



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Τομέας Συστήματα Παραγωγής

**«Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας
Λεπτού Υμενίου»**

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων
για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

υπό την

Αλεξάνδρα Ε. Χατζηκοκολάκη

Χανιά, Ιούνιος 2016

Copyright © υπό Αλεξάνδρα Χατζηκοκολάκη
Χανιά 2016

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα και μόνο. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτήν τη διατριβή εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

- Katsigiannis Y., Rentoumis M., Katsamaki A., **Chatzikokolaki A.**, Bilalis N. “ Estimation of Quantities of Waste Materials for Photovoltaic Installations in Crete Island ”, Int. Conf. on Advances in Mechanical and Automation Engineering - MAE, Rome, Italy, June 2014.
- Katsigiannis Y., Rentoumis M., Katsamaki A., **Chatzikokolaki A.**, Bilalis N. “ Estimation of Quantities of Waste Materials for Photovoltaic Installations in Crete Island ”, Int. Journal of Manufacturing and Industrial Engineering - IJMIE, Volume 1: Issue 3, September 2014.
- Efstathiou C., Vakondios D., **Chatzikokolaki A.**, Antoniadis A., “ Optimal Cutting Conditions in Ball-End Milling of Complex Surfaces Taking Into Account the Desired Surface Roughness ”, International Conference on advances in Mechanical and Automation Engineering MAE 2014, IMANE2014, MAE-14-850, 7-8/6/2014, Rome, Italy.
- Efstathiou C., Vakondios D., **Chatzikokolaki A.**, Antoniadis A., “ Optimal Cutting Conditions in Ball-End Milling of Complex Surfaces Taking Into Account the Desired Surface Roughness ”, International Conference on advances in Mechanical and Automation Engineering MAE 2014, IMANE2014, MAE-14-850, Volume 1: Issue 3, p.126-130, September 2014
- **Chatzikokolaki A.**, Athanailidis I., Bilalis N., “ Life Cycle Analysis of Cadmium Telluride PV Panels of Thin Film ”, this article will be submitted to International Journal of Product Lifecycle Management (PLM).

Ευχαριστίες

Μετά από 1,5 χρόνο ολοκληρώνω τον κύκλο των Μεταπτυχιακών μου Σπουδών στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Από αυτό το διάστημα θα έχω να θυμάμαι πολλά. Θεωρώ ότι αποκόμισα αρκετές γνώσεις ανώτερου επιπέδου αλλά γνώρισα και πολλούς διαφορετικούς ανθρώπους. Υπήρξαν μέρες με πολύ διάβασμα, άγχος, πίεση αλλά και ξενύχτια για να επιτευχθούν οι απαιτήσεις των Μεταπτυχιακών Σπουδών. Καθοριστικό ρόλο έπαιξαν κάποιοι συμφοιτητές μου με την αλληλοϋποστήριξη τους για την επίτευξη των ομαδικών εργασιών αλλά και για το διάβασμα την περίοδο των εξετάσεων. Θέλω να ευχηθώ καλή συνέχεια σε όλους και πάντα επιτυχίες.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου διατριβής, καθηγητή **κ. Μπιλάλη Νικόλαο**, για την πολύτιμη βοήθεια του και την καθοδήγηση του σε κομβικά σημεία της εργασίας μου. Στην συνέχεια θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή **κ. Αντωνιάδη Αριστομένη**, ο οποίος με καθοδήγησε, με δίδαξε και με στήριξε όλο αυτό το χρονικό διάστημα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αντιπρύτανη **κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο** για την συμμετοχή σου στην εξεταστική επιτροπή.

Οφείλω, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου **Όλγα** και **Μανώλη** και στον αδερφό μου **Μάριο**, οι οποίοι στηρίζουν πάντα τις επιλογές μου. Χωρίς αυτούς δεν θα υπήρχε σημείο αναφοράς στην ζωή μου.

Ο άνθρωπος που είναι δίπλα μου, με πολύ αγάπη, απεριόριστη υπομονή και κατανόηση είναι εκεί όταν είμαι έτοιμη να τα παρατήσω για να μου δώσει κίνητρα και να συνεχίσω. Δεν θα μπορούσε να είναι άλλος εκτός από τον **Κώστα**. Σε ευχαριστώ για όλα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον **κ. Αθαναηλίδη Ηλία** για την τέλεια συνεργασία εξ' αποστάσεως που είχαμε ώστε να ολοκληρωθεί η Ενότητα 8. Φυσικά, αυτό το κεφάλαιο έπαιξε καθοριστικό ρόλο για την δημοσίευση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής των φωτοβολταϊκών CdTe τεχνολογίας λεπτού υμενίου. Κάπως έτσι δημιουργήθηκαν νέες ιδέες και η ανάγκη για παρατεταίρω έρευνα.

Ένα ακόμα ευχαριστώ θέλω να πω στον **κ. Κουτσιανίτη Παναγιώτη**, στον **κ. Ρεντούμη Μελέτιο** και στον **Δρ. Κατσίγιαννη Ιωάννη** γιατί με βοήθησαν παρέχοντας μου χρήσιμες συμβουλές όποτε τις είχα ανάγκη.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου από το τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, τον **κ. Μανίτη Αντώνιο**.

Περίληψη

Η αειφόρος ανάπτυξη απαιτεί μεθόδους και εργαλεία για τη μέτρηση και τη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων για προϊόντα και υπηρεσίες. Οι Περιβαλλοντικές επιπτώσεις περιλαμβάνουν τις εκπομπές στο περιβάλλον και την κατανάλωση των πόρων, καθώς και άλλες παρεμβάσεις όπως η χρήση γης, κλπ. Η εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων των συμβατικών καυσίμων του πλανήτη μας (όπως ο άνθρακας, το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο κ.α.) σε συνδυασμό με την διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, αλλά και την βαθμιαία επιδείνωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων, οδήγησε τις σύγχρονες κοινωνίες να στραφούν αφενός σε τεχνικές εξοικονόμησης και ορθολογικής χρήσης της ενέργειας, αφετέρου στην αξιοποίηση των ήπιων ή Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Οι πιο γνωστές ενεργειακές πηγές αποτελούν ανανεώσιμα (ανανεώσιμα) ενεργειακά αποθέματα, ενώ η χρήση τους είναι φιλική (ήπια) προς το περιβάλλον. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι τα πιο διαδεδομένα, καθώς έχουμε αρκετές εγκαταστάσεις στην Ελλάδα.

Λόγω κάποιων προνομιών που χορηγήθηκαν στην Ελλάδα από το 2013 έχει υπερκαλυφθεί ο στόχος των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ο Ευρωπαϊκός στόχος «20-20-20» είναι 20% μείωση των αερίων θερμοκηπίου, 20% αύξηση ενεργειακής αποδοτικότητας και επιπλέον αύξηση του ποσοστού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 20%. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι μια από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες της νέας εποχής που ανατέλλει στο χώρο της ενέργειας. Σε παγκόσμια κλίμακα, το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς (≈90%) βασίζεται στη χρήση κρυσταλλικού πυριτίου ως ημιαγωγό για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αλλά τα τελευταία χρόνια έχουν παρουσιαστεί και άλλες νέες τεχνολογίες όπως τα λεπτού υμενίου φωτοβολταϊκά.

Ένα σημαντικό πρόβλημα αναμένεται να παρουσιαστεί σε βάθος χρόνου, καθώς θα επέλθει η φυσική φθορά των φωτοβολταϊκών πλαισίων και θα πρέπει να αποσυρθούν, να αποσυναρμολογηθούν και να ανακυκλωθούν. Τα υλικά που μπορούν να ανακυκλωθούν κυρίως από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι το πυρίτιο ή το κάδμιο το γυαλί, το αλουμίνιο αλλά και πολλά άλλα σπάνια μέταλλα. Ακριβά και βλαβερά υλικά. Επίσης, η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) είναι μια τεχνική για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών φορτίων ενός προϊόντος. Σύμφωνα με εκτιμήσεις αναμένεται πως η συνολική ποσότητα φωτοβολταϊκών αποβλήτων στην Ευρώπη θα πλησιάσει τους 3.400.000 τόνους μέχρι το 2040, ενώ στην Ελλάδα θα υπάρχουν 264.000 τόνοι μέχρι το 2038, σύμφωνα με τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις και τάσεις. Επομένως κρίνεται αναγκαία η μελέτη της μετέπειτα ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ώστε να επαναχρησιμοποιηθούν κάποια υλικά.

Ο σκοπός αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας είναι να εφαρμοστεί η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) σε γραμμές αποσυναρμολόγησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων τεχνολογίας λεπτού υμενίου CdTe με την βοήθεια του προγράμματος GaBi 6.

Abstract

Sustainable development requires methods and tools for measuring and comparing the environmental impact of human activities on products and services. The Environmental impacts include emissions to the environment and the consumption of resources, and other measures such as land use, etc. The depletion of energy reserves of fossil fuels on our planet (coal, gas, oil, etc.) is coupled with the growing demand for energy, but also the gradual deterioration of environmental problems have led modern societies to turn in both saving and rational use of energy techniques, on the other hand the use of soft and Renewable energy Sources (RES). The best known energy sources are inexhaustible (renewable) energy reserves, while their use is friendly (mild) to the environment. The photovoltaic panels are the most common, as we have several facilities in Greece.

Because some privileges granted to Greece since 2013 has exceeded the target of installed modules. The European objective "20-20-20" is 20% reduction of greenhouse gas emissions, 20% increase in energy efficiency and further increase the share of renewables to 20%. The photovoltaic panels are one of the most promising technologies of the new era dawning in the energy sector. Worldwide, the largest market share ($\approx 90\%$) based on the use of crystalline silicon as a semiconductor for solar panels but in recent years have occurred and other new technologies such as thin-film photovoltaics.

A major problem is expected to occur over time, as would occur the wear and tear of the modules will occur and should be removed, disassembled and recycled. The materials can be recycled mainly of a photovoltaic panel is silicon or cadmium, glass, aluminium and many other rare metals. Expensive and harmful materials. Also, the Life Cycle Analysis (LCA) is a technique for assessing the environmental load of a product. According to estimates it is expected that the total amount of PV waste in Europe to be close to 3.4 million tons by 2040, while in Greece there will be 264,000 tons by 2038, according to the existing facilities and trends. Therefore it is necessary to study the subsequent life of photovoltaic modules to reuse some materials.

The purpose of this postgraduate thesis is to apply the Life Cycle Analysis (LCA) in the disassembly lines of photovoltaic thin film modules CdTe technology with the help of the GaBi program 6.

Περιεχόμενα

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ	- 3 -
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	- 4 -
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	- 5 -
ABSTRACT	- 6 -
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	- 7 -
 1. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	- 9 -
 2. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	- 10 -
2.1. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	- 10 -
2.2. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	- 10 -
2.3. ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	- 11 -
2.4. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	- 13 -
 3. ΟΙ ΗΛΙΑΚΕΣ ΚΥΨΕΛΕΣ.....	- 14 -
3.1. Η ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ	- 14 -
3.2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΚΕΛΙΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΜΕΓΑΛΟΥ ΠΑΧΟΥΣ (THICK FILM)F.....	- 15 -
3.2.1. ΜΟΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΠΥΡΙΤΙΟ (SINGLECRYSTALLINE SILICON, SC-Si).....	- 16 -
3.2.2. ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΠΥΡΙΤΙΟ (MULTICRYSTALLINE SILICON, MC-Si).....	- 17 -
3.2.3. ΤΑΙΝΙΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ (RIBBON SILICON)	- 18 -
3.3. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΚΕΛΙΑ ΛΕΠΤΟΥ ΥΜΕΝΙΟΥ (THIN FILM).....	- 19 -
3.3.1. ΤΟ ΤΕΛΟΥΡΙΟΥΧΟ ΚΑΔΜΙΟ (CdTe) ΚΑΙ ΤΟ ΘΕΙΟΥΧΟ ΚΑΔΜΙΟ (CdS)	- 20 -
3.3.2. ΑΜΟΡΦΟ ΠΥΡΙΤΙΟ (AMORPHOUS Η THIN FILM SILICON, A-Si).....	- 21 -
3.3.3. ΔΙΣΕΛΗΝΟΪΝΔΙΟΥΧΟΣ ΧΑΛΚΟΣ (CuInSe2)	- 22 -
3.3.4. ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	- 23 -
 4. Η ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ	- 25 -
4.1. Η ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ.....	- 26 -
4.2. ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ	- 29 -
4.2.1. ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	- 32 -
4.3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ Φ/Β ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ	- 34 -
4.3.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ Φ/Β ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΑΠΟ ΓΝΩΣΤΕΣ ΕΤΑΙΡΕΙΕΣ	- 38 -
4.4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ Φ/Β ΧΑΛΚΟΓΕΝΙΔΙΩΝ.....	- 42 -
4.4.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ Φ/Β ΧΑΛΚΟΓΕΝΙΔΙΩΝ ΑΠΟ ΓΝΩΣΤΕΣ ΕΤΑΙΡΕΙΕΣ	- 46 -
4.5. ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ.....	- 57 -
 5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (LIFE CYCLE ANALYSIS)	- 60 -
5.1. ΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ.....	- 62 -
5.2. ΟΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ	- 63 -
 6. Η ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ (LIFE CYCLE COSTING).....	- 64 -
6.1. ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ	- 69 -
 7. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ.....	- 74 -
 8. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ LCA (GABI).....	- 85 -
8.1. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	- 92 -
 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 118 -

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	- 119 -
------------------------	---------

1. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι ΑΠΕ (ή ήπιες μορφές ενέργειας ή νέες πηγές ενέργειας ή πράσινη ενέργεια) είναι οι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο ήλιος, ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Ο όρος ΑΠΕ αναφέρεται σε τρία βασικά χαρακτηριστικά τους. Αρχικά, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα συμβατικές πηγές ενέργειας, αλλά χρειάζεται μόνο η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής της ενέργειας απ' τη φύση. Έπειτα, οι «καθαρές ή πράσινες» μορφές ενέργειας, είναι εναρμονισμένες με το περιβάλλον, χωρίς να αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Τέλος οι ΑΠΕ στοιχειοθετούν μια καλή αρχή για την λύση πάρα πολλών περιβαλλοντικών προβλημάτων που αντιμετωπίζονται στην εποχή μας.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντιπροσωπεύουν τις εναλλακτικές πηγές ενέργειας, ξεκινώντας από τις δυο πιο σημαντικές και αποδοτικές, την ηλιακή και την αιολική. Βέβαια σε κάποιες ενέργειες ο χαρακτηρισμός «ανανεώσιμες» δεν ευσταθεί καθώς δεν ανανεώνονται, όπως η γεωθερμία. Επιπροσθέτως, οι ΑΠΕ χρησιμοποιούνται σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην εξαντληθούν τα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων που είναι σε περιορισμένες ποσότητες στη Γη. Η Ευρωπαϊκή Ένωση μαζί με άλλα μικρά κράτη, υιοθετούν τις νέες στρατηγικές για τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι ΑΠΕ καθορίζουν τη βάση του μοντέλου οικονομικής ανάπτυξης της πράσινης οικονομίας. Μέσω των φυσικών κύκλων αναπληρώνονται οι ΑΠΕ και θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητοι. Ο άνεμος, ο ήλιος, και οι οργανικές ύλες είναι ανεξάντλητες πηγές ενέργειας. Φυσικά, η χρήση τους για να παραχθεί ενέργεια δεν επιβαρύνει το περιβάλλον. Η Ελλάδα έχει την δυνατότητα να εκμεταλλεύεται τις ΑΠΕ, με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον για την κάλυψη αρκετά μεγάλου μέρους των ενεργειακών αναγκών της. Η κίνηση αυτή θα έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της χρήσης των συμβατικών καυσίμων, την μείωση εκπομπής των αέριων του θερμοκηπίου, τη δημιουργία θέσεων εργασίας και την ανάπτυξη απομακρυσμένων περιοχών. Οι ήπιες μορφές ενέργειας που έχουν ως άξονα την ηλιακή ακτινοβολία είναι ανανεώσιμες, καθώς δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ όσο υπάρχει ο ήλιος. Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα ηλιακής ενέργειας υπό άλλη μορφή είναι: η βιομάζα (η οποία δεσμεύεται στους ιστούς των φυτών μέσω της φωτοσύνθεσης), η αιολική (υπό την έννοια ότι θερμαίνεται ο αέρας και προκαλείται ο άνεμος με την βοήθεια των κύκλων εξάτμισης και συμπύκνωσης του νερού).

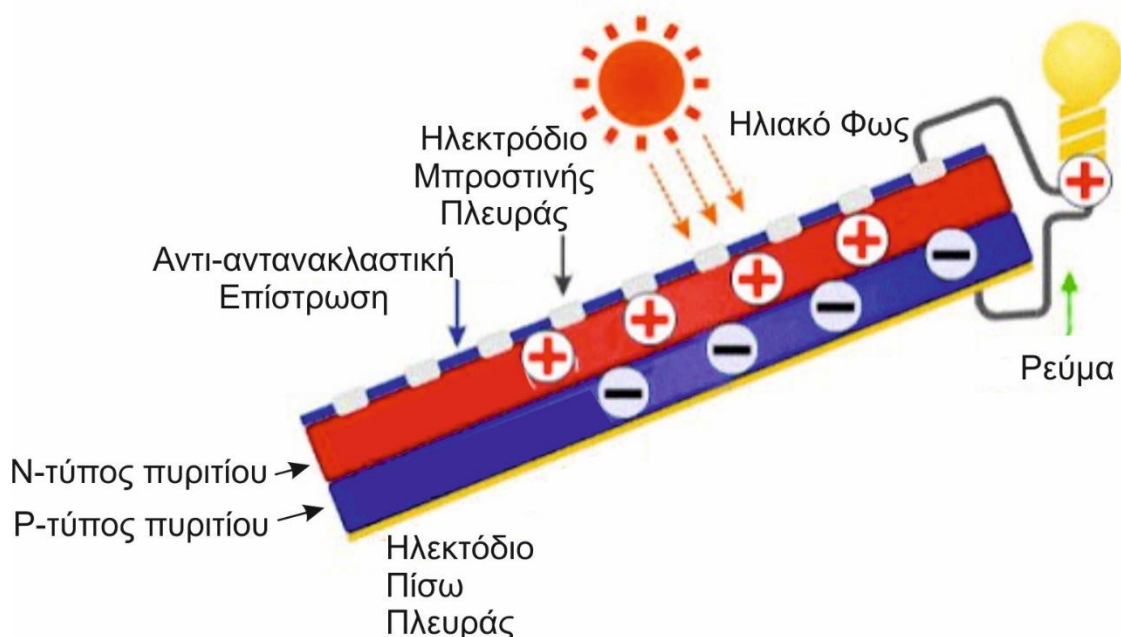
Οι ΑΠΕ χρησιμοποιούνται άμεσα (κυρίως για θέρμανση) είτε μετατρεπόμενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια). Το ενεργειακό δυναμικό απ' τις ήπιες μορφές ενέργειας είναι πολύ μεγαλύτερο από την παγκόσμια συνολική κατανάλωση της ενέργειας. Όμως λόγω του υψηλού κόστους των καινοτόμων ενεργειακών εφαρμογών, τα τεχνικά προβλήματα των εφαρμογών καθώς τα πολιτικά και τα οικονομικά συμφέροντα αδρανοποιούν την χρήση τους. Δυστυχώς στην Ελλάδα που έχει την καταλληλότερη μορφολογία και το ιδανικότερο κλίμα για την ανάπτυξη τέτοιων εφαρμογών δεν εκμεταλλεύονται όσο θα έπρεπε το ενεργειακό δυναμικό. Η Ελλάδα θα μπορούσε να είναι πρακτικά αυτόνομη ενεργειακά. ^[1]

Η δεκαετία του '70 ήταν καθοριστική για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς ο κόσμος άρχισε να έρχεται αντιμέτωπος με το αποτέλεσμα των πετρελαϊκών κρίσεων της εποχής, αλλά και την υπερεκμετάλλευση του περιβάλλοντος και την υποβάθμιση του βιοτικού επιπέδου από τη χρήση των συμβατικών μορφών ενέργειας. Αρχικά, λόγω της πειραματικής τους εφαρμογής ήταν πιο ακριβές απ' τις άλλες. Τα τελευταία 20 χρόνια παρατηρείται μια πτώση στο κόστος της υδροηλεκτρικής και της αιολικής ενέργειας. Επίσης, η βιομάζα μπορεί να ανταγωνίζεται επάξια τις συμβατικές μορφές ενέργειας όπως τον άνθρακα και την πυρηνική ενέργεια. Τώρα πια, όλα τα αναπτυσσόμενα κράτη λαμβάνουν πολύ σοβαρά υπόψη τους την χρήση αυτών των μορφών ενέργειας και τις αξιοποιούν όσο πιο αποδοτικά γίνεται. ^[2]

2. Ηλιακή ενέργεια και Ηλιακή ακτινοβολία

2.1. Ηλιακή ενέργεια

Από τον ήλιο προέρχεται η ηλιακή ενέργεια. Βέβαια η ηλιακή ενέργεια αποτελείται επίσης από άλλες μορφές ενέργειας όπως είναι η θερμότητα (θερμική ενέργεια), η ακτινοβολία (ενέργεια ακτινοβολίας) και το φως (φωτεινή ενέργεια). Ο ήλιος είναι ανεξάντλητος, άρα δεν υπάρχει κανένας περιορισμός χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή του. Οι τρεις βασικές τεχνολογίες είναι: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Μελετώντας τα παθητικά και τα ενεργητικά συστήματα καταλήγει κανείς ότι έχουν την ικανότητα να συλλέγουν και να αποθηκεύουν την ηλιακή ενέργεια. χρησιμοποιώντας είτε κάποιο υγρό, είτε αέρα ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας. Ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. ^[3] Φωτοβολταϊκό φαινόμενο ονομάζεται η άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική τάση (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.

Τα διαφορετικά ποσά ενέργειας που περιέχουν τα φωτόνια εξαρτώνται από το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι το υπεριώδες χρώμα έχει περισσότερη ενέργεια από το υπέρυθρο. Έτσι όταν τα φωτόνια προσκρούσουν σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο-ημιαγωγό διασκορπίζονται και κάποια ανακλώνται ενώ άλλα το διαπερνούν και άλλα απορροφώνται από το φωτοβολταϊκό. Τα φωτόνια που απορροφούνται είναι και αυτά που παράγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Τέλος, ο ηλεκτρισμός όπως είναι γνωστό από τη φυσική είναι η κίνηση των ηλεκτρονίων που έχουν εξαναγκαστεί από τα φωτόνια να αλλάξουν θέση.

2.2. Ηλιακή ακτινοβολία

Ο ήλιος είναι μια αέναη πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και διαδίδεται με την μορφή κβαντισμένων ποσοτήτων ενέργειας που ονομάζονται φωτόνια. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έξω από την γήινη ατμόσφαιρα έχει πυκνότητα ισχύος σχεδόν σταθερή. Το ορατό τμήμα που βρίσκεται στην επιφάνεια του Ηλίου λέγεται φωτόσφαιρα (πάχος 500 km) και αποτελεί την πηγή της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη Γη. Στη φωτόσφαιρα

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

παρατηρούνται οι ηλιακές κηλίδες, οι κόκκοι και οι ηλιακές εκλάμψεις. Πάνω από τη φωτόσφαιρα βρίσκεται η χρωμόσφαιρα (πάχος 3500-9000 km) στην οποία παρατηρούνται οι ηλιακές προεξοχές. Ακολουθούν η ζώνη αναστροφής της θερμοκρασίας (η θερμοκρασία αυξάνει απότομα στους 30.000 °K από τους 5.700 °K), το ηλιακό στέμμα (με πάχος 1.000.000 km) και η ηλιόσφαιρα που συνιστά την εξωτερική ατμόσφαιρα του Ηλίου και εκτείνεται μέχρι την τροχιά του Πλούτωνα. Στην περιοχή του ηλιακού στέμματος όπου εμφανίζεται ο ηλιακός άνεμος, υπάρχει ασθενής ακτινοβολία σωματιδιακής φύσης από τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια, τα οποία απομακρύνονται από τον Ήλιο με την ταχύτητα του φωτός. Όταν παρουσιάζονται έντονες ηλιακές εκρήξεις, καταφθάνει στην επιφάνεια της Γης με ταχύτητα ως 10^{12} πρωτόνια/ $\text{m}^2 \times \text{sec}$.

Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την γήινη ατμόσφαιρα είναι σχεδόν σταθερή στην τιμή 1367 W/m^2 . Αυτή η τιμή προσδιορίζει την πυκνότητας ισχύος της ηλιακής σταθεράς $G_{\text{SOLAR CONSTANT}}$. Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα σε μοναδιαία επιφάνεια, έξω από την ατμόσφαιρα της Γης, δίνεται από τον τύπο:

$$G_{\text{EXTRA_TERRESTRIAL}} = G_{\text{SOLAR_CONSTANT}} \times [1 + 0.033 \times \cos(360 \times D/365)]$$

Όπου:

D : οι ημέρες του έτους $D = 1, 2, 3, \dots, 365$

$G_{\text{EXTRA_TERRESTRIAL}}$: ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας και κάθετο στις ακτίνες του ήλιου

Όπως η ακτινοβολία μεταδίδεται προς τη Γη, εξασθενεί η πυκνότητα ισχύος της, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η ενέργεια των φωτονίων και αυξάνεται το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της Γης, το 7% της φασματικής απόκρισης βρίσκεται στην υπεριώδη περιοχή ($\lambda < 0.4 \mu\text{m}$), το 47% βρίσκεται στο ορατό φάσμα και το 46% στην υπέρυθη περιοχή ($\lambda > 0.75 \mu\text{m}$). Με βάση την τιμή της ηλιακής σταθεράς $G_{\text{SOLAR CONSTANT}} = 1367 \text{ W/m}^2$ και την περίμετρο 40000 km της Γης, υπολογίζεται ότι η συνολική ισχύς που δέχεται ο πλανήτης είναι της τάξης των 174000 TW. Η εξασθένηση της ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ακτινοβολίας στο επίπεδο της θάλασσας στην τιμή 1 KW/m^2 (αναφέρεται ως ισχύς ενός Ηλίου). Θεωρώντας καθημερινά 5 ώρες ηλιοφάνειας ισχύος 1 KW/m^2 , η ετήσια μέση ισχύς που προσπίπτει στη Γη στο επίπεδο της θάλασσας είναι 102.000 TW. [4]

2.3. Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

Για τη μεταφορά της δέσμης φωτός διαμέσω της ατμόσφαιρας γίνεται με τρεις μηχανισμούς: την απορρόφηση, τη σκέδαση και την ανάκλαση. Έτσι τροποποιείται η ακτινοβολία του μικρού μήκους κύματος.

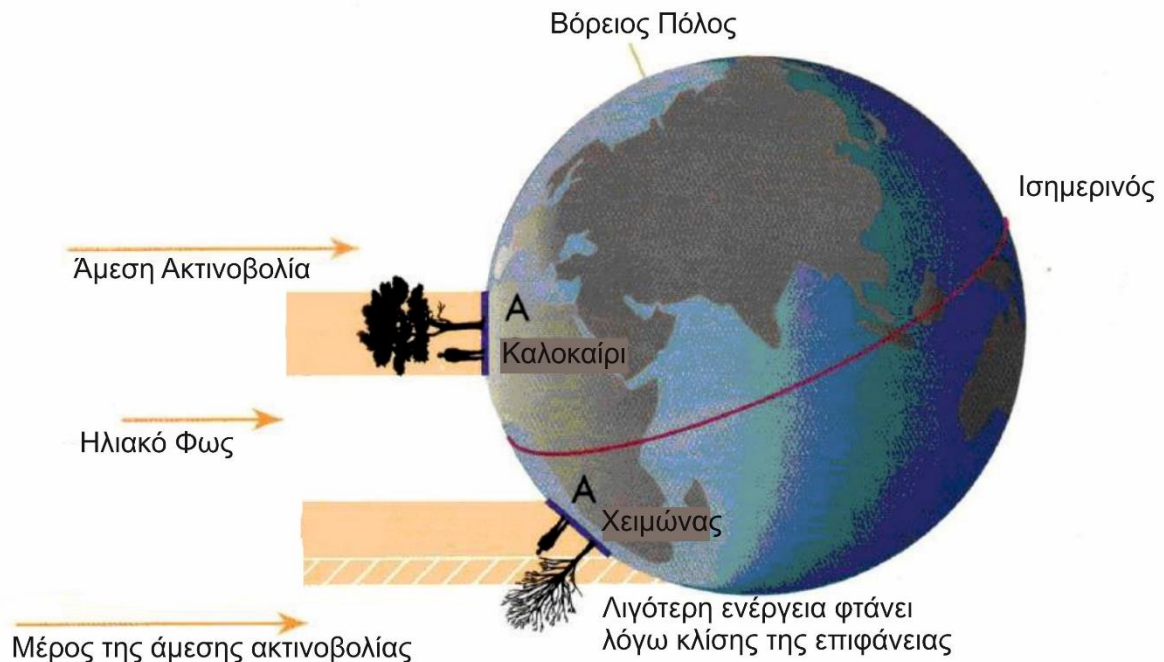
Απορρόφηση: είναι η προσπίπτουσα ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα και επανεκπέμπεται μερικώς ως μια ακτινοβολία μεγαλύτερου μήκους κύματος. Με βάση τα παραπάνω η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάται από το όζον και η υπέρυθη από τους υδρατμούς, το CO_2 , το SF_6 .

Σκέδαση: γίνεται αλλαγή της κατεύθυνσης διάδοσης της ακτινοβολίας, η οποία εξαρτάται από το μήκος κύματος και αποδίδεται στην ύπαρξη μορίων αέρα που αποτελούν τον ατμοσφαιρικό αέρα, τους υδρατμούς, τους σωματιδιακούς ρύπους και την αιωρούμενη σκόνη.

Ανάκλαση: έχει την ιδιότητα να γίνεται σε διεπιφάνειες διαφορετικής οπτικής πυκνότητας και συνήθως είναι ανεξάρτητη από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Η ολική ηλιακή ακτινοβολία G_{GLOBAL} που φθάνει στην επιφάνεια της Γης αποτελείται από την άμεση και τη διάχυτη συνιστώσα. Η άμεση φθάνει απευθείας από τον Ήλιο στην επιφάνεια του εδάφους χωρίς σκέδαση κατά τη διαδρομή της μέσα από την ατμόσφαιρα. Επομένως, η τιμή της θα εξαρτάται από την απόσταση Ηλίου-Γης, την ηλιακή απόκλιση δ , τη γωνία ύψους του Ηλίου, το γεωγραφικό πλάτος, το υψόμετρο, την κλίση της επιφάνειας που προσπίπτει και την

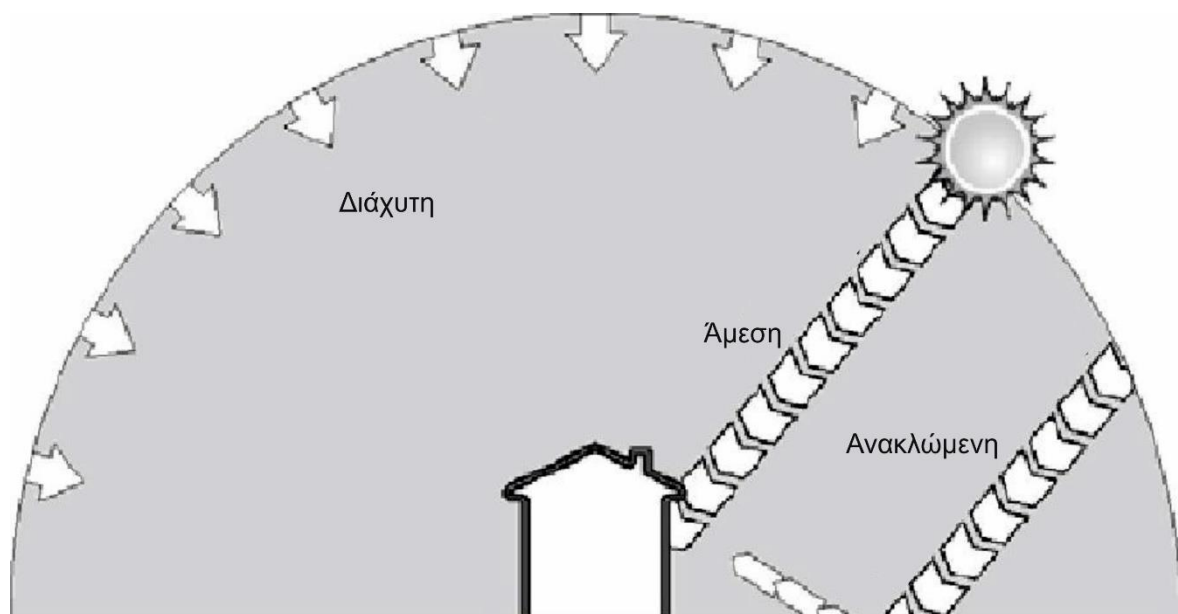
Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

απορρόφηση που υφίσταται στην ατμόσφαιρα (Εικόνα 2.2). Έτσι, η ένταση της εξαρτάται από την απόσταση που διανύει εντός της ατμόσφαιρας και σαν αποτέλεσμα θα έχει μεγαλύτερη τιμή κατά το καλοκαίρι και μικρότερη το χειμώνα. Τέλος, όσο πιο κάθετα προσπίπτει στην επιφάνεια τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της.



Εικόνα 2.2: Απεικόνιση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Η διάχυτη ακτινοβολία φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους μετά από ανάκλαση, σκέδαση εντός της ατμόσφαιρας, αλλά και μετά από ανάκλαση πάνω στην επιφάνεια της Γης. Ο συντελεστής ανάκλασης *albedo* ορίζεται από το λόγο ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα φωτεινή ισχύ στη θέση που δημιουργεί την ανάκλαση. Η διάχυτη ακτινοβολία εξαρτάται από τη γωνία ύψους του Ηλίου, το υψόμετρο του τόπου, τη λευκαύγεια του εδάφους, το ποσοστό νέφωσης και των υδροσταγονιδίων και άλλων παραγόντων σκέδασης που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα (Εικόνα 2.3). [5]-[6]

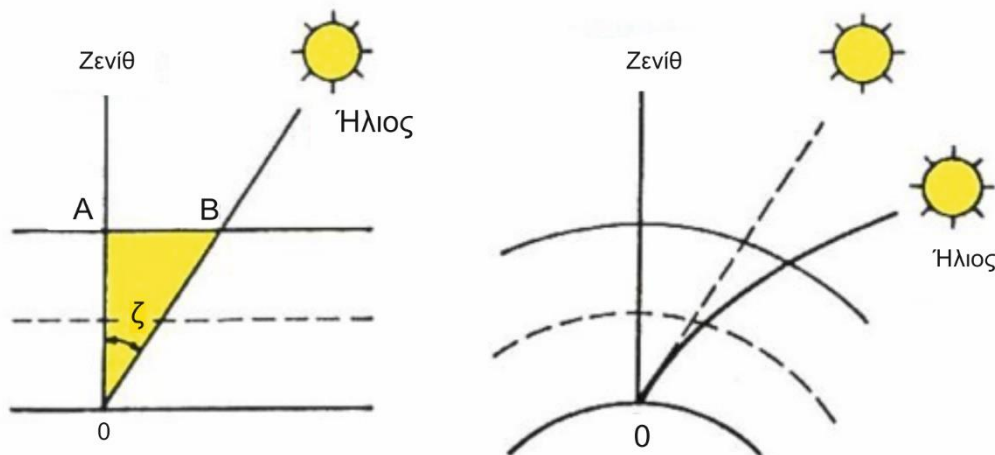


Εικόνα 2.3: Απεικόνιση διάχυτης, άμεσης και ανακλώμενης ακτινοβολίας.

2.4. Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του εδάφους

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στο έδαφος επηρεάζεται από το μήκος της γήινης ατμόσφαιρας. Η ένταση της μειώνεται όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που πρέπει να διανύσει το φως. Επομένως, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρότερη τις πρωινές ώρες, αυξάνεται κατά την ανατολή του ήλιου (μέχρι τις 12:00 το μεσημέρι) και μειώνεται μέχρι την δύση του. Ο όρος μάζα αέρα χρησιμοποιείται για να περιγραφεί η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα (Εικόνα 2.4).^[7] Έτσι η μάζα αέρα εξαρτάται από την ζενίθια γωνία ζ , η οποία σχηματίζει ένα ορθογώνιο τρίγωνο (αγνοώντας την καμπυλότητα και την διάθλαση της γης) και δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

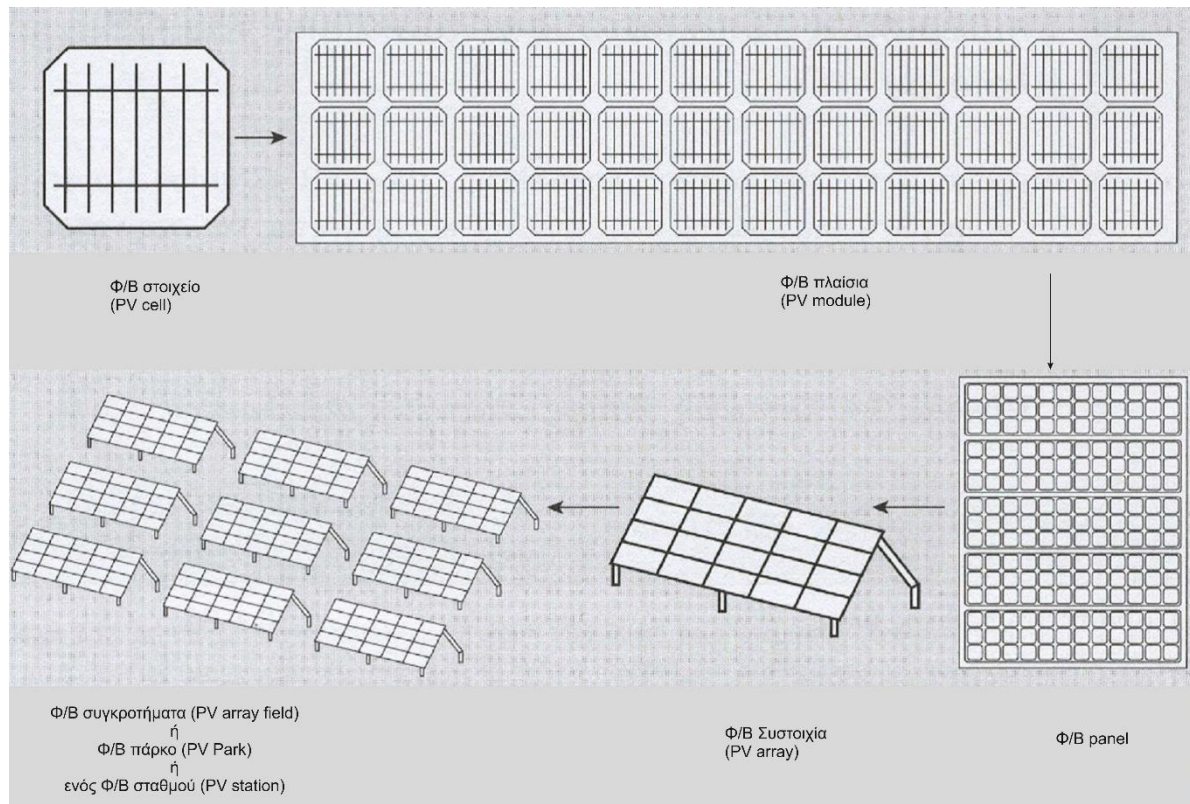
$$AM=1/\cos\zeta$$



Εικόνα 2.4: Η γωνία ζενίθ της ηλιακής ακτινοβολίας.

3. Οι ηλιακές κυψέλες

Η ενέργεια που παράγεται από μια ηλιακή κυψέλη είναι συγκεκριμένη και για να υπάρξει μια σημαντική ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος, περισσότερες ηλιακές κυψέλες συνδέονται μεταξύ τους, σχηματίζοντας το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Όμως, στις εγκαταστάσεις που η βασική λειτουργία τους είναι να παράγουν μέση ή μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ισχύος, απαιτείται η ύπαρξη πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα οποία συνδέονται και σχηματίζουν το φωτοβολταϊκό πάρκο (Εικόνα 3.1). Τελικά, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται σε σειρές και μεταξύ των σειρών αυτών υπάρχουν μεγάλες αποστάσεις για να μην δημιουργούνται προβλήματα σκίασης.



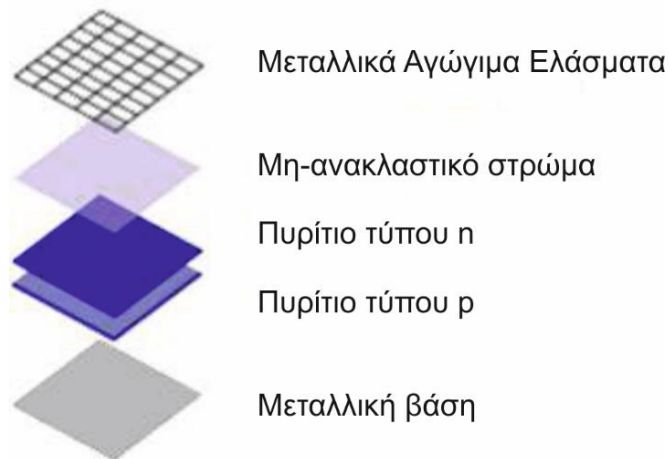
Εικόνα 3.1: Η σύνθεση των ηλιακών κυψελών και των πλαισίων.

3.1. Η δομή των ηλιακών κυψελών

Οι ηλιακές κυψέλες είναι δομημένες με τέτοιο τρόπο ώστε να προστατεύονται αεροστεγώς και υδατοστεγώς. Γι' αυτό τον λόγο κατά την δομή τους χρησιμοποιείται στο περίγραμμα τους μεταλλικό έλασμα ανοδιώμενου αλουμινίου και προστατεύονται με ένα ειδικό μονωτικό πλαστικό και ένα ειδικό γυαλί (Εικόνα 3.2). Φυσικά τα παραπάνω υλικά συντελούν στην καλύτερη μηχανική αντοχή και ευχρηστία των ηλιακών κυψελών.

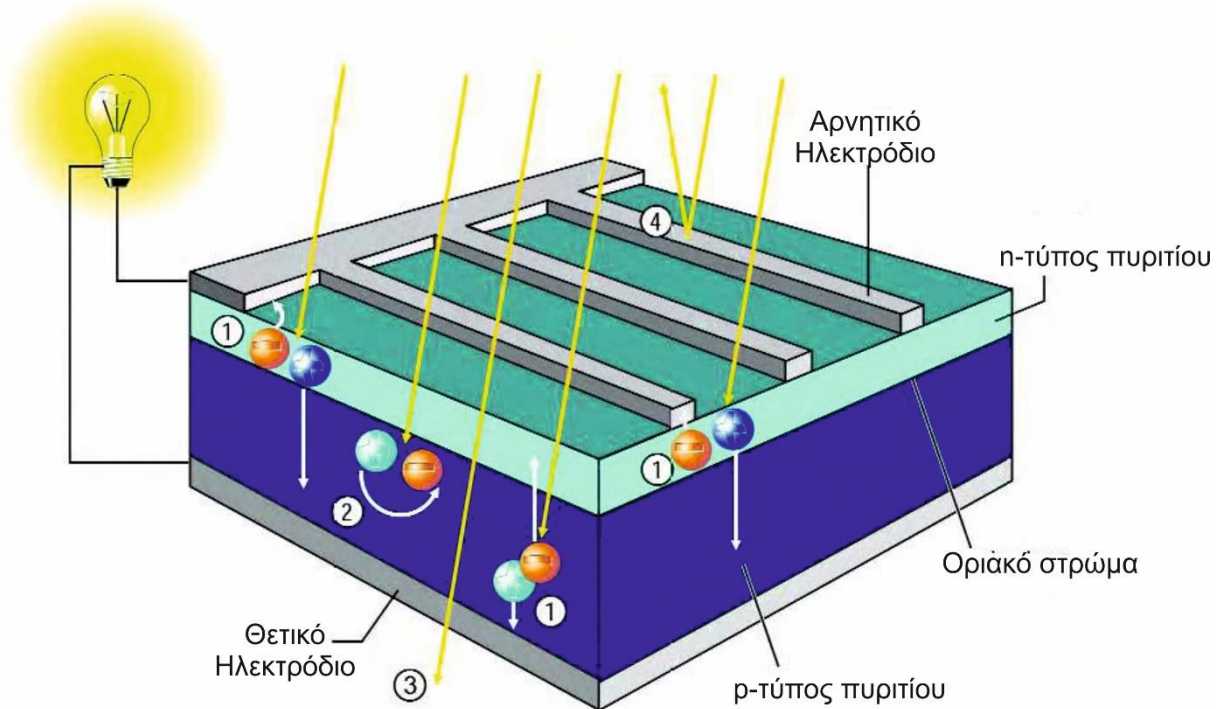
Οι ηλιακές κυψέλες αποτελούνται από:

- μεταλλική βάση,
- πυρίτιο τύπου p,
- πυρίτιο τύπου n,
- μη-ανακλαστικό στρώμα επικάλυψης και
- μεταλλικά αγωγίμα ελάσματα.



Εικόνα 3.2: Δομή ηλιακής κυψέλης.

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3.3) περιγράφεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Πολλά λεπτά οριζόντια και κάθετα ελάσματα είναι τα στοιχεία που συλλέγουν τα ηλεκτρόνια που διεγείρονται και δημιουργούν το ρεύμα. Έπειτα τα ηλεκτρόνια κινούνται προς τα κάθετα παχιά ελάσματα γνωστά ως busbars ή διαφορετικά ζυγοί. Οι ζυγοί των στοιχείων ενώνονται μεταξύ τους και δημιουργούνται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που συνδέονται μεταξύ τους και δημιουργείται το πλαίσιο. Κάθε πλαίσιο έχει δύο ακροδέκτες: τον θετικό πόλο και τον αρνητικό πόλο. ^{[8]-[9]-[10]}



Εικόνα 3.3: Πρόοψη φωτοβολταϊκού στοιχείου με 1) Διαχωρισμός φορτίου, 2) Επανασύνδεση, 3) Αχρησιμοποίητη φωτεινή ενέργεια, 4) Αγωγά ελάσματα

3.2. Φωτοβολταϊκά κελιά πυριτίου μεγάλου πάχους (Thick Film)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται με πολλούς τρόπους και με διαφορετικά υλικά. Ανάλογα με την τεχνολογία κατασκευής τους, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να διακριθούν σε δύο διαφορετικές ομάδες. Οι ομάδες χωρίζονται ανάλογα με το πάχος των υμένων. Το υλικό που χρησιμοποιείται κατά κόρον σήμερα για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων στη βιομηχανία είναι το πυρίτιο (Si). Η πρώτη ομάδα, χρησιμοποιεί

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

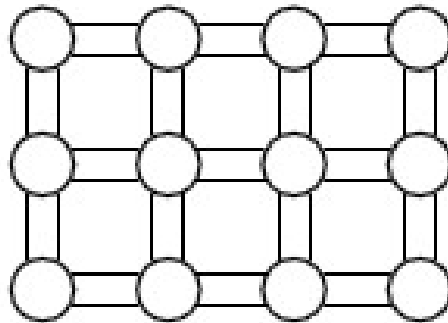
την τεχνολογία πυκνών υμένων (thick film) και παρακάτω παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων. ^{[11]-[12]-[13]-[14]}

3.2.1. Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (Single Crystalline Silicon, sc-Si)

Το πάχος του μονοκρυσταλλικού πυριτίου κυμαίνεται στα 0,3 mm και η απόδοση τους στις εγκαταστάσεις είναι μεταξύ 15%-18% για ένα πλαίσιο. Ενώ οι εργαστηριακές αποδόσεις φτάνουν το 24,7%. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης απόδοσης. ^[15] Το υψηλό κόστος κατασκευής του είναι ένα από τα μεγαλύτερα μειονέκτηματά τους. Κάποιες τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών (Εικόνα 3.6) είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Και οι δύο βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου (Εικόνα 3.4). Σε αυτές τις περιπτώσεις τα άτομα του πυριτίου σχηματίζουν 4 χημικούς δεσμούς με τα γειτονικά άτομα τους σχηματίζοντας μια τέλεια κρυσταλλική δομή όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5. ^[16]



Εικόνα 3.4: Ράβδος καθαρού μονοκρυσταλλικού πυριτίου.



Εικόνα 3.5: Δομή Μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

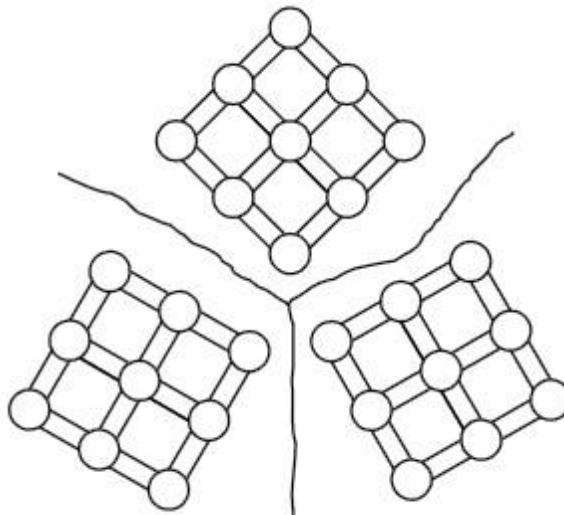
Το καθαρό πυρίτιο λιώνει στους 1420 °C το οποίο είναι το σημείο βρασμού του, παράγοντας έτσι μια ράβδο μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Εικόνα 3.4) η οποία καθαρίζεται και τεμαχίζεται μηχανικά ή με χρήση laser σε μικρά δισκία διαφόρων παχών γνωστά ως wafer. Με τόσο καλή απόδοση πλαισίου και τις μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πλαισίου κερδίζει μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία. ^[17]



Εικόνα 3.6: Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

3.2.2. Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)

Το πάχος του πολυκρυσταλλικού πυριτίου κυμαίνεται στα 0,3 mm όπως και στο μονοκρυσταλλικό. Η μέθοδος παραγωγής είναι φθηνότερη και η τιμή πώλησής του είναι αρκετά χαμηλή. ^{[18]-[19]} Στο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο διατηρείται η κρυσταλλική δομή, αλλά εμφανίζονται διαφορετικοί κρύσταλλοι πυριτίου. Τα κέντρα επανασύνδεσης των φωτοδιεγερμένων φορέων είναι τα σημεία που ενώνονται οι ατέλειες της κατασκευής (Εικόνα 3.7 και 3.8).



Εικόνα 3.7: Δομή πολυκρυσταλλικού πυριτίου και οι ατέλειες.

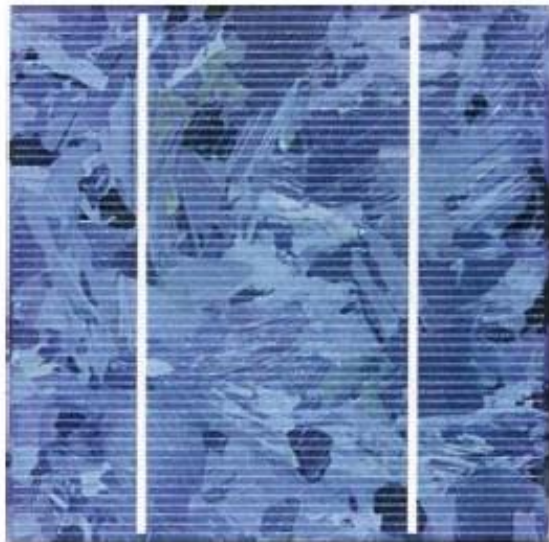
Με γυμνό μάτι μπορούν να παρατηρηθούν οι μονοκρυσταλλικές περιοχές. Η απόδοση των πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών πλαισίων εξαρτάται από την έκταση της μονοκρυσταλλικής περιοχής. Οι αποδόσεις που έχουν επιτευχθεί εργαστηριακά κυμαίνονται στο 20% ενώ στην πράξη τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία (Εικόνα 3.9) έχουν αποδόσεις από 13%-15%. ^[20] Τέλος το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο αναπτύσσεται σε μορφή μπαρών πυριτίου, στην συνέχεια τεμαχίζονται για να κατασκευαστούν τα μικρά δισκία διαφόρων παχών γνωστά ως wafer.



Εικόνα 3.8: Μπάρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Οι πιο γνωστές τεχνολογίες παραγωγής είναι:

- η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification),
- η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση") και
- η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.



Εικόνα 3.9: Πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου.

3.2.3. Ταινία πυριτίου (Ribbon Silicon)

Θεωρείται η νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων καθώς η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων πλησιάζει το 12%-13% με πάχος περίπου 0,3 mm (Εικόνα 3.10). Σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου έχει επιτευχθεί 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου. Σε εργαστηριακό επίπεδο οι αποδόσεις είναι κοντά στο 18%.^[21]



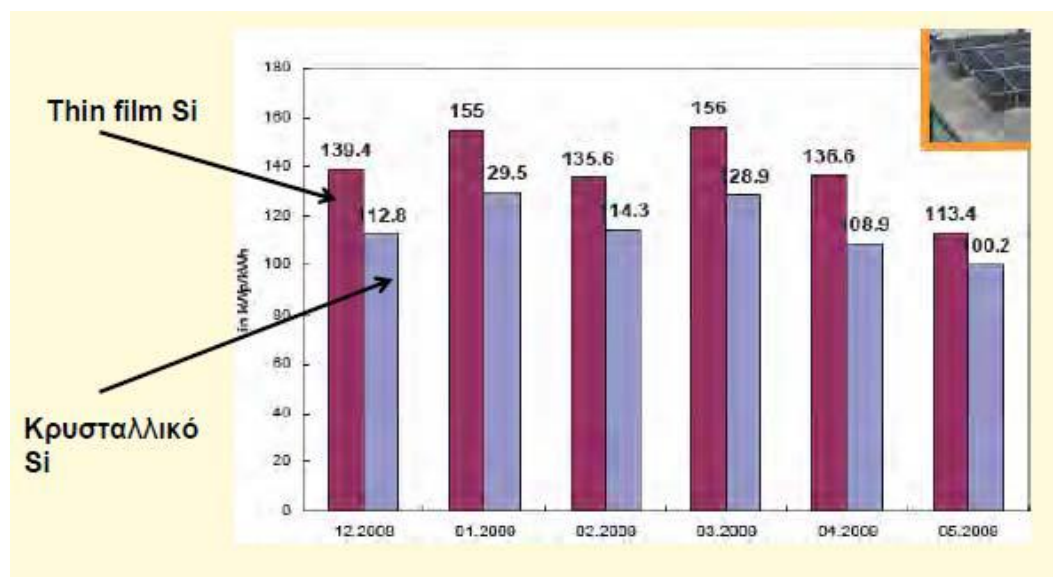
Εικόνα 3.10: Φωτοβολταϊκό στοιχείο ταινίας πυριτίου.

3.3. Φωτοβολταϊκά κελιά λεπτού υμενίου (Thin Film)

Συνεχίζοντας με την δεύτερη ομάδα και την τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film) παρατηρείται ότι αυτή η τεχνολογία έχει καταλάβει το 10% της συνολικής αγοράς των φωτοβολταϊκών και έχει αυξητική ζήτηση που θα κυμανθεί μεταξύ 40%-45% της συνολικής αγοράς τους τα επόμενα 4-5 χρόνια. Τα στοιχεία λεπτού υμενίου δεν έχουν αποδόσεις αντίστοιχες του κρυσταλλικού πυριτίου αλλά χαρακτηρίζονται από πολλά πλεονεκτήματα όπως:

- οι κυψέλες λεπτού υμενίου αντέχουν την ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν περισσότερη ισχύ όταν αυξάνεται η θερμοκρασία κατά την διάρκεια των μεσημεριανών ωρών. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι στην Ελλάδα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου παρά τις υψηλές θερμοκρασίες έχουν μειωμένη απόδοση σε σχέση με του λεπτού υμενίου (Εικόνα 3.11).
- Η τεχνολογία λεπτού υμενίου παράγει περισσότερη ενέργεια (σε KWh) σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κατασκευάζονται με συνδυασμό άλλων υλικών ώστε να έχουν διαφορετικές ιδιότητες και αποδόσεις. Μερικά παραδείγματα αυτών είναι το θειούχο κάδμιο (CdS), το τελουριούχο κάδμιο (CdTe), το χαλκο-ίνδιο-δισεληνίο (CuInSe_2), το χαλκο-γάλλιο-δισεληνίο (CuGaSe_2) και το χαλκο-ίνδιο-θείο (CuInS_2). Παρακάτω παρουσιάζονται οι τύποι των φωτοβολταϊκών πλαισίων λεπτού υμενίου.



Εικόνα 3.11: Το Thin Film έχει 15%-20% αποδιδόμενες KWh σε σχέση με το κρυσταλλικό Si.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

- Τα στοιχεία λεπτού υμενίου (Εικόνα 3.12) με μεγάλο εμβαδόν είναι η οικονομικότερη λύση για εγκαταστάσεις με υψηλές απαιτήσεις σε παραγωγή ενέργειας (σε MW). Βέβαια στην αγορά τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτού υμενίου είναι πολύ πιο φτηνά σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου.
- Ο γρήγορος χρόνος απόσβεσης και το μειωμένο κόστος αυτής της τεχνολογίας είναι σαφώς τα μεγαλύτερα και σημαντικότερα πλεονέκτημα της.



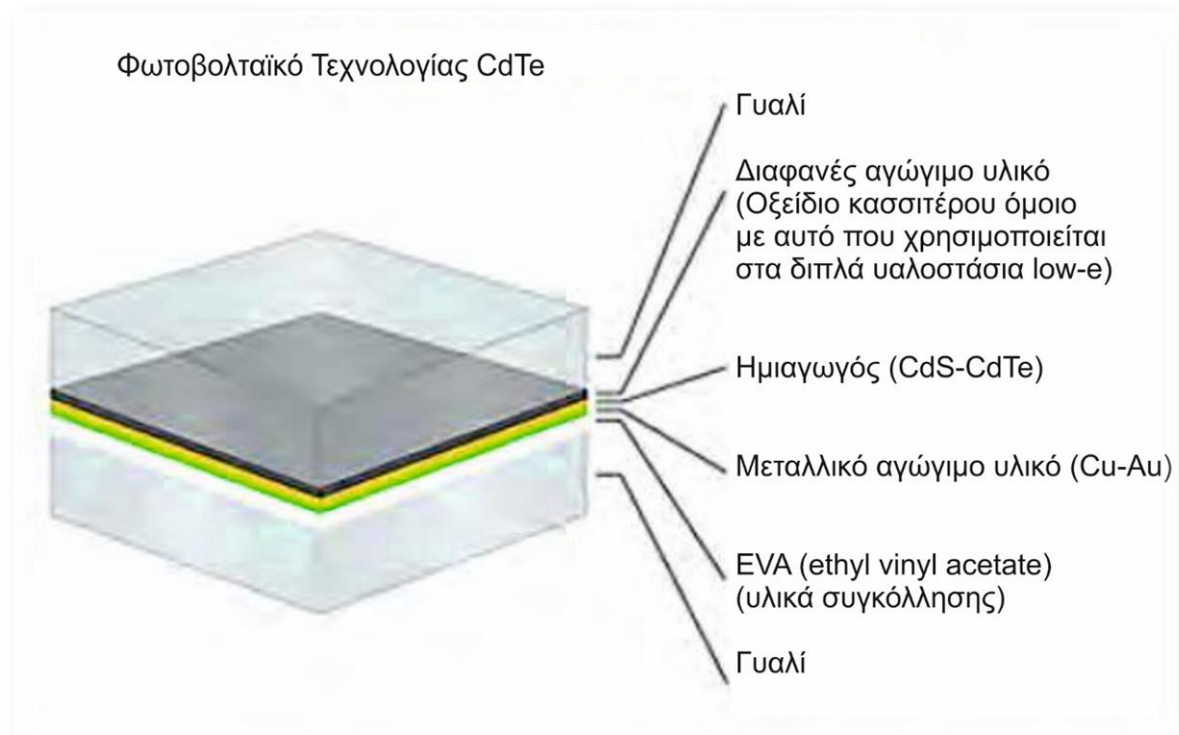
Εικόνα 3.12: Φωτοβολταϊκό τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου.

- Οι καινοτομίες στα κτίρια με την χρήση ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών πλαισίων στα παράθυρα, αντικαθιστώντας τα τζάμια προσφέρουν περισσότερο φως στους εσωτερικούς χώρους και αυτονομία στο ηλεκτρικό ρεύμα.
- Η ανακύκλωση, των υλικών που αποτελούν τα λεπτού υμενίου όπως το γυαλί και το μέταλλο, σε ποσοστό μεγαλύτερο της τάξης του 90% καθιστά τη συγκεκριμένη τεχνολογία απολύτως φιλική προς το περιβάλλον. ^[22]

3.3.1. Το Τελουριούχο κάδμιο (CdTe) και το Θειούχο κάδμιο (CdS)

Το Τελουριούχο Κάδμιο (Εικόνα 3.13) χαρακτηρίζεται από ενεργειακό διάκενο¹ 1eV το οποίο πλησιάζει το ηλιακό φάσμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να γίνεται απορρόφηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι και 99%. Οι αποδόσεις αυτών των φωτοβολταϊκών πλαισίων κυμαίνονται από 6% έως 8%. ^{[17]-[23]} Εργαστηριακά η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι στο 16%. Βέβαια το κόστος ακόμα κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα. Μετά από έρευνες αποδείχτηκε ότι το κάδμιο είναι καρκινογόνο και σταδιακά μειώνεται η χρήση του. Η Greenpeace έχει εκδηλώσει την έντονη αντίδραση της σε αυτό το στοιχείο. Αντίθετα η έλλειψη του Τελλουρίου από την φύση προβληματίζει τους επιστήμονες. Η βασική χρήση του τελλουρίου είναι στην ενθυλάκωση του γυαλιού ως δομικό υλικό (BIPV Building Integrated Photovoltaic). ^[24]

¹ Το ενεργειακό διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στην ζώνη αγωγιμότητας αποτελεί την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για την διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους, ώστε να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής.



Εικόνα 3.13: Φωτοβολταϊκό στοιχείο λεπτού υμενίου τεχνολογίας CdTe.

Σε οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές έχει χρησιμοποιηθεί το θειούχο κάδμιο (CdS) το οποίο είναι ημιαγωγός (Εικόνα 3.14). Χαρακτηρίζεται από διάκενο 2,45 eV και συμπεριφέρεται σαν ημιαγωγός τύπου n. Έτσι στην πλεονότητά τους οι φορείς είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, χωρίς να απαιτείται η προσθήκη ξένων ατόμων. Τα ηλιακά στοιχεία θειούχου καδμίου παράγουν μικρότερες ποσότητες φωτορεύματος σε σχέση με τα ηλιακά στοιχεία πυριτίου. Η απόδοση των ηλιακών στοιχείων θειούχου καδμίου κυμαίνεται περίπου στο 10% χωρίς να αναμένεται μεγάλη διάρκεια ζωής τους.



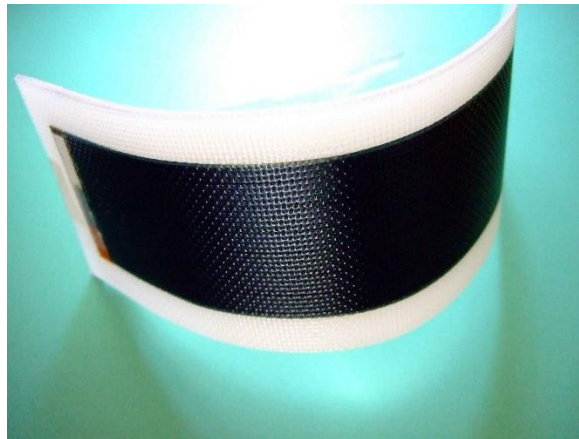
Εικόνα 3.14: Φωτοβολταϊκό στοιχείο λεπτού υμενίου τεχνολογίας CdS.

3.3.2. Άμορφο πυρίτιο (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)

Το πάχος του άμορφου πυριτίου είναι περίπου 0,0001 mm ενώ το υπόστρωμα του μπορεί να είναι από 1 έως 3 mm. Σε αυτά τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παρατηρούνται πολύ χαμηλές αποδόσεις της κλίμακας των 6%-8% ενώ στα εργαστήρια οι αποδόσεις τους φτάνουν το 14%. Ονομάζεται άμορφο πυρίτιο καθώς τα άτομα του πυριτίου διατάσσονται ακαθόριστα στο χώρο (Εικόνα 3.15). Είναι λεπτές ταινίες σε στρώσεις οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

ημιαγώγιμου υλικού όπως το πυρίτιο πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως το γυαλί ή το αλουμίνιο. Η τιμή του είναι πολύ χαμηλή καθώς χρησιμοποιείται μικρή ποσότητα πυριτίου. ^{[25]-[26]}



Εικόνα 3.15: Φωτοβολταϊκό στοιχείο λεπτού υμενίου τεχνολογίας άμορφου πυριτίου.

Ένα πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται από τις υψηλές θερμοκρασίες. Σε σχέση με άλλα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχει την ικανότητα να αποδίδει ακόμα και όταν υπάρχει συννεφιά (διάχυτη ακτινοβολία). Η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα του συγκαταλέγεται στα μειονεκτήματα καθώς χρειάζεται μεγάλη έκταση για την παραγωγή ενέργειας σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Αμφισβητείται η διάρκεια ζωής του άμορφου πυριτίου καθώς είναι μια σύγχρονη τεχνολογία χωρίς να υπάρχουν παλιότερα παραδείγματα. Έτσι οι κατασκευαστές δίνουν εγγυήσεις για την απόδοση 20 ετών. ^{[27]-[28]}

3.3.3. Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός (CuInSe₂)

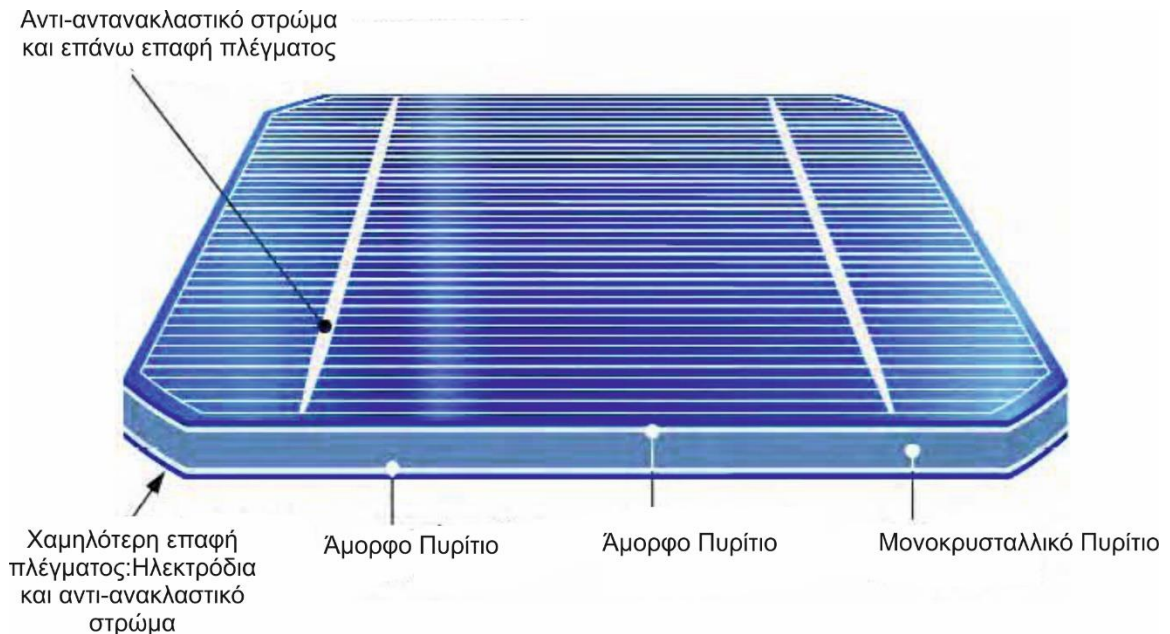
Η απόδοσή του κυμαίνεται στο 11% ενώ στα εργαστήρια η απόδοση φτάνει τα 18,8%. Στο δισεληνοϊνδιούχο χαλκό παρατηρείται μεγάλη απορροφητικότητα όσον αφορά την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (Εικόνα 3.16). Βέβαια η εργαστηριακή απόδοση είναι ίσως η μεγαλύτερη μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτού υμενίου. Εάν προστεθεί γάλλιο αυξάνεται περισσότερο η απόδοσή του CIS. Όμως το ίνδιο είναι σε περιορισμένες ποσότητες στη φύση και αναμένεται το κόστος του να είναι υψηλό τα επόμενα χρόνια. ^{[26]-[29]}



Εικόνα 3.16: Φωτοβολταϊκό στοιχείο CIS.

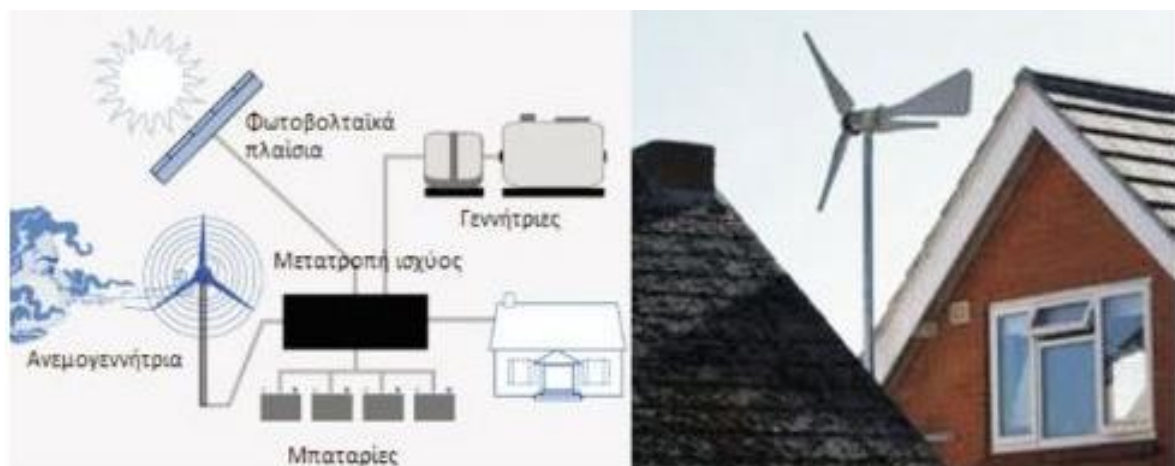
3.3.4. Υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

Το υβριδικό φωτοβολταϊκό (Εικόνα 3.17) στοιχείο είναι ένα πολυστρωματικό πλαίσιο με τον συνδυασμό διαφορετικών τεχνολογιών HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer). Όμως τα υβριδικά φωτοβολταϊκά πλαίσια που υπάρχουν στην αγορά αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) και ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.



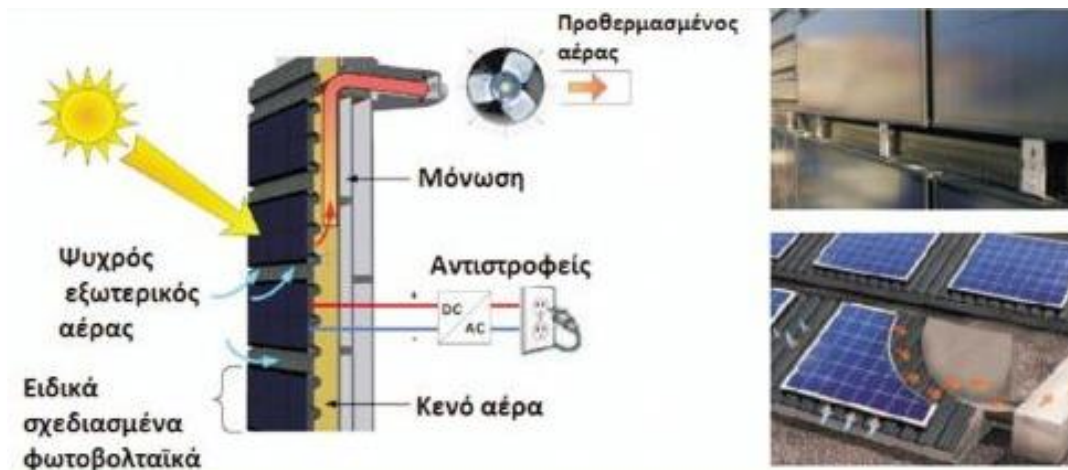
Εικόνα 3.17: Απεικόνιση πολυστρωματικού φωτοβολταϊκού.

Ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου ο οποίος στις εμπορικές εφαρμογές πλησιάζει το 17,2% είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα. Άρα με την χρήση μικρής επιφάνειας επιτυγχάνεται η ίδια εγκατεστημένη ισχύ.



Εικόνα 3.18: Υβριδικό Φωτοβολταϊκό-αιολικό σύστημα.

Σε υψηλές θερμοκρασίες και στην διαχεόμενη ακτινοβολία πλεονεκτούν αποδίδοντας υψηλά ποσοστά τα υβριδικά πλαίσια. Όμως λόγω των υψηλών αποδόσεων τα υβριδικά πλαίσια είναι αναμενόμενο να είναι ακριβότερα από άλλα φωτοβολταϊκά πλαίσια (Εικόνα 3.18). ^[25]



Εικόνα 3.19: Υβριδικό Φωτοβολταϊκό-θερμικό σύστημα.

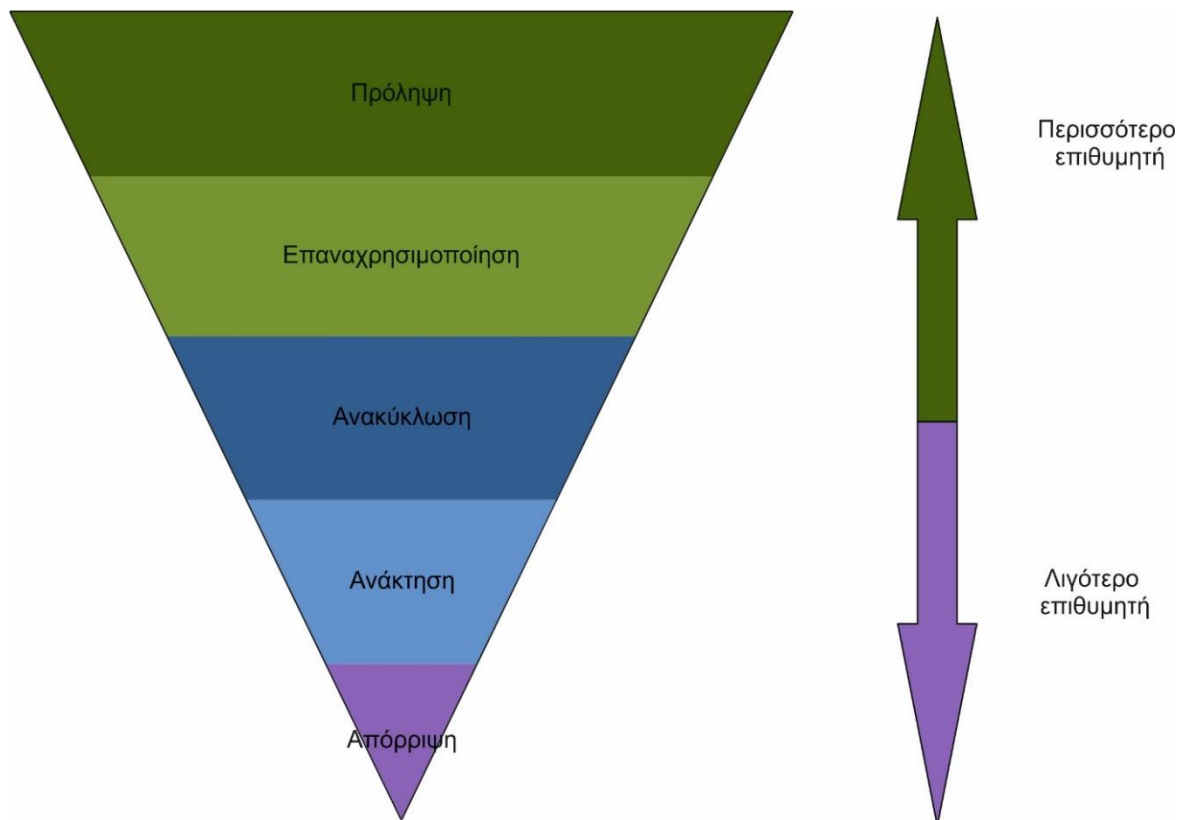
Τα υβριδικά συστήματα που παράγουν ηλεκτρική και θερμική ισχύ από την ηλιακή ακτινοβολία ονομάζονται φωτοβολταϊκά (θερμικά) ηλιακά συστήματα. Σε αυτά τα συστήματα τοποθετούνται τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών και των θερμικών ηλιακών συστημάτων (ΘΗΣ). Το υψηλό κόστος τους περιορίζει αισθητά την εφαρμογή τους σε ποσοστό 1,5%, εκτιμάται ότι η ζήτηση για τα συστήματα αυτά θα αυξηθεί στο μέλλον (Εικόνα 3.19). Οι έρευνες κινούνται με γρήγορους ρυθμούς έτσι ώστε να βελτιωθούν τα τεχνικά προβλήματα και να αυξηθεί η ζήτηση και η χρήση τους στο μέλλον.

Η μη ύπαρξη ψύξης ή βρασμού του ρευστού στον συλλέκτη είναι πλεονέκτημα για αυτή την τεχνολογία. Είναι τόσο καλά ρυθμισμένο που εάν υπάρξει μια διαρροή στο σύστημα, είναι αδύνατον να προκληθεί μεγάλη υλική ζημιά. Όμως η χαμηλή θερμοχωρητικότητα και η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του αέρα συντελούν στην χαμηλή ικανότητα μεταφοράς θερμότητας του συστήματος ως ένα μειονέκτημα. ^[30]

4. Η Ανακύκλωση

Η πυραμίδα της εναλλακτική διαχείρισης έχει υιοθετηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελλάδα με τέτοιο τρόπο ώστε να απεικονίζεται η διαχείριση των αποβλήτων (Εικόνα 4.1). Οι ενέργειες που είναι πιο επιθυμητές όσον αφορά την διαχείριση των αποβλήτων βρίσκονται στην κορυφή της πυραμίδας σε αντίθεση με τις μη επιθυμητές. Με τον νόμο 4042/2012 ορίζεται η ποινική προστασία του περιβάλλοντος. Σε κάποιες παραγράφους αυτού του νόμου γίνεται ξεκάθαρη περιγραφή της παραγωγής των αποβλήτων και της διαχείρισής τους.

Ο κεντρικός άξονας της στρατηγικής αυτής είναι να αξιοποιούνται τα απόβλητα όσο περισσότερο γίνεται ώστε να μην επιβαρύνεται το περιβάλλον. Επομένως η εναπόθεση των αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής θα πρέπει να είναι η τελευταία επιλογή. Όμως εάν προλαμβάνεται η παραγωγή των αποβλήτων και η μείωση τους, θα υπάρξει εξοικονόμηση της ενέργειας και των διαθέσιμων πόρων. Αυτή η ενέργεια θα ωφελήσει το περιβάλλον.



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση Πυραμίδας-Στρατηγικής Αποβλήτων.

Ο σχεδιασμός της πολιτικής διαχείρισης των αποβλήτων βασίζεται στην **πρόληψη** της παραγωγής των αποβλήτων. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιούνται ανακυκλωμένες πρώτες ύλες εάν για όλα τα προϊόντα είχε χρησιμοποιηθεί στο αρχικό στάδιο του προγραμματισμού της παραγωγής ο οικολογικός σχεδιασμός. Φυσικά χωρίς την ενημέρωση των καταναλωτών και την απόκτηση οικολογικής συνείδησης δεν μπορεί να επιτευχθεί η πρόληψη της παραγωγής των αποβλήτων. Το επόμενο επίπεδο της πυραμίδας βασίζεται στην **επαναχρησιμοποίηση** των προϊόντων. Επομένως θα πρέπει όλα τα προϊόντα να ξαναχρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν περισσότερες φορές γίνεται. Φυσικά στην Ελλάδα υπάρχουν 15 συστήματα εναλλακτικής διαχείρισης και ανακύκλωσης για ένα μεγάλο εύρος προϊόντων. Το επόμενο στάδιο αφορά την **ανακύκλωση**, με την οποία μπορούν να εξασφαλιστούν πολύτιμες πρώτες ύλες, οι οποίες υπό άλλες συνθήκες πρέπει να εισαχθούν με υψηλό κόστος. Ο παραγωγός ή κατασκευαστής είναι υπεύθυνος για το προϊόν που δημιουργεί. Όμως χωρίς την σημαντική συμβολή των καταναλωτών στον τομέα της ανακύκλωσης, τίποτα δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

Το επόμενο βήμα στηρίζεται στην αποτέφρωση των αποβλήτων για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ατμού και θέρμανσης για οικιακή χρήση. Εδώ γίνεται λόγος για την **ανάκτηση** των αποβλήτων. Σε αυτή την περίπτωση η Ευρωπαϊκή Ένωση δεν συνιστά την αποτέφρωση των αποβλήτων για την ανάκτηση ενέργειας επειδή υπάρχει πιθανότητα εκπομπής αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα.

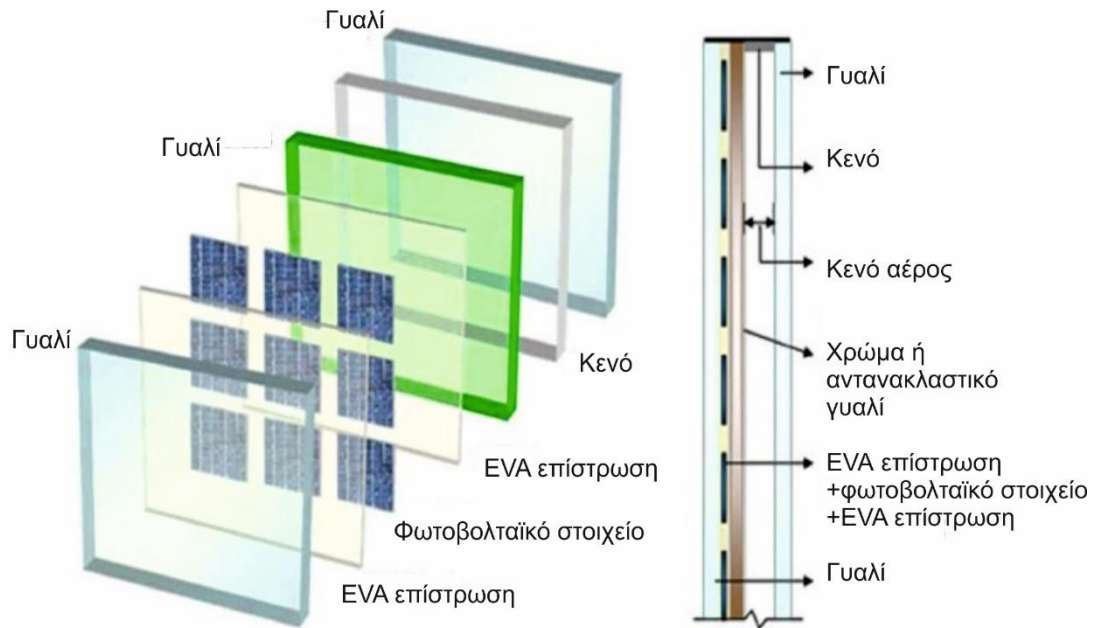
Το τελευταίο επίπεδο της ανάποδης τριγωνικής πυραμίδας είναι η **απόρριψη** σε χώρους υγειονομικής ταφής. Για τον λόγο ότι δεν είναι η πιο επιθυμητή ενέργεια και βρίσκεται πολύ χαμηλά στις προτιμήσεις όσον αφορά τη διαχείριση των αποβλήτων. Κατά την ταφή των αποβλήτων παράγεται το μεθάνιο (CH_4), το οποίο είναι αέριο του θερμοκηπίου και πολύ βλαβερό για το περιβάλλον. Κατά το στάδιο της αποσύνθεσης τα αποβλήτα συνήθως ελευθερώνουν χημικές ουσίες που ρυπαίνουν το έδαφος και το νερό. Ένας χώρος υγειονομικής ταφής ρυπαίνει κάθε μέρα, την ποσότητα πόσιμου νερού που καταναλώνει ένα σπίτι για να εξυπηρετήσει τις βασικές ανάγκες του για έναν ολόκληρο χρόνο. Δυστυχώς όλα τα υλικά που απορρίπτονται στους χώρους υγειονομικής ταφής υπολογίζονται να αξίζουν περίπου 5,25 δις €. ^[31]

4.1. Η Δομή των Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Η δομή του φωτοβολταϊκού πλαισίου βασίζεται στην σύνθεση επιμέρους φωτοβολταϊκών στοιχείων. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν την λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου και πρέπει να προστατεύεται από αυτές. Οι διαφορετικοί τύποι φωτοβολταϊκών πλαισίων ωφείλονται στα στοιχεία και στην εφαρμογή τους. Έτσι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από διάφορα στρώματα, τα οποία είναι:

- ειδικό γυαλί,
- συμπυκνωμένο πολυμερές υλικό (Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Sheet) για την ενθυλάκωση των στοιχείων,
- ηλιακά στοιχεία,
- συμπυκνωμένο υλικό (EVA),
- ειδικό γυαλί,
- κενό αέρος και
- ειδικό γυαλί.

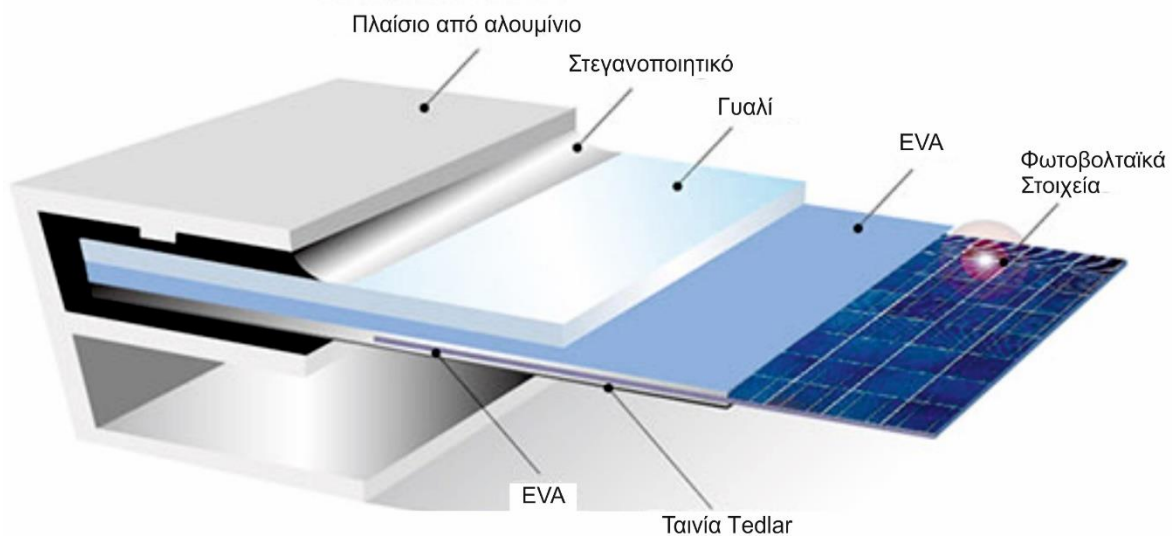
Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (Εικόνα 4.2) προστατεύονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες από δυο κομμάτια γυαλιού ή ένα φύλλο γυαλιού και ένα πλαστικό, ενώ μερικές φορές μόνο με ένα πλαστικό. Χρησιμοποιούνται είδη γυαλιών που αντανakλούν την θερμότητα. Τέτοια γυαλιά είναι διαφανή ή χρωματισμένα. Το επόμενο συμπυκνωμένο πολυμερές υλικό που χρησιμοποιείται λέγεται EVA. Αυτό το υλικό παρέχει ηλεκτρική μόνωση και μεγάλη διαπερατότητα στο φως. Η εικόνα παρακάτω δείχνει ακριβώς την θέση που καταλαμβάνει το κάθε υλικό.



Εικόνα 4.2: Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Δομή Κρυσταλλικού Πυριτίου

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου (Εικόνα 4.3) παράγονται με μορφή λεπτών πλακιδίων πυριτίου πάχους 200-500 nm. Το πρώτο βήμα της κατασκευής των ηλιακών κυττάρων είναι ένας κόμβος n-p που σχηματίζεται στην εμπρόσθια επιφάνεια αυτών των πλακιδίων με βάση την ατομική διάχυση του φωσφόρου. Έπειτα υπάρχει μια αντι-ανακλαστική επίστρωση (επίστρωση AR) που εφαρμόζεται σε αυτό το στρώμα. Στο επόμενο στάδιο της διαδικασίας παρασκευής, τοποθετούνται τα δύο ηλεκτρόδια αλουμινίου και οι εμπρός και οι πίσω πλευρές του πλακιδίου. ^[32] Διάφοροι τύποι φωτοβολταϊκών κυττάρων κατασκευάζονται από διαφορετικούς κατασκευαστές και διακρίνονται από τον τύπο του επιχρίσματος AR και το υλικό της ηλεκτρικής επαφής που εφαρμόζουν. Τα ηλεκτρόδια είναι συνήθως από ασήμι, ενώ εκείνα που βρίσκονται στην πίσω επιφάνεια του κυττάρου συχνά έχουν μια επιπλέον λεπτή επίστρωση από αλουμίνιο.

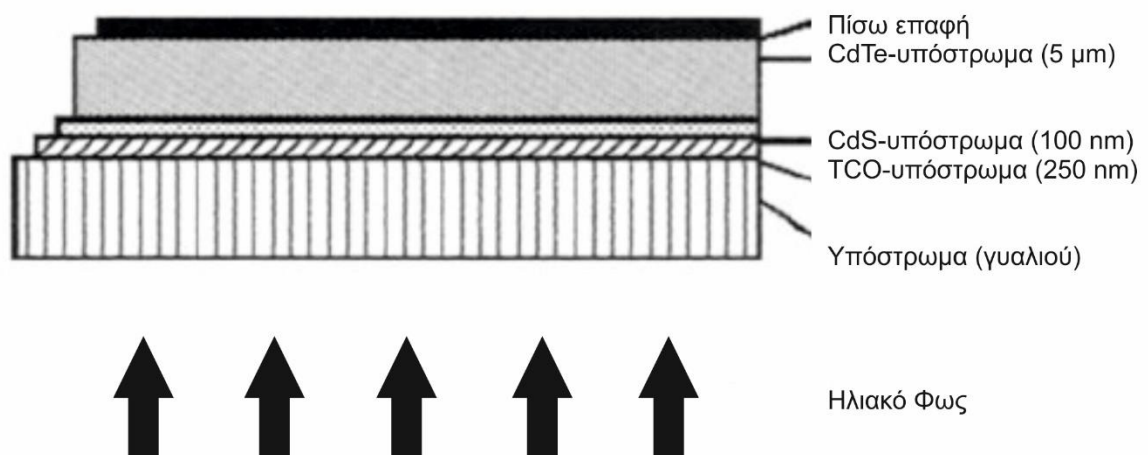


Εικόνα 4.3: Δομή κρυσταλλικού πυριτίου.

Δομή Χαλκογενιδίων

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1970, το CdTe και το CdS στα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν προσελκύσει ενεργά την έρευνα και αυτό βοήθησε στην επίτευξη λογικών αποδόσεων χρησιμοποιώντας ηλεκτρολυτικό υλικό CdTe (Εικόνα 4.4).

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η τυπική ακολουθία τεχνολογίας λεπτού υμενίου. Στην προτιμώμενη διάταξη, πρώτα μια διάφανη μεμβράνη αγωγίμη (συνήθως In_2O_3 ή SnO_2 ή ένας συνδυασμός και των δύο) εναποτίθεται πάνω στην γυάλινη πλάκα που χρησιμοποιείται ως διαφανές υπόστρωμα. Στη συνέχεια, μια ταινία n-CdS εναποτίθεται, ακολουθούμενη από την ενεργή p-αγωγίμη ταινία CdTe. Μια ειδική τεχνική βελτιώνει την p-n δίοδο μεταξύ Cd και CdTe ('ενεργοποίηση'). Τέλος μια επαφή χαμηλής αντίστασης εναποτίθεται πάνω στο CdTe, η οποία μπορεί να είναι αδιαφανής. Το φως εισέρχεται στο κύτταρο μέσα από το γυάλινο υπόστρωμα. Τα φωτόνια κινούνται εγκάρσια των υποστρωμάτων TCO και CdS. Αυτές οι ταινίες δεν δραστηριοποιούνται στην φωτοβολταϊκή διαδικασία, αν και οδηγεί σε μια μη επιθυμητή απορρόφηση. Στο υπόστρωμα CdTe γίνεται η ενεργός απορρόφηση. Τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών δημιουργούνται κοντά στην n-δίοδο. Τα ηλεκτρόνια οδηγούνται από τον ενσωματωμένο τομέα μέσω της διασύνδεσης στην ταινία n-CdS. Οι οπές που παραμένουν στο υπόστρωμα CdTe εντάσσονται στην ομάδα των οπών ώστε να προωθηθεί η p-αγωγιμότητα του υλικού αυτού. Τέλος, πρέπει να εγκαταλείψουν το κύτταρο μέσω της πίσω επαφής. Η ηλεκτρική ενέργεια συνδέεται με μεταλλικές επαφές που συνδέονται με το υπόστρωμα TCO και την πίσω επαφή του φωτοβολταϊκού πλαισίου.



Εικόνα 4.4: Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου CdTe.

Λόγω της ισχυρής απορρόφησης φωτός στο CdTe, περίπου 105 cm^{-1} για το φως που έχει ένα μήκος κύματος κάτω από 800 nm, το πάχος των στρωμάτων είναι λίγων μικρόμετρων και είναι αρκετό για την πλήρη απορρόφηση του φωτός. Για πρακτικούς λόγους, το πάχος που συχνά προτιμάται είναι περίπου 3 έως 7 μm .

Έρευνες έχουν δείξει ότι η δίοδος μπορεί να αφομοιωθεί έτσι ώστε τα ακόλουθα βασικά κριτήρια για τα ηλιακά κύτταρα μπορούν να πληρούνται υπό συνθήκες κατά την βιομηχανική παραγωγή:

- η αποτελεσματική παραγωγή φορτίου στο υπόστρωμα CdTe,
- ο αποτελεσματικός διαχωρισμός των φορέων του φορτίου μέσω του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου της συνδέσεως p-n μεταξύ n-CdS και p-CdTe,
- η χαμηλή απώλεια-εξαγωγή του φωτορεύματος μέσω των ωμικών επαφών με το TCO, η πίσω επαφή του υποστρώματος και

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

➤ οι απλές τεχνολογίες κατασκευής για χαμηλό κόστος και υψηλό όγκο παραγωγής. Όπως το CdTe, έτσι και το CdS έχει την ίδια ισχυρή τάση να σχηματίζει στοιχειομετρικά υποστρώματα, αλλά σε αντίθεση με το CdTe, τα υποστρώματα του CdS είναι εγγενώς η-προσμίξεις με μια μικρή μη-στοιχειομετρία. Τα υποστρώματα του CdS μπορούν να παρουσιαστούν από τις ίδιες διαδικασίες όπως το CdTe με τις βασικές του ιδιότητες να είναι αρκετά όμοιες με εκείνες του CdTe.

Οι ακόλουθες μέθοδοι έχουν μελετηθεί κατά την παραγωγή:

- η εξάχνωση ή η συμπύκνωση,
- η ηλεκτρο-εναπόθεση και
- η εκτύπωση της οθόνης.

Μια άλλη μέθοδος είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για το CdS είναι η χημική εναπόθεση (CBD). Σε αυτή τη διαδικασία ένα διάλυμα που περιέχει Cd και S οδηγεί σε αυθόρμητο σχηματισμό λεπτών υμενίων CdS σε επιφάνειες υποστρωμάτων βυθισμένο εντός του διαλύματος σε θερμοκρασίες γύρω στους 80 °C.

Η Cd ταινία σχηματίζεται να είναι σφιχτά προσκολλημένη και πολύ ομοιογενή, ακόμη και σε μικρό πάχος. Ένα πιθανό μειονέκτημα κατά τον σχηματισμό ένωσης υψηλών φωτοηλεκτρονίων μεταξύ του CdTe και του CdS είναι ότι το CdS έχει μια σημαντική αναντιστοιχία πλέγματος σε CdTe. ^[33]

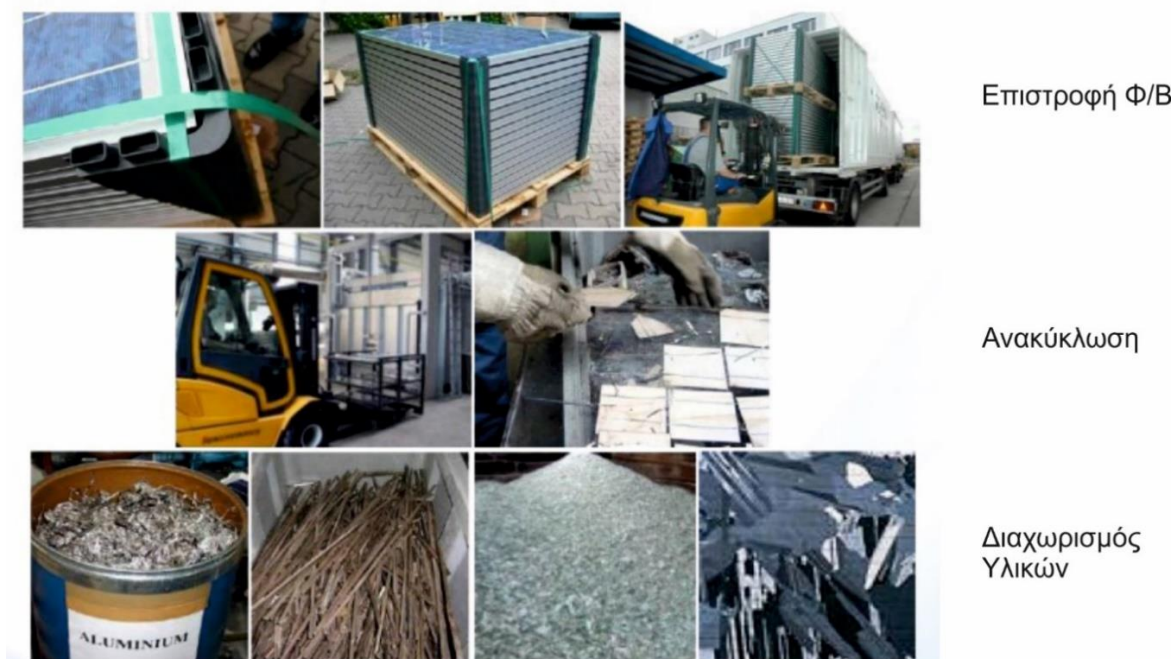
4.2. Ανακύκλωση Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Το φωτοβολταϊκό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια πολλά υποσχόμενη και καλά εδραιωμένη λύση για την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο, όπως και για όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες, μέσα σε λίγα χρόνια αναμένεται να παρουσιαστεί ένα πρόβλημα. Αυτό είναι το πρόβλημα των αποβλήτων που συνδέονται με τη μεγάλη χρήση των ηλιακών συλλεκτών. Πράγματι η μέση διάρκεια ζωής των κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών πλαισίων πυριτίου εκτιμάται σε 25-30 χρόνια.

Επί του παρόντος, τα κυρίαρχα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι τεχνολογίας κρυσταλλικού πυριτίου αλλά και φωτοβολταϊκά στοιχεία τεχνολογίας λεπτού υμενίου με τη χρήση Τελλουριούχου καδμίου (CdTe).

Πρόσφατα η Ευρωπαϊκή Ένωση εξέδωσε την κατευθυντήρια γραμμή 2012/19/ΕΕ ^[34] (που αντικαθιστά την προηγούμενη 2002/96/ΕΚ), προκειμένου να καθορίσει τους κανόνες σχετικά με το τέλος της ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Σύμφωνα με το σκοπό αυτό η κατευθυντήρια γραμμή της ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι ότι πρέπει να θεωρηθούν ως απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) και να πληρούν τους ειδικούς στόχους της συλλογής, της ανάκτησης και της ανακύκλωσης που πρέπει να επιτευχθούν μέσα στα επόμενα χρόνια. Σε γενικές γραμμές απαιτείται :

- Ελάχιστη ποσότητα του βάρους των φωτοβολταϊκών πλαισίων που θα συλλεχθεί να είναι έως το 45% του συνόλου των συσκευών μέχρι το 2016 και έως 65% αργότερα.
- Οι ελάχιστοι στόχοι στην ανάκτηση και στην ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι αντίστοιχα 75% και 65% ως μέσο βάρος μέχρι το 2015. ^[35]



Εικόνα 4.5: Σχεδιασμός Διαδικασίας Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών. ^[36]

Η διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων καθορίζεται από την αποσύνθεση του αιθυλενίου οξικού βινυλίου (EVA) από το ηλιακό φως και την καταστροφή των εσωτερικών στοιχείων από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (για παράδειγμα το σπασμένο γυαλί και τα ελαττώματα στα φύλλα των ηλιακών κυττάρων) (Εικόνα 4.5). Τα περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν έχουν ακολουθήσει την πορεία που θα έπρεπε ώστε να ανακυκλωθούν με τον σωστό τρόπο. Πολλά κατεστραμμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν θαφτεί στο έδαφος χωρίς καμία μέθοδο προστασίας προς το περιβάλλον. Οι αρνητικές συνέπειες αυτής της ενέργειας θα αποκαλυφθούν σύντομα. Από το 1980 ξεκίνησε η βιομηχανία να δραστηριοποιείται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Επομένως, μετά από 30 και πλέον χρόνια πρέπει να εξελιχθεί ο τομέας της ανακύκλωσης. Είναι πολύ σημαντικό να υπάρξει ενδιαφέρον για τον τομέα της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς αποτελούνται από επικίνδυνα υλικά, όπως Pb, Cd, Cr και Bi, τα οποία προκαλούν σοβαρές ασθένειες στον άνθρωπο λόγω της τοξικότητάς τους. Επομένως, απαιτείται η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά το τέλος του κύκλου της ζωής τους καθώς τα αποτελέσματα είναι όχι μόνο κερδοφόρα από περιβαλλοντική άποψη αλλά και από οικονομική.

Η επαναχρησιμοποίηση της μη χρήσιμης πρώτης ύλης έχει ήδη εφαρμοστεί από τους περισσότερους κατασκευαστές. Σήμερα τα απόβλητα από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια πυριτίου αποτελούν το 90% ενώ μόνο το 10% αποτελείται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτού υμενίου. Έως το 2030 δεν αναμένεται να υπάρχουν μεγάλες ποσότητες αποβλήτων από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια καθώς δεν είναι γνωστό κάποιες τεχνολογίες όπως του λεπτού υμενίου τι εύρος ζωής θα έχουν. Όμως, στα μικρά κομμάτια (scrap) οι ποσότητες για ανακύκλωση θα είναι κοντά στους 13.300 τόνους το 2030 και 35.000 τόνους το 2040. ^[37]



Εικόνα 4.6: Ελαττωματικά πλαίσια για ανακύκλωση.

Όταν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια φτάνουν στο τέλος του κύκλου της ζωής τους πρέπει να ανακυκλώνονται (Εικόνα 4.6) για να επαναχρησιμοποιηθούν όποια υλικά τους γίνεται και για να εξοικονομείται ενέργεια. Τα περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούνται από στοιχεία όπως το γυαλί και το αλουμίνιο, τα οποία ανακυκλώνονται (Πίνακας 1).

Για την ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πινάκων παρουσίασε πρώτη αποτελέσματα για πίνακες κρυσταλλικού πυριτίου η Deutsche Solar ^[37] και ακολούθησε τα βήματα της η First Solar για φωτοβολταϊκά που περιέχουν CdTe. ^[38]

Κατεργασία	Μέθοδος Κατεργασίας
Ακτινοβολία	-
Βιολογική	-
Διάθεση	<ul style="list-style-type: none"> • Ανακύκλωση του ίδιου προϊόντος • Ανακύκλωση άλλου προϊόντος • Ανάκτηση ενέργειας από την θερμική κατεργασία των οργανικών στρωμάτων • Χρήση του όγκου των ορυκτών κλασμάτων • Ταφή σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής • Άλλα
Θερμική	<ul style="list-style-type: none"> • Αποτέφρωση • Πυρόλυση • Τήξη • Άλλα
Μηχανική-Φυσική	<ul style="list-style-type: none"> • Σύνθλιψη • Τριβή • Διαχωρισμός Πυκνότητας • Επίπλευση • Προσρόφηση • Μεταλλικός Διαχωρισμός • Άλλα
Χημική	<ul style="list-style-type: none"> • Κατεργασία με διαλύτη • Όξινη και Βασική κατεργασία • Άλλα

Πίνακας 1: Κατεργασίες Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών πλαισίων. ^[39]

4.2.1. Απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού από Φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα

Σύμφωνα με την ΚΥΑ 50910/2003, πρώτη φορά αναφέρθηκε η διαχείριση του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Όμως, δεν περιελάμβανε την διαχείριση των ηλιακών συλλεκτών και των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Τα απόβλητα του ηλεκτρικού και του ηλεκτρονικού εξοπλισμού ονομάζονται για συντομία «ΑΗΗΕ». Τα ΑΗΗΕ είναι ένα σύνθετο μείγμα υλικών και εξαρτημάτων που λόγω του επικίνδυνου περιεχομένου τους και αν δεν είναι σωστή διαχείριση, μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα του περιβάλλοντος και της υγείας. Επιπλέον, η παραγωγή των σύγχρονων ηλεκτρονικών απαιτεί τη χρήση σπάνιων και ακριβών πόρων (π.χ. το 10% περίπου του συνολικού χρυσού παγκοσμίως χρησιμοποιείται για την παραγωγή τους). Για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής διαχείρισης των ΑΗΗΕ είναι απαραίτητη η συμβολής τους σε μια κυκλική οικονομία και στην ενίσχυση της αποδοτικότητας των πόρων με τη βελτίωση της συλλογής, επεξεργασίας και ανακύκλωσης των ηλεκτρονικών στο τέλος της ζωής τους. Λόγω της ταχύτατης αύξησης των ποσοτήτων των αποβλήτων και των βλαβερών επιπτώσεων που προκαλούν, η νομοθεσία τα χαρακτηρίζει ως ρεύμα αποβλήτων προτεραιότητας.



Εικόνα 4.7: Ειδικό container για την παράδοση ηλεκτρικών συσκευών από την "Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε."

Το Προεδρικό Διάταγμα 117/2004 και η τροποποίηση του 15/2006 μαζί με τις διατάξεις των Οδηγιών 2002/96/ΕΚ (WEEE), 2002/95/ΕΚ (RoHS) και 108/2003/ΕΚ έχουν ως στόχο τον διαχωρισμό των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών αποβλήτων. Με αυτό τον τρόπο τα απόβλητα του ηλεκτρικού και του ηλεκτρονικού εξοπλισμού θα υποστούν καλύτερη επεξεργασία. Η καλύτερη επεξεργασία μπορεί να αξιοποιήσει ότι είναι εφικτό ή να ανακυκλωθεί.^[40]

Όμως όλη αυτή η διαδικασία έχει σαν στόχο την διαχείριση των βλαβερών υλικών που συμπεριλαμβάνονται στις συσκευές. Φυσικά η ανακύκλωση των αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) στοχεύει και στην ανάκτηση των υλικών. Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή νομοθεσία η ανακύκλωση πρέπει να γίνεται μόνο σε κατάλληλα εργοστάσια όπου έχει γίνει η απαραίτητη εκπαίδευση. Σημαντική προϋπόθεση είναι να αποφευχθούν να εισχωρήσουν στο περιβάλλον τα βαρέα μέταλλα.

Η νέα οδηγία (2012/19/EU) για την διαχείριση των ΑΗΗΕ αναμένεται να εφαρμοστεί το 2016 και απαιτεί το ποσοστό συλλογής του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού να είναι 45%.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

Από το 2019 το ποσοστό αυτό αναμένεται να αυξηθεί στο 65% για όλες τις συσκευές που πωλούνται κάθε χρόνο ή 85% του συνόλου της παραγόμενης από (ΑΗΗΕ) αποβλήτων.



Εικόνα 4.8: Φωτοβολταϊκά πλαίσια στην φάση της διαλογής πριν την ανακύκλωση.

Καθοριστικό ρόλο έπαιξε η οδηγία 2002/96/ΕΚ, σύμφωνα με την οποία ο κατάλληλος διαχωρισμός έχει σαν αποτέλεσμα την συλλογή μεγαλύτερων ποσοτήτων αποβλήτων του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Μελέτες έδειξαν ένα μικρό ποσοστό 13% των αποβλήτων του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού το οποίο διατίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής ή αποτεφρώνεται. Όμως, στα εργοστάσια ανακύκλωσης καταλήγει μόνο το 1/3 των αποβλήτων του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Τα 2/3 των αποβλήτων του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού καταλήγει παράνομα σε τριτοκοσμικές χώρες ή σε χώρους υγειονομικής ταφής. Η Ευρωπαϊκή Ένωση φροντίζει η επεξεργασία των ΑΗΗΕ να γίνεται με σωστό τρόπο. Όμως πάντα υπάρχει το ενδεχόμενο κάποια απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού να καταλήξουν σε άλλες χώρες και η ανακύκλωσή τους να γίνει με τρόπο που θέτει σε κίνδυνο το περιβάλλον και την υγεία των ανθρώπων. Το έτος 2020, η ταχύτατη αύξηση των αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού αναμένεται να φτάσει τα 12,3 εκατομμύρια τόνους. Ενώ το 2005 κυμαινόταν περίπου στα 8,3-9,1 εκατομμύρια τόνους.

Τα απόβλητα του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού υπολογίζονται στους 140.000-180.000 τόνους τον χρόνο, στην χώρα μας. Λόγω της ραγδαίας αύξησης των ΑΗΗΕ η ευρωπαϊκή επιτροπή συνιστά την ανακύκλωση ως αναγκαία λύση μέχρι το 2019. Η αύξηση των αποβλήτων θα έχει φτάσει μέχρι το 2020 τα 20 κιλά ανά άτομο. Επίσης, το ίδιο έτος τα έσοδα από την διαχείριση των αποβλήτων του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού θα ανέρχονται στα 5,6 δις ευρώ.

Η απελευθέρωση των βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον εγκυμονεί πολλούς κινδύνους. Οι επίπεδες οθόνες και οι λαμπτήρες φθορισμού απελευθερώνουν βαρέα μέταλλα όπως μόλυβδο και υδράργυρο αντίστοιχα. Σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει για την δεκαετία 2010-2020 θα υπάρξει μεγάλη αύξηση εκπομπής των αερίων του θερμοκηπίου. Αυτό ωφείλεται στην ραγδαία αύξηση των κλιματιστικών και των συσκευών ψύξης. Έτσι οι αέριοι ρύποι αναμένεται να πλησιάσουν τους 6.700 τόνους. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω αναμένεται η καταστροφή αυτή να είναι του ύψους 1 δις ευρώ ετησίως.

Στις τριτοκοσμικές χώρες θέτουν σε κίνδυνο την υγεία τους και το περιβάλλον λόγω της άγνοιας που επικρατεί για την διαδικασία της διαχείρισης των αποβλήτων του ηλεκτρικού και

ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Δυστυχώς δεν τηρείται κανένα πρότυπο προστασίας από τις τοξικές ουσίες που απορρίπτονται από τα ΑΗΗΕ.



Εικόνα 4.9: Με την χρήση ηλεκτρονικών απορριμμάτων κατασκευάστηκε 3D εκτυπωτής στη Δυτική Αφρική.

Όμως, εάν υπάρξει σωστή διαχείριση θα υπάρξει η δυνατότητα να ανακτηθούν πολύτιμα-δυσεύρετα υλικά και να μειωθούν σημαντικά τα επικίνδυνα υλικά που απορρίπτονται στο περιβάλλον. Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (European Environment Agency) δημοσίευσε ποσοστά υλικών που μπορούν να ανακυκλωθούν:

- πίνακες κυκλωμάτων 3,1%,
- αλουμίνιο 4,7%,
- γυαλί 5,4%,
- χαλκός 7%,
- πλαστικό 20,6%,
- σίδηρος – ασβέστιο 47,9% και
- τα υπόλοιπα 11,3%.

Η τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει επικίνδυνα στοιχεία (μόλυβδο, υδράργυρο, κ.α.) και πολύτιμα μέταλλα (όπως χρυσό, άργυρο, κ.α). Η κάθε κατηγορία εξοπλισμού στοχεύει στην ανακύκλωση σε ποσοστά 70-80% ενώ η κατηγορία των ΑΗΗΕ στοχεύει σε ποσοστά 50-80%.

4.3. Μέθοδος Ανακύκλωσης Φ/Β Κρυσταλλικού πυριτίου

Η διαδικασία ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών απαιτεί δύο βασικά στάδια:

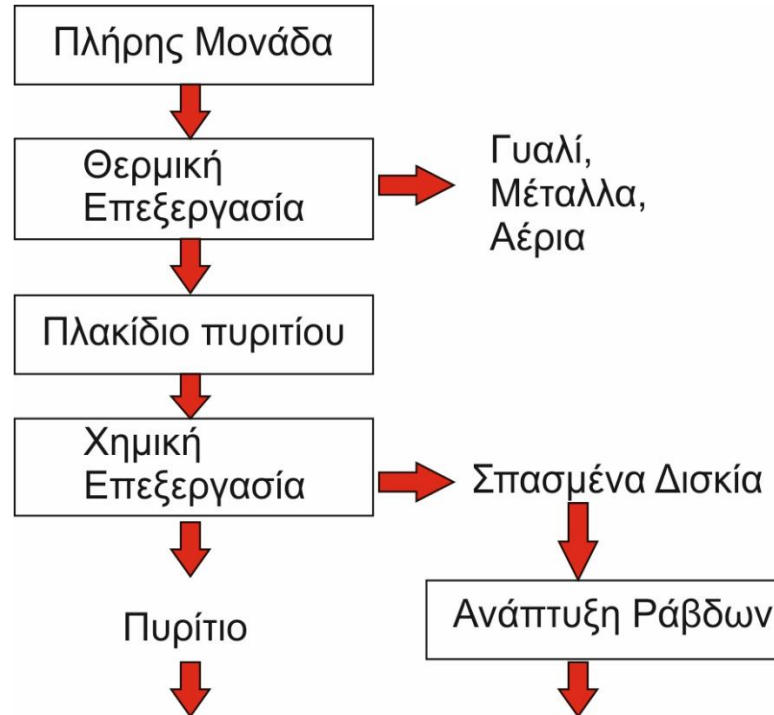
- Η αφαίρεση του EVA που χρησιμοποιείται συνήθως στις φωτοβολταϊκές μονάδες ως προστατευτικό από την υγρασία. Για την επιτευξη του χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, όπως η διάλυση με τη χρήση νιτρικού οξέος και η θερμική αποσύνθεση.
- Ο καθαρισμός της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων: αφαιρώντας τα ανεπιθύμητα στρώματα (το αντανάκλαστικό στρώμα, την επίστρωση μετάλλου και τον ημιαγωγό p-n). Επίσης διαχωρίζεται το υπόστρωμα πυριτίου από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο το οποίο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, εάν είναι σε καλή κατάσταση.

Για να διαχωριστεί το πυρίτιο από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο που είναι κατεστραμένο τοποθετείται σε ένα τραπέζιο με SiO₂, το οποίο στη συνέχεια θερμαίνεται. Αφού διαχωριστούν

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

τα διάφορα στρώματα των υλικών από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, πρέπει να αφαιρεθούν με συγκεκριμένη σειρά (Εικόνα 4.10): ^[46]

- Η εμπρός μεταλλική επίστρωση,
- η κάτω μεταλλική επικάλυψη,
- η αντι-ανακλαστική επίστρωση και
- η n-p ένωση.



Παραγωγή Κυψελών

Εικόνα 4.10: Διαδικασία ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Κάποιες διαδικασίες ανακύκλωσης δεν έδιναν καλά αποτελέσματα και έτσι η έρευνα τους σταμάτησε σε πρώιμο στάδιο. Μια από αυτές ήταν η πυρόλυση με θέρμανση μικροκυμάτων, η οποία απέτυχε λόγω της μη ομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα να υπάρξει κυτταρική θραύση. Μια άλλη έρευνα μελετούσε την διάλυση των πλαισίων σε ένα χημικό αντιδραστήρα με τρι-αιθυλενογλυκόλη σε θερμοκρασία μεταξύ 220°C-290°C. Δυστυχώς, η έρευνα αυτή οδήγησε σε αρνητικά αποτελέσματα. Το EVA διογκώνεται και δεν διαχωρίζεται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Επομένως, οι δοκιμές με άλλους διαλύτες κατέληξαν στο ίδιο συμπέρασμα. ^{[33],[41]}

Η εμπάπτιση σε θερμό νιτρικό οξύ είχε ήδη δείξει τα αποτελέσματα της. ^[42] Οι δοκιμές έδειξαν ότι αν και η διαδικασία λειτουργεί, είναι απίθανο να γίνει μια βιώσιμη βιομηχανική διαδικασία λόγω των τεράστιων ποσοτήτων νιτρικού οξέος που απαιτείται. Η απόρριψη αυτού του χημικού αποβλήτου με ένα τρόπο και η επεξεργασία των τοξικών αερίων NO₂ αναμφίβολα θα αυξήσει την ανάκτηση της πολυπλοκότητας των κυττάρων και της ενέργειας που εμπλέκεται καθώς επίσης και το οικονομικό κόστος.

Η θερμική προσέγγιση είναι πολύ ευνοϊκή ^[43], έτσι η πυρόλυση με έναν ιμάντα, μεταφορέα στον φούρνο μπορεί να θεωρηθεί ως μια βιομηχανική διαδικασία ανακύκλωσης. Το EVA καίγεται μακριά από τον ατμόσφαιρικό αέρα ή αποσυντίθεται υπό άζωτο σε θερμοκρασίες 450 °C και 480 °C αντίστοιχα. Οι δοκιμές με τη θερμική επεξεργασία υπό αέρα είχαν ως αποτέλεσμα κακή μηχανική απόδοση. Αυτό μπορεί να προκληθεί από το σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πυριτίου λόγω της εξώθερμης αντίδρασης που οδηγεί σε ρωγμές.

Αλλάζοντας την ατμόσφαιρα του κλιβάνου από τον αέρα προς το άζωτο αποφεύγεται η εξώθερμη αντίδραση. Με μια βελτιστοποιημένη ροή αζώτου και την ταχύτητα του ιμάντα μεταφοράς αξιοποιείται η διαδικασία που οδηγεί σε μηχανικές αποδόσεις υψηλότερες από 80%. Στο παρελθόν, το κύριο βάρος των προσπαθειών ανακύκλωσης ήταν η πλήρης ανάκτηση των κυττάρων, τα οποία διαχωρίζονται από τη μονάδα μέσω θερμικής αποσύνθεσης του πλαστικού ενθυλάκωσης. Για να ανακτηθούν τα λεπτά φύλλα θα υποβληθεί σε νέα γραμμή χάραξης και θα χρησιμοποιηθεί για νέες μονάδες χωρίς εμφανή απώλεια στην απόδοση.

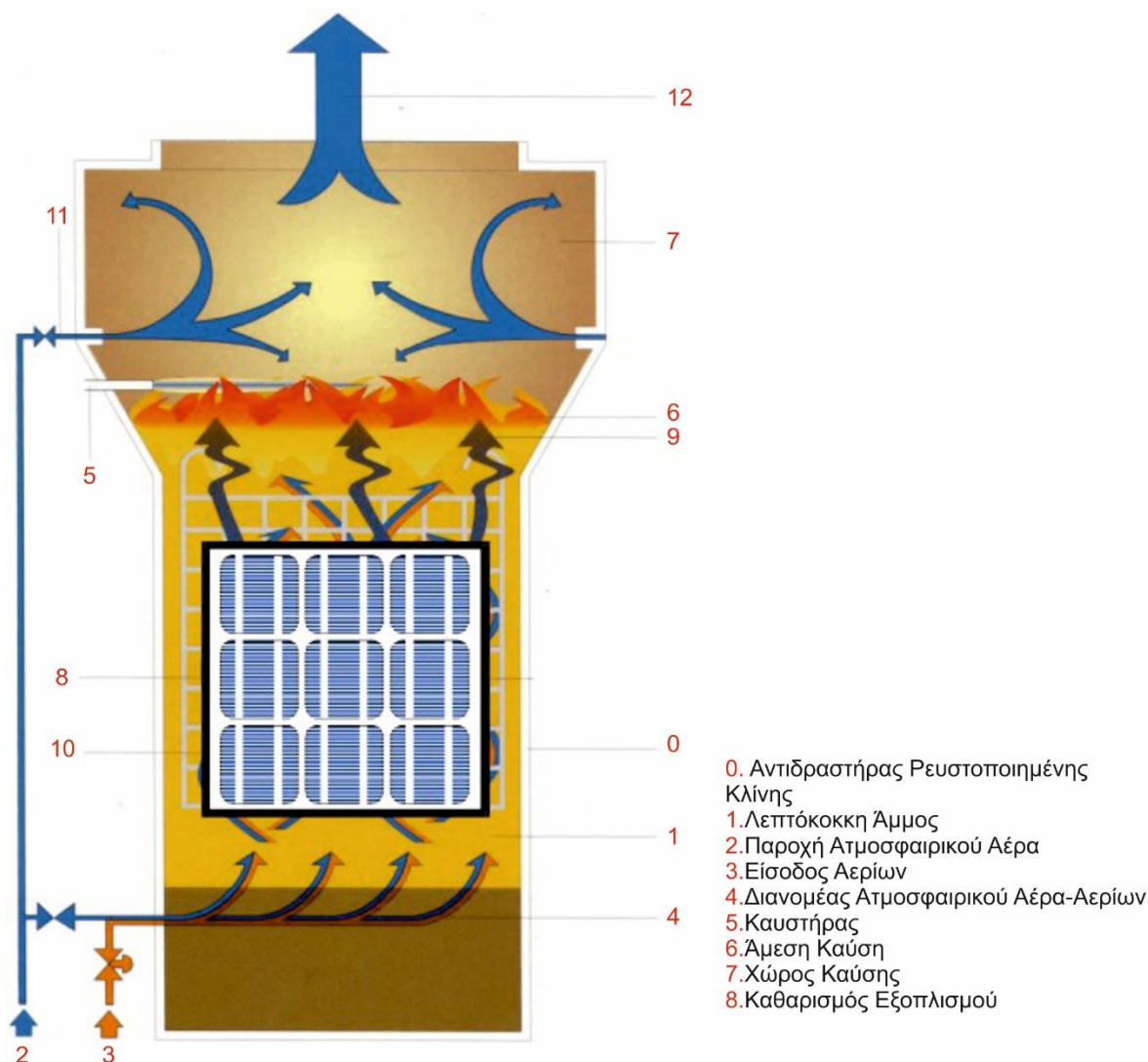
Η τεχνική απέδειξε ότι τα παλιά λεπτά φύλλα πυριτίου διατηρούν την ποιότητα και εμφανίζουν καλή μακροπρόθεσμη σταθερότητα, με τον υπολογισμό του ενεργειακού ισοζυγίου κατά την ανακύκλωση που δείχνει ότι οι αρχικές μονάδες είχαν ενεργειακή χρονική απόσβεση (EPBT) επτά ετών, ένα ποσό το οποίο έπεσε σε δύο χρόνια.

Ωστόσο, καθώς το πάχος των πλακιδίων μειώνεται, αναμένεται να γίνει πιο δύσκολο να ανακάμψει τα άθικτα κύτταρα. Σήμερα, ο κύριος στόχος είναι να ανακτηθεί το πυρίτιο ως πρώτη ύλη και η ξεχωριστή ανάκτηση των καθαρών κλασμάτων διαφόρων μετάλλων, γυαλιού και πυριτίου. Μια βασική απαίτηση μιας τέτοιας στρατηγικής είναι ότι κάθε κομμάτι πυριτίου που θα ανακτηθεί πρέπει να είναι αρκετά καθαρό για την επαναχρησιμοποίηση του στην κατασκευή πλακιδίων και να έχει χαμηλό κόστος.

Κατά την τρέχουσα διαδικασία της ανακύκλωσης, παρά την όποια βλάβη επιστρέφονται προϊόντα, από στοιχεία που είναι πλήρη ή θρυμματισμένα, αποσυντίθενται θερμικά. Στη συνέχεια, τα διαφορετικά υλικά διαχωρίζονται μεταξύ τους, για παράδειγμα με την πυκνότητα και το κοσκίνισμα. Στην συνέχεια τα υλικά του πυριτίου χαράσσονται σε μια παρόμοια σειρά διεργασιών για την αφαίρεση στρωμάτων επιμετάλλωσης, οι αντιανακλαστικές επιστρώσεις και ούτω καθ' εξής. Κατά την αφαίρεση του στρώματος επιμετάλλωσης ο άργυρος τυπικά βρίσκεται σε μεγαλύτερα στοιχεία διαλύεται σε οξέα και στη συνέχεια καθιζάνει, πριν τελικά να ανακτηθεί με ηλεκτρόλυση. Με το πιο σύγχρονο πίσω μέρος των στοιχείων (από αλουμίνιο) γίνεται η επιμετάλλωση του ασημιού, αλλά οι έρευνες έχουν δείξει ότι το ασήμι μπορεί ακόμα να ανακτηθεί οικονομικά.

Μετά τη σύνθλιψη και την χάραξη, το πυρίτιο τήκεται και στερεοποιείται. Σε γενικές γραμμές, οι ακμές, οι κορυφές και οι πυθμένες των πλινθωμάτων θα αποκοπούν και θα ανακυκλωθούν, καθώς και τα λεπτά φύλλα που μπορούν να πωληθούν σε κατασκευαστές ηλιακών κυψελών.

Η καλύτερη τεχνική για βιομηχανική εφαρμογή είναι η **πυρόλυση σε έναν αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης**.^{[44],[45]}



Εικόνα 4.11: Αντιδραστήρας Ρευστοποιημένης Κλίνης.

Ο αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης είναι γεμάτος με πολύ ψιλή άμμο που έχει κατανομή μεγέθους μικρών σωματιδίων (Εικόνα 4.11). Από ένα βελτιστοποιημένο ρεύμα αέρα αυτή η άμμος είναι σε σημείο βρασμού σε ρευστοποιημένη κατάσταση. Σε αυτήν την ρευστοποιημένη κατάσταση η άμμος παίρνει τις φυσικές ιδιότητες ενός υγρού. Οι μάζες της φορτώνονται και βυθίζονται στην ρευστοποιημένη κλίνη.

Τα καυσάγια εξέρχονται από τον αντιδραστήρα στην επιφάνεια και περνάει αμέσως μέσα από την φλόγα εξυπηρετώντας ταυτόχρονα την διαδικασία μετά την καύση και ως πηγή θερμότητας τον αντιδραστήρα. Η θερμοκρασία σε όλη την κλίνη, η τέλεια ανάμειξη και η έντονη επαφή με τον αντιδραστήρα ανακτά τα λεπτά φύλλα πυριτίου και το γυαλί στις βέλτιστες συνθήκες. Διαφορετικές παράμετροι έχουν διερευνηθεί όπως η θερμοκρασία επεξεργασίας και έχει βελτιστοποιηθεί περίπου στους 450 °C. Σε αυτή τη θερμοκρασία η χρονική διαδικασία 45 λεπτών φαίνεται να είναι τέλεια.

Μια πολύ σημαντική παράμετρος για τη βελτιστοποίηση είναι η ταχύτητα ρευστοποίησης των σωματιδίων της άμμου. Αυτή η ταχύτητα σχετίζεται άμεσα με την μέση διάμετρο των σωματιδίων. Για την ανακύκλωση του κρυσταλλικού πυριτίου η ταχύτητα διατηρείται εξαιρετικά χαμηλή στο 1 cm/sec για ένα σωματίδιο διαμέτρου 100 μm.

Όλες οι δοκιμές που γίνονται μέχρι σήμερα είναι σε έτοιμα δείγματα με διαφορετικές τεχνολογίες στην μονάδα ενθυλάκωσης. Οι δοκιμές ξεκίνησαν με μικρές μονάδες 8-πλαισίων και σταδιακά πρόκειται να αυξηθούν σε μονάδες 36-πλαισίων. Ο στόχος του 80% στην μηχανική απόδοση των πλακιδίων λαμβάνεται ήδη, αλλά με τις νέες δομές στερέωσης θα

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

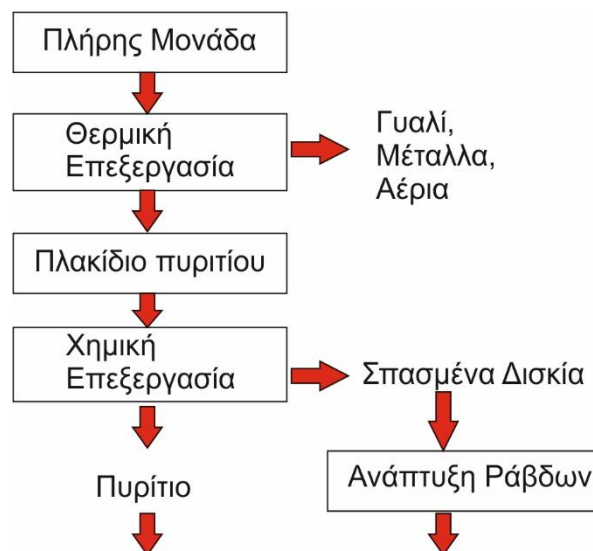
υπάρξουν καλύτερα αποτελέσματα. Μια απόδοση σχεδόν 100% επιτυγχάνεται για τα γυάλινα κομμάτια.

Η διαδικασία του αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης φτάνει σε βιομηχανικό επίπεδο από την κατασκευή μιας πιλοτικής μηχανής για να αποδειχθεί η ικανότητα εκμετάλλευσης. Οι αναγεννημένες λεπτές φέτες πυριτίου διατηρούν την αρχική τους υψηλή ποιότητα με αποτέλεσμα την υψηλή απόδοση ανακυκλωμένων ηλιακών κυττάρων. Έτσι, η βιομηχανία φωτοβολταϊκών έχει τώρα μια οικονομικά αποδοτική βιομηχανική διαδικασία ανακύκλωσης διαθέσιμη που μπορεί να ενισχύσει την θετική εικόνα ως την παραγωγή καθαρής ενέργειας.

4.3.1. Μέθοδος Ανακύκλωσης Φ/Β Κρυσταλλικού πυριτίου από γνωστές εταιρείες

Η μέθοδος κατεργασίας της **Deutsche Solar AG** (Εικόνα 4.12) για φωτοβολταϊκά πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου ξεκίνησε να λειτουργεί σαν ένα πιλοτικό πρόγραμμα από το 2003, σταμάτησε όμως, λόγω του υψηλού κόστους ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς ο όγκος των φωτοβολταϊκών πλαισίων που είχαν φθάσει στο τέλος του κύκλου ζωής τους ως τότε ήταν περιορισμένος. Ωστόσο ο οργανισμός εξέταζε το ενδεχόμενο να δρομολογήσει μια δοκιμαστική μονάδα στο μέλλον. Από το 2000, η Deutsche Solar AG είναι θυγατρική της SolarWorld AG και εδρεύει στην Βόννη της Γερμανίας. Η μέθοδος κατεργασίας και ανακύκλωσης που αναπτύχθηκε από την Deutsche Solar περιλαμβάνει την αφαίρεση των πλαστικών εξαρτημάτων των φωτοβολταϊκών πλαισίων με θερμική επεξεργασία, ακολουθούμενη από τον χειροκίνητο διαχωρισμό των υπόλοιπων υλικών όπως των ηλιακών κυψελών, του γυαλιού και των μετάλλων.^[46]

Η εταιρεία στοχεύει να προσδιορίσει τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα και την ενέργεια του χρόνου απόσβεσης που προκύπτει από τη διαδικασία της ανακύκλωσης. Ένας από τους παράγοντες που λαμβάνεται υπόψη είναι η ενέργεια που εξοικονομείται κατά τη διάρκεια της πρωτογενούς παραγωγής πυριτίου. Η εταιρεία είχε συσταθεί με την περιβαλλοντική πολιτική σε όλη την λειτουργία της και ανησυχεί ουσιαστικά για τη βελτιστοποίηση της όλης διαδικασίας σε οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο.



Παραγωγή Κυψελών

Εικόνα 4.12: Αρχή της διαδικασίας της ανακύκλωσης στην Deutsche Solar AG.^[47]

Έπειτα το γυαλί και τα μέταλλα, συμπεριλαμβανομένων του αλουμινίου, του χάλυβα και του χαλκού, τροφοδοτούνται σε διάφορες διεργασίες ανακύκλωσης και οι ηλιακές κυψέλες χαράσσονται εκ νέου σε φέτες. Οι περαιτέρω κατεργασμένες πλάκες πληρούν τις

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

προδιαγραφές ποιότητας και μπορούν να επαναεπεξεργαστούν σαν νέες ηλιακές κυψέλες και φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η διαδικασία χάραξης ακολουθεί τα εξής βήματα:

- την απομάκρυνση της επιμετάλλωσης,
- την απομάκρυνση του AR στρώματος,
- την ισοτροπική απομάκρυνση των n+ και d+ διεγέρσεων,
- το φινίρισμα της επιφάνειας,
- την πλύση και
- το στέγνωμα.

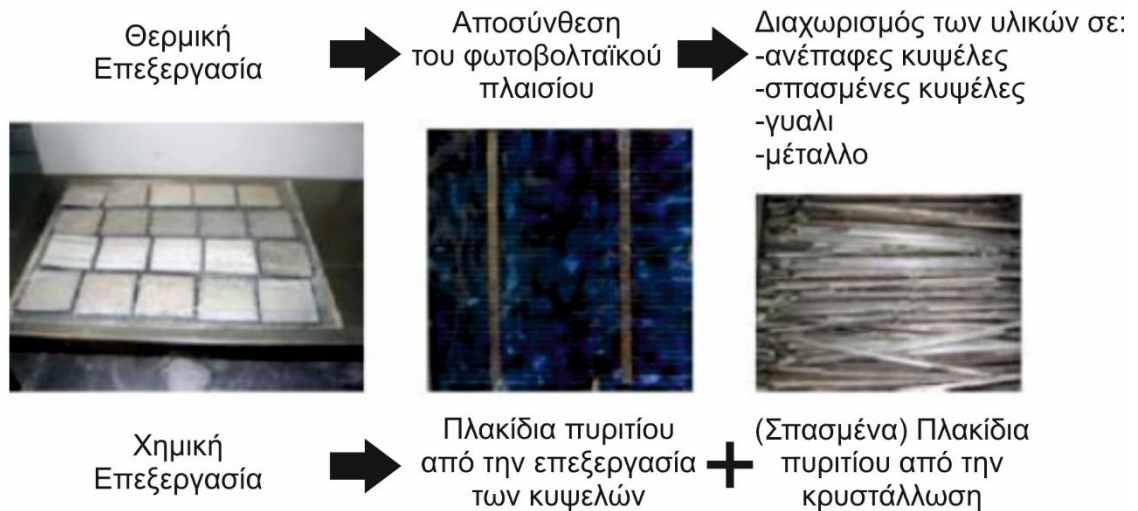
Στην περίπτωση των σπασμένων ηλιακών κυψελών (Εικόνα 4.13), το πυρίτιο συλλέγεται σε μορφή σπασμένων πλακών για κρυσταλλοποίηση. Είναι αξιοσημείωτο ότι η διαδικασία παρέχει τη δυνατότητα για την ανάκτηση ανέπαφων λεπτών στρωμάτων από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η ανακύκλωση καταλαμβάνει ποσοστό 80%, μη συμπεριλαμβανομένου των κατεργασμένων πλαστικών εξαρτημάτων. Το γυαλί εάν επεξεργαστεί όπως πρέπει, έχει την δυνατότητα να ανακτηθεί ολόκληρο. Η Deutsche Solar με την σωστή λειτουργία της ανακύκλωσης επαναχρησιμοποιεί τους κόκκους πυριτίου που έχει ανακτήσει, διαθέτοντας τα άλλα υλικά για ανακύκλωση ή για πώληση. ^[48]



Εικόνα 4.13: Ηλιακές κυψέλες σπασμένες.

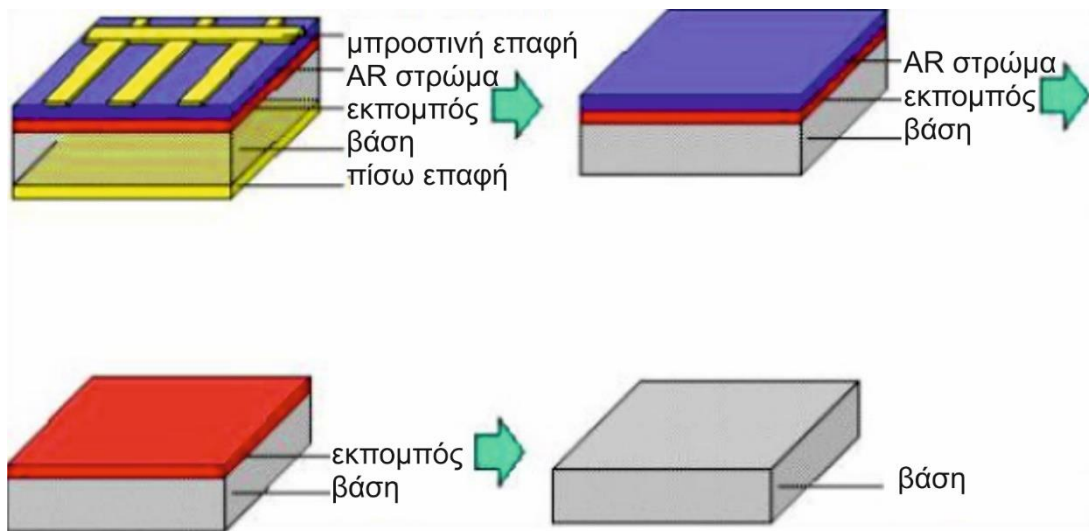
Η διαδικασία ανακύκλωσης περιλαμβάνει δύο κύρια στάδια. Αρχικά τα πλαστικά στρώματα (EVA, tedlar) καίγονται σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (Εικόνα 4.14). Όμως τα υλικά των ημιαγωγών έχουν την ικανότητα να προστατεύονται στους 600 °C σύμφωνα με την PV Cycle. Η επόμενη ενέργεια που ακολουθεί είναι ο διαχωρισμός με τα χέρια. Με αυτό τον τρόπο κάποια υλικά όπως το γυαλί και τα μέταλλα διατείθονται απευθείας στο κατάλληλο σύστημα για την ανακύκλωση τους.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου



Εικόνα 4.14: Αποσύνθεση φωτοβολταϊκού πλαισίου μέσω θερμικής επεξεργασίας της Deutsche Solar.

Έπειτα, για την ανάκτηση μιας επίπεδης πλάκας πυριτίου (wafers) χρειάζεται ειδική επεξεργασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η απομάκρυνση της p-n διόδου, της αντανάκλαστικής επίστρωσης και της μεταλλοποίησης επιτυγχάνεται με την χάραξη. Βέβαια με την χάραξη δεν έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία και ακολουθεί το φινίρισμα της επιφάνειας. Το πλεονέκτημα της διαδικασίας είναι ότι το πλακίδιο θα μπορέσει να ξαναχρησιμοποιηθεί για ένα νέο φωτοβολταϊκό πλαίσιο (Εικόνα 4.15). Την ικανότητα να ανακτηθούν ηλιακές κυψέλες με αυτή την διαδικασία αντιπροσωπεύεται από το σημαντικό ποσοστό 98% σύμφωνα με την PV Cycle.



Εικόνα 4.15: Σχηματική διαδικασία ανάκτησης του πλακιδίου από τις ηλιακές κυψέλες της Deutsche Solar.

Με την διαδικασία της διύλισης επιστρέφονται τα σπασμένα πλακίδια πυριτίου. Μετά καταστρέφονται και τήκονται. Ο σχεδιασμός, ο τύπος, η κατάσταση του φωτοβολταϊκού πλαισίου μετά την επεξεργασία καθορίζουν τον βαθμό της απόδοσης των ανακτηθέντων κυψελών. Ο τύπος του κρύσταλλου, ο τύπος του φύλλου, οι διαστάσεις των κυψελών, η

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

διάσταση των δεσμών, το υλικό και η ποιότητα της συγκόλλησης είναι παράγοντες που επηρεάζουν την διεργασία.

Η μέθοδος κατεργασίας της SolarWorld ξεκίνησε να λειτουργεί μέσω ενός πιλοτικού προγράμματος για την ανακύκλωση φωτοβολταϊκών από το 2003, όπου τα πλαστικά εξαρτήματα αφαιρούνταν πρώτα με μια θερμική διαδικασία πριν από τα λεπτά στρώματα πυριτίου, τα οποία ανακτώνταν μέσω της χάραξης. Η SolarWorld ανακτά επίσης το πυρίτιο από σπασμένα ηλιακά κύτταρα. Φυσικά, η SolarWorld χρησιμοποιεί τους κόκκους πυριτίου και εκμεταλλεύεται ό, τι άλλο γίνεται είτε πωλώνοντας τα ή αποστέλλοντας τα για ανακύκλωση. Η απόσυρση των φωτοβολταϊκών οργανώνεται μέσω ενός συστήματος «bring-in» στην SolarWorld.

Η διαδικασία ξεκινάει αποτεφρώνοντας τα φωτοβολταϊκά, όπου τα πλαστικά εξαρτήματα καίγονται στους 600 °C. Τα υπόλοιπα υλικά, όπως τα ηλιακά κύτταρα, το γυαλί και τα μέταλλα διαχωρίζονται με τα χέρια. Το γυαλί και τα μέταλλα αποστέλλονται για ανακύκλωση ενώ τα ηλιακά κύτταρα ξαναχαράσσονται σε λεπτά στρώματα. Στην διαδικασία ανακύκλωσης η SolarWorld προσπαθεί να διατηρήσει όσο πιο πολύ μέρος από το αρχικό πάχος του λεπτού στρώματος του πυριτίου είναι δυνατόν.

Το ποσοστό επιτυχίας αυτής της διαδικασίας είναι αρκετά υψηλό καθώς μπορεί να ανακτηθεί περισσότερο από 84% του βάρους της μονάδας εισόδου με καθαρότητα έως 6N² των κλασμάτων. Το γυαλί (>90%) προορίζεται για χρήση σε νέα προϊόντα και το 95% των ημιαγώγιμων υλικών για χρήση σε νέες ηλιακές κυψέλες, μετά την τήξη. Η ενέργεια της αποτέφρωσης του πολυμερούς θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες διαδικασίες ή για προθέρμανση μιας νέας παραγωγής στο μέλλον.



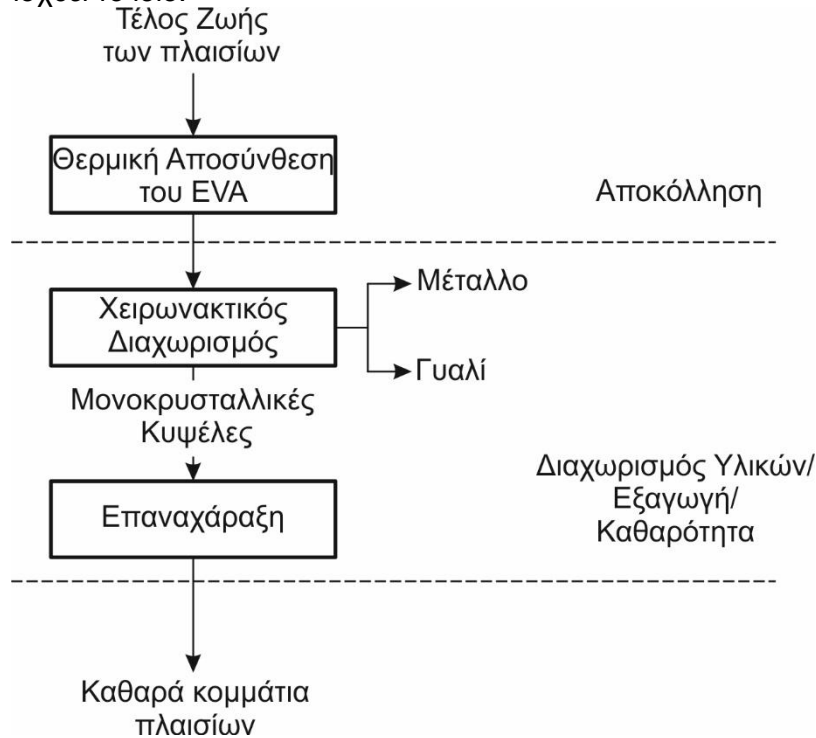
Εικόνα 4.16: Το ηλιακό αυτοκίνητο "SolarWorld GT" εφευρέθηκε από μια ομάδα του Πανεπιστημίου του Μπόχουμ με την υποστήριξη της Γερμανικής εταιρείας παραγωγής ηλιακών συλλεκτών SolarWorld.

Η θερμική διαδικασία ανακτά το 98% από άθικτα πλαίσια ανάλογα με την προηγούμενη ζημιά στα πλαίσια, το είδος της δομής των πλαισίων και τα ηλιακά κύτταρα που χρησιμοποιούνται. Αν τα κύτταρα έχουν μικρά θραύσματα στην άκρη, πολύ μικρές ρωγμές μπορούν κανονικά να ανακυκλώνονται ως ένα λεπτό στρώμα άθικτου πυριτίου και να μην διατίθενται για την ανάκτηση των πρώτων υλών του πυριτίου. Όσο μικρότερο είναι το πάχος των κυττάρων, τόσο μικρή είναι η απόδοση τους. Τα πυκνά στρώματα πυριτίου (>200 μm) παράγουν λιγότερα θραύσματα και μπορούν συχνά να επαναχρησιμοποιηθούν αφού χαραχθούν σε ηλιακά

² Nines είναι μια άτυπη, αλλά κοινή μέθοδος ταξινόμησης της καθαρότητας των πολύ λεπτών πολύτιμων μετάλλων.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

κύτταρα με απόδοση πάνω από 97% (Εικόνα 4.17). Όμως για τα λεπτά στρώματα πάχους (<200 μm), δεν ισχύει το ίδιο. ^[55]



Εικόνα 4.17: Διαδικασία Ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πλαισίων από την SolarWorld.

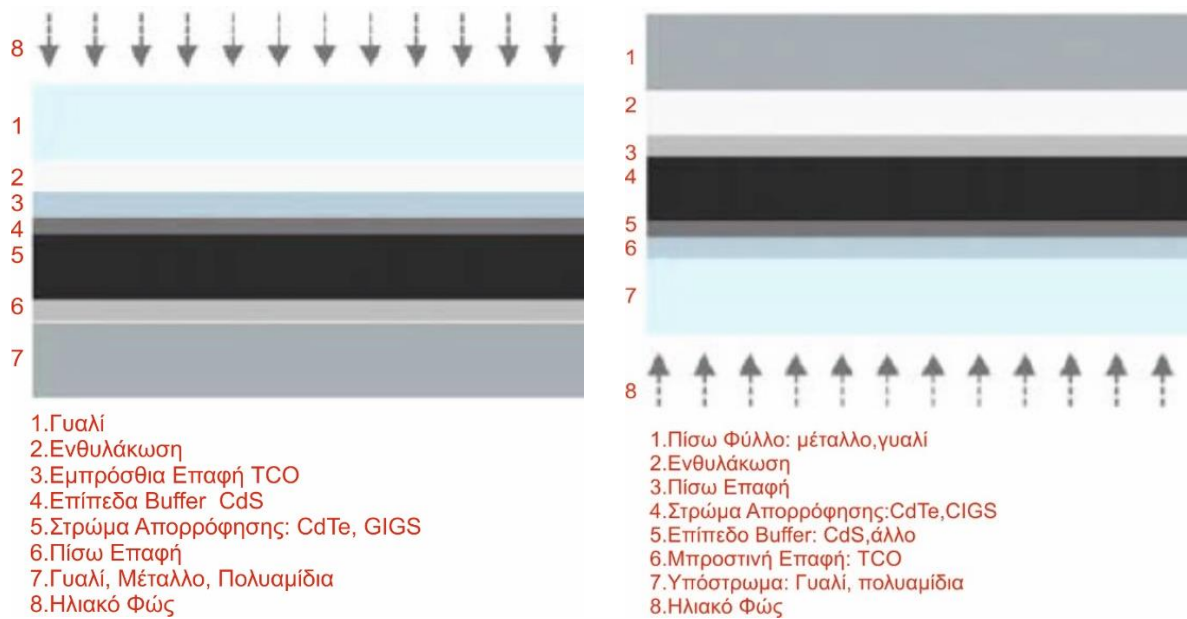
4.4. Μέθοδοι Ανακύκλωση Φ/Β Χαλκογενίδων

Μόνο το 2010 παρήχθησαν φωτοβολταϊκές μονάδες με δυναμικότητα 27 GW, εκ των οποίων 1,9 GW ήταν χαλκογενίδια ηλιακά κύτταρα. ^[49] Τα χαλκογενίδια ηλιακά κύτταρα ανήκουν στις II-VI και I-III VI₂ ομάδες του περιοδικού πίνακα, όπως το CdS ή το CuInSe₂ (CIS), το Cu (In, Ga) Se₂ (CIGS) και το CdTe. Αυτά τα στοιχεία είναι κατάλληλα για την παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας, λόγω της υψηλής τους αποτελεσματικότητας, της μακροχρόνιας σταθερής απόδοσης και του χαμηλού κόστους παραγωγής τους. ^[50]

Η υψηλή απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας τα καθιστά ιδανικά υλικά για τη μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. ^[51] Κατά συνέπεια, ένα λεπτό στρώμα (2 μm) είναι αρκετό για να απορροφήσει το μεγαλύτερο μέρος των χρήσιμων τμημάτων του φάσματος του φωτός, ως εκ τούτου, οι τεχνολογίες αυτές συγκαταλέγονται μεταξύ των λεπτών υμενίων (φωτοβολταϊκά πλαίσια).

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται, όπως το ίνδιο(In), το γάλλιο (Ga) και το τελλούριο (Te) θεωρούνται σημαντικά και επικίνδυνα υλικά. Το κάδμιο (Cd) ανήκει σε αυτά τα υλικά και ενδέχεται να βλάψει το περιβάλλον εάν δεν αξιοποιηθεί ή δεν διατεθεί σωστά. Συνεπώς, η σωστή ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων θα γίνεται ολοένα και πιο σημαντική λαμβάνοντας υπόψη τον αυξανόμενο αριθμό της παραγωγής και της επέκτασης των εγκαταστάσεων. Αρκετές τεχνολογίες ανακύκλωσης για χαλκογενίδια φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν ήδη αναπτυχθεί από κατασκευαστές φωτοβολταϊκών, από ερευνητικά ιδρύματα, μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις. Μια σχηματική διατομή της διάταξης του CdTe και CIGS φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 4.18).

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

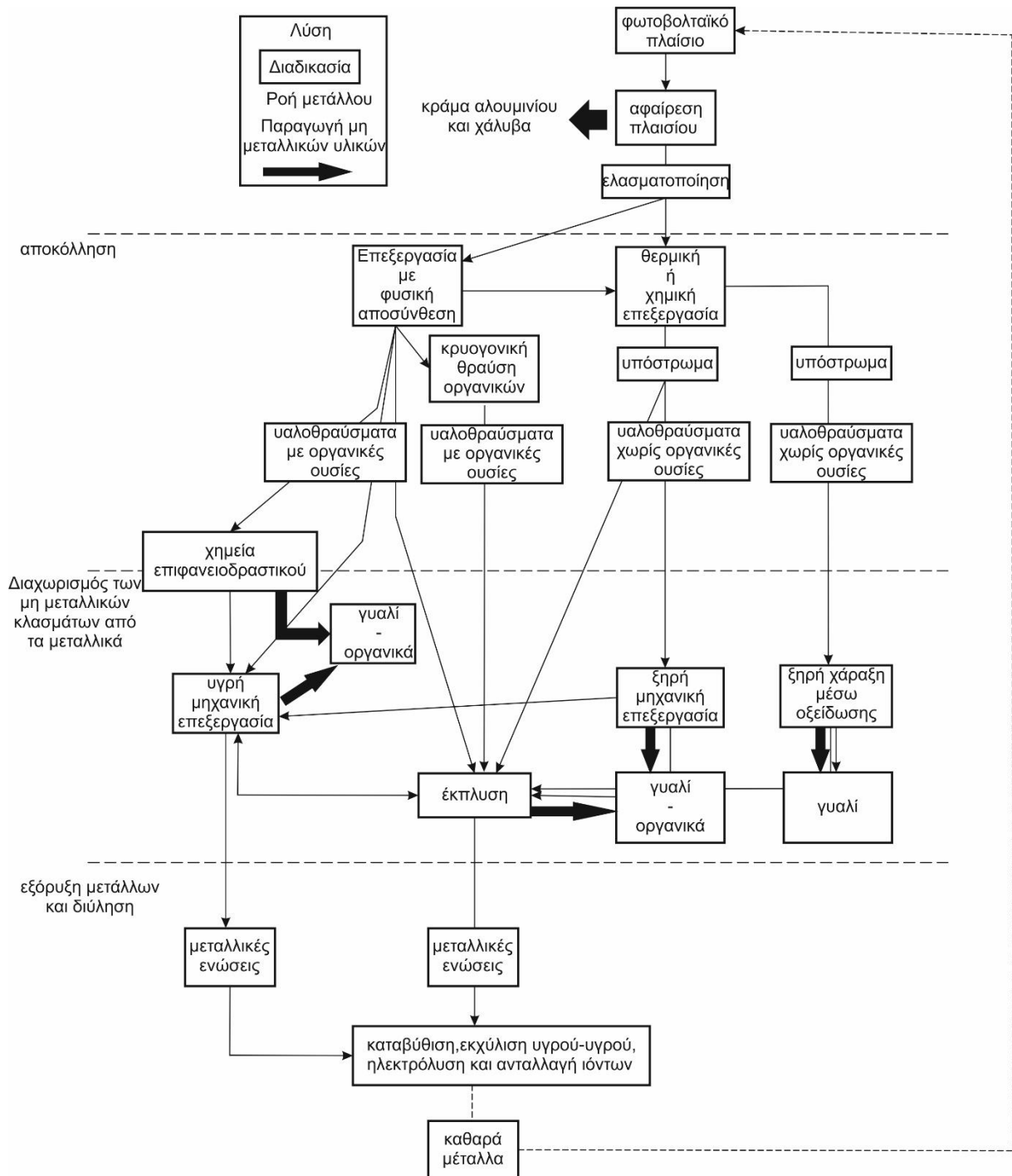


Εικόνα 4.18: Σχηματική Διατομή υποστρώματος και υπερ-στρώματος φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τύπου λεπτού υμενίου μερικές φορές πλαισιώνονται για μηχανική σταθερότητα και προστασία. Ανάλογα με το μέγεθος και το σχεδιασμό της μονάδας, το πλαίσιο συχνά αποτελείται από αλουμίνιο σε ποσοστό 12-15%. Το πλαίσιο, καθώς και τα καλώδια σύνδεσης, συνήθως μπορούν να αφαιρεθούν χωρίς δυσκολία. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια CIGS συνήθως κατασκευάζονται και μετά διαμορφώνεται το υπόστρωμα, το οποίο απαιτεί ένα πρόσθετο στρώμα ενθυλάκωσης, με το γυαλί να προστατεύει την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η πίσω επαφή είναι από μόλυβδο λόγω του υψηλού συντελεστή απορρόφησης, ένα πολύ λεπτό στρώμα απορρόφησης CIGS (0.1-0.3 μm) είναι αρκετό για την απορρόφηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. ^[49] Αλλά και για τη σύνθεση της ομοιομορφίας σε μεγάλες περιοχές το στρώμα απορρόφησης πρέπει να είναι τουλάχιστον 1 μm πάχους. ^[52] Το CdS χρησιμοποιείται συνήθως ως ένα ενδιάμεσο στρώμα για να σχηματιστεί μια ετερο-δίοδος. Ένα διαφανές αγώγιμο στρώμα οξειδίου (TCO) όπως το ίνδιο ή ο κασσίτερος ή το οξείδιο (ITO) ή ο Al ενισχύονται με ZnO και χρησιμοποιούνται ως ένα μέτωπο επαφής. ^[53] Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη εμπρόσθια επαφή TCO είναι SnOx:F, αλλά και με τη χρήση ITO, ZnO: Al και CuSO₄ έχουμε υψηλής απόδοσης φωτοβολταϊκά πλαίσια. Το ρυθμιστικό στρώμα CdS σχηματίζει μια ετερο-δίοδο με το στρώμα CdTe. Το πάχος του στρώματος CdTe εξαρτάται από τις μεθόδους εναπόθεσης και είναι τυπικά από 2-6 μm , ενώ μόλις τα 2 μm απαιτούνται για να απορροφηθεί το μεγαλύτερο μέρος του χρήσιμου φάσματος του φωτός. Πιθανά στάδια της ανακύκλωσης είναι (Εικόνα 4.19):

- η μερική αποκόλληση των φωτοβολταϊκών μονάδων από τη φυσική σύνθεση τους (τεμαχισμός ή άλεση),
- η χημική ή η θερμική αποσύνθεση του φύλλου ενθυλάκωσης ή με κρυογονική θραύση,
- η επικάλυψη του υποστρώματος (cullet ή ανέπαφο υπόστρωμα) και ο διαχωρισμός των μη μεταλλικών κλασμάτων (φύλλο ενθυλάκωσης, γυαλί) από τα μεταλλικά κλάσματα (ημιαγωγοί, μέταλλα) και
- η εξόρυξη και η διύλιση των στοιχείων.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου



Εικόνα 4.19: Διαδρομή ανακύκλωσης για χαλκογενίδια.

Διαχωρισμός στρωμάτων

Το πρώτο στάδιο είναι να ανοιχτεί το πλαστικοποιημένο πλαίσιο, το οποίο χρησιμοποιείται για να αντέχει σε βάθος χρόνου στις μηχανικές καταπονήσεις και στην υγρασία για περισσότερο από 25 χρόνια. Οι νέες τεχνολογίες, όπως κόλλητικές ουσίες αντί για φύλλα ενθυλάκωσης είναι σε εξέλιξη για να παρατείνει τον χρόνο ζωής ώστε να μην ξεφλουδίσει το χρώμα των πλαισίων. Υπάρχει συγκεκριμένη απαίτηση μεταξύ του σχεδιασμού για την μεγάλη διάρκεια ζωής και για την εύκολη αποσυναρμολόγηση των πλαισίων. Στο επίκεντρο των κατασκευαστών είναι η παράταση της διάρκειας ζωής, ώστε να παράγεται περισσότερη ενέργεια. ^[54]

Ένας τρόπος αποκόλλησης είναι η φυσική αποσύνθεση των πλαισίων με τον τεμαχισμό και τον μύλο άλεσης. ^[55] Για παράδειγμα, στην γραμμή ανακύκλωσης της First Solar κατά τη διάρκεια αυτών των διαδικασιών τα πλαίσια συνθλίβονται και αλέθονται σε μικρά σωματίδια.

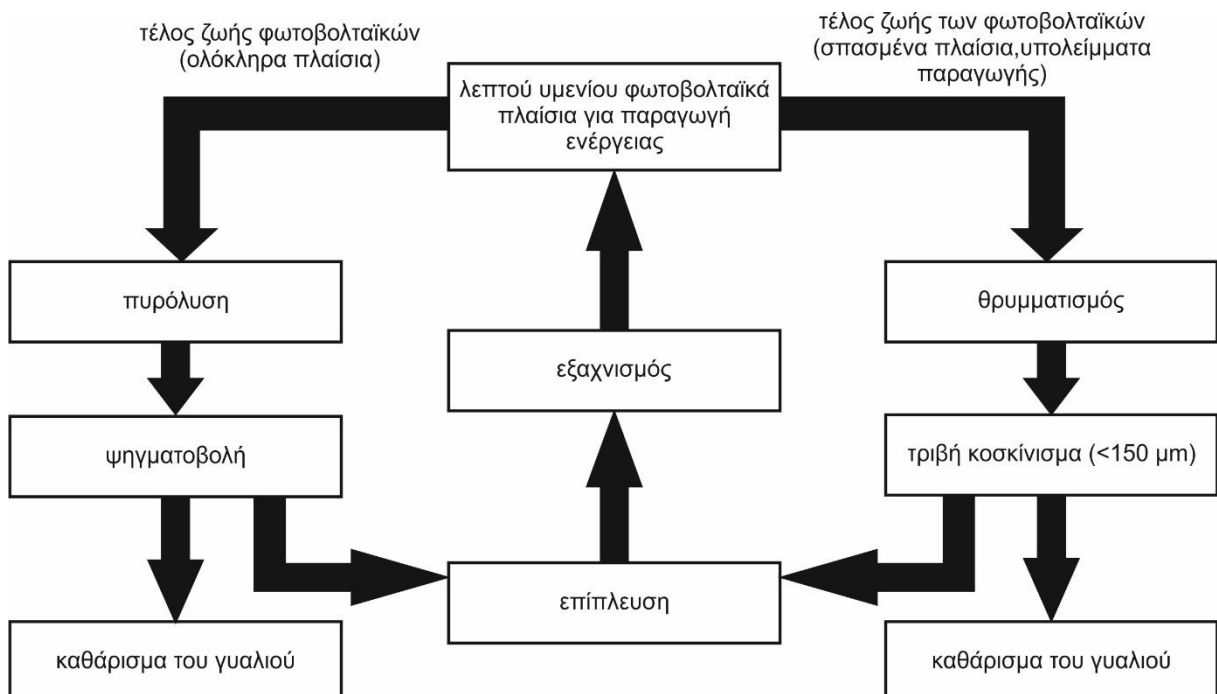
Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

Ωστόσο, δεν είναι δυνατό να απελευθερωθεί πλήρως το στρώμα του ημιαγωγού από το γυάλινο υπόστρωμα και το φύλλο πλαστικοποίησης ξεφλουδίζει μόνο εν μέρει από το γυαλί. Έπειτα, συνεχίζεται η διαδικασία για να διαχωριστεί το στρώμα απορρόφησης CIGS καθώς παρέμεινε στη γυάλινη επιφάνεια. Είναι επίσης δυνατό να αποσυντεθούν τα οργανικά συστατικά (όπως το αλουμινιο ενθυλάκωσης και τα μονωτικά υλικά). Με την πυρολυτική διαδικασία ξεχωρίζονται είτε σπασμένα είτε σε ακέραια μορφή στοιχεία. Τα προϊόντα που παράγονται κατά τη διαδικασία πυρόλυσης απορρίπτονται και πρέπει να καθαρίζονται.

Μια άλλη μέθοδος πιο απλή, η οποία παρέχει χαμηλού κόστους επαναχρησιμοποίηση και η διαδικασία ανακύκλωσης των Cu(InGa)Se_2 (CIGS) βασίζεται σε μονάδες λεπτού υμενίου. Η διαδικασία αποτελείται από έναν μηχανικό διαχωρισμό του γυαλιού κάλυψης μετά τη θέρμανση της μονάδας στους 250°C για να μαλακώσει το EVA, έπειτα απομακρύνονται τα υπολείμματα του EVA με βύθιση σε ένα διάλυμα οξικού οξέος. Τέλος, γίνεται η συλλογή του απορροφητικού στρώματος CIGS που είναι σαν μεταλλική πούδρα με μηχανικές τεχνικές χάραξης και ανάκτησης της πίσω επαφής από γυαλί, διαλύοντας το επόμενο στρώμα με αραιό διάλυμα νιτρικού οξέος.^[56]

Διαχωρισμός των μη μεταλλικών κλασμάτων από τα μεταλλικά κλάσματα

Ο κύριος στόχος είναι η χρήση μικρών χημικών ποσοτήτων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Τα σπασμένα στοιχεία συνθλίβονται σε ένα αναδευτήρα για την πλήρη φθορά των ημιαγωγικών υλικών. Με την διαδικασία της τριβής, το μίγμα των ημιαγωγών, το γυαλί και το EVA ξεπλένεται και κοσκινίζεται. Σε δεύτερη φάση διαχωρίζονται τα πολύτιμα υλικά από τις λειαντικές ουσίες μέσω ενός διαχωριστή αέρα (Εικόνα 4.20). Αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να ανακτήσει υλικά σε ποσοστό 25%. Επιπλέον η διαδικασία του διαχωρισμού με την επίπλευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαχωριστούν σωματίδια γυαλιού από τις λειαντικές ουσίες.^[54]



Εικόνα 4.20: Δυο τρόποι ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πλαισίων τεχνολογίας λεπτού υμενίου.

Έως το 99,999% της καθαρότητας των μετάλλων και των ημιαγωγών απαιτείται για την παραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων λεπτού υμενίου, όπου στην προ-επεξεργασία μετάλλων πρέπει να εμπλουτιστεί, να διαχωριστεί και να καθαριστεί. Υπάρχουν αρκετές χημικές διεργασίες, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαχωριστούν τα μέταλλα από τα διαλύματα όπως:

- η καθίζηση,
- η ηλεκτρόλυση,
- η ανταλλαγή ιόντων και
- η οξειδωση ή η αναγωγή.^[54]

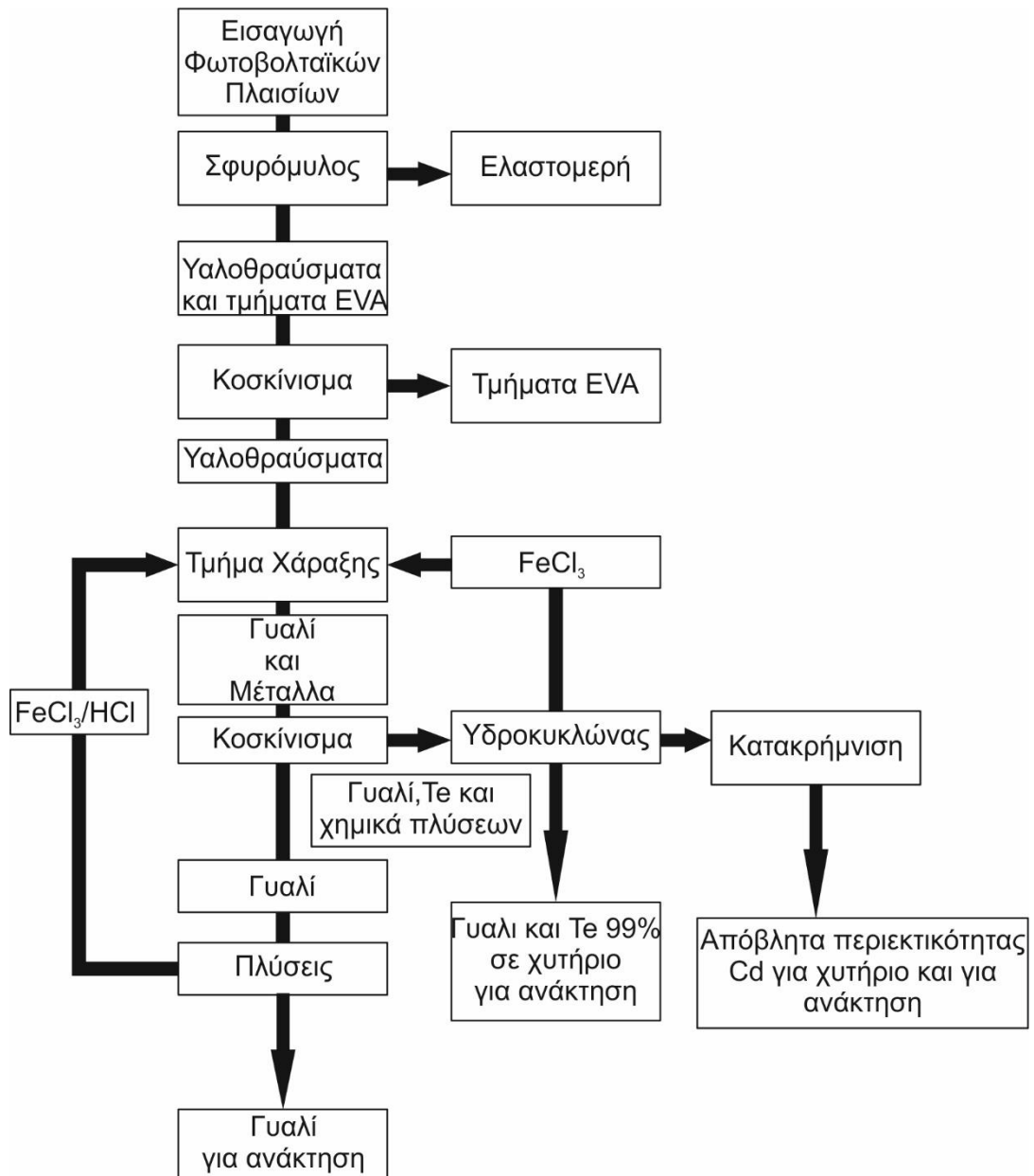
Παρακάτω περιγράφονται διαδικασίες ανακύκλωσης για την ανάκτηση υλικών λεπτού υμενίου από χαλκογενίδια (υπο)στοιχεία και κατάλοιπων της παραγωγής. Αρκετές εταιρείες και ερευνητικά ινστιτούτα έχουν αναπτύξει διαδικασίες ανακύκλωσης για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με χαλκογενίδια τεχνολογίας λεπτού υμενίου.

4.4.1 Μέθοδοι Ανακύκλωση Φ/B Χαλκογενιδίων από γνωστές εταιρείες

Η μέθοδος επεξεργασίας της First Solar για CdTe φωτοβολταϊκά πλαίσια ξεκίνησε από τις Ηνωμένες Πολιτείες στα τέλη του 1990. Η μέθοδος αυτή καθιερώθηκε το 2003 αναπτύσσοντας την πλήρη λειτουργία της το 2007. Η εταιρεία έχει εργοστάσια κατασκευής στις Ηνωμένες πολιτείες (απ' όπου ιδρύθηκε), στην Γερμανία και στην Μαλαισία. Η First Solar ξεκίνησε να επεξεργάζεται τα βιομηχανικά μικρά κομματάκια (scrap) στα εργοστάσια ανακύκλωσης της το 2011 (Εικόνα 4.21). Μέχρι το 2030, η εταιρεία σχεδιάζει να αυξήσει την χωρητικότητα της καθώς θα εμφανιστούν τα πρώτα φωτοβολταϊκά πλαίσια που θα έχουν φτάσει στο τέλος του κύκλου της ζωής τους.

Αρχικά, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συλλέγονται, θρυμματίζονται και συνεχίζουν την πορεία τους μέσα από τον σφυρόμυλο. Εκεί τα μικρά κομματάκια (scrap) θα θρυμματιστούν ώστε το μέγεθος τους να είναι περίπου 4-5 mm. Με αυτό τον τρόπο θα σπάσουν τυχόν δεσμοί που έχουν απομείνει. Για 4 με 6 ώρες πραγματοποιείται έκπλυση απομακρύνοντας τις ημιαγώγιμες ταινίες. Έπεται συνέχεια της διαδικασίας με ένα ανοξειδωτο περιστρεφόμενο χάλυβα όπου τοποθετούνται τα θραύσματα του υλικού με διάλυμα οξέος και υπεροξειδίου του υδρογόνου. Το κόκκινο που δονείται χρησιμοποιείται για να διαχωριστεί το γυαλί από το υγρό μέρος των αποβλήτων και από το υλικό σύνδεσης. Το υλικό σύνδεσης χρησιμοποιείται για να διασφαλιστεί η ένωση και η ομογενοποίηση των δυο στρωμάτων. Πριν την ανακύκλωση απαιτείται μια διεργασία για να γίνουν δεκτά τα στοιχεία προς ανακύκλωση. Το γυαλί πρέπει να πλυθεί καλά για να απομακρυνθούν τυχόν ημιαγώγιμα υλικά και να οδεύσει προς την ανακύκλωση. Η επόμενη μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η καθίζηση. Με την καθίζηση γίνεται διαχωρισμός του υγρού στοιχείου των αποβλήτων από τις μεταλλικές ενώσεις. Τα βήματα που πραγματοποιούνται για να διαχωριστούν οι μεταλλικές ενώσεις είναι η αύξηση του PH χρησιμοποιώντας υδροξείδιο του νατρίου. Έπειτα στην δεξαμενή πάχυνσης συλλέγονται τα καθιζήμενα υλικά με σκοπό την αφυδάτωση τους και την συλλογή των ημιαγώγιμων υλικών για περεταίρω επεξεργασία. Μετά την επεξεργασία το ημιαγώγιμο υλικό θα χρησιμοποιηθεί στα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου



Εικόνα 4.21: Ποή Ανακύκλωσης στην First Solar. ^[37]

Βέβαια, η ανακύκλωση δίνει την δυνατότητα της ανάκτησης πρωτογενών υλικών από τα απόβλητα όπως είναι το Te και το Cd. ^{[36],[57]} Η First Solar αναπτύσσοντας αυτή την μεθοδολογία έχει το προνόμιο να ανακτά το γυαλί από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε ποσοστό 90%. Επομένως, το γυαλί θα μπορεί να ξανα-χρησιμοποιηθεί σε άλλα νέα προϊόντα ή σε φωτοβολταϊκά πλαίσια, όπως και τα ημιαγωγιμα υλικά που μπορούν να ανακτήθούν σε ποσοστό 95%. Σύμφωνα με μελέτες, τα στοιχεία που δημιουργούν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο μπορούν να ανακυκλωθούν σε ποσοστό 90% (Εικόνα 4.22). Η μέθοδος της First Solar βασίζεται στην χρησιμοποίηση θρυμματισμένων υλικών από φωτοβολταϊκά πλαίσια και η διαδικασία επιτρέπει την χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων που έχουν φτάσει στο τέλος του κύκλου ζωής τους και μη, τη χρήση σπασμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων και βιομηχανικών μικρών κομματιών (scrap).

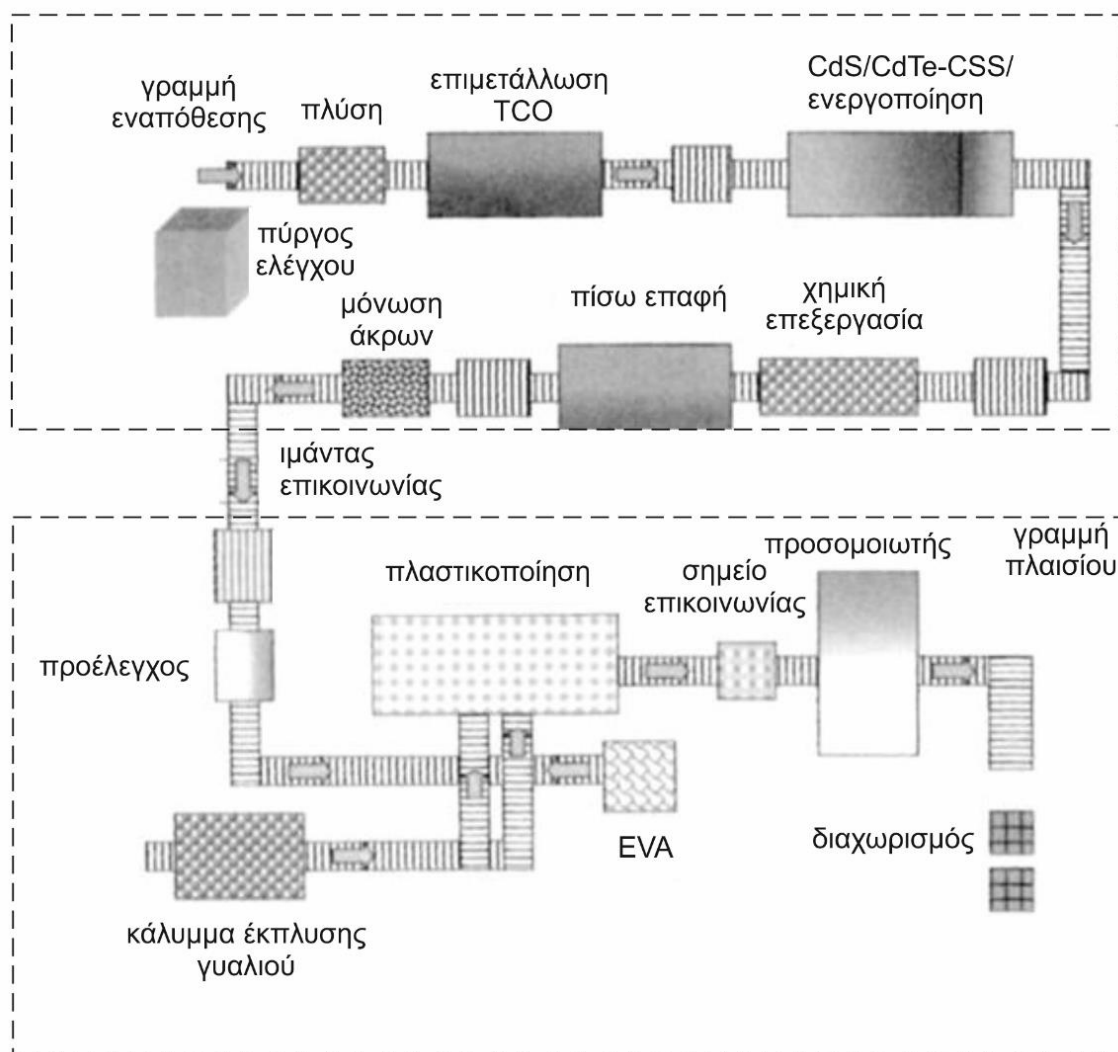


Εικόνα 4.22: Λάσπη ημιαγωγικού υλικού κατά την ανακύκλωση της First Solar.

Η πρωτοποριακή κίνηση της First Solar να διαθέτει δωρεάν πρόγραμμα συλλογής για την κατεργασία και ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, της δίνει προβάδισμα σε σχέση με άλλες εταιρείες. Όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια της εταιρείας διαθέτουν στοιχεία επικοινωνίας και οδηγίες για την ανακύκλωση τους στο πίσω μέρος τους. Η First Solar έχει προνοήσει για την διαδικασία μεταφοράς των πλαισίων διαθέτοντας ειδικό υλικό για την συσκευασία τους. Η συλλογή αυτών των φωτοβολταϊκών πλαισίων γίνεται στα εργαστάσια παραγωγής τους.

Η μέθοδος επεξεργασίας που χρησιμοποιείται στην ANTEC Solar βασίζεται ουσιαστικά στην ανάπτυξη που ξεκίνησε από το Ινστιτούτο Battelle γύρω στο 1970. ^[58] Μετά το κλείσιμο του Ινστιτούτου Battelle, μεταφέρθηκε στην ANTEC GmbH και εξαγοράστηκε η διαχείριση εξελίσσοντας την τεχνολογία κατασκευής (Εικόνα 4.23). Η ANTEC Solar ιδρύθηκε το 1996 με σκοπό να ξεκινήσει την παραγωγή τεχνολογίας λεπτών υμενίων CdTe στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Μια πλήρως αυτοματοποιημένη μονάδα παραγωγής έχει κατασκευαστεί στο Arnstadt της Γερμανίας και η παραγωγή άρχισε το 2001. Το γυάλινο-υπόστρωμα που έχει χαραγμένες TCO ταινίες μεταφέρεται πάνω σε κενά χωνευτήρια που περιέχουν Cd και CdTe σε θερμοκρασίες 700 °C. Τα υλικά των ημιαγωγών συμπυκνώνονται σε θερμοκρασίες 500 °C και ο σχηματισμός της δομής της διόδου n-p ενεργοποιείται με μια χημική επεξεργασία δημιουργώντας αέρια CdCl₂. Εάν το μέγεθος της μονάδας είναι 60 x 120 cm², προς το παρόν η βελτίωση της αποτελεσματικότητας των μονάδων είναι περίπου 7%, μια αύξηση έως 8% επιτεύχθηκε το 2002. Η First Solar, με την βοήθεια του αερίου HCl απομακρύνει το στρώμα TCO. Στη συνέχεια, ένα παράδειγμα απεικονίζει παρακάτω την γραμμή παραγωγής της ANTEC Solar GmbH.

- Καθαρισμός της γυάλινης επιφάνειας κάλυψης (γυαλί float),
- η απόθεση των διαδρόμων επαφής πάνω στις μονάδες,
- δοκιμές στα φωτοβολταϊκά πλαίσια για τον προσδιορισμό των υποβαθμισμένων πλαισίων, τα οποία μπορούν να αποκλείονται από την περαιτέρω επεξεργασία,
- κοπή φύλλου EVA με το μέγεθος που χρειάζεται,
- ένταξη του πλαισίου, το φύλλο EVA και το γυάλινο στρώμα,
- πλαστικοποίηση (σετ των 6 πλαισίων),
- συμπλήρωση των οπών επαφής στο γυάλινο στρώμα,
- προσάρτηση του πλαισίου επαφής,
- ποσοτική μέτρηση της φωτοβολταϊκής απόδοσης (σετ των 3 πλαισίων),
- προσκόλληση τύπου ετικέτας και
- ταξινόμηση, επιλογή και συσκευασία για την αποστολή.

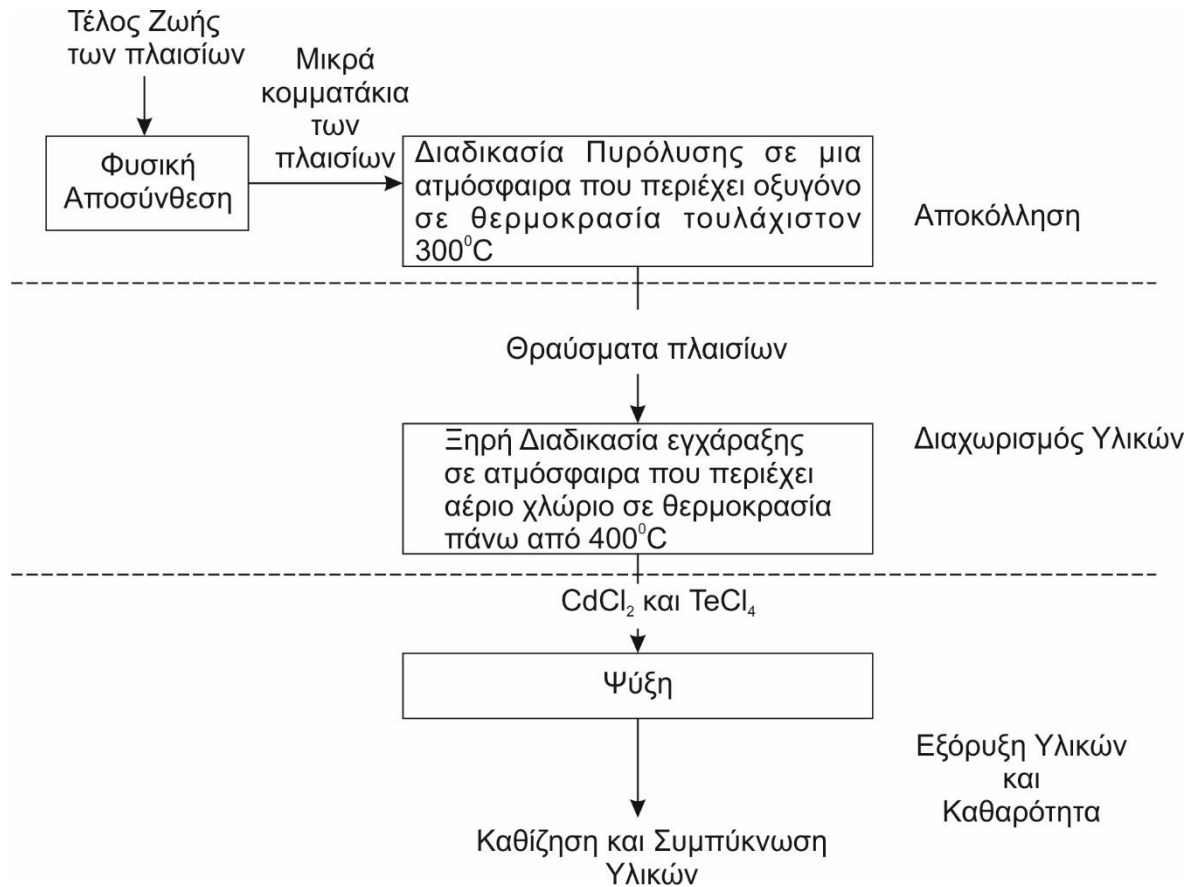


Εικόνα 4.23: Η γραμμή παραγωγής της ANTEC SOLAR GmbH.

Η γραμμή παραγωγής της μονάδας απαιτεί να μην γίνεται καμία χειρωνακτική διακίνηση φορτίων και προσαρμογές, λόγω της ετερογένειας των διαδικασιών. Στο σχήμα φαίνεται η γεωμετρική διάταξη των διαφορετικών διαδικασιών. Κάθε γραμμή έχει εγκατασταθεί σε μια ξεχωριστή αίθουσα. Και οι δύο αίθουσες συνδέονται με ένα διάδρομο μεταφοράς των στοιχείων. Οι ρυθμιστικοί σταθμοί επιτρέπουν την αφαίρεση ημιτελών πλαισίων σε περίπτωση συμβάντος στην κάτω γραμμή χωρίς να κολλάει στα πρατήρια της πάνω γραμμής. Η βασική παράμετρος για τη γραμμή εναπόθεσης και για την γραμμή της μονάδας είναι η ταχύτητα παραγωγής η οποία ορίζεται σε 120.000 μονάδες ετησίως, η οποία οδηγεί σε μια μέση γραμμική ταχύτητα μεταφοράς περίπου 1 m/min στη γραμμή παραγωγής.

Η ANTEC Solar GmbH έχει δημιουργήσει μια εγκατάσταση πιλοτικής κλίμακας που βασίζεται στην διαδικασία ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πλαισίων λεπτού υμενίου CdTe και CdS με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας (Εικόνα 4.24).^[59] Στη διαδικασία αυτή, οι μονάδες διαλύονται σε τεμάχια. Τα θραύσματα της μονάδας στη συνέχεια εκτίθενται σε μια ατμόσφαιρα που περιέχει οξυγόνο σε θερμοκρασία τουλάχιστον 300 °C, προκαλώντας την πυρόλυση του EVA. Στη συνέχεια, τα θραύσματα του πλαισίου εκτίθενται σε αέριο που περιέχει χλώριο στην ατμόσφαιρα σε θερμοκρασία άνω των 400 °C, προκαλώντας μια χαρακτηριστική διαδικασία όπου το CdCl_2 και το TeCl_4 δημιουργούνται. Τα CdCl_2 και TeCl_4 που δημιουργούνται στη συνέχεια συμπυκνώνονται και καταβυθίζονται σε ψύξη.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου



Εικόνα 4.24: Διαδικασία Ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πλαισίων της Antec Solar GmbH.^[60]

Μια σύγκριση των μονάδων ανακύκλωσης τριών εμπορευματοποιημένων φωτοβολταϊκών πλαισίων γίνεται στον παρακάτω πίνακα για τις προοπτικές των πλαισίων που χρησιμοποιούνται στις τεχνολογίες, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τεχνολογιών που παρέχονται. Οι διαδικασίες του FirstSolar και ANTEC Solar GmbH επικεντρώνονται στα πλαίσια λεπτού υμενίου, ενώ η SolarWorld εστιάζει στην ανακύκλωση των μονοκρυσταλλικών πλαισίων (Πίνακας 2). Η φυσική αποκόλληση χρησιμοποιείται από την FirstSolar και την ANTEC Solar GmbH. Παρά το γεγονός ότι μια τέτοια διαδικασία έχει αποδειχθεί ότι είναι τεχνικά εφικτή, οικονομικά βιώσιμη και ικανή να αντιμετωπίσει μια μίξη φωτοβολταϊκών αποβλήτων της μονάδας, καθώς δεν είναι δυνατό να αφαιρεθεί πλήρως το υπόστρωμα του ημιαγωγού από τη γυάλινη επιφάνεια. Ως εκ τούτου, οι διαδικασίες διαχωρισμού, όπως η διαδικασία πυρόλυσης, πρέπει να ακολουθηθούν. Επίσης, δεν είναι δυνατόν η άμεση χρήση των κυττάρων μετά τη φυσική αποφλοίωση. Η διαδικασία της θερμικής αποσύνθεσης χρησιμοποιείται στην διαδικασία ανακύκλωσης της SolarWorld. Σε σύγκριση με την φυσική διαδικασία απελασματοποίησης, η θερμική έχει το πλεονέκτημα της πιθανής άμεσης επαναχρησιμοποίησης για τα ακέραια ηλιακά κύτταρα και την ανάκτηση των υλικών υψηλής καθαρότητας. Ωστόσο, απαιτείται υψηλή ενέργεια και παράγονται εκπομπές αερίων. Επίσης η ANTEC Solar GmbH ξεκίνησε την διαδικασία ξηρής χάραξης αντί μιας υγρής-μηχανικής και έκπλυσης διαδικασία (δηλαδή με τριβή) για το υλικό διαχωρισμού. Η διαδικασία έχει το πλεονέκτημα ότι είναι περισσότερο οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον.^[60]

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

Εταιρείες	SolarWorld	FirstSolar	ANTEC Solar GmbH
Τύπος Φ/Β πλαισίου	c-Si	Λεπτού υμενίου	Λεπτού υμενίου
Τεχνολογία	<ul style="list-style-type: none"> Θερμική αποσύνθεση Χειρωνακτικός Διαχωρισμός Εγχάραξη 	<ul style="list-style-type: none"> Φυσική αποσύνθεση (τεμαχισμός με σφυρί άλεσμα) Έκπλυση Διαχωρισμός Στερεών-υγρών Διαλογή με δόνηση Κατακρήμνιση 	<ul style="list-style-type: none"> Φυσική αποσύνθεση Επεξεργασία πυρόλυσης Ξηρή χάραξη Κατακρήμνιση
Ποσοστό ανάκτησης & καθαρότητα	<ul style="list-style-type: none"> >90% του γυαλιού 95% των υλικών ημιαγωγών (Si) Έως 97% των ακέραιων πλακιδίων (>200 μm) 6 N καθαρότητα 	<ul style="list-style-type: none"> 90% του γυαλιού 95% των υλικών ημιαγωγών (Cd, Te) >80% του Te και 99,7% καθαρότητα 	Δεν έχουν δημοσιευθεί
Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Υψηλό ποσοστό ανάκτησης των πολύτιμων υλικών ✓ Υψηλή καθαρότητα των ανακτημένων υλικών ✓ Πιθανή άμεση επαναχρησιμοποίηση των πλακιδίων 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Δυνατότητα επεξεργασίας μεικτών αποβλήτων ✓ Υψηλό ποσοστό ανάκτησης γυαλιού και ημιαγωγών υλικών ✓ Πολύ αυτοματοποιημένη διαδικασία 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Δυνατότητα επεξεργασίας μεικτών αποβλήτων ✓ Υψηλό ποσοστό ανάκτησης γυαλιού και ημι-αγωγό υλικό ✓ Λιγότερη χρήση χημικών ✓ Λιγότερο πολύπλοκη διαδικασία
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> * Λεπτά ελαττωματικά πλακίδια και υποβάθμιση λόγω της υψηλής θερμοκρασίας * Αναποτελεσματικός διαχωρισμός με το χέρι * Πιθανές βλαβερές εκπομπές 	<ul style="list-style-type: none"> * Θραύση των ηλιακών κυττάρων, δεν είναι δυνατόν να επαναχρησιμοποιηθούν Απαιτείται αναπαραγωγή πλακιδίων * Υψηλή ενεργειακή ζήτηση * Περίπλοκη διαδικασία * Χρήση των χημικών ουσιών * Ακριβός εξοπλισμός 	<ul style="list-style-type: none"> * Υψηλή ενεργειακή ζήτηση * Θραύση των ηλιακών κυττάρων, δεν είναι δυνατόν να επαναχρησιμοποιηθούν, απαιτείται η αναπαραγωγή πλακιδίων * Υψηλή προσπάθεια απαιτείται για τον καθαρισμό

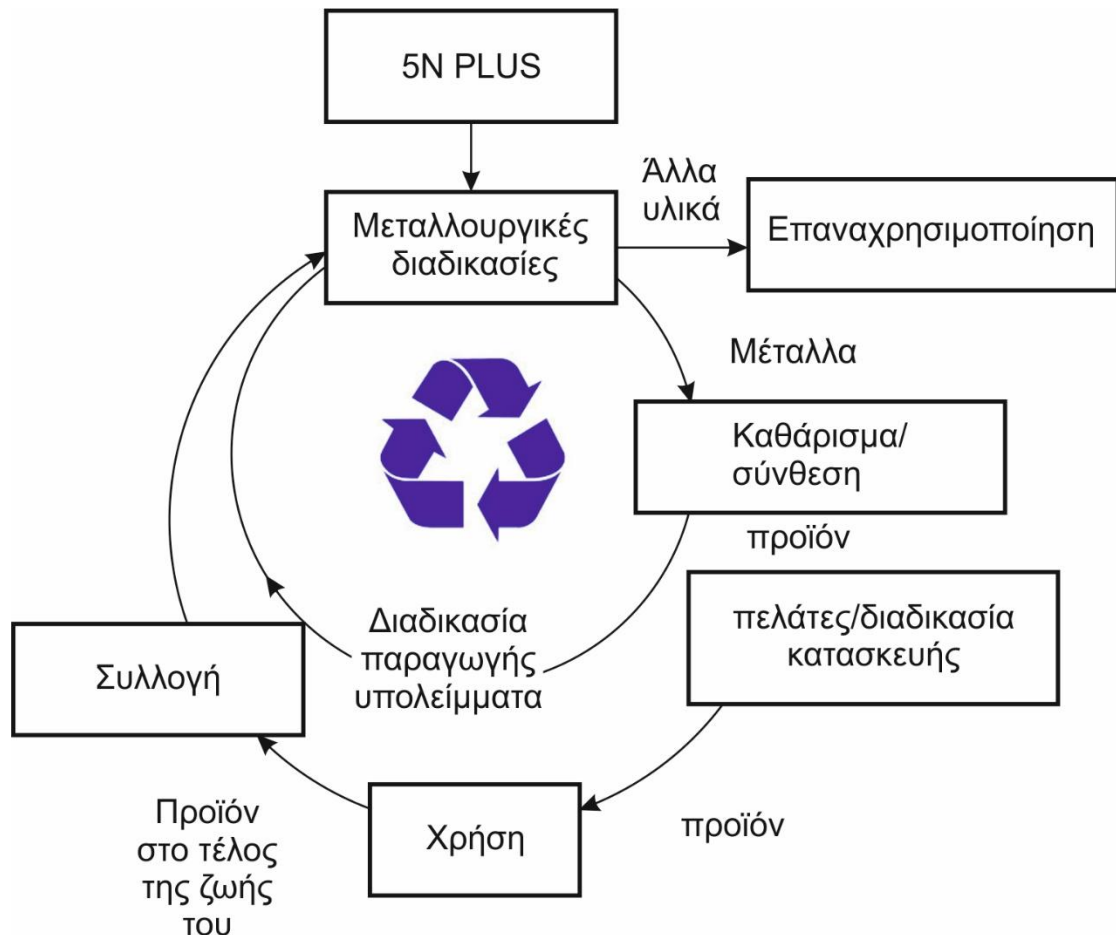
Πίνακας 2:Πληροφορίες για την διαδικασία της ανακύκλωσης από τις πιο μεγάλες μονάδες επεξεργασίας φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Η μέθοδος επεξεργασίας που χρησιμοποιεί η 5N PLUS πήρε το όνομά της από την καθαρότητα των προϊόντων της με ποσοστό 99,999%. Η εταιρεία ειδικεύεται στην παραγωγή και τον καθαρισμό ορισμένων μετάλλων όπως το βισμούθιο, το γάλλιο, το γερμάνιο, το ίνδιο, το σελήνιο και το τελλούριο (Εικόνα 4.25), καθώς και σε ανόργανες χημικές ουσίες που βασίζονται σε τέτοια μέταλλα και σε λεπτά στρώματα σύνθετων ημιαγωγών.



Εικόνα 4.25: Μέταλλα με τα οποία δραστηριοποιείται η 5N PLUS.

Πολλά από αυτά είναι απαραίτητα βασικά εργαλεία σε αγορές όπως η παραγωγή ηλιακής ενέργειας, οι δίοδοι εκπομπής φωτός και άλλα υλικά που είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Η 5N PLUS λειτουργεί τις εγκαταστάσεις παραγωγής της και τα γραφεία πωλήσεων σε διάφορες τοποθεσίες στην Ευρώπη, στην Αμερική και στην Ασία. Η εταιρεία αναπτύχθηκε το 2003 με ένα νέο εργοστάσιο πρωτοβάθμιας διύλισης στο Μόντρεαλ, το οποίο στεγάζει τις υδρομεταλλουργικές δραστηριότητές της. Το 2007 ξεκίνησε την κατασκευή μιας μονάδας παραγωγής στο Eisenhüttenstadt, της Γερμανία, ιδανικό για την παραγωγή και την ανακύκλωση προϊόντων για τη βιομηχανία ηλιακών κυττάρων. ^[61]



Εικόνα 4.26: Η μέθοδος ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών της 5N PLUS.

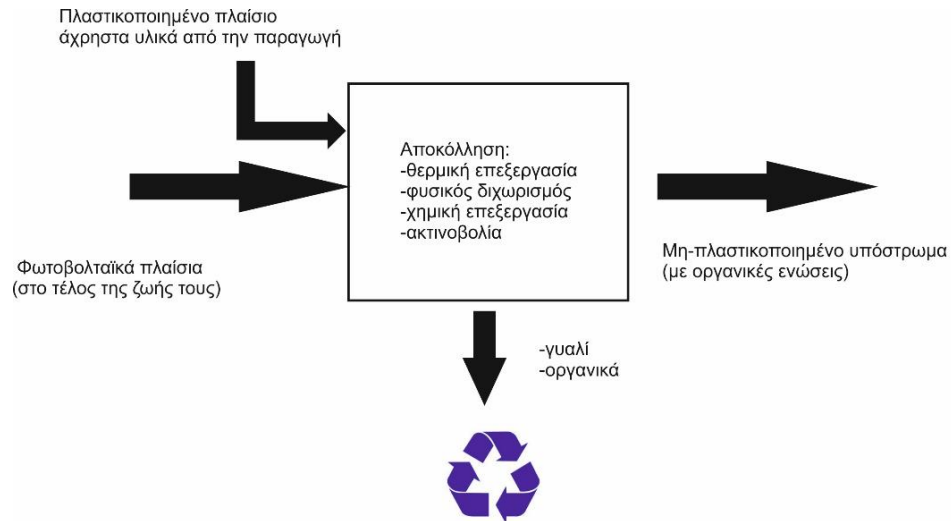
Η 5N Plus έχει διακριθεί ως ο μεγαλύτερος προμηθευτής του τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Το Τελλουριούχο κάδμιο είναι ένας ημιαγωγός που επιτρέπει την αποδοτική μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Τυπικά, απαιτείται τελλουριούχο κάδμιο καθαρότητας 5N για αυτόν τον τύπο εφαρμογής (Εικόνα 4.26).

Τα βασικά 3 βήματα για την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών τελλουριούχου καδμίου (CdTe) είναι:

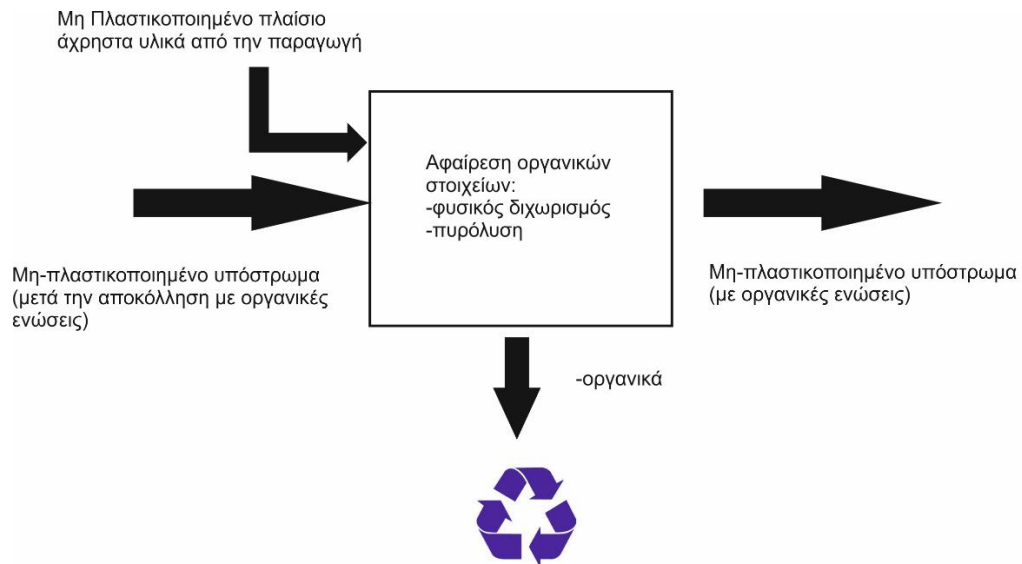
- η αποκόλληση από το πλαστικοποιημένο πλαίσιο (Εικόνα 4.27),
- η αφαίρεση των οργανικών στοιχείων (Εικόνα 4.28) και
- η εξόρυξη των μετάλλων με την διαμόρφωση τους (Εικόνα 4.29)

Αυτή η βασική μέθοδος εφαρμόζεται σε ανέπαφα ή ελαφρώς κατεστραμμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

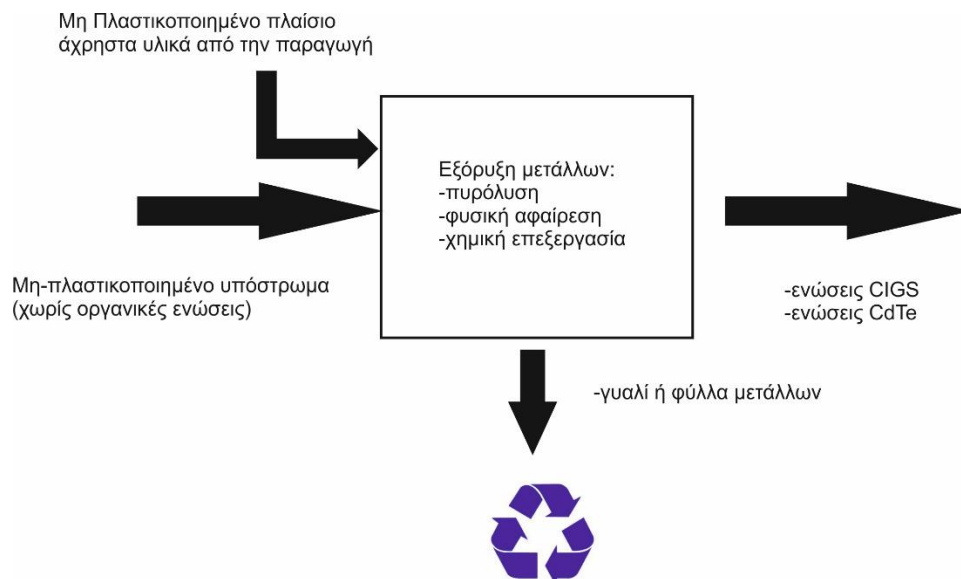
Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου



Εικόνα 4.27: Πρώτο στάδιο - Αποκόλληση.



Εικόνα 4.28: Δεύτερο στάδιο - Αφαίρεση οργανικών στοιχείων.



Εικόνα 4.29: Τρίτο στάδιο - Εξόρυξη μετάλλων. ^[61]

Η μέθοδος επεξεργασίας της Loser Chemie: αναπτύσσεται και προσανατολίζεται σε προϊόντα φιλικά προς το περιβάλλον. Η λειτουργία της εταιρείας εστιάζεται στους τομείς της επεξεργασίας του νερού, στα υφάσματα, στο χαρτί, αλλά και στην ανακύκλωση των σπάνιων μετάλλων με στρατηγική σημασία. Η λίστα των προτεραιοτήτων της εταιρείας περιλαμβάνει προϊόντα και υπηρεσίες. Με τα πιο πρόσφατα ενδιαφέροντα της εταιρείας να επικεντρώνονται στην ανακύκλωση του ίνδιου, του γάλλιο, του τελλουρίου, κ.α. και σε απόβλητα φωτοβολταϊκών πλαισίων λεπτού υμενίου. Το ενδιαφέρον της εταιρείας στρέφεται στην εξόρυξη σπάνιων βασικών μετάλλων. Η προσπάθεια της εταιρείας να συνδυάσει την οικολογική συνείδηση και το οικονομικό συμφέρον παρέχει το υψηλότερο δυνατό όφελος για τους πελάτες της και για το περιβάλλον (Εικόνα 4.30).

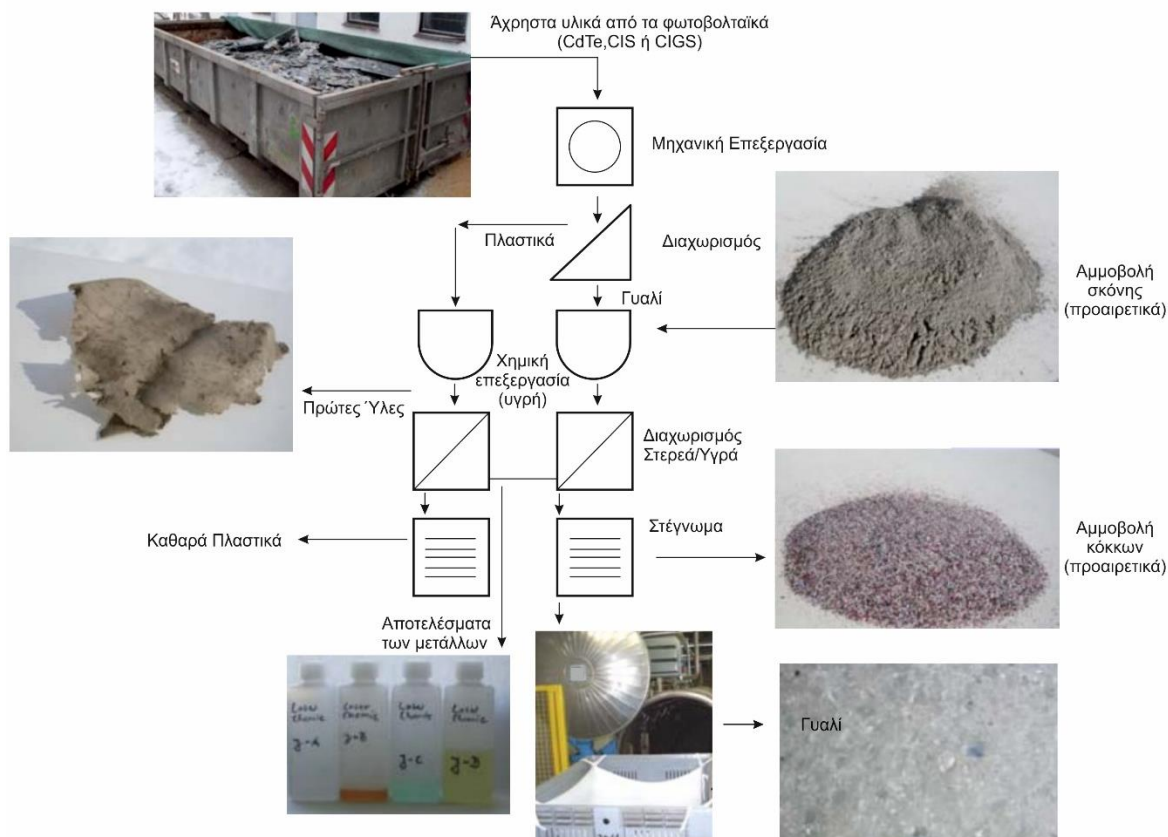
Αυτή τη στιγμή ασχολούνται επισταμένα με την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων και την ανακύκλωση γενικότερα. Μεταξύ άλλων, τα ακόλουθα υλικά για την παραγωγή ηλιακών συλλεκτών που συγκαταλέγονται στην λίστα των στόχων της εταιρείας είναι:

- το τελλουριούχο κάδμιο (CdTe),
- οι ενώσεις σεληνίου,
- οι ενώσεις γάλλιο,
- οι ενώσεις θείου,
- οι ενώσεις ίνδιου και
- οι ενώσεις χαλκού.

Ο σκοπός της εταιρείας είναι η δημιουργία μιας μεθόδου για την ανακύκλωση των αποβλήτων παραγωγής μέχρι το τέλος της ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων που δεν θα βασίζεται στο πυρίτιο. Έτσι η Loser Chemie έχει ερευνήσει εντατικά τους παραπάνω τομείς για να βρεί μια καλύτερη μέθοδο προσέγγισης για τα μέταλλα στα φωτοβολταϊκά, καθώς και για τις σπάνιες γαίες των λαμπτήρων.

Η ελαχιστοποίηση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων περιγράφεται παρακάτω με μια χημική μέθοδο ανακύκλωσης για το CIS, το CIGS και το CdTe έτσι ώστε να γίνει μια προσέγγιση για τη βιωσιμότητα των υλικών. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τεχνολογίας λεπτού υμενίου βασίζονται στο χαλκο και στο ίνδιο (CuInSe_2 , CIS) ή στο τελλουριούχο κάδμιο (CdTe). Ωστόσο, η εξέλιξη στον τομέα της νανοτεχνολογίας μπορεί να ανοίξει τους ορίζοντες για την παραγωγή φθηνότερων και πιο αποτελεσματικών φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η ανάκτηση των πολύτιμων υλικών, για παράδειγμα το ίνδιο και το τελλούριο από κατεστραμμένα ή στο τέλος του κύκλου ζωής τους φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να οδηγήσει σε οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Φυσικά περιλαμβάνεται η ανάκτηση και η επαναχρησιμοποίηση του γυαλιού. Αυτό είναι μια πραγματική ευκαιρία για την βιομηχανία της ανακύκλωσης. Οι απανωτές στρώσεις γυαλιού που έχουν υποστεί μηχανική κατεργασία διαχωρίζονται σε γυαλί και σε ένα πλαστικό κλάσμα. Έτσι, υπάρχουν δύο παράλληλες διαδικασίες, η μια δίνει το πλαστικό πλούσιο σε περιεχόμενο υψηλής ενέργειας και η άλλη δίνει κυρίως γυαλί. Ο διαχωρισμός της μηχανικής διαλογής χρησιμοποιείται με επιτυχία. Και τα δύο κλάσματα μπορούν να εξαχθούν από χημική επεξεργασία και μετά το πλύσιμο και την ξήρανση, το γυαλί είναι έτοιμο για επαναχρησιμοποίηση όπως το πλαστικό και τα μέταλλα.^[62]

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου



Εικόνα 4.30: Μέθοδος ανακύκλωσης της Loser Chemie.

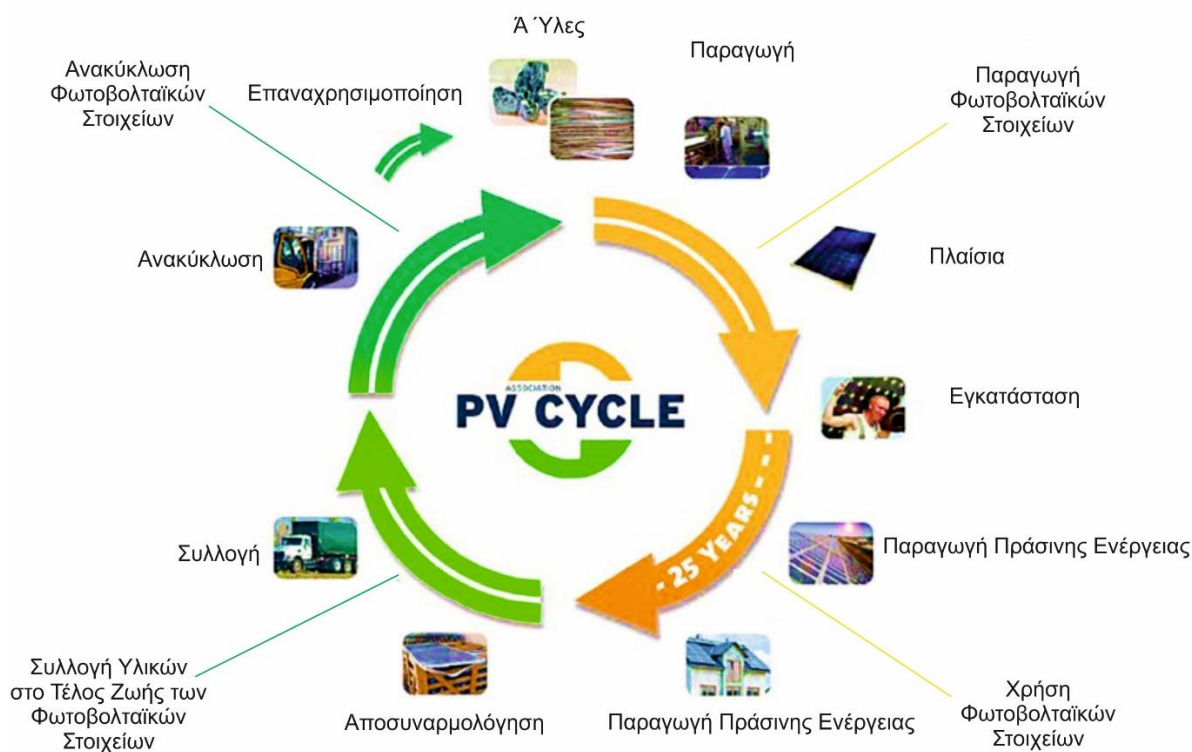
Ο οργανισμός PV Cycle

Το 2007 ιδρύθηκε ο πρωτοποριακός Ευρωπαϊκός οργανισμός της PV Cycle (Εικόνα 4.31). Η βασική ιδέα ήταν να δημιουργηθεί ένα πρόγραμμα εθελοντισμού στην συλλογή και στην ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ο οργανισμός της PV Cycle έχει στο δυναμικό της κατασκευαστές και πωλητές φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ένα ποσοστό 90% της ευρωπαϊκής αγοράς φωτοβολταϊκών πλαισίων αντιπροσωπεύεται από τον οργανισμό PV Cycle. Ο κύριος στόχος του οργανισμού PV Cycle είναι να ευαισθητοποιήσει τις εταιρείες παραγωγής φωτοβολταϊκών πλαισίων ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η PV Cycle θέλει να δημιουργήσει μεγαλύτερο αίσθημα ευθύνης στις εταιρείες παραγωγής φωτοβολταϊκών πλαισίων από το στάδιο επιλογής των πρώτων υλών μέχρι και το στάδιο της ανακύκλωσης. Αποδεκτά γίνονται όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, των οποίων οι κατασκευαστές είναι μέλη του οργανισμού PV Cycle. Εξαίρεση αποτελούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια της εταιρείας First Solar λόγω της ενδοεταιρικής διαδικασίας ανακύκλωσης που έχει αναπτύξει. Στην επίσημη ιστοσελίδα του οργανισμού PV Cycle παρουσιάζεται μία αναλυτική λίστα όλων των κατασκευαστών που συμμετέχουν στο πρόγραμμα ανακύκλωσης.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που δεν γίνονται δεκτά για ανακύκλωση είναι:

- ελλιπή (π.χ. χωρίς πλαίσια ή κουτί σύνδεσης),
- υπερβολικά λερωμένα,
- φωτοβολταϊκά πλαίσια της εταιρείας First Solar,
- καμένα (εξαίρεση αποτελούν τα πλαίσια με Hotspot βλάβες),
- θερμικά φωτοβολταϊκά πλαίσια,
- λοιπός εξοπλισμός φωτοβολταϊκού συστήματος όπως οι μετατροπείς ρεύματος και
- οι βάσεις στήριξης του φωτοβολταϊκού συστήματος.^[63]

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου



Εικόνα 4.31: Ανακύκλωση Φωτοβολταϊκού σύμφωνα με την PV CYCLE.

Επιπροσθέτως, όσα φωτοβολταϊκά πλαίσια προορίζονται για ανακύκλωση θα πρέπει να είναι κατάλληλα συσκευασμένα με ειδικό υλικό, ώστε να μην καταστραφούν, πριν γίνουν δεκτά. Αξιοσημείωτο είναι ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που έχουν ως βάση το πυρίτιο (κρυσταλλικά) δεν θα πρέπει να είναι συσκευασμένα μαζί με φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτού υμενίου (CIS, CIGS, CIGSSe, CdTe). Στις ίδιες συσκευασίες μπορούν να τοποθετηθούν φωτοβολταϊκά πλαίσια ίδιας τεχνολογίας μόνο.

4.5. Ανακύκλωση φωτοβολταϊκών στην Ευρώπη

Με την αυξανόμενη παραγωγή και εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων περιορίζεται η διαθεσιμότητα των πόρων και το τέλος του κύκλου ζωής των φωτοβολταϊκών απαιτεί σωστή διαχείριση. Λίγοι μεγάλοι κατασκευαστές φωτοβολταϊκών πλαισίων στην Ευρώπη λειτουργούν σύγχρονες τεχνολογίες ανακύκλωσης σε επίπεδο επεξεργασίας όπως η Deutsche Solar AG και η First Solar. Η διαχείριση των υποδομών ανακύκλωσης, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού της αντίστροφης μηχανικής, τίθεται σε λειτουργία στην Ευρώπη. Στη Γερμανία η περιβαλλοντική βιωσιμότητα των φωτοβολταϊκών πλαισίων αντιπροσωπεύει τις βέλτιστες συνθήκες κατά την επιστροφή των φωτοβολταϊκών στα εργοστάσια ανακύκλωσης. Στο επίκεντρο της έρευνας βρίσκονται τα απορρίματα των τελευταίων 5-10 ετών από την κατασκευή των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Τα παραπάνω περιγράφουν το μοντέλο της γερμανικής κατάστασης, αλλά στο μέλλον θα επικρατήσει και στην Ευρώπη και στις Ηνωμένες Πολιτείες.

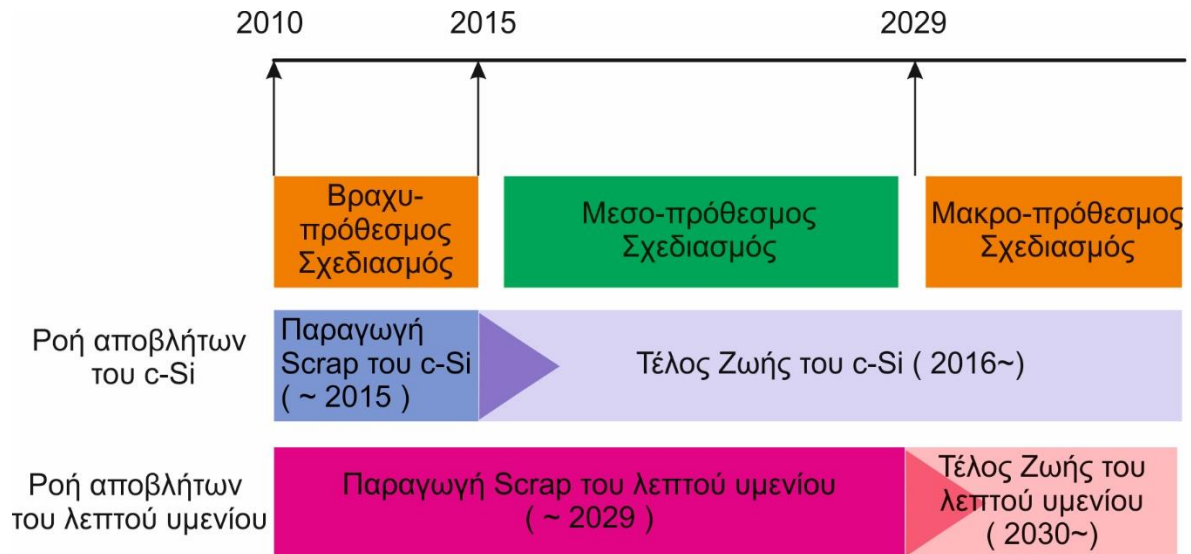
Τα Φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν δύο διαφορετικές σημαντικές ροές αποβλήτων:

- το τέλος του κύκλου ζωής (EOL) κατά την απεγκατάσταση και
- κατά την παραγωγή μικρών θραυσμάτων (scraps).

Η αγορά φωτοβολταϊκών έχει αυξηθεί κατά μέσο όρο περισσότερο από 40% ετησίως κατά τα τελευταία δέκα χρόνια και αναμένεται να αυξηθεί η αειφορία τουλάχιστον 30% ετησίως για τις επόμενες δύο δεκαετίες. ^{[64],[65]} Επί του παρόντος, οι διαδικασίες ανακύκλωσης εξελίσσονται για c-Si και για λεπτού υμενίου (όπως CdTe και CIGS) αναπτύσσονται και ανακυκλώνουν τα

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

απορρίμματα από την παραγωγή και το τέλος της ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Επομένως, σε διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες και στρατηγικές πρέπει να θεωρηθεί αποτελεσματική η διαχείριση των πολύπλοκων ροών αποβλήτων που προερχόταν από εγκαταστάσεις προηγούμενων ετών και η σημερινή και η μελλοντική παραγωγή από διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών. Αυτή η ανάλυση των αποβλήτων και η πρόγνωση παρέχει γνώσεις για το σχεδιασμό της δημιουργίας των υποδομών της ανακύκλωσης διαχρονικά.



Εικόνα 4.32: Χρονικό Διάγραμμα για την δημιουργία υποδομών ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών.

Επιπλέον, υπάρχουν μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις από την κατασκευή φωτοβολταϊκών πλαισίων έως το τέλος της ζωής τους (παραπάνω από 25 χρόνια) (Εικόνα 4.32). Ως εκ τούτου, στον βραχυπρόθεσμο σχεδιασμό (περίπου 5 χρόνια), οι υποδομές της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών επικεντρώθηκαν στη βελτιστοποίηση της θέσης των εγκαταστάσεων ανακύκλωσης με βάση την ποσότητα των φωτοβολταϊκών αποβλήτων και την παραγωγή μικρών κομματιών (scraps) τόσο για το κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) όσο και για το λεπτού υμενίου φωτοβολταϊκά πλαίσια. Κατά τη διάρκεια της μεσοπρόθεσμης περιόδου, δεν θα υπάρχουν πολλά φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτού υμενίου που να έχουν ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής τους, αλλά θα αυξάνονται τα απορρίμματα από την παραγωγή τους. Στον μακροπρόθεσμο σχεδιασμό θα πρέπει να θεωρηθούν τα απόβλητα από φωτοβολταϊκά λεπτού υμενίου μαζί με όλους τους άλλους τύπους των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Η Γερμανία είναι η μεγαλύτερη χώρα του κόσμου στην αγορά φωτοβολταϊκών πλαισίων όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ και είναι κορυφαία στην Ευρώπη στην παραγωγή φωτοβολταϊκών από το 2010. Αρκετοί βασικοί παράγοντες εξασφαλίζουν ότι τα φωτοβολταϊκά της Γερμανίας έχουν επιτυχία, έστω και αν τα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας εκεί είναι πολύ χαμηλά σε σχέση με άλλες χώρες. ^[66] Σε 16 επαρχίες της Γερμανίας από το 2001 έως το 2008 έχουν εγκατασταθεί μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα που καλύπτουν το 70% της συνολικής ετήσιας εγκατεστημένης ισχύς. Ωστόσο, το μεγαλύτερο ποσό των μεταχειρισμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων στο τέλος του κύκλου της ζωής τους αναμένεται να υπάρξουν από το 2025 και μετά, λαμβάνοντας υπόψη τα ιστορικά στοιχεία της εγκατάστασης και τη διάρκεια ζωής τους. Εν τω μεταξύ, μπορεί να ρυθμιστεί μια ατομική ολοκληρωμένη κεντρική συλλογή και ανακύκλωση στις εγκαταστάσεις και να αναλάβει τη φροντίδα των βραχυπρόθεσμων φωτοβολταϊκών αποβλήτων που παράγονται από τις λίγες μικρές εταιρείες που βρίσκονται στην περιοχή αυτή.

Η Γερμανική Κυβέρνηση προσφέρει εκτεταμένα προγράμματα παροχής κινήτρων για την τόνωση της περιφερειακής οικονομίας. Οι κατασκευαστές φωτοβολταϊκών πλαισίων παράγουν περισσότερο από το 90% τεχνολογίας πυριτίου της συνολικής παραγωγής από το 2009. Το

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

κρυσταλλικό πυρίτιο εξακολουθεί να κυριαρχεί στην αγορά των φωτοβολταϊκών πλαισίων με ποσοστό 85%. Βέβαια ήταν αναμενόμενο να μειωθεί η ζήτηση του κρυσταλλικού πυριτίου με την αύξηση του ενδιαφέροντος σε τεχνολογίες λεπτού υμενίου. Επιπλέον, οι τεχνολογίες ανακύκλωσης για φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτού υμενίου (όπου δραστηριοποιείται η First Solar) είναι αρκετά διαφορετική από την τεχνολογία ανακύκλωσης του κρυσταλλικού πυριτίου της Solar World. Επομένως, απαιτούνται ξεχωριστές εγκαταστάσεις ανακύκλωσης για τους δύο τύπους φωτοβολταϊκών πλαισίων.

5. Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Analysis)

Η ανάλυση κύκλου ζωής είναι ένα εργαλείο εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με κάποιο προϊόν, μια διεργασία ή μια δραστηριότητα προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον, εκτιμώντας τις επιπτώσεις από την χρήση της ενέργειας και των υλικών καθώς και των αποβλήτων και αναγνωρίζοντας και εκτιμώντας τις δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων (Εικόνα 5.1). ^[67]

Η ανάλυση κύκλου ζωής είναι μια προσέγγιση "από την κούνια στον τάφο" (cradle-to-grave) για την αξιολόγηση των βιομηχανικών συστημάτων. Η προσέγγιση αυτή αρχίζει με τη συλλογή των πρώτων υλών από τη γη που είναι απαραίτητες για να δημιουργηθεί το προϊόν και τελειώνει στο σημείο όπου όλα τα υλικά επιστρέφονται στη γη. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αξιολογεί όλα τα στάδια της ζωής ενός προϊόντος από τη σκοπιά ότι είναι αλληλοεξαρτώμενα, κάτι που σημαίνει ότι η μια λειτουργία οδηγεί στην επόμενη. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής επιτρέπει την εκτίμηση των αθροιστικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων όλων των σταδίων του κύκλου ζωής ενός προϊόντος και συμπεριλαμβάνει επιπτώσεις που δεν λαμβάνονται υπόψη στις περισσότερες παραδοσιακές αναλύσεις (όπως η εξαγωγή πρώτων υλών, η μεταφορά των υλικών, η τελική διάθεση προϊόντων, κ.λπ.). Με το να συμπεριλαμβάνονται οι επιπτώσεις ολόκληρου του κύκλου ζωής των προϊόντων, η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής προσδιορίζει περιεκτικά την εικόνα των περιβαλλοντικών πτυχών ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας και δίνει μια αναλυτικότερη εικόνα των αληθινών περιβαλλοντικών "ανταλλαγών" στην επιλογή των προϊόντων. ^[68]



Εικόνα 5.1: Ανάλυση Κύκλου Ζωής.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης και λήψης αποφάσεων που σκοπό έχει να αποτιμήσει τις επιδράσεις από τη χρήση ενέργειας και την επεξεργασία υλικών, συμπεριλαμβανομένης της απόρριψης αποβλήτων στο περιβάλλον και να εκτιμήσει τις δυνατότητες επίτευξης περιβαλλοντικών βελτιώσεων σε συνδυασμό με την ορθολογική χρήση πρώτων υλών και ενέργειας κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας.

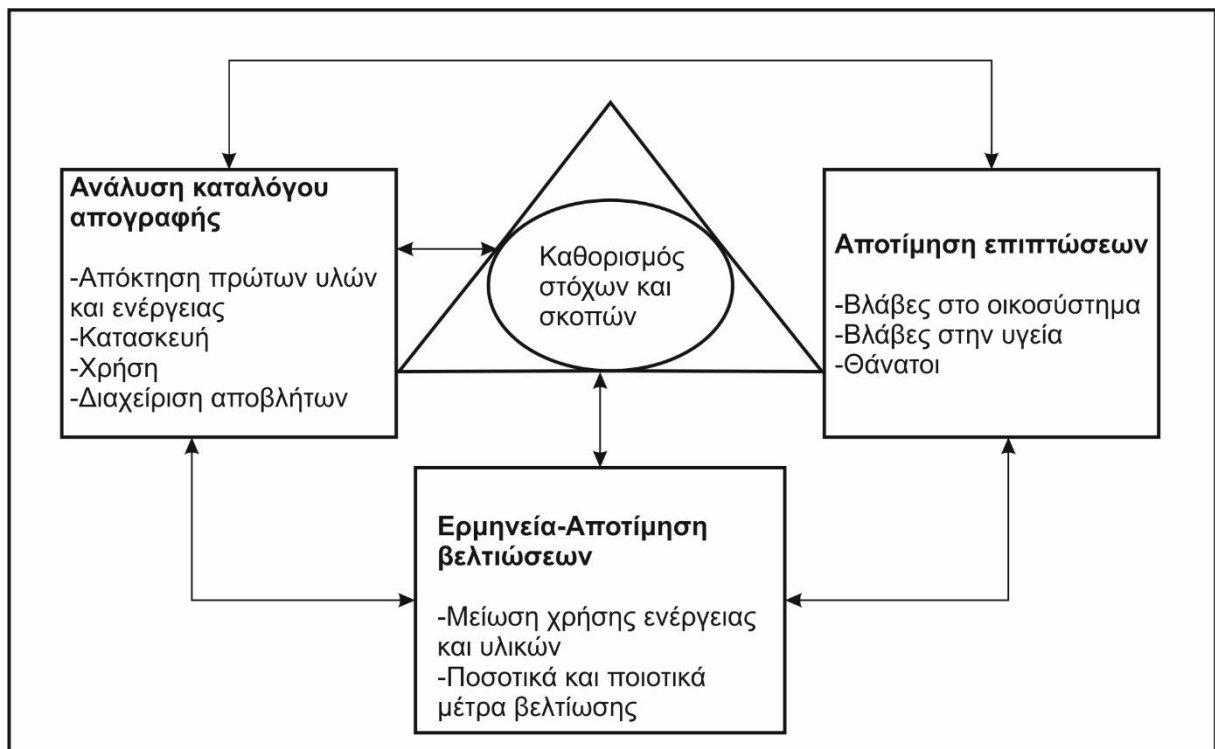
Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

Συγκεκριμένα, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι μια τεχνική για την αποτίμηση των περιβαλλοντικών πτυχών και πιθανών επιπτώσεων που συνδέονται με ένα προϊόν, μια διεργασία ή μια υπηρεσία, όπως περιγράφεται παρακάτω:

- Σύνταξη καταλόγου απογραφής της εισροής της σχετικής ενέργειας και των υλικών και των εκπομπών στο περιβάλλον.
- Αξιολόγηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με τις προσδιορισμένες εισροές και εκπομπές.
- Ερμηνεία αποτελεσμάτων για διευκόλυνση λήψης ενημερωμένων αποφάσεων.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι μια τεχνική:

- Αποτίμησης όλων των εισροών και εκροών ενός προϊόντος, μιας διεργασίας ή μιας υπηρεσίας (κατάλογος απογραφής κύκλου ζωής).
- Αποτίμησης των σχετικών αποβλήτων, της ανθρώπινης υγείας και των οικολογικών επιβαρύνσεων (αποτίμηση επιπτώσεων).
- Ερμηνείας, διάδοσης και επικοινωνίας των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης (ερμηνεία κύκλου ζωής) ολόκληρου του κύκλου ζωής των προϊόντων ή των διεργασιών που εξετάζονται (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2: Στάδια Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Ο όρος "κύκλος ζωής" αναφέρεται στις σημαντικότερες δραστηριότητες κατά τη διάρκεια ζωής του προϊόντος, από την κατασκευή, τη χρήση, τη συντήρηση και την τελική διάθεσή του, συμπεριλαμβάνοντας την απόκτηση των πρώτων υλών που απαιτούνται για να κατασκευαστεί το προϊόν.

Η ανάλυση του κύκλου ζωής αποτελεί ένα από τα εργαλεία περιβαλλοντικής διαχείρισης και λήψης αποφάσεων και συμβάλει στην πρόληψη της ρύπανσης, στη βιώσιμη ανάπτυξη και στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων. Είναι μια τεχνική αποτίμησης όλων των εισροών και των εκροών ενός προϊόντος και των διεργασιών που απαιτούνται (κατάλογος απογραφής κύκλου ζωής). Εκτιμά την επιβάρυνση στο περιβάλλον που προκαλεί ένα προϊόν από τη γέννησή του ως τη τελική του απόθεση. Εξετάζει μέσω εναλλακτικών σεναρίων την ελαχιστοποίηση αυτής της επιβάρυνσης και τη βελτίωση του περιβάλλοντος. Είναι μια τεχνική αποτίμησης των σχετικών αποβλήτων, της ανθρώπινης υγείας και των οικολογικών επιβαρύνσεων. Αξιολογεί

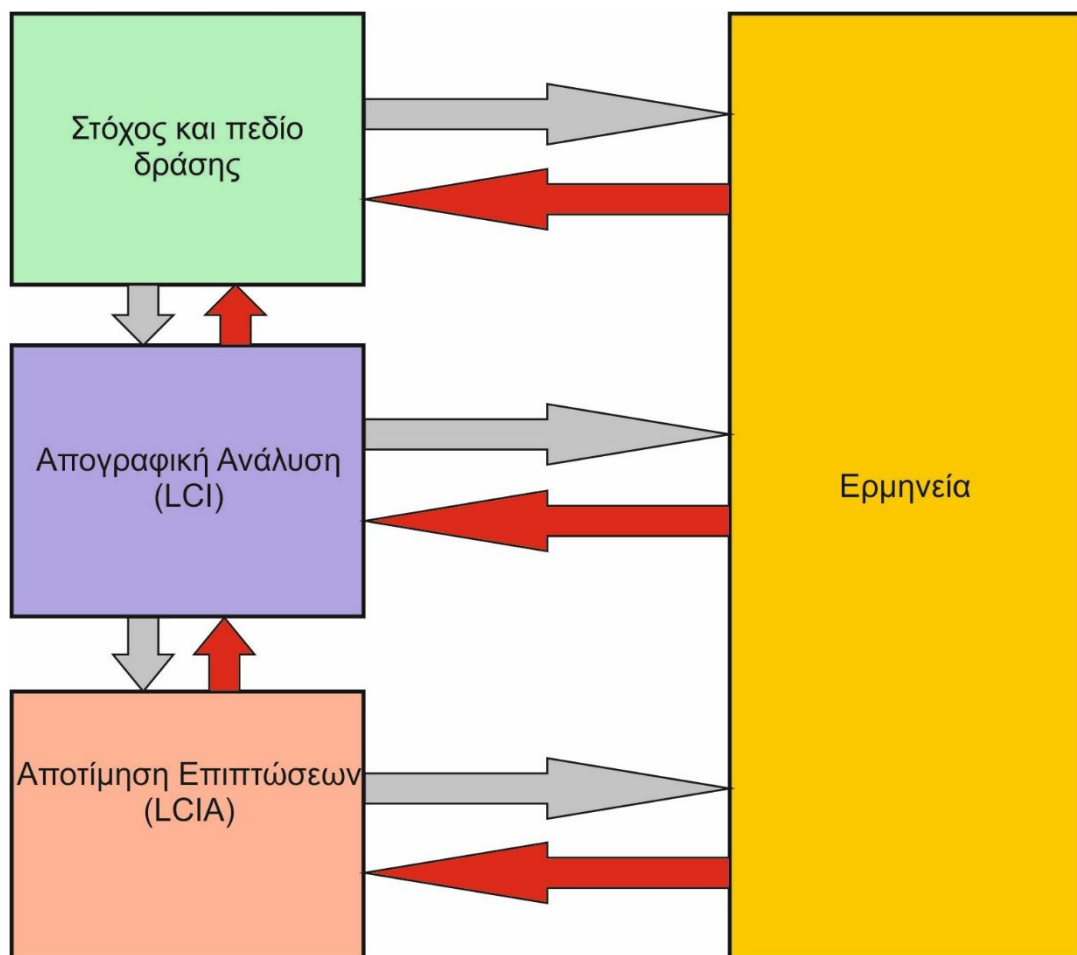
Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με τις προσδιορισμένες εισροές και εκπομπές έχοντας έτσι εύκολη ερμηνεία αποτελεσμάτων για τη διευκόλυνση λήψης αποφάσεων. Μια πρώτη παγκόσμια ομοφωνία διαφαίνεται στον κανονισμό ISO DIN 14042, ^[69] ο οποίος ακολουθεί τις συστάσεις της Κοινωνίας της Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας (Society of Environmental Toxicology And Chemistry-SETAC).

5.1. Τα Στάδια Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής

Μια Ανάλυση Κύκλου Ζωής πρέπει να περιλαμβάνει τα εξής τέσσερα βήματα (Εικόνα 5.3):

- Σκοπός και Στόχος (Goal and Scope): προσδιορισμός του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης
- Απογραφή του Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory–LCI): δηλαδή γίνεται η απογραφή των δεδομένων.
- Αποτίμηση-Ανάλυση Αντίκτυπου-Επιπτώσεων του Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Assessment-LCIA): προσδιορισμός και εκτίμηση των επιπτώσεων που προκύπτουν από τη χρήση πρώτων υλών και ενέργειας και των εκπομπών ρύπων προς το περιβάλλον
- Ερμηνεία (Interpretation): εύρεση εναλλακτικών δυνατοτήτων για τη μείωση των επιβαρύνσεων στο περιβάλλον. ^[70]



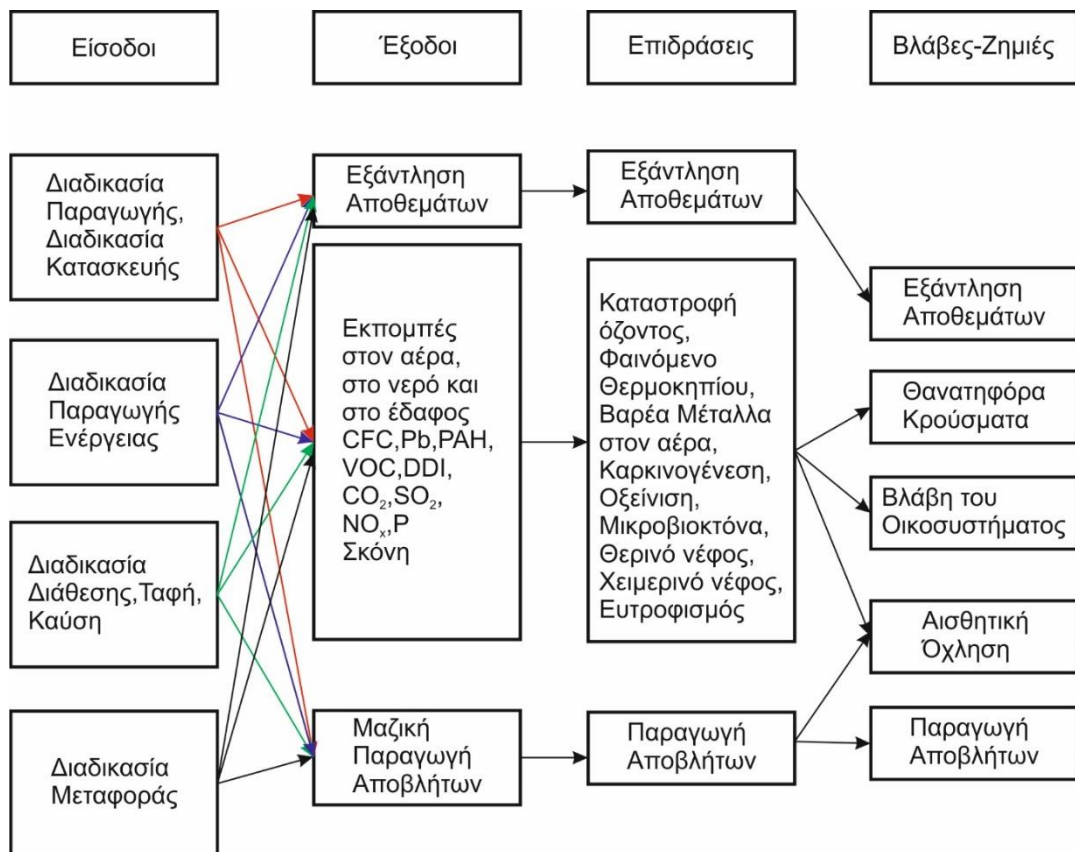
Εικόνα 5.3: Συνιστώσες μιας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

5.2. Οι Κατηγορίες των Επιπτώσεων

Οι παρακάτω κατηγορίες αποτελούν τις βασικότερες όσον αφορά τις επιπτώσεις στην αποτίμηση του κύκλου ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων:

- Η παγκόσμια υπερθέρμανση,
- η στρατοσφαιρική καταστροφή όζοντος,
- η (Τροποσφαιρική) φωτοχημική δημιουργία του όζοντος,
- η οξίνιση,
- ο ευτροφισμός,
- η τοξικότητα στον άνθρωπο,
- η οικοτοξικότητα και
- η χρήση γης.

Βέβαια, οι μελέτες επικεντρώνονται στις επιδράσεις που έχουν οι παραπάνω κατηγορίες στον άνθρωπο και στο περιβάλλον. Έτσι, οι κατηγορίες των επιδράσεων ταξινομούνται σε τοπικές, περιφερειακές και παγκόσμιες (Εικόνα 5.4). Όμως, κάποιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις μπορεί να προκληθούν από μια ροή ενός υλικού.



Εικόνα 5.4: Προσδιορισμός περιβαλλοντικών επιπτώσεων

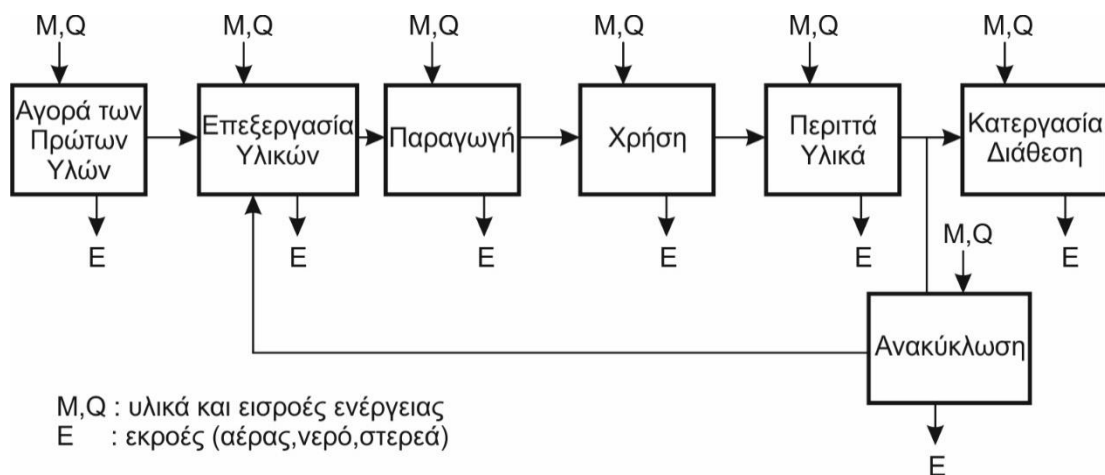
Στην φάση της ανάλυσης απογραφών έχουν καταγραφεί ροές που πολλαπλασιάζονται με τους αντίστοιχους παράγοντες ισοδυναμίας και αθροίζονται στις επιμέρους συνεισφορές. Το μέτρο της πιθανής περιβαλλοντικής βλάβης προσδιορίζεται από το δυναμικό της επίδρασης. Οι ποσότητες των διαφορετικών δυναμικών επιδράσεων δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες η μία με την άλλη. Κατά την τυποποίηση, η χωρική τιμή δίνει το αποτέλεσμα του προσδιορισθέντος δυναμικού της επίδρασης. Όμως σε ένα ή περισσότερους δείκτες δεν μπορούν να συσσωρευτούν πολλές κατηγορίες επιδράσεων. Συνήθως, η αξιολόγηση γίνεται με βάση συγκεκριμένα κριτήρια, τα οποία δεν τα αποδέχεται η επιστημονική κοινότητα. ^[71]

6. Η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής των Φωτοβολταϊκών (Life Cycle Costing)

Ο κύκλος ζωής των φωτοβολταϊκών ξεκινάει από την εξόρυξη των πρώτων υλών και τελειώνει με τη διάθεση (ταφή) ή ανακύκλωση και ανάκτηση των φωτοβολταϊκών εξαρτημάτων.

Τα στάδια του κύκλου ζωής των φωτοβολταϊκών περιλαμβάνουν (Εικόνα 6.1):

- την παραγωγή των πρώτων υλών,
- την επεξεργασία και τον καθαρισμό τους,
- την παραγωγή των μονάδων και την ισορροπία του συστήματος (BOS),
- την εγκατάσταση, τη χρήση των συστημάτων και
- την αποξήλωση και τη διάθεση ή την ανακύκλωση τους. ^[72]



Εικόνα 6.1: Ροή των σταδίων του κύκλου ζωής, της ενέργειας, των υλικών και των αποβλήτων για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Η εξόρυξη των πρώτων υλών, όπως η χαλαζιακή άμμο για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια πυριτίου, ακολουθείται από περαιτέρω επεξεργασία και τα στάδια καθαρισμού για την επίτευξη της απαιτούμενης υψηλής καθαρής ύλης, συνεπάγεται υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Το διοξείδιο του πυριτίου ελαχιστοποιείται σε ένα κλίβανο για μέταλλα, το οποίο καθαρίζεται περαιτέρω σε ποσοστό (>99,9999%), συνήθως μέσω μιας τροποποιημένης διαδικασίας. Το κάδμιο και το τελλούριο για φωτοβολταϊκά πλαίσια CdTe λαμβάνεται κυρίως ως υποπροϊόν από ψευδάργυρο και χαλκό από αντίστοιχα χυτήρια (Πίνακας 3). Ομοίως, τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια CIGS ανακτώνται ως υποπροϊόντα, ενώ το ίνδιο και το γάλλιο είναι παραπροϊόντα της εξόρυξης ψευδαργύρου, το σελήνιο ως επί το πλείστον ανακτάται από την παραγωγή χαλκού (Εικόνα 6.2).

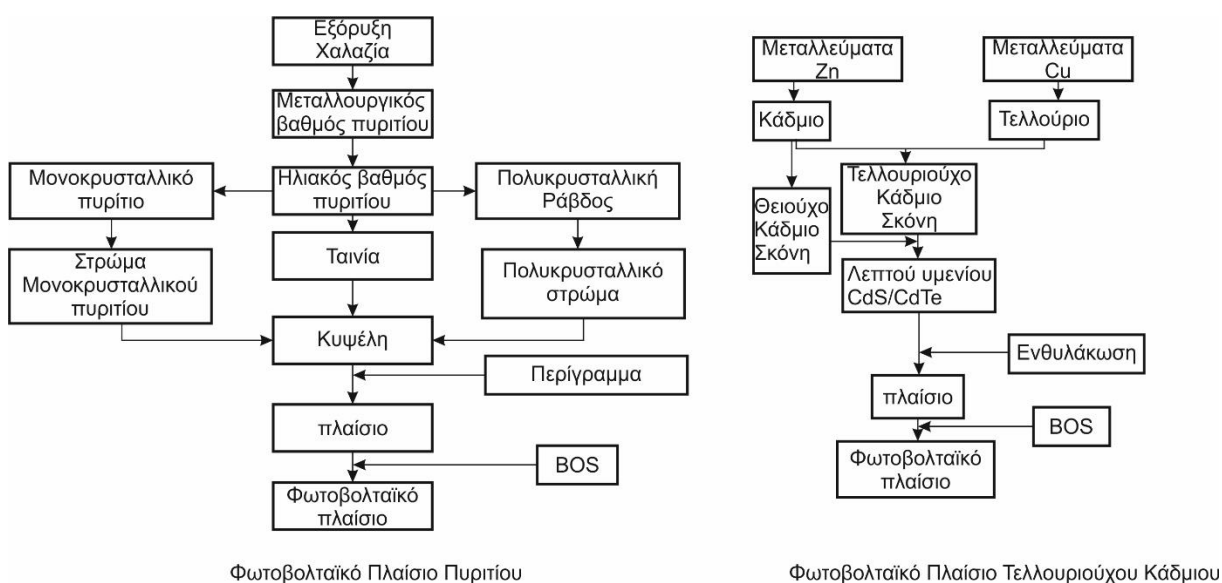
Τύπος Φωτοβολταϊκού	Πρώτες Ύλες	Εξάγεται από
Κρυσταλλικού Πυριτίου (c-Si)	Χαλαζιακή Άμμος	Τη Φύση σε κοκκώδη ή κρυσταλλική μορφή
	Διοξείδιο του Πυριτίου	Τη Φύση σε Κρυσταλλική ή άμορφη κατάσταση
Χαλκογενίδια (thin film CdTe)	Κάδμιο	Ψευδάργυρο
	Τελλούριο	Χαλκό
Χαλκού ίνδιο γάλλιο σεληνιούχο (CIGS)	Ίνδιο	Εξόρυξη Ψευδαργύρου
	Γάλλιο	Εξόρυξη Ψευδαργύρου
	Σελήνιο	Παραγωγή Χαλκού

Πίνακας 3: Οι πρώτες ύλες από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Οι πρώτες ύλες που περιλαμβάνονται στην ενθυλάκωση και τα συστατικά του συστήματος είναι το διοξείδιο του πυριτίου για το γυαλί, τα μέταλλα του χαλκού για τα καλώδια, τα μέταλλα,

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

ο σίδηρος και ο ψευδάργυρος για τις δομές στήριξης. Η κατασκευή χυτού πυριτίου φωτοβολταϊκού πλαισίου χωρίζεται σε διάφορα στάδια, δηλαδή τα πλακίδια, τα κύτταρα και τα πλαίσια. Στο επίπεδο των πλακιδίων, οι πολυκρυσταλλικοί ή οι μονοκρυσταλλικοί ράβδοι πυριτίου έχουν πάχος 0,2 mm. Στο επίπεδο του κυττάρου, η p-n ένωση σχηματίζεται με διάχυση ρυπαίνοντας και το ηλεκτρικό κύκλωμα που έχει δημιουργηθεί από την εφαρμογή και τη σύντηξη της επιμετάλλωσης. Στο επίπεδο του πλαισίου, τα κύτταρα συνδέονται φυσικά και ηλεκτρονικά και είναι προστατευμένα από το γυαλί και το πλαστικό. Το στάδιο της κατασκευής είναι σχετικά απλό για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτού υμενίου που συνήθως βασίζονται στην εναπόθεση του ημιαγώγιμου στρώματος που ακολουθείται από τα βήματα κατασκευής του πλαισίου. Για παράδειγμα η ενθυλάκωση είναι παρόμοια με την διαδικασία κατασκευής του φωτοβολταϊκού πλαισίου από πυρίτιο. Κατά την εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, οι δομές στήριξης έχουν ανεγερθεί, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται πάνω τους, καθώς τα καλώδια και ο εξοπλισμός του κλιματισμού είναι ενσωματωμένα. Στο τέλος του κύκλου ζωής τους, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παροπλίζονται και τα πολύτιμα εξαρτήματα και υλικά διατίθενται για ανακύκλωση.^[73]



Εικόνα 6.2: Διάγραμμα ροής από την απόκτηση των πρώτων υλών στο στάδιο κατασκευής του φωτοβολταϊκού τεχνολογίας πυριτίου και τελλουριούχου καδμίου.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου συνήθως κατασκευάζονται με πρόσθετη αντοχή για εύκολη τοποθέτηση. Η πρόσφατη ανάλυση του κύκλου ζωής για το κρυσταλλικό πυρίτιο βασίζεται στην απογραφή στοιχείων του κύκλου ζωής (LCI) που παρέχονται, συλλογικά, από έντεκα εταιρείες φωτοβολταϊκών της Ευρώπης και των ΗΠΑ που συμμετέχουν στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή «Crystal Clear project».^{[74],[75]}

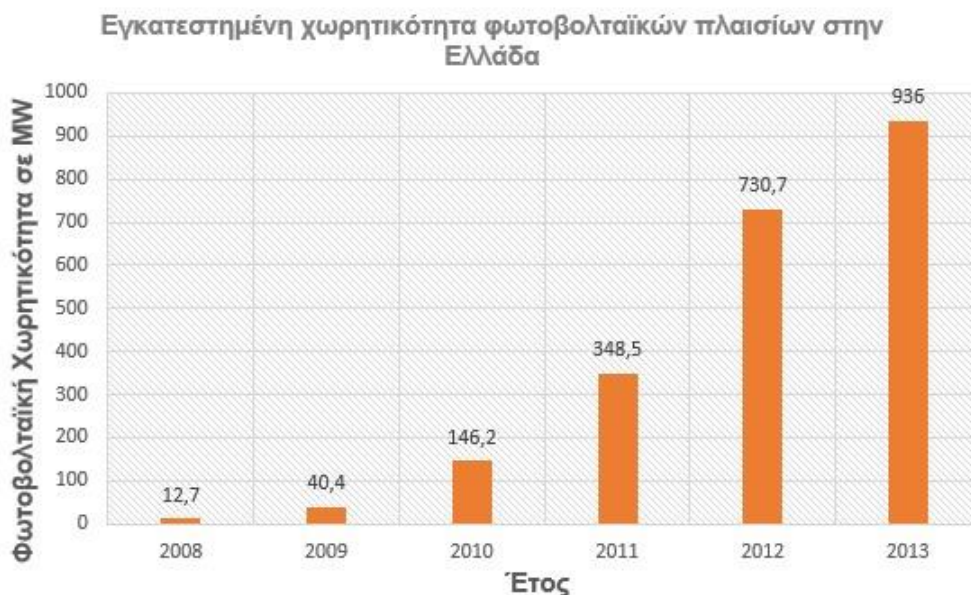
Τα αποθέματα του κύκλου ζωής σε σχέση με τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά πλαίσια τύπου λεπτού υμενίου, όπως Cd, In, Mo, και Se σχετίζονται με τον κύκλο της παραγωγής βασικών μετάλλων (Zn, Cu). Ο κύκλος ζωής ξεκινά με την παραγωγή του Cd και Te που είναι υποπροϊόντα, της τήξης των Zn και Cu-μετάλλων αντίστοιχα (όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.2). Το διοξείδιο του πυριτίου της χαλαζιακής άμμου είναι μειωμένο σε ένα τόξο μεταλλουργικής ποιότητας πυριτίου, το οποίο πρέπει να καθαριστεί περαιτέρω σε «ηλεκτρονικό βαθμό» ή «ηλιακό βαθμό» πυριτίου.^[76] Το κάδμιο λαμβάνεται από τις ροές των αποβλήτων του Zn, όπως τα σωματίδια συλλέγονται προς αποφυγή της ρύπανσης του αέρα για να ελεγχθούν και να περάσουν όλα τα στάδια του καθαρισμού. Η περαιτέρω επεξεργασία του καδμίου συμπεριλαμβάνει τον καθαρισμό ώστε να επιτευχθεί η σωστή σύνθεση του CdTe. Το τελλούριο ανακτάται και εκχυλίζεται μετά από επεξεργασία των αποθέσεων που παράγονται κατά την ηλεκτρολυτική διύλιση του χαλκού με αραιό θειικό οξύ. Οι πρόσθετες

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

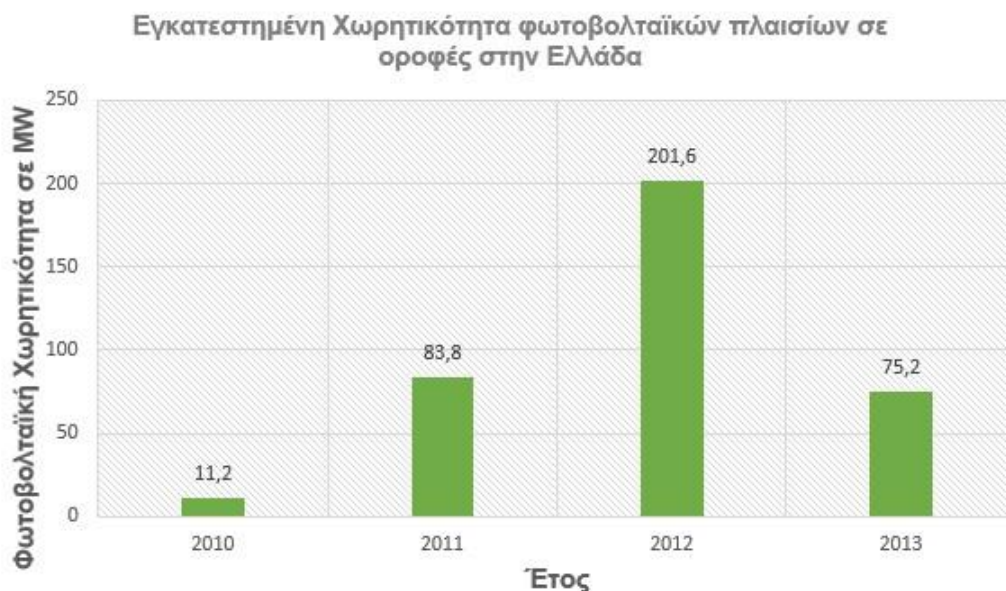
έκπλυσεις και οι αποστάξεις υπό κενό δίνουν κάδμιο και τελλούριο σε μορφή σκόνης σε μεγάλο ποσοστό. ^[73]

Από μελέτη, μπορεί να φανεί ότι τα έτη 2034 και 2035 δεν θα παράγονται απόβλητα, λόγω του γεγονότος ότι το 2033 είναι το έτος κατά το οποίο λήγουν οι συμβάσεις πώλησης ρεύματος από τα φωτοβολταϊκά πάρκα. Το 2036 είναι η χρονιά που λήγει η σύμβαση πώλησης ρεύματος από τα φωτοβολταϊκά οροφής. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι σημαντικές ποσότητες πολύτιμων αποβλήτων θα έχουν παραχθεί, κυρίως από χάλυβα, αλουμίνιο (από τα συστήματα στήριξης των φωτοβολταϊκών), γυαλί και χαλκό. Το συνολικό μέγεθος των αποβλήτων των φωτοβολταϊκών πλαισίων αναμένεται να λάβει χώρα το 2030. Υπολογίζεται να φτάνει τους 3.213 τόνους φωτοβολταϊκών πλαισίων. Βέβαια η ποσότητα αυτή θεωρείται μικρή σε σύγκριση με την ικανότητα των νέων εργοστασίων ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών (20,000 τόνοι ανά έτος). ^[77]

Η διαδικασία της ανακύκλωσης γενικεύεται για όλη την ελληνική επικράτεια (συμπεριλαμβανομένης της Κρήτης). Τα απαιτούμενα δεδομένα για τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις προβλέπονται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. ^[78] Το σύνολο του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας περιέχει περισσότερα από 14.000 φωτοβολταϊκά πάρκα και 41.000 φωτοβολταϊκά συστήματα σε στέγη. Τα πρώτα φωτοβολταϊκά πάρκα άρχισαν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια κατά τα πρώτα έτη της προηγούμενης δεκαετίας, αλλά μέχρι το 2008 ο αριθμός τους ήταν πολύ περιορισμένος. Τα φωτοβολταϊκά σε στέγες εγκαταστάθηκαν για πρώτη φορά το 2009 και σε μικρές ποσότητες (λιγότερο από 100 kWp στο σύνολο). Ενώ, από το 2010 αυξήθηκαν σημαντικά οι ποσότητες (Εικόνα 6.3 και Εικόνα 6.4). Έτσι, οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις δεν αναμένεται να αυξηθούν τα επόμενα χρόνια. Τα παρακάτω διαγράμματα δίνουν πληροφορίες σχετικά με την φωτοβολταϊκή εγκατεστημένη ισχύ σε ολόκληρη την ελληνική επικράτεια.



Εικόνα 6.3: Εγκατεστημένη Χωρητικότητα Φωτοβολταϊκών πλαισίων στην Ελλάδα.



Εικόνα 6.4: Εγκατεστημένη Χωρητικότητα Φωτοβολταϊκών πλαισίων σε οροφές στην Ελλάδα.

Η ετήσια ποσότητα των αποβλήτων παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα και καλύπτει την περίοδο 2028-2038 (Πίνακας 4). Βέβαια, δεν αναμένεται να παραχθούν απόβλητα κατά το έτος 2034 και μετά το έτος 2038. Από το ετήσιο ποσό των φωτοβολταϊκών πλαισίων, μπορεί να συνταχθεί το συμπέρασμα ότι αρκετές μονάδες ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πρέπει να εγκατασταθούν. Πιο αποτελεσματικό θα ήταν να σχεδιάσουν αυτά τα εργοστάσια ανακύκλωσης με τη δυνατότητα να ανακυκλώνουν πρόσθετους τύπους των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών αποβλήτων. ^[79]

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

Έτος	Φ/Β πλαίσιο Βάρος (tn)	Χάλυβας (tn)	Γυαλί (tn)	Σύνολο Χακλού (tn)	EVA (tn)	Ηλιακές Κυψέλες (tn)	Tedlar (tn)	Inverter (MW)
2028	1,140	2,080	862	11	76	37	42	11.15
2029	4,130	7,535	3,121	38	275	133	153	40.37
2030	14,961	27,295	11,305	139	994	483	556	146.25
2031	35,652	65,044	26,939	332	2,370	1,150	1,324	348.50
2032	74,750	136,375	56,483	698	4,969	2,411	2,777	730.69
2033	95,753	174,694	72,353	895	6,365	3,089	3,557	936.01
2034	–	–	–	–	–	–	–	–
2035	1,133	0	856	10	75	37	42	11.07
2036	8,574	0	6,479	77	570	277	318	83.81
2037	20,620	0	15,581	183	1,371	665	766	201.56
2038	7,695	0	5,814	68	511	248	286	75.22
Σύνολο	264,408	413,023	199,792	2,451	17,576	8,529	9,822	2,584.63

Πίνακας 4: Ποσότητες Αποβλήτων από την συνολική εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων στη Ελλάδα.

6.1. Δείκτες Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής

Κατά τα τελευταία χρόνια, σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Τα ακόλουθα ζητήματα είναι σημαντικά όταν συζητάμε για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των φωτοβολταϊκών συστημάτων:

- Ο Χρόνος Ενεργειακής Απόσβεσης (Energy Payback Time).
- Οι Εκπομπές των Αερίων του Θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Emissions GHG)
- Οι Τοξικές Εκπομπές Βαρέων Μετάλλων.
- Ο Εφοδιασμός Πόρων
- Οι Κίνδυνοι για την υγεία και την ασφάλεια. ^[73]

Ο χρόνος ενεργειακής απόσβεσης

Ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται για ένα σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ώστε να παραχθεί η ίδια ποσότητα ενέργειας (πρωτογενή ισοδύναμη ενέργεια) που χρησιμοποιήθηκε για το σύστημα.

$$\text{Energy Payback Time (EPBT)} = (E_{\text{mat}} + E_{\text{manuf}} + E_{\text{trans}} + E_{\text{inst}} + E_{\text{EOL}}) / ((E_{\text{agen}} / \eta_G) - E_{\text{aoper}})$$

Όπου:

- E_{mat} : Πρωτογενής ζήτηση ενέργειας για την παραγωγή υλικών που περιλαμβάνονται στο φωτοβολταϊκό σύστημα
 E_{manuf} : Πρωτογενής ζήτηση ενέργειας για την κατασκευή του φωτοβολταϊκού συστήματος
 E_{trans} : Πρωτογενής ενεργειακή ζήτηση σε υλικά μεταφορών που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής
 E_{inst} : Πρωτογενής ζήτηση ενέργειας για την εγκατάσταση του συστήματος
 E_{EOL} : Πρωτογενής ζήτηση ενέργειας για τη διαχείριση του τέλους του κύκλου ζωής τους
 E_{agen} : Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
 η_G : Αποδοτικότητα του δικτύου, ο μέσος όρος πρωτογενής ενέργειας προς την απόδοση μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας από την πλευρά της ζήτησης
 E_{aoper} : Ετήσια ζήτηση ενέργειας για τη λειτουργία και τη συντήρηση σε όρους πρωτογενούς ενέργειας

Για τον υπολογισμό της ισοδύναμης πρωτογενής ενέργεια απαιτείται η γνώση της ενεργειακής μετατροπής στη συγκεκριμένη χώρα των παραμέτρων για τα καύσιμα και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας και πρώτων υλών. ^{[80],[81]}

Οι Εκπομπές των Αερίων του Θερμοκηπίου (GHG)

Κατά τα στάδια του κύκλου ζωής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος υπολογίζονται ισοδύναμα οι εκπομπές του CO₂ χρησιμοποιώντας χρονικό ορίζοντα 100 ετών. Οι μεγάλες εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου είναι το διοξείδιο του άνθρακα (GWP³ = 1), το μεθάνιο (GWP = 25), το υποξείδιο του αζώτου (GWP = 298) και οι χλωροφθοράνθρακες (GWP = 4750-14400). ^[82]

Οι Τοξικές Εκπομπές Βαρέων Μετάλλων

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών και η κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγική διαδικασία συνδέονται μεταξύ τους μέσω της παραγωγής των άμεσων ρύπων, οι οποίοι είναι σχεδόν μηδέν. Ως εκ τούτου, οι εκπομπές καδμίου από CdTe τεχνολογία μπορεί να είναι

³ Global warming potential= Υπερθέρμανση του πλανήτη

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

χαμηλότερες από εκείνες των περισσότερων άλλων ενεργειακών επιλογών. Όμως, ο κίνδυνος από τη χρήση του τελλουριούχου καδμίου στο πλαίσιο φαίνεται να είναι αρκετά χαμηλός, με την προϋπόθεση ότι το υλικό διατηρείται καλά προστατευμένο (με διπλό γυαλί ενθυλάκωσης) και ανακτάται ότι είναι δυνατόν από τα απόβλητα των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Οι εκπομπές ρύπων (όπως SO₂, NO_x, σωματιδίων) κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με την ποσότητα του ορυκτού καυσίμου που καίγεται κατά τη διάρκεια διάφορων φάσεων του, ιδίως η επεξεργασία υλικών και η κατασκευή των φωτοβολταϊκών. Ως εκ τούτου, οι εκπομπές είναι παρόμοιες με εκείνες των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Τα τοξικά αέρια και τα βαρέα μέταλλα μπορούν να εκπέμπονται άμεσα από τα υλικά της επεξεργασίας και της κατασκευής των φωτοβολταϊκών, και έμμεσα από την παραγωγή της ενέργειας που χρησιμοποιείται στα διάφορα στάδια. Βέβαια για όλες τις εκπομπές των ρύπων είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της κάθε τεχνολογίας.

Άμεσες εκπομπές βαρέων μετάλλων μπορεί να συμβούν κατά τη διάρκεια της εξόρυξης και επεξεργασίας των φυσικών ακατέργαστων υλικών και κατά τη διάρκεια της κατασκευής των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Το κάδμιο είναι ένα υποπροϊόν του ψευδαργύρου και του μολύβδου και συλλέγεται από εκπομπές και ροές αποβλήτων κατά την παραγωγή αυτών των μετάλλων. Το μεγαλύτερο κλάσμα καδμίου, με καθαρότητα 99,5%, είναι υπό τη μορφή ενός σπόγγου από την ηλεκτρολυτική ανάκτηση του ψευδαργύρου. ^[73]

Έμμεσες εκπομπές βαρέων μετάλλων είναι αυτές που συνδέονται με την παραγωγή της ενέργειας που χρησιμοποιείται στον τομέα της εξόρυξης και στις βιομηχανικές διεργασίες στον κύκλο ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η αναφορά στις έμμεσες εκπομπές από τις άμεσες όχι μόνο βελτιώνει τη διαφάνεια στις αναλύσεις, αλλά επιτρέπει τον υπολογισμό των εκπομπών για ένα συγκεκριμένο μείγμα ενεργειακής επιλογής. ^[83]

Αποθέματα του Κύκλου Ζωής (LCI)

Η περίοδος της απογραφής του κύκλου ζωής (LCI) περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων των υλικών και των εισροών ενέργειας, τις εκπομπές και τις εξόδους των προϊόντων για τον πλήρη κύκλο ζωής του συστήματος που αναλύεται. Για τον κύκλο ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων τα δεδομένα συλλέγονται χωριστά ή ως πρότυπο για τα πλαίσια και την ισορροπία του συστήματος (Balance Of System).

Κρυσταλλικού πυριτίου φωτοβολταϊκά πλαίσια

Η λεπτομερή απογραφή του φωτοβολταϊκού πλαισίου του κρυσταλλικού πυριτίου και του πολυκρυσταλλικού πυριτίου για τον καθαρισμό της πρώτης ύλης, γίνεται με την κρυστάλλωση, την επεξεργασία των κυττάρων και την συναρμολόγηση του πλαισίου που έχει ολοκληρωθεί εντός του προγράμματος «Crystal Clear» της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Το πυρίτιο έχει μεταλλουργικό βαθμό και η εξόρυξη του γίνεται από χαλαζία και καθαρίζεται σε ηλιακό βαθμό πολυπυριτίου με σιλάνιο (SiH₄) ή τριχλωροσιλάνιο (CHCl₃) με την βασική διαδικασία. Η απαίτηση ενέργειας για αυτό το στάδιο καθαρισμού είναι σημαντική για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου, καθώς αντιπροσωπεύουν το 30% της πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή πολλών πλαισίων πυριτίου. ^[84] Οι δυο τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πολυπυριτίου από τα αέρια του πυριτίου είναι:

- η μέθοδος του αντιδραστήρα Siemens και
- η μέθοδος αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης (FBR).

Στην δεύτερη τεχνολογία, η οποία αντιπροσωπεύει το 90% των ηλιακών συστημάτων παραγωγής πυριτίου στις ΗΠΑ, το τριχλωροσιλάνιο-αέριο εισάγεται σε κλίβανο με θερμική αποσύνθεση (αντιδραστήρας) σε υψηλή θερμοκρασία 1100 °C-1200 °C για να παραχθούν ράβδοι πολυκρυσταλλικού πυριτίου. ^{[85],[86],[87]} Οι ράβδοι του πυριτίου αναπτύσσονται ως άτομα πυριτίου στο αέριο που καθιζάνει επάνω τους. Ενώ η πρώτη τεχνολογία περιλαμβάνει τα

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

θραύσματα του πυριτίου από την παραγωγή του με ηλεκτρονικό τρόπο και θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει μόνο το 5% της αγοράς. ^[88]

Τελλουριούχου Καδμίου φωτοβολταϊκά πλαίσια

Η απόδοση μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο CdTe ήταν 9% το έτος 2005 και 11% το 2010 σύμφωνα με στοιχεία από το εργοστάσιο της First Solar. Το στρώμα απορρόφησης του τελλουριούχου καδμίου (CdTe) και του θειούχου καδμίου (CdS) στο σύστημα παραγωγής της First Solar καθορίζονται από την εναπόθεση ατμών που μεταφέρονται (Vapour Transfer Deposition), με βάση την εξάχνωση και τη συμπύκνωση των ατμών στα υποστρώματα του γυαλιού. Ένα ρεύμα του αδρανούς φορέα των αερίων οδηγεί στην εξάχνωση του πυκνού ατμού για να επικολληθούν στις ταινίες των υποστρωμάτων του γυαλιού σε 500 °C-600 °C. Έπειτα, η διαδικασία ολοκληρώνεται με τα δεδομένα βήματα της χάραξης, της θερμότητας των συνδέσεων και των επαφών του πλαισίου.

Η ισορροπία του συστήματος (BOS)

Λίγη προσοχή έχει δοθεί στις μελέτες της ανάλυσης του κύκλου ζωής του υπολοίπου συστήματος (BOS) και έτσι τα στοιχεία απογραφής σπανίζουν. Ανάλογα με την εφαρμογή, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι είτε οροφής είτε εδάφους. ^{[37],[89]}

Ο Εφοδιασμός Πόρων

Ο δείκτης ανάλυσης του εφοδιασμού των προϊόντων αντικατοπτρίζει το επίπεδο των τελικών καταναλώσεων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής των προϊόντων και των υπηρεσιών. Η ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για κάθε κράτος μέλος χρησιμοποιεί τα δεδομένα του κύκλου ζωής, καθώς και τα στοιχεία για τις δαπάνες και τα στατιστικά της κατανάλωσης. Οι πόροι που επελέγονται για κάθε προϊόν πρέπει να είναι αρκετά συγκεκριμένοι, ώστε να υπολογιστεί ο κύκλος ζωής του, ενώ είναι αρκετά ευρύ ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά για μια ομάδα προϊόντων. Η εφαρμογή των δεικτών στο πλαίσιο της πολιτικής του σχεδιασμού, της ανάπτυξης και της παρακολούθησης περιλαμβάνουν:

- Παρακολούθηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των σχετικών προϊόντων και υπηρεσιών που καταναλώνονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στα κράτη μέλη με την πάροδο του χρόνου (αρχικά εξετάζει τη Γερμανία και ένα έτος βάσης).
- Παρακολούθηση της μετάβασης προς τα πιο βιώσιμα προϊόντα και την κατανάλωσή τους με το χρόνο, με την εξέταση των αλλαγών των προϊόντων.
- Η αξιολόγηση των επιπτώσεων των μέτρων πολιτικής σε σχέση με τα πιο φιλικά προς το περιβάλλον προϊόντα και υπηρεσίες και τον υπολογισμό των διαφόρων σεναρίων ανάπτυξης με την μοντελοποίηση των μελλοντικών σεναρίων.

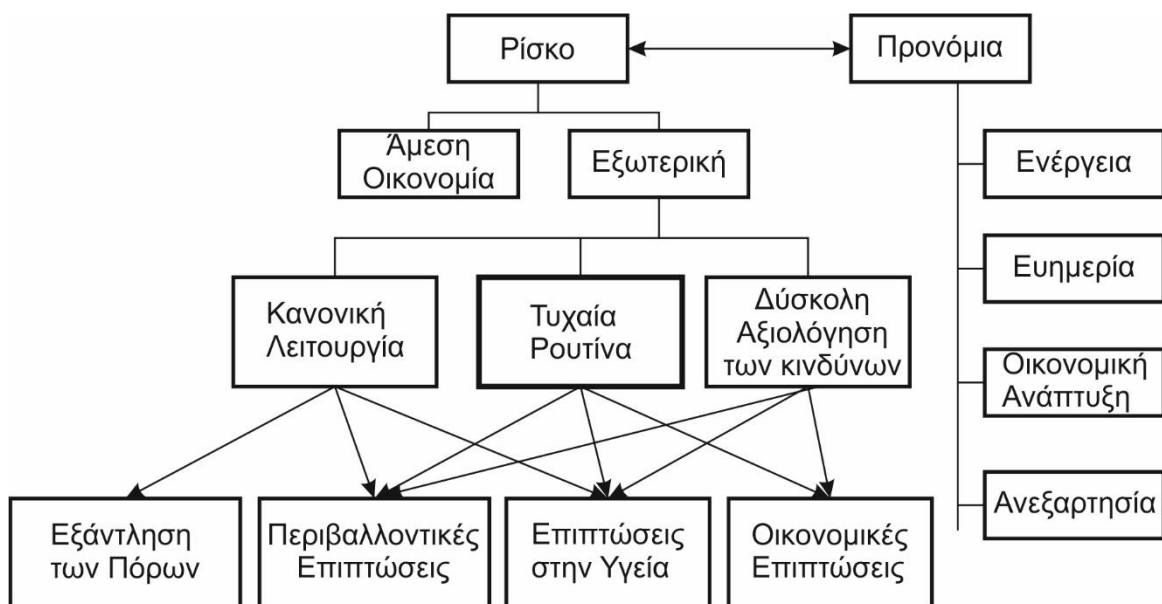
Ο δείκτης του εφοδιασμού των πόρων επιχειρεί να ποσοτικοποιήσει τις επιπτώσεις από την κατανάλωση των πόρων και τις εκπομπές των ρύπων για το σύνολο της Ευρωπαϊκής Ένωσης στην οικονομία. Αυτό επιτυγχάνεται με την πρώτη αναγνώριση ομάδων προϊόντων που αντιπροσωπεύουν την πλειοψηφία των πόρων που καταναλώνονται στη συγκεκριμένη επικράτεια. ^[90]

Οι Κίνδυνοι για την υγεία και την ασφάλεια

Οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις βελτιώνονται όσο εξελίσσεται ο κύκλος ζωής των φωτοβολταϊκών και η επικινδυνότητά τους είναι σχετικά χαμηλή.^[91] Ωστόσο, λίγα είναι γνωστά σχετικά με τους κινδύνους των τυχαίων γεγονότων, όπως η συχνότητα και η έκταση τους σε ότι αφορά τους ανθρώπινους θανάτους, τους τραυματισμούς και τις οικονομικές απώλειες. Ο μεγαλύτερος κίνδυνος του κύκλου ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων συνδέεται με τη χρήση χημικών κατά τη διάρκεια των σταδίων της παραγωγής υλικών και της επεξεργασίας του πλαισίου.^{[92],[93]}

Υπάρχει βάση δεδομένων που περιλαμβάνει όλα τα περιστατικά που έβλαψαν ή είχαν τη δυνατότητα να προκαλέσουν βλάβες σε εργαζόμενους και σε κοινό. Οι δείκτες κινδύνου που διερευνώνται περιλαμβάνουν τη συχνότητα των γεγονότων, των θανάτων, των τραυματισμών και τις μέγιστες συνέπειές τους. Οι δείκτες μελετήθηκαν από την ποσότητα των χημικών που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων, τόσο ως πρώτη ύλη όσο και ως αναλώσιμα.

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα απαραίτητο στοιχείο της κοινωνικής ευημερίας και της οικονομικής ανάπτυξης στη σύγχρονη κοινωνία. Όμως, οι δαπάνες που εξισορροπούν τις παροχές αυτές συχνά έχουν πολλές πιθανές επιβλαβείς συνέπειες για τον άνθρωπο και την οικολογική υγεία που δεν αντιμετωπίζονται πλήρως. Έχει αναπτυχθεί ένα πλαίσιο για να ταξινομούνται οι κίνδυνοι που σχετίζονται με τις ενεργειακές τεχνολογίες σε τέσσερις κατηγορίες (Εικόνα 6.5).



Εικόνα 6.5: Αξιολόγηση των Κινδύνων του κύκλου ζωής κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πλαίσια^[75].

Η πρώτη κατηγορία των κινδύνων (κανονική λειτουργία) προκαλείται από στρεσογόνους παράγοντες σε ένα ή περισσότερα στάδια του κύκλου ζωής για κάθε τεχνολογία. Τα γεγονότα είναι κοινά σε κανονική λειτουργία και δεν είναι μελετημένα ατυχήματα. Για τις περισσότερες ενεργειακές τεχνολογίες, συχνά επικαλύπτονται με δείκτες βιωσιμότητας που καθορίζεται από τα αναλυτικά εργαλεία, όπως η ανάλυση του κύκλου ζωής (ΑΚΖ). **Η δεύτερη και η τρίτη κατηγορία κινδύνων** (τυχαία ρουτίνα-σοβαρή) αναλύει τα σπάνια ή περίεργα γεγονότα που δεν εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας. Καταστροφικά ατυχήματα με μια πολύ χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης συχνά αξιολογούνται και διαχειρίζονται με διαφορετικό τρόπο από ό,τι τα ατυχήματα μικρής κλίμακας.^[94] **Η τέταρτη κατηγορία** (δύσκολη αξιολόγηση των κινδύνων) περιλαμβάνει τα γεγονότα που μπορεί να πραγματοποιηθούν κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου σταδίου του κύκλου ζωής. Τέτοια γεγονότα συχνά συνδέονται με την

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

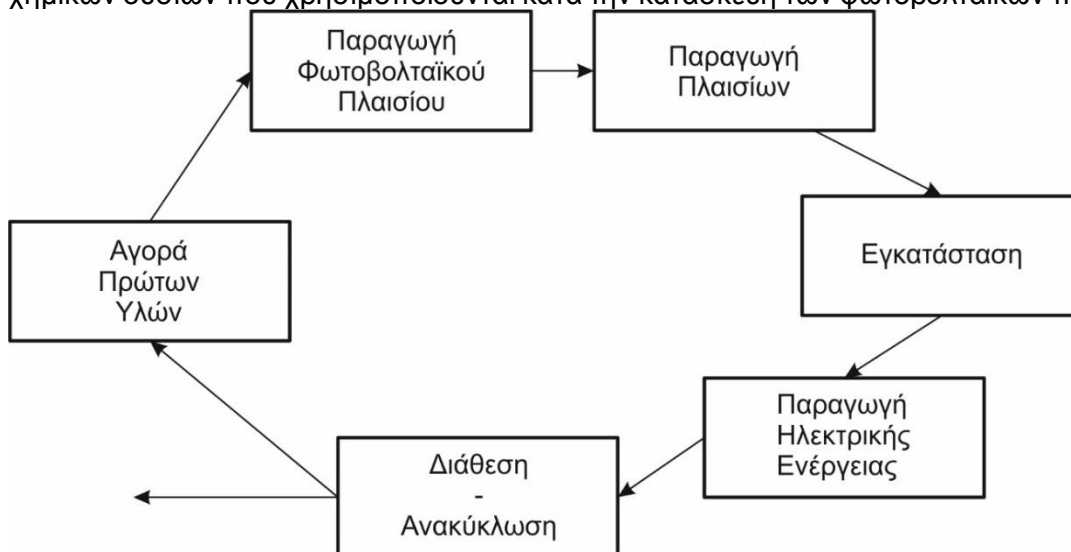
αντίληψη του κινδύνου σε ένα πληθυσμό και μπορεί να έχουν μεγάλο ή αμελητέο αντίκτυπο, ανάλογα με την ποικιλία των παραγόντων που τις προκαλούν.

	Ορισμός	Επιπτώσεις
Κανονική Λειτουργία	Τυπικά Αποδεκτή Συνέπεια	<ul style="list-style-type: none"> • Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου • Τοξικές εκπομπές χημικών • Ραδιενεργές εκπομπές • Χημικά/ραδιενεργά Απόβλητα • Εξάντληση Πόρων (καύσιμα, νερό)
Τυχαία Ρουτίνα	Υψηλή Συχνότητα/ Χαμηλή Συχνότητα	<ul style="list-style-type: none"> • Διαρροή χημικών ουσιών-Υγεία και περιβάλλον • Έκρηξη/πυρκαγιές • Ατυχήματα Μεταφορές • Απελευθέρωση ραδιενέργειας
Τυχαία αλλά Σοβαρή	Χαμηλή Συχνότητα/ Υψηλή Συχνότητα	<ul style="list-style-type: none"> • Τήξη του πυρήνα • Κατάρρευση του φράγματος • Πυρκαγιά/έκρηξη
Δύσκολη Αξιολόγηση των Κινδύνων	Κίνδυνος και μερικές φορές ενισχύεται από την αντίληψη	<ul style="list-style-type: none"> • Τρομοκρατική επίθεση στο αντιδραστήρα/χρησιμοποιούνται για αποθήκευση καυσίμων • Γεωπολιτική αστάθεια, στρατιωτικών συγκρούσεων • Ενεργειακή ασφάλεια/Εθνική ανεξαρτησία • Διάδοση της πυρηνικής ενέργειας

Πίνακας 5:Ταξινόμηση Κινδύνων.

Το πεδίο εφαρμογής της ανάλυσης περιλαμβάνει τα στάδια του κύκλου ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά την απόκτηση των πρώτων υλών στις μονάδες παραγωγής, την εγκατάσταση των πλαισίων, την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, τη διάθεση, την ανακύκλωση των πλαισίων και τον εξοπλισμό (Εικόνα 6.6). Ο μεγαλύτερος κίνδυνος θεωρείται συχνά η απελευθέρωση τοξικών ή εύφλεκτων χημικών κατά την παραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Άλλος σοβαρός κίνδυνος πρόκλησης ατυχημάτων ωφείλεται στην χειρισμό και την χρήση των χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή των φωτοβολταϊκών πλαισίων. ^[75]



Εικόνα 6.6: Τα στάδια του κύκλου ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

7. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγή ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι ακίνδυνη. Δεν δημιουργείται θόρυβος και δεν αποβάλλονται χημικοί ρύποι κατά τη χρήση. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συγκαταλέγονται στις βιώσιμες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Είναι πολύ σημαντικό ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μην προσβάλλουν την αισθητική του τοπίου.

Κατά την κατασκευή των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων επηρεάζεται όπως είναι φυσικό το οικοσύστημα. Όμως, οι επιπτώσεις εξαρτώνται από την τοπογραφία της περιοχή όπου θα καλυφθεί με φωτοβολταϊκά πλαίσια. Ο τύπος του εδάφους, η απόσταση από τις περιοχές φυσικής ομορφιάς ή τα ευαίσθητα οικοσυστήματα και η βιοποικιλότητα επηρεάζονται αρκετά. Είναι πιθανό να προκύψουν κατά τη διάρκεια κατασκευής κάποιες δραστηριότητες όπως κινήσεις της γης και μεταφορά της για την καλύτερη διαμόρφωση του εδάφους.

Κατά την κανονική λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν εκπέμπονται καθόλου αέριοι ή υγροί ρύποι και ραδιενεργές ουσίες. Στην περίπτωση του CIS και του CdTe φωτοβολταϊκών, στα οποία περιλαμβάνουν μικρές ποσότητες τοξικών ουσιών, υπάρχει μια μικρή πιθανότητα κινδύνου σε περίπτωση πυρκαγιάς. Μόνο σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ πιθανό να ελευθερωθούν χημικές ουσίες βλαβερές για το περιβάλλον.^[95] Έτσι πρέπει να υπάρχει ετοιμότητα σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης και άμεση αντίδραση σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Η εξάντληση των φυσικών πόρων επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό με την εξόρυξη των πρώτων υλών που απαιτούνται για την παραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Για την παραγωγή της τρέχουσας γενιάς φωτοβολταϊκών πλαισίων απαιτείται μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Τα υλικά που απαιτούνται για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν λιγότερη απαίτηση σε πρωτογενή ενέργεια ανά W από το κρυσταλλικό πυρίτιο λόγω της διαφοράς στην απόδοση των πλαισίων. Επίσης, μικρές ποσότητες των σπάνιων υλικών (In, Te, Ga) απαιτούνται, περιορίζοντας τις ποσότητες του τοξικού καδμίου (Cd). Σε γενικές γραμμές οι εκπομπές καδμίου αποδίδονται στο ύψος της παραγωγής του CdTe έως 0.001% του Cd που χρησιμοποιήθηκε (που αντιστοιχούν έως 0,01 g/GWh). Επιπλέον το Cd παράγεται ως υποπροϊόν της παραγωγής Zn και μπορεί είτε να τεθεί σε χρήση ή απορρίπτεται στο περιβάλλον.^[96] Αρκετές πτυχές που πρέπει να μελετηθούν για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σχετίζονται με την παραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Μερικές απ' αυτές τις προοπτικές είναι:

- τα λεπτότερα στρώματα πλαισίων,
- η αποδοτικότερη χρήση των υλικών,
- τα ασφαλέστερα υλικά, οι εναλλακτικές λύσεις και
- η τεχνολογία ανακύκλωσης των πλαισίων.

Η μόλυνση του αέρα είναι αποτέλεσμα των ρύπων που εκπέμπονται από διάφορες λειτουργίες κατά την παραγωγή των πλαισίων. Όσον αφορά την αξιολόγηση του κύκλου ζωής, οι περιβαλλοντικές επιδόσεις του συστήματος εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ενεργειακή απόδοση της κατασκευής του συστήματος και ιδιαίτερα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εκπομπές που συνδέονται με τη μεταφορά των πλαισίων είναι ασήμαντες σε σχέση με αυτές που σχετίζονται με την κατασκευή. Στην περίπτωση του πολυκρυσταλλικού και του μονοκρυσταλλικού πυριτίου εκτιμάται ότι οι εκπομπές τους είναι 2,757-3,845 kg CO₂/kWp, 5,049-5,524 kg SO₂/kWp και 4,507-5,273 NO_x/kWp. Στις πόλεις, τα σύγχρονα φωτοβολταϊκά συστήματα, έχουν ενσωματωθεί σε κτίρια και παρέχουν άμεση καθαρή ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να χρησιμοποιούνται αντί για καθρέφτες απευθείας στο πρόσωπο ενός κτιρίου. Έτσι, τα φωτοβολταϊκά συστήματα βοηθούν στη δημιουργία ενός υποστηρικτικού περιβάλλοντος ώστε να χρησιμοποιηθούν και άλλοι τρόποι εξοικονόμησης της ενέργειας στα κτίρια.

Ο θόρυβος δεν θα μπορούσε να μην υπάρχει απ' την στιγμή που γίνεται λόγος για εργοστάσιο με πολλά μηχανήματα ώστε να ολοκληρωθεί η παραγωγή. Όπως με όλα τα είδη δραστηριοτήτων κατασκευής, θα υπάρξει θόρυβος. Επίσης, θα υπάρξουν ορισμένα οφέλη για την απασχόληση κατά τη φάση της κατασκευής και ειδικά για τα μεγάλα συστήματα κατά τη φάση της λειτουργίας. Οι κατασκευαστικές εταιρείες, θα πρέπει να παράγουν συστήματα που είναι εύκολα ανακυκλώσιμα. Οι επιλογές για τη μείωση της ενεργειακής ζήτησης θα πρέπει να είναι πάντα στους βασικούς στόχους της εταιρείας.

Η διαχείριση των αποβλήτων απ' τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την προστασία του περιβάλλοντος. Στην περίπτωση των αυτόνομων συστημάτων, οι επιπτώσεις στην υγεία από τις χημικές ουσίες που περιέχονται στις μπαταρίες θα πρέπει να διαχειριστούν ως απόβλητα.^[97] Η ανάλυση του κύκλου ζωής των μπαταριών δείχνει ότι οι μπαταρίες είναι υπεύθυνες για το μεγαλύτερο μέρος της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης του περιβάλλοντος, λόγω της μικρής διάρκειας ζωής τους και της περιεκτικότητας τους σε βαρέα μέταλλα. Επιπλέον, μια μεγάλη ποσότητα της ενέργειας και των πρώτων υλών απαιτούνται για την παραγωγή των μπαταριών. Όμως, ένα σύστημα ανακύκλωσης μπορεί να βελτιώσει αυτή την κατάσταση.^[39]

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την κατασκευή φωτοβολταϊκών εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το ενεργειακό μείγμα από το οποίο παράγονται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Εάν αυτή η ενέργεια που χρησιμοποιείται για την κατασκευή ήταν 100% ανανεώσιμη, δεν θα υπήρχαν περιβαλλοντικές επιπτώσεις εκτός από λίγα επικίνδυνα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι σημαντικό να εξετάζεται:

- η εξάντληση των πρώτων υλών,
- η ενέργεια που χρειάζεται,
- η υπερθέρμανση του πλανήτη,
- η οξίνιση και
- τα απόβλητα.

Τα επικίνδυνα υλικά όπως το σιλάνιο πρέπει να καθαρίζεται ώστε να προκύπτει καθαρό πυρίτιο. Επιπλέον, άλλα τοξικά χημικά, όπως το διβοράνιο και η φωσφίνη, είναι αναγκαία για την ενίσχυση του πυριτίου. Μόνο μικρές ποσότητες που αραιώνονται σε αδρανή αέρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτή τη διαδικασία. Δεδομένου ότι αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται συνήθως για την μικροηλεκτρονική βιομηχανία, απαιτείται ένας καθιερωμένος έλεγχος και παρακολούθηση αυτού. Παρ' όλα αυτά, το σιλάνιο και η φωσφίνη είναι εύφλεκτα αέρια, με την τελευταία να είναι εξαιρετικά τοξική. Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας της κατασκευής επεξεργάζονται τα αέρια που δεν είναι επικίνδυνα, αλλά σε περίπτωση οποιουδήποτε ατυχήματος ή διαρροής επικίνδυνων αερίων από τα προαναφερθέντα μπορούν να συμβούν σοβαρά ατυχήματα. Με τη χρήση του ψευδάργυρου εξαντλούνται οι πρώτες ύλες. Τα πιο συνηθισμένα υλικά όπως το αλουμίνιο και ο χαλκός σχετίζονται με το πρότυπο των βιομηχανικών κινδύνων.^[98] Αν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θα μπορούσαν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις, μόνο το 0,1% στο 1% των εκπομπών θα προέκυπταν από τη μεταφορά.^[99] Κατά τη διάρκεια της παραγωγής τα ακόλουθα επικίνδυνα υλικά που εκπέμπονται είναι: η σκόνη πυριτίου, το σιλάνιο, το διβοράνιο, η φωσφίνη και κάποιοι διαλύτες.^[97]

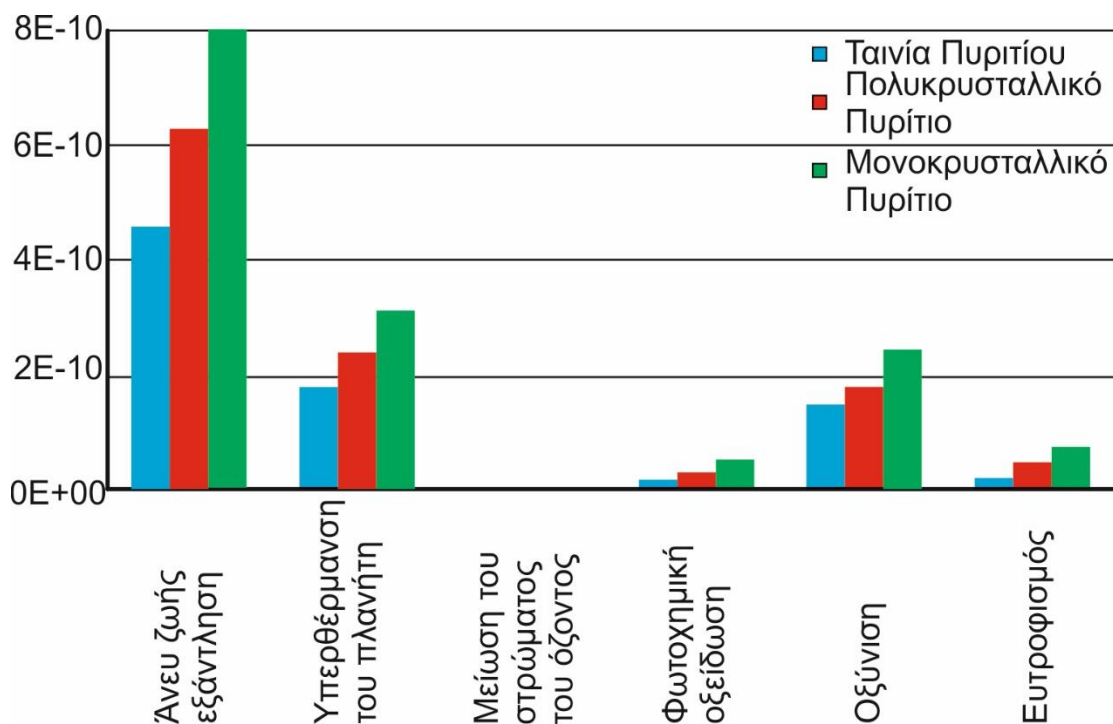
		SO ₂	NO _x	Άλλα	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Εκπομπές Ρύπων (kg/kWp)	Φ/Β πλαίσιο 1995/1998	5-5.5	4.5-5.3	-	2.7-3.8	-	-
	Φ/Β σύστημα 1998	1.9	1.8	0.11	971.000	0.6	0.003

Πίνακας 6: Εκπομπές από φωτοβολταϊκά πλαίσια και συστήματα.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

Ο παραπάνω πίνακας δείχνει τις εκπομπές από την παραγωγή φωτοβολταϊκών πλαισίων και μιας ολόκληρης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Τα δεδομένα είναι περίπου 15 ετών. Ως εκ τούτου, έχουν υπάρξει βελτιώσεις στις διαδικασίες παραγωγής. Σε αντίθεση με τα στοιχεία του πίνακα 3, πρόσφατες μελέτες δείχνουν την περιβαλλοντική επίδραση των εκπομπών σε γραμμάριο CO₂ ισοδύναμο με των παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε kWh κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Μελέτες δείχνουν την ισοδυναμία του CO₂ με τους διάφορους τύπους αερίων που εκπέμπονται. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα με πολυκρυσταλλικό πυρίτιο που παράγει με υδροηλεκτρική ενέργεια τα λεπτά στρώματα του πυριτίου, τα κύτταρα και τα πλαίσια έχει ενεργειακό αποτύπωμα άνθρακα με 34 gr CO₂-ισοδύναμο/kWh. ^[100] Αυτό υπολογίζεται υποθέτοντας ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι εγκατεστημένο στην Νότια Ευρώπη με ηλιακή ακτινοβολία 1700 kWh/m² ετησίως. Οι ειδικοί προβλέπουν περαιτέρω βελτίωση των διαδικασιών παραγωγής που θα μειώσει το αποτύπωμα κατά 40-50%. ^[101] Κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζεται η πρωτογενής ενέργεια που απαιτείται καθώς και το CO₂ εκπέμπεται ανά παραγόμενη ενέργεια σε kWh. Διαφορές εμφανίζονται ιδιαίτερα στην παραγωγή πυριτίου. ^[99]

Το παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 7.1) δείχνει ότι τα μονο-κρυσταλλικά κύτταρα έχουν το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Η περιβαλλοντική επίδραση των πολλαπλών κρυσταλλικών κυττάρων είναι η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την διαδικασία κατασκευής. Ουσιαστικά, μόνο η άνευ ζωής εξάντληση, η υπερθέρμανση του πλανήτη και η οξίνιση είναι τα αποτελέσματα στο περιβάλλον. Λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων για την ενέργεια (ηλεκτρική ενέργεια) και την παραγωγή κατά τη διάρκεια της κατασκευής, τα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων εξαντλούνται. Αυτό προκαλεί την άνευ ζωής εξάντληση. Η υπερθέρμανση του πλανήτη καθώς και η αύξηση της οξύτητας προκαλείται από τις εκπομπές αέριων ρύπων κατά την καύση των καυσίμων.



Εικόνα 7.1: Αποτελέσματα για την Ανάλυση του Κύκλου Ζωής τριών τύπων φωτοβολταϊκών πλαισίων του πυριτίου.

Από την άποψη του ενεργειακού αποτυπώματος του άνθρακα είναι ζωτικής σημασίας να δωθούν πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία και την ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών. Υποθέτοντας ότι το 100% της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων προερχόταν

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

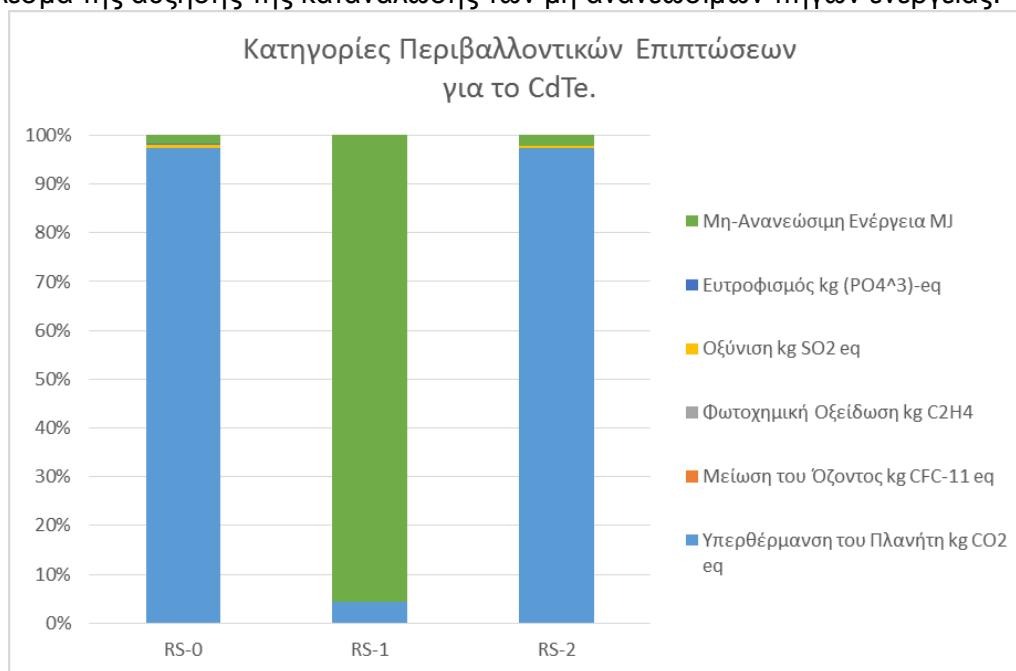
από τις ανανεώσιμες πηγές, δεν θα υπήρχε κανένα ενεργειακό αποτύπωμα άνθρακα. Στο πλαίσιο αυτό, η παραγωγή του πυριτίου επηρεάζει σημαντικά το ενεργειακό αποτύπωμα του άνθρακα.

Οι επιπτώσεις του καδμίου και ανάκτησης τελλούριο δεν περιλαμβάνονται στην αξιολόγηση επειδή εμφανίζονται μόνο στο μοντέλο κατά το τέλος της ζωής του, δηλαδή θα έχουν παρουσιαστεί κατά την παραγωγή των φωτοβολταϊκών (Εικόνα 7.2). Ωστόσο, η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των Cd και Te θα είναι περίπου 1% του συνόλου των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των διαδικασιών ανακύκλωσης. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης, με βάση τις επιπτώσεις 1 kWh του φωτοβολταϊκού του CdTe, εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να συγκριθεί με τα αποτελέσματα ακατέργαστου CdTe σε μία διαδικασία ανακύκλωσης (RS-0). Η σύγκριση αυτή φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 7.^[55]

Κατηγορία Επιπτώσεων	Μονάδες	RS-0	RS-1	RS-2
Υπερθέρμανση του Πλανήτη	kg CO ₂ eq	592	413	752
Μείωση του Όζοντος	kg CFC-11 eq	0,000038	1,011929	0,000058
Φωτοχημική Οξείδωση	kg C ₂ H ₄	0,16	0,1	0,15
Οξύνιση	kg SO ₂ eq	4,23	2,5	3,65
Ευτροφισμός	kg (PO ₄ ³⁻)-eq	0,31	0,2	0,3
Μη-Ανανεώσιμη Ενέργεια	MJ	11,158	9121	16,049

Πίνακας 7: Τα αποτελέσματα των Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για το CdTe.^[55]

Λόγω των θετικών αποτελεσμάτων της ανακύκλωσης γυαλιού, η τεχνική της ανακύκλωσης για σπασμένα κομματάκια (RS-1) έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη στρατηγική ανακύκλωσης λεπτού υμενίου με άθικτο γυαλί φορέα (RS-2) για κάθε κατηγορία επιπτώσεων. Ως εκ τούτου, το αποτέλεσμα είναι ότι η τεχνική RS-1 είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον από τις άλλες. Επίσης αξιοσημείωτο είναι ότι η RS-2 τεχνική οδηγεί σε σημαντικά υψηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και άλλων εκπομπών, κυρίως ως αποτέλεσμα της αύξησης της κατανάλωσης των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.



Εικόνα 7.2: Κατηγορίες των Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για το CdTe.

Υπάρχει έλλειψη γνώσης σχετικά με τις **κοινωνικές και πολιτικές επιπτώσεις** των ηλιακών συλλεκτών. Οι περισσότερες από τις έρευνες ασχολούνται με τις τεχνικές και τις οικονομικές πτυχές της αξιολόγησης. ^[102] Είναι ακόμα λίγα γνωστά για τις επιπτώσεις γενικότερα, επειδή η ηλιακή τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια και ο κύκλος ζωής της είναι μεγάλος. Εκτός από το γεγονός ότι οι επιπτώσεις της πρώτης γενιάς των ηλιακών συλλεκτών θα είναι εμφανής μετά από 25 χρόνια, ξεκινώντας την καταγραφή από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 οι τάσεις ^[103], οι νέες τεχνολογίες και τα συστατικά δεν έχουν ακόμη αναπτυχθεί (Πίνακας 8).

Ως εκ τούτου, η έρευνα βασίζεται σε περιορισμένες παραδοχές που γίνονται μετά από σύγκριση της ηλιακής ενέργειας με τις επιπτώσεις από τις ηλεκτρικές συσκευές. Επιπλέον, οι εκτιμήσεις βασίζονται σε δοκιμές εργαστηρίων που μπορεί να διαφέρουν από τις συνέπειες στον πραγματικό κόσμο. Συνήθως οι επιστήμονες τείνουν να υποτιμούν τις επιπτώσεις τέτοιων τεχνολογιών όπως χαρακτηριστικά στο παρελθόν είχε γίνει με την τρύπα του όζοντος. Ακόμα και αν μπορούν να εκτιμηθούν οι κίνδυνοι, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν εναλλακτικά υλικά και εξαρτήματα με στόχο να επιτευχθεί το 100% της ανακύκλωσης.

Κύριες κοινωνικές και συσχετισμένες οικονομικές επιπτώσεις οι οποίες χωρίζονται σε θετικές και αρνητικές πτυχές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Αν και τα οφέλη είναι σαφή, η αγορά ως επί το πλείστον αποφασίζει για την υιοθέτηση της ηλιακής φωτοβολταϊκής ενέργειας με μεγάλη επιτυχία. ^[104] Δεν είναι μόνο ότι η ηλιακή ενέργεια έχει φτάσει σε ανταγωνιστικό επίπεδο με τους πόρους του άνθρακα, του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και άλλων στοιχείων που παράγονται από τον άνθρακα, αλλά δεν χρειάζεται καθόλου νερό για την παραγωγή ενέργειας. Τέλος, με την εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας πολλές διεθνείς στρατιωτικές συγκρούσεις για το πετρέλαιο και το νερό μπορούν να εξαφανιστούν και να αποφευχθούν τεράστιες δαπάνες. Ως εκ τούτου, με τον αναπροσανατολισμό των επενδύσεων από την στρατιωτική χρήση στην ηλιακή ενέργεια μπορεί επίσης να μετριάσει σημαντικά η κλιματική αλλαγή.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

Επιπτώσεις	Θετικές	Αρνητικές
Χρήση της γης και του τοπίου	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Μείωση της χρήσης της γης σε σχέση με τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους. ➤ Επαναχρησιμοποίηση των υποβαθμισμένων χώρων. ➤ Χρήση των αχρησιμοποίητων χώρων (όπως σε ερήμους). ➤ Πολλαπλές χρήσεις και ολοκληρωμένη χρήση σε υπάρχουσες εξελίξεις ή κτιρίων (Όπως στέγες, προσόψεις). 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Μη διαθέσιμη γη/υψηλός ανταγωνισμό με άλλες χρήσεις γης (όπως η γεωργία). ➤ Υποβάθμιση της βλάστησης και του εδάφους με διάβρωση. ➤ Υψηλότερες αρχικές δαπάνες. ➤ Οπτική του τοπίου. ➤ Αλλαγή μικροκλίματος. ➤ Αντλία κινδύνου από αντανάκλαση.
Υποδομή	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Μειωμένες γραμμές μεταφοράς / δικτύων. ➤ Ενεργειακός εφοδιασμός για τις αποκεντρωμένες, χαμηλής πυκνότητας περιοχές εκτός δικτύου και σε αναπτυσσόμενες χώρες. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Προϋπόθεση για την αποθήκευση ενέργειας για συνεχή παροχή.
Πολιτικές επιπτώσεις	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Εθνική ενεργειακή ανεξαρτησία από την εισαγωγή. ➤ Μείωση στρατιωτικών δαπανών (λιγότερες συγκρούσεις στις πλούσιες χώρες πετρελαίου). 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Οικονομικά επιζήμιες επιδοτήσεις.
Αγορά Ενέργειας	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Διαποίκιση. ➤ Απορρύθμιση. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ζητήματα προσφοράς..
Βιομηχανία, εκπαίδευση	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Δημιουργία θέσεων εργασίας. ➤ Υψηλότερη ανάπτυξη και επίπεδο εκπαίδευσης. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Κίνδυνοι για την υγεία και κατά τη διάρκεια της κατασκευής.
Δημόσιο & Εμπόριο	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Αυξημένη περιβαλλοντική συνείδηση. ➤ Βελτιωμένη εικόνα. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Καμία.

Πίνακας 8: Κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Το σύνολο της παγκόσμιας χωρητικότητας φορτίου αιχμής είναι 5.000 GW το οποίο παράγεται από:

- άνθρακα (32%),
- φυσικό αέριο (24%) και
- υδροηλεκτρική ενέργεια (19%).

Η FirstSolar μπορεί να αντικαταστήσει μεγάλη ενέργεια που παράγεται από τα ορυκτά καύσιμα στις ανεπτυγμένες χώρες, καθώς στην Μέση Ανατολή και στην Ινδία χρησιμοποιείται μόνο το πετρέλαιο για την παραγωγή ενέργειας. Στην Κίνα η ηλιακή ενέργεια έχει εισαχθεί ως νέα πηγή καθαρής ενέργειας και γι' αυτό τον λόγο έχει πτώση η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Το 2012 η λιανική τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ορισμένες αγορές των ΗΠΑ και της Ευρωπαϊκής Ένωσης ήταν μειωμένη επειδή παράγεται στις στέγες των σπιτιών. Ταυτόχρονα η τιμή της ηλιακής ενέργειας εναντίον της κατανομής ισχύος με βάση το πετρέλαιο έχει γίνει πολύ ανταγωνιστική στην περιοχή της Ασίας-του Ειρηνικού, καθώς και στην Μέση Ανατολή η τιμή της ηλιακής ενέργειας είναι ήδη χαμηλότερη από την τιμή της καύσης με γεννήτρια ρεύματος. Οι τάσεις αυτές αναμένεται να συνεχιστούν από τη στιγμή που αναμένονται πρωτοποριακές τεχνολογίες. ^[105]

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

	Κρυσταλλικού Πυριτίου φ/β πλαίσια	Λεπτού Υμενίου φ/β πλαίσια		
		a-Si	CdTe	CIS/CIGS
Συνολικό βάρος ανά φ/β πλαίσιο	5-28 kg	11.7-20 kg	9-15 kg	10.2-20 kg
Κανονική χωρητικότητα	120-300 Wp	60-120 Wp		
Κλίμακα μεγέθους	1.4-1.7 m ²	1.4-5.7 m ²	0.6-1.0 m ²	

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά τεχνολογία. ^{[106],[39]}

Υλικά	Κρυσταλλικού Πυριτίου φ/β πλαίσια	Λεπτού Υμενίου φ/β πλαίσια		
		a-Si	CdTe	CIS/CIGS
Γυαλί	74 %	86 %	95 %	84 %
Αλουμίνιο	10 %	<1 %	<1 %	12 %
Άλλα εξαρτήματα (τα οποία περιλαμβάνουν σπάνια μέταλλα)	16 %	14 %	4 %	4 %
Άλλα βασικά υλικά (τα οποία αντιπροσωπεύουν το 1% της σύνθεσης)	EVA, Tedlar ταινία στήριξης, πυρίτιο, συγκόλληση	Πολυόλη, MDI	EVA	EVA
Σπάνια Μέταλλα	Ασήμι	Ίνδιο, Γερμάνιο	-	Ίνδιο, Γάλλιο
Παρουσία Καδμίου (Cd) και Μολύβδου (Pb)	Μόλυβδος	-	Κάδμιο	Κάδμιο

Πίνακας 10: Μέση σύνθεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. ^[39]

Όπως η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι διαφορετική και ποικίλει για διάφορα γεωγραφική πλάτη διαφέρει και η ένταση του φωτός που καθορίζει την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει κάθε κύτταρο. Η ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος θα ποικίλει ανάλογα με τη γεωγραφική θέση. Το κόστος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος συνήθως μετριέται σε τιμή ανά αιχμή Watt (€/Wp). Μια τάξη μεγέθους θα είναι 2,9 €/Wp ή 1,67 € ανά φωτοβολταϊκό πλαίσιο (χαμηλότερες τιμές αναμένονται για τα μονοκρυσταλλικού πυριτίου, τα πολυκρυσταλλικού πυριτίου και για τα λεπτά υμενίου αντίστοιχα). ^[107] Οι τιμές αναμένεται να μειωθούν έως το 2030 και θα κυμαίνονται από 0,70 €/Wp-0,93 €/Wp. Το 2050, η τιμή αναμένεται να έχει μειωθεί έως και 0,56 €/Wp. ^[107]

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία που είναι διαθέσιμη, τα απόβλητα των φωτοβολταϊκών πλαισίων, εάν δεν διατεθούν σωστά υλικά προκαλούν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην υγεία των ανθρώπων. Μερικές απ' αυτές είναι:

- Η έκπλυση του μολύβδου (Pb),
- η έκπλυση του καδμίου (Cd),
- η απώλεια των συμβατικών πηγών, όπως το γυαλί και το αλουμίνιο και
- η απώλεια σπάνιων μετάλλων, ιδιαίτερα το ασήμι, το ίνδιο, το γάλλιο και το γερμάνιο.

Ρύπανση του εδάφους και του αέρα

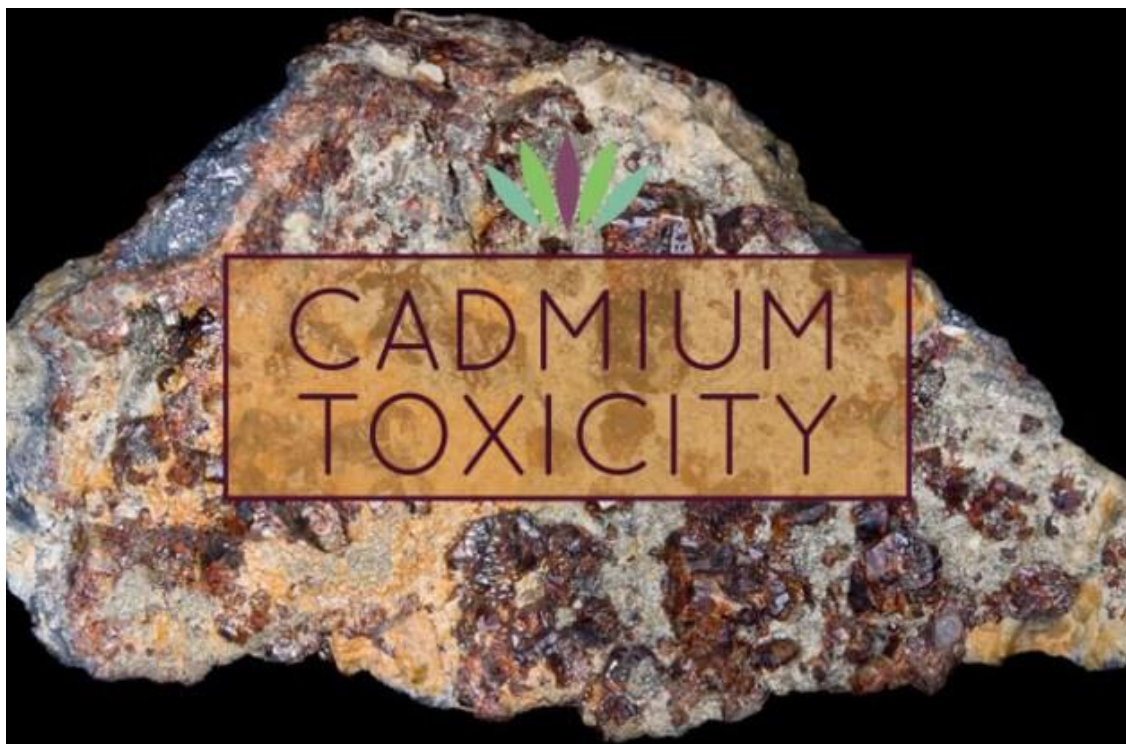
Ο μόλυβδος συγκαταλέγεται στα βαρέα μέταλλα και έχει την ικανότητα να συσσωρεύεται στους ανθρώπους και στο περιβάλλον (Εικόνα 7.3). Μόλις εισέρθει ο μόλυβδος στο ανθρώπινο σώμα εξαπλώνεται μέσω του αίματος και συσσωρεύεται στα κόκαλα. Ανεξάρτητα από το επίπεδο της έκθεσης, ο μόλυβδος μπορεί να προκαλέσει επιπτώσεις στο νευρικό σύστημα, στις λειτουργίες των νεφρών, στο αναπαραγωγικό σύστημα και στο καρδιαγγειακό σύστημα. Τα οικοσυστήματα όπου υπάρχουν σε κοντινή απόσταση πηγές μολύβδου, επιδεικνύουν ένα φάσμα ανεπιθύμητων ενεργειών περιλαμβάνοντας απώλειες στην βιοποικιλότητα, μείωση στον ρυθμό ανάπτυξης και της αναπαραγωγής των φυτών και των ζώων.

Η έκπλυση του μολύβδου στα $1^{ηs}$ γενιάς κρυσταλλικού πυριτίου φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι αμελητέα εάν παραμένει στο ίδιο PH όπως το πλαίσιο. Εάν εκτεθεί σε χαμηλότερο PH όπως το νιτικό οξύ η έκπλυση του αναμένεται μεταξύ 13% με 90% της ποσότητας του μολύβδου, η οποία βρίσκεται κατά μέσο όρο στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Περίπου 12,67 gr μολύβδου περιέχονται στα κρυσταλλικού πυριτίου πλαίσια με βάρος περίπου 22 kg. Ενώ η έκπλυση του μολύβδου στο περιβάλλον υπολογίζεται από 1,64 gr έως 11,4 gr ανά πλαίσιο.



Εικόνα 7.3: Ένδειξη προϊόντων χωρίς Μόλυβδο (Pb).

Το κάδμιο συγκαταλέγεται στα βαρέα μέταλλα τα οποία συσσωρεύονται στους ζωντανούς οργανισμούς, με διάρκεια ζωής τα 30 χρόνια. Η έκθεση του ανθρώπου στο κάδμιο μπορεί να εκδηλωθεί ακόμα και μετά από 10 χρόνια προκαλώντας σοβαρές ασθένειες. Το κάδμιο έχει υψηλή οξύτητα και μπορεί δυνητικά να συσσωρευτεί στον άνθρωπο. Όπως έχει παρατηρηθεί, η συνεχής έκθεση στο κάδμιο προκαλεί καρκίνο και δημιουργεί σοβαρά παθολογικά και ψυχολογικά συμπτώματα.



Εικόνα 7.4: Το κάδμιο (Cd).

Η έκπλυση του καδμίου 2^{ns} γενιάς του λεπτού υμενίου των φωτοβολταϊκών πλαισίων (ειδικά CdTe και CIGS τεχνολογίες) έχει το ρίσκο της (Εικόνα 7.4). Το κάδμιο εκπλύεται από το τελλουριούχο κάδμιο σε ποσοστό 7%, εάν διατηρηθεί στο ίδιο PH με του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Παρ' όλα αυτά, η έκθεση σε χαμηλότερο PH (όπως το νιτρικό οξύ) και η υγειονομική ταφή αυξάνουν την έκπλυση του καδμίου μεταξύ 29% και 40%. Περίπου, 4,60 gr καδμίου περιέχονται κατά μέσο όρο στα φωτοβολταϊκά πλαίσια του τελλουριούχου καδμίου, τα οποία έχουν βάρος 12 kg. Βέβαια το κάδμιο που εκπλύεται στο περιβάλλον είναι από 0,32 gr έως 1,84 gr ανά φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Το κόστος της ρύπανσης συνδέεται με διαρροές του μόλυβδου και του κάδμιου, οι οποίες είναι αντίστοιχα 1,174 €/gr και 0,046 €/gr.

Απώλεια των πόρων

Η πλειοψηφία των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατασκευάζεται από γυαλί και αλουμίνιο. Εάν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο περιέχει 74,16% γυαλί και το 10,30% είναι πλαίσιο, το οποίο είναι αλουμίνιο. Εκφράζοντας το βάρος, αυτό αντιπροσωπεύει 16,6 kg γυαλιού και 2,3 kg αλουμινίου ανά φωτοβολταϊκό πλαίσιο (συνολικού βάρους 22 kg) το οποίο μπορεί να ανακυκλωθεί. Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο CIS περιέχει 84% γυαλί και 12% αλουμίνιο, αντιπροσωπεύοντας έτσι 8 με 9 kg γυαλιού και 1,4 kg αλουμινίου ανά φωτοβολταϊκό πλαίσιο (συνολικού βάρους 11,7 kg), το οποίο ανακυκλώνεται. Η τιμή της αγοράς του γυαλιού έμεινε σταθερή από το 2000 έως το 2009, με τιμή γύρω στα 50 € ανά τόνο. Τον Φεβρουάριο του 2011, η τιμή της αγοράς του αλουμινίου ήταν περίπου 1200 € ανά τόνο. ^[108]

Απώλεια σπάνιων μετάλλων

Η απώλεια των σπάνιων μετάλλων όπως το ασήμι, το ίνδιο, το γάλλιο και το γερμάνιο είναι ένας άλλος αντίκτυπος της έλλειψης της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Πολλά απ' τα σπάνια μέταλλα βρίσκονται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Καθώς τα σπάνια μέταλλα συνδυάζονται αντιπροσωπεύουν μόνο το 1% της μάζας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, με την αξία τους να θεωρείται αμελητέα.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

Σπάνια Μέταλλα	Τιμή ανά κιλό	Τύποι Φωτοβολταϊκών πλαισίων
Ασήμι (Ag)	650 €	Κρυσταλλικό Πυρίτιο
Ίνδιο (In)	442 €	Άμορφο Πυρίτιο, CIS, CIGS
Γάλλιο (Ga)	515 €	CIGS
Γερμάνιο (Ge)	957 €	Άμορφο Πυρίτιο

Πίνακας 11: Σπάνια μέταλλα σε φωτοβολταϊκά πλαίσια και πληροφορίες για την τιμή τους στην αγορά.

Με τον καιρό, το κόστος της απώλειας των συμβατικών πόρων και των σπάνιων μετάλλων που βρίσκονται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια θα μπορούσε να αυξηθεί, λόγω της αύξησης των τιμών των πόρων. Η μελλοντική αγορά θα έχει ποικιλία τιμών για το αλουμίνιο, το γυαλί και τα σπάνια μέταλλα και θα εξαρτάται από το επίπεδο εξάντλησης των φυσικών αποθεμάτων, την μελλοντική ζήτηση και τη διαθεσιμότητα από τις τεχνολογίες ανακύκλωσης για την παροχή υλικών ώστε να επαναχρησιμοποιηθούν. Βέβαια, από την απόδοση της ανακύκλωσης θεωρείται ότι ανακυκλώνεται το 100% του αλουμινίου, το 95% του γυαλιού και το 30% των σπάνιων μετάλλων. ^[39]

Επιπτώσεις ανά φωτοβολταϊκό πλαίσιο			
Ρύπανση εδάφους και αέρα	Έκπλυση Μολύβδου	Κρυσταλλικού πυριτίου φ/β πλαίσια	75-518 g/t
	Έκπλυση Καδμίου	Τελλουριούχου Καδμίου φ/β πλαίσια	27-153 g/t
Απώλεια Πόρων	Γυαλί	Κρυσταλλικού πυριτίου φ/β πλαίσια	0.0734 kg/Wp
		Λεπτού υμενίου φ/β πλαίσια	0.2371 kg/Wp
	Αλουμίνιο	Κρυσταλλικού πυριτίου φ/β πλαίσια	0.0107 kg/Wp
		Λεπτού υμενίου φ/β πλαίσια	0.0001 kg/Wp
	Σπάνια μέταλλα (Rm)	Κρυσταλλικού πυριτίου φ/β πλαίσια	0.0009 kg/Wp
		Λεπτού υμενίου φ/β πλαίσια	0.0025 kg/Wp

Πίνακας 12: Επιπτώσεις ανά τύπο φωτοβολταϊκού πλαισίου.

	Κόστος ανά τόνο από το Κάδμιο και τον Μόλυβδο	Κόστος ανά τόνο των φωτοβολταϊκών πλαισίων
Κόστος από την Ρύπανση του εδάφους και του αέρα		
Κρυσταλλικού πυριτίου φ/β πλαίσια	1.174.000 €	348 €/t
Τελλουριούχου Καδμίου φ/β πλαίσια	46.000 €	12 €/t

Πίνακας 13: Κόστος ανά μονάδα των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Παρ' όλα αυτά, το μεγαλύτερο ποσοστό σύνθεσης από γυαλί και η χρήση των σπάνιων μετάλλων (όπως το ίνδιο και το γερμάνιο) συγκρίνονται με τα κρυσταλλικού πυριτίου φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία αποτελεσματικά αντιπροσωπεύουν την σύνθεση των υλικών άλλων φωτοβολταϊκών πλαισίων λεπτού υμενίου (CdTe και CIGS/CIS).

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

Τέλος, υπολογίστηκε η οικονομική απώλεια και η υψηλή απόδοση της παραγωγής συσσωρεύοντας τα με ποσοστά ανάκτησης 100% για το αλουμίνιο, 95% για το γυαλί και 30% για τα σπάνια μέταλλα.

8. Παρουσίαση Προγράμματος Προσομοίωσης LCA (Gabi)

Το πρόγραμμα GaBi 6 υποστηρίζει κάθε στάδιο της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής, από τη συλλογή και οργάνωση των δεδομένων έως την παρουσίαση των αποτελεσμάτων (Εικόνα 8.1). Έχει την ικανότητα να εντοπίζει αυτόματα όλα τα υλικά, την ενέργεια και τις ροές των εκπομπών, καθώς και όπως ορίζεται νομισματικές αξίες, το χρόνο εργασίας και τα κοινωνικά ζητήματα, δίνοντας άμεση λογιστική απόδοση σε δεκάδες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων.



Εικόνα 8.1: Λογότυπο του προγράμματος προσομοίωσης GaBi 6.

Με μια σπονδυλωτή και παραμετροποιημένη αρχιτεκτονική, το GaBi 6 επιτρέπει την ταχεία μοντελοποίηση πολύπλοκων διαδικασιών και διαφορετικών επιλογών παραγωγής. Αυτή η αρχιτεκτονική καθιστά επίσης εύκολο να προσθέτει κανείς και άλλα στοιχεία, όπως το οικονομικό κόστος ή πληροφορίες για το κοινωνικό αντίκτυπο σε ένα μοντέλο, κάνοντας το GaBi ένα εργαλείο ανάλυσης του κύκλου ζωής.

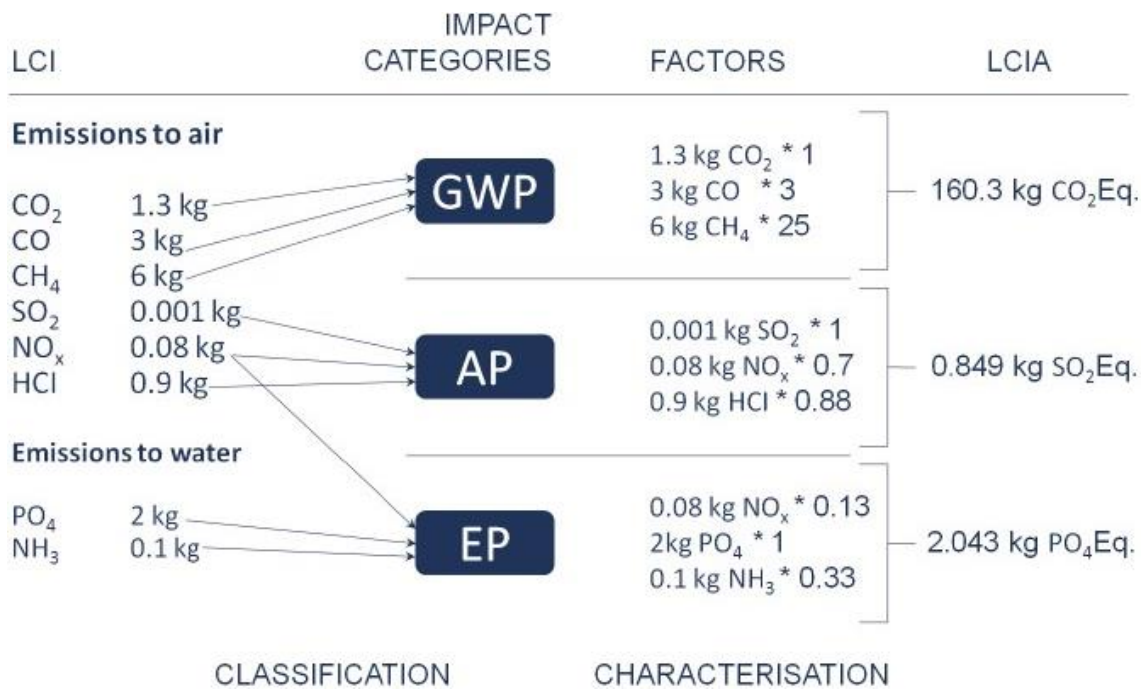
Το λογισμικό GaBi συμπληρώνεται από την πιο ολοκληρωμένη, επίκαιρη βάση δεδομένων απογραφής κύκλου ζωής που είναι διαθέσιμη. Με πάνω από 4.500 σύνολα δεδομένων Απογραφής Κύκλου Ζωής η συλλογή πρωτογενών δεδομένων κατά τη διάρκεια της παγκόσμιας εργασία με επιχειρήσεις, ενώσεις και δημόσιους φορείς, οι βάσεις δεδομένων του GaBi καλύπτουν τις περισσότερες βιομηχανίες.

Οι αξιολογήσεις του κύκλου ζωής που πραγματοποιούνται σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044. Η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής αποτελείται από τέσσερα στάδια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1:

- **Στόχος και πεδίο εφαρμογής:** σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040, η πρώτη φάση της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής είναι ο ορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής. Σε αυτό το βήμα είναι όλες οι γενικές αποφάσεις για τη δημιουργία της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής του συστήματος. Ο στόχος και το πεδίο εφαρμογής θα πρέπει να καθορίζονται με σαφήνεια και συνέπεια με την προβλεπόμενη εφαρμογή. Μια Ανάλυση του Κύκλου Ζωής είναι μια επαναληπτική διαδικασία και αυτό επιτρέπει τον επαναπροσδιορισμό του στόχου και του πεδίου εφαρμογής αργότερα στη μελέτη με βάση την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.
- **Ανάλυση Απογραφής (LCI):** είναι η φάση της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής που περιλαμβάνει τη συλλογή και την ποσοτικοποίηση των εισροών και εκροών για ένα δεδομένο σύστημα προϊόντος σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του ή για ενιαίες διαδικασίες. Η ανάλυση των αποθεμάτων περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων και την επεξεργασία των δεδομένων σε έναν πίνακα Απογραφής του Κύκλου Ζωής.
- **Αξιολόγηση των επιπτώσεων (LCIA):** εντοπίζει και αξιολογεί την ποσότητα και τη σημασία των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την Απογραφή του Κύκλου Ζωής. Οι εισοδοί και οι έξοδοι ορίζονται να έχουν αντίκτυπο στις κατηγορίες και στις πιθανές επιπτώσεις τους ποσοτικά σύμφωνα με παράγοντες χαρακτηρισμού. Η παρακάτω εικόνα δείχνει τη μετατροπή από τις εκπομπές να επηρεάζουν δυναμικά μέσω της ταξινόμησης και του χαρακτηρισμού. Η εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής περιλαμβάνει διάφορα στάδια σύμφωνα με το πρότυπο ISO. Αυτά μπορούν να βρεθούν με περισσότερες λεπτομέρειες στο πρότυπο ISO 14044. Εντός του πεδίου εφαρμογής της μελέτης ορίζονται ορισμένα στοιχεία για την Ανάλυση

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

των Επιπτώσεων του Κύκλου Ζωής. Υποχρεωτικά στοιχεία περιλαμβάνουν την επιλογή των σχετικών κατηγοριών των επιπτώσεων, της ταξινόμησης και του χαρακτηρισμού (Εικόνα 8.2). Τα προαιρετικά στοιχεία της μελέτης είναι η ομαδοποίηση και η στάθμιση.



Εικόνα 8.2: Ταξινόμηση και χαρακτηρισμός.

- **Ερμηνεία:** στη φάση αυτή, τα αποτελέσματα ελέγχονται και αξιολογούνται για να αποδειχτεί ότι συνάδουν με τον ορισμό του στόχου και του πεδίου εφαρμογής και ότι η μελέτη έχει ολοκληρωθεί. Η φάση αυτή περιλαμβάνει δύο κύρια στάδια:
- Τον εντοπισμό των σημαντικών θεμάτων και
 - την αξιολόγηση.

Η ερμηνεία του κύκλου ζωής είναι μια επαναληπτική διαδικασία, τόσο εντός της ίδιας της φάσης ερμηνείας όσο και με τις άλλες φάσεις της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής. Οι ρόλοι και οι αρμοδιότητες των διαφόρων σημείων πρέπει να περιγράφονται και να λαμβάνονται υπόψη. Εάν έχει διεξαχθεί μια κριτική επισκόπηση, τα αποτελέσματα αυτά θα πρέπει επίσης να περιγράφονται.

Ανοίγοντας το πρόγραμμα προσομοίωσης GaBi 6 μας παρουσιάζεται το αρχικό περιβάλλον του προγράμματος όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 8.3).



Εικόνα 8.3: Αρχικό περιβάλλον προγράμματος.

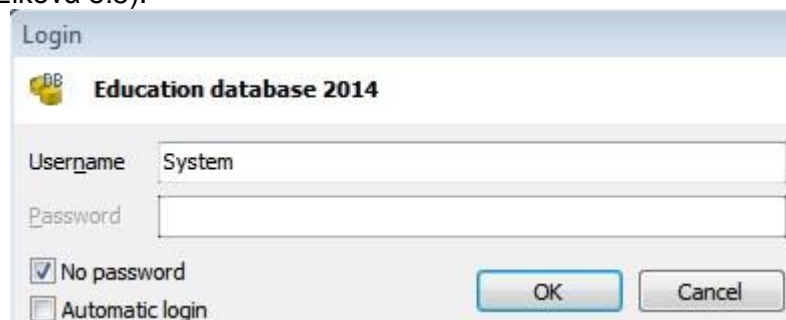
Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

Το πρώτο πράγμα που χρειάζεται είναι να συνδεθείτε με μια βάση δεδομένων του λογισμικού. Στο GaBi DBManager μπορείτε να δείτε αν υπάρχει ήδη μια βάση δεδομένων που συνδέεται απευθείας (Εικόνα 8.4). Η βάση δεδομένων είναι η Education Database 2014 όπως φαίνεται παρακάτω και ενεργοποιείται αυτόματα με την επιλογή της.



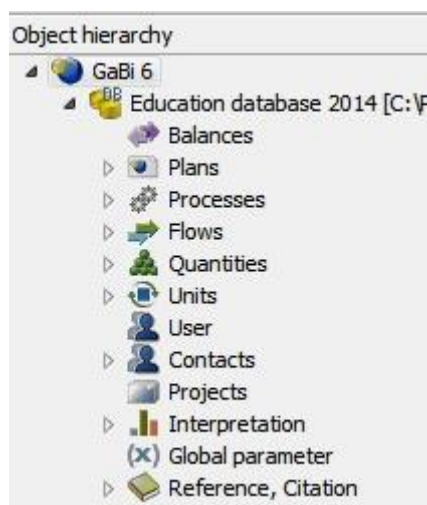
Εικόνα 8.4: Ενεργοποίηση της βάσης των δεδομένων.

Έπειτα, το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα διασφάλισης των δεδομένων με την εισαγωγή ενός κωδικού (Εικόνα 8.5).



Εικόνα 8.5: Διασφάλιση των δεδομένων.

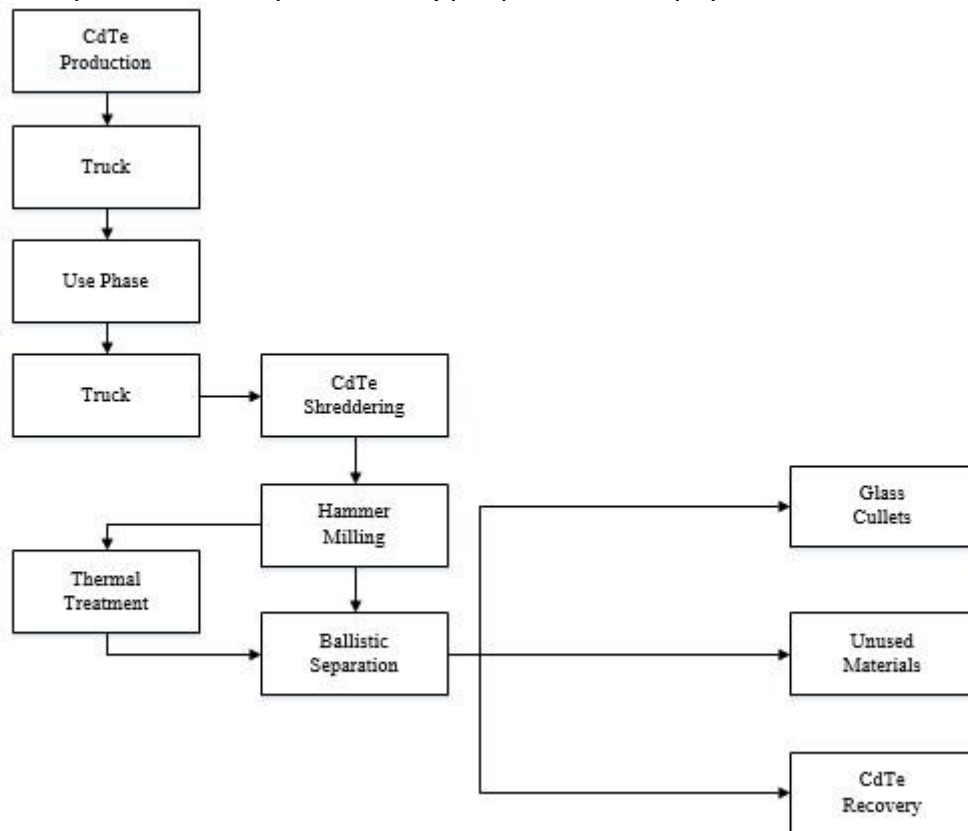
Στο επόμενο βήμα, το πρόγραμμα έχει ανοίξει την βάση των δεδομένων του και δίνει την δυνατότητα πολλών επιλογών (Εικόνα 8.6). Έτσι αρχίζει η προσομοίωση των εισροών και των εκροών της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής ενός φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας λεπτού υμενίου.^[109]



Εικόνα 8.6: Επιλογή διαδικασίας, εισροών, ποσοτήτων και εκροών από το σύστημα.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

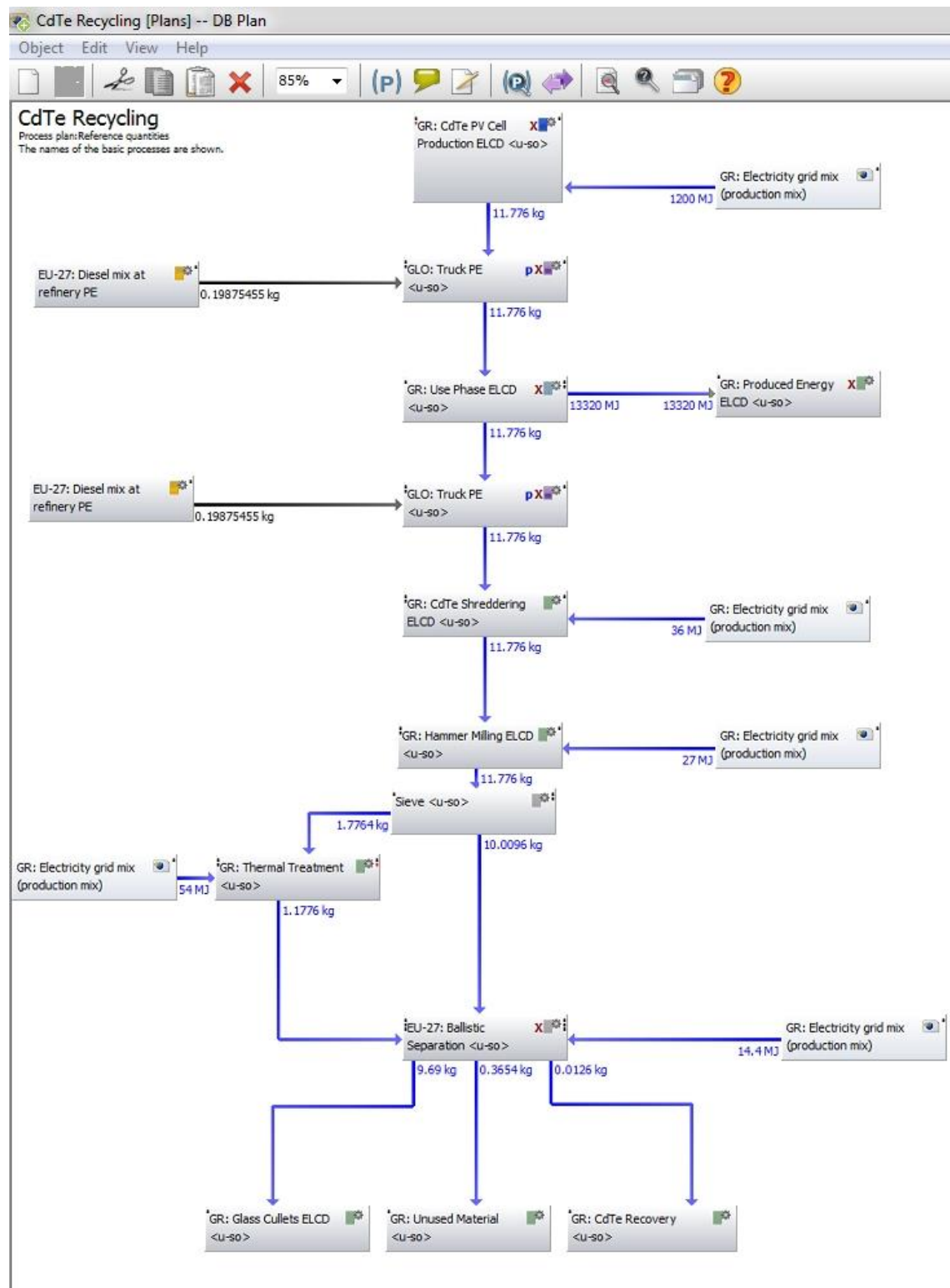
Βέβαια, πριν να αρχίσει η προσομοίωση στο πρόγραμμα GaBi 6 πρέπει να έχει γίνει ένα προσχέδιο του διαγράμματος ροής (Εικόνα 8.7) όπως θα αποτυπωθεί στην προσομοίωση ώστε να είναι γνωστά τα δεδομένα και τα ζητούμενα καθ' όλη την διαδικασία.



Εικόνα 8.7: Διάγραμμα Ροής.

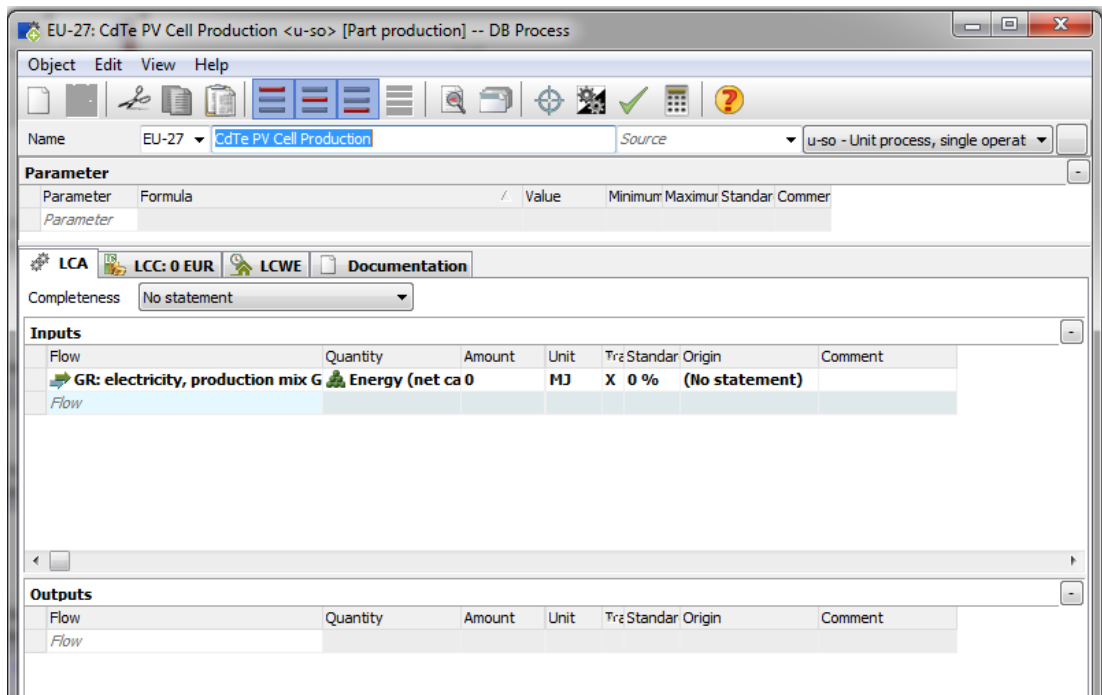
Στην συνέχεια θα τοποθετηθεί ένα-ένα στάδιο επεξεργασίας, εισάγοντας πολύ προσεκτικά τα δεδομένα όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 8.8). Κάποια δεδομένα μπορούν να εισαχθούν απ' την βάση δεδομένων του προγράμματος ενώ κάποια άλλα θα εισαχθούν χειροκίνητα (Εικόνα 8.9 και Εικόνα 8.10).

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

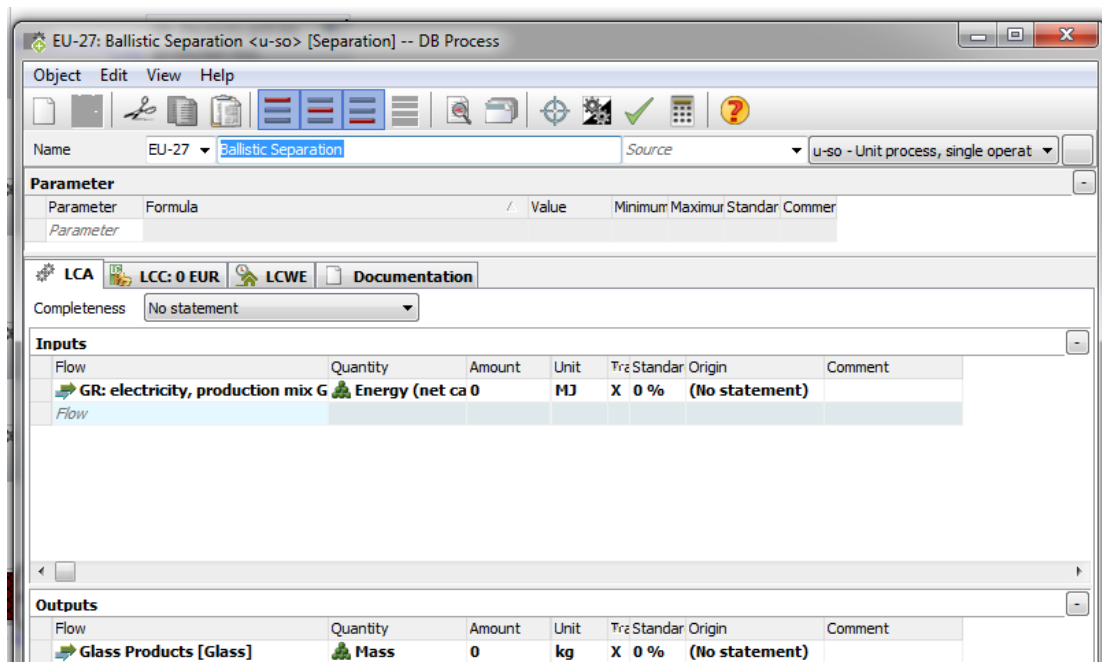


Εικόνα 8.8: Μεταφορά Διαγράμματος ροής στο GaBi 6.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου



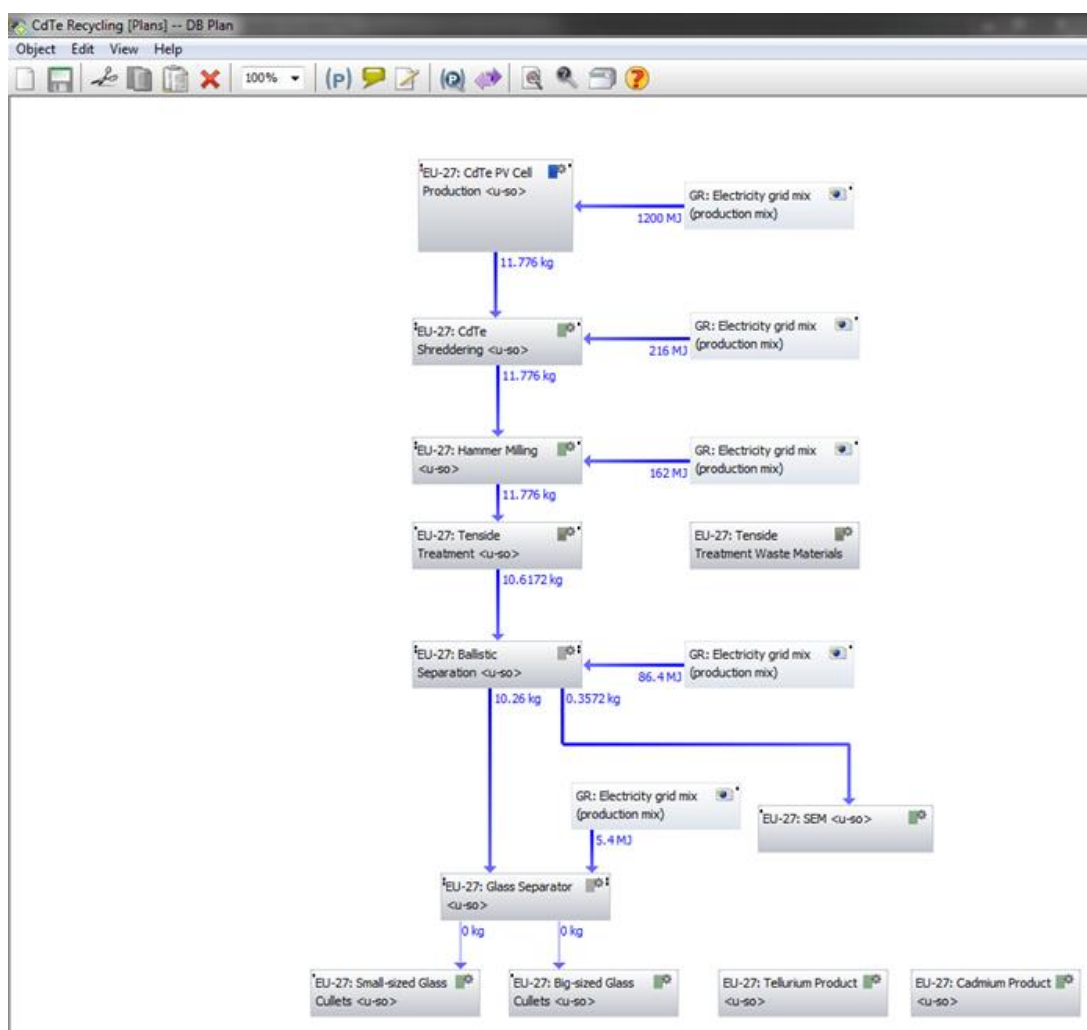
Εικόνα 8.9: Εισαγωγή Δεδομένων ως εισροές από την παραγωγή ενός CdTe thin film.



Εικόνα 8.10: Εισαγωγή Δεδομένων (εισροών και εκροών) κατά τον βαλλιστικό διαχωρισμό.

Με τον ίδιο τρόπο τοποθετούνται τα δεδομένα σε κάθε στάδιο. Διαχωρίζονται σε εισροές και εκροές και ολοκληρώνεται ένα βήμα κάθε φορά. Βέβαια, πριν την τελειοποίηση του παραπάνω μοντέλου της Εικόνας 8.8, δοκίμαστηκε κάποια άλλη τεχνική η οποία όμως δεν ολοκληρώθηκε λόγω έλλειψης δεδομένων (Εικόνα 8.11). Δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα καθώς η τεχνική ήταν κατοχυρωμένη πατέντα και χρησιμοποιείται από ιδιωτική εταιρεία με κατοχυρώμενα δικαιώματα με οικονομικό όφελος.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου



Εικόνα 8.11: Απεικόνιση ημιτελούς προσομοίωσης λόγω μη διαθέσιμων δεδομένων.

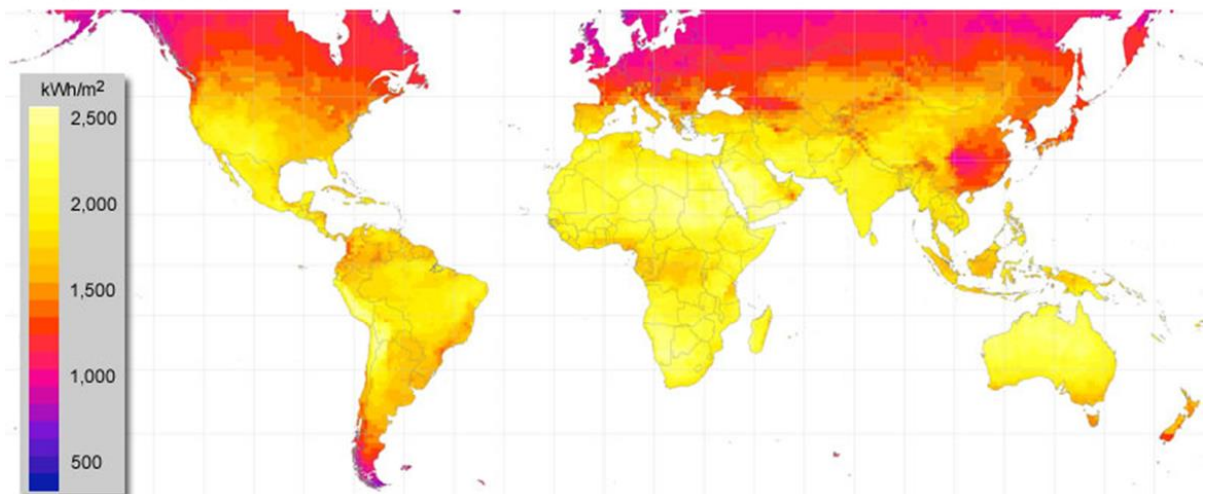
8.1. Παρουσίαση-Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Σε αυτή την υπο-ενότητα θα γίνει η παρουσίαση όλων των δεδομένων, των διαγραμμάτων που υπήρξαν από την προσομοίωση της ανακύκλωσης του φωτοβολταϊκού CdTe λεπτού υμενίου και η σύγκριση τους με παλαιότερα διαγράμματα του ίδιου τύπου φωτοβολταϊκών.

Στην Εικόνα 8.12 έχουν τοποθετηθεί συγκεντρωτικά τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του φωτοβολταϊκού CdTe.

Calculation of the solar PV energy output of a photovoltaic system							
	Yellow cell = enter your own data						
	Green cell = result (do not change the value)						
	White cell = calculated value (do not change the value)						
Global formula :		$E = A * r * H * PR$					
E = Energy (kWh)						122	kWh/an
A = Total solar panel Area (m ²)						1,2	m ²
r = solar panel yield (%)						8%	
H = Annual average irradiation on tilted panels (shadings not included)*						1700	kWh/m ² .an
PR = Performance ratio, coefficient for losses (range between 0.9 and 0.5, default value = 0.75)						0,75	
					Total power of the system	0,1	kWp
Losses details (depend of site, technology, and sizing of the system)							
- Inverter losses (6% to 15 %)						8%	
- Temperature losses (5% to 15%)						8%	
- DC cables losses (1 to 3 %)						2%	
- AC cables losses (1 to 3 %)						2%	
- Shadings 0 % to 40% (depends of site)						3%	
- Losses weak irradiation 3% yo 7%						3%	
- Losses due to dust, snow... (2%)						2%	
- Other Losses						0%	
				2446,51285	kWh		
*You can find this value on the map below or here : solar radiation data							
You have to find the global annual irradiation incident on your PV panels with your specific inclination (slope, tilt) and orientation (azimut).							

Εικόνα 8.12: Μέτρηση της Ηλιακής Ενέργειας που εξάγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.



Εικόνα 8.13: Ετήσια Παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία.^[110]

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

Παραγωγή CdTe	1200	MJ
Ώρες λειτουργίας μηχανημάτων για ένα PV	2	min
Διάρκεια ζωής	20	years
η_G	0,31	
E = Ενέργεια (kWh)	122	kWh/an
A = Συνολική επιφάνεια ηλιακών πάνελ (m^2)	1,2	m^2
τ = απόδοση ηλιακών πάνελ (%)	8%	
H = Μέση ετήσια ακτινοβολία σε κεκλιμένο πάνελ (οι σκιάσεις δεν περιλαμβάνονται)*	1700	kWh/ m^2 .an
PR = Αναλογία απόδοσης, συντελεστής απωλειών (εύρος μεταξύ 0,9 και 0,5, προκαθορισμένη τιμή = 0,75)	1,00	

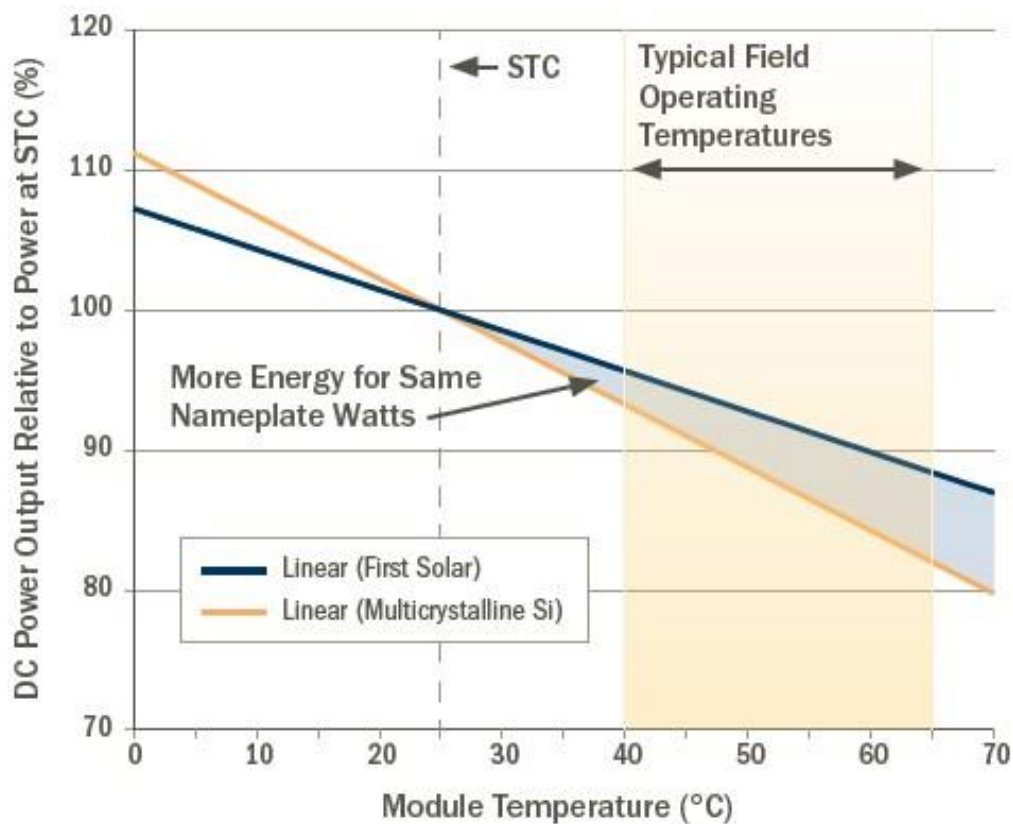
Πίνακας 14:Δεδομένα Εισαγωγής στο πρόγραμμα GaBi.

Ο Κύκλος Ζωής του φωτοβολταϊκού CdTe λεπτού υμενίου για την συγκεκριμένη προσομοίωση ξεκίνησε από την παραγωγή του. Η κορυφαία εταιρεία που δραστηριοποιείται στην παραγωγή και στην ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών λεπτού υμενίου είναι η First Solar. Επομένως, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που παρείχε η First Solar για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Μηχανική Περιγραφή	
Μήκος (m)	1,2
Πλάτος (m)	0,6
Βάρος (kg)	12
Πάχος (mm)	6,8
Περιοχή (m ²)	0,72
Συνδέσεις	MC4
Δίοδος παράκαμψης	Καμία
Τύπος Φωτοβολταϊκού	Thin-film CdTe ημιαγωγός, 216 ενεργά κελιά
Υλικό πλαισίων	Κανένα
Εμπρός Γυαλί	3.2 mm ενισχυτικό θερμότητας Series 4ATM περιλαμβάνει αντι-ανακλαστική επίστρωση
Πίσω Γυαλί	3.2 mm
Ενθυλάκωση	Series 3 Μαύρο υλικό Laminate με στεγανοποιημένη άκρη

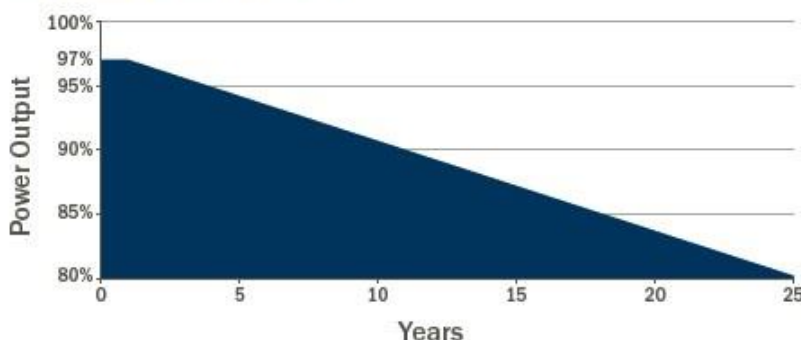
Πίνακας 15: Δεδομένα από την First Solar Advanced Thin Film Series 4 Modules.

SUPERIOR TEMPERATURE COEFFICIENT



Εικόνα 8.14: Διάγραμμα της First Solar-Σύγκριση πολυκρυσταλλικού πυριτίου και λεπτού υμενίου.


MODULE WARRANTY²



- 25-Year Linear Performance Warranty³
- 10-Year Limited Product Warranty

Εικόνα 8.15: Η εγγύηση της First Solar για την ποσοστιαία Ισχύ Εξόδου καθ' όλη την διάρκεια ζωής του φωτοβολταϊκού.

Απ' την στιγμή που θα ολοκληρωθεί η **παραγωγή του φωτοβολταϊκού λεπτού υμενίου CdTe (production CdTe PV Cell)** σύμφωνα με τις παραπάνω προδιαγραφές, θα αρχίσει η **διανομή** του σε επιχειρήσεις και σε σπίτια. Για την διανομή όμως χρειάζεται **καύσιμο (πετρέλαιο-Diesel)** ώστε να λειτουργήσουν τα **φορτηγά (Truck)**. Στον παρακάτω πίνακα υπάρχουν αναλυτικά τα στοιχεία.

Μεταφορά		
Απόσταση	800	km(with return)
Οφέλιμο φορτίο	9,3	t
Μικτό βάρος (μέγεθος φορτηγού)	12-14	t
Μέσο φορτηγό για σύντομες μεταφορές και μεγάλων αποστάσεων και διανομή		
Κατηγορίες εκπομπών	Euro 5 (1.10.2008)	
Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής	TRACI	

Πίνακας 16:Δεδομένα για την μεταφορά των φωτοβολταϊκών CdTe. ^{[111],[112],[113]}

Συνεχίζοντας την προσομοίωση στο GaBi, μετά τη διανομή των φωτοβολταϊκών θα υπάρξει η **παραγωγή ενέργειας (produced Energy)**. Η παραγωγή της ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών δείχνει την ανάπτυξη πιο οικολογικών μεθόδων προς το περιβάλλον. Η ολοκλήρωση της ζωής των συγκεκριμένων φωτοβολταϊκών (**use phase**) θα επέλθει μετά από 20 χρόνια. Θεωρώντας ότι πραγματοποιείται ολοκληρωμένη διαχείριση σε αυτή την προσομοίωση θα γίνει **συλλογή** των φωτοβολταϊκών ώστε να ανακυκλωθούν όσα περισσότερα στοιχεία γίνεται. Άρα μετά την χρησιμοποίησή τους θα ξαναχρειαστούν τα ίδια φορτηγά και οι ίδιες ποσότητες καυσίμων για την λειτουργία τους. Τα φορτηγά θα συγκεντρώσουν τα φωτοβολταϊκά σε ένα εργοστάσιο ανακύκλωσης.

Απ' την στιγμή που θα συγκεντρωθούν τα φωτοβολταϊκά CdTe λεπτού υμενίου στο εργοστάσιο ανακύκλωσης θα πρέπει να ολοκληρωθεί μια συγκεκριμένη σειρά διεργασιών. Αρχικά, τα φωτοβολταϊκά θα τεμαχιστούν σε ένα **μηχάνημα τεμαχισμού (shredding machine)** διπλού άξονα. Το μηχάνημα (Εικόνα 8.16) είναι κατάλληλα σχεδιασμένο για τη σύνθλιψη του φιλμ στους κυλίνδρους-μαχαίρια. Το μεγάλο στόμιο εισόδου που διαθέτει μπορεί να δεχτεί μεγάλα προϊόντα. Η περιστροφική λεπίδα, η κοπή και η ακμή της είναι σχεδιασμένες ώστε να μπορεί να παρέχει υψηλή απόδοση και μεγάλη χωρητικότητα. Το μηχάνημα έλεγχεται από το σύστημα Siemens PLC. Επίσης, το μαχαίρι έχει την ικανότητα να μπορεί να περιστραφεί στην αντίθετη κατεύθυνση και να κλείσει αυτόματα εάν κάτι απροσδόκητο συμβεί, κυρίως για λόγους

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

ασφαλείας. Το μαχαίρι (Εικόνα 8.17) είναι υψηλής ποιότητας χάλυβα εργαλείο, με μεγάλη διάρκεια ζωής. Τέλος, κατά την λειτουργία παράγεται χαμηλός θόρυβος και λίγη σκόνη. ^[114]



Εικόνα 8.16 Το μηχάνημα τεμαχισμού (Shredding Machine).

Τύπος	Ισχύς (KW)	Κινητήρα	Διάμετρος (mm)	Μέγεθος Στόμιου Εισαγωγής	Χωρητικότητα Τεμαχισμού (kg/h)
YSSJ-1200	2*30		φ 420	1200*800	1500~2500

Πίνακας 17: Τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας του μηχανήματος τεμαχισμού.



Εικόνα 8.17: Οι λεπίδες-μαχαίρια τεμαχισμού του μηχανήματος.

Το επόμενο στάδιο της προσομοίωσης είναι να περάσουν τα ήδη τεμαχισμένα κομμάτια του φωτοβολταϊκού από τον **σφυρόμυλο (hammer milling)**. Ο σφυρόμυλος (Εικόνα 8.18) χρησιμοποιείται ευρέως για την σύνθλιψη υλικών όπως ο άνθρακας, ο ασβεστόλιθος, η πέτρα και άλλα υλικά, τα οποία η αντοχή τους δεν ξεπερνούν 150MP και η επιφάνειάς τους είναι μικρότερη από 9%. Έτσι ο σφυρόμυλος χαρακτηρίζεται για το πλεονεκτήματα της σύνθλιψης

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

των μεγάλων αναλογιών με λιγότερη σύνθλιψη, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και εύκολη συντήρηση. ^[115]



Εικόνα 8.18: Ο σφυρόμυλος (hammer milling).

Τύπος	Προδιαγραφές (mm)	Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)	Μέγεθος Στόμιου Εισαγωγής (mm)	Μέγεθος Εκφόρτωσης (mm)	Χωρητικότητα (t/h)
PCK66	Ø 600x600	1250	Άνθρακας 120 Πέτρα 180	≤3	Άνθρακας 15-30 Πέτρα 8-20
	Ισχύς Κινητήρα (kW)		Διαστάσεις (mm)		Βάρος (t)
	45		1560x1230x972		2.35

Πίνακας 18: Προδιαγραφές του σφυρόμυλου που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση.

Στον σφυρόμυλο θα γίνει διαχωρισμός ποιά κομματάκια θα χρειαστούν **θερμική κατεργασία (thermal treatment)** ή ποιά θα πάνε κατ' ευθείαν στον **βαλλιστικό διαχωρισμό (ballistic separation)**. Ο διαχωρισμός αυτός θα γίνει με ένα **κόσκινο (sieve)** το οποίο έχει ενσωματωθεί στην χοάνη του σφυρόμυλου. Το κόσκινο θα είναι υπό κλίση διοχετεύοντας τα κομματάκια των κλασμάτων που είναι μεγαλύτερα από 1 mm στην θερμική κατεργασία ενώ τα υπόλοιπα κατ'ευθείαν στον βαλλιστικό διαχωρισμό με ξεχωριστά κανάλια.

Η **θερμική κατεργασία** είναι μια τεχνολογία που βασίζεται ουσιαστικά στην διαδικασία μιας ελεγχόμενης πυρόλυσης των οργανικών συστατικών με επακόλουθη θερμική καταστροφή τους σε αέριο και σύγχρονη διαπύρωση των ανόργανων αποβλήτων (Εικόνα 8.19). Η τεχνολογία της πυρόλυσης πραγματοποιείται σε φούρνους σύμφωνα με τους κανονισμούς και με σεβασμό προς το περιβάλλον. Αυτό το σύστημα έχει το βασικό χαρακτηριστικό ότι η υπολειμματική τέφρα είναι απολύτως αδρανής επειδή η ασβεστοποίηση του υλικού εξαλείφει όλα τα οργανικά μέρη. Αυτό εξασφαλίζει μία σχεδόν πλήρη ανάκτηση του μετάλλου. Όμως, η κατάργηση των οργανικών μερών συνεπάγεται με την απουσία ανθρακούχων υπολειμμάτων που μπορεί να είναι η αιτία της απώλειας του πολύτιμου υλικού κατά τη διάρκεια της επόμενης φάσης τήξης. Εγγυάται άμεσα το πέρασμα των αναθυμιάσεων "σε φλόγα" και ως εκ τούτου σε μια σταθερή θερμοκρασία άνω των 1300 °C (θερμοκρασία φλόγας).^[116]

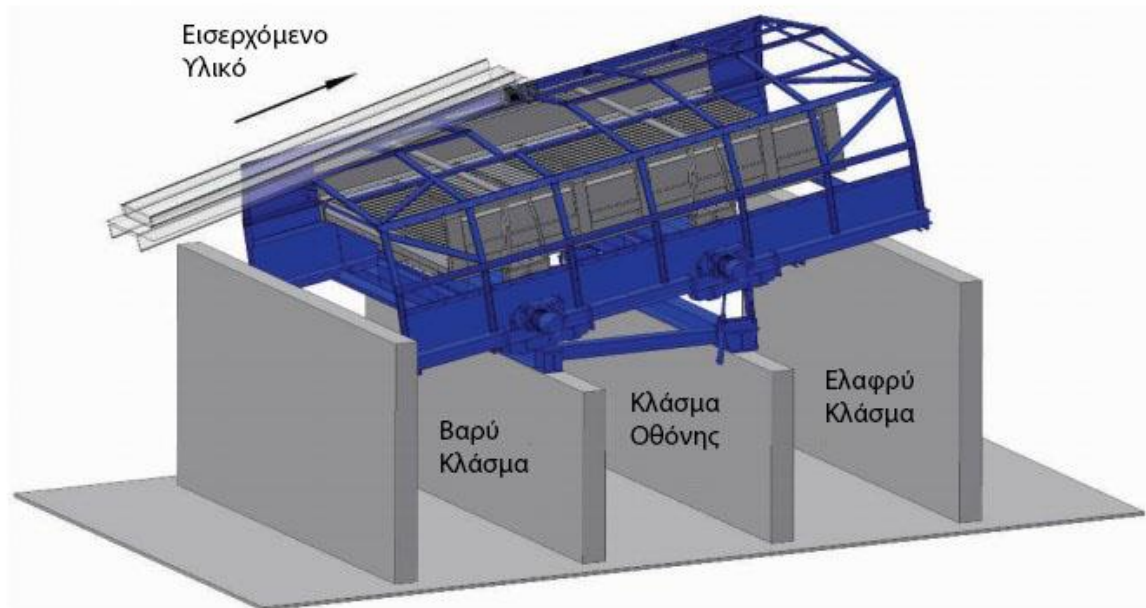


Εικόνα 8.19: Θερμική κατεργασία σε φούρνο πυρόλυσης (thermal treatment).

Τεχνικά Χαρακτηριστικά	FI/50
Χωρητικότητα Αντιδραστήρα	50 litres
Βάρος κάθε αποτεφρωτήρα	~ 600 kg
Ωριαία δυναμικότητα επεξεργασίας	3-4 kg
Παροχή ηλεκτρικού ρεύματος	3 kW
Ονομαστική Ισχύς	10 kW
Μέγιστη ισχύς	30 kW
Θερμοκρασία εργασίας	850 ° C
Μέγιστη Θερμοκρασία	1200 ° C
Κανονική πίεση παροχής Αερίου	22,5 – 35 mbar
Συνολικές διαστάσεις	1600x1600x2900 mm (Πλάτος x Βάθος x Ύψος)
Απαραίτητη επιφάνεια χώρου	~20 m ² , με ύψος 3 m

Πίνακας 19: Τεχνικά χαρακτηριστικά του φούρνου πυρόλυσης κατά την θερμική κατεργασία.

Το κόσκινο θα διοχετεύσει τα κομματάκια των κλασμάτων που είναι μικρότερα από 1 mm κατ'ευθείαν στον **βαλλιστικό διαχωρισμό**. Ο βαλλιστικός διαχωριστής χωρίζει τα διάφορα υλικά σε τρία μέρη (Εικόνα 8.20). Ένα κουπί φέρνει τα συστατικά μέσα στο ρεύμα του υλικού σε μια βαλλιστική πτητική τροχιά. Το κάθε συστατικό έχει άλλες φυσικές ιδιότητες και έτσι διαγράφεται διαφορετική καμπύλη πτήσης. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μία ακριβής ταξινόμηση των υλικών σε βαριά και ελαφρά, με μεγάλη επιφάνεια και συμπαγή, κτλ. Ο αριθμός των στροφών μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της λειτουργίας και μπορεί να προσαρμοστεί ο διαχωρισμός ανάλογα με τις ιδιότητες των υλικών. Το πλεονέκτημα του βαλλιστικού διαχωριστή είναι ότι έχει την δυνατότητα μεγάλης παροχής και ταυτόχρονα χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η εύκολη συντήρηση ολοκληρώνεται καθώς η πρόσβαση στο σύστημα μετάδοσης κίνησης είναι άμεση. Τέλος προσαρμόζεται εύκολα για διαφορετικά υλικά.^[117]

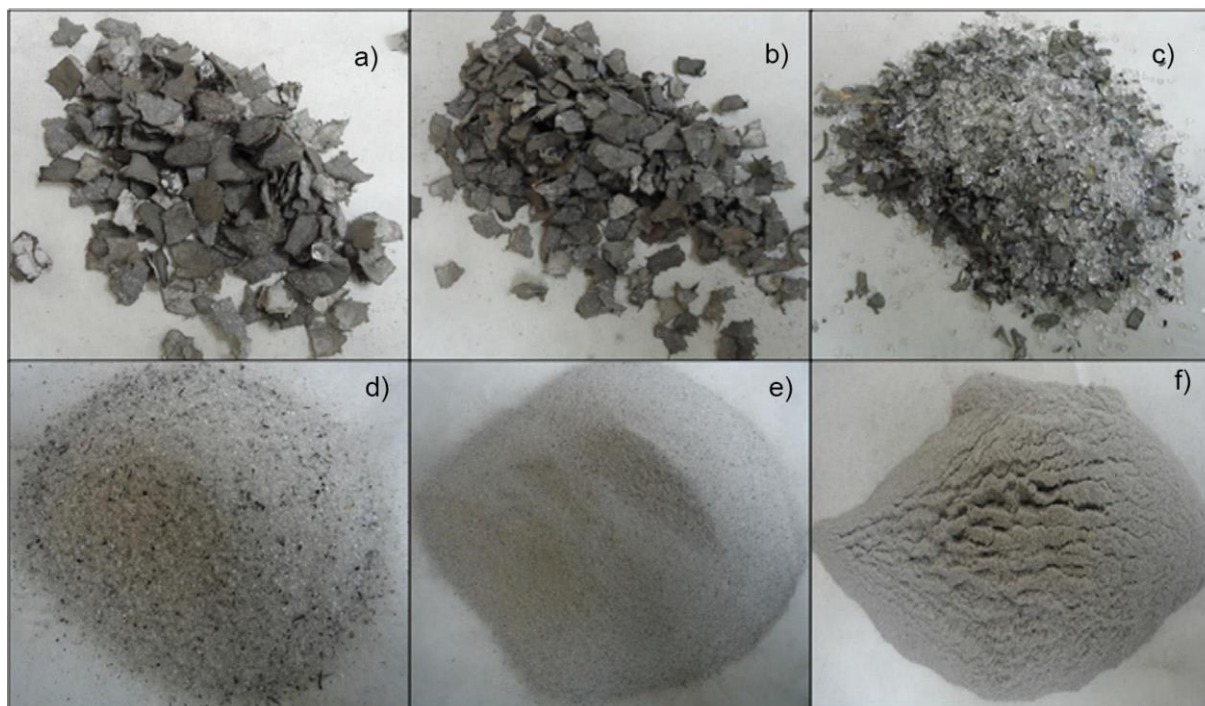


Εικόνα 8.20: Το μηχάνημα του βαλλιστικού διαχωριστή.

Πεδίο Εφαρμογής	Οικιακά απορρίμματα, βιολογικά απορρίμματα, επαγγελματικά απορρίμματα, κτλ.
Πλάτος Εργασίας	4000 mm
Ισχύς Κινητήρα	30 kW
Παροχή	~ 90 ² χώρα

Πίνακας 20:Τεχνικά χαρακτηριστικά του βαλλιστικού διαχωριστή (ballistic separation).

Σύμφωνα με τα αρχεία της First Solar, μετά τον βαλλιστικό διαχωρισμό θα υπάρξουν κλάσματα γυαλιού, κλάσματα λεπτά τα οποία δεν θα ξαναχρησιμοποιηθούν και κλάσματα ανάκτησης CdTe. Η διαδικασία έχει εξασφαλίσει το 100% του φωτοβολταϊκού CdTe μέχρι και τον σφυρόμυλο. Στο κόσκινο θα διαχωριστεί το 15% το οποίο λόγω μεγέθους (>1 mm) θα υποστεί θερμική κατεργασία και το 85% θα εισχωρήσει κατ' ευθείαν στον βαλλιστικό διαχωριστή. Το υλικό που θα υποστεί θερμική κατεργασία θα μειωθεί στο 10%. Επομένως το συνολικό ποσοστό που θα αποδοθεί απ' όλη την διαδικασία θα είναι 95%. Άρα, **το γυαλί (glass cullets)** που θα μπορέσει να ανακτηθεί είναι 85% δηλαδή 9,69 kg και το **τελλουριούχο κάδμιο (CdTe recovery)** θα ανακτηθεί σε ποσοστό 90% δηλαδή 0,0126 kg. Τέλος, θα υπάρξουν κάποια **υλικά (unused materials)** τα οποία δεν θα μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν και είναι περίπου 0,3654 kg.^{[35],[60]}



Εικόνα 8.21: Κλάσματα μετά τον τεμαχισμό και τον σφυρόμυλο από CdTe λεπτού υμενίου φωτοβολταϊκά a) $d > 8$ mm, b) $5 < d < 8$ mm, c) $1 < d < 5$ mm, d) $0.4 < d < 1$ mm, e) $0.08 < d < 0.4$ mm, f) $d < 0.08$ mm

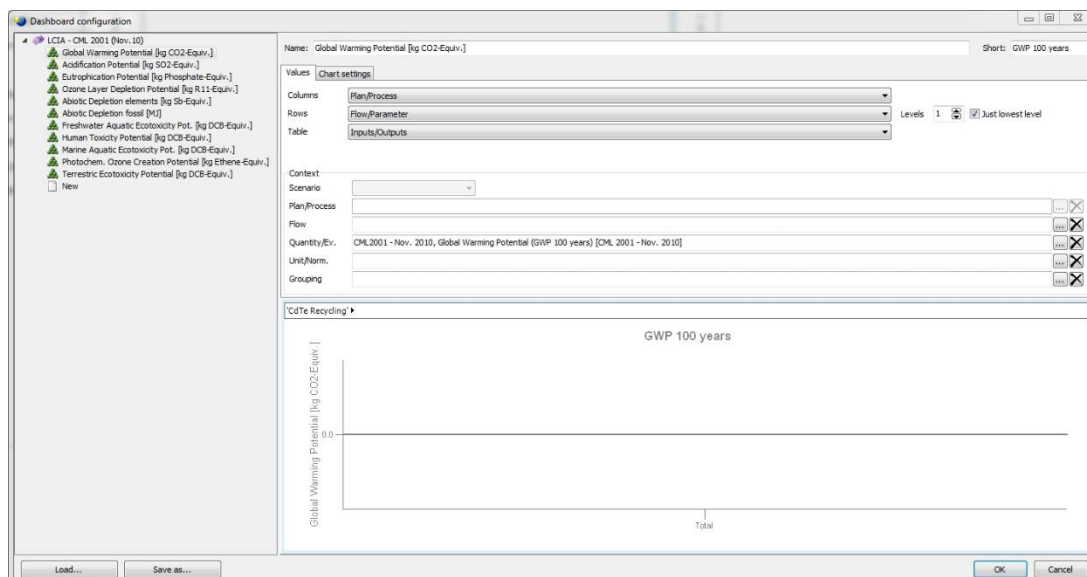
Τα κλάσματα που λαμβάνονται μέσω αυτής της διαδικασίας είναι κλάσμα γυαλιού $0.08 < d < 1$ mm (Εικόνα 8.21 d και e), λεπτό κλάσμα $d < 0.08$ mm (Εικόνα 8.21 f) και ένα ελαφρύτερο και μεγαλύτερο κλάσμα που αποτελείται από φύλλα EVA (Εικόνα 8.21 a και b) ακόμη και σε μίγμα με το γυαλί (Εικόνα 8.21 c). Αυτά τα κλάσματα $d > 1$ mm είχαν το χαμηλότερο ποσοστό εκείνων που λαμβάνονται με την σύνθλιψη από το σφυρί των μονάδων πυριτίου πιθανώς είναι συνέπεια της μονής στρώσης EVA στα φωτοβολταϊκά CdTe.

Η ολοκλήρωση της ανάλυσης του κύκλου ζωής του φωτοβολταϊκού CdTe λεπτού υμενίου στο πρόγραμμα GaBi έδωσε σαν αποτέλεσμα αρκετά συγκρίσιμα διαγράμματα τα οποία θα παρουσιαστούν παρακάτω. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να γίνει μια αξιολόγηση του κύκλου ζωής των επιπτώσεων. Αυτές οι μέθοδοι συνεχώς ερευνώνται και να αναπτύσσονται από διαφορετικές επιστημονικές ομάδες που βασίζονται σε διαφορετικές μεθοδολογίες.

Τα προβλήματα που ανήκουν στην κατηγορία των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αναπαριστώνται με την μέθοδο **CML** (Centre of Environmental Science, University of Leiden, the Netherlands) και την μέθοδο **TRACI** (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts) στις οποίες έχουν ταξινομηθεί πάνω από χίλιες ουσίες και χαρακτηριστεί σύμφωνα με το βαθμό στον οποίο συμβάλλουν σε μια λίστα κατηγοριών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η ανάλυση του Κύκλου Ζωής των Επιπτώσεων (**LCIA**) εντοπίζει και αξιολογεί την ποσότητα και τη σημασία των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την απογραφή του κύκλου ζωής (LCI). Γίνεται αξιολόγηση του κύκλου ζωής επηρεάζοντας τις κατηγορίες και τις πιθανές επιπτώσεις τους ποσοτικά σύμφωνα με τους χαρακτηριστικούς παράγοντες. Υπάρχουν διεργασίες στο GaBi σύμφωνα με το Διεθνές Σύστημα Δεδομένων για τον Κύκλο Ζωής (**ILCD**) της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι διαδικασίες κατηγοριοποιούνται, κυρίως για να γίνουν καλύτερα αντιληπτοί οι ρόλοι τους μέσα σε ένα σύστημα. Όλα τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται σε διαγράμματα μέσω του EXCEL του 2013 για καλύτερη ανάλυση και παρουσίαση (Εικόνα 8.22).

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου



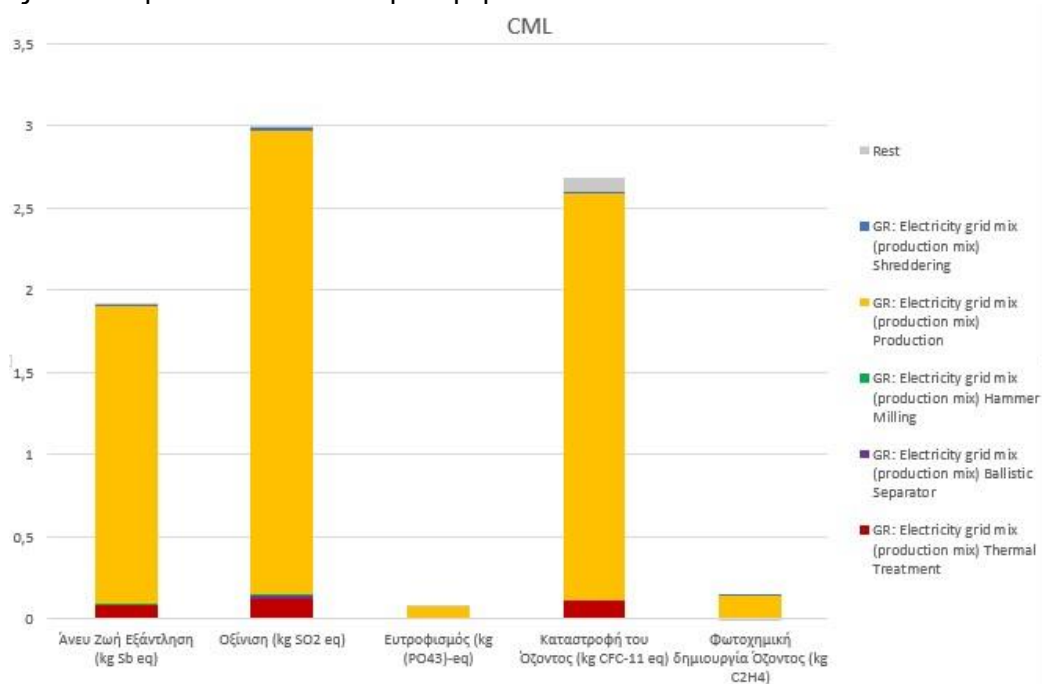
Εικόνα 8.22: Η εικόνα από το GaBi στην οποία δεν μπορούν να διευκρινιστούν οι λέξεις.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

• Μέθοδος CML

	Άνευ Ζωή Εξάντληση (kg Sb eq)	Οξίνιση (kg SO ₂ eq)	Ευτροφισμός (kg (PO ₄)-eq)	Καταστροφή του Όζοντος (kg CFC-11 eq)	Φωτοχημική δημιουργία Όζοντος (kg C ₂ H ₄)
GR: Electricity grid mix (production mix) Thermal Treatment	0,081242046	0,126965834	0,003152194	0,111384826	0,006260839
GR: Electricity grid mix (production mix) Ballistic Separator	0,007221515	0,011285852			0
GR: Electricity grid mix (production mix) Hammer Milling	0,008124205	0,012696583	0,000315219		0,000626084
GR: Electricity grid mix (production mix) Production	1,805378802	2,821462974	0,070048751	2,475218347	0,139129761
GR: Electricity grid mix (production mix) Shredding	0,010832273	0,016928778	0,000420293	0,01485131	0,000834779
Rest	0,0054412	0,003554074	0,001158746	0,078218387	-0,0003986

Πίνακας 21: Δεδομένα από το GaBi για την μέθοδο CML.

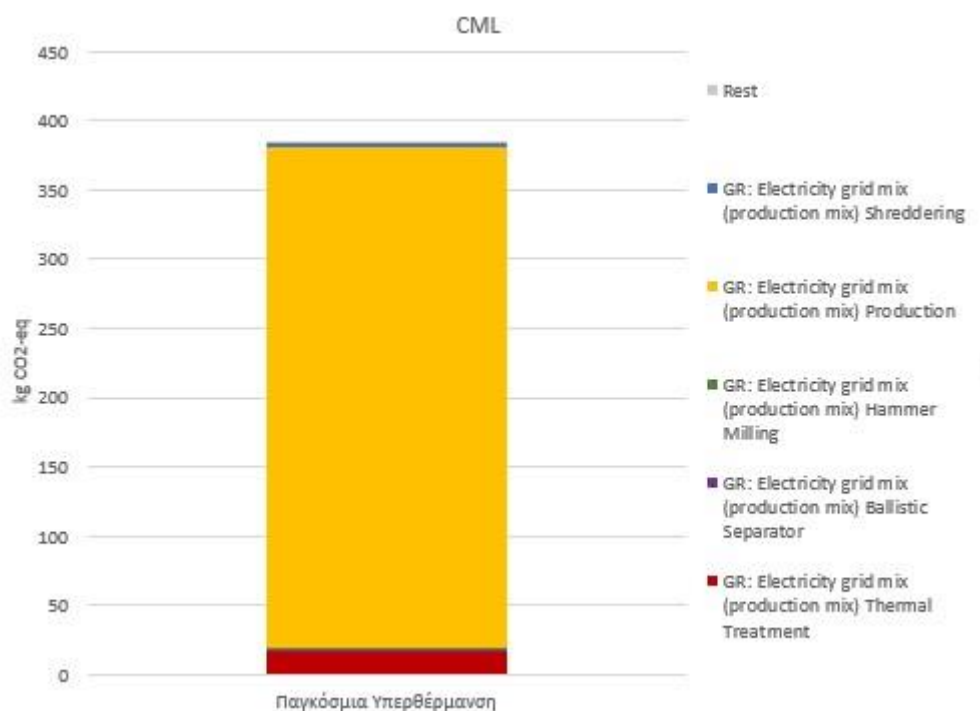


Εικόνα 8.23: Απεικόνιση μεθόδου CML.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

	Παγκόσμια Υπερθέρμανση kg CO ₂ -eq
GR: Electricity grid mix (production mix) Thermal Treatment	16,29312208
GR: Electricity grid mix (production mix) Ballistic Separator	1,448277519
GR: Electricity grid mix (production mix) Hammer Milling	1,629312208
GR: Electricity grid mix (production mix) Production	362,0693797
GR: Electricity grid mix (production mix) Shredding	2,172416278
Rest	1,392171444

Πίνακας 22: Δεδομένα για την Παγκόσμια Υπερθέρμανση για την μέθοδο CML.

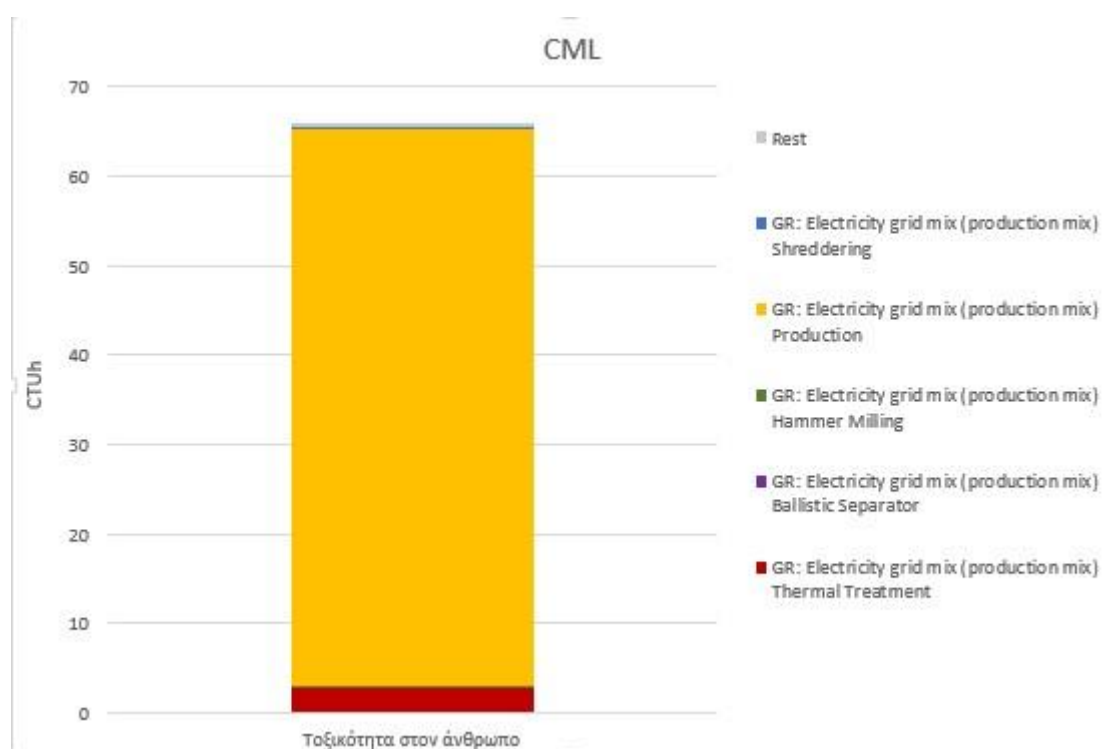


Εικόνα 8.24: Η Παγκόσμια Υπερθέρμανση σύμφωνα με την μέθοδο CML.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

	Τοξικότητα στον άνθρωπο (CTUh)
GR: Electricity grid mix (production mix) Thermal Treatment	2,798000806
GR: Electricity grid mix (production mix) Ballistic Separator	
GR: Electricity grid mix (production mix) Hammer Milling	0,279800081
GR: Electricity grid mix (production mix) Production	62,17779569
GR: Electricity grid mix (production mix) Shredding	0,373066774
Rest	0,294592403

Πίνακας 23: Δεδομένα για την Τοξικότητα στον άνθρωπο με την μέθοδο CML.



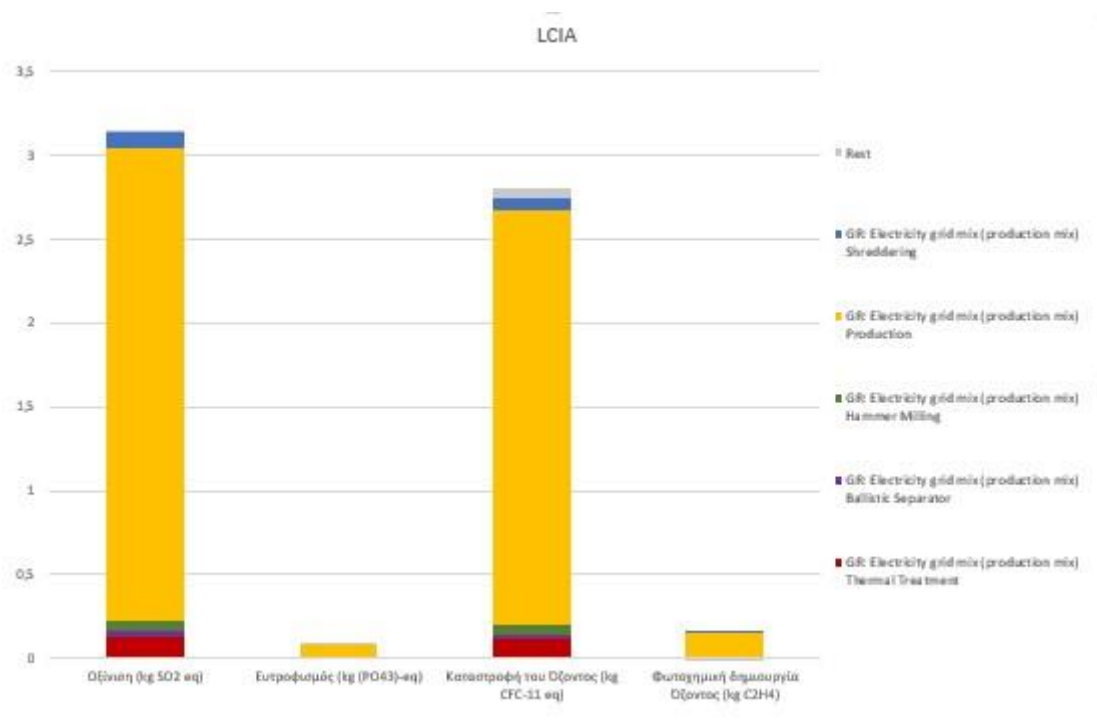
Εικόνα 8.25: Η τοξικότητα στον άνθρωπο στη μέθοδο CML.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

• Μέθοδος LCIA

	Οξίνιση (kg SO ₂ eq)	Ευτροφισμός (kg (PO ₄₃)-eq)	Καταστροφή του Όζοντος (kg CFC-11 eq)	Φωτοχημική δημιουργία Όζοντος (kg C ₂ H ₄)
GR: Electricity grid mix (production mix) Thermal Treatment	0,126965834	0,003152194	0,111384826	0,006260839
GR: Electricity grid mix (production mix) Ballistic Separator	0,033857556	0,000840585	0,02970262	0,001669557
GR: Electricity grid mix (production mix) Hammer Milling	0,063482917	0,001576097	0,055692413	0,00313042
GR: Electricity grid mix (production mix) Production	2,821462974	0,070048751	2,475218347	0,139129761
GR: Electricity grid mix (production mix) Shreddering	0,084643889	0,002101463	0,07425655	0,004173893
Rest	0,003554074	0,000878551	0,057179031	-0,000955119

Πίνακας 24: Δεδομένα από το GaBi για την μέθοδο LCIA.

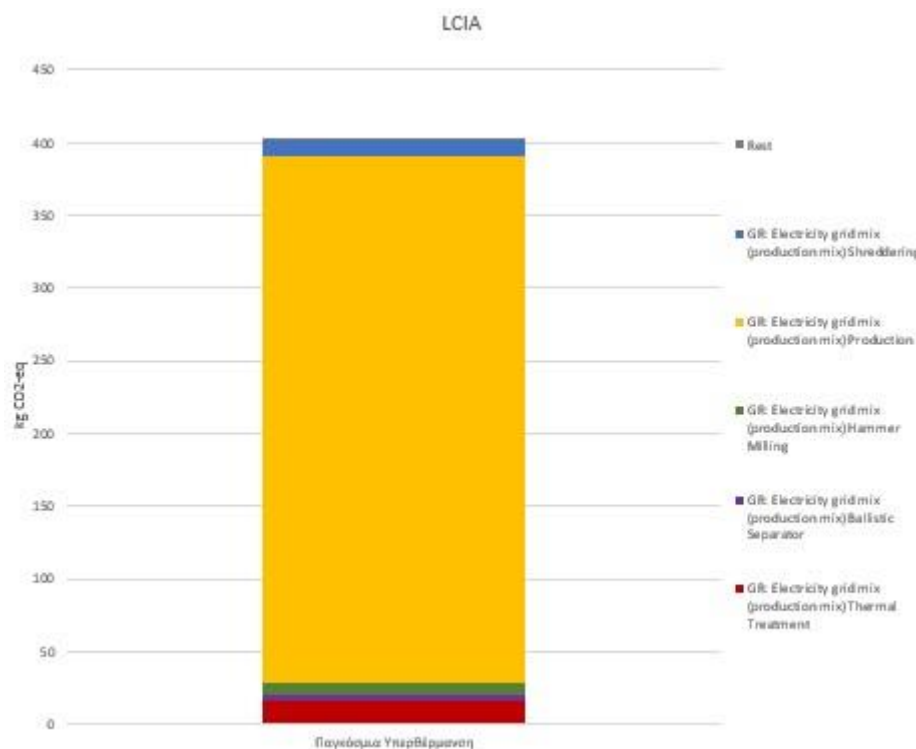


Εικόνα 8.26: Η απεικόνιση της μεθόδου LCIA σε διάγραμμα.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

	Παγκόσμια Υπερθέρμανση kg CO ₂ -eq
GR: Electricity grid mix (production mix) Thermal Treatment	16,29312208
GR: Electricity grid mix (production mix) Ballistic Separator	4,344832556
GR: Electricity grid mix (production mix) Hammer Milling	8,146561042
GR: Electricity grid mix (production mix) Production	362,0693797
GR: Electricity grid mix (production mix) Shreddering	10,86208139
Rest	1,392171444

Πίνακας 25: Δεδομένα για την Παγκόσμια Υπερθέρμανση για την μέθοδο LCIA.



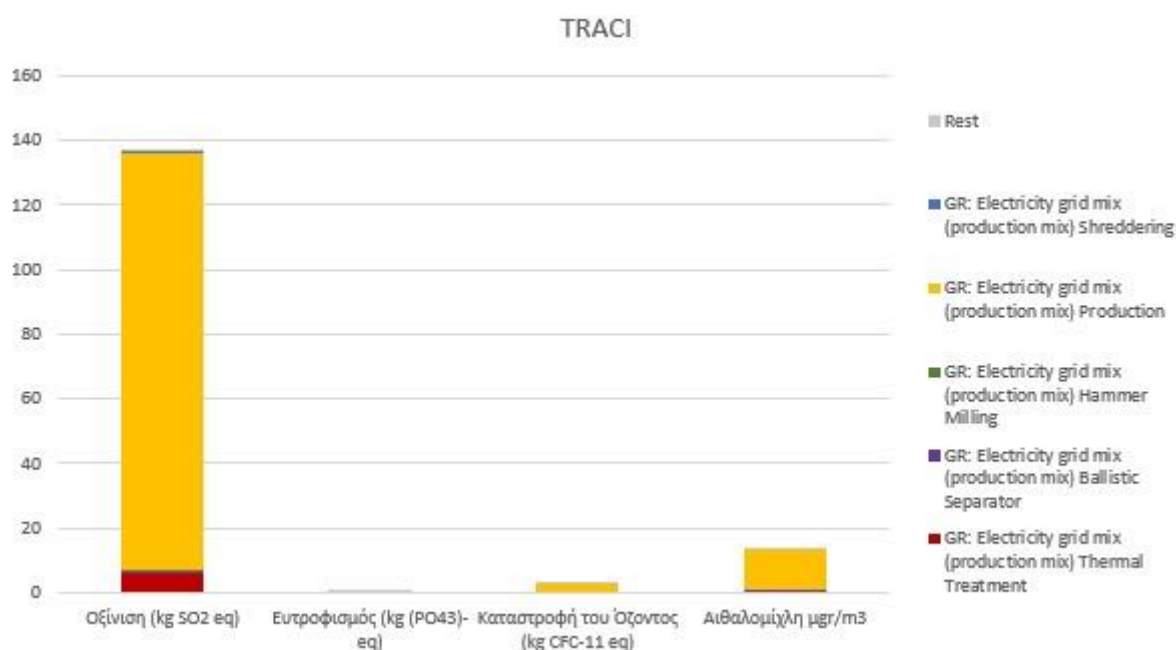
Εικόνα 8.27: Η Παγκόσμια Υπερθέρμανση σύμφωνα με την μέθοδο LCIA.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

• Μέθοδος TRACI

	Οξίνιση (kg SO ₂ eq)	Ευτροφισμός (kg (PO ₄)-eq)	Καταστροφή του Όζοντος (kg CFC-11 eq)	Αιθαλομίχλη μgr/m ³
GR: Electricity grid mix (production mix) Thermal Treatment	5,809743964	0,001262635	0,118486352	0,568407822
GR: Electricity grid mix (production mix) Ballistic Separator	0,516421686			0,05052514
GR: Electricity grid mix (production mix) Hammer Milling	0,580974396			0,056840782
GR: Electricity grid mix (production mix) Production	129,1054214	0,028058549	2,633030036	12,63128493
GR: Electricity grid mix (production mix) Shredding	0,774632529	0,000168351	0,01579818	0,07578771
Rest	0,250853303	0,000825184	0,083191406	0,08611185

Πίνακας 26: Τα δεδομένα από το πρόγραμμα GaBi για την μέθοδο TRACI.

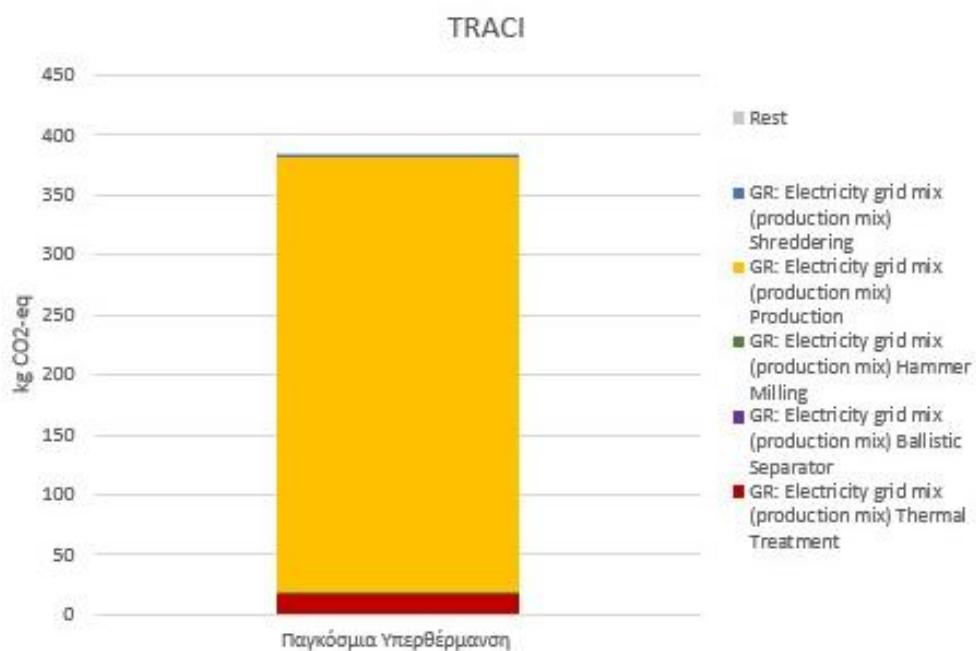


Εικόνα 8.28: Η απεικόνιση της μεθόδου TRACI σε διάγραμμα

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

	Παγκόσμια Υπερθέρμανση kg CO ₂ -eq
GR: Electricity grid mix (production mix) Thermal Treatment	16,29312209
GR: Electricity grid mix (production mix) Ballistic Separator	1,448277519
GR: Electricity grid mix (production mix) Hammer Milling	1,629312209
GR: Electricity grid mix (production mix) Production	362,0693797
GR: Electricity grid mix (production mix) Shredding	2,172416278
Rest	1,392171444

Πίνακας 27: Δεδομένα για την Παγκόσμια Υπερθέρμανση για την μέθοδο TRACI.

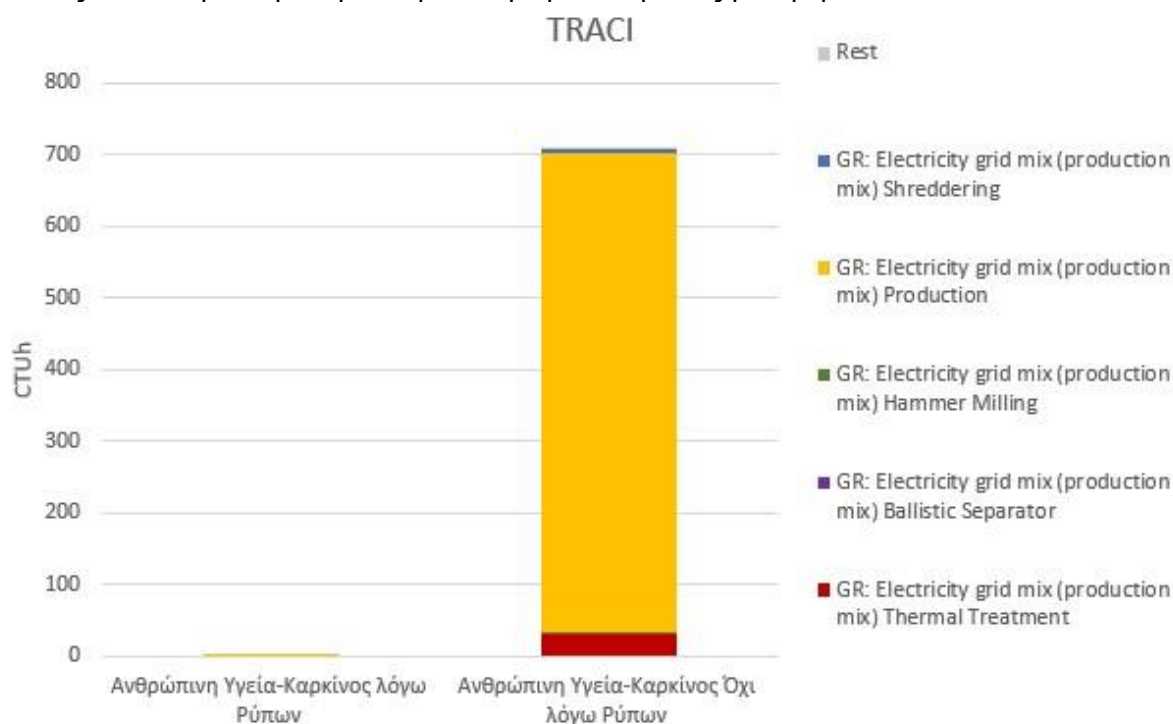


Εικόνα 8.29: Η Παγκόσμια Υπερθέρμανση σύμφωνα με την μέθοδο TRACI.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

	Ανθρώπινη Υγεία- Καρκίνος λόγω Ρύπων (CTUh)	Ανθρώπινη Υγεία- Καρκίνος Όχι λόγω Ρύπων (CTUh)
GR: Electricity grid mix (production mix) Thermal Treatment	5,59398E-05	30,1420887
GR: Electricity grid mix (production mix) Ballistic Separator		
GR: Electricity grid mix (production mix) Hammer Milling	5,59398E-06	3,01420887
GR: Electricity grid mix (production mix) Production	0,001243106	669,8241934
GR: Electricity grid mix (production mix) Shredding	7,45864E-06	4,01894516
Rest	6,75256E-06	2,779750416

Πίνακας 28: Δεδομένα για την Ανθρώπινη Υγεία-Καρκίνος με την μέθοδο TRACI.



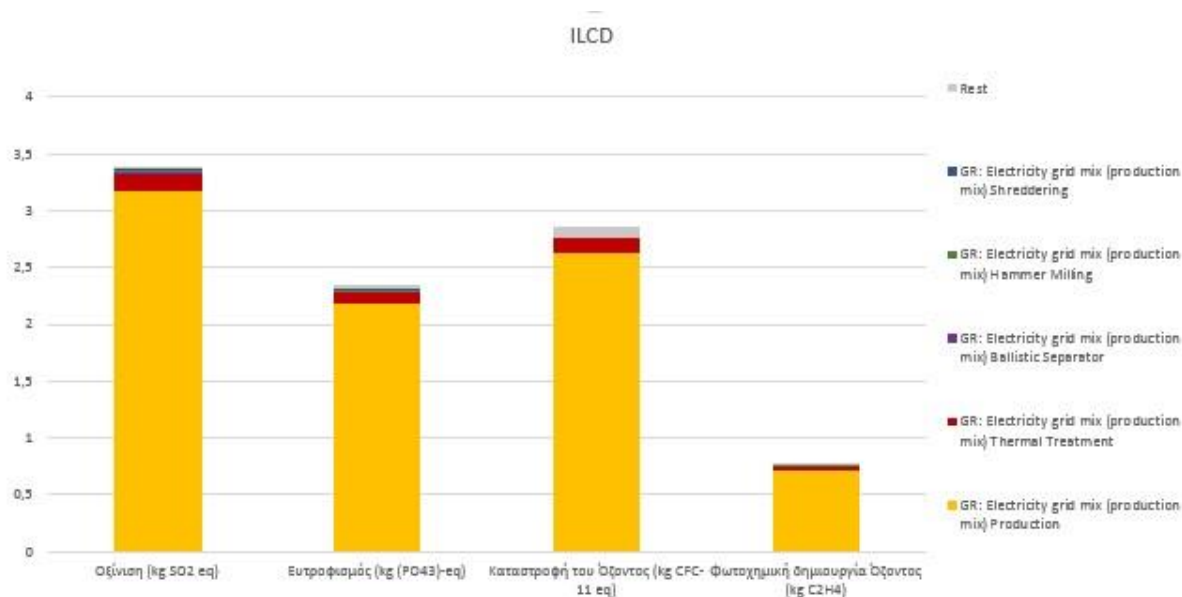
Εικόνα 8.30: Απεικόνιση της Ανθρώπινης Υγείας-Καρκίνος με την μέθοδο TRACI.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

- Μέθοδος ILCD

	Οξίνιση (kg SO ₂ eq)	Ευτροφισμός (kg (PO ₄)-eq)	Καταστροφή του Όζοντος (kg CFC-11 eq)	Φωτοχημική δημιουργία Όζοντος (kg C ₂ H ₄)
GR: Electricity grid mix (production mix) Thermal Treatment	0,142977721	0,098379111	0,118468109	0,032303284
GR: Electricity grid mix (production mix) Ballistic Separator	0,012709131			0,002871403
GR: Electricity grid mix (production mix) Hammer Milling	0,014297772	0,009837911		0,003230328
GR: Electricity grid mix (production mix) Production	3,177282683	2,186202471	2,632624638	0,717850749
GR: Electricity grid mix (production mix) Shreddering	0,019063696	0,013117215	0,015795748	0,004307104
Rest	0,005077752	0,032525991	0,083187933	0,001154241

Πίνακας 29: Δεδομένα από το πρόγραμμα GaBi για την μέθοδο ILCD.

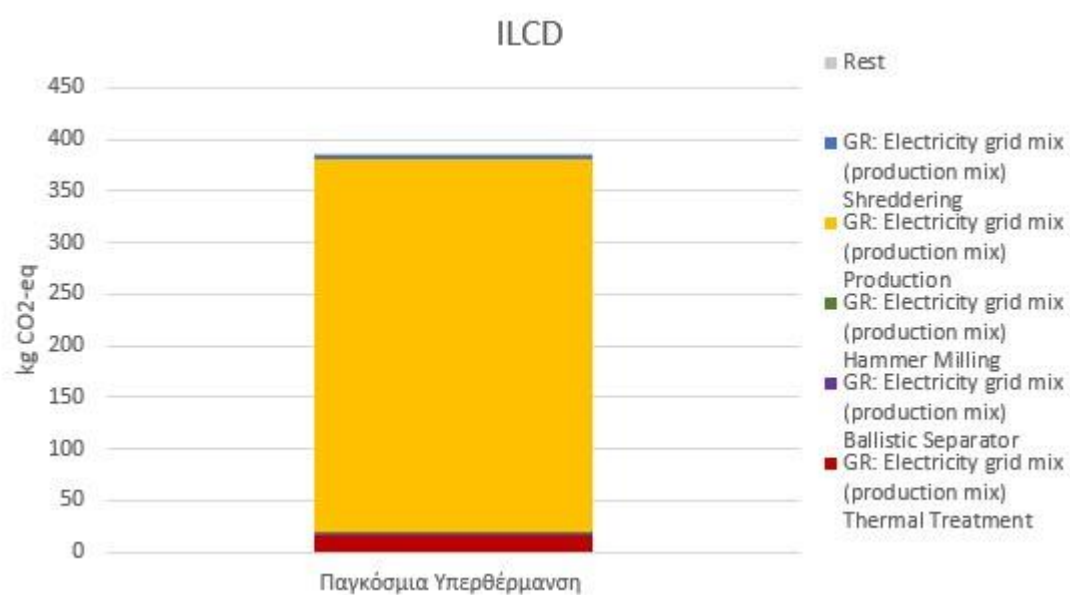


Εικόνα 8.31: Η απεικόνιση της μεθόδου ILCD σε διάγραμμα

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

	Παγκόσμια Υπερθέρμανση kg CO ₂ -eq
GR: Electricity grid mix (production mix) Thermal Treatment	16,30435953
GR: Electricity grid mix (production mix) Ballistic Separator	1,449276403
GR: Electricity grid mix (production mix) Hammer Milling	1,630435953
GR: Electricity grid mix (production mix) Production	362,3191007
GR: Electricity grid mix (production mix) Shredding	2,173914604
Rest	1,40356108

Πίνακας 30: Δεδομένα για την Παγκόσμια Υπερθέρμανση για την μέθοδο ILCD.

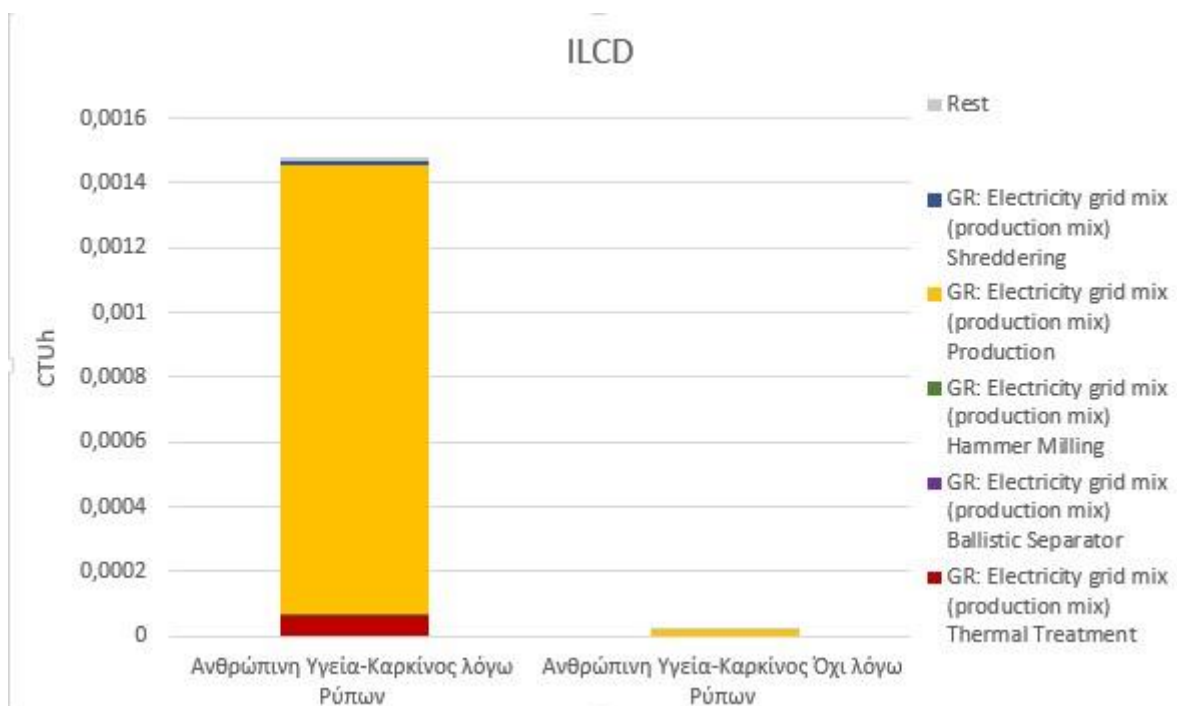


Εικόνα 8.32: Η Παγκόσμια Υπερθέρμανση σύμφωνα με την μέθοδο ILCD.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

	Ανθρώπινη Υγεία-Καρκίνος λόγω Ρύπων (CTUh)	Ανθρώπινη Υγεία-Καρκίνος Όχι λόγω Ρύπων (CTUh)
GR: Electricity grid mix (production mix) Thermal Treatment	6,25258E-05	8,55104E-07
GR: Electricity grid mix (production mix) Ballistic Separator		
GR: Electricity grid mix (production mix) Hammer Milling	6,25258E-06	
GR: Electricity grid mix (production mix) Production	0,001389463	1,90023E-05
GR: Electricity grid mix (production mix) Shreddering	8,33678E-06	
Rest	1,64961E-05	3,65878E-07

Πίνακας 31:Δεδομένα για την Ανθρώπινη Υγεία-Καρκίνος για την μέθοδο ILCD.



Εικόνα 8.33: Απεικόνιση της Ανθρώπινης Υγείας-Καρκίνος με την μέθοδο ILCD.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

• Energy Pay Back Time

Για τον υπολογισμό του Χρόνου της Ενεργειακής Απόσβεσης (Energy Payback Time), χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δεδομένα.

Εκροές		MJ	Εισροές	MJ
Παραγωγή		1200	Παραγωγή	122
Ανακύκλωση	Μηχάνημα Τεμαχισμού	7,2		
Ανακύκλωση	Σφυρόμυλος	5,4		
Ανακύκλωση	Βαλλιστικός Διαχωριστής	4,8		
Ανακύκλωση	Θερμική Κατεργασία	54		
Μεταφορά	Στον πελάτη	7,72		
Μεταφορά	Από τον πελάτη	7,72		
	Total (MJ)	1286,84		
	Total (kWh)	357,4556		

Πίνακας 32:Δεδομένα εισροής και εκροών ενέργειας απο το GaBi.

Στην συνέχεια, πραγματοποιώντας πράξεις υπολογίστηκαν όλες οι ενέργειες που χρειάστηκαν σε μορφή ποσοστού και συμπληρώθηκε ο παρακάτω πίνακας.^[118]

Με τον τύπο:

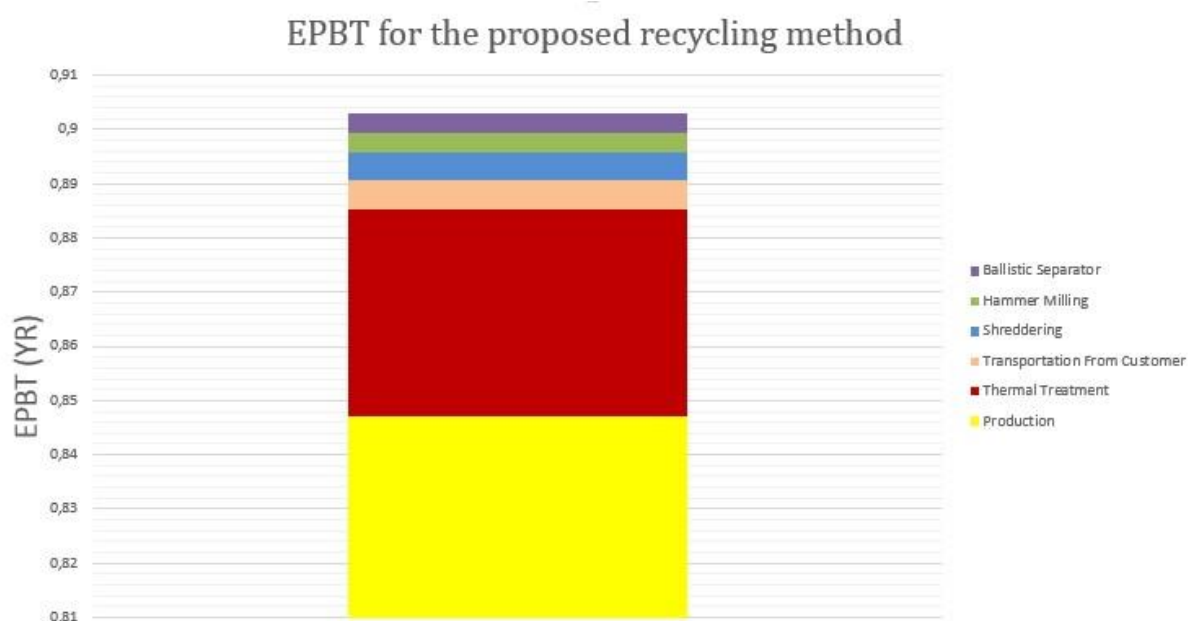
$$EPBT = CED / (E_{\text{annual}} \times \eta_G)$$

Όπου:

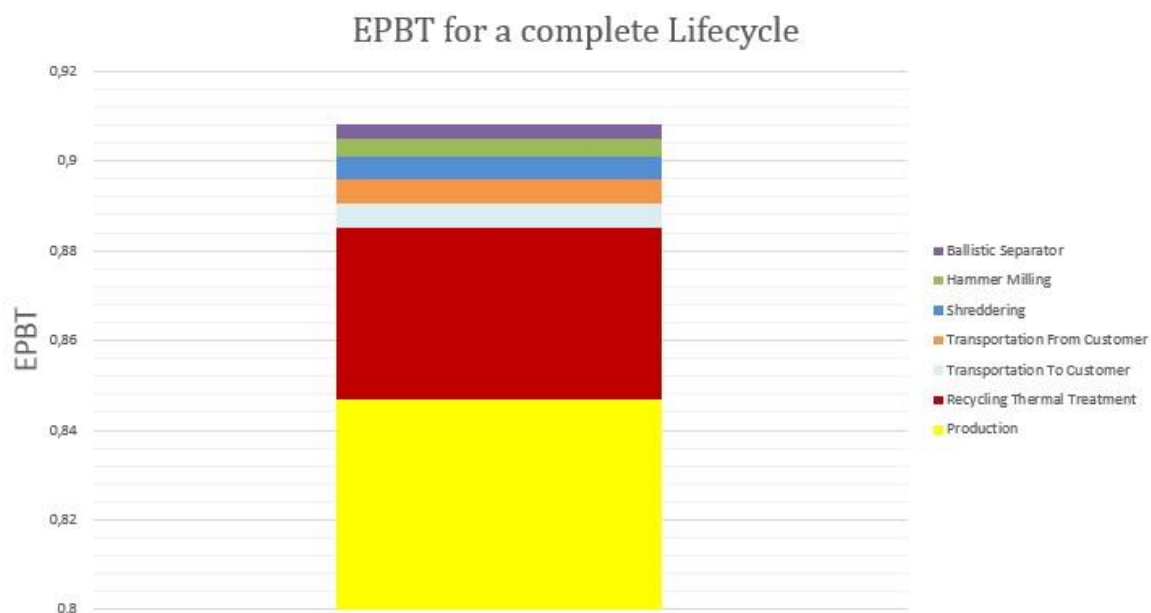
- CED : Η αθροιστική ενεργειακή ζήτηση του συστήματος
 E_{annual} : Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
 η_G : Η αποδοτικότητα του δικτύου.

Εκροές		MJ	%	EPBT %
Παραγωγή		1200	0,932517	0,846994542
Ανακύκλωση	Μηχάνημα Τεμαχισμού	7,2	0,005595	0,005081967
Ανακύκλωση	Σφυρόμυλος	5,4	0,004196	0,003811475
Ανακύκλωση	Βαλλιστικός Διαχωριστής	4,8	0,00373	0,003387978
Ανακύκλωση	Θερμική Κατεργασία	54	0,041963	0,038114754
Μεταφορά	Στον πελάτη	7,72	0,005999	0,005448998
Μεταφορά	Από τον πελάτη	7,72	0,005999	0,005448998
	Total (MJ)	1286,84		
	Total (kWh)	357,4556		
	EPBT	0,908289		

Πίνακας 33:Εξαγωγή Δεδομένων του Χρόνου της Ενεργειακής Απόσβεσης.



Εικόνα 8.34: Απεικόνιση των δεδομένων του Χρόνου της Ενεργειακής Απόσβεσης βάσει της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε στο GaBi.



Εικόνα 8.35: Συνολική Απεικόνιση του Κύκλου Ζωής του CdTe λεπτού υμενίου σε σχέση με τον Χρόνο της Ενεργειακής Απόσβεσης.

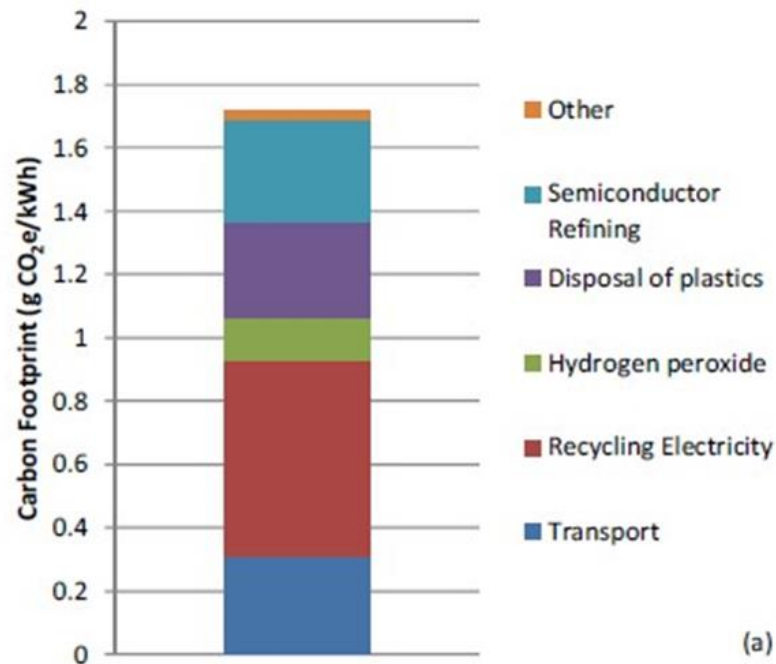
- **Σύγκριση Αποτελεσμάτων**

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον των νέων τεχνολογιών για την ανακύκλωση φωτοβολταϊκών, όπως αποδεικνύεται από τις καινοτόμες κατεργασίες αναπτύχθηκε από την Deutsche Solar για την ανακύκλωση του κρυσταλλικού πυριτίου και από το First Solar για την ανακύκλωση του τελλουριούχου κάδμιου (CdTe). Η αρχική ιδέα της προσομοίωσης του Κύκλου Ζωής του CdTe λεπτού υμενίου ήταν η σύγκριση με παλαιότερα αποτελέσματα. Τα βασικότερα σημεία είναι ο Χρόνος Ενεργειακής Απόσβεσης (Energy Payback Time) και η Υπερθέρμανση του Πλανήτη (Global Warming).

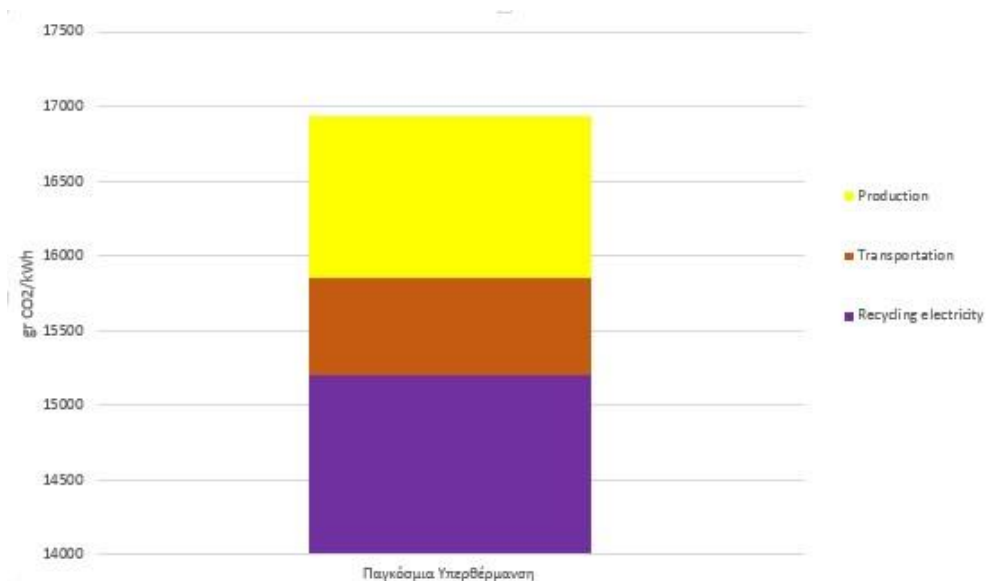
Η ανάλυση του κύκλου ζωής για τα φωτοβολταϊκά τύπου CdTe όσον αφορά τη συλλογή και την ανακύκλωση ελήφθησαν στοιχεία από την First Solar στην Φρανκφούρτη, από το εργοστάσιο της Γερμανίας το 2010 και το 2011. Ως εκ τούτου, η Γερμανική εγκατάσταση υπήρξε ο κύριος αποδέκτης των φωτοβολταϊκών στο τέλος της ζωής τους.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

Εκτός από τα στοιχεία LCI για τη συλλογή και την ανακύκλωση, στη Εικόνα 8.36 η αθροιστική ζήτηση ενέργειας και η υπερθέρμανση του πλανήτη της **USM (ανεπεξεργαστο υλικό ημιαγωγών)** διύλισης είναι 463,7 MJ / kg ξηρού USM και 25,8 kg CO₂ / kg ξηρού USM. Αυτά μετατρέπονται σε μονάδες ανά m² του φωτοβολταϊκού με βάση την εκτιμώμενη ποσότητα τους (~ **16,5 m²**). Έτσι, το τέλος του κύκλου ζωής των CdTe φωτοβολταϊκών και η ανακύκλωση με USM διύλιση συμβάλλει περίπου στο 10% στο συνολικό αποτύπωμα του κύκλου ζωής του άνθρακα (19-21 gr CO₂ / kWh). Στην περίπτωση που προσομοιώθηκε ο κύκλος ζωής του CdTe λεπτού υμενίου στο πρόγραμμα GaBi τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 8.37. Για φωτοβολταϊκά CdTe που καταλαμβάνουν περιοχή **0.72 m²** και η αθροιστική ζήτηση ενέργειας είναι 1286,84 MJ. Παρατηρείται μεγάλη διαφορά στο ενεργειακό αποτύπωμα του διοξειδίου του άνθρακα κατά την υπερθέρμανση του πλανήτη. Αυτό οφείλεται στην διαφορετική επιφάνεια που καταλαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά και φυσικά στην διαφορετική μέθοδο ανακύκλωσης που απαιτεί άλλα ποσά ενέργειας. Στην προσομοίωση που έγινε υπήρχαν περισσότερες μηχανικές διαδικασίες απ' ό,τι στην μέθοδο της Εικόνας 8.36.



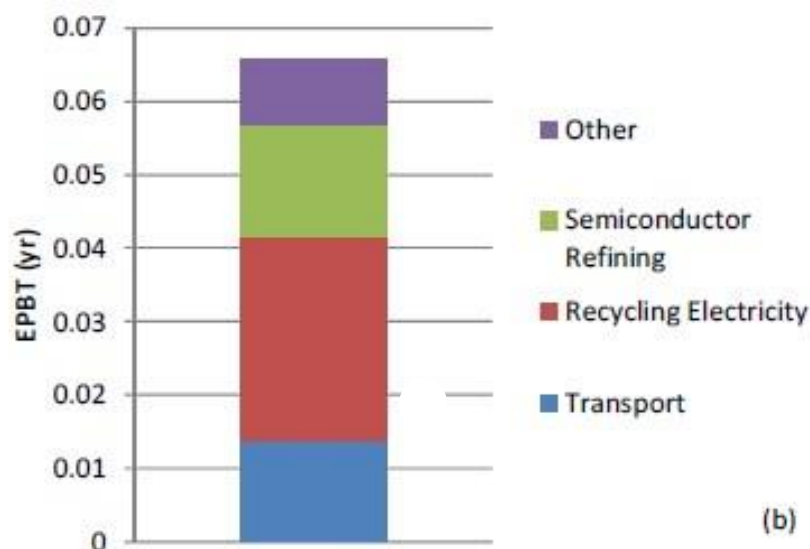
Εικόνα 8.36: Η Υπερθέρμανση του Πλανήτη.



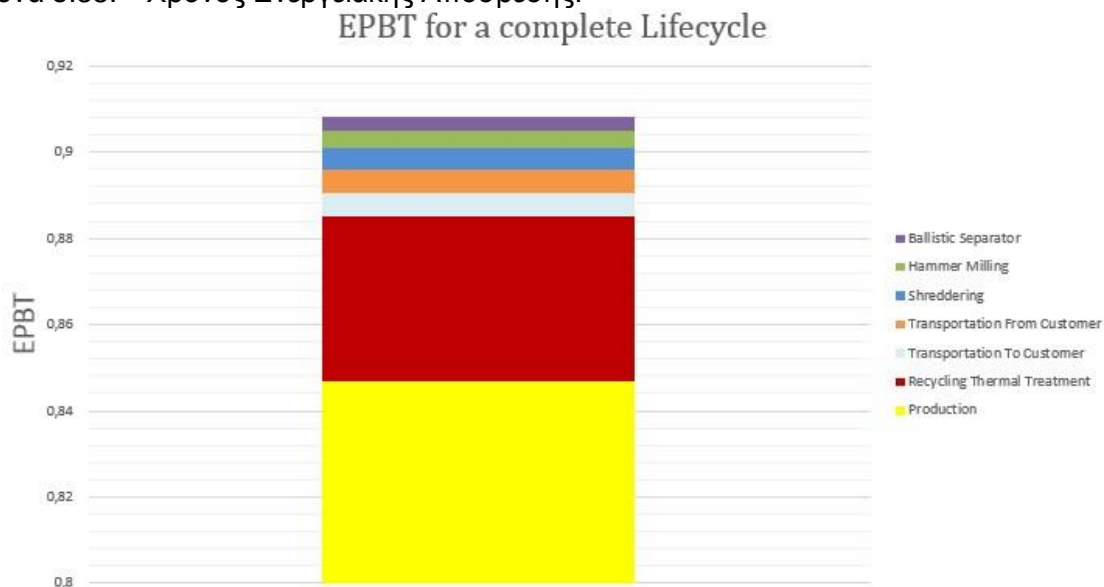
Εικόνα 8.37: Η Υπερθέρμανση του Πλανήτη.

Ανάλυση του Κύκλου Ζωής του Φωτοβολταϊκού CdTe τεχνολογίας Λεπτού Υμενίου

Στο διάγραμμα της Εικόνας 8.38 ο χρόνος ενεργειακής απόσβεσης (0,8 έτη) του CdTe, ή 1,7 gr ισοδύναμου CO₂/kWh και 0,07 χρόνια αντίστοιχα.^{[119] [120]} Η USM διύλιση αντιπροσωπεύει περίπου το ~ 20% των επιπτώσεων στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Άλλο σημαντικό είναι οι μεταφορές κατά τη διάρκεια της συλλογής (~ 20%) και η ηλεκτρική ενέργεια για την ανακύκλωση (~ 40%). με βάση το 12.6% ποσοστό αποδοτικότητας της μετατροπής, το ποσοστό απόδοσης 0.8, του δικτύου της Δυτικής και της Κεντρικής Ευρώπης (UCTE) και με ακτινοβολία (1700 kWh/m²/έτος), **0.67 %/έτος** με ρυθμό υποβάθμισης της μονάδας και **30 έτη** χρόνο ζωής του φωτοβολταϊκού.^[118] Ενώ στην προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα GaBi το διάγραμμα της Εικόνας 8.39 ο χρόνος ενεργειακής απόσβεσης (0,90 έτη) του CdTe για έναν ολοκληρωμένο κύκλο ζωής με βάση το 12.6% ποσοστό αποδοτικότητας της μετατροπής, το ποσοστό απόδοσης είναι 1, του δικτύου της Δυτικής και της Κεντρικής Ευρώπης (UCTE) και με ακτινοβολία (1700 kWh/m²/έτος), **0,65 %/ έτος** με ρυθμό υποβάθμισης της μονάδας και **20 έτη** χρόνο ζωής του φωτοβολταϊκού.



Εικόνα 8.38: Χρόνος Ενεργειακής Απόσβεσης.



Εικόνα 8.39: Χρόνος Ενεργειακής Απόσβεσης.

9. Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία πραγματοποιήθηκε η ανάλυση του Κύκλου Ζωής των Φωτοβολταϊκών, τεχνολογίας CdTe λεπτού υμενίου σε μια γραμμή αποσυναρμολόγησης προσομοιώνοντας την παραγωγή και την ανακύκλωση τους. Αυτό το είδος φωτοβολταϊκού δεν έχει φτάσει ακόμα στο τέλος της ζωής του καθώς είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία και η διαχείριση του δεν έχει ξεκινήσει ακόμα.

Ο σκοπός αυτής της εργασίας ήταν να αναλυθεί από την παραγωγή του φωτοβολταϊκού CdTe η ενέργεια που καταναλώνονταν σε κάθε στάδιο και σε κάθε μηχανήμα που χρησιμοποιήθηκε. Βασική παράμετρος στην διαδικασία ήταν να χρησιμοποιηθούν τα απαραίτητα μηχανήματα με την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Για όλα τα μηχανήματα λήφθηκαν υπόψη οι προδιαγραφές και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους σύμφωνα με τους κατασκευαστές τους. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα GaBi το οποίο παραχωρήθηκε δωρεάν από την ίδια την εταιρεία. Το πρόγραμμα προσομοίωσης GaBi παρέχει την δυνατότητα εξαγωγής πολλών γραφημάτων όσον αφορά τα αποτελέσματα και την δυνατότητα σύγκρισης τους με παλαιότερα.

Στην Ελλάδα έχει υπερκαλυφθεί η δυνατότητα εγκατάστασης φωτοβολταϊκών καθώς δόθηκαν κάποια προνόμια πριν μερικά χρόνια από την κυβέρνηση για την εγκατάστασή τους. Βέβαια, τα περισσότερα φωτοβολταϊκά που εγκαταστάθηκαν ήταν κρυσταλλικού πυριτίου.

Τέλος, θα ήταν καλό να κατασκευαστούν εργοστάσια στην Ελλάδα όπως αυτό που προσομοιώθηκε σε αυτή την εργασία καθώς σύντομα θα ολοκληρώσουν τον κύκλο ζωής τους και θα υπάρξει μεγάλο όφελος από την ανακύκλωση τους.

10. Βιβλιογραφία

- [1] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας – ΚΑΠΕ (CRES), Ocean Energy Conversion in Europe/ Recent advancements and projects, 2006, ISBN 960-86907-3-0
- [2] Γελεγένης Ι., Αξαοπουλος Π.,(2005), “Πηγές Ενέργειας Συμβατικές και Ανανεώσιμες”,Αθήνα,Σύγχρονη Εκδοτική.
- [3] Cooper, P I., Solar Energy, 12, 3 (1969). “The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills. ” United States Journal, 1969 (OSTI ID: 5176208)
- [4] Thekaekara. M. P., Solar Energy, 18.309 (1976). “Solar Radiation Measurement: Techniques and Instrumentation. ” (OSTI ID: 7338394)
- [5] ape.chania.teicrete.gr/gr/files/hpies_I_3.ppt
- [6] Johnson. F. S.. J. of Meteorology, 11. 431 (1954). “The Solar Constant”
- [7] http://www.tm.teicrete.gr/Portals/23/Shmeioseis/anan_piges_enegreias/pdf
- [8] http://www.helapco.gr/ims/file/oikiaka/pv_guide_jan11.pdf
- [9] Καγκαράκη, Κ., (1992), “Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία”, Εκδόσεις Συμμετρία
- [10] Σ.Ν.Καπλάνης, « Μηχανική των Φωτοβολταϊκών συστημάτων », Εκδόσεις Ιων
- [11] http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php
- [12] <http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-627-fundamentals-of-photovoltaics-fall-2013/lecture-videos-slides/2011-lecture-10-wafer-silicon-based-solar-cells-part-i/>
- [13] <http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-627-fundamentals-of-photovoltaics-fall-2013/lecture-videos-slides/2011-lecture-11-wafer-silicon-based-solar-cells-part-ii/>
- [14] Ι.Ε Φραγκιαδάκης, (2007), “Φωτοβολταϊκά Συστήματα”, Εκδόσεις Ζήτη
- [15] T.M. Razykov, C.S. Ferekides, D.Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya, Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects, Solar Energy 85 (2011) 1580–1608
- [16] R.W. Miles, K.M. Hynes, I. Forbes, Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues, Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials 51 (2005) 1e42.
- [17] Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta and Ewan D. Dunlop, Solar cell efficiency tables (version 39), Progress in photovoltaics: Research and applications, Appl. 2012; 20:12–20
- [18] C. Becker, D. Amkreutz, T. Sontheimer, V. Preidel, D. Lockau, J. Haschke, L. Jogschies, C. Klimm, J. J. Merkel, P. Plocica, S. Steffens, B. Rech, Polycrystalline silicon thin-film solar cells: Status and perspectives, Solar Energy Materials & Solar Cells 119 (2013) 112–123.
- [19] http://www.4green.gr/data/news/preview_news/88687.asp
- [20] Brigham Young University, Reactive Ion Etching (RIE), 2009
- [21] <http://www.selasenergy.gr/>
- [22] Κατάλογος Εταιρείας Thin film partners of Greece, www.thinfilm.gr
- [23] Hegedus SS, McCandless BE. CdTe contacts for CdTe/CdS solar cells: effect of Cu thickness surface preparation and re-contacting on device performance and stability. Solar Energy Materials and Solar Cells 2005; 88:75–95.
- [24] <https://www.wbdg.org/resources/bipv.php>
- [25] Κ. Καγκαράκης, “Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία”, Εκδόσεις Συμμετρία,1992
- [26] Βασιλική Περράκη, “Νέες Τεχνολογίες Των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων”,Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2006
- [27] <http://www.e-fotovoltaika.blogspot.gr>
- [28] Ζερβός Α., “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας ”, Πολυτεχνιακές Εκδόσεις, Αθηνά 2005
- [29] <http://www.energotechniki.gr/site/xpage.asp?sid=211&page=banner2>
- [30] Y.Tripanagnostopoulos, P.Yianoulis and D.Patrikios (May-August 1996)” Hybrid PV-TC solar systems” Renewable Energy, Volume 8, Issues 1-4, Pages 505-508
- [31] Ελληνικός Οργανισμός Ανακύκλωσης(ε.ο.αν.)
- [32] A.W. Czanderna, F.J. Pern, Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant, A Critical Review Solar Energy Materials and Solar Cells 43 (1996) 101–181.

- [33] Solar cells_Materials Manufacture and OperationsElsevier,2006
- [34] Οδηγία 2012/19/ΕΕ Του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 4ης Ιουλίου 2012 σχετικά με τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ)
- [35] G. Granata, F.Pagnanelli, E.Moscardini, T.Havlik, L.Toro, Recycling of photovoltaic panels by physical operations, Solar Energy Materials & Solar Cells 123 (2014) 239–248.
- [36] Jun-Ki Choi, Vasilis Fthenakis, Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro-perspectives, Journal of Cleaner Production 66 (2014) 443e449.
- [37] Anja Müller, Karsten Wambach and Erik Alsema, Life Cycle Analysis of Solar Module Recycling Process, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 895 © 2006 Materials Research Society
- [38] Vasilis M. Fthenakis, End-of-life management and recycling of PV modules, Energy Policy 28 (2000) 1051}1058.
- [39] Okopol 2007. Study on the development of a take back and recovery system for photovoltaic products
- [40] <http://www.diaamath.gr>
- [41] K. Sakuta et al : Attempt to recover silicon PV cells from modules for recycling 2nd world conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion July 1998 Vienna
- [42] T. Bruton et al : Recycling of high value, high energy content components of silicon PV modules, 12 th European Photovoltaic Solar Energy Conference April 1994 Amsterdam
- [43] K. Wambach : Recycling of PV modules 2nd World Conference on photovoltaic Solar Energy conversion July 1998 Vienna
- [44] L. Frisson et al : Cost effective recycling of PV modules and the impact on environmental, life cycle, energy payback time and cost 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy conversion July 1998 Vienna
- [45] <http://2011.solarteam.org/news/recycling-methods-for-used-photovoltaic-panels>.
- [46] K.Wambach, E.Bombach, A.Müller, I.Röver, Recycling of solar cells and modules – recent improvements, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain (2005) .
- [47] Ewa Klugmann-Radziemska, Piotr Ostrowski, Kazimierz Drabczyk, Piotr Panek, Marek Szkodo, Experimental validation of crystalline silicon solar cells recycling by thermal and chemical methods, Solar Energy Materials & Solar Cells 94 (2010) 2275–2282.
- [48] <http://www.renewableenergyworld.com/articles/print/volume-12/issue-2/solar-energy/light-cycle-recycling-pv-materials.html>
- [49] Hering G. Das Jahr des Tigers. Photon 2011; 2011 (04): 38–71.
- [50] Romeo A, Terheggen M, Abou-Ras D, Bätzner DL, Haug F, Kälin M, Rudmann D, Tiwari AN. Development of thin-film Cu(In,Ga)Se₂ and CdTe solar cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2004; 12 (23): 93–111.
- [51] Razykov TM, Ferekides CS, Morel D, Stefanakos E, Ullal HS, Upadhyaya HM. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects: Progress in Solar Energy. Solar Energy 2011; 85 (8): 1580–608.
- [52] Singh UP, Patra SP. Progress in Polycrystalline Thin-Film Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells. International Journal of Photoenergy 2010; 2010: 1–19.
- [53] Kazmerski LL. Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview: Science and Spectroscopy of Environmentally Important Interfaces. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena 2006; 150 (2–3): 105–35.
- [54] Marwede M, Middendorf A, Maher P, Ospina J, Ting A, Yang M, Arranz P, Jehoulet C. Guidance Document on D4R for PV Systems and Flat Panel Products: Deliverable 3.2 of the European research project "Towards Zero Waste in Industrial Networks"; 2012.
- [55] Berger W, Simon F, Weimann K, Alsema EA. A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules. Resources, Conservation and Recycling 2010; 54 (10): 711–8.
- [56] K.Kushiya, M.Ohshita, et al., editors. Development of recycling and reuse technologies for large-area Cu(InGa)Se₂-based thin-film modules, in: Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 18–18 May 2003.
- [57] <http://www.renewableenergyfocus.com/view/3005/end-of-life-pv-then-what-recycling-solar-pv-panels/>

- [58] Bonnet, D. and Rabenhorst, H., 1972. New Results on the Development of a Thin Film p-CdTe-n-CdS Heterojunction Solar Cell. Proc. 9th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Silver Springs, pp. 129-131.
- [59] M.Campo, Process for Recycling CdTe/Cds Thin Film Solar Cell Modules, Patent No.6572782, ANTEC Solar GmbH, 2003.
- [60] Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules, J Tao, S Yu - Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015
- [61] <http://www.5nplus.com>
- [62] <http://www.loserchemie.de/>
- [63] www.pvcycle.org
- [64] Fthenakis, V. M. Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells. Renewable Sustainable Energy Rev. 2009, 13, 2746–2750.
- [65] Zweibel, K.; Mason, J.; Fthenakis, V. M. A Solar Grand Plan. Sci. Am. 2008, 64–73.
- [66] www.pvcycle.org. Last accessed April 2010.
- [67] Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC): Guidelines for LifeCycle Assessment, A "Code of Practice"; SETAC Workshop in Sesimbra 31.03.- 03.04.1993, Brüssel, 1993
- [68] <http://globe.setac.org/2011/april/LCA.html>
- [69] ISO/EN/DIN 14042. (2000). Umweltmanagement, Ökobilanz, Wirkungsabschätzung.
- [70] <http://setac.sclivelearningcenter.com/index.aspx?PID=9484&SID=187044>
- [71] Koroneos C. and Moussiopoulos N. (2003) "Adoption of life cycle analysis in SMES", Proceedings of the 4th International Exhibition and Conference on Environmental Technology (HELECO 03), Athens, Greece, 30 January-2 February, Vol. 2, 419-425.
- [72] V. Fthenakis, H.C Kim, Photovoltaics: Life-cycle analyses - Solar Energy, 2011
- [73] V. Fthenakis, H. C. Kim, R. Frischknecht, M. Raugei, P. Sinha, M. Stucki, 2011, Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems, International Energy Agency(IEA) PVPS Task 12, Report T12-02:2011.
- [74] 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.
- [75] Fthenakis, V.M. et al., 2006. Evaluation of risks in the life cycle of photovoltaics in a comparative context. In: 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany.
- [76] Fthenakis, V.M., Kim, H.C., Alsema, E., 2008. Emissions from photovoltaic life cycles. Environmental Science & Technology 42, 2168–2174
- [77] J. K. Choi and V. Fthenakis, "Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives," Journal of Cleaner Production, vol. 66, pp. 443–449, 2014.
- [78] RESOffice. Available online: <http://www.resoffice.gr/main.html>.
- [79] Yiannis Katsigiannis, Meletios Rentoumis, Anastasia Katsamaki, Alexandra Chatzikokolaki, Nikolaos Bilalis, Estimation of Quantities of Waste Materials for Photovoltaic Installations in Crete Island, The International Conference on Advances in Mechanical and Automation Engineering-MAE 2014, June 07-08, 2014 at Rome, Italy.
- [80] Dones, R., et al., Sachbilanzen von Energiesystemen. Final report ecoinvent 2000. Volume: 6. 2003, Swiss Centre for LCI, PSI.
- [81] Franklin Associates, USA LCI Database Documentation. 1998: Prairie Village, Kansas.
- [82] Forster, P., et al., Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, in Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. Solomon, et al., Editors. 2007, Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- [83] Reich, N.H., et al., Greenhouse gas emissions associated with photovoltaic electricity from crystalline silicon modules under various energy supply options. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, in press.

- [84] Alsema, E.A. and M.J. de Wild-Scholten. Reduction of the Environmental Impacts in Crystalline Silicon Module Manufacturing. in 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference. 2007. Milano, Italy.
- [85] Aulich, H.A. and F.-W. Schulze, Crystalline Silicon Feedstock for Solar Cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2002. 10: p. 141-147.
- [86] Maycock, P.D., National Survey Report of PV Power Applications in the United States 2004, 2005, International Energy Agency
- [87] Woditsch, P. and W. Koch, Solar grade silicon feedstock supply for PV industry. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2002. 72: p. 11-26.
- [88] Rogol, M., Silicon and the solar sector: Mapping a new world in presentation at the 2nd Solar Silicon Conference 2005: Munich, Germany, 11 April.
- [89] Fthenakis, V.M. and H.C. Kim. Energy Use and Greenhouse Gas Emissions in the Life Cycle of CdTe Photovoltaics. in Material Research Society Fall Meeting, Symposium G: Life Cycle Analysis Tools for "Green" Materials and Process Selection. 2005. Boston, MA.
- [90] European Commission. 2012. Life cycle indicators framework: development of life cycle based macro-level monitoring indicators for resources, products and waste for the EU-27. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability
- [91] V.M. Fthenakis and H.C. Kim, A Review of Risks in the Solar Electric Life-Cycle. JRC/TREN Conference on Safety & Security of Energy Infrastructures in a Comparative View (SEIF-CV), Brussels, Belgium. Nov. 14-16, (2005).
- [92] V. Fthenakis, Overview of Potential Hazards, Chapter VII in Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, (Editors: T. Markvart and L. Gastaner), Elsevier (2003).
- [93] S. Hirschberg, G. Spikerman, and R. Dones, Severe Accidents in the Energy Sector, First Edition. Paul Scherrer Institute, Switzerland. PSI Bericht Nr. 98- 16. (1998).
- [94] Y.Y. Haimes, Risk Modeling, Assessment, and Management. John Wiley & Sons. (1998)
- [95] Various, 1996. Boyle, G. (Ed.), Renewable energy. Power for a sustainable future. The Open University, Oxford Press, London
- [96] Fthenakis, V., Zweibel, K., 2003. CdTe photovoltaics: real and perceived EHS risks, NCPV Program Review Meeting, www.pv.nnl.gov, March 2003.
- [97] Tsoutsos, T., Gekas, V., Marketaki, K., 2003a. Technical and economical evaluation of Stirling dish solar thermal power generation. Renewable Energy 28 (6), 873-886.
- [98] Aguado-Monsonet MA. The environmental impact of PV Technology. Sevilla : Institute for Prospective Technological Studies; 1998, p.7-8.
- [99] Tsoutsos T, Frantzeskaki N, Gekas V. Environmental impacts from the solar energy technologies. Energy Policy 2005;33:289-96
- [100] de Wild-Scholten MJ. Environmental profile of PV mass production: globalization. Proc. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference; Hamburg, Germany; 2011
- [101] Alsema EA, Wild-Scholten MJ de. Environmental impacts of crystalline silicon photovoltaic module production. 13th CIRP Intern. Conf. on Life Cycle Engineering, Leuven; 2006
- [102] Sheikh N, Kocaoglu DF. A comprehensive assessment of solar photovoltaic technologies: literature review. Proc. PICMET, Portland, OR, 2011.
- [103] IEA International Energy Agency. Trends in photovoltaic applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2010. 2011.
- [104] Jackson T, Oliver M. The viability of solar photovoltaics. Energy Policy 2000;28: 983-88.
- [105] Shrestha S. Lazard capital markets search. Inter Solar. 2012.
- [106] EPIA & Greenpeace (2011) Solar Generation 6: Solar photovoltaic electricity empowering the world.
- [107] <http://www.solarbuzz.com/facts-and-figures/retail-price-environment/panel-prices>
- [108] <http://forwast.brgm.fr/Documents/Deliverables/Forwast D63.pdf>
- [109] <http://www.gabi-software.com/international/index/>
- [110] <http://www.photovoltaic-software.com>

- [111] HAUSBERGER, Dr. Stefan, et al.: Emission functions for Heavy Duty Vehicles – Update of the Emission Functions for Heavy Duty Vehicles in the Handbook Emission Factors for Road Traffic, Wien: Umweltbundesamt GmbH, 2003.
- [112] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: Statistische Mitteilungen, Reihe 2: Kraftfahrzeuge. Flensburg, 2003.
- [113] Umweltbundesamt Berlin; BUWAL / OFEFP Bern; Umweltbundesamt Wien: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 3.1, Berlin, Bern, Vienna / Germany, Switzerland, Austria, 2010
- [114] Information of the company Zhangjiagang Yisu Machinery Co., Ltd.
- [115] Information of the company Zhengzhou Mega Industry Co., Ltd
- [116] Information of the company Italimpianti Orafi Spa
- [117] Προσωπική Επικοινωνία με τον εμπορικό αντιπρόσωπο της BRT Hartner Mr. Andrea Atzemian.
- [118] Parikhit Sinha, Maxime Cossette, and Jean-François Ménard: End of Life CdTe PV with Semiconductor Refining, 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition
- [119] de Wild-Scholten, M. 2011. Environmental Profile of PV Mass Production: Globalization. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany
- [120] Held, M. and R. Ilg. 2011. Update of environmental indicators and energy payback time of CdTe PV systems in Europe. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 19: 614–626.