

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών στη Διαχείριση και
Προστασία Περιβάλλοντος**

Μεταπτυχιακή Διατριβή



**Προσδιορισμός Βαθμού Απόσβεσης Μέσω Ανάλυσης Κύκλου
Ζωής Ενός Φωτοβολταϊκού Πλαισίου από την Διαδικασία
Παραγωγής Μέχρι και το Τέλος της Ζωής του.**

Ιωάννης Δημητρίου

**Επιβλέπων Καθηγητής
Αντώνης Ζορπάς**

Δεκέμβριος 2017

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών στη Διαχείριση και
*Προστασία Περιβάλλοντος***

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**Προσδιορισμός Βαθμού Απόσβεσης Μέσω Ανάλυσης Κύκλου
Ζωής Ενός Φωτοβολταϊκού Πλαισίου από την Διαδικασία
Παραγωγής Μέχρι και το Τέλος της Ζωής του.**

Ιωάννης Δημητρίου

**Επιβλέπων Καθηγητής
Αντώνης Ζορπάς**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στη Διαχείριση και Προστασία Περιβάλλοντος από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Δεκέμβριος 2017

ΛΕΥΚΗ ΣΕΛΙΔΑ

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη είχε ως στόχο να προσδιορίσει τον βαθμό απόσβεσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μέσω την ανάλυσης κύκλου ζωής. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός επιλέχθηκε ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης ανάλυσης κύκλου ζωής, το πρόγραμμα GaBi™. Στο πρόγραμμα εισάγαμε βιβλιογραφικά ποσοτικά δεδομένα για ένα πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο, με σκοπό να εξάγουμε τα αποτελέσματα της μελέτης. Τα αποτελέσματα, μετά το πέρας της μελέτης, είναι ότι ο βαθμός απόσβεσης είναι 4.13 χρόνια, για το συγκεκριμένο μοντέλο φωτοβολταϊκού πλαισίου στο συγκεκριμένο σημείο όπου εγκαταστάθηκε.

Summary

The scope of this study was to determine the energy payback time of a photovoltaic panel through life cycle analysis. To achieve this goal, a life cycle analysis modeling program, the GaBi™ program, was selected. We introduce bibliographic quantitative data to the program, for a polycrystalline photovoltaic module in order to extract the results of the study. The results, at the end of the study, are that energy payback time is 4.13 years, for the particular photovoltaic panel at the point where it was installed.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω για την βοήθεια και στήριξη του για την μελέτη αυτή τον επιβλέπων καθηγητή κ. Αντώνη Ζορπά. Επίσης να ευχαριστήσω την γυναίκα μου για την υπομονή και την στήριξη της.

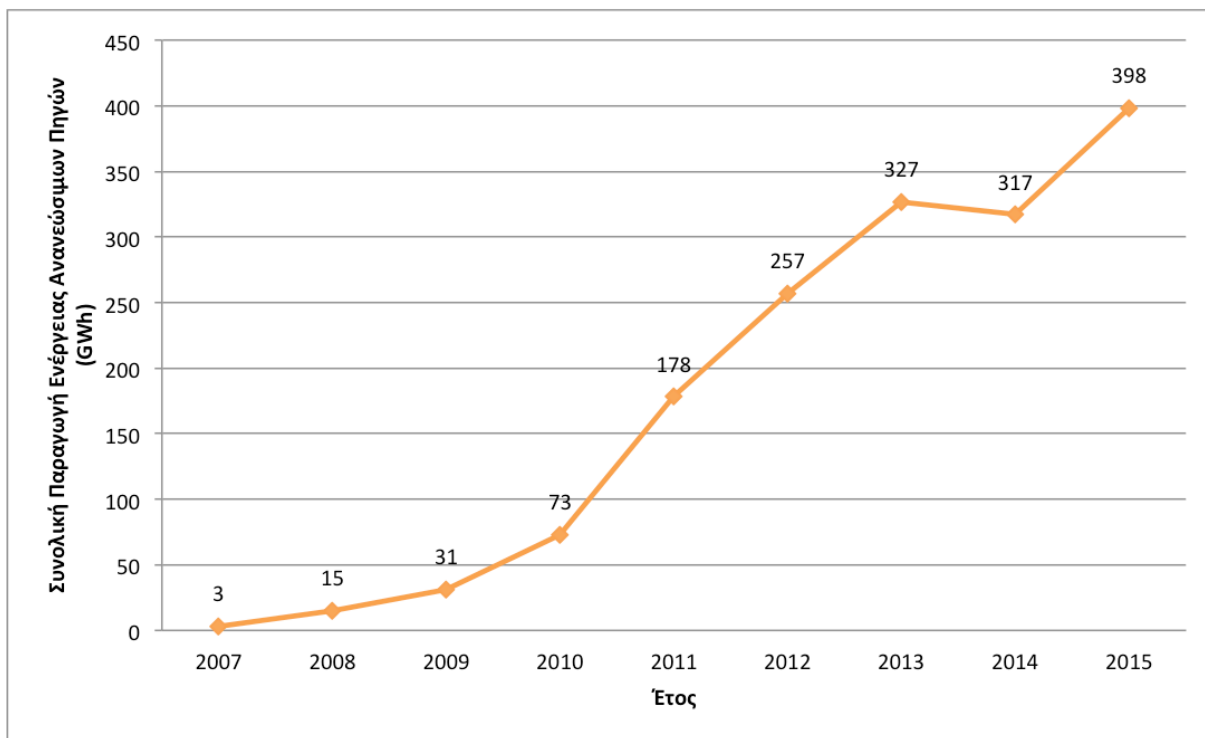
Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2 Φωτοβολταϊκή Ενέργεια	3
2.1 Γενικά.....	3
2.2 Ιστορική Αναδρομή.....	4
2.3 Σημερινή Κατάσταση	5
2.4 Νομοθεσία.....	7
2.4.1 Ευρωπαϊκή Νομοθεσία.....	7
2.4.2 Κυπριακή Νομοθεσία	8
2.5 Εθνικό Σχέδιο Δράσης.....	9
2.5.1 Μέτρα Επίτευξης Στόχων	9
Κεφάλαιο 3 Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία.....	10
3.1 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο	10
3.2 Διαδικασίες Κατασκευής Πλακιδίων	12
3.2.1 Σχηματισμός Ράβδων	14
3.2.2 Διαμόρφωση και Κατασκευή πλακιδίων.....	15
3.2.3 Κατασκευή πλακιδίων (wafers)	16
3.3 Ηλιακές Κυψέλες.....	17
3.3.1 Φωτοβολταϊκές κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου.....	19
3.3.2 Πολυκρυσταλλικές Ηλιακές Κυψέλες Πυριτίου.....	20
3.4 Πολυκρυσταλλικό Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο Πυριτίου	22
Κεφάλαιο 4 Ανάλυση Κύκλου Ζωής.....	22
4.1 Εισαγωγή.....	23
4.1.1 Κύρια Στάδια AKZ.....	23
4.1.1.1 Απογραφική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory Analysis)	23
4.1.1.2 Ανάλυση των Επιπτώσεων του Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Assessment) ...	24
4.1.1.3 Εμνηνεία Κύκλου Ζωής (Life Cycle Interpretation).....	24
4.1.2 Μεθοδολογία της AKZ.....	24
4.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών Συστημάτων.....	26
4.2.1 Στάδια Κύκλου Ζωής	28
4.2.1.1 Εξόρυξη Πυριτίου	29
4.2.1.2 Παραγωγή μεταλλουργικού πυριτίου.....	29
4.2.1.3 Καθαρισμός πυριτίου μεταλλουργικού βαθμού.....	29
4.2.1.4 Παραγωγή πλακιδίων πυριτίου.....	30
4.2.1.5 Παραγωγή κυψέλων	30
4.2.1.6 Παραγωγή πλαισίων.....	30
4.3 Υφιστάμενες Μελέτες	31
4.4 Χρόνος Ενεργειακής Απόσβεσης.....	32
Κεφάλαιο 5 Μεθοδολογία	33
5.1 Στόχοι και Σκοπός	33
5.2 Σχεδιασμός.....	33
5.3 Μέθοδος Συλλογής Δεδομένων.....	37
5.4 Διαδικασία	38
5.5 Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....	41
5.5.1 Αξιολόγηση των Επιπτώσεων του Κύκλου Ζωής	41
5.5.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής	44
Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα	45
6.1 Αποτελέσματα.....	45
6.2 Συμπεράσματα.....	47
Βιβλιογραφία	48

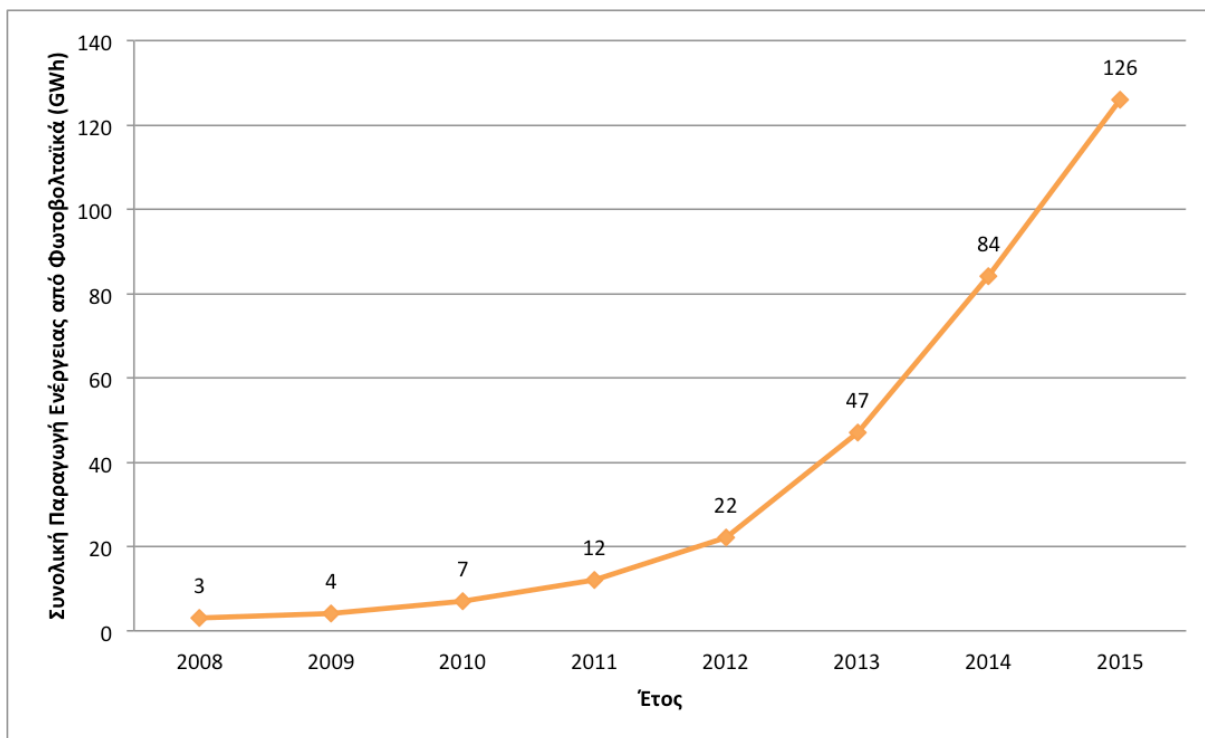
Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο άφθονη η πιο ευρέως διαδεδομένη ανανεώσιμη μορφή ενέργειας στον κόσμο. Με την πρόοδο της τεχνολογίας και τη μείωση του κόστους κατασκευής (Li et al., 2009), η ηλιακή ενέργεια μετατράπηκε σε μια τεχνολογία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που μπορεί πλέον να αναπτυχθεί σε μεγάλη κλίμακα. Στην περίπτωση που τα προβλήματα ενεργειακής ασφάλειας και κλιματικής αλλαγής γίνονται ολοένα και πιο σοβαρά, η ηλιακή ενέργεια λαμβάνει την προσοχή των κέντρων λήψεων αποφάσεων (Bhandari and Stadler, 2011; Hondo and Baba, 2010), ειδικότερα στην Ευρώπη. Η χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε ραγδαία τα τελευταία χρόνια, παρόλο που οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις δεν έχουν καθοριστεί ακόμη πλήρως. Για το λόγο αυτό πολλές μελέτες έχουν αναληφθεί πρόσφατα, στην βάση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ). Λαμβάνεται μια ευρεία ποικιλία αποτελεσμάτων κυρίως λόγω των επιμέρους χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών πλαισίων (τύπος, απόδοση, κτλ) και λόγω της μεθοδολογίας που ακολουθείται (λειτουργική μονάδα, όρια συστήματος, κτλ). Για παράδειγμα οι Peng et al. (2013), ερεύνησαν μόνο την κατανάλωση ενέργειας και τον χρόνο ενεργειακής απόσβεσης (EPBT) και το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη (GWP). Η μελέτη των Sumpster et al. (2011), επικεντρώνεται στις εκπομπές CO₂/kWh και στο χρόνο ενεργειακής απόσβεσης, ενώ οι Sherwani et al. (2010) επικεντρώνονται μόνο στα πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου. Στην Κύπρο η παραγωγή ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (εικόνα 1) και συνάμα από φωτοβολταϊκά συστήματα (εικόνα 2) αναπτύχθηκαν ραγδαία από το 2011 και μετά. Η ανάγκη για την διεξαγωγή ερευνών βασισμένων στην μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στην Κύπρο είναι μεγάλη. Μέσα από την ανάλυση κύκλου ζωής εντοπίζονται δυνατότητες βελτίωσης με στόχο την μείωση των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον και την εξάντληση των πόρων (Sherwani et al. 2010).



Εικόνα 1. Συνολική παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Κύπρο (EuroStat).



Εικόνα 2. Συνολική παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα όλων των κατηγοριών στην Κύπρο (International Energy Agency, IEA).

Κεφάλαιο 2

Φωτοβολταϊκή Ενέργεια

2.1 Γενικά

Οι σημερινοί ρυθμοί παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας αυξάνονται για να καλύψουν την ζήτηση ενέργειας που προκύπτει από την αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού και της επέκτασης των υποδομών. Η εκμετάλλευση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως τα ορυκτά καύσιμα είναι ο κυριότερος λόγος για την ατμοσφαιρική ρύπανση, την κλιματική αλλαγή και την επακόλουθη υπερθέρμανση του πλανήτη (Raugei et al., 2012). Η ανάγκη εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πόρων, για την μείωση της υποβάθμισης του περιβάλλοντος γίνεται πολύ σημαντική. Η ηλιακή ενέργεια είναι μία από αυτές τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η οποία είναι άφθονη και ανεξίτηλη. Ενώ η φωτοβολταϊκή τεχνολογία θεωρείται ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, παρόλα αυτά έχει ένα βαθμό περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ανάμεσα σε άλλες εναλλακτικές (π.χ. αιολική, πυρηνική), τα φωτοβολταϊκά θεωρούνται από τις πιο υποσχόμενες βιώσιμες ενεργειακές λύσεις (Darling et al., 2011). Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια απευθείας από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία είναι τόσο άφθονη ώστε να καλύπτει της ετήσιες ενεργειακές ανάγκες του κόσμου μόνο με μία ώρα ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στην Γη. Προκειμένου να καταγραφεί πλήρως το καθαρό περιβαλλοντικό κέρδος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί ανάλυση κύκλου ζωής. Η ανάλυση κύκλου ζωής αναγνωρίζεται ως μια ανεκτίμητη προσέγγιση για την αξιολόγηση του ενεργειακού και περιβαλλοντικού προφίλ ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (Fthenakis and Kim, 2011). Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούνται από ηλιακές κυψέλες, οι οποίες αποτελούν βασικά δομικά στοιχεία που συλλέγουν το φως του ήλιου. Συγκεκριμένα πρόκειται για διόδους ημιαγωγών μεγάλης επιφάνειας οι οποίες λόγω του φωτοβολταϊκού φαινομένου, μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια (ενέργεια των φωτονίων) σε ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος. Τα ηλιακά πλαίσια βελτιώθηκαν σημαντικά όσον αφορά την αποδοτικότητα και την ισχύ τους τις τελευταίες δεκαετίες. Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία υπήρξε η ταχύτερα αναπτυσσόμενη πηγή ενέργειας, την τελευταία δεκαετία. Τα σημαντικά κίνητρα που παρέχονται από τις κυβερνήσεις – είτε μέσω επιχορηγήσεων είτε μέσω φορολογικών ελαφρύνσεων – μαζί με την ωρίμανση

της τεχνολογίας και την μείωση των δαπανών για τις φωτοβολταϊκές τεχνολογίες, υποστήριξαν την βιομηχανία να ανταγωνιστεί συμβατικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής καθώς και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (IRENA, 2017a).

2.2 Ιστορική Αναδρομή

Προηγούμενες μελέτες που σχετίζονται με ανάλυση κύκλου ζωής φωτοβολταϊκών πλαισίων πυριτίου ανέφεραν ένα ευρύ φάσμα κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας. Ο Alsema (2000), επανεξέτασε τέτοιες αναλύσεις από την δεκαετία του 1990 και διαπίστωσε αξιοσημείωτη διακύμανση μεταξύ των ερευνητών στις εκτιμήσεις της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας (Alsema, 2000). Κανονικοποιημένες ανά τετραγωνικό μέτρο (m^2), οι ερευνητές ανέφεραν 2400-7600 MJ κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας για πολυκρυσταλλικά πλαίσια πυριτίου και 5300-16500 MJ για μονοκρυσταλλικά πλαίσια πυριτίου. Εκτός από τις αβεβαιότητες των δεδομένων, ο Alsema αποδίδει αυτές τις διαφορές κυρίως στους υπολογισμούς και τις υποθέσεις που ο κάθε ερευνητής υιοθέτησε για να μοντελοποιήσει τα στάδια καθαρισμού και κρυσταλλοποίησης του πυριτίου. Επιλέγοντας μόνο τα βήματα της διαδικασίας που απαιτούνται για την παραγωγή πυριτίου ηλιακού βαθμού οι εκτιμήσεις του Alsema ήταν 4200 και 5700 MJ/ m^2 για πλαίσια πολυκρυσταλλικού και μονοκρυσταλλικού πυριτίου αντίστοιχα (Alsema, 2000). Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν σε χρόνο απόσβεσης ενέργειας (Energy Pay Back Time, EPBT) 2,5 και 3,1 έτη και σε εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου 46 και 63 g CO₂-eq./kWh για πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά με απόδοση 13% και μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά με 14% απόδοση αντίστοιχα, υπό νότιες ευρωπαϊκές (μεσογειακές) συνθήκες (1700 kWh/ m^2 /έτος ηλιοφάνεια και λόγος απόδοσης 0,75). Τα μέρη του συστήματος ισορροπίας (Balance of System, BOS), όπως η βάση υποστήριξης, ο σκελετός και τα ηλεκτρικά στοιχεία, αντιπροσωπεύουν επιπλέον 0,7 έτη και 15 g CO₂-eq./kWh εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Οι Meijer et al. (2003) εκτίμησαν στην μελέτη τους ότι για την παραγωγή ενός πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού απαιτείται ελαφρώς ψηλότερη ενέργεια σε σύγκριση με την μελέτη του Alsema (2000). Υπολόγισαν ότι φωτοβολταϊκό πολυκρυσταλλικού πυριτίου με πάχος 270 mm, με απόδοση των κυψελών 14,5%, κατασκευάστηκε από ηλεκτρονικό πυρίτιο υψηλής καθαρότητας, το οποίο έχει ως συνεπακόλουθο μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Η εκτίμηση για τον χρόνο απόσβεσης της ενέργειας ήταν 3,5 έτη για ένα πλαίσιο, εξαιρουμένων των μερών του συστήματος. Η αύξηση στο χρόνο ενεργειακής απόσβεσης προέρχεται κυρίως από το χαμηλό επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας στην

Ολλανδία (1000 kWh/m² / έτος) σε σύγκριση με το μέσο όρο της Νότιας Ευρώπης (1700 kWh/m² / έτος) και στο μικρότερο βαθμό από την υψηλότερη ενεργειακή εκτίμηση πυριτίου (Alsema, 2000, Meijer et al., 2003). Ο Jungbluth ασχολήθηκε με μετρήσεις κύκλου ζωής διαφόρων φωτοβολταϊκών συστημάτων στις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στην Ελβετία κατά το έτος 2000 (Jungbluth, 2005).

2.3 Σημερινή Κατάσταση

Σύμφωνα με στοιχεία του Δικτύου Πολιτικής για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (REN21, 2017), η παγκόσμια εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς για το έτος 2016 ήταν τουλάχιστον 75 GW, φθάνοντας έτσι τα 303 GW παγκόσμιας συνολικής φωτοβολταϊκής ισχύς. Για τέταρτη συνεχόμενη χρονιά η Ασιατική Ήπειρος άφησε πίσω τις άλλες αγορές, αντιπροσωπεύοντας περίπου τα δύο τρίτα των παγκόσμιων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Οι πρώτες πέντε αγορές με μερίδιο περίπου 85% στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων κατά το 2016 ήταν: Κίνα, Η.Π.Α., Ιαπωνία, Ινδία και Ηνωμένο Βασίλειο (REN21, 2017). Την δεκάδα συμπληρώνουν η Γερμανία, η Νότιος Κορέα, η Αυστραλία, οι Φιλιππίνες και η Χιλή. Ενώ η Κίνα συνεχίζει να είναι κυρίαρχη τόσο στην χρήση όσο και στην κατασκευή φωτοβολταϊκών, αναδυόμενες αγορές σε όλες τις ηπείρους έχουν αρχίσει να συμβάλλουν σημαντικά στην παγκόσμια ανάπτυξη φωτοβολταϊκών συστημάτων. Σύμφωνα με έκθεση της REN21 (2017), η επέκταση των αγορών οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην αυξανόμενη ανταγωνιστικότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς επίσης στην αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας και στην ενημέρωση που τυγχάνουν για τα πλεονεκτήματα της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας τα κέντρα λήψεως αποφάσεων (π.χ. κυβερνήσεις) που επιδιώκουν την μείωση της ρύπανσης και την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Το 2016, η Κίνα πρόσθεσε 34,5 GW (αύξηση 126% σε σχέση με το 2015), αυξάνοντας έτσι την συνολική ισχύ από φωτοβολταϊκά κατά 45% φθάνοντας τα 77,4 GW, ισχύ πολύ μεγαλύτερη από οποιανδήποτε άλλη χώρα. Αν και μεγάλο μέρος της νέας ισχύς εγκαταστάθηκε μακριά από τα αστικά κέντρα, 15 επαρχίες πρόσθεσαν πάνω από 1 GW στο ενεργειακό ισοζύγιο ηλιακής ενέργειας από φωτοβολταϊκά, οι 9 από αυτές βρίσκονται στις ανατολικές περιοχές της Κίνας. Οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας συνεχίζουν να αντιπροσωπεύουν την μεγαλύτερη χωρητικότητα και ποσοστό μεγαλύτερο από το 86% της συνολικής χωρητικότητας κατά το έτος 2016 (REN21, 2017). Η ταχεία αύξηση της δυναμικότητας των φωτοβολταϊκών στην Κίνα, ως και 11 φορές από το τέλος του 2012, έχει προκαλέσει προβλήματα στο δίκτυο

ηλεκτροδότησης και καθυστερήσεις στις διασυνδέσεις. Οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (Η.Π.Α.) βρισκόταν στην δεύτερη θέση πολύ μακριά από την πρώτη θέση που κατείχε η Κίνα όσον αφορά τις νέες εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων. Για πρώτη φορά, η ηλιακή ενέργεια αποτελούσε την κυριότερη πηγή νέων ενεργειακών παραγωγικών δυνατοτήτων της χώρας. Περισσότερο από 14,8 GW ισχύ εγκαταστάθηκαν (σχεδόν διπλάσιες από το 2015) με την συνολική ισχύ να είναι στα 40,9 GW (REN21, 2017). Η επιτυχία στην κατανομή των φωτοβολταϊκών συστημάτων και η πτώση του κόστους οδήγησαν ορισμένες δημόσιες υπηρεσίες κοινής ωφελείας στις Η.Π.Α. να δημιουργήσουν τα δικά τους ηλιακά προγράμματα για να διεκδικήσουν αναθεωρήσεις ή ακυρώσεις υποστηρικτικών πολιτικών. Η αγορά της Ιαπωνίας η τρίτη μεγαλύτερη σε μέγεθος στον κόσμο το 2016. Εκτιμάται ότι το 2016 έχουν εγκατασταθεί φωτοβολταϊκά συστήματα συνολικής δυναμικότητας 8,6 GW, ανεβάζοντας την συνολική δυναμικότητα της χώρας στα 42,8 GW (REN21, 2017). Έργα μεγάλης κλίμακας οδήγησαν στην ανάπτυξη της ηλιακής φωτοβολταϊκής ενέργειας στην Ιαπωνία τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο η χώρα είχε αυξημένη ζήτηση και στα οικιακά φωτοβολταϊκά συστήματα, που αντιστοιχούσε στο 11,8% των νέων εγκαταστάσεων. Το 2012 και με την εισαγωγή συμβολαίων σταθερής τιμής αποζημίωσης (feed-in-tariff), η Ιαπωνία είχε μια απότομη αύξηση της δυναμικότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με την φωτοβολταϊκή ενέργεια να αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος. Ο μεγάλος όγκος φωτοβολταϊκών έργων και η παραγωγή τους είναι μια πρόκληση για το εύθραυστο ηλεκτρικό δίκτυο της Ιαπωνίας, οδηγώντας την κυβέρνηση να αναθεωρήσει τους κανονισμούς και να καθοδηγήσει υπηρεσίες κοινής ωφέλειας να αρνηθούν νέες διασυνδέσεις και να περιορίσουν την παραγωγή ενέργειας των υφιστάμενων μονάδων χωρίς αποζημιώσεις (REN21, 2017). Η πρώτες περικοπές των ηλιακών φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων πραγματοποιήθηκε με βάση τους νέους κανονισμούς που εφαρμόστηκαν στις αρχές του 2016. Ακόμη και με τους νέους κανονισμούς, το μερίδιο της ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά στο ενεργειακό ισοζύγιο της Ιαπωνίας αυξήθηκε στο 4,4% το 2016 (από 0,4 το 2012). Η τρίτη μεγαλύτερη αγορά το 2016 στην Ασιατική Ήπειρο ήταν η Ινδία, η οποία κατέλαβε την τέταρτη θέση παγκοσμίως στην προσθήκη νέων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Η Ινδία πρόσθεσε περίπου 4,1 GW (από τα 2 GW το 2015) φθάνοντας με εκτιμήσεις τα 9,1 GW (REN21, 2017). Η ζήτηση για μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκά έργα στην Ινδία προήλθε από την απότομη πτώση στις τιμές των φωτοβολταϊκών σε συνδυασμό με την ισχυρή πολιτική στήριξη σε τοπικό και Εθνικό επίπεδο από το 2014 και μετέπειτα (REN21, 2017). Η

Νότιος Κορέα κατά το έτος 2016 πρόσθεσε 0,9 GW και έφθασε την συνολική ενέργεια από φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στα 4,4 GW (REN21, 2017). Οι Φιλιππίνες και η Ταϊλάνδη πέρασαν τους εθνικούς τους στόχους προσθέτοντας 0,8 GW (συνολικό 0,9 GW) και πάνω από 0,7 GW (συνολικό 2,15 GW) αντίστοιχα για το 2016 (REN21, 2017). Το Πακιστάν και το Βιετνάμ είχαν πολλά έργα σε εξέλιξη μέχρι το τέλος του έτους, αλλά πολιτική αστάθεια οδήγησε σε καθυστέρηση της ανάπτυξης (REN21, 2017).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έκλεισε το 2016 με συνολική εγκατεστημένη ισχύ περίπου 106 GW σύμφωνα με εκτιμήσεις. Περίπου 5,7 GW εγκαταστάθηκαν το 2016, από τα οποία περίπου 70% συνδέθηκαν με το δίκτυο στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Γερμανία και την Γαλλία. Η Ευρώπη έχει μετατραπεί σε μια ανταγωνιστική αγορά για διάφορους λόγους. Η περιοχή βρίσκεται σε μεταβατικό στάδιο από τα κίνητρα για συμβόλαια σταθερής τιμής (feed-in-tariff) σε προσφορές και υπερτιμημένα συμβόλαια τιμής για εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών μεγάλης κλίμακας, καθώς και για την χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων για σκοπούς αυτοκατανάλωσης σε οικιακούς, εμπορικούς και βιομηχανικούς τομείς. Σύμφωνα με την έκθεση προόδου της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (EU-COM, 2017), τα ηλιακά φωτοβολταϊκά αυξήθηκαν ραγδαία και το 2015 αντιστοιχούσαν στο 12% του συνόλου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το 2013, για πρώτη φορά η ανάπτυξη τους ξεπέρασε την αντίστοιχη της στερεής βιομάζας. Το 2015, το 38% της ηλιακής φωτοβολταϊκής ενέργειας παρήχθηκε στην Γερμανία, την Ιταλία και την Ισπανία. Η ανάπτυξη αυτή της ηλιακής φωτοβολταϊκής ενέργειας οφείλεται στην ταχεία τεχνολογική πρόοδο, στη μείωση του κόστους και στο σχετικά μικρό χρονικά διάστημα που χρειάζεται για να αναπτυχθεί ένα φωτοβολταϊκό έργο. Αυτό όχι μόνο επέτρεψε την ταχεία και οικονομικά αποδοτική ανάπτυξη, αλλά επίσης συνέβαλε στο να τοποθετηθεί ο καταναλωτής στο επίκεντρο της ενεργειακής μετάβασης της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την προσπάθεια για αναδιάρθρωση της Οδηγίας για τις ανανεώσιμες πηγές (2009/28/EK) και τις προτάσεις για τους σχεδιασμούς της αγοράς.

2.4 Νομοθεσία

2.4.1 Ευρωπαϊκή Νομοθεσία

Η Οδηγία 2009/28/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, θεσπίζει κοινό πλαίσιο για την προώθηση της ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Καθορίζει υποχρεωτικούς εθνικούς στόχους για το συνολικό μερίδιο ενέργειας από ανανεώσιμες

πηγές στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση καθώς και το μερίδιο ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στις μεταφορές. Για την στατιστική μεταβίβαση μεταξύ κρατών μελών, για κοινά έργα μεταξύ κρατών μελών και με τρίτες χώρες, τις εγγυήσεις προέλευσης, τις διοικητικές διαδικασίες, την πληροφόρηση και κατάρτιση καθώς επίσης και την πρόσβαση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας για ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, η Οδηγία καθορίζει σχετικούς κανόνες. Το κάθε κράτος μέλος είναι υποχρεωμένο να θεσπίζει Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπου ορίζονται η εθνικοί συνολικοί στόχοι, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση άλλων μέτρων πολιτικής που σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση στην τελική κατανάλωση ενέργειας, και τα κατάλληλα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για να επιτευχθούν οι εθνικοί συνολικοί στόχοι, συμπεριλαμβανομένων των συνεργασιών μεταξύ τοπικών, περιφερειακών και εθνικών αρχών. Η Κύπρος θέσπισε Εθνικό Σχέδιο Δράσης τον Ιούνιο του 2010. Ο στόχος για το μερίδιο ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας το 2020 για την Κύπρο είναι 13%.

2.4.2 Κυπριακή Νομοθεσία

Στην Κυπριακή νομοθεσία υπάρχει ο νόμος N.112/2013 συμπεριλαμβανομένου και των τροποποιήσεων αυτού (Κυπριακή Δημοκρατία, 2013). Ο σκοπός του παρόντα νόμου είναι η προώθηση και η ενθάρρυνση της χρήσης ενέργειας προερχόμενη από ανανεώσιμες πηγές. Για την προώθηση της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ο νόμος N.112/13 θεσπίζει κοινό πλαίσιο όπου θέτει υποχρεωτικούς στόχους που αφορούν το συνολικό μερίδιο ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, καθορίζει κανόνες όπως την πληροφόρηση και την κατάρτιση εγκαταστατών μικρής κλίμακας συστημάτων ανανεώσιμων πηγών και την πρόσβαση στο σύστημα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές. Οι δεσμευτικοί εθνικοί στόχοι που αφορούν την Κύπρο σύμφωνα με τον Νόμο προνοούν ότι το μερίδιο της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας μέχρι το 2020 να αντιστοιχεί τουλάχιστον στο 13% και ότι το μερίδιο της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε όλες τις μορφές μεταφορών πρέπει μέχρι το 2020 να αντιπροσωπεύει ποσοστό τουλάχιστον 10% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στις μεταφορές. Βάση του Νόμου δύναται να προκύψουν καθεστώτα στήριξης για την ενθάρρυνση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως και Σχέδια Χορηγιών για την επιδότηση ή επιχορήγηση διαφόρων επενδύσεων ή δραστηριοτήτων προώθησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

2.5 Εθνικό Σχέδιο Δράσης

Η Οδηγία 2009/28/EK όπως περιγράφεται από το άρθρο 1, θεσπίζει κοινό πλαίσιο για την προώθηση της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Επίσης θέτει υποχρεωτικούς εθνικούς στόχους για το συνολικό μερίδιο ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας και το μερίδιο ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στις μεταφορές. Σύμφωνα με το άρθρο 4 της Οδηγίας 2009/28/EK το κάθε κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης οφείλει να θεσπίσει Εθνικό Σχέδιο Δράσης (ΕΣΔ) για την ανανεώσιμη ενέργεια. Το ΕΣΔ για την Κύπρο εκδόθηκε τον Ιούνιο του 2010 από το τότε λεγόμενο Υπουργείο Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού (νυν Υπουργείο Ενέργειας, Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού) και αφορά την περίοδο 2010 – 2020 (Υπουργείο Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού, Κυπριακή Δημοκρατία, 2010). Η εθνική ενεργειακή πολιτική της Κύπρου έχει ως κύριους πυλώνες: (α) την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού, (β) την ανταγωνιστικότητα και (γ) την προστασία του περιβάλλοντος. Με βάση τους πυλώνες αυτούς και την ενεργειακή πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης δημιουργήθηκαν συγκεκριμένοι ποσοτικοί και δεσμευτικοί για την Κύπρο στόχοι με ορόσημο το 2020 και αυτοί είναι:

- Συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική χρήση ενέργειας κατά 13%,
- Συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ενεργειακή κατανάλωση των οδικών μεταφορών κατά 10%, και
- Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 5% σε σχέση με το 2005, για τις κατηγορίες εκτός πεδίου εφαρμογής του Συστήματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπής Αερίων του Θερμοκηπίου.

2.5.1 Μέτρα Επίτευξης Στόχων

Στην Κύπρο από το 2000 δημιουργήθηκε το Ίδρυμα Ενέργειας Κύπρου με σκοπό την ανάπτυξη και την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το ίδρυμα δραστηριοποιείται κυρίως στην συμμετοχή σε διεθνή προγράμματα για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στην συνεργασία με Ινστιτούτα και Ιδρύματα του εξωτερικού που ασχολούνται στους ίδιους τομείς και στην παροχή τεχνικής βοήθειας και πληροφοριών που σχετίζονται με την προώθηση νέων, αποδοτικότερων ενεργειακών τεχνολογιών. Από τον Αύγουστο του 2003 ιδρύεται και λειτουργά ειδικό

ταμείο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εξοικονόμησης ενέργειας, με εφαρμογή του νόμου Ν.33(Ι)/2003, τα έσοδα του οποίου προέρχονται από την επιβολή τέλους €0.0022 ανά κιλοβατώρα που καταναλώνεται από όλους. Από τις 15 Μαΐου του 2012 το τέλος για την κατανάλωση κάθε κιλοβατώρας ανέρχεται σε €0.005. Το Σεπτέμβριο του 2013, αντικαταστάθηκε ο νόμος Ν.33(Ι)/2003 με τον Ν.112(Ι)/2013 και το ειδικό ταμείο μετονομάζεται Ταμείο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΕΞΕ). Ο κύριος σκοπός του Ταμείου είναι η ενθάρρυνση της εκμετάλλευσης των ΑΠΕ και γενικά της εξοικονόμησης ενέργειας. Με τον νόμο Ν.122(Ι)/2003 περί Ρύθμισης της Αγοράς Ηλεκτρισμού, εγκαθιδρύεται η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας Κύπρου (ΡΑΕΚ). Η ΡΑΕΚ διασφαλίζει τον ουσιαστικό και υγιή ανταγωνισμό, προστατεύει τα συμφέροντα των καταναλωτών, εξασφαλίζει την ποιότητα, την ασφάλεια, την επάρκεια, τη συνέχεια, την αξιοπιστία στην παροχή ενέργειας, καθώς επίσης ενθαρρύνει τη χρήση των ΑΠΕ. Επιπλέον, χορηγεί, ελέγχει, επιβάλλει, ανακλύει και τροποποιεί άδειες παραγωγής ενέργειας. Με το ίδιο νόμο εγκαθιδρύεται και ο Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς (ΔΣΜ). Βασικές δραστηριότητες του ΔΣΜ είναι η λειτουργία ενός αποδοτικού, συντονισμένου, ασφαλούς, αξιόπιστου και οικονομικά βιώσιμου συστήματος μεταφοράς, η διασφάλιση της ανάπτυξης και συντήρησης ενός ασφαλισμένου, αξιόπιστου, οικονομικά βιώσιμου και αποδοτικού συστήματος μεταφοράς και η πρόταση όρων και η σύναψη πρωτοκόλλων ή συμβάσεων για τη σύνδεση με το σύστημα μεταφοράς και για χρήση του, με όλους εκείνους που χρησιμοποιούν και επιζητούν να χρησιμοποιήσουν το σύστημα μεταφοράς.

Κεφάλαιο 3

Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία

3.1 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Οι ηλιακές κυψέλες λειτουργούν με την εφαρμογή του φωτοβολταϊκού φαινομένου. το οποίο ανακαλύφθηκε από τον Alexandre Edmond Becquerel το 1839. Ένας ημιαγωγός μπορεί να μετατρέψει άμεσα το ηλιακό φως σε ηλεκτρισμό εκμεταλλευόμενος την επίδραση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Με την προσθήκη ενισχυτικών σε ένα ημιαγωγό, οι ηλεκτρικές του ιδιότητες μπορούν να γίνουν

ελεγχόμενες, γεγονός που χρησιμοποιείται ευρέως στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές (Markvart, 2000).

Ένα άτομο πυριτίου έχει έλλειψη τεσσάρων ηλεκτρονίων στην εξωτερική του στιβάδα. Αυτά τα ηλεκτρόνια που λείπουν συμπληρώνονται από γειτονικά άτομα πυριτίου σχηματίζοντας δεσμούς μεταξύ των ατόμων καταλήγοντας έτσι σε κρυσταλλική δομή (Reinders, 2017). Η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου σε μια κρυσταλλική δομή κατανέμεται σε διαφορετικές ενεργειακές ζώνες. Όταν η εξωτερική στιβάδα ενός ατόμου πυριτίου γεμίσει, όπως και σε μια κρυσταλλική δομή, η ενέργεια των ηλεκτρονίων βρίσκεται στην ζώνη σθένους. Η ζώνη αγωγιμότητας είναι μια ζώνη υψηλότερης ενέργειας, η οποία διαχωρίζεται από την ζώνη σθένους με ένα κενό, χαρακτηριστικό των ημιαγωγών. Ωστόσο, προκειμένου το πυρίτιο να είναι ικανό να μεταφέρει ρεύμα, τα ηλεκτρόνια πρέπει να είναι σε θέση να κινούνται. Όταν δεσμεύονται σε μια κρυσταλλική δομή, τα ηλεκτρόνια δεν έχουν ελεύθερους χώρους για να μετακινηθούν και επομένως ένας ημιαγωγός καθαρού πυριτίου θα λειτουργήσει ως μονωτής. Το πυρίτιο και άλλοι ημιαγωγοί μπορούν να μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια μόνον εάν εισάγονται ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας ή αφαιρούνται από την ζώνη σθένους. Αυτό επιτυγχάνεται από την εισαγωγή ακαθαρσιών στο πυρίτιο. Εάν το πυρίτιο προσμιχθεί με ουσία όπου έχει πέντε ηλεκτρόνια στην εξωτερική στιβάδα (π.χ. φώσφορος), τότε τέσσερα από τα ηλεκτρόνια θα μεταφερθούν στην ζώνη σθένους του πυριτίου, ενώ το τελευταίο επιπλέον ηλεκτρόνιο θα βρει τη θέση του στην ζώνη αγωγιμότητας. Τα επιπλέον ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας είναι ελεύθερα να κινούνται με αποτέλεσμα το αρνητικό φορτίο. Έτσι το πυρίτιο μετατρέπεται σε ημιαγωγό τύπου-n. Η άλλη εναλλακτική πρακτική προσμίξεων είναι η πρόσμιξη του πυριτίου με μια ουσία όπου τα άτομα έχουν μόνο τρία ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στιβάδα (π.χ. βόριο). Δεδομένου ότι στο άτομο πυριτίου λείπουν τέσσερα ηλεκτρόνια, υπάρχει μια έλλειψη ηλεκτρονίων και έτσι θα υπάρχει μια οπή στην ζώνη σθένους. Αυτές οι οπές λειτουργούν ως κινητά, θετικά φορτισμένα σωματίδια, δημιουργώντας έτσι ένα θετικό φορτίο. Το πυρίτιο σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται ημιαγωγός τύπου-p.

Κατά την κατασκευή μιας ηλιακής κυψέλης πυριτίου, οι προσμίξεις χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν μια περιοχή τύπου-n και μια περιοχή τύπου-p. Η διεπαφή μεταξύ αυτών των δύο περιοχών ονομάζεται διακλάδωση (junction) p-n, έχοντας ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο (Gray, 2011). Από τη στιγμή που η διασταύρωση σχηματίζεται από το ίδιο υλικό σε μια κυψέλη κρυσταλλικού πυριτίου, η διακλάδωση

ονομάζεται ομοδιακλάδωση (homojunction). Στην αντίθετη περίπτωση όπου η διακλάδωση αποτελείται από δύο διαφορετικά υλικά ημιαγωγών ονομάζεται ετεροδιακλάδωση (heterojunction) (Muller et al., 2003). Το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται από τα ηλεκτρόνια στην περιοχή-n κοντά στην επιφάνεια που διαχέονται στην περιοχής-p και οι οπές που διαχέονται στην αντίθετη κατεύθυνση. Το ηλεκτρικό αυτό πεδίο δημιουργείται μέχρι τα σωματίδια δεν είναι ικανά φορτισμένα για να μετακινηθούν μεταξύ των δύο περιοχών. Ωστόσο, εάν η ηλιακή κυψέλη εκτίθεται σε ηλιακό φως, τα δεσμευμένα ηλεκτρόνια μπορεί να είναι θερμικά διεγερμένα σε υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση και να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Το ηλιακό φως μπορεί να θεωρηθεί ως μια ροή φωτονίων που φέρουν μια ορισμένη ποσότητα ενέργειας. Εάν η ενέργεια των φωτονίων υπερβαίνει την ενέργεια της ζώνης κενού (bandgap), τα ηλεκτρόνια παίρνουν ενέργεια για να μετακινηθούν από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας. Δεδομένου ότι μια οπή μένει πίσω στην ζώνη σθένους, δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών και δημιουργείται ρεύμα. Το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εξωτερικό φορτίο και να φορτίσει μεταφορείς που μετακινούνται μέσα στο σύστημα (Grey, 2011).

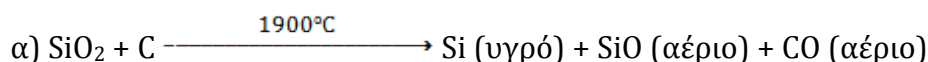
3.2 Διαδικασίες Κατασκευής Πλακιδίων

Η διαδικασία κατασκευής πλακιδίων κρυσταλλικού πυριτίου περιλαμβάνει πέντε σημαντικά βήματα:

- Επεξεργασία της άμμου για την λήψη μεταλλουργικού πυριτίου.
- Καθαρισμός.
- Παραγωγή καθαρισμένης πρώτης ύλης πυριτίου.
- Ανάπτυξη πλινθωμάτων πυριτίου, είτε μονοκρυσταλλικών είτε πολυκρυσταλλικών.
- Διαδικασία κοπής των πλινθωμάτων σε πλακίδια.

Το πρώτο βήμα για την παραγωγή πλακιδίων πυριτίου ηλιακής ποιότητας είναι η παραγωγή μεταλλουργικού πυριτίου (Metallurgical Grade Silicon – MGS). Αυτό επιτυγχάνεται σε κλίβανο υψηλών θερμοκρασιών με βυθισμένα ηλεκτρόδια από άνθρακα. Το φορτίο του κλίβανου αποτελείται από διοξείδιο του πυριτίου υψηλής καθαρότητας (SiO_2) ή χαλαζίτη αναμεμειγμένο με ξυλάνθρακα, υπολείμματα ξυλείας (ροκανίδια) και άνθρακα. Σε θερμοκρασίες άνω των 1900°C , ο άνθρακας μειώνει το

διοξείδιο του πυριτίου, όπως περιγράφεται στην χημική αντίδραση πιο κάτω, σχηματίζοντας πυρίτιο, το οποίο είναι υγρό στις υψηλές αυτές θερμοκρασίες και καθιζάνει στον πυθμένα του κλιβάνου.



Αυτή η διαδικασία απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας, περίπου 14kWh/kg και η καθαρότητα του πυριτίου είναι συνήθως γύρω στο 98%. Παρούσες είναι επίσης και άλλες χημικές αντιδράσεις. Για παράδειγμα, εάν υπάρχει υπερβολικός άνθρακας στον κλιβάνο, μπορεί να σχηματιστεί καρβίδιο του πυριτίου, όπως περιγράφεται στην χημική αντίδραση παρακάτω.



Η περίπτωση σχηματισμού καρβιδίου του πυριτίου μειώνεται εάν η συγκέντρωση διοξειδίου του πυριτίου (SiO₂) διατηρείται σε υψηλά επίπεδα.



Καθαρισμός του πυριτίου

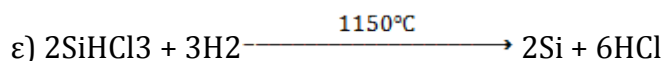
Το δεύτερο στάδιο στην παραγωγή πλακιδίων πυριτίου αποτελείται από τον καθαρισμό του μεταλλουργικού πυριτίου (MGS). Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τον καθαρισμό είναι μια διαδικασία απόσταξης τριχλωροσιλάνιου (SiHCl₃), αλλά και άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούν τετραχλωριούχο πυρίτιο (SiCl₄) ή σιλάνιο (SiH₄) επίσης εφαρμόζονται. Ξεκινώντας από το μεταλλουργικό πυρίτιο, το τριχλωροσιλάνιο σχηματίζεται σύμφωνα με την χημική αντίδραση:



Το τριχλωροσιλάνιο, το οποίο είναι υγρό σε θερμοκρασία δωματίου, καθαρίζεται με κλασματική απόσταξη.

Τροφοδότηση με πυρίτιο

Η παραγωγή ηλιακού πυριτίου (Solar Grade Silicon – SoG-Si) πραγματοποιείται με την μείωση του καθαρισμένου τριχλωροσιλανίου με υδρογόνο διαμέσου μιας διαδικασίας χημικής εναπόθεσης ατμού στους 1150°C. Το πυρίτιο που εναποτίθεται σε ράβδους καθαρού πυριτίου θερμαίνεται ηλεκτρικά, λειτουργώντας ως επιφάνεια πυρήνωσης για την εναπόθεση σύμφωνα με την αντίδραση:



Η διαδικασία διαρκεί αρκετές ώρες και παράγει μακριές ράβδους (μήκους αρκετών μέτρων) από καθαρό πυρίτιο (σε μορφή πολυπυριτίου) με διάμετρο έως 20 cm. Οι ράβδοι πυριτίου έπειτα διασπώνται σε κομμάτια στο μέγεθος που απαιτείται για να χρησιμοποιηθούν στην ανάπτυξη πλινθωμάτων. Το άνυδρο υδροχλώριο που παράγεται στην αντίδραση ε) μπορεί να ανακυκλωθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί για την παραγωγή τριχλωροσιλανίου στην αντίδραση της εξίσωσης δ). Αυτή η διαδικασία, γνωστή και ως διαδικασία Siemens, είναι η καλύτερη τεχνική για την παραγωγή πρώτης ύλης πυριτίου για τις φωτοβολταϊκές εφαρμογές.

3.2.1 Σχηματισμός Ράβδων

Μονοκρυσταλλικές ράβδοι

Οι μονοκρυσταλλικές ράβδοι πυριτίου για φωτοβολταϊκές εφαρμογές αναπτύσσονται με την μέθοδο Czochralski (Cz). Η μέθοδος Czochralski ξεκινά με την τοποθέτηση ενός μικρού κομματιού μονοκρυσταλλικού πυριτίου γνωστού προσανατολισμού σε τηγμένο πυρίτιο και έπειτα τραβώντας αργά το αυξανόμενο κρύσταλλο διατηρώντας ταυτόχρονα μια σταθερή περιστροφή, σε αντίθετες κατευθύνσεις, τόσο της ράβδου όσο και του δοχείου που περιέχει το τηγμένο πυρίτιο. Η διαδικασία ανάπτυξης μιας μονοκρυσταλλικής ράβδου πυριτίου είναι πολύ αργή και απαιτεί μεγάλης ποσότητα ενέργειας, συνήθως από 40-100 kWh/kg (Jester, 2002). Για να τηρούνται οι προδιαγραφές για ψευδοτετράγωνα πλακίδια μήκους 156 mm, οι ράβδοι πρέπει να έχουν διάμετρο 200 mm ή 220 mm.

Πολυκρυσταλλικές Ράβδοι

Οι ράβδοι πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι σχετικά φθηνότεροι για να τα παραχθούν από ότι τα μονοκρυσταλλικά κυρίως λόγω της απλούστερης διαδικασίας που

ακολουθείται και του εξοπλισμού, της χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας και του μεγαλύτερου μεγέθους της ράβδου, φθάνοντας στις μέρες μας περισσότερο από 800 kg ανά παρτίδα. Η μέθοδος βασίζεται στην ανάπτυξη μεγάλων ράβδων πυριτίου (κυρίως διαστάσεις 950 X 950 X 400 mm), ελέγχοντας την απώλεια θερμότητας από το τήγμα σε ένα δοχείο με τηγμένο διοξείδιο του πυριτίου ώστε να διατηρηθεί μια επίπεδη διεπαφή στερεού-υγρού και για να προωθηθούν κόκκοι στήλης πυριτίου μήκους μερικών χιλιοστών (Ferrazza, 2005). Μετά από την πλήρη στερεοποίηση και ψύξη, η ράβδος κόβεται σε κομμάτια διαστάσεων 156 × 156 × 350 mm (Verlinden, 2017).

3.2.2 Διαμόρφωση και Κατασκευή πλακιδίων

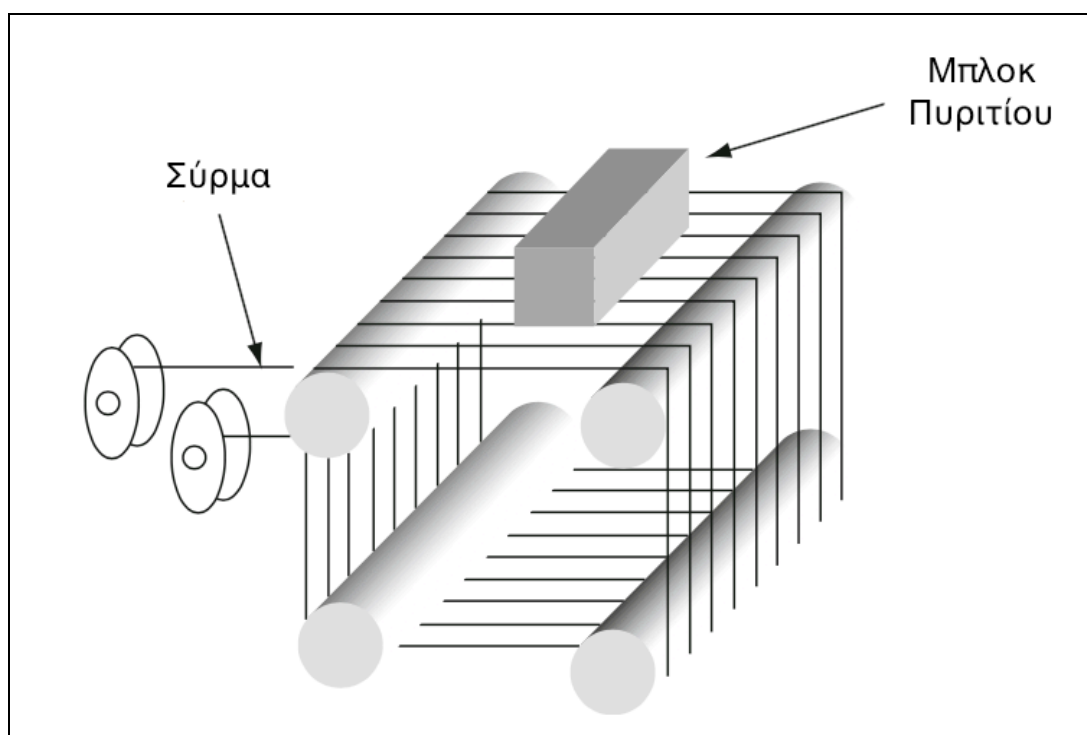
Η πλειοψηφία των πλακιδίων πυριτίου που χρησιμοποιούνται για ηλιακές κυψέλες είναι τα μονοκρυσταλλικά πλακίδια πυριτίου (μέθοδος Czochralski) ή τα πολυκρυσταλλικά πλακίδια πυριτίου. Μέχρι το 1995 τα μονοκρυσταλλικά πλακίδια πυριτίου της μεθόδου Czochralski αντιπροσώπευαν το 60% των πλακιδίων που χρησιμοποιήθηκαν από την βιομηχανία κατασκευής φωτοβολταϊκών και τα πολυκρυσταλλικά πλακίδια πυριτίου γύρω στο 25%. Η εικόνα αυτή όμως άλλαξε με την ραγδαία ανάπτυξη των πολυκρυσταλλικών πλακίδια πυριτίου που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο (Jester, 2002). Τα περισσότερα πλακίδια που παράγονται στα εργοστάσια έχουν διαστάσεις σχετικές με τις διαμέτρους των κυλίνδρων μονοκρυσταλλικού πυριτίου (5-6 ίντσες), οι οποίες έχουν επηρεάσει τα πρότυπα για την μεταφορά των πλακιδίων, την αυτοματοποίηση των βιομηχανιών, την συσκευασία κλπ. Ωστόσο, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η δυναμικότητα των φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα πλακίδια είναι τετράγωνα ή ψευδοτετράγωνα στην περίπτωση των μονοκρυσταλλικών πυριτίου. Αυτό μειώνει την επιφάνεια των πλακιδίων από 2% μέχρι 5% σε σύγκριση με ένα τετράγωνο των ίδιων διαστάσεων. Στην περίπτωση των πολυκρυσταλλικών πλακιδίων πυριτίου, τα μεγέθη των ράβδων σχεδιάζονται έτσι ώστε να είναι συμβατά με πολλαπλάσιο αριθμό των διαστάσεων ενός τυπικού πλακιδίου και να επιτυγχάνεται η μέγιστη γεωμετρική απόδοση (Jester, 2002). Οι μεγάλοι τετράγωνοι όγκοι πολυκρυσταλλικού πυριτίου κόβονται σε μικρότερα τετράγωνα χρησιμοποιώντας μεγάλες μηχανές δισκοπρίονων ή πριονοταινιών. Οι μηχανές δισκοπρίονων είναι σε γενικές γραμμές πιο ανθεκτικές και πιο εύκολες στην χρήση και στην συντήρηση, αλλά έχουν το μειονέκτημα να έχουν απώλειες (3-4 mm) κατά την διάρκεια της κοπής. Αυτό προκύπτει λόγω του πάχους του δισκοπρίονου που καθώς κόβει τα τετράγωνα τμήματα αποβάλλει ρινίσματα κοπής (Jester, 2002). Οι πριονοταινίες, από την άλλη δεν είναι

τόσο ανθεκτικά όσο τα δισκοπρίονα και παράγουν κυματοειδής μορφή στους όγκους πυριτίου τα οποία στην συνέχεια χρειάζονται αποκατάσταση. Ωστόσο, οι σύγχρονες πριονοταινίες έχουν βελτιωθεί σημαντικά (Jester, 2002). Οι μονοκρυσταλλικές ράβδοι πυριτίου αντιθέτως αντιμετωπίζονται σαν ημιαγωγοί αφαιρώντας τα τμήματα της κεφαλής και της ουράς και σχηματίζοντας σχήμα ψευδοτετραγώνου αφαιρώντας τμήματα των στρογγυλεμένων άκρων (Jester, 2002).

3.2.3 Κατασκευή πλακιδίων (wafers)

Η κατασκευή πλακιδίων από ράβδους πυριτίου για την βιομηχανία φωτοβολταϊκών είναι ίσως από τα μοναδικά παραδείγματα τεχνολογίας που μεταφέρθηκαν με επιτυχία στην βιομηχανία ημιαγωγών, η οποία αρχικά αναπτύχθηκε για την φωτοβολταϊκή βιομηχανία. Το περιοριστικό κόστος των φωτοβολταϊκών «ανάγκασαν» την βιομηχανία φωτοβολταϊκών να αναπτύξει τεχνικές τεμαχισμού για να μειώσει τις απώλειες από την κοπή και να αυξήσει την παραγωγικότητα, σαν εναλλακτικές λύσεις στις αργές, μεγάλες, με απώλειες τεχνικές που χρησιμοποιούνταν πριν από περίπου 15 χρόνια (Jester, 2002). Από την άλλη πλευρά, οι προδιαγραφές για πλακίδια (ημιαγωγούς) με διάμετρο μέχρι τα 300 mm απαιτούσαν μια εντελώς νέα αντίληψη στην τεχνική των μηχανημάτων για τον έλεγχο των ράβδων, της διακύμανσης του πάχους και την επιφανειακή λείανση, έτσι ώστε στο τέλος έφτασαν στην ανάπτυξη μιας τεχνολογίας συρματοπρίονου. Η σύγχρονη τεχνολογία κοπής βασίζεται στο πριόνισμα με σύρματα (ή καλώδια), όπου ένα λεπτό σύρμα (διαμέτρου 160 μm) σε πλέγμα κόβει το πυρίτιο με την βοήθεια λειαντικών μέσων. Διάφορα τεμάχια μόνο- ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου κολλιούνται επί μιας γυάλινης πλάκας, η οποία συναρμολογείται σε ένα κινητό επίπεδο που μετακινεί τα τεμάχια πυριτίου προς τα κάτω διαμέσου του πλέγματος των συρμάτων με ταχύτητα περίπου 0,3-0,4 mm/min. Με αυτόν τον τρόπο κόβονται ταυτόχρονα αρκετά πλακίδια, με υψηλή μηχανική ακρίβεια και η διαδικασία είναι πιο αυτοματοποιημένη. Μια γενική αρχή του πριονίσματος του σύρματος παρουσιάζεται στην εικόνα 3. Ένα καρούλι από ανοξείδωτο χάλυβα με επικάλυψη χαλκού τροφοδοτείται σε οδηγούς υψηλής ακρίβειας. Το σύστημα τροφοδοσίας, που δεν φαίνεται σχηματικά στην εικόνα, έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της τάσης του σύρματος, μία από τις πιο κρίσιμες παραμέτρους της διαδικασίας, καθ' όλη την διάρκεια της κοπής. Το κομμάτι πυριτίου, ή κομμάτια πυριτίου κολλούν σε χαμηλού κόστους γυάλινο στήριγμα το οποίο τοποθετείται σε ένα τραπέζι με κινητήρα που μετακινείται προς τα κάτω μέσω ιστού. Κατά τη διάρκεια ολόκληρης της

διαδικασίας πριονίσματος, η ταχύτητα του σύρματος διατηρείται σε περίπου 5-10 m / sec τροφοδοτώντας ένα πολτό που περιέχει μια λεπτή σκόνη καρβιδίου του πυριτίου. Όταν τα σύρματα φτάσουν στη γυάλινη πλάκα (συνολικός χρόνος επεξεργασίας περίπου 6-8 ώρες για πλακίδια 156 mm), τα πλακίδια αφαιρούνται από το γυαλί και καθαρίζονται πριν από την επεξεργασία τους σε κυψέλες. Ο λειαντικός πολτός τροφοδοτείται στο πλέγμα συρμάτων μέσω ενός ακροφυσίου και επιτρέπει την κοπή του πυριτίου. Το λειαντικό συνήθως είναι σκόνη καρβιδίου του πυριτίου. Η ταχύτητα και η τάση των συρμάτων, η ταχύτητα του πίνακα, το ιξώδες και η θερμοκρασία του πολτού και τα χαρακτηριστικά λείανσης είναι οι κυριότερες παράμετροι που πρέπει να ελέγχονται για την παραγωγή πλακιδίων ώστε να πληρούν τις προδιαγραφές.



Εικόνα 3. Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας κοπής πλακιδίων (wafers).

3.3 Ηλιακές Κυψέλες

Η πλέον εδραιωμένη φωτοβολταϊκή τεχνολογία είναι τα πλακίδια που προέρχονται από το κρυσταλλικό πυρίτιο. Η τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου έκανε την εμφάνισή της στην αγορά πριν από περισσότερα από 50 χρόνια και όμως εξακολουθεί να αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς. Από τότε, οι κατασκευαστές μείωσαν το κόστος και αύξησαν σημαντικά την αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών. Το 1954, οι D. Chapin, C. Fuller και G. Pearson στα εργαστήρια της Bell χρησιμοποίησαν το πυρίτιο ως ημιαγώγιμο υλικό για να δημιουργήσουν τη πρώτη πρακτικά ηλιακή κυψέλη στερεάς κατάστασης που εφαρμόζεται για την παραγωγή ηλεκτρικής

ενέργειας. Από τότε, η φωτοβολταϊκή τεχνολογία αναπτύχθηκε, βασισμένη όχι μόνο στο σύνολο των γνώσεων και των τεχνολογιών πυριτίου που αναπτύχθηκαν από τη βιομηχανία ημιαγωγών (Beadle et al., 1985), αλλά επίσης επωφελούνται από την τροφοδότηση πυριτίου χαμηλού κόστους που προέρχεται από την βιομηχανία ημιαγωγών. Μέχρι και το 2015, το κρυσταλλικό πυρίτιο εξακολουθεί να αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 90% της συνολικής παγκόσμιας αγοράς φωτοβολταϊκών (Verlinden, 2017). Το πυρίτιο (Si) είναι αναμφισβήτητα το πιο μελετημένο στοιχείο του Περιοδικού Πίνακα και, μετά το οξυγόνο (O), το πυρίτιο είναι το δεύτερο σε αφθονία στοιχείο στο φλοιό της Γης (περίπου 28,2% κατά βάρος). Η απόδοση των εμπορικά διαθέσιμων κυψελών κρυσταλλικού πυριτίου κυμαίνεται από 21%-23% (IRENA, 2016). Οι καινοτομίες συνεχίζονται σε πιο ελαφριές, προσαρμόσιμες και χαμηλού κόστους τεχνολογίες, όπως ηλιακά παράθυρα, ηλιακές στέγες κ.α.. Τέτοιες αναπτύξεις θα επιτρέψουν τη χρήση των φωτοβολταϊκών όχι μόνο στις στέγες αλλά και στις προσόψεις κτηρίων και τα παράθυρα, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται φωτοβολταϊκά έργα μεγάλης κλίμακας και εντός των πόλεων (IRENA, 2016, Merck KGaA, 2016, REN21, 2016). Περίπου το 90% της παγκόσμιας φωτοβολταϊκής αγοράς εξυπηρετείται από κρυσταλλικές ηλιακές κυψέλες πυριτίου. Το πυρίτιο έχει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η στοιχειώδης αφθονία, το μέτριο κόστος, η μη-τοξικότητα, η υψηλή απόδοση (20-25%), η σταθερότητα της απόδοσης της συσκευής, η απλότητα (είναι μονοηλεκτρικό ημιαγωγό), η φυσική ανθεκτικότητα, η υψηλή γνώση και εμπειρία στην επεξεργασία και την τεχνολογία του πυριτίου (Blakers and Zin, 2017). Το τελευταίο περιλαμβάνει εκτεταμένες τυποποιημένες και εξελιγμένες αλυσίδες εφοδιασμού, μεγάλες επενδύσεις σε εγκαταστάσεις μαζικής παραγωγής, βαθιά κατανόηση της τεχνολογίας και αγορών φωτοβολταϊκού πυριτίου και την παρουσία χιλιάδων ειδικευμένων ειδικών πυριτίου, επιστημόνων, μηχανικών και τεχνικών.

Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία αναφέρεται στο φαινόμενο της μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό συνεχούς ρεύματος (Direct Current, DC). Διαφορετικοί τύποι ημιαγωγικών υλικών χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστούν οι ηλιακές κυψέλες και διασυνδεθούν ώστε να συνθέσουν ένα ηλιακό πάνελ (πλαίσιο). Η κύρια εφαρμογή του παραγόμενου ηλεκτρισμού από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι η σύνδεση της ηλεκτροπαραγωγής στο δίκτυο, μετά την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (Alternate Current, AC) μέσω αντιστροφέα (inverter) και την χρήση μετασχηματιστών και υποσταθμών όπου χρειάζεται για σύνδεση με το δίκτυο (IRENA, 2017a). Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια βελτιώθηκαν ουσιαστικά από την

άποψη της αποδοτικότητας και τις ισχύος τους τις τελευταίες δεκαετίες (IRENA, 2017a). Οι τεχνολογίες κρυσταλλικού πυριτίου είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιημένες και αντιπροσωπεύονται κυρίως από τεχνολογίες μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Κατά μέσο όρο, οι κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση από τις κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου αλλά έχουν λιγότερο κόστος (IRENA, 2017a).

3.3.1 Φωτοβολταϊκές κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου

Οι κυψέλες θα μπορούσαν να είναι μονοκρυσταλλικές ή πολυκρυσταλλικές ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής τους. Η κυψέλη μονοκρυσταλλικού πυριτίου παράγεται από το τεμαχισμό πλακιδίων από ένα κύλινδρο κρυστάλλου υψηλής καθαρότητας. Για να υπάρχει βέλτιστη πυκνότητα των κυψελών, το πλακίδιο κόβονται σε οκταγωνικό σχήμα. Η πρακτική αυτή οδηγεί σε σπατάλη πυριτίου στην διαδικασία κατασκευής των κυψελών. Η καθαρότητα των μονοκρυσταλλικών κυψελών πυριτίου είναι πολύ υψηλή σε σύγκριση με την αντίστοιχη καθαρότητα των πολυκρυσταλλικών κυψελών. Η διαδικασία παραγωγή των μονοκρυσταλλικών κυψελών είναι περίπλοκη και δαπανηρή, καθιστώντας την τιμή της σχετικά ψηλή σε σχέση με άλλες φωτοβολταϊκές κυψέλες. Στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης τεχνολογίας ηλιακών κυψελών, οι ηλιακές κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονταν αποκλειστικά από υλικό μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Μεμονωμένοι κρύσταλλοι μονοκρυσταλλικού πυριτίου σε σχήμα ράβδου σχηματίζονται από ένα τήγμα ηλεκτρονικού πυριτίου (διαδικασία Czochralsky). Οι ράβδοι που δημιουργούνται από την διαδικασία αυτή ακολούθως κόβονται σε πλακίδια (wafers), τα οποία αποτελούν την βάση για την κατασκευή ηλιακών κυψελών. Το μειονέκτημα της διαδικασίας αυτής είναι ο χρόνος που απαιτείται για να αναπτυχθούν οι κρύσταλλοι πυριτίου και να σχηματιστεί η ράβδος πυριτίου. Επίσης, λόγω της χρονοβόρας αυτής διαδικασίας το κόστος των ράβδων είναι ψηλό. Στα επόμενα χρόνια, η ζήτηση για χαμηλού κόστους κυψέλες αυξήθηκε με αποτέλεσμα πολλές εταιρείες να ανέπτυξαν πολυκρυσταλλικό πυρίτιο ως φθηνότερη επιλογή πλακιδίων για ηλιακές κυψέλες (Phylipsen and Alsema, 1995). Η κυριαρχία που επικρατεί σήμερα στην παγκόσμια αγορά φωτοβολταϊκών με τεχνολογία πυριτίου όπως όλα δείχνουν αναμένεται να συνεχιστεί. Η εμπειρία που σχετίζεται με την μαζική παραγωγή, σε συνδυασμό με τις συνεχείς βελτιώσεις στον σχεδιασμό των κυψελών και την τεχνολογία παραγωγής, μειώνουν σταθερά το κόστος κατασκευής των πλαισίων. Καθώς τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνεχίζουν να μειώνουν το συνολικό κόστος των

φωτοβολταϊκών συστημάτων, αυξάνεται η δυνατότητα για να μεγαλώσει η απόδοση. Πολλές και διαφορετικές επιλογές είναι διαθέσιμες για να αυξήσουν την απόδοση των εμπορικών κυψελών με μέτριο πρόσθετο κόστος και λίγες αλλαγές στις διαδικασίες παραγωγής. Μια τυπική εμπορική κυψέλη είναι πολύ πιθανόν να ανεβάσει την απόδοση της πάνω από 25% στο προσεχές μέλλον (Blakers and Zin, 2017).

3.3.2 Πολυκρυσταλλικές Ηλιακές Κυψέλες Πυριτίου

Για να μετατραπεί ένα πλακίδιο σε ηλιακή κυψέλη, το πλακίδιο πρέπει να περάσει από διάφορες χημικές και θερμικές επεξεργασίες (Markvart, 2000). Ιδιαίτερα σημαντικά είναι τα στρώματα της κυψέλης, το στρώμα τύπου-n που σχηματίζει την ένωση (junction) p-n καθώς και δύο μεταλλικές στρώσεις που σχηματίζουν τις ηλεκτρικές επαφές. Οι κύριες διεργασίες περιγράφονται ακολούθως.

Χάραξη και καθαρισμός επιφανειών: Για την αφαίρεση μικροσκοπικών ατελειών στην επιφάνεια του, το πλακίδιο υποβάλλεται σε ορισμένα στάδια με χημικές εμβαπτίσεις. Στην συνέχεια το πλακίδιο χαράσσεται από αλκαλικά διαλύματα για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων τεμαχισμού.

Διάχυση από φώσφορο για των σχηματισμό της ένωσης p-n (junction): Το μπροστινό μέρος του πλακιδίου πρέπει να είναι με προσμίξεις (doped) για να δημιουργηθεί η ένωση p-n. Συνήθως, σύμφωνα με μελέτη του Markvart (2000), τα αρχικά πολυκρυσταλλικά πλακίδια είναι τύπου-p, π.χ. πρόσμιξη με βόριο. Ο φώσφορος είναι μία πρόσμιξη του τύπου-n, που τοποθετείται στην μπροστινή επιφάνεια του πλακιδίου. Η διάχυση του φώσφορου απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες μεταξύ 830-860 °C (Luque and Hegedus, 2011). Η διαδικασία προσμίξεων (doping process) μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους, είτε με την χρήση ενός ανοικτού σωληνοειδούς χαλαζιακού κλίβανου διάχυσης είτε με την χρήση κλίβανου μεταφορικού ιμάντα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο ανοιχτός σωληνοειδής χαλαζιακός κλίβανος διάχυσης για την διάχυση του φώσφορου, η πρόσμιξη προέρχεται από το υγρό οξυχλωριούχου φωσφόρου (POCl_3). Τα πλακίδια τοποθετώνται πάνω σε δοχεία χαλαζία και ακολούθως μέσα στον κλίβανο χαλαζία. Το υλικό πρόσμιξης μεταφέρεται στον κλίβανο χαλαζία διαμέσου της τροφοδότησης αζώτου, ενώ πραγματοποιείται ταυτόχρονη τροφοδότηση οξυγόνου στον κλίβανο. Το οξυγόνο αντιδρά με το υλικό πρόσμιξης και δημιουργείται οξείδιο του φωσφόρου (P_2O_5), το οποίο με την σειρά του μετατρέπεται σε διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και ατομικό φώσφορο. Ο φώσφορος ακολούθως διαχέεται στο πλακίδιο. Μετά την διάχυση, το οξυγόνο που απομένει στο πλακίδιο απομακρύνεται

χημικά. Όταν χρησιμοποιείται ένας κλίβανος μεταφορικού ιμάντα, η διάχυση του φωσφόρου εκτελείται με συνεχή τρόπο και με υψηλότερη απόδοση. Πριν τροφοδοτηθούν στον κλίβανο μεταφορικού ιμάντα, τα πλακίδια ψεκάζονται με υγρό που περιέχει φώσφορο (ενισχυτικό). Εναλλακτικά, το ενισχυτικό μπορεί να εναποτεθεί μέσω χημικής εξατμίσεως ή να εφαρμοστεί ως αέριο πάνω στο πλακίδιο (Luque and Hegedus, 2011). Η θερμοκρασία στον κλίβανο ελέγχεται με υπέρυθρη θέρμανση. Τα μειονεκτήματα του κλίβανου μεταφορικού ιμάντα είναι ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας μπορεί να εισέλθει στον κλίβανο και ότι ο θερμός ιμάντας μεταφοράς μπορεί να εισάγει μεταλλικές ακαθαρσίες. Οι άκρες και η πίσω επιφάνεια των πλακιδίων έχουν επίσης υποστεί διάχυση φωσφόρου. Αυτό δημιουργεί περιοχές τύπου-n που δεν είναι επιθυμητές. Για την απομάκρυνση των περιοχών αυτών, τα πλακίδια τοποθετούνται σε μηχανές χάραξης πλάσματος για την χάραξη των περιοχών αυτών.

Μεταλλικές επαφές (μπροστά και πίσω): Με την μεταξοτυπία δημιουργούνται οι ηλεκτρικές επαφές. Ένα χαλύβδινο πλέγμα καλωδίων τοποθετημένο σε ένα μείγμα αποτελεί το πλαίσιο εκτύπωσης (Markvart, 2000). Στα σημεία όπου πρόκειται να εναποτεθεί το μέταλλο, το μείγμα αφαιρείται με φωτογραφικές τεχνικές. Ακολούθως μια αγωγίμη μεταλλική πάστα συμπιέζεται διαμέσου του πλαισίου εκτύπωσης και μετατοπίζεται πάνω στο πλακίδιο και σχηματίζει το μεταλλικό πλέγμα. Συνήθως, χρησιμοποιείται μια πάστα που περιέχει άργυρο για την επαφή με τον φώσφορο στο μπροστινό μέρος του πλακιδίου, ενώ μια άλλη πάστα που περιέχει μείγμα αργύρου και αλουμινίου χρησιμοποιείται για την επαφή του τύπου-p στο πίσω μέρος. Μετά το τέλος της διαδικασίας, οι πάστες υφίστανται διαδικασίες πυρός σε κλίβανο μεταφορικού ιμάντα σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό αναγκάζει τα μεταλλικά ηλεκτρόδια να συνδεθούν με τα ηλεκτρόδια πυριτίου (LDK Solar, 2011a), σχηματίζοντας έτσι μια αγωγίμη διαδρομή για το ηλεκτρικό ρεύμα.

Απόθεση αντιανακλαστικής επίστρωσης: Μια αντιανακλαστική επίστρωση, εναποτίθεται στην μπροστινή επιφάνεια της ηλιακής κυψέλης προκειμένου να ενισχυθεί η απορρόφηση του ηλιακού φωτός (LDK Solar, 2011a). Η πιο προτεινόμενη επιλογή για την αντιανακλαστική επίστρωση είναι το νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4), λόγω των θετικών επιδράσεων στις ηλεκτρονικές ιδιότητες των πλακιδίων του πυριτίου. Μια άλλη επιλογή είναι το οξειδίο του τιτανίου (TiO_2). Το νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4) εναποτίθεται στην μπροστινή επιφάνεια του πλακιδίου εφαρμόζοντας χημική εναπόθεση εξατμίσεως κάτω από ατμοσφαιρική πίεση, συμπεριλαμβάνοντας την αντίδραση του αερίου σιλανίου και αμμωνίας (Luque & Hegedus, 2011).

Δοκιμές και διαλογή: Η δοκιμές πραγματοποιούνται υπό κανονικές συνθήκες πριν οι ηλιακές κυψέλες ταξινομηθούν σε τάξεις ανάλογα με την επίδοση τους σχετικά με την ισχύ και την τάση.

3.4 Πολυκρυσταλλικό Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο Πυριτίου

Οι ηλιακές κυψέλες διασυνδέονται σε σειρές με χάλκινες χορδές και ενθυλακώνονται για να σχηματίσουν ένα πλαίσιο. Σήμερα, τα περισσότερα πλαίσια στις αγορές αποτελούνται από 60-72 πολυκρυσταλλικές κυψέλες πυριτίου (Jungbluth et al., 2012).

Ένα τυπικό πλαίσιο έχει την ακόλουθη στρωμάτωση:

- Μπροστινό κάλυμμα από σκληρό γυαλί (tempered glass) ή από γυαλί χαμηλής περιεκτικότητας από σίδηρο (low iron): Προστατεύει τα στοιχεία του πλαισίου και μεγιστοποιεί την απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου.
- Ενθυλάκωση: Ένα διαφανές, μονωμένο ηλεκτρικά, θερμοπλαστικό πολυμερές, συνήθως αιθυλενίου-οξικού βινυλεστέρα (EVA). Το πίσω μέρος των ηλιακών κυψελών μπορεί επίσης να καλυφθεί με ένα στρώμα EVA.
- Ηλιακές κυψέλες και μεταλλικές διασυνδέσεις.
- Μεταλλικό φύλλο Tedlar (το πιο ευρέως χρησιμοποιημένο), το οποίο είναι ένα μείγμα από πολυεστέρα και φθοριούχου πολυβινυλίου.

Για την προστασία από την υγρασία μπορεί να συμπεριληφθεί ένα επιπλέον στρώμα φύλλου αλουμινίου. Με εφαρμογή θερμότητας στους 150°C περίπου και πίεση στο κενό, τα στρώματα στρωματοποιούνται (Markvart, 2000). Οι συνδέσεις είναι μονωμένες. Τέλος, οι άκριες του πλαισίου καθαρίζονται, σφραγίζονται και προστατεύονται με σκελετό αλουμινίου. Ένα κουτί διακλάδωσης εφαρμόζεται στο πλαίσιο για να ενεργοποιηθούν οι συνδέσεις μεταξύ των πλαισίων όταν συνδέονται σε σειρά για να σχηματίσουν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα (Solar World, 2012).

Κεφάλαιο 4 Ανάλυση Κύκλου Ζωής

4.1 Εισαγωγή

Ο όρος Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ) σύμφωνα με το ISO14040 (2006) περιλαμβάνει την συλλογή και αξιολόγηση των εισροών, των παραγόμενων προϊόντων και των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός συστήματος προϊόντος καθ'όλη την διάρκεια ζωής του. Μια AKZ μπορεί να βοηθήσει:

- στον εντοπισμό ευκαιριών για την βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων των προϊόντων στα διάφορα στάδια του Κύκλου ζωής
- ενημέρωση των κέντρων λήψης αποφάσεων στις βιομηχανίες, κυβερνητικές ή μη κυβερνητικές οργανώσεις (π.χ. για στρατηγικό σχεδιασμό, καθορισμό προτεραιοτήτων, σχεδιασμού ή επανασχεδιασμού προϊόντων η διαδικασιών)
- στην επιλογή σχετικών δεικτών περιβαλλοντικών επιδόσεων
- στην προώθηση προϊόντων (π.χ. εφαρμογή συστήματος οικολογικής σήμανσης, παραγωγή προϊόντων φιλικά προς το περιβάλλον)

Η AKZ καθορίζει τις περιβαλλοντικές πτυχές και τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (π.χ. χρησιμοποίηση πόρων και τις περιβαλλοντικές συνέπειες που προκύπτουν) σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος από την ανάκτηση πρώτων υλών μέσω παραγωγής, της χρήσης, της τελικής επεξεργασίας, της ανακύκλωσης και της τελικής απόθεσης. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι ένα ανεκτίμητο εργαλείο για την διερεύνηση της περιβαλλοντικής απεικόνισης ενός προϊόντος ή μιας τεχνολογίας από την «κούνια μέχρι το τάφο» (cradle-to-grave).

4.1.1 Κύρια Στάδια AKZ

4.1.1.1 Απογραφική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory Analysis)

Στάδιο της AKZ που περιλαμβάνει την συλλογή και ποσοτικοποίηση των εισροών και των εκροών ενός προϊόντος καθ'όλη την διάρκεια του κύκλου ζωής του.

4.1.1.2 Ανάλυση των Επιπτώσεων του Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Assessment)

Στάδιο της AKZ που αποσκοπεί στην κατανόηση και την αξιολόγηση του μεγέθους και της σημασίας των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός συστήματος σε όλη την διάρκεια του κύκλου ζωής του.

4.1.1.3 Ερμηνεία Κύκλου Ζωής (Life Cycle Interpretation)

Στάδιο της AKZ στην οποία αξιολογούνται τα ευρήματα είτε της Απογραφικής Ανάλυσης είτε της Ανάλυσης των Επιπτώσεων ή και των δύο σε σχέση με τον καθορισμένο στόχο και το πεδίο εφαρμογής προκειμένου να καταλήξουν σε συστάσεις ή συμπεράσματα.

4.1.2 Μεθοδολογία της AKZ

Ο στόχος (scope) μιας AKZ δηλώνει:

- την εφαρμογή της AKZ
- τους λόγους που διεξάγεται η μελέτη
- το κοινό στο οποίο απευθύνεται, π.χ. σε ποιούς θα γνωστοποιηθούν τα αποτελέσματα της μελέτης, και
- εάν τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν για συγκριτικούς ισχυρισμούς που πρόκειται να δημοσιοποιηθούν.

Το πεδίο εφαρμογής πρέπει να είναι επαρκώς καθορισμένο ώστε να εξασφαλίζει ότι το εύρος, το βάθος και η λεπτομέρεια της μελέτης είναι συμβατά και επαρκή για την αντιμετώπιση του αναφερόμενου στόχου.

Το πεδίο εφαρμογής περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- το σύστημα προϊόντος που πρόκειται να μελετηθεί
- τις λειτουργίες του συστήματος προϊόντων
- την λειτουργική μονάδα
- τα όρια του συστήματος
- διαδικασίες κατανομής
- τις κατηγορίες επιπτώσεων και την μεθοδολογία εκτίμησης των επιπτώσεων, καθώς και πως θα χρησιμοποιηθεί η επακόλουθη ερμηνεία των αποτελεσμάτων
- τα δεδομένα που χρειάζονται

- υποθέσεις
- περιορισμοί
- την ποιότητα των πρωτογενών δεδομένων
- το είδος της κριτικής ανασκόπησης, εάν υπάρχει
- το είδος και η μορφή της έκθεσης που απαιτείται για την μελέτη

Η AKZ είναι μία τεχνική με επαναληψιμότητα, αφού καθώς συλλέγονται δεδομένα και πληροφορίες, διάφορες πτυχές του πεδίου εφαρμογής ενδέχεται να τροποποιηθούν προκειμένου να επιτευχθεί ο αρχικός στόχος της μελέτης. Τα δεδομένα για κάθε διαδικασία εντός των ορίων του συστήματος μπορούν να ταξινομηθούν σε μεγάλες ομάδες, συμπεριλαμβανομένων των πιο κάτω:

- εισροές ενέργειας, εισροές πρώτων υλών, παράπλευρες εισροές, άλλες φυσικές εισροές,
- προϊόντα, παραπροϊόντα και απόβλητα,
- εκπομπές στον αέρα, απορρίψεις στο νερό και στο έδαφος, και
- άλλες περιβαλλοντικές πτυχές.

Κατά τον καθορισμό των ορίων του συστήματος, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, τα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής, διαδικασίες και ροές μονάδας, για παράδειγμα τα ακόλουθα:

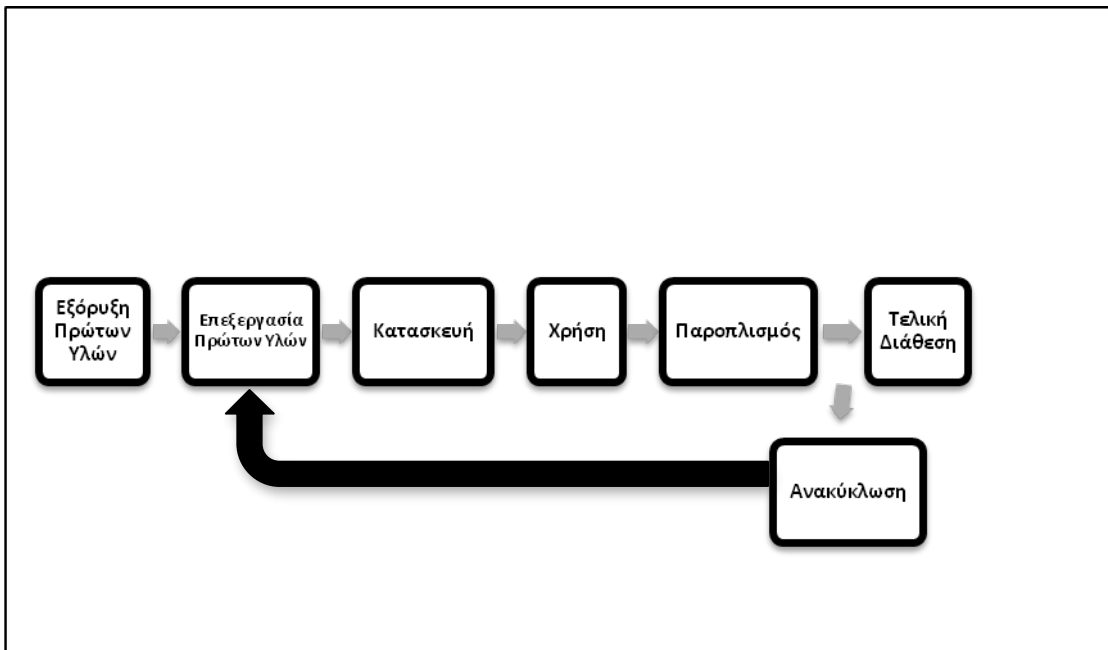
- απόκτηση πρώτων υλών
- εισροές και εκροές στην κύρια ακολουθία παραγωγής/ επεξεργασίας
- διανομή/ μεταφορά
- παραγωγή και χρήση καυσίμων, ηλεκτρισμού και θερμότητας
- χρήση και συντήρηση προϊόντων
- διάθεση αποβλήτων και προϊόντων επεξεργασίας
- ανάκτηση χρησιμοποιημένων προϊόντων (συμπεριλαμβανομένης της επαναχρησιμοποίησης, της ανακύκλωσης και της ανάκτησης ενέργειας)
- κατασκευή βοηθητικών προϊόντων
- κατασκευή, συντήρηση και παροπλισμός του εξοπλισμού
- επιπλέον λειτουργίες, όπως φωτισμός και θέρμανση.

Σε πολλές περιπτώσεις, τα αρχικά καθορισμένα όρια του συστήματος, θα πρέπει εκ των πραγμάτων να ανακαθοριστούν.

4.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Η ανάλυση κύκλου ζωής (ΑΚΖ) είναι ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούνται από τις ροές υλικών και ενέργειας σε όλα τα στάδια της ζωής ενός προϊόντος ή μιας δραστηριότητας. Περιγράφει όλα τα στάδια της ζωής από το «λίκνο στον τάφο» («cradle to grave»), δηλαδή από την εξόρυξη των πρώτων υλών μέχρι το τέλος της ζωής του προϊόντος. Ο κύκλος συνήθως ξεκινά από την εξόρυξη των υλικών από το έδαφος και συνεχίζεται με την επεξεργασία και τον καθαρισμό των υλικών, την παρασκευή των ενώσεων και των χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία, την παρασκευή του προϊόντος, την μεταφορά, την εγκατάσταση, την χρήση, την συντήρηση και σε τελικό στάδιο την τελική διάθεση ή/ και ανακύκλωση. Ο πιο διαδεδομένες μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ανάλυσης κύκλου ζωής ενός ενεργειακού συστήματος είναι ο Χρόνος Ενεργειακής Απόσβεσης (Energy Payback Time), η Ενεργειακή Απόδοση της Επένδυσης (Energy Return on Energy Investment), οι Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Emissions), οι Εκπομπές Τοξικών Στοιχείων (Toxic Emissions), οι Χρήσεις Γης (Land Use) και η Χρήση Νερού (Water Use) (Fthenakis, 2017). Σε γενικές γραμμές, η φωτοβολταϊκή τεχνολογία, που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια, είναι απαλλαγμένη από την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων και εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (GHG) κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους. Εντούτοις, κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής του, καταναλώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας και εκπέμπει κάποια αέρια του θερμοκηπίου σε μερικά στάδια, όπως στις διαδικασίες κατασκευή ηλιακών κυψελών, στην συναρμολόγηση φωτοβολταϊκών πλαισίων, στην παραγωγή των συστημάτων ισορροπίας (BOS), στην μεταφορά των υλικών, στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων και στην τελική διάθεση και ανακύκλωση του συστήματος. Προκειμένου να διερευνηθούν με ακρίβεια οι περιβαλλοντικές επιδόσεις των φωτοβολταϊκών συστημάτων, διεξάγονται αναλύσεις κύκλου ζωής για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής. Οι δύο ευρέως χρησιμοποιούμενοι περιβαλλοντικοί δείκτες είναι ο χρόνος ενεργειακής απόσβεσης και ο ρυθμός εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύκολη αξιολόγηση βιωσιμότητας και των περιβαλλοντικών

αποδόσεων των φωτοβολταϊκών συστημάτων (Peng et al., 2013). Αναλύσεις κύκλου ζωής ειδικά σε προϊόντα και τεχνολογίες που σχετίζονται με την ενέργεια, όπως είναι και τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, είναι απαραίτητες επειδή οι ροές υλικών και ενέργειας συχνά αλληλοσυνδέονται και οι διάφορες εκπομπές εισέρχονται στο περιβάλλον σε διαφορετικά στάδια του κύκλου ζωής. Τα φωτοβολταϊκά, είναι κατασκευασμένα από ημιαγώγιμα υλικά τα οποία μετατρέπουν τα φωτόνια σε ηλεκτρισμό. Όταν η ακτινοβολία του ήλιου κτυπήσει αυτά τα υλικά, τότε τα φωτόνια με συγκεκριμένο μήκος κύματος, ενεργοποιούν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και έτσι παράγεται συνεχές ρεύμα. Τα πιο εμπορικά φωτοβολταϊκά είδη είναι το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, το άμορφο πυρίτιο και τεχνολογίες λεπτού υμενίου, όπως το τελλουρίδιο του καδμίου (CdTe). Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, τα εξαρτήματα της ισορροπίας του συστήματος (BOS) για την εφαρμογή των φωτοβολταϊκών μονάδων και την μετατροπή του παραγόμενου συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα για να χρησιμοποιηθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι παραδοσιακές αναλύσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων γενικά επικεντρώνονται σε περιορισμένο αριθμό σταδίων του κύκλου ζωής. Αυτή η προσέγγιση είναι πολύ επιφανειακή, διότι περιορίζει την εικόνα που αφορά τις περιβαλλοντικές επιδόσεις ενός προϊόντος ή μιας τεχνολογίας (Ardente et al, 2008). Επιπλέον, σύμφωνα με τους Ardente et al. (2008), στις εγκατεστημένες μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οι μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις εντοπίζονται στα στάδια της κατασκευής και της εγκατάστασης. Η ανάλυση κύκλου ζωής είναι μια μεθοδολογία ικανή να διερευνήσει κάθε άμεσο και έμμεσο αντίκτυπο σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής. Τα στάδια του κύκλου ζωής (εικόνα 4) των φωτοβολταϊκών πλαισίων περιλαμβάνουν: (1) την εξόρυξη των πρώτων υλών, (2) την επεξεργασία και καθαρισμό των πρώτων υλών, (3) την κατασκευή των πλαισίων και των εξαρτημάτων του συστήματος ισορροπίας (Balance of the System, BOS), (4) την εγκατάσταση και την χρήση και (5) τον παροπλισμό και τελική διάθεση ή ανακύκλωση τους (Fthenakis and Kim, 2009).



Εικόνα 4. Κύρια στάδια του κύκλου ζωής.

Η παραγωγή ξεκινά με την εξόρυξη των πρώτων υλών (χαλαζιακή άμμος για τα φωτοβολταϊκά πυριτίου, μεταλλεύματα ψευδαργύρου και χαλκού για φωτοβολταϊκά τελλουριούχου καδμίου, CdTe) και ακολουθεί η επεξεργασία και ο καθαρισμός τους (Fthenakis et al., 2008). Το πυρίτιο στην χαλαζιακή άμμο μειώνεται μέσα σε κλίβανο για να σχηματιστεί μεταλλουργικό πυρίτιο, το οποίο πρέπει να καθαριστεί περαιτέρω σε πυρίτιο ηλεκτρονικής ποιότητας (electronic-grade) ή ηλιακής ποιότητας (solar-grade), συνήθως μέσω της διαδικασίας Siemens. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου έχουν επιπλέον εξωτερική επένδυση για πρόσθετη αντοχή και εύκολη συναρμολόγηση. Τα φωτοβολταϊκά τελλουριούχου καδμίου (CdTe) για να κατασκευαστούν χρειάζεται η τήξη μεταλλευμάτων χαλκού (Cu) και ψευδαργύρου (Zn), ώστε να παραχθούν το κάδμιο (Cd) και το τελλούριο (Te) ως υποπροϊόντα.

4.2.1 Στάδια Κύκλου Ζωής

Η διαδικασία παραγωγής ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να χωριστεί σε διάφορες φάσεις (Jungbluth et al., 2010). Κάθε φάση χαρακτηρίζεται από εισροές και εκροές. Λαμβάνοντας υπόψη την κύρια παραγωγή μιας φάσης ως την κύρια εισροή της επόμενης φάσης, η διαδικασία παραγωγής ενός φωτοβολταϊκού πάνελ έχει μοντελοποιηθεί.

4.2.1.1 Εξόρυξη Πυριτίου

Η πρώτη ύλη των περισσότερων ηλιακών κυψέλων σήμερα είναι το κρυσταλλικό πυρίτιο, το οποίο είναι το δεύτερο σε αφθονία στοιχείο στον φλοιό της Γης μετά το οξυγόνο. Το πυρίτιο σε φυσική μορφή το συναντάμε αποκλειστικά με οξυγόνο σαν διοξείδιο του πυριτίου και πυριτικά άλατα.

4.2.1.2 Παραγωγή μεταλλουργικού πυριτίου

Επιτυγχάνεται με θερμικές αντιδράσεις παρουσία άνθρακα απαιτούν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, για το λόγο αυτό παράγεται σε χώρες που οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλές και οι προμήθεια ηλεκτρισμού είναι ασφαλής. Οι σημαντικότεροι παραγωγοί βρίσκονται στην Νορβηγία, Η.Π.Α., Νότιο Αφρική, Βραζιλία, Γαλλία και Αυστραλία (Vellini et al., 2017). Στην διαδικασία αυτή, ένας κλίβανος ηλεκτρικού τόξου παράγει μεταλλικό πυρίτιο από την αντίδραση του χαλαζία σε υψηλές θερμοκρασίες. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε στην δεκαετία του 1930 και έκτοτε ο βασικός εξοπλισμός και οι μέθοδοι παρέμειναν σε γενικές γραμμές αμετάβλητοι. Οι σημαντικότερες εκροές της διεργασίας είναι ένα κράμα πυριτίου υψηλής πυκνότητας, το συμπυκνωμένο διοξείδιο του πυριτίου και η θερμότητα που χάνεται.

4.2.1.3 Καθαρισμός πυριτίου μεταλλουργικού βαθμού.

Παραγωγή ηλεκτρονικού βαθμού πυρίτιο, off-grade πυρίτιο και ηλιακού βαθμού πυρίτιο. Το πυρίτιο παράγεται μέσω διαδικασιών θερμικής μείωσης άνθρακα για την παραγωγή ημιαγωγών, συμπεριλαμβανομένων και των ηλιακών κυψελών. Το πυρίτιο ταξινομείται ανάλογα με την καθαρότητα του σε: πυρίτιο ηλιακού βαθμού (περιεκτικότητα πυριτίου σε μάζα 99, 9999%) και πυρίτιο ηλεκτρονικού βαθμού (περιεκτικότητα πυριτίου σε μάζα 99,999 999 999) (Jungbluth et al., 2010).

Τόσο το πυρίτιο ηλεκτρονικού βαθμού όσο και το πυρίτιο ηλιακού βαθμού, συχνά αναφέρεται ως πολυπυριτικό λόγω της πολυκρυσταλλικής του μορφής, αποτελούν την βάση για την παραγωγή κρυσταλλικών πλακιδίων πυριτίου, είτε για ηλεκτρονικές είτε για φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Στο παρελθόν η παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου υποστηρίχθηκε από τους παραγωγούς ηλεκτρονικού βαθμού πυριτίου. Καθώς το πυρίτιο για φωτοβολταϊκές εφαρμογές δεν απαιτεί τόσο ψηλό βαθμό καθαρότητας όπως οι ηλεκτρονικές εφαρμογές, χρησιμοποιείται πυρίτιο χαμηλότερου βαθμού καθαρότητας που δεν ήταν κατάλληλο για την ηλεκτρονική βιομηχανία. Λόγω της

σημαντικής ανάπτυξης της αγοράς φωτοβολταϊκών, οι κατασκευαστές πυριτίου ηλεκτρονικού βαθμού ανέπτυξαν μια νέα τεχνολογία για την παραγωγή πυριτίου που να έχει εφαρμογή στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, την τροποποιημένη διαδικασία Siemens. Η τροποποιημένη αυτή διαδικασία απαιτεί μικρότερη κατανάλωση ενέργειας από την τυποποιημένη διαδικασία Siemens, λόγω του βαθμού καθαρότητας πυριτίου που απαιτείται για τις φωτοβολταϊκές εφαρμογές (Vellini et al., 2017).

4.2.1.4 Παραγωγή πλακιδίων πυριτίου.

Η διαδικασία ξεκινά από την κοπή των πυριτικών κρυστάλλων με την μέθοδο της συρματοκοπής σε στήλες και ακολούθως τοποθετούνται σε ένα πολυσυρματοκόπτη που τα κόβει σε πλακίδια (wafers). Τα πλακίδια ακολούθως καθαρίζονται με την χρήση διαφόρων χημικών ουσιών (π.χ. KOH ή NaOH, υδροχλωρικό οξύ, οξικό οξύ).

4.2.1.5 Παραγωγή κυψέλων.

Τα πλακίδια, μετά από την χημική επεξεργασία για την απομάκρυνση τυχόν ακαθαρσιών και ατελειών, υποβάλλονται σε διαδικασία βερνικώματος για να δημιουργηθεί η φωτοενεργή διασταύρωση p/ n. Στις περισσότερες περιπτώσεις το βερνίκι είναι με φώσφορο (Jungbluth et al., 2010). Στο τέλος εφαρμόζεται, μια επιμετάλλωση στο μπροστινό και το πίσω μέρος του πλακιδίου ώστε να επιτρέψει την ηλεκτρική σύνδεση, και μια επίστρωση αντιαντανακλαστικού στο μπροστινό μέρος προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση. Το τελικό προϊόν που είναι μια κυψέλη ελέγχεται για την απόδοση και άλλες ηλεκτρικές προδιαγραφές, αλλά και οπτικά χαρακτηριστικά και ταξινομούνται αναλόγως.

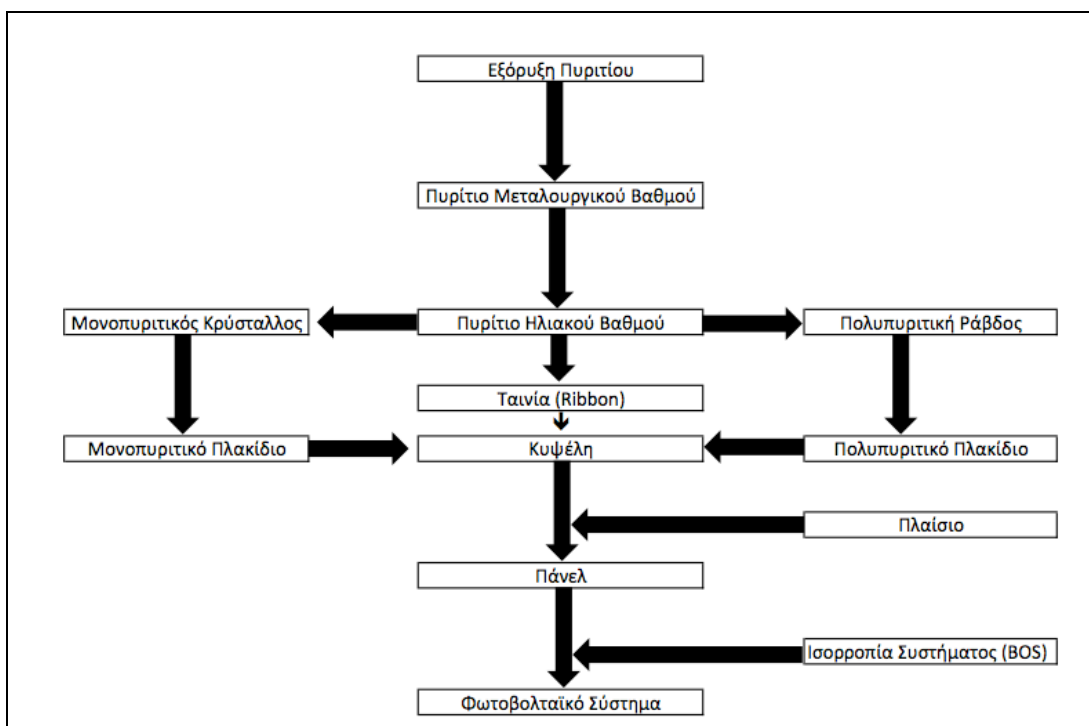
4.2.1.6 Παραγωγή πλαισίων.

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από διάφορες στρώσεις δίνοντας του έτσι μια μορφή σάντουιτς:

- πίσω κάλυμμα (μεμβράνη από πολυεστέρα και πολυβινυλοφθορίδιο)
- κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά χρησιμοποιώντας χάλκινες συνδέσεις και ενσωματωμένες σε στρώματα EVA (ethylene vinyl acetate), μπροστά και πίσω
- μπροστινό κάλυμμα (φύλλο από γυαλί χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο)

- πλαίσιο αλουμινίου

Με αυτή τη μορφή σάντουιτς ενώνονται υπό πίεση και θερμότητα, οι άκρες καθαρίζονται και οι συνδέσεις μονώνονται. Μικρές ποσότητες αερίων ενδέχεται να εκπέμπονται στον αέρα. Τέλος, τα πλαίσια δοκιμάζονται και συσκευάζονται.



Εικόνα 5. Στάδια κύκλου ζωής φωτοβολταϊκών πλαισίων.

4.3 Υφιστάμενες Μελέτες

Η παραδοσιακή ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων έχει επικεντρωθεί γενικά σε ορισμένα στάδια της ανάλυσης κύκλου ζωής (Sumper et al., 2011). Πρόκειται για μια επιφανειακή προσέγγιση για το λόγο ότι δίνει μια περιορισμένη εικόνα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος ή ενός συστήματος. Στην περίπτωση των συστημάτων ανανεώσιμης ενέργειας, οι μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια των σταδίων παραγωγής και εγκατάστασης (Sumper et al., 2011) αλλά και κατά την διάρκεια του παροπλισμού και ανακύκλωσης/ανάκτησης υλικών (McDonald and Pearce, 2010). Η AKZ είναι ένα εργαλείο για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος ή ενός συστήματος προϊόντων κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής του. Περιλαμβάνει την ποσοτικοποίηση των εισροών των υλικών και ενέργειας καθώς και εκροές που περιλαμβάνουν παραγωγή ρύπων και αποβλήτων που προκύπτουν κατά την διάρκεια των σταδίων του κύκλου ζωής του συστήματος, από την εξόρυξη πρώτων υλών έως την διαχείριση στο

τέλος του κύκλου ζωής τους. Η AKZ δίνει την δυνατότητα σύγκρισης των περιβαλλοντικών επιδόσεων των διαφόρων συστημάτων προϊόντων που εκτελούν την ίδια λειτουργία.

Έχουν δημοσιευθεί αρκετές λεπτομερείς μελέτες σχετικά με την AKZ φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η πλειοψηφία των μελετών επικεντρώνεται στις ενδεχόμενες επιπτώσεις από την υπερθέρμανση του πλανήτη (Global Warming Potential) και στον χρόνο ενεργειακής απόσβεσης (Energy Payback Time). Μελέτες τις τελευταίας δεκαετίας σχετικά με την φωτοβολταϊκή τεχνολογία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (multi-Si) δίνουν τιμές από 18 g CO₂ – equivalents (eq.)/kWh μέχρι 74,4 g CO₂ – equivalents (eq.)/kWh (Fthenakis & Alsema, 2006; Alsema et al., 2006; Pacca et al., 2007; Fthenakis & Kim, 2007; Stoppato, 2008; Fthenakis et al, 2008; Ito et al. 2008, Ito et al., 2009; Ito et al., 2010; Filippidou et al., 2010; Dominguez-Ramos et al., 2010; de Wild-Scholten 2011; Westgaard et al., 2012; de Wild-Scholten & Gløckner, 2012). Το μεγάλο εύρος τιμών στα αποτελέσματα των μελετών καθιστά δύσκολη την σύγκριση των δημοσιευμένων μελετών. Ο λόγος που το εύρος το τιμών είναι τόσο οφείλεται σε διάφορους λόγους.

4.4 Χρόνος Ενεργειακής Απόσβεσης

Ο χρόνος ενεργειακής απόσβεσης ορίζεται ως η περίοδος που απαιτείται για ένα σύστημα ανανεώσιμης ενέργειας για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας (σε ισοδύναμο πρωτογενούς ενέργειας) που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του ίδιου του συστήματος.

$$\text{Energy Payback Time} = (E_{\text{mat}} + E_{\text{manuf}} + E_{\text{trans}} + E_{\text{inst}} + E_{\text{EOL}}) / ((E_{\text{agen}} / n_G) - E_{\text{O\&M}})$$

E_{mat} : Πρωτογενής ζήτηση ενέργειας για την παραγωγή υλικών που συμπεριλαμβάνονται φωτοβολταϊκό σύστημα

E_{manuf} : Πρωτογενής ζήτηση ενέργειας για την κατασκευή φωτοβολταϊκού συστήματος

E_{trans} : Πρωτογενής ζήτηση ενέργειας για την μεταφορά υλικών που χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής

E_{inst} : Πρωτογενής ζήτηση ενέργειας για την εγκατάσταση του συστήματος

E_{EOL} : Πρωτογενής ζήτηση ενέργειας για την διαχείριση του τέλους ζωής

E_{agen} : Ετήσια παραγωγή ενέργειας

$E_{\text{O\&M}}$: Ετήσια ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας για την λειτουργία και την συντήρηση

n_G : Απόδοση δικτύου (μέση απόδοση πρωτογενούς ενέργειας προς την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας από την πλευρά της ζήτησης)

Ο υπολογισμός του ισοδύναμου πρωτογενούς ενέργειας απαιτεί γνώση των ειδικών για τη χώρα παραμέτρων ενεργειακής μετατροπής, τόσο για τα καύσιμα όσο και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας και πρώτων υλών (Fthenakis and Kim, 2011).

Κεφάλαιο 5

Μεθοδολογία

5.1 Στόχοι και Σκοπός

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να προσδιορίσει τον βαθμό απόσβεσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μέσω της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής από την διαδικασία παραγωγής μέχρι και το τέλος της ζωής του. Μέσω του λογισμικού προγράμματος Ανάλυσης Κύκλου Ζωής Gabi™ θα προσδιοριστούν τα ποσοτικά δεδομένα εισροών και εκροών που χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια της ζωής ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Με τα ευρήματα από την διαδικασία αυτή θα μπορέσουμε να προσδιορίσουμε και τον βαθμό απόσβεσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η μελέτη θα ασχοληθεί από την εξόρυξη των πρώτων υλών έως την ανακύκλωση και την τελική διάθεση του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

5.2 Σχεδιασμός

Η επιλογή για την προσομοίωση των ποσοτικών δεδομένων με το λογισμικό πρόγραμμα AKZ Gabi™ έγινε μετά από μελέτη των διαθέσιμων προγραμμάτων που υπάρχουν στην αγορά. Το λογισμικό πρόγραμμα Gabi™ μοντελοποιεί κάθε στοιχείο ενός προϊόντος ή συστήματος από την πλευρά του κύκλου ζωής. Εφοδιάζουν έτσι τις επιχειρήσεις ώστε να λαμβάνουν σωστές αποφάσεις σχετικά με την κατασκευή και τον κύκλο ζωής οποιουδήποτε προϊόντος. Παρέχει επίσης μια εύκολα προσβάσιμη και συνεχώς ανανεωμένη βάση δεδομένων που εμπεριέχει λεπτομερώς το κόστος, την ενέργεια και το περιβαλλοντικό αντίκτυπο από την εξόρυξη και την επεξεργασία κάθε πρώτης ύλης. Επιπλέον, εξετάζει τον αντίκτυπο στο περιβάλλον που παρουσιάζει εναλλακτικές επιλογές στους τομείς της παραγωγής, διανομής, ανακύκλωσης, ρύπανσης και βιωσιμότητας. Συνδυάζει το κορυφαίο λογισμικό μοντελοποίησης και αναφοράς ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) στον κόσμο, με βάσεις δεδομένων από πρωτογενή δεδομένα και εργαλεία αναφορών. Το λογισμικό δίνει την δυνατότητα στους

επαγγελματίες της ανάλυσης κύκλου ζωής να επιδράσουν στα αποτελέσματα των επιχειρήσεων και να βοηθήσουν στην εξοικονόμηση χρημάτων, στην μείωση των κινδύνων, στον εντοπισμό πλεονεκτημάτων ενός προϊόντος και στην αύξηση των εσόδων. Το λογισμικό πρόγραμμα GaBi™ εφαρμόζεται για να αξιολογηθεί κάθε πρώτη ύλη και διαδικασία σε κάθε στάδιο από την εξόρυξη μέχρι το τέλος της ζωής σε μια αλυσίδα ανεφοδιασμού.



Εικόνα 6. Λογότυπο του προγράμματος GaBi™

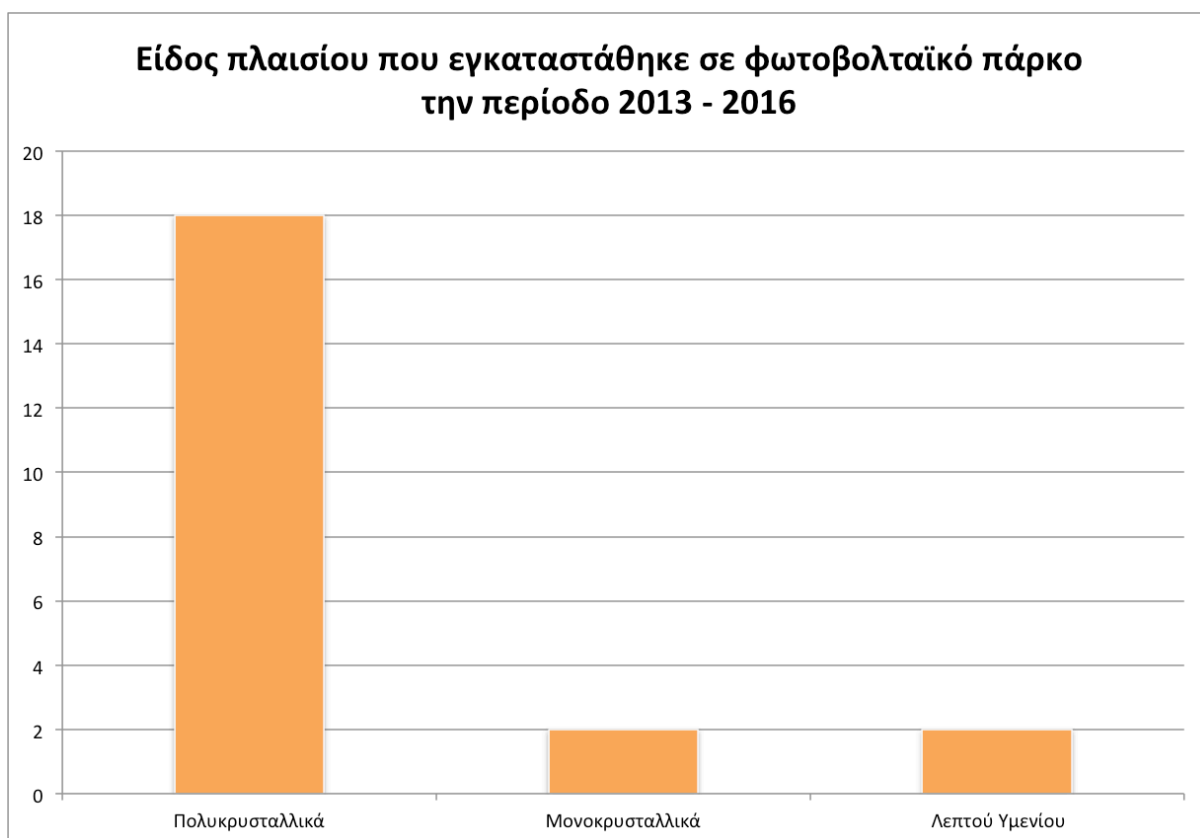
Το λογισμικό πρόγραμμα GaBi™ επίσης υποστηρίζει:

- Αποτύπωμα του άνθρακα (Carbon footprint)
- Σχεδιασμό τεχνικών, οικονομικών και οικολογικών αναλύσεων
- Μελέτες Ανάλυση Κύκλου Κόστους
- Μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Εργασιακού Περιβάλλοντος
- Κλασσικές αναλύσεις υλικών και ενεργειακών ροών
- Σχεδιασμό Περιβαλλοντικών Εφαρμογών
- Υπολογισμό Αερίων του Θερμοκηπίου
- Συγκριτικές Μελέτες
- Συστημάτων Περιβαλλοντικής Διαχείρισης

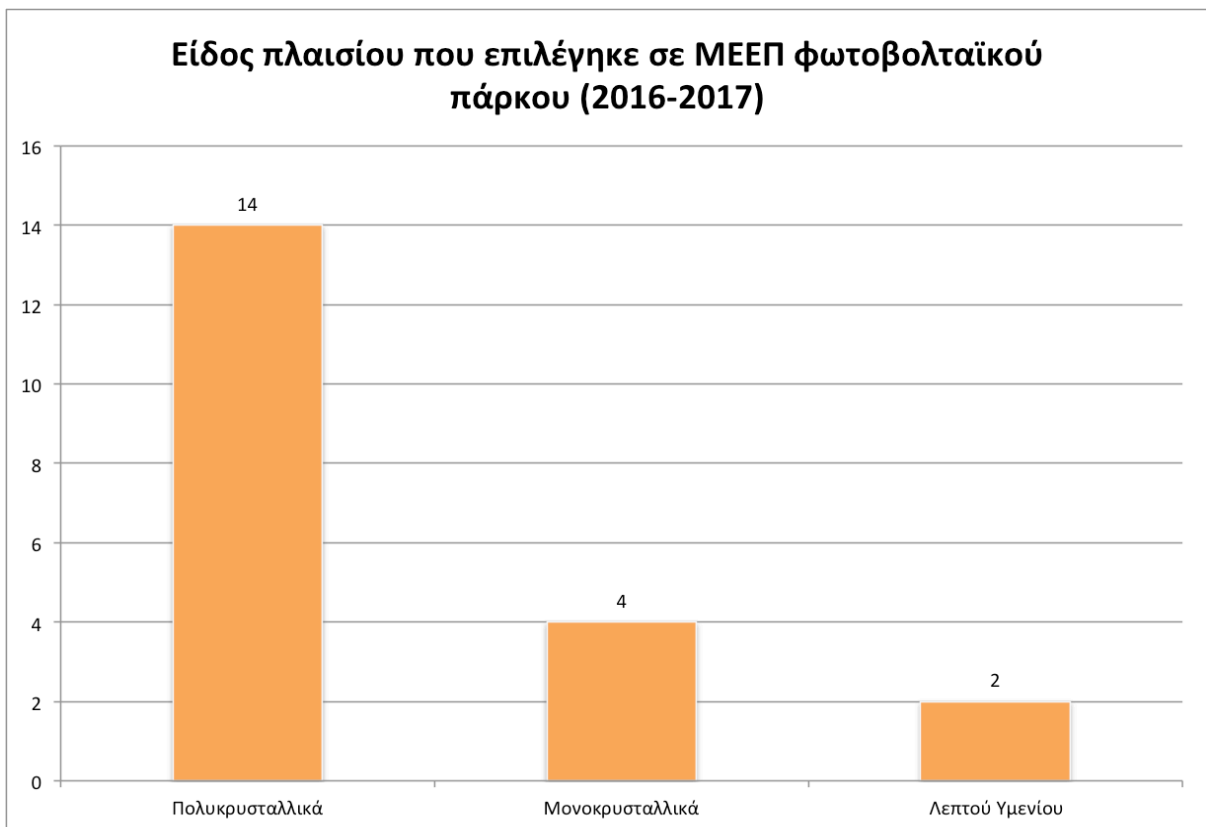
Το GaBi™ δεν περιορίζεται μόνο στην τεχνική του κύκλου ζωής και την ανάλυση του κύκλου ζωής. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση και ανάλυση των συστημάτων αλυσίδας, την σύνταξη αναλύσεων υλικών και ενέργειας, την δημιουργία αναφορών για τους στόχους της μελέτης, την οριοθέτηση συνθηκών και για την ποσοτική αναφορά.

Το είδος φωτοβολταϊκού πλαισίου που επιλέγηκε για την παρούσα μελέτη είναι το πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο πυριτίου και το μοντέλο της Suntech STP-

270, κατασκευασμένο στην Κίνα. Η επιλογή έγινε με βάση την πιο δημοφιλή χρησιμοποίηση φωτοβολταϊκών πλαισίων στην Κύπρο. Όπως φαίνεται στις εικόνες 7 και 8 τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που χρησιμοποιούνται ή πρόκειται να χρησιμοποιηθούν είναι τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια πυριτίου. Στην πρώτη εικόνα φαίνονται τα είδη φωτοβολταϊκών πλαισίων που είναι ήδη εγκατεστημένα σε φωτοβολταϊκά πάρκα. Τα δεδομένα λήφθηκαν από τις Μελέτες Εκτίμησης Επιπτώσεων στο Περιβάλλον (ΜΕΕΠ) που κατατέθηκαν στο Τμήμα Περιβάλλοντος την περίοδο 2013-2016 για την εικόνα 7 και 2016-σήμερα για την εικόνα 8.



Εικόνα 7. Ποσότητα ανά είδος εγκατεστημένου πλαισίου.



Εικόνα 8. Ποσότητα ανά είδος για μελλοντικά φωτοβολταϊκά πάρκα.

Τα κυριότερα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη φαίνονται στον πίνακα 1.

Τεχνολογία	Πολυκρυσταλλικό
Πλαίσιο	Suntech STP-270-24/Vd
Open circuit voltage (V_{oc})	44.5 V
Optimum operating voltage (V_{mp})	35.0 V
Short-circuit current (I_{sc})	8.20 A
Optimum operating current (I_{mp})	7.71 A
Maximum power at STC (P_{max})	270 Wp
Operating temperature	-40 °C/+85 °C
Maximum system voltage	1000 V DC
Maximum series fuse rating	20 A
Power tolerance	±3%

Πίνακας 1. Κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε είναι η περιοχή πλησίον του Εργαστηρίου Φωτοβολταϊκής Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Κύπρου. Ο λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη περιοχή δεν είναι κάποιος συγκεκριμένος αλλά έπρεπε να επιλεγεί μια τοποθεσία στην μελέτη, έτσι ώστε να γνωρίζουμε την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο σημείο. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι σταθερής κλίσης, στις 30°. Η λειτουργική μονάδα που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη είναι το kW.

5.3 Μέθοδος Συλλογής Δεδομένων

Η απογραφική ανάλυση κύκλου ζωής, που αφορά τις ενεργειακές και υλικές εισροές για την παραγωγή ενός πλαισίου Suntech STP-270, βασίστηκε σε δύο μελέτες που σχετίζονται με την κατασκευή φωτοβολταϊκού πλαισίου πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Οι Phylipsen και Alsema (1995) στην μελέτη τους αναφέρουν την σύνθεση των υλικών (kg/m^2) και τις ενεργειακές απαιτήσεις για την κατασκευή ενός πολυκρυσταλλικού πλαισίου στην Ευρώπη. Η λειτουργική μονάδα στην μελέτη τους είναι ανά τετραγωνικό μέτρο (m^2). Μετά τον υπολογισμό της μάζας υλικού που αντιστοιχεί σε κάθε πλαίσιο, έγινε μοντελοποίηση στο GaBi™ 6. Αν και τα πλαίσια Suntech STP-270 κατασκευάζονται στην Κίνα, ο ηλεκτρισμός για το πλαίσιο που εφαρμόστηκε στο πρόγραμμα Gabi χρησιμοποιήθηκε το μέσο μείγμα καυσίμων της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Μόνο τα υλικά με περισσότερο από 1% κατά βάρος έχουν ληφθεί υπόψη.

Η εισροή υλικού για το περιμετρικό πλαίσιο αλουμινίου υπολογίστηκε με διαγράμματα στο AutoCAD για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο Suntech STP-270.

Η ισορροπία του συστήματος (BOS) περιλαμβάνει τις δομές και τον εξοπλισμό που χρειάζονται για την υποστήριξη του πλαισίου και την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στο τοπικό δίκτυο. Η ισορροπία του συστήματος αποτελείται από τα κιβώτια διακλάδωσης (junction boxes) εφαρμοσμένα στο πίσω μέρος του κάθε πλαισίου, τα καλώδια και οι αλουμινένιες κατασκευές βάσης. Τα ποσοτικά δεδομένα που αφορούν το μετατροπέα συλλέχθηκαν απευθείας από την εταιρεία. Ο κατασκευαστής του μετατροπέα συμπεριέλαβε τεχνικά στοιχεία, πίνακες κυκλωμάτων, ηλεκτρονικά εξαρτήματα, υλικά καλωδίωσης, βίδες/ παξιμάδια, υλικά συσκευασίας και μεταφορές. Όσον αφορά τις μεταφορές, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο μεταφέρθηκε με πλοίο από τη Σαγκάη στην Λεμεσό και ακολούθως από την Λεμεσό στο Εργαστήριο Φωτοβολταϊκής Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Κύπρου, στην Αγλαντζιά. Η απόσταση από Σαγκάη στην Λεμεσό με πλοίο είναι 14364 km (σύμφωνα με υπολογισμούς της ιστοσελίδας www.Portwall.com), και η απόσταση από το λιμάνι Λεμεσού στο Εργαστήριο

Φωτοβολταϊκής Τεχνολογίας είναι 92,5 km. Η μεταφορά του αντιστροφέα υπολογίστηκε με το ίδιο τρόπο.

Διαθεσιμότητα ισχύος και ηλιακής ακτινοβολίας. Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι ανάλογη με την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, η οποία εξαρτάται από την θέση του πλαισίου σε σχέση με τον ήλιο. Η ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει κάθετα στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι η πιο ισχυρή (αποδοτική). Επομένως, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο τοποθετείται με τρόπο ώστε να μεγιστοποιηθεί η λήψη κάθετης ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό είναι θεμελιώδες για την μεγιστοποίηση της ηλεκτρικής ισχύος του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η εγκατάσταση αναλύθηκε μετά από μοντελοποίηση με το πρόγραμμα PVsyst™ για μελέτη (PVsyst™ software). Δημιουργήθηκε ένα μοντέλο για τον υπολογισμό με σκοπό την ποσοτικοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το πρόγραμμα υπολογίζει την διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία σε διακριτά χρονικά διαστήματα κατά την διάρκεια του έτους για μια δεδομένη τοποθεσία. Με γνώμονα την γωνία κλίσης (30°), την ετήσια ηλιακή ακτινοβολία και την αποδοτικότητα του φωτοβολταϊκού πλαισίου (Suntech STP-270) του μετατροπέα (Ingecon Sun 2.7HF), το PVsyst™ παράγει ένα δελτίο με την αναμενόμενη παραγωγή. Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης όπου μελετούμε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο η αναμενόμενη ετήσια παραγωγή είναι 448 kWh. Σύμφωνα με το Φωτοβολταϊκό Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (PV-GIS) του Ευρωπαϊκού Κέντρου Ερευνών, στο σημείο που είναι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο εγκατεστημένο προσπίπτουν 2250 kWh/m² ηλιακής ακτινοβολίας το χρόνο.

5.4 Διαδικασία

Η διαδικασία ξεκινά με την απογραφική ανάλυση κύκλου ζωής, σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής του φωτοβολταϊκού πλαισίου που επιλέξαμε να μελετήσουμε. Στην απογραφική ανάλυση εντοπίζονται οι ποσότητες των εισροών και εκροών του συστήματος. Τα δεδομένα λήφθηκαν από βιβλιογραφικές αναφορές (Sumper et al, 2011; Alema et al., 2006; De Wild-Scholten, 2011)

	Μονάδα Μέτρησης	Ποσότητα
Προϊόν:		
MG-Si (Μεταλλουργικού Βαθμού Πυρίτιο)	kg	1,00

Υλικά:		
Άμμος πυριτίου	kg	2.68
Γραφίτης	kg	1.20E-01
Ενέργεια:		
Ηλεκτρισμός	kWh	12,7
Ξυλάνθρακας		1,90E-01
Λιθάνθρακας		9,60E-01
Όπτάνθρακας Πετρελαίου		6,00E-01
Φυσικοί Πόροι:		
Νερό	m ³	1,20E-01

	Μονάδα Μέτρησης	Ποσότητα
Προϊόν:		
SoG-Si (Ηλιακού Βαθμού Πυρίτιο)	kg	1,00
Εισροή από προηγούμενη διαδικασία:		
MG-Si (Μεταλλουργικού Βαθμού Πυρίτιο)	kg	1,50
Υλικά:		
Χλωρίνη σε αέρια μορφή	kg	1,00
Υγρό υδρογόνο	kg	1,31E-01
Υδροξείδιο του νατρίου, 50% διαλυμένο στο νερό	kg	44,00
Ενέργεια:		
Ηλεκτρισμός	kWh	190
Θερμότητα	MJ	414
Πόροι:		
Νερό	m ³	1,70E-02
Κρύο νερό	m ³	4,54E-01

	Μονάδα Μέτρησης	Ποσότητα
Προϊόν:		
Όγκος Μετάλλου (Ingot)	kg	1,00
Εισροή από προηγούμενη διαδικασία:		
SoG-Si (Ηλιακού Βαθμού Πυρίτιο)	kg	1,33
Υλικά:		
Αργόν (υγρό)	kg	3,02E-05
Υδρογόνο (υγρό)	kg	4,89E-08
Ενέργεια:		
Ηλεκτρισμός	kWh	8,89
Πόροι:		
Νερό	m ³	8,89E-03

	Μονάδα Μέτρησης	Ποσότητα
Προϊόν:		
Πλακίδιο (wafer)	m ²	1,00
Εισροή από προηγούμενη διαδικασία:		
Όγκος Μετάλλου (Ingot)	kg	4,85E-01

Υλικά:		
Πολυεθυλαίνιο (HDPE)	kg	1,31
Υδροξείδιο του νατρίου, 50% διαλυμένο στο νερό	kg	5,75E-02
Καρβίδιο του πυριτίου	kg	1,18
Απιονισμένο νερό	kg	45,5
Χαρτόνι	kg	1,60
Ενέργεια:		
Ηλεκτρισμός	kWh	3,15
Υποδομή:		
Εργοστάσιο για πλακίδια	P	3,04E-06

	Μονάδα Μέτρησης	Ποσότητα
Προϊόν:		
Πολυκρυσταλλική Κυψέλη Πυριτίου	m ²	1,00
Εισροή από προηγούμενη διαδικασία:		
Πλακίδιο (wafer)	m ²	1,47
Υλικά:		
Ασήμι	kg	2,88E-02
Αλουμίνιο	kg	8,83E-01
Αμμωνία (υγρή)	kg	4,11E-03
Υδροχλωρικό οξύ	kg	7,81E-02
Υδροφθόριο	kg	1,20
Νιτρικό οξύ	kg	5,05E-01
Υδροξείδιο του νατρίου	kg	9,86E-02
Πολυλακτίδιο	kg	8,22E-03
Απιονισμένο νερό	kg	120
Ενέργεια:		
Ηλεκτρισμός	kWh	27,1
Υποδομή:		
Εργοστάσιο φωτοβολταϊκών κυψελών	P	4,47E-07
Πόροι:		
Νερό	m ³	3,61E-01

	Μονάδα Μέτρησης	Ποσότητα
Προϊόν:		
Πλαίσιο Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου	m ²	1,00
Εισροή από προηγούμενη διαδικασία:		
Πολυκρυσταλλική Κυψέλη Πυριτίου	m ²	7,53E-01
Υλικά:		
Αλουμίνιο	kg	1,09
Γυαλί	kg	6,75
Τριπλό υπερφωσφορικό, P ₂ O ₅	kg	4,95E-01
Χαρτόνι	kg	20,6
Συμπολυμερές EVA	kg	7,99E-01
Μείγμα γύψου (plaster)	kg	1,03E-01
Συγκόληση, χάλυβας	m	8,47E-02
Ενέργεια:		

Ηλεκτρισμός	kWh	2.32
Πόροι:		
Νερό	m ³	7,73E-04

	Μονάδα Μέτρησης	Ποσότητα
Προϊόν:		
Δομή στήριξης	m ²	1,00
Υλικά:		
Κατασκευή κεκλιμένης οροφής	m ²	4,00E-01

	Μονάδα Μέτρησης	Ποσότητα
Προϊόν:		
Αντιστροφέας + καλωδίωση	P	1,00
Υλικά:		
Αντιστροφέας, 2500W	P	1,56
Ηλεκτρική εγκατάσταση	P	1,00

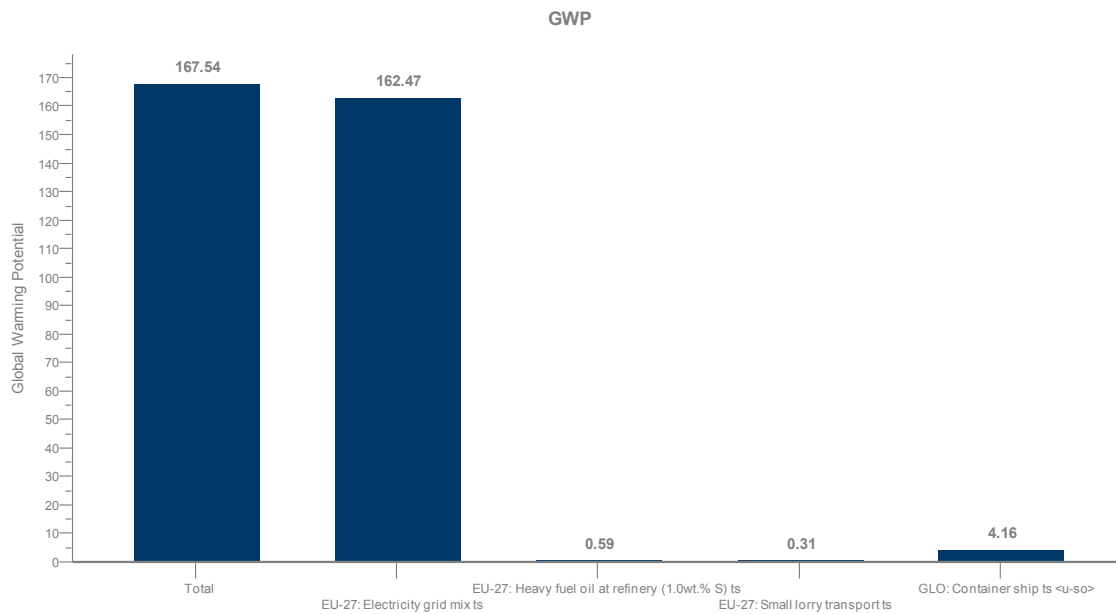
	Μονάδα Μέτρησης	Ποσότητα
Μεταφορές		
Σανγκάη-Λεμεσός	kgkm	330372
Λεμεσός-Εργαστήριο Φωτοβολταϊκής Τεχνολογίας	kgkm	2125,5

Τα δεδομένα που λήφθηκαν ακολούθως εισήχθησαν στο πρόγραμμα μοντελοποίησης GaBi™ για επεξεργασία έτσι ώστε να εξάχθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής.

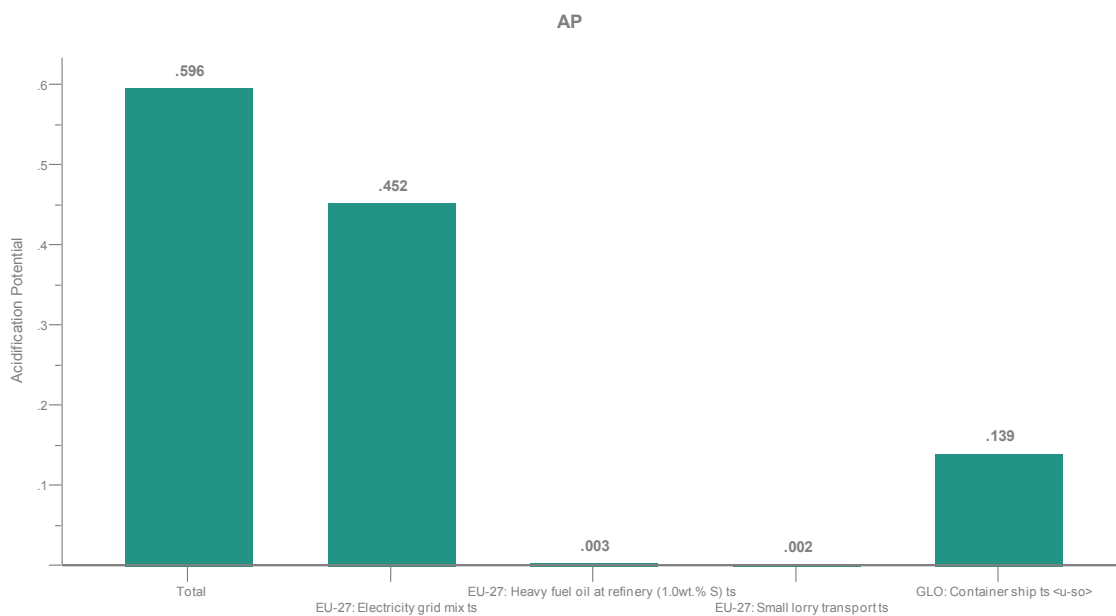
5.5 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

5.5.1 Αξιολόγηση των Επιπτώσεων του Κύκλου Ζωής

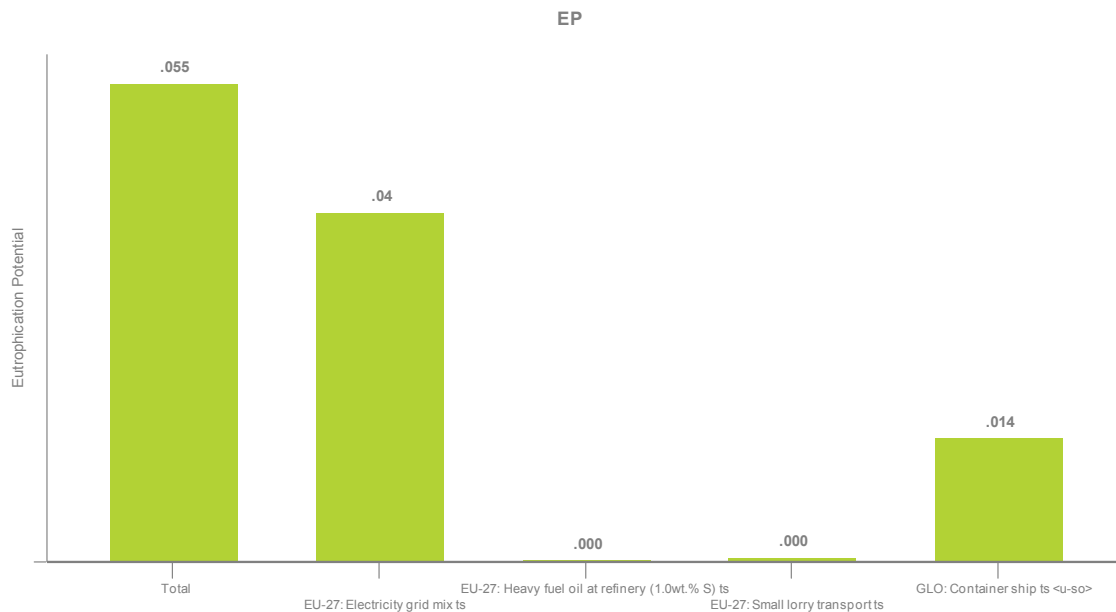
Η επιπτώσεις που προκύπτουν από την αξιολόγηση του κύκλου ζωής επικεντρώνονται στο δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη (global warming potential, GWP), στο δυναμικό όξυνσης (acidification potential), στο δυναμικό ευτροφισμού (eutrophication potential), στο δυναμικό καταστροφής του όζοντος και στην τοξικότητα.



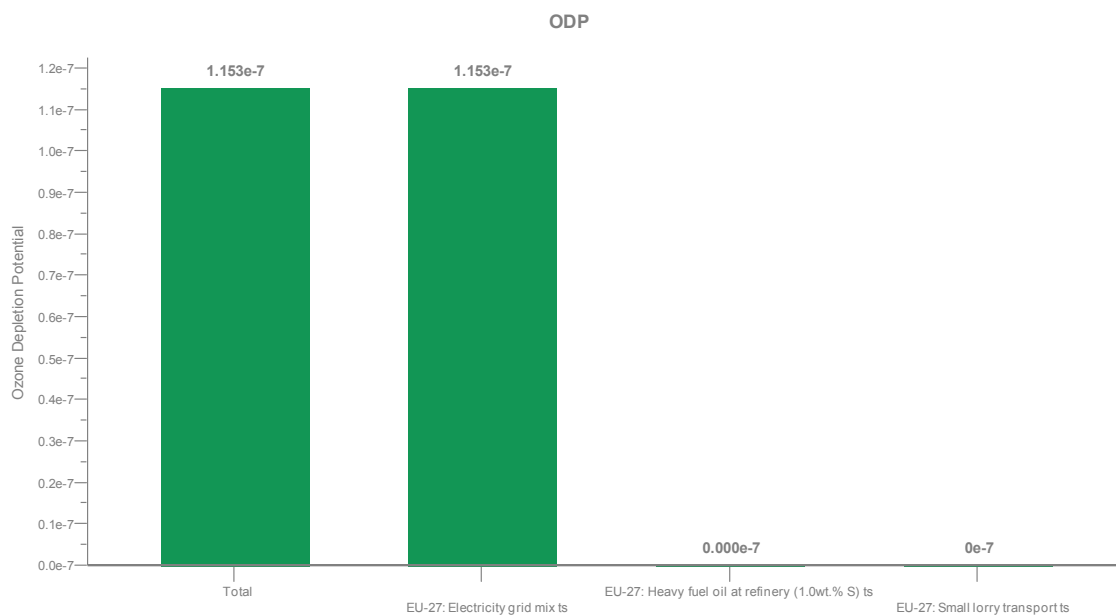
Εικόνα 9. Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη (global warming potential).



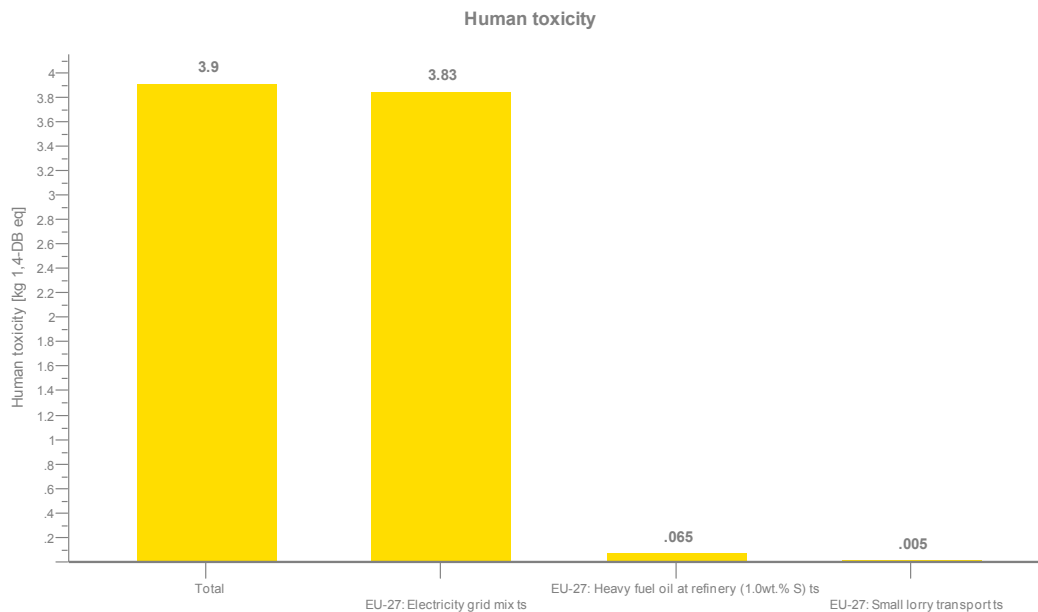
Εικόνα 10. Δυναμικό όξινσης.



Εικόνα 11. Δυναμικό ευτροφικότητας.



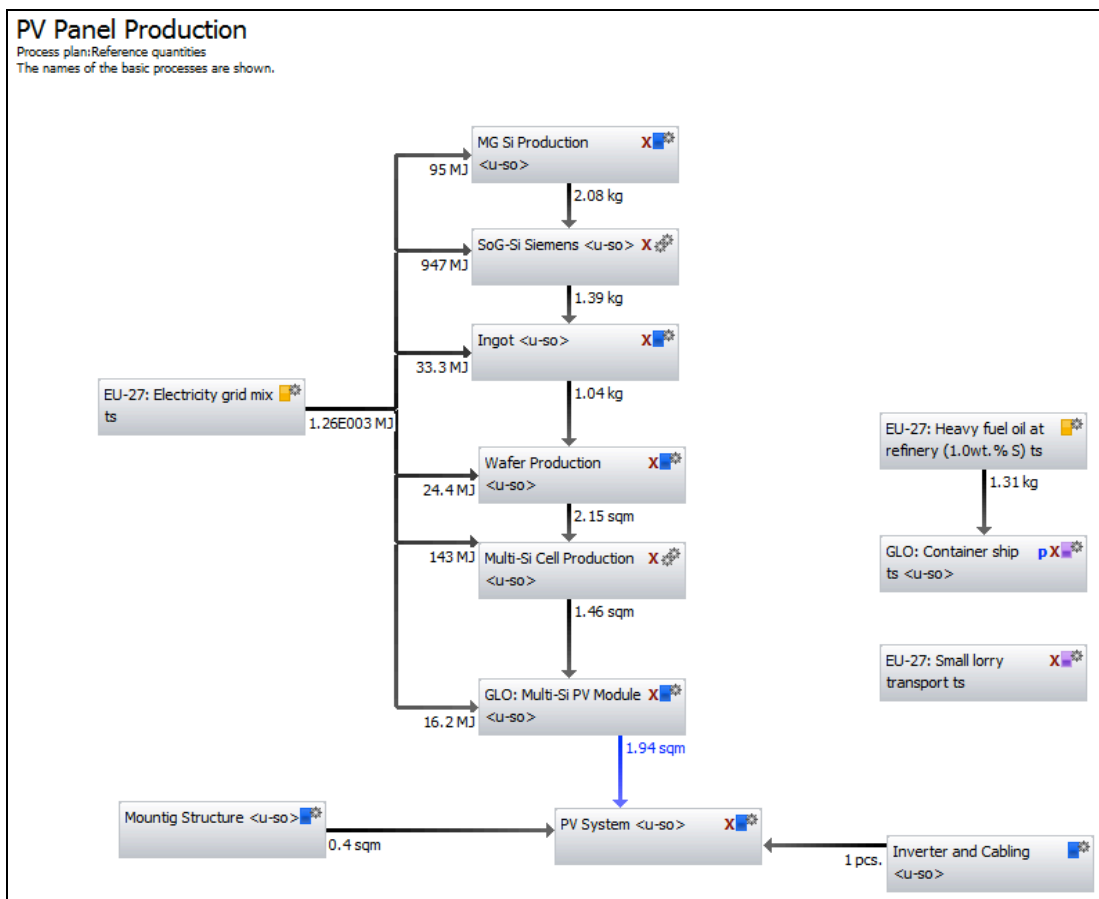
Εικόνα 12. Δυναμικό καταστροφής του όζοντος.



Εικόνα 13. Τοξικότητα για τον άνθρωπο.

5.5.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Με την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα GaBi™, μοντελοποιήθηκαν οι εισροές και εκροές του συστήματος όπως φαίνεται στην εικόνα 14. Η ανάλυση κύκλου ζωής στο πρόγραμμα μοντελοποίησης περιλαμβάνει την παραγωγή πυριτίου μεταλλουργικού βαθμού, την παραγωγή πυριτίου ηλιακού βαθμού με την μέθοδο Siemens, την παραγωγή του πλινθώματος (ingot), την παραγωγή πλακιδίων (wafers), την παραγωγή κυψελών πολυκρυσταλλικού πυριτίου και την παραγωγή του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στο κύκλο ζωής προστέθηκε και η ισορροπία του συστήματος (BOS), δηλαδή τα υλικά στήριξης, ο αντιστροφέας (inverter) και η καλωδίωση, καθώς επίσης και οι μεταφορές που χρειάστηκαν για να φτάσει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο στο σημείο εγκατάστασης.



Εικόνα 14. Πλάνο με τις εισροές και εκροές για την κατασκευή, μεταφορά και εγκατάσταση του υπό μελέτη φωτοβολταϊκού πλαισίου.

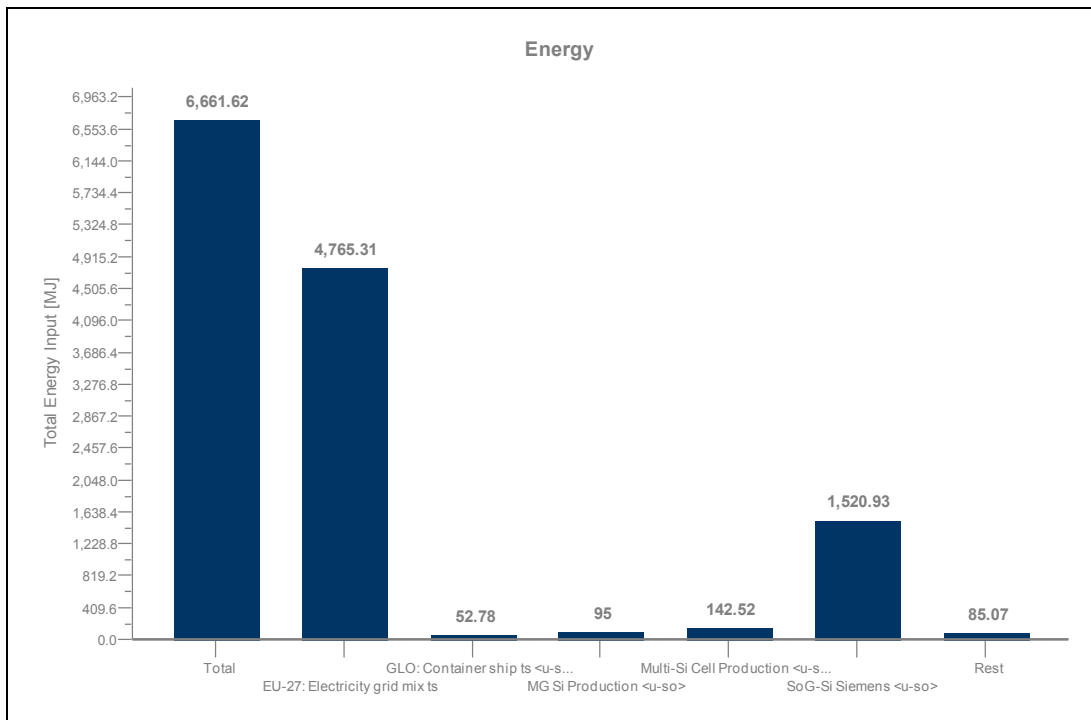
Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

6.1 Αποτελέσματα

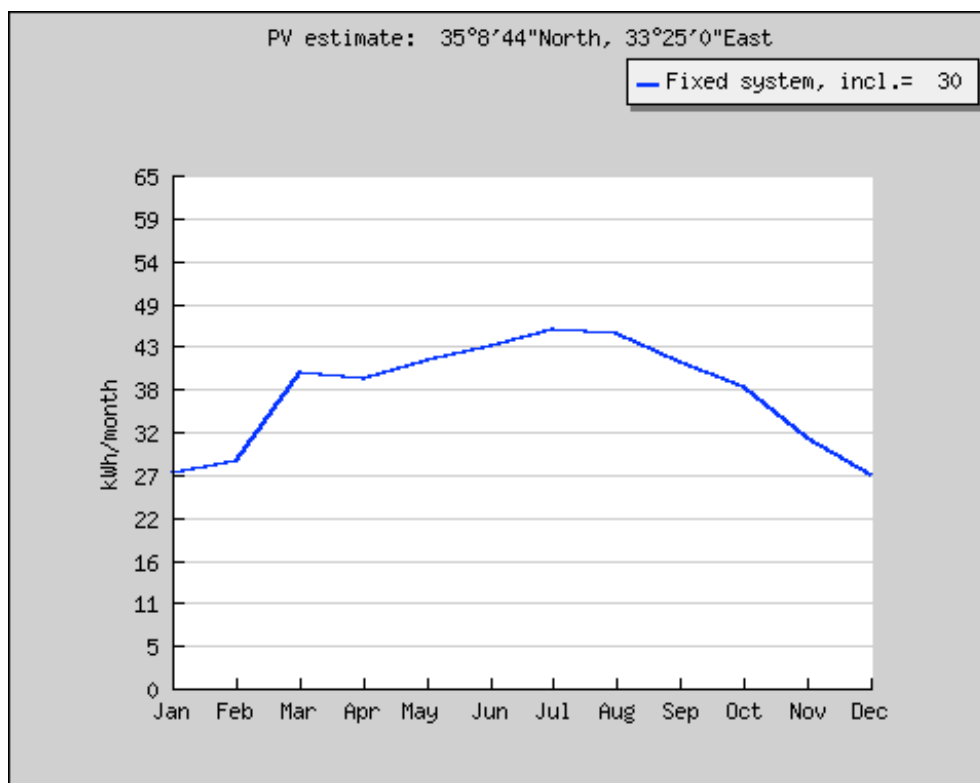
Με την επεξεργασία των δεδομένων αυτών βρέθηκε ότι η συνολική ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε για να κατασκευαστεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι 6661,62 MJ ή 1850 kWh (εικόνα 15). Όπως προαναφέρθηκε η αναμενόμενη ετήσια παραγωγή ενέργειας για το υπό μελέτη φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι 448 kWh ανά έτος (εικόνα 16). Για να βρεθεί ο χρόνος ενεργειακής απόσβεσης (EPBT), χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

EPBT= Εισροές ενέργειας/ παραγωγή ενέργειας ανά έτος

Ο χρόνος ενεργειακής απόσβεσης για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο Suntech STP-270, υπό σταθερή κλίση 30° στο σημείο που βρίσκεται το Εργαστήριο Φωτοβολταϊκής Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Κύπρου, στην Αγλαντζιά είναι 4,13 χρόνια. Το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι 91 g CO₂-eq./kWh.



Εικόνα 15. Συνολική εισροή ενέργειας στο κύκλο ζωής του υπό μελέτη φωτοβολταϊκού πλαισίου.



Εικόνα 16. Μηνιαία παραγωγή ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα.

6.2 Συμπεράσματα

Μέσα από τα ευρήματα της μελέτης διαπιστώθηκε ότι ο χρόνος ενεργειακής απόσβεσης (4,13 χρόνια) είναι λίγο μεγαλύτερος από τις περισσότερες δημοσιευμένες μελέτες. Υπήρξαν περιορισμοί στην ανάπτυξη της συγκεκριμένης μεθοδολογίας ανάλυσης κύκλου ζωής καθώς δεν μελετήθηκε καθόλου η περίπτωση το πυρίτιο να προέρχεται από ανακυκλωμένο πυρίτιο, ή η εισαγωγή άλλων ανακυκλωμένων υλικών στα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Βιβλιογραφία

- Υπουργείο Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού, Κυπριακή Δημοκρατία, 2010. *Εθνικό Σχέδιο Δράσης για την ανανεώσιμη ενέργεια με βάση την Οδηγία 2009/28/EK (2010-2020)*. Ιούνιος 2010.
- Κυπριακή Δημοκρατία, 2013. *Νόμος που προνοεί για την προώθηση και ενθάρρυνση της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας*. Νόμος 112/2013. Σεπτέμβριος 2013.
- Alsema, E.A., 2000. *Energy pay-back time and CO₂ emissions of PV systems*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 8, 17– 25.
- Alsema, E., de Wild-Scholten, M., 2005. *Environmental impact of crystalline silicon photovoltaic module production*. In: Material Research Society Fall Meeting, Symposium G: Life Cycle Analysis Tools for “Green” Materials and Process Selection, Boston, MA.
- Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., Lo Brano, V., 2008. *Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(1), pp.200–217.
- Ashraf, I., Chandra, A., 2005. *Energy pay-back time and air pollution mitigation of a 100-kWp grid connected SPV power plant for Lakshadweep island*. In: 39th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2004).
- Beadle, W.E., Tsai, J.C.C., and Plummer, R.D., 1985. *Quick Reference Manual for Silicon Integrated Circuit Technology*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Blakers, A., Zin, N., 2017. *Silicon solar cell device structure*. In: Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications. John Willey & Sons, Ltd. Chapter 3.2.
- Bohland, J.R., Anisimov, I.I., 1997. *Possibility of recycling silicon PV modules*. Photovoltaic Specialists Conference, 1997. IEEE.
- Bombach, E., Röver, I., Müller, A., Schlenker, S., Wambach, K., Kopecek, R., Wefringhaus, E., 2006. *Technical experience during thermal and chemical recycling of a 23 year old PV generator formerly installed on Pellworm Island*. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2006, Dresden, Germany.
- Darling, S.B., You, F., Veselka, T., Velosa, A., 2011. *Assumptions and the levelized cost of energy for photovoltaics*. Energy Environ. Sci., 4, pp. 3133–3139.

- De Wild-Scholten, M., Alsema, E., 2005. *Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production*. In: Material Research Society Fall Meeting, Symposium G: Life Cycle Analysis Tools for “Green” Materials and Process Selection, Boston, MA.
- Doi, T., Tsuda, I., Unagida, H., Murata, A., Sakuta, K., Kurokawa, K., 2001. *Experimental study on PV module recycling with organic solvent method*. *Sol. Energy and Sol. Cells*. 67, pp. 397-403
- Dones, R., Frischknecht, R., 1998. *Life-cycle assessment of photovoltaic systems: results of Swiss studies on energy chains*. *Prog. Photovolt*. 6, pp. 117-125.
- Ecofys, 2014. *Renewable energy progress and biofuels sustainability*, Ecofys, Utrecht
- European Commission, 2009. *Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC*.
- European Commission, 2017. *Renewable Energy Progress Report*. COM (2017) 57, Brussels.
- EurObserv'ER, 2016. *Photovoltaic barometer 2016*. <<https://www.euroobserver.org/category/all-photovoltaic-barometers/>> [Accessed 25 October 2017].
- E.E.A., 2017. *Renewable Energy in Europe 2017. Recent Growth and Knock-on Effects*. European Environmental Agency Report. No 3/2017. pp20. Luxembourg. ISBN 978-92-9213-848-6
- EuroStat, 2017. *Energy data 1990-2015*.
- Fernández, L., Ferrer, R., Aponte, D.F., Fernández, P., 2011. *Recycling silicon solar cell waste in cement-based systems*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95 (7), pp. 1701-1706.
- Ferrazza, F., 2005. *Crystalline silicon: manufacture and properties*. In: *Solar Cells, Materials, Manufacture and Operation* (eds T. Markvart and L. Castañer). Elsevier Science, Oxford, pp. 71–88.
- Frankl, P., Masini, A., Gamberale, M., Toccaceli, D., 1998. *Simplified life-cycle analysis of PV systems in buildings: present situation and future trends*. *Prog. Photovolt*. 6, 137-146.
- Frischknecht, R., Heath, G., Raugei, M., Sinha, P., de Wild-Scholten, M., Fthenakis, V., Kim, H. C., Alsema, E. and Held, M., 2016. *Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity*. 3rd edition, IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. Report IEA-PVPS T12-06:2016, ISBN 978-3-906042-38-1.

- Frisson, L., Lieten, K., Bruton, T., Declercq, K., Szlufcik, J., De Moor, H., Goris, M., Benali, A., Aceves, O., 2000. *Recent improvements in industrial PV module recycling*. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, UK.
- Fthenakis, V.M., 2000. *End-of-life management and recycling of PV modules*. Energy Policy 28, 1051–1058.
- Fthenakis, V., Alsema, E., 2006. *Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2004-early 2005 status*. Prog. Photovolt. 14, pp. 275-280.
- Fthenakis, V.M., Kim, H.C., Alsema, E., 2008. *Emissions from photovoltaic life cycles*. Environmental Science & Technology 42, pp.2168– 2174
- Fthenakis, V.M., Kim, H.C., 2011. *Photovoltaics: Life-cycle analyses*. Solar Energy 85, pp. 1609-1628
- Fthenakis, V.M., 2017. *Life cycle assessment of photovoltaics*. In: Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications. John Willey & Sons, Ltd. Chapter 13.3.
- Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T., Toro, L., 2014. *Recycling of photovoltaic panels by physical operation*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 123, pp. 239-248.
- Gray, J., 2011. *The physics of the solar cell*. In: Handbook of photovoltaic science and engineering. 2nd Edition. John Willey & Sons, Ltd. Chapter 2.
- Hunt, L.P., 1976. *Total energy use in the production of silicon solar cells from raw materials to finished product*. In: 12th IEEE PV Specialists Conference, pp347-352.
- International Energy Agency. *Energy statistics – Cyprus*. Available at: < <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=CYPRUS&product=renewablesandwaste&year>> [Accessed 25 December 2017]
- IRENA, 2016. *Letting in the Light: How Solar Photovoltaics Will Revolutionise the Electricity System*, IRENA, Abu Dhabi.
- IRENA, 2017a. *Boosting Solar PV Markets: The Role of Quality Infrastructure*. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi.
- IRENA, 2017b. *Renewable Energy Statistics 2017*. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi.
- ISO 14040, 2006. *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. 2nd edition, Switzerland.
- Jester T., 2002. *Crystalline silicon manufacturing progress*. Prog. Photovolt: Res. Appl. 10, 99-106.

- Jungbluth, N., 2005. *Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the Swiss ecoinvent database*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 13 (8), 429–446.
- Jungbluth, N., Stucki, M., Frischknecht, R., 2010. *Ecoinvent, Part XII photovoltaics, swiss centre for life cycle inventories*. 2010.
- Kang, S., Yoo, S., Lee, J., Boo, B., Ryu, H., 2012. *Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules*. Renewable Energy, 47, pp. 152-159.
- Klugmann-Radziemska, E., Ostrowski, P., Cenian, A., Sawczak, M., 2010. *Chemical, thermal and laser processes in recycling of photovoltaic silicon solar cells and modules*. Ecological Chemistry and Engineering, 17, pp. 384-391.
- Klugmann-Radziemska, E., Ostrowski, P., 2012. *Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules*. Renewable Energy 35(8), pp. 1751-1759.
- Latunussa C, Mancini L, Blengini G, Ardente F, Pennington D., 2016. *Analysis of material recovery from photovoltaic panels*. EUR 27797. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2016.
- Markvart T., 2000. *Solar electricity*. 2nd edition. UNESCO. Chichester, United Kingdom
- McDonald, N.C., Pearce, J.M., 2010. *Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules*. Energy Policy 38, 7041–7047
- Meijer, A., Huijbregts, M.A.J., Schermer, J.J., Reijnders, L., 2003. *Life-cycle assessment of photovoltaic modules: comparison of mc-Si, InGaP and InGaP/mc-si solar modules*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 11 (4), 275–287.
- Merck KGaA, 2016. *Photovoltaic Windows: Energy Efficient and Energy Generating*. Press release, Darmstadt. Available at: <<https://www.merckgroup.com/en/news/photovoltaic-windows-15-03-2016.html>> [Accessed 21 December 2017]
- Müller, A., Wambach, K., Alsema, E., 2005. *Life Cycle Analysis of solar module recycling process*. In: MRS Proceedings. Cambridge Univ Press; 2005.
- Notarnicola, S., 2013. *Recupero e riciclo del moduli fotovoltaici a fine vita*. Speciale Technico, Qualenergia.
- Peng, J., Lu, L., Yang, H., 2013. *Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems*. Renew. Sustain. Energy Rev. 19, 255-274.

Phylipsen, G.J.M., Alsema, E.A., 1995. *Environmental Life-cycle Assessment of Multicrystalline Silicon Solar Cell Modules*. Department of Science, Technology and Society Utrecht University. Report no. 95057

PVsyst™. Photovoltaic software. Available at: <<http://www.pvsyst.com/en/>>

Raugei, M., Fullana-i-Palmer, P. and Fthenakis, V., 2012. *The energy return on investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles*. *Energy Policy*, 45, pp. 576-582

Reinders, A., 2017. *Semiconductor materials and their properties*. In: *Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications*. John Willey & Sons, Ltd. Chapter 2.1.

REN21, 2016. *Renewables 2016 Global Status Report*. Paris.

REN21, 2017. *Renewables 2017 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat. ISBN 978-3-9818107-6-9

Sherwani, A.F., Usmani, J.A., Varun, 2010. *Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: a review*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 540-544.

Sueoka, K., 2004. *Modeling of internal gettering for metal impurities by oxide precipitates in CZ-Si wafers*. In: *High Purity Silicon VIII: Proceedings of the International Symposium*. The Electrochemical Society, 2004.

Sumper, A., Robledo-Garcia, M., Villafafila-Robles, R., Bergas-Jane, J., Andres-Peiro, J., 2011. *Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain)*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, pp. 3888-3896.

Verlinden, P., 2017. *Doping, diffusion, and defects in solar cells*. In: *Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications*. John Willey & Sons, Ltd. Chapter 2.2.

Wang, T-W., Hsiao, J-C., Du, C-H., 2016. *Recycling of materials from silicon base solar cell module*. Photovoltaic Specialists Conference, Austin, Texas, USA.

Yamashita, K., Miyazawa, A., Sannomiya, H., 2006. *Research and development on recycling and reuse treatment technologies for crystalline silicon photovoltaic modules*. *Photovoltaic Energy Conversion 2003*. IEEE.

Zeng, D.W., Born, M., Wambach, K., 2004. *Pyrolysis of EVA and its application in recycling of photovoltaic modules*. *Environmental Sciences*. 16, (6), pp.889-893.