



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών
Περιβάλλοντος**

**Σχεδιασμός Συστήματος Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών
Αποβλήτων στην Ελλάδα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΖΑΛΑ ΧΑΡΙΚΛΕΙΑ

Χανιά, Ιούλιος, 2023



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών
Περιβάλλοντος**

**Σχεδιασμός Συστήματος Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών
Αποβλήτων στην Ελλάδα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΤΖΑΛΑ ΧΑΡΙΚΛΕΙΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Απόστολος Γιαννής, (Επιβλέπων)

Διονυσία Κολοκοτσά

Στυλιανός Ροζάκης

"Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό.

Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης.

Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης".

Ευχαριστίες

Έχοντας ολοκληρώσει την διπλωματική μου εργασία θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που με στήριξαν και με βοήθησαν όλο το διάστημα των ακαδημαϊκών μου σπουδών.

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή μου Απόστολο Γιαννή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, για την πολύτιμη καθοδήγηση και τις εύστοχες υποδείξεις καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπλέον, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου και στις αδερφές μου που ήταν πάντα δίπλα μου με κάθε δυνατό τρόπο και με υποστήριζαν. Δεν μπορώ να παραλείψω τις φίλες και συναδέλφους μου που ήταν εκεί και γέμιζαν τα φοιτητικά μου χρόνια με όμορφες στιγμές.

Περίληψη

Η διαχείριση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων είναι ένα ζήτημα το οποίο θα μας απασχολήσει έντονα τα επόμενα χρόνια. Είναι ευρέως γνωστό πως τα φωτοβολταϊκά (φ/β) πλαίσια έχουν κατά μέσο όρο 25-30 χρόνια ζωής. Μετά το πέρας του κύκλου ζωής τους θεωρούνται απόβλητα. Η ανακύκλωση, η επαναχρησιμοποίηση και η ανάκτηση υλικών είναι πρακτικές οι οποίες αξίζουν να μελετηθούν τόσο από πλευράς οικονομικού κόστους-οφέλους όσο και από περιβαλλοντικό όφελος. Στην Ελλάδα μέχρι στιγμής δεν υπάρχει κάποιο σχέδιο για την διαχείριση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων. Οι παραγόμενες ποσότητες αποβλήτων έως τώρα είναι μικρές, ωστόσο τα επόμενα χρόνια προβλέπεται αύξηση αυτών. Η παρούσα μελέτη αναλύει και σχεδιάζει ένα σύστημα διαχείρισης, συλλογής και επεξεργασίας των φωτοβολταϊκών αποβλήτων στην Ελλάδα. Λαμβάνοντας υπόψιν την παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά συστήματα, το μερίδιο αγοράς της, τις τεχνολογίες των φ/β, τις παραγόμενες ποσότητες αποβλήτων, τρόπους μεταφοράς και συλλογής παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης και ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών αποβλήτων με στόχο την προστασία του περιβάλλοντος σε συνδυασμό με την οικονομική βιωσιμότητα και λειτουργικότητα του σχεδίου. Βάση ιστορικών δεδομένων από το 2010 έως το 2022 στην Ελλάδα παράγονται συνολικά 4.267,20 MW ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Σύμφωνα με προβλέψεις, το 2030 αναμένεται η συνολική παραγόμενη ενέργεια να ανέρχεται στα 7,7 GW ενώ το 2050 στα 16,1 GW. Έχοντας τα παραπάνω δεδομένα, έγινε μετατροπή της ενέργειας (MW) σε μάζα (kg) φ/β αποβλήτων για 2 διαφορετικά σενάρια. Στο Early Loss Scenario υπολογίστηκε πως το 2032 θα παράγονται 20.365,03 tn φωτοβολταϊκών αποβλήτων ετησίως, ενώ στο Regular Loss Scenario η αντίστοιχη ποσότητα θα παραχθεί το 2033 (21.004,35 tn φ/β αποβλήτων). Εν συνεχεία, έλαβαν χώρα επιμέρους υπολογισμοί των ποσοτήτων των υλικών που θα παράγονται καθώς τα φ/β πλαίσια περιέχουν υλικά τα οποία αξίζει να ανακτηθούν για διάφορους λόγους. Η ανάκτηση του αργύρου είναι ένας τέτοιος παράγοντας. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε πως το 2034 θα παραχθούν 6,07 tn Ag και 6,15 tn Ag αντίστοιχα για το κάθε σενάριο. Ο ίδιος υπολογισμός έγινε για διάφορα υλικά όπως το κάδμιο (Cd), το τελλούριο (Te), το πυρίτιο (Si) και πολλά ακόμη. Έπειτα, βάση των ποσοτήτων της παραγόμενης ενέργειας και των αντίστοιχων αποβλήτων υπολογίστηκε η βέλτιστη τοποθεσία για την δημιουργία του κέντρου ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων (PVRC). Σύμφωνα με τους υπολογισμούς, στον νομό Φθιώτιδας και συγκεκριμένα κατά μήκος στην Εθνική οδό Αθηνών-Λαμίας στην περιοχή Ανθήλη βρίσκεται η βέλτιστη επιλογή για την εγκατάσταση του PVRC σε συνδυασμό με διάφορα κέντρα συλλογής ανά την Ελλάδα. Τέλος, για την υλοποίηση αυτού του σχεδίου μια οικονομική ανάλυση έλαβε χώρα συνυπολογίζοντας διάφορα κόστη με βασικότερο το κόστος μεταφοράς. Προέκυψε ότι για το EL Scenario, η Καθαρή Παρούσα Αξία για 20 χρόνια είναι περίπου 37.980.000 € και η περίοδος αποπληρωμής είναι 14,64 χρόνια, ενώ για το RL Scenario είναι περίπου 36.720.000 € και 12,93 χρόνια αντίστοιχα. Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι πολύπλευρη καθώς λαμβάνει υπόψιν πολλούς παράγοντες-δεδομένα και παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο σχέδιο δράσης για την διαχείριση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων στην Ελλάδα.

Abstract

The management of photovoltaic waste is an issue that will be a major concern in the next years. It is known that photovoltaic (PV) panels have an average lifespan of 25-30 years. After the end-of-life cycle, they are considered as waste. The recycling, reuse and recovery of materials are practices that deserve to be studied both in terms of economic cost-benefit analysis and environmental benefits. Nowadays, in Greece there is no comprehensive plan for the management of photovoltaic waste. So far, the quantities of PV waste are small, but in the next few years it is expected to increase of them. This study analyses and designs a system for the management, collection, and treatment of photovoltaic waste in Greece. Taking into account, the energy produced by photovoltaic systems, the market share, the PV technologies, the quantities of waste produced, the transport and collection methods, an integrated system for the management and recycling of photovoltaic waste is presented, aiming at the protection of the environment in combination with the economic viability and functionality of the project. Based on historical data from the 2010 until 2022, in Greece the cumulative produced energy from photovoltaic systems is 4,267.20 MW. It is estimated that in 2030 the cumulative installed capacity will be 7.7 GW and in 2050 it will be 16.1 GW. Taking into consideration these data, the future PV waste is estimated by the conversion of the annual PV capacity (MW) into mass (kg) considering 2 different scenarios. In the Early Loss (EL) Scenario it was estimated that 20,365.03 tn of PV waste will be produced in 2032, while in the Regular Loss (RL) Scenario the corresponding amount will be produced in 2033 (21,004.35 tons of PV waste). Additionally, it calculated the quantities of various materials which compose the photovoltaic panel, which are worth recovering for several reasons. The recovery of silver is an important factor. Specifically, it was estimated that in 2034, 6.07 tons and 6.15 tons of silver (Ag) will be produced for each scenario, respectively. The same estimations have been made for various materials such as Cadmium (Cd), Tellurium (Te), Silicon (Si), etc. Furthermore, based on the amount of installed capacity and PV waste, the optimal location for the installation of the recycling center (PVRC) was found. According to the calculations, the prefecture of Fthiotida and specifically alongside the Athens-Lamia highway in the area of Anthili is the optimal location to establish the Photovoltaic Recycling Center (PVRC) in combination with various waste collection centers around Greece. Finally, in order to complete this project, an economic assessment was carried out, taking into account different costs, the main one being the transport costs. For the EL Scenario, the Net Present Value (NPV) for 20 years was calculated at around 37,980,000 € and the payback period (PB) was 14.64 years, while for the RL Scenario the NPV was around 36,720,000 € and the payback period was 12.93 years. The present study is interdisciplinary, as it takes into account many different factors and data in order to present a comprehensive plan for the management of photovoltaic waste in Greece.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	4
Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	14
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό μέρος.....	16
2.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	16
2.2 Φωτοβολταϊκή τεχνολογία	16
2.3 Προοπτικές ανάπτυξης Φ/Β συστημάτων	17
2.3.1 Παγκόσμια αγορά	17
2.3.2 Ελληνική Αγορά.....	18
2.3.3 Εθνικός στόχος ΑΠΕ	23
2.4 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών	24
2.4.1 Φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς	25
2.4.2 Φωτοβολταϊκά δεύτερης γενιάς	27
2.4.3 Φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς	28
2.5 Ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πλαισίων	29
2.5.1. Μεθοδολογίες ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πλαισίων	30
2.5.1.1 Ανακύκλωση φ/β πλαισίων 1 ^{ης} γενιάς	31
2.5.1.2 Ανακύκλωση φ/β πλαισίων 2 ^{ης} γενιάς	35
2.6 Ανάκτηση υλικών.....	37
2.6.1 Ανάκτηση υλικών φ/β πλαισίων πυριτίου.....	37
2.6.2 Ανάκτηση υλικών φ/β πλαισίων λεπτής μεμβράνης (Thin Film)	39
2.7 Αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα	41
Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία σχεδιασμού συστήματος	46
3.1 Χαρακτηρισμός της αγοράς των φωτοβολταϊκών και πρόβλεψη της μελλοντικής ανάπτυξης (Στάδιο 1)	47
3.2 Εκτίμηση μελλοντικού ρεύματος και σύνθεσης αποβλήτων (Στάδιο 2).....	48
3.3 Επιλογή των κέντρων συλλογής (Στάδιο 3)	49
3.4 Επιλογή της τεχνολογίας ανακύκλωσης (Στάδιο 4)	49
3.5 Οικονομική ανάλυση (Στάδιο 5)	50
3.6 Σχεδιασμός συστήματος για συλλογή φωτοβολταϊκών πλαισίων μετά το τέλος του κύκλου ζωής στην Ελλάδα	50
3.6.1 Η αγορά των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα - Τρέχουσα κατάσταση και μελλοντική ανάπτυξη (Στάδιο 1)	51

3.6.2 Μελλοντική ροή φωτοβολταϊκών αποβλήτων και σύνθεση αυτών στην Ελλάδα (Στάδιο 2)	53
3.6.3 Η βέλτιστη τοποθεσία για το Κέντρο Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών Πάνελ (PVRC) (Στάδιο 3).....	57
3.6.4 Επιλογή τεχνολογίας ανακύκλωσης (Στάδιο 4)	60
3.6.5 Οικονομική ανάλυση (Στάδιο 5)	61
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Συζήτηση.....	65
4.1 Ετήσια και αθροιστική ροή αποβλήτων.....	65
4.2 Ποσότητες ανακτημένων υλικών.....	68
4.3 Βέλτιστη τοποθεσία κέντρου ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών αποβλήτων (PVRC)	75
4.4 Επιλογή τεχνολογίας ανακύκλωσης.....	82
4.5 Οικονομική ανάλυση.....	83
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις	91
5.1 Συμπεράσματα	91
5.2 Μελλοντικές Προτάσεις.....	92
6.Βιβλιογραφία	93
7.Παραρτήματα	96

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1: (α) Πολυκρυσταλλικό πάνελ (β) Μονοκρυσταλλικό πάνελ.....	26
Εικόνα 2.2: (α) Πάνελ άμορφου πυριτίου (β) Πάνελ Thin film.....	28
Εικόνα 2.3: CPV πάνελ.....	29
Εικόνα 2.4: Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου (Strachala et al., 2017).....	31
Εικόνα 2.5: Ροή ανακύκλωσης της Deutsche Solar (Ρεντούμης, 2015).....	33
Εικόνα 2.6: Δομή φ/β πλαισίου λεπτής μεμβράνης (Thin film) (Ρεντούμης, 2015).....	36
Εικόνα 2.7: Ροή ανακύκλωσης της First Solar (Γκουλιούμη, 2018).....	37
Εικόνα 2.8: Ροή αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας.....	42
Εικόνα 2.9: Στάδια αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας.....	42
Εικόνα 2.10: Αντίστροφη και Πράσινη Εφοδιαστική (Αραμπατζής, 2021).....	44
Εικόνα 3.1: Διάγραμμα ροής σχεδιασμού αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας.....	47
Εικόνα 3.2: Χάρτης εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών (Ισχύς>1MW) στην Ελλάδα.....	58
Εικόνα 4.1: Χάρτης εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών (Ισχύς 1>MW) στην Ελλάδα, περιοχή μελέτης.....	75
Εικόνα 4.2: Κέντρο Συλλογής PV Κοζάνης (40,39956, 21,77582).....	78
Εικόνα 4.3: Κέντρο Συλλογής PV Τρίκαλα-Καρδίτσα (39,34395, 22,08166).....	78
Εικόνα 4.4: Κέντρο Συλλογής PV Λάρισας-Βόλου (39,40595, 22,43120).....	79
Εικόνα 4.5: Κέντρο Συλλογής PV Λαμίας - Κέντρο Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών Αποβλήτων (PVRC) (38,82931, 22,48858).....	79
Εικόνα 4.6: Κέντρο Συλλογής PV Βοιωτίας-Αττικής (38,36265, 23,31638).....	79
Εικόνα 4.7: Κέντρο Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών Αποβλήτων-PVRC.....	81
Εικόνα 4.8: Κέντρο Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών Αποβλήτων-PVRC, μεγάλη κλίμακα.....	81

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος μονάδων ΑΠΕ για ηλεκτροπαραγωγή (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2019)	23
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών τεχνολογιών (Domínguez et al., 2017).....	48
Πίνακας 3.2: Ετήσια και Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς.....	53
Πίνακας 3.3: Μελλοντικοί στόχοι.....	53
Πίνακας 3.4: Αναλογία βάρους προς μάζα (Domínguez et al., 2017).....	54
Πίνακας 3.5: Μερίδιο Αγοράς φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	54
Πίνακας 3.6: Πίνακας Σεναρίων (Molano et al., 2022).....	56
Πίνακας 3.7: Σύνθεση υλικών σε φωτοβολταϊκά πλαίσια (Molano et al., 2022).....	57
Πίνακας 3.8: LCI of FRELP Project (Molano et al., 2022).....	60
Πίνακας 3.9: Οικονομικοί παράμετροι και παραδοχές.....	61
Πίνακας 3.10: Υλικά ανάκτησης και τρέχουσες τιμές αυτών.....	64
Πίνακας 4.1: Παραγόμενη ισχύς από φ/β συστήματα των περιοχών μελέτης.....	76
Πίνακας 4.2: Συνολική σταθμισμένη απόσταση \bar{D}	80
Πίνακας 4.3: Γεωγραφικές Συντεταγμένες Κέντρου Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών-PVRC.....	80
Πίνακας 4.4: Λειτουργικό Κόστος (OC).....	84
Πίνακας 4.5: Κόστος Μεταφοράς (TC).....	85
Πίνακας 4.6: Κόστος Διάθεσης Παραπροϊόντων (CU).....	85
Πίνακας 4.7: Συνολικό Κόστος Αντίστροφης Εφοδιαστικής Λειτουργίας.....	86
Πίνακας 4.8: Συνολικά Έσοδα Αντίστροφης Εφοδιαστικής Λειτουργίας.....	87
Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα Αξιολόγησης Επένδυσης.....	87
Πίνακας 7.1: Κατανομή Weibull $f(t)$ για Early Loss Scenario.....	96
Πίνακας 7.2: Κατανομή Weibull $f(t)$ για Regular Loss Scenario.....	97
Πίνακας 7.3: Ποσότητες αποβλήτων για κάθε φωτοβολταϊκή τεχνολογία.....	98
Πίνακας 7.4: Αποτελέσματα ετήσιας ροής φ/β αποβλήτων για 2 σενάρια.....	99
Πίνακας 7.5: Αποτελέσματα αθροιστικής ροής αποβλήτων για 2 σενάρια.....	100
Πίνακας 7.6: Αποτελέσματα αθροιστικής μάζας κάθε στοιχείου για EL Scenario.....	101
Πίνακας 7.7: Αποτελέσματα αθροιστικής μάζας κάθε στοιχείου για RL Scenario.....	101
Πίνακας 7.8: Αποτελέσματα αθροιστικής μάζας κάθε στοιχείου ανά 4 χρόνια για 2 σενάρια.....	102
Πίνακας 7.9: Αποτελέσματα Εσόδων-Εξόδων για EL Scenario.....	102
Πίνακας 7.10: Αποτελέσματα Εσόδων-Εξόδων για RL Scenario.....	103
Πίνακας 7.11: Αποτελέσματα Καθαρής Παρούσας Αξίας για 2 σενάρια.....	104
Πίνακας 7.12: Αποτελέσματα Περιόδου Αποπληρωμής για 2 σενάρια.....	105

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1: Τάση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα παγκοσμίως (IRENA, 2023).....	18
Διάγραμμα 2.2: Ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων (Σύνδεσμος Εταιριών φωτοβολταϊκών, 2022).....	19
Διάγραμμα 2.3: Μερίδιο Αγοράς φ/β στην Ελλάδα (Σύνδεσμος Εταιριών φωτοβολταϊκών, 2022).....	19
Διάγραμμα 2.4: Αριθμός συνδεδεμένων συστημάτων (Σύνδεσμος Εταιριών φωτοβολταϊκών, 2022).....	20
Διάγραμμα 2.5: Επενδύσεις φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα (Σύνδεσμος Εταιριών φωτοβολταϊκών, 2022).....	21
Διάγραμμα 2.6: Κόστος επένδυσης σε φωτοβολταϊκά συστήματα (Σύνδεσμος Εταιριών φωτοβολταϊκών, 2022).....	22
Διάγραμμα 2.7: Μείωση εκπομπών CO ₂ λόγω των φωτοβολταϊκών (Σύνδεσμος Εταιριών φωτοβολταϊκών, 2022).....	22
Διάγραμμα 2.8: Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ κατά την περίοδο 2017-2030 (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2019).....	24
Διάγραμμα 3.1: Ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2019).....	51
Διάγραμμα 3.2: Εγκατεστημένη ισχύς στην Ελλάδα (IRENA, 2023).....	52
Διάγραμμα 4.1: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (GW) στην Ελλάδα έως το 2050.....	65
Διάγραμμα 4.2: Ετησία ροή φωτοβολταϊκών αποβλήτων για 2 σενάρια.....	66
Διάγραμμα 4.3: Αθροιστική ροή φωτοβολταϊκών αποβλήτων για 2 σενάρια.....	67
Διάγραμμα 4.4: Συνολική αθροιστική μάζα του Αργύρου (Silver-Ag).....	69
Διάγραμμα 4.5: Συνολική αθροιστική μάζα του Αργίλιου (Aluminum-Al) και του Γυαλίου (Glass).....	69
Διάγραμμα 4.6: Συνολική αθροιστική μάζα του Σιδήρου (Iron-Fe), Τιτανίου (Titanium-Ti) και Μαγγανίου (Manganese-Mn).....	70
Διάγραμμα 4.7: Συνολική αθροιστική μάζα του Ψευδάργυρου (Zinc-Zn), Κασσίτερου (Stannous-Sn) και Μολυβδαίνιου (Molybdenum-Mo).....	71
Διάγραμμα 4.8: Συνολική αθροιστική μάζα του Νικελίου (Nickel-Ni), Χρωμίου (Chromium-Cr), Μόλυβδου (Plumbum-Pb) και Ινδίου (Indium-In).....	71
Διάγραμμα 4.9: Συνολική αθροιστική μάζα του Μαγνησίου (Magnesium-Mg), Πυριτίου (Silicon-Si) και Χαλκού (Copper-Cu).....	72
Διάγραμμα 4.10: Συνολική αθροιστική μάζα του Τελλουρίου (Tellurium-Te) και Γαλλίου (Gallium-Ga).....	73
Διάγραμμα 4.11: Συνολική αθροιστική μάζα του Καδμίου (Cadmium-Cd) και Σεληνίου (Selenium-Se).....	73
Διάγραμμα 4.12: Συνολική αθροιστική μάζα του Χάλυβα (Steel) και της επίστρωσης EVA (Ethylene-vinyl acetate-EVA).....	74
Διάγραμμα 4.13: Έσοδα - Έξοδα επιχείρησης για το Early Loss Scenario (EL).....	88
Διάγραμμα 4.14: Έσοδα - Έξοδα επιχείρησης για το Regular Loss Scenario (RL).....	88

Διάγραμμα 4.15: Προφίλ Καθαρής Παρούσας Αξίας της επένδυσης.....	89
Διάγραμμα 4.16: Περίοδος Αποπληρωμής επένδυσης.....	90

Πίνακας συντομογραφιών

Φ/B: φωτοβολταϊκά
EOL: End of Life
c-Si: κρυσταλλικού πυριτίου
a-Si: άμορφου πυριτίου
CdTe: Τελλουριούχου καδμίου
CIGS: σεληνιούχου γαλίου-ινδίου-χαλκού
PV: Photovoltaic
EL Scenario: Early Loss Scenario
RL Scenario: Regular Loss Scenario
FRELP: Full Recovery End of Life Photovoltaic
LCI: Life Cycle Inventory
PVRC: Photovoltaic Recycling Centre
NPV: Net Present Value
PB: Payback Period
IRR: Internal Rate of Return
ΕΣΕΚ: Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα
IRENA: International Renewable Energy Agency

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και η σταδιακή απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα αποτελεί επιτακτική ανάγκη στην εποχή μας. Είναι αναγκαίο όχι μόνο λόγω της εξάντλησης των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων και της ρύπανσης του περιβάλλοντος αλλά και εξαιτίας της ανάγκης της ενεργειακής ανεξαρτησίας των χωρών (Χρυσόχου, 2020).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια δραστική ανάπτυξη στην αγορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων εστιάζοντας όλο και περισσότερο στην τεχνολογία τους η οποία αποσκοπεί να είναι πιο αποδοτική, οικονομική και περιβαλλοντικά φιλική. Παρόλα αυτά η ραγδαία ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών υποδομών και των νέων εγκαταστάσεων που αναπτύσσονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα οδηγήσει σε μια σημαντική αύξηση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων τα επόμενα χρόνια. Καθώς τα φωτοβολταϊκά πάνελ πρώτης γενιάς προσεγγίζουν το τέλος διάρκειάς της ζωής τους (End of life, EoL), δημιουργούνται έντονες ανησυχίες για το περιβαλλοντικό αντίκτυπο των αποβλήτων που αυτά δημιουργούν.

Τα απόβλητα που προέρχονται από τα φωτοβολταϊκά συστήματα περιέχουν πολλές επικίνδυνες ουσίες και ο ακατάλληλος χειρισμός και η διάθεση τους, όπως η εκχύλιση τοξικών μετάλλων, η απώλεια πόρων όπως το γυαλί, το αλουμίνιο, ο άργυρος, το γάλλιο θα οδηγήσουν σε ευρεία περιβαλλοντική και αειφορική ανησυχία.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση ανακοίνωσε πως τα φωτοβολταϊκά απόβλητα θα δημιουργήσουν το πιο σημαντικό ρεύμα αποβλήτων με αποτέλεσμα να εισάγουν απαγορεύσεις για την υγειονομική ταφή αυτών, δημιουργώντας έτσι την ανάγκη να ορισθούν στρατηγικές και μέτρα για των μετριασμό των επιπτώσεων. Η ορθή διαχείριση των αποβλήτων, οι διαδικασίες και τα συστήματα ανακύκλωσης για το τέλος του κύκλου ζωής των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι υψίστης σημασίας καθώς αποσκοπούν στην ανάκτηση πολυτίμων υλικών καθώς και στην ελαχιστοποίηση των κινδύνων που προκύπτουν εξαιτίας των επικίνδυνων ουσιών.

Είναι ευρέως γνωστό πως η ανάκτηση μετάλλων υψηλής αξίας δεν έχει αναπτυχθεί πλήρως σε εμπορική κλίμακα εξαιτίας της έλλειψης δικτύων συλλογής και βιώσιμων επενδύσεων. Είναι αναγκαίο λοιπόν η ανάπτυξη αποτελεσματικών εφοδιαστικών συστημάτων για την συλλογή και επεξεργασία των φωτοβολταϊκών αποβλήτων. Απαιτείται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την θέσπιση ορθών στρατηγικών ανακύκλωσης με στόχο την επίτευξη ενός σωστού συστήματος αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας για τα φωτοβολταϊκά απόβλητα αντιμετωπίζοντας έτσι τις προκλήσεις και τις ευκαιρίες που απαντώνται σε κάθε περιοχή.

Απαιτείται η συνολική κατανόηση των διαδικασιών λαμβάνοντας υπόψιν τη συλλογή, επεξεργασία, μεταφορά και ανάπτυξη δικτύου. Συνεπώς, ο σχεδιασμός ενός συστήματος ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ πρέπει να είναι επαρκής από οικονομική, περιβαλλοντική και λειτουργική άποψη. Ένας σημαντικός παράγοντας είναι η ελαχιστοποίηση της απόστασης μεταφοράς που συμπεριλαμβάνεται στην διαδικασία ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ επομένως πρέπει να αξιολογηθεί συνολικά λαμβάνοντας υπόψιν τα σημεία συλλογής και την ποσότητα των αποβλήτων που πρόκειται να παραχθούν.

Η παρούσα διπλωματική εργασία σκοπεύει να αναπτύξει μια δομημένη προσέγγιση για την αντίστροφη εφοδιαστική διαχείριση φωτοβολταϊκών αποβλήτων. Στην μελέτη αυτή γίνεται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση λαμβάνοντας υπόψη κρίσιμες μεταβλητές όπως τοποθεσίες, μεταφορές, όγκοι, ανάπτυξη της αγοράς, κόστος καθώς και μελλοντικές προβλέψεις, οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για την λήψη τεχνικών και οικονομικών αποφάσεων. Εξίσου σημαντικές είναι και για τον υλικοτεχνικό σχεδιασμό καθώς και την περιβαλλοντική και οικονομική βιωσιμότητα. Επομένως, αρχικά γίνεται μια αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τις τεχνολογίες, τις μεθόδους ανακύκλωσης και την ανάκτηση πολύτιμων υλικών και μετάλλων. Στην συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με την εφαρμογή της στην περίπτωση της Ελλάδας. Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και η συζήτηση σχετικά με τα ευρήματα και τις επιπτώσεις που εντοπίστηκαν. Τέλος, γίνονται οι καταλυτικές παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα και δίνεται το βήμα για περαιτέρω μελέτες και μελλοντικές προτάσεις.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό μέρος

2.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων συμβατών καυσίμων όπως για παράδειγμα ο άνθρακας, ο λιγνίτης, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας και την υποβάθμιση του περιβάλλοντος οδήγησε στην αξιοποίηση των εναλλακτικών πηγών ενέργειας με σκοπό την εξασφάλιση της βιωσιμότητας, ενεργειακής ασφάλειας και αξιοπιστίας. Η αξιοποίηση λοιπόν των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) βοηθά στην εξοικονόμηση και ορθολογική χρήση της ενέργειας.

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι ενεργειακές πηγές που μπορούν να εντοπιστούν σε αφθονία στο ίδιο το φυσικό περιβάλλον (Χρυσόχοου, 2020) ή ως η ενέργεια που αναπληρώνεται με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο καταναλώνεται (Τσούτσος et al., 2013). Στις πηγές περιλαμβάνονται η ηλιακή, η αιολική, η υδραυλική ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια κυμάτων και η παλιρροϊκή ενέργεια. Τέλος, ως ευρύτερη έννοια ως ΑΠΕ αναφέρονται κάθε είδους πηγή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ανανεώνεται μέσω φυσικών φαινομένων μονίμου κύκλου.

Γίνεται σαφές πως οι έννοιες των ΑΠΕ συνδέεται άρρηκτα με αυτήν του περιβάλλοντος. Οι ΑΠΕ αποτελούν «καθαρές» μορφές ενέργειας, φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς δεν αποδεδεσμεύουν διοξείδιο του άνθρακα στο περιβάλλον όπως γίνεται με την συμβατικές πηγές. Επιπρόσθετα, είναι ανεξάντλητες πηγές και βασίζονται σε φυσικές διαδικασίες όπως είναι ο ήλιος και ο άνεμος, επομένως η εκμετάλλευσή τους από το άνθρωπο κρίνεται απαραίτητη (Χρυσόχοου, 2020).

2.2 Φωτοβολταϊκή τεχνολογία

Φωτοβολταϊκή τεχνολογία ορίζεται ως η τεχνολογία που επιτρέπει την απευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Η φυσική διαδικασία που λαμβάνει χώρα στο φωτοβολταϊκό στοιχείο ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο (Τσούτσος et al., 2013).

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παρέχει την δυνατότητα άμεσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της προσπίπτουσας ακτινοβολίας χωρίς την χρήση κάποιου κινούμενου μηχανισμού (Καλδέλλης, Σπυρόπουλος, et al., 2007).

Έχοντας σταδιακή αύξηση της αξιοπιστίας αλλά και του βαθμού απόδοσης των συγχρόνων φωτοβολταϊκών πάνελ σε συνδυασμό με την μείωση του κόστους παράγωγής τους, η επένδυση σε Φ/Β συστήματα παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον με αποτέλεσμα να εισέρχονται δυναμικά τόσο στο εγχώριο όσο και στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο (Καλδέλλης, Σπυρόπουλος, et al., 2007). Αυτή η ραγδαία αύξηση στην ανάπτυξη της φ/β τεχνολογίας οφείλεται σε διάφορους παράγοντες και σε κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των φ/β συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα:

- Ένα βασικό χαρακτηριστικό των φωτοβολταϊκών είναι πως δεν παράγουν αέρια θερμοκηπίου κατά την διάρκεια λειτουργίας τους και είναι αθόρυβα, γεγονός που τα καθιστά εύχρηστα και εύκολα στην εγκατάστασή τους σε οποιοδήποτε περιβάλλον ακόμη και στον αστικό ιστό.
- Είναι ικανά να λειτουργήσουν ως αυτόνομα συστήματα είτε συνδεδεμένα στο δίκτυο. Στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, η παραγόμενη ενέργεια καταναλώνεται επιτόπου και εξολοκλήρου, ενώ στα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα, η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο έτσι ώστε να μπορέσει να μεταφερθεί αλλά και να καταναλωθεί αλλού (Χρυσόχοου, 2020).
- Συνδέονται σε διάφορους αριθμούς μεταξύ τους δίνοντας έτσι ποικιλία ισχύος από λίγα MW έως δεκάδες MW.
- Επιπλέον είναι εφικτό να συνδυαστούν με άλλες μορφές ενέργειας, κυρίως ΑΠΕ και να λειτουργήσουν ως υβριδικά συστήματα (Τσούτσος et al., 2013).

Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα λοιπόν έχουν οδηγήσει στην ευρεία αξιοποίηση και στην συνεχή ανάπτυξη τους.

2.3 Προοπτικές ανάπτυξης Φ/Β συστημάτων

2.3.1 Παγκόσμια αγορά

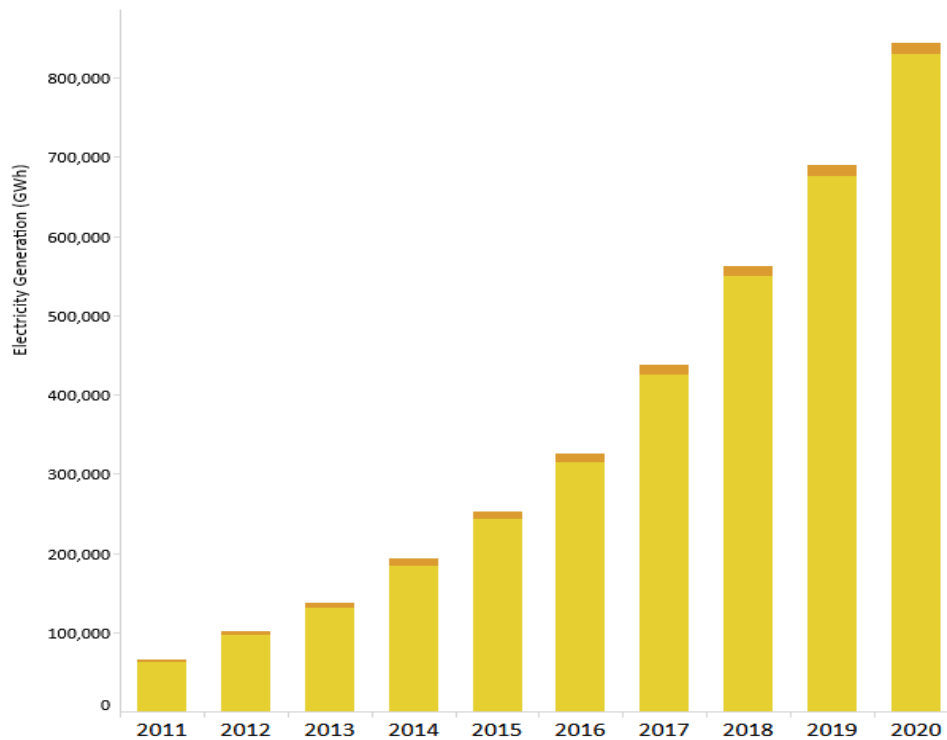
Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται παγκοσμίως και γίνεται όλο και πιο δημοφιλής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανσης ή αφαλάτωσης νερού.

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών έφτασε τα 710 GW παγκοσμίως στο τέλος του 2020. Το 2020 προστέθηκαν περίπου 125 GW νέας ηλιακής φωτοβολταϊκής ισχύος, η μεγαλύτερη προσθήκη ισχύος από κάθε άλλη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (Διάγραμμα 2.1) (IRENA, 2023).

Το κόστος κατασκευής των ηλιακών συλλεκτών έχει μειωθεί δραματικά την τελευταία δεκαετία, καθιστώντας της εγκατάστασή τους όχι μόνο προσιτή, αλλά και συχνά την φθηνότερη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τιμές των ηλιακών μονάδων μειώθηκαν κατά 93% μεταξύ του 2010 και 2020. Την ίδια περίοδο, ο παγκόσμιος σταθμισμένος μέσος όρος του ισοσταθμισμένου κόστους ηλεκτρικής ενέργειας (LCOE) για τα φωτοβολταϊκά έργα κοινής ωφέλειας μειώθηκε κατά 85% (IRENA, 2023).

Electricity Generation Trends

Navigate through the filters to explore trends in renewable energy



Διάγραμμα 2.1: Τάση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα παγκοσμίως (IRENA, 2023).

2.3.2 Ελληνική Αγορά

Στην Ελλάδα, η εικόνα της αγοράς φωτοβολταϊκών παρουσιάζει ενδιαφέρον κυρίως από το 2010 και μετά όπου παρατηρείται ένας αξιοσημείωτος όγκος εγκατάστασης συστημάτων (Σύνδεσμος Εταιριών φωτοβολταϊκών, 2022) .

Το Διάγραμμα 2.2 απεικονίζει τις ετήσιες και συνολικές συνδέσεις φωτοβολταϊκών στο δίκτυο.

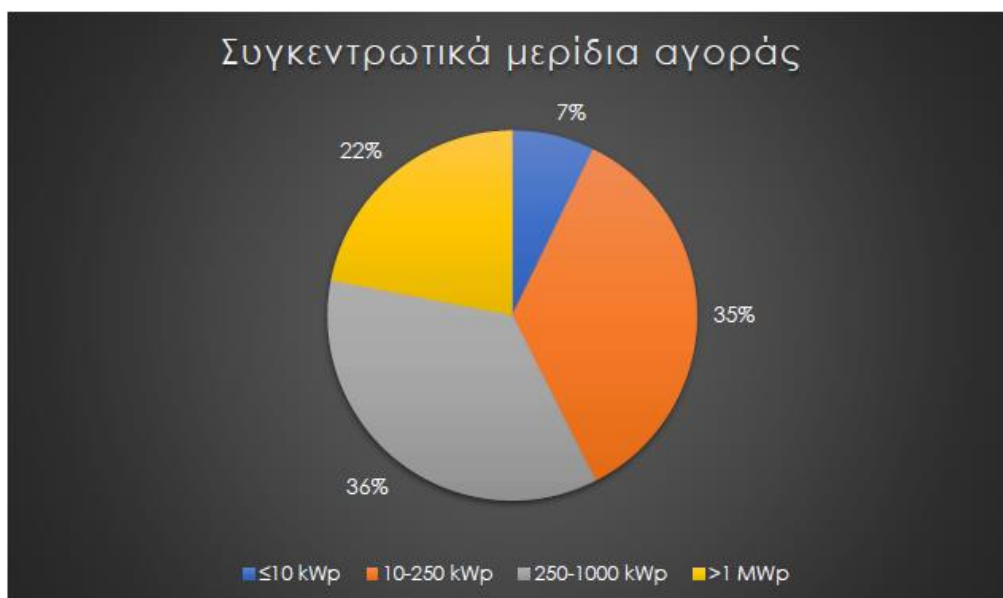


Τα νούμερα για το 2022 αποτελούν εκτίμηση.

Διάγραμμα 2.2: Ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων (Σύνδεσμος Εταιριών φωτοβολταϊκών, 2022).

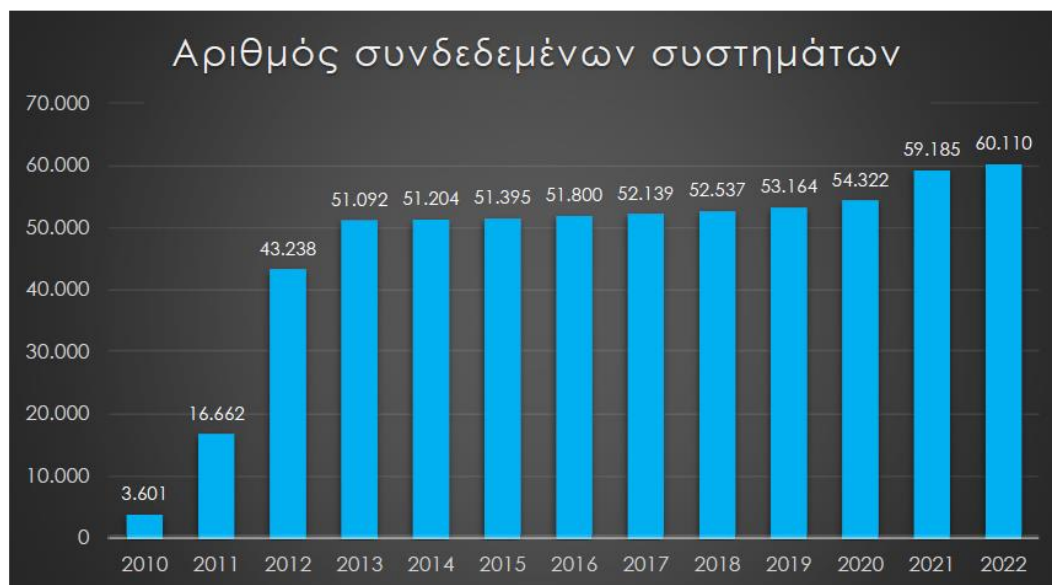
Την χρονική περίοδο από το 2013 έως και το 2018 οι συνθήκες δεν ήταν ευνοϊκές για την Ελλάδα. Η ετήσια συνδεδεμένη ισχύς ήταν ελαχίστη γεγονός το οποίο πιθανότατα οφείλεται στην ύφεση που επικρατούσε στην χώρα.

Το μερίδιο αγοράς με βάση την εγκατεστημένη ισχύ και ο αριθμός των συνδεδεμένων συστημάτων παρουσιάζονται στα επόμενα Διαγράμματα 2.3 και 2.4.



Διάγραμμα 2.3: Μερίδιο αγοράς φ/β στην Ελλάδα (Σύνδεσμος Εταιριών φωτοβολταϊκών, 2022).

Στην Ελλάδα όπως παρατηρείται το μερίδιο αγοράς κυμαίνεται ανάμεσα σε φ/β συστήματα παραγωγής 10-250 kWp και 250-1000 kWp.



Διάγραμμα 2.4: Αριθμός συνδεδεμένων συστημάτων (Σύνδεσμος Εταιριών φωτοβολταϊκών, 2022).

Από το Διάγραμμα 2.4 παρατηρείται πως από το 2010 έως το 2013 υπάρχει μια εμφανής τάση αύξησης των συνδεδεμένων συστημάτων. Το χρονικό διάστημα από το 2014 έως το 2018 η σύνδεση των φ/β συστημάτων είναι σταθερή και ελάχιστη χωρίς κάποια ανοδική πορεία και από το 2019 έως και το 2022 παρουσιάζεται μια τάση προς αύξηση των συνδέσεων.

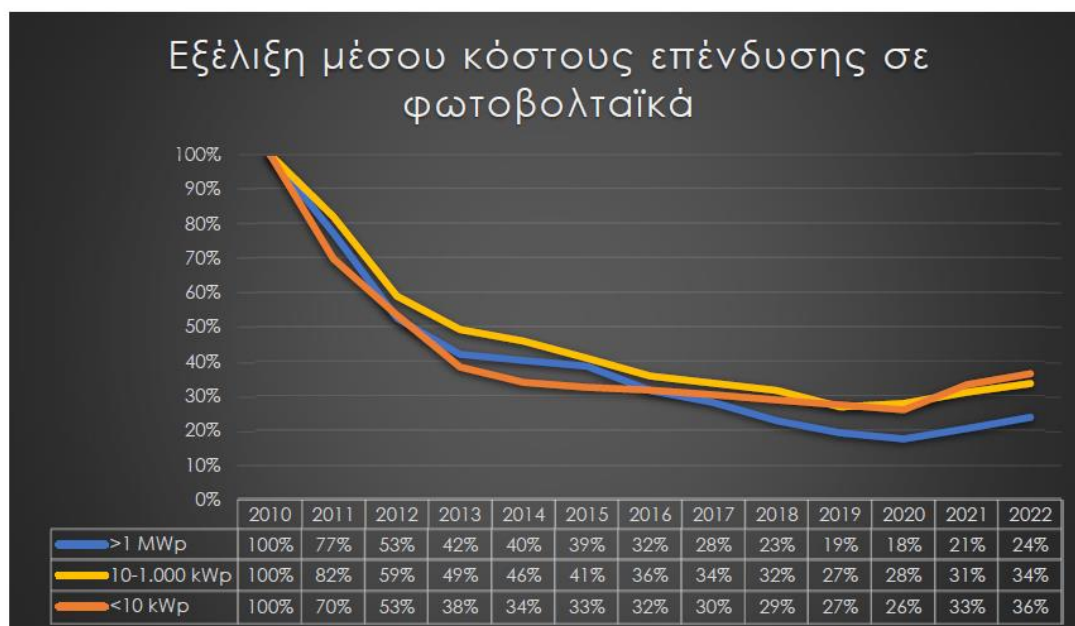
Σύμφωνα με τα υπάρχοντα δεδομένα όσο αναφορά για τις ετήσιες και συνολικές επενδύσεις σε συστήματα φωτοβολταϊκών για την 10ετή αυτήν περίοδο απεικονίζονται στο Διάγραμμα 2.5.



Διάγραμμα 2.5: Επενδύσεις φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα (Σύνδεσμος Εταιριών φωτοβολταϊκών, 2022).

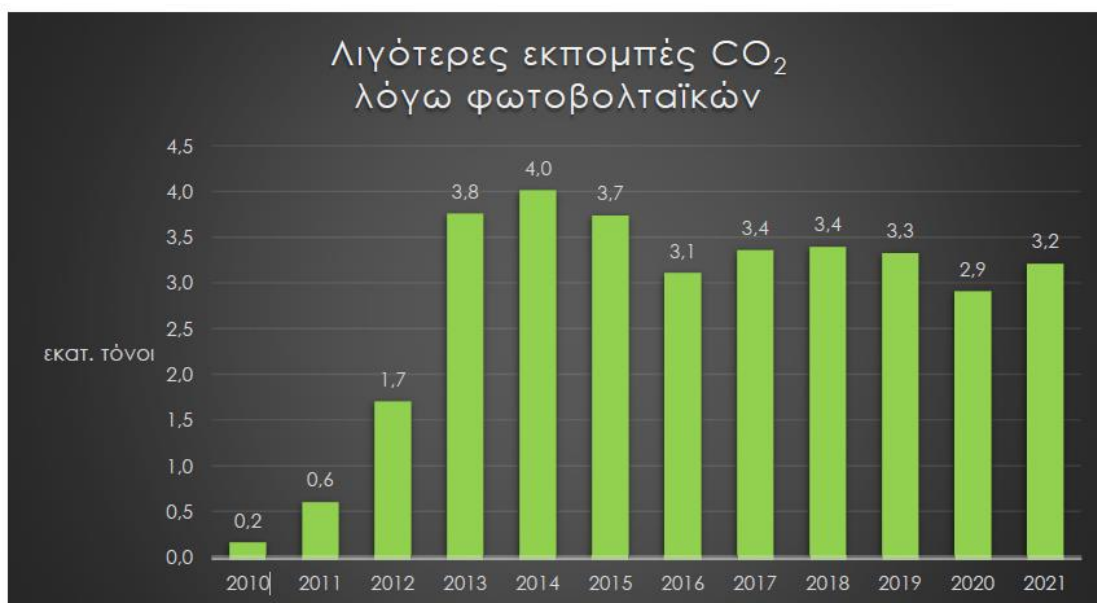
Τις περιόδους 2010-2013 και 2019-2022 το ενδιαφέρον για επενδύσεις σε φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα είναι μεγαλύτερο και παρουσιάζει σημαντική αύξηση ενώ στα χρόνια της ύφεσης οι επενδύσεις είναι ελάχιστες με αποτέλεσμα να επέρχεται μια περίοδος στασιμότητας.

Το κόστος επενδύσεις σε φωτοβολταϊκά συστήματα δεν είναι παντού το ίδιο αλλά εξαρτάται από την ωριμότητα της αγοράς, το είδος και το μέγεθος της εφαρμογής (Μπιτζιώνης et al., 2011). Επομένως από το ακόλουθο Διάγραμμα 2.6 συμπεραίνεται πως το κόστος επένδυσης για διάφορες κατηγορίες φωτοβολταϊκών ακολουθεί μια διαρκείς μείωση του με ορισμένες παροδικές αυξήσεις που προήλθαν από την πανδημία και την πρόσφατη ενεργειακή κρίση.



Διάγραμμα 2.6: Κόστος επένδυσης σε φωτοβολταϊκά συστήματα (Σύνδεσμος Εταιριών φωτοβολταϊκών, 2022).

Τέλος, το παρακάτω Διάγραμμα 2.7 απεικονίζει τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών.



Διάγραμμα 2.7: Μείωση εκπομπών CO₂ λόγω των φωτοβολταϊκών (Σύνδεσμος Εταιριών φωτοβολταϊκών, 2022).

2.3.3 Εθνικός στόχος ΑΠΕ

Σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο για την Ενεργεία και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), ο στόχος για την συμμετοχή των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας ορίζεται η επίτευξη μεριδίου συμμετοχής τουλάχιστον 35% έως το 2030. Όσον αφορά το μερίδιο συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, στόχος είναι το ποσοστό να ανέλθει στο 60% για τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης να ξεπεράσει το 40%, και στον τομέα μεταφορών να ξεπεράσει το 14%.

Η επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου προϋποθέτει την πολύ μεγάλη αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των ΑΠΕ για ηλεκτροπαραγωγή, η οποία για τις περισσότερες τεχνολογίες προβλέπεται να οδηγήσει σε υπερδιπλασιασμό της σημερινής εγκατεστημένης ισχύος.

Στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, οι κυρίαρχες εφαρμογές για την επόμενη περίοδο που θα συνεισφέρουν στην επίτευξη των στόχων είναι τα αιολικά και τα φωτοβολταϊκά πάρκα, τα οποία κρίνονται και τα πλέον ώριμα και ανταγωνιστικά με κανόνες αγοράς και οικονομικότητας ως προς τις επιπτώσεις τους σε θέματα ενισχύσεων (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2019).

Παρακάτω παρουσιάζονται οι στόχοι για την επίτευξη της ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ ως το 2030 (Πίνακας 2.1). Ο στόχος για τα φωτοβολταϊκά συστήματα ανέρχεται σε 7,7 GW εγκατεστημένης ισχύς έως το 2030 (Διάγραμμα 2.8).

Πίνακας 2.1: Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος μονάδων ΑΠΕ για ηλεκτροπαραγωγή (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2019)

Ηλεκτροπαραγωγή - Εγκατεστημένη Ισχύς [GW]	2020	2022	2025	2027	2030
Βιομάζα & Βιοαέριο	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3
Υ/Η (συμπ. μεικτών αντλητικών)	3,4	3,7	3,8	3,9	3,9
Αιολικά	3,6	4,2	5,2	6,0	7,0
Φ/Β	3,0	3,9	5,3	6,3	7,7
Ηλιοθερμικοί σταθμοί	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
Γεωθερμία	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Σύνολο	10,1	11,9	14,6	16,4	19,0



Διάγραμμα 2.8: Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ κατά την περίοδο 2017-2030
(Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2019).

2.4 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών

Για την αξιολόγηση της ποσότητας και της ποιότητας των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο τέλος του κύκλου ζωής τους είναι απαραίτητο να αναλυθούν διάφορες διαθέσιμες τεχνολογίες.

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από πολλαπλά στοιχεία, όπως τα κελιά (cell), τα οποία συνδέονται σε σειρά σε μεγάλα πλαίσια, από ηλεκτρικές και μηχανικές βάσεις αλλά και συνδέσεις, εργαλεία για την ρύθμιση και την τροποποίηση της εξόδου, η οποία είναι η ηλεκτρική ενέργεια.

Η ηλιακή κυψέλη είναι το στοιχειώδες δομικό στοιχείο της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Κατασκευάζεται από ημιαγώγιμα υλικά, όπως το πυρίτιο, τα οποία προκαλούν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Το φως του ηλίου μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μόνο και μόνο λόγω αυτού του φαινομένου. Όταν φωτόνια φωτός σε διαφορετικά μήκη κύματος προσπίπτουν σε ένα κελί, μπορούν να ανακλαστούν ή να απορροφηθούν ή να περάσουν μέσα από αυτό. Η απορρόφηση ενός φωτονίου έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίων-οπών τα οποία όταν διαχωρίζονται μεταξύ τους κατά μήκος της διασταύρωσης, έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία τάσης η οποία μπορεί να οδηγήσει το ρεύμα σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Ως αποτέλεσμα η ισχύς μπορεί να εξαχθεί από το ηλιακό κελί.

Υπάρχουν πολλοί τύποι ηλιακών κελιών αλλά περισσότερο από το 80% αυτών που παράγονται παγκοσμίως αποτελούνται από κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si). Το δεύτερο πιο συχνά χρησιμοποιούμενο ημιαγώγιμο υλικό είναι το τελλουριούχο κάδμιο (CdTe), το οποίο επιτρέπει την παραγωγή κελιών λεπτού υμένα. Το εύρος των σημερινών τεχνολογιών και των πιθανών μελλοντικών επιλογών είναι τα ακόλουθα:

- Φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς: Κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si)
 - a) Μονοκρυσταλλικό
 - b) Πολυκρυσταλλικό
 - c) Φύλλα Ribbon
- Φωτοβολταϊκά δεύτερης γενιάς: Λεπτή μεμβράνη (Thin film)
 - a) Άμορφο πυρίτιο (a-Si)
 - b) Τελλουριούχου καδμίου (CdTe)
 - c) Κυψέλες πολλαπλών διακλαδώσεων (a-Si-μc Si)
 - d) (δι)σεληνιούχου γαλιού-ινδίου-χαλκού (CIGS), (δι)σελινιού χαλκού-ινδίου (CIS)
- Φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς: Συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά (CPV) και αναδυνάμενες τεχνολογίες
 - a) CPV
 - b) Φωτοβολταϊκά στοιχεία ευαίσθητης βαφής
 - c) Οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία
 - d) Υβριδικά
 - e) PERC και PERL (Paiano, 2015)

2.4.1 Φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς

Οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται στην χρήση δυο τύπων πυριτίου. Ο πρώτος τύπος είναι το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο με μεγάλα ποσοστά καθαρότητας, το οποίο κατασκευάζεται με μια πολύπλοκη διαδικασία με υψηλό κόστος. Είναι ακριβότερο από το πολυκρυσταλλικό αλλά πιο αποδοτικό (Paiano, 2015). Το πάχος του υλικού στο πλακίδιο (Wafer) είναι περίπου 300 μm. Η απόδοση του σε συνθήκες εργαστήριου είναι 20-24% ενώ σε εμπορικές εφαρμογές είναι 14-18%. Το χρώμα των στοιχείων είναι συνήθως σκούρο μπλε (Τσούτσος et al., 2013). Στο μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, το κρυσταλλικό πλαίσιο είναι ομοιογενές, και ολόκληρο το κρυσταλλικό πλέγμα είναι συνεχές, αδιάσπαστο και χωρίς όρια κόκκων. Τα ηλιακά κελιά που βασίζονται σε ένα πολυκρυσταλλικό πυρίτιο αποτελούνται από ένα αριθμό μικρότερων κρυστάλλων. Είναι η πιο κοινή φωτοβολταϊκή τεχνολογία σήμερα, συγκεκριμένα αντιπροσωπεύουν το 63% της παγκόσμιας αγοράς επειδή είναι φθηνότερη τεχνολογία σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά, αν και έχουν χαμηλότερη απόδοση (Paiano, 2015). Η μέθοδος κατασκευής των πλακιδίων είναι διαφορετική και φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών Φ/Β στοιχείων. Όσον αφορά την απόδοση είναι χαμηλότερη γιατί οι ασυνέχειες στο κρυσταλλικό πλέγμα λόγω της δομής τους αυξάνουν το ποσοστό επανασύνδεσης οπών-ηλεκτρονίων. Σε συνθήκες εργαστήριου η απόδοση τους κυμαίνεται μεταξύ 17-20% ενώ σε εμπορικές εφαρμογές είναι 10-14%. Το χρώμα των πολυκρυσταλλικών στοιχείων είναι συνήθως γαλάζιο (Τσούτσος et al., 2013).

Οι κυψέλες πυριτίου (c-Si) με βάση το Wafer έχουν ήδη αποδείξει την εξαιρετική σταθερότητα και αξιοπιστία λειτουργώντας σε εξωτερικές συνθήκες χωρίς καμία

υποβάθμιση της απόδοσης τους. Το κύριο μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος της μονάδας σε σχέση με την χαμηλό όγκο παραγωγής κατά την διάρκεια της κατασκευής, την ολοκληρωμένη διαδικασία κατασκευής των κυψελών και της συναρμολόγησης του πλαισίου και της μεγάλης ποσότητας πρώτης ύλης υψηλής καθαρότητας πυριτίου που απαιτείται (συγκεκριμένα 15 τόνοι πρώτης ύλης πυριτίου για την παραγωγή μονάδων MWp). Μέχρι και τις αρχές του 1990, η φωτοβολταϊκή βιομηχανία χρησιμοποιούσε κυρίως αποκόμματα (scrap) από την μικροηλεκτρονική βιομηχανία, καθώς η τιμή των πρώτων υλών ήταν χαμηλή. Με το πέρασμα του χρόνου η ανάπτυξη της βιομηχανίας των φωτοβολταϊκών κατέστησε την προμήθεια αυτής της πρώτης ύλης όλο και περισσότερο ανεπαρκής. Έτσι οι μονάδες παραγωγής κατασκεύαζαν πυρίτιο ηλιακής ποιότητας με μόλυνση από μέταλλα της τάξης ανά εκατομμύριο ή και λιγότερο.

Το γεγονός ότι τα πλακίδια (Wafers) πρέπει να κοπούν από ένα πλινθίο με συρματοπρίονο είναι ένα ακόμη ζήτημα σχετικά με την τεχνολογία που είναι βασισμένη στα πλακίδια (Wafers). Επομένως είναι ακριβά, περιλαμβάνουν σημαντικές απώλειες υλικών της τάξης έως και 68% και μπορούν να οδηγήσουν στην θραύση των λεπτών πλακιδίων (Wafers). Εξάλλου τα πλακίδια (Wafers) έχουν περιορισμένα μεγέθη και πρέπει να συναρμολογηθούν εξωτερικά. Λαμβάνοντας υπόψη τους αυτές τις εκτιμήσεις, τα πολυκρυσταλλικά πλακίδια (Wafers) πυριτίου τετράγωνου σχήματος που κόβονται από ράβδους πολυπυριτίου είναι πιο εύχρηστες για την συναρμολόγηση σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά πλακίδια (Wafers) σχεδόν τετραγωνικού σχήματος.

Επιπρόσθετα, εναλλακτικές δομές όπως τα φύλλα πυριτίου ribbon, είναι διαθέσιμα, ωστόσο η απόδοσή τους είναι περίπου 13% δηλαδή χαμηλότερη από την απόδοση των 2 πρώτων τεχνολογιών. Κατά την διαδικασία κατασκευής τους, τα υψηλής θερμοκρασιακής αντίστασης σύρματα εξάγονται μέσα από το λιωμένο πυρίτιο για να σχηματίσουν ένα πολυκρυσταλλικό ribbon από κρύσταλλο πυριτίου. Στην συνέχεια το ribbon κόβεται σε μήκη, το οποίο επεξεργάζεται με παραδοσιακές διαδικασίες για να δημιουργηθεί μια ηλιακή κυψέλη. Η διαδικασία χρησιμοποιεί λιγότερο πυρίτιο (περίπου το μισό της ποσότητας) σε σύγκριση με την μέθοδο παραγωγής πλακιδίων (Wafer), αλλά η διαδικασία είναι θερμικά αναποτελεσματική, οπότε είναι ιδιαίτερα ενεργειακά δαπανηρή (Paiano, 2015).



Εικόνα 2.1: (α) Πολυκρυσταλλικό πάνελ

(β) Μονοκρυσταλλικό πάνελ

2.4.2 Φωτοβολταϊκά δεύτερης γενιάς

Τα φωτοβολταϊκά δεύτερης γενιάς από λεπτή μεμβράνη (Thin-film) είναι ένα ή περισσότερα λεπτά στρώματα πάχους 1-10 μm από ημιαγώγιμα υλικά που εφαρμόζονται σε ένα στερεό και χαμηλού κόστος υπόστρωμα όπως για παράδειγμα ατσάλι, γυαλί ή πλαστικό. Οι λεπτές μεμβράνες μειώνουν σημαντικά την ποσότητα του ημιαγώγιμου υλικού η οποία απαιτείται για κάθε κυψέλη, ως αποτέλεσμα το κόστος τους μειώνεται σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά πυριτίου, που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εξαιτίας της ευελιξίας τους, οι ηλιακές κυψέλες λεπτών μεμβρανών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κεραμίδια στέγης ή κτιρίων, σε προσόψεις κτιρίων ή ως υαλοπίνακες για φεγγίτες.

Ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται, αυτήν την στιγμή στην αγορά είναι διαθέσιμοι τέσσερις τύποι λεπτών μεμβρανών. Το άμορφο πυρίτιο (a-Si) είναι μια μορφή πυριτίου που χάνει σε μεγάλο βαθμό την κρυσταλλική του δομή με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας άμορφης δομής, ωστόσο διατηρεί σε μεγάλο βαθμό της ημιαγωγές ιδιότητες του. Η δομή αυτήν ευνοεί σε μεγάλο βαθμό τις επανασυνδέσεις οπών-ηλεκτρονίων, το οποίο έχει ως συνέπεια την χαμηλή απόδοση του ϕ/β στοιχείου. Αυτός ο τύπος λεπτής μεμβράνης χρησιμοποιεί λιγότερο σπάνια υλικά καθιστώντας το χαμηλότερο σε κόστος κατασκευής. Επιπρόσθετα το υλικό είναι εύπλαστο δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο ϕ/β στοιχεία λεπτού υμένα με πολύ μικρό πάχος και απόδοση γύρω στο 4-8% στο εμπόριο ενώ στο εργαστήριο κυμαίνεται περίπου στο 10,4%, αλλά είναι επιρρεπής στην υποβάθμιση (Paiano, 2015; Τσούτσος et al., 2013).

Στη δεύτερη γενιά, η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη ένωση ημιαγωγών είναι το τελλουριούχο κάδμιο (CdTe), το οποίο σχηματίζεται από κάδμιο και τελλούριο, ένα οικονομικό υλικό, αν και έχει απόδοση έως και 11%, χαμηλότερη από το πυρίτιο, εργαστηριακά η απόδοση φτάνει στο 16%. Σαν αποτέλεσμα τα ϕ/β στοιχεία τελλουριούχο καδμίου απαιτούν μεγαλύτερη επιφάνεια για παρόμοια απόδοση. Ένα πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι πως για την κατασκευή τους απαιτείται λιγότερο ημιαγώγιμο υλικό σε αντίθεση με την περίπτωση του πυριτίου. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως υπάρχουν δυο ανησυχίες σχετικά με αυτήν την τεχνολογία, η πρώτη είναι η δυνητική αρνητική περιβαλλοντική επίπτωση της υψηλής τοξικότητας του καδμίου και η δεύτερη είναι η πιθανή έλλειψη τελλουρίου (Paiano, 2015; Τσούτσος et al., 2013).

Επιπλέον υπάρχει μια τεχνολογία που βασίζεται σε συνδυασμό του άμορφου πυριτίου (a-Si) και του μικροκρυσταλλικού πυριτίου ($\mu\text{c Si}$), το οποίο ονομάζεται Tandem και έχει αναπτυχθεί πρόσφατα. Σε αυτήν την τεχνολογία τα ϕ/β στοιχεία Tandem αποτελούνται από δυο ή περισσότερες στρώσεις διαφορετικών ημιαγώγιμων συνθέσεων που η κάθε μια έχει διαφορετικό ενεργειακό χάσμα έτσι ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί μεγαλύτερο εύρος του ηλιακού φάσματος. Έχει απόδοση έως και 9,8% ενώ εργαστηριακά ξεπερνά το 16,5%, αλλά προς το παρόν έχει μικρό μερίδιο στην αγορά των φωτοβολταϊκών (Paiano, 2015; Τσούτσος et al., 2013).

Τέλος, ο χαλκός, το γάλλιο, το ίνδιο, το (δι)σεληνιούχο/(δι)θειούχο (CIGS) και ο χαλκός, το ίνδιο και το (δι)σεληνίδιο/(δι)σουλφίδιο (CIS) είναι οι πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες για τα ϕ/β στοιχεία λεπτού υμένα (Thin-film solar cells). Παρουσιάζουν την μεγαλύτερη απόδοση από 7% έως και πάνω από 12%, ενώ σε εργαστηριακή κλίμακα

πλησιάζουν στο 20%, μεταξύ των υπολοίπων λεπτών υμένων, αλλά επιβαρύνονται με υψηλότερο κόστος κατασκευής λόγω των πιο πολύπλοκων διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα (Paiano, 2015).



Εικόνα 2.2: (α) Πάνελ άμορφου πυριτίου

(β) Πάνελ Thin Film

2.4.3 Φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς

Οι φωτοβολταϊκές τεχνολογίες τρίτης γενιάς που έχουν αναπτυχθεί είτε αρχίζουν τώρα να διατίθενται στο εμπόριο είτε βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό επίπεδο.

Τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά (CPV) χρησιμοποιούν έναν φακό για να εστιάσουν το ηλιακό φως στις κυψέλες, οι οποίες έχουν ενσωματωθεί στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες. Η ποσότητα αυτών των ημιαγώγιμων υλικών που χρησιμοποιούνται είναι πολύ μικρή και η συλλογή του ηλιακού φωτός είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επειδή αυτό το σύστημα έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί με συγκεντρωτικό ηλιακό φως. Η απόδοση του στην πραγματικότητα είναι πολύ υψηλή της τάξης του 25%. Ωστόσο, επί του παρόντος εξακολουθεί να είναι ακριβό επειδή τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των κυψελών, όπως για παράδειγμα το πυρίτιο ή οι ενώσεις III-IV (γενικά αρσενιούχο γάλλιο), τα οποία είναι εξαιρετικά αποδοτικά αλλά αρκετά ακριβά. Εκτός από το υψηλό κόστος του συστήματος, το κόστος συντήρησης είναι ένα πραγματικό κόστος που συνδέεται με αυτό (Paiano, 2015).

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ευαίσθητης βαφής είναι κατασκευασμένα από ορισμένα υλικά όπως για παράδειγμα το διοξείδιο του τιτανίου, τα οποία καλύπτονται από μια χρωστική ουσία που απορροφά το φως και έχουν γενικά χαμηλότερο κόστος κατασκευής.

Τα οργανικά φ/β στοιχεία αποτελούνται από βιοδιασπώμενα υλικά όπως οργανικά πολυμερή ή μικρά οργανικά μόρια. Επίσης έχουν χαμηλό κόστος λόγω των χαμηλών απαιτήσεων σε υλικά και της επεξεργασίας σε χαμηλή θερμοκρασία, αλλά η

απόδοση τους είναι μόνο 5%. Η αποδόμηση των κυψελών αποτελεί επίσης ένα ζήτημα. Η ουσία της λειτουργίας αυτών των φωτοβολταϊκών είναι πως λειτουργούν βάση της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης, όπως κάνουν οι φυτικοί οργανισμοί (Ραϊάνο, 2015; Τσούτσος et al., 2013).

Τα υβριδικά φ/β στοιχεία εμπλέκονται στο συνδυασμό των τρεχουσών τεχνολογιών και αποτελούν συνδυασμό οργανικών και ανόργανων ημιαγωγών.

Άλλες προηγμένες τεχνολογίες είναι ο παθητικός εκπομπός και η οπίσθια κυψέλη (PERC) και ο παθητικός εκπομπός και η οπίσθια τοπικά διάχυτη κυψέλη (PERL). Τα σχέδια των κυψελών αναπτύσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε τόσο ο εκπομπός όσο και η πίσω πλευρά της κυψέλης παθητικοποιούνται χρησιμοποιώντας ένα λεπτό στρώμα από SiO_2 , οπότε η επιφανειακή παθητικοποίηση βελτιώνει σημαντικά την λειτουργία των κυψελών. Η ηλεκτρική ενέργεια ρέει μέσω μιας επαφής αλουμινίου που καλύπτει το πίσω μέρος του πλακιδίου. Αυτές οι τεχνολογίες παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα απόδοσης, πάνω από 20%, αλλά προς το παρόν βρίσκονται σε προ-εμπορική φάση λόγω του υψηλού κόστους τους (Ραϊάνο, 2015).



Εικόνα 2.3: CPV Πάνελ

2.5 Ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Είναι ευρέως γνωστό πως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα είναι μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες παγκοσμίως. Η ραγδαία αύξηση στην αγορά των φωτοβολταϊκών τις τελευταίες 10ετίες τόσο παγκοσμίως όσο και στην χώρα μας δημιουργεί νέες προκλήσεις όσον αφορά την διαχείριση των αποβλήτων που πρόκειται να παραχθούν εξαιτίας της ευρείας χρήσης τους. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων συνεπάγεται μελλοντικά αύξηση και στα απόβλητα που σχετίζονται με αυτά. Λαμβάνοντας υπόψη την εγκατάσταση των φ/β συστημάτων την δεκαετία του '90 και πως ο προσδόκιμος χρόνος ζωής ενός φωτοβολταϊκού πάνελ είναι 25-30 έτη γίνεται αντιληπτό πως πλέον τα πάνελ αυτά έχουν περατώσει τον κύκλο ζωής τους, επομένως αντιμετωπίζονται ως απόβλητα. Ως απόβλητα πλέον είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη ο τρόπος διαχείρισης τους μετά το τέλος του κύκλου ζωής του, δηλαδή είναι αναγκαίο να μελετηθεί ο τρόπος συλλογής τους, επεξεργασίας, ανάκτησης και ανακύκλωσής τους.

Η ανακύκλωση προφανώς δεν αφορά μόνο τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που θα έχουν ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής τους αλλά αφορά και φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία είναι είτε ελαττωματικά είτε σπασμένα και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αγορά (Ρεντούμης, 2015).

Η διάρκεια ζωής ενός φωτοβολταϊκού καθορίζεται από παράγοντες όπως είναι η αποσύνθεση του οξικού αιθυλενίου βινυλίου (EVA) από το φως του ήλιου, η αποδόμηση εσωτερικών υλικών από εξωτερικές επιδράσεις όπως σπασμένο γυαλί και τα ελαττώματα του φ/β στοιχείου (Kang et al., 2012). Η δομή των φωτοβολταϊκών αποτελείται κυρίως από γυαλί και μέταλλα, όμως λόγω της ύπαρξης τοξικών στοιχείων όπως του Μόλυβδου (Pb), του Καδμίου (Cd) και του Χρωμίου (Cr), η εναπόθεση τους στο περιβάλλον δίχως κάποια επεξεργασία είναι επιβλαβής τόσο για το περιβάλλον όσο και για των άνθρωπο. Επομένως κρίνεται επιτακτική η ανάγκη για την ανακύκλωση τους. Στόχος λοιπόν είναι η επαναχρησιμοποίηση των υλικών που το αποτελούν με ταυτόχρονη εναπόθεση όσο το δυνατόν λιγότερο βλαβερών στοιχείων στο περιβάλλον. Σύμφωνα με μελέτες η ανακύκλωση Φ/Β πλαισίων έχει σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη όταν συνδυάζεται με κατάλληλες πολιτικές (Kang et al., 2012).

2.5.1. Μεθοδολογίες ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πλαισίων

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια εντάσσονται στην κατηγορία αποβλήτων ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ). Μέχρι και σήμερα έχουν προταθεί ποικίλες μέθοδοι και τρόποι ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων αναλόγως την τεχνολογία. Αναλόγως την προέλευση και την τεχνολογία του φωτοβολταϊκού πλαισίου υπάρχει και η αντίστοιχη μεθοδολογία ανακύκλωσης.

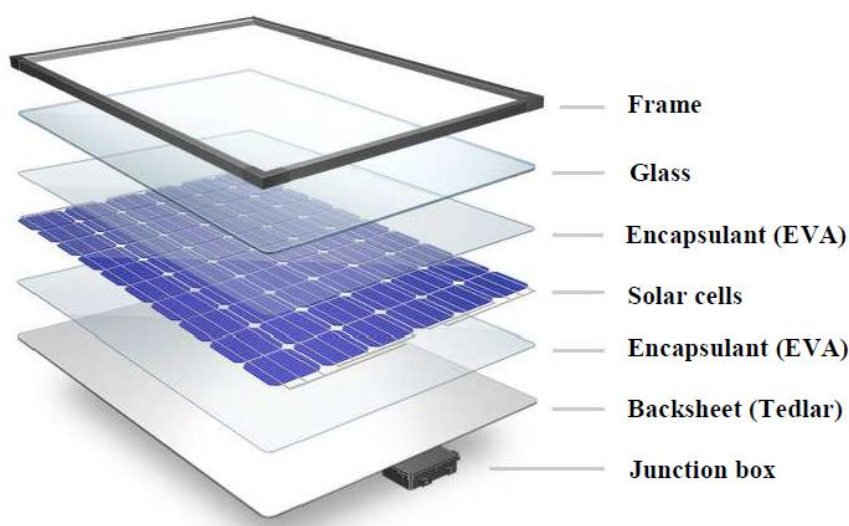
Υπάρχουν διάφορων ειδών φωτοβολταϊκά απόβλητα όπως:

- Φ/β πλαίσια τα οποία έφτασαν το προσδόκιμο όριο ζωής τους και επεστράφησαν στον αρχικό διανομέα ή παραγωγό, ή θεωρήθηκαν ως ελαττωματικά κατά τη διάρκεια ενός ελέγχου ποιότητας που πραγματοποιήθηκε σε μια παραγωγική διαδικασία.
- Φ/β πλαίσια τα οποία απορρίφθηκαν λόγω φθορών που προκλήθηκαν κατά τη χρήση τους, όπως: ραγισμένο προστατευτικό γυαλί, ελαττωματική κόλληση στρώσεων, βλάβες ηλεκτρολογικού χαρακτήρα.
- Υλικά τα οποία αποτελούν κατάλοιπα διάφορων διεργασιών που παίρνουν μέρος στη διαδικασία παραγωγής φ/β πινάκων.
- Καθαρές πρώτες ύλες που παρέμειναν ανεκμετάλλευτες μετά το τέλος ενός ολοκληρωμένου κύκλου παραγωγής (Ρεντούμης, 2015).

2.5.1.1 Ανακύκλωση φ/β πλαισίων 1^{ης} γενιάς

Μέχρι και πριν από λίγα χρόνια, οι μονάδες στο τέλος του κύκλου ζωής τους αντιμετωπίζονταν ως βιομηχανικά απόβλητα στα οποία ανακυκλώνονταν το γυαλί και τα μεταλλικά συστατικά αλλά όχι τα φ/β κελιά πυριτίου (Ρεντούμης, 2015). Ωστόσο καθώς μειώνεται η ποσότητα πυριτίου για την κατασκευή φ/β πλαισίων, η απλή απόρριψη γίνεται όλο ένα και πιο μη αποτελεσματική διαδικασία λόγω κόστους. Στην πλειοψηφία τα πλακίδια που απορρίπτονται είναι άθικτα με αποτέλεσμα να κρίνεται αναγκαία η ανακύκλωση τους βάσει των μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί που στόχο έχουν την δημιουργία νέων κελιών με παρόμοια απόδοση. Πλέον τα κύρια ανακυκλωμένα υλικά είναι το γυαλί, το αλουμίνιο, το πλαστικό, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και τα βαρέα μέταλλα.

Η πιο συχνή δομή φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 2.4: Δομή φωτοβολταϊκού κρυσταλλικού πλαισίου (Strachala et al., 2017)

Η διαδικασία ανακύκλωσης αποτελείται από δυο κυρία στάδια.

- Στο πρώτο στάδιο είναι ο διαχωρισμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Χρησιμοποιώντας χημική ή θερμική διαδικασία, τα κύτταρα διαχωρίζονται στη διαδικασία ανακύκλωσης.
- Στο δεύτερο στάδιο γίνεται ο καθαρισμός της επιφανείας του κυττάρου. Κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας, τα διαχωρισμένα κύτταρα από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια καθαρίζονται είτε χημικά είτε με τεχνικές Laser. Μέσω της διαδικασίας καθαρισμού αφαιρούνται τα ανεπιθύμητα στρώματα (αντανακλαστική επίστρωση, επιμετάλλωση, διασταύρωση PN) και ένα υπόστρωμα πυριτίου το οποίο προετοιμάζεται για την περαιτέρω χρήση του. Η αποκόλληση των φ/β στοιχείων είναι επίσης απαραίτητο για την διαδικασία ανακύκλωσης. Η επίστρωση EVA, το γυαλί, το Tedlar, το πλαίσιο αλουμινίου, ο χάλυβας, ο χαλκός και τα πλαστικά αφαιρούνται και διαχωρίζονται σε αυτό το βήμα (Strachala et al., 2017).

Οι μέθοδοι ανακύκλωσης είναι η θερμική, χημική και η μηχανική επεξεργασία. Από μελέτες συμπεραίνεται πως η ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πλαισίων με την θερμική μέθοδο είναι η πιο συμφέρουσα από τη χρήση της χημικής μεθόδου. Η διάρκεια της διαδικασίας είναι σημαντικά μικρότερη και οικονομικά φθηνότερη. Τα μειονεκτήματα της θερμικής επεξεργασίας είναι ο σχηματισμός αερίων εκπομπής κατά την αποσύνθεση της συμπολυμερούς EVA καθώς και ο κίνδυνος βλάβης των πλακιδίων (Wafers). Όσο αναφορά τη μηχανική ανακύκλωση είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε ποιες τεχνολογίες και ποιος εξοπλισμός είναι κατάλληλος για την δημιουργία θρυμματισμένου υλικού (Strachala et al., 2017)

❖ Χημική ανακύκλωση

Μετά το διαχωρισμό των μονοκρυσταλλικών ή των πολυκρυσταλλικών κελιών από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο τα μεμονωμένα στρώματα αφαιρούνται με την ακόλουθη σειρά: εμπρόσθια επιμετάλλωση, οπίσθια επιμετάλλωση, στρώματα αντανάκλασης και διασταύρωση PN. Βασικό ζήτημα είναι η επιλογή της σωστής σύνθεσης του διαλύματος χάραξης, η συγκέντρωση του και η βέλτιστη θερμοκρασία διεργασίας. Λόγω των χημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα είναι δυνατή η αφαίρεση των υλικών του κατεστραμμένου φωτοβολταϊκού κελιού. Η αποτελεσματικότητα της χημικής μεθόδου δεν είναι κατάλληλη για εμπορική χρήση σε μεγάλη κλίμακα καθώς ο χρόνος της δράσης του διαλύματος χάραξης είναι μεγάλος, χρειάζεται περίπου 20 λεπτά και το κόστος το διαλυτών είναι υψηλό (Strachala et al., 2017).

❖ Θερμική ανακύκλωση

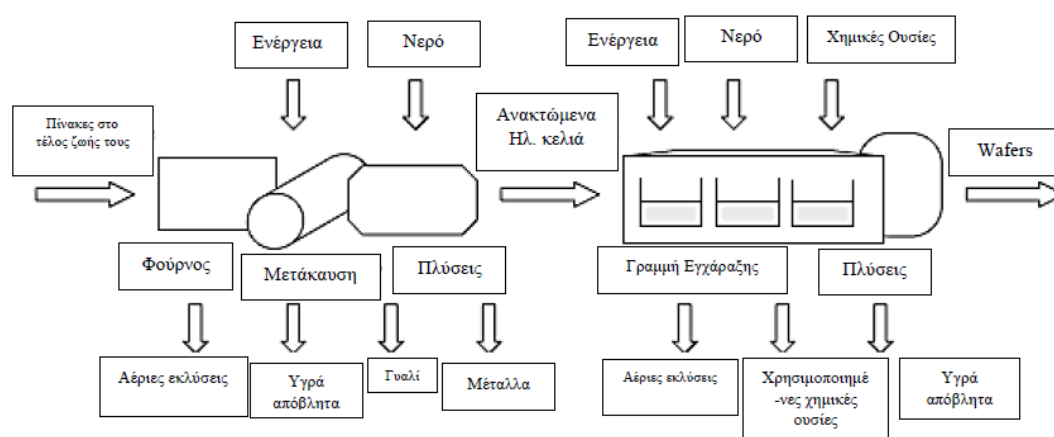
Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για την θερμική ανακύκλωση. Κάποιες είναι καθολικές και άλλες είναι κατάλληλες μόνο για ορισμένους τύπους φωτοβολταϊκών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το αποτέλεσμα της διαδικασίας της θερμικής ανακύκλωσης είναι πρώτη ύλη. Η διάρκεια της διαδικασίας είναι σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με την χημική επεξεργασία. Χρειάζονται περίπου 25 λεπτά για ολόκληρο το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Επίσης δεν υπάρχει πρόβλημα με τους διαλύτες. Το κόστος των χημικών ενώσεων είναι υψηλό, δεδομένου των ποσοτήτων που χρησιμοποιούνται και του πραγματικού κόστους της διάθεσης των αποβλήτων. Τα μειονεκτήματα της θερμικής ανακύκλωσης είναι ο σχηματισμός αερίων εκπομπών κατά την θερμική εξάτμιση της συμπολυμερούς EVA. Η διαδικασία ανακύκλωσης είναι ενεργοβόρα αλλά έως και το 85% των ανακυκλωμένων φ/β στοιχείων μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν και να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας της κατασκευής των νέων φ/β πλαισίων έως και 70%. Αυτή η μέθοδος εξαιτίας της αποτελεσματικότητας της και της υψηλής της απόδοσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εμπορική ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πλαισίων με καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με την χημική μέθοδο (Strachala et al., 2017). Ενδεικτικά αναφέρεται η μέθοδος της Deutsche Solar, η οποία χρησιμοποιεί την μέθοδο της θερμικής ανακύκλωσης.

Η μέθοδος της Deutsche Solar

Η εταιρεία απευθύνεται σε μια ευρεία ποικιλία φ/β πλαισίων πυριτίου, διάφορων μεγεθών και ειδών. Η Solar Material, είναι το τμήμα της εταιρείας το οποίο ασχολείται με διάφορους κλάδους ανακύκλωσης ενώ παράλληλα ειδικεύεται στη διαχείριση των αποσυρόμενων φ/β πλαισίων. Η εταιρεία καλύπτει ένα μεγάλο φάσμα γύρω από τα φωτοβολταϊκά τόσο στο στάδιο παραγωγής όσο και στο στάδιο

απόσυρσης. Ενδεικτικά η εταιρεία αναλαμβάνει κατεστραμμένες πλάκες πυριτίου, σπασμένα φωτοβολταϊκά κελιά, ελαττωματικά παραγόμενα φ/β κελιά, πλαϊνές, άνω και κάτω επιφάνειες πολυκρυσταλλικών ράβδων, κτλ. Η διαδικασία ανακύκλωσης της Deutsche Solar AG αποσκοπεί στην ανάκτηση πλακιδίων, αλουμινίου και την ανακύκλωση γυαλιού και μετάλλων από φ/β πλαίσια.

Στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας, οι πίνακες τοποθετούνται σε έναν ειδικό φούρνο με στόχο την ταχύτερη διαδικασία αποσυναρμολόγησης για τον διαχωρισμό των μεταλλικών τμημάτων από το γυαλί και τα φ/β κελιά με σκοπό την ξεχωριστή διαχείριση των τελευταίων. Το γυαλί και τα μεταλλικά τμήματα δίνονται για επεξεργασία σε εξωτερικούς συνεργάτες εκτός εταιρείας ενώ τα κελιά επεξεργάζονται εντός της εταιρείας. Τα κατεστραμμένα κελιά περιλαμβάνονται και αυτά στο ίδιο κύκλο επεξεργασίας με οξύ. Λόγω της χρήσης του οξέος επιτυγχάνεται η αφαίρεση των επιστρώσεων και της ένωσης p-n. Αποτέλεσμα της ανακύκλωσης είναι μια καθαρή πλάκα/ράβδος πυριτίου η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά για την δημιουργία νέων φ/β κελίων. Κατά την διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας στο φούρνο καταναλώνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας όπως και στον καθαρισμό. Σημαντικό είναι να τονιστεί πως καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας εκλύονται αέρια και υγρά απόβλητα. Επίσης κατά την διάρκεια της χημικής επεξεργασίας χρησιμοποιούνται διαφορετικά χημικά μείγματα. Σύμφωνα με μετρήσεις που έχουν γίνει για την συνολική ενεργειακή απαίτηση της διαδικασίας έχει βρεθεί πως απαιτείται πολύ μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας για την παραγωγή νέων ράβδων πυριτίου (306 kWh) σε σχέση με εκείνες που δημιουργούνται μετά την διαδικασία ανακύκλωσης (92 kWh) (Müller et al., 2006; Ρεντούμης, 2015).



Εικόνα 2.5: Ποή ανακύκλωσης της Deutsche Solar (Ρεντούμης, 2015).

❖ Μέθοδος Καθαρισμού Επιφανειών σε φ/β πλαίσια

Μια άλλη δυνατότητα ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών στοιχείων μετά τον διαχωρισμό τους από την φ/β μονάδα είναι η χρήση της μεθόδου καθαρισμού επιφανειών με λείζερ. Αυτήν η μέθοδος αναπτύχθηκε για την απόκτηση καθαρών υποστρωμάτων πυριτίου. Η προεπεξεργασία των φ/β πλαισίων με λείζερ πριν τον

διαχωρισμό των εξαρτημάτων τους είναι μια πολύ επιτυχημένη τεχνική και χρησιμοποιείται ειδικά σε ορισμένες εταιρείες ανακύκλωσης φ/β πλαισίων στην Γερμανία. Αυτήν η μέθοδος λείζερ έχει συγκριθεί με την χημική χάραξη (chemical etching) της επιφάνειας η οποία αναφέρθηκε στην χημική μέθοδο. Έπειτα από πειράματα βρέθηκε πως η χημική επεξεργασία είναι πολύ πιο συμφέρουσα από την μέθοδο λείζερ. Η μέθοδος λείζερ είναι δαπανηρή και η διαδικασία δεν είναι πολύ αποτελεσματική. Ο χρόνος για την αφαίρεση των στρωμάτων με την μέθοδο λείζερ είναι περίπου 1 min/cm^2 . Είναι δυνατόν να καθαριστεί ολόκληρη η επιφάνεια του κελιού με χημική επεξεργασία κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου (Strachala et al., 2017).

❖ Μηχανική Ανακύκλωση

Η μέθοδος μηχανικής ανακύκλωσης χρησιμοποιείται για πλήρη φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η διαδικασία ανακύκλωσης περιέχει κυρίως μηχανική και υδρομεταλλουργική επεξεργασία. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες αρχικά συνθλίβονται στον θραυστήρα (crusher) και στην συνέχεια τεμαχίζονται στα επιθυμητά κομμάτια μεγέθους περίπου 4-5 mm. Με αυτόν τον τρόπο καταστρέφεται η πλαστικοποίηση του φ/β στοιχείου. Το γυαλί διαχωρίζεται από τα μεγαλύτερα κομμάτια της μεμβράνης του ελάσματος λόγω του μεγέθους της φρέζας. Τα υπόλοιπα τμήματα της μεμβράνης ελάσματος διαχωρίζονται από το θραύσματα γυαλιού στο δίκτυο δόνησης. Στην συνέχεια το διαχωρισμένο γυαλί πλένεται. Όσον αφορά την ποιότητα της εξόδου, καλύτερα αποτελέσματα ανακύκλωσης μπορούν να επιτευχθούν από διαδικασίες που βρίσκονται επί του παρόντος σε πιλοτικό επίπεδο.

Για παράδειγμα, συνδυασμός μηχανικών και θερμικών διαδικασιών επιτρέπουν την ανακύκλωση κρυσταλλικών και λεπτών μεμβρανών φ/β στοιχείων και καθιστούν εφικτή την ανάκτηση πολύτιμων υλικών με υψηλή απόδοση και καλή ποιότητα. Αυτό δημιουργεί πρόσθετα περιβαλλοντικά οφέλη στις ακόλουθες τρεις πτυχές.

1. Τα ανακυκλωμένα θραύσματα χρησιμοποιούνται για την αντικατάσταση του αρχικού υλικού στο γυαλί. Η περιβαλλοντική επιβάρυνση μειώνεται και η απαιτήσεις για πρωτογενή ενέργεια είναι χαμηλότερες.
2. Μείωση του CO_2 κατά την διαδικασία της τήξης. Το βασικό σύνθετο υλικό για την παραγωγή γυαλιού αποτελείται από υλικά που περιέχουν ανθρακικά άλατα όπως ασβεστόλιθος, δολομίτης, ανθρακική σόδα. Προκύπτει πως οι εκπομπές CO_2 σε σχέση με τον άνθρακα που απελευθερώνεται από τα πρωτογενή υλικά είναι περίπου 30% των συνολικών εκπομπών CO_2 . Συμπεραίνεται λοιπόν πως είναι επωφελές να μειωθούν αυτές οι εκπομπές με την χρήση θραυσμάτων γυαλιού αντί για πρωτογενή υλικά.
3. Μείωση της ενέργειας κατά την διαδικασία της τήξης. Χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης του γυαλιού σε σύγκριση με το βασικό υλικό οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας κατά την διαδικασία τήξης του γυαλιού. Η δυνατότητα μειώσεις της ενέργειας κυμαίνεται από περίπου 3% έως 10% των θραυσμάτων γυαλιού. Αυτό θεωρείται ευεργετικό για την μείωση κατανάλωσης καυσίμων και των εκπομπών κατά την διαδικασία τήξης γυαλιού.

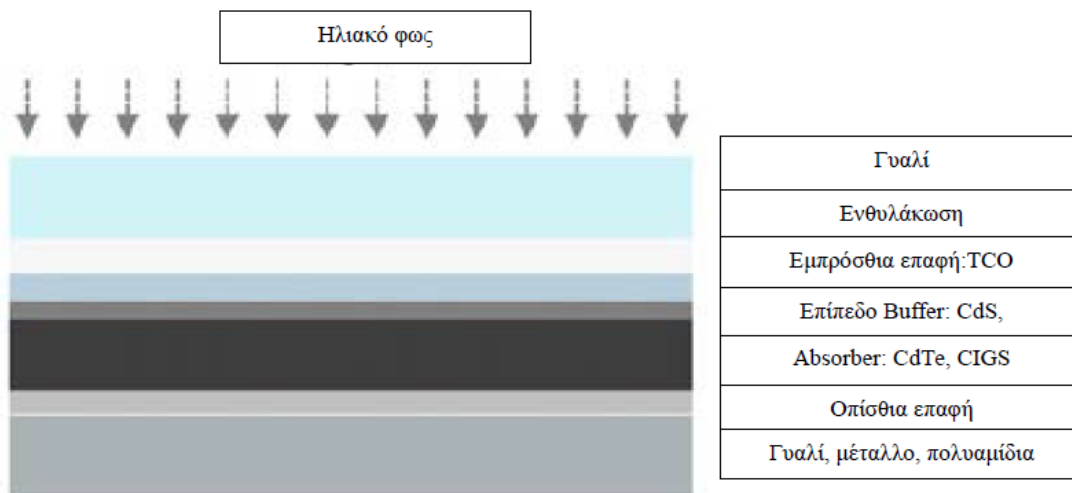
Τα απορρίμματα πλαστικού είναι εξώθερμα κατά την καύση. Αυτήν η ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω και μπορεί εν μέρη να αντικαταστήσει την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.

Για την ανακύκλωση κουτιών, διακλαδώσεις και καλωδίων δεν υπάρχουν συγκεκριμένα δεδομένα σχετικά με την επεξεργασία τους στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Θεωρείται ότι όλα τα πλαστικά υλικά καίγονται σε αποτεφρωτήρα αποβλήτων και τα μεταλλικά μέρη, κυρίως τα χάλκινα βύσματα και καλώδια ανακυκλώνονται με της συνήθεις μεθόδους για τα εν λόγω μέταλλα (Strachala et al., 2017).

Τέλος, από μελέτες προκύπτει ότι για εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα η πυρόλυση σε έναν αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης είναι η καλύτερη τεχνική για την απομάκρυνση της επίστρωσης EVA από το πλαίσιο. Στον αντιδραστήρα, η πολύ λεπτή άμμος επιτυγχάνει φυσικές ιδιότητες ενός υγρού λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και του χαμηλού μεγέθους των κόκκων. Οι συστοιχίες πλακιδίων τοποθετούνται σε αυτή τη ρευστοποιημένη άμμο για 45 λεπτά στους 450°C. Η επίστρωση EVA και το οπίσθιο φύλλο εξατμίζονται και ο ατμός καίγεται, ενεργώντας ως πηγή θερμότητας για τον αντιδραστήρα. Το 80% των κυττάρων που διαχωρίζονται με αυτή τη διαδικασία είναι μηχανικά άθικτα. Μόλις καεί η επίστρωση EVA και το πίσω φιλμ, τα κύτταρα μπορούν να διαχωριστούν φυσικά και να υποβληθούν σε ατομική επεξεργασία (Weadock, 2011; Ρεντούμης, 2015).

2.5.1.2 Ανακύκλωση φ/β πλαισίων 2^{ης} γενιάς

Όσο αναφορά την ανακύκλωση φ/β πλαισίων 2^η γενιάς δηλαδή τα Thin Film πάνελ ένας γενικευμένος τρόπος επεξεργασίας είναι για αρχή η αποκόλληση των στρώσεων. Πιο συγκεκριμένα, είναι αναγκαία η απομάκρυνση του οπίσθιου προστατευτικού φύλλου (Tedlar). Ακολουθείτε λοιπόν μια διαδικασία απομάκρυνσης του οργανικού φύλλου με την χρήση μεθόδων φυσικής αποσύνθεσης δηλαδή τεμαχισμός και άλεση. Από την διαδικασία αυτήν το έλασμα δεν απομακρύνεται πλήρως από το γυάλινο στρώμα με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η περαιτέρω επεξεργασία διαχωρισμού. Αυτήν η επεξεργασία περιλαμβάνει την χρήση ειδικών ουσιών για την ολική απομάκρυνση του φύλλου όπως υδροκοπή, θερμική επεξεργασία, χρήση οξέων-βάσεων, διαλυτών ή κρυογονική ψύξη. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας απομάκρυνσης του οπίσθιου φύλλου (Tedlar) ακολουθεί η απόσπαση των υλικών λεπτού υμενίου από το υπόστρωμα. Η επεξεργασία αυτήν γίνεται με την χρήση υγρών-μηχανικών, ξηρών-μηχανικών μεθόδων και ξηρής χάραξης μέσω οξείδωσης (Granata et al., 2014; Marwede et al., 2013; Ρεντούμης, 2015) .

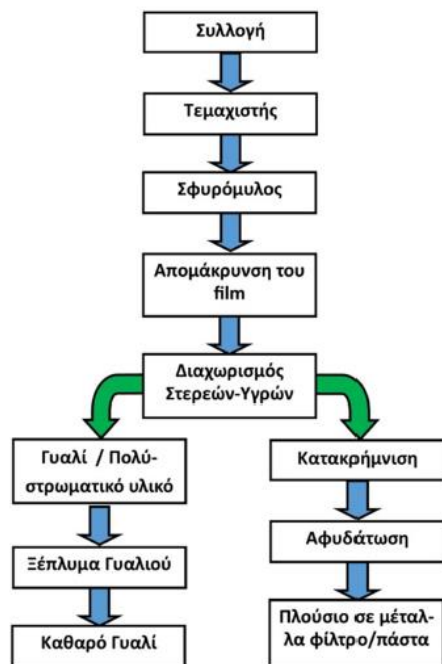


Εικόνα 2.6: Δομή φ/β πλαισίου λεπτής μεμβράνης (Thin Film) (Ρεντούμης, 2015)

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος ανακύκλωσης φ/β πλαισίων λεπτού υμένα είναι αυτήν της First Solar. Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία.

Η μέθοδος της First Solar

Η μέθοδος αυτήν αφορά την διαχείριση φ/β πινάκων λεπτού υμένα τεχνολογίας CdTe. Η συλλογή των πινάκων πραγματοποιείται από την ίδια την εταιρεία και ο πελάτης δεν επιβαρύνεται με καμία περεταίρω χρέωση καθώς η υπηρεσία έχει ήδη προπληρωθεί κατά την αγορά. Η μέθοδος αρχικά αφορούσε την ανακύκλωση μόνο CdTe πλαισίων, ωστόσο πραγματοποιούνται έλεγχοι και για την εφαρμογή της σε πλαίσια τεχνολογίας CIS και CIGS. Η διαδικασία αυτήν λαμβάνει χώρα σε 3 μόνο τοποθεσίες σε όλο τον κόσμο και έχει αποτελεσματική ανακύκλωση 95% για τους ημιαγωγούς, 90% για το γυαλί και 80% για το τελλούριο. Αρχικά γίνεται ο τεμαχισμός των πινάκων σε μεγάλα τμήματα πριν την δημιουργία μικρότερων τεμαχίων μεγέθους 5 mm από ένα ειδικά διαμορφωμένο σφυρόμυλο που σκοπός του είναι η καταστροφή των δεσμών συγκράτησης. Στην συνέχεια, γίνεται η αφαίρεση των μεμβρανών με αργό ρυθμό έπειτα από την τοποθέτηση τους σε πλυντήριο για 4-6 ώρες. Κατά την διάρκεια της πλύσης προστίθενται ασθενές θειικό οξύ και υπεροξείδιο του υδρογόνου για τη επίτευξη του βέλτιστου λόγου στερεού-υγρού. Έπειτα οι μεμβράνες (films) αφαιρούνται με την χρήση οξέος. Το γυαλί ξεχωρίζεται από τα υγρά μέσου ενός διαφοροποιητή. Το υλικό αυτό μεταφέρεται σε μια δονούμενη επιφάνεια στην οποία το γυαλί διαχωρίζεται από την επίστρωση EVA. Το γυαλί περνά μέσα από την δονούμενη επιφάνεια μέσω χοάνης στην διαδικασία πλύσης ενώ η επίστρωση Eva αποθηκεύεται σε άλλο φορέα. Μετά τον καθαρισμό του, το γυαλί αποθηκεύεται σε ειδικό σιλό και τα υγρά καθαρισμού αντλούνται σε ένα σύστημα κατακρήμνισης για την επεξεργασία και συλλογή μετάλλου. Ταυτόχρονα τα μεταλλικά στοιχεία κατακρημνίζονται, διερχόμενα μέσα από τρία στάδια με αυξημένο pH υδροξειδίου του νατρίου. Μετά την κατακάθιση των στερεών ακολουθεί η μεταφορά σε ένα εξωτερικό συνεργάτη με σκοπό την μετατροπή σε πρώτη ύλη για την δημιουργία ημιαγωγών που θα χρησιμοποιηθούν σε νέους φ/β πίνακες (Fthenakis, 2000; Marwede et al., 2013; Ρεντούμης, 2015).



Εικόνα 2.7: Ροή ανακύκλωσης της First Solar (Γκουλιούμη, 2018)

2.6 Ανάκτηση υλικών

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου (C-Si) είναι η πιο διαδεδομένη φωτοβολταϊκή τεχνολογία μέχρι και σήμερα και καταλαμβάνει πάνω από το 80% της αγοράς, το υπόλοιπο 20% αποτελείται από τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης (Thin film) όπως για παράδειγμα CdTe, CIGS, a-Si (Ρεντούμης, 2015). Τα επόμενα χρόνια η ισορροπία αναμένεται να αλλάξει με την αύξηση της εφαρμογής των νέων τεχνολογιών έναντι των τωρινών δεδομένων. Σε οποιαδήποτε περίπτωση η ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση και ανάκτηση υλικών θεωρούνται βασικό κομμάτι για την τύχη των φωτοβολταϊκών μετά το τέλος του κύκλου ζωής του. Με βάση τα σημερινά δεδομένα της αγοράς την περίοδο 2030-2050, τα μέταλλα τα οποία αναμένεται να ανακτηθούν από την ανακύκλωση των φ/β πάνελ θα είναι κυρίως το πυρίτιο (Si), ο άργυρος (Ag), ο χαλκός (Cu) και το αργίλιο (Al), τα οποία είναι υλικά που αποτελούν τα φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς (Γκουλιούμη, 2018).

2.6.1 Ανάκτηση υλικών φ/β πλαισίων πυριτίου

Το μεγαλύτερο ποσοστό κατά βάρος των κρυσταλλικών μονάδων αποτελείται από γυαλί σε ποσοστό περίπου 60-70% και από πλαίσιο αλουμινίου σε ποσοστό 20%. Για τα πλαίσια λεπτής μεμβράνης, το ποσοστό του γυαλιού και του αλουμινίου υπερβαίνει το 95%. Τα δυο αυτά υλικά ανακυκλώνονται πλήρως. Τα υπόλοιπα μέταλλα τα οποία περιέχονται στα πλαίσια είναι ακριβά και αξίζει να ανακτηθούν από τα απόβλητα. Τα πλαστικά μπορούν να ανακυκλωθούν εν μέρει ή και καθόλου.

Το αλουμίνιο (Al) μπορεί εύκολα να ανακυκλωθεί με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η απόδοση του πλησιάζει το 100%. Είναι το τρίτο πιο άφθονο στοιχείο στο φλοιό της Γης. Το πιο κοινό πέτρωμα με βάση το αλουμίνιο είναι ο βωξίτης. Η εξόρυξη του βωξίτη είναι μια διαδικασία η οποία επιβαρύνει σε μεγάλο βαθμό το περιβάλλον. Επομένως, η ανακύκλωση του είναι ζωτικής σημασίας. Περίπου ένας τόνος καθαρού αλουμινίου παράγεται από 4 τόνους εξορισμένου βωξίτη. Κατά την παραγωγή του αλουμινίου παράγεται ένα απόβλητο σε μεγάλες ποσότητες το οποίο είναι τοξικό και είναι γνωστό ως ερυθρά ιλύς (red sludge).

Το γυαλί είναι ένα βασικό στοιχείο το οποίο δεν μπορεί να αντικατασταθεί ή να αποφευχθεί. Η ανακύκλωση του μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή του κατά περίπου 40%. Στις περισσότερες περιπτώσεις το ανακυκλωμένο γυαλί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του ίδιου προϊόντος.

Τα πλαστικά εξαρτήματα λόγω της υποβάθμισης τους εξαιτίας των καιρικών συνθήκων είναι δύσκολο να ανακυκλωθούν. Ωστόσο είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί θερμική ενέργεια κατά την καύση τους.

Τα βαρέα μέταλλα αποτελούν αμελητέα στοιχεία όσον αναφορά το βάρος, την τιμή και την ενεργειακή κατανάλωση στα φ/β πάνελ. Ο μόλυβδος περιέχεται σε ποσοστό 0,12% του βάρους του φ/β πάνελ, ο άργυρος το 0,14% , ο κασσίτερος το 0,12% και ο χαλκός το 0,37%. Η ανακύκλωση τους είναι απαραίτητη καθώς τα βαρέα μέταλλα είναι τοξικά. Στην περίπτωση του αργύρου, το οποίο είναι ένα σπάνιο μέταλλο, η εκμετάλλευση των αποθεμάτων είναι ένα σημαντικό ζήτημα καθώς όσο θα μειώνονται οι ποσότητες του τόσο θα αυξάνεται το κόστος εξόρυξης του. Τα αποθέματα του υπολογίζονται σε 540.000 τόνους. Η απόδοση του κυμαίνεται από 40 έως 65%. Λαμβάνοντας υπόψη τους ρυθμούς εξόρυξης όλος ο άργυρος θα συγκομιζόταν σε περίπου 17 χρόνια. Έπειτα θα υπάρχει μόνο μια πηγή αργύρου και αυτή θα προκύπτει από τις διαδικασίες ανακύκλωσης. Σχετικά με τον χαλκό τα αποθέματα εκτιμώνται σε 720 εκατομμύρια τόνους. Η απόδοση της ανακύκλωσης του κυμαίνεται από 78% έως 100% καθώς η τεχνολογία επεξεργασίας είναι πολύ προηγμένη.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αντιπροσωπεύουν ένα μικρό μερίδιο στο βάρος των φ/β μονάδων. Ωστόσο τα φωτοβολταϊκά κελιά συμβάλλουν κατά 50% στην τιμή του πλαισίου και 80% στην κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή τους. Από την άποψη των υλικών, τα ηλιακά κελιά παραμένουν αμετάβλητα στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Η ανακύκλωση τους έχει ήδη αναφερθεί (Strachala et al., 2017).

Οι άθικτες πλάκες πυριτίου ανακυκλώνονται σε νέα κελιά αποδίδοντας παρόμοια ποσοστά απόδοσης με τα αρχικά της τάξεως 15-16,4% για μονοκρυσταλλικά κελιά και 12,7-15,9% για πολυκρυσταλλικά. Από τις μεθοδολογίες που έχουν αναφερθεί για την ανακύκλωση φ/β κελίων πυριτίου τα ποσοστά ανάκτησης των υλικών είναι για το γυαλί περίπου 90%, το πλαίσιο αλουμινίου 100%, τα φ/β κελιά 90% και οι ταινίες (Ribbons) 95% (Ρεντούμης, 2015).

Η μέθοδος της Loser Chemie αποδείχθηκε χρήσιμη εξαιτίας της σπανιότητάς των μετάλλων (Al, Ag, κ.α.) σε συνδυασμό με την υψηλή τους εμπορική αξία. Με την βοήθεια χημικής επεξεργασίας, ειδικότερα της χρήση διαλύματος χλωριούχου αργιλίου επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του φύλλου αλουμινίου από την οπίσθια επιφάνεια των

φ/β κελίων πυριτίου επιτυγχάνοντας παράλληλα την ανάκτηση του πολυτίμου παραπροϊόντος $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$ το οποίο αξιοποιείται στην βιομηχανία χαρτιού και σε μονάδες επεξεργασίας υδάτινων λυμάτων. Έπειτα με την χρήση νιτρικού αργυρού καθίσταται δυνατή η παράγωγή σωμάτων πυριτίου κατάλληλα για τήξη και επαναχρησιμοποίηση σε παραγωγή φ/β κελίων. Θεωρείται πως η χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα έχει καλύτερα αποτελέσματα από την χρήση υδροξειδίου του νατρίου. Τέλος, η ανάκτηση του αργύρου που βρίσκεται στις εμπρόσθιες επαφές του πίνακα πυριτίου γίνεται με χρήση νιτρικού οξέος (Ρεντούμης, 2015).

Με την μέθοδο της Solar World μπορεί να επιτευχθεί η ανάκτηση έως και του 84% του αρχικού βάρους που εισήχθη διατηρώντας παράλληλα υψηλό βαθμό καθαρότητας. Το γυαλί μπορεί να ανακυκλωθεί σε ποσοστό μεγαλύτερο από 90%, ενώ το 95% των ημιαγωγών επαναχρησιμοποιείται σε νέες πλάκες πυριτίου μετά από τήξη. Από την θερμική επεξεργασία ανακτάται το 80-98% των φ/β κελίων λαμβάνοντας μόνο υπόψιν την ζημιά που είχαν υποστεί πριν την επεξεργασία, το είδος της δομής του πίνακα και το είδος των κελίων. Πλάκες πυριτίου με πάχος μεγαλύτερο από 200 μm θραύονται ευκολότερα και μπορούν να υποστούν τη διαδικασία όπου εφαρμόζονται οξέα αποδίδοντας ποσοστό ανάκτησης πάνω από 97% (Ρεντούμης, 2015).

Γενικά τα ποσοστά ανακύκλωσης των μετάλλων βάσης, όπως είναι ο κασσίτερος (Zn), ο σίδηρος (Fe) και ο χαλκός (Cu) και των πολύτιμων μετάλλων, όπως του άργυρου (Ag) και του λευκόχρυσου (Pt) είναι μεταξύ 27-41% και 18-65%, αντίστοιχα, που είναι και τα υψηλότερα από όλα τα φ/β υλικά (Γκουλιούμη, 2018).

2.6.2 Ανάκτηση υλικών φ/β πλαισίων λεπτής μεμβράνης (Thin Film)

Η ανακύκλωση φ/β πλαισίων λεπτής μεμβράνης (Thin Film) τεχνολογίας CdTe και CIGS (χαλκό, ίνδιο, γάλλιο, γερμάνιο και σελήνιο) θεωρείται απαραίτητη για την ανάκτηση των μετάλλων υψηλής αξίας που έχουν χρησιμοποιηθεί. Το ίνδιο (In) και το γάλλιο (Ga) θεωρούνται από την Ευρώπη κρίσιμες πρώτες ύλες οπότε η ανάκτηση τους είναι ζωτικής σημασίας. Από τα φωτοβολταϊκά πάνελ τελλουριούχο καδμίου (CdTe) το κάδμιο (Cd) είναι τοξικό και το τελλούριο (Te) είναι ένα σπάνιο μέταλλο το οποίο λαμβάνεται ως παραπροϊόν από την επεξεργασία των ορυκτών χαλκού, μόλυβδου, χρυσού και βισμούθιου (Γκουλιούμη, 2018).

Όπως ήδη έχει αναφερθεί στην μεθοδολογία ανακύκλωσης φ/β πλαισίων δεύτερης γενιάς λαμβάνουν χώρα διάφορες υδρό-μηχανικές, ξηρό-μηχανικές μέθοδοι και ξηρή χάραξη μέσω οξείδωσης. Στη περίπτωση των υδρό-μηχανικών μεθόδων η επεξεργασία προσαρμόζεται ανάλογα με την κατάσταση του πλαισίου. Αν δεν είναι κατεστραμμένο δύναται να ανακτηθούν έως και 25% των χρήσιμων υλικών ποσοστό που μπορεί να αυξηθεί με την επανάληψη της διαδικασίας. Επιπλέον επιτυγχάνεται ανάκτηση περίπου 12% του Te και 35% του In. Στην περίπτωση που οι φ/β πίνακες είναι κατεστραμμένοι με την χρήση υγρό-μηχανικών μεθόδων οι ποσότητες του Cd και Te περιορίζονται κάτω από τα επιτρεπτά όρια. Με την μέθοδο της ξηρής χάραξης μέσω οξείδωσης το Cd και το Te εγκλωβίζονται σε χλωριούχες ενώσεις. Μια εναλλακτική προσέγγιση για την ανάκτηση του CdTe είναι η εφαρμογή οξειδωτικών μέσων σε θερμό περιβάλλον (Ρεντούμης, 2015).

Για την επαναχρησιμοποίηση των ημιαγωγών και των μετάλλων τα οποία είναι απαραίτητα για την κατασκευή των φ/β πάνελ είναι απαραίτητη η άριστη καθαρότητα τους. Για τον λόγο αυτόν απαιτείται προ-επεξεργασία των υλικών για εξαγνισμό και εμπλουτισμό. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία χημικών μεθόδων επεξεργασίας που εφαρμόζονται για την ανάκτηση μετάλλων από διαλύματα που έχουν δημιουργηθεί μέσω καθίζησης, ηλεκτρόλυσης, ανταλλαγής ιόντων και οξείδωση. Η απομάκρυνση υλικών όπως το κάδμιο (Cd), το τελλούριο (Te), το ίνδιο (In) και το γάλλιο (Ga) είναι μια λεπτή διεργασία με προσεγγμένες παραμέτρους επεξεργασίας με τις διεργασίες να κατατάσσονται στις υδρομεταλλουργικές και πυρομεταλλουργικές διεργασίες.

Η μέθοδος της 5N PLUS ασχολείται με την ανακύκλωση φ/β πινάκων λεπτής μεμβράνης και την παροχή υψηλής καθαρότητας μετάλλων και πρώτων υλών (Cd, Ga, Ge, Te, Zn, Se, Sn και In) για φ/β πίνακες. Η διαδικασία της ανακύκλωσης που χρησιμοποιείται από την εν λόγω εταιρεία είναι η απομάκρυνση κολλητικών στρωμάτων, η απομάκρυνση των οργανικών στοιχείων, και η ανάκτηση των μετάλλων. Η διαδικασία αυτή αξίζει να σημειωθεί πως εφαρμόζεται σε άθικτους ή ελαφρώς ταιπωρημένους φ/β πίνακες. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι αυτή της φυσικής αποσύνθεσης, της θερμικής και χημικής επεξεργασίας και της έκθεσης σε ακτινοβολία. Τα υλικά που περιέχουν κάδμιο (Cd) και τελλούριο (Te) και CIGS επεξεργάζονται ξεχωριστά. Αρχικά, για τα πάνελ CdTe, πραγματοποιείται ηλεκτρόλυση για την ανάκτηση τους. Μετά το τέλος του πρώτου σταδίου, από τα υγρά των πλύσεων, μετά από εξευγενισμό και απομάκρυνση προσμίξεων, ανακτάται το Cd. Από τα υπολείμματα του πρώτου σταδίου και παρουσία αλκαλικού περιβάλλοντος μετά από ηλεκτρόλυση απομονώνεται το Te ύστερα από εξευγενισμό. Αξίζει να τονιστεί πως το CdTe, το οποίο δεν αντέδρασε και παρέμεινε ως το τέλος υπόκειται σε επανεπεξεργασία. Επιπρόσθετα για τα πλαίσια που περιλαμβάνουν CIGS, ο διαχωρισμός γίνεται με την σταδιακή απόσπαση του Se, του Cu, του In και του Ga στο ίδιο στάδιο (Ρεντούμης, 2015).

Η μέθοδος της ANTEC Solar για την ανακύκλωση των thin films πάνελ αποφεύγει την χρήση υγρό-χημικών μεθόδων και δίνει βαρύτητα στην πραγματοποίηση των διαδικασιών παρουσία αερίων. Στην διάρκεια της χημικής επεξεργασίας δημιουργούνται αέρια CdCl_2 και TeCl_4 , ενώσεις οι οποίες συμπυκνώνονται και καθιζάνουν μέσω συστήματος ψύξης πετυχαίνοντας τον διαχωρισμό τους εξαιτίας της διαφορετικής θερμοκρασίας αεριοποίησης.

Η μέθοδος της PrimeStar Solar πλεονεκτεί γιατί η μεθοδολογία της στηρίζεται στις χαμηλές απαιτήσεις σε ποσότητες οξέων σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες και πετυχαίνει ανάκτηση του 80% της συνολικής ποσότητας CdTe του αρχικού φ/β πάνελ.

Τέλος, η μέθοδος της Loser-Chemie GmbH για την ανάκτηση πολυτίμων μετάλλων από φ/β πίνακες CdTe και CIGS μετά την πυρόλυση εφαρμόζει χημική επεξεργασία χρησιμοποιώντας οξέα όπως υδροχλωρικό οξύ και υπεροξείδιο του υδρογόνου. Ύστερα από τις πλύσεις με τα οξέα, καθίστατε εφικτή η ανάκτηση μετάλλων από τα πλαίσια όπως το τελλούριο, το κάδμιο, το ίνδιο, ο ψευδάργυρος, το μολυβδαίνιο, το σελήνιο και το γάλλιο (Ρεντούμης, 2015).

Από μελέτες προκύπτει ότι η ανάκτηση του γαλλίου (Ga) από βωξίτη κυμαίνεται περίπου στο 28-67% ενώ στην πραγματικότητα η ανάκτηση είναι 2%. Η ανάκτηση ινδίου (In) από ορυκτό ψευδάργυρο μπορεί θεωρητικά να είναι 64-73% ενώ ανέρχεται

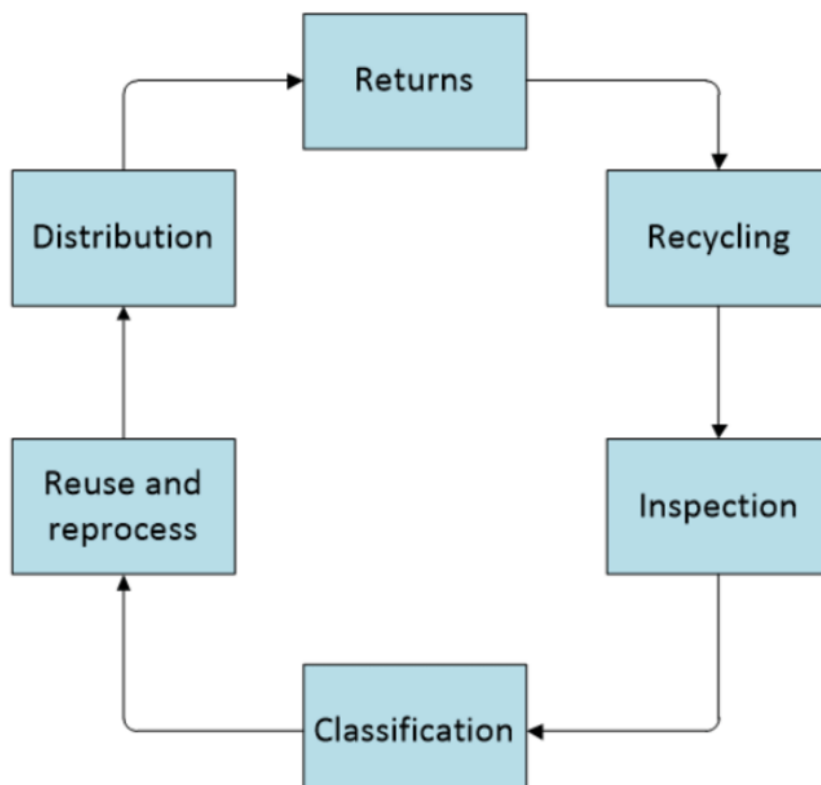
σε 15-20% και η ανάκτηση τελλουρίου από λάσπη ανόδου χαλκού θεωρητικά είναι 70-90% ενώ στην πραγματικότητα είναι 35% (Γκουλιούμη, 2018).

2.7 Αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα

Η αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα ή αλλιώς η διαχείριση των εμπορευμάτων είναι μια σημαντική λειτουργία των επιχειρήσεων εφοδιαστικής αλυσίδας. Οι επιστροφές αποτελούν ένα σημαντικό μέρος του κόστους των διαδικασιών logistics, το οποίο αυξάνεται στις περιπτώσεις που παρουσιάζονται προβλήματα στην διαχείριση τους. Υπάρχουν έξι βασικά στάδια τα οποία περιλαμβάνονται στην διαδικασία την αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας και είναι τα εξής:

1. Η συλλογή των εμπορευμάτων προς επιστροφή από τον υπεύθυνο της εταιρείας.
2. Η μεταφορά των εμπορευμάτων. Ανάλογα με το είδος της επιστροφής υπάρχουν ειδικοί κανονισμοί στο πως εκτελείται η μεταφορά.
3. Η παραλαβή, στο βήμα αυτό τα επιστρεφόμενα εμπορεύματα παραλαμβάνονται από την εταιρεία και γίνεται η εισαγωγή τους στο σύστημα διαχείρισης επιστροφών της εταιρείας.
4. Ο έλεγχος, στο στάδιο αυτό τα εμπορεύματα ελέγχονται σχετικά με την κατάσταση στην οποία βρίσκονται.
5. Η διαλογή, κατά την οποία τα εμπορεύματα κατατάσσονται ανά κατηγορία.
6. Η διαχείριση, στο τελευταίο βήμα τα εμπορεύματα ανάλογα με την χρήση τους δηλαδή ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση, καταστροφή λαμβάνουν και την αντίστοιχη διαχείριση.

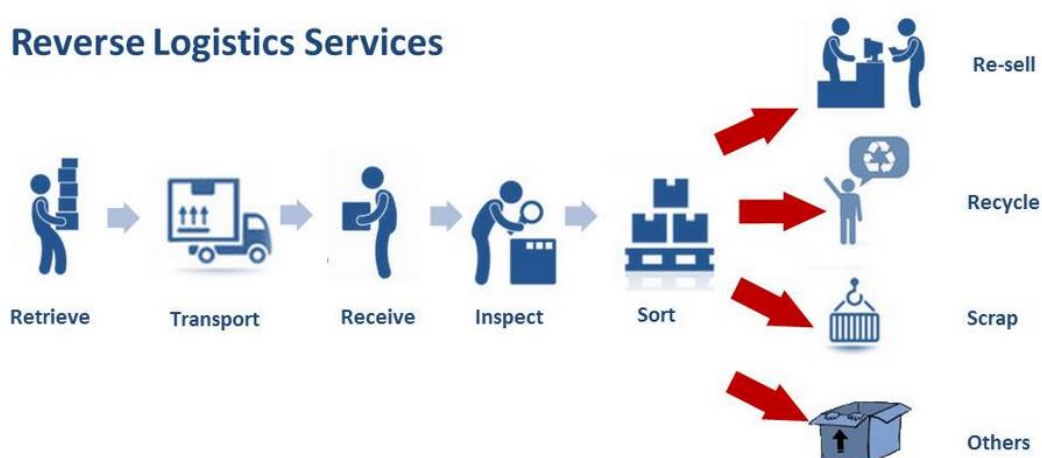
Σε όλα τα παραπάνω στάδια κρίνεται σημαντικό να υπάρχει η ροή της πληροφορίας που συνοδεύει τα επιστρεφόμενα εμπορεύματα (Ντούφας et al., 2016). Οι Εικόνες 2.8 και 2.9 απεικονίζουν τα 6 αυτά στάδια.



Εικόνα 2.8: Ροή αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας

Ένα

Reverse Logistics Services



Εικόνα 2.9: Στάδια αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας

Από τα σημαντικότερα προβλήματα που προκύπτουν σχετικά με την ανακύκλωση φ/β πινάκων είναι η απουσία ολοκληρωμένης υποδομής ικανής να υποστήριξη την πλήρη επεξεργασία τους (Fthenakis, 2000; Weadock, 2011). Αναφορικά με την πλήρη επεξεργασία ανακύκλωσης κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη δυο κυρίων τμημάτων. Πρώτον, η ύπαρξη μιας μεθόδου παραλαβής και μεταφοράς των αποσυρόμενων φ/β πινάκων από τον καταναλωτή ή τον αντιπρόσωπο και δεύτερον κέντρα καταλληλά για την αποδοχή και πλήρη διεκπεραίωση της διαδικασίας ανακύκλωσης (Ρεντούμης, 2015) . Με αλλά λογία, κρίνεται αναγκαία η δημιουργία μιας αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας.

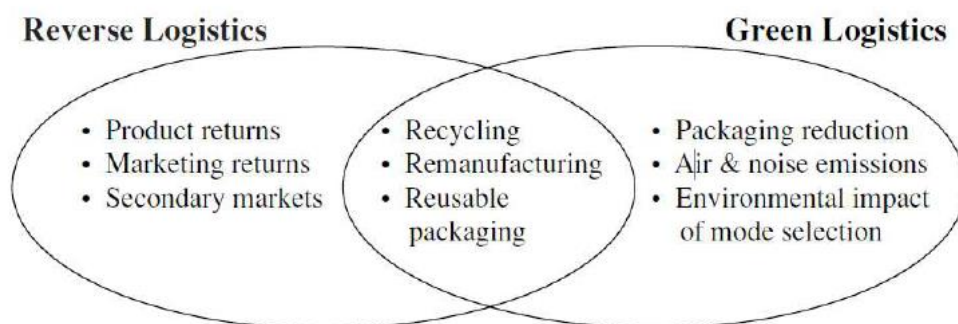
Στην περίπτωση της Ελλάδας, η δημιουργία ενός βιώσιμου συστήματος ανακύκλωσης φ/β αποβλήτων καθίσταται περίπλοκο ζήτημα λόγω της διάσπαρτης παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από φ/β συστήματα και λόγω της ασφάλειας και της ομαλής λειτουργίας του δικτύου ηλεκτροδότησης. Μέχρι στιγμής έχουν προταθεί ορισμένες πιθανές λύσεις στο παραπάνω ζήτημα (Fthenakis, 2000; Weadock, 2011). Πιο συγκεκριμένα,

- i. Εταιρείες κοινής ωφέλειας, κατασκευαστές φ/β ή κέντρα ανακύκλωσης ηλεκτρονικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού θα πραγματοποιούν την συλλογή και την ανακύκλωση των φ/β πλαισίων. Εταιρείες μεγάλων φ/β εγκαταστάσεων θα είναι υπεύθυνες για την μεταφορά και την ανακύκλωση των πάνελ στα κατάλληλα κέντρα συλλογής και επεξεργασίας. Τα κόστη που προκύπτουν θα μπορούν να περιλαμβάνονται στο αρχικό κόστος της αγοράς των πλαισίων και να βαραίνουν τον καταναλωτή. Παρόλα αυτά εταιρείες κοινής ωφέλειας με μεγάλες φ/β εγκαταστάσεις στην κατοχή τους είναι ελάχιστες, επομένως η λύση αυτή πιθανόν να μην είναι βιώσιμη υπό αυτές τις συνθήκες.
- ii. Η δεύτερη λύση αντιγράφει την μέθοδο που ήδη εφαρμόζεται από τις εταιρείες ηλεκτρονικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Οι κατασκευαστές των φ/β συστημάτων θα είναι υπεύθυνοι για την μεταφορά και την αποσυναρμολόγηση μετά το πέρας τους κύκλου ζωής τους σε κέντρα ανακύκλωσης ηλεκτρονικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Το κόστος της μεταφοράς στο κέντρο ανακύκλωσης μπορεί να επωμιστεί είτε στον κατασκευαστή είτε στον καταναλωτή και το κέντρο ανακύκλωσης μπορεί να επωφεληθεί από τα έσοδα που προκύπτουν από την πώληση των ανακτημένων υλικών.
- iii. Ως τρίτη λύση προτείνεται ο τρόπος λειτουργίας των κέντρων συγκέντρωσης συσσωρευτών όπως της μπαταρίας. Στην δεδομένη μέθοδο χρησιμοποιούνται αλυσίδες ανάκτησης προϊόντων ή περιοδικής συλλογής των μη-λειτουργικών φ/β πλαισίων από κέντρα συλλογής. Οι καταναλωτές θα έχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν τα απόβλητα σε κέντρα συλλογής ή μέσω συνεννόησης να είναι εφικτή η παραλαβή από τον χώρο μέσω κατάλληλων μεταφορικών μέσων. Το κόστος που προκύπτει μπορεί να περιλαμβάνεται στην τιμή αγοράς ή να εξοφλείται στο τέλος ζωής των φ/β πάνελ κατά την απόσυρση του. Μετά την συλλογή τα πλαίσια θα παραδίδονται προς ανακύκλωση.

Η δημιουργία λοιπόν μεγάλων κέντρων επεξεργασίας και ανακύκλωσης φ/β αποβλήτων θα μπορούσε να επιτευχθεί με την επέκταση-αναβάθμιση των ήδη υπάρχοντων εγκαταστάσεων ανακύκλωσης και πρωτοκόλλων επεξεργασίας (Ρεντούμης, 2015). Στην Ελλάδα μέχρι στιγμής δεν έχει πραγματοποιηθεί μια ολοκληρωμένη διαδικασία ανακύκλωσης φ/β πλαισίων. Προς το παρόν, έχουν δημιουργηθεί συγκεκριμένα κέντρα συλλογής τα οποία πραγματοποιούν τη διαλογή των διάφορων τμημάτων των πλαισίων με σκοπό την προώθηση τους σε κέντρα ανακύκλωσης άλλων ευρωπαϊκών χωρών. Η εταιρεία PV CYCLE, σύμφωνα με μια πρόσφατη αναφορά στην Ελλάδα διαθέτει 8 σημεία συγκέντρωσης φωτοβολταϊκών αποβλήτων (Ρεντούμης, 2015). Επιπλέον, η εταιρεία Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε. διαθέτει εκατοντάδες σημεία συγκέντρωσης ηλεκτρολογικών και ηλεκτρονικών συσκευών και πλέον προσπαθεί να εντάξει και τη συγκέντρωση φ/β πλαισίων προς ανακύκλωση (Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε., 2023).

Είναι ευρέως γνωστό πως κατά βάση οι παραγωγοί έχουν την τάση να μην νιώθουν υπεύθυνοι για το τι θα απογίνουν τα προϊόντα τους μετά την χρήση τους από τους καταναλωτές. Στο παρελθόν η πλειονότητα των χρησιμοποιημένων προϊόντων ή όπως αλλιώς αποκαλούνται των προϊόντων που έχουν φτάσει στο τέλος του κύκλου της ζωής τους κατέληγε σε χωματερές ή αποτεφρωνόταν με σημαντική ζημιά για το περιβάλλον. Αυτός ο τρόπος αντιμετώπισης πλέον έχει σταματήσει να συμβαίνει λόγω των περιβαλλοντικών νομοθεσιών. Λόγου αυτού λοιπόν, πολλοί κατασκευαστές αναγκάστηκαν να βρουν τρόπους ώστε να ανακυκλώνουν τα προϊόντα τους μετά από την χρήση τους από τους πελάτες τους. Δημιουργείτε έτσι, η ανάγκη ύπαρξης ενός δικτύου που θα υποστηρίξει τη ροή των προϊόντων ή των υλικών τους από τον τελικό χρήστη πάλι πίσω στον παραγωγό. Με την διαχείριση αυτού του δικτύου ασχολείται η αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα. Συγκεκριμένα, η αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα περιλαμβάνει δραστηριότητες Logistics όπως η κατασκευή δικτύου, ροή πληροφοριών, μεταφορά, απογραφή αποθεμάτων, αποθήκευση, διαχείριση υλικών και συσκευασία των ήδη χρησιμοποιημένων προϊόντων ώστε να διατεθούν ξανά στην αγορά (Αραμπατζής, 2021).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η οικονομική πτυχή της αντίστροφης εφοδιαστικής αλλά και η πράσινη-οικολογική της πτυχή. Η αντίστροφη εφοδιαστική έχει εξελιχθεί και περιγράφεται ως μια προσπάθεια μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της εφοδιαστικής αλυσίδας. Επομένως, θα μπορούσε να ονομαστεί και ως πράσινη εφοδιαστική ή περιβαλλοντική εφοδιαστική. Η περίπτωση της ανακύκλωσης φ/β αποβλήτων είναι μια δραστηριότητα που κατατάσσεται και στην αντιστροφή αλλά και στην πράσινη εφοδιαστική ταυτόχρονα. Στην Εικόνα 2.10 που ακολουθεί φαίνεται που διαφοροποιούνται οι δυο έννοιες και που συμπίπτουν (Αραμπατζής, 2021).



Εικόνα 2.10: Αντίστροφη και Πράσινη Εφοδιαστική (Αραμπατζής, 2021)

Η έννοια της πράσινης εφοδιαστικής ή αλλιώς Green Logistics δημιουργήθηκε από την ανάγκη του ανθρώπου για ένα καθαρότερο περιβάλλον με καλύτερες συνθήκες διαβίωσης. Η περιβαλλοντικές επιπτώσεις που δημιουργούνται από την εφοδιαστική αλυσίδα προκύπτουν λόγω των συστημάτων μεταφορών που χρησιμοποιούνται, των υλικών συσκευασίας, την αύξηση ή επέκταση των αποθηκών και αλλά πολλά. Οι περιβαλλοντικές πρωτοβουλίες που λαμβάνονται υπόψιν λοιπόν οδηγούν στην δημιουργία δραστηριοτήτων όπως η μεταφορά, η διανομή, η συλλογή που είναι πιο φιλική στο περιβάλλον και ταυτόχρονα αποτελεσματική. Η περιβαλλοντική ευαισθησία και η στροφή στην προσπάθεια εφαρμογής της κυκλικής

οικονομίας ανέπτυξε νέες αγορές όπως αυτές της ανακύκλωσης, επαναχρησιμοποίησης και της σωστής διαχείρισης των αποβλήτων.

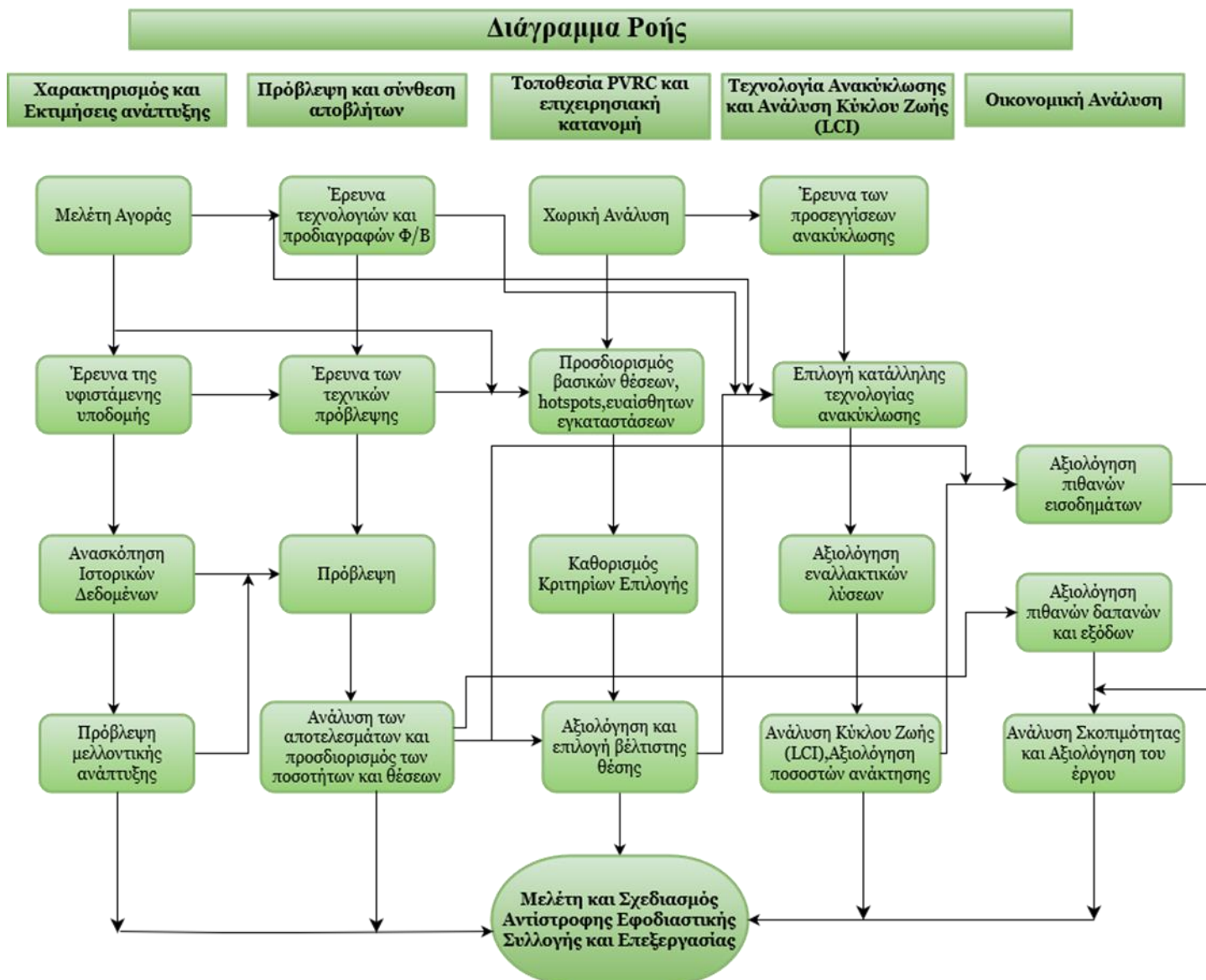
Στόχος της πράσινης εφοδιαστικής αλυσίδας είναι η βελτίωση των λειτουργιών έτσι ώστε να αποφεύγονται και να προλαμβάνονται όσο πιο άμεσα και σε μεγαλύτερο βαθμό τα αποτελεσματικά της που επιβαρύνουν το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Για την επίτευξη του στόχου αυτού λαμβάνονται μέτρα σχετικά με το δίκτυο διανομής της αλυσίδας και αφορούν την τροποποίηση των λειτουργιών της, τις πολιτικές και νομοθετικές παρεμβάσεις κυρίως στις μεταφορές, τη σωστή διαχείριση επικίνδυνων φορτίων, στην διαχείριση των επιστρεφόμενων και την χρήση κατάλληλης συσκευασίας για την μείωση της αλόγιστης χρήσης φυσικών πόρων. Η λύση στα παραπάνω ζητήματα προκύπτει από την δημιουργία στρατηγικών φιλικών προς το περιβάλλον (Τσαγρής, 2017).

Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να λειτουργήσει και η αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα στοχεύοντας να συμβαδίζει με τους περιβαλλοντικούς όρους προστασίας. Στόχος είναι η μείωση του παραγωγικού και του μεταφορικού κόστους των επιχειρήσεων καθώς γίνεται χρήση υλικών που βρίσκονται στο τέλος του κύκλου ζωής τους αλλά έχουν ακόμη κάποια αξία για την παραγωγή προϊόντων ή υποπροϊόντων. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτών των στόχων αφορούν κυρίως την μείωση του κόστους επιστροφής, την αύξηση της αξίας των χρησιμων υλικών, την μείωση του μεταφορικού και αποθηκευτικού κόστους, την ικανότητα με τους κατάλληλους χειρισμούς να μην υπάρχουν επιστροφές προϊόντων και τέλος η ελεγχόμενη και σε μεγαλύτερη ανακύκλωση των προϊόντων που υποβάλλονται στη διαδικασία αυτήν (Τσαγρής, 2017).

Από όλα τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως το ζήτημα για την άμεση υλοποίηση ενός σχεδίου δράσης για την ανακύκλωση φ/β αποβλήτων είναι πιο μείζον από ποτέ. Με γνώμονα αυτό, η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια μεθοδολογία που προσεγγίζει το παρόν ζήτημα από πολλές πλευρές προτείνοντας ένα τρόπο δράσης με έμφαση στην πράσινη αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα, ο οποίος αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία σχεδιασμού συστήματος

Για να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τον σχεδιασμό ενός συστήματος για την συλλογή και την επεξεργασία των φωτοβολταϊκών αποβλήτων, είναι αναγκαίο να ορισθούν, να εξεταστούν και να αναλυθούν τα βασικά στοιχεία του πλαισίου σύμφωνα με την υπάρχουσα ερευνά και τις μελέτες περιπτώσεων, τις τεχνολογίες ανακύκλωσης, την κατάσταση της αγοράς των φωτοβολταϊκών, τις τεχνολογίες αυτών, τις διαδικασίες εφοδιαστικής σε συνδυασμό με τον οικονομικό σχεδιασμό και την αξιολόγηση αυτού. Εξίσου σημαντικό είναι να δοθεί έμφαση και σε έρευνες και εκθέσεις που έχουν αναπτυχθεί λαμβάνοντας υπόψη τόσο τοπικές όσο και διεθνείς περιπτώσεις με στόχο την ορθή διαμόρφωση της προσέγγισης. Το Διάγραμμα Ροής (Εικόνα 3.1) υπογραμμίζει τις κρίσιμες εκτιμήσεις που απαιτούνται σε κάθε στάδιο της προτεινόμενης προσέγγισης. Επιπλέον, παρέχει τη βάση για το σχεδιασμό, την καθιέρωση και την εκτέλεση μιας επιχείρησης αντίστροφης εφοδιαστικής. Το παρακάτω Διάγραμμα Ροής (Εικόνα 3.1) απεικονίζει την κατασκευή αυτού του πλαισίου, τις σχέσεις που αναπτύσσονται μεταξύ του πλαισίου και των στοιχείων, καθώς και την αλληλεπίδραση και την παροχή κρίσιμων πληροφοριών για την ανάπτυξη στρατηγικών αντίστροφης εφοδιαστικής και συλλογής. Είναι απαραίτητες για τον εντοπισμό και την παροχή βέλτιστων λύσεων για μια συγκεκριμένη περιοχή ή κοινότητα η οποία ενδιαφέρεται να αναπτύξει ένα τέτοιο σύστημα προσαρμοσμένο στις περιβαλλοντικές, οικονομικές και τεχνικές απαιτήσεις. Η εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας σχεδιασμού αποτελείται από τα πέντε ακόλουθα στάδια (Molano et al., 2022).



Εικόνα 11: Διάγραμμα ροής σχεδιασμού αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας.

3.1 Χαρακτηρισμός της αγοράς των φωτοβολταϊκών και πρόβλεψη της μελλοντικής ανάπτυξης (Στάδιο 1)

Στο στάδιο αυτό σκοπός είναι η αναγνώριση και η περιγραφή των κύριων ενδιαφερομένων, δηλαδή των παραγωγών, των εγκαταστάσεων, των προμηθευτών και των χρηστών της τοπικής φωτοβολταϊκής βιομηχανίας. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την εκτενή εξέταση όλων των κυβερνητικών νομοθεσιών και των υφιστάμενων μεθόδων για τα φωτοβολταϊκά απόβλητα ή παρόμοια απόβλητα. Επιπλέον, η τρέχουσα κατάσταση και τα ιστορικά δεδομένα της εγκατεστημένης ισχύος και ο αριθμός των εγκαταστάσεων είναι υψίστης σημασίας για τον προσδιορισμό του φωτοβολταϊκού συμπλέγματος, της πυκνότητας των

φωτοβολταϊκών μιας περιοχής, των αριθμό των φωτοβολταϊκών και της ετήσιας ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών με βάση την ισχύ και τις ποσότητες. Πιο συγκεκριμένα, οι τεχνολογίες, το μερίδιο αγοράς και οι τεχνικές προδιαγραφές είναι πολύτιμες για τον υπολογισμό των εισροών του συστήματος. Η ανάλυση της παρούσας ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών και των χαρακτηριστικών της αγοράς στην περιοχή είναι αναγκαίες για την εκτίμηση της μελλοντικής ανάπτυξης και των τομέων που είναι κρίσιμοι για την ανάπτυξη της στρατηγικής του εφοδιασμού. Τα ιστορικά δεδομένα της ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών δείχνουν την εξέλιξη της παραγωγής φωτοβολταϊκών συστημάτων, γεγονός που επιτρέπει την εκτίμηση των ρυθμών ανάπτυξης με την χρήση γραμμικής παλινδρόμησης και παρεμβολής ή μοντέλα διάχυσης που προβλέπουν την χωρική διασπορά και την χωρητικότητα των νέων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα μοντέλα διάχυσης βασίζουν τη διασπορά και τις προβλέψεις σε τεχνικά, γεωγραφικά και περιβαλλοντικά κριτήρια που επηρεάζονται από πολιτικές και πρότυπα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Molano et al., 2022).

3.2 Εκτίμηση μελλοντικού ρεύματος και σύνθεσης αποβλήτων (Στάδιο 2)

Σύμφωνα με μελέτες αγορών, υπάρχουν πέντε βασικές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιούνται ευρέως σε παγκόσμιο επίπεδο και διαμορφώνουν με αυτόν τον τρόπο το μερίδιο αγοράς (market share). Οι τεχνολογίες αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών τεχνολογιών (Domínguez et al., 2017)

PV technology	Area (m ²)	Power (W)	Weight (kg)	Efficiency (%)	Average W/T (kg/Wp)
c-Si	1,46	224	23	15,3	0,103
a-Si	2,3	128	18,86	5,6	0,147
CdTe	0,72	65	12	9	0,185
CIGS	0,72	80	12,6	11	0,157
Others	-	-	-	-	0,1

Οι τεχνικές προδιαγραφές των κατασκευαστών είναι σημαντικές για τον προσδιορισμό και τον καθορισμό της σύνθεσης της κάθε φωτοβολταϊκής τεχνολογίας και της καταγραφής των υλικών των φωτοβολταϊκών αποβλήτων. Επιπρόσθετα, το μέγεθος, η ισχύς, η αποδοτικότητα και οι προδιαγραφές βάρους είναι βασικοί παράγοντες για την αναγνώριση της σχέσης μεταξύ χωρητικότητας και βάρους των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Επομένως, η πραγματική και προβλεπόμενη χωρητικότητα (kW) μπορούν να μετατραπούν σε μάζα φωτοβολταϊκών αποβλήτων (kg) χρησιμοποιώντας το μερίδιο αγοράς (market share) της κάθε τεχνολογίας και την αναλογία βάρους προς ισχύ (kg/W).

Μετά την μετατροπή της ετήσιας ισχύος (kW) σε εγκατεστημένη μάζα (kg) πραγματοποιείται ο υπολογισμός των παραγόμενων αποβλήτων με βάση τα σενάρια που λαμβάνουν υπόψη διαφορετικές μεταβλητές και παραδοχές για την αποτυχία των φωτοβολταϊκών. Η κατανομή της συνάρτησης Weibull χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των παραγόμενων φωτοβολταϊκών αποβλήτων σε σχέση με την πιθανότητα της απώλειας κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής του φωτοβολταϊκού. Με βάση τον τύπο τεχνολογίας και την σύνθεση των υλικών, τα εκτιμώμενα απόβλητα αναλύονται σε συνθέσεις υλικών χρησιμοποιώντας το μερίδιο αγοράς κάθε τεχνολογικού τύπου φωτοβολταϊκών, τις τεχνικές προδιαγραφές και την ποσότητα των αποβλήτων που παράγονται σε ένα έτος (Molano et al., 2022).

3.3 Επιλογή των κέντρων συλλογής (Στάδιο 3)

Η βέλτιστη τοποθεσία των κέντρων συλλογής και του κύριου κέντρου ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών (PVRC) είναι θεμελιώδης για να εξασφαλιστεί η αντίστροφη δυνατότητα εφοδιαστικής σε συνδυασμό με την μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Υπάρχουν αβεβαιότητες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το κόστος εφοδιαστικής για την ανάκτηση υλικών εξαιτίας της διασκορπισμένης κατανομής των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το πρόβλημα της χωροθέτησης και η κατανομή των διάφορων διεργασιών και δραστηριοτήτων κατά μήκος της δομής της αντίστροφης εφοδιαστικής είναι ζωτικής σημασίας και απαιτεί πολυπαραγοντική ανάλυση για την επιλογή της βέλτιστης απόφασης. Πρέπει να ληφθούν υπόψη τρεις σημαντικοί παράγοντες, πιο συγκεκριμένα η χωρική διασπορά των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων και η δυναμικότητάς τους, η καταλληλότητα της γης για την εγκατάσταση του κέντρου επεξεργασίας και η πιο αποδοτική κατανομή των λειτουργιών στις τοποθεσίες που προτάθηκαν. Η πολυπαραγοντική ανάλυση απαιτεί κριτήρια για τον αποκλεισμό και τον προσδιορισμό των θέσεων που καθορίζουν την βέλτιστη τοποθεσία. Τα κριτήρια επιλογής στις περισσότερες περιπτώσεις αντιστοιχούν στις παρακάτω 4 κατηγορίες, δηλαδή κάλυψη γης, υφιστάμενες υποδομές και κέντρα αποβλήτων, υπόγειοι υδροφορείς και η παρουσία ευαίσθητων εγκαταστάσεων και κοινοτήτων. Για την αποφυγή ρύπανσης, υποβάθμισης της γης και των επιπτώσεων στις κοινότητες, η κάλυψη γης βοηθάει στην επιλογή πιθανών τοποθεσιών ανάλογα με την ύπαρξη και την απόσταση από χαρακτηριστικά όπως δάση, άγονες εκτάσεις, καλλιεργούμενες καλλιέργειες, υδροβιότοπους, βοσκοτόπια και θάμνους (Molano et al., 2022).

3.4 Επιλογή της τεχνολογίας ανακύκλωσης (Στάδιο 4)

Διαφορετικές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών απαιτούν μοναδική διαδικασία ανακύκλωσης για την ανάκτηση υψηλής αξίας υλικών και επικίνδυνων ουσιών. Κάθε μια από αυτές παρέχει μοναδικά ποσοστά ανάκτησης και ποικίλες εισροές για να εγγυηθούν την σκοπιμότητα και την βιωσιμότητα της επιχείρησης. Επιπρόσθετα, οι μελέτες αγοράς παρέχουν μια εικόνα του μεριδίου αγοράς κάθε τεχνολογίας φωτοβολταϊκών καθώς και των χαρακτηρισμό των μελλοντικών φωτοβολταϊκών αποβλήτων επιτρέποντας έτσι την ανάπτυξη στρατηγικών για τον μετριασμό των

περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την διασφάλιση της βιωσιμότητας των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Οι προσεγγίσεις της ανακύκλωσης που επιλέγονται για κάθε συγκεκριμένο πλαίσιο απαιτούν πλήρη ανάλυση των μελλοντικών ροών αποβλήτων, των διαθέσιμων υποδομών, της σκοπιμότητας της λειτουργίας και των περιβαλλοντικών κερδών από την ‘upcycling’ (δηλαδή την εξαγωγή υλικών υψηλής αξίας ή καθαρότητας) ή την ‘downcycling’ (δηλαδή την εξαγωγή υλικών μολυσμένων ή χαμηλής αξίας). Επιπλέον οι δυο αυτές προσεγγίσεις ανακύκλωσης προσαρμόζονται καλύτερα ανάλογα με τις απαιτήσεις και τους πόρους της κοινότητας (Molano et al., 2022).

3.5 Οικονομική ανάλυση (Στάδιο 5)

Η καταγραφή των υλικών και οι αναλογίες λαμβάνονται από τα ποσοστά ανάκτησης της ανακύκλωσης που έχουν προσδιορισθεί από προηγούμενα βήματα. Οι ποσότητες των ανακτημένων υλικών χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ετήσιων κερδών της εφοδιαστικής επιχείρησης. Οι τιμές αυτές μπορούν να βασιστούν στις τρέχουσες τιμές αγοράς, σε προβλέψεις ή σε συμφωνίες αγοράς μεταξύ ενδιαφερόμενων. Η ανάλυση κόστους απαιτεί τον υπολογισμό τόσο του σταθερού όσο και του μεταβλητού κόστους που καθορίζεται από τις ανάγκες της εκάστοτε περιοχής. Επιπλέον, παράγοντες όπως το κόστος εγκατάστασης, μεταφοράς, επεξεργασίας και διάθεσης πρέπει να αναλύονται. Εφόσον εκτιμηθούν τα έσοδα και το κόστος της αντίστροφης εφοδιαστικής λειτουργίας, είναι εφικτό στην συνέχεια να αξιολογηθεί η σκοπιμότητα της εγκατάστασης ανακύκλωσης και να ακολουθήσει η ανάλυση ευαισθησίας. Η ανάλυση βοηθάει στον καθορισμό των πιθανών αποτελεσμάτων σε διάφορα σενάρια και επιτρέπει τον σχεδιασμό στρατηγικών για την ελαχιστοποίηση ανακριβειών των εκτιμήσεων. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές αξιολόγησης για την εκτίμηση της σκοπιμότητας, όπως η μέθοδος της Περιόδου Αποπληρωμής (Payback Period, PB), η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value, NPV), η Απόδοση της Επένδυσης (Return on Investment, ROI) και ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (Internal Rate of Return, IRR) (Molano et al., 2022).

3.6 Σχεδιασμός συστήματος για συλλογή φωτοβολταϊκών πλαισίων μετά το τέλος του κύκλου ζωής στην Ελλάδα

Τα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής βασίζονται στην τρέχουσα αγορά φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα και χρησιμοποιούνται για την ανάδειξη του προτεινόμενου πλαισίου και των κρίσιμων στοιχείων του, καθώς και για να αξιολογήσει τις προκλήσεις και τις ευκαιρίες διαχείρισης των φωτοβολταϊκών. Τα ευρήματα αυτά είναι ζωτικής σημασίας για την καθιέρωση και υλοποίηση μιας επιχείρησης αντιστροφής εφοδιαστικής, καθώς και για τη διασφάλιση της κερδοφορίας και τον περιβαλλοντικών κερδών. Η μελέτη αυτή παρουσιάζει ένα σενάριο συλλογής που επικεντρώνεται στη συλλογή φωτοβολταϊκών πλαισίων που προέρχονται τόσο από

πάρκα όσο και από στέγες και παρουσιάζει μια πρόταση διαχείρισης, συλλογής, επεξεργασίας των φωτοβολταϊκών αποβλήτων στην Ελλάδα.

3.6.1 Η αγορά των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα - Τρέχουσα κατάσταση και μελλοντική ανάπτυξη (Στάδιο 1)

Στην Ελλάδα, η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ανέρχεται σε 600.202 MWh που προέρχεται από αιολικά πάρκα και 673.271 MWh από φωτοβολταϊκά σύστημα. Η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών είναι 4.426,23 MW και από τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι 4.198,59 MW. Σύμφωνα με το εθνικό σχέδιο της χώρας μας στόχος είναι η παραγωγή 7,7 GW ενέργειας από φωτοβολταϊκά έως το 2030 (Διαχειριστής ΑΠΕ & Εγγυήσεων Προέλευσης Α.Ε.- ΔΑΠΕΕΠ Α.Ε., 2023).

Το 2021, τα φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα παρήγαγαν το 9,2% της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας αποσοβώντας με αυτόν τον τρόπο την έκλυση 3,7 εκατομμυρίων τόνων CO₂ από την υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων.

Συμφώνα με τα τελευταία δεδομένα, το 2021 στην Ελλάδα εγκαταστάθηκαν τα περισσότερα MWp που προέρχονται από τα φωτοβολταϊκά από κάθε άλλη τεχνολογία, γεγονός που αποδίδεται στο τεράστιο επενδυτικό ενδιαφέρον που συνεχίζεται αμείωτο. Συγκεκριμένα η συνολική ισχύς των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών έως και το 2021 ήταν 4.126 MW.

Στο παρακάτω Διάγραμμα 3.1 δίνεται μια εικόνα της ελληνικής αγοράς όσων αφορά τα φωτοβολταϊκά συστήματα

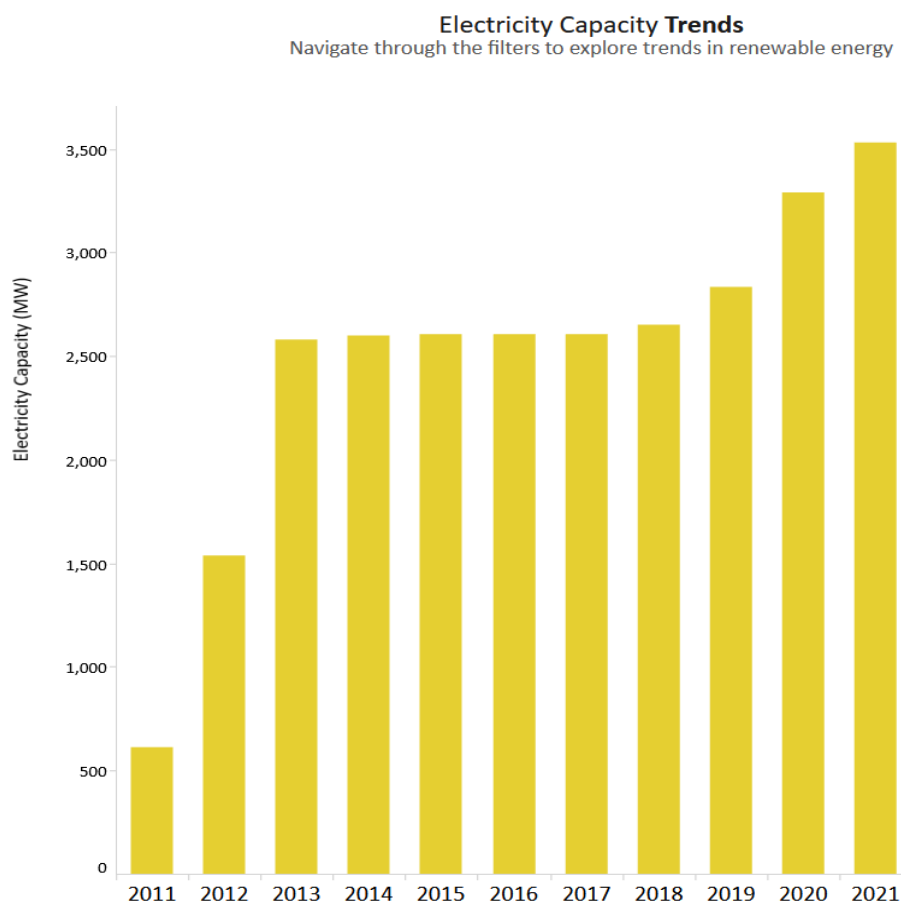


Διάγραμμα 3.1: Ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2019).

Όπως παρατηρείται από το έτος 2010 έως και 2013 υπάρχει μια αυξητική τάση στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως το έτος 2013 υπήρξε η μεγαλύτερη ετήσια εγκατεστημένη ισχύς ίση με 1.043 MW. Από

το έτος 2014 έως το 2018 υπάρχει μια σταθερότητα στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων η οποία αποδίδεται κατά βάση στην περίοδο και τις συνέπειες της οικονομικής κρίσης. Παρόλα αυτά από το έτος 2019 και έπειτα υπάρχει ανάκαμψη στην αγορά των φωτοβολταϊκών γεγονός ενθαρρυντικό και αναγκαίο για την επίτευξη του στόχου που είναι η πλήρης κάλυψη των ενεργειακών αναγκών από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Στο Διάγραμμα 3.2 παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ισχύς στην Ελλάδα σύμφωνα με τα δεδομένα του International Renewable Energy Agency (IRENA).



Διάγραμμα 3.2: Εγκατεστημένη ισχύς στην Ελλάδα (IRENA, 2023).

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα γίνεται αντιληπτό ότι θα υπάρξουν μεγάλες ποσότητες φωτοβολταϊκών αποβλήτων τα επόμενα χρόνια, γεγονός που οφείλει να μας προβληματίζει καθώς δεν υπάρχουν συγκεκριμένες στρατηγικές και πολιτικές για την διαχείριση και την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα.

Ωστόσο, την δεδομένη στιγμή στην Ελλάδα υπάρχουν δώδεκα μονάδες επεξεργασίας ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών αποβλήτων και εκατοντάδες κέντρα συλλογής που λειτουργούν σε όλη την χώρα με σκοπό την ανακύκλωση αυτών. Σύμφωνα με την επίσημη ιστοσελίδα της εταιρείας Ανακύκλωσης Συσκευών Α.Ε. (Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε., 2023) δεν δίνεται η πληροφορία αν τα κέντρα συλλογής και οι μονάδες επεξεργασίας έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίξουν την αντίστροφη

εφοδιαστική των φωτοβολταϊκών. Αν και η διαχείριση των ηλεκτρονικών αποβλήτων αφορά παρόμοια συστατικά και συμβατές διαδικασίες με εκείνες των φωτοβολταϊκών αποβλήτων για την ανάκτηση υλικών και τη μείωση των επιπτώσεων λόγω έλλειψης στοιχείων για τις δυνατότητες που παρέχει αυτή η εταιρία, στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε η τοποθέτηση των κέντρων συλλογής και του κέντρου ανακύκλωσης να είναι ανεξάρτητη και να ανταποκρίνεται στις υπάρχουσες ανάγκες και απαιτήσεις.

Στους Πίνακες 3.2 και 3.3 παρουσιάζονται η ετήσια εγκατεστημένη ισχύς (Annual PV Power) των φωτοβολταϊκών καθώς και η συνολική εγκατεστημένη ισχύς (Cumulative PV Power) από το 2010 έως και το 2021. Επιπλέον παρουσιάζονται και οι στόχοι σύμφωνα με την NECP.

Πίνακας 3.2: Ετήσια και Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς

Year	Annual PV Power (MW)	Cumulative PV Power (MW)
2010	150,40	205,40
2011	425,90	631,30
2012	912,00	1.536,30
2013	1.042,50	2.578,80
2014	16,95	2.595,75
2015	10,30	2.605,60
2016	5,42	2.611,00
2017	12,90	2.624,00
2018	43,10	2.668,00
2019	160,00	2.828,00
2020	459,00	3.288,00
2021	838,00	4.126,00

Πίνακας 3.3: Μελλοντικοί Στόχοι

Year	Cumulative PV Power (GW)
2019	2,7
2020	3
2022	3,9
2025	5,3
2027	6,3
2030	7,7

3.6.2 Μελλοντική ροή φωτοβολταϊκών αποβλήτων και σύνθεση αυτών στην Ελλάδα (Στάδιο 2)

Η πρόβλεψη των φωτοβολταϊκών αποβλήτων είναι το πιο σημαντικό στοιχείο για τον προσδιορισμό των μελλοντικών απαιτήσεων του συστήματος. Αρχικά, τα απόβλητα που παράγονται υπολογίζονται από την μετατροπή της ετήσιας φωτοβολταϊκής ισχύος (kW) σε εγκατεστημένη μάζα (kg), χρησιμοποιώντας το μερίδιο αγοράς (market share) κάθε φωτοβολταϊκού τύπου (Πίνακας 3.5) και την αντίστοιχη αναλογία βάρους προς μάζα (kg/Wp) (Πίνακας 3.4).

Πίνακας 3.4: Αναλογία βάρους προς μάζα (Domínguez et al., 2017)

(Weight-to-ratio)					
PV technology	C-Si	a-Si	CdTe	CIGS	CPV/OPV/others
kg/Wp	0,103	0,147	0,185	0,157	0,100

Πίνακας 3.5: Μερίδιο αγοράς φωτοβολταϊκών πλαισίων

PV technology market share per year					
	C-Si	a-Si	CdTe	CIGS	CPV/OPV/others
Year	M.S.	M.S.	M.S.	M.S.	M.S.
2010	80,00%	2,00%	17,00%	1,00%	0,00%
2011	86,00%	4,00%	9,00%	1,00%	0,00%
2012	90,00%	2,00%	6,00%	2,00%	0,00%
2013	91,00%	2,00%	4,00%	2,00%	0,00%
2014	87,00%	5,00%	5,00%	2,00%	1,00%
2015	85,00%	3,00%	5,00%	3,00%	4,00%
2016	80,00%	3,00%	6,00%	6,00%	5,00%
2017	80,00%	2,00%	7,00%	6,00%	5,00%
2018	76,00%	2,00%	8,00%	7,00%	7,00%
2019	75,00%	2,00%	6,00%	7,00%	10,00%
2020	70,00%	3,30%	5,20%	5,20%	16,30%
2021	70,00%	3,30%	6,00%	5,20%	15,50%
2022	68,00%	2,00%	6,00%	6,00%	16,00%
2023	68,00%	1,00%	8,00%	8,00%	15,00%
2024	66,00%	2,00%	8,00%	9,00%	15,00%
2025	66,00%	1,00%	8,50%	9,50%	15,00%
2026	62,00%	0,00%	10,00%	12,00%	16,00%
2027	58,00%	0,00%	8,00%	12,00%	22,00%
2028	50,00%	0,00%	5,00%	9,00%	36,00%
2029	47,00%	0,00%	6,00%	7,00%	40,00%
2030	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2031	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2032	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2033	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2034	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2035	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2036	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2037	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2038	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2039	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2040	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2041	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2042	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2043	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%

2044	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2045	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2046	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2047	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2048	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2049	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%
2050	44,80%	0,00%	4,70%	6,40%	40,20%

Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως ο παραπάνω Πίνακας 3.5 που αφορά το μερίδιο αγοράς των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα προκύπτει βάση προβλέψεων της ευρύτερης αγοράς των φωτοβολταϊκών σε παγκόσμια κλίμακα, σε αναφορές σε παρόμοιες εργασίες και σε προσωπικές εκτιμήσεις βάση των υπαρχόντων δεδομένων (IRENA, 2023; Mahmoudi et al., 2021).

Σύμφωνα με τα ιστορικά δεδομένα της εγκατεστημένης ισχύος από την εξίσωση (1) μπορεί να υπολογισθεί η ετήσια εγκατεστημένη μάζα κάθε τύπου φωτοβολταϊκού,

$$PV_{mi} = PV_{(kW)} \times WP_i \times MS_i \quad (1)$$

Όπου: PV_{mi} η ετήσια εγκατεστημένη μάζα κάθε φωτοβολταϊκού τύπου i

WP_i είναι ο παράγοντας μετατροπής της αναλογίας βάρους προς μάζα κάθε φωτοβολταϊκού τύπου i

MS_i είναι το μερίδιο αγοράς

Στην συνέχεια η ετήσια συνολική εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή μάζα PV_{am} μπορεί να υπολογισθεί από την παρακάτω εξίσωση (2),

$$PV_{am} = \sum_{i=1}^5 PV_{mi} \quad (2)$$

Για c-Si : $i=1$, a-Si : $i=2$, CdTe : $i=3$, CiGs : $i=4$, others: $i=5$

Η εξίσωση (3) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αθροιστικής μάζας σε μια δεδομένη χρονική περίοδο

$$PV_{cum} = \sum_{i=0}^n PV_{amn} \quad (3)$$

Όπου n είναι ο αριθμός των ετών.

Ο τρόπος αστοχίας ενός φ/β πάνελ δεν είναι σταθερός με την πάροδο του χρόνου αντιθέτως ακολουθεί μια κατανομή πιθανοτήτων. Η συνάρτηση κατανομής Weibull είναι η κατάλληλη για την περιγραφή της αστοχίας των φ/β πλαισίων, προσομοιώνοντας με επιτυχία τις πρώιμες, μεσαίες και σε μεταγενέστερη ηλικία αποτυχίες. Η εξίσωση (4) εκφράζει την πιθανότητα αποτυχίας ενός εγκατεστημένου φωτοβολταϊκού συστήματος την χρονική στιγμή $t=0$ έως την χρονική στιγμή t .

$$f(t, a, b) = \frac{a}{b^a} \times t^{(a-1)} \times \exp\left(-\left(\frac{t}{b}\right)^a\right) \quad (4) \text{ Κατανομή Weibull}$$

Οπού t αντιπροσωπεύει την διάρκεια ζωής ενός φωτοβολταϊκού πάνελ σε έτη

b είναι η μέση διάρκεια ζωής

Και a είναι ο παράγοντας σχήματος, δηλαδή περιγράφει τη σταδιακή γήρανση του προϊόν (Kastanaki et al., 2022).

Στην συγκεκριμένη μελέτη ο παράγοντας σχήματος για το **Early Loss Scenario (EL)** είναι **$a=2,4928$** και για το **Regular Loss Scenario (RL)** είναι **$a=5,3759$** . Στον παρακάτω Πίνακα 3.6 παρουσιάζονται οι παραδοχές που έχουν ορισθεί για το κάθε σενάριο.

Πίνακας 3.6: Πίνακας Σεναρίων (Molano et al., 2022)

Early Loss Scenario	Regular Loss Scenario
25 Χρόνια μέσος όρος ζωής	25 Χρόνια μέσος όρος ζωής
Στα 25 χρόνια 63,9% από τα εγκατεστημένα πάνελ αποσύρονται	Στα 25 χρόνια 63,9% από τα εγκατεστημένα πάνελ αποσύρονται
Μετά από 30 χρόνια όλα τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν αποσυρθεί	Μετά από 30 χρόνια όλα τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν αποσυρθεί
Παράγοντας σχήματος $a=2,4928$	Παράγοντας σχήματος $a=5,3759$

Οι ετήσιες εκροές φ/β αποβλήτων $PV_{annual\ waste}$ υπολογίζονται από την ακόλουθη εξίσωση (5),

$$PV_{annual\ waste} = \sum_{i=0}^n (PV_{am-i} \times f_i) \quad (5)$$

Όπου PV_{am} η ετήσια συνολική εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή μάζα σε τόνους, f_i η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας διάρκειας ζωής Weibull και n η μέγιστη δυνατή διάρκεια ζωής.

Η αθροιστική ποσότητα φ/β αποβλήτων $PV_{cum\ waste}$ το έτος t υπολογίζεται από την εξίσωση (6),

$$PV_{cum\ waste} = \sum_t^n (PV_{annual\ waste}) \quad (6)$$

Όπου n είναι ο αριθμός των ετών (Kastanaki et al., 2022).

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω υπολογισμών ακολουθεί η απογραφή των υλικών των φωτοβολταϊκών απορριμμάτων σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (7),

$$W_{ami} = W_{am} \times MS_i \quad (7)$$

όπου W_{ami} είναι τα ετησία απόβλητα κάθε φωτοβολταϊκού τύπου i

W_{am} τα απόβλητα που παράγονται κατά το έτος αυτό

Και MS_i είναι το μερίδιο αγοράς (market share) κάθε φωτοβολταϊκού τύπου i .

Η απογραφή των υλικών είναι βασισμένη στις τεχνικές προδιαγραφές του ακολούθου Πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.7: Σύνθεση υλικών σε φωτοβολταϊκά πλαίσια (Molano et al., 2022)

	Material	C-Si (%)	a-Si (%)	CdTe (%)	GIGS(%)
Precious Metals	Ag	0,000577000	0,000000000	0,000000000	0,000000000
Base metals	Al	0,165000000	0,416000000	0,000904000	0,085800000
	Cu	0,007310000	0,008990000	0,030100000	0,002840000
	Ni	0,000010600	0,000000000	0,000000000	0,000000000
	Fe	0,000000000	0,000007450	0,000000000	0,000000000
	Ti	0,000000052	0,000000000	0,000000001	0,000000000
	Sn	0,000000586	0,000000000	0,000000014	0,000586000
	Zn	0,000000078	0,000003720	0,000000002	0,000568000
	Cr	0,000000000	0,000005650	0,000180000	0,000000000
	Mn	0,000000000	0,000009370	0,000000000	0,000000000
	Mo	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,000568000
Hazardous Substances	Cd	0,000000000	0,000051300	0,001200000	0,001710000
	Pb	0,000046700	0,000000000	0,000042200	0,000000000
	Se	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,000568000
Critical Substances	Mg	0,005200000	0,013100000	0,000000000	0,002670000
	Ga	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,000568000
	In	0,000000000	0,000116000	0,000000000	0,000284000
	Te	0,000000000	0,000064200	0,001200000	0,000000000
Other metals	Si	0,007910000	0,000025700	0,003010000	0,000000000
	Steel	0,095100000	0,398000000	0,012000000	0,000000000
Other Materials	EVA	0,065000000	0,159000000	0,036100000	0,051200000
	Glass	0,654000000	0,004590000	0,915000000	0,853000000

Επιπρόσθετα, η εξίσωση (8) προσδιορίζει την αθροιστική μάζα κάθε στοιχείου m_{wi} ανά φωτοβολταϊκό τύπο i

$$m_{wi} = \sum_{j=1}^n (W_{amij} \times m_i) \quad (8)$$

Όπου m_i είναι το ποσοστό ενός υλικού στο φωτοβολταϊκό τύπο i .

Τέλος, η εξίσωση (9) υπολογίζει την συνολική αθροιστική μάζα οπουδήποτε υλικού m_w

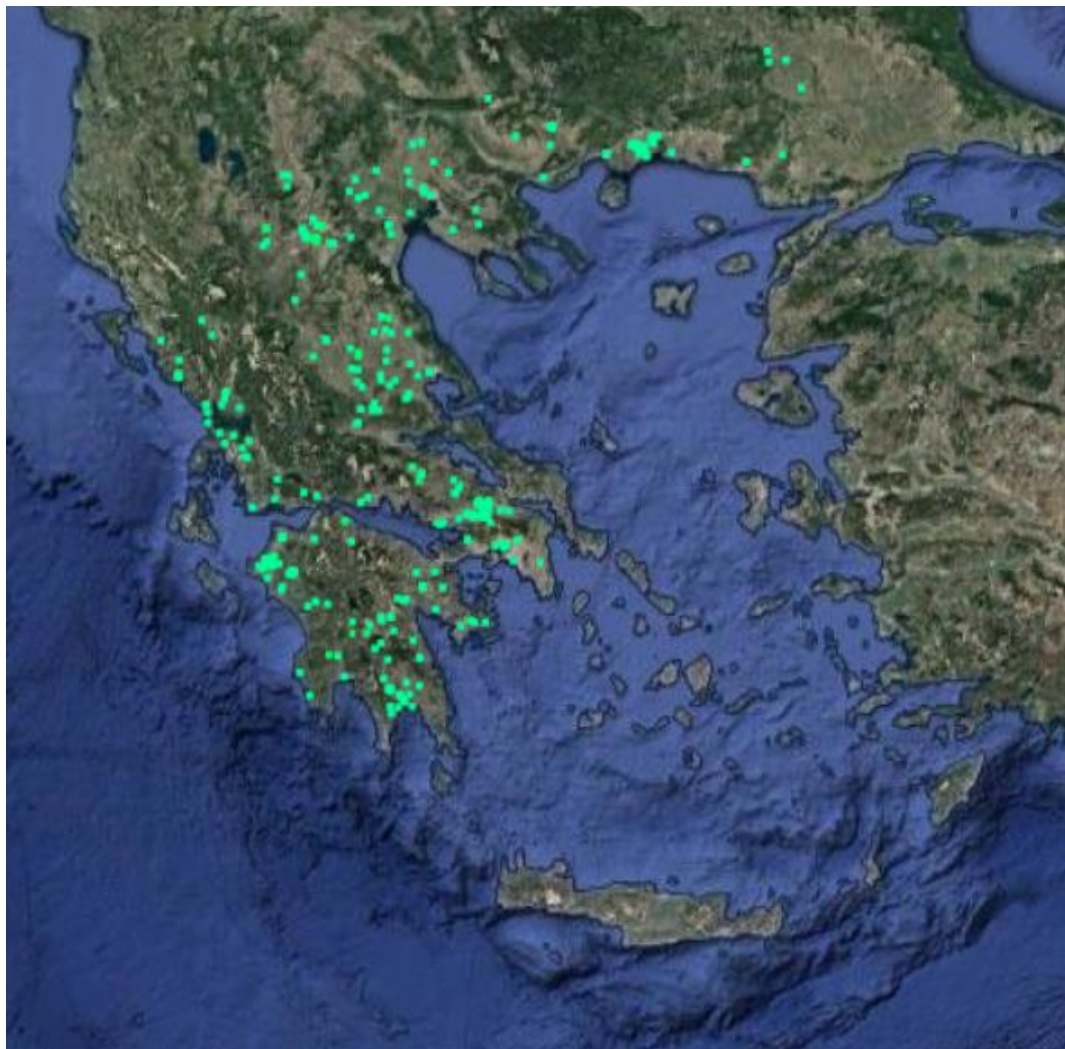
$$m_w = \sum_{i=1}^5 m_{wi} \quad (9)$$

για c-Si : $i=1$, a-Si : $i=2$, CdTe : $i=3$, CiGs : $i=4$, others: $i=5$

3.6.3 Η βέλτιστη τοποθεσία για το Κέντρο Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών Πάνελ (PVRC) (Στάδιο 3)

Από τον Γεωπληροφοριακό Χάρτη της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ) (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, 2023) αντλούνται σημαντικά δεδομένα για την κατανομή της εγκατεστημένης ισχύος που προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά συστήματα την

δεδομένη χρονική στιγμή στην Ελλάδα. Τα δεδομένα αυτά είναι σημαντικά για την συγκεκριμένη μελέτη. Πιο αναλυτικά, οι τοποθεσίες με την υψηλότερη παραγωγή ενέργειας είναι υψίστης σημασίας για τον προσδιορισμό σημαντικών ετήσιων ποσοτήτων απόβλητων. Επιπλέον, τα δεδομένα δείχνουν μια τάση ομαδοποίησης του αριθμού των εγκαταστάσεων και μια σχέση εξάρτησης μεταξύ των αριθμών των εγκαταστάσεων και της γεωμορφολογίας της Ελλάδος.



Εικόνα 12: Χάρτης Εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών (Ισχύς>1MW) στην Ελλάδα (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, 2023).

Η βέλτιστη γεωγραφική τοποθεσία είναι απαραίτητη για την εγκατάσταση του κέντρου ανακύκλωσης των πάνελ και των κέντρων συλλογής. Οι τοποθεσίες κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος είναι αναγκαίος παράγοντας για την εύρεση της βέλτιστης θέσης και για τα δυο σενάρια. Στην μελέτη αυτήν, η τοποθεσία του κέντρου PVRC προσδιορίζεται ελαχιστοποιώντας την συνολική απόσταση μεταξύ των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων και των κέντρων συλλογής. Αρχικά, η εξίσωση (10) υπολογίζει την απόσταση μεταξύ των τοποθεσιών των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων και των κέντρων συλλογής.

$$d(x, y) = \sqrt{[(\text{long}_1 - x) \times c \times \cos(\text{lat}_1 - y)]^2 + [(\text{lat}_1 - y) \times c]^2} \quad (10)$$

Όπου d είναι η απόσταση σε μίλια ανάμεσα των τοποθεσιών του εγκατεστημένου φωτοβολταϊκού συστήματος και του κέντρου συλλογής .

Ο c είναι μια σταθερά μετατροπής μεταξύ βαθμών και μίλια και ισούται με 69,172

Τέλος το lat_1 και $long_1$ αντιστοιχούν στις γεωγραφικές συντεταγμένες του κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος και το x και y είναι οι γεωγραφικές συντεταγμένες του κέντρου συλλογής. Στην συγκεκριμένη μελέτη οι συντεταγμένες αυτές χρειάζεται να προσδιοριστούν.

Στην συνέχεια, αναπτύσσεται μια εξίσωση σταθμισμένης απόστασης λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή βάρους ή τα απόβλητα που παράγονται σε κάθε θέση.

$$\bar{D} = \sum_{p=1}^m (d_{pq} \times W_{pq}) \quad (11)$$

Το \bar{D} αντιπροσωπεύει την συνολική σταθμισμένη απόσταση από οποιαδήποτε εγκατάσταση p σε ένα κέντρο συλλογής q .

Από τις εξισώσεις (10) και (11) μπορούν να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες των κέντρων συλλογής.

Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων της βέλτιστης θέσης είναι απαραίτητο να βρεθούν οι συντεταγμένες που παράγουν την ελάχιστη τιμή σύμφωνα με την εξίσωση (12).

$$F(x, y) = \min \sum_{q=1}^k \sum_{p=1}^m (d_{pq} \times W_{pq}) \quad (12)$$

Όπου το m αντιπροσωπεύει τον συνολικό αριθμό των φωτοβολταϊκών συστημάτων και το k τον αριθμό των κέντρων συλλογής ή των φωτοβολταϊκών θέσεων.

Η ακολουθεί εξίσωση (13) καθορίζει την συνολική απόσταση μεταφοράς λαμβάνοντας υπόψη των αριθμό των διαδρομών από την θέση του φωτοβολταϊκού συστήματος p στο κέντρο συλλογής q .

$$D(x, y) = \sum_{p=1}^m (d_{pq} \times N_{pq}) \quad (13)$$

Η συνολική απόσταση μεταφοράς εξαρτάται από τον αριθμό των διαδρομών N_i , ο οποίος εξαρτάται από την μέγιστη χωρητικότητα των φορηγών και το συνολικό βάρος των φωτοβολταϊκών αποβλήτων. Η πραγματική απόσταση μεταφοράς εξαρτάται από τους δρόμους και τις υποδομές στην μελέτη περιοχής. Επιπλέον, τα συστήματα GPS και οι χάρτες είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό την απόστασης μεταφοράς μεταξύ των τοποθεσιών των φωτοβολταϊκών και των κέντρων συλλογής και ανακύκλωσης.

Οι εκτιμήσεις των ποσοτήτων των αποβλήτων και η βέλτιστη θέση του κέντρου ανακύκλωσης PVRC είναι ζωτικής σημασίας για τον σχεδιασμό του συστήματος ανακύκλωσης. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται σε αυτό το πλαίσιο περιγράφονται και

εξηγούνται με στόχο την επίτευξη μιας αποτελεσματικής συλλογής αποβλήτων σε συνδυασμό με μια οικονομική αξιολόγηση όλου του εγχειρήματος.

3.6.4 Επιλογή τεχνολογίας ανακύκλωσης (Στάδιο 4)

Σύμφωνα με τις υπάρχουσες μελέτες, οι ηλιακοί συλλέκτες πυριτίου (c-Si) είναι η κορυφαία τεχνολογία στις περισσότερες χώρες, με ένα μερίδιο αγοράς πάνω από 80%. Η ιταλική εταιρεία, SASIL S.r.l., έχει ανάπτυξη το Project FRELP, επιτρέποντας την ανάκτηση υψηλής ποιότητας συστατικών από φωτοβολταϊκά πάνελ πυριτίου (c-Si) με αποτελεσματικότητα και εφικτές λειτουργίες. Η παρούσα μελέτη χρησιμοποιεί την ανάλυση κύκλου ζωής (LCI) του Project FRELP από διάφορους συγγραφείς. Ο Πίνακας 3.8 που ακολουθεί παρουσιάζει τις εισροές και τις εκροές της ανακύκλωσης 1000 kg φωτοβολταϊκών πάνελ με την χρήση του Project FRELP. Τα ποσοστά ανάκτησης και η διαδικασία εισροής και εκροής είναι αναγκαία για την πρόβλεψη των ποσοτήτων των υλικών που θα ανακτηθεί, του κόστους που σχετίζεται με τη λειτουργία και των πιθανών οφελών.

Πίνακας 3.8: LCI of FRELP Project (Molano et al., 2022)

Inputs/outputs FRELP		1000 kg PV
Input	Quantity	Unit
Electricity	113,55	kWh
Diesel Fuel	1,14	L
Water	309,71	kg
HNO ₃	7,08	kg
Ca(OH) ₂	36,5	kg
Output (Recovered materials)		
Aluminum Scrap	182,65	kg
Glass Scrap	686	kg
Copper Scrap	4,38	kg
Silicon Metal (Metallurgical Grade)	34,68	kg
Silver	0,5	kg
Output (Energy Recovery)		
Electricity	284,84	MJ
Thermal Energy	502,84	MJ
Output (Waste)		
Contaminated Glass	14	kg
Fly Ash(hazardous)	2	kg
Liquid Waste	306,13	kg
Sludge (hazardous)	50,25	kg
Output (air emissions)		
NOx	2	kg

Το Project FRELP περιλαμβάνει λεπτομερή ανάλυση των συστατικών των τεχνολογιών που βασίζονται στο πυρίτιο, όπως και στην ανάπτυξη και κατασκευή μια πιλοτικής μονάδας. Ενώ το Project αυτό διακόπηκε το 2016 λόγω των χαμηλών ποσοτήτων των αποβλήτων φωτοβολταϊκών πλαισίων που απαιτούνταν για την διασφάλιση της βιωσιμότητας της πιλοτικής μονάδας, το συμπέρασμα που προέκυψε ήταν πως η ελάχιστη ετήσια ποσότητα που απαιτείται για την διασφάλιση μια βιώσιμης λειτουργίας θα πρέπει να είναι 8.000 τόνοι αποβλήτων.

3.6.5 Οικονομική ανάλυση (Στάδιο 5)

Σύμφωνα με παρόμοιες μελέτες, η ετήσια ποσότητα αποβλήτων για την βιώσιμη λειτουργία ενός κέντρου ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών αποβλήτων PVRC είναι 20.000 τόνοι, και η μεταφορά τους απαιτεί φορτηγά χωρητικότητας 8 tn και 42 tn. Σύμφωνα με την πρόβλεψη των αποβλήτων στο Early Loss Scenario (EL) η ποσότητα των φωτοβολταϊκών αποβλήτων ανέρχεται στους 20.000 τόνους το 2032, ενώ στο Regular Loss Scenario (RL), παρόμοιες ποσότητες αποβλήτων θα συλλεχθούν το έτος 2033. Ο παρακάτω Πίνακας 3.9 παρουσιάζει τις παραμέτρους και τις παραδοχές για την οικονομική ανάλυση που έγινε.

Πίνακας 3.9: Οικονομικοί παράμετροι και παραδοχές

	Ποσότητα	Κόστος/ποσοστό	Πηγή
Plant Capacity	20.000 tn/year		(Molano et al., 2022)
Αρχική Επένδυση		44.780.050 €	(Molano et al., 2022)
Ποσοστό Πληθωρισμού		5%	(WorldData.info, 2023)
Σταθερό Κόστος Εγκατάστασης		4.032.974,40 €	(Molano et al., 2022)
Συντήρηση		609.747,32 €	(Molano et al., 2022)
Προσωπικό Εργοστασίου	30	713 €/month	(Υπουργείο Εργασίας & Κοινωνικών Υποθέσεων, 2023)
Προσωπικό Διαχείρισης	3	1500 €/month	(Υπουργείο Εργασίας & Κοινωνικών Υποθέσεων, 2023)
Κόστος Μεταφοράς σε κέντρο συλλογής		0,40 €/tn/km	(Αγριμανάκης, 2015)
Κόστος Μεταφοράς σε PVRC		0,20 €/tn/month	(Αγριμανάκης, 2015)
Κόστος φόρτωσης/εκφόρτωσης		2 €/tn	(Αγριμανάκης, 2015)
Κόστος Υγειονομικής Ταφής		40 €/tn	(IEA, 2022)
Επιτόκιο Προεξόφλησης		5%	

Εμπορικός Φόρος (ΦΠΑ)		24%	(Ανεξάρτητη Αρχή Δημοσίων Εσόδων, 2023)
Διάρκεια έργου	20 years		

Η εξίσωση (14) υπολογίζει το συνολικό κόστος της αντίστροφης εφοδιαστικής λειτουργίας,

$$C = fC + OC + TC + CU \quad (14)$$

Όπου fC είναι μια πρόβλεψη του σταθερού κόστους της εγκατάστασης

OC είναι το λειτουργικό κόστος

TC το κόστος μεταφοράς

CU το κόστος διάθεσης των υποπροϊόντων

Αρχικά το λειτουργικό κόστος OC υπολογίζεται από τον εξής τύπο,

$$OC = (W \times C_k) + LC \quad (15)$$

Όπου W η συνολική μάζα των αποβλήτων της επεξεργασμένης τεχνολογίας κατά την διάρκεια του έτους

C_k είναι το κόστος θεραπείας και το LC είναι το κόστος εργασίας κατά το έτος αυτό.

Έπειτα το κόστος μεταφοράς TC υπολογίζεται από τους παρακάτω τύπους.

Το συνολικό κόστος μεταφοράς δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση,

$$TC = TC_{KS} + TC_{KS-PVRC} + TC_{\Phi/E} \quad (16)$$

Όπου το TC_{KS} είναι το συνολικό κόστος μεταφοράς των Φ/β πάνελ στα κέντρα συλλογής

Το $TC_{KS-PVRC}$ είναι το συνολικό κόστος μεταφοράς των Φ/β πάνελ από τα κέντρα συλλογής στο PVRC

Και το $TC_{\Phi/E}$ είναι το συνολικό κόστος φόρτωσης/εκφόρτωσης των Φ/β πάνελ.

Πιο συγκεκριμένα το συνολικό κόστος μεταφοράς των Φ/β πάνελ στα κέντρα συλλογής είναι το άθροισμα του κόστους που απαιτείται για την μεταφορά των πάνελ από την περιοχή εγκατάστασης στο εκάστοτε κέντρο συλλογής. Δίνεται από τον εξής τύπο:

$$TC_{KS} = \sum_{i=1}^n (c_{t-KS} \times d_{KS} \times W) \quad (17)$$

Για $i=1$ κέντρο συλλογής έως n κέντρα συλλογής.

Όπου το c_{t-KS} είναι το κόστος μεταφοράς των φωτοβολταϊκών πάνελ στο κέντρο συλλογής. Το d_{KS} είναι η συνολική απόσταση μεταξύ των τοποθεσιών των

εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων και των κέντρων συλλογής το οποίο έχει υπολογιστεί από την εξίσωση 10 και το W η συνολική μάζα των αποβλήτων της επεξεργασμένης τεχνολογίας κατά την διάρκεια του έτους.

Το συνολικό κόστος μεταφοράς των φ/β πάνελ από τα κέντρα συλλογής στο PVRC είναι το άθροισμα του κόστους που απαιτείται για την μεταφορά των πάνελ από το εκάστοτε κέντρο συλλογής στο κέντρο ανακύκλωσης PVRC. Υπολογίζεται ως

$$TC_{KS-PVRC} = \sum_{i=1}^n (c_{t-PVRC} \times d_{KS-PVRC} \times W) \quad (18)$$

Για $i=1$ κέντρο συλλογής έως n κέντρα συλλογής.

Όπου το c_{t-PVRC} είναι το κόστος μεταφοράς των φωτοβολταϊκών πάνελ από το κέντρο συλλογής στο κέντρο ανακύκλωσης PVRC. Το $d_{KS-PVRC}$ είναι η συνολική απόσταση μεταξύ των τοποθεσιών των κέντρων συλλογής και του κέντρου ανακύκλωσης PVRC το οποίο έχει υπολογιστεί από την εξίσωση (10) και το W η συνολική μάζα των αποβλήτων της επεξεργασμένης τεχνολογίας κατά την διάρκεια του έτους.

Τέλος από την εξίσωση (19) δίνεται το συνολικό κόστος φόρτωσης/εκφόρτωσης των φ/β πάνελ. Υπολογίζεται από το άθροισμα των επιμέρους κοστών για τα κέντρα συλλογής, δηλαδή

$$T_{\Phi/E} = \sum_{i=1}^n (c_{t-\Phi/E} \times W) \quad (19)$$

Για $i=1$ κέντρο συλλογής έως n κέντρα συλλογής.

Όπου το $c_{t-\Phi/E}$ είναι το κόστος φόρτωσης/εκφόρτωσης των φωτοβολταϊκών πάνελ και το W η συνολική μάζα των αποβλήτων της επεξεργασμένης τεχνολογίας κατά την διάρκεια του έτους.

Η εξίσωση (20) υπολογίζει το κόστος διάθεσης CU των παραπροϊόντων που παράγονται από την διαδικασία ανακύκλωσης.

$$CU = C_d \times u \quad (20)$$

Όπου το C_d αντιπροσωπεύει το κόστος υγειονομικής ταφής και το u τις ποσότητες των παραπροϊόντων που παράγονται ετησίως.

Η αξιολόγηση της βιωσιμότητας μιας επιχείρησης στηρίζεται σε διάφορες προσεγγίσεις. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιούνται τρεις μέθοδοι για την αξιολόγηση της επένδυσης. Πιο συγκεκριμένα γίνεται ο υπολογισμός της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ ή NPV) σύμφωνα με το τύπο

$$NPV = \sum_{j=1}^n \frac{(I_j - C_j)}{(1+r)^j} + C_0 \quad (21)$$

Όπου n είναι η διάρκεια του έργου σε έτη

I_j είναι το εισόδημα της εταιρείας κατά το έτος j

C_j είναι το συνολικό κόστος κατά το έτος j

r είναι το επιτόκιο προεξόφλησης

και το C_0 είναι το αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης.

Στην συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός της περιόδου αποπληρωμής (Payback Period- PB), δηλαδή του χρόνου που απαιτείται για να αποκοιμηθεί οικονομικό όφελος ίσο με το αρχικό κεφάλαιο επένδυσης. Έτσι είναι

$$PB = J + \frac{|B_J|}{Z_{J+1}} \quad (22)$$

Όπου J είναι η τελευταία περίοδος με αρνητική σωρευτική ταμειακή ροή

B_J η σωρευτική ταμειακή ροή κατά το έτος J και

Z_{J+1} είναι η ταμειακή εισροή του επόμενου έτους

Τέλος, γίνεται ο υπολογισμός του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (Internal Rate of Return-IRR) το οποίο δείχνει την απόδοση ενός επενδυτικού προγράμματος. Είναι:

$$CF_0 = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1 + IRR)^t} \quad (23)$$

Όπου CF_t είναι η πρόσθετη ετήσια ταμειακή ροή (είτε αρνητική είτε θετική)

CF_0 το αρχικό κόστος επένδυσης, IRR ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης και t είναι το έτος.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως η ανάλυση κύκλου ζωής του Project FRELP είναι απαραίτητη ώστε να υπολογισθούν τα έσοδα καθώς και τα κόστος θεραπείας της επιχείρησης. Ο παρακάτω Πίνακας 3.10 δείχνει τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη βασισμένη στις τιμές του 2022-2023.

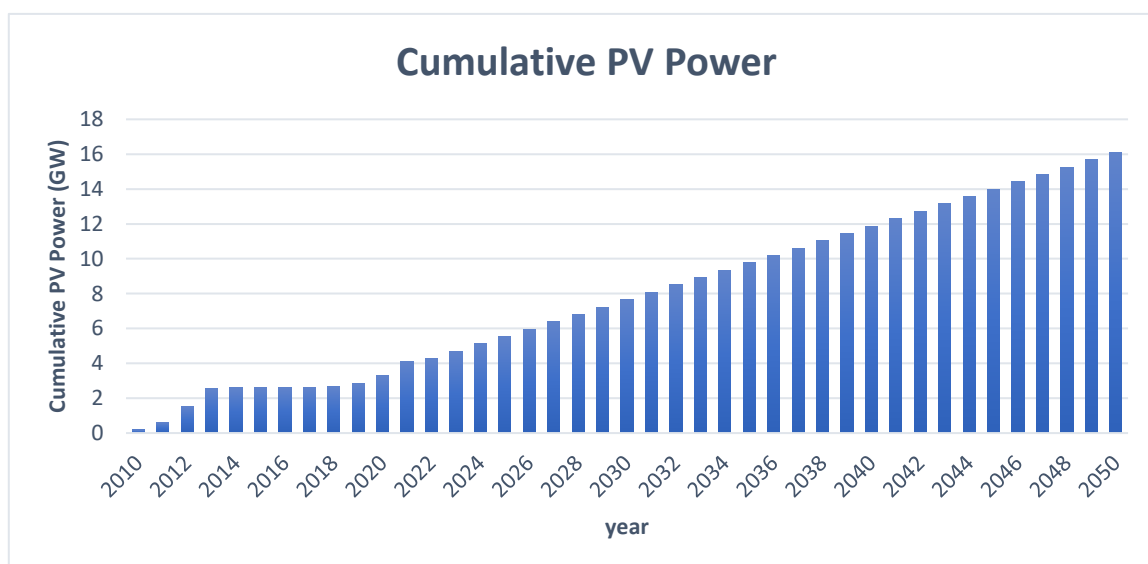
Πίνακας 3.10:Υλικά και τρέχουσες τιμές αυτών

Input	Price (€)	Unit	Source
Electricity	0,117	kWh	(GlobalPetrolPrices.com, 2023)
Diesel Fuel	1,822	L	(GlobalPetrolPrices.com, 2023)
Water	0,83	M3	(ΕΥΔΑΠ, 2013)
HNO ₃	15	L	(Manis Chemicals, 2023)
Ca(OH) ₂	187,32	tn	(Alibaba.com, 2023)
Output (recovered Materials)			
Aluminum Scrap	1,20	Kg	(Οικοκύκλιος Α.Β.Ε.Ε., 2023)
Glass Scrap	65	tn	(Eurostat, 2023)
Copper Scrap	8	Kg	(Eurostat, 2023)
Silicon Metal (Metallurgical Grade)	2.000	tn	(Latunussa et al., 2016)
Silver	700	Kg	(BullionByPost, 2023)

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Συζήτηση

4.1 Ετήσια και αθροιστική ροή αποβλήτων

Έχοντας τα δεδομένα των Πινάκων 3.2 και 3.3 έγινε μια πρόβλεψη για την ετήσια και στην συνολική εγκατεστημένη ισχύ στην Ελλάδα έως και το 2050. Προκύπτει λοιπόν το ακόλουθο Διάγραμμα 4.1.



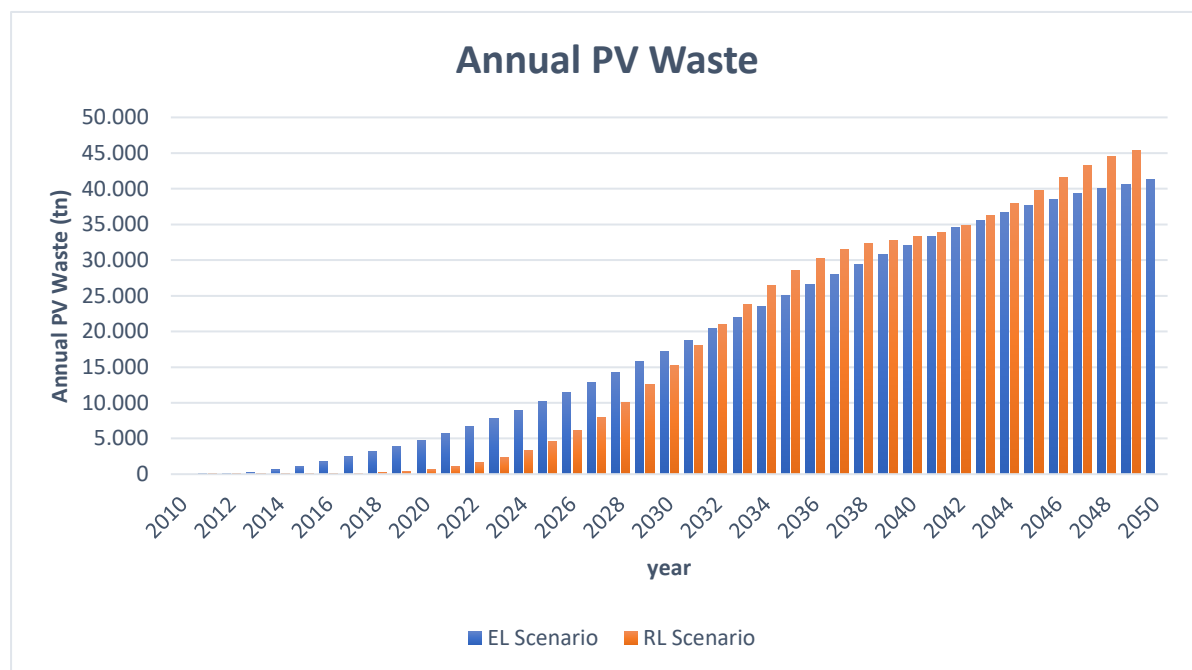
Διάγραμμα 4.1: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (GW) στην Ελλάδα έως το 2050.

Στο παραπάνω Διάγραμμα 4.1 παρατηρείται πως η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αναμένεται να αυξηθεί γραμμικά τα επόμενα χρόνια. Πιο συγκεκριμένα το 2030 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς υπολογίζεται περίπου ίση με 7,7 GW και το 2050 θα είναι 16,11 GW αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί πως τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ενδεικτικά και βασίζονται σε ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης. Καθίσταται λοιπόν σαφές πως στην πραγματικότητα η εγκατεστημένη ισχύς στα επόμενα χρόνια πιθανότατα να αποκλίνει ανά χρονικά διαστήματα.

Στην συνέχεια υπολογίστηκε η μελλοντική ροή φωτοβολταϊκών αποβλήτων καθώς και η σύνθεση αυτών. Αρχικά γίνεται η μετατροπή της ετήσιας εγκατεστημένης ισχύς (MW) σε μάζα (kg) σύμφωνα με την εξίσωση (1). Πιο συγκεκριμένα, έχοντας τα δεδομένα των Πινάκων 3.4 και 3.5 και την ετήσια εγκατεστημένη ισχύς για τα έτη 2010 έως 2050 (Πίνακας 3.2) υπολογίζονται τα φωτοβολταϊκά απόβλητα για κάθε τύπο φωτοβολταϊκών PV_{mi} σε κιλά (kg) για κάθε χρόνο. Έπειτα, από την εξίσωση (2) υπολογίζεται η ετήσια συνολική εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή μάζα PV_{am} σε τόνους και από την εξίσωση (3) υπολογίζεται η αθροιστική φωτοβολταϊκή μάζα PV_{cum} σε τόνους. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 7.3 στα Παραρτήματα.

Ακόμη από την εξίσωση κατανομής Weibull (4) και με βάση τον Πίνακα 3.6 υπολογίζεται η πιθανότητα αποτυχίας ενός εγκατεστημένου φωτοβολταϊκού συστήματος την χρονική στιγμή $t=0$ έως την χρονική στιγμή $t=40$ και για τα δυο σενάρια (Πίνακες 7.1 και 7.2 Παραρτήματα).

Τέλος, με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα από την εξίσωση (5) υπολογίζεται η παραγόμενη ποσότητα φωτοβολταϊκών αποβλήτων για κάθε έτος $PV_{annual\ waste}$ και για τα 2 σενάρια. Επομένως προκύπτει το ακόλουθο Διάγραμμα 4.2. Τα δεδομένα του Διαγράμματος 4.2 παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.4 στα παραρτήματα.



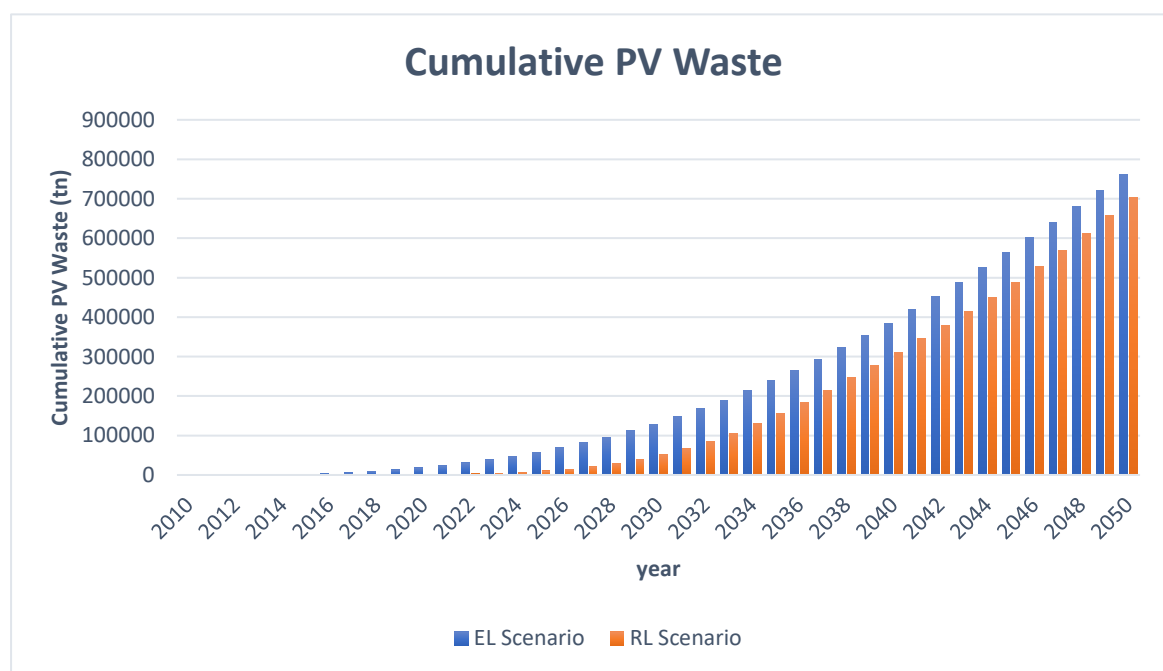
Διάγραμμα 4.2: Ετήσια ροή φωτοβολταϊκών αποβλήτων για δυο σενάρια.

Στο Διάγραμμα 4.2, η μπλε στήλη αναφέρεται στο Early Loss Scenario (EL) ενώ η πορτοκαλί στήλη αναφέρεται στο Regular Loss Scenario (RL). Παρατηρείται πως στο EL Scenario η παραγωγή φωτοβολταϊκών αποβλήτων είναι βαθμιαία σε συνάρτηση με το χρόνο σε σύγκριση με το RL Scenario, όπου η παραγωγή φ/β αποβλήτων είναι μεν βαθμιαία σε βάθος χρόνου αλλά με πιο απότομη κλήση. Είναι σαφές πως κάποια στιγμή θα επέλθει η μέγιστη παραγωγή αποβλήτων για το κάθε σενάριο. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4.2 η παραγωγή αποβλήτων αυξάνεται όσο παίρνουν τα χρόνια, γεγονός αναμενόμενο καθώς όλο και περισσότερα πλαίσια με την πάροδο του χρόνου θα πλησιάζουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Ωστόσο σε κανένα από τα δύο σενάρια δεν επέρχεται η μέγιστη παραγωγή αποβλήτων. Η παραγωγή αυτήν αναμένεται μετά το 2050 και στις δύο περιπτώσεις.

Καθοριστικό παράγοντα για την διεξαγωγή αυτής της μελέτης είναι το έτος που τα φωτοβολταϊκά απόβλητα ανέρχονται στους 20.000 tn ετησίως, και αυτό γιατί βάση αυτής της ποσότητας αποβλήτων είναι εφικτό να λειτουργήσει ένα εργοστάσιο ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών αποβλήτων από οικονομικής και βιώσιμης προοπτικής. Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα και το Διάγραμμα 4.2 προκύπτει ότι στην Ελλάδα η παραγωγή αποβλήτων ανέρχεται στους 20.000 tn το 2032 για το EL Scenario και το 2033 για το RL Scenario. Πιο αναλυτικά το 2032 αναμένεται να παραχθούν 20.365,03 tn PV Waste (EL) και για το 2033 υπολογίστηκε ότι 21.004,35 tn PV Waste (RL) πρόκειται να παραχθούν.

Λαμβάνοντας υπόψιν την εγκατεστημένη ισχύ, τα έτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάνελ, την διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών, τις πιθανότητες σφάλματος, την πιθανότητα αποτυχίας ενός φωτοβολταϊκού σε συνδυασμό με αντίστοιχες έρευνες που έχουν γίνει σε διάφορα μέρη του κόσμου όπως η Αυστραλία, η Ιταλία, η Ισπανία, το Μεξικό (Domínguez et al., 2017; Molano et al., 2022; Paiano, 2015; Santos et al., 2018) αναμέναμε τα φωτοβολταϊκά απόβλητα να ανέρχονται στους 20.000 tn ανάμεσα στα έτη 2030 με 2035 γεγονός που επαληθεύτηκε με βάση τα δεδομένα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν βάση των υπολογισμών. Έχοντας τα παραπάνω αποτελέσματα καθίσταται αντιληπτό πως το έτος 2030 και μετά θα ήταν αναγκαίο να τεθούν οι βάσεις για να σχεδιαστεί ένα εργοστάσιο ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα.

Στην συνέχεια έγινε ο υπολογισμός της αθροιστικής ποσότητας των φωτοβολταϊκών αποβλήτων $PV_{cum\ waste}$ σε τόνους για τα 2 σενάρια σύμφωνα με την εξίσωση (6). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.3. Τα δεδομένα του Διαγράμματος 4.3 παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.5 στα παραρτήματα.



Διάγραμμα 4.3: Αθροιστική ροή φωτοβολταϊκών αποβλήτων για δυο σενάρια.

Από το Διάγραμμα 4.3 γίνεται αντιληπτό ότι και για τα δυο σενάρια η αθροιστική ποσότητα των φωτοβολταϊκών αποβλήτων έχει μια ομαλή αύξηση με το πέρασμα του χρόνου. Συγκρίνοντας τις δυο στήλες παρατηρείται ότι στο EL Scenario (μπλε στήλη) η καμπύλη της αθροιστικής ποσότητας φ/β αποβλήτων είναι πιο έντονη σε σχέση με τις ποσότητες που προκύπτουν βάση του RL Scenario (πορτοκαλί στήλη). Η αύξηση στο EL Scenario είναι πιο απότομη και η παραγωγή ξεκινάει πολύ νωρίς από το 2018 και μετά ενώ στο RL scenario η παραγωγή αποβλήτων αρχίζει από το 2024, αρκετά χρόνια πιο μετά. Είναι λογικό να παρατηρούνται διάφορες μεταξύ των 2 σεναρίων καθώς σε κάθε ένα από αυτά λαμβάνονται διαφορετικοί παράμετροι υπόψιν. Στην περίπτωση του EL Scenario η παραγωγή ξεκινάει τόσο νωρίς καθώς στο σενάριο αυτό η πιθανότητα αποτυχίας ενός φ/β πάνελ είναι μεγαλύτερη σε μικρότερο χρονικό

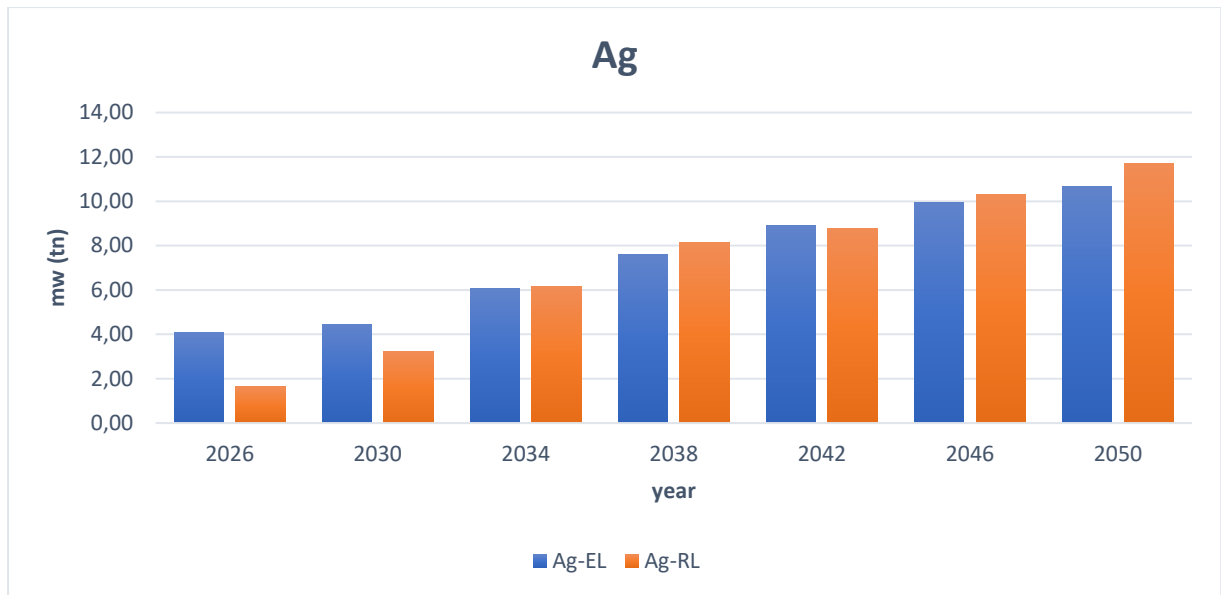
διάστημα σε σχέση με το RL Scenario το οποίο θεωρείται πιο συντηρητικό σαν περίπτωση, όπου η πρώτη παραγωγή αποβλήτων εμφανίζεται μεταγενέστερα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως ως χαρακτηριστικός μέσος όρος ζωής των φ/β πάνελ χρησιμοποιήθηκαν τα 25 έτη. Άρα βάση της κατανομής Weibull ο μέσος χρόνος ζωής των φ/β πάνελ θα είναι λίγο λιγότερος. Η ίδια μελέτη μπορεί να γίνει και με χαρακτηριστικό χρόνο ζωής τα 30 έτη, το οποίο θεωρείται από τους περισσότερους πιο ρεαλιστικό σενάριο.

4.2 Ποσότητες ανακτημένων υλικών

Εξίσου σημαντικό θεωρήθηκε να γίνει ο υπολογισμός των ποσοτήτων των υλικών που μπορούν να ανακτηθούν από την διαδικασία της ανακύκλωσης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2 της εργασίας από την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών οποιαδήποτε τεχνολογίες μπορούν να ανακτηθούν σημαντικά υλικά που περιέχονται στα φ/β πάνελ. Υπολογίζοντας τις ποσότητες αυτών λοιπόν για τα δεδομένα της Ελλάδας, είναι εφικτό να αποκτήσουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα για την αναγκαιότητα υλοποίησης αυτής της εργασίας.

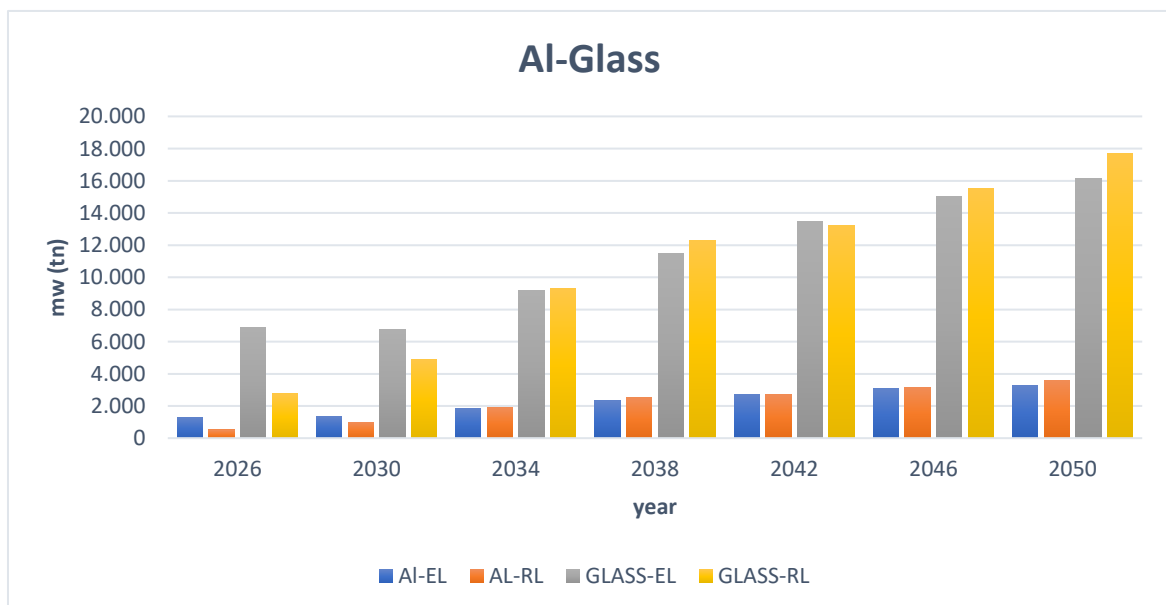
Επομένως, μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω υπολογισμών ακολουθήσε η απογραφή των φωτοβολταϊκών απορριμμάτων υπολογίζοντας αρχικά τα ετήσια απόβλητα κάθε φωτοβολταϊκού τύπου W_{ami} με βάση την εξίσωση (7), έχοντας ως δεδομένα τα απόβλητα που παράγονται ανά έτος και το μερίδιο αγοράς κάθε φ/β τύπου (οι φ/β τύποι που λάβαμε υπόψη είναι 5 και αναφέρονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3). Επίσης, τα χαρακτηριστικά τους αναφέρονται στον Πίνακα 3.1. Μέσω της εξίσωσης (8) προσδιορίστηκε η αθροιστική μάζα κάθε στοιχείου m_{wi} ανά φωτοβολταϊκό τύπο i χρησιμοποιώντας τον Πίνακα 3.7. Τέλος, βάση της εξίσωσης (9) υπολογίστηκε και η συνολική αθροιστική μάζα οποιουδήποτε υλικού m_w ανεξαρτήτου τεχνολογίας. Η διαδικασία αυτήν ακολουθήθηκε και για τα 2 σενάρια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στα παραρτήματα της εργασίας στους Πίνακες 7.6 και 7.7.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα Διαγράμματα 4.4 έως 4.12, τα οποία αφορούν την συνολική αθροιστική μάζα κάθε στοιχείου m_w ανά 4 χρόνια από το 2026 έως και το 2050. Τα δεδομένα των διαγραμμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.8 στα παραρτήματα.



Διάγραμμα 4.4: Συνολική αθροιστική μάζα του Αργύρου (Silver-Ag).

Όπως ήδη έχει αναφερθεί η ανάκτηση αργύρου (Ag) είναι μια από της πιο σημαντικές διεργασίες που μπορούν να λάβουν χώρα κατά την διαδικασία ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών πάνελ τόσο από οικονομικής όσο και από περιβαλλοντικής πλευράς. Επομένως αν ληφθεί υπόψη πως ο άργυρος είναι ένα σπάνιο μέταλλο και δεν αφθονεί στην φύση η ανάκτηση του κρίνεται αναγκαία. Όπως συμπεραίνεται και από το Διάγραμμα 4.4 τα φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς περιέχουν σημαντικές ποσότητες αργύρου οι οποίες μπορούν να ανακτηθούν. Ενδεικτικά το 2034 σύμφωνα με το EL Scenario ο άργυρος ανέρχεται στους 6,06 tn ενώ στο RL Scenario είναι 6,15 tn. Το έτος αυτό η παραγόμενη ποσότητα είναι σχεδόν ίση και για τα δυο σενάρια. Ωστόσο στο πέρασμα του χρόνου οι ποσότητες αυξάνονται και παρουσιάζουν διαφορές.



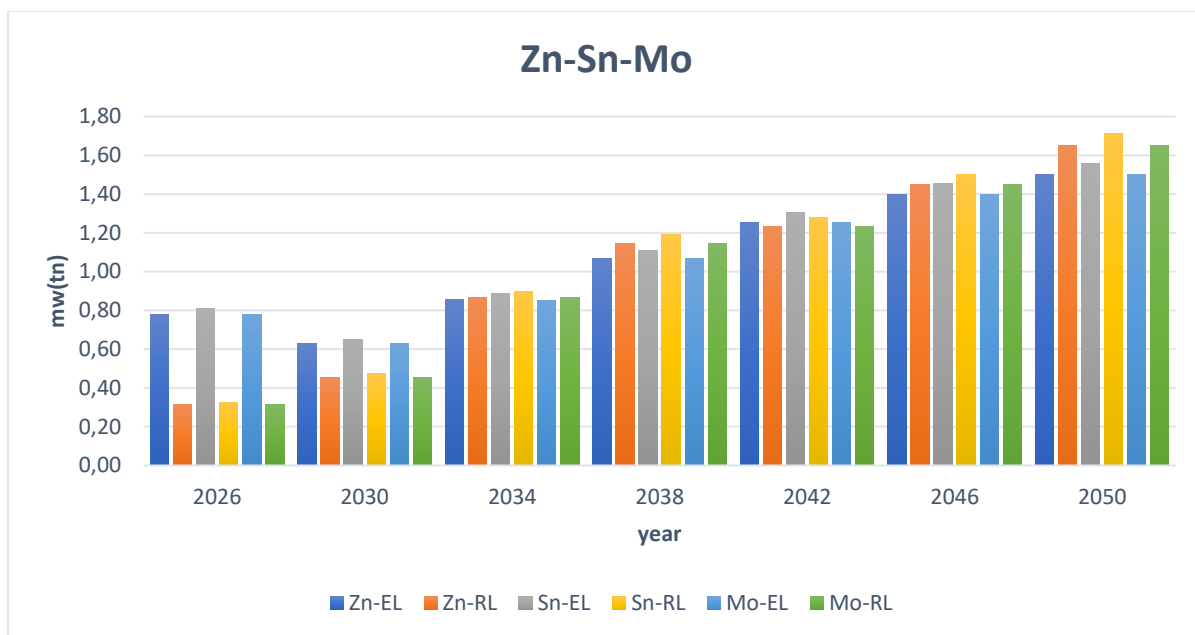
Διάγραμμα 4.5: Συνολική αθροιστική μάζα του Αργίλιου (Aluminum-Al) και του γυαλιού (Glass).

Το αλουμίνιο και το γυαλί είναι από τα κύρια υλικά τα οποία συνθέτουν ένα φωτοβολταϊκό πάνελ επομένως είναι αναμενόμενο σαν απόβλητα οι ποσότητες τους να είναι αρκετά μεγάλες. Η ανακύκλωση του αλουμινίου και του γυαλιού είναι γνωστές διαδικασίες. Ακόμη οι ποσότητες που αντλούνται από τα φ/β πάνελ όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4.5 είναι μεγάλες συνεπώς η ανάκτηση τους θεωρείται απαραίτητη. Για παράδειγμα το 2034 σύμφωνα με το EL Scenario θα παραχθούν 1.865,68 tn Al, ενώ με το RL Scenario θα παραχθούν 1.892,3 tn Al. Όσο αναφορά το γυαλί οι ποσότητες θα είναι 9.171,5 tn , 9.302,42 tn για το EL και RL Scenario αντίστοιχα.



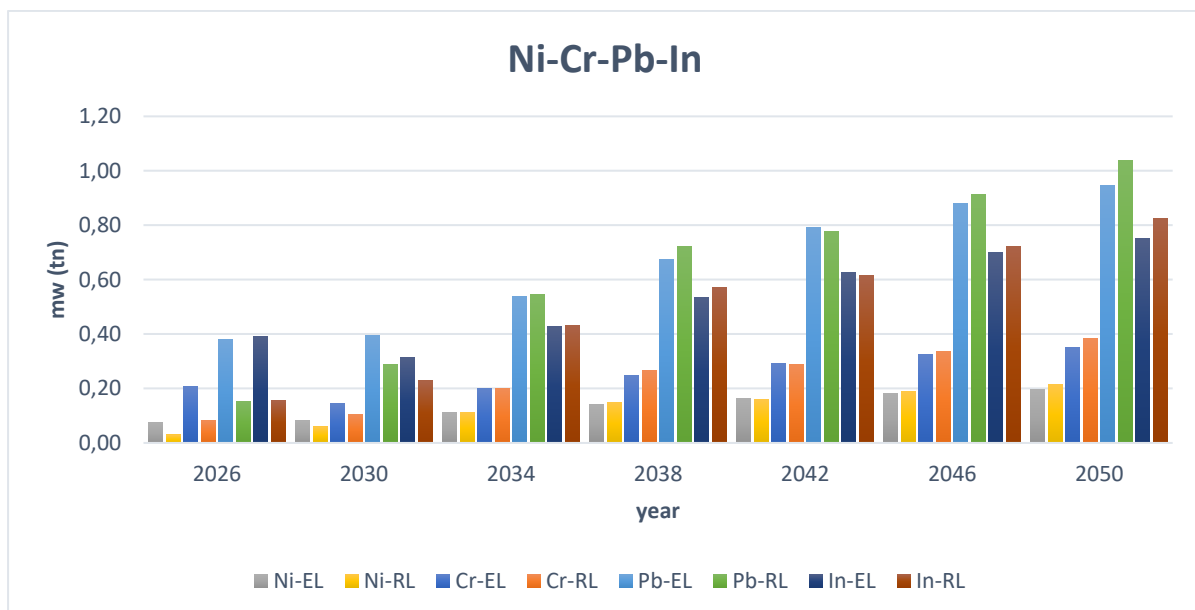
Διάγραμμα 4.6: Συνολική αθροιστική μάζα του Σιδήρου (Iron-Fe), Τιτανίου (Titanium-Ti) και Μαγγανίου (Manganese-Mn).

Οι ποσότητες των παραπάνω υλικών είναι πολύ μικρές σε σύγκριση με τα υπόλοιπα υλικά και αυτό γιατί αρχικά περιέχονται σε ορισμένες μόνο τεχνολογίες φωτοβολταϊκών και οι ποσότητες τους σε ολόκληρη την σύνθεση των πάνελ είναι ελάχιστη. Κατά συνέπεια η ανάκτηση τους δεν κρίνεται τόσο αναγκαία όσο των υπολοίπων υλικών. Ενδεικτικά από το Διάγραμμα 4.6 προκύπτει πως το 2034 οι ποσότητες του σιδήρου και του μαγγανίου είναι μηδαμινές ενώ του τιτανίου ανέρχονται σε 0,00055 tn και 0,0006 tn για κάθε σενάριο αντίστοιχα.



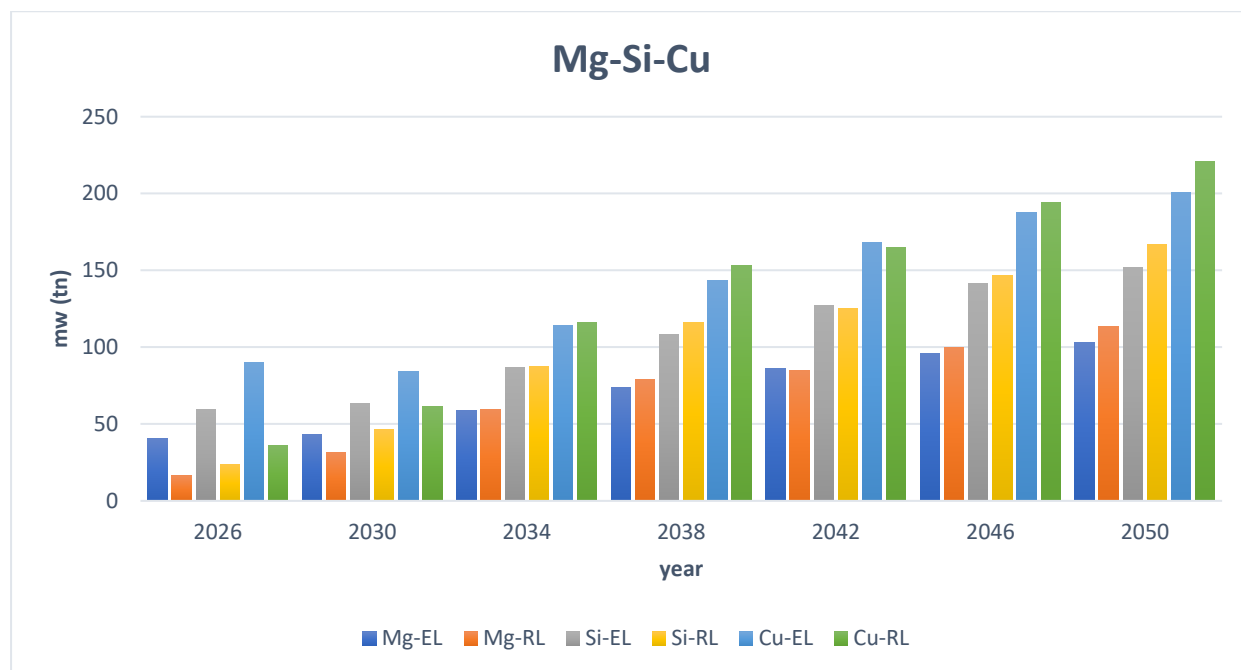
Διάγραμμα 4.7: Συνολική αθροιστική μάζα του Ψευδαργύρου (Zinc-Zn), Κασσίτερου (Stannous-Sn) και Μολυβδαίνιου (Molybdenum-Mo).

Τα παραπάνω υλικά δεν συμπεριλαμβάνονται σε όλους τους τύπους φωτοβολταϊκών άρα και οι ποσότητες που πρόκειται να παραχθούν θα είναι ανάλογες. Όπως γίνεται αντιληπτό και από το Διάγραμμα 4.7 στο πέρασμα του χρόνου παρουσιάζουν διακυμάνσεις, παράγονται αρκετές ποσότητες αυτών αλλά όχι τόσο μεγάλες όπως συμβαίνει στην περίπτωση του αργύρου. Το 2034 ο ψευδάργυρος θα είναι 0,85 tn (EL Scenario) και 0,86 tn (RL Scenario), ο κασσίτερος 0,88 tn (EL Scenario) 0,89 tn (RL Scenario) και το μολυβδαίνιου 0,85 tn (EL Scenario) 0,87 tn (RL Scenario). Η ανάκτηση τους από περιβαλλοντικής άποψης είναι συμφέρουσα από οικονομικής όμως άποψης μεμονωμένα πιθανόν να μην αξίζει.



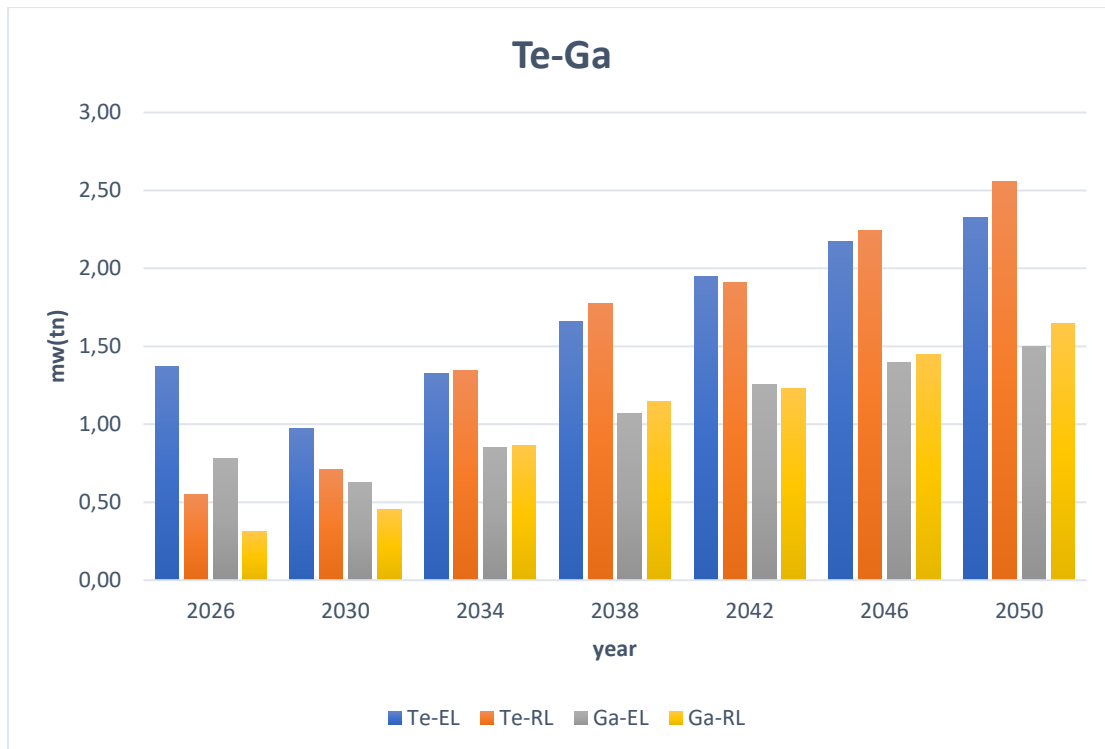
Διάγραμμα 4.8: Συνολική αθροιστική μάζα του Νικελίου (Nickel-Ni), Χρωμίου (Chromium-Cr), Μόλυβδου (Plumbum-Pb) και Ινδίου (Indium-In).

Όπως και τα προηγούμενα υλικά έτσι και αυτά παράγουν ορισμένες ποσότητες μέχρι και το 2050. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4.8 μέχρι και το 2050 κανένα στοιχείο δεν ξεπερνά τον 1 τόνο εκτός από τον μόλυβδο στο RL Scenario. Τα υπόλοιπα κυμαίνονται σε χαμηλότερες ποσότητες και αυξάνονται σταδιακά όσο τα χρόνια περνούν. Ο μόλυβδος ωστόσο είναι επικίνδυνο μέταλλο επομένως η ανάκτηση του και η περαιτέρω επεξεργασία του κρίνεται απαραίτητη.



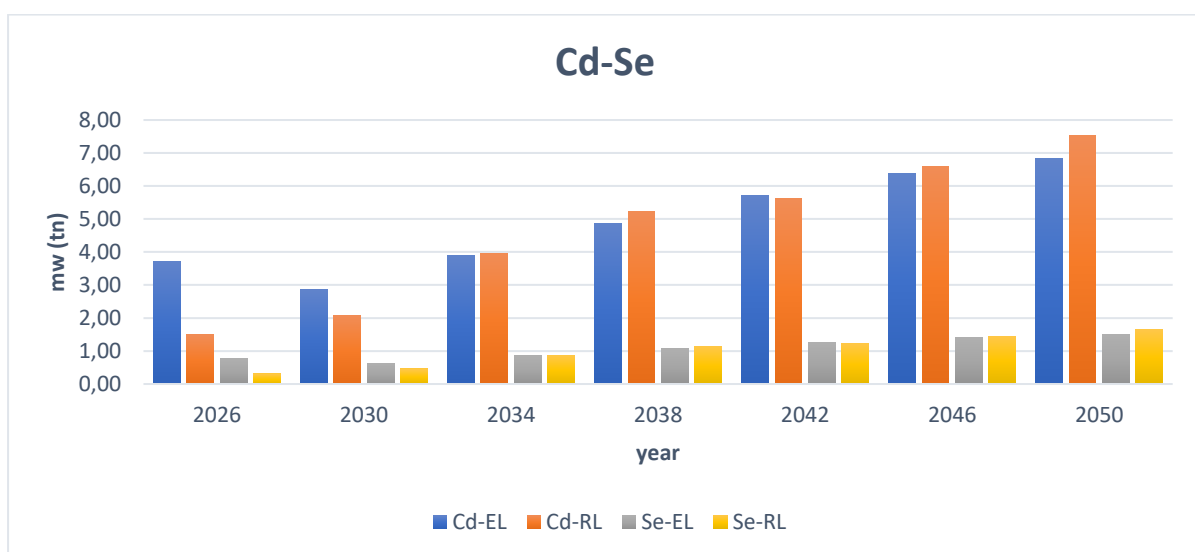
Διάγραμμα 4.9: Συνολική αθροιστική μάζα του Μαγνησίου (Magnesium-Mg), Πυριτίου (Silicon-Si) και Χαλκού (Copper-Cu).

Οι ποσότητες του μαγνησίου, του πυριτίου και του χαλκού που παράγονται από την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι σημαντικές δεδομένου της περιεκτικότητας τους στους διάφορους τύπους πάνελ που μελετήθηκαν. Από το Διάγραμμα 4.9 για το 2034 στο Early Loss Scenario προβλέπεται πως θα παραχθεί 58,7 tn Mg, 86,5 tn Si και 114,3 tn Cu, ενώ για Regular Loss Scenario την ίδια χρονιά υπολογίζονται 59,5 tn Mg, 87,7 tn Si και 116,01 tn Cu.



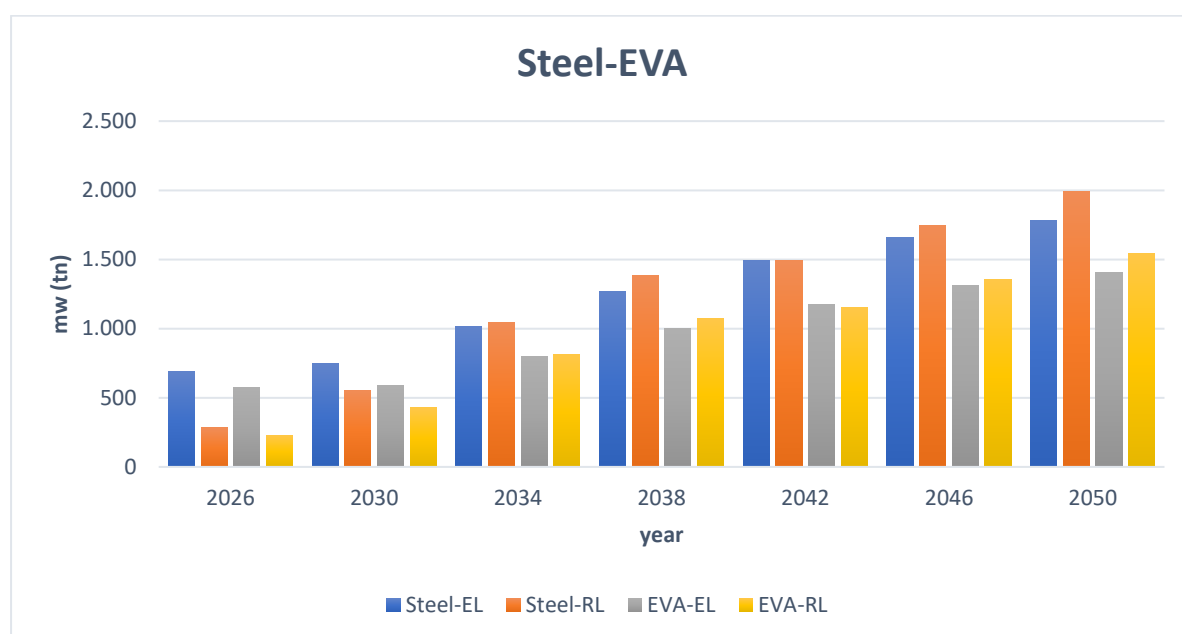
Διάγραμμα 4.10: Συνολική Αθροιστική μάζα του Τελλουρίου(Tellurium-Te) και Γαλλίου (Gallium-Ga).

Το τελλούριο και το γάλλιο είναι δυο ουσίες που περιέχονται σε συγκεκριμένες τεχνολογίες φ/β πάνελ και σε μικρές ποσότητες, με αποτέλεσμα από την ανακύκλωση τους να προκύπτουν ανάλογες ποσότητες. Πιο συγκεκριμένα, από το Διάγραμμα 4.10 συμπεραίνεται πως το 2034 θα ανακτηθούν 1,32 tn Te σύμφωνα με το EL Scenario και 1,34 tn Te κατά το RL Scenario. Επίσης για το γάλλιο είναι 0,85 tn για το EL Scenario και 0,86 tn για το RL Scenario.



Διάγραμμα 4.11: Συνολική αθροιστική μάζα του Καδμίου (Cadmium-Cd) και του Σεληνίου (Selenium-Se).

Τα υλικά όπως το κάδμιο και το σελήνιο κατατάσσονται στην κατηγορία των επικίνδυνων μετάλλων και η απόρριψη τους στο περιβάλλον χωρίς επεξεργασία κρίνεται ακατάλληλη και παράνομη, καθώς αποτελούν κίνδυνο για το περιβάλλον και κατ' επέκταση για την ανθρώπινη υγεία. Το κάδμιο περιέχεται σε μεγάλες ποσότητες στα πάνελ 2^{ης} γενιάς και όπως συμπεραίνεται και από το Διάγραμμα 4.11 οι ποσότητες που αναμένονται να παραχθούν είναι σημαντικές. Το σελήνιο αν και περιέχεται σε πάνελ 2^{ης} γενιάς σαν ποσότητα είναι αρκετά μικρότερη αλλά εξίσου σημαντική να ανακτηθεί. Το 2034 για το EL Scenario υπολογίστηκε πως θα παραχθούν 3,89 tn Cd και 0,86 tn Se, ενώ για το RL είναι 3,94 tn Cd και 0,87 tn Se. Από το Διάγραμμα 4.11 παρατηρείται επίσης πως τα μετέπειτα χρόνια οι ποσότητες του καδμίου πρόκειται να αυξηθούν σημαντικά έως και το 2050. Οι ποσότητες εκείνη την χρονιά πλησιάζουν τους 7 και 8 tn αντίστοιχα για κάθε σενάριο, επομένως κρίνεται απαραίτητο να ανακτηθούν. Η αύξηση αυτή είναι ανάλογη της αύξησης των εγκαταστάσεων φωτοβολταϊκών 2^{ης} γενιάς που λαμβάνει χώρα τα τελευταία έτη στην χώρα μας.



Διάγραμμα 4.12: Συνολική αθροιστική μάζα του Χάλυβα (Steel) και της επίστρωσης EVA (Ethylene-vinyl acetate-EVA).

Οι ποσότητες του χάλυβα και της επίστρωσης EVA που αναμένεται να παραχθούν είναι μεγάλες καθώς σαν υλικά περιέρχονται σε όλους του τύπους φωτοβολταϊκών όπως συμβαίνει και με το γυαλί και το αλουμίνιο. Συνεπώς, η ανακύκλωση τους είναι μονόδρομος. Πιο αναλυτικά, από το Διάγραμμα 4.12 το 2034 η συνολική αθροιστική μάζα του χάλυβα είναι 1.013,6 tn (EL Scenario) και 1.046,4 tn (RL Scenario). Παράλληλα για την επίστρωση EVA θα είναι 800,5 tn (EL Scenario) και 811,9 tn (RL Scenario) αντίστοιχα.

4.3 Βέλτιστη τοποθεσία κέντρου ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών αποβλήτων (PVRC)

Στο επόμενο στάδιο της παρούσας εργασίας μελετήθηκε και προσδιορίστηκε η βέλτιστη τοποθεσία για την δημιουργία των κέντρων συλλογής και της κύριας εγκατάστασης επεξεργασίας και ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών αποβλήτων (PVRC). Η μελέτη αυτήν έλαβε υπόψιν διάφορους παράγοντες όπως για παράδειγμα την κατανομή των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στην χώρα μας, την γεωμορφολογία της, τον οδικό άξονα, την ύπαρξη ήδη υπάρχοντων εγκαταστάσεων επεξεργασίας και ανακύκλωσης ηλεκτρονικών αποβλήτων, υποδομές και κέντρα αποβλήτων.

Στοιχεία για τα παραπάνω αντλήθηκαν από διάφορες πηγές και χάρτες. Πιο συγκεκριμένα ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στον Γεωπληροφοριακό χάρτη που παρέχει η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ).



Εικόνα 4.1: Χάρτης εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών (Ισχύς>1MW) στην Ελλάδα, περιοχές μελέτης (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, 2023).

Από τον παραπάνω χάρτη (Εικόνα 4.1) αντλήθηκαν πληροφορίες σχετικά για τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις με ισχύ μεγαλύτερη από 1 MW. Όπως γίνεται αντιληπτό από την κατανομή και την γεωμορφολογία της Ελλάδος περιοχές με την

μεγαλύτερη διασπορά φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι όλη η περιοχή της Θεσσαλίας δηλαδή Λάρισα, Τρίκαλα, Καρδίτσα και Βόλος, ο νομός της Κοζάνης, ο νομός Βοιωτίας, ο νομός Φθιώτιδας και η ευρύτερη περιοχή της Αττικής. Από την σελίδα της ΡΑΕ (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, 2023) συλλέχθηκαν δεδομένα και πληροφορίες για τα εγκατεστημένα πάρκα, γεωγραφικές συντεταγμένες, περιοχές, παραγόμενη ισχύς του κάθε πάρκου για όλη την Ελλάδα. Το 2021 στην Ελλάδα η συνολική αθροιστική εγκατεστημένη ισχύς είναι ίση με 4.126 MW, προκύπτει λοιπόν πως τα φ/β πάρκα ισχύος >1MW αντιπροσωπεύουν περίπου το 42% του συνόλου. Συνολικά από το 2010 έως και το 2021 στην Ελλάδα έχουν εγκατασταθεί 345 φ/β πάρκα με ισχύ >1MW τα οποία είναι σε λειτουργία. Η πιο πρόσφατη ενημέρωση είναι πως τα συστήματα αυτά συνολικά παράγουν 1.698,72 MW ετησίως το 2021. Οι περιοχές μελέτης που αναφέρθηκαν αποτελούνται από 134 φ/β πάρκα τα οποία αντιπροσωπεύουν το 60% της συνολικής αυτής ισχύς που παράγονται μέχρι την δεδομένη στιγμή, δηλαδή παράγουν 1.023,54 MW ενέργειας (Πίνακας 4.1). Κατά συνέπεια γίνεται αντιληπτό πως και η μεγαλύτερη ροή φωτοβολταϊκών αποβλήτων θα παράγεται από αυτές τις περιοχές. Επομένως η μελέτη για την εύρεση της βέλτιστης τοποθεσίας οροθετήθηκε ανάμεσα σε αυτές τις 7 περιοχές.

Πίνακας 4.1: Παραγόμενη ισχύς από φ/β συστήματα των περιοχών μελέτης

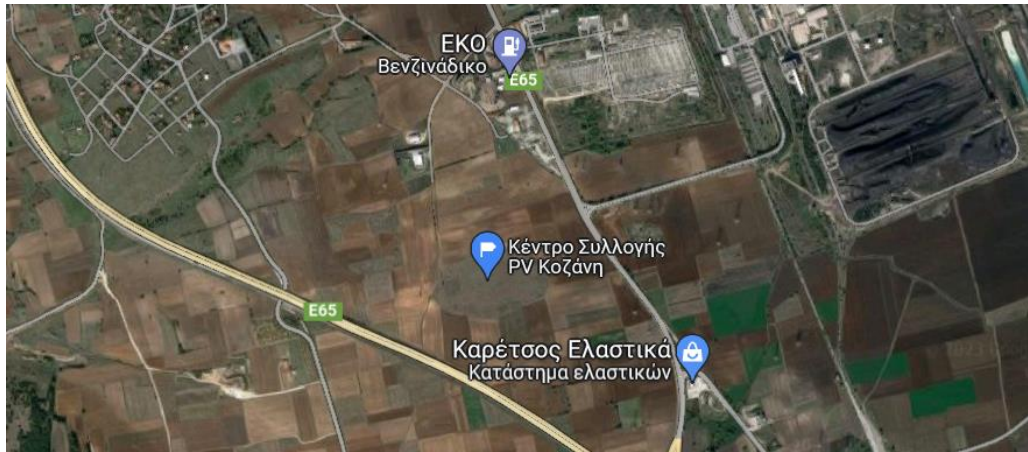
	φ/β συστήματα σε όλη την Ελλάδα	φ/β συστήματα ισχύς>1 MW	φ/β συστήματα περιοχών μελέτης ισχύς>1MW	Συνολική αθροιστική παραγόμενη ισχύς (MW) το 2021
Συνολική αθροιστική παραγόμενη ισχύς (MW) το 2021	4.126	1.698,72	Νομός Κοζάνης	488,98
Ποσοστό		42% όλων των φ/β συστημάτων	Νομός Τρικάλων- Νομός Καρδίτσας	60,43
			Νομός Λάρισας-Νομός Μαγνησίας	86,72
			Νομός Φθιώτιδας	44,37
			Νομός Βοιωτίας- Ευρύτερη περιοχή Αττικής	343,03
Συνολική αθροιστική ισχύ (MW) των περιοχών μελέτης το 2021				1.023,54
		Ποσοστό		60% των φ/β συστημάτων με ισχύ >1MW

Σημαντικό επίσης είναι να τονιστεί πως τα αποτελέσματα προέκυψαν λαμβάνοντας ως δεδομένα μόνο τα φ/β πάρκα με ισχύ >1 MW και όχι μικρότερα. Επίσης δεν συμπεριλαμβάνονται τα φωτοβολταϊκά στέγης. Η παραπάνω θεώρηση έγινε γιατί η μεγαλύτερη ροή αποβλήτων αναμένεται από μεγάλα φ/β πάρκα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Επιπλέον ήταν δύσκολο να βρεθούν δεδομένα για μικρότερες εγκαταστάσεις καθώς ο γεωπληροφοριακός χάρτης και η ΡΑΕ δεν παρέχουν τέτοιου είδους πληροφορίες. Δεδομένα αναζητήθηκαν και σε άλλες πηγές όπως στον Διαχειριστή ΑΠΕ και Εγγυήσεων Προέλευσης Α.Ε. (ΔΑΠΕΕΠ Α.Ε.), ωστόσο ότι πληροφορία συλλέχθηκε ήταν μια συνολική εικόνα της τρέχουσας κατάστασης στην Ελλάδα και όχι κάτι συγκεκριμένο. Αποτέλεσμα όλων αυτών λοιπόν ήταν η μελέτη να γίνει με τα υπάρχοντα δεδομένα. Θεωρήθηκαν ότι καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος και ανταποκρίνονται σε μεγάλο βαθμό στην πραγματικότητα.

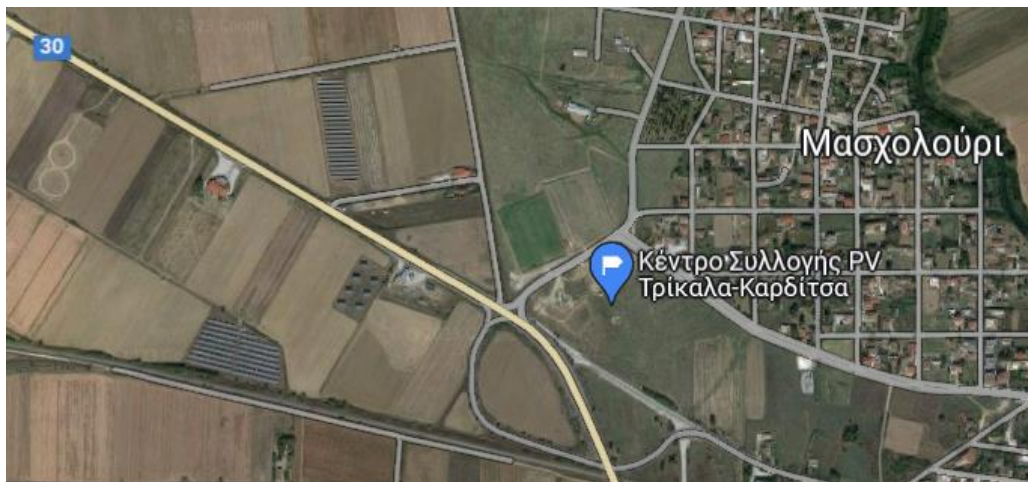
Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η εύρεση της βέλτιστης γεωγραφικής τοποθεσίας είναι απαραίτητη για την εγκατάσταση του κέντρου ανακύκλωσης των πάνελ (PVRC) και των κέντρων συλλογής. Οι τοποθεσίες κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος είναι αναγκαίος παράγοντας για την εύρεση της βέλτιστης θέσης και για τα δυο σενάρια. Έχοντας τα δεδομένα αυτά για κάθε φωτοβολταϊκό πάρκο των περιοχών μελέτης, η τοποθεσία του κέντρου PVRC προσδιορίστηκε ελαχιστοποιώντας την συνολική απόσταση μεταξύ των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων και των κέντρων συλλογής.

Αρχικά, από την εξίσωση (10) υπολογίζεται η απόσταση $d(x,y)$ μεταξύ των τοποθεσιών των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων και των κέντρων συλλογής. Στην συγκεκριμένη μελέτη, οι συντεταγμένες των κέντρων συλλογής χρειάστηκε να προσδιοριστούν. Έπειτα, από έρευνα σχετικά με τα ήδη υπάρχοντα κέντρα συλλογής αποβλήτων, και άλλες εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων σε συνδυασμό με πιθανά σημεία για την τοποθεσία των κέντρων συλλογής σε κάθε περιοχή επιλέχθηκε το κάθε κέντρο να δημιουργηθεί σε έναν ανεξάρτητο χώρο και να εξυπηρετεί μόνο την συγκεκριμένη δραστηριότητα. Η επιλογή έγινε με γνώμονα τις τοποθεσίες των φωτοβολταϊκών συστημάτων κάθε νομού, την καταλληλότητα του χώρου και της γύρω περιοχής και την χιλιομετρική απόσταση από τα πάρκα που κατά βάση δεν ξεπερνούσαν τα 10 km. Έτσι προέκυψαν 5 κέντρα συλλογής των φωτοβολταϊκών αποβλήτων μεταξύ των οποίων επιλέχθηκε το βέλτιστο για την κύρια εγκατάσταση του PVRC. Τα κέντρα συλλογής είναι τα ακόλουθα

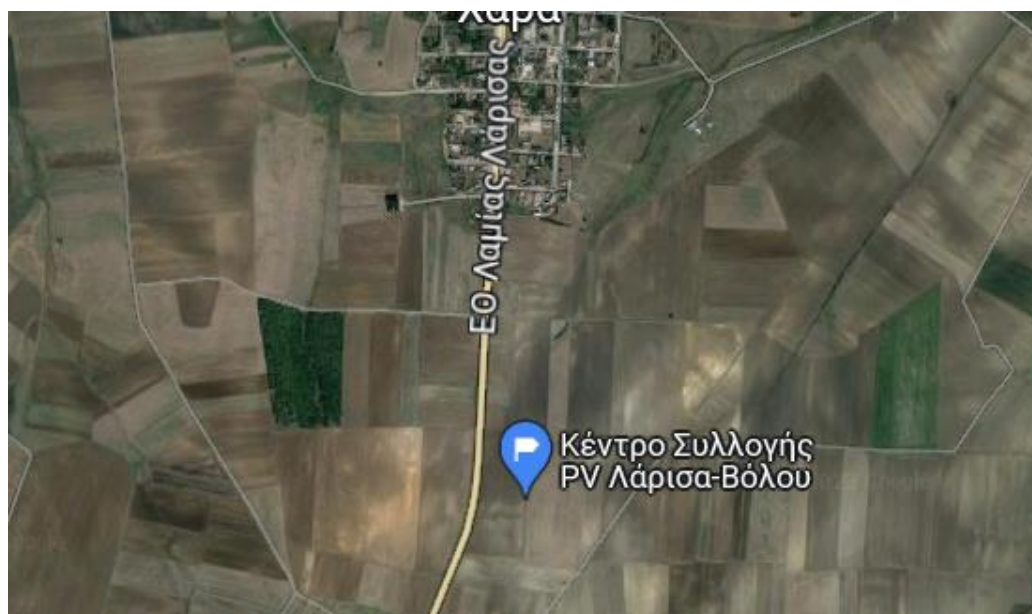
- ❖ ένα κέντρο συλλογής για τον νομό Κοζάνης (Εικόνα 4.2)
- ❖ ένα κέντρο συλλογής που εξυπηρετεί τον νομό Τρίκαλων και νομό Καρδίτσας (Εικόνα 4.3)
- ❖ ένα κέντρο για τους νομούς Λάρισας και Μαγνησίας (Εικόνα 4.4)
- ❖ ένα για τον νομό Φθιώτιδας (Εικόνα 4.5)
- ❖ ένα για τους νομούς Βοιωτίας, Δυτικής και Ανατολικής Αττικής (Εικόνα 4.6).



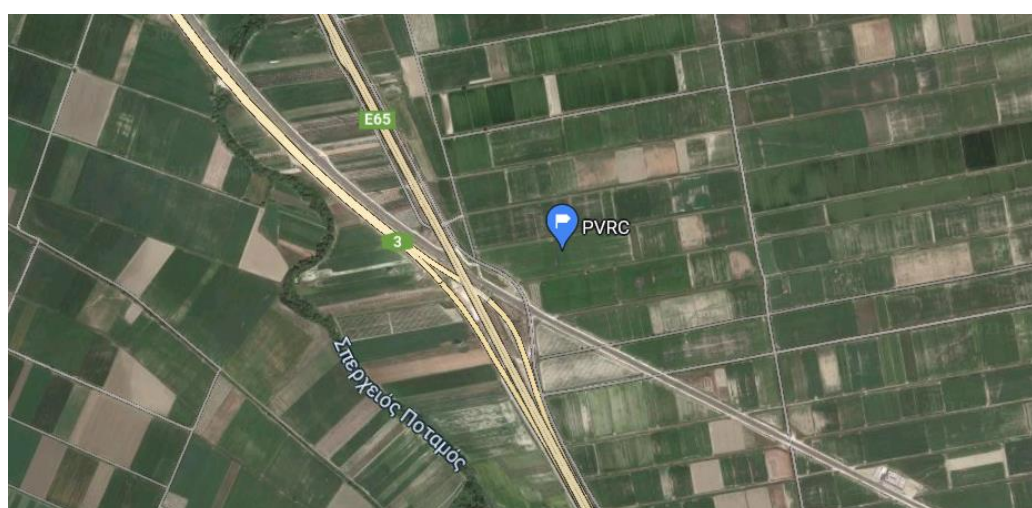
Εικόνα 4.2: Κέντρο Συλλογής PV Κοζάνης (40,39956, 21,77582).



Εικόνα 4.3: Κέντρο Συλλογής PV Τρίκαλα-Καρδίτσα (39,34395, 22,08166).



Εικόνα 4.4: Κέντρο Συλλογής PV Λάρισας-Βόλου (39,40595, 22,43120).



Εικόνα 4.5: Κέντρο Συλλογής PV Λαμίας-Κέντρο Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών Αποβλήτων PVRC (38,82931, 22,48858).



Εικόνα 4.6: Κέντρο Συλλογής PV Βοιωτίας-Αττικής (38,36265, 23,31638).

Στην συνέχεια μέσω της εξίσωσης (11) υπολογίζεται η σταθμισμένη απόσταση \bar{D} λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή βάρους. Θεωρήθηκε ότι 1 MW ισχύς ισούται με 75 τόνους φ/β αποβλήτων.

Με βάση λοιπόν τα αποτελέσματα της εξίσωσης (10) για κάθε φωτοβολταϊκό πάρκο και την συνολική σταθμισμένη απόσταση \bar{D} (Πίνακας 4.1) από οποιαδήποτε εγκατάσταση p σε ένα κέντρο συλλογής q , γίνεται ο προσδιορισμός της βέλτιστης θέσης μέσω της εξίσωσης (12), η οποία είναι μια εξίσωση ελαχιστοποίησης των συντεταγμένων για την εύρεση της βέλτιστης γεωγραφικής θέσης. Οι υπολογισμοί έγιναν σε μίλια και έπειτα έγινε η μετατροπή τους σε χιλιόμετρα (km). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Συνολική Σταθμισμένη απόσταση \bar{D}

ΠΕΡΙΟΧΕΣ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ D (miles)	Απόσταση D (km)
ΚΑΡΔΙΤΣΑ-ΤΡΙΚΑΛΑ	85.750,98	138.003
ΚΟΖΑΝΗ	267.349,64	430.258
ΒΟΙΩΤΙΑ-ΑΤΤΙΚΗ	352.557,89	567.387
ΛΑΡΙΣΑ-ΒΟΛΟΣ	114.888,40	184.894
ΦΘΙΩΤΙΔΑ	79.443,04	127.851
Optimal Location of PVRC	79.443,04	127.851

Πίνακας 11.3: Γεωγραφικές Συντεταγμένες Κέντρου Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών- PVRC

Βέλτιστη Θέση για την τοποθεσία του PVRC- Γεωγραφικές Συντεταγμένες	
Latitude (x)	38,82930552
Longitude (y)	22,48858269



Εικόνα 4.7: Κέντρο Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών Αποβλήτων -PVRC.



Εικόνα 4.8: Κέντρο Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών Αποβλήτων-PVRC, μεγάλη κλίμακα.

Προκύπτει λοιπόν πως η βέλτιστη γεωγραφική θέση για την εγκατάσταση του κέντρου επεξεργασίας και ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών αποβλήτων (PVRC) σύμφωνα με τις περιοχές μελέτης είναι στον νομό Φθιώτιδας. Πιο συγκεκριμένα, το εργοστάσιο τοποθετείτε παράλληλα στην Εθνική οδό Αθηνών-Λαμίας, κοντά στην περιοχή Ανθήλη (Εικόνα 4.7 και 4.8). Οι ακριβείς συντεταγμένες του PVRC αναφέρονται στον Πίνακα 4.2.

Τέλος, καθορίστηκε η συνολική απόσταση μεταφοράς D μέσω της εξίσωσης (13), λαμβάνοντας υπόψη των αριθμό των διαδρομών από την θέση του φωτοβολταϊκού συστήματος p στο κέντρο ανακύκλωσης PVRC.

Δεδομένου πως η συνολική απόσταση μεταφοράς εξαρτάται από τον αριθμό των διαδρομών N_i , ο οποίος εξαρτάται από την μέγιστη χωρητικότητα των φορτηγών και το συνολικό βάρος των φωτοβολταϊκών αποβλήτων, θεωρήθηκε πως τα φωτοβολταϊκά απόβλητα θα μεταφέρονται στο PVRC από τα κέντρα συλλογής με φορτηγά χωρητικότητας 42 tn, ωφέλιμου όγκου 34 m³. Ακόμη, τα φωτοβολταϊκά πάνελ από τα πάρκα θα μεταφέρονται στα κέντρα συλλογής με φορτηγά 8 tn, με ωφέλιμο όγκο 7,5 m³. Σημαντικό είναι πως έχουμε υπόψιν πως η πραγματική απόσταση μεταφοράς εξαρτάται από τους δρόμους και τις υποδομές στην μελέτη περιοχής.

Επιπλέον τα συστήματα GPS και οι χάρτες ήταν απαραίτητα για τον υπολογισμό την απόστασης μεταφοράς μεταξύ των τοποθεσιών των φωτοβολταϊκών και τον κέντρων συλλογής και ανακύκλωσης. Υπολογίστηκε λοιπόν πως η συνολική απόσταση μεταφοράς D των αποβλήτων στο PVRC για τις περιοχές μελέτης είναι **331.021,30 km**.

4.4 Επιλογή τεχνολογίας ανακύκλωσης

Αναφορικά με την επιλογή της τεχνολογίας ανακύκλωσης που επιλέχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία στηρίχθηκε σε υπάρχουσες μελέτες και εργασίες οι οποίες προσεγγίζουν το ζήτημα της ανακύκλωσης και της ανάκτησης με παρόμοιο τρόπο (Molano et al., 2022). Στηριζόμενοι λοιπόν σε δεδομένα πως τα φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς είναι η νούμερο ένα τεχνολογία που επικρατεί στην αγορά των φωτοβολταϊκών παγκοσμίως και κατ' επέκταση και στην Ελλάδα επιλέχθηκε να είναι ο οδηγός για την επιλογή των τεχνολογιών και μεθόδων ανακύκλωσης. Δεν δόθηκε παραπάνω έμφαση στο κομμάτι του σχεδιασμού των μεθόδων ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών πάνελ και ο λόγος είναι πως η παρούσα μελέτη θέλει να εστιάσει στις ποσότητες αποβλήτων οι οποίες πρόκειται να παραχθούν, την αναγκαιότητα της ύπαρξης ενός εργοστασίου ανακύκλωσης φ/β πάνελ σε συνδυασμό με το περιβαλλοντικό και οικονομικό συμφέρον που δημιουργείται από την ανάκτηση των υλικών. Για όλους αυτούς τους λόγους, η παρούσα μελέτη χρησιμοποιεί την ανάλυση κύκλου ζωής (LCI) του Project FREL. Στον Πίνακα 3.8 παρουσιάζονται οι εισροές και οι εκροές της ανακύκλωσης 1000 kg φωτοβολταϊκών πάνελ πυριτίου με την χρήση του Project FREL. Οι πληροφορίες του Πίνακα αυτού χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα για τα ποσοστά ανάκτησης και την διαδικασία εισροής και εκροής. Η χρήση τους είναι αναγκαία για την πρόβλεψη των ποσοτήτων των υλικών που θα ανακτηθούν αλλά και του κόστους που σχετίζεται με τη λειτουργία και των πιθανών οφελών της μονάδας ανακύκλωσης.

4.5 Οικονομική ανάλυση

Για να έχουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα της μελέτης θεωρήθηκε απαραίτητο να συμπεριληφθεί μια οικονομική ανάλυση για το σύστημα αυτό. Όπως έχει γίνει ήδη αντιληπτό η αναγκαιότητα να υλοποιηθεί ένα τέτοιο έργο από περιβαλλοντικής πλευράς είναι εμφανής καθώς παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Παρόλα αυτά, λαμβάνοντας υπόψιν το οικονομικό κόστος και όφελος αυτής της εφοδιαστικής επιχείρησης θα διαπιστωθεί αν αξίζει και από οικονομικής πλευράς.

Αρχικά από τα προηγούμενα στάδια έχει γίνει η καταγραφή των υλικών και οι αναλογίες τους και έχουν υπολογιστεί οι ποσότητες των ανακτημένων υλικών λόγω της ανακύκλωσης. Για την οικονομική ανάλυση συνεπώς χρησιμοποιούνται ως δεδομένα τα παραπάνω αποτελέσματα. Δηλαδή οι ποσότητες των ανακτημένων υλικών χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ετήσιων κερδών της εφοδιαστικής επιχείρησης. Όσο αναφορά τις τιμές βασίστηκαν στις τρέχουσες τιμές αγοράς, σε προβλέψεις ή σε συμφωνίες αγοράς μεταξύ ενδιαφερόμενων.

Για την ανάλυση κόστους απαιτήθηκε ο υπολογισμός τόσο του σταθερού όσο και του μεταβλητού κόστους που καθορίζεται από τις ανάγκες της εκάστοτε περιοχής. Επιπρόσθετα έγινε ο υπολογισμός του κόστους εγκατάστασης, μεταφοράς, επεξεργασίας και διάθεσης. Έχοντας λοιπόν εκτιμήσει τα έσοδα και το κόστος της αντίστροφης εφοδιαστικής λειτουργίας, στην συνέχεια έγινε η αξιολόγηση της εγκατάστασης ανακύκλωσης και η ανάλυση ευαισθησίας. Όπως ήδη έχει αναφερθεί η ανάλυση βοηθάει στον καθορισμό των πιθανών αποτελεσμάτων σε διάφορα σενάρια και επιτρέπει των σχεδιασμό στρατηγικών για την ελαχιστοποίηση των ανακριβειών των εκτιμήσεων. Για την αξιολόγηση της επένδυσης εκτιμήθηκαν η Περίοδος Αποπληρωμής (Payback Period, PB), η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value, NPV) και ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (Internal Rate of Return, IRR).

Σύμφωνα με παρόμοιες μελέτες, η ετήσια ποσότητα αποβλήτων για την βιώσιμη λειτουργία ενός κέντρου ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών αποβλήτων PVRC είναι 20.000 τόνοι, και η μεταφορά τους απαιτεί φορτηγά χωρητικότητας 8 tn και 42 tn. Από την πρόβλεψη των αποβλήτων στο Early Loss Scenario (EL) η ποσότητα των φωτοβολταϊκών αποβλήτων ανέρχεται στους 20.000 τόνους το 2032, ενώ στο Regular Loss Scenario (RL), παρόμοιες ποσότητες αποβλήτων θα συλλεχθούν το έτος 2033.

Το συνολικό κόστος της αντίστροφης εφοδιαστικής λειτουργίας υπολογίζεται από την εξίσωση (14). Για να βρεθεί λοιπόν το τελικό συνολικό κόστος C χρειάζεται να υπολογιστούν τα επιμέρους κόστη. Από τον Πίνακα 3.9 αντλούνται σημαντικές πληροφορίες.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως ο υπολογισμός του συνολικού κόστους αλλά και των εσοδών της επιχείρησης υπολογίστηκε ανά 5 χρόνια από το 2030 έως και το 2050.

Αρχικά το κόστος της εγκατάστασης θεωρείται σταθερό και ίσο με 4.032.974,40 € και για τα 2 σενάρια (Molano et al., 2022).

Το λειτουργικό κόστος OC υπολογίζεται από την εξίσωση (15) έχοντας υπολογίσει για το κάθε σενάριο την συνολική μάζα των αποβλήτων W της επεξεργασμένης

τεχνολογίας κατά την διάρκεια του έτους. Όπως ήδη έχει αναφερθεί το εργοστάσιο επικεντρώνεται στην ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πάνελ πρώτης γενιάς δηλαδή των πάνελ πυριτίου (c-Si), επομένως όλα τα κόστη υπολογίζονται για τις συγκεκριμένες ποσότητες αποβλήτων. Σημαντικό επίσης είναι να τονιστεί πως οι ποσότητες αυτές αναφέρονται μόνο στα απόβλητα που συλλέγονται από τα 5 κέντρα συλλογής που έχουν εγκατασταθεί. Άρα και η μάζα W αντιπροσωπεύει την μάζα των πάνελ c-Si από τα 5 κέντρα συλλογής. Το κόστος θεραπείας C_k προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τα δεδομένα του Πίνακα 3.8 και συγκεκριμένα τα inputs με τα αντίστοιχα δεδομένα του Πίνακα 3.10. Έπειτα, αθροίζοντας τα επιμέρους κόστη θεραπείας βρίσκουμε το συνολικό κόστος C_k το οποίο θεωρείται σταθερό για όλο το χρονικό διάστημα από 2030 έως 2050 και ίδιο και για τα 2 σενάρια. Το κόστος εργασίας LC θεωρείται και αυτό σταθερό και ίδιο για τα δυο σενάρια και προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τους εργαζομένους του εργοστασίου με τον αντίστοιχο μισθό, τα δεδομένα αναφέρονται στον Πίνακα 3.9. Έχοντας όλες τις μεταβλητές της εξίσωσης (15) υπολογίζεται το λειτουργικό κόστος OC για κάθε σενάριο. Έτσι προκύπτει ο Πίνακας 4.4.

Πίνακας 4.4: Λειτουργικό Κόστος (OC)

	EL Scenario	RL Scenario
year	OC (€)	OC (€)
2030	317.697,39	315.150,34
2035	320.676,87	321.001,11
2040	323.076,34	325.223,55
2045	324.654,12	326.031,85
2050	325.501,82	326.052,25

Ακολουθεί, ο υπολογισμός του κόστους μεταφοράς. Αξίζει να σημειωθεί πως για τον υπολογισμό αυτού του κόστους ακολουθήθηκε μια αρκετά λεπτομερής διαδικασία καθώς το κομμάτι της μεταφοράς των αποβλήτων είναι από τα βασικότερα στάδια που αφορούν την δημιουργία αυτού του εργοστασίου ανακύκλωσης.

Μέσω της εξίσωσης (16) υπολογίζεται το συνολικό κόστος. Πρώτα έγινε ο υπολογισμός τους κόστους μεταφοράς των φ/β πάνελ από τις εγκαταστάσεις στα κέντρα συλλογής. Θεωρήθηκε πως αυτό το κόστος μεταφοράς είναι 0,40 €/tn/km και θα γίνεται με φορτηγά χωρητικότητας 8 tn. Έχοντας και το άθροισμα των αποστάσεων υπολογισμένο από την εξίσωση (10) καθώς και της ποσότητες των αποβλήτων που παράγονται από κάθε πάρκο υπολογίζεται το κόστος μεταφοράς σε κάθε κέντρο συλλογής και έπειτα αθροίζοντας όλα αυτά καταλήγουμε στο συνολικό κόστος μεταφοράς TC_{KS} μέσω της εξίσωσης (17).

Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τον υπολογισμό του κόστους μεταφοράς από τα κέντρα συλλογής στο κέντρο ανακύκλωσης PVRC. Ειδικότερα, η μεταφορά πλέον γίνεται με φορτηγά μεγαλύτερης χωρητικότητας συγκεκριμένα 42 tn με ωφέλιμο όγκο 34 tn και κόστος μεταφοράς 0,20 €/tn/km. Γνωρίζοντας την ποσότητα αλλά και την χιλιομετρική απόσταση των κέντρων συλλογής από το PVRC υπολογίζεται το συνολικό κόστος μεταφοράς $TC_{KS-PVRC}$ από την εξίσωση (18).

Τέλος, από την εξίσωση (19) υπολογίζεται το κόστος φόρτωσης/εκφόρτωσης λαμβάνοντας υπόψιν πως το κόστος είναι 2 €/tn.

Όλα τα κόστη μεταφοράς θεωρήθηκαν σταθερά και ίδια και για τα δυο σενάρια. Έχοντας υπολογίσει όλες τις μεταβλητές από την εξίσωση (16) προκύπτει το συνολικό κόστος μεταφοράς. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Κόστος Μεταφοράς (TC)

	EL scenario	RL scenario
year	TC (€)	TC (€)
2030	4.995.733,80	3.182.468,63
2035	7.116.841,36	7.347.669,65
2040	8.825.041,96	10.353.658,41
2045	9.948.275,82	10.929.092,47
2050	10.551.760,07	10.943.618,17

Το επόμενο είναι το κόστος διάθεσης CU των παραπροϊόντων που παράγονται από την διαδικασία ανακύκλωσης. Ο υπολογισμός αυτών γίνεται από την εξίσωση (20) έχοντας το κόστος υγειονομικής ταφής το οποίο είναι 40 €/tn και παραμένει σταθερό και ίδιο και για τα δυο σενάρια. Το δεδομένο αυτό αναφέρεται και στον Πίνακα 3.9. Επιπλέον, οι ποσότητες u των παραπροϊόντων που παράγονται ετησίως προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας την συνολική μάζα των αποβλήτων W κάθε σεναρίου με τα επιμέρους δεδομένα output waste από τον Πίνακα 3.8. Στην συνέχεια προσθέτοντας τα, προκύπτει η συνολική ποσότητα των παραπροϊόντων. Από την εξίσωση (20) λοιπόν υπολογίζεται το κόστος διάθεσης CU για κάθε σενάριο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Κόστος Διάθεσης Παραπροϊόντων (CU)

	EL scenario	RL scenario
year	CU (€)	CU (€)
2030	233.844,24	148.967,50
2035	333.130,71	343.935,50
2040	413.089,51	484.642,19
2045	465.666,72	511.577,56
2050	493.915,09	512.257,49

Εφόσον έχουν υπολογιστεί οι επιμέρους μεταβλητές της εξίσωσης (14), ακολουθεί ο υπολογισμός του συνολικού κόστους της επιχείρησης C και για τα 2 σενάρια. Προκύπτει λοιπόν ο ακόλουθος Πίνακας 4.7.

Πίνακας 4.7: Συνολικό Κόστος Αντίστροφης Εφοδιαστικής Λειτουργίας

	EL scenario	RL scenario
year	C (€)	C (€)
2030	9.580.249,83	7.679.560,87
2035	11.803.623,34	12.045.580,66
2040	13.594.182,20	15.196.498,55
2045	14.771.571,06	15.799.676,28
2050	15.404.151,38	15.814.902,31

Πέραν του συνολικού κόστους αντιστροφής εφοδιαστικής λειτουργίας εξίσου σημαντικό είναι να υπολογισθούν και τα συνολικά έσοδα της επιχείρησης έτσι ώστε να υπάρχει μια ολοκληρωμένη εικόνα για την σχεδίαση του έργου. Επιπλέον γνωρίζοντας τα δεδομένα αυτά είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση και η ανάλυση ευαισθησίας.

Τα έσοδα της επιχείρησης προέρχονται από την πώληση των ανακτημένων υλικών και από τα gate fees τα οποία καλούνται να πληρώσουν οι ιδιοκτήτες-παραγωγοί των φωτοβολταϊκών αποβλήτων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση από τα πάνελ που ανακυκλώνονται τα υλικά που ανακτώνται είναι όσα αναφέρονται στον Πίνακα 3.8, συγκεκριμένα αναγράφονται ως Outputs (Recovered materials) και είναι το γυαλί, ο χαλκός, τα μέταλλα πυριτίου και ο άργυρος.

Αναλυτικά για την εύρεση των εσόδων ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Γνωρίζοντας τις ποσότητες αποβλήτων σε κάθε κέντρο συλλογής και έχοντας το μερίδιο αγοράς των πάνελ c-Si ανά 5 χρόνια για τα έτη 2030 έως 2050, υπολογίστηκε η συνολική ποσότητα αποβλήτων W_{am} των c-Si πλαισίων για κάθε σενάριο βάση την πιθανότητα αποτυχίας $f(t)$. Έπειτα για κάθε σενάριο υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα έσοδα αφού πρώτα έγινε ο υπολογισμός των αντίστοιχων ποσοτήτων ανάκτησης των υλικών πολλαπλασιάζοντας το ποσοστό του κάθε υλικού με την αντίστοιχη παραγόμενη ποσότητα αποβλήτων. Έχοντας λοιπόν την ποσότητα του κάθε υλικού που έχει ανακτηθεί με βάση τον Πίνακα 3.10 υπολογίζονται τα έσοδα από κάθε υλικό. Ακολούθως υπολογίζονται και τα έσοδα από τα gate fees πολλαπλασιάζοντας την συνολική ποσότητα των αποβλήτων που θα φτάνει στο εργοστάσιο με το gate fee που έχει ορισθεί 70 €/tn, το οποίο ορίστηκε τόσο βάση αντίστοιχων τιμών σε διάφορες χώρες της Ευρώπης.

Έχοντας λοιπόν τα επιμέρους έσοδα υπολογίζονται τα συνολικά έσοδα για κάθε σενάριο για διάστημα 5 χρόνων από το 2030 έως το 2050. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8: Συνολικά Έσοδα Αντίστροφης Εφοδιαστικής Λειτουργίας

	EL scenario	RL scenario
year	In (€)	In (€)
2030	12.382.196,21	7.887.920,49
2035	17.639.475,95	18.211.596,33
2040	21.873.343,44	25.662.101,94
2045	24.657.339,28	27.088.346,34
2050	26.153.107,61	27.124.349,08

Εν συνεχεία, εφόσον έχουν υπολογισθεί τόσο τα έξοδα όσο και τα έσοδα της επιχειρήσεις αυτής καθίσταται δυνατόν η αξιολόγηση από οικονομικής πλευράς του δεδομένου έργου χρησιμοποιώντας τρεις βασικές μεθόδους αξιολόγησης βιωσιμότητας. Πιο συγκεκριμένα θα υπολογισθεί η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV), η Περίοδος Αποπληρωμής (PB) και ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) και για τα 2 σενάρια.

Για την αξιολόγηση αυτήν είναι απαραίτητο να ορισθούν κάποιες μεταβλητές. Πιο αναλυτικά, η χρονική διάρκεια του έργου ορίσθηκε τα 20 χρόνια (2030-2050) με έτος έναρξης το 2030-2031. Όσο αναφορά τον υπολογισμό της Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τα έσοδα και τα έξοδα ανά έτος. Για τον λόγο αυτό εφόσον οι υπολογισμοί μέχρι στιγμής ήταν ανά 5 έτη για τα ενδιάμεσα έτη θεωρήθηκε μια αντίστοιχη αύξηση ανά έτος. Επομένως για τα έσοδα και τα έξοδα της επιχείρησης θεωρήθηκε αύξηση 3% ανά έτος από το 2030 μέχρι το 2050 (Πίνακας 7.9 και 7.10 Παραρτήματα). Το επιτόκιο προεξόφλησης r θεωρήθηκε 5% και το αρχικό κόστος επένδυσης είναι 44.780.050 €. Τα δεδομένα αυτά αναγράφονται στον Πίνακα 3.9 και μέσω της εξίσωσης (21) υπολογίζεται η Καθαρή Παρούσα Αξία του έργου και για τα 2 σενάρια.

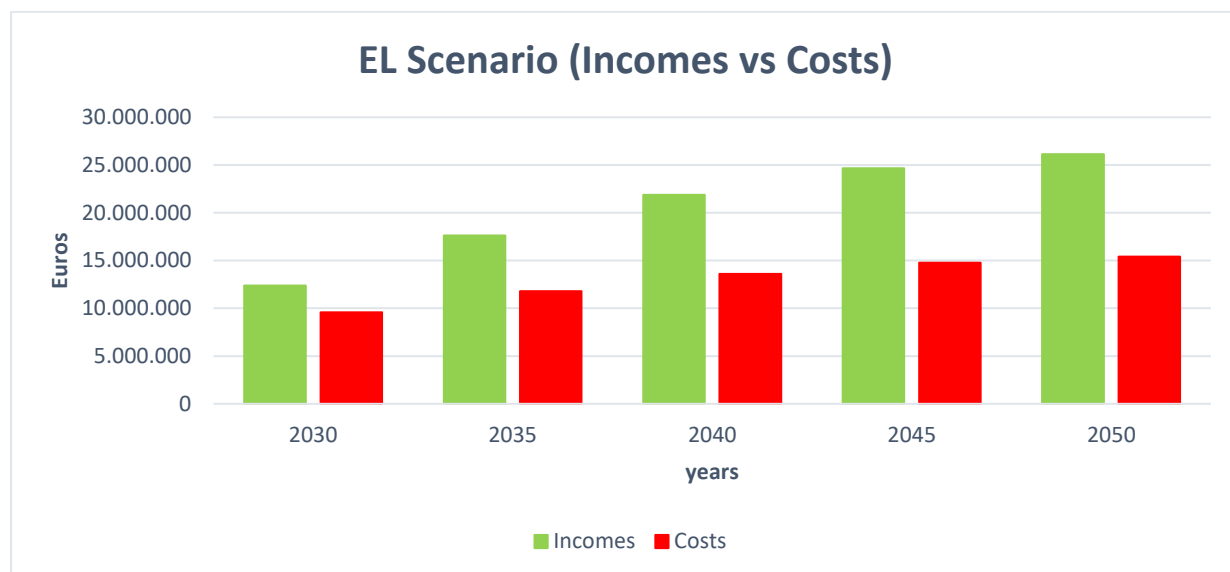
Ακολουθεί, ο υπολογισμός της Περιόδου Αποπληρωμής (PB) μέσω της εξίσωσης (22), γνωρίζοντας όλες τις μεταβλητές. Τέλος από την εξίσωση (23), υπολογίζεται ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) και για τα 2 σενάρια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα Αξιολόγηση Επενδύσεων

	EL Scenario	RL Scenario
NPV (5%)	37.978.494,87 €	36.722.955,34 €
IRR	11,07%	10%
Payback Period (PB)	14,64 years	12,93 years

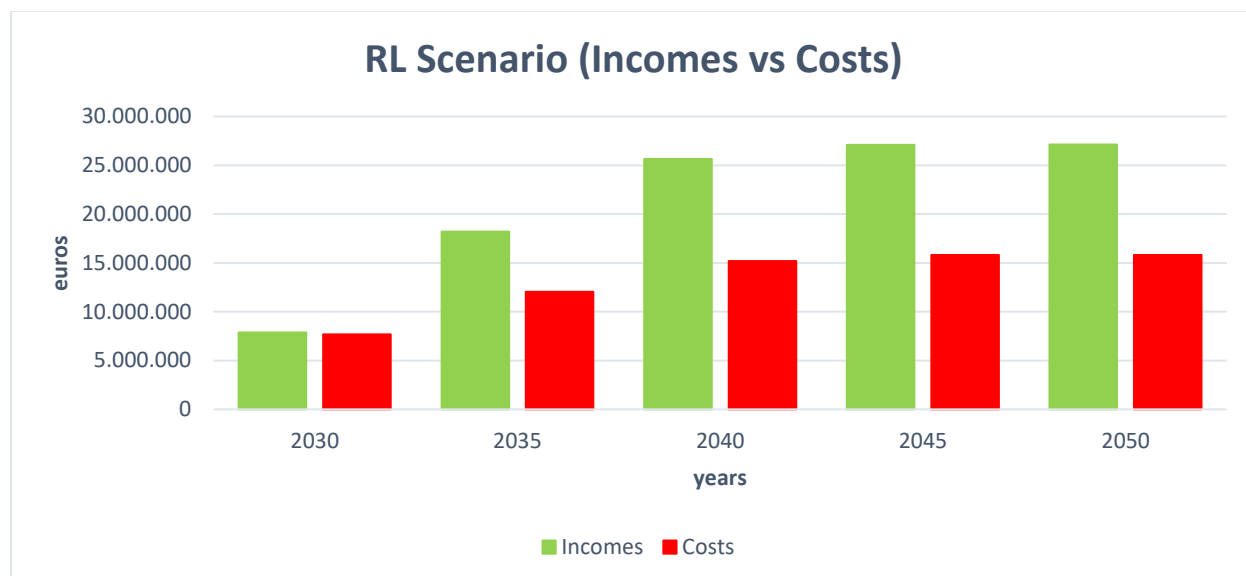
Βάση των αποτελεσμάτων συμπεραίνεται πως και στις 2 περιπτώσεις η επένδυση γίνεται αποδεκτή, καθώς η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) είναι θετική και >0 και ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) είναι μεγαλύτερος από το επιτόκιο προεξόφλησης r .

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα Διαγράμματα 4.13 έως 4.16 που αφορούν τα έσοδα, τα έξοδα, την Καθαρή Παρούσα Αξία και την Περίοδο Αποπληρωμής της επιχείρησης και για τα 2 σενάρια.



Διάγραμμα 4.13: Έσοδα- Έξοδα επιχείρησης για το Early Loss Scenario (EL).

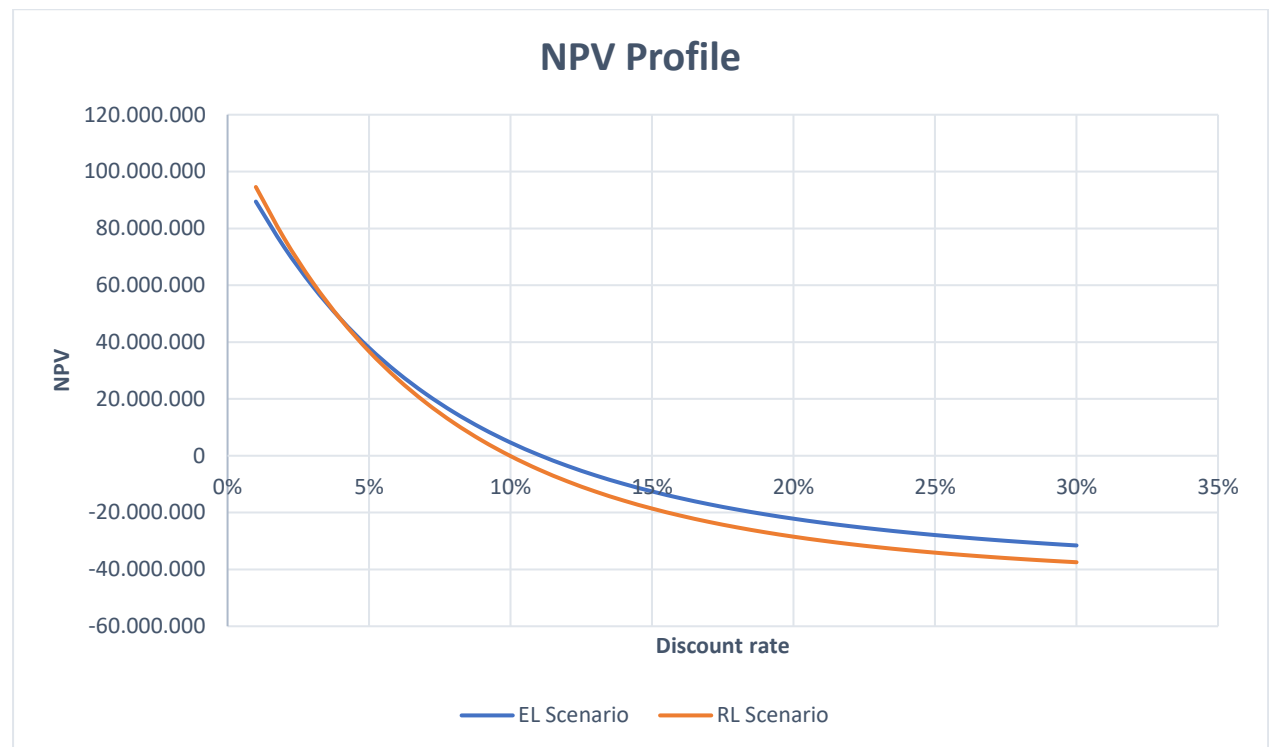
Από το Διάγραμμα 4.13 συμπεραίνεται πως σε κάθε χρονική περίοδο τα έσοδα είναι περισσότερα από τα έξοδα. Η διάφορα αυτήν είναι επιθυμητή καθώς είναι μια ένδειξη πως ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος είναι κερδοφόρος και ωφέλιμος και από οικονομικής πλευράς.



Διάγραμμα 4.14: Έσοδα-Έξοδα επιχείρησης για το Regular Loss Scenario (RL).

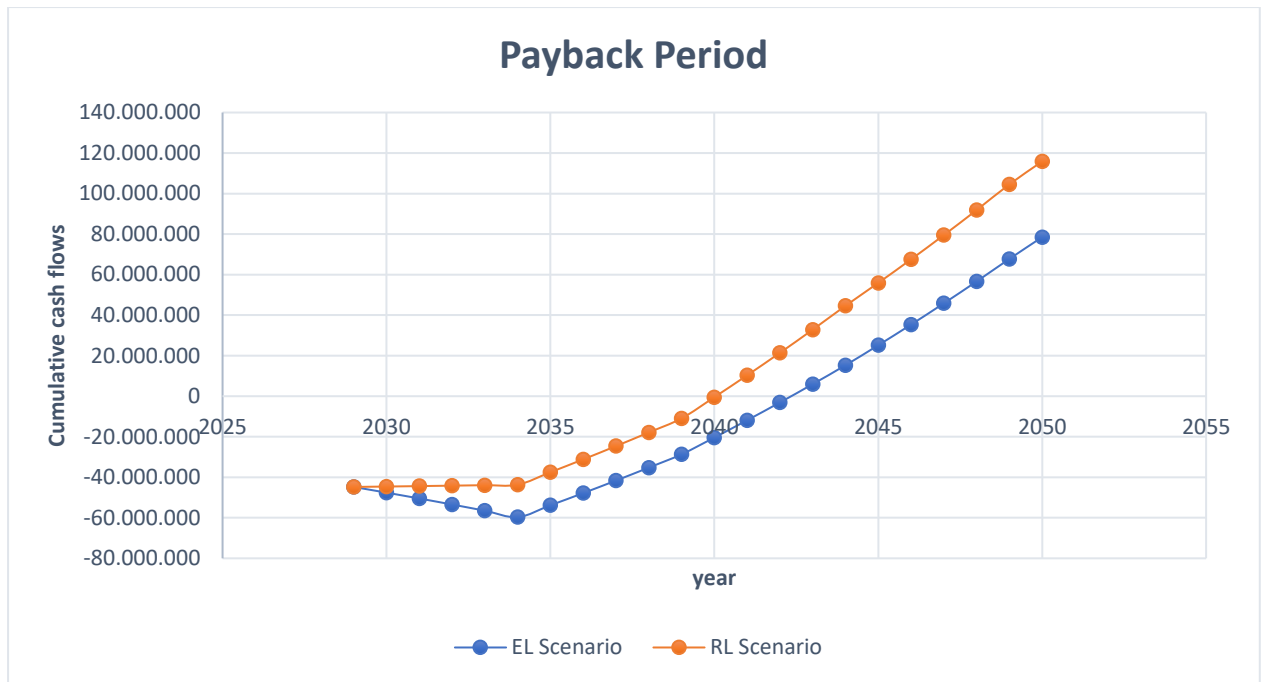
Από το Διάγραμμα 4.14 γίνεται αντιληπτό ότι και στην περίπτωση του Regular Loss Scenario τα έσοδα είναι περισσότερα από τα έξοδα. Παρατηρείται ότι τα έξοδα

από το 2045 και μετά είναι σχεδόν σταθερά ενώ τα έσοδα αυξάνονται. Τα έσοδα μεταβάλλονται και αυξάνονται καθώς όσο παίρνουν τα χρόνια οι ποσότητες των αποβλήτων θα αυξάνονται επομένως και τα ποσοστά των ανακτημένων υλικών θα είναι μεγαλύτερα άρα και τα κέρδη περισσότερα. Ενώ τα έξοδα είναι πιο σταθερά καθώς το κόστος των διαδικασιών ανακύκλωσης και μεταφοράς δεν μεταβάλλεται σημαντικά.



Διάγραμμα 4.15: Προφίλ Καθαρής Παρούσας Αξίας της Επένδυσης.

Το προφίλ της Καθαρής Παρούσας Αξίας δείχνει την ευαισθησία της ΚΠΑ ενός έργου για διαφορετικά προεξοφλητικά επιτόκια. Επίσης δείχνει τη σχέση μεταξύ της ΚΠΑ του έργου και του κόστους κεφαλαίου της επιχείρησης. Η σχέση μεταξύ του προεξοφλητικού επιτοκίου και της ΚΠΑ είναι αντίστροφη, δηλαδή η ΚΠΑ μειώνεται καθώς το προεξοφλητικό επιτόκιο αυξάνεται. Για το EL Scenario το 11,07% είναι το ποσοστό που καθιστά την ΚΠΑ του έργου μηδενική. Το ποσοστό αυτό είναι γνωστό ως εσωτερικός συντελεστής απόδοσης (IRR). Στο γράφημα αυτό είναι το σημείο όπου η γραμμή τέμνει τον άξονα x. Για το RL Scenario η ΚΠΑ γίνεται μηδενική για IRR ίσο με 10%. Όπως παρατηρείται και στο Διάγραμμα 4.15, η κλίση του προφίλ της ΚΠΑ στο RL Scenario είναι πιο απότομη σε σχέση με το EL Scenario, αυτό σημαίνει πως η ΚΠΑ του RL Scenario είναι πιο ευαίσθητη στις μεταβολές των προεξοφλητικών επιτοκίων. Τα δεδομένα του Διαγράμματος 4.15 παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.11 στα Παραρτήματα.



Διάγραμμα 4.16: Περίοδος αποπληρωμής επένδυσης.

Το παραπάνω Διάγραμμα 4.16 μας δείχνει τον χρόνο που απαιτείται σε κάθε περίπτωση για να αρχίσει η επιχείρηση να έχει οικονομικό όφελος ίσο με την αρχική επένδυση. Στην περίπτωση του EL σεναρίου η περίοδος αποπληρωμής υπολογίστηκε στα 14,64 χρόνια ενώ στο RL σενάριο στα 12,93 χρόνια. Με γνώμονα μόνο την μεταβλητή αυτήν η καλύτερη επιλογή θα ήταν αυτήν του RL Scenario. Ωστόσο σαν μεταβλητή ο χρόνος αποπληρωμής από μόνος του δεν θεωρείται αξιόπιστος. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν και τους άλλους 2 παράγοντες που έχουν υπολογιστεί. Τα δεδομένα του Διαγράμματος 4.16 παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.12 στα Παραρτήματα.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε και σχεδιάστηκε ένα σύστημα ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών αποβλήτων στην Ελλάδα ακολουθώντας 5 στάδια, τα οποία προσεγγίζουν τον σχεδιασμό από πολλές οπτικές ενώ παράλληλα αναδεικνύουν την αναγκαιότητα της ύπαρξης μιας τέτοιας εγκατάστασης. Από την μελέτη αυτήν λοιπόν προκύπτουν βασικά συμπεράσματα.

- ❖ Βάση ιστορικών δεδομένων αλλά και μελλοντικών προβλέψεων για την αναμενόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα υπολογίστηκαν κατά προσέγγιση οι ποσότητες των μελλοντικών φωτοβολταϊκών αποβλήτων έως και το 2050. Στην Ελλάδα, τα επόμενα χρόνια οι ποσότητες των φωτοβολταϊκών αποβλήτων αναμένεται να αυξηθούν, επομένως ο τρόπος διαχείρισης και η ανακύκλωση τους είναι ένα ζήτημα το οποίο θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα.
- ❖ Διαπιστώθηκε πως η αναγκαία ποσότητα των 20.000 tn φωτοβολταϊκών αποβλήτων ετησίως που απαιτούνται για την λειτουργία ενός παρομοίου εργοστασίου στην Ελλάδα αναμένεται να παραχθεί ανάμεσα στο 2032 με 2033. Επομένως στο επόμενο διάστημα έως και το 2030 θα πρέπει οι έρευνες για την αντιμετώπιση και την διαχείριση των αποβλήτων αυτών να εντατικοποιηθούν, καθώς η ανακύκλωση και η ανάκτηση υλικών από φωτοβολταϊκά απόβλητα έχει αποδειχθεί ωφέλιμη για λόγους κυρίως περιβαλλοντικούς.
- ❖ Μέσω των υπολογισμών διαπιστώθηκε πως οι ποσότητες των ανακτημένων υλικών είναι αξιόλογες βάση και των ποσοτήτων των αποβλήτων που αναμένεται να παραχθούν. Η ανάκτηση όσο των δυνατών περισσοτέρων υλικών είναι επιθυμητή γιατί συνεισφέρει περιβαλλοντικά ελαχιστοποιώντας την εναπόθεση επικίνδυνων υλικών που περιέχονται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια στο περιβάλλον. Επιπρόσθετα, η ανάκτηση τους ενισχύει οικονομικά την επιχείρηση διατηρώντας με αυτόν των τρόπο την βιωσιμότητα της.
- ❖ Βάση της κατανομής των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων και την μορφολογία της Ελλάδος επιλέχθηκε η βέλτιστη τοποθεσία για την εγκατάσταση του κέντρου ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών αποβλήτων (PVRC). Περιορίζοντας την ακτίνα μελέτης σε 5 βασικές περιοχές οι οποίες αντιπροσωπεύουν και το 60% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας άρα και των αποβλήτων βρέθηκε πως η βέλτιστη τοποθεσία βρίσκεται στον νομό Φθιώτιδας. Συγκεκριμένα η τοποθέτηση του εργοστασίου γίνεται παράλληλα στην εθνική οδό Αθηνών-Λαμίας κοντά στην περιοχή Ανθήλη.
- ❖ Όσο αναφορά την επιλογή της τεχνολογίας ανακύκλωσης που θα λάβει χώρα στο εργοστάσιο έγινε με γνώμονα παρόμοιες μελέτες, τεχνολογίες και μεθόδους ανακύκλωσης, το μερίδιο αγοράς και τα ποσοστά εγκατάστασης βάση τεχνολογίας τόσο παγκοσμίως όσο και στην Ελλάδα. Κατά συνέπεια, η ανακύκλωση εστιάζετε στα φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς με βάση το πυρίτιο (c-Si), τα οποία αποτελούν και το μεγαλύτερο ποσοστό των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών.

- ❖ Τέλος, σύμφωνα με την οικονομική ανάλυση προκύπτει ότι και στις δυο περιπτώσεις μελέτης η επένδυση γίνεται αποδεκτή, αναδεικνύοντας με τον τρόπο πως αυτό πως και από οικονομικής άποψης ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος είναι συμφέρον να υλοποιηθεί. Τα δύο σενάρια παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα γεγονός που δηλώνει πως η επιλογή οποιουδήποτε σεναρίου θα ήταν ορθή και οικονομικά συμφέρουσα. Η επιλογή λοιπόν εξαρτάται από τους στόχους, τις ανάγκες και τις επιθυμίες του εκάστοτε επενδυτή. Η επιλογή του Regular Loss Scenario είναι πιο κατάλληλη καθώς έχει χαμηλότερη Καθαρή Παρούσα Αξία από αυτήν του Early Loss Scenario και μικρότερη Περίοδο Αποπληρωμής. Ωστόσο, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης είναι ελάχιστα μικρότερος σε σχέση με το EL Scenario αλλά είναι μεγαλύτερος από το προεξοφλητικό επιτόκιο που είχε ορισθεί, επομένως γίνεται αποδεκτός.

5.2 Μελλοντικές Προτάσεις

Τα αποτελέσματα και η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία θα μπορούσαν να αποτελέσουν το βήμα για την εκπόνηση περαιτέρω ερευνητικών εργασιών.

- Η εύρεση της βέλτιστης τοποθεσίας του κέντρου επεξεργασίας και ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών αποβλήτων (PVRC), θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε μια μεγαλύτερη κλίμακα, δηλαδή να ληφθούν υπόψιν και άλλες περιοχές της Ελλάδος οι οποίες παράγουν σημαντική ποσότητα φ/β αποβλήτων βάση και της κατανομής.
- Η ίδια μεθοδολογία θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε μικρότερης κλίμακας περιοχές. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να γίνει έρευνα αν θα ήταν περιβαλλοντικά και οικονομικά συμφέρον να υλοποιηθεί ένα τέτοιο σχέδιο σε ένα μεγάλο νησί όπως η Κρήτη.
- Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε να εξεταστεί η περίπτωση να υπάρχουν περισσότερα από ένα κέντρα επεξεργασίας και ανακύκλωσης τα οποία θα μπορούν να υποστηρίξουν και την εισαγωγή φωτοβολταϊκών αποβλήτων από άλλες χώρες των Βαλκανίων.
- Η μελέτη αυτή θα μπορούσε να γίνει πιο λεπτομερής λαμβάνοντας υπόψιν τις ποσότητες όλων των φωτοβολταϊκών αποβλήτων, δηλαδή και μικρότερων φωτοβολταϊκών πάρκων και των φωτοβολταϊκών στέγης.
- Τέλος, θα μπορούσε να μελετηθεί η δυνατότητα υποστήριξης μεγαλύτερου εύρους τεχνολογιών ανακύκλωσης ή η πιθανότητα υποστήριξης ενός τέτοιου συστήματος σε ήδη υπάρχοντα εργοστάσια ανακύκλωσης ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών.

6. Βιβλιογραφία

- Alibaba.com*. (2023). Retrieved from https://www.alibaba.com/?src=sem_ggl&field=UG&from=sem_ggl&cmpgn=9922923043&adgrp=97780318062&fditm=&tgt=kwd-14739453&locintrst=&locphyscl=1007558&mtchtyp=e&ntwrk=g&device=c&dvcmdl=&creative=432272606776&plcmnt=&plcmntcat=&aceid=&position=&gad=1&gclid=Cj0KCQjwjryjBhD0ARIsAMLvnF8jaMo57GidmfUjfc_jw-uOaLXV2kDvwIDOSw7IJ4IDH-hVtu_AyiQaAhioEALw_wcB
- BullionByPost*. (2023). Retrieved from https://www.bullionbypost.eu/?gclid=Cj0KCQjwjryjBhD0ARIsAMLvnF9Kwr_HPJOyb6vFNKrGPtUy6ang3K4rt96nHqTrnTc2ZUFjJU2vp2waAn1zEALw_wcB
- Domínguez, A., & Geyer, R. (2017). Photovoltaic waste assessment in Mexico. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 29–41. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.08.013
- Eurostat*. (2023). Retrieved from <https://ec.europa.eu/eurostat>
- Fthenakis, V. M. (2000). *End-of-life management and recycling of PV modules*.
- GlobalPetrolPrices.com*. (2023). Retrieved from <https://www.globalpetrolprices.com/Greece/>
- Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T., & Toro, L. (2014). Recycling of photovoltaic panels by physical operations. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 123, 239–248. doi: 10.1016/j.solmat.2014.01.012
- IEA. (2022). *Waste disposal costs and share of EfW in selected countries*. Retrieved from <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/waste-disposal-costs-and-share-of-efw-in-selected-countries>
- IRENA*. (2023). Retrieved from <https://www.irena.org/>
- Kang, S., Yoo, S., Lee, J., Boo, B., & Ryu, H. (2012). Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 47, 152–159. doi: 10.1016/j.renene.2012.04.030
- Kastanaki, E., & Giannis, A. (2022). Energy decarbonisation in the European Union: Assessment of photovoltaic waste recycling potential. *Renewable Energy*, 192, 1–13. doi: 10.1016/j.renene.2022.04.098
- Latunussa, C. E. L., Ardente, F., Blengini, G. A., & Mancini, L. (2016). Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 156, 101–111. doi: 10.1016/j.solmat.2016.03.020
- Mahmoudi, S., Huda, N., & Behnia, M. (2021). Critical assessment of renewable energy waste generation in OECD countries: Decommissioned PV panels. *Resources, Conservation and Recycling*, 164. doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105145
- Manis Chemicals*. (2023). Retrieved from <https://manischemicals.com/en/>

- Marwede, M., Berger, W., Schlummer, M., Mäurer, A., & Reller, A. (2013). Recycling paths for thin-film chalcogenide photovoltaic waste - Current feasible processes. In *Renewable Energy* (Vol. 55, pp. 220–229). doi: 10.1016/j.renene.2012.12.038
- Molano, J. C., Xing, K., Majewski, P., & Huang, B. (2022). A holistic reverse logistics planning framework for end-of-life PV panel collection system design. *Journal of Environmental Management*, 317. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115331
- Müller, A., Wambach, K., & Alsema, E. (2006). Life cycle analysis of solar module recycling process. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 895, 89–94. doi: 10.1557/proc-0895-g03-07
- Nick Weadock. (2011). *Recycling Methods for used Photovoltaic Panels*. Retrieved from <http://2011.solarteam.org/news/recycling-methods-for-used-photovoltaic-panels>
- Paiano, A. (2015). Photovoltaic waste assessment in Italy. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 41, pp. 99–112). Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.208
- Santos, J. D., & Alonso-García, M. C. (2018). Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050. *Journal of Cleaner Production*, 196, 1613–1628. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.252
- Strachala, D., Hylský, J., Vaněk, J., Fafílek, G., & Jandová, K. (2017). Methods for recycling photovoltaic modules and their impact on environment and raw material extraction. In *Acta Montanistica Slovaca* (Vol. 22).
- WorldData.info. (2023). *Inflation rates in Greece*. Retrieved from <https://www.worlddata.info/europe/greece/inflation-rates.php>
- Α. Ντούφας, & Δρ. Β. Ζεϊμπέκης. (2016). *Τα Reverse Logistics βελτιώνουν αποδοτικότητα & αειφορία στην εφοδιαστική αλυσίδα*.
- Αθανάσιος Τσαγρής. (2017). *THE SUPPLY CHAIN MANAGEMENT IN THE RECYCLING OF PV SYSTEMS*.
- Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε. (2023). Retrieved from <https://www.electrocycle.gr/i-etairaia/>
- Αναστάσιος Χρυσόχου. (2020). *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Μερικές Εφαρμογές Μοντέλων Βιωματικής Μάθησης για τη Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση*.
- Ανεξάρτητη Αρχή Δημοσίων Εσόδων. (2023). Retrieved from <https://www.aade.gr/>
- Άννα Γκουλιούμη. (2018). *Ανάκτηση πολύτιμων υλικών από φωτοβολταϊκά πλαίσια στο τέλος του κύκλου ζωής τους*.
- Βασίλειος Δ. Μπιτζιώνης, & Δημήτριος Β. Μπιτζιώνης. (2011). *ΕΝΝΑΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*. Αθήνα: Τζιόλα.
- Διαχειριστής ΑΠΕ & Εγγυήσεων Προέλευσης Α.Ε. - ΔΑΠΕΕΠ Α.Ε. (2023). Retrieved from <https://www.dapeep.gr/>
- ΕΥΔΑΠ. (2013). *Timologio_EYDAP_2*.
- Θεοχάρης Δ. Τσούτσος, & Ιωάννης Ν. Κανάκης. (2013). *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Τεχνολογίες & Περιβάλλον*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

- Ιωάννης Κ. Καλδέλλης, Γιώργος Χ. Σπυρόπουλος, & Κοσμάς Α. Καββαδίας. (2007). *Υπολογιστικές εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας*. Αθήνα: Σταμούλη Α.Ε.
- Μανώλης Αгриμανάκης. (2015). *Κόστος Μεταφοράς*. Retrieved from <https://trochoikaitir.gr/article/330/pos-na-ypologisete-kostos-metaforas>
- Μάριος Αραμπατζής. (2021). *Βελτιστοποίηση και Ανάλυση της Αντίστροφης Εφοδιαστικής Αλυσίδας*.
- Μελέτιος Γ. Ρεντούμης. (2015). *“Ανάπτυξη Βιομηχανικής Γραμμής Παραγωγής Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών Πινάκων Κρυσταλλικού Πυριτίου.”*
- Οικοκύκλιος Α.Β.Ε.Ε. (2023). Retrieved from <https://oikokiklios.gr/>
- Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας. (2023). *Γεωπληροφοριακός Χάρτης*. Retrieved from <https://geo.rae.gr/>
- Σύνδεσμος Εταιριών φωτοβολταϊκών. (2022). *Μια “ακτινογραφία” της ελληνικής αγοράς φωτοβολταϊκών*.
- Υπουργείο Εργασίας & Κοινωνικών Υποθέσεων. (2023). Retrieved from <https://ypergasias.gov.gr/ypourgeio/organotiki-domi/>
- Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας. (2019). *ΕΘΝΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΚΛΙΜΑ*.

7. Παραρτήματα

Πίνακας 7.1: Κατανομή Weibull $f(t)$ για Early Loss Scenario

EARLY LOSS SCENARIO		a=2,4928
year	t	f(t)
2010	0	0
2011	1	0,000816132
2012	2	0,003109531
2013	3	0,007296979
2014	4	0,013696559
2015	5	0,022557209
2016	6	0,034069062
2017	7	0,048367288
2018	8	0,065533365
2019	9	0,085595435
2020	10	0,108528609
2021	11	0,134255717
2022	12	0,162648791
2023	13	0,193531492
2024	14	0,226682545
2025	15	0,26184023
2026	16	0,298707863
2027	17	0,336960175
2028	18	0,376250431
2029	19	0,416218096
2030	20	0,456496824
2031	21	0,496722516
2032	22	0,536541184
2033	23	0,575616387
2034	24	0,613635979
2035	25	0,650317974
2036	26	0,685415346
2037	27	0,718719646
2038	28	0,750063359
2039	29	0,77932097
2040	30	0,806408786
2041	31	0,831283586
2042	32	0,853940214
2043	33	0,874408305
2044	34	0,892748288
2045	35	0,9090469
2046	36	0,923412402
2047	37	0,935969687
2048	38	0,946855482
2049	39	0,956213785
2050	40	0,96419168

Πίνακας 7.2: Κατανομή Weibull $f(t)$ για Regular Loss Scenario

REGULAR LOSS SCENARIO		5,3759
year	t	f
2010	0	0
2011	1	1,64159E-07
2012	2	3,57249E-06
2013	3	2,36678E-05
2014	4	9,44293E-05
2015	5	0,00028228
2016	6	0,000699318
2017	7	0,001517531
2018	8	0,002983577
2019	9	0,005433467
2020	10	0,00930617
2021	11	0,015154546
2022	12	0,023651374
2023	13	0,035587314
2024	14	0,051856777
2025	15	0,073426896
2026	16	0,101284521
2027	17	0,136356861
2028	18	0,179403738
2029	19	0,230883948
2030	20	0,290805492
2031	21	0,358578974
2032	22	0,432903927
2033	23	0,511725888
2034	24	0,592303123
2035	25	0,671410447
2036	26	0,745680543
2037	27	0,812042451
2038	28	0,868173015
2039	29	0,912848464
2040	30	0,946089679
2041	31	0,969045839
2042	32	0,98364501
2043	33	0,992122386
2044	34	0,996575783
2045	35	0,998671308
2046	36	0,999545109
2047	37	0,999864303
2048	38	0,999965199
2049	39	0,999992436
2050	40	0,999998627

Πίνακας 7.3: Ποσότητες αποβλήτων για κάθε φωτοβολταϊκή τεχνολογία

		C-Si	a-Si	CdTe	CIGS	CPV/OPV/others	Total PV mass(t)	Total PV mass(t)
year	Capacity(W)	Pvmass(kg)	Pvmass(kg)	Pvmass(kg)	Pvmass(kg)	Pvmass(kg)	Annual	Cumulative
2010	150.400.000	12.392.960,00	442.176,00	4.730.080,00	236.128,00	0,00	17.801,34	17.801,34
2011	425.900.000	37.726.222,00	2.504.292,00	7.091.235,00	668.663,00	0,00	47.990,41	65.791,76
2012	912.000.000	84.542.400,00	2.681.280,00	10.123.200,00	2.863.680,00	0,00	100.210,56	166.002,32
2013	1.042.500.000	97.713.525,00	3.064.950,00	7.714.500,00	3.273.450,00	0,00	111.766,43	277.768,74
2014	16.950.000	1.518.889,50	124.582,50	156.787,50	53.223,00	16.950,00	1.870,43	279.639,17
2015	10.300.000	901.765,00	45.423,00	95.275,00	48.513,00	41.200,00	1.132,18	280.771,35
2016	5.420.000	446.608,00	23.902,20	60.162,00	51.056,40	27.100,00	608,83	281.380,18
2017	12.900.000	1.062.960,00	37.926,00	167.055,00	121.518,00	64.500,00	1.453,96	282.834,14
2018	43.100.000	3.373.868,00	126.714,00	637.880,00	473.669,00	301.700,00	4.913,83	287.747,97
2019	160.000.000	12.360.000,00	470.400,00	1.776.000,00	1.758.400,00	1.600.000,00	17.964,80	305.712,77
2020	459.000.000	33.093.900,00	2.226.609,00	4.415.580,00	3.747.276,00	7.481.700,00	50.965,07	356.677,83
2021	838.000.000	60.419.800,00	4.065.138,00	9.301.800,00	6.841.432,00	12.989.000,00	93.617,17	450.295,00
2022	141.200.000	9.889.648,00	415.128,00	1.567.320,00	1.330.104,00	2.259.200,00	15.461,40	465.756,40
2023	422.900.000	29.619.916,00	621.663,00	6.258.920,00	5.311.624,00	6.343.500,00	48.155,62	513.912,03
2024	422.900.000	28.748.742,00	1.243.326,00	6.258.920,00	5.975.577,00	6.343.500,00	48.570,07	562.482,09
2025	387.000.000	26.308.260,00	568.890,00	6.085.575,00	5.772.105,00	5.805.000,00	44.539,83	607.021,92
2026	458.800.000	29.298.968,00	0,00	8.487.800,00	8.643.792,00	7.340.800,00	53.771,36	660.793,28
2027	341.200.000	20.383.288,00	0,00	5.049.760,00	6.428.208,00	7.506.400,00	39.367,66	700.160,94
2028	504.600.000	25.986.900,00	0,00	4.667.550,00	7.129.998,00	18.165.600,00	55.950,05	756.110,99
2029	422.900.000	20.472.589,00	0,00	4.694.190,00	4.647.671,00	16.916.000,00	46.730,45	802.841,44
2030	472.500.000	21.803.040,00	0,00	4.108.387,50	4.747.680,00	18.994.500,00	49.653,61	852.495,04
2031	373.300.000	17.225.555,20	0,00	3.245.843,50	3.750.918,40	15.006.660,00	39.228,98	891.724,02
2032	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	936.165,31
2033	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	980.606,60
2034	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.025.047,90
2035	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.069.489,19
2036	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.113.930,48
2037	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.158.371,77
2038	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.202.813,07
2039	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.247.254,36
2040	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.291.695,65
2041	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.336.136,94
2042	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.380.578,24
2043	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.425.019,53
2044	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.469.460,82
2045	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.513.902,11
2046	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.558.343,40
2047	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.602.784,70
2048	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.647.225,99
2049	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.691.667,28
2050	422.900.000	19.514.297,60	0,00	3.677.115,50	4.249.299,20	17.000.580,00	44.441,29	1.736.108,57

Πίνακας 7.4: Αποτελέσματα ετήσιας ροής φ/β αποβλήτων για 2 σενάρια

year	Annual PV Waste (EL) (tn)	Annual PV Waste (RL) (tn)
2010	0	0
2011	14,53	0,00
2012	79,99	0,07
2013	266,39	0,54
2014	635,92	2,58
2015	1.142,33	9,13
2016	1.744,69	25,78
2017	2.421,10	61,35
2018	3.154,98	128,31
2019	3.934,12	243,02
2020	4.756,79	425,96
2021	5.645,42	701,71
2022	6.648,65	1.098,92
2023	7.735,28	1.650,04
2024	8.898,45	2.390,62
2025	10.138,80	3.357,66
2026	11.448,39	4.586,88
2027	12.825,47	6.108,87
2028	14.254,80	7.943,87
2029	15.734,12	10.095,46
2030	17.253,35	12.543,72
2031	18.802,82	15.238,98
2032	20.365,03	18.097,96
2033	21.927,94	21.004,35
2034	23.481,39	23.816,40
2035	25.015,19	26.382,87
2036	26.519,78	28.567,34
2037	27.986,35	30.277,67
2038	29.406,94	31.493,94
2039	30.774,49	32.285,62
2040	32.082,91	32.808,56
2041	33.327,05	33.276,37
2042	34.502,78	33.909,45
2043	35.606,93	34.874,57
2044	36.637,28	36.235,40
2045	37.592,53	37.933,34
2046	38.472,26	39.807,62
2047	39.276,91	41.647,85
2048	40.007,64	43.257,90
2049	40.666,36	44.506,88
2050	41.255,59	45.350,33

Πίνακας 7.5: Αποτελέσματα αθροιστικής ροής αποβλήτων για 2 σενάρια

year	Cumulative PV waste (EL) (tn)	Cumulative PV Waste (RL) (tn)
2010	0	0
2011	14,52824458	0,002922256
2012	94,52033084	0,071473247
2013	360,9087269	0,609215267
2014	996,8261525	3,193147316
2015	2139,154173	12,32802247
2016	3883,842167	38,11047259
2017	6304,942991	99,46450031
2018	9459,926161	227,7728797
2019	13394,04996	470,7942963
2020	18150,84173	896,7516416
2021	23796,26134	1598,460912
2022	30444,91095	2697,376377
2023	38180,18989	4347,41234
2024	47078,6381	6738,037077
2025	57217,43311	10095,70013
2026	68665,82346	14682,58347
2027	81491,29667	20791,4537
2028	95746,09402	28735,31951
2029	111480,21	38830,7752
2030	128733,5605	51374,49086
2031	147536,3849	66613,47385
2032	167901,4105	84711,43083
2033	189829,3539	105715,7817
2034	213310,7411	129532,1825
2035	238325,9282	155915,0525
2036	264845,707	184482,3964
2037	292832,0588	214760,0684
2038	322239,0007	246254,0057
2039	353013,4952	278539,6271
2040	385096,4021	311348,1857
2041	418423,4536	344624,5599
2042	452926,2366	378534,0129
2043	488533,1669	413408,5832
2044	525170,4434	449643,9865
2045	562762,9696	487577,324
2046	601235,2346	527384,9489
2047	640512,1427	569032,7982
2048	680519,7854	612290,7022
2049	721186,1471	656797,5797
2050	762441,7387	702147,9079

Πίνακας 7.6: Αποτελέσματα αθροιστικής μάζας κάθε στοιχείου για EL Scenario

	Cumulative mass of each element per PV type mwi(tn)					Total Cumulative mass of any Material mw(t) (EL Scenario)
	Material	C-Si	a-Si	CdTe	GIGS	
Precious Metals	Ag	208,210	0,000	0,000	0,000	208,210
Base metals	Al	59.540,137	478,015	34,776	4.382,807	64.435,735
	Cu	2.637,808	10,330	1.157,906	145,072	3.951,116
	Ni	3,825	0,000	0,000	0,000	3,825
	Fe	0,000	0,009	0,000	0,000	0,009
	Ti	0,019	0,000	0,000	0,000	0,019
	Sn	0,211	0,000	0,001	29,934	30,146
	Zn	0,028	0,004	0,000	29,014	29,047
	Cr	0,000	0,006	6,924	0,000	6,931
	Mn	0,000	0,011	0,000	0,000	0,011
	Mo	0,000	0,000	0,000	29,014	29,014
	Cd	0,000	0,059	46,162	87,350	133,571
Hazardous Substances	Pb	16,852	0,000	1,623	0,000	18,475
	Se	0,000	0,000	0,000	29,014	29,014
Critical Substances	Mg	1.876,416	15,053	0,000	136,388	2.027,857
	Ga	0,000	0,000	0,000	29,014	29,014
	In	0,000	0,133	0,000	14,507	14,640
	Te	0,000	0,074	46,162	0,000	46,236
Other metals	Si	2.854,318	0,030	115,791	0,000	2.970,138
	Steel	34.316,770	457,332	461,624	0,000	35.235,725
Other materials	EVA	23.455,205	182,703	1.388,717	2.615,381	27.642,007
	Glass	235.995,451	5,274	35.198,795	43.572,664	314.772,184

Πίνακας 7.7: Αποτελέσματα αθροιστικής μάζας κάθε στοιχείου για RL Scenario

	Cumulative mass of each element per PV type mwi(tn)					Total Cumulative mass of any Material mw(t) (RL Scenario)
	Material	C-Si	a-Si	CdTe	GIGS	
Precious Metals	Ag	184,1106	0,0000	0,0000	0,0000	184,1106
Base metals	Al	52.648,6066	69,4401	30,6423	3.945,0571	56.693,7462
	Cu	2.332,4928	1,5006	1.020,2806	130,5823	3.484,8563
	Ni	3,3823	0,0000	0,0000	0,0000	3,3823
	Fe	0,0000	0,0012	0,0000	0,0000	0,0012
	Ti	0,0166	0,0000	0,0000	0,0000	0,0166
	Sn	0,1870	0,0000	0,0005	26,9441	27,1315
	Zn	0,0249	0,0006	0,0001	26,1165	26,1421
	Cr	0,0000	0,0009	6,1013	0,0000	6,1023
	Mn	0,0000	0,0016	0,0000	0,0000	0,0016
	Mo	0,0000	0,0000	0,0000	26,1165	26,1165
	Cd	0,0000	0,0086	40,6756	78,6253	119,3095
Hazardous Substances	Pb	14,9012	0,0000	1,4304	0,0000	16,3316
	Se	0,0000	0,0000	0,0000	26,1165	26,1165
Critical Substances	Mg	1.659,2288	2,1867	0,0000	122,7658	1.784,1813
	Ga	0,0000	0,0000	0,0000	26,1165	26,1165
	In	0,0000	0,0194	0,0000	13,0582	13,0776
	Te	0,0000	0,0107	40,6756	0,0000	40,6864
Other metals	Si	2.523,9423	0,0043	102,0281	0,0000	2.625,9746
	Steel	30.344,7424	66,4355	406,7564	551,7562	31.369,6905
Other materials	EVA	20.740,3602	26,5408	1.223,6588	2.354,1600	24.344,7197
	Glass	208.679,9317	0,7662	31.015,1738	39.220,6727	278.916,5443

Πίνακας 7.8: Αποτελέσματα αθροιστικής μάζας κάθε στοιχείου ανά 4 χρόνια για 2 σενάρια

EL SCENARIO	Ag	Al	Cu	Ni	Fe	Ti	Sn	Zn	Cr	Mn	Mo	Co	Pb	Sr	Mg	Ga	In	Te	Si	steel	EVA	Gloss
year																						
2022	2,6087	835,8831	47,3849	0,0479	0,00099	0,00024	0,23642	0,2274	0,0726	0,0012	0,2266	1,1677	0,2280	0,2266	26,3167	0,2266	0,1287	0,4872	36,9659	487,6652	349,8386	3662,6866
2026	4,0955	1290,0779	90,2477	0,0752	0,00000	0,00037	0,80923	0,7809	0,2061	0,0000	0,7803	3,7230	0,3798	0,7803	40,5777	0,7803	0,3902	1,3738	59,5912	688,7581	573,0377	6861,4783
2030	4,4599	1370,8423	84,0469	0,0829	0,00000	0,00040	0,65161	0,6278	0,1460	0,0000	0,6272	3,8613	0,3952	0,6272	42,1417	0,6272	0,3136	0,9731	63,5812	744,8064	588,2371	6738,6689
2034	6,0698	1865,6828	114,3858	0,1115	0,00000	0,00055	0,88883	0,8544	0,1987	0,0000	0,8536	3,8942	0,5378	0,8536	58,7147	0,8536	0,4268	1,3244	86,5324	1013,6633	800,5627	9171,5716
2038	7,6016	2336,4900	143,2512	0,1396	0,00000	0,00069	1,11062	1,0700	0,2488	0,0000	1,0690	4,8768	0,6736	1,0690	73,5315	1,0690	0,5345	1,6586	108,3690	1269,4624	1002,5856	11486,0280
2042	8,9188	2741,3734	168,0748	0,1638	0,00000	0,00081	1,30307	1,2555	0,2919	0,0000	1,2542	5,7219	0,7903	1,2542	86,2735	1,2542	0,6271	1,9460	127,1479	1489,4437	1176,3206	13476,4075
2046	9,9440	3056,7633	187,4115	0,1827	0,00000	0,00090	1,45299	1,3999	0,3255	0,0000	1,3985	6,3802	0,8812	1,3985	96,1991	1,3985	0,6993	2,1698	141,7761	1650,8015	1311,6542	15076,9435
2050	10,6644	3277,9089	200,9700	0,1959	0,00000	0,00096	1,55811	1,5012	0,3490	0,0000	1,4997	6,8418	0,9450	1,4997	103,1588	1,4997	0,7499	2,3268	152,0330	1780,9544	1406,5475	16113,9803
RL SCENARIO	Ag	Al	Cu	Ni	Fe	Ti	Sn	Zn	Cr	Mn	Mo	Co	Pb	Sr	Mg	Ga	In	Te	Si	steel	EVA	Gloss
year																						
2022	0,4312	138,1581	7,8320	0,0079	0,0002	0,0000	0,0391	0,0376	0,0120	0,0002	0,0375	0,1930	0,0377	0,0375	4,3497	0,0375	0,0213	0,0805	6,1099	81,3945	57,8227	605,3835
2026	1,6409	516,8794	36,1584	0,0301	0,0000	0,0001	0,3242	0,3129	0,0826	0,0000	0,3126	1,4917	0,1522	0,3126	16,2577	0,3126	0,1563	0,5504	23,8756	282,5612	229,5919	2749,1027
2030	3,2425	996,6445	61,1047	0,0596	0,0000	0,0003	0,4737	0,4564	0,1061	0,0000	0,4560	2,0802	0,2873	0,4560	31,3653	0,4560	0,2280	0,7075	46,2255	551,1307	427,6592	4899,4374
2034	6,1564	1892,3009	116,0178	0,1131	0,0000	0,0006	0,8995	0,8666	0,2015	0,0000	0,8658	3,9407	0,5455	0,8658	59,5324	0,8658	0,4329	1,3432	87,7670	1046,4164	811,9845	9302,4242
2038	8,1411	2502,3095	153,4177	0,1496	0,0000	0,0007	1,1394	1,1460	0,2664	0,0000	1,1449	5,2230	0,7214	1,1449	78,7500	1,1449	0,5724	1,7763	116,0599	1383,7428	1073,7385	12301,1855
2042	8,7655	2694,2311	165,1845	0,1610	0,0000	0,0008	1,2807	1,2339	0,2869	0,0000	1,2327	5,6235	0,7767	1,2327	84,7899	1,2327	0,6163	1,9125	124,9614	1489,8729	1156,0919	13244,6593
2046	10,2901	3162,8626	193,9165	0,1890	0,0000	0,0009	1,5034	1,4485	0,3368	0,0000	1,4471	6,6017	0,9118	1,4471	99,5382	1,4471	0,7235	2,2452	146,6971	1749,0197	1357,1813	15548,4204
2050	11,7229	3603,2508	220,9169	0,2154	0,0000	0,0011	1,7128	1,6502	0,3837	0,0000	1,6486	7,5209	1,0387	1,6486	113,3976	1,6486	0,8243	2,5578	167,1228	1992,5483	1546,1514	17713,3394

Πίνακας 7.9: Αποτελέσματα Εσόδων-Εξόδων για EL Scenario

EL Scenario	Συνολικά Έσοδα	Συνολικά Έξοδα
year	euro	euro
2030	12.382.196,21	9.580.249,83
2031	12.753.662,10	9.867.657,33
2032	13.136.271,96	10.163.687,05
2033	13.530.360,12	10.468.597,66
2034	13.936.270,92	10.782.655,59
2035	17.639.475,95	11.803.623,34
2036	18.168.660,23	12.157.732,04
2037	18.713.720,04	12.522.464,00
2038	19.275.131,64	12.898.137,92
2039	19.853.385,59	13.285.082,06
2040	21.873.343,44	13.594.182,20
2041	22.529.543,75	14.002.007,67
2042	23.205.430,06	14.422.067,90
2043	23.901.592,96	14.854.729,94
2044	24.618.640,75	15.300.371,84
2045	24.657.339,28	14.771.571,06
2046	25.397.059,46	15.214.718,20
2047	26.158.971,25	15.671.159,74
2048	26.943.740,38	16.141.294,53
2049	27.752.052,59	16.625.533,37
2050	26.153.107,61	15.404.151,38

Πίνακας 7.10: Αποτελέσματα Εσόδων-Εξόδων για RL Scenario

RL Scenario	Συνολικά Έσοδα	Συνολικά Έξοδα
year	euro	euro
2030	7.887.920,49	7.679.560,87
2031	8.124.558,11	7.909.947,69
2032	8.368.294,85	8.147.246,12
2033	8.619.343,70	8.391.663,51
2034	8.877.924,01	8.643.413,41
2035	18.211.596,33	12.045.580,66
2036	18.757.944,22	12.406.948,08
2037	19.320.682,54	12.779.156,52
2038	19.900.303,02	13.162.531,21
2039	20.497.312,11	13.557.407,15
2040	25.662.101,94	15.196.498,55
2041	26.431.965,00	15.652.393,51
2042	27.224.923,95	16.121.965,31
2043	28.041.671,66	16.605.624,27
2044	28.882.921,81	17.103.793,00
2045	27.088.346,34	15.799.676,28
2046	27.900.996,73	16.273.666,56
2047	28.738.026,64	16.761.876,56
2048	29.600.167,43	17.264.732,86
2049	30.488.172,46	17.782.674,84
2050	27.124.349,08	15.814.902,31

Πίνακας 7.11: Αποτελέσματα Καθαρής Παρούσας Αξίας για 2 σενάρια

	EL Scenario	RL Scenario
Discount rate	NPV	NPV
1%	89.431.646,55	94.564.613,84
2%	73.413.799,39	76.490.434,03
3%	59.744.529,30	61.106.997,34
4%	48.038.405,60	47.972.381,08
5%	37.978.494,87	36.722.955,34
6%	29.303.401,66	27.058.629,98
7%	21.796.892,43	18.731.030,79
8%	15.279.563,99	11.533.995,87
9%	9.602.134,65	5.295.915,66
10%	4.640.026,93	-126.458,49
11%	288.981,03	-4.853.032,35
12%	-3.538.506,66	-8.984.446,86
13%	-6.916.083,09	-12.605.401,19
14%	-9.905.905,35	-15.787.367,77
15%	-12.560.577,76	-18.590.816,17
16%	-14.924.741,41	-21.067.039,58
17%	-17.036.381,82	-23.259.658,57
18%	-18.927.907,49	-25.205.862,28
19%	-20.627.041,66	-26.937.435,50
20%	-22.157.561,54	-28.481.610,59
21%	-23.539.912,56	-29.861.775,79
22%	-24.791.720,03	-31.098.065,64
23%	-25.928.216,38	-32.207.854,23
24%	-26.962.598,72	-33.206.168,18
25%	-27.906.328,82	-34.106.033,32
26%	-28.769.385,43	-34.918.766,29
27%	-29.560.476,83	-35.654.220,38
28%	-30.287.220,50	-36.320.993,28
29%	-30.956.295,16	-36.926.602,99
30%	-31.573.569,86	-37.477.637,10

Πίνακας 7.12: Αποτελέσματα Περιόδου Αποπληρωμής για 2 σενάρια

		RL Scenario	EL Scenario
year	period	Cumulative cash flows	Cumulative cash flows
2029	0	-44.780.050,00	-44.780.050,00
2030	1	-44.571.690,37	-47.581.996,38
2031	2	-44.357.079,96	-50.468.001,15
2032	3	-44.136.031,23	-53.440.586,07
2033	4	-43.908.351,04	-56.502.348,53
2034	5	-43.673.840,44	-59.655.963,87
2035	6	-37.507.824,77	-53.820.111,26
2036	7	-31.156.828,63	-47.809.183,07
2037	8	-24.615.302,60	-41.617.927,04
2038	9	-17.877.530,79	-35.240.933,33
2039	10	-10.937.625,83	-28.672.629,80
2040	11	-472.022,45	-20.393.468,56
2041	12	10.307.549,04	-11.865.932,48
2042	13	21.410.507,67	-3.082.570,32
2043	14	32.846.555,06	5.964.292,70
2044	15	44.625.683,88	15.282.561,62
2045	16	55.914.353,94	25.168.329,84
2046	17	67.541.684,11	35.350.671,10
2047	18	79.517.834,19	45.838.482,61
2048	19	91.853.268,76	56.640.928,46
2049	20	104.558.766,38	67.767.447,68
2050	21	115.868.213,14	78.516.403,91