

Ανακύκλωση Φωτοβολταϊκών Πλαισίων και Διερεύνηση Βιωσιμότητας



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Ανακύκλωση Φωτοβολταϊκών Πλαισίων και Διερεύνηση Βιωσιμότητας



Φοιτήτρια: Λαλοπούλου Αγγελική

ΑΜ: 19387140

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Βόκας Γεώργιος

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, (ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ) (2024)



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

FACULTY OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Recycling Photovoltaic Panels and Sustainability Investigation



Student: Lalopoulou Angeliki

Registration Number: 19387140

Supervisor

Dr. Vokas Georgios

ATHENS-EGALEO, (SEPTEMBER) (2024)

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Βόκας Γεώργιος, Καθηγητής	Καλκάνης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής	Ψωμόπουλος Κωνσταντίνος, Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Λαλοπούλου Αγγελική,
Σεπτέμβριος, 2024**

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 τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Λαλοπούλου Αγγελική του Νικολάου, με αριθμό μητρώου 19387140 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 1/11/2024 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή μου.»

Η Δηλούσα

Λαλοπούλου Αγγελική



Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κύριο Βόκα Γεώργιο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την ανάθεση του θέματος και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την διάρκεια της εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την μητέρα μου, τον πατέρα μου, τον αδερφό μου και τον Αποστόλη για την αδιάκοπη υποστήριξη, την αγάπη και την κατανόηση που μου προσέφεραν κατά την διάρκεια των σπουδών αλλά και της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής.

Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή είναι ένα γεγονός υψίστης σημασίας για την βιωσιμότητα του πλανήτη μας, το οποίο χρήζει άμεσης αντιμετώπισης. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν έναν από τους τρόπους αντιμετώπισής της. Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες ΑΠΕ ενώ συγχρόνως, τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται ιδιαίτερη αύξηση στην παραγωγή ενέργειας μέσω αξιοποίησης αυτής. Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών πάνελ. Συγκεκριμένα, αναλύεται η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών κατά την πάροδο των χρόνων και αναφέρονται λεπτομερώς οι τρόποι κατασκευής αυτών ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκουν. Επιπρόσθετα, γίνεται αναφορά στην ισχύουσα νομοθεσία της Ελλάδας περί της χρήσης των φωτοβολταϊκών αλλά και των στόχων, τους οποίους έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση. Παρά το θετικό αντίκτυπο των φωτοβολταϊκών στην κλιματική αλλαγή, δεν πρέπει να παραλειφθεί το γεγονός ότι μετά το πέρας της ζωής τους δημιουργούν απόβλητα, τα οποία μολύνουν εμμέσως το περιβάλλον στην περίπτωση που δεν ανακυκλωθούν και καταλήξουν σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ). Λόγω των ανωτέρω γεγονότων και της ανάγκης ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών, κρίθηκε σκόπιμο να εκτελεστεί περαιτέρω ανάλυση επί των παραγόμενων αποβλήτων των φωτοβολταϊκών. Η ανάλυση εστιάζει στον όγκο των φωτοβολταϊκών που απορρίπτονται κάθε χρόνο στην Ελλάδα και στις επιπτώσεις αυτών στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία μετά το πέρας της λειτουργίας τους. Επιπλέον, γίνεται εκτενής αναφορά στις πιο σύγχρονες και αποτελεσματικές μεθόδους αποσυναρμολόγησης των φωτοβολταϊκών ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκουν και υπολογίζεται το ποσοστό ανάκτησης των υλικών που περιέχονται σε αυτά. Στην συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα, υπολογίζεται το βάρος των ανακτώμενων υλικών από αυτά σε περίπτωση ανακύκλωσης. Ακολούθως, αναλύεται η βιωσιμότητα της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών λαμβάνοντας υπόψη του παράγοντες περιβάλλον, ανθρώπινη υγεία και οικονομία. Τέλος εκτελείται μια πρώτη προσέγγιση στην ανάλυση του κύκλου ζωής των φωτοβολταϊκών με τη χρήση του λογισμικού «openLCA».

Λέξεις – κλειδιά

Φωτοβολταϊκά, πάνελ, γκοφρέτες, , ανακύκλωση, περιβάλλον, βιωσιμότητα

Abstract

Climate change is an event of utmost importance for the sustainability of our planet, which needs immediate confrontation. Renewable Energy Resources (RES) are one of the ways to deal with it. Solar energy is one the most known RES, at the same time, the last years, it has been observed a particular increase of the energy production through its utilization. This thesis, focuses on the exploitation of solar energy through photovoltaic panels. In particular, the evolution of photovoltaics over the years is analyzed and the methods of their construction are detailed according to the category in which they belong. In addition, reference is made to the recent legislation of Greece regarding the use of photovoltaics as well as the goals set by the European Union. Despite the positive impact of photovoltaics on climate change, it should not be overlooked that at the end of their life they create waste, which indirectly pollutes the environment if they aren't recycled and end up in landfills. Due to the above facts and the need to recycle photovoltaics, it was deemed necessary to carry out further analysis of the waste generated by photovoltaic panels. The analysis focuses on the volume of photovoltaic panels disposed of each year in Greece and the impacts on the environment and human health after the end of their life cycle. Furthermore, extensive reference is made to the most modern and efficient methods of disassembling photovoltaics based on the category in which they belong and the recovery rate of materials contained within them is calculated. Next, taking into account the data on installed photovoltaic systems in Greece, the weight of recoverable materials from these panels in the event of recycling is calculated. Subsequently, the sustainability of recycling photovoltaic panels is analyzed, considering factors such as the environment, human health, and economics. Finally, an initial approach to the life cycle analysis of photovoltaic panels is carried out using the "openLCA" software.

Keywords

Photovoltaics, modules, EoL, recycling, environment, sustainability

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	10
Κατάλογος Εικόνων.....	10
Κατάλογος Διαγραμμάτων	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
ΔΟΜΗ	14
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Εισαγωγή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)	16
Μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.....	16
1.1 Ηλιακή Ενέργεια.....	16
1.2 Αιολική Ενέργεια	19
1.3 Υδάτινη Ενέργεια	20
1.4 Γεωθερμική Ενέργεια	21
1.5 Βιομάζα	21
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Εξέλιξη Αγοράς Φωτοβολταϊκών 1980 έως Σήμερα	23
2.1 Εξέλιξη παγκόσμιας αγοράς Φ/Β	23
2.2 Εξέλιξη Ευρωπαϊκής-Ελληνικής Αγοράς Φωτοβολταϊκών	26
2.2.1 Ευρωπαϊκή αγορά	26
2.2.2 Ελληνική αγορά.....	28
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Φωτοβολταϊκά	31
3.1 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών πάνελ.....	31
3.1.1 Μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mono-Si).....	31
3.1.2 Πολυκρυσταλλικού πυριτίου (poly-Si)	31
3.1.3 Λεπού υμένα (Thin film)	32
3.2 Κατασκευή Φωτοβολταϊκών.....	33
3.2.1 Φωτοβολταϊκά πυριτίου (silicon)	33
3.2.2 Φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα (Thin film)	42

3.3	Ελληνική νομοθεσία φωτοβολταϊκών	42
3.4	Στόχοι ΚΥΟΤΟ και Ευρωπαϊκής Ένωσης	44
3.5	Πρώτες ύλες στην Ελλάδα (Al, γυαλί, Si, Ag).....	47
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο : Ανακύκλωση Φωτοβολταϊκών	54
4.1	Τρόποι Αποσυναρμολόγησης Φωτοβολταϊκών	54
4.1.1	Ανακύκλωση κρυσταλλικών πάνελ	60
4.1.2	Ανακύκλωση thin film πάνελ	69
4.2	Βαθμός (%) ανάκτησης πρώτων υλών και Κόστος Αποσυναρμολόγησης	71
4.3	Ένωση PV CYCLE.....	72
4.4	Νομοθεσία Ευρωπαϊκής Ένωσης	73
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο : Εφαρμογή μεθοδολογίας.....	76
5.1	Μεθοδολογία υπολογισμών	76
5.2	Αποτελέσματα	77
5.3	Ανάλυση αποτελεσμάτων	84
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο : Βιωσιμότητα εγχειρήματος	86
6.1	Περιβαλλοντική σκοπιά.....	86
6.2	Σκοπιά δημόσιας υγείας	86
6.3	Οικονομική σκοπιά.....	87
7	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ^ο : Life Cycle Analysis (LCA)	89
8	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ^ο : Συμπεράσματα	102
	Βιβλιογραφία	104

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Αποθέματα Πρώτων Υλών και Ετήσια Παραγωγή στην Ελλάδα.....	52
Πίνακας 2: Ποσοστό ανάκτησης πρώτων υλών	71
Πίνακας 3: Αξία ανακτώμενων υλικών (Σεπτέμβριος 2024).....	87
Πίνακας 4: Τεχνικά χαρακτηριστικά	92

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Εξώφυλλο.....	1
Εικόνα 2: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	16
Εικόνα 3: Ηλιακά συγκεντρωτικά συστήματα (CSP).....	18
Εικόνα 4: Κατηγορίες φωτοβολταϊκών	19
Εικόνα 5: Κατηγορίες ανεμογεννητριών	19
Εικόνα 6: Pelton.....Εικόνα 7: Turgo	20
Εικόνα 8: Francis.....Εικόνα 9: Kaplan	20
Εικόνα 10: Μορφές γεωεναλλάκτη	21
Εικόνα 11: Ποσοστά ΑΠΕ στην Ευρώπη, 2022	22
Εικόνα 12: Συνολική εγκατεστημένη ηλιακή ισχύς	25
Εικόνα 13: Αναμενόμενες εγκατεστημένες ισχύς	26
Εικόνα 14: Ετήσια Ευρωπαϊκή Εγκατεστημένη Ισχύς.....	27
Εικόνα 15: Ετήσια Παραγόμενη Ισχύς στην Ελλάδα (2000-2008).....	29
Εικόνα 16: Ετήσια Παραγόμενη Ισχύς στην Ελλάδα (2010-2023).....	30

Εικόνα 17: Κελιά φωτοβολταϊκών	32	
Εικόνα 18: Διαδικασία ανακύκλωσης kerf	35	
Εικόνα 19: Junction box	Εικόνα 20: Εσωτερικό του Junction box	38
Εικόνα 21: Επαφές MC4 / MC5	38	
Εικόνα 22: Αλυσίδα κατασκευής ηλιακών πάνελ	39	
Εικόνα 23: Μέρη του φωτοβολταϊκού πάνελ.....	40	
Εικόνα 24: Βάρος υλικών σε ένα κρυσταλλικό φωτοβολταϊκό	41	
Εικόνα 25: Ποσοστά εκπομπών ρύπων του φαινομένου του θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Emissions) και ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος (GDP)	47	
Εικόνα 26: Εξέλιξη αξίας ανακυκλώσιμων υλικών που περιέχονται μέσα στα πάνελ	57	
Εικόνα 27: Μέρη πολυκρυσταλλικού πάνελ.....	58	
Εικόνα 28: Διαδικασία ανακύκλωσης	61	
Εικόνα 29: Θερμική και SSTD διαδικασία	63	
Εικόνα 30: Διαδικασία καθαρισμού του κελιού.....	64	
Εικόνα 31: Διαδικασία ανάκτησης γκοφρετών και άλλων υλικών	65	
Εικόνα 32: Διαδικασία ανακύκλωσης με χρήση DMPU	66	
Εικόνα 33: Διαδικασία ανάκτησης υλικών	69	
Εικόνα 34: Διαδικασία ανακύκλωσης	70	
Εικόνα 35: Βάρος υλικών σε ένα τόνο πάνελ scrap	71	
Εικόνα 36: Ποσοστό ανακύκλωσης-επαναχρησιμοποίησης φωτοβολταϊκών πάνελ.....	75	
Εικόνα 37: Λήψη openLCA	90	
Εικόνα 38: Εφαρμογή openLCA	91	

Εικόνα 39: Ecoinvent.....	93
Εικόνα 40: Λήψη ecoinvent	93
Εικόνα 41: Λήψη ELCD	94
Εικόνα 42: Λήψη NEEDS.....	95
Εικόνα 43: Λήψη δεδομένων	95
Εικόνα 44: eco-indicator 99, (H,A)	96

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Εξέλιξη ισχύος των πιο διαδεδομένων φωτοβολταϊκών πάνελ	77
Διάγραμμα 2: Πλήθος φωτοβολταϊκών πλαισίων που εγκαταστάθηκαν ανά έτος.....	78
Διάγραμμα 3: Βάρος φωτοβολταϊκού σε σχέση με την ισχύ του ανά έτος.....	78
Διάγραμμα 4: Βάρος φωτοβολταϊκών που τοποθετήθηκαν ανά έτος	79
Διάγραμμα 5: Βάρος πρώτων υλών (Κασσίτερος, Άργυρος)	80
Διάγραμμα 6: Βάρος πρώτων υλών (Χαλκός)	80
Διάγραμμα 7: Βάρος πρώτων υλών (Αλουμίνιο, Πυρίτιο).....	81
Διάγραμμα 8: Βάρος πρώτων υλών (Γυαλί)	81
Διάγραμμα 9: Βάρος ανακτώμενων υλικών (Κασσίτερος, Άργυρος).....	82
Διάγραμμα 10: Βάρος ανακτώμενων υλικών (Χαλκός).....	83
Διάγραμμα 11: Βάρος ανακτώμενων υλικών (Αλουμίνιο, Πυρίτιο).....	83
Διάγραμμα 12: Βάρος ανακτώμενων υλικών (Γυαλί)	84
Διάγραμμα 13: Κόστος ανακύκλωσης-Αξία ανακτώμενων υλικών	88
Διάγραμμα 14: Επιπτώσεις κατά την χρήση	99

Διάγραμμα 15: Επιπτώσεις κατά την απόσυρση σε ΧΥΤΑ..... 100

Διάγραμμα 16: Επιπτώσεις 100

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν έναν από τους τρόπους αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής. Η χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ μέσω αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας είναι μια από τις πιο ανεπτυγμένες μεθόδους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δίχως την εκπομπή ρύπων. Η παρούσα διπλωματική συντάχθηκε με σκοπό να αναδειχθεί η αναγκαιότητα της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών μετά το πέρας της ζωής τους καθώς περιέχουν υλικά τα οποία μολύνουν το περιβάλλον. Τέλος, εξετάζεται η βιωσιμότητα του εγχειρήματος της ανακύκλωσης σύμφωνα με την υφιστάμενη τεχνολογία και το κόστος της.

ΔΟΜΗ

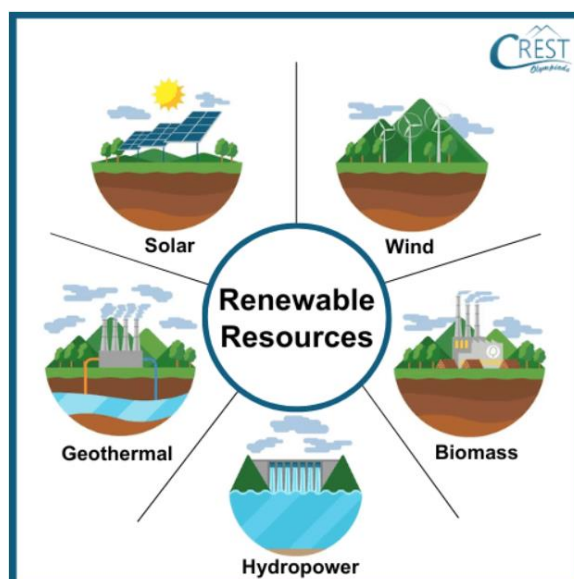
Η παρούσα διπλωματική έχει χωριστεί σε πέντε (5) κεφάλαια και δεκαοκτώ (18) υποκεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο, το οποίο υποδιαιρείται σε πέντε (5) υποκεφάλαια, γίνεται μια σύντομη αναφορά στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, οι οποίες είναι η ηλιακή, η αιολική, η υδάτινη, η γεωθερμική και η βιομάζα. Στο δεύτερο κεφάλαιο, το οποίο υποδιαιρείται σε τρία (3) υποκεφάλαια, παρουσιάζεται η τεχνολογική εξέλιξη των φωτοβολταϊκών πάνελ με το πέρασμα των χρόνων σε εθνικό, ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο. Στο τρίτο κεφάλαιο, το οποίο υποδιαιρείται σε πέντε (5) υποκεφάλαια, αναλύονται λεπτομερώς οι κατηγορίες των φωτοβολταϊκών και οι μέθοδοι κατασκευής τους. Επιπλέον γίνεται εκτενής αναφορά στην ισχύουσα νομοθεσία της Ελλάδας περί των φωτοβολταϊκών και στους στόχους που έχουν τεθεί από τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και του πρωτοκόλλου Kyoto. Τέλος υπολογίζονται οι πρώτες ύλες για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών, οι οποίες υπάρχουν στον Ελλαδικό χώρο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, το οποίο υποδιαιρείται σε πέντε (5) υποκεφάλαια, γίνεται εκτενής αναφορά στην ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών. Συγκεκριμένα, αναφέρονται οι τρόποι και το κόστος αποσυναρμολόγησης των φωτοβολταϊκών καθώς και ο βαθμός ανάκτησης των πρώτων υλών. Επιπλέον, αναφέρεται η ένωση PV cycle και η ισχύουσα νομοθεσία στην Ευρώπη περί της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών. Στο πέμπτο κεφάλαιο, το οποίο υποδιαιρείται σε τρία (3) υποκεφάλαια, γίνεται αναφορά της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των ανακτώμενων υλικών ανά έτος στην Ελλάδα. Στο έκτο κεφάλαιο, το οποίο υποδιαιρείται σε τρία (3) υποκεφάλαια, παρουσιάζεται η βιωσιμότητα του

εγχειρήματος λαμβάνοντας υπόψη τρεις παράγοντες, το περιβάλλον, την ανθρώπινη υγεία και την οικονομία. Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια πρώτη προσέγγιση για την ανάλυση του κύκλου ζωής των φωτοβολταϊκών με την χρήση του λογισμικού «openLCA». Στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο παραθέτονται τα συμπεράσματα, τα οποία προέκυψαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Εισαγωγή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ονομάζονται οι πηγές ενέργειας που βρίσκονται στην φύση και είναι ανεξάντλητες, ενώ ο ρυθμός παραγωγής τους είναι μεγαλύτερος από αυτόν της κατανάλωσης τους. Η αξιοποίηση των ΑΠΕ δεν διαταράσσει ούτε μολύνει το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, χωρίζονται σε δύο (2) κατηγορίες, οι οποίες είναι οι ήπιες μορφές ενέργειας που δεν μολύνουν το περιβάλλον και οι ανανεώσιμες που είναι ανεξάντλητες ή παράγονται από την φύση και τον άνθρωπο.



Εικόνα 2: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

(Natural Resources and Source of Energy - Class 5 Science)

Μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

1.1 Ηλιακή Ενέργεια

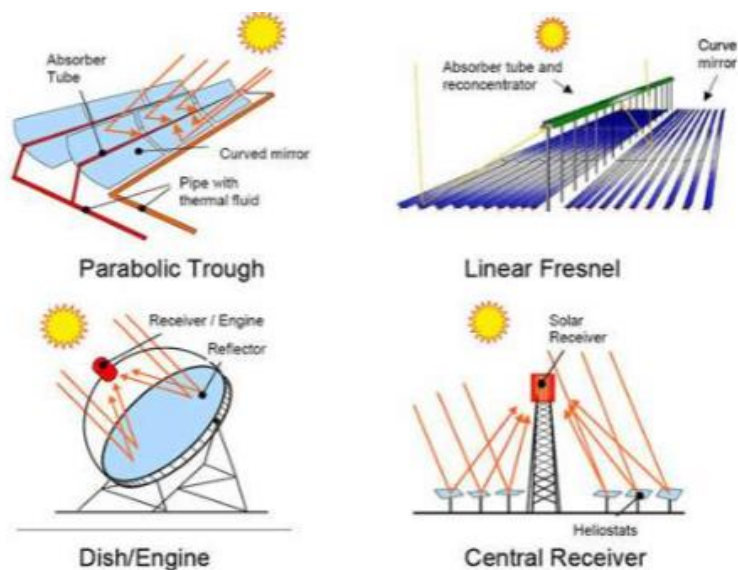
Το 70% της ηλιακής ακτινοβολίας θερμαίνει τη Γη και την ατμόσφαιρα ή πολλές φορές απορροφάται από την εξάτμιση του νερού ενώ το υπόλοιπο 30% της αντανακλάται στο διάστημα. Η αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται με τρεις τρόπους, οι οποίοι κατανέμονται σε παθητικά συστήματα, ενεργητικά συστήματα και φωτοβολταϊκά. Τα παθητικά και τα ενεργητικά συστήματα αξιοποιούν την θερμότητα που παράγει η ηλιακή ακτινοβολία ενώ τα φωτοβολταϊκά μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια.

Παθητικά Συστήματα

Τα παθητικά συστήματα εκμεταλλεύονται την θερμότητα ώστε να θερμάνουν τα κτίρια τον χειμώνα. Ένα παράδειγμα παθητικού συστήματος είναι οι ηλιακοί τοίχοι, οι οποίοι έχουν τζάμι στην εξωτερική τους πλευρά. Το τζάμι λειτουργεί σαν συλλέκτης και μπορεί να μεταφέρει την θερμότητα μέσω του τοίχου. Επίσης τα παθητικά συστήματα, μπορούν να αποθηκεύσουν-εγκλωβίσουν την θερμότητα και να την αποδώσουν στο χώρο, όπως για παράδειγμα τα θερμοκήπια ή τα ηλιακά αίθρια, τα οποία στεγάζονται εντός κτιρίων και λειτουργούν σαν τα θερμοκήπια.

Ενεργητικά Συστήματα

Τα ενεργητικά συστήματα είναι συσκευές όπου μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμική, ψυκτική ή ηλεκτρική. Ένα από τα πιο γνωστά ενεργητικά συστήματα είναι ο ηλιακός συλλέκτης. Συγκεκριμένα, ο ηλιακός θερμοσίφοντας αξιοποιεί την ηλιακή ενέργεια και παράγει ζεστό νερό χρήσης (ZNX). Πέρα από τον ηλιακό θερμοσίφωνα υπάρχουν και τα ηλιακά συγκεντρωτικά συστήματα παραγωγής ισχύος (Concentrated Solar Power- CSP). Τα ηλιακά συγκεντρωτικά συστήματα συγκεντρώνουν την ηλιακή ενέργεια και την μετατρέπουν σε θερμική ενέργεια (ατμό) έτσι ώστε να παράγουν ηλεκτρική ισχύ. Υπάρχουν τέσσερα (4) διαφορετικά συγκεντρωτικά συστήματα. Τα πρώτα είναι τα γραμμικά συστήματα των παραβολικών κατόπτρων (Parabolic Trough), τα οποία περιστρέφονται από την Ανατολή προς τη Δύση και είναι κατασκευασμένα να παράγουν έως 400W, ενώ η θερμοκρασία τους φτάνει στους 400°C. Τα δεύτερα είναι οι κεντρικοί δέκτες με καθρέπτες που ανακλούν το ηλιακό φως σε έναν «ενεργειακό πύργο» (Central Receiver) και είναι κατασκευασμένα να παράγουν παραπάνω από 10MW, ενώ οι θερμοκρασίες τους είναι διπλάσιες από αυτές της πρώτης κατηγορίας καθώς φτάνουν τους 800-1000°C. Τα συστήματα της πρώτης κατηγορίας έχουν σχεδόν το ίδιο κόστος με αυτά της δεύτερης. Τα τρίτα συστήματα είναι οι γραμμικοί ανακλαστήρες Frensel (Linear Frensel), των οποίων οι θερμοκρασίες φτάνουν τους 380°C, ενώ σε σχέση με τα κάτοπτρα μπορούν να τοποθετηθούν πιο κοντά ο ένας με τον άλλο. Το ανωτέρω γεγονός έχει σαν αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χώρου. Τα τέταρτα είναι τα σύστημα παραβολικού δίσκου με μηχανές Sterling (Dish/Engine), τα οποία είναι κατασκευασμένα με δυναμικότητα έως και 2MW, ενώ οι θερμοκρασίες τους φτάνουν τους 1000°C. Τα τέσσερα συστήματα απεικονίζονται στην εικόνα που ακολουθεί.

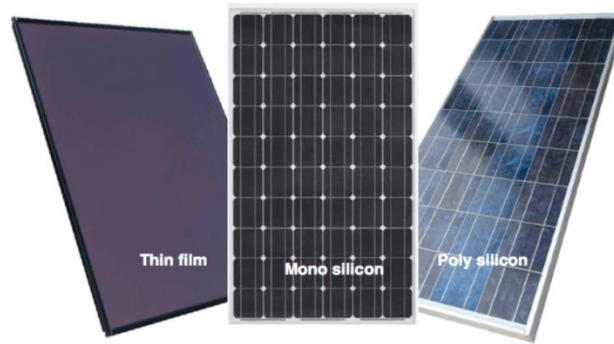


Εικόνα 3: Ηλιακά συγκεντρωτικά συστήματα (CSP)

(Χατζηαθανασίου, 2016)

Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά ηλιακά πάνελ όταν εκτίθενται στο ηλιακό φως παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεκριμένα, τα πάνελ αποτελούνται από κυψέλες που έχουν κατασκευαστεί από ημιαγωγούς, οι οποίοι απορροφούν το φως και μεταφέρουν την ενέργεια σε μορφή ηλεκτρονίων. Τα φωτοβολταϊκά χωρίζονται σε τρεις (3) κατηγορίες, οι οποίες είναι τα μονοκρυσταλλικά πυριτίου (mono-Si), τα πολυκρυσταλλικά πυριτίου (poly-Si) και του λεπτού υμένα (Thin film). Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών είναι απαραίτητη η ύπαρξη του ρυθμιστή φόρτισης, ο οποίος εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Επιπλέον, απαιτείται ο inverter, ο οποίος μετατρέπει τη συνεχή τάση που παράγει το φωτοβολταϊκό σε εναλλασσόμενη. Σε περιπτώσεις που το σύστημα δεν είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο απαιτείται και μπαταρία.

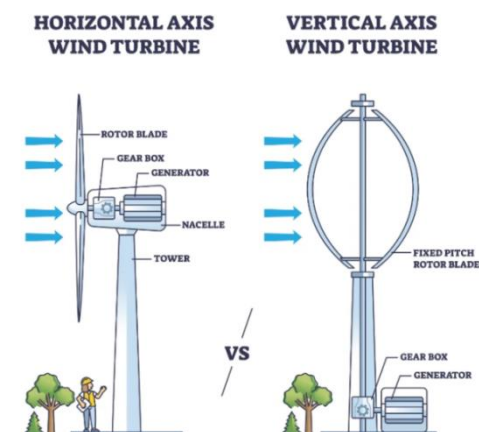


Εικόνα 4: Κατηγορίες φωτοβολταϊκών

(SVARC, 2014)

1.2 Αιολική Ενέργεια

Ο άνεμος παράγεται λόγω των διαφορετικών θερμοκρασιών στην ατμόσφαιρα της γης, της περιστροφής της και των ανωμαλιών της επιφάνειας του εδάφους της. Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η κινητικότητα του ανέμου προκαλεί στρέψη στα πτερύγια της, τα οποία είναι συνδεδεμένα μηχανικά σε ένα δρομέα. Η στροφή του δρομέα παρέχει τροφοδοσία σε μια γεννήτρια, με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε δύο (2) βασικές κατηγορίες, οι οποίες είναι η οριζόντιου άξονα (Horizontal axis) και η καθέτου άξονα (Vertical axis). Οι δύο κατηγορίες απεικονίζονται στην εικόνα που ακολουθεί.

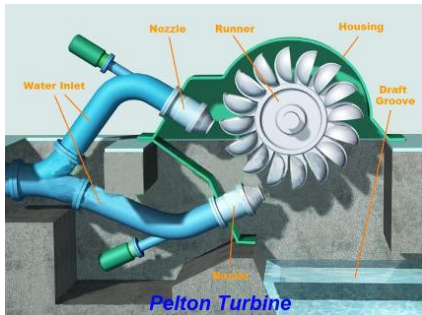


Εικόνα 5: Κατηγορίες ανεμογεννητριών

(Luke S., 2023)

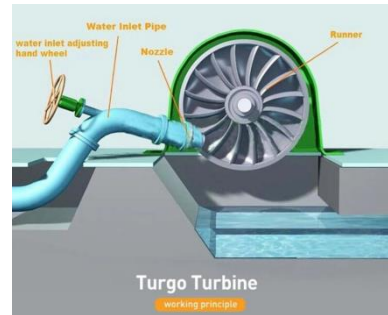
1.3 Υδάτινη Ενέργεια

Η υδάτινη ενέργεια (υδραυλική) μετατρέπει την μηχανική ενέργεια, που παράγεται από τις υδατοπτώσεις, σε ηλεκτρική με την χρήση στροβίλων και γεννητριών. Η υδραυλική ενέργεια περιλαμβάνει την κυματική ενέργεια, την παλιρροϊκή και των ρευμάτων. Η μηχανική ενέργεια που παράγεται από το τρεχούμενο νερό, προκαλεί την περιστροφή του δρομέα στον στρόβιλο, ο οποίος συνδέεται με μια γεννήτρια παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Οι υδροστρόβιλοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, οι οποίες είναι η δράσης (Impulse) όπου ανήκουν οι Pelton και Turgo και η αντίδρασης (Reaction) όπου ανήκουν οι Francis και Kaplan. Οι τύποι των υδροστροβίλων απεικονίζονται στις εικόνες 5 έως 8.



Εικόνα 6: Pelton

(Pelton Turbine)



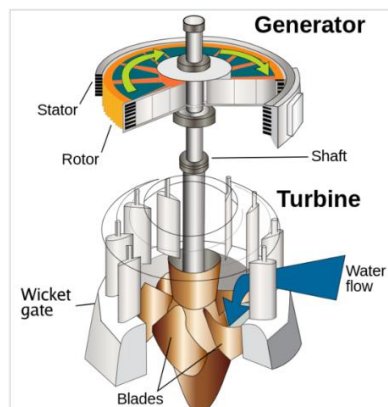
Εικόνα 7: Turgo

(Linquip Team , 2022)



Εικόνα 8: Francis

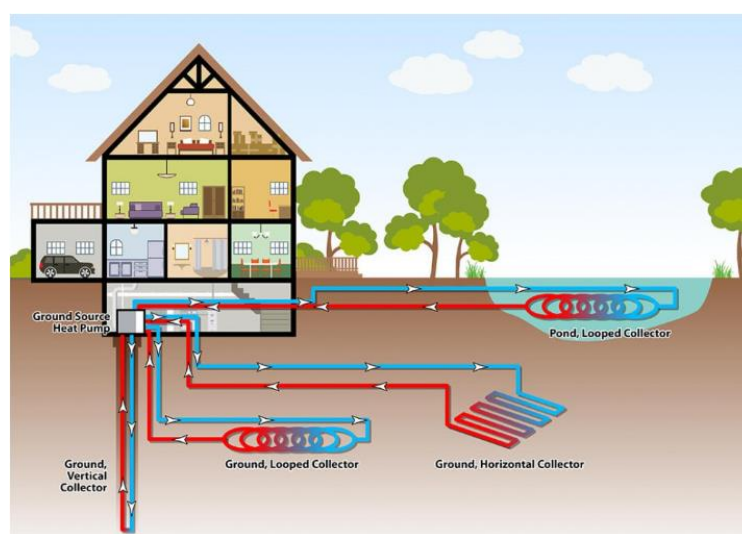
(Francis Turbine Its Components, Working And Application The Constructor)
(Kaplan turbine)



Εικόνα 9: Kaplan

1.4 Γεωθερμική Ενέργεια

Η γεωθερμία εκμεταλλεύεται την θερμότητα που βρίσκεται στο εσωτερικό του πλανήτη και παράγει είτε ηλεκτρική είτε θερμική ενέργεια. Με την χρήση της γεωθερμίας μπορεί επίσης να παραχθεί θερμότητα, ψύξη αλλά και ζεστό νερό. Η εκμετάλλευση της γεωθερμίας προϋποθέτει την ύπαρξη αντλίας θερμότητας, γεωεναλλάκτη, ο οποίος συλλέγει την θερμότητα του εδάφους και αποτελείται από σωλήνες νερού και κυκλοφορητή ο οποίος βοηθά στην συνεχή κυκλοφορία του νερού. Οι γεωεναλλάκτες κατηγοριοποιούνται σε κάθετους εδάφους, οριζόντιους εδάφους, κυκλικούς εδάφους και κυκλικούς λίμνης.

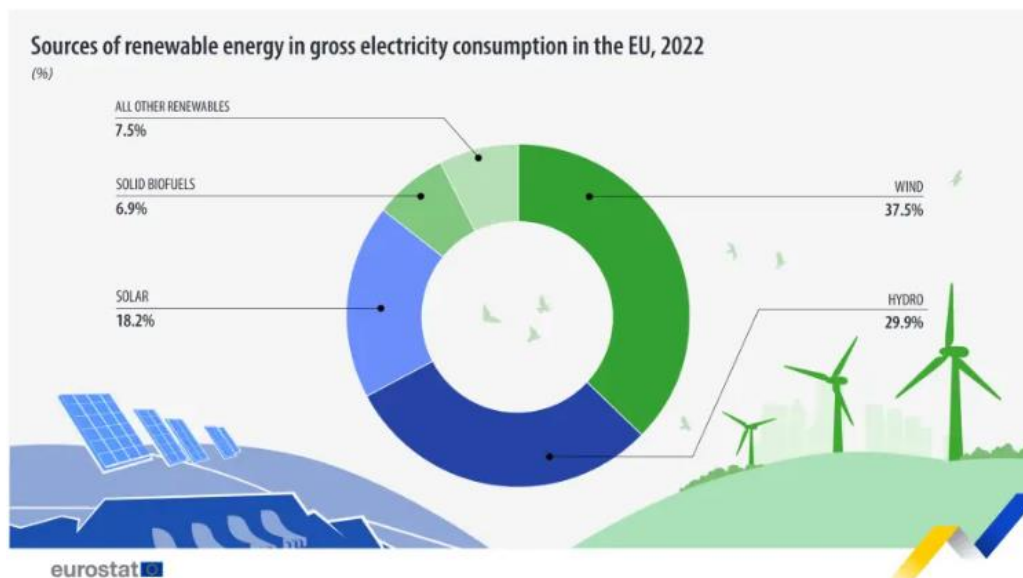


Εικόνα 10: Μορφές γεωεναλλάκτη

(Geothermal Heat Pumps)

1.5 Βιομάζα

Βιομάζα είναι κάθε οργανική ύλη η οποία έχει παραχθεί από τον φυτικό κόσμο. Συγκεκριμένα στη βιομάζα ανήκουν τα υπολείμματα τροφών, τα αστικά σκουπίδια, τα κτηνοτροφικά απόβλητα, τα δασικά και γεωργικά υπολείμματα και απόβλητα, οι ενεργειακές καλλιέργειες, οι ελαιώδες ύλες κλπ τα οποία με την καύση τους μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Η βιομάζα χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανίες και βιοτεχνίες, στη θέρμανση θερμοκηπίων και κτιρίων, στην τηλεθέρμανση αλλά και στην παραγωγή ενέργειας σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) κλπ.



Εικόνα 11: Ποσοστά ΑΠΕ στην Ευρώπη, 2022

(Ενέργεια: Οι ΑΠΕ κερδίζουν έδαφος στην Ευρώπη - Στο 43% της κατανάλωσης έφτασαν στην Ελλάδα, 2024)

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Εξέλιξη Αγοράς Φωτοβολταϊκών 1980 έως Σήμερα

2.1 Εξέλιξη παγκόσμιας αγοράς Φ/Β

Η πορεία των φωτοβολταϊκών ξεκινά τον 19^ο αιώνα από τον Γάλλο φυσικό Edmond Becquerel, ο οποίος το 1839 μέσω πειραμάτων ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρολυτικό στοιχείο φτιαγμένο από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Η έκθεση του στοιχείου στον ήλιο προκαλούσε την αύξηση της ροής του ρεύματος. Το 1873 ο γερμανός ηλεκτρολόγος μηχανικός Willoughby Smith ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο στο σελήνιο. Τρία χρόνια αργότερα το 1876 παρατηρήθηκε από τον William G. Adams και τον φοιτητή του Richard E. Day ότι όταν το σελήνιο (Se) ήταν εκτεθειμένο στο φως παραγόταν μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος. Το 1883 δημιουργήθηκε το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο (solarcell) από τον αμερικανό εφευρέτη Charles Edgar Fritz, χρησιμοποιώντας στρώσεις σεληνίου. Η απόδοση του στοιχείου αυτού ήταν 1-2%.

Το 1904 ο Albert Einstein δημοσίευσε μια έρευνα για την συμπεριφορά των σωματιδίων φωτός που αλληλεπιδρούν με ορισμένα υλικά, για την οποία το 1921 βραβεύτηκε με το Νόμπελ Φυσικής. Η θεωρία του Einstein επιβεβαιώθηκε στην πράξη από το πείραμα του Robert Milikan. Το 1918 ο Πολωνός Jan Czohralski ανακάλυψε μια μέθοδο παραγωγής μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si). Το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάστηκε το 1941. Το 1932 παρατηρήθηκε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο στο θειούχο κάδμιο (CdS), το οποίο χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα για την κατασκευή φωτοβολταϊκών. Μόλις πέντε χρόνια αργότερα, το 1937 κατασκευάστηκε φωτοβολταϊκό στοιχείο από θειούχο μόλυβδο (Pbs). Χρονιά ορόσημο της πορείας των φωτοβολταϊκών αποτελεί το 1949, καθώς αναπτύχθηκε η θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης από τους Mott και Schottky.

Την δεκαετία του 1950 υπήρξε σημαντική πρόοδος της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών. Ένα χρόνο αργότερα το 1951 κατασκευάστηκαν τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία γερμανίου. Το 1953 ο αμερικανός χημικός Dan Trivich έκανε θεωρητικούς υπολογισμούς για την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων από διαφορετικά υλικά. Ένα χρόνο αργότερα, το 1954 τα εργαστήρια RCA δημοσίευσαν μια έρευνα για το CdS φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Τα εργαστήρια Bell δημοσίευσαν αποτελέσματα φωτοβολταϊκών στοιχείων με αποδοτικότητα 4,5%. Η αποδοτικότητα αυξήθηκε στο 6% μέσα σε μερικούς μήνες από τους Fuller, Pearson Chapin, χρησιμοποιώντας πυρίτιο (Si) και σχηματισμό p-n. Το

1955 έκανε την εμφάνιση του το πρώτο αυτοκίνητο που κινείται με ήλιο. Ένα χρόνο αργότερα το 1956 έγινε η πρώτη παρουσίαση εμπορικών φωτοβολταϊκών προϊόντων από την εταιρεία Hoffman, με απόδοση 8%. Αργότερα, την ίδια χρονιά η ίδια εταιρεία παρουσίασε προϊόν με απόδοση 9%. Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών απέκτησε άμεση εφαρμογή στον τομέα της διαστημικής επιστήμης όπου το 1958 εκτοξεύτηκε ο πρώτος αμερικάνικος δορυφόρος Vanguard I, με μοναδική πηγή ενέργειας τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα σε όλους τους δορυφόρους. Επιπλέον, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ενσωματώθηκαν στην τέχνη της φωτογραφίας μέσω της υλοποίησης του φωτόμετρου.

Ένα χρόνο αργότερα το 1959 κατασκευάστηκε το φωτοβολταϊκό στοιχείο, θειούχο κάδμιο (CdS) με απόδοση 5%. Την ίδια χρονιά η εταιρεία Hoffman Electronics παρουσίασε το πυρίτιο (Si) με αποδοτικότητα 10%. Μετά από ένα χρόνο το 1960 ο Lindmayer & Allison κατάφεραν να αυξήσουν την αποδοτικότητα των ΦΒ στο 14%.

Η μεγαλύτερη εγκατάσταση ΦΒ της εποχής έγινε το 1962 στην Ιαπωνία από την εταιρεία Sharp, σε έναν φάρο με εγκατεστημένη ισχύ 242Wp. Την ίδια χρονιά εκτοξεύτηκε ο πρώτος τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος, ο Telstar, κατασκευασμένος από τα εργαστήρια Bell, με μέγιστη ισχύ 14W.

Το 1972 οι Γάλλοι εγκατέστησαν άμορφα CdS φωτοβολταϊκά σε ένα σχολείο στην επαρχία Niger. Μετά από τέσσερα χρόνια οι Carlson & Wronski κατασκεύασαν φωτοβολταϊκά στοιχεία από άμορφο πυρίτιο (a-Si) με απόδοση 0.01%. Την επόμενη χρονιά κατασκευάστηκε από τον Kameth ηλιακό στοιχείο από GaAs (Gallium-Arsenide) με απόδοση 16%. Το 1976 τα ΦΒ ξεκινούν να ενσωματώνονται σε εφαρμογές για τροφοδότηση ψυγείων, τηλεπικοινωνιακού και ιατρικού εξοπλισμού, άντλησης νερού και φωτισμού.

Στην αρχή της δεκαετίας του '80, το 1981 στη Μάγχη πέταξε το πρώτο αεροπλάνο, Solar Challenger εξοπλισμένο με 16.128 φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου, συνολικής ισχύς 2,7W. Το 1983 ήταν η έναρξη λειτουργίας φωτοβολταϊκού σταθμού ισχύος 1MW στην Βικτροβίλ. Τα ανωτέρω γεγονότα προκάλεσαν την ένταξη των ΦΒ σε πολυάριθμες εφαρμογές.

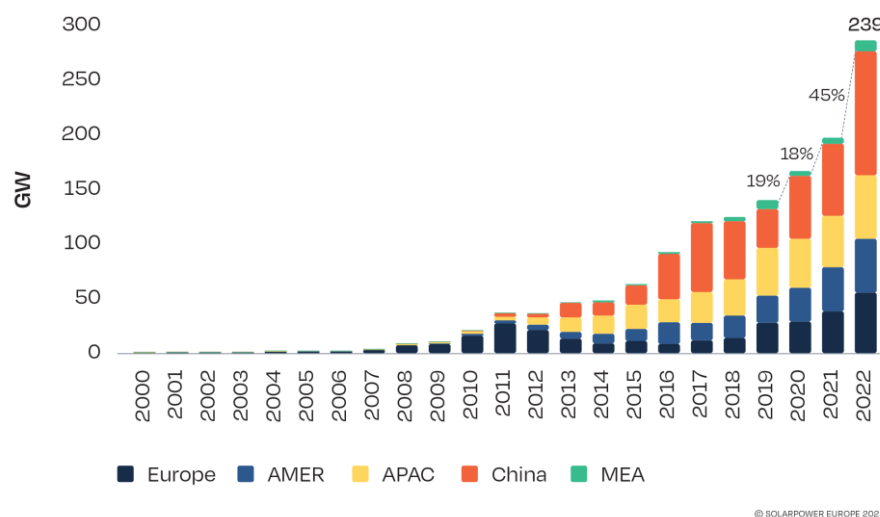
Το 1999 επετεύχθη η μεγαλύτερη απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου 32,2% από την συνεργασία των εταιρειών Spectrolab και NREL. Το στοιχείο αυτό αποτελείται από τρία

υλικά (στρώσεις) και είναι ειδικό για εφαρμογές σε συγκεντρωτικά συστήματα CPV. Την ίδια χρονιά η απόδοση των Thin films φτάνει στο 18,8%. Η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς των ΦΒ φτάνει στα 100MW.

Τρία χρόνια μετά το 2002 η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς των ΦΒ διπλασιάζεται (200MW) ενώ το 2004 μεγάλες εταιρείες εισέρχονται στον χώρο τον ΦΒ και προκαλούν την μαζική παραγωγή των φωτοβολταϊκών. Κυρίαρχη θέση στην κατασκευή των ΦΒ έχει η Ιαπωνία και η Γερμανία.

Το 2009 η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς φτάνει τα 8,1GW, της Ευρώπης ανέρχεται στα 6,6GW, της Ασίας (APAC/Asia-Pacific) ανέρχεται 0,9GW και της Αμερικής στα 0,6GW. Το 2011 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αυξάνεται ραγδαία και ανέρχεται στα 30,5GW, με την Ευρώπη να κυριαρχεί στα 22,4GW. Το 2016 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς διπλασιάζεται και ανέρχεται στα 77,4GW με την Κίνα να παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και να καλύπτει τα 34,5GW. Μετά από τέσσερα χρόνια, το 2020 η εγκατεστημένη ισχύς φτάνει τα 139GW και το 2022 η ισχύς αυξάνεται σημαντικά και φτάνει τα 239GW με την Κίνα να καλύπτει τα 95GW. Σύμφωνα με την Solarpower η συνολική ηλιακή εγκατεστημένη ισχύς το 2023 έφτασε τα 440GW. Οι εγκατεστημένες ισχύς απεικονίζονται στο διάγραμμα της εικόνας που ακολουθεί.

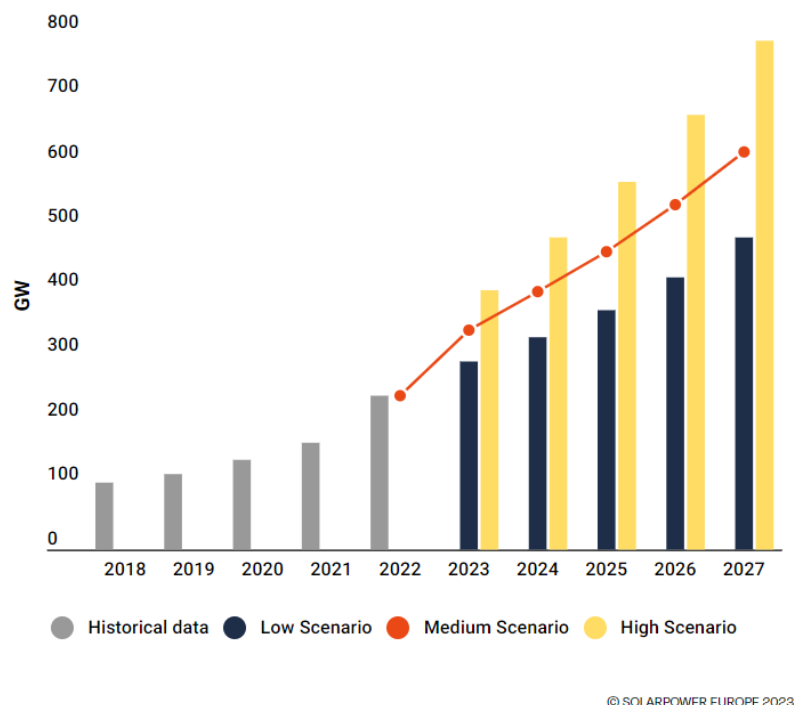
ANNUAL SOLAR PV INSTALLED CAPACITY 2000-2022



Εικόνα 12: Συνολική εγκατεστημένη ηλιακή ισχύς

(EU Market Outlook for Solar Power 2023-2027)

Μέχρι το 2027 η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αναμένεται να τριπλασιαστεί και συγκεκριμένα να κυμανθεί από 485GWέως 790GW. Οι αναμενόμενες εγκατεστημένες ισχύς απεικονίζονται στο διάγραμμα της Εικόνα 13.



Εικόνα 13: Αναμενόμενες εγκατεστημένες ισχύς

(EU Market Outlook for Solar Power 2023-2027)

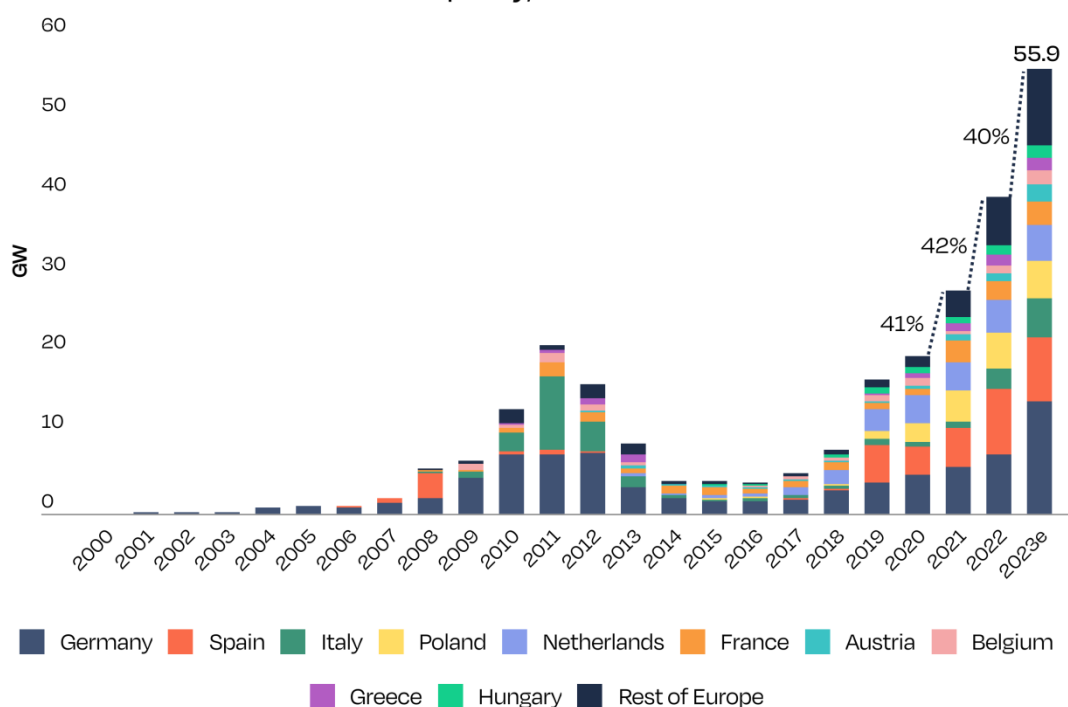
2.2 Εξέλιξη Ευρωπαϊκής-Ελληνικής Αγοράς Φωτοβολταϊκών

2.2.1 Ευρωπαϊκή αγορά

Από το 1980 μέχρι το 2005 έγιναν σημαντικά βήματα για την εξέλιξη της Ευρωπαϊκής αγοράς των φωτοβολταϊκών. Η Γερμανία έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην περαιτέρω ανάπτυξη της αγοράς των φωτοβολταϊκών τα επόμενα χρόνια, ως απεικονίζεται στο διάγραμμα της Εικόνα 14. Συγκεκριμένα, το 2005 η εγκατεστημένη ισχύς έφτασε τα 985MW, με τη Γερμανία να λαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό συνολικής ισχύς. Τρία χρόνια αργότερα το 2008, η Ισπανία ξεπερνώντας την εγκατεστημένη ισχύ της Γερμανίας κατέκτησε ρεκόρ συνολικής ισχύς φτάνοντας τα 2,6GW. Το 2009 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς παραμένει σχεδόν ίδια, με την Γερμανία να κατέχει ξανά το μεγαλύτερο ποσοστό συνολικής ισχύς. Τρία χρόνια αργότερα το 2011, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φτάνει τα 22,4GW, με την πλειοψηφία της εγκατεστημένης ισχύς να προέρχεται από την Ιταλία και τη Γερμανία. Τα

επόμενα δύο χρόνια η συνολική ισχύς μειώνεται, με την Ιταλία και τη Γερμανία να παραμένουν οι δύο πρώτες χώρες με την μεγαλύτερη συνολική ισχύ. Μέχρι το 2016 η συνολική ισχύς συνεχίζει να μειώνεται και να φτάνει τα 6,7GW. Την επόμενη χρονιά η συνολική ισχύς αυξάνεται σταδιακά ώσπου το 2019 φτάνει τα 20,4GW, με την Γερμανία και την Ισπανία να λαμβάνουν τις πρώτες θέσεις. Τρία χρόνια αργότερα, το 2022 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φτάνει τα 40GW, με την Πολωνία και την Ολλανδία να προστίθενται στη συμβολή της Ισπανίας και της Γερμανίας και να καλύπτουν το μεγαλύτερο ποσοστό συνολικής ισχύς. Το 2023 η Ευρωπαϊκή ηλιακή ισχύς αυξάνεται κατά 55,9% και ανέρχεται στα 56GW. Ειδικότερα η Γερμανία εγκατέστησε 14,1GW, η Ισπανία 4,8GW, η Πολωνία 4,6GW, η Ολλανδία 4,1GW και οι υπόλοιπες Ευρωπαϊκές χώρες 28,4 GW. Τα ανωτέρω δεδομένα απεικονίζονται στο διάγραμμα της Εικόνα 14.

EU-27 Annual Solar PV Installed Capacity, 2000-2023



SOURCE: European Market Outlook for Solar Power 2023-2030



Εικόνα 14: Ετήσια Ευρωπαϊκή Εγκατεστημένη Ισχύς

(New report: EU solar reaches record heights of 56 GW in 2023 but warns of clouds on the horizon, 2023)

2.2.2 Ελληνική αγορά

Η ΔΕΗ τοποθέτησε τα πρώτα φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα εγκαθιστώντας ένα φωτοβολταϊκό σύστημα των 100KW στην Κύθνο το 1983 και ένα σύστημα των 60KW στην Σίφνο το 1999. Συνολικά το 2000 στην Ελληνική επικράτεια εγκαταστάθηκε 1MW, το 2003 εγκαταστάθηκαν 3,3MW, ενώ το 2005 εγκαταστάθηκαν 5,4MW. Η ανάπτυξη της αγοράς των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα ξεκίνησε το 2006 μέσω της δυνατότητας κατάθεσης αιτήσεων εγκατάστασης στην αρμόδια υπηρεσία της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ), γεγονός που προκάλεσε την αύξηση των εγκαταστάσεων στα 6,7MW. Το 2007 οι εγκαταστάσεις κυμάνθηκαν στα 9,2MW, ενώ το 2008 ξεκίνησε η ραγδαία ανάπτυξη των εγκαταστάσεων φτάνοντας τα 19,7MW. Το 2009 εγκαταστάθηκαν φωτοβολταϊκά τα οποία είχαν συνολική εγκατεστημένη ισχύ 29,8MW. Ένα χρόνο αργότερα, το 2010, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς έφτασε τα 198MW, ενώ το 2011 η συνολική ισχύς πολλαπλασιάστηκε, φτάνοντας τα 626MW. Το 2012 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς έφτασε τα 1,5 GW ενώ ένα χρόνο αργότερα, το 2013, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αυξήθηκε στα 2,5GW και παρέμεινε σταθερή για τα επόμενα 7 χρόνια (2,5GW έως 2,8GW). Η στασιμότητα που παρατηρείται στην ανάπτυξη της αγοράς των φωτοβολταϊκών το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα οφειλόταν σε διάφορους παράγοντες. Πρώτος και κύριος παράγοντας ήταν η οικονομική κρίση την οποία βίωνε η χώρα εκείνη την περίοδο. Οι επενδύσεις για τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είχαν μειωθεί καθώς δεν υπήρχε η ανάλογη χρηματοδότηση και το επενδυτικό ενδιαφέρον. Επιπλέον, παρατηρείται ότι τα προηγούμενα χρόνια το πλήθος των φωτοβολταϊκών που εγκαταστάθηκαν ήταν μεγάλο γεγονός το οποίο προκάλεσε τον κορεσμό της αγοράς με αποτέλεσμα η ελληνική κυβέρνηση να μειώσει τις επιδοτήσεις και να αποθαρρυνθούν καινούριες επενδύσεις.

Συγχρόνως το 2015 ξεκίνησαν τα προγράμματα του ενεργειακού συμψηφισμού παραγόμενης-καταλισκόμενης ενέργειας (net-metering). Net-metering είναι η διαδικασία της παραγωγής ενέργειας από τον καταναλωτή με παράλληλη αποθήκευση της ενέργειας αυτής στο δίκτυο. Το 2020 η παραγόμενη ισχύς αυξήθηκε σταδιακά στα 3,3GW. Ένα χρόνο αργότερα το 2021 η συνολική ισχύς έφτασε τα 4,2GW, το 2022 η παραγόμενη ισχύς αυξήθηκε στα 5,5GW ενώ το 2023 παρήχθησαν 6,2GW. Η ετήσια και η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ελλάδα απεικονίζεται στα διάγραμμα των εικόνων 14 και 15. Μέχρι το 2027 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της Ελλάδας αναμένεται να αυξηθεί κατά 4%.

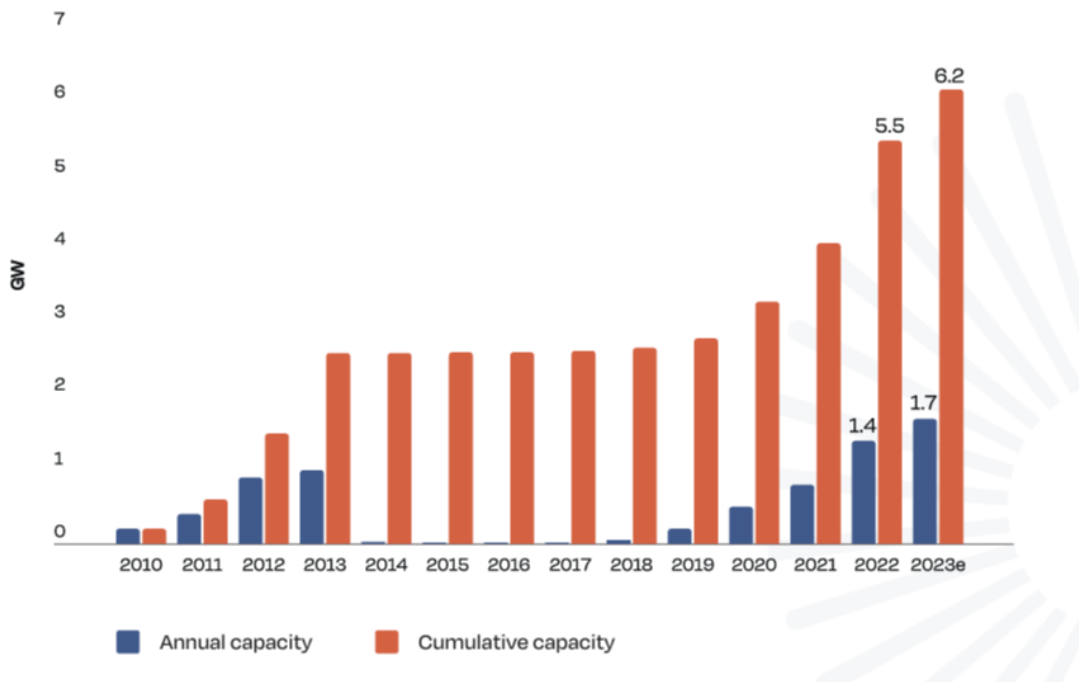
Η αύξηση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύς οφειλόταν τόσο στην εγκατάσταση περισσότερων φωτοβολταϊκών όσο και στην εξέλιξη της τεχνολογίας αυτών. Συγκεκριμένα, το 2009 η ισχύς ενός φωτοβολταϊκού πάνελ έφτανε τα 290Wp, ενώ το 2010 η ισχύς αυξήθηκε ελάχιστα στα 295Wp. Ένα χρόνο αργότερα, το 2011, η ισχύς ενός φωτοβολταϊκού πάνελ έφτανε τα 305Wp ενώ το 2012 η ισχύς κυμαινόταν στα 320Wp. Τη χρονική περίοδο από το 2013 έως το 2020 η ισχύς ενός φωτοβολταϊκού πάνελ κυμαινόταν από 325Wp έως 550Wp, παρά το γεγονός ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς παρέμενε σταθερή. Το 2021 η ισχύς ενός φωτοβολταϊκού έφτανε τα 670Wp και το 2022 η ισχύς έφτανε τα 700Wp. Το 2023 η ισχύς έφτανε τα 720Wp, αριθμός που αναμένεται να αυξηθεί με την πάροδο των χρόνων.



Εικόνα 15: Ετήσια Παραγόμενη Ισχύς στην Ελλάδα (2000-2008)

(Βόκας, 2009)

FIGURE GW 9.1 GREECE SOLAR PV MARKET DEVELOPMENT 2010-2023, BY HELAPCO



Εικόνα 16: Ετήσια Παραγόμενη Ισχύς στην Ελλάδα (2010-2023)

(EU Market Outlook for Solar Power 2023-2027)

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Φωτοβολταϊκά

3.1 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών πάνελ

Τα φωτοβολταϊκά κελιά βασίζονται στην ικανότητα των ημιαγωγών να μετατρέπουν όσο το δυνατόν περισσότερο ηλιακό φως σε ενέργεια. Η ακτινοβολία που προσπίπτει στο κελί προκαλεί την κίνηση των φορτισμένων σωματιδίων μέσα στον ημιαγωγό παράγοντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια.

3.1.1 Μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mono-Si)

Τα πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι τα πιο γνωστά και επιτυγχάνουν βαθμό απόδοσης έως και 26,7% ενώ η διαδικασία παραγωγής τους είναι χαμηλού κόστους. Περιέχουν πυρίτιο το οποίο κρυσταλλώνεται στο ίδιο πλέγμα, Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο μπορεί να συμπεριφερθεί ως ημιαγωγός που αποτελείται από πολύ καθαρό πυρίτιο. Ανάλογα με τον συνδυασμό άλλων στοιχείων μπορεί να καταταχθούν σε δύο τύπους, τύπο-p και τύπο-n. Έχουν ομοιόμορφο μπλε σκούρο ή μαύρο χρώμα και σχήμα τετραγωνικό ή τετραγωνικό με κομμένες τις γωνίες τους.

Τα στοιχεία (ή κύτταρα ή κυψέλες ή κελιά) τύπου p είναι γεμάτα βόριο, το οποίο έχει λιγότερα ηλεκτρόνια από το πυρίτιο κάνοντας έτσι το στοιχείο θετικά φορτισμένο (positive). Αντίθετα, τα στοιχεία τύπου n είναι γεμάτα φώσφορο το οποίο έχει ένα παραπάνω ηλεκτρόνιο από το πυρίτιο, οπότε το στοιχείο φορτίζεται αρνητικά (negative). Αυτή την περίοδο τα στοιχεία τύπου p επικρατούν στην αγορά. Παρόλα αυτά, τα στοιχεία τύπου n έχουν αποκτήσει διασημότητα έχοντας μεγάλη προοπτική, καθώς τα υλικά τους παρουσιάζουν υψηλές ικανότητες αύξησης της αποδοτικότητας σε σχέση με τα στοιχεία τύπου p.

3.1.2 Πολυκρυσταλλικού πυριτίου (poly-Si)

Τα πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου επιτυγχάνουν βαθμό απόδοσης έως και 22,3%. Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο είναι ένα λεπτόκοκκο και υψηλής καθαρότητας προϊόν του κρυσταλλικού πυριτίου και έχει την μορφή σφαιριδίων ή ράβδων η οποία διαφέρει ανάλογα την μέθοδο παραγωγής. Τα πάνελ έχουν μπλε χρώμα το οποίο είναι ανομοιόμορφο σε όλη την επιφάνεια του κελιού.

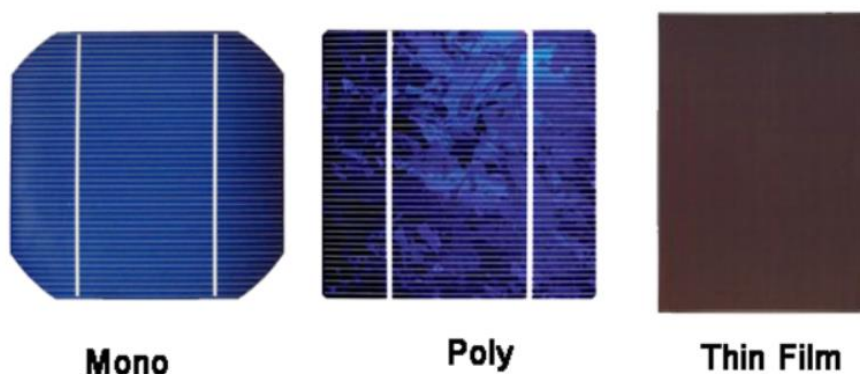
3.1.3 Λεπτού υμένα (Thin film)

Τα πάνελ λεπτού υμένα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, άμορφου πυριτίου(a-Si), καδμίου-τελλούριου (CdTe) και χαλκού-ινδίου-γαλλίου-σεληνίου (CIGS). Έχουν χρώμα μαύρο, μπλε ή σκούρο μοβ και το σχήμα τους είναι τετράγωνο.

Τα πάνελ άμορφου πυριτίου κατασκευάζονται από άμορφο πυρίτιο, το οποίο δεν είναι κρυσταλλικό. Το γεγονός αυτό κάνει τα συγκεκριμένα πάνελ πιο εύκολα στην παραγωγή σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά.

Τα πάνελ καδμίου-τελλούριου είναι δεύτερα στην κατηγορία ζήτησης μετά τα κρυσταλλικά. Είναι κατασκευασμένα από μια χημική ένωση η οποία ονομάζεται Κάδμιο Τελλούριο, η οποία είναι εξαιρετική στο να συγκεντρώνει το ηλιακό φως και να το μετατρέπει σε ενέργεια. Ωστόσο, τα προαναφερθέντα πάνελ έχουν κάποια μειονεκτήματα. Το τελλούριο είναι πολύ σπάνιο στοιχείο, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορεί να πραγματοποιηθεί μαζική παραγωγή. Ακόμα ένα μειονέκτημα είναι η τοξικότητα του καδμίου. Η τοξικότητα του το καθιστά ως ένα από τα πιο τοξικά στοιχεία στον κόσμο. Για τον λόγο αυτό απαιτεί μέτρα ασφαλείας κατά την διάρκεια παραγωγής τους για την αντιμετώπιση της τοξικότητας.

Τα πάνελ χαλκού-ινδίου-γαλλίου-σεληνιδίου κατασκευάζονται τοποθετώντας στρώσεις χαλκού, ινδίου, γαλλίου, σεληνιδίου την μια πάνω στην άλλη, για να δημιουργηθεί ημιαγωγός που θα μετατρέπει το ηλιακό φως σε ενέργεια.



Εικόνα 17: Κελιά φωτοβολταϊκών

(photovoltaic (PV))

3.2 Κατασκευή Φωτοβολταϊκών

3.2.1 Φωτοβολταϊκά πυριτίου (silicon)

Η πλειοψηφία των φωτοβολταϊκών πάνελ που συναντώνται στο εμπόριο έχουν ως απορροφητικό υλικό το κρυσταλλικό πυρίτιο. Τα κρυσταλλικά πάνελ είναι πιο διαδεδομένα σε σχέση με τα υπόλοιπα πάνελ χάρη στην υψηλή αξιοπιστία, αποδοτικότητα και διαθεσιμότητα τους. Τα στάδια κατασκευής των συγκεκριμένων πάνελ αναγράφονται κάτωθι.

Μονοκρυσταλλικά πάνελ

Παραγωγή κρυσταλλικού πυριτίου (silicon)

Ένα από τα βασικά συστατικά των μονοκρυσταλλικών πάνελ είναι το πυρίτιο γνωστή και ως χαλαζιακή άμμος. Πιο συγκεκριμένα για να κατασκευαστεί ένα μονοκρυσταλλικό κελί πρέπει να συλλεχτεί το καθαρό πυρίτιο από τη χαλαζιακή άμμο έτσι ώστε να κατασκευαστεί το μεταλλουργικό πυρίτιο. Για να δημιουργηθεί το μεταλλουργικό πυρίτιο μέσα σε ειδικούς φούρνους τοποθετείται άνθρακας (Carbon) και η χημική ένωση πυριτίου-οξυγόνου (SiO_2) σε θερμοκρασία $2552^\circ\text{Fahrenheit}$, δημιουργώντας 98% έως 99% καθαρό πυρίτιο. Ωστόσο, η καθαρότητα του πυριτίου δεν είναι αρκετά υψηλή για να χρησιμοποιηθεί σε φωτοβολταϊκά πάνελ, για αυτό και υπόκειται σε περισσότερη επεξεργασία.

Μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους επεξεργασίας, κατακτώντας το 90% της αγοράς, ονομάζεται Siemens. Η κατασκευή του κρυσταλλικού πυριτίου συνήθως βασίζεται σε μεθόδους που χρησιμοποιούν δραστικά αέρια. Η σύνθεση των αερίων αυτών γίνεται με χρήση υδρογόνου-χλωρίου (HCl) και μεταλλουργικού πυριτίου (Si). Κατά την διάρκεια της διαδικασίας Siemens, το αέριο ένωσης πυριτίου-υδρογόνου-χλωρίου θερμαίνεται με την βοήθεια ενός θερμαινόμενου νήματος πυριτίου. Όταν το αέριο θερμανθεί γίνεται διάσπαση των μοριακών δεσμών και το άτομο του πυριτίου παραμένει πάνω στο νήμα. Το νήμα διογκώνεται και παίρνει την μορφή μιας μεγάλης ράβδου κρυσταλλικού πυριτίου σε σχήμα U. Τα άτομα του υδρογόνου και χλωρίου που περισσεύουν επαναχρησιμοποιούνται επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία. Το νήμα είναι κατασκευασμένο από καθαρό πυρίτιο, έτσι ώστε να μην μολύνει το κρυσταλλικό πυρίτιο. Πέρα των ανωτέρω υφίστανται μια διαδικασία κατά την οποία μικρά σφαιρίδια πυριτίου κατακάθονται στον πυθμένα ενός ανεστραμμένου κωνικού δοχείου. Μέσα στο δοχείο τοποθετείται μια χημική ένωση πυριτίου και υδρογόνου, εξαναγκάζοντας τα σφαιρίδια να επιπλέουν στην επιφάνεια. Θερμαίνοντας το

δοχείο προκαλείται η διάσπαση των δεσμών του πυριτίου-υδρογόνου, με αποτέλεσμα τα άτομα του πυριτίου να ακουμπούν πάνω στα μικρά σφαιρίδια, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του βάρους τους και έπειτα την καθίζηση τους. Τα σφαιρίδια κατακάθονται στον πυθμένα του δοχείου, έπειτα συλλέγονται και είναι έτοιμα για χρήση.

Παραγωγή πλινθωμάτων (ingot)

Η διαφορά ανάμεσα στα μονοκρυσταλλικά κελιά και τα πολυκρυσταλλικά, είναι ότι τα μονοκρυσταλλικά είναι φτιαγμένα από ένα ολόκληρο καθαρό πλίνθωμα πυριτίου.

Για να γίνει η μετατροπή του κρυσταλλικού πυριτίου σε πλίνθωμα, το κρυσταλλικό πυρίτιο τοποθετείται μέσα σε δοχείο το οποίο θερμαίνεται μέχρι αυτό να γίνει μια υγρή μάζα. Μια από τις πιο γνωστές διαδικασίες κατασκευής πλινθώματος, είναι η διαδικασία Czochralski. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας αυτής δημιουργείται μια μεγάλη κυλινδρική ράβδος μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Η δημιουργία της πραγματοποιείται αγγίζοντας έναν μικρό κρυσταλλικό σπόρο στην επιφάνεια της υγρής μάζας του πυριτίου. Αφού τοποθετηθεί ο σπόρος στην υγρή μάζα, τραβιέται και περιστρέφεται αργά προς τα πάνω. Κατόπιν υφίστανται μια άλλη διαδικασία η οποία ονομάζεται κατευθυντήρια στερεοποίηση. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας αυτής, το υγρό πυρίτιο ψύχεται αργά και στερεοποιείται από κάτω μέχρι πάνω. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε χρονικό διάστημα τεσσάρων (4) ημερών. Αφού παρέλθει το χρονικό διάστημα των τεσσάρων ημερών έχει δημιουργηθεί ένας μεγάλος ομογενής μονοκρυσταλλικός κύλινδρος, γνωστός ως ράβδος πυριτίου ή πλινθώματος. Το μέγεθος του πλινθώματος εξαρτάται από τρεις (3) διαφορετικούς παράγοντες, οι οποίοι είναι η θερμοκρασία, ο ρυθμός ψύξης και η ταχύτητα περιστροφής.

Παραγωγή γκοφρετών (wafer)

Τα παραγόμενα πλινθώματα πυριτίου κόβονται σε λεπτές γκοφρέτες πάχους 200μm, με χρήση πριονιών με επικάλυψη διαμαντιού. Κατά την διαδικασία κοπής των γκοφρετών παράγεται 40% πριονίδι, το οποίο ονομάζεται kerf. Το kerf πωλείται στη βιομηχανία του χάλυβα, ωστόσο υφίσταται η δυνατότητα να ανακυκλωθεί και να τεθεί ξανά στην διαδικασία παραγωγής γκοφρετών.



Εικόνα 18: Διαδικασία ανακύκλωσης kerf

(Silicon kerf recycling)

Η δημιουργία γκοφρέτας χωρίς την παραγωγή πριονιδιού είναι λιγότερο συνηθισμένη και μπορεί να επιτευχθεί με δύο διαφορετικές μεθόδους. Μια από αυτές της μεθόδους είναι τραβώντας παγωμένες στρώσεις από το λιωμένο πυρίτιο. Μια άλλη μέθοδος αποφυγής παραγωγής πριονιδιού είναι χρησιμοποιώντας ενώσεις αέριου πυριτίου. Η μέθοδος αυτή πραγματοποιείται τοποθετώντας μια λεπτή στρώση από άτομα πυριτίου σε ένα κρυσταλλικό περίγραμμα σε σχήμα γκοφρέτας.

Οι κρυσταλλικές γκοφρέτες είναι θετικά φορτισμένες, για την ακρίβεια λειτουργούν ως τύπου p. Για να παραχθεί ηλεκτρισμός χρειάζεται p-n ένωση, αυτό σημαίνει ότι πρέπει να τοποθετηθεί μια αρνητικά φορτισμένη στρώση φωσφόρου σε κάθε γκοφρέτα. Κατόπιν η γκοφρέτα ψήνεται στους 1652°F για να γίνει έγχυση αζώτου στο φώσφορο. Ο συνδυασμός αζώτου και φωσφόρου δημιουργεί μια τύπου n στρώση και κατά συνέπεια μια αποτελεσματική τύπου p-n γκοφρέτα, η οποία αυξάνει την απόδοση του πάνελ. Η στρώση αυτή ονομάζεται BSF-Back Surface Field.

Κατασκευή κυψέλης-κελιού (cell)

Οι γκοφρέτες πυριτίου μετατρέπονται σε φωτοβολταϊκά στοιχεία (κυψέλες). Για να δημιουργηθούν οι κυψέλες ακολουθείται μια σειρά βημάτων. Το πρώτο βήμα είναι η τοποθέτηση χημικών στην επιφάνεια της γκοφρέτας τα οποία αφαιρούν την σκόνη και την ζημιά που έχει προκαλέσει το πριόνι. Συγκεκριμένα, κάνουν την επιφάνεια της κυψέλης πιο τραχιά με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ποσότητα του φωτός που μπορεί να περάσει από την γκοφρέτα, όταν αυτή εκτεθεί στο ηλιακό φως. Οι διαδικασίες που ακολουθούν μετά την διόρθωση της ζημιάς του πριονιού εξαρτώνται από την αρχιτεκτονική της συσκευής. Οι

περισσότερες γκοφρέτες εκτίθενται σε αέριο που περιέχει ηλεκτρικά ενεργή πρόσμιξη και οι επιφάνειες τους καλύπτονται με στρώσεις που βελτιώνουν την απόδοση της κυψέλης. Μια κυψέλη τυπικά έχει μέγεθος 15,24cm επί 15,24cm.

Συναρμολόγηση πάνελ (module)

Κατά την συναρμολόγηση των πάνελ, ακολουθείται μια διαδικασία που ονομάζεται tabbing και stringing. Οι κυψέλες πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους σε σειρά έτσι ώστε η τάση στην έξοδο να αυξηθεί. Για να φορτιστεί μια μπαταρία 12 Volt συνήθως συνδέονται 30 ή 36 στοιχεία. Τα κελιά ή αλλιώς κυψέλες όταν είναι συνδεδεμένα σε σειρά ονομάζονται string. Tabbing ονομάζεται η διαδικασία σύνδεσης των κελιών σε σειρά, η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας χάλκινες κορδέλες (copper tabbing ribbons) επικαλυμμένες με συγκολλητικό υλικό, μόλυβδο (lead-Pb) και κασσίτερο (tin-Sn). Οι κορδέλες αυτές ενώνουν ράβδους διαύλου (busbars), ασημένιες (silver-Ag) λωρίδες, την μπροστινή επιφάνεια μιας κυψέλης με την πίσω επιφάνεια μιας διπλανής κυψέλης. Όταν οι κυψέλες συνδεθούν σε σειρά τότε, οι σειρές που δημιουργούνται συνδέονται παράλληλα για να αυξηθεί το ρεύμα στην έξοδο και κατά συνέπεια η ισχύς. Με την μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η μείωση απωλειών ισχύος των καλωδίων, όπως προκύπτει από την σχέση

$$P= I^2 \cdot R \quad 3-1$$

όπου Pη απώλεια ισχύος, Iτο ρεύμα και R αντίσταση. Κάθε μονοκρυσταλλικό πάνελ αποτελείται από 32 έως 96 καθαρά κρυσταλλικές γκοφρέτες τοποθετημένες σε στήλες και σειρές.

Οι χάλκινες κορδέλες (tabbing ribbons), πάχους 2mm, είναι κατασκευασμένες από χαλκό υψηλής αγωγιμότητας χωρίς την ύπαρξη οξυγόνου. Ο χαλκός που χρησιμοποιείται είναι εύκαμπτος με σκοπό την διευκόλυνση της συγκόλλησης αλλά και της προστασίας των κυψελών καθώς είναι πολύ εύθραυστες. Η επιφάνεια των κορδελών επικαλύπτεται με συγκολλητικό υλικό έτσι ώστε να αποφευχθεί η οξείδωση κατά την διάρκεια αποθήκευσης και μεταφοράς. Το συγκολλητικό υλικό συχνά έχει πάχος 0,025mm, το υλικό αυτό λιώνει και δημιουργεί την σύνδεση των κυψελών.

Οι ράβδοι διαύλου (busbars) συνήθως κατασκευάζονται από ασημί καθώς με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται καλύτερη αγωγιμότητα και αντανάκλαση. Συνέπεια των ανωτέρω είναι

να δημιουργείται μια ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ των κυψελών και οι κορδέλες να μεταφέρουν την ενέργεια που παράγει μια κυψέλη στην διπλανή της.

Ένα πολύ μικρό ποσοστό της επιφάνειας της κυψέλης σκιάζεται από τις κορδέλες, μειώνοντας έτσι την ισχύ που παράγεται. Για τον λόγο αυτό η πάνω επιφάνεια της καλύπτεται με νιτρίδιο πυριτίου (Si_3N_4) ή διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2). Αυτή η στρώση ονομάζεται ARC-Anti Reflection Coating και έχει υψηλή αντανάκλαση, έτσι ώστε το φως να αντανακλάται αντί να απορροφάται. Ένα ποσοστό ανακλώμενου φωτός, αντανακλάται ξανά στην κυψέλη λόγω εσωτερικής ανάκλασης ανάμεσα στο γυαλί και τον αέρα. Το φαινόμενο αυτό βοηθά στην μείωση της απώλειας ισχύος λόγω σκίασης των κορδελών.

Το σύνολο των διασυνδεδεμένων κυψελών τοποθετείται με την μπροστινή όψη προς τα κάτω πάνω σε ένα φύλλο γυαλιού καλυμμένο με πολυμερές (polymer) ενθυλακωτικό (encapsulant), που ονομάζεται EVA Αιθυλένιο-Οξικός Βινυλεστέρας (Ethylene-Vinyl Acetate). Στην πίσω όψη των διασυνδεδεμένων κυψελών τοποθετείται ένα δεύτερο φύλλο encapsulant και έπειτα ένα σκληρό φύλλο πολυμερές ή ένα κομμάτι γυαλιού. Όλα τα υλικά αυτά θερμαίνονται μαζί στους 360 με 380°C, για να γίνει το πάνελ αδιάβροχο. Επιπλέον, στο πίσω φύλλο τοποθετείται φθόριο πολυβινυλίου PVF (polyvinyl fluoride) και τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο PET (polyethylene terephthalate). Το PVF τοποθετείται στην εξωτερική πλευρά και προστατεύει το πάνελ από την τριβή, την χημική ατμόσφαιρα και την υπεριώδη ακτινοβολία. Ταυτόχρονα τοποθετείται και στην πλευρά της κυψέλης έτσι ώστε να την ενώνει με το EVA. Το PET τοποθετείται από την εσωτερική πλευρά και παρέχει ηλεκτρική μόνωση. Η ένωση των στρωμάτων (PVF-PET-PVF) πραγματοποιείται με εποξική ρητίνη (epoxy) και με ουρεθάνη (urethane). Στην συνέχεια τοποθετείται αλουμινένιο (aluminium) πλαίσιο, σιλικόνη (silicone) ως στεγανωτικό άκρων για την προστασία από θερμικές και μηχανικές εντάσεις και κουτί διακλάδωσης (junction box).

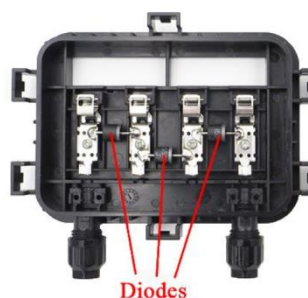
Το κουτί διακλάδωσης (junction box), το οποίο απεικονίζεται στις εικόνες 22 και 23 είναι ένα από τα πιο σημαντικά κομμάτια του φωτοβολταϊκού. Μέσα στο κουτί διακλάδωσης συνδέονται ηλεκτρικά τα strings του φωτοβολταϊκού. Το κουτί τοποθετείται στο πίσω μέρος του πάνελ με κόλλα πυριτίου και είναι η διεπαφή εξόδου του. Με την βοήθεια του junction box συνδέονται τα πάνελ μεταξύ τους, χρησιμοποιώντας καλώδια με επαφές MC4 / MC5 στα άκρα τους. (Στην Εικόνα 21 απεικονίζεται αντίστοιχη επαφή καλωδίου).

Τα περισσότερα κουτιά περιέχουν διόδους για την προστασία των φωτοβολταϊκών κυττάρων από μερική ή πλήρη σκίαση εξαιτίας φύλλων, δέντρων, κτηρίων ή κεραιών. Κατά την διάρκεια της ημέρας τα κελιά που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους δεν δέχονται τις ίδιες ηλιακές συνθήκες. Τα σκιασμένα κελιά προκαλούν μείωση του παραγόμενου ρεύματος και κατά συνέπεια μειωμένη ισχύ σε σχέση με τα μη σκιασμένα. Η τάση του σκιασμένου κελιού αντιστρέφεται και αναγκάζει το ρεύμα να ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση καταναλώνοντας ενέργεια. Με την πάροδο του χρόνου προκαλείται υπερθέρμανση και τήξη των συγκολλήσεων αλλά και ράγισμα του κελιού, συνεπώς καταστροφή του και έπειτα ολόκληρης της σειράς. Η λειτουργία της διόδου είναι να διατηρεί την κατεύθυνση του ρεύματος προς την μια πλευρά, για αυτό τον λόγο αυτό οι διόδοι τοποθετούνται αντίστροφα και παράλληλα με τις κυψέλες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρέχουν μια διαδρομή παράκαμψης της κυψέλης όταν αυτή σκιάζεται, έτσι το παραγόμενο ρεύμα δεν μπορεί να διαρρεύσει μέσω αυτής. Η τοποθέτηση διόδου σε κάθε μια κυψέλη καθίσταται πολύ ακριβή, για τον λόγο αυτό τοποθετείται μια διάδος σε σειρές των 16 έως 24 κυψελών.



Εικόνα 19: Junction box

(Dricus De Rooij)



Εικόνα 20: Εσωτερικό του Junction box

(Dricus De Rooij)

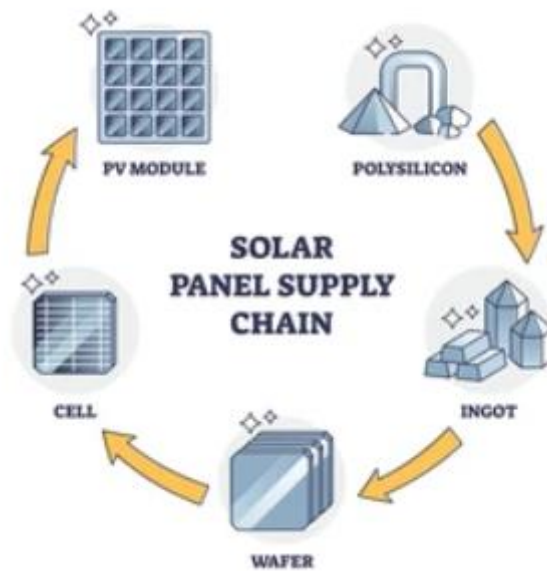


Εικόνα 21: Επαφές MC4 / MC5

(Dricus De Rooij)

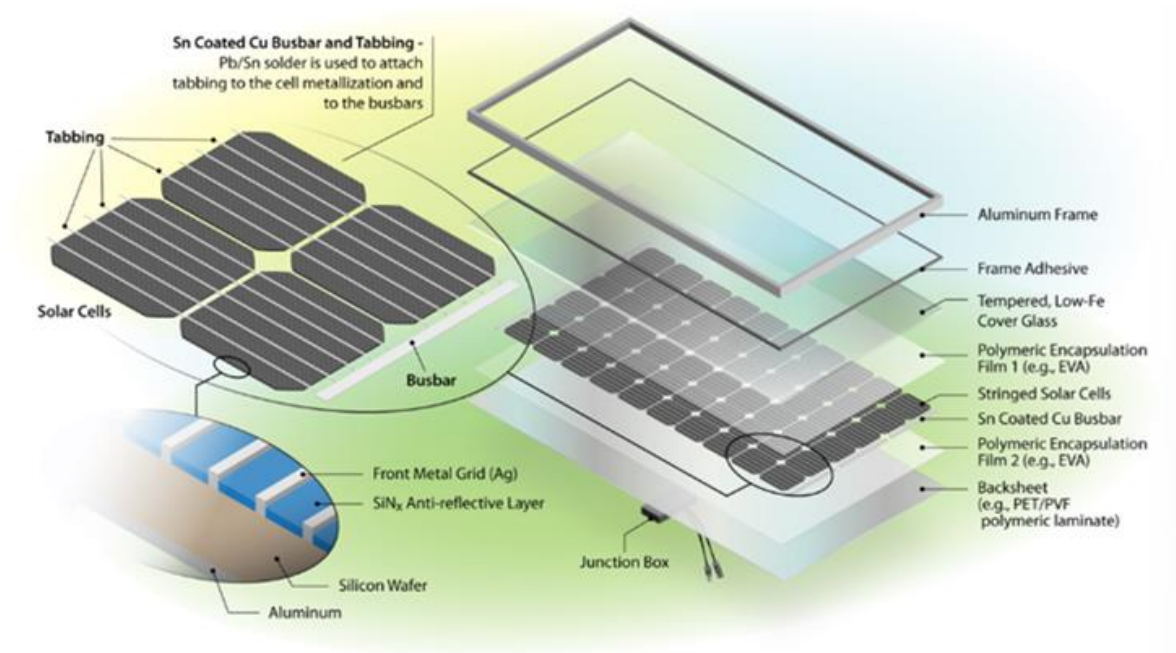
Πολυκρυσταλλικά πάνελ

Τα πολυκρυσταλλικά πάνελ είναι κατασκευασμένα από καθαρό πυρίτιο, ωστόσο σε αντίθεση με τα μονοκρυσταλλικά πάνελ κατασκευάζονται από πολλά διαφορετικά θραύσματα πυριτίου αντί για ένα ομογενές πλινθώμα. Συγκεκριμένα η παραγωγή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου διαφέρει κατά την διάρκεια της διαδικασίας Czochralski, όπου το λιωμένο πυρίτιο αφήνεται να κρυσταλλώσει και να θρυμματιστεί, αντί να δημιουργηθεί ο ομογενής κύλινδρος σχήμα U. Στην συνέχεια τα θραύσματα ρευστοποιούνται σε φούρνους και χύνονται σε καλούπια σχήματος κύβου. Κατόπιν στερεοποιείται το πυρίτιο, τα πλινθώματα κόβονται σε λεπτές γκοφρέτες. Η υπόλοιπη διαδικασία επεξεργασίας που ακολουθείται είναι όμοια με αυτή των μονοκρυσταλλικών γκοφρετών.



Εικόνα 22: Αλυσίδα κατασκευής ηλιακών πάνελ

(sutterstock)



Source: National Renewable Energy Laboratory.

Εικόνα 23: Μέρη του φωτοβολταϊκού πάνελ

(Brian, 2023)

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το βάρος των υλικών που χρησιμοποιούνται σε ένα κρυσταλλικό φωτοβολταϊκό πάνελ.

Material		Weight
Solar cell	Total	4.7%
	Silicon	4.4%
	Aluminium	0.3%
	Silver	0.03%
Ribbon	Total	0.9%
	Copper	0.8%
	Tin	0.1%
	Lead	0.01%
Glass	Solar glass	67%
Plastics	Total	11%
	EVA	6.7%
	PVF	0.8%
	PET	2.6%
	Silicone	0.9%
Frame	Aluminium	16%

Εικόνα 24: Βάρος υλικών σε ένα κρυσταλλικό φωτοβολταϊκό

(Rong Deng, Yuting Zhuo, Yansong Shen, 2022)

3.2.2 Φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα (Thin film)

Τα πιο γνωστά φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα είναι τα πάνελ καδμίου-τελουρίου. Τα πάνελ λεπτού υμένα επεξεργάζονται ως μια ολόκληρη μονάδα από την αρχή μέχρι το τέλος, τα στάδια της διαδικασίας αυτής πραγματοποιούνται σε μια εγκατάσταση. Η κατασκευή τους συνήθως ξεκινά με γυαλί float. Το γυαλί float κατασκευάζεται θερμαίνοντας γυαλί στους 1000°C, έπειτα το λιωμένο γυαλί ρίχνεται σε υγρό κασίτερο, επιπλέει και απλώνεται ομοιόμορφα χωρίς να υπάρχει καμία παραμόρφωση. Στην συνέχεια της διαδικασίας παραγωγής το γυαλί float επικαλύπτεται με διάφανη αγωγίμη στρώση μέσα στην οποία τοποθετείται και το απορροφητικό υλικό του φωτοβολταϊκού. Με χρήση λέιζερ διαμορφώνονται οι λωρίδες των κυψελών και δημιουργείται σύνδεση μεταξύ των γειτονικών κυψελών. Ακολούθως τοποθετούνται χάλκινες κορδέλες και έπειτα καλύπτονται από ένα encapsulant φύλλο και ένα δεύτερο φύλλο γυαλιού, όλα τα υλικά μαζί πλαστικοποιούνται έτσι ώστε να γίνουν αδιάβροχα. Μόλις το πάνελ γίνει αδιάβροχο, στο πίσω μέρος του τοποθετείται το junctionbox.

3.3 Ελληνική νομοθεσία φωτοβολταϊκών

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα, σύμφωνα με την αρμόδια υπηρεσία της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ) απαιτεί την εκτέλεση έξι (6) βημάτων, τα οποία είναι υποχρεωτικά και αυτοτελή.

Βήμα 1°

Χορήγηση Βεβαίωσης Παραγωγού ή Άδειας Παραγωγής, από την αρμόδια υπηρεσία της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ).

Η Βεβαίωση Παραγωγού όπως αυτή αναγράφεται στο ν.4685/2020, συνιστά άδεια σκοπιμότητας σύμφωνα με το Συμβούλιο της Επικράτειας (ΣτΕ 3749/2008, 4448/2013, 3572/2014).

Η προϋπόθεση για τη χορήγηση της βεβαίωσης είναι η τήρηση του ν.4685/2020 και του Κανονισμού Βεβαιώσεων Παραγωγού (ΦΕΚ Β'5291/01.12.2020) με τα κάτωθι τεχνικά χαρακτηριστικά χορηγείται η βεβαίωση. Συγκεκριμένα απαιτείται η γνωστοποίηση της θέσης και το μέγεθος του έργου και η απόσταση των παραγωγικών μονάδων. Επιπλέον, είναι απαραίτητη η μη ύπαρξη άλλης άδειας στο ίδιο σημείο και το δίκτυο διανομής να μην είναι

κορεσμένο. Τέλος, σύμφωνα με το Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης, το έργο δεν θα πρέπει να βρίσκεται εντός της ζώνης αποκλεισμού.

Η Άδεια Παραγωγής αλλά και η Βεβαίωση Παραγωγού Ειδικού Έργου αναγράφονται επίσης στο ν.4685/2020. Η τελική χορήγηση της άδειας σκοπιμότητας λαμβάνεται κατόπιν ελέγχου της οικονομικής επάρκειας του φορέα υλοποίησης και της ενεργειακής αποδοτικότητας του έργου.

Βήμα 2^ο

Χορήγηση Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ), από την αρμόδια υπηρεσία της Αποκεντρωμένης Διοίκησης ή Περιφέρειας που ανήκει το έργο ή Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ).

Η Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων αποτελεί την περιβαλλοντική αδειοδότηση, κατά την οποία ελέγχονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του έργου. Για τα έργα κατηγορίας Α, απαιτείται η υποβολή Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων. Η κατηγορία Α χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες, την Α1 η οποία αφορά έργα με πολύ σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και έχουν αρμόδια αρχή το ΥΠΕΝ και την Α2 η οποία έργα με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και έχουν αρμόδια αρχή την Αποκεντρωμένη Διοίκηση. Για τα έργα της κατηγορίας Β, η οποία αφορά έργα που έχουν τοπικές ή μη σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, απαιτείται η υποβολή των Πρότυπων Περιβαλλοντικών Δεσμεύσεων (ΠΠΔ). Η κατηγορία Β έχει αρμόδια αρχή την Περιφέρεια. Πέρα των ανωτέρω είναι υποχρεωτική η υποβολή και άλλων μελετών (τεχνικές, περιβαλλοντικές, οικολογικές, δασοτεχνικές κλπ). Ενδεικτικά το έργο εξετάζεται επιπλέον από τις Εφορείες Αρχαιοτήτων, το Περιφερειακό ή το Κεντρικό Αρχαιολογικό Συμβούλιο (εφόσον απαιτείται), τις Δασικές Υπηρεσίες, τη Διεύθυνση Χωροταξίας, τη Διεύθυνση Βιοποικιλότητας (εφόσον απαιτείται), τις Πολεοδομικές Υπηρεσίες, το ΓΕΕΘΑ, το Επιτελείο Αεροπορίας, Στρατού και Ναυτικού, το ΕΤΗΜ του ΓΕΑ, την ΥΠΑ και το Περιφερειακό Συμβούλιο.

Βήμα 3^ο

Χορήγηση Οριστικής Προσφοράς Σύνδεσης, από την αρμόδια υπηρεσία ΑΔΜΗΕ/ΔΕΔΔΗΕ. Ένα πιθανό αίτιο μη ολοκλήρωσης νέων έργων ΑΠΕ είναι ο κορεσμός

των δικτύων και η μη δυνατότητα σύνδεσης τους σε αυτά. Το ανωτέρω γεγονός μπορεί να αντιμετωπιστεί με την κατασκευή νέων υποσταθμών ή επιπλέον γραμμών κλπ.

Βήμα 4^ο

Χορήγηση Άδειας Εγκατάστασης, από την αρμόδια υπηρεσία της Αποκεντρωμένης Διοίκησης ή Περιφέρειας που ανήκει το έργο ή Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). Η ανωτέρω άδεια χορηγείται από το ΥΠΕΝ όταν η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι πολύ μεγάλη.

Βήμα 5^ο

Υπογραφή σύμβασης Πώλησης Ηλεκτρικής Ενέργειας/ Συμμετοχής στην Αγορά, η οποία συνάπτεται από την αρμόδια υπηρεσία της ΔΑΠΕΕΠ/ΔΕΔΔΗΕ και των Προμηθευτών Ηλεκτρικής Ενέργειας/Φορείς Σωρευτικής Εκπροσώπησης (ΦΟΣΕ) ΑΠΕ. Σε περίπτωση που το έργο κατατάσσεται σε καθεστώς κρατικής ενίσχυσης συνάπτεται σύμβαση με την ΔΑΠΕΕΠ ή τη ΔΕΔΔΗΕ. Τα καθεστώτα στήριξης βασίζονται σε μηχανισμούς αγοράς feed-in-premium (εγγυημένες διαφορικές τιμές), feed-in-tariff (σταθερές εγγυημένες τιμές) αλλά και net-metering (ως αναφέρεται στο υποκεφάλαιο Ελληνική αγορά). Σε περίπτωση που το έργο δεν κατατάσσεται σε καθεστώς κρατικής ενίσχυσης συνάπτονται διμερή συμβόλαια Purchasing Power Agreements (PPAs) με Προμηθευτές Ηλεκτρικής Ενέργειας ή με τον ΦΟΣΕ. Η υπογραφή της σύμβασης ή του συμβολαίου μπορεί να ολοκληρωθεί πριν την χορήγηση της Άδειας Εγκατάστασης ωστόσο απαιτείται για την έναρξη της δοκιμαστικής λειτουργίας.

Βήμα 6^ο

Χορήγηση η Άδεια Λειτουργίας, από την αρμόδια υπηρεσία της Αποκεντρωμένης Διοίκησης ή Περιφέρειας που ανήκει το έργο ή Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), η οποία χορηγείται μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του έργου ή και της σύνδεσης του σταθμού αλλά και της δοκιμαστικής λειτουργίας τους.

3.4 Στόχοι ΚΥΟΤΟ και Ευρωπαϊκής Ένωσης

Το ΚΥΟΤΟ είναι ένα πρωτόκολλο το οποίο καθορίζεται στη σύμβαση Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή, (United Nations Framework Convention on Climate Change-UNFCCC), η οποία υπογράφηκε το 1992 με σκοπό την αντιμετώπιση του

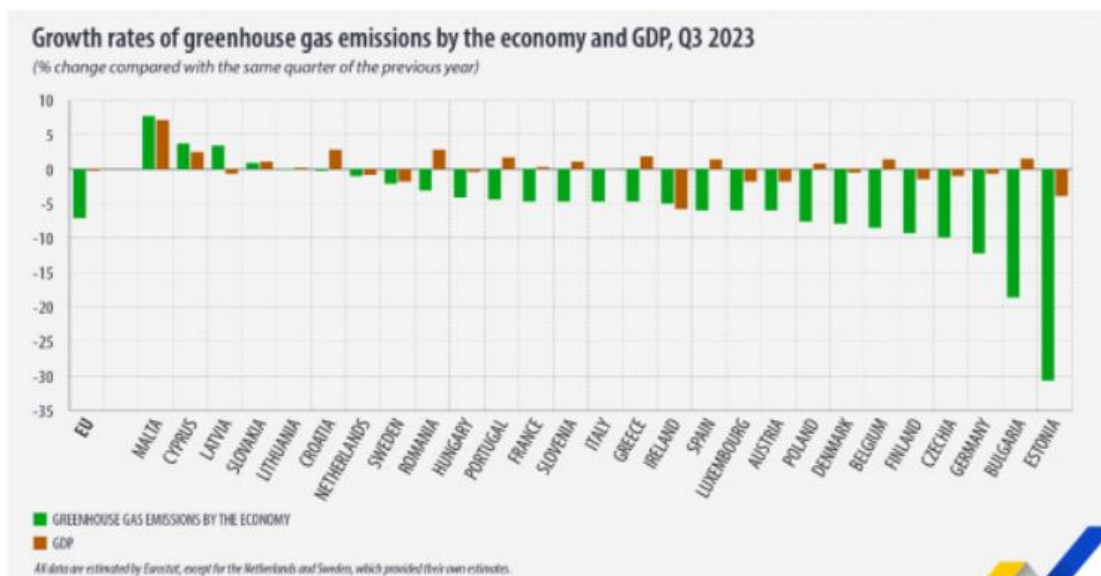
φαινόμενου του θερμοκηπίου. Σε αυτή συμμετέχουν η Ευρωπαϊκή Ένωση και 154 χώρες από όλο τον κόσμο (με εξαίρεση την Ιαπωνία). Το πρωτόκολλο ΚΥΟΤΟ υποχρεώνει τις συμμετέχουσες χώρες να μειώσουν τους ρύπους οι οποίοι είναι επιβλαβείς για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι ρύποι αυτοί είναι το διοξείδιου του άνθρακα CO₂, το οποίο είναι ένα από τα πιο επιβλαβή αέρια για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το μεθάνιο CH₄, το υποξείδιο του αζώτου N₂O, υδροφθοράνθρακες HFC, υδρογονάνθρακες ή υπερφθοράνθρακες PFC και εξαφθοριούχο θείο SF₆. Η εφαρμογή του πρωτοκόλλου ξεκίνησε με πενταετής συμβάσεις. Η πρώτη σύμβαση αφορούσε το χρονικό διάστημα από το 2008 έως το 2012 και υπογράφηκε από 37 χώρες. Στόχος της ήταν η μείωση των παγκόσμιων ρύπων κατά 5% σε σχέση με τους ρύπους του 1990, οι οποίοι ήταν 22,4 γιγατόνοι (billion metric tons). Στην συνέχεια από το 2013 έως το 2020 τέθηκε σε ισχύ η δεύτερη σύμβαση, στην οποία συμμετείχαν 147 χώρες και είχε ως στόχο την μείωση των ρύπων κατά 18% σε σχέση με τους ρύπους του 1990. Λόγω του γεγονότος ότι ο ανωτέρω στόχος δεν επετεύχθη η προθεσμία παρατάθηκε έως το 2023. Το 2024 αναμένεται η δημιουργία καινούργιας σύμβασης.

Το πρωτόκολλο για την επίτευξη των στόχων περιλαμβάνει τρεις μηχανισμούς, οι οποίοι είναι ο International Emissions Trading (ET), ο Clean Development Mechanism (CDM) και ο Joint Implementation (JI). Ο International Emissions Trading είναι η εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών. Συγκεκριμένα, όταν μια χώρα έχει διαθέσιμους ρύπους επιτρέπεται να τους πουλήσει σε χώρες που έχουν ξεπεράσει το επιτρεπτό όριο των ρύπων τους. Ο δεύτερος και ο τρίτος μηχανισμός βασίζονται σε προγράμματα έργων. Ο Clean Development Mechanism (CDM) είναι ο μηχανισμός καθαρής ανάπτυξης, ο οποίος επιτρέπει σε αναπτυγμένες χώρες που ξεπερνούν το επιτρεπτό όριο ρύπων να δημιουργήσουν έργα μείωσης εκπομπών σε άλλες αναπτυσσόμενες χώρες. Με αυτό τον τρόπο εξισορροπείται η εκπομπή των ρύπων της μιας χώρας με την μείωση της άλλης. Ο τελευταίος μηχανισμός Joint Implementation (JI) επιτρέπει την κοινή εφαρμογή μείωσης ρύπων. Συγκεκριμένα, μια χώρα μπορεί να κερδίσει μονάδες μείωσης ρύπων (Emission Reduction Units-ERU) σε συνεργασία με μια άλλη χώρα, μέσω της υλοποίησης ενός έργου μείωσης εκπομπών.

Το πρωτόκολλο ΚΥΟΤΟ αλλά και η Ευρωπαϊκή Ένωση ενθαρρύνουν την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ο ήλιος, ο αέρας, το νερό και η γεωθερμία, με σκοπό την μείωση των εκπομπών. Τα τελευταία χρόνια το ποσοστό ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές που καταναλώνει η Ε.Ε ξεπερνά το 20%.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση επιπλέον προσπαθεί να μειώσει τους ρύπους με τους δικούς της θεσμούς. Συγκεκριμένα, το 2016, το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης υπέγραψε τη συμφωνία του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή. Στόχος της συμφωνίας ήταν ο περιορισμός της αύξησης της θερμοκρασίας και η μείωση των ρύπων σε ποσοστό 40% μέχρι το 2030 σε σύγκριση με τα ποσοστά του 1990.

Το 2019 η Ευρωπαϊκή Ένωση είχε καταφέρει να μειώσει τους ρύπους κατά 26% σε σχέση με το 1990, πριν ξεκινήσουν τα lockdown λόγω της πανδημίας Covid-19. Το 2020 καταγράφηκε η μεγαλύτερη μείωση των ρύπων σε ποσοστό 34%, η μεγάλη αυτή μείωση προκλήθηκε από τα lockdown που επιβλήθηκαν. Ένα χρόνο αργότερα, το 2021 καταγράφηκε μείωση σε ποσοστό 30% σε σχέση με το 1990. Ωστόσο το 2022 οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αυξήθηκαν περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη χρονιά, καθώς ξεκίνησε να ανακάμπτει η κοινωνία από την πανδημία. Η αύξηση κυμάνθηκε σε ποσοστό 6% ετησίως και η συνολική παραγωγή ρύπων ήταν 1.029 εκατομμύρια τόνοι. Το 2023 παρατηρήθηκε εκ νέου αύξηση των παγκόσμιων εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα σε ποσοστό 1,1% και η συνολική παραγωγή εκπομπών έφτασε τους 410 εκατομμύρια τόνους. Τα ποσοστά των εκπομπών του φαινόμενου του θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Emissions) αλλά και του ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος (GDP) απεικονίζονται στο διάγραμμα της Εικόνα 25. Ο όρος ακαθάριστο εγχώριο προϊόν αναφέρεται στα αγαθά και τις υπηρεσίες που παράγει μια χώρα. Όταν το ποσοστό αυτό αυξάνεται, τότε είτε τα αγαθά και οι υπηρεσίες αυξάνονται ποσοτικά είτε αυξάνεται η τιμή πώλησης αυτών. Σε αντίθεση με την παγκόσμια παραγωγή ρύπων, στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2023 παρατηρήθηκε μείωση των ρύπων και του ΑΕΠ κατά 7,1% και 0,2% αντίστοιχα. Σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικόνα 25 παρατηρείται ότι οι ρύποι αυξήθηκαν στην Μάλτα σε ποσοστό 7,7%, στην Κύπρο σε ποσοστό 3,7%, στη Λετονία σε ποσοστό 3,4% και στη Σλοβακία σε ποσοστό 0,9%. Αντίθετα, το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης κατέλαβε η Εσθονία κατά 30,7%, ενώ οι ρύποι στην Ελλάδα μειώθηκαν σε ποσοστό 4,7%.



Εικόνα 25: Ποσοστά εκπομπών ρύπων του φαινομένου του θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Emissions) και ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος (GDP)

(Eurostat: Μείωση των εκπομπών ρύπων στην Ελλάδα κατά 4,7% στο γ' τρίμηνο του 2023, 2024)

3.5 Πρώτες ύλες στην Ελλάδα (Al, γυαλί, Si, Ag)

Αλουμίνιο (Al)

Η πρώτη ύλη για την παραγωγή του αλουμινίου είναι ο βωξίτης. Ο βωξίτης είναι ένα πέτρωμα, κόκκινου χρώματος και κατατάσσεται σε δύο τύπους κοιτασμάτων. Ο πρώτος τύπος είναι κοιτάσματα λατεριτικού βωξίτη ενώ ο δεύτερος κοιτάσματα καρστικού βωξίτη. Τα κοιτάσματα λατεριτικού βωξίτη παράγονται από λατεριτική αποσάρθρωση αργιλοπυριτικών πετρωμάτων. Λατερίτης είναι ο σχηματισμός που δημιουργείται μετά την διαδικασία της αποσάρθρωσης ενώ λατερική αποσάρθρωση είναι η διαδικασία δημιουργίας του. Η λατεριτική αποσάρθρωση είναι μια πολύπλοκη χημική επεξεργασία, η οποία περιλαμβάνει ταυτόχρονη οξείδωση, αναγωγή, υδρόλυση και διάλυση. Τα κοιτάσματα καρστικού βωξίτη παράγονται από την διάβρωση λατεριτικού βωξίτη, ο οποίος μεταφέρεται και τοποθετείται σε μορφολογικές παγίδες καρστικών ασβεστόλιθων. Ο όρος Καρστ αναφέρεται στην διάβρωση των ασβεστολιθικών πετρωμάτων, κατά την οποία δημιουργούνται επιφανειακές και υπόγειες γεωμορφές όπως γλύφες, πηγάδια, καταβόθρες, δολίνες και καρστικοί αγωγοί.

Εντός ελληνικού γεωγραφικού χώρου έχουν βρεθεί μόνο κοιτάσματα καρστικού βωξίτη. Συγκεκριμένα, η Ελλάδα κατατάσσεται στην 8η θέση παγκοσμίως σε κοιτάσματα βωξίτη, πραγματοποιώντας εξόρυξη με υπόγειες εκμεταλλεύσεις σε ποσοστό 65% ενώ με υπαίθριες σε ποσοστό 35%. Επιπλέον η ετήσια παραγωγή βωξίτη ξεπερνά τους 2.400.000 τόνους και τα γεωλογικά αποθέματα τους 130.000.000 τόνους. Ένα ποσοστό του παραχθέντος βωξίτη διατίθεται στην εγχώρια παραγωγή αλουμινίου ενώ το υπόλοιπο εξάγεται στην διεθνή αγορά για άλλες χρήσεις όπως η τσιμεντοβιομηχανία.

Μετά την εξόρυξη του βωξίτη, το πέτρωμα υπόκειται σε μια επεξεργασία που ονομάζεται Bayer. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας αυτής γίνεται δύλιση του οξειδίου του αργιλίου μέσα από τον βωξίτη. Το πρώτο βήμα της διαδικασίας Bayer περιλαμβάνει την ανάμειξη και τη θέρμανση του βωξίτη με υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) το οποίο εν συνεχεία διαλύει το οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3) και παράγει αργλικό νάτριο (NaAlO_2). Το υδροξείδιο του νατρίου αφού ψυχθεί αναμειγνύεται με το αργλικό νάτριο, παράγοντας κρυστάλλους τρι-υδροξειδίου αργιλίου ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Ακολούθως οι κρύσταλλοι καθαρίζονται και καίγονται για να απομακρυνθεί το νερό, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παράγεται καθαρό οξείδιο αργιλίου, μια λευκή σκόνη που είναι γνωστή ως αλουμίνα.

Η αλουμίνα είναι το ενδιαμέσο προϊόν κατασκευής του αλουμινίου και μετατρέπεται σε αυτό μέσω μιας μεθόδου ηλεκτρόλυσης που ονομάζεται Hall-Heroult. Κατά την διαδικασία αυτή το οξείδιο του νατρίου διαλύεται μέσα σε μείγμα λιωμένου κρυόλιθου και άνθρακα (Na_3AlF_6). Το φθοριούχο αργίλιο (AlF_3) που περιέχεται στο μείγμα συντελεί στην μείωση του σημείου τήξης του κρυόλιθου. Καθώς το μείγμα περνά από την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, το υγρό αργίλιο ή γνωστό και ως αλουμίνιο όντας πιο πυκνό από τον λιωμένο κρυόλιθο κατακάθεται σαν ίζημα. Επιπλέον η καθίζηση αυτή του αλουμινίου μέσα στον λιωμένο κρυόλιθο το προστατεύει από την οξείδωση. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της βύθισης, το αλουμίνιο συλλέγεται ενώ ο άνθρακας οξειδώνεται και αναδύεται με μορφή φυσαλίδων ως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2).

Το αλουμίνιο που έχει παραχθεί μέσω της ηλεκτρόλυσης της αλουμίνας ονομάζεται πρωτόχυτο ενώ η παραγωγή ενός (1) τόνου πρωτόχυτου αλουμινίου απαιτεί δύο (2) τόνους αλουμίνας. Επιπλέον υφίστανται το δευτερόχυτο αλουμίνιο που παράγεται από scrap, δηλαδή παλιά κομμάτια αλουμινίου (παράθυρα ή πόρτες κλπ).

Το πρώτο εργοστάσιο αλουμινίου κατασκευάστηκε το 1963 ενώ η παραγωγή του ξεκίνησε τρία χρόνια αργότερα το 1966. Η ετήσια παραγωγή πρωτόχυτου αλουμινίου ήταν 36.000 τόνοι ενώ ο βωξίτης προερχόταν από τη διεθνή αγορά. Τα τελευταία χρόνια η Ελλάδα κατατάσσεται στην 7η θέση στην Ευρώπη στη παραγωγή πρωτόχυτου αλουμινίου με εγχώριο βωξίτη. Συγκεκριμένα η ετήσια παραγωγή πρωτόχυτου αλουμινίου στην Ελλάδα ξεπερνά 160.000 τόνους.

Το πρωτόχυτο αλουμίνιο υπόκειται σε δυο διαφορετικές μεταποιήσεις, στην Α μεταποίηση και στην Β μεταποίηση. Η Α μεταποίηση είναι αυτή που χρησιμοποιείται για στην κατασκευή των εξαρτημάτων του φωτοβολταϊκού. Η μεταποίηση αυτή κατηγοριοποιείται σε υποκλάδους ανάλογα με την επεξεργασία της πρώτης ύλης. Ένας από τους κλάδους αυτούς είναι η βιομηχανία έλασης, κατά την οποία παράγονται ημιπροϊόντα αλουμινίου όπως φύλλα και foil, τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φωτοβολταϊκών. Η ελληνική βιομηχανία έλασης παράγει 300.000 τόνους ημιπροϊόντων ετησίως.

Το αλουμίνιο είναι ένα ανακυκλώσιμο υλικό, το οποίο μπορεί να ανακυκλωθεί πολλαπλές φορές χωρίς να αλλοιωθούν οι ιδιότητες του. Με την ανακύκλωσή του εξοικονομείται το 95% της ενέργειας σε σχέση με αυτή που απαιτείται για να παραχθεί εξ ολοκλήρου.

Γυαλί

Το γυαλί παρασκευάζεται από τρία διαφορετικά συστατικά, τον διαμορφωτή, τα συλλιπάσματα και τους σταθεροποιητές. Τα συλλιπάσματα χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό των μεταλλευμάτων από τις όξινες προσμίξεις. Οι σταθεροποιητές χρησιμοποιούνται για να μην γίνεται το γυαλί εύθρυπτο, δηλαδή να μην θρυμματίζετε και αποσαθρώνεται από το νερό. Το βασικό συστατικό του διαμορφωτή είναι η χαλαζιακή άμμος ή αλλιώς οξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Τα συλλιπάσματα αποτελούνται από ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3) και οξείδιο του καλίου (K_2O) ενώ οι σταθεροποιητές αποτελούνται από ασβεστόλιθο ή αλλιώς ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3), ανθρακικό μαγνήσιο (MgCO_3) και οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3).

Χαλαζιακή άμμος

Η πρώτη ύλη της χαλαζιακής άμμου είναι ο χαλαζίας, ο οποίος είναι ένας λίθος πυριτίου και το χρώμα του είναι λευκό έως γκρι. Πολλές φορές το χρώμα του μπορεί να επηρεαστεί από άλλα ορυκτά και να γίνει κίτρινο, πράσινο ή μπλε ακόμα και ροζ ή κόκκινο αν έρθει σε επαφή με τον αιματίτη. Ο χαλαζίας αποτελείται από πυρίτιο και οξυγόνο (SiO_2) γνωστό και ως διοξείδιο του πυριτίου και είναι ένα εξαιρετικά σκληρό υλικό ενώ η δομή του είναι κρυσταλλική.

Ο χαλαζίας κατηγοριοποιείται ανάλογα με την χημική σύσταση και μορφή του. Η πρώτη κατηγορία είναι ο ορυκτός χαλαζίας γνωστός και ως Quartz, έχει την μορφή πρίσματος έξι όψεων ενώ οι άκρες του είναι κοφτερές και έχουν μορφή πυραμίδας. Ο ορυκτός χαλαζίας έχει υψηλή χημική καθαρότητα, είναι ανθεκτικός στις καιρικές συνθήκες και έχει διάφανο ή λευκό χρώμα. Τις περισσότερες φορές βρίσκεται πάνω σε βράχους και φαίνεται μόνο η μία του πλευρά. Όταν οι βράχοι διαβρώνονται ή φθείρονται, το ορυκτό συγκεντρώνεται στο έδαφος. Η δεύτερη κατηγορία είναι τα χαλαζιακά ή πυριτικά προϊόντα γνωστά και ως Silica, έχουν κοκκώδη μορφή ενώ το χρώμα τους είναι λευκό ή ανοιχτό κίτρινο. Η Silica έχει υψηλή αντοχή στη χημική διάβρωση και δεν θρυμματίζεται εύκολα. Τις περισσότερες φορές βρίσκεται στην φύση υπαίθρια ή υπόγεια ή ακόμα και μέσα στο νερό. Η Silica sand χρησιμοποιείται για την κατασκευή του γυαλιού. Τα αποθέματα των χαλαζιακών προϊόντων στην Ελλάδα, είναι ικανά να καλύψουν τις ανάγκες της αγοράς για πολλά χρόνια ακόμα, ξεπερνώντας τους 70.000.000 τόνους ενώ η ετήσια παραγωγή ξεπερνά τους 150.000 τόνους.

Ανθρακικό νάτριο

Το ανθρακικό νάτριο συναντάται σε δύο μορφές ορυκτών, το τρόνα και το νάτρο. Το τρόνα έχει σαν βασικό συστατικό ουδέτερο και όξινο ανθρακικό νάτριο, ενώ το νάτρο έχει το δεκαϋδρικό ανθρακικό νάτριο ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Το ανθρακικό νάτριο μπορεί να βρεθεί σε τεράστιες ποσότητες σε ξηρές λίμνες σε ερημικές περιοχές ή σε σημεία όπου έχει εξατμιστεί κάποια εποχική λίμνη ή στην τέφρα πολλών φυτών. Έχει μορφή σκόνης ενώ το χρώμα του είναι λευκό. Στην Ελλάδα δεν υπάρχουν αποθέματα ανθρακικού νατρίου.

Οξείδιο του καλίου

Το οξείδιο του καλίου δεν βρίσκεται στην φύση αλλά παράγεται σε εργαστήρια και διατίθεται στο εμπόριο. Είναι μια αδιάλυτη ουσία και πολύ δραστική ένωση ενώ έχει ανοιχτό κίτρινο ή λευκό χρώμα.

Ασβεστόλιθος

Ο ασβεστόλιθος αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη και είναι ένα ιζηματογενές πέτρωμα, το οποίο δημιουργείται από απόθεση. Ο ασβεστόλιθος δημιουργείται από απολιθώματα πολύ μικρών οργανισμών ή από θρυμματισμένα οστά ή από φυτά που έχουν πεθάνει και έχουν καταλήξει στο βάθος της θάλασσας. Όλα αυτά μαζί, κατακάθονται στον πυθμένα της θάλασσας και δημιουργούν το πέτρωμα του ασβεστόλιθου. Το πέτρωμα έχει χρώμα λευκό ή ανοιχτό γκρι και πολλές φορές μπορεί να εμφανιστεί σε χρώμα γκρι σκούρο ή ακόμα και κόκκινο ανάλογα με τις προσμίξεις του. Τα αποθέματα ασβεστόλιθου θεωρούνται ανεξάντλητα ενώ η παραγωγή στην Ελλάδα ξεπερνά τους 500.000 τόνους ετησίως.

Ανθρακικό μαγνήσιο

Το ανθρακικό μαγνήσιο είναι ένα άλας και έχει μορφή σκόνης ενώ το χρώμα του είναι λευκό. Συναντάται στη φύση σαν ορυκτό το οποίο ονομάζεται μαγνησίτης γνωστός και ως λευκόλιθος και έχει λευκό χρώμα. Κατηγοριοποιείται σε δύο διαφορετικούς τύπους, στον κρυπτοκρυσταλλικό μαγνησίτη και στον ανδρόκοκκο μαγνησίτη. Συνήθως συναντάται μέσα σε πετρώματα οφιολιθικών συμπλεγμάτων. Το οφιολιθικό σύμπλεγμα αποτελεί ένα πολλών χρόνων κομμάτι ωκεάνιου φλοιού, το οποίο έχει δημιουργηθεί από την διαπλάτυνση των ωκεανών. Τα αποθέματα λευκόλιθου στην Ελλάδα ξεπερνούν τους 15.000.000 τόνους ενώ η ετήσια παραγωγή ξεπερνά τους 450.000 τόνους.

Οξειδίο του αργιλίου

Το οξειδίο του αργιλίου όπως αναφέρεται και ανωτέρω παράγεται από την επεξεργασία του βωξίτη, 100 τόνοι βωξίτη παράγουν 40-50 τόνους οξειδίο του αργιλίου.

Κατασκευή γυαλιού

Για να κατασκευαστεί το γυαλί χρησιμοποιείται 73,7% διαμορφωτής χαλαζιακής άμμου, 16,5% συλλιπάσματα, από τα οποία τα 16% είναι ανθρακικού νατρίου, ενώ τα 0,5% οξειδίο του καλίου. Οι σταθεροποιητές αποτελούν το 9,8%, εκ των οποίων το 5,2% είναι ανθρακικού ασβεστίου, το 3,6% είναι ανθρακικού μαγνησίου ενώ το 1% που απομένει είναι οξειδίο του αργιλίου. Όλες οι προαναφερθέντες ουσίες αναμειγνύονται και θερμαίνονται μέσα σε ειδικούς κλιβάνους σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (1550-1600°C). Αφού λιώσουν δημιουργείται ένα γυάλινο υγρό, χωρίς την ύπαρξη φυσαλίδων. Για να μετατραπεί το υγρό

γυαλί σε στερεό υπόκειται στη διαδικασία της διαμόρφωσης. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι διαμόρφωσης του γυαλιού, ο πρώτος είναι με εμφύσηση, ο δεύτερος με τη βοήθεια καλουπιών ενώ ο τρίτος με συσκευές που δημιουργούν φύλλα γυαλιού. Το υγρό γυαλί περνά μέσα από μια διαδικασία ψύξης γύρω στους 700°C, κατά την διάρκεια αυτή το στερεό γυαλί παίρνει συγκεκριμένο σχήμα, όπως επίπεδες πλάκες. Κατά την διάρκεια της διαμόρφωσης το στερεό γυαλί γίνεται πιο εύθραυστο, για να αποφευχθεί οποιαδήποτε καταστροφή, το γυαλί υπόκειται σε μια άλλη διαδικασία που ονομάζεται ανόπτηση. Κατά την διαδικασία αυτή μειώνεται η σκληρότητα του στερεού γυαλιού, με αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολη η κατεργασία του. Στα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιείται γυαλί float όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Πυρίτιο (Si)

Το πυρίτιο είναι ένα χημικό στοιχείο το οποίο συναντάται στην φύση ως διοξείδιο του πυριτίου όπως αναφέρεται ανωτέρω. Με την αφαίρεση του οξυγόνου από το διοξείδιο του πυριτίου παράγεται το πυρίτιο.

Άργυρος (Ag)

Ο άργυρος γνωστός και ως ασήμι είναι ένα μαλακό μέταλλο ενώ το χρώμα του είναι λευκό. Έχει πολύ μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα για αυτό και χρησιμοποιείται στα φωτοβολταϊκά. Ο άργυρος βρίσκεται στην φύση σε μορφή αυτοφυή αργύρου, σαν αργυρίτης, σαν χλωραργυρίτης και σαν πυραργυρίτης. Ο άργυρος λαμβάνεται ως παραπροϊόν καθώς βρίσκεται μαζί με άλλα μέταλλα όπως ο χαλκός (Cu) και ο μόλυβδος (Pb). Τα αποθέματα του αργύρου στην Ελλάδα ξεπερνούν τους 2.000 τόνους ωστόσο πλέον έχει σταματήσει η εξόρυξη του.

Στον πίνακα 1 που ακολουθεί αναγράφονται τα αποθέματα και η ετήσια παραγωγή των πρώτων υλών στην Ελλάδα.

Πίνακας 1: Αποθέματα Πρώτων Υλών και Ετήσια Παραγωγή στην Ελλάδα

Πρώτες ύλες	Αποθέματα στην Ελλάδα (τόνοι)	Ετήσια παραγωγή στην
Βωξίτης	130.000.000	2.400.000
Χαλαζιακή άμμος	70.000.000	150.000

Ανθρακικό νάτριο	-	-
Ασβεστόλιθος	Ανεξάντλητα	500.000
Ανθρακικό μαγνήσιο	15.000.000	450.000
Άργυρος	2.000	-

Προοπτικές πρώτων υλών

Τα επόμενα χρόνια η παραγωγή του βωξίτη αναμένεται να ξεπεράσει τους 1,2 εκατομμύρια τόνους ετησίως ενώ η παραγωγή του αλουμινίου αναμένεται να διπλασιαστεί. Η παραγωγή του χαλαζία, του ασβεστόλιθου όπως και του λευκόλιθου αναμένεται να αυξηθούν κατά πολύ τα επόμενα χρόνια.

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: Ανακύκλωση Φωτοβολταϊκών

4.1 Τρόποι Αποσυναρμολόγησης Φωτοβολταϊκών

Ο πλανήτης αντιμετωπίζει διάφορα προβλήματα λόγω της κλιματικής αλλαγής αλλά και λόγω της μείωσης των ορυκτών πόρων. Τα φωτοβολταϊκά, τα οποία αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια, αποτελούν ένα τρόπο αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων, ωστόσο δημιουργούν απόβλητα τα οποία μολύνουν το περιβάλλον. Το 2016 τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία τέθηκαν εκτός λειτουργίας (end of life- EoL) έφταναν τους 45.000 τόνους. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας-International Renewable Energy Agency (IRENA), ο αριθμός αυτός αναμένεται να αυξηθεί μέχρι το 2030 στους 6-8 εκατομμύρια τόνους, ενώ μέχρι το 2050 στους 60-70 εκατομμύρια τόνους. Η ανωτέρω αύξηση οφείλεται στο γεγονός ότι η μέση διάρκεια ζωής ενός φωτοβολταϊκού είναι 25-30 χρόνια. Σύμφωνα με την International Energy Agency (IEA), οι πιο συχνοί λόγοι απόσυρσης ενός πάνελ είναι η απώλεια ισχύος (σε ποσοστό 19%), τα προβλήματα στο junction box και στα καλώδια (σε ποσοστό 19%) και στο ράγισμα του γυαλιού (σε ποσοστό 10%). Άτεροι λόγοι απόσυρσης είναι η καταστροφή κάποιου κελιού, η ύπαρξη ηλεκτρικών προβλημάτων, η εξέλιξη της απόδοσης των πάνελ και η καταστροφή από κάποιο καιρικό φαινόμενο.

Η συσσώρευση των μη λειτουργικών πάνελ θα προκαλέσει πολλά περιβαλλοντικά προβλήματα αλλά και προβλήματα υγείας στους ανθρώπους. Για τον λόγο αυτό, η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων κρίνεται αναγκαία, καθώς υλικά όπως το πυρίτιο (Si), το γυαλί, ο χαλκός (Cu), το αλουμίνιο (Al), το ασήμι (Ag) κλπ δύναται να ανακτηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές κατασκευές.

Η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πάνελ καθιστά την χρήση αυτών λιγότερο επιβλαβή για το περιβάλλον. Επιπλέον, παρέχει την δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης πολλών σπάνιων στοιχείων (γάλλιο και ίνδιο) με θετικό αντίκτυπο στην οικονομία καθώς ανακτούνται υλικά μεγάλης αξίας δίχως αυτά να καταλήγουν σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ). Ένα ακόμα πλεονέκτημα της ανακύκλωσης των πάνελ είναι ότι η ανάκτηση των υλικών απαιτεί σημαντικά λιγότερη από αυτή που απαιτείται για την παραγωγή καινούργιων. Τέλος, η ανάπτυξη του κλάδου της ανακύκλωσης θα δημιουργήσει νέες θέσεις εργασίας.

Η ανακύκλωση των πάνελ ωστόσο είναι μια περίπλοκη και κοστοβόρα διαδικασία. Το ανωτέρω οφείλεται στο γεγονός ότι τα πάνελ αποτελούνται από πολλά διαφορετικά κομμάτια, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται ο διαχωρισμός προκαλώντας αντίστοιχη αύξηση του κόστους. Ένα ακόμα μειονέκτημα της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η μείωση της απόδοσης αυτών μετά το πέρας των 25 χρόνων σε ποσοστό από 6 έως 8%. Επί του παρόντος, ανακυκλώνεται μονάχα το 10% των πάνελ, ενώ το υπόλοιπο 90% καταλήγει σε ΧΥΤΑ, με αποτέλεσμα υλικά όπως το κάδμιο, το τελλούριο και ο μόλυβδος να απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα, το κάδμιο μολύνει το περιβάλλον καθώς είτε αναμειγνύεται με το νερό είτε απελευθερώνεται στον αέρα κατά την διάρκεια εκδήλωσης πυρκαγιών, οι οποίες προκαλούν την αποτέφρωση του. Τα ανωτέρω, πέρα από την μόλυνση του περιβάλλοντος, προκαλούν προβλήματα υγείας στον άνθρωπο, όπως προβλήματα στα πνευμόνια, στα νεφρά και στα κόκαλα ενώ το κάδμιο μπορεί να παραμείνει στο ανθρώπινο σώμα για δεκαετίες. Αντίστοιχα, το τελλούριο μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στο ήπαρ και στο νευρικό σύστημα του ανθρώπου. Τέλος, ο μόλυβδος μπορεί να προκαλέσει εγκεφαλικά επεισόδια, νεφρική ανεπάρκεια και καρδιακή προσβολή.

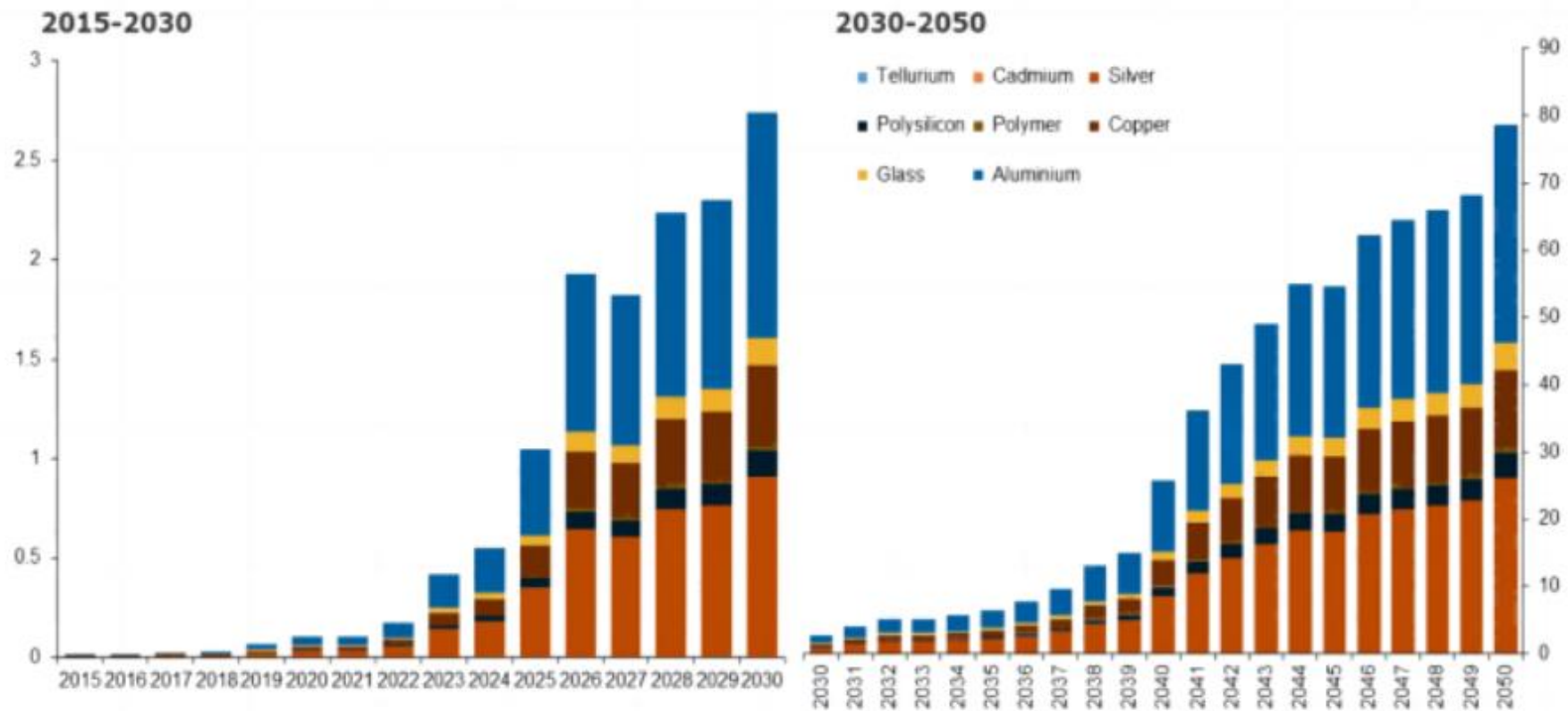
Η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πάνελ ακμάζει με γρήγορους ρυθμούς, ιδίως σε χώρες όπως η Γαλλία, η Γερμανία και η Ιταλία. Η ανακύκλωση των πάνελ ξεκίνησε το 2018 στην Γαλλία, όπου δημιουργήθηκε το πρώτο εργοστάσιο ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ, από την οργάνωση PV CYCLE και τον οργανισμό αποβλήτων Veolia. Σκοπός της εταιρείας αυτής είναι η ανάκτηση και η επαναχρησιμοποίηση των παλιών πάνελ σε ποσοστό 99%. Αντίστοιχα, στην Γερμανία την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών έχει αναλάβει η ένωση PV CYCLE. Το 2021 η εταιρεία ReProSolar καθοδηγούμενη από την Veolia και σε συνεργασία με την E.E., ξεκίνησαν ένα πενταετές πρόγραμμα με σκοπό την εξερεύνηση τρόπων ανάκτησης όλων των υλικών από τα πάνελ. Στόχος της εταιρείας είναι η ανάκτηση αλουμινίου, αργύρου, γυαλιού, χαλκού και υψηλής καθαρότητας πυριτίου, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως η αποκόλληση (delamination) και ο καθαρισμός των πρώτων υλών. Άλλες εταιρείες όπως η Photorama και η Icarus προσπαθούν να βρουν καλύτερους τρόπους ανακύκλωσης και ανάκτησης μεγαλύτερων ποσοστών πυριτίου. Επιπλέον, μια ιταλική εταιρεία που ονομάζεται Tialpi βρίσκεται στα πρώτα στάδια κατασκευής εργοστασίου ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών με στόχο την ανάκτηση των υλικών σε ποσοστό 100%. Τέλος, το εργοστάσιο ανακύκλωσης πάνελ ROSI έχει τεθεί σε λειτουργία με αναμενόμενη δυνατότητα ανακύκλωσης 10.000 τόνων φωτοβολταϊκών πάνελ μέχρι το 2025. Στην Ελλάδα, η μοναδική εταιρεία που ασχολείται με την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών, από το 2020,

είναι η ΦΩΤΟΚΥΚΛΩΣΗ Α.Ε., η οποία είναι εγκεκριμένη από τον Ελληνικό Οργανισμό Ανακύκλωσης (ΕΟΑΝ). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, το 2021, η ΦΩΤΟΚΥΚΛΩΣΗ Α.Ε. προέβει στην ανακύκλωση τριάντα έξι (36) τόνων αποβλήτων από φωτοβολταϊκά.

Σύμφωνα με διεξαγόμενες μελέτες τα κρυσταλλικά πάνελ δεν έχουν αρκετά πολύτιμα υλικά για ανάκτηση, ενώ συγχρόνως το κόστος ανακύκλωσης αυτών είναι υψηλότερο από την μεταφορά και απόρριψη τους σε ΧΥΤΑ, καθιστώντας την ανακύκλωση ασύμφορη οικονομικά.

Στα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πάνελ το ποσοστό ανάκτησης των υλικών κυμαίνεται στο 90%, ενώ στα φωτοβολταϊκά thin film και συγκεκριμένα στα καδμίου τελλουρίου (CdTe) το ποσοστό ανάκτησης των υλικών κυμαίνεται στο 95%. Το εκτιμώμενο κόστος των υλικών που αναμένεται να ανακτηθούν έως το 2050 είναι 15 δισεκατομμύρια δολάρια. Η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών μπορεί να εξοικονομήσει το ένα τρίτο της αξίας και της ενέργειας που χρειάζεται για να κατασκευαστούν εξολοκλήρου τα φωτοβολταϊκά. Πολλές εταιρείες ωστόσο αρνούνται να αναλάβουν την ανακύκλωση καθώς απαιτεί υψηλό κόστος ενώ αποδίδει χαμηλό κέρδος. Στο παρακάτω διάγραμμα της Εικόνα 26 απεικονίζεται η εξέλιξη της αξίας των ανακυκλώσιμων υλικών που περιέχονται μέσα σε ένα πάνελ. Παρατηρείται ότι μέχρι το 2030 η αξία των ανακυκλώσιμων υλικών θα φτάνει τα 3 δισεκατομμύρια ενώ μέχρι το 2050 τα 80 δισεκατομμύρια, εκ των οποίων το μεγαλύτερο ποσοστό να οφείλεται στην ύπαρξη αλουμινίου και του αργύρου.

Estimated PV panel recyclable material value* Billion USD

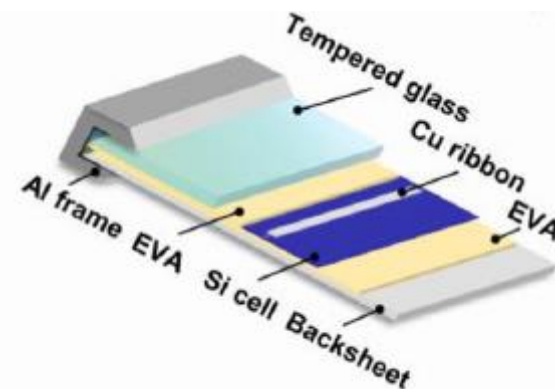


*Forecasted value from material recovered from PV panels as current implementations reach end-of-life
Source: Rystad Energy SolarSupplierCube, EnergyScenarioCube, Rystad Energy research and analysis

Εικόνα 26: Εξέλιξη αξίας ανακυκλώσιμων υλικών που περιέχονται μέσα στα πάνελ

(Solar PV recycling market to be worth \$2.7bn by 2030, 2022)

Ένα κρυσταλλικό πάνελ αποτελείται από το αλουμινένιο πλαίσιο (Al frame), το γυαλί, δύο στρώσεις από πολυμερές EVA, κελιά πυριτίου, τις χάλκινες κορδέλες, το πίσω μέρος και το junction box όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 27 παρακάτω. Τα υλικά όπως το γυαλί, το αλουμινένιο πλαίσιο, τα χάλκινα καλώδια και το junction box είναι εύκολα ανακυκλώσιμα. Τα κελιά πυριτίου έχουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας, ωστόσο η ανακύκλωση τους δεν είναι τόσο εύκολη συγκριτικά με τα υπόλοιπα υλικά. Μέσα σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο υπάρχουν επίσης υλικά τα οποία δεν βρίσκονται σε μεγάλη ποσότητα όπως το ασήμι και ο εσωτερικός χαλκός (χάλκινες κορδέλες), ο κασσίτερος, το αντιμόνιο. Επιπλέον, στα thin film πάνελ βρίσκεται το γάλλιο και το ίνδιο, ενώ μπορούν να βρεθούν και τοξικά υλικά όπως ο μόλυβδος, το τελλούριο και το κάδμιο. Η ύπαρξη τοξικών υλικών εντός των thin film πάνελ απαιτεί διαφορετική διαδικασία ανακύκλωσης συγκριτικά με τα κρυσταλλικά πάνελ, ώστε να ληφθούν όλα τα απαραίτητα μέτρα για την αποφυγή μόλυνσης του περιβάλλοντος. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα παραγωγής ενέργειας αποτελείται επιπλέον από έτερα συστήματα όπως inverters, κατασκευές στήριξης και μπαταρίες, τα οποία ανακυκλώνονται σύμφωνα με τις διαδικασίες ανακύκλωσης των ηλεκτρονικών αποβλήτων, των μετάλλων scrap και των μπαταριών αντίστοιχα.



Εικόνα 27: Μέρη πολυκρυσταλλικού πάνελ

(Xinhai Xu, Dengguo Lai, Wenxuan Wang, Yin Wang, 2022)

Τα κρυσταλλικά πάνελ αποτελούνται από γυαλί σε ποσοστό 76%, πλαστικό σε ποσοστό 10%, αλουμίνιο σε ποσοστό 8%, πυρίτιο σε ποσοστό 5% και άλλα μέταλλα (ασήμι, γάλλιο κ.α.) σε ποσοστό 1%. Αντίστοιχα τα thin film πάνελ αποτελούνται από γυαλί σε ποσοστό 89%, πλαστικό σε ποσοστό 4%, αλουμίνιο σε ποσοστό 6% και άλλα μέταλλα (ασήμι, γάλλιο κ.α.) σε ποσοστό 1%. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η διαδικασία ανακύκλωσης για

τα κρυσταλλικά πάνελ διαφέρει σε σχέση με αυτή για τα thin film πάνελ. Επί του παρόντος, η πιο διαδεδομένη διαδικασία είναι αυτή για τα κρυσταλλικά πάνελ. Σύμφωνα με τις διεξαγόμενες μελέτες, η αποδοτικότητα της ανακύκλωσης των πάνελ κυμαίνεται περί το 96%, ενώ στο μέλλον αναμένεται αυτό το ποσοστό να αυξηθεί.

Μία μέθοδος ανακύκλωσης αφορά την επαναχρησιμοποίηση των πάνελ, τα οποία αφού καθαριστούν, εξετάζονται για την λειτουργικότητά τους. Όσα είναι λειτουργικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα εκτός δικτύου καθώς σε αυτά δεν είναι απαραίτητη η χρήση καινούργιων και πολύ αποδοτικών πάνελ. Ωστόσο τα επαναχρησιμοποιούμενα πάνελ δεν μπορούν να τοποθετηθούν σε μεγαλύτερα συστήματα παραγωγής ενέργειας διότι η απόδοσή τους έχει μειωθεί. Παραδείγματα χρήσης αποτελούν οι πινακίδες των δρόμων και συγκεκριμένοι φορτιστές όπως αυτοί των ηλεκτρικών ποδηλάτων. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευασμένα από γυαλί θερμοκήπια, για αντικατάσταση αυτού ή να μετατραπούν σε έπιπλα, έργα τέχνης και άλλα παρόμοια πρότζεκτ. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε χώρους κάμπινγκ για την παροχή ρεύματος ακόμα και σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από κάποιο δίκτυο. Η παροχή ρεύματος είναι δυνατή και μετά τη δύση του ηλίου εφόσον τα πάνελ συνδεθούν σε κάποια γεννήτρια.

Διαδικασία ανακύκλωσης

Η διαδικασία της ανακύκλωσης είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, η οποία ωστόσο βρίσκεται σε πρώιμα στάδια καθώς είναι ακόμα σε εξέλιξη. Η πολυπλοκότητα της διαδικασίας αφορά αρχικά την αφαίρεση των στρώσεων από το πολυμερές EVA, το οποίο προστατεύει το φωτοβολταϊκό από τις καιρικές συνθήκες (όπως υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες). Η ανθεκτικότητα του EVA (για την αντιμετώπιση των καιρικών φαινομένων) καθιστά την διαδικασία της ανακύκλωσης και της αποσυναρμολόγησης πιο δύσκολη, καθώς απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες για να αφαιρεθεί αυτό το υλικό.

Η διαδικασία της ανακύκλωσης αποτελείται από τα κάτωθι βήματα. Αρχικά συλλέγονται όλα τα πάνελ στο κέντρο ανακύκλωσης. Εκεί εκτελείται έλεγχος της κατάστασης τους και έπειτα πραγματοποιείται διαχωρισμός ανάλογα με την τεχνολογία και τα υλικά που περιέχουν. Οι διαδικασίες ανακύκλωσης των πάνελ χωρίζονται σε δύο κατηγορίες αναλόγως του τρόπου κατασκευής τους, δηλαδή είτε αφορούν τα κρυσταλλικά είτε τα thin film πάνελ. Επιπλέον, η ανακύκλωση των πάνελ πραγματοποιείται με τη χρήση τριών τεχνολογιών, οι οποίες χρησιμοποιούνται είτε ξεχωριστά είτε με συνδυασμό αυτών. Η πρώτη τεχνολογία είναι

η θερμική (Thermal process), η δεύτερη είναι η μηχανική (Mechanical process) και η τρίτη είναι η χημική (Chemical process).

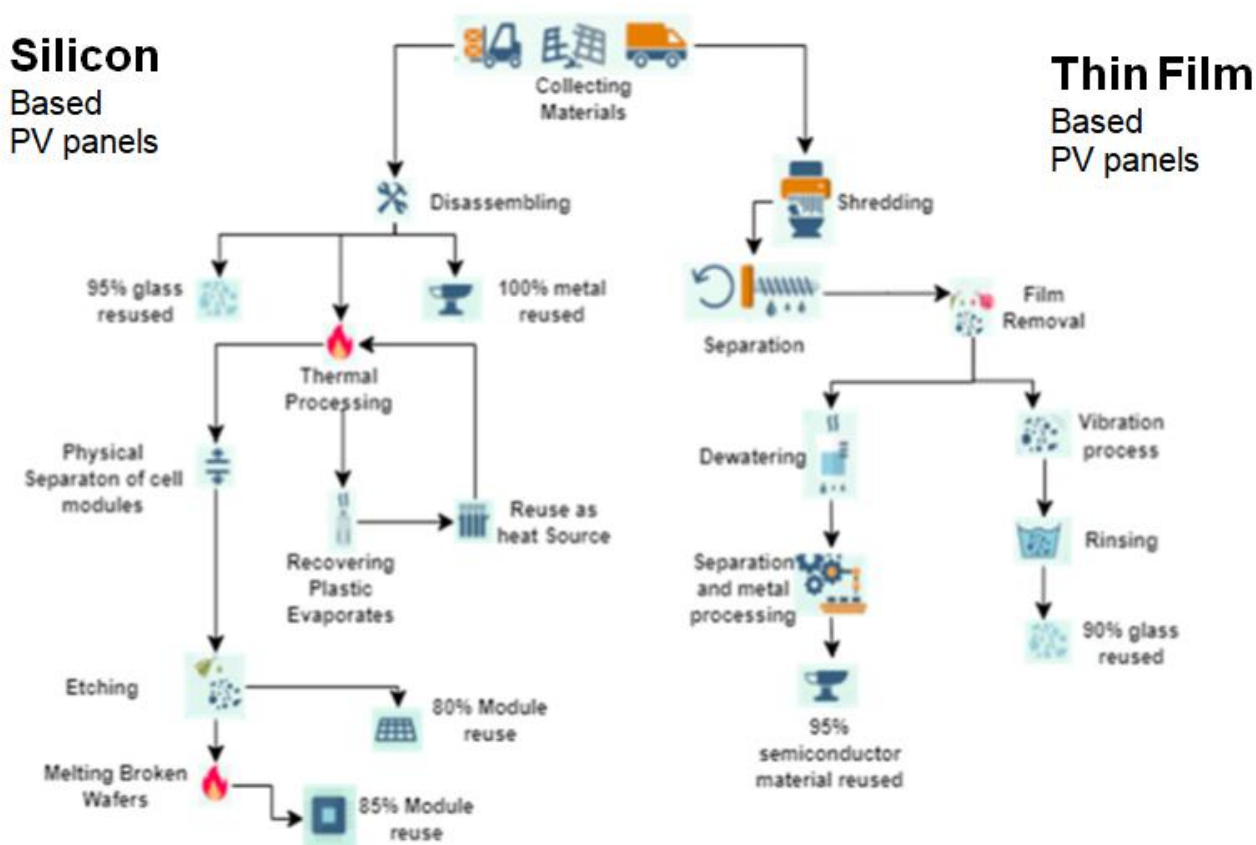
4.1.1 Ανακύκλωση κρυσταλλικών πάνελ

Το πρώτο βήμα της ανακύκλωσης των κρυσταλλικών πάνελ είναι η αφαίρεση του junction box και στη συνέχεια η αφαίρεση του αλουμινένιου πλαισίου. Οι διαδικασίες αυτές είτε γίνονται χειροκίνητα είτε μηχανικά. Έπειτα χωρίζεται το γυαλί από τα κελιά πυριτίου μέσω μιας μηχανικής, χημικής ή θερμικής διαδικασίας. Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι το γυαλί που ανακτάται από όλες τις διαδικασίες ανακύκλωσης τις περισσότερες φορές δεν είναι ολόκληρο φύλλο, αλλά κομματιασμένο σε κομματάκια των mm λόγω της φυσικής ζημιάς που έχει υποστεί με το πέρασμα το χρόνου. Το ποσοστό ανάκτησης του γυαλιού, το οποίο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί ή να ανακυκλωθεί, κυμαίνεται στο 95%. Σε αντίθεση με το γυαλί, το αλουμίνιο ανακτάται πλήρως σε ποσοστό 100% και επαναχρησιμοποιείται για την κατασκευή αλουμινένιων πλαισίων.

Ανάκτηση γκοφρετών

Θερμική Διαδικασία

Ο διαχωρισμός των υλικών απαιτεί τη θέρμανση αυτών σε θερμοκρασίες περί τους 500°C, με σκοπό τη διάσπαση των ενώσεων του κελιού. Λόγω της υπερβολικά υψηλής θερμοκρασίας, το πολυμερές EVA εξατμίζεται αφήνοντας έτσι τα κελιά έτοιμα για περαιτέρω επεξεργασία. Το πολυμερές EVA επαναχρησιμοποιείται ως πηγή θέρμανσης κατά την εκτέλεση θερμαντικών επεξεργασιών. Στην συνέχεια, τα κελιά υπόκεινται σε μια χημική διαδικασία με σκοπό την αφαίρεση μετάλλων όπως ασήμι, χαλκός, κασσίτερος και μόλυβδος. Από την χημική διαδικασία αυτή προκύπτουν οι γκοφρέτες (wafers), οι οποίες έχουν πάχος 140μm και σχεδόν το 80% αυτών δύναται να επαναχρησιμοποιηθεί. Το υπόλοιπο 20% των γκοφρετών που έχουν υποστεί ζημιά υπόκεινται σε μια διαφορετική διαδικασία, κατά τη διάρκεια της οποίας, αρχικά ρευστοποιούνται και εν συνεχεία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή καινούργιων πυριτικών κελιών. Η ανακύκλωση του πυριτίου μέσω της ανωτέρω διαδικασίας ανέρχεται σε ποσοστό 85%.



Εικόνα 28: Διαδικασία ανακύκλωσης

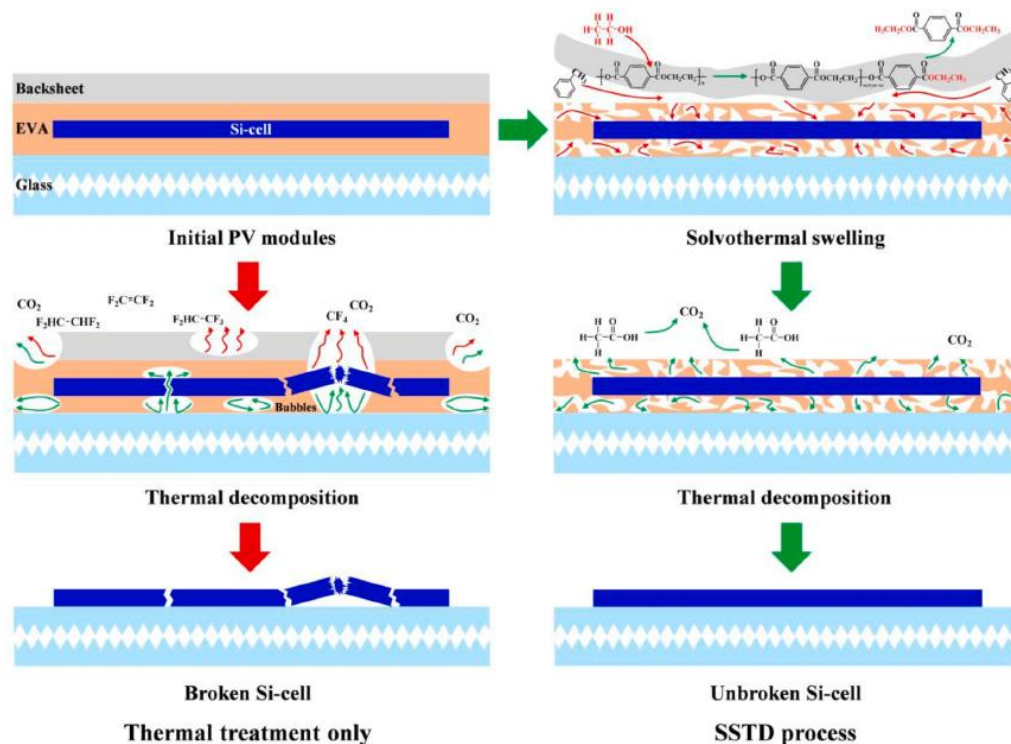
(A. Divya, T. Adish, P. Kaustubh, P.S. Zade, 2022)

Η αφαίρεση του πολυμερούς EVA πολλές φορές προκαλεί τη θραύση των κελιών. Το πολυμερές EVA έχει δύο στρώσεις όπου η μια είναι ανάμεσα στα κελιά και στο πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού και η άλλη είναι ανάμεσα στα κελιά και το γυαλί. Κατά την θέρμανση του φωτοβολταϊκού, το EVA αποσυντίθεται στους 430°C και παράγει αέρια. Στην στρώση ανάμεσα στα κελιά και το πίσω μέρος, τα αέρια απελευθερώνονται καθώς το πίσω μέρος αποσυντίθεται στους 415°C ταυτόχρονα με το EVA. Ωστόσο, στην στρώση ανάμεσα στα κελιά και το γυαλί, τα αέρια που παράγονται, δεν έχουν έξοδο διαφυγής, λόγω της θερμικής σταθερότητας του γυαλιού και μετατρέπονται σε φουσκάλες. Η αύξηση της θερμοκρασίας για την αποσύνθεση του EVA προκαλεί περαιτέρω συσσώρευση των αερίων και αύξηση της πίεσης που περιέχουν οι φουσκάλες. Ανωτέρω γεγονός προκαλεί τη θραύση των κελιών πυριτίου καθώς είναι πιο εύθραυστα από το γυαλί.

SSTD Διαδικασία

Σύμφωνα με την μελέτη των (Xinhai Xu, Dengguo Lai, Gang Wang, Yin Wang, 2021) δημιουργήθηκε μια μέθοδος που ονομάζεται SSTD-Solvothermal Swelling and Thermal Decomposition με σκοπό την αποτροπή της θραύσης των κελιών. Η SSTD είναι αποδοτικότερη από τις υπόλοιπες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση των γκοφρετών, καθώς το πάχος τους είναι μεγαλύτερο από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Το φωτοβολταϊκό πάνελ υπόκειται αρχικά σε μια διαδικασία προετοιμασίας, κατά τη διάρκεια της οποίας εκτίθεται σε ζεστούς και υπό πίεση ατμούς, ώστε το EVA να διογκωθεί δημιουργώντας διόδους διαφυγής του παραγόμενου αερίου. Η θερμοκρασία διόγκωσης του EVA φτάνει τους 190°C και τα διαλυτικά μέσα που χρησιμοποιούνται είναι η αιθανόλη και το τολουόλιο (toluene-C₇H₈). Το τολουόλιο είναι πολύ αποτελεσματικό στην διάλυση του EVA ενώ η προσθήκη αιθανόλης συντελεί στην αφαίρεση του πίσω μέρους του φωτοβολταϊκού για να επιταχύνει τη διόγκωση του EVA. Επιπλέον, η εκτέλεση της SSTD διαδικασίας είναι λιγότερο επιβλαβής για το περιβάλλον καθώς αποφεύγονται εκπομπές αερίων που περιέχουν φθόριο. Στην συνέχεια, τα πάνελ τοποθετούνται μέσα σε κλιβάνους σε θερμοκρασία 500°C για την ολοκληρωτική αφαίρεση του EVA, του πίσω μέρους αλλά και τον διαχωρισμό του PET και του PVF. Κατά την θέρμανση, τα αέρια που παράγονται απελευθερώνονται πλέον οριζόντια μέσω των διόδων που έχουν δημιουργηθεί νωρίτερα, αντί να απελευθερωθούν κάθετα σπάζοντας τα κελιά πυριτίου. Μετά το πέρας της διαδικασίας αυτής, τα κελιά επανέρχονται στην αρχική τους μορφή, η οποία είναι οι γκοφρέτες (wafers). Οι παραγόμενες αυτές γκοφρέτες ονομάζονται PP-wafers (pre-purification) και έχουν πάχος 182μm, το οποίο είναι κατά 42μm μεγαλύτερο από αυτών που παράγονται μέσω της θερμικής διαδικασίας. Επιπρόσθετα, η ανθεκτικότητα των γκοφρετών που έχουν ανακτηθεί με την SSTD διαδικασία είναι 86,11% ενώ των γκοφρετών που έχουν ανακτηθεί με τη θερμική διαδικασία είναι 9,26%.

Τα ανακτώμενα υλικά των EVA, PET και PVF μπορούν να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν σε φωτοβολταϊκά πάνελ, ή σε άλλους τομείς. Συγκεκριμένα, το ανακυκλωμένο EVA μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για να κατασκευαστούν καινούργια αθλητικά παπούτσια, αθλητικός εξοπλισμός, υλικά συσκευασίας, ανταλλακτικά αυτοκινήτων (καλύμματα για ταμπλό και πατάκια) και δομικά υλικά. Το ανακυκλωμένο PET μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τσαντών, ζωνών ασφαλείας, χαλιών, μονώσεων οροφής και ρούχων.



Εικόνα 29: Θερμική και SSTD διαδικασία

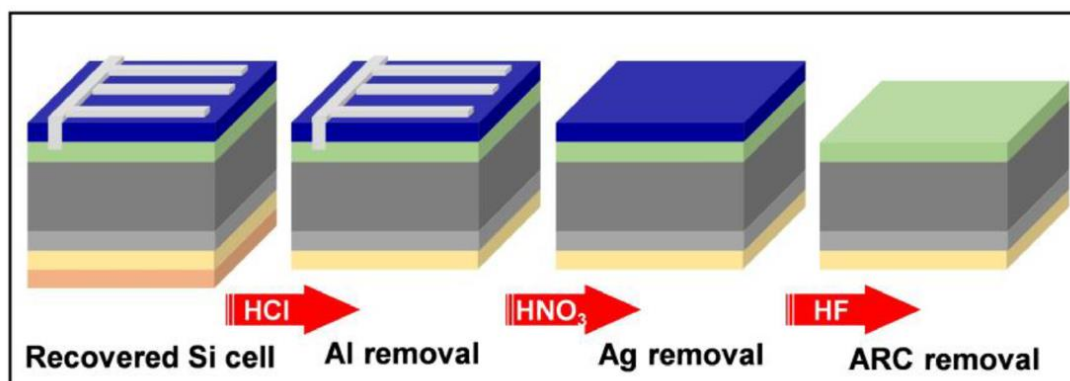
(Xinhai Xu, Dengguo Lai, Gang Wang, Yin Wang, 2021)

Καθαρισμός γκοφρετών

Χημική διαδικασία

Σύμφωνα με την μελέτη των (Xinhai Xu, Dengguo Lai, Wenxuan Wang, Yin Wang, 2022) αφού ανακτηθούν οι μη σπασμένες γκοφρέτες ακολουθεί μια χημική διαδικασία για τον καθαρισμό τους. Συγκεκριμένα, οι γκοφρέτες τοποθετούνται σε διάλυμα υδροχλωρίου (HCL) σε θερμοκρασία δωματίου έτσι ώστε να αφαιρεθεί το αλουμίνιο (Al), και στην συνέχεια τοποθετούνται σε διάλυμα νιτρικού οξέος (HNO₃) στους 50°C για να αφαιρεθεί ο άργυρος (Ag). Αφού ολοκληρωθεί η αφαίρεση των μετάλλων, ακολουθεί μια διαδικασία στην οποία χρησιμοποιείται υδροφθόριο (HF) για να αφαιρεθεί το ARC (anti-reflection coating). Μετά από αυτές τις διαδικασίες εμφανίζονται μικρές ποσότητες φωσφόρου (P) στην μπροστινή πλευρά της γκοφρέτας, ενώ στην πίσω πλευρά της παγιδεύεται αλουμίνιο. Το αλουμίνιο παγιδεύεται στο μείγμα του αλουμινίου και του πυριτίου αλλά και στην BSF στρώση (Back Surface Field), η οποία αυξάνει την τάση του κελιού. Μετά την ολοκλήρωση της ανωτέρω διαδικασίας η γκοφρέτα δεν έχει καθαριστεί πλήρως, λόγω ύπαρξης αλουμινίου

και φωσφόρου, για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται η μέθοδος MACE η οποία αναλύεται παρακάτω.



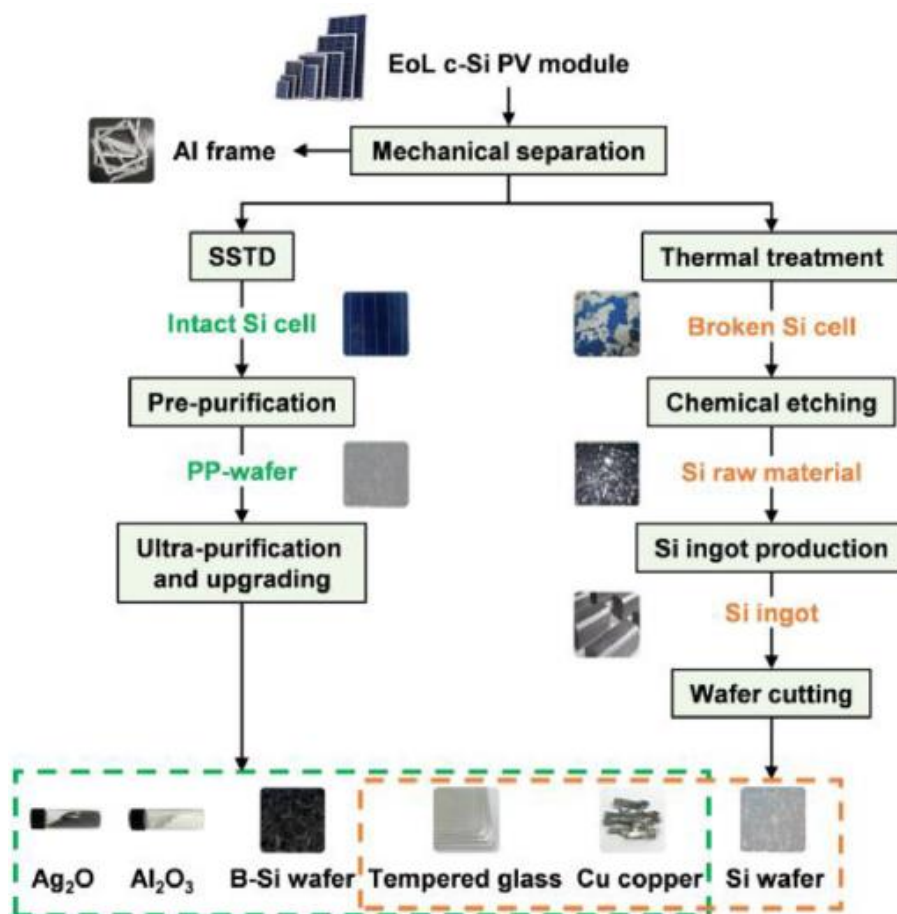
Εικόνα 30: Διαδικασία καθαρισμού του κελιού

(Xinhai Xu, Dengguo Lai, Wenxuan Wang, Yin Wang, 2022)

Διαδικασία MACE

Σύμφωνα με την μελέτη των (Xinhai Xu, Dengguo Lai, Wenxuan Wang, Yin Wang, 2022) εκπονήθηκε μια διαδικασία η οποία ονομάζεται MACE-Metal-Assisted Chemical Etching με σκοπό να εξασφαλιστεί η καθαρότητα και το πάχος της γκοφρέτας. Κατά τη διαδικασία MACE η καθαρότητα και η αφαίρεση της στρώσης ανάκλασης ολοκληρώνονται σε ένα βήμα (σε αντίθεση με τη χημική διαδικασία). Συγκεκριμένα, αντί να τοποθετηθεί νιτρικό οξύ πριν το υδροφθόριο, τοποθετείται υπεροξείδιο του υδρογόνου (H_2O_2) μαζί με μεταλλικούς καταλύτες όπως ιόν χαλκού Cu^{2+} και ιόν αργύρου Ag^+ . Με αυτό τον τρόπο οξειδώνεται το πυρίτιο (Si) και δημιουργείται διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), το οποίο διαλύεται από το υδροφθόριο. Η διαδικασία MACE απαιτεί την κατανάλωση λιγότερης ενέργειας σε σύγκριση με την HF/HNO_3 , καθώς πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου. Μετά την διαδικασία MACE δημιουργείται μια micro/nano πορώδης και τραχιά υφή πάνω στην επιφάνεια της γκοφρέτας, η οποία έχει τη δομή ανεστραμμένης πυραμίδας και ονομάζεται DMN (dual-scale micro/nano texture). Αντίστοιχα οι παραγόμενες γκοφρέτες ονομάζονται DMN-wafers. Η DMN υφή προκαλεί την μείωση της απόδοσης μετατροπής ισχύος. Επομένως απαιτείται η εκτέλεση μιας θεραπείας με αλκάλια, η οποία περιέχει υδροξείδιο του καλίου (KOH) και ισοπροπυλική αλκοόλη (IPA-Isopropyl Alcohol) για την τροποποίηση της επιφάνειας της γκοφρέτας. Με το πέρας της διαδικασίας αυτής, οι

παραγόμενες γκοφρέτες ονομάζονται DMNP-wafers, έχουν πάχος 165,71μm και είναι εξίσου αποτελεσματικές με τις καινούργιες.



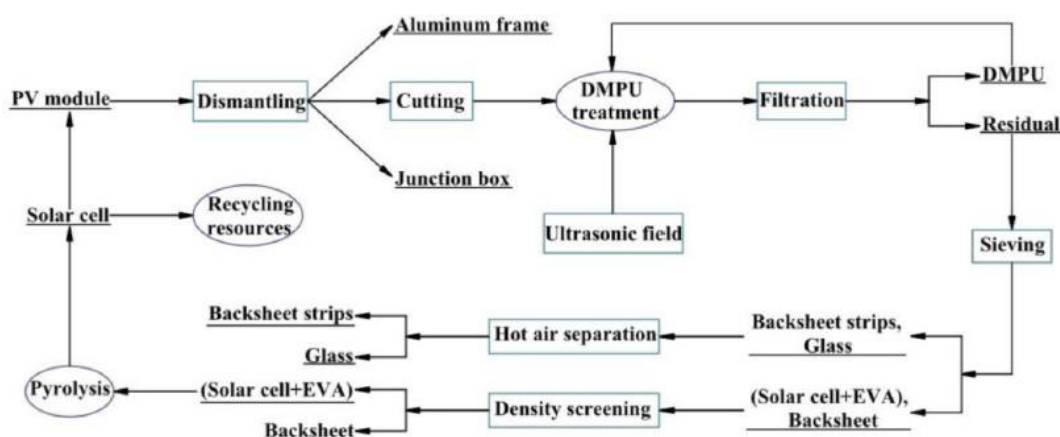
Εικόνα 31: Διαδικασία ανάκτησης γκοφρετών και άλλων υλικών

(Xinhai Xu, Dengguo Lai, Wenxuan Wang, Yin Wang, 2022)

Ανάκτηση υλικών με DMPU

Το τολουόλιο είναι ένα άχρωμο τοξικό υγρό το οποίο μπορεί να προκαλέσει πολλά προβλήματα υγείας στον άνθρωπο, όπως νεφρική και ηπατική ανεπάρκεια, νευρολογικά προβλήματα και άλλα. Σύμφωνα με την μελέτη των (Ke Li, 2022) η μέθοδος με το τολουόλιο μπορεί να αντικατασταθεί με την μέθοδο DMPU- dimethylpropenylurea ($C_6H_{12}N_2O$). Με την χρήση της μεθόδου DMPU επιτυγχάνεται η διατήρηση του πάχους των γκοφρετών ενώ ταυτόχρονα δεν είναι επιβλαβής για την ανθρώπινη υγεία. Συνεπώς, πρόκειται για μια εξίσου αποτελεσματική μέθοδο συγκριτικά με αυτή του τολουολίου αλλά και φιλική ως προς τον άνθρωπο. Κατά την εκτέλεση της μεθόδου αρχικά αφαιρούνται το αλουμινένιο πλαίσιο και το

junction box. Στην συνέχεια το πάνελ χωρίζεται σε μικρά κομμάτια, τα οποία επεξεργάζονται με DMPU, παρουσία υπερηχητικού πεδίου (ultrasonic field). Το υπερηχητικό πεδίο παράγει κύματα που βοηθούν στον διαχωρισμό των στρωμάτων καθώς αυτά περνούν μέσα από το υγρό. Έπειτα τα κομμάτια φιλτράρονται ώστε να διαχωριστούν από το DMPU, το οποίο στη συνέχεια δύναται να επαναχρησιμοποιηθεί. Ακολούθως, τα υπολειπόμενα κομμάτια υπόκεινται σε μια διαδικασία κοσκινίσματος (sieving). Το γυαλί και το πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού διαχωρίζονται με τη χρήση ζεστού αέρα. Η διαδικασία αυτή μετατρέπει το πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού σε λωρίδες. Ο διαχωρισμός του κελιού με το EVA από το πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού εκτελείται με τη χρήση κατάλληλου αντιδραστηρίου (density reagent) ενώ η αφαίρεση του EVA από το κελί εκτελείται μέσω της διαδικασίας της πυρόλυσης. Πυρόλυση είναι η χημική διαδικασία διαχωρισμού υλικών που περιέχουν άνθρακα, με θέρμανση δίχως τη χρήση οξυγόνου ή άλλων αντιδρώντων. Σε σύγκριση με την διαδικασία εκτέλεσης πυρόλυσης δίχως τη χρήση DMPU, δεν παράγεται φθόριο. Η αφαίρεση του γυαλιού και της μεγάλης ποσότητας του πίσω μέρους, προκαλεί την μείωση του όγκου του κλιβάνου με αποτέλεσμα να καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια κατά την διάρκεια της πυρόλυσης. Μέσω της πυρόλυσης αποφεύγεται το σπάσιμο των γκοφρετών, οι οποίες στη συνέχεια μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε καινούργια πάνελ.



Εικόνα 32: Διαδικασία ανακύκλωσης με χρήση DMPU

(Ke Li, 2022)

Συγκρίνοντας την αποτελεσματικότητα των δύο μεθόδων στους 100°C προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Η μέθοδος με DMPU μπορεί να διαχωρίσει τα διαφορετικά στρώματα του πάνελ σε 50 λεπτά, ενώ η μέθοδος με το τολουόλιο σε 30 λεπτά. Ωστόσο, το DMPU

μπορεί να μειώσει τον χρόνο διαχωρισμού του πάνελ αυξάνοντας την θερμοκρασία στους 160°C, ενώ οι ικανότητες του τολουολίου περιορίζονται καθώς το σημείο βρασμού του είναι στους 110,6°C. Επιπλέον, το πάχος της στρώσης EVA, που έχει διαλυθεί από DMPU είναι 630μm, ενώ η στρώση που έχει διαλυθεί από το τολουόλιο είναι 680μm. Ανωτέρω γεγονός φανερώνει ότι το τολουόλιο έχει μεγαλύτερη ικανότητα διόγκωσης του EVA, με αποτέλεσμα να χάνεται περισσότερη ποσότητα αντιδραστηρίου. Αντίθετα, με χρήση DMPU το πάχος της στρώσης του EVA παραμένει σταθερό λόγω χαμηλής ικανότητας διόγκωσης του. Όσον αφορά το κόστος των δύο μεθόδων, το DMPU είναι πολύ πιο κοστοβόρο από οποιοδήποτε άλλο διαλυτικό μέσο.

Εναλλακτικοί τρόποι ανάκτησης υλικών

Σύμφωνα με την μελέτη των (A. Divya, T. Adish, P. Kaustubh, P.S. Zade, 2022) για να ανακτηθούν τα υλικά ακολουθείται η θερμική διαδικασία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Ειδικότερα, το πρώτο βήμα είναι ο διαχωρισμός του αλουμινένιου πλαισίου, ο οποίος επιτυγχάνεται θερμαίνοντας το πάνελ στους 250°C. Στην συνέχεια, το πάνελ θερμαίνεται στους 480°C ώστε να διαχωριστούν οι διαφορετικές στρώσεις EVA. Έπειτα συλλέγεται το γυαλί που δεν έχει σπάσει, τα ηλιακά κελιά (solar cells) και τα χάλκινα καλώδια. Ο διαχωρισμός του πυριτίου (Si), του αλουμινίου (Al), του χαλκού (Cu), του αργύρου (Ag) και του μόλυβδου (Pb) πραγματοποιείται ξεχωριστά για διασφαλιστεί η αποτελεσματικότερη ανάκτηση τους.

Ανάκτηση γκοφρετών

Οι πυριτικές γκοφρέτες περιέχουν υλικά όπως SiNx (νιτρίδια του πυριτίου) και ηλεκτρόδια αλουμινίου, τα οποία τις καθιστούν «βρώμικες» (impure). Για να αφαιρεθεί το SiNx, οι γκοφρέτες τοποθετούνται σε διάλυμα HNO₃ (νιτρικού οξέος) περιεκτικότητας 90% στους 160°C, ενώ για να αφαιρεθούν τα ηλεκτρόδια αλουμινίου τοποθετούνται σε διάλυμα KOH (υδροξείδιο του καλίου) περιεκτικότητας 45% στους 80°C. Μετά το πέρας της διαδικασίας, οι γκοφρέτες είναι έτοιμες για να επαναχρησιμοποιηθούν σε καινούργια φωτοβολταϊκά.

Ανάκτηση χαλκού

Το επόμενο βήμα αφορά την ανάκτηση του χαλκού, η οποία πραγματοποιείται σε τρία (3) στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι ο διαχωρισμός των ιόντων του χαλκού από το διάλυμα

HNO₃ (νιτρικό οξύ), παρουσία Ag⁺ (ión αργύρου) και Pb²⁺ (ión μολύβδου). Ο διαχωρισμός πραγματοποιείται με χρήση διαλύματος LIX84-I (2-hydroxy-5-nonylbenzophenone) περιεκτικότητας 20%. Το δεύτερο στάδιο είναι η αφαίρεση του χαλκού από το διάλυμα LIX84-I με χρήση H₂SO₄ (θειικό οξύ). Η ανωτέρω αντίδραση προκαλεί το σχηματισμό του CuSO₄ (θειικός χαλκός). Στο τελευταίο στάδιο, πραγματοποιείται ανάκτηση του χαλκού χρησιμοποιώντας H₂SO₄, το οποίο περιέχει χαλκό στους 50°C μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης. Επιπλέον, χρησιμοποιείται μια πλάκα τιτανίου καλυμμένη με IrO₂ (διοξειδίο του ιριδίου), ως άνοδος και μια πλάκα χαλκού, ως κάθοδος. Μετά την ανάκτηση του χαλκού, αυτός μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε καινούργια φωτοβολταϊκά ή σε άλλους τομείς όπως κοσμήματα, καλώδια ή άλλα ηλεκτρικά εξαρτήματα.

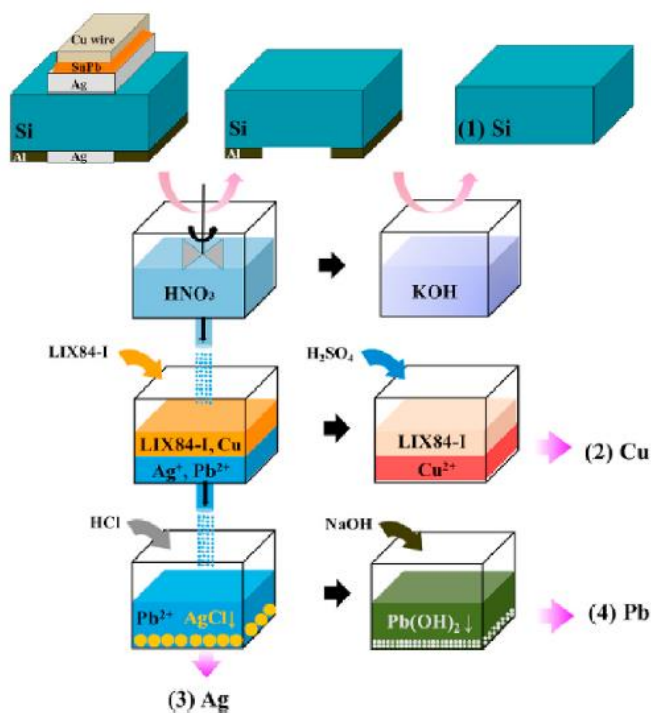
Ανάκτηση αργύρου

Η ανάκτηση του ασημιού/αργύρου πραγματοποιείται μέσω μιας διαδικασίας, η οποία αποτελείται από πέντε (5) βήματα. Το πρώτο βήμα είναι η προσθήκη HCl (υδροχλωρίο) στο διάλυμα HNO₃, παρουσία Ag και Pb με αποτέλεσμα την παραγωγή του AgCl (χλωριούχος άργυρος). Στην συνέχεια το AgCl τοποθετείται σε διάλυμα NaOH (υδροξείδιο του νατρίου) σε θερμοκρασία δωματίου και παράγεται Ag₂O (οξείδιο του αργύρου). Στο τρίτο βήμα η N₂H₄ (υδραζίνη) και το H₂O (υπεροξείδιο του υδρογόνου) τοποθετούνται σε αποσταγμένο νερό και αιθανόλη με σκοπό της μείωσης της περιεκτικότητας του μείγματος σε Ag₂O. Στην συνέχεια, στο τέταρτο βήμα, η σκόνη του Ag₂O θερμαίνεται στους 1100°C για να διαχωριστεί και να ανακτηθεί ο άργυρος (Ag). Στο τελευταίο βήμα, εκτελείται καθαρισμός των μετάλλων με χρήσης της διαδικασίας της ηλεκτρολυτικής δύλισης (electrolytic refining). Η δύλιση πραγματοποιείται σε διάλυμα HNO₃ και AgNO₃ (νιτρικός άργυρος) σε θερμοκρασίες 25°C, 30°C, 40°C και 50°C. Ο ανακτημένος άργυρος μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε καινούργια φωτοβολταϊκά, σε κοσμήματα και σε κάμερες ή τηλέφωνα.

Ανάκτηση μολύβδου

Η ανάκτηση του μολύβδου πραγματοποιείται μέσω μιας διαδικασίας, η οποία αποτελείται από τρία (3) βήματα. Το πρώτο βήμα είναι η τοποθέτηση NaOH, το οποίο περιέχει ίοντα μολύβδου Pb²⁺ σε θερμοκρασία δωματίου. Κατά τη διαδικασία αυτή παράγεται Pb(OH)₂ (υδροξείδιο του μολύβδου). Στο δεύτερο βήμα το Pb(OH)₂ θερμαίνεται στους 500°C, για να διαχωριστεί και να ανακτηθεί το PbO (μονοξείδιο του μολύβδου). Στο

τελευταίο βήμα τοποθετείται Na_2S (θειούχο νάτριο) στο διάλυμα του HNO_3 για να απομακρυνθεί ο υπολειπόμενος μόλυβδος. Μετά από αυτή την αντίδραση παράγεται PbS (θειούχος μόλυβδος), ο οποίος απομακρύνεται μέσω της διαδικασίας της διύλισης. Μετά την ανάκτηση του μολύβδου, μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε καινούργια φωτοβολταϊκά.



Εικόνα 33: Διαδικασία ανάκτησης υλικών

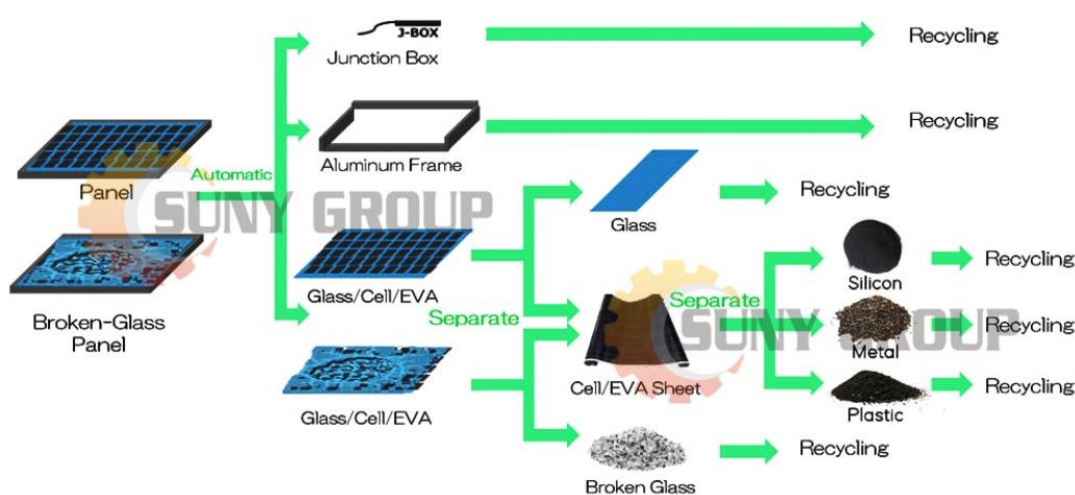
(A. Divya, T. Adish, P. Kaustubh, P.S. Zade, 2022)

4.1.2 Ανακύκλωση thin film πάνελ

Η διαδικασία ανακύκλωσης των thin film πάνελ είναι διαφορετική από αυτή των κρυσταλλικών, καθώς εκτελείται με τη χρήση μιας μηχανικής μεθόδου ανακύκλωσης. Το πρώτο βήμα της διαδικασίας είναι ο τεμαχισμός των πάνελ. Στη συνέχεια, μέσω ειδικών μηχανημάτων εξασφαλίζεται ότι όλα τα κομμάτια δεν ξεπερνούν σε μέγεθος τα 4 με 5mm. Το πλαστικό, το οποίο κρατάει τα υλικά στο εσωτερικό του πάνελ αφαιρείται καθώς σπάει κατά τη διάρκεια του τεμαχισμού. Μετά τον τεμαχισμό των thin film πάνελ προκύπτει στερεή και υγρή μάζα, οι οποίες τοποθετούνται σε ένα μηχάνημα και διαχωρίζονται. Το μηχάνημα έχει μορφή βίδας και περιστρέφεται με αποτέλεσμα τα στερεά κομμάτια να παραμένουν στο εσωτερικό του και να συνεχίζουν να στριφογυρίζουν ενώ το υγρό να απομακρύνεται και

τοποθετείται σε δοχεία. Η υγρή μάζα στην συνέχεια καθαρίζεται με τη χρήση διαφόρων διαδικασιών. Το προϊόν, που προκύπτει από τις διαδικασίες αυτές, υπόκειται σε ακόμα μια διαδικασία μετάλλων, με σκοπό τον διαχωρισμό των ημιαγωγών. Σχεδόν το 95% των ημιαγωγών ανακτάται και επαναχρησιμοποιείται. Η στερεή μάζα είναι αναμειγμένη με διάφορα ενδιάμεσα υλικά, τα οποία βρίσκονται εντός του φωτοβολταϊκού. Επειδή το κάθε υλικό έχει διαφορετική μάζα, αυτά περνούν από μια δονούμενη επιφάνεια ώστε να διαχωριστούν και να απομακρυνθούν τα υλικά με ελαφρύτερη μάζα. Εν συνεχεία το εναπομένον υλικό υπόκειται σε μια διαδικασία ξεβγάλματος όπου προκύπτει καθαρό γυαλί. Μέσω των ανωτέρω, σχεδόν το 90% του γυαλιού ανακτάται και επαναχρησιμοποιείται.

Ένας εναλλακτικός τρόπος ανακύκλωσης των πάνελ είναι η υδρομεταλλουργική ανακύκλωση (hydrometallurgical recycling), η οποία διασπά και αφαιρεί τα μέταλλα από το πάνελ. Η διάσπαση και αφαίρεση των μετάλλων εκτελείται μέσω χημικών αντιδράσεων, οι οποίες πραγματοποιούνται εντός υδάτινων ή οργανικών διαλυμάτων. Η τεχνική αυτή είναι πιο αποδοτική για την αφαίρεση μεγαλύτερων ποσοτήτων χαλκού, με τη χρήση θεικού οξέος (H_2SO_4), παρουσία ιόν χαλκού Cu^{2+} ή υπεροξειδίου του υδρογόνου H_2O_2 . Επιπρόσθετα, η τεχνική αυτή είναι λιγότερο κοστοβόρα και ανακτά το 85% του πυριτίου ενώ το υπόλοιπο 15% χάνεται κατά την διαδικασία της ανακύκλωσης.



Εικόνα 34: Διαδικασία ανακύκλωσης

(Scrap PV Solar Panel Recycling Plant)

4.2 Βαθμός (%) ανάκτησης πρώτων υλών και Κόστος Αποσυναρμολόγησης

Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται το βάρος των υλικών που υπάρχουν σε ένα τόνο πάνελ scrap.

	Average proportion per ton of module scrap
Silver	0.5 - 1 kg
Copper	5 - 10 kg
Tin	0.5 - 1 kg
Silicon	25 - 50 kg
Alumunium (frame)	100 - 150 kg
Glass	700 - 750 kg
Plastic	Remainder

Εικόνα 35: Βάρος υλικών σε ένα τόνο πάνελ scrap

(Development of an Industrial Recycling Process for PV Modules, 2018)

Πίνακας 2: Ποσοστό ανάκτησης πρώτων υλών

Πρώτες ύλες	Ποσοστό ανάκτησης
Πυρίτιο (Si)	85%
Αλουμίνιο (Al)	100%
Άργυρος (Ag)	98-100%
Γυαλί	95%
Χαλκός (Cu)	97%
Ίνδιο (In)	85%

Νικέλιο (Ni)	41%
Μαγγάνιο (Mn)	37%
Κασσίτερος (Sn)	32%
Μολυβδαίνιο (Mo)	18%
Μόλυβδος (Pb)	2.9%

Κόστος Απουναρμολόγησης

Η ανακύκλωση ενός ηλιακού πάνελ κυμαίνεται από 0,8\$ έως 1,7\$/kg, ενώ το κόστος απόρριψης του σε ΧΥΤΑ (Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων) κυμαίνεται από 0,1\$ έως 0,6\$/kg.

4.3 Ένωση PV CYCLE

Η ένωση PV CYCLE είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός ο οποίος ιδρύθηκε το 2007 για την βιομηχανία των φωτοβολταϊκών πάνελ και έχει αντιπροσωπίες παγκοσμίως. Διαχειρίζεται εξατομικευμένα απορρίμματα από εταιρείες σε όλο τον κόσμο, με χρήση οικονομικότερων τεχνικών συγκριτικά με το κόστος συλλογής, μεταφοράς, ανακύκλωσης και επεξεργασίας παλιών φωτοβολταϊκών. Ο οργανισμός αρχικά δημιουργήθηκε για τα φωτοβολταϊκά, ωστόσο πλέον διαχειρίζεται και άλλα προϊόντα όπως μπαταρίες, βιομηχανικά απόβλητα ή προϊόντα scrap.

Η ένωση PV CYCLE προσφέρει υπηρεσίες που αφορούν τα Απόβλητα των Ηλεκτρολογικών και Ηλεκτρονικών Εξοπλισμών (ΑΗΗΕ)-Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), τις Μπαταρίες και τις Συσκευασίες. Εφαρμόζει την αρχή της Εκτεταμένης Ευθύνης Παραγωγού-Extended Producer Responsibility σύμφωνα με τον νόμο 2012/19/EU για τα ΑΗΗΕ και τον νόμο 2006/66/EC για τις Μπαταρίες.

Οι εταιρείες που εδρεύουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση και πωλούν Ηλεκτρολογικό και Ηλεκτρονικό Εξοπλισμό είναι υποχρεωμένες να συλλέγουν και να επεξεργάζονται τα απορρίμματα τους ή να αναθέτουν αυτές τις διαδικασίες σε αντίστοιχους οργανισμούς, όπως για παράδειγμα η PV CYCLE. Αντίστοιχα, οφείλουν να συμμορφώνονται με τις ισχύουσες

νομοθεσίες περί διαχείρισης των Αποβλήτων του Ηλεκτρολογικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού, των Μπαταριών και των Συσκευασιών.

Επιπλέον, η ένωση PV CYCLE λειτουργεί σύμφωνα με τις διεθνείς και εθνικές νομοθεσίες (Εκτεταμένης Ευθύνης Παραγωγού), με σκοπό τη μείωση των αποβλήτων και των επιπτώσεων τους στο περιβάλλον.

Απόβλητα των Ηλεκτρολογικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού

Τα Απόβλητα του Ηλεκτρολογικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού αποτελούν ένα σημαντικό πρόβλημα, το οποίο χρήζει αντιμετώπισης, καθώς αυξάνονται με ταχύτατους ρυθμούς. Συγκεκριμένα, η ετήσια ποσότητα παραγωγής των ΑΗΗΕ κυμαίνεται στους 80.000-115.000 τόνους. Η ανακύκλωση των ΑΗΗΕ πρέπει να εκτελείται από πιστοποιημένους οργανισμούς με σκοπό την ανάκτηση υλών όπως ο χαλκός, ο χρυσός, το ασήμι κ.α. αλλά και την διαχείριση των επιβλαβών για το περιβάλλον υλικών που περιέχονται σε πολλές συσκευές όπως ο μόλυβδος, ο υδράργυρος, το κάδμιο κλπ. Η νομοθεσία στην Ελλάδα περί διαχείρισης των αποβλήτων αναγράφεται στην ΚΥΑ Η.Π. 23615/651/Ε.103/2014 (ΦΕΚ 1184/Β/9-5-2014) όπως αυτή τροποποιήθηκε με την ΥΠΕΝ/ΔΝΕΠ/36928/2227. Σύμφωνα με το άρθρο 16 της ΚΥΑ θεσπίζεται το Εθνικό Μητρώο Παραγωγών Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού εξοπλισμού ενώ παράλληλα υποχρεώνει τους παραγωγούς φωτοβολταϊκών να καταβάλουν χρηματικό ποσό σε προγράμματα διαχείρισης ΑΗΗΕ. Για την εφαρμογή της νομοθεσίας είναι υπεύθυνος ο Ελληνικός Οργανισμός Ανακύκλωσης (ΕΟΑΝ).

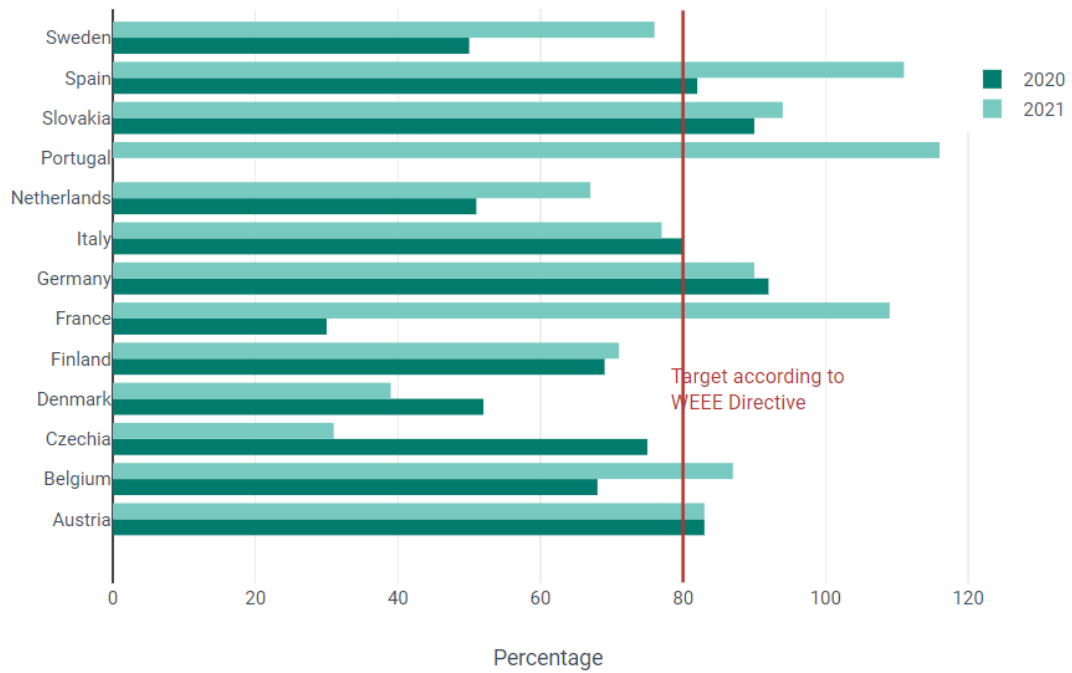
4.4 Νομοθεσία Ευρωπαϊκής Ένωσης

Η νομοθεσία στην Ευρωπαϊκή Ένωση περί διαχείρισης των Ηλεκτρικών και Ηλεκτρονικών Αποβλήτων (WEEE) αναγράφεται στην οδηγία 2012/19/EU, η οποία συντάχθηκε το 2012. Σύμφωνα με την προαναφερθείσα οδηγία απαιτείται η συλλογή και σωστή διαχείριση των αποβλήτων, ενώ συγχρόνως θέτονται τα θεμέλια για την συλλογή, ανάκτηση και ανακύκλωση τους. Επιπλέον, η οδηγία υποστηρίζει τις Ευρωπαϊκές χώρες στην αντιμετώπιση του φαινομένου των παράνομων εξαγωγών αποβλήτων, καθώς προβλέπει την έκδοση ειδικής άδειας από τις κυβερνήσεις των χωρών αποστολής και παραλαβής. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος, η ανακύκλωση των αποβλήτων πραγματοποιείται σε ποσοστό 46%, ενώ το ποσοστό εξαγωγών αποβλήτων της Ε.Ε. κυμαίνεται στο 75%.

Στόχος της οδηγίας είναι η μείωση Ηλεκτρικών και Ηλεκτρονικών Αποβλήτων και η συμβολή στην χρήση πόρων και στην ανάκτηση πρώτων υλών μέσω της επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης των υλικών. Επιπλέον, προβάλλει τη σημαντικότητα της βελτίωσης της περιβαλλοντικής αποτύπωσης του κύκλου ζωής των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών προϊόντων.

Συγκεκριμένα, το 2022, το Δικαστήριο Δικαιοσύνης της Ε.Ε προέβη σε τροποποίηση της οδηγίας, η οποία αφορά τα απόβλητα των φωτοβολταϊκών πάνελ. Σύμφωνα με τη τροποποίηση, εφαρμόστηκε η εκτεταμένη ευθύνη παραγωγού για τα φωτοβολταϊκά που τέθηκαν στην αγορά το χρονικό διάστημα 13 Αυγούστου 2005 έως 13 Αυγούστου 2012. Ειδικότερα, το κόστος διαχείρισης και απόρριψης των πάνελ μετά τις 13 Αυγούστου του 2012, επιβαρύνει αποκλειστικά τον παραγωγό, ο οποίος είναι υποχρεωμένος να οργανώνει προγράμματα διαχείρισης ΑΗΗΕ ή να συμμετέχει σε αυτά. Η τροποποίηση περιέχει σαν ρήτρα την αναθεώρηση της οδηγίας έως το 2026. Στις 7 Φεβρουαρίου του 2023, η Ε.Ε ενέκρινε τη συγκεκριμένη τροποποίηση, ενώ στις 6 Φεβρουαρίου του 2024 το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο ψήφισε επίσημα την οδηγία.

Η οδηγία για τα Ηλεκτρικά και Ηλεκτρονικά Απόβλητα περιέχει επιπλέον, στόχους για τη συλλογή, ανάκτηση και ανακύκλωση αυτών ως αναφέρθηκε ανωτέρω. Συγκεκριμένα, ορίζει ως στόχο την ανάκτηση των πάνελ, τα οποία τέθηκαν στην αγορά από το 2018 και ύστερα σε ποσοστό 85% και επαναχρησιμοποίηση-ανακύκλωση αυτών σε ποσοστό 80%. Παρατηρώντας την Εικόνα 36 ωστόσο, συμπεραίνεται ότι μονάχα έξι (6) Ευρωπαϊκές χώρες πραγματοποίησαν αυτούς τους στόχους.



Εικόνα 36: Ποσοστό ανακύκλωσης-επαναχρησιμοποίησης φωτοβολταϊκών πάνελ

(eurostat)

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Εφαρμογή μεθοδολογίας

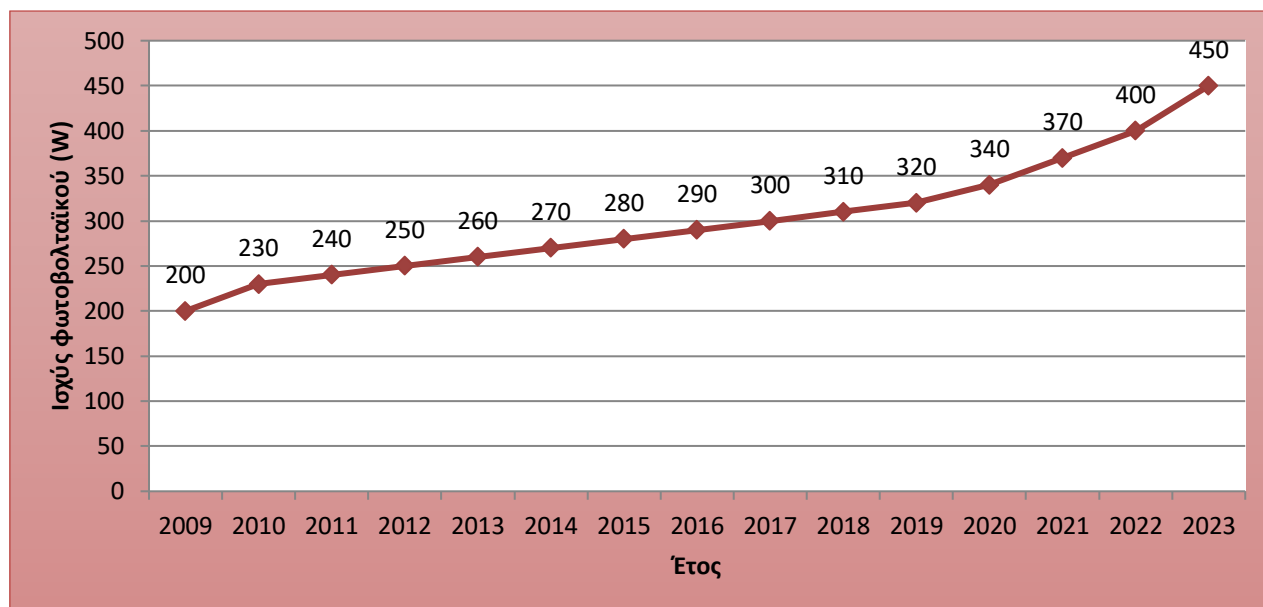
5.1 Μεθοδολογία υπολογισμών

Οι υπολογισμοί εκτελέστηκαν σύμφωνα με τα δεδομένα που αφορούν την Ελληνική επικράτεια.



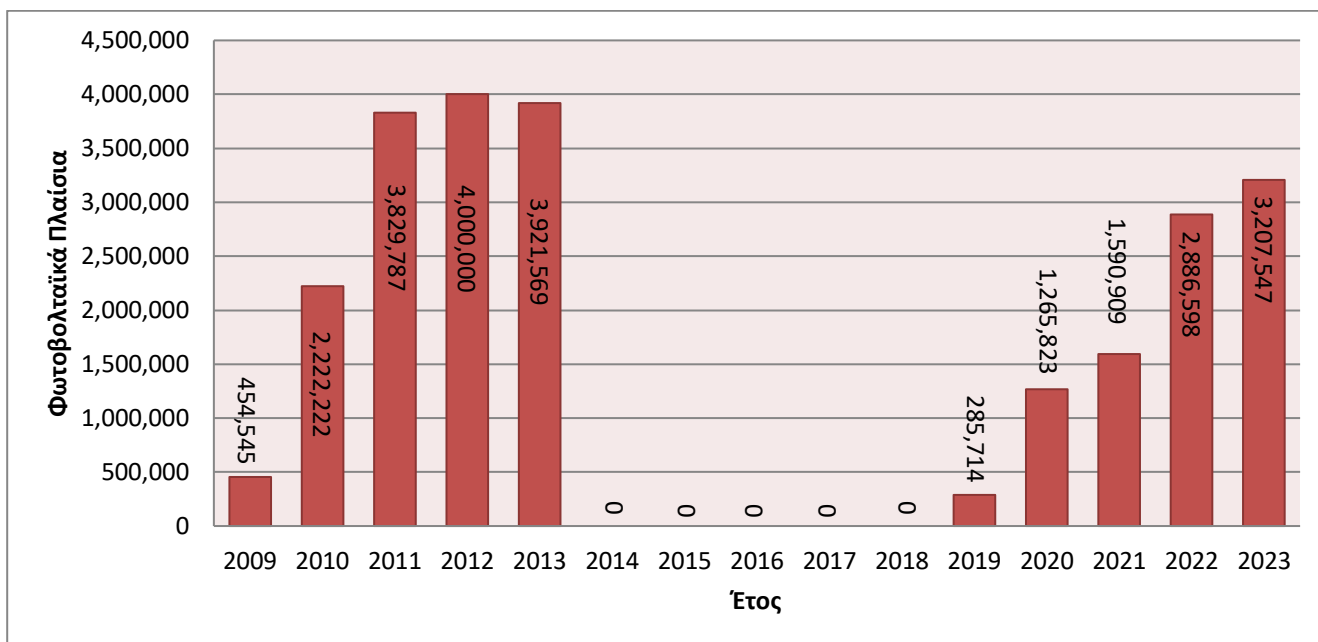
5.2 Αποτελέσματα

Στην Διάγραμμα 1 απεικονίζεται η ισχύς του πιο διαδεδομένου φωτοβολταϊκού από το 2009 μέχρι το 2023.



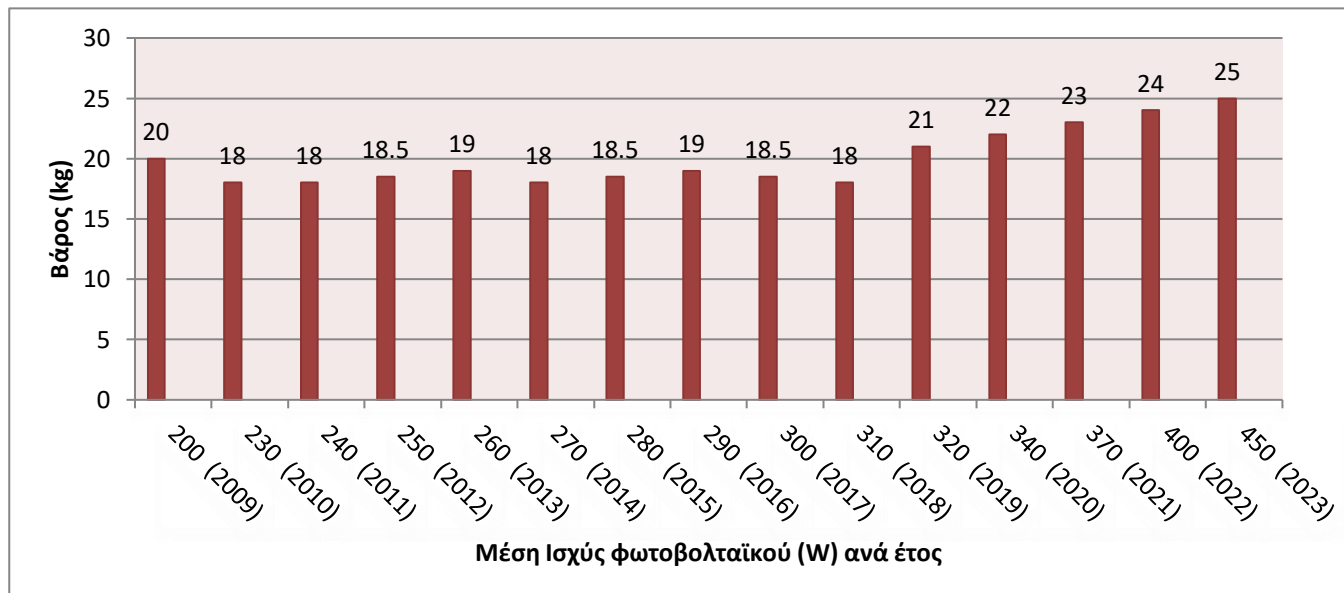
Διάγραμμα 1: Εξέλιξη ισχύος των πιο διαδεδομένων φωτοβολταϊκών πάνελ

Λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες της Εικόνα 16: Ετήσια Παραγόμενη Ισχύς στην Ελλάδα (2010-2023) Εικόνα 16 και του Διάγραμμα 1 προκύπτει το πλήθος των φωτοβολταϊκών που εγκαταστάθηκαν ανά έτος, το οποίο απεικονίζεται συνοπτικά στο κατωτέρω Διάγραμμα 2.



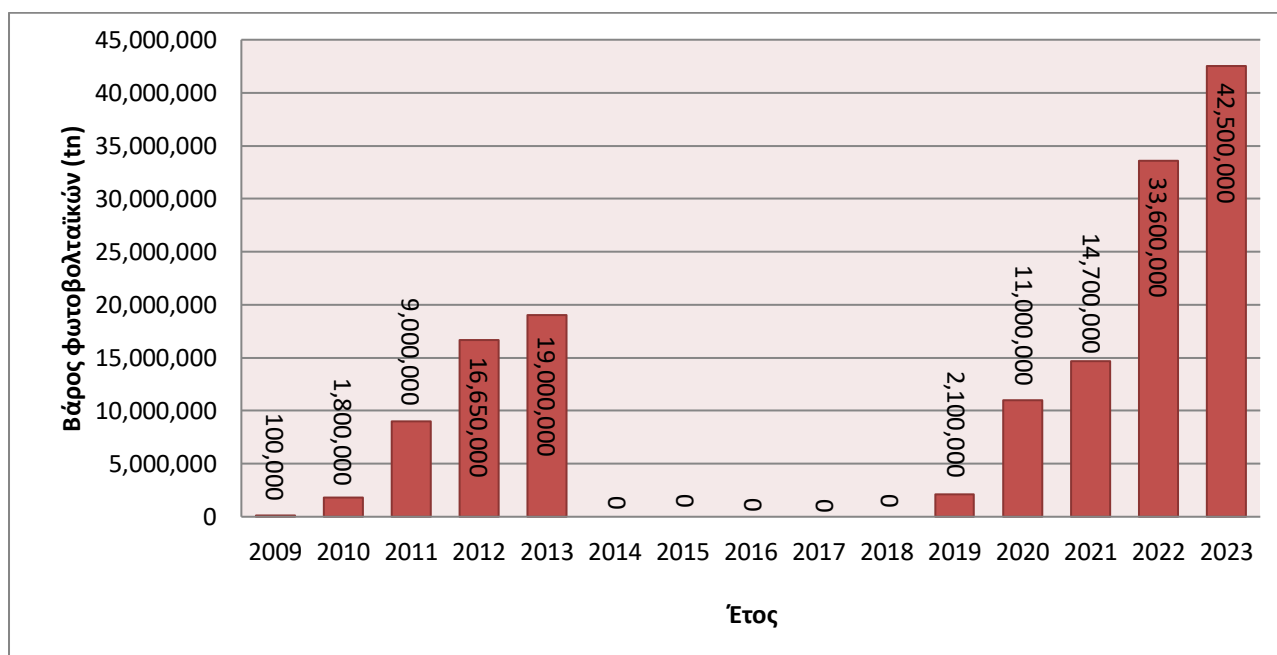
Διάγραμμα 2: Πλήθος φωτοβολταϊκών πλαισίων που εγκαταστάθηκαν ανά έτος

Το βάρος του κάθε φωτοβολταϊκού σε σχέση με την ισχύ αυτού ανά έτος από το 2009 μέχρι το 2023 απεικονίζεται στο παρακάτω Διάγραμμα 3.



Διάγραμμα 3: Βάρος φωτοβολταϊκού σε σχέση με την ισχύ του ανά έτος

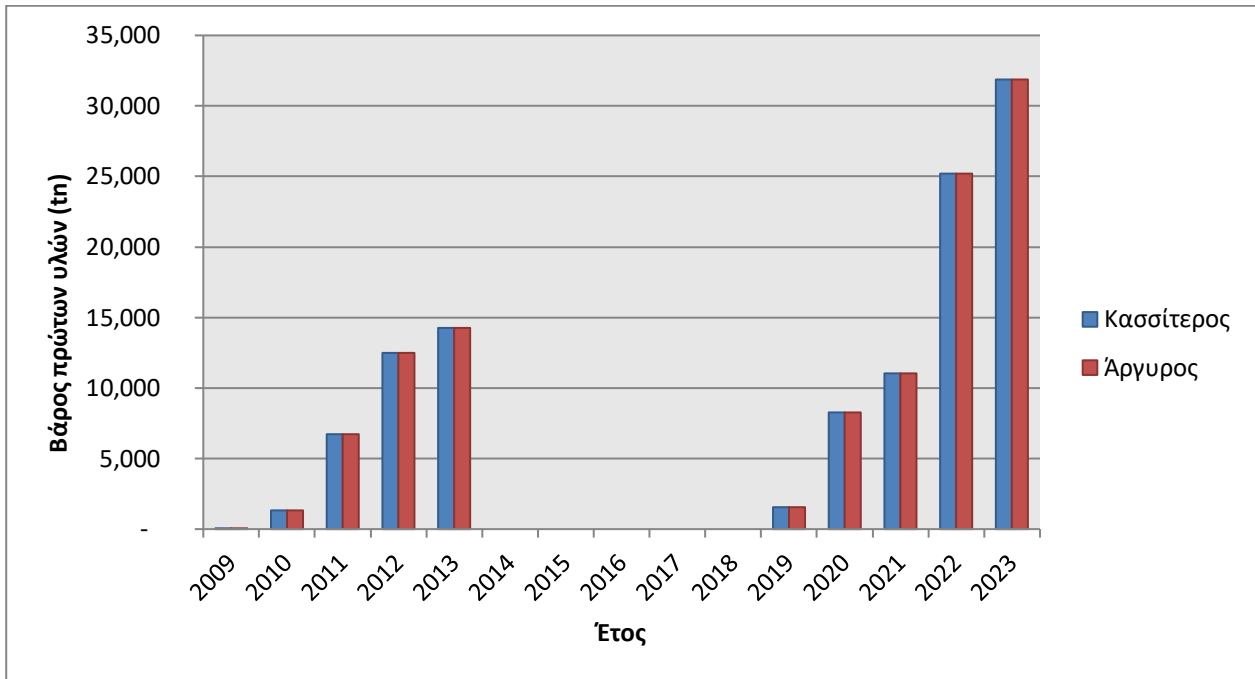
Από τα ανωτέρω υπολογίστηκαν οι τόνοι των φωτοβολταϊκών που τοποθετήθηκαν κάθε έτος στην Ελλάδα. Τα αποτελέσματα αναγράφονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



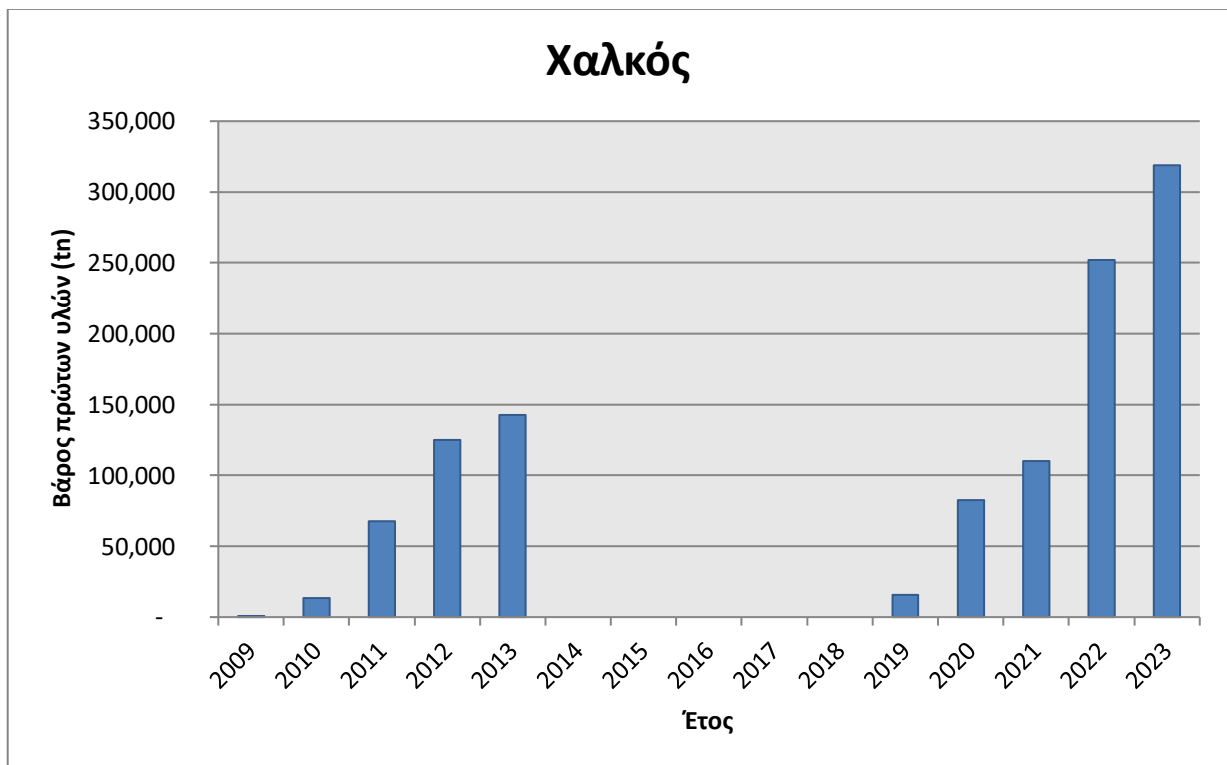
Διάγραμμα 4: Βάρος φωτοβολταϊκών που τοποθετήθηκαν ανά έτος

Από την **Error! Reference source not found.** και τον Πίνακα 2 χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές των υλικών που περιέχονται σε ένα τόνο πάνελ και οι μέσες τιμές των ποσοστών ανάκτησης τους και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Από ποσότητα 0,75kg (0,5-1kg) αργύρου ανακτώνται τα 0,7425kg. Από ποσότητα 7,5kg (5-10kg) χαλκού ανακτώνται τα 7,425kg. Από ποσότητα 0,75kg (0,5-1kg) κασσίτερου ανακτώνται τα 0,24kg. Από ποσότητα 37,5kg (25-50kg) πυριτίου ανακτώνται τα 31,875kg. Από ποσότητα 725kg (700-750kg) γυαλιού ανακτώνται τα 688,85kg. Το αλουμίνιο είναι το μοναδικό υλικό, το οποίο ανακτάται πλήρως. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η ανακύκλωση των πάνελ είναι ωφέλιμη για υλικά όπως το πυρίτιο, το γυαλί και το αλουμίνιο καθώς βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες μέσα στο πάνελ και τα ποσοστά ανάκτησης τους είναι ικανοποιητικά. Αντίθετα, όσον αφορά τον άργυρο και τον χαλκό, οι οποίοι δεν βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες εντός του πάνελ, η ανάκτηση τους δεν είναι ωφέλιμη. Το ανωτέρω γεγονός, ωστόσο, δεν πρέπει να υποβαθμίζει την αξία της ανάκτησής τους.

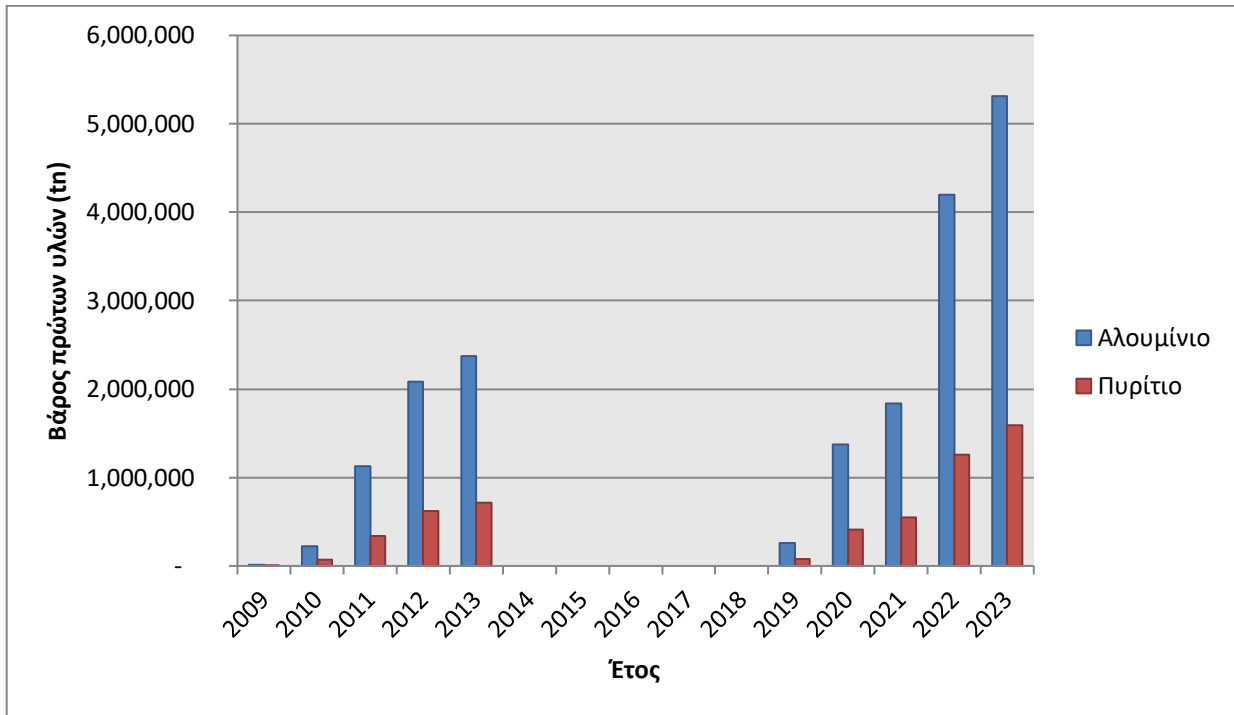
Σύμφωνα με τα ανωτέρω είναι εφικτός ο υπολογισμός των πρώτων υλών σε τόνους που βρίσκονται μέσα στα φωτοβολταϊκά τα οποία τοποθετήθηκαν από το 2009 και μετά.



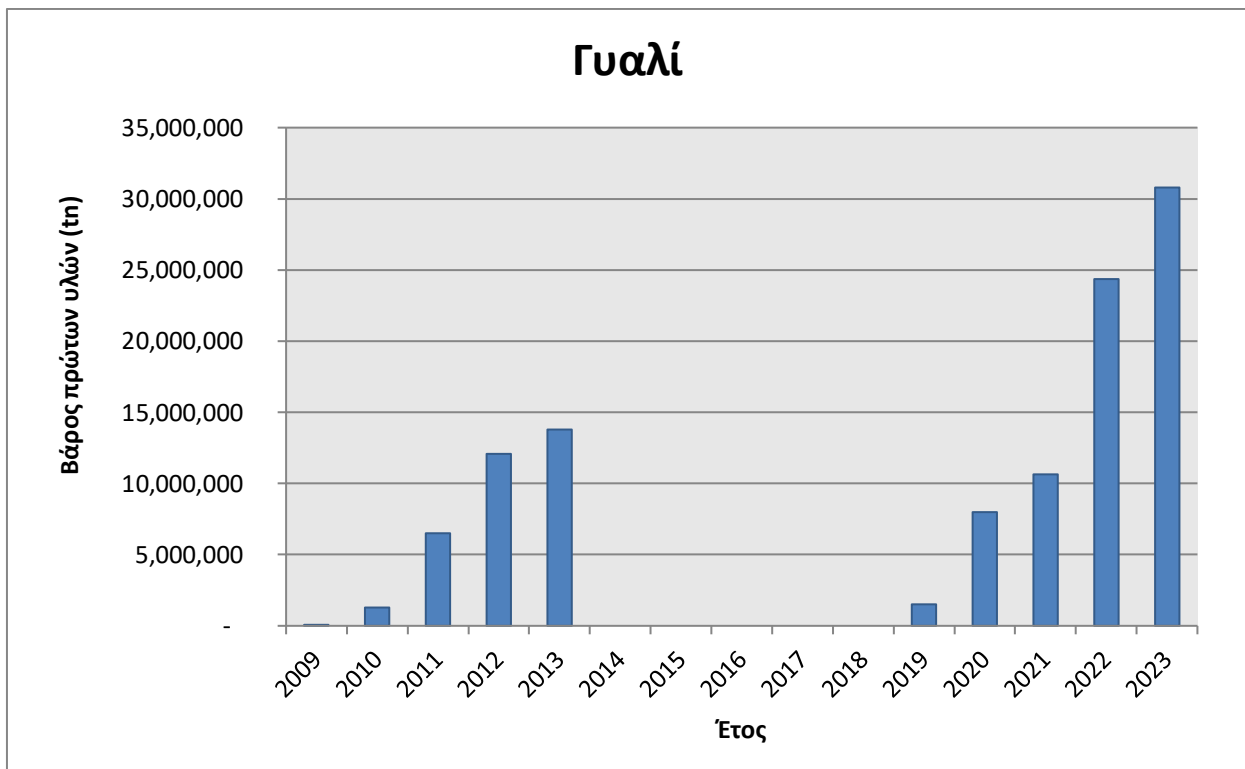
Διάγραμμα 5: Βάρος πρώτων υλών (Κασσίτερος, Άργυρος)



Διάγραμμα 6: Βάρος πρώτων υλών (Χαλκός)

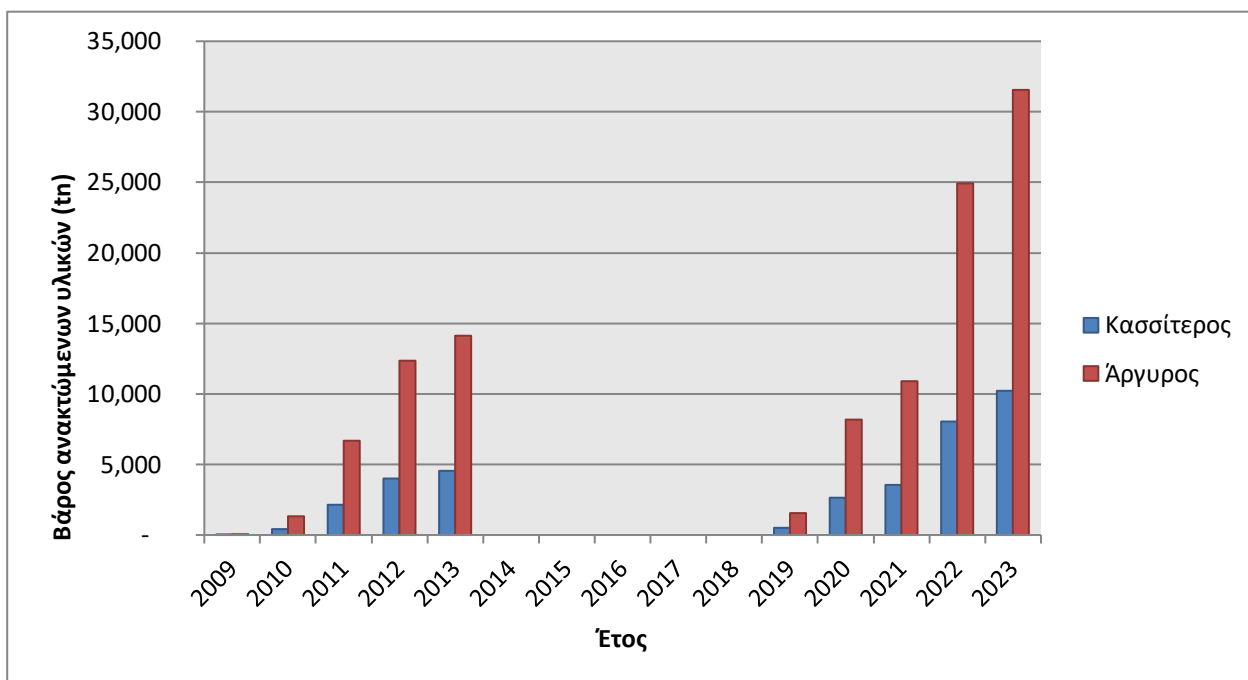


Διάγραμμα 7: Βάρος πρώτων υλών (Αλουμίνιο, Πυρίτιο)

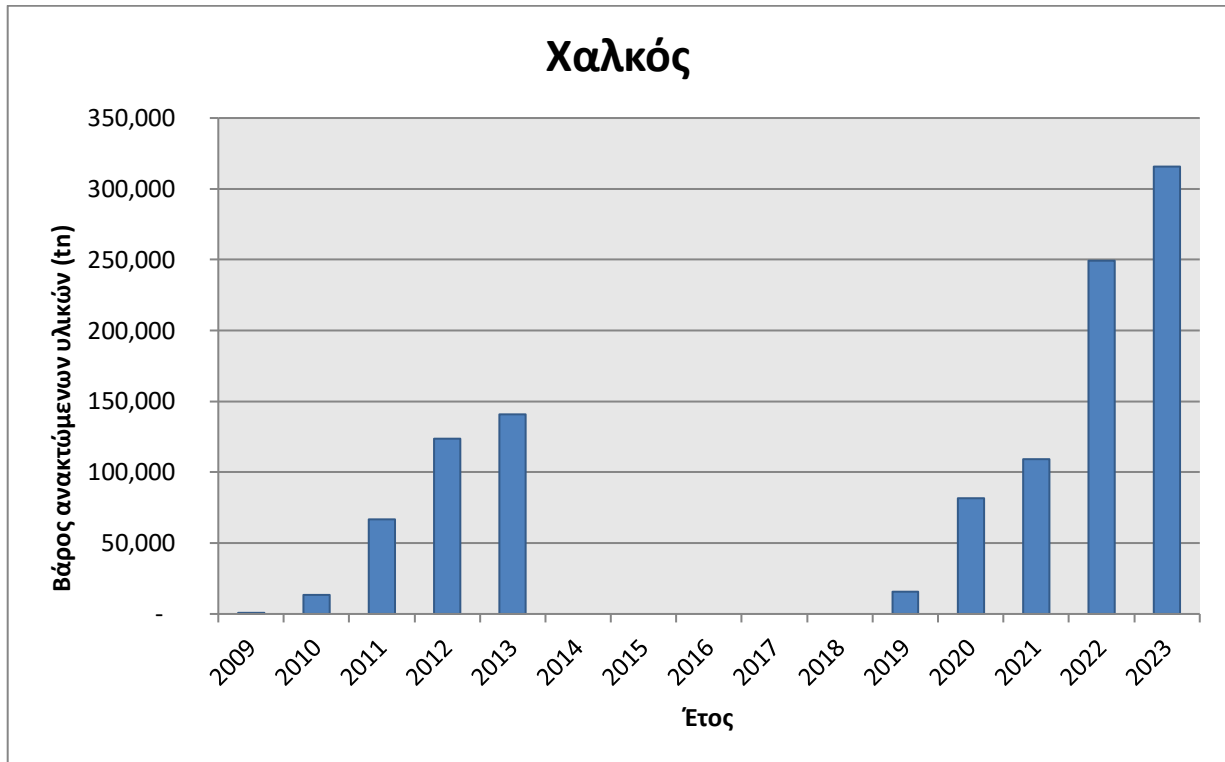


Διάγραμμα 8: Βάρος πρώτων υλών (Γυαλί)

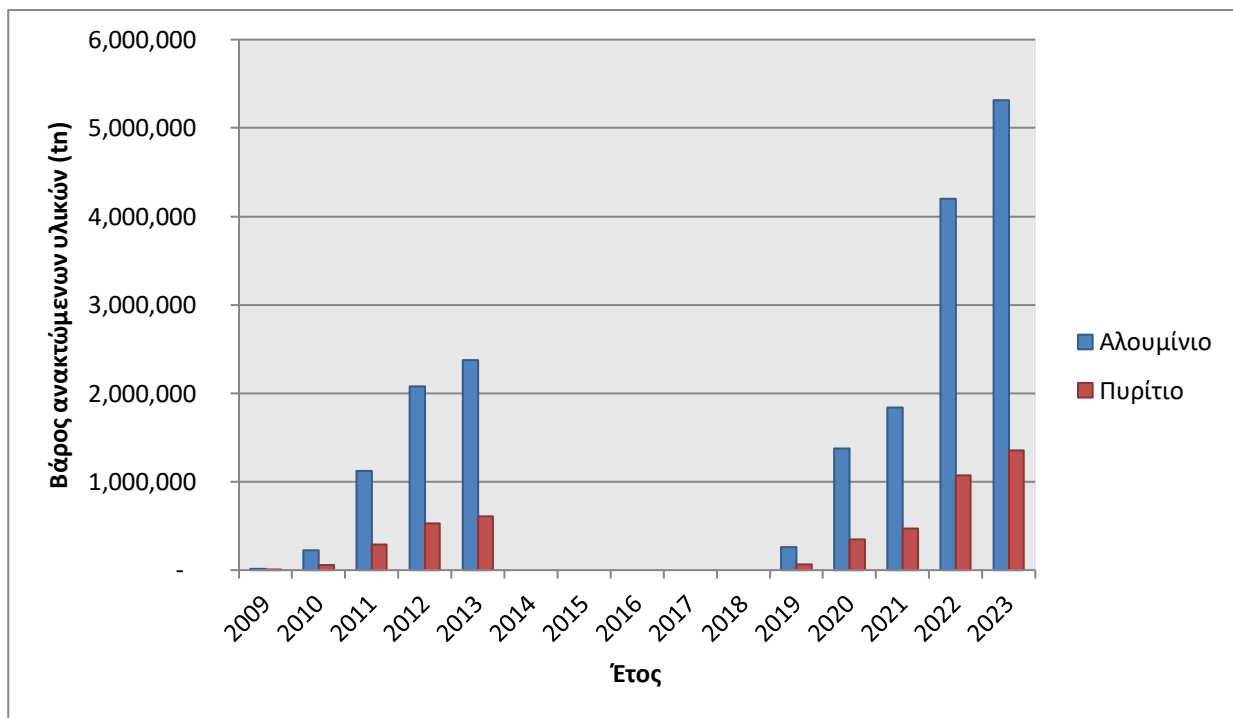
Από τα ανωτέρω διαγράμματα και τον Πίνακα 2: Ποσοστό ανάκτησης πρώτων υλών είναι εφικτός ο προσεγγιστικός υπολογισμός των ανακτώμενων υλικών ανά έτος, στην περίπτωση που ανακυκλωθούν τα φωτοβολταϊκά που εγκαταστάθηκαν το αντίστοιχο έτος. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



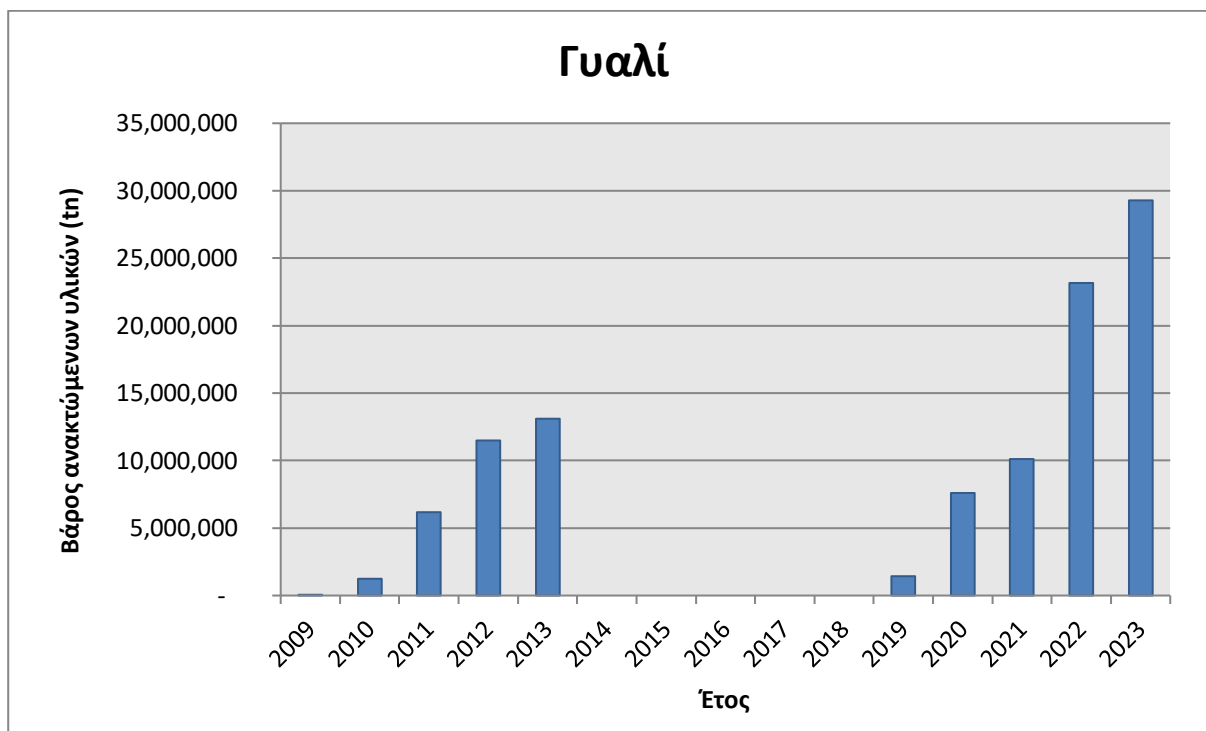
Διάγραμμα 9: Βάρος ανακτώμενων υλικών (Κασσίτερος, Άργυρος)



Διάγραμμα 10: Βάρος ανακτώμενων υλικών (Χαλκός)



Διάγραμμα 11: Βάρος ανακτώμενων υλικών (Αλουμίνιο, Πυρίτιο)



Διάγραμμα 12: Βάρος ανακτώμενων υλικών (Γυαλί)

5.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Εσωτερική ανάλυση

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 2: Πλήθος φωτοβολταϊκών πλαισίων που εγκαταστάθηκαν ανά έτος παρατηρείται ραγδαία αύξηση των εγκαταστάσεων των φωτοβολταϊκών από το 2009 μέχρι το 2013. Συγκεκριμένα, το 2012 εγκαταστάθηκε ο μεγαλύτερος αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων (περίπου 4.000.000). Η αύξηση αυτή οφειλόταν στα κρατικά προγράμματα επιδότησης για τις ΑΠΕ εκείνης της χρονικής περιόδου. Από το 2014 έως το 2018 παρατηρείται μια στασιμότητα στην εγκατάσταση νέων συστημάτων, η οποία οφειλόταν στην επικρατούσα οικονομική κρίση και στην διακοπή των κρατικών επιδοτήσεων. Από το 2019 και ύστερα παρατηρείται μια επανάκαμψη της αγοράς με αποτέλεσμα το πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων που εγκαταστάθηκαν το 2023 να ανέρχεται προσεγγιστικά στα 3,2 εκατομμύρια. Η ραγδαία αυτή αύξηση εκτιμάται ότι οφειλόταν στην αυξανόμενη ζήτηση βιώσιμων πηγών ενέργειας.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα του βάρους των ανακτώμενων υλικών σε περίπτωση που ανακυκλωθούν τα φωτοβολταϊκά κάθε χρονιάς παρατηρείται ότι το αλουμίνιο (100%), ο άργυρος (98-100%), το γυαλί (95%) και ο χαλκός (97%) ανακτώνται σχεδόν πλήρως. Το

πυρίτιο (85%) έχει ικανοποιητικό ποσοστό ανάκτησης, ενώ αντίθετα το ποσοστό ανάκτησης του κασσίτερου (32%) είναι ιδιαίτερα μικρό. Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, υπολογίστηκε το βάρος των υλικών που μπορούν να ανακτηθούν σε περίπτωση ανακύκλωσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, από τα φωτοβολταϊκά που εγκαταστάθηκαν το 2023, μπορούν να ανακτηθούν προσεγγιστικά 31.000 τόνοι αργύρου, 10.000 τόνοι κασσίτερου, 300.000 τόνοι χαλκού, 5.000.000 τόνοι αλουμινίου, 1.300.000 τόνοι πυριτίου και 30.000.000 τόνοι γυαλιού.

Εξωτερική ανάλυση

Το αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία έχει αναλυθεί κατά το παρελθόν, ιδιαιτέρως τα τμήματα που αφορούν τον κύκλο ζωής και τη βιωσιμότητα της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών πάνελ. Στην Ελλάδα έχει διενεργηθεί μια μελέτη, η οποία αναλύει τη βιωσιμότητα μίας εταιρείας ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων, η οποία εδρεύει στην Ελλάδα (ΙΩΑΝΝΗΣ, ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ, 2015). Η ανωτέρω μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι μία εταιρεία ανακύκλωσης στην Ελλάδα δύναται να αποτελέσει μία κερδοφόρα επένδυση ενώ ταυτόχρονα η εμφάνιση ανάλογων εταιρειών μπορεί να μετατρέψει τη χώρα μας σε «κόμβο» ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ.

Αντίστοιχες μελέτες έχουν διενεργηθεί και στο εξωτερικό όπως για παράδειγμα η μελέτη των (Dan Mao, 2023), η οποία αξιολογεί τον κύκλο ζωής της ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ. Η ανωτέρω μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η βιωσιμότητα της ανακύκλωσης θα επιτευχθεί μέσω της ανάπτυξης των υφιστάμενων τεχνολογιών ανακύκλωσης ή/και της εύρεσης νέων. Επιπλέον, προτείνει τη χρήση χημικών ουσιών με χαμηλότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο, κατά την παραγωγή των φωτοβολταϊκών και την ψήφιση κατάλληλης νομοθεσίας περί της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της κάθε χώρας. Μια ακόμα μελέτη περί της αξιολόγησης του κύκλου ζωής της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι των (Cynthia E.L. Latunussa, Fulvio Ardente, Gian Andrea Blengini, Lucia Mancini, 2016). Η συγκεκριμένη μελέτη προτείνει, ως τρόπους μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των φωτοβολταϊκών, τη μείωση ή την αποφυγή της χρήσης φθοριωμένων πλαστικών στις στρώσεις του πάνελ. Επιπλέον, κατά την μελέτη, ενισχύεται η αξία της χρήσης ανακυκλωμένου γυαλιού για την παραγωγή νέων πάνελ, το οποίο προέρχεται από την επεξεργασία αποβλήτων PV.

6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: Βιωσιμότητα εγχειρήματος

6.1 Περιβαλλοντική σκοπιά

Η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι αναγκαία για την προστασία του περιβάλλοντος, καθώς μέσω αυτής μειώνεται η ρύπανση και εξοικονομούνται οι φυσικοί πόροι. Μέσω της ανακύκλωσης αποτρέπεται η διάθεση μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων σε ΧΥΤΑ. Τα φωτοβολταϊκά περιέχουν υλικά όπως το κάδμιο και ο μόλυβδος, τα οποία μπορούν να διαρρεύσουν στο έδαφος και στο νερό, με αρνητικές επιπτώσεις για το περιβάλλον, καθώς επηρεάζεται η ποιότητα του εδάφους και του νερού. Επιπλέον μέσω της ανακύκλωσης εξοικονομούνται πολύτιμες πρώτες ύλες όπως το πυρίτιο, ο άργυρος και ο χαλκός. Τα υλικά αυτά δύναται να επαναχρησιμοποιηθούν για την κατασκευή καινούριων πάνελ ή έτερες κατασκευές. Το ανωτέρω γεγονός έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ανάγκης εξόρυξης νέων ορυκτών, την εξοικονόμηση των φυσικών πόρων και την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούνται κατά την διαδικασία εξόρυξης και επεξεργασίας τους. Ιδιαίτερος όσον αφορά την εξόρυξη των ορυκτών, με την μείωση της απελευθέρωσης των τοξικών ουσιών στο περιβάλλον περιορίζεται η ατμοσφαιρική ρύπανση και η επιδείνωση της τρύπας του όζοντος.

6.2 Σκοπιά δημόσιας υγείας

Η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πάνελ έχει μεγάλα οφέλη για την ανθρώπινη υγεία, καθώς περιορίζεται η ρύπανση και η υποβάθμιση της ποιότητας του περιβάλλοντος ενώ συνάμα μειώνεται η έκθεση των ανθρώπων σε τοξικές ουσίες. Συγκεκριμένα με την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με αυτή που απαιτείται για την παραγωγή εξολοκλήρου καινούριων πάνελ. Το ανωτέρω γεγονός έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των παραγόμενων ρύπων και τη βελτίωση της ποιότητας της εισπνεόμενης ατμόσφαιρας ιδίως στην περίπτωση των ευπαθών ομάδων, όπως παιδιών και ηλικιωμένων.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα φωτοβολταϊκά πάνελ περιέχουν επικίνδυνες για τον άνθρωπο ουσίες, οι οποίες αν δεν ανακυκλωθούν και διαρρεύσουν στο έδαφος και στο νερό, επιβαρύνουν την υγεία των ανθρώπων, ιδιαίτερος αυτών που κατοικούν κοντά σε ΧΥΤΑ ή εργάζονται εντός αυτών. Η έκθεση σε τοξικές ουσίες προκαλεί σοβαρά προβλήματα υγείας όπως καρκίνο, νευρολογικές διαταραχές και αναπνευστικά προβλήματα. Επιπλέον, με

την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών μειώνεται η ανάγκη εξόρυξης καινούριων πρώτων υλών, η οποία αποτελεί μια διαδικασία επιβλαβή για τους εργαζόμενους τόσο ως προς τις συνθήκες εργασίας όσο ως προς την έκθεσή τους σε επικίνδυνα χημικά. Αντίστοιχα προβλήματα αντιμετωπίζουν και οι τοπικές κοινωνίες που βρίσκονται εγγύς των σημείων εξόρυξης.

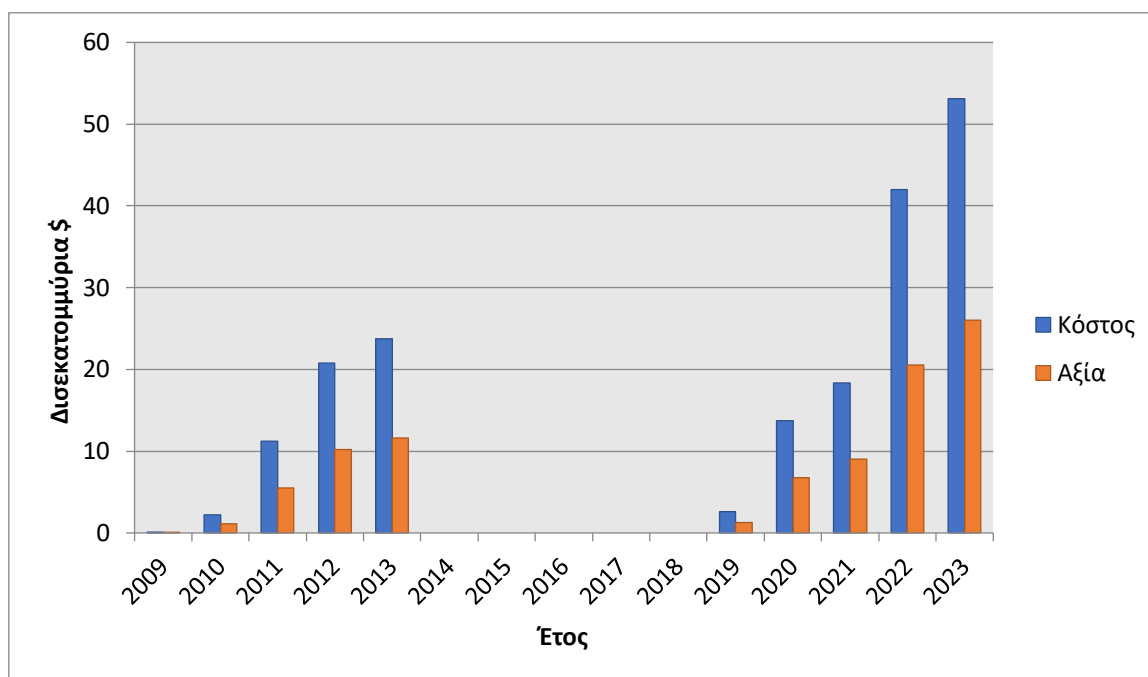
6.3 Οικονομική σκοπιά

Η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών κοστίζει από 800\$/tn έως 1.700\$/tn. Λαμβάνοντας υπόψη το Διάγραμμα 4: Βάρος φωτοβολταϊκών που τοποθετήθηκαν ανά έτος, είναι εφικτός ο υπολογισμός, κατά προσέγγιση, του κόστους ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών που τοποθετήθηκαν κάθε έτος. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος του κόστους ανακύκλωσης (1.250\$/tn).

Λαμβάνοντας υπόψη το Διάγραμμα 4 και τον Πίνακα 3 είναι εφικτός ο υπολογισμός της αξίας των ανακτώμενων υλικών, τα οποία δύναται να προκύψουν από την ανακύκλωση ανά έτος. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η αξία των ανακυκλωμένων υλικών ανά τόνο μεταβάλλεται συνεχώς με τη πάροδο των χρόνων. Συνεπώς, τα οικονομικά οφέλη από την ανακύκλωση θα πρέπει να αξιολογούνται δυναμικά, λαμβάνοντας υπόψη τις εκάστοτε συνθήκες της αγοράς.

Πίνακας 3: Αξία ανακτώμενων υλικών (Σεπτέμβριος 2024)

Ανακυκλωμένα Υλικά	Αξία
Πυρίτιο	2000\$/tn
Αλουμίνιο	661,39 \$/tn
Άργυρος	551.156,11\$/tn
Γυαλί	10\$/tn
Χαλκός	6702,06\$/tn
Κασσίτερος	132,28\$/tn



Διάγραμμα 13: Κόστος ανακύκλωσης-Αξία ανακτώμενων υλικών

Από τα ανωτέρω δεδομένα προκύπτει ότι, παρόλη την ιδιαίτερη αξία της ανακύκλωσης ως προς την προστασία του περιβάλλοντος και την δημόσια υγεία, η οικονομική της βιωσιμότητα παραμένει αμφισβητούμενη με βάση τα τρέχοντα δεδομένα. Οι υπάρχουσες τεχνολογίες ανακύκλωσης και η αξία των ανακυκλωμένων υλικών καθιστούν τη διαδικασία οικονομικά μη αποδοτική. Για να καταστεί η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών οικονομικά βιώσιμη, θα πρέπει να υπάρξει περαιτέρω εξέλιξη στις τεχνολογίες ανακύκλωσης, με στόχο τη μείωση του κόστους και την αύξηση της απόδοσης, ώστε να υποστηριχθεί η ανάπτυξη του συγκεκριμένου τομέα. Μία ακόμα λύση, για να καταστεί η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών βιώσιμη, είναι οι κρατικές επιδοτήσεις αντίστοιχων προγραμμάτων, οι οποίες θα ενισχύσουν οικονομικά τις εταιρείες που πραγματοποιούν την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών με θετικό αντίκτυπο στην προστασία του περιβάλλοντος και την ανθρώπινη υγεία.

Μια επιχείρηση ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών δύναται να καταστεί βιώσιμη επενδύοντας σε τρεις πηγές εσόδων. Η πρώτη πηγή εσόδων αφορά την πώληση των ανακτώμενων υλικών, η δεύτερη προέρχεται από την εκμετάλλευση των κρατικών επιδοτήσεων και η τρίτη αφορά τη σύναψη κατάλληλων οικονομικών συμβάσεων με τους παραγωγούς/χρήστες των φωτοβολταϊκών για την ανακύκλωση αυτών εκμεταλλεζόμενη την υποχρέωση τους από την υφιστάμενη νομοθεσία.

7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο: Life Cycle Analysis (LCA)

Ανάλυση κύκλου ζωής (Life cycle analysis) ονομάζεται η συστηματική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, ενός υλικού ή μιας διαδικασίας. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών πάνελ, η μέθοδος LCA εξετάζει όλα τα στάδια, από την κατασκευή και την εγκατάστασή τους, μέχρι τη χρήση και τη διαχείρισή τους μετά το πέρας της ζωής τους (end of life).

Το πρώτο βήμα του κύκλου ζωής ενός φωτοβολταϊκού είναι η εξόρυξη και η επεξεργασία των πρώτων υλών, όπως το πυρίτιο, το αλουμίνιο και το γυαλί. Η εξόρυξη και η επεξεργασία των πρώτων υλών έχουν αρνητικές επιπτώσεις για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία καθώς απαιτούν την κατανάλωση ενέργειας, εκπέμπουν αέρια που επιβαρύνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και εξαντλούν τους ορυκτούς πόρους. Σκοπός της μεθόδου LCA είναι να εξετάσει τις ανωτέρω επιπτώσεις και να συμβάλλει ώστε οι επιχειρήσεις να κατασκευάσουν φιλικότερα προς το περιβάλλον φωτοβολταϊκά. Επιπλέον η μέθοδος LCA εξετάζει τις πιθανότητες μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος κατά την μεταφορά και εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών.

Κατά τη χρήση των φωτοβολταϊκών πάνελ, αυτά παράγουν ενέργεια χωρίς άμεσες εκπομπές ρύπων, ωστόσο τα δίκτυα στα οποία είναι συνδεδεμένα εξακολουθούν να παράγουν διοξείδιο του άνθρακα. Με την χρήση της LCA μπορεί να μετρηθεί η ενέργεια που παράγουν τα πάνελ και να συγκριθεί με τους ρύπους που παράγουν.

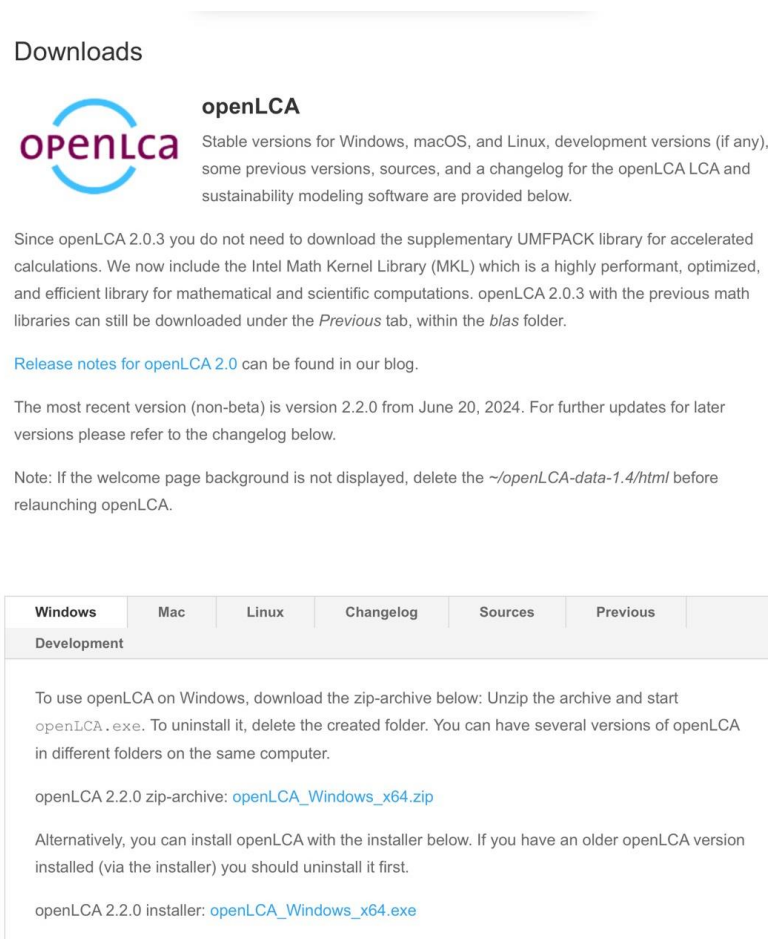
Τα ηλιακά πάνελ έχουν μέση διάρκεια ζωής 25-30 χρόνια. Αφού παρέλθει αυτό το χρονικό διάστημα και παύσουν να λειτουργούν πρέπει είτε να αποσυρθούν σε Χ.Υ.Τ.Α. είτε να ανακυκλωθούν. Η μέθοδος LCA αξιολογεί τους πιο οικολογικούς τρόπους απόσυρσης ή ανακύκλωσης των πάνελ που έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα υλικά που περιέχουν δεν θα μολύνουν το περιβάλλον.

Πέραν των ανωτέρω, με τη μέθοδο LCA εντοπίζονται τα στάδια του κύκλου ζωής των πάνελ στα οποία μπορούν να μειωθούν οι εκπεμπόμενοι ρύποι και να βελτιωθεί η διαδικασία της ανακύκλωσης.

Αξιοποιώντας τη μέθοδο LCA οι κατασκευαστές μπορούν να αυξήσουν την αποδοτικότητα των πάνελ μειώνοντας παράλληλα την χρήση των επιβλαβών για το περιβάλλον ουσιών.

Η μέθοδος LCA μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στην διαμόρφωση της νομοθεσίας για την ευθύνη του παραγωγού. Η νομοθεσία θα πρέπει να είναι με τέτοιο τρόπο δομημένη ώστε οι κατασκευαστές να ενθαρρύνονται να συλλέγουν και να ανακυκλώνουν τα πάνελ τους, μειώνοντας το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα. Παράλληλα, θα πρέπει να παρέχονται κατάλληλα κίνητρα ώστε να εξετάζεται η πιθανότητα επισκευής ή επαναχρησιμοποίησης των παλαιών πλαισίων, παρατείνοντας την ζωή τους και μειώνοντας τα απόβλητα τους.

Για την πραγματοποίηση της μεθόδου LCA χρησιμοποιούνται διάφορα λογισμικά όπως το Simapro, το openLCA κ.α. Στην παρούσα διπλωματική θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό openLCA, το οποίο μπορεί να εγκατασταθεί δωρεάν μέσω του διαδικτύου από τον σύνδεσμο <https://www.openlca.org/download/>, περιβάλλον της ιστοσελίδας απεικονίζεται στην Εικόνα 37. Εκεί είναι δυνατή η λήψη συμβατού λογισμικού αναλόγως των τεχνικών χαρακτηριστικών του υπολογιστή.



Downloads

openLCA

Stable versions for Windows, macOS, and Linux, development versions (if any), some previous versions, sources, and a changelog for the openLCA LCA and sustainability modeling software are provided below.

Since openLCA 2.0.3 you do not need to download the supplementary UMFPACK library for accelerated calculations. We now include the Intel Math Kernel Library (MKL) which is a highly performant, optimized, and efficient library for mathematical and scientific computations. openLCA 2.0.3 with the previous math libraries can still be downloaded under the *Previous* tab, within the *blas* folder.

[Release notes for openLCA 2.0](#) can be found in our blog.

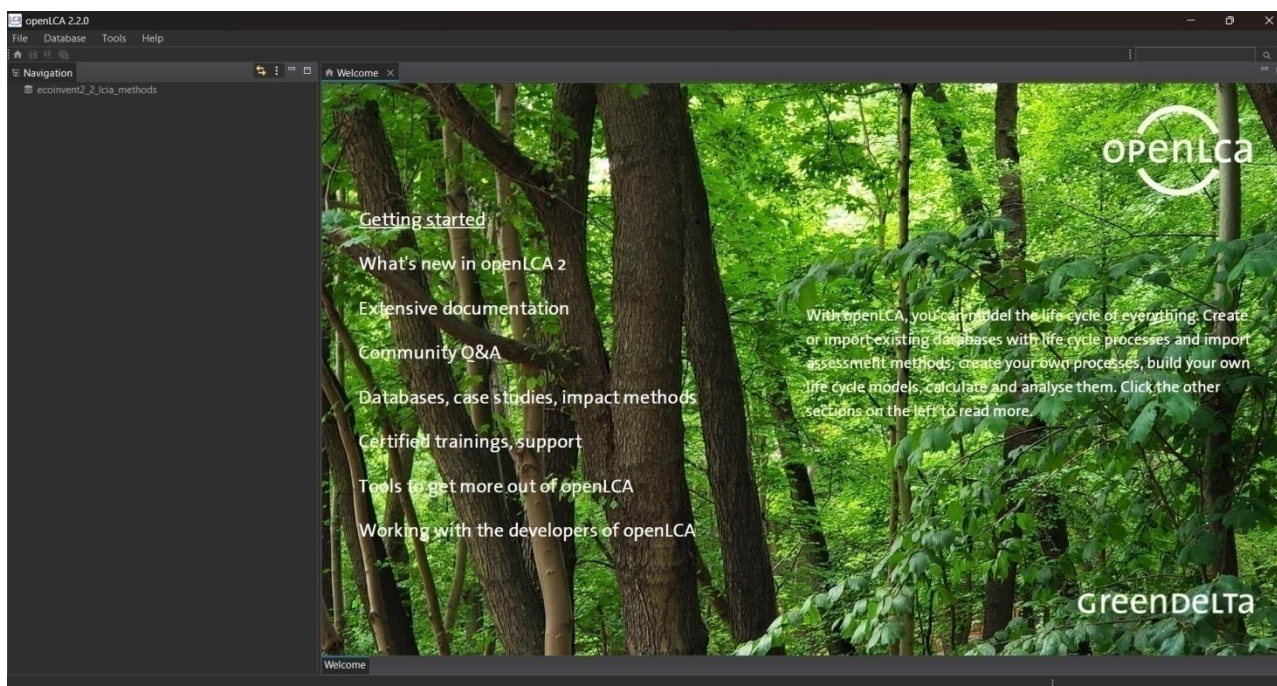
The most recent version (non-beta) is version 2.2.0 from June 20, 2024. For further updates for later versions please refer to the changelog below.

Note: If the welcome page background is not displayed, delete the `~/openLCA-data-1.4/html` before relaunching openLCA.

Windows	Mac	Linux	Changelog	Sources	Previous
Development					
To use openLCA on Windows, download the zip-archive below: Unzip the archive and start openLCA.exe. To uninstall it, delete the created folder. You can have several versions of openLCA in different folders on the same computer.					
openLCA 2.2.0 zip-archive: openLCA_Windows_x64.zip					
Alternatively, you can install openLCA with the installer below. If you have an older openLCA version installed (via the installer) you should uninstall it first.					
openLCA 2.2.0 installer: openLCA_Windows_x64.exe					

Εικόνα 37: Λήψη openLCA

(openLCA)



Εικόνα 38: Εφαρμογή openLCA

(openLCA)

Η ανάλυση του κύκλου ζωής προϋποθέτει, αρχικά, τον ορισμό του σκοπού και του πλαισίου αυτής. Ειδικότερα, ο σκοπός της παρούσας ανάλυσης είναι η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός μονοκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού. Το πλαίσιο της ανάλυσης περιλαμβάνει τον ορισμό της λειτουργικής μονάδας και του συστήματος ορίων αυτής. Στην παρούσα ανάλυση, η λειτουργική μονάδα αποτελείται από την παραγωγή 1kWh ηλεκτρικής ενέργειας ενώ το σύστημα ορίων αποτελείται από τα στάδια, παραγωγή, χρήση, τέλος ζωής με και χωρίς ανακύκλωση. Για την παραγωγή 1kWh θα χρησιμοποιηθεί πάνελ με τα κάτωθι τεχνικά χαρακτηριστικά (R. Frischknecht, P. Stolz, L. Krebs, M. de Wild-Scholten, P. Sinha, 2020).

Πίνακας 4: Τεχνικά χαρακτηριστικά

Χαρακτηριστικά	
Μέγεθος πάνελ	1,6 m ² /πάνελ
Βάρος πάνελ (χωρίς πλαίσιο)	15kg
Αποδοτικότητα πάνελ	19,5 %
Πάχος γκοφρέτας	170 μm
Μέγεθος κελιού	156*156 mm ²

Σύμφωνα με την εξίσωση:

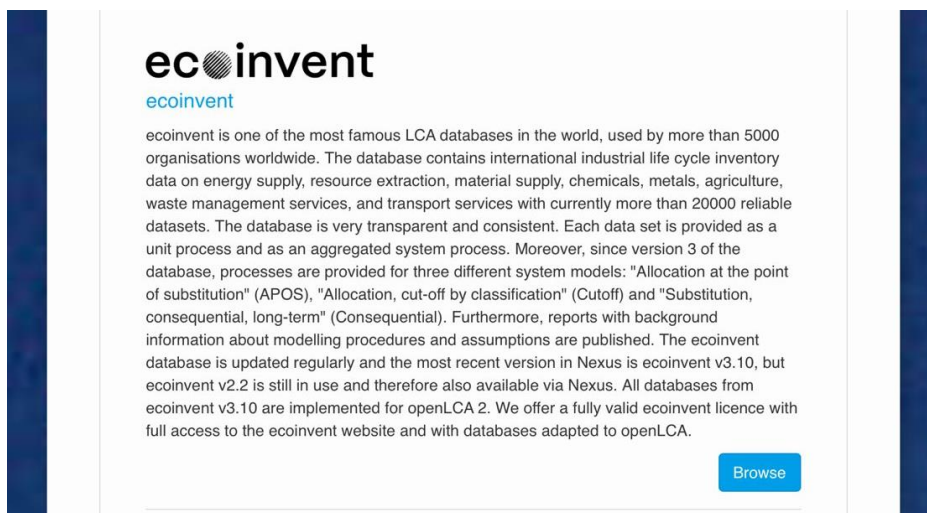
$$P_{STC} = \eta_{STC} * G_{STC} * A \quad 7-1$$

υπολογίζεται η ονομαστική ισχύς (P_{STC}) του φωτοβολταϊκού, όπου η_{STC} ορίζεται ο βαθμός απόδοσης, G_{STC} η ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m² και A το εμβαδόν του πάνελ.

$$P_{STC} = (19,5\%)*(1000W/m^2)*(1,6 m^2) = 312Watts.$$

Θεωρώντας ότι το κάθε πάνελ λειτουργεί για τέσσερις (4) ώρες στην ονομαστική του ισχύ, προκύπτει ότι η ημερήσια παραγωγή του είναι 312Watts* 4h= 1,248 kWh. Επομένως κατά την ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί ένα πάνελ καθώς καλύπτει την επιθυμητή ποσότητα ενέργειας (1kWh).

Στην συνέχεια, ακολουθεί η συλλογή δεδομένων (Inventory Analysis) για τις εισροές (inputs) και τις εκροές (outputs). Η άντληση των δεδομένων προϋποθέτει τη χρήση συγκεκριμένων βάσεων δεδομένων (databases). Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων «ecoinvent», η οποία διατίθεται δωρεάν μέσω του συνδέσμου <https://nexus.openlca.org/downloads>. Το περιβάλλον της ιστοσελίδας απεικονίζεται στην **Error! Reference source not found.** Να σημειωθεί ότι για τη λήψη της βάσης δεδομένων είναι απαραίτητη η δημιουργία λογαριασμού.



Εικόνα 39: Ecoinvent

(openLCA)

Free databases				
Download?	Data file	Nexus version	Format	Licence & Order information
▼	BioEnergieDat			
<input type="checkbox"/>	BioEnergieDat	3	openLCA zolca	Show licence info
▼	ecoinvent LCIA Methods			
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 2.2 LCIA Methods	1	openLCA zolca ▼	Show licence info
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3 LCIA Methods	2 ▼	openLCA zolca	Show licence info Show release notes
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3.1 LCIA Methods	2 ▼	openLCA zolca	Show licence info Show release notes
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3.2 LCIA Methods	2 ▼	openLCA zolca	Show licence info Show release notes
<input checked="" type="checkbox"/>	ecoinvent 3.3 LCIA Methods	2 ▼	openLCA zolca	Show licence info Show release notes
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3.4 LCIA Methods	1	openLCA zolca	Show licence info
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3.5 LCIA Methods	1	openLCA zolca	Show licence info
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3.6 LCIA Methods	1	JSON-LD	Show licence info

Εικόνα 40: Λήψη ecoinvent

(openLCA)

Μετά την ολοκλήρωση της λήψης της βάσης δεδομένων, είναι απαραίτητη η εισαγωγή της στο openLCA, μέσω της επιλογής «import database». Ολοκληρώνοντας την εισαγωγή της βάσης δεδομένων ecoinvent, μπορεί να εισαχθεί και η βάση δεδομένων ELCD- European reference Life Cycle Database. Είναι μια δωρεάν βάση δεδομένων, η οποία αναπτύχθηκε από το Joint Research Center (JRC) και προσφέρει πρόσβαση σε έγκυρα και επιστημονικά τεκμηριωμένα δεδομένα που ακολουθούν τις προδιαγραφές της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η βάση διατίθεται δωρεάν μέσω του συνδέσμου <https://nexus.openlca.org/downloads>.

Download?	Data file	Nexus version	Format	Licence & Order information
▼	BioEnergieDat			
<input type="checkbox"/>	BioEnergieDat	3	openLCA zolca	Show licence info
>	ecoinvent LCIA Methods			
▼	ELCD			
<input checked="" type="checkbox"/>	ELCD 3.2	3 ▼	openLCA zolca	Show licence info Show release notes
>	exiobase			
▼	IMPACT World+ LCIA Methods			
<input type="checkbox"/>	IMPACT World+ Global	1	JSON-LD ▼	Show licence info
▼	LCA commons			
<input type="checkbox"/>	USDA	1	openLCA zolca	Show licence info
▼	NEEDS			
<input type="checkbox"/>	NEEDS complete	2	openLCA zolca	Show licence info Show release notes
>	openLCA LCIA methods			
▼	OzLCI2019			
<input type="checkbox"/>	OzLCI2019	1	openLCA zolca	Show licence info
▼	worldsteel			

Εικόνα 41: Λήψη ELCD

(openLCA)

Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία μπορεί να γίνει η λήψη και της βάσης δεδομένων NEEDS- New Energy Externalities Developments for Sustainability. Η βάση διατίθεται δωρεάν μέσω του προηγούμενου συνδέσμου

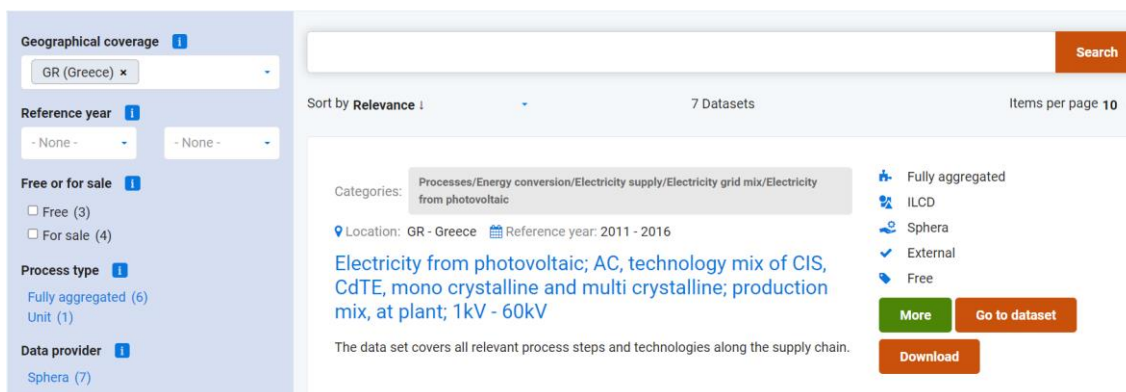
Download?	Data file	Nexus version	Format	Licence & Order information
Free models				
ELCD models				
<input type="checkbox"/>	PET Case study	2	openLCA zolca	Show licence info

Download?	Data file	Nexus version	Format	Licence & Order information
exiobase				
IMPACT World+ LCIA Methods				
<input type="checkbox"/>	IMPACT World+ Global	1	JSON-LD	Show licence info
LCA commons				
<input type="checkbox"/>	USDA	1	openLCA zolca	Show licence info
NEEDS				
<input checked="" type="checkbox"/>	NEEDS complete	2	openLCA zolca	Show licence info Show release notes
openLCA LCIA methods				
OzLCI2019				
<input type="checkbox"/>	OzLCI2019	1	openLCA zolca	Show licence info
worldsteel				
<input type="checkbox"/>	worldsteel 2020 (EF 3.0)	1	openLCA zolca	Show licence info

Εικόνα 42: Λήψη NEEDS

(openLCA)

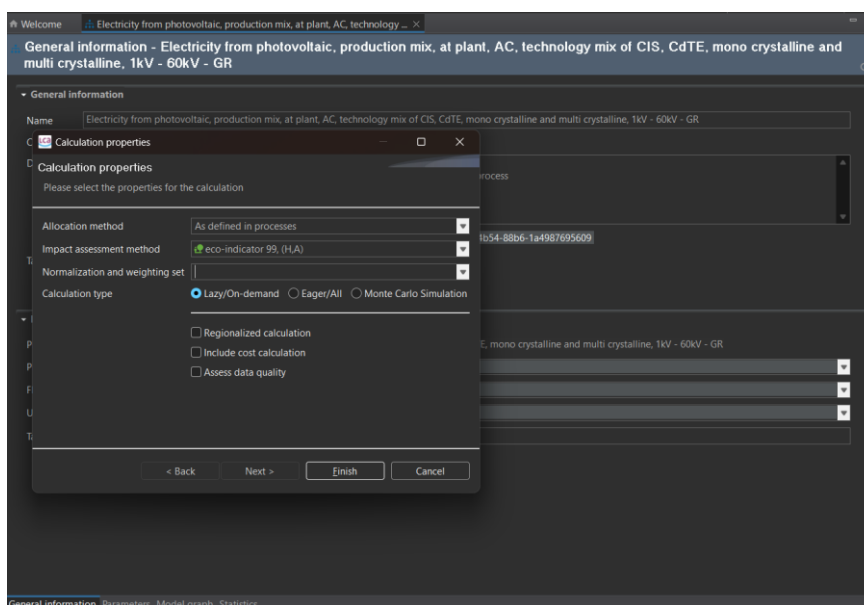
Στην συνέχεια μέσω της ιστοσελίδας Global LCA Data Access εκτελείται η λήψη της βάσης δεδομένων "Electricity from photovoltaic; AC, technology mix of CIS, CdTE, mono crystalline and multi crystalline; production mix, at plant; 1kV- 60kV". Το περιβάλλον της ιστοσελίδας απεικονίζεται στην Εικόνα 43. Η βάση διατίθεται δωρεάν μέσω του συνδέσμου https://www.globalcadataaccess.org/search?query=photovoltaic+1kV&items_per_page=10&sort_bef_combine=search_api_relevance_DESC&f%5B0%5D=location%3A1771. Να σημειωθεί ότι για τη λήψη της βάσης δεδομένων είναι απαραίτητη η δημιουργία λογαριασμού.



Εικόνα 43: Λήψη δεδομένων

(Global LCA Data Access)

Μετά την ολοκλήρωση της εγκατάστασης των δεδομένων και την εισαγωγή τους στο λογισμικό openlca είναι εφικτή η λήψη των αποτελεσμάτων. Στην παρούσα διπλωματική, για τον υπολογισμό των επιπτώσεων, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος eco-indicator 99, (H,A), όπως απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί. Η μέθοδος eco-indicator 99, (H,A) βοηθά στην αξιολόγηση του κύκλου ζωής (LCA), με την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η eco-indicator 99 εξετάζει τις αρνητικές επιπτώσεις, διαχωρίζοντάς τες σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες είναι η Ανθρώπινη Υγεία (Human Health), η Ποιότητα των Οικοσυστημάτων (Ecosystem Quality) και τα Αποθέματα των Πόρων (Resources). Τα αποτελέσματα εμφανίζονται με την μορφή «πόντων» (points), έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των κατηγοριών. Το H (Hierarchical) χρησιμοποιείται για τις βραχυπρόθεσμες και για τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις, ενώ το A (Average) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των μέσων συντελεστών έτσι ώστε τα αποτελέσματα να βασίζονται σε μια κοινώς αποδεκτή άποψη.



Εικόνα 44: eco-indicator 99, (H,A)

Τα αποτελέσματα της κάθε μίας επίπτωσης διαχωρίζονται σε επιπλέον υποκατηγορίες. Συγκεκριμένα, η Ποιότητα Οικοσυστημάτων (Ecosystem Quality) διαχωρίζεται στις κατωτέρω τρεις υποκατηγορίες.

- Όξυνση & Ευτροφισμός (Acidification & Eutrophication)

Όξινη είναι η διαδικασία κατά την οποία αέρια όπως το διοξείδιο του θείου (SO₂) και τα οξείδια του αζώτου (NO_x), αντιδρούν στην ατμόσφαιρα σχηματίζοντας θειικό και νιτρικό οξύ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το περιβάλλον να γίνεται πιο όξινο, γεγονός που προκαλεί τη μείωση του pH του εδάφους και του νερού, επηρεάζοντας αρνητικά την υγεία όλων των ζωντανών οργανισμών. Συγκεκριμένα, η αλλαγή του pH δύναται να προκαλέσει την αφάνιση διαφόρων ειδών ζωντανών οργανισμών ενώ συγχρόνως έχει αρνητικό αντίκτυπο στην ανθρώπινη υγεία καθώς επηρεάζεται η ποιότητα του αέρα και του νερού.

Κατά την διαδικασία του ευτροφισμού, το νερό εμπλουτίζεται σε υπερβολικό βαθμό με θρεπτικά συστατικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υπερβολική αύξηση των κυανοβακτηρίων τα οποία εξαντλούν το οξυγόνο εντός του νερού και προκαλούν ζώνες νεκρών περιοχών. Η μείωση του οξυγόνου επηρεάζει αρνητικά την υγεία των λοιπών ζωντανών οργανισμών που υπάρχουν μέσα στο νερό. Επιπλέον, η ποιότητα του πόσιμου νερού επηρεάζεται καθώς προκαλείται δυσάρεστη οσμή και γεύση. Τέλος, η αλλαγή στις συνθήκες του νερού μπορεί να προκαλέσει την μείωση της βιοποικιλότητας.

➤ Οικοτοξικότητα (Ecotoxicity)

Οι χημικές ουσίες και οι ρύποι προκαλούν την οικοτοξικότητα σε ένα οικοσύστημα. Η οικοτοξικότητα μπορεί να προκαλέσει πληθώρα προβλημάτων στην υγεία των οργανισμών προκαλώντας τον μερικό ή ολικό αφανισμό ειδών ή ακόμα και γενετικές αλλοιώσεις. Επιπλέον, η οικοτοξικότητα προκαλεί σημαντικά προβλήματα στην ισορροπία του οικοσυστήματος, όπως απώλεια της βιοποικιλότητας και αλλοίωση των τροφικών αλυσίδων. Τέλος, προκαλεί προβλήματα στην δημόσια υγεία τα οποία προέρχονται από τη μόλυνση του πόσιμου νερού ή την κατανάλωση μολυσμένων ψαριών.

➤ Κατάληψη Γης (Land Occupation)

Η υπερβολική κατάληψη γης μπορεί να προκαλέσει πληθώρα προβλημάτων, όπως απώλεια της βιοποικιλότητας, αλλαγές στο οικοσύστημα λόγω της διαταραχής των φυσικών λειτουργιών και υποβάθμιση/διάβρωση του εδάφους.

Η Ανθρώπινη Υγεία (Human Health) διαχωρίζεται στις κατωτέρω πέντε υποκατηγορίες.

➤ Καρκινογόνοι Παράγοντες (Carcinogenics)

Καρκινογόνοι ονομάζονται οι παράγοντες οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν καρκίνο σε κάποιο μέρος του ανθρώπινου σώματος. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνουν ουσίες είτε

ανθρωπογενούς είτε φυσικής προέλευσης οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τον άνθρωπο μέσω της εισπνοής, της κατάποσης ή της δερματικής επαφής.

➤ Κλιματική Αλλαγή (Climate Change)

Η κλιματική αλλαγή οφείλεται κυρίως σε ανθρωπογενείς παράγοντες και προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Συνέπεια αυτής είναι το λιώσιμο των πάγων και η αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Πέραν των ανωτέρω οδηγεί στην αύξηση των βροχοπτώσεων και των ακραίων καιρικών φαινομένων, προκαλώντας αλλαγές στα οικοσυστήματα, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και την εμφάνιση οικονομικών προβλημάτων από την καταστροφή των καλλιεργειών και των ιδιοκτησιών.

➤ Ιονίζουσα Ακτινοβολία (Ionising Radiation)

Η ιονίζουσα ακτινοβολία είναι μορφή ενέργειας, η οποία απελευθερώνεται από ραδιενεργές ουσίες και μπορεί να ιονίζει τα άτομα και τα μόρια. Η ιονίζουσα ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει βλάβες στο DNA και στους ιστούς των ζωντανών οργανισμών.

➤ Εξασθένιση του Στρώματος του Όζοντος (Ozone Layer Depletion)

Η εξασθένιση του στρώματος όζοντος, γνωστή ως «τρύπα του όζοντος», μειώνει την προστασία του πλανήτη από την υπεριώδη ακτινοβολία του ήλιου. Η υπεριώδης ακτινοβολία του ήλιου μπορεί να προκαλέσει καρκίνο του δέρματος, οφθαλμικές παθήσεις και αναποτελεσματικότητα του ανοσοποιητικού συστήματος. Έχει πολλές επιπτώσεις στο κλίμα του πλανήτη και στην μείωση της βιοποικιλότητας.

➤ Αναπνευστικές Επιπτώσεις (Respiratory Effects)

Οι αναπνευστικές επιπτώσεις μπορεί να προκληθούν από ατμοσφαιρικούς ρύπους και χημικές ουσίες, οι οποίες προκαλούν σημαντικά προβλήματα υγείας.

Τα Αποθέματα Πόρων (Resources) διαχωρίζεται στις κατωτέρω δύο υποκατηγορίες.

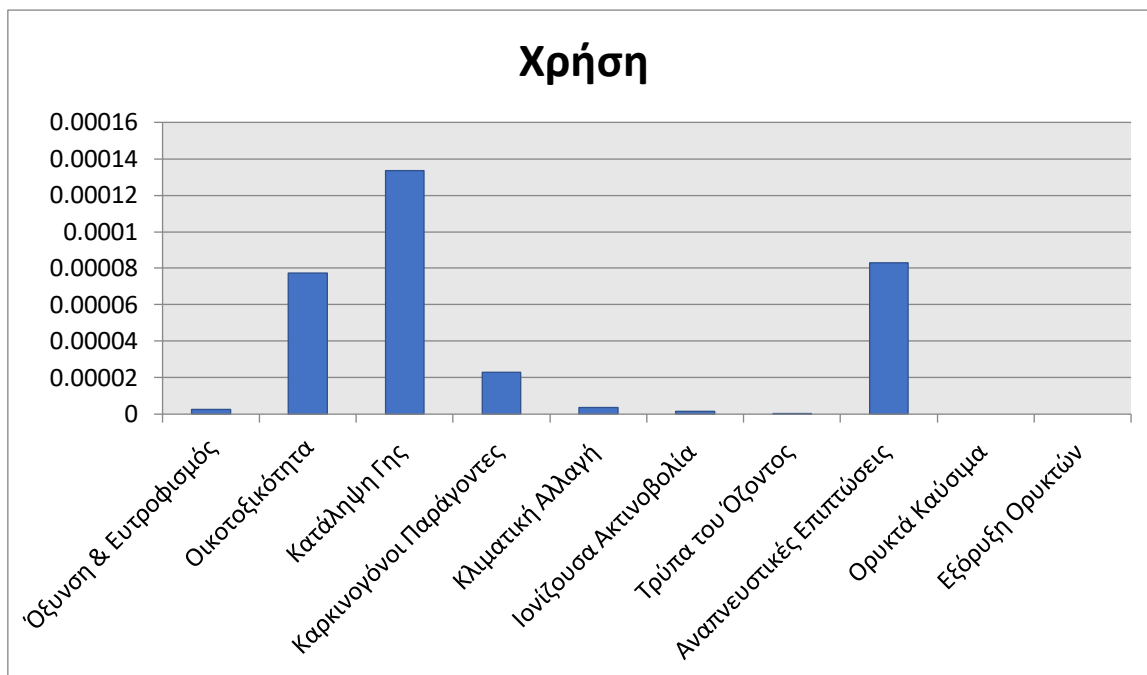
➤ Ορυκτά Καύσιμα (Fossil Fuels)

Τα ορυκτά καύσιμα συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή καθώς εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και άλλα αέρια του θερμοκηπίου. Οι εκπεμπόμενοι ρύποι μολύνουν την ατμόσφαιρα και συμβάλλουν στην δημιουργία όξινης βροχής.

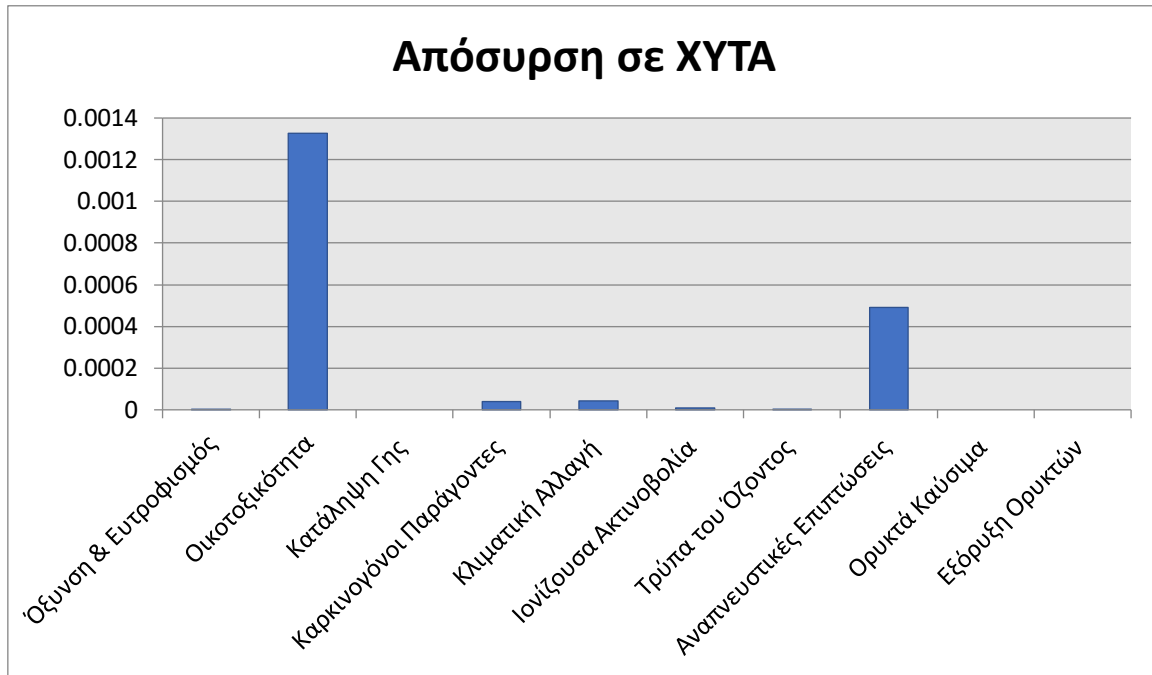
➤ Εξόρυξη Ορυκτών (Mineral Extraction)

Κατά την εξόρυξη των ορυκτών προκαλείται απώλεια της βιοποικιλότητας και ρύπανση του νερού, του εδάφους και της ατμόσφαιρας. Επιπλέον, η εξόρυξη δύναται να προκαλέσει ανθρωπογενείς σεισμούς.

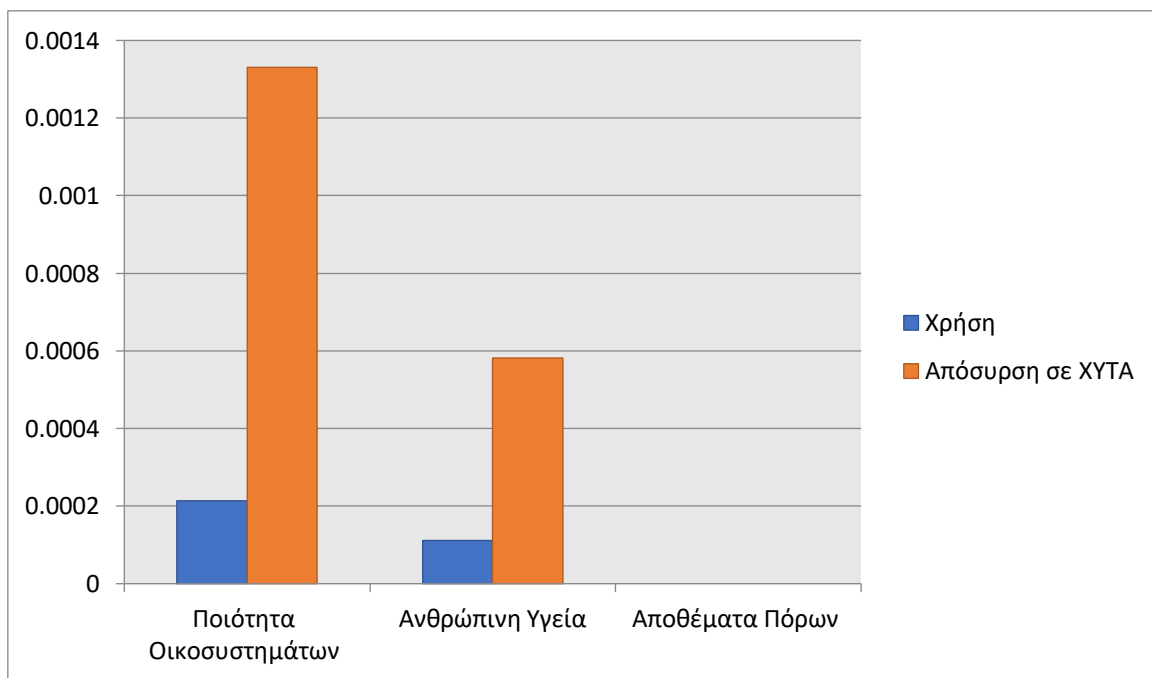
Οι επιπτώσεις για το στάδιο χρήσης φωτοβολταϊκών και για το τέλος κύκλου ζωής αυτών χωρίς ανακύκλωση μέσω ταφής αστικών στερεών αποβλήτων. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 14: Επιπτώσεις κατά την χρήση



Διάγραμμα 15: Επιπτώσεις κατά την απόσυρση σε ΧΥΤΑ



Διάγραμμα 16: Επιπτώσεις

Παρατηρείται ότι, κατά το στάδιο απόσυρσης των φωτοβολταϊκών σε Χ.Υ.Τ.Α., οι επιπτώσεις είναι μεγαλύτερες σε σύγκριση με το στάδιο χρήσης. Η ποιότητα του οικοσυστήματος επηρεάζεται αρνητικά περισσότερο από την ανθρώπινη υγεία και στις δύο

περιπτώσεις, ενώ τα αποθέματα των πόρων δεν επηρεάζονται καθόλου διότι δεν πραγματοποιείται εξόρυξη ή χρήση ορυκτών κατά το στάδιο χρήσης ή απόσυρσης.

8 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική είχε ως στόχο την διερεύνηση της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών και της βιωσιμότητας της. Η ανάλυση των επιπτώσεων των αποβλήτων από τα EoL πάνελ, ανέδειξε ότι τα απόβλητα μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις με τον αντίστοιχο αντίκτυπο στην ανθρώπινη υγεία. Δεδομένου ότι η διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι 25-30 έτη, εντός των επόμενων χρόνων αναμένεται η απόσυρση των πρώτων φωτοβολταϊκών που εγκαταστάθηκαν με αποτέλεσμα τη δημιουργία εκατομμυρίων τόνων αποβλήτων σε περίπτωση μη ανακύκλωσης αυτών.

Μέσα από την ανάλυση των μεθόδων ανακύκλωσης διαπιστώθηκε ότι η βιομηχανία της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών είναι ένας αναπτυσσόμενος κλάδος ο οποίος χρήζει περαιτέρω εξέλιξης. Η τεχνολογία της ανακύκλωσης βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης, με πολλές υποσχόμενες μεθόδους να είναι ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο. Κατά κανόνα, με την υπάρχουσα τεχνολογία επιτυγχάνονται ικανοποιητικά ποσοστά ανάκτησης των υλικών του φωτοβολταϊκού, τα οποία δύναται να επαναχρησιμοποιηθούν σε νέες εφαρμογές. Το κύριο ζήτημα με την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών αφορά την οικονομική βιωσιμότητα της. Συγκεκριμένα, οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ανακύκλωσης είναι ιδιαίτερα κοστοβόρες. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για τις υφιστάμενες μεθόδους ανακύκλωσης ανέδειξε ότι τα έξοδα από την ανακύκλωση των πάνελ είναι σημαντικά μικρότερα από τα έξοδα όπου περιλαμβάνουν τα κόστη μεταφοράς, διαχωρισμού και επεξεργασίας των πάνελ.

Η μη οικονομική βιωσιμότητα της ανακύκλωσης των πάνελ αποτελεί το σημαντικότερο εμπόδιο στην υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών διαχείρισης αυτών μετά το πέρας της ζωής τους. Ανωτέρω γεγονός αναδεικνύει την ανάγκη αυστηρότερης τήρησης των νόμων για τη διαχείριση των αποβλήτων, ιδιαιτέρως μέχρι την ανάπτυξη αποτελεσματικότερων και οικονομικότερων μεθόδων ανακύκλωσης. Ένα πιθανό μέτρο για την μείωση των αρνητικών επιπτώσεων από την ισχύουσα νομοθεσία για την ανακύκλωση είναι η χορήγηση κρατικών επιδοτήσεων για τα προγράμματα ανακύκλωσης. Η ενίσχυση αυτή θα περιορίζε το οικονομικό βάρος της ανακύκλωσης, καθιστώντας την πιο προσιτή και βιώσιμη, τόσο για τις εταιρείες όσο και για το περιβάλλον. Με αυτό τον τρόπο, θα μπορούσε να επιτευχθεί μια ισορροπία μεταξύ της οικονομικής και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, εξασφαλίζοντας ένα βιώσιμο μέλλον για την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πάνελ. Σε περίπτωση μη ανάπτυξης οικονομικότερων μεθόδων ανακύκλωσης είναι δυνατόν να επηρεαστεί αρνητικά

ολόκληρος ο κλάδος των φωτοβολταϊκών, μειώνοντας την περιβαλλοντική του αξία. Απαραίτητη προϋπόθεση, για την ανάπτυξη του κλάδου της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών πάνελ και την επίτευξη ενός πράσινου και βιώσιμου μέλλοντος, είναι η συνεργασία μεταξύ των κατασκευαστών και των εταιρειών ανακύκλωσης. Η συνεργασία αυτή θα ωφελήσει τόσο τον κλάδο της ανακύκλωσης, ιδίως στο τομέα της διαχείρισης των αποβλήτων, αλλά και την ανάπτυξη μεθόδων κατασκευής φιλικότερων προς το περιβάλλον προϊόντων.

Βιβλιογραφία

Dricus De Rooij. (n.d.). *PV Junction Box: purpose and connection*. Ανάκτηση Ιανουάριος 19, 2024, από <https://sinovoltaics.com/learning-center/materials/pv-junction-box-purpose-and-connection/>

“*Global Market Outlook For Solar Power 2022-2026*” by SolarPower Europe. (2022). Ανάκτηση Ιανουάριος 12, 2024, από <https://www.e-solar.co.jp/en/column/post713>

A COMPLETE GUIDE TO SOLAR PANEL RECYCLING. (2022). Ανάκτηση Μάρτιος 2, 2024, από <https://freedomsolarpower.com/blog/complete-guide-to-solar-panel-recycling>

A. Divya, T. Adish, P. Kaustubh, P.S. Zade. (2022). Review on recycling of solar modules/panels. Στο *Solar Energy Materials and Solar Cells*. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112151>.

Babin, M. (2023). *Lifecycle analysis of a PV plant: Carbon footprints and recycling modules*. Ανάκτηση Φεβρουάριος 10, 2024, από <https://ratedpower.com/blog/lifecycle-analysis-pv-plant/>

Brian. (2023). *Secondary use: recycling of solar panels*. Ανάκτηση Ιούνιος 2, 2024, από <https://www.maysunsolar.com/blog-secondary-use-recycling-of-solar-panels/>

Carcinogens. (2023). Ανάκτηση Σεπτέμβριος 16, 2024, από <https://my.clevelandclinic.org/health/articles/25081-carcinogens>

CIHEAM. (n.d.). Ανάκτηση Σεπτέμβριος 16, 2024, από Advantages and disadvantages of land use changes for the preservation of soil resources. Review of soil conservation practices and the need for related research: <http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=95605231>

Clissitt, C. (2024). *The Complete Guide to Solar Panel Recycling*. Ανάκτηση Απρίλιος 27, 2024, από <https://www.theecoexperts.co.uk/solar-panels/solar-panel-recycling>

Cynthia E.L. Latunussa, Fulvio Ardente, Gian Andrea Blengini, Lucia Mancini. (2016). Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. Στο *Solar Energy Materials & Solar Cells*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.020>.

D.S. Prasad, B. Sanjana, D. Sai Kiran, P.P. Srinivasa Kumar, R. Ratheesh. (2022). Process optimization studies of essential parameters in the organic solvent. Στο *Solar Energy Materials and Solar Cells*. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111850>.

Dan Mao, S. Y. (2023). Overview of life cycle assessment of recycling end-of-life photovoltaic panels: A case study of crystalline silicon photovoltaic panels. Στο *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140320>.

(2018). Development of an Industrial Recycling Process for PV Modules. Στο *Fraunhofer ISE*. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/pv-recycling.html>.

Dricus De Rooij. (n.d.). *Tabbing Ribbons: Design and Purpose*. Ανάκτηση Ιανουάριος 18, 2024, από <https://sinovoltaics.com/learning-center/materials/tabbing-ribbons-design-and-purpose/>

Ecotoxicity. (2021). Ανάκτηση Σεπτέμβριος 15, 2024, από https://knowledge4policy.ec.europa.eu/glossary-item/ecotoxicity_en

Elval – Εργοστάσιο Οινοφύτων, Ελλάδα. (2021). Ανάκτηση Απρίλιος 2, 2024, από <https://www.elvalhalcor.com/el/facilities/elval-oinofyta-plant>

End-of-Life Management for Solar Photovoltaics. (n.d.). Ανάκτηση Φεβρουάριος 12, 2024, από <https://www.energy.gov/eere/solar/end-life-management-solar-photovoltaics>

Environmental impact of mining. (n.d.). Ανάκτηση Σεπτέμβριος 16, 2024, από WIKIPEDIA: https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_impact_of_mining

Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Recycling. (n.d.). Ανάκτηση Μάρτιος 5, 2024, από <https://www.wastetrade.com/resources/introduction-to-plastics/types-of-plastics/ethylene-vinyl-acetate-eva-recycling/>

EU Market Outlook for Solar Power 2023-2027. (n.d.). Ανάκτηση Φεβρουάριος 15, 2024, από <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/eu-market-outlook-for-solar-power-2023-2027/detail>

eurostat. (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 2, 2024, από <https://ec.europa.eu/eurostat>

Eurostat: Μείωση των εκπομπών ρύπων στην Ελλάδα κατά 4,7% στο γ' τρίμηνο του 2023. (2024). Ανάκτηση Απρίλιος 20, 2024, από https://www.imerisia.gr/koinonia/88549_eurostat-meiosi-ton-ekpompon-rypon-stin-ellada-kata-47-sto-g-trimino-toy-2023

Executive summary. (n.d.). Ανάκτηση Αύγουστος 27, 2024, από <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains/executive-summary>

Fossil Fuels. (n.d.). Ανάκτηση Σεπτέμβριος 16, 2024, από NATIONAL GEOGRAPHIC: <https://education.nationalgeographic.org/resource/fossil-fuels/>

Francis Turbine Its Components, Working And Application The Constructor. (n.d.). Ανάκτηση Μάιος 21, 2024, από https://supernnsk.life/product_details/91379262.html

Geothermal Heat Pumps. (n.d.). Ανάκτηση Μάιος 8, 2024, από <https://uticageothermal.com/services/geothermal-heat-pumps/>

Global LCA Data Access. (n.d.). Ανάκτηση Σεπτέμβριος 5, 2024, από <https://www.globalcadataaccess.org/>

Global Market Outlook For Solar Power 2023 - 2027. (n.d.). Ανάκτηση Ιανουάριος 14, 2024, από <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2023-2027/detail#global-solar-market>

Hall-Hérault process. (n.d.). Ανάκτηση Μάρτιος 23, 2024, από https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Hall-H%C3%A9rault_process.html

Hunter's Lean-to Tent (Βαμβακερός καμβάς). (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 13, 2024, από <https://www.wayandfarer.com/el/guides/glossary/limestone/>

Ito, M. (2011). Life Cycle Assessment of PV systems. Στο *Crystalline Silicon - Properties and Uses*. <https://doi.org/10.5772/23134>.

Kaplan turbine. (n.d.). Ανάκτηση Μάιος 22, 2024, από https://energyeducation.ca/encyclopedia/Kaplan_turbine

Ke Li, Z. W. (2022). A green method to separate different layers in photovoltaic modules by using DMPU as a separation agent. Στο *Solar Energy Materials and Solar Cells*. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111870>.

KHOKHAR, T. (2017). *Chart: Global CO2 Emissions Rose 60% between 1990 and 2013*. Ανάκτηση Ιανουάριος 29, 2024, από <https://blogs.worldbank.org/en/opendata/chart-global-co2-emissions-rose-60-between-1990-and-2013>

Kiger, B. (2016). *Life Cycle Assessment and Photovoltaic (PV) Recycling: Designing a More Sustainable Energy System*. Ανάκτηση Φεβρουάριος 15, 2024, από <https://www.nrel.gov/state-local-tribal/blog/posts/life-cycle-assessment-and-photovoltaic-pv-recycling-designing-a-more-sustainable-energy-system.html>

Kyoto 1st commitment period (2008–12). (n.d.). Ανάκτηση Φεβρουάριος 3, 2024, από https://climate.ec.europa.eu/eu-action/international-action-climate-change/kyoto-1st-commitment-period-2008-12_en

Linquip Team . (2022). *What is Turgo Turbine and How does it Work?* Ανάκτηση Μάιος 22, 2024, από https://www.linquip.com/blog/turgo-turbine/#google_vignette

Luke S. (2023). *Wind Energy at Home: How to Choose Between Horizontal and Vertical Axis Wind Turbines*. Ανάκτηση Μάιος 15, 2024, από <https://greenrhub.com/wind-energy-at-home-horizontal-vs-vertical-axis-turbines/>

M.H. Alaaeddin, S.M. Sapuan, M.Y.M. Zuhri, E.S. Zainudin, Faris M. AL- Oqla. (2019). Photovoltaic applications: Status and manufacturing prospects. Στο *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (σσ. 318-332). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.026>.

Manufacturers responsible for PV module disposal, confirms EU. (2024). Ανάκτηση Μάιος 22, 2024, από <https://www.pv-magazine.com/2024/03/06/manufacturers-responsible-for-pv-module-disposal-confirms-eu/>

Marek Królikowski, Michał Fotek, Piotr Zach, Marcin Michałowski. (2024). Development of a Recycling Process and Characterization. Στο *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma17040821>.

Marina Monteiro Lunardi, Juan Pablo Alvarez-Gaitan, José I. Bilbao, Richard Corkish. (2018). A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. Στο *Solar Panels and Photovoltaic Materials*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74390>.

Monocrystalline Silicon. (n.d.). Ανάκτηση Ιανουάριος 19, 2024, από <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/monocrystalline-silicon>

Monocrystalline vs Polycrystalline. (2015). Ανάκτηση από <https://suntech.energy/solar-panel-types/>

Monocrystalline vs Polycrystalline Solar Panels. (2021). Ανάκτηση Ιανουάριος 21, 2024, από <https://ases.org/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>

Mytilineos: Μεγάλη επένδυση στον βωξίτη – Αποκτά την Imerys Βωξίτες. (2023). Ανάκτηση Απρίλιος 2, 2024, από <https://www.naftemporiki.gr/business/1510091/mytilineos-megali-ependysi-ston-voxiti-apokta-tin-imerys-boxites/>

N.C. McDonald, J.M.Pearce. (2022). Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules. Στο *Energy Policy* (σσ. 7041-7047). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.07.023>.

Nallely Guadalupe Picazo-Rodriguez, G. B.-C.-A.-A.-P. (2023). E-waste Recycling: An Overview of. Στο *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints202311.0933.v1>.

Natural Resources and Source of Energy - Class 5 Science. (n.d.). Ανάκτηση Μάιος 20, 2024, από <https://www.crestolympiads.com/topic/class-5-natural-resources-and-source-of-energy>

New report: EU solar reaches record heights of 56 GW in 2023 but warns of clouds on the horizon. (2023). Ανάκτηση Απρίλιος 20, 2024, από <https://www.solarpowereurope.org/press-releases/new-report-eu-solar-reaches-record-heights-of-56-gw-in-2023-but-warns-of-clouds-on-the-horizon>

Niclas. (n.d.). *Polycrystalline Silicon Cells: production and characteristics.* Ανάκτηση Ιανουάριος 21, 2024, από <https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/polycrystalline-silicon-cells-production-and-characteristics/>

Niclas. (n.d.). *PV Cycle: body and recycling certification.* Ανάκτηση Φεβρουάριος 7, 2024, από <https://sinovoltaics.com/learning-center/recycling/pv-cycle-body-and-recycling-certification/>

NORBERT WOHLGEMUTH, FANNY MISSFELDT. (2000). THE KYOTO MECHANISMS AND THE PROSPECTS FOR RENEWABLE. Στο *Pergamon*. www.elsevier.com/locate/solener.

Norbert Wohlgemuth, Fanny Missfeldt. (2000). The Kyoto mechanisms and the prospects for renewable energy technologies. Στο *Solar Energy* (σσ. 305-314). [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00103-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00103-1).

O'Brien, C. (2021). *Solar Panel Recycling: How To Reuse Clean Energy Technology*. Ανάκτηση Μάρτιος 3, 2024, από <https://palmetto.com/learning-center/blog/solar-panel-recycling-how-to-reuse-clean-energy-technology>

openLCA. (n.d.). Ανάκτηση Αύγουστος 20, 2024, από <https://www.openlca.org/download/>

Party Groupings. (n.d.). Ανάκτηση Φεβρουάριος 3, 2024, από <https://unfccc.int/process-and-meetings/parties-non-party-stakeholders/parties/party-groupings>

Pelton Turbine. (n.d.). Ανάκτηση Μάιος 20, 2024, από <https://www.firmametal.com/pelton-turbun/>

photovoltaic (PV). (n.d.). Ανάκτηση Μάιος 21, 2024, από <https://www.subcontractsindia.com/solar-panels--pv-.html>

Photovoltaics - Historical Development. (n.d.). Ανάκτηση Ιανουάριος 11, 2024, από <https://www.pvresources.com/en/introduction/history.php>

Priscila Silva Silveira Camargo, Andrey da Silva Domingues, João Pedro Guê Palomero, Angela Cristina Kasper, Pablo Ribeiro Dias, Hugo Marcelo Veit. (2021). PHOTOVOLTAIC MODULE RECYCLING: THERMAL TREATMENT TO DEGRADE POLYMERS AND CONCENTRATE VALUABLE METALS. Στο *Detritus* (σσ. 48-62). <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2021.15119>.

Quartz. (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 5, 2024, από <https://www.mindat.org/min-3337.html>

R. Frischknecht, P. Stolz, L. Krebs, M. de Wild-Scholten, P. Sinha. (2020). *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems*. Ανάκτηση Αύγουστος 23, 2024, από <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/12/IEA-PVPS-LCI-report-2020.pdf>

Recycling materials from green energy technologies (Signal). (2024). Ανάκτηση Μάιος 24, 2024, από <https://www.eea.europa.eu/en/european-zero-pollution-dashboards/indicators/recycling-from-green-technology>

Recycling of solar panels. (n.d.). Ανάκτηση Φεβρουάριος 22, 2024, από <https://www.iberdrola.com/about-us/our-activity/solar-energy-photovoltaics/solar-panel-recycling>

ReProSolar: Demonstrator of High Grade PV Recovery Value Chain in Europe. (n.d.). Ανάκτηση Μάιος 22, 2024, από <https://eitrawmaterials.eu/project/reprosolar/>

Rong Deng, Yuting Zhuo, Yansong Shen. (2022). Recent progress in silicon photovoltaic module recycling processes. Στο *Resources, Conservation & Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106612>.

S.A. Norton, J. K. 11.10 - Acid Rain – Acidification and Recovery. Στο *Treatise on Geochemistry (Second Edition)* (σσ. 379-414). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00910->.

Sadler, R. (2024). *Here's how solar panel recycling works*. Ανάκτηση Απρίλιος 20, 2024, από <https://www.independent.co.uk/advisor/solar-panels/solar-panel-recycling>

Scientists claim 100% silver recovery from solar cells. (2023). Ανάκτηση Μάιος 22, 2024, από <https://recyclinginternational.com/commodities/non-ferrous-metals-recycling/scientists-claim-100-silver-recovery-from-solar-cells/53002>

Scrap PV Solar Panel Recycling Plant. (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 7, 2024, από https://www.sunyrecycle.com/Scrap-PV-Solar-Panel-Recycling-Plant/?campaignid=18479209652&adgroupid=144441507480&feeditemid=&targetid=kwd-827559341726&device=c&creative=671953730571&keyword=solar%20panels%20recycling%20process&gad_source=1&gclid=CjwKCAjww_

Silica. (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 5, 2024, από <https://mineralseducationcoalition.org/minerals-database/silica/>

Silicon kerf recycling. (n.d.). Ανάκτηση Μάιος 9, 2024, από <https://www.rosi-solar.com/kerf-recycling/>

Silicon kerf recycling. (n.d.). Ανάκτηση Φεβρουάριος 17, 2024, από <https://www.rosi-solar.com/kerf-recycling/>

Simon, F. (2022). *EU overshoots 2020 climate target, records 34% drop in emissions.* Ανάκτηση Φεβρουάριος 6, 2024, από <https://www.euractiv.com/section/emissions-trading-scheme/news/eu-overshoots-2020-climate-target-records-34-drop-in-emissions/>

Solar Panel Recycling. (2023). Ανάκτηση Φεβρουάριος 19, 2024, από <https://www.epa.gov/hw/solar-panel-recycling>

Solar Photovoltaic Manufacturing Basics. (n.d.). Ανάκτηση Ιανουάριος 17, 2024, από <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-manufacturing-basics>

Solar Power Statistics in Europe 2019. (2023). Ανάκτηση Ιανουάριος 15, 2024, από <https://www.solarfeeds.com/mag/solar-power-statistics-in-europe/>

Solar PV. (n.d.). Ανάκτηση Αύγουστος 27, 2024, από <https://www.iea.org/reports/renewables-2020/solar-pv>

Solar PV recycling market to be worth \$2.7bn by 2030. (2022). Ανάκτηση Μάιος 19, 2024, από <https://knowledge.energyinst.org/new-energy-world/article?id=127142>

Solarpower Europe: Η Ελλάδα θα προσθέσει 1,6 GW φωτοβολταϊκών φέτος - Στο 18% το μερίδιο στην ηλεκτροπαραγωγή. (2023). Ανάκτηση Φεβρουάριος 15, 2024, από <https://energypress.gr/news/solarpower-europe-i-ellada-tha-prosthesei-16-gw-fotovoltaikon-fetos-sto-18-meridio-stin>

sutterstock. (n.d.). Ανάκτηση Φεβρουάριος 15, 2024, από <https://www.shutterstock.com/el/image-vector/solar-panel-supply-chain-components-manufacturing-2223116975>

SVARC, J. (2014). *What are monocrystalline, polycrystalline and thin film solar panels?* Ανάκτηση Μάιος 21, 2024, από <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/pv-panel-technology>

Technology evolution of solar panels. (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 14, 2024, από <https://greenenergy.cr/en/technology-evolution-of-solar-panels/>

Technology evolution of solar panels. (n.d.). Ανάκτηση Ιανουάριος 25, 2024, από <https://greenenergy.cr/en/technology-evolution-of-solar-panels/>

Tom Schoder. (2020). *Can Solar Panels Be Recycled?* Ανάκτηση 5 Ιουνίου, 2024, από <https://www.greentechrenewables.com/article/can-solar-panels-be-recycled>

Total net greenhouse gas emission trends and projections in Europe. (2023). Ανάκτηση Φεβρουάριος 6, 2024, από <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/total-greenhouse-gas-emission-trends>

Tsoni, P. (2023). *Greece is World's Second in Solar Energy Production Potential.* Ανάκτηση Ιανουάριος 21, 2024, από <https://greekreporter.com/2023/05/27/greece-world-second-solar-energy-production/>

V.M. Fthenakis, H.C. Kim. (2011). Photovoltaics: Life-cycle analyses. Στο *Solar Energy* (σσ. 1609-1628). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.002>.

Vekony, A. T. (2024). *The Opportunities of Solar Panel Recycling.* Ανάκτηση Απρίλιος 28, 2024, από <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2017/10/the-opportunities-of-solar-panel-recycling>

VR, A. (2023). *Solar Panel Recycling Challenges: Sustainable Disposal and End-of-Life Management for Installers.* Ανάκτηση Φεβρουάριος 25, 2024, από <https://arka360.com/ros/solar-panel-recycling-challenges/>

Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE). (n.d.). Ανάκτηση Μάιος 22, 2024, από https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee_en

What Is Climate Change? (n.d.). Ανάκτηση Σεπτέμβριος 16, 2024, από United Nations: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>

What is ionising radiation? (n.d.). Ανάκτηση Σεπτέμβριος 16, 2024, από Australian Government: <https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/ionising-radiation>

What is the Kyoto Protocol? (n.d.). Ανάκτηση Φεβρουάριος 1, 2024, από https://unfccc.int/kyoto_protocol

Wuebbles, D. (n.d.). *ozone depletion*. Ανάκτηση Σεπτέμβριος 16, 2024, από Britannica: <https://www.britannica.com/science/climate-change>

Xiaojing Sun. (2019). *Solar Technology Got Cheaper and Better in the 2010s. Now What?* Ανάκτηση Αύγουστος 27, 2024, από <https://www.greentechmedia.com/articles/read/solar-pv-has-become-cheaper-and-better-in-the-2010s-now-what>

Xinhai Xu, Dengguo Lai, Gang Wang, Yin Wang. (2021). Nondestructive silicon wafer recovery by a novel method of solvothermal swelling coupled with thermal decomposition. Στο *Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129457>.

Xinhai Xu, Dengguo Lai, Wenxuan Wang, Yin Wang. (2022). A systematically integrated recycling and upgrading technology for waste crystalline silicon photovoltaic module. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106284>.

Yan LI, Qi ZHANG, Ge WANG, Xi LU. (2022). Recycling schemes and supporting policies modeling for photovoltaic modules considering heterogeneous risks. Στο *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106165>.

Your Comprehensive Guide To Solar Panel Recycling. (2023). Ανάκτηση Μάιος 15, 2024, από <https://irish.solar/solar-panel-recycling/>

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 25, 2024, από http://49lyk-athin.att.sch.gr/AJIOPOIHSH_ENERDEIAS.htm

ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΕΙΔΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ (ΑΗΕΕ). (n.d.). Ανάκτηση Φεβρουάριος 9, 2024, από <https://www.eoan.gr/%CE%B5%CE%BD%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B7/%CE%B1%CF%80%CF%8C%CE%B2%CE%BB%CE%B7%CF%84%CE%B1-%CE%B5%CE%B9%CE%B4%CF%8E%CE%BD-%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF>

Αποσπóρη, Χ. (2012). *Ποιους Συμφέρει το Μοντέλο Feed-in Premium στις ΑΠΕ και Ποιους Όχι*. Ανάκτηση Ιανουάριος 27, 2024, από <https://www.energia.gr/article/57357/poroys-symferei-to-montelo-feedin-premium-stis-ape-kai-poiouys-ohi>

Αύξηση των εκπομπών CO₂ κατά το α' τρίμηνο του 2022 στην Ευρώπη. (2022). Ανάκτηση Φεβρουάριος 4, 2024, από <https://www.esgstories.gr/environment/ayxisi-ton-ekpompon-co2-kata-trimino-toy-2022-stin-eyropi>

Βιομάζα. (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 27, 2024, από <http://www.agroenergy.gr/categories/%ce%b2%ce%b9%ce%bf%ce%bc%ce%ac%ce%b6%ce%b1>

Βόκας Γ., Πρωτογερόπουλος Χ. (n.d.). *ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.* Ανάκτηση Φεβρουάριος 5, 2024, από ΕΛΑΝΕΤ, ΚΑΠΕ: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.cres.gr/kape/publications/photovo/PV%20presentation%20Elanet-CRES%2007.12.05.pdf>

Βόκας, Γ. (2009). *Επενδύσεις Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα: Στόχοι και Εμπόδια.* Ανάκτηση Ιανουάριος 25, 2024, από <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.iene.gr/greenbusiness/articlefiles/session2/Vokas.pdf>

ΒΩΞΙΤΗΣ ΚΑΙ ΣΙΔΗΡΟΝΙΚΕΛΙΟΥΧΑ. (n.d.). Ανάκτηση Μάρτιος 20, 2024, από <https://www.orykta.gr/oryktes-protis-yles-tis-ellados/latomika-orykta/29-koitasmatologia/85-boxitis-kai-sidhronikelio>

Γεωλογία. (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 17, 2024, από <https://www.polignosi.com/cgibin/hweb?-A=12633&-V=limmata>

Γιατί Τα Γυάλινα Προϊόντα Πρέπει Να Ανοπτηθούν;. (2021). Ανάκτηση Απρίλιος 20, 2024, από <https://gr.globalbottlesandjars.com/news/why-do-the-glass-products-have-to-be-annealed-48103149.html>

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, Σ. (2018). *Πτυχιακή Εργασία Εξέλιξη και απόδοση των φωτοβολταϊκών πάρκων στην Ελλάδα.* Ανάκτηση από ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ.

Διαδικασία Παραγωγής Γυαλιού. (2021). Ανάκτηση Απρίλιος 20, 2024, από <https://gr.yukuan-chem.com/info/glass-production-process-80529784.html>

Διπλασιάστηκε σε επτά μήνες η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών. (2009). Ανάκτηση Ιανουάριος 25, 2024, από <https://www.in.gr/2009/09/15/economy/diplasiastike-se-eptamines-i-egkatestimeni-isxys-twn-fwtoboltaikwn/>

Δρ. Στυλιανός Λουμάκης. (2023). *Διάρκεια ζωής Φωτοβολταϊκών πλαισίων και ανακύκλωση τους.* Ανάκτηση Ιούνιος 12, 2024, από chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://mcusercontent.com/aabf1a7c04fa21b7380b9c28f/files/c2bd201a-f9b5-0706-c129-5ad7660fbc5b/Loumakis_SPEF_Rho_Alpha_Alpha_Epsilon_Upsilon_Iota_Omicron_Upsilon_Nu_23_1_.pdf

Ελλάδα: Υψηλές επιδόσεις στην ανάπτυξη φωτοβολταϊκών έως το 2027. (2024). Ανάκτηση Ιανουάριος 22, 2024, από <https://rawmathub.gr/enimerosi-gia-ti-viosimi-anaptyksi/ananeosimes-piges-energeias/ellada-ypsiles-epidoseis-stin-anaptyksi-fotovoltikon-eos-to-2027>

Ενέργεια: Οι ΑΠΕ κερδίζουν έδαφος στην Ευρώπη - Στο 43% της κατανάλωσης έφτασαν στην Ελλάδα. (2024). Ανάκτηση Μάιος 24, 2024, από <https://www.protothema.gr/economy/article/1469477/energeia-oi-ape-kerdizoun-edafos-stin-europi-sto-43-tis-katanalosis-eftasan-stin-ellada/>

ΕΝΗΜΕΡΩΤΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ ΤΗΣ ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΗΣ ΑΡΧΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΡΑΕ) ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΣΗ ΕΡΓΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ) ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. (2023). Ανάκτηση Απρίλιος 28, 2024, από chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.rae.gr/wp-content/uploads/2023/04/enimerotiko-simeioma-tis-RAE-shetika-me-tin-adeiodotisi-APE_TELIKO.pdf

Έρευνα και ανάπτυξη. (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 11, 2024, από <https://olympus-minerals.com/erevna-anaptyksi/>

ΕΥΤΡΟΦΙΣΜΟΣ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ. (n.d.). Ανάκτηση Σεπτέμβριος 15, 2024, από <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.perseus-net.eu/assets/media/PDF/PERSEUS@SCHOOL%20Docs/2532.pdf>

Ζαφειράτος, Ι. (2010). *Ο τομέας βωξίτη – αλουμινίου*. Ανάκτηση Μάρτιος 6, 2024, από https://www.oryktosploutos.net/2010/10/blog-post_2346/

ΖΟΡΜΠΙΑ, Ν. (2023). *Πόσο αυξήθηκε η ισχύς από τα φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα το 2022;*. Ανάκτηση Ιανουάριος 22, 2024, από https://www.energymag.gr/energeia/ape/64512_poso-ayxithike-i-ishys-apo-ta-fotovoltaika-stin-ellada-2022

Η βασική ροή επεξεργασίας του γυαλιού. (2021). Ανάκτηση Απρίλιος 18, 2024, από <https://gr.shdyglass.net/news/the-basic-processing-flow-of-glass-52360576.html>

Η δομή του κλάδου αλουμινίου στην Ελλάδα. (2016). Ανάκτηση Μάρτιος 28, 2024, από <https://dominal.gr/klados-aluminio-ellada/>

Η εξέλιξη του ελληνικού κλάδου αλουμινίου. (n.d.). Ανάκτηση Μάρτιος 10, 2024, από <https://aluminium.org.gr/exelixa-toy-kladoy/>

Η ΕΞΟΡΥΞΗ ΤΟΥ ΑΡΓΥΡΟΥ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΑ. (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 23, 2024, από https://users.sch.gr/peroukgr/periballontiki_2013-2014/Html/Silver.htm

Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ. (n.d.). Ανάκτηση Ιανουάριος 12, 2024, από <https://www.omniphos.gr/%CE%B7-%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%81%CE%AF%CE%B1-%CF%84%CF%89%CE%BD-%CF%86%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CF%8E%CE%BD/>

Η κύρια διαδικασία της διαδικασίας παραγωγής γυαλιού. (2021). Ανάκτηση Απρίλιος 21, 2024, από <http://m.gr.glasstube-machine.com/info/the-main-process-of-glass-production-process-57588542.html>

ΙΕΑ: Η Ελλάδα δεύτερη στον κόσμο στα φωτοβολταϊκά. (2023). Ανάκτηση Ιανουάριος 21, 2024, από <https://www.ot.gr/2023/05/27/green/iea-i-ellada-deyteri-ston-kosmo-sta-fotovoltaika/>

Ιζηματογενή πετρώματα. (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 13, 2024, από http://www.geo.auth.gr/106/theory/pet_sedimentary.htm

Ιστορικό των φωτοβολταϊκών. (n.d.). Ανάκτηση Ιανουάριος 12, 2024, από <https://new.selasenergy.gr/fotovoltaika/%CE%AC%CF%81%CE%B8%CF%81%CE%B1-%CE%B3%CE%B9%CE%B1-%CF%86%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CE%B9%CE%BA%CE%B1/%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C-%CF%84%CF%89%CE%BD-%CF%86%CF%89%CF%84%CE>

ΙΩΑΝΝΗΣ, ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ. (2015). *Μελέτη βιωσιμότητας Εταιρείας Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων στην Ελλάδα.* Ανάκτηση Σεπτέμβριος 20, 2024, από ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗΝ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ: <https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/6590>

Καρστικές Μορφές. (n.d.). Ανάκτηση Μάρτιος 17, 2024, από https://www.topoguide.gr/geology/geology_karst.php

ΚΛΑΔΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ. (2014). Ανάκτηση Απρίλιος 15, 2024, από https://www.oryktosploutos.net/2014/06/blog-post_26-24/

Κλιματική αλλαγή — Κύρωση της συμφωνίας του Παρισιού από την ΕΕ. (2016). Ανάκτηση Φεβρουάριος 4, 2024, από https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=LEGISSUM%3A20110301_2

Κοιτασματολογία. (n.d.). Ανάκτηση Μάρτιος 19, 2024, από <https://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/metalleytika-orykta/131-boxitis>

Λευθεριώτης, Γ. (2015). *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Ενότητα: Φωτοβολταϊκά Συστήματα.* Ανάκτηση Ιανουάριος 12, 2024, από Πανεπιστήμιο Πατρών: <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://library.cut.ac.cy/etds/pdf/apa.pdf>

Μαγνησίτης. (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 14, 2024, από <https://www.orykta.gr/component/content/article/30-syntomes-perigrafes-orykton/95-magnisitis>

Μαγνησίτης. (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 15, 2024, από <https://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/metalleytika-orykta/43-magnisitis>

Νικελιούχος λατερίτης. (n.d.). Ανάκτηση Μάρτιος 20, 2024, από <https://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/latomika-orykta/30-syntomes-perigrafes-orykton/108-lateritis>

Ο ΧΑΛΑΖΙΑΣ. (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 6, 2024, από <https://strouboulis.gr/chalaziaka/>

Οι εκπομπές ρύπων που συνδέονται με την ενέργεια κατέγραψαν νέο ρεκόρ το 2023. (2024). Ανάκτηση Απρίλιος 10, 2024, από <https://www.moneyreview.gr/green-economy/137774/oi-pagkosmies-typon-rov-syndeontai-me-tin-energeia-kategrapsan-neo-rekor-to-2023/>

Οξείδιο του καλίου: Δομή, τύπος, ιδιότητες & χρήσεις. (n.d.). Ανάκτηση Απρίλιος 11, 2024, από <https://www.jiantao.org/chemistry32/1003010566.html>

Παραγωγή πρωτόχυτου και δευτερόχυτου αλουμινίου. (n.d.). Ανάκτηση Μάρτιος 27, 2024, από <https://www.atem-oe.gr/alouminio-plirofories/teχνologies-alouminiou/paragogi-protoxitou-deuteroxitou-alouminiou.html>

Περισσότερη ανακύκλωση, λιγότερες εξαγωγές αποβλήτων για την ΕΕ. (2024). Ανάκτηση Μάιος 22, 2024, από <https://energypress.gr/news/perissoteri-anakyklosi-ligoteres-exagoges-apobliton-gia-tin-ee>

Ποιες είναι οι 5 κύριες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας;. (2022). Ανάκτηση Απρίλιος 26, 2024, από <https://rawmathub.gr/enimerosi-gia-ti-viosimi-anaptyksi/ananeosimes-piges-energeias/poies-einai-oi-5-kyries-ananeosimes-piges-energeias>

Ποιος ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό στοιχείο;. (n.d.). Ανάκτηση Ιανουάριος 10, 2024, από 1. <https://www.basengreen.com/el/%CF%80%CE%BF%CF%85-%CE%B1%CE%BD%CE%B1%CE%BA%CE%AC%CE%BB%CF%85%CF%88%CE%B5-%CF%86%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CF%8C-%CF%83%CF%84%CE%BF%CE%B9%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF/>

Πρωτόκολλο του Κιότο. (n.d.). Ανάκτηση Ιανουάριος 29, 2024, από https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=LEGISSUM:kyoto_protocol

Πώς παράγεται το αλουμίνιο;. (2022). Ανάκτηση Μάρτιος 29, 2024, από <https://rawmathub.gr/epistimonika-nea-gia-ta-raw-materials/gnosiaki-vasi/pos-paragetai-to-alouminio>

Σαρηγιάννη, Ρ. (n.d.). *ΧΑΛΑΖΙΤΗΣ*. Ανάκτηση Απρίλιος 8, 2024, από <https://politimigi.gr/blog/xalazitis-idiotites>

Σκάρκος Νικόλαος. (2024). *Διπλωματική Εργασία, Αξιολόγηση των επιπτώσεων των φωτοβολταϊκών πινέλων*. Ανάκτηση Αύγουστος 20, 2024, από <http://dx.doi.org/10.26265/polynoe-6013>

Τι είναι Γεωθερμία και πως εφαρμόζεται στη Θέρμανση και την Ψύξη ενός κτιρίου. (2024). Ανάκτηση Απρίλιος 26, 2024, από <https://www.e-ecology.gr/oikologia-perivalon/energeia/ti-einai-geothermia-kai-pos-efarmozetai-sti-thermanshi-kai-tin-psyxi-enos-ktiriou/>

Τι είναι το Net Metering;. (2021). Ανάκτηση Ιανουάριος 15, 2024, από https://ecosun.gr/%CF%84%CE%B9-%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9-%CF%84%CE%BF-net-metering-2/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwqpSwBhClARIsADIZ_TlgGy531oZWehq2MMzFvN9ATY0ypM9bMUiycAj-fSYEmpAPvNIHorgaAhetEALw_wcB

Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο. (n.d.). Ανάκτηση Ιανουάριος 11, 2024, από <https://pv.hmu.gr/history>

Τουχτίδου, Σ. (2023). *2022: Παγκόσμιο ρεκόρ εκπομπών ρύπων*. Ανάκτηση Φεβρουάριος 4, 2024, από <https://gr.euronews.com/2023/03/02/2022-pagosmio-rekor-ekprompon-rypon>

Τράτσα, Μ. (2024). *Φωτοβολταϊκά: Φρένο από το υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας στις «ταρίφες» για τα μικρά έργα*. Ανάκτηση Ιούνιος 3, 2024, από <https://www.ot.gr/2024/02/26/green/ape/fotovoltaika-freno-apo-to-ypourgeio-perivallontos-kai-energeias-stis-tarifes-gia-ta-mikra-erga/>

ΦΥΣΙΚΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ - Καρστική Γεωμορφολογία. (n.d.). Ανάκτηση Μάρτιος 17, 2024, από <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://eclass.aegean.gr/modules/document/file.php/GEO340/09%20A%20%CE%A6%CE%A5%CE%A3%CE%99%CE%9A%CE%97%2>

0%CE%93%CE%95%CE%A9%CE%93%CE%A1%CE%91%CE%A6%CE%99%CE%91%
20-%20%CE%9A%CE%B1%CF%81%CF%83%CF%84%CE%B9

Φωτοβολταϊκά συστήματα. (n.d.). Ανάκτηση Ιανουάριος 10, 2024, από https://www.alten.gr/fotovoltaika_systimata_history.html

Χατζηαθανασίου, Λ. (2016). ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: Μελέτη Ηλιοθερμικής Μονάδας Παραβολικών Κατόπτρων 50MW. Ανάκτηση Μάιος 18, 2024, από ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: <https://docplayer.gr/45315757-Meleti-iliothermikis-monadas-paravolikon-katoptron-50mw.html>

Ψωμάς, Σ. (2022). Μια “ακτινογραφία” της ελληνικής αγοράς φωτοβολταϊκών. Ανάκτηση από Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών: www.helapco.gr