 (0,335% του παγκοσμίου οικολογικού κόστους). Το οικολογικό κόστος 1kg σιδήρου είναι 35,4 γραμμάρια ΔτΑ ανά μέσο όρο έτους.

Στον κώδικα που υλοποιήθηκε υπολογίζεται το συνολικό μήκος των μεταλλικών ράβδων που χρειάζεται για να τοποθετηθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η μετατροπή το μήκους των μεταλλικών ράβδων σε κιλά μετάλλου υπολογίζεται με βάση στοιχεία που έχουν να κάνουν κυρίως με τις διαστάσεις της ράβδου.

6.6.6 Συνολικό Κόστος Κατασκευής Εξαρτημάτων

Συνοψίζοντας το συνολικό κόστος κατασκευής των Εξαρτημάτων της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης θα υπολογίζεται προσθέτοντας:

1. Συνολική ισχύ της εγκατάστασης (σε kWp) Χ περιβαλλοντικό κόστος κατασκευής φωτοβολταϊκού στοιχείου (sc-Si 82,6 g CO2/kWh, pc-Si 39,27 g CO2/kWh, a-Si 34,725 g CO2/kWh)
2. Συνολική ισχύ της εγκατάστασης (σε kWp) Χ περιβαλλοντικό κόστος αντιστροφέων τάσης (3,3 g CO_2/kWh g CO_2/kWh)

3. Συνολικό μήκος Καλωδίων (σε μέτρα) Χ περιβαλλοντικό κόστος καλωδίου ανά μέτρο (52,2 g CO_2/m)
4. Συνολική μάζα Σκυροδέματος (σε κιλογραμμάρια) Χ περιβαλλοντικό κόστος Συροδέματος ανά κιλογραμμάριο (111,5 g CO_2 / $kg_{σκυρ}$)
5. Συνολική μάζα πλαισίων στήριξης (σε κιλογραμμάρια) Χ περιβαλλοντικό κόστος σιδίρου ανά κιλογραμμάριο (35,4 g CO_2 / $kg_{υλικού}$)

6.7 Μεταφορά Εξαρτημάτων

6.7.1 Το Παράδειγμα του Τομέα Οδικών Μεταφορών

Για παράδειγμα στον τομέα των οδικών μεταφορών, όχι μόνο υπάρχουν κινητήρες που δέχονται διαφορετικών τύπων καύσιμα για την κίνηση των οχημάτων, αλλά και για κάθε κατηγορία κινητήρων οι τεχνολογίες καύσης αλλάζουν ραγδαία. Για να υπολογιστεί μια ρεαλιστική τιμή εκπομπών CO_2/Km για το σύνολο των οδικών μεταφορών στην Ευρώπη θα πρέπει να λάβουμε υπόψη, εκτός από της διαφορετικές κατηγορίες οχημάτων και την παλαιότητα τους, παράγοντας που επηρεάζει όχι μόνο την πλευρά της κατανάλωσης καυσίμου, αλλά και την πλευρά της συχνότερης συντήρησης του οχήματος, διαδικασία όπου και αυτή κοστίζει περιβαλλοντικά.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή στην προσπάθεια της να μειώσει τον στόλο παλιών ρυπογόνων οχημάτων, συμφώνησε με την Ευρωπαϊκή Ένωση Κατασκευαστών Αυτοκινήτων (ACEA)[6.7.1-1] και μετέπειτα τις αντίστοιχες Ιαπωνική (JAMA) και Κορεατική (KAMA) για να εισέρχονται στην ευρωπαϊκή αγορά οχήματα με μειωμένες εκπομπές ρύπων όσο περνούν τα χρόνια. Αυτή η κίνηση κατέληξε σήμερα στα γνωστά ως Ευρωπαϊκά Πρότυπα Εκπομπών (European emission standards)[6.7.1-2]. Ακόμα όμως και αυτή προσπάθεια αντιμετωπίζει δυσκολίες σε κάποιους τομείς. Επί παραδείγματι παρόλο που από την 1η Ιανουαρίου 2010 θα έπρεπε να παράγονται οχήματα στο πρότυπο του "Euro 5", η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρότεινε την παράταση της ημερομηνίας αυτής για 2 χρόνια ώστε να δοθεί στα διυλιστήρια ο απαραίτητος χρόνος να εκσυγχρονίσουν τις εγκαταστάσεις τους[6.7.1-3].

Στο πλαίσιο της Εργασίας μελετήθηκαν όλοι οι τρόποι μεταφοράς αγαθών και οι επιπτώσεις που η κάθε μια έχει στο περιβάλλον. Παρόλο που είναι προφανές ότι κάποιες είναι σαφώς πιο «οικολογικές» από άλλες, η χρήση τους είναι απαγορευτική για κάποια σενάρια βάση των υπαρχουσών υποδομών . Όπως για παράδειγμα θα ήταν πολύ πιο οικολογικό να μεταφέραμε από την Γερμανία υλικά με τραίνο αλλά δεν υπάρχει το σιδηροδρομικό δίκτυο να μπορεί να υποστηρίξει μια τέτοια ενέργεια.

6.7.2 Οικολογικό Κόστος της Κατασκευής και της Συντήρησης των Οχημάτων Μεταφοράς

Το οικολογικό κόστος των μεταφορών δεν περιορίζεται μόνο στην κατανάλωση καυσίμων. Όπως είναι λογικό, κάθε ενέργεια που μελετάτε σε ένα κομμάτι της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, έχει και εκείνη ένα οικολογικό κόστος, ανάλογο της συμμετοχής της, το οποίο χρήζει αντίστοιχης ανάλυσης. Συνεπώς μπορεί το μεγαλύτερο οικολογικό κόστος της μεταφοράς αγαθών να την επωμίζεται η κατανάλωση καυσίμων αλλά δεν είναι αμελητέα και η συμβολή της κατασκευής, της ανακύκλωσης και της συντήρησης του κάθε μέσου. Σε καμιά περίπτωση δεν θα υπολογίσουμε όλο το οικολογικό κόστος της κατασκευής πχ ενός φορτηγού στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής ενός Φωτοβολταϊκού Πάρκου αλλά θα προστίθεται ποσοστιαία για κάθε τιμή γραμμαρίων ανά χιλιόμετρο μεταφοράς (g CO_2/Km) μια τιμή που θα αντιστοιχεί στο οικολογικό κόστος της ενέργειας αυτής. Το ίδιο και για την ανακύκλωση αλλά και για την συντήρηση του οχήματος.

Με βάση μελέτη που διενήργησε το πανεπιστήμιο του Berkeley[6.7.2-1] για όλα τα μέσα μεταφοράς σε ξηρά και αέρα, για μεγάλα οχήματα όπως λεωφορεία στο συνολικό 100% του περιβαλλοντικού κόστους ζωής του το 84,6% έχει να κάνει με την λειτουργία του (κατανάλωση καυσίμων) και μετά το 11% με την κατασκευή του, περίπου 2% για την συντήρηση (περιλαμβάνει και το κόστος κατασκευής των λάστιχων) του και τέλος ένα 2,4% για λοιπές εργασίες όπως την παραγωγή των καυσίμων, την κατασκευή και την συντήρηση των δρόμων.

Στην ίδια μελέτη, όσο αφορά τα επιβατικά τραίνα, από το 100% του περιβαλλοντικού κόστους ζωής των τραίνων, ένα ποσοστό της τάξης του 50% πήγαινε για την λειτουργία των συρμών, ποσοστό περίπου 3% στην συντήρηση τους, ποσοστό 2,25% στην κατασκευή των συρμών και το υπόλοιπο 44,75% σε διάφορες άλλες εργασίες όπως η κατασκευή των σταθμών , την καθαριότητα τους και τον φωτισμό τους. Τέλος για τα αεροπλάνα το 80% του περιβαλλοντικού τους κόστους αφορούσε την κατανάλωση καυσίμων για την λειτουργία τους, ποσοστό 1,75% γα την συντήρηση του αεροπλάνου, ποσοστό 6,6% για την κατασκευή του και το υπόλοιπο 11,65% αφορούσε εργασίες σχετικές με την κατασκευή, συντήρηση και καθαριότητα του αεροδρομίου.

6.7.3 Οικολογικό κόστος μεταφοράς αγαθών για διάφορα μέσα μεταφοράς.

Υπάρχουν πολλές μελέτες για τις μεταφορές αγαθών και τις οικολογικές επιπτώσεις τους. Για τους σκοπούς της Εργασίας επιλέξαμε τις πιο πρόσφατες και τις πιο αξιόπιστες πηγές. Για τις οδικές, σιδηροδρομικές και αεροπορικές μεταφορές, επιλέχτηκαν οι κατευθυντήριες γραμμές του Τμήματος Περιβάλλοντος, Τροφών και Αγροτικών Υποθέσεων της Βρετανικής Κυβέρνησης (Defra) για το 2008[6.7.3-1]. Για τις θαλάσσιες μεταφορές, μια μελέτη του Εργαστηρίου Θαλασσίων Μεταφορών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για λογαριασμό του Ναυτικού Επιμελητηρίου Ελλάδος[6.7.3-2].

Από τις τιμές που συλλέχτηκαν φαίνεται ξεκάθαρα ότι τα φορτηγά έχουν το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό κόστος ανά χιλιόμετρο μεταφερόμενου τόνου αγαθών (tone kilometer, tkm).

6.7.3.1 Εναέριες Μεταφορές

Οι αεροπορικές μεταφορές κοστίζουν και σε χρήμα αλλά και στο περιβάλλον, για αυτό και συνήθως προτιμούνται σε περιπτώσεις όπου τα χρονικά περιθώρια είναι στενά και το κόστος όχι κύρια προτεραιότητα στον σχεδιασμό. Το οικολογικό κόστος τον αεροπλάνων αυξάνεται δραματικά κατά την διάρκεια όπου το αεροσκάφος αλλάζει ύψος και το άμεσο συμπέρασμα είναι ότι οι προσγειώσεις και απογειώσεις είναι από τις πιο ενεργειακά απαιτητικές λειτουργίες. Πέραν αυτών τον δύο αναγκαίων λειτουργιών σε ένα ταξίδι, η συχνή αλλαγή υψομέτρου λόγω της πυκνής εναέριας κίνησης στοιχίζει στην κατανάλωση καυσίμων. Για πτήσεις μικρής διάρκειας (πτήσεις λιγότερες των τριών ωρών), που οι πλείστες είναι πτήσεις εσωτερικού και κατά συνέπεια γίνονται σε συνθήκες έντονης εναέριας κυκλοφορίας το κόστος είναι σχεδόν τρεις φορές πιο μεγάλο από το αντίστοιχο πτήσεων μεγάλης διάρκειας. Οι δείκτες της Defra για το 2005 ήταν 1,58 κιλά ΔτΑ ανά χιλιόμετρο μεταφερόμενου τόνου (1,58 kg CO_2/tkm) για πτήσεις εσωτερικού και μικρής διάρκειας, και 0,57 κιλά ΔτΑ ανά χιλιόμετρο μεταφερόμενου τόνου (0,57 kg CO_2/tkm) για πτήσεις μεγάλης διάρκειας. Στους δείκτες του 2008 οι εσωτερικές πτήσεις εκτιμούνται ξεχωριστά από τις πτήσεις μικρής διάρκειας γιατί περιλαμβάνουν πολύ λιγότερα χιλιόμετρα και σε πολύ πιο πυκνή εναέρια κίνηση. Οι δείκτες είναι 1,9 κιλά ΔτΑ ανά χιλιόμετρο μεταφερόμενου τόνου (1,9 kg CO_2/tkm) για τις εσωτερικές πτήσεις, 1,32 κιλά ΔτΑ ανά χιλιόμετρο μεταφερόμενου τόνου (1,32 kg CO_2/tkm) για τις πτήσεις μικρής διάρκειας και 0,61 κιλά ΔτΑ ανά χιλιόμετρο μεταφερόμενου τόνου (0,61 kg CO_2/tkm) για τις μεγάλης διάρκειας πτήσεις.

6.7.3.2 Οδικές Μεταφορές

Τα φορτηγά είναι το μέσο μεταφοράς που πάντα θα συμπεριλαμβάνεται σε κάθε πραγματικό σενάριο. Έστω και αν άλλο μέσο μεταφοράς διανύσει πολύ μεγαλύτερη απόσταση για να φέρει τα αγαθά σε αεροδρόμια, λιμάνια ή σιδηροδρομικού σταθμούς, στο τέλος θα μεταφερθούν με φορτηγά στον προορισμό τους. Η αναγκαιότητα τους όμως ανεβάζει κατακόρυφα το περιβαλλοντικό κόστος των μεταφορών λόγω της πολύ κακής τεχνολογίας που έχουν οι συμβατικές μηχανές οχημάτων. Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης μεταφέρουν στην κίνηση του οχήματος μόνο το 12,6% της ενέργειας που παράγουν καταναλώνοντας βενζίνη για καύσιμο[6.7.3.2-1]. Το υπόλοιπο 87,4% της ενέργειας χωρίζεται:

- 62,4% σε θερμότητα που παράγεται από την καύση, στην εισαγωγή αέρα στους κυλίνδρους και στην τριβή των πιστονιών.
- 17,2% όταν το όχημα δεν κινείται αλλά η μηχανή δουλεύει.
- 2,2% σε διάφορα εξαρτήματα όπως κλιματισμό και ραδιόφωνο
- 5,6% σε αεροδυναμική αντίσταση, τριβή με τον δρόμο και φρενάρισμα.

Για τις πετρελαιομηχανές, ο συντελεστής απόδοσης ανεβαίνει κατά 30-35%[6.7.3.2-2].

Τα ποσοστά αυτά αλλάζουν μετά την τρομερή πίεση που ασκήθηκε στις αυτοκινητοβιομηχανίες και τις νέες τεχνολογίες σε κινητήρες και κιβώτια ταχυτήτων που αναπτύχθηκαν. Παρόλα αυτά όμως δεν διαφαίνεται να βελτιωθούν σε τέτοιο βαθμό που να καταστήσουν το περιβαλλοντικό κόστος των οδικών μεταφορών λογικό για το έργο που παράγεται. Τα στοιχεία δείχνουν ότι για φορτηγά μικρότερα των 7,5 t το περιβαλλοντικό κόστος είναι 591 γραμμάρια ΔτΑ ανά χιλιόμετρο μεταφερόμενου τόνου (591 g CO_2/tkm), για φορτηγά μεταξύ 7,5-17 τόνων 336 g CO_2/tkm και για φορτηγά μεγαλύτερα των 17 τόνων 187 γραμμάρια ΔτΑ ανά χιλιόμετρο μεταφερόμενου τόνου (187 g CO_2/tkm).

6.7.3.3 Σιδηροδρομικές Μεταφορές

Οι Σιδηροδρομικές μεταφορές είναι μια από τις πιο αξιόπιστες μεθόδους μεταφοράς αγαθών, συνδυάζοντας μεταφορά οικονομία και ταχύτητα. Δεν είναι τυχαία μάλιστα η σοβαρή πρόθεση[6.7.3.3] της χώρας με την μεγαλύτερη βιομηχανία στον πλανήτη να στραφεί προς αυτό το μέσο για την μεταφορά αγαθών προς την Ευρώπη. Η ανακάλυψη της μηχανής του ατμού ήταν η αρχή της βιομηχανικής επανάστασης και των τρένων. Σε όλα αυτά τα χρόνια μέχρι σήμερα, η τεχνογνωσία που αποκτήθηκε για βελτίωση της απόδοσης των τρένων, τα καθιστούν τα μέσα μεταφοράς με τα πιο αποδοτικά συστήματα κίνησης από άποψη ενέργειας. Πιο οικολογικό μέσο μπορεί να είναι τα πλοία, αλλά αυτό παραπάνω έχει να κάνει με τον τρόπο που χρησιμοποιούν την ενέργεια που παράγει η μηχανή τους για κίνηση παρά με το τύπο της μηχανής που είναι τεράστιας κλίμακας μηχανές εσωτερικής καύσης. Το κόστος μεταφοράς αγαθών με τραίνο είναι 21 γραμμάρια ΔτΑ ανά χιλιόμετρο μεταφερόμενου τόνου (21 g CO_2/tkm).

6.7.3.4 Θαλάσσιες Μεταφορές

Για μεγάλα εμπορικά πλοία με ικανότητα για μεταφορά πάνω από 4,400 εμπορευματοκιβώτια, το περιβαλλοντικό κόστος ανά χιλιόμετρο μεταφερόμενου τόνου είναι 10,8 γραμμάρια ΔτΑ (10,8 g CO_2/tkm) για πλοίο φορτωμένο κατά 70%, που είναι και το μέσο ποσοστό φόρτωσης των πλοίων. Η αντίστοιχη τιμή περιβαλλοντικού κόστους για 100% φορτωμένο πλοίο είναι 7,56 γρ ΔτΑ ανά χιλιόμετρο μεταφερόμενου τόνου (7,56 g CO_2/tkm). Για οχηματαγωγά πλοία (Roll-on/roll-off), όπως αυτά που διακινούν προϊόντα στα

Ελληνικά νησιά, το περιβαλλοντικό κόστος είναι κατά μέσο όρο 19,7 γραμμάρια ΔτΑ ανά χιλιόμετρο μεταφερόμενου τόνου (19,7 g CO_2/tkm).

6.8 Ανακύκλωση Εξαρτημάτων

Η ανακύκλωση έχει πλέον καθιερωθεί σαν κομμάτι της ζωής κάθε προϊόντος χρόνια τώρα. Η ανακύκλωση φωτοβολταϊκών στοιχείων όμως είναι σχετικά καινούργια βιομηχανία, μιας και οι πρώτες εμπορικές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις εμφανίστηκαν στα μέσα τις δεκαετίας του 80, αρχές τις δεκαετίας του 90 και το όριο ζωής τους ήταν περίπου 20 χρόνια. Μόλις τον Ιανουάριο του 2010 έγινε το 1^{ο} Διεθνές Συνέδριο για την Ανακύκλωση Φωτοβολταϊκών Στοιχείων, στο Βερολίνο.

Η ανακύκλωση των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων δεν είναι εύκολη υπόθεση μιας και είναι ένα προϊόν από διάφορα στοιχεία και υλικά. Μάλιστα είναι δυνατή η ανακύκλωση ενός ποσοστού 95,7 του Φωτοβολταϊκού στοιχείου και όχι όλου[6.8-1]. Το επιπλέον περιβαλλοντικό κόστος της ανακύκλωσης έχει να κάνει με την αποσυναρμολόγηση τους, τον διαχωρισμό των υλικών και την μετατροπή τους σε πρώτες ύλες. Το κέρδος όμως της ανάκτησης πρώτων υλών (γυαλί, κρυσταλλικό πυρίτιο, αλουμίνιο και χαλκός) υπερκαλύπτει την ενέργεια που χάνεται κατά την διαδικασία[6.8-2]. Υπολογίζεται ότι η ανακύκλωση Φωτοβολταϊκών Στοιχείων, μειώνει τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις σε εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα κατά 6%[6.8-3].

7. Μέθοδος Particle Swarm Optimization – PSO

7.1 Εισαγωγή

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι αποτελούν μια κατηγορία αλγορίθμων που σχετίζονται με την απομίμηση διαφόρων εξελικτικών φαινομένων. Χαρακτηριστική τους διαφορά έναντι άλλων μεθευρετικών μεθόδων είναι το γεγονός ότι η λειτουργία τους βασίζεται στην εξέλιξη όχι μιας λύσης, αλλά ενός συνόλου λύσεων που συνήθως αποκαλείται πλήθος ή πληθυσμός λύσεων και αλληλεπιδρούν με κάποιο τρόπο. Μια νέα εξελικτική μέθοδος βελτιστοποίησης είναι η Τεχνική Βελτιστοποίησης με Σμήνη Σωματιδίων ή Particle Swarm Optimization (PSO). Η PSO είναι μια στοχαστική τεχνική βελτιστοποίησης βασισμένη σε πληθυσμό που αναπτύχθηκε από τους Eberhart and Kennedy (1995), σαν ένα εναλλακτικό εργαλείο στους γενετικούς αλγορίθμους, εμπνευσμένοι από την κοινωνική συμπεριφορά που έχουν τα σμήνη πουλιών.

Η PSO έχει πολλές ομοιότητες με εξελικτικές υπολογιστικές τεχνικές όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι. Το σύστημα αρχικοποιείται με ένα πληθυσμό τυχαίων λύσεων και αναζητά βέλτιστα ενημερώνοντας (updating) γενιές. Σε αντίθεση με τους γενετικούς αλγορίθμους, η PSO δεν έχει εξελικτικές διαδικασίες όπως η διασταύρωση και η μετάλλαξη. Στην PSO, οι ενδεχόμενες λύσεις, που λέγονται σωματίδια (particles), κινούνται στο χώρο των λύσεων ακολουθώντας το ρεύμα των βέλτιστων σωματιδίων. Το πλεονέκτημα της PSO συγκρινόμενη με τους γενετικούς αλγορίθμους είναι ότι είναι εύκολο να υλοποιηθεί και υπάρχουν λίγες παράμετροι προς ρύθμιση ενώ θεωρείται ιδιαιτέρως αποδοτική σε προβλήματα πραγματικών μεταβλητών.

7.2 Ο αλγόριθμος Particle Swarm Optimization

Όπως προαναφέρθηκε, η PSO προσομοιώνει τη συμπεριφορά ενός σμήνους πουλιών. Έστω ότι έχουμε το ακόλουθο σενάριο. Ένα σμήνος πουλιών ψάχνουν τυχαία για τροφή στη θάλασσα. Υπάρχει μόνο ένα κομμάτι τροφής στην περιοχή που ερευνάται. Κανένα πουλί δεν ξέρει που είναι η τροφή. Αλλά ξέρουν πόσο μακριά είναι η τροφή σε κάθε χρονικό σημείο ή επανάληψη. Άρα η πιο αποτελεσματική τακτική είναι να ακολουθούν το πουλί που είναι πιο κοντά στην τροφή. Στην PSO κάθε λύση είναι ένα πουλί στο χώρο αναζήτησης, που το καλούμε σωματίδιο. Όλα τα σωματίδια έχουν τιμές καταλληλότητας (fitness values) με τις οποίες αξιολογούνται από την αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να βελτιστοποιηθεί και έχουν ταχύτητες που κατευθύνουν το πέταγμά τους. Τα σωματίδια πετάνε στο χώρο των λύσεων ακολουθώντας το ρεύμα των καλύτερων σωματιδίων.

Η PSO αρχικοποιείται με μια ομάδα τυχαίων σωματιδίων (λύσεων) και μετά αναζητά βέλτιστα ενημερώνοντας τις γενιές. Σε κάθε επανάληψη, κάθε σωματίδιο ενημερώνεται ακολουθώντας δύο «καλύτερες» τιμές. Η μία είναι η καλύτερη λύση (fitness) που έχει επιτύχει ως τώρα (η τιμή καταλληλότητας είναι αποθηκευμένη επίσης) και καλείται ατομικό βέλτιστο (personal best, pbest). Η άλλη «καλύτερη» τιμή είναι αυτή που έχει επιτευχθεί από οποιοδήποτε particle στον πληθυσμό και καλείται ολικό βέλτιστο (global best, gbest). Όταν ένα σωματίδιο συμμετέχει στον πληθυσμό σαν ένας τοπολογικός γείτονας, η καλύτερη τιμή είναι ένα τοπικό βέλτιστο και καλείται τοπικό βέλτιστο (lbest). Αυτές είναι δυο διαφορετικές εκδόσεις της PSO (ολική και τοπική). Ο βασικός αλγόριθμος PSO για την ενημέρωση της θέσης του κάθε σωματιδίου περιγράφεται από τις επόμενες σχέσεις:

$$v_{i+1}(j) = v_i(j) + c_1 \cdot r_{1,i}(j) \cdot \left\{ pbest(j) - x_i(j) \right\} + c_2 \cdot r_{2,i}(j) \cdot \left\{ gbest(j) - x_i(j) \right\} \quad (7.2\text{ -1})$$

$$x_{i+1}(j) = v_{i+1}(j) + x_i(j) \quad (7.2\text{ -2})$$

όπου:

i ο αριθμός της τρέχουσας επανάληψης,

j ο αριθμός της μεταβλητής του διανύσματος βελτιστοποίησης (1η, 2η κ.ο.κ),

$r_{1,i}$ και $r_{2,i}$ μεταβλητές που δημιουργούνται τυχαία στο διάστημα [0,1] σε κάθε εφαρμογή του αλγορίθμου PSO,

$x_i(j)$ η τιμή της μεταβλητής j κατά την επανάληψη i,

$v_i(j)$ η ταχύτητα της μεταβλητής j κατά την επανάληψη i,

c_1 και c_2 σταθερές μεταβλητές με τιμή συνήθως ίση με 2,

pbest(j) η τιμή της μεταβλητής j της καλύτερης λύσης που έχει επιτύχει το συγκεκριμένο σωματίδιο μέχρι την επανάληψη i και

gbest(j) η τιμή της μεταβλητής j της καλύτερης λύσης που έχει εντοπιστεί από ολόκληρο τον πληθυσμό μέχρι την επανάληψη i.

Οι Eberhart et al. (1996) πρότειναν τον περιορισμό της ταχύτητας σε ένα εύρος $\left[-v_{\max}, v_{\max}\right]$ ώστε να μειωθεί η πιθανότητα κινήσεων εκτός του επιτρεπτού χώρου αναζήτησης. Οι Shi και Eberhart [1998] παρατήρησαν ότι η έλλειψη της συνιστώσας μνήμης της προηγούμενης ταχύτητας, δηλαδή ο όρος $v_i(j)$ στην Εξίσωση 7.2 -1, έχει ως αποτέλεσμα την παγίδευση του σμήνους στην καλύτερη λύση που έχει βρεθεί από τον αρχικό, τυχαία ορισμένο, πληθυσμό. Αντιθέτως, ο μηχανισμός “μνήμης” της ταχύτητας συμβάλλει σε μια διευρυμένη κίνηση στο χώρο αναζήτησης. Προκειμένου να επιτευχθεί μια καλύτερη ισορροπία μεταξύ εξερεύνησης και εκμετάλλευσης των αποτελεσμάτων της, προτείνεται η χρήση ενός συντελεστή αδράνειας (inertia weight) w, ώστε η βασική εξίσωση του αλγορίθμου PSO να διαμορφώνεται ως εξής:

$$v_{i+1}(j) = w \cdot v_i(j) + c_1 \cdot r_{1,i}(j) \cdot \{pbest(j) - x_i(j)\} + c_2 \cdot r_{2,i}(j) \cdot \{gbest(j) - x_i(j)\} \qquad (7.2\ \text{-}3)$$

Ο συντελεστής αδράνειας παίζει σημαντικό ρόλο στη σύγκλιση της βέλτιστης λύσης σε μια βέλτιστη τιμή καθώς και στη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης. Ελέγχει την επίδραση των προηγούμενων ταχυτήτων στην παρούσα, όπως και τις τοπικές και ολικές ικανότητες αναζήτησης της PSO. Γενικά, σε μεθόδους βελτιστοποίησης που βασίζονται σε πληθυσμούς, είναι επιθυμητή η "ενθάρρυνση" της περιπλάνησης των ατόμων σε όλο το χώρο αναζήτησης, χωρίς να εγκλωβίζονται γύρω από τοπικά βέλτιστα κατά τη διάρκεια των πρώτων σταδίων βελτιστοποίησης. Αντίθετα, κατά τα τελευταία στάδια είναι πολύ σημαντικό να ευνοείται η σύγκλιση προς το ολικό βέλτιστο, ώστε να βρεθεί αποδοτικά η βέλτιστη λύση. Μεγάλοι συντελεστές αδράνειας ευνοούν την ολική εξερεύνηση από την PSO, ενώ μικροί συντελεστές αδράνειας ευνοούν την τοπική εξερεύνηση.

Οι Eberhart και Shi (2000) προτείνουν τη γραμμική μείωση του συντελεστή αδράνειας, ανάλογα με τις επαναλήψεις της διαδικασίας βελτιστοποίησης, από 0.9 ($1^{η}$ επανάληψη) σε 0.4 (τελευταία επανάληψη).

Ένας τρόπος ελέγχου της συμπεριφοράς του σμήνους, εναλλακτικός στη χρήση συντελεστού αδράνειας, είναι η λεγόμενη Constriction PSO (CPSO), η οποία από τους Clerc και Kennedy (2002). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, εφαρμόζεται ένας συντελεστής περιορισμού (constriction factor) χ, ως εξής:

$$v_{i+1}(j) = \chi \cdot \left[v_i(j) + c_1 \cdot r_{1,i}(j) \cdot \left\{ pbest(j) - x_i(j) \right\} + c_2 \cdot r_{2,i}(j) \cdot \left\{ gbest(j) - x_i(j) \right\} \right]$$

(7.2 -4)

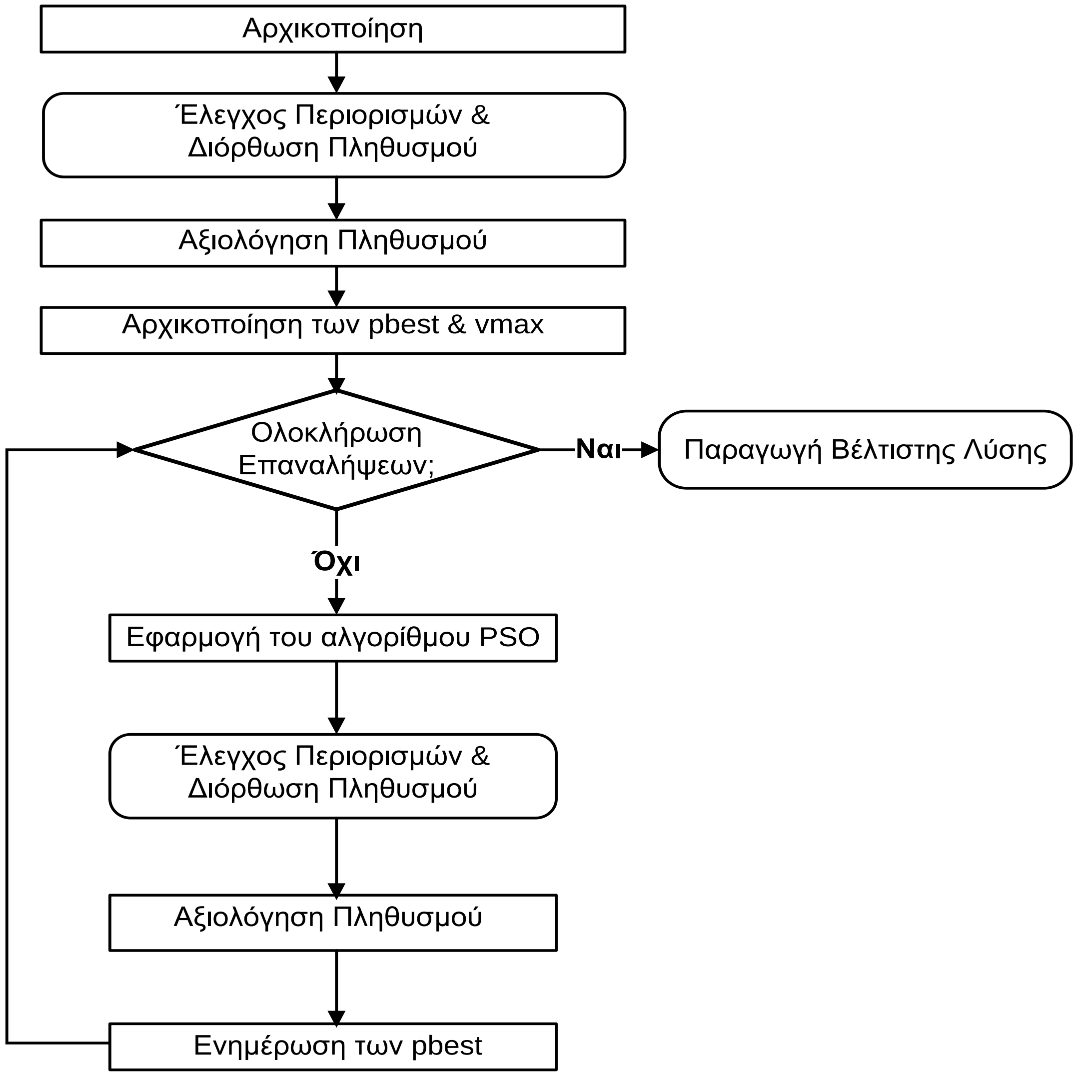
όπου:

$$\chi = \frac{2}{\left| 2 - c - \sqrt{c^2 - 4 \cdot c} \right|} \qquad (7.2 - 5)$$

με c ίσο με $c = c_1 + c_2, c > 4$.

Στην περίπτωση της μεθόδου CPSO, τα c_1 και c_2 συνήθως τίθενται ίσα με 2,05.

Στο Σχήμα 7.2 - 1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου PSO. Κατά την έναρξη του αλγορίθμου δημιουργείται ο αρχικός πληθυσμός με τυχαίο τρόπο και στη συνέχεια ελέγχεται για τυχόν παραβιάσεις των περιορισμών και διορθώνεται. Έπειτα, όλα τα μέλη του πληθυσμού αξιολογούνται με την αντικειμενική συνάρτηση και αρχικοποιούνται τα διανύσματα pbest και vmax. Αμέσως μετά, ακολουθεί η επαναληπτική διαδικασία του αλγορίθμου, όπου σε κάθε επανάληψη εφαρμόζεται ο αλγόριθμος PSO σε κάθε μέλος του πληθυσμού, διορθώνονται οι προκύπτουσες λύσεις, ώστε να μην παραβιάζονται οι περιορισμοί, αξιολογείται ο πληθυσμός με χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης και ενημερώνονται τα διανύσματα pbest.



Σχήμα 7.2 -1: Διάγραμμα Ροής του Αλγορίθμου PSO.

7.3 Λειτουργία του Αλγορίθμου PSO για Εύρεση Βέλτιστης Λύσης με Πολλαπλά Κριτήρια

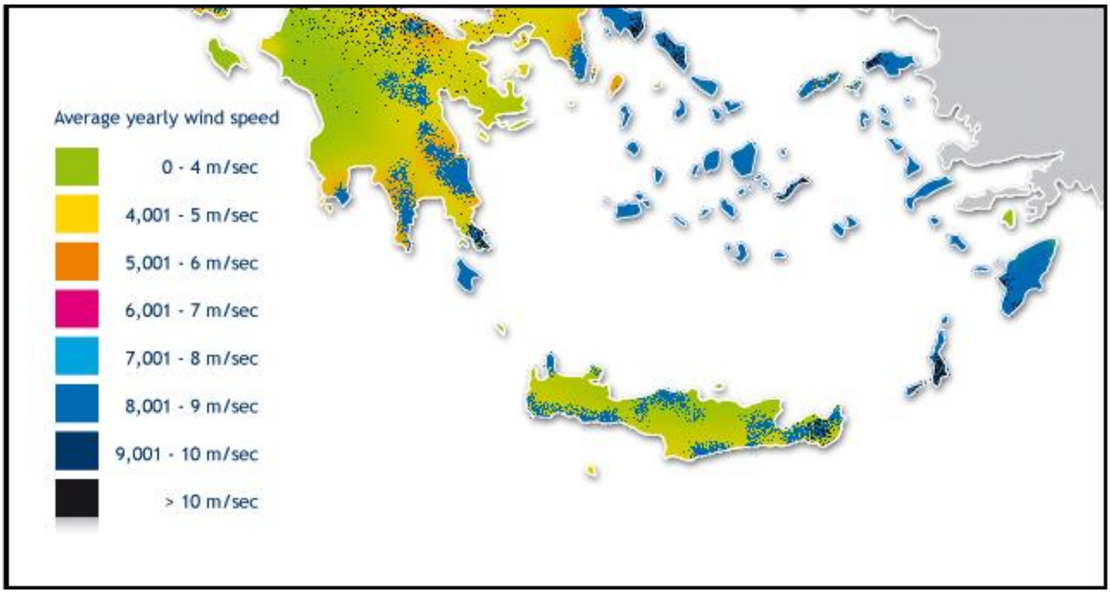
Για την υλοποίηση της κεντρικής ιδέας της παρούσας εργασίας έπρεπε να εξελιχθεί μια μέθοδος που να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο το οικονομικό όφελος μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης αλλά και το περιβαλλοντικό της όφελος. Για τον σκοπό αυτό υπήρξε η ανάγκη για τρεις ξεχωριστές αντικειμενικές συναρτήσεις, κάθε μια από τις οποίες θα εφάρμοζε την μέθοδο του αλγορίθμου PSO για εύρεση της βέλτιστης λύσης για συγκεκριμένα κριτήρια.

Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση που υλοποιήθηκε έχει ως στόχο την εύρεση της βέλτιστης οικονομικής λύσης, με μια διάταξη των φωτοβολταϊκών στον χώρο που θα πρόσφερε το μέγιστο οικονομικό κέρδος. Η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση βρίσκει την βέλτιστη διάταξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων με γνώμονα την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εξοικονόμηση γραμμαρίων ΔτΑ που, αν δεν κατασκευαστεί το φωτοβολταϊκό πάρκο, θα είναι προϊόν της παραγωγής ενέργειας με συμβατικές μορφές. Οι δύο πρώτες αντικειμενικές συναρτήσεις είναι μέρος της τελευταίας αντικειμενικής συνάρτησης όπου με τα επιμέρους βάρη, που είναι παράμετροι εισόδου στην μέθοδο από τον χρήστη, εφαρμόζει τον αλγόριθμο PSO και βρίσκει την βέλτιστη λύση δύο κριτηρίων ή αλλιώς πολυκριτήρια λύση.

8. Μελέτη Φ/Β Εγκατάστασης στην Κρήτη (Case Study)

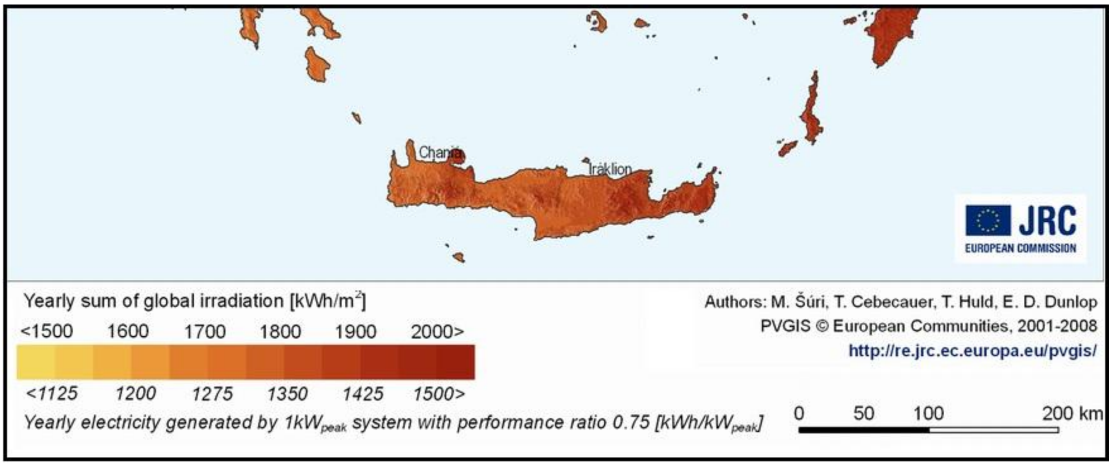
8.1 Εισαγωγή - Επιλογή Τοποθεσίας

Η Κρήτη είναι μια περιοχή όπου η ανάγκη για ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι πολύ μεγάλη. Η χρήση παλαιάς τεχνολογίας γεννητριών από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, η ανάπτυξη της τουριστικής βιομηχανίας και η ανάγκη για ενεργειακή αυτονομία του νησιού σε συνδυασμό με τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν δημιουργούν το κατάλληλο έδαφος για επενδύσεις σε αυτό τον τομέα. Μάλιστα η συγκέντρωση στον μικρό αυτό γεωγραφικό χώρο μεγάλων ακαδημαϊκών και επιστημονικών φορέων όπως το Πολυτεχνείο Κρήτης, το Πανεπιστήμιο Κρήτης και το Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας αλλά και επενδυτικών φορέων, μπορούν να συμβάλουν τα μέγιστα ώστε να καταστεί το νησί υπόδειγμα αειφόρου ανάπτυξης για την Ελλάδα και την Μεσόγειο.



Εικόνα 8.1-1: Μέρος χάρτη αιολικού δυναμικού της χώρας[8.1-1]

Οι κλιματολογικές συνθήκες της Κρήτης είναι ιδανικές για όλες σχεδόν τις μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Είναι γνωστό ότι στον νομό Λασιθίου έχουν εγκατασταθεί πολλά αιολικά πάρκα που η συνολική τους ισχύς φτάνει τα 150 MW. Όπως φαίνεται και στην εικόνα [8.1-1] η περιοχή του Λασιθίου έχει το καλύτερο αιολικό δυναμικό της Κρήτης, και με βάση τα στοιχεία του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Εξοικονόμησης Ενέργειας, ένα από τα καλύτερα της Ελλάδος. Στην εικόνα [8.1-2] παρουσιάζεται μέρος του χάρτη ηλιακού δυναμικού της χώρας και το άμεσο συμπέρασμα είναι ότι στους νομούς Χανιών και Λασιθίου το ηλιακό δυναμικό είναι πιο ενισχυμένο.



Εικόνα 8.1-2: Χάρτης ηλιακού δυναμικού της χώρας[8.1-2]

Η επιλογή της τοποθεσίας για την μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκού πάρκου δεν έγινε μόνο με βάση ενεργειακά κριτήρια αλλά και με κάποια πιο ρεαλιστικά γεγονότα. Το γεγονός ότι τα Χανιά έχουν μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις καθώς και καλύτερη υποδομή (λιμάνι της Σούδας), καθώς και το ότι για τον νομό Χανίων υπήρχαν καλύτερα στοιχεία θερμοκρασίας και ακτινοβολίας ήταν καταλυτικοί παράγοντες για την επιλογή της τοποθεσίας κοντά στα Χανιά. Για τους λόγους αυτούς η περιοχή όπου θα εγκατασταθεί το φωτοβολταϊκό πάρκο για την μελέτη θα θεωρηθεί περιοχή του νομού Χανίων η οποία θα είναι 60km μακριά από το λιμάνι της Σούδας.

8.2 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Ένας από τους σκοπούς της μελέτης ήταν να αξιολογηθεί το περιβαλλοντικό κόστος όλων των τεχνολογιών φωτοβολταϊκών Πυριτίου. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκαν αντιπροσωπευτικά δείγματα μονοκρυσταλλικού, πολυκρυσταλλικού και άμορφου Πυριτίου που είναι διαθέσιμα στην παγκόσμια αγορά.

Από την κατηγορία των φωτοβολταϊκών μονοκρυσταλλικού Πυριτίου επιλέγηκε το μοντέλο E19 της αμερικανικής εταιρίας Sunpower τα στοιχεία του οποίου φαίνονται πιο κάτω. Να σημειωθεί ότι ο δείκτης απόδοσης του συγκεκριμένου φωτοβολταϊκού είναι 19,5%, πολύ πάνω από τον μέσω όρο δείκτη απόδοσης πολλών εμπορικών φωτοβολταϊκών.

Pmax (W)	**318**
Vm (V)	54,7
Im (A)	5,82
Voc (V)	64,7
Isc (A)	6,2
NOCT ©	45
Voltage Coefficient (mV/C)	-176,6

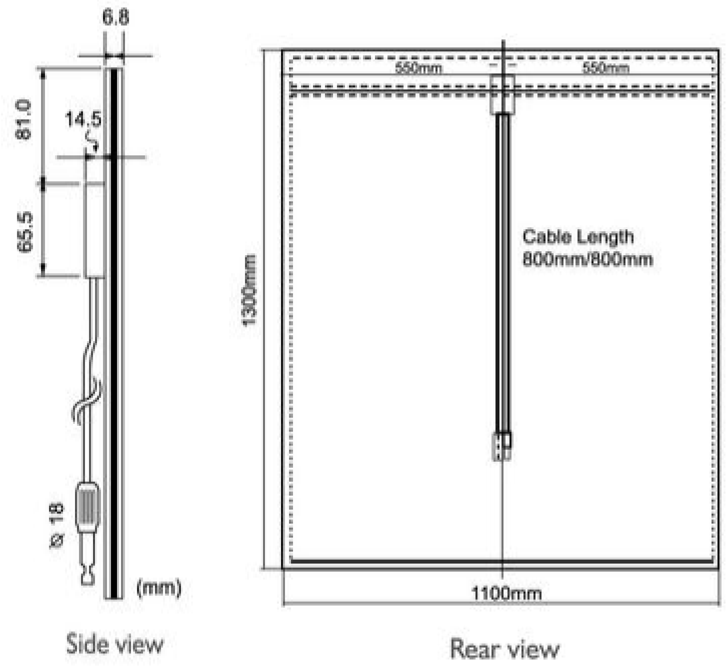
Πίνακας 8.2-1: Στοιχεία ΦωτοβολταΪκού Sunpower E19

Σαν είσοδο για τις διατάξεις βασισμένες σε πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο επιλέχθηκε το μοντέλο KC170GHT-2 της Ιαπωνικής εταιρίας KYOCERA. Το φωτοβολταϊκό αυτό έχει επιλεγεί αρκετές φορές σε εγκαταστάσεις στην Ελλάδα. Ο δείκτης απόδοσης του συγκεκριμένου φωτοβολταϊκού είναι 16%, που κρίνεται ως πάρα πολύ καλός για την κατηγορία του.

Pmax (W)	**170**
Vm (V)	23,4
Im (A)	7,27
Voc (V)	29
Isc (A)	8,03
NOCT ©	47
Voltage Coefficient (mV/C)	-109

Πίνακας 8.2-2: Στοιχεία Φωτοβολταϊκού Kyocera KC170GHT-2

Για την κατηγορία των φωτοβολταϊκών άμορφου Πυριτίου προτιμήθηκε το M140000 της εταιρίας Auria με έδρα την Ταϊβάν. Η επιλογή έγινε με βάση τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού αλλά και τις διαστάσεις του, λόγω του ότι πολλά από τα φωτοβολταϊκά άμορφου Πυριτίου που διατίθενται στην αγορά έχουν πολύ μεγάλο μήκος εκμεταλλευόμενα τις πλαστικές ιδιότητες που έχουν (thin film). Τέτοιου είδους φωτοβολταϊκά δοκιμάστηκαν σαν είσοδοι στον αλγόριθμο αλλά τα αποτελέσματα δεν ήταν αξιοποιήσιμα και ρεαλιστικά. Τα χαρακτηριστικά του Auria M140000 φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα.



Pmax (W)	140
Vm (V)	100,3
Im (A)	1,4
Voc (V)	134,2
Isc (A)	1,63
NOCT ©	45
Voltage Coefficient (mV/C)	-300

Πίνακας 8.2-3: Στοιχεία ΦωτοβολταΪκού Auria M140000

8.3 Σενάρια Μεταφοράς Υλικών

Όπως έχει εξηγηθεί στο κεφάλαιο της περιβαλλοντικής μοντελοποίησης (κεφ. 6), η μεταφορά αγαθών χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και παίζει σημαντικό ρόλο στο τελικό περιβαλλοντικό κόστος. Τα σενάρια μεταφοράς των υλικών που τέθηκαν σε δοκιμή δεν είναι τυχαία. Σκοπός που δοκιμάστηκαν δεν ήταν μόνο ο ακριβής υπολογισμός των εκπομπών Διοξειδίου του Άνθρακα, αλλά και για να δοθούν απαντήσεις σε ερωτήματα που αφορούν άμεσα την σχεδίαση εθνικής περιβαλλοντικής στρατηγικής. Για παράδειγμα όλοι μπορούμε να υπολογίσουμε ότι θα ήταν οικολογικά συμφέρουσα η μεταφορά φωτοβολταϊκών από βιομηχανία παραγωγής στην Ελλάδα αλλά είναι η δημιουργία μιας τέτοιας βιομηχανίας κίνηση περιβαλλοντικά βέλτιστη; Σε ένα σωστό αειφόρο σχεδιασμό θα πρέπει να μελετηθεί και το ακριβές περιβαλλοντικό κέρδος που θα έχει η μονάδα αυτή και αν αυτό θα αποσβέσει το περιβαλλοντικό κόστος κατασκευής της

8.3.1 Μεταφορά Φωτοβολταϊκών

Για την μεταφορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων εφαρμόστηκαν έξι διαφορετικά σενάρια. Η επιλογή των τοποθεσιών κατασκευής των φωτοβολταϊκών έγινε με βάση κυρίως πραγματικές μεγάλες μονάδες παραγωγής φωτοβολταϊκών παγκόσμια. Οι διαδρομές και τα μέσα μεταφοράς προσεγγίζουν αρκετά ρεαλιστικά την πορεία που συνήθως ακολουθούν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Ακολουθούν τα σενάρια για τις εξής χώρες προέλευσης των φωτοβολταϊκών με τις επιμέρους τιμές περιβαλλοντικού κόστους:

1. Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.

Από	Προς	Απόσταση (km)	Μέσο μεταφοράς	Συντελεστής (g CO_2/tkm)	Περιβαλλοντικό κόστος (g CO_2)
Trenton, New Jersey	New Jersey Port	100	Φορτηγό	336	33.600
New Jersey Port	Πειραιάς	8.800	Πλοίο	7,56	66.528
Πειραιάς	Σούδα	300	Πλοίο	19,7	5.910
Σούδα	Τοποθεσία Εγκατάστασης	60	Φορτηγό	591	35.460
				Σύνολο	141.498

Πίνακας 8.3.1-1: Περιβαλλοντικό Κόστος μεταφοράς Φ/Β πλαισίων από την Αμερική

2. Ισπανία

Από	Προς	Απόσταση (km)	Μέσο μεταφοράς	Συντελεστής (g CO_2/tkm)	Περιβαλλοντικό κόστος (g CO_2)
Tech Park of Andalucía	Malaga	17	Φορτηγό	591	10.047
Malaga	Πειραιάς	2.757	Πλοίο	7,56	20.842,92
Πειραιάς	Σούδα	300	Πλοίο	19,7	5910
Σούδα	Τοποθεσία Εγκατάστασης	60	Φορτηγό	591	35.460
				Σύνολο	72.259,92

Πίνακας 8.3.1-2: Περιβαλλοντικό Κόστος μεταφοράς Φ/Β πλαισίων από την Ισπανία

3. Γερμανία

Από	Προς	Απόσταση (km)	Μέσο μεταφοράς	Συντελεστής (g CO_2/tkm)	Περιβαλλοντικό κόστος (g CO_2)
Dortmund	Ancona	1.320	Φορτηγό	336	443.520
Ancona	Πάτρα	1.020	Πλοίο	19,7	20.094
Πάτρα	Πειραιάς	210	Φορτηγό	591	124.110
Πειραιάς	Σούδα	300	Πλοίο	19,7	5.910
Σούδα	Τοποθεσία Εγκατάστασης	60	Φορτηγό	591	35.460
				Σύνολο	629.094

Πίνακας 8.3.1-3: Περιβαλλοντικό Κόστος μεταφοράς Φ/Β πλαισίων από την Γερμανία

4. Κίνα (με πλοίο)

Από	Προς	Απόσταση (km)	Μέσο μεταφοράς	Συντελεστής (g CO_2/tkm)	Περιβαλλοντικό κόστος (g CO_2)
Wuxi	Shangai	160	Φορτηγό	591	94.560
Shangai	Πειραιάς	16.000	Πλοίο	7,56	120.960
Πειραιάς	Σούδα	300	Πλοίο	19,7	5.910
Σούδα	Τοποθεσία Εγκατάστασης	60	Φορτηγό	591	35.460
				Σύνολο	256.890

Πίνακας 8.3.1-4: Περιβαλλοντικό Κόστος μεταφοράς Φ/Β πλαισίων από την Κίνα με πλοίο

5. Κίνα (με τρένο)

Από	Προς	Απόσταση (km)	Μέσο μεταφοράς	Συντελεστής (g CO_2/tkm)	Περιβαλλοντικό κόστος (g CO_2)
Wuxi	Beijing	1.123	Τρένο	21	23.583
Beijing	Chita	2.275	Τρένο	21	47.775
Chita	Moscow	6.199	Τρένο	21	130.179
Moscow	Novorosiysk	940	Τρένο	21	19.740
Novorosiysk	Πειραιάς	1.540	Πλοίο	7,56	11.642,4
Πειραιάς	Σούδα	300	Πλοίο	19,7	5.910
Σούδα	Τοποθεσία Εγκατάστασης	60	Φορτηγό	591	35.460
				Σύνολο	274.289,4

Πίνακας 8.3.1-5: Περιβαλλοντικό Κόστος μεταφοράς Φ/Β πλαισίων από την Κίνα με τρένο

6. Ελλάδα

Από	Προς	Απόσταση (km)	Μέσο μεταφοράς	Συντελεστής (g CO_2/tkm)	Περιβαλλοντικό κόστος (g CO_2)
ΒΙΠΕ Αττικής	Πειραιάς	50	Φορτηγό	519	25.950
Πειραιάς	Σούδα	300	Πλοίο	19,7	5.910
Σούδα	Τοποθεσία Εγκατάστασης	60	Φορτηγό	591	35.460
				Σύνολο	67.320

Πίνακας 8.3.1-6: Περιβαλλοντικό Κόστος μεταφοράς Φ/Β πλαισίων από την Ελλάδα

8.3.2 Μεταφορά Αντιστροφέων Τάσης DC/AC, Καλωδίων και Πλαισίων Στήριξης

Για τους σκοπούς της μελέτης θεωρήθηκε ότι οι αντιστροφείς τάσης, τα καλώδια και τα μεταλλικά πλαίσια στήριξης κατασκευάζονται στην Ελλάδα. Λόγω της συγκέντρωσης της βαριάς βιομηχανίας στην περιοχή της Αττικής το οικολογικό κόστος μεταφοράς υπολογίστηκε θέτοντας ως χώρο παραγωγής περιοχή 50 χιλιόμετρα από το λιμάνι του Πειραιά. Το συνολικό οικολογικό κόστος μεταφοράς είναι, ίδιο με αυτό του σεναρίου μεταφοράς φωτοβολταϊκών πλαισίων από την Ελλάδα όπως φαίνεται στον πίνακα 8.3.1-6, 67320 γραμμάρια ΔτΑ ανά χιλιόμετρο μεταφερόμενου τόνου.

8.3.3 Μεταφορά Σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα είναι το μοναδικό από τα υλικά που παρασκευάζεται στην Κρήτη. Η μεταφορά του θα γίνεται με μεσαίο φορτηγό (φορτίο μεγαλύτερο των 7,5 τόνων και μικρότερο των 15 τόνων) το οποίο θα διανύσει περίπου εκατό χιλιόμετρα (100km) μέχρι την τοποθεσία εγκατάστασης του ΦΒ πάρκου. Το κόστος μεταφοράς του σκυροδέματος υπολογίστηκε στα 35,46 κιλά ΔτΑ ανά χιλιόμετρο μεταφερόμενου τόνου (35460 g CO2/tkm).

8.4 Σενάρια Ανακύκλωσης

Προκειμένου να προσδιοριστεί η ανάγκη ή μη για κατασκευή μονάδας ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών στοιχείων στην Ελλάδα, εξετάστηκαν δύο σενάρια ανακύκλωσης.

- Το πρώτο προνοεί μεταφορά για ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών στοιχείων στην Γερμανία (Dortmund) όπου λειτουργούν ήδη τέτοιες μονάδες στην χώρα. Η διαδρομή και το συνολικό κόστος φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα.

Από	Προς	Απόσταση (km)	Μέσο μεταφοράς	Συντελεστής (g CO_2/tkm)	Περιβαλλοντικό κόστος (g CO_2)
Τοποθεσία Εγκατάστασης	Σούδα	60	Φορτηγό	591	35.460
Σούδα	Πειραιάς	300	Πλοίο	19,7	5.910
Πειραιάς	Πάτρα	210	Φορτηγό	591	124.110
Πάτρα	Ancona	1.020	Πλοίο	19,7	20.094
Ancona	Dortmund	1.320	Φορτηγό	336	443.520
				Σύνολο	629.094

Πίνακας 8.4-1: Περιβαλλοντικό κόστος μεταφοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων για ανακύκλωση στην Γερμανία

- Το δεύτερο σενάριο προνοεί την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε μονάδα ανακύκλωσης που βρίσκεται σε βιομηχανική περιοχή, 50 χιλιόμετρα από το λιμάνι του Πειραιά στην Αττική. Η διαδρομή και το συνολικό κόστος φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα.

Από	Προς	Απόσταση (km)	Μέσο μεταφοράς	Συντελεστής (g CO_2/tkm)	Περιβαλλοντικό κόστος (g CO_2)
Τοποθεσία Εγκατάστασης	Σούδα	60	Φορτηγό	591	35.460
Σούδα	Πειραιάς	300	Πλοίο	19,7	5.910
Πειραιάς	ΒΙΠΕ Αττικής	50	Φορτηγό	519	25.950
				Σύνολο	67.320

Πίνακας 8.4-2: Περιβαλλοντικό κόστος μεταφοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων για ανακύκλωση στην Ελλάδα

Το δρομολόγιο αυτό θα ακολουθήσουν και τα υπόλοιπα υλικά προς ανακύκλωση που είναι οι αντιστροφείς τάσης, τα καλώδια και τα μεταλλικά πλαίσια στήριξης.

8.5 Αποτελέσματα

8.5.1 Αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου για διαφορετικές τιμές των συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων.

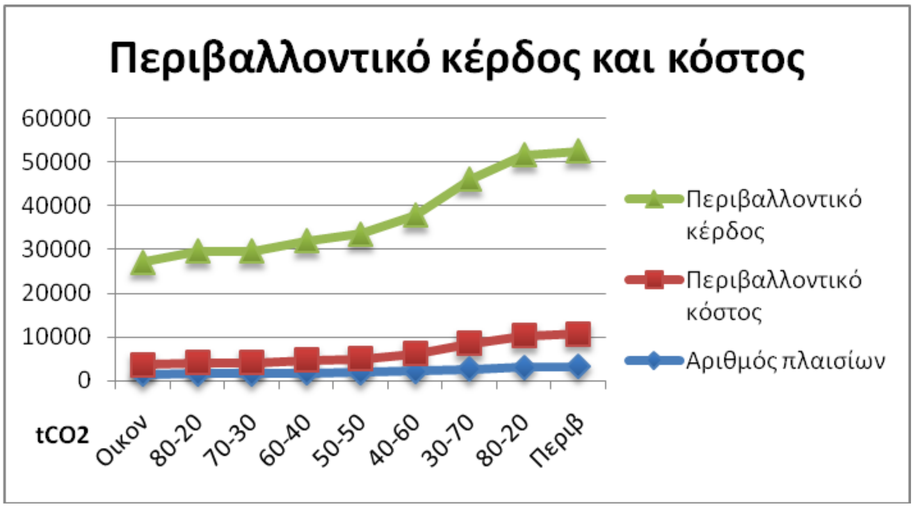
Η πρώτη σειράς πειραμάτων εκτελέστηκε για τη μελέτη των τιμών της Πολυκριτήρια λύσης, αναλόγως των βαρών των δύο επιμέρους κριτηρίων. Για το σκοπό αυτό οι υπόλοιπες παράμετροι του πειράματος παρέμειναν σταθερές. Σαν είσοδοι του προγράμματος επιλέχθηκαν ένας χώρος εγκατάστασης 50 μέτρα (Νότια όψη) επί 50 μέτρα (Δυτική όψη), φωτοβολταϊκά τεχνολογίας μονοκρυσταλλικού Πυριτίου τα οποία κατασκευάστηκαν και ανακυκλώθηκαν στην Γερμανία. Δοκιμάστηκαν συντελεστές 50% (οικονομικά κριτήρια) - 50% (περιβαλλοντικά κριτήρια) και ανά 10% ± και προς τα δύο κριτήρια μέχρι ποσοστού 20% και 80%. Για τιμές συντελεστών 10%-90% και 90%-10% οι τιμές της πολυκριτήρια λύσης συμπίπτανε με την βέλτιστη περιβαλλοντική και την βέλτιστη οικονομική λύση αντίστοιχα. Οι τιμές που λήφθηκαν παρουσιάζονται στον πιο κάτω πίνακα.

	Αριθμός πλαισίων	**Γραμμές ανά Σειρά**	**Κλίση**	**Περιβαλλοντικό κόστος (tCO_2)**	**Περιβαλλοντικό κέρδος (tCO_2)**	**Οικονομικό κέρδος (€)**
Βέλτ. Οικον.	1.536	48	9	2.166	23.499	9.937.619
80-20	1.632	51	21	2.493	25.431	9.767.645
70-30	1.632	51	21	2.493	25.431	9.767.645
60-40	1.760	55	31	2.882	27.293	8.674.268
50-50	1.856	58	35	3.164	28.527	7.648.877
40-60	2.144	67	45	3.975	31.756	4.036.116
30-70	2.720	85	56	5.762	37.538	-5.850.587,17
80-20	3.136	98	61	7.212	41.334	-15.062.923,45
Βέλτ. Περιβ	3.200	100	62	7.547	41.678	-17.921.622,99

Πίνακας 8.5.1-1: Αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου για διαφορετικές τιμές των συντελεστών βαρύτητας

Οι τιμές δείχνουν ξεκάθαρα ότι το οικονομικό κέρδος και το περιβαλλοντικό κέρδος είναι εκ διαμέτρου αντίστροφα. Στην περίπτωση της βέλτιστης περιβαλλοντικής λύσης υπάρχει η τάση να τοποθετηθεί όσο μεγαλύτερος αριθμός φωτοβολταϊκών γίνεται, κάτι που οδηγεί σε βάσης στήριξης με πολύ μεγάλες κλίσεις και όσο το δυνατό περισσότερες γραμμές φωτοβολταϊκών ανά σειρά. Στα πιο κάτω σχέδια φαίνεται γραφικά το οικονομικό κέρδος και το περιβαλλοντικό κέρδος και κόστος από την βέλτιστη οικονομική λύση έως την βέλτιστη περιβαλλοντική λύση. Ενδιάμεσα οι τιμές των διαφόρων πολυκριτήρια λύσεων αναλόγως των συντελεστών βαρύτητας.

Σχήμα 8.5.1-1: Οικονομικό κέρδος ανά λύση



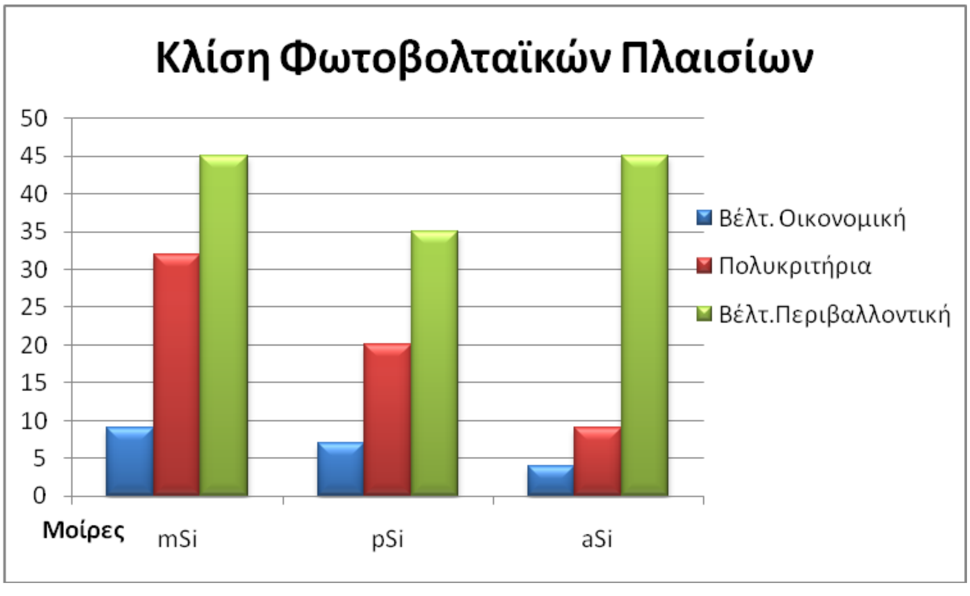
Σχήμα 8.5.1-2: Περιβαλλοντικό κέρδος και κόστος ανά λύση

8.5.2 Αποτελέσματα περιβαλλοντικού κέρδους και κόστους και του οικονομικού κέρδους ανά τεχνολογία φωτοβολταϊκών Πυριτίου

Στην συνέχεια μελετήθηκε η διαφορά στις τιμές περιβαλλοντικού κέρδους και κόστους καθώς και του οικονομικού κέρδους ανά τεχνολογία φωτοβολταϊκών Πυριτίου. Για το σενάριο αυτό θεωρήσαμε ότι τα φωτοβολταϊκά πάρκα θα στηθούν σε χωράφι έκτασης 20 μέτρα (Νότια όψη) επί 50 μέτρα (Δυτική όψη) και τα φωτοβολταϊκά θα κατασκευάζονται και θα ανακυκλώνονται στην Γερμανία. Η πολυκριτήρια λύση θα δίνεται έχοντας τον ίδιο συντελεστή βάρους σε βέλτιστη οικονομική και βέλτιστη περιβαλλοντική λύση (50%-50%). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πιο κάτω πίνακες και τα αντίστοιχα σχήματα.

	mSi	pSi	aSi
Βέλτ. Οικονομική	9	7	4
Πολυκριτήρια	32	20	9
Βέλτ.Περιβαλλοντική	45	35	45

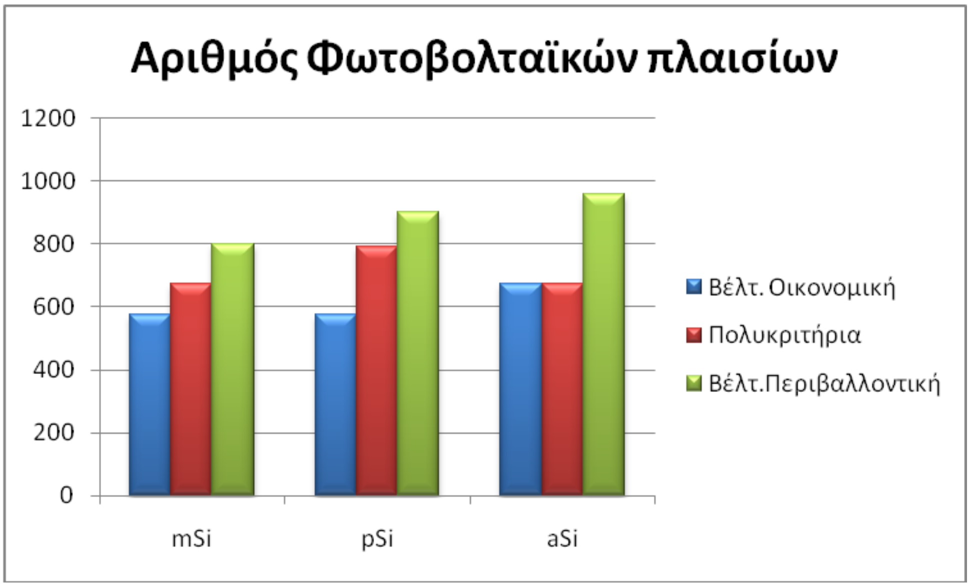
Πίνακας 8.5.2-1: Κλίση Φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά τεχνολογία και κριτήρια



Σχήμα 8.5.2-1: Κλίση Φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά τεχνολογία και κριτήρια

	mSi	pSi	aSi
Βέλτ. Οικονομική	576	576	672
Πολυκριτήρια	672	792	672
Βέλτ.Περιβαλλοντική	800	900	960

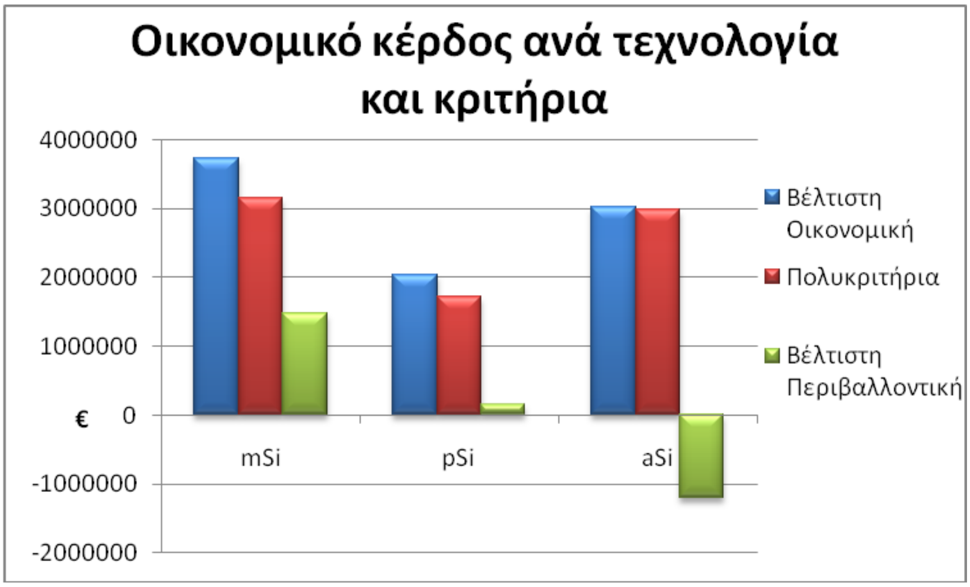
Πίνακας 8.5.2-2: Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά τεχνολογία και κριτήρια



Σχήμα 8.5.2-2: Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά τεχνολογία και κριτήρια

	mSi (€)	pSi (€)	aSi (€)
Βέλτ. Οικονομική	3.726.607	2.026.031,84	3.020.832,65
Πολυκριτήρια	3.145.325	1.716.543,4	2.982.117,76
Βέλτ.Περιβαλλοντική	1.482.221	148.795,63	-1.205.138,47

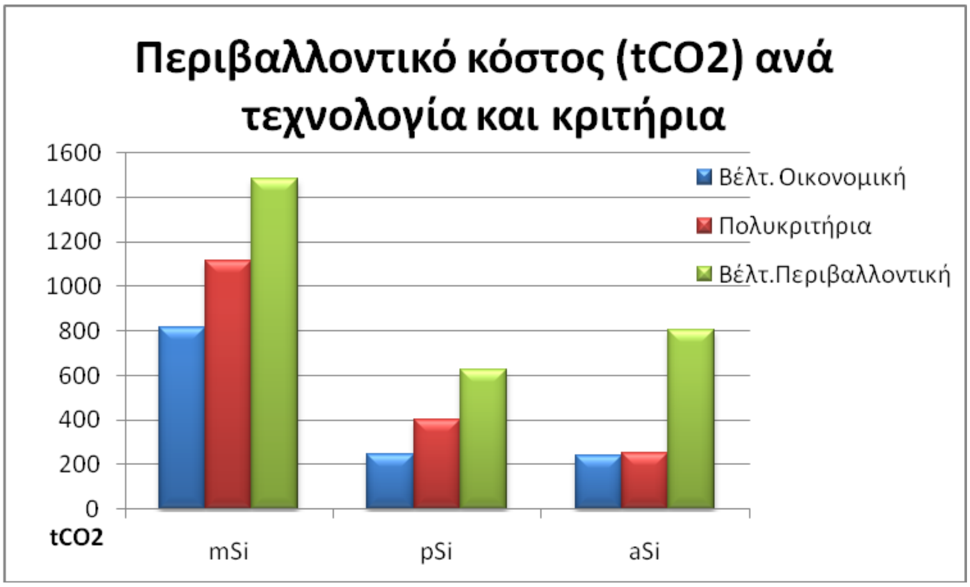
Πίνακας 8.5.2-3: Οικονομικό κέρδος ανά τεχνολογία και κριτήρια



Σχήμα 8.5.2-3: Οικονομικό κέρδος ανά τεχνολογία και κριτήρια

	mSi (tCO_2)	pSi (tCO_2)	aSi (tCO_2)
Βέλτ. Οικονομική	813,15	244,72	237,94
Πολυκριτήρια	1.116,11	399,56	251,48
Βέλτ.Περιβαλλοντική	1.485,38	625,25	802,03

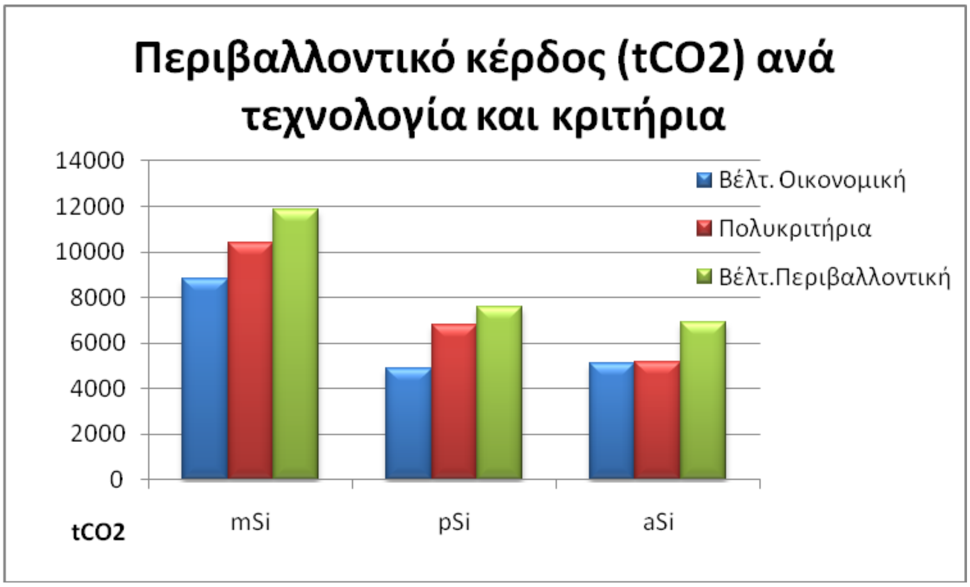
Πίνακας 8.5.2-4: Περιβαλλοντικό κόστος ανά τεχνολογία και κριτήρια



Σχήμα 8.5.2-4: Περιβαλλοντικό κόστος ανά τεχνολογία και κριτήρια

	mSi (tCO_2)	pSi (tCO_2)	aSi (tCO_2)
Βέλτ. Οικονομική	8.811,12	4.875,43	5.126,24
Πολυκριτήρια	10.396,11	6.819,06	5.186,71
Βέλτ.Περιβαλλοντική	11.846,76	7.566,97	6.911,67

Πίνακας 8.5.2-5: Περιβαλλοντικό κέρδος ανά τεχνολογία και κριτήρια



Σχήμα 8.5.2-5: Περιβαλλοντικό κέρδος ανά τεχνολογία και κριτήρια

Τα πρώτα συμπεράσματα που βγαίνουν από τα σχήματα είναι ότι ο αλγόριθμος για τις περιβαλλοντικές λύσεις έχει την τάση να γεμίζει τον χώρο με όσα παραπάνω φωτοβολταϊκά πλαίσια γίνεται και αυτό έχει ως επακόλουθο τις μεγάλες κλίσεις των πλαίσια στήριξης. Οι μεγάλες κλίσεις των πλαισίων στήριξης και ο μεγάλος αριθμός φωτοβολταϊκών έχουν τεράστιο αρνητικό αντίκτυπο στο οικονομικό κέρδος της εγκατάστασης. Μάλιστα στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών τεχνολογίας άμορφου Πυριτίου δεν υπάρχει οικονομικό κέρδος παρά μόνο ζημιά από ένα τέτοιο εγχείρημα.

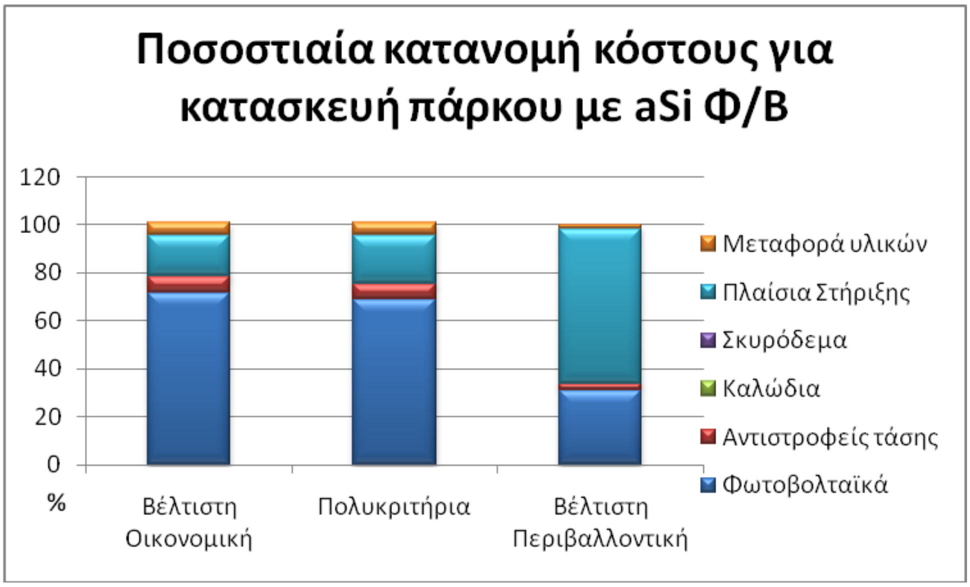
Το ρίσκο της τοποθέτησης όσο περισσοτέρων φωτοβολταϊκών στον χώρο φαίνεται ότι αποδίδει με βάση τα στοιχεία. Η αύξηση του περιβαλλοντικού κόστους αυξάνει σημαντικά το περιβαλλοντικό κέρδος. Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών τεχνολογίας μονοκρυσταλλικού Πυριτίου με σχεδόν διπλασιασμού του περιβαλλοντικού κόστους στην βέλτιστη περιβαλλοντική (11.846 τόνοι ΔτΑ) λύση σε σχέση με την βέλτιστη οικονομική λύση (8.811 τόνοι ΔτΑ) επιτυγχάνουμε αύξηση του περιβαλλοντικού κέρδους κατά 25,6% και εξοικονομούμε ακόμα 3035 τόνους ΔτΑ που θα παραγόντουσαν με συμβατικές μορφές ενέργειας.

8.5.3 Αποτελέσματα ανάλυσης κατανομής κόστους κατασκευής φωτοβολταϊκής εγκατάστασης για όλες τις τεχνολογίες.

Η ακόλουθη σειρά πειραμάτων υλοποιήθηκε προκειμένου να μελετηθεί η συνεισφορά των επιμέρους ενεργειών που εκτελούνται αλλά και υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού πάρκου. Για την σειρά αυτή θεωρήθηκε ότι ο χώρος εγκατάστασης έχει διαστάσεις 20 μέτρα (Νότια όψη) επί 50 μέτρα (Δυτική όψη) και τα φωτοβολταϊκά κατασκευάστηκαν και ανακυκλώθηκαν στην Γερμανία. Τα πειράματα έγιναν και για τις τρεις τεχνολογίες φωτοβολταϊκών Πυριτίου όπως επίσης και για τρεις ξεχωριστές λύσεις του αλγορίθμου (βέλτιστη οικονομική, βέλτιστη περιβαλλοντική και πολυκριτήρια λύση με βάρος 50%-50% επί των κριτηρίων).

	Βέλτιστη Οικονομική (%)	Πολυκριτήρια (%)	Βέλτιστη Περιβαλλοντική (%)
Φωτοβολταϊκά	71,8829	68,9585	30,7758
Αντιστροφείς τάσης	6,8322	6,5542	2,9251
Καλώδια	0,0581	0,0549	0,0172
Σκυρόδεμα	0,0029	0,0045	0,0074
Πλαίσια Στήριξης	16,7742	20,2193	64,4613
Μεταφορά υλικών	5,2878	5,0031	1,5688

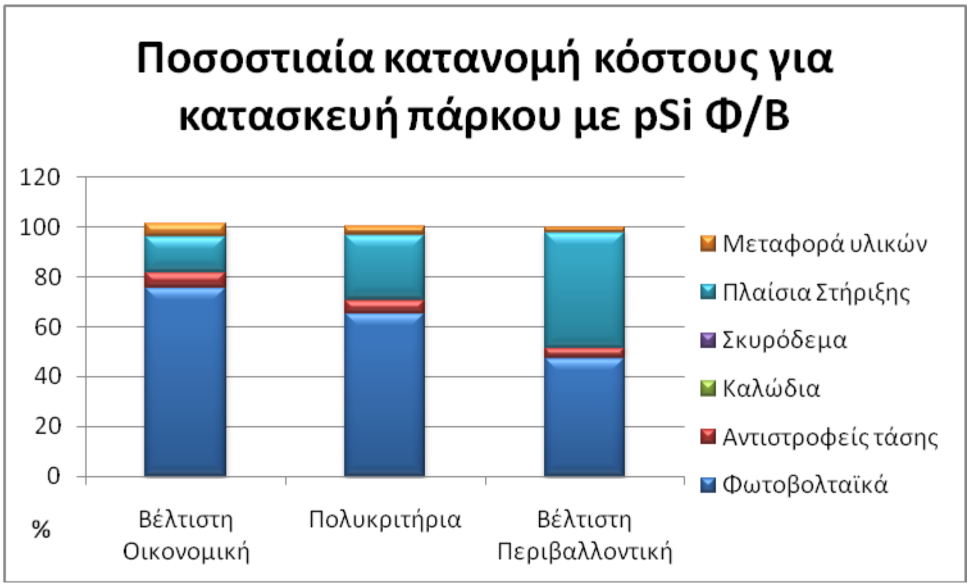
Πίνακας 8.5.3-1: Ποσοστιαία κατανομή κόστους με χρήση aSi φωτοβολταϊκών



Σχήμα 8.5.3-1: Ποσοστιαία κατανομή κόστους με χρήση aSi φωτοβολταϊκών

	Βέλτιστη Οικονομική (%)	Πολυκριτήρια (%)	Βέλτιστη Περιβαλλοντική (%)
Φωτοβολταϊκά	75,4713	65,1977	47,3422
Αντιστροφείς τάσης	6,3421	5,4788	3,9783
Καλώδια	0,0563	0,0346	0,0221
Σκυρόδεμα	0,003	0,0057	0,0069
Πλαίσια Στήριξης	14,1916	26,1331	46,3626
Μεταφορά υλικών	5,1414	3,149	2,0123

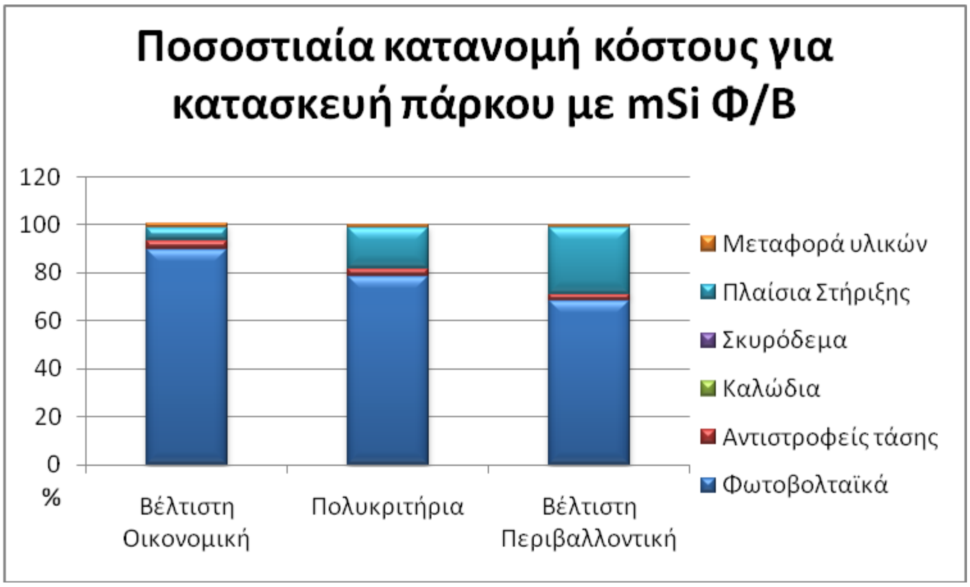
Πίνακας 8.5.3-2: Ποσοστιαία κατανομή κόστους με χρήση pSi φωτοβολταϊκών



Σχήμα 8.5.3-2: Ποσοστιαία κατανομή κόστους με χρήση pSi φωτοβολταϊκών

	Βέλτιστη Οικονομική (%)	Πολυκριτήρια (%)	Βέλτιστη Περιβαλλοντική (%)
Φωτοβολταϊκά	89,9977	78,4889	68,3584
Αντιστροφείς τάσης	3,5956	3,1358	2,731
Καλώδια	0,017	0,0124	0,0093
Σκυρόδεμα	0,0013	0,0033	0,0038
Πλαίσια Στήριξης	5,1193	17,2556	27,9691
Μεταφορά υλικών	1,5473	1,1273	0,847

Πίνακας 8.5.3-3: Ποσοστιαία κατανομή κόστους με χρήση mSi φωτοβολταϊκών



Σχήμα 8.5.3-3: Ποσοστιαία κατανομή κόστους με χρήση mSi φωτοβολταϊκών

Τα στοιχεία από την ποσοστιαία κατανομή κόστους έρχονται να επιβεβαιώσουν τις διάφορες μελέτες ανάλυσης του κόστους ζωής που απασχόλησαν το κεφάλαιο 6 . Οι στήλες στα σχήματα που αντιστοιχούν στις βέλτιστες οικονομικές λύσεις είναι χαρακτηριστικές των πραγματικών συνθηκών που ισχύουν στις πλείστες εγκαταστάσεις σήμερα.

Φαίνεται επίσης και η τάση που υπάρχει όσο φεύγουμε από την βέλτιστη οικονομική λύση και πλησιάζουμε την βέλτιστη περιβαλλοντική λύση. Το ποσοστό κόστους των πλαισίων στήριξης αυξάνεται και μειώνεται το αντίστοιχο των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Μάλιστα όσο μεγαλώνει και ο αριθμός των φωτοβολταϊκών παρατηρείται και μείωση του ποσοστού κόστους μεταφοράς των υλικών γιατί το κόστος κατασκευής τους είναι μακράν μεγαλύτερο του κόστους μεταφοράς τους. Ακόμα τα υπόλοιπα υλικά εκτός από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν μικρότερο κόστος μεταφοράς.

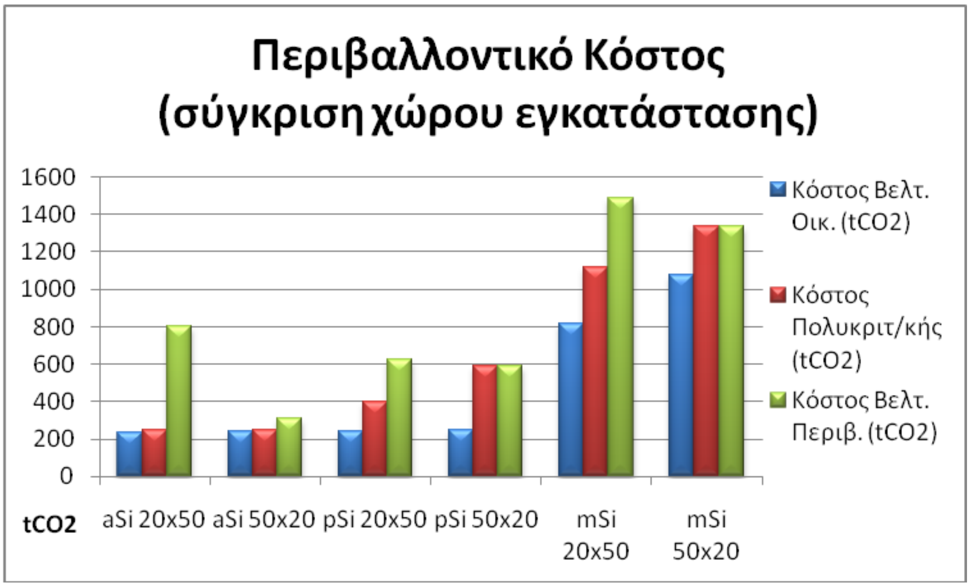
Το σκυρόδεμα και τα καλώδια της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης έχουν μηδαμινό κόστος σε σύγκριση με τα υπόλοιπα.

8.5.4 Αποτελέσματα περιβαλλοντικού κέρδους και κόστους και του οικονομικού κέρδους για εκτάσεις ίδιου εμβαδού, διαφορετικών διαστάσεων.

Οι διαστάσεις του χώρου εγκατάστασης, σε συνδυασμό με τον προσανατολισμό του, παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην τελική διάταξη των φωτοβολταϊκών. Επιλέχθηκαν δύο χώροι εγκατάστασης διαστάσεων 20 μέτρα (Νότια όψη) επί 50 μέτρα (Δυτική όψη) και 50 μέτρα (Νότια όψη) επί 20 μέτρα (Δυτική όψη).Για την σειρά αυτή θεωρήθηκε ότι τα φωτοβολταϊκά κατασκευάστηκαν και ανακυκλώθηκαν στην Γερμανία.

	aSi 20x50	aSi 50x20	pSi 20x50	pSi 50x20	mSi 20x50	mSi 50x20
Κόστος Βελτ. Οικ. (tCO_2)	237,94	239,17	244,72	250,82	813,15	1.073,03
Κόστος Πολυκρ/ρια (tCO_2)	251,48	250,39	399,56	589,09	1.116,11	1.335,94
Κόστος Βελτ. Περιβ. (tCO_2)	802,03	312,67	625,25	589,28	1.485,38	1.335,31

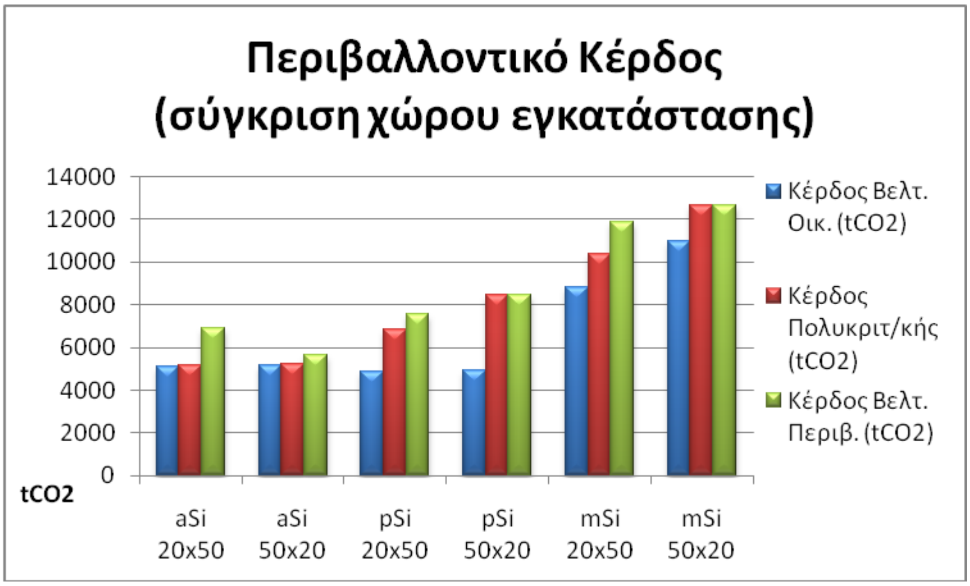
Πίνακας 8.5.4-1: Περιβαλλοντικό κόστος ανά τεχνολογία για διαφορετικούς χώρους εγκατάστασης



Σχήμα 8.5.4-1: Περιβαλλοντικό κόστος ανά τεχνολογία για διαφορετικούς χώρους εγκατάστασης

	aSi 20x50	aSi 50x20	pSi 20x50	pSi 50x20	mSi 20x50	mSi 50x20
Κέρδος Βελτ. Οικ. (tCO_2)	5.126,24	5.141,65	4.875,43	4.955,32	8.811,12	11.001,73
Κέρδος Πολυκρ/ρια (tCO_2)	5.186,71	5.211,88	6.819,06	8.469,28	10.396,11	12.623,2
Κέρδος Βελτ. Περιβ. (tCO_2)	6.911,67	5.634,77	7.566,97	8.469,08	11.846,76	12.623,87

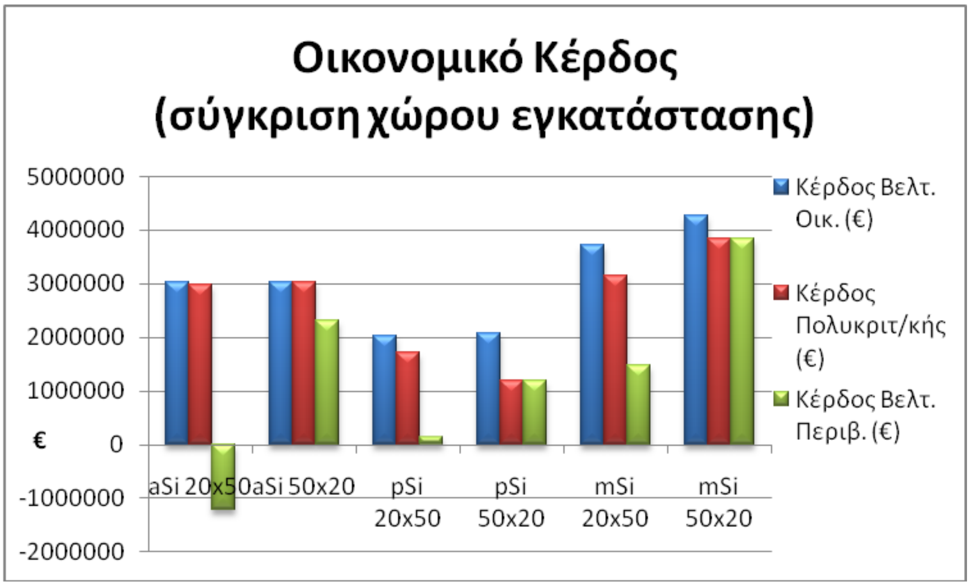
Πίνακας 8.5.4-2: Περιβαλλοντικό κέρδος ανά τεχνολογία για διαφορετικούς χώρους εγκατάστασης



Σχήμα 8.5.4-2: Περιβαλλοντικό κέρδος ανά τεχνολογία για διαφορετικούς χώρους εγκατάστασης

	aSi 20x50	**aSi 50x20**	**pSi 20x50**	**pSi 50x20**	**mSi 20x50**	**mSi 50x20**
Κέρδος Βελτ. Οικ. (€)	3.020.832,6	3.030.724,7	2.026.031,8	2.083.677	3.726.607	4.260.701
Κέρδος Πολυκρ/ρια (€)	2.982.117,7	3.027.148,6	1.716.543,4	1.201.853	3.145.325	3.848.489
Κέρδος Βελτ. Περιβ. (€)	-1.205.138	2.321.944,7	148.795,63	1.201.845	1.482.221	3.848.515

Πίνακας 8.5.4-3: Οικονομικό κέρδος ανά τεχνολογία για διαφορετικούς χώρους εγκατάστασης

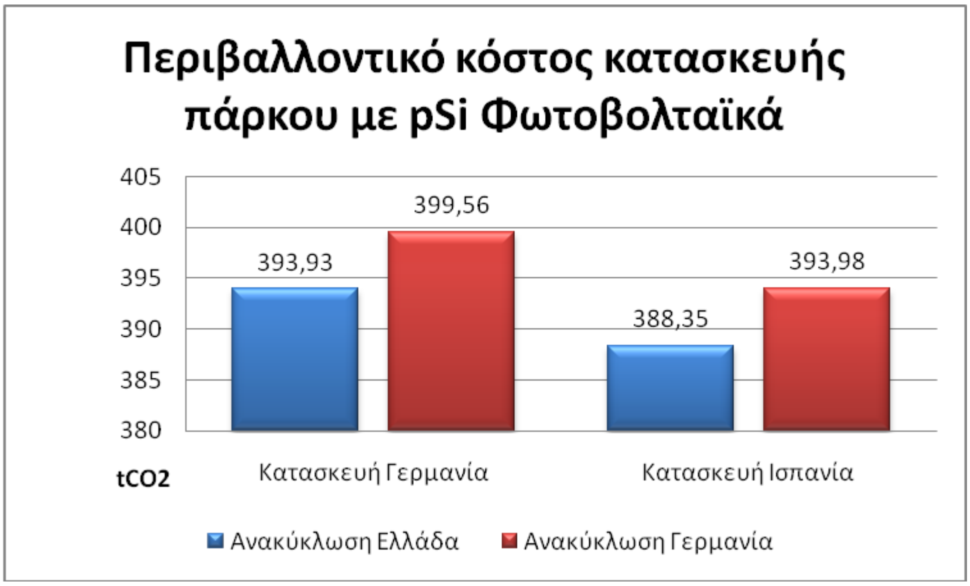


Σχήμα 8.5.4-3: Οικονομικό κέρδος ανά τεχνολογία για διαφορετικούς χώρους εγκατάστασης

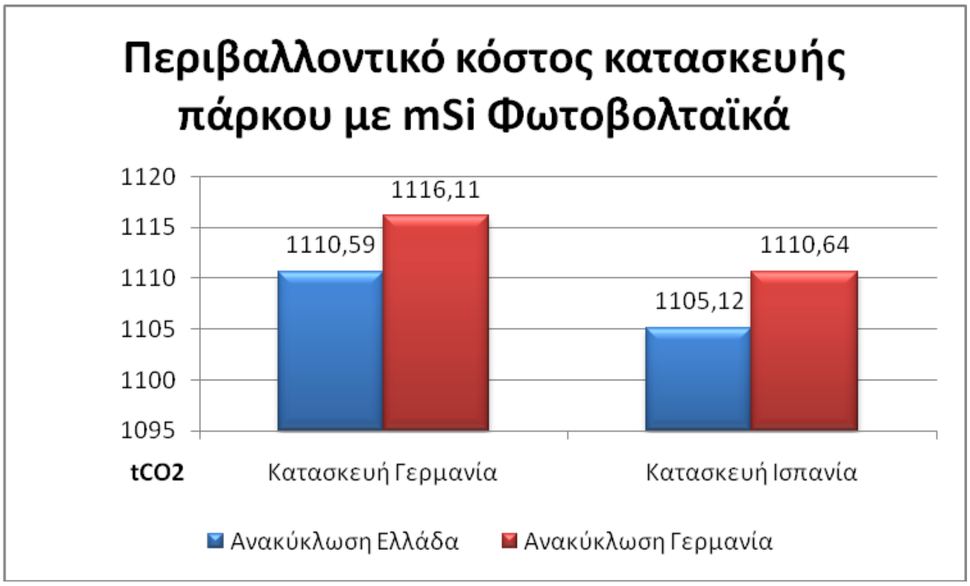
Οι διαστάσεις του χώρου παίζουν σημαντικότατο ρόλο στο τελικό περιβαλλοντικό και οικονομικό κέρδος. Όπως φαίνεται και στα σχήματα, όταν ο χώρος έχει μεγαλύτερη Νότια πλευρά βοηθάει στην αύξηση του κέρδους κυρίως λόγω της λιγότερης σκίασης που προκύπτει όταν δεν τοποθετούνται πολλές σειρές φωτοβολταϊκών στο χώρο.

8.5.5 Αποτελέσματα σύγκρισης συνολικού Περιβαλλοντικού κόστους εγκατάστασης ανά χώρα ανακύκλωσης

Ο προσδιορισμός της ανάγκης η μη κατασκευής μονάδας ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα ήταν ο σκοπός της επόμενης σειράς πειραμάτων. Με τον ρυθμό ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στην χώρα, σίγουρα όχι σήμερα, αλλά γύρω στο 2030 όπου πολλές από τις εγκαταστάσεις θα ολοκληρώνουν τον κύκλο παραγωγής ενέργειας, θα είναι ένα μεγάλο δίλημμα η τελική αξιοποίηση των φωτοβολταϊκών. Για αυτή την σειρά πειραμάτων θεωρήθηκε ότι ο χώρος εγκατάστασης έχει διαστάσεις 20 μέτρα (Νότια όψη) επί 50 μέτρα (Δυτική όψη).



Σχήμα 8.5.5-1 Περιβαλλοντικό κόστος κατασκευής πάρκου με φωτοβολταϊκά pSi

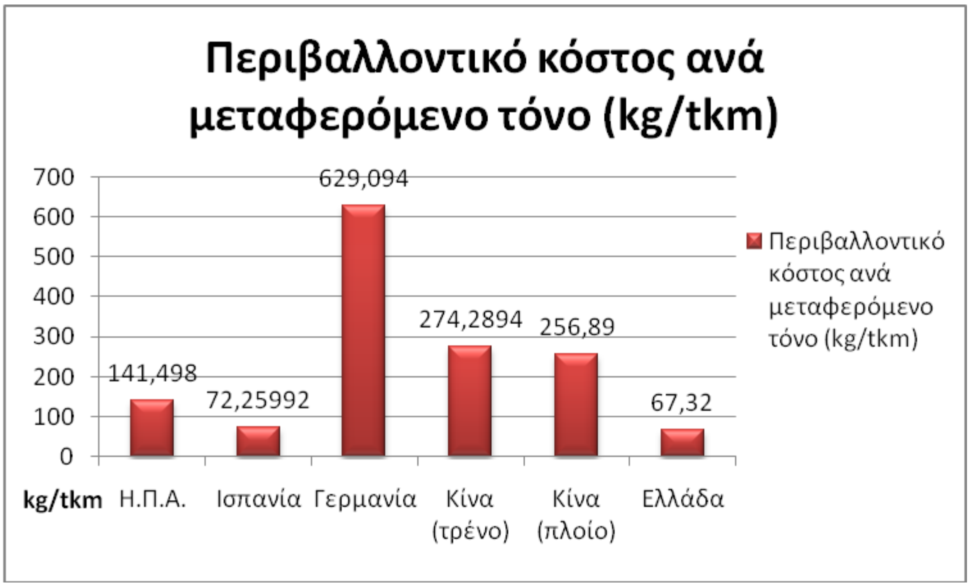


Σχήμα 8.5.5-2 Περιβαλλοντικό κόστος κατασκευής πάρκου με φωτοβολταϊκά mSi

Στους πίνακες και τα σχήματα διακρίνεται ότι η ανακύκλωση στην Γερμανία των φωτοβολταϊκών τεχνολογίας πολυκρυσταλλικού Πυριτίου προσθέτει στο συνολικό κόστος της εγκατάστασης 5,63 τόνους ΔτΑ έναντι της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα. Αυτό οφείλεται αποκλειστικά στην μεταφορά των φωτοβολταϊκών στο χώρο ανακύκλωσης. Η αντίστοιχη επιβάρυνση για τα φωτοβολταϊκά τεχνολογίας μονοκρυσταλλικού Πυριτίου είναι 5,52 τόνοι ΔτΑ. Η μικρή διαφορά στην τιμή έχει να κάνει καθαρά με τις διαστάσεις και το βάρος των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

8.5.6 Αποτελέσματα σύγκρισης Περιβαλλοντικού κόστους εγκατάστασης ανά χώρα κατασκευής

Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 8.3.1, στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν πολλά σενάρια μεταφοράς φωτοβολταϊκών από διάφορους προορισμούς και με διάφορα μέσα μεταφοράς στον χώρο εγκατάστασης στην περιοχή των Χανίων. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στο πιο κάτω σχήμα.



Σχήμα 8.5.6-1 Περιβαλλοντικό κόστος ανά μεταφερόμενο τόνο (kg/tkm) ανά χώρα προέλευσης προϊόντων

Φαίνεται ξεκάθαρα από το σχήμα 8.5.6-1 ότι η απόσταση από το εργοστάσιο παραγωγής των φωτοβολταϊκών έως το χώρο εγκατάστασης δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο όσο τα μέσα μεταφοράς. Σίγουρα είναι εύκολο να ειπωθεί ότι το ιδανικό σενάριο μεταφοράς θα ήταν να κατασκευάζονταν τα φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα, αλλά κάτι που δεν διαφαίνεται στα στοιχεία είναι ποιο θα ήταν το οικολογικό κόστος κατασκευής και συντήρησης μια τέτοιας μονάδας παραγωγής.

Η ύπαρξη μιας τέτοιας μονάδας στην Ισπανία και η μικρή σχετικά επιβάρυνση (+ ~5kg/tkm) από το σενάριο να υπήρχε αντίστοιχη στην Ελλάδα σίγουρα δείχνει πιο περιβαλλοντικά συμφέρουσα. Αυτό πάντως που προκαλεί θαυμασμό είναι το τεράστιο κόστος μεταφοράς αγαθών από την Γερμανία, γνωρίζοντας μάλιστα ότι είναι ένα δρομολόγιο που επιλέγεται από τις παραπάνω βιομηχανίες για μεταφορά προϊόντων.

9. Συμπεράσματα

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι για την επιτυχή εφαρμογή μιας τεχνολογίας πρέπει να καλύπτεται από το εξής τρίπτυχο: να είναι οικονομικά συμφέρουσα, να είναι κοινωνικά αποδεκτή και περιβαλλοντικά αειφόρα. Τα φωτοβολταϊκά καλύπτουν τις τρεις αυτές πτυχές αλλά υπάρχουν και σκιές όσο αφορά την περιβαλλοντική αειφορία. Ο μεγάλος χρόνος ενεργειακής αποπληρωμής που έχουν σε σύγκριση με άλλες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας τους θα φέρει σε δύσκολη τους υποστηριχτές τους και αν η τεχνολογία δεν προχωρήσει στην παραγωγή αποδοτικών φωτοβολταϊκών με χαμηλότερο περιβαλλοντικό κόστος. Μέχρι την παραγωγή όμως τέτοιων φωτοβολταϊκών, είναι εφικτή και αναγκαία η σχεδίαση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων με πιο περιβαλλοντικά φιλική προσέγγιση αντί των στεγνά οικονομικών κριτηρίων που επικρατούν σήμερα.

Το πιο σημαντικό συμπέρασμα από τα αποτελέσματα της μελέτης είναι η ανάγκη σύμπλευσης του οικονομικού οφέλους με το περιβαλλοντικό. Αν οι χρηματοδοτήσεις δίνονται με γνώμονα όχι μόνο το οικονομικό κέρδος ή αν για παράδειγμα βρεθεί τρόπος να μειωθεί το οικονομικό κόστος των πλαισίων στήριξης έτσι ώστε να κοστίζουν ανάλογα με το περιβαλλοντικό τους κόστος και όχι με βάση τους νόμους της αγοράς, τότε θα είναι ένα σημαντικό βήμα για πιο πράσινα φωτοβολταϊκά πάρκα. Σίγουρα τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχουν και περιπτώσεις όπου οι βέλτιστες οικολογικές λύσεις είναι οικονομικά ζημιογόνες. Τέτοιες λύσεις και πάλι δεν είναι αποδεκτές γιατί δεν καλύπτουν την πρώτη πτυχή για την επιτυχημένη ανάπτυξη μιας τεχνολογίας. Βοηθούν όμως στην εύρεση του μέτρου, της πολυκριτήρια λύσης.

Όσο αφορά τις μεταφορές των προϊόντων, είναι προτιμότερο να επιλέγονται διαδρομές και μέσα μεταφοράς που να μην επιβαρύνουν τόσο το περιβάλλον. Σε ένα πραγματικό αειφόρο σχεδιασμό θα πρέπει όλες οι ενέργειες να γίνονται όσο το δυνατό πιο φιλικές περιβαλλοντικά. Δεν γίνεται να δημιουργείται πρόβλημα την στιγμή που εφαρμόζεται λύση. Θα πρέπει να δοθούν επιπρόσθετα κίνητρα για την καλύτερη σχεδίαση των διαδρομών και των μέσων έτσι ώστε να μην επιβαρύνεται ούτε το οικονομικό κόστος κατασκευής της εγκατάστασης αλλά ούτε και το περιβαλλοντικό.

Τελευταίο συμπέρασμα που βγαίνει από την παρούσα εργασία είναι η ανάγκη μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής για μια μονάδα ανακύκλωσης στον Ελληνικό χώρο. Η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στην χώρα προς το παρών αποκρύπτει το πρόβλημα που θα προκύψει σε κάποια χρόνια για ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ο σωστός σχεδιασμός ια βοηθήσει στο να παραμείνουν «πράσινα» σε όλο τον κύκλο ζωής τους. Η αγνόηση του προβλήματος αυτού μπορεί να οδηγήσει κάποια μέρα σε περιβαλλοντικό εφιάλτη.

10. Μελλοντική Επέκταση

Η παρούσα εργασία μπορεί να είναι η βάση μιας πιο ευρείας έρευνας όσο αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών αλλά και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το υπάρχον λογισμικό μπορεί να εξελιχθεί ως ένα λογισμικό ανάλυσης κύκλου ζωής που να μπορεί να δώσει πιο ακριβή στοιχεία που να αφορούν την Ελληνική πραγματικότητα. Θα μπορούσε μάλιστα με πρόσθετη οικονομική και περιβαλλοντική μοντελοποίηση άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας να προτείνει άλλες πιο οικονομικές ή περιβαλλοντικές λύσεις και επενδυτικές προτάσεις.

Μπορούν να προστεθούν και άλλα κριτήρια στην πολυκριτήρια λύση εκτός από τα περιβαλλοντικά και οικονομικά. Για παράδειγμα θα μπορούσε να προστεθεί και κριτήριο ενσωμάτωσης του ενεργειακού πάρκου στο δίκτυο που να βοηθήσει στην εύρεση κατάλληλης τοποθεσίας για την κατασκευή του.

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε κυρίως σε τρεις τεχνολογίες φωτοβολταϊκών και συγκεκριμένα τεχνολογίες Πυριτίου. Νέες τεχνολογίες οργανικών φωτοβολταϊκών (κυρίως) βρίσκονται σε εργαστηριακό στάδιο. Η μοντελοποίηση αυτών των τεχνολογιών σε συνδυασμό στο λογισμικό που αναπτύχθηκε θα μπορούσε να βοηθήσει στην προώθηση τους στο ευρύ κοινό και στην αναγνώριση που γίνεται και στην Κρήτη για την ανάπτυξη τους.

11. Βιβλιογραφία

[1.1-1] Benjamin K. Sovacool, Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey

[1.2-1] Πηγή : Morini, M., «Atlante di Storia dell' Urbanistica», εκδόσεις Hoepli, Milano

[1.2-2] Παπάζογλου Αριστόδημος, «Ο Αριστοτέλης Πολεοδόμος», περιοδικό «ΙΣΤΟΡΙΑ Εικονογραφημένη», Έκδοση της ΠΑΠΥΡΟΣ ΠΡΕΣΣ, τεύχος 296, Φεβρουάριος 1993

[1.2-3] Παπαθανασίου Μ.Α., «Η Χρήση της Ηλιακής Ενέργειας στη Θέρμανση των Οικιών», 2008, http://www.diplomatikoperiskopio.com/index.php?option=com_content&view=article&id=213:2008-07-15-09-31-25&catid=48:2008-05-31-14-25-37&Itemid=76 στις 24 Οκτωβρίου 2010.

[1.2-4] «Ιστορία της Ανακάλυψης του Φωτοβολταϊκού Φαινομένου», Πηγή: http://www.selasenergy.gr/history.php στις 24 Οκτωβρίου 2010.

[1.2-5] Κορνελάκη Ελισάβετ, «Ανάλυση Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκού Συστήματος στην Περιοχή της Κρήτης», 2009, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης – Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος – Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων

[2.3-1] "Glossary of Meteorology of the American Meteorological Society", http://amsglossary.allenpress.com/glossary/search?id=optical-air-mass1 στις 23 Οκτωβρίου 2010

[3.2.2-1] Πηγή: http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php

[3.3.2-1] Πηγή: http://greenenergia.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=36&Itemid=47

[4.2-1] Πηγή: http://www.epa.gov/nrmrl/lcaccess/pdfs/600r06060.pdf

[4.2-2] Πηγή: http://www.setac.org

[4.3-1] Πυροβολάκης Α.Α & Γεωργακέλλος Δ.Α, 2005]

[4.3-2] Πηγή: http://aix.meng.auth.gr/helcare/LCA/OriothethshSysthmatos.pdf

[6.2-1] PV FAQs , The National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy

[6.2-2] Πηγή: http://engineering.electrical-equipment.org/energy-efficiency-news/c02-emission-by-countries.html

[6.3-1] Optimizing Greenhouse Gas Mitigation strategies to Suppress Energy Cannibalism, J.M.Pearce, Department of Mechanical and Material Engineering Queens University, Kingston, Ontario, Canada

[6.5-1] Ίδια με [6.2-2]

[6.6.1-1] Rafael Garcia-Valverde, Judith A. Cherni, Antonio Urbina: Life cycle analysis of organic photovoltaic technologies

[6.6.1-2] Πηγή: http://www.renewable-energy-sources.com/2009/07/30/pv-panels-efficiency-degradation-factors/

[6.6.1-3] Πηγή: http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php#bookmark1

[6.6.1-4] Μπάλας Κωνσταντίνος, Σημειώσεις μαθήματος "Ηλεκτρονική 1", Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνείο Κρήτης

[6.6.1-5] Σταυρακάκης Γεώργιος, Σημειώσεις μαθήματος "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας", Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνείο Κρήτης

[6.6.1-6] Πηγή: http://en.wikipedia.org/wiki/Amorphous_silicon#Applications

[6.6.1-7] A. Schönecker*, L. Laas, A. Gutjahr, M. Goris, P. Wyers, G. Hahn, D. Sontag: Ribbon-Growth-on-Substrate: Status, Challenges and Promises of High Speed Silicon Wafer Manufacturing

[6.6.1-8] W. Schmidt, B. Woesten, J.P. Kalejs: Manufacturing technology for ribbon silicon (EFG) wafers and solar cells

[6.6.1-9] Η εικόνα για την μέθοδο RGS ήταν από την ιστοσελίδα www.solwafer.eu και η αντίστοιχη της μεθόδου EFG από την ιστοσελίδα www.pveducation.org

[6.6.1-10] E.A. Alsema, M. J. de Wild-Scholten: Environmental Life Cycle Assessment of Advanced Silicon Solar Cell Technologies

[6.6.1-11] Πηγή: http://www.solarserver.com/knowledge/basic-knowledge/photovoltaics.html

[6.6.1-12] Sergio Pacca, Deepak Sivaraman, Gregory A. Keoleian: Life Cycle Assessment of the 33 kW Photovoltaic System on the Dana Building at the University of Michigan: Thin Film Laminates, Multi-crystalline Modules, and Balance of System Components

[6.6.1-13] Schaefer H, Hagedorn G. Hidden energy and correlated environmental characteristics of P.V. power generation. Renewable Energy 1992;2(2):159–66.

[6.6.1-14] Mathur J, Bansal NK, Wagner HJ. Energy and environmental correlation for renewable energy systems in India. Energy Sources 2002;24:19–26.

[6.6.1-15] Muneer T, Younes S, Lambert N, Kubie J. Life cycle assessment of a mediumsized photovoltaic facility at a high latitude location. IMechE Journal of Power and Energy 2006;220:517–24.

[6.6.1-16] Kannan R, Leong KC, Osman R, Ho HK, Tso CP. Life cycle assessment study of solar PV systems: an example of a 2 7 kWp distributed solar PV system in Singapore. Solar Energy 2006;80(5):555–63

[6.6.1-17] Vasilis M. Fthenakis, Hyung Chul Kim, and Erik Alsema: Emissions from Photovoltaic Life Cycles

[6.6.1-18] Ito M, Kato K, Sugihara H, Kichimi T, Song J, Kurokava K. A preliminary study on potential for very large-scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system in the Gobi desert from economic and environmental view points. Solar Energy Materials & Solar Cells 2003;75:507–17

[6.6.1-19] Hondo H. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems Japanese case. Energy 2005;30:2042–56

[6.6.1-20] Battisti R, Corrado R. Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology. Energy 2005;30:952–67

[6.6.1-21] Tripanagnostopoules Y, Souliotis M, Battisti R, Corrado A. Energy, cost and LCA results of PV and hybrid PV/T solar systems. Progress in Photovoltaics Research and Applications 2005;13:235–50

[6.6.1-22] Pacca S, Sivaraman D, Keoleian GA. Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems. Energy Policy 2007;35:3316–26

[6.6.1-23] Ito M, Kato K, Komoto K, Kichimi T, Kurokava K. A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100MW very large-scale (VLS-PV) systems in deserts using m-si, a-si CdTe and CIS modules. Progress in Photovoltaics Research and Applications 2008;16:17–30.

[6.6.1-24] Alsema EA. Energy pay back time and CO2 emissions of PV systems. Progress in Photovoltaics Research and Applications 2000;8:17–25

[6.6.1-25] Meier PJ. Life cycle assessment of electricity generation systems and applications for climate change policy analysis. Doctoral dissertation. Fusion Technology Institute University of Wisconsin, Madison; 2002

[6.6.2-1] Ίδιο με [1.2-7]

[6.6.2-2] SENSE, Sustainability Evaluation of Solar Energy Systems: LCA Analysis

[6.6.2-3] Aleksandar Pregelj, Miroslav Begovic and Ajeet Rohatgi: Impact of Inverter Configuration on pv System Reliability and energy production

[6.6.2-4] ίδιο με [6.6.1-12]

[6.6.2-5] Erik Alsema Life Cycle Assessment of PV technology: current status and further needs, SENSE Workshop, 7 September 2006, Dresden

[6.6.2-6] ίδιο με [6.6.1-17]

[6.6.3-1] Wire and Cable Insulation and Jacketing, Environmental Protection Agency (June 2008)

[6.6.4-1] LCA of Concrete (master Thesis of Janette Sjunnesson), Department of Technology and Society, Environmental and Energy Systems, LUND University

[6.6.4-2] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Γενική Διεύθυνση Ενέργειας
http://ec.europa.eu/energy/observatory/eu_27_info/doc/sweden_2010_d2008.pdf
http://ec.europa.eu/energy/observatory/eu_27_info/doc/greece_2010_d2008.pdf

[6.6.4-3] Mariska de Wild-Scholten: Life Cycle Assessment of Photovoltaics from cradle to cradle, Energy research Centre of the Netherlands (1st International Conference on PV Module Recycling, Berlin, 26 January 2010)

[6.6.5-1] 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC 2006) http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html

[6.6.5-2] Methodology for the free allocation of emission allowances in the EY ETS post 2012, Sector report for the iron ore industry, ECOFYS November 2009, By order of the European Commission http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/docs/BM%20study%20-%20Iron%20ore.pdf

[6.6.5-3] Millennium Development Goals Indicators, United Nations http://mdgs.un.org/unsd/mdg/SeriesDetail.aspx?srid=749&crid=

[6.7.1-1] Πηγή: http://en.wikipedia.org/wiki/ACEA_agreement

[6.7.1-2] Πηγή: http://ec.europa.eu/environment/air/transport/road.htm
http://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards

[6.7.1-3] Πηγή: http://en.wikipedia.org/wiki/Emission_standard#European_Union

[6.7.2-1] Environmental Life-cycle Assessment of Passenger Transportation: A Detailed Methodology for Energy, Greenhouse Gas and Criteria Pollutant Inventories of Automobiles, Buses, Light Rail, Heavy Rail and Air
UC Berkeley Center for Future Urban Transport: A Volvo Center of Excellence
UC Berkeley

[6.7.3-1] 2008 Guidelines to Defra's GHG Conversion Factors: Methodology Paper for Transport Emission Factor, Department of Environment, Food and Rural Affairs, July 2008

[6.7.3-2] Ship Emissins Study, Laboratory of Maritime Transport, National Technical University of Athens, prepared for Hellenic Chamber of Shipping, May 2008

[6.7.3.2-1] U.S. Environmental Protection Agency, U.S. Department of Energy http://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml

[6.7.3.2-2] California Energy Commission http://www.consumerenergycenter.org/transportation/consumer_tips/vehicle_energy_losses.html

[6.7.3.3-1] Πηγή: http://www.businessweek.com/globalbiz/content/mar2010/gb20100316_622801.htm

[6.8-1] Recycling of PV modules, Karsten Wambach, Sunicon AG (1st International Conference on PV Module Recycling, Berlin, 26 January 2010)

[6.8-2] ίδιο με [6.6.4-3]

[6.8-3] Held, M., 'Life Cycle Assessment of CdTe Module Recycling,' presented at the 24thEU PVSEC, Hamburg, September, 2009

[8.1-1] Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας http://www.eletaen.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=168&Itemid=93&lang=el

[8.1-2] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), Institute of Energy, Joint Research Centre of the European Commission http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmaps/eu_opt/pvgis_solar_optimum_GR.png