



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

**Ανάλυση κύκλου ζωής για φωτοβολταϊκά πάνελ
τέλους κύκλου ζωής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Περάκη Βασιλική-Ελένη

Επιβλέπων:
Γεράσιμος Λυμπεράτος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2022

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Γεράσιμο Λυμπεράτο, που μου προσέφερε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και συνεχώς αναπτυσσόμενο αντικείμενο όπως είναι η συγκριτική ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μεθόδων επεξεργασίας και ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πλαισίων. Την Δρ. Κωνσταντίνα Παπαδοπούλου, ΕΔΙΠ, η βοήθεια της οποίας αποτέλεσε καταλυτικό παράγοντα επιτυχούς ολοκλήρωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και όλα τα μέλη του εργαστηρίου “Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας” της Σχολής Χημικών Μηχανικών και του εργαστηρίου “Επιστήμης & Τεχνολογίας Προστασίας Περιβάλλοντος στη Μεταλλουργία & Τεχνολογία Υλικών” της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων- Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την άψογη συνεργασία και τη πολύτιμη συμβολή τους στην απόκτηση των κατάλληλων πειραματικών δεδομένων.

Περίληψη

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα προσφέρονται σαν βιώσιμη εναλλακτική για τη μείωση των ρύπων που οφείλονται στην ηλεκτροπαραγωγή, καθώς αποτελεί μία από τις κύρια χρησιμοποιούμενες ΑΠΕ της εποχής μας. Ωστόσο, νέες μελέτες εμφανίζουν περιβαλλοντικούς κινδύνους τόσο λόγω του ολοένα αυξανόμενου όγκου τους, όσο λόγω της σύστασης τους. Αυτός είναι ένας κύριος λόγος για τον οποίον εξετάζονται τα εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Με τον περιορισμό της αλόγιστης διάθεσης τους αποφεύγεται η έκπλυση μολύβδου όπως και η πιθανή απώλεια πόρων, λόγω της μη ανάκτησης των διάφορων πολύτιμων υλικών και σπάνιων μετάλλων που περιέχονται σε αυτά (Paiano, 2015).

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος διαφορετικών σεναρίων διαχείρισης και ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου πρώτης γενιάς. Η ανάλυση κύκλου ζωής εκπονήθηκε στο λογισμικό SimaPro v.9, στα πλαίσια του έργου ΦΩΤΟΜΕΓΑ με τίτλο: Ολοκληρωμένη διαχείριση φωτοβολταϊκών με στόχο τη μέγιστη ανάκτηση υλικών, της ενιαίας δράσης κρατικών ενισχύσεων έρευνας, τεχνολογικής ανάπτυξης & καινοτομίας, «ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ» συνεργασία της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η κατάστρωση καταλόγων απογραφής στηρίχθηκε κυρίως στη βάση δεδομένων Ecoinvent, ενώ η ανάλυση επιπτώσεων τέλους ζωής πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τη μέθοδο Impact2002+.

Ως λειτουργική μονάδα επιλέχθηκε φωτοβολταϊκό πάρκο ονομαστικής ισχύος 120 kWp. Η μελέτη εστιάζει στη διεργασία αποσυναρμολόγησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων και στην ανάλυση των επικρατέστερων μεθόδων ανακύκλωσής τους.

Εν κατακλείδι, παρατίθενται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της συγκριτικής περιβαλλοντικής μελέτης. Παράλληλα, παρουσιάζονται περαιτέρω ευκαιρίες και προκλήσεις σχετικά με τις διαδικασίες ανακύκλωσης, που θα μπορούσαν να επεκτείνουν τη παρούσα μελέτη.

Λέξεις κλειδιά: Φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς, Ανάλυση κύκλου ζωής SimaPRO, Ανακύκλωση, Διαχείριση αποβλήτων, Υδρομεταλλουργική επεξεργασία, Σταθεροποίηση φωτοβολταϊκών αποβλήτων

Abstract

At present, photovoltaics is offered as a sustainable alternative for electricity generation, in order to reduce pollution. However, new studies show environmental risks caused by solar panels, because of their ever-increasing volume and their composition. This is the main reason why alternative PV system management scenarios are being considered.

By limiting their reckless disposal, lead leaching is avoided as well as the possible loss of resources, due to the non-recovery of the various valuable materials and rare metals contained in them (Paiano, 2015).

The current study deals with the environmental impact of different management and recycling scenarios of first-generation crystalline silicon photovoltaic panels. The life cycle analysis was conducted in SimaPro v.9 software, within a project called PHOTOREC with a title: Integrated management of photovoltaic panels for maximum materials recovery, a research, technological development & innovation action "RESEARCH - CREATE – INNOVATE" a collaboration of School of Chemical Engineering and the School of Metallurgical Engineering of the National Technical University of Athens. The compilation of inventory lists was mainly based on the Ecoinvent 3.4 database, while the end-of-life impact analysis was carried out following the Impact2002+ method.

A photovoltaic park with a nominal power of 120 kWp was chosen as the functional unit. The study focuses on the process of dismantling a photovoltaic panel and describing the prevailing photovoltaic recycling processes that have been used.

In conclusion, the obtained results of the environmental study are demonstrated and discussed. Furthermore, it is ascertained that there are further opportunities and challenges regarding PV recycling processes, which may comprise food for future analyses on the EoL management, its environmental consequences and financial benefits.

Key words: First generation photovoltaic panels, Life Cycle Assessment, SimaPRO, Recycling, Waste management, Hydrometallurgical treatment, Photovoltaic waste stabilization

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	2
Περίληψη	3
Λέξεις κλειδιά	3
Abstract	4
Key words.....	4
Κατάλογος Εικόνων.....	8
Κατάλογος Πινάκων.....	9
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	10
1. Εισαγωγή.....	11
1.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	12
1.2. Ιστορική αναδρομή φωτοβολταϊκών συστημάτων	13
1.3. Διεθνή αγορά φωτοβολταϊκών.....	15
1.3.1. Γερμανία και υπόλοιπη Ευρώπη	16
1.3.2. Κίνα	17
1.3.3. ΗΠΑ	17
1.3.4. Υπόλοιπος Κόσμος	18
1.4. Ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών	18
2. Φωτοβολταϊκά Συστήματα	22
2.1. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	22
2.2. Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	24
2.2.1. Φωτοβολταϊκά πλαίσια πρώτης γενιάς: Πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου.....	24
2.2.2. Φωτοβολταϊκά πλαίσια δεύτερης γενιάς: Κυψέλες λεπτών υμενίων (Thin-film)	25
2.2.3. Φωτοβολταϊκά πλαίσια τρίτη γενιάς: Οργανικά	26
2.3. Δομή πολυκρυσταλλικών πάνελ.....	27
2.4. Απόδοση φωτοβολταϊκών πάνελ	29
2.4.1. Εσωτερικοί Παράγοντες.....	30
2.4.2. Εξωτερικοί Παράγοντες	31
3. Φωτοβολταϊκά απόβλητα.....	32
3.1. Φωτοβολταϊκά απόβλητα.....	32
3.2. Εκτιμώμενη εξέλιξη των παραγόμενων φωτοβολταϊκών αποβλήτων.....	33
3.3. Αναμενόμενα απόβλητα.....	34
3.4. Επιπτώσεις τέλους κύκλου ζωής αποβλήτων.....	35

3.4.1.	Τοξικότητα για τον άνθρωπο	35
3.4.2.	Αέρια και χερσαία ρύπανση	36
3.4.3.	Απώλεια πόρων	36
3.4.4.	Αυξημένος όγκος αποβλήτων	37
3.5.	Εθνικό νομοθετικό πλαίσιο	37
3.6.	Εθνικό σύστημα διαχείρισης φωτοβολταϊκών αποβλήτων	39
4.	Διαχείριση φωτοβολταϊκών πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου μετά το τέλος κύκλου ζωής	40
4.1.	Υγειονομική Ταφή (ΧΥΤΑ)	40
4.2.	Αποτέφρωση	41
4.3.	Επαναχρησιμοποίηση	41
4.4.	Ανακύκλωση	42
4.5.	Διαδικασία ανακύκλωσης φωτοβολταϊκού πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου (cSi)	43
4.5.1.	Ανάκτηση αλουμινίου	46
4.5.2.	Ανάκτηση γυαλιού	46
4.5.3.	Ανάκτηση πυριτίου	47
4.5.4.	Ανάκτηση μετάλλων	48
4.5.5.	Παραγωγή χρήσιμων προϊόντων	49
5.	Ανάλυση Κύκλου Ζωής	51
5.1.	Γενικά	51
5.2.	Στάδια μεθοδολογίας AKZ	51
5.2.1.	Καθορισμός στόχου και οριοθέτηση του πεδίου εφαρμογής	53
5.2.2.	Καταγραφή δεδομένων κύκλου ζωής	54
5.2.3.	Εκτίμηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής	55
5.2.4.	Ερμηνεία των αποτελεσμάτων	56
6.	Λογισμικό SimaPRO	57
6.1.	Εισαγωγή – Λογισμικό SimaPRO 7	57
6.2.	Βιβλιοθήκες και βάσεις δεδομένων	57
6.3.	Μέθοδος αξιολόγησης IMPACT 2002+	58
6.3.1.	Τελικοί δείκτες (Endpoint)	59
6.3.2.	Ενδιάμεσοι δείκτες (Endpoint)	60
6.4.	Κανονικοποίηση	61
7.	Καταγραφή δεδομένων	62
7.1.	Στόχος και Πεδίο μελέτης	62

7.2.	Συλλογή καταλόγου δεδομένων (LCI).....	63
7.2.1.	Λειτουργική Μονάδα.....	63
7.2.2.	Περιγραφή Συστήματος.....	64
7.2.3.	Όρια Συστήματος	65
7.3.	Περιορισμοί – Παραδοχές	65
8.	Ανάλυση σεναρίων στο SimaPRO – Αποτελέσματα	67
8.1.	Σενάριο I: Απόθεση φωτοβολταϊκών αποβλήτων σε ΧΥΤΑ χωρίς προεπεξεργασία	67
8.2.	Σενάριο II: Σταθεροποίηση φωτοβολταϊκών αποβλήτων σε τσιμεντοκονία	69
8.3.	Σενάριο III: Υδρομεταλλουργική επεξεργασία φωτοβολταϊκών αποβλήτων	72
8.4.	Σενάριο IIIa: Ανάκτηση γυαλιού	73
8.4.1.	Σενάριο IIIa(i): ΧΥΤΑ	75
8.4.2.	Σενάριο IIIa(ii): Ανακύκλωση.....	77
8.4.3.	Σενάριο IIIa(iii): Σταθεροποίηση	79
8.4.4.	Συγκριτικά αποτελέσματα Σεναρίου IIIa	81
8.5.	Σενάριο IIIb: Ανάκτηση αλουμινίου	82
8.6.	Σενάριο IIIc: Ανάκτηση ασημιού	86
8.6.1.	Καταβύθιση (Precipitation).....	87
8.6.2.	Ηλεκτράνακτηση (Electrowinning)	90
8.6.3.	Συγκριτικά αποτελέσματα Σεναρίων III	91
8.7.	Σενάριο IIId: Ανάκτηση πυριτίου	92
9.	Συμπεράσματα.....	95
9.1.	Ευνοϊκότερο σενάριο υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας	95
9.2.	Σύγκριση αποτελεσμάτων σεναρίων διαχείρισης.....	97
9.3.	Προτάσεις βελτίωσης αποδοτικότητας	98
	Βιβλιογραφία	100
	Παράρτημα	104

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 2021 (ανά μερίδιο αγοράς) [Τροποποίηση από ΔΑΠΕΕΠ, 2021]	11
Εικόνα 2 Ετήσια εγκατάσταση φωτοβολταϊκών (GWdc), [Τροποποίηση από NREL, 2022].....	15
Εικόνα 3 Συνολική σωρευμένη εγκατάσταση νέων φωτοβολταϊκών συστημάτων για το έτος 2022 (GWdc), [Τροποποίηση από NREL, 2022].....	16
Εικόνα 4 Ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών (Helarco, 2022)	19
Εικόνα 5 Κατανομή διασυνδεδεμένων συστημάτων ανά ισχύ [Τροποποίηση HELAPCO, 2021]	21
Εικόνα 6 Σχηματική απεικόνιση του φωτοβολταϊκό φαινομένου σε ένα φβ κύτταρο	23
Εικόνα 7 Στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα τυπικό πάνελ πυριτίου [solarpanels-china.com].....	28
Εικόνα 8 Αστοχίες που οδηγούν σε πρόωρη απόσυρση φωτοβολταϊκών πλαισίων [Τροποποίηση από Weckend, Wade & Heath, 2016].	33
Εικόνα 9 Συγκριτική εξέλιξη του συσσωρευτικού όγκου αποβλήτων φωτοβολταϊκών πλαισίων βάση σεναρίων τυπικής και πρόωμης απόσυρσης. [Τροποποίηση από (Weckend, Wade, & Heath, 2016)]	34
Εικόνα 10 Διάγραμμα ροής υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας (Theocharis et al, 2022)	46
Εικόνα 11 Διάγραμμα ροής υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας με παραγωγή φωτοκαταλύτη	48
Εικόνα 12 Διάγραμμα ροής προς παραγωγή σύνθετων υλικών εποξειδικής ρητίνης.....	50
Εικόνα 13 Στάδια AKZ [Τροποποίηση από ISO 14044, 2006]	52
Εικόνα 14 Γενική δομή του πλαισίου της μεθόδου IMPACT 2002+ για την αξιολόγηση των επιπτώσεων [Τροποποίηση από Jolliet, O. et al (2016)]	59
Εικόνα 15 Ποσοστά εκπομπών ρύπων (kg CO ₂ eq) υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας	97

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Γεωγραφική κατανομή φωτοβολταϊκών συστημάτων [Τροποποίηση Helarco, 2022].....	20
Πίνακας 2 Τυπικές τιμές για τα πάχη κάθε επίστρωσης (από εμπρόσθια προς οπίσθια όψη) [Τροποποίηση από Πηλίκος, 2013].....	29
Πίνακας 3 Τυπική σύσταση φωτοβολταϊκού πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου	29
Πίνακας 4 Τυπικές τιμές απόδοσης για διαφορετικούς τύπους φωτοβολταϊκών συστημάτων	30
Πίνακας 5 Μέθοδοι και επιμέρους στάδια ανακύκλωσης αποβλήτων από φωτοβολταϊκά απόβλητα [Τροποποίηση από Sander et al, 2007]	42
Πίνακας 6 Ανακτώμενα υλικά που προκύπτουν από φωτοβολταϊκό πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου [Τροποποίηση από Komoto et al, 2018]	43
Πίνακας 7 Τιμές ανακτώμενων υλικών (Αύγουστος 2022).....	48
Πίνακας 8 Τυπικά ποσοστά ανάκτησης [Τροποποίηση από Δασκαλόγλου, Κίναλης (2012)].....	49
Πίνακας 9 Συντελεστές κανονικοποίησης για κάθε κατηγορία τελικής βλάβης	62
Πίνακας 10 Στοιχεία κατασκευαστή φωτοβολταϊκού Hyundai HIS S248MG.....	64
Πίνακας 11 Λειτουργική μονάδα στη παρούσα μελέτη.....	64
Πίνακας 12 Σύσταση φωτοβολταϊκού πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου στη παρούσα μελέτη	65
Πίνακας 13 Δεδομένα απογραφής LCIA Σεναρίου II: Σταθεροποίηση μίγματος αποβλήτων σε τσιμεντοκονία	70
Πίνακας 14 Δεδομένα απογραφής LCIA Σεναρίου IIIa: Ανάκτηση γυαλιού.....	74
Πίνακας 15 Ανθρακικό αποτύπωμα για τα Στάδια 0-3.....	75
Πίνακας 16 Δεδομένα απογραφής LCIA Σεναρίου IIIa(iii): Σταθεροποίηση	80
Πίνακας 17 Συγκριτικά αποτελέσματα υποσεναρίων IIIa (Συνολικά και τελική διεργασία).....	81
Πίνακας 18 Δεδομένα απογραφής LCIA – Πρώτη εκχύλιση	84
Πίνακας 19 Δεδομένα απογραφής LCIA Σεναρίου IIIb: Ανάκτηση αλουμινίου	84
Πίνακας 20 Ανθρακικό αποτύπωμα για τα Στάδια 4,7	86
Πίνακας 21 Δεδομένα απογραφής LCIA Εκχύλισης II	87
Πίνακας 22 Δεδομένα απογραφής LCIA Σεναρίου IIIc(i): Καταβύθιση.....	89
Πίνακας 23 Δεδομένα απογραφής LCIA Σεναρίου IIIc(ii): Ηλεκτράνακτηση	91
Πίνακας 24 Συγκριτικά αποτελέσματα υποσεναρίων IIIc: Ανάκτηση ασημιού.....	92
Πίνακας 25 Δεδομένα απογραφής LCIA Σεναρίου IIId: Ανάκτηση πυριτίου.....	93
Πίνακας 26 Συγκεντρωτικός πίνακας ανθρακικού αντίκτυπου του συνόλου των σταδίων της υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας	96

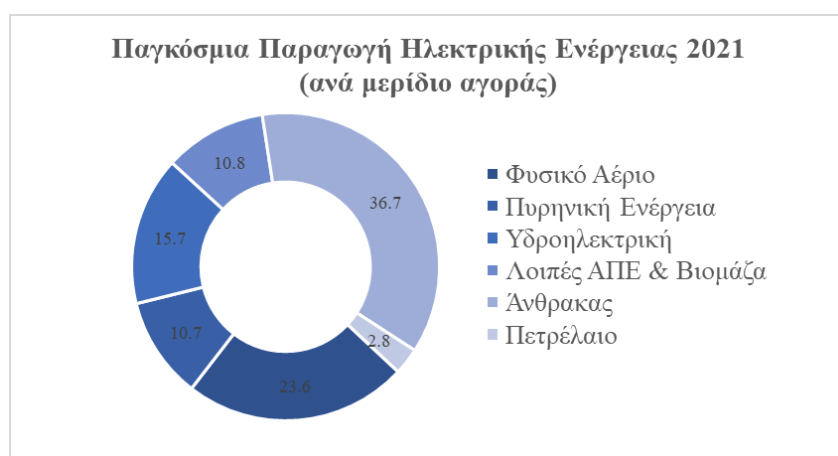
Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1	Διάγραμμα ροής Σεναρίου 1: Απόθεση σε ΧΥΤΑ	67
Διάγραμμα 2	Δέντρο διεργασιών SimaPRO Σεναρίου 1: Απόθεση σε ΧΥΤΑ	68
Διάγραμμα 3	Διάγραμμα ροής Σεναρίου ΙΙ: Σταθεροποίηση μίγματος αποβλήτων σε τσιμεντοκονία	69
Διάγραμμα 4	Δέντρο διεργασιών SimaPRO Σεναρίου ΙΙ: Σταθεροποίηση μίγματος φωτοβολταϊκών αποβλήτων σε τσιμεντοκονία	71
Διάγραμμα 5	Διάγραμμα ροής Σεναρίου ΙΙΙα: Ανάκτηση γυαλιού.....	73
Διάγραμμα 6	Διάγραμμα ροής Σεναρίου ΙΙΙα(i): Απόθεση σε ΧΥΤΑ.....	76
Διάγραμμα 7	Δέντρο διεργασιών SimaPRO Σεναρίου ΙΙΙα(i): Απόθεση σε ΧΥΤΑ.....	77
Διάγραμμα 8	Διάγραμμα ροής Σεναρίου ΙΙΙα(ii): Ανακύκλωση.....	77
Διάγραμμα 9	Δέντρο διεργασιών SimaPRO Σεναρίου ΙΙΙα(ii): Ανακύκλωση.....	78
Διάγραμμα 10	Διάγραμμα ροής Σεναρίου ΙΙΙα(iii): Σταθεροποίηση	79
Διάγραμμα 11	Δέντρο διεργασιών SimaPRO Σεναρίου ΙΙΙα(iii): Σταθεροποίηση	80
Διάγραμμα 12	Διάγραμμα ροής Σεναρίου ΙΙΙβ: Ανάκτηση αλουμινίου	83
Διάγραμμα 13	Διάγραμμα ροής Σεναρίου ΙΙΙβ: Ανάκτηση αλουμινίου	85
Διάγραμμα 14	Διάγραμμα ροής Σεναρίου ΙΙΙβ(i): Καταβύθιση.....	88
Διάγραμμα 15	Δέντρο διεργασιών SimaPRO Σεναρίου ΙΙΙβ(i): Καταβύθιση	89
Διάγραμμα 16	Διάγραμμα ροής Σεναρίου ΙΙΙβ(ii): Ηλεκτρανάκτηση	90
Διάγραμμα 17	Δέντρο διεργασιών SimaPRO Σεναρίου ΙΙΙβ(ii): Ηλεκτρανάκτηση	91
Διάγραμμα 18	Δέντρο διεργασιών SimaPRO Σεναρίου ΙΙΙβ: Ανάκτηση πυριτίου.....	94
Διάγραμμα 19	Σενάριο Ι: Απόθεση σε ΧΥΤΑ - Ενδιάμεσοι δείκτες, Μέθοδος IMPACT2002+.....	104
Διάγραμμα 20	Σενάριο ΙΙ: Σταθεροποίηση σε τσιμεντοκονία – Single Score – Συγκριτικά αποτελέσματα	105
Διάγραμμα 21	Σενάριο ΙΙ: Σταθεροποίηση σε τσιμεντοκονία - Ενδιάμεσοι δείκτες – Συγκριτικά αποτελέσματα.....	106
Διάγραμμα 22	Σενάριο ΙΙ: Σταθεροποίηση σε τσιμεντοκονία - Τελικοί δείκτες – Συγκριτικά αποτελέσματα	107
Διάγραμμα 23	Σενάριο ΙΙα(ii):	108
Διάγραμμα 24	Σενάριο ΙΙΙα(ii) Ενδιάμεσοι δείκτες – Μέθοδος IMPACT2002+	109
Διάγραμμα 25	Σενάρια ΙΙΙα Ενδιάμεσοι δείκτες – Συγκριτικά αποτελέσματα.....	111
Διάγραμμα 26	Σενάρια ΙΙΙα Τελικοί δείκτες – Συγκριτικά αποτελέσματα.....	112
Διάγραμμα 27	Σενάριο ΙΙΙβ: Ανάκτηση αλουμινίου – Ενδιάμεσοι δείκτες	113
Διάγραμμα 28	Σενάριο ΙΙΙβ: Ανάκτηση αλουμινίου – Τελικοί δείκτες.....	114
Διάγραμμα 29	Σενάρια ΙΙΙβ Ενδιάμεσοι δείκτες – Συγκριτικά αποτελέσματα.....	115
Διάγραμμα 30	Σενάριο ΙΙΙβ Single Score – Μέθοδος IMPACT2002+.....	117
Διάγραμμα 31	Σενάρια ΙΙΙβ Τελικοί δείκτες – Συγκριτικά αποτελέσματα	118
Διάγραμμα 32	Σενάριο ΙΙΙβ: Ανάκτηση πυριτίου - Ενδιάμεσοι δείκτες – Μέθοδος IMPACT20	118
Διάγραμμα 33	Σενάριο ΙΙΙβ: Ανάκτηση πυριτίου - Τελικοί δείκτες – Μέθοδος IMPACT2002+	119

1. Εισαγωγή

Ένα από τα πιο επιτακτικά προβλήματα που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα είναι το ενεργειακό. Η παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται συνεχώς τον τελευταίο μισό αιώνα, από 6.131 TWh το 1973 φτάνει τις 26.936 TWh το 2021 (IEA, 2021), δηλαδή 4.4 φορές.

Σήμερα, σχεδόν το 29% της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας προέρχεται από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, από ορυκτά καύσιμα (άνθρακα, φυσικό αέριο και πετρέλαιο) και πυρηνική ενέργεια (Εικόνα 1). Η ηλεκτροπαραγωγή αποτελεί μία από τις βασικότερες πηγές εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG), αντιπροσωπεύοντας πάνω από τα τρία τέταρτα των αερίων ρύπων.



Εικόνα 1 Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 2021 (ανά μερίδιο αγοράς) [Τροποποίηση από ΔΑΠΕΕΠ, 2021]

Το περιβαλλοντικό πρόβλημα είναι απόρροια της καύση των ορυκτών καυσίμων και αλυσιδωτά της έκλυσης στην ατμόσφαιρα μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα (CO₂, CO). Τα αέρια αυτά συμβάλλουν στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και της υπερθέρμανσης του πλανήτη. (Καραδήμα, 2011)

Τα οξείδια του αζώτου και του θείου που εκλύονται, προκαλούν το φαινόμενο όξινης βροχής και του φωτοχημικού νέφους. Η όξινη βροχή επιδρά δυσμενώς στους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς ενώ παράλληλα καταστρέφει και τα μαρμάρινα μνημεία. Επιπρόσθετα, τα παραπάνω αέρια σε συνδυασμό με τα στερεά αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία απελευθερώνονται επίσης κατά τη καύση και από άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες, επιβαρύνουν σημαντικά το οικοσύστημα και την ανθρώπινη υγεία.

Η κλιματική αλλαγή είναι πλέον πραγματικότητα. Η παγκόσμια κοινή γνώμη, ευαισθητοποιημένη για περιβαλλοντικά ζητήματα, επιζητά την απανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα. Ταυτόχρονα, το αυξημένο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικούς πόρους, η μεταβλητότητα των τιμών αλλά

και η μείωση της διαθεσιμότητας των φυσικών πόρων συμβάλλουν στην επιτάχυνση της πράσινης αλλαγής. Στρατηγικές μετριασμού τους αναπτύσσονται και επικροτούνται από την Ευρωπαϊκή Ένωση. (Κιότο, 2020)

Για να εξασφαλιστεί μία αξιόπιστη, περιβαλλοντικά καθαρή και βιώσιμη πηγή ενέργειας παρατηρείται στροφή στην ανάπτυξη και αποτελεσματικότερη αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Οι ΑΠΕ προβλέπεται να γίνουν η ραχοκοκαλιά των μελλοντικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Milousi, 2017).

1.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού προϋποθέτει την εξοικονόμηση ενέργειας με τη βοήθεια των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Εκμεταλλεύονται τον ήλιο, τον άνεμο, τη γεωθερμία, τη βιομάζα, τη κυκλοφορία του νερού και άλλες φυσικές διαδικασίες του περιβάλλοντος. Επομένως, βρίσκονται εν αφθονία στο φυσικό περιβάλλον προς εκμετάλλευση.

Οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας αποκαλούνται και ήπιες μορφές ενέργειας ή πράσινη ενέργεια. Ο όρος «ήπιες» οφείλεται σε δύο κύρια χαρακτηριστικά τους (Μαμάτας, 2016). Πρώτον, δεν απαιτείται ενεργειακή παρέμβαση για την εκμετάλλευσή του, αλλά εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Για παράδειγμα, για χρήση των συμβατικών πηγών ενέργειας απαιτούνται εξόρυξη, άντληση ή και καύση. Δεύτερον, είναι καθαρές πηγές ενέργειας, φιλικές προς το περιβάλλον, που δεν απελευθερώνουν αέρια του θερμοκηπίου ή τοξικούς ρύπους προς το περιβάλλον.

Συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι τα εξής:

- Πρόκειται για μη αναλώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες δεν εξαντλούνται, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον, κατά τη λειτουργία τους δεν παράγουν απόβλητα και ρύπους. Κατά αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνονται οι ενεργειακοί στόχοι για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας, προσφέροντας ευελιξία ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες του πληθυσμού. Ταυτόχρονα, μειώνεται η εξάρτηση για ενεργειακό εφοδιασμό σε εθνικό επίπεδο.

- Συμβάλλουν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, καθώς βρίσκονται διάσπαρτες γεωγραφικά, ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες κατά τη μεταφορά ενέργειας.
- Οι επενδύσεις σε ΑΠΕ δημιουργούν σημαίνοντα αριθμό νέων θέσεων εργασίας, ιδιαιτέρως σε τοπικό επίπεδο.

Οι ΑΠΕ, βασίζονται, ουσιαστικά, στην ηλιακή ακτινοβολία, με εξαιρέσεις τη γεωθερμική ενέργεια η οποία είναι ροή ενέργειας από το εσωτερικό του φλοιού της Γης και την ενέργεια από τις παλίρροιες των ωκεανών με θαλάσσια αιολικά πάρκα.

Η αιολική ενέργεια αξιοποιεί τον άνεμο που οφείλεται στη θέρμανση του αέρα από τον ήλιο ενώ αυτές που βασίζονται στο νερό εκμεταλλεύονται τον κύκλο εξάτμισης-συμπύκνωσης του νερού και την κυκλοφορία του. Αξίζει να σημειωθεί, πως μέχρι και η βιομάζα πρόκειται για ηλιακή ενέργεια δεσμευμένη στους ιστούς των φυτών μέσω της φωτοσύνθεσης.

Η ενέργεια που παράγεται από συστήματα ΑΠΕ μπορούν να εκμεταλλευτούν είτε άμεσα για θέρμανση, είτε έπειτα από μετατροπή τους σε διαφορετικούς τύπους ενέργειας, όπως η ηλεκτρική και η μηχανική ενέργεια.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αξιοποιούν τη δύναμη του Ήλιου, την ηλιακή ενέργεια, η οποία μετατρέπεται σε συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα και τελικά παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Λόγω της αστείρευτης ηλιακής ακτινοβολίας, της απλής και ασφαλούς λειτουργίας των φωτοβολταϊκών, της μεγάλης διάρκειας ζωής τους, καθώς και της αφθονίας της πρώτης ύλης κατά τη κατασκευή τους, τα φωτοβολταϊκά συστήματα πλεονεκτούν σημαντικά έναντι των υπόλοιπων ΑΠΕ.

Αυτό είχε ως επακόλουθο τη σταδιακή ένταξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο ενεργειακό μίγμα, ενώ παράλληλα η ανάπτυξη της τεχνολογίας ωφέλησε στο να γίνουν πιο οικονομικά, αποδοτικότερα και με μεγαλύτερη διαθεσιμότητα στις αγορές (Kang et al., 2012).

1.2. Ιστορική αναδρομή φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η ιδέα της χρήσης της δύναμης του ήλιου ως μορφή φωτός και θερμότητας χρησιμοποιείται ήδη από τη πρόωμη ανθρωπότητα. Τον 5ο αιώνα π.Χ. τα σπίτια στην Αρχαία Ελλάδα σχεδιάζονται με τρόπο τέτοιο, ώστε να συλλαμβάνουν τη θερμότητα του ήλιου κατά τους χειμερινούς μήνες. Αργότερα, οι Ρωμαίοι, βελτίωσαν την αρχιτεκτονική των οικημάτων εισάγοντας διάφανο υλικό (πχ. γυαλί, mica) στα νότια

παράθυρα. Αποτρέπεται, έτσι, η διαφυγή της ηλιακής ενέργειας που συλλαμβάνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Το 1760 ο Ελβετός επιστήμονας Horace de Saussure κατασκεύασε έναν πρώιμο ηλιακό συλλέκτη για τη θέρμανση του νερού. Πρόκειται για ένα μονωμένο ορθογώνιο κουτί με γυάλινο κάλυμμα.

Αργότερα, το 1839 ο 19χρονος φυσικός Edmund Becquerel ανακαλύπτει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, όσο πειραματιζόταν με δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια σε αγωγίμο υγρό. Παρατήρησε ότι η ροή αυξανόταν με την έκθεση στον ήλιο. Παρόλο το ενδιαφέρον που συγκεντρώθηκε από την επιστημονική κοινότητα για τις σημειώσεις του γύρω από το φαινόμενο, δεν υπήρξε πρακτική εφαρμογή.

Η βιομηχανία των φωτοβολταϊκών, όπως τη γνωρίζουμε σήμερα, αναπτύχθηκε στο πρώτο μισό του 19ου αιώνα. Στα Bell Telephone Laboratories (Bell Labs) κατασκευάζονται τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία από πυρίτιο με προσμίξεις (τεχνολογίες «πρώτης γενιάς»), μικρών αποδόσεων (6-9%) και ξεκινούν να χρησιμοποιούνται για συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας και μετατροπή της σε ηλεκτρικό ρεύμα. Εώς το 1972 έχει επιτευχθεί η κατασκευή ηλιακού στοιχείου απόδοσης 14%.

Το 1977 η συνολική παραγωγή φωτοβολταϊκών ξεπερνά τα 500 kW, ενώ το 1983 ανέρχεται σε 21.3 MW. Ενδεικτικά, η τιμή των φωτοβολταϊκών εκείνη τη περίοδο ξεκινά από 500\$ ανά εγκατεστημένο Watt και τελικά διαμορφώνεται στα 100\$/Watt. Λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής, κυριότερος πελάτης αυτές τις δεκαετίες αποτελεί η NASA.

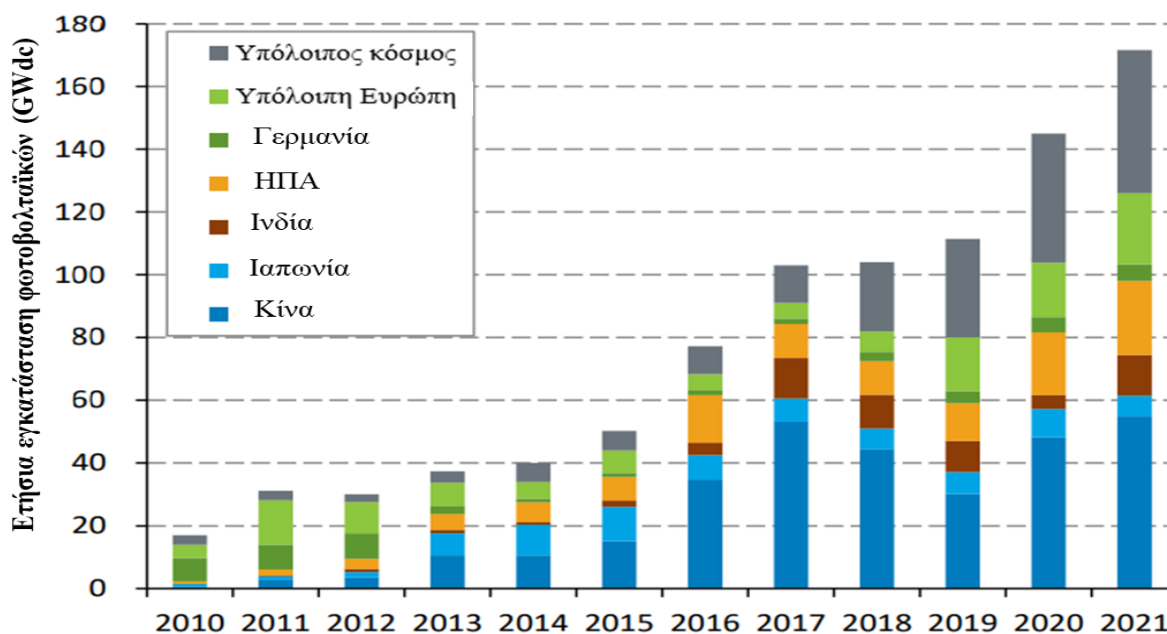
Τη δεκαετία του 1980 εμφανίστηκαν τα φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου και σταδιακά ακολούθησε η γενική ανάπτυξη της γενιά των πάνελ λεπτού υμενίου (τεχνολογίες «δεύτερης γενιάς»). Το 1999 η εταιρία Spectrolab συνεργαζόμενη με το National Renewable Energy Laboratory (NREL) των Η.Π.Α. αναπτύσσουν φωτοβολταϊκό εργαστηριακής απόδοσης ρεκόρ 32.3%. Η χιλιετία φτάνει στο τέλος της με συνολικά εγκατεστημένα πάνελ ονομαστικής ισχύος 200 MW.

Η εξάπλωση των φωτοβολταϊκών ως πηγή ενέργειας είναι πλέον αλματώδης. Από το 2004, μεγάλες εταιρείες εισέρχονται στο χώρο των ΑΠΕ και μειώνουν σημαντικά το κόστος με οικονομία μεγάλη κλίμακας. Τα τελευταία χρόνια βελτιώνονται όλο περισσότερο οι αποδόσεις και γίνονται μελέτες για κατασκευή φωτοβολταϊκών από εναλλακτικά υλικά. Πρόσφατα, έχουν αναπτυχθεί ακόμα περισσότερες φωτοβολταϊκές τεχνολογίες, γνωστές ως «τρίτης γενιάς», οι οποίες βρίσκονται σε ερευνητικό ή πιλοτικό επίπεδο.

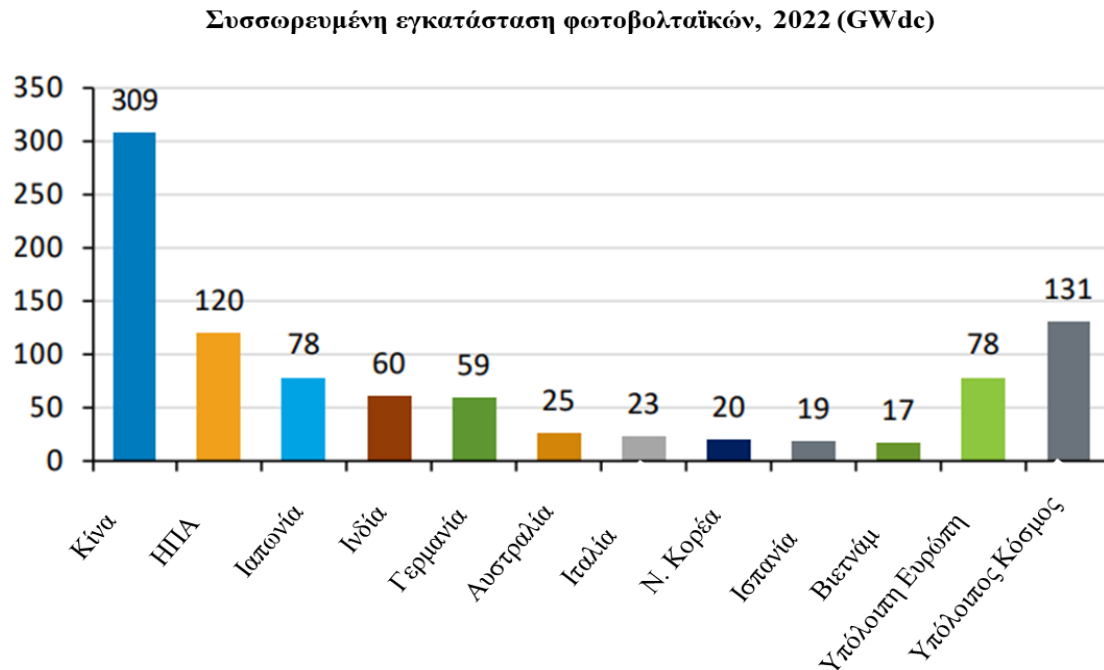
1.3. Διεθνή αγορά φωτοβολταϊκών

Στις σύγχρονες κοινωνίες, ιδιαίτερα στις δυτικές, με την πρόοδο της οικονομίας και τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια συνεχώς αυξάνεται. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας που καταναλώνεται, προέρχεται από συμβατικές πηγές ενέργειας, ωστόσο, τις τελευταίες δύο δεκαετίες παρατηρείται η στροφή προς τις ΑΠΕ.

Η ηλιακή ενέργεια είναι ανανεώσιμη, πρακτικά ανεξάντλητη για μερικά ακόμα δεσεκατομμύρια χρόνια. Σε συνδυασμό με τα μακροπρόθεσμα συμβόλαια ηλεκτρικής ενέργειας, τη μείωση του κόστους παραγωγής ηλιακών συλλεκτών και το χαμηλό λειτουργικό τους κόστος, τα φωτοβολταϊκά συστήματα εξαπλώνονται στη παγκόσμια αγορά.



Εικόνα 2 Ετήσια εγκατάσταση φωτοβολταϊκών (GWdc), [Τροποποίηση από NREL, 2022]



Εικόνα 3 Συνολική σωρευμένη εγκατάσταση νέων φωτοβολταϊκών συστημάτων για το έτος 2022 (GWdc), [Τροποποίηση από NREL, 2022]

Οι φωτοβολταϊκές τεχνολογίες γνώρισαν σημαντική ανάπτυξη το 2010. Η συνολική χωρητικότητα που εγκαταστάθηκε παγκόσμια το 2010 ήταν περίπου 18 GWdc, ενώ το 2021 ήταν περίπου 10 φορές μεγαλύτερη, στα 170GWdc, γεγονός που δείχνει τη μετάβαση στη βιώσιμη ανάπτυξη. (Εικόνα 2)

Οι πέντε κορυφαίες αγορές, όσον αφορά το σύνολο των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών για το 2021, είναι η Κίνα, οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Ιαπωνία, η Ινδία και η Γερμανία. Οι αναλυτές προβλέπουν περαιτέρω αύξηση της ετήσιας παγκόσμιας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων τα επόμενα 4 χρόνια, με τη Κίνα, την Ευρώπη και την Ινδία να είναι στο προσκήνιο.

1.3.1. Γερμανία και υπόλοιπη Ευρώπη

Η Ευρωπαϊκή Ένωση είναι η δεύτερη μεγαλύτερη αγορά φωτοβολταϊκών, με 178,5 GWdc αθροιστικών εγκαταστάσεων (19% του παγκόσμιου συνόλου) και 26,5 GWdc ετήσιες εγκαταστάσεις (15% του παγκόσμιου) το 2021. (Εικόνα 3)

Η Γερμανία αποτελεί πρωτοπόρο στην Ευρώπη για τα φωτοβολταϊκά, θέτοντας τον στόχο πλήρους απανθρακοποίησης έως το 2035, με τα φωτοβολταϊκά να είναι πυλώνες στο σχέδιο της πράσινης μετάβασης. Συγκεκριμένα, η γερμανική κυβέρνηση στοχεύει σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών στη Γερμανία 215 GWp έως το 2030 και 400 GWp έως το 2040. (GTAI, 2022)

Στη Γερμανία, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες χώρες, παρατηρείται εγκατάσταση της πλειονότητας των νέων συστημάτων σε οικιακούς πελάτες. Οι γερμανικές στέγες φιλοξενούν φωτοβολταϊκά συστήματα μεγέθους έως και 30 kWp καθιστώντας τα ενεργειακά αυτόνομα.

Αξιοσημείωτη είναι η νέα πιλοτική μονάδα παραγωγής τσιμέντου στην Ισπανία. Γίνεται χρήση της ηλιακής ενέργειας ως άμεση μορφή θερμότητα έναντι των ορυκτών καυσίμων στη τσιμεντοβιομηχανία, μία από τις πιο ενεργοβόρες βιομηχανίες.

1.3.2. Κίνα

Η Κίνα, όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 3, παραμένει η μεγαλύτερη αγορά φωτοβολταϊκών από την αρχή της προηγούμενης δεκαετίας. Οι ετήσιες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις της Κίνας αυξήθηκαν κατά 14% ετησίως το 2021, εκπροσωπώντας λίγο λιγότερο από το ένα τρίτο του ετήσιου παγκόσμιου όγκου νέων συστημάτων. Το 2022 αναμένεται να σπάσει το περσινό ρεκόρ των 54.9 GWdc με εγκατάσταση ονομαστικής ισχύος ύψους μεταξύ 75 και 90GWdc. (Reuters, 2022)

Στόχος του 2030 είναι να φέρει τη συνολική αιολική και ηλιακή ισχύ στα 1200 GWdc. Για το λόγο αυτό, αυτή τη περίοδο αναπτύσσει βάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μεγάλης κλίμακας σε απομακρυσμένες περιοχές της ερήμου.

1.3.3. ΗΠΑ

Το 2021, οι Ηνωμένες Πολιτείες είχαν τη δεύτερη μεγαλύτερη αγορά τόσο σωρευτικά όσο και σε ετήσια εγκατεστημένα συστήματα. (NREL, 2022) Το 2021 εγκατέστησαν 23,6 GWdc φωτοβολταϊκών, κλείνοντας το έτος με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 119,7 GWdc. Το μεγαλύτερο ποσοστό των ηλιακών συλλεκτών βρίσκονται σε 11 πολιτείες, με τη Καλιφόρνια να πρωτοστατεί με κάλυψη των αναγκών της κατά 25%.

Η ανάπτυξη της αγοράς των ΗΠΑ προβλέπεται σχετικά στάσιμη, με μικρή πτώση το 2022, αύξηση το 2023 και στη συνέχεια μείωση κατά τη διετία 2024- 2025 παρά την υποστηρικτική πολιτική σε ομοσπονδιακό και πολιτειακό επίπεδο.

1.3.4. Υπόλοιπος Κόσμος

Η Ινδία για να καλύψει τις ενεργειακές τις ανάγκες έχει στραφεί στα φωτοβολταϊκά ήδη από το 2016. Καθυστερήσεις που σχετίζονται με τη πανδημία του Covid19 προσπερνιούνται και η αγορά φωτοβολταϊκών στην Ινδία αναμένεται να ανακάμψει. Τα έργα που έλαβαν ξανά μπρος τη διετία 2021-2022 αφορούν έργα μεγάλης κλίμακας (83% του συνόλου) και οικιακής χρήσης (17%). Μάλιστα, η ηλιακή ενέργεια αποτελεί πλέον το 62% των νέων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής.

Ταυτόχρονα, αυξημένη παραγωγή παρατηρείται σε τρία διαφορετικά σημεία του κόσμου με εξίσου ευνοϊκές κλιματολογικές συνθήκες, το Βιετνάμ, τη Χιλή και τη Βραζιλία. Η Βραζιλία, μάλιστα, μόλις το 2021 ξεπέρασε τη Γερμανία όσον αφορά τη πρώτη πεντάδα ετήσιας ανάπτυξης του φωτοβολταϊκού τομέα.

1.4. Ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών

Στην Ελλάδα, η προοπτική ανάπτυξης και εφαρμογής των φωτοβολταϊκών συστημάτων καθυστέρησε σε σχέση με την υπόλοιπη Ευρώπη. Έως το 2007, τα φωτοβολταϊκά ήταν μικρής κλίμακας αυτόνομα συστήματα για ιδιωτική χρήση, κατά βάση σε απομακρυσμένες περιοχές δίχως πρόσβαση στο δίκτυο. Οι πρώτοι φωτοβολταϊκοί σταθμοί τέθηκαν σε λειτουργία το έτος 2007, με το μεγαλύτερο μέρος τους (91.7%) να ηλεκτροδοτείται τη τριετία 2011-2013. Τα επόμενα χρόνια, ως συνέπεια της εγχώριας κρίσης και της χαλαρής νομοθεσίας υπήρξε στασιμότητα όσον αφορά τις εγκαταστάσεις νέων συστημάτων.

Το 2018 τίθεται ως δεσμευτικός στόχος της ΕΕ με την Οδηγία 2018/2001 το μερίδιο της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας να ανέρχεται τουλάχιστον στο 32% μέχρι το 2030. Το επενδυτικό ενδιαφέρον για τα φωτοβολταϊκά αυξάνεται από το τότε αμείωτα, όπως αποτυπώνεται και από το παρακάτω διάγραμμα. (Helarco, 2022)

Η Εικόνα 4 παρουσιάζει την ανάπτυξη της ελληνικής αγοράς φωτοβολταϊκών (Ετήσια και συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ελλάδα από το 2007 έως το 2021), περιλαμβάνοντας τόσο τις εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας όσο και των μικρότερων ιδιωτικών συστημάτων.

Σύμφωνα με τον ελληνικό σύνδεσμο εταιρειών φωτοβολταϊκών, το 2021 εγκαταστάθηκαν περισσότερα μεγαβάτ (MWp) από κάθε άλλη τεχνολογία και παράχθηκαν 5.26 δισεκατομμύρια κιλοβατώρες (TWh).

Από τα 838 MWp φωτοβολταϊκών που διασυνδέθηκαν το 2021, τα 454 MWp είχαν κάνει δήλωση ετοιμότητας ήδη από το 2020 αλλά ηλεκτρίστηκαν το 2021. Ομοίως, επιπλέον 370 MWp περίπου έκαναν δήλωση ετοιμότητας το 2021 αλλά θα ηλεκτριστούν το 2022. (Helarco/ΣΕΦ, 2022)

Διασυνδεδεμένα συστήματα	MWp
Νέα ισχύς διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών το 2021	838
Συνολική ισχύς διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών ως και το 2021	4.126



Εικόνα 4 Ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών (Helarco, 2022)

Είναι φανερό, πως η ηλιακή ενέργεια υποκαθιστά πλέον σταδιακά τα ορυκτά καύσιμα (πχ. λιγνίτης), με το 2021 να καλύπτεται το 9.2% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας, αποσοβώντας την έκλυση 3.7 εκατ. τόνων διοξειδίου του άνθρακα.

Το 2022 αναμένεται αύξηση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύς. Απόρροια της αυξανόμενης επενδυτικής δραστηριότητας είναι το φωτοβολταϊκό πάρκο με φωτοβολταϊκά διπλής όψης ισχύος 12MWp στη Κοζάνη, το οποίο εγκαινιάστηκε τον Απρίλιο του 2022. Εκτείνεται σε ορεινή περιοχή 4500 στρεμμάτων σε υψόμετρο 920-1050μ. στη Κοζάνη. Αποτελεί το μεγαλύτερο σε λειτουργία έργο ΑΠΕ μέχρι σήμερα στην Ελλάδα και στην ευρύτερη περιοχή της ΝΑ Μεσογείου.

Τα φωτοβολταϊκά διπλής όψης έχουν τη δυνατότητα να εκμεταλλευτούν και την ηλιακή ακτινοβολία που αντανακλάται από το έδαφος. Κατά αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται σημαντική η συνολική τους απόδοση. Συγκεκριμένα, η ετήσια παραγωγή ρεύματος θα αγγίζει τις 330 γιγαβατώρες, ικανές να τροφοδοτήσουν 75.000 ελληνικά νοικοκυριά. Οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα επίκεινται μείωση κατά 300.000 τόνους ετησίως.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί, πως η Ελλάδα ξεπέρασε τον στόχο της για το 2020, αξιοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για το 21,7% της ενεργειακής της κατανάλωσης, σύμφωνα με τη στατιστική υπηρεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης και στοχεύει να αυξήσει το ποσοστό αυτό στο 35% έως το 2030.

➤ **Κατανομή διασυνδεδεμένων συστημάτων ανά γεωγραφική περιοχή**

Η επένδυση σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις ξεκίνησε από γεωγραφικές περιοχές με ευνοϊκότερες κλιματολογικές συνθήκες και υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας, κατά βάση στο νοτιότερο μέρος της χώρας και σταδιακά επεκτάθηκε σε ολόκληρη τη χώρα.

Πίνακας 1 Γεωγραφική κατανομή φωτοβολταϊκών συστημάτων [Τροποποίηση Helarco, 2022]

Γεωγραφική κατανομή φωτοβολταϊκών συστημάτων			
Περιφέρεια	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)		
	Χαμηλή Τάση	Μέση Τάση	Υψηλή Τάση
Ανατολική Μακεδονία & Θράκη	113	128	0
Κεντρική Μακεδονία	277	128	22
Δυτική Μακεδονία	63	55	0
Ήπειρος	68	61	0
Θεσσαλία	110	169	10
Ιόνια νησιά	27	0	0
Δυτική Ελλάδα	145	156	4
Στερεά Ελλάδα	131	199	7
Πελοπόννησος	171	149	14
Αττική	89	123	0
Νησιά Αιγαίου & Κρήτη	158	2	0
Σύνολο	1352	1170	57

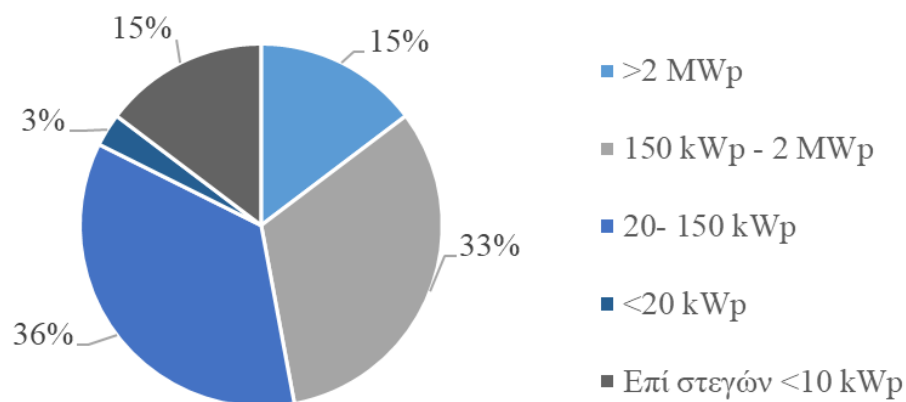
Η εγκατεστημένη ισχύς ανά γεωγραφική περιοχή της ελληνικής επικράτειας παρουσιάζεται στο Πίνακα 1. Η Κεντρική Μακεδονία συγκεντρώνει το 2022 το 17% των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Ακολουθούν περιοχές στη Στερεά Ελλάδα και στη Πελοπόννησος με 13% έκαστες. Η Δυτική Ελλάδα καλύπτει το 12% των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Τα νησιά του Αιγαίου και η Κρήτη, στη πλειοψηφία τους, στηρίζονται ακόμα στο πετρέλαιο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εγκατεστημένες μονάδες καταλαμβάνουν μόλις το 6% της συνολικής ισχύος. Σύγχρονη πρόκληση αποτελεί η εγκατάσταση ολοένα μεγαλύτερου ποσοστού φωτοβολταϊκών στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, με στόχο την απανθρακοποίηση τους έως το 2030.

➤ Κατανομή διασυνδεδεμένων συστημάτων ανά ισχύ

Τα φωτοβολταϊκά σε στέγες κτηρίων έως 10kWp αποτελούν μόλις το 15% των συνολικά διασυνδεδεμένων συστημάτων. Χάρη στα επιδοτούμενα προγράμματα και τις ολοένα αυξανόμενες τιμές ηλεκτρικού ρεύματος, αναμένεται ταχεία εξάπλωση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας για οικιακή χρήση.

Κατανομή διασυνδεδεμένων συστημάτων ανά ισχύ



Εικόνα 5 Κατανομή διασυνδεδεμένων συστημάτων ανά ισχύ [Τροποποίηση HELAPCO, 2021]

Το μεγαλύτερο πλήθος των φωτοβολταϊκών είναι σε μορφή αυτόνομων φωτοβολταϊκών πάρκων. Σημαντικό μέρος των διασυνδεδεμένων εγκαταστάσεων ισχύος 100-500kWp (69%) οφείλεται στα επιχορηγούμενα αγροτικά φωτοβολταϊκά. Η εγκατάσταση συστήματος κατάλληλου μεγέθους καλύπτει μέρος των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία των κτηνοτροφικών και πτηνοτροφικών μονάδων, την άρδευση των χωραφιών και των θερμοκηπίων, μειώνοντας σημαντικά το λειτουργικό κόστος.

Μέρος των εγκαταστάσεων ισχύος 20-150kWp καταλαμβάνεται από εγκαταστάσεις σε βιομηχανικές στέγες. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είτε χρησιμοποιείται για τη κάλυψη των αναγκών της βιομηχανίας είτε πωλείται στο δίκτυο

2. Φωτοβολταϊκά Συστήματα

2.1. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα έχει ως κύρια λειτουργία τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ακτινοβολία του Ήλιου που προσπίπτει σε αυτό. Η διεργασία βασίζεται στην ιδιότητα των ημιαγωγών να μετατρέπουν το ηλιακό φως όταν προσπίπτει στην επιφάνεια τους σε ηλεκτρική ενέργεια.

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι τεχνητοί ημιαγωγοί με τα άτομα τους να είναι διατεταγμένα σε περιοδική συμμετρική δομή, δηλαδή σε τετραεδρική κρυσταλλική δομή. Αποτελούνται από τουλάχιστον δύο πλάκες ημιαγωγών (δίοδοι p-n), σε επαφής συνήθως κατασκευασμένοι από πυρίτιο. Το υλικό αυτό καθίσταται ιδανικό λόγω της αφθονίας του στη φύση και τη τέλεια κρυσταλλική δομή. Δύναται εύκολη μορφοποίηση με ικανοποιητική καθαρότητα και λειτουργεί ικανοποιητικά σε ευρύ φάσμα θερμοκρασίας.

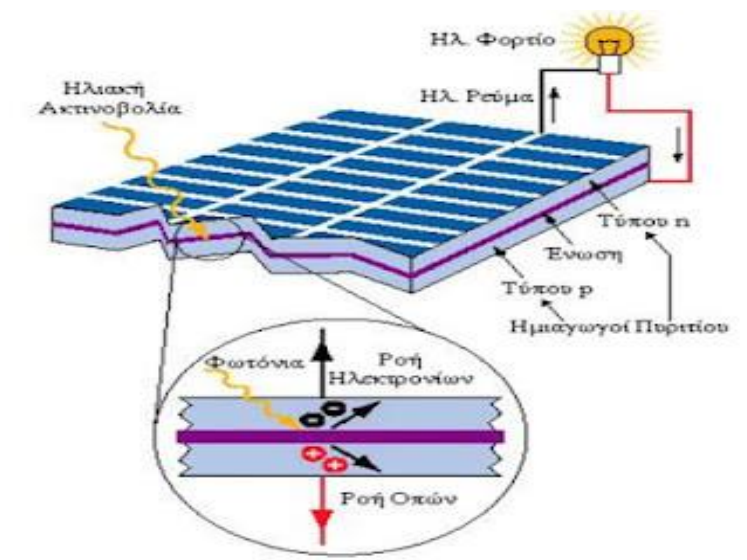
Η άνω πλάκα ονομάζεται ημιαγωγός τύπου n (negative- αρνητικό φορτίο) φέροντας επιπλέον ηλεκτρόνια και η κάτω πλάκα ονομάζεται ημιαγωγός τύπου p (positive, θετικό φορτίο), φέροντας λιγότερα ηλεκτρόνια. Η διάταξη των ημιαγωγών p και n σε επαφή, ονομάζεται δίοδος επαφής.

Στη θεμελιώδη τους κατάσταση δεν είναι ηλεκτρικά αγωγάμοι, καθώς δεν υπάρχουν αδέσμευτοι φορείς ηλεκτρικού ρεύματος. Οι ημιαγωγοί συνδέονται μεταξύ τους σε κλειστό ηλεκτρικό κύκλωμα και όταν απορροφούν ενέργεια, παρατηρείται κινητικότητα.

Με ηλιακή ακτινοβολία υψηλής ενέργειας, φωτόνια με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του αγωγού, απορροφάται σε ένα χημικό δεσμό και ενεργοποιούν ίσο αριθμό ηλεκτρονίων. Συνεπώς, χάρη στην ακτινοβολία δημιουργούνται ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών σε περίσσεια.

Τα περισσευούμενα ηλεκτρόνια της πλάκας (τύπου n) αφήνουν την αρχική τους θέση και μεταφέρονται στη ζώνη αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια των δύο πλακών. Παρατηρείται κίνηση οπών προς μία κατεύθυνση (προς τον αγωγό p) και μια κίνηση ηλεκτρονίων προς την άλλη (προς τον αγωγό n). Το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της σύνδεσης των δύο στρωμάτων προκαλεί, έτσι, ροή των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα τη συνεχή παραγωγή ρεύματος.

Ως φωτοβολταϊκό φαινόμενο χαρακτηρίζεται η διαφορά δυναμικού που εκδηλώνεται μεταξύ των ημιαγωγών, η οποία αντιστοιχεί σε πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων., όσο διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στην πρακτική εκμετάλλευση αυτού του φαινομένου βασίζεται η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών κυττάρων προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 6 Σχηματική απεικόνιση του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε ένα φβ κύτταρο

Στο κλειστό κύκλωμα που δημιουργείται, η ένταση του ρεύματος που αναπτύσσεται παραμένει σταθερή και ονομάζεται ένταση βραχυκυκλώσεως. Η ένταση βραχυκυκλώσεως μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Βάση της χρήσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατηγοριοποιούνται:

- Αυτόνομα συστήματα

Η παραγόμενη ενέργεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες, με αποτέλεσμα να καταναλώνεται επιτόπου. Μία εγκατάσταση μπορεί επομένως να ηλεκτροδοτηθεί χωρίς να υπάρχει σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο.

➤ Διασυνδεδεμένα συστήματα χωρίς μπαταρίες

Τα συστήματα αυτά διοχετεύουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια απευθείας στο δίκτυο, δίχως τη δυνατότητα αποθήκευσής της για μελλοντική χρήση.

➤ Διασυνδεδεμένα συστήματα με μπαταρίες

Ο συγκεκριμένος τύπος φωτοβολταϊκών εκμεταλλεύεται την ηλιακή ακτινοβολία ως εφεδρική τροφοδοσία της εγκατάστασης. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο.

2.2. Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μία ολοένα και αναπτυσσόμενη τεχνολογία. Λόγω της διαρκούς ανάπτυξής τους έχουν κατηγοριοποιηθεί σε τρεις γενιές:

2.2.1. Φωτοβολταϊκά πλαίσια πρώτης γενιάς: Πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου

Οι τεχνολογίες πρώτης γενιάς βασίζονται στα συστήματα διαφορετικών τύπων πυριτίου, ευρέως διαδεδομένα για οικιακές και εμπορικές χρήσεις με αποδόσεις έως 15%. Συγκεκριμένα, διακρίνονται στις παρακάτω υποκατηγορίες:

➤ Μονοκρυσταλλικά πάνελ (sc-Si)

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο παρουσιάζει υψηλότερη καθαρότητα, αλλά απαιτεί πολύπλοκες διεργασίες για τη παρασκευή του, καθιστώντας το ακριβό. Ωστόσο, σημειώνουν καλύτερη απόδοση (13-19%). Η μορφή του τελικού προϊόντος εμφανίζει ομοιογένεια, με συνεχές και αδιάσπαστο κρυσταλλικό πλέγμα χωρίς όρια κόκκων.

➤ Πολυκρυσταλλικά πάνελ (mc-Si)

Τα φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από λιγότερους κρυστάλλους με εμφανή ορατούς κόκκους. Παρουσιάζουν εμφανώς χαμηλότερη απόδοση (11-18%) έναντι της πρώτης κατηγορίας.

Η χαμηλότερη τιμή τους τα καθιστά επι του παρόντος τη πιο συχνή τεχνολογία, με μερίδιο αγοράς στο 63%.

➤ Τεχνολογία κορδέλας (ribbon)

Η τεχνολογία κορδέλας πρόκειται για τη Τρίτη εναλλακτική δομή των φωτοβολταϊκών πρώτης γενιάς. Η ανάπτυξη τους βασίστηκε στη μειωμένη απαιτούμενη ποσότητα πυριτίου κατά τη κατασκευή, αλλά η τελική απόδοση τους (13%) κρίνεται ανεπαρκής για εμπορική χρήση.

Τα κρυσταλλικά κελιά πυριτίου απαιτούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας κατά τη παραγωγή τους. Η ενεργοβόρα διαδικασία οφείλεται στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται (1100-1200 °C) για τη παραγωγή πυριτίου υψηλής καθαρότητας από διοξείδιο του πυριτίου (SiCO₂).

Μετά τη κατάλληλη επεξεργασία (πριόνισμα, χάραξη, μεταξοτυπία, επίστρωση, έλεγχος κλπ.), τα κελιά συνδέονται μεταξύ τους και στη συνέχεια εγκλείονται σε δύο στρώσεις γυαλιού και πλαστικού (αιθυλένιο-οξικό βινύλιο) πριν εγκατασταθούν στο σύστημα.

2.2.2. Φωτοβολταϊκά πλαίσια δεύτερης γενιάς: Κυψέλες λεπτών υμενίων (Thin-film)

Τα λεπτών επιστρώσεων φωτοβολταϊκά πάνελ απαρτίζονται από μία ή περισσότερες λεπτές στιβάδες (1-10 μm) ημιαγωγικών υλικών, τα οποία εναποτίθενται σε ένα στερεό και χαμηλού κόστους υπόστρωμα. (πχ. ανοξείδωτο χάλυβα, γυαλί ή πλαστικό). Οι λεπτές στρώσεις ελαττώνουν σημαντικά τη ποσότητα του αγωγικού υλικού που απαιτείται σε σύγκριση με τις τεχνολογίες πρώτης γενιάς (Τοκατλίδης Ζ., 2019)

Οι τεχνολογίες δεύτερης γενιάς ηλιακών κυττάρων εισάγουν επιπλέον νέα εναλλακτικά υλικά κατασκευής της απορροφητικής επιφάνειας των ηλιακών κυττάρων. Επομένως, πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί η σημαντική μείωση του κατασκευαστικού και λειτουργικού κόστους των διατάξεων, χωρίς να επηρεάζεται η διάρκεια ζωής τους.

Στα φωτοβολταϊκά δεύτερης γενιάς υπάγονται οι τεχνολογίες λεπτού υμενίου (μεμβράνης) και σε αυτής περιλαμβάνονται φωτοβολταϊκά συστήματα από:

➤ Πάνελ άμορφου πυριτίου (a-Si)

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ κατασκευάζονται από λεπτές επιστρώσεις ταινιών πυριτίου άμορφης δομής, δηλαδή τυχαίων διατεταγμένων ατόμων πυριτίου. Σαν υπόστρωμα χρησιμοποιούνται υλικά χαμηλού

κόστους (πχ. γυαλί ή αλουμίνιο). Πλεονέκτημα αποτελεί η μικρή ποσότητα πυριτίου και το χαμηλό κόστος κατασκευής τους. Επιπρόσθετα, είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες και απορροφούν μεγάλες ποσότητες ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά εμφανίζουν μικρό βαθμό απόδοσης σε σχέση με τα πάνελ πρώτης γενιάς (8-10%).

➤ Πάνελ τελλουριούχου καδμίου (CdTe)

Η ημιαγώγιμη ένωση κατασκευάζεται από τελλουριούχο κάδμιο (CdTe), ένα οικονομικό υλικό χαμηλής ενεργειακής απόδοσης (6-11%).

➤ Δισεληνοϊδούχο Χαλκό (CIGS) και με προσθήκη γαλλίου CIGS

Στη κατασκευή τους χρησιμοποιείται ένα σπάνιο στοιχείο, το ίνδιο, το οποίο δεν υπάρχει σε αφθονία στη φύση. Τα πάνελ τύπου CIGS παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση (7-12%), η οποία μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο με τη προσθήκη γαλλίου CIGS.

Στις τεχνολογίες λεπτού υμενίου δεν απαιτείται ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών. Πρόκειται για τεχνολογίες χαμηλότερου κόστους και μεγαλύτερης ελαστικότητας με απόδοση να κυμαίνεται από 5 έως 15%. (Χατζόπουλος Γ., 2017) Σαν αποτέλεσμα, τα πάνελ δεύτερης γενιάς απαιτούν εκτενέστερη επιφάνεια για να επιτύχουν ισοδύναμη απόδοση με τα της πρώτης γενιάς.

2.2.3. Φωτοβολταϊκά πλαίσια τρίτης γενιάς: Οργανικά

Τέλος, τα φωτοβολταϊκά συστήματα τρίτης γενιάς χρησιμοποιούν οργανικά μόρια και πολυμερή ως πρώτη ύλη, εμφανίζοντας μεγάλα περιθώρια μελλοντικής ανάπτυξης για αντικατάσταση των συμβατικών συστημάτων πρώτης γενιάς. Βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο και κάποια αρχίζουν να διατίθενται τώρα στο εμπόριο.

Κυριότερες τεχνολογίες αποτελούν:

- Πάνελ με Νανοτεχνολογία. Αποτελούνται από νανοκρυστάλλους για ευκαμψία και υψηλό βαθμό απόδοσης.
- Πάνελ με δομές περοβσκίτη (PSC). Αποτελούνται από ορυκτό αποτελούμενο από ασβεστούχο τριοξείδιο του Τιτανίου (CaTiO₃)

- Πάνελ με οργανικά και αναδύομενες τεχνολογίες. Αποτελούνται από βιοδιασπώμενα υλικά (πχ. οργανικά πολυμερή, μικρά οργανικά μόρια) σε παχύρρευστη μορφή
- Φωτοευαίσθητα (χρωμοευαίσθητοποιημένα) ή πάνελ ενεργής χρωστικής (Dye Sensitized Solar Cells, DSSC)
- Συγκεντρωτικά πλαίσια (CPV πάνελ) με έναν συμπακνωτή (φακό) προς συγκέντρωση του φωτός πάνω στα ηλιακά κύτταρα

Το κόστος τους είναι επί του παρόντος ακόμα υψηλό, άλλα οι νέες εναλλακτικές πρώτες ύλες το συμπιέζουν διαρκώς. Ταυτόχρονα, εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η διαφάνεια, η ελαστικότητα και το μικρό βάρος. Κύριο μειονέκτημα αποτελεί η σχετικά μικρή απόδοση των οργανικών συγκριτικά με τα ανόργανα φωτοβολταϊκά και η συντομότερη διάρκεια ζωής.

Η κατηγορία αυτή μπορεί να αξιοποιήσει μελλοντικά αποτελεσματικότερα την ηλιακή ενέργεια με χαμηλότερο κόστος παραγωγής του εξοπλισμού.

2.3. Δομή πολυκρυσταλλικών πάνελ

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ από κρυσταλλικό πυρίτιο χρησιμοποιούνται σχεδόν κατά αποκλειστικότητα στην παγκόσμια αγορά. Η βασική τους διάταξη περιλαμβάνει τα εξής στρώματα:

- Στρώμα ηλιακού γυαλιού πάχους 3-4mm στην εμπρόσθια επιφάνεια.

Το γυάλινο κάλυμμα έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο που επιτρέπει την υψηλή μεταδοτικότητα και τη χαμηλή ανακλαστικότητα με στόχο την επαρκή διάδοση του φωτός. Το γυαλί περιλαμβάνει περίπου το 75% του πάνελ.

- Ηλιακές κυψέλες με βάση το πυρίτιο, ενωμένες σε σειρά.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια προκύπτουν με σύνδεση των επιμέρους φωτοβολταϊκών κυττάρων με χάλκινες επαφές. Απαρτίζονται από 60 κύτταρα διαστάσεων 156 x 156 mm². Στις ηλιακές κυψέλες λαμβάνει χώρα το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, όπως περιεγράφηκε στη προηγούμενη παράγραφο.

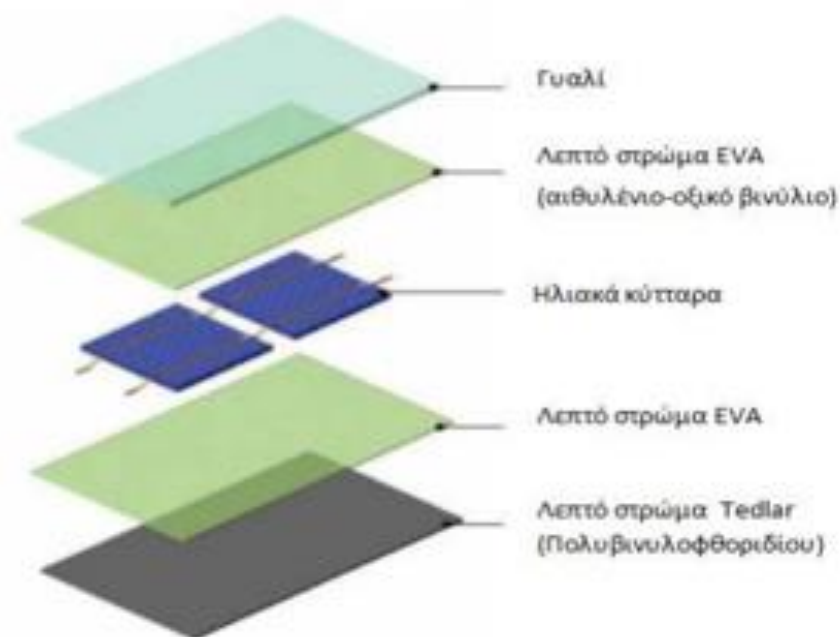
- Μια υαλώδη μεμβράνη ειδικής επεξεργασίας (EVA)

Για τη προστασία από εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες (χιόνι, βροχή, χαλάζι), λαμβάνει χώρα ενθυλάκωση με υμένα πολυμερούς EVA εκατέρωθεν των φωτοβολταϊκών κυψελών. Ταυτόχρονα, δρα ως συγκολλητικό μεταξύ του γυαλιού και των κυττάρων. Καταλαμβάνει το 6% της σύστασης του πάνελ.

- Μια μονωτική μεμβράνη Tedlar (PVF)

Στο οπίσθιο φύλλο τοποθετείται ένα αδιαπέραστο στρώμα ταινία από ένα πλαστικό πολυμερές Tedlar (συνήθως από πολυβινυλοφθορίδιο, PVF) για μόνωση. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται επιπρόσθετη στεγανότητα και ανθεκτικότητα στην υπεριώδη ακτινοβολία.

Τα παραπάνω στρώματα συνιστούν ένα ανθεκτικό φύλλο, ανθεκτικό στις καιρικές συνθήκες. Στην Εικόνα 7 σχηματοποιείται η τυπική δομή του φωτοβολταϊκού πάνελ.



Εικόνα 7 Στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα τυπικό πάνελ πυριτίου [solarpanels-china.com]

Το πλαίσιο ασφαρίζεται με μία μεταλλική θήκη από ανοδιωμένο αλουμίνιο, το οποίο καταλαμβάνει περίπου το 8.5% του πάνελ. Η δομή αυτή εξασφαλίζει ακαμψία και εξαιρετική αντοχή σε στροφή και κάμψη. Στο πίσω μέρος τοποθετείται το κιβώτιο σύνδεσης, στο οποίο περιέχονται τα τερματικά, οι συνδέσεις τους και οι δίοδοι προστασίας.

Στους Πίνακες 2 και 3 δίνεται η τυπική περιεκτικότητα ενός φωτοβολταϊκού πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου και οι τυπικές τιμές για τα πάχη κάθε επίστρωσης (από την εμπρόσθια προς οπίσθια όψη):

Πίνακας 2 Τυπικές τιμές για τα πάχη κάθε επίστρωσης (από εμπρόσθια προς οπίσθια όψη) [Τροποποίηση από Πηλίκος, 2013]

Στρώμα	Πάχος (mm)
Γυαλί	3
EVA	0.5
Αντιανακλαστική μεμβράνη	0.00006-0.0001
Πυρίτιο (Si)	0.25-0.4
EVA	0.5
Tedlar	0.1

Πίνακας 3 Τυπική σύσταση φωτοβολταϊκού πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου

Σύσταση ΦΒ μοντούλ	
Πλαίσιο αλουμινίου	8.50%
Γυαλί	75.18%
EVA	5.85%
PVF	3.85%
Συγκολλητικά	0.90%
Si	4.70%
Ag	0.05%
Cu	0.88%
Sn	0.08%
Pb	0.02%

2.4. Απόδοση φωτοβολταϊκών πάνελ

Ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων εξαρτάται τόσο από εσωτερικούς όσο από εξωτερικούς παράγοντες. Στους εσωτερικούς συγκαταλέγονται τα τεχνικά του χαρακτηριστικά και εξαρτώνται από τον τρόπο κατασκευής του, όπως η εσωτερική αντίσταση, οι οπτικές απώλειες και η γήρανση. Οι εξωτερικοί παράγοντες περιλαμβάνουν τους περιβαλλοντικούς παράγοντες (ακτινοβολία, θερμοκρασία, άνεμος), τη ρύπανση και τη χωροταξική τοποθέτηση του πλαισίου (σκίαση). (Τετελένης Σ., 2011)

Τυπικές τιμές απόδοσης συστημάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4:

Πίνακας 4 Τυπικές τιμές απόδοσης για διαφορετικούς τύπους φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τεχνολογία	Εμπορική απόδοση (%)	Απόδοση εργαστηριακής κλίμακας (%)
Μονοκρυσταλλικό sc-Si	13-19	25
Πολυκρυσταλλικό mc-Si	11-18	20.4
CIGS/ CIS	7-12.7	20.3
CdTe	6-11	16.7
Άμορφου πυριτίου a-Si	7-9.8	11.9-13.2
CPV	25	25-30
DSSC	2-4	8-12

Η απόδοση ενός συστήματος επηρεάζεται από υποβάθμιση των πρώτων υλών, των διασυνδέσεων, των ημιαγωγών και λόγω εισβολής υγρασίας στο πλαίσιο. Σύμφωνα με τον Wohlgemuth et al. (2013), ένα φωτοβολταϊκό πάνελ θεωρείται υποβαθμισμένο, όταν η ισχύς βρίσκεται σε επίπεδο χαμηλότερο του 80% της αρχικής.

2.4.1. Εσωτερικοί Παράγοντες

Οι εσωτερικοί παράγοντες διακρίνονται σε:

➤ Εσωτερική αντίσταση

Σημαντικός παράγοντας που συνεισφέρει στο καθορισμό της απόδοσης του συστήματος είναι η εσωτερική τους απόδοση. Για επίτευξη καλής αποδοτικότητας προτιμάται όσο το δυνατόν μικρότερη αντίσταση.

➤ Γήρανση

Η σταδιακή φθορά του εξοπλισμού επιφέρει τη γήρανση του συστήματος και κατ'επέκταση βαθμιαία μείωση της ενεργειακής απόδοσης. Το ποσοστό κυμαίνεται από 1% έως 2% ετησίως και καθορίζεται από τον κατασκευαστή.

➤ Οπτικές απώλειες

Σχετίζεται με τη διαφοροποίηση της πόλωσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Υπολογίζεται γύρω στο 2%.

2.4.2. Εξωτερικοί Παράγοντες

Οι εξωτερικοί παράγοντες διακρίνονται σε:

➤ Διαθέσιμη ακτινοβολία

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα εξαρτάται άμεσα από τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία. Υψηλότερα ποσά ηλιακής ενέργειας προσφέρουν μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Επομένως, συνδέεται άμεσα με τη γεωγραφική θέση, την εποχή, τα καιρικά φαινόμενα αλλά και την ώρα της ημέρας. (Fouad et al, 2017)

Σύμφωνα με τον Stoppato (2006) παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα τιμές ετήσιας παραγόμενης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας ίδιου τύπου φωτοβολταϊκού σε διαφορετικές τοποθεσίες παγκοσμίως. Επιπρόσθετα, η ηλεκτροπαραγωγή επηρεάζεται από τη σκίαση του συστήματος. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται όταν υπάρχουν εμπόδια, πχ. κτήρια, βλάστηση στον ορίζοντα των φωτοβολταϊκών πλαισίων, μειώνοντας τη διαθέσιμη ακτινοβολία. Για το λόγο αυτό, απαιτείται λεπτομερής προσδιορισμός της τοποθεσίας εγκατάστασης.

➤ Γωνία πρόσπτωσης

Ο βαθμός απόδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας διαφοροποιείται ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης των ακτινών στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. Για τη μετατροπή μεγαλύτερων ποσών ενέργειας χρησιμοποιούνται στρεφόμενες βάσεις ενός ή δύο αξόνων, με στόχο την επίτευξη βέλτιστη γωνία κλίσης.

➤ Θερμοκρασία

Σε θερμοκρασίες ανώτερες των 25°C παρατηρούνται απώλειες, που δεν υπάρχουν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, και κατ'επέκταση μειωμένη απόδοση του συστήματος. Η θερμοκρασία μπορεί να επηρεαστεί από τον υπάρχοντα άνεμο. Μεγάλες ταχύτητες ανέμου έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας του πλαισίου.

➤ Ρύπανση

Η ενεργειακή απόδοση μειώνεται από τη ρύπανση στην επιφάνεια των συλλεκτών. Η σκόνη και η άμμος, τα φύλλα, το χιόνι, το θαλασσινό αλάτι συσσωρεύονται στην επιφάνεια και παρεμποδίζεται η διερχόμενη ακτινοβολία. Για την διασφάλιση της ικανοποιητικής λειτουργίας απαιτείται τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών υπό κλίση τουλάχιστον 45° για την αποφυγή τέτοιων περιστατικών. Ταυτόχρονα, κρίνεται απαραίτητος ο περιοδικός καθαρισμός από τις ακαθαρσίες σε περιοχές με υψηλά ποσοστά ρύπανσης.

3. Φωτοβολταϊκά απόβλητα

Τα τελευταία χρόνια, ο όγκος των παραγόμενων φωτοβολταϊκών πάνελ πολλαπλασιάζεται για να καλύψει τις ανάγκες της κοινωνίας για πράσινη ενέργεια. Ταυτόχρονα, η αντικατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων από νέα ολοκληρώνεται πλέον σε συντομότερο χρονικό διάστημα από τη προβλεπόμενη διάρκεια ζωής τους, ως απόρροια της μείωσης του κόστους παραγωγής τους.

Τα φωτοβολταϊκά συγκαταλέγονται σύμφωνα με την ΚΥΗ 232/323 στα Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (ΑΗΗΕ). Εώς το 2050, αναμένεται ότι τα φωτοβολταϊκά απόβλητα θα ξεπεράσουν το 10% του παγκόσμιου ρεκόρ ηλεκτρονικών αποβλήτων.

3.1. Φωτοβολταϊκά απόβλητα

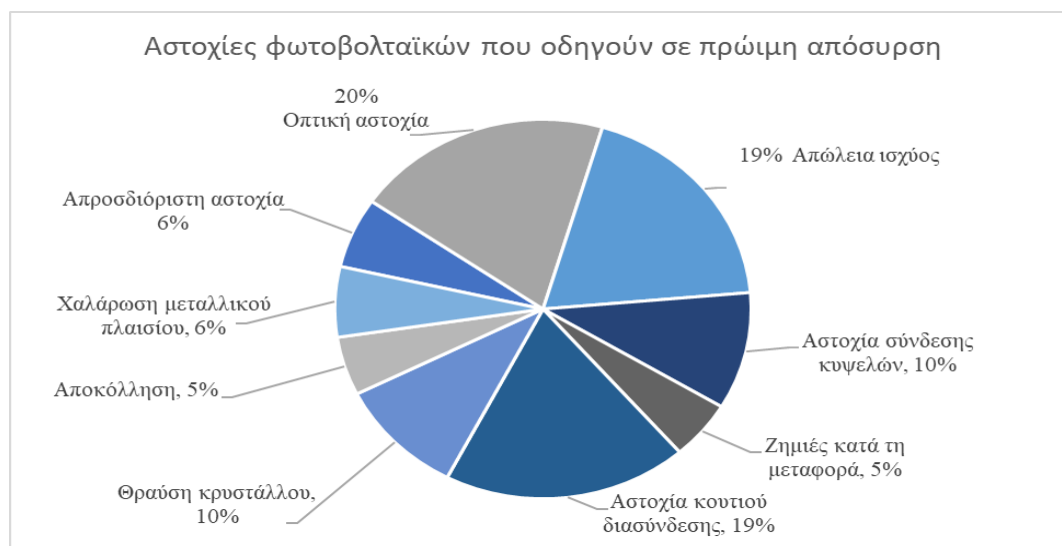
Η βιομηχανία των φωτοβολταϊκών θεωρείται φιλική προς το περιβάλλον συγκριτικά με το κλάδο των ορυκτών καυσίμων. Για τη παραγωγή κάθε GWh ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ, συγκριτικά με τη καύση ορυκτών καυσίμων, αποτρέπεται η εκπομπή έως και 10 τόνων διοξειδίου του θείου, 1.000 τόνων διοξειδίου του άνθρακα, 0.7 τόνοι αιωρούμενων σωματιδίων (συμπεριλαμβανομένου 1 kg Cd και 120 κιλών As) και 4 τόνων οξειδίων του αζώτου (NREL, 1990). Τα αποτελέσματα αυτά είναι άκρως ενθαρρυντικά για τις τεχνολογίες φωτοβολταϊκών και το μελλοντικό μερίδιό τους στην αγορά.

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών πρόκειται για πηγή ενέργειας που ευθύνεται για σχετικά μικρές ποσότητες αποβλήτων, καθώς δεν παράγονται κατά τη διάρκεια ζωής τους. Η λειτουργία τους δεν παράγει ηχορύπανση και δεν συμβάλλει στην εκπομπή τοξικών αερίων ή αερίων του θερμοκηπίου.

Βέβαια, μικρό ρεύμα αποβλήτων δημιουργείται στο στάδιο παραγωγής των φωτοβολταϊκών που απορρίπτονται μετά από το ποιοτικό έλεγχο. Επιπροσθέτως, ένα πλαίσιο μπορεί να αποσυρθεί κατά τη διάρκεια λειτουργίας του πριν το θεωρητικό προσδόκιμο ζωής τους για πολλαπλούς λόγους (Εικόνα 8, Τροποποίηση από Weckend, Wade & Heath, 2016).

Στους παράγοντες πρώιμης απόρριψης συγκαταλέγονται τα φωτοβολταϊκά που καταστρέφονται κατά τη μεταφορά και την εγκατάσταση. Κατεστραμμένες μονάδες προκύπτουν, επίσης, έπειτα από έντονα καιρικά φαινόμενα λόγω αστοχίας υλικού (π.χ. ελαττώματα αντιανακλαστικής επίστρωσης, θραύση γυαλιού). Οι λόγοι μειωμένης απόδοσης φωτοβολταϊκών μονάδων έχει αναλυθεί εκτενώς στο Εδάφιο 2.5.

Ωστόσο, η ροή αποβλήτων που δημιουργείται στο τέλος της φάσης εκμετάλλευσης δεν πρέπει να αγνοείται. Οι ίδιοι οι ηλιακοί συλλέκτες όταν τελειώσει η ωφέλιμη ζωής τους γίνονται μία μορφή επικίνδυνων αποβλήτων



Εικόνα 8 Αστοχίες που οδηγούν σε πρόωρη απόσυρση φωτοβολταϊκών πλαισίων [Τροποποίηση από Weckend, Wade & Heath, 2016].

3.2. Εκτιμώμενη εξέλιξη των παραγόμενων φωτοβολταϊκών αποβλήτων

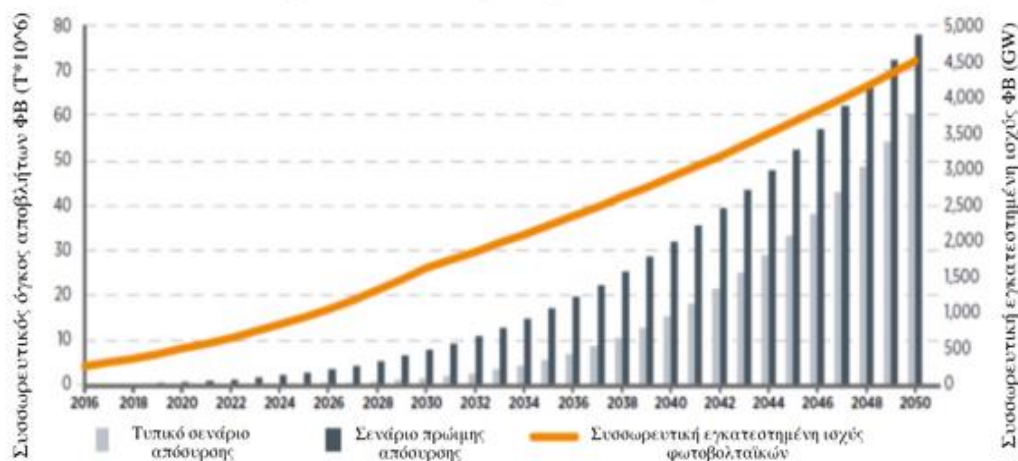
Το φωτοβολταϊκά απόβλητα ως περιβαλλοντικό ζήτημα έκαναν την εμφάνισή τους τη τελευταία πενταετία με την απόσυρση της πρώτης παρτίδας εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών (Aman et al., 2015). Η ιδιαιτερότητα αυτή στην μεταγενέστερη εμφάνιση του προβλήματος έγκειται στο μεγάλο προσδόκιμο ζωής τους. Ως εκ τούτου, μεσολαβούν κατά μέσο όρο 25-30 χρόνια μεταξύ της εγκατάστασής και της απόσυρσης μετά το τέλος ζωής τους.

Ο ετήσιος όγκος των φωτοβολταϊκών αποβλήτων σήμερα δεν είναι πολύ μεγάλος. Η ακμάζουσα ζήτηση τους, όμως, καθιστά τη διαχείριση των μελλοντικών αποβλήτων σοβαρή πρόκληση. Συγκεκριμένα, το 2016 ο παγκόσμιος συσσωρευτικός όγκος αποσυρόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων ανήλθε στους 250.000

τόνους ενώ αναμένεται το 2050 να ανέλθει στα 5,5 με 6 εκατομμύρια τόνους. Στις παραπάνω προβλέψεις δεν λαμβάνει υπόψιν το σενάριο πρώιμης απόσυρσης. (Lunardi et al., 2018)

Στη περίπτωση που συνυπολογίζονται τα απόβλητα πρώιμης απόσυρσης, η πρόβλεψη για το 2050 ανέρχεται στους 7,8 εκατομμύρια τόνους, μία αύξηση της τάξης του 30% (Εικόνα 9). Μελέτες των Weckend, Wade, & Heath (2016) αποδεικνύουν πως η ρεαλιστική κατάσταση βρίσκεται κάπου μεταξύ των δύο σεναρίων.

Στην Ελλάδα, η εκτιμώμενη εξέλιξη των παραγόμενων αποβλήτων συνάδει με τα σενάρια της παραπάνω μελέτης. Το μεγαλύτερο μέρος των φωτοβολταϊκών στοιχείων εγκαταστάθηκε τη πενταετία 2009-2013. Συνεπώς, ο κυριότερος όγκος αποβλήτων εκτιμάται να εμφανιστεί από το διάστημα 2032 έως το 2038.



Εικόνα 9 Συγκριτική εξέλιξη του συσσωρευτικού όγκου αποβλήτων φωτοβολταϊκών πλαισίων βάσει σεναρίων τυπικής και πρώιμης απόσυρσης. [Τροποποίηση από (Weckend, Wade, & Heath, 2016)].

3.3. Αναμενόμενα απόβλητα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση συμπεριλαμβάνει πλέον τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στα Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (ΑΗΗΕ, Ηλεκτρονικά Απόβλητα). Σε τέτοιου είδους απόβλητα συγκαταλέγονται οικιακές συσκευές, εξοπλισμός πληροφορικής & επικοινωνιών και λοιπά ηλεκτρονικά καταναλωτικά είδη.

Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου απαρτίζεται από γυαλί. Η διαχείρισή του μετά το τέλος κύκλου ζωής του πλαισίου, καθορίζει σημαντικά την οικονομική αξία του πλαισίου. Επιπλέον, τα ΑΗΗΕ περιέχουν τόσο επικίνδυνα όσο πολύτιμα υλικά, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για ορθή διαχείριση και ανακύκλωσή τους.

➤ Πολύτιμα υλικά

Η κατηγοριοποίηση των φωτοβολταϊκών βασίζεται στη κατάταξη των υλικών που απαρτίζουν τους ημιαγωγούς. Συνήθως εμπεριέχονται πολύτιμα μέταλλα (πχ. άργυρος, χρυσός, πλατίνα) σε χαμηλές συγκεντρώσεις (<1%). Η ανάκτηση τους καθίσταται δύσκολη, αλλά επιφέρει υψηλό οικονομικό και περιβαλλοντικό κέρδος.

Επιπρόσθετα, τα φωτοβολταϊκά απόβλητα περιέχουν κρίσιμες πρώτες ύλες, μέταλλα όπως το γάλλιο, το ίνδιο, το γερμάνιο και άλλες σπάνιες γαίες. Η κρισιμότητά τους έγκειται στη περιορισμένη διαθεσιμότητά τους στο περιβάλλον.

➤ Επικίνδυνα υλικά

Κάποια μέταλλα κατατάσσονται ως επικίνδυνα ή τοξικά (μόλυβδος, κάδμιο) χρήζοντας εξειδικευμένο χειρισμό πριν τη τελική διάθεση. Σύμφωνα με τη νομοθεσία πρέπει να διατίθενται και να επεξεργάζονται ξεχωριστά από τα υπόλοιπα μη επικίνδυνα υλικά. Στη περίπτωση που δεν διαχειριστούν σωστά κατά τη τελευταία φάση της ζωής τους, πιθανώς λόγω του υψηλού κόστους, συνεπάγονται αρνητικές επιπτώσεις για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

3.4. Επιπτώσεις τέλους κύκλου ζωής αποβλήτων

Το προσδόκιμο ζωής των φωτοβολταϊκών πριν παροπλισθούν είναι περιορισμένο από τον κατασκευαστή στα 25-30 έτη, αν δεν αποσυρθούν πρόωρα. Το μεγαλύτερο μέρος τους έχει απορριφθεί ανεξέλεγκτα, έχει καεί ή θαφτεί κάτω από το έδαφος. Η αλόγιστη τελική διάθεση επιφέρει αρνητικές συνέπειες τόσο στον άνθρωπο όσο και στο περιβάλλον.

Στις επιπτώσεις από το τέλος του κύκλου ζωής των πάνελ συγκαταλέγονται:

3.4.1. Τοξικότητα για τον άνθρωπο

Τα απόβλητα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στα μη επικίνδυνα και στα επικίνδυνα. Στα επικίνδυνα περιλαμβάνονται τα απορρίμματα, τα οποία αποτελούν κίνδυνο για την υγεία και ασφάλεια του ανθρώπου, των ζώντων οργανισμών και οικολογικού περιβάλλοντος. Παραδείγματα επικίνδυνων ουσιών κατά την απόρριψη είναι ο υδράργυρος, ο μόλυβδος και το κάδμιο. Η ανυπολόγιστη ταφή των ηλιακών κυττάρων εγκυμονεί κινδύνους τόσο έκλυσης τοξικών αερίων στην ατμόσφαιρα όσο και επικίνδυνες απορροές.

Ο μόλυβδος πρόκειται για μέταλλο υψηλής τοξικότητας για τον άνθρωπο. Η εισπνοή σκόνης ή καπνού μετάλλου και η απορρόφησή του από το δέρμα, οδηγεί στη συσσώρευση του στον οργανισμό. Δυσμενείς επιπτώσεις ανάλογα με το βαθμό έκθεσης εμφανίζονται ως νευροφυσιολογικές δυσλειτουργίες, στο ανοσοποιητικό και αναπαραγωγικό σύστημα, αλλά και στη λειτουργία των νεφρών (Υψηλάντη Ο., 2012).

3.4.2. Αέρια και χερσαία ρύπανση

Η έκπλυση του μολύβδου είναι αμελητέα στο pH του πάνελ, ενώ η έκθεση τους σε όξινο περιβάλλον προκαλεί ποσοστά έκπλυσης 15-90% της συνολικής ποσότητας που περιέχεται σε αυτό. Για παράδειγμα, σε φωτοβολταϊκό πολυκρυσταλλικού πυριτίου 22kg περιέχονται 13.2g Pb, εμφανίζοντας δυναμικό έκπλυσης 1.98 – 11.88g ανά πάνελ.

Οι διαλυμένες τοξικές ουσίες εισέρχονται στο έδαφος και μεταφέρονται στον υδροφόρο ορίζοντα. Η εναπόθεση τους χωρίς προηγούμενη επεξεργασία, οδηγεί στη σταδιακή συσσώρευση τους με αποτέλεσμα την υπέρβαση οριακών τιμών για το νερό και έδαφος (Tammaro M., et al., 2016)

Τα χερσαία και θαλάσσια οικοσυστήματα κοντά σε περιοχές έκπλυσης μολύβδου παρουσιάζουν δυσμενείς επιπτώσεις. Σε αυτές περιλαμβάνονται η μείωση της ανάπτυξης και παραγωγής φυτών, μείωση τις βιοποικιλότητας και επιπτώσεις στο νευρικό σύστημα των σπονδυλωτών.

Η ορθή διαχείριση των επικίνδυνων περιλαμβάνει σύμφωνα με την εθνική και την ευρωπαϊκή νομοθεσία την επαναχρησιμοποίησή τους. Ως επιπλέον μέτρο επονομάζεται η ανάκτηση χρήσιμων υλικών ή/και ενέργειας. Κατά αυτόν τον τρόπο, καταστρέφονται ή και αδρανοποιούνται οι επικίνδυνες ουσίες.

3.4.3. Απώλεια πόρων

Στα φωτοβολταϊκά πλαίσια πρώτης γενιάς περιέχονται μεγάλες ποσότητες συμβατικών υλικών, κυρίως γυαλιού (75%) και αλουμινίου (8.5%) στο σκελετό τους. Μεταφρασμένο σε κιλά, ένα φωτοβολταϊκό πολυκρυσταλλικού πυριτίου συνολικού βάρους 18.5 κιλών περιέχει 13.9 κιλά γυαλιού και 1.6 κιλά αλουμινίου. Εξίσου υψηλά ποσοστά εμφανίζονται στις τεχνολογίες δεύτερης γενιάς με ποσοστά 84% και 12% αντίστοιχα.

Αποδεικνύεται, έτσι, ότι η μελλοντική απώλεια των εν δυνάμει ανανεώσιμων υλικών μπορεί να επηρεάσει τη δυνατότητα κατασκευής νέων φωτοβολταϊκών πάνελ. Οι τεχνολογίες ανακύκλωσης αυτών των υλικών είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάκτηση υλικών από πλαίσια.

Τα κρίσιμα μέταλλα αντιπροσωπεύουν συνολικά μόλις το 1% της μάζας του συστήματος. Η μη ανάκτηση των σπάνιων αυτών υλικών προκαλεί διαταραχές στην αλυσίδα εφοδιασμού λόγω της σπανιότητάς τους. Αλυσιδωτά, η σταδιακή έκλειψη τους προκαλεί σημαντικές διακυμάνσεις στις τιμές τους, αυξάνοντας σημαντικά το τελικό κόστος παραγωγής των φωτοβολταϊκών (Domínguez and Geyer, 2017). Επομένως, η μη ανάκτησή τους εμφανίζει τόσο οικολογική όσο και οικονομική καταστροφή.

Μακροχρόνιο στόχο της Ευρώπης συναποτελεί η βελτιωμένη autarkεία των μετάλλων που είναι απαραίτητα για την ενεργειακή μετάβαση, μέσω βελτιστοποίησης της αξιακής αλυσίδας ανακύκλωσης μετάλλων. Η εισαγωγή τεχνολογιών ανακύκλωσης τους, θα μειώσει την ανάγκη σε πρωτογενή προμήθεια μετάλλων και των σχετικών επιπτώσεων εξόρυξης και εξευγενισμού νέων πρώτων υλών. Σε αριθμούς, η αντικατάσταση πρωτογενούς μετάλλου με ανακυκλωμένου επιτυγχάνει εξοικονόμηση διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ 35-96%, ανάλογα τη πολυπλοκότητα της ροής αποβλήτων.

3.4.4. Αυξημένος όγκος αποβλήτων

Τέλος, οι συνέπειες του αυξημένου όγκου των αποβλήτων αναμένεται να είναι πλέον ορατός. Σύμφωνα με τους N.C.McDonald και J.M.Pearce (2010), σε κάθε εγκατεστημένο MWp αντιστοιχεί 70-80 τόνοι αποβλήτων. Η τελική απόθεση τους χωρίς προεπεξεργασία σε ΧΥΤΑ ισοδυναμεί με ανάγκη χρήσης εκτενέστερων εκτάσεων, δημιουργώντας ένα αντιαισθητικό και δυσάρεστο αποτέλεσμα.

3.5. Εθνικό νομοθετικό πλαίσιο

Με βάση το νόμο N.3851/2010 (ΦΕΚ ‘Α 85/4-6-2010) η Ελλάδα θέτει ως στόχο για το 2020 η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ να συνεισφέρει σε ποσοστό 40% στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός (ΗΗΕ) αποτελεί συνεπώς μία ταχέως αναπτυσσόμενη πηγή αποβλήτων. Η ανάκτηση και η διάθεση τους συνδέεται άρρηκτα με τη διαφύλαξη των φυσικών πόρων. Εξίσου σημαντικές είναι η πρόληψη αλλά και η μείωση των επιπτώσεων της παραγωγής και διαχείρισης τους στο περιβάλλον.

Το πλαίσιο διαχείρισης τους στην Ευρωπαϊκή Ένωση οροθετήθηκε αρχικά στις αρχές του 2000 από τις Οδηγίες 2002/96/EC και 2002/95/EC. Το 2012 η Οδηγία 2002/96/EC αναδιατυπώνεται και το 2021 περνάει η νέα Οδηγία 2012/19/EE, σύμφωνα με την οποία οι εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων στα κράτη της ΕΕ συγκαταλέγονται στον κατάλογο των ΑΗΗΕ (Συλλογικό Σύστημα Εναλλακτικής

Διαχείρισης Αποβλήτων Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού), κρίνοντας απαραίτητη την ορθή διαχείρισή τους μετά το τέλος ζωής τους.

Ειδικότερα, δίνεται προσοχή στην επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση των χρησιμοποιημένων συσκευών, στην αποτελεσματική χρήση των πολύτιμων πόρων καθώς και στην αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει». Επιπλέον, στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της παράνομης εξαγωγής τέτοιων αποβλήτων από την ΕΕ και θέτει στόχους σχετικούς με τα ποσοστά ανακύκλωσης και ανάκτησης για τη περίοδο 2015 έως 2018.

Στην Ελλάδα αρμόδιο Υπουργείο για τη ρύθμιση ζητημάτων σχετικά με τις ΑΠΕ αποτελεί το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). Η Ευρωπαϊκή Οδηγία ενσωματώνεται στο ελληνικό δίκαιο μέσω της ΚΥΑ Η.Π 23615/651/Ε.103 της 9ης Μαΐου 2014 (ΦΕΚ 1184Β). Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σύμφωνα με το άρθρο 5 αυτής, εντάσσονται στη 4^η κατηγορία του 1^{ου} παραρτήματος της απόφασης για τη μεταβατική περίοδο 2012-2018 και στη 4^η κατηγορία του 2^{ου} παραρτήματος για τη περίοδο μετά την 15^η Αυγούστου 2018.

Η ΚΥΑ θεσπίζει νομοθετικό πλαίσιο εναλλακτικής διαχείρισης των ΗΗΕ αποβλήτων, με στόχο τη μείωση της ποσότητας τους κατά τη τελική διάθεση. Ταυτόχρονα, υποβοηθάται η διαφύλαξη των φυσικών πόρων και η ανάκτηση πολύτιμων δευτερογενών πρώτων υλών, συμβάλλοντας στην αειφόρο παραγωγή και κατανάλωση. Η εναλλακτική διαχείριση τους περιλαμβάνει μέτρα:

- Συστηματοποίησης της εναλλακτικής διαχείρισης των ΑΗΗΕ
- Μείωσης του όγκου των ΑΗΗΕ στα οικιακά απόβλητα
- Ορθής συλλογής και τελικής διαλογής ΑΗΗΕ προς περαιτέρω επεξεργασία
- Επαναχρησιμοποίησης ΑΗΗΕ και ανάκτησης πολύτιμων υλικών από αυτά
- Ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης του καταναλωτή/τελικού χρήστη

Οι παραγωγοί ΗΗΕ οφείλουν να συνεργάζονται με τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας και ανακύκλωσης ΑΗΗΕ για την ανάληψη κοινής δράσης ώστε να διευκολύνεται η επαναχρησιμοποίηση, η αποσυναρμολόγηση και η ανάκτηση των ΑΗΗΕ, των κατασκευαστικών τους στοιχείων και των συναρμολογημένων μερών τους και των υλικών. Στη περίπτωση που ο παραγωγός δεν προβεί στην οργάνωση ατομικού ή συλλογικού συστήματος εναλλακτικής διαχείρισης, υποχρεούται να συμμετέχει σε εγκεκριμένο συλλογικό σύστημα εναλλακτικής διαχείρισης ΑΗΗΕ και πρέπει να συνοδεύεται από την καταβολή στο σύστημα χρηματικής εισφοράς εκ μέρους του ενδιαφερόμενου παραγωγού

Με βάση το άρθρο 17 της ΚΥΑ Η.Π. 23615/651/Ε.103/2014, ο Εθνικός Οργανισμός Ανακύκλωσης (ΕΟΑΝ) θα πρέπει να καταρτίζει και να τηρεί εθνικό μητρώο παραγωγών συμπεριλαμβανομένων των παραγωγών που προμηθεύουν ΗΗΕ χρησιμοποιώντας επικοινωνία εξ αποστάσεως. Το μητρώο έχει σκοπό την παρακολούθηση της τήρησης των απαιτήσεων της ίδιας απόφασης.

Σύμφωνα με το άρθρο 7 (ΦΕΚ 5459/Β/6-12-2018) το ελάχιστο ποσοστό συλλογής που πρέπει να επιτυγχάνεται ετησίως είναι το 65% του μέσου ετήσιου βάρους του ΗΗΕ που διατέθηκε στην αγορά τη προηγούμενη τριετία, ή εναλλακτικά το 85% των ΑΗΗΕ που παράγονται ανά βάρος.

Ο ΕΟΑΝ έχει την ευθύνη για την εκπόνηση και εφαρμογή προγραμμάτων προκειμένου να επιτευχθούν οι ποσοτικοί στόχοι που αναφέρθηκαν. Για την αξιολόγηση των στόχων, τα συστήματα εναλλακτικής διαχείρισης οφείλουν να διαβιβάζουν στον ΕΟΑΝ πληροφορίες για τα ΑΗΗΕ που συλλέγονται, όπως ποσότητες και κατηγορίες που συλλέγονται.

3.6. Εθνικό σύστημα διαχείρισης φωτοβολταϊκών αποβλήτων

Στην Ελλάδα λειτουργεί από το 2020 ένα ιδιωτικό σύστημα ορθής διαχείρισης ΑΗΗΕ, το οποίο παραλαμβάνει, επεξεργάζεται και τελικά ανακυκλώνει τις συσκευές σύμφωνα με τη νομοθεσία. Η ΦΩΤΟΚΥΚΛΩΣΗ Α.Ε. συμβάλλει στην ορθή διαχείριση ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών αποβλήτων, όπως λευκές συσκευές, προϊόντα τεχνολογίες, μικροσυσκευές, φωτοβολταϊκά πλαίσια. Παρέχει ολοκληρωμένες υπηρεσίες παραλαβής, επεξεργασίας, ανακύκλωσης και τελικής διάθεσης των αποβλήτων σύμφωνα με την ελληνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία. Συγκεκριμένα, τον περασμένο Μάιο (2021), συλλέχθηκαν 36 τόνοι φωτοβολταϊκών αποβλήτων έπειτα από αποξήλωση φωτοβολταϊκού πάρκου στη περιοχή της Θεσσαλίας, ισχύος 0.5 μεγαβάτ.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το έργο «Επанаσχεδιασμός και Ανακύκλωση ΦΒ πινάκων RE-PV» για τη στήριξη εναλλακτικών επιχειρηματικών ευκαιριών που σχετίζονται με τη βέλτιστη διαχείριση φωτοβολταϊκών πάνελ. Πρόκειται για συνεργασία ιδιωτικών εταιριών και Πανεπιστημιακών Ιδρυμάτων

Προκειμένου να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι, απαιτείται η ανάπτυξη επιπλέον οργανωμένων συστημάτων ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πλαισίων στην Ελλάδα για την εξυπηρέτηση του ολοένα αυξανόμενου όγκου των παραγόμενων αποβλήτων.

4. Διαχείριση φωτοβολταϊκών πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου μετά το τέλος κύκλου ζωής

Ο όρος «διαχείριση φωτοβολταϊκών αποβλήτων» εμπεριέχει τις απαραίτητες διεργασίες οι οποίες σχετίζονται με τη συλλογή, τη μεταφορά, την προσωρινή αποθήκευση, την ανάκτηση των χρήσιμων υλικών, την επεξεργασία και την ορθή τελική διάθεση των απορριμμάτων.

4.1. Υγειονομική Ταφή (XYTA)

Η κύρια περιβαλλοντική πολιτική επικεντρώνεται στο σχεδιασμό, εγκατάσταση και λειτουργία χώρων ελεγχόμενης απόθεσης (XYTA) των φωτοβολταϊκών αποβλήτων, με εφαρμογή της μεθόδου της υγειονομικής ταφής. Ως Υγειονομική ταφή χαρακτηρίζεται η διαδικασία κατά την οποία τα απορρίμματα που πρόκειται να διατεθούν διαστρώνονται σε στρώσεις ύψους 2-3m, συμπιέζονται και καλύπτονται με κατάλληλο αδρανές υλικό (ως επί το πλείστον χώμα) στο τέλος της καθημερινής λειτουργίας. Όταν ο χώρος διάθεσης φθάσει στην τελική του χωρητικότητα, τοποθετείται μία τελική στρώση αδρανούς υλικού, πάχους 0,60m περίπου, και μετά στρώμα χώματος κατάλληλο για δενδροφύτευση, ώστε να αποκατασταθεί τελικά το τοπίο.

Τη τρέχουσα περίοδο, τα μεγαλύτερο μέλος των φωτοβολταϊκών αποβλήτων οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής, χωρίς να επεξεργαστούν προγενέστερα (Xu, Y. et al, 2018). Δεν απαιτείται διαχωρισμός από τα οικιακά απορρίμματα, μειώνοντας το ενεργειακό και οικονομικό κόστος της διεργασίας.

Οι περισσότερες μελέτες (Gertsakis J., Lewis H (2018)) αναφέρονται στις δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις της υγειονομικής ταφής εστιαζόμενες στη παρουσία βαρέων μετάλλων στα απόβλητα, συγκεκριμένα μολύβδου και αργύρου. Με την ανεξέλεγκτη διάθεση τους στους χώρους ταφής απελευθερώνονται τοξικές ουσίες και ρύποι στον αέρα και στο έδαφος μέσω διήθησης και κατ' επέκταση στον υδροφόρο ορίζοντα. Οι ρύποι αυτοί συμβάλλουν στην οικοτοξικότητα και τη καρκινογένεση.

Για παράδειγμα, ένα τυπικό πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου ζυγίζει 18.5kg. Περίπου 2.78g του τοξικού μολύβδου σε ποσοστό 10-90% (0.27 g έως 2.49 g ανά πάνελ) κατά την υγειονομική ταφή απομακρύνεται από το πάνελ και καταλήγει στο έδαφος. (European Commission, 2011)

Ωστόσο, δεν πρέπει να αμελούνται, οι προβλέψεις σχετικά με τη μελλοντική διαθεσιμότητα των πόρων. Η εκθετική μείωση των αποθεμάτων σε μέταλλα και σπάνια υλικά, καθιστά αναγκαία την εναλλακτική διαχείριση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων ως προληπτική λύση.

4.2. Αποτέφρωση

Η αποτέφρωση στερεών απορριμμάτων εκπροσωπεί μία από τις παλιότερες και πιο διαδεδομένες μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων. Κατά την αποτέφρωση αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες για την οξείδωση των επι μέρους στοιχείων του αποβλήτου, μειώνοντας σημαντικά τον όγκο του. Τα μειωμένα σε όγκο απόβλητα οδηγούνται σε ΧΥΤΑ για αδρανή απόβλητα προς τελική απόθεση.

Τα κύρια προτερήματα είναι η ταχύτητα της μεθόδου, η μείωση του όγκου έως 90% και του βάρους των αποβλήτων έως και 80%. Αποτελεσματικά, δεν απαιτείται εκτενή περιοχή για τη δημιουργία χώρων υγειονομικής ταφής. Κατά τη καύση δεν απελευθερώνεται πρόσθετο μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, όπως στα ΧΥΤΑ, συμβάλλοντας σε μικρότερο βαθμό στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Βέβαια, αυτό δεν μειώνει τη τοξικότητα των εκπομπών βαρέων μετάλλων στην ατμόσφαιρα, στις περιπτώσεις καύσης σε μη κατάλληλα σχεδιασμένους αποτεφρωτήρες. Ταυτόχρονα, παράγονται μεγάλες ποσότητες διοξινών και φουρανίων, που σημαίνει μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στον άνθρωπο, τη πανίδα και τη χλωρίδα (Vandeligt et al, 2012)

Τέλος, καταργείται κάθε πιθανότητα ανάκτησης πολύτιμων πρώτων υλών, εντείνοντας το πρόβλημα των μειωμένων αποθεμάτων (Solar Power Europe, 2018).

4.3. Επαναχρησιμοποίηση

Η επαναχρησιμοποίηση φωτοβολταϊκών πάνελ αποτελεί μία εναλλακτική διαχείριση τους. Φωτοβολταϊκά πάνελ, τα οποία έχουν καταστραφεί ή έχουν ολοκληρώσει το κύκλο ζωής τους, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε νέα εγκατάσταση έπειτα από επισκευή. Στο προϊόν εφαρμόζεται νέο πλαίσιο από αλουμίνιο ή αντικαθίσταται κάποιο κατεστραμμένο εξάρτημα, λαμβάνοντας νέα ετικέτα και νέες εγγυήσεις ποιότητας. Κατά αυτόν το τρόπο, η επισκευασμένη μονάδα, επιμηκύνει τον χρόνο ζωής της, μειώνοντας την ανάγκη κατασκευής εκ νέου μονάδων. (ΚΥΑ 23615/651/Ε.103)

Η μέθοδος της επαναχρησιμοποίησης δεν αποτελεί πανάκεια για το πρόβλημα, καθώς τα φωτοβολταϊκά πάνελ εξακολουθούν να έχουν προδιαγεγραμμένο τέλος ζωής, το οποίο έχει μόνο επιμηκυνθεί. Επομένως, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη τελική απόρριψη τους μετατοπίζεται για μεταγενέστερη περίοδο.

4.4. Ανακύκλωση

Οι μελέτες γύρω από τις τεχνολογίες ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ ως μέθοδο διαχείρισης έχουν αρχίσει ήδη από τη δεκαετία του 1990. Σήμερα, οι έρευνες στοχεύουν στη βελτίωση της αποδοτικότητας των τεχνολογιών, με αύξηση του ποσοστού ανάκτησης και ανακύκλωσης, αλλά και μείωση του κόστους τους. Οι μέθοδοι ανακύκλωσης χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: τις θερμικές, τις μηχανικές, τις χημικές και τις οπτικές (Πίνακας 5, Sander et al 2007). Η επιλογή της μεθόδου ανακύκλωσης του φωτοβολταϊκού πάνελ εξαρτάται τόσο από τον τύπο του πάνελ όσο από το κόστος των χρησιμοποιούμενων διαδικασιών και το οικονομικό όφελος. Πολλές φορές χρησιμοποιούνται συνδυαστικά προς επίτευξη επιθυμητού αποτελέσματος.

Πίνακας 5 Μέθοδοι και επιμέρους στάδια ανακύκλωσης αποβλήτων από φωτοβολταϊκά απόβλητα [Τροποποίηση από Sander et al, 2007].

ΤΥΠΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	ΣΤΑΔΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ
A. ΜΗΧΑΝΙΚΗ	Σύνθλιψη Τριβή Φυγοκεντρικός διαχωρισμός Διαχωρισμός με βάση τη πυκνότητα Επίπλευση Προσρόφηση Καθίζηση Μεταλλικός διαχωρισμός Κοπή Χάραξη Άλλα
B. ΧΗΜΙΚΗ	Επεξεργασία με διαλύτες Χημική Χάραξη Άλλα
Γ. ΘΕΡΜΙΚΗ	Αποτέφρωση Πυρόλυση Ψύξη Άλλα
Δ. ΟΠΤΙΚΗ	Laser Ακτινοβολία

Η βασική διαδικασία που ακολουθείται για την ανακύκλωση φωτοβολταϊκών περιλαμβάνει κάποια κοινά στάδια. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ συλλέγονται και αποσυναρμολογούνται στα επιμέρους συστατικά. Υλικά από ενδιάμεσα στάδια χωρίς ενδιαφέρον επαναχρησιμοποίησης δεν επεξεργάζονται περαιτέρω και οδηγούνται σε ΧΥΤΑ.

Τα χρήσιμα υλικά που ανακτώνται (Πίνακας 6) χρησιμοποιούνται αφού καθαριστούν, ως δευτερογενή υλικά, πρώτη ύλη για τη παραγωγή νέων προϊόντων. Στη περίπτωση που τα νέα προϊόντα είναι καλύτερης ποιότητας από τα προϊόντα προέλευσης, η διαδικασία ονομάζεται «upcycling», ενώ όταν είναι χαμηλότερης ποιότητας από τα προϊόντα προέλευσης η διαδικασία ονομάζεται «downcycling». Το ποσοστό ανακύκλωσης τους φτάνει στο 80 με 90%.

Πίνακας 6 Ανακτώμενα υλικά που προκύπτουν από φωτοβολταϊκό πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου [Τροποποίηση από Komoto et al, 2018].

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Φ/Β ΠΑΝΕΛ	ΤΜΗΜΑ Φ/Β ΠΑΝΕΛ	ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ
Κρυσταλλικού πυριτίου cSi	Πλαίσιο	Αλουμίνιο
	EVA, PVF (Ενθυλακωτικά) Φωτοβολταϊκά στοιχεία	Γυαλί
	Καλώδια χαλκού	Πυρίτιο Άργυρος Χαλκός Γυαλί Ημιαγώγιμα υλικά (μέταλλα)

Στα υποκεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται εκτενέστερα τρέχουσες διαδικασίες ανακύκλωσης για πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου ανάλογα το ανακτήσιμο προϊόν.

4.5. Διαδικασία ανακύκλωσης φωτοβολταϊκού πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου (cSi)

Η διαδικασία ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου περιλαμβάνει δύο κύρια στάδια, συνδυάζει πρωτογενή θερμική επεξεργασία, ακολουθούμενη από υδρομεταλλουργική επεξεργασία. Τα επιμέρους στάδια, όπως αυτά παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 1 βασίζονται σε πειραματική μελέτη του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Theocharis et al, 2022). Το έργο στοχεύει στη περαιτέρω ανάπτυξη μίας καινοτόμου διαδικασίας ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ και ανάκτησης χρησιμων υλικών σε πιλοτικό επίπεδο.

Αρχικά, θεωρείται ότι οι συνιστώσες του συστήματος αποσυναρμολογούνται και τα επιμέρους υλικά διαχωρίζονται μηχανικά και χειροκίνητα στο βαθμό που είναι εφικτό. Η χειροκίνητη αποσυναρμολόγηση θεωρείται μη ενεργοβόρα, γιατί δεν λαμβάνεται υπόψιν κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος στο λογισμικό.

Ο διαχωρισμός του πλαισίου αλουμινίου (~7% κ.β.) και του κιβωτίου σύνδεσης (καλώδια, πλαστικό) οδηγούνται σε πρόσθετες μονάδες για τη περαιτέρω επεξεργασία τους για επαναχρησιμοποίηση, διαδικασίες που δεν μελετώνται στα όρια της παρούσας εργασίας.

Τα απόβλητα του πάνελ, δίχως πλαίσιο και καλώδια, επεξεργάζονται θερμικά σε εργαστηριακό κλίβανο Carbolite (550 °C) με στόχο την αποσύνθεση της αυτοκόλλητης ρητίνης EVA/ συγκολλητικών ρητινών. Τα κύρια μέρη του πάνελ διαχωρίζονται σε τρία κύρια ρεύματα: γυαλί, κατακερματισμένες κυψέλες πυριτίου και ηλεκτρόδια μετάλλων.

Τα μεταλλικά καλώδια αφαιρούνται χειροκίνητα, ενώ το γυαλί ανακτάται και χρησιμοποιείται με τους τρόπους που παρουσιάζονται στο Εδάφιο 4.5.2. Η τρίτη εκροή διοχετεύεται σε μια σειρά κατεργασιών για τη τελική ανάκτηση του πυριτίου και του αργύρου. Ακολούθως, για διευκόλυνση της διεργασίας, τα υπολειπόμενα απορρίμματα τεμαχίζονται σε μικρά κομμάτια περίπου 40mm x 40mm και διαχωρίζονται με κοσκίνισμα. Με οπτικό σύστημα επιτυγχάνεται η αφαίρεση τεμαχίων από γυαλί με ακαθαρσίες και τέφρα, τα οποία αποστέλλονται προς απόρριψη.

Τα υπολείμματα του κοσκίνισματος μεταφέρονται σε κατεργασία εκχύλισης με οξύ, η οποία πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Η εκχύλιση είναι διεργασία της εκλεκτικής διαλυτοποίησης στερεού από υγρό, αποσκοπώντας στην εξαγωγή ενός (ή περισσοτέρων) χρήσιμων μετάλλων από κάποιο άλλο μέταλλευμα. Επιτυγχάνεται δια της διαλύσεως μόνο του ορυκτού ή ορυκτών που περιέχουν το χρήσιμο μέταλλο. Προκύπτει διάλυμα με υψηλή συγκέντρωση στο χρήσιμο μέταλλο, ενώ το υπόλειμμα της εκχύλισης είναι ένα σταθερό προϊόν, το οποίο μπορεί να αποτεθεί με ασφάλεια, με την προϋπόθεση ότι έχει πρώτα καθαριστεί (Καράμπελας, 2021)

Στόχος αυτής της διεργασίας είναι να διαχωριστεί το πυρίτιο από το αργίλιο. Η επιλογή κατάλληλου εκφυλιστικού μέσου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αποδοτικότητα της μεθόδου. Κατά την πρώτη έκπλυση, γίνει ανάμειξη των υπολειμμάτων με διάλυμα νερού και θειικού οξέος (H₂SO₄) υπό ανάδευση, το οποίο διαλυτοποιεί τα μέταλλα, παράγοντας διάφορα μεταλλικά οξείδια, και αφήνει μέταλλο πυριτίου στα υπολείμματα. Το μείγμα μεταφέρεται σε αντλία κενού, όπου διαχωρίζεται το στερεό και υγρό κλάσμα.

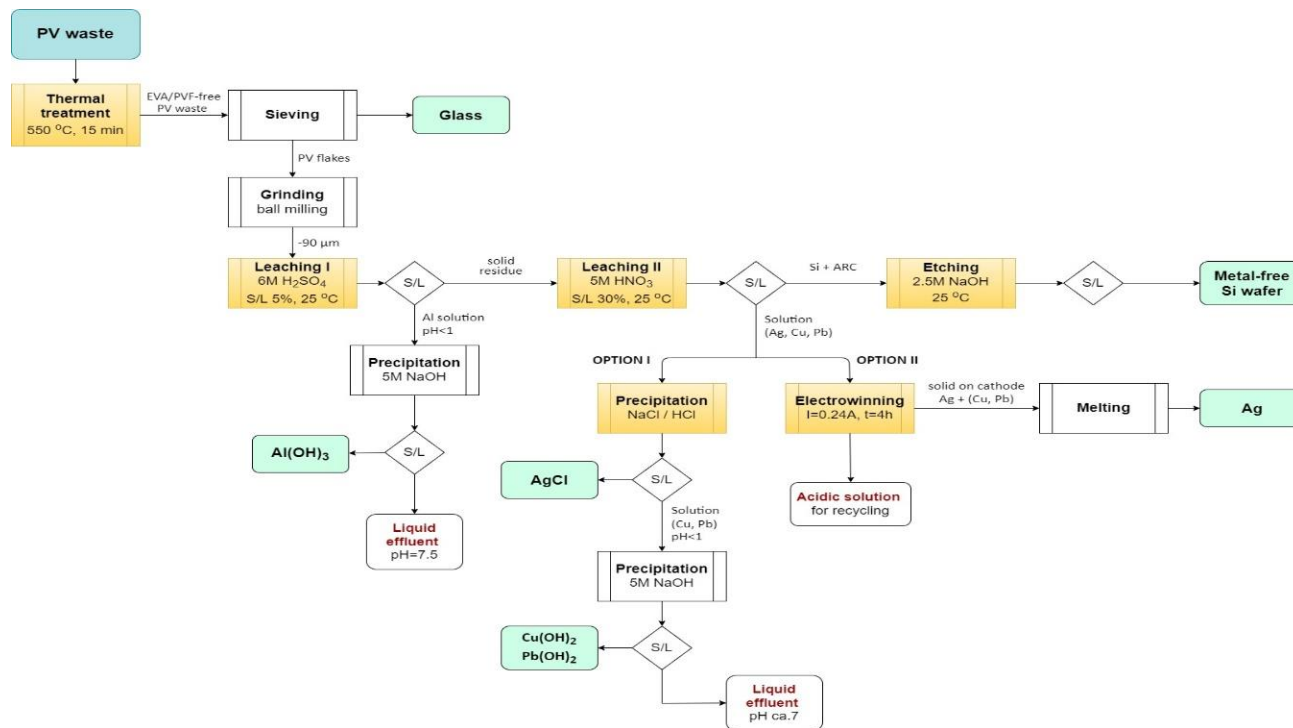
Το υγρό κλάσμα καταβυθίζεται με καυστικό νάτριο (NaOH) προς παραλαβή αργιλίου. Η τελική εκροή διαχωρίζεται σε ένα υγρό απόβλητο (pH 7.5), αποτελούμενο από νερό και θειικά, απουσία μετάλλων, το οποίο μεταφέρεται και απορρίπτεται και σε στερεό $Al(OH)_3$.

Το στερεό κλάσμα της πρώτης εκχύλισης υφίσταται δεύτερη εκχύλιση με οξύ (HNO_3) υπό ανάδευση για την ανάκτηση του αργύρου. Έπειτα από διαχωρισμό σε αντλία κενού, ανακτάται το πυρίτιο και οδηγείται στο στάδιο της επιφανειακής προσβολής. Η κατεργασία αναμένεται να ανακτήσει το 100% του πυριτίου ως μεταλλικό πυρίτιο σε μεταλλουργική ποιότητα, καθώς δεν υπάρχουν απώλειες.

Το υγρό κλάσμα της δεύτερης εκχύλισης περιέχει διαλυμένα μέταλλα σε όξινο διάλυμα και προχωρά προς ανάκτηση αργύρου με τρεις εναλλακτικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος περιλαμβάνει τη καταβύθιση του στερεού κλάσματος με χλωριούχο νάτριο (NaCl). Ανακτάται άργυρος σε μορφή χλωριούχου αργύρου ($AgCl$). Μετά από διαχωρισμό στερεού/ υγρού, το διάλυμα εξουδετερώνεται με καυστικό νάτριο (NaOH) που οδηγεί σε δέσμευση όλου του διαλυτού χαλκού και μολύβδου ως υδροξειδία. Το υγρό απόβλητο είναι ουδέτερο, απαλλαγμένο από κάθε είδους διαλυτού μετάλλου, αλλά με σημαντική περιεκτικότητα σε νιτρικά άλατα. Η απόρριψη του προϋποθέτει τη κατάλληλη επεξεργασία για δέσμευση των νιτρικών.

Εναλλακτικά, η ανάκτηση αργύρου επιτυγχάνεται με ηλεκτράνακτηση από νιτρικό άλας. Παραλαμβάνεται στερεός άργυρος, μείγμα χαλκού/ μολύβδου και όξινο διάλυμα νιτρικών προς ανακύκλωση.

Η τρίτη μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση Μικροβιακών Κυψελίδων Καυσίμων (MKK) τόσο για την ανάκτηση αργύρου, όσο και για παραγωγής ηλεκτρικής. Παράλληλα, επιτυγχάνεται μερική απομάκρυνση τοξικών, μεταλλικών προσμίξεων από το απόβλητο, σε μορφή οξειδίων που επικολλώνται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου (Κυριακόπουλος Δ., 2021).



Εικόνα 10 Διάγραμμα ροής υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας (Theocharis et al, 2022)

4.5.1. Ανάκτηση αλουμινίου

Η ανάκτηση και ανακύκλωση του αλουμινίου απαιτεί κατά 95% μικρότερη κατανάλωση ενέργειας συγκριτικά με τη παραγωγή αλουμινίου από πρώτη ύλη εκ νέου. Ταυτόχρονα, επιτυγχάνεται η εξοικονόμηση πρώτων υλών. Για το λόγο αυτό, το αλουμίνιο αποτελεί υλικό με μεγάλη αξία ως απόβλητο.

Η μέθοδος ανακύκλωσης αλουμινίου βασίζεται στο ποσοστό καθαρότητας του. Στη περίπτωση που το αλουμίνιο δεν περιέχει προσμίξεις από άλλα υλικά, μπορεί να ανακυκλώνεται συνεχώς δίχως μεταβολή των ιδιοτήτων του, σε μορφή διαδικασίας κλειστού βρόγχου. Όταν, όμως, συναντάται, μεγάλο ποσοστό προσμίξεων, απαιτείται προσθήκη καθαρού αλουμινίου. Με αυτό το τρόπο, αυξάνεται η καθαρότητα του τελικού κράματος και μπορεί να λάβει χώρα η ανακύκλωσή του. (UNEP, 2013)

4.5.2. Ανάκτηση γυαλιού

Το γυαλί που ανακτάται καθαρίζεται και αποστέλλεται σε εταιρείες για δευτερεύουσα χρήση. Υπάρχουν δύο κύριοι δρόμοι ανακύκλωσης: είτε να οδηγηθεί στη βιομηχανία ανακύκλωσης γυαλιού (ανακύκλωση

downcycling), είτε να οδηγηθεί στη κατασκευή καινούργιων πλαισίων (ανακύκλωση upcycling). (Γκουλιούμη Α., 2018)

Μία άλλη μέθοδος διαχείρισης του γυαλιού είναι η σταθεροποίηση του σε τσιμεντοκονία. Ο εγκλεισμός - σταθεροποίηση αποβλήτων με την χρήση του τσιμέντου είναι μια μέθοδος κατά την οποία εγκλείονται τοξικές ουσίες σε συνδετικό μέσο. Στόχο αποτελεί η αποφυγή εκχύλισης τους στο περιβάλλον. Έχει αποδειχθεί ως μια αποδοτική επιλογή τόσο για τη μείωση της τοξικότητας των αποβλήτων στα επιθυμητά όρια όσο και για τη μείωση του ρυθμού προσβολής του περιβάλλοντος από αυτά. Η διαδικασία βασίζεται στον εκτενή περιορισμό της επιφάνειας της ουσίας που αποστραγγίζεται ή και στον ολικό περιορισμό της σε μια αδιαπέραστη κάψουλα (Kogbara R. ,2013).

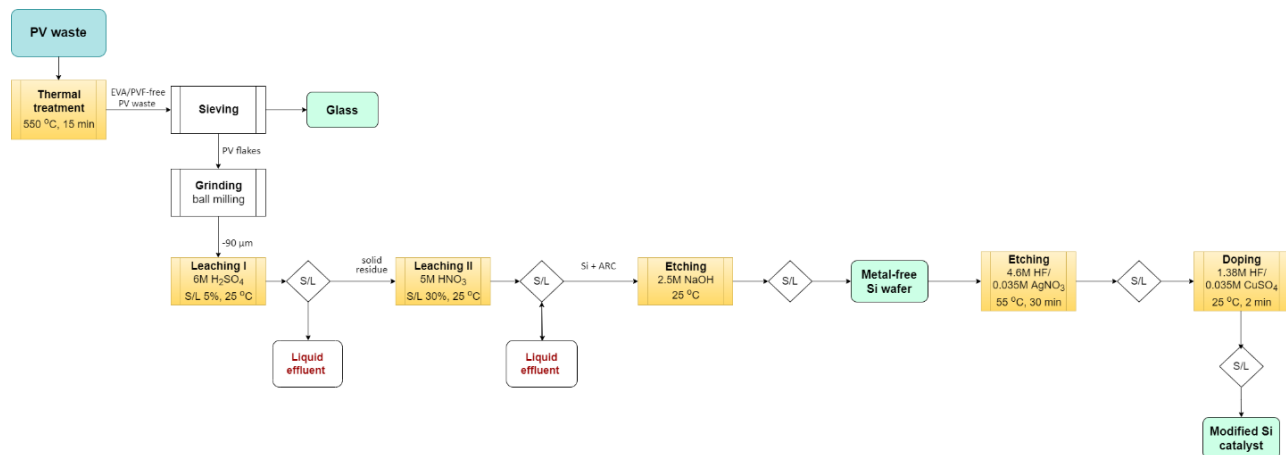
Η στρατηγική αυτή εστιάζει

- στη μείωση του όγκου των φωτοβολταϊκών αποβλήτων που διατίθενται σε ΧΥΤΑ,
- στη μείωση των εκπομπών που εκλύονται.
- στη παραγωγή ωφέλιμου προϊόντος για μελλοντική χρήση ως ασφαλτος.

4.5.3. Ανάκτηση πυριτίου

Η ανάκτηση πυριτίου υψηλής καθαρότητας είναι ένας από τους κυριότερους στόχους της μεθόδου της υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας. Έπειτα από επιφανειακή προσβολή, όπως αναπτύσσεται στην ενότητα 3.5, ανακτάται πυρίτιο σε μεταλλουργική ποιότητα.

Τα πλακίδια πυριτίου που ανακτώνται χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή νέων φωτοβολταϊκών στοιχείων, μειώνοντας έτσι τα επιπλέον απόβλητα αλλά και ενισχύοντας τη κυκλική οικονομία. Επιπρόσθετα, μελετάται σε εργαστηριακό επίπεδο η δυνατότητα παρασκευής φωτοκοταλύτη πυριτίου (Si), ικανό να διασπάσει ρύπους υπό την επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας (Εικόνα 11). Ο καταλύτης παρασκευάζεται έπειτα από τροποποίηση της επιφάνειας του πυριτίου μέσω νανοδομών (SiNWs) με τη μέθοδο της επιφανειακής προσβολής. Η διαδικασία υποβοηθάται από άργυρο, βοηθώντας σημαντικά τον αριθμό των ενεργών κέντρων και τη προσροφητική ικανότητα του υλικού (Κυριακοπούλου Β, 2020).



Εικόνα 11 Διάγραμμα ροής υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας με παραγωγή φωτοκαταλύτη

4.5.4. Ανάκτηση μετάλλων

Τα φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου περιέχουν μικρές αλλά σημαντικές ποσότητες μετάλλων, τα οποία είναι σπάνια ή παράγονται σε μικρές ποσότητες.

Από τα δεδομένα που συνοψίζονται στο Πίνακα 7 και τις τιμές των μετάλλων (εν έτη 2022) που περιέχονται σε κρυσταλλικά πάνελ, είναι φανερό πως η ανάκτηση των μετάλλων έχει και οικονομικό όφελος. Δεδομένης της πολυπλοκότητας της μεθόδου, η ανακύκλωση υλικών όπως το ασήμι (ή άργυρος), κρίνεται απαραίτητη για τη βελτίωση της οικονομικής βιωσιμότητας των διαδικασιών ανακύκλωσης.

Πίνακας 7 Τιμές ανακτώμενων υλικών (Αύγουστος 2022)

ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ	ΤΙΜΗ €/kg	kg/MW
Αλουμίνιο (Al)	2.29	10.7
Χαλκός (Cu)	6.3	583
Πυρίτιο (Si)	30-35	3069
Αργυρος (Ag)	606.35	5.115

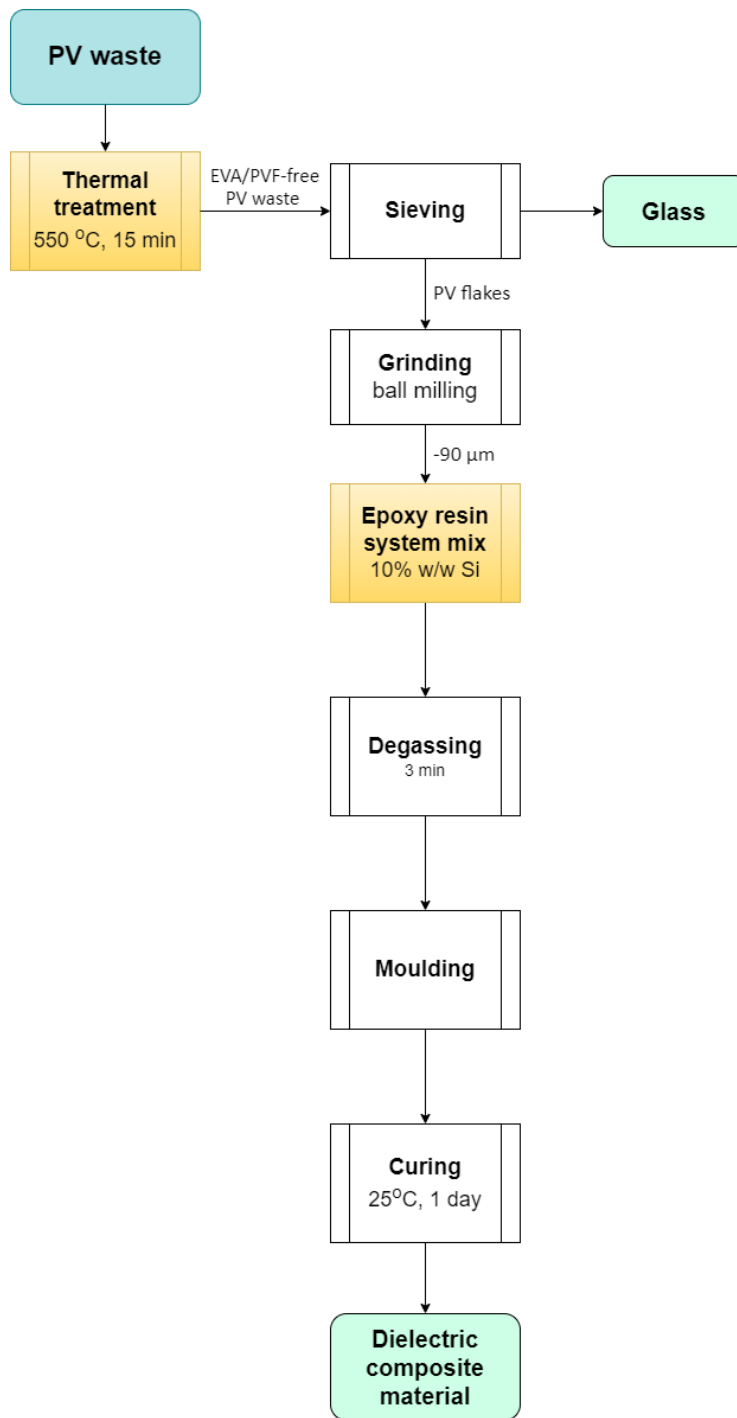
Συγκεντρωτικά, οι μέθοδοι διαχείρισης των επιμέρους συστατικών του φωτοβολταϊκού πλαισίου και τα μέγιστα ποσοστά ανάκτησης βάσης βιβλιογραφίας (Δασκαλόγλου, Κίναλης (2012)) παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 8 Τυπικά ποσοστά ανάκτησης [Τροποποίηση από Δασκαλόγλου, Κίναλης (2012)]

ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ	ΤΕΛΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ
Αλουμίνιο	100%	Ανακύκλωση
Γυαλί	96.96%	ΧΥΤΑ Ανακύκλωση
Πυρίτιο	85%	Σταθεροποίηση - Εγκλεισμός Ανακύκλωση

4.5.5. Παραγωγή χρήσιμων προϊόντων

Εκτός από την ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων και λοιπών υλικών, δίνεται η δυνατότητα κατασκευής χρήσιμων προϊόντων (Εικόνα 12). Για παράδειγμα, κατά την ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πλαισίων δύναται η παραγωγή σύνθετων υλικών εποξειδικής ρητίνης με πρόσθετα πυριτίου, το οποίο περιέχεται στα ηλεκτρικά κύτταρα. Παράγονται διηλεκτρικά κατάλληλα για χρήση σε πυκνωτές (Χριστούλα, 2021).



Εικόνα 12 Διάγραμμα ροής προς παραγωγή σύνθετων υλικών εποξειδικής ρητίνης

5. Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η μέθοδος ανάλυσης του κύκλου ζωής, τα πλεονεκτήματα και τα οφέλη όπως προκύπτουν από τη χρήση της, ο τρόπος λειτουργίας της και οι διάφορες επιπτώσεις εφαρμογής της.

5.1. Γενικά

Η μέθοδος Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ) ορίζεται από τον οργανισμό United States Environmental Protection Agency (US EPA), ως μέθοδος αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος.

Ο όρος «προϊόν» περιλαμβάνει τόσο φυσικά αγαθά, διεργασίες όσο και υπηρεσίες σε λειτουργικό και στρατηγικό επίπεδο. Το εργαλείο αυτό δεν έχει ως στόχο τη σύγκριση των προϊόντων, αλλά τη παρεχόμενη λειτουργία αυτών. Η ολιστική προσέγγιση του κύκλου ζωής περιλαμβάνει τα προϊόντα και τις επιμέρους διαδικασίες από την εξόρυξη των πρώτων υλών έως και τη τελική τους διάθεση. Με αυτόν τον τρόπο, υπάρχει η δυνατότητα ποιοτικού και ποσοτικού εντοπισμού των ευκαιριών και κινδύνων - ρυπογόνων και ενεργοβόρων – σε κάθε στάδιο και τη πιθανή μελλοντική βελτίωσή τους.

Σύμφωνα με τον Guinee (2010) πρόκειται για μία ευέλικτη τεχνική ποσοτικοποίησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ενός προϊόντος. Στόχος είναι η επιλογή του καλύτερου προϊόντος όσον αφορά τις επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον όσο και στον άνθρωπο, σε συνάρτηση με το δυναμικό παραγωγής ενέργειας. Επιπρόσθετα, συμβάλλει στην ανάπτυξη νέων καινοτόμων προϊόντων ή διεργασιών, όπου παρατηρείται επιπρόσθετη μείωση των πρώτων υλών και των εκπομπών.

Η προσέγγιση κύκλου ζωής καθίσταται απαραίτητη στη μελέτη της βιωσιμότητας πολιτικών και βιομηχανικών αποφάσεων σύμφωνα με τη Αξιολόγηση Βιωσιμότητας των Τεχνολογιών (Sustainability Assessment of Technologies, SAT), ιδιαίτερα αναδυόμενων τεχνολογιών.

5.2. Στάδια μεθοδολογίας AKZ

Το μεθοδολογικό πλαίσιο μίας ανάλυσης AKZ αναλύεται στις επόμενες παραγράφους. Η AKZ περιγράφεται από τέσσερα στάδια σύμφωνα με πρότυπο ISO14044, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13. Τα διπλά βέλη οφείλονται στην αλληλεπιδραστική φύση της μεθόδου.

Τα τέσσερα βασικά στάδια:

I.Καθορισμός στόχου και οριοθέτηση του πεδίου εφαρμογής

Καθορισμός και περιγραφή του προϊόντος, της διαδικασίας ή της δραστηριότητας, δημιουργία του πλαισίου στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση και προσδιορισμός των ορίων και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που θα συμπεριληφθούν στην αξιολόγηση.

II.Απογραφή, καταγραφή δεδομένων κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory, LCI)

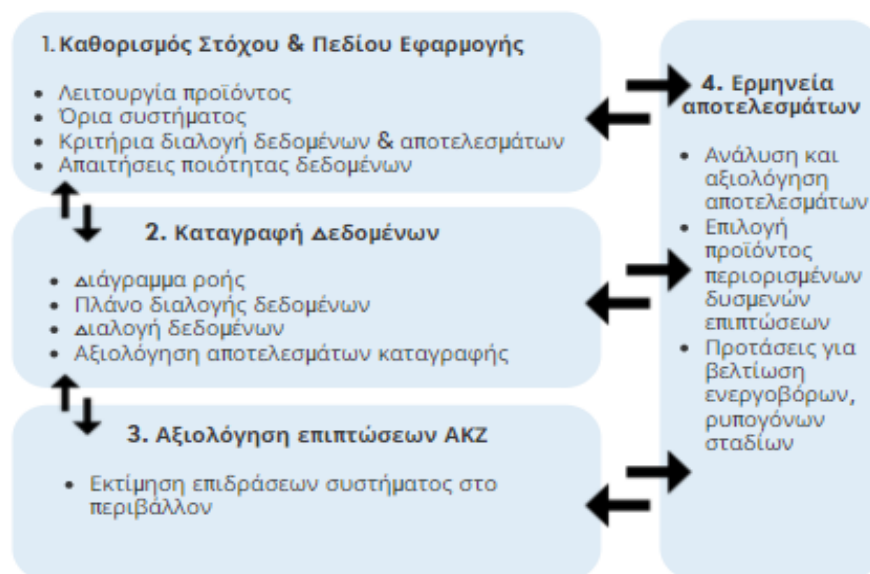
Προσδιορισμός και ποσοτικοποίηση ενέργειας, νερού και κατανάλωσης πρώτων υλών, καθώς και εκλύσεων στο περιβάλλον όπως εκπομπές αερίων, στερεά απόβλητα και λύματα.

III.Αξιολόγηση επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)

Εκτίμηση των επιδράσεων του συστήματος, όπως αυτά έχουν προσδιοριστεί στο προηγούμενο βήμα, στο περιβάλλον.

IV.Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με στόχο την επιλογή του προϊόντος, της διαδικασίας ή της υπηρεσίας που θα οδηγήσει σε περιορισμό των επιδράσεων του συστήματος στο περιβάλλον, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα και τις παραδοχές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των αποτελεσμάτων (ISO 14040-44).



Εικόνα 13 Στάδια AKZ [Τροποποίηση από ISO 14044, 2006]

5.2.1. Καθορισμός στόχου και οριοθέτηση του πεδίου εφαρμογής

Το πρώτο στάδιο μίας ΑΚΖ περιλαμβάνει τον καθορισμό του σκοπού και του πεδίου εφαρμογής. Ο σκοπός και το πεδίο εφαρμογής της ΑΚΖ δεν αποτελούν στατικά δεδομένα. Υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης τους σε περίπτωση που αποδειχθεί ότι τα αρχικά δεδομένα δεν είναι βέλτιστα για συγκεκριμένο σενάριο.

Πιο αναλυτικά στην αρχή της LCA πρέπει να λαμβάνονται οι παρακάτω αποφάσεις:

- Στόχος μελέτης
- Πλαίσιο εφαρμογής (ερωτήματα που θα απαντηθούν, κοινό στο οποίο απευθύνεται)
- Τύπος & ακρίβεια πληροφοριών που απαιτείται για τη διευκόλυνση λήψης αποφάσεων (ποιότητα, ποσότητα, ακρίβεια)
- Όρια συστήματος
- Κανόνες για την εκτέλεση της μελέτης (υποθέσεις, περιορισμοί)
- Τρόπος οργάνωσης των δεδομένων και εμφάνισης των αποτελεσμάτων

i. Στόχος LCA

Ανάλυση των παραπάνω, η διερεύνηση του φάσματος περιβαλλοντικών επιπτώσεων & νέα προϊόντα/τεχνολογίες με μείωση των απαιτούμενων πόρων και ρύπων προς το περιβάλλον

ii. Πλαίσιο Εφαρμογής

Το πλαίσιο εφαρμογής περιλαμβάνει τις σημαντικότερες μεθοδολογικές επιλογές, περιορισμούς και υποθέσεις που αφορούν τα ακόλουθα:

➤ Λειτουργία, λειτουργική μονάδα και ροή αναφοράς

Η λειτουργία των προϊόντων προς μελέτη είναι πολλές φορές δύσκολο να οριοθετηθεί. Επιπλέον, η σύγκριση προϊόντων με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά αποδεικνύεται αβάσιμη. Για το λόγο αυτό, ορίζεται η λειτουργική μονάδα ως η κοινή βάση αναφοράς (functional unit) για τη σύγκριση συστημάτων και εναλλακτικών λύσεων προς την επιτυχή μελέτη τους. Στον ορισμό της λαμβάνονται υπόψιν η ωφέλιμη διάρκεια ζωής, το πρότυπο επίδοσης ποιότητας (performance quality standard) και η αποδοτικότητα του προϊόντος.

➤ Όρια συστήματος

Ο πλήρης και ακριβής καθορισμός των εισροών και εκροών ενός συστήματος είναι αδύνατος. Επομένως, τίθενται όρια συστήματος κατάλληλα για την εκάστοτε μελέτη, προσδιορίζοντας ορισμένα στάδια, διαδικασίες και αντίστοιχες ροές, όπως:

- απόκτηση πρώτων υλών
- ηλεκτρική ενέργεια, καύσιμα και θερμότητα προς χρήση
- μεταφορά
- τελική διάθεση αποβλήτων
- ανάκτηση χρησιμοποιημένων προϊόντων

Σημαντικό είναι να αναφερθεί η πιθανότητα στρέβλωσης των αποτελεσμάτων λόγω ανεπαρκούς οριοθέτησης.

➤ Κριτήρια διαλογής δεδομένων και αποτελεσμάτων

Κατόπιν επιλογής ορίων συστήματος, απαιτείται η επιλογή τέτοιων δεδομένων εισόδου και εξόδου συστήματος, χρήσιμα για τη μελέτη.

Τα παραπάνω δεδομένα πρέπει να είναι συγκεκριμένου τύπου, πληρότητας, συνοχής και επαναληψιμότητας. Η ποιότητα τους θα αντικατοπτρίζεται στα τελικά αποτελέσματα της ΑΚΖ. Συνεπώς, η ποιότητα τους οφείλει να χαρακτηρίζεται τόσο από ποσοτικές και ποιοτικές παραμέτρους, όσο και από μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή και την ενσωμάτωση αυτών των δεδομένων (ISO 14044).

5.2.2. Καταγραφή δεδομένων κύκλου ζωής

Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει τη καταγραφή δεδομένων του κύκλου ζωής ενός προϊόντος και συντελείται σε τέσσερα επιμέρους βήματα. Η διαδικασία καταγραφής είναι επαναληπτική. Όσο συλλέγονται νέα, πιο έγκυρα δεδομένα για το σύστημα, υπάρχει η δυνατότητα αναγνώρισης νέων απαιτήσεων ή περιορισμών που απαιτούν επαναξιολόγηση των ορίων του συστήματος ή των στόχων που έχουν τεθεί.

Η καταγραφή των δεδομένων εισόδου και εξόδου του συστήματος παρουσιάζονται ως διάγραμμα ροής, συνδυάζοντας τις απαραίτητες ενδιάμεσες διεργασίες προς ολοκληρωμένη απεικόνιση του κύκλου ζωής.

Πολλές φορές τα πολύπλοκα συστήματα καθίστανται δύσκολα στην απεικόνιση και στη διαλογή των δεδομένων. Αποδίδουν, βέβαια, πιο ακριβή και χρηστικά αποτελέσματα χάρη στη λεπτομερή ανάλυση

τους. Τα πολύπλοκα συστήματα θα πρέπει να αναλύονται σε μία σειρά υποσυστημάτων, το κάθε υποσύστημα σύμφωνα με την EPA, (EPA, 2006) είναι «ένα μοναδικό βήμα ή μία διαδικασία που αποτελεί μέρος του συστήματος που έχει ήδη οριστεί». (Ρουμελιώτη, 2013)

Για κάθε υποσύστημα πρέπει να καθορίζονται οι εισροές πρώτων υλών και ενέργειας, οι εκροές προϊόντων, ατμοσφαιρικών ρύπων, υγρών και στερεών αποβλήτων καθώς και οποιεσδήποτε άλλες εκροές.

Η ΑΚΖ ως εργαλείο ανάλυσης βρίσκεται ακόμα σε στάδιο εξέλιξης και οι κανόνες της μεθοδολογίας δεν είναι αυστηρά καθορισμένοι. Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαίος ο ορισμός περιορισμών και παραδοχών κατά τη διεξαγωγή της μελέτης.

5.2.3. Εκτίμηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) συμπεριλαμβάνεται στην LCA. Είναι το στάδιο στο οποίο γίνεται η εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, δηλαδή των διαφόρων εκπομπών και της εξάντλησης των πόρων. Δημιουργεί μια σύνδεση μεταξύ του προϊόντος ή της διαδικασίας και των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Το τρίτο στάδιο πρόκειται μία ποσοτική ή/και ποιοτική διαδικασία, σύμφωνα με την οποία χαρακτηρίζονται και ερμηνεύονται οι δυσμενείς συνέπειες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όπως αυτές υπολογίστηκαν στο στάδιο της καταγραφής (Guinee et al, 2001). Υλοποιείται με τα εξής βήματα:

- Προσδιορισμός επιπτώσεων – Προσδιορισμός των σχετικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων του προς μελέτη προϊόντος και κατηγοριοποίηση τους (π.χ. υπερθέρμανση πλανήτη, τοξικότητα)
- Κατηγοριοποίηση – Διαχωρισμός των αποτελεσμάτων στις διάφορες κατηγορίες (π.χ. την ταξινόμηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην υπερθέρμανση του πλανήτη)
- Χαρακτηρισμός – Μοντελοποίηση των επιπτώσεων στις κατηγορίες επιπτώσεων με χρήση της επιστήμης με βάση συντελεστές μετατροπής (π.χ. μοντελοποίηση των πιθανών επιπτώσεων του διοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου στην υπερθέρμανση του πλανήτη).
- Στάθμιση – Έμφαση στις σημαντικές πιθανές επιπτώσεις.
- Αξιολόγηση και υποβολή εκθέσεων αποτελεσμάτων LCA - Για τη καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων LCA περιλαμβάνονται εκθέσεις και παρουσιάσεις των αποτελεσμάτων σε μορφή πίνακα ή γραφικά.

5.2.4. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Κατά το τελευταίο στάδιο της AKZ, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται ερμηνεύονται κατάλληλα και χρησιμοποιούνται για τη λήψη αποφάσεων. Αυτά περιλαμβάνουν δεδομένα για τον εντοπισμό, τον έλεγχο τήρησης των προϋποθέσεων και την αξιολόγηση των συμπερασμάτων, σύμφωνα με το δεδομένα που περιγράφονται στο στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης.

Ο συνδυασμός της αναλυτικής καταγραφής δεδομένων κατά το δεύτερο στάδιο με την ορθή εκτίμηση των επιπτώσεων στο τρίτο, δίνει τη δυνατότητα σφαιρικής οπτικής του προϊόντος. Είναι φανερά τα σημεία που επιδέχονται βελτιώσεις, και πως μπορούν αυτές να εφαρμοστούν.

Όπως έχει προαναφερθεί, η AKZ αποτελεί μία επαναληπτική διαδικασία. Η ερμηνεία αποτελεσμάτων αφορά δεδομένα και υποθέσεις ενός σεναρίου. Το εξεταζόμενο σύστημα μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με τα αποτελέσματα, για την πιο ορθή ερμηνεία του.

Η αξιοπιστία της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό α) από τον τρόπο μοντελοποίησης, β) τις υποθέσεις και απλοποιήσεις που χρησιμοποιούνται σε κάθε βήμα της ανάλυσης και γ) την διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων.

6. Λογισμικό SimaPRO

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η λειτουργία του λογισμικού Αναλύσεων Κύκλου Ζωής, SimaPRO, όπως και η διαδικασία καταγραφής και απογραφής δεδομένων για τη πραγματοποίηση της μελέτης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

6.1. Εισαγωγή – Λογισμικό SimaPRO 7

Στη παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται το ευρέως χρησιμοποιούμενο λογισμικό SimaPRO για την αξιολόγηση των εναλλακτικών σεναρίων διάθεσης φωτοβολταϊκών πάνελ στο τέλος κύκλου ζωής τους. Το SimaPRO δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης του κύκλου ζωής ενός προϊόντος βασισμένη στο ISO 14040-44.

Πρόκειται για ένα εύχρηστο εργαλείο μοντελοποίησης και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων ως προς το περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο. Η επιλογή της βάσης δεδομένων και των μεθοδολογιών βασίζονται σε συγκεκριμένες κατηγορίες επίδρασης και αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

6.2. Βιβλιοθήκες και βάσεις δεδομένων

Η εφαρμογή μεθοδολογιών εκτίμησης επιπτώσεων του κύκλου ζωής βασίζεται στη χρήση βάσεων δεδομένων, οι οποίες παρέχουν τα απαραίτητα δεδομένα απογραφής για τα στάδια των LCI και LCIA. Υπάρχουν διαθέσιμες πολλές τέτοιες βάσεις στο SimaPRO, οι ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι: Ecoinvent, US LSI, ELCD, US Input Output, Swiss Input Output, LCA Food, Industry Data.

Στην εργασία χρησιμοποιείται η διεθνής βάση δεδομένων Ecoinvent, της οποίας η τελευταία έκδοση εμπεριέχει πάνω από 10.000 διαδικασίες, έχει περίπου 4500 χρήστες σε πάνω από 40 χώρες παγκοσμίως (www.ecoinvent.org). Η βάση δεδομένων προέκυψε από τη συνεργασία με ελβετικούς φορείς με στόχο την επικαιροποίηση και ενσωμάτωση διαφόρων βάσεων δεδομένων απογραφής κύκλου ζωής. Αφορά κυρίως τους τομείς της παροχής ενέργειας (θερμότητα, συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας), μεταφορών (αυτοκίνητο, πλοίο, σιδηρόδρομος, αερομεταφορές, σωληνώσεις κ.α.), υλικών (πλαστικά, χημικά, μέταλλα, υλικά δόμησης) και επεξεργασίας αποβλήτων (υγειονομική ταφή, αποτέφρωση και ανακύκλωση) (Huijbregts et al., 2008).

Τα κύρια χαρακτηριστικά της Ecoinvent είναι:

- i. Ευρύ φάσμα δεδομένων σε πολλαπλούς τομείς
- ii. Ικανοποιούνται οι απαιτήσεις σε ποιότητα και ακρίβεια πληροφοριών ως λογαριθμική κατανομή με τυπική απόκλιση
- iii. Ενημέρωση δεδομένων ανά τακτά χρονικά διαστήματα
- iv. Συνεπής εφαρμογής ορίων συστήματος και κατανομής
- v. Ύπαρξη κεφαλαιουχικών αγαθών ως προεπιλογή, για τα συστήματα ενέργειας και μεταφοράς
- vi. Επιμέρους κατηγοριοποίηση των εκπομπών για ορθότερη ανάλυση
- vii. Τακτική ενημέρωση από το Κέντρο Ecoinvent (Ecoinvent Center)

Όλες οι διαδικασίες έχουν τη δυνατότητα να παρουσιαστούν σε δύο μορφές: ως μοναδιαίες διαδικασίες ή ως συστήματα διαδικασιών. Η πρώτη εκδοχή παρουσιάζει μόνο τις εισροές πόρων και τις εκπομπές από μία διαδικασία. Η επιλογή της κατά τη μοντελοποίηση ισοδυναμεί με αυτόματη ενσωμάτωση όλων των εκπομπών των ανάντη διαδικασιών. Η δεύτερη μορφή λειτουργεί σαν ένα «μαύρο κουτί», συμπεριλαμβάνοντας όλες τις εκπομπές σαν σύνολο και όχι σαν μεμονωμένες διεργασίες. (SimaPRO Manual).

6.3. Μέθοδος αξιολόγησης IMPACT 2002+

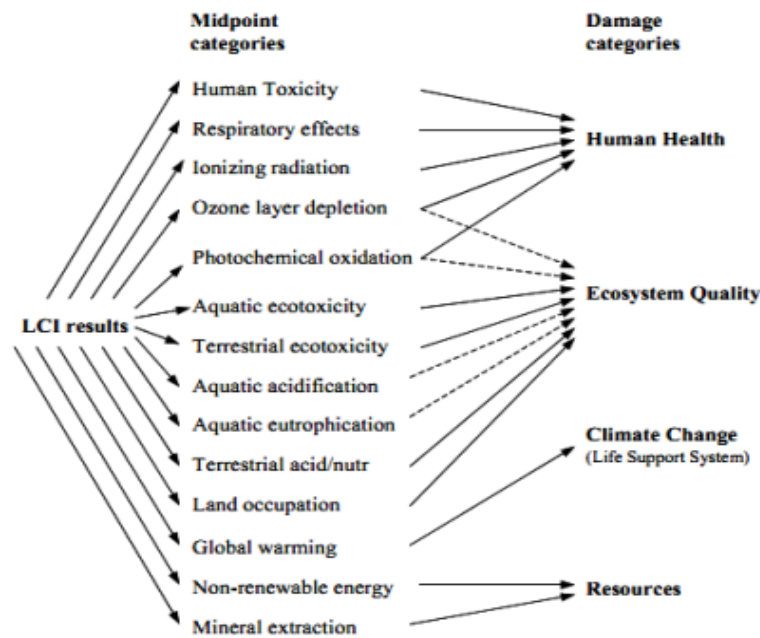
Η μέθοδος IMPACT 2002+ αναπτύχθηκε αρχικά από το Ελβετικό Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο Τεχνολογίας στη Λοζάνη (Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne – EPFL), και εκσυγχρονίστηκε έπειτα από αλλαγές που διεξήχθησαν από την ίδια ομάδα ερευνητών με βάση τα συστήματα κύκλου ζωής ecointesys (ecointesys-life cycle systems, Lausanne).

Η μέθοδος αξιολόγησης (αλγόριθμος) συνδυάζει τις προσεγγίσεις ενδιάμεσης (Midpoint) και τελικής βλάβης (Damage). Αρχικά, τα αποτελέσματα του αποθέματος LCI μεταφράζονται σε δεκατέσσερις ενδιάμεσες κατηγορίες αντίκτυπου με παρόμοιες επιπτώσεις. Στη συνέχεια, οι ενδιάμεσες κατηγορίες ομαδοποιούνται σε τέσσερις κατηγορίες βλαβών μέσω δεκατεσσάρων ενδιάμεσων κατηγοριών (Εικόνα 14, Jolliet et al. 2016)

Η απεικόνιση κάθε τόξου συμβολίζει ένα μονοπάτι επίδρασης, ενώ το διακεκομμένο τόξο φανερώνει τα λιγότερο βέβαια μονοπάτια μεταξύ ενδιάμεσου δείκτη και τελικού επίπεδου βλάβης.

Οι δείκτες κατηγοριοποιούνται βάση του επιπέδου στο οποίο ανήκουν, στους «ενδιάμεσους» (midpoint) και «τελικούς» (endpoint).

Ένας «ενδιάμεσος δείκτης» χαρακτηρίζει τις βασικές ροές του συστήματος και περιβαλλοντικές παρεμβάσεις που συμβάλλουν στην ίδια τελική επίδραση. Ο χαρακτηρισμός αυτός οφείλεται στην ενδιάμεση σχέση της επίδρασης στην αλυσίδα αίτιου-αποτελέσματος. Με αυτή την ομαδοποίηση, ελαχιστοποιείται η πολυπλοκότητα της μοντελοποίησης της ΑΚΖ.



Εικόνα 14 Γενική δομή του πλαισίου της μεθόδου IMPACT 2002+ για την αξιολόγηση των επιπτώσεων [Τροποποίηση από Jolliet, O. et al (2016)]

6.3.1. Τελικοί δείκτες (Endpoint)

Στο σημείο αυτό αξιολογείται η συνεισφορά κάθε ενδιάμεσης κατηγορίας επιπτώσεων σε έναν ή περισσότερους τελικούς δείκτες. Η μετάβαση αυτή γίνεται μέσω ενός συντελεστή χαρακτηρισμού, διαφορετικό για κάθε κατηγορία τελικών ζημιών.

Οι κατηγορίες τελικής βλάβης είναι οι ακόλουθες:

- Βλάβη στην ανθρώπινη υγεία

Η αξιολόγηση της τελικής βλάβης στην ανθρώπινη υγεία εφαρμόζει την ιδέα των «σταθμισμένα λόγω αναπηρίας έτη ζωής» (disability adjusted life years, DALY). Μέτρο σύγκρισης αποτελεί η ιδανική

κατάσταση, όπου ο πληθυσμός ζει έως προχωρημένη ηλικία χωρίς νόσο ή/και αναπηρία (Simapro, 2008). Ο όρος αναφέρεται στη διαφορά του μέτρου των συνολικών ετών ζωής που χάνονται λόγω πρόωρης θνησιμότητας και αναπηρίας σε σχέση με το μέτρο σύγκρισης σε συγκεκριμένη περιοχή και χρονικό ορίζοντα. Η αξιολόγηση DALY καθιστά αντιληπτή την επίδραση των εκπομπών κύκλου ζωής στην ανθρώπινη υγεία μέσω παγκόσμιων μέσων όρων.

➤ Βλάβη στη ποιότητα του οικοσυστήματος

Η ποιότητα του οικοσυστήματος μπορεί να περιγραφεί σε όρους ενέργειας, ύλης και ροής πληροφοριών. Ως «υψηλής ποιότητας» χαρακτηρίζονται τα οικοσυστήματα όπου οι ροές δεν διακόπτονται λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Η ζημία που προκαλείται στο οικοσύστημα μετριέται σε PDF (potentially disappeared fraction of species), εκφράζοντας τα είδη που έχουν εξαφανιστεί σε ένα τετραγωνικό μέτρο (m²) γης σε χρονικό διάστημα ενός έτους (PDF m² yr/pers/yr) (Kolotzek, S. et al. (2018)).

➤ Βλάβη στη κλιματική αλλαγή

Η τελική βλάβη στη κλιματική αλλαγή είναι αποτέλεσμα της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Η μέθοδος IMPACT2002+ χρησιμοποιεί σαν χρονικό ορίζοντα τα 500 έτη για τον υπολογισμό του παρακάτω συντελεστή. Το αποτέλεσμα προκύπτει από το άθροισμα όλων των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (CO₂, CH₄, NO₂, κ.λπ.), οι οποίες μπορούν να εκφραστούν ως ισοδύναμες εκπομπές CO₂, με βάση το πόσο συνεισφέρει 1 kg αέριων ρύπων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου σε σχέση με 1 kg CO₂.

➤ Βλάβη στη διαθεσιμότητα πόρων

Η σταδιακή εξάντληση πόρων είναι αποτέλεσμα ταχύτατης κατανάλωσης ανανεώσιμων και μη φυσικών πόρων προτού ανακτηθούν. Η μειωμένη διαθεσιμότητά τους προκαλεί αλυσιδωτά την αύξηση του κόστους εξόρυξης. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία IMPACT2002+, αξιολογείται ο τρόπος που η γεωλογική κατανομή ορυκτών πόρων και καυσίμων επηρεάζει τις προσπάθειες εξόρυξης μελλοντικών πόρων.

6.3.2. Ενδιάμεσοι δείκτες (Endpoint)

Οι εξεταζόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις τελικής βλάβης διακρίνονται συνήθως στις ακόλουθες ενδιάμεσες κατηγορίες:

➤ Ανθρώπινη τοξικότητα (Human Toxicity)

- Αναπνευστικά Προβλήματα, λόγω εκπομπής Οργανικών/μη οργανικών Σωματιδίων (Respiratory effects) στην ατμόσφαιρα.
- Επίδραση της ραδιενεργούς ιονίζουσας ακτινοβολίας (Ionizing Radiation).
- Μείωση της στοιβάδας του όζοντος (Ozone Layer depletion)
- Φωτοχημική οξείδωση (Photochemical oxidation)
- Υδάτινη οικοτοξικότητα (Aquatic ecotoxicity)
- Οικοτοξικότητα εδάφους (Terrestrial ecotoxicity)
- Υδάτινη Οξίνιση (Acidification)
- Ευτροφισμός (Eutrophication)
- Οξίνιση χερσαίου εδάφους (Terrestrial acid/nutrification)
- Επίδραση της μεταβολής των χρήσεων γης ή της κατάληψης εδάφους (Land Use)
- Υπερθέρμανση του πλανήτη (Global warming)
- Απώλεια και χαμηλότερη ποιότητα ορυκτών καυσίμων (Fossil Fuels)
- Απώλεια και χαμηλότερη ποιότητα μεταλλεύματος ή ορυκτού (Mineral extraction).

Οι δείκτες του ενδιάμεσου επιπέδου με της τελικής βλάβης αντιστοιχίζονται στον Πίνακα 9. Με (+) χαρακτηρίζονται τα βέβαια μονοπάτια και με (-) τα λιγότερο βέβαια.

Πίνακας 9 Πίνακας σύνδεσης επιπτώσεων ενδιάμεσου επιπέδου με τελικές βλάβες.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ/ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ (MIDPOINT)	ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ	ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑ	ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ	ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ
1. Ανθρώπινη οικοτοξικότητα	+			
2. Αναπνευστικά προβλήματα	+			
3. Ιονίζουσα ακτινοβολία	+			
4. Μείωση στοιβάδας του όζοντος		-		
5. Φωτοχημική οξείδωση	+	-		
6. Υδάτινη οικοτοξικότητα		+		
7. Οικοτοξικότητα εδάφους		+		
8. Υδάτινη οξίνιση		-		
9. Ευτροφισμός		-		
10. Οξίνιση χερσαίου εδάφους		+		
11. Ενασχόληση με τη γη		+		
12. Υπερθέρμανση του πλανήτη				+
13. Μείωση ορυκτών καυσίμων			+	
14. Μείωση ορυκτών πόρων			+	

6.4. Κανονικοποίηση

Η κανονικοποίηση πραγματοποιείται στο επίπεδο των κατηγοριών βλάβης και τα δεδομένα υπολογίζονται σε Ευρωπαϊκό επίπεδο (Δυτική Ευρώπη). Ο συντελεστής βλάβης που καταγράφεται κανονικοποιείται

διαιρώντας τη τιμή της επίδρασης ανά μονάδα εκπομπής με τη συνολική επίδραση όλων των ουσιών της συγκεκριμένης κατηγορίας για την οποία υπάρχουν οι συντελεστές χαρακτηρισμού ανά άτομο, ανά έτος (Πανταζή, 2014). Συνοπτικά, οι συντελεστές κανονικοποίησης για κάθε τελικό δείκτη φαίνονται στο Πίνακα 10. (Στεργίου Β., 2018)

Πίνακας 9 Συντελεστές κανονικοποίησης για κάθε κατηγορία τελικής βλάβης

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΒΛΑΒΗΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
Ανθρώπινη υγεία	0.068	DALY/άτομο/έτος
Ποιότητα οικοσυστήματος	13700	PDF*m2/άτομο/έτος
Κλιματική αλλαγή	9950	kg CO2/άτομο/έτος
Πόροι	152000	MJ/άτομο/έτος

7. Καταγραφή δεδομένων

Στην ενότητα παρουσιάζονται τα εισαγόμενα δεδομένα για την ορθή καταγραφή των σεναρίων στο πρόγραμμα όπως και οι υποθέσεις ή οι περιορισμοί που τέθηκαν. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα δέντρα διεργασιών κάθε περίπτωσης, όπου απεικονίζεται σχηματικά η σύνδεση μεταξύ των διαφόρων διεργασιών ολόκληρου του κύκλου ζωής των σεναρίων.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί, πως λόγω της καθολικής χρήσης της αγγλικής γλώσσας από το πρόγραμμα, τα διαγράμματα ροής και τα δέντρα δικτύου είναι κατασκευασμένα στη γλώσσα αυτή.

7.1. Στόχος και Πεδίο μελέτης

Η παρούσα μελέτη στοχεύει στην αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με διαχείριση εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης φωτοβολταϊκών πάνελ

κρυσταλλικού πυριτίου στην Ελλάδα μετά το τέλος ζωής τους. Το έργο μπορεί να χρησιμεύσει ως πηγή πληροφοριών για την αποσαφήνιση των διαφορετικών δυνατοτήτων επεξεργασίας αποβλήτων μέχρι τη τελική απόθεση.

Στη μελέτη όλων των σεναρίων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος AKZ και επικεντρώνεται στη φάση του τέλους κύκλου ζωής (TKZ, “End-of-Life”, EoL) φωτοβολταϊκών πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου.

Λαμβάνεται υπόψιν μόνο η διαχείριση του φωτοβολταϊκού πάνελ, όχι των υπόλοιπων στοιχείων του φωτοβολταϊκού συστήματος (BOS). Συνεπώς, δεν περιλαμβάνονται οι καλωδιώσεις, η βάση στήριξης, οι μετατροπείς και το κουτί καλωδίωσης. Η επιλογή αυτή βασίζεται στο γεγονός πως το BOS συνεισφέρει αμελητέα στο τελικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο Jungbluth (2005, 2012).

7.2. Συλλογή καταλόγου δεδομένων (LCI)

Για την απογραφή των δεδομένων (LCI) συλλέχθηκαν στοιχεία για τη σύσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων από εργαστηριακές μελέτες των σχολών Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τα πρωτογενή δεδομένα που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα, διασταυρώθηκαν με ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας (δευτερογενή δεδομένα). Επιπλέον, λήφθηκε υπόψη η πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενη βάση δεδομένων Ecoinvent, που περιέχεται στο λογισμικό (<https://ecoinvent.org/>). Κατά αυτόν τον τρόπο, δημιουργήθηκε μία αντιπροσωπευτική λίστα δεδομένων, προσαρμοσμένη στην Ελλάδα.

7.2.1. Λειτουργική Μονάδα

Τα πολυκρυσταλλικά πάνελ αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών πλαισίων τόσο παγκοσμίως όσο και στην Ελλάδα (Helarco, 2022). Σύμφωνα με την Εικόνα 5 (“Κατανομή διασυνδεδεμένων συστημάτων ανά ισχύ”) της Ενότητας 1.4, το μεγαλύτερο ποσοστό διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα ανήκει στη κατηγορία ισχύος 20-150kWp. Ως λειτουργική μονάδα λαμβάνεται ένας φωτοβολταϊκός σταθμός που αποδίδει κατά μέσο όρο 120kWp ηλεκτρικής ενέργειας.

Το φωτοβολταϊκό πάνελ που χρησιμοποιείται σαν πρώτη ύλη στη Σχολή Μηχανικών και Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών πρόκειται για φωτοβολταϊκό πολυκρυσταλλικού πυριτίου τύπου Hyundai HIS S24MG. Η ονομαστική ισχύς ανέρχεται σύμφωνα με τα δεδομένα του κατασκευαστή στα 248 Wp και ζυγίζει 18.5kg. (Πίνακας 10, Στοιχεία Κατασκευαστή).

Πίνακας 10 Στοιχεία κατασκευαστή φωτοβολταϊκού Hyundai HIS S248MG

Hyundai HIS S248MG		
Απόδοση	15.3%	
Ονομαστική ισχύς	248	Wp
Αριθμός κελιών	60	κελιά
Διαστάσεις	56.60	m2
Βάρος	18.5	kg

Πίνακας 11 Λειτουργική μονάδα στη παρούσα μελέτη

Λειτουργική Μονάδα	
ΦΒ πάρκα	120 kWp
Ονομαστική ισχύς	248 Wp
Βάρος	18.5 kg
Απαιτούμενα φωτοβολταϊκά	483.871 μοντούλ
Συνολικός όγκος αποβλήτων ΦΒ	8951.61 kg

Συνεπώς, η λειτουργική μονάδα για τη μελέτη της διαδικασίας αποτελείται από 483.8 μοντούλ φωτοβολταϊκών, δηλαδή η επεξεργασία 8951.6kg απορριμμάτων φωτοβολταϊκών πάνελ πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

7.2.2. Περιγραφή Συστήματος

Ως πρώτη ύλη (εισροή) σε κάθε σενάριο λαμβάνονται φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου έπειτα από παροπλισμό φωτοβολταϊκού πάρκου ονομαστικής ισχύος 120kWp συνολικού βάρους 8951.6kg. Ως χώρος εγκατάστασής τους λαμβάνεται περιοχή στα περίχωρα της Αθήνας (επιδαπέδια εγκατάσταση) μέσης απόστασης 50χλμ. από το χώρο επεξεργασίας τους (EMΠ).

Η τυπική ποσοστιαία σύσταση του πάνελ που μελετήθηκε, επιλέχθηκε βάση μετρήσεων του εργαστηρίου και βιβλιογραφικών δεδομένων για φωτοβολταϊκά παρόμοιου τύπου (Πίνακας 13). Τα παραπάνω δεδομένα τροφοδοτήθηκαν στο SimaPRO. Για διαδικασίες με θερμικές και ενεργειακές απαιτήσεις χρησιμοποιήθηκαν τιμές από τις ίδιες πηγές δεδομένων.

Πίνακας 12 Σύσταση φωτοβολταϊκού πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου στη παρούσα μελέτη

Σύσταση ΦΒ μοντούλ	
Πλαίσιο αλουμινίου	8.50%
Γυαλί	75.18%
EVA	5.85%
PVF	3.85%
Συγκολλητικά	0.90%
Si	4.70%
Ag	0.05%
Cu	0.88%
Sn	0.08%
Pb	0.02%

7.2.3. Όρια Συστήματος

Ο καθορισμός των ορίων του συστήματος είναι ζωτικής σημασίας καθώς ορίζει τα στάδια και τις διαδικασίες που περιλαμβάνονται στη μελέτη AKZ. Όσον αφορά τα επιμέρους στοιχεία της εγκατάστασης (καλωδιώσεις, κουτί διασύνδεσης), η συνεισφορά στα τελικά αποτελέσματα είναι αμελητέα. Για το λόγο αυτό, δεν γίνει αναλυτική καταγραφή τους ως διαδικασία στο SimaPRO.

Τα όρια του συστήματος αντιπροσωπεύουν το σύνολο των επιπτώσεων που σχετίζονται με τη διαχείριση των φωτοβολταϊκών μετά το τέλος κύκλου ζωής τους. Η AKZ περιλαμβάνει τα στάδια που σχετίζονται με την αποκομιδή των απορριμμάτων, τη παράδοση στην εγκατάσταση επεξεργασίας, τη περαιτέρω κατεργασία τους, τη ταξινόμηση των διαφόρων κλασμάτων των ανακτώμενων υλικών και τη τελική απόθεση των απορριμμάτων.

7.3. Περιορισμοί – Παραδοχές

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι οι διαδικασίες που περιγράφονται στα παρακάτω σενάρια, παρουσιάζουν μερικούς περιορισμούς σχετικά με τα δεδομένα.

Καταρχάς, οι μέθοδοι ανακύκλωσης που περιγράφονται βρίσκονται σε πιλοτικό επίπεδο και όχι σε βιομηχανική κλίμακα. Επομένως, τα δεδομένα που σχετίζονται με τις εισροές και τις ενεργειακές απαιτήσεις, όπως και τα καυσαέρια βασίζονται σε πειραματικές μελέτες και στην υφιστάμενη βιβλιογραφία. Οι τιμές αναμένονται ελαφρώς αυξημένες λόγω του μεγάλου όγκου εισροών σε σχέση με τις πραγματικές τιμές που θα αντιστοιχούσαν σε οικονομίες κλίμακας.

Η πλειονότητα των μελετών στην υπάρχουσα βιβλιογραφία αξιολογεί τα στάδια της παραγωγής και λειτουργίας, τα οποία συμβάλλουν σημαντικά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Το σύνολο των επιπτώσεων που σχετίζεται με τη διαχείριση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο. Η έλλειψη επαρκών διαθέσιμων πρωτογενών δεδομένων λόγω του πρώιμου σταδίου ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών αποβλήτων, δεν δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης εις βάθος των αποτελεσμάτων της μελέτης. Δεδομένα της βάσης Ecoinvent στο λογισμικό SimaPRO χρησιμοποιούνται με σχετική ακρίβεια.

Όσον αφορά τα υγρά απόβλητα, ελλείπει λεπτομερών σετ δεδομένων για τις διαδικασίες διαχείρισης και εκπομπές τους από αξιόπιστα σενάρια, επιλέχθηκε να μην μελετηθούν στη παρούσα μελέτη.

Για τα δεδομένα ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων Ecoinvent, συγκεκριμένα για το ενεργειακό μίγμα της Ελλάδος. Για το φωτοβολταϊκό κρυσταλλικού πυριτίου, το οποίο αποτελεί την κύρια εισροή των σεναρίων μας τροποποιείται το σετ δεδομένων “Photovoltaic System” βάση της σύστασης του χρησιμοποιούμενου πάνελ (Πίνακας 13).

Επιπρόσθετα, δεν λαμβάνονται υπόψιν οι μεταφορές των φωτοβολταϊκών πλαισίων μεταξύ χώρο εγκατάστασής τους, χώρο επεξεργασίας και χώρο υγειονομικής ταφής. Οι αποστάσεις στον Ελλαδικό χώρο θεωρούνται 50km μεταξύ των εγκαταστάσεων, μικρές σχετικά με τα Ευρωπαϊκά/ παγκόσμια δεδομένα. Προηγούμενες μελέτες (Jungbluth et al., Riccardo Battisti, Annalisa Corrado) παρουσιάζουν πως οι συνολικές εκπομπές που σχετίζονται με τις μεταφορές είναι αμελητέες συγκριτικά με το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα.

8. Ανάλυση σεναρίων στο SimaPRO – Αποτελέσματα

Στη παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια διεξοδική περιβαλλοντική ανασκόπηση τριών κύριων προσεγγίσεων επεξεργασίας και τελική απόθεσης φωτοβολταϊκών. Το **σενάριο I** εκδηλώνει τη συνήθη έως σήμερα απόρριψη των φωτοβολταϊκών αποβλήτων σε ΧΥΤΑ αδρανών υλικών χωρίς προεπεξεργασία. Το **σενάριο II** χρησιμοποιώντας τη μέθοδο σταθεροποίησης αποβλήτων, παράγει τσιμεντοκονία προς χρήση στη τσιμεντοβιομηχανία. Τέλος, το **σενάριο III** πρόκειται για μία καινοτόμα διαδικασία ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών που αποσκοπεί στην ανάκτηση πολύτιμων υλικών.

Η σύγκριση των μεθόδων διαχείρισης φωτοβολταϊκών αποβλήτων στο καθορισμό της αποδοτικότητάς τους, αξιολογώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τις ποσότητες των ανακτώμενων υλικών, τον όγκο των παραγόμενων αποβλήτων, τη κατανάλωση αλλά και την ανάκτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

8.1. Σενάριο I: Απόθεση φωτοβολταϊκών αποβλήτων σε ΧΥΤΑ χωρίς προεπεξεργασία

Το βασικό σενάριο (αναφοράς) που εξετάζεται είναι η απευθείας απόθεση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων από ένα φωτοβολταϊκό πάρκο σε ΧΥΤΑ. Τη τρέχουσα περίοδο, τα μεγαλύτερο μέρος των φωτοβολταϊκών αποβλήτων οδηγείται σε χώρους υγειονομικής ταφής αδρανών αποβλήτων, χωρίς αυτά να επεξεργαστούν προγενέστερα. Δεν απαιτείται διαχωρισμός από τα οικιακά απορρίμματα, μειώνοντας το ενεργειακό και οικονομικό κόστος της διεργασίας.

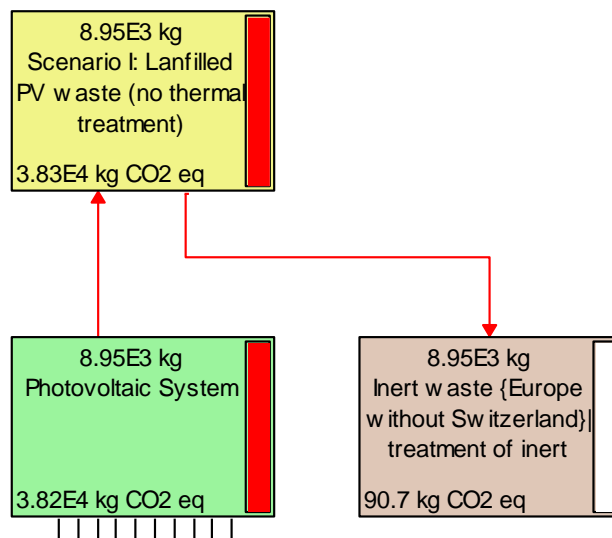


Διάγραμμα 1 Διάγραμμα ροής Σεναρίου I: Απόθεση σε ΧΥΤΑ

Αφού ορίστηκε η ροή του υλικού, τα δεδομένα τοποθετήθηκαν στο λογισμικό SimaPRO για τη διενέργεια της ανάλυσης. Η ροή παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2 με μία μικρή αποκοπή, για να υπάρξει καλύτερη επισκόπηση των κυριότερων διαδικασιών και ροών υλικών.

Όπως φαίνεται από το δέντρο της διεργασίας, το στάδιο της απόρριψης εμφανίζει χαμηλές εκπομπές (90.7kg CO₂eq). Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης (Διάγραμμα 19), η απόρριψη σε ΧΥΤΑ εκδηλώνει

αμελητέα επίδραση στο περιβάλλον συγκριτικά με το στάδιο παραγωγής των φωτοβολταϊκών. Τα κελιά πυριτίου οφείλουν την υψηλή περιβαλλοντική υποβάθμιση στη παραγωγή της γκοφρέτας πυριτίου χάρη στην ενεργοβόρα και μετρίως τοξική φύση της διύλισης του πυριτίου.



Διάγραμμα 2 Δέντρο διεργασιών SimaPRO Σεναρίου I: Απόθεση σε ΧΥΤΑ

Οι περιβαλλοντικές επιδράσεις του Σεναρίου I είναι πραγματικά μηδαμινές, με τη μεγαλύτερη επίδρασή τους να είναι μία συμμετοχή 2.5% στη οξίνιση του υδάτινου περιβάλλοντος. Η οξίνιση του υδάτινου περιβάλλοντος προκαλείται κυρίως από το αέριο CO₂ της ατμόσφαιρας που διαλύεται στο νερό. Αλυσιδωτά, οδηγεί σε μείωση του pH του νερού, καθιστώντας το υδάτινο περιβάλλον πιο όξινο.

Τα φωτοβολταϊκά θεωρούνται αδρανή, καθώς δεν αποσυντίθενται με τη πάροδο του χρόνου στα ΧΥΤΑ. Περιέχουν, όμως, μικρή ποσότητα (0.2%) μολύβδου. Κατά την απόθεση σε ΧΥΤΑ, η απουσία ορθού σχεδιασμού στεγανότητας μπορεί να οδηγήσει σε έκπλυση του μολύβδου στο έδαφος και κατ' επέκταση στον υδροφόρο ορίζοντα. Πιο αναλυτικά, το ήδη όξινο υδάτινο περιβάλλον επηρεάζει τη διαλυτότητα του μολύβδου, αυξάνοντας τη τοξικότητά του στη θαλάσσια βιοποικιλότητα και τον ευτροφισμό (Botte A. et al, 2022).

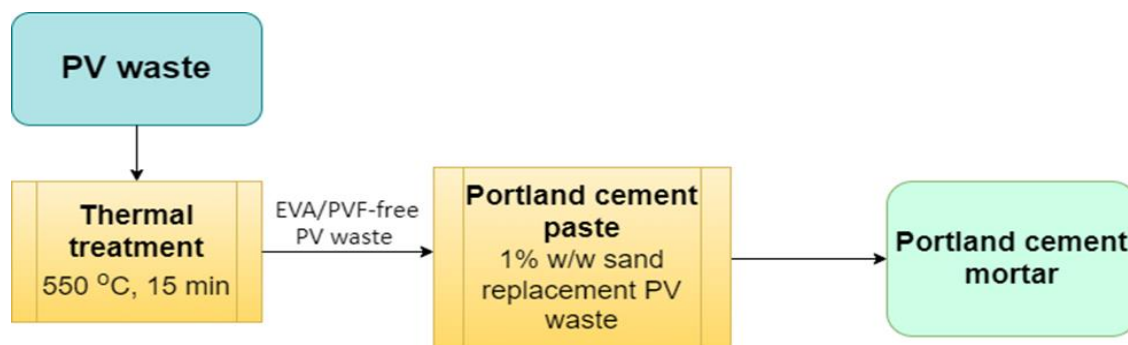
Από την άλλη πλευρά, στη μέθοδο αυτή δεν λαμβάνεται υπόψιν η απώλεια πόρων και το πρόβλημα του ολοένα αυξανόμενου όγκου ηλεκτρονικών αποβλήτων. Η άμεση απόρριψη σε ΧΥΤΑ συμβάλλει στη

διαίωσιση του χωροταξικού προβλήματος με ανάγκη δημιουργίας νέων χώρων ταφής απορριμμάτων. Επιπλέον, δεν λαμβάνει χώρα ανάκτηση πολύτιμων υλικών και η δυνητική επαναχρησιμοποίηση τους. Κατά αυτόν τον τρόπο, η ανάγκη εξόρυξης νέων πρώτων υλών αυξάνει με έμμεσο τρόπο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του σεναρίου αυτού, το οποίο δεν παρουσιάζεται στην ανάλυση του λογισμικού.

8.2. Σενάριο II: Σταθεροποίηση φωτοβολταϊκών αποβλήτων σε τσιμεντοκονία

Η σταθεροποίηση αποβλήτων σε τσιμεντοκονία αποτελεί το δεύτερο σενάριο που μελετήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού SimaPRO. Η μέθοδος στοχεύει στη σταθεροποίηση του τοξικού μολύβδου προς αποφυγή στραγγισμάτων.

Το προκείμενο σενάριο βασίζεται σε πειραματικά στοιχεία εργαστηριακής μελέτης του Εργαστηρίου Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας, Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Pavlopoulos et al., 2022). Η κατεργασία της σταθεροποίησης χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη το θερμικά επεξεργασμένο και κονιορτοποιημένο μικτό κλάσμα των φωτοβολταϊκών πάνελ (Στάδιο 1, Εδάφιο 4.5). Στο Διάγραμμα 4 αποτυπώνεται το μοντέλο της διαδικασίας σταθεροποίησης φωτοβολταϊκών αποβλήτων σε τσιμεντοκονία .



Διάγραμμα 3 Διάγραμμα ροής Σεναρίου II: Σταθεροποίηση μίγματος αποβλήτων σε τσιμεντοκονία.

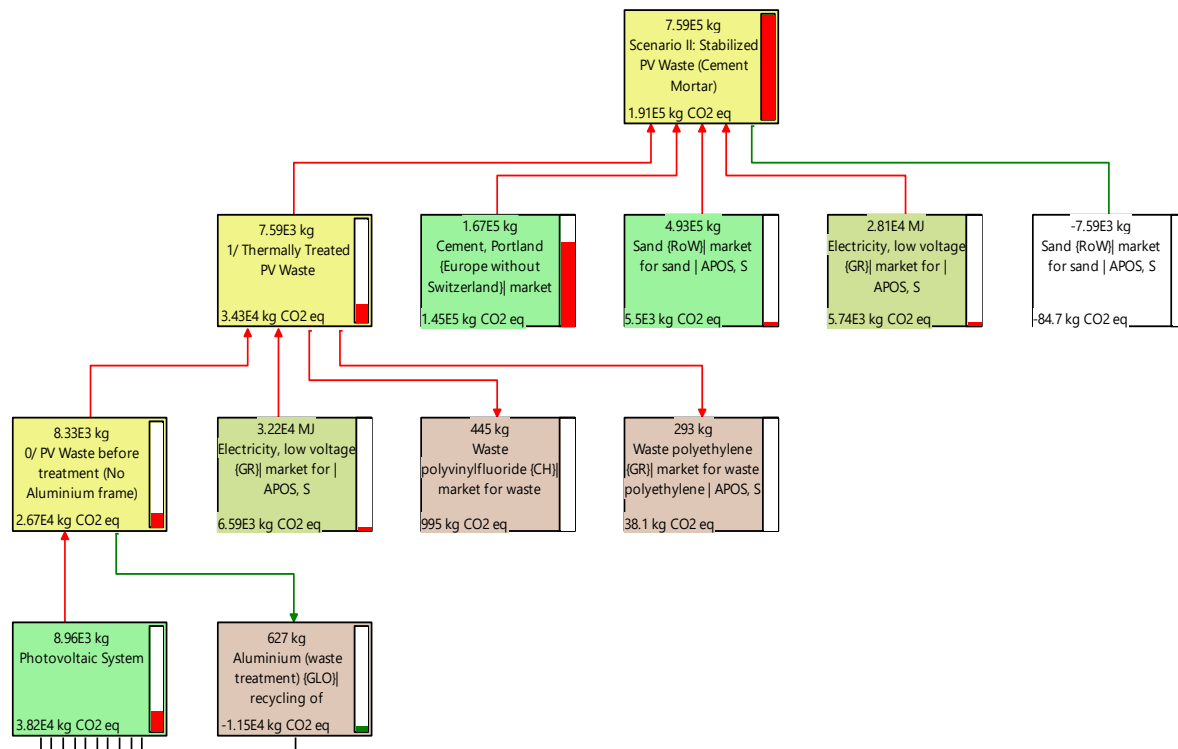
Η αναλογία νερού προς τσιμέντο Portland είναι 0.55 και η αναλογία άμμου προς τσιμέντο Portland είναι 3. Επιπλέον, προστίθεται στο μίγμα άμμος ανθρακικού ασβεστίου. Τα φωτοβολταϊκά απόβλητα αντικαθιστούν 1% κ.β. άμμου ανθρακικού ασβεστίου (Σενάριο IIa) και μελετώνται συγκριτικά τα αποτελέσματα με την απουσία αποβλήτων στο μίγμα (Σενάριο IIb). Η ανάδευση γίνεται στα 800W για 3

λεπτά προς παραλαβή του τελικού προϊόντος. Στο λογισμικό SimaPRO για τη μοντελοποίηση των δύο υπο-σεναρίων εισάγονται τα δεδομένα, όπως παρουσιάζονται αναλυτικά στο Πίνακα 13.

Πίνακας 13 Δεδομένα απογραφής LCIA Σεναρίου II: Σταθεροποίηση μίγματος αποβλήτων σε τσιμεντοκονία

Scenario IIa: Photovoltaic Waste stabilization (after thermal treatment)	
Inputs from technosphere: materials/fuels	
Thermally treated photovoltaic waste (No EVA/PVF)	7.59 tn
Sand {ROW} market for sand	493.65 tn
Cement, Portland {Europe without Switzerland} market for	166.75 tn
Water, unspecified natural origin, GR	91.75 tn
Electricity, low voltage {GR} market for	7798.28 kWh
Outputs to technosphere: Avoided products	
Sand {ROW} market for sand	7.59 tn
Outputs from technosphere: materials/fuels	
Cement mortar	758.69 tn
Scenario IIb: Cement Mortar	
Inputs from technosphere: materials/fuels	
Sand {ROW} market for sand	500.19 tn
Cement, Portland {Europe without Switzerland} market for	166.75 tn
Water, unspecified natural origin, GR	91.75 tn
Electricity, low voltage {GR} market for	7798.28 kWh
Outputs from technosphere: materials/fuels	
Cement mortar	758.69 tn

Το διάγραμμα ροής υπολογισμού περιβαλλοντικών επιπτώσεων για το μίγμα με απόβλητα, όπως διαμορφώνεται από το λογισμικό:



Διάγραμμα 4 Δέντρο διεργασιών SimaPRO Σεναρίου II: Σταθεροποίηση μίγματος φωτοβολταϊκών αποβλήτων σε τσιμεντοκονία

Το συγκριτικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο αναπαρίσταται στο Διάγραμμα 19. Συνολικά, η κατεργασία εκλύει 156.7 tn CO₂eq, ή 17.5 kg CO₂eq ανά κιλό φωτοβολταϊκού αποβλήτου.

Η πιο επιβλαβής επίδραση οφείλεται στις εκπομπές από τη παραγωγή του τσιμέντου Portland, μίας ιδιαίτερα ενεργοβόρας διαδικασίας (0.86 kg CO₂eq/kg). Συγκριτικά, η άμμος συνεισφέρει μόλις με 0.01 kg CO₂Eq/kg. (Διάγραμμα 20)

Η κατανομή των παραπάνω επιβαρύνσεων επηρεάζει κυρίως τις ενδιάμεσες κατηγορίες της εξόρυξης μεταλλευμάτων (Mineral Extraction), της οικοτοξικότητας (Ecotoxicity) των καρκινογόνων (Carcinogenics) και ανόργανων ουσιών που βλάπτουν το αναπνευστικό σύστημα (Respiratory Inorganics) σύμφωνα με το Διάγραμμα 21. Συνεπώς, παρατηρείται τελική βλάβη τόσο στην ανθρώπινη υγεία όσο και στη ποιότητα του οικοσυστήματος (Διάγραμμα 22).

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυξάνονται με την αντικατάσταση 1% κ.β. άμμου ανθρακικού ασβεστίου από μίγμα αποβλήτων, καθώς συμπεριλαμβάνονται αυτόματα από το πρόγραμμα οι εκπομπές ρύπων από τη παραγωγή των φωτοβολταϊκών.

Στη πραγματικότητα, εισάγοντας 0% Allocation, δηλαδή μηδενικής συνεισφοράς των εκπομπών που συνδέονται με την επεξεργασία του φωτοβολταϊκού απόβλητου, παρατηρείται μείωση των ρύπων της τάξης των 84.7kg CO₂eq λόγω χρήσης 1% λιγότερης άμμου.

Βέβαια, η σταθεροποίηση των αποβλήτων σε τσιμεντοκονία έχει επιπλέον περιβαλλοντικά οφέλη που δεν αντικατοπτρίζονται στα παραπάνω διαγράμματα (Mácaloná, K, 2021). Συμβάλλει στη μείωση του όγκου των απορριπτόμενων αποβλήτων και εκμηδενίζει τα τοξικά στραγγίσματα από τον μόλυβδο στις χωματερές. Ταυτόχρονα, η επαναχρησιμοποίηση τους ως ωφέλιμο προϊόν συνεισφέρει στις μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις για εξόρυξη και επεξεργασία νέας ποσότητας άμμου ανθρακικού ασβεστίου.

8.3. Σενάριο III: Υδρομεταλλουργική επεξεργασία φωτοβολταϊκών αποβλήτων

Η συντριπτική πλειοψηφία των φωτοβολταϊκών αποβλήτων επιδέχονται κάποια επεξεργασία μετά το ΤΚΖ. Η πρακτική αυτή ακολουθείται στην Ελλάδα για μικρές ποσότητες φωτοβολταϊκών πλαισίων, κυρίως για την ανάκτηση και ανακύκλωση γυαλιού. Βασικό πλεονέκτημα αυτού του σεναρίου είναι η ανάκτηση και ανακύκλωση μεγάλου όγκου του πλαισίου και η ικανοποίηση των τρεχουσών περιβαλλοντικών απαιτήσεων της ελληνικής νομοθεσίας.

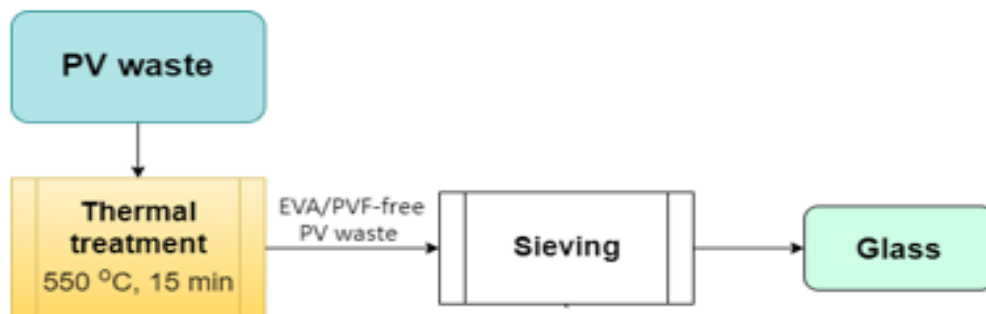
Οι εξειδικευμένες γραμμές ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών είναι ελάχιστες και βρίσκονται σε πιλοτικό ή πρώιμο στάδιο. Οι υδρομεταλλουργικές μέθοδοι δεν είναι τόσο οικονομικές όσο των δύο παραπάνω σεναρίων, αλλά πλεονεκτούν στην εκλεκτικότητά τους για την ανάκτηση πολύτιμων και σπάνιων μετάλλων.

Ως σενάριο επεξεργασίας λαμβάνεται η πρότυπη διεργασία της υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας, η οποία παρουσιάστηκε λεπτομερώς στο Εδάφιο 4.5. και ως υποσενάρια η ανάκτηση των επιμέρους υλικών (γυαλί, αλουμίνιο, πυρίτιο, ασήμι) που απαρτίζουν το φωτοβολταϊκό.

8.4. Σενάριο IIIa: Ανάκτηση γυαλιού

Το γυαλί ως αδρανές υλικό δεν αποσυντίθεται μετά την απόρριψη του σε ΧΥΤΑ. Λόγω του μεγάλου ποσοστού του στο φωτοβολταϊκό πάνελ κρίνεται ωφέλιμο περιβαλλοντικά και οικονομικά να συλλέγεται, να διαχωρίζεται και να ανακυκλώνεται. Η ικανότητα να ανακυκλώνεται αέναα χωρίς απώλεια ποιότητας, καθιστά την ανάκτηση και διαχείριση του μετά το ΤΚΖ ελκυστικό εγχείρημα.

Το φωτοβολταϊκά απόβλητα συλλέγονται και μεταφέρονται στη μονάδα επεξεργασίας. Αρχικά, αφαιρείται το πλαίσιο αλουμινίου και οδηγείται προς ανακύκλωση (Στάδιο 0). Στη συνέχεια, υπό θερμότητα, διασπώνται πλήρως τα οργανικά ενθυλακωτικά EVA και PVF (Στάδιο 1). Βάση βιβλιογραφίας δεν ανακυκλώνονται προς χρήσιμη δευτερογενή πρώτη ύλη. Μετά τη θερμική επεξεργασία, ακολουθεί κοσκίνηση και χειροκίνητος διαχωρισμός των επιμέρους υλικών. Τα υπολείμματα υφίστανται λειοτρίβηση μέχρι μεγέθους 90μm εργαστηριακό μύλο 2200W. (Στάδια 2, 3). Παραλαμβάνεται γυαλί ποσότητας 6448.87kg (Διάγραμμα 7).



Διάγραμμα 5 Διάγραμμα ροής Σεναρίου IIIa: Ανάκτηση γυαλιού

Το σετ δεδομένων των τριών πρώτων σταδίων περιλαμβάνει τις εισροές και εκροές πρώτων υλών και τις ηλεκτρικές απαιτήσεις κάθε διεργασίας:

Πίνακας 14 Δεδομένα απογραφής LCIA Σεναρίου IIIa: Ανάκτηση γυαλιού

0/ PV Waste before treatment		
Inputs from technosphere: materials/ fuels		
Photovoltaic System	8951.61	kg
Outputs to technosphere: materials/ fuels		
PV Waste before treatment (No Aluminium frame)	8325.00	kg
Aluminium	626.61	kg
1/ Thermal Treatment		
Inputs from technosphere: materials/ fuels		
PV Waste before treatment (No Aluminium frame)	8325.00	kg
Electricity, low voltage {GR} market for	8951.61	kWh
Outputs to technosphere: materials/ fuels		
Thermally treated photovoltaic waste (No EVA/P	7586.91	kg
Waste polyvinylfluoride {GR} market for waste P	445.14	kg
Waste polyethylene {GR} market for waste PE	292.95	kg
2/ Sieving & Grinding		
Inputs from technosphere: materials/ fuels		
Thermally treated photovoltaic waste	7586.91	kg
Electricity, low voltage {GR} market for	447.58	kWh
Outputs to technosphere: materials/ fuels		
Sieved PV Waste (towards Hydrometallurgical process)	569.02	kg
Metal parts for electronics scrap, in blister-copper	75.87	kg
Glass	6448.87	kg
Ash (Final waste)	493.15	kg
3/ Grinding		
Inputs from technosphere: materials/ fuels		
Sieved PV Waste (towards Hydrometallurgical process)	569.02	kg
Outputs to technosphere: materials/ fuels		
Grinded 90µm PV flakes (Si-Electrode)	569.02	kg

Όπως αποδεικνύεται από την ανάλυση του συστήματος από το πρόγραμμα SimaPRO, το σύνολο των φωτοβολταϊκών αποβλήτων στη τυπική γραμμή ανάκτησης γυαλιού καταναλώνουν αθροιστικά 34.010 MJ ενέργειας και εκπέμπουν συνολικά 7965.3 kg CO₂eq (Πίνακας 15).

Πίνακας 15 Ανθρακικό αποτύπωμα για τα Στάδια 0-3

Στάδιο 0: Απομάκρυνση πλαίσιο αλουμινίου	-11500 kg CO₂eq
(-) Ανακύκλωση αλουμινίου	11500 kg CO ₂ eq
Στάδιο 1: Θερμική επεξεργασία	7623 kg CO₂eq
(+) Ηλεκτρική ενέργεια (32200 MJ)	6590 kg CO ₂ eq
(+) Απόβλητα PVF	995 kg CO ₂ eq
(+) Απόβλητα PE	38 kg CO ₂ eq
Στάδιο 2/3: Κοσκίνισμα & λειοτρίβιση	342.3 kg CO₂eq
(+) Ηλεκτρική ενέργεια (1610 MJ)	330 kg CO ₂ eq
(+) Απόβλητα χαλκού	12.3 kg CO ₂ eq

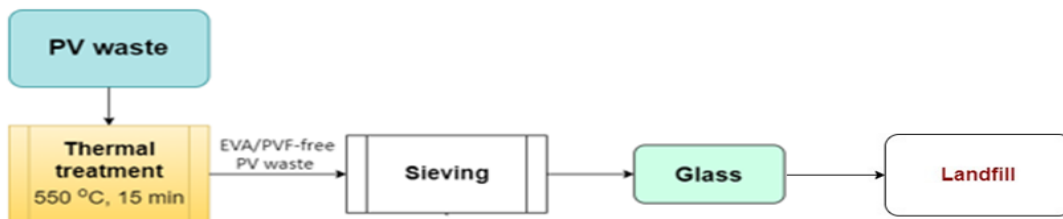
Το μεγαλύτερο μέρος (95%) των συνολικών εκπομπών αποδίδεται στη θερμική επεξεργασία των πλαισίων για την αποσυναρμολόγησή τους. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί πως τα δεδομένα εισροών προκύπτουν από εργαστηριακές μελέτες (Theocharis et al, 2022) για μικρές ποσότητες αποβλήτων. Το σενάριο αυτό εξετάζει την ανακύκλωση γυαλιού από φωτοβολταϊκό πάρκο 120kWp και γιαυτό αναμένονται αποκλίσεις. Βάση οικονομία κλίμακας, η ηλεκτρική ενέργεια για τη θερμική επεξεργασία τέτοιου όγκου, προβλέπεται αρκετά χαμηλότερη από αυτή που έχει χρησιμοποιηθεί.

Στις παραπάνω τιμές δεν συνυπολογίζεται το στάδιο της απομάκρυνσης του πλαισίου αλουμινίου και ανακύκλωσής του, καθώς δεν είναι στο όρια της παρούσας μελέτης.

Η μετέπειτα διαχείριση του γυαλιού αναλύεται σε 3 υποσενάρια: τη τελική διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής αδρανών υλικών, την ανακύκλωση του και τη σταθεροποίηση σε τσιμεντοκονία.

8.4.1. Σενάριο IIIa(i): XYTA

Το γυαλί που παραλαμβάνεται μετά τη λειοτρίβιση οδηγείται σε χωματερή αδρανών υλικών. Χώρος υγειονομικής ταφής αδρανών αποβλήτων σημαίνει μια εγκατάσταση διάθεσης που δέχεται μόνο απόβλητα που δεν θα προκαλέσουν ή δεν είναι πιθανό να προκαλέσουν παραγωγή στραγγίσματος περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος.

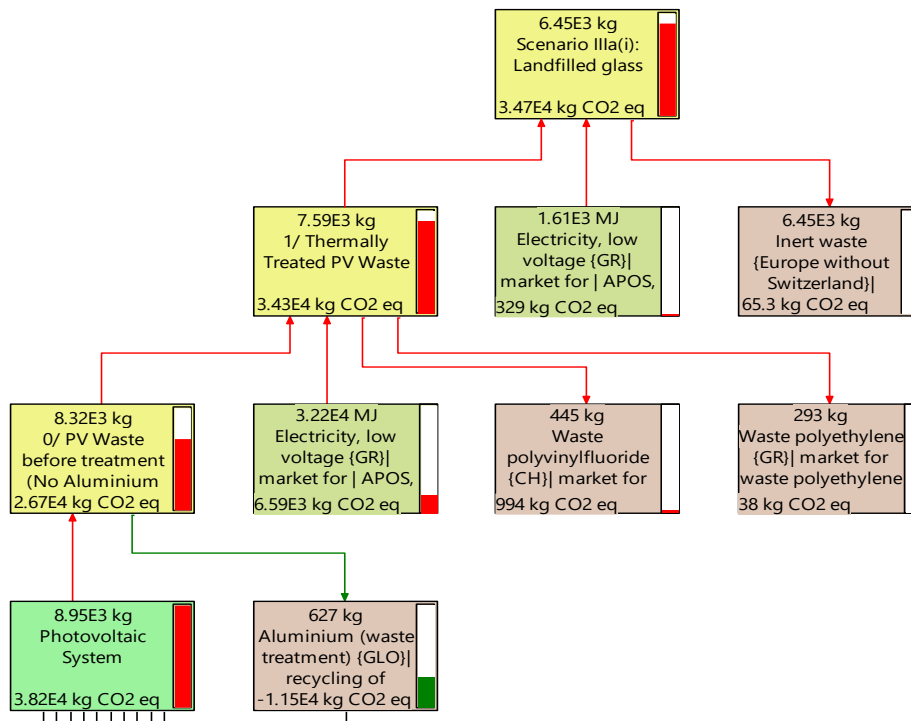


Διάγραμμα 6 Διάγραμμα ροής Σεναρίου IIIa(i): Απόθεση σε ΧΥΤΑ

Σύμφωνα με το λογισμικό (Διάγραμμα 7), η τελική διάθεση της συνολικής ποσότητας απορριπτόμενου γυαλιού ισοδυναμεί με εκπομπές 65.3 kg CO₂eq.

Η περιβαλλοντική επιβάρυνση από το τελικό στάδιο απόθεσης παρουσιάζεται μηδαμινή σε σχέση με το σύνολο των εκπομπών της κατεργασίας. Η εκπλυσιμότητα και η οικοτοξικότητα των στραγγισμάτων είναι ασήμαντες. Ιδίως σημαντικό είναι να μην τίθεται κίνδυνος η ποιότητα των επιφανειακών και/ή των υπόγειων υδάτων. (Twardowska, 2004)

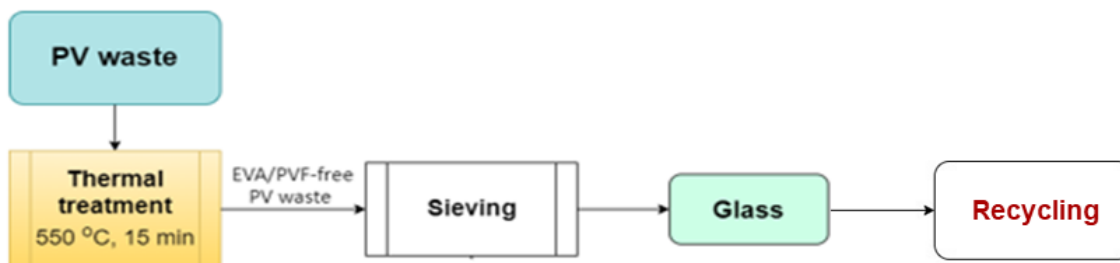
Στη πραγματικότητα, όμως, εγκυμονούν κίνδυνοι στις χωματερές αδρανών υλικών εξαιτίας του αυξημένου όγκου και των μειωμένων πόρων, όπως έχουν ήδη αναφερθεί στο Σενάριο I.



Διάγραμμα 7 Δέντρο διεργασιών Simapro Σεναρίου IIIa(i): Απόθεση σε ΧΥΤΑ

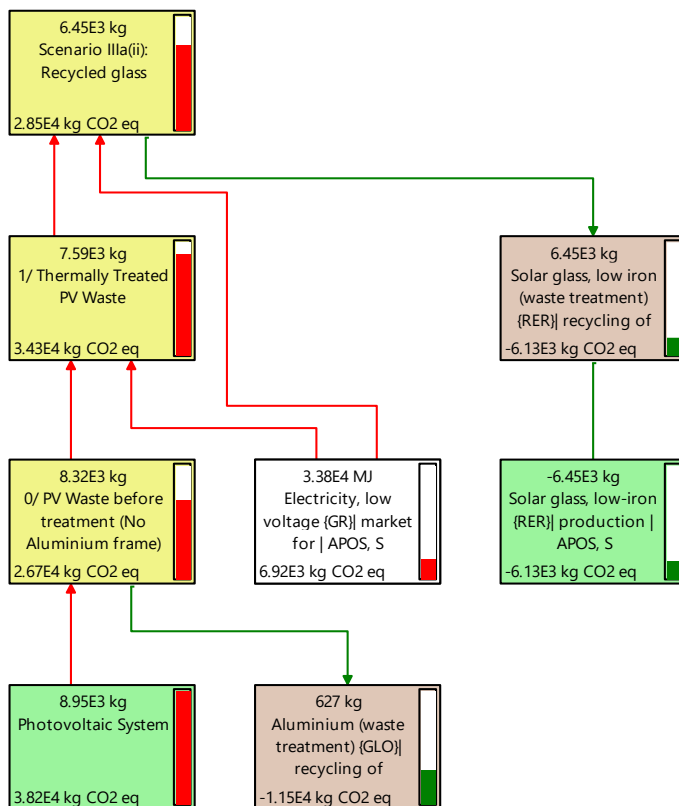
8.4.2. Σενάριο IIIa(ii): Ανακύκλωση

Το δεύτερο σενάριο διαχείρισης του γυαλιού περιλαμβάνει την ανακύκλωσή του γυαλιού που έχει απομακρυνθεί έπειτα από κοσκίνισμα και λειοτρίβιση (Στάδια 3,4). Επιτυγχάνεται έως και 94% ανακύκλωση γυαλιού το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε νέα προϊόντα (downcycling, upcycling).



Διάγραμμα 8 Διάγραμμα ροής Σεναρίου IIIa(ii): Ανακύκλωση

Στο λογισμικό SimaPRO εισάγεται το γυαλί ως εισροή. Ως σενάριο απόρριψης του ορίζεται η ανακύκλωση του γυαλιού των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Συγκεκριμένα, εισάγεται ως: «Solar glass, low iron (waste treatment) | recycling of» της βιβλιοθήκης Ecoinvent, καθώς ταιριάζει στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του. Το διάγραμμα ροής παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 9 Δέντρο διεργασιών SimaPRO Σεναρίου IIIa(ii): Ανακύκλωση

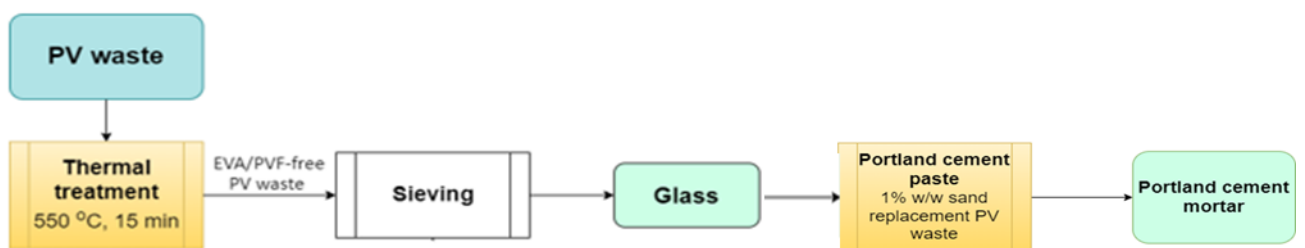
Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης, η ανακύκλωση του γυαλιού συνεισφέρει θετικά στη προστασία του περιβάλλοντος. Το Διάγραμμα 23 παρουσιάζει κάποια ενδιαφέροντα αποτελέσματα σχετικά με το σενάριο αυτό. Παρατηρείται 20% βελτίωση στις κατηγορίες Οξίνιση του χερσαίου (“Terrestrial acid/ nitrification”) και υδάτινου περιβάλλοντος (“Aquatic acidification”). Επιπλέον, συνεισφέρει κατά 10% στη μείωση της καταστροφή του όζοντος (“Ozone depletion”).

Η μείωση των δυσμενών ενδιάμεσων επιπτώσεων οφείλεται στις μειωμένες ανάγκες για παραγωγή νέου γυαλιού. Συγκεκριμένα, ένας τόνος γυαλιού που ανακυκλώνεται εξοικονομεί περισσότερο από ένα τόνο πρώτων υλών που απαιτούνται για τη δημιουργία νέου γυαλιού, συμπεριλαμβανομένων 1.300 κιλών άμμου, 410 κιλά σόδας και 380 κιλά ασβεστόλιθου. Σύμφωνα με τη WWF, το ανακυκλωμένο γυαλί που

παράγεται μειώνει τη σχετική ατμοσφαιρική ρύπανση κατά 20% και τη σχετική ρύπανση των υδάτων κατά 50%.

8.4.3. Σενάριο IIIa(iii): Σταθεροποίηση

Η σταθεροποίηση του γυαλιού σε τσιμεντοκονία αποτελεί το τρίτο σενάριο διαχείρισης του γυαλιού. Στο Διάγραμμα 10 αποτυπώνεται το μοντέλο της διαδικασίας.



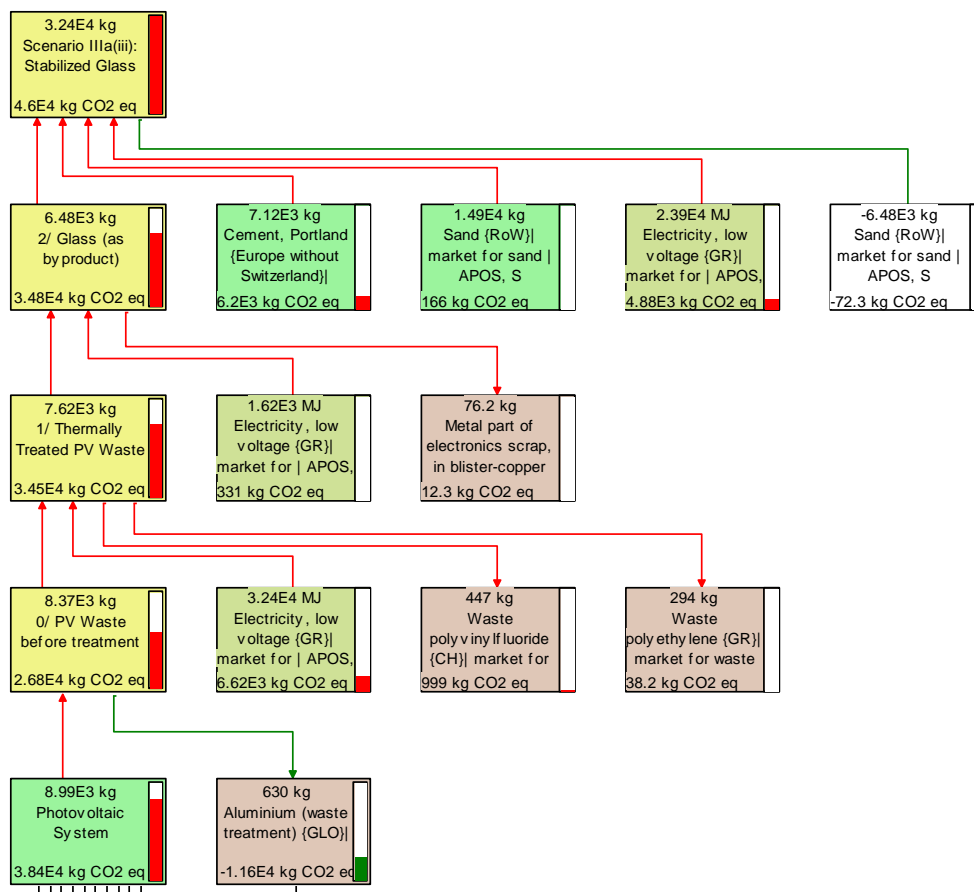
Διάγραμμα 10 Διάγραμμα ροής Σεναρίου IIIa(iii): Σταθεροποίηση

Το προκείμενο σενάριο βασίζεται σε ίδιες αναλογίες πειραματικών στοιχείων με το Σενάριο II «Σταθεροποίηση φωτοβολταϊκών αποβλήτων σε τσιμεντοκονία». Η κατεργασία της σταθεροποίησης χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη τη συνολική ποσότητα του γυαλιού (6448.79kg). Η αναλογία νερού προς τσιμέντο Portland είναι 0.55 και η αναλογία άμμου προς τσιμέντο Portland είναι 3. Επιπρόσθετα, προστίθεται στο μίγμα γυαλί, σε ποσότητα τέτοια που αντικαθιστά 20% κ.β. άμμου ανθρακικού ασβεστίου. Η ανάδευση γίνεται στα 800W για 3 λεπτά προς παραλαβή του τελικού προϊόντος. Αναλυτικά, τα δεδομένα που εισάγονται στο λογισμικό καταγράφονται στο Πίνακα 16:

Πίνακας 16 Δεδομένα απογραφής LCIA Σεναρίου IIIa(iii): Σταθεροποίηση

Scenario IIIa(iii): Glass Waste stabilization	
Inputs from technosphere: materials/fuels	
Glass	6.48 tn
Sand {ROW} market for sand	14.88 tn
Cement, Portland {Europe without Switzerland}	7.12 tn
Water, unspecified natural origin, GR	3.92 tn
Electricity, low voltage {GR} market for Cut-off, U	6627.6 kWh
Outputs to technosphere: Avoided products	
Sand {ROW} market for sand	6.48 tn
Outputs from technosphere: materials/fuels	
Stabilized Glass Waste (in Cement Mortar)	32.40 tn

Το ολοκληρωμένο δέντρο διεργασιών του σεναρίου:



Διάγραμμα 11 Δέντρο διεργασιών SimaPRO Σεναρίου IIIa(iii): Σταθεροποίηση

Σε αντιστοιχία με το Σενάριο II, η διεργασία της σταθεροποίησης παρουσιάζει υψηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο (Διάγραμμα 20). Το τσιμέντο και οι υψηλές απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια (23900 MJ) για την ανάδευση του μίγματος καθιστούν τη μέθοδο οικολογικά ασύμφορη. Οι ενδιάμεσες βλάβες επηρεάζονται από αυτά σε διαφορετικό ποσοστό από. Για παράδειγμα, το τσιμέντο Portland εμφανίζει τις μεγάλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις πρωτίστως στις κατηγορίες της Υπερθέρμανσης του πλανήτη («Global Warming») και των Καρκινογόνων και μη ουσιών σε ποσοστό 55-60%, κάτι πολύ λογικό αν αναλογιστεί κανείς τις διαδικασίες παραγωγής του.

8.4.4. Συγκριτικά αποτελέσματα Σεναρίου IIIa

Στο Διάγραμμα 25 μπορούν εύκολα να διακριθούν οι διαφορές μεταξύ των τριών σεναρίων. Φαίνεται αναλυτικά το μέγεθος των επιβαρύνσεων για τις εκάστοτε ενδιάμεσες κατηγορίες. Ο Πίνακας 17 παρουσιάζει τις συνολικές εκπομπές ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα για τα τρία υποσενάρια:

Πίνακας 17 Συγκριτικά αποτελέσματα υποσεναρίων IIIa (Συνολικά και τελική διεργασία)

Σενάριο IIIa: Ανάκτηση γυαλιού (Συνολικά)				
Υποσενάριο	Συνολικές εκπομπές		Εκπομπές/kg αποβλήτου	
IIIa(i)	34700	kg CO ₂ eq	3.88	kg CO ₂ eq/kg αποβλήτου
IIIa(ii)	28500	kg CO ₂ eq	3.18	kg CO ₂ eq/kg αποβλήτου
IIIa(iii)	46000	kg CO ₂ eq	5.14	kg CO ₂ eq/kg αποβλήτου

Σενάριο IIIa: Ανάκτηση γυαλιού (τελική διεργασία)				
Υποσενάριο	Συνολικές εκπομπές		Εκπομπές/kg αποβλήτου	
IIIa(i)	65.3	kg CO ₂ eq	0.01	kg CO ₂ eq/kg αποβλήτου
IIIa(ii)	-6130	kg CO ₂ eq	-0.68	kg CO ₂ eq/kg αποβλήτου
IIIa(iii)	11246	kg CO ₂ eq	1.26	kg CO ₂ eq/kg αποβλήτου

Το Σενάριο IIIa(ii), η ανακύκλωση του γυαλιού, όπως είναι αναμενόμενο, εμφανίζει τα καλύτερα αποτελέσματα σε όλες τις περιβαλλοντικές κατηγορίες, έχοντας αρνητικό πρόσημο, δηλαδή δεν εκπέμπει ρύπους. Αποτελεί, αδιαμφισβήτητα, τη καλύτερη λύση από τις παρούσες τεχνολογίες. Η οξίνιση του εδάφους (“Terrestrial acid/nutrication”) και η υπερθέρμανση του πλανήτη (“Global Warming”) είναι οι δύο κατηγορίες με τις μεγαλύτερες μειώσεις της τάξης του 35%.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ανακύκλωση χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια, η οποία μεταφράζεται σε λιγότερα ορυκτά καύσιμα που καίγονται και αλυσιδωτά μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή. Αυτή η τάση επιβεβαιώνεται και στο Διάγραμμα 26.

Το Σενάριο IIIa(i), η απόθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής αδρανών υλικών, επηρεάζει περισσότερο το περιβαλλοντικό φορτίο. Αν και δεν υπάρχουν ενεργειακές απαιτήσεις ή εκπομπή σημαντικής τιμής ρύπων (0.01kg CO₂eq/kg αποβλήτου) για την ολοκλήρωση του σεναρίου, η ταφή του γυαλιού δεν προσδίδει κανένα περαιτέρω περιβαλλοντικό και οικονομικό όφελος.

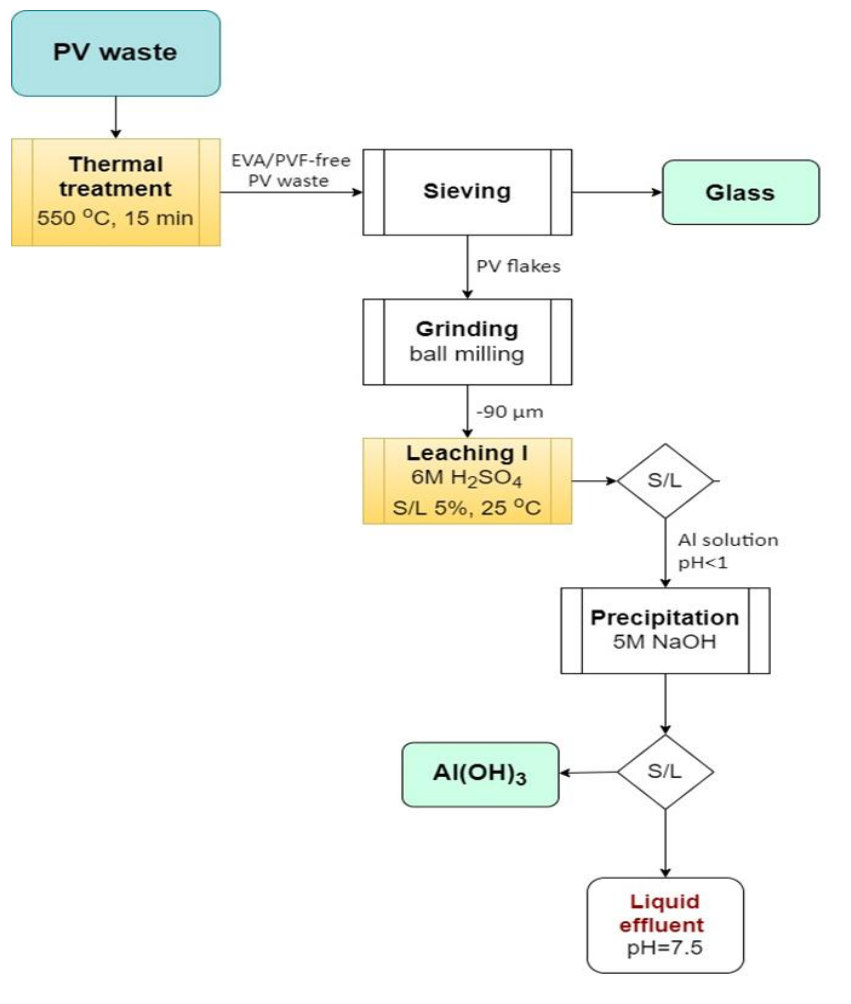
Το Σενάριο IIIa(iii), η σταθεροποίηση του γυαλιού σε τσιμεντοκονία, φαίνεται να παράγει τις πιο δυσμενείς επιπτώσεις με 1.26kg CO₂eq/kg αποβλήτου. Ενώ παράγεται χρήσιμο προϊόν, οι πρώτες ύλες που συμμετέχουν στη μήτρα της τσιμεντοκονίας αλλά και η απαιτήσεις σε ηλεκτρικό ρεύμα καθιστούν τη διαδικασία αυτή ιδιαίτερα ενεργοβόρα (Διάγραμμα 20).

8.5. Σενάριο IIIb: Ανάκτηση αλουμινίου

Η βιομηχανία του αλουμινίου πρωταγωνιστεί στη προσπάθεια περιορισμού των εκπομπών ρύπων. Η ανάκτηση και ανακύκλωσή του είναι το σημαντικότερο βήμα προς μία οικονομία ενέργειας. Μάλιστα, η πρωτογενή παραγωγή 1kg αλουμινίου απαιτεί 14kWh, ενώ η ανακύκλωση ίδιας ποσότητας από σκραπ μόνο το 5% αυτής. Δικαίως, λοιπόν, χαρακτηρίζεται σαν το "πράσινο" μέταλλο.

Η πρώτη ροή αλουμινίου προκύπτει από την αποσυναρμολόγηση του πλαισίου αλουμινίου (8.5%) κατά το πρώτο στάδιο της διεργασίας. Σύμφωνα με το λογισμικό, η ανακύκλωση του μειώνει τις εκπομπές κατά 11500 kg CO₂eq (ή 18.34kg CO₂eq/kg Al).

Η δεύτερη ροή αλουμινίου είναι αποτέλεσμα ανάκτησης του μετά τη πρώτη εκχύλιση. Το κονιορτοποιημένο απόβλητο, έπειτα από το κοσκίνισμα (Στάδια 2,3) μεταφέρεται σε κατεργασία εκχύλισης (Στάδιο 4).



Διάγραμμα 12 Διάγραμμα ροής Σεναρίου IIIb: Ανάκτηση αλουμινίου

Με προσθήκη διαλύματος νερού και θεικού οξέος (6M H₂SO₄) υπό ανάδευση σε Shaker 46W (300 rpm) για 5 ώρες, τα μέταλλα διαλυτοποιούνται, παράγοντας διάφορα μεταλλικά οξείδια και πυρίτιο στα υπολείμματα. Το μείγμα μεταφέρεται σε αντλία κενού, όπου διαχωρίζεται το στερεό και υγρό κλάσμα, τα οποία είναι σε αναλογία 5%.

Το υγρό κλάσμα καταβυθίζεται με καυστικό νάτριο (NaOH 5M) προς παραλαβή αργιλίου (Στάδιο 7). Η τελική εκροή διαχωρίζεται σε ένα υγρό απόβλητο (pH 7.5), αποτελούμενο από νερό και θειικά, απουσία μετάλλων, το οποίο μεταφέρεται και απορρίπτεται και σε στερεό Al(OH)₃, που είναι το ζητούμενο τελικό προϊόν. Η περαιτέρω επεξεργασία του υγρού αποβλήτου δεν λαμβάνεται υπόψιν στη παρούσα διπλωματική εργασία.

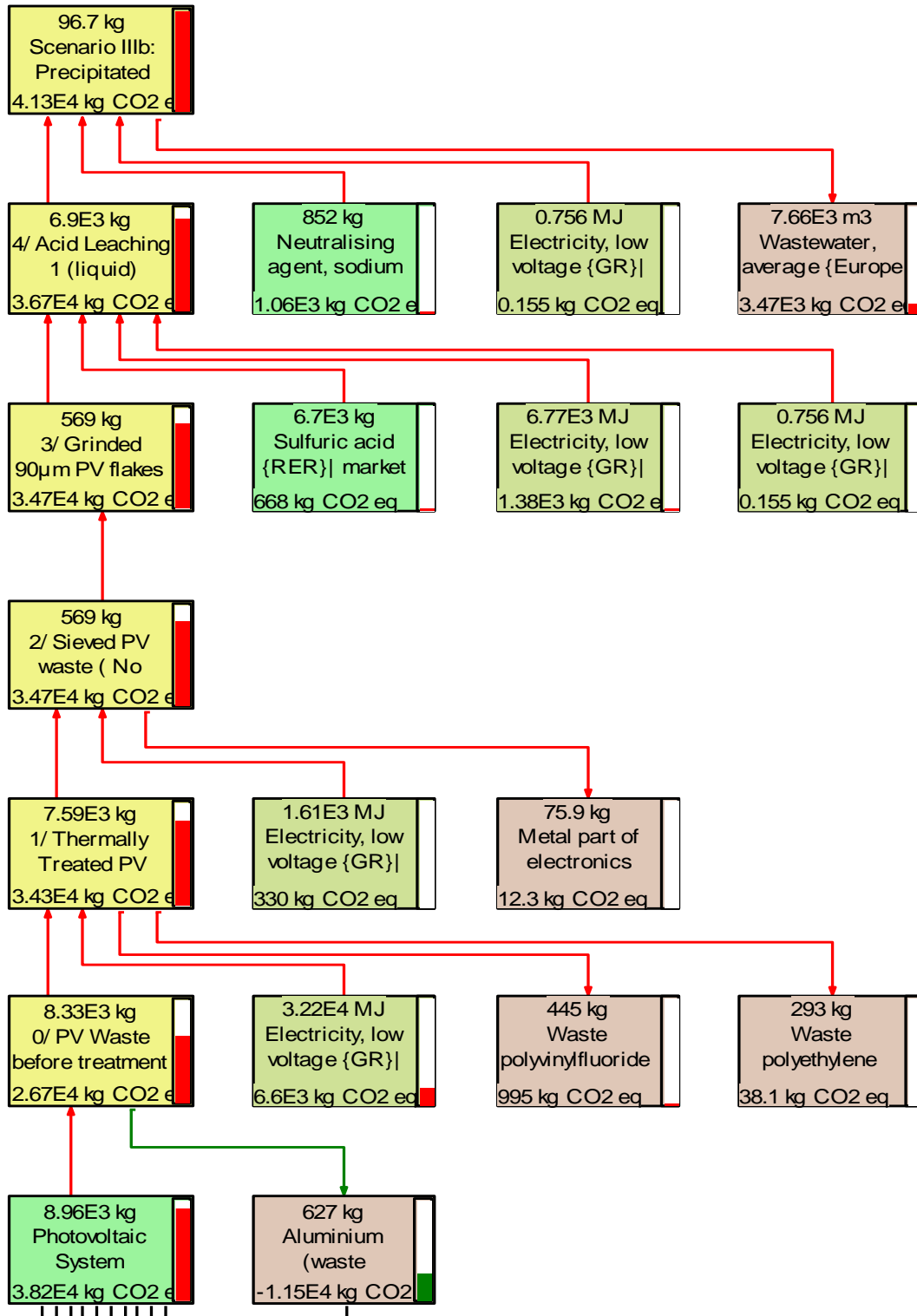
Η απογραφή των δεδομένων (Στάδια 5,7), βάση πειραματικής διαδικασίας, καταγράφονται στους Πίνακες 18-19 αντίστοιχα, όπως και το συνολικό δέντρο διεργασίας των Σταδίων 0-7 (Διάγραμμα 13).

Πίνακας 18 Δεδομένα απογραφής LCIA – Πρώτη εκχύλιση

4/Acid Leaching I	
Inputs from technosphere: materials/ fuels	
Grinded 90µm PV flakes (Si-Electrode)	569.02 kg
Sulfuric acid {RER} market for sulfuric acid	6696.43 kg
Electricity, low voltage {GR} market for	1879.84 kWh
Electricity, low voltage {GR} market for	0.21 kWh
Outputs to technosphere: materials/ fuels	
Acid Leaching 1 (liquid)	6902.18 kg
Acid Leaching 1 (solid)	363.27 kg

Πίνακας 19 Δεδομένα απογραφής LCIA Σεναρίου IIIb: Ανάκτηση αλουμινίου

7/ Precipitation of AL1 (liquid)	
Inputs to technosphere: materials/ fuels	
Acid Leaching 1 (liquid)	6902.18 kg
Neutralising agent, sodium hydroxide- equivalent	851.94 kg
Electricity, low voltage {GR} market for	0.21 kWh
Outputs to technosphere: materials/ fuels	
Precipitated solid Al(OH) ₃	96.68 kg
Wastewater, average	7657.44 kg



Διάγραμμα 13 Διάγραμμα ροής Σεναρίου IIIb: Ανάκτηση αλουμινίου

Το ανθρακικό αποτύπωμα των δύο σταδίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 20. Ανά κιλό ανακτώμενου αλουμινίου, οι ισοδύναμες εκπομπές CO₂ ανέρχονται σε 11.35 kg.

Πίνακας 20 Ανθρακικό αποτύπωμα για τα Στάδια 4,7

Στάδιο 4: Πρώτη εκχύλιση	8080 kg CO₂eq
(+) H ₂ SO ₄	6700 kg CO ₂ eq
(+) Ηλεκτρική ενέργεια (6840 MJ)	1380 kg CO ₂ eq
Στάδιο 7: Καταβύθιση προς ανάκτηση Al(OH)₃	1098.155 kg CO₂eq
(+) NaOH	1060 kg CO ₂ eq
(+) Ηλεκτρική ενέργεια (0.75 MJ)	0.155 kg CO ₂ eq

Πιο αναλυτικά, είναι φανερό και από τα Διαγράμματα 27 και 28, οι ρύποι που παράγονται από το στάδιο της ανάκτησης του αλουμινίου είναι μηδαμινές συγκριτικά με το σύνολο. Όσον αφορά τις τελικές βλάβες, σοβαρότερες επιπτώσεις εμφανίζονται στην ανθρώπινη υγεία. Αυτό επιβεβαιώνεται με το διάγραμμα των ενδιάμεσων επιπτώσεων, όπου παρατηρείται επίδραση στις καρκινογόνες και μη ουσίες, αλλά και στα οργανικά σωματίδια. Αλυσιδωτά, αναμενόμενη είναι η εμφάνιση αναπνευστικών και λοιπών προβλημάτων υγείας στον άνθρωπο.

Επιπρόσθετα, η καταβύθιση φαίνεται να μειώνει τη στοιβάδα του όζοντος κατά 15% και να συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη κατά 2.5%. Για το λόγο αυτό, στο Διάγραμμα 28 η ποιότητα του οικοσυστήματος έχει υψηλότερο αντίκτυπο από τις βλάβες στη κλιματική αλλαγή.

8.6. Σενάριο IIIc: Ανάκτηση αργύρου

Η ανάκτηση πολύτιμων υλικών, συγκεκριμένα ασημιού, έχει τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά οφέλη. Η επεξεργασία των υπολειμμάτων των φωτοβολταϊκών απόβλητων, τα οποία περιέχουν μικρή ποσότητα ασημιού, στοχεύει στην ανάκτηση καθαρού πολύτιμου μετάλλου, δίχως προσμίξεις.

Έπειτα από τη πρώτη εκχύλιση (Στάδιο 4), το στερεό κλάσμα μεταφέρεται προς δεύτερη εκχύλιση με εκχυλιστικό μέσο 5M HNO₃ σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με αναλογία στερεού/υγρού 30%. Για την ανάδευση, γίνεται χρήση Shaker ισχύος 46W (300 rpm) για 4 ώρες (Στάδιο 5). Έπειτα από διαχωρισμό σε αντλία κενού, ανακτάται το πυρίτιο και οδηγείται στο στάδιο της επιφανειακής προσβολής. Το υγρό κλάσμα με διαλυμένα μέταλλα σε όξινο διάλυμα προχωρά προς ανάκτηση αργύρου.

Τα δεδομένα, όπως εισάχθηκαν στο λογισμικό, παρουσιάζονται στον Πίνακα 21.

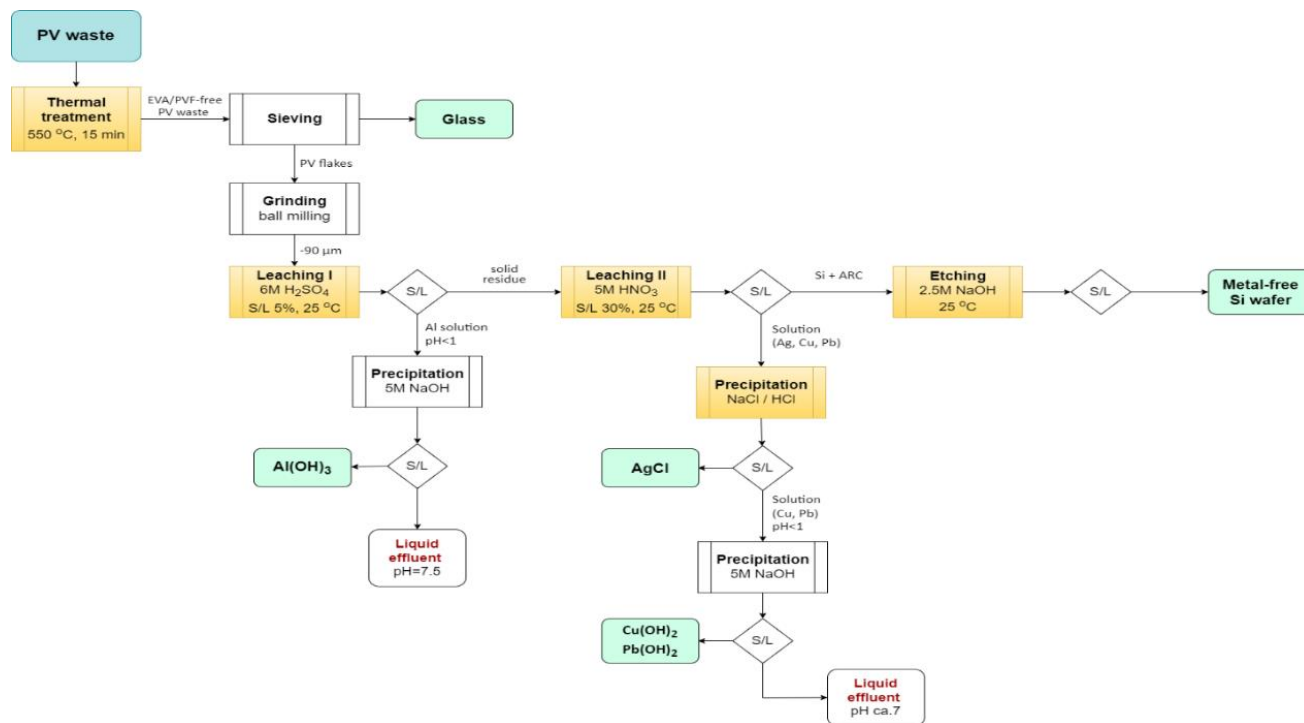
Πίνακας 21 Δεδομένα απογραφής LCIA Εκχύλισης II

5/Acid Leaching II	
Inputs from technosphere: materials/ fuels	
Acid Leaching 1 (solid)	363.27 kg
Nitric acid {RER} market for nitric acid	1825.00 kg
Electricity, low voltage {GR} market for	1432.26 kWh
Electricity, low voltage {GR} market for	0.21 kWh
Outputs to technosphere: materials/ fuels	
Acid Leaching 2 (liquid)	1531.79 kg
Acid Leaching 2 (solid)	656.48 kg

Η εκλεκτική ανάκτηση του από τα διαλύματα εκχύλισης, αποφεύγοντας παράλληλα την ανάκτηση των ανεπιθύμητων συστατικών, επιτυγχάνεται με δύο διαφορετικούς τρόπους, οι οποίοι αναπτύσσονται σε δύο διαφορετικά σενάρια.

8.6.1. Καταβύθιση (Precipitation)

Το πρώτο σενάριο ανάκτησης αργύρου περιλαμβάνει τη καταβύθιση του στερεού κλάσματος με χλωριούχο νάτριο (NaCl). Η μέθοδος αυτή ολοκληρώνεται σε δύο στάδια. Αρχικά, με τη προσθήκη χλωριούχου νατρίου ανακτάται ασήμι σε μορφή χλωριούχου αργύρου (AgCl). Δημιουργούνται, όμως, προβλήματα συγκαταβύθισης με υδροξείδια χαλκού και μολύβδου. Η δέσμευση τους ως υδροξείδια επιτυγχάνεται έπειτα από εξουδετέρωση με καυστικό νάτριο (NaOH). Το τελικό υγρό απόβλητο χαρακτηρίζεται ως ουδέτερο. Αναλυτικά, το διάγραμμα ροής:



Διάγραμμα 14 Διάγραμμα ροής Σεναρίου IIIc(i): Καταβύθιση

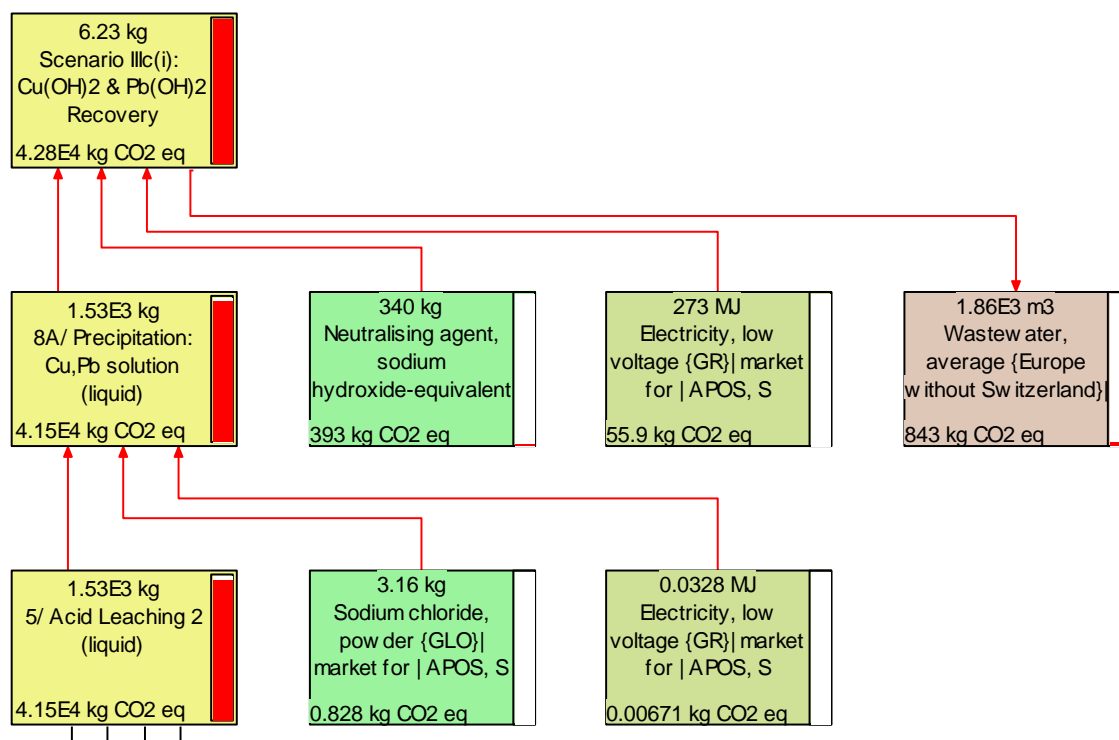
Στο λογισμικό SimaPRO για τη μοντελοποίηση των δύο υποσεναρίων εισάγονται τα δεδομένα, όπως παρουσιάζονται αναλυτικά στο Πίνακα 22.

Πίνακας 22 Δεδομένα απογραφής LCIA Σεναρίου IIIc(i): Καταβύθιση

Scenario IIIc(i): Precipitation (Step 1)	
Inputs from technosphere: materials/ fuels	
Acid Leaching 2 (liquid)	1531.79 kg
Sodium chloride, powder {GLO} market for Cut-off, U	3.16 kg
Outputs to technosphere: materials/ fuels	
Solid silver chloride (AgCl)	6.66 kg
Precipitation, Cu, Pb solution (liquid)	1528.29 kg

Scenario IIIc(i): Precipitation (Step 2)	
Inputs from technosphere: materials/ fuels	
Precipitation, Cu, Pb solution (liquid)	1528.29 kg
Neutralising agent, sodium hydroxide- equivalent {GLO} mε	339.56 kg
Outputs to technosphere: materials/ fuels	
Cu(OH) ₂ + Pb(OH) ₂	6.23 kg
Final liquid effluent pH 7.5	1861.63 kg

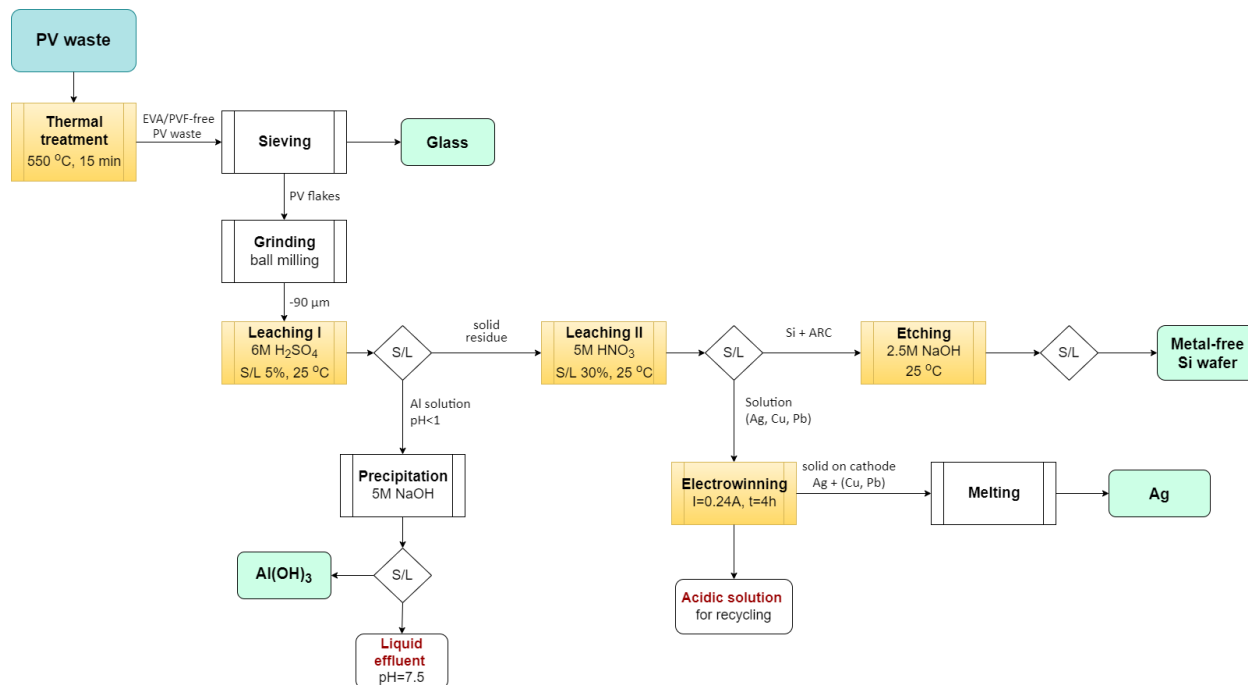
Έπειτα από αποκοπές για παρουσίαση των σημαντικότερων διαδικασίας, το διάγραμμα ροής του σεναρίου φαίνεται στο Διάγραμμα 15.



Διάγραμμα 15 Δέντρο διεργασιών SimaPRO Σεναρίου IIIc(i): Καταβύθιση

8.6.2. Ηλεκτράνακτηση (Electrowinning)

Εναλλακτικά, η ανάκτηση αργύρου επιτυγχάνεται με ηλεκτράνακτηση από νιτρικό άλας. Η διαδικασία βασίζεται στο διάγραμμα ροής (Διάγραμμα 15). Παραλαμβάνεται στερεός άργυρος, μείγμα χαλκού/ μολύβδου και όξινο διάλυμα νιτρικών προς ανακύκλωση.

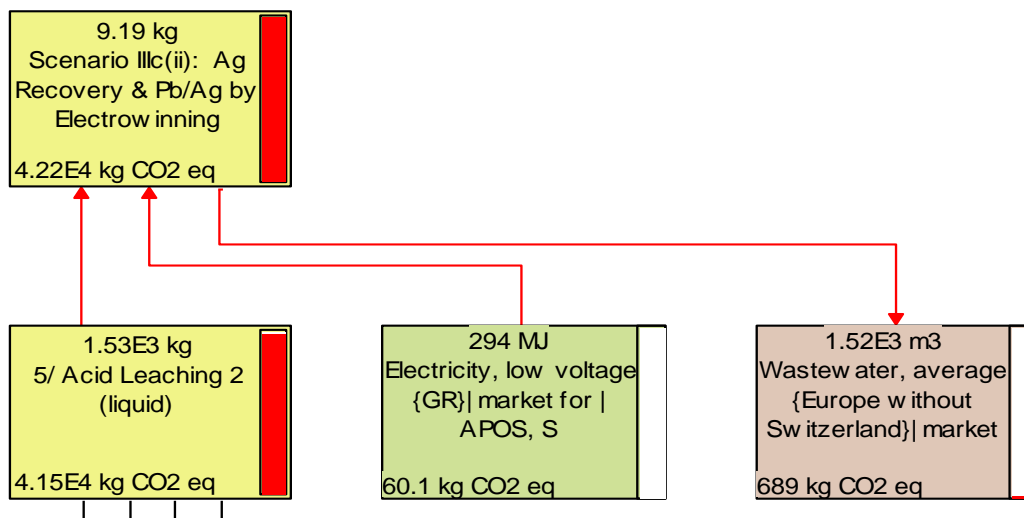


Διάγραμμα 16 Διάγραμμα ροής Σεναρίου IIIc(ii): Ηλεκτράνακτηση

Τα δεδομένα που εισάγονται στο λογισμικό και η τελική τους αναπαράσταση σε διάγραμμα ροής υλικών και διαδικασιών φαίνονται στο Πίνακα 23 και Διάγραμμα 17 αντίστοιχα.

Πίνακας 23 Δεδομένα απογραφής LCIA Σεναρίου IIIc(ii): Ηλεκτράνακτηση

Scenario IIIc(ii): Electrowinning	
Inputs from technosphere: materials/ fuels	
Acid Leaching 2 (liquid)	1531.79 kg
Electricity, low voltage {GR} market for	81.6 kWh
Outputs to technosphere: materials/ fuels	
Recovered Ag & Pb/Ag	9.19 kg
Wastewater, average {Europe without Switzerland}	1522.60 kg



Διάγραμμα 17 Δέντρο διεργασιών SimaPRO Σεναρίου IIIc(ii): Ηλεκτράνακτηση

8.6.3. Συγκριτικά αποτελέσματα Σεναρίων III

Το συγκριτικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο αναπαρίσταται στα Διαγράμματα 29-30. Το Διάγραμμα 29 απεικονίζει το ποσοστό των επιβαρύνσεων που επηρεάζει τις εκάστοτε κατηγορίες.

Η ηλεκτράνακτηση (Σενάριο IIIc(ii)) δίνει κατά 10% ευνοϊκότερες συνέπειες όσον αφορά την οικοτοξικότητα, χερσαία και υδάτινη. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην απουσία επιπλέον χημικών ουσιών που εκλύονται από πρώτες ύλες.

Η καταβύθιση έχει καλύτερες επιδόσεις από την ηλεκτράνακτηση όσον αφορά το ανθρακικό αποτύπωμα. Στο Σενάριο IIIc(i) η χρήση χλωριούχου νατρίου (NaCl) και καυστικού νατρίου (NaOH) προσδίδει 0.828kg και 393kg ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂eq) αντίστοιχα. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της απαιτούμενης ενέργειας ανέρχεται στα 55.9kg CO₂eq. Αντίστοιχα, κατά την ηλεκτράνακτηση (Σενάριο

IIIc(i)) απαιτείται μόνο κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος, ποσότητας που ισοδυναμεί με 60.1 kg CO₂eq. Επομένως, οι μειωμένοι περιβαλλοντικοί ρύποι είναι αναμενόμενοι. Δεν λαμβάνεται υπόψη η διεργασία ανακύκλωσης των υγρών αποβλήτων, με την οποία θα πρόκυπταν παρόμοια αποτελέσματα. Συνοπτικά, τα αποτελέσματα καταγράφονται στο Πίνακα 24:

Πίνακας 24 Συγκριτικά αποτελέσματα υποσεναρίων IIIc: Ανάκτηση ασημιού

Σενάριο IIIc: Ανάκτηση ασημιού		
Υποσενάριο	Συνολικές εκπομπές	Εκπομπές/kg αποβλήτου
IIIc(i)	449.73 kg CO ₂ eq	0.2939 kg CO ₂ eq/kg αποβλήτου
IIIc(ii)	60.1 kg CO ₂ eq	0.0393 kg CO ₂ eq/kg αποβλήτου

Αυτό επιβεβαιώνεται και από το τελικό αποτέλεσμα που φαίνεται στα Διαγράμματα 29 και 30. Το πρώτο εμφανίζει τις τελικές επιπτώσεις της μεθοδολογίας, στο δεύτερο οι ίδιες κανονικοποιούνται. Το δεύτερο σενάριο εμφανίζει ξανά χαμηλότερες επιβαρύνσεις σε όλες τις κατηγορίες, χωρίς όμως να είναι εμφανής η διαφορά όπως φαίνεται στον Πίνακα 24.

Κατά κύριο λόγο, και στα δύο σενάρια, επηρεάζεται ως τελική βλάβη η ποιότητα του οικοσυστήματος. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στην επίδραση των ρύπων των χημικών ουσιών στην χερσαία και υδάτινη οικοτοξικότητα.

8.7. Σενάριο IIId: Ανάκτηση πυριτίου

Η υδρομεταλλουργική επεξεργασία ολοκληρώνεται με την ανάκτηση πυριτίου. Η αντι-ανακλαστική επίστρωση αφαιρείται έπειτα από επιφανειακή προσβολή των θραυσμάτων πυριτίου με 2.5 M NaOH. Οι συνθήκες κατεργασίας λαμβάνονται ως εξής: θερμοκρασία περιβάλλοντος, χωρίς ανάδευση. Ανακτάται 100% κρυσταλλικό πυρίτιο υψηλής καθαρότητας.

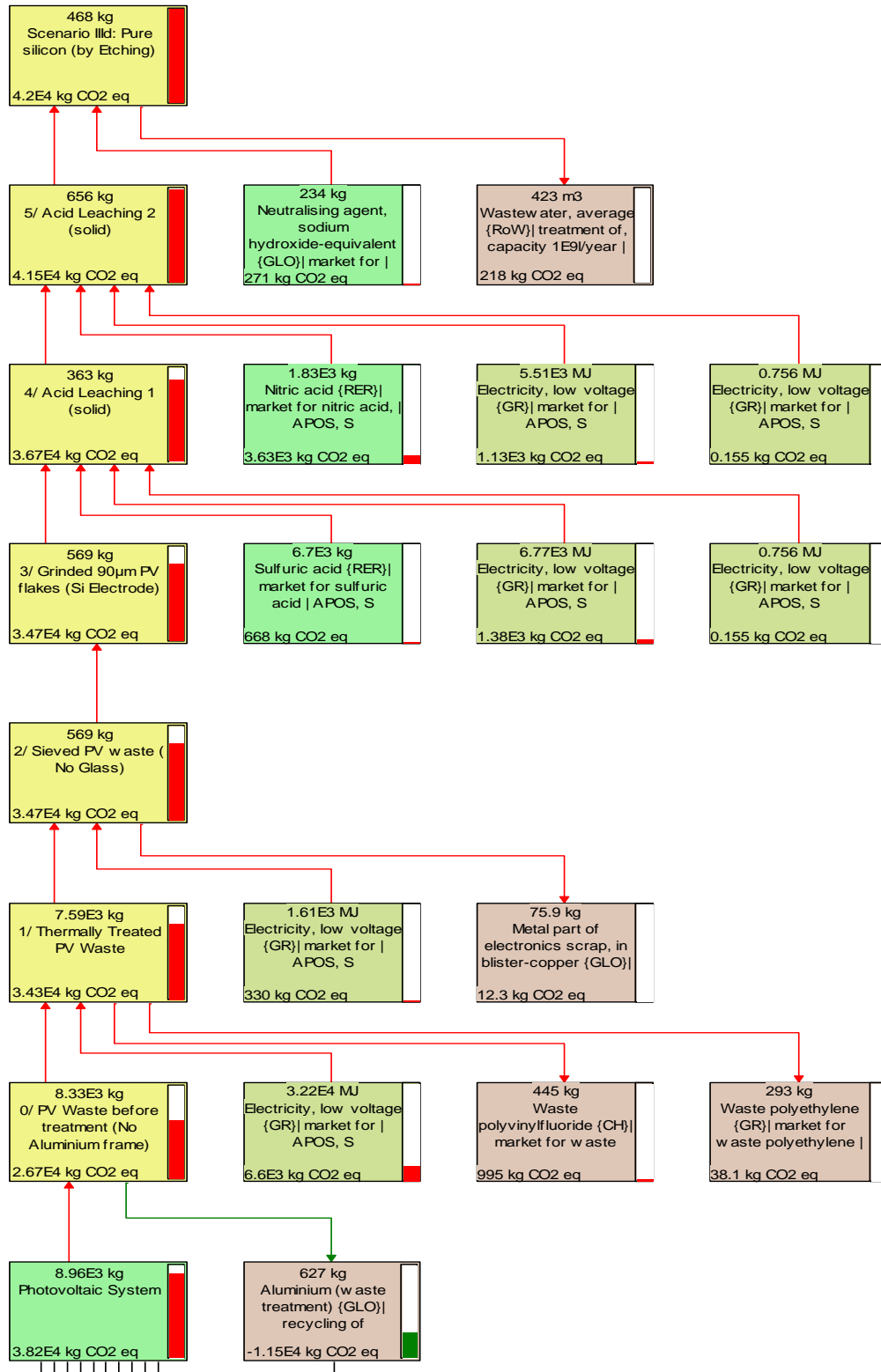
Το σχετικό σετ δεδομένων και το δέντρο διεργασιών για το τελευταίο στάδιο παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 25 Δεδομένα απογραφής LCIA Σεναρίου IIId: Ανάκτηση πυριτίου

Scenario IIId: Si Catalyst	
Inputs from technosphere: materials/ fuels	
Acid Leaching 2 (solid)	656.48 kg
Neutralising agent, sodium hydroxide- equivalent {GLO} m _e	234.28 kg
Outputs to technosphere: materials/ fuels	
Metal free silicon wafer	467.73 kg
Liquid effluent	423.03 kg

Το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας του συνόλου των φωτοβολταϊκών αποβλήτων προς ανάκτηση κρυσταλλικού πυριτίου καταναλώνει αθροιστικά ενέργεια ίση με 489kg CO₂eq, μόλις το 3% της συνολικής κατεργασίας. Κρίνεται, επομένως, ότι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα είναι αρκετά μικρό, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει πολλά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Στο Διάγραμμα 31 γίνεται ανάλυση των επιμέρους εισροών της διεργασίας της επιφανειακής προσβολής. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης υποδεικνύουν πως την μεγαλύτερη περιβαλλοντική επίδραση θα την έχει το υγρό απόβλητο. Συγκεκριμένα, συμμετέχει κατά περίπου 95% στη χερσαία και υδάτινη οικοτοξικότητα, όπως και στον ευτροφισμό λόγω των όξινων που περιέχονται. Ξέχωρα, με ποσοστά που κυμαίνονται στο 85% με 95% συμμετέχει στην εκπομπή καρκινογόνων και μη ουσιών (Διάγραμμα 32). Ως επακόλουθο, στο κανονικοποιημένο γράφημα, η τελική βλάβη που επηρεάζεται στο μεγαλύτερο βαθμό είναι η ποιότητα του οικοσυστήματος και μετέπειτα η ανθρώπινη υγεία (Διάγραμμα 33).



Διάγραμμα 18 Δέντρο διεργασιών SimaPRO Σεναρίου IIIId: Ανάκτηση πυριτίου

9. Συμπεράσματα

Τη σημερινή εποχή κρίνεται αναγκαία η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη των αυξημένων αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας. Η αλματώδης ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής βιομηχανίας προσφέρεται ως βιώσιμη εναλλακτική για τη προστασία του περιβάλλοντος από τους βλαβερούς ρύπους των συμβατικών πηγών ενέργειας.

Ωστόσο, νέες μελέτες εμφανίζουν περιβαλλοντικούς κινδύνους που συνδέονται με την αλόγιστη τελική διάθεση των φωτοβολταϊκών μετά το ΤΚΖ. Ο κύριος όγκος των φωτοβολταϊκών αποβλήτων αναμένεται να εμφανιστεί μετά το 2030, δίνοντας τον απαραίτητο χρόνο για έρευνα και ανάπτυξη νέων μεθόδων και καινοτομιών που θα κάνουν την ανακύκλωση φωτοβολταϊκών ελκυστική μέθοδο τελικής διαχείρισής τους.

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε το ανθρακικό αποτύπωμα τριών διαφορετικών σεναρίων στο λογισμικό SimaPro v.9 ακολουθώντας τη μέθοδο Impact2002+. Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει τη διάθεση τους σε ΧΥΤΑ χωρίς προεπεξεργασία, το δεύτερο τη σταθεροποίηση τους σε τσιμεντοκονία και το τρίτο αναφέρεται στην ανάκτηση των επιμέρους υλικών με τη μέθοδο της υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας, όπως αυτή αναπτύχθηκε στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ως λειτουργική μονάδα για την ΑΚΖ επιλέχθηκε φωτοβολταϊκό πάρκο ονομαστικής ισχύος 120 kWp. Η μελέτη εστιάζει στη διεργασία αποσυναρμολόγησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων και στην ανάλυση των επικρατέστερων μεθόδων τελικής διαχείρισης και ανακύκλωσής τους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω εδάφια.

9.1. Ευνοϊκότερο σενάριο υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας

Όσον αφορά στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής του υπό μελέτη φωτοβολταϊκού συστήματος που υφίσταται υδρομεταλλουργική επεξεργασία (Σενάριο III), προέκυψε το εξής ανθρακικό αποτύπωμα για τα επιμέρους στάδια (Πίνακας 26). Το συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο ανέρχεται σε περίπου 16tn CO₂eq ή σε 1.8kg/kg φωτοβολταϊκού αποβλήτου.

Ο καλύτερος συνδυασμός ανάκτησης υλικών περιλαμβάνει την ανακύκλωση του γυαλιού (-6130 kg CO₂eq), την ανάκτηση αλουμινίου έπειτα από καταβύθιση (1060 kg CO₂eq), την ανάκτηση ασημιού με ηλεκτρική ανάκτηση (60.1 kg CO₂eq) και την ανάκτηση πυριτίου έπειτα από επιφανειακή προσβολή (271kg

CO₂eq). Παρατηρείται, ότι, οι τελικές διαδικασίες προς ανάκτηση των μετάλλων συνεισφέρουν σε μικρό βαθμό στο συνολικό αποτύπωμα του σεναρίου (Εικόνα 15).

Η ανακύκλωση του γυαλιού κρίθηκε ευνοϊκότερη περιβαλλοντικά από τα άλλα δύο υπο-σενάρια, καθώς όχι μόνο δεν παρήγαγε ρύπους, αλλά συνέβαλλε στην αντιστροφή του φαινομένου με εξοικονόμηση 6130kg CO₂eq. Αντίστοιχα, η μέθοδος της ηλεκτρικής ανάκτησης επικράτησε της καταβύθισης, λόγω της απουσίας χρήσης επιπλέον χημικών ουσιών.

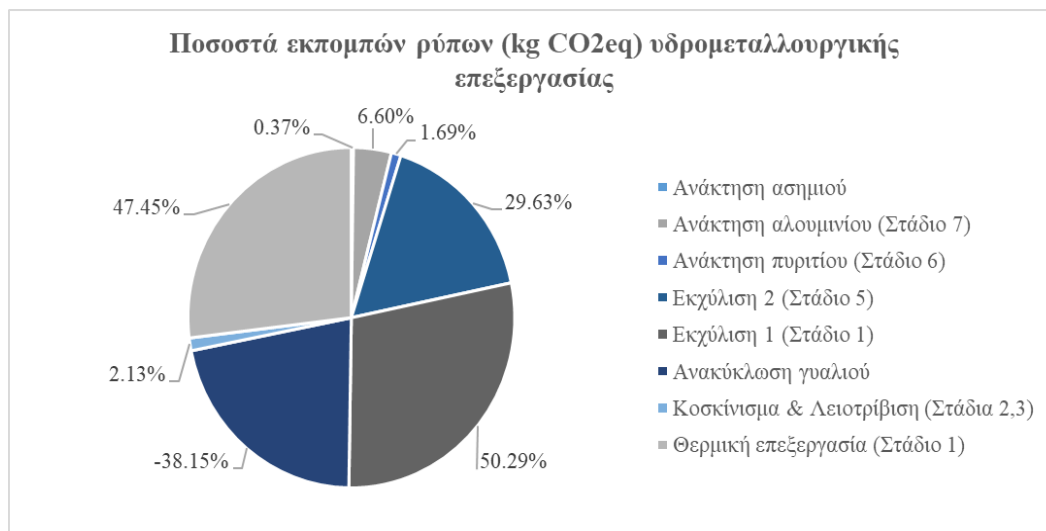
Πίνακας 26 Συγκεντρωτικός πίνακας ανθρακικού αντίκτυπου του συνόλου των σταδίων της υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας

Συνολικές εκπομπές υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας	16,066.71	kg CO₂eq
Στάδιο 0: Απομάκρυνση πλαίσιο αλουμινίου	-11500	kg CO₂eq
(-) Ανακύκλωση αλουμινίου	11500	kg CO ₂ eq
Στάδιο 1: Θερμική επεξεργασία	7623	kg CO₂eq
(+) Ηλεκτρική ενέργεια (32200 MJ)	6590	kg CO ₂ eq
(+) Απόβλητα PVF	995	kg CO ₂ eq
(+) Απόβλητα PE	38	kg CO ₂ eq
Στάδιο 2/3: Κοσκίνισμα & λειοτρίβιση	342.3	kg CO₂eq
(+) Ηλεκτρική ενέργεια (1610 MJ)	330	kg CO ₂ eq
(+) Απόβλητα χαλκού	12.3	kg CO ₂ eq
(-) Διαχείριση γυαλιού	<i>εξαρτάται από τη διαδικασία</i>	
Σενάριο IIIa: Ανακύκλωση γυαλιού	-6130	kg CO₂eq
(-) Ανακύκλωση γυαλιού	-6130	kg CO ₂ eq
Στάδιο 4: Εκχύλιση 1	8080	kg CO₂eq
(+) H ₂ SO ₄	6700	kg CO ₂ eq
(+) Ηλεκτρική ενέργεια (6480 MJ)	1380	kg CO ₂ eq
Στάδιο 5: Εκχύλιση 2	4760.155	kg CO₂eq
(+) HNO ₃	3630	kg CO ₂ eq
(+) Ηλεκτρική ενέργεια (6480 MJ)	1130.2	kg CO ₂ eq
Στάδιο 6: Επιφανειακή προσβολή προς ανάκτηση πυριτίου (Σενάριο II	271	kg CO₂eq
(+) NaOH	271	kg CO ₂ eq
Στάδιο 7: Καταβύθιση προς ανάκτηση Al(OH)₃ (Σενάριο IIIb)	1060.155	kg CO₂eq
(+) Ηλεκτρική ενέργεια (1610 MJ)	1060	kg CO ₂ eq
(+) Ηλεκτρική ενέργεια (0.75 MJ)	0.155	kg CO ₂ eq
Σενάριο IIIc(ii): Ανάκτηση ασημιού	60.1	
IIIc(ii) (+) Ηλεκτρική ενέργεια (294 MJ)	60.1	kg CO ₂ eq

Το ποσοστό που καταλαμβάνει κάθε επιμέρους στάδιο αποτυπώνεται σε μορφή διαγράμματος πίτας, για καλύτερη κατανόηση. Το πρώτο στάδιο της υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας, η θερμική επεξεργασία εκπέμπει το μεγαλύτερο μέρος των ρύπων (7623 kg CO₂eq). Τα αποτελέσματα αυτά μπορεί να είναι

λιγότερα ευνοϊκά από τη πραγματικότητα, καθώς δεν είναι υπολογισμένα με δεδομένα οικονομίας κλίμακας.

Στη συνέχεια, ακολουθούν ποσοστιαία οι εκπομπές από τις δύο εκχυλίσσεις. Εμφανίζουν υψηλούς ρύπους τόσο λόγω των υψηλών αναγκών τους σε ηλεκτρική ενέργεια για ανάδευση, όσο και στα οξέα που κατά την έκπλυση βρίσκονται σε περίσσεια.



Εικόνα 15 Ποσοστά εκπομπών ρύπων (kg CO₂eq) υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας

Η έκταση των επιπτώσεων από τις τελικές διαδικασίες ανάκτησης πολύτιμων υλικών είναι μικρή, μόλις το 9% των συνόλου. Επομένως, πραγματικά δεν μπορεί να υπάρξει αντίλογος στο γεγονός πως τέτοιες διεργασίες μπορούν να προσφέρουν μεγάλο οικονομικό και περιβαλλοντικό όφελος με μικρό ενεργειακό αντίκτυπο. Ο συνδυασμός της ανάκτησης τους με την ανακύκλωση γυαλιού (“ανακύκλωση υψηλής αξίας”) συμβάλλει στην ορθότερη διαχείριση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων με δυνατότητα κερδοφορίας.

Αν ληφθεί υπόψη και η ανακύκλωση του αλουμινίου, του «πράσινου» μετάλλου, στο σύνολο της διεργασίας, οι εκπομπές μειώνονται στα 4,566.71 kg CO₂eq, δηλαδή μόλις 0.5kg CO₂eq/kg παραγόμενου φωτοβολταϊκού αποβλήτου.

9.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων σεναρίων διαχείρισης

Συνοψίζοντας, το Σενάριο II, η σταθεροποίηση του μίγματος αποβλήτων σε τσιμεντοκονία, εκλύει 156.7 t_n CO₂eq, ή 17.5 kg CO₂eq/ kg φωτοβολταϊκού αποβλήτου. Το υπέρογκο αυτό ποσό οφείλεται στις πρώτες

ύλες που συμμετέχουν στη μήτρα του τσιμέντου, τα οποία προέρχονται από άκρως ενεργοβόρες βιομηχανίες.

Παρόλα αυτά, δεν πρέπει να παραβλέπεται στις συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων, πλεονεκτήματα που δεν είναι φανερά μέσω της μοντελοποίησης τους στο λογισμικό. Για παράδειγμα, η σταθεροποίηση αποβλήτων συμβάλλει σημαντικά στον εγκλεισμό του μολύβδου και την απαλοιφή προβλημάτων μόλυνσης του χερσαίου και υδροφόρου ορίζοντα από επικίνδυνα μέταλλα. Ταυτόχρονα, παράγεται ένα ωφέλιμο προϊόν που δύναται να επαναχρησιμοποιηθεί στην οδοποιία και λοιπές κατασκευές.

Αντίθετα, το Σενάριο I, η απευθείας απόρριψη σε ΧΥΤΑ, παρουσιάζει μηδενικές εκπομπές και θεωρητικά αποτελεί τη βέλτιστη λύση. Στη πραγματικότητα, όμως, πρόκειται για μία απαρχαιωμένη μέθοδο που η ΕΕ έχει ως στόχο να μειώσει σημαντικά τις επόμενες δεκαετίες. Ισοδυναμεί με ένα αέναο χωροταξικό πρόβλημα, ιδίως μετά την αλματώδη αύξηση του όγκου των αποβλήτων από ΑΗΗΕ κατά 5% ετησίως.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των τριών σεναρίων και λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω γνωρίσματα, είναι δυνατή η διατύπωση μίας ορθολογικής προσέγγισης των αναλύσεων. Τα προκύπτοντα στοιχεία για την υδρομεταλλουργική επεξεργασία (Σενάριο III) με ευνοϊκές συνθήκες, όπως αναλύθηκαν στο εδάφιο 8.1., υποδεικνύουν τη δυνατότητα επιτυχούς διαχείρισης των φωτοβολταϊκών αποβλήτων βάση περιβαλλοντικού αντίκτυπου.

9.3. Προτάσεις βελτίωσης αποδοτικότητας

Αναμφισβήτητα, ο απώτερος στόχος κάθε τεχνολογίας πρέπει να είναι η ελαχιστοποίηση των εκπομπών που τελικώς απελευθερώνονται στο περιβάλλον και τη βιωσιμότητα της διεργασίας. Οι τεχνολογικές αναβαθμίσεις στις μονάδες ανακύκλωσης θα κάνουν την ήδη φιλική προς το περιβάλλον ανακύκλωση υλικών υψηλής αξίας πιο ελκυστική, μειώνοντας το κόστος και βελτιώνοντας τους ρύπους. Η βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας κάποιων επιμέρους σταδίων μπορεί να αλλάξει σημαντικά το ανθρακικό αποτύπωμα

Το στάδιο της αποσυναρμολόγησης υπό θερμική επεξεργασία έχει σημαντική συνεισφορά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε όλα τα σενάρια που μελετήθηκαν σε ποσοστό έως και 50%. Οι δυσμενείς συνέπειες είναι αποτέλεσμα των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που απελευθερώνονται κατά τη καύση των φωτοβολταϊκών πλαισίων προς αποκόλληση τους.

Οι εκπομπές που σχετίζονται με το στάδιο επεξεργασίας των θερμικά κατεργασμένων αποβλήτων διαφέρουν ανάλογα με το τελικό στόχο ανακτώμενου προϊόντος. Οφείλονται τόσο στη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (10.5tn CO₂eq) βάση του μίγματος της Ελλάδος, όσο και στην ανάγκη σε μεγάλο όγκου πρώτη ύλη (πχ. εκχυλιστικό μέσο σε περίσσεια). Η εισαγωγή μεγαλύτερου ποσοστού ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα ή η πλήρη απανθρακοποίηση της βιομηχανίας επεξεργασίας μπορεί να συνεισφέρει στην αλλαγή της κατανάλωσης.

Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων μετά το ΤΚΖ τους ήταν εκτός ορίων μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η δημιουργία νέων εφοδιαστικών αλυσίδων που βασίζεται στην ανακύκλωση των υγρών εκροών, συμβάλλει στον μετριασμό των αναγκών σε νέες πρώτες ύλες για τις χημικές ουσίες. Ωστόσο, είναι σημαντικό, οι δράσεις αυτές να μην μεταβάλλουν την οικονομική βιωσιμότητα της διεργασίας.

Το οικονομικό όφελος της ανάκτησης πολύτιμων μετάλλων, όπως ο άργυρος, δεν πρέπει να παραβλέπεται. Ακόμη και στη περίπτωση που τα ποσοστά τέτοιων μετάλλων στα φωτοβολταϊκά μειωθούν, η ανάκτηση τους αυξάνει την οικονομική βιωσιμότητα των εγκαταστάσεων. Καθίσταται, κατά αυτόν τον τρόπο, πιο ελκυστική στους επενδυτές.

Η περαιτέρω ανάλυση των παραπάνω σεναρίων διαχείρισης φωτοβολταϊκών κρυσταλλικού πυριτίου μετά το τέλος κύκλου ζωής τους, θα βοηθήσει την έρευνα, ανάπτυξη και βελτίωση των τεχνολογιών. Η προσθήκη νέων παραγόντων που δεν έχουν ληφθεί υπόψη στο παρελθόν, όπως η διαχείριση των υγρών αποβλήτων, και η βελτίωση της αποδοτικότητας των επιμέρους σταδίων, θα συμβάλλει στη συγκρότηση μιας περιβαλλοντικά μεθόδου διαχείρισης αποβλήτων.

Τέλος, η πραγματοποίηση μίας αναλυτικής οικονομικής ανάλυσης των μονάδων επεξεργασίας διαχείρισης φωτοβολταϊκών και της οικονομική αξιοποίησης των ανακτώμενων υλικών σε πραγματική κλίμακα, θα προσφέρει αποτελέσματα που αντικατοπτρίζουν την ουσιαστική οικονομική βιωσιμότητα των σεναρίων.

Βιβλιογραφία

Ξενογλώσση Βιβλιογραφία

- Adriana Domínguez, Roland Geyer, 2017, “Photovoltaic waste assessment in Mexico”, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 127: 29-41
- Aman, M. M., Solangi, K. H., Hossain, M. S., Badarudin, A., Jasmon, G. B., Mokhlis, H., & Kazi, S. N., 2015. A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41: 1190-1204.
- Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products. *Ecological economics* 64: 798-807.
- Gertsakis J. και Lewis H., 2008. “Sustainability and the Waste Management Hierarchy”, Sustainability Victoria, Melbourne Australia
- Huijbregts M., Hellweg S., Frischknecht R., Hungerbühler K., Hendriks J., 2008.
- Jolliet, O. et al, 2016. ENVIRONMENTAL LIFE CYCLE ASSESSMENT.
- Jungbluth Niels, 2005. Life Cycle Assessment of Crystalline Photovoltaics in the Swiss Ecoinvent Database. *Prog. Photovolt. Res Appl.* 13: 429- 446.
- Kang, S., Yoo, S., Lee, J., Boo, B. and Ryu, H., 2012. Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 47: 152-159.
- Kolotzek, S. et al., 2018. A company-oriented model for the assessment of raw material supply risks, environmental impact and social implications. *Journal of Cleaner Production*: 176
- Komoto, K., and J.S. Lee (2018). End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies. Report IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Power Systems Programme.
- Lunardi, M. M., Alvarez-Gaitan, J. P., Bilbao, J. I., & Corkish, R. (2018). A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. *Solar Panels and Photovoltaic Materials*
- M. D. Kempe and J. H. Wohlgemuth, 2013. "Evaluation of temperature and humidity on PV module component degradation," 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC):120-125
- M.M. Fouad, Lamia A. Shihata, ElSayed I. Morgan, 2017. “An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 80 : 1499-1511.
- Mácalová, K.; Václavík, V.; Dvorský, T.; Figmig, R.; Charvát, J.; Lupták, 2021. The Use of Glass from Photovoltaic Panels at the End of Their Life Cycle in Cement Composites. 14: 6655

- Marco Tammaro, Antonio Salluzzo, Juri Rimauro, Simona Schiavo, Sonia Manzo., 2016, «Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels», *Journal of Hazardous Materials*, Volume 306: 395-405
- Milousi, Maria, Manolis Souliotis, George Arampatzis, and Spiros Papaefthimiou. 2019. "Evaluating the Environmental Performance of Solar Energy Systems Through a Combined Life Cycle Assessment and Cost Analysis" *Sustainability* 11, no. 9: 2539.
- N.C. McDonald, J.M. Pearce, 2010, "Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules", *Energy Policy*, Volume 38, Issue 11, 7041-7047.
- P. Stolz, R. Frischknecht, K. Wambach, P. Sinha, G. Heath, 2017, *Life Cycle Assessment of Current Photovoltaic Module Recycling*, IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Power Systems Programme, Report IEA-PVPS T12-13:2018.
- Pavlopoulos Charalampos, Maria Kelesi, Dimitrios Michopoulos, Konstantina Papadopoulou, Theopisti Lymperopoulou, Agelliki Skaropoulou, Sotirios Tsivilis, Gerasimos Lyberatos, Management of end-of-life photovoltaic panels based on stabilization using Portland cement, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, Volume 27, 2022, 100687, ISSN 2352-5541, <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100687>.
- PRÉ Consultants (2010) *SimaPro Introduction to LCA*. The Netherlands, www.presustainability.com.
- Reginald B. Kogbara, 2013. «A review of the mechanical and leaching performance of stabilized/solidified contaminated soils» *NRC research press*: 66-67
- Riccardo Battisti, Annalisa Corrado, 2003 . Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology. University of Roma 'La Sapienza' via Eudossiana, *Energy* 30 (2005) 952–967
- Sander, K., Schilling, S., Reinschmidt, J., Wambach, K., Schlenker, S., Müller, A., Springer, J., Fouquet, D., Jelitte, A., Stryi-Hipp, G. and T. Chrometzka (2007). *Study on the Development of a Take Back and Recovery System for Photovoltaic Products*, Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, Hamburg.
- Solar Power Europe, 2018. *Global market outlook For Solar Power / 2018 – 2022* Brussels.
- Theocharis, M., Pavlopoulos, C., Kousi, P. et al., 2022. «An Integrated Thermal and Hydrometallurgical Process for the Recovery of Silicon and Silver from End-of-Life Crystalline Si Photovoltaic Panels». *Waste Biomass Valor* 13: 4027–4041
- Twardowska Irena, 2004, "Solid Waste: Assessment, Monitoring and Remediation" *Waste Management Series* : 6-16.
- Vandeligt, K., Pelland, S., & Poissant, Y, 2012. *Assessment of the Environmental Performance of Solar Photovoltaic Technologies*. Environment Canada.
- Weckend, S., Wade, A., & Heath, G., 2016. *End-of-Life Management Solar Photovoltaic Panels*. IRENA & IEA-PVPS

- Wild-Scholten MJ, Alsema EA, Horst EW, Bächler M, Fthenakis VM, 2006. A cost and environmental impact comparison of grid-connected rooftop and ground-based PV systems. In: Proc. 21st European photovoltaic solar energy conference.
- Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A.L. and C. Yang, 2018. Global status of recycling waste solar panels: A review, Waste Management, 75, 450-458.

Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

- Γκουλιούμη Άννα, 2018. «Ανάκτηση πολύτιμων υλικών από φωτοβολταϊκά πλαίσια στο τέλος κύκλου ζωής τους».
- Καραδήμα Μαρία-Ελένη, 2011. «Μελέτη αποτυπώματος άνθρακα και δημιουργία προγράμματος υπολογισμού του»
- Καράμπελας Αθανάσιος, 2021. «Ανάκτηση χρήσιμων μετάλλων από θραύσματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων με υδρομεταλλουργική διεργασία»
- ΚΥΑ 23615/651/Ε.103, Καθορισμός κανόνων, όρων και προϋποθέσεων για την εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ), ΦΕΚ 1184Β/9-5-2014
- Κυριακοπούλου Βασιλική, 2020. «Μελέτη φωτοκαταλυτικών διεργασιών από φωτοβολταϊκά πάνελ τέλους κύκλου ζωής».
- Κυριακόπουλος Δημήτρης, 2021. «Χρήση βιοηλεκτροχημικών συστημάτων για παραγωγή βιοενέργειας (βιοηλεκτρισμός και βιοαέριο) και ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων».
- Μαμάτας Δημήτρης, 2016. «Ανακύκλωση φωτοβολταϊκών στοιχείων»
- Μιχόπουλος Κ., 2021. «Σταθεροποίηση αποβλήτων από φωτοβολταϊκά πάνελ»
- Πελέκη Μαρία- Δανάη, 2013. «Οργανικά φωτοβολταϊκά»
- Πηλίχος, 2013. «Μέθοδοι επεξεργασίας και ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πλακιδίων»
- Ρουμेलιώτη Ηρώ, 2013. «Ανάλυση κύκλου ζωής της μεταλλικής κατασκευής πλοίου»
- Στεργίου Βασιλική, 2018. Μεσομεταλλικές ενώσεις: Υποκατάσταση κρίσιμων υλών εξόρυξης και ανάλυση κύκλου ζωής
- Τετελένης Στέφανος, 2011. «Προσδιορισμός παραμέτρων γήρανσης φωτοβολταϊκών στοιχείων»
- Τοκατλίδης Ζ., 2019. «Ανακύκλωση υλικών φωτοβολταϊκών διατάξεων στον Ελλαδικό Χώρο»
- Υψηλάντη Ο., 2012, “Βαρέα μέταλλα σε υγρά απόβλητα. Η περίπτωση του υδραργύρου, του καδμίου και του μολύβδου
- Χατζόπουλος Γ. 2017. «Φωτοβολταϊκά συστήματα τρίτης γενιάς»
- Χριστούλα Αμαλία Ρόζα, 2021. «Κατασκευή σύνθετων υλικών εποξειδικής ρητίνης με πρόσθετα πυριτίου από ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πλακών»

Σύνδεσμοι

<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/transformation>

<https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/82854.pdf>

https://www.arcmeletitiki.gr/images/uploads/pdf/arc_ape11.pdf

<https://www.gtai.de/en/invest/industries/energy/photovoltaic#74720>

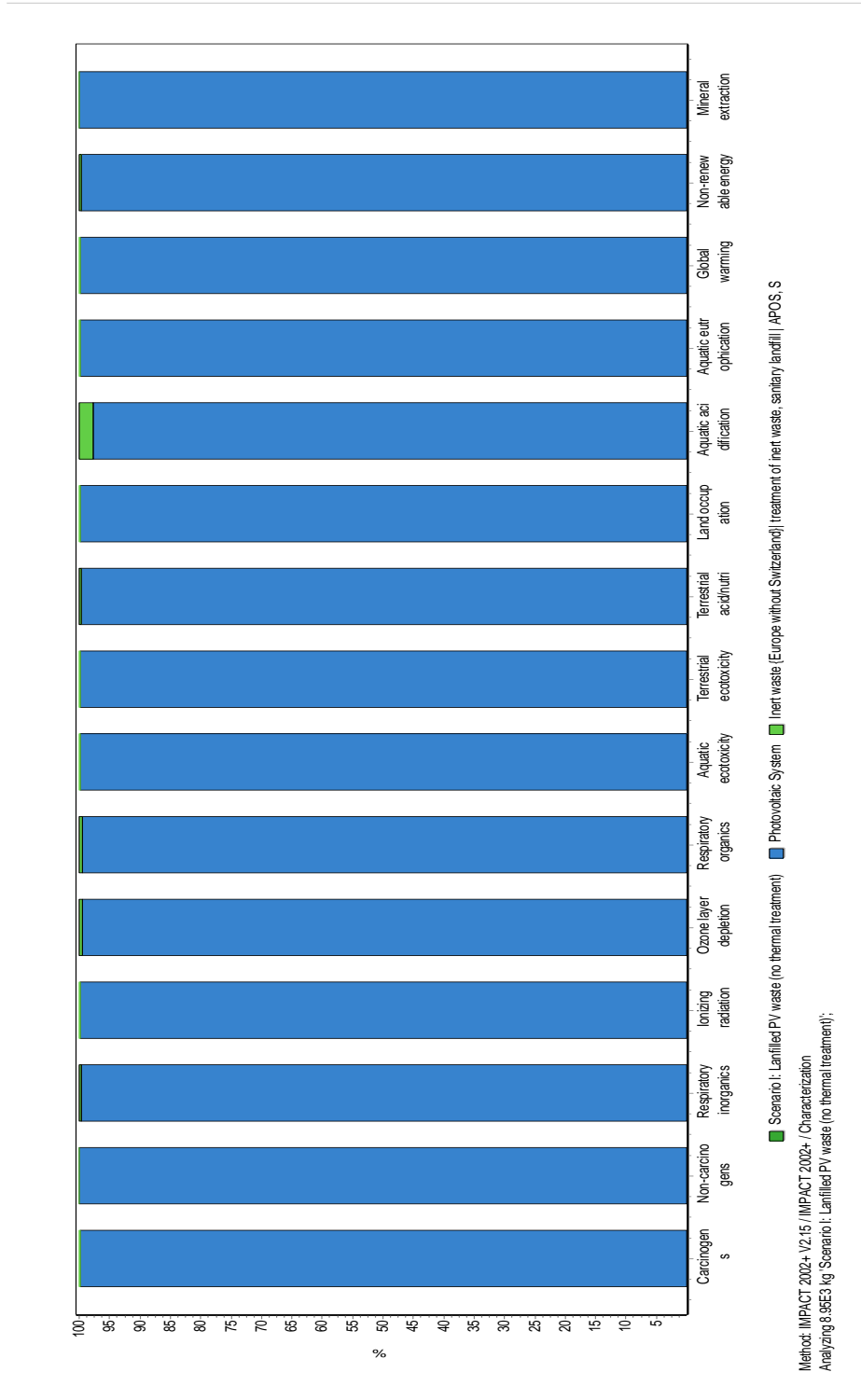
<https://www.reuters.com/business/energy/china-solar-installations-more-than-double-first-half-assn-2022-07-21/>

<http://www.varnas-ete.gr/photovoltaic-systems.php>

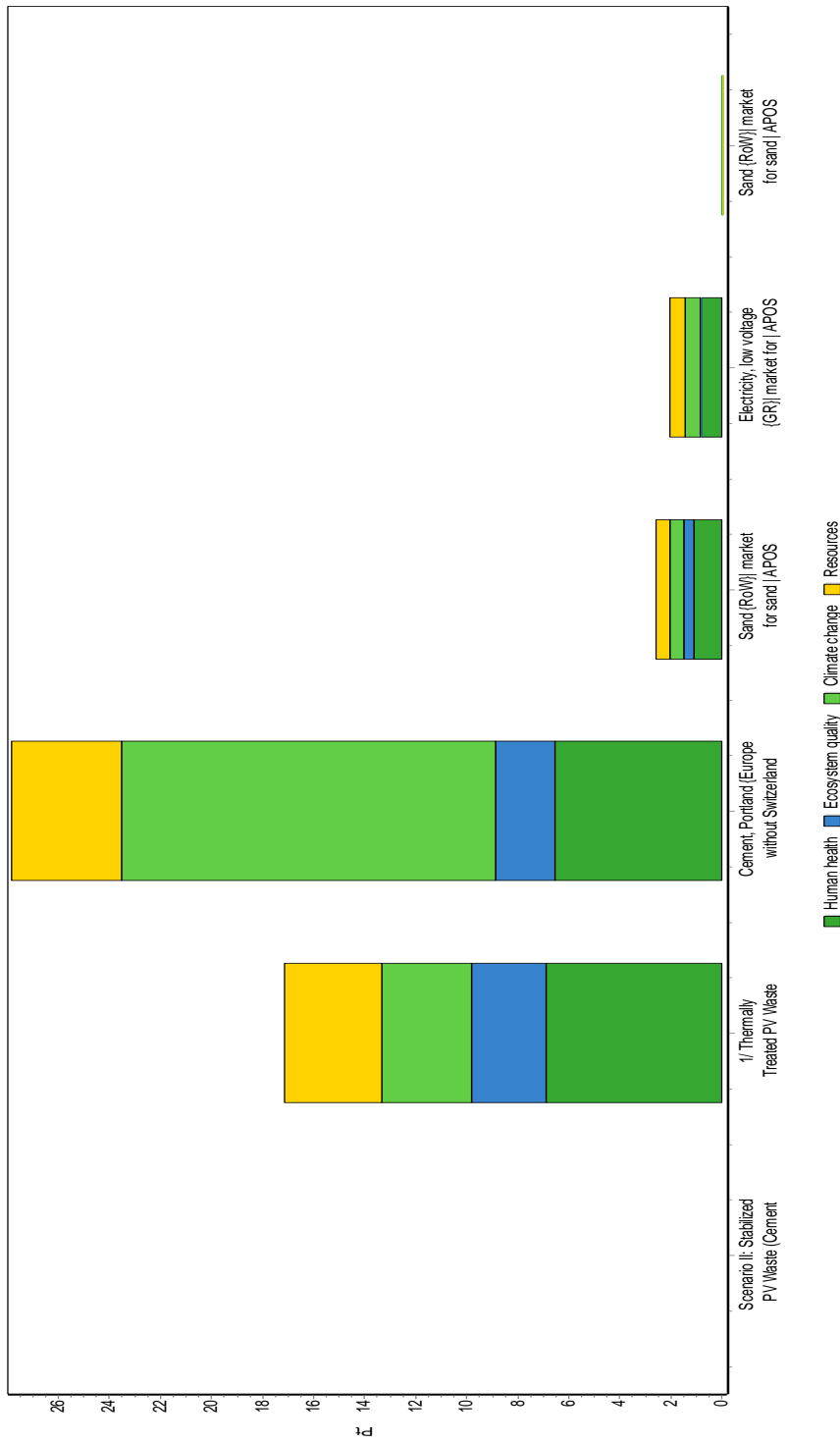
<https://www.fotovoltaiika-systems.gr/blog/fotovoltaiikasysthmata/>

<https://www.renugen.co.uk/hyundai-his-s248mg-248-watt-solar-panel-module/>

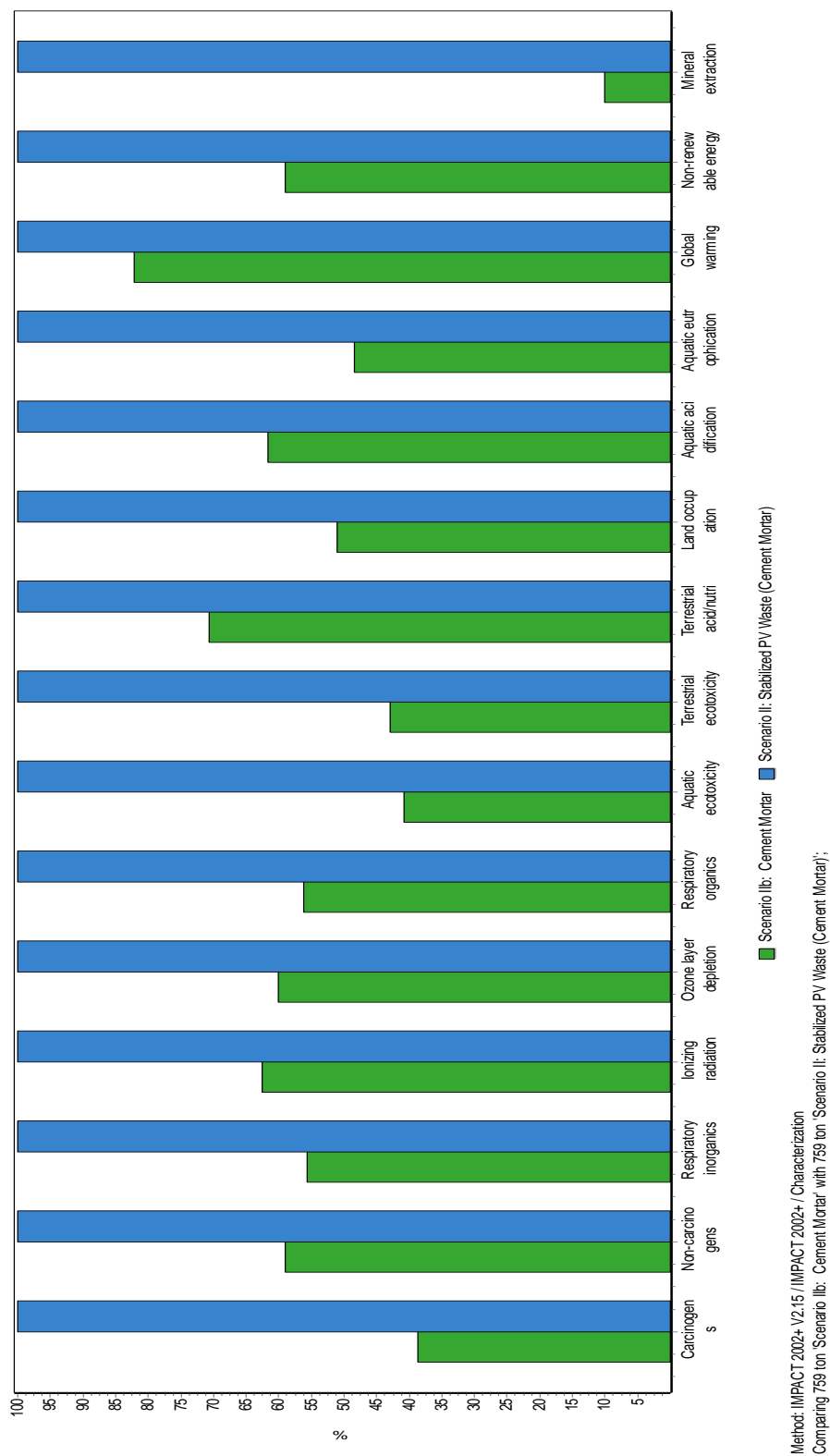
Παράρτημα



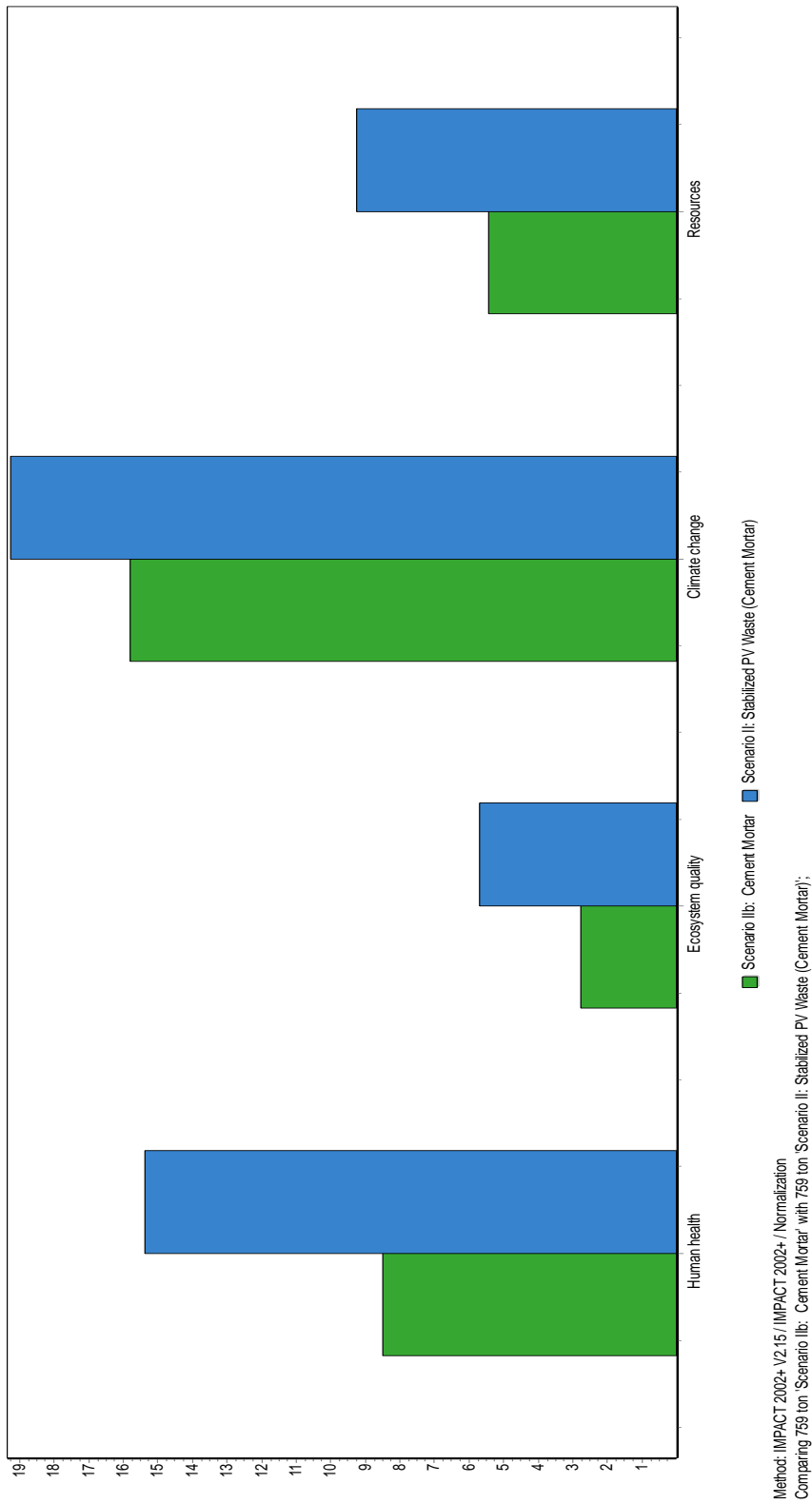
Διάγραμμα 19 Σενάριο I: Απόθεση σε ΧΥΤΑ - Ενδιάμεσοι δείκτες, Μέθοδος IMPACT2002+



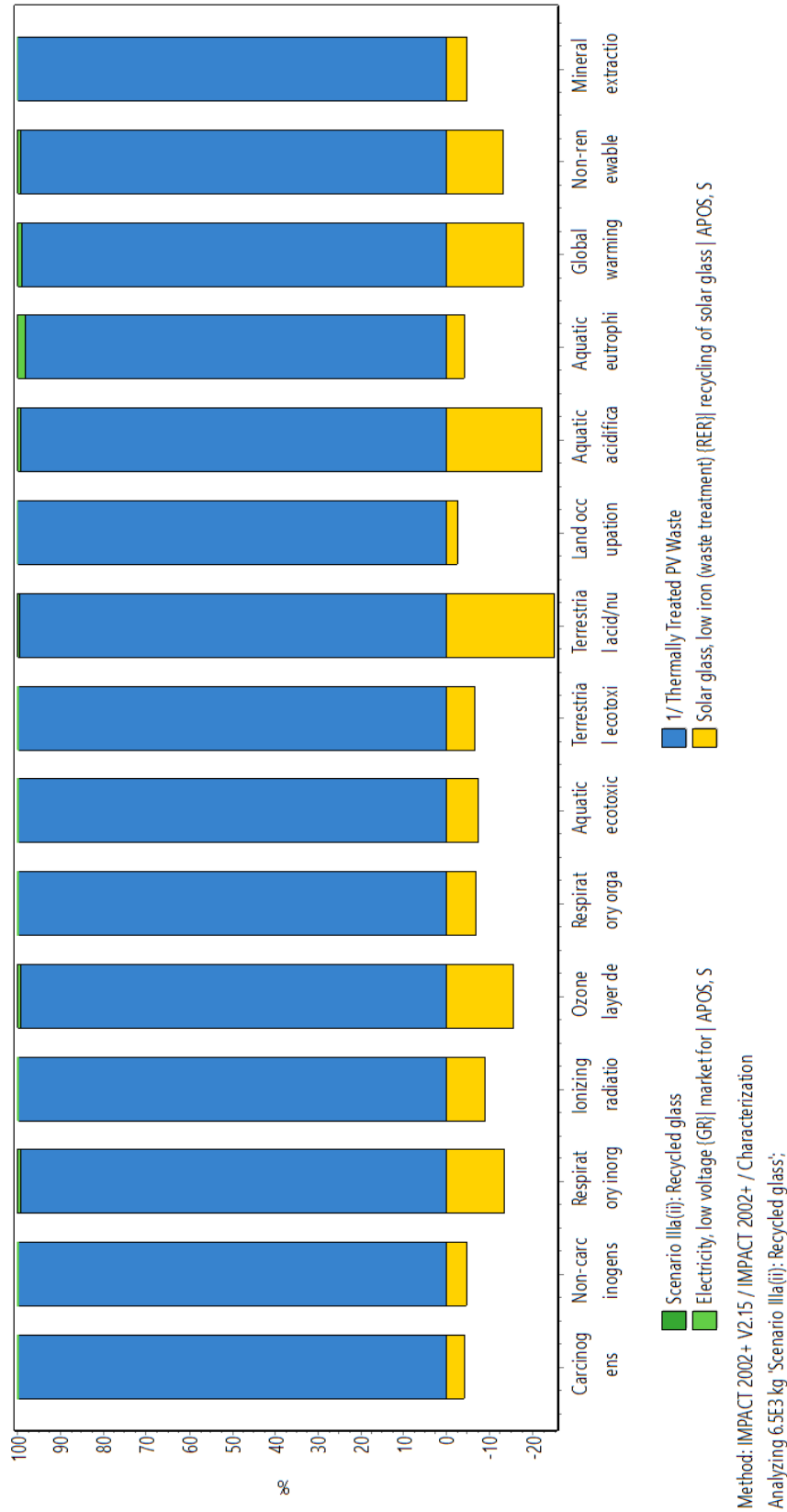
Διάγραμμα 20 Σενάριο II: Σταθεροποίηση σε τσιμεντοκονία – Single Score – Συγκριτικά αποτελέσματα



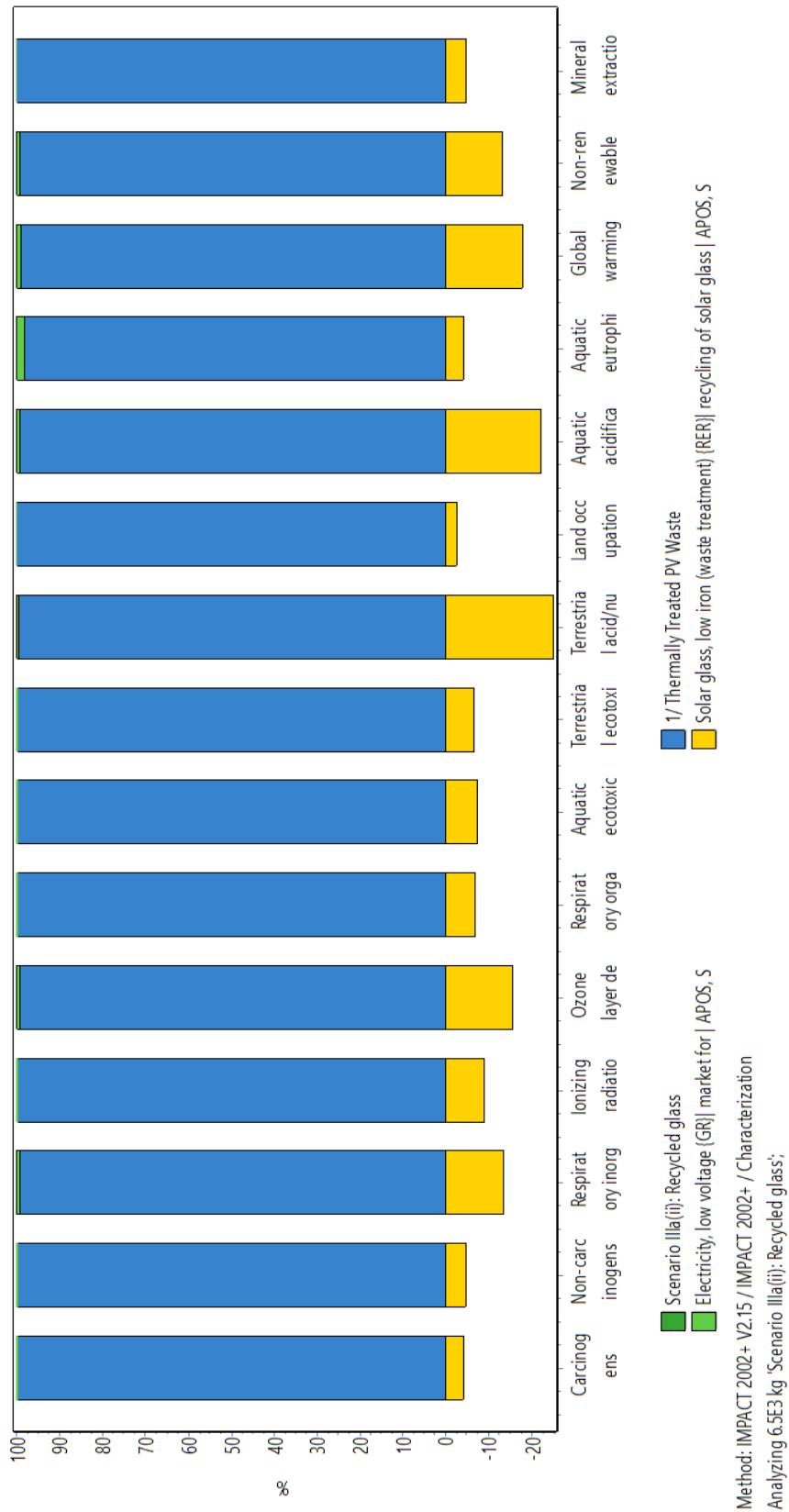
Διάγραμμα 21 Σενάριο II: Σταθεροποίηση σε τσιμεντοκονία - Ενδιάμεσοι δείκτες - Συγκριτικά αποτελέσματα



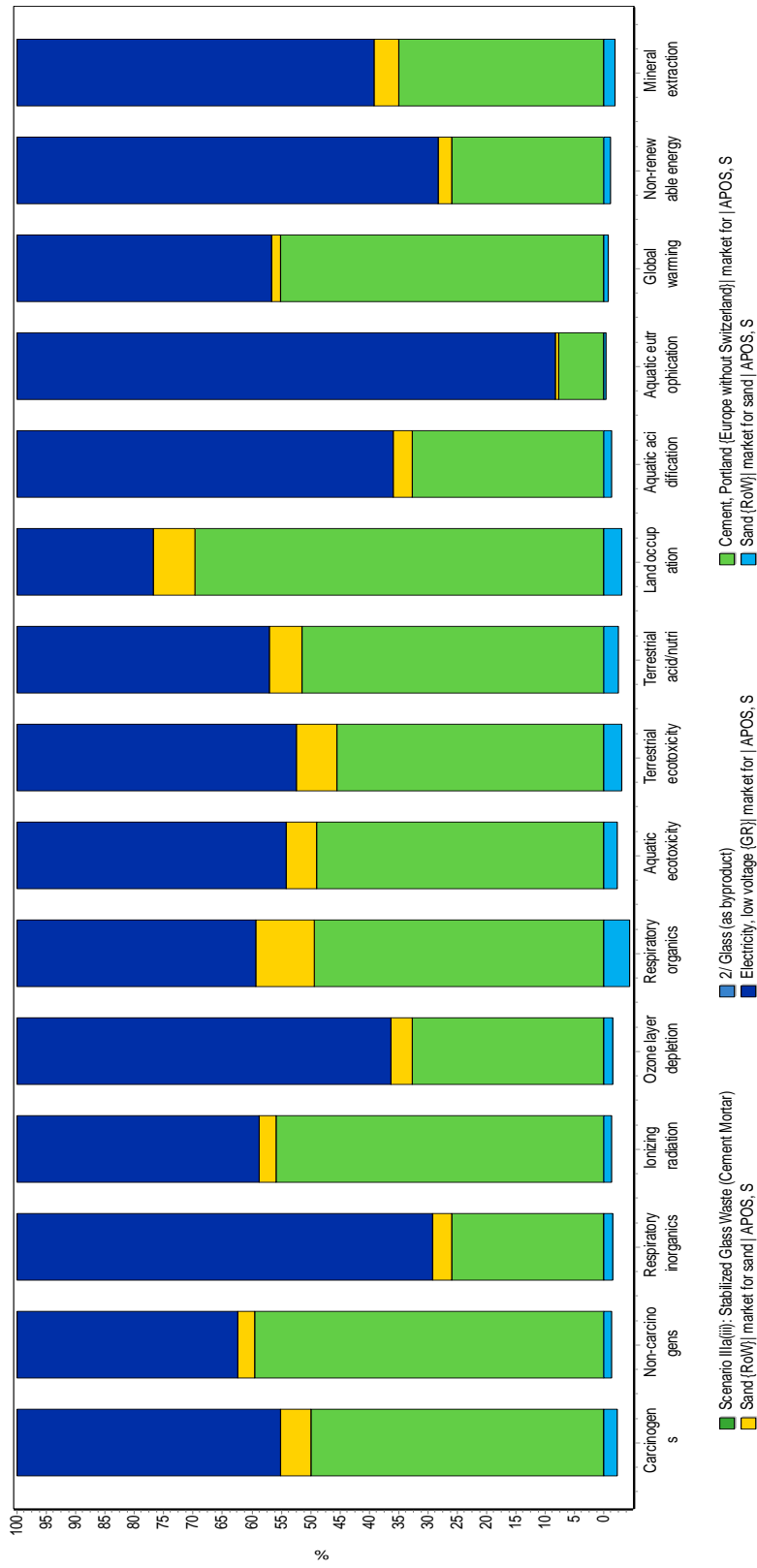
Διάγραμμα 22 Σενάριο II: Σταθεροποίηση σε σιμεντοκονία - Τελικοί δείκτες – Συγκριτικά αποτελέσματα



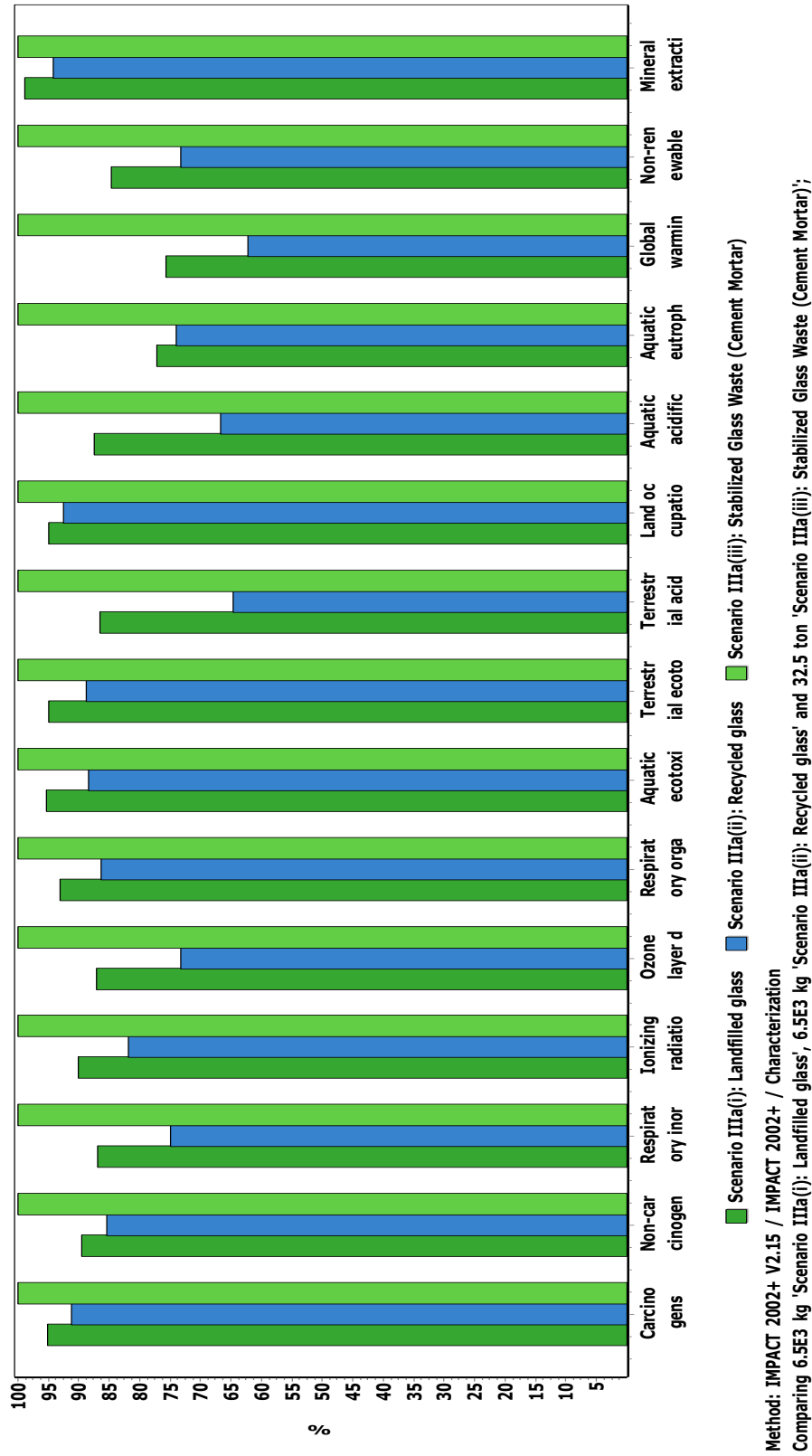
Διάγραμμα 23 Σενάριο Πα(ii): Ανακύκλωση γυαλιού - Ενδιάμεσοι δείκτες



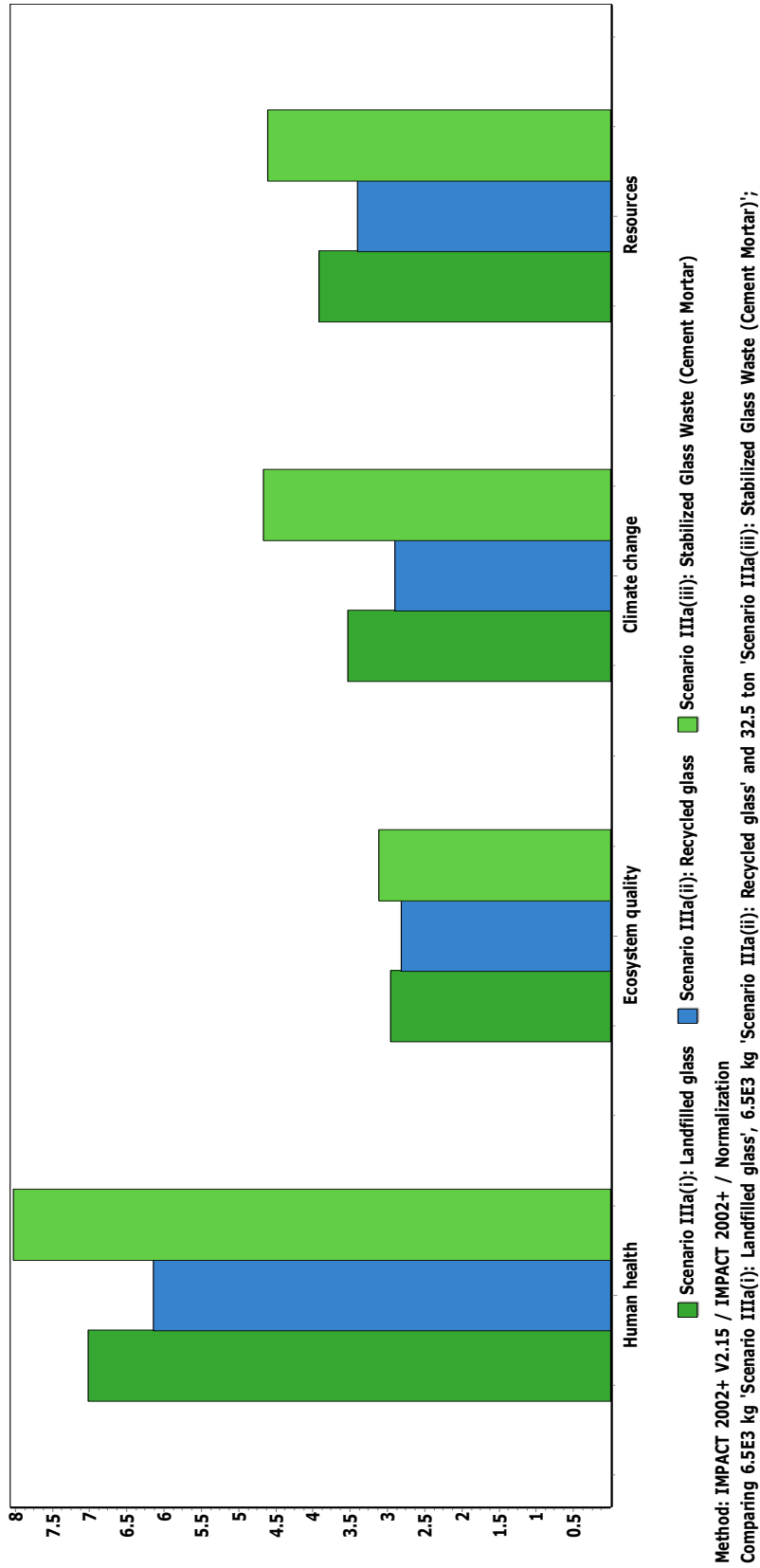
Διάγραμμα 23 Σενάριο IIIa(ii) Ενδιάμεσοι δείκτες – Μέθοδος IMPACT2002+



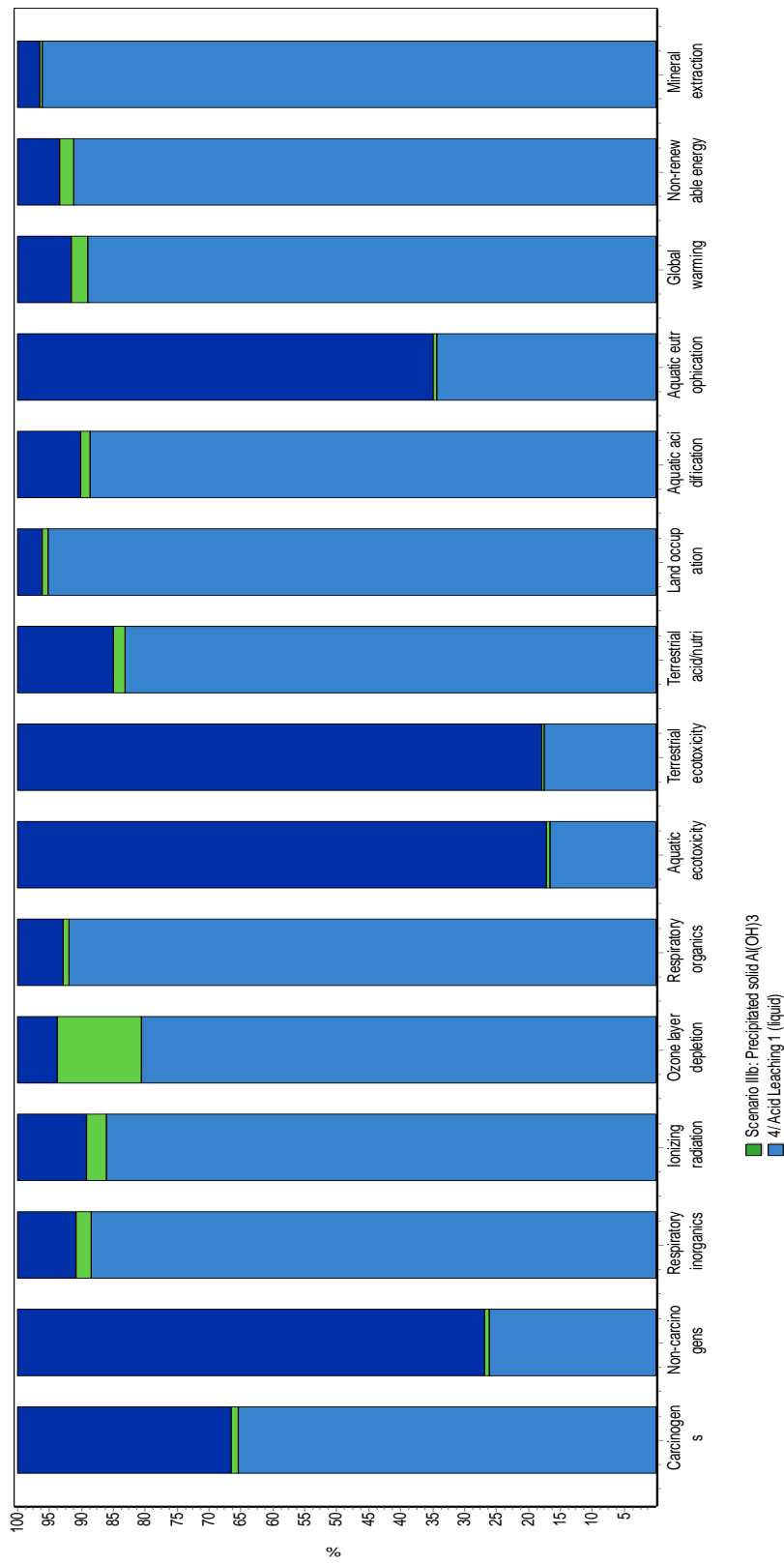
Διάγραμμα 24 Σενάριο IIIa(iii) Ενδιάμεσοι δείκτες – Μέθοδος IMPACT2002+



Διάγραμμα 25 Σενάρια IIIa. Ενδιάμεσοι δείκτες – Συγκριτικά αποτελέσματα

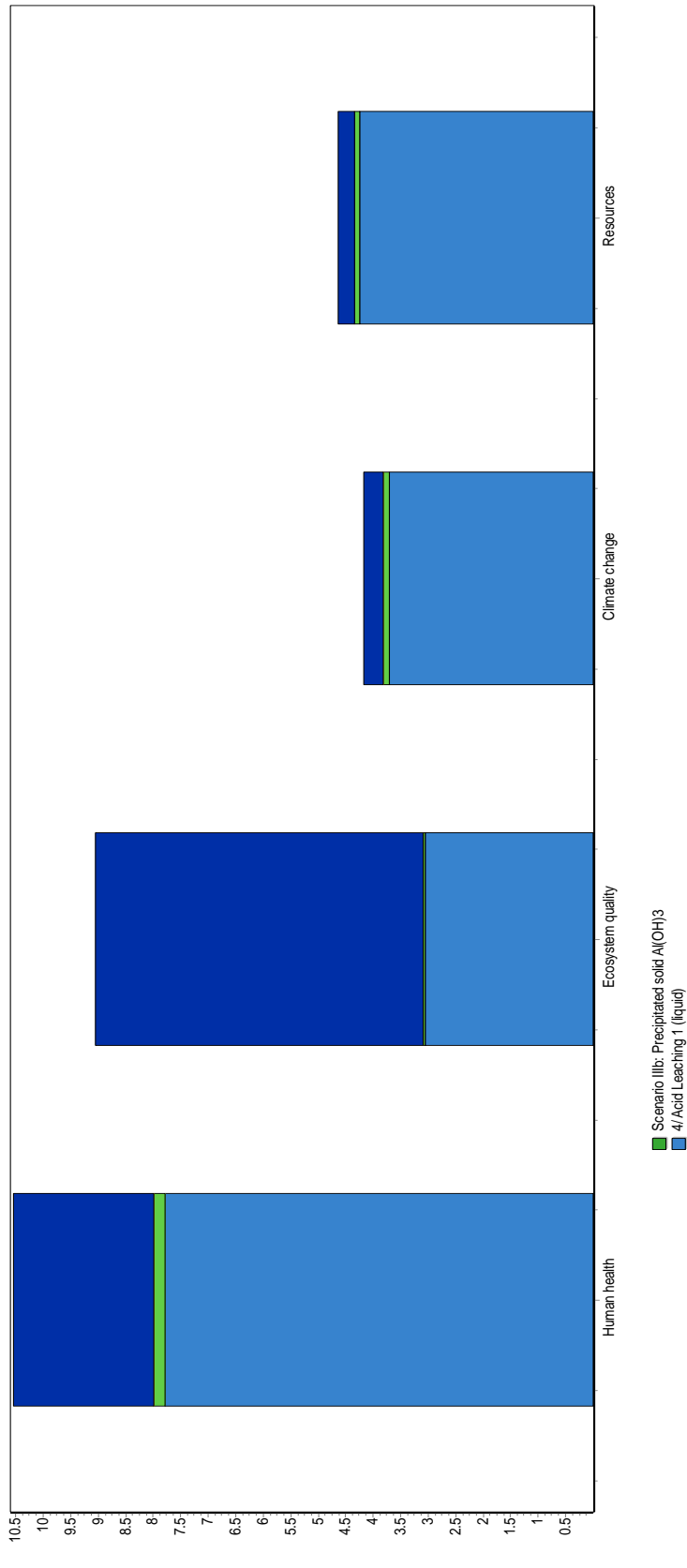


Διάγραμμα 26 Σενάρια IIIa Τελικοί δείκτες – Συγκριτικά αποτελέσματα

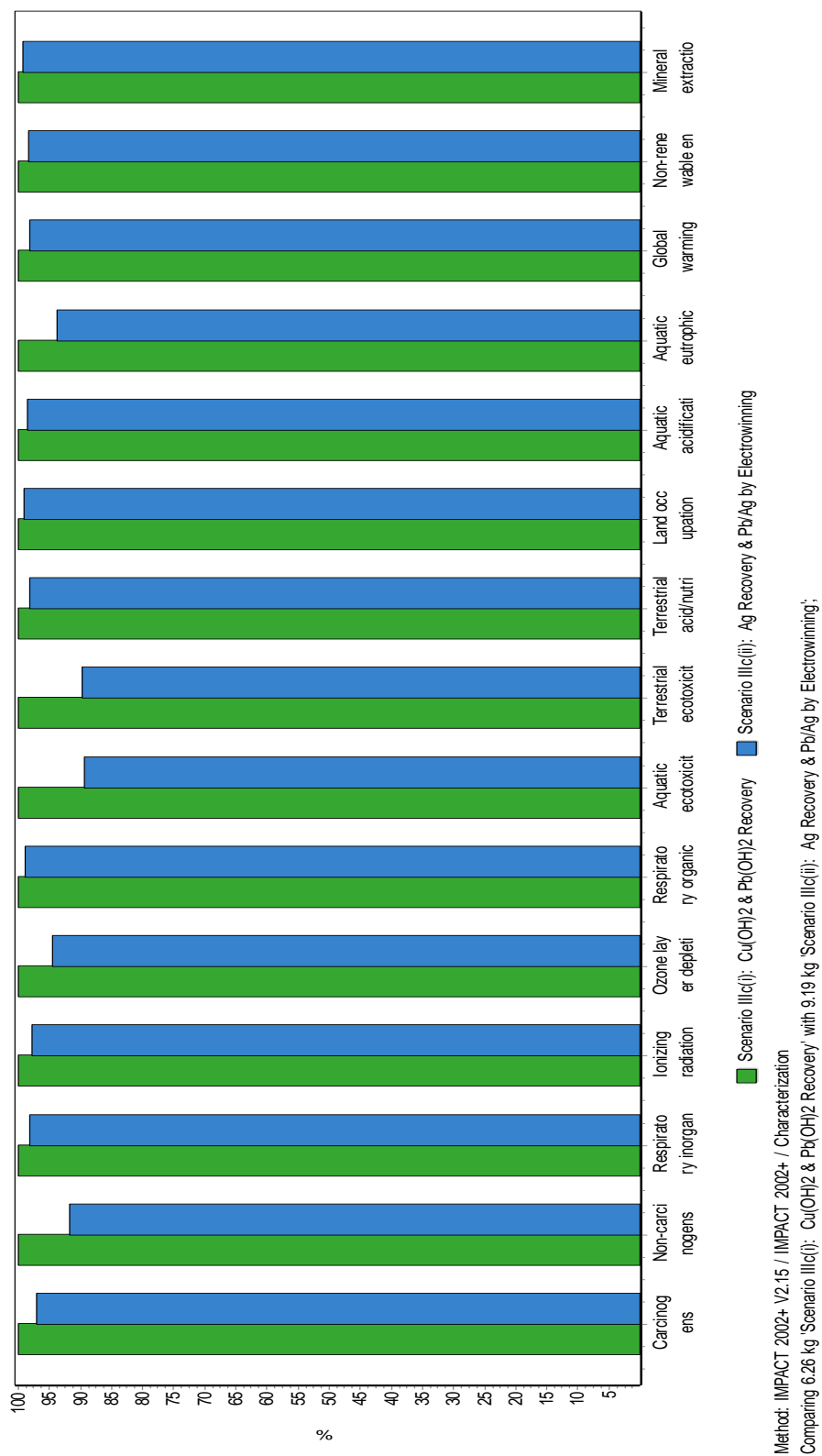


Method: IMPACT 2002+ V2.15 / IMPACT 2002+ / Characterization
Analyzing 96.7 kg Scenario 1Ib: Precipitated solid Al(OH)₃;

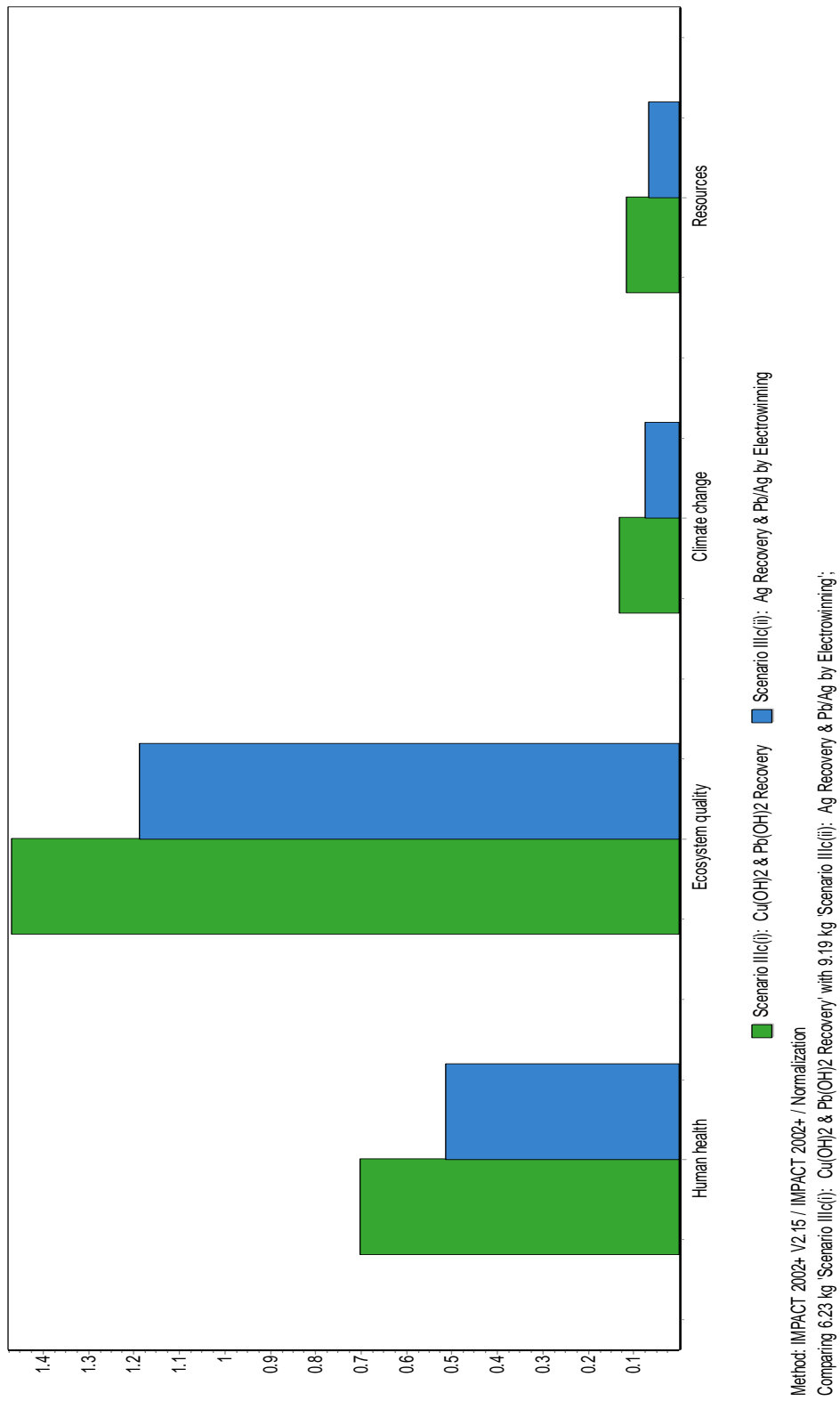
Διάγραμμα 27 Σενάριο 1Ib: Ανάκτηση αλουμνίου – Ενδιάμεσοι δείκτες



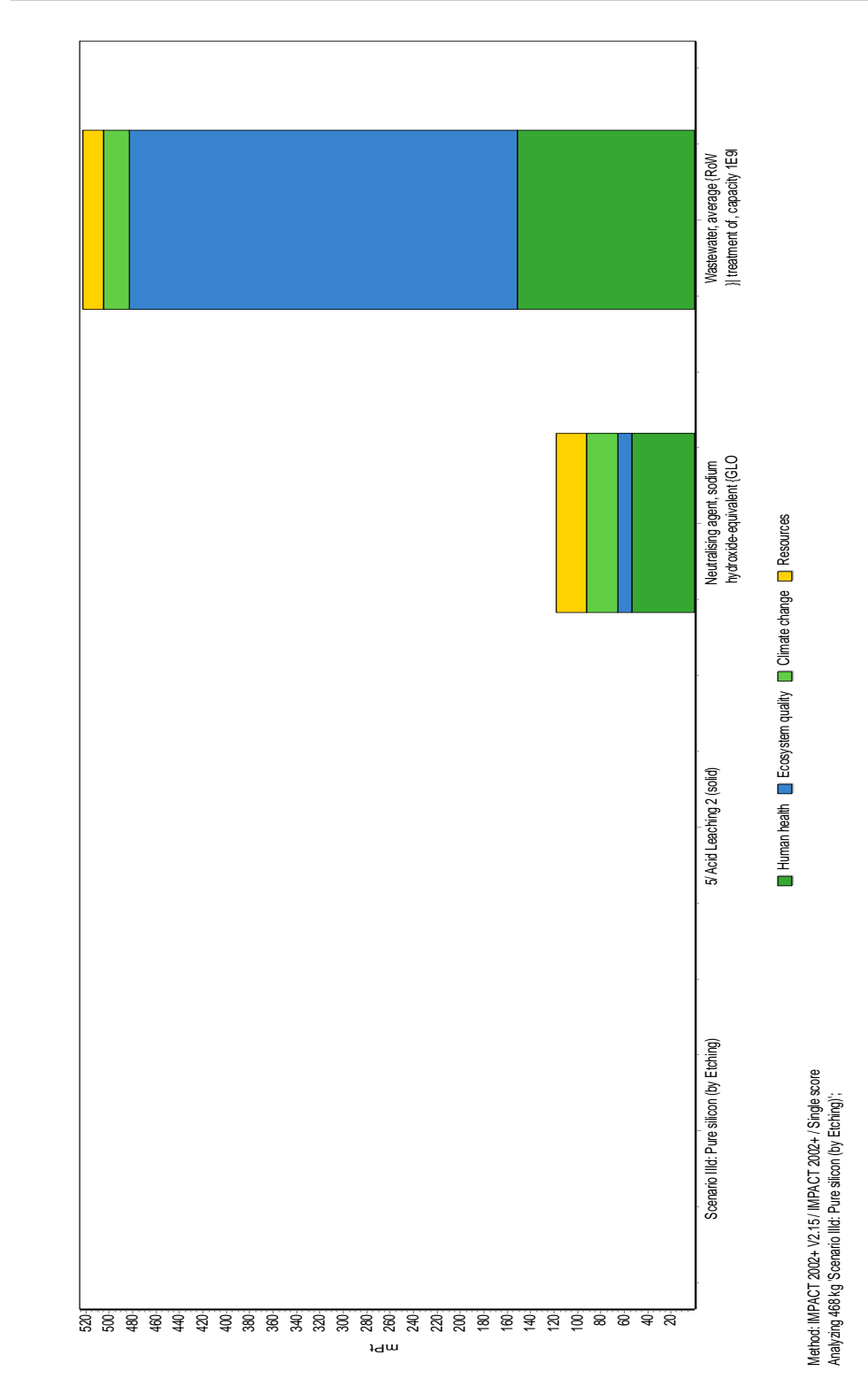
Διάγραμμα 28 Σενάριο IIIb: Ανάκτηση αλουμινίου – Τελικοί δείκτες



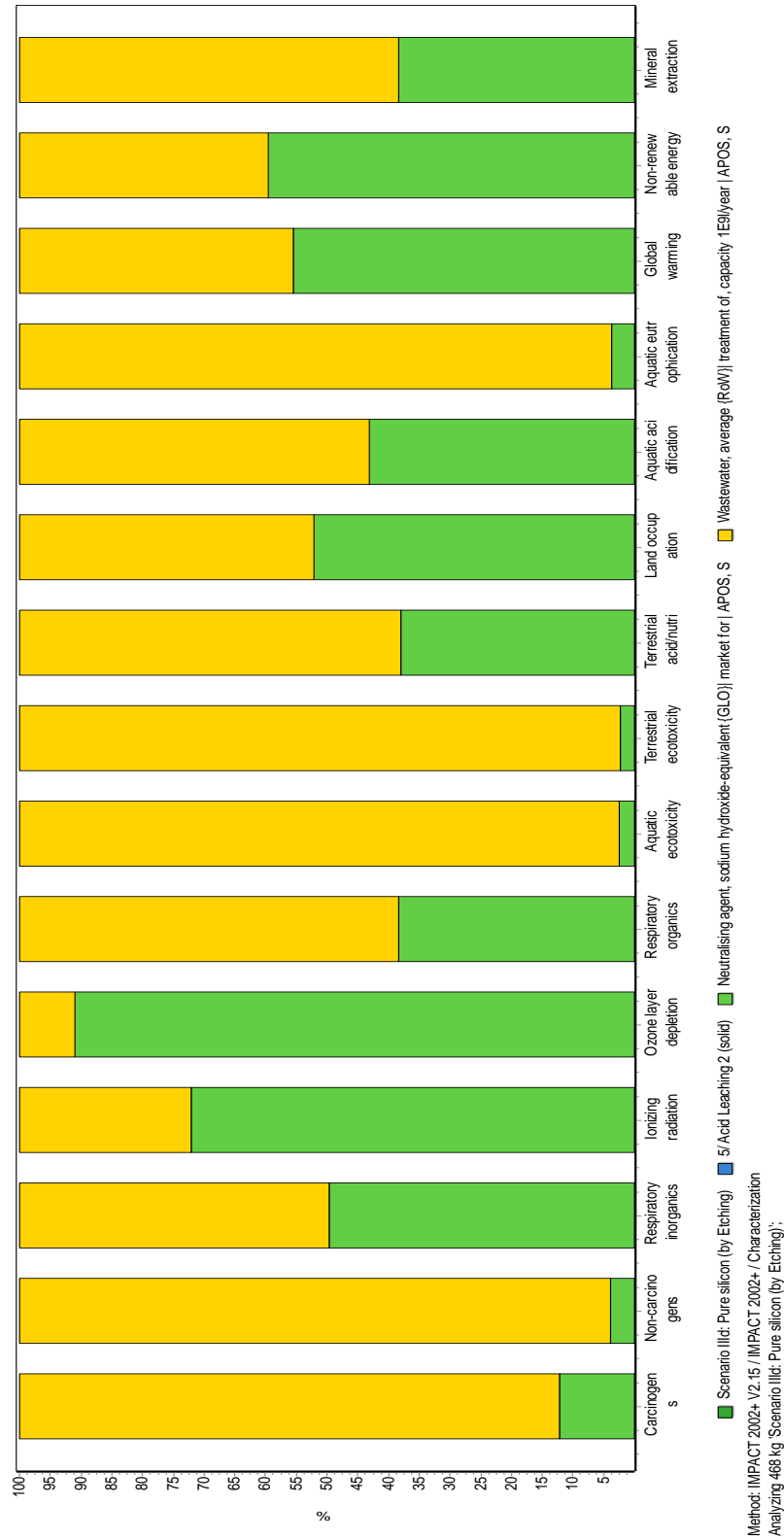
Διάγραμμα 29 Σενάρια IIIc Ενδιάμεσοι δείκτες – Συγκριτικά αποτελέσματα



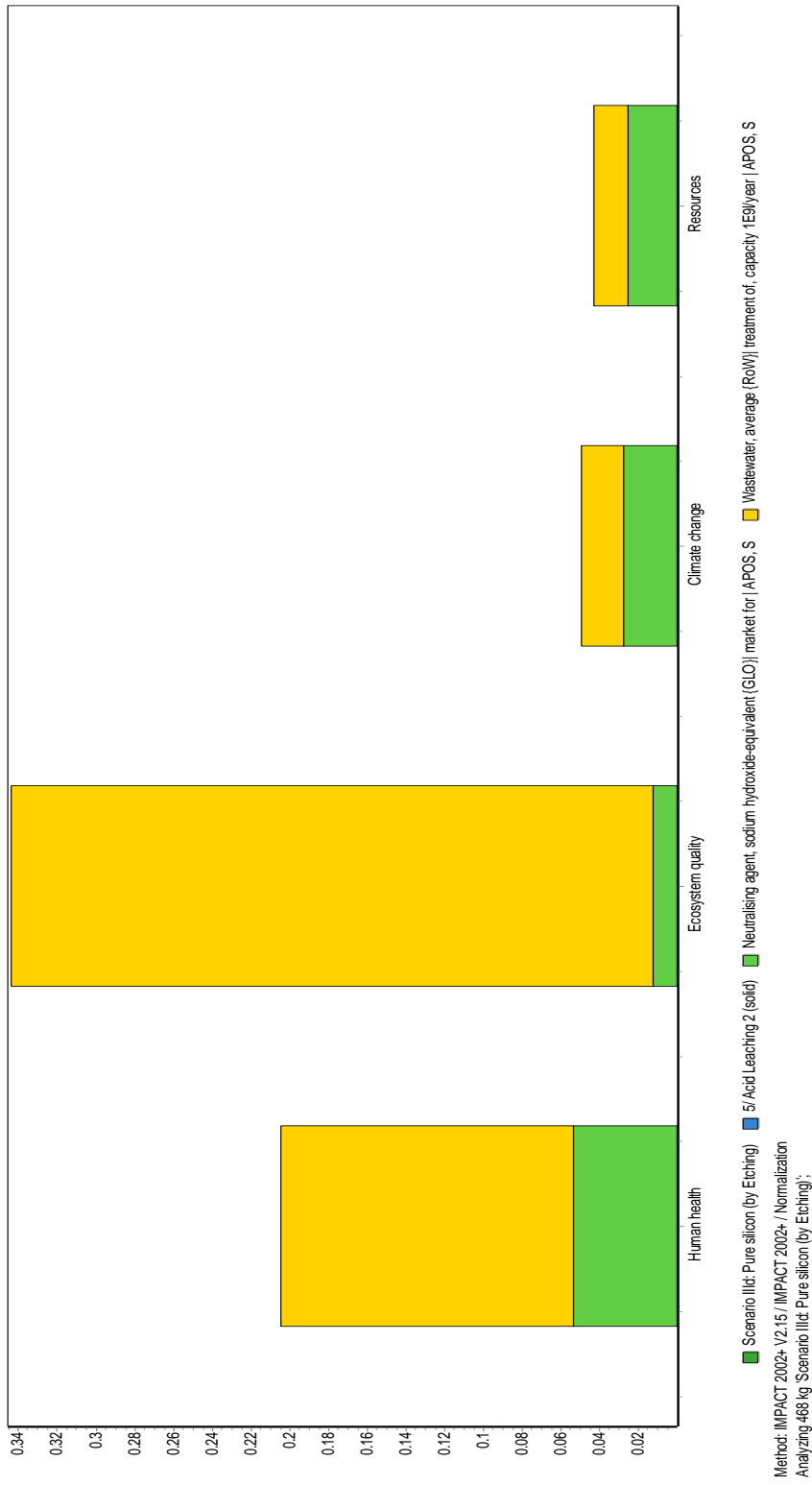
Διάγραμμα 30 Σενάρια IIIc Τελικοί δείκτες – Συγκριτικά αποτελέσματα



Διάγραμμα 31 Σενάριο IIId: Ανάκτηση ποριτίου - Single Score – Μέθοδος IMPACT2002+



Διάγραμμα 32 Σενάριο IIId: Ανάκτηση πυριτίου - Ενδιάμεσοι δείκτες - Μέθοδος IMPACT2002+



Διάγραμμα 33 Σενάριο III: Ανάκτηση πυριτίου - Τελικοί δείκτες - Μέθοδος IMPACT2002+