



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Αξιολόγηση των επιπτώσεων των φωτοβολταϊκών πανέλων
με τεχνικές ανάλυσης κύκλου ζωής**



Φοιτητής: Σκάρκος Νικόλαος
Αριθμός Μητρώου: 18387155

Επιβλέπων
Ψωμόπουλος Κωνσταντίνος Σ.
Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Impact assessment of photovoltaic panels with life cycle analysis techniques



Student: Skarkos Nikolaos
Registration Number: 18387155

Supervisor
Psomopoulos Constantinos S.
Professor

ATHENS-EGALEO, MARCH 2024

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

Ψωμόπουλος Κωνσταντίνος Σ. Καθηγητής	Βόκας Γεώργιος Α. Καθηγητής	Καλογεροπούλου Σοφία Α. Καθηγήτρια
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Σκάρκος Νικόλαος, Μάρτιος, 2024

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

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

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΣΚΑΡΚΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ του ΣΠΥΡΙΔΩΝΟΣ με αριθμό μητρώου 18387155 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

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

Ο Δηλών

Σκάρκος Νικόλαος



(Υπογραφή φοιτητή)

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Κύκλου Ειδίκευσης Σπουδών Ενέργειας του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Πρωτίστως, απευθύνονται ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Ψωμόπουλο Κωνσταντίνο, στον εργαστηριακό διδάσκοντα κύριο Χρόνη Ιωάννη και στην ακαδημαϊκή υπότροφο κυρία Μέντη Ανθούλα για την ανάθεση του θέματος και την καθοδήγησή τους στην έρευνα και τη μελέτη αυτού.

Δευτερευόντως, αξίζει να τονιστεί η ευγνωμοσύνη και ο σεβασμός του συγγραφέα προς το οικογενειακό περιβάλλον του για την αδιάκοπη στήριξη στον τομέα της εκπαίδευσης.

Περίληψη

Με την αύξηση τόσο του πληθυσμού όσο και της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας, η σύγχρονη κοινωνία πλησιάζει τα φυσικά όρια της διαθεσιμότητας των ορυκτών καυσίμων. Για να είναι μια μελλοντική κοινωνία βιώσιμη και να λειτουργεί σε ένα ικανοποιητικό περιβάλλον διαβίωσης, πρέπει να υπάρξει αποστροφή από τις πηγές ενέργειας που βασίζονται στον άνθρακα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την ηλιακή ενέργεια. Η αξιοποίησή της επιτυγχάνεται μέσω των φωτοβολταϊκών πανέλων, που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι φωτοβολταϊκές τεχνολογίες αναπτύσσονται ραγδαία, ως αποτέλεσμα της ικανότητά τους να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας από συμβατικές πηγές, όπως ο λιγνίτης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρέχεται μια επισκόπηση της τρέχουσας κατάστασης των φωτοβολταϊκών, προκειμένου να γίνει κατανοητή η σημασία τους, η οποία εξαρτάται από την ανάπτυξη των παγκόσμιων ενεργειακών δαπανών. Ωστόσο, μελετώνται και οι επιπτώσεις των φωτοβολταϊκών στον ανθρώπινο και στον περιβαλλοντικό τομέα με τη μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής. Πρόκειται για μια χρήσιμη τεχνική αξιολόγησης του προφίλ ενός προϊόντος σε σχέση με τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Τέτοιες αναλύσεις κύκλου ζωής των ενεργειακών τεχνολογιών είναι ζωτικής σημασίας, καθώς μπορούν να συμβάλουν στην εμφάνιση αποκλινουσών εκπομπών σε διάφορα στάδια του κύκλου ζωής. Συνεπώς, χρίζεται καίρια η αξιολόγηση των επιπτώσεων των φωτοβολταϊκών πανέλων μέσω της ανάλυσης κύκλου ζωής.

Λέξεις – κλειδιά

Φωτοβολταϊκές τεχνολογίες, φωτοβολταϊκά πάνελ, ανάλυση κύκλου ζωής, τέλος κύκλου ζωής, αξιολόγηση επιπτώσεων κύκλου ζωής.

Abstract

With both population and per capita energy consumption increasing, modern society is approaching the natural limits of fossil fuel availability. For a future society to be sustainable and to function in a satisfactory living environment, there must be a shift from carbon-based energy sources to renewable energy sources, with solar energy being a prime example. Its utilization is achieved through photovoltaic panels, which convert solar radiation into electricity. Photovoltaic technologies are developing rapidly as a result of their ability to reduce energy consumption from conventional sources, such as lignite. In this diploma thesis, an overview of the current state of photovoltaics is provided in order to understand their importance, which depends on the growth of the global energy expenditure. However, the impact of photovoltaics on the human and environmental sectors is also studied using the methodology of life cycle analysis. It is a useful technique for assessing the human and environmental profile of a product. Such life cycle analyses of energy technologies are crucial, as they can contribute to the occurrence of divergent emissions at different stages of the life cycle. Therefore, it is crucial to assess the impact of photovoltaic panels through life cycle analysis.

Keywords

Photovoltaic technologies, photovoltaic panels, life cycle analysis, end of life, life cycle impact assessment.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	13
Κατάλογος Εικόνων	16
Κατάλογος Διαγραμμάτων	18
Αλφαβητικό Ευρετήριο	21
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	22
Αντικείμενο.....	22
Σκοπός.....	22
Δομή.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	25
1.1 Ενέργεια.....	25
1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	25
1.3 Ηλιακή Ενέργεια	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ	29
2.1 Φωτοβολταϊκό Σύστημα	29
2.1.1 Ορισμός.....	29
2.1.2 Κατηγορίες	29
2.1.3 Εξαρτήματα	29
2.1.4 Ισχύς και Απόδοση	30
2.2 Φωτοβολταϊκό Κελί	31
2.2.1 Εξήγηση	31
2.2.2 Τεχνολογίες.....	31
2.2.3 Αρχή Λειτουργίας.....	32
2.2.4 Δομή.....	33
2.2.5 Μοντελοποίηση	34
2.2.6 Χαρακτηριστική Καμπύλη	35
2.3 Φωτοβολταϊκό Πάνελ.....	36
2.3.1 Ερμηνεία.....	36
2.3.2 Κατασκευή.....	37
2.3.3 Χαρακτηριστική Εξίσωση	38
2.3.4 Εξωτερικοί Παράγοντες	38
2.4 Φωτοβολταϊκή Συστοιχία.....	40
2.4.1 Σημασία.....	40
2.4.2 Συνδεσμολογίες.....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ «ΒΑΡΟΜΕΤΡΟ».....	43

3.1 Παγκόσμια Φωτοβολταϊκή Ισχύς	43
3.2 Ευρωπαϊκή Φωτοβολταϊκή Χωρητικότητα.....	43
3.3 Βιομηχανία Φωτοβολταϊκών	45
3.3.1 Παραγωγή Πολυπυριτίου	45
3.3.2 Παραγωγή Ράβδων και Πλακιδίων.....	45
3.3.3 Παραγωγή Φωτοβολταϊκών Κελιών.....	46
3.3.4 Παραγωγή Φωτοβολταϊκών Πανέλων	46
3.4 Φωτοβολταϊκά Απόβλητα	47
3.4.1 Προβλέψεις Αύξησης.....	47
3.4.2 Σχέδιο Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ	50
4.1 Γενική Περιγραφή.....	50
4.2 Πρότυπα και Διαδικαστικά Βήματα	50
4.3 Στάδια.....	52
4.4 Τέλος Κύκλου Ζωής	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ	56
5.1 Επεξήγηση	56
5.2 Κύκλος Ζωής Φωτοβολταϊκών Τεχνολογιών.....	61
5.2.1 Κρυσταλλικού Πυριτίου.....	61
5.2.2 Λεπτής Μεμβράνης	62
5.3 Επιπτώσεις Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών	63
5.3.1 Κλιματική Αλλαγή.....	63
5.3.2 Καταστροφή του Όζοντος	65
5.3.3 Τοξικότητα για τον Άνθρωπο	66
5.3.4 Σωματιδιακή Ύλη.....	66
5.3.5 Ιονίζουσα Ακτινοβολία	67
5.3.6 Σχηματισμός Φωτοχημικού Όζοντος.....	68
5.3.7 Οξίνιση.....	69
5.3.8 Ευτροφισμός.....	69
5.3.9 Οικοτοξικότητα	70
5.3.10 Χρήση Γης.....	72
5.3.11 Εξάντληση Πόρων	72
5.3.12 Σωρευτική Ζήτηση Ενέργειας.....	74
5.4 Τέλος Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών	74
5.4.1 Στρατηγικές Διαχείρισης	74
5.4.2 Μείωση.....	75

5.4.3 Επαναχρησιμοποίηση	76
5.4.4 Ανακύκλωση	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ.....	78
6.1 Γενική Εικόνα	78
6.2 Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής.....	79
6.2.1 Λογισμικά Προσομοίωσης	79
6.2.2 Βάσεις Δεδομένων.....	79
6.2.3 Μέθοδοι.....	80
6.3 Πεδίο Εφαρμογής Πρώτου Σεναρίου.....	82
6.3.1 Λειτουργική Μονάδα και Ροή Αναφοράς	82
6.3.2 Οριοθέτηση Συστήματος.....	82
6.3.3 Παραγωγή, Μεταφορά και Εγκατάσταση	82
6.3.4 Ταξινόμηση και Χαρακτηρισμός	83
6.3.5 Κανονικοποίηση και Στάθμιση	84
6.4 Απογραφή Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών Πρώτης Περίπτωσης.....	84
6.4.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά	84
6.4.2 Κατάλογος Υλικών.....	85
6.5 Απογραφή Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών Δεύτερης Περίπτωσης.....	85
6.5.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά	85
6.5.2 Κατάλογος Υλικών.....	86
6.6 Απογραφή Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών Τρίτης Περίπτωσης	86
6.6.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά	86
6.6.2 Κατάλογος Υλικών.....	87
6.7 Απογραφή Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών Τέταρτης Περίπτωσης	87
6.7.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά	87
6.7.2 Κατάλογος Υλικών.....	88
6.8 Απογραφή Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών Πέμπτης Περίπτωσης.....	88
6.8.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά	88
6.8.2 Κατάλογος Υλικών.....	89
6.9 Αποτελέσματα Πρώτης Περίπτωσης	89
6.9.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση.....	89
6.9.2 Με Κανονικοποίηση.....	92
6.9.3 Με Στάθμιση.....	95
6.10 Αποτελέσματα Δεύτερης Περίπτωσης	98
6.10.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση	98
6.10.2 Με Κανονικοποίηση	101
6.10.3 Με Στάθμιση.....	104

6.11 Αποτελέσματα Τρίτης Περίπτωσης	107
6.11.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση	107
6.11.2 Με Κανονικοποίηση	110
6.11.3 Με Στάθμιση	113
6.12 Αποτελέσματα Τέταρτης Περίπτωσης	116
6.12.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση	116
6.12.2 Με Κανονικοποίηση	119
6.12.3 Με Στάθμιση	122
6.13 Αποτελέσματα Πέμπτης Περίπτωσης	125
6.13.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση	125
6.13.2 Με Κανονικοποίηση	128
6.13.3 Με Στάθμιση	131
6.14 Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων Πρώτης Περίπτωσης	134
6.14.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση	134
6.14.2 Με Κανονικοποίηση	136
6.14.3 Με Στάθμιση	138
6.14.4 Σύνοψη	140
6.15 Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων Δεύτερης Περίπτωσης	141
6.15.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση	141
6.15.2 Με Κανονικοποίηση	142
6.15.3 Με Στάθμιση	144
6.15.4 Σύνοψη	146
6.16 Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων Τρίτης Περίπτωσης	147
6.16.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση	147
6.16.2 Με Κανονικοποίηση	148
6.16.3 Με Στάθμιση	150
6.16.4 Σύνοψη	152
6.17 Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων Τέταρτης Περίπτωσης	153
6.17.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση	153
6.17.2 Με Κανονικοποίηση	154
6.17.3 Με Στάθμιση	156
6.17.4 Σύνοψη	158
6.18 Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων Πέμπτης Περίπτωσης	159
6.18.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση	159
6.18.2 Με Κανονικοποίηση	160
6.18.3 Με Στάθμιση	162
6.18.4 Σύνοψη	164

6.19 Συγκεντρωτικές Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων.....	165
6.19.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση	165
6.19.2 Με Κανονικοποίηση	166
6.19.3 Με Στάθμιση.....	168
6.20 Πεδίο Εφαρμογής Δεύτερου Σεναρίου	170
6.20.1 Περιγραφή Συστήματος	170
6.20.2 Δεδομένα Εισόδου και Εξόδου	171
6.21 Αποτελέσματα	172
6.21.1 Πρώτη Μέθοδος.....	172
6.21.2 Δεύτερη Μέθοδος.....	173
6.21.3 Τρίτη Μέθοδος.....	173
6.21.4 Τέταρτη Μέθοδος.....	174
6.22 Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων	174
6.22.1 Πρώτη Μέθοδος.....	174
6.22.2 Δεύτερη Μέθοδος.....	176
6.22.3 Τρίτη Μέθοδος.....	177
6.22.4 Τέταρτη Μέθοδος.....	178
6.23 Συγκεντρωτικές Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων.....	179
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	188
Αναφορές.....	191
Παράρτημα Α	197

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5.1: Υλικά φωτοβολταϊκών κελιών [31]	75
Πίνακας 6.1: Κατηγορίες επιπτώσεων και δείκτες [79]	83
Πίνακας 6.2: Συντελεστές κανονικοποίησης και στάθμισης [79]	84
Πίνακας 6.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πανέλων πρώτης περίπτωσης [79]	85
Πίνακας 6.4: Κατάλογος υλικών πρώτης περίπτωσης [79]	85
Πίνακας 6.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πανέλων δεύτερης περίπτωσης [79].....	86
Πίνακας 6.6: Κατάλογος υλικών δεύτερης περίπτωσης [79]	86
Πίνακας 6.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πανέλων τρίτης περίπτωσης [79]	87
Πίνακας 6.8: Κατάλογος υλικών τρίτης περίπτωσης [79]	87
Πίνακας 6.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πανέλων τέταρτης περίπτωσης [79].....	88
Πίνακας 6.10: Κατάλογος υλικών τέταρτης περίπτωσης [79].....	88
Πίνακας 6.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πανέλων πέμπτης περίπτωσης [79].....	89
Πίνακας 6.12: Κατάλογος υλικών πέμπτης περίπτωσης [79]	89
Πίνακας 6.13α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής πρώτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]	90
Πίνακας 6.13β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής πρώτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]	91
Πίνακας 6.13γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση πρώτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79].....	92
Πίνακας 6.14α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής πρώτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]	93
Πίνακας 6.14β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής πρώτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]	94
Πίνακας 6.14γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση πρώτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]	95
Πίνακας 6.15α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής πρώτης περίπτωσης με στάθμιση [79]	96
Πίνακας 6.15β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής πρώτης περίπτωσης με στάθμιση [79]	97
Πίνακας 6.15γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση πρώτης περίπτωσης με στάθμιση [79]	98

Πίνακας 6.16α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής δεύτερης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79].....	99
Πίνακας 6.16β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής δεύτερης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79].....	100
Πίνακας 6.16γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση δεύτερης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79].....	101
Πίνακας 6.17α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής δεύτερης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79].....	102
Πίνακας 6.17β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής δεύτερης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79].....	103
Πίνακας 6.17γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση δεύτερης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79].....	104
Πίνακας 6.18α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής δεύτερης περίπτωσης με στάθμιση [79].....	105
Πίνακας 6.18β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής δεύτερης περίπτωσης με στάθμιση [79].....	106
Πίνακας 6.18γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση δεύτερης περίπτωσης με στάθμιση [79].....	107
Πίνακας 6.19α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής τρίτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]	108
Πίνακας 6.19β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής τρίτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]	109
Πίνακας 6.19γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση τρίτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79].....	110
Πίνακας 6.20α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής τρίτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]	111
Πίνακας 6.20β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής τρίτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]	112
Πίνακας 6.20γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση τρίτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]	113
Πίνακας 6.21α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής τρίτης περίπτωσης με στάθμιση [79]	114
Πίνακας 6.21β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής τρίτης περίπτωσης με στάθμιση [79]	115

Πίνακας 6.21γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση τρίτης περίπτωσης με στάθμιση [79]	116
Πίνακας 6.22α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής τέταρτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]	117
Πίνακας 6.22β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής τέταρτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]	118
Πίνακας 6.22γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση τέταρτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]	119
Πίνακας 6.23α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής τέταρτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]	120
Πίνακας 6.23β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής τέταρτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]	121
Πίνακας 6.23γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση τέταρτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]	122
Πίνακας 6.24α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής τέταρτης περίπτωσης με στάθμιση [79]	123
Πίνακας 6.24β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής τέταρτης περίπτωσης με στάθμιση [79]	124
Πίνακας 6.24γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση τέταρτης περίπτωσης με στάθμιση [79]	125
Πίνακας 6.25α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής πέμπτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]	126
Πίνακας 6.25β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής πέμπτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]	127
Πίνακας 6.25γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση πέμπτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]	128
Πίνακας 6.26α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής πέμπτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]	129
Πίνακας 6.26β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής πέμπτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]	130
Πίνακας 6.26γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση πέμπτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]	131
Πίνακας 6.27α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής πέμπτης περίπτωσης με στάθμιση [79]	132

Πίνακας 6.27β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής πέμπτης περίπτωσης με στάθμιση [79].....	133
Πίνακας 6.27γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση πέμπτης περίπτωσης με στάθμιση [79].....	134
Πίνακας 6.28: Ενδεικτικά δεδομένα εισόδου υπό εξέταση συστήματος.....	171
Πίνακας 6.29: Ενδεικτικά δεδομένα εξόδου υπό εξέταση συστήματος.....	172
Πίνακας 6.30: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων ανά τομείς πρώτης μεθόδου.....	173
Πίνακας 6.31: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων ανά τομείς δεύτερης μεθόδου.....	173
Πίνακας 6.32: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων ανά τομείς τρίτης μεθόδου.....	174
Πίνακας 6.33: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων ανά τομείς τέταρτης μεθόδου.....	174

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Παγκόσμιος χάρτης χρήσης ενέργειας [2].....	25
Εικόνα 2.1: Τρόπος λειτουργίας φωτοβολταϊκού συστήματος [11].....	29
Εικόνα 2.2: Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κελιών [15].....	31
Εικόνα 2.3: Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκού κελιού [8].....	33
Εικόνα 2.4: Δομή φωτοβολταϊκού κελιού [17].....	34
Εικόνα 2.5: Στοιχειώδες ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού κελιού [18].....	34
Εικόνα 2.6: Φωτοβολταϊκό πάνελ [20].....	37
Εικόνα 2.7: Διαδικασία κατασκευής φωτοβολταϊκού πανέλου [21].....	38
Εικόνα 2.8: Φωτοβολταϊκή συστοιχία [24].....	41
Εικόνα 2.9: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε σειρά [25].....	41
Εικόνα 2.10: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε παραλληλία [25].....	42
Εικόνα 3.1: Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω πλωτών φωτοβολταϊκών [26].....	44
Εικόνα 3.2: Αυτόνομος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με φωτοβολταϊκά στέγης [26].	44
Εικόνα 3.3: Παγκόσμιο μερίδιο παραγωγής πολυπυριτίου [14].....	45
Εικόνα 3.4: Παγκόσμιο μερίδιο παραγωγής πλακιδίων [14].....	46
Εικόνα 3.5: Παγκόσμιο μερίδιο παραγωγής φωτοβολταϊκών κελιών [14].....	46
Εικόνα 3.6: Παγκόσμιο μερίδιο παραγωγής φωτοβολταϊκών πανέλων [14].....	47
Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής διαδικαστικών βημάτων ανάλυσης κύκλου ζωής [29].....	51
Εικόνα 4.2: Στάδια ανάλυσης κύκλου ζωής [30].....	54
Εικόνα 4.3: Πυραμίδα στρατηγικών διαχείρισης τέλους κύκλου ζωής [31].....	54
Εικόνα 5.1: Διάγραμμα ροής σταδίων κύκλου ζωής φωτοβολταϊκών πανέλων [32].....	56
Εικόνα 5.2: Στάδιο εξόρυξης πρώτων υλών [33].....	57

Εικόνα 5.3: Στάδιο επεξεργασίας υλικών [34]	57
Εικόνα 5.4: Στάδιο παραγωγής φωτοβολταϊκών κελιών [21]	57
Εικόνα 5.5: Στάδιο παραγωγής φωτοβολταϊκών πανέλων [35].....	58
Εικόνα 5.6: Στάδιο μεταφοράς φωτοβολταϊκών πανέλων [36].....	58
Εικόνα 5.7: Στάδιο εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πανέλων [36].....	59
Εικόνα 5.8: Στάδιο χρήσης φωτοβολταϊκών πανέλων [14].....	59
Εικόνα 5.9: Στάδιο παροπλισμού φωτοβολταϊκών πανέλων [37].....	60
Εικόνα 5.10: Στάδιο ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πανέλων [38].....	60
Εικόνα 5.11: Στάδιο κατεργασίας / απόρριψης φωτοβολταϊκών πανέλων [38].....	61
Εικόνα 5.12: Διάγραμμα ροής σταδίων κύκλου ζωής φωτοβολταϊκής τεχνολογίας κρυσταλλικού πυριτίου [39]	62
Εικόνα 5.13: Διάγραμμα ροής σταδίων κύκλου ζωής φωτοβολταϊκής τεχνολογίας τελλουριδίου καδμίου [39].....	63
Εικόνα 5.14: Κλιματική αλλαγή και ανθρώπινη υγεία [42]	64
Εικόνα 5.15: Κλιματική αλλαγή και ποιότητα οικοσυστημάτων [43].....	65
Εικόνα 5.16: Καταστροφή του όζοντος και ανθρώπινη υγεία [44].....	65
Εικόνα 5.17: Τοξικότητα για τον άνθρωπο και ανθρώπινη υγεία [46].....	66
Εικόνα 5.18: Σωματιδιακή ύλη και ανθρώπινη υγεία [48]	67
Εικόνα 5.19: Ιονίζουσα ακτινοβολία και ανθρώπινη υγεία [51]	68
Εικόνα 5.20: Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος και ανθρώπινη υγεία [52].....	68
Εικόνα 5.21: Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος και ποιότητα οικοσυστημάτων [53].....	69
Εικόνα 5.22: Οξίνιση και ποιότητα οικοσυστημάτων [55]	69
Εικόνα 5.23: Ευτροφισμός γλυκών υδάτων και ποιότητα οικοσυστημάτων [56].....	70
Εικόνα 5.24: Θαλάσσιος ευτροφισμός και ποιότητα οικοσυστημάτων [57].....	70
Εικόνα 5.25: Χερσαία οικοτοξικότητα και ποιότητα οικοσυστημάτων [59]	71
Εικόνα 5.26: Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων και ποιότητα οικοσυστημάτων [60]	71
Εικόνα 5.27: Θαλάσσια οικοτοξικότητα και ποιότητα οικοσυστημάτων [61].....	71
Εικόνα 5.28: Χρήση γης και ποιότητα οικοσυστημάτων [63].....	72
Εικόνα 5.29: Εξάντληση ορυκτών πόρων και ποιότητα οικοσυστημάτων [64].....	73
Εικόνα 5.30: Εξάντληση υδάτινων πόρων και ανθρώπινη υγεία [65].....	73
Εικόνα 5.31: Εξάντληση υδάτινων πόρων και ποιότητα οικοσυστημάτων [66].....	74
Εικόνα 5.32: Στρατηγικές διαχείρισης φωτοβολταϊκών στο τέλος κύκλου ζωής [27].....	75

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1: Παγκόσμια εγκατεστημένη χωρητικότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [4]	26
Διάγραμμα 1.2: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει της ηλιακής χωρητικότητας [6]	27
Διάγραμμα 1.3: Φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας στη Γη [9].....	28
Διάγραμμα 2.1: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V φωτοβολταϊκού κελιού [19]	36
Διάγραμμα 2.2: Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V [23]	39
Διάγραμμα 2.3: Επίδραση της θερμοκρασίας κελιών στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V [23].....	39
Διάγραμμα 2.4: Επίδραση της αντίστασης σειράς στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V [7].....	40
Διάγραμμα 2.5: Επίδραση της παράλληλης αντίστασης στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V [7]	40
Διάγραμμα 2.6: Συνδυασμός χαρακτηριστικής καμπύλης I-V φωτοβολταϊκής συστοιχίας [19].....	42
Διάγραμμα 3.1: Παγκόσμια εξέλιξη ετήσιων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων [14]	43
Διάγραμμα 3.2: Προβλέψεις αύξησης όγκου φωτοβολταϊκών αποβλήτων [27].....	48
Διάγραμμα 3.3: Προβλεπόμενη κατάταξη χωρών με φωτοβολταϊκά απόβλητα [27]	48
Διάγραμμα 6.1: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων πρώτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση.....	135
Διάγραμμα 6.2: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής πρώτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση.....	136
Διάγραμμα 6.3: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων πρώτης περίπτωσης με κανονικοποίηση	137
Διάγραμμα 6.4: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής πρώτης περίπτωσης με κανονικοποίηση	138
Διάγραμμα 6.5: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων πρώτης περίπτωσης με στάθμιση	138
Διάγραμμα 6.6: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής πρώτης περίπτωσης με στάθμιση	140
Διάγραμμα 6.7: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων δεύτερης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση.....	141
Διάγραμμα 6.8: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής δεύτερης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση.....	142
Διάγραμμα 6.9: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων δεύτερης περίπτωσης με κανονικοποίηση.....	143
Διάγραμμα 6.10: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής δεύτερης περίπτωσης με κανονικοποίηση.....	144

Διάγραμμα 6.11: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων δεύτερης περίπτωσης με στάθμιση.....	145
Διάγραμμα 6.12: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής δεύτερης περίπτωσης με στάθμιση.....	146
Διάγραμμα 6.13: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων τρίτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση.....	147
Διάγραμμα 6.14: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής τρίτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση.....	148
Διάγραμμα 6.15: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων τρίτης περίπτωσης με κανονικοποίηση	149
Διάγραμμα 6.16: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής τρίτης περίπτωσης με κανονικοποίηση	150
Διάγραμμα 6.17: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων τρίτης περίπτωσης με στάθμιση	151
Διάγραμμα 6.18: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής τρίτης περίπτωσης με στάθμιση	152
Διάγραμμα 6.19: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων τέταρτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση.....	153
Διάγραμμα 6.20: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής τέταρτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση.....	154
Διάγραμμα 6.21: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων τέταρτης περίπτωσης με κανονικοποίηση.....	155
Διάγραμμα 6.22: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής τέταρτης περίπτωσης με κανονικοποίηση.....	156
Διάγραμμα 6.23: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων τέταρτης περίπτωσης με στάθμιση.....	157
Διάγραμμα 6.24: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής τέταρτης περίπτωσης με στάθμιση.....	158
Διάγραμμα 6.25: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων πέμπτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση.....	159
Διάγραμμα 6.26: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής πέμπτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση.....	160
Διάγραμμα 6.27: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων πέμπτης περίπτωσης με κανονικοποίηση.....	161

Διάγραμμα 6.28: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής πέμπτης περίπτωσης με κανονικοποίηση.....	162
Διάγραμμα 6.29: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων πέμπτης περίπτωσης με στάθμιση.....	163
Διάγραμμα 6.30: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής πέμπτης περίπτωσης με στάθμιση.....	164
Διάγραμμα 6.31: Σωρευτική σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων όλων των περιπτώσεων χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση.....	165
Διάγραμμα 6.32: Σωρευτική σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής όλων των περιπτώσεων χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση.....	166
Διάγραμμα 6.33: Σωρευτική σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων όλων των περιπτώσεων με κανονικοποίηση	167
Διάγραμμα 6.34: Σωρευτική σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής όλων των περιπτώσεων με κανονικοποίηση	168
Διάγραμμα 6.35: Σωρευτική σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων όλων των περιπτώσεων με στάθμιση	169
Διάγραμμα 6.36: Σωρευτική σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής όλων των περιπτώσεων με στάθμιση	170
Διάγραμμα 6.37: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων πρώτης μεθόδου	175
Διάγραμμα 6.38: Σύγκριση τομέων πρώτης μεθόδου.....	175
Διάγραμμα 6.39: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων δεύτερης μεθόδου.....	176
Διάγραμμα 6.40: Σύγκριση τομέων δεύτερης μεθόδου	177
Διάγραμμα 6.41: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων τρίτης μεθόδου	177
Διάγραμμα 6.42: Σύγκριση τομέων τρίτης μεθόδου.....	178
Διάγραμμα 6.43: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων τέταρτης μεθόδου.....	179
Διάγραμμα 6.44: Σύγκριση τομέων τέταρτης μεθόδου	179
Διάγραμμα 6.45: Συσχέτιση επίπτωσης της κλιματικής αλλαγής στην ανθρώπινη υγεία.....	180
Διάγραμμα 6.46: Συσχέτιση επίπτωσης της καταστροφής του όζοντος στην ανθρώπινη υγεία	181
Διάγραμμα 6.47: Συσχέτιση επίπτωσης της τοξικότητας για τον άνθρωπο στην ανθρώπινη υγεία.....	181
Διάγραμμα 6.48: Συσχέτιση επίπτωσης της τοξικότητας για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία	182
Διάγραμμα 6.49: Συσχέτιση επίπτωσης της σωματιδιακής ύλης, αναπνευστικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.....	182
Διάγραμμα 6.50: Συσχέτιση επίπτωσης της ιονίζουσας ακτινοβολίας στην ανθρώπινη υγεία	183

Διάγραμμα 6.51: Συσχέτιση επίπτωσης του σχηματισμού φωτοχημικού όζοντος στην ανθρώπινη υγεία.....	184
Διάγραμμα 6.52: Συσχέτιση επίπτωσης της χερσαίας οξίνισης στην ποιότητα οικοσυστημάτων ..	184
Διάγραμμα 6.53: Συσχέτιση επίπτωσης της χερσαίας οικοτοξικότητας στην ποιότητα οικοσυστημάτων	185
Διάγραμμα 6.54: Σωρευτική σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων όλων των μεθόδων.....	186
Διάγραμμα 6.55: Σωρευτική σύγκριση τομέων όλων των μεθόδων.....	187

Αλφαβητικό Ευρετήριο

ΑΚΖ: Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Φ/Β: Φωτοβολταϊκά

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αρχικά, τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) (photovoltaic, PV) πάνελ αποτελούν μια κρίσιμη τεχνολογία για την αξιοποίηση της ανανεώσιμης ενέργειας από τον ήλιο. Καθώς ο κόσμος συνεχίζει να εστιάζει σε βιώσιμες πηγές ενέργειας, η αξιολόγηση των Φ/Β πανέλων, δηλαδή της απόδοσης και της αξιοπιστίας κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας και της αποδοτικότητας των συστημάτων ηλιακής ενέργειας.

Οι τεχνικές ανάλυσης κύκλου ζωής (AKZ) (life cycle analysis, LCA) είναι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης και της ανθεκτικότητας των Φ/Β πανέλων καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργικής τους ζωής. Οι τεχνικές αυτές βοηθούν στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αυτά υποβαθμίζονται με την πάροδο του χρόνου, των επιπτώσεων που προκύπτουν, αλλά και του τρόπου βελτιστοποίησης του σχεδιασμού τους για τη μέγιστη απόδοση και τη μακροζωία τους.

Τέλος, ο αντίκτυπος της αξιολόγησης των Φ/Β πανέλων με τεχνικές AKZ είναι πολύπλευρος, από τη βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας αυτών έως τη διαμόρφωση πολιτικών αποφάσεων και την προώθηση της τεχνολογικής καινοτομίας. Με την κατανόηση των επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων κατά τον κύκλο ζωής τους, δύναται η συνεχής και αποτελεσματική αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, η οποία θα συμβάλλει σε ένα πιο βιώσιμο μέλλον για την κοινωνία.

Αντικείμενο

Το αντικείμενο το οποίο θίγεται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η αξιολόγηση των επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων με τεχνικές AKZ. Αυτό θα υλοποιηθεί μέσω ενός πρώτου σεναρίου, μέσω του οποίου θα αξιολογηθούν οι επιπτώσεις 5 περιπτώσεων τεχνολογιών Φ/Β πανέλων ανά τα στάδια του κύκλου ζωής τους με 3 τρόπους και ενός δεύτερου, που μέσω αυτού θα αξιολογηθούν οι επιπτώσεις ενός μείγματος 6 τεχνολογιών Φ/Β πανέλων με 4 μεθόδους.

Σκοπός

Η ανάπτυξη του συγκεκριμένου θέματος έχει ως σκοπό την:

- ✓ Έκθεση σε βασικές εισαγωγικές έννοιες.
- ✓ Ενημέρωση σχετικά με τις σημαντικές παραμέτρους των Φ/Β.
- ✓ Καταγραφή ουσιαστικών τιμών των Φ/Β.
- ✓ Πληροφόρηση αναφορικά με τη μέθοδο της AKZ.
- ✓ Παρουσίαση του κύκλου ζωής των Φ/Β.
- ✓ Αξιολόγηση των επιπτώσεων που προκαλούνται από την εφαρμογή της AKZ στα Φ/Β.

Δομή

Η δομή που πρόκειται να πλαισιώσει τη διπλωματική εργασία, θα καταταχθεί σε 6 κεφάλαια με απώτερο στόχο την:

1. Εξοικείωση με θεμελιώδεις έννοιες, όπως η ενέργεια, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η ηλιακή ενέργεια.
2. Ανάλυση των Φ/Β σε επαρκές επίπεδο ξεκινώντας από το Φ/Β σύστημα με τον ορισμό, τις κατηγορίες, τα εξαρτήματα, την ισχύ και την απόδοσή του, συνεχίζοντας στο Φ/Β κελί με την εξήγηση, τις τεχνολογίες, την αρχή λειτουργίας, τη δομή, τη μοντελοποίηση και τη χαρακτηριστική καμπύλη του, προχωρώντας στο Φ/Β πάνελ μέσω της ερμηνείας, της κατασκευής, της χαρακτηριστικής εξίσωσης και των εξωτερικών παραγόντων του, ολοκληρώνοντας με τη Φ/Β συστοιχία μέσω της σημασίας και των συνδεσμολογιών αυτής.
3. Παροχή ενός Φ/Β «βαρομέτρου» έγκριτων δεδομένων σχετικά με τη Φ/Β ισχύ παγκοσμίως και τη Φ/Β χωρητικότητα σε ευρωπαϊκό επίπεδο, τη βιομηχανία Φ/Β αναφορικά με την παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου, ράβδων και πλακιδίων, Φ/Β κελιών και πανέλων και τέλος τα Φ/Β απόβλητα με τη βοήθεια προβλέψεων αύξησης και του σχεδίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
4. Εξήγηση της μεθοδολογίας της AKZ μέσω της γενικής περιγραφής αυτής, των προτύπων και των διαδικαστικών βημάτων της, των σταδίων που την απαρτίζουν και του τέλους κύκλου ζωής.
5. Επεξήγηση του κύκλου ζωής των Φ/Β μέσω της ειδίκευσης στις Φ/Β τεχνολογίες κρυσταλλικού πυριτίου και λεπτής μεμβράνης, στις επιπτώσεις του κύκλου ζωής των Φ/Β, όπως η κλιματική αλλαγή, η καταστροφή του όζοντος, η τοξικότητα για τον άνθρωπο, η σωματιδιακή ύλη, η ιονίζουσα ακτινοβολία, ο σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος, η οξίνιση, ο ευτροφισμός, η οικοτοξικότητα, η χρήση γης, η εξάντληση πόρων, η σωρευτική ζήτηση ενέργειας και στο τέλος του κύκλου ζωής των Φ/Β, σχετικά με τις στρατηγικές διαχείρισης αυτού, δηλαδή τη μείωση, την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση.
6. Αξιολόγηση των επιπτώσεων των Φ/Β με την εφαρμογή της AKZ, μέσω της ανάδειξης αντίστοιχων λογισμικών προσομοίωσης, βάσεων δεδομένων, μεθόδων, του καθορισμού του πεδίου εφαρμογής του πρώτου σεναρίου, δηλαδή της λειτουργικής μονάδας και της ροής αναφοράς, της οριοθέτησης συστήματος, της παραγωγής, της μεταφοράς και της εγκατάστασης, της ταξινόμησης και του χαρακτηρισμού, της κανονικοποίησης και της στάθμισης αυτών, της παράθεσης της απογραφής του κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων της πρώτης, της δεύτερης, της τρίτης, της τέταρτης και της πέμπτης περίπτωσης μέσω των

τεχνικών χαρακτηριστικών και του καταλόγου υλικών τους, της παρουσίασης των αντίστοιχων αποτελεσμάτων χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση, με κανονικοποίηση, με στάθμιση, της καταγραφής των αντίστοιχων ατομικών και συγκεντρωτικών παρατηρήσεων αυτών, του καθορισμού του πεδίου εφαρμογής του δεύτερου σεναρίου, της περιγραφής του συστήματος αυτού, της αποτύπωσης των δεδομένων εισόδου και εξόδου, της ανάδειξης των αντίστοιχων αποτελεσμάτων των τεσσάρων μεθόδων και της παρουσίασης των αντίστοιχων παρατηρήσεων αυτών τόσο σε ατομικό, όσο και σε συνολικό επίπεδο.

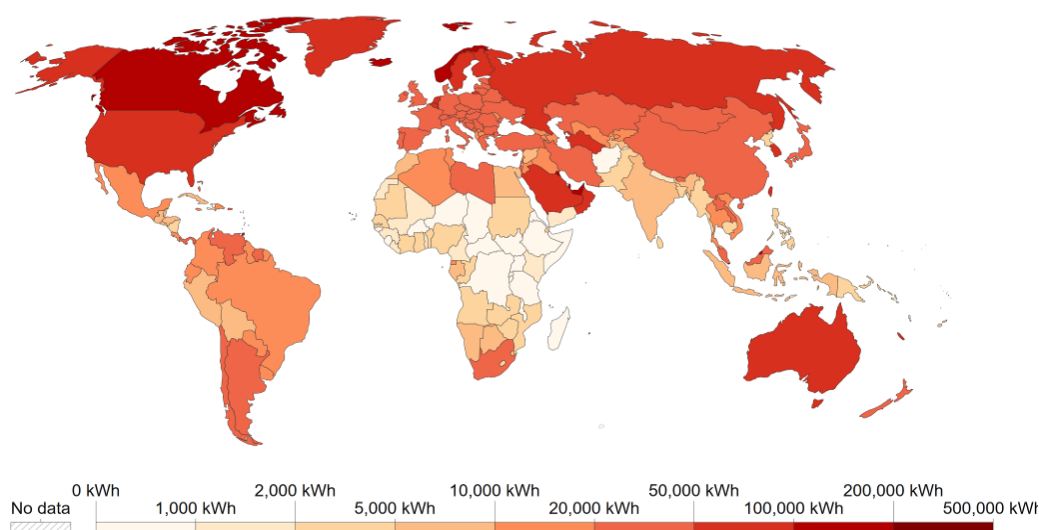
Τέλος, θα εξαχθούν συμπεράσματα εποικοδομητικού χαρακτήρα εφ' όλης της ύλης της διπλωματικής εργασίας για τους αναγνώστες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ενέργεια

Η ενέργεια (energy) είναι απαραίτητη για την ανθρώπινη ζωή και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο σε πολλές πτυχές της καθημερινής ζωής. Οι άνθρωποι χρειάζονται ενέργεια για να εκτελούν βασικές βιολογικές λειτουργίες, όπως η αναπνοή, η κυκλοφορία του αίματος και η ρύθμιση της θερμοκρασίας του σώματος, αλλά και για να πραγματοποιούν σωματικές δραστηριότητες όπως το περπάτημα, το τρέξιμο και η ανύψωση αντικειμένων. Ακόμα, η έλλειψη πρόσβασης σε σύγχρονες ενεργειακές υπηρεσίες, όπως η ηλεκτρική ενέργεια, περιορίζει τις ευκαιρίες για εκπαίδευση, υγειονομική περίθαλψη, κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη, ιδίως στις αναπτυσσόμενες χώρες. [1]

Στην Εικόνα 1.1, απεικονίζεται ένας παγκόσμιος χάρτης της χρήσης ενέργειας ανά άτομο σε kWh για το έτος 2022. Η χρήση ενέργειας δεν περιλαμβάνει μόνο την ηλεκτρική ενέργεια, αλλά και άλλους τομείς κατανάλωσης, όπως οι μεταφορές, η θέρμανση και το μαγείρεμα. [2]



Εικόνα 1.1: Παγκόσμιος χάρτης χρήσης ενέργειας [2]

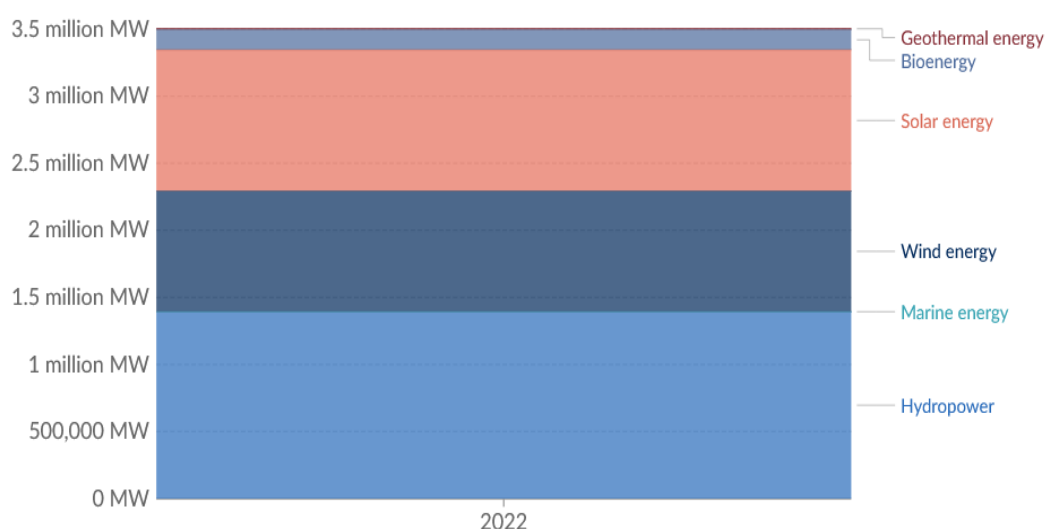
1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η ανανεώσιμη ενέργεια (renewable energy) είναι ένα είδος ενέργειας, που συλλέγεται από ανανεώσιμες πηγές, οι οποίες αναπληρώνονται φυσικά σε ανθρώπινα χρονικά διαστήματα. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) (renewable energy sources, RES) υπάρχουν σε αφθονία σε ευρείες γεωγραφικές περιοχές, σε αντίθεση με άλλες πηγές ενέργειας που συγκεντρώνονται σε περιορισμένο αριθμό χωρών. Πρακτικά, η χρήση τους δεν επιβαρύνει το περιβάλλον και η ενεργειακή απόδοσή τους συμβάλει στην παροχή αξιοπιστίας, ασφάλειας και οικονομικής ευρωστίας. [3]

Ακόμα, οι ΑΠΕ είναι πηγές ενέργειας που αναπληρώνονται με φυσικό τρόπο και μπορούν να αναπληρώνονται με ρυθμό ίσο ή μεγαλύτερο από το ρυθμό με τον οποίο καταναλώνονται. Οι πιο συνηθισμένες μορφές των ΑΠΕ περιλαμβάνουν: [3]

- Ηλιακή ενέργεια (solar energy).
- Αιολική ενέργεια (wind energy).
- Γεωθερμική ενέργεια (geothermal energy).
- Υδροηλεκτρική ενέργεια (hydropower).
- Θαλάσσια ενέργεια (marine energy).
- Βιοενέργεια (bioenergy).

Το Διάγραμμα 1.1 είναι σωρευτικό και περιλαμβάνει την παγκόσμια εγκατεστημένη χωρητικότητα ΑΠΕ ανά μορφή σε MW για το έτος 2022. [4]



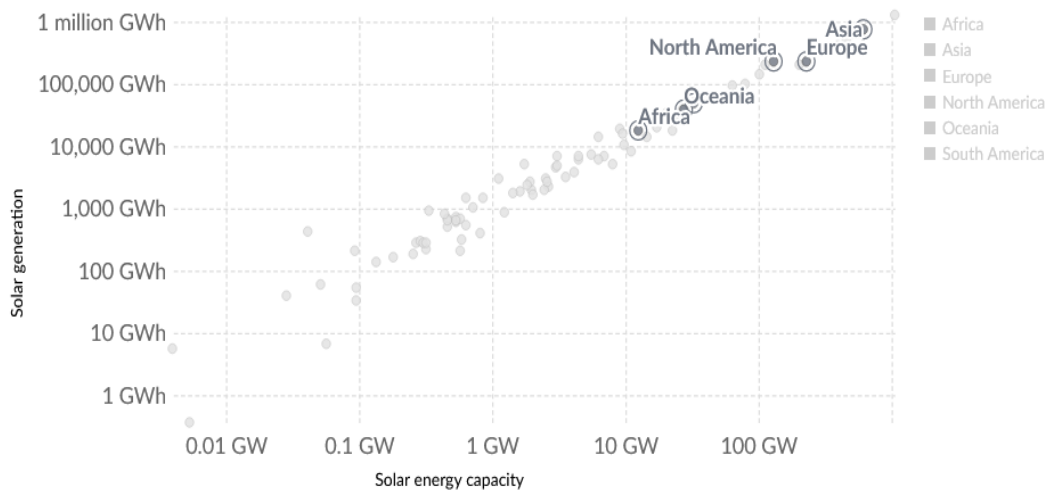
Διάγραμμα 1.1: Παγκόσμια εγκατεστημένη χωρητικότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [4]

1.3 Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια (solar energy) είναι η ενέργεια, που προέρχεται από τις ακτίνες του ήλιου. Είναι μια ανανεώσιμη και βιώσιμη πηγή ενέργειας, που μπορεί να αξιοποιηθεί με διάφορους τρόπους για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανσης και ψύξης. Οι τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας περιλαμβάνουν τα Φ/Β συστήματα, τα οποία μετατρέπουν το ηλιακό φως απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια και τα ηλιοθερμικά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν τη θερμότητα του ήλιου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή για την παροχή ζεστού νερού σε σπίτια και επιχειρήσεις. [5]

Το Διάγραμμα 1.2 είναι λογαριθμικής κλίμακας και αποτυπώνει την παραγωγή της ηλιακής ενέργειας (solar generation) μετρούμενη σε GWh έναντι της εγκατεστημένης ηλιακής ισχύος (solar

energy capacity) μετρούμενη σε GW για το έτος 2022 μεταξύ των ηπείρων: Νότια Αμερική (South America), Ωκεανία (Oceania), Βόρεια Αμερική (North America), Ευρώπη (Europe), Ασία (Asia) και Αφρική (Africa). [6]



Διάγραμμα 1.2: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει της ηλιακής χωρητικότητας [6]

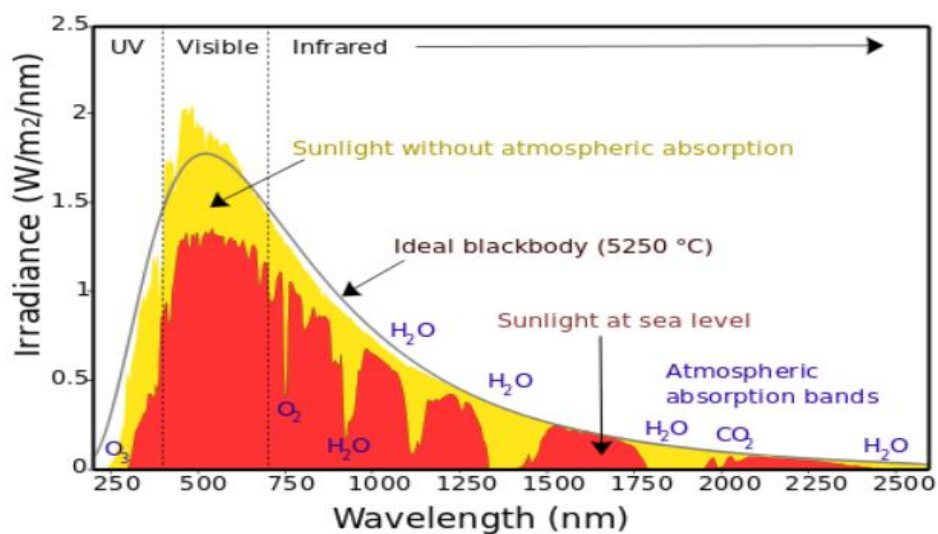
Ειδικότερα, ηλιακή ενέργεια είναι το σύνολο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (electromagnetic radiation) με μήκη κύματος από 0,3 - 3 μm , που εκπέμπει ο Ήλιος διαρκώς για δισεκατομμύρια χρόνια. Η ηλικία του Ήλιου εκτιμάται μεγαλύτερη από 5 δισεκατομμύρια έτη. Ο Ήλιος έχει επιφανειακή θερμοκρασία 5.778 K και απόσταση από τη Γη περίπου 93 εκατομμύρια μίλια, δηλαδή μόνο τα φωτόνια που εκπέμπονται απευθείας προς την κατεύθυνση της Γης συμβάλλουν στο ηλιακό φάσμα, όπως παρατηρείται από τη Γη. Η ένταση της ακτινοβολίας του ακριβώς πάνω από την ατμόσφαιρα της Γης είναι περίπου 1.353 kW/m^2 και η φασματική κατανομή αναφέρεται ως φάσμα ακτινοβολίας μηδενικής μάζας αέρα (air mass zero, AM0). Η μάζα αέρα (air mass, AM) είναι ένα μέτρο του τρόπου απορρόφησης στην ατμόσφαιρα, που επηρεάζει το φασματικό περιεχόμενο και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. [7, 8]

Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας δίνεται από τον νόμο του Planck, ως συνάρτηση του μήκους κύματος από την εξίσωση (1.1): [7]

$$u(\lambda) = \frac{2h\pi c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc/\lambda}{kT_{\text{sun}}}\right) - 1} \quad (1.1)$$

Όπου u : η φασματική ένταση εκπομπής του Ήλιου ($\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$), h : η σταθερά του Planck ($6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{Hz}^{-1}$), c : η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($299.792.458 \text{ m/s}$), λ : το μήκος κύματος (μm), k : η σταθερά του Boltzmann ($1,380649 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$), T_{sun} : η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας του Ήλιου (5.778 K).

Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας (irradiance) σε $W/m^2/nm$ εντός της ατμόσφαιρας μεταβάλλεται με τις καιρικές συνθήκες, τη θέση του Ήλιου σε σχέση με την επιφάνεια της Γης, την ώρα της ημέρας και την περιοχή συναρτήσει του μήκους κύματος (wavelength) σε nm, σύμφωνα με το Διάγραμμα 1.3. [9]



Διάγραμμα 1.3: Φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας στη Γη [9]

Στο εξωτερικό της Γήινης ατμόσφαιρας η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η εξίσωση (1.2): [7]

$$u_o(\lambda) = \frac{4\pi D_{sun}^2 / 4}{4\pi AU^2} u(\lambda) \quad (1.2)$$

Όπου D_{sun} : η διάμετρος του Ήλιου ($1,3927 \times 10^6$ km), AU : η μέση απόσταση Γης-Ήλιου (150×10^6 km).

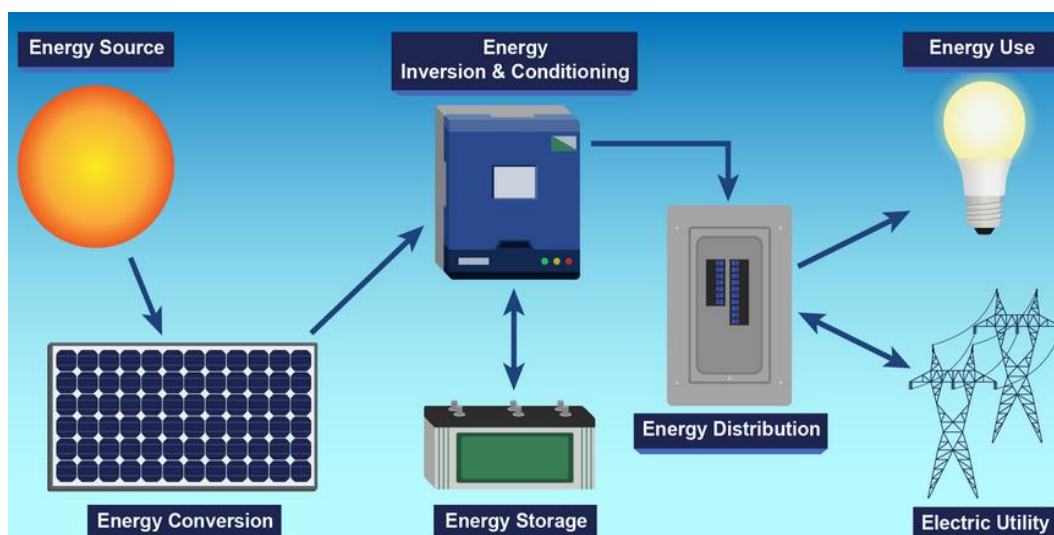
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

2.1 Φωτοβολταϊκό Σύστημα

2.1.1 Ορισμός

Το Φ/Β σύστημα (PV system), επίσης γνωστό ως σύστημα ηλιακής ενέργειας (solar power system), είναι μια συλλογή εξαρτημάτων, που συνεργάζονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλιακό φως. Αποτελείται από Φ/Β κελιά, τα οποία μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος (direct current, DC) και από μια σειρά άλλων εξαρτημάτων που μετατρέπουν, αποθηκεύουν και διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια προς χρήση. [10]

Στην Εικόνα 2.1 αναπαρίσταται αυτή η διαδικασία με την πηγή ενέργειας (energy source), τη μετατροπή της (energy conversion), την αντιστροφή και τη συντήρησή της (energy inversion & conditioning), την αποθήκευσή της (energy storage), τη διανομή της (energy distribution) προς τη χρήση της (energy use) ή προς το ηλεκτρικό δίκτυο (electric utility). [11]



Εικόνα 2.1: Τρόπος λειτουργίας φωτοβολταϊκού συστήματος [11]

2.1.2 Κατηγορίες

Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες Φ/Β συστημάτων ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους: [12]

- Συνδεδεμένα στο δίκτυο (on-grid).
- Υβριδικά (hybrid).
- Εκτός δικτύου (off-grid).

2.1.3 Εξαρτήματα

Στο σημείο αυτό, αναφέρονται τα βασικά εξαρτήματα (components) ενός Φ/Β συστήματος: [13]

- Φ/Β κελιά (PV cells).

- Αντιστροφέας (inverter).
- Μετρητής (meter).
- Σύστημα παρακολούθησης (monitoring system).
- Μπαταρίες (batteries).
- Ελεγκτής φόρτισης (charge controller).

Το σύνολο των εξαρτημάτων του Φ/Β συστήματος εκτός των Φ/Β πανέλων ονομάζεται ισοζύγιο του συστήματος (balance of system, BOS) και αυτό διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος και τον τύπο του συστήματος. [13]

2.1.4 Ισχύς και Απόδοση

Η στιγμιαία ισχύς που αποδίδεται στο δίκτυο δίνεται από την εξίσωση (2.1): [7]

$$P = n_{inv} \cdot n_{pv} \cdot (1 - n_{loss}) \cdot G_T \cdot A_{array} \quad [W] \quad (2.1)$$

Όπου n_{inv} : ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα, n_{pv} : ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης της συστοιχίας, n_{loss} : οι απώλειες στις καλωδιώσεις, G_T : η ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2), A_{array} : η συνολική επιφάνεια της Φ/Β συστοιχίας (m^2).

Εάν είναι γνωστή η ετήσια παραγωγή ενέργειας ενός Φ/Β συστήματος, μπορεί να υπολογιστεί ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης μέσω της εξίσωσης (2.2): [7]

$$n_{an} = \frac{E_{an}}{H_{an} \cdot A_{array}} \quad (2.2)$$

Όπου E_{an} : η ετήσια ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο επίπεδο των Φ/Β ($kWh/έτος$), H_{an} : η ετήσια ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο επίπεδο των Φ/Β ($(kWh/m^2)/έτος$).

Ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης προκύπτει από την εξίσωση (2.3): [7]

$$n_{STC} = \frac{P_{max,STC}/A_{panel}}{G_{STC}} \quad (2.3)$$

Όπου $P_{max,STC}$: η μέγιστη ισχύς υπό πρότυπες συνθήκες δοκιμής (W), A_{panel} : το εμβαδόν του πανέλου (m^2), G_{STC} : η ηλιακή ακτινοβολία υπό πρότυπες συνθήκες δοκιμής (W/m^2).

Ο λόγος του μέσου ετησίου βαθμού απόδοσης προς τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης ονομάζεται λόγος απόδοσης (performance ratio, PR) και αποτελεί βασικό κριτήριο απόδοσης ενός Φ/Β συστήματος. Η τιμή του κυμαίνεται από 70 - 80 % και περιγράφεται από την εξίσωση (2.4): [7]

$$PR = \frac{n_{an}}{n_{STC}} \quad (2.4)$$

2.2 Φωτοβολταϊκό Κελί

2.2.1 Εξήγηση

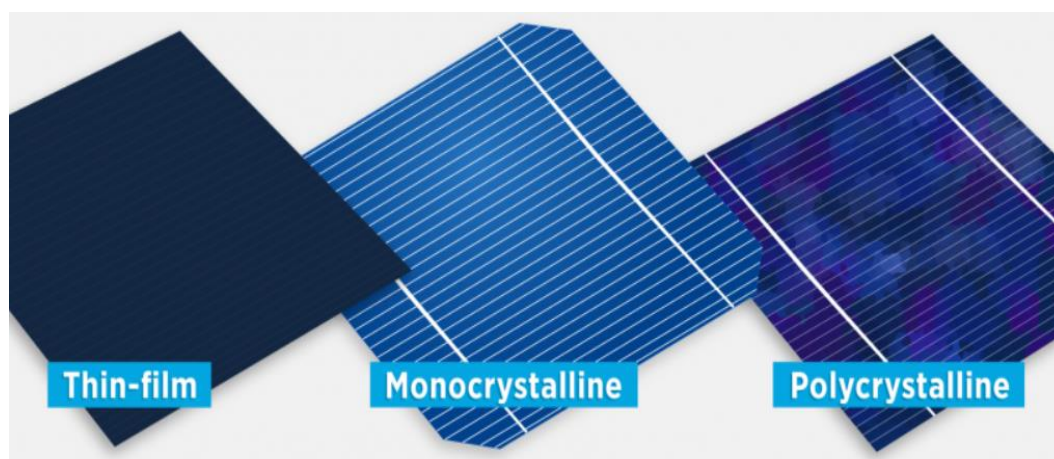
Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (International Energy Agency, IEA): [10]

«Το βασικό δομικό στοιχείο ενός Φ/Β συστήματος είναι το Φ/Β κελί ή στοιχείο (PV cell), το οποίο είναι μια διάταξη ημιαγωγών, που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος».

2.2.2 Τεχνολογίες

Οι 2 πιο στοιχειώδεις τεχνολογίες των Φ/Β κελιών μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής (Εικόνα 2.2): [7, 14, 15]

- Κρυσταλλικού πυριτίου (crystalline-silicon, c-Si).
- Λεπτής μεμβράνης (thin-film).



Εικόνα 2.2: Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κελιών [15]

Οι τεχνολογίες c-Si συμπεριλαμβάνουν τις τεχνολογίες μονοκρυσταλλικού πυριτίου (monocrystalline-silicon, mono-Si) και πολυκρυσταλλικού πυριτίου (multicrystalline-silicon, multi-Si ή polycrystalline-silicon, poly-Si), αντιπροσωπεύοντας περισσότερο από το 97,5 % της συνολικής παραγωγής Φ/Β κελιών. [7, 14]

Τα Φ/Β κελιά mono-Si σχηματίζονται με πλακίδια, τα οποία κατασκευάζονται με τη μέθοδο της μονοκρυσταλλικής ανάπτυξης, διαθέτουν εμπορικές αποδόσεις μεταξύ 20 - 25 %. Έχουν κερδίσει το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς, διατηρώντας το 97 % του μεριδίου του c-Si. Η διαδικασία παραγωγής τους είναι ακριβότερη και δυσκολότερη, καθώς το πυρίτιο (silicon, Si) κρυσταλλώνεται στο ίδιο πλέγμα. Έχουν ομοιόμορφο μπλε σκούρο / μαύρο χρώμα, σχήμα τετραγωνικό με κομμένες ή μη τις γωνίες τους, ώστε η ενεργός επιφάνεια να προσεγγίζει τη γεωμετρική επιφάνεια του Φ/Β πανέλου. [7, 14]

Τα Φ/Β κελιά multi-Si διαμορφώνονται με πολυκρυσταλλικά πλακίδια, που κατασκευάζονται από μια διαδικασία στερεοποίησης με χύτευση. Εξακολουθούν να είναι σε παραγωγή, λόγω των χαμηλότερων τιμών παραγωγής τους. Παρόλα αυτά, είναι λιγότερο αποδοτικά με μέση απόδοση περίπου 18 - 21 % σε μαζική παραγωγή. Έχουν μπλε χρώμα, το οποίο δεν είναι ομοιόμορφο σε όλη την επιφάνεια του Φ/Β κελιού, ενώ το σχήμα τους είναι τετραγωνικό ή τετραγωνικής κυψέλης. [7, 14]

Τα Φ/Β κελιά thin-film κατασκευάζονται με την εναπόθεση εξαιρετικά λεπτών στρωμάτων Φ/Β ημιαγωγών πάνω σε ένα υλικό στήριξης, όπως γυαλί, ανοξείδωτος χάλυβας ή πλαστικό. Αυτή η τεχνολογία έχει ως χαρακτηριστικό τον χαμηλό βαθμό απόδοσης, αλλά και το χαμηλό κόστος παραγωγής. Ακόμη, τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο εμπόριο είναι το τελλουρίδιο καδμίου (cadmium telluride, CdTe) και το σεληνίδιο (γαλλίου) ινδίου χαλκού (copper indium (gallium) selenide, CI(G)S) με εύρος βαθμών απόδοσης 17 και 19 % αντίστοιχα. Το χρώμα τους ανάλογα με τον τύπο είναι μαύρο, μπλε ή σκούρο μωβ, ενώ έχουν τετράγωνο σχήμα. [7, 14]

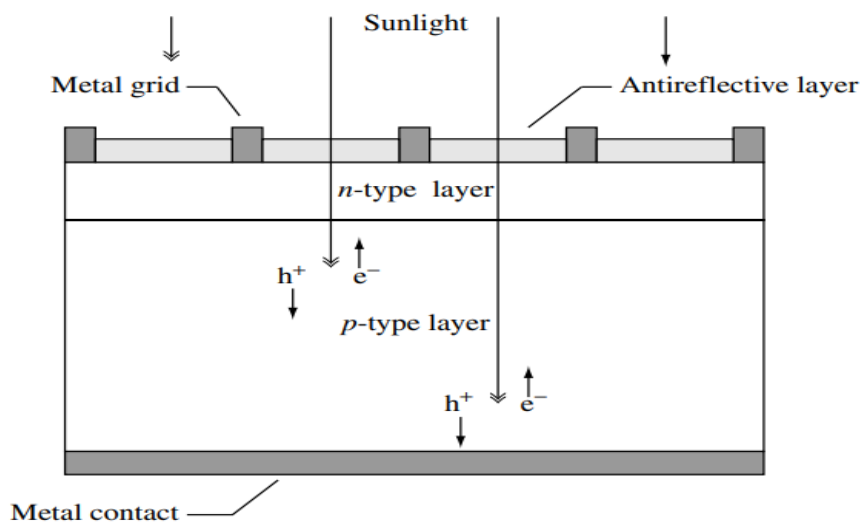
Τα Φ/Β κελιά άμορφου πυριτίου (amorphous-silicon, a-Si) και μικρομορφικού πυριτίου (micromorph-silicon, micro-Si ή μ-Si) κατείχαν ένα σημαντικό μερίδιο αγοράς, αλλά δεν κατάφεραν να ακολουθήσουν τόσο την τιμή του c-Si, όσο και την αύξηση της απόδοσης άλλων τεχνολογιών thin-film. [14]

Μια εναλλακτική Φ/Β τεχνολογία είναι η κορδέλα πυριτίου (ribbon-silicon, ribbon-Si), που αποσκοπεί στην εξάλειψη της διαδικασίας χύτευσης και τεμαχισμού των ράβδων, καθώς και στην κυριαρχία κυρίως στο μερίδιο της αγοράς υλικών Si. [16]

2.2.3 Αρχή Λειτουργίας

Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει στο Φ/Β κελί, τα φωτόνια με επαρκή ενέργεια μπορούν να αποκολλήσουν ηλεκτρόνια από τα άτομά τους στο υλικό του ημιαγωγού. Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από την επαφή p-n βοηθάει στον διαχωρισμό των νεοαπελευθερωμένων ηλεκτρονίων και οπών, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να ρέουν από την πλευρά n και τις οπές προς την πλευρά p. Αυτός ο διαχωρισμός των φορτίων δημιουργεί διαφορά τάσης μεταξύ των δύο πλευρών του στοιχείου, δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα που μπορεί να αξιοποιηθεί για διάφορες εφαρμογές. Δηλαδή, ένα Φ/Β κελί είναι απλώς μια δίοδος ημιαγωγού (semiconductor diode), προσεκτικά σχεδιασμένη και κατασκευασμένη, για να απορροφάει και να μετατρέπει αποτελεσματικά την φωτεινή ενέργεια από τον ήλιο σε ηλεκτρική ενέργεια. [8]

Στην Εικόνα 2.3 αποτυπώνεται αυτή η διαδικασία με το ηλιακό φως (sunlight), το μεταλλικό πλέγμα (metal grid), το αντιανακλαστικό στρώμα (antireflective layer), το στρώμα τύπου n (n-type layer), το στρώμα τύπου p (p-type layer), τα ηλεκτρόνια (e^-), τις οπές (h^+) και τη μεταλλική επαφή (metal contact). [8]

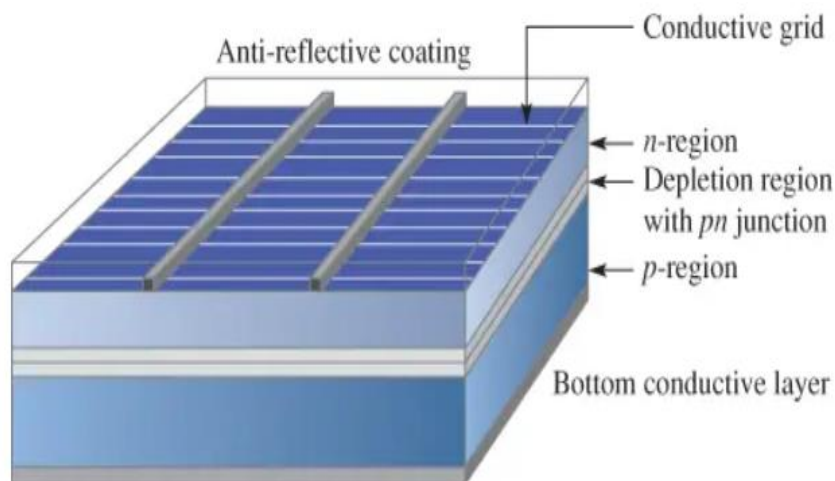


Εικόνα 2.3: Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκού κελιού [8]

2.2.4 Δομή

Η δομή ενός Φ/Β κελιού αποτελείται από διάφορα στρώματα. Το σημαντικότερο στρώμα είναι το στρώμα ημιαγωγού, το οποίο συνήθως αποτελείται από Si. Η δομή του ακολουθεί την αδαμαντοειδή κρυστάλλωση, όπου κάθε άτομο έχει τους κοντινότερους «γείτονες» στις τέσσερις γωνίες ενός τετραέδρου. Αυτή η δομή είναι αποτέλεσμα των δεσμών, που δημιουργούνται από τα τέσσερα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας. Κάθε δεσμός μεταξύ δύο ατόμων Si έχει δύο ηλεκτρόνια (ένα από κάθε άτομο) και όλοι οι ημιαγωγοί σχηματίζουν παρόμοιες κρυσταλλικές δομές. [7]

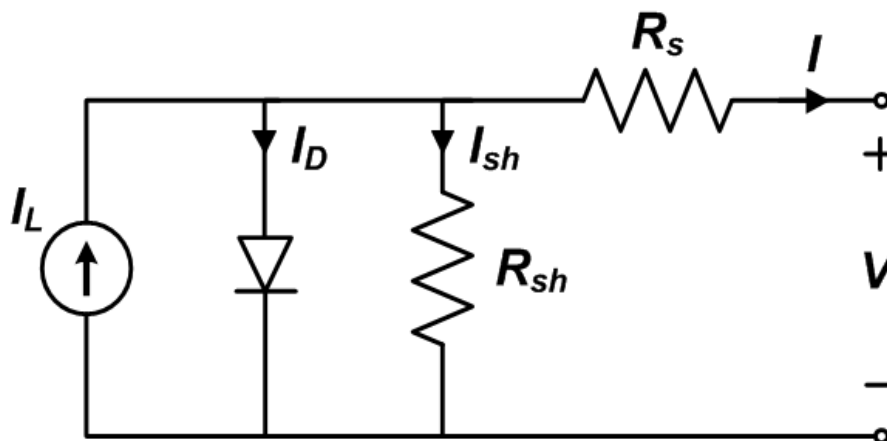
Στην Εικόνα 2.4 φαίνεται αυτή η διαδικασία με την αντιανακλαστική επίστρωση (anti-reflective coating), το αγωγίμο πλέγμα (conductive grid), την περιοχή n (n-region), την περιοχή εξάντλησης με επαφή pn (depletion region with pn junction), την περιοχή p (p-region) και το κάτω αγωγίμο στρώμα (bottom conductive layer). [17]



Εικόνα 2.4: Δομή φωτοβολταϊκού κελιού [17]

2.2.5 Μοντελοποίηση

Το στοιχειώδες κύκλωμα ενός Φ/Β κελιού μοντελοποιείται από μια δίοδο ρεύματος (I_D), μια πηγή ρεύματος (I_L), μια αντίσταση παράλληλα σε αυτή (R_{sh}) και μια αντίσταση σε σειρά (R_s), σύμφωνα με την Εικόνα 2.5. [7, 18]



Εικόνα 2.5: Στοιχειώδες ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού κελιού [18]

Η χαρακτηριστική εξίσωση έντασης ρεύματος-τάσης (current-voltage, I-V) της διόδου δίνεται από τη σχέση του Shockley, δηλαδή την εξίσωση (2.5): [7]

$$I_D = I_o \left[e^{q_e \frac{V_D}{kT}} - 1 \right] \quad (2.5)$$

Όπου I_o : το ρεύμα κόρου, q_e : το φορτίο του ηλεκτρονίου, k : η σταθερά του Boltzmann ($1,380649 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$), V_D : η τάση στα άκρα της διόδου, T : η θερμοκρασία της διόδου.

Από τον 1^ο νόμο του Kirchhoff, το ρεύμα στα άκρα του κυκλώματος θα είναι βάσει της εξίσωσης (2.6): [7]

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (2.6)$$

Όπου I_L : το φωτορεύμα, I_{sh} : το ρεύμα που διαρρέει την παράλληλη αντίσταση.

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (2.5) στην εξίσωση (2.6), προκύπτει η εξίσωση (2.7):

$$I = I_L - I_o \left[e^{q_e \frac{V_D}{kT}} - 1 \right] - I_{sh} \quad (2.7)$$

Η εξίσωση (2.7) με αντικατάσταση από τον νόμο του Ohm για την R_{sh} , παίρνει τη μορφή της εξίσωσης (2.8):

$$I = I_L - I_o \left[e^{q_e \frac{V_D}{kT}} - 1 \right] - \frac{V_D}{R_{sh}} \quad (2.8)$$

Από τον 2^ο νόμο του Kirchhoff, για την τάση V_D ισχύει η εξίσωση (2.9): [7]

$$V_D = V - IR_s \quad (2.9)$$

Άρα, αντικαθιστώντας την εξίσωση (2.8) στην εξίσωση (2.9), προκύπτει η εξίσωση (2.10):

$$I = I_L - I_o \left[e^{q_e \frac{V_D}{kT}} - 1 \right] - \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \quad (2.10)$$

2.2.6 Χαρακτηριστική Καμπύλη

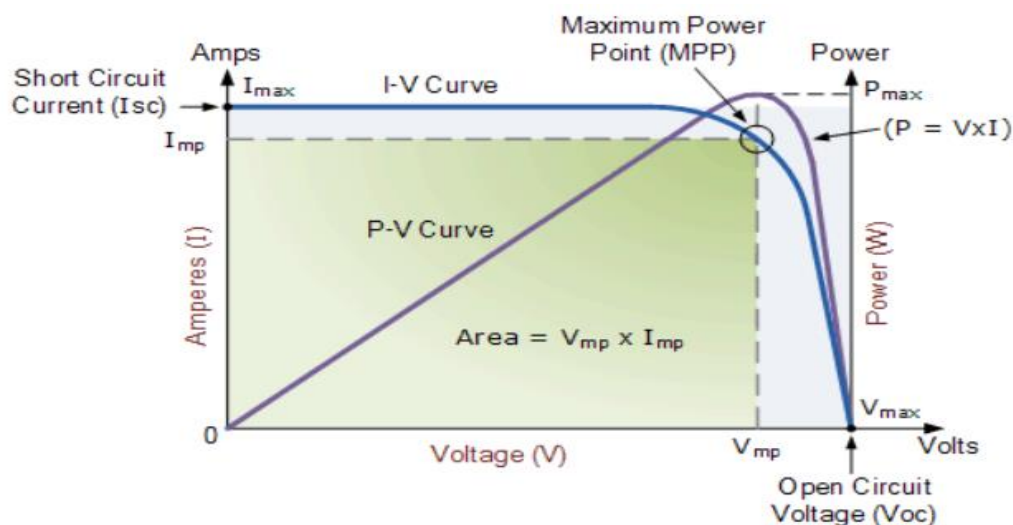
Η εξίσωση (2.6) αποτελεί τη χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός Φ/Β κελιού και απεικονίζεται στο Διάγραμμα 2.1, το οποίο αποτυπώνει τα χαρακτηριστικά ενός τυπικού Φ/Β στοιχείου Si, που λειτουργεί υπό πρότυπες συνθήκες δοκιμής (standard test conditions, STC), δηλαδή: [7, 19]

- Ακτινοβολία (E) = 1.000 W/m².
- Μάζα αέρα (Air mass) = 1,5.
- Θερμοκρασία κελιού (T_{cell}) = 25 °C.

Ακόμη, οι παράμετροι της χαρακτηριστικής καμπύλης είναι: [19]

- I_{sc} : ρεύμα βραχυκύκλωσης ή μέγιστη ένταση ρεύματος (short circuit current).
- V_{oc} : τάση ανοικτού κυκλώματος ή μέγιστη τάση (open circuit voltage).
- I_{mp} : ένταση στη μέγιστη ισχύ.
- V_{mp} : τάση στη μέγιστη ισχύ.

- P_{max} : μέγιστη ισχύς.
- MPP : σημείο μέγιστης ισχύος (maximum power point).
- FF: συντελεστής πλήρωσης (fill factor).



Διάγραμμα 2.1: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V φωτοβολταϊκού κελιού [19]

2.3 Φωτοβολταϊκό Πάνελ

2.3.1 Ερμηνεία

Η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electrotechnical Commission, IEC) ορίζει τα Φ/Β πάνελ (PV panels) ή μονάδες (modules) ως ένα πλήρες και περιβαλλοντικά προστατευμένο σύνολο διασυνδεδεμένων Φ/Β στοιχείων. Αναλυτικότερα: [10]

«Οι Φ/Β μονάδες αποτελούν τη Φ/Β συστοιχία ενός Φ/Β συστήματος, που παράγει και παρέχει ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια σε εμπορικές και οικιακές εφαρμογές. Κάθε μονάδα βαθμολογείται με βάση την ισχύ εξόδου της σε συνεχές ρεύμα υπό τυποποιημένες συνθήκες δοκιμής και κυμαίνεται συνήθως από 100 έως 365 W. Η απόδοση μιας μονάδας καθορίζει την περιοχή μιας μονάδας με την ίδια ονομαστική ισχύ. Δηλαδή, μια μονάδα 230 W με απόδοση 8 % θα έχει διπλάσια επιφάνεια από μια μονάδα 230 W με απόδοση 16 %».

Η μορφή ενός Φ/Β πινάκων παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.6. [20]

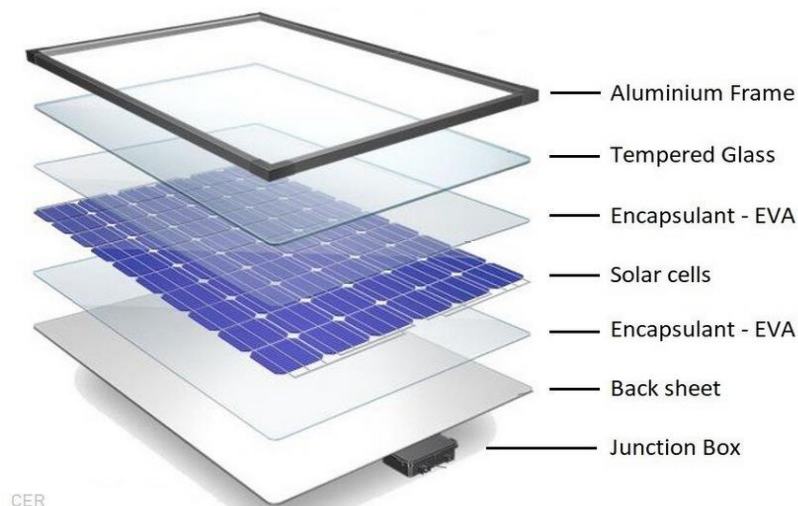


Εικόνα 2.6: Φωτοβολταϊκό πάνελ [20]

2.3.2 Κατασκευή

Η διαδικασία κατασκευής των Φ/Β πινάκων απαρτίζεται από τα κάτωθι κύρια εξαρτήματα (Εικόνα 2.7): [21]

- Πλαίσιο αλουμινίου (aluminium frame).
- Σκληρυμένο γυαλί (tempered glass).
- Φύλλο ενθυλάκωσης οξικού αιθυλένιου βινύλιου (encapsulant ethylene vinyl acetate, EVA).
- Ηλιακά κελιά (solar cells).
- Φύλλο ενθυλάκωσης οξικού αιθυλένιου βινύλιου (encapsulant ethylene vinyl acetate, EVA).
- Οπίσθιο φύλλο (backsheet).
- Κουτί διακλάδωσης (junction box).



Εικόνα 2.7: Διαδικασία κατασκευής φωτοβολταϊκού πανέλου [21]

2.3.3 Χαρακτηριστική Εξίσωση

Εάν ένα Φ/Β πάνελ αποτελείται από N_s Φ/Β κελιά συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά και N_p σειρές συνδεδεμένες παράλληλα, τότε η τάση και η ένταση του ρεύματος στα άκρα του θα δίνονται από την εξίσωση (2.11) και την εξίσωση (2.12) αντίστοιχα: [7]

$$V_{panel} = N_s V \quad (2.11)$$

$$I_{panel} = N_p I \quad (2.12)$$

Η χαρακτηριστική εξίσωση του Φ/Β πανέλου βρίσκεται με αντικατάσταση της εξίσωσης (2.10) στην εξίσωση (2.12) και έτσι προκύπτει η εξίσωση (2.13):

$$I_{panel} = N_p \left[I_i - I_o \left(e^{q_e \frac{V_D}{kT}} - 1 \right) - \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \right] \quad (2.13)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (2.11) στην εξίσωση (2.13), προκύπτει η εξίσωση (2.14), που είναι η χαρακτηριστική εξίσωση του Φ/Β πανέλου:

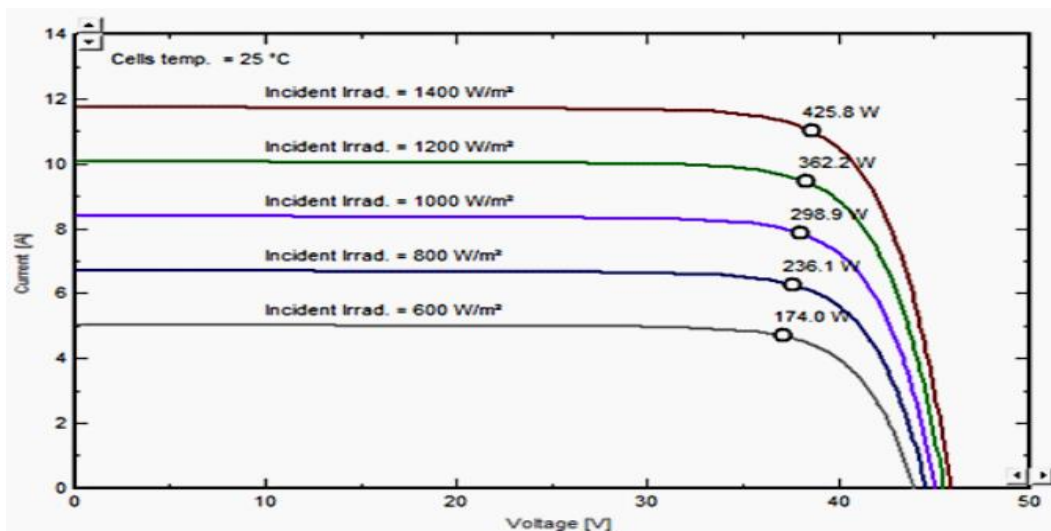
$$I_{panel} = N_p \left[I_i - I_o \left(e^{q_e \frac{V_D}{kT}} - 1 \right) - \frac{\frac{V_{panel}}{N_s} - IR_s}{R_{sh}} \right] \quad (2.14)$$

2.3.4 Εξωτερικοί Παράγοντες

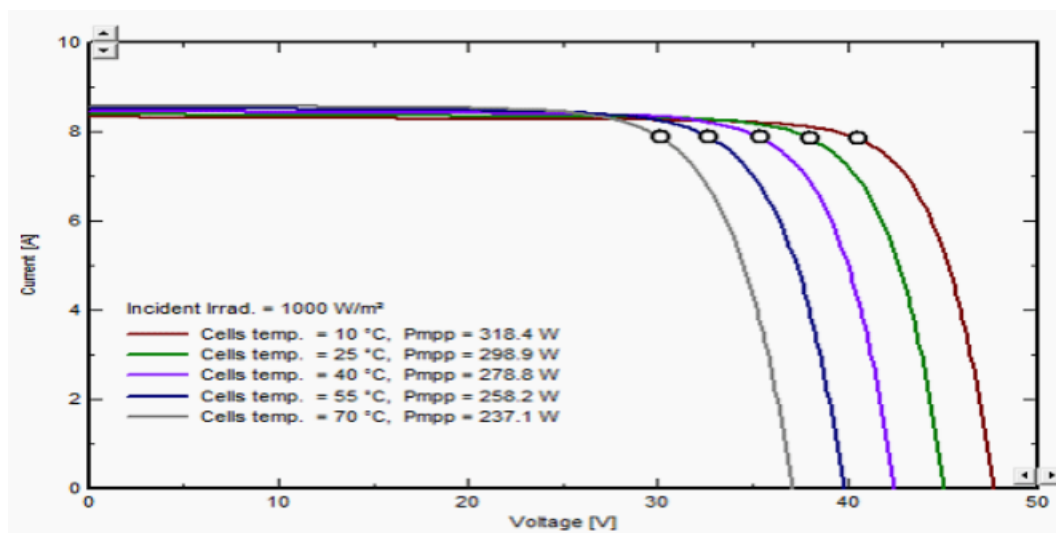
Η λειτουργία ενός Φ/Β πανέλου μπορεί να επηρεαστεί από τους ακόλουθους κυριότερους εξωτερικούς παράγοντες: [7, 22, 23]

- Ηλιακή ακτινοβολία (Διάγραμμα 2.2).

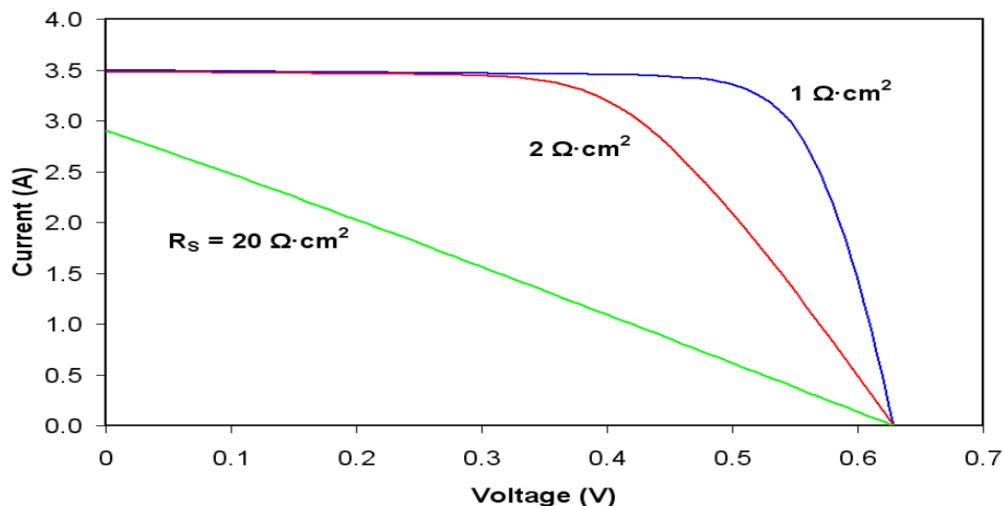
- Θερμοκρασία κελιών (Διάγραμμα 2.3).
- Αντίσταση σειράς (Διάγραμμα 2.4).
- Παράλληλη αντίσταση (Διάγραμμα 2.5).



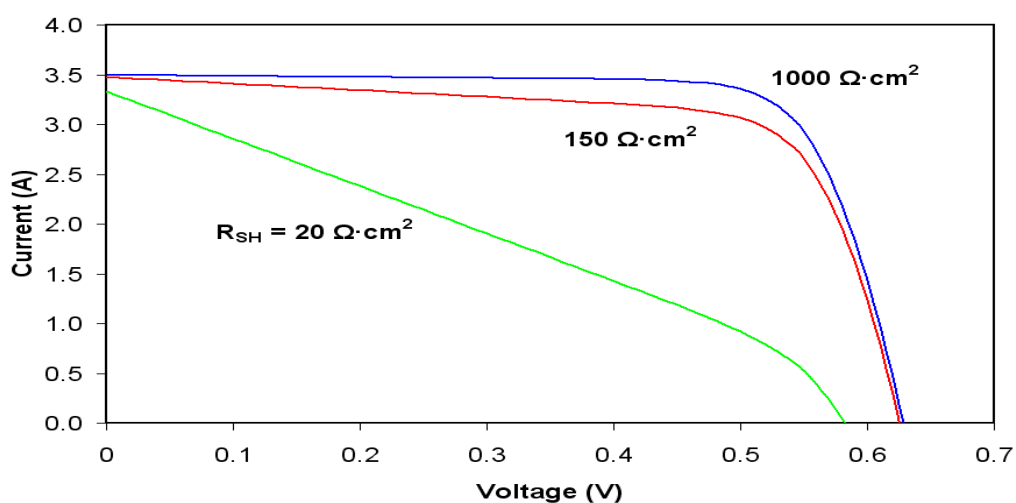
Διάγραμμα 2.2: Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V [23]



Διάγραμμα 2.3: Επίδραση της θερμοκρασίας κελιών στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V [23]



Διάγραμμα 2.4: Επίδραση της αντίστασης σειράς στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V [7]



Διάγραμμα 2.5: Επίδραση της παράλληλης αντίστασης στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V [7]

2.4 Φωτοβολταϊκή Συστοιχία

2.4.1 Σημασία

Η Φ/Β συστοιχία (PV array) ή σύνθετο (string) (Εικόνα 2.8) αποτελείται από Φ/Β πάνελ κατάλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους (σε σειρά ή παράλληλα), έτσι ώστε στους ακροδέκτες της να υπάρχουν ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τα οποία θα επιτρέψουν τη σύνδεση με άλλες συσκευές για την πραγματοποίηση κάποιας συγκεκριμένης εργασίας. [24]

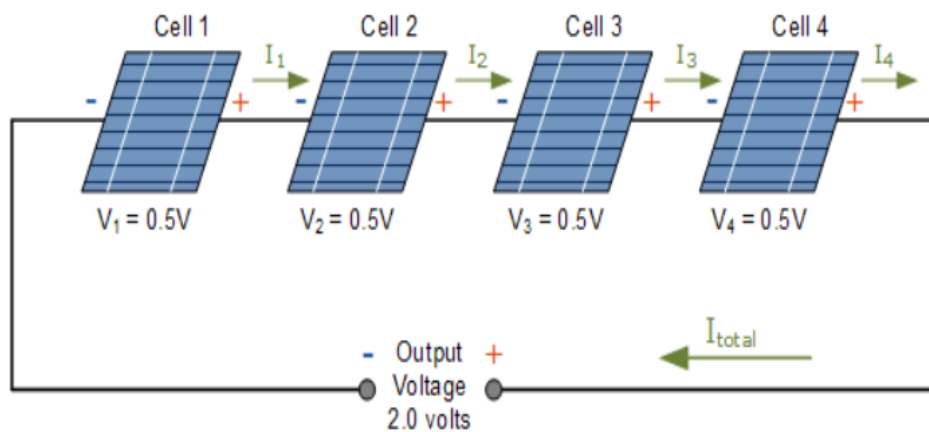


Εικόνα 2.8: Φωτοβολταϊκή συστοιχία [24]

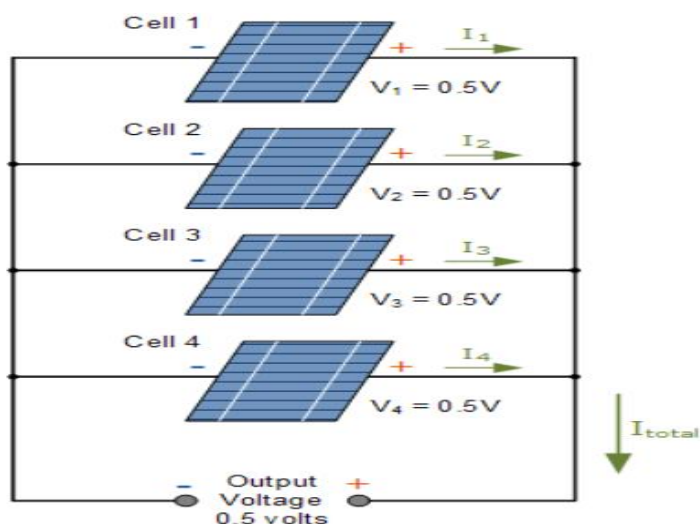
2.4.2 Συνδεσμολογίες

Οι συνδεσμολογίες των Φ/Β συστοιχιών μπορούν να επιτευχθούν με τους παρακάτω τρόπους: [19, 25]

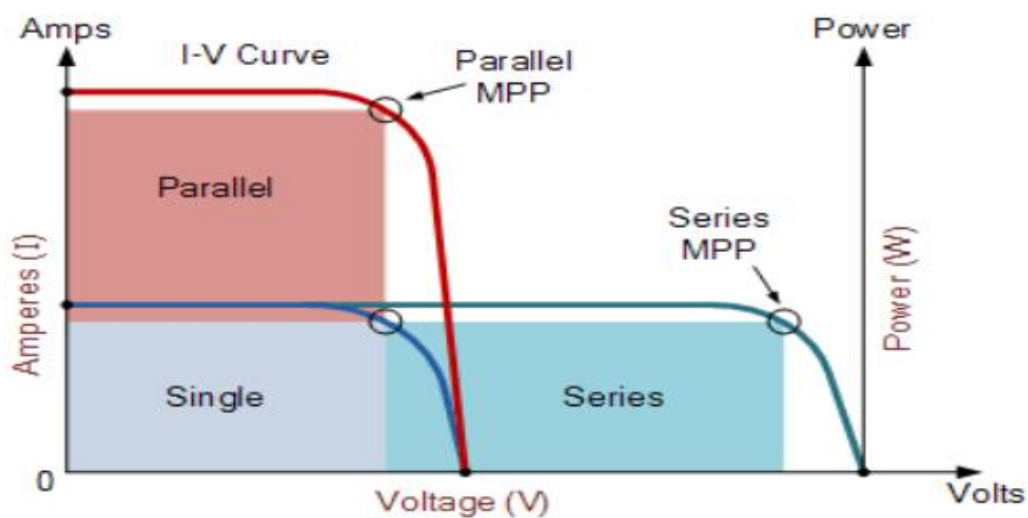
- Σε σειρά (Εικόνα 2.9).
- Σε παραλληλία (Εικόνα 2.10).
- Σε συνδυασμό σειράς (series) και παραλληλίας (parallel) (Διάγραμμα 2.6).



Εικόνα 2.9: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε σειρά [25]



Εικόνα 2.10: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε παραλληλία [25]



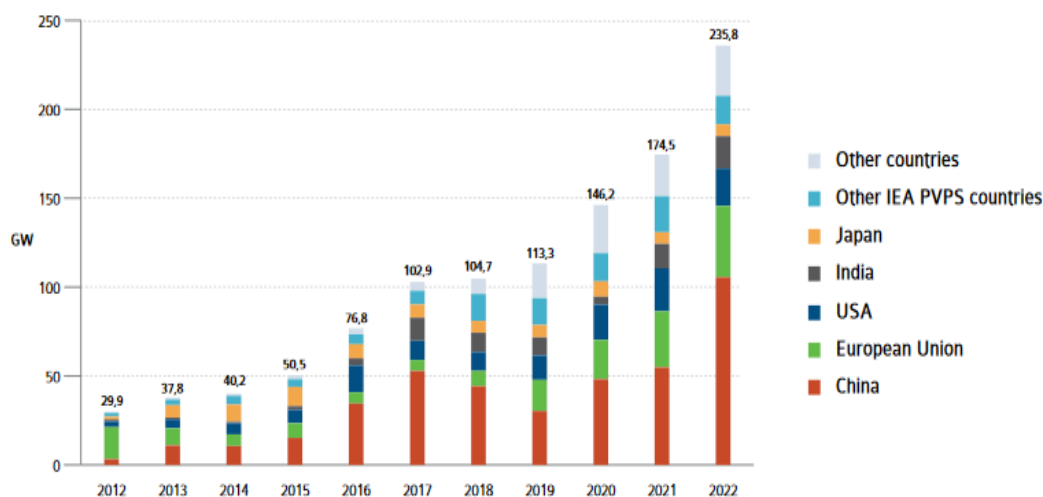
Διάγραμμα 2.6: Συνδυασμός χαρακτηριστικής καμπύλης I-V φωτοβολταϊκής συστοιχίας [19]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ «ΒΑΡΟΜΕΤΡΟ»

3.1 Παγκόσμια Φωτοβολταϊκή Ισχύς

Στο τέλος του 2022, η παγκόσμια εγκατεστημένη Φ/Β ισχύς αντιπροσώπευε 1.183,4 GW σωρευτικών Φ/Β εγκαταστάσεων. Για το 2022, φαίνεται ότι 235,8 GW αντιπροσώπευαν την ελάχιστη χωρητικότητα, που εγκαταστάθηκε σε ένα λογικά σταθερό επίπεδο βεβαιότητας. Το επίπεδο αυτό είναι το υψηλότερο που έχει καταγραφεί ποτέ για τις Φ/Β εγκαταστάσεις, παρά τις συνεχιζόμενες διαταραχές που σχετίζονται με την πανδημία Covid-19, τις υψηλές τιμές των Φ/Β πινάκων, τις εμπορικές διαμάχες και τη συμφόρηση του δικτύου σε όλο και περισσότερες χώρες. [14]

Στο Διάγραμμα 3.1 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η εξέλιξη των ετήσιων Φ/Β εγκαταστάσεων σε GW από το 2012 μέχρι το 2022 σε Κίνα (China), Ευρωπαϊκή Ένωση (European Union), Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (USA), Ινδία (India), Ιαπωνία (Japan), άλλες χώρες του Προγράμματος Συστημάτων Φ/Β Ενέργειας του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme) (other IEA PVPS countries) και άλλες χώρες (other countries). [14]



Διάγραμμα 3.1: Παγκόσμια εξέλιξη ετήσιων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων [14]

3.2 Ευρωπαϊκή Φωτοβολταϊκή Χωρητικότητα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), έχοντας συνδέσει τουλάχιστον 32,8 GW καθαρής μέγιστης χωρητικότητας το 2022, στοχεύει σε νέα ύψη. Η συνδυασμένη παραγωγή ηλιακής ενέργειας της τάξης των 205,2 TWh που ενισχύεται από τα επίπεδα ρεκόρ ηλιοφάνειας του 2022, αυξήθηκε κατά 29,6 % σε σχέση με την απόδοση του 2021. Συγκεντρωτικά, η σωρευτική Φ/Β ισχύς στην ΕΕ το 2022 έφτασε τα 195.413,2 MW, η παραγόμενη Φ/Β ηλεκτρική ενέργεια τις 205,2 TWh και η

εγκατεστημένη Φ/Β ισχύς τα 32.818,6 MW. Ακολουθούν δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα Φ/Β εγκαταστάσεων στην Ευρώπη. [26]

Στην Εικόνα 3.1 απεικονίζεται μια πλωτή μονάδα παραγωγής ενέργειας στη νότια Γαλλία χωρητικότητας 12 MW. Αυτή τοποθετείται στη θέση αχρησιμοποίητου νερού ενός εγκαταλελειμμένου λατομείου χαλκιών. Αυτός ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής 12.000 m² με 43.000 Φ/Β πάνελ είναι αγκυροβολημένος στον πυθμένα της λίμνης. [26]



Εικόνα 3.1: Μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω πλωτών φωτοβολταϊκών [26]

Τον Μάρτιο του 2023, ένας αυτόνομος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ξεκίνησε να λειτουργεί στη στέγη του Πανεπιστημίου του Γκρενόμπλ στη Γαλλία (Εικόνα 3.2). Έχει εγκατασταθεί στην οροφή ενός πρωτοποριακού κτιρίου, το οποίο φιλοξενεί μία σχολή μηχανικών και ένα ερευνητικό εργαστήριο. Αυτή η ισχύς των 195 kW θα καλύψει το 10 - 15 % της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του κτιρίου (23.000 m² και 2.000 κάτοικοι). [26]

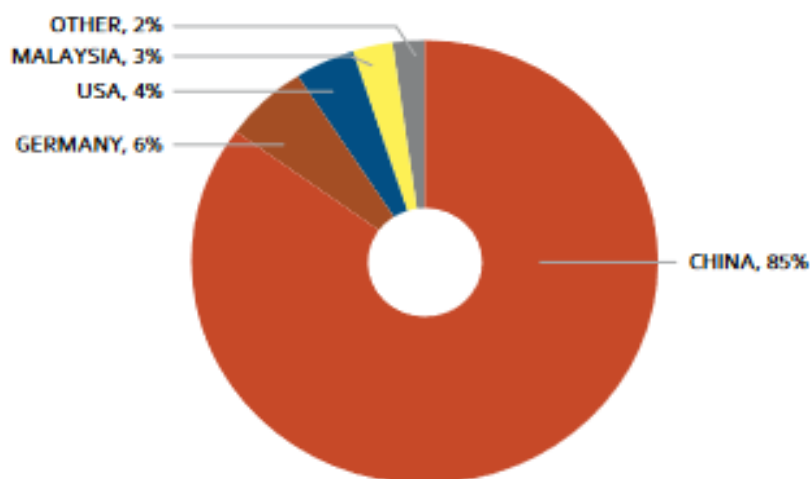


Εικόνα 3.2: Αυτόνομος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με φωτοβολταϊκά στέγης [26]

3.3 Βιομηχανία Φωτοβολταϊκών

3.3.1 Παραγωγή Πολυπυριτίου

Η παγκόσμια παραγωγή poly-Si το 2022 ήταν περίπου 1.001.350 t. Το poly-Si που χρησιμοποιείται για Φ/Β κελιά, αυξήθηκε από 604.812 t το 2021 σε 955.575 t το 2022, ενώ οι 39.300 t που χρησιμοποιήθηκαν για τη βιομηχανία ημιαγωγών το 2021 αυξήθηκαν σε 45.780 t το 2022. Ο όγκος παραγωγής του poly-Si για Φ/Β κελιά αντιπροσώπευε περίπου το 95 % της συνολικής παραγωγής του για το 2022. Το παγκόσμιο μερίδιο παραγωγής poly-Si για το 2022 φαίνεται στην Εικόνα 3.3. [14]

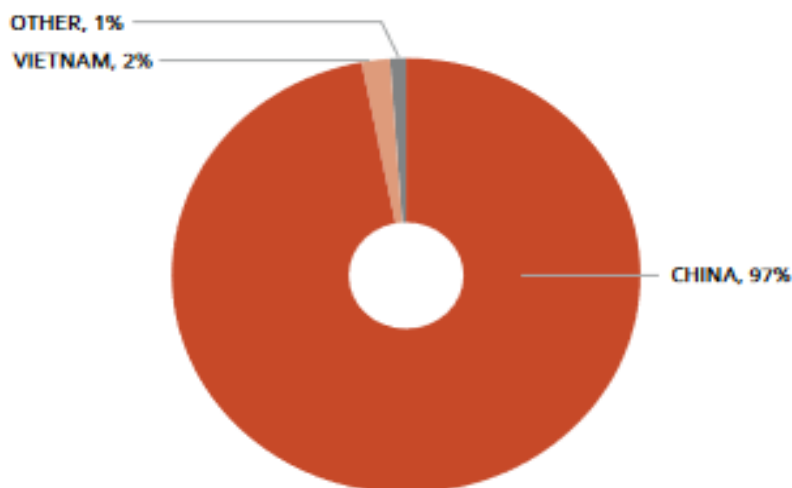


Εικόνα 3.3: Παγκόσμιο μερίδιο παραγωγής πολυπυριτίου [14]

3.3.2 Παραγωγή Ράβδων και Πλακιδίων

Για την παραγωγή ράβδων mono-Si ή multi-Si, το βασικό υλικό εισόδου αποτελείται από πολύ καλά καθαρισμένο multi-Si. Οι ράβδοι πρέπει να κοπούν σε τούβλα ή μπλοκ και στη συνέχεια να πριονιστούν σε λεπτά πλακίδια. Οι συμβατικοί ράβδοι πυριτίου είναι mono-Si και multi-Si. Συνήθως, προτιμάται ο δεύτερος τύπος, που χρησιμοποιείται μόνο στη Φ/Β βιομηχανία. Οι κατασκευαστές ράβδων είναι σε πολλές περιπτώσεις και κατασκευαστές πλακιδίων. [14]

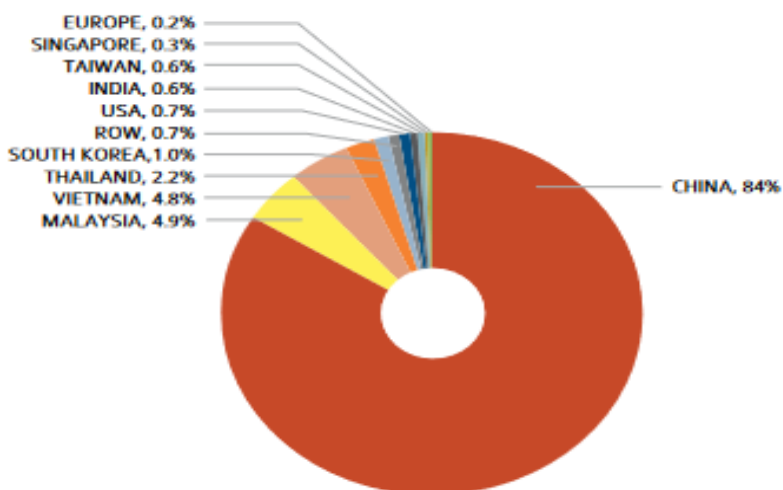
Η παγκόσμια παραγωγή πλακιδίων ανήλθε σε 381 GW το 2022, μια αύξηση 64 % από το 233 GW το 2021. Η παραγωγική ικανότητα των πλακιδίων στο τέλος του 2022 έφτασε τα 687 GW/έτος από τα 415 GW/έτος το 2021. Όπως και το 2021, η παραγωγική ικανότητα και ο όγκος παραγωγής για πλακίδια multi-Si μειώθηκαν, ενώ εκείνα των mono-Si αυξήθηκαν, λόγω της ζήτησης Φ/Β κελιών υψηλότερης απόδοσης. Το παγκόσμιο μερίδιο παραγωγής πλακιδίων για το 2022 διακρίνεται στην Εικόνα 3.4. [14]



Εικόνα 3.4: Παγκόσμιο μερίδιο παραγωγής πλακιδίων [14]

3.3.3 Παραγωγή Φωτοβολταϊκών Κελιών

Η παγκόσμια παραγωγή Φ/Β κελιών (c-Si και thin-film) έφτασε τα 394 GW το 2021, σημειώνοντας αύξηση 61 % από τα 244 GW το 2021. Όπως και το 2021, η Κίνα ήταν η μεγαλύτερη χώρα παραγωγής Φ/Β κελιών στον κόσμο για το 2022, διότι παρήγαγε 331 GW το 2022, μια αύξηση της τάξης του 62 % σε σχέση με 198 GW το 2021. Το παγκόσμιο μερίδιο παραγωγής Φ/Β κελιών για το 2022 απεικονίζεται στην Εικόνα 3.5. [14]

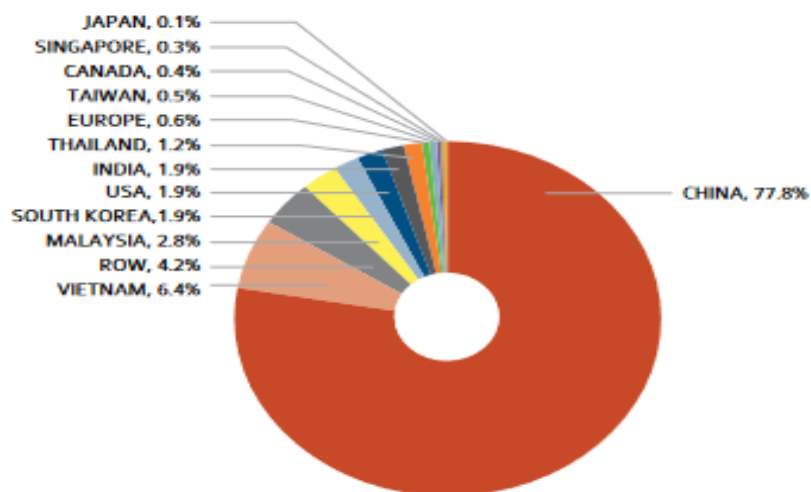


Εικόνα 3.5: Παγκόσμιο μερίδιο παραγωγής φωτοβολταϊκών κελιών [14]

3.3.4 Παραγωγή Φωτοβολταϊκών Πανέλων

Η παγκόσμια παραγωγή Φ/Β πανέλων παρουσίασε αύξηση, ακολουθώντας την παγκόσμια ζήτηση για εγκαταστάσεις Φ/Β συστημάτων από 242 GW το 2021 σε 379 GW το

2022. Από την Εικόνα 3.6, φαίνεται ότι όπως και το 2021, η Κίνα συνέχισε να είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός Φ/Β πανέλων και το 2022 παγκοσμίως με 294,7 GW και παραγωγική ικανότητα 552 GW/έτος. [14]

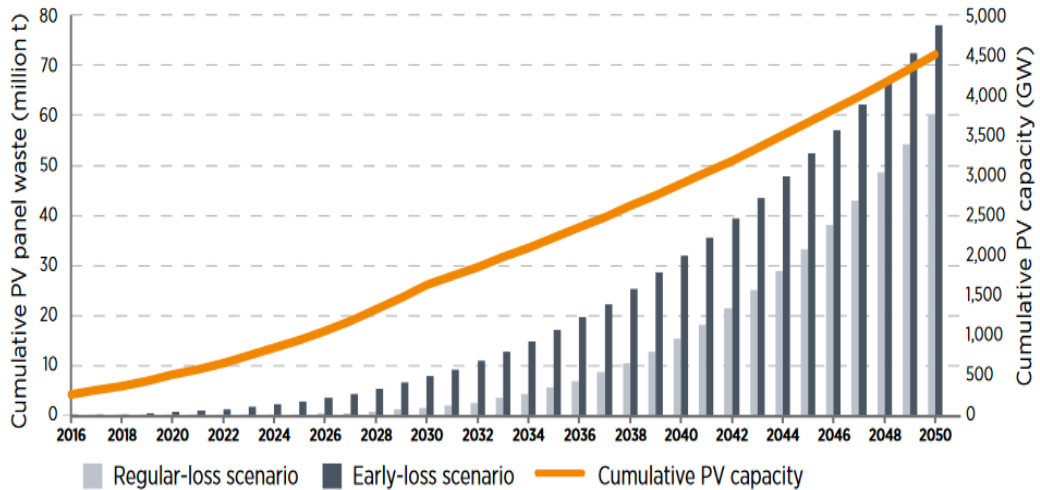


Εικόνα 3.6: Παγκόσμιο μερίδιο παραγωγής φωτοβολταϊκών πανέλων [14]

3.4 Φωτοβολταϊκά Απόβλητα

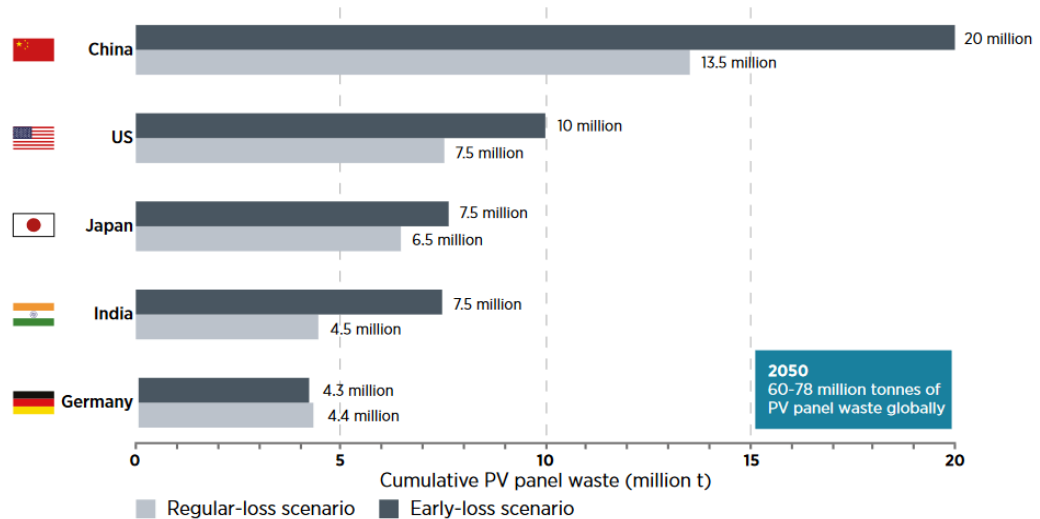
3.4.1 Προβλέψεις Αύξησης

Καθώς η παγκόσμια αγορά Φ/Β πανέλων αυξάνεται, θα αυξηθεί και ο αντίστοιχος όγκος των Φ/Β αποβλήτων, τα οποία θα έχουν περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Στο Διάγραμμα 3.2 παρουσιάζονται οι προβλέψεις αύξησης των σωρευτικών αποβλήτων Φ/Β πανέλων (cumulative PV panel waste) σε Mt από το 2016 μέχρι το 2050 σε 2 σενάρια τακτικής και πρόωρης απώλειας (regular-loss, early-loss scenario), λαμβάνοντας υπόψη και την αντίστοιχη σωρευτική Φ/Β χωρητικότητα (cumulative PV capacity) σε GW. [27]



Διάγραμμα 3.2: Προβλέψεις αύξησης όγκου φωτοβολταϊκών αποβλήτων [27]

Στο Διάγραμμα 3.3 αποτυπώνεται η προβλεπόμενη κατάταξη χωρών σωρευτικού όγκου αποβλήτων Φ/Β πινάκων σε Mt σε 2 σενάρια τακτικής και πρόωρης απώλειας ανάμεσα σε Γερμανία (Germany), Ινδία, Ιαπωνία, ΗΠΑ και Κίνα. [27]



Διάγραμμα 3.3: Προβλεπόμενη κατάταξη χωρών με φωτοβολταϊκά απόβλητα [27]

3.4.2 Σχέδιο Ευρωπαϊκής Ένωσης

Η ΕΕ έχει θεσπίσει ειδικούς κανονισμούς για τα Φ/Β απόβλητα, ενώ οι περισσότερες χώρες σε όλο τον κόσμο ταξινομούν τα Φ/Β πάνελ ως γενικά ή βιομηχανικά απόβλητα. Σε περιορισμένες περιπτώσεις, όπως στην Ιαπωνία ή στις ΗΠΑ, οι κανονισμοί για τα γενικά απόβλητα μπορεί να περιλαμβάνουν δοκιμές πινάκων για υλικά επικίνδυνου περιεχομένου,

καθώς και την οριοθέτηση ή την απαγόρευση διαδρομών συγκεκριμένης μεταφοράς, επεξεργασίας, ανακύκλωσης και απόρριψης. [27]

Ωστόσο, η ΕΕ έχει πρωτοπορήσει στους κανονισμούς για τα ηλεκτρονικά απόβλητα (e-waste), τα οποία καλύπτουν τη συλλογή, την ανάκτηση και την ανακύκλωση ειδικά για Φ/Β πάνελ. Με βάση την αρχή της διευρυμένης ευθύνης του παραγωγού, ο κανονισμός της ΕΕ για τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (waste from electrical and electronic equipment, WEEE) απαιτεί από όλους τους παραγωγούς, που προμηθεύουν Φ/Β πάνελ στην αγορά της ΕΕ (οπουδήποτε και αν εδρεύουν) να χρηματοδοτούν το κόστος της συλλογής και της ανακύκλωσης των Φ/Β πανέλων στο τέλος κύκλου ζωής τους για την αγορά τους στην Ευρώπη. [27]

Η διαχείριση του τέλους κύκλου ζωής θα μπορούσε να γίνει ένα σημαντικό συστατικό στοιχείο της αλυσίδας εφοδιασμού (supply chain) των Φ/Β πανέλων, αφού μπορεί να απελευθερώσει ένα μεγάλο απόθεμα πρώτων υλών και άλλων πολύτιμων συστατικών. Το ανακτώμενο υλικό, μπορεί να χρησιμοποιήσει για την παραγωγή νέων Φ/Β πανέλων ή να πωληθεί σε παγκόσμιες αγορές πρώτων υλών, αυξάνοντας έτσι την ασφάλεια του μελλοντικού εφοδιασμού με πρώτες ύλες. [27]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

4.1 Γενική Περιγραφή

Η σκέψη κύκλου ζωής (life cycle thinking, LCT) είναι μια βασική έννοια, που αναφέρεται στην ανάγκη αξιολόγησης της επιβάρυνσης και των οφελών που συνδέονται με προϊόντα, τομείς και έργα, υιοθετώντας μια ολιστική προοπτική, από την ακατέργαστη εξόρυξη των πρώτων υλών έως το τέλος του κύκλου ζωής τους. Η σκέψη κύκλου ζωής μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε οικονομικούς, κοινωνικούς όσο και σε περιβαλλοντικούς πυλώνες, όπως η ΑΚΖ. [28]

Η ΑΚΖ είναι ένα σύνολο ερευνητικών εργαλείων για την εκτίμηση όλων των περιβαλλοντικών συνεπειών, που σχετίζονται με ολόκληρη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. [7]

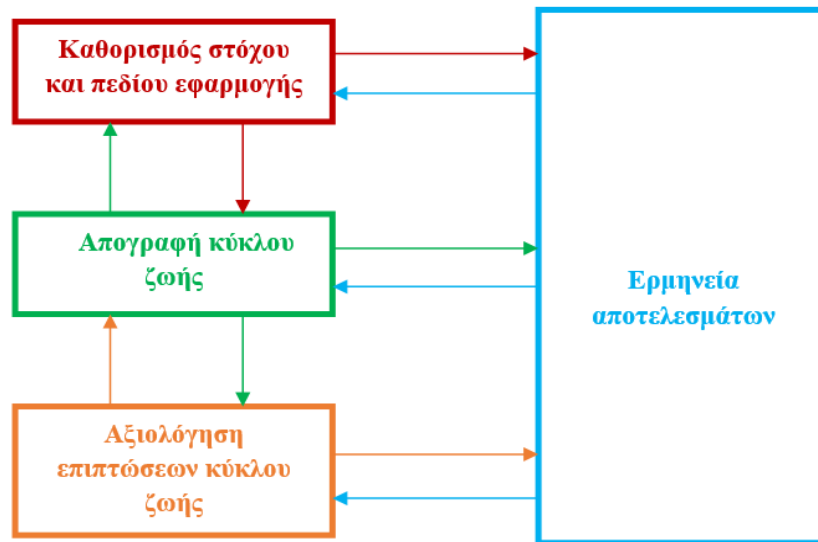
Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (European Environmental Agency, EEA): [9]

«Η αξιολόγηση του κύκλου ζωής περιλαμβάνει την αξιολόγηση ορισμένων πτυχών (συχνά των περιβαλλοντικών) μιας υπηρεσίας ή ενός προϊόντος σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του. Μερικές φορές ονομάζεται επίσης "ανάλυση κύκλου ζωής", "προσέγγιση κύκλου ζωής", "ανάλυση από την κούνια έως τον τάφο" ή "οικολογική ισορροπία" και αντιπροσωπεύει μια ταχέως αναδυόμενη οικογένεια εργαλείων και τεχνικών, που έχουν σχεδιαστεί για να βοηθήσουν στην περιβαλλοντική διαχείριση και μακροπρόθεσμα στην αειφόρο ανάπτυξη».

4.2 Πρότυπα και Διαδικαστικά Βήματα

Τα πρότυπα του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (International Organization for Standardization, ISO) αναφέρονται στην ΑΚΖ ως εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης, περιγράφοντας τα στάδια που εφαρμόζονται για την πλήρη διεξαγωγή της και ταυτίζονται με τα διαδικαστικά βήματα (Εικόνα 4.1). Πιο συγκεκριμένα: [28, 29]

- ISO 14040: Καθορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής (Objective and scope definition).
- ISO 14041: Απογραφή κύκλου ζωής (Life cycle inventory, LCI).
- ISO 14042: Αξιολόγηση επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life cycle impact assessment, LCIA).
- ISO 14043: Ερμηνεία αποτελεσμάτων (Results interpretation).



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής διαδικαστικών βημάτων ανάλυσης κύκλου ζωής [29]

Αναλυτικότερα: [28]

- **Καθορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής:** Εδώ καθορίζονται οι στόχοι της μελέτης, δηλαδή οι επιδιωκόμενες εφαρμογές, οι λόγοι διεξαγωγής της μελέτης και το κοινό στο οποίο απευθύνεται. Ακόμα, αναπτύσσονται οι κύριες μεθοδολογικές επιλογές, ιδίως ο ακριβής ορισμός των λειτουργικής μονάδας, ο προσδιορισμός των ορίων του συστήματος, των διαδικασιών κατανομής, του μοντέλου της αξιολόγησης των επιπτώσεων του κύκλου ζωής, που πρόκειται να μελετηθεί και ο προσδιορισμός των απαιτήσεων της ποιότητας των δεδομένων. Τέλος, σε αυτό το βήμα αναφέρονται όλες οι παραδοχές που έγιναν.
- **Απογραφή κύκλου ζωής:** Σε αυτό το βήμα περιλαμβάνεται η συλλογή δεδομένων και η διαδικασία υπολογισμού για την ποσοτικοποίηση των εισροών και των εκροών, του υπό μελέτη συστήματος. Οι εισροές και οι εκροές αφορούν την ενέργεια, τις πρώτες ύλες και άλλες φυσικές εισροές, τα προϊόντα και τα απόβλητα, τις εκπομπές στον αέρα, στο νερό, στο έδαφος και άλλες περιβαλλοντικές πτυχές. Στην πραγματικότητα, καθώς συλλέγονται δεδομένα και μαθαίνονται περισσότερα για το σύστημα, μπορεί να εντοπιστούν νέες απαιτήσεις δεδομένων ή περιορισμοί, που απαιτούν αλλαγή των διαδικασιών συλλογής δεδομένων, έτσι ώστε να εξακολουθούν να επιτυγχάνονται οι στόχοι της μελέτης. Εάν χρειαστεί, ο στόχος και το πεδίο εφαρμογής θα μπορούσαν να αναθεωρηθούν.
- **Αξιολόγηση επιπτώσεων κύκλου ζωής:** Στο βήμα της εκτίμησης επιπτώσεων, τα αποτελέσματα της απογραφής κύκλου ζωής συσχετίζονται με τις κατηγορίες και τους δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου της

αξιολόγησης επιπτώσεων κύκλου ζωής, η οποία αρχικά ταξινομεί τις εκπομπές σε κατηγορίες επιπτώσεων και έπειτα τις ανάγει σε κοινή μονάδα, ώστε να επιτρέπεται η σύγκριση.

- Ερμηνεία αποτελεσμάτων: Τέλος, ερμηνεύονται τα αποτελέσματα από την απογραφή κύκλου ζωής και την αξιολόγηση επιπτώσεων κύκλου ζωής, σύμφωνα με τον καθορισμένο στόχο και το πεδίο εφαρμογής. Το βήμα αυτό περιλαμβάνει ελέγχους πληρότητας, ευαισθησίας, συνέπειας, αβεβαιότητας και ακρίβειας των λαμβανόμενων αποτελεσμάτων.

4.3 Στάδια

Η AKZ ολόκληρης της διαδικασίας ενός προϊόντος είναι ιδιαίτερα λεπτομερής και περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια (Εικόνα 4.2): [9, 30]

- Απόκτηση πρώτων υλών (Raw materials acquisition): Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει την εξόρυξη ή τη συγκομιδή των φυσικών πόρων που απαιτούνται για το προϊόν.
- Παραγωγή (Production): Οι πρώτες ύλες επεξεργάζονται και μετατρέπονται στο τελικό προϊόν μέσω κατασκευαστικών εργασιών, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν διάφορες εισροές ενέργειας και πόρων.
- Διανομή και μεταφορά (Distribution and transportation): Εδώ περιλαμβάνεται η μεταφορά του προϊόντος από την εγκατάσταση παραγωγής στον καταναλωτή ή τον τελικό χρήστη, συμπεριλαμβανομένης της συσκευασίας, της αποθήκευσης και του εφοδιασμού.
- Χρήση και λειτουργία (Use and operation): Αυτό το στάδιο εξετάζει την ενέργεια και τους πόρους, που καταναλώνονται κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής του προϊόντος, λαμβάνοντας υπόψη τη συντήρηση, τις επισκευές και τα τυχόν αναγκαία αναλώσιμα.
- Τέλος κύκλου ζωής (End of life, EOL): Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει τη διάθεση ή την ανακύκλωση του προϊόντος. Αυτό περικλείει τη διαχείριση των αποβλήτων, τις διαδικασίες ανακύκλωσης, τις πιθανές εκπομπές που σχετίζονται με την αποτέφρωση ή την υγειονομική ταφή.



Εικόνα 4.2: Στάδια ανάλυσης κύκλου ζωής [30]

4.4 Τέλος Κύκλου Ζωής

Η διαχείριση του τέλους κύκλου ζωής (EOL management) περιγράφει τα συστήματα και τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο τέλος του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, δηλαδή μετά τη χρήση του προϊόντος όπως είχε αρχικά προταθεί. Για οικονομικούς και οικολογικούς λόγους, τα προϊόντα αυτά δεν είναι πλέον άχρηστη ποσότητα αποβλήτων, που πρέπει να απορριφθεί. Τα παλιά προϊόντα αποτελούν ενδιαφέροντες πόρους, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορα νέα. Επιπλέον, η ευαισθητοποίηση σε οικολογικά ζητήματα αυξάνεται. [31]

Σύμφωνα με διάφορους κανονισμούς, τα επικίνδυνα υλικά πρέπει να συλλέγονται και να επεξεργάζονται με ειδικό τρόπο, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις στο περιβάλλον. Για τη διαχείριση του τέλους κύκλου ζωής ενός προϊόντος μπορούν να επιλεγούν 5 διαφορετικές στρατηγικές κατά φθίνουσα σημασία (Εικόνα 4.3). Αυτές είναι: [31]

- Μείωση (Reduce).
- Επαναχρησιμοποίηση (Reuse).
- Ανακύκλωση (Recycle).
- Ανάκτηση (Recover).
- Χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (XYTA) (Landfill).



Εικόνα 4.3: Πυραμίδα στρατηγικών διαχείρισης τέλους κύκλου ζωής [31]

Εκτενέστερα: [31]

Η πρώτη και πιο ευνοϊκή στρατηγική είναι η μείωση της ποσότητας του πρωτογενούς υλικού, που χρησιμοποιείται για ένα προϊόν και συνδέεται άμεσα με τη διαχείριση του τέλους κύκλου ζωής. Αυτό σημαίνει, ότι η μείωση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη φάση σχεδιασμού του προϊόντος.

Η δεύτερη καλύτερη επιλογή είναι η επαναχρησιμοποίηση ολόκληρου του προϊόντος ή μεμονωμένων τμημάτων του. Σε αυτή την περίπτωση, η παραγόμενη αξία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε έναν δεύτερο κύκλο ζωής, χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις του προϊόντος που επαναχρησιμοποιείται. Εάν δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί ολόκληρο το προϊόν, αλλά μόνο ορισμένα τμήματα αυτού, οι συσκευές πρέπει να αποσυναρμολογηθούν κατά τέτοιο τρόπο, ώστε τουλάχιστον τα τμήματα που προορίζονται για επαναχρησιμοποίηση, να μην καταστραφούν κατά τη διαδικασία.

Η τρίτη καλύτερη εναλλακτική λύση είναι η ανακύκλωση των υλικών, που μπορούν να εξαχθούν από ένα προϊόν. Τα υλικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αρχικό υλικό για νέα προϊόντα. Όταν τα νέα προϊόντα είναι καλύτερης ποιότητας από τη συσκευή προέλευσης, η διαδικασία ονομάζεται "ανακύκλωση προς τα πάνω", ενώ η "ανακύκλωση προς τα κάτω" περιγράφει τη διαδικασία παραγωγής νέων προϊόντων χαμηλότερης ποιότητας από τη συσκευή προέλευσης.

Η τέταρτη απόφαση που χρησιμοποιείται σε αυτό το μοντέλο στρατηγικών διαχείρισης τέλους κύκλου ζωής, συμβολίζει την ανάκτηση ενέργειας από τα απόβλητα προϊόντων. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, τα μη επικίνδυνα υλικά καίγονται, γεγονός που έχει δύο στόχους. Ο πρώτος είναι, ότι η παραγόμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή π.χ. ηλεκτρικής

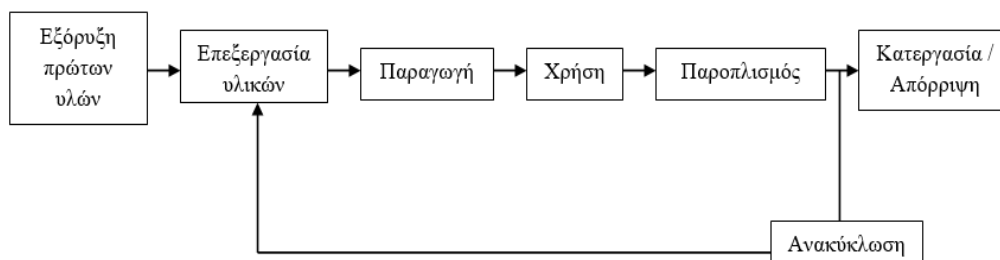
ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ή να πωληθεί. Το δεύτερο πλεονέκτημα είναι, ότι μειώνεται σημαντικά η ποσότητα των αποβλήτων.

Η τελευταία και χειρότερη στρατηγική είναι η υγειονομική ταφή, όπου τα προϊόντα εναποτίθενται σε χωματερές μετά το τέλος κύκλου ζωής τους. Αυτή η εναλλακτική είναι δαπανηρή για διάφορους λόγους. Μια μεγάλη ποσότητα εδάφους είναι απαραίτητη και απαιτούνται πολλοί πόροι για τη διατήρηση των ΧΥΤΑ. Από την άλλη πλευρά, δεν υπάρχουν θετικές αποδόσεις από μια χωματερή. Ως εκ τούτου, ο κύριος στόχος για την παρούσα και μελλοντική ανάπτυξη είναι η μείωση του μεριδίου των προϊόντων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής στο μηδέν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

5.1 Επεξήγηση

Ο κύκλος ζωής των Φ/Β πανέλων βασίζεται στα παρακάτω στάδια της ΑΚΖ (Εικόνα 5.1). [32]



Εικόνα 5.1: Διάγραμμα ροής σταδίων κύκλου ζωής φωτοβολταϊκών πανέλων [32]

Πιο λεπτομερώς: [32]

- Εξόρυξη πρώτων υλών (Mining raw material): Εξόρυξη και συμπύκνωση μεταλλευμάτων, εξόρυξη ορυκτών καυσίμων (Εικόνα 5.2). [33]
- Επεξεργασία υλικών (Material processing): Τήξη μετάλλων, καθαρισμός κραμάτων, ηλιακή παραγωγή Si και παραγωγή πλακιδίων (Εικόνα 5.3). [34]
- Παραγωγή (Manufacturing): Παραγωγή Φ/Β κελιών ή εναπόθεση λεπτών μεμβρανών (π.χ. κοπή πλακιδίων, σπατουλάρισμα, χημική εναπόθεση ατμών και εναπόθεση με μεταφορά ατμών) (Εικόνα 5.4), παραγωγή Φ/Β πανέλων (π.χ. σχηματισμός επαφών, ενθυλάκωση, καλωδίωση και συναρμολόγηση) (Εικόνα 5.5). Ακόμα, περιλαμβάνεται η μεταφορά, η εγκατάσταση των Φ/Β πανέλων και του ισοζυγίου του συστήματος (Εικόνες 5.6, 5.7). [21, 35, 36]
- Χρήση (Use): Εδώ περιλαμβάνεται η λειτουργία του Φ/Β συστήματος και η συντήρηση του εξοπλισμού (Εικόνα 5.8). [14]
- Παροπλισμός (Decommissioning): Αποτελεί το τέλος κύκλου ζωής του Φ/Β συστήματος και την αποσυναρμολόγησή του (Εικόνα 5.9). [37]
- Ανακύκλωση (Recycling): Εάν τα Φ/Β πάνελ δεν έχουν υποστεί σοβαρή φθορά, επιστρέφουν στο στάδιο επεξεργασίας υλικών για εκ νέου χρήση (Εικόνα 5.10). [38]
- Κατεργασία / Απόρριψη (Treatment / Disposal): Συλλογή, τεμαχισμός, διαχωρισμός των υλικών των Φ/Β πανέλων και κατεργασία ή απόρριψη των απορριμμάτων αυτών (Εικόνα 5.11). [38]



Εικόνα 5.2: Στάδιο εξόρυξης πρώτων υλών [33]



Εικόνα 5.3: Στάδιο επεξεργασίας υλικών [34]



Εικόνα 5.4: Στάδιο παραγωγής φωτοβολταϊκών κελιών [21]



Εικόνα 5.5: Στάδιο παραγωγής φωτοβολταϊκών πινάκων [35]



Εικόνα 5.6: Στάδιο μεταφοράς φωτοβολταϊκών πινάκων [36]



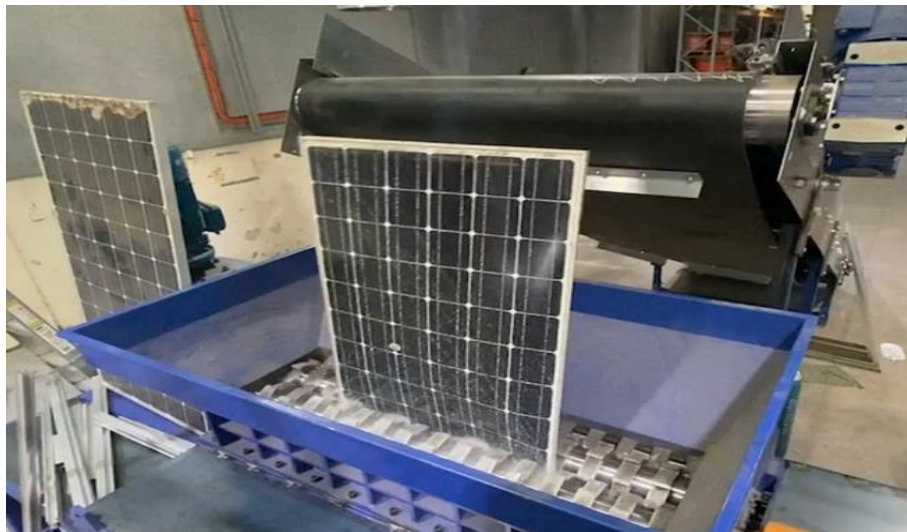
Εικόνα 5.7: Στάδιο εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πινάκων [36]



Εικόνα 5.8: Στάδιο χρήσης φωτοβολταϊκών πινάκων [14]



Εικόνα 5.9: Στάδιο παροπλισμού φωτοβολταϊκών πινάκων [37]



Εικόνα 5.10: Στάδιο ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πινάκων [38]

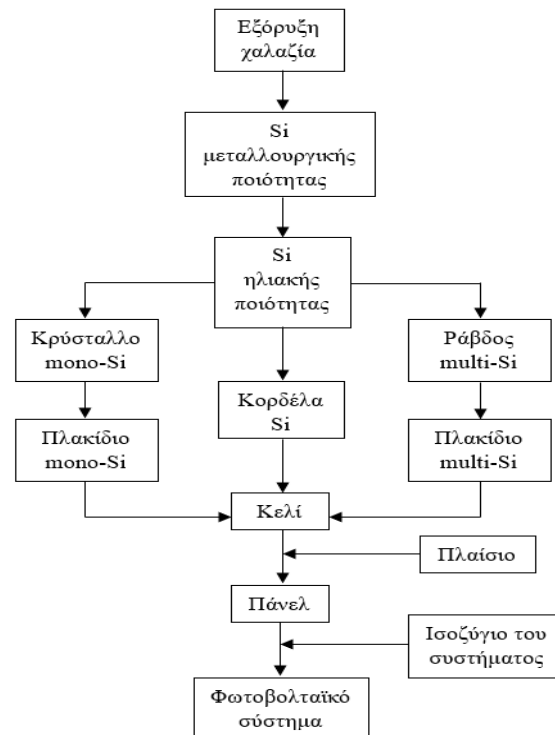


Εικόνα 5.11: Στάδιο κατεργασίας / απόρριψης φωτοβολταϊκών πινάκων [38]

5.2 Κύκλος Ζωής Φωτοβολταϊκών Τεχνολογιών

5.2.1 Κρυσταλλικού Πυριτίου

Μια ΑΚΖ των Φ/Β c-Si ξεκινάει με την αξιολόγηση της εξόρυξης των πρώτων υλών, δηλαδή του χαλαζία ή διοξειδίου του πυριτίου (silicon dioxide, SiO_2) για τα Φ/Β Si και συνεχίζει με την επεξεργασία και τον καθαρισμό του. Το SiO_2 ανάγεται σε κλίβανο τόξου Si μεταλλουργικής ποιότητας (metallurgical grade), το οποίο καθαρίζεται σε Si ηλιακής ποιότητας (solar grade) είτε με σιλάνιο (silane, SiH_4), είτε με τριχλωροσιλάνιο (trichlorosilane, SiHCl_3). Έπειτα, σχηματίζεται η κορδέλα (ribbon) Si, ενώ όσον αφορά την τεχνολογία mono-Si σχηματίζεται το κρύσταλλο (crystal) mono-Si και το πλακίδιο (wafer) mono-Si, καθώς σχετικά με την τεχνολογία multi-Si σχηματίζεται η ράβδος (ingot) multi-Si και το πλακίδιο multi-Si. Και οι 3 εναλλακτικές διαδρομές οδηγούν στη δημιουργία του κελιού. Στη συνέχεια, με την τοποθέτηση του πλαισίου δημιουργείται το πάνελ. Τέλος, μαζί με το ισοζύγιο του συστήματος ολοκληρώνεται το Φ/Β σύστημα (Εικόνα 5.12). [32, 39]



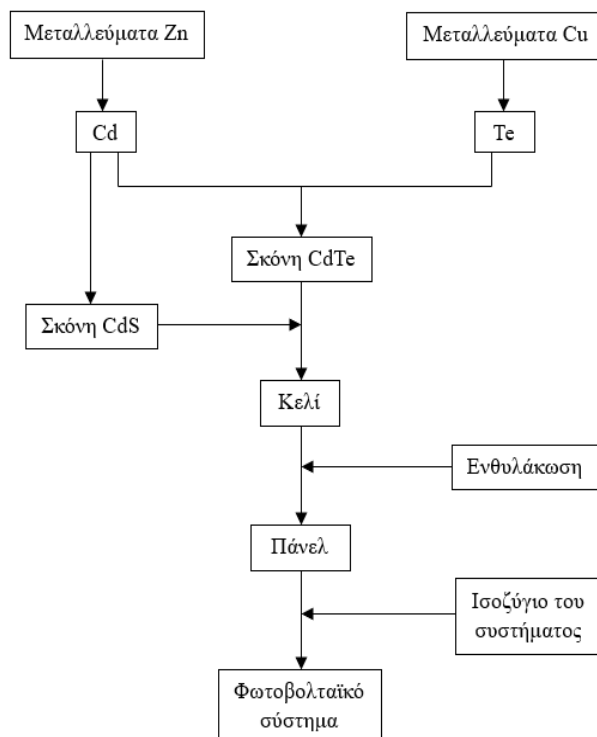
Εικόνα 5.12: Διάγραμμα ροής σταδίων κύκλου ζωής φωτοβολταϊκής τεχνολογίας κρυσταλλικού πυριτίου [39]

5.2.2 Λεπτής Μεμβράνης

Τα αποθέματα του κύκλου ζωής των δευτερευόντων μετάλλων που χρησιμοποιούνται στα Φ/Β thin-film CdTe συνδέονται στενά με τον κύκλο παραγωγής των αντίστοιχων βασικών μετάλλων, όπως μεταλλεύματα ψευδαργύρου (zinc, Zn) (Zn ores) και χαλκού (copper, Cu) (Cu ores). Το κάδμιο (cadmium, Cd) λαμβάνεται από τα ρεύματα αποβλήτων στην τήξη Zn, κυρίως στις λάσπες από τα στάδια καθαρισμού του ηλεκτρολύτη Zn και τα σωματίδια που συλλέγονται σε σακκοθαλάμους, ηλεκτροστατικά φίλτρα και κυκλώνες στις μονάδες θερμικής οξείδωσης. Στη συνέχεια, υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία και καθαρίζεται σε καθαρότητα 99,999 %, που απαιτείται για τη σύνθεση καθαρού CdTe σε σκόνη (powder) ή σουλφίδιου του καδμίου (cadmium sulfide, CdS) σε σκόνη. [32]

Το τελλούριο (tellurium, Te) ανακτάται μετά από επεξεργασία με αραιό θειικό οξύ (sulfuric acid, H₂SO₄) των ιλύων, που παράγονται κατά τη διάρκεια του ηλεκτρολυτικού εξευγενισμού του Cu. Τα ιζήματα αυτά περιέχουν Cu και άλλα μέταλλα. Μετά την τσιμεντοποίηση με Cu, το CuTe εκπλένεται με καυστική σόδα, για να παραχθεί ένα νάτριο (sodium, Na), το οποίο χρησιμοποιείται ως τροφοδοσία για Te και διοξείδιο του τελλουρίου (tellurium dioxide, TeO₂). Πρόσθετη έκπλυση και απόσταξη υπό κενό παράγουν σκόνη Te και TeO₂ καθαρότητας 99,999 %, που απαιτείται για τη σύνθεση καθαρού CdTe σε σκόνη. Και οι 2 εναλλακτικές διαδρομές οδηγούν στη δημιουργία του κελιού. Έπειτα, με την ενθυλάκωση

(encapsulation) δημιουργείται το πάνελ. Τέλος, σε συνδυασμό με το ισοζύγιο του συστήματος ολοκληρώνεται το Φ/Β σύστημα (Εικόνα 5.13). [32, 39]



Εικόνα 5.13: Διάγραμμα ροής σταδίων κύκλου ζωής φωτοβολταϊκής τεχνολογίας τελλουρίδιου καδμίου [39]

5.3 Επιπτώσεις Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών

5.3.1 Κλιματική Αλλαγή

Οι συνέπειες του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη (global warming potential, GWP) μπορούν να παρατηρηθούν με τη μορφή διαφόρων φυσικών αλλαγών, όπως ανεμοστρόβιλοι, ξηρασίες, ασθένειες, άνοδος της στάθμης της θάλασσας, λιώσιμο των παγετώνων. Ο ποσοτικός προσδιορισμός και η ανάλυση του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη πραγματοποιούνται με τη μετατροπή κάθε εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (greenhouse gases, GHGs) στην ισοδύναμη τιμή διοξειδίου του άνθρακα (carbon dioxide, CO₂). Οι κύριες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου με χρονικό ορίζοντα 100 ετών είναι: [40]

- ❖ CO₂ με GWP = 1.
- ❖ Υποξείδιο του αζώτου (nitrous oxide, N₂O) με GWP = 298.
- ❖ Μεθάνιο (methane, CH₄) με GWP = 25.
- ❖ Χλωροφθοράνθρακες (chlorofluorocarbons, CFCs) με GWP = 4750 - 14.400.

Για τις Φ/Β εγκαταστάσεις, ο αντίκτυπος του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη προκύπτει κυρίως από τη φάση παραγωγής, η οποία απαιτεί την περισσότερη ενέργεια.

Ωστόσο, οι πρώτες ύλες (π.χ. Si) μπορούν να ανακτηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν μετά τη διάρκεια ζωής των κελιών. [40]

Οι δυνατότητες μετριασμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (impact mitigation potential, IMP) μπορούν να ποσοτικοποιηθούν με χαρακτηριστικό παράδειγμα την κλιματική αλλαγή (climate change) (Εικόνες 5.14, 5.15) σε επίπεδο διάρκειας ζωής. Αφενός, οι επιπτώσεις του κύκλου ζωής ενδεχομένως αποφεύγονται κατά τη διάρκεια ζωής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός Φ/Β συστήματος. Αφετέρου, καθορίζονται οι επιπτώσεις του κύκλου ζωής, που προκαλούνται από την προμήθεια υλικών, την κατασκευή, την εγκατάσταση, τη λειτουργία, τη συντήρηση και τη διαχείριση στο τέλος του κύκλου ζωής. Ο συγκεκριμένος δείκτης αξιολόγησης υπολογίζεται από την εξίσωση (5.1): [41, 42, 43]

$$CC = \frac{CC_{agen}}{\gamma_G} - (CC_{mat} + CC_{manuf} + CC_{trans} + CC_{inst} + CC_{EOL} + CC_{O\&M}) \quad (5.1)$$

Όπου CC_{agen} : η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής (kWh), γ_G : οι επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή από την πλευρά της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου (kg CO₂ / kWh), CC_{mat} : οι επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή από την παραγωγή υλικών, που αποτελούν το Φ/Β σύστημα (kg CO₂), CC_{manuf} : οι επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή από την κατασκευή του Φ/Β συστήματος (kg CO₂), CC_{trans} : οι επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή από τη μεταφορά υλικών, που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής (kg CO₂), CC_{inst} : οι επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή από την εγκατάσταση του συστήματος (kg CO₂), CC_{EOL} : οι επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή από τη διαχείριση στο τέλος του κύκλου ζωής (kg CO₂), $CC_{O\&M}$: οι επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή από λειτουργία και τη συντήρηση καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής (kg CO₂).



Εικόνα 5.14: Κλιματική αλλαγή και ανθρώπινη υγεία [42]

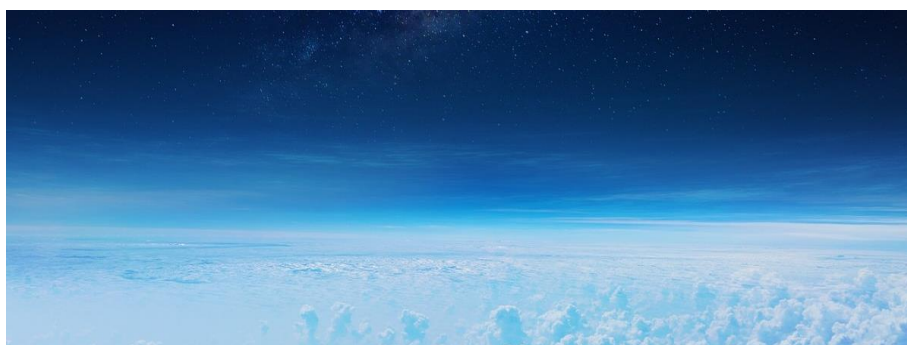


Εικόνα 5.15: Κλιματική αλλαγή και ποιότητα οικοσυστημάτων [43]

5.3.2 Καταστροφή του Όζοντος

Η καταστροφή του όζοντος (ozone depletion) (Εικόνα 5.16), δηλαδή η εξάντληση του στρώματος του όζοντος το καθιστά λεπτότερο και προωθεί τη διείσδυση της υπεριώδους ακτινοβολίας (ultraviolet (UV) radiation) στη Γη. Το όζον είναι σημαντικό για τη βιόσφαιρα της Γης, καθώς έχει οφέλη σε στρατοσφαιρικά ύψη, όπου απορροφάει το 99 % της επιβλαβούς εισερχόμενης υπεριώδους ακτινοβολίας, η οποία κατά συνέπεια προστατεύει τη ζωή στη Γη. Επομένως, αν το όζον σε χαμηλότερα υψόμετρα μειωθεί, η επιβλαβής υπεριώδης ακτινοβολία θα διεισδύσει και θα επηρεάσει αρνητικά τη βιόσφαιρα, γεγονός που είναι επικίνδυνο για τα οικοσυστήματα και τον άνθρωπο. Χημικές ουσίες όπως CH_4 , N_2O και νερό (dihydrogen monoxide, H_2O) είναι οι κύριοι παράγοντες, που συμβάλλουν στην καταστροφή του όζοντος, διότι έχουν μεγάλο χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα. [40, 44]

Όσον αφορά τα Φ/Β συστήματα, ο κύριος παράγοντας που συμβάλλει στην καταστροφή του όζοντος είναι η παραγωγή Φ/Β στοιχείων. Επιπλέον, η κατανάλωση αλουμινίου (aluminium, Al) κατά τη διαδικασία συναρμολόγησης των Φ/Β πανέλων συμβάλλει σημαντικά στο δυναμικό καταστροφής της στιβάδας του όζοντος και έχει αποδειχθεί ότι η μείωση της κατανάλωσης Al κατά 10 % θα οδηγούσε σε μείωση του δυναμικού καταστροφής της στιβάδας του όζοντος κατά 7,01 %. [40]



Εικόνα 5.16: Καταστροφή του όζοντος και ανθρώπινη υγεία [44]

5.3.3 Τοξικότητα για τον Άνθρωπο

Η κατασκευή Φ/Β στοιχείων απαιτεί μεγάλες ποσότητες χημικών ουσιών, όπως διαλύτες και οξέα για τον καθαρισμό των εξαρτημάτων των ημιαγωγών, αέρια για την εναπόθεση των εξαιρετικά λεπτών στρωμάτων υλικού και μέταλλα ανάλογα με την τεχνολογία του Φ/Β πανέλων. Πολλές από αυτές τις χημικές ουσίες μπορεί να είναι ιδιαίτερα τοξικές για τον άνθρωπο (human toxicity) (Εικόνα 5.17). Οι επιπτώσεις των χημικών ουσιών και ενώσεων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή Φ/Β πανέλων μπορούν να χωριστούν σε καρκινογενείς (cancer effects) και μη καρκινογενείς (non-cancer effects). Οι καρκινογενείς χημικές ουσίες έχει αποδειχθεί ότι προάγουν την ανάπτυξη καρκινικών όγκων στον άνθρωπο, ενώ μπορούν να έχουν και άλλες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Σε αντίθεση, οι μη καρκινογενείς χημικές ουσίες που δεν έχει αποδειχθεί ότι προάγουν την ανάπτυξη καρκινικών όγκων στον άνθρωπο, περιλαμβάνουν επιδράσεις σε συγκεκριμένα όργανα, στο αναπαραγωγικό, στο νευρικό ή στο ανοσοποιητικό σύστημα. [45, 46]

Τα κυριότερα καρκινογόνα χημικά που χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία Φ/Β περιλαμβάνουν αρσενικό (arsenic, As), αρσίνη (arsine, AsH₃), Cd, διχλωρομεθάνιο (dichloromethane, CH₂Cl₂) και τριχλωροαιθυλένιο (trichloroethylene, C₂HCl₃). Αντιθέτως, τα πιο σημαντικά μη καρκινογόνα χημικά εμπεριέχουν θειουρία (thiourea, CH₄N₂S), φωσφίνη (phosphine, PH₃), φωσφίδιο του ψευδαργύρου (zinc phosphide, Zn₃P₂), μολυβδαίνιο (molybdenum, Mo) και σελήνιο (selenium, Se). Καταληκτικά, τα χημικά διαφέρουν ανά τη Φ/Β τεχνολογία, για παράδειγμα τα Φ/Β poly-Si περιέχουν AsH₃, ενώ τα Φ/Β thin-film Mo. [45]



Εικόνα 5.17: Τοξικότητα για τον άνθρωπο και ανθρώπινη υγεία [46]

5.3.4 Σωματιδιακή Ύλη

Η ατμοσφαιρική ρύπανση περιλαμβάνει συνήθως το όζον και τη σωματιδιακή ύλη (particulate matter, PM) (Εικόνα 5.18). Οι σωματιδιακές ύλες διακρίνονται σε μικρές (PM₁₀) και λεπτές (PM_{2,5}). Οι δείκτες περιγράφουν σωματιδιακές ουσίες με διάμετρο μικρότερη από

10 και 2,5 mm αντίστοιχα. Οι κύριες πηγές αυτών των ουσιών είναι η ατελής καύση, οι αυτοκινούμενες εκπομπές, η σκόνη και το μαγείρεμα. Στην πλειονότητά τους, είναι ανθρωπογενείς, με τα κύρια συνθετικά να είναι θειικά ιόντα (sulfates, SO_4^{2-}), νιτρικά ανιόντα (nitrates, NO_3^-), αμμωνία (ammonia, NH_3), άνθρακα (carbon, C), μόλυβδο (lead, Pb) και οργανική ύλη. Λόγω του μικρού τους μεγέθους, τα σωματίδια $\text{PM}_{2.5}$ αποτελούν σημαντικό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία, καθώς μπορούν να εισέλθουν στους πνεύμονες και τα αιμοφόρα αγγεία των ανθρώπων. Επιπλέον, προκαλούν χρόνιες βλάβες στο αναπνευστικό και καρδιαγγειακό σύστημα και συμβάλλουν στην πρόωγη ανθρώπινη θνησιμότητα. Κατά κύριο λόγο παρουσιάζουν αναπνευστικές επιπτώσεις (respiratory effects) στον άνθρωπο. [47, 48]

Η παραγωγή Φ/Β ενέργειας εξαρτάται σημαντικά από την ηλιακή ακτινοβολία. Σε γενικές γραμμές, τα χαρακτηριστικά των νεφών θεωρούνται οι πρωταρχικοί παράγοντες, που τροποποιούν την επιφανειακή ηλιακή ακτινοβολία. Οι υψηλές συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρύπων θα μπορούσαν να εξασθενήσουν σημαντικά την εισερχόμενη ακτινοβολία, απορροφώντας και διασκορπίζοντας το ηλιακό φως, ιδίως σε περιοχές με έντονη ρύπανση. Κατόπιν έρευνας, έχει διαμορφωθεί μια συνολική εικόνα των επιπτώσεων στην απόδοση και την παραγωγή ενέργειας από Φ/Β που προκαλεί η ατμοσφαιρική ρύπανση. Πιο συγκεκριμένα, οι συντελεστές ισχύος (power factors, PF) των Φ/Β συστημάτων έχουν μειωθεί κατά 4 – 34 % στις κυριότερες Φ/Β αγορές, λόγω των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων που προέρχονται από ανθρωπογενείς εκπομπές. [49]



Εικόνα 5.18: Σωματιδιακή ύλη και ανθρώπινη υγεία [48]

5.3.5 Ιονίζουσα Ακτινοβολία

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία (electric and magnetic fields, EMFs) είναι αόρατες περιοχές ενέργειας, που συχνά αναφέρονται ως ακτινοβολία και διακρίνονται σε ιονίζοντα και μη. Τα μη ιονίζοντα είναι χαμηλού επιπέδου μορφές ακτινοβολίας, που γενικά θεωρούνται αβλαβείς για τον άνθρωπο. Στην πραγματικότητα, οι άνθρωποι έρχονται καθημερινά σε επαφή με μη ιονίζουσα ακτινοβολία μέσω ραδιοφωνικών και τηλεοπτικών κυμάτων, κινητών τηλεφώνων

και μικροκυμάτων χωρίς σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Τα Φ/Β πάνελ παράγουν χαμηλά επίπεδα μη ιονίζουσας ακτινοβολίας, αλλά ακόμη και τότε, είναι απίθανο να φτάσει στο ευρύ κοινό. Οι άνθρωποι εκτός της περιφραγμένης περιμέτρου μιας Φ/Β εγκατάστασης δεν εκτίθενται σε σημαντική ποσότητα ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και ως εκ τούτου δεν κινδυνεύουν από δυσμενή προβλήματα υγείας, εξαιτίας της ιονίζουσας ακτινοβολίας (ionizing radiation) (Εικόνα 5.19). [50, 51]



Εικόνα 5.19: Ιονίζουσα ακτινοβολία και ανθρώπινη υγεία [51]

5.3.6 Σχηματισμός Φωτοχημικού Όζοντος

Η φωτοχημική οξείδωση των πτητικών οργανικών ενώσεων (volatile organic compounds, VOCs) και του μονοξειδίου του άνθρακα (carbon monoxide, CO) παρουσία οξειδίων του αζώτου (nitrogen oxides, NO_x) και υπεριώδους φωτός δημιουργεί όζον και άλλες αντιδραστικές χημικές ουσίες στην τροπόσφαιρα. Το αιθυλένιο (ethylene, C₂H₄) είναι η ουσία που συμβάλλει στον σχηματισμό φωτοχημικού όζοντος (photochemical ozone formation) (Εικόνες 5.20, 5.21), το οποίο παρουσιάζει επιπτώσεις στα οικοσυστήματα, τις καλλιέργειες και την ανθρώπινη υγεία. [40, 52, 53]



Εικόνα 5.20: Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος και ανθρώπινη υγεία [52]



Εικόνα 5.21: Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος και ποιότητα οικοσυστημάτων [53]

5.3.7 Οξίνιση

Ως οξίνιση (acidification) (Εικόνα 5.22) ορίζονται οι εκπομπές, που αυξάνουν τη συγκέντρωση οξύτητας του νερού και του εδάφους. Η οξίνιση είναι αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που προέρχεται από το άζωτο (nitrogen, N), το θείο (sulfur, S) με τη μορφή NO_x ή NH_3 . Επίσης, είναι ένας από τους σημαντικούς σύγχρονους περιβαλλοντικούς κινδύνους σε παγκόσμια κλίμακα, που επηρεάζει άμεσα το οικοσύστημα. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της οξίνισης, τόσο μεγαλύτερες είναι οι περιβαλλοντικές ζημιές, ενώ το δυναμικό της ποικίλλει ανάλογα με τα ατμοσφαιρικά περιβάλλοντα και με τα περιφερειακά χαρακτηριστικά. [54, 55]

Αναφορικά με τα Φ/Β συστήματα, η οξίνιση προκαλείται κυρίως στη διαδικασία παραγωγής των Φ/Β πανέλων με περίπου 57 % και προκύπτει κατά κύριο λόγο από τις χημικές ουσίες, που εκπέμπονται από την καύση ορυκτών καυσίμων, όπως SO_2 , υδροχλωρίο (hydrogen chloride, HCl), NO_x και NO_3^- . [40]



Εικόνα 5.22: Οξίνιση και ποιότητα οικοσυστημάτων [55]

5.3.8 Ευτροφισμός

Ο ευτροφισμός (eutrophication) (Εικόνες 5.23, 5.24) συμβαίνει όταν ένα σώμα δέχεται υπερβολικά θρεπτικό φορτίο, αυξάνοντας την παραγωγή βιομάζας, η οποία στην περίπτωση

των υδάτινων συστημάτων, καθιστά το νερό ακατάλληλο για πόση. Τα κύρια χημικά του ευτροφισμού είναι φωσφόρος (phosphorus, P), NH_3 , NO_3^- και N. Ο ευτροφισμός αποδίδεται στην υπερβολική ανάπτυξη των φυτών και των φυκιών ως αποτέλεσμα της αύξησης των σχετικών παραγόντων ανάπτυξης και έτσι βλάπτει τα οικοσυστήματα των γλυκών και των θαλάσσιων υδάτων. [54, 56, 57]

Επιπλέον, είναι επιβλαβής για τα χερσαία ζώα και τα φυτά, καθώς διαταράσσει το τροφικό πλέγμα, επηρεάζοντας τη βιοποικιλότητα στα οικοσυστήματα, περιγράφοντας την τροφική (αγρονομική ή οικολογική) κατάσταση ενός χερσαίου, υδάτινου ή αγροτικού περιβάλλοντος, όπου τα έμβια όντα εκτίθενται σε "περίσσεια". Τέλος, σχετικά με τα Φ/Β συστήματα, ο ευτροφισμός προκαλείται κυρίως από τη διαδικασία παραγωγής των Φ/Β πανέλων. [40]



Εικόνα 5.23: Ευτροφισμός γλυκών υδάτων και ποιότητα οικοσυστημάτων [56]



Εικόνα 5.24: Θαλάσσιος ευτροφισμός και ποιότητα οικοσυστημάτων [57]

5.3.9 Οικοτοξικότητα

Η οικοτοξικότητα (ecotoxicity) (Εικόνες 5.25, 5.26, 5.27) χαρακτηρίζει τις πιθανές δυσμενείς επιδράσεις, που προκαλεί μια χημική ουσία σε έναν υδάτινο ή χερσαίο υποδοχέα. Βασίζεται στις τοξικολογικές ιδιότητες της χημικής ουσίας και στην ευαισθησία του οργανισμού και διακρίνεται από τους περιβαλλοντικούς κινδύνους, οι οποίοι αναφέρονται σε

δυναμικές επιπτώσεις της χημικής ουσίας που εμφανίζονται σε μεγαλύτερες (συχνά γεωλογικές ή μετεωρολογικές) χωρικές ή χρονικές κλίμακες. [58, 59, 60, 61]

Ακόμα, η οικοτοξικότητα εξαρτάται από την ένταση των οικοτοξικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από τα αστικά στερεά απόβλητα. Πιο συγκεκριμένα, για την οικοτοξικότητα των γλυκών υδάτων η πιθανή αύξηση της σχετίζεται με την αύξηση της ηλιακής Φ/Β ενέργειας και την αποτέφρωση των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων. [62]



Εικόνα 5.25: Χερσαία οικοτοξικότητα και ποιότητα οικοσυστημάτων [59]



Εικόνα 5.26: Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων και ποιότητα οικοσυστημάτων [60]



Εικόνα 5.27: Θαλάσσια οικοτοξικότητα και ποιότητα οικοσυστημάτων [61]

5.3.10 Χρήση Γης

Οι μεγάλες Φ/Β εγκαταστάσεις απαιτούν υψηλή χρήση γης (land use) (Εικόνα 5.28). Εάν δεν αναφέρονται σε εγκαταλελειμμένους χώρους ή σε ερήμους, αυτό μπορεί να προϋποθέσει την εκκαθάριση απολύτως χρήσιμων εκτάσεων για να δημιουργηθεί χώρος για τα Φ/Β πάνελ. Αυτό μπορεί να έχει άμεσο αντίκτυπο στα τοπικά οικοσυστήματα βραχυπρόθεσμα, αλλά θα μπορούσε επίσης να έχει μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στα ενδιαίτηματα των αυτοφυών φυτών και ζώων. Ακόμη, η εκκαθάριση γης για την προετοιμασία μιας Φ/Β εγκατάστασης έχει συχνά ως αποτέλεσμα τη συμπίεση του εδάφους και την αλλοίωση των φυσικών καναλιών αποστράγγισης. Με ελάχιστη έως καθόλου σημαντική βλάστηση να επιτρέπεται να αναπτυχθεί γύρω από τα Φ/Β πάνελ, καθώς αυτό θα τα σκίαζε, συνεπάγεται μια σημαντική αύξηση της διάβρωσης του εδάφους και της επιφανειακής απορροής, που μπορεί να είναι καταστροφική για τα τοπικά οικοσυστήματα μακροπρόθεσμα. [38, 63]



Εικόνα 5.28: Χρήση γης και ποιότητα οικοσυστημάτων [63]

5.3.11 Εξάντληση Πόρων

Η αύξηση της ζήτησης της παραγωγής ηλιακής ενέργειας, δηλαδή της κατασκευής Φ/Β πανέλων, συνεπάγεται την αύξηση της εξόρυξης πρώτων υλών, η οποία είναι επικίνδυνη για την εξάντληση ορυκτών πόρων (mineral resources depletion) (Εικόνα 5.29). Σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (Department of Energy, DOE), περίπου το 12 % του συνόλου του μεταλλικού Si, που παράγεται παγκοσμίως μετατρέπεται σε poly-Si για την παραγωγή Φ/Β πανέλων. Ακόμα, το 10 % του παγκόσμιου αργύρου (silver, Ag) χρησιμοποιείται στα Φ/Β κελιά και αυτό επιφέρει τα δικά του προβλήματα στην αλυσίδα εφοδιασμού. [33, 64]

Μέχρι το 2050, σε ένα σενάριο 100 % ΑΠΕ, που προϋποθέτει την τρέχουσα ηλιακή τεχνολογία και τα τρέχοντα ποσοστά ανακύκλωσης, η ζήτηση Ag για την ηλιακή ενέργεια θα μπορούσε να ξεπεράσει το 50 % των παγκόσμιων αποθεμάτων. Όσον αφορά το Al, το οποίο προέρχεται από βωξίτη (bauxite, Al_2O_3) που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια της γης, κατέχει μια μικρή ποσότητα στα Φ/Β πάνελ. Τέλος, σε ένα σενάριο 100 % ΑΠΕ έως το 2050, η ζήτηση

Cu για ηλιακά έργα μπορεί σχεδόν να τριπλασιαστεί, σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας. [33]



Εικόνα 5.29: Εξάντληση ορυκτών πόρων και ποιότητα οικοσυστημάτων [64]

Επιπλέον, η κατασκευή Φ/Β πανέλων συντελεί στην εξάντληση υδάτινων πόρων (water resources depletion) (Εικόνες 5.30, 5.31). Οι υδάτινοι πόροι χρησιμοποιούνται για διάφορα μέρη της διαδικασίας, συμπεριλαμβανομένης της ψύξης, της χημικής επεξεργασίας και της καταστολής της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Για παράδειγμα, σε μια Φ/Β εγκατάσταση της τάξης των 230 - 550 MW μπορούν να καταναλωθούν έως και 1,5 GJ νερού για τον έλεγχο της σκόνης κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν άλλα 26 MJ νερού ετησίως για το πλύσιμο των πανέλων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. [38, 65, 66]



Εικόνα 5.30: Εξάντληση υδάτινων πόρων και ανθρώπινη υγεία [65]



Εικόνα 5.31: Εξάντληση υδάτινων πόρων και ποιότητα οικοσυστημάτων [66]

5.3.12 Σωρευτική Ζήτηση Ενέργειας

Η σωρευτική ζήτηση ενέργειας (cumulative energy demand, CED) ενός Φ/Β συστήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του είναι το άθροισμα της (ανανεώσιμης και μη ανανεώσιμης) πρωτογενούς ενέργειας, που συλλέγεται από τη γεω-βιόσφαιρα, προκειμένου να προμηθεύσει την άμεση ενέργεια (π.χ. καύσιμα και ηλεκτρική ενέργεια) και τα υλικά (π.χ. Si, μέταλλα και γυαλί), που χρησιμοποιούνται σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του (εξαιρουμένης της ηλιακής ενέργειας, που συλλέγεται άμεσα από το σύστημα κατά τη λειτουργία του) και δίνεται από την εξίσωση (5.2): [32]

$$CED = E_{mat} + E_{manuf} + E_{trans} + E_{inst} + E_{EOL} [MJ_{PE}] \quad (5.2)$$

Όπου E_{mat} : η ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας για την παραγωγή υλικών, που αποτελούν το Φ/Β σύστημα (MJ_{PE}), E_{manuf} : η ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας για την κατασκευή του Φ/Β συστήματος (MJ_{PE}), E_{trans} : η ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας για τη μεταφορά υλικών, που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής (MJ_{PE}), E_{inst} : η ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας για την εγκατάσταση του συστήματος (MJ_{PE}), E_{EOL} : η ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας για τη διαχείριση στο τέλος του κύκλου ζωής (MJ_{PE}).

5.4 Τέλος Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών

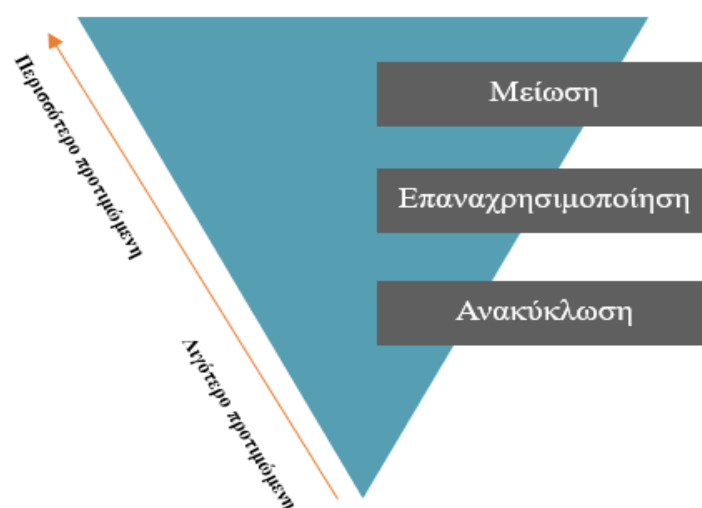
5.4.1 Στρατηγικές Διαχείρισης

Κατά το στάδιο του παροπλισμού των Φ/Β στοιχείων, τα Φ/Β πάνελ μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, να ανακυκλωθούν ή να απορριφθούν. Τα Φ/Β στοιχεία μπορεί να περιέχουν μικρές ποσότητες υλικών, όπως Cd, Pb και σελήνιο (selenium, Se), τα οποία καθιστούν τη διάθεση σε ΧΥΤΑ αμφισβητήσιμη και έτσι η υγειονομική ταφή είναι η λιγότερο βέλτιστη επεξεργασία του τέλους ζωής σε κάθε είδους βιομηχανία. Εκτός από το Al, το γυαλί και τα υλικά ημιαγωγών, τα Φ/Β πάνελ περιέχουν και άλλα υλικά για επαναχρησιμοποίηση. Στον Πίνακα 5.1 παρατίθεται κατάλογος των συνηθέστερων υλικών, που περιέχουν τα Φ/Β κελιά. [31]

Πίνακας 5.1: Υλικά φωτοβολταϊκών κελιών [31]

Υλικά	Υλικά
Σελήνιο (Se)	Ινδίο (In)
Τετραχλωριούχος άνθρακας (CCl ₄)	Κασσίτερος (Sn)
Εξαφθοριούχο θείο (SF ₆)	Αργυρος (Ag)
Αλουμίνιο (Al)	Νικέλιο (Ni)
Πλαστικά	Ψευδάργυρος (Zn)
Γυαλί	Χαλκός (Cu)

Αυτό σημαίνει, ότι από τις 5 στρατηγικές διαχείρισης του τέλους κύκλου ζωής, οι οποίες έχουν περιγράψει στο υποκεφάλαιο 4.4, οι 3 από αυτές είναι κατά κύριο λόγο εφαρμόσιμες για τα Φ/Β. Δηλαδή, η μείωση, η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση κατά φθίνουσα προτίμηση, σύμφωνα με την Εικόνα 5.32. [27, 31]



Εικόνα 5.32: Στρατηγικές διαχείρισης φωτοβολταϊκών στο τέλος κύκλου ζωής [27]

5.4.2 Μείωση

Καθώς η έρευνα και η ανάπτυξη (research and development, R&D) και οι τεχνολογικές πρόοδοι συνεχίζονται με τη βιομηχανική ωρίμανση, η σύνθεση των Φ/Β πανέλων αναμένεται να απαιτεί λιγότερες πρώτες ύλες. Έως το 2016, τα 2/3 των κατασκευασμένων Φ/Β πανέλων είναι c-Si. Αυτά αποτελούνται συνήθως περισσότερο από 90 % γυαλί, πολυμερές και Al, τα οποία ταξινομούνται ως μη επικίνδυνα απόβλητα. Ωστόσο, τα ίδια τα Φ/Β πάνελ περιλαμβάνουν επικίνδυνα υλικά όπως ο Ag, ο κασσίτερος (tin, Sn) και ίχνη Pb. Συγκριτικά, τα Φ/Β πάνελ thin-film είναι πάνω από 98 % μη επικίνδυνα (γυαλί, πολυμερές και Al) σε συνδυασμό με περίπου 2 % δυνητικά επικίνδυνα (Cu, Zn, ημιαγωγοί ή άλλα επικίνδυνα υλικά, όπως In, Ga, Se, Cd, Te και Pb). Συνήθως, τα επικίνδυνα υλικά υπόκεινται σε αυστηρές απαιτήσεις επεξεργασίας με ειδικές ταξινομήσεις ανάλογα με τη δικαιοδοσία. [27]

Μέχρι το 2030, οι εισροές πρώτων υλών για τα Φ/Β πάνελ c-Si και thin-film θα μπορούσαν να περιοριστούν σημαντικά. Η μείωση της χρήσης επικίνδυνων και σπάνιων υλικών στη διαδικασία παραγωγής τους θα βελτιώσει την ανακυκλωσιμότητα και τη δυνατότητα ανάκτησης πόρων των Φ/Β πανέλων στο τέλος κύκλου ζωής τους. [27]

5.4.3 Επαναχρησιμοποίηση

Η ταχεία παγκόσμια ανάπτυξη των Φ/Β αναμένεται να δημιουργήσει ισχυρή δευτερογενή αγορά για εξαρτήματα Φ/Β πανέλων και υλικών. Οι πρώιμες αστοχίες κατά τη διάρκεια ζωής ενός Φ/Β πανέλου παρουσιάζουν σημαντικές ευκαιρίες επισκευής και επαναχρησιμοποίησης αυτού. Η επαναχρησιμοποίηση σχετίζεται με την περαιτέρω χρήση φθαρμένου ή κατεστραμμένου Φ/Β πανέλου ή μέρος αυτού, κάτι που συνδέεται άρρηκτα με την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του. Τα επισκευασμένα (μερικώς ή μη) Φ/Β πάνελ μπορούν να μεταπωληθούν στην παγκόσμια αγορά σε μειωμένη τιμή. Έτσι, αυτή η δευτερογενής αγορά αποτελεί μια σημαντική ευκαιρία για αγοραστές σε χώρες με περιορισμένους οικονομικούς πόρους, που εξακολουθούν να θέλουν να συμμετάσχουν στον τομέα αγοράς Φ/Β. [27, 31]

5.4.4 Ανακύκλωση

Καθώς οι τρέχουσες Φ/Β εγκαταστάσεις φτάνουν στο τελικό στάδιο του παροπλισμού, η ανακύκλωση και η ανάκτηση υλικών θα είναι προτιμότερες από την απόρριψη των Φ/Β πανέλων. Η βιομηχανία ανακύκλωσης Φ/Β συνήθως αντιμετωπίζει τον κύκλο ζωής τους μέσω ξεχωριστών παρτίδων εντός υφιστάμενων γενικών μονάδων ανακύκλωσης. Αυτό επιτρέπει την ανάκτηση υλικών από τα κύρια συστατικά. Παραδείγματα αποτελούν το γυαλί, το Al και ο Cu για Φ/Β πάνελ c-Si, που μπορούν να ανακτηθούν με σωρευτικές αποδόσεις μεγαλύτερες από το 85 % της συνολικής μάζας του Φ/Β πανέλου. [27]

Υπάρχει μεγάλη απόσταση μεταξύ της εγκατάστασης και της ανακύκλωσης Φ/Β στοιχείων (ο εκτιμώμενος κύκλος ζωής των Φ/Β πανέλων είναι περίπου 30 έτη). Επιπλέον, η ανακύκλωση των Φ/Β κελιών είναι περίπλοκη, λόγω του γεγονότος ότι η συγκέντρωση του πολύτιμου υλικού στα Φ/Β στοιχεία είναι χαμηλή και επίσης τα Φ/Β πάνελ είναι διασκορπισμένα σε διάφορες γεωγραφικές θέσεις, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη συλλογή τους. Αν και η βιομηχανία ανακύκλωσης κυριαρχείται παραδοσιακά από μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις, έχει δημιουργηθεί ρεύμα μετατόπισης της διάρθρωσης της βιομηχανίας από αυτές στις μεγάλες, πολυεθνικές εταιρείες. Δηλαδή, έχει αναπτυχθεί μια κινητή μονάδα ανακύκλωσης για την αύξηση του βαθμού λειτουργίας εντός των εταιρειών. Το πλεονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος είναι ότι μπορεί να μετακινηθεί από τη μία εταιρεία στην άλλη για να ανακυκλώσει συνήθως μικρές ποσότητες αποβλήτων. Αυτό μειώνει το κόστος επένδυσης για

κάθε μεμονωμένη επιχείρηση και αυξάνει τον βαθμό λειτουργίας, καθώς οι εταιρείες ανακύκλωσης αντιμετωπίζουν εξαιρετικά κυμαινόμενη ροή εισερχόμενων πρώτων υλών, δηλαδή απόβλητα. [31]

Η περιγραφόμενη κινητή μονάδα ανακύκλωσης είναι ιδιαίτερα αυτοματοποιημένη για τη μείωση του κόστους προσωπικού. Στοχεύει στην εξαγωγή υλικών όπως: ύττριο (yttrium, Y), In, λίθιο (lithium, Li), κοβάλτιο (cobalt, Co), Zn, Cu, χρυσός (gold, Au), Ag, Ni, Pb ή SnO₂ σε υψηλή καθαρότητα άνω του 95 %. Η ίδια η διαδικασία ανακύκλωσης βασίζεται σε υδρομεταλλουργικές διεργασίες, δηλαδή το κέρδος υλικών από απόβλητα μέσω διεργασιών με βάση τις ειδικές για το υλικό διαφορές στη διαλυτότητα και τη διαβρεξιμότητα. [31]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

6.1 Γενική Εικόνα

Η αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων (environmental impact assessment, EIA) είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όμως πρέπει να επανεξεταστεί εκ νέου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι οι επιπτώσεις που μελετώνται στην αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων παρουσιάζονται μόνο ποιοτικά και δεν δηλώνονται ποσοτικά. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ορισμένες αδυναμίες, όσον αφορά τον προσδιορισμό των πιθανών επιπτώσεων, που ενδέχεται να προκύψουν και τον καθορισμό της προτεραιότητας των επιπτώσεων, που πρέπει να αντιμετωπιστούν πρώτα. Έτσι, χρίζεται αναγκαία η δημιουργία μιας νέας μεθόδου για την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μιας δραστηριότητας. [67]

Η AKZ πληροί τα κριτήρια της ποσοτικής ανάλυσης, που απαιτείται σε μια ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η AKZ είναι αποδεδειγμένο, ότι χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς δραστηριότητας, όπως για παράδειγμα σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο, στη διαχείριση αστικών αποβλήτων και στην τεχνολογία χαμηλών εκπομπών CO₂. Αυτό συμβαίνει, διότι τα αποτελέσματα της είναι ικανά να προβλέψουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις μαζί με τις τιμές ή τα βάρη τους, ποσοτικά. Τέλος, τα αποτελέσματα της μεθόδου AKZ παρουσιάζονται με τη μορφή γραφήματος, όπου τα σημεία εστίασης μπορούν να εντοπιστούν εύκολα. Μέρος της AKZ είναι η αξιολόγηση επιπτώσεων κύκλου ζωής, η οποία αποτελείται από 4 διαδοχικά βήματα: [67]

- ❖ Ταξινόμηση (Classification).
- ❖ Χαρακτηρισμός (Characterization).
- ❖ Κανονικοποίηση (Normalization).
- ❖ Στάθμιση (Weighting).

Κατά την ταξινόμηση, όλες οι ουσίες ταξινομούνται σε κατηγορίες ανάλογα με την επίδρασή τους στο περιβάλλον.

Στον χαρακτηρισμό, κάθε κατηγορία επίπτωσης ποσοτικοποιείται με τη χρήση ενός συγκεκριμένου συντελεστή, ο οποίος αντικατοπτρίζει τη σχετική συμβολή της στο περιβάλλον και παρέχει ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα για τη συγκέντρωση της ουσίας.

Στην κανονικοποίηση, μια ποσοτικοποιημένη κατηγορία επίπτωσης συγκρίνεται με μια συγκεκριμένη και με αυτόν τον τρόπο όλες οι κατηγορίες επιπτώσεων αποκτούν την ίδια τιμή, για να συσχετιστούν μεταξύ τους.

Η στάθμιση συνεπάγεται τον πολλαπλασιασμό των κανονικοποιημένων αποτελεσμάτων κάθε μιας από τις κατηγορίες επιπτώσεων με ένα συντελεστή στάθμισης, που εκφράζει τη σχετική σημασία αυτών.

6.2 Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής

6.2.1 Λογισμικά Προσομοίωσης

Υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα λογισμικά προσομοίωσης αξιολόγησης επιπτώσεων κύκλου ζωής, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως για παράδειγμα SimaPro, openLCA, Gabi και Umberto. Τα συγκεκριμένα λογισμικά προσομοίωσης είναι ευέλικτα, διαθέτουν φιλικό περιβάλλον προς τον χρήστη, συνδέονται με πολλές βάσεις δεδομένων και παρουσιάζουν εμφανή αποτελέσματα. [67]

Το SimaPro της εταιρείας PRé Sustainability δημιουργήθηκε το 1990 και συγκαταλέγεται μεταξύ των κορυφαίων λογισμικών AKZ, συμβάλλοντας στην αποτελεσματική εφαρμογή της τεχνογνωσίας στον τομέα της βιωσιμότητας για την ενίσχυση της λήψης τεκμηριωμένων αποφάσεων, τη βελτίωση του κύκλου ζωής των προϊόντων και την αύξηση του δυναμικού των εταιρειών. [68]

Η ιδέα δημιουργίας του openLCA της εταιρείας GreenDelta προέκυψε το 2006 και αποτελεί ένα ελεύθερα διαθέσιμο λογισμικό AKZ, που ανοίγει πολλά διαφορετικά και νέα πεδία εφαρμογών στην επιστήμη και στην εκπαίδευση. [69]

6.2.2 Βάσεις Δεδομένων

Τόσο το SimaPro, όσο και το openLCA προσφέρουν μια ευρεία γκάμα βάσεων δεδομένων αξιολόγησης επιπτώσεων κύκλου ζωής, οι οποίες παρέχονται από διάφορους φορείς. Ενδεικτικές κοινές βάσεις δεδομένων αποτελούν οι ecoinvent, Environmental FootPrint της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Commission, EC), που αφορά το Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα Προϊόντος (Product Environmental Footprint, PEF) και ELCD του Κοινού Κέντρου Έρευνας (Joint Research Centre, JRC), που αποτελεί την Ευρωπαϊκή Βάση Δεδομένων Κύκλου Ζωής (European Life Cycle Database, ELCD). Τα δεδομένα για τα Φ/Β στη βάση δεδομένων ecoinvent έχουν επικαιροποιηθεί για λογαριασμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης Βιομηχανίας Φ/Β (European Photovoltaics Industry Association, EPIA) και της Ελβετικής Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Ενέργειας (Swiss Federal Office of Energy, SFOE). Ακόμη, το openLCA χορηγεί τη βάση δεδομένων LCIA methods μεταξύ άλλων. [70, 71, 72]

6.2.3 Μέθοδοι

Το SimaPro και το openLCA παρέχουν ποικίλα πακέτα μεθόδων αξιολόγησης επιπτώσεων κύκλου ζωής με χαρακτηριστικές κοινές μεθόδους τις eco-indicator 99, IMPACT 2002+, ReCiPe 2016 και TRACI 2.1. [73, 74]

Η μέθοδος eco-indicator 99 εξακολουθεί να είναι μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους, εξελίσσοντας την eco-indicator 95, την πρώτη μέθοδο αξιολόγησης των τελικών σημείων (endpoint). Η τυποποιημένη μονάδα μέτρησης που δίνεται είναι το σημείο Pt ή mPt. Ο σκοπός αυτής της μεθόδου είναι η σύγκριση των προϊόντων ή των εξαρτημάτων. Η μέθοδος διακρίνει 3 διαφορετικά αρχέτυπα: [73]

- Ιεραρχικό (hierarchist, H).
- Ατομικιστικό (individualist, I).
- Ισόνομο (egalitarian, E).

Πιο αναλυτικά: [75]

Η χρονική προοπτική του ιεραρχικού αρχέτυπου είναι ισορροπημένη μεταξύ βραχυπρόθεσμου και μακροπρόθεσμου ορίζοντα, η διαχείρισή του επιτυγχάνεται με κατάλληλες πολιτικές που μπορεί να περιορίσουν αρκετά προβλήματα και το απαιτούμενο επίπεδο απόδειξης του επιτυγχάνεται μέσω της ένταξης με βάση τη συναίνεση. Η χρονική προοπτική του ατομικιστικού αρχέτυπου βασίζεται σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα, η διαχείρισή του επιτυγχάνεται με τεχνολογίες που μπορεί να αποφύγουν πολλά προβλήματα και το απαιτούμενο επίπεδο απόδειξης του επιτυγχάνεται μόνο μέσω αποδεδειγμένων αποτελεσμάτων. Η χρονική προοπτική του ισόνομου αρχέτυπου βασίζεται σε πολύ μακροπρόθεσμο ορίζοντα, η διαχείρισή του αφορά τα προβλήματα που μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφές και το απαιτούμενο επίπεδο απόδειξης του επιτυγχάνεται μέσω όλων των πιθανών επιπτώσεων.

Οι επιπτώσεις της συγκεκριμένης μεθόδου ομαδοποιούνται σε 3 τομείς προστασίας: [73]

- Ανθρώπινη υγεία (Human health).
- Ποιότητα οικοσυστημάτων (Ecosystems quality).
- Πόροι (Resources).

Ειδικότερα: [75]

Ο τομέας προστασίας της ανθρώπινης υγείας μπορεί να εκφραστεί ως ο αριθμός των χαμένων ετών ζωής και ο αριθμός των ετών ζωής με αναπηρία. Ο συνδυασμός τους ορίζεται ως προσαρμοσμένα έτη ζωής με αναπηρία (disability adjusted life years, DALYs). Ο τομέας προστασίας της ποιότητας οικοσυστημάτων μπορεί να εκφραστεί ως η απώλεια ειδών σε μια

συγκεκριμένη περιοχή κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Ο τομέας προστασίας των πόρων μπορεί να εκφραστεί ως το πλεόνασμα ενέργειας, που απαιτείται για μελλοντικές εξορύξεις μεταλλικών και ορυκτών καυσίμων.

Η μέθοδος IMPACT 2002+ προτείνει μια εφικτή εφαρμογή ενός συνδυασμού μέσου και τελικού σημείου, συνδέοντας όλους τους τύπους των αποτελεσμάτων της απογραφής κύκλου ζωής. Οι επιπτώσεις της συγκεκριμένης μεθόδου ταξινομούνται σε 4 τομείς προστασίας: [76]

- Ανθρώπινη υγεία.
- Ποιότητα οικοσυστημάτων.
- Κλιματική αλλαγή.
- Πόροι.

Πιο διεξοδικά: [76]

Η τοξικότητα για τον άνθρωπο (καρκινογενείς και μη καρκινογενείς επιπτώσεις), οι αναπνευστικές επιπτώσεις (ανόργανες και οργανικές ουσίες), η ιονίζουσα ακτινοβολία και η καταστροφή του όζοντος συμβάλλουν στη βλάβη της ανθρώπινης υγείας. Οι κατηγορίες μέσων σημείων (midpoint) της χερσαίας οξίνισης και της χρήσης γης λαμβάνονται απευθείας από τη μέθοδο eco-indicator 99 και ο αντίκτυπός τους μπορεί να προσδιοριστεί ως ένα δυνητικά εξαφανιζόμενο κλάσμα σε μια ορισμένη περιοχή κατά τη διάρκεια ενός ορισμένου χρόνου ανά kg εκπεμπόμενης ουσίας. Για την οικοτοξικότητα, η εκτίμηση μέσου σημείου βασίζεται στην ενσωμάτωση του δυνητικά επηρεαζόμενου κλάσματος ειδών στον χρόνο και στον όγκο. Η μοντελοποίηση έως και τη ζημία από τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην ανθρώπινη υγεία και στην ποιότητα οικοσυστημάτων δεν είναι αρκετά ακριβής, έτσι ώστε να προκύψουν αξιόπιστοι παράγοντες χαρακτηρισμού των ζημιών. Οι δύο κατηγορίες μέσων σημείων που συμβάλλουν στην κατηγορία τελικού σημείου των πόρων είναι η εξόρυξη ορυκτών πόρων και η σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας.

Η μέθοδος ReCiPe 2016 έχει ως κύριο στόχο την αναβάθμιση της μεθόδου eco-indicator 99, καθώς περιλαμβάνει δείκτες μέσου και τελικού σημείου. Οι δείκτες τελικού σημείου αφορούν τις επιπτώσεις στα παρακάτω 3 πεδία προστασίας: [73]

- Ανθρώπινη υγεία.
- Οικοσυστήματα.
- Διαθεσιμότητα πόρων.

Επίσης, η μέθοδος ReCiPe παρέχει μια εναρμονισμένη εφαρμογή των μονοπατιών αιτίου-αποτελέσματος για τον υπολογισμό των παραγόντων χαρακτηρισμού του μέσου και του τελικού σημείου. [77]

Η μέθοδος TRACI 2.1 έχει αναπτυχθεί από τον Οργανισμό Προστασίας Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency, EPA) των ΗΠΑ και αποτελεί ένα εργαλείο για τη μείωση και την αξιολόγηση χημικών και άλλων περιβαλλοντικών επιπτώσεων (tool for reduction and assessment of chemicals and other environmental impacts, TRACI), που αποσκοπεί στην ενίσχυση της αξιολόγησης των επιπτώσεων για τις μετρήσεις βιωσιμότητας, την αξιολόγηση του κύκλου ζωής, τη βιομηχανική οικολογία, τον σχεδιασμό διεργασιών και την πρόληψη της ρύπανσης. Ο Οργανισμός Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ έχει επιλέξει έναν διαχειρίσιμο κατάλογο κατηγοριών επιπτώσεων για αρκετούς λόγους, συμπεριλαμβανομένης της συνέπειας με τους υφιστάμενους κανονισμούς, τις πολιτικές και της ευκολίας της μοντελοποίησης. [73, 78]

6.3 Πεδίο Εφαρμογής Πρώτου Σεναρίου

6.3.1 Λειτουργική Μονάδα και Ροή Αναφοράς

Η λειτουργική μονάδα ορίζεται ως 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος, που παράγεται από ένα Φ/Β πάνελ οικιακής κλίμακας. Η ροή αναφοράς είναι το Φ/Β πάνελ, μετρούμενη σε kWp, δηλαδή η μέγιστη ισχύς εξόδου σύμφωνα με πρότυπες συνθήκες δοκιμής. [79]

6.3.2 Οριοθέτηση Συστήματος

Το συγκεκριμένο σύστημα προϊόντων αποτελείται από τα στάδια παραγωγής, κατασκευής, χρήσης, τέλους κύκλου ζωής, συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση. Η παραγωγή περιλαμβάνει την εξόρυξη πρώτων υλών έως την παραγωγή Φ/Β πανέλων, ενώ η κατασκευή την εγκατάσταση και την τοποθέτηση αυτών. Το στάδιο χρήσης αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη λειτουργία των Φ/Β πανέλων, ενώ το τέλος κύκλου ζωής την αποσυναρμολόγησή τους. Τέλος, εξετάζονται τα στάδια του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση. [79]

6.3.3 Παραγωγή, Μεταφορά και Εγκατάσταση

Όσον αφορά την παραγωγή των υπό εξέταση Φ/Β πανέλων στην Ευρώπη, το 15 % πραγματοποιείται στην Ευρώπη, το 79 % στην Κίνα και το 6 % στην Ασία. Σχετικά με τη μεταφορά των υπό εξέταση Φ/Β πανέλων στην ευρωπαϊκή περιφερειακή αποθήκευση, αυτά εισάγονται από την Κίνα και τη Μαλαισία στο Ρότερνταμ (περίπου 20.000 και 15.550 km αντίστοιχα). Έπειτα, μεταφέρονται με φορτηγό από το Ρότερνταμ στην εκάστοτε περιφερειακή αποθήκη. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, θεωρείται πως η μεταφορά από την περιφερειακή αποθήκη στο εργοτάξιο γίνεται με φορτηγό και η απόσταση ισούται με 100 km. Τέλος, όσον

αφορά την εγκατάσταση των υπό εξέταση Φ/Β πανέλων, αυτά θα τοποθετηθούν σε κεκλιμένη οροφή, με ισχύ 3 kWp, αναμενόμενο χρόνο ζωής 30 έτη και ετήσια απόδοση 975 kWh/kWp. [79]

6.3.4 Ταξινόμηση και Χαρακτηρισμός

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται 18 κατηγορίες επιπτώσεων με τους αντίστοιχους δείκτες τους κατόπιν ταξινόμησης και χαρακτηρισμού αυτών, μέσω των οποίων θα αξιολογηθεί το ενεργειακό και περιβαλλοντικό προφίλ των υπό εξέταση Φ/Β πανέλων. [79]

Πίνακας 6.1: Κατηγορίες επιπτώσεων και δείκτες [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων	Δείκτες* (Μονάδες μέτρησης)
Κλιματική αλλαγή	Ακτινοβολία ως δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, GWP100 (kg CO ₂)
Καταστροφή του όζοντος	Δυναμικό καταστροφής του όζοντος, ODP (kg CFC-11)
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις	Συγκριτική τοξική μονάδα για τον άνθρωπο (CTUh, c)
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις	Συγκριτική τοξική μονάδα για τον άνθρωπο (CTUh, n-c)
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις	Κλάσμα πρόσληψης λεπτών σωματιδίων (kg PM _{2.5})
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία	Αποτελεσματικότητα έκθεσης του ανθρώπου σε σχέση με το U ²³⁵ (kBq U ²³⁵)
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος	Αύξηση της συγκέντρωσης τροποσφαιρικού όζοντος (kg NMVOC)
Οξίνιση	Συσσωρευμένη υπέρβαση, ΑΕ (mol H ⁺)
Χερσαίος ευτροφισμός	Συσσωρευμένη υπέρβαση, ΑΕ (mol N)
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων	Κλάσμα θρεπτικών ουσιών που φθάνουν στο τελικό διαμέρισμα των γλυκών υδάτων, P (kg P)
Θαλάσσιος ευτροφισμός	Κλάσμα θρεπτικών ουσιών που φθάνουν στο τελικό διαμέρισμα της θάλασσας, N (kg N)
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων	Συγκριτική τοξική μονάδα για τα οικοσυστήματα (CTUe)
Χρήση γης	Οργανική ουσία εδάφους (έλλειμμα kg C)
Εξάντληση υδάτινων πόρων	Απόληψη υδάτων που σχετίζεται με την τοπική λειψυδρία τους (m ³ ύδατος)
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων	Σπανιότητα (kg Sb)
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας	Ακαθάριστο ενεργειακό περιεχόμενο των πόρων πρωτογενούς ενέργειας (MJ πετρελαίου)
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας	Ακαθάριστο ενεργειακό περιεχόμενο των πόρων πρωτογενούς ενέργειας (MJ πετρελαίου)
Πυρηνικά απόβλητα	Ραδιοτοξικότητα, RTI (m ³ HAA)

* Σύμφωνα με τις οδηγίες Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος Προϊόντος

6.3.5 Κανονικοποίηση και Στάθμιση

Μέσω των κατάλληλων συντελεστών κανονικοποίησης και στάθμισης θα προσδιοριστεί η συσχέτιση μεταξύ των διαφόρων επιπτώσεων (εξαιρούνται οι 3 τελευταίες κατηγορίες επιπτώσεων του Πίνακα 6.1). Αυτοί περιέχονται στον Πίνακα 6.2. [79]

Πίνακας 6.2: Συντελεστές κανονικοποίησης και στάθμισης [79]

Συντελεστές κανονικοποίησης	Συντελεστές στάθμισης
$9,22 \cdot 10^3 \text{ kg CO}_2$	1/15
$2,16 \cdot 10^{-2} \text{ kg CFC-11}$	1/15
$3,69 \cdot 10^{-5} \text{ kg CTUH, c}$	1/15
$5,33 \cdot 10^{-4} \text{ kg CTUH, n-c}$	1/15
$3,80 \cdot 10^0 \text{ kg PM}_{2,5}$	1/15
$1,13 \cdot 10^3 \text{ kBq U}^{235}$	1/15
$3,17 \cdot 10^1 \text{ kg NMVOC}$	1/15
$4,73 \cdot 10^1 \text{ mol H}^+$	1/15
$1,76 \cdot 10^2 \text{ mol N}$	1/15
$1,48 \cdot 10^0 \text{ kg P}$	1/15
$1,69 \cdot 10^1 \text{ kg N}$	1/15
$8,74 \cdot 10^3 \text{ CTUe}$	1/15
$7,48 \cdot 10^4 \text{ kg C}$	1/15
$8,14 \cdot 10^1 \text{ m}^3 \text{ ύδατος}$	1/15
$1,01 \cdot 10^{-1} \text{ kg Sb}$	1/15
0 MJ πετρελαίου	0
0 MJ πετρελαίου	0
0 m ³ ΗΑΑ	0

6.4 Απογραφή Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών Πρώτης Περίπτωσης

6.4.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Στον Πίνακα 6.3 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση Φ/Β πανέλων της πρώτης περίπτωσης τεχνολογίας mono-Si. [79]

Πίνακας 6.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πανέλων πρώτης περίπτωσης [79]

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Τιμές	Μονάδες μέτρησης
Μέγεθος πανέλου	1,6	m ² /πάνελ
Βάρος πανέλου (χωρίς πλαίσιο)	11,7	kg/m ²
Μέγεθος κελιού	156 · 156	mm ²
Πάχος πλακιδίου	190	μm
Απόδοση	15,1	%
Ονομαστική ισχύς	151	Wp/m ²

6.4.2 Κατάλογος Υλικών

Στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζεται ο κατάλογος υλικών (bill of materials, BOM) σε ποσοστό, που χρησιμοποιήθηκε για τα Φ/Β πάνελ mono-Si της πρώτης περίπτωσης. [79]

Πίνακας 6.4: Κατάλογος υλικών πρώτης περίπτωσης [79]

Υλικά	Ποσοστά (%)
Ημιαγωγός Si	10,2
Al	0,4
Cu	0,9
Ag	0,1
Sn	0,1
EVA	7,5
PVF*	1,0
PET*	3,0
HDPE*	0,2
Προϊόν Si	1,0
Ηλιακό γυαλί	75,6

* Όπου PVF (polyvinyl fluoride film): φύλλο φθοριδίου πολυβινυλίου,

PET (polyethylene terephthalate): τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο,

HDPE (high density polyethylene): πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας

6.5 Απογραφή Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών Δεύτερης Περίπτωσης

6.5.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Στον Πίνακα 6.5 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση Φ/Β πανέλων της δεύτερης περίπτωσης τεχνολογίας multi-Si. [79]

Πίνακας 6.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πανέλων δεύτερης περίπτωσης [79]

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Τιμές	Μονάδες μέτρησης
Μέγεθος πάνελου	1,6	m ² /πάνελ
Βάρος πάνελου (χωρίς πλαίσιο)	11,2	kg/m ²
Μέγεθος κελιού	156 · 156	mm ²
Πάχος πλακιδίου	200	μm
Απόδοση	14,7	%
Ονομαστική ισχύς	147	Wp/m ²

6.5.2 Κατάλογος Υλικών

Στον Πίνακα 6.6 φαίνεται ο κατάλογος υλικών σε ποσοστό, που χρησιμοποιήθηκε για τα Φ/Β πάνελ multi-Si της δεύτερης περίπτωσης. [79]

Πίνακας 6.6: Κατάλογος υλικών δεύτερης περίπτωσης [79]

Υλικά	Ποσοστά (%)
Ημιαγωγός Si	6,2
Al	0,4
Cu	0,9
Ag	0,1
Sn	0,1
EVA	7,8
PVF	1,0
PET	3,1
HDPE	0,2
Προϊόν Si	1,1
Ηλιακό γυαλί	79,0

6.6 Απογραφή Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών Τρίτης Περίπτωσης

6.6.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Στον Πίνακα 6.7 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση Φ/Β πανέλων της τρίτης περίπτωσης τεχνολογίας CdTe. [79]

Πίνακας 6.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πανέλων τρίτης περίπτωσης [79]

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Τιμές	Μονάδες μέτρησης
Μέγεθος πάνελου	0,72	m ² /πάνελ
Βάρος πάνελου (χωρίς πλαίσιο)	17,1	kg/m ²
Μέγεθος κελιού	-	mm ²
Πάχος πλακιδίου	2,5	μm
Απόδοση	14,0	%
Ονομαστική ισχύς	140	Wp/m ²

6.6.2 Κατάλογος Υλικών

Στον Πίνακα 6.8 φαίνεται ο κατάλογος υλικών σε ποσοστό, που χρησιμοποιήθηκε για τα Φ/Β πάνελ CdTe της τρίτης περίπτωσης. [79]

Πίνακας 6.8: Κατάλογος υλικών τρίτης περίπτωσης [79]

Υλικά	Ποσοστά (%)
CdTe	0,2
Cu	0,1
EVA	2,8
FRP*	0,6
Επίπεδο γυαλί	47,6
Ηλιακό γυαλί	48,7

* Όπου FRP (fiberglass reinforced plastics): πλαστικά ενισχυμένα με υαλονήματα

6.7 Απογραφή Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών Τέταρτης Περίπτωσης

6.7.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Στον Πίνακα 6.9 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση Φ/Β πανέλων της τέταρτης περίπτωσης τεχνολογίας CIS. [79]

Πίνακας 6.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πανέλων τέταρτης περίπτωσης [79]

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Τιμές	Μονάδες μέτρησης
Μέγεθος πάνελου	0,72	m ² /πάνελ
Βάρος πάνελου (χωρίς πλαίσιο)	14,9	kg/m ²
Μέγεθος κελιού	-	mm ²
Πάχος πλακιδίου	2	μm
Απόδοση	10,8	%
Ονομαστική ισχύς	108	Wp/m ²

6.7.2 Κατάλογος Υλικών

Στον Πίνακα 6.10 φαίνεται ο κατάλογος υλικών σε ποσοστό, που χρησιμοποιήθηκε για τα Φ/Β πάνελ CIS της τέταρτης περίπτωσης. [79]

Πίνακας 6.10: Κατάλογος υλικών τέταρτης περίπτωσης [79]

Υλικά	Ποσοστά (%)
Al	0,3
Cu	0,1
Sn	0,1
ZnO*	0,1
EVA	5,0
PVB*	1,3
PPS*	0,6
PET	2,3
HDPE	0,3
Προϊόν Si	2,7
Επίπεδο γυαλί	35,4
Ηλιακό γυαλί	51,8

* Όπου ZnO (zinc oxide): οξείδιο ψευδαργύρου,

PVB (polyvinyl butyral): πολυβινυλοβουτυράλη,

PPS (polyphenylene sulfide): σουλφίδιο πολυφαινυλενίου

6.8 Απογραφή Κύκλου Ζωής Φωτοβολταϊκών Πέμπτης Περίπτωσης

6.8.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Στον Πίνακα 6.11 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση Φ/Β πανέλων της πέμπτης περίπτωσης τεχνολογίας micro-Si. [79]

Πίνακας 6.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πανέλων πέμπτης περίπτωσης [79]

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Τιμές	Μονάδες μέτρησης
Μέγεθος πανέλου	1,4	m ² /πάνελ
Βάρος πανέλου (χωρίς πλαίσιο)	13,9	kg/m ²
Μέγεθος κελιού	-	mm ²
Πάχος πλακιδίου	10 - 20	μm
Απόδοση	10,0	%
Ονομαστική ισχύς	100	Wp/m ²

6.8.2 Κατάλογος Υλικών

Στον Πίνακα 6.12 φαίνεται ο κατάλογος υλικών σε ποσοστό, που χρησιμοποιήθηκε για τα Φ/Β πάνελ micro-Si της πέμπτης περίπτωσης. [79]

Πίνακας 6.12: Κατάλογος υλικών πέμπτης περίπτωσης [79]

Υλικά	Ποσοστά (%)
SiH ₄	0,2
Cu	0,1
Sn	0,1
EVA	3,2
HDPE	0,1
Προϊόν Si	0,1
Ηλιακό γυαλί	96,3

6.9 Αποτελέσματα Πρώτης Περίπτωσης

6.9.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση

Τα αποτελέσματα των 18 κατηγοριών επιπτώσεων ανά τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων mono-Si χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακες 6.13α, 6.13β και 6.13γ. [79]

Πίνακας 6.13α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής πρώτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο παραγωγής	Στάδιο κατασκευής
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	8,00·10 ⁻²	9,47·10 ⁻³
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	2,12·10 ⁻⁹	2,63·10 ⁻¹⁰
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, c)	7,09·10 ⁻¹⁰	6,76·10 ⁻¹⁰
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, n-c)	9,12·10 ⁻⁹	4,33·10 ⁻⁹
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	1,26·10 ⁻⁴	6,42·10 ⁻⁶
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (kBq U ²³⁵)	2,82·10 ⁻³	8,32·10 ⁻⁴
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NMVOC)	2,96·10 ⁻⁴	2,59·10 ⁻⁵
Οξίνιση (mol H ⁺)	7,42·10 ⁻⁴	6,83·10 ⁻⁵
Χερσαίος ευτροφισμός (mol N)	1,05·10 ⁻³	8,82·10 ⁻⁵
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (kg P)	3,77·10 ⁻⁶	3,93·10 ⁻⁶
Θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N)	1,05·10 ⁻⁴	7,37·10 ⁻⁶
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (CTUe)	2,90·10 ⁻²	7,52·10 ⁻²
Χρήση γης (kg C)	7,39·10 ⁻²	9,50·10 ⁻³
Εξάντληση υδάτινων πόρων (m ³ ύδατος)	9,15·10 ⁻⁵	1,49·10 ⁻⁵
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb)	1,21·10 ⁻⁵	5,13·10 ⁻⁷
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	9,21·10 ⁻¹	1,36·10 ⁻¹
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	1,13·10 ⁻¹	2,66·10 ⁻²
Πυρηνικά απόβλητα (m ³ HAA)	6,70·10 ⁻¹¹	1,83·10 ⁻¹¹

Πίνακας 6.13β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής πρώτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο χρήσης	Στάδιο τέλους κύκλου ζωής
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	3,13·10 ⁻⁶	1,43·10 ⁻³
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	1,96·10 ⁻¹³	4,87·10 ⁻¹¹
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, c)	4,86·10 ⁻¹³	3,36·10 ⁻¹¹
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, n-c)	7,54·10 ⁻¹²	1,01·10 ⁻¹⁰
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	1,63·10 ⁻⁹	4,36·10 ⁻⁷
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (kBq U ²³⁵)	5,91·10 ⁻⁷	1,59·10 ⁻⁴
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NMVOC)	1,13·10 ⁻⁸	5,21·10 ⁻⁶
Οξίνιση (mol H ⁺)	2,34·10 ⁻⁸	6,40·10 ⁻⁶
Χερσαίος ευτροφισμός (mol N)	6,20·10 ⁻⁸	1,88·10 ⁻⁵
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (kg P)	4,23·10 ⁻⁹	7,85·10 ⁻⁸
Θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N)	9,29·10 ⁻⁸	1,86·10 ⁻⁶
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (CTUe)	1,88·10 ⁻⁵	1,11·10 ⁻³
Χρήση γης (kg C)	1,31·10 ⁻⁵	1,32·10 ⁻³
Εξάντληση υδάτινων πόρων (m ³ ύδατος)	8,47·10 ⁻⁸	8,23·10 ⁻⁷
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb)	2,01·10 ⁻¹¹	5,87·10 ⁻⁹
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	4,82·10 ⁻⁵	2,04·10 ⁻²
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	3,60·10 ⁰	1,33·10 ⁻³
Πυρηνικά απόβλητα (m ³ HAA)	1,10·10 ⁻¹⁴	3,33·10 ⁻¹²

Πίνακας 6.13γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση πρώτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	9,09·10 ⁻²	8,75·10 ⁻²
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	2,43·10 ⁻⁹	2,36·10 ⁻⁹
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, c)	1,42·10 ⁻⁹	1,21·10 ⁻⁹
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, n-c)	1,36·10 ⁻⁸	1,34·10 ⁻⁸
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	1,33·10 ⁻⁴	1,30·10 ⁻⁴
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (kBq U ²³⁵)	3,82·10 ⁻³	3,53·10 ⁻³
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NMVOC)	3,27·10 ⁻⁴	3,20·10 ⁻⁴
Οξίνιση (mol H ⁺)	8,17·10 ⁻⁴	7,94·10 ⁻⁴
Χερσαίος ευτροφισμός (mol N)	1,15·10 ⁻³	1,13·10 ⁻³
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (kg P)	7,78·10 ⁻⁶	6,77·10 ⁻⁶
Θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N)	1,15·10 ⁻⁴	1,12·10 ⁻⁴
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (CTUe)	1,05·10 ⁻¹	1,02·10 ⁻¹
Χρήση γης (έλλειμμα kg C)	8,47·10 ⁻²	8,21·10 ⁻²
Εξάντληση υδάτινων πόρων (m ³ ύδατος)	1,07·10 ⁻⁴	1,01·10 ⁻⁴
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb)	1,26·10 ⁻⁵	1,25·10 ⁻⁵
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	1,08·10 ⁰	1,03·10 ⁰
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	3,74·10 ⁰	3,73·10 ⁰
Πυρηνικά απόβλητα (m ³ HAA)	8,86·10 ⁻¹¹	8,21·10 ⁻¹¹

6.9.2 Με Κανονικοποίηση

Τα αποτελέσματα των 15 κατηγοριών επιπτώσεων ανά τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων mono-Si με κανονικοποίηση έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Οι κατηγορίες επιπτώσεων της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας, της σωρευτικής ζήτησης μη ανανεώσιμης ενέργειας και των πυρηνικών αποβλήτων δεν λαμβάνονται υπόψη. Αυτά αναγράφονται στους Πίνακες 6.14α, 6.14β και 6.14γ. [79]

Πίνακας 6.14α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής πρώτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο παραγωγής	Στάδιο κατασκευής
Κλιματική αλλαγή (-)	$8,67 \cdot 10^{-6}$	$1,03 \cdot 10^{-6}$
Καταστροφή του όζοντος (-)	$9,81 \cdot 10^{-8}$	$1,22 \cdot 10^{-8}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,92 \cdot 10^{-5}$	$1,83 \cdot 10^{-5}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,71 \cdot 10^{-5}$	$8,12 \cdot 10^{-6}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (-)	$3,31 \cdot 10^{-5}$	$1,69 \cdot 10^{-6}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (-)	$2,50 \cdot 10^{-6}$	$7,36 \cdot 10^{-7}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (-)	$9,35 \cdot 10^{-6}$	$8,18 \cdot 10^{-7}$
Οξίνιση (-)	$1,57 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-6}$
Χερσαίος ευτροφισμός (-)	$5,95 \cdot 10^{-6}$	$5,01 \cdot 10^{-7}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (-)	$2,54 \cdot 10^{-6}$	$2,65 \cdot 10^{-6}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (-)	$6,23 \cdot 10^{-6}$	$4,36 \cdot 10^{-7}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (-)	$3,32 \cdot 10^{-6}$	$8,61 \cdot 10^{-6}$
Χρήση γης (-)	$9,88 \cdot 10^{-7}$	$1,27 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (-)	$1,12 \cdot 10^{-6}$	$1,84 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-)	$1,19 \cdot 10^{-4}$	$5,08 \cdot 10^{-6}$

Πίνακας 6.14β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής πρώτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο χρήσης	Στάδιο τέλους κύκλου ζωής
Κλιματική αλλαγή (-)	$3,39 \cdot 10^{-10}$	$1,55 \cdot 10^{-7}$
Καταστροφή του όζοντος (-)	$9,06 \cdot 10^{-12}$	$2,25 \cdot 10^{-9}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,32 \cdot 10^{-8}$	$9,11 \cdot 10^{-7}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,42 \cdot 10^{-8}$	$1,89 \cdot 10^{-7}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (-)	$4,30 \cdot 10^{-10}$	$1,15 \cdot 10^{-7}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (-)	$5,23 \cdot 10^{-10}$	$1,41 \cdot 10^{-7}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (-)	$3,57 \cdot 10^{-10}$	$1,64 \cdot 10^{-7}$
Οξίνιση (-)	$4,95 \cdot 10^{-10}$	$1,35 \cdot 10^{-7}$
Χερσαίος ευτροφισμός (-)	$3,52 \cdot 10^{-10}$	$1,07 \cdot 10^{-7}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (-)	$2,86 \cdot 10^{-9}$	$5,30 \cdot 10^{-8}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (-)	$5,50 \cdot 10^{-9}$	$1,10 \cdot 10^{-7}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (-)	$2,15 \cdot 10^{-9}$	$1,27 \cdot 10^{-7}$
Χρήση γης (-)	$1,75 \cdot 10^{-10}$	$1,76 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (-)	$1,04 \cdot 10^{-9}$	$1,01 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-)	$1,99 \cdot 10^{-10}$	$5,81 \cdot 10^{-8}$

Πίνακας 6.14γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση πρώτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση
Κλιματική αλλαγή (-)	$9,86 \cdot 10^{-6}$	$9,50 \cdot 10^{-6}$
Καταστροφή του όζοντος (-)	$1,13 \cdot 10^{-7}$	$1,09 \cdot 10^{-7}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$3,85 \cdot 10^{-5}$	$3,27 \cdot 10^{-5}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$2,54 \cdot 10^{-5}$	$2,52 \cdot 10^{-5}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (-)	$3,49 \cdot 10^{-5}$	$3,43 \cdot 10^{-5}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (-)	$3,38 \cdot 10^{-6}$	$3,12 \cdot 10^{-6}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (-)	$1,03 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$
Οξίνιση (-)	$1,73 \cdot 10^{-5}$	$1,68 \cdot 10^{-5}$
Χερσαίος ευτροφισμός (-)	$6,56 \cdot 10^{-6}$	$6,41 \cdot 10^{-6}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (-)	$5,25 \cdot 10^{-6}$	$4,58 \cdot 10^{-6}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (-)	$6,78 \cdot 10^{-6}$	$6,65 \cdot 10^{-6}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (-)	$1,21 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$
Χρήση γης (-)	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$1,10 \cdot 10^{-6}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (-)	$1,32 \cdot 10^{-6}$	$1,24 \cdot 10^{-6}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-)	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$

6.9.3 Με Στάθμιση

Τα αποτελέσματα των 15 κατηγοριών επιπτώσεων ανά τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων mono-Si με στάθμιση έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Οι κατηγορίες επιπτώσεων της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας, της σωρευτικής ζήτησης μη ανανεώσιμης ενέργειας και των πυρηνικών αποβλήτων δεν λαμβάνονται υπόψη. Αυτά περιλαμβάνονται στους Πίνακες 6.15α, 6.15β και 6.15γ. [79]

Πίνακας 6.15α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής πρώτης περίπτωσης με στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο παραγωγής	Στάδιο κατασκευής
Κλιματική αλλαγή (Pt)	$5,78 \cdot 10^{-7}$	$6,85 \cdot 10^{-8}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	$6,54 \cdot 10^{-9}$	$8,12 \cdot 10^{-10}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$1,22 \cdot 10^{-6}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$1,14 \cdot 10^{-6}$	$5,41 \cdot 10^{-7}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	$2,21 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-7}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (Pt)	$1,67 \cdot 10^{-7}$	$4,91 \cdot 10^{-8}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	$6,23 \cdot 10^{-7}$	$5,45 \cdot 10^{-8}$
Οξίνιση (Pt)	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$9,63 \cdot 10^{-8}$
Χερσαίος ευτροφισμός (Pt)	$3,97 \cdot 10^{-7}$	$3,34 \cdot 10^{-8}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (Pt)	$1,70 \cdot 10^{-7}$	$1,77 \cdot 10^{-7}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Pt)	$4,15 \cdot 10^{-7}$	$2,91 \cdot 10^{-8}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	$2,21 \cdot 10^{-7}$	$5,74 \cdot 10^{-7}$
Χρήση γης (Pt)	$6,59 \cdot 10^{-8}$	$8,47 \cdot 10^{-9}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (Pt)	$7,49 \cdot 10^{-8}$	$1,22 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt)	$7,96 \cdot 10^{-6}$	$3,39 \cdot 10^{-7}$

Πίνακας 6.15β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής πρώτης περίπτωσης με στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο χρήσης	Στάδιο τέλους κύκλου ζωής
Κλιματική αλλαγή (Pt)	$2,26 \cdot 10^{-11}$	$1,04 \cdot 10^{-8}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	$6,04 \cdot 10^{-13}$	$1,50 \cdot 10^{-10}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$8,78 \cdot 10^{-10}$	$6,07 \cdot 10^{-8}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$9,44 \cdot 10^{-10}$	$1,26 \cdot 10^{-8}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	$2,86 \cdot 10^{-11}$	$7,64 \cdot 10^{-9}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (Pt)	$3,49 \cdot 10^{-11}$	$9,41 \cdot 10^{-9}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	$2,38 \cdot 10^{-11}$	$1,10 \cdot 10^{-8}$
Οξίνιση (Pt)	$3,30 \cdot 10^{-11}$	$9,02 \cdot 10^{-9}$
Χερσαίος ευτροφισμός (Pt)	$2,35 \cdot 10^{-11}$	$7,12 \cdot 10^{-9}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (Pt)	$1,91 \cdot 10^{-10}$	$3,54 \cdot 10^{-9}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Pt)	$3,67 \cdot 10^{-10}$	$7,32 \cdot 10^{-9}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	$1,43 \cdot 10^{-10}$	$8,50 \cdot 10^{-9}$
Χρήση γης (Pt)	$1,17 \cdot 10^{-11}$	$1,17 \cdot 10^{-9}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (Pt)	$6,94 \cdot 10^{-11}$	$6,74 \cdot 10^{-10}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt)	$1,32 \cdot 10^{-11}$	$3,87 \cdot 10^{-9}$

Πίνακας 6.15γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση πρώτης περίπτωσης με στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση
Κλιματική αλλαγή (Pt)	$6,57 \cdot 10^{-7}$	$6,33 \cdot 10^{-7}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	$7,50 \cdot 10^{-9}$	$7,28 \cdot 10^{-9}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$2,56 \cdot 10^{-6}$	$2,18 \cdot 10^{-6}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$1,70 \cdot 10^{-6}$	$1,68 \cdot 10^{-6}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	$2,33 \cdot 10^{-6}$	$2,29 \cdot 10^{-6}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (Pt)	$2,25 \cdot 10^{-7}$	$2,08 \cdot 10^{-7}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	$6,89 \cdot 10^{-7}$	$6,73 \cdot 10^{-7}$
Οξίνιση (Pt)	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$1,12 \cdot 10^{-6}$
Χερσαίος ευτροφισμός (Pt)	$4,37 \cdot 10^{-7}$	$4,27 \cdot 10^{-7}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (Pt)	$3,50 \cdot 10^{-7}$	$3,05 \cdot 10^{-7}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Pt)	$4,52 \cdot 10^{-7}$	$4,44 \cdot 10^{-7}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	$8,04 \cdot 10^{-7}$	$7,79 \cdot 10^{-7}$
Χρήση γης (Pt)	$7,55 \cdot 10^{-8}$	$7,31 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (Pt)	$8,79 \cdot 10^{-8}$	$8,26 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt)	$8,30 \cdot 10^{-6}$	$8,28 \cdot 10^{-6}$

6.10 Αποτελέσματα Δεύτερης Περίπτωσης

6.10.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση

Τα αποτελέσματα των 18 κατηγοριών επιπτώσεων ανά τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων multi-Si χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Αυτά παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.16α, 6.16β και 6.16γ. [79]

Πίνακας 6.16α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής δεύτερης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο παραγωγής	Στάδιο κατασκευής
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	4,52·10 ⁻²	9,69·10 ⁻³
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	1,48·10 ⁻⁹	2,70·10 ⁻¹⁰
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, c)	5,38·10 ⁻¹⁰	6,93·10 ⁻¹⁰
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, n-c)	6,12·10 ⁻⁹	4,37·10 ⁻⁹
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	6,14·10 ⁻⁵	6,53·10 ⁻⁶
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (kBq U ²³⁵)	1,91·10 ⁻³	8,53·10 ⁻⁴
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NMVOC)	1,66·10 ⁻⁴	2,64·10 ⁻⁵
Οξίνιση (mol H ⁺)	4,05·10 ⁻⁴	6,93·10 ⁻⁵
Χερσαίος ευτροφισμός (mol N)	5,97·10 ⁻⁴	8,97·10 ⁻⁵
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (kg P)	3,11·10 ⁻⁶	3,94·10 ⁻⁶
Θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N)	5,51·10 ⁻⁵	7,50·10 ⁻⁶
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (CTUe)	2,42·10 ⁻²	7,55·10 ⁻²
Χρήση γης (kg C)	5,63·10 ⁻²	9,70·10 ⁻³
Εξάντληση υδάτινων πόρων (m ³ ύδατος)	4,71·10 ⁻⁵	1,53·10 ⁻⁵
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb)	1,88·10 ⁻⁵	5,15·10 ⁻⁷
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	5,46·10 ⁻¹	1,39·10 ⁻¹
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	7,20·10 ⁻²	2,72·10 ⁻²
Πυρηνικά απόβλητα (m ³ HAA)	4,42·10 ⁻¹¹	1,88·10 ⁻¹¹

Πίνακας 6.16β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής δεύτερης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο χρήσης	Στάδιο τέλους κύκλου ζωής
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	$3,25 \cdot 10^{-6}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	$2,02 \cdot 10^{-13}$	$4,78 \cdot 10^{-11}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, c)	$4,99 \cdot 10^{-13}$	$3,30 \cdot 10^{-11}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, n-c)	$7,75 \cdot 10^{-12}$	$9,89 \cdot 10^{-11}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	$1,74 \cdot 10^{-9}$	$4,28 \cdot 10^{-7}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (kBq U ²³⁵)	$6,08 \cdot 10^{-7}$	$1,57 \cdot 10^{-4}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NMVOC)	$1,17 \cdot 10^{-8}$	$5,12 \cdot 10^{-6}$
Οξίνιση (mol H ⁺)	$2,44 \cdot 10^{-8}$	$6,29 \cdot 10^{-6}$
Χερσαίος ευτροφισμός (mol N)	$6,42 \cdot 10^{-8}$	$1,85 \cdot 10^{-5}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (kg P)	$4,35 \cdot 10^{-9}$	$7,71 \cdot 10^{-8}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N)	$9,55 \cdot 10^{-8}$	$1,82 \cdot 10^{-6}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (CTUe)	$1,93 \cdot 10^{-5}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$
Χρήση γης (kg C)	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (m ³ ύδατος)	$8,70 \cdot 10^{-8}$	$8,09 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb)	$1,49 \cdot 10^{-11}$	$5,76 \cdot 10^{-9}$
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	$5,00 \cdot 10^{-5}$	$2,00 \cdot 10^{-2}$
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	$3,60 \cdot 10^0$	$1,31 \cdot 10^{-3}$
Πυρηνικά απόβλητα (m ³ HAA)	$1,13 \cdot 10^{-14}$	$3,27 \cdot 10^{-12}$

Πίνακας 6.16γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση δεύτερης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	5,63·10 ⁻²	5,28·10 ⁻²
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	1,79·10 ⁻⁹	1,72·10 ⁻⁹
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, c)	1,27·10 ⁻⁹	1,05·10 ⁻⁹
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, n-c)	1,06·10 ⁻⁸	1,05·10 ⁻⁸
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	6,84·10 ⁻⁵	6,61·10 ⁻⁵
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (kBq U ²³⁵)	2,92·10 ⁻³	2,62·10 ⁻³
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NMVOC)	1,97·10 ⁻⁴	1,90·10 ⁻⁴
Οξίνιση (mol H ⁺)	4,81·10 ⁻⁴	4,58·10 ⁻⁴
Χερσαίος ευτροφισμός (mol N)	7,05·10 ⁻⁴	6,77·10 ⁻⁴
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (kg P)	7,13·10 ⁻⁶	6,12·10 ⁻⁶
Θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N)	6,46·10 ⁻⁵	6,23·10 ⁻⁵
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (CTUe)	1,01·10 ⁻¹	9,75·10 ⁻²
Χρήση γης (έλλειμμα kg C)	6,73·10 ⁻²	6,46·10 ⁻²
Εξάντληση υδάτινων πόρων (m ³ ύδατος)	6,33·10 ⁻⁵	5,66·10 ⁻⁵
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb)	1,93·10 ⁻⁵	1,93·10 ⁻⁵
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	7,05·10 ⁻¹	6,62·10 ⁻¹
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	3,70·10 ⁰	3,69·10 ⁰
Πυρηνικά απόβλητα (m ³ HAA)	6,63·10 ⁻¹¹	5,96·10 ⁻¹¹

6.10.2 Με Κανονικοποίηση

Τα αποτελέσματα των 15 κατηγοριών επιπτώσεων ανά τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων multi-Si με κανονικοποίηση έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Οι κατηγορίες επιπτώσεων της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας, της σωρευτικής ζήτησης μη ανανεώσιμης ενέργειας και των πυρηνικών αποβλήτων δεν λαμβάνονται υπόψη. Αυτά αναγράφονται στους Πίνακες 6.17α, 6.17β και 6.17γ. [79]

Πίνακας 6.17α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής δεύτερης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο παραγωγής	Στάδιο κατασκευής
Κλιματική αλλαγή (-)	$4,90 \cdot 10^{-6}$	$1,05 \cdot 10^{-6}$
Καταστροφή του όζοντος (-)	$6,83 \cdot 10^{-8}$	$1,25 \cdot 10^{-8}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,46 \cdot 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$8,19 \cdot 10^{-6}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (-)	$1,62 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-6}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (-)	$1,69 \cdot 10^{-6}$	$7,55 \cdot 10^{-7}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (-)	$5,23 \cdot 10^{-6}$	$8,32 \cdot 10^{-7}$
Οξίνιση (-)	$8,57 \cdot 10^{-6}$	$1,47 \cdot 10^{-6}$
Χερσαίος ευτροφισμός (-)	$3,39 \cdot 10^{-6}$	$5,10 \cdot 10^{-7}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (-)	$2,10 \cdot 10^{-6}$	$2,66 \cdot 10^{-6}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (-)	$3,26 \cdot 10^{-6}$	$4,44 \cdot 10^{-7}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (-)	$2,77 \cdot 10^{-6}$	$8,63 \cdot 10^{-6}$
Χρήση γης (-)	$7,53 \cdot 10^{-7}$	$1,30 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (-)	$5,78 \cdot 10^{-7}$	$1,88 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-)	$1,86 \cdot 10^{-4}$	$5,09 \cdot 10^{-6}$

Πίνακας 6.17β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής δεύτερης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο χρήσης	Στάδιο τέλους κύκλου ζωής
Κλιματική αλλαγή (-)	$3,53 \cdot 10^{-10}$	$1,53 \cdot 10^{-7}$
Καταστροφή του όζοντος (-)	$9,34 \cdot 10^{-12}$	$2,21 \cdot 10^{-9}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,35 \cdot 10^{-8}$	$8,94 \cdot 10^{-7}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,45 \cdot 10^{-8}$	$1,86 \cdot 10^{-7}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (-)	$4,58 \cdot 10^{-10}$	$1,13 \cdot 10^{-7}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (-)	$5,38 \cdot 10^{-10}$	$1,39 \cdot 10^{-7}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (-)	$3,71 \cdot 10^{-10}$	$1,62 \cdot 10^{-7}$
Οξίνιση (-)	$5,15 \cdot 10^{-10}$	$1,33 \cdot 10^{-7}$
Χερσαίος ευτροφισμός (-)	$3,65 \cdot 10^{-10}$	$1,05 \cdot 10^{-7}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (-)	$2,94 \cdot 10^{-9}$	$5,21 \cdot 10^{-8}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (-)	$5,65 \cdot 10^{-9}$	$1,08 \cdot 10^{-7}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (-)	$2,21 \cdot 10^{-9}$	$1,25 \cdot 10^{-7}$
Χρήση γης (-)	$1,80 \cdot 10^{-10}$	$1,73 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (-)	$1,07 \cdot 10^{-9}$	$9,93 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-)	$1,34 \cdot 10^{-10}$	$5,70 \cdot 10^{-8}$

Πίνακας 6.17γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση δεύτερης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση
Κλιματική αλλαγή (-)	$6,10 \cdot 10^{-6}$	$5,73 \cdot 10^{-6}$
Καταστροφή του όζοντος (-)	$8,30 \cdot 10^{-8}$	$7,96 \cdot 10^{-8}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$3,43 \cdot 10^{-5}$	$2,84 \cdot 10^{-5}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,99 \cdot 10^{-5}$	$1,97 \cdot 10^{-5}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (-)	$1,80 \cdot 10^{-5}$	$1,74 \cdot 10^{-5}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (-)	$2,58 \cdot 10^{-6}$	$2,32 \cdot 10^{-6}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (-)	$6,22 \cdot 10^{-6}$	$5,98 \cdot 10^{-6}$
Οξίνιση (-)	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$9,69 \cdot 10^{-6}$
Χερσαίος ευτροφισμός (-)	$4,00 \cdot 10^{-6}$	$3,85 \cdot 10^{-6}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (-)	$4,82 \cdot 10^{-6}$	$4,14 \cdot 10^{-6}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (-)	$3,82 \cdot 10^{-6}$	$3,69 \cdot 10^{-6}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (-)	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$
Χρήση γης (-)	$9,00 \cdot 10^{-7}$	$8,63 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (-)	$7,78 \cdot 10^{-7}$	$6,96 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-)	$1,91 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^{-4}$

6.10.3 Με Στάθμιση

Τα αποτελέσματα των 15 κατηγοριών επιπτώσεων ανά τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων multi-Si με στάθμιση έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Οι κατηγορίες επιπτώσεων της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας, της σωρευτικής ζήτησης μη ανανεώσιμης ενέργειας και των πυρηνικών αποβλήτων δεν λαμβάνονται υπόψη. Αυτά περιλαμβάνονται στους Πίνακες 6.18α, 6.18β και 6.18γ. [79]

Πίνακας 6.18α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής δεύτερης περίπτωσης με στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο παραγωγής	Στάδιο κατασκευής
Κλιματική αλλαγή (Pt)	$3,26 \cdot 10^{-7}$	$7,01 \cdot 10^{-8}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	$4,55 \cdot 10^{-9}$	$8,32 \cdot 10^{-10}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$9,72 \cdot 10^{-7}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$7,65 \cdot 10^{-7}$	$5,46 \cdot 10^{-7}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	$1,08 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-7}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (Pt)	$1,13 \cdot 10^{-7}$	$5,03 \cdot 10^{-8}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	$3,48 \cdot 10^{-7}$	$5,55 \cdot 10^{-8}$
Οξίνιση (Pt)	$5,71 \cdot 10^{-7}$	$9,77 \cdot 10^{-8}$
Χερσαίος ευτροφισμός (Pt)	$2,26 \cdot 10^{-7}$	$3,40 \cdot 10^{-8}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (Pt)	$1,40 \cdot 10^{-7}$	$1,77 \cdot 10^{-7}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Pt)	$2,18 \cdot 10^{-7}$	$2,96 \cdot 10^{-8}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	$1,84 \cdot 10^{-7}$	$5,76 \cdot 10^{-7}$
Χρήση γης (Pt)	$5,02 \cdot 10^{-8}$	$8,64 \cdot 10^{-9}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (Pt)	$3,86 \cdot 10^{-8}$	$1,26 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt)	$1,24 \cdot 10^{-5}$	$3,40 \cdot 10^{-7}$

Πίνακας 6.18β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής δεύτερης περίπτωσης με στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο χρήσης	Στάδιο τέλους κύκλου ζωής
Κλιματική αλλαγή (Pt)	$2,35 \cdot 10^{-11}$	$1,02 \cdot 10^{-8}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	$6,23 \cdot 10^{-13}$	$1,48 \cdot 10^{-10}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$9,02 \cdot 10^{-10}$	$5,96 \cdot 10^{-8}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$9,70 \cdot 10^{-10}$	$1,24 \cdot 10^{-8}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	$3,06 \cdot 10^{-11}$	$7,51 \cdot 10^{-9}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (Pt)	$3,59 \cdot 10^{-11}$	$9,24 \cdot 10^{-9}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	$2,47 \cdot 10^{-11}$	$1,08 \cdot 10^{-8}$
Οξίνιση (Pt)	$3,44 \cdot 10^{-11}$	$8,86 \cdot 10^{-9}$
Χερσαίος ευτροφισμός (Pt)	$2,43 \cdot 10^{-11}$	$6,99 \cdot 10^{-9}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (Pt)	$1,96 \cdot 10^{-10}$	$3,47 \cdot 10^{-9}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Pt)	$3,77 \cdot 10^{-10}$	$7,19 \cdot 10^{-9}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	$1,47 \cdot 10^{-10}$	$8,35 \cdot 10^{-9}$
Χρήση γης (Pt)	$1,20 \cdot 10^{-11}$	$1,15 \cdot 10^{-9}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (Pt)	$7,13 \cdot 10^{-11}$	$6,62 \cdot 10^{-10}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt)	$8,91 \cdot 10^{-12}$	$3,80 \cdot 10^{-9}$

Πίνακας 6.18γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση δεύτερης περίπτωσης με στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση
Κλιματική αλλαγή (Pt)	$4,07 \cdot 10^{-7}$	$3,82 \cdot 10^{-7}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	$5,53 \cdot 10^{-9}$	$5,31 \cdot 10^{-9}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$2,29 \cdot 10^{-6}$	$1,89 \cdot 10^{-6}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$1,32 \cdot 10^{-6}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	$1,20 \cdot 10^{-6}$	$1,16 \cdot 10^{-6}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (Pt)	$1,72 \cdot 10^{-7}$	$1,55 \cdot 10^{-7}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	$4,15 \cdot 10^{-7}$	$3,99 \cdot 10^{-7}$
Οξίνιση (Pt)	$6,78 \cdot 10^{-7}$	$6,46 \cdot 10^{-6}$
Χερσαίος ευτροφισμός (Pt)	$2,67 \cdot 10^{-7}$	$2,56 \cdot 10^{-7}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (Pt)	$3,21 \cdot 10^{-7}$	$2,76 \cdot 10^{-7}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Pt)	$2,55 \cdot 10^{-7}$	$2,46 \cdot 10^{-7}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	$7,69 \cdot 10^{-7}$	$7,43 \cdot 10^{-7}$
Χρήση γης (Pt)	$6,00 \cdot 10^{-8}$	$5,75 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (Pt)	$5,18 \cdot 10^{-8}$	$4,64 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt)	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$

6.11 Αποτελέσματα Τρίτης Περίπτωσης

6.11.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση

Τα αποτελέσματα των 18 κατηγοριών επιπτώσεων ανά τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων CdTe χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Αυτά παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.19α, 6.19β και 6.19γ. [79]

Πίνακας 6.19α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής τρίτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο παραγωγής	Στάδιο κατασκευής
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	$1,35 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{-2}$
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	$6,73 \cdot 10^{-10}$	$2,83 \cdot 10^{-10}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, c)	$8,10 \cdot 10^{-11}$	$7,26 \cdot 10^{-10}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, n-c)	$8,36 \cdot 10^{-10}$	$4,44 \cdot 10^{-9}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	$6,25 \cdot 10^{-6}$	$6,76 \cdot 10^{-6}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (kBq U ²³⁵)	$2,84 \cdot 10^{-4}$	$8,95 \cdot 10^{-4}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NMVOC)	$6,14 \cdot 10^{-5}$	$2,75 \cdot 10^{-5}$
Οξίνιση (mol H ⁺)	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$7,15 \cdot 10^{-5}$
Χερσαίος ευτροφισμός (mol N)	$2,41 \cdot 10^{-4}$	$9,35 \cdot 10^{-5}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (kg P)	$5,32 \cdot 10^{-7}$	$3,96 \cdot 10^{-6}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N)	$2,14 \cdot 10^{-5}$	$7,84 \cdot 10^{-6}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (CTUe)	$3,80 \cdot 10^{-3}$	$7,59 \cdot 10^{-2}$
Χρήση γης (kg C)	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{-2}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (m ³ ύδατος)	$4,18 \cdot 10^{-6}$	$1,61 \cdot 10^{-5}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb)	$6,57 \cdot 10^{-6}$	$5,19 \cdot 10^{-7}$
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	$1,92 \cdot 10^{-1}$	$1,45 \cdot 10^{-1}$
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	$8,05 \cdot 10^{-3}$	$2,85 \cdot 10^{-2}$
Πυρηνικά απόβλητα (m ³ HAA)	$7,25 \cdot 10^{-12}$	$1,97 \cdot 10^{-11}$

Πίνακας 6.19β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής τρίτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο χρήσης	Στάδιο τέλους κύκλου ζωής
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	$3,45 \cdot 10^{-6}$	$1,63 \cdot 10^{-3}$
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	$2,13 \cdot 10^{-13}$	$5,24 \cdot 10^{-11}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, c)	$5,25 \cdot 10^{-13}$	$3,42 \cdot 10^{-11}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, n-c)	$8,15 \cdot 10^{-12}$	$1,03 \cdot 10^{-10}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	$1,89 \cdot 10^{-9}$	$3,70 \cdot 10^{-7}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (kBq U ²³⁵)	$6,40 \cdot 10^{-7}$	$9,43 \cdot 10^{-5}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NMVOC)	$1,25 \cdot 10^{-8}$	$5,09 \cdot 10^{-6}$
Οξίνιση (mol H ⁺)	$2,59 \cdot 10^{-8}$	$5,38 \cdot 10^{-6}$
Χερσαίος ευτροφισμός (mol N)	$6,78 \cdot 10^{-8}$	$1,85 \cdot 10^{-5}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (kg P)	$4,57 \cdot 10^{-9}$	$1,22 \cdot 10^{-7}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N)	$1,00 \cdot 10^{-7}$	$1,83 \cdot 10^{-6}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (CTUe)	$2,03 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$
Χρήση γης (kg C)	$1,42 \cdot 10^{-5}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (m ³ ύδατος)	$9,14 \cdot 10^{-8}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb)	$2,81 \cdot 10^{-11}$	$6,06 \cdot 10^{-9}$
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	$5,29 \cdot 10^{-5}$	$2,15 \cdot 10^{-2}$
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	$3,60 \cdot 10^0$	$1,04 \cdot 10^{-3}$
Πυρηνικά απόβλητα (m ³ HAA)	$1,19 \cdot 10^{-14}$	$2,49 \cdot 10^{-12}$

Πίνακας 6.19γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση τρίτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	2,52·10 ⁻²	2,19·10 ⁻²
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	1,01·10 ⁻⁹	9,33·10 ⁻¹⁰
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, c)	8,42·10 ⁻¹⁰	6,58·10 ⁻¹⁰
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, n-c)	5,39·10 ⁻⁹	5,17·10 ⁻⁹
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	1,34·10 ⁻⁵	1,11·10 ⁻⁵
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (kBq U ²³⁵)	1,27·10 ⁻³	1,02·10 ⁻³
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NMVOC)	9,40·10 ⁻⁵	8,68·10 ⁻⁵
Οξίνιση (mol H ⁺)	1,91·10 ⁻⁴	1,69·10 ⁻⁴
Χερσαίος ευτροφισμός (mol N)	3,53·10 ⁻⁴	3,25·10 ⁻⁴
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (kg P)	4,61·10 ⁻⁶	3,58·10 ⁻⁶
Θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N)	3,12·10 ⁻⁵	2,91·10 ⁻⁵
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (CTUe)	8,09·10 ⁻²	7,77·10 ⁻²
Χρήση γης (έλλειμμα kg C)	2,90·10 ⁻²	2,61·10 ⁻²
Εξάντληση υδάτινων πόρων (m ³ ύδατος)	2,14·10 ⁻⁵	1,58·10 ⁻⁵
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb)	7,09·10 ⁻⁶	4,25·10 ⁻⁶
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	3,59·10 ⁻¹	3,18·10 ⁻¹
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	3,64·10 ⁰	3,63·10 ⁰
Πυρηνικά απόβλητα (m ³ HAA)	2,94·10 ⁻¹²	2,37·10 ⁻¹¹

6.11.2 Με Κανονικοποίηση

Τα αποτελέσματα των 15 κατηγοριών επιπτώσεων ανά τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων CdTe με κανονικοποίηση έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Οι κατηγορίες επιπτώσεων της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας, της σωρευτικής ζήτησης μη ανανεώσιμης ενέργειας και των πυρηνικών αποβλήτων δεν λαμβάνονται υπόψη. Αυτά αναγράφονται στους Πίνακες 6.20α, 6.20β και 6.20γ. [79]

Πίνακας 6.20α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής τρίτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο παραγωγής	Στάδιο κατασκευής
Κλιματική αλλαγή (-)	$1,46 \cdot 10^{-6}$	$1,10 \cdot 10^{-6}$
Καταστροφή του όζοντος (-)	$3,12 \cdot 10^{-8}$	$1,31 \cdot 10^{-8}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$2,20 \cdot 10^{-6}$	$1,97 \cdot 10^{-5}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,57 \cdot 10^{-6}$	$8,34 \cdot 10^{-6}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (-)	$1,64 \cdot 10^{-6}$	$1,78 \cdot 10^{-6}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (-)	$2,51 \cdot 10^{-7}$	$7,92 \cdot 10^{-7}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (-)	$1,94 \cdot 10^{-6}$	$8,67 \cdot 10^{-7}$
Οξίνιση (-)	$2,41 \cdot 10^{-6}$	$1,51 \cdot 10^{-6}$
Χερσαίος ευτροφισμός (-)	$1,37 \cdot 10^{-6}$	$5,32 \cdot 10^{-7}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (-)	$3,59 \cdot 10^{-7}$	$2,67 \cdot 10^{-6}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (-)	$1,27 \cdot 10^{-6}$	$4,64 \cdot 10^{-7}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (-)	$4,35 \cdot 10^{-7}$	$8,69 \cdot 10^{-6}$
Χρήση γης (-)	$2,34 \cdot 10^{-7}$	$1,36 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (-)	$5,14 \cdot 10^{-8}$	$1,98 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-)	$6,50 \cdot 10^{-5}$	$5,14 \cdot 10^{-6}$

Πίνακας 6.20β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής τρίτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο χρήσης	Στάδιο τέλους κύκλου ζωής
Κλιματική αλλαγή (-)	$3,74 \cdot 10^{-10}$	$1,77 \cdot 10^{-7}$
Καταστροφή του όζοντος (-)	$9,85 \cdot 10^{-12}$	$2,42 \cdot 10^{-9}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,42 \cdot 10^{-8}$	$9,26 \cdot 10^{-7}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,53 \cdot 10^{-8}$	$1,93 \cdot 10^{-7}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (-)	$4,97 \cdot 10^{-10}$	$9,74 \cdot 10^{-8}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (-)	$5,66 \cdot 10^{-10}$	$8,34 \cdot 10^{-8}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (-)	$3,93 \cdot 10^{-10}$	$1,61 \cdot 10^{-7}$
Οξίνιση (-)	$5,48 \cdot 10^{-10}$	$1,14 \cdot 10^{-7}$
Χερσαίος ευτροφισμός (-)	$3,85 \cdot 10^{-10}$	$1,05 \cdot 10^{-7}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (-)	$3,08 \cdot 10^{-9}$	$8,24 \cdot 10^{-8}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (-)	$5,93 \cdot 10^{-9}$	$1,08 \cdot 10^{-7}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (-)	$2,32 \cdot 10^{-9}$	$1,28 \cdot 10^{-7}$
Χρήση γης (-)	$1,90 \cdot 10^{-10}$	$1,76 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (-)	$1,12 \cdot 10^{-9}$	$1,33 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-)	$2,77 \cdot 10^{-10}$	$6,00 \cdot 10^{-8}$

Πίνακας 6.20γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση τρίτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση
Κλιματική αλλαγή (-)	$2,73 \cdot 10^{-6}$	$2,37 \cdot 10^{-6}$
Καταστροφή του όζοντος (-)	$4,67 \cdot 10^{-8}$	$4,32 \cdot 10^{-8}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$2,28 \cdot 10^{-5}$	$1,78 \cdot 10^{-5}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,01 \cdot 10^{-5}$	$9,71 \cdot 10^{-6}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (-)	$3,52 \cdot 10^{-6}$	$2,93 \cdot 10^{-6}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (-)	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$9,01 \cdot 10^{-7}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (-)	$2,97 \cdot 10^{-6}$	$2,74 \cdot 10^{-6}$
Οξίνιση (-)	$4,03 \cdot 10^{-6}$	$3,56 \cdot 10^{-6}$
Χερσαίος ευτροφισμός (-)	$2,00 \cdot 10^{-6}$	$1,84 \cdot 10^{-6}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (-)	$3,12 \cdot 10^{-6}$	$2,42 \cdot 10^{-6}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (-)	$1,85 \cdot 10^{-6}$	$1,72 \cdot 10^{-6}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (-)	$9,25 \cdot 10^{-6}$	$8,89 \cdot 10^{-6}$
Χρήση γης (-)	$3,87 \cdot 10^{-7}$	$3,49 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (-)	$2,63 \cdot 10^{-7}$	$1,94 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-)	$7,02 \cdot 10^{-5}$	$4,21 \cdot 10^{-5}$

6.11.3 Με Στάθμιση

Τα αποτελέσματα των 15 κατηγοριών επιπτώσεων ανά τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων CdTe με στάθμιση έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Οι κατηγορίες επιπτώσεων της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας, της σωρευτικής ζήτησης μη ανανεώσιμης ενέργειας και των πυρηνικών αποβλήτων δεν λαμβάνονται υπόψη. Αυτά περιλαμβάνονται στους Πίνακες 6.21α, 6.21β και 6.21γ. [79]

Πίνακας 6.21α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής τρίτης περίπτωσης με στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο παραγωγής	Στάδιο κατασκευής
Κλιματική αλλαγή (Pt)	$9,73 \cdot 10^{-8}$	$7,32 \cdot 10^{-8}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	$2,08 \cdot 10^{-9}$	$8,72 \cdot 10^{-10}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$1,46 \cdot 10^{-7}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$1,05 \cdot 10^{-7}$	$5,56 \cdot 10^{-7}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	$1,10 \cdot 10^{-7}$	$1,19 \cdot 10^{-7}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (Pt)	$1,67 \cdot 10^{-8}$	$5,28 \cdot 10^{-8}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	$1,29 \cdot 10^{-7}$	$5,78 \cdot 10^{-8}$
Οξίνιση (Pt)	$1,61 \cdot 10^{-7}$	$1,01 \cdot 10^{-7}$
Χερσαίος ευτροφισμός (Pt)	$9,12 \cdot 10^{-8}$	$3,54 \cdot 10^{-8}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (Pt)	$2,39 \cdot 10^{-8}$	$1,78 \cdot 10^{-7}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Pt)	$8,45 \cdot 10^{-8}$	$3,09 \cdot 10^{-8}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	$2,90 \cdot 10^{-8}$	$5,79 \cdot 10^{-7}$
Χρήση γης (Pt)	$1,56 \cdot 10^{-8}$	$9,04 \cdot 10^{-9}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (Pt)	$3,43 \cdot 10^{-9}$	$1,32 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt)	$4,33 \cdot 10^{-6}$	$3,42 \cdot 10^{-7}$

Πίνακας 6.21β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής τρίτης περίπτωσης με στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο χρήσης	Στάδιο τέλους κύκλου ζωής
Κλιματική αλλαγή (Pt)	$2,49 \cdot 10^{-11}$	$1,18 \cdot 10^{-8}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	$6,57 \cdot 10^{-13}$	$1,62 \cdot 10^{-10}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$9,48 \cdot 10^{-10}$	$6,17 \cdot 10^{-8}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$1,02 \cdot 10^{-9}$	$1,29 \cdot 10^{-8}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	$3,32 \cdot 10^{-11}$	$6,50 \cdot 10^{-9}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (Pt)	$3,78 \cdot 10^{-11}$	$5,56 \cdot 10^{-9}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	$2,62 \cdot 10^{-11}$	$1,07 \cdot 10^{-8}$
Οξίνιση (Pt)	$3,65 \cdot 10^{-11}$	$7,58 \cdot 10^{-9}$
Χερσαίος ευτροφισμός (Pt)	$2,57 \cdot 10^{-11}$	$6,99 \cdot 10^{-9}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (Pt)	$2,06 \cdot 10^{-10}$	$5,49 \cdot 10^{-9}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Pt)	$3,96 \cdot 10^{-10}$	$7,21 \cdot 10^{-9}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	$1,55 \cdot 10^{-10}$	$8,53 \cdot 10^{-9}$
Χρήση γης (Pt)	$1,26 \cdot 10^{-11}$	$1,17 \cdot 10^{-9}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (Pt)	$7,49 \cdot 10^{-11}$	$8,89 \cdot 10^{-10}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt)	$1,85 \cdot 10^{-11}$	$4,00 \cdot 10^{-9}$

Πίνακας 6.21γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση τρίτης περίπτωσης με στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση
Κλιματική αλλαγή (Pt)	$1,82 \cdot 10^{-7}$	$1,58 \cdot 10^{-7}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	$3,11 \cdot 10^{-9}$	$2,88 \cdot 10^{-9}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$1,52 \cdot 10^{-6}$	$1,19 \cdot 10^{-6}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$6,74 \cdot 10^{-7}$	$6,47 \cdot 10^{-7}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	$2,35 \cdot 10^{-7}$	$1,95 \cdot 10^{-7}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (Pt)	$7,51 \cdot 10^{-8}$	$6,01 \cdot 10^{-8}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	$1,98 \cdot 10^{-7}$	$1,83 \cdot 10^{-7}$
Οξίνιση (Pt)	$2,69 \cdot 10^{-7}$	$2,38 \cdot 10^{-7}$
Χερσαίος ευτροφισμός (Pt)	$1,34 \cdot 10^{-7}$	$1,23 \cdot 10^{-7}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (Pt)	$2,08 \cdot 10^{-7}$	$1,61 \cdot 10^{-7}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Pt)	$1,23 \cdot 10^{-7}$	$1,15 \cdot 10^{-7}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	$6,17 \cdot 10^{-7}$	$5,93 \cdot 10^{-7}$
Χρήση γης (Pt)	$2,58 \cdot 10^{-8}$	$2,33 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (Pt)	$1,76 \cdot 10^{-8}$	$1,29 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt)	$4,68 \cdot 10^{-6}$	$2,80 \cdot 10^{-6}$

6.12 Αποτελέσματα Τέταρτης Περίπτωσης

6.12.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση

Τα αποτελέσματα των 18 κατηγοριών επιπτώσεων ανά τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων CIS χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Αυτά παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.22α, 6.22β και 6.22γ. [79]

Πίνακας 6.22α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής τέταρτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο παραγωγής	Στάδιο κατασκευής
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	2,63·10 ⁻²	1,27·10 ⁻²
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	1,36·10 ⁻⁹	3,61·10 ⁻¹⁰
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, c)	3,14·10 ⁻¹⁰	9,26·10 ⁻¹⁰
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, n-c)	4,07·10 ⁻⁹	4,91·10 ⁻⁹
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	9,44·10 ⁻⁶	8,12·10 ⁻⁶
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (kBq U ²³⁵)	2,10·10 ⁻³	1,15·10 ⁻³
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NMVOC)	7,90·10 ⁻⁵	3,33·10 ⁻⁵
Οξίνιση (mol H ⁺)	1,40·10 ⁻⁴	8,38·10 ⁻⁵
Χερσαίος ευτροφισμός (mol N)	2,99·10 ⁻⁴	1,13·10 ⁻⁴
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (kg P)	2,46·10 ⁻⁶	4,07·10 ⁻⁶
Θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N)	2,55·10 ⁻⁵	9,59·10 ⁻⁶
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (CTUe)	1,19·10 ⁻²	7,87·10 ⁻²
Χρήση γης (kg C)	4,21·10 ⁻²	1,26·10 ⁻²
Εξάντληση υδάτινων πόρων (m ³ ύδατος)	2,14·10 ⁻⁵	2,07·10 ⁻⁵
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb)	5,12·10 ⁻⁴	5,40·10 ⁻⁷
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	4,05·10 ⁻¹	1,82·10 ⁻¹
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	4,15·10 ⁻²	3,66·10 ⁻²
Πυρηνικά απόβλητα (m ³ HAA)	5,18·10 ⁻¹¹	2,53·10 ⁻¹¹

Πίνακας 6.22β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής τέταρτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο χρήσης	Στάδιο τέλους κύκλου ζωής
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	$4,46 \cdot 10^{-6}$	$2,55 \cdot 10^{-3}$
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	$2,75 \cdot 10^{-13}$	$8,65 \cdot 10^{-11}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, c)	$6,80 \cdot 10^{-13}$	$5,97 \cdot 10^{-11}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, n-c)	$1,06 \cdot 10^{-11}$	$1,79 \cdot 10^{-10}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	$2,45 \cdot 10^{-9}$	$7,74 \cdot 10^{-7}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (kBq U ²³⁵)	$8,28 \cdot 10^{-7}$	$2,83 \cdot 10^{-4}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NMVOC)	$1,61 \cdot 10^{-8}$	$9,26 \cdot 10^{-6}$
Οξίνιση (mol H ⁺)	$3,36 \cdot 10^{-8}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$
Χερσαίος ευτροφισμός (mol N)	$8,79 \cdot 10^{-8}$	$3,34 \cdot 10^{-5}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (kg P)	$5,92 \cdot 10^{-9}$	$1,39 \cdot 10^{-7}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N)	$1,30 \cdot 10^{-7}$	$3,30 \cdot 10^{-6}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (CTUe)	$2,63 \cdot 10^{-5}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$
Χρήση γης (kg C)	$1,84 \cdot 10^{-5}$	$2,34 \cdot 10^{-3}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (m ³ ύδατος)	$1,18 \cdot 10^{-7}$	$1,46 \cdot 10^{-6}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb)	$-4,69 \cdot 10^{-10}$	$1,04 \cdot 10^{-8}$
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	$6,84 \cdot 10^{-5}$	$3,62 \cdot 10^{-2}$
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	$3,60 \cdot 10^0$	$2,36 \cdot 10^{-3}$
Πυρηνικά απόβλητα (m ³ HAA)	$1,54 \cdot 10^{-14}$	$5,91 \cdot 10^{-12}$

Πίνακας 6.22γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση τέταρτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	4,16·10 ⁻²	3,66·10 ⁻²
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	1,81·10 ⁻⁹	1,70·10 ⁻⁹
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, c)	1,30·10 ⁻⁹	1,00·10 ⁻⁹
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, n-c)	9,17·10 ⁻⁹	9,14·10 ⁻⁹
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	1,83·10 ⁻⁵	1,52·10 ⁻⁵
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (kBq U ²³⁵)	3,53·10 ⁻³	3,12·10 ⁻³
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NMVOC)	1,22·10 ⁻⁴	1,11·10 ⁻⁴
Οξίνιση (mol H ⁺)	2,35·10 ⁻⁴	2,05·10 ⁻⁴
Χερσαίος ευτροφισμός (mol N)	4,46·10 ⁻⁴	4,07·10 ⁻⁴
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (kg P)	6,67·10 ⁻⁶	5,62·10 ⁻⁶
Θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N)	3,85·10 ⁻⁵	3,55·10 ⁻⁵
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (CTUe)	9,27·10 ⁻²	8,84·10 ⁻²
Χρήση γης (έλλειμμα kg C)	5,71·10 ⁻²	5,31·10 ⁻²
Εξάντληση υδάτινων πόρων (m ³ ύδατος)	4,37·10 ⁻⁵	3,44·10 ⁻⁵
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb)	5,12·10 ⁻⁴	5,12·10 ⁻⁴
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	6,23·10 ⁻¹	5,61·10 ⁻¹
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	3,68·10 ⁰	3,67·10 ⁰
Πυρηνικά απόβλητα (m ³ HAA)	8,30·10 ⁻¹¹	7,37·10 ⁻¹¹

6.12.2 Με Κανονικοποίηση

Τα αποτελέσματα των 15 κατηγοριών επιπτώσεων ανά τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων CIS με κανονικοποίηση έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Οι κατηγορίες επιπτώσεων της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας, της σωρευτικής ζήτησης μη ανανεώσιμης ενέργειας και των πυρηνικών αποβλήτων δεν λαμβάνονται υπόψη. Αυτά αναγράφονται στους Πίνακες 6.23α, 6.23β και 6.23γ. [79]

Πίνακας 6.23α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής τέταρτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο παραγωγής	Στάδιο κατασκευής
Κλιματική αλλαγή (-)	$2,86 \cdot 10^{-6}$	$1,38 \cdot 10^{-6}$
Καταστροφή του όζοντος (-)	$6,29 \cdot 10^{-8}$	$1,67 \cdot 10^{-8}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$8,52 \cdot 10^{-6}$	$2,51 \cdot 10^{-5}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$7,63 \cdot 10^{-6}$	$9,22 \cdot 10^{-6}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (-)	$2,49 \cdot 10^{-6}$	$2,14 \cdot 10^{-6}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (-)	$1,86 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (-)	$2,49 \cdot 10^{-6}$	$1,05 \cdot 10^{-6}$
Οξίνιση (-)	$2,96 \cdot 10^{-6}$	$1,77 \cdot 10^{-6}$
Χερσαίος ευτροφισμός (-)	$1,70 \cdot 10^{-6}$	$6,43 \cdot 10^{-7}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (-)	$1,66 \cdot 10^{-6}$	$2,75 \cdot 10^{-6}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (-)	$1,51 \cdot 10^{-6}$	$5,68 \cdot 10^{-7}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (-)	$1,37 \cdot 10^{-6}$	$9,01 \cdot 10^{-6}$
Χρήση γης (-)	$5,62 \cdot 10^{-7}$	$1,69 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (-)	$2,63 \cdot 10^{-7}$	$2,54 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-)	$5,06 \cdot 10^{-3}$	$5,34 \cdot 10^{-6}$

Πίνακας 6.23β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής τέταρτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο χρήσης	Στάδιο τέλους κύκλου ζωής
Κλιματική αλλαγή (-)	$4,84 \cdot 10^{-10}$	$2,76 \cdot 10^{-7}$
Καταστροφή του όζοντος (-)	$1,27 \cdot 10^{-11}$	$4,00 \cdot 10^{-9}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,84 \cdot 10^{-8}$	$1,62 \cdot 10^{-6}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,98 \cdot 10^{-8}$	$3,36 \cdot 10^{-7}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (-)	$6,44 \cdot 10^{-10}$	$2,04 \cdot 10^{-7}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (-)	$7,33 \cdot 10^{-10}$	$2,51 \cdot 10^{-7}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (-)	$5,09 \cdot 10^{-10}$	$2,92 \cdot 10^{-7}$
Οξίνιση (-)	$7,10 \cdot 10^{-10}$	$2,40 \cdot 10^{-7}$
Χερσαίος ευτροφισμός (-)	$4,99 \cdot 10^{-10}$	$1,90 \cdot 10^{-7}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (-)	$4,00 \cdot 10^{-9}$	$9,42 \cdot 10^{-8}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (-)	$7,69 \cdot 10^{-9}$	$1,95 \cdot 10^{-7}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (-)	$3,01 \cdot 10^{-9}$	$2,27 \cdot 10^{-7}$
Χρήση γης (-)	$2,46 \cdot 10^{-10}$	$3,13 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (-)	$1,46 \cdot 10^{-9}$	$1,80 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-)	$-4,63 \cdot 10^{-9}$	$1,03 \cdot 10^{-7}$

Πίνακας 6.23γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση τέταρτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση
Κλιματική αλλαγή (-)	$4,51 \cdot 10^{-6}$	$3,97 \cdot 10^{-6}$
Καταστροφή του όζοντος (-)	$8,37 \cdot 10^{-8}$	$7,87 \cdot 10^{-8}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$3,53 \cdot 10^{-5}$	$2,72 \cdot 10^{-5}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,72 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-5}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (-)	$4,83 \cdot 10^{-6}$	$4,00 \cdot 10^{-6}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (-)	$3,13 \cdot 10^{-6}$	$2,76 \cdot 10^{-6}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (-)	$3,84 \cdot 10^{-6}$	$3,51 \cdot 10^{-6}$
Οξίνιση (-)	$4,97 \cdot 10^{-6}$	$4,34 \cdot 10^{-6}$
Χερσαίος ευτροφισμός (-)	$2,53 \cdot 10^{-6}$	$2,31 \cdot 10^{-6}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (-)	$4,51 \cdot 10^{-6}$	$3,80 \cdot 10^{-6}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (-)	$2,28 \cdot 10^{-6}$	$2,10 \cdot 10^{-6}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (-)	$1,06 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$
Χρήση γης (-)	$7,63 \cdot 10^{-7}$	$7,10 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (-)	$5,37 \cdot 10^{-7}$	$4,23 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-)	$5,07 \cdot 10^{-3}$	$5,07 \cdot 10^{-3}$

6.12.3 Με Στάθμιση

Τα αποτελέσματα των 15 κατηγοριών επιπτώσεων ανά τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων CIS με στάθμιση έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Οι κατηγορίες επιπτώσεων της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας, της σωρευτικής ζήτησης μη ανανεώσιμης ενέργειας και των πυρηνικών αποβλήτων δεν λαμβάνονται υπόψη. Αυτά περιλαμβάνονται στους Πίνακες 6.24α, 6.24β και 6.24γ. [79]

Πίνακας 6.24α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής τέταρτης περίπτωσης με στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο παραγωγής	Στάδιο κατασκευής
Κλιματική αλλαγή (Pt)	$1,90 \cdot 10^{-7}$	$9,19 \cdot 10^{-8}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	$4,20 \cdot 10^{-9}$	$1,12 \cdot 10^{-9}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$5,68 \cdot 10^{-7}$	$1,67 \cdot 10^{-6}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$5,09 \cdot 10^{-7}$	$6,15 \cdot 10^{-7}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	$1,66 \cdot 10^{-7}$	$1,42 \cdot 10^{-7}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (Pt)	$1,24 \cdot 10^{-7}$	$6,77 \cdot 10^{-8}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	$1,66 \cdot 10^{-7}$	$7,00 \cdot 10^{-8}$
Οξίνιση (Pt)	$1,97 \cdot 10^{-7}$	$1,18 \cdot 10^{-7}$
Χερσαίος ευτροφισμός (Pt)	$1,13 \cdot 10^{-7}$	$4,29 \cdot 10^{-8}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (Pt)	$1,11 \cdot 10^{-7}$	$1,83 \cdot 10^{-7}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Pt)	$1,01 \cdot 10^{-7}$	$3,78 \cdot 10^{-8}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	$9,11 \cdot 10^{-8}$	$6,00 \cdot 10^{-7}$
Χρήση γης (Pt)	$3,75 \cdot 10^{-8}$	$1,13 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (Pt)	$1,75 \cdot 10^{-8}$	$1,70 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt)	$3,38 \cdot 10^{-4}$	$3,56 \cdot 10^{-7}$

Πίνακας 6.24β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής τέταρτης περίπτωσης με στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο χρήσης	Στάδιο τέλους κύκλου ζωής
Κλιματική αλλαγή (Pt)	$3,23 \cdot 10^{-11}$	$1,84 \cdot 10^{-8}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	$8,50 \cdot 10^{-13}$	$2,67 \cdot 10^{-10}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$1,23 \cdot 10^{-9}$	$1,08 \cdot 10^{-7}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$1,32 \cdot 10^{-9}$	$2,24 \cdot 10^{-8}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	$4,30 \cdot 10^{-11}$	$1,36 \cdot 10^{-8}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (Pt)	$4,88 \cdot 10^{-11}$	$1,67 \cdot 10^{-8}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	$3,40 \cdot 10^{-11}$	$1,95 \cdot 10^{-8}$
Οξίνιση (Pt)	$4,74 \cdot 10^{-11}$	$1,60 \cdot 10^{-8}$
Χερσαίος ευτροφισμός (Pt)	$3,33 \cdot 10^{-11}$	$1,26 \cdot 10^{-8}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (Pt)	$2,67 \cdot 10^{-10}$	$6,28 \cdot 10^{-9}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Pt)	$5,13 \cdot 10^{-10}$	$1,30 \cdot 10^{-8}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	$2,01 \cdot 10^{-10}$	$1,51 \cdot 10^{-8}$
Χρήση γης (Pt)	$1,64 \cdot 10^{-11}$	$2,09 \cdot 10^{-9}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (Pt)	$9,71 \cdot 10^{-11}$	$1,20 \cdot 10^{-9}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt)	$-3,15 \cdot 10^{-10}$	$6,88 \cdot 10^{-9}$

Πίνακας 6.24γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση τέταρτης περίπτωσης με στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση
Κλιματική αλλαγή (Pt)	$3,01 \cdot 10^{-7}$	$2,65 \cdot 10^{-7}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	$5,58 \cdot 10^{-9}$	$5,25 \cdot 10^{-9}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$2,35 \cdot 10^{-6}$	$1,81 \cdot 10^{-6}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$1,14 \cdot 10^{-6}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	$3,22 \cdot 10^{-7}$	$2,67 \cdot 10^{-7}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (Pt)	$2,08 \cdot 10^{-7}$	$1,84 \cdot 10^{-7}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	$2,56 \cdot 10^{-7}$	$2,34 \cdot 10^{-7}$
Οξίνιση (Pt)	$3,31 \cdot 10^{-7}$	$2,89 \cdot 10^{-7}$
Χερσαίος ευτροφισμός (Pt)	$1,69 \cdot 10^{-7}$	$1,54 \cdot 10^{-7}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (Pt)	$3,00 \cdot 10^{-7}$	$2,53 \cdot 10^{-7}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Pt)	$1,52 \cdot 10^{-7}$	$1,40 \cdot 10^{-7}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	$7,07 \cdot 10^{-7}$	$6,74 \cdot 10^{-7}$
Χρήση γης (Pt)	$5,09 \cdot 10^{-8}$	$4,74 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (Pt)	$3,58 \cdot 10^{-8}$	$2,82 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt)	$3,38 \cdot 10^{-4}$	$3,38 \cdot 10^{-4}$

6.13 Αποτελέσματα Πέμπτης Περίπτωσης

6.13.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση

Τα αποτελέσματα των 18 κατηγοριών επιπτώσεων ανά τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων micro-Si χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Αυτά παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.25α, 6.25β και 6.25γ. [79]

Πίνακας 6.25α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής πέμπτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο παραγωγής	Στάδιο κατασκευής
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	4,09·10 ⁻²	1,36·10 ⁻²
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	7,50·10 ⁻¹⁰	3,89·10 ⁻¹⁰
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, c)	4,00·10 ⁻¹⁰	9,96·10 ⁻¹⁰
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, n-c)	4,63·10 ⁻⁹	5,08·10 ⁻⁹
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	5,00·10 ⁻⁵	8,59·10 ⁻⁶
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (kBq U ²³⁵)	1,20·10 ⁻³	1,24·10 ⁻³
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NMVOC)	1,67·10 ⁻⁴	3,53·10 ⁻⁵
Οξίνιση (mol H ⁺)	3,62·10 ⁻⁴	8,81·10 ⁻⁵
Χερσαίος ευτροφισμός (mol N)	6,15·10 ⁻⁴	1,20·10 ⁻⁴
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (kg P)	1,84·10 ⁻⁶	4,11·10 ⁻⁶
Θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N)	5,48·10 ⁻⁵	1,02·10 ⁻⁵
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (CTUe)	1,39·10 ⁻²	7,97·10 ⁻²
Χρήση γης (kg C)	3,51·10 ⁻²	1,35·10 ⁻²
Εξάντληση υδάτινων πόρων (m ³ ύδατος)	6,33·10 ⁻⁵	2,23·10 ⁻⁵
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb)	9,53·10 ⁻⁷	5,50·10 ⁻⁷
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	4,31·10 ⁻¹	1,95·10 ⁻¹
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	3,65·10 ⁻²	3,95·10 ⁻²
Πυρηνικά απόβλητα (m ³ HAA)	2,67·10 ⁻¹¹	2,72·10 ⁻¹¹

Πίνακας 6.25β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής πέμπτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο χρήσης	Στάδιο τέλους κύκλου ζωής
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	4,81·10 ⁻⁶	2,56·10 ⁻³
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	2,98·10 ⁻¹³	8,70·10 ⁻¹¹
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, c)	7,34·10 ⁻¹³	6,01·10 ⁻¹¹
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, n-c)	1,14·10 ⁻¹¹	1,80·10 ⁻¹⁰
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	2,61·10 ⁻⁹	7,79·10 ⁻⁷
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (kBq U ²³⁵)	8,95·10 ⁻⁷	2,85·10 ⁻⁴
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NMVOC)	1,74·10 ⁻⁸	9,32·10 ⁻⁶
Οξίνιση (mol H ⁺)	3,61·10 ⁻⁸	1,14·10 ⁻⁵
Χερσαίος ευτροφισμός (mol N)	9,46·10 ⁻⁸	3,36·10 ⁻⁵
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (kg P)	6,39·10 ⁻⁹	1,40·10 ⁻⁷
Θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N)	1,40·10 ⁻⁷	3,32·10 ⁻⁶
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (CTUe)	2,84·10 ⁻⁵	1,99·10 ⁻³
Χρήση γης (kg C)	1,98·10 ⁻⁵	2,36·10 ⁻³
Εξάντληση υδάτινων πόρων (m ³ ύδατος)	1,28·10 ⁻⁷	1,47·10 ⁻⁶
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb)	4,77·10 ⁻¹¹	1,05·10 ⁻⁸
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	7,39·10 ⁻⁵	3,64·10 ⁻²
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	3,60·10 ⁰	2,38·10 ⁻³
Πυρηνικά απόβλητα (m ³ HAA)	1,66·10 ⁻¹⁴	5,95·10 ⁻¹²

Πίνακας 6.25γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση πέμπτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	5,71·10 ⁻²	5,15·10 ⁻²
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	1,23·10 ⁻⁹	1,11·10 ⁻⁹
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, c)	1,46·10 ⁻⁹	1,12·10 ⁻⁹
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (CTUh, n-c)	9,90·10 ⁻⁹	9,91·10 ⁻⁹
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	5,93·10 ⁻⁵	5,59·10 ⁻⁵
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (kBq U ²³⁵)	2,72·10 ⁻³	2,25·10 ⁻³
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NMVOC)	2,11·10 ⁻⁴	2,00·10 ⁻⁴
Οξίνιση (mol H ⁺)	4,61·10 ⁻⁴	4,29·10 ⁻⁴
Χερσαίος ευτροφισμός (mol N)	7,69·10 ⁻⁴	7,26·10 ⁻⁴
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (kg P)	6,10·10 ⁻⁶	5,04·10 ⁻⁶
Θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N)	6,84·10 ⁻⁵	6,50·10 ⁻⁵
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (CTUe)	9,56·10 ⁻²	9,09·10 ⁻²
Χρήση γης (έλλειμμα kg C)	5,10·10 ⁻²	4,67·10 ⁻²
Εξάντληση υδάτινων πόρων (m ³ ύδατος)	8,73·10 ⁻⁵	7,68·10 ⁻⁵
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb)	1,51·10 ⁻⁶	1,52·10 ⁻⁶
Σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	6,62·10 ⁻¹	5,92·10 ⁻¹
Σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου)	3,68·10 ⁰	3,66·10 ⁰
Πυρηνικά απόβλητα (m ³ HAA)	5,99·10 ⁻¹¹	4,94·10 ⁻¹¹

6.13.2 Με Κανονικοποίηση

Τα αποτελέσματα των 15 κατηγοριών επιπτώσεων ανά τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων micro-Si με κανονικοποίηση έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Οι κατηγορίες επιπτώσεων της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας, της σωρευτικής ζήτησης μη ανανεώσιμης ενέργειας και των πυρηνικών αποβλήτων δεν λαμβάνονται υπόψη. Αυτά αναγράφονται στους Πίνακες 6.26α, 6.26β και 6.26γ. [79]

Πίνακας 6.26α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής πέμπτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο παραγωγής	Στάδιο κατασκευής
Κλιματική αλλαγή (-)	$4,44 \cdot 10^{-6}$	$1,48 \cdot 10^{-6}$
Καταστροφή του όζοντος (-)	$3,47 \cdot 10^{-8}$	$1,80 \cdot 10^{-8}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$2,70 \cdot 10^{-5}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$8,68 \cdot 10^{-6}$	$9,53 \cdot 10^{-6}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (-)	$1,31 \cdot 10^{-5}$	$2,26 \cdot 10^{-6}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (-)	$1,06 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (-)	$5,26 \cdot 10^{-6}$	$1,11 \cdot 10^{-6}$
Οξίνιση (-)	$7,65 \cdot 10^{-6}$	$1,86 \cdot 10^{-6}$
Χερσαίος ευτροφισμός (-)	$3,49 \cdot 10^{-6}$	$6,81 \cdot 10^{-7}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (-)	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$2,77 \cdot 10^{-6}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (-)	$3,24 \cdot 10^{-6}$	$6,03 \cdot 10^{-7}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (-)	$1,59 \cdot 10^{-6}$	$9,12 \cdot 10^{-6}$
Χρήση γης (-)	$4,70 \cdot 10^{-7}$	$1,80 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (-)	$7,78 \cdot 10^{-7}$	$2,74 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-)	$9,44 \cdot 10^{-6}$	$5,44 \cdot 10^{-6}$

Πίνακας 6.26β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής πέμπτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο χρήσης	Στάδιο τέλους κύκλου ζωής
Κλιματική αλλαγή (-)	$5,21 \cdot 10^{-10}$	$2,78 \cdot 10^{-7}$
Καταστροφή του όζοντος (-)	$1,38 \cdot 10^{-11}$	$4,03 \cdot 10^{-9}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,99 \cdot 10^{-8}$	$1,63 \cdot 10^{-6}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$2,14 \cdot 10^{-8}$	$3,38 \cdot 10^{-7}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (-)	$6,85 \cdot 10^{-10}$	$2,05 \cdot 10^{-7}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (-)	$7,92 \cdot 10^{-10}$	$2,52 \cdot 10^{-7}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (-)	$5,48 \cdot 10^{-10}$	$2,94 \cdot 10^{-7}$
Οξίνιση (-)	$7,63 \cdot 10^{-10}$	$2,42 \cdot 10^{-7}$
Χερσαίος ευτροφισμός (-)	$5,38 \cdot 10^{-10}$	$1,91 \cdot 10^{-7}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (-)	$4,32 \cdot 10^{-9}$	$9,49 \cdot 10^{-8}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (-)	$8,31 \cdot 10^{-9}$	$1,96 \cdot 10^{-7}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (-)	$3,25 \cdot 10^{-9}$	$2,28 \cdot 10^{-7}$
Χρήση γης (-)	$2,65 \cdot 10^{-10}$	$3,15 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (-)	$1,57 \cdot 10^{-9}$	$1,81 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-)	$4,73 \cdot 10^{-10}$	$1,04 \cdot 10^{-7}$

Πίνακας 6.26γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση πέμπτης περίπτωσης με κανονικοποίηση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση
Κλιματική αλλαγή (-)	$6,19 \cdot 10^{-6}$	$5,59 \cdot 10^{-6}$
Καταστροφή του όζοντος (-)	$5,68 \cdot 10^{-8}$	$5,12 \cdot 10^{-8}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$3,95 \cdot 10^{-5}$	$3,04 \cdot 10^{-5}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (-)	$1,86 \cdot 10^{-5}$	$1,86 \cdot 10^{-5}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (-)	$1,56 \cdot 10^{-5}$	$1,47 \cdot 10^{-5}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (-)	$2,41 \cdot 10^{-6}$	$1,99 \cdot 10^{-6}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (-)	$6,67 \cdot 10^{-6}$	$6,31 \cdot 10^{-6}$
Οξίνιση (-)	$9,75 \cdot 10^{-6}$	$9,06 \cdot 10^{-6}$
Χερσαίος ευτροφισμός (-)	$4,37 \cdot 10^{-6}$	$4,12 \cdot 10^{-6}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (-)	$4,12 \cdot 10^{-6}$	$3,40 \cdot 10^{-6}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (-)	$4,05 \cdot 10^{-6}$	$3,85 \cdot 10^{-6}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (-)	$1,09 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$
Χρήση γης (-)	$6,82 \cdot 10^{-7}$	$6,24 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (-)	$1,07 \cdot 10^{-6}$	$9,44 \cdot 10^{-7}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-)	$1,50 \cdot 10^{-5}$	$1,50 \cdot 10^{-5}$

6.13.3 Με Στάθμιση

Τα αποτελέσματα των 15 κατηγοριών επιπτώσεων ανά τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων micro-Si με στάθμιση έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Οι κατηγορίες επιπτώσεων της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας, της σωρευτικής ζήτησης μη ανανεώσιμης ενέργειας και των πυρηνικών αποβλήτων δεν λαμβάνονται υπόψη. Αυτά περιλαμβάνονται στους Πίνακες 6.27α, 6.27β και 6.27γ. [79]

Πίνακας 6.27α: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής και κατασκευής πέμπτης περίπτωσης με στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο παραγωγής	Στάδιο κατασκευής
Κλιματική αλλαγή (Pt)	$2,96 \cdot 10^{-7}$	$9,84 \cdot 10^{-8}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	$2,32 \cdot 10^{-9}$	$1,20 \cdot 10^{-9}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$7,22 \cdot 10^{-7}$	$1,80 \cdot 10^{-6}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$5,79 \cdot 10^{-7}$	$6,35 \cdot 10^{-7}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	$8,77 \cdot 10^{-7}$	$1,51 \cdot 10^{-7}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (Pt)	$7,07 \cdot 10^{-8}$	$7,29 \cdot 10^{-8}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	$3,51 \cdot 10^{-7}$	$7,41 \cdot 10^{-8}$
Οξίνιση (Pt)	$5,10 \cdot 10^{-7}$	$1,24 \cdot 10^{-7}$
Χερσαίος ευτροφισμός (Pt)	$2,33 \cdot 10^{-7}$	$4,54 \cdot 10^{-8}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (Pt)	$8,30 \cdot 10^{-8}$	$1,85 \cdot 10^{-7}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Pt)	$2,16 \cdot 10^{-7}$	$4,02 \cdot 10^{-8}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	$1,06 \cdot 10^{-7}$	$6,08 \cdot 10^{-7}$
Χρήση γης (Pt)	$3,13 \cdot 10^{-8}$	$1,20 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (Pt)	$5,19 \cdot 10^{-8}$	$1,83 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt)	$6,29 \cdot 10^{-7}$	$3,63 \cdot 10^{-7}$

Πίνακας 6.27β: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια χρήσης και τέλους κύκλου ζωής πέμπτης περίπτωσης με στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο χρήσης	Στάδιο τέλους κύκλου ζωής
Κλιματική αλλαγή (Pt)	$3,48 \cdot 10^{-11}$	$1,85 \cdot 10^{-8}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	$9,20 \cdot 10^{-13}$	$2,69 \cdot 10^{-10}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$1,33 \cdot 10^{-9}$	$1,09 \cdot 10^{-7}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$1,43 \cdot 10^{-9}$	$2,25 \cdot 10^{-8}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	$4,57 \cdot 10^{-11}$	$1,37 \cdot 10^{-8}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (Pt)	$5,28 \cdot 10^{-11}$	$1,68 \cdot 10^{-8}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	$3,65 \cdot 10^{-11}$	$1,96 \cdot 10^{-8}$
Οξίνιση (Pt)	$5,09 \cdot 10^{-11}$	$1,61 \cdot 10^{-8}$
Χερσαίος ευτροφισμός (Pt)	$3,58 \cdot 10^{-11}$	$1,27 \cdot 10^{-8}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (Pt)	$2,88 \cdot 10^{-10}$	$6,32 \cdot 10^{-9}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Pt)	$5,54 \cdot 10^{-10}$	$1,31 \cdot 10^{-8}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	$2,17 \cdot 10^{-10}$	$1,52 \cdot 10^{-8}$
Χρήση γης (Pt)	$1,77 \cdot 10^{-11}$	$2,10 \cdot 10^{-9}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (Pt)	$1,05 \cdot 10^{-10}$	$1,21 \cdot 10^{-9}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt)	$3,15 \cdot 10^{-11}$	$6,92 \cdot 10^{-9}$

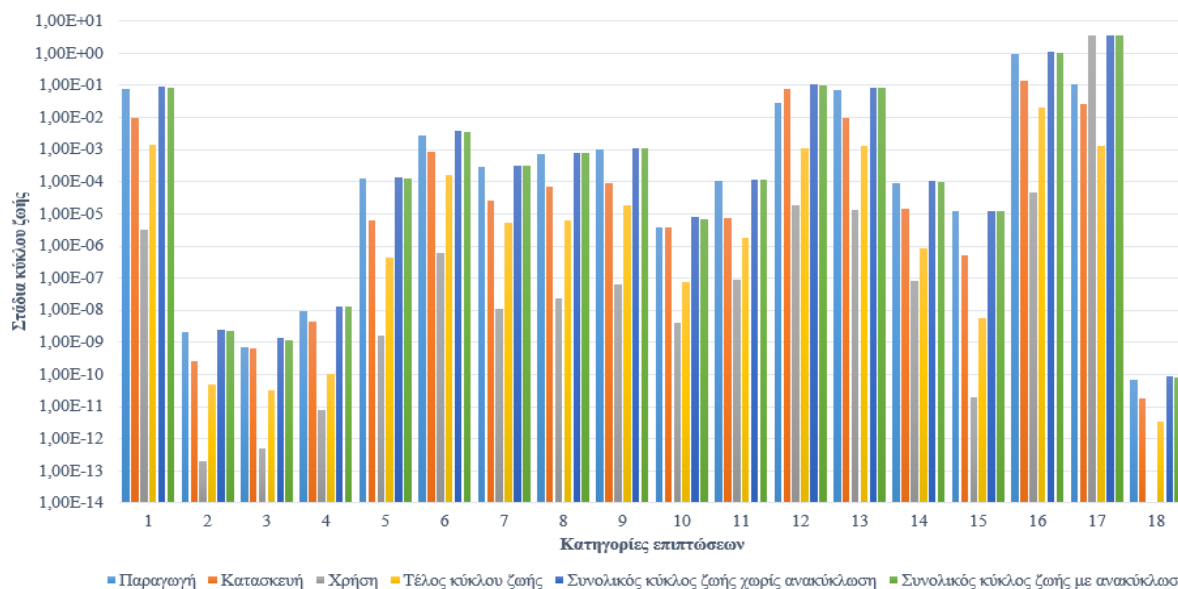
Πίνακας 6.27γ: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων στα στάδια συνολικού κύκλου ζωής χωρίς και με ανακύκλωση πέμπτης περίπτωσης με στάθμιση [79]

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση	Στάδιο συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση
Κλιματική αλλαγή (Pt)	$4,13 \cdot 10^{-7}$	$3,72 \cdot 10^{-7}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	$3,79 \cdot 10^{-9}$	$3,41 \cdot 10^{-9}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$2,63 \cdot 10^{-6}$	$2,03 \cdot 10^{-6}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	$1,24 \cdot 10^{-6}$	$1,24 \cdot 10^{-6}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	$1,04 \cdot 10^{-6}$	$9,80 \cdot 10^{-7}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη υγεία (Pt)	$1,60 \cdot 10^{-7}$	$1,33 \cdot 10^{-7}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	$4,45 \cdot 10^{-7}$	$4,21 \cdot 10^{-7}$
Οξίνιση (Pt)	$6,50 \cdot 10^{-7}$	$6,04 \cdot 10^{-7}$
Χερσαίος ευτροφισμός (Pt)	$2,91 \cdot 10^{-7}$	$2,75 \cdot 10^{-7}$
Ευτροφισμός γλυκών υδάτων (Pt)	$2,75 \cdot 10^{-7}$	$2,27 \cdot 10^{-7}$
Θαλάσσιος ευτροφισμός (Pt)	$2,70 \cdot 10^{-7}$	$2,57 \cdot 10^{-7}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	$7,29 \cdot 10^{-7}$	$6,93 \cdot 10^{-7}$
Χρήση γης (Pt)	$4,55 \cdot 10^{-8}$	$4,16 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση υδάτινων πόρων (Pt)	$7,15 \cdot 10^{-8}$	$6,29 \cdot 10^{-8}$
Εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt)	$9,99 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$

6.14 Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων Πρώτης Περίπτωσης

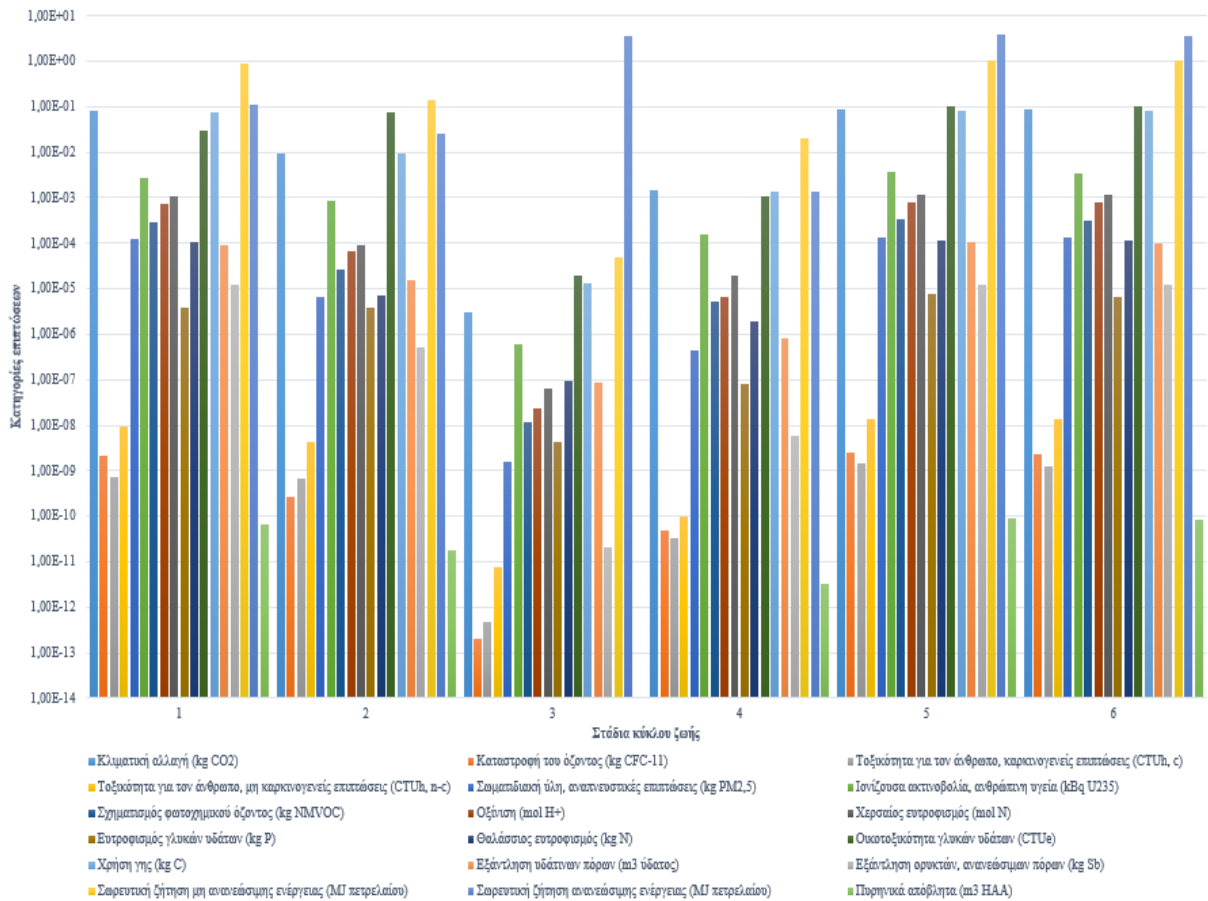
6.14.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση

Στο Διάγραμμα 6.1 απεικονίζεται η σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 18 κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων mono-Si χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει το στάδιο του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση, ενώ ακολουθούν ο συνολικός κύκλος ζωής με ανακύκλωση και η χρήση. Αντιθέτως, την ελάχιστη τιμή κατέχει το στάδιο της χρήσης, καθώς έπονται το τέλος κύκλου ζωής και η παραγωγή.



Διάγραμμα 6.1: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων πρώτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση

Στη συνέχεια, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.2 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 18 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων ποσο-Si χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει η κατηγορία επίπτωσης της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας ($3,74 \cdot 10^0$ MJ πετρελαίου), ενώ ακολουθούν η σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας ($1,08 \cdot 10^0$ MJ πετρελαίου) και η οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων ($1,05 \cdot 10^{-1}$ CTUe). Από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης των πυρηνικών αποβλήτων ($1,10 \cdot 10^{-14}$ m³ HAA), καθώς έπονται η καταστροφή του όζοντος ($1,96 \cdot 10^{-13}$ kg CFC-11) και η τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις ($4,86 \cdot 10^{-13}$ CTUh, c).



Διάγραμμα 6.2: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής πρώτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση

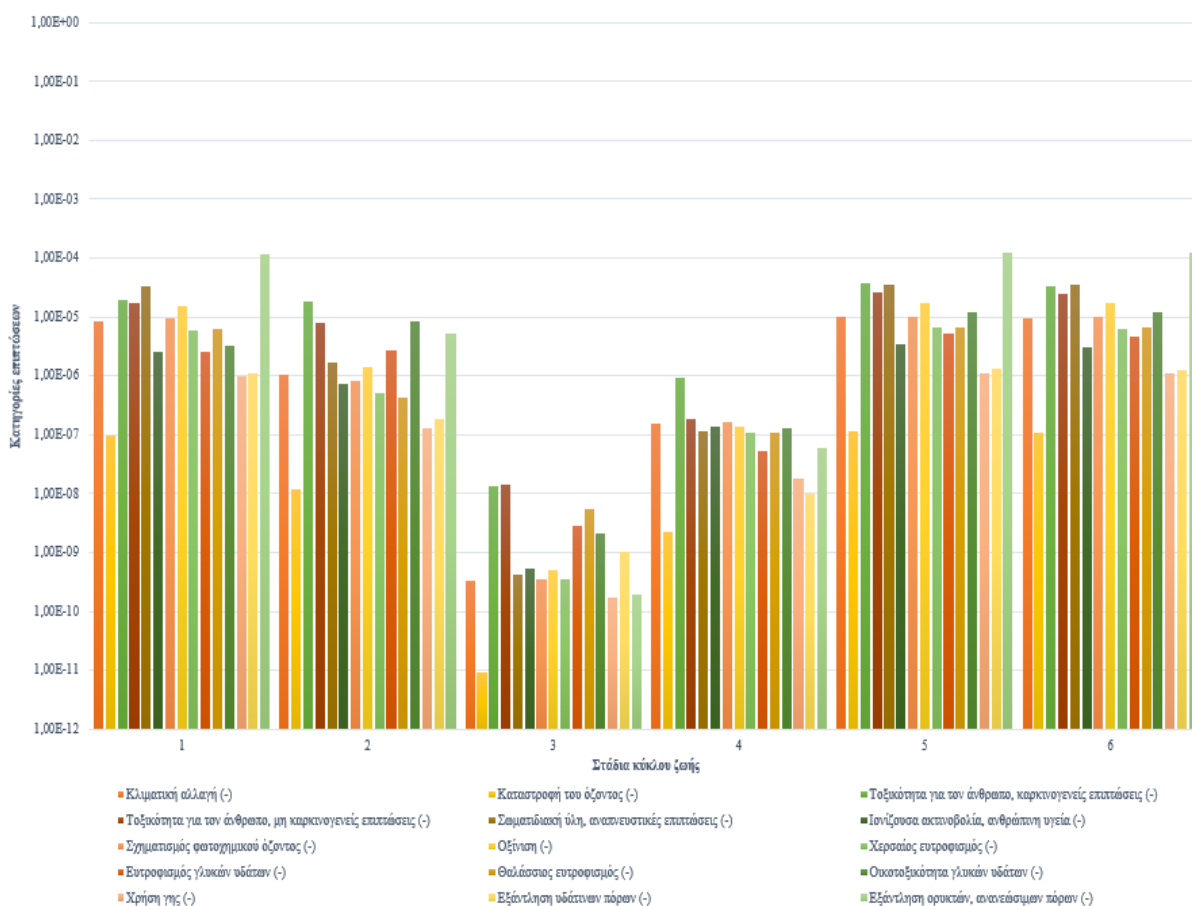
6.14.2 Με Κανονικοποίηση

Στο Διάγραμμα 6.3 απεικονίζεται η σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων mono-Si με κανονικοποίηση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει το στάδιο του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση, ενώ ακολουθούν ο συνολικός κύκλος ζωής με ανακύκλωση και η παραγωγή. Αντιθέτως, την ελάχιστη τιμή κατέχει το στάδιο της χρήσης, καθώς έπονται το τέλος κύκλου ζωής και η κατασκευή.



Διάγραμμα 6.3: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων πρώτης περίπτωσης με κανονικοποίηση

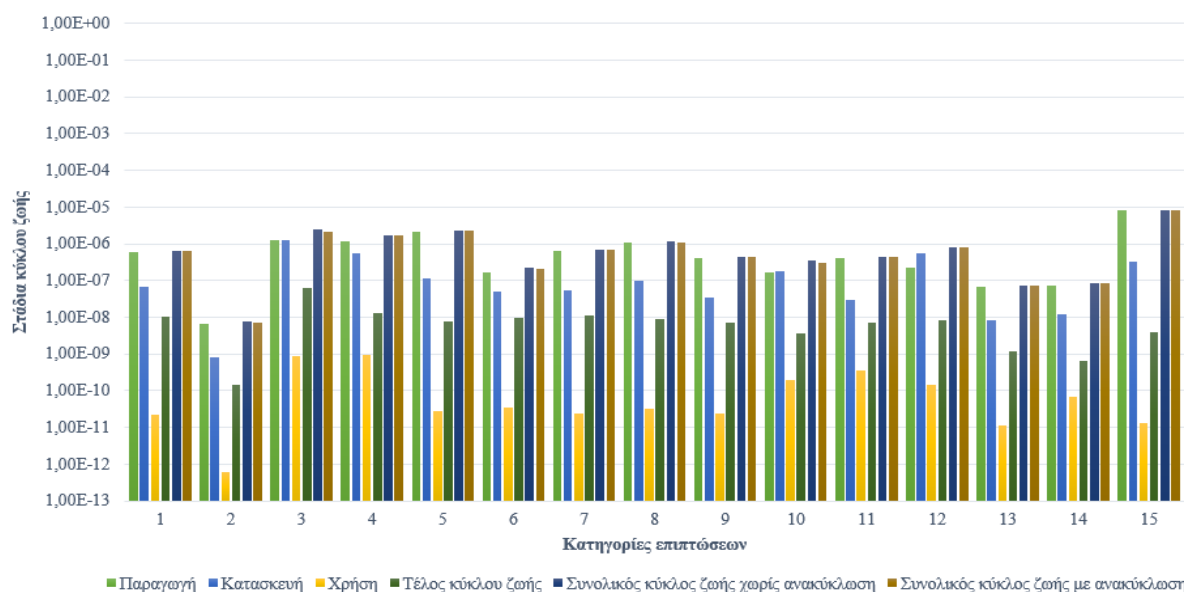
Έπειτα, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.4 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 15 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πινάκων mono-Si με κανονικοποίηση, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($1,25 \cdot 10^{-4}$), ενώ ακολουθούν η τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις ($3,85 \cdot 10^{-5}$) και η σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις ($3,49 \cdot 10^{-5}$). Από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης της καταστροφής του όζοντος ($9,06 \cdot 10^{-12}$), καθώς έπονται η χρήση γης ($1,75 \cdot 10^{-10}$) και η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($1,99 \cdot 10^{-10}$).



Διάγραμμα 6.4: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής πρώτης περίπτωσης με κανονικοποίηση

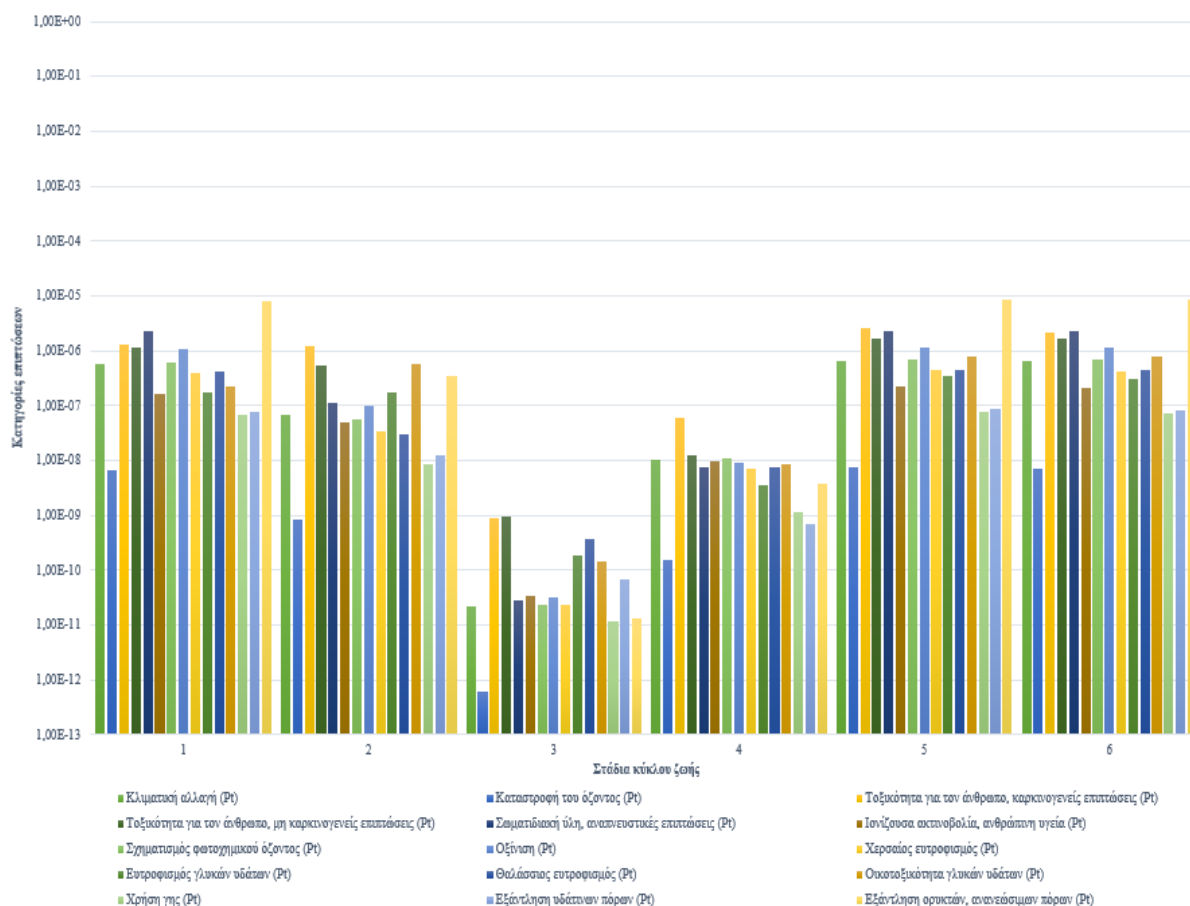
6.14.3 Με Στάθμιση

Στο Διάγραμμα 6.5 απεικονίζεται η σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων mono-Si με στάθμιση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει το στάδιο του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση, ενώ ακολουθούν ο συνολικός κύκλος ζωής με ανακύκλωση και η παραγωγή. Αντιθέτως, την ελάχιστη τιμή κατέχει το στάδιο της χρήσης, καθώς έπονται το τέλος κύκλου ζωής και η κατασκευή.



Διάγραμμα 6.5: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων πρώτης περίπτωσης με στάθμιση

Ύστερα, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.6 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 15 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων mono-Si με στάθμιση, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($8,30 \cdot 10^{-6}$ Pt), ενώ ακολουθούν η τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις ($2,56 \cdot 10^{-6}$ Pt) και η σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις ($2,33 \cdot 10^{-6}$ Pt). Από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης της καταστροφής του όζοντος ($6,04 \cdot 10^{-13}$ Pt), καθώς έπονται η χρήση γης ($1,17 \cdot 10^{-11}$ Pt) και η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($1,32 \cdot 10^{-11}$ Pt).



Διάγραμμα 6.6: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής πρώτης περίπτωσης με στάθμιση

6.14.4 Σύνοψη

Σχετικά με τα αποτελέσματα των Φ/Β πανέλων mono-Si χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση:

Ανάμεσα στα 6 στάδια κύκλου ζωής και τις 18 κατηγορίες επιπτώσεων, παρατηρείται ότι ο συνολικός κύκλος ζωής χωρίς ανακύκλωση και η σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας κατέχουν τη μέγιστη τιμή, ενώ η χρήση και τα πυρηνικά απόβλητα την ελάχιστη.

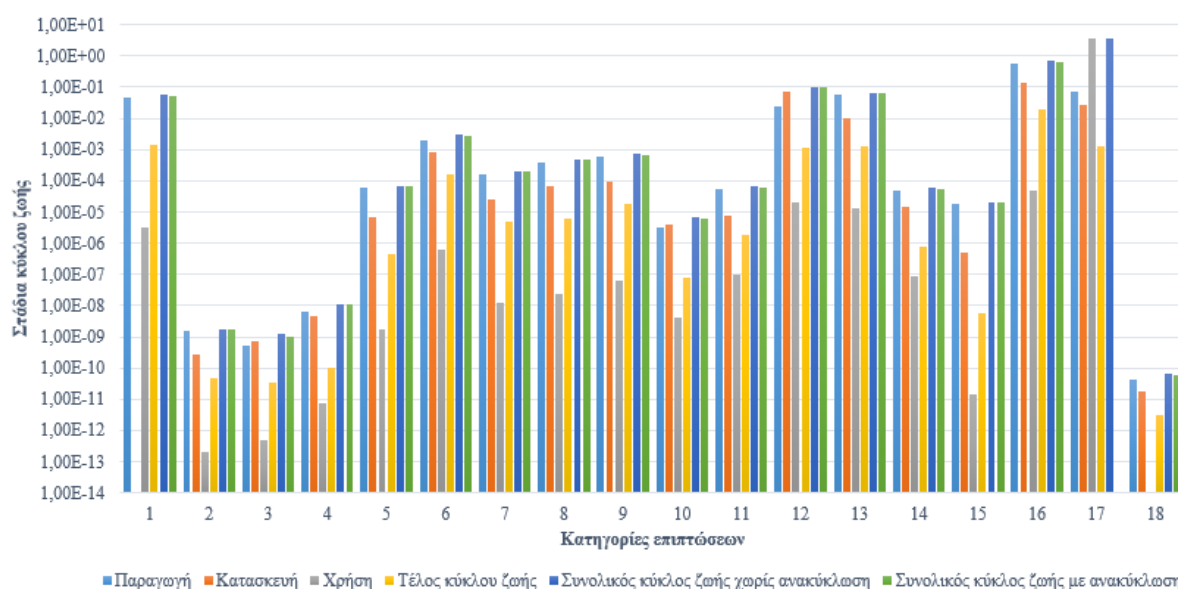
Όσον αφορά τα αποτελέσματα των Φ/Β πανέλων mono-Si με κανονικοποίηση και με στάθμιση:

Αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής και τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων, ερμηνεύεται πως ο συνολικός κύκλος ζωής χωρίς ανακύκλωση και η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές, ενώ η χρήση και η καταστροφή του όζοντος τις ελάχιστες.

6.15 Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων Δεύτερης Περίπτωσης

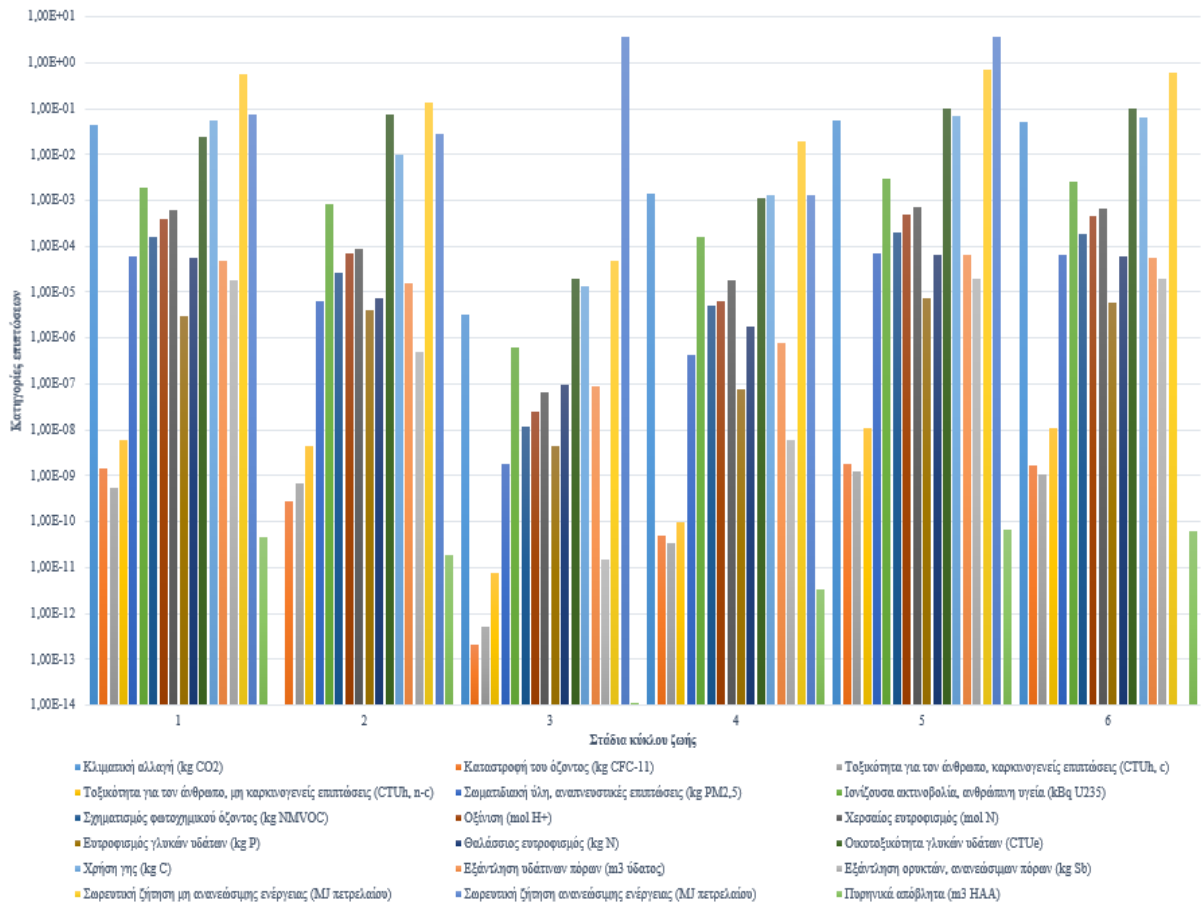
6.15.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση

Στο Διάγραμμα 6.7 απεικονίζεται η σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 18 κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πινάκων multi-Si χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει το στάδιο του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση, ενώ ακολουθούν η χρήση και ο συνολικός κύκλος ζωής με ανακύκλωση. Αντιθέτως, την ελάχιστη τιμή κατέχει το στάδιο της χρήσης, καθώς έπονται το τέλος κύκλου ζωής και η κατασκευή.



Διάγραμμα 6.7: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων δεύτερης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση

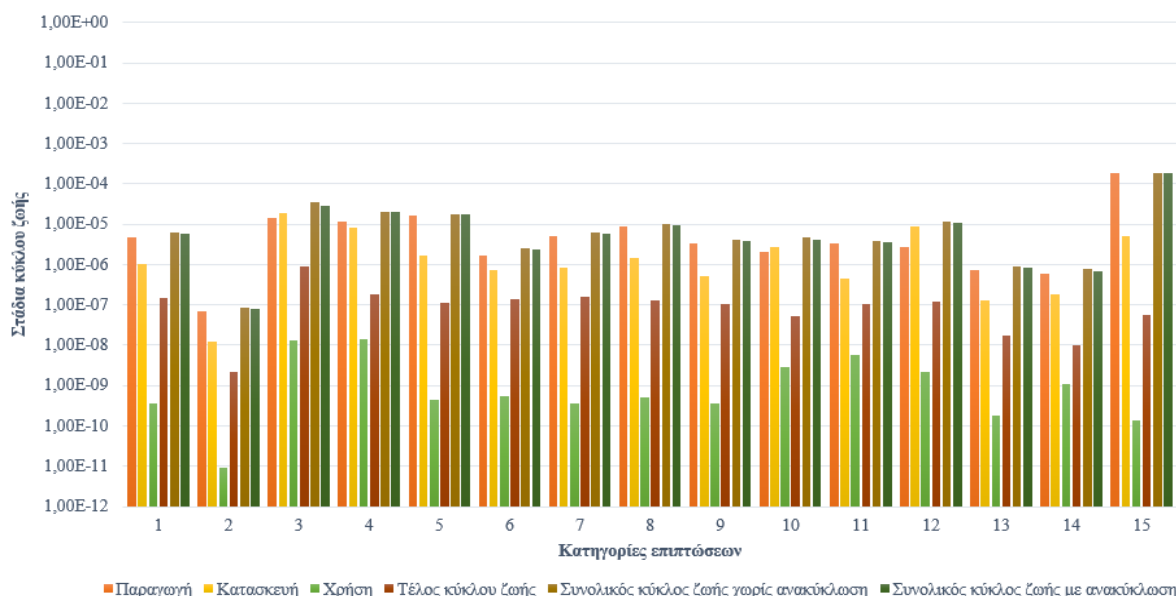
Στη συνέχεια, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.8 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 18 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πινάκων multi-Si χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει η κατηγορία επίπτωσης της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας ($3,70 \cdot 10^0$ MJ πετρελαίου), ενώ ακολουθούν η σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας ($7,05 \cdot 10^{-1}$ MJ πετρελαίου) και η οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων ($1,01 \cdot 10^{-1}$ CTUe). Από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης των πυρηνικών αποβλήτων ($1,13 \cdot 10^{-14}$ m³ HAA), καθώς έπονται η καταστροφή του όζοντος ($2,02 \cdot 10^{-13}$ kg CFC-11) και η τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις ($4,99 \cdot 10^{-13}$ CTUh, c).



Διάγραμμα 6.8: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής δεύτερης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση

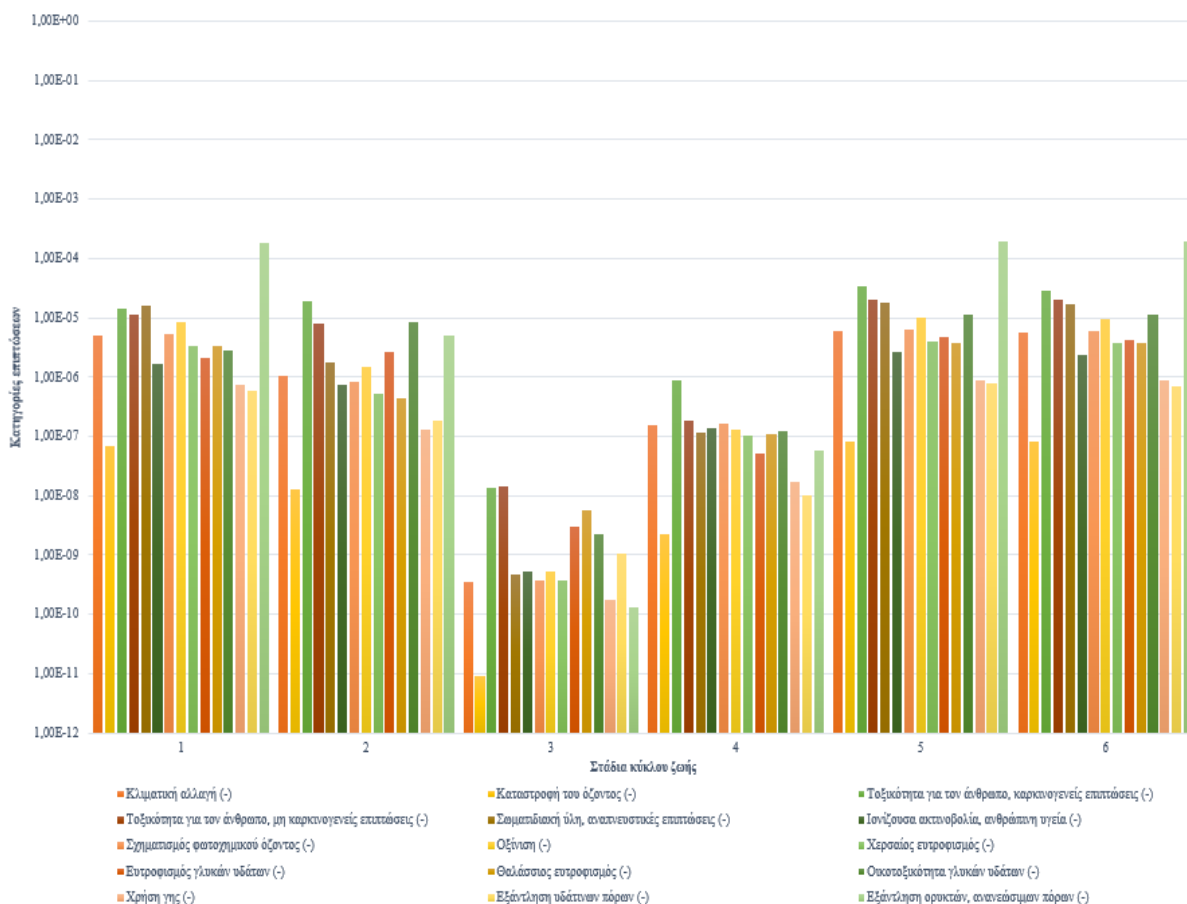
6.15.2 Με Κανονικοποίηση

Στο Διάγραμμα 6.9 απεικονίζεται η σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων multi-Si με κανονικοποίηση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνουν τα στάδια του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση και του συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση, ενώ ακολουθεί η παραγωγή. Αντιθέτως, την ελάχιστη τιμή κατέχει το στάδιο της χρήσης, καθώς έπονται το τέλος κύκλου ζωής και η κατασκευή.



Διάγραμμα 6.9: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων δεύτερης περίπτωσης με κανονικοποίηση

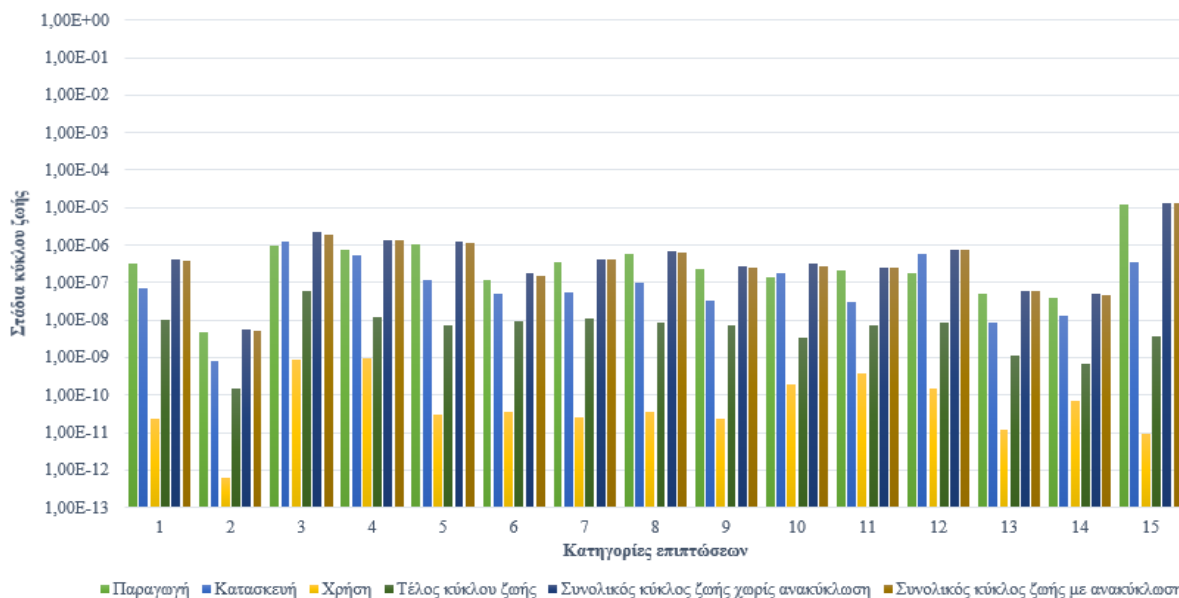
Έπειτα, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.10 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 15 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πινάκων multi-Si με κανονικοποίηση, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($1,91 \cdot 10^{-4}$), ενώ ακολουθούν η τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις ($3,43 \cdot 10^{-5}$) και η τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις ($1,99 \cdot 10^{-5}$). Από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης της καταστροφής του όζοντος ($9,34 \cdot 10^{-12}$), καθώς έπονται η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($1,34 \cdot 10^{-10}$) και η χρήση γης ($1,80 \cdot 10^{-10}$).



Διάγραμμα 6.10: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής δεύτερης περίπτωσης με κανονικοποίηση

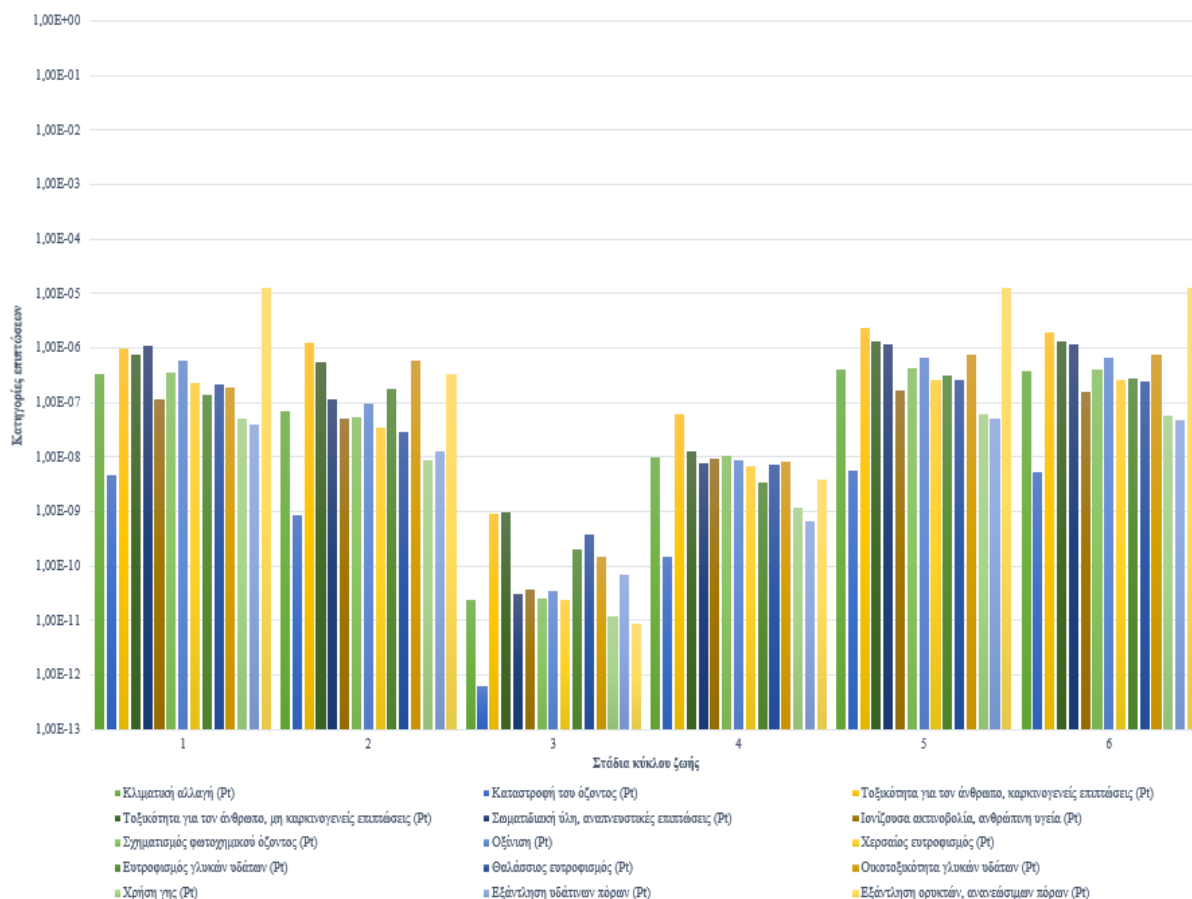
6.15.3 Με Στάθμιση

Στο Διάγραμμα 6.11 απεικονίζεται η σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων multi-Si με στάθμιση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνουν τα στάδια του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση και του συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση, ενώ ακολουθεί η παραγωγή. Αντιθέτως, την ελάχιστη τιμή κατέχει το στάδιο της χρήσης, καθώς έπονται το τέλος κύκλου ζωής και η κατασκευή.



Διάγραμμα 6.11: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων δεύτερης περίπτωσης με στάθμιση

Ύστερα, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.12 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 15 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων multi-Si με στάθμιση, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($1,27 \cdot 10^{-5}$ Pt), ενώ ακολουθούν η τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις ($2,29 \cdot 10^{-6}$ Pt) και η τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις ($1,32 \cdot 10^{-6}$ Pt). Από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης της καταστροφής του όζοντος ($6,23 \cdot 10^{-13}$ Pt), καθώς έπονται η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($8,91 \cdot 10^{-12}$ Pt) και η χρήση γης ($1,20 \cdot 10^{-11}$ Pt).



Διάγραμμα 6.12: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής δεύτερης περίπτωσης με στάθμιση

6.15.4 Σύνοψη

Σχετικά με τα αποτελέσματα των Φ/Β πανέλων multi-Si χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση:

Ανάμεσα στα 6 στάδια κύκλου ζωής και τις 18 κατηγορίες επιπτώσεων, παρατηρείται ότι ο συνολικός κύκλος ζωής χωρίς ανακύκλωση και η σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας κατέχουν τη μέγιστη τιμή, ενώ η χρήση και τα πυρηνικά απόβλητα την ελάχιστη.

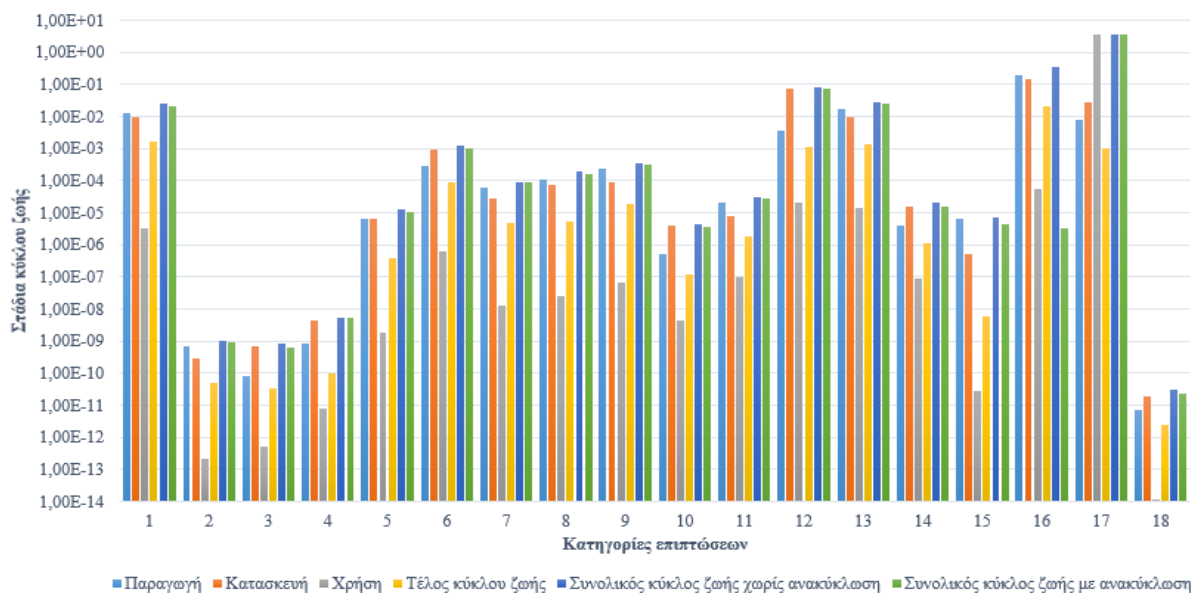
Όσον αφορά τα αποτελέσματα των Φ/Β πανέλων multi-Si με κανονικοποίηση και με στάθμιση:

Αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής και τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων, ερμηνεύεται πως ο συνολικός κύκλος ζωής χωρίς ανακύκλωση, ο συνολικός κύκλος ζωής με ανακύκλωση και η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές, ενώ η χρήση και η καταστροφή του όζοντος τις ελάχιστες.

6.16 Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων Τρίτης Περίπτωσης

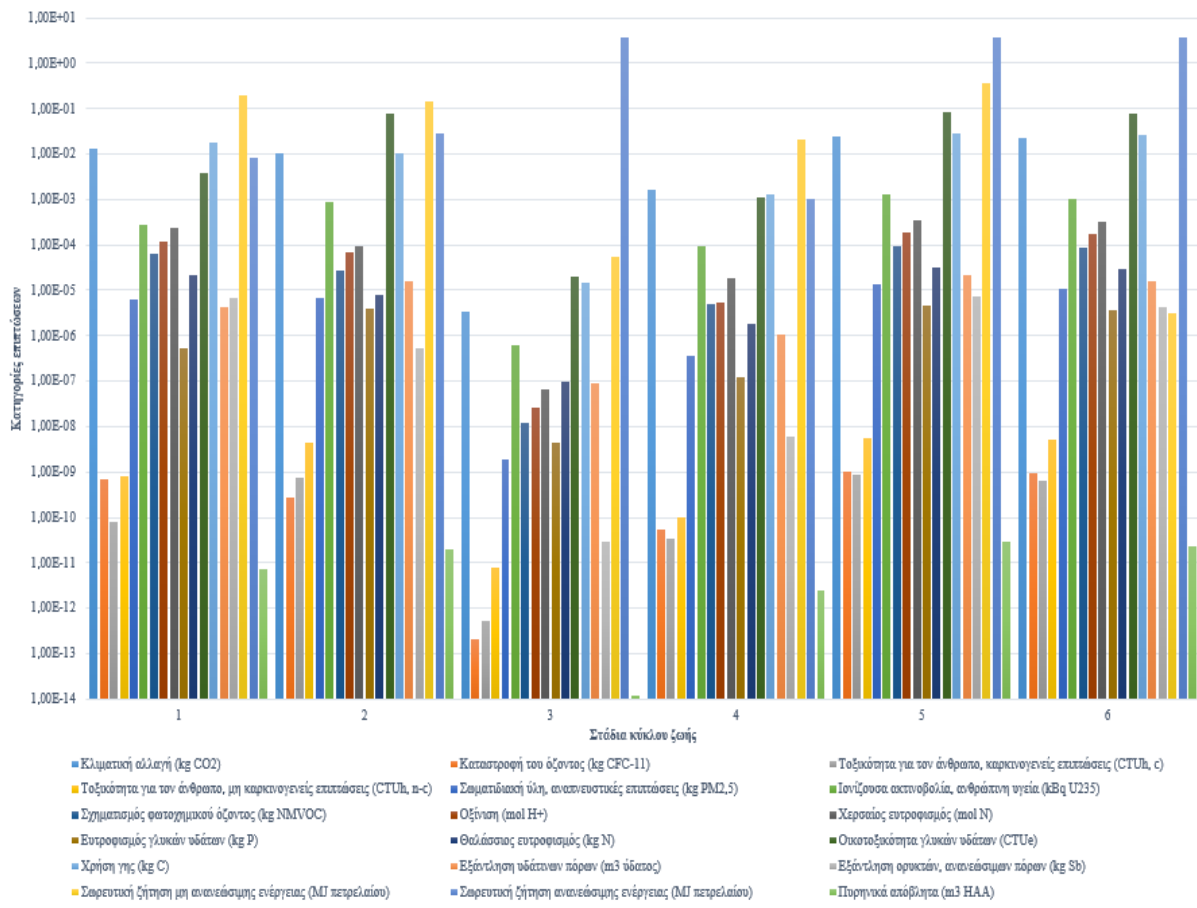
6.16.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση

Στο Διάγραμμα 6.13 απεικονίζεται η σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 18 κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων CdTe χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει το στάδιο του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση, ενώ ακολουθούν ο συνολικός κύκλος ζωής με ανακύκλωση και η χρήση. Αντιθέτως, την ελάχιστη τιμή κατέχει το στάδιο της χρήσης, καθώς έπονται το τέλος κύκλου ζωής και η παραγωγή.



Διάγραμμα 6.13: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων τρίτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση

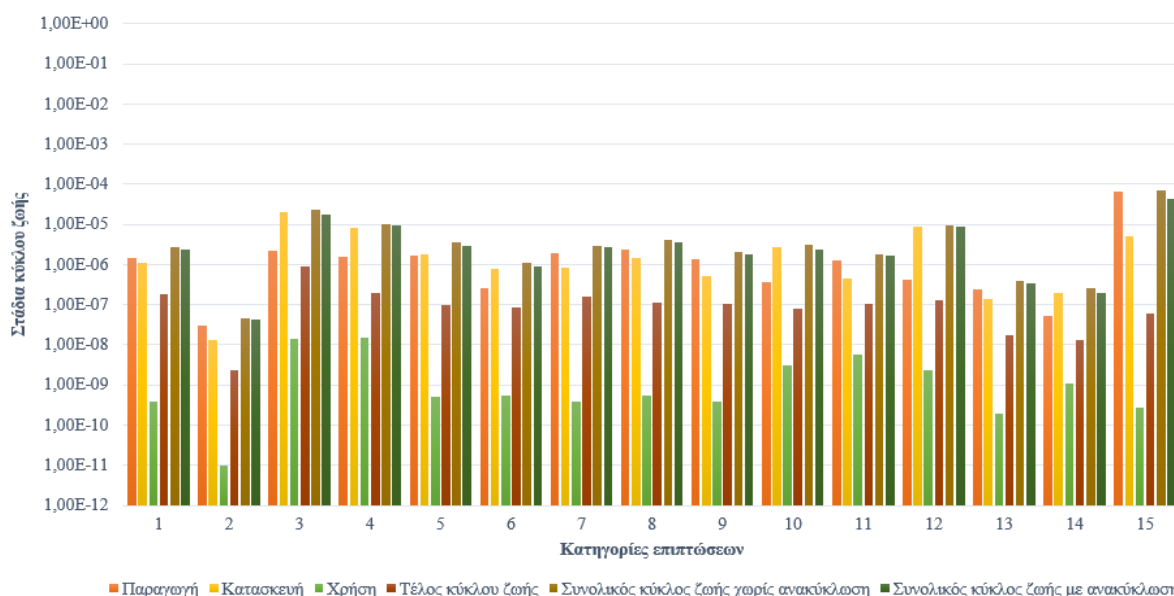
Στη συνέχεια, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.14 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 18 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων CdTe χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει η κατηγορία επίπτωσης της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας ($3,64 \cdot 10^0$ MJ πετρελαίου), ενώ ακολουθούν η σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας ($3,59 \cdot 10^{-1}$ MJ πετρελαίου) και η οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων ($8,09 \cdot 10^{-2}$ CTUe). Από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης των πυρηνικών αποβλήτων ($1,19 \cdot 10^{-14}$ m³ HAA), καθώς έπονται η καταστροφή του όζοντος ($2,13 \cdot 10^{-13}$ kg CFC-11) και η τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις ($5,25 \cdot 10^{-13}$ CTUh, c).



Διάγραμμα 6.14: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής τρίτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση

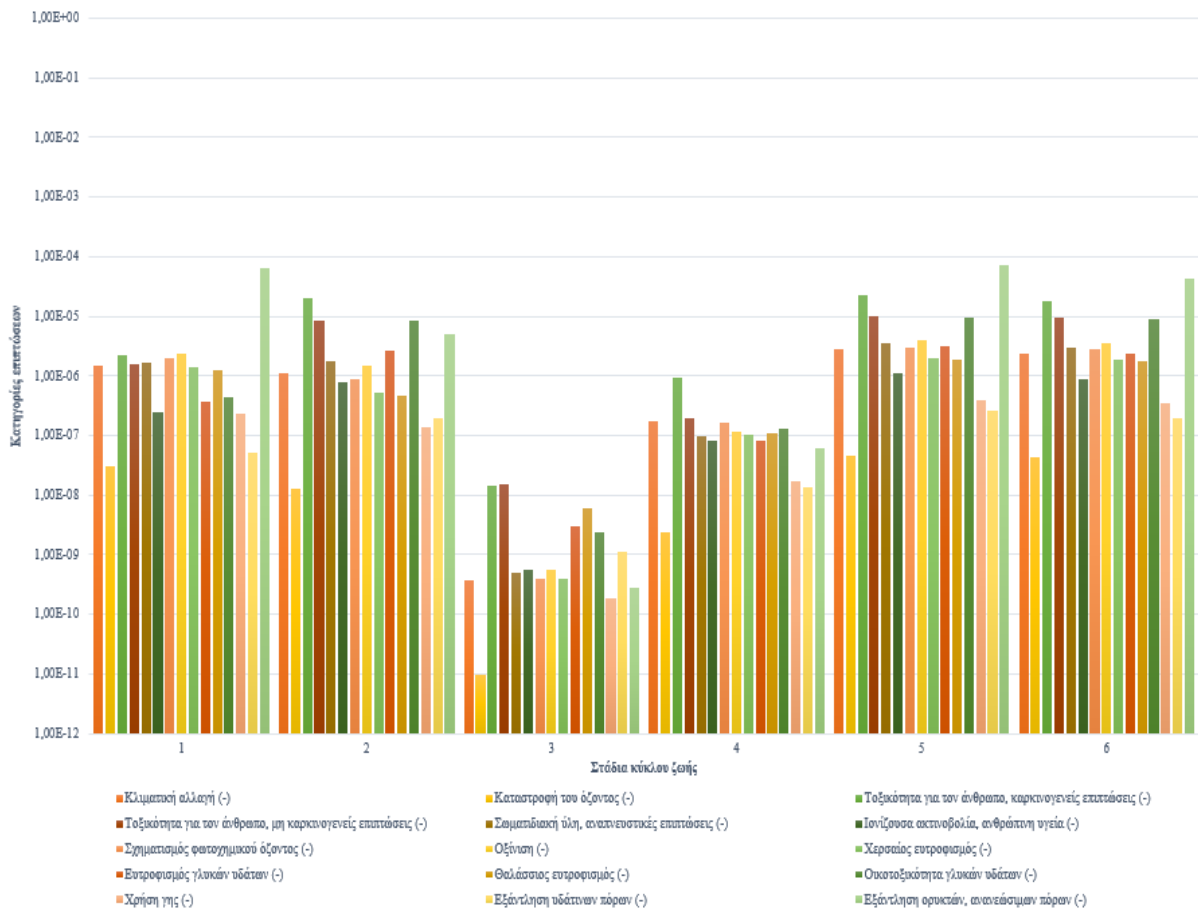
6.16.2 Με Κανονικοποίηση

Στο Διάγραμμα 6.15 απεικονίζεται η σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων CdTe με κανονικοποίηση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει το στάδιο του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση, ενώ ακολουθούν η παραγωγή και ο συνολικός κύκλος ζωής με ανακύκλωση. Αντιθέτως, την ελάχιστη τιμή κατέχει το στάδιο της χρήσης, καθώς έπονται το τέλος κύκλου ζωής και η κατασκευή.



Διάγραμμα 6.15: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων τρίτης περίπτωσης με κανονικοποίηση

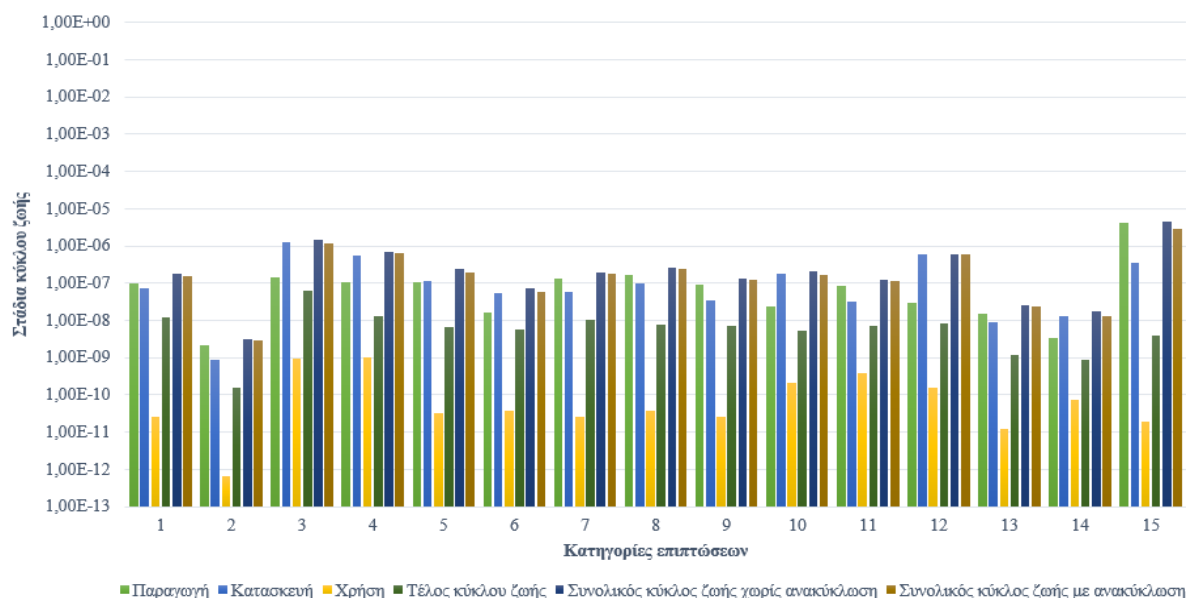
Έπειτα, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.16 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 15 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων CdTe με κανονικοποίηση, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($7,02 \cdot 10^{-5}$), ενώ ακολουθούν η τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις ($2,28 \cdot 10^{-5}$) και η τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις ($1,01 \cdot 10^{-5}$). Από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης της καταστροφής του όζοντος ($9,85 \cdot 10^{-12}$), καθώς έπονται η χρήση γης ($1,90 \cdot 10^{-10}$) και η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($2,77 \cdot 10^{-10}$).



Διάγραμμα 6.16: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής τρίτης περίπτωσης με κανονικοποίηση

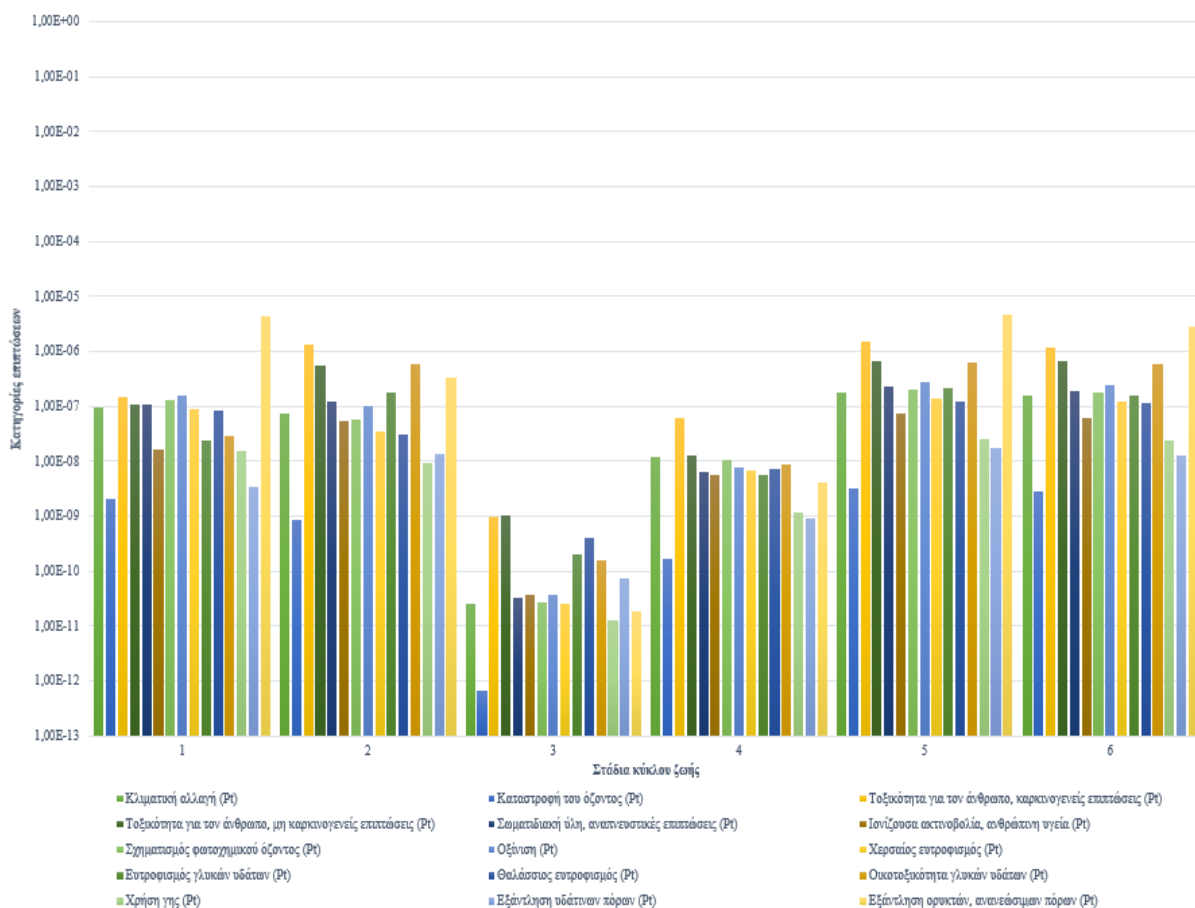
6.16.3 Με Στάθμιση

Στο Διάγραμμα 6.17 απεικονίζεται η σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων CdTe με στάθμιση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει το στάδιο του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση, ενώ ακολουθούν η παραγωγή και ο συνολικός κύκλος ζωής με ανακύκλωση. Αντιθέτως, την ελάχιστη τιμή κατέχει το στάδιο της χρήσης, καθώς έπονται το τέλος κύκλου ζωής και η κατασκευή.



Διάγραμμα 6.17: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων τρίτης περίπτωσης με στάθμιση

Ύστερα, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.18 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 15 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πινάκων CdTe με στάθμιση, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($4,68 \cdot 10^{-6}$ Pt), ενώ ακολουθούν η τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις ($1,52 \cdot 10^{-6}$ Pt) και η τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις ($6,74 \cdot 10^{-7}$ Pt). Από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης της καταστροφής του όζοντος ($6,57 \cdot 10^{-13}$ Pt), καθώς έπονται η χρήση γης ($1,26 \cdot 10^{-11}$ Pt) και η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($1,85 \cdot 10^{-11}$ Pt).



Διάγραμμα 6.18: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής τρίτης περίπτωσης με στάθμιση

6.16.4 Σύνοψη

Σχετικά με τα αποτελέσματα των Φ/Β πανέλων CdTe χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση:

Ανάμεσα στα 6 στάδια κύκλου ζωής και τις 18 κατηγορίες επιπτώσεων, παρατηρείται ότι ο συνολικός κύκλος ζωής χωρίς ανακύκλωση και η σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας κατέχουν τη μέγιστη τιμή, ενώ η χρήση και τα πυρηνικά απόβλητα την ελάχιστη.

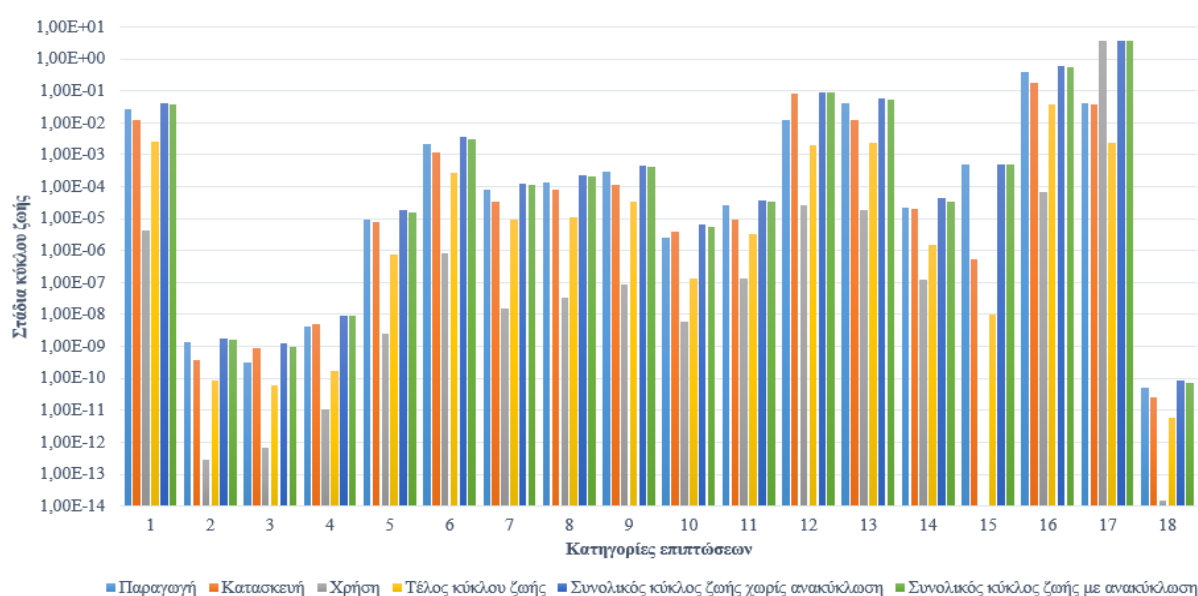
Όσον αφορά τα αποτελέσματα των Φ/Β πανέλων CdTe με κανονικοποίηση και με στάθμιση:

Αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής και τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων, ερμηνεύεται πως ο συνολικός κύκλος ζωής χωρίς ανακύκλωση και η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές, ενώ η χρήση και η καταστροφή του όζοντος τις ελάχιστες.

6.17 Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων Τέταρτης Περίπτωσης

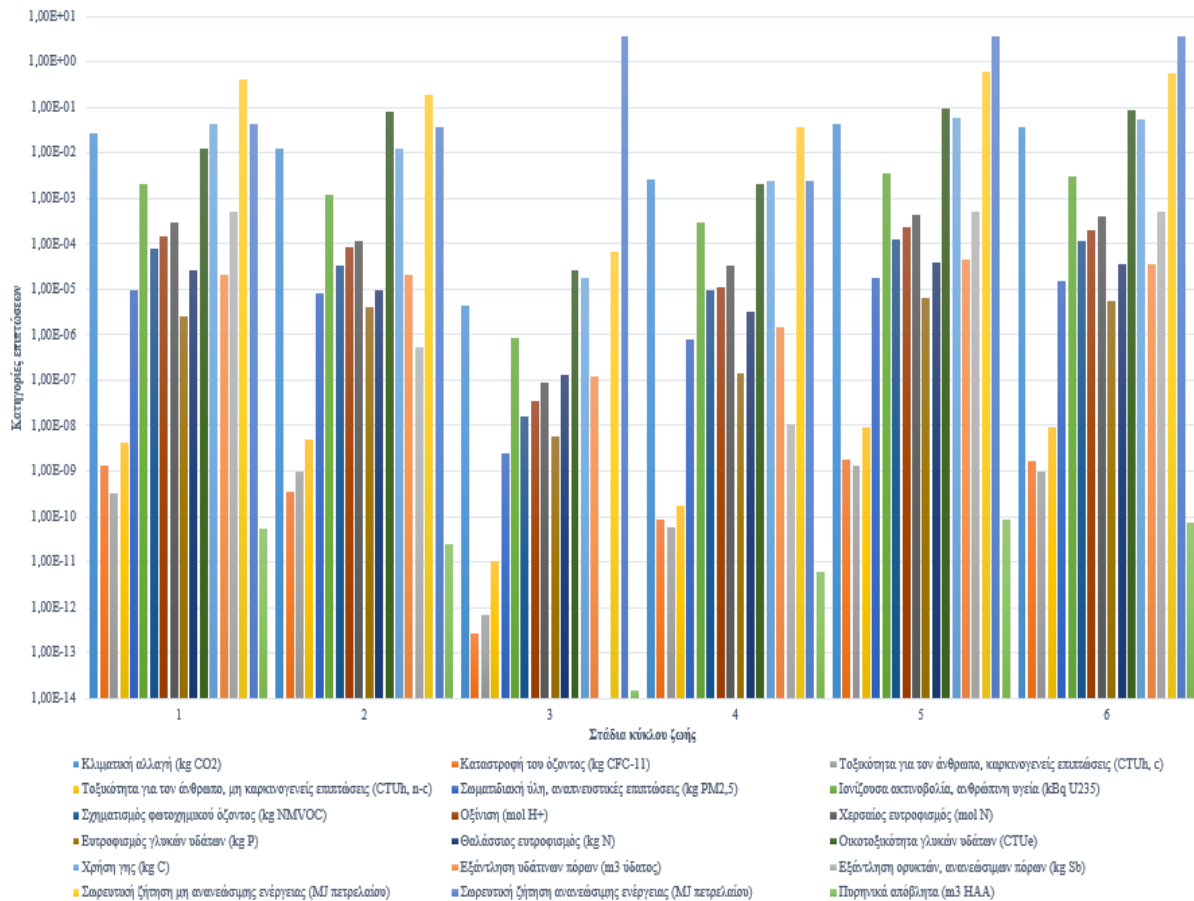
6.17.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση

Στο Διάγραμμα 6.19 απεικονίζεται η σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 18 κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων CIS χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει το στάδιο του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση, ενώ ακολουθούν ο συνολικός κύκλος ζωής με ανακύκλωση και η χρήση. Αντιθέτως, την ελάχιστη τιμή κατέχει το στάδιο της χρήσης, η οποία δεν διακρίνεται λόγω λογαριθμικής κλίμακας, καθώς έπονται το τέλος κύκλου ζωής και η κατασκευή.



Διάγραμμα 6.19: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων τέταρτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση

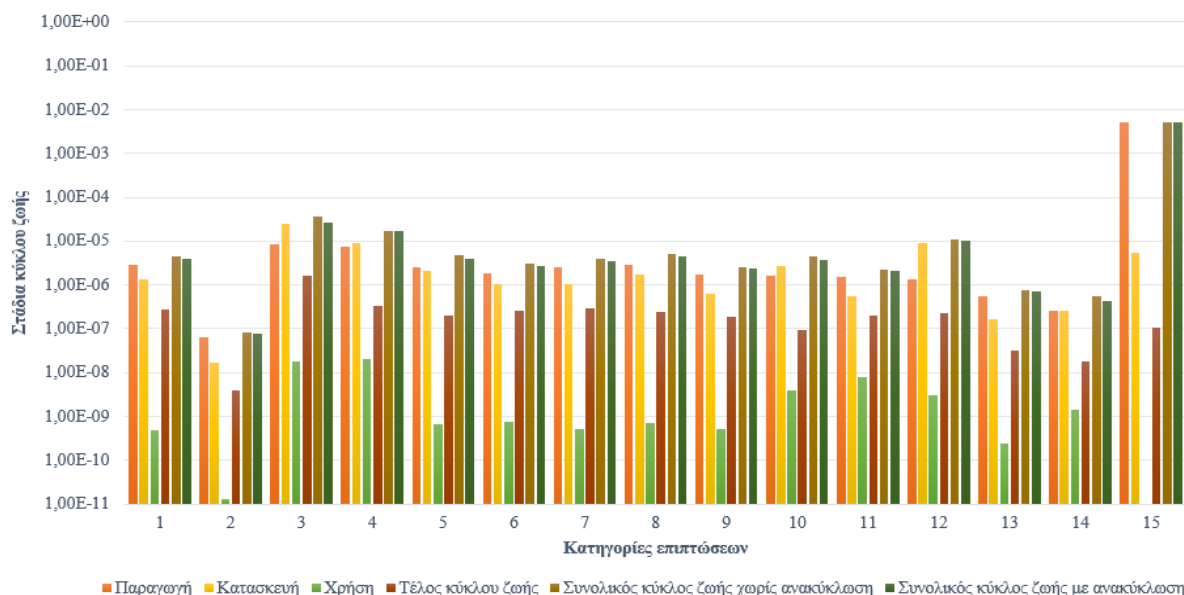
Στη συνέχεια, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.20 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 18 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων CIS χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει η κατηγορία επίπτωσης της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας ($3,68 \cdot 10^0$ MJ πετρελαίου), ενώ ακολουθούν η σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας ($6,23 \cdot 10^{-1}$ MJ πετρελαίου) και η οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων ($9,27 \cdot 10^{-2}$ CTUe). Από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($-4,69 \cdot 10^{-10}$ kg Sb), η οποία δεν διακρίνεται λόγω λογαριθμικής κλίμακας, καθώς έπονται τα πυρηνικά απόβλητα ($1,54 \cdot 10^{-14}$ m³ HAA) και η καταστροφή του όζοντος ($2,75 \cdot 10^{-11}$ kg CFC-11).



Διάγραμμα 6.20: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής τέταρτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση

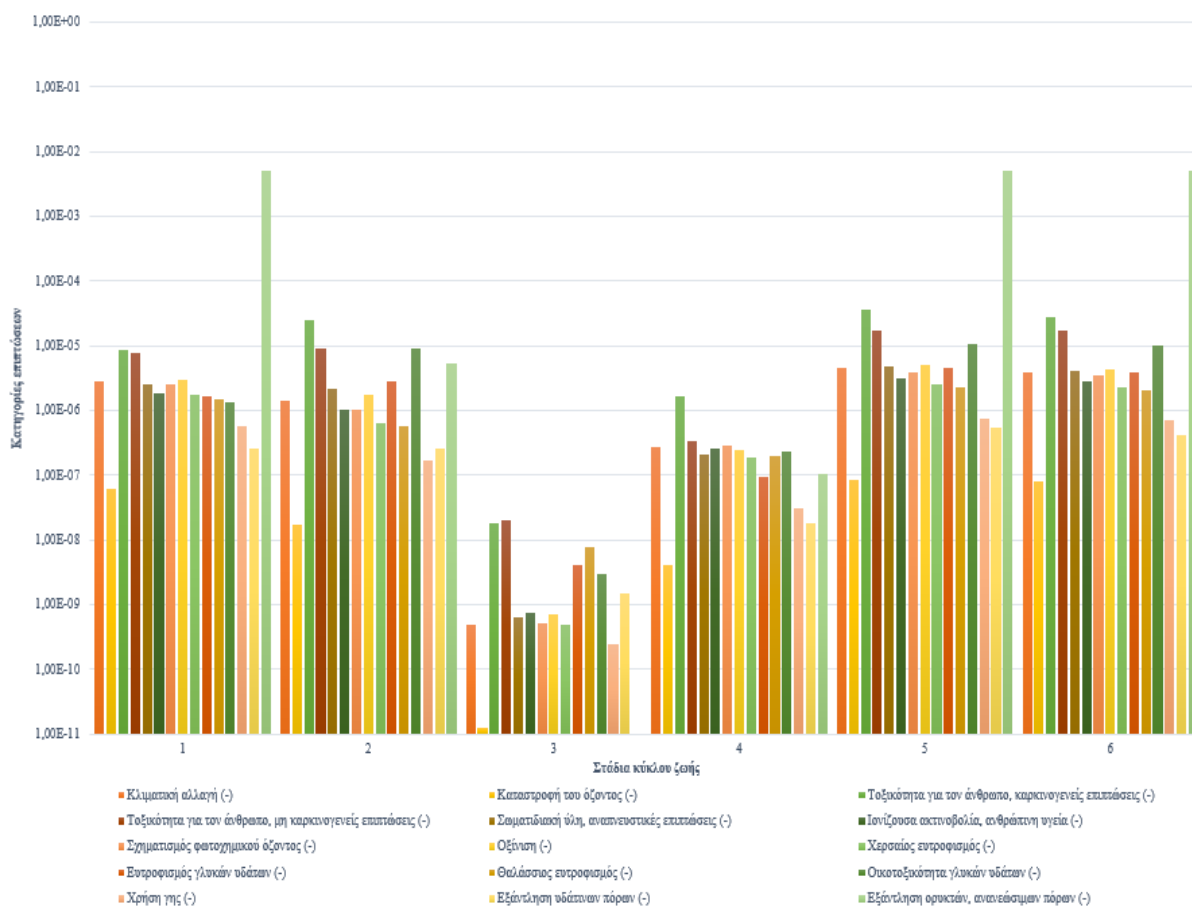
6.17.2 Με Κανονικοποίηση

Στο Διάγραμμα 6.21 απεικονίζεται η σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων CIS με κανονικοποίηση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνουν τα στάδια του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση και του συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση, ενώ ακολουθεί η παραγωγή. Αντιθέτως, την ελάχιστη τιμή κατέχει το στάδιο της χρήσης, η οποία δεν διακρίνεται λόγω λογαριθμικής κλίμακας, καθώς έπονται το τέλος κύκλου ζωής και η κατασκευή.



Διάγραμμα 6.21: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων τέταρτης περίπτωσης με κανονικοποίηση

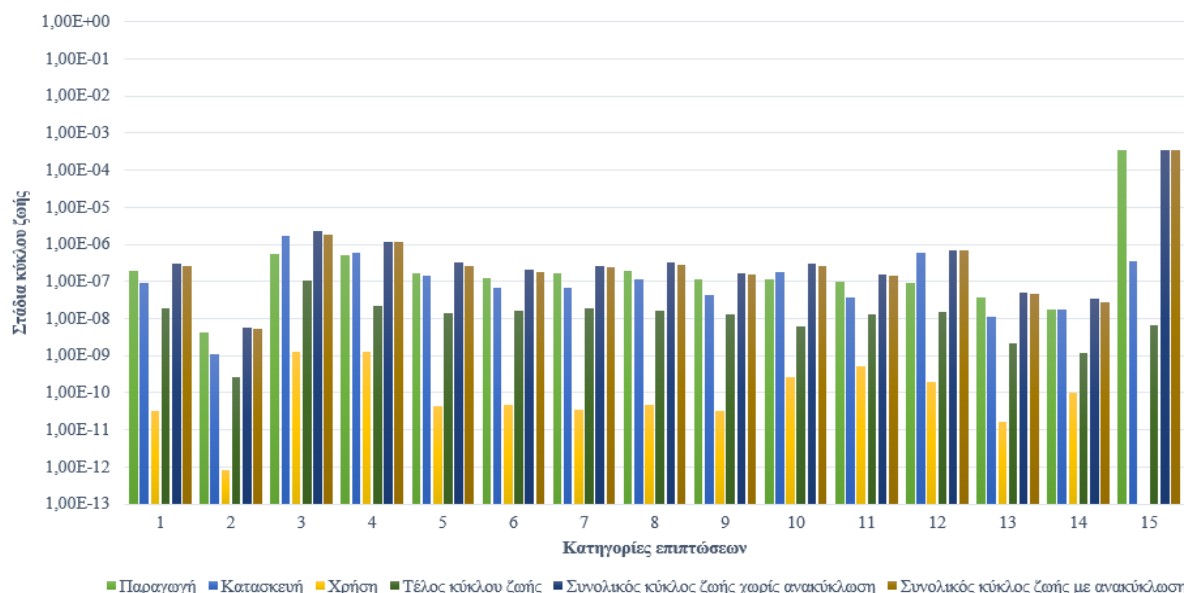
Έπειτα, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.22 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 15 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων CIS με κανονικοποίηση, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($5,07 \cdot 10^{-3}$), ενώ ακολουθούν η τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις ($3,53 \cdot 10^{-5}$) και η τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις ($1,72 \cdot 10^{-5}$). Από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($-4,63 \cdot 10^{-9}$), η οποία δεν διακρίνεται λόγω λογαριθμικής κλίμακας, καθώς έπονται η καταστροφή του όζοντος ($1,27 \cdot 10^{-11}$) και η χρήση γης ($2,46 \cdot 10^{-10}$).



Διάγραμμα 6.22: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής τέταρτης περίπτωσης με κανονικοποίηση

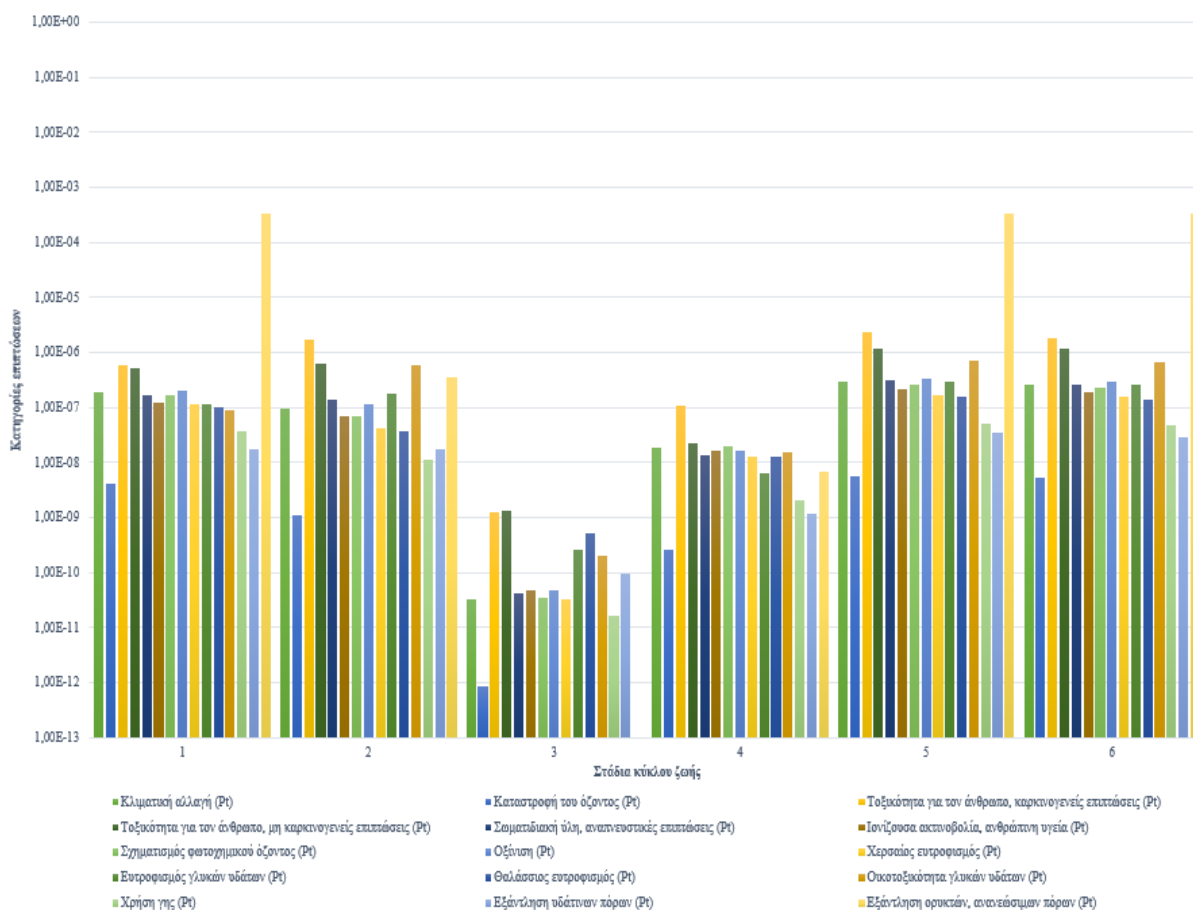
6.17.3 Με Στάθμιση

Στο Διάγραμμα 6.23 απεικονίζεται η σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων CIS με στάθμιση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνουν τα στάδια της παραγωγής, του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση και του συνολικού κύκλου ζωής με ανακύκλωση. Αντιθέτως, την ελάχιστη τιμή κατέχει το στάδιο της χρήσης, η οποία δεν διακρίνεται λόγω λογαριθμικής κλίμακας, καθώς έπονται το τέλος κύκλου ζωής και η κατασκευή.



Διάγραμμα 6.23: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων τέταρτης περίπτωσης με στάθμιση

Ύστερα, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.24 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 15 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων CIS με στάθμιση, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($3,38 \cdot 10^{-4}$ Pt), ενώ ακολουθούν η τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις ($2,35 \cdot 10^{-6}$ Pt) και η τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις ($1,15 \cdot 10^{-6}$ Pt). Από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($-3,15 \cdot 10^{-10}$ Pt), η οποία δεν διακρίνεται λόγω λογαριθμικής κλίμακας, καθώς έπονται η καταστροφή του όζοντος ($8,50 \cdot 10^{-13}$ Pt) και η χρήση γης ($1,64 \cdot 10^{-11}$ Pt).



Διάγραμμα 6.24: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής τέταρτης περίπτωσης με στάθμιση

6.17.4 Σύνοψη

Σχετικά με τα αποτελέσματα των Φ/Β πανέλων CIS χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση:

Ανάμεσα στα 6 στάδια κύκλου ζωής και τις 18 κατηγορίες επιπτώσεων, παρατηρείται ότι ο συνολικός κύκλος ζωής χωρίς ανακύκλωση και η σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας κατέχουν τη μέγιστη τιμή, ενώ η χρήση και η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων την ελάχιστη.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα των Φ/Β πανέλων CIS με κανονικοποίηση:

Αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής και τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων, ερμηνεύεται πως ο συνολικός κύκλος ζωής χωρίς ανακύκλωση, ο συνολικός κύκλος ζωής με ανακύκλωση και η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές, ενώ η χρήση και η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων τις ελάχιστες.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα των Φ/Β πανέλων CIS με στάθμιση:

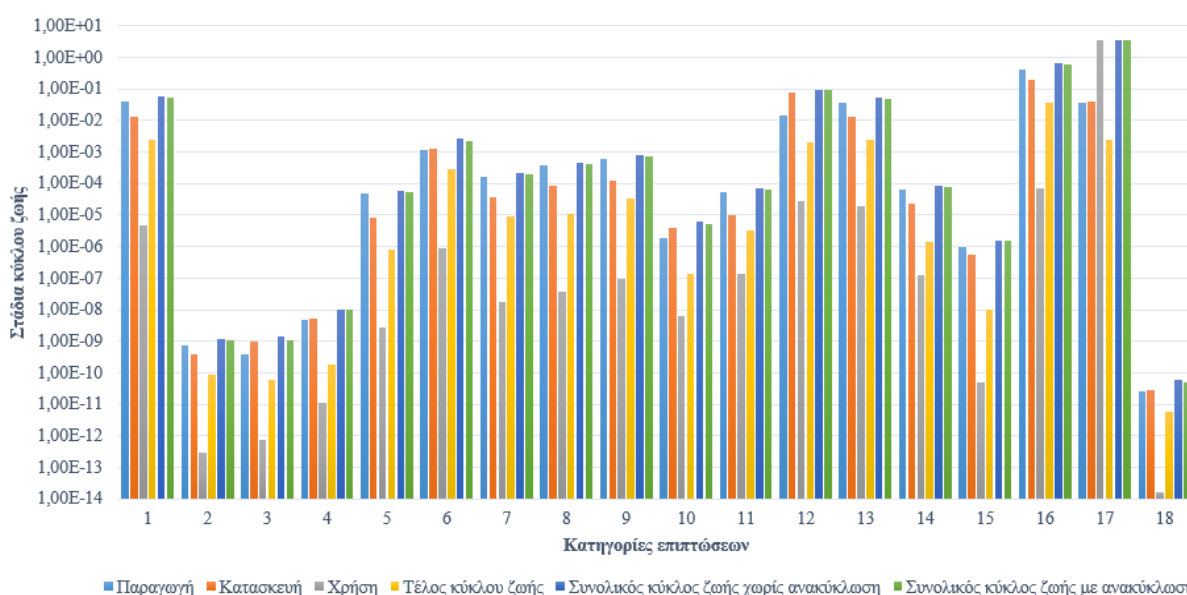
Αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής και τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων, ερμηνεύεται πως η παραγωγή, ο συνολικός κύκλος ζωής χωρίς ανακύκλωση, ο συνολικός κύκλος ζωής με

ανακύκλωση και η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές, ενώ η χρήση και η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων τις ελάχιστες.

6.18 Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων Πέμπτης Περίπτωσης

6.18.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση

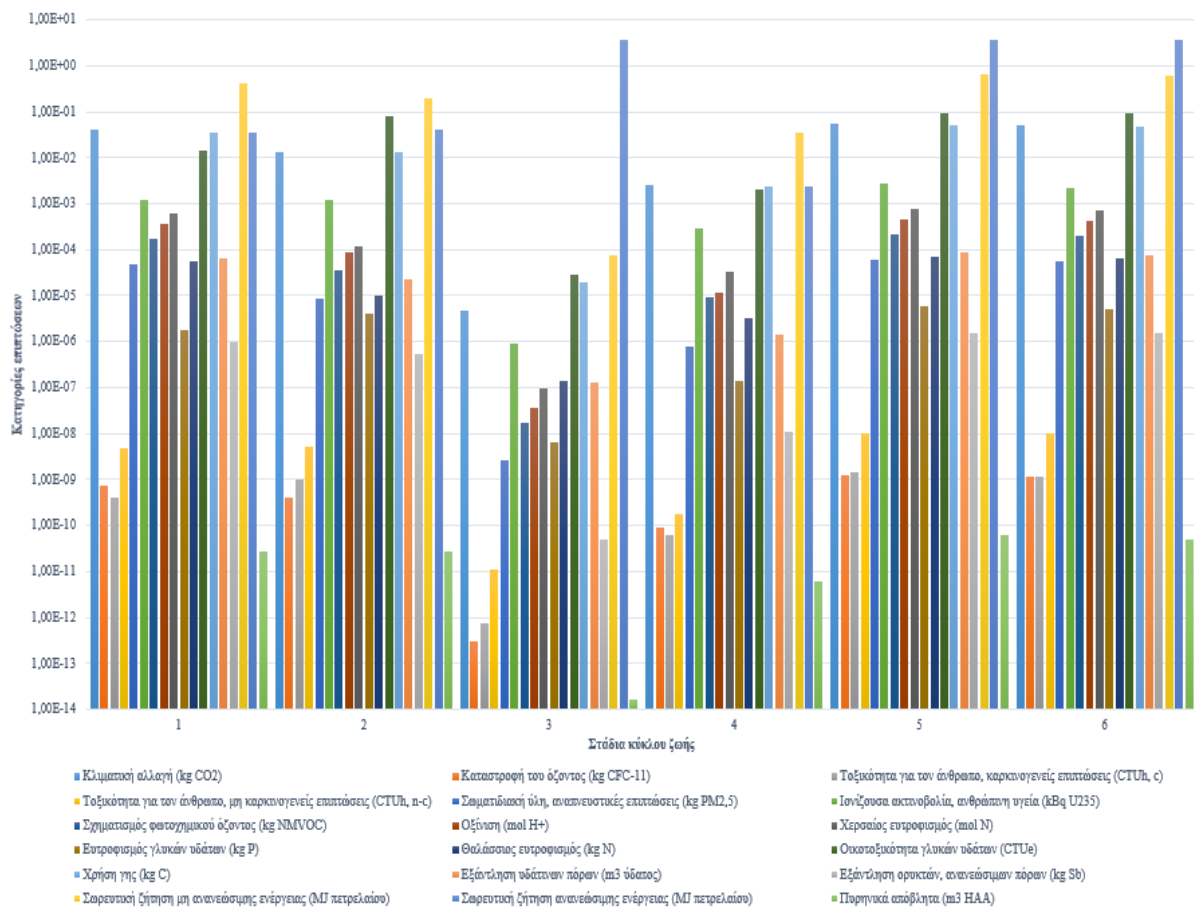
Στο Διάγραμμα 6.25 απεικονίζεται η σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 18 κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων micro-Si χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει το στάδιο του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση, ενώ ακολουθούν ο συνολικός κύκλος ζωής με ανακύκλωση και η χρήση. Αντιθέτως, την ελάχιστη τιμή κατέχει το στάδιο της παραγωγής, καθώς έπονται το τέλος κύκλου ζωής και η παραγωγή.



Διάγραμμα 6.25: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων πέμπτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση

Στη συνέχεια, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.26 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 18 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων micro-Si χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει η κατηγορία επίπτωσης της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας ($3,68 \cdot 10^0$ MJ πετρελαίου), ενώ ακολουθούν η σωρευτική ζήτηση μη ανανεώσιμης ενέργειας ($6,62 \cdot 10^{-1}$ MJ πετρελαίου) και η οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων ($9,56 \cdot 10^{-2}$ CTUe). Από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης των πυρηνικών αποβλήτων

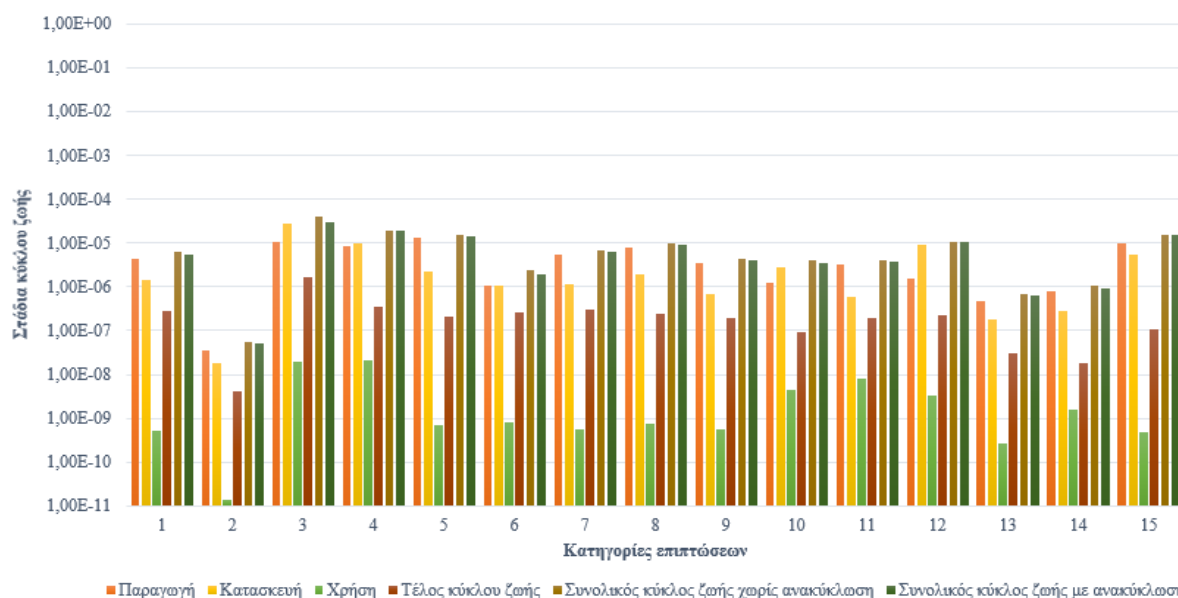
($1,66 \cdot 10^{-14} \text{ m}^3 \text{ HAA}$), καθώς έπονται η καταστροφή του όζοντος ($2,98 \cdot 10^{-13} \text{ kg CFC-11}$) και η τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις ($7,34 \cdot 10^{-13} \text{ CTUh, c}$).



Διάγραμμα 6.26: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής πέμπτης περίπτωσης χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση

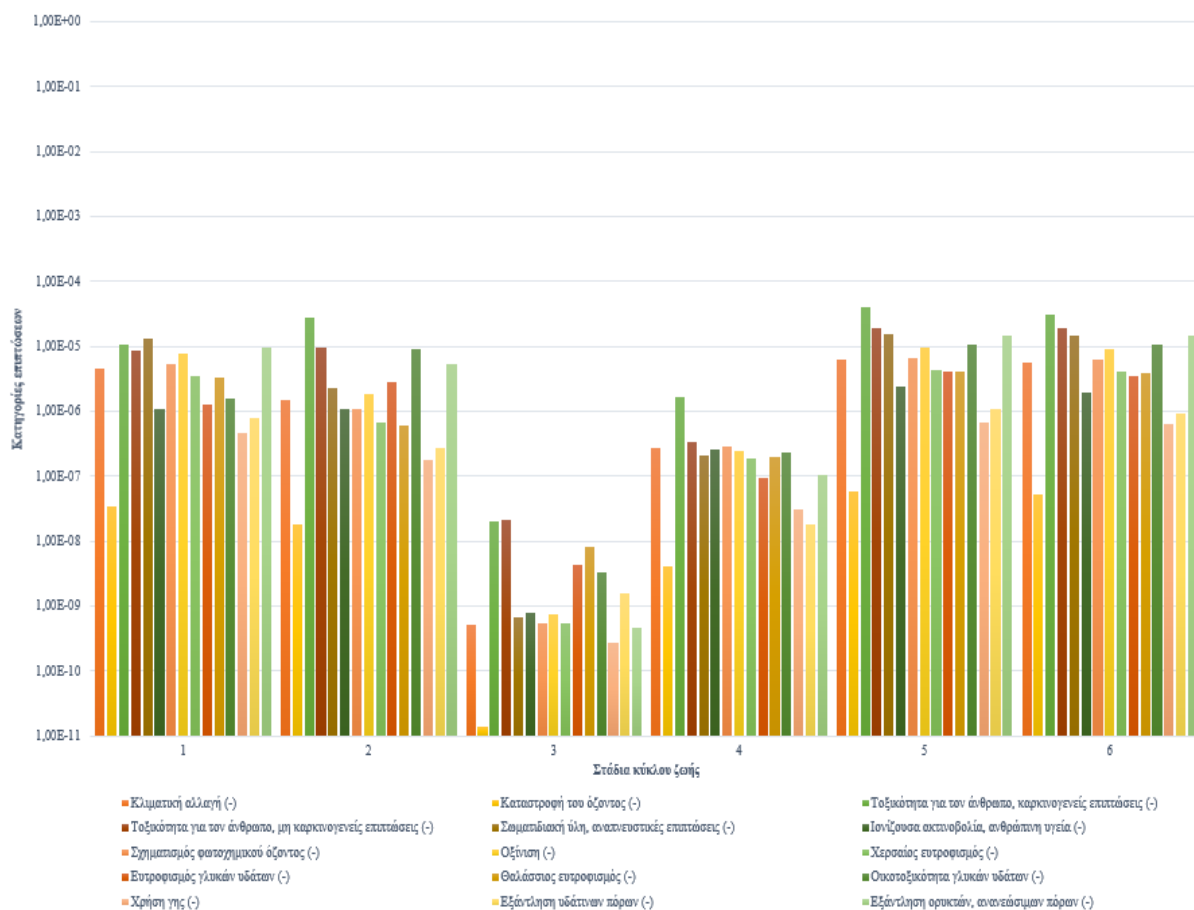
6.18.2 Με Κανονικοποίηση

Στο Διάγραμμα 6.27 απεικονίζεται η σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων micro-Si με κανονικοποίηση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει το στάδιο του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση, ενώ ακολουθούν ο συνολικός κύκλος ζωής με ανακύκλωση και η κατασκευή. Αντιθέτως, την ελάχιστη τιμή κατέχει το στάδιο της χρήσης, καθώς έπονται το τέλος κύκλου ζωής και η κατασκευή.



Διάγραμμα 6.27: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων πέμπτης περίπτωσης με κανονικοποίηση

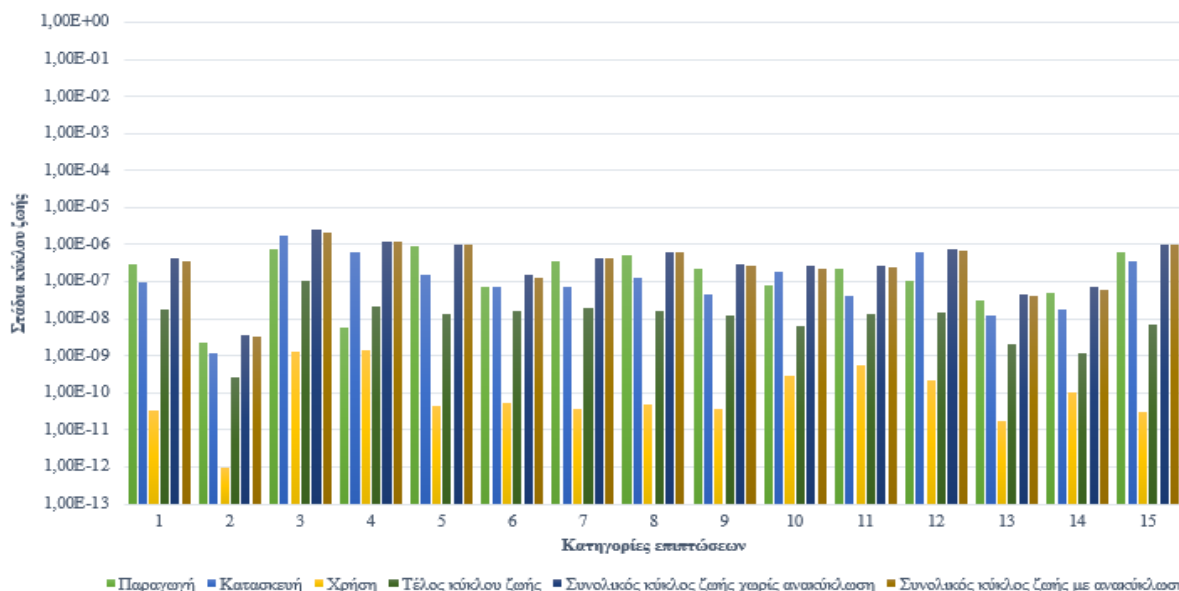
Έπειτα, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.28 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 15 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων micro-Si με κανονικοποίηση, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει η κατηγορία επίπτωσης της τοξικότητας για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις ($3,95 \cdot 10^{-5}$), ενώ ακολουθούν η τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις ($1,86 \cdot 10^{-5}$) και η σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις ($1,56 \cdot 10^{-5}$). Από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης της καταστροφής του όζοντος ($1,38 \cdot 10^{-11}$), καθώς έπονται η χρήση γης ($2,65 \cdot 10^{-10}$) και η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($4,73 \cdot 10^{-10}$).



Διάγραμμα 6.28: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής πέμπτης περίπτωσης με κανονικοποίηση

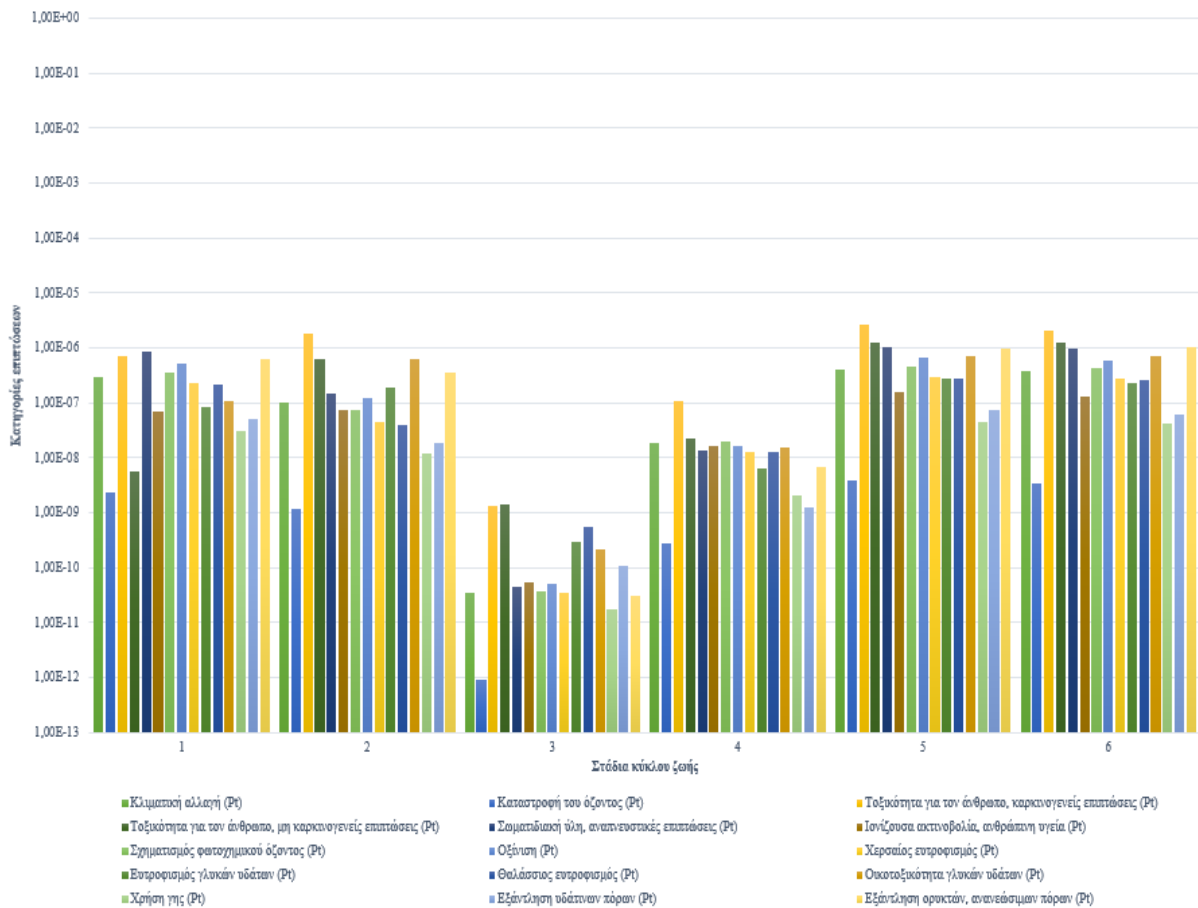
6.18.3 Με Στάθμιση

Στο Διάγραμμα 6.29 απεικονίζεται η σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων micro-Si με στάθμιση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει το στάδιο του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση, ενώ ακολουθούν ο συνολικός κύκλος ζωής με ανακύκλωση και η κατασκευή. Αντιθέτως, την ελάχιστη τιμή κατέχει το στάδιο της χρήσης, καθώς έπονται το τέλος κύκλου ζωής και η κατασκευή.



Διάγραμμα 6.29: Σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων πέμπτης περίπτωσης με στάθμιση

Ύστερα, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.30 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 15 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων micro-Si με στάθμιση, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει η κατηγορία επίπτωσης της τοξικότητας για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις ($2,63 \cdot 10^{-6}$ Pt), ενώ ακολουθούν η τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις ($1,24 \cdot 10^{-6}$ Pt) και η σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις ($1,04 \cdot 10^{-6}$ Pt). Από την άλλη πλευρά, την ελάχιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης της καταστροφής του όζοντος ($9,20 \cdot 10^{-13}$ Pt), καθώς έπονται η χρήση γης ($1,77 \cdot 10^{-11}$ Pt) και η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων ($3,15 \cdot 10^{-11}$ Pt).



Διάγραμμα 6.30: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής πέμπτης περίπτωσης με στάθμιση

6.18.4 Σύνοψη

Σχετικά με τα αποτελέσματα των Φ/Β πανέλων micro-Si χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση:

Ανάμεσα στα 6 στάδια κύκλου ζωής και τις 18 κατηγορίες επιπτώσεων, παρατηρείται ότι ο συνολικός κύκλος ζωής χωρίς ανακύκλωση και η σωρευτική ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας κατέχουν τη μέγιστη τιμή, ενώ η χρήση και τα πυρηνικά απόβλητα την ελάχιστη.

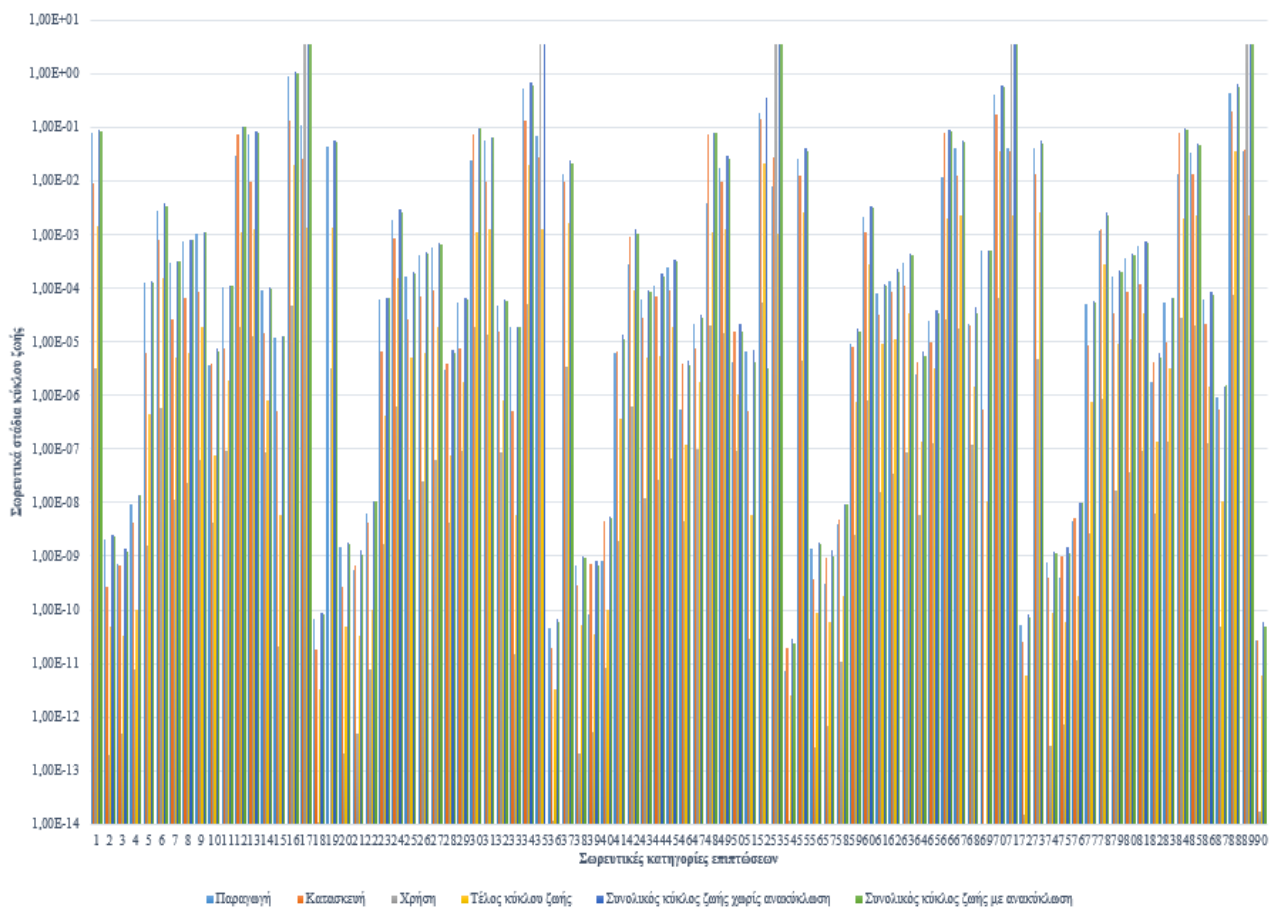
Όσον αφορά τα αποτελέσματα των Φ/Β πανέλων micro-Si με κανονικοποίηση και με στάθμιση:

Αναφορικά με τα 6 στάδια κύκλου ζωής και τις 15 κατηγορίες επιπτώσεων, ερμηνεύεται πως ο συνολικός κύκλος ζωής χωρίς ανακύκλωση και η τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές, ενώ η χρήση και η καταστροφή του όζοντος τις ελάχιστες.

6.19 Συγκεντρωτικές Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων

6.19.1 Χωρίς Κανονικοποίηση και Στάθμιση

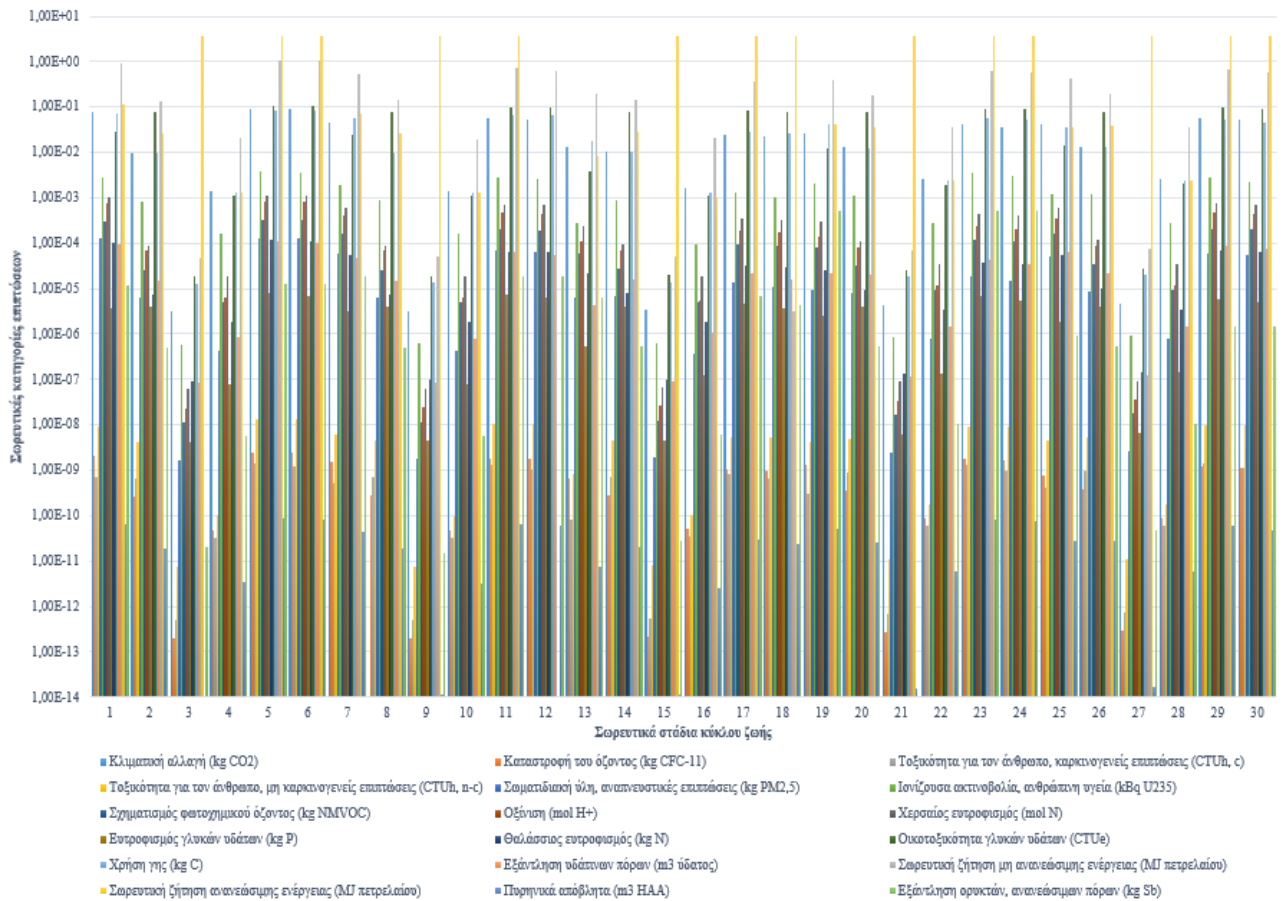
Στο Διάγραμμα 6.31 απεικονίζεται η σωρευτική σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 90 σωρευτικές κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων mono-Si, multi-Si, CdTe, CIS και micro-Si χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως το στάδιο του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση λαμβάνει τις μέγιστες τιμές και στις 5 Φ/Β τεχνολογίες, ενώ το στάδιο της χρήσης τις ελάχιστες.



Διάγραμμα 6.31: Σωρευτική σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων όλων των περιπτώσεων χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση

Στη συνέχεια, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.32 στο οποίο παρουσιάζεται η σωρευτική σύγκριση των 18 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 30 σωρευτικά στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων mono-Si, multi-Si, CdTe, CIS και micro-Si χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση, στο οποίο παρατηρείται πως η κατηγορία επίπτωσης της σωρευτικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας (MJ πετρελαίου) κατέχει τις μέγιστες τιμές και στις 5 Φ/Β τεχνολογίες. Αντιθέτως, η κατηγορία επίπτωσης των πυρηνικών

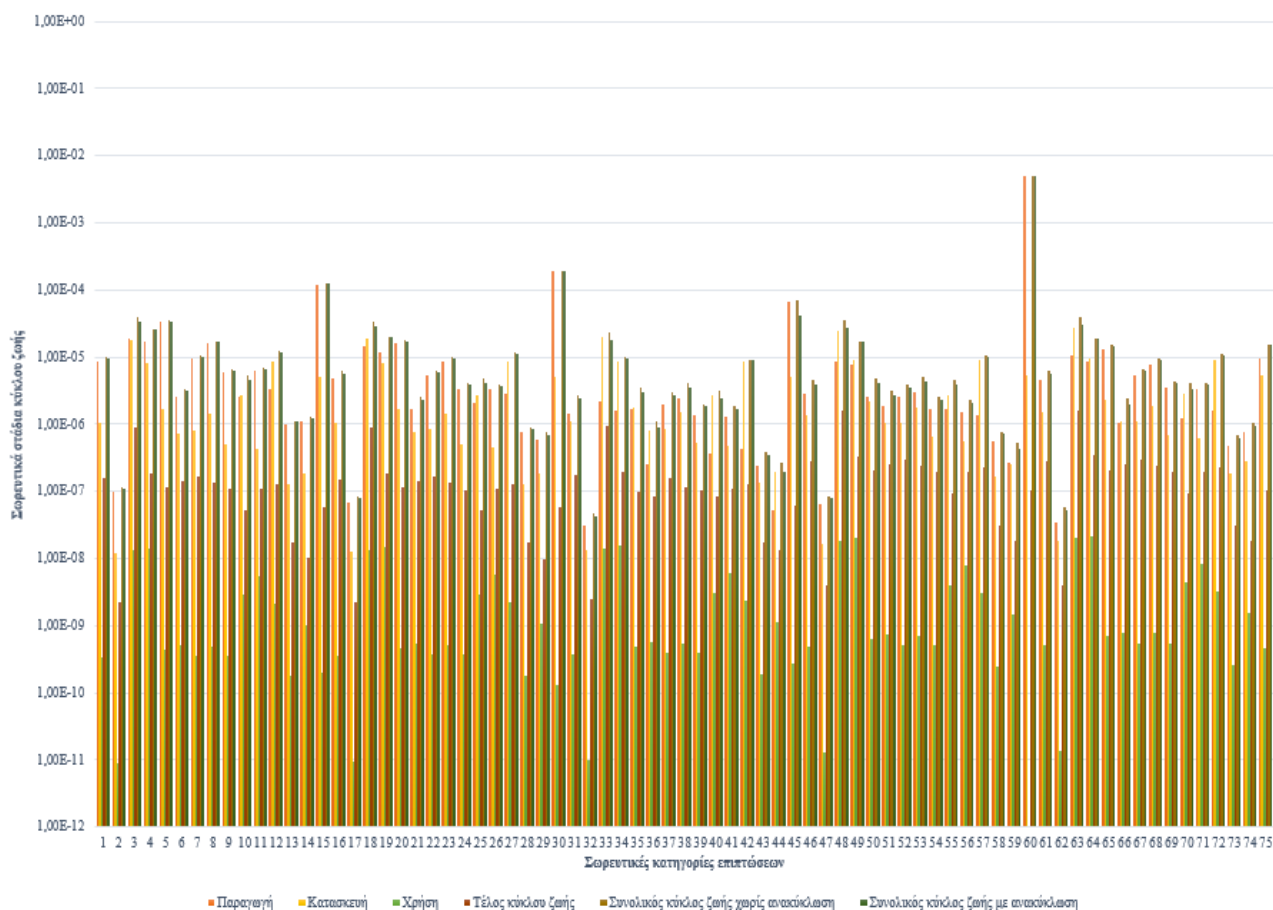
αποβλήτων (m^3 HAA) κατέχει τις ελάχιστες τιμές στις 4 Φ/Β τεχνολογίες mono-Si, multi-Si, CdTe και micro-Si, ενώ η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (kg Sb) στη Φ/Β τεχνολογία CIS, η οποία δεν διακρίνεται λόγω λογαριθμικής κλίμακας.



Διάγραμμα 6.32: Σωρευτική σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής όλων των περιπτώσεων χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση

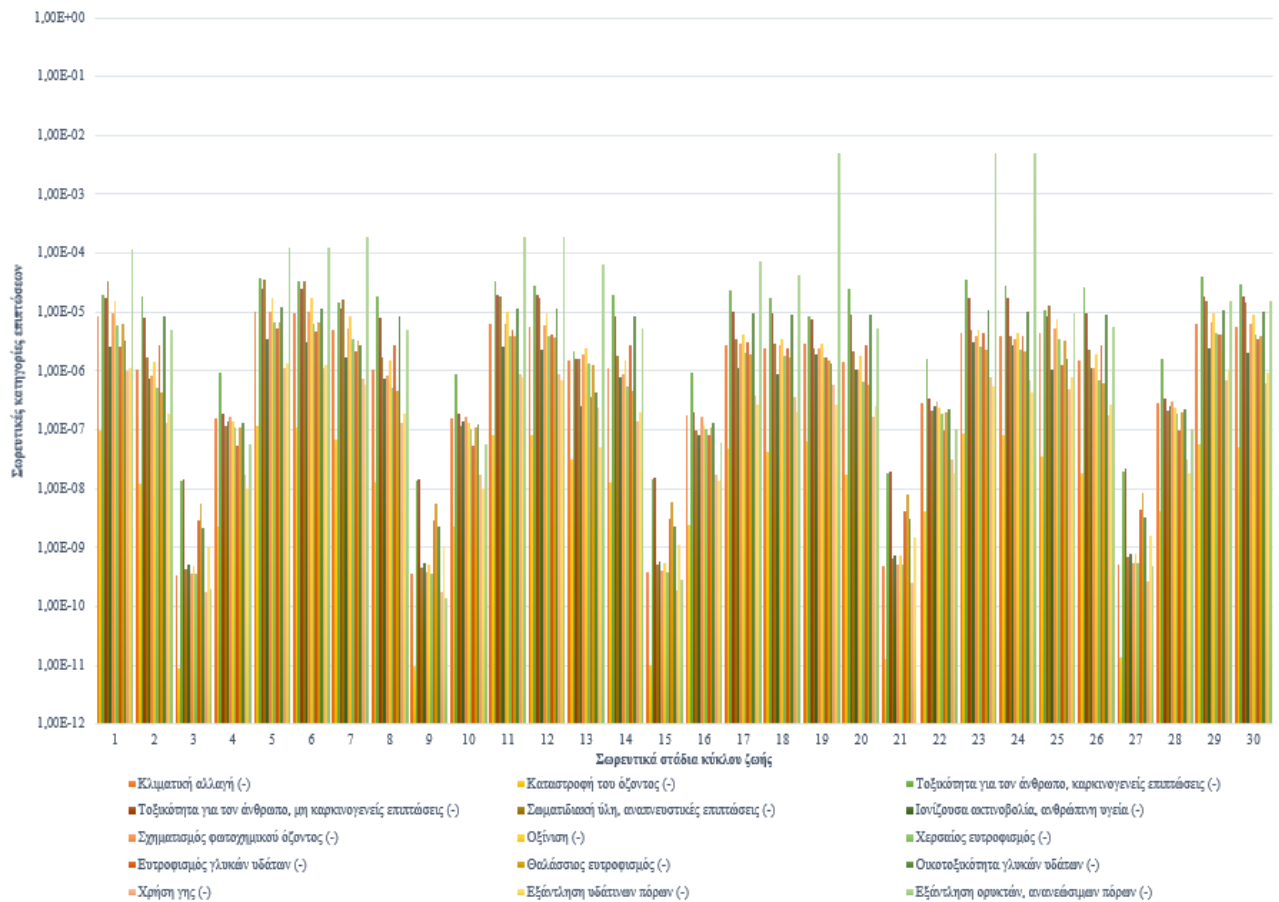
6.19.2 Με Κανονικοποίηση

Στο Διάγραμμα 6.33 απεικονίζεται η σωρευτική σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 75 σωρευτικές κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων mono-Si, multi-Si, CdTe, CIS και micro-Si με κανονικοποίηση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως το στάδιο του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση λαμβάνει τις μέγιστες τιμές και στις 5 Φ/Β τεχνολογίες, ενώ το στάδιο της χρήσης τις ελάχιστες.



Διάγραμμα 6.33: Σωρευτική σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων όλων των περιπτώσεων με κανονικοποίηση

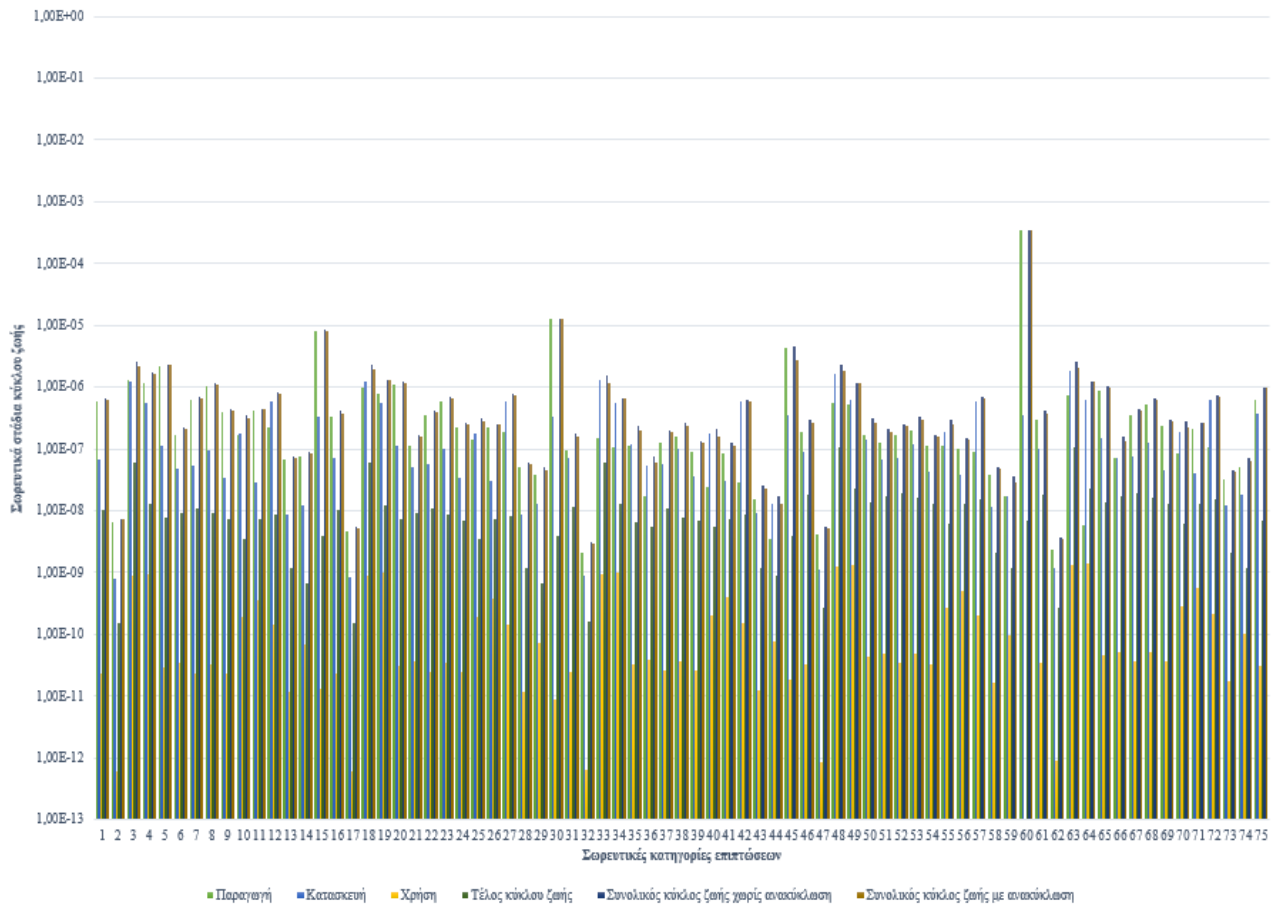
Έπειτα, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.34 στο οποίο παρουσιάζεται η σωρευτική σύγκριση των 15 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 30 σωρευτικά στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων mono-Si, multi-Si, CdTe, CIS και micro-Si με κανονικοποίηση, στο οποίο παρατηρείται πως η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-) κατέχει τις μέγιστες τιμές στις 4 Φ/Β τεχνολογίες mono-Si, multi-Si, CdTe και CIS, ενώ η τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (-) στη Φ/Β τεχνολογία micro-Si. Αντιθέτως, η κατηγορία επίπτωσης της καταστροφής του όζοντος (-) κατέχει τις ελάχιστες τιμές στις 4 Φ/Β τεχνολογίες mono-Si, multi-Si, CdTe και micro-Si, ενώ η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (-) στη Φ/Β τεχνολογία CIS, η οποία δεν διακρίνεται λόγω λογαριθμικής κλίμακας.



Διάγραμμα 6.34: Σωρευτική σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής όλων των περιπτώσεων με κανονικοποίηση

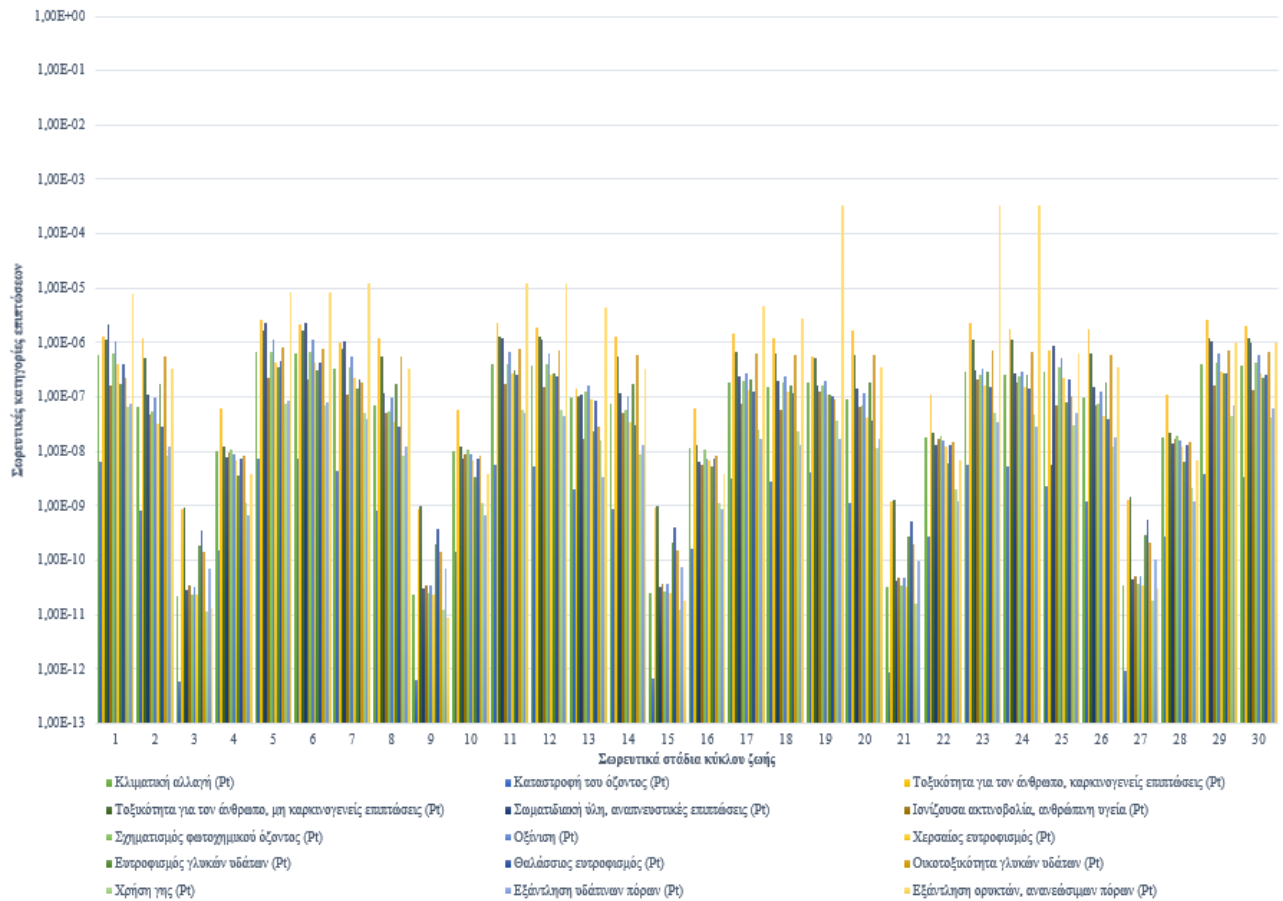
6.19.3 Με Στάθμιση

Στο Διάγραμμα 6.35 απεικονίζεται η σωρευτική σύγκριση των 6 σταδίων κύκλου ζωής σχετικά με τις 75 σωρευτικές κατηγορίες επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων mono-Si, multi-Si, CdTe, CIS και micro-Si με στάθμιση, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως το στάδιο του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση λαμβάνει τις μέγιστες τιμές και στις 5 Φ/Β τεχνολογίες, ενώ το στάδιο της χρήσης τις ελάχιστες.



Διάγραμμα 6.35: Σωρευτική σύγκριση σταδίων κύκλου ζωής ανά κατηγορίες επιπτώσεων όλων των περιπτώσεων με στάθμιση

Ύστερα, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.36 στο οποίο παρουσιάζεται η σωρευτική σύγκριση των 15 κατηγοριών επιπτώσεων αναφορικά με τα 30 σωρευτικά στάδια κύκλου ζωής των Φ/Β πανέλων mono-Si, multi-Si, CdTe, CIS και micro-Si με στάθμιση, στην οποία παρατηρείται πως η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt) κατέχει τις μέγιστες τιμές στις 4 Φ/Β τεχνολογίες mono-Si, multi-Si, CdTe και CIS, ενώ η τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt) στη Φ/Β τεχνολογία micro-Si. Αντιθέτως, η κατηγορία επίπτωσης της καταστροφής του όζοντος (Pt) κατέχει τις ελάχιστες τιμές στις 4 Φ/Β τεχνολογίες mono-Si, multi-Si, CdTe και micro-Si, ενώ η εξάντληση ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων (Pt) στη Φ/Β τεχνολογία CIS, η οποία δεν διακρίνεται λόγω λογαριθμικής κλίμακας.



Διάγραμμα 6.36: Σταθμιαστή σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων ανά στάδια κύκλου ζωής όλων των περιπτώσεων με στάθμιση

6.20 Πεδίο Εφαρμογής Δεύτερου Σεναρίου

6.20.1 Περιγραφή Συστήματος

Το σύστημα του δεύτερου σεναρίου βασίζεται σε δεδομένα του δικτύου Παγκόσμιας Πρόσβασης Δεδομένων AKZ (Global LCA Data Access, GLAD), τα οποία έχουν ενσωματωθεί σε λογισμικό AKZ και έχουν εξαχθεί αποτελέσματα. Το μοντέλο προσομοίωσης αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 1 kWh (3,6 MJ) από Φ/Β σε εγκατάσταση από 1 έως 60 kV στην Ελλάδα μεταξύ των ετών 2011 και 2016. Ακόμη, στηρίζεται σε μείγμα 6 Φ/Β τεχνολογιών, δηλαδή mono-Si, poly-Si, CdTe, CIGS, a-Si και ribbon-Si με αντίστοιχα μέσα παγκόσμια μερίδια 47,7 %, 38,3 %, 6,4 %, 1,0 %, 5,1 % και 1,5 %. Το σύνολο των δεδομένων καλύπτει τα στάδια της παραγωγής, της κατασκευής και της χρήσης κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού των Φ/Β πανέλων. Οι χρόνοι λειτουργίας τους θεωρούνται 20 έτη, ενώ οι αποδόσεις τους διαχωρίζονται ανάλογα της τεχνολογίας τους, δηλαδή mono-Si 14 %, poly-Si 13,2 %, CdTe 9 %, CIGS 11 %, a-Si 5,5 % και ribbon-Si 11, 2 %. Η απόδοση του συστήματος λαμβάνεται υπόψη με 75 % για εγκατάσταση σε κεκλιμένη στέγη και 80 % για εγκατάσταση

στο έδαφος. Το μερίδιο της εγκατάστασης σε κεκλιμένη στέγη είναι 90 %. Θεωρείται ότι η συναρμολόγηση των Φ/Β πινέλων πραγματοποιείται στη Γερμανία.

Η απογραφή βασίζεται σε βιομηχανικά και βιβλιογραφικά δεδομένα, όπου απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια μέσης τάσης από Φ/Β. Η μοντελοποίηση του μείγματος κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει τις απώλειες μετάδοσης / διανομής και την ίδια χρήση από τους παραγωγούς ενέργειας. Ακόμη, λαμβάνεται υπόψη ο εφοδιασμός των ενεργειακών φορέων, αλλά και οι διαδικασίες εξόρυξης / παραγωγής, επεξεργασίας και μεταφοράς των αλυσίδων εφοδιασμού αυτών.

6.20.2 Δεδομένα Εισόδου και Εξόδου

Στον Πίνακα 6.28 παρουσιάζονται τα ενδεικτικά δεδομένα εισόδου του εν λόγω συστήματος.

Πίνακας 6.28: Ενδεικτικά δεδομένα εισόδου υπό εξέταση συστήματος

Ενδεικτικά δεδομένα εισόδου	Τιμές (Μονάδες μέτρησης)
Αέρας	$2,77 \cdot 10^{-1}$ (kg)
Sb*	$8,91 \cdot 10^{-13}$ (kg)
BaSO ₄ *	$1,85 \cdot 10^{-8}$ (kg)
Al ₂ O ₃ *	$2,08 \cdot 10^{-3}$ (kg)
CaCO ₃ *	$1,63 \cdot 10^{-3}$ (kg)
C	$8,46 \cdot 10^{-12}$ (kg)
CO ₂	$4,02 \cdot 10^{-3}$ (kg)
Cu	$4,00 \cdot 10^{-4}$ (kg)
Pb	$6,30 \cdot 10^{-5}$ (kg)
Mn*	$2,51 \cdot 10^{-5}$ (kg)
Hg*	$1,49 \cdot 10^{-14}$ (kg)
Mo	$6,59 \cdot 10^{-8}$ (kg)
Ni	$6,44 \cdot 10^{-8}$ (kg)
P	$8,75 \cdot 10^{-7}$ (kg)
Πρωτογενής ενέργεια από ηλιακή ενέργεια	$27,01 \cdot 10^0$ (MJ)
Άμμος χαλαζία	$4,00 \cdot 10^{-3}$ (kg)
Έδαφος	$1,80 \cdot 10^{-3}$ (kg)
Si	$9,16 \cdot 10^{-8}$ (kg)
Ag	$7,40 \cdot 10^{-7}$ (kg)
Sn	$9,69 \cdot 10^{-9}$ (kg)
U*	$8,40 \cdot 10^{-2}$ (MJ)
Zn	$3,30 \cdot 10^{-4}$ (kg)

* Όπου Sb (antimony): αντιμόνιο, BaSO₄ (barite): βαρίτης, Al₂O₃ (bauxite): βωξίτης, CaCO₃ (calcium carbonate): ανθρακικό ασβέστιο, Mn (manganese): μαγγάνιο, Hg (mercury): υδράργυρος, U (uranium): ουράνιο

Στον Πίνακα 6.29 διακρίνονται τα ενδεικτικά δεδομένα εξόδου του εν λόγω συστήματος.

Πίνακας 6.29: Ενδεικτικά δεδομένα εξόδου υπό εξέταση συστήματος

Ενδεικτικά δεδομένα εξόδου	Τιμές (Μονάδες μέτρησης)
Al, εκπομπές στον αέρα	$1,27 \cdot 10^{-7}$ (kg)
Al, εκπομπές στα μη γεωργικά εδάφη	$1,51 \cdot 10^{-9}$ (kg)
Al, εκπομπές στα γλυκά ύδατα	$1,11 \cdot 10^{-7}$ (kg)
Al, εκπομπές στα θαλάσσια ύδατα	$4,98 \cdot 10^{-12}$ (kg)
C ₆ H ₆ *, εκπομπές στον αέρα	$4,01 \cdot 10^{-8}$ (kg)
C ₆ H ₆ , εκπομπές στα γλυκά ύδατα	$1,53 \cdot 10^{-8}$ (kg)
C ₆ H ₆ , εκπομπές στα θαλάσσια ύδατα	$3,68 \cdot 10^{-9}$ (kg)
Ca*, εκπομπές στα μη γεωργικά εδάφη	$5,45 \cdot 10^{-7}$ (kg)
Ca, εκπομπές στα γλυκά ύδατα	$1,00 \cdot 10^{-4}$ (kg)
Ca, εκπομπές στα θαλάσσια ύδατα	$1,64 \cdot 10^{-11}$ (kg)
CO ₂	$3,31 \cdot 10^{-2}$ (kg)
Cu, εκπομπές στον αέρα	$7,52 \cdot 10^{-8}$ (kg)
Cu, εκπομπές στα γεωργικά εδάφη	$4,79 \cdot 10^{-9}$ (kg)
Cu, εκπομπές στα μη γεωργικά εδάφη	$2,34 \cdot 10^{-10}$ (kg)
Cu, εκπομπές στα γλυκά ύδατα	$1,80 \cdot 10^{-8}$ (kg)
Ηλεκτρική ενέργεια	$3,60 \cdot 10^0$ (MJ)
CH ₄	$7,28 \cdot 10^{-5}$ (kg)
Απόβλητα	$2,27 \cdot 10^{-2}$ (MJ)
C ₆ H ₅ CH ₃ *, εκπομπές στον αέρα	$6,10 \cdot 10^{-8}$ (kg)
C ₆ H ₅ CH ₃ , εκπομπές στα γλυκά ύδατα	$9,25 \cdot 10^{-9}$ (kg)
C ₆ H ₅ CH ₃ , εκπομπές σε θαλάσσια ύδατα	$2,24 \cdot 10^{-9}$ (kg)
ZnO	$1,09 \cdot 10^{-18}$ (kg)

* Όπου C₆H₆ (benzene): βενζόλιο, Ca (calcium): ασβέστιο, C₆H₅CH₃ (toluene): τολουόλιο

6.21 Αποτελέσματα

6.21.1 Πρώτη Μέθοδος

Τα αποτελέσματα των κατηγοριών επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων του μείγματος τεχνολογιών mono-Si, poly-Si, CdTe, CIGS, a-Si και ribbon-Si στα στάδια παραγωγής, κατασκευής και χρήσης έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού openLCA 2.0.0, της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2 LCIA methods και πιο συγκεκριμένα της μεθόδου eco-indicator 99 (H, A). Αυτά διακρίνονται στον Πίνακα 6.30.

Πίνακας 6.30: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων ανά τομείς πρώτης μεθόδου

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Τομείς	Τιμές
Κλιματική αλλαγή (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$7,67 \cdot 10^{-6}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$6,73 \cdot 10^{-7}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$1,78 \cdot 10^{-4}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$2,20 \cdot 10^{-3}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$1,11 \cdot 10^{-5}$
Οξίνιση και ευτροφισμός (Pt)	Ποιότητα οικοσυστημάτων	$1,67 \cdot 10^{-4}$
Οικοτοξικότητα (Pt)	Ποιότητα οικοσυστημάτων	$4,11 \cdot 10^{-4}$

6.21.2 Δεύτερη Μέθοδος

Τα αποτελέσματα των κατηγοριών επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων του μείγματος τεχνολογιών mono-Si, poly-Si, CdTe, CIGS, a-Si και ribbon-Si στα στάδια παραγωγής, κατασκευής και χρήσης έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού openLCA 2.0.0, της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2 LCIA methods και πιο συγκεκριμένα της μεθόδου IMPACT 2002+ (Endpoint). Αυτά αναγράφονται στον Πίνακα 6.31.

Πίνακας 6.31: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων ανά τομείς δεύτερης μεθόδου

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Τομείς	Τιμές
Κλιματική αλλαγή (Pt)	Ανθρώπινη υγεία, ποιότητα οικοσυστημάτων	$7,07 \cdot 10^{-8}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$3,90 \cdot 10^{-9}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$6,66 \cdot 10^{-7}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$1,21 \cdot 10^{-5}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$6,00 \cdot 10^{-8}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$7,76 \cdot 10^{-9}$
Χερσαία οξίνιση (Pt)	Ποιότητα οικοσυστημάτων	$1,58 \cdot 10^{-7}$
Υδάτινη οικοτοξικότητα (Pt)	Ποιότητα οικοσυστημάτων	$2,39 \cdot 10^{-9}$
Χερσαία οικοτοξικότητα (Pt)	Ποιότητα οικοσυστημάτων	$3,68 \cdot 10^{-7}$

6.21.3 Τρίτη Μέθοδος

Τα αποτελέσματα των κατηγοριών επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων του μείγματος τεχνολογιών mono-Si, poly-Si, CdTe, CIGS, a-Si και ribbon-Si στα στάδια παραγωγής, κατασκευής και χρήσης έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού openLCA 2.0.0, της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2 LCIA methods και πιο συγκεκριμένα της μεθόδου ReCiPe Endpoint (E, A). Αυτά περιέχονται στον Πίνακα 6.32.

Πίνακας 6.32: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων ανά τομείς τρίτης μεθόδου

Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Τομείς	Τιμές
Κλιματική αλλαγή (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$2,37 \cdot 10^{-5}$
Κλιματική αλλαγή (Pt)	Ποιότητα οικοσυστημάτων	$1,94 \cdot 10^{-5}$
Καταστροφή του όζοντος (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$4,22 \cdot 10^{-7}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$1,11 \cdot 10^{-2}$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$7,28 \cdot 10^{-4}$
Ιονίζουσα ακτινοβολία (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$3,24 \cdot 10^{-6}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (Pt)	Ανθρώπινη υγεία	$5,49 \cdot 10^{-8}$
Χερσαία οξίνιση (Pt)	Ποιότητα οικοσυστημάτων	$3,03 \cdot 10^{-5}$
Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Pt)	Ποιότητα οικοσυστημάτων	$1,08 \cdot 10^{-8}$
Θαλάσσια οικοτοξικότητα (Pt)	Ποιότητα οικοσυστημάτων	$5,53 \cdot 10^{-7}$
Χερσαία οικοτοξικότητα (Pt)	Ποιότητα οικοσυστημάτων	$1,63 \cdot 10^{-5}$

6.21.4 Τέταρτη Μέθοδος

Τα αποτελέσματα των κατηγοριών επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων του μείγματος τεχνολογιών mono-Si, poly-Si, CdTe, CIGS, a-Si και ribbon-Si στα στάδια παραγωγής, κατασκευής και χρήσης έχουν υπολογιστεί μέσω του λογισμικού openLCA 2.0.0, της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2 LCIA methods και πιο συγκεκριμένα της μεθόδου TRACI. Αυτά περιλαμβάνονται στον Πίνακα 6.33.

Πίνακας 6.33: Αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων ανά τομείς τέταρτης μεθόδου

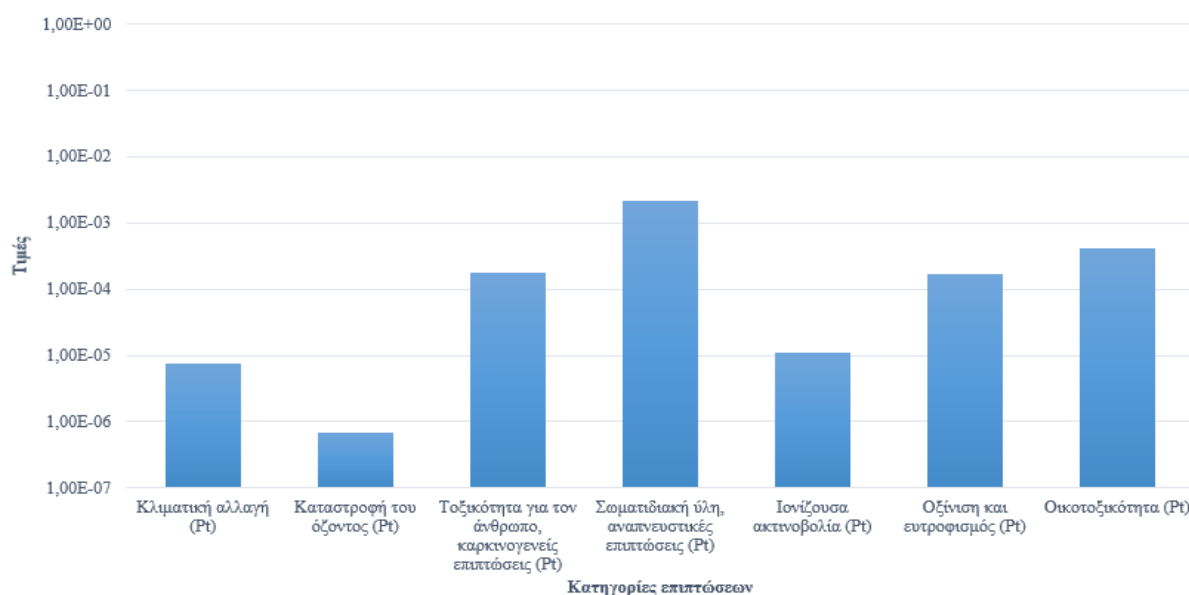
Κατηγορίες επιπτώσεων (Μονάδες μέτρησης)	Τομείς	Τιμές
Κλιματική αλλαγή (kg CO ₂)	Περιβάλλον	$1,16 \cdot 10^{-3}$
Καταστροφή του όζοντος (kg CFC-11)	Περιβάλλον	$1,54 \cdot 10^{-8}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις (kg C ₆ H ₆)	Ανθρώπινη υγεία	$9,48 \cdot 10^{-4}$
Τοξικότητα για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις (kg C ₆ H ₅ CH ₃)	Ανθρώπινη υγεία	$2,56 \cdot 10^0$
Σωματιδιακή ύλη, αναπνευστικές επιπτώσεις (kg PM _{2,5})	Ανθρώπινη υγεία	$3,23 \cdot 10^{-4}$
Σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος (kg NO _x)	Περιβάλλον	$9,40 \cdot 10^{-6}$
Οξίνιση (mol H ⁺)	Περιβάλλον	$7,00 \cdot 10^{-2}$
Ευτροφισμός (kg N)	Περιβάλλον	$6,14 \cdot 10^{-6}$
Οικοτοξικότητα (kg 2,4-D)	Περιβάλλον	$3,46 \cdot 10^{-3}$

6.22 Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων

6.22.1 Πρώτη Μέθοδος

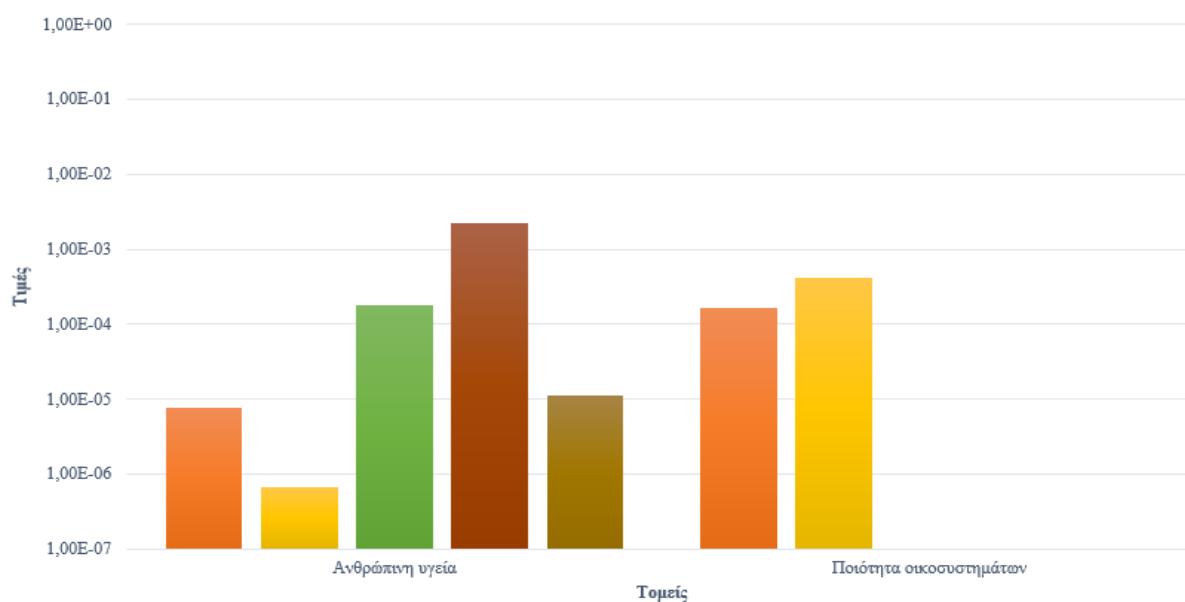
Στο Διάγραμμα 6.37 απεικονίζεται η σύγκριση των 7 κατηγοριών επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων του μείγματος τεχνολογιών mono-Si, poly-Si, CdTe, CIGS, a-Si και ribbon-Si με τη μέθοδο eco-indicator 99 (H, A), μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή

κατέχει η κατηγορία επίπτωσης της σωματιδιακής ύλης, αναπνευστικές επιπτώσεις ($2,20 \cdot 10^{-3}$ Pt), ενώ την ελάχιστη η καταστροφή του όζοντος ($6,73 \cdot 10^{-7}$ Pt).



Διάγραμμα 6.37: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων πρώτης μεθόδου

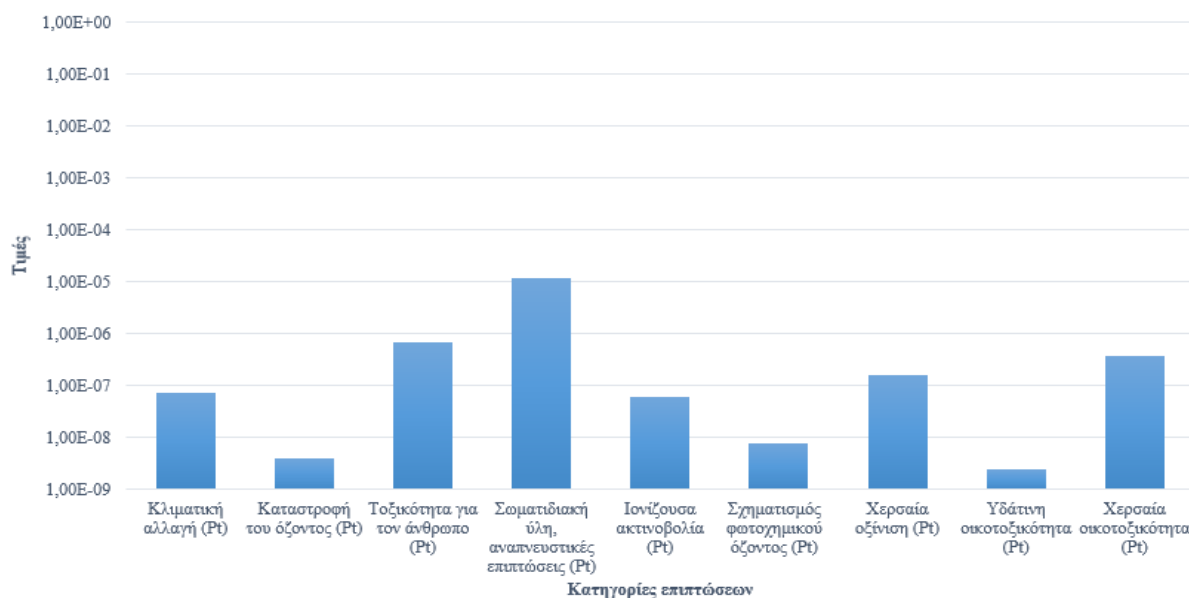
Στη συνέχεια, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.38 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 2 τομέων των Φ/Β πανέλων του μείγματος τεχνολογιών mono-Si, poly-Si, CdTe, CIGS, a-Si και ribbon-Si με τη μέθοδο eco-indicator 99 (H, A), στο οποίο παρατηρείται πως τόσο τη μέγιστη, όσο και την ελάχιστη τιμή λαμβάνει ο τομέας της ανθρώπινης υγείας.



Διάγραμμα 6.38: Σύγκριση τομέων πρώτης μεθόδου

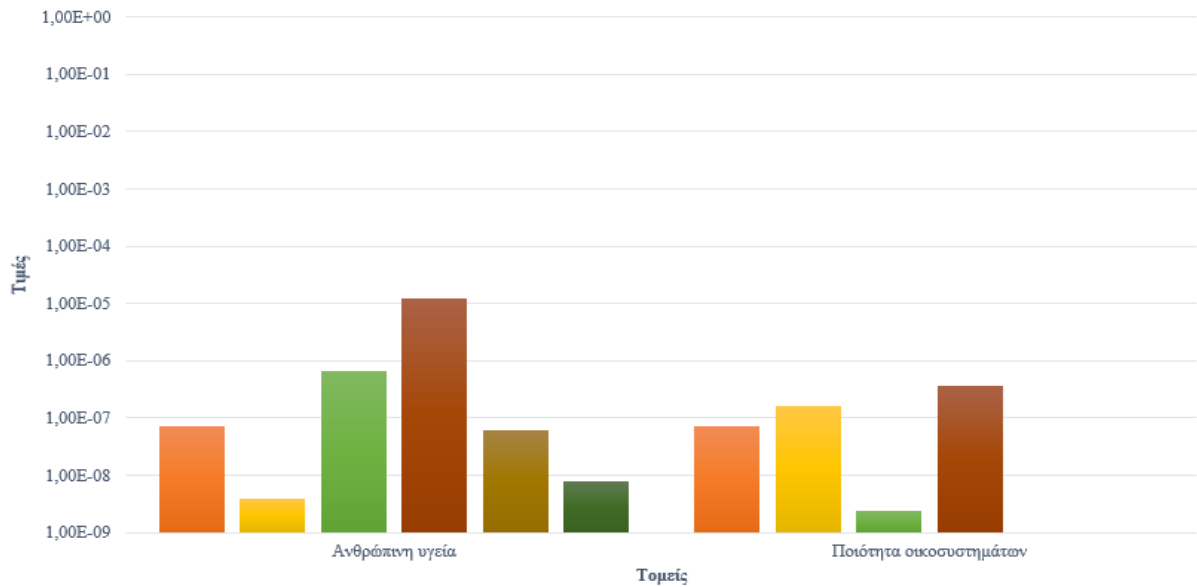
6.22.2 Δεύτερη Μέθοδος

Στο Διάγραμμα 6.39 απεικονίζεται η σύγκριση των 9 κατηγοριών επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων του μείγματος τεχνολογιών mono-Si, poly-Si, CdTe, CIGS, a-Si και ribbon-Si με τη μέθοδο IMPACT 2002+ (Endpoint), μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης της σωματιδιακής ύλης, αναπνευστικές επιπτώσεις ($1,21 \cdot 10^{-5}$ Pt), ενώ την ελάχιστη η υδάτινη οικοτοξικότητα ($2,39 \cdot 10^{-9}$ Pt).



Διάγραμμα 6.39: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων δεύτερης μεθόδου

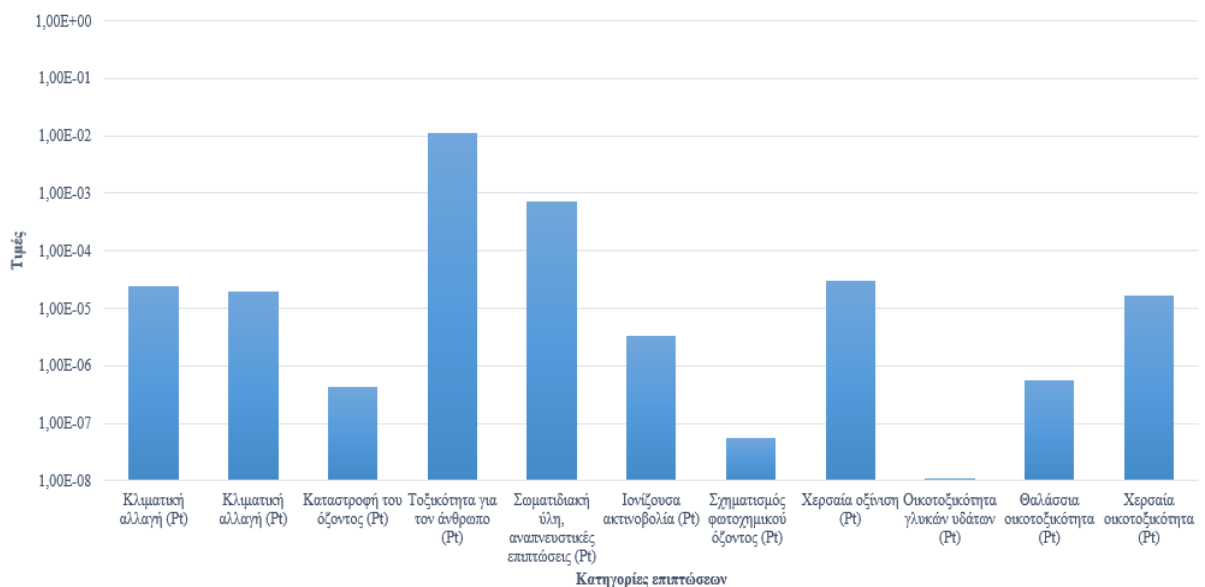
Έπειτα, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.40 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 2 τομέων των Φ/Β πανέλων του μείγματος τεχνολογιών mono-Si, poly-Si, CdTe, CIGS, a-Si και ribbon-Si με τη μέθοδο IMPACT 2002+ (Endpoint), στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει ο τομέας της ανθρώπινης υγείας, ενώ την ελάχιστη η ποιότητα οικοσυστημάτων.



Διάγραμμα 6.40: Σύγκριση τομέων δεύτερης μεθόδου

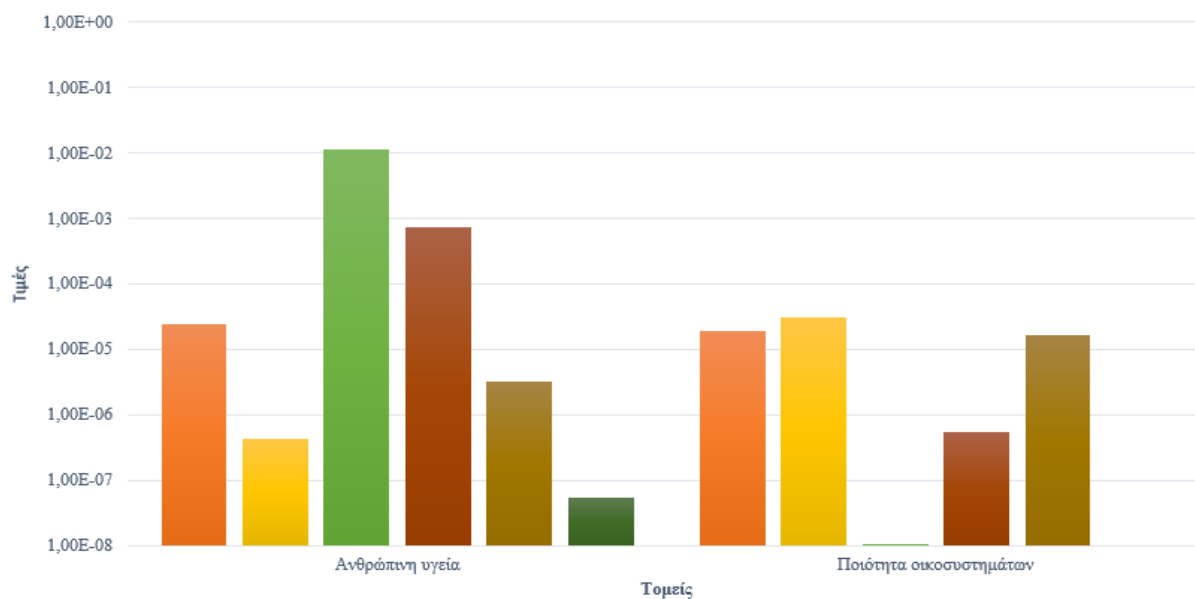
6.22.3 Τρίτη Μέθοδος

Στο Διάγραμμα 6.41 απεικονίζεται η σύγκριση των 11 κατηγοριών επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων του μείγματος τεχνολογιών mono-Si, poly-Si, CdTe, CIGS, a-Si και ribbon-Si με τη μέθοδο ReCiPe Endpoint (E, A), μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης της τοξικότητας για τον άνθρωπο ($1,11 \cdot 10^{-2}$ Pt), ενώ την ελάχιστη η οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων ($1,08 \cdot 10^{-8}$ Pt).



Διάγραμμα 6.41: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων τρίτης μεθόδου

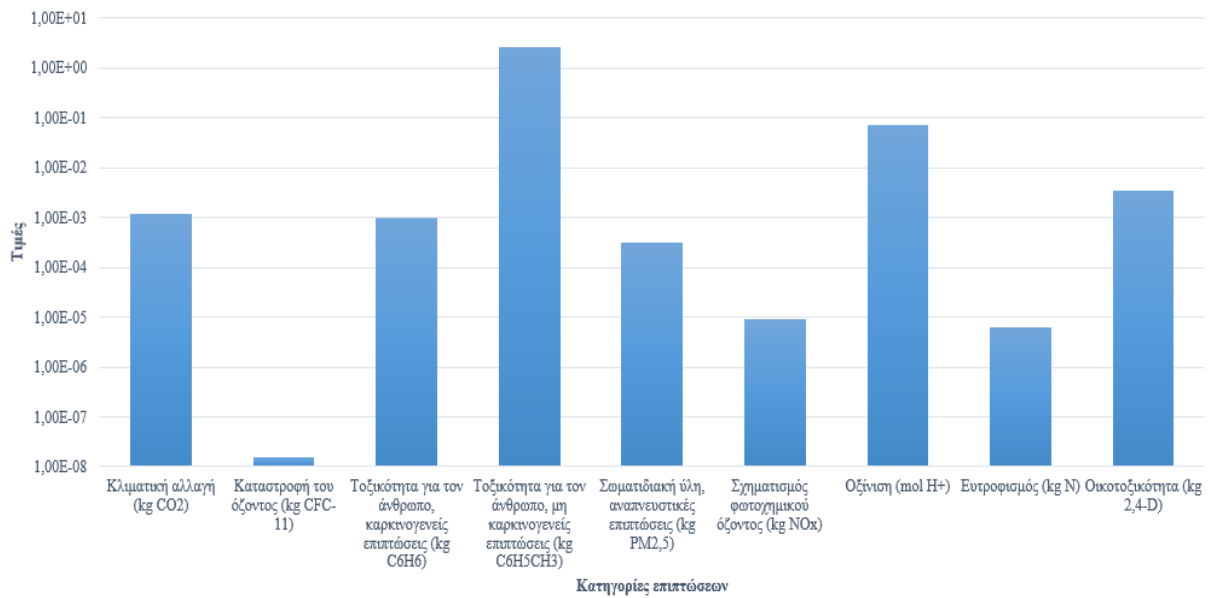
Ύστερα, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.42 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 2 τομέων των Φ/Β πανέλων του μείγματος τεχνολογιών mono-Si, poly-Si, CdTe, CIGS, a-Si και ribbon-Si με τη μέθοδο ReCiPe Endpoint (E, A), στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει ο τομέας της ανθρώπινης υγείας, ενώ την ελάχιστη η ποιότητα οικοσυστημάτων.



Διάγραμμα 6.42: Σύγκριση τομέων τρίτης μεθόδου

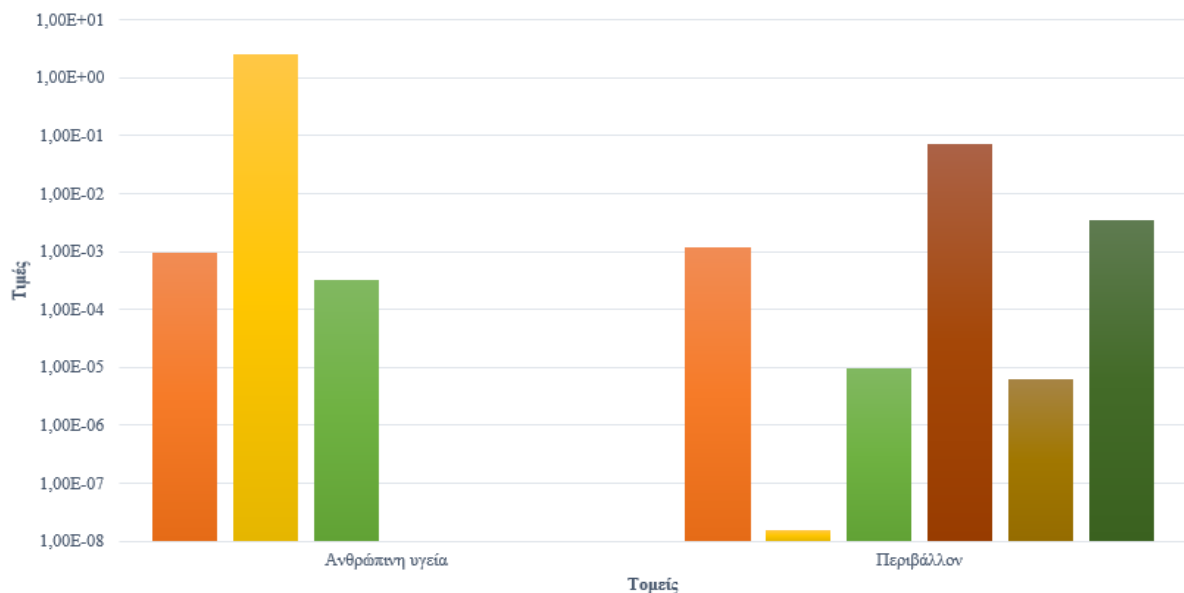
6.22.4 Τέταρτη Μέθοδος

Στο Διάγραμμα 6.43 απεικονίζεται η σύγκριση των 9 κατηγοριών επιπτώσεων των Φ/Β πανέλων του μείγματος τεχνολογιών mono-Si, poly-Si, CdTe, CIGS, a-Si και ribbon-Si με τη μέθοδο TRACI, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό πως τη μέγιστη τιμή κατέχει η κατηγορία επίπτωσης της τοξικότητας για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις ($2,56 \cdot 10^0$ kg $C_6H_5CH_3$), ενώ την ελάχιστη η καταστροφή του όζοντος ($1,54 \cdot 10^{-8}$ kg CFC-11).



Διάγραμμα 6.43: Σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων τέταρτης μεθόδου

Ακόμη, παρατίθεται το Διάγραμμα 6.44 στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση των 2 τομέων των Φ/Β πανέλων του μείγματος τεχνολογιών mono-Si, poly-Si, CdTe, CIGS, a-Si και ribbon-Si με τη μέθοδο TRACI, στο οποίο παρατηρείται πως τη μέγιστη τιμή λαμβάνει ο τομέας της ανθρώπινης υγείας, ενώ την ελάχιστη το περιβάλλον.



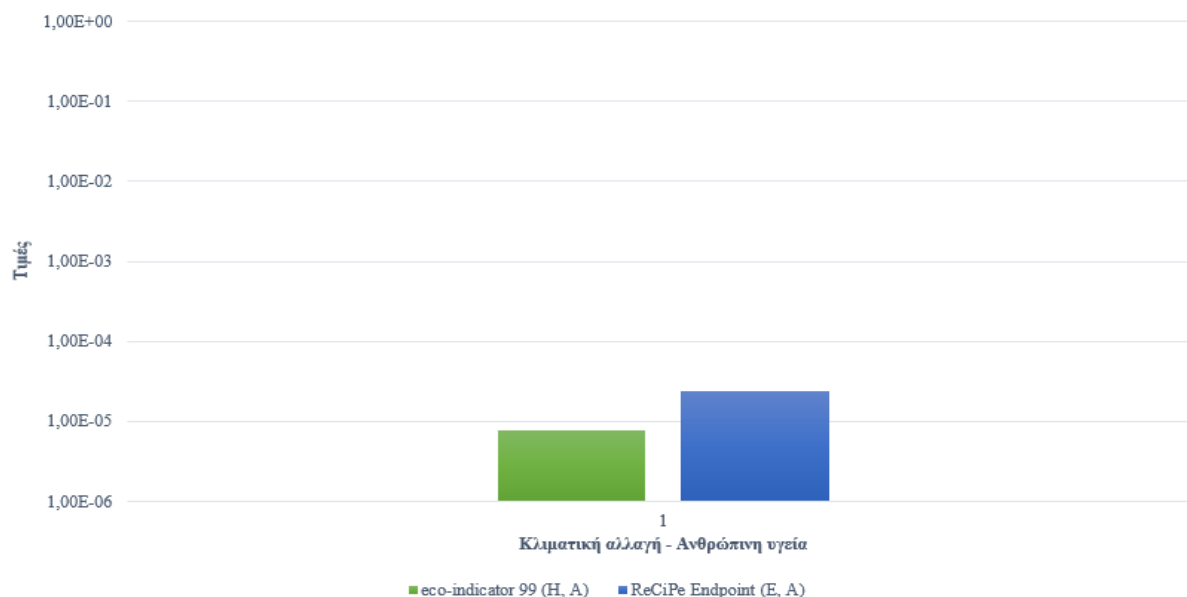
Διάγραμμα 6.44: Σύγκριση τομέων τέταρτης μεθόδου

6.23 Συγκεντρωτικές Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων

Αρχικά, όσον αφορά τις 4 μεθόδους των αποτελεσμάτων των Φ/Β πανέλων του μείγματος τεχνολογιών mono-Si, poly-Si, CdTe, CIGS, a-Si και ribbon-Si στα στάδια παραγωγής, κατασκευής

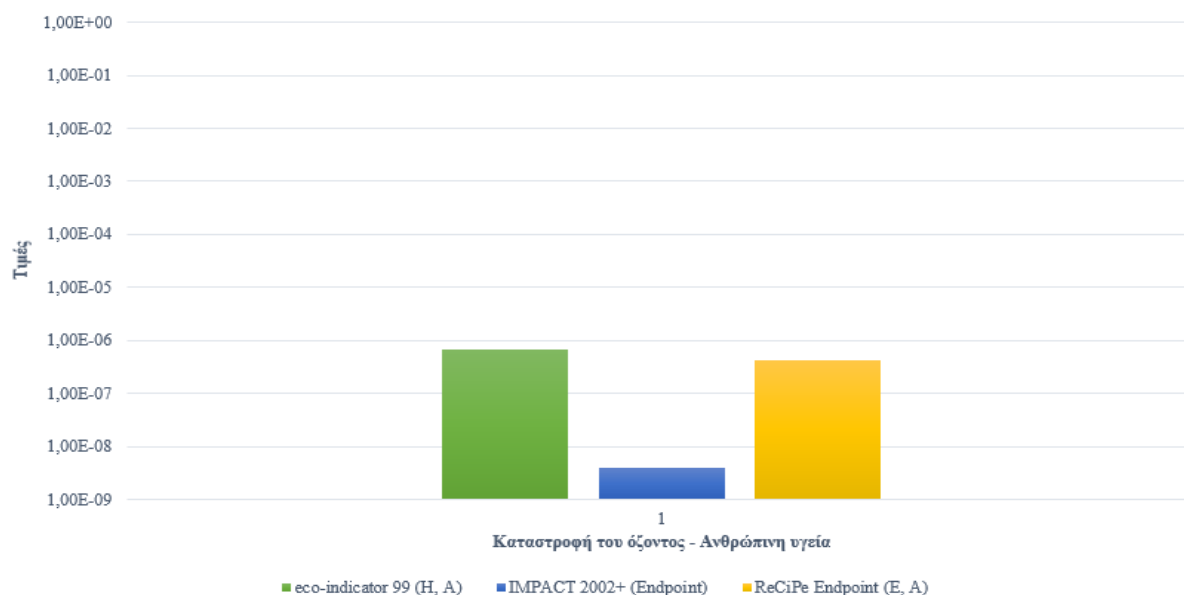
και χρήσης, μέσω του λογισμικού openLCA 2.0.0 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2 LCIA methods, παρατηρείται πως οι 4 μέθοδοι δεν υπολογίζουν ακριβώς τις ίδιες κατηγορίες επιπτώσεων, καθώς διαφέρουν και οι αντίστοιχοι τομείς.

Στο Διάγραμμα 6.45 απεικονίζεται η συσχέτιση σχετικά με την επίπτωση της κλιματικής αλλαγής στην ανθρώπινη υγεία, μέσω του οποίου γίνεται φανερό πως η τιμή της μεθόδου ReCiPe Endpoint (E, A) ($2,37 \cdot 10^{-5}$ Pt) είναι υψηλότερη της eco-indicator 99 (H, A) ($7,67 \cdot 10^{-6}$ Pt).



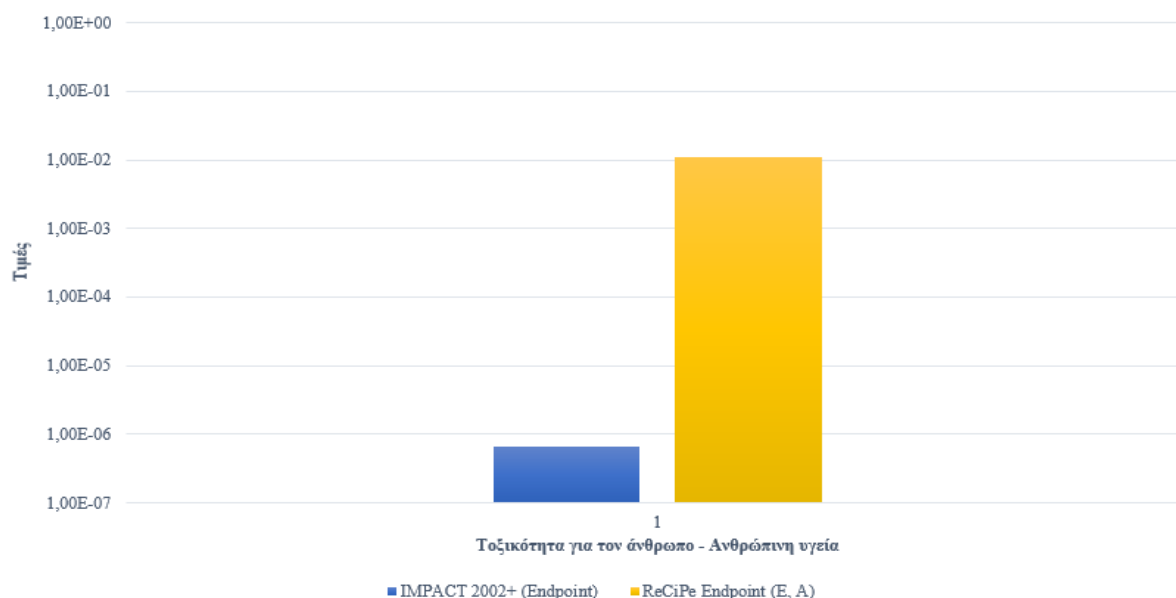
Διάγραμμα 6.45: Συσχέτιση επίπτωσης της κλιματικής αλλαγής στην ανθρώπινη υγεία

Στο Διάγραμμα 6.46 παρουσιάζεται η συσχέτιση όσον αφορά την επίπτωση της καταστροφής του όζοντος στην ανθρώπινη υγεία, στο οποίο γίνεται φανερό πως η τιμή της μεθόδου eco-indicator 99 (H, A) ($6,73 \cdot 10^{-7}$ Pt) είναι η υψηλότερη, ενώ ακολουθούν οι ReCiPe Endpoint (E, A) ($4,22 \cdot 10^{-7}$ Pt) και IMPACT 2002+ (Endpoint) ($3,90 \cdot 10^{-9}$ Pt).



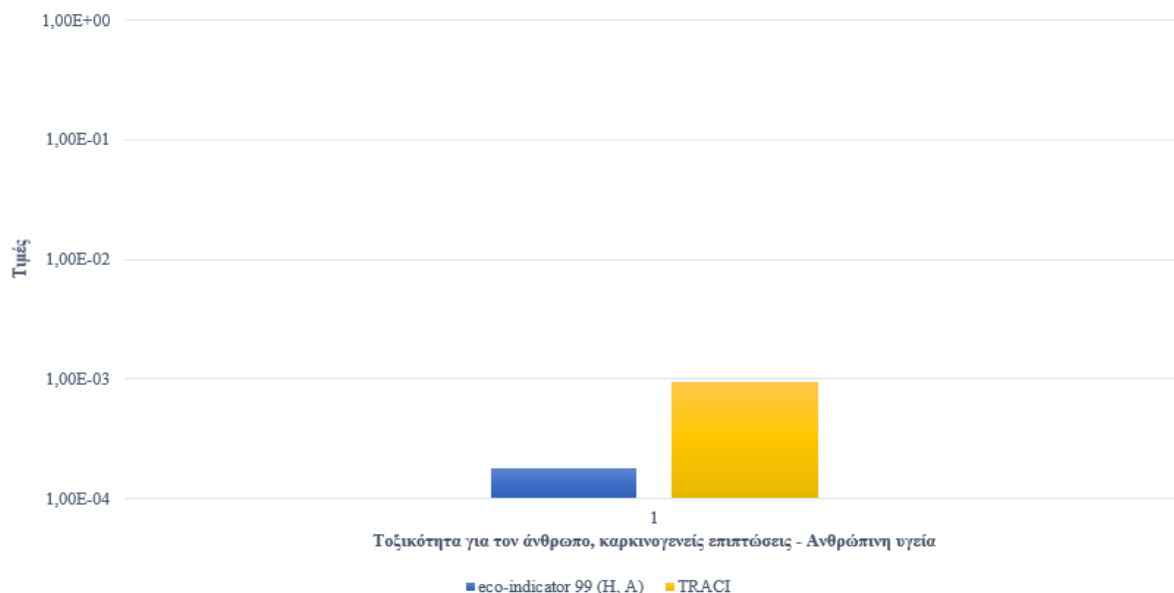
Διάγραμμα 6.46: Συσχέτιση επίπτωσης της καταστροφής του όζοντος στην ανθρώπινη υγεία

Στο Διάγραμμα 6.47 αποτυπώνεται η συσχέτιση αναφορικά με την επίπτωση της τοξικότητας για τον άνθρωπο στην ανθρώπινη υγεία, μέσω του οποίου παρατηρείται ότι η τιμή της μεθόδου ReCiPe Endpoint (E, A) ($1,11 \cdot 10^{-2}$ Pt) είναι πολύ υψηλότερη της IMPACT 2002+ (Endpoint) ($6,66 \cdot 10^{-7}$ Pt).



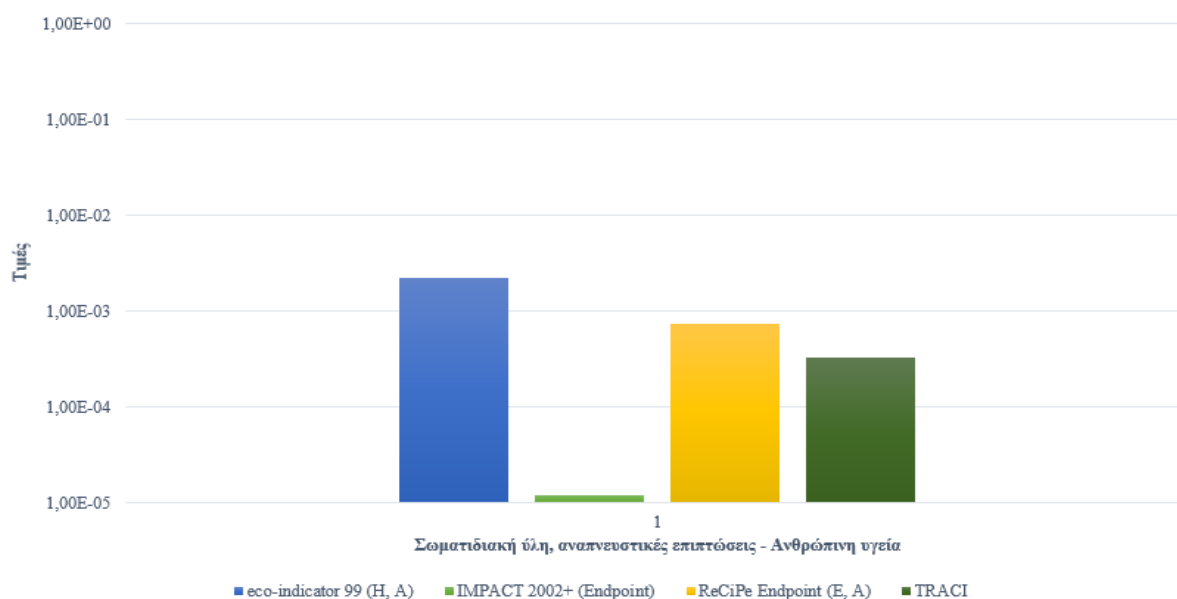
Διάγραμμα 6.47: Συσχέτιση επίπτωσης της τοξικότητας για τον άνθρωπο στην ανθρώπινη υγεία

Στο Διάγραμμα 6.48 εμφανίζεται η συσχέτιση όσον αφορά την επίπτωση της τοξικότητας για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, στο οποίο παρατηρείται ότι η τιμή της μεθόδου TRACI ($9,48 \cdot 10^{-4}$ kg C₆H₆) είναι υψηλότερη της eco-indicator 99 (H, A) ($1,78 \cdot 10^{-4}$ Pt).



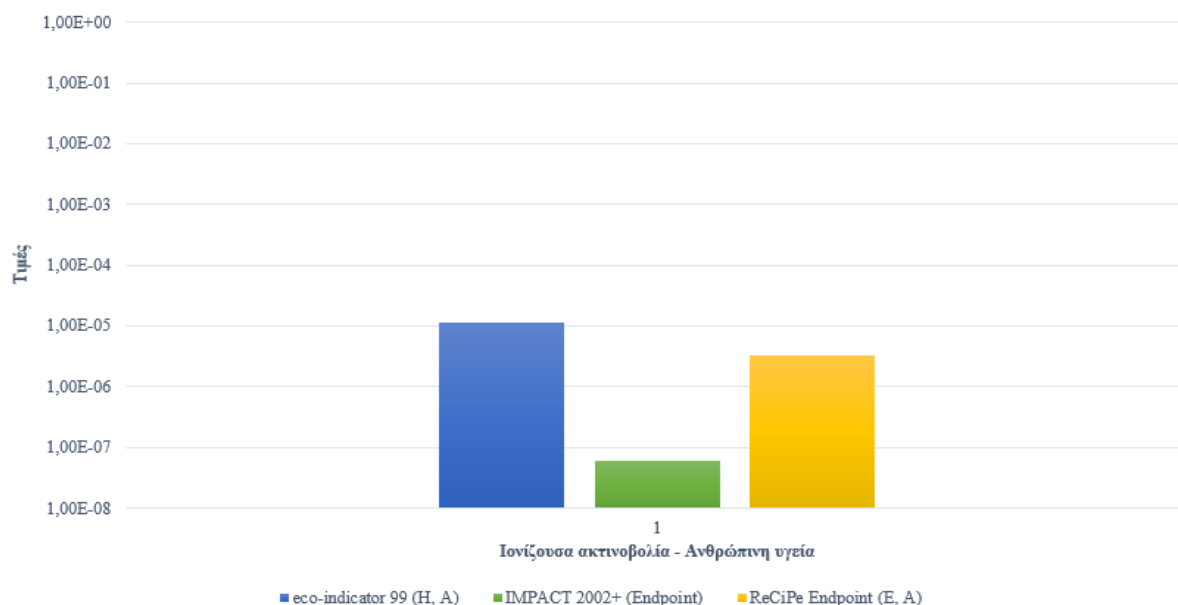
Διάγραμμα 6.48: Συσχέτιση επίπτωσης της τοξικότητας για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Στο Διάγραμμα 6.49 παρουσιάζεται η συσχέτιση σχετικά με την επίπτωση της σωματιδιακής ύλης, αναπνευστικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, μέσω του οποίου ερμηνεύεται ότι η τιμή της μεθόδου eco-indicator 99 (H, A) ($2,20 \cdot 10^{-3}$ Pt) είναι η υψηλότερη, ενώ έπονται οι ReCiPe Endpoint (E, A) ($7,28 \cdot 10^{-4}$ Pt), TRACI ($3,23 \cdot 10^{-4}$ kg PM_{2,5}) και IMPACT 2002+ (Endpoint) ($1,21 \cdot 10^{-5}$ Pt).



Διάγραμμα 6.49: Συσχέτιση επίπτωσης της σωματιδιακής ύλης, αναπνευστικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Στο Διάγραμμα 6.50 απεικονίζεται η συσχέτιση αναφορικά με την επίπτωση της ιονίζουσας ακτινοβολίας στην ανθρώπινη υγεία, στο οποίο ερμηνεύεται ότι η τιμή της μεθόδου eco-indicator 99 (H, A) ($1,11 \cdot 10^{-5}$ Pt) είναι η υψηλότερη, ενώ ακολουθούν οι ReCiPe Endpoint (E, A) ($3,24 \cdot 10^{-6}$ Pt) και IMPACT 2002+ (Endpoint) ($6,00 \cdot 10^{-8}$ Pt).



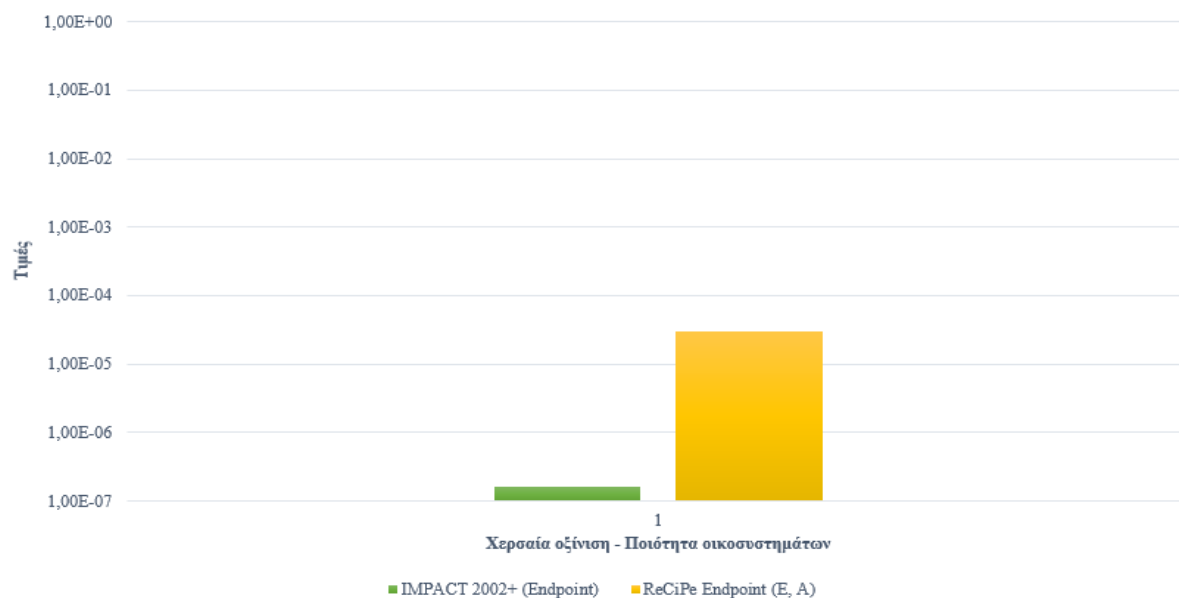
Διάγραμμα 6.50: Συσχέτιση επίπτωσης της ιονίζουσας ακτινοβολίας στην ανθρώπινη υγεία

Στο Διάγραμμα 6.51 αποτυπώνεται η συσχέτιση όσον αφορά την επίπτωση του σχηματισμού φωτοχημικού όζοντος στην ανθρώπινη υγεία, μέσω του οποίου γίνεται φανερό πως η τιμή της μεθόδου ReCiPe Endpoint (E, A) ($5,49 \cdot 10^{-8}$ Pt) είναι υψηλότερη της IMPACT 2002+ (Endpoint) ($7,76 \cdot 10^{-9}$ Pt).



Διάγραμμα 6.51: Συσχέτιση επίπτωσης του σχηματισμού φωτοχημικού όζοντος στην ανθρώπινη υγεία

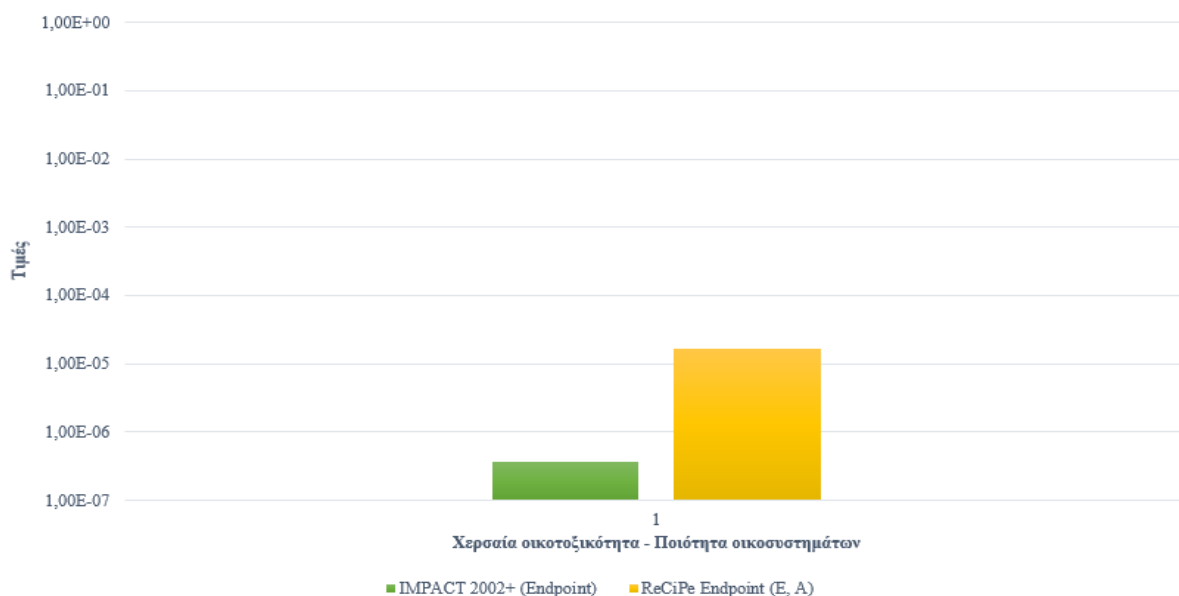
Στο Διάγραμμα 6.52 παρουσιάζεται η συσχέτιση σχετικά με την επίπτωση της χερσαίας οξίνισης στην ποιότητα οικοσυστημάτων, στο οποίο παρατηρείται ότι η τιμή της μεθόδου ReCiPe Endpoint (E, A) ($3,03 \cdot 10^{-5}$ Pt) είναι αρκετά υψηλότερη της IMPACT 2002+ (Endpoint) ($1,58 \cdot 10^{-7}$ Pt).



Διάγραμμα 6.52: Συσχέτιση επίπτωσης της χερσαίας οξίνισης στην ποιότητα οικοσυστημάτων

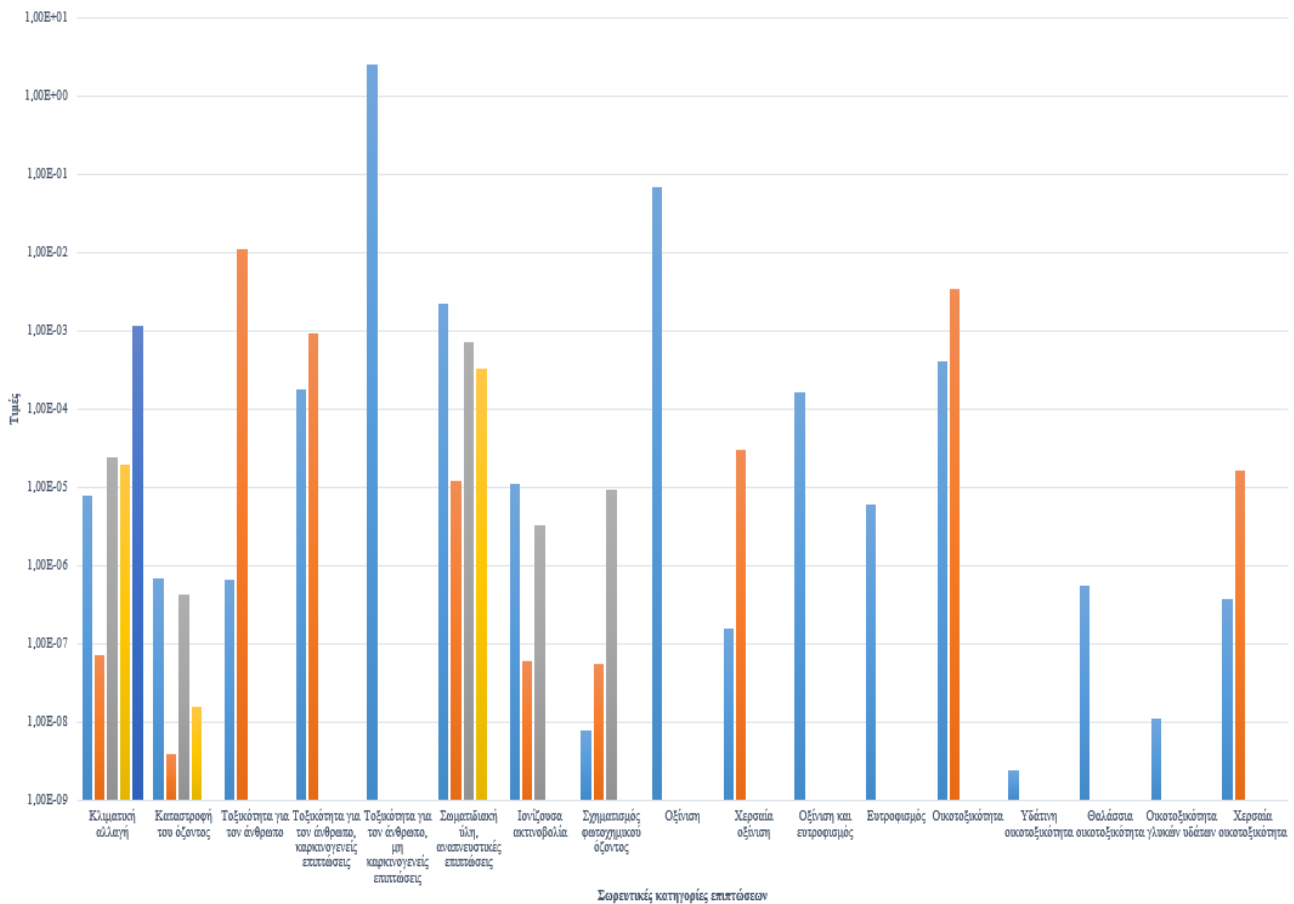
Στο Διάγραμμα 6.53 εμφανίζεται η συσχέτιση αναφορικά με την επίπτωση της χερσαίας οικοτοξικότητας στην ποιότητα οικοσυστημάτων, μέσω του οποίου ερμηνεύεται ότι η τιμή της

μεθόδου ReCiPe Endpoint (E, A) ($1,63 \cdot 10^{-5}$ Pt) είναι αρκετά υψηλότερη της IMPACT 2002+ (Endpoint) ($3,68 \cdot 10^{-7}$ Pt).



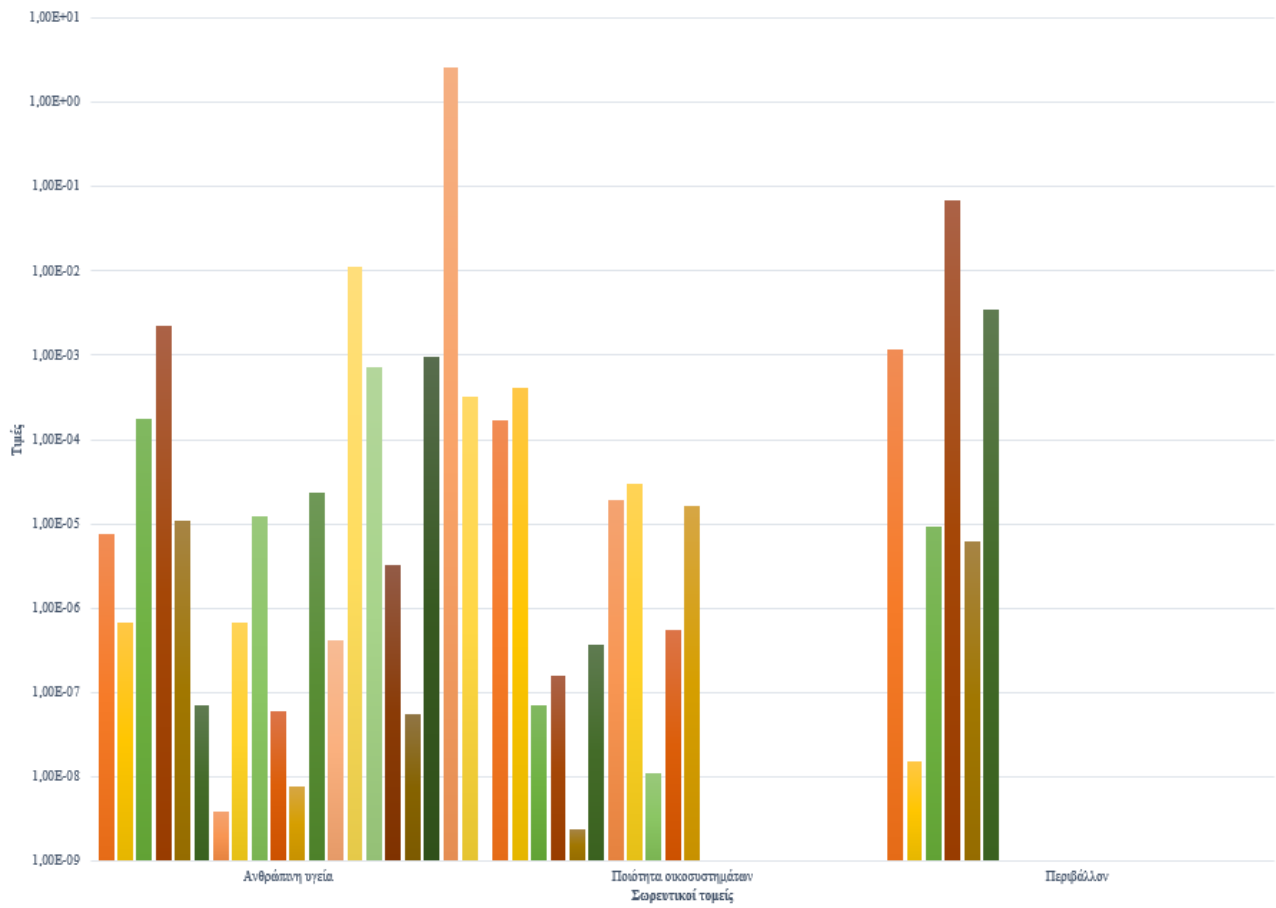
Διάγραμμα 6.53: Συσχέτιση επίπτωσης της χερσαίας οικοτοξικότητας στην ποιότητα οικοσυστημάτων

Επιπλέον, στο Διάγραμμα 6.54 παρουσιάζεται η σωρευτική σύγκριση των 17 κατηγοριών επιπτώσεων σχετικά και με τις 4 μεθόδους, όπου παρατηρείται μέσω εποπτείας ότι η κατηγορία επίπτωσης της τοξικότητας για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις ($2,56 \cdot 10^0$ kg $C_6H_5CH_3$) λαμβάνει τη μέγιστη τιμή μέσω της μεθόδου TRACI, ενώ η υδάτινη οικοτοξικότητα ($2,39 \cdot 10^{-9}$ Pt) κατέχει την ελάχιστη μέσω της IMPACT 2002+ (Endpoint).



Διάγραμμα 6.54: Σωρευτική σύγκριση κατηγοριών επιπτώσεων όλων των μεθόδων

Τέλος, στο Διάγραμμα 6.55 αποτυπώνεται η σωρευτική σύγκριση των 3 τομέων αναφορικά και με τις 4 μεθόδους, μέσω του οποίου γίνεται αντιληπτό, ότι ο τομέας της ανθρώπινης υγείας κατέχει τη μέγιστη τιμή μέσω της μεθόδου TRACI, ενώ η ποιότητα οικοσυστημάτων λαμβάνει την ελάχιστη μέσω της IMPACT 2002+ (Endpoint).



Διάγραμμα 6.55: Σωρευτική σύγκριση τομέων όλων των μεθόδων

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά το πέρας της συγγραφής της διπλωματικής εργασίας «αξιολόγηση των επιπτώσεων των φωτοβολταϊκών πανέλων με τεχνικές ανάλυσης κύκλου ζωής», οι αναγνώστες είναι σε θέση να:

- ✓ Αφομοιώσουν τις θεμελιώδεις έννοιες της ενέργειας, των ΑΠΕ και της ηλιακής ενέργειας.
- ✓ Γνωρίζουν τις σημαντικές παραμέτρους των Φ/Β, μέσω της εξήγησης του Φ/Β συστήματος, κελιού, πανέλου και συστοιχίας.
- ✓ Συνειδητοποιήσουν την έκταση των Φ/Β σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο, σχετικά με την χωρητικότητα, την παραγωγή, αλλά και τη δημιουργία αποβλήτων τους.
- ✓ Κατανοήσουν την τεχνική της ΑΚΖ, μέσω των διαδικαστικών βημάτων, των σταδίων και του τέλους κύκλου ζωής αυτής.
- ✓ Εμπεδώσουν τον κύκλο ζωής των Φ/Β, τις επιπτώσεις που προκύπτουν και τις στρατηγικές διαχείρισης του τέλους κύκλου ζωής τους.
- ✓ Αντληφθούν τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζεται η ΑΚΖ στα Φ/Β και να αξιολογήσουν τις επιπτώσεις που απορρέουν μέσω αυτής της προσέγγισης.

Στο σημείο αυτό, πραγματοποιείται μια ανακεφαλαίωση των 6 κεφαλαίων αναφορικά με τις ουσιαστικότερες πληροφορίες αυτών.

1. Η ενέργεια είναι απαραίτητη για την ανθρώπινη ζωή και ειδικότερα η ανανεώσιμη ενέργεια, που συλλέγεται από ΑΠΕ, οι οποίες αναπληρώνονται φυσικά σε ανθρώπινα χρονικά διαστήματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής αποτελεί η ηλιακή ενέργεια, η οποία προέρχεται από τις ακτίνες του ήλιου και μπορεί να αξιοποιηθεί για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του Φ/Β συστήματος, το οποίο είναι μια συλλογή εξαρτημάτων, που συνεργάζονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μετατρέποντάς την από το ηλιακό φως. Το σημαντικότερο εξάρτημα είναι το Φ/Β κελί, που είναι μια διάταξη ημιαγωγών. Πολλά Φ/Β κελιά συνδεδεμένα μεταξύ τους σχηματίζουν το Φ/Β πάνελ και αυτό τη Φ/Β συστοιχία αντίστοιχα.
3. Σε παγκόσμιο επίπεδο για το 2022, η εγκατεστημένη Φ/Β ισχύς αντιπροσώπευε 1.183,4 GW. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο για το 2022, η εγκατεστημένη Φ/Β ισχύς έφτασε στα 32.818,6 MW. Ακόμη, η παγκόσμια παραγωγή Φ/Β κελιών (c-Si και thin-film) ανήλθε σε 381 GW το 2022 και η παγκόσμια παραγωγή Φ/Β πανέλων σε 379 GW με κυρίαρχο παραγωγό την Κίνα. Αυτά τα υψηλά μεγέθη θα συμβάλλουν και στην αύξηση του όγκου των Φ/Β αποβλήτων, που προβλέπεται να φτάσουν τους 60 - 78 Mt έως το 2050 παγκοσμίως.

4. Η AKZ είναι ένα σύνολο ερευνητικών εργαλείων για την εκτίμηση όλων των περιβαλλοντικών συνεπειών, που σχετίζονται με ολόκληρη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Τα διαδικαστικά βήματα της AKZ ακολουθούν τα πρότυπα ISO και πιο συγκεκριμένα: ISO 14040: Καθορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής, ISO 14041: Απογραφή κύκλου ζωής, ISO 14042: Αξιολόγηση επιπτώσεων κύκλου ζωής, ISO 14043: Ερμηνεία αποτελεσμάτων. Τέλος, τα στάδια της AKZ αφορούν την απόκτηση πρώτων υλών, την παραγωγή, τη διανομή και τη μεταφορά, τη χρήση και τη λειτουργία, το τέλος κύκλου ζωής, του οποίου η διαχείριση περιλαμβάνει τις στρατηγικές της μείωσης, της επαναχρησιμοποίησης, της ανακύκλωσης, της ανάκτησης και των ΧΥΤΑ.
5. Ο κύκλος ζωής των Φ/Β βασίζεται στα στάδια της AKZ, δηλαδή απόκτηση πρώτων υλών, επεξεργασία υλικών, παραγωγή, χρήση, παροπλισμός, ανακύκλωση και επιστροφή στην επεξεργασία υλικών ή κατεργασία / διάθεση. Κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των Φ/Β προκύπτουν επιπτώσεις, όπως η κλιματική αλλαγή, η καταστροφή του όζοντος, η τοξικότητα για τον άνθρωπο, η σωματιδιακή ύλη, η ιονίζουσα ακτινοβολία, ο σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος, η οξίνιση, ο ευτροφισμός, η οικοτοξικότητα, η χρήση γης, η εξάντληση πόρων και η σφραγιστική ζήτηση ενέργειας. Όσον αφορά τη διαχείριση του τέλους του κύκλου ζωής των Φ/Β, κυρίαρχες στρατηγικές είναι η μείωση, η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση αυτών.
6. Αναφορικά με την αξιολόγηση επιπτώσεων κύκλου ζωής των Φ/Β, εφαρμόζεται η τεχνική της AKZ. Αφού καθοριστεί το πεδίο εφαρμογής του πρώτου σεναρίου και χορηγηθεί η απογραφή κύκλου ζωής των υπό εξέταση Φ/Β πανέλων των τεχνολογιών mono-Si, multi-Si, CdTe, CIS και micro-Si εξάγονται κάποια αποτελέσματα για συγκεκριμένες κατηγορίες επιπτώσεων ανά τα στάδια κύκλου ζωής τους, μέσω του λογισμικού SimaPro 8.0.6 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2+. Αυτά τα αποτελέσματα υπολογίζονται με 3 τρόπους: χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση, με κανονικοποίηση, με στάθμιση. Ανάμεσα και στους 3 τρόπους υπολογισμού σχετικά με τα στάδια κύκλου ζωής και των 5 Φ/Β τεχνολογιών mono-Si, multi-Si, CdTe, CIS και micro-Si, το στάδιο του συνολικού κύκλου ζωής χωρίς ανακύκλωση κατέχει τις μέγιστες τιμές, ενώ το στάδιο της χρήσης τις ελάχιστες. Ανάμεσα στον πρώτο τρόπο υπολογισμού (χωρίς κανονικοποίηση και στάθμιση) όσον αφορά τις κατηγορίες επιπτώσεων και των 5 Φ/Β τεχνολογιών mono-Si, multi-Si, CdTe, CIS και micro-Si, η κατηγορία επίπτωσης της σφραγιστικής ζήτησης ανανεώσιμης ενέργειας λαμβάνει τις μέγιστες τιμές. Αντιθέτως, μεταξύ των 4 Φ/Β τεχνολογιών mono-Si, multi-Si, CdTe και micro-Si, η κατηγορία επίπτωσης των πυρηνικών αποβλήτων λαμβάνει τις ελάχιστες τιμές, ενώ σχετικά με τη Φ/Β τεχνολογία CIS η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών,

ανανεώσιμων πόρων. Ανάμεσα στους 2 τρόπους υπολογισμού (με κανονικοποίηση, με στάθμιση) των 4 Φ/Β τεχνολογιών mono-Si, multi-Si, CdTe και CIS η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων κατέχει τις μέγιστες τιμές, ενώ αναφορικά με τη Φ/Β τεχνολογία micro-Si η κατηγορία επίπτωσης της τοξικότητας για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις. Αντίθετα, μεταξύ των 4 Φ/Β τεχνολογιών mono-Si, multi-Si, CdTe και micro-Si η κατηγορία επίπτωσης της καταστροφής του όζοντος λαμβάνει τις ελάχιστες τιμές, ενώ σχετικά με τη Φ/Β τεχνολογία micro-Si η κατηγορία επίπτωσης της εξάντλησης ορυκτών, ανανεώσιμων πόρων. Στη συνέχεια, με τον καθορισμό του πεδίου εφαρμογής του δεύτερου σεναρίου και την περιγραφή του συστήματος των υπό εξέταση Φ/Β πανέλων του μείγματος τεχνολογιών mono-Si, multi-Si, CdTe, CIGS, a-Si και ribbon-Si παρατίθενται αποτελέσματα για συγκεκριμένες κατηγορίες επιπτώσεων στα στάδια παραγωγής, κατασκευής και χρήσης με τις μεθόδους eco-indicator 99 (H, A), IMPACT 2002+ (Endpoint), ReCiPe Endpoint (E, A) και TRACI, μέσω του λογισμικού openLCA 2.0.0 και της βάσης δεδομένων ecoinvent 2.2 LCIA methods. Κάθε μέθοδος υπολογίζει διαφορετικές κατηγορίες επιπτώσεων και τομείς, οπότε πραγματοποιείται συσχέτιση των συγκρίσιμων αποτελεσμάτων. Ενδεικτικά, η επίπτωση της τοξικότητας για τον άνθρωπο, καρκινογενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία είναι υψηλότερη με τη μέθοδο TRACI σε σχέση με την eco-indicator 99 (H, A), η επίπτωση της σωματιδιακής ύλης, αναπνευστικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία είναι η υψηλότερη με τη μέθοδο eco-indicator 99 (H, A) συγκριτικά με τις ReCiPe Endpoint (E, A), TRACI και IMPACT 2002+ (Endpoint), η επίπτωση της χερσαίας οξίνισης στην ποιότητα οικοσυστημάτων είναι αρκετά υψηλότερη μέσω της μεθόδου ReCiPe Endpoint (E, A) σε σχέση με της IMPACT 2002+ (Endpoint), η επίπτωση της χερσαίας οικοτοξικότητας στην ποιότητα οικοσυστημάτων είναι αρκετά υψηλότερη μέσω της μεθόδου ReCiPe Endpoint (E, A) συγκριτικά με της IMPACT 2002+ (Endpoint). Καταληκτικά, ύστερα από σωρευτικές συγκρίσεις εξάγεται το συμπέρασμα, ότι η κατηγορία επίπτωσης της τοξικότητας για τον άνθρωπο, μη καρκινογενείς επιπτώσεις και ο τομέας της ανθρώπινης υγείας λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές μέσω της μεθόδου TRACI, ενώ η κατηγορία επίπτωσης της υδάτινης οικοτοξικότητας και ο τομέας της ποιότητας οικοσυστημάτων κατέχουν τις ελάχιστες τιμές μέσω της μεθόδου IMPACT 2002+ (Endpoint).

Αναφορές

- [1] “What Is Energy? A Deep Dive Into Understanding Energy”. Just Energy.
<https://justenergy.com/blog/what-is-energy-understanding/>
- [2] “Energy Use per Person”. Our World in Data.
<https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use>
- [3] “What is renewable energy?”. Climate Action, United Nations.
<https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy>
- [4] “Installed Global Renewable Energy Capacity by Technology”. Our World in Data.
<https://ourworldindata.org/grapher/installed-global-renewable-energy-capacity-by-technology>
- [5] “Solar Energy”. Solar Energy Industries Association.
<https://www.seia.org/initiatives/about-solar-energy>
- [6] “Solar Energy Generation vs. Capacity”. Our World in Data.
<https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-energy-consumption-vs-solar-pv-capacity>
- [7] Πολυζάκης Α. Λ. «Ενέργεια, Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη». Υλικό συγγράμματος. 2020
- [8] Luque A., Hegedus S. “Handbook of photovoltaic science and engineering”. John Wiley & Sons. 2003. <https://doi.org/10.1002/0470014008>
- [9] Ψωμόπουλος Κ. Σ. «Ενέργεια και Περιβάλλον». Διαλέξεις μαθήματος. 2021
- [10] Dodd N., Espinosa N., Van Tichelen P., Peeters K., Soares A. M. “Preparatory study for solar photovoltaic modules, inverters and systems”. Joint Research Centre, European Commission. 2020. <https://doi.org/10.2760/852637>
- [11] “How a PV System Works”. Florida Solar Energy Center. 2017.
<https://energyresearch.ucf.edu/consumer/solar-technologies/solar-electricity-basics/how-a-pv-system-works/>
- [12] “The Different Types of Solar PV Systems”. Deege Solar. 2022.
https://www.deegesolar.co.uk/different_types_of_solar_pv_systems/
- [13] “Photovoltaic System”. Energy Education.
https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_system
- [14] Masson G., De l’Epine M., Kaizuka I. “Trends in Photovoltaic Applications 2023”. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. 2023.
https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-2023/
- [15] “Solar Photovoltaic Cell Basics”. Solar Energy Technologies Office, United States Department of Energy. <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics>

- [16] Lian J.G., Wu P., Yu P., Li S.A. “Ribbon Silicon Material for Solar Cells”. *Advanced Materials Research*. 2012. vol. 531. pp. 67-70. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.531.67>
- [17] “Photovoltaic (PV) Cell: Structure & Working Principle”. *Electrical A2Z*.
<https://electricala2z.com/renewable-energy/photovoltaic-pv-cell-structure-working-principle/>
- [18] Yildirim M. A. “Maximum Power Point Tracking Techniques for Solar Photovoltaic Applications”. 2020. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20027.44322>
- [19] “Solar Cell I-V Characteristic”. *Alternative Energy Tutorials*.
<https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/solar-cell-i-v-characteristic.html>
- [20] “Photovoltaic module”. *Enel Green Power*.
<https://www.enelgreenpower.com/learning-hub/renewable-energies/solar-energy/photovoltaic-module>
- [21] Svarc J. “Solar Panel Construction”. *Clean Energy Reviews*. 2020.
<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>
- [22] Fouad M. M., Shihata L. A., Morgan E. I. “An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. vol. 80. pp. 1499-1511. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.141>
- [23] Ndrilo E. “3 Photovoltaic Installation Terms To Be Familiar With”. *Electrical Engineering Portal*. 2018.
<https://electrical-engineering-portal.com/3-photovoltaic-installation-terms-to-be-familiar-with>
- [24] “What’s the difference between PV module and PV array”. *Chint Global*.
<https://chintglobal.com/blog/difference-between-pv-module-pv-array/>
- [25] “Solar Photovoltaic Panel”. *Alternative Energy Tutorials*.
<https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/photovoltaic-panel.html>
- [26] “Photovoltaic Barometer”. *EurObserv'ER*. 2023.
<https://www.eurobserv-er.org/photovoltaic-barometer-2023/>
- [27] Wade A., Heath G., Weckend S., Wambach K., Sinha P., Jia Z., Komoto K., Sander K. “End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels”. *International Renewable Energy Agency, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme*. 2016.
<https://doi.org/10.2172/1561525>
- [28] Sala S., Reale F., Cristobal Garcia J., Marelli L., Pant R. “Life cycle assessment for the impact assessment of policies”. *Joint Research Centre, European Commission*. 2016.
<https://doi.org/10.2788/318544>
- [29] Gazbour N., Razongles G., Schaeffer C., Charbuillet C. “Photovoltaic power goes green”. *Electronics Goes Green 2016+*. 2016. pp. 1-8. <https://doi.org/10.1109/egg.2016.7829819>

- [30] Λαμπρακόπουλος Σ. «Ανάλυση Κύκλου Ζωής και Ενεργειακή Σήμανση Κουφωμάτων». Ένωση Κατασκευαστών Αλουμινίου – Σιδήρου Πειραιά. 2017.
<https://www.enkas.gr/drastiriotites/anakoynoseis/89-analysi-kyklou-zois-kai-energeiaki-simansi-koufomaton>
- [31] Masoumian M., Kopacek P. “End-of-Life Management of Photovoltaic Modules”. IFAC-PapersOnLine. 2015. vol. 48. iss. 24. pp. 162-167. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.12.076>
- [32] Fthenakis V., Raugei M. “Environmental life-cycle assessment of photovoltaic systems”. The Performance of Photovoltaic (PV) Systems. 2017. pp. 209-232.
<https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-336-2.00007-0>
- [33] Hoffs C. “Mining Raw Materials for Solar Panels: Problems and Solutions”. The Equation. 2022.
<https://blog.ucsusa.org/charlie-hoffs/mining-raw-materials-for-solar-panels-problems-and-solutions/>
- [34] Weimar N. D. “Solar Cell Production: from silicon wafer to cell”. Sinovoltaics. 2015.
<https://sinovoltaics.com/solar-basics/solar-cell-production-from-silicon-wafer-to-cell/>
- [35] Hoffs C. “How Are Solar Panels Made?”. The Equation. 2022.
<https://blog.ucsusa.org/charlie-hoffs/how-are-solar-panels-made/>
- [36] Hoffs C. “Solar Panels Should Be Reused and Recycled. Here’s How.”. The Equation. 2022.
<https://blog.ucsusa.org/charlie-hoffs/solar-panels-should-be-reused-and-recycled-heres-how/>
- [37] “Funding to address end-of-life issues for solar”. Utility Magazine. 2019.
<https://utilitymagazine.com.au/funding-to-address-end-of-life-issues-for-solar/>
- [38] McFadden C. “Renewable Energy Paradox: Solar Panels and Their Toxic Waste”. Interest Engineering. 2021.
<https://interestingengineering.com/science/renewable-energy-paradox-solar-panels-and-their-toxic-waste>
- [39] Fthenakis V. M., Kim H. C., Alsema E. “Emissions from Photovoltaic Life Cycles”. Environmental Science & Technology. 2008. vol. 42. pp. 2168-2174.
<https://doi.org/10.1021/es071763q>
- [40] Abuzaid H., Samara F. “Environmental and Economic Impact Assessments of a Photovoltaic Rooftop System in the United Arab Emirates”. Energies. 2022. vol. 15. no. 22. p. 8765.
<https://doi.org/10.3390/en15228765>

[41] Frischknecht R., Heath G., Raugei M., Sinha P., De Wild-Scholten M., Fthenakis V., Kim H. C., Alsema E., Held M. “Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity”. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. 2016. 3rd ed.

Methodology_Guidelines_on_Life_Cycle_Assessment_of_Photovoltaic_Electricity_3rd_Edition.pdf

[42] “Climate Change - Human Health”. LC-Impact. https://lc-impact.eu/HHclimate_change.html

[43] “Climate Change - Ecosystem Quality”. LC-Impact.

https://lc-impact.eu/EQclimate_change.html

[44] “Ozone Depletion - Human Health”. LC-Impact. https://lc-impact.eu/HHozone_depletion.html

[45] “Potential Health and Environmental Impacts Associated with the Manufacture and Use of Photovoltaic Cells”. Electric Power Research Institute, California Energy Commission. 2003. <https://www.epri.com/research/products/1000095>

[46] “Human Toxicity - Human Health”. LC-Impact. https://lc-impact.eu/HHhuman_toxicity.html

[47] Peters I. M., Karthik S., Haohui L., Buonassisi T., Nobre A. M. “Urban Haze and Photovoltaics”. Energy & Environmental Science. 2018. vol. 11. no. 10. pp. 3043–3054.

<https://doi.org/10.1039/C8EE01100A>

[48] “Particulate Matter Formation - Human Health”. LC-Impact.

https://lc-impact.eu/HHparticular_matter_formation.html

[49] Song Z., Wang M., Yang H. “Quantification of the Impact of Fine Particulate Matter on Solar Energy Resources and Energy Performance of Different Photovoltaic Technologies”. American Chemical Society Environmental. 2022. vol. 2. no. 3. pp. 275-286.

<https://doi.org/10.1021/acsenvironau.1c00048>

[50] “Solar energy myths: EMF radiation and sound”. Alliant Energy. 2022.

<https://www.alliantenergy.com/alliantenergynews/illuminate/cef-021622-emradiationsound>

[51] “Ionising Radiation - Human Health”. LC-Impact.

https://lc-impact.eu/HHionising_radiation.html

[52] “Photochemical Ozone Formation - Human Health”. LC-Impact.

https://lc-impact.eu/HHphotochemical_ozone_formation.html

[53] “Photochemical Ozone Formation – Ecosystem Quality”. LC-Impact.

https://lc-impact.eu/EQphotochemical_ozone_formation.html

[54] Nematchoua M. K. “Strategies for Studying Acidification and Eutrophication Potentials, a Case Study of 150 Countries”. J Multidisciplinary Scientific Journal. 2022. vol. 5. no. 1. pp. 150-165.

<https://doi.org/10.3390/j5010012>

[55] “Acidification - Ecosystem Quality”. LC-Impact. <https://lc-impact.eu/EQacidification.html>

- [56] “Freshwater Eutrophication - Ecosystem Quality”. LC-Impact.
https://lc-impact.eu/EQfreshwater_eutrophication.html
- [57] “Marine Eutrophication - Ecosystem Quality”. LC-Impact.
https://lc-impact.eu/EQmarine_eutrophication.html
- [58] “Assessment of Ecotoxicity - A Framework to Guide Selection of Chemical Alternatives”.
National Center for Biotechnology Information, National Library of Medicine, National
Institutes of Health. 2014. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK253975/>
- [59] “Terrestrial Ecotoxicity - Ecosystem Quality”. LC-Impact.
https://lc-impact.eu/EQterrestrial_ecotoxicity.html
- [60] “Freshwater Ecotoxicity - Ecosystem Quality”. LC-Impact.
https://lc-impact.eu/EQfreshwater_ecotoxicity.html
- [61] “Marine Ecotoxicity - Ecosystem Quality”. LC-Impact.
https://lc-impact.eu/EQmarine_ecotoxicity.html
- [62] “EU renewable electricity has reduced environmental pressures; targeted actions help further
reduce impacts”. European Environment Agency. 2023.
<https://www.eea.europa.eu/publications/eu-renewable-electricity-has-reduced>
- [63] “Land Stress - Ecosystem Quality”. LC-Impact. https://lc-impact.eu/EQland_stress.html
- [64] “Mineral Resource Scarcity - Ecosystem Quality”. LC-Impact.
https://lc-impact.eu/Rmineral_resource_scarcity.html
- [65] “Water Stress - Human Health”. LC-Impact. https://lc-impact.eu/HHwater_stress.html
- [66] “Water Stress - Ecosystem Quality”. LC-Impact. https://lc-impact.eu/EQwater_stress.html
- [67] Iswara A. P., Farahdiba A. U., Nadhifatin E. N., Pirade F., Andhikaputra G., Mufliah I.,
Boedisantoso R. “A Comparative Study of Life Cycle Impact Assessment using Different
Software Programs”. Institute of Physics Conference Series: Earth and Environmental Science.
2020. vol. 506. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/506/1/012002>
- [68] “Why SimaPro”. SimaPro. <https://simapro.com/about/>
- [69] Hildenbrand J., Srocka M., Ciroth A. “Why we started the development of openLCA”.
openLCA. 2005. <https://www.openlca.org/the-idea/>
- [70] Jungbluth N., Tuchschnid M., De Wild-Scholten M. “Life Cycle Assessment of Photovoltaics:
Update of Ecoinvent Data”. 2008.
https://www.researchgate.net/publication/237541622_Life_Cycle_Assessment_of_Photovoltaics_Update_of_ecoinvent_data
- [71] “Marketplace”. SimaPro. https://simapro.com/marketplace/?_product_categories=databases

- [72] “openLCA Nexus: The Source for LCA Data Sets”. openLCA Nexus.
<https://nexus.openlca.org/databases>
- [73] Acero A. P., Rodríguez C., Citroth A. “LCIA methods - Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories”. GreenDelta. 2015. ver. 1.5.2.
<https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/LCIA-METHODS-v.1.5.4.pdf>
- [74] “Which impact assessment methods are available in SimaPro desktop?”. Help Center, SimaPro.
<https://support.simapro.com/s/article/Which-impact-assessment-methods-are-available-in-SimaPro>
- [75] Goedkoop M. “The Eco-indicator 99 Methodology”. Journal of Life Cycle Assessment. 2007. vol. 3. no. 1. https://www.jstage.jst.go.jp/article/lca/3/1/3_32/_pdf
- [76] Jolliet O., Margini M., Charles R., Humbert S., Payet J., Rebitzer G., Rosenbaum R. “IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology”. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2002. vol. 8. no. 6. pp. 324-330. <https://doi.org/10.1007/BF02978505>
- [77] Huijbregts M.A.J., Steinmann Z.J.N., Elshout P.M.F., Stam G., Verones F., Vieira M., Zijp M., Hollander A., Van Zelm R. “ReCiPe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level”. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2016. vol. 22. pp. 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- [78] Bare J. “TRACI 2.0: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts 2.0”. Clean Technologies and Environmental Policy. 2011. vol. 13. pp. 687–696. <https://doi.org/10.1007/s10098-010-0338-9>
- [79] Stolz P., Frischknecht R., Wyss F., De Wild-Scholten M. “PEF screening report of electricity from photovoltaic panels in the context of the EU Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) Pilots”. 2016. ver. 2.0.
<https://pvthin.org/wp-content/uploads/2016-04-PEFCR-PV-LCA-screening-report.pdf>

Παράρτημα Α

Downloads



openLCA

Since the release of version 2.0 on May 16th 2023, we are working on more developments. Please refer to our changelog in the tab below for information about smaller updates. We recommend using the software version below, which has passed our tests, but please let us know if you run into any issues. Thanks in advance!

Since **openLCA 2.0.3**, we're thrilled to announce a significant improvement in the user experience. Through the incorporation of the Intel Math Kernel Library (MKL), we have removed the necessity to download the supplementary UMFPACK library for accelerated calculations. MKL stands as an optimized and efficient library for mathematical and scientific computations. Please, note that **openLCA 2.0.3** with the previous math libraries can still be downloaded under the *Previous* tab, within the *bias* folder.

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

For further smaller updates please refer to the changelog below.

Windows	Mac	Linux	Changelog	Sources	Previous	Latest
<p>To use openLCA on Windows, download the zip-archive below: Just unzip the archive and start <code>openLCA.exe</code>. To uninstall it, just delete the created folder. You can have several versions of openLCA in different folders on the same computer.</p> <p>openLCA 2.0.3 zip-archive: openLCA_Windows_x64_2.0.3_2023-10-16.zip</p> <p>Alternatively, you can install openLCA with the installer below. If you have an older openLCA version installed (via the installer) you should uninstall it first.</p> <p>openLCA 2.0.3 installer: openLCA_Windows_x64_2.0.3_2023-10-16.exe</p>						

Εικόνα Α.1: Λήψη λογισμικού openLCA συμβατού λειτουργικού συστήματος



openLCA Nexus

Your source for LCA and sustainability data.

Free databases

Download?	Data file	Nexus version	Format	Licence & Order information
>	Agribalyse			
>	BioEnergieDat			
▼	ecoinvent LCIA methods			
<input checked="" type="checkbox"/>	ecoinvent 2.2. LCIA methods	1	openLCA zolca	Show licence info
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3 LCIA methods	2	openLCA zolca	Show licence info
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3.1. LCIA methods	2	openLCA zolca	Show licence info
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3.2 LCIA methods	2	openLCA zolca	Show licence info
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3.3 LCIA methods	2	openLCA zolca	Show licence info
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3.4 LCIA methods	1	openLCA zolca	Show licence info
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3.5 LCIA methods	1	openLCA zolca	Show licence info
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3.6 LCIA methods	1	JSON-LD	Show licence info
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3.7 LCIA methods	1	JSON-LD	Show licence info
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3.8 LCIA methods	1	JSON-LD	Show licence info
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3.9.1 LCIA Methods (for openLCA 1.11)	1	JSON-LD	Show licence info
<input type="checkbox"/>	ecoinvent 3.9.1 LCIA Methods (openLCA 2)	1	JSON-LD	Show licence info
>	ELCD			
>	Environmental Footprints			
>	exiobase			
>	IMPACT World+ LCIA Methods			
>	LCA commons			
>	NEEDS			
>	openLCA LCIA methods			
>	OzLCI2019			
>	worldsteel			

Free case studies

Download?	Data file	Nexus version	Format	Licence & Order information
>	ELCD Case Studies			

Free utilities

Download?	Data file	Nexus version	Format	Licence & Order information
>	One Click LCA - Mapping File			
<input checked="" type="checkbox"/> I have read the licences of the selected databases and accept them <input checked="" type="checkbox"/> I have read the EULA and accept it To get notified of database changes and updates, feel free to follow our Twitter or LinkedIn channel.				

Download

Εικόνα Α.2: Λήψη επιλεγμένης βάσης δεδομένων μέσω openLCA Nexus

Categories: Processes/Energy conversion/Electricity supply/Electricity grid mix/Electricity from photovoltaic

Location: GR - Greece Reference year: 2011 - 2016

Electricity from photovoltaic; AC, technology mix of CIS, CdTE, mono crystalline and multi crystalline; production mix, at plant; 1kV - 60kV

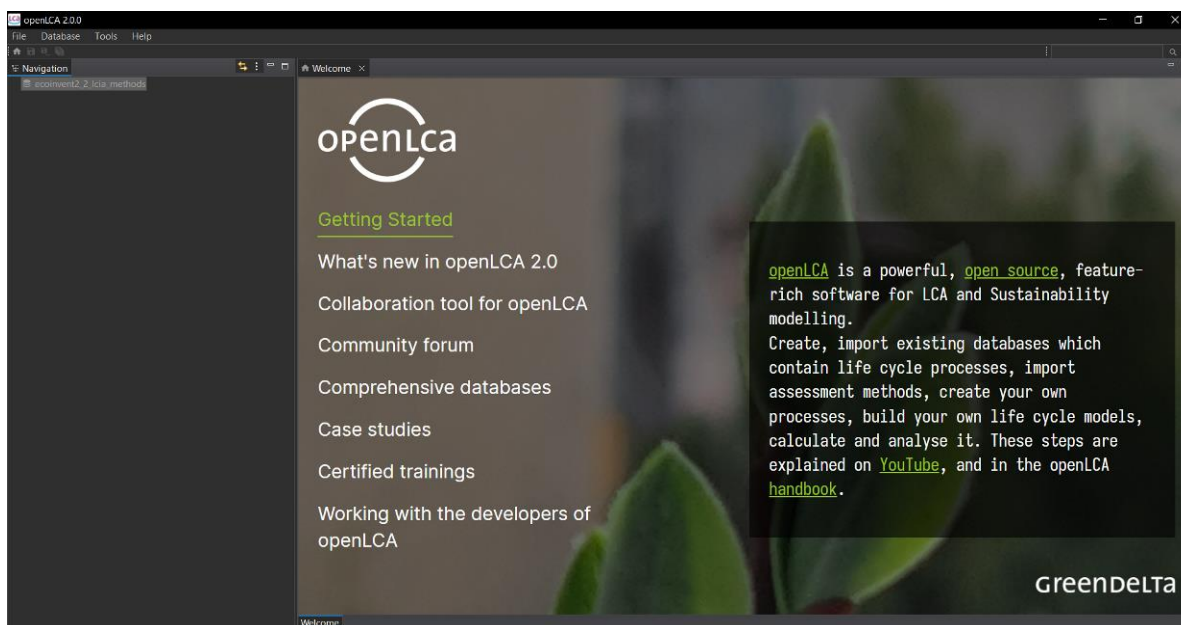
The data set covers all relevant process steps and technologies along the supply chain.

- Fully aggregated
- ILCD
- Sphera
- External
- Free

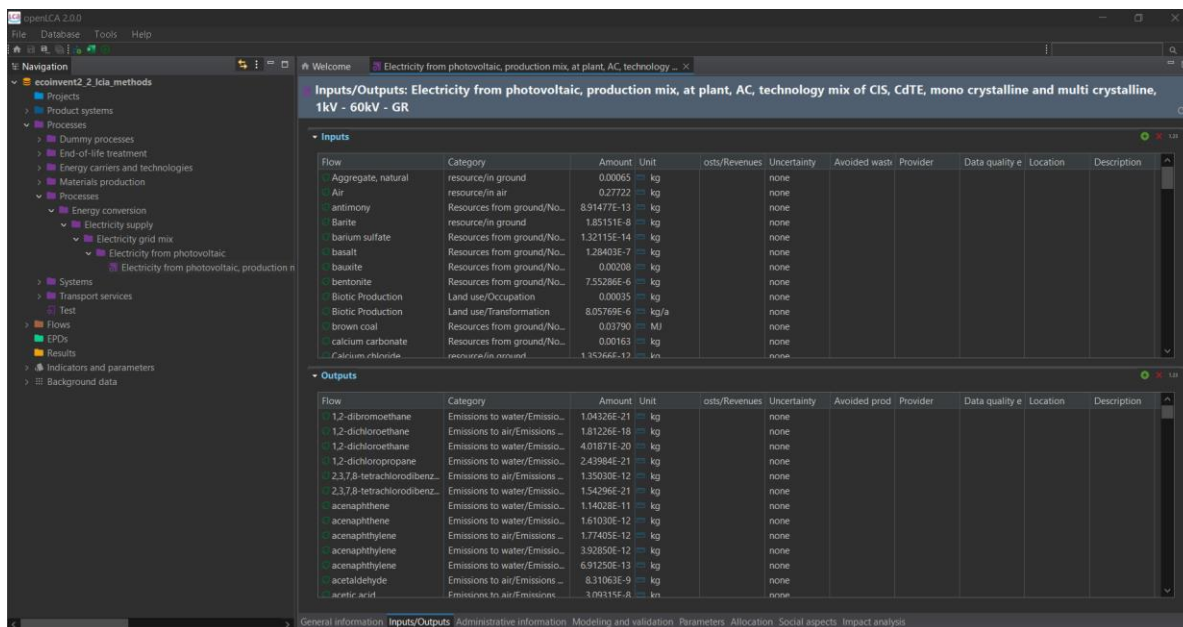
More Go to dataset

Download

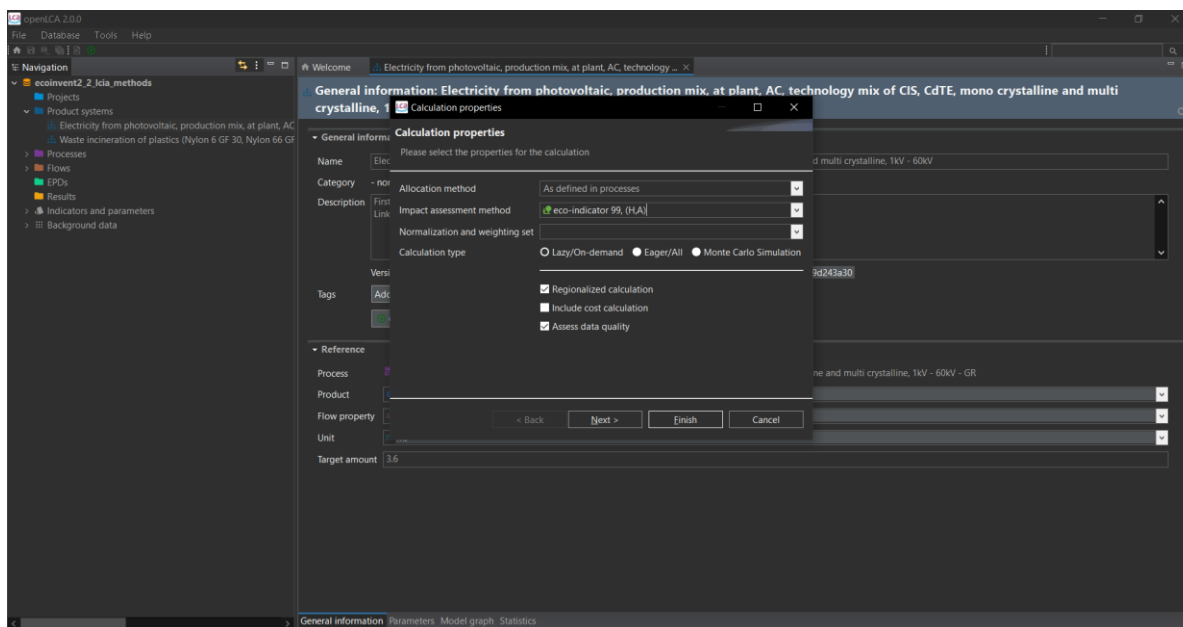
Εικόνα Α.3: Λήψη συγκεκριμένων δεδομένων μέσω GLAD



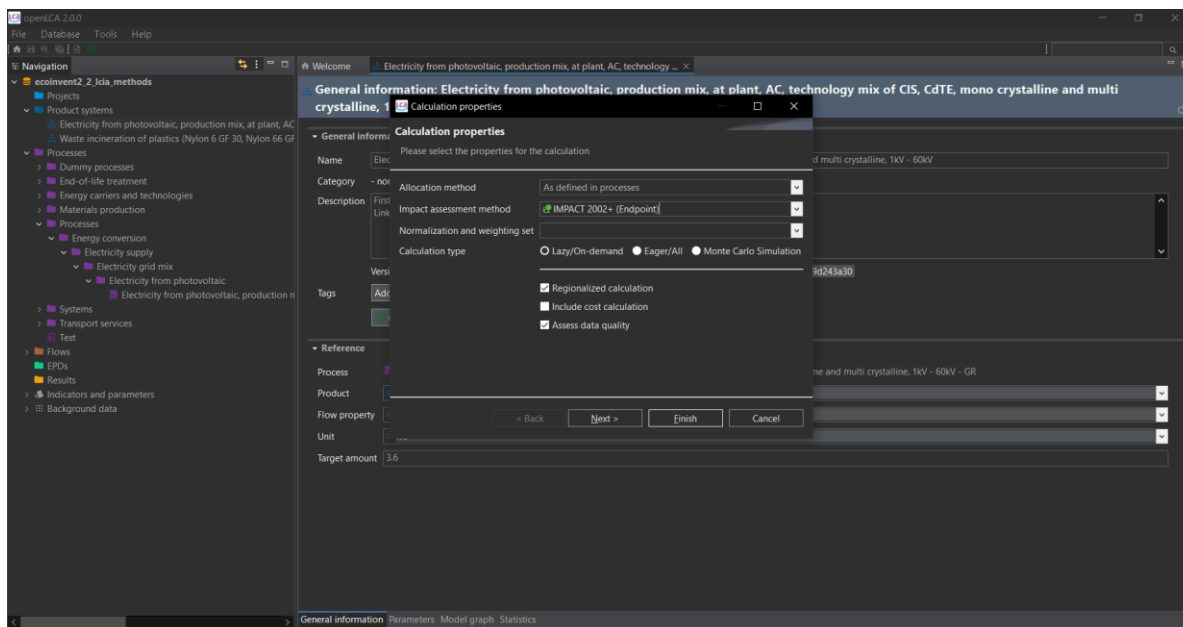
Εικόνα Α.4: Εκκίνηση λογισμικού openLCA και εισαγωγή επιλεγμένης βάσης δεδομένων



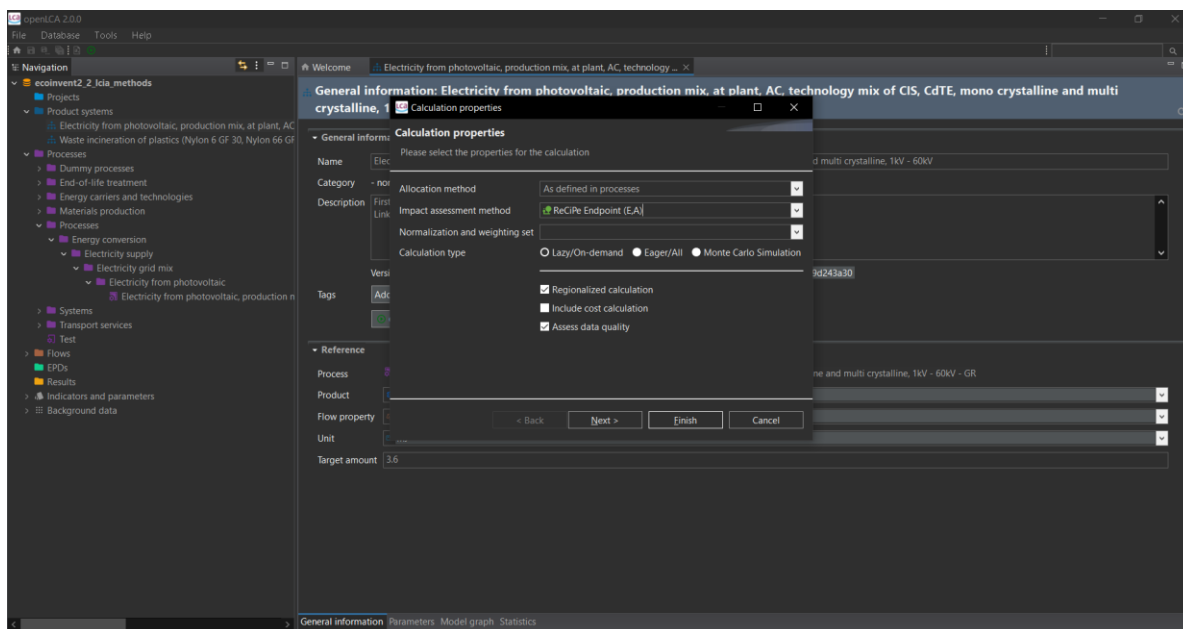
Εικόνα Α.5: Άνοιγμα επιλεγμένης βάσης δεδομένων, ενσωμάτωση συγκεκριμένων δεδομένων, επιλογή διαδικασιών, προβολή δεδομένων εισόδου και εξόδου



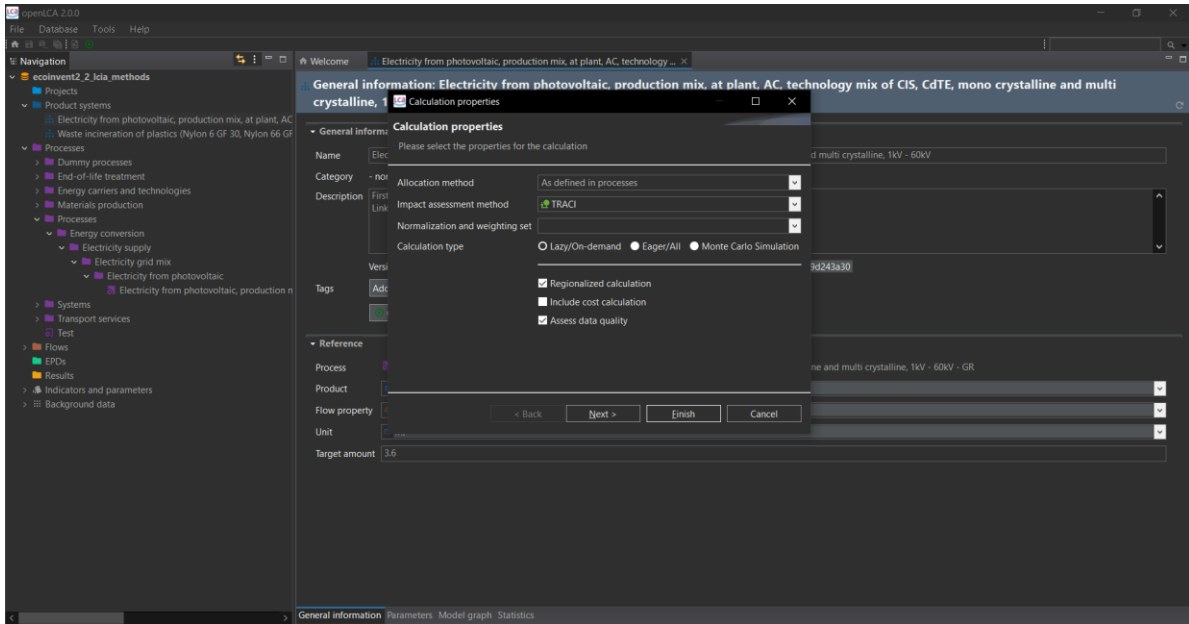
Εικόνα Α.6: Επιλογή συστήματος προϊόντων και υπολογισμός κατηγοριών επιπτώσεων πρώτης μεθόδου



Εικόνα Α.7: Επιλογή συστήματος προϊόντων και υπολογισμός κατηγοριών επιπτώσεων δεύτερης μεθόδου



Εικόνα Α.8: Επιλογή συστήματος προϊόντων και υπολογισμός κατηγοριών επιπτώσεων τρίτης μεθόδου



Εικόνα Α.9: Επιλογή συστήματος προϊόντων και υπολογισμός κατηγοριών επιπτώσεων τέταρτης μεθόδου